### 平成27年度

# 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子カシステム研究開発事業

# 外部ハザードに対する崩壊熱除去機能の マージン評価手法の研究開発

## 成果報告書

## 平成28年3月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

本報告書は、文部科学省の原子力システム 研究開発事業による委託業務として、国立研 究開発法人 日本原子力研究開発機構が実施 した平成24-27年度「外部ハザードに対 する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研 究開発」の成果を取りまとめたものです。

### 目次

概略	xix
1. はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1–1
2. 業務計画 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2. 1–1
2.1 全体計画 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2. 1–1
2.2 平成27年度の成果の目標及び業務の実施方法	2. 2–1
3. 平成27年度の実施内容及び成果	3. 1. 1-1
3.1 マージン評価手法の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 1–1
3.1.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 1–1
3.1.2 森林火災に対するマージン評価手法	3. 1. 2–1
3.1.2.1 概要 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 1. 2–1
3.1.2.2 マージン評価(タンク燃料火災を伴うシナリオ) ・・・・・・・・・	3. 1. 2–1
3.1.2.3 マージン評価の方法(タンク燃料火災を伴うが、非常用電源は	
確保されるシナリオ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 2–4
3.1.2.4 マージン評価の方法(タンク燃料火災を伴わないシナリオ) ・・・・	3. 1. 2–5
3.1.2.5 森林火災に対するマージン評価のまとめ・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 2–5
3.1.3 重畳事象 (積雪と低温) に対するマージン評価手法	3. 1. 3–1
3.1.3.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–1
3.1.3.2 積雪単独の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–1
3.1.3.3 積雪と低温の重畳事象に対するマージン評価手法・・・・・・・・・・	3. 1. 3–4
3.1.3.4 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–8
3.1.4 重畳事象 (強風と降雨) に対するマージン評価手法	3. 1. 4–1
3.1.4.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–1
3.1.4.2 強風のみの影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–1
3.1.4.3 降雨のみの影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–8
3.1.4.4 強風と降雨の重畳事象に対するマージン評価手法	3. 1. 4–12
3.1.4.5 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–16
3.1.5 コストーベネフィット評価手法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 5–1
3.1.5.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 5–1
3.1.5.2 評価手法に関する既往研究の調査・整理・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 5–1
3.1.5.3 評価手法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 5–1
3.1.5.4 積雪に対するコストーベネフィット評価・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 5–2
3.1.6 評価手法の整備(4年間のまとめ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 6–1
3.1.6.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 6–1

3.1.6.2 マージン評価手法に関する既往研究の調査・整理	3. 1. 6–1
3.1.6.3 マージン評価手法の概念構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 6–1
3.1.6.4 モデルサイト条件及びプラント情報の調査・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 6–2
3.1.6.5 本研究で対象とする外部ハザードの代表性の検討・整理	3. 1. 6–2
3.1.6.6 一般的なマージン評価手法の開発	3. 1. 6–3
3.1.6.7 積雪に対するマージン評価手法	3. 1. 6–5
3.1.6.8 竜巻に対するマージン評価手法	3. 1. 6–7
3.1.6.9 強風に対するマージン評価手法	3. 1. 6–9
3.1.6.10 異常降雨に対するマージン評価手法	3. 1. 6–15
3.1.6.11 火山噴火に対するマージン評価手法······	3. 1. 6–17
3.1.7 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 7–1
3.2 外部ハザード評価手法の開発·····	3. 2. 1. 1–1
3.2.1 異常気象ハザード評価手法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 1–1
3.2.1.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 1–1
3.2.1.2 重畳事象の選定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 2–1
3.2.1.3 ハザード評価手法に関する既往研究の調査・整理	3. 2. 1. 3–1
3.2.1.4 重畳事象(積雪と低温)に対するハザード評価手法	3. 2. 1. 4–1
3.2.1.5 重畳事象(強風と降雨)に対するハザード評価手法	3. 2. 1. 5–1
3.2.1.6評価手法の整備(4年間のまとめ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 6–1
3.2.1.7まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 7–1
3.2.2 火山噴火ハザード評価手法の開発	
(再委託先:産業技術総合研究所)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–1
3.2.2.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–1
3.2.2.2 重畳事象の選定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–2
3.2.2.3 フィルタ目詰まり試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–4
3.2.2.4 火山灰粒度分析の総合評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–15
3.2.2.5 評価手法の整備(4年間のまとめ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–28
3.2.2.6 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–37
3.2.3 森林火災ハザード評価手法の開発	3. 2. 3–1
3.2.3.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–1
3.2.3.2 重畳事象の選定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–1
3.2.3.3 森林火災の延焼シミュレーション	3. 2. 3–4
3.2.3.4 森林火災ハザードの評価手法	3. 2. 3–6
3.2.3.5 森林火災の煤煙シミュレーション	3. 2. 3–6
3.2.3.6 煤煙ハザードの評価手法	3. 2. 3–8
3.2.3.7 評価手法の整備(4年間のまとめ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–10
3.2.3.8 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–42
<ol> <li>3.3 事象シーケンス評価手法の開発</li> </ol>	3. 3. 1. 1–1

3.3.1 安全対策の整理及び事象シーケンス評価手法の開発・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 1–1
3.3.1.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 1–1
3.3.1.2 安全対策の整理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 2–1
3.3.1.3 森林火災ハザードに対する事象シーケンス評価手法	3. 3. 1. 3–1
3.3.1.4 重畳事象(積雪と低温)に対する事象シーケンス評価手法	3. 3. 1. 4–1
3.3.1.5 重畳事象(強風と降雨)に対する事象シーケンス評価手法	3. 3. 1. 5–1
3.3.1.6 崩壊熱除去解析 ·····	3. 3. 1. 6–1
3.3.1.7 評価手法の整備(4年間のまとめ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1–7–1
3.3.1.8 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1-8-1
3.3.2 時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法	
の開発(再委託先:平成27年8月31日まで大阪大学、平成27	
年9月1日以降原子力機構)	3. 3. 2–1
3.3.2.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–1
3.3.2.2 評価プログラムの機能追加 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 2–1
3.3.2.3 降雨を起因とする事象シーケンスに対する評価手法の適用性評	
価 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 2–5
3.3.2.4 評価手法の整備(4年間のまとめ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–8
3.3.2.5 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3.3.2-20
3.4 研究推進・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 4–1
3.5 まとめ・評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 5–1
3.5.1 目標達成度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 5–1
3.5.2 技術の卓越性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 5–6
3.5.3 研究開発効果・・・・・・	3. 5–7
3.5.4 得られた成果の外部発表・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 5–7
3.5.5 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 5–11
4. 結言	4-1

		頁
表 3.1.4-1	外部電源喪失時の最大瞬間風速	3. 1. 4–19
表 3.1.4-2	飛来物の空力パラメータ	3. 1. 4–19
表 3.1.4-3	風速 100m/s における飛来物の空力パラメータと飛来物速度の	
	関係 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 1. 4–19
表 3.1.4-4	貫通限界肉厚に相当する飛来物速度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–20
表 3.1.4-5	貫通限界肉厚に相当する風速・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–20
表 3.1.4-6	飛来物による想定破損部位	3. 1. 4–20
表 3.1.4-7	各機器に対する貫通限界肉厚に相当する風速 ・・・・・・・・・・	3. 1. 4–22
表 3.1.4-8	強風に対する機器別のマージン評価	3. 1. 4–23
表 3.1.4-9	強風に対するシーケンス別のマージン評価 ・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–23
表 3. 2. 1. 2-1	5つのスクリーニング基準・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 2–8
表 3. 2. 1. 2-2	外部ハザードリストの第1スクリーニング結果 ・・・・・・・・・	3. 2. 1. 2–9
表 3. 2. 1. 2-3	外部ハザードリストの第2スクリーニング結果 ・・・・・・・・・	3. 2. 1. 2–13
表 3. 2. 1. 2-4	外部ハザードリストの第3スクリーニング(重畳事象選定)結	
	果	3. 2. 1. 2–17
表 3. 2. 1. 2-5	外部ハザードの重畳影響(相互影響)を考慮すべき組み合わせ	
	の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 2–20
表 3. 2. 1. 2-6	重畳事象の組み合わせ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 2–38
表 3. 2. 1. 4-1	年最低気温のハザード曲線の評価のために推定した分布パラメ	
	-9	3. 2. 1. 4–5
表 3. 2. 1. 4-2	低温継続時間のハザード曲線の評価のために推定した分布パラ	
	メータ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–5
表 3. 2. 1. 4-3	年最低気温及び継続時間の確率分布の適合度評価結果・・・・・・・	3. 2. 1. 4–5
表 3. 2. 1. 4-4	安定性評価結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–5
表 3. 2. 1. 4-5	日降雪深、積雪継続時間、低温継続時間のカテゴリ化(グンベ	
	ル分布)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–6
表 3. 2. 1. 4-6	日降雪深、積雪継続時間、低温継続時間のカテゴリ化(ワイブ	
	ル分布)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–7
表 3. 2. 1. 5-1	強風ハザード評価のために推定した確率分布パラメータ ・・・・・・	3. 2. 1. 5–5
表 3. 2. 1. 5-2	降雨ハザード評価のために推定した確率分布パラメータ ・・・・・・	3. 2. 1. 5–5
表 3. 2. 1. 5-3	1 時間降水量及び年最大 1 時間降水量記録時の継続時間及び風	
	速のハザード曲線評価のために推定した確率分布パラメータ・・・	3. 2. 1. 5–6
表 3. 2. 2-1	火山灰供給試験結果概要 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 2. 2–7
表 3. 2. 2-2	フィルタ耐圧性能確認試験結果概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–14
表 3. 2. 2-3	平成27年2月桜島降灰総量の推定値(単位トン)・・・・・・・	3. 2. 2–19
表 3. 2. 2-4	火山灰採集装置の仕様(InnovaPrep 製 ACD-200Bobcat)・・・・・	3. 2. 2–21

表 3.2.2-5	高峠での火山灰試料採取結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–21
表 3.2.2-6	分析に用いた粒子パラメータ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–24
表 3.2.3-1	森林火災と重畳する可能性のある外部事象	3. 2. 3–48
表 3. 2. 3-2	福井県火災調査(2004 年~2012 年(平成16年~平成24	
	年))における「雷」「不明」の森林火災事例	3. 2. 3–49
表 3.2.3-3	火災前線の周囲全長に対する、射影した長さの比(出火地点	
	2、出火時刻0時、相対湿度2%)の例)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–49
表 3. 2. 3-4	フィルタ圧力損失試験条件及び試験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–50
表 3.2.3-5	フィルタ破損限界試験条件及び試験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–50
表 3.3.1.2-1	森林火災発生時の重要機器・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 2–7
表 3.3.1.2-2	重畳事象(積雪と低温)発生時の重要機器	3. 3. 1. 2–8
表 3.3.1.2-3	重畳事象(強風と降雨)発生時の重要機器	3. 3. 1. 2–9
表 3.3.1.3-1	FV 重要度及び RAW 評価結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 3–5
表 3.3.1.3-2	煤煙強度区分 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 1. 3–5
表 3.3.1.3-3	空気冷却機能維持の失敗確率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 3–5
表 3.3.1.3-4	炉心損傷頻度 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 1. 3–5
表 3.3.1.4-1	積雪と低温の重畳事象に対するイベントツリーのヘディング	
	(1/2)	3. 3. 1. 4–13
表 3.3.1.4-2	積雪と低温の重畳事象に対するイベントツリーのヘディング	
	(2/2)	3. 3. 1. 4–14
表 3.3.1.4-3	積雪と低温の重畳事象に対するイベントツリーの追加ヘディン	
	グ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 4–15
表 3.3.1.5-1	年最大1時間降水量記録日の最大瞬間風速の発生頻度(グンベ	
	ル分布)の離散化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 5–13
表 3.3.1.5-2	年最大1時間降水量の超過確率(グンベル分布)の離散化 ・・・・・	3. 3. 1. 5–13
表 3.3.1.5-3	年最大1時間降水量記録日の0.5㎜以上の降水継続時間の超過	
	確率(グンベル分布)の離散化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 5–13
表 3.3.1.5-4	飛来物の空力パラメータ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 5–13
表 3.3.1.5-5	風速 100m/s における飛来物の空力パラメータと飛来物速度の	
	関係 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 1. 5–14
表 3.3.1.5-6	飛来物による想定破損部位	3. 3. 1. 5–14
表 3.3.1.6-1	崩壊熱除去解析における解析条件と結果(1/2) ・・・・・・・・・	3. 3. 1. 6–7
表 3.3.1.6-1	崩壊熱除去解析における解析条件と結果(2/2) ・・・・・・・・・	3. 3. 1. 6–9
表 3. 3. 1. 7-1	外部ハザードに対する安全対策候補(強制循環除熱に対する対	
	策及び評価) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 7–43
表 3. 3. 1. 7-2	外部ハザードに対する安全対策候補(自然循環除熱に対する対	
	策及び評価) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 7–45
表 3.3.2-1	1hr 後における総水質量誤差・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–23

表 3.3.2-2	統計処理結果例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–23
表 3.3.2-3	シナリオ分析(積雪ハザード、終状態別) ・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–24
表 3. 3. 2-4	積雪ハザードワーストシナリオ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–24
表 3.3.2-5	竜巻発生時(F5)における機能喪失確率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–25
表 3.3.2-6	シナリオ分析(竜巻ハザード、終状態) ・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–25
表 3. 3. 2-7	サンプル妥当性評価(竜巻ハザード) ・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–25
表 3.3.2-8	竜巻ハザードワーストシナリオ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–26
表 3.3.2-9	強風発生時(SSHS5)における機能喪失確率 ·····	3. 3. 2–26
表 3.3.2-10	シナリオ分析(強風ハザード、終状態別、確率値:デフォル	
	F)	3. 3. 2–26
表 3.3.2-11	シナリオ分析(強風ハザード、終状態別、確率値:10 倍)・・・・	3. 3. 2–27
表 3.3.2-12	サンプル妥当性評価(強風ハザード) ・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–27
表 3.3.2-13	強風ハザードワーストシナリオ	3. 3. 2–28

		頁
図 2.1-1	全体計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.1–3
図 2.1-2	体制図 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2.1-4
図 2.2-1	平成27年度業務実施計画 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.2–3
図 3. 1. 2-1	森林火災に対する高速炉のマージン評価手法のスキーム	3. 1. 2–6
図 3.1.2-2	森林火災の燃焼強度と継続時間に対する外部燃料タンクの壁面	
	温度の変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 2–6
図 3.1.2-3	全交流電源喪失時の原子炉冷却材温度の時間変化	
	(周囲空気温度:20/50/100℃の場合) ・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 2–7
図 3. 1. 2-4	全交流電源喪失時の原子炉出力(規格化済み)の時間変化・・・・	3. 1. 2–7
図 3.1.2-5	壁面温度 350℃到達時刻における原子炉冷却材温度及び崩壊熱	
	出力レベル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 2–8
図 3.1.2-6	全交流電源喪失で外部燃料タンク外壁温度 350℃到達後に、外	
	部燃料タンク火災を生じ 17.5 時間後に火災が終了した場合の	
	原子炉容器出口冷却材温度 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 1. 2–8
図 3.1.2-7	全交流電源喪失で外部燃料タンク外壁温度 350℃到達後に、外	
	部燃料タンク火災を生じ、仮想的に火災が永続すると仮定した	
	場合の原子炉容器出口冷却材温度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 2–9
図 3.1.2-8	全交流電源喪失で森林火災の燃焼強度に応じた温度マージンの	
	変化(原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合) ・・・・・・	3. 1. 2–9
図 3.1.2-9	全交流電源喪失で森林火災の燃焼強度に応じた時間マージンの	
	変化(原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合) ・・・・・・	3. 1. 2–10
図 3. 1. 2-10	外部電源喪失で外部燃料タンク外壁温度 350℃到達後に、	
	外部燃料タンク火災を生じ 17.5 時間後に火災が終了した場合	
	の原子炉容器出口冷却材温度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 2–10
図 3. 1. 2-11	外部電源喪失で外部燃料タンク外壁温度 350℃到達後に、	
	外部燃料タンク火災を生じ、仮想的に火災が永続すると仮定し	
	た場合の原子炉容器出口冷却・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 2–11
図 3. 1. 2-12	外部電源喪失で森林火災の燃焼強度に応じた温度マージンの変	
	化(原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合) ・・・・・・・	3. 1. 2–11
図 3. 1. 2-13	外部電源喪失で森林火災の燃焼強度に応じた時間マージンの変	
	化(原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合) ・・・・・・・	3. 1. 2–12
図 3. 1. 2-14	外部燃料タンクの火災が発生しなかった場合の原子炉容器出口	
	冷却材温度 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 1. 2–12
図 3. 1. 2-15	外気温に応じた温度マージンの変化	
	(原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合)	
	(外部燃料タンクの火災を生じない場合) ・・・・・・・・・・・	3. 1. 2–13

図 3.1.3-1	系統数を考慮しない場合の積雪に対する機器別のマージン評価	3.1.3–9
図 3.1.3-2	系統数を考慮した場合の積雪に対する機器別のマージン評価	3. 1. 3–9
図 3.1.3-3	積雪に対するイベントツリー	3. 1. 3–10
図 3.1.3-4	積雪に対するシーケンス別のマージン評価(シーケンス 6~	
	8)	3. 1. 3–10
図 3.1.3-5	日降雪深に対する大気中降雪濃度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–11
図 3.1.3-6	大気中降雪濃度に対する単位面積・単位時間あたりの氷着量	3. 1. 3–11
図 3.1.3-7	大気中降雪濃度に対する猶予時間(マージン) ・・・・・・・・	3. 1. 3–11
図 3.1.3-8	フィルタ氷着量履歴(大気中降雪濃度) ・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–12
図 3.1.3-9	フィルタ氷着厚み履歴(大気中降雪濃度) ・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–12
図 3.1.3-10	日降雪深に対する単位面積・単位時間あたりの氷着量 ・・・・・・	3. 1. 3–13
図 3.1.3-11	フィルタ氷着量履歴(日降雪深)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–13
図 3.1.3-12	フィルタ氷着厚み履歴(日降雪深)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–14
図 3.1.3-13	日降雪深に対する猶予時間(マージン) ・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–14
図 3.1.3-14	積雪と低温の重畳事象に対する補助冷却設備のイベントツリー	3. 1. 3–15
図 3.1.3-15	大気中濃度に対する猶予時間(マージン) ・・・・・・・・・・	3. 1. 3–15
図 3.1.3-16	氷着厚み履歴(大気中降雪濃度)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–15
図 3.1.3-17	日降雪深に対する猶予時間(マージン) ・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–16
図 3. 1. 3-18	氷着厚み履歴(日降雪深)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 3–16
図 3.1.3-19	積雪と氷着を考慮した日降雪深に対する猶予時間(マージン)	3. 1. 3–16
図 3.1.4-1	風速と飛来物速度の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–24
図 3.1.4-2	飛来物速度と裏面剥離限界厚さの関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–24
図 3.1.4-3	飛来物速度と貫通限界肉厚の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–24
図 3.1.4-4	強風に対する機器別のマージン評価	3. 1. 4–25
図 3.1.4-5	強風に対するイベントツリー	3. 1. 4–26
図 3.1.4-6	強風に対する補助冷却設備のイベントツリー	3. 1. 4–27
図 3.1.4-7	1 時間降水量に対する海水ポンプの猶予時間(排水能力係数の	
	影響) ·····	3. 1. 4–28
図 3.1.4-8	1 時間降水量に対する海水ポンプの猶予時間(屋外水位係数の	
	影響) ·····	3. 1. 4–28
図 3.1.4-9	屋外、第1室及びディーゼル発電機(EDG)室の水位上昇履歴	3. 1. 4–28
図 3.1.4-10	1時間降水量に対するディーゼル発電機の猶予時間 ・・・・・	3. 1. 4–29
図 3.1.4-11	排水能力係数 0.1 のときの屋外、第 1 室及び電気設備室の水位	
	上昇履歴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–29
図 3.1.4-12	異常降雨に対する機器別のマージン評価(排水能力係数 0.1、	
	屋外水位係数 0.1) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 1. 4–29
図 3.1.4-13	異常降雨に対するイベントツリー	3. 1. 4–30
図 3.1.4-14	強風と降雨の重畳事象時に現れるシナリオ	3. 1. 4–31

図 3.1.4-15	排気ダクト内雨水液滴の温度上昇履歴 ・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–31
図 3.1.4-16	1回の雨水接触による低下する伝熱管温度	3. 1. 4–32
図 3.1.4-17	1回の雨水接触により発生する熱応力	3. 1. 4–32
図 3.1.4-18	単位面積あたりの液滴個数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 4–33
図 3.1.4-19	1 時間あたりの液滴衝突回数	3. 1. 4–33
図 3.1.4-20	オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労線図 ・・・・・・・・・	3. 1. 4–33
図 3.1.4-21	伝熱管初期温度 400℃における破損までの許容時間・・・・・・・・	3. 1. 4–34
図 3.1.4-22	伝熱管初期温度 500℃における破損までの許容時間・・・・・・・・	3. 1. 4–35
図 3.1.4-23	伝熱管初期温度 600℃における破損までの許容時間・・・・・・・	3. 1. 4–36
図 3.1.4-24	強風と降雨の重畳事象に対する補助冷却設備のイベントツリー	3. 1. 4–37
図 3.1.5-1	コストーベネフィット評価のイメージ(平成24年度報告書)	3. 1. 5–4
図 3.1.5-2	コストーベネフィット評価手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1. 5–4
図 3.1.5-3	積雪に対するコストーベネフィット評価	3. 1. 5–4
図 3.2.1.2-1	自然現象重畳事象の検討フロー(保全学会ガイドライン) ・・・・・	3. 2. 1. 2–39
図 3.2.1.2-2	本研究で実施する重畳事象のスクリーニング方法 ・・・・・・・・	3. 2. 1. 2–40
図 3.2.1.4-1	年最低気温と低温継続時間(敦賀市、1961~2010 年(昭和3	
	6年~平成22年)) · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 2. 1. 4–8
図 3.2.1.4-2	低温ハザード曲線の算定フロー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–8
図 3.2.1.4-3	最低気温と年超過確率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–9
図 3.2.1.4-4	年最低気温に関するハザード曲線(敦賀市、ワイブル分布、グ	
	ンベル分布)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–9
図 3.2.1.4-5	低温継続時間に関するハザード曲線(敦賀市、ワイブル分布、	
	グンベル分布) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–10
図 3.2.1.4-6	確率分布の安定性評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–10
図 3.2.1.4-7	年最低気温(旭川市、1938~2014 年(昭和13年~平成26	
	年))	3. 2. 1. 4–11
図 3.2.1.4-8	年最低気温に関するハザード曲線(旭川市と敦賀市、ワイブル	
	分布、グンベル分布) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 4–11
図 3.2.1.5-1	敦賀における最大風速と最大瞬間風速の年最大値の記録	3. 2. 1. 5–7
図 3.2.1.5-2	最大風速と最大瞬間風速の最大値と台風との関係	3. 2. 1. 5–7
図 3.2.1.5-3	日降水量と風速の台風との関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 5–7
図 3.2.1.5-4	台風の可能性毎の日降水量と風速の関係	3. 2. 1. 5–8
図 3.2.1.5-5	最大風速と最大瞬間風速の年最大値を観測した日時の風向	3. 2. 1. 5–8
図 3.2.1.5-6	1時間降水量と降水継続時間の関係	3. 2. 1. 5–9
図 3.2.1.5-7	1 時間降水量と連続降水量の関係	3. 2. 1. 5–9
図 3. 2. 1. 5-8	1 時間降水量と最大風速の関係	3. 2. 1. 5–9
図 3. 2. 1. 5-9	年最大1時間降水量記録日の最大風速と最大瞬間風速・・・・・・	3. 2. 1. 5–10
図 3. 2. 1. 5-10	年最大1時間降水量とその記録日の最大風速と最大瞬間風速の	

	関係 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 2. 1. 5–10
図 3.2.1.5-11	年最大1時間降水量記録日の最大降水継続時間、年最大1時間	
	降水量記録時の 1 時間降水量 0.5mm 以上並びに 1 時間降水量	
	5mm 以上のときの降水継続時間・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 5–10
図 3.2.1.5-12	最大風速と最大瞬間風速の年最大値に関する強風ハザード曲線・	3. 2. 1. 5–11
図 3. 2. 1. 5-13	年最大1時間降水量のハザード曲線	3. 2. 1. 5–11
図 3.2.1.5-14	年最大1時間降水量記録日の最大風速と最大瞬間風速のハザー	
	ド曲線 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 1. 5–11
図 3.2.1.5-15	年最大1時間降水量記録日の最大降水継続時間のハザード曲線・	3. 2. 1. 5–12
図 3.2.1.5-16	年最大1時間降水量記録日の最大降水継続時間のハザード曲線	3. 2. 1. 5–12
図 3.2.2-1	ラハールの動的圧力と流速の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–3
図 3. 2. 2-2	碍子に付着した火山灰起因の閃絡確率フラジリティ曲線	3. 2. 2–4
図 3. 2. 2-3	試験ダクトの概略・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–5
図 3. 2. 2-4	ファンとダストフィーダの間に設置した散水ノズル ・・・・・・	3. 2. 2–5
図 3.2.2-5	フィルタ交換圧損到達時間(プレフィルタ) ・・・・・・・・・・	3. 2. 2–8
図 3.2.2-6	フィルタ交換圧損到達時間(中性能フィルタ) ・・・・・・・・・・	3. 2. 2–8
図 3.2.2-7	フィルタ交換圧損到達時間(プレフィルタ+中性能フィルタ) 💀	3. 2. 2–9
図 3. 2. 2-8	フィルタ組み合わせによるフィルタ交換圧損到達時間(火山灰	
	濃度 70mg/m <sup>3</sup> ) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 2. 2–9
図 3.2.2-9	フィルタ組み合わせによるフィルタ交換圧損到達時間(火山灰	
	濃度 700mg/m <sup>3</sup> ) ······	3. 2. 2–10
図 3.2.2-10	フィルタ組み合わせによるフィルタ交換圧損到達時間(火山灰	
	濃度 7,000mg/m <sup>3</sup> ) ·····	3. 2. 2–10
図 3.2.2-11	フィルタ組み合わせによる火山灰保持量(プレフィルタ単体)	3. 2. 2–11
図 3.2.2-12	フィルタ組み合わせによる火山灰保持量(中性能フィルタ単	
	体)	3. 2. 2–11
図 3.2.2-13	フィルタ組み合わせによる火山灰保持量(プレ+中性能フィル	
	タ2段)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–12
図 3.2.2-14	火山灰捕集率(プレフィルタ単体)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–12
図 3.2.2-15	火山灰捕集率(中性能フィルタ単体)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–13
図 3.2.2-16	火山灰捕集率(プレフィルタ+中性能フィルタ2段) ・・・・・・・	3. 2. 2–13
図 3.2.2-17	耐圧試験時のプレフィルタ状態写真(圧力損失 62Pa)・・・・・・	3. 2. 2–15
図 3. 2. 2-18	耐圧試験時のプレフィルタ状態写真(圧力損失 500Pa)・・・・・・	3. 2. 2–15
図 3.2.2-19	平成27年2月17日の桜島火山周辺の衛星画像	
	(Terra/MODIS 可視画像)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–17
図 3. 2. 2-20	平成27年2月16日から2月20日の桜島火山噴火による降	
	灰量分布 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 2. 2–18
図 3. 2. 2-21	平成27年2月17日夕方に採取した桜島噴火による火山灰試	

	料の粒度分布	3. 2. 2–20
図 3. 2. 2-22	平成27年2月17日 9 時から 18 時に高峠で採取したフィル	
	タ吸入試料(ST5BC)及び降灰試料(ST5B)の粒度分布比較・・・・	3. 2. 2–22
図 3. 2. 2-23	平成27年2月17日の海潟(桜島から南東約 7km)における	
	降灰重量の時間変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–23
図 3. 2. 2-24	主成分分析の結果例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–25
図 3. 2. 2-25	粒径毎の主成分分析結果例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–26
図 3. 2. 2-26	噴出火口の分析結果例(平成25年1月30日日中に降灰した	
	火山灰)	3. 2. 2–27
図 3. 2. 2-27	分析のノイズとなる粒子の例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 2–28
図 3. 2. 3-1	強風・豪雨・落雷と森林火災との重畳形態	3. 2. 3–51
図 3. 2. 3-2	地震・津波・火山と森林火災との重畳形態 ・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–51
図 3. 2. 3-3	森林火災と重畳する可能性のある外部ハザードと因果関係	3. 2. 3–51
図 3. 2. 3-4	1時間平均風速に対する瞬間最大風速及び10分間平均風速・・・・	3. 2. 3–52
図 3. 2. 3-5	外挿方法違いによる傾向の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–52
図 3. 2. 3-6	最大瞬間風速と反応強度の年超過頻度	
	(重点サンプリング、2×10 <sup>5</sup> サンプル)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–53
図 3. 2. 3-7	最大瞬間風速と火線強度の年超過頻度	
	(重点サンプリング、2×10 <sup>5</sup> サンプル)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–54
図 3. 2. 3-8	年毎の雷発生月別数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–55
図 3. 2. 3-9	雷注意報時の風速・相対湿度の出現確率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–55
図 3. 2. 3-10	相対湿度区分毎の経験分布&一般パレート分布による風速の超	
	過頻度	3. 2. 3–56
図 3. 2. 3-11	全期間と雷発生時における反応強度の超過確率の比較	
	(重点サンプリング、サンプル数 105 ) ・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–56
図 3. 2. 3-12	【全サンプルに対する雷サンプルの発生率を 1/67 とした場	
	合】全期間と雷発生時における反応強度の超過頻度の比較(重	
	点サンプリング、サンプル数 10 <sup>5</sup> ) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–57
図 3. 2. 3-13	全期間と雷発生時における火線強度の超過頻度の比較 ・・・・・・	3. 2. 3–57
図 3. 2. 3-14	【全サンプルに対する雷サンプルの発生率を 1/67 とした場	
	合】全期間と雷発生時における火線強度の超過頻度の比較 ・・・・・	3. 2. 3–58
図 3. 2. 3-15	風速と相対湿度の組み合わせに対する火線強度の傾向 ・・・・・・	3. 2. 3–58
図 3. 2. 3-16	森林火災生成物によるハザード曲線の構築作業・・・・・・・・・・	3. 2. 3–59
図 3. 2. 3-17	火災前線の進展と燃焼領域の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–60
図 3. 2. 3-18	アクティブ燃焼域奥行の出現頻度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–60
図 3. 2. 3-19	燃焼領域の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–61
図 3. 2. 3-20	アクティブ燃焼域を一箇所に集中させた場合の効果 ・・・・・・・・	3. 2. 3–61
図 3. 2. 3-21	上部及び下部フィルタにおける PM2.5、PM10 及び 2mm 以上の粒	

	子の積算到達量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–62
図 3.2.3-22	フラジリティの簡易評価スキーム(熱影響) ・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–62
図 3.2.3-23	ハザード区分、及び区分毎の発生頻度 ・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–63
図 3.2.3-24	煤煙の影響に対するロジックツリー	3. 2. 3–63
図 3.2.3-25	PM10 濃度の空間分布の風速依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–64
図 3. 2. 3-26	微粒子(PM10)の濃度分布の湿度依存性(風速 2m/s)・・・・・・	3. 2. 3–65
図 3.2.3-27	PM10 濃度の空間分布の気温依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–66
図 3. 2. 3-28	風速とプルーム挙動、PM10 濃度の関係	3. 2. 3–67
図 3.2.3-29	積算フィルタ目詰まり量の応答曲面 ・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–68
図 3.2.3-30	空気冷却器 1m²あたり、吸込み風速 1m/s あたりのグラム数・・・・	3. 2. 3–69
図 3.2.3-31	消火開始時刻の設定による非消火確率(ワイブル分布) ・・・・・	3. 2. 3–69
図 3.2.3-32	消火確率の設定による積算目詰り量のハザード曲線	
	(サンプル数 10℃、通常サンプリング) ・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–70
図 3.2.3-33	目詰まり量に対するフィルタのフラジリティ曲線	3. 2. 3–70
図 3.2.3-34	PM10 模擬粒子の測定された粒子径分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–71
図 3.2.3-35	耐圧試験時の中性能フィルタ状態写真・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–71
図 3.2.3-36	耐圧試験時のフィルタ状態写真(サブマイクロ模擬粒子、圧カ	
	損失 3, 100Pa) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 2. 3–71
図 3.2.3-37	座屈部分の拡大写真	
	(サブマイクロ模擬粒子、圧力損失 3, 100Pa) · · · · · · · · · · ·	3. 2. 3–72
図 3.2.3-38	隙間部分の拡大写真	
	(サブマイクロ模擬粒子、圧力損失 3, 100Pa) · · · · · · · · · · ·	3. 2. 3–72
図 3.2.3-39	隙間部分の拡大写真(PM10 模擬粒子、圧力損失 200Pa) ・・・・・	3. 2. 3–72
図 3.2.3-40	隙間部分の拡大写真(PM10 模擬粒子、圧力損失 405Pa) ・・・・・	3. 2. 3–73
図 3.2.3-41	隙間部分の拡大写真(PM10 模擬粒子、圧力損失 1,050Pa) ・・・・	3. 2. 3–73
図 3.2.3-42	隙間部分の拡大写真(PM10 模擬粒子、圧力損失 3, 200Pa) ・・・・	3. 2. 3–73
図 3.2.3-43	隙間部分の拡大写真	
	(PM10 模擬粒子、圧力損失 3, 200Pa、2 時間後)・・・・・・・・・	3. 2. 3–74
図 3.2.3-44	森林火災のリスク評価手法の全体概念・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2. 3–74
図 3.3.1.2-1	森林火災(熱・炎)により炉心損傷に至りうる事象シーケンス	
	と安全対策候補・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 2–10
図 3.3.1.2-2	森林火災(飛散物・煙・火災灰)により炉心損傷に至りうる事	
	象シーケンスと安全対策候補・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 2–11
図 3.3.1.2-3	重畳事象(積雪と低温)により炉心損傷に至りうる事象シーケ	
	ンスと安全対策候補・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 2–12
図 3.3.1.2-4	重畳事象(強風と降雨)により炉心損傷に至りうる事象シーケ	
	ンスと安全対策候補・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 2–13
図 3.3.1.3-1	崩壊熱除去機能に係るシステム構成(強制循環除熱時)・・・・・	3.3.1.3-6

図 3.3.1.3-2	崩壊熱除去機能に係るシステム構成(自然循環除熱) 3.3.1.3-6
図 3.3.1.3-3	熱影響のイベントツリー
図 3.3.1.3-4	燃焼速度の調和平均値のヒストグラム
図 3.3.1.3-5	森林火災継続時間のヒストグラム
図 3.3.1.3-6	ハザード区分毎の発生頻度、条件付き炉心損傷確率、炉心損傷
	頻度 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.3.1.3-7	タンク破損確率に対する放水の効果のイメージ ······ 3.3.1.3-9
図 3.3.1.3-8	各ヘディングの失敗確率を 1/10 とした場合の条件付炉心損傷
	確率 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.3.1.3-9	煤煙影響に対するイベントツリー
図 3.3.1.4-1	積雪と低温の重畳事象に対するイベントツリー
図 3.3.1.4-2	雪の付着量・・・・・・・
図 3.3.1.4-3	フィルタ交換失敗確率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.3.1.4-17
図 3.3.1.4-4	ナトリウム凍結確率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3.3.1.4-5	補機海水系の給水設備の配管内の水の凍結確率・・・・・・・・・・・3.3.1.4-17
図 3.3.1.4-6	除雪失敗確率 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.3.1.4-7	扉の開閉の成功と失敗の確率評価の概念
図 3.3.1.4-8	扉の開閉失敗確率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.1.4-19
図 3.3.1.4-9	炉心損傷頻度(グンベル分布) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.1.4-19
図 3.3.1.4-10	炉心損傷頻度(ワイブル分布) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.1.4-20
図 3.3.1.4-11	積雪と低温の重畳事象に対するイベントツリー
	(電熱ヒータの導入) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3.3.1.4-12	炉心損傷頻度の比較(上図:グンベル分布、下図:ワイブル分
	布、継続時間カテゴリ 168h(7day)~も含める(直接炉心損
	傷有り)) ・・・・・・
図 3.3.1.4-13	炉心損傷頻度の比較(上図:グンベル分布、下図:ワイブル分
	布、継続時間カテゴリ 168h(7day)~は含めない(直接炉心
	損傷無し))
図 3.3.1.5-1	メインイベントツリー
図 3.3.1.5-2	排気塔のイベントツリー
図 3.3.1.5-3	非常用電源外部燃料タンクのイベントツリー
図 3.3.1.5-4	非常用電源のイベントツリー · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.3.1.5-5	電気設備・換気空調機能のイベントツリー
図 3.3.1.5-6	メンテナンス冷却系のイベントツリー
図 3.3.1.5-7	補助冷却設備吸気部のイベントツリー
図 3.3.1.5-8	補助冷却設備排気部のイベントツリー
図 3.3.1.5-9	風速と飛来物速度の関係
図 3.3.1.5-10	強風による開口部の衝突確率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.1.5-21

図 3.3.1.5-11	飛来物速度と貫通限界肉厚の関係 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.3.1.5-12	飛来物に対する鋼板の破損確率
図 3.3.1.5-13	想定する雨水液滴径分布
図 3.3.1.5-14	排気ダクト内雨水液滴の温度上昇履歴
図 3.3.1.5-15	1回の雨水接触による低下する伝熱管温度
図 3.3.1.5-16	1回の雨水接触により発生する熱応力・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.3.1.5-24
図 3.3.1.5-17	単位面積あたりの液滴個数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.3.1.5-24
図 3.3.1.5-18	1 時間あたりの液滴衝突回数
図 3.3.1.5-19	オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労線図 · · · · · · · · · 3.3.1.5-25
図 3.3.1.5-20	シーケンス別炉心損傷頻度と条件付除熱失敗確率 · · · · · · · · 3.3.1.5-25
図 3.3.1.5-21	シーケンス別炉心損傷頻度と条件付除熱失敗確率(ダンパ手動
	操作失敗シーケンスを無視)
図 3.3.1.5-22	カテゴリ別炉心損傷頻度(ダンパ手動操作失敗シーケンスを無
	視)
図 3.3.1.5-23	カテゴリ別条件付除熱失敗確率(ダンパ手動操作失敗シーケン
	スを無視)
図 3.3.1.6-1	崩壊熱除去解析結果の一例(ケース 2-1a-1)・・・・・・・・・・・ 3.3.1.6-10
図 3.3.1.6-2	崩壊熱除去解析結果:流路面積の影響・・・・・・・・・・・・・・・・・3.3.1.6-11
図 3.3.1.6-3	崩壊熱除去解析結果:外気温度の影響・・・・・・・・・・・・・・・・・3.3.1.6-11
図 3.3.1.6-4	崩壊熱除去解析結果:除熱条件の影響(流路断面積)3.3.1.6-12
図 3.3.1.6-5	崩壊熱除去解析結果:除熱条件の影響(外気温度) ・・・・・・・・ 3.3.1.6-12
図 3.3.1.6-6	崩壊熱除去解析結果:外気温度 20℃及び流路断面積 15%の場合
	の 650°C/700°C/750°C到達時間 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.3.1.6-7	崩壊熱除去解析結果:外気温度 100℃及び流路面積 100%の場合
	の 650°C/700°C/750°C到達時間・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3.3.1.6-8	崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした原子炉容器
	出口及び空気冷却器出口のナトリウム温度(流路断面積
	100%)(Case 2-1a: 外部電源喪失時、ダンパ自動調整長期可
	能な場合)
図 3.3.1.6-9	崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした原子炉容器
	出口及び空気冷却器出口のナトリウム温度(流路断面積
	100%)(Case 2-1c:外部電源喪失時、120h でダンパ自動調整
	停止、120h ダンパ開度固定の場合) · · · · · · · · · · · · · · · · · · 3.3.1.6-14
図 3.3.1.6-10	崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした原子炉容器
	出口及び空気冷却器出口のナトリウム温度(流路断面積
	100%)(Case 3-2a:全電源喪失時) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3. 3. 1. 6-11	崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした原子炉容器
	出口及び空気冷却器出口のナトリウム温度(流路断面積

	100%)(Case 4-1a:全電源喪失時1ループ運転) ・・・・・・・・・:	3. 3. 1. 6–15
図 3.3.1.6-12	崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした空気冷却器	
	出ロナトリウム温度 150℃/120℃到達時間(流路断面積 100%)	
	(Case 3-2a∶全電源喪失時3ループ運転) ・・・・・・・・・・・	3. 3. 1. 6–15
図 3.3.2-1	越流及び浸水・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–29
図 3.3.2-2	フローネットワークコード概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–29
図 3.3.2-3	検証解析体系	3. 3. 2–30
図 3.3.2-4	各部屋の水位(ドレインなし、降水源:部屋 1)・・・・・・・・	3. 3. 2–30
図 3.3.2-5	越流、浸水モデルの検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–31
図 3.3.2-6	検証解析モデル(ドレイン含む) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–31
図 3.3.2-7	各部屋の水位(ドレイン含む) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–32
図 3.3.2-8	ドレインモデル((3.3.2-7)式)の検証 ・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–32
図 3.3.2-9	降雨事象シーケンスイベントツリー ・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–33
図 3.3.2-10	電気設備室機能喪失に伴うポンプ(1、2 次系)機能喪失状態	
	確率 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 2–33
図 3.3.2-11	1 次系冷却材流量時刻曆変化	
	(異常降雨ハザード、50 サンプル)・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–34
図 3.3.2-12	炉心出口温度時刻暦変化	
	(異常降雨ハザード、50 サンプル)・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–34
図 3.3.2-13	炉心出口最高温度累積度数分布(異常降雨ハザード) ・・・・・・	3. 3. 2–34
図 3. 3. 2-14	連続マルコフ過程モンテカルロ法(CMMC 法)の概念・・・・・・・	3. 3. 2–35
図 3.3.2-15	従来手法との比較(可逆シーケンス評価)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–35
図 3.3.2-16	開発プログラム構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–36
図 3.3.2-17	ヘディングイベントと影響機器の同定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–36
図 3. 3. 2-18	冷却系構成概要 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 2–37
図 3. 3. 2-19	積雪ハザードヘディング(平成25年度検討結果) ・・・・・・・	3. 3. 2–37
図 3.3.2-20	積雪時における補助冷却設備空気冷却器(ACS-AC)及びアクセ	
	スルート確保の機能喪失状態確率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–37
図 3.3.2-21	炉心出口温度解析結果(積雪ハザード、50 サンプル)・・・・・・	3. 3. 2–38
図 3.3.2-22	炉心出口最高温度累積分布(積雪ハザード) ・・・・・・・・・・	3. 3. 2–38
図 3.3.2-23	シナリオ分析(積雪ハザード、アクセスルート確保の影響)	3. 3. 2–39
図 3.3.2-24	シナリオ分析(積雪ハザード、補助冷却設備空気冷却器機能喪	
	失状態の影響)	3. 3. 2–39
図 3.3.2-25	事象発生時刻歴変化(除雪成功、伝熱ヒータ起動、アクセスル	
	ート確保)	3. 3. 2–40
図 3.3.2-26	事象発生時刻歴変化(積雪ハザード、補助冷却設備空気冷却器	
	機能喪失)	3. 3. 2–40
図 3.3.2-27	竜巻起因イベントツリー各へディング ・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–40

図 3.3.2-28	各機器累積機能喪失割合(竜巻(F5)) · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 2–41
図 3.3.2-29	1 次系流量変化(竜巻ハザード、50 サンプル) ・・・・・・・・・・	3. 3. 2–41
図 3.3.2-30	炉心出口温度変化(竜巻ハザード、50 サンプル)・・・・・・・・	3. 3. 2–42
図 3.3.2-31	炉心出口最高温度累積分布(竜巻ハザード) ・・・・・・・・・・	3. 3. 2–42
図 3.3.2-32	シナリオ分析(竜巻ハザード、ポンプ機能別) ・・・・・・・・・・	3. 3. 2–43
図 3.3.2-33	シナリオ分析(竜巻ハザード、補助冷却設備空気冷却器機能	
	別) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 2–43
図 3.3.2-34	強風起因イベントツリー各ヘディング	3. 3. 2–44
図 3.3.2-35	各機器累積機能喪失割合(強風(SSHS5)) ·····	3. 3. 2–44
図 3.3.2-36	1 次系流量変化(強風ハザード、50 サンプル) ・・・・・・・・・・	3. 3. 2–45
図 3.3.2-37	炉心出口温度変化(強風ハザード、50 サンプル)・・・・・・・・	3. 3. 2–46
図 3.3.2-38	炉心出口最高温度累積分布(強風ハザード) ・・・・・・・・・・	3. 3. 2–47
図 3.3.2-39	シナリオ分析(強風ハザード、火災発生別) ・・・・・・・・・・	3. 3. 2–48
図 3.3.2-40	シナリオ分析(強風ハザード、補助冷却設備空気冷却器機能	
	別) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3. 2–49
図 3.3.2-41	確率値の補正(強風ハザード)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3. 2–50

略語一覧							
ALOFT-FT	: A Large Outdoor Fire plume Trajectory	大型の屋外火災プルームの軌					
	model - Flat Terrain	道モデルー平坦な地形					
AM	: Accident Management	アクシデントマネジメント					
AmeDAS	: Automated Meteorological Data	地域気象観測システム(アメ					
	Acquisition System	ダス)					
BWR	: Boiling Water Reactor	沸騰水型原子炉					
CBH	: Crown Base Height	樹冠高さ					
CDF	: Core Damage Frequency	炉心損傷頻度					
CMMC	: Continuous Marcov chain Monte Carlo	連続マルコフ連鎖モンテカ					
	method	口法					
DKP	: Daisen Kurayoshi Pumice tephra	大山倉吉テフラ					
EF スケール	: Enhanced Fujita scale	改良藤田スケール					
Fスケール	: Fujita scale	藤田スケール					
FV	: Fussell-Vesely	ファッセルベズレイ					
GIF	: Generation IV International Forum	第 4 世代原子カシステム国際					
		フォーラム					
HCLPF	: High-Confidence-of-Low-Probability-of-	高信頼度低損傷確率					
	Failure						
IAEA	: International Atomic Energy Agency	国際原子力機関					
IPEEE	: Individual Plant Examination for	外的事象に対する個別プラン					
	External Events	ト評価					
JIS	: Japanese Industrial Standards	日本工業標準調査会					
	Committee						
JNES	: Japan Nuclear Energy Safety	(独)原子力安全基盤機構					
	Organization						
LOCA	: loss-of-coolant accident	冷却材喪失事故					
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric	米国海洋大気庁					
	Administration						
NRC	: United States Nuclear Regulatory	アメリカ合衆国原子力規制委					
	Commission	員会					
OECD/NEA	: Organisation for Economic Co-operation	経済協力開発機構原子力機関					
	and Development/The Nuclear Energy						
	Agency						
PLOHS	: Protected Loss of Heat Sink	スクラム成功後除熱源喪失事					
		故					
PM	: Particulate Matter	粒子状物質					
PRA	: Probabilistic Risk Assessment	確率論的リスク評価					

PSA	: Probabilistic Safety Assessment	確率論的安全評価
PWR	: Pressurized Water Reactor	加圧水型原子炉
RAW	: Risk Achievement Worth	リスク増加価値
RMS	: Root Mean Square	二乗平均平方根
ROS	: Rate-of-Spread	延焼速度
RV	: Reactor Vessel	原子炉容器
SLSC	: Standard Least-Squares Criterion	標準最小二乗基準
SSHS	: Saffir-Simpson Hurricane Scale	サファ・シンプソン・ハリケ
		ーンスケール
THERP	: Technique for Human Error Rate	人的過誤率予測技法
	Prediction	
VIA	: Value Impact Assessment	バリュー・インパクト・アセ
		スメント

#### 概略

地震のみならず様々な外部ハザードに対して安全性を確保することが重要であるが、地震・ 津波以外の様々な外部ハザードに対するプラントの安全性を確認する手法は未確立である。そ こで、本業務では、種々の外部ハザードに対する原子力施設の安全性の向上及び炉心損傷まで のマージン(安全裕度)を定量的に評価する安全基盤技術の確立のため、代表的な外部ハザー ドである異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)、火山噴火、森林火災を対象に、ナトリウム冷 却高速炉の崩壊熱除去機能のマージン評価手法、外部ハザード評価手法及び事象シーケンス評 価手法を開発することを目的とする。

以下に、4か年計画の最終年度である平成27年度の業務の実績を述べる。

#### (1) マージン評価手法の開発

外部ハザードに対するマージン評価手法を開発するため、森林火災・重畳事象に対するナト リウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージンを評価した。また、合理的な安全対策とするた めのコストーベネフィット評価手法を構築した。4年間のまとめとして手法を整備した。

森林火災については、反応強度をハザード強度の指標として、評価上重要な燃料タンクを対 象に破損評価を行い、機器別のマージン評価手法を開発した。その結果、タンクが損傷発生す るまでの森林火災継続時間と、タンク損傷後にタンクの火災が生じた場合のタンク火災の継続 時間に対して、プラント冷却材温度の上限は大きな熱容量のために損傷判定温度に対してマー ジンを有することを示した。また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価手 法も開発し、森林火災時には補助冷却設備の全系統同時破損は極めて考えにくいため除熱失敗 シーケンスは現れないことを示した。積雪と低温の重畳事象については、フィルタに着雪する ことにより機能喪失に相当するフィルタ目詰まり量までの許容時間をマージンと定義し、機器 別のマージン評価手法を開発した。積雪のみの影響の場合、機能喪失積雪深に対する除雪速度 に応じたマージンを評価した。その結果、日降雪深が増大するにつれてマージンが小さくなる ことを示した。また、イベントツリーに基づくシーケンス別のマージン評価手法も開発した。 補助冷却設備が3系統あることを考慮すれば、マージンは3倍になることを示した。強風と降 雨の重畳事象については、強風のみの影響の場合、主に最大瞬間風速をハザード強度の指標と して、風圧・気圧差・飛来物衝突による破損評価を行い、機器別のマージン評価手法を開発し た。その結果、最大瞬間風速の過去最大値に比べて十分なマージンを有することを確認した。 また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価手法も開発し、強風時には補助 冷却設備の全系統同時破損は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは現れないことを示し た。降雨のみの影響の場合、機能喪失水位に対する排水設備閉塞物除去速度に応じた継続時間 を指標とした機器別のマージン評価手法を開発し、1時間降水量が増大するにつれてマージン が小さくなることを示した。また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価手 法も開発し、降雨時には補助冷却設備の浸水は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは現 れないことを示した。強風と降雨の重畳時には補助冷却設備排気部雨どいの破損に続く排気ダ クト内への降雨の浸入による空気冷却器伝熱管疲労破損が考えられ、伝熱管破損までの許容時 間を指標とした機器別のマージン評価手法を開発し、雨水液滴径が大きくなるにつれてマージ ンが小さくなることを示した。また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価 手法も開発し、補助冷却設備の全系統同時破損は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは 現れないことを示した。積雪を対象に、ヒータを設置する場合と除雪作業の場合のコストを定 性的に分析し、炉心損傷頻度と比較することでコストーベネフィット評価手法を開発した。最 後に、4年間のまとめとして、開発してきた手法を整理した。

#### (2) 外部ハザード評価手法の開発

#### ①異常気象ハザード評価手法の開発

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価 対象とする重畳事象を選定した。その重畳事象に対して、既往のハザード強さの記録を調査・ 整理した。また、既往研究からハザード評価手法を調査・整理した。次に、ナトリウム冷却高 速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼすハザードの重要パラメータを同定し、起こりやすさとハ ザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、重畳事象に対するハザードを評価した。4 年間のまとめとして手法を整備した。

重畳事象の選定方法を調査し、本研究における選定方法を考案して、平成27年度に評価対 象とする重畳事象として、積雪と低温、強風と降雨の重ね合わせを選定した。既往のハザード 強さの記録として、積雪と低温の重畳事象については、積雪深、日降雪深、最低気温、低温継 続時間を調査・整理した。強風と降雨の重畳事象については、最大風速、最大瞬間風速、1 時 間降水量を調査・整理した。また、国内外の技術会議に参加し様々なハザード及びリスク評価 手法に関する情報を収集するとともに、既往文献に基づきハザード評価手法を調査・整理し、 統計処理的方法により年超過確率を算出できる見通しを得た。次に、積雪と低温の重畳事象に ついては、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能喪失要因には積雪によるフィルタ閉塞、低 温によるフィルタ凍結及び空気冷却器伝熱管内ナトリウム凍結が考えられるため、重要パラメ ータとして年最低気温記録日の日降雪深、降雪継続時間、低温継続時間を同定した。これらの 年最大値を極値分布にあてはめてハザード曲線を構築し、適合度評価と安定性評価で妥当性を 確認するハザード評価手法を開発した。低温継続時間については、凍結が考えられる 0℃以下 の低温が継続した時間を用いてハザードを評価した。強風と降雨の重畳事象については、ナト リウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能喪失要因には強風によって生じる飛来物衝突による機器の 破損、空気冷却器への雨水浸入による伝熱管疲労破損が考えられるため、重要パラメータとし て年最大1時間降水量記録日の最大瞬間風速、1時間降水量、降水継続時間を同定した。これ らの年最大値を極値分布にあてはめてハザード曲線を構築し、適合度評価と安定性評価で妥当 性を確認するハザード評価手法を開発した。降水継続時間については、異常降雨と考えられる 1時間あたり 5mm 以上の降水が継続した時間を用いてハザードを評価した。最後に、4年間の まとめとして、開発してきた手法を整理した。

#### ②火山噴火ハザード評価手法の開発(再委託先:産総研)

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を選定し

た。また、湿分等を考慮したフィルタ目詰まり試験を実施した。さらに、これまでの粒度分析 の総合評価を行い、火山灰粒子の特徴を整理した。4年間のまとめとして手法を整備した。

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象として、 火山灰+降雨(霧)を選定した。そして選定した重畳事象により噴火時の降下火山灰によるフ ィルタ目詰まりによりどのような影響が出るのかを確認するために、フィルタ試験ダクト内に 散水して火山灰を供給し、フィルタの性能変化(圧力損失、粉じん保持量、外観)を確認した。 試験は平成26年度と同様に中性能フィルタ単体、プレフィルタ単体、両者の組み合わせで実 施したが、交換圧損到達時のフィルタ火山灰保持量に乾燥時と散水時で有意な差は確認できな かた。したがって、フィルタ損傷に対する降雨の重畳効果はほとんどないことが確認できた。 さらに、これまでの桜島噴火中に採取した降灰試料の粒度分析の総合評価を行い、粒径サイズ と粒子形状に相関があることを明らかにした。最後に、4年間のまとめとして、開発してきた 手法を整理した。

#### ③森林火災ハザード評価手法の開発

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を選定した。その重畳事象に対して、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能への影響を調べるため、 森林火災の延焼シミュレーションを実施するとともに、森林火災ハザードを評価した。4年間 のまとめとして手法を整備した。

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、煤煙に関するハザード曲線を導出 した。導出にあたっては、森林火災の延焼シミュレーションを実施し、延焼量の保存性を高め た森林火災の燃焼強度と進展速度の代表値を導出し、さらに延焼進展に応じた煤煙の空間分布 を ALOFT-FT コードを用いて煤煙シミュレーションを実施することで、空気冷却設備のフィル タ目詰まり積算量に関する応答曲面を構築した。構築した応答曲面を、平成25年度及び平成 26年度に開発したロジックツリーへ適用し、モンテカルロ計算を行うことで、煤煙積算目詰 まり量を指標とした森林火災ハザードを評価した。さらに評価対象とする重畳事象として、森 林火災+強風、森林火災+雷を選定した。それらの重畳事象に対して、ナトリウム冷却高速炉 の崩壊熱除去機能への影響を調べるため、重畳条件でのハザード曲線を導出した。最後に、4 年間のまとめとして、開発してきた手法を整理した。

#### (3) 事象シーケンス評価手法の開発

#### ①安全対策の整理及び事象シーケンス評価手法の開発

事象シーケンス評価手法を開発するため、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関する 重要機器を同定し、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去機能維持に係わる安全対策を整理した。 また、森林火災・重畳事象を起因とした炉心損傷に至り得るイベントツリーを構築して、事象 シーケンスを評価した。さらに、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去解析を実施した。4年間 のまとめとして手法を整備した。

森林火災、積雪と低温の重畳事象、強風と降雨の重畳事象によるナトリウム冷却高速炉の崩 壊熱除去機能喪失要因を抽出し、空気冷却器、電源系、換気空調系といった重要機器を同定し た。また、森林火災時の安全対策としてポンプ車による燃料タンクへの放水、積雪と低温の重 畳事象時の安全対策として除雪作業とヒータの設置などを整理するとともに、強風と降雨の重 畳事象時の安全対策として排水溝閉塞物除去作業などを整理した。次に、森林火災については、 反応強度を指標とした森林火災ハザードをカテゴリ化して、森林火災を起因とした炉心損傷シ ーケンスについてイベントツリーを構築して、燃料タンク破損及び火災発生確率を算定して、 空気冷却器外気温度高温化による機能喪失を考慮した事象シーケンスを評価し、炉心損傷頻度 を定量化する手法を開発した。積雪と低温の重畳事象については、日降雪深、降雪継続時間と 低温継続時間に応じたハザードカテゴリを設定して、積雪と低温の重畳事象を起因とした炉心 損傷シーケンスについてイベントツリーを構築して、着雪によるフィルタ閉塞確率、水配管凍 結確率、ナトリウム凍結確率といった確率モデルを考案して、補助冷却設備機能喪失を考慮し た事象シーケンスを評価し、炉心損傷頻度を定量化する手法を開発した。強風と降雨の重畳事 象については、最大瞬間風速、1時間降水量、降水継続時間に応じたハザードカテゴリを設定 して、強風と降雨の重畳事象を起因とした炉心損傷シーケンスについてイベントツリーを構築 した。また、空気冷却器伝熱管への雨水液滴の接触により発生する熱応力を求め、繰返し接触 による疲労破損を評価することで補助冷却設備機能喪失を考慮した事象シーケンスを評価し、 炉心損傷頻度を定量化する手法を開発した。さらに、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去解析 として、低温時の空気冷却器伝熱管ナトリウム凍結に着目した解析を実施した。最後に、4年 間のまとめとして、開発してきた手法を整理した。

### ②時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発(再委託先:平成2 7年8月31日まで大阪大学、平成27年9月1日以降原子力機構)

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法を開発するため、降雨を 起因とした炉心損傷に至り得る事象シーケンスに対して適用性評価を可能とすべく、平成26 年度に開発した評価プログラムの機能追加と必要な改良を施した。また、この評価手法の降雨 時のシーケンスに対する適用性を評価した。4年間のまとめとして手法を整備した。

降雨を起因とした炉心損傷に至り得る事象シーケンスに対して適用性評価を可能とすべく、 平成26年度に開発した評価プログラムに、建物内各部屋の構成、浸水、越流および排出(ド レイン)をモデル化し、建物内部の水位評価プログラムの組み込みを実施した。開発した評価 手法を用い、降雨時のシーケンスに対する適用性評価として、降雨条件を 140mm/hr、屋外排 出機能喪失時におけるプラント挙動解析を実施した。平成26年度に実施されたイベントツリ ー評価より、対象イベントとして、屋上水位上昇に伴う電気設備の機能喪失に起因する1、2 次系ポニーモータの機能喪失及び自然循環運転への移行を選定した。解析の結果、最高温度は ポニーモータの機能停止から自然循環運転へ移行する過程で発生し約50℃の温度上昇を伴う こと、統計処理の結果平均最高温度は435℃であり、炉心損傷を伴う可能性が極めて小さいこ とが明らかとなった。最後に、4年間の成果のまとめとして、これまでに開発したプログラム の入出力に関する整備を行うとともに、本手法で取り扱うイベントの設定方法に関してまとめ

xxii

た。

#### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意見を 聴きながら研究を進めるため委員会を開催した。

個別に進めている各研究項目との間で連携を深めるため、業務参加者全員が参加する全体会 議を3回開催し、効率的に研究を進めた。また、外部ハザードおよびPRAの外部有識者で構成 される委員会を設置し、本研究の進捗状況について議論する委員会を1回開催し、本研究に反 映できる意見を得た。

#### (5) まとめ・評価

平成24年度から平成27年度の4年間の成果をまとめた。

4年間の実施内容を整理して、研究開発成果を総括してまとめるとともに、成果について自 己評価を行った。

以上、4か年計画の最終年度として平成27年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

#### 1. はじめに

これまで原子力発電所は地震に対する安全確保が最重要視されてきたが、東京電力福島第一 原子力発電所の事故後、地震のみならず様々な外部ハザードに対して安全性を確保することが 重要であると認識された。これまでの外部ハザードに対する安全設計は歴史的な記録に基づい て過去最大に相当する統計的に妥当とみなされる条件に基づいていた。しかしながら、東京電 力柏崎刈羽原子力発電所では新潟県中越沖地震(2007年)の加速度が設計当時の想定を上回り、 設計基準地震動は十数万年に1度の地震まで想定されることになった。また、東北地方太平洋 沖地震(2011年)で起きた津波は設計当時の想定を大きく上回り、過去400年程度の歴史津波 では不十分であり、専門家により設定されたハザードのレベルに応じて安全性を確保する必要 があるとの意見が出された。地震・津波については、安全設計指針や PSA (Probabilistic Safety Assessment、確率論的安全評価)実施基準が策定されたところであるが、その他の外 部ハザードについては策定されていない状況であり、様々な外部ハザードに対するプラントの 安全性を確認する手法を開発する必要がある。特に、東京電力福島第一原子力発電所の事故で は、地震直後の原子炉停止は成功したものの、地震起因の巨大津波により崩壊熱除去機能を喪 失したことから、崩壊熱除去機能に影響を及ぼす外部ハザードが着目される。ナトリウム冷却 高速炉の崩壊熱除去系は大気で除熱していることから、プラント上方からの外部ハザードに対 するプラントの安全性を評価する手法を開発する必要がある。

本課題は、種々の外部ハザードに対する原子力施設の安全性の向上及び炉心損傷までのマー ジン(安全裕度)を定量的に評価する安全基盤技術の確立のため、代表的な外部ハザードであ る異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)、火山噴火、森林火災を対象に、ナトリウム冷却高速 炉の崩壊熱除去機能のマージン評価手法、外部ハザード評価手法及び事象シーケンス評価手法 を開発することを目的とする。

上記目的を踏まえて、これまで開発されていない地震・津波以外の外部ハザードに対するマ ージン評価手法を開発する上で必要な研究開発項目は、(1)マージン評価手法の開発、(2)外 部ハザード評価手法の開発、(3)事象シーケンス評価手法の開発である。各研究開発項目の目 標を以下のように設定した。

#### (1) マージン評価手法の開発

外部ハザードに対するナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージン評価手法を 開発し、本課題で対象とする代表的な外部ハザードに対するマージン評価を行う。また、 外部ハザード評価手法及び事象シーケンス評価手法と併せて、標準化を目指した手法と して整備する。

#### (2) 外部ハザード評価手法の開発

#### ①異常気象ハザード評価手法の開発

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)を対象として、重要パラメータを同定して、数 値シミュレーションも活用しながら、起こりやすさとハザード強さを指標としたハザー ド曲線を構築して、ハザード評価手法を開発する。

#### ②火山噴火ハザード評価手法の開発

火山噴火を対象として、重要パラメータを同定して、数値シミュレーションも活用し ながら、起こりやすさとハザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、ハザード 評価手法を開発する。

#### ③森林火災ハザード評価手法の開発

森林火災を対象として、重要パラメータを同定して、数値シミュレーションも活用し ながら、起こりやすさとハザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、ハザード 評価手法を開発する。

#### (3) 事象シーケンス評価手法の開発

#### ①安全対策の整理及び事象シーケンス評価手法の開発

ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関する重要機器を同定し、崩壊熱除去機能 維持に係る安全対策(ハード対策とアクシデントマネージメント)を整理し、崩壊熱除 去機能に関する成功基準解析に基づき、従来のイベントツリー解析手法を拡張した事象 シーケンス評価手法を開発する。

#### ②時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発

外部ハザードの時間進展が重要であるため、より詳細な手法としてモンテカルロ計算 を活用した時間依存事象進展アルゴリズムに基づく評価手法を開発する。

#### 2. 業務計画

#### 2.1 全体計画

本業務の全体計画及び体制図をそれぞれ図 2.1-1 と図 2.1-2 に示す。

#### (1) マージン評価手法の開発

平成24年度に既往研究からマージン評価手法を調査し評価手法の概念を構築するとと もに、種々の外部ハザードを調査し本研究で対象とする外部ハザードの代表性を検討・整 理する。平成25年度に外部ハザードに対する一般的なマージン評価手法を開発し、積 雪・竜巻に対するマージンを評価し、手法開発を行う。平成26年度に強風・降雨・火山 噴火に対するマージンを評価し、手法開発を行う。平成27年度に森林火災・重畳事象に 対するマージンを評価し、手法開発を行うとともに、コストーベネフィット評価手法を構 築し、4年間のまとめとして手法を整備する。

#### (2) 外部ハザード評価手法の開発

#### ① 異常気象ハザード評価手法の開発

平成24年度に積雪を対象としてハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザードの 重要パラメータを同定した上で、ハザード曲線を構築して異常気象ハザードを評価する。 平成25年度に竜巻・強風を対象としてハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザー ドの重要パラメータを同定した上で、ハザード曲線を構築して異常気象ハザードを評価す る。平成26年度に降雨を対象としてハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザード の重要パラメータを同定した上で、ハザード曲線を構築して異常気象ハザードを評価する。 平成27年度に重畳事象を対象としてハザードの重要パラメータを同定した上で、ハザー ド曲線を構築して異常気象ハザードを評価するとともに、4年間のまとめとして手法を整 備する。

#### 火山噴火ハザード評価手法の開発

平成24年度にハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザードの重要パラメータを 同定するとともに、火山灰粒度分析手法を開発する。平成25年度に火山噴火ハザード評 価手法の概念を構築するとともに、平成24年度に収集した火山噴火記録を対象とした降 灰シミュレーションを実施する。平成26年度に火山噴火ハザード評価手法を開発すると ともに、降灰シミュレーション、フィルタ目詰まり試験及び降下火山灰の粒度分析を実施 する。平成27年度に重畳事象のハザード評価を実施するとともに、4年間のまとめとし て手法を整備する。

#### ③ 森林火災ハザード評価手法の開発

平成24年度にハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザードの重要パラメータを 同定するとともに、平成25年度に実施する森林火災シミュレーションのための解析条件 を設定する。平成25年度に森林火災ハザード評価手法の概念を構築するとともに、風の 影響を受けない森林火災シミュレーションを実施し、その結果を踏まえて重要パラメータ を同定する。平成26年度に森林火災ハザード評価手法を開発するとともに、風の影響を 受ける森林火災シミュレーションを実施し、森林火災ハザードを評価する。平成27年度 に重畳事象のハザード評価を実施するとともに、4年間のまとめとして手法を整備する。

#### (3) 事象シーケンス評価手法の開発

#### ① 安全対策の整理及び事象シーケンス評価手法の開発

平成24年度に積雪を対象として安全対策を整理するとともに、事象シーケンスを評価 する。平成25年度に竜巻・強風を対象として安全対策を整理するとともに、事象シーケ ンスを評価する。平成26年度に降雨・火山噴火を対象として安全対策を整理するととも に、事象シーケンスを評価する。平成27年度に森林火災・重畳事象を対象として安全対 策を整理するとともに、事象シーケンスを評価する。また、4年間のまとめとして手法を 整備する。

#### ② 時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発

平成24年度に既往研究から評価手法を調査し評価手法の概念を構築するとともに、評価プログラムを作成する。平成25年度に適用性評価ができるように評価手法を開発し、 積雪への適用性を評価する。平成26年度に評価手法の改良を行い、強風への適用性を評価する。平成27年度に評価手法の改良を行い、降雨への適用性を評価するとともに、4 年間のまとめとして手法を整備する。

#### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意 見を聴きながら研究を進めるため委員会を開催する。

#### (5) まとめ・評価

平成24年度から平成27年度の4年間の成果をまとめる。

年度	平成24	平成 2 5	平成26	平成 2 7
業務項目	年度	年度	年度	年度
(1)マージン評価手法の開発	評価手法調査、 概念構築、 ハザード調査	積雪・竜巻に対 するマージン評 価手法の開発	強風・降雨・火 山噴火に対する マージン評価手 法の開発	森林火災・重畳 事象に対する マージン評価手 法の開発、手法 のとりまとめ
<ul><li>(2) 外部ハザード評価手法の開発</li><li>① 異常気象ハザード評価手法</li></ul>	● 評価手法調査、 重要パラメータ	◆ 竜巻・強風の	◆ 降雨のハザード	▲ ●
の開発	<sub>呈</sub> 同定、積雪ハザ ード評価手法の 開発	ハサート評価 手法の開発	評価手法の開発	ハサート評価 手法の開発、 手法のとりまと め
	<b>↓</b>			<b>←</b> →
② 火山噴火ハサート評価手法 の開発	評価手法調査、 重要パラメータ 同定、 火山灰粒度分析 手法開発	火山灰粒度 分析、 ハザード評価手 法の概念構築	降灰シミュレー ション、 火山噴火のハザ ード評価 手法の開発	重畳事象の ハザード評価 手法の開発、 手法のとりまと め
	<b>←</b> →	← →	← →	<b>←</b>
③ 森林火災ハザード評価手法の開発	評価手法調査、 重要パラメータ 同定、 解析条件設定	森林火災シミュ レーション、 ハザード評価手 法の概念構築	森林火災のハザ ード評価手法の 開発	重畳事象のハザ ード評価 手法の開発、 手法のとりまと め
<ul><li>(3) 事象シーケンス評価手法の開</li></ul>	• • •	<b>←</b> →	<b>←</b> →	• • •
<ol> <li>① 安全対策の整理及び事象シ</li> <li>一ケンス評価手法の開発</li> </ol>	積雪に対する安 全対策の整理・ 事象シーケンス 評価手法の開発	<ul> <li>竜巻・強風に対</li> <li>する安全対策の</li> <li>整理・事象シー</li> <li>ケンス評価手法</li> <li>の開発</li> </ul>	降雨・火山噴火 に対する安全 対策の整理・事 象シーケンス評 価手法の開発	森林火災・重畳 事象に対する 安全対策の整 理・事象シーケ ンス評価手法の 開発、手法のと りまとめ
② 時間依存事家進展アルコリ ズムに基づいた事象シーケ ンス評価手法の開発	評価手法調査、 手法の概念構 築、 プログラム作成	評価手法の 開発、積雪への 適用性評価	評価手法の 改良、 強風への適用性 評価	評価手法の 改良、 降雨への適用性 評価、 手法のとりまとめ
	<b>←</b>	►►	◆ →	<b>←</b> ►
(4) 研究推進	委員会開催	委員会開催	委員会開催	委員会開催
(5) まとめ・評価				まとめ・ 評価

### 図 2.1-1 全体計画



図 2.1-2 体制図

#### 2.2 平成27年度の成果の目標及び業務の実施方法

本業務では、種々の外部ハザードに対する原子力施設の安全性の向上及び炉心損傷までの マージン(安全裕度)を定量的に評価する安全基盤技術の確立のため、代表的な外部ハザー ドである異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)、火山噴火、森林火災を対象に、ナトリウム 冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージン評価手法、外部ハザード評価手法及び事象シーケン ス評価手法を開発することを目的とする。

本事業における平成27年度の実施計画を図2.2-1に示す。

#### (1) マージン評価手法の開発

外部ハザードに対するマージン評価手法を開発するため、森林火災・重畳事象に対する ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージンを評価する。また、合理的な安全対策 とするためのコストーベネフィット評価手法を構築する。4年間のまとめとして手法を整 備する。

#### (2) 外部ハザード評価手法の開発

#### ①異常気象ハザード評価手法の開発

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)に関する外部ハザード評価手法を開発するため、 評価対象とする重畳事象を選定する。その重畳事象に対して、既往のハザード強さの記 録を調査・整理する。また、既往研究からハザード評価手法を調査・整理する。次に、 ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼすハザードの重要パラメータを同 定し、起こりやすさとハザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、重畳事象に 対するハザードを評価する。4年間のまとめとして手法を整備する。

#### ②火山噴火ハザード評価手法の開発

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を 選定する。また、湿分等を考慮したフィルタ目詰まり試験を実施する。さらに、これま での粒度分析の総合評価を行い、火山灰粒子の特徴を整理する。4年間のまとめとして 手法を整備する。

#### ③森林火災ハザード評価手法の開発

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を 選定する。その重畳事象に対して、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能への影響を 調べるため、森林火災の延焼シミュレーションを実施するとともに、森林火災ハザード を評価する。4年間のまとめとして手法を整備する。

#### (3) 事象シーケンス評価手法の開発

#### ①安全対策の整理及び事象シーケンス評価手法の開発

事象シーケンス評価手法を開発するため、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に

関する重要機器を同定し、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去機能維持に係わる安全対 策を整理する。また、森林火災・重畳事象を起因とした炉心損傷に至り得るイベントツ リーを構築して、事象シーケンスを評価する。さらに、森林火災・重畳事象時の崩壊熱 除去解析を実施する。4年間のまとめとして手法を整備する。

#### ②時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法を開発するため、 降雨を起因とした炉心損傷に至り得る事象シーケンスに対して適用性評価を可能とすべ く、平成26年度に開発した評価プログラムの機能追加と必要な改良を施す。また、こ の評価手法の降雨時のシーケンスに対する適用性を評価する。4年間のまとめとして手 法を整備する。

#### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意 見を聴きながら研究を進めるため委員会を開催する。

#### (5) まとめ・評価

平成24年度から平成27年度の4年間の成果をまとめる。

区分	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(1)マージン評価手法												
の開発	◄											
(原子力機構)												
(2)外部ハザード評価												
手法の開発												
①異常気象ハザード評価	•											
手法の開発												
(原子力機構)												
②火山噴火ハザード評価												
手法の開発	┥											
(産業技術総合研究所)												
③森林火災ハザード評価												
手法の開発	◀											
(原子力機構)												
(3) 事象シーケンス評												
価手法の開発												
①安全対策の整理及び事	←											
象シーケンス評価手法の												
開発												
(原子力機構)												
②時間依存事象進展アル												
ゴリズムに基づいた事象												
シーケンス評価手法の開		大	' :阪大!	ı 学				房	, 〔子力	∟ 機構	I	
発	┥—				┝	◀						
(大阪大学,原子力機												
構)												
(4)研究推進												
(原子力機構)	-											
(5) まとめ・評価												
(原子力機構)										◀		

図 2.2-1 平成 27年度業務実施計画

#### 3. 平成27年度の実施内容及び成果

#### 3.1 マージン評価手法の開発

外部ハザードに対するマージン評価手法を開発するため、森林火災・重畳事象に対する ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージンを評価した。また、合理的な安全対策 とするためのコストーベネフィット評価手法を構築した。4年間のまとめとして手法を整 備した。

#### 3.1.1 はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故後に、欧州のストレステストに倣って、我が国では 発電用原子炉施設の安全性に関する総合的評価(いわゆるストレステスト)を実施するこ とが事業者に指示された。このストレステスト評価手法は本研究で開発されるマージン (安全裕度)評価手法と類似したものであることから、平成24年度は、国内外の既往研 究からマージン評価手法を調査・整理し、マージン評価手法の概念を構築した。マージン 評価の場合は、ハザード評価が指標とするハザード強さを設定するのに対して、PRA (Probabilistic Risk Assessment、確率論的リスク評価)ではハザード強さを発生頻度 と関連付けてハザード曲線を描く。すなわち、ハザードを定量化できれば PRA になり、定 量化できなければ確率の概念を取り入れないマージン評価となる。本研究では、ハザード の定量化を試みることから、PRA とマージン評価の両方の手法を開発することとしている。

4年間の業務計画は次のとおりである。平成24年度に既往研究からマージン評価手法 を調査し評価手法の概念を構築するとともに、種々の外部ハザードを調査し本研究で対象 とする外部ハザードの代表性を検討・整理する。平成25年度に外部ハザードに対する一 般的なマージン評価手法を開発し、積雪・竜巻に対するマージンを評価し、手法開発を行 う。平成26年度に強風・降雨・火山噴火に対するマージンを評価し、手法開発を行う。 平成27年度に森林火災・重畳事象に対するマージンを評価し、手法開発を行うとともに、 コストーベネフィット評価手法を構築し、4年間のまとめとして手法を整備する。

ここでは、森林火災・重畳事象に対するマージン評価手法及びコストーベネフィット評価手法について記述するとともに、4年間の成果をまとめる。なお、重畳事象は、積雪と低温の組み合わせ、強風と降雨の組み合わせを評価対象事象とした。

#### 3.1.2 森林火災に対するマージン評価手法(H27)

#### 3.1.2.1 概要

森林火災ハザードに対し、高速炉が有する堅牢性を評価するため、崩壊熱除去機能維持 に関わるマージン評価を行った。評価の前提となる事故進展シナリオは、これまでの評価 を踏まえ、森林火災の熱影響に関して厳しい条件を重畳させた状況で、炉心損傷に至る代 表的なものを選定した。1つ目は、「外部燃料タンクの破損火災時の周囲の空気の昇温に より、換気空調系(電源維持)と空気冷却器が、共に機能喪失」である。すなわち、空気 冷却器の機能喪失が森林火災への潜在的な脆弱性を有する外部燃料タンクにおいて、その 損傷と内部燃料への引火を仮定する。さらに、燃料火災により生じるタンク周囲の空気の 昇温が、崩壊熱除去モードにある崩壊熱除去系の空気冷却器の除熱性能低下をもたらすと 仮定する。これらの仮定により、外部燃料タンクの火災が継続している間は除熱機能が大 幅に低下することで、原子炉冷却材の温度上昇がもたらされることとなる。これが換気空 調系の機能喪失あるいはディーゼル発電機の起動失敗と重なることより、全交流電源喪失 の状態となる。このように評価した冷却材最高温度が、保守的な冷却材バウンダリ損傷判 断基準値に対してどの程度のマージンを有するかを評価した。このシナリオは、他の代表 的なシナリオである、「ディーゼル発電機起動失敗(電源確保失敗)」が重畳した場合も 包絡し、全炉心損傷確率のうち約 94%を占めるものである(3.3.1.3 節参照)。2つ目は、 「外部燃料タンクの破損火災時の周囲の空気の昇温により空気冷却器が機能喪失」と「強 制循環系であるメンテナンス冷却系の起動失敗」が重なるシナリオであり、外部電源喪失 の状態となるが非常用発電機による交流電源自体は確保され、ポニーモータによる冷却材 循環と空気冷却器のダンパ制御は可能となるものである。全炉心損傷確率のうち約 4%を占 める。3つ目は、外部燃料タンクの火災が生じないシナリオであり、電源が確保されない 状況で自然循環冷却時に空気冷却器のダンパ制御に失敗する状況であり、全炉心損傷確率

のうち約2%を占めるものである。

#### 3.1.2.2 マージン評価(タンク燃料火災を伴うシナリオ)

図 3.1.2-1 に示す流れにより、マージン評価を実施した。

(1) 森林火災

森林火災の延焼が発電所周囲に達したときに、主に輻射伝熱により発電所系統機器の温度上昇が生じる。FARSITEを用いた森林火災延焼シミュレーションを通じ、これまでに燃焼強度  $I_r$ が解析されており、発電所周囲での最大値は  $I_{r\_max}$ =~1,100kW/m<sup>2</sup>である。燃焼強度は対流熱と輻射熱の影響の和であり、その内の輻射の割合を与える樹木燃焼特性値として Red Pine の値  $e_{rad}$ =0.376 (37.6%)を与えて輻射発散強度とする。また森林前面と外部燃料タンクとの最近接離隔距離として保守的に L=100m を与える。森林火災前線から外部燃料タンクへの輻射量は、形態係数  $\phi$ を用いて評価される。火災柱の燃焼半径 Rは火炎高さ Hの 1/3 とみなせ、森林火災延焼シミュレーションで計算された代表的な火炎長として H=1.36m を与える。ここで、 $m = \frac{H}{R} \cong 3$ 、 $n = \frac{L}{R} \cong 220$ 、さらに $A = (1 + n)^2 + m^2 \cong 4.9 \times 10^4$ 、 $B = (1 - n)^2 + m^2 \cong 4.8 \times 10^4$ が求まり、
$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(n - 1)}{B(n + 1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(n - 1)}{(n + 1)}} \right] \right\}$$
(3. 1. 2-1)

を用いて、形態係数  $\phi$ =3.9×10<sup>-5</sup>が求められる。これらにより、ある1つの火炎柱から外部燃料タンクが受ける熱流束 $E_i = \phi \times e_{rad} \times I_{r_max}$ が求められる。ここで、外部燃料タン クから見た場合、森林火災前線にある火炎柱は横手方向に並んでいる(もしくは、横手方向にいくつかに分かれている)ことから、火炎柱の数だけ輻射熱を受けることとなる。この横手方向の長さとして W=100m を仮定した場合、火炎柱の数 F は火炎柱の燃焼半径 R を用い F=100/2R となり、よって総熱流束は $E_{all} = F \times E_i = F \times \phi \times e_{rad} \times I_{r_max}$ となる。 よって、 $I_{r_max}$ =1,100kW/m<sup>2</sup>の場合、 $E_{all}$ =1.79×10<sup>3</sup>W/m<sup>2</sup>となる。なお L=100m の場合、横手方向に並ぶ火炎柱と外部燃料タンクの実効距離は、これよりも長い。輻射の熱流束は距離の2 乗に反比例することを用いた別途積分計算により、実効的な横手方向長さは W<sub>eff</sub>=約110m となる。

## (2) 外部燃料タンク

輻射熱を受けた外部燃料タンクは昇温することから、構造壁の強度低下や内部燃料の自 然発火・沸騰などを通じて損傷に至る潜在的リスクを評価する必要がある。熱容量の大小 に応じた温度上昇速度の差のため、構造壁の温度上昇はタンク内部の軽油の温度上昇より も顕著である。外部燃料タンクに関する技術基準によれば、構造壁材料の規格上の上限値 は 350℃であり、これを超えると破損の可能性が生じてくると仮定した。温度上昇では、 上記の外部燃料タンクが受ける熱流束に加え、森林火災の継続時間が重要となる。

発電所周囲での森林火災継続時間であるが、風速・湿度・発生地点・発生時間を変化さ せた全 240 ケースの FARSITE 解析によれば、各ケースでの発電所周囲での ROS (Rate of Spread、延焼速度)の調和平均は 0.2-1.7m/min.であった。0.3~0.4m/min.の出現頻度が 高く、平均値及び標準偏差は各々0.53m/min.及び 0.27m/min.であった。輻射発散強度を 用いた外部燃料タンクの昇温計算は、火災柱が敷地境界に沿って横手方向に並んだ状況で なされていることから、横手方向に延焼する効果は既に取込まれている。よって延焼時間 の設定は、森林火災前線が奥行方向から発電所境界へと前進してくる時間に対応したもの となる。外部燃料タンクが受ける輻射熱流束は、奥行方向距離rの2乗に反比例すること から、奥手方向での積分輻射量は、

$$\int_{DL}^{\infty} \left( E_{all} \times \frac{L^2}{r^2} \right) dr = E_{all} \times X \tag{3. 1. 2-2}$$

と表せる。ここでXは、実効奥行長さ(奥行方向の積分輻射量と等価な熱量を与える、地 点Lでの強度 E<sub>al1</sub>に対する奥行長さ)である。簡単な計算により X=L が求まる。よって、 森林と外部燃料タンクの離隔距離 L=100m の場合、地点L・強度 E<sub>al1</sub>の輻射強度で、奥行 長さ X=L=100m 分、森林火災前線が進む時間受熱することと等価となる。上述の ROS 値を 用いて、奥行長さ 100m 分を森林火災前線が進展する時間を全 240 ケースに対して求めた ところ、平均値及び標準偏差は各々3.9 時間及び 1.7 時間、最も長時間なものでも 8 時間 未満であった。また 0~4 時間未満、4~6 時間未満、6 時間以上(それぞれの代表時間は 3 時間、5 時間、7 時間とする)の割合は 0.5 (50%)、0.35 (35%)、0.15 (15%)であった。 外部燃料タンクの壁温度の初期値を、敦賀地区で観測された気温最大値 37.6℃とし、 壁材比熱(473K/J)を与えることで壁温度が 350℃に達する時刻は t\_T350=1.17×10<sup>4</sup>秒 (~3.25 時間)となる。燃焼強度 I<sub>r</sub>に応じた 350℃到達時間は図 3.1.2-2 となる。燃焼 時間 8 時間未満、燃焼強度 1,100kW/m<sup>2</sup>未満、350℃到達曲線の右上を同時に満たす領域が、 外部燃料タンクの損傷リスクが顕在化しえる領域である。ここで 350℃到達曲線の回帰曲 線式は、t\_T350=3,574/x となった。

## (3) 外部燃料タンク火災発生

壁面温度が、規格上限値 350℃に達した直後に、外部燃料タンクに貯蔵された軽油の火 災が生ずると保守的に仮定する。軽油タンク火災時の標準的な質量低下速度 (0.036kg/m<sup>2</sup>s)と外部燃料タンク容量から、外部燃料タンク火災が生じた場合の継続時 間は 4.37 時間と評価された。よって、外部燃料タンクが4つ併設されていた場合、1つ のタンクが火災を起こし火災が収束した直後に別のタンクが火災を生ずる状況を仮定した 場合、外部燃料タンク火災の最大継続時間は、4.37×4=17.48=約17.5 時間となる。

## (4) プラント過渡挙動

森林火災発生後、煤煙が発電所に到達した場合でも、崩壊熱除去系の空気冷却器フィル タ目詰まりは生じがたいことが別途評価により分かっている。よって、本検討における状 況下では、外部燃料タンクの火災が生じる前までは、空気通風流路が 100%維持された通 常の崩壊熱除去が行われていると想定される。この際、森林火災が遠方にあるときの高圧 送電線への火災の影響で、発電所では外部電源喪失が生じており、さらにディーゼル発電 機も起動しない全交流電源喪失にあると仮定する。すなわちポニーモータやブロワは停止 状態にあり、ダンパは全開状態にある。このような過渡状態における原子炉容器出口冷却 材温度の変化を図 3.1.2-3 に示す。なおこのとき、崩壊熱除去に用いられる発電所周囲で の空気温度は 20/50/100℃とした解析を示している。また保守的に換気空調系は停止し主 系統配管からの自然放熱は無視している。崩壊熱出力レベルの変化を図 3.1.2-4 に示す。 発電所周囲での森林火災が継続し、タンク壁面温度 350℃に達した時にタンク火災が生じ ると仮定しており、この 350℃に達した時刻での冷却材温度と出力レベルを、時刻及び燃 焼強度を横軸としてまとめたものを図 3.1.2-5 に示す。

#### (5) 原子炉冷却材温度

外部燃料タンクで火災が生じた場合、周囲の空気温度は上昇することから、その一部が 崩壊熱除去系の吸い込み空気となる潜在的可能性がある。森林火災が発電所周囲に到達し た時点で原子炉をスクラムさせ、崩壊熱除去モードに移行した状況を考える。このとき、 吸い込み空気温度は 20℃を仮定した場合、原子炉冷却材の温度挙動は図 3.1.2-3 の 20℃ の場合に沿って変化する。さらに上記の考察から、外部燃料タンクの壁面温度が 350℃に 達したと同時に外部燃料タンク火災が生じ、吸い込み空気温度は 100℃となり、その状態 の継続時間は 17.5 時間と仮定する。この状態における原子炉冷却材の温度上昇速度は、 図 3.1.2-3 の空気温度 100℃の場合の原子炉冷却材温度変化と同等となる。外部燃料タン クは 17.5 時間後に火災が終わり、その後の周囲の空気温度は 20℃に戻ることとなる。そ の時刻以降の原子炉冷却材の温度変化は、再び図 3.1.2-3 の空気温度 20℃の場合と同等 となる。以上の推移をプラント動特性解析コードにより導出した原子炉冷却材温度を、図 3.1.2-6 に示す。一方、仮想的に外部燃料タンク火災が永続した場合、原子炉冷却材温度 が判断値(例:700℃)に達する時刻が、図 3.1.2-7 から求まる。

## (6) マージン計算

原子炉冷却材の初期温度(T<sub>0</sub>=514℃)を基準に、外部燃料タンク火災時の原子炉冷却材 最高温度(T<sub>max</sub>)が、制限目安値(T<sub>1imit</sub>=700℃)に対して有する温度マージンを評価した結果 を図 3.1.2-8 に示す。また外部燃料タンク火災時に原子炉冷却材が最高温度を示す時刻 (t<sub>Tmax</sub>)が、仮想的に外部燃料タンク火災が永続した場合に制限目安値に到達する時刻 (t<sub>Tlimit</sub>)に対して有する時間マージンを評価した結果を図 3.1.2-9 に示す。制限目安値を 700℃とした場合でも、温度マージンは 80℃程度あり、また対応する時間マージンは 20 時間以上ある。制限目安値を 750℃とした場合、さらに温度マージン、時間マージンは大 きくなり、特に燃焼強度 800kW/m<sup>2</sup>以下では時間マージンは∞となる。

# 3.1.2.3 マージン評価の方法(タンク燃料火災を伴うが、非常用電源は確保されるシナリ オ)

(1) 森林火災

森林火災の挙動は、3.1.2.2節の場合と同じとなる。

## (2) プラント過渡挙動

「外部燃料タンクの火災」と、「強制循環系であるメンテナンス冷却系の起動失敗」が 重なるシナリオであり、非常用発電機による交流電源自体は確保され、ポニーモータによ る冷却材循環と空気冷却器のダンパ制御は可能となる。プラント過渡挙動は、最終ヒート シンクである大気の気温に応じたものとなる。このような過渡状態における原子炉容器出 口冷却材温度の変化を図 3.1.2-10 に、仮想的に外部燃料タンクの火災が継続したとした 場合の変化を図 3.1.2-11 に示す。

#### (3) 原子炉冷却材温度

原子炉冷却材温度の変化は、(2)の場合と同等となる。ポニーモータとダンパ制御に より、温度は(2)よりも低く推移する。

## (4) マージン計算

制限目安値に対する温度マージン計算結果を図 3.1.2-12、時間マージンを図 3.1.2-13 に示す。気温を 50℃と仮想的に設定した場合、温度マージンは制限目安値 700℃の場合で 約 100℃、制限目安値 750℃の場合で約 150℃となる。制限目安温度に達することはない ことから、時間マージンはいずれの場合も∞となる。

## 3.1.2.4 マージン評価の方法(タンク燃料火災を伴わないシナリオ)

(1) 森林火災

森林火災の挙動は、3.1.2.2 節の場合と同じとなる。外部燃料タンクの火災を生じない ことから、プラント過渡挙動は全電源喪失によるものとなる。

## (2) プラント過渡挙動

完全自然循環による崩壊熱除去が行われる。プラント過渡挙動は、最終ヒートシンクで ある大気の気温に応じたものとなる。このような過渡状態における原子炉容器出口冷却材 温度の変化を図 3.1.2-14 に示す。なおこのとき、崩壊熱除去に用いられる発電所周囲の 空気温度は-10/-5/0/20/36.8/50℃とした解析を示した。

## (3) 原子炉冷却材温度

気温が低く 20℃以下の場合、原子炉容器出口冷却材温度は過渡挙動当初から低下し続ける。

## (4) マージン計算

制限目安値に対する温度マージン計算結果を図 3.1.2-15 に示す。気温を 50℃と仮想的 に設定した場合、温度マージンは制限目安値 700℃の場合で約 100℃、制限目安値 750℃ の場合で約 150℃となる。制限目安温度に達することはないことから、時間マージンはい ずれの場合も∞となる。

## 3.1.2.5 森林火災に対するマージン評価のまとめ

森林火災ハザードに対し、保守的な仮定を重畳し、原子炉冷却材温度の制限目安値及び 到達時刻に関する温度マージン及び時間マージンを評価した。いずれの森林火災燃焼強度 に対しても十分なマージンを有していることが分かった。高速炉は熱容量が大きく、原子 炉冷却材温度の時間変化が穏やかなことから、森林火災及び随伴する外部燃料タンク火災 の影響がプラントに及ぶ時間の範囲内では、原子炉冷却材の温度が安全上の懸念を及ぼす 温度に至らず、堅牢性を有していることが示された。



図 3.1.2-1 森林火災に対する高速炉のマージン評価手法のスキーム



図 3.1.2-2 森林火災の燃焼強度と継続時間に対する外部燃料タンクの壁面温度の変化



図 3.1.2-3 全交流電源喪失時の原子炉冷却材温度の時間変化



図 3.1.2-4 全交流電源喪失時の原子炉出力(規格化済み)の時間変化



図 3.1.2-5 壁面温度 350℃到達時刻における原子炉冷却材温度及び崩壊熱出力レベル



図 3.1.2-6 全交流電源喪失で外部燃料タンク外壁温度 350℃到達後に、外部燃料タンク火 災を生じ 17.5 時間後に火災が終了した場合の原子炉容器出口冷却材温度



図 3.1.2-7 全交流電源喪失で外部燃料タンク外壁温度 350℃到達後に、外部燃料タンク火 災を生じ、仮想的に火災が永続すると仮定した場合の原子炉容器出口冷却材温度



壁面温度350℃到達時刻(hour)

図 3.1.2-8 全交流電源喪失で森林火災の燃焼強度に応じた温度マージンの変化 (原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合)



図 3.1.2-9 全交流電源喪失で森林火災の燃焼強度に応じた時間マージンの変化 (原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合)



図 3.1.2-10 外部電源喪失で外部燃料タンク外壁温度 350℃到達後に、 外部燃料タンク火災を生じ 17.5 時間後に火災が終了した場合の原子炉容器出口冷却材温度



図 3.1.2-11 外部電源喪失で外部燃料タンク外壁温度 350℃到達後に、 外部燃料タンク火災を生じ、仮想的に火災が永続すると仮定した場合の原子炉容器出口冷却 材温度



図 3.1.2-12 外部電源喪失で森林火災の燃焼強度に応じた温度マージンの変化 (原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合)



図 3.1.2-13 外部電源喪失で森林火災の燃焼強度に応じた時間マージンの変化 (原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合)



図 3.1.2-14 外部燃料タンクの火災が発生しなかった場合の原子炉容器出口冷却材温度

## 3.1.2 - 12



図 3.1.2-15 気温に応じた温度マージンの変化 (原子炉冷却材温度制限 700℃及び 750℃の場合) (外部燃料タンクの火災を生じない場合)

## 3.1.3 重畳事象(積雪と低温)に対するマージン評価手法(H27)

3.1.3.1 はじめに

積雪と低温の重畳事象時に崩壊熱除去機能喪失に至らしめるシナリオとしては、積雪単 独のマージン評価で考慮した空気冷却器取入口閉塞に加えて、降雪時に空気取入口フィル タに付着した雪が低温によりフィルタ面で凍結することが考えられる(3.3.1.4節参照)。 ここでは、この着雪して凍結することを氷着と呼ぶ。そこで、積雪と低温の重畳事象とし て現れる氷着の影響についてマージン評価手法を開発することとする。シーケンス別のマ ージン評価には積雪単独のマージン評価も必要になってくるため、平成25年度に実施し た積雪単独の影響を考慮したマージン評価手法も記述する。

# 3.1.3.2 積雪単独の影響

## (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

積雪の重要パラメータは、日降雪深で表される降雪速度、積雪深を日降雪深で除するこ とで表される降雪継続時間、積雪深に積雪密度を乗ずることで表される積雪重量である。 一方、原子炉補助建物の耐震壁は積雪十m程度に耐えられることから、積雪重量は除熱失 敗への寄与が相対的に小さいと考えられる。これを踏まえて、降雪速度と降雪継続時間に 考慮すべき指標を限定し、ある降雪速度の条件で空気取入口閉塞に至るまでの降雪継続時 間をマージンと定義する。

# (2) 機器別のマージン評価

## a. 定式化

プラント作業員は1日のうち、一定の時間に限り除雪できると考えられるので、1日あたりの除雪速度 $V_{removal}$  (m/day)に1日あたりの除雪作業割合 $\phi$ (-)を乗ずることにより得られる実効的な除雪速度 $V_{removal}^{eff}$  (m/day)を取り入れることとする。

$$V_{removal}^{eff} = V_{removal}\phi \tag{3.1.3-1}$$

初期状態が正常に機能している場合、この実効除雪速度が降雪速度以上であれば機能喪失に至ることはない。一方、実効除雪速度が降雪速度を下回る場合、降雪による積雪が徐々に継続することで機能喪失積雪深に到達し、除熱機能喪失に至る可能性が考えられる。機能喪失に至るまでの降雪継続時間がマージンとして定義できる。つまり、降雪速度 $V_{fall}$  (m/day)と実効除雪速度 $V_{removal}^{eff}$  (m/day)との差に降雪継続時間、すなわちマージン $T_{margin}$  (day)を乗じたものが機能喪失積雪深 $D_{failure}$  (m)に到達すれば除熱機能喪失と判断でき、この関係は次式で表される。

$$(V_{fall} - V_{removal}^{eff})T_{margin} = D_{failure}$$
(3. 1. 3-2)

したがって、最終的にまとめると、機器別のマージン $T_{maroin}$  (day)は次式で表される。

$$T_{margin} = D_{failure} / (V_{fall} - V_{removal}^{eff}) , \quad if V_{removal}^{eff} < V_{fall}$$
(3.1.3-3)

# 3. 1. 3 - 1

 $T_{margin} = \infty$  , if  $V_{removal}^{eff} \ge V_{fall}$ 

(3.1.3-4)

なお、ヒータによる融雪も対策として挙げられ、その場合はバッテリー容量と非常用発 電機のデイタンク1日分容量からマージンを求めることができる。ここでは、ヒータによ る融雪は検討対象外として、除雪のみを対象とする。

## b. 系統数を考慮しないマージン評価

保守的な評価とするため、ここでは系統数を考慮せずにマージン評価を実施する。除雪 にはアクセスルート確保が必要なため、ここでは積雪が 1m に到達した場合にアクセスル ート確保失敗と仮定した。最終ヒートシンクである補助冷却設備の空気冷却器空気取入口 とメンテナンス冷却系の空気冷却器空気取入口は高い位置に設定されていることを踏まえ、 ここではマージンを保守的に評価するため、それぞれの機能喪失積雪深に 1.5m と 1m を仮 定した。また、プラント作業員の1日あたりの除雪作業割合は 1/3 (8時間) と仮定して、 (3.1.3-3) 式及び (3.1.3-4) 式を用いてマージン評価を実施した。

図 3.1.3-1 に機器別のマージン評価結果を示す。機能喪失積雪深が 1m の場合、降雪速 度が 1m/day のとき、除雪速度 3m/day (実効除雪速度 1m/day) 以上であれば機能喪失には 至らないが、2m/day (実効除雪速度 0.67m/day) では 3day のマージンしかなくなる。降雪 速度が 3m/day のとき、除雪速度 6m/day (実効除雪速度 2m/day) で 1day のマージンしか ない。このように極めて厳しい降雪の場合にはマージンが小さくなることから、除雪作業 割合を増加する等の除雪のための体制強化を図ることが重要である。

#### c. 系統数を考慮したマージン評価

補助冷却設備は1系統でも除熱可能であり、3系統全てを除雪せずに1系統の集中除雪 を行えばマージンは大きくなる。その場合、実効除雪速度が3倍になると想定すればよい。 例えば、0.67m/dayの実効除雪速度が3倍の2m/dayになる。図3.1.3-2に系統数を考慮し た機器別のマージン評価結果を示す。1.0m で機能喪失する場合に降雪速度3m/dayのとき、 系統数を考慮しない場合の0.43day が系統数を考慮することで1day にマージンが増加す る。このように、系統数を考慮して、除雪作業の集中化を図ることもマージン増加には有 効である。

#### (3) シーケンス別のマージン評価

#### a. イベントツリー

積雪に対するイベントツリーを図 3.1.3-3 に示す。除雪あるいはヒータによる融雪がな ければ、最終ヒートシンクの空気取入口は積雪によりを閉塞し、除熱失敗に至ることが考 えられる。最終ヒートシンクには補助冷却設備とメンテナンス冷却系があるが、メンテナ ンス冷却系(1m)が閉塞したとしても補助冷却設備(1.5m)が閉塞しなければ炉心損傷に は至らない。つまり、補助冷却設備(1.5m)が閉塞して初めて炉心損傷に至るシーケンス が現れる。以下に示すように、イベントツリーに示したシーケンスのうちシーケンス1~5 と9は、アクセスルート確保には成功するが補助冷却設備の除雪に失敗し除熱失敗になる 場合である。シーケンス 6~8 は、アクセスルート確保に失敗しその後は補助冷却設備で 積雪し除熱失敗になる場合である。

シーケンス1:補助冷却設備による除熱失敗(強制循環)
 シーケンス2:補助冷却設備による除熱失敗(強制循環)
 シーケンス3:補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)
 シーケンス4:補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)
 シーケンス5:補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)
 シーケンス6:アクセスルート確保失敗+補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)
 シーケンス7:アクセスルート確保失敗+補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)
 シーケンス8:アクセスルート確保失敗+補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)
 シーケンス9:補助冷却設備による除熱失敗

## b. 定式化

シーケンス 1~5 と 9 は、機器別のマージン評価で代用できる。一方、シーケンス 6~8 は、アクセスルート確保失敗までは降雪速度と実効除雪速度との差から求めるマージンで 表されるが、アクセスルートを断たれると補助冷却設備の除雪は不可能となるため降雪速 度を用いてマージンを求めることができる。すなわち、次式で表される。

$$\left(V_{fall} - V_{removal}^{eff}\right)T_{margin,access} + V_{fall}\left(T_{margin,ACS} - T_{margin,access}\right) = D_{failure,ACS} \quad (3. 1. 3-5)$$

ただし、 $T_{margin,access}$ はアクセスルート確保失敗までのマージン(day)、 $T_{margin,ACS}$ は補助冷却設備機能喪失までのマージン(day)、 $D_{failure,ACS}$ は補助冷却設備機能喪失積雪深(m)を表す。したがって、補助冷却設備機能喪失までのマージンは次式で表される。

$$T_{margin,ACS} = T_{margin,access} + \left\{ D_{failure,ACS} - \left( V_{fall} - V_{removal}^{eff} \right) T_{margin,access} \right\} / V_{fall} ,$$
  

$$if V_{removal}^{eff} < V_{fall}$$
(3. 1. 3-6)

 $T_{margin} = \infty$  ,  $if V_{removal}^{eff} \ge V_{fall}$  (3.1.3-7)

## c. マージン評価

図 3.1.3-4 にシーケンス別のマージン評価としてシーケンス 6~8 の評価結果を示す。 機能喪失積雪深 1m の機器別評価結果と同等の結果となっている。シーケンス 6 に着目す ると、メンテナンス冷却系での除雪失敗となっている。降雪速度が 1m/day のとき、除雪 速度 2m/day (実効除雪速度 0.67m/day)の場合、機器別評価では機能喪失積雪深 1m (メン テナンス冷却系)には 3day だったが、シーケンス別評価では 3.5day とマージンがやや大 きくなる。シーケンスを考えることにより、炉心損傷に至る可能性のある比較的正確にマ ージンを評価することができるようになった。

## 3.1.3.3 積雪と低温の重畳事象に対するマージン評価手法

# (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

積雪と低温の重畳事象を考えると、降雪時にフィルタに氷着してフィルタ閉塞が崩壊熱 除去失敗要因となる可能性がある。その場合の重要パラメータは、日降雪深で表される降 雪速度、降雪継続時間、低温継続時間である。ただし、降雪が継続している間は低温が継 続して凍結可能であると仮定すると、降雪速度と降雪継続時間を考慮すべき指標とできる。 ここでは、ある降雪速度の条件で限界氷着厚みに到達するまでの降雪継続時間をマージン と定義する。

# (2) 機器別のマージン評価

#### a. 定式化

# (a) 大気中濃度

降雪の大気中濃度は次式で表される。

$$C_{snow} = \frac{\rho_{snow} V_{fall}}{v_{snow}}$$
(3.1.3-8)

ただし、 $C_{snow}$ は大気中濃度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $v_{snow}$ は雪片落下速度 (=1m/s) [3.1.3-1]、 $\rho_{snow}$ は湿った雪の積雪密度 (=100kg/m<sup>3</sup>) [3.1.3-2]、 $V_{snow}$ は日降雪深 (m/day) である。

図 3.1.3-5 に日降雪深に対する大気中降雪濃度を示す。例えば、日降雪深 1m/day で は大気中濃度は 1.2×10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>となる。

(b) 猶予時間 (マージン)

空気取入口のフィルタに氷着して閉塞に至る前に、プラント作業員がフィルタを取 り替えればよいため、フィルタ閉塞に至るまでの猶予時間をマージンと定義する。た だし、その猶予時間が降雪継続時間より長い場合、フィルタ閉塞に至る前に降雪が終 了することになるため、機能喪失には至らない。つまり、機能喪失となるのは、降雪 継続時間より猶予時間が短い場合となる。

各機器の吸込み風量は決まっているため、ある大気中降雪濃度で吸い込む場合のフィルタの単位面積・単位時間あたりの氷着量 $M_{ice}$ (kg/hr/m<sup>2</sup>)は、大気中濃度 $C_{mov}$ (kg/m<sup>3</sup>)と単位面積あたりの吸込み風量 $V_{metric}$ (m<sup>3</sup>/hr/m<sup>2</sup>)の積で表される。

$$M_{ice} = C_{snow} V_{suction} \tag{3. 1. 3-9}$$

この氷着量 $M_{ice}$ (kg/hr/m<sup>2</sup>)を密度 $\rho_{ice}$ (=920kg/m<sup>3</sup>)で除することで、単位時間あたりの 氷着厚み $F_{ice}$ 

(m/hr) を求めることができる。

$$F_{ice} = M_{ice} / \rho_{ice}$$
(3. 1. 3-10)

ここでは、氷着厚みがフィルタ破損限界 $F_{limit}$  (1cm と仮定)に到達するとフィルタ機

## 3.1.3-4

能喪失に至ると仮定すると、フィルタ破損限界 $F_{limit}$ を用いて、猶予時間 $T_{margin}$ を算出でき、次式で表される。

$$T_{margin} = \frac{F_{limit}}{F_{ice}} = \frac{F_{limit}\rho_{ice}}{C_{snow}V_{suction}} = \frac{F_{limit}\rho_{ice}v_{snow}}{\rho_{snow}V_{fall}V_{suction}}$$
(3. 1. 3–11)

各機器の単位面積あたりの吸込み風量V<sub>sucion</sub>は、ディーゼル発電機が 11,000m<sup>3</sup>/hr/m<sup>2</sup>、換気空調系が 5,000m<sup>3</sup>/hr/m<sup>2</sup>、メンテナンス冷却系が 9,067m<sup>3</sup>/hr/m<sup>2</sup>、強制通風時補助 冷却設備が 2,833m<sup>3</sup>/hr/m<sup>2</sup>である。自然通風時補助冷却設備が 1,250m<sup>3</sup>/hr/m<sup>2</sup>である。

## b. マージン評価

(3.1.3-9) 式で示したとおり、フィルタの単位面積・単位時間あたりの氷着量は、図 3.1.3-6 に示されるように大気中降雪濃度が高くなるにつれて氷着量も大きくなる。各機 器の猶予時間(マージン)は、フィルタ破損限界と吸込み風量が定数であるため、大気中 濃度の反比例で表される。図 3.1.3-7 に機器別のマージン評価結果として、大気中濃度に 対する猶予時間を示す。大気中濃度が高くなるにつれて、猶予時間が短くなることが分か る。特に、10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>以上では補助冷却設備でさえも約 7 時間未満となり、猶予時間は短く なる。わかりやすくするため、大気中降雪濃度 10<sup>-2</sup>kg/m<sup>3</sup>、10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>、10<sup>-5</sup>kg/m<sup>3</sup> を代表として、フィルタ氷着量及び氷着厚みの時間履歴を図 3.1.3-8 及び図 3.1.3-9 にそ れぞれ示す。これらの図には、同じデータを用いて縦軸と横軸を線形表示と対数表示とし ている。大気中濃度が 10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>以上では余裕が長いものでも約 10 時間未満になるが、10<sup>-5</sup>kg/m<sup>3</sup>では余裕が短いものでも約 70 時間以上あることが分かる。

大気中濃度より日降雪深を用いることで、わかりやすくなる場合もある。図 3.1.3-10 に日降雪深に対する機器別の単位面積・単位時間あたりの氷着量を示す。また、日降雪深 0.1、1m/day を代表としてフィルタ氷着量及び氷着厚みの時間履歴を図 3.1.3-11 及び図 3.1.3-12 にそれぞれ示す。日降雪深が 0.1m/day では十~数十時間の余裕があるが、 1m/day ではほとんど余裕がないことが分かる。図 3.1.3-13 に機器別マージン評価結果と して、日降雪深に対する猶予時間を機器別に整理した。1m/day では猶予時間は 6.4 時間し かない。このような降雪は起こる可能性は相対的に高いことを考えると、注意が必要であ る。この結果を踏まえて、フィルタ取替えの体制や手順の強化を図ることが重要である。

# (3) シーケンス別のマージン評価

#### a. イベントツリー

機器別のマージン評価から、補助冷却設備の猶予時間は強制通風より自然通風の方が長 くなり、マージンが大きいことを示した。プラント運用を考えれば、強制通風を停止して 自然通風によりフィルタ閉塞までの猶予時間を長くすることも考えられる。そこで、強制 通風停止の判断をイベントツリーに取り入れた。積雪と低温の重畳事象に対するイベント ツリーを図 3.1.3-14 に示す。

上記を踏まえて、ここで検討する炉心損傷に至るシーケンスは次のとおりである。

- シーケンス 1:非常用電源使用可能な状態で強制通風時に補助冷却設備のフィルタ閉塞 (強制循環除熱失敗)
- シーケンス 2:換気空調系フィルタ閉塞に伴う非常用電源喪失によって、強制通風時から自然循環に移行した後、自然通風時に補助冷却設備のフィルタ閉塞 (自然循環除熱失敗)
- シーケンス 3:非常用ディーゼル発電機フィルタ閉塞に伴う非常用電源喪失によって、 強制通風時から自然循環に移行するが、自然通風時に補助冷却設備のフ ィルタ閉塞(自然循環除熱失敗)
- シーケンス 4:強制通風停止の判断により、補助冷却設備自然循環モードに移行した後、 自然通風時の補助冷却設備のフィルタ閉塞(自然循環除熱失敗)

# b. 定式化

シーケンス1及び4は、補助冷却設備の強制通風時と自然通風時の猶予時間となるため、 機器別のマージン評価で得られた猶予時間で代用できる。一方、シーケンス2及び3は、 非常用ディーゼル発電機あるいは換気空調系のフィルタ閉塞による非常用電源喪失が起き るまでは、補助冷却設備は強制循環除熱だが、それ以降は自然循環除熱になることを考慮 する必要がある。すなわち、次式で表される。

$$(C_{snow} / \rho_{ice}) V_{suction, ACS-FC} T_{margin, A} + (C_{snow} / \rho_{ice}) V_{suction, ACS-NC} T_{margin, B} = F_{limit}$$
(3. 1. 3–12)

ただし、 $T_{margin,A}$ は非常用電源喪失までの時間(hr)、 $T_{margin,B}$ は非常用電源喪失後の補助冷却設備機能喪失までの時間(hr)、 $V_{suction,ACS-FC}$ と $V_{suction,ACS-NC}$ はそれぞれ補助冷却設備の強制通風時と自然通風時の吸込み風量(m/hr)を表す。ここで、 $T_{margin,A}$ は次式で求められる。

$$T_{margin,A} = \frac{F_{limit}\rho_{ice}}{C_{snow}V_{suction,A}}$$
(3. 1. 3–13)

ここで、 $V_{suction,A}$ は非常用ディーゼル発電機あるいは換気空調系の吸込み風量を表す。 (3.1.3-13) 式を (3.1.3-12) 式に代入して、 $T_{margin} = T_{margin,A} + T_{margin,B}$ の関係から、補助 冷却設備機能喪失までのマージンを求めることができる。よって、シーケンス 1~4 のマ ージンは次式で表される。

シーケンス1:

$$T_{margin} = \frac{F_{limit}\rho_{ice}}{C_{snow}V_{suction,ACS-FC}}$$
(3. 1. 3–14)

$$T_{margin} = \frac{F_{limit}\rho_{ice}}{C_{snow}} \left( \frac{V_{suction,ACS-NC} + V_{suction,A} - V_{suction,ACS-FC}}{V_{suction,ACS-NC}V_{suction,A}} \right)$$
(3. 1. 3–15)

# 3.1.3-6

シーケンス4:

$$T_{margin} = \frac{F_{limit}\rho_{ice}}{C_{snow}V_{suction,ACS-NC}}$$
(3. 1. 3-16)

## c. マージン評価

図 3.1.3-15 に積雪・低温の重畳事象時のシーケンス別のマージン評価結果として、各 シーケンスにおける補助冷却設備の猶予時間を示す。大気中濃度が高くなるにつれてマー ジンが小さくなることが分かる。機器別評価でディーゼル発電機のマージンが小さいこと から、支配的なシーケンスはシーケンス3に相当すると考えられ、シーケンス3に注目す ると、大気中濃度 10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>以上では猶予時間は十時間に満たないが、10<sup>-4</sup>kg/m<sup>3</sup>以下では猶 予時間が数十時間以上あることがわかる。ハザードの規模に応じて適切に対処することが 重要であることを示唆している。

図 3.1.3-16 に大気中降雪濃度 10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>と 10<sup>-4</sup>kg/m<sup>3</sup>の場合の各シーケンスのフィルタ氷 着厚みを示す。シーケンス 1 は補助冷却設備強制通風運転をしているため早くフィルタ閉 塞に至り、猶予時間が短くマージンが小さい。一方、シーケンス 3 は 6 時間程度でディー ゼル発電機のフィルタ閉塞が起こり、非常用電源喪失が発生することによって早めに自然 循環除熱になり、吸込み風量が低くなったことにより猶予時間が長くなり、マージンが大 きくなった。このように、ディーゼル発電機は機器別のマージン評価では吸込み風量が大 きいため猶予時間が短くマージンは小さいと評価されたが、シーケンスを考慮すれば事象 進展に時間を有するからマージンが大きくなると評価される。したがって、シーケンス別 マージン評価では機器別マージン評価より正確な評価を可能とする。シーケンス 4 として、 ディーゼル発電機を停止する運用を今回は取り入れたが、それによって猶予時間は長くな る。強制通風停止の判断を取り入れることで、マージンが大きくなることが明らかとなり、 今後のプラント運用の検討に有用な評価結果を得た。

機器別のマージン評価と同様に、大気中濃度ではなく日降雪深で整理する方が分かりや すいと思われる。図 3.1.3-17 に日降雪深に対する各シーケンスの猶予時間を示す。また、 図 3.1.3-18 には日降雪深 0.1m/day と 1m/day の氷着厚み履歴を示す。頻繁に発生する 0.1m/day 程度の日降雪深では数十時間のマージンを有するが、数十年に1回程度の1m/day の日降雪深では、シーケンス 1~4 でそれぞれ 2.8hr、4.3hr、5.4hr、6.3hr であり、比較 的裕度が小さい。

# d. 積雪単独によるフィルタ閉塞と積雪・低温時の氷着によるフィルタ閉塞を考慮したマ ージン評価

3.1.3.2.c 節では、積雪単独によるフィルタ閉塞による機能喪失、3.1.3.3.c 節では、 積雪・低温時の氷着によるフィルタ閉塞による機能喪失を考慮した。ここでは、同時に発 生した時のマージンを評価することとする。これらの評価結果を重ね合わせたものを図 3.1.3-19に示す。除雪作業のない場合は積雪によって比較的早期に閉塞に至るため、猶予 時間は小さい。一方、除雪作業を考慮すると、実効除雪速度 1m/day の場合、氷着を考慮 した時の支配的なシーケンスと予想されるシーケンス3は、日降雪深1.2m/day 程度を超 えると積雪によるフィルタ閉塞の方が早期に起こるが、日降雪深1.2/day 程度を超えない 場合には氷着によるフィルタ閉塞の方が早く生じるため、マージンが小さくなる。このよ うに、積雪・低温の重畳事象時のマージン評価が可能となった。

以上より、炉心損傷に至る可能性のあるマージンを評価することができるようになり、 マージン評価手法を開発できた。なお、本評価では、ヒータによる融雪やフィルタ交換な どの作業を考慮していないため、今後は、実際のプラント運用を提案して、それを取り入 れてマージン評価を行う必要がある。

## 3.1.3.4 まとめ

積雪と低温の重畳事象については、積雪のみの影響を受ける場合、降雪速度(日降雪深) をハザード強度の指標として、降雪が継続すると仮定して、空気取入口のフィルタ閉塞ま での猶予時間をマージンと定義し、機器別のマージン評価手法を開発した。その結果、降 雪速度が 1m/day のとき、実効除雪速度が 1m/day 以上であればマージンは大きいが、極め て厳しい降雪の場合にはマージンが小さくなることが明らかとなった。また、補助冷却設 備が3系統あることを考慮すれば、マージンは3倍になることを示した。以上から、除雪 作業割合を増加する等の除雪のための体制強化を図ることが重要である。また、イベント ツリーに基づいてシーケンス別の評価手法も開発し、シナリオを考慮したマージンを評価 することができた。積雪と低温の重畳事象時には、雪がフィルタに付着して凍結するとい う氷着によるフィルタ閉塞までの猶予時間をマージンと定義し、機器別のマージン評価手 法を開発した。日降雪深が大きくなると、大気中降雪濃度が高くなり、マージンは小さく なる。日降雪深 1m/day 程度の降雪でもマージンは比較的小さいことから、フィルタ取替 えの体制や手順の強化を図ることが重要である。また、イベントツリーを構築してシーケ ンス別の評価手法を開発した。その結果、ディーゼル発電機が早期に機能喪失に至っても 補助冷却設備が自然循環除熱運転になるまでの時間が長いことで、マージンが大きくなる ことが明らかとなった。さらに、積雪単独によるフィルタ閉塞と氷着によるフィルタ閉塞 を同時に考慮してマージンを評価することができ、日降雪深に応じて閉塞原因が変わるこ とを示した。上記を通じて、積雪・低温の重畳事象に対するマージン評価手法を開発する ことができた。

# 参考文献

- [3.1.3-1] 鈴木道也、謝国章、小野光弘、鈴木道隆、「降雪粒子落下速度に関する一考察」、
   日本雪氷学会誌 雪氷 50巻2号63-71頁、1988年6月.
- [3.1.3-2] 一般財団法人日本気象協会、「雪の重さを考える ~豪雪のまち 新潟県十日町市 から~」https://www.jwa.or.jp/news/docs/2012-02-09.pdf、2012年2月.







OK:健全、CD:炉心損傷、ACS-FC:補助冷却設備による強制循環除熱成功、
 ACS-NC:補助冷却設備による自然循環除熱成功、MCS-FC:メンテナンス冷却系設備による強制循環除熱成功
 図 3.1.3-3 積雪に対するイベントツリー



図 3.1.3-4 積雪に対するシーケンス別のマージン評価 (シーケンス 6~8)





## 3.1.3-11



図 3.1.3-8 フィルタ氷着量履歴(大気中降雪濃度)



図 3.1.3-9 フィルタ氷着厚み履歴(大気中降雪濃度)

## 3.1.3-12



図 3.1.3-11 フィルタ氷着量履歴(日降雪深)



図 3.1.3-12 フィルタ氷着厚み履歴(日降雪深)





図 3.1.3-14 積雪と低温の重畳事象に対する補助冷却設備のイベントツリー



図 3.1.3-15 大気中濃度に対する猶予時間(マージン)



図 3.1.3-16 氷着厚み履歴 (大気中降雪濃度)





図 3.1.3-19 積雪と氷着を考慮した日降雪深に対する猶予時間(マージン)

## 3.1.4 重畳事象(強風と降雨)に対するマージン評価手法(H27)

3.1.4.1 はじめに

強風と降雨の重畳事象時に崩壊熱除去機能喪失に至る潜在的なシナリオとしては、補助 冷却設備排気部雨どいの強風時の飛来物衝突による破損、その雨どいの開口部への雨の浸 入、雨水の繰返し接触による伝熱管の疲労破損が考えられる(3.3.1.5節参照)。ここで は、そのシナリオに対するマージン評価手法を開発する。この重畳事象に対するマージン 評価を行うには、強風単独の評価をまず実施してからの方が理解しやすい。ただし、平成 26年度に実施した強風単独のマージン評価では、燃料タンク破損に伴う火災による共通 要因故障を考えたが、降雨との重畳事象時には火災発生は考えられない。また、平成26 年度に実施した降雨に対するマージン評価手法では極めて保守的な仮定を設定した。そこ で、強風と降雨の重畳事象時に考慮すべきマージン評価手法を開発するため、平成26年 度に実施した強風単独及び降雨単独に対するマージン評価手法を踏まえて強風及び降雨の みの影響を検討するとともに、強風と降雨の重畳事象で現れるシナリオに対するマージン 評価手法を開発することとする。

## 3.1.4.2 強風のみの影響

# (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

平成25年度では、外部ハザードの特徴と指標を抽出し、抽出された指標に基づき、ハ ザード強度のみを指標とした手法とハザード進展速度と継続時間の指標の組み合わせで表 される手法の2種類の一般的なマージン評価手法を開発した。強風の特徴を考えれば、ハ ザード強度に着目すればよい。

強風により影響を受ける崩壊熱除去機能は、風圧(風荷重)により機器が構造損傷する 場合、気圧差により機器が構造損傷あるいは圧力調整のための機能が損傷する場合、強風 により飛散する飛来物により機器が構造損傷する場合が考えられる。前者2つは、比較的 長時間の強風継続を必要とするので瞬間風速で評価するわけではないのに対して、後者の 飛来物は瞬間風速のような比較的短時間の風によって飛散すると考えられる。したがって、 強風ハザードの重要パラメータは最大風速と最大瞬間風速となる。

(2) 重要機器の同定

強風による崩壊熱除去機能喪失には、風圧、圧力差、飛来物衝突による機器の構造損 傷が考えられる。崩壊熱除去機能に関する重要機器は直接的に影響するもの以外に、直 接的には崩壊熱除去機能に関する設備ではないが、強風により破損すると2次的に崩壊 熱除去機能喪失に波及する恐れのある機器がある。平成25年度には、強風により影響 を受ける可能性がある重要機器として以下を同定した。

- ·外部電源設備
- ・排気塔
- ・原子炉補助建物(崩壊熱除去系設備の健全性維持)
- ・補助冷却設備(外気の吸排気)
- ・メンテナンス冷却系(外気の吸排気)

- ・非常用ディーゼル発電機(外気の吸排気)
- ・非常用発電に必要な燃料タンク
- ・換気空調設備(外気の吸排気、電源設備の冷却)

## (3) 機器別のマージン評価

## a. マージンの定義

崩壊熱除去機能維持に必要な補助冷却設備とメンテナンス冷却系(外気の吸排気)は原 子炉補助建物の屋上辺り(高さ数十m位置)に設置しており、飛来物がそれらの吸排気口 から侵入して衝突すれば、空気冷却器伝熱管が破損する可能性がある。換気空調設備(外 気の吸排気)も屋上に設置されており同様のことが考えられる。非常用ディーゼル発電機 は地上から数m~十m程度の位置に空気取入口が設置されており、開口部への飛来物の侵 入・衝突が考えられる。燃料タンクは原子炉補助建物に近接して地上設置しているため飛 来物の衝突が考えられる。

飛来物候補は敷地内にあると想定される自動車、コンテナ、鋼製パイプ、鉄鋼材、砂利 が考えられる。また、強風の場合は、頻度及び影響を考慮に入れて支配的な風向きは山側 (南もしくは南南東の方向)からの風であると考えられる。この場合、山側に位置する森 林から多数の木材が飛来する可能性がある。また、強風は数日間継続することも考えられ るため、作業員によるアクシデントマネジメントが困難である可能性に留意する必要があ る。

強風による崩壊熱除去機能喪失には、風圧、圧力差、飛来物衝突による機器の構造損傷 が考えられ、機器別のマージン評価では、これらによる機器の構造損傷に至らしめる最大 風速あるいは最大瞬間風速をマージンと定義した。

#### b. 風圧による破損

### (a) 風圧により破損する可能性のある機器

風圧により破損する可能性のある機器・設備には、外部電源に関連する機器、排気 塔、原子炉補助建物が挙げられる。

# (b) 風圧による破損評価

外部電源喪失

外部電源喪失時の風速は、外部電源復旧時間の調査と絡めて整理がなされた [3.1.4-1]。その調査において、台風到来時の外部電源喪失事象に関する文献[3.1.4-2~3.1.4-18]を参照した。鉄塔の崩壊や開閉所の損傷など様々な要因によって外部電 源を喪失しているため、ここでは、後述の飛来物による損傷評価と比較しやすいよう に、平成26年度評価と同様に最大瞬間風速で整理した。表 3.1.4-1 に外部電源喪失 時最大瞬間風速を示す。この中で、最も低い風速は 54m/s であるため、これが外部電 源設備のマージンとなる。

# ・排気塔の倒壊による崩壊熱除去機能(一部)喪失

別途、排気塔への風圧について構造評価を行った結果、支持鉄塔の主柱材部につい て、許容応力度比が 69m/s で 0.38、100m/s で 0.74 との一例がある。平成26年度に、 この結果を踏まえて排気塔を倒壊させる風速を算定した。風速による圧力は風速の二 乗に比例し、風速 0m/s で極小となる対称曲線になると仮定すると、許容応力度比が 1.0になる風速は117m/s と算出される。ただし、この評価には保守的な想定が含まれ ているため、この117m/s と許容応力度比が 2.0 となる 168m/s の平均値相当で破損す ると想定すると、それらの平均値の143m/s がマージンと算定される。

排気塔が倒壊した場合、補助冷却設備及びメンテナンス冷却系の吸排気口に影響す ることが想定される。しかしながら、全ての崩壊熱除去系の設備は分散配置を想定す るため、排気塔倒壊によって崩壊熱除去系の系統が全て同時に機能喪失に至ることは ないと考えられる。

## ・原子炉補助建物倒壊による崩壊熱除去機能喪失

平成25年度に、風圧に対する原子炉補助建物の壁の破損確率を評価した。その結果、極めて高い風速と評価され、現実的な風速の範囲では原子炉補助建物が倒壊する ことは無いほどマージンは大きい。

### c. 気圧差による破損

#### (a) 気圧差により破損する可能性のある機器

平成25年度に検討したとおり、高速炉の崩壊熱除去系に対して想定される事象は、 補助冷却設備及びメンテナンス冷却系の排気ダクト変形閉塞が挙げられる。

## (b) 気圧差による破損評価

平成25年度に実施した評価結果では、気圧差による圧力荷重での部分的なダクト 変形はありえるが、工学的に変形閉塞あるいは設備破損の可能性は小さいと判断でき、 本評価では、気圧差による排気ダクト変形閉塞は発生しないと仮定した。

## d. 飛来物による破損

#### (a) 飛来物による影響モード

飛来物が原子力発電所に与える影響モードは、大きく分けて以下の3つに分けられ ると考えられる。

- ・大きな運動量を持つ飛来物の地上平行移動による原子炉補助建物の裏面剥離
- ・補助冷却設備及び/またはメンテナンス冷却系の空気冷却器の吸気口、排気口等の開口部に飛来物が侵入することによる、崩壊熱除去系に係る重要機器・設備の 機能喪失
- ・原子炉補助建物外の燃料タンクなどの設備への飛来物の衝突による機能喪失
- (b) 飛来物の候補

平成25年度に選定したように、発電所敷地内で飛来物になる可能性のものに加え

## 3.1.4-3

て、発電所周辺にある山側森林からの木を想定した。以降、具体的には以下の括弧内 の物を飛来物と想定する。

- ・大きな運動エネルギーを持つ飛来物(自動車、コンテナ)
- ・施設の貫通抵抗を確認するための固い飛来物(鋼製パイプ、鋼製材)
- ・開口部等を通過することができる程度に小さくて固い飛来物(砂利等)
- ・高所からの飛来物(森林からの木)

### (c) 飛来物により破損する可能性のある機器

崩壊熱除去機能に関係する機器・設備のうち、飛来物に影響されるものとして以下 が想定される。本評価では、各機器の設置高さは、燃料タンク及びディーゼル発電機 が地上数 m、それ以外は数十 m を想定した。

# · 補助冷却設備

山側からの飛来物は、補助冷却設備の空気取入口から侵入し、空気冷却器あるいは 2次ナトリウム配管に衝突することでそれらを破損し、補助冷却設備が機能喪失に至 る可能性がある。特に、山側のうち、屋上より高い位置からの飛来物については、屋 上に配置する排気ダクト側から侵入し、空気冷却器内の伝熱管に衝突することで伝熱 管を破損し、補助冷却設備が機能喪失に至る可能性も考えられる。ただし、3系統あ るため、1系統でも健全であれば除熱可能である。

#### ・メンテナンス冷却系

山側からの飛来物は、その角度からメンテナンス冷却系の空気取入口側に侵入でき ないと考えられる。屋上高さより高い位置の山側からの飛来物については、落下して きた飛来物が排気ダクト側から侵入し、空気冷却器内の伝熱管に衝突することで破損 し、メンテナンス冷却系が機能喪失に至ることが考えられる。

## ・ディーゼル発電機

ディーゼル発電機の空気取入口から飛来物が侵入し、ディーゼル発電機に衝突、破 損し、機能喪失に至ることが想定される。本評価では外部電源は喪失すると想定する ため、ディーゼル発電機が機能喪失すれば、電源は全て喪失し、補助冷却設備及びメ ンテナンス冷却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、自然循環による 崩壊熱除熱に期待できる。

# ・換気空調設備の出入ロダクト

屋上高さより高い位置の山側からの飛来物については、落下してきた飛来物が排気 ダクト側から侵入し、主要な機器に衝突することで破損し、換気空調設備が機能喪失 に至ることが考えられる。本評価では、換気空調設備が機能喪失すれば、電源から動 的機器へ電力を供給するための配電設備が機能喪失すると想定するため、補助冷却設 備及びメンテナンス冷却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、自然循 環による崩壊熱除熱に期待できる。

# ・ディーゼル発電機燃料タンク

ディーゼル発電機用の燃料タンクに飛来物が衝突し、燃料が流出する可能性がある。 これによりディーゼル発電機が機能喪失に至ることが考えられる。平成26年度では、 流出した燃料が燃焼した場合、燃焼に伴う高温の外気が補助冷却設備の空気取入口に 流入することで外気による冷却機能を喪失することを考えたが、平成27年度の重畳 事象時には降雨を考慮するため、火災の発生はないと想定できる。本評価では外部電 源喪失を想定すると、ディーゼル発電機の燃料タンクが機能喪失すればディーゼル発 電機は運転できないため、電源は全て機能喪失し、補助冷却設備及びメンテナンス冷 却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、自然循環による崩壊熱除熱に 期待できる。

# (d) 飛来物速度の算定

竜巻での飛来物評価と同様の手法で飛来物の飛来速度を求める。竜巻評価ガイド [3.1.4-19]においては飛来物の抗力係数は空力パラメータ*C<sub>D</sub>A/m*と呼ばれ、次式で 表される。

$$\frac{C_D A}{m} = 0.33 \frac{C_{D1} L_2 L_3 + C_{D2} L_1 L_3 + C_{D3} L_1 L_2}{m}$$
(3.1.4-1)

ただし、mは飛散物の質量、 $C_p$ は抗力係数、Aは飛来物が風を受ける面積、Lはその面積の1辺の長さである。空力パラメータは表 3.1.4-2の値として示される。また、 飛来物速度は、風速 100m/s における飛来物の空力パラメータ[3.1.4-20]に対応して 表 3.1.4-3のように算定される。飛来速度は風速に比例すると仮定すると、風速と飛 来物速度の関係は図 3.1.4-1 に示される。

#### (e) 原子炉補助建物の裏面剥離

大きな運動量を持つ飛来物が、原子炉建物の壁に衝突し、原子炉建物の壁の内側が 破壊され、その破壊された壁のコンクリートの塊が新たな飛来物(裏面剥離して飛来 物化)となり、原子炉補助建物内にある機器・設備に2次被害を与える可能性がある。 そこで、以下の Chang の式[3.1.4-21、3.1.4-22]を用いて、裏面剥離限界厚さを求め て、それに相当する風速をマージンと定義する。

$$t_{s} = \alpha_{s} 1.84 \left(\frac{200}{V}\right)^{0.13} \frac{\left(MV^{2}\right)^{0.4}}{\left(D/12\right)^{0.2} \left(144F_{c}\right)^{0.4}}$$
(3. 1. 4-2)

ただし、 $t_s$ は裏面剥離限界肉厚[ft]、 $\alpha_s$ は飛来物低減係数、Vは飛来物の衝突速度 [ft/s]、Mは飛来物の質量[1b/(ft/s<sup>2</sup>)]、Dは飛来物の直径[in]、 $F_c$ はコンクリー ト強度[psi]である。なお、Changの式は実験によって検証されており、信頼性が高い ことが示されている[3.1.4-23]。

本研究では、文献[3.1.4-24]を参考として、前節の飛来物のうち、裏面剥離で影響

の大きな鋼製材を想定して評価した。鋼製材の寸法は表 3.1.4-2 に示したとおりであ る。飛来物低減係数は 1.0 と仮定し、コンクリート強度は 2.7kgf/mm<sup>2</sup>を仮定した。鋼 製材が衝突した際の裏面剥離限界厚さを図 3.1.4-2 に示す。ここでは、建物のコンク リート厚さを 70cm と仮定してみると、飛来物の衝突速度 100m/s に相当する風速 180m/s がマージンと算定される。

軽水炉の場合は、崩壊熱除去に必要な重要機器(例えば、ポンプ、電源設備)は原 子炉補助建物の下部にあるため、裏面剥離が発生した場合は重要機器に影響を与える 可能性が大きいと考えられるが、一方、高速炉は、崩壊熱除去に必要な重要機器(例 えば、空気冷却器)は原子炉補助建物の上部にあるため、裏面剥離が仮に発生したと してもそれらが舞い上がったうえでさらに重要機器・設備に衝突しなければ破損は起 こらず、影響を与える可能性は小さいと考えられる。以上から、高速炉では、裏面剥 離の影響は非常に小さいと考えられ、本研究では裏面剥離の影響はないと想定できる。

### (f) 飛来物衝突による破損評価

飛来物が衝突した時に鉄板を貫通させない限界厚さ(貫通限界肉厚)と各飛来物の 衝突速度との関係を BRL 式[3.1.4-24]と呼ばれる評価式から評価する。

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2d^{3/2}} \tag{3.1.4-3}$$

ここで、Tは鉄板厚さ[in]、Mは飛来物の質量[1b/(ft/s<sup>2</sup>)]、Vは飛来物の衝突速 度[ft/s]、dは飛来物の直径[in]、Kは鋼板の材質に関する係数 $\Rightarrow$ 1。また、衝突速 度は飛来物速度と等しいと仮定すると、図 3.1.4-3 が得られる。この図に基づき、想 定した肉厚を限界肉厚と仮定し、その肉厚に対する各飛来物の衝突速度を求め、それ に相当する風速が得られる。

本研究では、評価対象とする機器に対する肉厚を5種類に代表させて評価すること とした。図3.1.4-3より、貫通限界肉厚に対する飛来物速度を表3.1.4-4に示す。こ の飛来物速度に相当する風速は、表3.1.4-5のように整理される。

#### e. 機器別のマージン評価

3.1.4.2 (2) 節で抽出された重要機器のうち、飛来物衝突による破損を想定すべき機器 は、補助冷却設備、メンテナンス冷却系、燃料タンク、非常用ディーゼル発電機、換気空 調設備である。これらのうち一部は、建物の中に収納されており、飛来物が幾重の壁を破 損させて、崩壊熱除去機能を喪失させる部位に到達することになる。本研究では、表 3.1.4-6 に示すような破損部位を想定した。建物壁にはフィルターが設置されているが、 これらの厚みは 30cm 程度ではあるものの、フィルター自体は 635mmH<sub>2</sub>0 (6.2×10<sup>3</sup>Pa) で 破壊し始めることがカタログ値で示されている。750mmH<sub>2</sub>0 (7.4×10<sup>3</sup>Pa) ではセパレータ が外れてしまう可能性があるので、鉄板肉厚換算とすると比較的薄くなると想定した。ま た、各機器の厚みは具体的な数値は入手できないため、平成26年度の想定条件に対して 薄い条件を感度 I と感度 II の2ケースに分けて検討した。飛来物がこれらの肉厚を破損 させるには、最も厚い肉厚を破損させる必要があることから、その最大厚みを代表させて 貫通限界肉厚に相当する風速を算定することとした。その結果を表 3.1.4-7 に示す。

飛来物のうち、砂利による破損はあり得ないことがわかる。重要機器の設置高さを考え ると、コンテナと自動車が衝突することはありえない。鋼製パイプと鋼製材は屋上資材が 飛散するなどを考えれば、重要機器を破損させる可能性があるため、屋上資材の固縛など を検討する必要がある。燃料タンクは地上に設置しているため、比較的低い風速で飛来物 による破損に至る可能性があるため、地上に資材を保管しない方がいいことを示唆してい る。

ここでは、屋上あるいは地上に仮置き資材を保管していない想定でマージン評価を行う。 平成25年度の竜巻評価では70m/s以下では飛来物は浮き上がることはない。また、強風 の場合はプラントの上方から飛来するものは木材しか考えられないことから、本研究では 飛来物として木材のみがマージン評価の対象となる。

上述の風圧・気圧差・飛来物による破損評価をまとめると、表 3.1.4-8 のようにマージ ンが評価される。平成26年度の想定条件では、外部電源設備が最もマージンが小さいこ とが示された。次に、小さなマージンを示しているのは、補助冷却設備の空気冷却器(吸 気部)で135m/s であるが、最大瞬間風速の過去最大値42m/s(最大風速の過去最大値: 24m/s)に比べれば、3.2倍のマージンを有している。図3.1.4-4に機器別のマージン評価 を示すとおり、原子力施設内の重要機器のマージンは大きいことが示された。次に、感度 Iや感度 II では外壁厚みを薄くした分だけマージンが小さくなるが、最大瞬間風速の過去 最大値42m/s(最大風速の過去最大値:24m/s)よりマージンを有することが分かる。以上 より、機器別マージン評価手法を開発することができた。

#### (4) シーケンス別のマージン評価

## a. イベントツリー

対象とする崩壊熱除去系は、補助冷却設備の強制循環冷却が期待できるが、3系統のうち1系統の成功でよい。強制循環除熱喪失した場合であっても、3系統のうち1系統の自然循環除熱で成功となる。また、別系統のメンテナンス冷却系の強制循環除熱にも期待できる。すなわち、以下の成功基準を設定できる。

- ・補助冷却設備の強制循環成功(3系統のうち1系統成功でよい)
- ・補助冷却設備の自然循環成功(3系統のうち1系統成功でよい)
- ・メンテナンス冷却系の強制循環成功

上述の重要機器の破損評価を踏まえて、強風時の崩壊熱除去系機能喪失と要因を分析し た上で、イベントツリーを図 3.1.4-5 のように構築した。イベントツリーのヘディングの 各設備の下部には機器別マージン評価で得たマージンを示している。このイベントツリー でメンテナンス冷却系が機能喪失に至ったとしても補助冷却設備による除熱が期待できる ことから、図 3.1.4-6 に示すような補助冷却設備 3 系統のイベントツリーを展開した。こ の図でも、機器別マージン評価で得た風速を追記した。このイベントツリーの最後には、 シーケンス分析の結果を示しているが、ほとんどの場合は健全であり、風速を示している ものがマージンである。これらをまとめたシーケンス別のマージン評価結果を表 3.1.4-9 に示す。

#### 3.1.4-7

## b. 同時破損を考慮しない場合(独立破損)のマージン評価

地震・津波と異なり、強風による飛来物はランダムに衝突し、衝突確率は低く、さらに 1 つの衝突が電源確保に必要な設備と最終ヒートシンクを同時に破損させることはない。 そこで、図 3.1.4-6 のイベントツリーでは、「3系統同時破損を考慮」のヘディングによ り、同時破損がない場合には除熱失敗シーケンスは現れない。本評価により、強風の場合 には、ほとんどの場合において除熱失敗シーケンスは現れないことがわかる。

#### c. 同時破損を考慮した場合のマージン評価

極めて起こりがたいが、メンテナンス冷却系と補助冷却設備の4系統全てが破損する場合には、除熱失敗シーケンスが現れる。その場合は、補助冷却設備の吸気側のマージンで制限され、平成26年度の想定条件では135m/sがマージンとなる。補助冷却設備は電源がなくても自然循環冷却ができるため、仮に1系統でも135m/s以上の風速に耐えられるように強化されれば、崩壊熱除去機能は維持され、マージンは更に増加することが可能である。感度ケースでは、補助冷却設備排気部厚みが薄いと想定すると、マージンは80m/sとなる。

#### 3.1.4.3 降雨のみの影響

# (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

降雨の場合は荷重による構造物の破損は考えにくいため、没水や被水による機器故障が 考えられる。したがって、降雨ハザードの重要パラメータは単位時間あたりの降雨量(例 えば、1時間降水量)と降雨継続時間の組み合わせとなる。

#### (2) 機器別のマージン評価

#### a. 重要機器

異常降雨時に崩壊熱除去に必要な重要機器は次のとおり。

- ・排水設備(原子炉補助建物の屋上、及び地上に配置されていると仮定)
- ・海水ポンプ
- ・電気設備室
- ・メンテナンス冷却系
- ·補助冷却設備
- ・ディーゼル発電機

各機器は没水や被水により機能喪失すると考え、機能喪失する水位に至るまでの猶予時 間をマージンと定義した。排水設備の機能喪失は後述のようにパラメータとして扱い、屋 外にある海水ポンプは 1.2m、屋上からの浸水を考えた電気設備室は屋上扉の高さ 1m から 浸水し被水すると考え、1m で機能喪失すると考えた。メンテナンス冷却系は電気設備喪失 により機能喪失するため、電気設備室に代表させる。補助冷却設備は屋上扉からの浸水を 考慮しても空気冷却器が設置されている部屋は防水扉であり浸水により機能喪失するとは 考えにくい。仮に浸水があれば、3m の没水により機能喪失すると仮定した。ディーゼル発
電機は建物内のディーゼル発電機室の浸水を考慮して機能喪失すると考えた。

b. 定式化

通常、建物やその周辺には排水設備が設置されており、過去最大の降水量でも排水に問題なく、降雨時に雨が溜まることはない。本評価では、設計上の排水設備の排水能力を 140mm/hrと仮定した。さらに、異常降雨時には小枝や落ち葉といったゴミが大量に排水設 備に流れ込むことで排水設備が閉塞する仮定を設けた。この場合、プラント作業員は排水 設備の閉塞物を除去し、排水能力を維持しようとすると想定される。極端な降雨環境では 閉塞物除去作業は困難になると考えられ、排水能力は低下すると想定される。そこで、本 評価では、排水能力係数を導入してマージン評価を行うこととする。ただし、排水能力が 低下しても、1時間降水量が少なければ浸水することはないため、排水能力が1時間降水 量を下回った時のマージンを評価する必要がある。

異常降雨時の水位h(m)は、1時間降水量P(mm/hr)と排水設備の排水能力 $W_{140}$ (mm/hr)に排水能力係数 $\varphi$ を乗じたものの差に降雨継続時間 $T_{margin}$ を乗ずることにより得られる。

$$h = (P - W_{140}\phi) \times T_{margin} / 1000 \tag{3.1.4-4}$$

この水位が前節の機能喪失する水位を上回る場合、除熱機能喪失に至ると考えられる。その機能喪失に至るまでの降雨継続時間を猶予時間、すなわちマージンとして定義できる。機能喪失水位 $h_{failure}$ (m)に到達すれば除熱機能喪失と判断でき、次式で表される。

$$(P - W_{140}\phi) \times T_{margin} / 1000 \le h_{failure}$$
(3. 1. 4-5)

よって、機器別のマージン $T_{margin}$  (hr) は次式で表される。

$$T_{margin} \le h_{failure} \times 1000 / (P - W_{140}\varphi)$$
, if  $W_{140}\varphi \le P$  (3.1.4-6)

$$T_{margin} = \infty$$
 , if  $W_{140} \varphi > P$  (3.1.4-7)

屋外(地上)の場合、排水設備がなくても低位方向(海側)に流れていくと考えられる。 200mm/hr であっても排水できるとのことから、屋外水位係数 ∉を導入する。よって、海水 ポンプは次式でマージンを評価できる。

$$T_{margin} \le h_{failure} \times 1000 / \phi (P - W_{140} \varphi)$$
, if  $W_{140} \varphi \le P$  (3.1.4-8)

平成26年度に実施した異常降雨に対する事象シーケンス評価(3.3.1.3節)で示した ように、ベルヌーイの定理に基づき、ディーゼル室への浸水を計算できる。

海水ポンプは降雨による屋外水位でマージンを評価できるが、ディーゼル発電機は建物 内に設置されているため、ディーゼル建物1階扉の隙間から浸入し、ディーゼル発電機が 設置されている部屋に浸入し、ディーゼル発電機が没水する水位にまで浸水することを計 算する必要がある。そこで、屋外から区画部屋1(A<sub>1</sub>=約300m<sup>2</sup>を仮定)に一旦浸入してか

らn部屋ある区画部屋 2 ( $A_2$ =約 1,000m<sup>2</sup>を仮定) うちの一つのディーゼル発電機室に浸入 すると想定した。ベルヌーイの定理から、区画部屋 1 及び区画部屋に浸入する流量 $W_1$ 、  $W_2$ はそれぞれ次式で表される。

$$W_1 = C_{door} t_{room1} \sqrt{2g(h - h_{room1})}$$
(3.1.4-9)

$$W_2 = C_{door} t_{room2} \sqrt{2g(h_{room1} - h_{room2})}$$
(3.1.4-10)

ここで、gは重力加速度、 $C_{door}$ は縮流係数(=0.61)、 $t_{room1}$ と $t_{room2}$ はそれぞれ区画部屋 1 と区画部屋 2 の扉の隙間面積であり、それぞれ 0.01m<sup>2</sup>と 0.005m<sup>2</sup>と仮定した。 $h_{room1}$ と  $h_{room2}$ は区画部屋 1 と区画部屋 2 の水位を表しており、次式で計算できる。

$$h_{room1} = \sum \left\{ (W_1 - nW_2) \Delta \tau / A_1 \right\}$$
(3.1.4-11)

$$h_{room2} = \sum \{ W_2 \Delta \tau / A_2 \}$$
(3. 1. 4-12)

 $\Delta \tau$ は計算上のタイムステップ、 $A_1$ 及び $A_2$ はそれぞれ区画部屋 1 と区画部屋 2 の床面積 であり、積分することで水位を計算できる。

ディーゼル発電機の場合は、ディーゼル発電機室への浸水高さ 1m で機能喪失すると考え、上式で計算される $h_{room2}$ が 1m に到達するときの時間をマージンと定義する。

一方、屋上の場合、垂直面外壁に沿って柵が設けられており(建築基準法では 1.1m 以上)の、水位が柵高さを超えると屋上から流れ落ちる構造となっている。そこで、屋上については、柵高さに相当する屋上限界水位 $h_{imit}$ (m)を設定すると、次式で表される。

$$T_{margin} \le h_{failure} \times 1000 / (P - W_{140}\varphi) \quad , \quad if \quad h_{failure} \le h_{limit} \tag{3.1.4-13}$$

$$T_{maroin} = \infty$$
, if  $h_{failure} > h_{limit}$  (3.1.4-14)

電気設備室は建物内に設置されているため、屋上扉の隙間から浸入し、階段が浸水し、 階段扉を通って、電気設備室に浸入し、電気設備が没水する水位にまで浸水することを計 算する必要がある。これは上記のディーゼル発電機と同様に、屋上から区画部屋 1 ( $A_1$ =20m<sup>2</sup>を仮定) に一旦浸入してからn部屋 (n=4 を仮定) ある区画部屋 2 ( $A_2$ =約 100m<sup>2</sup>を仮 定) うちの一つの電気設備室に浸入すると想定した。屋上扉高さ 1m と仮定した場合、屋 上限界水位 $h_{imit}$ =1.1m であるため、0.1m 分の水位が継続していると想定できる。したがっ て、1時間降水量に関係なくある程度の時間が経てば 0.1m 一定で計算を行った。屋上扉は 0.1m 浸水し、隙間を通じて浸入すると隙間面積は小さいと想定できる。そこで、 $t_{room1}$  と  $t_{room2}$ は共に 0.0001m<sup>2</sup>と仮定した。

# c. マージン評価

海水ポンプは(3.1.4-6)式を用いて、ディーゼル発電機は(3.1.4-12)式を用いて、 屋上設置のメンテナンス冷却系が電気設備室で代表させて(3.1.4-12)と(3.1.4-13)式

を用いて、マージン評価を行う。補助冷却設備は(3.1.4-14)式により、機能喪失に至る ことはない。

図 3.1.4-7 は海水ポンプのマージン評価結果を示す。左図は屋外水位係数 0.1 の場合で あるが、排水溝の閉塞がない排水能力係数 1 の場合はマージンが非常に大きいが、閉塞を 考慮して排水能力係数が 1/10 になった場合はマージンが小さくなるものの、50mm/hr の異 常降雨に対しても 300hr 程度のマージンを有することが分かる。右図の屋外水位係数 0.5 の場合では 1 時間降水量が大きい場合にはマージンは小さいものの、排水溝の閉塞物を除 去して排水能力を高めればマージンは大きくなることが分かる。図 3.1.4-8 は海水ポンプ のマージンに対する屋外水位係数の影響を示しているが、1.0 と 0.5 はさほど変わらない が、0.5 から 0.1 にすると大きく変化する。実際には降水のうち海に流れ込む分も多く、 水位上昇は有意でないと考えられるため、0.5 よりも 0.1 程度で想定しておいてよい。

図 3.1.4-9 はディーゼル発電機室の水位上昇履歴を示す。200mm/hr の異常降雨時に排水 能力係数 0.1、屋外水位係数 0.1 の場合、90 時間程度で水位 1m に到達し機能喪失に至る。 図 3.1.4-10 はディーゼル発電機室のマージン評価結果を示す。排水能力係数 0.1 を用い て、屋外水位係数は 0.5 と 0.1 で計算を行った。海水ポンプと比べると、建物内浸入によ る時間遅れを考慮しているため、マージンは大きくなっている。例えば、排水能力係数 0.1、屋外水位係数 0.1 の場合、200mm/hr で比較すると、海水ポンプの 65hr に対して、デ ィーゼル発電機は 90 時間のマージンを有している。

図 3.1.4-11 は電気設備室の水位上昇履歴を示す。1 時間降水量にかかわらず屋上水位は 1.1m で一定であり、浸水を考慮しても115hr で 0.08m 程度の水位であった。これから線形 外挿すると、1m 到達には 1,000hr 以上を要するので、機能喪失には至らないと言える。

機器別のマージン評価結果として表されるのは海水ポンプとディーゼル発電機だけであ り、排水能力係数 0.1、屋外水位係数 0.1 を用いたマージンを図 3.1.4-12 に示す。双方と も同程度であるが、例えば、100mm/hr を見ると、海水ポンプは 140hr、ディーゼル発電機 は 144hr の猶予時間であり、マージンは非常に大きい。

# (3) シーケンス別のマージン評価

a. イベントツリー

降雨に対するイベントツリーを図 3.1.4-13 に示す。イベントツリー1 及び2 はそれぞれ 屋外(地上)排水と屋上排水に着目して構築している。排水設備の閉塞防止とはマージン 評価では排水能力係数で表している。また、前述のとおり、メンテナンス冷却系及び補助 冷却設備は屋上での浸水による機能喪失はないとの評価結果を得たため、イベントツリー 1 を見れば分かるように、海水ポンプ及びディーゼル発電機が浸水したとしても補助冷却 設備は浸水しないので自然循環により除熱可能である。イベントツリー2 では、浸水によ り機能喪失に至らないため、炉心損傷シナリオは現れない。ここでは、補助冷却設備のダ ンパ手動調整失敗をアプリオリに考慮し、海水ポンプとディーゼル発電機の浸水のみを考 慮する。

# b. マージン評価

図 3.1.4-12 に示す機器別のマージン評価結果(排水能力係数 0.1 と屋外水位係数 0.1) より、海水ポンプとディーゼル発電機の猶予時間の短い方をとることで、シーケンス別の マージンを評価できる。90mm/hr 以下では双方とも同じだが、90mm/hr 以上では海水ポン プの猶予時間を参照すればよい。したがって、シーケンス別のマージン評価は機器別のマ ージン評価結果を代用できる。実際には、補助冷却設備のダンパ手動調整は異常降雨時に は可能と考えられるため、異常降雨のみの外部ハザードに対して除熱失敗シーケンスは現 れない。

## 3.1.4.4 強風と降雨の重畳事象に対するマージン評価手法

# (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

強風と降雨の重畳事象を考えると、降雨によって強風に対する防護設備に影響を与える とは考えにくく、強風によって降雨に対する防護設備に影響を与える可能性がある。プラ ントに影響を与えるシナリオを検討した結果、強風と降雨の重畳事象時に崩壊熱除去機能 喪失に至らしめるシナリオとしては補助冷却設備排気部雨どいの強風時の飛来物衝突によ る破損、その雨どいの開口部に雨の浸入、雨水の繰返し接触による伝熱管の疲労破損が考 えられる(図 3.1.4-14 参照)。ここでは、そのシナリオに対するマージン評価手法を開 発する。

前節で示したように、強風によって破損に至るには飛来物衝突が考えられ、最大瞬間風 速が重要パラメータとなる。一旦、構造損傷が発生し、その開口部から雨水が浸入する場 合には1時間降水量といった降雨速度と降雨継続時間の組み合わせが重要パラメータとな る。

# (2)機器別のマージン評価

### a. 重要機器

強風と降雨の重畳時に現れるシナリオで崩壊熱除去に必要な重要機器は補助冷却設備だ けとなり、次のような影響が考えらえる。

- ・強風飛来物による補助冷却設備排気部雨どいの破損
- ・排気ダクト出口ダンパ下部への雨水液滴の落下
- ・雨水液滴の空気冷却器伝熱管接触により発生する熱衝撃
- ・繰り返し雨水接触によって発生する熱応力による伝熱管疲労破損

上記のシナリオに従い、伝熱管疲労破損に至るまでの猶予時間をマージンと定義した。

# b. 定式化

# (a) 飛来物による補助冷却設備排気部雨どいの破損

(3.1.4-3) 式を用いて飛来物衝突による破損評価が可能であり、3.1.4.2 節を参照 する。

### (b) 排気ダクト出口ダンパ下部への雨水液滴の落下

排気部雨どいの破損後、空気冷却器排気ダクト内を雨水が落下して伝熱管部に接触

する。出口ダンパの開度によっては雨水はダンパに衝突してから落下すると考えられ るが、ここでは、ダンパには接触せずに伝熱管部に落下すると考えた。また、雨水液 滴がダクト内を落下していく過程で、伝熱管部で加熱された高温の空気と対向流の状 態で熱伝達が行われ、雨水液滴温度は浸入時から上昇していく。仮に雨水液滴温度が 100℃に達した場合には、雨水液滴は蒸発し、伝熱管部には到達しないものと仮定す る。

雨水液滴と伝熱管部からの空気の間の熱伝達については、雨水液滴の落下速度と空 気冷却器排気速度が対向流となるため相対速度に基づく球体の強制対流熱伝達として、 Ranz-Marshallの式を用いる[3.1.4-25]。

 $\begin{aligned} Nu &= 2 + 0.6 \, \mathrm{Pr}^{1/3} \, \mathrm{Re}^{1/2} & (3.\,1.\,4\text{-}15) \\ \text{ここで、} Nu \, \mathrm{kl} \, \texttt{x} \, \textit{y} \, \texttt{tl} \, \textit{kl} \, \texttt{v} \, \texttt{tl} \, \texttt{v} \, \texttt{ll} \, \texttt{sl} \, \texttt$ 

は空気の動粘性係数(400℃で 26mm²/s、500℃で 39mm²/s、600℃で 52mm²/s)である。  $\lambda_{air}$ は空気の熱伝導度(400℃で 33mW/m/K、500℃で 40mW/m/K、600℃で 46mW/m/K、) を用いると、空気側熱伝達係数 $h_{air}$ は次式で求められる。

$$h_{air} = \frac{Nu\lambda_{air}}{D_{drop}}$$
(3. 1. 4–16)

大雨の時の液滴直径  $D_{drop}$ は 5mm 程度で、降雨時落下速度(終端速度) $v_{drop,0}$ は 10m/s と言われている[3.1.4-26]。単一液滴の初期温度を 20℃と仮定し、単一液滴の熱バラ ンスから温度上昇は次式で求められる。

$$\rho_{drop} C p_{drop} V_{drop} \frac{T_{drop}^{n+1} - T_{drop}^n}{\Delta \tau} = h_{air} A_{drop} (T_{air}^n - T_{drop}^n)$$
(3. 1. 4-17)

$$T_{drop}^{n+1} = T_{drop}^{n} + \frac{h_{air}A_{drop}(T_{air}^{n} - T_{drop}^{n})}{\rho_{drop}Cp_{drop}V_{drop}}\Delta\tau$$
(3.1.4-18)

ここで、 $\rho_{drop}$ は液滴密度(998kg/m<sup>3</sup>)、 $Cp_{drop}$ は液滴比熱(4.18kJ/kg/K)、 $V_{drop}$ は液 滴体積(=(4/3) $\pi$ ( $D_{drop}$ /2)<sup>3</sup>)、 $T_{drop}^{n}$ はnステップ時の液滴温度( $^{\circ}$ C)、 $T_{air}^{n}$ はnス テップ時の液滴周り空気温度( $^{\circ}$ C)、 $A_{drop}$ は液滴表面積(= $\pi D_{drop}^{2}$ )、 $\Delta \tau$ はタイム ステップである。

空気冷却器内の空気流量 $F_{AC}$ 、断面積 $A_{AC}$ とすると、降雨時落下速度 $v_{drop,0} = 10$ m/sを用いれば、空気冷却器内の液滴落下速度は次式で表される。

 $v_{drop} = v_{drop,0} - F_{AC} / A_{AC}$ (3.1.4-19)

空気冷却器内出口温度で風量は変わることを考慮すると、液滴落下速度*V<sub>drop</sub>*は 400℃ で 4.4m/s、500℃で 5.1m/s、600℃で 5.7m/s となる。

(3.1.4-18) と(3.1.4-19) 式を用いて、排気ダクト内の液滴温度を計算した結果 を図 3.1.4-15 に示す。空気温度 400℃の場合、伝熱管位置(8.8m と仮定) に 2mm で は 100℃に到達して蒸発することを表している。2.5mm では液滴のまま伝熱管に衝突 することになる。空気温度 500℃の場合、3mm では蒸発するが、3.5mm では液滴のまま 伝熱管に接触する。空気温度 600℃では、3.5mm では蒸発するが、4mm では液滴のまま 伝熱管に接触することになる。なお、実際には、液滴径は表面の蒸発により小さくな るが、ここでは簡単のため、その効果を無視して計算した。また、入口側空気温度は 気象条件に左右されるが、伝熱管部で加熱された空気温度は伝熱管内のナトリウム温 度に影響を受けて入口側温度の影響は小さいと考えられるため、本計算では入口側空 気温度は 20℃とした。

# (c) 雨水液滴の空気冷却器伝熱管接触により発生する熱衝撃

雨水液滴が伝熱管に接触すると、伝熱管部は局所的に温度低下が生じ熱衝撃を与える。例えば、液滴直径 5mm の雨水は 600℃空気温度条件では排気ダクト通過中に約20℃上昇するから、顕熱は 5.5J であり、潜熱 147J に対して 4%程度と小さい。ただし、蒸発潜熱 Lv<sub>drop</sub> は2.26MJ/kgを用いた。2mmの場合であっても、70℃上昇するが、顕熱は 1.2J であり、潜熱 25J に対して 4%程度と小さい。ここでは、顕熱の効果は無視して、潜熱分だけ考慮することとし、簡単のため局所的な温度低下のみを考慮する

こととする。

伝熱管の熱容量を考えると、液滴と等価面積の伝熱管(約 3mm 厚みを仮定)の温度低下幅 $\Delta T_{tube}$ は次式で表される。ただし、雨水の蒸発温度 100℃を超えて温度低下することはないため、伝熱管初期温度と蒸発温度との差で制限されることを考慮する。

$$\Delta T_{tube} = \min\left(\frac{\rho_{drop}V_{drop}Lv_{drop}}{\rho_{tube}Cp_{tube}C_{drop}A_{drop}t_{tube}}, T_{tube,init} - T_{vap,drop}\right)$$
(3. 1. 4-20)

ここで、 $\rho_{drop}$ は液滴密度(998kg/m<sup>3</sup>)、 $Lv_{drop}$ は蒸発潜熱(2.26MJ/kg)、 $V_{drop}$ は液滴体積(=(4/3) $\pi$ ( $D_{drop}$ /2)<sup>3</sup>)、 $A_{drop}$ は液滴表面積(= $\pi D_{drop}^{-2}$ )、 $C_{drop}$ は液滴広がり係数、 $\rho_{tube}$ は伝熱管密度(7,980kg/m<sup>3</sup>)、 $Cp_{tube}$ は伝熱管比熱(500J/kg/K)、 $t_{tube}$ は伝熱管厚み、 $T_{tube,init}$ は伝熱管初期温度(°C)、 $T_{vap,drop}$ は液滴蒸発温度(°C)である。液滴接触により発生する熱応力 $\sigma$ (kN/mm<sup>2</sup>)は次式で求められる。

$$\sigma = \frac{E_{tube} \alpha_{tube} \Delta T_{tube}}{1 - \nu_{tube}}$$
(3. 1. 4-21)

ここで、 $E_{tube}$ はオーステナイト系ステンレス鋼[3.1.4-27]のヤング率(193kN/mm<sup>2</sup>)、 空気側熱伝達係数 $\alpha_{tube}$ は熱膨張係数(1.61×10<sup>-5</sup>/℃)、 $U_{tube}$ はポアソン比(0.3 を仮定)である。

(3.1.4-20) 式を用いて、雨水液滴接触による伝熱管温度低下を考慮した伝熱管温 度を図 3.1.4-16 に示す。空気温度に合わせて伝熱管初期温度は 400℃、500℃、600℃

を考慮した。実際には、液滴接触時には伝熱管表面で広がると考えられるため、ここ では接触時液滴直径に対する元の液滴直径との比で表される液滴広がり係数を導入し た。広がり係数が大きくなると、温度低下に寄与する伝熱管面積が大きくなり熱容量 が大きくなるため、伝熱管温度低下幅は小さくなる。

伝熱管温度低下幅を(3.1.4-21)式に代入することで、液滴接触による熱応力を計算できる。液滴広がり係数をパラメータとした伝熱管初期温度は 400℃、500℃、600℃の場合の熱応力を図 3.1.4-17 に示す。

### (d)繰り返す雨水接触によって発生する熱応力による伝熱管疲労破損

オーステナイト系ステンレス鋼のような延性材は、1回の熱応力での破損は生じが たく、繰り返す雨水液滴接触による疲労破損が生じると考えられる。そこで、1時間 降水量に対して雨水液滴が接触する回数を算定し、発生応力と応力発生回数の関係を 示すステンレス鋼の設計疲労線図から、許容繰返し回数を超えた場合に伝熱管が破損 すると考えられる。

単位面積あたりの液滴衝突個数は、1 時間降水量 P (mm/hr) を液滴体積 $V_{drop}$ で除 することで求められ、図3.1.4-18に示される。それに液滴面積 $a_{drop}$ を乗ずることで、 1時間あたりの液滴衝突回数  $N_{drop}$  を算出することができ、図3.11.4-18に示される。

$$N_{drop} = (P / V_{drop}) a_{drop}$$
(3. 1. 4-22)

次に、オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労線図は日本機械学会の規格 [3.1.4-28]を参照することとし、プロットしたものを図 3.1.4-20 に示す。伝熱管初 期温度、液滴径、液滴広がり係数を設定すれば、1 回の液滴接触による熱応力 $\sigma$ を求 めることができるため、その値と設計疲労線図の関係から、許容繰返し回数 $N_{limit}$ を 求めることができる。この許容繰返し回数を 1 時間あたりの液滴衝突回数で除するこ とで、伝熱管疲労破損までの許容時間を計算することができ、本評価では、この許容 時間をマージン $T_{marein}$  と定義する。

$$T_{margin} = N_{limit} / N_{drop}$$
(3. 1. 4–23)

# c. マージン評価

図 3.1.4-21、図 3.1.4-22、図 3.1.4-23 は、それぞれ伝熱管初期温度 400℃、500℃、 600℃の時のマージン評価結果を示す。各図には、液滴広がり係数を 1、2、5、10 とし、 液滴径も代表的な 1.5mm、2mm、3mm、5mm、10mm をプロットした。全般的には、液滴径が 小さいほど、液滴広がり係数が大きいほど、破損までの許容時間、すなわちマージンが大 きい。伝熱管初期温度に対する感度はあまりないことが分かる。液滴広がり係数が 1 のと き、液滴径が大きい場合にマージンが大きくなっているが、これは雨水接触時の伝熱管温 度低下幅が蒸発温度で制限されているためである。実際には、液滴は広がるはずなので、 係数 5 を見れば、違和感のない結果となっている。図 3.1.4-22 の液滴広がり係数 5 を見

ると、液滴径 3mm 以上で 1,000 時間以上、5mm で 1 時間降水量 100mm/hr であっても 150 時 間程度であり、マージンは非常に大きいと言える。

### (3) シーケンス別のマージン評価

### a. イベントツリー

強風に対するマージンは系統ごとに同じであり、吸気部と排気部で代表させると、3系 統同時破損を考慮すれば強風と降雨の重畳事象のイベントツリーは図 3.1.4-24 のように なる。ここでは、3.1.4.2 節の強風の評価における感度 I ケースを取り上げることとする。 極めて起こりがたいが、強風によって生じる飛来物破損が3系統同時に発生すると想定す ると、除熱失敗シーケンスは次のとおりである。

- ・シーケンスS1: (重畳シーケンス)強風で生じる飛来物による補助冷却設備排気部雨 どい破損、空気冷却器ダクト内雨水浸入、雨水液滴伝熱管到達、繰 返し雨水接触による伝熱管疲労破損
- ・シーケンスS2: (強風シーケンス) 強風で生じる飛来物による補助冷却設備排気部雨 どい及び空気冷却器伝熱管破損
- ・シーケンス S3: (強風シーケンス)強風で生じる飛来物による補助冷却設備吸気部破 損

#### b. マージン評価

シーケンス S2 と S3 は、強風のみの影響であるため、それぞれマージンは 135m/s と 80m/s となる。一方、シーケンス S1 は、強風と降雨の重畳事象であり、強風 80m/s 以上、 降雨に対するマージンは図 3.1.4-21~図 3.1.4-23 に示されているとおりである。例えば、 空気冷却器 400<sup>°</sup>Cの場合、液滴広がり係数を 5 とすると、雨水液滴 5mm、1 時間降水量 100mm/hr とすると 150hr 程度と、極めて大きなマージンを有する。ただし、ここで想定し た全系統同時破損は実際には考えにくく、除熱失敗シーケンスは現れない。

### 3.1.4.5 まとめ

強風と降雨の重畳事象については、強風のみの影響の場合、主に最大瞬間風速をハザー ド強度の指標として、風圧・気圧差・飛来物衝突による破損評価を行い、機器別のマージ ン評価手法を開発した。その結果、最大瞬間風速の過去最大値に比べて十分なマージンを 有することを確認した。また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価手 法も開発し、強風時には補助冷却設備の全系統同時破損は極めて考えにくいため除熱失敗 シーケンスは現れないことを示した。降雨のみの影響の場合、機能喪失水位に対する排水 設備閉塞物除去速度に応じた継続時間を指標とした機器別のマージン評価手法を開発し、 1 時間降水量が増大するにつれてマージンが小さくなることを示した。また、イベントツ リーに基づいてシーケンス別のマージン評価手法も開発し、降雨時には補助冷却設備の浸 水は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは現れないことを示した。強風と降雨の重 畳時には補助冷却設備排気部雨どいの破損に続く排気ダクト内への降雨の浸入による空気 冷却器伝熱管疲労破損が考えられ、伝熱管破損までの許容時間を指標とした機器別のマー ジン評価手法を開発し、雨水液滴径が大きくなるにつれてマージンが小さくなることを示 した。また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価手法も開発し、補助 冷却設備の全系統同時破損は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは現れないことを 示した。

# 参考文献

- [3.1.4-1] 宮部,鳴戸,杉野,ほか,外部電源喪失頻度及び外部電源復旧失敗確率の評価,
  日本原子力学会 2014 年春の年会,東京, 2014/3/26-28, N19.
- [3.1.4-2] 石川,送電用鉄塔の動的効果を考慮した風荷重評価法に関する研究,2004年7月.
- [3.1.4-3] 高橋 和雄; 松野 進; 松永 博之,1991 年台風 19 号による都市システムの被害と 社会的影響,長崎大学工学部研究報告,23(41), pp.163-170; 1993.
- [3.1.4-4] 琉球新報、台風 18 号、家屋の全半壊 28 棟/指切断など 41 人重軽傷、1999/9/24.
- [3.1.4-5] 事故調查検討結果、東京電力.
- [3.1.4-6] 北海道新聞、2003年8月15日朝刊.
- [3.1.4-7] 丸山 敬ほか、宮古島を来週した台風 0314 号について その2 被害の特性、光 都大学防災研究所年報 第47 号 B 平成 16 年 4 月.
- [3.1.4-8] 第6 主な災害記録、東京都総務局.
- [3.1.4-9] ローカル通信舎.
- [3.1.4-10] 山形県 消防防災課、台風 22 号による影響(第2報)、平成 16年 10月 10日.
- [3.1.4-11] 北陸電力、〈石川〉 停電状況について(最終報)、平成17年9月8日.
- [3.1.4-12] ウィキペディア 平成 18 年台風第 13 号.
- [3.1.4-13] 北陸電力、(最終報)台風 18 号による停電状況及び災害対策本部の解散について、 平成 21 年 10 月 8 日.
- [3.1.4-14] 本田誠, 強風下における鉄塔-送電線連成系の部材振動の実態とその制振対策の開発, 九州大学学術情報リポジトリ, 2011/11/30.
- [3.1.4-15] 林泰一(災害観測実験センター), 台風 9918 台風の概要, 京都大学 防災研究所.
- [3.1.4-16] 内閣府, 平成 18 年台風第 13 号による被害状況等について(第4報), 平成 18 年 11 月 15 日.
- [3.1.4-17] 中国電力、台風 18 号による停電の状況について、平成 16 年 9 月 10 日.
- [3.1.4-18] 国土交通省、台風第 18 号について(第 6 報:最終報)、災害情報 平成 16 年 9 月 9 日 19:00 作成.
- [3.1.4-19] 原子力発電所の竜巻評価ガイド(案),第 23 回発電用軽水型原子炉の新規制基準 に関する検討チーム会合配布資料、平成 25 年 6 月 3 日.
- [3.1.4-20] 東京工芸大学 "平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻に
  よる原子力施設への影響に関する調査研究" 平成 23 年 2 月.
- [3.1.4-21] Chang, W.S. Impact of solid missiles on concrete barriers.ASCE J. Struct. Div., 1981, 107(ST2), 257-71.
- [3.1.4-22] A. Rama Chandra Murthy, G.S. Palani, and Nagesh R. Iyer, Impact Analysis

of Concrete Structural Components, Defence Science Journal, Vol. 60, No. 3, May 2010, pp. 307-319.

- [3.1.4-23] 電力中央研究所, 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法 (平成3年7月).
- [3.1.4-24] 四国電力(株) "伊方発電所発電所 3 号炉 竜巻影響評価説明資料"原子力規制委員会発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チーム会合,平成 25 年 7 月 (伊方発電所安全審査資料 番号 DB-8-05 提出年月日 平成 25 年 7 月 29 日).
- [3.1.4-25] 伝熱工学資料 改訂第4版,日本機械学会(1986).
- [3.1.4-26] 小倉義光「一般気象学」東京大学出版会(1984).
- [3.1.4-27] ステンレス協会、http://www.jssa.gr.jp/contents/faq-article/q7/.
- [3.1.4-28] 日本機械学会、発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2011 年追補版) 〈第 I 編 軽水炉規格〉JSME S NC1-2011、第 4 章添付 4-2(2011 年 12 月).

台風名	発生日	鉄塔	最大瞬間風速	電源復旧時間	文献
		等倒			
		壊			
9117	平成3年9月12日~15日	有	~57.4m/s[那覇]	不明	[3.1.4-2]
9119	平成3年9月25日~28日	有	~54.3m/s[長崎]	62 時間 56 分	[3.1.4-3]
93.1.4	平成3年9月1日~5日	有	~59.1m/s[種子島]	不明	[3.1.4-2]
9918	平成3年9月21日~25日	有	~66.2m/s[牛深]	約2日	[3. 1. 4 - 4]
					[3.1.4-15]
0221	平成 14 年 9 月 30 日~10 月 3 日	有	~56.7m/s[茨城延方]	5 時間 45 分	[3.1.4-5]
					[3.1.4-14]
0310	平成 15 年 8 月 7 日~10 日	不明	~69.2m/s[室戸岬]	約5日	[3.1.4-6]
0314	平成 15 年 9 月 10 日~14 日	不明	~74.1m/s[宮古島]	約9日	[3.1.4-7]
					[3.1.4-13]
0315	平成 15 年 9 月 22 日	不明	~59.5m/s[八丈島]	約3日	[3.1.4-8]
0418	平成 16 年 9 月 4 日~8 日	有	~60.2m/s[広島]	約 76 時間	[3.1.4-9]
					[3.1.4-17]
					[3.1.4-18]
0422	平成 16 年 10 月 7 日~9 日	不明	~67.6m/s[石廊崎]	不明	[3.1.4-10]
0514	平成17年8月29日~9月8日	無	~59.2m/s[種子島]	約 22 時間	[3.1.4-11]
0618	平成18年9月10日~18日	有	~69.9m/s[西表島]	約4日	[3.1.4-12]
					[3.1.4-16]
0918	平成 21 年 10 月 6 日~9 日	無	~55m/s[最大風速]	約 12 時間	[3.1.4-13]

表 3.1.4-1 外部電源喪失時の最大瞬間風速

表 3.1.4-2 飛来物の空力パラメータ

飛来物	$L_1(m)$	$L_2(m)$	L <sub>3</sub> (m)	m(kg)	$C_{D1}$	$C_{D2}$	$C_{D3}$	C <sub>D</sub> A/m
砂利	0.04	0.04	0.04	0.18	2	2	2	0.0177
鋼製パイプ	2.0	0.05	0.05	8.4	2	0.7	0.7	0.0057
鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	1.2	1.2	2	0.0089
木材	2.0	0.2	0.2	48	2	0.7	0.7	0.0044
コンテナ	2.4	2.6	6	2300	2	2	2	0.0105
自動車	3.5	1.8	1.5	1100	2	2	2	0.0086

表 3.1.4-3 風速 100m/s における飛来物の空力パラメータと飛来物速度の関係

飛来物	C <sub>D</sub> A/m	飛来物速度(m/s)
砂利	0.0177	$\sim 65$
鋼製パイプ	0.0057	$\sim 50$
鋼製材	0.0089	$\sim$ 55
木材	0.0044	$\sim 45$
コンテナ	0.0105	$\sim 60$
自動車	0.0086	$\sim 55$

肉厚(mm)	鋼製パイプ	鋼製材	木材	コンテナ	自動車	砂利
2.5	8	6	21	9	9	140
5	13	11	36	15	15	235
10	22	18	61	25	26	>>
20	36	30	102	41	44	>>
50	72	59	203	82	87	>>

表 3.1.4-4 貫通限界肉厚に相当する飛来物速度

※単位 m/s, >>は音速より高い

表 3.1.4-5 貫通限界肉厚に相当する風速

肉厚(mm)	鋼製パイプ	鋼製材	木材	コンテナ	自動車	砂利
2.5	15	11	48	14	17	215
5	26	19	80	24	28	$\rangle\rangle$
10	43	32	135	41	47	$\rangle\rangle$
20	73	54	227	69	79	$\rangle\rangle$
50	145	108	>>	137	158	$\rangle\rangle$

※単位 m/s, >>は音速より高い

# 表 3.1.4-6 飛来物による想定破損部位

(a) 平成26年度想定

設備	破損箇所	代表
		肉厚
	フィルター等障害物	10mm
補助冷却系設備の空気冷却器(吸気部)	空気冷却器胴部	
	空気冷却器伝熱管	
	排気部雨どい	50mm
補助行却未敢加切至或行却器(併気前)	空気冷却器伝熱管	
	フィルター等障害物	10mm
メンテナンス冷却系の空気冷却器(吸気部)	空気冷却器胴部	
	空気冷却器伝熱管	
インテナンフ 冷却 不 の 広 左 次 切 明 (北 左 如)	フィルター等障害物	50mm
入 ク フ フ ノ ノ ス 行 却 糸 の 空 気 行 却 奋 ( 排 え 部 )	空気冷却器伝熱管	
非常用ディーゼル発電機燃料タンク	燃料タンク	10mm
北学田ゴノ ゼル惑電機 (四批/戸辺)	フィルター等障害物	20mm
か市市/1~2/1/元电(域(吸併気部)	ディーゼル発電機本体	
換気空調設備 空気取入部・排出部	換気空調吸排気口障害物	20mm

設備	破損箇所	代表 肉厚
補助冷却系設備の空気冷却器(吸気部)	フィルター等障害物 空気冷却器胴部 空気冷却器伝熱管	10mm
補助冷却系設備の空気冷却器(排気部)	排気部雨どい 空気冷却器伝熱管	<u>5mm</u>
メンテナンス冷却系の空気冷却器(吸気部)	フィルター等障害物 空気冷却器胴部 空気冷却器伝熱管	10mm
メンテナンス冷却系の空気冷却器(排気部)	フィルター等障害物 空気冷却器伝熱管	<u>10mm</u>
非常用ディーゼル発電機燃料タンク	燃料タンク	5mm
非常用ディーゼル発電機(吸排気部)	フィルター等障害物 ディーゼル発電機本体	20mm
換気空調設備 空気取入部・排出部	換気空調吸排気口障害物	10mm

(b)外壁厚さの感度 I

(c)外壁厚さの感度 II

設備	破損箇所	代表
		肉厚
	フィルター等障害物	5mm
補助冷却系設備の空気冷却器(吸気部)	空気冷却器胴部	
	空気冷却器伝熱管	
「「「「「「「「「」」」」(「「」」」(「「」」」(「「」」)	排気部雨どい	5mm
補助行却未設備の空気行却器(排気部)	空気冷却器伝熱管	
	フィルター等障害物	5mm
メンテナンス冷却系の空気冷却器(吸気部)	空気冷却器胴部	
	空気冷却器伝熱管	
マンテナンフ冷却での空気の知思(地気如)	フィルター等障害物	2.5mm
>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	空気冷却器伝熱管	
非常用ディーゼル発電機燃料タンク	燃料タンク	5mm
非常田ディーゼル発電機(咽地与如)	フィルター等障害物	20mm
が市田ノィービル光电磁(欧伊丸印)	ディーゼル発電機本体	
換気空調設備 空気取入部・排出部	換気空調吸排気口障害物	2.5mm

# 表 3.1.4-7 各機器に対する貫通限界肉厚に相当する風速

(a) 平成 2	6年度想定
----------	-------

機器	鋼製パイ プ	鋼製材	木材	コンテナ	自動車	砂利
補助冷却系設備の空気冷却器(吸気 部)	ā 43	32	135	41	47	>>
補助冷却系設備の空気冷却器(排気 部)	ī. 145	108	>>	137	158	>>
メンテナンス冷却系の空気冷却器 (吸気部)	43	32	135	41	47	>>
メンテナンス冷却系の空気冷却器 (排気部)	145	108	>>	137	158	>>
非常用ディーゼル発電機燃料タンク	43	32	135	41	47	>>
非常用ディーゼル発電機(吸排気 部)	73	54	227	69	79	>>
換気空調設備 空気取入部 · 排出部	ß 73	54	227	69	79	$\rangle\rangle$
	(b)外壁厚	さの感度 I				
機器	鋼製パイプ	鋼製材	木材	コンテナ	自動車	砂利
補助冷却系設備の空気冷却器 (吸気部)	43	32	135	41	47	>>
補助冷却系設備の空気冷却器 (排気部)	26	19	80	24	28	>>
メンテナンス冷却系の空気冷却 器(吸気部)	43	32	135	41	47	>>
メンテナンス冷却系の空気冷却 器(排気部)	43	32	135	41	47	>>
非常用ディーゼル発電機燃料タ ンク	26	19	80	24	28	>>
非常用ディーゼル発電機(吸排 気部)	73	54	227	69	79	>>
換気空調設備 空気取入部・排 出部	26	19	80	24	28	>>
	(c)外壁厚	さの感度 II				
機器	鋼製パイプ	鋼製材	木材	コンテナ	自動車	砂利
補助冷却系設備の空気冷却器 (吸気部)	26	19	80	24	28	>>
補助冷却系設備の空気冷却器 (排気部)	26	19	80	24	28	>>
メンテナンス冷却系の空気冷却 器(吸気部)	26	19	80	24	28	>>
メンテナンス冷却系の空気冷却 器(排気部)	15	11	48	14	17	>>
非常用ディーゼル発電機燃料タ ンク	26	19	80	24	28	>>
非常用ディーゼル発電機(吸排 気部)	73	54	227	69	79	>>
換気空調設備 空気取入部・排 出部	15	11	48	14	17	>>

※単位 m/s, >>は音速より高い

松巴	Υ.	マージン (m/s)			
100 石匠	H26 想定	感度 I	感度 II		
外部電源	54	54	54		
排気塔	143	143	143		
原子炉補助建物	$\rangle\rangle$	>>	$\rangle\rangle$		
補助冷却系設備の空気冷却器(吸気部)	135	135	80		
補助冷却系設備の空気冷却器(排気部)	$\rangle\rangle$	80	80		
メンテナンス冷却系の空気冷却器(吸気部)	135	135	80		
メンテナンス冷却系の空気冷却器(排気部)	>>	135	48		
非常用ディーゼル発電機燃料タンク	135	80	80		
非常用ディーゼル発電機(吸排気部)	227	227	227		
換気空調設備 空気取入部・排出部	227	80	48		

表 3.1.4-8 強風に対する機器別のマージン評価

※ >>は極めて大きい

# 表 3.1.4-9 強風に対するシーケンス別のマージン評価

# (a)平成26年度想定

シーケンス	マージンを支配する機器	マージン(m/s)
外部電源喪失+補助冷却系設備3系統同 時破損	補助冷却系設備(吸気部)	135

(b)感度 I

シーケンス	マージンを支配する機器	マージン(m/s)
外部電源喪失+補助冷却系設備3系統同 時破損	補助冷却系設備(吸気部)	135
外部電源喪失+補助冷却系設備3系統同 時破損	補助冷却系設備(排気部)	80

(c)感度 II

シーケンス	マージンを支配する機器	マージン(m/s)
外部電源喪失+補助冷却系設備3系統同 時破損	補助冷却系設備(吸気部)	80
外部電源喪失+補助冷却系設備3系統同時破損	補助冷却系設備(排気部)	80



図 3.1.4-3 飛来物速度と貫通限界肉厚の関係



(b)感度 I









※「接続 1f」は補助冷却設備強制循環冷却シーケンスに接続 「接続 1n」は補助冷却設備自然循環冷却シーケンスに接続 「-」はマージンが大きくて物理的に現れ難いシーケンス

図 3.1.4-5 強風に対するイベントツリー



※「失敗」は補助冷却設備3系統同時破損を想定した場合

図 3.1.4-6 強風に対する補助冷却設備のイベントツリー







図 3.1.4-8 1時間降水量に対する海水ポンプの猶予時間(屋外水位係数の影響)





図 3.1.4-10 1時間降水量に対するディーゼル発電機の猶予時間



※200mm/hr を図示しているが、0.1m で制限されるため1時間降水量の影響はない。 図 3.1.4-11 排水能力係数 0.1 のときの屋外、第1室及び電気設備室の水位上昇履歴



図 3.1.4-12 異常降雨に対する機器別のマージン評価(排水能力係数 0.1、屋外水位係数 0.1)

イベントツリー1						
事象	屋外の排水 設備の閉塞 防止	海水ポン プ健全	ディーゼル建物 内への雨水の 浸入防止	ディーゼル発 電機健全	補助冷却設備	状態
						成功
	X2 ↑成功					成功
異常降雨の発生、 <u>外部電源喪失</u>				X1		成功
						炉心損傷
						X1以降と同じ分岐
						X2以降と同じ分岐

# <u>イベントツリー2</u>



図 3.1.4-13 異常降雨に対するイベントツリー



図 3.1.4-15 排気ダクト内雨水液滴の温度上昇履歴



図 3.1.4-17 1回の雨水接触により発生する熱応力



(機械学会規格[3.1.4-28]をもとに作図)







ケース	3 系統同 時破損を 考慮	補助冷却設備 (吸気部)	補助冷却設備 (排気部)雨 どい健全	補助冷却設備 (排気部)伝 熱管健全	ダクト内 雨水浸入	雨水液滴の 伝熱管到達	繰返し雨水接触 による伝熱管疲 労破損	備考
(強風ケース)	<b>強風影響</b>					降雨影響		
感度I	*	135m/s	80m/s	48m/s	-	-	_	



# ※「失敗(S#)」は補助冷却設備3系統同時破損を想定した場合のシーケンス番号

図 3.1.4-24 強風と降雨の重畳事象に対する補助冷却設備のイベントツリー

## 3.1.5 コストーベネフィット評価手法(H27)

3.1.5.1 はじめに

平成24年度にマージン評価手法の概念を構築した際、マージンを整理すれば、図 3.1.5-1 示すように、対策のコストに対して有効性を示すことが可能になることを示した。 ここでは、既往研究を調査するとともに、4か年の研究成果を踏まえて、コストーベネフ ィット評価手法を開発することとした。

### 3.1.5.2 評価手法に関する既往研究の調査・整理

コストーベネフィット評価は、1800 年代後半から 1900 年代初頭にかけて米国における 大規模な公共事業を評価する目的で用いられるようになり、1960 年代になってからは防衛、 宇宙、エネルギー問題を扱う米国連邦機関で意思決定プロセスの一つの手段として参照さ れるようになった。1981 年にレーガン大統領が公布した大統領令 12291 によって、規制策 定の際には、その便益が費用を上回ることを示す責任が規制策定省庁に課されることにな った。

原子力分野においても、NRC (United States Nuclear Regulatory Commission、米国原 子力規制委員会)は1983年1月に規制分析ガイドライン (NUREG/BR-0058)[3.1.5-1]に おいてコストーベネフィット評価を実施するようになった。しかしながら、それ以前から NRC はバリュー・インパクト・アナリシスと呼ばれるガイドラインを発行していた。大統 領令 12291を踏まえて、NRC は体系的に手順を記述したバリュー・インパクト・アセスメ ント (VIA)ガイドライン (NUREG/CR-3568)[3.1.5-2]を発行した。VIAは、まず規制行為 に影響される属性を同定し、各属性に対する提案行為の評価を行い、個々の評価の要約が 意思決定者に提供される。米国では古くからプラントを対象に試算されてきた[3.1.5-3、 3.1.5-4]。NUREG/CR-5281[3.1.5-3]では、使用済燃料を貯蔵するリスクを軽減することを 目的とし、事故予防策・関連設備の更新・補強工事を行ったが、結果としては、重大な放 射線放出および更新工事に多大なコストがかかり有用な効果が得られなかった。

我が国では、旧原子力安全基盤機構が原子力発電の社会・環境経済学的研究を実施し、 原子力発電所への規制に関する規制影響因子の定量化と金銭価値化のためのデータベース の整備・開発と、費用便益分析やリスクーベネフィット分析のような意思決定支援技術を 利用する観点で検討がなされた[3.1.5-5]。この報告書では、NRCが開発した規制影響費用 分析コード (FORECAST) が VIA で利用された例が示された。FORECAST は規制による Value だけでなく Impact も一般的な方法で容易に推定するために作られた計算コードであり、 コードを使用するにあたっての根拠を収集し、その例が記載されている。米国では FORECAST が実際に費用推定に用いられているが、過去の実績より見い出された今後の課題 としては、「リスク削減で得られる便益」が「単位リスクを削減する為に必要な費用」よ りも小さくなる傾向がみられることが挙げられる。

### 3.1.5.3 評価手法の開発

前節の調査から、VIA が評価手法として適切と考えられるが、様々な対策についてメーカにコストを問い合わせても定量的に回答することは困難との回答であった。そこで、簡

便な方法として、コストについては定性的表現とした。ベネフィットとして、本研究成果 である PRA で得られた炉心損傷頻度あるいはマージン評価で得られたマージンを用いる評 価手法とした。本研究で提案するコストーベネフィット評価手法を図 3.1.5-2 に示す。ま ず、既実施の PRA とマージン評価の中で、感度解析として対策の有効性を炉心損傷頻度あ るいはマージンで示す。その対策のコストは、高価あるいは安価といった定性的表現を用 いる。それらを図示して整理する手法とした。

# 3.1.5.4 積雪に対するコストーベネフィット評価

平成25年度に積雪に対するマージン評価及び PRA を実施した。積雪に対する対策は除 雪作業とヒータ設置になることから、感度解析等により定量的に評価結果を得た。

マージン評価の結果は、降雪速度 2m/day のとき、実効除雪速度が 0.67、1.0、1.33、 1.67m/day の場合、マージンはそれぞれ 1.0、1.3、1.8、3.3day と評価された。一方、ヒ ータを設置した場合は、バッテリー容量 8 時間としていたが、実際には非常用ディーゼル 発電機デイタンクが 1 日分(屋外燃料タンクは想定しない)あるため、それを考慮して、 マージンは 1.3day と見積もることができる。除雪作業は安価、ヒータは高価と定性的に 判断して、図示したものが図 3.1.5-3 (a) である。除雪作業はヒータに比べて安価かつマ ージンが大きく効果的な対策と言える。除雪作業は、必要となる機材は安価であるが、実 効的に除雪が作業できるように実施体制等を検討する必要がある。

PRA の結果は、ノミナル除雪速度 4m/day とした基準解析では、炉心損傷頻度は 5×10<sup>-7</sup>/ 炉年であった。一方、除雪作業に加えて更にヒータ設置を考慮した場合、7×10<sup>-9</sup>/炉年であった。同様に、コストと併せて図示したものが図 3.1.5.3 (b) である。除雪作業のみと比較すれば、除雪作業とヒータ設置の両対策を導入する方が炉心損傷頻度は桁違いに低減しているが、コストは確実に高くなる。仮にヒータを設置しない場合の炉心損傷頻度の絶対値が許容可能な水準と判断されるならば、ヒータは設置せずに除雪作業が効果的となるように体制を構築することが対策として合理的と提言できる。

一方、さらなる炉心損傷頻度の低減を追求する場合には、安価な除雪作業を実施せずに 高価なヒータ設置のみ導入した場合の炉心損傷頻度を評価すれば、本評価手法を適用する ことにより、除雪作業、ヒータ設置及び両対策の実施の3者間でのコストーベネフィット の比較が可能となる。また、全系統にヒータを設置しなくても単一系統に設置することで 崩壊熱除去を成功しつつコストダウンを図ることも合理的な対策となりうる。

以上のように、合理的な対策策定のためのコストーベネフィット評価手法を開発するこ とができた。

# 参考文献

- [3.1.5-1] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Analysis Guideline of the U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/BR-0058 Revision 4 (Sep. 2004).
- [3.1.5-2] S.W. Heaberlin J.B. Burnham, R.H.V. Gallucci, M.F. Mullen, R.J. Nesse, L.A. Nieves, J.J. Tawil, M.B. Triplett, S.A. Weakley, A.R. Wusterbarth, A Handbook for Value-Impact Assessment, NUREG/CR-3568, U.S. Nuclear Regulatory Commission (Dec. 1983).
- [3.1.5-3] J.H. Jo, P.F. Rose, S.D. Unwin, V.L. Sailor, K.R. Perkins, A.G. Tingle, Value/Impact Analyses of Accident Preventive and Mitigative Options for Spent Fuel Pools, NUREG/CR-5281 (Jan. 1989).
- [3.1.5-4] W.E. Kastenberg and L. Cave, Valu/Impact Assessment for the Evaluation of Risk Reduction: Development of a Framework, Reliability Engineering and System Safety, Vol.28, pp.205-227 (1990).
- [3.1.5-5] 原子力規制員会(旧原子力安全基盤研究機構)、原子力発電の社会・環境経済学的 研究、平成22~23年度 原子力安全基盤調査研究(平成22年度).



図 3.1.5-1 コストーベネフィット評価のイメージ(平成24年度報告書)



図 3.1.5-2 コストーベネフィット評価手法



## 3.1.6 評価手法の整備(4年間のまとめ)

3.1.6.1 はじめに

平成24年度に既往研究からマージン評価手法を調査し評価手法の概念を構築するとと もに、種々の外部ハザードを調査し本研究で対象とする外部ハザードの代表性を検討・整 理した。平成25年度に外部ハザードに対する一般的なマージン評価手法を開発し、積 雪・竜巻に対するマージンを評価し、手法開発を行った。平成26年度に強風・降雨・火 山噴火に対するマージンを評価し、手法開発を行った。平成27年度に森林火災・重畳事 象に対するマージンを評価し、手法開発を行うとともに、コストーベネフィット評価手法 を構築した。平成27年度実施内容は前節までに記述していることから、ここでは、平成 26年度までの実施内容をまとめる。

### 3.1.6.2 マージン評価手法に関する既往研究の調査・整理(H24)

ストレステストは、安全上重要な施設・機器等について、設計上の想定を超える事象に 対して、どの程度の安全裕度が確保されているかを評価するとされた。評価は、許容値等 に対し、どの程度の裕度を有するかという観点から行われた。なお、許容値が最終的な耐 力に比して余裕をもって設定されている場合については、必要に応じ、技術的に説明可能 な範囲においてその余裕を考慮した値を用いることとされた。また、設計上の想定を超え る事象に対し安全性を確保するために取られている措置について、多重防護の観点からそ の効果が示された。国際的な活動状況を調べてみると、地震については日米欧においてマ ージン評価が実施されていた。津波については欧米では洪水として同様の手法で評価され ていた。

地震確率論的リスク評価 (PRA; Probabilistic Risk Assessment) は、日本原子力学会 標準[3.1.6-1]に示される考え方に基づき、起因事象を選定する。次に、選定した各起因 事象に対して、事象の影響緩和に必要な機能を抽出し、イベントツリーを作成の上、事象 の進展を終息させる終息シナリオを特定する。耐震裕度の評価方法は、当該評価対象設備 の損傷モードに応じた地震動に対する評価値を求め、評価値が許容値に達するのはどの程 度の地震動に相当するかを算出し、耐震裕度を求める。各イベントツリーの耐震裕度の中 から、各イベントツリーの耐震裕度の中の最も小さいものとしてクリフエッジ (終息シナ リオが成立しなくなる地震動)を特定する。

#### 3.1.6.3 マージン評価手法の概念構築(H24)

本研究では、異常気象・火山噴火・森林火災を対象としているが、基本的には地震や津 波のストレステスト(マージン評価手法)と同様の手法が適用できると考えられる。具体 的には、ハザード評価と事象シーケンス評価を踏まえて、その結果を整理してマージン評 価とする流れである。マージン評価の場合は、ハザード評価が基準とするハザード強さを 設定するのに対して、PRA ではハザード強さを発生頻度と関連付けてハザード曲線を描く。 すなわち、ハザードを定量化できれば PRA になり、定量化できなければマージン評価とな る。本研究では、ハザードの定量化を試みることから、PRA もまた実施することになる。 マージン評価では、ある対策の有効性を評価することができる。プラント内の影響を受 ける設備機器のマージンを示すとともに、炉心損傷に至る事象シーケンスについても対策 のマージンを整理することが可能である。

#### 3.1.6.4 モデルサイト条件及びプラント情報の調査(H24)

### (1) モデルサイト条件の調査

ナトリウム冷却高速炉原型炉の原子炉設置許可申請書(平成18年10月変更) [3.1.6-2]によれば、原子炉施設を設置する敷地(発電所敷地)は、敦賀半島の北端に位置し、福井県敦賀市白木に属する。敷地は日本海に面し、標高200m地点を頂点とする北西斜面及び丘陵部にあり、北東から南西にかけて海岸線が形成されている。原子炉施設は標高20m~80mの丘陵部に設置される。地質は主として花崗岩類から成る。敷地の面積は約108万m<sup>2</sup>であり、ほとんどが山林原野である。

## (2) プラント情報の調査

ナトリウム冷却高速炉原型炉の崩壊熱除去設備は補助冷却設備及びメンテナンス冷却系 設備を有している。補助冷却設備は強制循環のみならず自然循環でも冷却できる設備であ る。崩壊熱除去に必要な機器設備について、環境(外気、海水)と接している機器設備を 抽出して、崩壊熱除去に必要な機器設備に影響を及ぼす外部ハザードを整理した。

#### 3.1.6.5 本研究で対象とする外部ハザードの代表性の検討・整理(H24)

(1)研究のスコープ

炉心損傷に至る事象として炉停止機能喪失及び崩壊熱除去機能喪失が挙げられるが、東 京電力福島第一原子力発電所の事故では、崩壊熱除去機能の重要性が認識されたため、本 研究では崩壊熱除去機能に着目した評価を実施した。また、一般に、トリウム冷却高速炉 では、最終ヒートシンクが大気であるため、プラント上方からの自然災害が重要であるこ とを鑑みて評価する必要がある。

### (2) 外部事象リストとスクリーニングの概要

まず、考えられる全ての外部ハザードを網羅的に抽出し、リストを作成することである。 IAEA (International Atomic Energy Agency、国際原子力機関) [3.1.6-3、3.1.6-4、 3.1.6-5]、及び OECD/NEA (Organisation for Economic Co-operation and Development/The Nuclear Energy Agency、経済協力開発機構原子力機関) [3.1.6-6]を参 照して網羅的に外部ハザードをまとめた。ただし、本研究で検討する外部ハザードとは、 自然現象及び偶発的に発生する人為的な事象を指している。つまり、人為的な事象のうち、 日偶発事象であるテロは別途の評価が必要となることから、本研究の対象外とした。

PRA の評価が必要な外部ハザードを選定するためにスクリーニングを実施することによって、PRA の評価対象を絞り、評価全体の効率化を図る必要がある。米国の軽水炉を対象に実施された既往のスクリーニング手法は、NUREG レポート[3.1.6-7、3.1.6-8]に記載のある5つの基準を設けてスクリーニングを実施している。以降、本研究ではこれを「第1

スクリーニング」と呼ぶ。

# (3) 本研究のスクリーニング

本研究では、サンプルケースとして敦賀のモデルサイトを想定した。外部ハザードリス トを作成及びモデルサイトを選定した後、第1スクリーニングを実施し、外部ハザードリ ストの事象全てに対して、PRAの評価が必要な外部ハザードとPRAの評価が不要な外部ハ ザードに分類する。第1スクリーニングにてPRAの評価が必要な外部ハザードであると選 択された事象のうち、選択された幅広い外部ハザードの中から更に的を絞って評価を実施 するため、本研究の対象とすべき外部ハザードを選定する。ここでは、その選定過程を第 2スクリーニングと呼ぶ。

本研究では自然災害についての評価手法を開発することとしている。したがって、第2 スクリーニングの最初のステップは、第1スクリーニングから選定された外部ハザードの うち、自然災害である外部ハザードを選択する。2番目のステップでは、プラントの最終 ヒートシンクが大気である崩壊熱除去機能に着目して評価を実施するため、主に気象など プラントの上方からのハザードを選定し、それ以外の事象は別途評価とする。最後のステ ップとして、プラントに及ぼす影響の観点から類似する外部ハザードを1つにまとめ、本 研究で対象とする PRA の評価が必要な外部ハザードを選定する。

以上のスクリーニングにより、本研究で検討すべき PRA の評価が必要な外部ハザードは 以下の 6 つの事象及び重畳事象に選定された。

- Strong winds (e.g. hurricane, cyclone, typhoon)/強風(暴風、温帯性低気圧、 台風等)
- Tornado/ 竜巻
- ・Extreme rain/極端な降雨
- ・Extreme snow pack (including snow storm) /極端な積雪
- Volcanic phenomena/火山現象
- ・Forest fire/森林火災
- Any combination of the above as a result of a common initiating event
  /外部ハザードリストの中の任意の重畳事象

# 3.1.6.6 一般的なマージン評価手法の開発(H25)

- (1) 外部ハザードの特徴と指標
- a. 地震

地震については地震加速度、津波については津波高さを指標としてマージンを評価して いる。地震の場合、発生から極めて短時間のうちに地震が到来することから、プラント作 業員は発生直後に地震による影響を防ぐ(例えば、サポートを追加して耐震補強する)こ とはできない。大小の地震波が到来することになるが、本震の地震加速度は余震と比べて 相対的に機器の健全性に影響が大きいことから、本震の地震加速度が地震ハザードの指標 となる。つまり、短時間で地震加速度というハザード強度のみに着目すればよい。
# b. 津波

津波の場合、地震発生後数分から数時間で津波が到来する。プラント作業員は地震後に 津波到来を認識し退避等は可能であるが、地震発生直後に津波による影響を防ぐ(例えば、 防潮堤を設ける)ことはできない。津波による損傷モードは、被水・没水、波力、洗掘、 漂流物衝突、海底砂移動による閉塞等が挙げられるが、これらに影響する津波ハザードの 指標は津波水位である。つまり、地震と同様に、津波の場合も短時間で津波水位というハ ザード強度のみに着目すればよい。

#### c. 積雪

積雪の場合、降雪が数日にわたって継続することになり、プラント作業員は除雪により プラントへの影響を軽減できる。プラントへの影響は積雪荷重による構造損傷や積雪によ る空気取入口閉塞といった機能損傷が挙げられ、降雪速度(日降雪深)と降雪継続時間の 積である積雪深で評価できる。ただし、除雪作業は時間依存であることを考慮すると、降 雪の時間依存性を取り入れて評価する必要がある。つまり、積雪の指標は降雪速度と降雪 継続時間の組み合わせで表され、長時間で積雪深というハザード強度と降雪速度というハ ザード進展速度と降雪の継続時間に着目すればよい。

# d. 竜巻

竜巻の場合、発生から数分ないし数十分で到来すると考えられ、津波と同様に、プラン ト作業員は発生後に竜巻到来を認識し退避等は可能であるが、竜巻発生直後に竜巻による 影響を防ぐ(例えば、飛来物からの防護壁を設ける)ことはできない。竜巻の強度は一般 に被災状況から判断される Fujita スケール(Fスケール)で表されることが多いため、 竜巻ハザードの指標はFスケールとなる。つまり、津波と同様に、竜巻の場合も短時間で Fスケールというハザード強度のみに着目すればよい。

#### e. 強風

強風の場合、竜巻に比べると、発生から到来までに時間はかかり到来後も数時間は継続 すると考えられる。しかし、プラント作業員は強風発生直後に強風による影響を防ぐ(例 えば、飛来物からの防護壁を設ける)ことはできない。強風は数時間にわたるため長時間 事象と言えるかもしれないが、強風による損傷モードは風荷重や飛来物衝突によるものと 考えられるため、強風の指標は風速となる。つまり、風速というハザード強度のみに着目 すればよい。

# f. 降雨

降雨の場合、積雪と同様に、通常は発生から到来までに時間がかかり到来後も数日は継 続すること考えられる。プラント作業員は排水によりプラントへの影響を軽減できること から、積雪と同様に、降雨の指標は降雨速度(日降水量)と降雨継続時間の組み合わせで 表され、降水量というハザード強度と降雨速度というハザード進展速度と降水の継続時間 に着目すればよい。

## g. 火山灰

火山灰の場合、積雪と同様に、通常は発生から到来までに時間がかかり到来後も数日は 継続すること考えられる。プラント作業員はある時間内でのフィルタ交換によりプラント への影響を軽減できることから、火山噴火の降灰の指標は降灰速度(日降灰量)と降灰継 続時間の組み合わせで表され、降灰量というハザード強度と降灰速度というハザード進展 速度と降灰の継続時間に着目すればよい。

#### h. 森林火災

森林火災の場合、発生から到来までに数十分から十数時間はかかり、到来後も数時間は 継続すると考えられる。しかし、プラント作業員あるいは消防署員は消火により、火災の 到来を防ぐ、あるいはプラントへの影響を軽減できる。森林火災のハザード強度は火線強 度、ばい煙量、飛散物量といったものが考えられるが、消火には継続時間が重要であるた め、森林火災の指標は火線強度、ばい煙量又は飛散物量というハザード強度と継続時間に 着目すればよい。

## (2) マージン評価手法

外部ハザード評価は成熟しておらず、定量化に不確実さが大きい場合は PRA に代わる手 法として確率に依拠しない手法が有効である。つまり、外部ハザードを定量化できない場 合、本事業で開発するマージン評価手法を活用できる。

前節で述べたように、外部ハザードの特徴は継続時間の有無で大別できる。ハザード継 続時間が重要でなければ、ハザード強度を指標としたマージン評価手法を適用すればよい。 一方、継続時間が重要であれば、ハザード進展速度と継続時間を指標としてマージン評価 手法を適用すればよい。

ハザード強度を指標としたマージン評価手法は、機器別に損傷に至ると考えられるハザ ード強度を表形式で整理するものである。一方、ハザード進展速度と継続時間を指標とし たマージン評価手法は、機器別にハザード進展速度に対する継続時間をマージンとして表 形式で整理するものである。

マージン評価にあたっては、機器別に評価するだけでなく、事象シーケンスを分析して 炉心損傷に至る可能性のあるマージンを定量的に評価することが重要である。そこで、シ ーケンス別のマージン評価手法は、炉心損傷に至るイベントツリーを作成し、それに従っ て各分岐に割りあてられる機器別のマージン評価結果を用いて、最もマージンの小さなも のを選定する。これによりシーケンス毎にマージンを評価できる。

# 3.1.6.7 積雪に対するマージン評価手法(H25)

#### (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

積雪の重要パラメータは、日降雪深で表される降雪速度、積雪深を日降雪深で除することで表される降雪継続時間、積雪深に積雪密度を乗ずることで表される積雪重量である。 一方、原子炉補助建物の耐震壁は積雪深十m程度に耐えられることから、積雪重量は除熱 失敗への寄与が相対的に小さいと考えられる。これを踏まえて、降雪速度と降雪継続時間 に考慮すべき指標を限定し、ある降雪速度で生じる積雪に対するマージンを降雪継続時間 で表す。

#### (2) 機器別のマージン評価

除雪にはアクセスルート確保が必要なため、ここでは積雪深が 1m に到達した場合にア クセスルート確保失敗と仮定した。最終ヒートシンクである補助冷却設備の空気冷却器空 気取入口とメンテナンス冷却系の空気冷却器空気取入口は高い位置に設定されていること を踏まえ、ここではマージンを保守的に評価するため、それぞれの機能喪失積雪深に 1.5m と 1m を仮定した。また、プラント作業員の1日あたりの除雪作業割合は 1/3 (8 時 間)と仮定して、マージン評価を実施した。

機能喪失積雪深が 1m の場合、降雪速度が 1m/day のとき、除雪速度 3m/day (実効除雪 速度 1m/day) 以上であれば機能喪失には至らないが、2m/day では 3 日のマージンになる。 降雪速度が 3m/day のとき、除雪速度 6m/day (実効除雪速度 2m/day) で1日のマージンに なる。このように極めて厳しい降雪の場合にはマージンが小さくなることから、除雪作業 割合を増加するなどの除雪のための体制強化を図ることが重要である。

#### (3) シーケンス別のマージン評価

除雪あるいはヒーターによる融雪がなければ、最終ヒートシンクの空気取入口は積雪に より閉塞し、除熱失敗に至ることが考えられる。最終ヒートシンクには補助冷却設備とメ ンテナンス冷却系があるが、メンテナンス冷却系(1m)が閉塞したとしても補助冷却設備 (1.5m)が閉塞しなければ炉心損傷には至らない。つまり、補助冷却設備(1.5m)が閉塞 して初めて炉心損傷に至るシーケンスが現れる。これらを考慮してイベントツリーを構築 した。以下に示すように、イベントツリーに示したシーケンスのうちシーケンス 1~5 と 9 は、アクセスルート確保には成功するが補助冷却設備の除雪に失敗し除熱失敗になる場 合である。シーケンス 6~8 は、アクセスルート確保に失敗しその後は補助冷却設備で積 雪し除熱失敗になる場合である。

シーケンス1:補助冷却設備による除熱失敗(強制循環)

シーケンス2:補助冷却設備による除熱失敗(強制循環)

シーケンス3:補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)

シーケンス4:補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)

シーケンス5:補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)

シーケンス6:アクセスルート確保失敗+補助冷却設備による除熱失敗(強制循環)

シーケンス7:アクセスルート確保失敗+補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)

シーケンス8:アクセスルート確保失敗+補助冷却設備による除熱失敗(自然循環)

シーケンス9:補助冷却設備による除熱失敗

降雪速度が 1m/day のとき、除雪速度 2m/day(実効除雪速度 0.67m/day)の場合、機器

別評価では 1.5day だったが、シーケンス別評価では 1.3day とマージンが小さくなる。シ ーケンスを考えることにより、炉心損傷に至る可能性のあるマージンを評価することがで きるようになった。

## 3.1.6.8 竜巻に対するマージン評価手法(H25)

# (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

重要パラメータは風圧(風荷重)、気圧差、及び飛来物が挙げられる。風圧により機器・設備の破損確率(フラジリティ)を評価すると、現実的な風速では原子炉補助建物崩壊には至らないことから、風圧によりプラントに影響があるとは考えにくい。竜巻風速から得られる気圧差を用いて機器・設備の破損確率を評価すると、F5 スケールでも補助冷却設備やメンテナンス冷却系の排気ダクトは部分的な変形の可能性はあるが通風遮断のような変形はないことから、気圧差によりプラントに影響があるとは考えにくい。飛来物については、地上資材等の物体が浮き上がり、その物体が崩壊熱除去系の空気冷却器開口部に衝突・侵入し、開口部内の設備が飛来物衝突により破損するシナリオが考えられる。また、屋上の配管等の機器が破損あるいは屋上資材等の物体が崩壊熱除去系の空気冷却器開口部に衝突・侵入し、開口部内の設備が飛来物衝突により破損するシナリオが考えられる。よって、マージン評価にあたっては、飛来物衝突について評価した。

## (2) 機器別のマージン評価

崩壊熱除去機能維持に必要な重要設備は、崩壊熱除去設備としての補助冷却設備とメン テナンス冷却系、電源確保のための非常用ディーゼル発電機、換気空調系と非常用ディー ゼル発電機用燃料タンクが挙げられる。補助冷却設備とメンテナンス冷却系は原子炉補助 建物の屋上(数十m位置)に設置されており、飛来物がそれらの吸排気口から侵入して衝 突すれば、空気冷却器伝熱管が破損する可能性がある。換気空調系も屋上に設置されてお り同様のことが考えられる。非常用ディーゼル発電機は地上から数m~十m程度の位置に 空気取入口が設置されており、開口部への飛来物の侵入・衝突が考えられる。燃料タンク は原子炉補助建物に近接して地上設置されているため飛来物の衝突が考えられる。

飛来物候補は、敷地内にあると想定される自動車、コンテナ、鋼製パイプ、鉄鋼材、砂 利が考えられる。これら地上飛来物に対して、原子炉補助建物屋上で飛来物候補となるの は機器破損物あるいは保管資材と考えられるため、鋼製パイプと鉄鋼材を想定した。

地上飛来物は重要設備高さまで浮き上がらない限り、重要設備の破損に至らない。そこ で、F スケールに対する飛来物の浮き上がり高さを求めて、重要設備高さに到達する F ス ケールと飛来物を整理した。補助冷却設備は屋上高さのため重量物が浮き上がることはな く、砂利が F4 スケール以上で飛来する可能性がある。一方、燃料タンクは地上付近にあ るため砂利が F2 スケール以上で、自動車が F5 スケールで飛来する可能性があることを示 している。

機器別のマージン評価は、地上飛来物の浮き上がりとそれによる設備の破損可能性を考 慮するものと、屋上飛来物による設備の破損可能性を考慮するものの2種類で表される。 地上飛来物と屋上飛来物による各設備のマージンとしてFスケールで整理した。崩壊熱除 去設備は屋上に設置されているため、地上飛来物に対しては竜巻に対する耐性が高い。一 方、屋上飛来物については比較的小さな竜巻で損傷する可能性がある。屋上では飛来物に ならないように資材保管などしないといった対策が有効であることを示唆している。

## (3) シーケンス別のマージン評価

地震・津波と異なり、竜巻による飛来物はランダムに衝突するため、電源確保に必要な 設備と最終ヒートシンクを同時に破損させることはないことから、独立破損を想定する。 すなわち、以下の成功基準を設定できる。

・メンテナンス冷却系の強制循環成功

・補助炉心冷却設備の強制循環成功(3系統のうち1系統成功でよい)

・補助炉心冷却設備の自然循環成功(3系統のうち1系統成功でよい)

地上飛来物による事象シーケンスを考慮した竜巻に対するイベントツリーで、メンテナ ンス冷却系が機能喪失に至ったとしても補助冷却設備による除熱が期待できることから、 補助冷却設備3系統のイベントツリーを展開した。地上飛来物による影響を考えるため、 屋上構造物破損を考慮する必要はなく、そのシーケンスは無視できる。屋上飛来物による 事象シーケンスを考慮した竜巻に対するイベントツリーでも、補助冷却設備による除熱が 期待できることから、補助冷却設備3系統のイベントツリーを展開した。屋上飛来物は屋 上構造物破損により生成されると仮定しているため、屋上構造物破損がないというシーケ ンスは無視できる。地上飛来物によるイベントツリーと同様に、機器別マージン評価で得 たFスケールを追記することで評価できた。

地上飛来物によるイベントツリーを展開した結果、除熱失敗シーケンスは現れないこと が分かった。これは地上飛来物が補助冷却設備高さまで飛散しない、あるいは飛散して設 備に衝突しても設備が破損しない程度の軽い飛来物だからである。

屋上飛来物によるイベントツリーに対しては、メンテナンス冷却系損傷に加えて、補助 冷却設備損傷を仮定した場合でも除熱失敗シーケンスは現れない。これは、竜巻による設 備破損は独立破損を仮定しているため、補助冷却設備A系が破損したとしてもB系1系統 による除熱が可能であるからである。仮に、更にB系が破損したとしてもC系1系統によ る除熱が可能であるから、除熱失敗シーケンスは現れない。以上から、同時破損を考慮す る必要がない竜巻の場合、除熱失敗シーケンスは現れないと言える。

極めて起こりがたいが、メンテナンス冷却系と補助冷却設備の4系統全てが破損する場合に限り、除熱失敗シーケンスは現れる。F3スケールで屋上構造物破損により生じた屋上飛来物によって補助冷却設備全系統及びメンテナンス冷却系の空気冷却器の全てがF1スケールで破損するシーケンスが考えられ、その場合はマージンがF3スケールとなる。 仮に1系統でも空気冷却器のマージンがF1からF5以上へ強化されたならば、F4スケール未満では崩壊熱除去機能は維持され、F4スケールで初めて全ての空気冷却器排気ダクトが破損することから、マージンはF4スケールに増加する。

以上から、屋上飛来物に対しては比較的マージンが小さいことが分かったため、屋上飛 来物が生じないような対策を講ずることが有効であると言える。

## 3.1.6.9 強風に対するマージン評価手法(H26)

# (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

強風により影響を受ける崩壊熱除去機能は、風圧(風荷重)により機器が構造損傷する 場合、気圧差により機器が構造損傷あるいは圧力調整機能を喪失する場合、強風により飛 散する飛来物により機器が構造損傷する場合が考えられる。前者2つは、瞬間風速で評価 するわけではなく比較的長時間を必要とするのに対して、後者の飛来物は瞬間風速のよう な比較的短時間の風によって飛散すると考えられる。したがって、強風ハザードの重要パ ラメータは最大風速と最大瞬間風速となる。

#### (2) 強風により影響を受ける崩壊熱除去機能に関する重要機器の同定

強風による崩壊熱除去機能喪失は、風圧、圧力差、飛来物衝突による機器の構造損傷が 考えられる。崩壊熱除去機能に関する重要機器は直接的に影響するもの以外に、直接的に は崩壊熱除去機能に関する設備ではないが、強風により破損すると2次的に崩壊熱除去機 能喪失に波及する恐れのある機器がある。平成25年度には、強風により影響を受ける可 能性がある重要機器として以下を同定した。

- 外部電源設備
- · 排気塔
- ・原子炉補助建物(崩壊熱除去系設備の健全性維持)
- ・補助冷却設備(外気の吸排気)
- ・メンテナンス冷却系(外気の吸排気)
- ・非常用ディーゼル発電機(外気の吸排気)
- ・非常用発電に必要な燃料タンク
- ・換気空調系(外気の吸排気、電源設備の冷却)

## (3) 機器別のマージン評価

### a. マージンの定義

崩壊熱除去機能維持に必要な補助冷却設備とメンテナンス冷却系の吸排気口は原子炉補助建物の屋上(数十m位置)に設置しており、飛来物がそれらの吸排気口から侵入して衝突すれば、空気冷却器伝熱管が破損する可能性がある。換気空調系の吸排気口も屋上に設置されており同様のことが考えられる。非常用ディーゼル発電機は地上から数m~十m程度の位置に空気取入口が設置されており、開口部への飛来物の侵入及び衝突が考えられる。燃料タンクは原子炉補助建物に近接して地上設置されているため飛来物の衝突が考えられる。

飛来物候補には敷地内にあると想定される自動車、コンテナ、鋼製パイプ、鉄鋼材、砂 利が考えられる。また、強風の場合は、頻度及び影響を考慮に入れて支配的な風向きは山 側(南、南南東の方向)からの風であると考えられる。この場合、山側に位置する森林の 多くの木材が飛来物化する可能性がある。また、強風は数日間も継続することが考えられ るため、作業員によるアクシデントマネジメントが困難である可能性に留意する必要があ る。 強風による崩壊熱除去機能喪失には、風圧、圧力差、飛来物衝突による機器の構造損傷 が考えられ、機器別のマージン評価では、これらによる機器の構造損傷に至らしめる最大 風速あるいは最大瞬間風速をマージンと定義した。

# b. 風圧による破損

## (a) 風圧により破損する可能性のある機器

風圧により破損する可能性のある機器・設備は、外部電源設備、排気塔、原子炉補助建物が挙げられる。

## (b) 風圧による破損評価

# 外部電源喪失

鉄塔の崩壊や開閉所の損傷など様々な要因によって外部電源を喪失しているため、 ここでは、後述の飛来物による損傷評価と比較しやすいように、最大瞬間風速で整理 した。最も低い風速は 54 m/s であるため、これが外部電源設備のマージンとなる。

# ・排気塔の倒壊による崩壊熱除去機能(一部)喪失

別途、排気塔への風圧について構造評価を行った結果、支持鉄塔主柱材部について、 許容応力度比が 69m/s で 0.38、100m/s で 0.74 との一例がある。本研究では、この結 果を踏まえて排気塔を倒壊させる風速を算定することとした。風速による圧力は風速 の二乗に比例し、風速 0 m/s で極小となる対称曲線になると仮定すると、許容応力度 比が 1.0 になる風速は 117 m/s と算出される。ただし、この評価には保守的な想定が 含まれているため、この 117 m/s と許容応力度比が 2.0 となる 168 m/s の平均値相当 で破損すると想定すると、それらの平均値の 143 m/s がマージンと算定される。

排気塔が倒壊した場合、補助冷却設備及びメンテナンス冷却系の吸排気口に影響す ることが想定される。しかしながら、崩壊熱除去系の設備は系統間で分散配置を想定 するため、排気塔倒壊によって崩壊熱除去系の系統が全て同時に機能喪失に至ること はないと考えられる。

#### ・原子炉補助建物倒壊による崩壊熱除去機能喪失

風圧に対する原子炉補助建物の壁の破損確率を評価した。その結果、極めて高い風 速と評価され、現実的な風速の範囲では原子炉補助建物が倒壊することはないほどマ ージンは大きい。

# c. 気圧差による破損

#### (a) 気圧差により破損する可能性のある機器

高速炉の崩壊熱除去系に対して想定される事象は、補助冷却設備及びメンテナンス 冷却系の排気ダクト変形閉塞が挙げられる。

# (b) 気圧差による破損評価

平成25年度に実施した評価結果では、気圧差による圧力荷重での部分的なダクト 変形はありえるが、工学的に変形閉塞あるいは設備破損の可能性は小さいと判断でき、 本評価では、気圧差による排気ダクト変形閉塞は発生しないと仮定した。

# d. 飛来物による破損

#### (a) 飛来物による影響モード

飛来物が原子力発電所へ与える影響モードは、大きく分けて以下の3つに分けられ ると考えられる。

- ・大きな運動量を持つ飛来物の地上平行移動による原子炉補助建物の裏面剥離
- ・補助冷却設備及び/またはメンテナンス冷却系の空気冷却器の吸気口、排気口等の開口部に飛来物が侵入することによる、崩壊熱除去系に係る重要機器・設備の機能喪失
- ・原子炉補助建物外の燃料タンクなどの設備に飛来物が衝突し、機能喪失

#### (b) 飛来物の候補

平成25年度に選定したように、発電所敷地内で飛来物になる可能性のあるものに 加えて、発電所周辺にある山側森林からの木を想定した。以降、具体的には以下の括 弧内の物を飛来物と想定する。

- ・大きな運動エネルギーを持つ飛来物(自動車、コンテナ)
- ・施設の貫通抵抗を確認するための固い飛来物(鋼製パイプ、鋼製材)
- ・開口部等を通過することができる程度に小さくて固い飛来物(砂利等)
- ・高所からの飛来物(山側森林からの木)

## (c) 飛来物により破損する可能性のある機器

崩壊熱除去機能に関係する機器・設備のうち、飛来物に影響されるものとして以下 が想定される。本評価では、各機器の設置高さは、燃料タンク及びディーゼル発電機 が地上数m、それ以外は数十mを想定した。

#### 補助冷却設備

山側からの飛来物は、補助冷却設備の空気取入口から侵入し、空気冷却器あるいは 2次ナトリウム配管に衝突することでそれらを破損し、補助冷却設備が機能喪失に至 る可能性がある。特に、山側のうち、屋上より高い位置からの飛来物については、屋 上に配置する排気ダクト側から侵入し、空気冷却器内の伝熱管に衝突することで伝熱 管が破損し、補助冷却設備が機能喪失に至る可能性も考えられる。ただし、3 系統あ るため、1 系統でも健全であれば除熱可能である。

## ・メンテナンス冷却系

山側からの飛来物は、その角度からメンテナンス冷却系の空気取入口側に侵入できないと考えられる。屋上高さより高い位置の山側からの飛来物については、落下して

# 3.1.6-11

きた飛来物が排気ダクト側から侵入し、空気冷却器内の伝熱管に衝突することで破損し、メンテナンス冷却系が機能喪失に至ることが考えられる。

# ・ディーゼル発電機

ディーゼル発電機の空気取入口から飛来物が侵入し、ディーゼル発電機に衝突、破 損し、機能喪失に至ることが想定される。本評価では外部電源は喪失すると想定する ため、ディーゼル発電機が機能喪失すれば、電源は全て機能喪失し、補助冷却設備及 びメンテナンス冷却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、自然循環に よる崩壊熱除去に期待できる。

## ・換気空調系の出入ロダクト

屋上高さより高い位置の山側からの飛来物については、落下してきた飛来物が排気 ダクト側から侵入し、主要な機器に衝突することで破損し、換気空調系が機能喪失に 至ることが考えられる。本評価では外部電源は喪失すると想定するため、換気空調系 が機能喪失すれば、電源の配電設備が機能喪失するため、補助冷却設備及びメンテナ ンス冷却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、自然循環による崩壊熱 除熱に期待できる。

# ・ディーゼル発電機燃料タンク

ディーゼル発電機用の燃料タンクに飛来物が衝突し、燃料が流出する可能性がある。 これによりディーゼル発電機が機能喪失に至ることが考えられる。さらに、流出した 燃料が燃焼した場合、燃焼に伴う高温の外気が補助冷却設備の空気取入口へ流入する ことで外気による冷却機能を喪失する影響が考えられる。本評価では外部電源は喪失 すると想定するため、ディーゼル発電機の燃料タンクが機能喪失すればディーゼル発 電機は運転できないため、電源は全て機能喪失し、補助冷却設備及びメンテナンス冷 却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、自然循環による崩壊熱除熱に 期待できる。

#### (d) 飛来物速度の算定

竜巻での飛来物評価と同様の手法で飛来物の飛来速度を求める。竜巻評価ガイド [3.1.6-9]においては飛来物の抗力係数は空力パラメータ*C<sub>D</sub>A/m*と呼ばれ、次式で表 される。

$$\frac{C_D A}{m} = 0.33 \frac{C_{D1} L_2 L_3 + C_{D2} L_1 L_3 + C_{D3} L_1 L_2}{m}$$
(3. 1. 6-1)

ただし、mは飛散物の質量、 $C_D$ は抗力係数、Aは飛来物が風を受ける面積、Lはその面積の1辺の長さである。

## (e) 原子炉補助建物の裏面剥離

大きな運動量を持つ飛来物が、原子炉建物の壁に衝突し、原子炉建物の内側の壁が

### 3.1.6-12

破壊され、その破壊された壁のコンクリートの塊が新たな飛来物(裏面剥離して飛来物化)となり、原子炉補助建物内にある機器・設備に2次被害を与える可能性がある。 そこで、以下の Chang の式[3.1.6-10]を用いて、裏面剥離限界厚さを求めて、それに 相当する風速をマージンと定義する。

$$t_{s} = \alpha_{s} 1.84 \left(\frac{200}{V}\right)^{0.13} \frac{\left(MV^{2}\right)^{0.4}}{\left(D/12\right)^{0.2} \left(144F_{c}\right)^{0.4}}$$
(3. 1. 6-2)

ただし、 $t_s$ は裏面剥離限界厚さ[ft]、 $\alpha_s$ は飛来物低減係数、Vは飛来物の衝突速度 [ft/s]、Mは飛来物の質量[lb/(ft/s<sup>2</sup>)]、Dは飛来物の直径[in]、 $F_c$ はコンクリー ト強度[psi]である。

本研究では、文献[3.1.6-11]を参考として、前節の飛来物のうち、裏面剥離で影響の大きな鋼製材を想定して評価した。建物のコンクリート厚さを 70 cm と仮定してみると、飛来物の衝突速度 100 m/s に相当する風速 180 m/s がマージンと算定される。

高速炉は、崩壊熱除去に必要な重要機器(例えば、空気冷却器)は原子炉補助建物 の上部にあるため、裏面剥離が仮に発生したとしても重要機器・設備に影響を与える 可能性は小さいと考えられる。

#### (f) 飛来物衝突による破損評価

飛来物が衝突した時に鉄板を貫通させない限界厚さ(貫通限界肉厚)と各飛来物の 衝突速度との関係を BRL 式[3.1.6-11]と呼ばれる評価式から評価する。

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2d^{3/2}} \tag{3. 1. 6-3}$$

ここで、Tは鉄板厚さ[in]、Mは飛来物の質量[lb/(ft/s<sup>2</sup>)]、Vは飛来物の衝突速 度[ft/s]、dは飛来物の直径[in]、Kは鋼板の材質に関する係数=1.0。また、衝突 速度は飛来物速度と等しいと仮定する。また、想定した肉厚を限界肉厚と仮定し、そ の肉厚に対する各飛来物の衝突速度を求め、それに相当する風速が得られる。本研究 では、評価対象とする機器に対する肉厚を5種類に代表させて評価することとした。

# e. 機器別のマージン評価

飛来物衝突による破損を想定すべき機器は、補助冷却設備、メンテナンス冷却系、燃料 タンク、非常用ディーゼル発電機、換気空調系である。これらのうち一部は、建物の中に 収納されており、飛来物が幾重の壁を破損させて、崩壊熱除去機能を喪失させる部位に到 達することになる。飛来物がこれらの肉厚を破損させるには、最も厚い肉厚を破損させる 必要があることから、その最大厚みを代表させて貫通限界肉厚に相当する風速を算定する こととした。

飛来物のうち、砂利による破損はあり得ないことが分かる。重要機器の設置高さを考え ると、コンテナと自動車が衝突することはありえない。鋼製パイプと鋼製材は屋上資材が 飛散するなどを考えれば、重要機器を破損させる可能性があるため、屋上資材の固縛など を検討する必要がある。燃料タンクは地上に設置しているため、比較的低い風速で飛来物

### 3.1.6 - 13

による破損に至る可能性があるため、地上に資材を保管しない方がよいことを示唆してい る。ここでは、屋上あるいは地上に仮置き資材を保管していない想定でマージン評価を行 う。竜巻評価では 70 m/s 以下では飛来物は浮き上がることはない。また、強風の場合は プラントの上方から飛来するものは木材しか考えられないことから、本研究では飛来物と して木材のみがマージン評価の対象となる。

上述の風圧・気圧差・飛来物による破損評価をまとめると、外部電源設備が最もマージンが小さいことが示された。次に、小さなマージンを示しているのは、補助冷却設備の空気冷却器(吸気部)で135 m/s であるが、最大瞬間風速の過去最大値42 m/s(最大風速の過去最大値:24 m/s)に比べれば、3.2 倍のマージンを有している。原子力施設内の重要機器のマージンは大きいことが示された。

# (4) シーケンス別のマージン評価

対象とする崩壊熱除去系は、補助冷却設備の強制循環冷却を基本とし、3 系統のうち 1 系統の成功で崩壊熱除去が可能な能力を有する。強制循環除熱喪失した場合であっても、 3 系統のうち 1 系統の自然循環除熱に期待できる。また、別系統のメンテナンス冷却系の 強制循環除熱にも期待できる。すなわち、以下の成功基準を設定できる。

・補助冷却設備の強制循環成功(3系統のうち1系統の成功でよい)

- ・補助冷却設備の自然循環成功(3系統のうち1系統の成功でよい)
- ・メンテナンス冷却系の強制循環成功

強風時における崩壊熱除去系の機能喪失要因を分析した上で、イベントツリーを構築し た。イベントツリーのヘディングの各設備の下部には機器別マージン評価で得たマージン を示している。強風時には飛来物により燃料タンクで火災が生じた際に長時間にわたり外 気温度が上昇することによって最終ヒートシンクが喪失すると仮定するため、「燃料タン ク火災による共通要因故障」を取り入れた。これは現実的には発生するとは考えられない が、現段階で詳細評価を実施していないため、念のため追加的に取り入れたシーケンスで ある。

このイベントツリーでメンテナンス冷却系が機能喪失に至ったとしても補助冷却設備に よる除熱が期待できることから、補助冷却設備3系統のイベントツリーを展開した。地 震・津波と異なり、強風による飛来物はランダムに衝突し、衝突確率は低いため、電源確 保に必要な設備と最終ヒートシンクを同時に破損させることはない。本評価により、強風 の場合には、ほとんどの場合において除熱失敗シーケンスは現れないことが分かる。極め て起こりがたいが、メンテナンス冷却系と補助冷却設備の4系統全てが破損する場合には、 除熱失敗シーケンスが現れる。補助冷却設備の吸気側のマージンで制限され、135 m/s が マージンとなる。補助冷却設備は電源がなくても自然循環冷却ができるため、仮に1系統 でも135m/s 以上の風速に耐えられるように強化されれば、崩壊熱除去機能は維持され、 マージンは更に増加することが可能である。

極めて起こりがたいが、燃料タンク火災時に外気温度が上昇し、長時間にわたり補助冷 却設備の入口側外気温度が高い場合には、除熱失敗シーケンスが現れる。この場合は、燃 料タンク健全性のマージンで制限され、135m/s がマージンとなる。実際には、外気温度

#### 3.1.6-14

が長時間継続するとは考えにくいため、除熱失敗シーケンスは現れない。仮に外気温度が 高くなっても原子炉停止後の1次系ナトリウム温度は十数時間かけて昇温していくため炉 心損傷までには余裕時間がある。その余裕時間以内であれば、除熱失敗シーケンスは現れ ない。

#### 3.1.6.10 異常降雨に対するマージン評価手法(H26)

## (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

降雨の場合、積雪と同様に、通常は発生から到来までに時間がかかり到来後も数日は継 続すること考えられる。プラント作業員は排水によりプラントへの影響を軽減できること から、積雪と同様に、降雨の指標は降雨速度(日降水量や1時間降水量)と降雨継続時間 の組み合わせで表され、ハザード進展速度と降雨の継続時間に着目すればよい。降雨の場 合は荷重による構造物の破損は考えにくいため、没水や被水による機器故障が考えられる。

## (2) 機器別のマージン評価

#### a. 重要機器

異常降雨時に崩壊熱除去に必要な重要機器は次のとおり。

- ・排水設備(原子炉補助建物の屋上及び地上に配置されていると仮定)
- ・海水ポンプ
- ・電気設備室
- ・メンテナンス冷却系
- ·補助冷却設備
- ・ディーゼル発電機

各機器は没水により機能喪失すると考え、それぞれの機能喪失する水位は次のとおり。 排水設備の機能喪失は後述のようにパラメータとして扱い、屋外にある海水ポンプは 1.2m、屋上からの浸水を考えた電気設備室は 1m で機能喪失すると考え、ここではメンテ ナンス冷却系に代表させる。補助冷却設備は 3m と仮定した。ディーゼル発電機は建物内 のディーゼル発電機室への侵入を考慮して機能喪失すると考えた。

# b. 定式化

通常、建物やその周辺には排水設備が設置されており、降雨時に雨が溜まることはない。 本評価では、設計上の排水設備の排水能力を 140mm/hr と仮定し、過去最大の降水量でも 排水に問題ないと考えられる。しかし、異常降雨時には小枝や落ち葉といったゴミが大量 に排水設備に流れ込み、排水設備が閉塞する可能性がある。プラント作業員は排水設備の 閉塞物を除去し、排水能力を維持しようとすると想定される。極端な降雨環境では閉塞物 除去作業は困難になると考えられ、排水能力は低下すると想定される。そこで、本評価で は、排水能力係数を導入してマージン評価を行うこととする。ただし、排水能力が低下し ても、1 時間降水量が少なければ浸水することはないため、排水能力が 1 時間降水量を下 回った時のマージンを評価する必要がある。

異常降雨時の水位 h (m) は、1 時間降水量 P (mm/hr) と排水設備の排水能力

### 3.1.6 - 15

 $W_{
m 140}$  (mm/hr) に排水能力係数 $\varphi$ を乗じたものの差に降雨継続時間  $T_{
m margin}$  を乗ずることにより得られる。

$$h = (P - W_{140}\varphi) \times T_{margin} / 1000$$
(3. 1. 6-4)

この水位が前節の機能喪失する水位を上回る場合、除熱機能喪失に至ると考えられる。その機能喪失に至るまでの降雨継続時間を猶予時間、すなわちマージンとして定義できる。 機能喪失水位  $h_{failure}$  (m) に到達すれば除熱機能喪失と判断でき、次式で表される。

$$(P - W_{140}\varphi) \times T_{margin} \le h_{failure}$$

$$(3. 1. 6-5)$$

よって、機器別のマージン  $T_{margin}$  (hr) は次式で表される。

$$T_{margin} \le h_{failure} \times 1000 / (P - W_{140}\varphi) , \quad if W_{140}\varphi \le P$$
 (3.1.6-6)

$$T_{maroin} = \infty$$
 , if  $W_{140} \varphi > P$  (3.1.6-7)

屋外の場合、排水設備がなくても低位方向(海側)に流れていくと考えられる。200mm/hr であっても排水できるとのことから、屋外水位係数 **¢** を導入する。よって、海水ポンプ は次式でマージンを評価できる。

$$T_{marein} \le h_{failure} \times 1000 / \phi (P - W_{140} \varphi) , \quad if W_{140} \varphi \le P$$
 (3.1.6-8)

ディーゼル発電機の場合は、ディーゼル発電機建物に一旦浸水してからディーゼル発電機 室へ水が浸入していくと考えられ、ディーゼル発電機室への侵入量 を $W_{EDG}$  (mm/hr) と すると、マージンは次式で表される。

$$T_{margin} \le h_{failure} \times 1000 / W_{EDG} , \quad if W_{140} \varphi \le P$$

$$(3. 1. 6-9)$$

# c. マージン評価

機器別のマージンとして、1 時間降水量に対する屋上設置機器の猶予時間を評価した結 果、例えば、150mm/hr を見ると、閉塞がない想定である排水能力係数 1.0 の場合、メン テナンス冷却系と補助冷却設備はそれぞれ 100 時間と 300 時間であり、マージンは非常に 大きい。一方、排水能力係数 0.1 の場合、それぞれ 7.4 時間と 22 時間になり、マージン はかなり小さくなり、排水能力係数の感度が高いことが分かった。

# (3) シーケンス別のマージン評価

#### a. イベントツリー

降雨に対するイベントツリーはそれぞれ屋外排水と屋上排水に着目して構築した。排水 設備の閉塞防止とはマージン評価では排水能力係数で表している。また、事象シーケンス 評価では、補助冷却設備は屋上での浸水による機能喪失とダンパ手動調整失敗を考慮した が、マージン評価では屋上での浸水のみを考慮する。ディーゼル発電機浸水の場合は補助 冷却設備が浸水していなければ自然循環により除熱可能である。海水ポンプ浸水の場合も 同様に除熱可能である。電気設備室及びメンテナンス冷却系が浸水する場合は補助冷却設備によって自然循環除熱が可能である。

# b. マージン評価

排水能力係数 0.1 と屋外水位係数 0.5 の場合の機器別のマージンを評価した結果、海水 ポンプとメンテナンス冷却系は補助冷却設備より早期に機能喪失に至る。ディーゼル発電 機は補助冷却設備より 40mm/hr 以上では補助冷却設備の方が早いが、それ以下ではほぼ同 じ時期に機能喪失に至ることを示している。したがって、シーケンス別のマージン評価は 補助冷却設備を対象とした機器別のマージン評価結果を代用できる。

なお、本評価では、屋上で排水設備が閉塞して水位が数mに到達することを想定したが、 実際には 1m 未満で建物側壁側に流れ込み、補助冷却設備が浸水することはありえない。 したがって、異常降雨のみの外部ハザードに対して除熱失敗シーケンスは現れない。

# 3.1.6.11 火山噴火に対するマージン評価手法(H26)

# (1) 重要パラメータ(プラントに影響を与える因子)

火山灰の場合、積雪と同様に、通常は発生から到来までに時間がかかり到来後も数日は 継続すること考えられる。主な機能喪失要因は火山灰による空気取入口閉塞であり、建物 に堆積した火山灰の除去やフィルタに吸着した火山灰の除去は有効な対策ではなく、空気 取入口のフィルタの取替えが重要な対策となる。それを考慮すると、フィルタ閉塞(フィ ルタ取替え)に影響を及ぼす重要パラメータは火山灰の大気中濃度と降灰継続時間である。

#### (2)機器別のマージン評価

# a. 定式化

# (a) 大気中濃度

火山灰の大気中濃度は次式で表される。

$$C_{tephra} = \frac{\rho_{tephra} L_{tephra}}{\Delta t_{tephra} V_{tephra}}$$
(3. 1. 6-10)

ただし、 $C_{tenhra}$ は大気中濃度( $kg/m^3$ )、 $V_{tenhra}$ は降灰速度(m/s)、 $\Delta t_{tenhra}$ は降灰継続

時間 (s) 、 $\rho_{tephra}$  は火山灰密度 (kg/m<sup>3</sup>) 、 $L_{tephra}$  は層厚 (m) である。

降灰速度は、火山灰の終端速度とみなすと、火山灰粒子径から下記の沈降速度式により降灰速度を算出できる[3.1.6-12]。

$$V_{tephra} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{c_w} \frac{\rho_{tephra} - \rho_{air}}{\rho_{air}}} d_{tephra}$$
(3.1.6-11)

沈降速度式は火山灰粒子の沈降速度を自由沈降として考えてモデル化されたもので

#### 3.1.6-17

あり、沈降速度は単粒子が静止した気体中を自由落下し、粒子の流体抵抗、重力及び 浮力の間に釣り合いの状態が生じたときの粒子の速度である。ここで、gは重力加 速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)、 $C_w$ は抵抗係数(=0.44)[3.1.6-13]、 $\rho_{air}$ は空気密度 (=1.1kg/m<sup>3</sup>)である。 $\rho_{tephra}$ は粒子密度であり、1,000kg/m<sup>3</sup>を想定した。 $d_{tephra}$ は粒子 径(m)であり、この粒子径によって終端速度は決まる。大気中に浮遊している火山 灰粒径を観測し、粒径分布の中央地は数十 $\mu$ m であると報告されている。例えば、 0.1mmの粒径の場合、約1.6m/sの終端速度となる。

(b) 猶予時間 (マージン)

空気取入口のフィルタ閉塞に至る前に、プラント作業員がフィルタを取り替えれば よいため、フィルタ閉塞に至るまでの猶予時間をマージンと定義する。ただし、その 猶予時間が降灰継続時間より長い場合、フィルタ閉塞に至る前に降灰が終了すること になるため、機能喪失には至らない。つまり、機能喪失となるのは、降灰継続時間よ り猶予時間が短い場合となる。

平成26年度に実施したフィルタ目詰まり試験で、フィルタの破損限界を取得して おり、7kg/m<sup>2</sup>と設定する。各機器の吸込み風量は決まっているため、ある火山灰濃度 で吸い込む場合のフィルタの単位時間あたりの吸着量は、火山灰濃度 $C_{tephra}$ と吸込み 風量 $V_{suction}$ の積で表される。このフィルタ吸着量でフィルタ破損限界 $F_{limit}$ を除すること により、猶予時間 $T_{marein}$ を算出でき、次式で表される。

$$T_{margin} = \frac{F_{limit}}{C_{tephra}V_{suction}}$$
(3. 1. 6–12)

各機器の吸込み風量V<sub>suction</sub>は、ディーゼル発電機が 11,000m/hr、換気空調系が 5,000m/hr、メンテナンス冷却系が 9,067m/hr、強制通風時補助冷却設備が 2,833m/hr である。自然通風時補助冷却設備が 1,250m/hr である。(3.1.6-12) 式に(3.1.6-10) 式を代入すると、次式が得られる。

$$T_{margin} = \frac{F_{limit}}{\rho_{tephra} L_{tephra} V_{suction}} V_{tephra} \Delta t_{tephra}, \quad if T_{margin} \le \Delta t_{tephra}$$
(3. 1. 6–13)

一方、猶予時間が降灰継続時間より長い場合は機能喪失とならないから、次式で表 される。

$$T_{margin} = \infty$$
, if  $T_{margin} > \Delta t_{tephra}$  (3.1.6-14)

# b. マージン評価

各機器の猶予時間(マージン)は、フィルタ破損限界と吸込み風量が定数であるため、 大気中濃度の反比例で表される。機器別のマージンを評価した結果、大気中濃度が高くな るにつれて、猶予時間が短くなる。特に、10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>以上では補助冷却設備でさえも猶予時 間は10時間未満となる。

#### 3.1.6 - 18

## (3) シーケンス別のマージン評価

a. イベントツリー

火山噴火に対するイベントツリーでは、メンテナンス冷却系は検討対象としないことと したが、非常用電源使用時にはポニーモータで冷却するため強制通風を考慮するイベント ツリーとした。機器別のマージン評価から、補助冷却設備は強制通風より自然通風の方が 猶予時間が長くなり、マージンが大きいことを示した。プラント運用を考えれば、強制通 風を停止して自然通風によりフィルタ閉塞までの猶予時間を長くすることも考えられる。 そこで、強制通風停止の判断をイベントツリーに取り入れた。

上記を踏まえて、ここで検討する炉心損傷に至るシーケンスは次のとおりである。

- シーケンス 1:非常用電源が使用可能な状態で強制通風時に補助冷却設備のフィルタ閉 塞(強制循環除熱失敗)
- シーケンス 2:換気空調系フィルタ閉塞に伴う非常用電源喪失によって、強制通風時から自然循環に移行した後、自然通風時に補助冷却設備のフィルタ閉塞 (自然循環除熱失敗)
- シーケンス 3:非常用ディーゼル発電機フィルタ閉塞に伴う非常用電源喪失によって、 強制通風時から自然循環に移行するが、自然通風時に補助冷却設備のフ ィルタ閉塞(自然循環除熱失敗)
- シーケンス 4:強制通風停止の判断により、補助冷却設備自然循環モードに移行した後、 自然通風時の補助冷却設備のフィルタ閉塞(自然循環除熱失敗)

# b. 定式化

シーケンス1及び4は、補助冷却設備の強制通風時と自然通風時の猶予時間となるため、 機器別のマージン評価で得られた猶予時間で代用できる。一方、シーケンス2及び3は、 非常用ディーゼル発電機あるいは換気空調系のフィルタ閉塞による非常用電源喪失が起き るまでは、補助冷却設備は強制循環除熱だが、それ以降は自然循環除熱になることを考慮 する必要がある。すなわち、次式で表される。

$$C_{tephra}V_{suction,ACS-FC}T_{margin,A} + C_{tephra}V_{suction,ACS-NC}T_{margin,B} \le F_{limit}$$
(3. 1. 6–15)

ただし、 $T_{margin,A}$ は非常用電源喪失までの時間(hr)、 $T_{margin,B}$ は非常用電源喪失後の補助冷却設備機能喪失までの時間(hr)、 $V_{suction,ACS-FC}$ と $V_{suction,ACS-NC}$ はそれぞれ補助冷却設備の強制通風時と自然通風時の吸込み風量(m/hr)を表す。ここで、 $T_{margin,A}$ は次式で求められる。

$$T_{margin,A} = \frac{F_{limit}}{C_{tephra}V_{suction,A}}$$
(3. 1. 6–16)

ここで、 $V_{suction,A}$ は非常用ディーゼル発電機あるいは換気空調系の吸込み風量を表す。  $T_{margin} = T_{margin,A} + T_{margin,B}$ の関係から、補助冷却設備機能喪失までのマージンを求めることが できる。よって、シーケンス 1~4 のマージンは次式で表される。 シーケンス 1:

### 3.1.6 - 19

$$T_{margin} = \frac{F_{limit}}{C_{tephra} V_{suction, ACS-FC}}$$
(3. 1. 6–17)

シーケンス2と3:

$$T_{margin} = \frac{F_{limit}}{C_{tephra}} \left( \frac{V_{suction,ACS-NC} + V_{suction,A} - V_{suction,ACS-FC}}{V_{suction,ACS-NC} V_{suction,A}} \right)$$
(3. 1. 6–18)

シーケンス 4:  

$$T_{margin} = \frac{F_{limit}}{C_{tephra}V_{suction,ACS-NC}}$$
(3. 1. 6-19)

# c. マージン評価

火山噴火時のシーケンス別のマージンを評価した結果、大気中濃度が高くなるにつれて マージンが小さくなる。支配的なシーケンスは、シーケンス3に相当するが、大気中濃度 10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>以上では猶予時間は短いが、10<sup>-4</sup>kg/m<sup>3</sup>以下では猶予時間が長い。噴火規模に応じ て適切に対処することが重要であることを示唆している。

シーケンス1は補助冷却設備強制通風運転をしているため早くフィルタ閉塞に至り、猶 予時間が短くマージンが小さい。一方、シーケンス3は6時間程度でディーゼル発電機の フィルタ閉塞に伴う非常用電源喪失によって早めに自然循環除熱になり、吸込み風量が低 くなったことにより猶予時間が長くなり、マージンが大きくなった。このように、ディー ゼル発電機は機器別のマージン評価では吸込み風量が大きいため猶予時間が短くマージン は小さいと評価されたが、シーケンスを考慮すればマージンが大きくなると評価される。 したがって、シーケンス別マージン評価では機器別マージン評価より正確な評価を可能と する。シーケンス4として、ディーゼル発電機運用を停止する運用を今回は取り入れたが、 それによって猶予時間は長くなり 50時間を超えるほどのマージンを持つ。強制通風停止 の判断を取り入れることで、マージンが大きくなることが明らかとなり、今後のプラント 運用の検討に有用な評価結果を得た。

# 参考文献

- [3.1.6-1] 社団法人日本原子力学会、原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施 基準:2007、AESJ-SC-P006:2007(2007年9月).
- [3.1.6-2] 高速増殖炉研究開発センター原子炉設置許可申請書,独立行政法人日本原子力研究 開発機構,平成18年10月変更(2006).
- [3.1.6-3] International Atomic Energy Agency, Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Standards No. NS-R-3, IAEA, Vienna (2003).
- [3.1.6-4] International Atomic Energy Agency, Meteorological and Hydrological Hazards, Safety Standards No.SSG-18, IAEA, Vienna (2011).
- [3.1.6-5] International Atomic Energy Agency, External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants, safety standards series NO. NS-G-1.5 Vienna (2003).
- [3.1.6-6] Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installations, Probabilistic Safety Analysis of Other External Events than Earthquake, NEA/CSNI/R (2009).
- [3.1.6-7] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Analysis of Core Damage Frequency: Peach Bottom, Unit 2 External Events, NUREG/CR-4550 SAND86-2084 Vol.4, Rev.1, Part3 (Date Published: December 1990).
- [3.1.6-8] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Analysis of Core Damage Frequency: Surry Power Station, Unit 1 External Events, NUREG/CR-4550 SAND86-2084 Vol. 3, Rev. 1, Part3 (Date Published: December 1990).
- [3.1.6-9] 原子力発電所の竜巻評価ガイド(案),第23回発電用軽水型原子炉の新規制基準に 関する検討チーム会合配布資料、平成25年6月3日.
- [3.1.6-10] Chang, W.S. Impact of solid missiles on concrete barriers.ASCE J. Struct. Div., 1981, 107(ST2), 257-71.
- [3.1.6-11] 四国電力(株)"伊方発電所発電所3号炉 竜巻影響評価説明資料"原子力規制委員 会発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チーム会合,平成25年7月(伊方 発電所安全審査資料 番号DB-8-05 提出年月日 平成25年7月29日).
- [3.1.6-12] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, Transport Phenomena, p. 182, John Wiley & Sons (1960).
- [3.1.6-13] 森川敬信, 流体-固体二相流一空気輸送と水力輸送一, 日刊工業新聞社 (1979).

# 3.1.7 まとめ (H27)

森林火災については、反応強度をハザード強度の指標として、評価上重要な燃料タンク を対象に破損評価を行い、機器別のマージン評価手法を開発した。その結果、タンクが損 傷発生するまでの森林火災継続時間と、タンク損傷後にタンクの火災が生じた場合のタン ク火災の継続時間に比べてプラントは大きな熱容量を有するため、プラント冷却材温度の 上限は損傷判定温度に対してマージンを有することを示した。また、イベントツリーに基 づいて分類したシーケンス別にマージン評価を行う手法も開発し、いずれのシーケンスで もマージンを有することから、除熱失敗シーケンスは現れないことを示した。

積雪と低温の重畳事象については、フィルタに着雪することにより機能喪失に相当する フィルタ目詰まり量までの許容時間をマージンと定義し、機器別のマージン評価手法を開 発した。積雪のみの影響の場合、機能喪失積雪深に対する除雪速度に応じたマージンを評 価した。その結果、日降雪深が増大するにつれてマージンが小さくなることを示した。ま た、イベントツリーに基づくシーケンス別のマージン評価手法も開発した。補助冷却設備 が3系統あることを考慮すれば、マージンは3倍になることを示した。

強風と降雨の重畳事象については、強風のみの影響の場合、主に最大瞬間風速をハザー ド強度の指標として、風圧・気圧差・飛来物衝突による破損評価を行い、機器別のマージ ン評価手法を開発した。その結果、最大瞬間風速の過去最大値に比べて十分なマージンを 有することを確認した。また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価手 法も開発し、強風時には補助冷却設備の全系統同時破損は極めて考えにくいため除熱失敗 シーケンスは現れないことを示した。降雨のみの影響の場合、機能喪失水位に対する排水 設備閉塞物除去速度に応じた継続時間を指標とした機器別のマージン評価手法を開発し、 1 時間降水量が増大するにつれてマージンが小さくなることを示した。また、イベントツ リーに基づいてシーケンス別のマージン評価手法も開発し、降雨時には補助冷却設備の浸 水は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは現れないことを示した。強風と降雨の重 畳時には補助冷却設備排気部雨どいの破損に続く排気ダクト内への降雨の浸入による空気 冷却器伝熱管疲労破損が考えられ、伝熱管破損までの許容時間を指標とした機器別のマー ジン評価手法を開発し、雨水液滴径が大きくなるにつれてマージンが小さくなることを示 した。また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価手法も開発し、補助 冷却設備の全系統同時破損は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは現れないことを 示した。

積雪を対象に、ヒータを設置する場合と除雪作業の場合のコストを定性的に分析し、炉 心損傷頻度と比較することでコストーベネフィット評価手法を開発した。

最後に、4年間のまとめとして、開発してきた手法を整理した。

### 3.2 外部ハザード評価手法の開発

## 3.2.1 異常気象ハザード評価手法の開発(H27)

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)に関する外部ハザード評価手法を開発するた め、評価対象とする重畳事象を選定した。その重畳事象に対して、既往のハザード強 さの記録を調査・整理した。また、既往研究からハザード評価手法を調査・整理した。 次に、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼすハザードの重要パラメ ータを同定し、起こりやすさとハザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、 重畳事象に対するハザードを評価した。4年間のまとめとして手法を整備した。

# 3.2.1.1 はじめに

原子力施設の外部ハザードに対する安全評価のうち、地震及び津波を対象としたも のは行われており評価手法は確立されつつあるが、異常気象などの他の外部ハザード では評価手法が十分であるとは言い難い。そこで、本研究では、異常気象データと異 常気象ハザード評価手法を幅広く調査して、原子炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす 外部ハザード強さとして適切な指標を検討する。ここでは、そのハザード強さの指標 を重要パラメータと呼び、それを同定することとする。また、起こりやすさ(発生頻 度)を縦軸に、ハザード強さ(重要パラメータ)を横軸にしたハザード曲線を構築し て、異常気象ハザード評価手法を構築する。

4年間の業務計画は次のとおりである。平成24年度に積雪を対象としてハザード 強さ記録及び評価手法を調査し、ハザードの重要パラメータを同定した上で、ハザー ド曲線を構築して異常気象ハザードを評価する。平成25年度に竜巻・強風を対象と してハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザードの重要パラメータを同定した 上で、ハザード曲線を構築して異常気象ハザードを評価する。平成26年度に降雨を 対象としてハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザードの重要パラメータを同 定した上で、ハザード曲線を構築して異常気象ハザードを評価する。平成27年度に 重畳事象を対象としてハザードの重要パラメータを同定した上で、ハザード曲線を構 築して異常気象ハザードを評価するとともに、4年間のまとめとして手法を整備する。 ここでは、重畳事象の選定を行った後、選定された重畳事象ハザードに対して、ハ ザード強さの記録及び評価手法の調査、重要パラメータの同定、並びにハザード評価 について記述する。

## 3.2.1.2 重畳事象の選定(H27)

平成24年度では、本研究で対象とする外部ハザードの代表性を検討・整理するため、 IAEA[3.2.1.2.1~3.2.1.2.3]や OECD/NEA[3.2.1.2.4]を参照して、外部ハザードを網羅的 に抽出した。次に、本研究のためのスクリーニング手法を開発・適用し、重畳事象に加え て、平成24年度~平成26年度で手法開発の対象とした6つの外部ハザードを選定した。

- Strong winds (e.g. hurricane, cyclone, typhoon) / 強風(暴風、温帯性低気圧、 台風)
- Tornado/ 竜巻
- ・Extreme rain/極端な降雨
- ・Extreme snow pack (including snow storm) /極端な積雪
- Volcanic phenomena/火山現象
- ・Forest fire/森林火災
- Any combination of the above as a result of a common initiating event/外部ハ ザードリストの中の任意の重畳事象

平成27年度に重畳事象の評価手法を開発するため、当初は選定された外部ハザードの 組み合わせを検討する計画であった。しかし、平成24年度に実施した委員会において、 外部有識者より、重畳事象の組み合わせはスクリーニングにて選定した後のハザードの組 み合わせではなく外部ハザードリストから検討すべきであるとのコメントを受けた。

そこで、本研究では、重畳事象の選定方法を調査し、本研究に適した重畳事象の選定方法を考案したうえで、上記6つの外部ハザードとの重畳影響を考慮すべき事象を外部ハザ ードリストから選定することとした。

## (1) 重畳事象の選定方法の調査

a. 文献調査

東京電力福島第一原子力発電所事故以前は、IAEA[3.2.1.2.1~3.2.1.2.3]、US.DOE(ア メリカ合衆国エネルギー省)[3.2.2.4]、ASME/ANS(アメリカ機械学会/アメリカ原子力 学会)[3.2.1.2-5]のガイドラインでは、重畳事象に対する具体的な選定方法は記載され ておらず、一般的に考えられる地震発生後の津波や火災といったものを取り上げていた。 OECD/NEA[3.2.1.2-6]では、各国の重畳事象の同定について述べられており、フィンラン ドでは事象の相関性とプラントの影響を分析して推定、独国では極端な気象を重ね合わ せて検討、韓国では海水取入口閉塞に関連する事象を考慮、スロベキアでは外部電源に 影響にする事象を考慮、スイスでは厳しい夏と冬の気象について工学的判断により検討、 台湾では台風による外部電源喪失や海水悪条件及び漂流物の影響を考慮するといったも のであり、ハザードの組み合わせを多少考えているものの、重畳事象に関する考え方が 明確に示されてはいない。

同事故以後では、個別の外部ハザード評価及び地震と津波に関連したハザード評価は 重要視されているものの、規制側の安全審査において、幅広く重畳事象を対象とした検 討はなされていない(例えば、英国 UK-EPR[3.2.1.2-7])。US.NRC[3.2.1.2-8]及び OECD/NEA[3.2.1.2-9]は、2013年(平成25年)に外部ハザードのワークショップを開 催し、重畳事象の評価手法の重要性を指摘している。OECD/NEAは、2014年(平成26年) に外部事象ワーキンググループを新規に立ち上げて検討している状況である [3.2.1.2-10]。原子力規制委員会の安全性向上評価ガイド[3.2.1.2-11]では、地震及び 津波に対する評価が重要視されているが、地震及び津波の重畳に加えて、その他の自然 現象の重畳を考慮することが求められている。

日本原子力学会は、同事故直後に津波 PRA 実施基準[3.2.1.2-12]を発行し、その後、 地震随伴津波 PRA 実施基準を検討しているところであり、順次、地震起因内部溢水や地 震起因内部火災の学会標準に取りかかる計画である。一方、外部ハザードに対するリス ク評価方法を選定するプロセスを平成26年に作成した[3.2.1.2-13]。これは、特性分 析により相応の評価方法を選定するものであり、単一事象のみならず、複数のハザード からなる重畳事象についても検討されている。IAEA SSG-3[3.2.1.2-14]では、(a) 同じ 原因による影響を受けて、同時に発生する可能性があるハザードの組み合わせ、(b) 外 部ハザードが他のハザードを誘発するような組み合わせが挙げられている。この考え方 を踏襲して、日本原子力学会では、(a) を原因共有事象、(b) を随伴事象と呼び、組み 合わせを検討することとしている。

日本保全学会は、平成26年に「軽水型原子力発電所の設計で考慮すべき自然現象と その重畳に関する考え方のガイドライン」を発行した[3.2.1.2-15]。本ガイドラインに は、これまでに調べてきた範囲の中で最も具体的な選定方法が記述されていることから、 本研究では本ガイドラインを参考にして選定方法を考案する。本ガイドラインは設計基 準として考慮すべき自然現象の重畳に関する考え方を規定し、設計基準を超える発生確 率の小さな自然現象の重畳を対象外としている。一方、本研究では、設計基準を超える 自然現象についても確率論的に考慮する。

#### b. 日本保全学会ガイドラインの概要

本ガイドラインでは、設計基準として2つの自然事象の組み合わせに着目している。 3つ以上の自然事象の組み合わせを対象外としている理由は、3つ以上の自然現象が重 畳する確率は各自然現象の発生確率の積であると考えれば、設計上考慮するほどのリス クとはなりえないためである。

# 3.2.1.2-2

自然現象重畳事象の検討フローを図 3.2.1.2-1 に示す。結果的に、同時発生の影響、 時差来襲する長期的な影響に分類される。

(a) 同時来襲による影響

2つの自然現象が同時に発生する可能性があるため、その重畳の影響を評価する必要がある。ただし、次の条件を満足する場合は除外できる。

条件1:事象として物理的に同時に発生しないこと(例:高温+積雪)。

条件2:重畳の可能性が非常に小さいこと(例:津波+竜巻)

一方の自然現象による影響と他方の自然現象の影響が重畳し、その影響を増大させるケース(例:火山+降雨など)があるため、以下の相互影響及び発生順序を適切に 考慮する。

# a)相互影響

- 同一の影響モードの重なり:影響モードが同一であり、事象が重なり合うことで影響度合いが大きくなるもの(例:積雪+火山灰による荷重)。
- ② 自然現象の影響の変化:一方の自然現象の影響により、他方の自然現象の前 提条件が変化し、元の自然現象の影響度合いが大きくなるもの(例:火山灰 +降雨による火山灰の密度変化)。
- ③ 他の自然現象の対策設備への影響:一方の自然現象による影響が、他方の自然現象に対する設備耐力や防護対策に影響を及ぼすもの(例:竜巻による避雷鉄塔の倒壊後、落雷の影響)。
- ④ 新たな損傷・機能喪失モードの発生:自然現象が重畳することによる新たな 損傷・機能喪失モードが生じるもの(川岸で地すべりにより川がせき止めら れ、川の水位が上昇、その状態で地震が発生し決壊して鉄砲水が発生する)。
- b)発生順序

自然現象の発生の順序によって生じる影響の違いを考慮する(例:火山灰が蓄積 した後に降雨が発生すると影響度合いは大きくなるが、降雨の最中に火山噴火が発 生しても火山灰は拡散しにくくなり、影響度合いは小さくなる。)。

(b) 時差来襲による影響

自然現象の同時発生はないが、ある自然現象が別の自然現象の防護設備に影響を与 え、その状態が長時間持続するものについては当該設備に生じた影響を緩和・除去、 修復するのに必要な時間、あるいは他の防護対策を実施するのに必要な時間の観点か ら重畳事象を考慮する(例:地震+津波、竜巻+地震など)。また、長期影響について 検討する際は、発生する自然現象の順序によって生じる影響の違いについても適切に 考慮する。

自然現象の重畳を考慮する必要のある範囲の設定について、「自然現象の重畳が発生

する確率が十分低ければ検討対象外とすることができる」とし、その条件を「プラン ト寿命中に発生する自然現象重畳の発生確率」としている。

## (2) 本研究に適した重畳事象の選定方法の考案

平成24年度に実施した単一外部ハザードのスクリーニングを活用して、重畳事象の選 定方法を考案した。

本研究では、網羅的に作成された外部ハザードリストからスクリーニングプロセスを経 て研究対象とすべき単一外部ハザードを平成24年度に6つ選定した。これらの6つの外 部ハザードに対して網羅的に重畳関係を調べるため、まず、IAEA[3.2.1.2.1~3.2.1.2.3] 及び OECD/NEA[3.2.1.2-6]を参照して、重畳関係を調べる対象を網羅的に抽出する。抽出 された対象には、自然現象及び偶発的に発生する人為的な事象が含まれる。この抽出され た対象を基に PRA の評価対象を絞り込むため、図3.2.1.2-2 に示す流れに従ってスクリー ニングを行う。

米国の軽水炉を対象に実施された外部事象 PRA[3.2.1.2-16、3.2.1.2-17]では、表 3.2.1.2-1 に記載された5つの基準を設けて外部事象のスクリーニングを実施している。 本研究ではこの5つの基準によるスクリーニングを図3.2.1.2-2 における「第1スクリー ニング」として適用する。ここで特筆すべき点は、単一外部ハザードのスクリーニングで はプラントへの影響がなく評価対象外となるものであっても、他の外部ハザードとの重畳 影響を考えることでプラント影響が有意になる場合があることである。例えば、霧は単一 ハザードとしてはプラントへの影響がなく評価対象外となるが、火山灰の降下中に霧があ る場合には、フィルタ目詰まりといったプラント影響の可能性がある。

次に、重畳影響を考える対象を本研究の範囲に合致するものに絞り込むため、図 3.2.1.2-2 における「第2スクリーニング」を行う。この過程で、人為事象を将来の課題 と位置づけて自然現象のみを評価対象とし、プラントの最終ヒートシンクが空気であるこ とを鑑みて、自然現象のうち主にプラントの上方からのハザードを選定し、地震や津波と いったプラント全体あるいは地表面付近で影響する重畳事象は別途評価することとする。 さらに、類似事象は一つにまとめることとする。

最後に、日本保全学会ガイドラインを基に、同時来襲と時差来襲を区別した上で重畳に より影響が増大するかを考慮した「第3スクリーニング」を取り入れて、重畳事象を選定 する。

#### (3) 重畳事象の選定

上記で考案した選定方法に沿って、第1スクリーニングを実施した結果を表 3.2.1.2-2 に示す。重畳影響を考える対象のうち、表 3.2.1.2-1のスクリーニング基準に従い、評価 対象外と判定したものに、判定に適用したスクリーニング基準の番号を記した。選定対象 として残ったものには〇を記した。

次に、第2スクリーニングを実施した結果を表3.2.1.2-3に示す。ここでは、自然現象 でないと判定されたものにA、上方からのハザードでないと判定されたものにB、類似事象 としてまとめられたものにCと記述し、それらに当てはまらないものを選定対象として残 し、Oを記した。この過程で、人為事象である火災及び敷地内外の施設影響は排除された。 高潮、津波、雪解け水、地震、地滑り、雪崩は上方からのハザードにあたらないため、別 途評価することとした。ただし、地滑りは異常降雨によって発生する可能性が高いことか ら、異常降雨との重畳影響を考える際の重畳事象として選定され、雪崩は異常積雪によっ て発生する可能性が高いことから、異常積雪との重畳影響を考える際の重畳事象として選 定された。落雷はプラント全体にわたって影響を及ぼすため別途評価することとし、ここ では検討対象外とした。水面上で発生する竜巻及び潮を伴う嵐は、モデルサイトの特性上、 竜巻が海上からプラントに近接することに照らして、竜巻との類似事象にまとめた。極度 の気圧変化は強風または竜巻によって生じることが考えられることから、これらの類似事 象にまとめた。霜、水面の氷、氷晶、雪嵐は、低温に関連することから、低温の類似事象 にまとめた。雹は低温時の強風や竜巻時の飛来物との類似事象とみなした。

第3スクリーニングでは、「a:同時来襲」及び「b:重畳による影響増大」の可能性があ る場合、または「c:時差来襲時に防護設備への影響」がある場合に、重畳影響を考える対 象として選定し、これらにあてはまらない場合に検討対象から除外した。例えば、「高い気 温」は、森林火災と重畳する際に最終ヒートシンクである大気温度の上昇を増大すること で除熱能力を低下させることから検討対象とし、他の事象との重畳の際には影響が増大す ることはないことから対象外とした。この過程で検討対象に残った事象の組み合わせは、 表 3. 2. 1. 2-4 において、a、b または c と記入されたものである。最後に、これらについて、 3. 2. 1. 2 (1) b. (a) 節で示したとおり、相互影響と発生順序を考慮して重畳影響を検討し、 重畳事象として考慮すべきかを判定し、表 3. 2. 1. 2-5 にまとめた。以下に検討の概要を述 べる。

まず、3.2.1.2 (1) b. (a) 節の「条件 2」に記された「可能性が非常に小さいこと」を 根拠に重畳事象を除外することは避けた。

自然現象のうち、強風、降雨、積雪、低温のようにハザードの強度を表す指標(例;強 風の場合は風速[m/s]、降雨の場合は降水量[mm/h]等)を明確に定義できるものについては、 その自然現象の単独発生ではプラントに影響を与えないほど小さい強度の範囲であっても、 重畳の組み合わせ次第ではプラントに影響を与える場合には重畳影響を考慮した。

一方、霧のようにハザードの強度を表す指標を定義しにくい自然現象については、単独 発生においてはプラントに影響を及ぼさない場合であっても、重畳の組み合わせによって プラントへ影響を及ぼすかどうかを検討した。

この他、単独の発生でプラントに大きな影響をもたらす可能性がある竜巻、火山、森林 火災及び斜面崩壊については、これらが重畳することによる相互影響により、より大きな 影響をプラントに及ぼすかを主に検討した。

本研究で対象とした重畳事象の組み合わせを表 3.2.1.2-6 にまとめて示す。

4年間の研究期間の最終年度として実施する重畳事象は、図 3.2.1.2-2 に示すように、 比較的頻度が高いと考えられるもの、プラント影響が比較的高いと考えられるものを選定 することとし、以下を選定した。

- ・異常降雪と異常低温(凍結)
- ・強風と異常降雨(台風)
- 火山灰と霧
- ・森林火災と強風

# 参考文献

- [3.2.1.2-1] International Atomic Energy Agency, Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Standards No.NS-R-3, IAEA, Vienna (2003).
- [3. 2. 1. 2-2] International Atomic Energy Agency, Meteorological and Hydrological Hazards, Safety Standards No. SSG-18, IAEA, Vienna (2011).
- [3.2.1.2-3] International Atomic Energy Agency, External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants, Safety Standards No. NS-G-1.5, Vienna (2003).
- [3.2.1.2-4] US Nuclear Regulatory Commission, Procedural and Submittal Guidance for the individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, NUREG-1407 (1991).
- [3.2.1.2-5] American Society of Mechanical Engineers, Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications, ASME/ANS RA-Sa-2009 (2009).
- [3.2.1.2-6] OECD Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installations, Probabilistic Safety Analysis of Other External Events than Earthquake, NEA/CSNI/R (2009).
- [3.2.1.2-7] UK-EPR Fundamental Safety Overview, Vol.2: Design and Safety, Chapter c: Design basis and General Layout, Sub-chapter C.3: Protection Against

External Hazards,

http://www.epr-reactor.co.uk/ssmod/liblocal/docs/V3/Volume%202%20-%20Des ign%20and%20Safety/2.C%20-%20Design%20Basis%20and%20General%20Layout/2.C .3%20-%20Protection%20against%20External%20Hazards%20-%20v02.pdf

- [3.2.1.2-8] US Nuclear Regulatory Commission, Workshop on Probabilistic Hazard Assessment, Rockville, Maryland, 29-31 Jan. 2013, http://www.nrc.gov/public-involve/public-meetings/meeting-archives/resea rch-wkshps.html
- [3. 2. 1. 2-9] OECD Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installations, Probabilistic Safety Assessment (PSA) of Natural External Hazards Including Earthquake, Workshop Proceedings, Prague, Czech Republic, 17-20 June 2013, NEA/CNRA/R (2014) 9, (2014). https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2014/csni-r2014-9.pdf
- [3.2.1.2-10] OECD Nuclear Energy Agency, Working Group on External Events,

https://www.oecd-nea.org/nsd/csni/wgev.html

- [3.2.1.2-11] 原子力規制委員会,実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド,平成25年11月27日制定(原子力規制委員会決定(原規技発1311273号)).
- [3.2.1.2-12] 日本原子力学会,原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に 関する実施基準:2011, AESJ-SC-PK004:2011 (2012年2月).
- [3.2.1.2-13] 日本原子力学会,外部ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基 準:2014, AESJ-SC-RK008:2014 (2014年12月).
- [3.2.1.2-14] International Atomic Energy Agency, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Safety Standards No. SSG-3, IAEA, Vienna (2010).
- [3.2.1.2-15] 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会,軽水型原子力発電所の設計で考慮すべき自然現象とその重畳に関する考え方のガイドライン,JSM-NRE-008(平成26年9月).
- [3.2.1.2-16] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Analysis of Core Damage Frequency: Peach Bottom, Unit 2 External Events, NUREG/CR-4550 SAND86-2084 Vol. 4, Rev. 1, Part3 (Date Published: December 1990).
- [3.2.1.2-17] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Analysis of Core Damage Frequency: Surry Power Station, Unit 1 External Events, NUREG/CR-4550 SAND86-2084 Vol.3, Rev. 1, Part3 (Date Published: December 1990).

1. 軽微条件	プラント設計で考慮される事象より損害・損傷を与
	える可能性が小さい。これは設計基準評価で要求さ
	れる。
2. 低頻度条件	その他の事象よりも発生頻度が十分低い。
3. モデルサイト条件	プラントに影響を与えないほど十分に離隔してい
	る。
4. 包絡条件	る。 その他の事象の定義に含まれる。
4. 包絡条件 5. 進展速度条件	る。 その他の事象の定義に含まれる。 進展していくスピードが遅い。そして危険な兆候の
4. 包絡条件 5. 進展速度条件	る。 その他の事象の定義に含まれる。 進展していくスピードが遅い。そして危険な兆候の 原因を排除する十分な時間がある。または、危険な
<ul><li>4. 包絡条件</li><li>5. 進展速度条件</li></ul>	る。 その他の事象の定義に含まれる。 進展していくスピードが遅い。そして危険な兆候の 原因を排除する十分な時間がある。または、危険な 兆侯の原因を排除できなくても対応できる十分な

表 3.2.1.2-1 5つのスクリーニング基準

外部ハザードリスト (英語 / 日本語)	強風	竜巻	降雨	積雪	火山 灰	森林 火災
Wind / 風	-		-			
Strong winds						
(e.g. hurricane, cyclone, typhoon)		0	0	0	$\bigcirc$	0
/ 強風(例 暴風、温帯性低気圧、台風)		-	-	-	-	-
Tornado / 竜巻	0		0	0	0	0
Waterspout / 水面上で発生する竜巻	0		0	0	4	4
Salt storm / 潮を伴う嵐	—	0	0	0	4	4
Sand storm / 砂嵐	3,4	3,4	3,4	3, 4	3,4	3,4
Temperature / 温度、気温	-					
High air temperature / 高い気温	0	0	0	4	$\bigcirc$	0
Low air temperature / 低い気温	0	0	0	0	0	0
Extreme air pressure						
(high/low/gradient)	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4,5	4,5	4,5	4,5
/ 極度の気圧(高 / 低 / 勾配)						
High sea/river water temperature	1 3 5	1 3 5	135	1 3 5	1 3 5	1 3 5
/ 海や川の高い水温	1, 5, 5	1, 5, 5	1, 5, 5	1, 5, 5	1, 5, 5	1, 5, 5
Low sea/river water temperature	5	5	5	5	5	5
/ 海や川の低い水温	5	5	5	5	5	5
White frost / 霜	$\bigcirc$	0	0	0	$\bigcirc$	1
Soil frost / 土壌を含む霜	3	3	3	3	3	3
Surface ice / 水面(表面)の氷	1	1	0	0	1	1
Frazil ice	0	$\bigcirc$	0	$\bigcirc$	0	1
/ 氷晶 (大気中にできる氷の結晶)	Ŭ	0	)	0	0	-
Ice barriers / 氷棚 (陸地から飛び出している氷棚)	1,4	1, 4	1, 4	1,4	1,4	1, 4
Precipitation / 降水、降雨						
Extreme rain / 極端な降雨	0	0		0	0	1
Extreme snow pack (including snow storm)			$\sim$		$\sim$	1
/ 極端な積雪	0	0	0		0	1
Ice storm / sub-cooled rain	$\cap$	$\cap$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4
/ 雪嵐、冷たい雨	0	0	0	0	0	4
Extreme hail	$\bigcirc$	$\cap$	$\bigcirc$	$\cap$	$\bigcirc$	$\cap$
/ 多量の雹(ヒョウ)	$\cup$	$\bigcirc$	0	0	$\cup$	$\bigcirc$
Fog / 霧	1	1	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	1
Low water level / 低い水位						
Drought / 日照り、干ばつ	3	3	3	3	3	3
Low sea / river water level						
/ 海や川の低い水位	1, 5	1, 5	1, 5	1, 5	1,5	1,5
River diversions						
/ 川 (川の流れ)の移転 (例えば川の流れの変化。1つ	3	3	3	3	3	3
の川の流れが2つに分かれる場合、流量が片方へ大きく	Ŭ	Ū	0	Ũ	Ũ	0
変化するなど。)		_	_		-	
Flooding / 浸水、冠水						
High sea/river water level (e.g. high tide) / 海や川の高い水位 (満潮)	4	4	4	4	4	4
Storm surge / 高潮 (津波よりも浸水時間の短い海面上	6	6	<u> </u>		6	
昇現象)	0	0	0	0	0	4

表 3.2.1.2-2 外部ハザードリストの第1スクリーニング結果

(※表中の数字は、対応する第1スクリーニング基準番号を表す)

Strong water current / 強い水流	3	3	3	3	3	3
Seiche / 静振(湖の水面の振動)	3	3	3	3	3	3
Tsunami / 津波	$\bigcirc$	0	0	0	$\bigcirc$	$\bigcirc$
Other extraordinary waves / その他の異常な波	4	4	4	4	4	4
Floods and waves caused by failure of water control						
structures						
(Sudden release of water from natural or artificial						
storage )	3	3	3	3	3	3
/ (ダムなどの)水位など水をコントロールする構造物						
の決壊による洪水と波(自然または人工的な貯蔵施設か						
らの突然の水の解放)						
Available flow of water, minimum water level and the						
period of time for which safety related sources of						
cooling water are at a minimum level, with account						
taken of the potential for failure of water control	3	3	3	3	3	3
structures.						
/ 治水構造物の破損の可能性を考慮した利用可能な水						
流量、最低水位、冷却水水源が最低水位状態にある期間						
Extreme groundwater level / 多量の地下水	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5
Snow melt / 雪解け水	0	0	0	0	0	1,4
Geology / 地質						
Seismic event / 地震	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\cap$	$\cap$	$\bigcirc$
Surfage foulting / 地震	0	0	0	0	0	0
Surface faulting / 地衣的層	4	4	4	4	4	4
Land rise / 陸の上昇	4	4	4	4	4	4
Soil shrink/swell / 土(土壌)の収縮(圧縮)や隆起	4	4	4	4	4	4
Landslide / 地すべり(山などの斜面の不安定性含む)	0	0	0	0	0	0
Under-water landslide / 水中の地すべり(水中へ地す		4		4		
べりも含む)	4	4	4	4	4	4
Coastal erosion / 浸食	1	1	1	1	1	1
Avalanche / 雪崩	0	0	0	0	0	0
Soil liquefaction / 液状化	3	3	3	3	3	3
Behavior of foundation materials						
/ 基礎地盤の挙動	4	4	4	4	4	4
Lightning / 落雷	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
Meteorites / 阳子	2	2	2	2	2	2
Meteorites / 隕石	2	4	4	2	2	2 0
Volcanic phenomena / 火山現象	0	0	0	0		0
Biological / 生物					-	-
Animals/(動物、生物)	0	0	0	0	$\bigcirc$	0
Organic material in water	4	4	4	4	4	4
/ 水の中の有機物質	4	4	4	4	4	4
Other biological impacts / その他生物的な影響	4	4	4	4	4	4
Chemical / 化学						
Corrosion (e.g. from salt water)						
/ 腐食 (潮水からなど)	0	0	0	0	0	0
Fire / 火災 (プラント外部)						
Forest fire / 森林火災	0	0	0	0	0	
Other external fire / その他火災	0	0	0	0	0	0

Other hydrological hazard / その他の水のハザード						
Landslide or avalanches into water bodies / 水の中に地すべりや雪崩が入る現象	4	4	4	4	4	4
<ul> <li>Deterioration or failure of facilities on the site or near site facilities (e.g. canals water retaining structure of pipes)</li> <li>/ モデルサイト内の施設、またはモデルサイトの施設近くの崩壊(悪化)または倒壊(例えば、パイプ構造を留めておく運河に関するシステムの崩壊)</li> </ul>	3	3	3	3	3	3
Water level rising upstream or falling downstream / (水の流れが)上流に上昇または下流に下降すること による水位の変化	3	3	3	3	3	3
Swelling of water in a channel due to a sudden change in the flow rate (the origin may be natural, for example a tidal bore, or artificial, as in the case of closure of a hydroelectrical plant) / 流量の突然の変化による河川の増水 (例えば、津波な どによる川の逆流、水力発電所の閉鎖などによる人工的 な流れの変化など)	3, 5	3, 5	3, 5	3, 5	3, 5	3, 5
Variation of groundwater level / 地下水の変化	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5
<ul> <li>Fires (e.g. after transportation accident, pipeline accident, or industrial accidents) including the impact of smoke on the plant</li> <li>/ 火災 ((例えば、輸送事故、パイプライン事故、工業的な事故の後に起きる事象) これはプラントへの煙の影響も含まれる)</li> </ul>	0	0	0	0	0	0
<ul> <li>Explosion (e.g. after transportation accident, pipeline accident, or industrial accidents)</li> <li>/ 爆発(例えば、輸送事故、パイプライン事故、工業的な事故の後に起きる事象)</li> </ul>	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2,3	2, 3
Radioactive release / 放射性物質の放出(輸送されてくる燃料の漏れなど)	1	1	1	1	1	1
Electromagnetic disturbance / 電磁的な変動	4	4	4	4	4	4
Satellite crash / 人工衛星衝突	2	2	2	2	2	2
Airplane crash / 航空機衝突	2	2	2	2	2	2
Excavation work / 発掘活動	2	2	2	2	2	2
Missiles from military activity / 軍事施設からのミサイル	2	2	2	2	2	2
Missiles from other installations / 他の施設(基地)からのミサイル	2	2	2	2	2	2
Solid or fluid impurities from ship release / 船舶からの固体または液体の不純物	1,2	1, 2	1,2	1, 2	1,2	1,2
Chemical release to water / 水への化学物質の放出	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Installations / 敷地内外の施設(危険物の施設、飛来物の発生する可 能性のある施設の影響)	0	0	0	0	0	0
Asphyxiant, toxic materials / 窒息、有毒物質	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Direct impact from ship collision / 船舶衝突からの直接的な影響	1, 2	1, 2	1,2	1, 2	1,2	1,2
Ground vibration (e.g. due to nearby explosions ) / 大地の振動(例えば、近くの爆発があった場合など)	4	4	4	4	4	4
Eddy currents into ground / 地盤中の渦電流	4	4	4	4	4	4
Any combination of the above as a result of a common initiating event /外部事象リストの中の任意の重畳事象	_	_	_	_		

※「一」は同事象であるため組み合わせ対象外

外部ハザードリスト (英語 / 日本語)	強風	竜巻	降雨	積雪	火山 灰	森林 火災
Wind / 風	-	-	-	-		
Strong winds						
(e.g. hurricane, cyclone, typhoon)	_	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
/ 強風(例 暴風、温帯性低気圧、台風)		Ŭ	0	0	0	Ŭ
Tornado / 竜巻	0		0	0	0	0
Waterspout / 水面上で発生する竜巻	C		C	C	4	4
Salt storm / 潮を伴う嵐	_	С	С	С	4	4
Sand storm / 砂嵐	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Temperature / 温度、気温	_		_	-		-
High air temperature / 高い気温	0	0	0	4	0	0
Low air temperature / 低い気温	0	0	0	0	0	0
Extreme air pressure						
(high/low/gradient)	С	С	4,5	4,5	4,5	4,5
/ 極度の気圧(高 / 低 / 勾配)						
High sea/river water temperature	195	195	195	195	195	195
/ 海や川の高い水温	1, 3, 5	1, 3, 5	1, 3, 5	1, 3, 5	1, 5, 5	1, 3, 5
Low sea/river water temperature	5	5	5	Б	Б	5
/ 海や川の低い水温	5	5	5	0	0	5
White frost / 霜	С	С	С	С	С	1
Soil frost / 土壌を含む霜	3	3	3	3	3	3
Surface ice / 水面(表面)の氷	1	1	С	С	1	1
Frazil ice	С	С	С	С	С	1
/ 水晶 (大気中にでさる水の結晶)						
lce barriers / 氷棚(陸地から飛び出している氷棚)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Precipitation / 降水、降雨						
Extreme rain / 極端な降雨	$\bigcirc$	$\bigcirc$	—	0	0	1
Extreme snow pack (including snow storm)	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$		$\bigcirc$	1
/ 極端な積雪	0	0	0		0	1
Ice storm / sub-cooled rain	C	C	C	C	C	4
/ 雪嵐、冷たい雨	C	C	C	C	C	4
Extreme hail	C	C	C	С	С	С
/ 多量の雹(ヒョウ)		Ŭ				
Fog / 霧	1	1	1	0	0	1
Low water level / 低い水位						
Drought / 日照り、干ばつ	3	3	3	3	3	3
low sea / river water level	<u> </u>		<u> </u>	<u> </u>		
/ 海や川の低い水位	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
River diversions						
/ 川 (川の流れ)の移転 (例えば川の流れの変化。1つ	3	3	3	3	3	3
の川の流れが2つに分かれる場合、流量が片方へ大き	0	0	0	0	0	0
く変化するなど。)						
Flooding / 浸水、冠水						
High sea/river water level (e.g. high tide)	4	4	4	4	4	4
/ 海や川の高い水位 (満潮)				*		-
Storm surge / 高潮 (津波よりも浸水時間の短い海面	В	В	В	В	В	4
上 异 現 家 )	-	-	-	-		-

表 3.2.1.2-3 外部ハザードリストの第2スクリーニング結果 (※表中の数字は、A:自然現象以外、B:上方からのハザード以外、C:類似事象を表す)

	1				1	
Strong water current / 強い水流	3	3	3	3	3	3
Seiche / 静振 (湖の水面の振動)	3	3	3	3	3	3
Tsunami / 津波	В	В	В	В	В	В
Other extraordinary waves	4	4	4	4	4	4
/ その他の異常な波						
Floods and waves caused by failure of water control						
structures						
(Sudden release of water from natural or artificial		0	0	0	0	0
storage) ( (U, t) V(t) + V(t	3	3	3	3	3	3
/ (ダムなどの) 水位など水をコントロールりる伸迫 物の沖撞に上て洪水し速(白焼またはして的な防鬱症						
初の伏壊による供小と彼(日然まには八上的な灯廠施 設からの空鉄の水の解放)						
neriod of time for which safety related sources of						
cooling water are at a minimum level with account						
taken of the potential for failure of water control						
structures	3	3	3	3	3	3
/ 治水構造物の破損の可能性を考慮した利用可能な水						
流量、最低水位、冷却水水源が最低水位状態にある期						
Extreme groundwater level / 多量の地下水	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5
Snow melt / 雪解け水	В	В	В	В	В	1,4
Geology / 地質						
Seismic event /	В	В	В	В	В	В
Surface faulting / 地表断層	2				2	
	4	4	4	4	4	4
Land rise / 陸の上昇	4	4	4	4	4	4
Soil shrink/swell	4	4	4	4	4	4
/ 土(土壌)の収縮(圧縮)や隆起	4	4	4	4	4	4
Landslide / 地すべり(山などの斜面の不安定性含む)	В	В	0	В	В	В
Under-water landslide / 水中の地すべり(水中へ地	4	4	4	4	4	4
すべりも含む)	т	т	Т	т	т	т
Coastal erosion / 浸食	1	1	1	1	1	1
Avalanche / 雪崩	В	В	В	$\bigcirc$	В	В
Soil liquefaction / 液状化	3	3	3	3	3	3
Behavior of foundation materials	4	4	4	4	4	4
/ 基礎地盤の挙動	1	1	1	1	1	1
Lightning / 落雷	В	В	В	В	В	В
Meteorites / 隕石	2	2	2	2	2	2
Volcanic phenomena / 火山現象	0	0	0	0		0
Biological / 生物						
Animals/(動物 生物)	$\cap$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\cap$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
Organic material in water			0			
/ 水の中の有機物質	4	4	4	4	4	4
Other biological impacts						
/ その他生物的な影響	4	4	4	4	4	4
Chemical / 化学						
Corrosion (e.g. from salt water )			<u> </u>			_
/ 腐食 (潮水からなど)	0	0	0	0	0	0
Fire / 火災 (プラント外部)						
Forest fire / 森林火災	0	0	0	0	0	
Other external fire / その他火災	0	C	C	C	C	
	L L	U	U	U	U	U

Other hydrological hazard / その他の水のハザード						
Landslide or avalanches into water bodies / 水の中に地すべりや雪崩が入る現象	4	4	4	4	4	4
<ul> <li>Deterioration or failure of facilities on the site or near site facilities (e.g. canals water retaining structure of pipes)</li> <li>/ モデルサイト内の施設、またはモデルサイトの施設 近くの崩壊(悪化)または倒壊(例えば、パイプ構造 を留めておく運河に関するシステムの崩壊)</li> </ul>	3	3	3	3	3	3
Water level rising upstream or falling downstream / (水の流れが)上流に上昇または下流に下降するこ とによる水位の変化	3	3	3	3	3	3
Swelling of water in a channel due to a sudden change in the flow rate (the origin may be natural, for example a tidal bore, or artificial, as in the case of closure of a hydroelectrical plant) / 流量の突然の変化による河川の増水(例えば、津波 などによる川の逆流、水力発電所の閉鎖などによる人 工的な流れの変化など)	3, 5	3, 5	3, 5	3, 5	3, 5	3, 5
Variation of groundwater level / 地下水の変化	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5
Fires (e.g. after transportation accident, pipeline accident, or industrial accidents) including the impact of smoke on the plant / 火災 ((例えば、輸送事故、パイプライン事故、工業 的な事故の後に起きる事象) これはプラントへの煙の 影響も含まれる)	A	A	A	A	A	A
<ul> <li>Explosion (e.g. after transportation accident, pipeline accident, or industrial accidents)</li> <li>/ 爆発(例えば、輸送事故、パイプライン事故、工業的な事故の後に起きる事象)</li> </ul>	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3
Radioactive release / 放射性物質の放出(輸送されてくる燃料の漏れなど)	1	1	1	1	1	1
Electromagnetic disturbance / 電磁的な変動	4	4	4	4	4	4
Satellite crash / 人工衛星衝突	2	2	2	2	2	2
Airplane crash / 航空機衝突	2	2	2	2	2	2
Excavation work / 発掘活動	2	2	2	2	2	2
Missiles from military activity / 軍事施設からのミサイル	2	2	2	2	2	2
Missiles from other installations / 他の施設(基地) からのミサイル	2	2	2	2	2	2
Solid or fluid impurities from ship release / 船舶からの固体または液体の不純物	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Chemical release to water / 水への化学物質の放出	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Installations / 敷地内外の施設(危険物の施設、飛来物の発生する 可能性のある施設の影響)	A	A	A	А	А	A
Asphyxiant, toxic materials / 窒息、有毒物質	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Direct impact from ship collision / 船舶衝突からの直接的な影響	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Ground vibration (e.g. due to nearby explosions) / 大地の振動 (例えば、近くの爆発があった場合など)	4	4	4	4	4	4
Eddy currents into ground / 地盤中の渦電流	4	4	4	4	4	4
Any combination of the above as a result of a common initiating event /外部事象リストの中の任意の重畳事象					_	_

※「一」は同事象であるため組み合わせ対象外
表 3.2.1.2-4 外部ハザードリストの第3スクリーニング(重畳事象選定)結果

(※表中の数字は、a:同時来	襲、b:重量	とによる影響増大、	c:時差来襲、	x:対象外を表す)
----------------	--------	-----------	---------	-----------

外部ハザードリスト (英語 / 日本語)	強風	竜巻	降雨	積雪	火山	森林
(天阳 / 日本阳)	[	-		-		八灭
Strong winds						
(e.g. hurricane, cyclone, typhoon)		a.b.c	a.b.c	a.b.c	a.b.c	a.b
/ 強風 (例 暴風、温帯性低気圧、台風)		,, .	a, ., .	a, 2, 0	a, 2, 0	, ~
Tornado / 竜巻	a, b, c		a, b, c	a, b, c	a, b, c	Х
Waterspout / 水面上で発生する竜巻	С		С	С	4	4
Salt storm / 潮を伴う嵐		С	С	С	4	4
Sand storm / 砂嵐	3, 4	3,4	3,4	3, 4	3, 4	3, 4
Temperature / 温度、気温	-					-
High air temperature / 高い気温	Х	Х	Х	4	Х	a, b
Low air temperature / 低い気温	Х	Х	Х	a, b	Х	Х
Extreme air pressure						
(high/low/gradient)	С	С	С	4,5	4,5	4,5
/ 極度の気圧(高 / 低 / 勾配)						
High sea/river water temperature	135	1 3 5	135	135	135	1 3 5
/ 海や川の高い水温	1, 0, 0	1, 5, 5	1, 0, 0	1, 0, 0	1, 0, 0	1, 0, 0
Low sea/river water temperature	5	5	5	5	5	5
/ 海や川の低い水温	Ŭ	0	Ŭ	0	Ŭ	Ŭ
White frost / 霜	С	С	С	С	С	1
Soil frost / 土壌を含む霜	3	3	3	3	3	3
Surface ice / 水面(表面)の氷	1	1	С	С	1	1
Fraz11 1ce / 氷晶(大気中にできる氷の結晶)	С	С	С	С	С	1
Ice barriers / 氷棚(陸地から飛び出している氷棚)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Precipitation / 降水、降雨		-			-	
Extreme rain / 極端な降雨	a, b, c	a, b, c		Х	a, b, c	1
Extreme snow pack (including snow storm) / 極端な積雪	a, b, c	a, b, c	a, b	_	a, b, c	1
Ice storm / sub-cooled rain / 雪嵐 冷たい雨	С	С	С	С	С	4
Extreme hail	~	~	~	~	~	~
/ 多量の雹(ヒョウ)	С	С	С	С	С	C
Fog / 霧	1	1	1	а	a, b	1
Low water level / 低い水位						
Drought / 日照り、干ばつ	3	3	3	3	3	3
Low sea / river water level						
/海や川の低い水位	1, 5	1,5	1,5	1, 5	1, 5	1,5
<ul> <li>River diversions</li> <li>/ 川 (川の流れ)の移転 (例えば川の流れの変化。</li> <li>1 つの川の流れが 2 つに分かれる場合、流量が片 方へ大きく変化するなど。)</li> </ul>	3	3	3	3	3	3
Flooding / 浸水、冠水		-				
High sea/river water level (e.g. high tide) / 海や川の高い水位 (満潮)	4	4	4	4	4	4
Storm surge / 高潮(津波よりも浸水時間の短い 海面上昇現象)	В	В	В	В	В	4

Strong water current / 強い水流	3	3	3	3	3	3
Seiche / 静振(湖の水面の振動)	3	3	3	3	3	3
Tsunami / 津波	В	В	В	В	В	В
Other extraordinary waves / その他の異常な波	4	4	4	4	4	4
Floods and waves caused by failure of water						
control structures						
(Sudden release of water from natural or						
artificial storage )	3	3	3	3	3	3
/ (ダムなどの)水位など水をコントロールする						
構造物の決壊による洪水と波(自然または人工的						
な貯蔵施設からの突然の水の解放)						
Available flow of water, minimum water level						
and the period of time for which safety related						
level with account taken of the notential for						
failure of water control structures.	3	3	3	3	3	3
/ 治水構造物の破損の可能性を考慮した利用可						
能な水流量、最低水位、冷却水水源が最低水位状						
態にある期間						
Extreme groundwater level / 多量の地下水	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5
Snow melt / 雪解け水	В	В	В	В	В	1,4
Geology / 地質						
Seismic event / 地震	В	В	В	В	В	В
Surface faulting / 地表断層	4	4	4	4	4	4
	-1	T	т	т	-1	-1
Land rise / 陸の上昇	4	4	4	4	4	4
Soll shrink/swell ( L ( L 菘) の収焼 (耳蛇) の吹打	4	4	4	4	4	4
/ 土(土壌)の収縮(圧縮)や隆起						
Landslide / 地すへり(山などの斜面の不安正性 今ta)	В	В	a, b	В	В	В
」 100 Under-water landslide / 水中の地すべり(水中						
へ地すべりも含む)	4	4	4	4	4	4
Coastal erosion / 浸食	1	1	1	1	1	1
Avalanche / 雪崩	В	В	В	a, b	В	В
Soil liquefaction / 液状化	3	3	3	3	3	3
Behavior of foundation materials	4	4	4	4	4	4
/ 基礎地盤の挙動	4	4	4	4	4	4
Lightning / 落雷	В	В	В	В	В	В
Meteorites / 隕石	2	2	2	2	2	2
	ahc	ahc	ahc	ahc		ahc
Riological / 生物	a, s, c	u, s, c	u, s, c	u, s, c		- u, s, c
Animale/(動物 生物)	0	0	0	0	0	C
Organic material in water	C	C	C	C	C	C
/ 水の中の有機物質	4	4	4	4	4	4
Other biological impacts						
/ その他生物的な影響	4	4	4	4	4	4
Chemical / 化学						
Corrosion (e.g. from salt water )	C	C	C	C	C	C
/ 腐食 (潮水からなど)	0	Ŭ	Ŭ	Ŭ	Ŭ	0
Fire / 火災 (プラント外部)						
Forest fire / 森林火災	a, b	Х	Х	Х	a, b, c	
Other external fire / その他火災	С	С	С	С	С	a, b

Other hydrological hazard / その他の水のハザード		-				
Landslide or avalanches into water bodies / 水の中に地すべりや雪崩が入る現象	4	4	4	4	4	4
<ul> <li>Deterioration or failure of facilities on the site or near site facilities (e.g. canals water retaining structure of pipes)</li> <li>/ モデルサイト内の施設、またはモデルサイトの施設近くの崩壊(悪化)または倒壊(例えば、パイプ構造を留めておく運河に関するシステムの崩壊)</li> </ul>	3	3	3	3	3	3
Water level rising upstream or falling downstream / (水の流れが)上流に上昇または下流に下降す ることによる水位の変化	3	3	3	3	3	3
Swelling of water in a channel due to a sudden change in the flow rate (the origin may be natural, for example a tidal bore, or artificial, as in the case of closure of a hydroelectrical plant) / 流量の突然の変化による河川の増水(例えば、 津波などによる川の逆流、水力発電所の閉鎖など による人工的な流れの変化など)	3, 5	3, 5	3, 5	3, 5	3, 5	3, 5
Variation of groundwater level / 地下水の変化	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5	1, 4, 5
Fires (e.g. after transportation accident, pipeline accident, or industrial accidents) including the impact of smoke on the plant / 火災 ((例えば、輸送事故、パイプライン事故、 工業的な事故の後に起きる事象)これはプラント への煙の影響も含まれる)	A	A	А	А	А	А
<ul> <li>Explosion (e.g. after transportation accident, pipeline accident, or industrial accidents)</li> <li>/ 爆発 (例えば、輸送事故、パイプライン事故、 工業的な事故の後に起きる事象)</li> </ul>	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3
Radioactive release / 放射性物質の放出(輸送されてくる燃料の漏れ など)	1	1	1	1	1	1
Electromagnetic disturbance / 電磁的な変動	4	4	4	4	4	4
Satellite crash / 人工衛星衝突	2	2	2	2	2	2
Airplane crash / 航空機衝突	2	2	2	2	2	2
Excavation work / 発掘活動	2	2	2	2	2	2
Missiles from military activity / 軍事施設からのミサイル	2	2	2	2	2	2
Missiles from other installations / 他の施設(基地) からのミサイル	2	2	2	2	2	2
Solid or fluid impurities from ship release / 船舶からの固体または液体の不純物	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Chemical release to water / 水への化学物質の放出	1,2	1,2	1,2	1,2	1, 2	1, 2

Installations / 敷地内外の施設(危険物の施設、飛来物の発生 する可能性のある施設の影響)	А	А	A	A	A	A
Asphyxiant, toxic materials / 窒息、有毒物質	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Direct impact from ship collision / 船舶衝突からの直接的な影響	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Ground vibration (e.g. due to nearby explosions) / 大地の振動(例えば、近くの爆発があった場合 など)	4	4	4	4	4	4
Eddy currents into ground / 地盤中の渦電流	4	4	4	4	4	4
Any combination of the above as a result of a common initiating event /外部事象リストの中の任意の重畳事象						

※「一」は同事象であるため組み合わせ対象外

先 事	後事	考察(重畳事家が発生した場合に、安全機能を喪失する可能   性等)	相互	相互影響(該当する 場合は〇)			判定(重畳事象として考慮する:○、対
象	象		1	2	3	4	象外:×)
強	竜	<同時来襲>	0		0		0
風	巻	強風と竜巻は独立事象であるとは言い切れず、同時に発生す					
		る確率は十分低いとは言えない。例えば、積乱雲の発達によ					
		b お国ぶび先していて見由に充光がびたよて可能快ぶ不安					

表 3.2.1.2-5 外部ハザードの重畳影響(相互影響)を考慮すべき組み合わせの検討

	る確率は十分低いとは言えない。例えば、積乱雲の発達によ り、強風が発生している最中に竜巻が発生する可能性が否定 できないと考えられる。大局的な範囲の強風に加えて局所的 な範囲で竜巻がプラント等に影響を及ぼすと考えられる。相 互影響としては、強風と竜巻との風速の重ね合わせが考えら れる。 プラントに影響を与えるような強風や竜巻の2つの事象に対 して風や飛来物に対する防護設備も同じと考えられるため、 重畳事象により安全設備への影響が大きくなると考えられる ことから「重畳事象」として考慮する。 なお、プラントに影響を与えない程度の風と竜巻との組み合 わせは竜巻単独事象と同じと考えられる。			
	<時差来襲> 強風や飛来物に対する共通の防護設備は同じと考えられるた め、プラントに影響を与えるような強風によって破損した防 護設備が復旧する前に竜巻が発生すると、重畳事象により影 響が大きくなると考えられる。短期間の間に復帰できない場 合は、強風と竜巻は「重畳事象」として考慮する。 なお、プラントに影響を与えない程度の風と竜巻との組み合 わせは竜巻単独事象と同じと考えられる。	0	0	0
火山	<同時来襲> 強風時に火山噴火が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられるが、プラ ントに影響を与えるような強風と火山噴火の2つの事象に対 して、強風(飛来物など)により火山噴火に対する防護設備 (火山灰を防ぐフィルタなど)が損傷する可能性が考えられ るため、「重畳事象」として考慮する。 なお、プラントに影響を与えない程度の風と火山噴火との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。		0	0

		<時差来襲>			$\cap$	0
		プラントに影響を与えたるな強風レル山時ルの9つの東魚			0	0
		ノノントに影響を子んるような風風と八田頃八のとうの事家				
		に対して、強風(飛来物など)により火山噴火に対する防護				
		設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、それらを短期				
		間の間に復帰できない場合は、強風と火山噴火の時差来襲は				
		「重畳事象」として考慮する。				
		なお、プラントに影響を与えない程度の風と火山噴火との組				
		ひ合わせけ水山噴水単独東兔と同じと考えられる				
	四夕	※日420日頃八半弦争家と向しころんられる。				0
	降一				0	0
	কা	強風時に降雨が発生する確率は十分低いとは言えない。				
		プラントに影響を与えるような強風によって発生する飛来物				
		が排気口の屋根を破損させ、その破損個所を通じて雨水が建				
		物内部に侵入することが考えられ、崩壊熱除去系へ影響する				
		可能性がある この雨水の量け異党か降雨でかくても日党登				
		日本になっている。この内水の主は突出な体内でなくてして出た				
		生りる阵羽の里しも影響を与えることになると与えられる。				
		なお、ノフントに影響を与えない程度の風と降雨との組み合				
		わせは降雨単独事象と同じと考えられる。				
		<時差来襲>			$\bigcirc$	0
		プラントに影響を与えるような強風による飛来物で排気口の				
		屋根が破損するたど、降雨に対する防護設備が破損すること				
		注てい、秋葉) りょこく (中国に内) りの彼夜にに、秋葉) りここ が考うられる それらな毎期間の間に復帰できかい場合け				
		かちんられる。てれらを広労间の间に復帰しさない場合は、				
		強風と降雨の時差米襲は「里畳事家」として考慮する。ここ				
		で、この雨水の量は、異常な降雨でなくても日常発生する降				
		雨の量でも影響を与えることになると考えられる。				
		なお、プラントに影響を与えない程度の風と降雨との組み合				
		わせは降雨単独事象と同じと考えられる。				
	積	<同時来襲>			$\bigcirc$	0
	雪	岡田時に積雪が発生する確率は十分低いとけ言えたい プラ			0	0
	-	いしに影響なちゃるとこれ強固にとって改化する孤立動が地				
		ントに影響をすんるような風風にようて元王する風水物が許 たらの島田を使得をは、この使得個部を通じて建電が決断中				
		X1の産牧を恢復させ、ての恢復回所を通して積当が建物的 かに見まれてきたがあきさん。 出席執込まず、影響ホスマや				
		部に ( 人) ること か 考 え ら れ 、 朋 壊 熟 际 去 糸 へ 影 響 り る り 能				
		性がある。この雪の量は、異常な積雪でなくても冬季になる				
		と発生する降雪でも影響を与えることになると考えられる。				
		なお、プラントに影響を与えない程度の強風と積雪との組み				
		合わせは積雪単独事象と同じと考えられる。				
		<時差來態>			$\cap$	0
		、小元へ表/ プラントに影響なちらるとられ強固による孤立物で排信ロの			0	0
		ノノノトに影響を子んるような風風による形木物で近気日の 目目が使得たてたい。 建電に対力では満測供が使得たてとし				
		産根が 酸損 9 る など、 損 当 に 対 9 る 防 酸 設 備 が 吸 損 9 る こ ど				
		が考えられる。それらを短期間の間に復帰できない場合は、				
		強風と降雨の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。				
		ここで、この雪の量は、異常な積雪でなくても冬季になると				
		発生する降雪でも影響を与えることになると考えられる。				
		かお、プラントに影響を与えたい程度の強風と積雪との組み				
		今わせけ  諸電  単  加  本  も  と  同  ド  レ  ま  ク  に  れ  に  低  い  に  に  ま  い  に  い  に  い  に  い  に  い  に  い  に  い  に  い  に  い  に  い  い  い  い  い  い  い  い  い  い  い  い  い				
	杰	ロットには1月ヨギャムア外に回して行んり40日。 ノ目時立龍へ		$\bigcirc$		0
	冧			0		0
	杯	強風時に森林火災が発生する確率について、これらの事象は				
	火	独立な事象ではあるが確率は十分低いとは言えない。同時発				
	災	生した場合、どのような大きさの風であっても火災の伝搬が				
		速くなり、また飛び火の影響も大きくなると考えられる。				
		<時差来襲>				×
		油風後に森林火災が発生したとしても防護設備 及び影響 モ				
		ードけ異なるため、対象処とできる。これけどのとうな大き				
		+の風でなっても同様でなる				
		との風にめらても同様である。				
-	Irt					~
	1広	<    可米裝>				X
	温	強風時に低温が発生する確率は十分低いとは言えないが、強				
	温	強風時に低温が発生する確率は十分低いとは言えないが、強 風と低温が同時発生したとしても防護設備、及び影響モード				
	温	強風時に低温が発生する確率は十分低いとは言えないが、強 風と低温が同時発生したとしても防護設備、及び影響モード は異なるため、単独事象と同じ影響と考えられる。このため				

		及び低温であっても同様である。			
		/ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			~
		>内左木袋/ み宮辺に低温が変生しまししてき防滞部(株) 豆が彫郷す い			^
		強風後に低温が発生したとしても防護設備、及び影響モード			
		は異なるため、対象外とできる。これはどのような大きさの			
		風、及び低温であっても同様である。			
	斜	<同時来襲>			×
	而	油風時に斜面崩壊が発生する状況は相定しにくく 発生確率			
	出	は十分低いと考えられる 万が一 強風と斜面崩壊が同時に			
	庙	なーカビバン なんられる。カル 、 風風と府面崩後が同時に 変圧したししてた約 高島歯が強固の防護評価 (ファルタ笙)			
	坂	第生したとしても料面崩壊が強風の防護設備(ノイルク寺) に影響なみばよしはまたにくく、また、決勝の時、影響ぶよ			
		に影響を反はりとは考えにくく、まに、建物の壁へ影響が人			
		きくなることがあれは、それは風よりも斜面崩壊の影響が大			
		きいと考えられる。このように影響モードが異なるため、強			
		風と斜面崩壊との組み合わせは強風、または斜面崩壊単独事			
		象と同じと考えられる。これはどのような大きさの風であっ			
		ても同様である。			
		<時差来襲>			×
		強風後に斜面崩壊が発生したとしても、強風による影響(フ			
		イルタ等)と斜面崩壊に上る影響(建物の時かど)け異たる			
		イバノ 寺/ こが固加線になるが音(定物の主なこ) は突なる			
		ことから、風風と射面崩壊との組み口がせば風風、よには射			
		面朋塚単独争家と回しと考えられる。これはとのような人さ     ちゃ見てた。てい同じてたる。			
	-	この風であつても回様である。			
	霧	<同時来襲>			X
		強風時に霧が発生する状況は想定しにくく、発生確率は十分			
		低いと考えられる。万が一、強風と霧が同時に発生したとし			
		ても強風(飛来物)で破損した防護設備を通じて霧がプラン			
		トヘ影響を与える状況も想定しにくく、霧だけではプラント			
		へ影響を及ぼさないと考えられることから、強風の単独事象			
		と同じであると考えられる。これはどのようか大きさの風で			
		ちっても同様である			
					~
		、 対定木袋/			^
		強風俊に務が発生したとしても、強風(飛米物) (戦損した)			
		防護設備を通じて霧がフラントへ影響を与える状況も想定し			
		にくく、霧だけではプラントへ影響を及ぼさないと考えられ			
		ることから、強風の単独事象と同じであると考えられる。こ			
		れはどのような大きさの風であっても同様である。			
竜	強	<同時来襲>	0	0	0
巻	風	竜巻の発生時間は数十分ほどであるため、先に竜巻が発生し、			
		その後、ほぼ同時に強風が発生することは想定しがたく、同			
		時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかしながら、プ			
		ラントに影響を与えるような強風や音巻の2つの事象に対し			
		て国や飛车物に対する防難設備も同じと考えられるため 重			
		これ、「水水物に内」、るめ後以面の向しこうたら4000にの、重 再重免に上り安全設備への影響が十キイカスレタうたわるこ			
		「重ず豕により女主以脯、の影響が入さてなるころんられるこ しか」「香用東角」 しして老歯十て			
		こから「里宜寺家」こして与思りる。			
		なお、ノフントに影響を与えない程度の風と軍をとの組み合			
		わせは竜巻単独事象と同じと考えられる。			-
		<時差来襲>	0	0	0
		強風や飛来物に対する共通の防護設備は同じと考えられるた			
		め、強風によって破損した防護設備が復旧する前に竜巻が発			
		生すると、重畳事象により影響が大きくなると考えられる。			
		短期間の間に復帰できない場合は、強風と竜巻は「重畳事象」			
		として考慮する。			
		なお、プラントに影響を与えない程度の風と音巻との組み合			
		わせは竜巻単独事象と同じと考えられる。			

火山	<同時来襲> 竜巻の発生時間は数十分ほどであるため、先に竜巻が発生し、 その後、ほぼ同時に火山噴火が発生することは想定しがたい。 また竜巻と火山噴火は独立事象であり、それらの発生確率も 十分低いことから、同時来襲の確率は十分小さいと考えられ る。しかしながら、万が一、竜巻と火山噴火が同時に発生し た場合は、竜巻(飛来物など)により火山噴火に対する防護 設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が損傷することが考えら れることから、竜巻と火山噴火の同時来襲は「重畳事象」と して考慮する。		0	0
	<時差来襲> 竜巻(飛来物など)により火山噴火に対する防護設備(火山 灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、それらを短期間の間に復 帰できない場合は、竜巻と火山噴火の時差来襲は「重畳事象」 として考慮する。		0	0
降雨	<同時来襲> 竜巻の発生時間は数十分ほどであるため、先に竜巻が発生し、 その後、ほぼ同時に降雨が発生することは想定しがたい。ま た竜巻と降雨は独立事象であり、それらの発生確率も十分低 いことから、同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。し かしながら、万が一、竜巻と降雨が同時に発生した場合、竜 巻(飛来物)によって排気口の屋根が破損するなど、降雨に 対する防護設備が破損し、その破損個所を通じて雨水が建物 内部に侵入することが考えられ、崩壊熱除去系への影響する 可能性がある。竜巻と降雨の同時来襲は「重畳事象」として 考慮する。これはどのような降水量であっても同様である。		0	0
	<時差来襲> 竜巻(飛来物)によって排気口の屋根が破損するなど、降雨 に対する防護設備が破損し、その破損個所を通じて雨水が建 物内部に侵入することが考えられ、崩壊熱除去系への影響す る可能性がある。防護設備を短期間の間に復帰できない場合 は、竜巻と降雨の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。 これはどのような降水量であっても同様である。		0	0
積雪	<同時来襲> 竜巻の発生時間は数十分ほどであるため、先に竜巻が発生し、 その後、ほぼ同時に積雪が発生することは想定しがたい。ま た竜巻と積雪は独立事象であり、それらの発生確率も十分低 いことから、同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。 しかしながら、万が一、竜巻と積雪が同時に発生した場合、 竜巻(飛来物)によって排気口の屋根が破損するなど、積雪 に対する防護設備が破損し、その破損個所を通じて積雪が建 物内部に侵入することが考えられ、崩壊熱除去系への影響す る可能性がある。竜巻と積雪の同時来襲は「重畳事象」とし て考慮する。これはどのような積雪であっても同様である。		0	0
	<時差来襲> 竜巻(飛来物)によって排気口の屋根が破損するなど、積雪 に対する防護設備が破損し、その破損個所を通じて積雪が建 物内部に侵入することが考えられ、崩壊熱除去系への影響す る可能性がある。防護設備を短期間の間に復帰できない場合 は、竜巻と積雪の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。 これはどのような積雪であっても同様である。		0	0
森 林 火 災	<同時来襲> 竜巻の発生時間は数十分ほどであるため、先に竜巻が発生し、 その後、ほぼ同時に森林火災が発生することは想定しがたい。 また竜巻と森林火災は独立事象であり、それらの発生確率も			×

		十分低いことから、同時来襲の確率は十分小さいと考えられ		
		3.		
		また 万が一 音巻と森林火災が同時発生したとしても 日		
		本の音楽は海岸領シンに発生するのに対し 本林本のけ山側		
		本の电合は毎年标伯いに光王, つのに対し、林林八次は田岡		
		から発生するものであるにの、ノフントへ影響を与える方向		
		(フラントの山側、海岸線側)も異なる。このため、防護設		
		備、及び影響モードは異なり、単独事象の影響と同じと考え		
		ることができる。		
		<時差来襲>		×
		金券発生後に森林火災が発生したとしても 日本の竜巻け海		
		岩台222(24年)(24) 220200000000000000000000000000000000		
		オのでなるため、プラントへ影響なたうる士向(プラントの		
		ものでのるため、ノフントや影響を子える刀円(ノフントの		
		山側、御戸稼側)も共なる。防護設備、及び影響モートは共		
		なり、単独事家の影響と同じと考えることかできる。		
	低	<同時来襲>		×
	温	竜巻の発生時間は数十分ほどであるため、先に竜巻が発生し、		
		その後、ほぼ同時に低温が発生することは想定しがたい。ま		
		た竜巻と低温は独立事象であり、それらの発生確率も十分低		
		いことから、同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。		
		また、万が一、竜巻と低温が同時発生しても防護設備、及び		
		影響モードけ異かるため、対象外とできる。これけ低温の程		
		一度に依在したい		
				~
		く 时 左 米 聚 ノ		×
		電を発生後に低温が発生したとしても防護設備、及び影響 モンジョン・ション・ション・ション・ション・ション・ション・ション・ション・ション・シ		
		ードは異なるため、対象外とできる。これは低温の程度に依		
		存しない。		
	斜	<同時来襲>		$\times$
	面	竜巻時に斜面崩壊が発生する状況は想定しにくく、発生確率		
	崩	は十分低いと考えられる。万が一、竜巻と斜面崩壊が同時に		
	壞	発生しても防護設備、及び影響モードは異なるため、対象外		
		とできる。また		
		日本の音差け海岸線沿いに発生するのに対しの公開になってい		
		日本の电台は時年标旧くに元上するのに対し、所面所家は田 側から惑生するため、プラントへ影響などうる士		
		向かり光王するものてのるため、フランド、影響を子える力		
		同(ノノノトの山側、御庄脉側)も共なる。このため、単独		
		事家の影響と回しと考えることかできる。		
		<時差米襲>		×
		竜巻発生後に斜面崩壊が発生したとしても日本の竜巻は海岸		
		線沿いに発生するのに対し、斜面崩壊は山側から発生するも		
		のであるため、プラントへ影響を与える方向(プラントの山		
		側、海岸線側)も異なる。このため、単独事象の影響と同じ		
		と考えることができる。		
	霧	<同時来襲>		X
		金巻時に霧が発生する状況は想定しにくく 発生確率は十分		
		低いと考えられる		
		「方が」 音巻レ雾が同時発生したレーアル 音巻にトップ神		
		カか 、电容と務が回転元王したとしても、电容によりて戦 増した陆謙訥借むるドア電がプラント。影響なちらて中辺を		
		頃しため受い脯を通して務パノノントへ影響を子んる状化も 相会したくい、また。 電だけではプラント。影響なみぼされ		
		忍圧しにくい。また、務にりじはノフノトへ影響を及はさな		
		いと考えられることから、电をの単独争家と回しじめると考		
		えられる。		
		<時差来襲>		×
		竜巻発生後に霧が発生したとしても、竜巻によって破損した		
		防護設備を通じて霧がプラントへ影響を与える状況も想定し		
		にくく、霧だけではプラントへ影響を及ぼさないと考えられ		
		ることから、竜巻の単独事象と同じであると考えられる。		
降	強	<同時来襲>		X
 इन्न	風	降雨時に強風が発生する確率は十分低いとは言えないが 降		
119	/	雨によって確風に対する防護設備に影響を与うるとけ考うに		
		イルアレから 防難設備 及び影響エードは思わり 対色が		
		ヽヽ ここかり、辺曖以囲、及び影音に「「は共なり、刈家/ト		1

		とできる。これはどのような降水量、風であっても同様であ ス			
					×
		降雨によって強風に対する防護設備に影響を与えるとは考え			
		にくく、また、強風の影響(強風及び飛来物)が変化するこ			
		ともなく、プラントへの影響は降雨または強風の単独事象と			
		同じであると考えられる。これはどのような降水量、風であ			
-	- <del>1</del> *	っても同様である。			
	电坐	< 同時米襲> 欧五味に充光が死生せて施索はし八低いしは言さないが			X
	苍	降雨時に电をか発生する雌半は十分低いとは言えないか、 降雨に上って音差に対する防難設備に影響を与うるとけ考う			
		降雨によりて电をに対する防護設備に影響を子えるとは与え にくいことから 防難設備 及び影響モードけ異かり 対象			
		外とできる。これはどのような隆水量であっても同様である。			
		<時差来襲>			X
		降雨によって竜巻に対する防護設備に影響を与えるとは考え			
		にくく、また、降雨後に竜巻が発生したとしてもその影響(強			
		風及び飛来物)が変化することもなく、プラントへの影響は			
		降雨または竜巻の単独事象と同じであると考えられる。これ			
		はどのような降水量であっても同様である。		_	-
	火		0	$\bigcirc$	0
	Щ	降雨時に火山噴火が発生する確率について、これらの事象は			
		畑立争家でめり、てれらの発生帷半は十分低いことから、回 時本龍の確率は上公小さいと考えられて しかし 下が一			
		時米襲り唯学は十万小さいと考えられる。しかし、カか一、 略両時にル山時ルが発生した担合 略両でル山正の密度け亦			
		体内時に八山頃八が光生した物ロ、陸内で八山八の石及は友 化し水山灰の重量が大きくたり 建物室に影響を与うスト考			
		えられる。また、火山灰が排水設備へ流れることによって排			
		水設備が詰まり、排水が不能になることも考えられる。この			
		ようにプラントへの影響が大きいと考えられるため、「重畳			
		事象」として考慮する。これはどのような降水量であっても			
		同様である。			
		<時差来襲>			×
		降雨後に火山噴火が発生しても降雨によって火山噴火に対す			
		る防護設備(火山灰を防ぐフィルタ)に影響を与えるとは考			
		えにくく、防護設備、及び影響モードは異なり、対象外とで			
-	≄	さる。これはどのような降水重でめつても回様でめる。 /同味支館へ			~
	傾雪	>、回時末慶/  略雨時に積重が発生する状況け相定したくく 発生確率け上			^
	=	今低いと考えられる。 万が一 降雨と積雪が同時発生したと			
		しても、お互いの防護設備に影響を与えるとは考えにくく、			
		プラントへの影響は降雨または積雪の単独事象と同じである			
		と考えられる。これはどのような降水量、及び積雪であって			
		も同様である。			
		<時差来襲>			×
		降雨後に積雪が発生してもお互いの防護設備に影響を与える			
		とは考えにくく、ブラントへの影響は降雨または積雪の単独			
		争家と回しじめると考えられる。これはとのよりな降水重、 及び積重であってた同样である			
ŀ	枩	へい項目 くのつ く ひ 凹 1% く の つ。 < 同時 本 鶴 >			×
	林	ないのです。     ながたのです。     ながないのです。     ながないのです。			
	火	は十分低いと考えられる。万が一、降雨時に森林火災が発生			
	災	したとしてもその影響は抑制される。これはどのような降水			
		量であっても同様である。			
		<時差来襲>			×
		降雨後に森林火災が発生したとしてもお互いの防護設備に影			
		響を与えるとは考えにくく、プラントへの影響は降雨または			
		森林火災の単独事象と同じであると考えられる。これはどの			
		ような降水量であっても同様である。			

	低	<同時来襲>			×
	温	降雨時に低温が発生すろ確率は十分低いとは言えたいが 防			
		していていたい。 していていていていていていていていていていていていていていていていていていてい			
		れなどのような陣小重でのうても同様でのる。	 		~
					X
		降雨後に低温か発生したとしてもお互いの防護設備に影響を			
		与えるとは考えにくく、ブラントへの影響は降雨または低温			
		の単独事象と同じであると考えられる。これはどのような降			
		水量であっても同様である。			
	斜	<同時来襲>		0	0
	面	降雨により、斜面崩壊が発生する確率は十分低いとは言えな			
	崩	い。斜面崩壊は降雨の防護設備、建物、その他外部に設置し			
	壊	ている機器に影響を与える可能性がある。これはどのような			
		降水量であっても同様である。			
		<時差来襲>		0	0
		隆雨後であっても、不安定な地盤が何かしらの影響により斜		-	-
		面が崩壊する可能性が否定できかい 斜面崩壊け建物 その			
		他外部に設置している機哭に影響を与うる可能性がある。 ****			
		ーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー			
-	雿				$\vee$
	浙东	>四町木炭/ 阪市中に雪が改出すて確認け」八低いいけーさかい、 しょい			^
		降的時に務が完生90年半は十万低いとは言えない。しかし わぶと 咳声欲に電が発生したトレナまでの咳声の影響(+			
		はいめ、			
		位上昇等)か変化することもなく、フラントへの影響は降雨			
		の単独事象と同じであると考えられる。これはどのような降			
		水量であっても同様である。			
		<時差来襲>			×
		降雨後に霧が発生したとしてもプラントへの影響は降雨の単			
		独事象と同じであると考えられる。これはどのような降水量			
		であっても同様である。			
il.	34				
八	短	<同時来襲>		$\circ$	0
八山	短風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は		0	0
八山	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる		0	0
火 山	風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし		0	0
火 山	風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような		0	0
火 山	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火		0	0
<u>八</u> 山	通風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え		0	0
八 山	風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に得		0	0
八 山	風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時		0	0
<u>八</u> 山	通風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として老慮すろ。		0	0
<u>八</u> 山	通風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 たむ 水山噴水とプラントに影響を与えたい程度の風との組		0	0
<b>火</b> 山	通風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせけ火山噴水単純事象と同じと考えられろ		0	0
<u>八</u> 山	通風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。		0	0
<u></u> Ц	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。		0	0
<u></u> Ц	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。		0	0
<u></u> Ц	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。		0	0
ΥЦ	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <時差来襲> 火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す ス郡本物が、より建物中町に得えしやすい状況になると想定。		0	0
ΥЦ	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <時差来襲> 火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す る飛来物が、より建物内部に侵入しやすい状況になると想定		0	0
入山	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <時差来襲> 火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す る飛来物が、より建物内部に侵入しやすい状況になると想定 される。防護設備を短期間の間に復帰できない場合は、火山 いたりかり、ため回りたまままし、		0	0
<b>八</b> 山	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <p> <p> <p< td=""><td></td><td>0</td><td>0</td></p<></p></p>		0	0
入山	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <床襲> 火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す る飛来物が、より建物内部に侵入しやすい状況になると想定 される。防護設備を短期間の間に復帰できない場合は、火山 噴火と強風の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。なお、 火山噴火とプラントに影響を与えるい程度の風との組み合わ とりまって多いないなると想定		0	0
<b>八</b> 山	强風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <時差来襲> 火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す る飛来物が、より建物内部に侵入しやすい状況になると想定 される。防護設備を短期間の間に復帰できない場合は、火山 噴火と強風の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。なお、 火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組み合わ せは火山噴火単独事象と同じと考えられる。		0	0
ΥЦ	強風 竜光	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <時差来襲> 火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す る飛来物が、より建物内部に侵入しやすい状況になると想定 される。防護設備を短期間の間に復帰できない場合は、火山 噴火と強風の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。なお、 火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組み合わ せは火山噴火単独事象と同じと考えられる。		0	0
ΥЦ	<b>通風</b>	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <時差来襲> 火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す る飛来物が、より建物内部に侵入しやすい状況になると想定 される。防護設備を短期間の間に復帰できない場合は、火山 噴火と強風の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。なお、 火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組み合わ せは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <同時来襲> 火山噴火時に竜巻が発生する確率について、これらの事象は		0	0
入 山	<b>油風</b>	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <p、山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す る飛来物が、より建物内部に侵入しやすい状況になると想定 される。防護設備を短期間の間に復帰できない場合は、火山 噴火と強風の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。なお、 火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組み合わ せは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 &lt;同時来襲&gt; 火山噴火時に竜巻が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる</p、山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 		0	0
入 山	<b>油風</b>	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <p> <p> <p> <p>  &lt;</p></p></p></p>		0	0
入 山	· 通風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <p> <p> <p></p></p></p>		0	0
入 山	· 通風	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <p><p><p> <p>  &lt;</p></p></p></p>		0	0
入 山	<b>油風</b>	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <味業等> 火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す る飛来物が、より建物内部に侵入しやすい状況になると想定 される。防護設備を短期間の間に復帰できない場合は、火山 噴火と強風の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。なお、 火山噴火とブラントに影響を与えるい程度の風との組み合わ せは火山噴火と強風の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。なお、 火山噴火とうラントに影響を与えない程度の風との組み合わ せは火山噴火を強馬の時差楽襲は「重畳事象」として考慮する。なお、 火山噴火と方うントに影響を与えない程度の風との組み合わ せは火山噴火を強悪物が、より建物内部に侵入 ながら、万が一、火山噴火と竜巻が同時に発生した場合、火 山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が損 傷し、竜巻によって発生する飛来物が、より建物内部に侵入		0	0
入山	<b>竜</b> 巻	<同時来襲> 火山噴火時に強風が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火とプラントに影響を与えるような 強風が同時に発生した場合、火山噴火に対する防護設備(火 山灰を防ぐフィルタなど)が損傷し、プラントに影響を与え るような強風によって発生する飛来物が、より建物内部に侵 入しやすい状況になると想定される。火山噴火と強風の同時 来襲は「重畳事象」として考慮する。 なお、火山噴火とプラントに影響を与えない程度の風との組 み合わせは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <時差来襲> 火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が 損傷し、プラントに影響を与えるような強風によって発生す る飛来物が、より建物内部に侵入しやすい状況になると想定 される。防護設備を短期間の間に復帰できない場合は、火山 噴火と強風の時差来襲は「重畳事象」として考慮する。なお、 火山噴火とプラントに影響を与えるい程度の風との組み合わ せは火山噴火単独事象と同じと考えられる。 <同時来襲> 火山噴火時に竜巻が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし ながら、万が一、火山噴火と竜巻が同時に発生した場合、火 山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が損 傷し、竜巻によって発生する飛来物が、より建物内部に侵入 しやすい状況になることが想定される。火山噴火と竜巻の同		0	0

		<時差来襲>			0	0
		火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど)が				
		<b>指傷し、 音巻によって発生する飛来物が、より建物内部に侵</b>				
		入しやすい状況にたろことが想定される。防護設備を短期間				
		の問に復帰できない場合け、水山噴水と岡園の時美本龍け「重				
		- 馬車魚」 レーて 老 慮 する				
-	四次	「里芋豕」 こして 与思り る。 、日味 古鶴 5			$\cap$	$\bigcirc$
	平			0	0	0
	1	火山噴火時に降雨が発生する確率について、これらの事象は				
		独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる				
		ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし				
		ながら、万が一、火山噴火と降雨が同時に発生した場合、降				
		雨で火山灰の密度は変化し火山灰の重量が大きくなり、建物				
		等に影響を与えると考えられる。また、火山灰が排水設備へ				
		流れることによって排水設備が詰まり、排水が不能になるこ				
		とも考えられる。このようにプラントへの影響が大きいと考				
		えられるため、「重畳事象」として考慮する。これはどのよ				
		うな降水量であっても同様である。				
		<時差來觀>		$\cap$	$\cap$	0
		*山灰が降灰」た後に降雨が発生することによって 水山灰		0	0	0
		の密度が変わり 重畳も大きくたる 降灰後の降雨に上り灰				
		の石皮が変わり、重重し八さくなる。阵八夜の阵雨により八 が地水評価。広わることにわる。このため、地水評価が封ま				
		が外小成備、(加4しることになる。このにの、外小成備が向ま の 世界がてななななたとれて、た山底の除土など				
		り、排水が不能になることも考えられる。火田灰の味去など				
		か短期間の間に美施できない場合は、火山噴火と降雨の時差				
		来襲は「重畳事象」として考慮する。これはどのような降水				
		量であっても同様である。				
	積	<同時来襲>	0			0
	雪	火山噴火時に積雪が発生する確率について、これらの事象は				
		独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる				
		ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しかし				
		ながら、万が一、火山噴火と積雪が同時に発生した場合、火				
		山灰の重量に数メートルの積雪が加わることにより、重量が				
		大きくなり、建物等に影響を与えることもと考えられる。ま				
		た、雪解け水で火山灰が排水設備へ流れることによって排水				
		設備が詰まり、排水が不能になることも考えられる。このよ				
		うにプラントへの影響が大きいと考えられるため 「重畳事				
		ターとして考慮する これけどのような積雪であっても同様				
		家」としてう感, 5。これのよこのような損当てのうても内容				
			$\cap$			0
		、一切左木袋/	0			0
		べ田灰が降灰した後に数クートルの損害が加わることによ し、 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・				
		り、里重が大さくなる。建物寺に影響を与えることもと考え				
		られる。降灰後の雪解け水により灰か排水設備へ流れること				
		になる。このため、排水設備が詰まり、排水が不能になるこ				
		とも考えられる。火山灰の除去などが短期間の間に実施でき				
		ない場合は、火山噴火と積雪の時差来襲は「重畳事象」とし				
		て考慮する。これはどのような積雪であっても同様である。				
	森	<同時来襲>			0	0
	林	火山付近の森林では火砕流等で火災が発生する可能性がある				
	火	が、十分な遠方にあるプラントと周辺の森林では、火山噴火				
	災	の影響で森林火災が発生することは想定しにくく、同時に発				
		生確率は十分低いと考えられる。一方、偶発的に発生する森				
		林火災と火山噴火は独立な事象であり、これらの発生確率は				
		十分低いと考えられることから同時来襲の確率は十分小さい				
		と考えられる。しかしながら、万が一、火山噴火と森林火災				
		が同時に発生した場合、火山灰の降灰に上り火山噴火に対す				
		ス防護設備(水山灰を防ぐフィルタたど)が指揮1 そこに				
		1000000000000000000000000000000000000				
		「赤庄小区八)つり北江小のつ。この床庄による影音は林仲八 ※し記い周で双仕する」と山底とし本せた※の日時立館は「毛				
		火 C 羽い 風 C 光 生 り る。 八 山 頃 八 C 冧 杯 八 火 の 回 时 米 襞 は 「 里 車 車 毎 」 し し て 老 虔 子 ス				
		耳ず豕」として与思りる。				

		<時差来襲> 森林火災による反応強度による熱影響は、発生した降灰のプ ラントへの影響モードとは異なる。一方、火山灰の降灰によ		0	0
		り火山噴火に対する防護設備(火山灰を防ぐフィルタなど) が損傷し、そこに煤煙が侵入する可能性がある。この煤煙に よる影響は森林火災と弱い風で発生する。フィルタを短期間 の間に復帰できない場合は、火山噴火と森林火災の時差来襲 け「番禺事象」として考慮する			
	低温	<(同時来襲) 火山噴火時に低温が発生する確率について、これらの事象は 独立事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。万が一、 火山噴火時に低温が発生したとしても、その灰の影響が低温 により増幅する、または変化するとは考えにくく、防護設備、 及び影響モードは異なるため、対象外とできる。			×
		<時差来襲> 火山噴火後に、低温が発生してもその灰の影響が低温により 増幅する、または変化するとは考えにくく、防護設備、及び 影響モードは異なるため、対象外とできる。			×
	斜面崩壞	<同時来襲> 火山噴火時、十分遠くにあるモデルサイト周辺の斜面崩壊が 発生する状況は想定しにくいことから同時に発生確率は十分 低いと考えられる。万が一、火山噴火と斜面崩壊が同時に発 生したとしても斜面崩壊が火山灰の防護設備(フィルタ等) に影響を及ぼすとは考えにくく、また、斜面崩壊は建物の壁 へ影響すると考えられる。このように影響モードが異なるた め、火山噴火と斜面崩壊との組み合わせは火山噴火、または 斜面崩壊単独事象と同じと考えられる。			×
		<時差来襲> 火山噴火後に、十分遠くにあるモデルサイト周辺の斜面崩壊 が発生したとしても斜面崩壊が火山灰の防護設備(フィルタ 等)に影響を及ぼすとは考えにくく、また、斜面崩壊は建物 の壁へ影響すると考えられる。このように影響モードが異な るため、火山噴火と斜面崩壊との組み合わせは火山噴火、ま たは斜面崩壊単独事象と同じと考えられる。			×
	<b>雲</b> 務	<同時来襲> 火山噴火時に霧が発生する確率について、これらの事象は独 立な事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられる ことから同時来襲の確率は十分小さいと考えられるが、火山 灰が降灰している状況下で霧が発生すると、火山灰の密度が 変化し、崩壊熱除去系に係るフィルタ目詰まりへの影響が増 幅、プラントに影響を及ぼす可能性がある。このようなこと から、火山噴火が発生している際の霧の発生は重畳事象とし て選定する。	0		0
		<時差来襲> 火山噴火後に、その灰の影響が霧により増幅する、または変 化するとは考えにくい。防護設備、及び影響モードは異なる ため、対象外とできる。			×
積雪	強風	<同時来襲> 積雪時に強風が発生する確率は十分低いとは言えないが、積 雪時に強風が発生したとしても、お互いの防護設備に影響を 与えるとは考えにくい。防護設備、及び影響モードは異なる ため、対象外とできる。これはどのような積雪、風であって も同様である。			×
		<時差来襲> 積雪後に強風が発生したとしても、お互いの防護設備に影響 を与えるとは考えにくい。防護設備、及び影響モードは異な			×

	るため、対象外とできる。これはどのような積雪、風であっ				
	ても同様である。				
竜	<同時来襲>			×	
巻	積雪時に竜巻が発生する確率は十分低いとは言えないが、積				
	雪時に竜巻が発生したとしても、お互いの防護設備に影響を				
	与えるとは考えにくい。防護設備、及び影響モードは異なる				
	ため、対象外とできる。これはどのような積雪であっても同				
	様である。				
	<時差来襲>			×	
	着雪後に竜巻が発生したとしても、お互いの防護設備に影響				
	を与えるとけ老えにくい 防護設備 及び影響モードけ異な				
	スため、対象外とできる、これけどの上うか積雪であっても				
	同様である				
降				×	
म्म स्त	>同時不衰/ 諸電時に降雨が発生する世辺け相会したく/ 発生確素は上			~	
EE1	損当时に阵羽が光生りる仏化は忍足しにくく、光生唯学は しいいいようとれて、かれ、欧正し建築が美男しても建築は				
	プ低いとちんられる。なわ、降阳と慎雪が里宜しても慎雪は				
	酢りるにりである。ノブントへの影響は降雨まには損雪単独 し ロジェキストオンシトスートしいがありたたけまで、 欧丁・				
	と回しじめると考えられる。これはどのような積雪、降雨で				
	めつても同様である。			 	
	<時差来襲>			$\times$	
	積雪後に降雨が発生してもお互いの防護設備に影響を与える				
	とは考えにくく、プラントへの影響は積雪または降雨の単独				
	事象と同じであると考えられる。これはどのような積雪、降				
	雨であっても同様である。				
火	<同時来襲>	0		0	
山	積雪時に火山噴火が発生する確率について、これらの事象は				
	独立な事象であり、これらの発生確率は十分低いと考えられ				
	ることから同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。しか				
	しながら、万が一、積雪と火山噴火が同時に発生した場合。				
	着雪の後に火山灰が降灰することに上って 番号が大きくか				
	「有当り後に穴山穴" (中穴) ふここにようて、 宝宝// 穴にてな ろ これらけ プラントに影響があるため 「香農事象」と				
	る。これらは、アファーに影音があるにの、「里里手豕」と して考慮する。これけどのような語雪であっても同样である				
	してう思する。これのよこのような損害でのうても同様でのる。	$\cap$		$\cap$	
	へ时左木袋/ 電が細けてわらず 重の除せればが后期間の間に実抜づきれ	0		0	
	当か解りてわらり、当の际去などが思期间の間に美施でさな い思へい、しい医び欧国士ストレストーズ、手見が古ちくか				
	い場合は、火山火が降火することによつし、里重が大さくな				
	る。積雪と火山噴火の時差米襲は「重畳事象」として考慮す				
	る。これはどのような積雪であっても同様である。				
森	<同時来襲>			$\times$	
林	積雪後、森林火災が発生する状況は想定しにくく、発生確率				
火	は十分低いと考えられる。仮に、森林火災が発生したとして				
災	も積雪によって、火災は抑制されると考えられる。これはど				
	のような積雪であっても同様である。				
	<時差来襲>			$\times$	
	積雪が残っていれば、森林火災は抑制される。また、積雪が				
	無くなった後に森林火災が発生した場合は、単独事象と同じ				
	となる。これはどのような積雪であっても同様である。				
低	<同時来襲>		0	0	
温	低温時に積雪が発生する確率は十分低いとは言えず 発生す				
1002	る可能性のある事象である。積雪と低温の影響により雪が演				
	はし 崩壊執除夫系に係るフィルタの閉塞を引き起こすこと				
	ま考えられる その退合 プラントへの影響が大きい可能性				
	があるため 「番禺重象」として老虐する これけじのとう				
	かのつにの、「里里芋豕」としてう思りる。これはこのよう た音電 BTIH担でなってた同様でなる				
	(3項目、及い限価でのつても凹体でのる。) / 味辛本館へ			 ~	
	↓ 「「「「「「」」」」」」」」」 □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □			×	
	積雪俊に低温か発生したとしても、同時米襲のときに考えら     ねよ 柔のませいねことかいしま。こと、				
	れに雪の便結は起こらないと考えられる。ブラントへの影響				
	は積雪または低温の単独事象と同じであると考えられる。こ				
	れはどのような積雪、及び低温であっても同様である。				

	斜	<同時来襲>				×
	而	<b>着雪時に斜面崩壊が発生すろ確率について</b> これらの事象は				
	ш Ш	独立な東角でなり これたの政府確認は上八任いと考えたわ				
	月月	独立な争家でのり、これらの光生帷谷は一万低いこちんられ				
	瑗	ることから同時米襲の確率は十分小さいと考えられる。方か				
		一、積雪と斜面崩壊が同時に発生したとしても斜面崩壊の影				
		響モード(建物建物の壁への影響)と積雪による影響モード				
		(崩壊熱除去系の空気流路への影響)は異なると考えられる				
		ため、積雪と斜面崩壊との組み合わせは積雪、または斜面崩				
		「「「」」」、「「」」、「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、				
		数半弦争家と同じとつんり4000。 また東角ししてけ、約五島歯とりた電島が改たするし来うと				
		よに争家としては、料面朋塚よりも自朋が光生りると与えら				
		れるが当期は別述評価とする。			 	
		<時差来襲>				×
		積雪後、解けきれていない雪が残った時に斜面崩壊が発生す				
		る状況も考えにくく、プラントへの影響は積雪の単独事象と				
		同じであると考えられる。				
	霧	<同時来襲>				×
		<b>積雪時に霧が発生する確率は十分低いとは言えず。発生する</b>				
		可能性のある事象である 1 か1 かがら 万が一 積雪時に				
		雪がなたしたししてオースの存電の影響が亦化せることすわ				
		務が光生したとしても、ての傾当の影響が変化することもな				
		く、ノノントへの影響は阵羽の単独争家と回してのると考え				
		られる。これはどのような降水量であっても同様である。				
		<時差来襲>				×
		霧が積雪の防護設備に影響を与えるとは考えにくく、プラン				
		トへの影響は積雪の単独事象と同じであると考えられる。				
木	砂	/日味 本鶴 /		$\sim$		$\frown$
冧	短			0		0
杯	風	森林火災時に強風が発生する確率について、これらの事象は				
火		独立事象ではあるが確率は十分低いとは言えない。同時発生				
災		した場合、風によって火災の伝搬が速くなり、また飛び火の				
		影響も大きくなると考えられる。これはどのような大きさの				
		風でも同様である。				
						×
		本林ル巛浴に強風が発生してたた万いの防護設備に影響たち				~
		林小八火後に国気が元王してもお互いの防硬取哺に影響をす				
		えるとは考えにくく、ノブントへの影響は緑林火灰まには強				
		風の単独事象と同じであると考えられる。				
	竜	<同時来襲>				×
	巻	森林火災時に竜巻が発生する確率について、これらの事象は				
		独立事象であり、それらの発生確率も十分低いことから、同				
		時来襲の確率は十分小さいと考えられる。万が一、森林火災				
		時に竜巻が発生したとしても、日本の竜巻は海岸線沿いに発				
		生するのに対し、森林水災け山側から発生するものであるた				
		エチョッに入し、林林へのは田園から元王チョーのでのここ				
		の、ノノント、影響を子んる刀向(ノノントの山側、伸岸隊)				
		側)も共なる。防護設備、及び影響モートは共なり、単独争				
		家の影響と回しと考えることかでさる。				
		<時差来襲>				×
		森林火災後に竜巻が発生したとしても、日本の竜巻は海岸線				
		沿いに発生するのに対し、森林火災は山側から発生するもの				
		であるため、プラントへ影響を与える方向 (プラントの山側、				
		海岸線側)も異なる。防護設備、及び影響モードは異なり、				
		単独事象の影響と同じと考えることができる。				
	降	< 同時来態 >			 	×
	का	本林水災時に降雨が発生」を担合 水災の強産け低下またけ				, ,
	144	林小八火町に(2円)が光工しに笏百、八火り畑及は低下または 逃しそれてため、木井山巛し欧王が同時に変化中マ小河に相				
		伯八されるため、湫竹八火と降附か回時に発生する状況は想				
		たしにくく、 発生 雌学 は十分 低いと考えられる。 力が一、 森				
		杯火災時に降雨が発生したとしても、お互いの防護設備に影				
		響を与えるとは考えにくい。防護設備、及び影響モードは異				
		なるため、対象外とできる。これはどのような降雨であって				
		も同様である。				
		<時差来襲>				X

	えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なるた			
	め、対象外とできる。これはどのような降雨であっても同様			
ik			$\bigcirc$	$\bigcirc$
八山	>四吋木袋/ 本林水巛時に水山時水が発生する確率について これらの車		0	0
μı	森林小八次時に八山頃八が光生りる確平について、これのの事 免け独立事象であり それらの発生確率も十分低いことから			
	家は孤立事家でのり、これらの元王権平も十万匹いことから、 同時本龍の確率は十公小さいと考えられる「しかしたがら			
	「「「「木装の帷午は」」」「「ビビビラえられる。 しかしながら、			
	トル防護設備(フィルタかど)が指復し そこに水山広が得			
	入する可能性がある この性価に上る影響け森林火災と弱い			
	■で発生する 森林火災と火山噴火の同時支護は「重畳事象」			
	して老庸する			
			$\bigcirc$	0
	煤煙により防護設備(フィルタなど)が損傷し。 フィルタを		0	0
	短期間の間に復帰できない場合は、そこに火山灰が侵入する			
	可能性がある。この煤煙による影響は森林火災と弱い風で発			
	生する。森林火災と火山噴火の同時来襲は「重畳事象」とし			
	て考慮する。			
積	<同時来襲>			 Х
雪	森林火災時に積雪が発生する場合、火災の強度は低下すると			
	考えられるため、森林火災と積雪が同時に発生する状況は想			
	定しにくく、発生確率は十分低いと考えられる。万が一、森			
	林火災時に積雪が発生してもお互いの防護設備に影響を与え			
	るとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なるため、			
	対象外とできる。これはどのような積雪であっても同様であ			
	る。			
	<時差来襲>			Х
	森林火災後に積雪が発生してもお互いの防護設備に影響を与			
	えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なるた			
	め、対象外とできる。これはどのような積雪であっても同様			
	である。			
低	<同時来襲>			×
温	森林火災時に異常な低温が発生する確率について、これらの			
	事象は独立である。万が一、森林火災時に低温が発生しても			
	お互いの防護設備に影響を与えるとは考えにくく、防護設備、			
	及び影響モードは異なるため、対象外とできる。これはどの			
	ような低温であっても同様である。			
	<時差来襲>			×
	森林火災後に低温が発生してもお互いの防護設備に影響を与			
	えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なるた			
	め、対象外とできる。これはどのような低温であっても同様			
- Ani				
斜	< 同時米駸>   本社山巛哇に斜云島遠ぶ飛舟寺で低洞は相会したく /			X
田	林仰八火时に料囬朋塚が先生りる状況は想正しにくく、発生 藤家は上八低いしまうこれて てが 本せよ巛哇に到工具			
朋	催半は十分低いと考えられる。万か一、緑林火灰時に料面崩 壊ぶ発生してす本社よ巛にとて影響エード(増価にとてつ)			
崁	暖が発生しても緑杯欠次による影響モート(煤煙によるノイ ルク閉塞)ト創売最適による影響モード(煤煙によるノイ			
	Nク闭塞) こ料面開張による影響て一下(建物建物の壁、の) 影響) は思わるため 低胆と斜面崩撞との組み合わせけ赤林			
	影響) は共なるため、低価と計画崩壊との組み自分とは林林 ル災 またけ斜面崩壊畄独重象と同じと考えられる			
	く時美本龍〜			×
	本林火災後 自発的に斜面崩壊する状況け相定しにくい 万			~
	が一 森林火災後に斜面崩壊が発生しても森林火災に上ろ影			
	響モード(煤煙によるフィルタ閉塞)と斜面崩壊に上ろ影響			
	モード(建物建物の壁への影響)は異たろため、低温と斜面			
	崩壊との組み合わせは森林火災。または斜面崩壊単独事象と			
	同じと考えられる。			
	また、3つの事象の重ね合わせとして、森林火災後に斜面崩			
	壊が発生し、森林火災後に土壌が曝露され、その後の降雨な			
	どにより斜面崩壊が発生した事例がある。しかしながら、こ			

		のような事象は、降雨の影響が大きいと考えられるため、降 雨と斜面崩壊の組み合わせの中に包絡することにする。		
	動務	<同時来襲> 森林火災時に霧が発生する確率について、これらの事象は独 立であり、これらの発生確率は十分低いと考えられることか ら同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。 加えて、森林火災は霧により抑制されると考えられるため、 プラントへの影響は小さくなると考えられる。 また、森林火災時に霧が発生しても森林火災の防護設備に 影響を与えるとは考えにくく、プラントへの影響は森林火災 の単独事象と同じであると考えられる。		×
		<時差来襲> 森林火災後に霧が発生しても森林火災の防護設備に影響を与 えるとは考えにくく、プラントへの影響は森林火災の単独事 象と同じであると考えられる。		×
低温	強風	<同時来襲> 低温時に強風が発生する確率について、これらの事象は独立 ではあるが確率は十分低いとは言えない。しかしながら、低 温後に強風が発生したとしても、お互いの防護設備に影響を 与えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なる ため、対象外とできる。これはどのような低温、風であって も同様である。		×
		<時差来襲> 低温後に強風が発生したとしても、お互いの防護設備に影響 を与えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異な るため、対象外とできる。これはどのような低温、風であっ ても同様である。		×
	竜巻	<同時来襲> 低温時に竜巻が発生する確率について、これらの事象は独立 ではあるが確率は十分低いとは言えない。しかしながら、低 温後に竜巻が発生したとしても、お互いの防護設備に影響を 与えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なる ため、対象外とできる。これはどのような低温であっても同 様である。		×
		<時差来襲> 低温後に竜巻が発生したとしても、お互いの防護設備に影響 を与えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異な るため、対象外とできる。これはどのような低温であっても 同様である。		×
	降雨	<同時来襲> 低温時に降雨が発生する確率について、これらの事象は独立 ではあるが十分低いとは言えない。しかしながら、低温後に 降雨が発生したとしてもお互いの防護設備に影響を与えると は考えにくく、プラントへの影響は低温または降雨の単独事 象と同じであると考えられる。これはどのような低温、降水 量であっても同様である。		×
		<時差来襲> 低温後に降雨が発生したとしてもお互いの防護設備に影響を 与えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なる ため、対象外とできる。		×
	火山	<同時来襲> 低温時に火山噴火が発生する確率について、これらの事象は 独立であり、これらの発生確率は十分低いと考えられること から同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。万が一、低 温時に火山噴火が発生してもお互いの防護設備に影響を与え るとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なるため、 対象外とできる。これはどのような低温であっても同様であ る。		×

		<時差来襲>			×
		任温裕に水山噴水が発生しても、水山灰の影響が増幅する			
		民通後に八田頃八が元王しても、八田八の泉音が増幅する、 またい本ルトストルホンマイノ 吐蕃刑佛 丑ざ影響 エード			
		まには変化するとは考えにくく、防護設備、及び影響モート			
		は異なるため、対象外とできる。これはどのような低温であ			
		っても同様である。			
	積	<同時来襲>	0		0
	雪	低温時に積雪が発生する確率について、これらの事象は十分			
	-	低いとは言えたい。また、積雪と低温の影響により雪が凍結			
		これには、これに、「「「」」とは「」」、「「」」とは「」、「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、			
		し、朋家旅店ムホに体のノイルクの肉本を引き起こりことも			
		ろんられる。その場合、ノラントへの影響が入さい可能性が			
		あるため、「重畳事象」として考慮する。これはどのような			
		低温、積雪であっても同様である。			
		<時差来襲>			×
		積雪は低温時に降ると考えられるため、低温後、時差によっ			
		て降雪が発生する事象は想定しにくいこのため、単独事象			
		し同じし去うこれるから、対象のしたる、これはどのとうか			
		こ回しこ与えり40分かり、対象外とする。こ40はこのような			
	-	低温、慎当じめつしも回家じめる。		 	
	森	<同時米襲>			×
	林	低温時に森林火災が発生する確率について、これらの事象は			
	火	独立である。万が一、低温時に森林火災が発生してもお互い			
	災	の防護設備に影響を与えるとは考えにくく、防護設備、及び			
		影響モードは異たるため、対象外とできる、これはどのよう			
		か低温であっても同样である			
					~
		> 「「「一」」「「「「一」」」」「「「「「」」」」「「「「一」」」」「「「「「」」」」」「「「」」」」」「「「」」」」」「「「」」」」」「「「」」」」			~
		低温後に森林火災が発生してもお互いの防護設備に影響を与			
		えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なるた			
		め、対象外とできる。これはどのような低温であっても同様			
		である。			
	斜	<同時来襲>			×
	面	低温時に斜面崩壊が発生する状況は想定しにくいことから同			
	出	時に発生確率は十分低いと考えられる。万が一(低温と斜面			
	庙	出価が同時に改生したししても低担による影響に」 じ (対機			
	坂	朋塚が同時に先生したとしても低価による影響モート(補機			
		糸配官内の水の凍結など)と斜面崩壊の影響モート(建物建			
		物の壁への影響)は異なるため、低温と斜面崩壊との組み合			
		わせは低温、または斜面崩壊単独事象と同じと考えられる。			
		これはどのような低温であっても同様である。			
		<時差来襲>			×
		任温裕に斜面崩壊が発生したとしても任温に上る影響モード			
		(佃筬示配官内の小の保福など)と新国朋家の影響で一下(建 「一時の時、の影響) は思わてたみ 低温し対天忠病しの知			
		物建物の壁への影響)は異なるため、低温と料面崩壊との組			
		み合わせは低温、または斜面崩壊単独事象と同じと考えられ			
		る。これはどのような低温であっても同様である。			
	霧	<同時来襲>			X
		低温時に霧が発生する確率について、これらの事象は十分低			
		いとは言えない。しかしながら、万が一、低温時に霧が発生			
		したとしても霧が低温の防護設備に影響を与えるとけ考えに			
		くく 防難設備 及び影響モードけ異たるため 対象外上で			
		、、、防疫収備、及び影音と「な共なるため、内家/PCC キモートわけばの上され低温でも」でも同様でもで			
		さる。これはとりよりな低価でのろくも回様でのる。			
		<時差米襲≥			×
		低温後に霧が発生したとしても霧が低温の防護設備に影響を			
		与えるとは考えにくく、防護設備、及び影響モードは異なる			
		ため、対象外とできる。これはどのような低温であっても同			
		様である。			
斜	砯	<同時来鸛>			X
而	同				, ,
山出	1993	M国防教団に囲風が光工りの唯学について、こ400の事象は 独立でもり これたの政圧強売すし八低いこしふと 回吐声			
朋友		<u> </u>			
瑗		その確率は十分小さいと考えられる。斜面崩壊時に強風が発 し、見いないないと考えられる。斜面崩壊時に強風が発			
		生する状況は想定しにくく、発生確率は十分低いと考えられ			

	フーマン 創工出場しか同ぶ回吐に改作したししてす約二		г	
	る。万か一、斜面崩壊と強風が同時に発生したとしても斜面			
	崩壊が強風の防護設備(フィルタ等)に影響を及ぼすとは考			
	えにくく、また、建物の壁へ影響が大きくなることがあれば、			
	それけ風上りも斜面崩壊の影響が大きいと考えられる この			
	ように影響モードか異なるため、強風と斜面崩壊との組み合			
	わせは強風、または斜面崩壊単独事象と同じと考えられる。			
	これはどのような大きさの風であっても同様である。			
				 ~
	<□ <p>◇吋左米襞/</p>			~
	斜面崩壊後に強風が発生したとしても斜面崩壊が強風の防護			
	設備(フィルタ等)に影響を及ぼすとは考えにくく、また、			
	建物の辟へ影響が大きくたることがあれば それけ風上りも			
	足物の生 影響がつきくなることがあればな、これは広なりの			
	斜面崩壊の影響が大さいと考えられる。このように影響モー			
	ドが異なるため、強風と斜面崩壊との組み合わせは強風、ま			
	たは斜面崩壊単独事象と同じと考えられる。これはどのよう			
	かナキさの風であっても同样である			
	なべてでの風てのうても向泳でのる。			
龟	<同時米襲>			×
巻	斜面崩壊時に竜巻が発生する状況は想定しにくく、発生確率			
	は十分低いと考えられる。 万が一 竜巻と斜面崩壊が同時に			
	先生しても防護設備、及び影響モートは異なるため、対象外			
	とできる。			
	また、万が一、竜巻と斜面崩壊が同時発生したとしても、日			
	木の帝巻け海岸線沙山に発生するのに対しの斜面崩壊け山側			
	イン电台は10月17日11に元王りるシルトリレ、所国朋族は川関			
	から発生するものであるため、ノフントへ影響を与える方向			
	(プラントの山側、海岸線側)も異なる。このため、単独事			
	象の影響と同じと考えることができる。			
	(1) (1) 目 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)			~
	~町左木装/			^
	斜面崩壊後に竜巻か発生したとしても日本の竜巻は海岸線沿			
	いに発生するのに対し、斜面崩壊は山側から発生するもので			
	あろため プラントへ影響を与える方向 (プラントの山側)			
	のうため、ノブマー 影響とすたの方向(ノブマージロ風、			
	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一			
	えることができる。			
降	<同時来襲>			×
त्र	斜面崩壊が生じている瞬間に異党な降雨が独立に発生する状			
PP:				
	況は想定しにくく、発生確率は十分低いと考えられる。仮に			
	このような状況を想定すると、斜面崩壊は降雨の防護設備、			
	建物、その他外部に設置している機器に影響を与える可能性			
	がちてが、これは欧西時に致生せて約五島博し目にでもてた			
	かめるが、これは降的時に先生する料面崩壊と向してめるた			
	め、降雨時の斜面崩壊発生の組み合わせの中に包絡すること			
	にする。これはどのような降水量であっても同様である。			
	<時差來襲>	1		×
	約二出版法に改正式が生した相人 別デロはいのエッサギー			
	新面開環境に降的か発生した場合、新面開環は降雨の防護設			
	備、建物、その他外部に設置している機器に影響を与える可			
	能性があるが、これは降雨時に発生する斜面崩壊と同じであ			
	スため 降雨浴の斜面崩壊発生の知る合わせの由に気ぬする			
	シルツ、戸田区ツ加田加級元王ツ加の日4ノビジアに已陥りる			
	ことにする。これはとのような降水重であっても同様である。			 
火	<同時来襲>			×
TI.	斜面崩壊時に火山噴火が発生する状況は想定しにくく 発生			
	確素け十〇任いと考えられる			
	「カか一、斜面崩壊と火山噴火が同時に発生したとしても斜面			
	崩壊が火山灰の防護設備(フィルタ等)に影響を及ぼすとは			
	老えにくく また 斜面崩壊け建物の辟へ影響するレ老うら			
	れる この上るに影響を二じが思わてたみ しい時もしがす			
	4000。このように影響で一下が共なるため、欠田噴火と料面			
	・ 朋環との組み合わせは火山噴火、または斜面崩壊単独事象と			
	同じと考えられる。			
	<時差來龍>	1		×
	> 四正小衣/ 約二島描述によ山時長が改圧したし、 イモ約二島長がした正			
	新面崩壊仮に欠山噴火が発生したとしても新面崩壊が火山火			
	の防護設備(フィルタ等)に影響を及ぼすとは考えにくく、			
	また、斜面崩壊は建物の壁へ影響すると考えられる。このよ			
	うに影響モードが異かるため、水山噴水と斜面崩壊との知る			
	ノマール音で エルディネシューツン ハロ・良ハモル 田加教との加か	1		

		合わせは火山噴火、または斜面崩壊単独事象と同じと考えら			
		れる。			
	積	<同時来襲>		×	
	雪	斜面崩壊時に積雪が発生する状況は想定しにくく、発生確率			
		は十分低いと考えられる。			
		万が一、積雪と斜面崩壊が同時に発生したとしても斜面崩壊			
		の影響モード(運物の壁への影響)と積雪による影響モード			
		(朋塚恐昧云赤の空丸(肌鉛への影響) は共なると考えられる ため 諸軍と斜面崩壊との組み合わせけ諸軍 またけ斜面崩			
		壊単独事象と同じと考えられる。これはどのような積雪であ			
		っても同様である。			
		<時差来襲>		×	
		斜面崩壊後に積雪が発生したとしても斜面崩壊の影響モード			
		(建物の壁への影響)と積雪による影響モード(崩壊熱除去			
		糸の空気流路への影響)は異なると考えられるため、積雪と 約五崩壊との知り合わせは積雪。または約五崩壊単独東角と			
		料面崩壊との組み口わせは傾当、または料面崩壊単独争家と 同じと考えられる。これはどのようか積雪であっても同様で			
		ある。			
	森	斜面崩壊時に森林火災が発生する状況は想定しにくく、発生		×	
	林	確率は十分低いと考えられる。万が一、斜面崩壊時に森林火			
	火	災が発生しても森林火災による影響モード(煤煙によるフィ			
	灭	ルタ闭奉) と斜面朋瑗による影響セート (建物の壁への影響) は思わるため、低温上約五島庫上の知り合わせけ本井山巛			
		は異なるため、低温と評面崩壊との組み自わせな緑林八次、または斜面崩壊単独事象と同じと考えられる。			
		<時差来襲>		×	
		斜面崩壊後に森林火災する状況は想定しにくい。万が一、森			
		林火災後に斜面崩壊が発生しても森林火災による影響モード			
		(煤煙によるフィルタ閉塞)と斜面崩壊による影響モード(建			
		初の壁への影響) は異なるため、低温と斜面崩壊との組み合わせけ赤林ルツ またけ斜面崩壊単独重免と同じと考えられ			
		47世は林仲八火、または府国朋感単低争家と同じと考えら40 ろ			
	低	。 <同時来襲>		×	
	温	斜面崩壊時に低温が発生する状況は想定しにくく、発生確率			
		は十分低いと考えられる。万が一、低温と斜面崩壊が同時に			
		発生したとしても低温による影響モード(補機系配管内の水			
		の保結など)と料面崩壊の影響セート(建物の壁への影響) け異なるため 低温と斜面崩壊との組み合わせけ低温 また			
		は異なるため、認識と評面崩壊との短の目がとな認識、よたは斜面崩壊単独事象と同じと考えられる。これはどのような			
		低温であっても同様である。			
		<時差来襲>		×	
		斜面崩壊後に低温が発生したとしても低温による影響モード			
		(補機系配管内の水の凍結など)と斜面崩壊の影響モード(建物の時、の影響)は思わえため、低調し対応岸庫しの知れる			
		初の壁への影響)は異なるため、低温と料面崩壊との組み合わせは低温 またけ斜面崩壊単独重免と同じと考えられる			
		これはどのような低温であっても同様である。			
	霧	<同時来襲>		×	
		斜面崩壊時に霧が発生する状況は想定しにくく、発生確率は			
		十分低いと考えられる。万が一、斜面崩壊後に霧が発生して			
		も斜面崩壊による影響モード(建物の壁への影響)が霧によ			
		つく相互影響することはないと考えられるにの、斜面朋瑗と 季レの組み合わせけ斜面崩壊単独重免と同じと考えられる			
		- 27 C - 27 L - 27 C - 17 C - 12 C		×	
		斜面崩壊後に霧が発生したとしても斜面崩壊による影響モー			
		ド(建物の壁への影響)が霧によって相互影響することはな			
		いと考えられるため、斜面崩壊と霧との組み合わせは斜面崩			
	3AC	場単独事象と同じと考えられる。		 	
務	短尾	~回時米襲> 霊の発生時に論園が発生する世辺け相学してノノ 致生確率		×	
	1256	物シュニー (19) (19) (19) (19) (19) (19) (19) (19)			

	は十分低いと考えられる。万が一、霧発生後に強風が発生し						
	ても霧によって強風が相互影響することはないと考えられる						
	ため、電し強風しの知り合わせけ強風単独重免し同じしまう						
	にの、務と限風との組み日初とは限風単低事家と同して与え						
	られる。これはどのような大きさの風であっても同様である。						
	<時差来襲>					×	
	霧の発生後に強風が発生したとしても、強風と霧が相互に影						
	響して防護設備に影響を与える状況も想定しにくく 霧だけ						
	でけプラントへ影響な及ぼさかいと考えられることから 強						
	てはノブンド、影響を及ばさないころんり40ることがり、風						
	風単独の事象と同じであると考えられる。これはどのような						
	大きさの風であっても同様である。						
竜	<同時来襲>					×	
巻	霧の発生時に竜巻が発生する状況は想定しにくく、発生確率						I
_	け十分低いと考えられる 万が一 霧発生後に音券が発生し						
	てす 季に上って 辛労が 切互影響 ナスト しけかいし 老うこれ ス						I
	しておによりし电合が相互影響りることはないころんり400						I
	ため、霧と竜春との組み合わせは竜春単独事家と同じと考え						I
	られる。						I
	<時差来襲>					×	I
	霧の発生後に竜巻が発生したとしても、竜巻と霧が相互に影						I
	郷して防難設備に影響を与うる仕児け相定してくい、素単独						I
	音して防護欧洲に影響ですん気状化は心圧しにくい。務手拡、						I
17.84	のないは电谷早畑の尹家と回しじめるとちんり私る。			┣───	──		I
降	<同時来襲>					×	I
雨	霧の発生時に降雨が発生する確率は十分低いとは言えない。				1		I
	しかしながら、万が一、霧の発生中に降雨が発生したとして						I
	もその隆雨の影響(水位上昇等)が変化することもなく、プ						I
	ういしへの影響は際雨の単独重魚と同じでなると考えられ						I
	ノント、の影響は阵雨の半弧事家と向してのるとちんられ						I
	る。これはとのような降水重でめつても回体である。			<u> </u>	<u> </u>		I
	<時差来襲>					×	I
	霧の発生後に降雨が発生したとしてもその降雨の影響(水位						I
	上昇等)が変化することもなく、また霧よって降雨に対する						I
	防護設備に影響を与えるとは考えにくいことから プラント						I
	~の影響は欧市の単独東色と同じでなるし来うこれる。これ						I
	・ の影響は陣雨の単振事家と同じてのるとちんられる。これ						I
	はどのような降水量であっても同様である。			<u> </u>	──		I
火	<同時来襲>		0			0	I
山	霧の発生時に火山噴火時が発生する確率について、これらの						I
	事象は独立な事象であり、これらの発生確率は十分低いこと						I
	から同時来館の確率け十分小さいと考えられる「しかしかが						I
							I
	ら、万が一、務の先生中に八田噴八が先生した場合、八田八						I
	の密度が変化し、崩壊熱除去糸に係るフィルタ目詰まりへの						I
	影響が増幅することは考えられる。これらはプラントへの影				1		I
1	響が大きいと考えられることから、霧が発生中の火山噴火は				1		I
1	「重畳事象」として考慮する。				1		I
	<時差来襲>			<u> </u>	1	X	I
1	電が惑生した忽で 水山時水浴までに味美がもて担合け 電				1		I
	務が元王しに返し、八田唄八仮ましに时左がめる笏首は、務				1		I
1	により八川火の省度が変化し、ノイルタへの影響が増幅する				1		I
1	ということは考えにくいことから、プラントへの影響は火山				1		I
	噴火の単独事象と同じであると考えられる。				1		I
積	<同時来襲>				Ι	X	I
雪	霧の発生時に積雪が発生する確率について これらの事象け				1		I
	42 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2				1		I
1					1		I
	に 有 雪 か 発 生 し た と し て も 、 霧 か 有 雪 の 防 護 設 備 に 影 響 を 与				1		I
	えるとは考えにくく、プラントへの影響は積雪の単独事象と				1		I
	同じであると考えられる。これはどのような積雪であっても				1		I
	同様である。				1		I
	✓ 時美本龍 >			<u> </u>	<u> </u>	×	I
	▶町左木炭/ 雪の双4位に住命が双41とししてき ●い住房の叶井==□/#				1	^	I
	務の光生後に積雪か光生したとしても、霧か積雪の防護設備				1		I
1	に影響を与えるとは考えにくく、プラントへの影響は積雪の				1		I
	単独事象と同じであると考えられる。これはどのような積雪				1		I
		1	1	1	1	1	J
	「であっても同様である。						۱
枩	であっても同様である。 < 同時来襲 >					×	

	林	霧の発生時に森林火災が発生する確率について、これらの事			
	火	象は独立な事象であり、これらの発生確率は十分低いと考え			
	災	られることから、同時来襲の確率は十分小さいと考えられる。			
		万が一、霧の発生中に森林火災が発生したとしても、森林火			
		災の火線強度と霧は互いに抑制し合うと考えられるため、よ			
		りプラントへの影響は小さくなる。			
		<時差来襲>			×
		霧の発生後に森林火災が発生しても、お互いの防護設備に影			
		響を与えるとは考えにくく、プラントへの影響は森林火災の			
		単独事象と同じであると考えられる。			
Γ	低	<同時来襲>			X
	温	霧の発生時に低温が発生する確率について、これらの事象は			
		十分低いとは言えない。しかしながら、万が一、霧の発生時			
		に低温が発生しても、お互いの防護設備に影響を与えるとは			
		考えにくく、プラントへの影響は低温の単独事象と同じであ			
		ると考えられる。これはどのような低温であっても同様であ			
		る。			
		<時差来襲>			X
		霧発生後に低温が発生したとしてもお互いの防護設備に影響			
		を与えるとは考えにくく、プラントへの影響は低温の単独事			
		象と同じであると考えられる。これはどのような低温であっ			
		ても同様である。			
Γ	斜	<同時来襲>			×
	面	霧の発生時に斜面崩壊も発生する状況は想定しにくく、発生			
	崩	確率は十分低いと考えられる。万が一、霧の発生後に斜面崩			
	壞	壊が発生したとしても、霧と斜面崩壊が相互に影響するとは			
		考えにくく、プラントへの影響は斜面崩壊の単独事象と同じ			
		であると考えられる。			
		<時差来襲>			×
		霧の発生後に斜面崩壊後が発生したとしても霧と斜面崩壊が			
		相互に影響するとは考えにくく、プラントへの影響は斜面崩			
		壊の単独事象と同じであると考えられる。			

後事象	強風	竜巻	火山	降雨	積雪	森林火	低温	斜面崩壊	霧
先事象						災			
強風	-	0	0	Ø	0	0			
竜巻	0	-	0	0	0				
火山	0	0	-	0	0	0			Ø
降雨			0	-				0	
積雪			0		-		Ø		
森林火	Ø		0			-			
災									
低温					Ø		-		
斜面崩								-	
壊									
霧			0						-

表 3.2.1.2-6 重畳事象の組み合わせ

※〇選定された重畳事象、◎:平成27年評価対象事象



図 3.2.1.2-1 自然現象重畳事象の検討フロー(保全学会ガイドライン[3.2.1.2-15])



図 3.2.1.2-2 本研究で実施する重畳事象のスクリーニング方法

# 3.2.1.3 ハザード評価手法に関する既往研究の調査・整理(H27)

(1) 情報収集

静岡県静岡市(静岡大学静岡キャンパス)で平成27年9月9日(水)~11日 (金)に開催された日本原子力学会2015年秋の大会に参加し、外部ハザード評価 手法及び事象シーケンス評価手法に関して研究成果を発表するとともに、情報を収集 した。日本原子力学会は年2回開催される原子力関係の国内最大の会議であり、熱流 動、リスク評価、安全評価を含め多岐にわたる知見収集、情報発信が可能な場である。 この中で、火山噴火ハザード評価、森林火災ハザード評価、異常降雨ハザード評価並 びに時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価の各手法における 平成26年度成果に係るコメントを得た。火山噴火ハザードに関しては、噴煙に関す る数値解析の有効性と解析結果の不確かさの評価手法への適用について、また異常降 雨については得られた炉心損傷頻度の妥当性について、質問及びコメントを得た。森 林火災に関連し、モデルサイト周辺特有の条件の影響について質問を得た。また時間 依存事象進展アルゴリズムについては、既存 PRA(特にイベントツリー法)との相違、 優位点に係る質問及びコメントがあった。これらの質問及びコメントは今後の研究開 発における検討への貴重な情報となった。

東京・日本学術会議で平成27年10月14日(水)~16日(金)に開催された 国内会議「第8回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCOSSAR2015)」に参加し、外部ハザードに関するハザード及びフラジリティの評価 手法に関して研究成果を発表するとともに、情報を収集した。この会議は幅広い領域 にわたる研究発表及び討論を通じて技術レベルと学術の向上を図ることを目的とした 国内総合シンポジウムであり、津波・断層・地震に関連する原子力施設の安全性評価、 加えて、構造物の経年劣化に伴うフラジリティ、構造物の安全基準や信頼性評価、土 木・地盤におけるリスク評価の情報を得た。この国内会議での、森林火災の熱影響に 対するフラジリティの平成26年度成果の発表に関連して、森林火災の単独リスクを 対象としているが地震後の森林火災など重畳事象に対しても手法を拡張してほしい、 という今後の研究開発で検討すべきコメントを得た。

米国・アイダホ州・サンバレーで平成27年4月26日(日)~30日(木)に開 催された国際会議「確率論的安全評価及び分析に関する特別会合2015」に参加し、 森林火災の確率論的安全評価手法の開発に関して研究成果を発表するとともに、情報 を収集した。この国際会議は、確率論的安全評価に関わる幅広い分野の最新の研究発 表が行われるため、広く知見を集め、情報を発信できる場でもあった。会議では、森 林火災ハザードの平成26年度成果の発表に関連し、森林火災において特に反映すべ き高速炉の特徴があるかの質疑を行い、また今後の研究開発で検討すべきコメントを 得た。さらに発電所での内部火災や竜巻を対象とした確率論的安全評価についての情 報を収集した。

フランス・ニースで平成27年5月3日(日)~6日(水)に開催された国際会議 「2015年先進原子力プラント国際会議(ICAPP'15)」に参加し、ナトリウム冷却 高速炉の外部ハザードリスク評価手法の開発に関して研究成果を発表するとともに、 情報を収集した。この国際会議は、先進原子力プラントに関わる幅広い分野の最新の 研究発表が行われるため、広く知見を集め、情報を発信できる場でもあった。会議で は、本研究開発の全体概要を報告するとともに、強風ハザード評価、イベントツリー 構築、破損確率評価、炉心損傷頻度の定量化を一貫して評価できる強風 PRA 手法開発 について発表した。質疑応答では、強風ハザード評価において、ワイブル分布とグン ベル分布での差異に関する確信度について質問があり、確率分布には低頻度側で不確 かさが大きくなることを認識しながらリスク評価する必要があると回答した。また、 外部ハザードを対象とした研究のみならず安全解析や確率論的安全評価についての情 報を収集した。

本研究で得られたリスク評価手法の国際標準化を目指すため、当初計画どおり、第4 世代国際フォーラム(Generation IV International Forum: GIF)におけるナトリウ ム冷却高速炉の安全・運転に関するプロジェクト運営管理会議に参加した。積極的に 成果をアピールするため、中国・成都で平成27年9月22日(火)~25日(金) に開催された第13回会議、並びにドイツ・カールスルーエで平成28年3月15日 (火)~18日(金)に開催された第14回会議の2回に参加し、研究成果を発表する とともに、情報を収集した。本会議では、高速炉安全評価の専門家が集まっているた め、積雪、強風、森林火災等の外部ハザードに対するリスク評価手法に関する条件設 定、仮定の妥当性、結果や考察について質疑応答がなされ、本研究に役立つ有益なコ メントを得た。また、世界を先導する本研究の先進性に高い関心が持たれ、国際標準 化の足掛かりとなった。

### (2) 既往研究の調査・整理

降雨を対象とし、確率論を使用したハザード評価は気象庁で行われている。そこで は、対象とする地域の降水量(例:年最大降水量)のデータから非超過確率及び再現 期間を評価している。まず、再現期間*T*(*x*)(年最大降水量の場合、年単位)を、下記 の式により算出している。

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)}$$
(3. 2. 1. 3-1)

ここで、xは降水量(mm)、F(x)は非超過確率である。この非超過確率は、ある降水 量x以下の度数をデータの総度数で割った値として定義される。降水量に対する連続 的な再現期間を評価する場合は、観測データを入力値として(3.2.1.3-1)式から得ら れる再現期間に対し、確率分布をあてはめて評価できる。代表的な確率分布としては、 (1) グンベル分布、(2) 一般化極値分布、(3) 平方根指数型最大分布、(4) 対数 ピアソンIII型分布、(5) 対数正規分布などが知られている。このうち、分布(1) ~

(3) は極値分布と呼ばれ、最大値や最小値に関する統計理論でみられる分布であり、 分布(4)~(5) は極値分布と似た分布となることから既往の評価でも使用されてき た分布である。

得られたデータに対する再現期間を評価する公式として、以下のプロッティング・ ポジション公式が知られている。

#### 3.2.1.3-2

$$T(i) = \frac{N+0.2}{i-0.4}$$
(3. 2. 1. 3-2)

(3.2.1.3-2) 式は、総データ数N 個に対してi番目のデータの再現期間を表現している。降水量のデータから得られた再現期間に対し、(3.2.1.3-1) 式及び確率分布 (1) ~ (5) を使うことにより、降水量に対する連続的な再現期間も評価可能である。 その場合、確率分布が適合することを定量的に示すことが必要となる。このような適 合度の指標として SLSC (Standard Least-Squares criterion、標準最小二乗基準) 指 標が知られており、これが小さいほど確率分布は適合していると見なされる。また、 確率分布が特異な観測データに大きく依存していないか、という安定性を調べる方法 にはジャックナイフ法が知られ、必要に応じてこれも評価する。

### 3.2.1.4 重畳事象(積雪と低温)に対するハザード評価手法(H27)

# (1) 低温に関する記録の調査・整理

気象庁による地上気象観測地点は約 160 地点あり、このうち 2 拠点は福井県内にあ る。気象庁のデータベース[3.2.1.4-1]では、全国の気圧、気温、湿度、風速、降水量 などが記録されており、日時と場所を指定して気象データを入手できる。

本研究では、福井県に着目し、敦賀気象観測所で記録されたデータを用いて 1961 年 (昭和36年)~2010 年(平成22年)(50年間)の年毎の最低気温の記録を調査 した。また、原子力発電所への影響を評価するためには低温の継続時間も必要と考え、 冷却水が凍結する 0℃以下となる気温を低温と定義し、その継続時間を調査した。これ ら調査したデータを図 3.2.1.4-1 に示す。年最低気温、及び低温継続時間のハザード 曲線は、これらのデータを基に構築した。

# (2) 低温ハザードの重要パラメータの同定

低温の影響として原子炉補助建物の外に設置されている補機海水系設備の配管内の 水の凍結が考えられる。凍結に至るには、低温にも依存すると考えられるが、その他、 低温の継続時間にも大きく依存すると考えられる。このため、最低気温、または低温 継続時間を指標とするハザード曲線を算出する。

# (3) 低温ハザードの評価

# a. 年最低気温に対するハザード曲線

低温ハザード評価手法は、平成24年度、平成25年度、及び平成26年度のハザ ード評価で実施した手法を低温ハザード評価にも適用できる。評価フローを図 3.2.1.4-2に示す。年超過確率を評価する方法として、実際に起こった異常気象がどの ような頻度で発生しているか、その分布の様子を視覚的に確認するために、確率紙が 用いられる。確率紙とは横軸に変量(例えば、最低気温)を、縦軸に頻度(確率)を とり、頻度(確率)の累積値をプロットしたときに直線上になるよう縦軸の目盛りに 工夫が凝らされている用紙のことである。個々のデータを、確率紙にプロットするた めに、次式のような非超過確率を評価するプロッティング・ポジション公式が使われ る。

$$F(i) = \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha}$$
(3. 2. 1. 4-1)

この(3.2.1.4-1)式は、経験式であり、総データ数N 個に対してi番に小さな指標に 対する非超過確率F(i)を表現している。ここで、 $\alpha$ は定数であり、 $\alpha = 0$ (ワイブル 公式)、 $\alpha = 0.4$ (カナン公式)などが知られている。この主たる研究は 1960~1970 年代になされており、これまで様々なもの(例えば、ワイブル、ハーゼン、カナン) が提案されている[3.2.1.4-2]。3.2.1.4(1)節で整理された年最低気温のデータを小 さい方から順に並べ、年超過確率を求めた。敦賀における年超過確率を図 3.2.1.4-3 に示す。ここで、本評価ではプロッティング・ポジションとして多くの分布に適合す るカナン公式を用いた。

#### 3. 2. 1. 4-1

次に、求めた超過確率を基に最低気温のハザード曲線を算定する。平成24年度、 平成25年度、及び平成26年度のハザード評価と同様に、極値分布と呼ばれるグン ベル分布及びワイブル分布を用いて近似的に表した場合の確率分布を推定する。指標 xに対するワイブル分布 $F_w(x)$ 、及びグンベル分布 $F_G(x)$ は、各々次式のように定義 される。

$$F_w(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-r}{\eta}\right)^m\right]$$
 (3. 2. 1. 4-2)

$$F_G(x) = \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{x-\mu}{\theta}\right)\right\}\right]$$
(3. 2. 1. 4-3)

ここで、*r*、*m*、*η*、及び*µ*、*θ*はそれぞれワイブル分布、及びグンベル分布を決め る確率分布パラメータである。ワイブル分布とグンベル分布による推定方法は平成2 4年度成果報告書の積雪ハザード評価手法で記述されている。ワイブル分布とグンベ ル分布を年超過確率にあてはめることで、表 3.2.1.4-1 の確率分布パラメータを推定 した。推定した確率分布パラメータを用いた、年最低気温に関するハザード曲線を図 3.2.1.4-4 に示す。

#### b. 低温継続時間に対するハザード曲線

原子力発電所に対する低温の影響は低温だけでなく低温の継続時間にも大きく依存 すると考えられる。そこで、本研究では、最低気温だけでなく、継続時間を指標とす るハザード曲線を算出することとした。算定方法としては、3.2.1.4 (3) a. 節と同じ ハザード曲線の推定方法である。ただし、低温継続時間のデータは 3.2.1.4 (1) 節で 整理したデータを用いた。推定した確率分布パラメータを表 3.2.1.4-2 に示す。これ らの確率分布パラメータを使った低温継続時間のハザード曲線を図 3.2.1.4-5 に示す。

### c. 適合度評価

平成24年度、平成25年度、及び平成26年度のハザード評価と同様に、観測値と の適合度はSLSC(Standard Least-Squares Criterion,標準最小二乗基準)で判断する。 SLSCとはプロッティング・ポジション公式と確率分布から推定した超過確率の差を指標 化したものであり、0.04以下で適合していると判断される。年最低気温と継続時間の年 超過確率に適用した確率分布の適合度評価結果を表3.2.1.4-3に示す。導出した確率分 布は判断基準の0.04より小さく、適合していると判断できる。

### d. 安定性評価

平成24年度、平成25年度、及び平成26年度のハザード評価と同様に、 Jackknife 法を用いて安定性評価を行う。この評価は、現在の観測値をランダムに選ん だ場合や今後観測値が追加された場合でも、確率分布パラメータの推定結果が大きく 変わらず、安定しているかを判断するためのものである。ここでは、1961年(昭和3

3.2.1.4-2

6年)~2010年(平成22年)の50年間のデータに対する低温継続時間の場合の確 率分布に対する安定性評価結果として、超過確率 10<sup>-1</sup>、10<sup>-2</sup>、10<sup>-3</sup>における Jackknife 推定誤差分散を表 3.2.1.4-4 に示す。この表 3.2.1.4-4 の結果からも分かるように Jackknife 推定誤差は、グンベル分布よりもワイブル分布の方が小さく安定性が高い。 ここで、この安定性評価のために 51 個の確率分布を求めた。それらの確率分布を図 3.2.1.4-6 に示す。50 年分のデータを使った時のハザード曲線とそれから最も大きく ずれるハザード曲線との差については、ワイブル分布の場合は 10<sup>-2</sup> で 2.96%、10<sup>-4</sup> で 2.96%、10<sup>-6</sup> で 2.96%の誤差であり、グンベル分布の場合は 10<sup>-2</sup> で 12.64%、10<sup>-4</sup> で 13.84%、10<sup>-6</sup> で 14.30%の誤差であった。

# e. 日本における最低気温に基づくハザード曲線(参考評価)

参考評価として、日本における最低気温を記録した北海道旭川市におけるハザード 曲線を評価した。北海道旭川市での年最低気温のデータを図 3.2.1.4-7 のように整理 した。3.2.1.4 (3) a. 節と同様の手法でワイブル分布及びグンベル分布で確率分布を 推定した結果を図 3.2.1.4-8 に示す。また参考として敦賀市の最低気温のハザード曲 線も示す。グンベル分布で年超過確率が 10<sup>-5</sup> となる年最低気温を比較すると、敦賀市 のハザード曲線では約-20℃であるのに対し、北海道旭川市のハザード曲線では約-50℃となった。

# (4) 積雪ハザード、及び低温と積雪の重畳事象ハザード

積雪のハザード曲線は、日降雪深、及び積雪深を指標として平成24年度、及び平 成25年度に評価済みである。一方、低温ハザードの評価は前述のとおりである。以 上を踏まえ、低温と積雪は独立であると仮定して各ハザードの年超過確率を掛け合わ せることで重畳事象ハザードの年超過確率を算定した。ここで、積雪との重畳影響と して考慮すべき低温の影響は、融雪しない温度の継続であることから、低温の指標と して「0℃以下の継続時間」を考慮した。よって、本評価では、低温継続時間[day]、 積雪継続時間[day]、及び日降雪深[m/day]の 3 つの指標で重畳事象ハザードの超過確 率を評価した。また、後でイベントツリーを定量化し、支配的なハザードのカテゴリ を同定するために、各指標をカテゴリ化した。日降雪深については 1m/day~4m/day の 範囲を 1m/day 毎に離散化し、積雪継続時間及び低温継続時間については 1~7day の範 囲を 1day 毎に離散化してカテゴリ化した。日降雪深を降雪速度[m/day]と解釈すれば、 降雪速度のハザード曲線は日降雪深を指標としたハザード曲線で与えられる。また、 降雪速度が一定ならば、積雪深[m]は降雪速度[m/day]と積雪継続時間[day]の積で表さ れる。前述のとおり、積雪深を指標としたハザード曲線は評価済みであることから、 降雪速度が与えられた条件下では、積雪深に係る超過確率を積雪継続時間に係る条件 付きの超過確率に読み換えることができる。各指標に対するカテゴリと区間頻度、区 間確率を評価し、表 3.2.1.4-5 及び表 3.2.1.4-6 にまとめた。重畳事象ハザードの年 超過確率は、指標のカテゴリの組み合わせに対応した日降雪深の区間頻度、積雪継続 時間の区間確率、低温継続時間の区間確率を掛け合わせることで算出できる。

# 参考文献

- [3.2.1.4-1] 気象庁ウェブサイト、過去の気象データ検索 http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php
- [3.2.1.4-2] 田守、許士、「プロッティング・ポジションの最適化に関する研究」、平成2 1年度土木学会北海道支部 論文報告集 第66号, B-27 (2009).

表 3.2.1.4-1 年最低気温のハザード曲線の評価のために推定した分布パラメータ

項目	分布形	rまたはµ	$\eta$ または $ heta$	m
年最低気温	ワイブル	0	-3.7	2.2
	グンベル	-2.5	-1.3	

表 3.2.1.4-2 低温継続時間のハザード曲線の評価のために推定した分布パラメータ

項目	分布形	rまたはµ	$\eta$ または $ heta$	т
低温継続時間	ワイブル	0	14.8	1.8
	グンベル	8.6	8.7	

表 3.2.1.4-3 年最低気温及び継続時間の確率分布の適合度評価結果

項目	分布形	適合度(SLSC)
年最低気温	ワイブル	0.019
	グンベル	0.015
低温継続時間	ワイブル	0.037
	グンベル	0.018

表 3.2.1.4-4 安定性評価結果

項目	分布形	年超過確率に対する安定性		定性
		$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$
低温継続時間	ワイブル	10.0	41.8	94.3
	グンベル	24.5	99.5	223.2

日降雪深[m/day]	区間頻度[1/年]
1	3.3
2	7.4E-3
3	8.3E-6
4	9.3E-9

表 3.2.1.4-5 日降雪深、積雪継続時間、低温継続時間のカテゴリ化(グンベル分布)

積雪継続時間	条件付き区間確率			
[day]	1m/day	2m/day	3m/day	4m/day
1	8.5E-1	1.4E-1	7.4E-3	3.7E-4
2	1.4E-1	3.7E-4	9.2E-7	2.3E-9
3	7.4E-3	9.2E-7	1.1E-10	1.5E-14
4	3.7E-4	2.3E-9	1.5E-14	8
5	1.9E-5	5.7E-12	3	8
6	9.2E-7	1.5E-14	3	٤
7	4.6E-8	8	3	8
7~	2.3E-9	8	3	8

ε:1E-15よりも小さい値

低温継続時間[day]	区間確率
1	7.8E-1
2	1.5E-1
3	1.0E-2
4	6.3E-4
5	4.0E-5
6	2.5E-6
7	1.6E-7
7~	1.0E-8

日降雪深[m/day]	区間頻度[1/年]
1	2.7
2	4.0E-3
3	8.9E-10
4	8

表 3.2.1.4-6 日降雪深、積雪継続時間、低温継続時間のカテゴリ化(ワイブル分布)

ε:1E-15よりも小さい値

積雪継続時間	条件付き区間確率				
[day]	1m/day	2m/day	3m/day	4m/day	
1	8.6E-1	1.4E-1	5.0E-3	7.5E-5	
2	1.4E-1	7.5E-5	2.3E-9	9.1E-15	
3	5.0E-3	2.3E-9	3	ε	
4	7.5E-5	9.1E-15	3	3	
5	5.6E-7	٤	3	ε	
6	2.3E-9	٤	3	ε	
7	5.8E-12	8	3	8	
7~	9.1E-15	8	3	3	

ε:1E-15 よりも小さい値

低温継続時間[day]	区間確率
1	9.1E-1
2	9.4E-2
3	3.0E-4
4	5.9E-8
5	9.0E-13
6	8
7	٤
7~	8

ε:1E-15よりも小さい値



図 3.2.1.4-2 低温ハザード曲線の算定フロー

# 3.2.1.4-8



図 3.2.1.4-3 最低気温と年超過確率



(敦賀市、ワイブル分布、グンベル分布)






図 3.2.1.4-6 確率分布の安定性評価 (左図:ワイブル分布、右図:グンベル分布)



図 3.2.1.4-7 年最低気温(旭川市、1938~2014年(昭和13年~平成26年))



図 3.2.1.4-8 年最低気温に関するハザード曲線 (旭川市と敦賀市、ワイブル分布、グンベル分布)

# 3.2.1.5 重畳事象(強風と降雨)に対するハザード評価手法(H27)

- (1) ハザード強さに関する記録の調査・整理
- a. 強風の記録

気象庁のデータは、全国約1,300 地点の気象台、特別地域気象観測所(旧測候所)、ア メダス観測所等で観測された観測値及び統計値(合計値、極値等)であるが、強風・降雨 に係る観測は、一部の観測所でしか行われていない。本評価では、ナトリウム冷却高速炉 原型炉の設置サイトである敦賀地区を対象に、気象庁年報をデータベース化した「気象デ ータベース・地上観測」(以下、気象データベースと略す。)から敦賀測候所における年 最大値を用いて、ハザード曲線を描くことにした。サイトでも気象データは観測している が、近年の記録と比較して敦賀測候所と同等であったことから、敦賀測候所の記録を使用 した。

まず、強風について、最大風速(10分間平均風速の最大値)及び最大瞬間風速(3秒間 平均風速の最大値)の年最大値(単位 m/s)を集計し、その履歴を図 3.2.1.5-1 に示す。 敦賀では、これらのデータのうち最大風速及び最大瞬間風速の過去最大値はそれぞれ 24m/s 及び 40m/s である。なお、最大風速は 1961 年(昭和36年)~2012 年(平成24 年)(52年間)、最大瞬間風速は 1967 年(昭和42年)~2012 年(平成24年)(4 6年間)の情報を利用した。

### b. 強風記録と台風との関係

1961年(昭和36年)から2011年(平成23年)の間で年最大風速に近い強風が吹い た日時の候補日を毎年3つ選定し、その日の敦賀市の一日の風速・風向や雨量、気温等に ついて調査した。敦賀市で強風の吹く季節は4月、8~10月に集中している傾向にあり、8 ~10月の台風起因による強風は大雨を伴っている。台風起因の場合、その日一日中の風速 が高い。そこで、最大風速の年最大値記録日に台風が発生しているかを確認するため、気 象データから独自に台風かどうかを判断した。最大風速及び最大瞬間風速の年最大値と台 風との関係を図 3.2.1.5-2 に示す。台風の可能性がないと判断した記録でも台風の可能性 大と判断した記録と同様に年最大値が高いものがある。ただし、台風の勢力が弱まると熱 帯低気圧に変わることや台風の中心から最大 500km 離れた地点で竜巻が発生することを勘 案すると、台風が検討地域付近を通過しない場合でも強風が台風の影響によるものではな いとは必ずしも断定はできない。また、日降水量と最大風速及び最大瞬間風速の関係につ いて、台風の影響度合いで区別をしたものを図 3.2.1.5-3 と図 3.2.1.5-4 に示す。日降水 量が多いときは最大風速及び最大瞬間風速が台風起因である。一方、風速が高いときに日 降水量が少ないものもあり、台風の可能性がないものも含まれる。日本で強風が吹く要因 としては主に台風及び寒冷前線が挙げられるため、寒冷前線の影響である可能性が高いと 考えられる。敦賀市の風向について調べてみると、図 3.2.1.5-5 に示すように、台風の影 響度合いに関わらず南南東、北北西が多い。

### c. 降水量及び風速と降水継続時間の関係

気象庁データベースでは、1時間降水量データは 0.5mm 以上を記録していることから、

0.5mm以上の降水が継続している時間を降水継続時間と定義して、1991年(平成3年)~2013年(平成24年)のデータを用いてデータ整理を行った。また、その降水継続時間中の累積降水量を連続降水量と定義する。図3.2.1.5-6に1時間降水量と降水継続時間の関係を示す。図(a)と(b)はそれぞれ縦軸を線形と対数で表示したものである。少ない降水量及び短時間の降雨が多く、やや降水量が多くなっても継続時間は短いことを示している。図3.2.1.5-7に1時間降水量と連続降水量の関係を示す。少ない降水量及び低連続降水量の降雨が多い。降水量が多いとき、連続降水量は25~50mm以上が最も多い。図3.2.1.5-8に1時間降水量と最大風速の関係を示す。降水量が多くなると風速が低い場合が多く、風速が高くなると降水量が少なくなる傾向があるが、15~17.5m/s で急に多くなってくる。これは台風の影響によるものである。例えば、1998年(平成10年)9月22日16時には1時間降水量38mm/h、最大風速17m/s が記録されている。

### d. 年最大1時間降水量記録日の風速及び降水継続時間

最大風速の年最大記録時の降水量はばらつきが大きく相関性が見られなかった。そこで、 強風と降雨の重畳を考えるため、年最大1時間降水量記録日の風速で整理することとした。 1961年(昭和36年)から54年分の年最大風速と1967年(昭和42年)から47年分 の年最大瞬間風速を用いて、年最大1時間降水量記録日の風速を図3.2.1.5-9に示す。こ れらのデータのうち、最大風速及び最大瞬間風速の過去最大値はそれぞれ23m/s及び 36m/sである。

年最大1時間降水量と最大風速及び最大瞬間風速の関係を図 3.2.1.5-10 に示す。風速 が高くなると降水量も多くなるが、ばらつきが大きい。そこで、次式で相関関係を評価 する。

$$r = \frac{\sum_{i} (x_i - \overline{x}) (y_i - \overline{y})}{\sqrt{\left(\sum_{i} (x_i - \overline{x})\right)^2} \sqrt{\left(\sum_{i} (y_i - \overline{y})\right)^2}}$$
(3. 2. 1. 5-1)

ここで $_i$ は $_i$ 番目のデータを示す添え字、 $_{x_i}$ は風速[m/s]、 $_{y_i}$ は1時間降水量を示し、 $_{\overline{x}}$ 及び  $\overline{y}$ は平均を示す。相関係数は 0.7 以上であれば高い相関があると判断される。この (3.2.1.5-1)式から算出した結果、1時間降水量と最大風速の相関係数は 0.28、1時間降 水量と最大風速の相関係数は 0.22 となり、相関性は認められなかった。

1937年(昭和12年)から77年分の年最大1時間降水量記録日について、同記録日及 びその前後日の3日間に発生した1回以上の降水の中での降水継続時間の最大値を図 3.2.1.5-11に示す。過去最大で80時間もの降雨が継続した例がある。なお、この最大値 には、記録日を含む3日間において2回以上の降水が発生し、それらのうち、年最大1時 間降水量を記録した降水よりも他の降水の降水継続時間が長い場合を含むことから、必ず しも年最大1時間降水量を記録した降水の継続時間を表すわけではない。図3.2.1.5-12 は、年最大1時間降水量記録時の1時間降水量0.5mm以上及び5mm以上の降水継続時間を 示す。1時間降水量0.5mm以上は5mm以上に比べて当然長くなっているが、5mm以上でも 14時間も継続した降雨があり、土砂災害などが懸念される。

3.2.1.5-2

(2) ハザードの重要パラメータの同定

強風により影響を受ける崩壊熱除去機能は、風圧(風荷重)により機器が構造損傷す る場合、気圧差により機器が構造損傷あるいは圧力調整のための機能損傷する場合、強 風により飛散する飛来物により機器が構造損傷する場合が考えられる。前者2つは、瞬 間風速で評価するわけではなく比較的長時間を必要とするのに対して、後者の飛来物は 瞬間風速のような比較的短時間の風によって飛散すると考えられる。したがって、強風 ハザードの重要パラメータは最大風速と最大瞬間風速となる。

一方、降雨の場合は継続時間が重要であり、前節の降雨記録の調査結果から、数時間 から数十時間の継続時間を考慮する必要がある。そのような場合、日降水量よりも1時間 降水量の方が評価しやすいため、降雨ハザードの重要パラメータは1時間降水量と降水継 続時間となる。

強風と降雨の重畳事象では、これらのパラメータの組み合わせで表される。

- (3) ハザードの評価
- a. 年超過確率の評価

3.2.1.5 (1) 節で整理された年最大風速及び年最大瞬間風速のデータを小さい方から 順に並べ、プロッティング・ポジション公式により年超過確率を求めた。導出方法は平 成24~26年度のハザード評価手法で記述したため、ここでは割愛する。

### b. ハザード曲線の構築

本評価では、ハザード曲線をグンベル分布とワイブル分布で近似的に表した場合の確率 分布を推定する。グンベル分布とワイブル分布による推定方法は平成24~26年度のハ ザード評価手法で記述したため、ここでは割愛する。グンベル分布及びワイブル分布はそ れぞれ次式で表される。これまでワイブル分布は2パラメータにより推定していたが、グ ンベル分布と比べてかい離が大きかったため、平成27年度は3パラメータワイブル分布 も推定することとした。

・グンベル分布

$$F_{Gumbel}(x) = \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{x-\mu}{\theta}\right)\right\}\right]$$
(3. 2. 1. 5-2)

・2 パラメータワイブル分布

$$F_{Weibull,2}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^k\right]$$
(3. 2. 1. 5-3)

・3 パラメータワイブル分布

$$F_{Weibull,3}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\theta}\right)^k\right]$$
 (3. 2. 1. 5-4)

#### 3.2.1.5-3

表 3.2.1.5-1 はカナン公式に基づく最大風速及び最大瞬間風速の年最大値の確率分布パ ラメータを示す。このパラメータを用いた最大風速及び最大瞬間風速の年最大値に関する 強風ハザード曲線を図 3.2.1.5-12 に示す。観測値はシンボル、推定曲線はラインで表し ている。最大風速と最大瞬間風速は記録期間が異なるため、最大風速は 1961 年(昭和3 6年)からと 1967 年(昭和42年)からのデータを用いた場合の2種類の図を示すが、 そんなに差異は見られない。2 パラメータワイブル分布は同 0.1 程度以下では2次曲線状 に下降しているのに対し、3 パラメータワイブル分布及びグンベル分布は年超過確率で差異が 拡大することが分かる。3 パラメータワイブル分布及びグンベル分布は比較的よく一致し ている。

降雨ハザード評価のため、年最大10分間降水量、年最大1時間降水量、年最大24時間 降水量、年最大日降水量について、カナン公式に基づく超過確率を算出したうえで、ワイ ブル分布及びグンベル分布の確率分布パラメータを求めた結果を表3.2.1.5-2に示す。こ のパラメータを用いた1時間降水量のハザード曲線を図3.2.1.5-13に示す。2パラメータ ワイブル分布は、3パラメータワイブル分布に比べて近似性がよくない。グンベル分布は 直線状に下降し、ワイブル分布に比べて過大評価する。

強風と降雨の重畳事象を考えるため、年最大1時間降水量記録日の最大風速と最大瞬間 風速のハザード曲線を描いてみる。表 3.2.1.5-3 は、年最大1時間降水量、0.5mm/h以上 及び 5mm/h 以上の降水継続時間、最大風速、最大瞬間風速について、同様にワイブル分布 及びグンベル分布の確率分布パラメータを示す。なお、敦賀における気象庁データは、1 時間毎の降水量データがあるのは 1950 年(昭和25年)以降であることから、1950 年 (昭和25年)~2013年(平成25年)の64年間を対象(1954年(昭和29年)は情 報欠落のため63年分として使用)とした。図 3.2.1.5-14 は年最大 1 時間降水量記録日 の最大風速及び最大瞬間風速を示す。図 3.2.1.5-12 と比べると、最大風速は若干低くな るが、最大瞬間風速は高くなることがわかる。最大瞬間風速が高くなる理由は高年超過確 率において図 3.2.1.5-12 では高風速側になっているため、その影響により分布が2次曲 線状になったためである。図 3.2.1.5-15 は、年最大 1 時間降水量記録日の最大降水継続 時間のハザード曲線を示しており、1937年(昭和12年)からと1950年(昭和25年) からの2種類を比較した。データソースにより差異が大きくなっているが、これは図 3.2.1.5-11 に示したように、1937~1950 年(昭和12年~昭和25年)では降水継続時 間が比較的長くなっており、このデータにより 1937 年からのハザード曲線は厳しい側に なっている。図 3.2.1.5-16 は、年最大 1 時間降水量記録日の 0.5mm/h 以上及び 5mm/h 以 上の最大降水継続時間のハザード曲線を示す。5mm/h 以上のハザード曲線を見ると、1日 以上継続する可能性があることを示唆している。

項目	分布形	μ	heta	k
最大風速の年最大値	ワイブル(2)		18.5	7.0
(1961~2012)	ワイブル(3)	12	6.1	1.6
	グンベル	16.0	2.4	
最大風速の年最大値	ワイブル(2)		18.0	7.3
$(1967 \sim 2012)$	ワイブル(3)	12	5.6	1.6
	グンベル	15.6	2.3	
最大瞬間風速の年最大値	ワイブル(2)		32.4	8.9
(1967~2012)	ワイブル(3)	24	7.8	1.4
	グンベル	28.8	3.4	

表 3.2.1.5-1 強風ハザード評価のために推定した確率分布パラメータ

※ワイブル(2):2パラメータワイブル、ワイブル(3):3パラメータワイブル

項目	分布形	μ	θ	k
年最大10分間降水量	ワイブル(2)		15.3	4.1
(1937~2013)	ワイブル(3)	6	9.0	1.9
	グンベル	11.9	3.4	
年最大1時間降水量	ワイブル(2)		36.3	4.0
(1937~2013)	ワイブル(3)	15	20.3	1.8
	グンベル	28.2	8.2	
年最大 24 時間降水量	ワイブル(2)		120.6	3.4
(1971~2013)	ワイブル(3)	55	61.8	1.0
	グンベル	89.9	32.9	
年最大日降水量	ワイブル(2)		112.4	3.5
(1897~2013)	ワイブル(3)	37	73.5	1.9
	グンベル	85.3	28.4	

表 3.2.1.5-2 降雨ハザード評価のために推定した確率分布パラメータ

※ワイブル(2):2パラメータワイブル、ワイブル(3):3パラメータワイブル

項目	分布形	μ	heta	k
年最大1時間降水量	ワイブル(2)		36.8	4.0
(1950~2013)	ワイブル(3)	17	18.3	1.6
	グンベル	28.6	8.3	
最大降水継続時間	ワイブル(2)		13.0	1.2
(1937~2013)	ワイブル(3)	1	11.3	1.0
	グンベル	13.0	5.8	
最大降水継続時間	ワイブル(2)		9.4	1.4
$(1950 \sim 2013)$	ワイブル(3)	1	8.0	1.2
	グンベル	7.5	4.7	
継続時間(1時間あたり	ワイブル(2)		8.3	1.5
0.5mm 以上の降水量時)	ワイブル(3)	1	7.0	1.2
$(1950 \sim 2013)$	グンベル	4.2	6.4	
継続時間(1 時間あたり 5mm	ワイブル(2)		3.9	1.6
以上の降水量時)	ワイブル(3)	1	3.0	1.2
$(1950 \sim 2013)$	グンベル	2.1	2.6	
最大風速	ワイブル(2)		9.7	3.2
(1961~2013)	ワイブル(3)	4	5.2	1.5
	グンベル	7.1	3.0	
最大瞬間風速	ワイブル(2)		17.0	2.9
$(1967 \sim 2013)$	ワイブル(3)	7	8.8	1.2
	グンベル	12.0	5.5	

表 3.2.1.5-3 1時間降水量及び年最大1時間降水量記録時の継続時間及び風速のハザー ド曲線評価のために推定した確率分布パラメータ

※ワイブル(2):2パラメータワイブル、ワイブル(3):3パラメータワイブル



図 3.2.1.5-1 敦賀における最大風速と最大瞬間風速の年最大値の記録 (最大風速:1961~2012年、最大瞬間風速:1967~2012年)



図 3.2.1.5-2 最大風速と最大瞬間風速の最大値と台風との関係

(1967~2012年)



図 3.2.1.5-3 日降水量と風速の台風との関係 (最大風速:1961~2012年、最大瞬間風速:1967~2012年)





 <sup>○</sup>は台風の可能性大、△は台風の可能性あり、×は台風の可能性なし
 図 3.2.1.5-5 最大風速と最大瞬間風速の年最大値を観測した日時の風向



(a)縦軸線形表示
 (b)縦軸対数表示
 図 3. 2. 1. 5-8 1 時間降水量と最大風速の関係
 (1991~2013)



図 3.2.1.5-9 年最大1時間降水量記録日の最大風速と最大瞬間風速 (年最大風速:1961~2013年、年最大瞬間風速:1967~2013年)



図 3.2.1.5-10 年最大1時間降水量とその記録日の最大風速と最大瞬間風速の関係 (1967~2013 年)



図 3.2.1.5-11 年最大1時間降水量記録日の最大降水継続時間、年最大1時間降水量記録時の1 時間降水量 0.5mm 以上並びに1時間降水量 5mm 以上のときの降水継続時間 (最大降水継続時間:1937~2013年、0.5mm/5mm 以上:1950~2013年)



図 3.2.1.5-12 最大風速と最大瞬間風速の年最大値に関する強風ハザード曲線



図 3.2.1.5-13 年最大1時間降水量のハザード曲線



図 3.2.1.5-14 年最大1時間降水量記録日の最大風速と最大瞬間風速のハザード曲線



図 3.2.1.5-15 年最大1時間降水量記録日の最大降水継続時間のハザード曲線



# 3.2.1.6 評価手法の整備(4年間のまとめ)

3.2.1.6.1 はじめに (H27)

平成24年度に積雪を対象としてハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザードの 重要パラメータを同定した上で、ハザード曲線を構築して異常気象ハザードを評価した。 平成25年度に竜巻・強風を対象としてハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザー ドの重要パラメータを同定した上で、ハザード曲線を構築して異常気象ハザードを評価し た。平成26年度に降雨を対象としてハザード強さ記録及び評価手法を調査し、ハザード の重要パラメータを同定した上で、ハザード曲線を構築して異常気象ハザードを評価した。 平成27年度に重畳事象を対象としてハザードの重要パラメータを同定した上で、ハザー ド曲線を構築して異常気象ハザードを評価した。平成27年度実施内容は前節までに記述 していることから、ここでは、平成26年度までの実施内容をまとめる。

# 3.2.1.6.2 積雪ハザード評価手法の開発(H24)

# (1) 積雪ハザード強さに関する記録の調査・整理

### a. 積雪深及び降雪深

気象庁のデータは、全国約1,300地点の気象台、特別地域気象観測所(旧測候所)、ア メダス観測所等で観測された観測値及び統計値(合計値、極値等)であるが、雪に係る観 測は、一部の観測所でしか行われていない[3.2.1.6.2-1]。例えば、福井県の場合、観測 所は18ヶ所あるが、そのうち11ヶ所では降雪・積雪に係る観測は行われていない。降 雪・積雪に係る観測が行われている観測所は福井地方気象台、敦賀特別地域気象観測所及 び5つのアメダス観測所である。本研究では、気象庁年報をデータベース化した「気象デ ータベース・地上観測」(以下、気象データベースと略す。)[3.2.1.6.2-2]より昭和36 年1月1日~平成22年3月31日(49年間)の降雪及び積雪情報を利用した。

気象データベースには、降雪の深さ日合計(cm)と日最深積雪(cm)が示されている。 降雪の深さ日合計とは一日あたりに積もった雪の深さを表した日降雪深である。日最深積 雪とは前日までに積もった雪の深さに「1日あたりに積もった雪の深さ」と「気温上昇等 によって溶けた雪の深さ」が加味された累積の最深積雪の深さを表した積雪深である。年 単位の極値を表す際には寒候年で整理される。寒候年とは前年の8月1日から当年の7月 31日までの期間を表している。

ナトリウム冷却高速炉原型炉の設置サイトである敦賀地区を対象とした積雪ハザード曲 線の評価にあたっては、気象データベースに収録された敦賀測候所における昭和36年

(寒候年で昭和37年)から49年分の寒候年あたりの積雪深と日降雪深の最大値、すな わち年最大積雪深及び年最大日降雪深を用いた。年最大積雪深と年最大日降雪深の関係を 見ると、降雪が多いときは積雪も多くなる傾向があることが分かる。ただし、ばらつきが 大きいことから、降雪が多い日が継続するとは言えないということを意味しており、降雪 継続期間が重要であると言える。

原子力施設で極端な降雪が想定される場合には、運転員の対応や送電線の補修等を考慮 すると、降雪継続期間(降雪連続日数)が重要となる。そこで、日降雪深が 1cm/day 以上、 10cm/day 以上、以降 10cm/day 毎の降雪継続期間を調査した。

# b. 積雪密度

雪の密度は、乾いた雪では 50kg/m<sup>3</sup>、湿った雪では 100kg/m<sup>3</sup>くらいである[3.2.1.6.2-3]。 屋根雪の平均的な密度は 300kg/m<sup>3</sup>と言われる。定期観測を行っている十日町試験地では、 平成18年冬季に積雪は表面近くが 100kg/m<sup>3</sup>くらいで 1m 下がる毎に約 100kg/m<sup>3</sup>増大する ことが示された。2月に入り積雪深のピークが過ぎてからは 400~550kg/m<sup>3</sup>に収束してい る。また、季節が進むと、全層平均密度は12月の約 150kg/m<sup>3</sup>から4月には約 500kg/m<sup>3</sup>に 推移する。

積雪密度は、最大積雪深に乗じることで最大積雪重量を求めるためのパラメータである。 積雪した雪の密度は、上層の新雪部分では小さく下層では圧縮されるので大きくなるが、 必要とされる積雪密度は、最大積雪深に乗じたときに最大積雪量となるように調整された 仮想的な積雪密度(これを日本建築学会では「等価単位積雪重量」と呼んでいる。)であ る。

建築物荷重指針・同解説(2004)[3.2.1.6.2-4]では、等価単位積雪重量 P<sub>0</sub>(kN / m<sup>3</sup>)を 次の式で与えている。

$$p_0 = 0.72 \sqrt{d_0 / d_{ref}} + 2.32 \tag{3. 2. 1. 6. 2-1}$$

ここで、 $d_0$ は地上積雪深(m)、 $d_{ref}$ は基準積雪深(=1m)を表している。

本研究で対象としている積雪ハザードは極端な日降雪深を想定しているため、数か月も 継続する降雪(日降雪深は小さい)を想定する必要はない。また、アクシデントマネジメ ントとしての除雪作業が期待されるため、新雪に近い状態で密度は低いと考えられる。こ の式は保守的に密度を計算できると考えられることから、積雪重量を計算する上では有用 と考えられる。

### c. 異常気象ハザード評価手法に関する既往研究の調査・整理

気象庁では、異常気象リスクマップを提供することとしており、稀にしか起こらないよ うな極端な大雨の強度や頻度を示す資料として、「確率降水量の推定方法」を掲載してい る[3.2.1.6.2-5]。ある現象が平均的に何年に1回起きるかを表した値を「再現期間」と 言い、ある再現期間に1回起こると考えられる降水量を「確率降水量」と呼ぶ。50年・ 100年といった長い再現期間の確率降水量は、その地点で長い期間においてどれくらいの 大雨が起こりうるかを示すものであるが、その利用にあたってはいくつかの注意点がある と示されている。例えば、再現期間 100年の確率降水量が 200mm という地点では、平均す ると 200mm 以上の大雨が 100年に1回の確率で起こりうることを意味するが、これは 200mm の大雨が必ず 100年に1回降るということではなく、100年に2回以上降る場合も あれば、1回も降らない場合もあることを意味している。このため、ある年に 200mm 以上 の大雨が降ったからといって、その次の年には降らない、ということはなく、大雨の降る 確率は毎年 100分の1で変わらない。また、確率降水量以上の 400mm、500mm といった飛 びぬけた大雨が降る恐れも全く無いわけではないことに注意が必要であると記述されてい る。

一般の建築設計や土木設計では、自然現象に対する設計基準値として過去の観測データ から統計的方法により求めた年超過確率 3.3%に相当する値(30年再現期待値)や年超 過確率 2%に相当する値(50年再現期待値)が多く用いられている。降雪・積雪につい ては、建築物荷重指針・同解説(2004)に統計的方法に基づく各観測点における年最大積 雪深、年最大積雪重量等の 100 年再現期待値と任意の再現期間に対する推定式等が記載さ れている[3.2.1.6.2-4]。

気象庁の確率降水量の推定方法は、適合度及び安定性とも高い確率分布形を最適な確率 分布形と仮定した推定方法であり、一般化された推定方法であるため積雪ハザードにも適 用できると考えられる。建築物荷重指針には推定式が示されているが、本研究では確率分 布の感度を調べることも重要であると考えている。そこで、本研究では、この気象庁の推 定方法に基づいて積雪ハザードを評価した。

# (2) 積雪ハザードの重要パラメータの同定

積雪ハザードにより影響を受ける崩壊熱除去機能は、積雪により外気との通風が遮断されることにより機能を喪失する場合と、積雪荷重により建物が構造損傷する場合が考えられる。前者では積雪深が重要となるが、後者では積雪重量(積雪深×積雪密度)が重要となる。積雪は時間依存性があるため、除雪作業などを考慮すると降雪速度及び降雪継続期間もまた重要となる。したがって、積雪ハザードの重要パラメータは以下のとおりとなる。

- ・積雪深
- ・降雪速度
- ・降雪継続期間
- ·積雪密度

# (3) 積雪ハザードの評価

# a. 年超過確率の評価

実際に起こった異常気象がどのような頻度で発生しているか、その分布の様子を視覚的 に確認する方法として、確率紙が用いられる。確率紙とは横軸に変量(例えば、積雪深) を、縦軸に頻度(確率)をとり、頻度(確率)の累積値をプロットしたときに直線上にな るよう縦軸の目盛りに工夫が凝らされている用紙のことである。個々のデータを、確率紙 のどの位置にプロットするか(いくらの確率値を与えるか)を決めるための公式をプロッ ティング・ポジション公式と呼び、主たる研究は 1960~1970 年代になされており、これ まで様々なものが提案されている[3.2.1.6.2-6]。

Cunnane (カナン) によって (3.2.1.6.2-2) 式のように統一的に表現されている。その 後も一般化極値分布やピアソンIII型分布などについての検討は進められているが、基本的 な使われ方は変わっていない。プロッティング・ポジション *F*(*x*<sub>*i*</sub>)は次式で表される。

$$F(x_i) = \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha}$$
(3. 2. 1. 6. 2-2)

ここで、*N*:標本数、*x<sub>i</sub>*:標本を値の小さいものから順に並べた時の*i*番目の順序標本値である。定数αは、次のように表され、一般的に知られている特徴は次のとおりである。

- ・Weibull (ワイブル)公式; $\alpha = 0$ :順位標本値の超過確率を与え、プロッティング・ ポジション $F(x_i)$ の変化率が一様である。正のひずみ係数を持つ分布形の分布上端で の推定値の偏りが大きいので、使用にあたっては注意する。
- ・Hazen (ハーゼン)公式; α=1/2:分布形を特定できず、その理論的根拠がしばし ば議論されるが、通常考えているよりも適合度は悪くない。
- ・Cunnane (カナン) 公式;  $\alpha = 2/5$ :全ての確率分布形に適用可能な折衷案として提案されたものである。

年最大積雪深及び年最大日降雪深のデータ(データ個数 49)を小さい方から順に並べ、 *i*番目のデータ *x<sub>i</sub>*の非超過確率 *F*(*x<sub>i</sub>*)を求め、敦賀地区の年超過確率(1-*F*(*x<sub>i</sub>*))と年最大積 雪深、年最大日降雪深の関係を求める。

# b. 確率分布の推定

建築物荷重指針の積雪深評価でグンベル分布が仮定されたことを踏まえ、グンベル分布 を用いて確率分布を推定し、グンベル分布の適合度評価及び安定性評価の後、一般化極値 分布や平方根指数型最大値分布[3.2.1.6.2-7]を用いた推定の必要性を判断することにし た。一方、分布形の影響を調べるため、比較的簡単に推定できるワイブル分布を用いた推 定も行った。

年最大積雪深あるいは降雪深 X と年超過確率  $P(X) (=1 - F(x_i))$ から  $\ln(X)$ と  $\ln(-\ln(F(X)))$ を計算し、確率紙にプロットし、直線回帰することで分布パラメータを推定した。具体的には次のとおりである。

# (a) グンベル分布による推定方法

グンベル分布の累積分布関数は次式で表される。

$$F(X) = \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{X-\mu}{\theta}\right)\right\}\right]$$
(3. 2. 1. 6. 2-3)

この式を直線式に変換するため両辺に対数を取ると次式になる。

$$-\ln(-\ln(F(X))) = \frac{X - \mu}{\theta}$$
(3. 2. 1. 6. 2-4)

ここで、 $Y = -\ln(-\ln(F(X)))$ 、 $A = \frac{1}{\theta}$ 、 $B = \frac{\mu}{\theta}$ とおくと次式で表される。

$$Y = A \times X + B \tag{3. 2. 1. 6. 2-5}$$

最小二乗法を利用しA、Bを推定した後、グンベル分布曲線を描くための $\mu$ 、 $\theta$ を求める。

# (b) ワイブル分布による推定方法

ワイブル分布の累積分布関数は次式で表される。

$$F(X) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{X}{\eta}\right)^{m}\right]$$
(3. 2. 1. 6. 2-6)

$$1 - F(X) = \exp\left[-\left(\frac{X}{\eta}\right)^{m}\right]$$
 (3. 2. 1. 6. 2-7)

式 (3.2.1.6.2-7)を直線式に変換するため両辺に対数を取ると次式になる。  $\ln(-\ln(1 - F(X))) = m \times \ln(X) - m \times \ln(\eta)$  (3.2.1.6.2-8) ここで、 $Y = \ln(-\ln(1 - F(X)))$ 、 $Z = \ln(X)$ とおくと次式で表される。

$$Y = m \times Z - m \times \ln(\eta)$$
 (3. 2. 1. 6. 2-9)

さらに、A = m、 $B = -m \times \ln(\eta)$ とおくと次式で表される。

 $Y = A \times Z + B$ 

(3, 2, 1, 6, 2-10)

最小二乗法を利用しA、Bを推定した後、ワイブル分布曲線を描くためのm、 $\eta$ を求める。

# c. 積雪ハザード曲線

カナン公式に基づく確率分布パラメータを用いて、年最大積雪深及び年最大日降雪深に 関する積雪ハザード曲線を構築した。グンベル分布を仮定した積雪ハザード曲線の場合、 積雪深については、200cm が約 10<sup>-2</sup>、500cm が約 10<sup>-6</sup>となり、日降雪深については、 100cm/day が約 10<sup>-2</sup>、200cm/day が約 10<sup>-5</sup>となった。グンベル分布はワイブル分布より保 守的に評価することから、現状ではグンベル分布を用いる方がよいと思われる。プロッテ ィング・ポジション公式における定数αの3個の公式間で得られた積雪ハザード曲線を比 較すると、グンベル分布及びワイブル分布共に、ワイブル公式は多少ずれてくるが、カナ ン公式とハーゼン公式はよく一致する。前述のとおり、カナン公式は全ての分布への適合 性がよいと言われていることから、カナン公式を用いる方がよいと思われる。

# d. 適合度評価

観測値との適合度は SLSC (Standard Least-Squares criterion、標準最小二乗基準) という指標を用いる。SLSC はプロッティング・ポジション公式と確率分布から推定した 非超過確率の差を指標化したものである。SLSC は小さいほど適合度が良く、気象庁の確 率降水量推定方法では 0.04 以下で適合していると判断されている。多少異なるが、宝・ 高棹は 0.03 以下で適合していると述べられている[3.2.1.6.2-8]。

$$SLSC = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (S_i - r_i)^2}}{|S_{0.99} - S_{0.01}|}$$
(3. 2. 1. 6. 2–11)

ここで、*S<sub>i</sub>*:*i*番目のデータを推定母数で変換した標準変量、*r<sub>i</sub>*:プロッティング・ポジ ション公式に対応した非超過確率を推定母数で変換した標準変量、*S*<sub>0.99</sub>,*S*<sub>0.01</sub>:非超過確率 を 0.99 及び 0.01 とした場合の当該確率分布の標準変量

$$S_i = -\ln\{-\ln F(x_i)\}$$
(3. 2. 1. 6. 2-12)

$$S_i^* = -\ln\left\{-\ln\frac{(i-0.4)}{(n+0.2)}\right\}$$
(3. 2. 1. 6. 2-13)

 $S_{0.99} = -\ln\{-\ln 0.99\}$ 

(S<sub>0.01</sub>も同様) (3.2.1.6.2-14)

# 結果、判断基準である 0.04 より一桁程度小さく適合していることとなった。

# e. 安定性評価

安定性評価はリサンプリング手法で行う。リサンプリング手法には Jackknife 法や bootstrap 法がある。Jackknife 法は大きさN 個の標本のうち任意の 1 データを欠いたデ ータ数N-1 個の標本をNセット作成し、これらの標本から求めた統計量を基に不偏推定 値及びその周りの推定誤差を算定する手法である。Jackknife 法は計算回数が少なく、作 成する標本数及び不偏推定値、推定誤差が一意的に定まる特徴があり有用である。本研究 では、Jackknife 法を用いて安定性評価を行う。

以下では、Jackknife 推定誤差分散の求め方を記述する。N 個のデータ $x_1, x_2, ..., x_N$ を用いてその母集団の特性を表す量を推定する構造(統計量)を $\varphi(x_1, x_2, ..., x_N)$ と記す。

まず、i番目のデータを除いたN-1個のデータを用いて統計量を求める。

$$\hat{\varphi}_{(i)} = \varphi(x_1, x_2, \cdots x_{i-1}, x_{i+1}, \cdots, x_N)$$
(3. 2. 1. 6. 2-15)

グンベル分布の統計量:

$$\varphi = \mu - \theta \times \ln(-\ln(F(x))) \tag{3.2.1.6.2-16}$$

ワイブル分布の統計量:

$$\varphi = \exp\left[\left(\frac{\ln(-\ln(\overline{F}))}{m}\right) + \ln(\eta)\right] \mu - \theta \times \ln(-\ln(F(x))) \qquad (3. 2. 1. 6. 2-17)$$

ただし、 $\overline{F}$ は超過確率である。

次に、N 個の $\hat{\varphi}_{(i)}$ の平均 $\hat{\varphi}_{(i)}$ を求める。

$$\hat{\varphi}_{(\cdot)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \hat{\varphi}_{(i)}$$
(3. 2. 1. 6. 2–18)

最後に、統計量 $\varphi$ の Jackknife 推定誤差分散  $\hat{s}_j^2$ を求める。

$$\hat{s}_{j}^{2} = \frac{N-1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left( \hat{\varphi}_{(i)} - \hat{\varphi}_{(\cdot)} \right)^{2}$$
(3.2.1.6.2-19)

上式を用いて、年超過確率 10<sup>-1</sup>、10<sup>-2</sup>、10<sup>-3</sup>における Jackknife 推定誤差分散を求めた。 Jackknife 推定誤差はカナンプロッティング・ポジション公式でグンベル分布の場合が最

も小さくなっており、安定性が高いことから、この組み合わせが最適と判断した。

この安定性評価では 49 個の確率分布を求めることになる。カナンプロッティング・ポ ジション公式でグンベル分布の場合、年最大積雪深では 10<sup>-2</sup>で 9.8%、10<sup>-4</sup>で 10.7%、10<sup>-6</sup>で 11.1%の誤差であり、年最大日降雪深では 10<sup>-2</sup>で 3.3%、10<sup>-4</sup>で 3.5%、10<sup>-6</sup>で 3.5%の誤差で あった。

### 3.2.1.6.3 竜巻ハザード評価手法の開発(H25)

# (1) 竜巻ハザード強さに関する記録の調査・整理

本研究では、竜巻の発生件数と最大風速を調査するため、気象庁ウェブサイトから得ら れる「突風等の発生データベース」[3.2.1.6.3-1]に基づき、昭和36年~平成23年 (51年間)の竜巻及び竜巻情報を利用した。突風等の発生データベースには、事象区別、 発生日時、発生場所、被害幅(m)、被害長さ(km)、主な被害状況、藤田スケール(以 下、Fスケールという)と呼ばれる指標が示されている。事象区別とは、竜巻、漏斗雲、 ダウンバースト(下降噴流)など突風発生時に被害をもたらした事象について記載されて いる。

平成25年度は原子力規制委員会より新規制基準が施行され、電力会社では竜巻影響評価が進められていた。本研究では、その先行検討例[3.2.1.6.3-2~3.2.1.6.3-4]を参考とした。その検討例では、竜巻検討地域は敦賀地区を含む日本海側の範囲(下関~稚内宗谷岬)、かつ海岸線から陸側~5kmの範囲が設定された。なお、気象庁ウェブサイト「竜巻分布図」[3.2.1.6.3-5]及び東京工芸大学の調査研究[3.2.1.6.3-6]から、日本では海岸線から±1kmの範囲に最も竜巻発生件数が多いことが示されている。

本検討地域における昭和36年から平成23年までの51年間の竜巻発生件数とFスケールを調査した。当該検討地域では最大でもF2スケールの竜巻であり、F2より大きなスケールの竜巻は観測されていなかった。

### (2) 竜巻ハザード評価手法に関する既往研究の調査・整理

### a. 国内の竜巻ハザード評価手法に関する調査・整理

関西電力では、竜巻検討地域として、大飯発電所を中心とする半径 180km の範囲内かつ 海岸に沿った海側 5km と山側 5km の重なる地域(面積 5, 321km<sup>2</sup>)を設定して竜巻ハザード 曲線が評価された[3.2.1.6.3-2]。次に、日本における竜巻発生数を補正し、観測記録を 用いて竜巻の強度(EF スケール(Enhanced Fujita scale、改良藤田スケール))より、 竜巻最大風速の確率密度分布に対数正規分布を仮定して分布パラメータを評価し、その結 果を基に竜巻最大風速の超過確率を算定した。また、竜巻による被災幅、長さ及び被災面 積の分布に対数正規分布を仮定し、観測記録に基づき分布パラメータを評価した上で、竜 巻による被災面積の1年あたりの期待値を評価し、それを竜巻検討地域面積で除すること で年被災確率が算出された。このとき、年被災確率は点構造物と構造物の幅を考慮した場 合の2つが考慮された。竜巻最大風速のハザード曲線は、竜巻最大風速の超過確率と年被 災確率を掛け合わせた確率として求められた。

北海道電力では、北海道から本州にかけての日本海沿岸に沿った海側、陸側それぞれ

5km の地域(面積 33,395km<sup>2</sup>)が検討地域として設定された[3.2.1.6.3-4]。それ以外の評価手法については上記[3.2.1.6.3-2]と同じであった。

東京工芸大学では、原子力発電施設で想定される竜巻被害をモデル化し、最終的に竜巻 によるリスクを評価する手順を明らかにすることを目的としており、ガイドライン策定の ために 1) 竜巻リスクモデルの構築、2) 竜巻の工学的モデル策定、3) 原子力施設への影 響を検討、4) 諸外国における原子力施設の竜巻対策ガイドライン調査、竜巻対策ガイド ライン策定の4項目が実施された[3.2.1.6.3-6]。

関西電力及び北海道電力では、竜巻検討地域として、北海道から本州日本海側に加えて 北海道の襟裳岬以西も対象にして、海岸に沿った海側 5km と陸側 5km の地域(面積 38,895km<sup>2</sup>)を設定するとともに、東京工芸大学[3.2.1.6.3-6]により提案された評価手法 を用いて再評価がなされた[3.2.1.6.3-7]、[3.2.1.6.3-8]。竜巻風速、竜巻の被害幅・被 害長さの確率密度分布を3変量対数正規分布として算定し、観測の元データを基に竜巻風 速、竜巻の被害幅、竜巻の被害長さの相関係数を推定、ポリヤ分布近似曲線を用いてハザ ード曲線を算定していることが特徴的である。また、竜巻影響エリアを1km 毎に刻んだエ リアでハザード曲線もまた評価された。

# b. 海外の竜巻ハザード評価手法に関する調査・整理

米国では、原子力発電所の竜巻影響評価ガイドである Regulatory guide 1.76 を補完す る形での報告書[3.2.1.6.3-9]が用意されている。その報告書には、米国での竜巻特性に 加えて米国全土の緯度・経度 1°毎の区画及び原子力発電所毎の竜巻最大風速の年超過確 率が報告されている。その報告書によれば、有益な情報を与える竜巻件数が 39,600 以上 あり、Fスケール毎の竜巻による被災長さ、被災幅そして被災面積の分布が報告されてい る。点構造物と大きさのある構造物の両方について竜巻領域密度分布を考慮して年超過確 率を評価し、竜巻最大風速のハザード曲線を竜巻最大風速の超過確率と年被災確率を掛け 合わせた確率として求めている。竜巻ハザード曲線は、米国全土の緯度・経度 1°、2°、 4°区画毎の竜巻最大風速が報告されており、また、米国を州の単位で大きく3つに分割 してそれぞれのハザード曲線が算定、比較されている。

# (3) 竜巻ハザードの重要パラメータの同定

竜巻を特徴づける現在観測記録から推定可能なパラメータとして、以下が挙げられる。

- ・最大風速
- ・竜巻の移動速度
- ・竜巻の接線速度
- ·最大接線風速半径
- ・竜巻の中心気圧

竜巻による崩壊熱除去系機能喪失は、以下の3つの要因により発生する起因事象によるも のと考えられる。

- ・風圧
- ・圧力差

・飛来物衝突による衝撃

なお、ナトリウム冷却高速炉は大気を最終ヒートシンクとすることから、空気冷却器の 構造健全性が維持されている状態で外気の流動挙動により崩壊熱除去機能が阻害されるこ とが懸念されるが、崩壊熱除去に必要なヒートシンク部が位置的に分散していること、竜 巻の継続時間は最大でも数分間との観測結果があることから、空気冷却器の構造健全性が 維持されている状態で外気の流動挙動により崩壊熱除去系が炉心損傷に至るほど機能を失 う状況は考えにくい。

したがって、上記の3つの要因による荷重により必要な構造健全性が失われ、崩壊熱除 去機能を喪失すると想定するのが妥当である。これらの荷重を定量化するにあたって重要 なパラメータは竜巻の最大風速である。したがって、本節で評価される竜巻ハザード曲線 の重要パラメータは次のとおりとなる。

·最大風速

### (4) 竜巻ハザードの評価

#### a. 竜巻ハザード手法(竜巻ハザード曲線の算定フロー)

本研究では、既往研究[3.2.1.6.3-1~3.2.1.6.3-9]及び竜巻影響評価ガイド(案) [3.2.1.6.3-10]などを参考とし、建物等が竜巻に遭遇する確率及び遭遇した竜巻がある風 速を超過する竜巻である確率を掛け合わせた確率(竜巻被害発生時の風速の年超過確率) を算出し、ハザード曲線を算定することとした。

#### b. 竜巻検討地域の設定

本評価では、ナトリウム冷却高速炉原型炉の設置サイトである敦賀地区を含む日本海側 の範囲、かつ海岸線から±5km の範囲を検討地域として設定した。ここで、日本では海岸 線から±1km の範囲が最も竜巻発生件数が多い上に、検討対象プラントの設置位置が海岸 線から1km以内に設置されていることから、基本的には海岸線から1km以内を対象とした ハザード曲線を構築する方針とした。一方、海岸線から5km以上離れると、竜巻発生件数 が急減する。そのため、本研究では、より幅広い範囲でデータを収集する目的から海岸線 から5km以内の範囲を対象とした。ハザード曲線構築にあたっては、海岸線からの距離を パラメータとした感度解析を実施することとした。

### c. 竜巻ハザードデータの補正

検討地域における昭和36年~平成18年の竜巻発生数は少なく、年発生数分布は年発 生数の平均値4.7件、標準偏差7.5件となっている。また、観測方法の違いにより、平成 19年以降に観測された竜巻発生件数と大きく差があると考えられる。そこで竜巻発生デ ータの補正を行うこととした。補正方法は、以下のとおりである。F1スケール以上の竜 巻に関しては昭和36年~平成23年の竜巻の年発生数に大きく変化はなかったが、不明、 F0スケール以下に関しては平成19年以降急激に増加しており、平成19年~平成23 年の5年間で年平均23.2件発生している。これは平成19年以降に気象庁の観測体制強 化及び収集方針変更がなされたからであり、平成19年以前は観測数としてカウントされ ていなかったと言える。そこで、昭和36年~平成18年にも、F0以下の竜巻が毎年 23.2 件発生していると仮定し、23.2 件から昭和36年~平成18年の年平均発生数であ る0.5件を差し引いた22.7件を足し合わせることで補正を行った。

### d. 年被災確率の評価

竜巻の被災確率は、竜巻によって被害を受ける面積が竜巻検討地域面積に対して占める 割合として考えられる。米国 NRC NUREG/CR-4461、Rev.2 の方法を参考にし、被災確率を 算出した。

#### (a) 被災確率の算出方法

竜巻により被害を受ける領域を、建物等の構造物が無い箇所を襲う領域P(点構造物)と、建物等を通過する領域L(構造物の幅の寄与分)に分けて考え、以下の2式を用いて、被災確率 $P_p$ 、 $P_L$ を算出する。なお、被災面積・長さに関しては十分な観測データがないため、日本全域の竜巻データを対象とする。

$$P_p = (\Sigma A_T) / (N \cdot A_R)$$
(3. 2. 1. 6. 3-1)

 $P_L = (D \cdot \Sigma L_T) / (N \cdot A_R)$ (3. 2. 1. 6. 3-2)

ここで、ΣA<sub>r</sub>は推定総被災面積、ΣL<sub>r</sub>は推定総被災長さ、Dは評価対象の建物などの 代表幅、Nは観測年数、A<sub>R</sub>は検討地域の面積を示す。

# (b) 推定総被災面積 $\Sigma A_r$ 及び推定総被災長さ $\Sigma L_r$

竜巻の観測記録からFスケール毎の被災長さ及び被災面積の平均値、標準偏差を求め、それぞれの確率密度分布を対数正規分布として評価した。そして、被災長さ及び 被災面積の値と対数正規分布によって求めた確率密度を乗じることでスケール毎の被 災面積及び被災長さの期待値 $E[A_f]$ 、 $E[L_f]$ を求めた。なお、被災面積は被災幅×被 災長さとして計算した。

(c) 被災確率の算出結果

(3.2.1.6.3-1) 式、(3.2.1.6.3-2) 式に各パラメータの値を代入し被災確率 $P_p$ 、  $P_L$ を算出した。また、式の分母に観測年数が含まれていることから、被災確率 $P_p$ 、  $P_L$ は1年間あたりの被災確率、すなわち年被災確率となる。

### e. 最大風速に対する超過確率の評価

(a) 超過確率の評価のために使用するデータ

昭和36年~平成23年における竜巻の観測記録より得られる竜巻強度スケールで あるFスケール毎の竜巻発生数のヒストグラムを用いて竜巻最大風速の確率密度分布 を求める。

評価にあたっては、検討地域での竜巻発生数が少ないために統計データとして取り 扱うことが難しいこと、かつ検討地域内では F3 以上の大規模な竜巻のデータが存在

しないことから、日本全域の竜巻データを用いた。このとき、不明は含まず、F0 未 満、F0 以下及び F0 は F0、F0~F1 及び F1 は F1、F1~F2 及び F2 は F2、F2~F3 及び F3 は F3 として取り扱い、F0 未満、F0 の発生数の補正方法は 3.2.1.6.3 (4) c. 節と 同じ手法を用いた。

### (b) F スケールと被災面積比率及び被災長さ比率補正

例えば、F3 スケールの竜巻に被災した場合、被災した全域でF3 スケールの風速が 吹いているわけではなく、竜巻の中心から離れたところではそれ以下の風速が混在し ていると考えられる[3.2.1.6.3-11]。そのため、竜巻風速の密度分布に領域補正を加 味する必要があり、被災面積比率及び被災長さ比率に応じて各スケールの竜巻発生数 及び竜巻最大風速の確率分布を補正する必要がある。

# i. F スケールと被災面積補正

文献[3.2.1.6.3-11]から得られる被災面積スケール比率を各スケールの発生数に 乗じることで竜巻発生数の補正を行った。ただし、最大風速は平均時間に依存し、 F スケールは時間が統一されていないことから、風速を3秒平均で風速が統一され た EF スケールの風速へ変更した。このとき、前節の F スケール使用時と同様に各 EF スケールの最大値を用いた。被災面積スケール比率の補正によって、竜巻最大 風速の平均値は 38.9m/s、標準偏差は 8.2m/s となった。その平均値及び標準偏差 を用いて竜巻最大風速の確率密度分布を対数正規分布として評価し、累積確率密度 分布を用いて算出した竜巻最大風速の超過確率曲線を評価した。

# ii. Fスケールと被災長さ補正

文献[3.2.1.6.3-9]から得られる被災長さスケール比率を各スケールの発生数に 乗じることで竜巻発生数の補正を行った。ここで、前節と同様に、F スケールから EF スケールへ変更した。被災長さ比率の補正によって、竜巻最大風速の平均値は 40.3m/s、標準偏差は 7.4m/s となった。その平均値、標準偏差を用いて竜巻最大風 速の確率密度分布を対数正規分布として評価し、累積確率密度分布を用いて算出し た竜巻最大風速の超過確率曲線を評価した。

# (c) 極値分布を用いた竜巻最大風速の超過確率評価

竜巻最大風速の超過確率評価のために、気象の分野で用いられる極値分布(ワイブ ル分布及びグンベル分布)を用いて評価する。既に導出した超過確率について、各 EF スケールに対応する超過確率の値を新たなプロット点として求め、ワイブル分布 及びグンベル分布を用いて再度超過確率の曲線を引き直す。以降は、そのための母数 推定プロセスについて記す。なお、評価にあたっては、EF0 未満及び EF3 の 2 点の超 過確率の値を除いた方が厳しいハザードになるため、EF0、EF1、EF2 の 3 点の超過確 率の値で母数を推定することとした。

# i. ワイブル分布の母数推定

ワイブル分布の累積分布関数 $F(V_x)$ は

$$F(V_X) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_X - V_{min}}{a}\right)^b\right]$$
(3. 2. 1. 6. 3-3)

と表され、 $V_{min}$ 、a、bはそれぞれワイブル分布の位置母数、尺度母数、形状母数 を示す。 $V_{min}$ は F0 スケールの竜巻風速の下限値を EF スケールに換算した風速、す なわち 28m/s である。超過確率は $T(V_x) = 1 - F(V_x)$ より算出することができる。

$$T(V_X) = 1 - F(V_X) = \exp\left[-\left(\frac{V_X - V_{min}}{a}\right)^b\right]$$
(3. 2. 1. 6. 3-4)

また、(3.2.1.6.3-4)を直線式に変換するために、(3.2.1.6.3-4)の両辺に2度 対数を取り、

$$\ln\left(\ln(1/T(V_X))\right) = b \cdot \ln\left(\frac{V_X - V_{min}}{a}\right)$$
(3. 2. 1. 6. 3-5)

と表わす。この直線式 (3.2.1.6.3-5) から母数a及びbを推定する。ただし、 $V_{min}$ は、F0 スケールの下限値 17m/s を F スケールから EF スケールへ変換[3.2.1.6.3-12]した風速 28m/s と仮定する。同時に、風速の単位を変更するため、mile/h からm/s に変換した次式を用いて計算した。

 $V_{EF} = 0.6246V_F + 16.269$  (3.2.1.6.3-6) ただし、 $V_F$ はFスケールの風速[m/s]であり、 $V_{EF}$ はEFスケールの風速[m/s]であ る。被災面積及び被災長さのスケール比率補正を考慮した場合のEF0、EF1及び EF2スケールの最大風速のそれぞれの超過確率を評価した。

# ii. グンベル分布の母数推定

グンベル分布の累積分布関数 $F'(V_x)$ は、

$$F'(V_X) = \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{V_X - V'}{a'}\right)\right\}\right]$$
(3. 2. 1. 6. 3-7)

であり、V'、a'はそれぞれグンベル分布の位置母数、尺度母数を示す。 (3.2.1.6.3-7)式を直線式に変換するために、(3.2.1.6.3-7)の両辺に2度対数 を取り、

$$-\ln\left(-\ln(F'(V_X))\right) = \frac{V_X - V'}{a'}$$
(3. 2. 1. 6. 3-8)

と表す。この直線式(3.2.1.6.3-8)から母数*a*'及び*V*'を推定する。被災面積及び 被災長さのスケール比率補正を考慮した場合の EF0、EF1 及び EF2 スケールの最大 風速のそれぞれの超過確率を評価した。

### iii. 竜巻最大風速の超過確率

ワイブル分布、グンベル分布の推定した母数を用いて、被災面積スケール比率補

# 3. 2. 1. 6 - 12

正及び被災長さスケール比率補正それぞれの超過確率を求めた。

# f. 竜巻ハザード曲線の算定

被災確率 $P_P$ 、 $P_L$ 、及び被災面積スケール比率補正の超過確率 $T_P(V_{EF})$ 、被災長さスケール比率補正の超過確率 $T_L(V_{EF})$ を用いて竜巻ハザード曲線を算定する。算定式は下記のとおりである。

①点構造物において竜巻最大風速 $V_{EF}$ がある風速 $V_0$ を超える年超過確率 $P_P(V_{EF} \ge V_0)$ 

$$P_P(V_{EF} \ge V_0) = P_P \times T_P(V_{EF}) \tag{3.2.1.6.3-9}$$

②構造物の幅の寄与を考慮した場合において竜巻最大風速 $V_{EF}$ がある風速 $V_0$ を超える年 超過確率  $P_L(V_{EF} \ge V_0)$ 

$$P_L(V_{EF} \ge V_0) = P_L \times T_L(V_{EF})$$
(3. 2. 1. 6. 3-10)

上記 2 つの超過確率について、(3.2.1.6.3-11)式のように和を取り、竜巻ハザード曲線  $P(V_{EF} \ge V_0)$ を算定する。

$$P(V_{EF} \ge V_0) = P_P(V_{EF} \ge V_0) + P_L(V_{EF} \ge V_0)$$
(3. 2. 1. 6. 3-11)

(3.2.1.6.3-11) 式を用いて、竜巻ハザード曲線を算定した。なお、本評価では最終的 に、EF スケールで評価される竜巻ハザード曲線の風速を、(3.2.1.6.3-6) 式を用いて F スケールに変換して評価した。

# 3.2.1.6.4 強風ハザード評価手法の開発(H25)

# (1) 強風ハザード強さに関する記録の調査・整理

気象庁のデータは、全国約 1,300 地点の気象台、特別地域気象観測所(旧測候所)、 アメダス観測所等で観測された観測値及び統計値(合計値、極値等)であるが、強風に 係る観測は、一部の観測所でしか行われていない[3.2.1.6.4-1]。例えば、福井県の場合、 観測所は18ヶ所あるが、そのうち8ヶ所では風速に係る観測は行われていない。風速 に係る観測が行われている観測所は福井地方気象台、敦賀特別地域気象観測所及び5つ のアメダス観測所である。本研究では、気象庁年報をデータベース化した「気象データ ベース・地上観測」(以下、気象データベースと略す。)[3.2.1.6.4-2]より昭和42年 1月1日~平成22年3月31日(44年間)の最大風速(10分間平均風速の最大値) と最大瞬間風速(3秒間平均風速の最大値)の情報を利用した。

本評価では、ナトリウム冷却高速炉原型炉の設置サイトである敦賀地区を対象に、気 象データベースから敦賀測候所における年あたりの最大風速と最大瞬間風速の最大値、 すなわち年最大風速及び年最大瞬間風速を用いて、強風ハザード曲線を描くことにした。 参考のため、現在観測を実施している測候所のうち日本最大の風速(昭和40年に 70m/s)を記録した室戸岬測候所のデータもまた集計することとした。敦賀及び室戸岬に おける昭和42年~平成22年の年最大風速及び年最大瞬間風速(単位 m/s)を集計した。 敦賀では、これらのデータのうち年最大風速及び年最大瞬間風速の最大値はそれぞれ 23m/s 及び 40m/s である。一方、室戸岬では、それらは 51m/s 及び 69m/s である。

日本最大記録(最大風速 70m/s)は、昭和42年より前の昭和40年に観測された。そこで、昭和42年以前の風速データを調査した結果、気象庁ホームページ「災害をもた

らした気象事例」[3.2.1.6.4-1]から、敦賀及び室戸岬における昭和20年~昭和41年 のデータを取得した。敦賀における最大風速と最大瞬間風速を年最大値としてみなし、 44年分のデータに追加した。

### (2) 強風ハザード評価手法に関する既往研究の調査・整理

### a. 国内の強風評価

既往研究を調べてみると、巨大建造物の耐風安全性の向上や耐風設計の合理化のため に確率モデルを用いた設計手法の開発が進められている。我が国における強風の主要因 は台風であり、台風シミュレーションも活発に行われている[3.2.1.6.4-3~3.2.1.6.4-10]。また、地震と強風の相関に着目した研究もある[3.2.1.6.4-11]。このような台風シ ミュレーションは、風力発電設備(風車)の設計風速を設定するのに役立っており [3.2.1.6.4-9、3.2.1.3-10]、土木学会構造工学委員会にて「風力発電設備支持物構造設 計指針・同解析 2010 年版」 [3.2.1.6.4-12]として平成23年1月に刊行され、設計手法 として確立された[3.2.1.6.4-13]。電力会社にとっては再現期待値を用いて電柱など配 電設備や送電用鉄塔の設計合理化が図れているところである[3.2.1.6.4-14、3.2.1.3-15]。建築業界では建物外装材の耐風設計においてリスク評価が行われている [3.2.1.6.4-16、3.2.1.6.4-17]。このように強風リスク評価は建造物の設計に適用され ており、参考文献は比較的多い。これらの手法の基本的な部分は、建築物荷重指針・同 解説(2004)[3.2.1.6.4-18]及び風力発電設備支持物構造設計指針・同解析 2010 年版 [3.2.1.6.4-12]に集約されている。石原ら[3.2.1.6.4-14]の評価では、台風シミュレー ションで得た台風ハザード曲線はワイブル分布を過大評価し、グンベル分布を過小評価 する結果を得た。どちらかと言えば、ワイブル分布に近い曲線であり、回帰式を用いて 台風シミュレーション結果への近似が試みられた。

### b. 海外の強風評価

東京電力福島第一原子力発電所事故以前でも海外では外部事象 PRA が規制要求となっていた。OECD/NEA では 2009 年(平成 2 1 年)に各国の PRA の現状についてアンケートを取っていた[3.2.1.6.4-19]。PRA のための強風のカテゴリとして強風(ハリケーン)、竜巻、砂嵐、塩風がある。台湾では、制御設備に対する台風 PRA が行われていると記述されている。

米国では、IPEEE (Individual Plant Examination for External Events、外部事象の 個別プラント評価)が行われており、リスク評価手法の標準化がなされている [3.2.1.6.4-20~3.2.1.6.4-21]。Galyean と Kelly (2009) [3.2.1.6.4-22]によれば、強 風の成因は竜巻、ハリケーン、温帯低気圧であり、Indian Point 2 の IPEEE での強風に よる影響評価では強風による脆弱性はないという結果となっている。その評価で用いら れたハリケーンの最大風速は 45m/s であり、竜巻に比べるとかなり低い風速となってい る。他のプラントにおける IPEEE においても強風による影響は小さいという結果となっ ており、Wind damage というカテゴリー (竜巻、ハリケーン、温帯低気圧) での炉心損傷 確率に大きく寄与するものは温帯低気圧である。米国では竜巻に比べると強風の炉心損

傷確率はオーダーが一桁小さく竜巻の影響評価によって強風の影響評価は包含されるが、 日本では台風による強風の評価が重要になると考えられる。

IAEA では、異常気象ハザードに対するサイト評価のためのガイド; SSG-18 (2011) [3.2.1.6.4-23]が作成されているが、具体的な手法は見られない。次世代原子力プラン ト設計の外部事象への対処について調査されており、設計基準の設定などが述べられて いる[3.2.1.6.4-24]。

### c. 気象庁の評価手法

平成24年度は、気象庁の確率降水量の推定方法[3.2.1.6.4-25]に基づき、積雪ハザ ード手法を開発した。これは、適合度及び安定性がともに高い確率分布形を最適な確率 分布形と仮定した推定方法であり、一般化された推定方法であるため強風にも適用でき ると考えられる。

# (3) 強風ハザードの重要パラメータの同定

強風により影響を受ける崩壊熱除去機能は、風圧(風荷重)により機器が構造損傷す る場合、気圧差により機器が構造損傷あるいは圧力調整のための機能損傷する場合、強 風により飛散する飛来物により機器が構造損傷する場合が考えられる。前者2つは、瞬 間風速で評価するわけではなく比較的長時間を必要とするのに対して、後者の飛来物は 瞬間風速のような比較的短時間の風によって飛散すると考えられる。したがって、強風 ハザードの重要パラメータを以下のとおりとなる。

### ・最大風速

·最大瞬間風速

なお、ナトリウム冷却高速炉においては大気を最終ヒートシンクとすることから、空 気冷却器の構造健全性が維持されている状態で外気の流動挙動により崩壊熱除去機能が 阻害されることが懸念されたが、崩壊熱除去に必要なヒートシンク部が位置的に分散し ているとともに、吸気側は広いうえ、排気ダクトは四方に開放していることから、空気 冷却器の構造健全性が維持されている状態で外気の流動挙動により崩壊熱除去系が炉心 損傷に至るまで機能を失う状況は考えにくい。したがって、機器の構造健全性が失われ、 崩壊熱除去機能喪失に至らしめる強風は、年最大風速及び年最大瞬間風速を重要パラメ ータとしてハザード評価を行うこととする。

### (4) 強風ハザードの評価

### a. 年超過確率の評価

まず、年最大値を作成する必要があるが、実際に起こった異常気象がどのような頻度 で発生しているか、その分布の様子を視覚的に確認する方法として、確率紙を用いる。 得られた年最大風速及び年最大瞬間風速のデータを小さい方から順に並べ、年超過確率 を求めた。評価にあたっては、昭和42年~平成22年の44個のデータに昭和20年 ~昭和41年の14個のデータを加えて、58年分と保守的に仮定した。プロッティン グ・ポジション公式による差異が 0.01 近傍で多少あるが、概ね一致する。

# b. 強風ハザード曲線の構築

### (a) 確率分布の推定

本評価では、年最大風速及び年最大瞬間風速のハザード曲線をグンベル分布とワイ ブル分布で近似的に表した場合の確率分布を推定する。グンベル分布とワイブル分布 による推定方法は積雪ハザード評価手法で記述したため、ここでは割愛する。

観測記録を基に求めた年最大風速と年最大瞬間風速の年超過確率の離散値を横軸に プロットし、縦軸には対応する年最大風速と年最大瞬間風速毎にグンベル分布を仮定 して近似的に求めた年超過確率値及びワイブル分布を仮定して近似的に評価し、敦賀 における年最大風速及び年最大瞬間風速に関する強風ハザード曲線を評価した。結果、 グンベル分布は年超過確率 0.1 程度以下では高風速側に直線的に下降しているのに対 し、ワイブル分布は同 0.1 程度以下では2次曲線状に下降しており、分布の違いによ り年超過確率の差異が拡大することが分かる。また、昭和42年以降の44個のデー タを用いた推定曲線に比べて、昭和42年以前の比較的厳しい風速を含む14個のデ ータを用いた推定曲線は大きめに評価しており、その差異が大きいことが分かる。昭 和20年以降のデータを用いたグンベル分布の場合、年最大風速については、30m/s が約 10<sup>-2</sup>、50m/s が約 10<sup>-5</sup>である。年最大瞬間風速については、50m/s が約 10<sup>-5</sup>である。グンベル分布はワイブル分布より保守的に評価するものの、 低頻度における風速を物理的に考え難いほど高く推定するため、現状ではワイブル分 布を用いる方がよいと思われる。

# (b) 適合度評価

積雪ハザード評価と同様に、観測値との適合度は SLSC (Standard Least-Squares criterion、標準最小二乗基準) という指標を用いる。SLSC はプロッティング・ポジ ション公式と確率分布から推定した超過確率の差を指標化したものである。SLSC は 小さいほど適合度がよく、気象庁の確率降水量推定方法では 0.04 以下で適合してい ると判断されている。適合度評価した結果、判断基準である 0.04 より小さく適合し ていると判断できる。

### (c) 安定性評価

積雪ハザード評価と同様に、Jackknife 法を用いて安定性評価を行う。この評価は、 現在の観測値をランダムに選んだ場合や今後観測値が追加された場合でも、確率分布 パラメータの推定結果が大きく変わらず、安定しているかどうかを判断するためのも のである。ここでは、超過確率 10<sup>-1</sup>/年、10<sup>-2</sup>/年、10<sup>-3</sup>/年における Jackknife 推定誤 差分散を求めた。結果、Jackknife 推定誤差は全体的に小さく安定性が高いことを示 している。カナン・プロッティング・ポジション公式ではややワイブル分布の場合が 小さくなっている。この安定性評価の結果、年最大風速の場合、10<sup>-2</sup>で 0.02%、10<sup>-4</sup>で 0.15%、10<sup>-6</sup>で 0.22%の誤差であり、年最大瞬間風速の場合、10<sup>-2</sup>で 0.20%、10<sup>-4</sup>で 0.13%、10<sup>-6</sup>で0.10%の誤差であった。

# 3.2.1.6.5 異常降雨ハザード評価手法の開発(H26)

# (1) 異常降雨ハザード強さに関する記録の調査・整理

気象庁による地上気象観測地点は約160地点あり、このうち2拠点は福井県内にある。 気象庁のデータベース[3.2.1.6.5-1]では、全国の気圧、気温、湿度、風速、降水量など が記録されており、特に、降水量に関しては、10分間、1時間、24時間、1日の降水量が 1時間毎に記録されている。ここで、日降水量とは0時から24時までの降水量であり、 24時間降水量とはある時刻から24時間の降水量であり、1時間降水量のピークを含んだ 降水量の最大値を示している。本研究では、福井県の敦賀気象観測所で記録されたデータ を用い、年毎に最大となる10分間、1時間、24時間、1日の降水量、及び降水の継続時 間を調査した。年最大10分間降水量及び年最大1時間降水量は1937年(昭和12年)~ 2013年(平成25年)の77年間、年最大24時間降水量は1937年(昭和46年)~ 2013年の43年間、年最大日降水量は1897年(明治30年)~2013年の117年の降水量 のデータ、及び継続時間は1950年(昭和25年)~2013年の64年間のデータを調査し た。ここで、継続時間に関しては、年最大1時間降水量のデータから1時間降水量が 0.5mm、または5mm以上となるデータを選定し、雨の降り始めた時刻と降り終わった時刻 を基に年最大継続時間を算出して年毎に整理した。

### (2) 異常降雨ハザード評価手法に関する既往研究の調査・整理

降雨を対象とし、確率論を使用したハザード評価は気象庁で行われている[3.2.1.6.5-2]。そこでは、対象とする地域の降水量のデータから非超過確率及び再現期間を評価して いる。まず、再現期間*T*(*x*)は、下記の式により算出している。

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)} \tag{3. 2. 1. 6. 5-1}$$

ここで、xは降水量(mm)、F(x)は非超過確率である。この非超過確率は、ある降水量 x未満の度数をデータの総度数で割った値として定義される。降水量に対する連続的な再 現期間を評価する場合は、観測データを入力値として(3.2.1.6.5-1)式から得られる再 現期間に対し、確率分布をあてはめて評価できる。代表的な確率分布としては、(1)グ ンベル分布、(2)一般化極値分布、(3)平方根指数型最大分布、(4)対数ピアソンIII 型分布、(5)対数正規分布などが知られている。このうち、分布(1)~(3)は極値分 布と呼ばれ、最大値や最小値に関する統計理論でみられる分布であり、分布(4)~(5) は極値分布と似た分布となることから既往の評価でも使用されてきた分布である。

得られたデータに対する再現期間を評価する公式として、以下のプロッティング・ポジ ション公式が知られている。

$$T(i) = \frac{N+0.2}{i-0.4}$$
(3. 2. 1. 6. 5-2)

# 3. 2. 1. 6 - 17

(3.2.1.6.5-2) 式は、総データ数N 個に対してi番目のデータの再現期間を表現している。降水量のデータから得られた再現期間に対し、(3.2.1.6.5-1) 式及び確率分布(1) ~ (5) を使うことにより、降水量に対する連続的な再現期間も評価可能である。その場合、確率分布が適合することを定量的に示すことが必要となる。このような適合度の指標として SLSC (Standard Least-Squares criterion、標準最小二乗基準) 指標が知られており、これが小さいほど確率分布は適合していると見なされる。また、確率分布が特異な観測データに大きく依存していないか、という安定性を調べる方法には Jackknife 法が知られ、必要に応じてこれも評価する。

### (3) 異常降雨ハザードの重要パラメータの同定

原子炉補助建物外や屋上には排水設備が設置されているが、異常降雨発生時に排水容量 を超えれば次第に水位が上昇し、原子炉補助建物外に配置されている機器の没水、原子炉 補助建物内への水の浸入による機器の没水等が考えられる。水位の上昇は、時間あたりの 降水量と継続時間に依存すると考えられる。このため、本研究では、データが収集可能な 降水量として 10 分間、1 時間、24 時間、1 日の降水量、並びに継続時間をハザードの重 要パラメータと同定する。すなわち、各時間あたりの降水量、または継続時間を指標とす るハザード曲線を算出する。

### (4) 異常降雨ハザードの評価

# a. 年超過確率の評価

異常降雨ハザード評価手法は、これまでに実施した手法を適用する。年超過確率を評価する方法として、実際に起こった異常気象がどのような頻度で発生しているか、その分布の様子を視覚的に確認するために、確率紙が用いる。個々のデータを、確率紙にプロットするために、次式のような非超過確率を評価するプロッティング・ポジション公式を使った。

$$F(i) = \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha}$$
(3. 2. 1. 6. 5-3)

この(3.2.1.6.5-3) 式は、経験式であり、総データ数*N* 個に対して*i*番に小さな指標に 対する非超過確率 *F*(*i*)を表現している。ここで、 $\alpha$ は定数であり、 $\alpha = 0$ (ワイブル公 式)、 $\alpha = 0.4$ (カナン公式)などが知られている。この主たる研究は 1960~1970 年代 になされており、これまで様々なもの(例えば、ワイブル、ハーゼン、カナン)が提案 されている[3.2.1.6.5-3]。

整理された年最大10分間降水量、年最大1時間降水量、年最大24時間降水量及び年最 大日降水量のデータを小さい方から順に並べ、年超過確率を求めた。ここで、本評価で はプロッティング・ポジションとして多くの分布に適合するカナン公式を用いた。

### b. 異常降雨ハザード曲線の評価方法

本評価では、年最大10分間降水量、年最大1時間降水量、年最大24時間降水量及び 年最大日降水量のハザード曲線をグンベル分布とワイブル分布で近似的に表した場合の

確率分布を推定する。指標 x に対するワイブル分布  $F_w(x)$ 、及びグンベル分布  $F_G(x)$  は、 各々次式のように定義される。

$$F_{w}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-r}{\eta}\right)^{m}\right]$$
(3. 2. 1. 6. 5-4)

$$F_G(x) = \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{x-\mu}{\theta}\right)\right\}\right]$$
(3. 2. 1. 6. 5-5)

ここで、*r*、*m*、*η*、及び*µ*、*θ*はそれぞれワイブル分布、及びグンベル分布を決める 確率分布パラメータである。ワイブル分布とグンベル分布による推定方法は積雪ハザー ド評価手法と同様である。

# c. 期間を設定した場合の 1 時間降水量に対するハザード曲線と降水継続時間に対するハ ザード評価

(a) 確率分布の推定

降雨地点の水位が上昇するような異常降雨が発生した場合、建物内外にある機器が 没水し、機能喪失する可能性がある。この評価には、時間あたりの降水量だけでなく、 降水の継続時間も必要となる。継続時間については 1950 年(昭和25年)~2013 年 (平成25年)の64年間のデータがあり、その期間に対応した年最大1時間降水量 も評価する。ここで、プラント外に配置される排水設備では、1時間降水量に対応で きるよう設計で考慮されていると考えられることから、降水量の指標は1時間降水量 に着目した。以上から、この64年間のデータを使って年最大1時間降水量と継続時 間に関するハザード曲線の評価を実施した。これらの確率分布パラメータを使った 1950 年(昭和25年)~2013 年(平成25年)の1時間降水量データを使用した際 のハザード曲線及び降水継続時間のハザード曲線を評価した。

(b) 適合度評価

これまでのハザード評価と同様に、観測値との適合度は SLSC で判断する。SLSC と はプロッティング・ポジション公式と確率分布から推定した超過確率の差を指標化し たものであり、気象庁の確率降水量推定方法では 0.04 以下で適合していると判断さ れている。導出した確率分布は判断基準の 0.04 より小さく、適合していると判断で きた。

(c) 安定性評価

これまでのハザード評価と同様に、Jackknife 法を用いて安定性評価を行う。この 評価は、現在の観測値をランダムに選んだ場合や今後観測値が追加された場合でも、 確率分布パラメータの推定結果が大きく変わらず、安定しているかを判断するための ものである。ここでは、1950 年(昭和25年)~2013 年(平成25年)の64年間 のデータに対する年最大1時間降水量の場合の確率分布に対する安定性評価結果とし て、超過確率 10<sup>-1</sup>/年、10<sup>-2</sup>/年、10<sup>-3</sup>/年における Jackknife 推定誤差分散を求めた。 Jackknife 推定誤差は、ワイブル分布よりもグンベル分布の方が小さく安定性が高く なった。64年分のデータを使った時のハザード曲線とそれから最も大きくずれる 63年分のハザード曲線との差については、ワイブル分布の場合は 10<sup>-2</sup>で 5.0%、10<sup>-4</sup> で 7.6%、10<sup>-6</sup>で 8.9%の誤差であり、グンベル分布の場合は 10<sup>-2</sup>で 2.7%、10<sup>-4</sup>で 3.2%、10<sup>-6</sup>で 3.4%の誤差であった。

# 参考文献

- [3.2.1.6.2-1] 気象庁ウェブサイト. http://www.jma.go.jp/jma/index.html
- [3.2.1.6.2-2] 気象業務支援センター,気象データベース地上観測 version3.10 (2012).
- [3.2.1.6.2-3] 日本気象協会,雪の重さを考える (2012/2/9).

http://www.jwa.or.jp/static/topics/20120209/snow120209.pdf

- [3.2.1.6.2-4] 日本建築学会,建築物荷重指針・同解説(2004).
- [3.2.1.6.2-5] 気象庁,異常気象リスクマップ.

http://www.data.kishou.go.jp/climate/riskmap/index.htm

- [3.2.1.6.2-6] 田守,許士, プロッティング・ポジションの最適化に関する研究, 平成21年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第66号, B-27 (2009).
- [3.2.1.6.2-7] 藤部,極値分布関数の適合度評価に関する検討,日本気象学会機関誌「天気」 第 58 巻 9 号, pp. 3-13 (2011/9).
- [3.2.1.6.2-8] 宝,高棹,水文頻度解析における確率分布モデルの評価規準,土木学会論文集 第 393 号/II-9, pp. 151-160 (1988/5).
- [3.2.1.6.3-1] 気象庁ウェブサイト, 突風等の発生データベース. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/
- [3.2.1.6.3-2] 関西電力株式会社, 竜巻影響評価方針(2013/5/30).
- [3.2.1.6.3-3] 関西電力株式会社, 竜巻に係るコメント回答及び影響評価結果(2013/6/11).
- [3.2.1.6.3-4] 北海道電力株式会社, 竜巻影響評価結果(2013/8/22).
- [3.2.1.6.3-5] 気象庁ウェブサイト, 竜巻分布図. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/bunpu/bunpu zu.html
- [3.2.1.6.3-6] 東京工芸大学,「平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書,平成 23 年 2 月.
- [3.2.1.6.3-7] 関西電力株式会社,大飯3号炉及び4号炉 竜巻影響評価について (2013/10/16).
- [3.2.1.6.3-8] 北海道電力株式会社, 泊発電所3号機 竜巻影響評価結果 補足説明資料 (2013/11/19).

- [3.2.1.6.3-9] U.S.NRC, Tornado Climatology of the Contiguous United States (NUREG/CR-4461), February 2007.
- [3.2.1.6.3-10] 原子力規制委員会,原子力発電所の竜巻評価ガイド(案),(2013/3/8).
- [3.2.1.6.3-11] James R. McDonald and Timothy P. Marshall, DAMAGE SURVEY OF THE TORNADOES NEAR ALTUS, OKLAHOMA ON MAY 11, 1982.
- [3.2.1.6.3-12] Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, A Recommendation for an ENHANCED FUJITA SCALE, June 2004.
- [3.2.1.6.4-1] 気象庁ウェブサイト. http://www.jma.go.jp/jma/index.html
- [3.2.1.6.4-2] 気象業務支援センター,気象データベース地上観測 version3.10 (2012).
- [3.2.1.6.4-3] 藤井建、塚本修、光田寧「日本本土に来襲する台風の統計的性質について」京 都大学防災研究所年報第28号 B-1, pp.463-473(1985年).
- [3.2.1.6.4-4] 藤井健、光田寧「台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション」京都大学防災研究所年報第29号 B-1, pp.229-239(1986年4月).
- [3.2.1.6.4-5] 藤井健、光田寧「台風域内の強風と地形との間の統計的関係についての一考 察」京都大学防災研究所年報第30号 B-1, pp.279-285(1987年4月).
- [3.2.1.6.4-6] 天野貴文、明田修、鈴木威「台風シミュレーション・システムの開発と風向別 最大風速の評価」GIS-理論と応用, Vol.14, No2, pp. 73-83 (2006).
- [3.2.1.6.4-7] 勝地弘、山田均、宮田利雄、斉藤智久、「海面水温の影響を導入した台風シミ ュレーション」日本風工学会論文集第 29 巻第 3 号(通号第 100 号)(2004 年 7 月).
- [3.2.1.6.4-8] 石原孟、ホタイホム、チョンチーリョン、藤野陽三「台風シミュレーションのための混合確率分布関数と修正直行交換法の提案」第18回風工学シンポジウム、 pp.5-10 (2004).
- [3.2.1.6.4-9] 山口敦、石原孟、「台風シミュレーションと気象解析を利用した設計風速と段
   階別風速出現頻度推定手法の提案」第 21 回風工学シンポジウム, pp. 215-220
   (平成22年).
- [3.2.1.6.4-10] 菊地由佳、石原孟、「台風時の風向特性と複雑地形の増速特性を考慮した風速 割増係数の評価手法の提案」第21回風工学シンポジウム,pp.21-26,(平成22 年).
- [3.2.1.6.4-11] 神田順、西嶋一欽「多変量極値分布を用いた多地点強風および地震危険度解 析」統計数理第52巻第1号, pp.155-173 (2004).
- [3.2.1.6.4-12] 土木学会構造工学委員会「風力発電設備支持物構造設計指針・同解析平成22 年版」(2011).
- [3.2.1.6.4-13] 石原孟「世界をリードする風力発電設備構造設計手法の確立を目指して〜風力 発電設備支持物構造設計指針・解説 平成22年版の策定」第12回風力エネル ギー利用綜合セミナー, pp. 47-54 (2011).
- [3.2.1.6.4-14] 石原孟、榎木康太、高原景滋、荒川洋「気流解析と台風シミュレーションに基づく配電設備のリスクマネジメント」土木学会論文集、A1(構造・地震工学), Vol. 67, No. 2, pp. 360-373 (2011).

- [3.2.1.6.4-15] 山崎智之、石川智巳、「第2章 合理的な風荷重評価技術の確立に向けて」電 中研レビュー、2003 年電中研レビューNo.48, pp.18-35 (2003).
- [3.2.1.6.4-16] 河合宏允、藤田正則「外装材等の台風疲労設計について」京都大学防災研究所 年報第48号B(2005年4月).
- [3.2.1.6.4-17] 坂本成弘、浅見豊「建物外装材の強風による被災リスク」、大成建設技術セン ター報第40号(2007).
- [3.2.1.6.4-18] 日本建築学会,建築物荷重指針・同解説(2004).
- [3.2.1.6.4-19] OECD/NEA [Probabilistic Safety Analysis (PSA) of Other External Events Than Earthquake」 NEA/CSNI/R(2009)4.
- [3.2.1.6.4-20] USNRC 「Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events(IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities」NUREG1407(1991).
- [3.2.1.6.4-21] USNRC [Perspectives Gained From the Individual Plant Examination of External Events(IPEEE) PROGRAMJ NUREG-1742(2002).
- [3.2.1.6.4-22] USNRC [NUREG/External Events Risk Analysis P-204] (2009).
- [3.2.1.6.4-23] IAEA [Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations] Specific Safety Guide, SSG-18 (2011).
- [3.2.1.6.4-24] IAEA 「Advanced Nuclear Plant Design Options to Cope with External Events」 IAEA-TECDOC-1487(2006).
- [3.2.1.6.4-25] 気象庁,異常気象リスクマップ.

http://www.data.kishou.go.jp/climate/riskmap/index.htm

[3.2.1.6.5-1] 気象庁ウェブサイト、過去の気象データ検索

http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php

- [3.2.1.6.5-2] 気象庁ウェブサイト、異常気象リスクマップ 確率降水量の推定方法 http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/cal\_qt.html
- [3.2.1.6.5-3] 田守、許士、「プロッティング・ポジションの最適化に関する研究」、平成2 1年度土木学会北海道支部 論文報告集 第66号, B-27(2009).
3.2.1.7 まとめ

重畳事象の選定方法を調査し、本研究における選定方法を考案して、平成27年度に評価対象とする重畳事象として、積雪と低温、強風と降雨の重ね合わせを選定した。

既往のハザード強さの記録として、積雪と低温の重畳事象については、積雪深、日降雪 深、最低気温、低温継続時間を調査・整理した。強風と降雨の重畳事象については、最大 風速、最大瞬間風速、1時間降水量を調査・整理した。また、国内外の技術会議に参加し 様々なハザード及びリスク評価手法に関する情報を収集するとともに、既往文献に基づき ハザード評価手法を調査・整理し、統計処理的方法により年超過確率を算出できる見通し を得た。

次に、積雪と低温の重畳事象については、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能喪失 要因には積雪による空気冷却器空気取入口の閉塞、積雪及び低温によるフィルタ凍結(閉 塞)及び低温による空気冷却器伝熱管内ナトリウム凍結が考えられるため、重要パラメー タとして年最低気温記録日の日降雪深、降雪継続時間、低温継続時間を同定した。これら の年最大値を極値分布にあてはめてハザード曲線を構築し、適合度評価と安定性評価で妥 当性を確認するハザード評価手法を開発した。低温継続時間については、凍結が考えられ る0℃以下の低温が継続した時間を用いてハザードを評価した。

強風と降雨の重畳事象については、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能喪失要因に は強風によって生じる飛来物衝突による機器の破損、空気冷却器への雨水浸入による伝熱 管疲労破損が考えられるため、重要パラメータとして年最大1時間降水量記録日の最大瞬 間風速、1時間降水量、降水継続時間を同定した。これらの年最大値を極値分布にあては めてハザード曲線を構築し、ハザード評価手法を開発した。降水継続時間については、1 時間あたり0.5mm あるいは5mm 以上の降水が継続した時間を用いてハザードを評価した。

最後に、4年間のまとめとして、開発してきた手法を整理した。

#### 3.2.2 火山噴火ハザード評価手法の開発(再委託先:産業技術総合研究所)

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を選 定した。また、湿分等を考慮したフィルタ目詰まり試験を実施した。さらに、これまでの 粒度分析の総合評価を行い、火山灰粒子の特徴を整理した。4年間のまとめとして手法を 整備した。

3.2.2.1 はじめに

原子力施設への火山噴火ハザード評価は、一部を除いてこれまでほとんど実施されては こなかった。日本は火山国ではあるものの、活火山自体は地域的に偏在しており、結果的 に活火山の麓以外の場所に原子力施設が建設されてきたからに他ならない(例外は青森県 の高レベル放射性廃棄物の中間貯蔵施設)。また、桜島火山で1914年(大正3年)に起 きた大正噴火以降、日本ではこれを超える規模の大きな噴火がたまたま発生しておらず、 原子力施設に影響を及ぼし得るような広域の大規模噴火が起きてこなかったこともその背 景の一つにはある。しかし、個々の活火山の噴火間隔が数十~百年を超えることは一般的 であり、特に、大規模噴火は休止期間が数千~万年と長く、いずれこのような噴火が日本 で起こることは避けられない。このような発生頻度の低い噴火現象について、既存や新た に調査で得られる情報から、当該火山の噴火による影響をどのように評価するのかは大き な課題である。日本の活火山の活動状況については、気象庁が大学を含めた研究機関や自 治体・防災機関などの協力を得ながら、24時間体制で監視し、火山噴火ハザードの軽減 のために噴火警報及び噴火予報の発表を行っている。しかし、数千年~万年に一度の大規 模噴火を念頭に置いた防災対策までは未着手であり、火山観測のみからの評価はほぼ不可 能である。

低頻度の大規模事象に備えるためには、地質学的手法による火山噴火ハザード履歴の解 析がまず必要である。そこで、本研究では、数値シミュレーションも活用しながら、起こ りやすさとハザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、ハザード評価手法を開発 する。

4年間の業務計画は次のとおりである。平成24年度にハザード強さ記録及び評価手法 を調査し、ハザードの重要パラメータを同定するとともに、火山灰粒度分析手法を開発す る。平成25年度に火山噴火ハザード評価手法の概念を構築するとともに、平成24年度 に収集した火山噴火記録を対象とした降灰シミュレーションを実施する。平成26年度に 火山噴火ハザード評価手法を開発するとともに、降灰シミュレーション、フィルタ目詰ま り試験及び降下火山灰の粒度分析を実施する。平成27年度に重畳事象のハザード評価を 実施するとともに、4年間のまとめとして手法を整備する。

平成24年度は、ナトリウム冷却高速炉原型炉をモデルサイトとして、その敷地周辺に おいて火山噴火ハザード履歴の調査を実施した。また、降下火山灰の定量的特性を明らか にする目的で、鹿児島県で噴火中の桜島火山を対象に降下火山灰を観測・採取するととも に、火山灰細粒粒度分析装置及び火山灰微細粒子形状観察装置を導入・活用し、火山灰評 価手法の開発に着手した。

平成25年度は、火山噴火による降下火山灰災害の評価手法の概念を構築するとともに、

平成24年度に実施した履歴調査の結果、施設周辺で起きた最大規模の被災事例である大 山倉吉テフラを対象にした降灰シミュレーションによる噴火パラメータを推定した。さら に、桜島火山で降灰調査を行い、地表に降下する火山灰粒子をほぼリアルタイムで採取し て粒度分析を実施した。また、火山灰採取装置を導入し、浮遊する火山灰試料を吸入採取 した。

平成26年度は、平成25年度の評価手法の概念構築を踏まえて、火山噴火による降下 火山灰のハザード評価手法を開発した。また、平成25年度に検討した大山倉吉テフラを 対象として、大山周辺の様々な風条件で降灰シミュレーションを実施するとともに、フィ ルタの目詰まり試験を実施した。さらに、噴火により大気中に浮遊する火山灰粒子と降下 する火山灰粒子について粒度分析を行い、粒子濃度に関する情報を取得した。

平成27年度は、火山噴火による降下火山灰災害に自然現象を重ね合わせることで、評価対象とする重畳事象を選定した。また、重畳事象評価に資するため、湿分等を考慮したフィルタ目詰まり試験を実施した。さらに、これまで桜島で取得した浮遊火山灰粒子の粒度分析の総合評価を行い、粒径分布や構成成分といった火山灰粒子の特徴を整理した。4年間のまとめとして、これまでに実施してきた堆積火山灰の地質学的データや降灰シミュレーションに基づく評価の流れを記述する手法を整備した。

# 3.2.2.2 重畳事象の選定(H27)

火山噴火に対する重畳事象として、降雨を選定した。積雪、強風、竜巻、森林火災等に ついては火山噴火と同時発生若しくは連鎖発生する必然性はないので考慮対象外とする。 火山噴火に降雨が重畳した結果、様々な障害や災害が発生することはこれまでに多くの報 告があり、施設に影響を及ぼし得る代表的な事象を取り上げる。

#### (1) 降雨の重畳効果

# ①堆積物重力流(ラハール)の発生

火山噴火時若しくは噴火後の降雨は、噴火による火山噴出物の河川への過剰供給や植生 の破壊、斜面を被覆する火山灰の力学的な不安定さを反映して、多様な火山噴出物の再移 動現象を発生させる。例えば、平成3年から始まった雲仙普賢岳噴火に伴う一連の土砂災 害[3.2.2-1]はその典型で、再移動した火山噴出物により下流域の家屋や構造物が破壊さ れた。水を媒介とする火山噴出物の再移動現象である堆積物重力流はラハールと呼ばれ、 泥質分を多く含み流体のマトリックス強度が比較的大きい粘着性の流れや、非粘着性の狭 義の土石流、高密度洪水流など多様な流れが存在する[3.2.2-2]。どのようなタイプのラ ハールが発生するのかは、母材となる火山噴出物の性質の違いが大きく寄与している。原 子力施設のように立地により火山体から離れた地点においては、降下砕物として堆積した 斜面上の火山灰が、その発生源となり得よう。評価の閾値としては、富士山ハザードマッ プに示された層厚 10cm の降灰量が目安となり[3.2.2-3]、過去の事例からみてこれを超え る降灰域では降雨時にラハールの発生を警戒する必要がある。

施設に対するラハールの動的圧力 Paは、ラハールの速度 v と流れの密度 pに依存し、

$$P_{\rm d}$$
 = 0.5  $\rho v^2$ 

(3. 2. 2 - 1)

流れの密度 $\rho$ は、水の密度を $\rho_w$ 、火山噴出物の密度を $\rho_v$ 、水の体積フラクションを  $v_w$ として、

$$\rho = \rho_{\rm w} \ v_{\rm w} + \rho_{\rm v} \ (1 - v_{\rm w}) \tag{3.2.2-2}$$

である。一般に、発生したラハールが土石流タイプの場合は、粒子濃度の大きな流れになりやすく、反対に高密度洪水流は粒子濃度の小さい流れになりやすい。図 3.2.2-1 は、ラ ハールの動的圧力 Paと粒子濃度-火山噴出物密度の関係を示すが[3.2.2-4]、Paは想定する ラハールのタイプにより大きく異なることに留意する必要がある。



図 3.2.2-1 ラハールの動的圧力と流速の関係[3.2.2-4]

# ②排水施設の閉塞

ラハールのような土砂災害を伴わない場合でも、降雨による火山灰の再移動は様々な障害を過去に引き起こしている。特に都市部に降灰があった直後に激しい降雨があった場合には、厚さ 10cm に満たない量の火山灰でも排水溝を閉塞させ、広範囲に内水氾濫を起こした事例がある[3.2.2-5]。重要な点は排水施設に火山灰混じりの雨水が流れ込む前に、降灰を取り除くことであり、除灰のための道具の準備や、除灰し易い構造物の設計が求められよう。

# ③火山灰堆積荷重の増加

堆積した火山灰に降雨があった場合、雨水は火山灰の間隙に一次的に保持される。その ため、降雨時には堆積層のバルク密度が約 1.5 倍になるものとして評価されている [3.2.2-3]。

# ④送電施設への影響

火山灰は乾燥時にはほとんど電気を通さないものの、湿った状態では火山灰表面に付着 した二酸化硫黄等の火山ガス成分が溶け出して通電性が良くなることが知られている。そ のため送電線の碍子に湿った火山灰が付着した場合には、閃絡(フラッシュオーバー)に よる絶縁破壊が起きて停電に至った事例が多く報告されている[3.2.2-6]。図 3.2.2-2 は、 堆積した火山灰厚さと閃絡発生確率の関係である[3.2.2-7]。



乾燥時(赤線)には確率は 0 であるが、湿潤状態(青線)では数 mm の火山灰厚でも閃絡が起きた事例がある[3.2.2–7]。

# 3.2.2.3 フィルタ目詰まり試験(H27)

ナトリウム冷却高速炉の空気冷却器には、塩害防止のためのエアフィルタが設置されて いるが、噴火による降灰時にはエアフィルタの目詰まりにより、空気冷却系が閉塞する可 能性が指摘できる。そこで、ハザード評価手法の確立のため、平成26年度は実際の火山 灰をエアフィルタに供給し、エアフィルタの目詰まりの状況を把握するための試験を乾燥 状態で実施し、フィルタ性能の劣化状況を確認している。平成27年度は、重畳事象に選 定した降雨がエアフィルタ性能に及ぼす影響を確認するために、湿潤状態での目詰まり試 験を実施した。エアフィルタを設置しているガスタービン火力発電所では、エアフィルタ (プレフィルタ+中性能+高性能フィルタ)がダストによりかなり目詰まりした状況で降雨 があると一次的に圧損が増加する現象が知られており[3.2.2-8]、同様の降雨影響が火山 灰でも起こるのかどうかを確認することがこの試験の大きな目的である。また、平成26 年度のフィルタ耐圧性能確認試験についても条件を変えて追加実施している。

# (1) 火山灰供給によるフィルタ性能変化確認試験

# ①試験方法

JIS (Japanese Industrial Standards Committee、日本工業規格) B 9908「換気用エ アフィルタユニット・換気用電気集じん器の性能試験方法」に準拠し、試験ダクトに供試 フィルタを取り付けて、火山灰を供給してフィルタの性能変化(圧力損失、粉じん保持量、 外観)を確認した。試験ダクトの概略を図 3.2.2-3 に示す。なお、本試験は沈降火山灰が フィルタへ全量直接流入したと想定したものである。



図 3.2.2-3 試験ダクトの概略 点検口内に散水ノズル(青丸)を設置している。



図 3.2.2-4 ファンとダストフィーダの間に設置した散水ノズル ミスト状の水が試験ダクトに供給されている。

平成26年度試験との違いは、ダストフィーダにて火山灰を供給するのと同時に二流体 ノズルにて散水している点で、降雨時の湿潤状態を再現している(図3.2.2-4)。

#### ②供試フィルタ

プレフィルタ:質量法 85%グレード品 製品名、型番:デアマット G85(ガラス繊維フィルタ) フィルタ寸法:610×610×50mm 定格風量:56m<sup>3</sup>/min フィルタ圧力損失:44~147Pa

中性能フィルタ:比色法 90%グレード品 製品名、型番:ミラセル MCS-S9-FF2Z/A(両フランジ、両面フェースガード付き) フィルタ寸法:594×594×292mm 定格風量:56m<sup>3</sup>/min フィルタ圧力損失:155~294Pa

フィルタ組み合わせ:プレフィルタのみ、中性能フィルタのみ、プレフィルタ+中性能 フィルタ組み合わせの3パターン

試験風量:定格風量(面風速2.5m/s)

# ③供給火山灰

火山灰種別:入戸火砕流堆積物を粉砕したガラス質火山灰 火山灰粒径:3.0φ (≒0.125mm)以上の粒径をカットしたものを使用 火山灰の状態:乾燥状態のものをダストフィーダで供給し、二流体ノズルで散水した水 と混合する

# ④供給条件

火山灰濃度が 70mg/m<sup>3</sup> (JIS によるフィルタ試験時の試験用粉体供給濃度)、及びその 10 倍、100 倍となるようにダストフィーダの供給スピードを設定した。ダストフィーダに は、K-Tron 社 K-Qx を使用している。

3.0 φ の火山灰の場合、その終端速度(約 0.2m/s)から、火山灰濃度 700mg/m<sup>3</sup>は毎時数 mm の降灰、火山灰濃度 7,000mg/m<sup>3</sup>は毎時数 cm の降灰に相当する。DKP (Daisen Kurayoshi Pumice tephra、大山倉吉テフラ)噴火では最盛期噴火時の継続時間目安は 10~20 時間で あるので、火山灰濃度 7,000mg/m<sup>3</sup>はほぼ DKP 噴火に相当している。

# ⑤フィルタ性能変化確認試験結果

平成26年度の乾燥状態試験結果と併せて平成27年度の試験結果概要を表 3.2.2-1 に示す。

	試験結果									
供試フィルタ	試験風量 (m <sup>3</sup> /min)	供給 状態	設定供給濃度 (mg/m <sup>3</sup> )	供給量 (g)	交換圧損 到達時間	粉体 (g/	保持量 <sup>′</sup> unit)	捕集率 (%)		_
	56	乾燥	70	903.0	3h33m0s	4	14.8	47.3%	平成26年/	
	56	乾燥	700	1,118.2	0h26m30s	5	18.1	49.2%	平成26年/	度実施
プレフィルタ	56	乾燥	7,000	2,110.0	0h5m6s	9	15.1	49.6%	平成26年[	度実施
デアマットG85	56	散水	70	2,033.1	8h38m39s	688.0		46.9%		
	56	散水	700	2,091.3	0h53m21s	31	387.8		*1	
	56	散水	7,000	3,579.0	0h9m8s	4	02.7	48.1%		
	56	乾燥	70	402.0	1h35m13s	3	81.6	100.0%	平成26年月	」 度実施
	56	乾燥	700	435.5	0h10m15s	4	15.1	99.9%	平成26年/	度実施
中性能フィルタ	56	乾燥	7,000	675.3	0h1m40s	5	90.4	100.0%	平成26年カ	度実施
ミラセルS	56	散水	70	501.3	2h7m53s	40	09.3	99.7%		
	56	散水	700	529.7	0h13m31s	437.2		99.4%		
	56	散水	7,000	1,044.8	0h2m40s	804.5		99.6%		
						プレ	中性能			
プレフィルタ	56	乾燥	70	753.5	2h58m0s	330.4	377.8	99.6%	平成26年/	度実施
デアマットG85 + 中性能フィルタ ミラセルS	56	乾燥	700	1,072.4	0h26m15s	502.1	487.2	99.9%	平成26年カ	度実施
	56	乾燥	7,000	1,477.0	0h3m30s	452.7	791.8	100.0%	平成26年月	度実施
	56	散水	70	979.8	4h9m57s	365.2	309.3	100.0%		
	56	散水	700	1,006.7	0h25m32s	506.0	381.5	100.0%		
	56	散水	7,000	2,024.3	0h5m10s	877.2	460.2	100.0%		
		*1:圧損が交換圧損まで上がらず、途中試験中止							7	

表 3.2.2-1 火山灰供給試験結果概要

# ⑥フィルタ交換圧損到達時間

平成26年度の乾燥状態での試験では、プレフィルタ単体、中性能フィルタ単体、及び プレフィルタと中性能フィルタの二段使用時いずれにおいても、火山灰濃度が高くなるほ ど交換圧損への到達時間が短くなることが確認できている(供給濃度 70mg/m<sup>3</sup>と比較して、 700mg/m<sup>3</sup>で約1/10、7,000mg/m<sup>3</sup>で約1/50;表3.2.2-1)。平成27年度の散水条件におい ても、供給濃度による到達時間の変化率は乾燥時と同等であった(表 3.2.2-1)。ただし、 散水条件では、火山灰が水を含んで重くなり、試験ダクト内に落下して供試フィルタまで 到達する量が少なくなるため、乾燥条件よりも交換圧損到達時間が長くなる傾向が見られ た(プレフィルタ単体で約2倍、中性能フィルタを使用した場合で約1.4倍;図3.2.2-5、 3.2.2-6、3.2.2-7)。

なお、降灰が一時的に止まった時に降雨がある場合、火山灰は雨で落下しないため、乾 燥条件と近くなることが考えられるが、試験で確認が必要である。



図 3.2.2-5 フィルタ交換圧損到達時間(プレフィルタ)



図 3.2.2-6 フィルタ交換圧損到達時間(中性能フィルタ)



図 3.2.2-7 フィルタ交換圧損到達時間(プレフィルタ+中性能フィルタ)

プレフィルタ単体で使用した場合は、中性能フィルタを使用した場合と比較して捕集効 率が低い(フィルタ下流側に抜ける量が多い)ことから、目詰まりまでの時間は長くなる。 一方、通常の使用組み合わせである、プレフィルタと中性能フィルタの二段使用時の場合 は、中性能フィルタを単独で使用した場合と比較して、プレフィルタで適切に火山灰を処 理でき、中性能フィルタに流入する火山灰濃度が低くなることから、目詰まりまでの時間 は長くなることが確認できた(図3.2.2-8、3.2.2-9、3.2.2-10)。



図 3.2.2-8 フィルタ組み合わせによるフィルタ交換圧損到達時間 (火山灰濃度 70mg/m<sup>3</sup>)



図 3.2.2-9 フィルタ組み合わせによるフィルタ交換圧損到達時間 (火山灰濃度 700mg/m<sup>3</sup>)



図 3.2.2-10 フィルタ組み合わせによるフィルタ交換圧損到達時間 (火山灰濃度 7,000mg/m<sup>3</sup>)

# ⑦フィルタ組み合わせによる火山灰保持量

定格風量で使用した場合、供給火山灰濃度が高いほうが火山灰保持量が多くなる傾向が 見られた。これは、本試験を行った JIS 試験装置(規格上の供給濃度 70mg/m<sup>3</sup>)において より高い濃度で火山灰を供給した場合、火山灰の分散が悪く粒子同士が凝集して、フィル タの目詰まりが起こりにくくなったためと考えられる。散水条件では、火山灰に湿分を含 むため保持量(フィルタの質量増加分)が減ると予想されたが、火山灰濃度 7,000mg/m<sup>3</sup>で は増加・減少の明確な傾向が見られず、その他の濃度ではバラツキはあるものの乾燥条件 とさほど変わらなかった(図 3.2.2-11、3.2.2-12、3.2.2-13)。



図 3.2.2-11 フィルタ組み合わせによる火山灰保持量(プレフィルタ単体)



図 3.2.2-12 フィルタ組み合わせによる火山灰保持量(中性能フィルタ単体)

# ⑧火山灰捕集率

火山灰捕集率は、JIS に規定されている方法に準拠し、供給した火山灰の量と、供試フ ィルタの下流側に設置したバックアップフィルタの捕集量(=供試フィルタを通過した量) より、次式で計算した。

 $E = (1 - m/M) \times 100$  (%)

(3.2.2-3)

E:火山灰捕集率(質量法、%)



M: 火山灰供給量(g)、供試フィルタに到達せずダクト内に落下した量を除く

m: バックアップフィルタ捕集量(g)、BUフィルタに到達せず落下した量を含む プレフィルタ単体では、散水・乾燥での大きな違いは見られなかった。JIS 試験粉体に よるプレフィルタ仕様値(質量法平均効率で 85%)よりも低くなったが、これは粉体の種 類・粒度の違いによるものと推測される(なお、散水時 700mg/m<sup>3</sup>は交換圧損まで到達しな かったためデータ欠損)。中性能フィルタ(比色法平均効率で 90%、質量法換算では 95% 以上)では、測定誤差によるばらつきは見られるが、ほぼ完全に火山灰を捕集できている ことが明らかになった(図 3.2.2-14、3.2.2-15、3.2.2-16)。



図 3.2.2-14 火山灰捕集率 (プレフィルタ単体) 散水 700mg/m<sup>3</sup>試験では、交換圧損に達しなかったためデータが欠損している。

図 3.2.2-13 フィルタ組み合わせによる火山灰保持量 (プレフィルタ+中性能フィルタ2段)



図 3.2.2-15 火山灰捕集率(中性能フィルタ単体)



図 3.2.2-16 火山灰捕集率 (プレフィルタ+中性能フィルタ2段)

# 9降雨の重畳効果

降雨を想定した散水条件での火山灰目詰まり試験では、当初期待したような乾燥状態よ りも少ない火山灰保持量での交換圧損到達は確認できなかった。むしろ、火山灰凝集の降 下による交換圧損到達時間の延びが顕著で、フィルタ損傷に対する降雨の重畳効果はほと んどないものと判断できる。

# (2) 火山灰供給によるフィルタ破損確認試験

# ①試験方法

供試フィルタを耐圧試験ダクトに取り付けて、圧力損失を強制的に上昇させ、フィルタ 破損の有無を確認した。平成26年度は中性能フィルタ単体であったため、平成27年度 はプレフィルタ単体とプレフィルタ+中性能フィルタ2段の供試フィルタを対象にしてい る。供給火山灰は、フィルタ性能変化確認試験と同じものである。

# ②試験結果

試験結果を表 3.2.2-2 に示す。プレフィルタについては、400Pa を超えると風圧でろ材 が押され、ろ材周囲の枠との間に隙間が生じてそこから火山灰がリークした(図 3.2.2-17、 3.2.2-18)。プレフィルタと中性能フィルタの組み合わせでは、試験装置の構造上プレフ ィルタの状態しか確認できなかったが、平成 2 6 年度試験の実績より中性能フィルタは 2,500Pa までは使用可能であることから、プレフィルタが先に使用不可の状態となること が明らかとなった。

	試験結果							
供試フィルタ	試験風量 〈m <sup>3</sup> /min〉	設定供給濃 度 (mg/m <sup>3</sup> )	フィル 圧力損	ルタ (Pa)	フィルタの状態			
		700	62		変化なし			
			120		変化なし			
			150		変化なし			
プレフィルタ	56		200		下流側にふくらみ始める			
デアマットG85	50		250		同上			
			30	00	ふくらみがさらに拡大			
			400		大きくふくらみ、枠間に隙間発生			
			500		さらに拡大			
フィルタ捕集火山	フィルタ捕集火山灰量(参考):			14.1				
				試験結	果			
供試フィルタ	試験風量 〈m <sup>3</sup> /min〉	設定供給濃	フィルタ 圧力損失(Pa)					
NUX TIP		度。			フィルタの状態			
		(mg∕m°)	ブレ	中性能				
		700	70	157	変化なし			
プレフィルタ			140	210	変化なし			
デアマットG85			190	300	変化なし			
+	56		265	400	変化なし			
中性能フィルタ			335	600	変化なし			
ミフセルら			360	800	変化なし			
			450	1300	プレの枠間に隙間発生			
フィルタ捕集火山灰量(参考):			3042	1443				

表 3.2.2-2 フィルタ耐圧性能確認試験結果概要



図 3.2.2-17 耐圧試験時のプレフィルタ状態写真(圧力損失 62Pa)



図 3.2.2-18 耐圧試験時のプレフィルタ状態写真(圧力損失 500Pa) 赤円で示した部分に隙間が発生している

# 3.2.2.4 火山灰粒度分析の総合評価(H27)

火山の爆発的噴火により大気中に拡散される火山灰の災害影響評価には、実際の噴火で もたらされる火山灰粒子の物質科学的解析手法の整備が必要である。これまで細粒な火山 灰の粒径や形状については 1960 年(昭和35年)代から電子顕微鏡等による観察が行わ れてきた[3.2.2-9]。しかし 60 ミクロン以下の細粒な火山灰の観察や火山灰の粉体として のふるまいを支配する統計量は十分に得られていない。粒径分布についてはレーザ回折方 式や沈降管方式による測定も盛んに行われているが、これらの手法は測定対象粒子が物理 的に均質であることを前提としており、ガラスや鉱物の混在する火山灰粒子を測定するの に適していない。そこで、高解像度の光学像の撮像装置により細粒火山灰粒子の構成物の 識別、及び高解像度撮像装置と解析ソフトウェアを組み合わせた粒径分布を中心とした統 計量の測定手法を開発した。

噴火により放出される細粒な火山灰粒子は、地表に堆積した後に風雨や生物擾乱などの 影響で堆積量や粒子の形状などが改変されやすい。噴煙からもたらされる初生的な火山灰 粒子の情報を得るため、日本で最も噴火頻度の高い桜島火山を対象に噴火中及び噴火直後 に採取した火山灰を対象に粒径分布解析を実施した。噴煙の直下で採取した浮遊火山灰粒 子についても粒度分析の総合評価を行い、火山灰粒子の構成成分や粒子濃度に関連する特 徴を整理した。

#### (1) 噴煙からもたらされる火山灰の粒径分布

#### ①堆積火山灰粒子の粒度特性

平成27年2月の調査時に採取した桜島火山の降下火山灰堆積物について、分布と粒径 分布の解析を実施した。現地調査は平成27年2月16日から2月20日までの5日間、 約40地点で堆積した火山灰を採集したものである。調査期間中、気象庁によって認定さ れた桜島火山の噴火は12回で、噴火に認定された時刻以外にも、連続した低い噴煙によ る火山灰放出があった。降下火山灰の分布は南東方向に伸張して、北西風に強く規制され た分布を示す(図3.2.2-19、3.2.2-20)。鹿児島地方気象台によると5-7m/sの北西風が 卓越していたことと調和的である。堆積物の分布から推定される降灰量は約数千トンから 十数万トンのオーダとなった(表3.2.2-4)。細粒粒度分析計 MorphologiG3S を用い、直 径 1mm から 0.5 $\mu$ m の範囲の粒子について、粒径と形状パラメータを測定した。試料の粒 度分布は主に 10 $\mu$ m から 500 $\mu$ m まで幅広い粒径範囲を示す(図3.2.2-21)。多くの試料 では細粒側はなだらかに減衰する分布を示す。一方、粗粒側は不規則な分布を示すものが 多い。



図 3.2.2-19 平成27年2月17日の桜島火山周辺の衛星画像(Terra/MODIS 可視画像)。桜島から南東方向の枠外100km以上まで拡散している様子。桜島昭和火口(赤三角)、高峠(緑三角)、噴煙の分布(黄色破線)を加筆。



図 3.2.2-20 平成27年2月16日から2月20日の桜島火山噴火による降灰量分布 ●:観測点、青破線:等重量線(g/m<sup>2</sup>)。

表 3.2.2-3 平成 27年2月桜島降灰総量の推定値(単位トン)

手法はLegros[3.2.2-10]、Hayakawa[3.2.2-11]、べき乗則、指数関数[3.2.2-12]にそ れぞれ近似した計算結果。

Period	Legros	Hayakawa	Power function	exponential
Feb. 16 evening - 17 morning, 2015	41,000	140,000	99,000	110,000
Feb. 17 morning - 17 evening, 2015	7,400	24,000	20,000	72,000
Feb. 17 evening - 18 morning, 2015	40,300	130,000	65,000	89,000
Feb. 18 morning - 18 evening, 2015	8,500	28,000	21,000	43,000
Feb. 18 evening - 19 morning, 2015	20,100	66,000	53,000	76,000
Feb. 19 morning - 19 evening, 2015	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Feb.19 evening - 20 morning, 2015	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.



図3.2.2-21 平成27年2月17日夕方に採取した桜島噴火による火山灰試料の粒度分 布。採取地点と分布を中央に示す。粒度分布は横軸に粒子の円相当直径(μm)の常用対 数、縦軸に体積換算分率(%)をヒストグラムで示す。

# ②浮遊火山灰粒子の粒度特性

桜島昭和火口(標高 750m)から南東 12km 地点にある垂水市高峠(標高 721m)は桜島周 辺では比較的標高が高く、噴煙が火口から低く流れた場合には噴煙中の浮遊火山灰を直接 採取できる可能性のある場所である。高峠山頂で火山灰採取装置(表 3.2.2-5)による吸 入サンプリングを平成27年2月17日から4日間実施した。地表に降下堆積する火山灰 と比較するため、降灰収集バケツによる試料採集を同時に実施した。2月17日の日中は 噴煙が南東方向に低く流れ、高峠は直接噴煙に覆われた状態あるいは噴煙の直下にある状 態となった。吸入試料が採取できたのは日中の3回で、夜間はバッテリ切れで吸入時間の 情報が得られなかった(表 3.2.2-6)。2月17日の日中は最も多くの試料が得られ、空 気吸入量から2.2mg/m<sup>3</sup>の粒子濃度が得られた。2月18日及び2月19日はバケツによる 降灰量に対して、吸入試料は大幅に減少した。

表 3.2.2-4	火山灰採集装置の仕様	(InnovaPrep 製 ACD-200Bobcat)
÷ •		

Specifications						
Flow rate	200 Lpm					
Filter Type	52 mm dry electret					
Extraction fluid type	Standard buffer solutions such as PBS, TBS with sur- factant or protein added to allow the solution to foam					
Particle collection size	1 μm to 10 μm					
Dimensions:	12 X 7.5 X 7"					
Weight (with battery)	7.8 lbs.					
Battery life (Rechargeable)	18 hrs continuous 200Lpm >4 days intermittent mode					
Inlet height with tripod deployed	30 inches					
Final liquid sample volume	6-7mL					

表 3.2.2-5 高峠での火山灰試料採取結果

開始	終了	手法	サンプル	重量, g	吸入体積,1	g/m <sup>3</sup>	g/m <sup>2</sup>	備考
2015/2/17 9:42	2/17 17:45	吸入	ST5BC	0.21	96600	0.0022		
2015/2/17 9:45	2/17 18:00	バケツ	ST5B	6.47			98.03	
2015/2/17 18:00	2/18 9:40	吸入	ST6BC	0.02	-	-		ポンプ停止
2015/2/17 18:04	2/18 9:38	バケツ	ST6B	3.26			49.39	
2015/2/18 9:45	2/18 17:45	吸入	ST7BC	0.06	96000	0.0006		
2015/2/18 9:45	2/18 17:45	バケツ	ST7B	3.55			53.79	
2015/2/18 17:55	2/19 9:05	吸入	ST8BC	0.01	-	-		ポンプ停止
2015/2/18 17:55	2/19 9:05	バケツ	ST8B	5.74			86.97	
2015/2/19 9:05	2/19 17:50	吸入	ST9BC	0.04	105000	0.0004		
2015/2/19 9:05	2/19 18:00	バケツ	ST9B	0.07			1.06	
2015/2/19 18:00	2/20 9:30	吸入	ST10BC	0.00	-	-		ポンプ停止
2015/2/19 18:00	2/20 9:30	バケツ	ST10B	0.00	-	-		

採集した火山灰試料の粒度分布は細粒粒度分析計 MorphologiG3S により直径 0.5 $\mu$ m から 1mm の粒子を対象にして、粒度分布と形状パラメータを測定した。粒度分布を体積基準の頻度で比較すると、降灰試料は直径 100 $\mu$ m 以上の粒子が主体で、中央粒径(累積 50% 値)が 162 $\mu$ m である(図 3.2.2-22)。それに対して吸入試料は 10~100 $\mu$ m の粒子が主体で中央粒径 35 $\mu$ m となり、有意に細粒粒子が卓越していることがわかった。また、粒度分布を個数基準の頻度分布で比較すると、両者とも 1~10 $\mu$ m の粒子が卓越しており共通の粒度特性を持つことがわかった。

2月17日の噴煙は高峠方向を覆うように低く流れていたことから、今回測定した粒子 濃度は噴煙の下面あるいは近傍に浮遊する粒子を測定したものと解釈できる。よって噴煙 の下面では粒径が100µm以下で終端速度が0.1m/sより小さい粒子が浮遊しており、粒径 100µm以上の終端速度が大きな粒子は相対的に沈降して地表に降下したと考えられる。今 回得られた粒子濃度2.2mg/m<sup>3</sup>は大気汚染防止法の環境基準0.1mg/m<sup>3</sup>の20倍以上であるが、 8時間の平均値であり、粒子濃度は10倍程度の変動がある可能性がある(図3.2.2-23)。 個数基準の粒度分布では浮遊粒子と降灰粒子がよく似た粒度分布を取っており、噴火の破 砕現象のような両者に共通するプロセスを反映している可能性を示唆する。浮遊粒子のほ うがやや粗粒な分布を示すことは細粒粒子の凝集効果で説明可能である。



図 3.2.2-22 平成27年2月17日9時から18時に高峠で採取したフィルタ吸入試料

(ST5BC)及び降灰試料(ST5B)の粒度分布比較。横軸粒径(粒子の円相当直径、常用対数表示)、縦軸は体積基準(上)及び個数基準(下)の頻度(%)。D[v, 0.5]:体積基準の中央粒径、D[4, 3]:体積加重平均径、D[3, 2]:表面積加重平均径(ザウター径)、

D[n, 0.5]: 個数基準の中央粒径、D mean: 平均径。



図 3.2.2-23 平成27年2月17日の海潟(桜島から南東約7km)における降灰重量の時間変化。11:50から16:43の間に15分から30分間隔で採取した試料の1分あたりの堆 積重量(1m<sup>2</sup>あたり)に換算。堆積火山灰量は0.8g/m<sup>2</sup>から0.1g/m<sup>2</sup>未満まで変動してい

る。

#### ③火山灰粒子の形状特性

# a. 研究の背景および目的

火山灰の粒子形状について、これまでの研究で堆積・噴火様式と関連性のあること が指摘されており、精密な記載は他データとの相関を検討する上で必須である。近年 では、画像撮影・認識技術の向上によって、多量の火山灰の粒子形状を定量的・自動 的に表すことが可能となった。例えば、Maria and Carey [3.2.2-13]では、画像解析 ソフトを用いて粒子形状のフラクタル次元を求め、それと粒子径にどのような関係が あり、噴火様式ごとに違いが見られるのか、クラスター分析などの統計的手法を用い て検証した。Liu et al. [3.2.2-14]は、火山灰粒子形状を測定して、堆積・噴火様式 によって面積包絡度と周囲長包絡度(表 3.2.2-7)のグラフ上でのプロット位置に違 いのあることを示した。このように、火山灰粒子形状と爆発プロセスの関係性につい て、最新の技術を基に理解が進められており、粒子の特徴から噴火現象の理解及び噴 火推移を予測できる日が近い。自動的に火山灰の組成を判別することが可能になれば、 上述の推移予測の高精度化が期待される。さらに、レーダー観測などの物理観測を組 み合わせることができれば、降灰予測やそれに伴う災害についての予測も可能となる。 一方で、自動的な火山灰組成の判別や物理観測との比較に必要な基本的情報(火山灰 の粒径や噴出火口からの距離と粒子性状の関係性)は検証が不十分である。そこで本 研究では、1)ほぼ恒常的な火山灰噴出が続いていて、2)多くの地点でサンプルが採 取されており、かつ 3) 各種物理観測が継続して実施されている桜島を対象として、 粒径や噴出火口からの距離によって火山灰粒子性状にどのような特徴が見られるか調 べた。

#### 3.2.2-23

# b. 手法

本研究では、将来の火山灰粒子性状の自動測定及び構成物判別を目指して、自動測 定可能な機器を用いて計測を行った。本研究で用いた桜島火山灰は、平成25年1月 30日の日中に降灰し採取されたものである。噴出火口からの距離に応じた特徴を検 証するため、分析には火山灰等層厚線の分布軸上で採取されたものを使用した。後述 するように、本研究では複数の粒子パラメータを扱うので、多変量解析手法の1つで ある主成分分析をデータ処理に用いた。

# 火山灰粒子性状測定

本研究では、Malvern 社製 Morphologi G3S 細粒粒度分析計を用いて粒子性状を測定 した。当該機では 23 種類の粒子パラメータが自動的に得られるが、本研究では表 3.2.2-6 に示す 7 つのパラメータ(粒子形状を表す 5 種類と輝度の 2 種類)を選択し た。粒子形状は 1)丸みを帯びている、2)歪がある、3)表面がざらざらしている、 4)伸張している、をそれぞれ反映するパラメータである。輝度値は、ガラス・透明 鉱物と有色鉱物との区別に寄与することが期待されるので使用した。

パラメータ	定義	対応する粒子の性状		
円形度(Circularity)	等面積円との周長比	真円からのゆがみ(真円=1)		
面積円形度	英五穂田山の五穂比	П 武 府 とい 关 さ 込 知 し な 七 栖 (吉 円 - 1)		
(HS Circularity)	守面傾円との面積比	内形度より左と114酮しに相標(具円=1)		
周囲長包絡度(Convexity)	凸包との周長比	凹みの多寡		
面積包絡度(Solidity)	凸包に対する実際の面積比	周囲長包絡度より凹みを強調した指標		
アスペクト比	粒子の長軸径に対する短軸径の比	粒子の伸張度		
輝度平均値	反射光下でのグレースケール平均	粒子の明るさ平均値		
經在八世位	「日火でのガレーフト」」「西洋信兰	粒子の明るさのばらつき具合(不均質または平坦で		
	以別 元 「 じのク レースク ール標準 偏差	ない面が多い)		

表 3.2.2-6 分析に用いた粒子パラメータ

# 主成分分析

測定した多量の粒子パラメータデータを統計的に分析するにあたり、本研究では主 成分分析(例えば、3.2.2-15)を用いた。主成分分析は、多変量データについて総合 的指標を統計的に設定し、因子間の関係を把握するための手法である(3.2.2-16)。 主成分と各因子との相関係数である主成分負荷量を求めることで、各因子の主成分へ の影響度を定量的に表すことが可能となる。主成分負荷量は、絶対値が1に近い因子 ほど主成分に強く寄与していることを示す。本研究では、主成分負荷量の絶対値が 0.4 以上のものを支配性の強い因子であるとした。また、累積の寄与率(各主成分の 分散が分散の総和に占める割合)が80%程度となる主成分を結果の解釈に使用した。 分析には統計分析プログラム HAD(Excel マクロ、3.2.2-17)を使用した。 図 3.2.2-24 は、平成25年1月30日に海潟(火口から約8km 南東)で採取され た桜島火山灰サンプルの粒子パラメータを主成分分析したものである。図において主 成分負荷量の絶対値が0.4以上のものを赤く示した。主成分負荷量表より円形度、面 積円形度、そして面積包絡度が第一主成分を支配していることが分かる。すなわち、 丸みの帯び具合及び表面の粗さの程度というのが粒子全体の傾向のなかで卓越してい ることになる。一方で、第二主成分では、輝度平均値と輝度分散値が傾向を支配して いる。このことから輝度が第二の傾向として現れていることが分かる。また、第三主 成分では累積寄与率が約93%に達し、周囲長包絡度(負)とアスペクト比が傾向の支 配要因となっていることが読み取れる。



図 3.2.2-24 主成分分析の結果例

A) 主成分負荷量の表。第三主成分までで負荷量絶対値が0.4以上のものを赤く示した。B) 主成分負荷量のプロット。C) 各粒子の主成分スコアのプロット及び対応する粒子
画像。色は粒径区分(詳細は図内凡例を参照)を示す。粒子画像はプロット上で特徴的な
位置にあるもののみ示す。

# 粒径による粒子形状の差異

図 3.2.2-24 では主成分負荷量から全体の傾向がわかり、粒径毎にパラメータの違

いがありそうなことも推測できる。主成分スコア上で色分けしてみると、細粒の火山 灰とそれより粗粒のものでプロットの位置が異なっている(図 3.2.2-24C)。この違 いをより定量的に示すために、粒径幅毎に主成分分析を実施した(図 3.2.2-25)。図 において各主成分の負荷量を見てみると、粒径によらず円形度、面積円形度が第一主 成分を支配していることが分かる。また、第二主成分では、輝度分散値の負荷量が高 い場合が多い。しかしながら後述するように、ノイズ粒子が含まれていると主成分分 析結果に大きな影響があるので、考慮する必要がある。



図 3.2.2-25 粒径毎の主成分分析結果例 平成25年1月30日の日中に、海潟に降灰した火山灰試料

# 火口からの距離による粒子形状の差異

桜島において、粒子形状の傾向に火口からの距離による共通点及び違いが見られた。 図 3.2.2-26 は 200~299.99 μm の粒子を対象として、噴出火口からの距離毎に 4 地点 (A:有村川右岸監視カメラ下(3km)、B:海潟(8km)、C:荒崎(10km)、D:千本 イチョウ(15km))での主成分分析をした結果である。共通点として、第一主成分で 円形度・面積円形度・面積包絡度が、第二主成分で輝度分散値が、第三主成分でアス ペクト比(ただし荒崎のみ正)が主要因子となっていることが挙げられる。ただし、 海潟と千本イチョウは粒子数が少ないので、結果が統計的に意味のあるものか、考慮 する必要がある。粒子数の 2 地点のデータを見ると、荒崎では周囲長包絡度の負荷量 が大きく第一主成分の主要因子となっているのに対し、有村川右岸監視カメラ下では 負荷量が小さい。すなわち、噴出火口から離れた荒崎では、丸みの帯具合と粒子表面 の粗さの程度に加えて粒子の歪度が傾向を支配していることが分かる。



図 3. 2. 2-26 噴出火口の分析結果例(平成25年1月30日日中に降灰した火山
灰)。左)火山灰等層厚線及び火山灰採取地点。等層厚線上の数字単位はg/m<sup>2</sup>。
右)距離毎の主成分分析結果。対象粒径は200~299.99 μ m。

手法の妥当性、主に測定データのノイズおよびそれが主成分分析に与える影響について

主成分分析は多変・多量データの解析に優れており、火山灰の性状に対しても有効 に機能した。一方でMorphologiによる測定には図3.2.2-27A-Dに示すようなノイズと なる粒子が発生している。そこで、特定の火山灰サンプルについて Morphologi 撮影 画像を確認し、ノイズ粒子の割合を調べた。その結果、ノイズ粒子の割合は 16%であ った。このことから、粒子パラメータは個数にして約 80%の精度で測定されていると 判断できる。

図 3.2.2-25 において、粒径 300~399.99  $\mu$ mの主成分スコアプロット図を見ると、 第一主成分の低い領域に 4 つの粒子が存在する。この粒子を画像で確認したところ、 いずれもノイズ粒子であった。これら 4 つの粒子を取り除いてから主成分分析を行っ たところ、図 3.2.2-25 の値と異なる結果が得られた(図 3.2.2-27E)。そもそも、主 成分分析はデータのノイズ除去に用いられることがある[3.2.2-15]。検証したように、 ノイズを除去しないままに主成分分析を実施すると、ノイズ源の数が少なくても結果 に大きい影響を与える。図 3.2.2-25 の粒径 300~399.99  $\mu$ m において、4 つのノイズ 粒子はいずれもアスペクト比が 0.12 以下の細長い粒子であった。Morphologi による 測定データを用いて主成分分析するためには、分析前にノイズを除去する必要があり、 使用するパラメータの幅、例えばアスペクト比 0.12 以下の粒子は除外する等制約条 件の付与が不可欠である。



図 3.2.2-27 分析のノイズとなる粒子の例

A) 結合した粒子。B) 撮像範囲縁にあり見切れた粒子。C) 白とびしたと思われる粒

子。

D)植物片と思われる粒子。スケールは考慮していない。

E)ノイズ粒子の除去して場合の主成分分析結果。

# まとめ

本研究により桜島火山灰の粒子形状を定量的に表し、それを統計的に分析したところ、粒径及び噴出火口からの距離によって粒子パラメータの傾向に違いのあることがわかった。一方で、ノイズ粒子が結果に大きな影響を与えることが判明したので、主成分分析する際にパラメータ設定等で事前に取り除く必要がある。今後は、火山灰構成物の目視観察との対応、物理観測データ(例えば、Maki et al.[3.2.2-18])との相関が課題となる。本手法を発展・改良するために、桜島だけでなく阿蘇山など他の火山や御嶽山や西之島など他の噴火様式との比較を行う必要がある。

# 3.2.2.5 評価手法の整備(4年間のまとめ)

# (1) 火山噴火ハザード評価手法の開発

火山噴火ハザード評価では、火山灰の降灰量、粒径、降灰継続時間が崩壊熱除去系のフラ ジリティ評価の指標となる。そのために必要な降灰ハザード評価の一般的な手順は、以下の とおりである。

- 1) 対象地周辺における地質情報からの降灰履歴の抽出と頻度の見積もり
- 2) 最大降灰事例と給源火山の特定
- 3) 数値計算による最大降灰事例噴火の噴煙パラメータ検討
- 4) 決定した噴煙パラメータによる降灰確率の見積もり

# ①火山噴火ハザード強さに関する記録の調査・整理(H24)

火山活動は、地下のマグマ(溶融した岩石で主成分は二酸化ケイ素)が地表またはその 近くまで上昇して冷却固化するまでの間に引き起こす様々な作用で、貫入・噴火・噴気・

#### 3.2.2-28

熱水活動・火山性地震・火山性地殻変動などの現象が含まれる。このうち噴火は、マグマ やその急冷固結した破片、火山ガス、地下の岩石などが急速に地表に放出される現象であ る。流れ出たマグマ(溶岩)や厚い噴出物に覆われた地域では、人的・物的な被害が著し く、噴火時には被災域からの適切な事前避難が必要とされる。また、火山ガスはその大半 が水蒸気であるものの、塩酸・二酸化硫黄・硫化水素・二酸化炭素などの成分が常に含ま れ、大量に放出された場合には、人体や地表環境に大きな影響を及ぼし得る。さらに、マ グマの貫入がもたらす火山性の地殻変動は、地表や地下の構造物に大きな損傷を与え、こ れに対し工学的な対処を施すことはほぼ不可能である。

火山活動によるハザードを評価するためには、1)原子力施設に影響を及ぼす火山の抽 出、2)当該火山における噴火履歴の解析による火山活動現象の抽出、3)モデルサイトに 対する火山活動現象毎のスクリーニング、4)モデルサイトに対する火山活動現象毎のハ ザード評価とする流れが妥当である[3.2.2-19、3.2.2-20]。特に IAEA の火山評価基準 [3.2.2-20]では、評価対象の火山現象として、降下火山灰、火砕流、溶岩流、岩屑なだれ、 新火口の形成、弾道放出物、火山ガス、津波、空振、火山性地殻変動、火山性地震、熱水 活動を記載しており、本研究でもこれに従い日本におけるそのハザード強度の実績を記述 する必要がある。

#### ②火山噴火ハザードの重要パラメータの同定(H24)

# a. ハザード・スクリーニング

活火山の分布図で明らかなように、モデルサイトの敷地周辺には活火山は分布しな い。最も近隣の活火山である白山まで約 90km の水平距離がある。それゆえ、敷地に 対する火山活動現象毎のスクリーニングでは、単純に距離だけでハザードから溶岩流、 岩屑なだれ、新火口の形成、弾道放出物、火山性地殻変動、火山性地震、熱水活動な どの現象が除外できよう。空振は強力な爆発の際に遠方まで伝搬する場合もあるが、 施設に対するハザードとしては無視できよう。また、近隣で大型の火砕流が発生した 場合には、到達の可能性がないわけではないが、そのような火砕流を発生しうるのは 第四紀の大型カルデラ火山に限られ、敷地からは十分な距離が保たれている。近隣活 火山の白山は安山岩質の成層火山であり、大型火砕流の発生履歴は全くない。結果と して、モデルサイトに対するスクリーニングで残る火山噴火現象は、遠方の火山で起 きた爆発的噴火による降下火山灰のみとなる。

#### b. 火山灰の降下実績

国内の広域テフラに係る既存のカタログ[3.2.2-21]、データベース[3.2.2-22]等に 基づき、モデルサイトに到達した可能性のある降下火山灰を抽出し、これらの年代、 給源火山、分布等の基本情報をまず記録の目安として整理した。中国地方では大山火 山及び三瓶火山のほか、中国地方沖合の 鬱稜 島では成層火山、九州地方(鬼界・姶 良・阿蘇カルデラ)、中部山岳地方、東北地方(八甲田カルデラ)では大規模なカル デラ火山に分けられる。大山火山、三瓶火山では、プリニー式噴火等に伴う降下火山 灰(軽石等)が飛来したと考えられる。これに対して、九州地方や中部山岳地方等の カルデラ火山では、大規模カルデラ噴火等に伴って噴出した火砕流と共に飛散した灰 かぐらが飛来したと考えられる。なお、調査対象とする降下火山灰のうち、カワゴ平 は特異であり、東伊豆単成火山群を構成するカワゴ平火山からプリニー式噴火に伴っ て噴出した火山灰が西方に飛来したものである。

カタログ等に記載された情報はあくまで主要な火山灰のみであり、モデルサイトに おける降下火山灰の降下実績や火山灰の層厚や粒径の情報は、別途、収集・整理する 必要がある。そこで、敷地周辺で第四紀層が連続して厚く堆積し過去の火山灰が良く 保存されていると期待される若狭湾沿岸(中池見湿原、水月湖、三方湖等)、琵琶湖 周辺におけるボーリングコア試料及びピストンコア試料の記載・分析、並びに、降下 火山灰の同定・対比に係る文献情報からデータ抽出を行った。

若狭湾沿岸の各ボーリングコア試料では、鬼界アカホヤから阿多までの期間の降下 火山灰が確認・対比されている。これらの降下火山灰のうち、姶良 Tn は全てのボー リングコア試料で確認されており、その層厚は最大で 30cm である。このほか、鬼界 アカホヤ(最大層厚 7cm)、鬱稜隠岐(最大層厚 5cm)、大山 奄ヶ 平 (層厚不明)、 阿蘇 4 (層厚不明)、鬼界 葛原 (最大層厚 5cm)、阿多(層厚不明)は複数のボーリ ングコア試料で確認されている。

琵琶湖周辺のボーリングコア試料及びピストンコア試料では、カワゴ平から 加久 藤 までの期間の降下火山灰のほか、より深い時代の降下火山灰(小林笠森、誓願寺 栂、猪牟田アズキ、猪牟田ピンク、恵比寿峠福田)が複数確認・対比されている。高 島沖ボーリングのコア試料では、各降下火山灰の層厚、粒径等の産状が記載されてお り、調査対象とする降下火山灰の中では、阿蘇 1 で層厚 41cm、阿多鳥で層厚 11cm、 姶良 Tn で層厚 10cm を有する。一方、粒径に着目すると、大山火山・三瓶火山起源の 降下火山灰は粒径が特に大きく、三瓶 池田から大山 生 竹 にかけての降下火山灰群に おいては最大 2.55mm の軽石を含む。このほか、阿蘇カルデラ・阿多カルデラ起源の 降下火山灰においても 1mm~2mm 以上の軽石を含むものもある。一方、主に火山ガラ スから構成される降下火山灰については、最大粒径 1mm のものからなり、最大層厚を 有する阿蘇 1 においても最大粒径 0.59mm である。このほかのボーリングコア試料及 びピストンコア試料では、鬼界アカホヤで最大層厚 16cm、姶良 Tn で最大層厚 33cm、 阿蘇 4 で層厚 40cm、誓願寺栂で層厚 18cm、猪牟田アズキで最大層厚 25cm、猪牟田ピ ンクで層厚 59cm、恵比寿峠福田で層厚 430cm を有する。

若狭湾沿岸及び琵琶湖付近のボーリングコア試料に基づく降下火山灰の堆積頻度は、 若狭湾沿岸で最小約 0.03 回/ky(ky:キロ年)~約 0.06 回/ky(阿多、鬼界葛原以 降)、最大約 0.20 回/ky~約 0.21 回/ky(阿多以降)、琵琶湖沿岸で最小約 0.01 回 /ky~約 0.02 回/ky(高山Ng-1、恵比寿峠福田以降)、最大 0.21 回/ky(加久籐以降) と求められ、最大及び最小頻度共に、若狭湾沿岸と琵琶湖付近では類似した値を示し ている。

# ③降下火山灰ハザード評価手法の概念構築(H25)

ハザードスクリーニングで選定された降下火山灰による機器の損傷としては、空気冷却 器の空気取入口閉塞、フィルタ目詰まり、ダンパ調整部固着等が想定されよう。特に塩害 防止のためにナトリウム冷却高速炉原型炉の空気冷却器内に設置されたフィルタについて は、降下火山灰被害を想定した防御策は現時点で何も施されておらず、噴火の規模によっ ては完全に閉塞する可能性もあろう。また、空気冷却器が完全に機能喪失に至らない場合 も含め、空気取入量をパラメータとしたプラント動特性解析によりフラジリティ(損傷確 率分布)を評価する必要がある。ただし、これらの機器損傷については、各種基準や既往 知見に記載された現実的耐力式等がないため、実際の試験によりその損傷モードを確認す る必要がある。

空気冷却系の損傷評価の指標としては、いずれの機器損傷を考えた場合も、「降灰量」 と「降灰継続時間」が要求される。このうち、前者の火山灰の粒径も含めた降灰量につい ては、平成26年度の火山灰降下履歴調査結果から直接示すことができている。しかしな がら、後者の降灰継続時間は、評価対象とすべき地質学的な過去の噴火について全く不明 であり、何らかの推定方法が必要となる。ここでは、火山灰降下履歴調査から得られた対 象火山灰の分布を、次節で記述する降灰シミュレーションで再現計算することにより、降 下火山灰をもたらした噴煙柱のパラメータ(噴煙柱高度、噴出総量、噴出物の粒度組成等) を逆解析で決める手法を採用した。噴煙柱高度は火口からの噴出流量と正の相関があるこ とは観測で確認されており[3.2.2-23]、噴出総量と噴出流量が決まればこれから平均的な 継続時間の目安が付けられると考えるものである。一般的には噴火の開始から終息へと至 る一連の噴火の中では活動の強弱があるのは当然であり、この考え方で見積もられる平均 的な継続時間は噴火の中の最盛期の時間指標としてみるべきものである。そして、そのよ うな理解の上で、世界の他の火山で観測された爆発的噴火の噴煙パラメータと最盛期継続 時間との比較から、降灰シミュレーションによる逆解析結果の妥当性を検討することで、 評価指標の信頼性を判断する手順が必要となる。

#### ④降灰再現計算(H25)

火山噴火ハザード評価手法の概念に従い、対象火山灰の分布からこれをもたらした爆発 的噴火の噴煙柱パラメータを決めるために、降灰シミュレーションによる再現計算を実施 した。対象とする火山灰には、履歴調査で最大規模の降灰量であった大山倉吉テフラを選 定している。また、降灰シミュレーションには鈴木(1990)の火山灰移流拡散モデル [3.2.2-24]を発展させた南フロリダ大学の Tephra2[3.2.2-25]を用いた。

a. 大山倉吉テフラ

大山倉吉テフラ (DKP [3.2.2-21]) は、大山火山より約5万年前に噴火したデイサ イトマグマのプリニー式噴火による降下火砕堆積物であり、大山火山より東北東にそ の分布が伸びており、太平洋まで達する[3.2.2-26]。DKPの噴出量は、約20km<sup>3</sup>とも言 われ[3.2.2-21]、40km<sup>3</sup>以上とする文献もある[3.2.2-26]。そこで今回は、竹本 (1991) が示した等層厚線図を基に、Hayakawa (1985) [3.2.2-11]の V = 12.2 TS (V:噴出量、T:層厚、S:面積)を用いて噴出量の再計算を行った。各計算手法も 組み合わせて検討すると、等層厚線から求められる DKP の噴出量は、20~60km<sup>3</sup>とな る。

# b. Tephra2の概要

Tephra2 は、移流拡散モデルを基本に構成されており、以下のステップで計算は進行する。1)入力データ読みこみ、2)粒子の放出量計算、3)落下時間の計算、4)噴煙柱内の移流拡散の計算、5)大気中での移流拡散の計算、6)鉛直層間の移動計算、7)各メッシュの堆積量計算。また、入力条件は以下のとおりである。

[地形データ] 火口位置は大山火山中心とし、噴火当時の火口標高は不明であるため、現在の山頂標高の位置と標高を設定した。また、DKP 分布範囲の地形データは、数値地図 250m メッシュ(標高) CD-ROM(国土地理院刊行)から、1km 標高メッシュデ ータを用いた。

[DKPの噴出量] 噴出量は、前述のように、下限値として 20km<sup>3</sup>が挙げられる。また 上限値として、等層厚線図を基に算出した噴出量である 20~60km<sup>3</sup>が挙げられる。こ れに対し比重(1.0 E+3kg/m<sup>3</sup>)を考慮すると、噴出量は、2.0~6.0 E+13kg となる。 これらを踏まえ、計算で設定する分布量として、1.0~8.0E+13kg の 4 ケースを与え た。

[噴煙柱高度データ] 既往文献を考慮しながら感度分析をする方針に従い、10km、 12km、14km、16km、18kmの5ケースを設定した。噴煙柱高度が圏界面付近まで達する と、強い偏西風に乗ることによって、より遠方まで到達する軌道を示すことになる。

[DKP の粒径分布] 粒度データについては、平均粒径、粒径分布の偏差を、φスケ ールで設定した。設定される粒径分布は正規分布で自動的に与えられる。粒度分布の 設定については、降下火山灰履歴調査を基に感度分析をする方針に従い、20ケースを 設定した。

[風データ] 風データには、高度別の風速と風向を設定した。気象庁が公開する日本国内 20 カ所の高層気象統計データから DKP の放出地点である大山近郊の米子を選択し、各高度の合成風の平年値及び風向の平均値を整理した。DKP の分布方向(南西 ~ 北東方向)を鑑み、年平均風の方が再現性は高いものと判断し、米子の年平均風データを設定した。

[密度データ] 既往設定値を参考に、1,000g/m<sup>3</sup>を設定した。

[みかけ渦拡散係数] 既往設定値を参考に、0.04を設定した。

[拡散係数] 既往設定値を参考に試計算を実施し、横断方向の堆積幅の整合性の高い値(50,000)を設定した。拡散係数が大きいと風速が大きくても同心円上に分布するようになり、拡散係数が小さいと風向方向に直線上に分布するようになる。

[FALLITME\_THREFOLD] 既往設定値を参考に、100,000を設定した。

#### c. 再現計算結果

上記の計算パラメータの組み合わせ(400 ケース)に対して Tephra2 の入力データ を作成し、繰り返し演算を実施した。ここから実績分布と整合性の高いケースを抽出 する手順は以下のとおりである。1)5地点の実績降灰厚と計算値との最小二乗和の上 位ケースから抽出、2)粒径を考慮して、100mm以上(φ=-7)が確実に存在するパタ ーンから選択。その結果、6 ケースを抽出して、実績に整合する DKP 噴煙柱パラメー タとして、噴煙柱高度推定値=14,000m~16,000m、マグマ噴出量推定値=4E13kg~ 8E13kgを算出した。いずれのケースも完全に火山灰の分布と一致するものではなく、 おおよその傾向を説明するものではあるが、この手法による逆解析では十分な値であ ろう。一致しない理由については、後述の課題に示すように噴火時の風力・風速デー タが一様であったとする仮定が成立したかどうか不明であることがまず指摘できる。 また、火山灰の全粒度分布を対数正規分布としたのは全くの仮定であり、実際の噴火 がそうであったとする根拠はないことも問題である。しかしながら、今回得られたパ ラメータのうち、マグマ噴出量については従来の低めの見積り[3.2.2-21]では説明不 可能で、4E13kg(40km<sup>3</sup>)以上であったことは確実となった。また、噴煙柱高度は 10km 以下では説明不可能なことも確実である。

#### d. 噴火継続時間の推定

Tephra2 で求められる噴煙柱の高さは、あくまで火山灰の供給できる部分の高さで あり、目視される噴煙の高度は更に高いはずである[3.2.2-27]。したがって、噴煙柱 高度と噴出率の関係を検討する際には、このことは考慮しておく必要があり、DKP に 対して逆解析で得られた 14,000m~16,000m の高度よりも実際の噴煙の頭は高かった ことは確実である。すなわち、DKP の噴煙の高度は、プリニー式噴火でも最大規模の 噴煙柱を形成したことは確実であろう。従って、噴煙柱高度と噴出率の相関関係 [3.2.2-23]から推定すると、DKP 噴火の最盛期にはは 1E9kg/s 程度の噴出率が必要と なるので、マグマ噴出量を噴出率で割った値を最盛期の継続時間目安とすると、その 時間は 4E4s~8E4s(10~20 時間)となろう。DKP のようなデイサイトマグマのプリニ ー式噴火の最盛期の継続時間の多くは数時間程度であることを考えると、DKP の最盛 期継続時間の目安は数倍の大きさである。しかし、DKP のマグマ噴出量は多くのプリ ニー式噴火の事例よりも数倍以上と飛び抜けて大きく、その分継続時間が大きくなけ ればならない。推定される 1E9kg/s 程度の噴出率はプリニー式噴火の上限値に近く、 これを超えるような噴出率では噴煙柱は崩壊し、火砕流へと変化するので、やはり、 最盛期の噴煙柱の継続時間が 10~20 時間と考えなければ DKP の分布は説明できなく なる。

#### ⑤降灰確率計算(H26)

上記の再現計算で得られた噴煙パラメータを用いて、現在の気象条件でDKPと同等の噴 火が起きた場合の敷地周辺での降灰確率の算定を実施した。降灰シミュレーションは、上 記と同じ Tephra2 を用いて行った。

a. 噴煙パラメータ

噴煙パラメータは 6 ケースで、各噴煙パラメータで異なる項目は、噴出量総量、平 均粒径、粒径偏差の 3 項目である。噴出量総量については、このうちの 2 ケースが 4.00E+13kg と他の 8.00E+13kg の半分である。また、平均粒径は、このうちの 2 ケー スが 2.0  $\phi$  で他の 3.0  $\phi$  よりも低い。粒径偏差については、1~5  $\phi$  のばらつきがあ る。

b. 風データ

風データとして用いた気象庁のラジオゾンデデータは、気象庁 HP より取得できる 大山火山に近い松江と米子の高層気象データである。本ラジオゾンデデータは、指定 の25気圧面と任意の高度で記録された2種類のデータがあり、鉛直データ数が多い任 意高度データを用いた。米子では昭和63年1月から観測が続けられてきたが、平成 22年2月に廃止となっている。その後、松江に引き継がれて観測が続けられている。 この2地点は20kmほど離れている。ラジオゾンデデータは日本時間の午前9時と午後 9時に観測されており、松江の25気圧面データを用いて各気圧面の午前9時と午後9 時の差を算出し統計的にまとめた。2月と8月の傾向として、季節別・高度別にばら つきの大きさは異なるものの平均的にはその差に偏りがないことが確認された。この 結果とDKP噴火最盛時の継続時間が10~20hと見積もられたことから、午前9時のデ ータを1日の代表値として各日毎の火山灰の拡散状況をシミュレーションすることに した。データとして用いた昭和63年1月1日~平成25年12月31日まで9,497 日あるが、本データは欠測日が10日ある。ただし、その欠測日は全体の0.1%未満で あり、偏りもないためシミュレーション結果の統計的解析には影響がないと判断した。 したがって、シミュレーションで使用するデータ数は、9,487である。

#### c. 降灰量計算結果

6 種類の各噴煙パラメータについて、9,487 の風データを用いた Tephra2 によるシ ミュレーションを実施した。各月の平均降灰量分布をみると、年間を通じて、降灰量 が厚く分布する地域は大山から東側に分布している様子が分かる。風データの特徴と して1月~4月、11月~12月は西からの風が多く見られたが、平均降灰量分布も 同様に他の月の分布と比べると降灰が厚く堆積する範囲が東へ張り出しており、風の 影響を受けている様子が分かる。また、東風が卓越する7月~8月は、西風が卓越す る期間と比べるとより同心円状に降灰量が分布している様子が分かる。このような月 毎の降灰量分布の特徴は、6つの噴煙パラメータに共通している。

降灰量の平均は、おおよそ 30 以下で推移しているが、各噴煙パラメータに共通し て月による変化がみられる。風データにみられる特徴と同様に東風が卓越する5月か ら9月までの期間は、降灰量が 15~20cm と相対的に低下する。一方、降灰量の標準 偏差は、噴煙パラメータ、月を通して、おおよそ 50 程度と変動は少ない。したがっ て、降灰量については季節によらず 50cm 程度のばらつきがあると解釈できる。

次に、各噴煙パラメータについて、モデルサイトにおける降灰量の頻度分布をみる と、最も頻度が高い降灰量は 0~5cm で、各噴煙パラメータに共通して 33~39%程度 を占めている。降灰量の最大値は、各噴煙パラメータでばらつきはあるが、最も高い もので約 100cm、最も低いもので 50cm 程度であった。

d. 降灰確率の算定

56,922の全シミュレーション結果を用いて、モデルサイトにおける降灰量の超過確 率を求めた。その結果、10 cmを超える確率が約 53%と半分程度となった。50 cmを超 える確率から 10%を下回り、75 cmを超える確率で 1%を切った。各噴煙パラメータに おいて集計した超過確率を見ると、噴煙パラメータ毎の差異がみられた。また、月別 に全噴煙パラメータの超過確率を集計すると、降灰量の平均値と同様に 8 月を中心と して降灰量が厚く堆積する確率が低く、逆に 12 月を中心に高くなる傾向が見られた。

#### (2) フィルタ目詰まり試験(H26)

ナトリウム冷却高速炉の空気冷却器には、塩害防止のためのエアフィルタが設置されて いるが、噴火による降灰時にはエアフィルタの目詰まりにより、空気冷却系が閉塞する可 能性が指摘できる。降灰時のエアフィルタの性能低下を検討した事例はなく、ハザード評 価手法の確立のために、3.2.2.3 章に示した仕様で火山灰のフィルタ目詰まり試験を実施 した。試験結果のまとめは、以下のとおりである。

・火山灰の供給濃度が高くなると、当然ながらフィルタ交換圧損までの到達時間が短く なることが確認できた。また、実際の噴火時の火山灰濃度は不明な部分も多いが、例とし て 7g/m<sup>3</sup>という濃度を想定すると、この場合は乾燥状態では数分でフィルタ交換圧損まで 到達してしまうことが明らかとなった。

・プレフィルタと中性能フィルタを組み合わせることで、より適切に火山灰を捕集できることが明らかとなった。プレフィルタ単体で使用するとフィルタ交換圧損までの到達時間は延長できるが、フィルタを通過してタービン本体に流入する火山灰量も多くなり、タービンブレードに対する影響が多大になると考えらえる。

・降雨を想定した散水条件での火山灰目詰まり試験では、当初期待したような乾燥状態 よりも少ない火山灰保持量での交換圧損到達は確認できなかった。したがって、フィルタ 損傷に対する降雨の重畳効果はほとんどないものと判断できる。

・中性能フィルタは、推奨交換圧力損失である 300Pa を超えても、2,500Pa 程度までは 使用可能であることが確認できた。2,500Pa を超えるとフィルタろ材に亀裂が発生し、最 悪の場合フィルタが破損する恐れがあることから、これを超えての使用は不可能である。 プレフィルタについては、400Pa を超えると風圧でろ材が押され、ろ材周囲の枠との間に 隙間が生じてそこから火山灰がリークした。このことから、プレフィルタと中性能フィル タの組み合わせでは、プレフィルタが先に使用不可の状態となることが明らかとなった。

#### (3)火山灰粒度分析(H24~H26)

火山噴火により大気中に放出される火山灰粒子の特性を記述するパラメータとして、粒 径、形状、構成物、粒子濃度などがある。特に粒径 60 ミクロン(0.06mm)以下の細粒な 火山灰は、粒子の終端速度が小さいため、地表まで降下するのに時間がかかること、地表 に堆積後は風雨などの二次的な影響で散逸しやすいことから、過去の噴火堆積物として地 層に保存されている確証はない。一方で、噴火による火山灰の拡散は、条件によっては火 山から数千 km 以上に及び、火山噴火災害の影響評価には火山灰粒子の拡散過程解明が不 可欠である。そのため、実際の火山噴火を直接観測して、拡散する火山灰の事例研究を行 うことが有効である。本研究では、高解像度の光学撮像装置による細粒火山灰粒子の構成 物解析、及び、高解像度撮像装置と解析ソフトウェアを組み合わせた細粒粒度分析計によ る火山灰試料の解析手法を開発し、桜島火山の噴火堆積物を例に降下火山灰粒子の特性を 記述した。試料採取のための現地調査は噴火頻度の高い鹿児島県の桜島火山を対象として 平成25年1月から平成27年2月まで、のべ15日間実施し、桜島昭和火口から2km か ら 40km 程度の範囲の 40 から 47 地点で降灰観測及び試料採取を実施した。調査期間中、 気象庁の認定した噴火は 33 回発生し、噴煙高度は大きいもので比高2,000m 程度であった。
なお、噴火が認定されていない期間にも、低い噴煙から火山灰の放出が続いていることが あった。噴煙から降下堆積した火山灰を採集容器(容積 20 リットル)で回収し、およそ 720 点の試料を採集した。得られた試料の乾燥重量から等重量分布を求め、火山灰の噴出 量は規模の大きい場合で十万トン程度と見積もられた。

火山灰微細粒子形状観察装置(キーエンス製VHX-2000)を導入し、桜島火山の細粒火山 灰粒子の構成物の粒子サイズや構造の規模に応じて低倍率(100 倍以下)から超高倍率 (2,500 倍)までのカラー光学像を取得した特性を解析した。火山灰粒子はその構成物及 び組織から、淡色発泡ガラス質粒子、濃色発泡ガラス質粒子、淡色緻密ガラス質粒子、濃 色緻密ガラス質粒子、及び石質岩片、変質岩片、結晶片に分類できた。今回採取された試 料の多くは、緻密なガラス質岩片を全体の 60%程度含む。また、エアサンプラを使用して 噴煙の下の地表で吸入試料採取した試料を観察したところ、直径 1μmより細かい火山灰 粒子が凝集した状態で捕捉されていることがわかった。

細粒粒度分析計(マルバーン社製 Morphologi G3S)を導入し、直径 0.3µm から 1mm ま での火山灰の粒径及び形状パラメータを測定した。対象とする粒径範囲が広いため、複数 の対物レンズ(x5、x20)で測定したデータを面積補正して全体の粒度分布を求めるルー チンを適用した。桜島火山から放出された降下火山灰試料の粒径分布は 100 ミクロン前後 に中央粒径(累積頻度 50%相当粒径)を持ち、正規分布に近いまとまりを示す。中央粒径 は火口からの距離に応じて僅かながら減衰する傾向があり、分散は小さくなる傾向を示し た。また火口から数 km 以内の場所では粗粒側に離散した分布が見られ、大気中での沈降 以外のプロセスを含んでいる可能性を示唆する。

噴煙中に浮遊している火山灰の粒子濃度を測定するため、桜島から南東 12km の高峠 (標高 721m)で火山灰採取装置(吸入型サンプラ)による試料採取を行った。この地点は、 周辺で最も標高が高く、噴火によって風下へ棚引く噴煙中の浮遊火山灰粒子を直接採取で きる可能性がある場所である。平成27年2月17日の日中は噴煙が高峠方向に低く流れ、 吸入試料が最も多く採取できた。吸入量から求められる浮遊粒子濃度は2.2mg/m<sup>3</sup>となった。 吸入採取試料と同一地点で採取した堆積試料を比較すると、浮遊粒子は堆積粒子より有意 に細粒の粒径分布(体積基準)を持つことがわかった。求められた粒子濃度は下限値に近 いと推測されるが、噴煙の粒子濃度は過去の噴火堆積物からは得られない情報であり、噴 煙の物理条件を解明する上で制約条件となり得るものである。

火山灰の粒子形状は噴火の破砕メカニズムを反映する重要な情報を保持している可能性 が高い。今回は粒子の二次元投影形状を統計的手法を用いて解析し、火山灰の形状評価を 実施した。形状及び構成物種を反映するパラメータとして、円形度、面積円形度、周囲長 包絡度、面積包絡度、アスペクト比、輝度平均値、輝度分散値を選択して、主成分分析を 行った。その結果、円形度、面積円形度、そして面積包絡度が第一主成分を支配しており、 第二主成分では輝度平均値と輝度分散値、第三主成分では周囲長包絡度とアスペクト比が それぞれ傾向の支配要因となっており、全体の傾向の93%を説明することがわかった。ま た粒径の違いと火口からの距離によっても傾向が異なり、粒径及び距離に対する依存性が あることも示された。一方、解析からノイズ粒子と思われる離散した分布を示す粒子も含 まれており、ノイズ粒子を除去する手法の開発も必要である。今後は、火山灰構成物の定 量化、噴煙のレーダ観測データ(例えば、[3.2.2-18])との比較検討が課題となる。手法 を発展・改良する上で、阿蘇火山など他火山の異なる噴火様式との比較が重要になるだろう。

# 3.2.2.6 まとめ

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象とし て、火山灰+降雨(霧)を選定した。そして、選定した重畳事象により噴火時の降下火山 灰によるフィルタ目詰まりによりどのような影響が出るのかを確認するために、フィルタ 試験ダクト内に散水して火山灰を供給し、フィルタの性能変化(圧力損失、粉じん保持量、 外観)を確認した。試験は平成26年度と同様に中性能フィルタ単体、プレフィルタ単体、 両者の組み合わせで実施したが、交換圧損到達時のフィルタ火山灰保持量に、乾燥時と散 水時で有意な差は確認できなかた。したがって、フィルタ損傷に対する降雨の重畳効果は ほとんどないことが確認できた。さらに、これまでの桜島噴火中に採取した降灰試料の粒 度分析の総合評価を行い、細粒火山灰を含む降灰堆積物の分布拡散状況をまとめた。浮遊 火山灰粒子の測定を行い、噴煙の粒子濃度に関する情報を取得した。粒子形状が粒径と火 口からの距離にそれぞれ相関があることを明らかにした。最後に、4年間のまとめとして、 開発してきた手法を整理した。

# 参考文献

- [3.2.2-1] 池谷 浩, 雲仙・水無川の土石流発生機構について,砂防学会誌, vol.46, p.15-21 (1993).
- [3.2.2-2] 山元孝広,川辺禎久,伊豆大島 2013 年ラハールの堆積学的特徴:ラハール堆積物の 粒度組成による分類,地質学雑誌,vol.120, p.233-245 (2014).
- [3.2.2-3] 富士山火山防災協議会,富士山ハザードマップ検討委員会報告書,内閣府,240pp, (2004). http://www.bousai.go.jp/kazan/fujisan-kyougikai/report/index.html.
- [3.2.2-4] Jenkins, S.F., Phillips, J.C., Price, R., Feloy, K., Baxter, P.J., Hadmoko, D.S., de Bélizal, E., Developing building-damage scales for lahars: application to Merapi volcano, Indonesia. Bull. Volcanol., vol.77, DOI:10.1007/s00445-015-0961-8, (2015).
- [3.2.2-5] Wilson, T.M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G.S., Johnston,
  D.M., Cole, J.W., Wardman, J., Wilson, G., Barnard, S.T., Volcanic ash impacts on critical infrastructure. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C vol.45-46, 5-23 (2012).
- [3.2.2-6] Wardman, J.B., Wilson, T.M., Bodger, P.S., Cole, J.W., Johnston, D.M., Investigating the electrical conductivity of volcanic ash and its effect on HV power systems. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C vol.45-46, p.128-145 (2012).
- [3.2.2-7] Wardman, J.B., Wilson, T.M., Bodger, P.S., Cole, J.W., Stewart, C., Potential impacts from tephra fall to electric power systems: a review and mitigation strategies. Bull. Volcanol., vol. 74, p. 2221-2241 (2012).
- [3.2.2-8] 藤井智晴,尾関高行,ガスタービン用吸気フィルタの保守管理の実態調査,電力中 央研究所報告,M13008,17p(2014).
- [3.2.2-9] Heiken, G. and Wohletz, K., Volcanic Ash. University of California Press, Berkeley, 246p (1985).
- [3.2.2-10] Legros, F., Minimum volume of a tephra fallout deposit estimated from a single isopach. J. Volcanol. Geotherm. Res., vol. 96, p. 25-32 (2000).
- [3.2.2-11] Hayakawa Y., Pyroclastic geology of Towada volcano. Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, no.60, p.507-592 (1985).
- [3.2.2-12] Fierstein, J. and Nathenson, M. Another look at the calculation of fallout tephra volumes. Bull. Volcanol., vol. 54, p. 156-167 (1992).
- [3.2.2-13] Maria, A. and S. Carey, Quantitative discrimination of magma fragmentation and pyroclastic transport processes using the fractal spectrum technique.
   J. Volcanol. Geotherm. Res., vol. 161, p. 234-246 (2007).
- [3.2.2-14] Liu, E. J., Cashman, K.V., Rust, A.C., and Gislason, S.R., The role of bubbles in generating fine ash during hydromagmatic eruptions. Geology, vol. 43, p. 239-242 (2015).
- [3.2.2-15] Jolliffe, I.T., Principal Component Analysis. Springer Series in

Statistics, Springer New York, 488p (2002).

- [3.2.2-16] 加納学,主成分分析. 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻ヒューマンシ ステム論分野講義資料,14p(2002). http://manabukano.brilliantfuture.net/document/text-PCA.pdf
- [3.2.2-17] 清水裕士・村山綾・大坊郁夫,集団コミュニケーションにおける相互依存性の分析
  (1) コミュニケーションデータへの階層的データ分析の適用.電子情報通信学会技術研究報告, vo. 106, no. 146, p. 1-6 (2006).
- [3.2.2-18] Maki, M., Maesaka, T., Muraji, Y. and Suzuki, I., Statistical analysis of volcanic ash measured by X-band polarimetric radar. 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (abstract), APP. p. 11 (2014).
- [3.2.2-19] 原子力企画委員会編、原子力発電所火山影響評価技術指針: JEAG4625-2009,日本電 気協会 (2009).
- [3.2.2-20] Volcanic harzards in site evaluation for nuclear installations: Specific Safety Guide No. SSG-21, IAEA (2012).
- [3.2.2-21] 町田 洋、新井房夫、新編 火山灰アトラス―日本列島と周辺―、東京大学出版 会、336p、(2003).
- [3.2.2-22] Satoguchi, Y., Nagahashi, Y., Tephrostratigraphy of the Pliocene to Middle Pleistocene Series in Honshu and Kyushu Islands, Japan, Island Arc, vol.21, p.149–169, (2012).
- [3.2.2-23] M. Bursik, et al., Estimation and propagation of volcanic source parameter uncertainty in an ash transport and dispersal model: application to the Eyjafjallajokull plume of 14–16 April 2010. Bulletin of Volcanology, vol.74, p.2321-2338 (2012).

http://riodb02.ibase.aist.go.jp/db099/volcmap/index.html

- [3.2.2-24] 鈴木健夫,火山噴火時における降灰火砕物災害の予測,職業訓練大学紀要, no.19-A, p.1-17 (1990).
- [3. 2. 2-25] L. Connor, *et al.*, Tephra2 Users Manual (2011).
- [3.2.2-26] 竹本弘幸,大山倉吉軽石層とこれにまつわる諸問題. 駒澤地理, vol.27, p.131-150 (1991).
- [3.2.2-27] 萬年一剛,降下火山灰シミュレーションコード Tephra2 の理論と現状-第四紀学での 利用を視野に. 第四紀研究, vol. 52, p. 173-187 (2013).

#### 3.2.3 森林火災ハザード評価手法の開発

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を選 定した。その重畳事象に対して、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能への影響を調べ るため、森林火災の延焼シミュレーションを実施するとともに、森林火災ハザードを評価 した。4年間のまとめとして手法を整備した。

# 3.2.3.1 はじめに

本研究開発項目の4か年の目標は、森林火災を対象として、重要パラメータを同定して、 数値シミュレーションも活用しながら、起こりやすさとハザード強さを指標としたハザー ド曲線を構築して、ハザード評価手法を開発することである。

4年間の業務は次のとおりである。平成24年度にハザード強さ記録及び評価手法を調 査し、ハザードの重要パラメータを同定するとともに、平成25年度に実施する森林火災 シミュレーションのための解析条件を設定した。平成25年度に森林火災ハザード評価手 法の概念を構築するとともに、風の影響を受けない森林火災シミュレーションを実施し、 その結果を踏まえて重要パラメータを同定した。平成26年度は森林火災ハザード評価手 法を開発するとともに、風の影響を受ける森林火災シミュレーションを実施し、森林火災 ハザードを評価する。平成27年度に重畳事象のハザード評価を実施するとともに、4年 間のまとめとして手法を整備する。

# 3.2.3.2 重畳事象の選定(H27)

#### (1) 重畳事象のデータ調査

森林火災に関連した外部ハザードについて、その重畳の可能性、頻度について調査する ため、森林火災個票の追加調査を行った。平成27年度より前に入手した福井県の個票に 加えて、原子力関連施設の立地県という観点から、北海道、青森県、宮城県、愛媛県につ いて個票の入手申請を行った。また、米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration、以下、NOAA)及び学術論文についても調査範囲を広げた。

このうち、青森県については、特に東日本大震災直後及びその後に着目し、平成23年 3~4月を対象に調査を行った。また、宮城県については平成22年~平成26年につい ての森林火災簿を入手できた。一方、北海道については、植生が本州とは異なっているこ とから、新たな知見の獲得を目指したが、個票に個人情報を含みその分離が困難であるた めに入手には至らなかった。また愛媛県については、森林火災が比較的多い瀬戸内の立地 県であることから、データの充実を図り入手を目指したが、天災の種類に応じた分類が個 票上判別できないことから入手には至らなかった。ここで、森林火災の発火源の分類は、 火災報告取扱要領ハンドブック[3.2.3-1]によれば、

- 大分類番号8:天変地異による
  - ▶ 81:地震のために家が倒れる
  - ▶ 82:風のために家が倒れる
  - ▶ 83:水害で薬品に火がつき発火
  - ▶ 84:落雷する

- ▶ 85:その他(天変地異)
- 大分類番号9:原因不明

となっている。大分類8の件数が非常に少ないことと、大分類9の原因不明に分類されている件数が比較的多いことが分かった。一方、NOAAのデータベースではハザード重畳に関する情報が含まれていないことが分かり、今回の重畳事象の選定では対象外となった。

### (2) 重畳事象の因果関係の分析

重畳事象の因果関係について、現象論的な考察、及びハンドブックにおける分類を参考 に、幅広く定性的な考察を行った結果を、表 3.2.3-1 に示す。強風、豪雨、落雷と森林火 災との重畳形態、及び物理的作用を図 3.2.3-1 にまとめた。発達した低気圧が接近した場 合、落雷、降雨、強風、竜巻の発生をもたらす。大気の不安定化の一種で広範囲なのもの が低気圧であるが、局所的に生じた場合は落雷や竜巻をもたらす。落雷は森林火災の出火 原因となり得る。降雨は森林火災の発生や延焼を抑制するが、強風、竜巻は森林火災の出 大をもたらす。森林火災後、数か月~数年程度の中期的な影響としては、地表、地中の変 質による土砂崩れが、降雨の影響と重畳した場合に生じ得る。地震、津波、火山噴火と森 林火災との重畳形態を図 3.2.3-2 にまとめた。地震の発生により津波が生じることがあり、 また火山活動への影響も指摘されている。地震による家屋倒壊や津波による燃料タンク流 出等により、市街地において火災が生じた事例があり、これがさらに裏山にある森林への 延焼に繋がり得る。火山噴火においては近接地域において火砕流等の噴出物の到達により 森林火災が生じ得るものの、十分な離隔距離がある場合は降灰の影響のみとなり、森林火 災の発生の可能性は生じない。

以上のように森林火災と重畳する可能性のある外部ハザードについて、日本原子力学会 基準[3.2.3-2]も参考に、

A)森林火災の直接的、間接的な起因事象となるもの

B) 森林火災の強度の増加をもたらすもの

C) 他の自然現象の対策設備の損傷等をもたらしうるもの

に分類し整理したものを、図3.2.3-3に示す。本研究における対象は、強風、竜巻、雷と なる。このうち、強風で、B)森林火災の強度の増加については、平成26年度において ハザード曲線を導出する際に未出現の天候条件を取り込んでおり、考慮済みである。よ って、C)の機器の損傷、倒壊を考えることになる。竜巻については強風との影響範囲及 び風速域が異なるものの、強風において十分強い風速を考慮することで配慮されること、 森林火災と独立して同時発生する確率は低く、また地形上の特徴(主に海側から来る竜 巻と主に山側から来る森林火災)から、本検討では除外する。雷については、A)起因事 象となる観点で本検討で考慮する。その際、同時に天候が不安定になる条件を適切に取 り込む必要がある。なお森林火災個票を調査したところ、地震が発生した時刻の数時間 のうちに、地震の影響があった地域(震度3以上とした)で森林火災が生じた事例は見ら れず、特に両者に関連は見つからなかった。また論文調査の結果、東北地方太平洋沖地 震津波により岩手県大槌町の市街地で火災が発生し、裏山の森林に燃え移り、スギ林、 マツ林、二次林など65haが延焼した事例がある[3.2.3-3]。また森林火災後に土砂崩れが 発生した事例が米国、カナダにおいて報告されている[3.2.3-4、3.2.3-5、3.2.3-6、 3.2.3-7]。

# (3) 強風と森林火災の重畳

森林火災評価で使用される風速である1時間平均風速に対し、強風に対する設備健全性 検討及び飛散物評価で使用される風速である最大瞬間風速/10分平均風速は、後者の方が 通常 1.5~2 倍程度高く、突風率として知られる。気象庁観測地点:敦賀の平成21年~ 平成26年における風速データにおいて、1時間風速[Vhr]に対する最大瞬間風速[Vgs]/10 分[Vmn]平均風速をまとめたものを図3.2.3-4に示す。さらに最大瞬間風速/10分最大風速 を包絡するモデル式として、次を導出した。この式はほぼ全ての条件を包絡しており、数 例の例外点が Vhr<10 であるのみである。

最大瞬間風速[Vgs])

$$V_{gs} = \begin{cases} 6.8 V_{hr} & (V_{hr} < 2.5) \\ 17.0 + 1.5 (V_{hr} - 2.5) & (V_{hr} > 2.5) \end{cases}$$
(3. 2. 3-1)

10 分平均風速[Vmm])

$$V_{mn} = \begin{cases} 4.0 V_{hr} & (V_{hr} < 2.5) \\ 10.0 + 1.0 (V_{hr} - 2.5) & (V_{hr} > 2.5) \end{cases}$$
(3. 2. 3-2)

平成26年度に導出された反応強度及び火線強度のハザード曲線は、主に観測上出現し た条件で求めた応答曲面を用いた評価に基づいていた。今回は非常に大きな風速を扱うこ とから、風速に対する火線強度については既存結果を外挿することとした(図 3.2.3-5)。 なお反応強度は風速の影響を受けないため、既存の応答曲面を用いた。ここで、式 (3.2.3-1)と式(3.2.3-2)のうち、より高い風速を与える式(3.2.3-1)を対象に、全ての 風速条件の内、式(3.2.3-2)のうち、より高い風速を与える式(3.2.3-1)を対象に、全ての 風速条件の内、式(3.2.3-1)である最大瞬間風速(20、40、60、80m/s)に相当する1時 間平均風速を与える部分集合を考え、この部分集合におけるハザード曲線を導出したもの を図 3.2.3-6、図 3.2.3-7に示す。最大瞬間風速 80m/s に相当するハザード曲線は増度 にして 10<sup>-14</sup>(1/年)レベルにあることが分かる。平成26年度の強風ハザードにおける飛 来物評価においては、崩壊熱除去に関連する系統の機能損傷に繋がる破損を与える風速カ テゴリは、10分間風速において 80m/s を超える条件であった。森林火災と強風の重畳にお けるハザード曲線は頻度にして 10<sup>-14</sup>(1/年)レベルにあることから、森林火災と強風の重 畳による機器破損のリスクは極めて低頻度であり除外されることが分かった。

#### (4) 雷と森林火災の重畳

雷を起因事象とする森林火災発生に関し、森林火災簿を分析したところ、平成16~平 成24年の森林火災、全67件中、1件の発生が見られた(表 3.2.3-2)。これは、高浜 町にて平成19年5月15日に発生し、出火時刻4:39、鎮火時刻14:45、直接雷による出 火、朝の天気概況は晴一時雨であった。出火原因が不明となっているものが全67件中1 0件あったが、その多くは曇や曇一時雨であることが多く、雷が原因であった可能性も排 除はされない。また、福井地点の天気概況より「雷」注意報の表記のある時間帯を抽出し た。注意報は半日単位で出されること、注意報がある場合でも雷が発生するとは限らない こと、雷が発生した場合でも評価対象地域(敦賀地区)以外の可能性もあることから、注 意報による雷起因の森林火災の発生頻度推測は実際より高頻度となるハザード曲線を与え ることとなる。福井県における雷注意報を平成2年~平成24年において月別に集計した 結果を図 3.2.3-8 に示す。雷注意報が出ている総時間は、全観測期間のうち約7%であり、 注意報期間の風速-湿度出現確率マップは図 3.2.3-9 となる。相対頻度毎に経験値分布 (99/95パーセンタイル値以下)と一般パレート分布を結合した超過頻度を図 3.2.3-10 に 示す。これは平成26年度評価で出した全期間における風速-湿度出現確率マップと比較 し、高出現確率領域がやや「高風速かつ高湿度」側によった形となっている。

雷により直接森林火災が発生した発生頻度(火災個票データに基づく頻度)と雷注意報 が出されている期間を森林火災の発生頻度とした頻度(気象予報に基づく頻度の予測)で の天候出現頻度を上記により与え、ロジックツリーを用いてモンテカルロシミュレーショ ンを用いて、雷と森林火災の重畳ハザード曲線を導出した結果を、反応強度を図 3.2.3-11、 図 3.2.3-12 に、火線強度を図 3.2.3-13、図 3.2.3-14 に示す。反応強度は相対湿度が低い ほど大きくなるが、雷発生時には相対湿度はやや高湿度側で出現頻度が高くなるため、全 期間と比較して大きな反応強度が発生しにくくなっている。火線強度は、高頻度から低頻 度に向かう途中で雷発生期間と全期間の両条件のハザード曲線が一旦接近する傾向となっ た。これは雷発生時には同時確率分布において大きな風速を生じる確率が比較的高く設定 されているためである。これらの傾向は、図 3.2.3-15 に示されるように、火線強度は風 速が非常に高い条件で大きくなり、さらに相対湿度が非常に低い条件が重なるとさらに高 くなることが反映されている。200~400kW/m 程度の火線強度は 20~30m/s 程度の風速で生 じているが、雷発生時の気象出現確率は、雷発生時の相対湿度 60~100%区間で当該風速 の発生頻度は全期間より大きい。極低頻度で火線強度が大きなレベル(400kW/m 程度以上) では再び差が大きくなっているが、相対湿度40%以下の出現確率はパレート分布上は現れ ないことが反映された結果である。

# 3.2.3.3 森林火災の延焼シミュレーション(H27)

煤煙による空気冷却器のフィルタ閉塞評価のための評価スキームを図 3.2.3-16 に示す。 FARSITE による延焼解析を行い、GIS ソフトウェア[3.2.3-8]により火災前線の位置を判定 し、火災前線上の火災強度関連パラメータ(燃焼強度、火線強度、延焼速度)を FARSITE 出力から抽出する。前線位置における火災強度パラメータとPM粒子(Particulate Matter、 粒子状物質)発生割合を与えて ALOFT-FT(A Large Outdoor Fire plume Trajectory model - Flat Terrain、大型の屋外火災プルームの軌道モデルー平坦な地形)により煤煙移行挙 動を行い、発電所位置、高さでの煤煙濃度を導出する。PM粒子から森林火災灰量を推定し フィルタにおける濃度を求める。前線位置を発火位置から発電所近傍まで離散的に移動さ せ(評価点は 5 点程度)、粒子の総目詰まり量を推定する。FARSITE 入力値である風速、 相対湿度、発火地点、発火時刻に対して、総目詰まり量を推算する内挿関数である応答曲 面をガウス過程補間により導出する。導出した応答曲面をハザード曲線導出のためのモン テカルロシミュレーションで用いることとなる。平成27年度に実施した FARSITE 解析ケ ースを表 3.2.3-3 に示す。平成26年度に実施した解析ケースの一部(風速が 2m/s と 10m/s の場合)も応答曲面導出に適用可能で、応答曲面の高解像度化に寄与することから 活用を図った。

単位面積あたりの燃焼速度を導出するにあたっては、FARSITE→ALOFT-TF 間で、森林火 災により燃焼した森林木材の総量が保存するよう、モデルを高度化した。単位面積あたり 燃焼速度の設定の考え方としては、奥行きを 1m として、計算空間における延焼方向の単 位長さ (1m)を用いて求める。図 3.2.3-17 によれば、単位面積、単位時間あたりの微小 面積での燃焼進展を考えて、単位面積あたりの可燃物質量[kg/m<sup>2</sup>]×延焼速度[m/s]を求め ればよい。ALOFT-FT へ渡される i 番目と i-1 番目の抽出時刻間に燃焼した面積を  $S_i$ とす る。

ここで火災前線の周長と横幅(射影した長さ)の比は表 3.2.3-3 に示すとおりであり、や や歪んだ楕円(扁平率 0.1 程度)となっている。

ここで、i番目と i-1番目の抽出時刻間の平均の延焼速度は以下のように書ける。

$$\frac{L_i - L_{i-1}}{\Delta t_i}$$

(3.2.3-3)

ここで、L<sub>i</sub>は火災前線の発火地点からの水平距離、Δt<sub>i</sub>は i 番目と i-1 番目の抽出時刻の 間隔である。i 番目と i-1 番目の抽出時刻間の平均の燃焼速度は、w<sub>i</sub>を単位面積あたり可 燃物質量とすれば、以下となる。

$$\frac{S_i w_i}{\Delta t_i} \tag{3. 2. 3-4}$$

よって、単位面積のアクティブ燃焼域あたりの燃焼速度は、アクティブ燃焼域奥行を D<sub>i</sub> とすれば、

$$\frac{S_i w_i}{\Delta t_i} \frac{1}{P L_i D_i} \tag{3.2.3-5}$$

となる。本検討においては、上記を単位面積あたり燃焼速度の代表値として用いた。平成 26年度は解析の時点毎の瞬間値を用いていたが、本モデル化により総燃焼量を保存しつ つ、代表的な燃焼速度を与えることができた。なお FARSITE 出力におけるアクティブ燃焼 域奥行の出現頻度を図 3.2.3-18 に示した。

また ALOFT-TF において与える燃焼面積であるが、タンク燃焼火災のように1か所で大きな発熱を生じる現象に対し、森林火災では図 3.2.3-19 に示されるように燃焼領域が数 kmの範囲で細く長く円周上に繋がることとなる。この場合、単純に総燃焼面積を集めてしまった場合、図 3.2.3-20 に示されるように、プルームの効果を過大評価し、結果として地表付近における煤煙濃度を低く評価することになる。燃焼面積に対し、それ以外の条件を同一にし、この効果を見た結果を図 3.2.3-21 に示す。燃焼面積 100m<sup>2</sup> (10m 四方)以下であれば、積算到達量はほぼ面積に比例しており粒子の移行挙動は(濃度が違うだけで)ほぼ同一と判断できる。一方 300m<sup>2</sup> を超えると面積増加により逆に低下しているが、これはプルームにより上空に煤煙が舞い上がったためである。森林火災における火線の幅は図 3.2.3-18 に示されるように高々数mであり、これは 100m<sup>2</sup>以下に設定することで煤煙挙動を模擬することが適当である。ALOFT-FT における最小入力値は 25m<sup>2</sup> であることを用いて、

(ALOFT-FT 出力の煤煙空間濃度)×(燃焼総面積 m<sup>2</sup>/25m<sup>2</sup>) (3.2.3-6) により補正することで森林火災時の煤煙濃度として推算することとした。煤煙発生場所は 円周上の火線位置の中で発電所への距離が最近接となる位置を単一地点で与えており、円 周上の最遠隔地からの煤煙も最近接地として評価していることとなるため、実際には推算 値より低い値となることが保証される。

# 3.2.3.4 森林火災ハザードの評価手法(H27)

森林火災の熱影響のハザード曲線のうち、発電所の脆弱性に関連した評価対象とした外 部燃料(軽油)タンクに対しては、輻射熱による温度上昇を評価する必要がある。タンク の破損確率を導出する簡易評価スキームを図 3.2.3-22 に示す。反応強度に対し、森林火 災における代表的な輻射割合を乗じ、輻射発散強度を求める。さらに森林とタンクとの離 隔距離と周辺での森林火災の継続時間を保守的に与えることで、タンクの積算受熱量を求 める。タンク壁面(軽油液面より上部)と(タンク壁面を含む、液面より下部の)軽油の 熱容量から断熱条件を仮定して温度上昇を求める。タンクの損傷モードとしては、構造部 材の強度低下に伴うものと軽油の自然発火、沸騰に伴うものとに分類できる。構造材の規 格上の温度上限値(350℃)を超えると破損の可能性が生じ始め、構造材強度が半減する 約500℃では必ず破損すると仮定し、タンクの破損温度がこの温度範囲で±3gの正規分布 に従って分布すると仮定する。また軽油の自然発火温度(240℃)を超えると破損する可 能性が生じ、沸点(350℃)では必ず破損すると仮定し、タンクの破損温度がこの温度範 囲で±3σの正規分布に従って分布すると仮定する。以上の仮定に従って、タンクのフラ ジリティ曲線を導出する。フラジリティ曲線が大きくなってくる反応強度域で区分が細か くなる設定を行うことで、差分化に伴うハザード評価の誤差低減を図った。ハザード曲線 としては広域消防の効果があるケースを標準に、その効果が無いとするケースも併せて評 価する。フラジリティ曲線としては、熱容量が小さく低い反応強度で破損確率が高くなる 壁面を対象とする。これらの考え方とハザード区分、それに応じたハザード頻度を図 3.2.3-23 にまとめた。

#### 3.2.3.5 森林火災の煤煙シミュレーション(H27)

### (1) 煤煙シミュレーションによる積算フィルタ目詰まり量の評価手法

森林火災に伴う煤煙の影響について、ハザード曲線を導出した。図 3.2.3-16 に示された FARSITE 解析結果を ALOFT-FT への入力データに反映させ、煤煙の空間濃度を導出する。

煤煙の影響に対するロジックツリーは図 3.2.3-24 となる。熱影響との違いは、煤煙は 火災が遠方にあっても発電所敷地(サイト)に到達することから、煤煙到達確率=1 とする ことになる。また平成26年度に行った煤煙濃度の距離に対する変化から、森林火災が近 接した場合に濃度が急激に増加する傾向があり、今回の評価においては広域消防による発 電所敷地外での消火活動の効果は保守的に考慮しないこととする。その他のロジックツリ ーの中で確率変数として考慮したパラメータ評価条件は熱影響の場合と同じとなる。

平成27年度は、PM 粒子に加えて、森林火災灰の影響も考慮する。ALOFT-TF において は PM 粒子のみ考慮できるため、森林火災灰の分については、PM 粒子と火災灰の割合を用 いて推算する。火災灰における粒子状生成物と直径に応じた生成割合については、オース トラリア、地中海の植生データ[3.2.3-9]を対象とした実験データがあり、粒子径に応じ た生成重量割合が%にて整理されている。それによると直径 2mm 以上の生成割合は、燃焼 形態により多少異なるものの 13.64~48.24%となっている。森林火災灰の大きさが 2mm 以 上に相当すると考え、本検討では、PM2.5+PM10の PM 粒子重量に対し、1/(1-0.4814)=1.9 倍することで PM 粒子+火災灰の重量を推算することとした。火災灰は PM 粒子よりかなり 大きく、家屋火災での紙質落下物の飛散距離として風下側約 1.2km での観測例がある程度 であり[3.2.3-10]、PM 粒子と比べてその飛散距離は短距離であることが推察される。これ より、PM 粒子を基準に、比例計算により火災灰量を推定してフィルタ目詰まり量を求める ことは保守側であることが言える。

ALOFT-FTを用いた煤煙移行シミュレーションを、風速と相対湿度、発火地点及び発火時 刻をパラメータとして実施した。パラメータ設定値は、

- 風速 (2、6、10、15m/s) 4 ケース
- 出火時刻(0、6、12、18時) 4ケース
- 出火地点(1、2.5、3.5km) 3 ケース
- 相対湿度(2、23、35、50%) 4 ケース

である。風速 6m/s の場合は風速と相対湿度の変化のみを扱っている。合計 3×4×3× 4+1×4=148 ケースである。各ケースに対し5時間ステップでの ALOFT-FT 計算を行い、時 間ステップ毎の煤煙空間濃度からフィルタ目詰まり量を求め、5 ステップ全体での総積算 目詰まり量を求めた。フィルタ目詰まり量は崩壊熱除去系のフィルタ通過風速及びフィル タ面積に依存することから、通過風速 1m/s、フィルタ面積 1m<sup>2</sup> あたりの総積算目詰まり量 で整理する。PM 粒子の空間移行の風速依存性を図 3.2.3-25 に、相対湿度依存性を図 3.2.3-26 に、気温依存性を図 3.2.3-27 に示す。風速が弱い場合、火災プルームの影響に より煤煙は上空に上がり、地上付近の濃度は小さくなる。風速の増加に伴い、煤煙の主流 が地表に届くようになる。相対湿度が低い場合は火災の強度が強く、高い場合は弱くなる ことを反映し、相対湿度が低いほどプルームの主流はやや低空を移行する。一方で温度に よる差異は見られない。これらの変化の様子をフィルタ積算目詰まり量と共に、模式的に 図 3.2.3-28 に示した。風速が小→中になるとプルームは地上に近づくが、中→高では空 気通風量が増加することから単位空気体積あたりの煤煙濃度は低下する。結果として風速 6~7m/s の場合にフィルタ目詰まり量が極大値をとることとなった。148 ケースに対して 積算フィルタ目詰まり量を求め、それを内挿するガウス過程補間により応答曲面を求めた。 評価点と補間結果を示す応答曲面を図 3.2.3-29 に示す。ここで上部フィルタと下部フィ ルタに対し、その目詰まり量平均値は異なるものの、応答曲面の形状はほぼ同一であるこ とから、共分散行列を同一(平均値ベクトルは異なる)として解析点数を増やすことで補 間精度を高めた。補間結果と真値との誤差(RMS:Root Mean Square、二乗平均平方根) は、上部フィルタ(出火地点 A、B、C)で±72、±319、±103g/(m/s)/(m<sup>2</sup>)、下部フィル タ(出火地点 A、B))で±34、±259、±170g/(m/s)/(m<sup>2</sup>)であり、約10%程度に抑えられ ている。

#### (2) 煤煙積算量のハザード曲線

ロジックツリーの中で確率変数として考慮したパラメータに対し乱数を発生させること でモンテカルロサンプルを発生させ、対応するフィルタ目詰まり量を応答曲面から推算す る。多くのモンテカルロサンプルを生じさせ、その結果のヒストグラムを取ることでハザ ード曲線が導出される。導出したハザード曲線を図 3.2.3-30 に示す。中間的な風速で強 度(目詰まり量)が大きくなるが、中間的な風速の出現頻度はそれなりにあることから、 Mean ハザード曲線における年超過頻度は積算目詰まり量が増加してもその下がり方は小さ い。また強度(目詰まり量)の最大値は応答曲面上の最大値に相当し、風速約 6m/s で高 湿度条件に相当する。フィルタの通過風速概算値は、崩壊熱除去系空気冷却器(自然循環 時)で 0.35m/s、非常用ディーゼル空気取入口で 3.0m/s である。フィルタ破損限界は数 kg/m<sup>2</sup>であることから、崩壊熱除去系空気冷却器が目詰まりを起こす確率はほぼ無く、一 方ディーゼル発電機用の空気フィルタは破損を生じる可能性があることになる。また消火 活動により、延焼がサイト到達前に消火され、同時に煤煙の発生も停止した状況を考える。 時間依存の消火されない確率を表すワイブル分布曲線を、消火が森林火災発生後1、3、5、 7 時間後に行われたと仮定して平行移動した曲線(図 3.2.3-31)を与えた場合のハザード 曲線を図 3.2.3-32 に示す。

#### 3.2.3.6 煤煙ハザードの評価手法(H27)

### (1) フィルタのフラジリティ曲線

本検討では、森林火災により生じた煤煙として PM 粒子と森林火災灰がフィルタに累積 的に捕捉され、フィルタが目詰まりをおこし、交換を行わない場合は最終的にフィルタ破 損が生じる可能性が潜在的にあり、フィルタ破損により空気冷却器の機能喪失がおこると 保守的に仮定して評価を進めた。

空気冷却器若しくは空調用空気取入口に設置されるフィルタの種類、吸気流量、フィル タ表面積、代表風速は次のとおりである。

非常用ディーゼル発電機:吸気流量 550m<sup>3</sup>/min、表面積 3.0m<sup>2</sup>、代表風速 3.1m/s
 安全系空調設備: 吸気流量 50m<sup>3</sup>/min、表面積 0.6m<sup>2</sup>、代表風速 1.4m/s
 メンテナンス冷却系: 吸気流量 3,400m<sup>3</sup>/min、表面積 22.5m<sup>2</sup>、代表風速 2.5m/s
 崩壊熱除去系:

(強制循環通風) 吸気流量 1,700m<sup>3</sup>/min、表面積 36.0m<sup>2</sup>、代表風速 0.79m/s (自然循環通風) 吸気流量 750m<sup>3</sup>/min、表面積 36.0m<sup>2</sup>、代表風速 0.35m/s

後述される森林火災灰に対するフィルタ圧力損失試験によれば、森林火災灰の粒子の種 類、粒径によらず、フィルタにおける捕捉率はほぼ 100%と見なしてよい。なお、プレフ ィルタでの捕捉率は、粒子の種類や粒径により幅があるが10~50%程度である。さらに森 林火災灰に対するフィルタ破損限界試験では、破損限界積算目詰まり量は、6kg/m<sup>2</sup>、 9kg/m<sup>2</sup>、16kgm/<sup>2</sup>と幅を有しており、平成26年度の火山灰では7kg/m<sup>2</sup>であった。これらの ことから、本検討では、破損限界値として 9kg/m<sup>2</sup>と 6kg/m<sup>2</sup>を±3σとする正規分布により 破損確率密度関数を考え、フラジリティ曲線を図3.2.3-33で与えた。

# (2) フィルタ目詰まり試験

森林火災灰に対するフィルタ目詰まり試験を実施し、圧力損失の低下特性、破損限界を 把握する。火山灰の挙動と異なる場合は、それを事象シーケンス評価に反映する

#### a. 試験粒子の選定

森林火災で発生する粒子状物質[3.2.3-11]は、その直径分布に2つの分布を持つことが 報告され、小さい方は約0.2µm、大きい方は43µmとされている。これは火山灰による 粒子径より小さい方に偏った分布となっている。また森林火災灰の成分は、燃焼形態によ りやや異なるものの、ミネラル分は3~9%となっており、残り90%以上は有機物である ことが推定される。以上のことから、森林火災灰の模擬粒子として、粒子径が定まってい ることと入手性を考慮した上で、以下の3つを選定した。

● 微粉炭:ダイネン製 PL-WPS

測定された粒子径分布を図 3.2.3-34 に示す。5~95 パーセンタイルで 1.4~29  $\mu$  mの粒 子径分布を持ち、最頻値は 10  $\mu$  m近傍にある。50~80  $\mu$  mの粒子も含んでおり、森林火災 灰の大きい方の粒径も含まれている。PM10 模擬粒子として試験する。

● フライアッシュ(石炭灰): JIS Z 8901 10 種

JIS にて定められた粉体であり、粒子径分布は 22~82 パーセンタイルで 2~8 $\mu$ m である。中央値は 5 $\mu$ m近傍にある。2.5 $\mu$ m相当の粒径を含むことから、PM2.5 模擬粒子として試験する。

● カーボンブラック:JIS Z 8901 1 2種

JIS にて定められた粉体であり、粒子径は  $0.03 \sim 0.20 \, \mu \, \text{m}$  である。 $0.2 \, \mu \, \text{m}$  近傍の森林火 災灰の小さい方の粒径も一部含んでいる。サブマイクロ粒子として試験する。

#### b. 試験装置及び試験条件

試験装置は、日本工業規格[3.2.3-12]に準拠した装置であり、火山灰フィルタ試験と同 ーの装置である。試験条件は、試験粉体をバッチで供給し、交換圧力損失(約 294Pa)に 達するまでの供給粉体重量を求める。試験風量は 56m<sup>3</sup>/min、通期風量中の粉体空間濃度 (設定値)は 70mg/m<sup>3</sup>である。表 3.2.3-4 に試験条件として、供給粉体、供給フィルタ、

試験風量、供給状態、初期圧力損失、最終圧力損失、設定供給濃度、供給総量をまとめた。

#### c. 試験結果

表 3.2.3-4 に示された試験結果によれば、中性能フィルタのみの場合、3 種類の粉体、 及び3 種事前等重量混合粉体のいずれも捕集率は高い。サブマイクロ模擬粒子のみやや捕 集率は低いが、事象シーケンス評価上はいずれも全量捕捉されると考えてよい。中性能フ ィルタとプレフィルタを併用した場合の捕集率は、中性のフィルタを用いた場合とほぼ同 じであったが、目の粗いプレフィルタでも多くの粉体が保持されることが分かった。最も 細かいサブマイクロ粒子は、プレフィルタと中性能フィルタで同程度捕捉されている。粒 子径の大きい PM10 模擬粒子のプレフィルタでの捕捉量は中性能フィルタの 1/10 程度とな っている。また交換圧力損失に達するまでの供給量は、サブマイクロ模擬粒子が102.3g、 PM2.5 模擬粒子が461.2g であり、粒子によりだいぶ異なる結果となった。実験中の空気の 相対湿度に依存することは中性能フィルタ+プレフィルタの試験結果から考えにくい。供 給量の多い PM2.5 粒子と比較し、サブマイクロ粒子と PM10 模擬粒子は供給量が少ないう ちに交換圧力損失に達する、すなわち詰まりやすい性質を持つと考えられる。これは PM2.5 のみミネラル成分で、他の2つは炭素を主体としており、化学的な成分が影響して いることが推察される。また粒子により交換圧力損失に達する供給量が異なることから、 破損に至るまでの粉体保持量にも大きな差があることが予想される。

一般にプレフィルタで空気中のゴミを取り除いた上で中性能フィルタにて PM10 等の細 かい粒子を捕捉することを考えると、森林火災灰の場合、灰はプレフィルタで捕捉され、 PM粒子はプレフィルタ及び中性能フィルタで捕捉されると予想される。プレフィルタ及び 中性能フィルタにより森林火災灰を捕捉する場合、プレフィルタによる捕捉量は、PM10 で やや少ないものの(全供給量の 1/10)、PM2.5 とサブマイクロ模擬粒子では全供給量の 1/2~1/3 程度捕捉している。交換圧力までに達する時間については、プレフィルタと中性 能フィルタを組み合わせることで、中性能フィルタの交換圧損到達時間を 1.2~1.7 倍程 度延長可能であることが確認できた。火山灰(直径 125μ m以下)での約 1/2 程度捕捉よ りやや効率は落ちる結果となった。

フィルタ破損試験の条件及び結果を表 3.2.3-5 にまとめる。破損時、破損後の捕捉率は サブマイクロ粒子でやや低いものの、圧力損失試験と同様、供給粒子はほぼ捕捉されたと シナリオ評価上は見なしてよい。また試験時の様子と破損状態を図 3.2.3-35、3.2.3-36、 3.2.3-37、3.2.3-38 及び 3.2.3-39、3.2.3-40、3.2.3-41、3.2.3-42、3.2.3-43 に示す。 いずれの模擬粒子においても、圧力損失が 1,300Pa 程度から外観の変形(ろ材の目開き) が発生し、3,000Pa を超えた付近でろ材に座屈が生じてろ材と外枠の間に隙間が生じて漏 えいが発生した。これにより破損と見なした。PM10 模擬粒子では、隙間が発生した状態で 更に 2 時間通風して状態を確認したが、座屈、隙間量ともに増加傾向であった。この場合 の捕捉率も 100%に近い値が出ており、破損後に粒子が離散したことは考えにくい。

破損に至った供給量に対し、フィルタ表面の表面積(594mm×594mm)で割ることにより、 フィルタ単位面積あたりの破損重量を求めると、サブマイクロ粒子、PM2.5 模擬粒子、 PM10 模擬粒子に対し 9.6、16.9、6.1kg/m<sup>2</sup>となった。

#### 3.2.3.7 評価手法の整備(4年間のまとめ)

(1) 平成24年度成果の概要(H24)

研究の初年度である平成24年度は、森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発す るため、既往の森林火災ハザード強さの記録を調査、整理した。また、既往研究から森林 火災ハザード評価手法を調査、整理した。次に、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能 に影響を及ぼす森林火災ハザードの重要パラメータを同定した。さらに、森林火災の延焼 シミュレーションのための解析条件を設定した。

# a. 森林火災ハザード強さに関する記録の調査・整理

既往のデータベースや資料を基に、過去に国内外で発生した森林火災における延焼面積、 延焼継続時間に関する情報を収集、整理した。日本と米国における森林火災の特徴を比較 すると、日本国内では、森林火災の発生主因はタバコや焚き火等の人為的な要因であるの に対し、米国など海外では落雷等の自然的要因が主な発生要因となっている[3.2.3-13]。 平成14年以降に国内、米国、オーストラリアで発生した大規模な山火事の継続日数と焼 損面積を調査した報告によれば、日本国内の森林火災は海外と比較すると非常に小規模で あることが分かった。継続日数について見ても、海外では数か月続くのに対し、我が国の 火災では数日~2週間程度と短い[3.2.3-14]。

森林火災ハザード評価手法に関する既往研究の調査・整理として、森林火災のハザード 評価手法に関連するものとして、火災の延焼評価手法及び発生確率評価手法の調査を行っ た。火災の延焼評価手法として、既存の論文等[3.2.3-15等]に基づき、次の火災の延焼評 価手法(解析コードを含む)を抽出した。手法としては、複雑な計算を行うことなく数表 等から延焼評価を行う簡易手法、米国等において公開されている各種の火災解析コードに よるもの、解析コードにおいて理論的な前提とされている一般的な延焼のモデルがある。 区画内の火災を評価するためのモデルについては、用途や規模に応じて各国で非常に多数 のモデルが開発されている。

発生確率評価手法に関連し、森林火災による影響を評価する基本的な方法としては、火 災の発生源(出火地点)を対象地点周辺の特定の地点に設定し、上述で調査した延焼シミ ュレーションの手法を用いて様々な条件下(気象、植生等)での対象地点への影響を計算 するという手順が取られる。一方で、他の災害と森林火災の危険度を相対的かつ数値的に 評価したい場合や、施設側の設計が確率的な目標(例えば30年に一度の災害に対して防 護する)である場合等には、森林火災の出火確率やそれにより生じるサイトへの影響の確 率を評価することが期待される。このような森林火災に対する確率的ハザード評価の手法、 またその基礎となる出火確率の評価手法について既往文献を基に調査した。

出火の確率であるが、出火位置に関する過去の情報が十分にあれば、空間統計の手法を 用いて出火確率のマップを作成することができる。カナダのオンタリオ州を対象として、 1970年(昭和45年)~2007年(平成19年)の人為要因の出火位置の情報と落雷によ る出火位置の情報に基づいて出火確率を推定した解析例[3.2.3-16]があった。解析領域の 広さは25km×35kmであり、統計期間中に生じた出火は319件であった。出火確率の推定 にあたっては、確率が空間的に滑らかに変化するようにスプライン関数を用いた一般化加 法モデルにより、出火データへの当てはめを行い、出火確率を推定する手法である。米国 農務省山林局(USDA Forest Service)の研究者らによる研究の例[3.2.3-17]では、オレ ゴン州を対象としている。1989年(平成元年)から1996年(平成8年)の間に生じた 15,786件の森林火災を基に出火確率の確率モデルが設定され、推定が行われた。手法は一 般化加法モデルによるものであるが、空間的に滑らかに変化するという点だけでなく、出 火確率の大小に影響を与える要因として標高と季節を考え、それらを説明変数として確率 モデルの推定が行われた。図はある地域の7月における出火の確率と信頼区間を推定した 結果で、出火の回数に対する確率が求められている。いずれの場合も、対象地点周辺に十 分な発生事例のサンプルがあることが前提となるため、比較的出火確率の小さい地域にお いて、同様の手法により出火確率のマップが作成可能であるかは検討する必要がある。日本においては、地域別の出火頻度や延焼面積に関する確率的な評価は行われていないが、 日本全体での森林火災による延焼面積と発生頻度の関係が求められた解析例[3.2.3-18]あった。この解析に用いられたのは消防庁によって記録された平成元年~平成12年の森林 火災のデータであり、延焼面積と発生頻度との間にべき乗則(Power Law)が確認された。 同文献によると、同様のべき乗則(係数は異なる)が中国、米国における森林火災のデー タでも見られた。ただし、森林火災の発生は地域的な偏りが非常に大きく、日本全体で求 めた発生確率を特定の地点において用いることは適切ではない場合がある。

延焼過程を含む確率論的評価に関連し、出火確率は対象地点の森林火災に対するハザー ドを評価する上で重要となるが、出火数が多くても各種条件(湿度や風速、土壌水分、林 床の状態等)から延焼面積が小さくなるような場合も考えられる。そのため、ハザード解 析においては出火確率と延焼過程の両方が考慮されることが望ましい。米国農務省山林局 の研究者らにより、1989年(平成元年)から1996年(平成8年)の間にオレゴン州に生 じた森林火災を対象として延焼過程を考慮した確率論的評価の方法が検討された。この評 価手法の特徴は、森林火災のハザードマップを、(出火確率マップ)×(出火した場合の 大規模延焼確率マップ)という積の形で定式化している点である。これにより、出火確率 の違いに影響する要因(人間活動や季節等)と延焼に影響する要因(植生や土壌水分、風 速等)に分けて考えることができ、出火確率、延焼確率の両方が高い地域を把握すること ができる。

上記の文献では出火、延焼の両方を確率モデルにより定式化していたが、出火を確率モ デル、延焼を数値シミュレーションとして直接延焼計算を行うことが有効であると示唆す るものであった。海外のハザード評価手法のうち、評価手法毎の適用性と適用にあたって の課題を整理した。ただし、Rothermel の延焼速度予測モデル及び Byram の火線強度につ いては、解析コードの基礎を成すモデルであるため除外した。研究では、本項の結果と森 林火災ハザードの重要パラメータの検討結果を踏まえて、最適な解析コードの選定を行っ た。

#### b. 森林火災ハザードの重要パラメータの同定

次に森林火災ハザードの重要パラメータを同定した。国内で発生する森林火災の一般的 な特徴を調査して、出火及び延焼に関する特徴を整理した。調査にあたっては、ナトリウ ム冷却高速炉のサイト周辺の地域性を考慮した。また、近年、気候変動により森林火災は 拡大していることも踏まえて気候変動の影響を調査して、その影響を考慮した。抽出され た森林火災の特徴(森林火災ハザードパラメータ)のうち、重要パラメータを同定するた め、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に必要な因子として、直接的に影響を受ける 重要機器及び重要な運転員操作を調査した。森林火災の延焼はサイト外において発生する ため、サイト外において間接的に影響を受けるインフラについても調査した。これらは現 地調査結果も踏まえて重要因子を抽出した。そのプラント側の重要因子に影響を与える森 林火災ハザードパラメータを重要パラメータとして同定した。

(a) 森林火災の一般的な特徴の抽出

日本国内の一般的な特徴について、文献調査、ウェブ調査を行い、(a)火災発生 (分布と原因)、(b)火災延焼、(c)消火活動、防火対策に分けて整理した。

# 火災発生(分布と原因)

都道府県別森林火災発生件数と焼損面積の関係として、発生件数は関東平野南部、 東海地方、瀬戸内海沿岸部、九州北部の都市周辺域に集中している。森林火災発生原 因は、たき火、たばこ、放火(疑い含む)等の人為的なものが大半を占めている。地 域による特徴として、都道府県別発生状況では東北南部と関東の太平洋側、東海、瀬 戸内海沿岸の冬季から春季にかけて晴天、乾燥が続く地域で多くなっている。居住人 ロとの関係では、都市部に人口が集中している東京、神奈川、森林が人口に対し非常 に多い北海道を除き、居住人口と森林面積あたりの森林火災発生件数には一定の相関 関係が認められる。時期による特徴として、月別の発生状況は(4月>3月>2月> 5月>1月)となっているが、ただし、地域により件数のピークとなる月が異なる。 曜日別の発生状況だが、レクリエーションで入山者が増える土日が多く、これらの 人々のたき火やたばこの不始末等により森林火災が多く発生すると考えられる。時刻 別の発生状況は、昼過ぎ(13時~15時)が多く、夜間はほとんど発生しない。出 火原因としては、(たき火>火入れ>たばこ>放火>火遊び)となる。人為的要因が 国内の森林火災では圧倒的に多い。

#### 火災延焼

日本国内で、森林火災が発生、延焼しやすい森林の特徴について調査、整理した。 山林の形態、樹種との関連では、近年、森林火災が発生した林分で全国的に多いタイ プは、松食い虫の被害林分である。マツ林は他の針葉樹林と比較して林床が明るいた め、林床植生が繁茂しやすいが、マツが枯死すると、立ち枯れたマツの葉が落下して 林床は益々明るくなり、シダ類、ススキ等の林床植生が繁茂し、可燃物量が増加する。 落葉広葉樹林は森林火災が止まる、焼止まり線になると思われていたが、延焼が止ま らない事例も出ている。手入れ不足の人工林では、林床にススキやササ、大型草本類 が繁茂し、可燃物量が多くなる。また、枝打ち、除伐が行われないと、枯れた枝が地 面近くに存在し、林床可燃物が燃えるときに、容易に燃え移り、地表火が樹幹火や樹 冠火に移行する危険性がある。

林床可燃物の多寡との関連では、林内には各種の植物と植物遺体(枯死したもの) があり、それらは立体的に分布している。すなわち、・地中の泥炭や腐食、植物の根 系等からなる地中可燃物、・低木・草本類や落葉・落枝、倒木等からなる地表可燃 物、・樹木の樹冠部を構成する枝葉や樹幹、着生植物類、立枯れ木等がある。森林火 災の発生過程は主に、土壌の有機物層(A0層)の種類、乾燥状態、堆積状態に影響さ れる。一般に寒い地方の森林ほど A0 層の集積量は多い。また、針葉樹林は落葉樹林 と比較し、A0 層の集積量が多い。A0 層以外の地表可燃物で重要なのは、草本類を主 体とした林床の植物である。森林火災頻発地域である瀬戸内海沿岸では林床にウラジ ロやコシダ等のシダ類が繁茂している。生きた植物体の下に、過去10年分に近い枯 れた葉が未分解のままマット状に 10~20cm の厚さで堆積している。林床可燃物量 (1m<sup>2</sup>の面積に生育している植物と堆積物重量の合計)は伐採跡地が最も多く、スギ、 ヒノキ、マツ、カラマツ林では樹齢20年以上では気乾重量で 1.2~4.6kg/m<sup>2</sup>の可燃 物がある。林内の堆積物の含水量が19%以下に下がると着火しやすくなる。樹種、樹 齢としては、一般に油脂分の多いスギ、ヒノキ、アカマツ等の針葉樹が燃えやすい。 老齢の針葉樹など樹皮が粗いものや、エゾマツ、トドマツのように、樹脂のしみだし ているもの、枯木、大木の空洞箇所が着火しやすい。

地形との関連では、無風下において平坦地の火災の延焼速度は 20~30m/hr 程度で ある。可燃物が多いところでは火勢が強くなり、延焼速度が大きくなる。傾斜地の森 林火災は、傾斜角度に応じて延焼速度が増大し、平地の火災よりも数倍から数十倍に 増加する。無風下でも、火災の影響により傾斜地を吹き上げる風が誘発されて火災の 拡大を促進させる。乾燥した可燃物が多量に堆積している箇所ではこの風が強くなり、 延焼速度が増大する。有風下では、起伏がある箇所に地形特有の局所風が起きる。複 雑地形の周囲で発生した森林火災は地上における延焼方向と火の粉の飛散方向が逆に なり、飛び火が想定外の箇所で発生する。強風の斜面では約 15km/hr の速度で延焼が 拡大する。

気象条件に関する特徴としては、相対湿度が低く、風速が大きいほど火災が拡大し やすい。ただし、風速は局地性が高いため、実際の火災においては、湿度の方が拡大 に対して強い相関を持つ。特に、実効湿度が森林火災の発生に影響を与えることが分 かっている。実効湿度は、何日か前(通常1週間から10日程度)からの湿度を考慮 に入れて計算した湿度のことで、木材の乾燥具合を表す指標となる。年間降水量が少 ない地域では無降水日が続き、乾燥しやすいため森林火災が多く発生する。また干ば つと台風の接近という悪条件が重なれば、大規模火災が発生する可能性がある。フェ ーン現象等により大規模な火災が起こることもある。日本海を台風や前線を伴う温帯 低気圧が移動し強い南風が吹くと、日本海側では温かく乾燥した強風が吹くため、森 林火災に対して注意が必要である。

燃焼形態との関連で、地表火は森林火災の中で最も多く発生する火災形態であり、 林地や原野の地表を覆っている樹木、落葉、枯枝等が燃えるものである。地表の可燃 物が多いときは、樹冠火、樹幹火になり被害が拡大する。地表火は、地形、気象(特 に風)の影響を受けやすく、酸素の供給も多いので、火線も大きく、延焼速度が速い。 4~7km/hrの速さで延焼が拡大する。風が強く昇り斜面になると、非常に危険であり 1時間に10km以上の速度となる。特に、ススキなど乾燥した枝葉が多い場所で延焼速 度が大きく、火勢が強い。樹冠火は、木の樹冠(枝葉)が燃える火災である。発生の 大部分は地表火から誘発されるものであり、単独に樹冠から発火することは少ない。 乾燥強風下でしばしば地表火から樹冠火に移行する。延焼速度は2~4km/hrとなる。 樹冠に着火すると火勢は非常に強くなり、消火困難となる。火炎長が数+mに及ぶこ ともある。炎のついた大きな燃え枝を飛ばして、飛び火し、火災を拡大する。樹幹火 は木の幹が燃える火災である。地表火からの燃え上がる場合がほとんどである。地中 火は地中にある泥炭層、亜炭層その他の有機質層が燃えるもので、空気の供給が少な い地中のため、火勢が低く延焼速度も4~5m/hrほどである。燃焼箇所が地中のため、 容易に鎮火せず延焼方向が複雑であり消火困難である。飛び火は乾燥強風下で起こり やすい。飛び火は、燃焼で生じた小さな火の粉が数百mも風下に飛んで新たな火災を 起こす現象である。樹冠火になると枝葉が燃えながら舞い上がって火の粉を撒き散ら す。防火帯を越えて発生することもあり、火災が大規模化する要因になる。飛び火距 離は200~300mの場合が多いが、1km以上に及ぶこともある。

# 消火活動・防火対策

日本国内の森林火災において一般的な消火活動、防火対策について調査し整理した。 消火活動に関する特徴としては、出火から消防機関の覚知までの時間は、58%が 10 分以内、出火から鎮火までの時間は、67%が 1 時間以内である。周囲に河川等の水利 が利用できるかにより、消火活動は制約を受ける。早期の放水により、火災の拡大を 大きく抑制できる。直接消火は、燃えている箇所に直接水や化学消火剤をかけたり、 枝で叩いて消火したりする方法であり、火勢が強くなると延焼速度が速くなり、風下 側での直接消火は難しくなる。間接消火は、火先線の前方に防火帯を構築して、火災 がその防火線の外側に拡大しないようにする方法である。火災が急速に拡大する場合 に、稜線などを防火帯にして延焼阻止を図る。ここで火先線の火勢の強さは火災強度 と呼ばれ、これは単位長あたりの発熱強度で表される。火災強度は可燃物の種類、含 水率、風速、延焼速度に影される。可燃物の含水率が高い場合や火災が斜面を燃え下 がる場合には一般的に延焼速度が小さく火勢も弱い。

#### (b) 気候変動の影響

気候変動による森林火災の特徴の変化(発生形態、発生件数、地域変化等)について既往研究の調査を行い、気候変動により影響を受ける因子を抽出した。

#### 近年における大規模な森林火災の増加

米国や豪州、ロシア等において、近年森林火災により大規模な被害が生じる事例が 相次いでおり、気温上昇や渇水等の影響が指摘されている。例として、2009年(平成 21年)に豪州で生じた森林火災について述べる。ビクトリア州及び南オーストラリ ア州のほぼ全域では、2009年(平成21年)1月~2月に記録的な熱波に襲われてい た。ビクトリア州(ホープタウン)で過去最高気温48.8℃を記録。その他、各地で観 測史上最高気温を更新し、南オーストラリア州(レンマーク)で48.2℃、ニューサウ スウェールズ州(ワガワガ空港)で 45℃、メルボルンで 46.4℃(過去 154 年間で最 高)を記録した。最高気温のみならず、熱波の継続期間も記録的であり、アデレード 及びメルボルンにおいて、気温43℃以上の連続日数の記録を更新した。このような状 況のなか、2月7日にビクトリア州で発生した大規模な森林火災は4,500km<sup>2</sup>もの範囲 に延焼した。複数の地点で出火しており、後の報告によると15か所からの出火が確 認されている。消火までに要した時間は地点によって異なるが、2日~31日である。 出火原因は送電線の発火、放火、落雷等である。この火災により 173 名という豪州に おける過去最大の死者を記録し、2,133 戸の家屋を破壊し、「ブラックサタデー」と 名付けられた。ブラックサタデーと気候変動の直接の因果関係を認める記述は無いが、 ビクトリア州が組織した調査委員会(Victorian Bushfires Royal Commission)の最 終報告書では、気候変動の影響により今後同様の被害が増加する可能性が高いとして いる。

#### 観測されている気候変動影響

世界の地域によっては、既に森林火災の増加傾向が科学的な解析により実証されて いるケースがある。気候変動に関する政府間パネルが 2012 年(平成24年)に公表 した極端現象に関する特別報告書[3.2.3-19]では、気象災害の変化に関する代表的な 研究がレビューされており、森林火災についても言及されている。米国西部において は、20世紀末にかけて森林火災が増加したことが確認されており、その原因は気温 の上昇と融雪時期が早まったことによると考えられている[3.2.3-20]。同様にアラス カにおいても、1950 年(昭和25年)から 2003 年(平成15年)までの森林火災の 解析により、近年火災が増加していることが分かっており、この場合も気温上昇によ る影響が大きいと考えられている。カナダにおいても、人為的な温室効果ガスの排出 による気温上昇が森林火災の増加要因であるとする研究がある[3.2.3-21]。

# 気候変動による森林火災の頻度の変化

森林火災の頻度変化に影響を与える可能性のある気候要因として IPCC SREX (International Panel on Climate Change-Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation、気候変 動国際パネルー気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関す る特別報告書)で言及されているのは次のとおりである。気温上昇、融雪量及び融雪 時期の変化、渇水頻度の増加、湿度の低下、(気温変化による)植生の変化。実際に はこれらの要因が複合的に作用することとなるため、定量的な解析は簡単ではない。 いくつかの前提のもとでの研究事例では、米国西部やカナダにおいて将来の気候変動 により深刻な影響を及ぼす森林火災の頻度が増加すると予測されている[3.2.3-22等]。 なお、日本を対象とした気候変動による将来の森林火災リスクの変化についての研究 事例は確認できなかった。

#### c. 崩壊熱除去機能の重要因子の調査・整理

# (a) ナトリウム冷却高速炉原型炉の崩壊熱除去機能の重要因子の調査・整理 崩壊熱除去に関する緩和設備

ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に係る緩和設備には、補助冷却設備とメン テナンス冷却系設備がある。以下に、各設備の概要を示す[3.2.3-23]。

✓ 補助冷却設備:

補助冷却設備は、補助冷却設備空気冷却器、補助冷却設備配管及び弁等で構成さ れ、原子炉補助建物内に設置されている。補助冷却設備運転時は、1次主冷却系 中間熱交換器を介して1次冷却材の熱を2次冷却材に伝え、この熱を補助冷却設 備空気冷却器により大気に放散させる。補助冷却設備の動的機器は、非常用所内 電源系による駆動が可能である。補助冷却設備は、相互に独立な3系統で構成さ れ、それぞれに適切な除熱能力を持ち、単一故障を仮定しても所定の機能を達成 できる設計である。また、自然循環により原子炉の炉心から核分裂生成物の崩壊 熱及び他の残留熱を除去できる設計である。

✓ メンテナンス冷却系設備:

メンテナンス冷却系設備は、1次主冷却系設備等のメンテナンス時に、炉心から の核分裂生成物の崩壊熱及び他の残留熱を除去するために使用される。1次メン テナンス冷却系は、熱交換器を介して崩壊熱を2次メンテナンス冷却系に伝達す る。2次メンテナンス冷却系では、その崩壊熱を、空気冷却器を介して大気中に 放散する。

### ストレステスト結果

ストレステスト結果[3.2.3-24]を基に、当該プラントの崩壊熱除去機能に必要な 重要機器及び重要な動作、操作を整理した。崩壊熱除去機能を維持するために重 要な機器は次のとおりである。補助冷却設備空気冷却器(入口ベーン、出入口ダ ンパ、空気冷却器出口止め弁)、蓄電池、電源車。その他に、燃料池への給水を 確保するためには、近隣の屋内消火栓や、消防車も必要となる。崩壊熱除去機能 を確保するためには、これらの機器の作動が必要であるが、空気冷却器の入口ベ ーン、出入口ダンパ、空気冷却器出口止め弁については、自動制御や遠隔制御に 失敗した場合には、現場での操作が必要とされる。また、現場での温度監視も必 要である。

#### (独) 原子力安全基盤機構における出力運転時レベル 1PSA 重要度解析結果

(独)原子力安全基盤機構(Japan Nuclear Energy Safety Organization、以下、 JNES)では、高速増殖炉の内的レベル 1PSA 手法整備において、重要度解析を実施 しており、炉心損傷に関するリスク重要度の高い機器が系統毎に抽出された。以 下に、JNES による、補助冷却設備及びメンテナンス冷却系設備における重要度分 類方法及びその分類結果を示す。なお、これは内的レベル 1PSA に基づいているた め、森林火災により影響を受ける設備(外気と接触)とは異なることに留意が必 要である。

✓ JNES における重要機器の抽出方法

JNES では出力運転時レベル 1PSA における重要度解析結果を用いて系統毎に安 全上重要な機器が抽出された[3.2.3-25]。リスク領域は4分割にされており、分 割条件は、図 3.2.3-11 に示す FV (Fussell-Vesely、ファッセルベズレイ) 重要 度、RAW (Risk Achievement Worth、リスク増加価値) 重要度のリスク領域分割 条件に従っている。

#### ✓ JNES による補助冷却設備機器の重要度分類結果

JNES による補助冷却設備機器の重要度分類結果によれば、補助冷却設備にお けるリスク重要度高(領域 I)の機器は、崩壊熱除去運転時に作動が必要である 補助冷却設備出口電動弁が選定されている。同電動弁は、通常運転時においては 閉止しているが、補助冷却設備起動信号により開き、崩壊熱除去に必要な流路を 確保する。補助冷却設備は3ループあるが、これら3ループの補助冷却設備出口 電動弁の共通原因故障が故障原因となっている。空気冷却器の構成機器である空 気冷却器本体、出入口ダンパ、ベーン、送風機は、リスク重要度低(領域IV)と して選定されている。送風機については、自然循環によって崩壊熱除去が可能な ため、リスク重要度が低くなっている。

#### ✓ JNES による1次メンテナンス冷却系設備機器の重要度分類結果

JNES による1次メンテナンス冷却系設備機器の重要度分類結果によれば、1 次メンテナンス冷却系設備におけるリスク重要度高(領域I)の機器は、メンテ ナンス冷却系設備の漏洩時にメンテナンス冷却系を隔離するのに必要な電動弁が 選定されている。同電動弁は、メンテナンス冷却系設備隔離信号により、電動弁 が閉まりメンテナンス冷却系設備を隔離し、原子炉容器内の液位を確保する。こ れらの電動弁の共通原因故障が故障原因となっている。その他の構成機器である 中間熱交換器、電磁ポンプ、逆止弁は、リスク重要度中(領域Ⅲ)として選定さ れている。

#### ✓ JNES による2次メンテナンス冷却系設備機器の重要度分類結果

JNES による 2 次メンテナンス冷却系設備機器の重要度分類結果によれば、 2 次メンテナンス冷却系設備におけるリスク重要度高(領域 I)の機器は、崩壊熱 除去に必要な動的機器(循環ポンプ、空気冷却用送風機、ダンパ)が選定されて いる。これは、メンテナンス冷却系においては、自然循環による熱除去ができな いため、ナトリウムを強制循環させるための循環ポンプ及び空気冷却用送風機、 空気側の流路を確保するためのダンパの開放が必要であるためである。その他の 構成機器である空気冷却器は、リスク重要度中(領域Ⅲ)として選定されている。

# (b)既存の軽水炉の崩壊熱除去機能の重要因子の調査・整理

PWR プラント (Pressurized Water Reactor、加圧水型原子炉) は、起因事象によっ て再循環モードの成功基準が異なるが、LOCA (loss-of-coolant accident、冷却材喪 失事故)時には、「高圧注入系及び格納容器スプレイ系」による除熱が大部分のLOCA 事象及び過渡事象で共通の成功基準である。LOCAの規模あるいは過渡事象によっては、 この他に「低圧注入系、2次系の減圧、2次系の冷却」による除熱が可能な場合もあ る。これらに共通しているのは、最終ヒートシンクに原子炉補機冷却海水ポンプの作 動と駆動用電源が必要であることである。BWR プラントには残留熱除去給水系があり、 残留熱除去冷却系ポンプ、非常用補機冷却水系ポンプ、残留熱除去海水系ポンプ、熱 交換器により除熱を行う[3.2.3-26]。熱交換器が機能するためには、熱交換器を冷却 するポンプの作動が必要である。このことから、PWR プラントでは原子炉補機冷却海 水ポンプの機能が重要であり、BWR プラントでは、残留熱除去冷却系ポンプ、非常用 補機冷却水系ポンプ、残留熱除去海水系ポンプの機能確保が重要である。森林火災ハ ザードとしては、これらのポンプ類は水冷であることから、これらのポンプ類の機能 を確保するために冷却水である海水及び駆動用電源を確保することが必要である。東 京電力福島第一原子力発電所事故を受けて、電力会社には、電源車または大容量電源 (ガスタービンやディーゼル発電機)の配備が要求されている。 空冷式発電機は外気 を取り入れる必要があるため、森林火災の影響を受ける。このことから、軽水炉に影 響を及ぼす森林火災ハザードは、海水の確保への影響を及ぼす因子と、空冷式ガスタ ービンへの影響を及ぼす因子が重要である。

# d. ナトリウム冷却高速炉次期炉の崩壊熱除去機能の重要因子の調査・整理

次期炉の崩壊熱除去系は、完全自然循環方式の採用を志向している[3.2.3-27]。これは、 ポニーモータ等の動的機器へ依存しない崩壊熱除去系とすることによって、安全性、信頼 性を確保するとともに、さらに、非常用電源設備の合理化により、経済性を高めることを 狙いとしている。具体的な除熱システムとして直接補助炉心冷却系(DRACS)×1系統と 1次系共用型補助炉心冷却系(PRACS)×2系統による自然循環除熱に適した系統構成の 設計が検討されている。最終除熱は、ナトリウム冷却高速炉原型炉と同様、空気冷却器に よって行うため、ナトリウム冷却高速炉次期炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす森林火災 ハザードは、ナトリウム冷却高速炉原型炉と同様であると考えられる。

#### e. ナトリウム冷却高速炉原型炉の現地調査

現地調査においては、施設外で生じた森林火災が延焼し、施設の機能に影響を与える可 能性のある経路について調査を行った。結果の概要を以下に示す。

# (a)森林火災の出火、延焼に関連する施設外の状況

土地利用及び地形であるが、施設は敦賀半島の先端部に位置する。三方を山林に囲 まれており、残りの一方は海に面している。沿岸を造成して建設されているため、施 設の背後は標高 50m 程度の崖になっており、崖の上には森林が広がっている。森林は 二次林または自然林であり、人工林はほとんど存在しない。若狭湾国定公園に含まれ る。森林植生及び林床であるが、敦賀半島の森林植生[3.2.3-28]としては、海岸から 標高 100m 付近まではクロマツ林やスダジイ、タブノキが優占する照葉樹林が分布し、 標高 500m 付近までは尾根沿いにアカマツ林、山腹斜面にはクリーコナラ林、クリー ミズナラ林、そして標高 500m 付近から上には萌芽林状ではあるがブナ林が広範囲に 分布し、全体として植生が垂直的に推移していくのが比較的明瞭に見られる。林間に はハウチワカエデ、オオバクロモジ、マルバマンサク、林床にはツルシキミ、ヒメカ ンスグが占有する。

#### (b) 森林火災による施設への直接影響の可能性

森林火災により施設へ直接影響を与える因子としては、熱、炎、煙、飛び火に集約 される。ここでは、それらの影響に着目して整理した。

#### 熱及び炎の影響

周囲の森林から主要施設までの水平距離は、原子炉補助建物が 100m 程度、廃棄 物処理建物が 30m 程度であった。森林からの距離が遠いため、施設外の森林火災で 生じた熱によりこれらの建物内部の温度が顕著に上昇したり、火が直接燃え移った りする可能性は低い。ただし、仮に原子力補助建物周辺の気温が上昇した場合、補 助冷却設備空気冷却器の作動に必要なベーン、ダンパの手動操作が不可能となるケ ースが考えられる。

#### 煙の影響

森林火災による煙の発生状況と風向によっては、施設外で生じた煙が施設内に侵 入する可能性がある。煙による影響の可能性としては、補助冷却設備空気冷却器の 空気吸い込み口に設置されているフィルタに煙の粒子が詰まる可能性が考えられる。 補助冷却設備空気冷却器の作動に必要なベーン、ダンパの手動操作が、煙により実 施できなくなる可能性が考えられる。

#### 飛び火の影響

周囲の森林から主要施設までの水平距離が 100m 程度と離隔されているが、有風 下の飛び火の影響を受ける距離は 200~300m とされているため、飛び火により施設 内の植栽やその他の人工物に引火する可能性があるが、通常は発見され消火活動が 行われるため、問題を生じる可能性は低いと考えられる。敷地内には燃料タンク等 の引火物があるが、飛び火による火炎強度は大きいとは考えにくいため、タンク付 近での消火により、問題を生じる可能性は低いと考えられる。なお、近隣には用水 路があるため、放水しやすい環境であると言える。

#### (c) インフラ遮断による間接影響の可能性

配電線の遮断に関連し、施設に電力を供給するための配電線、及び発電された電力 の送電線は施設背後の山林の尾根に沿って敷設されている。配電線は線路としては二 重化されているものの、距離的に近接している。森林火災が配電線に到達した場合、 熱による配電線の断線または配電設備の故障が発生する可能性があり、結果として施 設への配電が遮断される可能性がある。配電の遮断時には、非常用電源による運用に 切り替えるための対策がとられている。有線通信線の遮断に関連し、施設内外の通信 のため、内線電話、外線電話のケーブルが敷設されている。敷地内の電話線は地下を 通っているため火災の影響は無視できるが、敷地外では地上を通っている。携帯電話 の基地局も敷地周辺に存在する。森林火災が地上を通る電話線に到達した場合、断線 の可能性がある。断線すれば内線、外線電話、インターネット、携帯電話が使用でき なくなり、施設の運用に影響が生じる。これら有線電話回線の遮断時にも利用できる 衛星電話が備え付けられており、緊急時の通信手段は確保されている。道路アクセス の遮断に関連し、施設への道路アクセスの経路は、1本の道路に限定されている。森 林火災の延焼等により道路の通行が不可能となった場合、道路を通じた人員や燃料、 機材等の供給が不可能となる。道路アクセスが利用できない場合には、船による海上 からのアクセスが可能であり、船によるアクセスは森林火災の影響を受けにくい。水 道の遮断に関連し、施設内で利用する淡水については、市の水道網による上水供給を 受けておらず、立地位置周辺の降水が谷地形に沿って集められてできる小規模な水源 から取水している。水道網からの水の供給を受けていないため、水の供給経路が森林 火災の影響により絶たれることは考えにくい。

#### f. ナトリウム冷却高速炉原型炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす重要パラメータ

森林火災に着目して、森林火災により崩壊熱除去機能がどのように影響を受けるかを検 討した結果、森林火災の重要パラメータは熱・炎、煙、飛び火である。これらにより、崩 壊熱除去機能が喪失する影響経路を整理した。

#### 熱・炎による影響

森林からの距離が遠いため、施設外の森林火災で生じた熱によりこれらの建物内部の温 度が顕著に上昇したり、火が直接燃え移ったりする可能性は低い。一方、配電線、交通ア クセス、通信線、水路の遮断の可能性が挙げられる。配電線遮断により外部電源喪失の可 能性がある。また、交通アクセス遮断により外部電源車による電源供給不可に至る可能性 がある。その結果、全交流電源喪失に至る可能性があるが、電源に依存しない自然循環除 熱に期待できる。ただし、仮に原子力補助建物周辺の気温が上昇した場合、補助冷却設備 空気冷却器の作動に必要なベーン、ダンパの手動操作が不可能となるケースが考えられる。 したがって、手動操作失敗にならないように敷地外での早期消火が重要である。

# 煙による影響

森林火災による煙の発生状況と風向によっては、施設外で生じた煙が施設内に侵入する 可能性がある。補助冷却設備空気冷却器の空気吸い込み口に設置されているフィルタに煙 の粒子が詰まることにより、冷却性に影響を及ぼす可能性が考えられる。また、補助冷却 設備空気冷却器の作動に必要なベーン、ダンパの手動操作が、煙により実施できなくなる ケースが考えられる。したがって、手動操作失敗にならないように煙に対策が重要である。 飛び火による影響

飛び火により施設内の植栽やその他の人工物に引火する可能性は否定できない。施設内 に引火した際には、通常は発見され消火活動が行われるため、問題を生じる可能性は小さ いと考えられる。ただし、仮に燃料タンク等に引火した場合には大きな影響を及ぼすため、 引火した際に影響が大きいものを優先的に消火する手順を作成しておくことが重要である。

また、森林火災ハザード評価において重要と考えられる特徴について、現地調査を踏ま えて整理した。重要なサイト条件としては、樹種、林床、気候、湿度・気温、風速、地形 (斜面)、消火対策が挙げられる。これらについては、今後、詳細な情報入手が必要であ る。熱・炎に関する重要パラメータとしては、火災強度(kW/m)、延焼速度(km/hr)、 延焼継続時間(hr)、火炎長(m)、単位面積あたり熱量(kJ/m<sup>2</sup>)、単位面積あたり燃焼 速度(kW/m<sup>2</sup>)、延焼面積(m<sup>2</sup>)、全周長(km)が挙げられる。

#### g. 森林火災シミュレーションのための解析条件の設定

#### (a) 解析コードの選定

解析コードの選定:整理した各種評価手法のうち、森林火災ハザード評価への適用 可能性がある解析コードは、CanFIRE、BehavePlus、FlamMap、FARSITE、FFP、WFAS、 FDS 等(他の CFD コード等を含む。)である。解析コードの選定にあたっては、次の 点を重視した。入力パラメータの時間的、空間的な可変性が高いこと、ナトリウム冷 却高速炉原型炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす因子(延焼速度、火線強度等)を考 慮または出力可能であること、国内の森林の状況、気象条件を模擬可能であること、 計算時間がある程度短いこと、である。CanFIRE は、北米において代表的な樹種で構 成される森林の火災を想定しており、日本国内の森林火災への直接の適用は困難であ る。ただし、計算時間が非常に短いこと、延焼速度や火線強度といった重要な指標が 得られることから、他のコードとの結果比較に利用可能と考える。BehavePlus、 FlamMap 及び FARSITE は基本的に同一のモデルに基づくコードであるが、この3種類 のコードの中では、入力パラメータの自由度が最も高く、気象条件の時間変化にも対 応可能な FARSITE の汎用性が高い。FFP 及び WFAS は、利用可能なデータが米国の気象 データに限定されること及び出力結果が火災の危険度情報に限定されることから、こ こでは選定から除外する。FDS は小規模の建物内火災等の挙動把握には有効であるが、 サイト周辺から延焼する大規模火災の計算に適用するには、入力データの整備及び計 算量の観点から困難が伴う。以上により、森林火災ハザード評価に適当な解析コード として、FARSITEを選定する。また、現地植生の考慮の下、McArthurの火災危険度指 数(FDI)、Alexander 及び Fogarty による牧草地火災ポケットカード、CanFIRE 等の 簡易手法による結果と合わせて確認する。

(b) 入力データの整理

FARSITE で必要な入力パラメータは、解析中に入力パラメータが 1 つの値に固定さ れるもの、複数の空間毎に異なる値を設定可能なもの、複数の時間毎に異なる値を設 定可能なものがあり、これらを解析条件として設定した。FARSITE を利用してナトリ ウム冷却高速炉を対象とした森林火災延焼評価を行うための入力データ以外に、計算 の時間ステップ、出火地点等の解析条件を指定する必要がある。

# (c) ナトリウム冷却高速炉を対象としたシミュレーションにおける課題

### 発生確率評価における課題

出火確率の評価にあたっては、サイト実績を反映することが望ましい。出火の実 績が多くないため、ベイズ統計手法、専門家判断等を組み合わせることが必要であ ると考えられる。

# 延焼評価における課題

森林火災のハザード評価手法の一般的な課題について抽出、整理したが、ここで は、ナトリウム冷却高速炉を対象とした延焼シミュレーションを実施する際の課題 について抽出、整理した。

#### ✓ 重要な機器への影響評価方法

重要な設備、機器として補助冷却設備における空気冷却器、入口ベーン、出入口 ダンパ、弁が抽出されたが、これらは原子炉補助建物内にある。森林火災の延焼 評価では、火炎による建物外壁の温度上昇は得られるため、作業員が建物に接近 することの可否を検討することは可能であると考えらえるが、建物内の機器への 影響を評価することはできない。建物内の機器への影響評価方法について検討す ることが必要である。

✓ サイト周辺の防火帯の効果

サイト周辺に設置されている防火帯(防火保安林)と森林火災による火線強度 (kW/m)の関係を適切に評価する方法が必要である。

✓ 飛散物による影響

サイトがくぼんだ部分に立地しているという特徴を踏まえ、飛散物による影響を 考慮する必要がある。飛散物の影響を考慮するためには、風の影響を適切に評価 することも必要となる。

#### h. 平成24年度成果のまとめ

国内外の森林火災の記録を調査し、火災発生日と継続期間、出火原因、延焼範囲を整理 した。また、森林火災ハザード評価手法として、国内外に延焼評価手法や発生確率評価手 法が存在することを確認し、延焼過程を含めて確率論的に評価できる見通しを得た。次に、

森林火災の一般的な特徴を抽出した上で、サイト条件及びプラント情報を調査し、ナトリ ウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす森林火災ハザードの重要パラメータとし て、熱・炎(火災強度、延焼速度、延焼継続時間等)、煙、飛散物を同定した。さらに、 森林火災の延焼シミュレーションコードを選定し、必要な解析条件を定めた。

#### (2) 平成25年度成果の概要(H25)

#### a. 森林火災ハザード評価手法の開発

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、森林火災ハザード評価手法の 概念を構築した。また、平成24年度に整備された入力データを基に、風の影響を受けな い森林火災の延焼シミュレーションを実施した。それを踏まえて、ナトリウム冷却高速炉 の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす森林火災ハザードの重要パラメータを同定した。

まず、森林火災ハザード評価手法の概念構築、延焼シミュレーション、それを踏まえた 森林火災ハザードの重要パラメータの定量的な感度の同定について記述する。

# (a) 森林火災ハザード評価手法の概念構築

#### 基本方針

平成25年度は手法の概念を構築する段階であったことから、単純化した想定を 設定し、ハザード評価手法の全体フレームを構築した。各種データに関しては、客 観性及び一般性の観点から公開情報を積極的に活用し、地域固有及びサイト固有の データを補完的に使用した。ハザード評価で対象とするアウトプットは、プラント に大きな影響を与え得る被評価パラメータが、ある値を超過する確率(年超過頻度 [1/年])とした。被評価パラメータには、森林火災シミュレーションで直接得られ る値(火線強度等)と、出力結果の解釈あるいは変換が必要なもの(煤煙の空間密 度等)があり、後者はモデル開発が必要となった。被評価パラメータによるプラン トへの影響とその条件における炉心損傷頻度は、プラント動特性解析や事象シーケ ンス評価を行い、平成26年度に評価される計画とした。なお、検討対象地域は、 福井県敦賀市の敦賀半島及びその近傍とした。

# (b) 森林火災ハザード評価手法の概念

#### 基本概念

森林火災ハザード評価手法としては、出火から被評価パラメータへと至るロジッ クツリーを用いた概念とした。ロジックツリーとは、被評価パラメータに対して感 度を有する評価条件のうち、不確実さまたはばらつきを有することによって一意に 定められない条件について、条件分岐を設定するとともにその分岐確率を評価し、 考慮すべき条件分岐の組み合わせ全てについて確率及び被評価パラメータを求める ことによって、被評価パラメータについての確率分布を年超過頻度として導出する というものである。

# ロジックツリーの構成

ロジックツリーは、出火条件、気象条件、植生条件、森林火災シミュレーション から構成される。

# ✓ 出火条件

① 年発生頻度

年発生頻度については、過去の統計による平均発生回数を用いた。

② 出火月

出火月については、過去の統計による経験分布を用いた。

ここで、①及び②の統計データを用いて、火災の発生頻度を導出した。

③ 出火時刻

出火時刻ついては、過去の統計による経験分布を踏まえ、シミュレーションに おいて感度評価として取り扱った。

④ 出火地点

出火地点については、既存の評価ガイド及び評価事例[3.2.3-29]、さらに対象 地域の地形データを参考に、数点を決定論的に選定した。なお、平成24年度 の調査結果から、日本において多い出火要因は、たき火>火入れ>放火>たば こ>火遊びの順であり、これらは全て作為若しくは不作為の人間活動による出 火要因である。これにより、出火地点に関しては人間が立ち入り易い場所を対 象地域から決定論的に選定した。

⑤延焼到達確率

延焼がサイトに到達する確率については、消火活動の効果を反映して導出する 必要がある。

✓ 気象条件

⑥気温·湿度

⑦風速·風向

⑥及び⑦については、過去の統計による月別分布の統計データを用いて、出現 頻度を導出する必要がある。

8雲量

雲量については、過去の統計による月別分布を参考に、シミュレーションにお いては保守側の設定により取り扱う。

⑨降水量

降水量については、過去の統計による月別分布を参考に、シミュレーションに おいては保守側の設定により取り扱う。

# ✓ 植生条件

⑩水分初期值

シミュレーションにて保守側の設定により取り扱う。 ①表面積・体積比 ②可燃物量 ③低位発熱量 ④限界含水比 ⑤樹冠率 ⑥林床可燃物深さ ①~⑮は、植生データに基づき定まる。

# ✓ 森林火災シミュレーション条件

⑪シミュレーションにおけるモデル選定

モデル選定における条件分岐としては、飛び火の有無があるが、飛び火の生じ ない条件で森林火災ハザード評価を行い、飛び火の効果についてはシミュレー ションにて感度評価として取り扱うことでその影響を見ることとする。 (1) 被評価パラメータ

シミュレーションによる計算結果として、火線強度等の被評価パラメータが求 まる。重要な被評価パラメータは以下のとおりである。

(i) 火線強度(kW/m)

輻射による建物外壁(コンクリート)の加熱をもたらすことから重要である。 火線強度はシミュレーションにより直接得られる値である。

(ii) 煤煙空間密度 (kg/m<sup>3</sup>)

生成物による空気フィルタの目詰まりをもたらすことから重要である。シミュ レーションにより直接得られる値ではないことから、シミュレーションで得ら れる出力値を用いて煤煙空間密度を導出するモデル開発を行う必要がある。

(ⅲ) 延焼到達確率

ある火災発生条件に対し、延焼がサイトへと至り、発電所が影響を受ける確率 であることから重要である。シミュレーションにより直接得られる値ではない ことから、シミュレーションで得られる値若しくは消火活動に対する統計分析 により、当該評価パラメータを導出するためのモデル開発を行う必要がある。

# b. 森林火災の延焼シミュレーション

# (a) 各種データベースの取扱い

# 植生データ

植生データとしては、以下を用いた。

- ▶ 国土数値情報[3.2.3-30]
- ▶ 森林簿[3.2.3-31]

このうち、国土数値情報は広範囲にわたる土地利用データを有し、また森林簿は 森林植生に関するデータを与える。これらのデータは、決定論的に一意に与えられ る。またサイト周辺の実測データとしては、今後行われる現地調査により得られる 植生調査情報を適宜反映していくこととした。

# 地形データ

地形データとしては、以下を用いた。

▶ 基盤地図情報 標高データ[3.2.3-32]

このデータは高い空間解像度を有している。またデータは決定論的に一意に与え られる。また標高データが更新された場合は、随時反映していくこととした。

# 植生データと地形データの重ね合わせの考え方

国土数値情報は100m×100mメッシュ、地形データは10m×10mメッシュ構造を持つ。森林簿は林班毎の植生情報を有する。

# 天候データ

データ充実度及び客観性の高い気象台(AmeDAS) (Automated Meteorological Data Acquisition System、地域気象観測システム) [3.2.3-33]のデータより、平成2年1月~平成24年12月の23年間にわたる1時間間隔のデータを使用する。サイト固有のデータについては、今後、その必要性が生じた場合に補足的に使用するものとする。重要な気象条件である気温、湿度、風速について、それらの出現頻度を評価し、ハザード評価手法において反映させる。その他の気象パラメータについては、天候条件として保守側となるものを選定することとした。例えば、雲量は0として評価を行う。

# 森林火災の発生頻度及び延焼面積データ

福井県における林野火災として、平成15年~平成23年を対象とした延焼面積 [単位 a]と出火件数データ[3.2.3-34]を収集した。全延焼面積は1,162a、全発生件 数は72件であった。このデータから、対象地域を「敦賀市及び美浜町」とした場 合の森林火災の発生頻度を推算したところ、0.6~0.7件/年となった。この推算で は、福井県内の森林火災の発生頻度の分布が均質と仮定したが、実際には嶺北>嶺 南という傾向があり、サイト周辺の推算値としては保守側となる。また森林火災の 追加調査として、詳細なデータが記載される個票データ[3.2.3-35]を基に分析を行 った。個票データは、平成16年~平成24年に発生した59件(1a以上焼失)の ものである。火災の発生件数、焼失面積、共に嶺北>嶺南という傾向があった。さ らに、森林火災の発生頻度に関し、統計分析を行った。

# ✓ 延焼面積(s)と火災発生頻度(F)に関する既往研究

平成24年度の調査結果から、日本、中国及び米国における森林火災の規模と発 生頻度[3.2.3-36]を比較した場合、日本における森林火災は米国と比べて小規模で あり、日本海側では発生頻度が低い。また、平成元年~平成12年を対象とし、市 町村面積で除して補正を行った市町村別の林野火災発生件数[3.2.3-37]によれば、 日本国内の林野火災の発生件数は、太平洋ベルト地帯で多く、日本海沿いで少ない ことから、地域差が大きいことが分かる。森林火災の頻度及び影響(この場合は延 焼面積)に関しては、延焼面積(s)と発生頻度(F)についてべき乗則(Power Law)による相関式で表現可能であるが、森林火災の設定条件、すなわち本研究で は福井県敦賀半島及びその近傍であるため日本海側に位置し、この条件に応じた適 切な延焼面積(s)と発生頻度(F)の相関式の導出が必要である。

# ✓ 福井県における延焼面積(s)と火災発生頻度(F)の導出

福井県における延焼面積(s)と火災発生頻度(F)の関係を導出した。福井県の データ回帰式は次のとおりとなった。

 $\ln(F) = -1.46 \ln(s) - 1.11 - \ln(6) \qquad (3.2.3 - 7)$ 

ここで、Fは、sの変化に対する発生件数 Nの密度関数に相当する定義である。対象面積あたりの年火災発生頻度(F)、10a以上焼失は、福井県は日本全体の約 1/6となることが分かった。

# ✓ 福井県における延焼面積(s)の年超過頻度(p)の導出

福井県における延焼面積(s)の年超過頻度(p)についても導出を行った。導出

にあたっては、プロッティングポジション公式(α=2/5:カナンプロット):

$$G(x_i) = \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha}$$
(3. 2. 3-8)

を用いて、さらに年超過頻度:

$$p(x_i) = (1 - G(x_i)) \cdot \frac{N}{Y}$$
(3. 2. 3-9)

へと変換を行った。ここで、火災データ数:N=59、統計年数:Y=9 である。通年の 1次回帰式の場合、延焼面積が大きい領域において回帰式が過大な頻度値を与える。 延焼面積の大きな場合の傾向に着目したところ、これらの火災は3月及び4月に発 生していることが分かったため、回帰式を3月及び4月とそれ以外の月との複合回 帰式により表すことにより、データと回帰式の適合性を高めることができた。3月 及び4月は人間活動が盛んになり、また雨雪の比較的少ない時期であることから、 森林火災が多くなることが統計にも現れている。本研究での対象地域以外の地域に ついて回帰式を導出する場合、地域的な差異、例えば太平洋側と日本海側とで異な る可能性があることに留意する必要がある。

### (b) 森林火災シミュレーションコード(FARSITE) の分析

# FARSITE における因子間の相互関係

FARSITE における因子間の相互関係を分析した。天候データ、出火データ、植生 データ間での相互関係がある。例えば、気象条件の風速が増加した場合、延焼速度 は増加する関係がある。分析は、[3.2.3-38]、[3.2.3-39]を参考とした。

#### 計算可能条件の確認

森林火災シミュレーションで入力可能な最大変域は、天候条件に対し幅広く対応 しており、評価対象とする条件をカバーできることが確認できた。なお、湿度に関 しては入力可能な最大値が 99%であることから、99%~100%の場合は湿度 99%と して森林火災シミュレーションを行った。

(c) 気象データの分析

#### 敦賀地点における天候の出現頻度

統計期間平成2年1月~平成24年12月に対し、1時間毎の観測データを基に 作成した敦賀地点における天候の出現頻度を次に示す。

▶ 気温

平均値は季節で変動するものの、分布形状は正規分布に近く月毎の変動は小さい。

▶ 湿度

平均値の月変動は小さく、また分布形状は右より分布で月毎の変動は小さい。

▶ 気温-湿度の相関

夏に気温-湿度間の相関性が見られるものの、それ以外の月での相関は小さい。

▶ 風向・風速

風配図の形状の月毎の変動は小さく、また形状としては北と南南東にピークを有 する。風向・風速の出現頻度としては、季節によらず南南東からは 5m/s 以下の風 が吹き、冬に 9m/s を超す強い風が北から吹く傾向がある。東西方向では、3m/s 以

下と弱い風の頻度が高い。

- ▶ 風向-風速の相関 風向と風速の関係(分布形状)には、毎月の変動はほとんど見られない。
- ▶ 気温-風向の相関

気温と風向の相関性は、1~12月を通じてほとんど見られない

▶ 気温-風速の相関

気温と風速の相関性は、1~12月を通じてほとんど見られない。

以上の分析をまとめると、気象条件は「気温-湿度」と「風向-風速」の2セット の代表変数で表現可能であることが分かる。このとき、「気温-湿度」セットにつ いてはその出現頻度を反映したロジックツリー上の分岐を与えることになる。「風 向」については、出火地点を決定論的に選定することから、サイトが風下となる風 向を設定することになる。「風速」に関しては、平成25年度は風速 0m/s を基準 解析として風速以外の天候パラメータの影響を把握することから、平成26年度に おいて出現頻度を反映した評価を行うことになる。

# 森林火災ガイドでの天候条件との相違

森林火災ガイドによる森林火災評価で用いる天候条件と、本研究にて検討を行う 森林火災ハザード評価で用いる天候条件の扱い方の相違について説明する。森林火 災ガイドにおける条件設定は最悪の天候条件を重畳させた単一条件を用いるもので あり、観測上の最高温度、最低湿度、最大風速を、無条件に重ね合わせるものであ る。風向きはサイトから見て風上方向と設定される。一方、森林火災ハザード評価 における条件設定は、温度・湿度についてそれらの出現頻度分布を用い、また風速 については風向に応じた頻度分布を用いる。風向については、平成25年度の検討 においてはサイトから見て風上方向を選定する。

### (d) 延焼到達確率

延焼がサイトに到達するかについて、影響を与える要因としては、防火帯の設置や 残雪、雨の影響があるが、本検討ではこれらを取り込まないことで、保守側の設定を 行う。火災に対する消防活動や、サイトにおけるアクシデント・マネジメントとして の自衛消防隊による消火活動のモデル化が重要となる。また、森林火災シミュレーシ ョンを活用することから、これに関連した制約及び得られる結果の特性を考慮する必 要がある。森林火災シミュレーションは、「可燃物は全て延焼する、防火帯が完全に 機能する」という計算を行う。また延焼面積は、出火後の経過時間の関数として求ま る。森林火災がサイト到達前に鎮火に至る確率を求めるモデルを開発する必要があり、 下記の2つのモデルを考案した。

#### ✓ 消火活動を単純化するモデル

火災がサイトへ到達した段階でアクシデント・マネジメントによる消火活動が行われる状況を仮定する。これにより、消防による消火活動によりサイト到達前に鎮火される効果は取り込まないこととなる。実際には消防による消火活動が十分期待されることから、保守側の設定となる。さらに、火災のサイト到達時点の延焼面積に対して「延焼面積-年超過頻度」曲線により当該火災の年超過頻度を導出する。

この場合、延焼面積は大きめで保守側となるが、面積-超過頻度曲線を用いること から頻度は非保守側となる。

# ✓ 森林火災に対する消防活動を取り込むモデル

サイトへの火災到達までに消防活動により鎮火する確率を導入する。この確率は 時間依存性を持つ。日本における出火から鎮火までの時間(平成7年~平成15年 のデータに基づく)[3.2.3-40]によれば、鎮火までの時間に対して、ワイブル分布 を用いて回帰式を構築した。

$$\operatorname{Ext}(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m}\right)$$
(3. 2. 3-10)

ここで、m=0.48、 $\eta$ =0.47、 $\gamma \equiv 1$ , t > 1 である。この回帰式を用いて、火災が サイトに到達する確率を評価可能である。すなわち、シミュレーションで得られる 「延焼面積の時間変化」に、「鎮火しない確率の時間変化」を乗じて求められる。 ここで、出火から鎮火までの時間データの文献値は日本全体を対象としているが、 本検討で対象とする地域は原子力発電所近傍であることから、市街地に比べて、一 般に人は少なく火災発生件数が少ない一方、消防のアクセスルートが限定されるな どの特徴を有すると考えられることから、地域的な特性を反映するためのデータ拡 充及び精緻化の可能性を検討していくことが重要である。また「延焼面積の期待値」

の導出も可能となる。ある火災発生条件に対し、森林火災シミュレーションを行い、 出火後の経過時間に応じた延焼面積の増加を求める。出火から鎮火までの時間の回 帰式を時間微分した確率密度関数を用い、

 $E(s) = \int [s F_{ext}] dt [0 < t < \infty]$  (3.2.3-11) とすることで、延焼面積の期待値となる。ここで、確率密度関数は、40時間で $F_{ext}$ ~2×10<sup>-5</sup>であり、次節にて述べられる森林火災シミュレーションにおいて最も風 速が強く延焼速度が速いケースにおいても、40時間時点の焼失面積は全解析体系 の一部となっている。よって、sとtの最大値は、森林火災シミュレーション体系内 の延焼可能エリア全体が延焼した時の面積と時刻で近似できる。なお、ここで「期 待値」は消防活動の効果を取り込んでおり、この期待値からさらに「延焼面積-年 超過頻度曲線」で年超過頻度を求めた場合、消防活動の効果を部分的にダブルカウ ントする可能性がある。

# c. 森林火災シミュレーション

FARSITE を用いた森林火災シミュレーションにおいては、基準解析として風速 0m/s 条件 を設定する。これは、風速の影響を排し、気温、湿度の影響を分析するためである。後述 のように、風がない場合は延焼に非常に時間がかかることが示され、実際には消火の可能 性が高くプラントに影響する可能性は小さいと判断される。そこで、さらに感度解析とし て、風速を設定及び変更した場合の影響、火災発生場所が異なる場合の影響を分析するこ ととした。風速の変化に応じた、気温、湿度も影響の変化を分析するため、風速、気温、 湿度を変化させることとなる。森林火災シミュレーションの解析結果の分析では、被評価 パラメータの感度を定量的に評価する。

#### (a) FARSITE 解析ケース

出火地点は当該地域の地形及び土地利用を踏まえ、森林火災ガイドを参考に選定した。

# ✓ 基準解析での出火地点の選定

出火地点として山間の林道終点を設定した。サイトから南東方向のため、風速は 大きめとなる。サイトへの火災到達前に、高圧送電線を通過することから、外部電 源喪失の発生が想定される。発電所には、補助電源設備、バッテリー、電源車等、 多重の対策が為されており問題が生じる可能性は考えられないが、外部電源喪失か らサイトへの火災到達の時間的余裕を定量的に概算する観点から、火災発生から高 圧送電線への到達時刻、さらにサイトへの到達時刻を評価する。

#### ✓ 基準解析とは異なる地点の選定

人為的な要因を念頭に、当該地域の海水浴場から、基準解析とは異なる方向のも のを抽出する。サイトの東側及び南東側の海水浴場を選定した。サイト東側の場合、 風速は弱めとなる。

# (b) FARSITE 解析結果

#### 基準解析(風速 Om/s)

風速を 0m/s とし、気温 37℃、湿度 5%の場合の基準解析ケースの結果である。 サイトへの火災到達時間は 97 時間程度である。基準解析ケースに対し、気温 90% 値である 27℃とした場合の結果では、サイトへの火災到達時間は 100 時間程度であ る。また基準解析ケースに対し、湿度を最大値 99%とした場合の結果では、サイ トへの火災到達時間は 330 時間程度である。サイト近傍での最大火線強度に対し、 気温の影響はほとんど見られなかった。一方、湿度の影響は大きく、湿度 99%の 場合の到達時間は基準解析の 3 倍強となった。これは火災による延焼速度が 1/3 以 下となったことを意味している。

### 悪天候条件重畳ケース

基準解析ではサイトへの到達時間が4日程度と比較的長い。風速も考慮した最も 厳しい条件でサイトへの到達時間をまず見積もることとした。本ケースを悪天候条 件重畳ケースと呼ぶこととし、その解析結果について、到達時間、単位時間あたり の燃焼強度、火線強度、延焼速度、火炎長を整理した。分析結果は以下のとおりで ある。

- ▶ 出火後、20時間程度でサイトに到達する。
- 森林火災が高圧送電線を通過後、10時間程度でサイトに到達する。
- サイト近傍での輻射強度は、1,000kW/m<sup>2</sup> 程度である。また、昼と夜で、 200kW/m<sup>2</sup>程度の差が生じる。
- ▶ サイト近傍での最大火線強度は、1,000kW/m程度である。

#### 風速の影響

風速に対する影響をまとめる。悪天候条件重畳ケースの風速 24m/s 条件における 火災サイト到達時間は 19 時間程度であった。一方、風速 99%値である 11.6m/s の 場合、サイト到達まで 52 時間程度となった。風速 90%値である 7.8m/s の場合、サ

イト到達まで71時間程度となった。さらに風速50%値である4.7m/sの場合、サイト到達まで82時間程度となった。これらの解析の結果、到達時間の差は4倍程度であった。サイト到達時間と風速の関係としては、風速の影響を大きく受けるものの、風速に反比例するわけではないことが分かった。

### 風速及び気温・湿度の影響の重ね合わせ

風速最大値 24m/s の条件の下で、気温や湿度が変化した場合の影響をまとめる。 気温 90%値である 27℃の場合、サイト到達まで 19 時間程度となった。気温 50%値 である 16℃の場合、サイト到達まで 20 時間程度となった。気温最低値である-4.3℃の場合、サイト到達まで 20 時間程度となった。湿度 99%の場合、サイト到達 まで 62 時間程度となった。湿度 50%値である 73%の場合、サイト到達まで 60 時 間程度となった。

# (c) 煤煙空間密度のシミュレーション

煤煙空間密度を求めるため、ALOFT-FT[3.2.3-41]によるシミュレーションを行う。 ALOFT-FT は、PM2.5 及び PM10 粒子の水平方向の拡散挙動を解析するものである。入 カデータの設定値は、FARSITE 解析結果データを用いることとなる。すなわち、単位 面積あたりの放出熱量 I<sub>R</sub> (kW/m<sup>2</sup>)、火線強度 I (kW/m)、火線の周囲長さb (km)を 用いる。またアクティブ燃焼域の奥行 D (m)を I/I<sub>R</sub>と設定した時、アクティブ燃焼 域の面積は次式で求められる。

 $S_{ac} = D \times b (m^2)$ 

(3. 2. 3-12)

これらを ALOFT-FT シミュレーションの入力データとすることで、サイトにおける煤 煙空間密度の時間変化 ρ<sub>PM</sub> (g/m<sup>3</sup>)が求められる。ここで、発電所の空気取入口面積 S<sub>DH</sub> (m<sup>2</sup>) 及び空気平均流速 V<sub>DH</sub> (m/s) を与えることで、フィルタ総通過量が次式で求 められる。

 $M_{PM} = \int \rho_{PM}(t) \times S_{DH} \times V_{DH}$ 

(3. 2. 3 - 13)

ここで ALOFT-FT は、地形として平坦地 (Flat Terrain) のみを扱えるコードである ことに留意する必要がある。局所的な地形の効果、例えばサイトが尾根に囲まれたく ぼ地にあり、尾根を越えて煤煙が到来する場合、煤煙の主流はサイト上方を通過する こととなるが、このような状況は反映されない。

# ✓ ALOFT-FT によるシミュレーション例

ALOFT-FT の入力条件を与える元となる FARSITE 計算では、放出熱量(kW/m<sup>2</sup>)、 火線強度(kW/m)、火線周囲長さ(m)の解析結果を用い、また煤煙が集中して発 生し、かつ全てがサイト方向へ向かうという保守的な仮定をおく。風速の影響を見 るため、風速99%値(11.6m/s)、風速90%値(7.8m/s)、風速50%値(4.7m/s) とした場合の解析を行った。これを基に、発電所の空気取入口を通過する PM 総量 を推算したところ PM10 と PM2.5 の合計で高々10kg 程度となり、これをフィルタの 単位面積あたりに換算すると高々0.5kg/m<sup>2</sup>程度となった。他の外部事象によるフィ ルタへの影響を考えた場合、例えば火山灰による影響については、EUR/NAT による 飛行禁止が設定される火山灰濃度は 4mg/m<sup>3</sup>以上であり、今回評価された煤煙濃度と 比較して1桁大きい。

### d. 森林火災ハザード曲線の導出試計算

平成25年度に開発した森林火災ハザード評価手法の適用性を確認する目的で、森林火 災シミュレーションの感度解析結果を踏まえ、ロジックツリーを単純化し、さらにモンテ カルロシミュレーションを行うことでハザード曲線を導出する試計算を行った。シミュレ ーションの感度解析をまとめ、ロジックツリーを以下により簡略化した。

▶ 出火条件:

3地点のみとし、各分岐確率を 1/3 と仮定する。これら3地点はいずれも市街 地から遠いことから、出火頻度の観点からは、現実より保守側の設定となる。 また出火時刻はいずれも深夜0時で同一と仮定した。

▶ 天候条件:

影響の大きいパラメータは風速、湿度であり、この2つのパラメータで構成す る。この際、風向は3地点毎にサイトが風下となる方角であるが、その方角に 応じた風速-湿度の出現頻度データベースを用いた。

- 被評価パラメータの応答曲面: 風速、湿度に対する火線強度の変化については、森林火災シミュレーションの 結果を線形近似により単純に近似した。火線強度の最大値に対する風速及び湿 度の依存性を近似した応答曲面を求めた。また近似した応答曲面の相関式が汎 用的に適用可能と仮定した。
- 「消火活動を単純化するモデル」の適用 火災がサイトに到達した時点の延焼面積から、延焼面積-年超過頻度曲線を用 い、「サイトに火災が到達する年超過頻度」を導出する。「延焼面積-年超過 頻度曲線」は「通年での1次回帰式」を用いた。

出火条件、気象条件、植生条件に対する分析、及び森林火災シミュレーションの結果を 踏まえてロジックツリーを単純化した。単純化されたロジックツリーを用い、モンテカル ロシミュレーションによりハザード曲線を導出した。

# e. 森林火災ハザードの重要パラメータの同定

平成24年度に同定された火災に関連する重要パラメータとして、熱・炎、煤煙、飛散 物が選出された。熱・炎は発電所に対し直接的な影響を及ぼす要因となるが、これに関す る重要なパラメータは以下である。

- ▶ 火線強度(kW/m)
- ➤ 延焼速度(km/hr)
- ▶ 延焼継続時間(hr)
- ▶ 熱量(kJ/m<sup>2</sup>)(単位面積あたり)
- ▶ 燃焼速度(kW/m<sup>2</sup>) (単位面積あたり)

これは平成25年度のシミュレーション結果であり、これを踏まえて重要パラメータは 平成24年度に同定したものと変わらない。そこで、平成25年度のシミュレーションケ ース数は限られているが、その結果から、いずれの場合も、風速と湿度の感度が大きいこ
とが示された。煤煙は、空気冷却器のフィルタの目詰まりによる崩壊熱除去機能の低下や、 消火活動への影響として現れる。平成25年度のシミュレーションによる試計算の結果、 定量的に評価できる見通しを得た。飛散物は、飛び火による火災拡大の影響がある。今後、 取扱いを検討する必要がある。

## f. まとめ

森林火災ハザード評価手法の概念として、出火条件、気象条件、植生条件、森林火災シ ミュレーションから構成されるロジックツリーに基づく方法を考案した。植生データ及び 地形データの整備及び気象データの統計分析に基づき入力条件を設定し、森林火災シミュ レーションを実施した。基準解析(風なし条件)では、火線強度に対しては湿度の影響が 大きいことを確認した。森林火災の地域的特徴を踏まえた火災発生頻度及び年超過頻度の 相関式を導出し、シミュレーション結果を基に、森林火災ハザード曲線の構築を試み、評 価手法を開発できる見通しを得た。また、シミュレーション結果に基づき、重要パラメー タとして延焼速度、火線強度、火炎長を同定し、それらに対する感度を分析した。

## (3) 平成26年度成果の概要(H26)

## a. 平成26年度は、具体的には、以下の事項に着目した開発を実施した。

#### (a) 森林火災ハザード評価手法の開発

ロジックツリーにおける評価項目に対し、①手法の高度化として、森林火災プラン トウォークダウン等を実施し、そこで得られた知見を反映した。また、②手法の詳細 化として、気象条件同時出現確率の計算手法等を開発した。それらを踏まえて、森林 火災ハザード評価手法を開発した。

### (b) 森林火災の延焼シミュレーション

森林火災の影響は風に大きく左右されることから、風の影響を受ける場合の①延焼 シミュレーションを実施し、地形及び植生の影響を調べた。また、平成24年度には、 プラントへの影響の観点で、熱・炎以外に煤煙と飛散物(飛び火)も重要パラメータ と同定したことから、②煤煙移行シミュレーションを実施し、森林火災の影響を評価 するとともに、③飛び火が生ずる条件及び影響に関する検討を実施した。

(c) 森林火災ハザードの評価

ロジックツリーから定まる森林火災の発生、延焼条件における強度指標を導出する ため、上記(1)(2)の検討を踏まえ、①数百ケースの森林火災シミュレーションを 実施して詳細な応答曲面を導出した。また、ハザード曲線を導出するのに用いるモン テカルロシミュレーションにおいて、②極低頻度まで導出可能な重点サンプリング法 による計算手法を新たに開発した。最後に、③森林火災ハザードの評価として、火線 強度と反応強度に対するハザード曲線を導出した。また、森林火災に関わる条件等に 対する感度分析を実施した。

### b. 森林火災ハザード評価手法の開発

## (a) ロジックツリーにおける評価項目の高度化

### 森林火災プラントウォークダウンの実施

森林火災に着目したプラントウォークダウンを実施し、手法開発の観点から特定 プラント条件に依らない、一般的な知見を以下のとおり整理した。

### ✓ 植生と森林火災の関連について

発電所周辺の山林が広葉樹を主たる植生とする場合、米国の針葉樹林での森林火 災と比較して緩やかな燃え方になる。広葉樹林で林床に日差しが届くような場所で はシダ類が生える。シダ類は燃えやすい植生のため注意が必要となる。森林簿等で 針葉樹となっているような場合でも、部分的に広葉樹の茂みも混在して生えている ことがある。FARSITE は米国の植生データを標準設定で用いることから、日本の植 生にそのまま適用する場合には注意が必要で、現地の植生に応じたパラメータを設 定することが重要である。

# ✓ 森林火災と地形の関連について

海に面し背後に山がある地形の場合、海から山へ風が吹く時は、山の斜面で火災 が発生したとしても、海側へ向かって延焼してくることはなく、建物への影響も考 えがたい。ただし、山側から谷側に強い風が吹く時は、建物への延焼も考えられる ことから注意が必要となる。

## ✓ 森林火災とプラント周辺設備の関連について

シダ類が燃えた場合の森林火災は地表火であり、地中の埋設ケーブルに影響を与 えるような地中火は生じない。森林内に鉄塔がある場合でも、鉄塔が倒壊するほど の森林火災は日本では報告例が無い。今回の検討対象地域の広葉樹の場合、樹高か ら考えて火炎長は数 m 程度で、送電線まで火炎が届くとは考え難い。のり面に生え ている植生は不連続な分布となることから、飛び火(燃えている枝等が飛んできて 落下)で燃え移る、といった様相となる。

## ✓ 森林火災のプラント設備への影響について

プラントにある燃料タンクやディーゼルの設置された建物が、道路等で森林から 十分な距離が確保されている場合、森林火災の輻射熱により延焼が生じるようなこ とは考え難い。またタンクや建物の周辺の空気温度もほとんど上がらないであろう。 煤煙は対流により上昇するため、作業性が失われる等の影響は少ないと考えられる。

# ✓ 森林火災の消火活動について

森林周辺の水源の水量が豊富な場合でも、消火活動の際には、落ち葉等によるホ ースの目詰まりに注意が必要となる。海水を利用した消火活動も視野に入れておい た方がよい。初期消火活動として、森林火災が到達する前にあらかじめ延焼すると 考えられる林床、樹木に水を撒いておくのは有効である。火線強度(~1,000kW/m 程度)の場合、炎の長さは2~3mであり、消火活動も風上側からであれば10m程度 離れれば実施できる。

## 文献等の調査

以下の事項について調査及び検討を実施した。

✓ 延焼速度の評価

森林火災の延焼シミュレーションには、斜面の効果が経験式[3.2.3-42]に基づい

て導入されている。延焼速度は斜面の上り下りで 5~0.5m/s の差があり、この差は 既存の研究[3.2.3-43]の範囲内にあることを確認した。

## ✓ 森林火災に伴う様々な現象

大規模な火災に伴う現象として、火災旋風が関東大震災等で都市部での大規模な 火災[3.2.3-44]に伴い生じたことが知られている。他国においては米国のイエロー ストーンやカリフォルニア州での報告[3.2.3-45]の他、オーストラリアのキャンベ ラ郊外の草原における事例[3.2.3-46]として竜巻強度にして改良藤田スケール 2~ 3(EF2-EF3)であった、という報告がある。一方で、本研究で対象としている地域 での森林火災に伴う火災旋風の発生報告は見いだせなかった。火災旋風は火災に伴 う上昇気流が要因となっており、比較的平坦な地域での大規模火災で生じたと考え られる。山に囲まれ海に面したくぼ地の場合、火災延焼時に火災プルームは上空に 向かうことを踏まえれば、そのような場所で選択的に生じる事は考え難い。一方、 現象論的には、どのような場合に生じるか等については明確でないことから、火災 旋風に対する最新事例及び関連研究について、今後も継続して注視してゆく必要が ある。

### ✓ 局所的な風の影響

風向に関して調査を実施し、モデルサイトと敦賀市内気象台における地表付近の 風配図[3.2.3-47]を比較し、有意な差が無いことを確認した。これを踏まえ、本研 究における風向については、気象台での観測値を研究対象地域の代表値として扱え ることを確認した。

### 情報収集

森林火災を対象とした安全評価に関連する最新知見の情報収集のため、沖縄県宜 野湾市の沖縄コンベンションセンターにて平成26年12月14~18日に開催さ れた「第10回原子炉の熱流動・運転・安全に関わる特別国際会議(10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety: NUTHOS-10)」へ参加した。米国においては原子力発電所の森林火災対策 として発電所周囲に非植生ゾーンを設けていること、外部電源喪失は森林火災に伴 う随伴事象として想定され得るという情報を得た。また日本原子力学会で今般発行 された標準[3.2.3-48]においては、森林火災は外部ハザードの1つであることに加 え、他の外部ハザード(地震、強風、雷、隕石落下、火山噴火)に随伴して発生し 得るものと規定されているという情報を得た。

### 得られた知見の手法詳細化への反映

上記により得られた知見に対し、以下の事項を反映することで、ロジックツリー を詳細化した。

### ✓ 森林火災に伴う現象と施設内への影響

森林火災に伴い生じる物理現象は、熱、炎、煤煙、飛び火に分類される。これら の影響要因に対し、発電所に設置される建物、燃料タンク、空気冷却器等、影響を 受けうる系統については、平成24年度報告書にて分析がなされている。平成26 年度は、プラントウォークダウン及び評価委員会でのコメントを踏まえ、影響因子 と被影響機器についての見直しを行った。具体的には、排除され得ないシナリオと、 発電所における離隔距離等の観点で排除できるシナリオを分類し、さらに重畳事象 において影響を受ける因子を分類して改定した。

### ✓ 広域消防による消火活動の延焼到達確率への反映

発電所が海に面していたり沢が近くにあるような場合は、海水や淡水源を積極的 に活用した消火活動が可能である。また、森林火災が例えば遠隔地から延焼してく る場合、その途中での広域消防による消火活動の効果は、一般的に大きいと期待さ れる。しかしながら、道路等のアクセスルートの有無や通行可否の状況、さらに他 の消火活動と前後することなどが考えられ、リスク評価上は不確定の要素が多い。 よって、広域消防の活動が通常どおり期待できる場合とできない場合のハザード曲 線を導出することとした。

## (b) ロジックツリーにおける評価項目の詳細化

## 福井県森林火災の発生条件

平成25年度に続き、火災個票を用いて、月別出火頻度、森林火災時の風速・湿 度出現頻度、出火時刻頻度、森林火災継続時間について追加分析した。火災は春期、 昼間に多い。また、風が強く、湿度の低い時に多い。森林火災が発生した時の出現 頻度を、この後のハザード曲線評価で用いた。継続時間は全国規模のものと類似し た傾向を示した。また福井県での平均的な森林火災発生頻度をシミュレーション対 象とした森林面積に対応させることで、0.358件/年を算出した。

## 風速・湿度の同時出現頻度条件

平成26年度は、観測データを超える天候条件の出現頻度を扱うことで、ハザー ド曲線における低頻度・高影響部分も評価する。このために、天候データベースを 外挿するモデルの構築、さらにハザード曲線導出のためのモンテカルロ計算におい て適切に低頻度をサンプリング対象とする手法の構築が必要となった。敦賀におけ る AmeDAS データ(1時間平均/値)に基づく風速・湿度の出現頻度データベースに 対し、20%刻みの湿度区分毎に95あるいは99パーセンタイルまでは実際の出現頻 度に基づき、それ以上では次式の一般化パレート分布に基づく連続分布に基づき外 挿することで出現頻度を与えることとした。観測データによる経験的な風速・湿度 出現密度関数と、本モデルを用いランダムサンプリング(サンプル数 107)で作成 した風速・湿度出現密度はよく一致しており、本モデル化が妥当な出現確率を与え ることが確認できる。

### 雨・雪の影響

雨若しくは雪の森林火災への影響について、初期水分量を増加及び半減させた場合のシミュレーションを実施した。到達時間にやや相違があるものの、火線強度と反応強度には有意な変化は見られなかった。これは森林火災の延焼が進む時間経過の間に1時間/10時間可燃物量の保有する水分が大気中の湿分と平衡に近づいたことによるものである。森林火災の出火時あるいは延焼時に降雨があった場合のシミュレーションを行った。雲量を100%とした場合、反応強度は157kW/m<sup>2</sup>と約1/8まで低下した。降雨を模擬した条件においては、いずれも森林火災は生じない、ある

いは直ちに消火した結果となった。以上の検討から、降雨、降雪が生じた場合、森 林火災シミュレーションにおいても火災が継続しない状態となること、ロジックツ リーで降雨、降雪を考慮せずにハザード曲線を導出することで頻度、影響度共に保 守的な評価となることが確認できた。

### (c)森林火災評価手法の開発

開発を行った森林火災評価手法での評価の流れとしては、まず始めに、ロジックツ リーにおけるパラメータの条件設定を行う。一定条件とするものは平均値あるいは保 守的な設定とする。確率変数として扱うものは出現頻度/発生頻度のデータベースを 構築する。森林火災発生頻度の地域依存性及び出火月依存性については、年平均の当 該地域での平均的な発生件数とし、出火月は12か月で平均して扱う。気象条件のう ち低感度パラメータである気温、雲量、降水量は保守側一定値で扱い、風向は出火地 点からモデルサイトが風下とする。植生条件は樹種毎の植生パラメータを保守側一定 値で扱う。また熱・炎の影響を評価することから、飛び火を考慮する FARSITE オプシ ョンを設定しないで扱う。確率変数である森林火災の発生時刻は、1日24時間の中 での発生頻度確率分布を求める。出火地点は複数の場所を想定し、それらの頻度分布 は出火要因を考慮して確率分布を設定する。延焼到達確率は、森林火災発生後の経過 時間の関数としてモデルサイトに到達するまでに消火される確率分布を求め、1 から 引くことで延焼到達確率分布を求める。気象条件のうち強度指標に対して高い感度を 持つ風速、相対湿度は、1年を通じた風速―相対湿度の同時出現確率の関数分布を求 める。またパラメータ間の相関関係として、森林火災発生と風速、火災発生と相対湿 度の関係を分析し、相関がある場合は出現確率を補正する。本研究では、相対湿度の 出現確率を火災発生時の相対湿度で補正する。次に、強度指標値を森林火災発生条件 から関数で求めるための応答曲面を、森林火災の延焼シミュレーションを実施して導 出する。すなわち、確率変数である風速、相対湿度、出火時刻、出火地点を変化させ た FARSITE シミュレーションを多数実施し、モデルサイト近接地点における強度指標 値と延焼到達までの時間を算出する。これを用い、強度指標値である火線強度と反応 強度を関数で与える応答曲面として、出火地点毎に、風速、相対湿度、到達時刻の3 次元補間曲面を導出する。同様に延焼到達までの経過時間の応答曲面も、出火地点毎 に、風速、相対湿度、到達時刻の3次元補間曲面として導出する。次に、モンテカル ロシミュレーションを実施する。モンテカルロサンプルとしては、出火地点に対し、 出火候補地点毎の相対的な発生頻度を反映して1個ランダムサンプリングを行う。到 ·達時刻のサンプリングは、到達時刻と出火時刻の相関はランダムと仮定し、出火時刻 の頻度分布から1個ランダムサンプリングを行う。風速、相対湿度のサンプリングは、 風速、相対湿度の同時出現確率分布から1組ランダムサンプリングする。最後にハザ ード曲線を導出する。モンテカルロシミュレーションでサンプリングされた確率変数 の組み合わせから、応答曲面を用いて、火線強度及び反応強度、延焼到達までの経過 時間を計算する。延焼到達までの経過時間から、延焼到達確率を計算する。さらに森 林火災の発生頻度、延焼到達確率、出火地点/出火時刻/風速、相対湿度の出現頻度か ら、火線強度と反応強度の年超過頻度を計算する。多数のサンプリングで求めた「年

超過頻度火線強度・反応強度の対応」から、それらの合計を取ることでハザード曲線 を生成する。

## c. 森林火災の延焼シミュレーション

### (a) 風の影響を受ける場合の延焼シミュレーション

### 地形の影響との重畳

風の影響を受ける延焼シミュレーションでは、地形の影響も同時に考慮すること が必要となる。平成27年度の検討では、モデルサイトから約1km 南南東の地点を 選定した。この地点で森林火災が発生した場合、延焼は水路及び沢沿いの小道に沿 って進むこととなるが、これは風が山側から海側へ強く吹き下ろす状況では、風が この経路に沿って吹く可能性を考慮したものである。また発生想定地点の頭上には 高圧送電線が通っており、人の出入りがあること、送電線の断線あるいは落雷が火 災要因となりえることから選定した。FARSITE による延焼シミュレーション結果で あるが、火線強度は約 600kW/m、約 10 時間後に森林火災はモデルサイトへ到達す る。延焼は沢から尾根へ上る方向へ相対的に早く進むことから、沢沿いに延焼が下 ってゆく速度はその周囲に比べてやや遅くなっている(約 2m/min に対し、約 1m/min)。延焼シミュレーションで求める強度パラメータは、風や地形の影響に加 え、火災発生時刻でも変化する。例えば、同一条件(出火位置は南南東約 2.5km、 悪天候重畳条件[風速 24m/s、気温 37 度、湿度 5%])で、出火時刻を 0~23 時と変 化させた時の、モデルサイト周辺ゾーン分割毎の火線強度と反応強度の最大値であ るが、いずれのゾーンでも到達時刻が正午過ぎ頃になる場合に最大値を示す。

## 植生の影響との重畳

FARSITE を用いた評価では樹冠火モードへの移行が、特に火線強度へ大きく影響 する。火線強度は、風が強く反応速度の大きな植生で高くなる。本検討では、強風 (24m/s)が吹く広葉樹林において、植生パラメータのうち1時間クラス可燃物量 と林床可燃物深さ、CBH (Crown Base Height、樹冠高さ)をFARSITE標準値から変 化させ、樹冠火への移行条件、火線強度、反応強度への影響を分析した。シミュレ ーションは平坦で一様な斜面(斜度:28.3度)にて行った。1時間可燃物量と林床 可燃物深さを変化させた場合の地表火から樹冠火への移行と、最大火線強度と最大 反応強度の結果を分析した。この場合、樹冠火への移行は火線強度1,348kW/mで生 じる。広葉樹の植生パラメータに対し、1時間可燃物量と林床可燃物深さで2倍程 度としなければ樹冠火への移行は見られないことが分かった。また CBH を 4m から 3m、2m に変化させた場合、樹冠火への移行と判断される火線強度は葉の含水率と CBH により変化する。ミズナラを対象とした胸高直径と枝下高の実測値[3.2.3-49] の例では、枝下高は 6.7±3.2m であり、樹冠火への移行条件で用いられる CBH=4m は保守側と判断した。また伐採直後の広葉樹の樹葉の含水比実測値[3.2.3-50]は 117~245%にあり、標準的な条件で用いる 100%は保守側と判断した。

### (b) 風の影響を受ける場合の煤煙移行シミュレーション

森林火災に伴い発生する煤煙の挙動は、風の影響を強く受けることから、FARSITE

による延焼シミュレーションと ALOFT-FT[3.2.3-41]による煤煙移行シミュレーション を組み合わせ、強風条件下での煤煙移行シミュレーションを実施した。ここで森林火 災が樹冠火へ移行した場合、火線強度が大きくなることから、森林火災に伴う上昇気 流が強くなり、煤煙移行挙動が変化すると考えられる。今回の検討では、樹冠火への 移行が生じやすい条件として、CBH を 4m から 1.5m と変更した場合(ケース A とし、 この場合、309kW/mで樹冠火へ移行)と、植生を広葉樹からスギ 10 年生未満へと変更 した場合(ケース B とする)を検討した。樹冠火が生じない条件(植生として樹冠が 無い)として広葉樹から茂み(Brush)へと植生を変更した場合(ケース C とする) も検討した。検討では、FARSITE による延焼解析、そこから火線強度、反応強度、延 焼領域面積の解析結果を引き継いで ALOFT-FT による煤煙移行シミュレーションを実 施した。火線強度が大きな値の場合、煤煙が直ぐに上空へ上昇するため、境界位置の 地表近傍での濃度は低下する。また茂み(Brush)の場合のように可燃物質量が少な い場合も煤煙濃度は低くなる。よって、広葉樹の場合のように、火線強度が比較的弱 く、かつ可燃物質量が多い場合に地表での煤煙濃度が大きく傾向があることが分かっ た。今後は、煤煙の影響を受ける空気冷却器のフィルタ側での影響を定量的に評価す るため、森林火災での煤煙生成物を模擬したフィルタ性能劣化試験が必要と考えられ る。

## (c) 飛び火に対する風の影響

FARSITE の Albini モデル[3.2.3-51]による飛び火計算を実施し、強風条件下での飛 び火の発生条件及び影響の分析を行った。FARSITE では飛び火による発火確率として 5%が与えられるが、発生確率を 0%/50%/100%に変化させた場合、植生を落葉広葉 樹主体のものから、針葉樹(スギ 10 年未満)、茂み(Brush)とした場合について、 延焼シミュレーションを行った。ここで風の影響を分析する観点から、風速は 24m/s、 12m/sとしている。落葉広葉樹主体の植生で時間経過により応じた飛び火の様子を、 発火確率 5%と 100%の場合で比較した。飛び火が風下に生じた後、延焼本体が拡大 し重なる様子が分かる。飛び火は樹冠火において生ずるモデルとなっており、植生の 相違による燃焼モードの相違を落葉広葉樹・風速 24m/s、落葉広葉樹・風速 12m/s、 針葉樹・風速 12m/s、茂み(Brush)・風速 12m/sについて行った。いずれの植生にお いても、発火確率を 0%から 5%とした場合に到達時間が短縮しているが、5%から 50%、100%とした場合では顕著な短縮化は見られず発火確率に対する影響は飽和し ている。落葉広葉樹の場合、モデルサイト到達時間は、5%、100%いずれの場合も、 約 20 時間から約 16 時間へと約 20%程度短縮化された。

飛び火が生じた場合の飛散挙動について、Albini モデルに基づくシミュレーション 結果を整理した。FARSITE では9種類の飛び火植生(Grand Fir、Douglas fir、 Western hemlock、Subalpine fir、Engelmann spruce、Ponderosa pine、Lodgepole pine、Western white pine、Western red cedar)が選択可能である。落葉広葉樹で 飛び火確率 100%、風速 12m/s の場合の飛び火点数(飛び火により新たに生じた延焼 が 10m×10m メッシュサイズを超えたものをカウント)と延焼前線からの距離は、11 ケースで 9~751m に分布した。これは、日本国内の事例として報告[3.2.3-52]されて いる、飛び火が多く発生した報告での距離と比較して同レベルの範囲にあり、 FARSITE における飛び火モデルが、日本において発生した森林火災に伴う飛び火との 比較において、飛距離を妥当に評価していることを示している。リスク評価上は飛び 火による延焼の到達時間の短縮効果が重要となるが、これは風下への飛距離分が延焼 前線のモデルサイトとの離隔距離が短縮することが要因であることから、FARSITE に よりリスク評価上の影響は評価可能であることを示している。

### d. 森林火災ハザードの評価

平成25年度の研究において、簡略化したロジックツリーを用い火線強度に対するハザ ード曲線の導出を行った。この際、気象条件は気象観測値の範囲内を対象とし、火災燃焼 面積一頻度相関式により森林火災の消火の影響を単純化し、さらに風速、相対湿度の2変 数のみに対する応答関数を用いた。平成26年度は、気象条件の出現頻度を定式化し、さ らに観測値外の天候条件の出現頻度をモデル化することで、非常にまれな天候出現条件も 反映したハザード曲線を導出した。また強度指標として火線強度に加えて、反応強度、延 焼時間(火災到達までの時間)に対する応答曲面を導出した。反応強度はハザード曲線の 強度指標であり、また延焼時間は出火後の広域消防の活動可能時間となるため消火確率の 導出に用いた。

## (a) 応答曲面導出のための森林火災の延焼シミュレーション

出火地点、出火時刻、風速、相対湿度を変化させた多数の延焼シミュレーションに より火線強度、反応強度、到達時間を求め、それらを補間で求めるための応答曲面を 導出した。出火地点は代表的な3地点、出火時刻は6時間毎に4ケース、風速は既往 最大値以上~最頻値までの4ケース、湿度は2%、23%、35%、51%の4ケースであ り、積算合計で192ケースである。シミュレーション結果に対し、火線強度と反応強 度はモデルサイト境界における最大値、到達時刻については火線強度最大地点への到 達時刻とした。なお、火線強度最大地点と反応強度最大地点への到達時刻の間にはほ とんど差が無いことを確認している。これらシミュレーションの結果データに対し、 ガウス過程補間を用いた補間を行った。元の結果データの値と、補間で求めた推定値 との、192ケースでの平均誤差は、火線強度で±17kW/m、反応強度で±32kW/m<sup>2</sup>、到達 時刻で±2.6時間となっており、評価対象の火線強度(数 100kW/m)と反応強度(~ 1,000kW/m<sup>2</sup>)のレベルと比較して十分小さくなっている。到達時間は8~140時間と幅 が大きいため、短時間の場合では誤差が相対的に大きくなる。

### (b) 極低頻度条件へのモンテカルロシミュレーション適用

通常のモンテカルロ計算では極低頻度までのハザード曲線を導出する場合、非常に 多くのサンプル数が必要となる(例:10<sup>-8</sup>/年まで求めるのに必要なサンプリング数は 109 など)。本研究では重点サンプリング法を適用する手法を開発する。重点サンプ リングでは、各サンプルに対して適切な重みを乗じる必要があり、十分な解像度を持 つ確率密度分布マップが必要となる。ここで天候出現条件は、相対湿度毎に区分化し た風速変数に対する一般化パレート分布関数と整合させる必要があり、各相対湿度区 分(1~5)に対し、風速変数(x 軸)だけでなく、湿度区分内での湿度変数(y 軸) に対する分配関数をヒストグラムにより導出した。重み関数として 10-20 レベルまで 関数化されている。通常サンプルと重点サンプリング法を用いた場合で高頻度部分は ほぼ同一であり、手法の妥当性が確認できた。重点サンプリング法を用いることで、 同サンプル数(105)の場合でも、極低頻度までハザード曲線が構築できる手法を開 発した。

### (c) ハザード曲線の導出

上記のモデル化とロジックツリーを用い、以下に示すロジックツリー上のモデル選定の相違が与えるハザード曲線への影響について評価を行った。重点サンプリング法を用いずにサンプル数 106 程度で曲線を導出したが、比較のためには十分な程度に曲線が収束していることが分かる。

### 広域消防による消火活動効果の有無によるハザード曲線の相違

サンプル数 105、火災発生頻度 0.358/年、出火確率は3地点で均一とした場合の、 延焼途中での消防による消火効果の有無の影響について、重点サンプリング法を用 いて評価した。ロジックツリー上は、広域消防による消火に要する時間に対応した 延焼到達確率を、ワイブル分布で評価するか、期待しない(到達確率は 1)とする かの違いとなる。消火の効果を反映することで、火線強度と反応強度のどちらも年 超過頻度が 1.5 桁程度低下した。

## 森林火災発生時間の差異によるハザード曲線の相違

サンプル数 105、火災発生頻度 0.358/年、延焼途中での消火活動は有り、出火確 率は3地点で均一とした条件において、発生時間が昼間に多い場合と時間帯によら ず均一とした場合を比較した。発生時間が昼間に多い場合、火線強度は 20%程度、 反応強度は5%程度の増加となる。

### 森林火災発生地点の差異によるハザード曲線の相違

サンプル数 105、火災発生頻度 0.358/年、延焼途中での消火活動は有り、火災発 生時間は均一とした条件において、出火確率は 3 地点で均一、1 地点で高く(0.6) 他の 2 地点で低い(各 0.2)とした場合を比較した。火線強度、反応強度は共に頻 度にして±40%程度の変化となる。出火地点の近い条件での発生確率を高くした場 合に頻度が大きくなる。

## e. まとめ

平成25年度に構築した概念を踏まえて、ロジックツリーにおける評価条件の設定、森 林火災シミュレーションの実施、応答曲面の導出、モンテカルロシミュレーションの実施、 ハザード曲線の導出からなる森林火災ハザード評価手法を開発した。また、気象条件同時 出現確率の計算手法等を開発して、評価条件の詳細化を図った。風の影響を受ける場合の 延焼シミュレーションを実施し、地形及び植生の影響を調べた。煤煙及び飛び火について もシミュレーションを実施し、森林火災の影響を評価した。広葉樹の植生では火災強度が 比較的弱く煤煙濃度が地表付近で高くなることから、フィルタへの影響が大きくなること を見いだした。次に、森林火災シミュレーションに基づく応答曲面を構築し、それを用い たモンテカルロシミュレーションを実施することで、火線強度と反応強度に対するハザー ド曲線を導出した。また、極低頻度まで導出可能な重点サンプリング法による計算手法も 開発した。

#### (4) 平成27年度成果の概要(H27)

平成27年度は、具体的には、以下の事項に着目した開発を実施した。

### a. 重畳事象の選定

森林火災との重畳事象として、強風と雷を選定し、強風と森林火災の重畳時、及び、雷 と森林火災の重畳時のハザード曲線を導出した。森林火災後の土砂崩れについて調査を行 った。さらに地震後の森林火災発生の有無、津波を起因とした森林火災について文献調査 を行った。

## b. 森林火災の延焼シミュレーション

低~中程度の風速に対する評価点を充実させた延焼シミュレーションを実施した。これにより煤煙シミュレーションで用いるための延焼領域、反応強度及び火線強度を決定した。

### c. 森林火災ハザードの評価手法

発電所機器のうち外部燃料タンクについて、反応強度に応じた損傷確率の評価方法を考 案し、フィラジリティ曲線を導出した。熱影響に対するイベントツリーを構築し、フラジ リティ曲線を用いて条件付炉心損傷確率を導出した。反応強度に応じたハザード曲線から 求まる発生頻度と、条件付炉心損傷確率を用いて、炉心損傷確率を導出した。

### d. 森林火災の煤煙シミュレーション

風速、湿度、発火地点及び発火時刻をパラメータとした煤煙シミュレーションを行い、 発電所でのフィルタの積算目詰まり量を推算する応答曲面を求めた。

### e. 煤煙ハザードの評価手法

発電所機器においてフィルタを有するディーゼル発電機、換気空調系、崩壊熱除去系 (強制循環モード、自然循環モード)について、フィルタ損傷確率を導出した。その導出 にあたっては、森林火災灰を模擬する粒子状物質として、微粉炭、フライアッシュ、カー ボンブラックを選定し、圧力損失試験及び破壊試験を実施することで、フィルタ破損限界 の粒子による差異を測定し、フィルタ損傷の破損確率を表すフラジリティ曲線を導出した。 煤煙影響に対するイベントツリーを構築し、炉心損傷確率を導出した。

## (5) 評価手法整備の4年間のまとめ

4年間にわたる研究開発成果の全体図を図 3.2.3-44 にまとめた。

## 3.2.3.8 まとめ (H27)

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、煤煙に関するハザード曲線を 導出した。導出にあたっては、森林火災の延焼シミュレーションを実施し、延焼量の保存

性を高めた森林火災の燃焼強度と進展速度の代表値を導出し、さらに延焼進展に応じた煤 煙の空間分布を ALOFT-FT コードを用いて煤煙シミュレーションを実施することで、空気 冷却設備のフィルタ目詰まり積算量に関する応答曲面を構築した。構築した応答曲面を、 平成25年度及び平成26年度に開発したロジックツリーへ適用し、モンテカルロ計算を 行うことで、煤煙積算目詰まり量を指標とした森林火災ハザードを評価した。さらに評価 対象とする重畳事象として、森林火災+強風、森林火災+雷を選定した。それらの重畳事 象に対して、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能への影響を調べるため、重畳条件で のハザード曲線を導出した。最後に、4年間のまとめとして、開発してきた手法を整理し た。 参考文献

- [3.2.3-1] 火災報告取扱要領ハンドブック(11訂版)、防災行政研究会編、ISBN978-4-8090-2050-6 (2015)
- [3.2.3-2] 外部ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準:2014 (AESJ-SC-RK008:2014)、日本原子力学会(2014)
- [3.2.3-3] 小林悟志、2011年の震災津波による二次災害で発生した岩手県大槌町の山林火災の現状、自然災害科学、31(2)、145-153(2012)
- [3.2.3-4] M. Parise and S. H. Cannon, Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds, Natural Hazards, Volume 61, Issue 1, pp 217-227, DOI 10.1007/s11069-011-9769-9 (2012)
- [3.2.3-5] P. Jordan, K. Turner, D. Nicol and D. Boyer, Developing a Risk Analysis Procedure for Post-Wildfire Mass Movement and Flooding in British Columbia, Proc. 1st Specialty Conference on Disaster Mitigation, Calgary, Alberta, Canada, May 23-26, p. DM-013-1 (2006)
- [3.2.3-6] Kristine L. Verdin, Jean A. Dupree, and John G. Elliott, Probability and Volume of Potential Postwildfire Debris Flows in the 2012 High Park Burn Area near Fort Collins, Colorado, Open-File Report 2012–1148, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (2012)
- [3.2.3-7] Kenneth D. Skinner, Post-Fire Debris-Flow Hazard Assessment of the Area Burned by the 2013 Beaver Creek Fire near Hailey, Central Idaho, Open-File Report 2013-1273, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (2013)
- [3.2.3-8] GIS ソフトウェア ESRI ジャパン, www.esrij.com
- [3.2.3-9] Merche B. Bodí, Gary Sheridan, Philip Noske, Jane Cawson, Victoria Balfour, Stefan H. Doerr, Jorge Mataix-Solera and Artemi Cerdà, Types of ash resultant from burning different vegetation and from varied combustion processes, Sagvntvm Extra, Vol. 11, pp. 53-54 (2011).
- [3.2.3-10] 消防研究所報告、火の粉の性状が飛距離に及ぼす影響: 2010年1月別府市強風下 市街地火災の現地調査に基づいて、113号、ISSN 0426-2700 (2012)
- [3.2.3-11] E. A. Hohnson and K. Miyanishi, Forest Fires, Academic Press, p. 66-68 (2001)
- [3.2.3-12] JIS B 9908「換気用エアフィルタユニット・換気用電気集じん器の性能試験方法」 (2011)
- [3.2.3-13] 寒河江幸平,佐藤晃由,新井場公徳,林野火災の発生危険度・拡大予測システムの開 発ー外国の事例及び開発中のシステムの概要-,消研輯報第55号,(2002)
- [3.2.3-14] 林野庁ウェブサイト. http://www.rinya.maff.go.jp
- [3.2.3-15] The McArthur Fire Danger Index. http://www.firebreak.com.au/mcarthur\_meter.html
- [3.2.3-16] W. John Braun, Bruce L. Jones, Jonathan S. W. Lee, Douglas G. Woolford, B.

Mike Wotton, Forest Fire Risk Assessment: An Illustrative Example from Ontario, Canada, Journal of Probability and Statistics Volume 2010, (2010).

- [3.2.3-17] Preisler HK, Brillinger DR, Burgan RE, Benoit JW Probability based models for estimation of wildfire risk, International Journal of Wildland Fire 13, 133-142, (2004).
- [3.2.3-18] Weiguo Song, Jian Wang, Kohyu Satoh, Weicheng Fan, Three types of powerlaw distribution of forest fires in Japan, Ecological Modelling, Volume 196, Issues 3-4, 25 July 2006.
- [3.2.3-19] IPCC, Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (2012).
- [3.2.3-20] Westerling, A.L., H.G. Hidalgo, D.R. Cayan, and T.W. Swetnam, Warming and earlier spring increases western U.S. forest wildfire activity. Science, 313, 940-943. (2006).
- [3.2.3-21] Gillett, N.P., A.J. Weaver, F.W. Zwiers, and M.D. Flannigan, Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. Geophysical Research Letters, 31(18), L18211, doi:10.1029/2004GL020876, (2004).
- [3.2.3-22] Westerling, A.L. and B.P. Bryant, Climate change and wildfire in California. Climatic Change, 87, 231-249, (2008).
- [3.2.3-23] 動力炉・核燃料開発事業団,高速増殖炉もんじゅ発電所原子炉設置許可申請書,平 成2年7月変更,(1990).
- [3.2.3-24] 第4回もんじゅ安全性総合評価検討委員会配布資料,平成24年12月25日, (2012).

http://www.jaea.go.jp/04/turuga/jturuga/press/posirase/1212/ex4.pdf

- [3.2.3-25] 独立行政法人 原子力安全基盤機構,高速増殖炉の内的レベル 1PSA 手法の整備=出力運転時及び停止時に関する報告書(平成17年度),JNES/SAE06-079 06 解部報-0079,平成19年2月(2007).
- [3.2.3-26] 独立行政法人原子力安全基盤機構, JNES の地震 PSA 手法の品質ガイドライン等への適合性の検討に関する報告書(別冊2) 出力運転時レベル1 地震 PSA 標準報告書=マーク II 型格納容器 BWR5 型プラント=, 平成21 年 8 月, (2009). http://www.jnes.go.jp/content/000004694.pdf
- [3.2.3-27] 日本原子力研究開発機構,高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT プロジェクト)-フェーズ I 報告書-,2011年6月.
  http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Evaluation-2011-003.pdf
- [3.2.3-28] 福井県みどりのデータバンク: すぐれた自然データベース http://www.erc.pref.fukui.jp/gbank/tokusei/index.html
- [3.2.3-29] JNES「福島第一原子力発電所の林野火災に関する影響評価」、JNES-RC-2012-0002 (2012)

- [3.2.3-30] 国土交通省 国土地理院 http://www.gsi.go.jp/
- [3.2.3-31] 森ナビふくい http://morinavi.pref.fukui.jp/map.php
- [3.2.3-32] 国土交通省 国土地理院 基盤地図情報サイト http://www.gsi.go.jp/kiban/
- [3.2.3-33] 気象庁 アメダス http://www.jma.go.jp/jp/amedas/
- [3.2.3-34] 福井県統計年鑑 https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/toukei-jouhou/nenkan.html
- [3.2.3-35] 福井県危機対策・防火課 http://www.pref.fukui.lg.jp/doc/kikitaisaku/
- [3.2.3-36] Weiguo Song, Jian Wang, Kohyu Satoh, Weicheng Fan, 「Three types of powerlaw distribution of forest fires in Japan」, Ecological Modelling, I96, pp. 529-532 (2006)
- [3.2.3-37] 三菱総合研究所他、消防防災科学技術研究推進制度 平成17年度研究報告書 (2005)
- [3.2.3-38] Frank A. Albini, Spot Fire Distance From Burning Trees, A Predictive Model, USDA Forest Service, General Technical Report INT-56, July (1979)
- [3.2.3-39] Martin E. Alexander, Calculating and interpreting forest fire intensities, National Research Council of Canada (1982)
- [3.2.3-40] 森林火災対策協会編、林野火災対策の解説、林野弘済会(2007)
- [3. 2. 3-41] ALOFT-FT http://www.fire.nist.gov/aloft/
- [3.2.3-42] M. A. FINNEY, "FARSITE: Fire Area Simulator Model Development and Evaluation", RMRS-RP-4 Revised, United States Department of Agriculture (2004).
- [3.2.3-43] 後藤他「日本で発生する山火事の強度の検討」、日林誌、8713、(2005)、p.193-201.
- [3.2.3-44] 昭文社出版編集部「なるほど知図帳 日本の自然災害」、ISBN-13:978-4398200549 (2014).
- [3.2.3-45] 例えば、"A fire tornado formed yesterday in California", Vox Media, 15 May (2014). Available at http://www.vox.com/2014/5/15/5720010/fire-tornadoformed-yesterday-in-california.
- [3.2.3-46] R. H. D. McRae, et al., "An Australian pyro-tornadogenesis event", Nat. Hazards, 65, pp. 1801-1811 (2013). DOI 10.1007/s11069-012-0443-7.
- [3.2.3-47] 東京管区気象台、「管内の風配図」. Available at http://www.jmanet.go.jp/tokyo/sub\_index/fuuhai/fu631.htm.
- [3.2.3-48] 日本原子力学会、「外部ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基 準:2014」、AESJ-SC-RK008:2014、平成26年12月22日発行.
- [3.2.3-49] 横井、「広葉樹はプロポーション-樹冠を考えた広葉樹林の管理を-」、岐阜県の林 業、岐阜県山林協会刊、526、p.8 (1997).
- [3.2.3-50] 山下、「林内可燃物の火災危険について」、日本火災学会、37、1、p.21 (1987).
- [3.2.3-51] F. A. Albini, "Spot Fire Distance From Burning Trees, A Predictive Model", USDA Forest Service, General Technical Report INT-56, July (1979).

[3.2.3-52] 稲垣他、「林野火災における飛火と飛火を考慮にいれた延焼シミュレーション」、 消防研究所報告、69、p.47 (1990).

事象	同時発生	因果関係	理由
地震動	同時発生	地震動→森	地震動による家屋等の倒壊により発生した火災が、森林
		林火災	に燃え移り森林火災に発展する可能性がある。
地盤変動	なし	なし	地盤変動により森林火災が生じることは考えにくい。
津波	同時発生	津波→森林	津波により発生した市街地等での火災が、森林に燃え移
		火災	り森林火災に発展する可能性がある。
潮位変化	同時発生	なし	台風や強い低気圧により高潮と気圧低下、強風が同時発
<u> 強風</u> (竜巻	同時発生	強風→森林	生する。強風は森林火災の強度を強める。
を含む)		火災リスク	
		増	
気圧変化	同時発生	なし	
豪雨	非同時発生	森林火災→	豪雨が発生している状況では森林火災が発生する可能
		土砂崩れリ	性は小さい。
		スク増	森林火災の発生後、土壤軟弱化が徐々に進行し、その後
			に生じた豪雨による土砂崩れのリスクが高まる可能性
雷	同時発生	落奮→森林	台風や強い低気圧により落雷と強風が同時発生する。強
		火災	風は森林火災の強度を強める。
温度変化	同時発生	高温気温→	気温の上昇により相対湿度が低下することで、森林火災
		森林火災リ	の強度が増加する。
		スク増	
降雹	非同時発生	なし	激しい降雹が発生している状況では森林火災が発生す
			る可能性は小さい。
火山噴出	同時発生	噴出物等→	火山からの高温の噴出物により森林火災に発展する可
		森林火災	能性があるが、離隔距離が十分なサイト近辺での発生は
			考えにくい。
豪雪	非同時発生	なし	豪雪が発生している状況では森林火災が発生する可能
融雪	非同時発生	なし	融雪が発生している状況では森林火災が発生する可能
4-4	- it > 1	- A- 1	
生物学的争	12 L	72 L	土に海井にねいて生しる生物子的事家と採林火災は関
家			
	なし	なし	主に海洋において生じる塩害と森林火災は関連しない。
隕石	なし	なし	彗星の運動により生じる隕石と森林火災は関連しない。
侵食(海岸、	なし	なし	潮汐や降水により生じる侵食と森林火災は関連しない。
水面下、カ			
ルスト)			
河川閉塞・	同時発生	少雨→河川	水位低下そのものは森林火災と関連しない。
水位低下		水位低下、森	少雨による水位低下を生じる状況では、実効湿度低下に
(干ばつ等)		林火災リス	より森林火災リスク増大の可能性がある。
		ク増	
磁気嵐	なし	なし	太陽活動により生じる磁気嵐と森林火災は関連しない。

表 3.2.3-1 森林火災と重畳する可能性のある外部事象

表 3. 2. 3-2 福井県火災調査(2004 年~2012 年(平成16年~平成24年))における「雷」 「不明」の森林火災事例 (全67 個より抽出)

改得	古町村夕	山山時刻	出火	结业時	焼損	出火原	出火	福井 天気樹	況 夜
年	(合併前)	田大時刻. 年 <b>月</b> 日	時刻: 時分	與入时 刻:時分	面積 (ha)	因.況⊐ 火源⊐ ード	示因. 発火 源	/ <u>*</u> (06:00– 18:00)	(18:00- 翌日 06:00)
2004	敦賀市	2004/7/16	16:27	18:08	0	9	不明	曇一時雨 後一時晴	雲
2004	小浜市	2004/8/3	12:30	14:39	3	9	不明	晴後一時 曇	雲
2005	あわら市	2005/9/1	13:00	14:53	21	9	不明	晴	晴
2006	坂井市	2006/6/19	16:30	16:52	1	9	不明	晴後時々 薄曇	薄曇
2006	上中町	2006/8/25	15:00	21:10	1	9	不明	晴	快晴
2007	高浜町	2007/5/15	4:39	14:45	8	8101	直接 雷	晴一時雨	晴
2009	越前町	2009/4/12	12:20	14:13	70	9	不明	晴	晴後一 時曇
2012	小浜市	2012/4/26	7:40	8:33	0	9	不明	雨時々 曇、大風を 伴う	曇時々 雨
2012	越前町	2012/8/2	10:43	11:09	1	9	不明	晴後一時 薄曇	晴時々 曇
2012	越前町	2012/8/5	13:10	14:00	1	9	不明	晴後時々 薄曇	曇一時 雨
2012	福井市	2012/8/11	不明	不明	8	9	不明	曇一時雨	晴一時 薄曇

表 3.2.3-3 火災前線の周囲全長に対する、射影した長さの比 (出火地点 2、出火時刻 0 時、相対湿度 2%)の例)

ケース17(発火地点2、湿度2%、風速2m/s、風向158度、4/1 00:00発火)

時刻	15.67h後	32.29h後	48.59h後	64.24h後	80.47h後
周長[km]	3.656	7.675	11.422	14.617	18.043
前線の長さ[km]	1.094	2.152	2.995	3.995	4.802
比	3.341	3.566	3.814	3.659	3.757
平均比	3.627				

ケース21(発火地点2、湿度2%、風速10m/s、風向158度、4/1 00:00発火)

時刻	10.05h後	19.87h後	29.71h後	40.02h後	49.88h後
周長[km]	2.639	6.076	8.393	10.898	13.208
前線の長さ[km]	0.728	1.585	2.128	2.801	3.508
比	3.626	3.832	3.943	3.890	3.765
平均比	3.812				

ケース197(発火地点2、湿度2%、風速15m/s、風向158度、4/1 00:00発火)

時刻	6.63h後	13.34h後	19.96h後	26.70h後	33.41h後
周長[km]	2.010	4.766	7.056	8.938	11.127
前線の長さ[km]	0.534	1.235	1.766	2.310	2.747
比	3.767	3.858	3.995	3.869	4.051
平均比	3.908				

		試験条件								試験結果						
供給粉体	供給粉体 供試フィルタ		試験風量	温液	昆度	供給	初期圧損	最終圧損	設定供給濃度	供給量	交換圧損	粉体	保持量	排出部フィル	捕集率	
			(m <sup>3</sup> /min)	ĉ	%RH	状態	(Pa)	(Pa)	(mg/m <sup>3</sup> )	(g)	到達時間	(g/1	unit)	タ捕集量(g)	(%)	
												プレ	中性能			
サブマイクロ模擬粒子			56	30.1	36.0	乾燥	169	294	70	102.3	0h26m7s	9	5.1	7.2	93.0%	
PM2.5模擬粒子	巾紙能フィルタ	ターミラセルS	56	20. 2	72.0	乾燥	175	294	70	461.2	1h57m43s	48	51.5	9.9	97.9%	
PM10模擬粒子	千江地 ノイアク		276703	272/0	56	27.9	50.4	乾燥	173	294	70	237.8	1h0m42s	23	33. 3	4.4
3種等重量事前混合			56	30.0	36.3	乾燥	166	294	70	136. 2	0h34m45s	13	34.0	2.2	98.4%	
サブマイクロ模擬粒子	プレフィルタ	デアマットG85	56	11.5	21.3	乾燥	68/162	108/294	70	155.6	0h39m50s	81.5	62.8	11.3	92.7%	
PM2.5模擬粒子	+	+	56	10.9	31.2	乾燥	58/162	91/294	70	819.7	3h28m4s	244.0	552.5	23. 2	97.2%	
PM10模擬粒子	中性能フィルタ	ミラセルS	56	10.9	32.5	乾燥	60/163	78/294	70	292. 8	1h15m42s	28. 9	260.6	3.3	98.9%	

表 3.2.3-4 フィルタ圧力損失試験条件及び試験結果

表 3.2.3-5 フィルタ破損限界試験条件及び試験結果

		試験条件			試験結果			課		
供試 フィルタ	供給粉体	試験風量 (m <sup>3</sup> /min)	設定供給 濃度 (mg/m <sup>3</sup> )	粉体 供給量 <sub>(g)</sub>	フィルタ 捕集模擬 粒子量 (g)	フィルタ 圧力損失 (Pa)	捕捉率 (%)	フィルタの状態		
	サブマイクロ模擬粒子	56			3674.4	3396.3	3100	92.4	座屈して亀裂・隙間発生	
中性能	PM2.5模擬粒子		700				6175.8	5965.8	3000	96.6
フィルタ ミラセルS	PM10模擬粒子			2200.8	-	3200	-	座屈して亀裂・隙間発生		
					2152.1	3200 2Hr後	97.8	隙間が拡大		





図 3.2.3-2 地震・津波・火山と森林火災との重畳形態

	✔[地震動	同時発生	⇒家屋倒壊⇒(a) 森林火災]
公募作外し	└_[津波	同時発生	⇒構造物火災⇒(a)森林火災 <sub>*H26<i>年度検討済</i>み</sub>
	<u>強風</u>	同時発生	⇒ (b) <i>森林火災の強度の増加*</i> ⇒ (c) 機器の 損傷・倒壊
便訂灯家	<u> </u>	同時発生	⇒ (b) 森林火災の強度の増加, (c) 機器倒壊
	重	同時発生	⇒ (a) 森林火災の発生

火災後の長期的影響 [降雨 非同時発生 森林火災の後 ⇒ (a) 土砂崩れリスク] 十分な離隔距離【火山噴出

高温噴出物 ⇒ (a) 森林火災の発生]



同時発生



図 3.2.3-4 1時間平均風速に対する最大瞬間風速及び 10 分間平均風速



図 3.2.3-5 外挿方法違いによる傾向の比較



図 3.2.3-6 最大瞬間風速と反応強度の年超過頻度(重点サンプリング、2×10<sup>5</sup>サンプル)



図 3.2.3-7 最大瞬間風速と火線強度の年超過頻度(重点サンプリング、2×10<sup>5</sup>サンプル)







図 3.2.3-9 雷注意報時の風速・相対湿度の出現確率







図 3.2.3-11 全期間と雷発生時における反応強度の超過確率の比較 (重点サンプリング、サンプル数 10<sup>5</sup>)



図 3.2.3-12 【全サンプルに対する雷サンプルの発生率を 1/67 とした場合】 全期間と雷発生時における反応強度の超過頻度の比較(重点サンプリング、サンプル数 10<sup>5</sup> )



図 3.2.3-13 全期間と雷発生時における火線強度の超過頻度の比較



図 3.2.3-14 【全サンプルに対する雷サンプルの発生率を 1/67 とした場合】 全期間と雷発生時における火線強度の超過頻度の比較



図 3.2.3-15 風速と相対湿度の組み合わせに対する火線強度の傾向



図 3.2.3-16 森林火災生成物によるハザード曲線の構築作業







図 3.2.3-18 アクティブ燃焼域奥行の出現頻度



図 3.2.3-20 アクティブ燃焼域を一箇所に集中させた場合の効果



図 3.2.3-21 上部及び下部フィルタにおける PM2.5、PM10 及び 2mm 以上の粒子の積算到達量



図 3.2.3-22 フラジリティの簡易評価スキーム(熱影響)

# 外部燃料タンク(軽油)の フラジリティ曲線



輻射発散	強度区分	標準ケース区分頻度	消火活動無し区分頻度
[kW	/m²]	[1/year]	[1/year]
0	200	0.0000E+00	0.0000E+00
200	250	6.2020E-06	2.5198E-03
250	300	3.5122E-03	2.9731E-01
300	350	9.8831E-04	5.6617E-02
350	360	3.5643E-05	1.8118E-03
360	370	3.1058E-05	1.6266E-03
370	380	2.2941E-05	8.2131E-04
380	390	8.9532E-06	3.1676E-04
390	400	3.2647E-06	1.5447E-04
400	410	3.9952E-07	2.3009E-05
410	420	5.1767E-09	2.7753E-06
420	以上	3.8266E-19	1.7692E-11
		•	

図 3.2.3-23 ハザード区分、及び区分毎の発生頻度



図 3.2.3-24 煤煙の影響に対するロジックツリー

煤煙濃度を導出するため、ALOFT-FTを活用



図 3.2.3-25 PM10 濃度の空間分布の風速依存性



図 3.2.3-26 微粒子 (PM10) の濃度分布の湿度依存性 (風速 2m/s)



図 3.2.3-27 PM10 濃度の空間分布の気温依存性



図 3.2.3-28 風速とプルーム挙動、PM10 濃度の関係



図 3.2.3-29 積算フィルタ目詰まり量の応答曲面


図 3.2.3-30 空気冷却器 1m<sup>2</sup>あたり、吸込み風速 1m/s あたりのグラム数



図 3.2.3-31 消火開始時刻の設定による非消火確率(ワイブル分布)



図 3.2.3-33 目詰まり量に対するフィルタのフラジリティ曲線

粉塵保持量 [kg/m<sup>2</sup>]

3.2.3-70





図 3.2.3-34 PM10 模擬粒子の測定された粒子径分布

図 3.2.3-35 耐圧試験時の中性能フィルタ状態写真



図 3.2.3-36 耐圧試験時のフィルタ状態写真(サブマイクロ模擬粒子、圧力損失 3,100Pa)

る材折り筋の変形



図 3.2.3-37 座屈部分の拡大写真(サブマイクロ模擬粒子、圧力損失 3,100Pa)



図 3.2.3-38 隙間部分の拡大写真(サブマイクロ模擬粒子、圧力損失 3,100Pa)



図 3.2.3-39 隙間部分の拡大写真(PM10 模擬粒子、圧力損失 200Pa)



図 3.2.3-40 隙間部分の拡大写真(PM10 模擬粒子、圧力損失 405Pa)

図 3.2.3-41 隙間部分の拡大写真(PM10 模擬粒子、圧力損失 1,050Pa)



図 3.2.3-42 隙間部分の拡大写真(PM10 模擬粒子、圧力損失 3,200Pa)



図 3.2.3-43 隙間部分の拡大写真(PM10 模擬粒子、圧力損失 3,200Pa、2 時間後)



図 3.2.3-44 森林火災のリスク評価手法の全体概念

### 3.3 事象シーケンス評価手法の開発

# 3.3.1 安全対策の整理及び事象シーケンス評価手法の開発

事象シーケンス評価手法を開発するため、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関 する重要機器を同定し、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去機能維持に係わる安全対策を 整理した。また、森林火災・重畳事象を起因とした炉心損傷に至り得るイベントツリーを 構築して、事象シーケンスを評価した。さらに、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去解析 を実施した。4年間のまとめとして手法を整備した。

# 3.3.1.1 はじめに

本研究で対象とした外部ハザードに対する事象シーケンス評価例は見当たらないことか ら、日本原子力学会発行の津波 PRA 標準[3.3.1.1-1]などを参考にして、起因事象の分析、 シーケンスのモデル化などを行い、イベントツリーを作成する。津波 PRA 標準では、① 「プラント構成・特性及びサイト状況の調査」、②「事故シナリオの同定」、③「ハザー ド評価」、④「建物・機器フラジリティ評価」、⑤「事故シーケンス評価」(本研究では、 事象シーケンス評価と呼ぶ)が大まかな流れとなっている。本研究では、①「プラント構 成・特性及びモデルサイト状況の調査」を平成24年度にプラント情報として整理した。 また、③「ハザード評価」は実施され、異常降雨・火山噴火については3.2節においてハ ザード曲線が構築された。定量化されたハザード曲線を用いて事象シーケンスを評価する ことにより、PRA が実施できることから、本研究では炉心損傷頻度の定量化を試みること とした。

そこで、本節では、②「事故シナリオの同定」、④「建物・機器フラジリティ評価」及 び⑤「事故シーケンス評価」を行う。②「事故シナリオの同定」では、外部ハザードの重 要パラメータに対して、崩壊熱除去機能に関する重要機器を同定し、安全対策を提案する。 ④「建物・機器フラジリティ評価」は、従来の地震動に対するフラジリティ評価と同様に、 外力に対する機器の破損確率(フラジリティ曲線)を算出する。⑤「事故シーケンス評 価」では、イベントツリーを作成して、炉心損傷に至る可能性のある事象シーケンスを構 築する。事象シーケンス評価では、④「建物・機器フラジリティ評価」で得た破損確率を イベントツリーのへディングに代入して定量化を行う。

4年間の業務計画は次のとおりである。平成24年度に積雪を対象として安全対策を整 理するとともに、事象シーケンスを評価する。平成25年度に竜巻・強風を対象として安 全対策を整理するとともに、事象シーケンスを評価する。平成26年度に降雨・火山噴火 を対象として安全対策を整理するとともに、事象シーケンスを評価する。平成27年度に 森林火災・重畳事象を対象として安全対策を整理するとともに、事象シーケンスを評価す る。また、4年間のまとめとして手法を整備する。

ここでは、森林火災・重畳事象ハザードに対して、安全対策を整理するとともに、事象 シーケンス評価について記述する。

# 参考文献

[3.3.1.1-1] 日本原子力学会,原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に 関する実施基準:2011,AESJ-SC-RK004:2011 (2012).

# 3.3.1.2 安全対策の整理(H27)

ここでは、森林火災・重畳事象時のナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関する重 要機器を同定するとともに、安全対策を整理する。重畳事象には、積雪と低温の組み合わ せ、強風と降雨の組み合わせを考える。

### (1) 重要機器の同定

# a. 森林火災

煙や火災灰が敷地内に到達した場合は、補助冷却設備の冷却空気取入部フィルタが短時 間で目詰まりするのを防止するため、フィルタの差圧を監視するとともに補助冷却設備を 強制循環除熱から自然循環除熱運転に移行させる。これにより冷却器風量を大幅に減少さ せることができ、フィルタの目詰まり寿命を延長することができる。また、原子炉の崩壊 熱除去レベルに応じて、運転する補助冷却設備のループ数を減らし、一部の補助冷却設備 の運転を停止するループ切替運転を行う。フィルタの目詰まりにより除熱能力の低下した 補助冷却設備は、出口ダンパを閉鎖して、吸気ラインのフィルタの交換・清掃を行うとと もに、停止している補助冷却設備を立ち上げて除熱運転に移行させる。または、メンテナ ンス冷却系を起動して、吸気ラインのフィルタの交換・清掃を行う補助冷却設備に代わり、 崩壊熱除去運転を行う。

メンテナンス冷却系や制御用圧空設備の空気取入部の閉塞に対しても、フィルタ交換・ 清掃が有効と考えられる。

森林火災で発生する煙や火災灰により換気空調系の空気吸込フィルタが目詰まりすると、 2次主循環ポンプや2次メンテナンス冷却系電磁ポンプ室の雰囲気温度が上昇し、機能喪 失に至る恐れがある。対策としては、閉塞防止のためにフィルタ交換・清掃等について考 慮しておくことや、換気空調系停止時雰囲気温度評価を実施し、温度上昇率をあらかじめ 見積もっておくことが有効と考える。

非常用ディーゼル発電機の空気取入フィルタまたはディーゼル発電機入口のフィルタが 煙や火災灰により目詰まりすると、燃焼用空気の吸気不全に至り、非常用ディーゼル発電 機が機能喪失する恐れがある。外部電源の喪失と重畳するため、非常用直流電源の充電機 能の喪失に発展するので、フィルタの差圧を監視しフィルタ交換・清掃が必要となる。ま た、非常用ディーゼル発電機が機能喪失した場合の対策として、バックアップ用電源確保 (電源車等)の検討が必要となる。

熱風が施設付近に到達し補助冷却設備冷却器の吸気温度が上昇した場合(注:冷却器の 吸気温度が60℃になると、空気冷却器出ロダンパ及び送風機入ロベーンを全閉にするイン ターロックが作動し、補助冷却設備の起動信号も阻止されるため、この温度以下で補助冷 却設備の停止及び再起動を行う必要がある)には補助冷却設備を停止して、森林火災の鎮 火を待って補助冷却設備を再起動し冷却を行う。また、森林火災シミュレーションを実施 して、敷地近傍での森林火災になるかどうかの予測を行い、防煙マスク、安全ゴーグル、 防火服等の対策準備を行う。

煙や火災灰が敷地内に到達した場合は、補助冷却設備の冷却空気取入部フィルタが短時 間で目詰まりするのを防止するため、フィルタの差圧を監視するとともに補助冷却設備を

強制循環除熱から自然循環除熱運転に移行させる。これにより冷却器風量を大幅に減少さ せることができ、フィルタの目詰まり寿命を延長することができる。また、原子炉の崩壊 熱除去レベルに応じて、運転する補助冷却設備のループ数を減らし、一部の補助冷却設備 の運転を停止するループ切替運転を行う。フィルタの目詰まりにより除熱能力の低下した 補助冷却設備は、出口ダンパを閉鎖して、吸気ラインのフィルタの交換・清掃を行うとと もに、停止している補助冷却設備を立ち上げて除熱運転に移行させる。

以上より、森林火災によって崩壊熱除去機能喪失に至る重要機器は、崩壊熱除去に必要 な補助冷却設備(強制循環及び自然循環)及びメンテナンス冷却系(強制循環)に加えて、 強制循環に必要な外部電源系及び非常用電源系であり、表 3.3.1.2-1 に整理する。森林火 災による崩壊熱除去機能への影響を以下に示す。

- ・森林火災の輻射熱による崩壊熱除去系の最終ヒートシンク部のフィルタ周辺空気 温度上昇
- ・建物内温度上昇による崩壊熱除去系の空気冷却器本体の破損
- ・森林火災の火災灰による崩壊熱除去系の最終ヒートシンク部のフィルタ閉塞
- ・森林火災及び燃料タンク火災の輻射熱による換気空調系空気取入口周辺の空気温度上昇
- ・ディーゼル発電機給排気口周辺の空気温度上昇による全電源喪失
- ・森林火災の火災灰による安全系換気空調系空気取入口のフィルタ閉塞

# b. 重畳事象(積雪と低温)

積雪により補助冷却設備の冷却空気取入部/排出部が閉塞する(凍結する)と、補助冷 却設備の除熱機能が喪失する恐れがあるため、最低限の最終ヒートシンクを目的とした対 策として雪かきの実施や、空気取入フィルタへの電熱線ヒータの導入、空気排出部の閉塞 防止構造の検討が必要と考える。なお、補助冷却設備の空気取入部に関しては、ラック室 扉の開放も空気流路確保として有効と考えられる(ラック室扉の開放以外は、メンテナン ス冷却系設備及び制御用圧空設備についても同様)。

積雪により換気空調系の空気取入部/排出部が閉塞すると、2次主循環ポンプや2次メ ンテナンス冷却系電磁ポンプ室の雰囲気温度が上昇し、機能喪失に至る恐れがある。対策 としては、空気取入部/排出部の閉塞防止のため、雪かき、風除室空気取入口の高所化等 について考慮しておくことや、換気空調系停止時雰囲気温度評価を実施し、温度上昇率の 程度を確認しておくことが有効と考える。

非常用ディーゼル発電機への空気取入ガラリが、吹雪による雪の横殴りの吹き付けによ り閉塞すると、燃焼用空気の吸気不全に至り、非常用ディーゼル発電機が機能喪失する恐 れがある。さらに外部電源喪失(積雪による送電線、開閉所、変圧器等の機能喪失による) と重畳すると非常用直流電源の充電機能の喪失に発展する可能性があるため、電熱線ヒー タの導入やバックアップ用電源確保(電源車等)の検討が必要となる。

また、降雪時に崩壊熱除去系の空気取入口フィルタに雪が付着し低温状態が継続するこ とで、雪が凍結しフィルタが閉塞し、低温の外気が建物内に入ってくることで空気冷却器 の伝熱部が過冷却され、伝熱管内のナトリウムの凍結が懸念される。このため、2次系ナ

トリウムの熱交換を行う空気冷却器を含む補助冷却設備においては、降雪と低温の重畳事 象における伝熱管内ナトリウム凍結による崩壊熱除去機能喪失が考えられ、ヒータでの融 雪や外気流量調整等のアクシデントマネジメント対策において留意する必要がある。

原子炉補助建物等が倒壊した場合、クレーン等の重量物を巻き込み、甚大な被害に拡大 する恐れがあるため、建物の倒壊は確実に回避する必要がある。したがって、設定した積 雪荷重への耐性がないと評価された場合は、建物補強により耐性強化を図る必要がある。

積雪によって崩壊熱除去機能喪失に至る重要機器は、崩壊熱除去に必要な補助冷却設備 (強制循環及び自然循環)及びメンテナンス冷却系設備(強制循環)に加えて、強制循環 に必要な外部電源系及び非常用電源系である。電源系を継続的に利用するためには換気空 調系の機能維持が必要である。また、以下のような機能喪失が考えられ、表 3.3.1-2 で積 雪と低温の重畳事象による崩壊熱除去機能への影響を整理した。

- ・最終ヒートシンク部(補助冷却設備とメンテナンス冷却系)の冷却回路閉塞
- ・換気空調系空気取入口閉塞あるいは制御機能喪失
- ・外部電源喪失と非常用ディーゼル発電機の空気取入口閉塞による全電源喪失
- ・外部電源喪失及び補機冷却海水ポンプ破損による全電源喪失

# c. 重畳事象(強風と降雨)

強風による飛来物衝突を検討する場合には、破損により影響の大きいエリアの開口部 (ドア、給排気口)に着目する必要がある。補助冷却設備、メンテナンス冷却系は補助建 物の中に位置しているが、空気冷却は大気で行うため各々の空気取入口と排気口は外気と 接する位置に接続されている。安全系のサポート(補機冷却系、ディーゼル発電機、空調 系)は建物の中にあり、設計基準風速には耐える設計となっていると考えられるが、外気 を取り入れて機能する設備(空気冷却器、制御用空気圧縮機、ディーゼル発電機)に影響 を及ぼす強風による飛来物の衝突によって、空気取入口から上記設備等に影響が及ぶ可能 性がある。また、補助冷却設備、メンテナンス冷却系の排気ダクト部は強風により変形閉 塞する可能性がある。

異常降雨により原子炉補助建物周りが冠水した場合、多量の雨水が建物内に流入し、流 入量によっては原子炉補助建物が浸水する可能性がある。その場合、計装品や電気盤等の 電気・制御設備が機能喪失し、崩壊熱除去系の制御機能が喪失する恐れがある。さらに、 ディーゼル発電機建物内に雨水が流入すると、非常用ディーゼル発電機が機能喪失する恐 れがある。そのため、原子炉補助建物及びディーゼル発電機建物の「浸水可能性の評価」 を検討しておくことが有効である。

また、強風と降雨の重畳を考えれば、補助冷却設備の空気排出部が破損すると、破損部 分から流入した雨水が空気冷却器の伝熱管と接触することで、2次系ナトリウムが凍結す る可能性がある。この場合、補助冷却設備による除熱機能が阻害される恐れがあるので、 まず空気排出部の耐風性評価を行い、その結果に応じて空気排出部の耐風性強化や雨水流 入防止構造の導入を検討する必要がある。また、ナトリウム凍結に至る雨水流入量評価を 実施し、過酷な状態に陥る場合の雨水流入量を定量的に把握しておくことが、事象の被害 影響を判断する上で有効であると考えられる(メンテナンス冷却系についても同様)。

電気・制御設備が機能喪失した場合や、全交流電源喪失時にバックアップ用電源による 電源供給に失敗した場合には、補助冷却設備空気冷却器のベーン・ダンパ手動制御による 自然循環除熱がアクシデントマネジメント策として有効と考えられる。しかし、全開状態 が継続するとナトリウムが凍結する可能性があるため、無電源下で使用できる温度計(膨 張式温度計等)の導入等によって、現場にて制御操作が可能なアクシデントマネジメント 手段を併せて考慮しておく必要がある。

崩壊熱除去機能喪失に至る重要機器は、崩壊熱除去に必要な補助冷却設備(強制循環及 び自然循環)及びメンテナンス冷却系(強制循環)に加えて、強制循環に必要な外部電源 系及び非常用電源系である。強風と降雨の重畳事象発生時の重要機器を表 3.3.1.2-3 に整 理する。なお、強制循環除熱時には、以下の機器はその機器が設置される部屋の雰囲気空 気により熱負荷の除去を行っていることから、換気空調系が外部ハザードにより機能を喪 失した後、部屋の雰囲気温度が上昇すると、その影響を受けて2次主循環ポンプモータ及 びメンテナンス冷却系2次系循環ポンプモータの機能を喪失することが懸念される。その ため、これらの設備を設置する部屋の換気空調系も表内に記している。

以上より、重畳事象(強風と降雨)による崩壊熱除去機能への影響を以下に示す。

- ・飛来物衝突による崩壊熱除去系の伝熱管部破損
- ・飛来物衝突による補助冷却設備排気部破損に伴う雨水浸入による伝熱管破損
- ・飛来物衝突荷重による外部電源喪失及びディーゼル燃料タンク破損等による全電 源喪失
- ・換気空調系空気取入口の閉塞あるいは破損による制御機能喪失
- ・外部電源喪失及びディーゼル発電機破損による全電源喪失
- ・外部電源喪失及び補機冷却海水ポンプ破損による全電源喪失

#### (2) 安全対策の整理

#### a. 森林火災

森林火災による対象設備への影響は、以下のものとなると考えられている。

- ・森林火災及び燃料タンク火災の輻射熱による機器の空気取入口温度上昇
- ・建物内雰囲気温度上昇による機器の破損
- ・森林火災の火災灰による機器の空気取入口フィルタ閉塞

図 3.3.1.2-1 と図 3.3.1.2-2 は森林火災により炉心損傷に至る事象シーケンスと安全対 策候補を示し、それぞれ熱・炎と飛散物・煙・火災灰の影響を整理する。森林火災発生時 の火災源からの輻射熱によって建物全体の温度が上昇することで空気冷却器が取り込む外 気温度が上昇すると、除熱効果を期待できなくなる恐れがある。そのため、建物に対して 森林火災あるいは燃料タンク火災による熱・炎の影響が及ばないような安全対策が有効と 考えられる。また、迅速かつ十分な消火活動を行うための水源の確保には留意しておく必 要がある。森林火災発生から鎮火までに生じる火災灰によって崩壊熱除去系の空気取入口 フィルタが閉塞すると、除熱できなくなる恐れがある。そのため、主要機器の空気取入口 に対して火災灰の影響が及ばないような安全対策が有効と考えられる。

森林火災に対する安全対策は次のとおり整理される。

- ・水源の確保
- ・防火帯幅の確保
- ・消火活動のアクシデントマネジメント策
- ・燃料タンク保護カバーあるいは断熱材の設置
- ・非常用ディーゼル発電機、換気空調系給排気部のフィルタ強化
- ・補助冷却設備、メンテナンス冷却系のフィルタ強化
- ・フィルタの追加設置及び交換等のアクシデントマネジメント策

#### b. 重畳事象(積雪と低温)

積雪時には除雪(雪かき)が最も有効であると考えられる。また、空気取入口閉塞時に はラック室扉解放を挙げているが、扉外側の除雪に成功する必要があるので、重要なアク シデントマネジメントは除雪と言える。一方、運転員に頼らないハード対策としては、電 熱線ヒータによる融雪が考えられるが、バックアップ電源を確保する必要がある。自然循 環除熱時にはベーン・ダンパの手動操作が期待できる。適切な風量とするためには、無電 源下での温度計測が必要となる。空気冷却器排気部には高温の空気が排出されるため融雪 される見込みではあるが、何らかの閉塞防止構造を考えてもよい。

積雪時に低温状態が継続すると、空気取入口フィルタや建物屋上扉が凍結する可能性が ある。凍結防止対策としては電熱線ヒータによる融雪が考えられる。また、フィルタ閉塞 した場合にはフィルタ交換も考えられる。空気冷却器伝熱管内ナトリウムの凍結の可能性 も考えられるが、自然循環除熱時にはベーン・ダンパの手動操作による風量調整が期待で きる。図 3.3.1.2-3 に積雪と低温の重畳事象により炉心損傷に至る事象シーケンスと安全 対策候補を示す。

重畳事象(積雪と低温)に対する安全対策は以下のとおり整理される。

- 除雪(雪かき)
- ・電熱線ヒータによる融雪
- ・空気冷却器ベーン・ダンパの手動操作
- ・非常用ディーゼル発電機、換気空調系給排気部のフィルタ強化
- ・補助冷却設備、メンテナンス冷却系のフィルタ強化
- ・フィルタの追加設置及び交換等のアクシデントマネジメント策

#### c. 重畳事象(強風と降雨)

図 3.3.1.2-4 は異常降雨により炉心損傷に至る事象シーケンスと安全対策候補を示す。 強風と降雨の重畳事象の場合には、想定される荷重によって補助冷却設備の空気排出部 あるいはメンテナンス冷却系排気部が破損すると、破損部分から流入した雨水が空気冷却 器の伝熱管と接触することで、2次系ナトリウムが凍結する可能性がある。また、上記重 要機器の機能喪失に伴い電気・制御設備が機能喪失した場合や、全交流電源喪失時にバッ クアップ用電源による電源供給に失敗した場合には、補助冷却設備空気冷却器のベーン・ ダンパ手動制御がアクシデントマネジメント策として有効と考えられる。

強風と降雨の重畳事象に対する安全対策は次のとおり整理される。

- (a) 強制循環除熱(補助冷却設備、メンテナンス冷却系で共通) 強風による飛来物衝突荷重に対して
  - ・飛来物となりえる対象物の固縛などによる飛散化防止策
  - ・補助冷却設備及びメンテナンス冷却系のヒートシンク部位の耐飛来物衝撃対策
  - ・非常用ディーゼル発電機及びディーゼル燃料タンクの耐飛来物衝撃対策
  - ・安全系の空調系給排気部の耐飛来物衝撃対策

異常降雨による浸水に対して

- ・非常用ディーゼル発電機建物ドアの浸水防護強化
- ・主要機器周辺の排水溝目詰まり防護策
- ・施設の排水能力強化

が考えられる。

- (b) 自然循環除熱(補助冷却設備)
  - ・飛来物となりえる対象物の固縛などによる飛散化防止策
  - ・補助冷却設備ヒートシンク部位の耐飛来物衝撃対策
  - ・建物屋上の排水能力強化策

灭姑 凯借夕	松坦夕	森林火災による影響				
示心、以哺石	1成46-71	熱・炎	飛散物	煙	火災灰	
補助冷却設備	空気冷却器 (空気取入/排出部)	0	0	0	0	
原子炉補機冷却海	海水ポンプ	—	—	_	—	
水系	海水ストレーナ	—	—	—	—	
制御用圧縮空気設 備	制御用空気圧縮機 (空気取入部)	0	0	0	0	
ディーゼル発電機 設備	ディーゼル機関 (空気取入部)	0	0	0	0	
蒸気発生器室 *3換気 装置	_	0	0	0	0	

# 表 3.3.1.2-1 森林火災発生時の重要機器 (a) 補助冷却設備による強制循環除熱

(b) メンテナンス冷却系による強制循環除熱

灭姑 扒借夕	松坦々	森林火災による影響				
示肌、政佣石	版台口	熱・炎	飛散物	煙	火災灰	
2 次メンテナンス冷 却系	空気冷却器 (空気取入/排出部)	0	0	0	0	
原子炉補機冷却海水	海水ポンプ	—	—	—	—	
系	海水ストレーナ	—	—	—	—	
制御用圧縮空気設備	制御用空気圧縮機 (空気取入部)	0	0	0	0	
ディーゼル発電機設 備	ディーゼル機関 (空気取入部)	0	0	0	0	
メンテナンス冷却系 室換気装置	_	0	0	0	0	

# (c) 補助冷却設備による自然循環除熱

灭姑 設備友	松坦々	森林火災による影響			
<b>示</b> 视、	成在个	熱・炎	飛散物	煙	火災灰
補助冷却設備 空気冷却器 (空気取入/排出部)		0	0	0	0

\*1 記号の説明 ○:影響あり -:影響なし

\*2 強制循環除熱を行う際、2次主冷却系の2次主循環ポンプモータ部での発熱は、当該機器が設置される部屋 の雰囲気により除熱されている。メンテナンス冷却系の2次系循環ポンプモータについても同様に、運転中 のコイルからの発熱は、当該機器が設置される部屋の雰囲気により除熱されている。そのため、それぞれの ポンプが設置される部屋の換気空調系が外部ハザードにより機能を喪失した後、部屋の雰囲気温度が上昇す ると、その影響を受けて機能を喪失することが懸念されることから、換気装置を記載している。

\*3 2次主循環ポンプが設置される部屋の換気空調系は、蒸気発生器室換気装置の系統に含まれている。

系統、設備名	機器名	積 雪 による 影響	低温による 影響	積雪と低温の重畳 による影響
補助冷却設備	空気冷却器 (空気取入/排出部)	0	0	0
原子炉補機冷却	海水ポンプ	—	—	—
海水系	海水ストレーナ	—	—	—
制御用圧縮空気 設備	制御用空気圧縮機 (空気取入部)	0	_	0
ディーゼル発電 機設備	ディーゼル機関 (空気取入部)	0	_	0
蒸気発生器室 * <sup>3</sup> 換気装置	_	0	_	0

表 3.3.1.2-2 重畳事象(積雪と低温)発生時の重要機器 (a)補助冷却設備による強制循環除熱

(b) メンテナンス冷却系による強制循環除熱

系統、設備名	機器名	積雪による 影響	低温による 影響	積雪と低温の重畳 による影響
2 次メンテナン ス冷却系	空気冷却器 (空気取入/排出部)	0	0	0
原子炉補機冷却	海水ポンプ	—	—	—
海水系	海水ストレーナ	—	—	—
制御用圧縮空気 設備	制御用空気圧縮機 (空気取入部)	0	—	0
ディーゼル発電 機設備	ディーゼル機関 (空気取入部)	0	_	0
メンテナンス冷 却系室換気装置	_	0	—	0

(c) 補助冷却設備による自然循環除熱

系統、設備名	機器名	積雪による 影響	低温による 影響	積雪と低温の重畳 による影響			
補助冷却設備	空気冷却器 (空気取入/排出部)	0	0	0			

\*1 記号の説明 ○:影響あり △:影響の可能性あり -:影響なし

\*2 強制循環除熱を行う際、2次主冷却系の2次主循環ポンプモータ部での発熱は、当該機器が設置される部屋 の雰囲気により除熱されている。メンテナンス冷却系の2次系循環ポンプモータについても同様に、運転中 のコイルからの発熱は、当該機器が設置される部屋の雰囲気により除熱されている。そのため、それぞれの ポンプが設置される部屋の換気空調系が外部ハザードにより機能を喪失した後、部屋の雰囲気温度が上昇す ると、その影響を受けて機能を喪失することが懸念されることから、換気装置を記載している。

\*3 2次主循環ポンプが設置される部屋の換気空調系は、蒸気発生器室換気装置の系統に含まれている。

<b>玄統</b> 設備名	楼哭夕	強風によ異常降雨にる影響		こよる影響	<ul><li>強風と降雨の</li><li>重畳による影</li></ul>
	1/2/10/14	<ul><li>飛来物衝</li><li>突</li></ul>	地上浸水	屋上浸水	響
補助冷却設備	空気冷却器(空気 取入/排出部)	0	_	0	0
原子炉補機冷	海水ポンプ	$\bigtriangleup$	0	—	-
却海水系	海水ストレーナ	$\bigtriangleup$	0	—	-
制御用圧縮空 気設備	制御用空気圧縮機 (空気取入部)	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	_	-
ディーゼル発 電機設備	ディーゼル機関 (空気取入部)	0	$\bigtriangleup$	—	-
蒸気発生器室 *3 換気装置	—	_	_	_	-

表 3.3.1.2-3 重畳事象(強風と降雨)発生時の重要機器 (a) 補助冷却設備に上ろ強制循環除熱

(b) メンテナンス冷却系による強制循環除熱

系統一設備名	楼兕夕	強風によ      異常降雨に        る影響		こよる影響	強風と降雨の 重畳による影
	1/2/10/14	<ul><li>飛来物衝</li><li>突</li></ul>	地上浸水	屋上浸水	響
2次メンテナン	空気冷却器(空気	$\bigcirc$	_	$\bigcirc$	$\cap$
ス冷却系	取入/排出部)	0		0	$\bigcirc$
原子炉補機冷	海水ポンプ	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$	_	_
却海水系	海水ストレーナ	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$	_	_
制御用圧縮空 気設備	制御用空気圧縮機 (空気取入部)	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	—	_
ディーゼル発 電機設備	ディーゼル機関 (空気取入部)	0	Δ	_	_
メンテナンス 冷却系室換気 装置	_	_	_	_	_

(c) 補助冷却設備による自然循環除熱

系統一設備名	機哭名	強風によ る影響	異常降雨による影響		<ul><li>強風と降雨の</li><li>重畳による影</li></ul>
示机、政佣石	1)及前的11	<ul><li>飛来物衝</li><li>突</li></ul>	地上浸水	屋上浸水	響
補助冷却設備	空気冷却器(空気 取入/排出部)	0	—	0	0

\*1 記号の説明 ○:影響あり △:影響の可能性あり -:影響なし

\*2 強制循環除熱を行う際、2次主冷却系の2次主循環ポンプモータ部での発熱は、当該機器が設置される部屋 の雰囲気により除熱されている。メンテナンス冷却系の2次系循環ポンプモータについても同様に、運転中 のコイルからの発熱は、当該機器が設置される部屋の雰囲気により除熱されている。そのため、それぞれの ポンプが設置される部屋の換気空調系が外部ハザードにより機能を喪失した後、部屋の雰囲気温度が上昇す ると、その影響を受けて機能を喪失することが懸念されることから、換気装置を記載している。

\*3 2次主循環ポンプが設置される部屋の換気空調系は、蒸気発生器室換気装置の系統に含まれている。



※DG:ディーゼル発電機

AM:アクシデントマネジメント

図 3.3.1.2-1 森林火災(熱・炎)により炉心損傷に至りうる事象シーケンスと安全対策候補



※DG:ディーゼル発電機

図 3.3.1.2-2 森林火災(飛散物・煙・火災灰)により炉心損傷に至りうる事象シーケンスと安全対策候補





# 3.3.1.3 森林火災ハザードに対する事象シーケンス評価手法(H27)

# (1) 熱影響の事象シーケンス評価

崩壊熱除去機能に関わるシステム構成を、強制循環除熱時と自然循環除熱時について、 それぞれ図 3.3.1.3-1、図 3.3.1.3-2 に示す。熱影響に対するイベントツリーを図 3.3.1.3-3 に示す。森林火災が発電所に到達するまでに火災前線は高圧送電線網を通過す ることから、外部電源喪失を仮定した。なお、日本においては森林火災による高圧送電線 の破損事象は報告されていないが、諸外国においては報告がある。

発電所周辺での火災継続時間の評価を行った。これまでに FARSITE を用いて評価した森 林火災進展シミュレーションにより、サイト境界での ROS (m/min) が導出されている。こ れまでに解析された全240 ケースでは風速や相対湿度を変化させており、各ケースで40 地 点の ROS が求められている。各ケースの 40 点の ROS に対して調和平均を求め、ケース毎 の代表的な ROS 値を導出した。結果をヒストグラムとして図 3.3.1.3-4 に示す。0.3~ 0.4m/min の頻度が高く、平均値及び標準偏差は各々0.53 m/min 及び 0.27m/min であった。 輻射発散強度による外部燃料タンクの昇温計算では、森林火災による火災柱がタンクから 見て敷地境界前面を横手方向に並んだ状況で評価されており、横手方向の延焼による輻射 は昇温計算で取り込まれている。よって延焼時間の設定は、火災が奥手方向から敷地境界 へと進んでくる時間に対応したものとなる。ここでタンクが受ける輻射強度は、奥手方向 のタンクと火災前線の距離の二乗に反比例することを用い、タンクと森林境界との離隔距 離を DL、その位置での輻射強度を A と表せば、奥手方向での積分輻射量は、

$$\int_{DL}^{\infty} \left( A \times \frac{DL^2}{r^2} \right) dr = A \times X \tag{3.3.1.3-1}$$

と表せる。ここで X は、実効奥行き長さ(奥行き方向の積分輻射量と等価な熱量を与える、 地点 DL での強度 A に対する奥行き長さ)である。簡単な計算により X=DL が求まる。よっ て、森林とタンクの離隔距離 DL=100m の場合、地点 DL・輻射強度 A で、奥行き長さ X=DL=100m だけ進む時間、輻射熱を受けることと等価となる。離隔距離が 100m として、代 表的な ROS 値を用いて、奥行き長さ 100m 分を森林火災が進展する時間を求めた確率分布 を図 3.3.1.3-5 に示す。平均値及び標準偏差は各々3.9 時間及び 1.7 時間であった。また 0~4 時間未満、4~6 時間未満、6 時間以上の割合は、図より、延焼継続時間の分岐確率: 3 時間/5 時間/7 時間=0.5/0.35/0.15 とすればよい。

非常用ディーゼル発電機用の外部燃料タンクの健全性に関しては、森林火災の継続時間 に応じてタンク破損の確率がフラジリティ曲線から求まり、それを確率分岐の値として用 いる。さらにタンク破損後に火災が生じる確率を 0.01 と仮定した。原因としては、燃え さし等による飛び火が考えられる。

非常用電源の確率に関しては、外部電源車の交通アクセス障害による失敗確率 0.135 を 与えた。非常用ディーゼル発電機起動失敗には 5×10<sup>-3</sup>/d、タンク火災が生じた場合に周 囲空気の温度上昇が確率 0.5 で生じるとし、これに伴い生じる非常用ディーゼル発電機用 の換気空調系の冷却機能低下を本研究では保守的に機能喪失とみなした。

強制循環により原子炉を冷却するメンテナンス冷却系については、電源が確保された条

#### 3.3.1.3-1

件で、起動失敗確率を 5×10<sup>-3</sup>/d と仮定した。崩壊熱除去系(補助冷却設備)については、 タンク火災が生じた場合に空気冷却器の空気取入口の周囲空気の温度上昇が確率 0.5 で生 じるとし、これに伴って生じる空気冷却器の除熱の低下を本研究では保守的に除熱機能喪 失とみなした。補助冷却設備が、電源確保のうえ強制循環モードにある時に空気流量制御 用ダンパの起動に失敗する確率を 5×10<sup>-3</sup>/d とし、電源確保に失敗し自然循環モードにあ る時に空気流量制御のためのダンパ開閉操作に運転員が失敗する確率を 6.51×10<sup>-3</sup>/d とし た。

上記の分岐確率を、反応強度が最も高い強度区分に対して与えて定量化したものが図 3.3.1.3-3である。条件付炉心損傷確率は1.9×10<sup>-4</sup>となった。このとき、除熱機能喪失に 至る主要なシナリオは4つに分類できた。

- 1. 外部燃料タンクの破損・火災時の周囲空気昇温による空気冷却器の機能喪失が、メ ンテナンス冷却系の起動失敗と重畳(図3.3.1.3-3中の紫色のパス)
- 2. 外部燃料タンクの破損・火災時の周囲空気昇温により、換気空調系(電源維持)と 空気冷却器が、共に機能喪失(図 3.3.1.3-3 中の赤色のパス)
- 3. 外部燃料タンクの破損・火災時の周囲空気昇温による空気冷却器の機能喪失が、ディーゼル発電機起動(電源確保)失敗と重畳(図3.3.1.3-3中の紺色のパス)
- 4. 電源が確保されない状況で、ダンパ制御に失敗(図3.3.1.3-3中の水色のパス)

このうち、2のパスが支配的である。また1、2、3のパスはいずれも外部燃料タンクの 破損、さらにタンク火災による影響が生じた場合である。

上記の解析を、輻射強度区分毎に行うことで、条件付炉心損傷確率を導出し、区分毎の ハザード発生頻度を乗じることで、炉心損傷確率を導出した。結果を図 3.3.1.3-6 に示す。 炉心損傷頻度は 3.8×10<sup>-7</sup>/year となった。なおこの値は外部電源が喪失した条件での値と なる。またサイト外での消火活動の効果が無いとした場合は 2.8×10<sup>-5</sup>/year となる。

# (2) アクシデントマネジメントの考察

次に、重要度の分析を行い、有効なアクシデントマネジメントを提案する。FV 重要度は、 機器やシステムの故障確率を 0 とおいた時に、炉心損傷頻度の低下しやすさを判断する指 標であり、この指標の値が大きいシステムや機器は改善対策の効果が大きい。また RAW 重 要度は、機器やシステムの故障確率を 1 とおいた時に、炉心損傷頻度の増加しやすさを判 断する指標であり、この指標の値が大きいシステムや機器は不具合が発生した場合の影響 が大きい。

3.2.3.7 節(3)での考察によれば、海水を活用し森林火災が発電所に到達する前の時点 で延焼を防止する対策が挙げられている。一方、森林火災が発電所に隣接した場合、森林 火災の影響を受けうる構造物である燃料タンクに集中して防護活動を行うことが考えられ る。これら対策毎の条件は、下記のように整理できる。

- ✓ 森林火災の延焼を防止する対策
  - 位置・時間:森林火災が発電所からまだ離れており、施設への影響が小さく、
    かつ到達までの時間的余裕がある場合
  - ▶ 水源と手段:沢水貯めや海を水源とした、消防車による森林への散水

#### 3.3.1.3-2

- ✓ 森林火災の施設への影響を防止する対策
  - ▶ 位置・時間:森林火災が発電所に隣接し、施設への影響が懸念される状況
  - ▶ 水源と手段:沢水貯めや海を水源とした、消防車による構造物への放水
- / 施設の火災の影響を緩和する対策
  - ▶ 位置・時間:森林火災が発電所の建屋などに延焼した場合
  - ▶ 水源と手段:沢水貯めや海を水源とした、延焼構造物への消防車による放水

これらのうち、自衛消防隊による施設への影響防止対策を行うアクシデントマネジメントが重要と考え、定量的な評価を行った。FV 重要度及び RAW 重要度の評価結果を表3.3.1.3-1 に示す。FV 重要度から、燃料タンク自体の破損やタンク火災を防止することは、改善効果が大きいことが分かる。併せて、タンク火災による空気温度上昇がもたらす空気冷却器の機能低下を防止する効果も大きい。これは、自衛消防隊の放水による燃料タンクの破損とタンク火災防止活動、あるいは、空気冷却器への熱風流入の防止活動(空気取入口付近での散水等)が有効であることを示唆する。また外部電源車のアクセス性向上は、改善効果が大きい。また、森林火災が要因で燃料タンク火災が万一発生した場合の悪影響が大きいことがRAW 重要度から分かる。これは、自衛消防隊の放水による燃料タンクの破損とタンク火災防止活動が望ましいことを示唆する。また外部電源が喪失しない場合の炉心損傷頻度は、外部電源車による電源供給が必ず成功することに相当することから、その概算値は3.8×10<sup>-7</sup>×(1-0.94)=2.3×10<sup>-8</sup>(/year)と約1/20に低下することが分かる。

上記の考察から、燃料タンクの破損を防止する対策を中心に検討することが合理的であ ると判断し、自衛消防隊による放水活動をモデル化することとした。モデル化としては、 可燃物を内包する外部燃料タンク周辺への放水を考え、放水中は輻射熱受熱時もタンク壁 面及びタンク内部の軽油の温度は上昇も低下もしないと仮定した。実際にはタンク構造物 が冷却される効果も相当あると考えられるが、詳細な解析検討が必要であることから、今 回は単純な仮定を用いた。また放水時間継続は2時間を想定した[3.3.1.3-1]。これらの 仮定、想定により、発電所周辺での火災継続時間Hに対し、外部燃料タンクはH'=H-2時間 の受熱継続時間となる。これは図3.3.1.3-7のイメージで示されるように、外部燃料タン クのフラジリティ曲線が右側(高強度側)に平行移動したことに相当する。

アクシデントマネジメント対策の効果の検証のため、各へディングの失敗確率を 1/10 とした場合の条件付炉心損傷確率を輻射強度毎に評価した結果を図 3.3.1.3-8 に示す。赤 色の曲線は燃料タンク破損とタンク火災の防止効果を示すもので、強度が高い場合も顕著 である。水色の曲線は外部電源車の到達確率向上の効果であり強度が低い場合に顕著であ る。また黒色破線の曲線は燃料タンク火災での熱風の影響を緩和させる対策を取る場合の 効果に相当するが、「燃料タンク破損・火災の防止効果」よりは効果の度合いが低いこと が分かる。以上より、自衛消防隊による燃料タンクへの放水(タンク温度の維持)の効果 を活用することで、炉心損傷頻度は  $3.8 \times 10^{-7}$  (1/year) から  $7.3 \times 10^{-8}$  (1/year) へと低 減し、また広域消防による森林火災消火の効果が無い場合でも  $2.8 \times 10^{-5}$  (1/year) から  $4.9 \times 10^{-6}$  (1/year) へ低減されることが分かる。

# (3) 煤煙影響の事象進展評価

#### 3.3.1.3-3

煤煙影響に対するイベントツリーを図 3.3.1.3-9 に示す。積算目詰まり量区分は、図 3.2.3-30 のフィルタ面積 1m<sup>2</sup>、風速 1m/s に対して、1、2、3、4kg/m<sup>2</sup>/(m/s) で区分した (表 3.3.1.3-2)。

熱影響でのシーケンス同様、外部電源は喪失していると仮定する。非常用電源確立において、電源車到達の電源確保に失敗する確率を 0.135/d、非常用ディーゼル発電機起動失敗を 5×10<sup>-3</sup>/d とする。ディーゼル発電機吸気フィルタ閉塞の確率を、吸い込み代表風速を用いたフィルタ目詰まり量が破損限界に達し、かつ、森林火災が発電所付近で継続する時間(3~7時間の中で離散化)中にフィルタ交換に失敗する条件が重なった場合で与える。安全系空調設備フィルタ、メンテナンス冷却系フィルタ、崩壊熱除去系のフィルタも、代表風速は異なるものの同様の考え方で失敗確率を与える。補助冷却設備が、電源確保のうえ強制循環モードにある時に空気流量制御用のダンパの起動失敗する確率を 5×10<sup>-3</sup>/d とし、電源確保に失敗し自然循環モードにある時に空気流量制御のためのダンパ開閉操作に運転員が失敗する確率を 6.51×10<sup>-3</sup>/d とした。

ここで、フィルタ交換失敗確率は、日本原子力学会標準手法を参照に、平均修復時間に 対する修復猶予時間の比に対して指数関数的に減少するモデルを適用した。平均修復時間 を1時間、修復猶予時間を2時間と仮定した。さらに、森林火災の燃焼継続時間が3、5、 7時間となる割合は0.5、0.35、0.15と評価されていることから、その重みに応じて加算 することでフィルタ交換失敗確率(0.22)を求めた。以上より推算される各へディングで の失敗確率を表3.3.1.3-3にまとめた。確率10<sup>-20</sup>未満のものはεで示した。崩壊熱除去系 のフィルタ閉塞は極めて起こりがたいことが分かる。

炉心損傷頻度の導出結果を表 3.3.1.3-4 にまとめた。ハザード曲線が高強度側でも頻度 があまり低下しないことを受け、強度区分の高いもので区分炉心損傷頻度の値が高くなる。 炉心損傷頻度の値は 2.54×10<sup>-8</sup> (1/year)となった。

# 参考文献

[3.3.1.3-1] US NRC, REGULATORY GUIDE 1.189, "FIRE PROTECTION FOR NUCLEAR POWER PLANTS", 2009, http://www.nrc.gov/docs/ML0925/ML092580550.pdf

	非常用DG燃料タンク 非常用電源確立 メ		非常用電源確立		メンテナンス冷却	補助冷	却設備	
	タンク破損	タンク火災	外部電源車	非常用DG	換気空調系	空気冷却器	空気冷却器本体	空気冷却器以外
ヘディング	壁面・燃料の 温度上昇	<b>タンク</b> 燃料の 燃焼	交通アクセス 遮断	DG起動失敗	機能低下(タンク 火災による空気 温度上昇)	起動失敗	機能低下 (タンク火災による 空気温度上昇)	ダンパ制御失敗⑦
FV重要度	0.95	0.95	0.94	0.06	0.87	0.06	0.94	0.06
RAW	4.4	95	7.0	1.9	1.9	13	1.9	9.8

表 3.3.1.3-1 FV 重要度及び RAW 評価結果

DG:ディーゼル発電機

表 3.3.1.3-2 煤煙強度区分

強度区分	区分頻度
$kg/m^2/(m/s)$	1/year
<1	0.19
1-2	0.076
2-3	0.045
3<	0.046

表 3.3.1.3-3 空気冷却機能維持の失敗確率

た 版 探 変 ( コノル 人 地 拐 体 変 … コノル 人 六 焼 た 敗 体 変 ) ( ~ / 10-20)							
大	以唯一 (ノイルグ)()	<u>貝唯一 × ノイルツン</u>	授大以唯学八とく	<b>j</b> )			
非常用DG	安全系換気空調	メンテナンス冷却系	崩壊熱除去系 (強制循環)	崩壊熱除去系 (自然循環)			
			(),,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,				
ε	ε	ε	ε	ε			
6.5E-02	ε	1.4E-07	έ	ε			
2.2E-01	8.8E-18	2.2E-01	έ	ε			
2.2E-01	6.1E-04	2.2E-01	ε	ε			

DG:ディーゼル発電機

区分炉心損傷頻度
1/year
1.92E-09
4.66E-09
9.26E-09
9.57E-09

表	3.	3.	1.	3-4	炉心損傷頻度
11	υ.	υ.	Τ.	υт	N 山口只 (勿)(只)(又)

合計値	
2.54E-08	



図 3.3.1.3-1 崩壊熱除去機能に係るシステム構成(強制循環除熱時)





図 3.3.1.3-3 熱影響のイベントツリー







図 3.3.1.3-6 ハザード区分毎の発生頻度、条件付き炉心損傷確率、炉心損傷頻度



図 3.3.1.3-7 タンク破損確率に対する放水の効果のイメージ



DG:ディーゼル発電機

HVAC:換気空調設備

DHRS:崩壞熱除去設備

図 3.3.1.3-8 各へディングの失敗確率を 1/10 とした場合の条件付炉心損傷確率



DG:ディーゼル発電機

HVAC:換気空調設備

図 3.3.1.3-9 煤煙影響に対するイベントツリー

#### 3.3.1.4 重畳事象(積雪と低温)に対する事象シーケンス評価手法(H27)

# (1) 積雪と低温の重畳事象により影響を受ける崩壊熱除去に関する重要機器の同定

積雪と低温の重畳による影響は、積雪のみの影響、低温のみの影響、積雪と低温の相互 影響によるものがあると考えられるため、それぞれの場合に分けて影響を受ける重要機器 を同定することが重要となる。

#### a. 積雪のみの影響

#### (a) 積雪のみの影響を受ける重要機器

平成24年度、平成25年度に考慮したように、プラントに影響を与える影響モー ドとしては、積雪による荷重、積雪による吸排気口の空気流路閉塞が考えられる。こ れらの影響により以下の重要機器、設備などが影響を受ける可能性がある。

- ✓ 外部電源設備
- ✔ 原子炉補助建物
- ✓ 非常用ディーゼル発電機
- ✓ 補助冷却設備
- ✓ メンテナンス冷却系

外部電源設備については、送電線やガイシに雪が蓄積し、蓄積した雪の落下によっ て生じる衝撃やガイシへの塩雪害で送電が切断するメカニズムを考えた。このような 雪による送電線切断のデータは多くないため、失敗確率を導出できた場合でも不確実 さが大きいと考え、本研究では送電線の切断等による外部電源喪失を仮定することと した。

積雪の荷重による原子炉補助建物の倒壊については、原子炉補助建物が非常に頑強 であり数メートルの積雪では倒壊しないことから、本研究では、積雪の荷重で原子炉 補助建物は倒壊しないと仮定した。

非常用ディーゼル発電機の起動・運転、補助冷却設備及びメンテナンス冷却系の崩 壊熱除去のために吸排気口の空気流路を確保する必要がある。この吸排気口は積雪に よって閉塞する可能性があり、非常用ディーゼル発電機の吸排気口が閉塞した場合は 起動・運転失敗になり、非常用電源喪失に至る。また、補助冷却設備及びメンテナン ス冷却系の吸排気口が閉塞した場合は崩壊熱除去失敗に至る。このため、これらの機 器を積雪の影響を受ける重要機器として同定した。

#### (b) 積雪ハザード時における作業員のアクシデントマネジメント

平成24年度、平成25年度では降雪時に非常用ディーゼル発電機、補助冷却設備 及びメンテナンス冷却系の吸排気口の空気流路を確保するため、作業員による除雪を 考慮した。さらに、一旦空気流路が閉塞したとしても作業員が現場までたどり着けれ ば、除雪作業により空気流路を確保できると想定した。また、この除雪により空気流 路を確保した後、万が一、非常用電源が機能喪失した場合は補助冷却設備の自然循環 を行うために崩壊熱除去系のダンパを手動調整することを想定した。

### 3.3.1.4-1

# b. 低温のみの影響

# (a) 低温のみの影響を受ける重要機器

プラントに与える低温のみの影響には凍結が考えられ、以下の重要設備がこの影響 を受ける可能性がある。

- ✓ 補機系の給水系設備の配管
- ✓ 補助冷却設備の伝熱管

補機系の給水系設備の配管内には水が流れており、その水が低温の影響を受けて凍 結する可能性がある。凍結した場合は補機系の給水系設備が機能喪失し、それに依存 関係のある非常用電気設備室が機能喪失して非常用電源の喪失に至ると考えられる。 また、低温により補助冷却設備の伝熱管内のナトリウムが万一凍結した場合、強制循 環及び自然循環が妨げられ、その系統による崩壊熱除去機能は失われる。よってこれ らの設備の配管の凍結を防止することは重要であり、これらの設備を低温のみの影響 を受ける重要設備と同定した。

### (b) 低温ハザード時における作業員のアクシデントマネジメント

補機系の給水系設備の配管内の水の凍結防止対策として、作業員が配管に保温材を 巻くこと、またはバルブを開けて水が常に流れている状態にしておくことが考えられ る。このような凍結防止策は、作業員が認知できれば簡単に実施できると考えらえる。

# c. 積雪と低温の重畳による影響

#### (a) 積雪と低温の影響を受ける重要機器

プラントへの影響として、非常用ディーゼル発電機、補助冷却設備及びメンテナン ス冷却系の崩壊熱除去のために吸排気ロのフィルタに雪が付着し、低温の影響で凍結 することにより、凍結した雪がフィルタを覆って閉塞する事象が考えられる。以下の 重要機器がこの影響を受ける可能性がある。

- ✓ 非常用ディーゼル発電機の吸排気口のフィルタ
- ✓ 補助冷却設備(空気冷却器)の吸排気口のフィルタ
- ✓ メンテナンス冷却系(空気冷却器)の吸排気口のフィルタ

これらの吸排気ロのフィルタが閉塞することに伴う差圧の異常な上昇によりフィル タ破損が生じた場合、雪と冷気がプラント内部に侵入することにより内部は過酷な環 境になると想定される。このような過酷な環境は、内部の非常用ディーゼル発電機へ 悪影響を及ぼす、あるいは崩壊熱除去系の伝熱管内のナトリウムが凍結する潜在的要 因となる。このため、非常用ディーゼル発電機、補助冷却設備及びメンテナンス冷却 系のフィルタの破損も崩壊熱除去への影響が大きいと考え、積雪と低温の影響を受け る重要機器と同定した。

# (b) 積雪と低温の重畳事象ハザード時における作業員のアクシデントマネジメント

フィルタ破損の対策として、フィルタが閉塞又は破損に至る前に作業員がフィルタ を交換することを想定する。すなわち、積雪と低温の事象が終息するまで、必要な回

### 3.3.1.4-2

数フィルタ交換を行い、プラント内部への雪と冷気の侵入を防止することを想定する。

# (2) 崩壊熱除去の成功基準

高速炉の崩壊熱除去設備は、補助冷却設備(3系統)、メンテナンス冷却系(1系統) があり、循環ポンプを使用した強制循環による冷却が可能である。また、補助冷却設備は 自然対流を利用した自然循環冷却が可能である。炉心損傷を防止するための成功基準は、 以下のとおりである。

①補助冷却設備による強制循環成功②補助冷却設備による自然循環成功③メンテナンス冷却系による強制循環成功

①は、補助冷却設備のポンプを使った強制循環、及び空気冷却器の空気流量を調整する ためのベーン・ダンパの自動調整の成功を意味する。この成功基準を満たすためには、本 節(1)にて同定した重要機器のうち、補助冷却設備、非常用電源として非常用ディーゼ ル発電機、及びそれをサポートする補機系の給水系設備の全てが健全である必要がある。

②は、非常用電源に頼らずに、運転員がベーン・ダンパ(以下、ダンパと略す)を手動 で操作することにより、空気冷却器の空気流量を調整し、自然循環が成功することを意味 している。この成功基準を満たすためには、本節(1)にて同定した重要機器のうち、補 助冷却設備が健全である必要がある。

③は、メンテナンス冷却系のポンプを使った強制循環、及び空気冷却器の空気流量を調整するためのベーン・ダンパの自動調整の成功を意味する。ただし、ディーゼル発電機が必要となる。この成功基準を満たすためには、本節(1)にて同定した重要機器のうち、メンテナンス冷却系、非常用電源として非常用ディーゼル発電機、及びそれをサポートする補機系の給水系設備の全てが健全である必要がある。

#### (3) 成功基準を成立させるための条件とシナリオ

成功基準①~③を成立させるためには、非常用ディーゼル発電機、補助冷却設備、メン テナンス冷却系の吸排気口を確保する必要があり、積雪による吸排気口の閉塞を防止しな ければならない。このため、平成25年度の評価における想定と同様に、作業員は吸排気 口のある屋上まで行き、吸排気口周辺の雪を除雪する必要があるとした。この際、屋上の 扉の下端高さまでの雪の蓄積や凍結によって扉が開閉できなくなることが想定されるため、 そのような状態になる前に作業員は屋上まで行き、除雪を行いながら吸排気口に到着した 後、吸排気口の周辺を除雪すると想定した。もし、吸排気口の確保に失敗すれば、その吸 排気口を利用している機器及び設備は機能喪失すると想定した。なお、吸排気口の確保及 びそのための吸排気口へのアクセスルートの確保の必要性の認知の機会は、3回あると想 定し、3回とも認知に失敗すると降雪から長時間が経過していることから吸排気口は閉塞 し炉心損傷に至ると想定した。一方、吸気流路の確保の認知に成功すれば、作業員は崩壊 熱除去操作にも注意すると考えられるため、成功基準②にて必要となるダンパ手動調整の 認知にも成功すると想定した。

成功基準①及び③の強制循環のためには、非常用母線などの非常用電気設備が必要とな る。この非常用電気設備からの発熱は、補機系の給水系設備によって取り除かれる。万が 一、低温によって補機系の給水系設備の配管内の水が凍結すれば、補機系の給水系設備が 機能喪失し、非常用電源は機能喪失すると想定される。そこで、作業員が低温による凍結 対策を認知できれば、本節(1)b.(b)のアクシデントマネジメントが実施でき、低温に よる給水系設備の配管内の水の凍結は防止できると想定した。また、このような対策の認 知に失敗しても、低温によって配管内の水が凍結する事象は稀と考えられるため、確率的 に凍結する場合としない場合のシナリオも想定することとした。すなわち、凍結する場合 は非常用電源喪失、そうでない場合は非常用電源健全の可能性があると想定した。この凍 結対策の認知は、補助冷却設備などの空気流路の確保に集中すると気づかない可能性があ ると考え、別途、凍結対策の認知も必要と想定した。

本節(1) c. で述べたように、フィルタが低温と積雪によって閉塞及び破損した場合の プラント内部環境の過酷化を防止するために本節(1)c. (b)のアクシデントマネジメン トを実施すると想定した。これに伴って、このアクシデントマネジメントに失敗した場合 を対象に、成功基準①~③と本節(1)で同定した吸排気口を持つ機器である非常用ディ ーゼル発電機への影響、補助冷却設備及びメンテナンス冷却系の空気冷却器の伝熱管への 影響についてシナリオを想定しておく必要がある。まず非常用ディーゼル発電機について、 本研究では、非常用ディーゼル発電機の吸排気口のフィルタが閉塞・破損した場合、雪の 侵入と過冷却により非常用ディーゼル発電機は機能喪失すると仮定し、非常用電源が喪失 すると想定した。次に補助冷却設備に関しては、フィルタの閉塞及び破損によって崩壊熱 除去設備の内部が過酷な環境になると考えられるが、強制循環時の空気冷却器内のナトリ ウム流量は2次主冷却系のポンプにより一定量が確保されるとともに、空気冷却器の空気 流量が自動制御されていることから、ナトリウムは凍結しないと想定した。これはメンテ ナンス冷却系も同様であると想定した。一方、自然循環の場合は、このような制御が行わ れていないため、崩壊熱除去設備のダンパの開度が仮に3系統とも全開の場合は空気冷却 器の伝熱管は過冷却に至り、ナトリウムが凍結する可能性があることから、ナトリウム凍 結シナリオも想定することとした。

# (4) イベントツリーの構築

前節までの検討から、イベントツリー構築のためのヘディングを表 3.3.1.4-1、表 3.3.1.4-2 のように定義し、イベントツリーを構築した。イベントツリーは、図 3.3.1.4-1 となる。イベントツリーのヘディングのうち、積雪ハザードのみの影響を受けるヘディングは AR、DS、AS、MS であり、低温のみの影響を受けるヘディングは P、AN、D、積雪と低温の重畳影響は AD、DF、AF である。その他のヘディングは認知に関するヘディングと なる。

#### (5) 失敗確率評価

# a. フィルタの閉塞とフィルタ交換の失敗確率

フィルタ閉塞を評価するためには、低温の影響による雪のフィルタへの付着量の評価が 必要となる。このフィルタへの付着量: V は以下の式で評価できる。

$$V = \rho_1 \times \kappa \times I \times T \tag{3.3.1.4-1}$$

 $\rho_{l}$ は雪の大気中濃度[kg/m<sup>3</sup>]、Iは機器の吸気流量[m<sup>3</sup>/h]、Tは積雪継続時間[h]である。  $\kappa$ は吸気によってフィルタに付着する量の加減を表現する因子であり、本研究では  $\kappa = 0.1$ を仮定した。また、大気中濃度 $\rho_{l}$ は以下のように表わされる。

$$\rho_1 = \frac{\rho_2 \times S}{v} \tag{3.3.1.4-2}$$

 $\rho_2$ は積雪密度 [kg/m³] であり湿った雪の値  $\rho_2 = 100$  [kg/m³] を仮定、 vは雪の落下速度 [m/s] であり v = 1 [m/s] を仮定する。また S は日降雪深 [m/day] である。吸気流量 I は機器 に依存し、非常用ディーゼル発電機の場合は  $I_{DG} = 5.0 \times 10^3$  [m³/h]、補助冷却設備の自然 循環の場合は  $I_{NC} = 1.3 \times 10^3$  [m³/h] となる。また、この付着量: V が以下の条件を満たす 時、フィルタは閉塞する。

# $V \ge A \times t \times \rho_3 \tag{3.3.1.4-3}$

ここで、 $\rho_3$ は氷の密度[kg/m<sup>3</sup>]で 0℃の時の密度の値 $\rho_3 = 0.92 \times 10^3$  [kg/m<sup>3</sup>]とし、tは雪の付着によって閉塞する付着厚さであり、本研究ではt = 0.01 [m]と仮定した。またAはフィルタの面積[m<sup>2</sup>]である。以上のような条件から、付着量V が単位面積あたり 9.2 [kg/m<sup>2</sup>]以上の場合、フィルタ閉塞するという判断基準が得られる。

式 (3.3.1.4-1)、(3.3.1.4-2)を使って非常用ディーゼル発電機の吸排気のフィルタ、 及び補助冷却設備空気冷却器の吸排気ロのフィルタの雪の付着量を評価した結果を図 3.3.1.4-2 に示す。ここで、フィルタ閉塞は積雪と低温の重畳事象で発生すると想定して いるため、積雪及び低温が同時に発生している時間を図 3.3.1.4-2 の横軸に示している。 この図 3.3.1.4-2 と式 (3.3.1-4-3)から得られる判断基準から、非常用ディーゼル発電 機のフィルタは日降雪深 1m/day 以上かつ継続時間 1day 以上で閉塞し、補助冷却設備の空 気冷却器のフィルタは日降雪深 1m/day では継続時間 3day 以上、日降雪深 2m/day では継 続時間 2day 以上、日降雪深 3m/day 以上では継続時間 1day 以上で閉塞することとなった。 フィルタ閉塞・破損する前に作業員がフィルタ交換を行うことを想定するため、フィル タ交換失敗確率を評価する。フィルタ交換失敗確率  $P_R$ は、

$$P_R = N \cdot \exp\left(-\frac{T_a}{T_r}\right) \tag{3.3.1.4-4}$$

を用いて評価する[3.3.1.4-1]。 $T_r$ は平均復旧時間で1時間と仮定した。 $T_a$ は猶予時間を示しており以下のように表現される。

$$T_a = \frac{V_0}{V_{HE}} \tag{3.3.1.4-5}$$

 $V_0$ はフィルタ閉塞が起きる単位面積あたりの雪の付着量 $[kg/m^2]$ であり式(3.3.1-4-3)と

### 3.3.1.4-5
パラメータの条件から $V_0 = 9.2 [kg/m^2]$ であり、 $V_{HE}$ は単位時間かつ単位面積あたりのフィルタの雪の付着量 $[kg/(m^2 \cdot h)]$ を示している。また、式(3.3.1-4-4)のNは、積雪と低温の事象が終息するまで何度もフィルタ交換を行うことからフィルタ交換の回数を示す因子であり、

$$N = \frac{\min(T_{snow}, T_{lowtemperature})}{T_a}$$
(3. 3. 1. 4-6)

を使って評価した。ここで $\min(T_{snow}, T_{lowtemperature})$ は低温継続時間と積雪継続時間のどちら

か小さい方をとる。

式(3.3.1.4-1)~(3.3.1.4-6)、及びパラメータの条件を考慮してフィルタ交換失敗 確率を評価した結果を図3.3.1.4-3に示す。非常用ディーゼル発電機は補助冷却設備に比 べて吸気量が大きい関係から雪が付着しやすく、フィルタ交換が何度も必要なため失敗確 率は大きくなる結果となっている。

#### b. 補助冷却設備の伝熱管内のナトリウム凍結確率

低温が継続することによって補助冷却設備の空気冷却器が低温の外気を取り込み、伝熱 管が過冷却の状態になり、伝熱管内のナトリウムが凍結する可能性がある。安全解析では 150℃以下でナトリウムが凍結する結果が得られている。そこで、150℃でナトリウムは凍 結し始め、120℃でほぼナトリウムが凍結すると想定し、ナトリウム凍結確率を算出する。

本研究ではナトリウム凍結確率は2つの状況を想定して算出した。1つは補助冷却設備の空気冷却器のフィルタが健全な場合(閉塞しない場合)であり、本研究では室温は 0℃ と想定した。一方、このフィルタが閉塞・破損した場合、空気冷却器周辺は雪と冷気によって過酷な環境になると考えられるため室温は-5℃を想定した。

プラント動特性の解析結果より、室温 0℃の状態において補助冷却設備の空気冷却器の ダンパが3系統とも全開の場合、95 時間、65 時間でナトリウム温度がそれぞれ 120℃、 150℃となる。このことから 65 時間で凍結確率が生じ初め、95 時間でほぼ凍結となるよ うに確率密度分布を平均値 80 時間、標準偏差 5 時間の正規分布型として仮定、すなわち 65 時間を平均値-3 $\sigma$ 、95 時間を平均値+3 $\sigma$ の値と仮定した。結果を図 3.3.1.4-4 の左図 に示す。

室温-5℃の場合は 50 時間で凍結確率が生じ初め、80 時間でほぼ凍結となるように確率 密度分布を平均値 65 時間、標準偏差 5 時間の正規分布型として仮定、すなわち 50 時間を 平均値-3 σ、80 時間を平均値+3 σ の値と仮定した。結果を図 3.3.1.4-4 の右図に示す。

#### c. 補機海水系の給水設備の機能喪失確率

本節(1) b. (b) 及び(3) で想定したように、作業員が低温による凍結対策を失敗し た場合の補機海水系の給水設備の配管内の水の凍結確率を算出する。この配管内部の水は 低温でも凍結しにくいと考えられることから、凍結まではある程度の低温継続時間が必要 と考えられる。本研究では、凍結までの平均時間は 75 時間と想定し、標準偏差 15 時間の 正規分布を仮定した。結果を図 3.3.1.4-5 に示す。

3.3.1.4-6

### d. 人的過誤確率

### (a) 認知失敗

平成24年度に想定したように THERP (Technique for Human Error Rate Prediction、人的過誤率予測技法) (NUREG/CR-1278) [3.3.1.4-2]に基づき、60分の猶予時間の認知エラーの人的過誤率を設定した。ストレスレベル・段階的作業・熟練者を仮定(1倍)した。この場合、認知失敗確率は8.48×10<sup>-4</sup>となる。また、作業員は天気予報などにより事前に積雪と低温の情報を得ることができる。このことから認知失敗の可能性はより低くなると想定し、1/10 倍である 8.48×10<sup>-5</sup>を認知失敗確率として用いることとした。また、平成24年度に想定したように、イベントツリーでは1日3交代制で8時間毎に3回程度の認知の機会があることを考慮している。

### (b) 操作エラー

崩壊熱除去系の空気冷却器のダンパ手動操作時には過冷却によるナトリウム凍結を 防ぐために無電源下での温度計測も必要となる。本評価は、平成24年度の事象シー ケンス評価時と同様に、補助冷却設備の空気冷却器のダンパ手動調整の失敗確率を 6.51×10<sup>-3</sup>とし、また THERP に基づき無電源下での温度計測失敗確率を 2.40×10<sup>-3</sup>と 仮定した。どちらの操作が失敗しても崩壊熱除去失敗となることから、1系統の空気 冷却器のダンパ手動操作失敗確率は、これらの2つの操作失敗確率を足し合わせた 8.91×10<sup>-3</sup>とした。また、補助冷却設備は3系統あると想定しているため、3系統の 空気冷却器のダンパ手動操作失敗確率を評価する必要がある。この3系統全ての失敗 確率は1系統の失敗確率に共通原因失敗因子をかけた値とした。共通原因失敗因子を 1.0×10<sup>-3</sup>を仮定すると、3系統全ての空気冷却器のダンパ手動操作失敗確率は 8.91 ×10<sup>-6</sup>となる。

低温が継続することによってダンパ手動調整及び温度計測が困難になると考えられる。このため、1系統のダンパ手動操作失敗確率8.91×10<sup>-3</sup>は、低温継続時間が1日 延びる毎に2倍の値になると仮定した。また、室温の変化(0℃→-5℃)によっても ダンパ手動調整及び温度計測が困難になると考えられる。このことから、室温の変化 によってもダンパ手動操作失敗確率は増加すると想定し、その失敗確率は10倍の値 になると仮定した。

#### e. 除雪の失敗確率

除雪失敗確率は平成24年度及び平成25年度に実施した評価と同様である。積雪によ る吸排気口の閉塞は除雪作業失敗のみに依存すると仮定した。また、除雪作業は降雪認知 から1日に1回と仮定し、除雪作業は降雪継続期間に応じて回数を増加できると仮定した。 1回の除雪失敗確率は、除雪失敗確率分布として正規分布を仮定し、分布の平均値にはノ ミナル除雪速度として4m/day、分布の幅は1σ=0.5m/dayを仮定した。2回目以降は1回 でも失敗すれば除雪失敗と考えて8回までの失敗確率を評価した。評価した失敗確率を図 3.3.1.4-6に示す。

### 3. 3. 1. 4-7

### f. アクセスルート確保の失敗確率

本節(3) でアクセスルート確保のシナリオを想定したため、本節ではその失敗確率を 評価する。既にイベントツリーのヘディングでも設定されたように、扉の開閉失敗と吸排 気口までのアクセスルート確保について失敗確率をモデル化する。

#### (a) 扉の開閉

建物の外側、特に屋上などの扉の外側に雪が積もると、雪の重さにより扉の開閉が 不可能になることが想定される。また低温の影響により扉の開閉時の駆動部が凍結し 扉の開閉が不可能になることも想定される。平成25年度の評価では扉の開閉に失敗 する積雪深を1.0mと仮定したが、さらに低温の影響もあるため、本研究ではより早 く扉の開閉が不可能になると想定し、積雪深が0.8mで扉の開閉が不可能になると仮 定した。アクセスルート確保のためには、積雪深0.8mに達する前に作業員は屋上の 扉を開ける必要がある。図3.3.1.4-7では、扉の開閉成功と失敗の確率を考える上で の概念を示している。これは、横軸上の任意の時刻に対して縦軸にその時刻までに運 転員が屋上の扉に到達する確率をプロットしたものである。運転員が除雪の必要性を 判断(除雪の認知)する時間及び中央制御室から屋上の扉へ移動する時間の不確実さ を考慮したことによって扉への到達成功確率が階段状でなく時間とともに滑らかに増 加する曲線となっている。

当直運転員のチームの業務開始時(時間0)に積雪が始まり、除雪が必要と判断される積雪深を 0.2m(時間 $\bar{t}$ )と仮定した。ただし、積雪深が判断基準の 0.2mに達した瞬間に、運転員が除雪の必要性を判断できるとは限らないことから、判断基準の 0.2m に達してからある程度の時間の後(時間 $t_a$ )に運転員が現場の除雪の必要性を判断することとした。除雪の必要があると判断した後、作業員は除雪のために中央制御室から屋上へ移動すると考えられ、屋上の扉前にたどり着いた時(時間 $t_b$ )、既に積雪が 0.8m 以上に達している場合は扉の開閉が不可能になる。このため、扉の開閉が成功する条件は以下の場合である。

$$t_h \leq \overline{t}$$

(3. 3. 1. 4 - 7)

また、時間tとtは積雪深 0.2m と 0.8m で決まる時間のため、日降雪深に依存するが カテゴリが決まれば定数となる。一方、 $t_a$ と $t_b$ は作業員の認知・行動に依存する変数 であり、積雪と低温のハザードからは定まらない変数である。

運転員が除雪の必要性を判断(除雪の認知)する時間、及び中央制御室から屋上の 扉へ移動する時間の不確実さを考慮するために確率密度分布を定義する。認知成功に 関する確率分布として対数正規分布 *f*(*t*)を仮定し、*t*から1時間後を平均値、標準偏 差を1.5時間と仮定した。同様に、中央制御室から屋上の扉への移動に関する確率分 布として対数正規分布 *g*(*t*)を仮定し、認知成功した時間*t* から10分後を平均値と仮

#### 3.3.1.4-8

定し、標準偏差は3分と仮定した。原点をtとする変数 $t'=t_a-t$ 、及び原点を $t_a$ とする変数 $t'=t_b-t_a$ を新たに定義すると、積雪が0.8mに達する時間tまでに作業員が屋上の扉の前にたどり着き、扉の開閉に成功する確率 $p_2(\bar{t})$ は、式(3.3.1.4-7)のように表され、一方、失敗確率 $p_1(\bar{t})$ は1から成功確率を引いた値として表される。

$$p_{1}\left(\bar{t}\right) = 1 - p_{2}\left(\bar{t}\right)$$

$$p_{2}\left(\bar{t}\right) = \int_{0}^{\bar{t}-\bar{t}} \left[\int_{0}^{\bar{t}-(t'+\bar{t})} g\left(t''\right) dt''\right] f\left(t'\right) dt'$$
(3. 3. 1. 4-7)

元の変数 $t_a$ 、 $t_b$ の変域は $\overline{t} \le t_a \le t$ 、 $t_a \le t_b \le t$ であると仮定し、これを基に新しい変数t'、t''で変換すると変域 $0 \le t' \le \overline{t-t}$ 、 $0 \le t'' \le \overline{t-t}(t'+\overline{t})$ が得られることから、この変域を式(3.3.1.4-7)の積分区間とした。この式(3.3.1.4.7)を使って評価した扉の開閉失敗確率の結果を図 3.3.1.4-8 に示す。

除雪の必要性を判断する認知回数は、1つの作業員チームにつき1回と仮定した。 作業員のチームは1日3回交代することを想定しており、最初のチームが認知・判断 に失敗した場合、同日内であっても約8時間後に第二のチームが除雪の必要性を認 知・判断すると想定し、これに失敗してもさらに約8時間後に第三のチームが認知・ 判断すると想定した。図3.3.1.4-8ではこれらの認知回数を扉の開閉失敗確率に反映 した。最初のチームと比較して第二・三のチームの認知・判断で与えられる猶予時間 は短くなるため、認知回数を重ねるにつれて扉の開閉失敗確率が増加している。

### (b) 開閉後のアクセスルート確保

屋上の扉から吸排気口までは、除雪を行いながらアクセスルートを確保することを 想定する。この除雪の失敗確率は(5) e 節と同じ失敗確率を想定した。

### (6) イベントツリー定量化

3.2.1.4.f 節で定義した各カテゴリに対して、その組み合わせに対する発生頻度及び失 敗確率をイベントツリーに代入することで炉心損傷頻度を定量化した。結果を図 3.3.1.4-9 及び図 3.3.1.4-10 に示す。ただし、低温または積雪の継続時間が 7day を超え る場合は直接炉心損傷とみなした。ハザード曲線としてグンベル分布を使った場合、炉心 損傷頻度は 8.1×10<sup>-7</sup>/年となり、ワイブル分布を使った場合、炉心損傷頻度は 2.2×10<sup>-7</sup>/ 年となった。支配的な日降雪深のカテゴリは、グンベル分布を使った場合は 3m/day、ワ イブル分布を使った場合は 2m/day であった。低温及び積雪継続時間のカテゴリは、両方 の分布とも低温継続時間 24 時間、積雪継続時間 24 時間の場合であった。支配的なシーケ ンスは、アクセスルートの確保の失敗であった。

(7) 感度解析

前節までに実施した基準解析の結果からアクセスルートの確保が重要であり、成功すれ ば炉心損傷頻度が大きく低減されると予想できる。これはアクセスルート確保によって非

#### 3.3.1.4-9

常用ディーゼル発電機のための吸気流路、及び補助冷却設備、メンテナンス冷却系の空気 冷却器のための吸気流路が確保できるからである。このため、感度解析では、アクセスル ート確保が必ず成功する場合を想定して感度解析を実施する。また、アクセスルート確保 に失敗した場合でも、吸排気口が確保できるように電熱ヒータを各吸排気口周辺に位置し て、中央制御室の操作から吸排気口が確保にできるシナリオも考慮して感度解析を実施す る。また、重畳事象のイベントツリーから積雪から影響を受ける部分、または低温から影 響を受ける部分を分け、積雪 PRA の近似、低温 PRA の近似を実施し、基準解析結果と比較 する。

#### a. アクセスルート確保成功

基準解析のイベントツリーのうち、アクセスルート確保のヘディングが必ず成功する場合、すなわち扉の開閉、及び開閉後のアクセスルート確保のための除雪に必ず成功する場合を想定して解析を行った。アクセスルート確保以外のヘディングの失敗確率は基準解析と同じとして計算した結果、ハザード曲線としてグンベル分布を使った場合、炉心損傷頻度は 6.1×10<sup>-8</sup>/年となり、ワイブル分布を使った場合、炉心損傷頻度は 1.8×10<sup>-10</sup>/年となった。これは基準解析の時に比べて、グンベル分布を使った場合は 7.5×10<sup>-2</sup> 倍、ワイブル分布を使った場合は 8.1×10<sup>-4</sup> 倍まで炉心損傷頻度が低減していることを示している。

#### b. 電熱ヒータの導入

平成25年度に検討したように、アクセスルート確保に失敗した場合でも中央制御室の 操作によって各吸排気口周辺の積雪を電熱ヒータで除雪でき、吸排気口が確保可能である と想定する。また本評価では、アクセスルート確保のために必要な扉の開閉も可能である と想定、この電熱ヒータによってフィルタ閉塞の防止も可能であると想定する。なお、電 熱ヒータはバッテリーで起動・運転できると想定し、バッテリーは120時間(5日)まで 運転できると想定し、120時間を超えた場合はバッテリー枯渇によって機能喪失すると想 定した。120時間の間、全ての電熱ヒータの失敗確率は、平成25年度と同じように1.1 ×10<sup>-1</sup>とした。

基準解析のヘディングに新たに追加するヘディングを表 3.3.1.4-3 のように定義し、イ ベントツリーを再構築した。電熱ヒータを導入したイベントツリーは、図 3.3.1.4-11 の ようになる。電熱ヒータ以外のヘディングの失敗確率は基準解析と同じとして計算した結 果、ハザード曲線としてグンベル分布を使った場合、炉心損傷頻度は 5.2×10<sup>-8</sup>/年となり、 ワイブル分布を使った場合、炉心損傷頻度は 3.6×10<sup>-9</sup>/年となった。これは基準解析の時 に比べて、グンベル分布を使った場合は 6.5×10<sup>-2</sup> 倍、ワイブル分布を使った場合は 1.7 ×10<sup>-2</sup>倍まで炉心損傷頻度が低減していることを示している。

#### c. 積雪 PRA 近似

基準解析のイベントツリーから、積雪 PRA に必要なヘディングのみを選定して評価を実施する。本節(4) で定義したように、図 3.3.1.4-1 のヘディングのうち、積雪ハザードのみの影響を受けるヘディングは AR、DS、AS、MS であり、評価のために分岐が必要なへ

#### 3.3.1.4 - 10

ディングである。また、除雪に係る認知 H1、H2、H3 も必要である。低温の影響を受ける ヘディングとして、補助冷却設備のダンパ手動調整 D があるが、積雪のみの PRA では、低 温による影響を除いた単純な操作エラーを定義した。また、積雪と低温と重畳影響として 扉の開閉失敗を想定したが、平成25年度に想定したように積雪のみの場合でも扉の開閉 が困難になる場合が考えられることから、積雪深 1.0m の時に開閉が不可能になる失敗確 率を定義した。また、フィルタ閉塞は積雪と低温の重畳影響により発生すると想定してい るため、積雪 PRA ではフィルタ交換の失敗を想定する必要が無いとした。その他のヘディ ングは、水やナトリウムの凍結に関わることから積雪 PRA では必要のないヘディングと判 断し、図 3.3.1.4-1 のイベントツリー上は成功側の分岐と定義した。積雪ハザードのカテ ゴリは日降雪深及び積雪継続時間は基準解析と同じ範囲とし、区間頻度及び区間確率も同 じとした。また、低温継続時間は24時間のみとし、その区間確率は1とした。

結果、ハザード曲線としてグンベル分布を使った場合、炉心損傷頻度は 6.3×10<sup>-7</sup>/年と なり、ワイブル分布を使った場合、炉心損傷頻度は 1.6×10<sup>-7</sup>/年となった。これは基準解 析の時に比べて、グンベル分布を使った場合は 7.8×10<sup>-1</sup> 倍、ワイブル分布を使った場合 は 7.3×10<sup>-1</sup> 倍まで炉心損傷頻度が低減しているが、基準解析と比較して炉心損傷頻度に 大きな差は無い事が分かる。このことからも、積雪と低温の重畳事象は積雪による影響が 大きいと考えられる。

#### d. 低温 PRA 近似

基準解析のイベントツリーから低温 PRA に必要なヘディングのみを選定して評価を実施 する。本節(4)で定義したように、図 3.3.1.4-1 のヘディングのうち、低温ハザードの みの影響を受けるヘディングは P、AN、D であり、評価のために分岐が必要なヘディング である。また、認知 H1、H2、H3 も基準解析では吸気流路が確保されればダンパ調整にも 注意が向くと仮定して評価を実施していたため、低温 PRA でも補助冷却設備のダンパ手動 調整 D を定義し、その認知として H1、H2、H3 も定義することとした。また、基準解析と 同様に補助冷却設備の吸気流路だけでは補機系の給水設備の機能確保のための低温対策の 作業の必要性までは認知しにくいと想定し、HW も定義した。積雪ハザードのみ影響を受 けるヘディングとしては AR、DS、AS、MS でるが、低温 PRA では除雪の必要は無いため、 図 3.3.1.4-1 のイベントツリー上はこれらのヘディングの分岐を成功側と定義した。また 扉の開閉やフィルタ閉塞も低温のみでは発生しないと考えられるため、ヘディングの分岐 を成功側と定義した。低温ハザードのカテゴリについて、低温継続時間は基準解析と同じ 範囲とし、区間確率も同じとした。一方、日降雪深は 1m/day、積雪継続時間は 24 時間の みとし、その区間確率は両方とも1とした。結果、ハザード曲線としてグンベル分布を使 った場合、炉心損傷頻度は 1.0×10<sup>-8</sup>/年となり、ワイブル分布を使った場合、炉心損傷頻 度は 6.5×10<sup>-13</sup>/年となった。これは基準解析の時に比べて、グンベル分布を使った場合は  $1.2 \times 10^{-2}$  倍、ワイブル分布を使った場合は  $3.0 \times 10^{-6}$  倍まで炉心損傷頻度が低減しており、 基準解析と比較して炉心損傷頻度に大きな差がある。このことから、積雪と低温の重畳事 象は低温のみの影響は積雪の影響に比べると小さいと考えられる。

#### 3. 3. 1. 4 - 11

### e. 基準解析と感度解析結果の比較

基準解析と感度解析で得られた炉心損傷頻度の比較を図 3.3.1.4-12、図 3.3.1.4-13 に 示す。2つの図は低温または積雪の継続時間カテゴリ 168h(7day)~、すなわち直接炉 心損傷となる事象が含まれているかどうかの違いがある。グンベル分布の場合、ワイブル 分布と比較して直接炉心損傷となる頻度が大きく炉心損傷頻度に大きく寄与するが、ワイ ブル分布の場合は直接炉心損傷となる事象の頻度が非常に小さくなるためその寄与は非常 に小さくなる。基準解析で見たように、グンベル分布とワイブル分布を使った場合は支配 的な継続時間カテゴリが異なるため、両分布にて感度解析の低減効果にも差が見られるが、 グンベル分布の場合、アクセスルート確保、または電熱ヒータを導入することで炉心損傷 頻度を約 0.1 倍程度低減できることが分かる。また、積雪 PRA 近似と低温 PRA 近似の結果 から、積雪と低温の重畳事象で算定された炉心損傷頻度は、積雪 PRA の炉心損傷頻度とほ ぼ同じ大きさであり、積雪の影響が低温よりも大きいことを示す結果となった。

### (8) 課題の整理

感度解析の結果からアクセスルート確保の感度は高いと考えられる。このため、本評価では扉の開閉失敗となる積雪深を平成25年度に評価した時の1.0mから0.8mに下げ、低温の影響を考慮する形となったが、この低温の影響と扉の開閉失敗について詳細にモデル化して失敗確率を評価することは重要と考えられる。また、本評価では積雪と低温を独立させてハザード評価を行ったが、これらは相関があると思われるため、その相関性を考慮したハザード評価、及び各へディングの失敗確率評価が重要と考えられる。以上がこの研究の今後の課題となる。

### 参考文献

- [3.3.1.4-1] 日本原子力学会、原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準(レベル1PRA編):2013.
- [3.3.1.4-2] A. D. Swain, and H. E. Guttmann, Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278 (1983).

ヘディング名	ヘディング名	記号	失敗の要因	失敗による影響
(大項目)	(小項目)			
除雪やフィルタ	1回目	H1	認知の失敗。	除雪及びフィルタ交換に失敗す
交換の必要性の				る。このため、積雪により吸排
認知				気口は閉塞する。また、フィル
				タ破損により内部に雪と冷気が
				侵入する。
	2回目	H2	同上。	同上。
	3回目	H3	同上。	同上。ただし、3 回の認知に失
				敗したときは、降雪から長時間
				が経過しているため吸排気口は
				閉塞していると想定する。この
				場合、炉心損傷に至ると仮定す
				る。
アクセスルート	扉の開閉	AD	積雪や低温によ	各機器・設備の吸排気口までア
確保			る屋上の扉の開	クセスできず、除雪ができな
			閉失敗。	い。このため、非常用ディーゼ
				ル発電機の機能喪失、補助冷却
				設備及びメンテナンス冷却系は
				崩壊熱除去失敗になる。
	開閉後ルート	AR	屋上の扉の開閉	各機器・設備の吸排気口までア
	確保のための		には成功する	クセスできず、除雪ができな
	除雪		が、アクセスル	い。このため、非常用ディーゼ
			ート確保のため	ル発電機の機能喪失、補助冷却
			の除雪失敗によ	設備及びメンテナンス冷却系は
			って各機器・設	崩壊熱除去失敗になる。
			備の吸排気口ま	
			でたどり着けな	
			$V_{\circ}$	
建物外等補機系	作業員の認知	HW	認知の失敗。	補機系の給水設備(配管内)の
の給水機能確保				水の凍結の可能性がある。
	水の凍結回避	Р	低温継続時間に	補機系の給水設備(配管内)の
			依存して偶発的	水が凍結する。非常用電源は機
			に発生する。	能喪失に至る。

表 3.3.1.4-2 積雪と低温の重畳事象に対するイベントツリーのヘディング(2/2)

	T	1	1	
ヘディング名	ヘディング名	記号	失敗の要因	失敗による影響
(大項目)	(小項目)			
電源確保(ディ	除雪	DS	除雪の失敗。	非常用ディーセル発電機は機能
ーゼル発電機の				喪失に至る。
空気流路確保)	フィルタ交換	DF	フィルタ交換の	非常用ディーセル発電機は機能
			失敗。	喪失に至る。
補助冷却設備空	除雪	AS	除雪の失敗。	補助冷却設備は崩壊熱除去失敗
気冷却器				になる。
空気流路確保	フィルタ交換	AF	フィルタ交換の	補助冷却設備の内部に雪と冷気
			失敗。	が侵入し、伝熱管内のナトリウ
				ムの凍結に影響する可能性があ
				る。
補助冷却設備空	ダンパ手動調	D	運転員の操作失	補助冷却設備の伝熱管内のナト
気冷却器	整		敗。ただし、低	リウムの凍結に影響する可能性
ダンパ手動調			温の影響で失敗	がある。
整、ナトリウム			しやすくなるこ	
凍結回避			とも想定。	
	ナトリウム凍	AN	低温継続時間に	補助冷却設備は崩壊熱除去失敗
	結回避		依存して偶発的	になる。
			に発生する。	
メンテナンス冷	除雪	MS	除雪の失敗。	メンテナンス冷却系は崩壊熱除
却系空気冷却器				去失敗になる。
空気流路確保				

			•••••	
ヘディング名	ヘディング名	記号	失敗の要因	失敗による影響
(大項目)	(小項目)			
アクセスルート	電熱ヒータ	EH1	内的要因による	扉の開閉失敗によるアクセスル
確保			故障。	一卜確保失敗。
電源確保(ディ	電熱ヒータ	EH2	内的要因による	電熱ヒータによる非常用ディー
ーゼル発電機の			故障。	セル発電機の吸気流路の確保失
空気流路確保)				敗。作業員による除雪及びフィ
				ルタ交換に期待する。
補助冷却設備空	電熱ヒータ	EH3	内的要因による	電熱ヒータによる補助冷却設備
気冷却器			故障。	の吸気流路の確保失敗。作業員
空気流路確保				による除雪及びフィルタ交換に
				期待する。
メンテナンス冷	電熱ヒータ	EH4	内的要因による	電熱ヒータによるメンテナンス
却系空気冷却器			故障。	冷却系の吸気流路の確保失敗。
空気流路確保				作業員による除雪及びフィルタ
				交換に期待する。

表 3.3.1.4-3 積雪と低温の重畳事象に対するイベントツリーの追加ヘディング







図 3.3.1.4-1 積雪と低温の重畳事象に対するイベントツリー

(左図:非常用ディーゼル発電機のフィルタ、右図:補助冷却設備のフィルタ)

# 3.3.1.4-16

図 3.3.1.4-2 雪の付着量



図 3.3.1.4-3 フィルタ交換失敗確率

(左図:非常用ディーゼル発電機のフィルタ、右図:補助冷却設備のフィルタ)



図 3.3.1.4-4 ナトリウム凍結確率(左図:室温0℃、右図:室温-5℃)



図 3.3.1.4-5 補機海水系の給水設備の配管内の水の凍結確率

### 3.3.1.4-17



図 3.3.1.4-6 除雪失敗確率



記号	内容
0	積雪及び低温が発生した時間
_	一般的に除雪が必要と判断される時間
I	(積雪 0.2m に達した時間と仮定)
t	実際に作業員が除雪必要性を
l <sub>a</sub>	認知する時間
t	作業員が屋上の扉前に
$\iota_b$	たどり着く時間
=	低温と積雪により屋上の扉が
t	開閉不可能となる時間

図 3.3.1.4-7 扉の開閉の成功と失敗の確率評価の概念







図 3.3.1.4-9 炉心損傷頻度 (グンベル分布)



図 3.3.1.4-10 炉心損傷頻度 (ワイブル分布)



DG:ディーゼル発電機、Na:ナトリウム

図 3.3.1.4-11 積雪と低温の重畳事象に対するイベントツリー(電熱ヒータの導入)



図 3.3.1.4-12 炉心損傷頻度の比較(上図:グンベル分布、下図:ワイブル分布、 継続時間カテゴリ 168h(7day) ~も含める(直接炉心損傷有り))



図 3.3.1.4-13 炉心損傷頻度の比較(上図:グンベル分布、下図:ワイブル分布、 継続時間カテゴリ 168h(7day) ~は含めない(直接炉心損傷無し))

### 3.3.1.5 重畳事象(強風と降雨)に対する事象シーケンス評価手法(H27)

(1) はじめに

平成25年度には強風に対する事象シーケンス評価、平成26年度には異常降雨に対す る事象シーケンス評価を実施した。その結果から、強風評価においては外部燃料タンク火 災及び共通要因による除熱能力低下に伴う崩壊熱除去失敗が支配的であったが、強風と降 雨の重畳事象時には降雨により消火されるため外部燃料タンク火災の影響を考える必要は ない。また、異常降雨については保守的な想定をしていたため、それを見直せば炉心損傷 頻度は十分に低くなると予想される。そこで、強風と降雨の重畳事象時のプラントへの影 響を検討し、重要機器を同定し、それらの破損確率評価を行い、イベントツリーに基づい て定量化を行う。

#### (2) 重要機器の同定

平成25年度の事象シーケンス評価で示したように、強風により影響を受ける崩壊熱除 去機能に関する重要機器としては以下が挙げられる。

- ·外部電源設備
- ·排気塔
- ・原子炉補助建物(崩壊熱除去系設備の健全性維持)
- ・補助冷却設備(外気の吸排気)
- ・メンテナンス冷却系(外気の吸排気)
- ・非常用ディーゼル発電機(外気の吸排気)
- ・非常用発電に必要な外部燃料タンク
- ・換気空調設備(外気の吸排気、電源設備の冷却)

強風による崩壊熱除去機能喪失には、風圧、圧力差、飛来物衝突による機器の構造損傷 が考えられる。平成25年度のマージン評価で示したように、外部電源設備が最もマージ ンが小さく起因事象となる可能性が高い。それを考慮して、起因事象としては外部電源喪 失を想定できる。強風による損傷は飛来物衝突によるものが考えられる。強風の場合は竜 巻と異なり上昇気流により巻き上がることはないと考えられることから、発電所より高い 位置にある森林からの木材を飛来物として検討する。また、森林から最も遠い位置にある 排気塔については、森林からの飛来物による損傷は考えがたいことから、風圧による破損 のみを考慮した。

一方、異常降雨時に崩壊熱除去に必要な重要機器は次のとおり。各機器は没水又は被水 により機能喪失すると考えられるが、現実的な雨水浸水防止策及び機器配置を考慮に入れ れば没水又は被水が起こることは考えにくい。

・排水設備(原子炉補助建物の屋上、及び地上に配置されていると仮定)

- ・海水ポンプ
- ・電気設備室
- ・メンテナンス冷却系
- ·補助冷却設備
- ・ディーゼル発電機

強風と異常降雨の重畳においては、現象の特性を考慮して以下の観点から重畳事象の影響を評価する必要がある。

- 一方の自然現象による影響が、他方の自然現象に対する設備耐力や防護対策に影響を 及ぼすもの
- ・自然現象が重畳することによる新たな損傷・機能喪失モードが生じるもの
- ・さらに、ある自然現象が別の自然現象の防護設備に影響を与え、その状態が一定期間
   内に修復あるいは他の方法による防護対策を完了できない場合

上記の観点から、強風と降雨の重畳事象時に崩壊熱除去機能喪失に至らしめるシナリオ としては補助冷却設備排気部雨どいの強風時の飛来物衝突による破損、その雨どいの開口 部に雨の侵入、雨水の繰返し接触による伝熱管の疲労破損が考えられる。よって、重要機 器は以下が同定される。

·補助冷却設備

#### (3) イベントツリーの構築

強風と降雨のイベントツリーを合成したうえで、重畳の影響を取り込むこととし、イベ ントツリーを図 3.3.1.5-1 のように構築した。これはメインイベントツリーであるため、 ヘディング毎にサブイベントツリー(図 3.3.1.5-2~図 3.3.1.5-8)を作成し、その分岐 に強風、降雨、重畳の影響を記載することとした。重畳の影響は、補助冷却設備排気部に 現れる。なお、後述するように、降雨単独の影響は考える必要がないため、イベントツリ ーにおいても降雨の影響を除いた図も併せて示す。

### (4) ハザードカテゴリの設定

今回の重畳影響は、強風によって発生する飛来物衝突による構造物破損がまず発生する ことを考えていることから、強風時の事象シーケンス評価と同様にカテゴリ化すればよい。 一方、降雨については、少量であっても伝熱管に影響を与える可能性を考慮し、異常降雨 という多雨に着目するわけではなく、少雨であっても検討する必要があることを踏まえて カテゴリ化を行った。表 3.3.1.5-1~3 にそれぞれグンベル分布の場合の年最大1時間降 水量記録日の最大瞬間風速、年最大1時間降水量、年最大1時間降水量記録日の降水継続 時間のカテゴリ化を示す。強風と降雨の重畳事象のハザードカテゴリはこれらを組み合わ せることとし、それぞれのハザードカテゴリに対して事象シーケンス評価を行う。なお、 事象シーケンス評価に当たっては、その区間の大きな値を用いることとする。例えば、風 速 20~40m/s の場合は 40m/s で代表させて機能喪失確率を算出することとし、140m/s 以 上の場合は失敗とみなして機能喪失確率を1とする。

#### (5) 機能喪失確率の評価

崩壊熱除去機能維持に必要な補助冷却設備とメンテナンス冷却系(外気の吸排気)は原 子炉補助建物の屋上辺り(数十m高さ)に設置しており、飛来物がそれらの吸排気口から 侵入して衝突すれば、空気冷却器伝熱管が破損する可能性がある。換気空調設備(外気の 吸排気)も屋上に設置されており同様のことが考えられる。非常用ディーゼル発電機は地 上から数m~十m程度の高さに空気取入口が設置されており、開口部への飛来物の侵入・ 衝突が考えられる。外部燃料タンクは原子炉補助建物に近接して地上設置しているため飛 来物の衝突が考えられる。

飛来物候補は敷地内にあると想定される自動車、コンテナ、鋼製パイプ、鉄鋼材、砂利 が考えられる。また、強風の場合は、頻度及び影響を考慮に入れて支配的な風向きは山側 (南、南南東の方向)からの風であると考えられる。この場合、山側に位置する森林の多 くの木材が飛来物化する可能性がある。また、強風は数日間継続することも考えられるた め、従業員によるアクシデントマネジメントが困難である可能性に留意する必要がある。

### a. 風圧による破損

#### (a) 風圧により破損する可能性のある機器

風圧により破損する可能性のある機器・設備には、外部電源に関連する機器、排気 塔、原子炉補助建物が挙げられる。平成25年度に評価したように、外部電源は比較的 低い風速で機能喪失する確率が高く、強風の場合にはアプリオリに機能喪失すると想定 した。一方、原子炉補助建物倒壊による崩壊熱除去機能喪失については、平成25年度 に風圧に対する原子炉補助建物の壁の破損確率を評価した結果、現実的な風速の範囲で は原子炉補助建物が倒壊することはないことが示されたため、ここでは破損確率評価と して示す必要はない。

### (b) 風圧による破損評価

・排気塔の倒壊による崩壊熱除去機能(一部)喪失

別途、排気塔への風圧について構造評価を行った結果、支持鉄塔主柱材部について、 許容応力度比が 69 m/s で 0.38、100 m/s で 0.74 との一例がある。平成26年度に、 この結果を踏まえて排気塔を倒壊させる風速を算定した。風速による圧力は、風速 0m/s で極小点を持つ二次関数になると仮定すると、許容応力度比が 1.0 になる風速は 117 m/s と算出される。応力度比が 1.0 で破損が開始すると仮定し、この 117 m/s を 3 σ の下限値、許容応力度比が 2.0 となる 168 m/s を 3 σ の上限値と仮定して、正規 分布型の確率密度分布(平均値 142.5 m/s、標準偏差 8.5 m/s) とした。

#### b. 気圧差による破損

平成25年度に検討したとおり、気圧差荷重による構造物への影響を評価した結果、 有意な影響を及ぼすとは考えにくい。

### c. 飛来物による破損

#### (a) 飛来物による影響モード

飛来物が原子力発電所へ与える影響モードは、大きく分けて以下の 3 つに分けられ ると考えられる。

・大きな運動量をもつ飛来物の地上平行移動による原子炉補助建物の裏面剥離

・補助冷却設備及び/またはメンテナンス冷却系の空気冷却器の吸気口、排気口等

の開口部に飛来物が侵入することによる、崩壊熱除去系に係る重要機器・設備の 機能喪失

・原子炉補助建物外の外部燃料タンクなどの設備へ飛来物が衝突し、機能喪失

このうち、原子炉補助建物の裏面剥離は非常に起こりがたいうえ、プラントへの影響も大きくないことが平成25年度の検討で示されたことから、ここでは、影響モードとして取り上げる必要はない。

#### (b) 飛来物の候補

平成25年度に選定したように、発電所敷地内で飛来物になる可能性のものに加え て、発電所周辺にある山側森林からの木を想定した。以降、具体的には以下の括弧内 の物を飛来物と想定する。

- ・大きな運動エネルギーをもつ飛来物(自動車、コンテナ)
- ・施設の貫通抵抗を確認するための固い飛来物(鋼製パイプ、鋼製材)
- ・開口部等を通過することができる程度に小さくて固い飛来物(砂利等)
- ・高所からの飛来物(森林からの木)

### (c) 飛来物により破損する可能性のある機器

崩壊熱除去機能に関係する機器・設備のうち、飛来物に影響されるものとして以下 が想定される。本評価では、各機器の設置高さは、外部燃料タンク及びディーゼル発 電機が地上数 m、それ以外は数十 m を想定した。

### 補助冷却設備

山側からの飛来物は、補助冷却設備の空気取入口から侵入し、空気冷却器あるいは 2次ナトリウム配管に衝突することでそれらを破損し、補助冷却設備が機能喪失に至 る可能性がある。特に、山側で屋上より高い位置からの飛来物については、屋上に配 置する排気ダクト側から侵入し、空気冷却器内の伝熱管に衝突することで伝熱管を破 損し、補助冷却設備が機能喪失に至る可能性も考えられる。ただし、3系統あるため、 1系統でも健全であれば除熱可能である。

#### ・メンテナンス冷却系

山側からの飛来物は、その角度からメンテナンス冷却系の空気取入口側に侵入でき ないと考えられる。屋上高さより高い位置の山側からの飛来物については、落下して きた飛来物が排気ダクト側から侵入し、空気冷却器内の伝熱管に衝突することで破損 し、メンテナンス冷却系が機能喪失に至ることが考えられる。

### ・ディーゼル発電機

ディーゼル発電機の空気取入口から飛来物が侵入し、ディーゼル発電機に衝突、破 損し、機能喪失に至ることが想定される。本評価では外部電源は喪失すると想定する ため、ディーゼル発電機が機能喪失すれば、電源は全て喪失し、補助冷却設備及びメ

ンテナンス冷却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、自然循環による 崩壊熱除熱に期待できる。

#### ・換気空調設備の出入ロダクト

屋上高さより高い位置の山側からの飛来物については、落下してきた飛来物が排気 ダクト側から侵入し、主要な機器に衝突することで破損し、換気空調設備が機能喪失 に至ることが考えられる。本評価では、換気空調設備が機能喪失すれば、電源から動 的機器へ電力を供給するための配電設備が機能喪失すると想定するため、補助冷却設 備及びメンテナンス冷却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、自然循 環による崩壊熱除熱に期待できる。

### ・ディーゼル発電機用外部燃料タンク

ディーゼル発電機用の外部燃料タンクに飛来物が衝突し、燃料が流出する可能性が ある。これによりディーゼル発電機が機能喪失に至ることが考えられる。平成26年 度では、流出した燃料が燃焼した場合、燃焼に伴う高温の外気が補助冷却設備の空気 取入口へ流入することで外気による冷却機能を喪失することを考えたが、平成27年 度の重畳事象時には降雨を考慮するため、火災の発生はないと想定できる。本評価で は外部電源喪失を想定すると、ディーゼル発電機の外部燃料タンクが機能喪失すれば ディーゼル発電機は運転できないため、電源は全て機能喪失し、補助冷却設備及びメ ンテナンス冷却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、自然循環による 崩壊熱除熱に期待できる。

#### (d) 飛来物速度の算定

竜巻での飛来物評価と同様の手法で飛来物の飛来速度を求める。竜巻評価ガイド [3.3.1.5-1]においては飛来物の抗力係数は空力パラメータ C<sub>D</sub>A/m と呼ばれ、次式で 表される。

$$\frac{C_D A}{m} = 0.33 \frac{C_{D1} L_2 L_3 + C_{D2} L_1 L_3 + C_{D3} L_1 L_2}{m}$$
(3. 3. 1. 5-1)

ただし、mは飛散物の質量、C<sub>D</sub>は抗力係数、Aは飛来物が風を受ける面積、Lはその面積の1辺の長さである。空力パラメータは表3.3.1.5-4の値として示される。また、飛来物速度は、風速100m/sにおける飛来物の空力パラメータ[3.3.1.5-2]に対応して表3.3.1.5-5のように算定される。飛来速度は風速に比例すると仮定すると、風速と飛来物速度の関係は図3.3.1.5-9に示される。

### (e) 強風による開口部への衝突確率の算定

強風発生時の飛来物衝突確率を求めるにあたり、竜巻で使用した飛来物インパクト パラメータと同じ考え方を踏襲する。飛来物インパクトパラメータ Ψ は、強風発生 あたり、単位ターゲット面積あたりかつ飛来物あたりの飛来物衝突頻度として一般に 定義される。対象とする開口部に飛来物が衝突する確率は、強風頻度あたりに単位面

積に一つの飛来物が衝突する確率(/m<sup>2</sup>/(1/年))、開口部の面積、強風(竜巻)発 生頻度、強風時に発生する飛来物の数の積で表される[3.3.1.4-2]。ここでは、平成 25年度に検討した値を用いることとし、衝突確率は図3.3.1.5-10に示される。

### (f) 飛来物衝突による破損評価

飛来物が衝突した時に鉄板を貫通させない限界厚さ(貫通限界肉厚)と各飛来物の 衝突速度との関係を BRL 式[3.3.1.5-3]と呼ばれる評価式から評価する。

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2d^{3/2}} \tag{3.3.1.5-2}$$

ここで、Tは鉄板厚さ[in]、Mは飛来物の質量[lb/(ft/s<sup>2</sup>)]、Vは飛来物の衝突速度 [ft/s]、dは飛来物の直径[in]、Kは鋼板の材質に関する係数 $\Rightarrow$ 1。また、衝突速度 は飛来物速度と等しいと仮定すると、図 3.3.1.5-11 が得られる。この図に基づき、 想定した肉厚を限界肉厚と仮定し、その肉厚に対する各飛来物の衝突速度を求め、そ れに相当する風速が得られる。

本研究では、評価対象とする機器に対する肉厚を5種類に代表させて評価すること とした。表 3.3.1.5-6 に平成26年度想定の破損部位を示すが、同時に、感度ケース として2種類(感度 I と感度 II)を想定した。図 3.3.1.5-11 より、代表させた肉厚  $t_a$ が貫通限界肉厚  $t_A$  と等しいときに破損確率の中央値とし、対数標準偏差 $\beta$ (= $\beta_r = \beta_u$ ) ( $\beta_r$ :偶然的不確実さに対する対数標準偏差、 $\beta_u$ :認識論的不確実さ に対する対数標準偏差)を用いて、標準正規分布として破損確率  $P_{fragility}$ を表すと次 式となる。

$$P_{fragility} = \Phi\left(\frac{\ln(t_a / t_A) + \beta_u \Phi^{-1}(P_{conf})}{\beta_r}\right)$$
(3.3.1.5-3)

ここで、 $\Phi()$ は標準正規分布関数である。 $P_{conf}$ は信頼度を表しており、平均信頼度 曲線は 0.5、95%信頼度曲線は 0.95 となる。本研究では、対数標準偏差 $\beta$ =0.2 とした 対数正規分布を仮定して、95%信頼度曲線を用いて評価すると、図 3.3.1.5-12 のよう になる。

# d. 降雨による破損

はじめに記載したとおり、降雨単独による機能喪失は考えにくいことから、本研究 では破損しないと想定した。

#### e. 強風と降雨の重畳による破損

### (a) 飛来物による補助冷却設備排気部雨どいの破損

(3.3.1.5-2) 式を用いて飛来物衝突による破損評価が可能であり、3.3.1.5 (5) c (f) 節を参照する。

### (b) 排気ダクト出口ダンパ下部への雨水液滴の落下

排気部雨どいの破損後、空気冷却器排気ダクト内を雨水が落下して伝熱管部に接触 する。出口ダンパの開度によっては雨水はダンパに衝突してから落下すると考えられ るが、ここでは、ダンパには接触せずに伝熱管部に落下すると考えた。また、雨水液 滴がダクト内を落下していく過程で、伝熱管部で加熱された高温の空気と対向流の状 態で熱伝達が行われ、雨水液滴温度は浸入時から上昇していく。仮に雨水液滴温度が 100℃に達した場合には、雨水液滴は蒸発し、伝熱管部には到達しないものと仮定す る。

雨水液滴と伝熱管部からの空気の間の熱伝達については、雨水液滴の落下速度と空 気冷却器排気速度が対向流となるため相対速度に基づく球体の強制対流熱伝達として、 Ranz-Marshallの式を用いる[3.3.1.5-4]。

 $Nu = 2 + 0.6 \operatorname{Pr}^{1/3} \operatorname{Re}^{1/2}$  (3. 3. 1. 5-4) ここで、Nu はヌッセルト数、 $\operatorname{Pr}$  はプラントル数(=0.7)、 $\operatorname{Re}$  はレイノルズ数 (= $v_{drop}D_{drop}/v_{air}$ )を表す。 $D_{drop}$  は液滴直径、 $v_{drop}$  は落下速度(終端速度) $v_{air}$  は 空気の動粘性係数(400℃で 26mm²/s、500℃で 39mm²/s、600℃で 52mm²/s)である。  $\lambda_{air}$  は空気の熱伝導度(400℃で 33mW/m/K、500℃で 40mW/m/K、600℃で 46mW/m/K、) を用いると、空気側熱伝達係数 $h_{air}$  は次式で求められる。

$$h_{air} = \frac{Nu\lambda_{air}}{D_{drop}}$$
(3.3.1.5-5)

大雨の時の液滴直径 **D**<sub>drop</sub> は 5mm 程度で、降雨時落下速度(終端速度) v<sub>drop.0</sub> は 10m/s と言われている[3.3.1.5-5]。また、霧雨や雹のような形態もあるが、通常の雨の場 合、雨水液滴直径は概ね 1~5mm 程度の範囲であるとの情報がある[3.3.1.5-5]。この 情報に基づき、本研究では、平均値 2mm、標準偏差 2.5mm の対数正規分布を想定した。 図 3.3.1.5-13 に想定する液滴径分布を示す。

次に、単一液滴の初期温度を 20℃と仮定し、単一液滴の熱バランスから温度上昇 は次式で求められる。

$$\rho_{drop} C p_{drop} V_{drop} \frac{T_{drop}^{n+1} - T_{drop}^{n}}{\Delta \tau} = h_{air} A_{drop} (T_{air}^{n} - T_{drop}^{n})$$
(3. 3. 1. 5-6)

$$T_{drop}^{n+1} = T_{drop}^{n} + \frac{h_{air}A_{drop}(T_{air}^{n} - T_{drop}^{n})}{\rho_{drop}Cp_{drop}V_{drop}}\Delta\tau$$
(3.3.1.5-7)

ここで、 $\rho_{drop}$ は液滴密度(998kg/m<sup>3</sup>)、 $Cp_{drop}$ は液滴比熱(4.18kJ/kg/K)、 $V_{drop}$ は液滴体積(=(4/3) $\pi$ ( $D_{drop}$ /2)<sup>3</sup>)、 $T_{drop}^{n}$ は n ステップ時の液滴温度(℃)、 $T_{air}^{n}$ は n ステップ時の液滴周り空気温度(℃)、 $A_{drop}$ は液滴表面積(= $\pi D_{drop}^{2}$ )、 $\Delta \tau$ はタイムステップである。

空気冷却器内の空気流量 $F_{AC}$ 、断面積 $A_{AC}$ とすると、降雨時落下速度 $v_{drop,0} = 10$ m/sを用いれば、空気冷却器内の液滴落下速度は次式で表される。

 $v_{drop} = v_{drop,0} - F_{AC} / A_{AC}$ 

(3.3.1.5-8)

空気冷却器内出口温度で風量は変わることを考慮すると、液滴落下速度*v<sub>drop</sub>*は 400℃で4.4 m/s、500℃で5.1 m/s、600℃で5.7 m/sとなる。

(3.3.1.5-7)と(3.3.1.5-8)式を用いて、排気ダクト内の液滴温度を計算した結 果を図3.3.1.5-14に示す。ここでは、簡単のため、0.5mm毎で計算することとした。 空気温度400℃の場合、液滴径2mmでは伝熱管位置(8.8mと仮定)までに100℃に到 達して蒸発することを表している。2.5mmでは液滴のまま伝熱管に衝突することにな る。空気温度500℃と600℃では、それぞれ3mmと3.5mmでは蒸発するが、3.5mmと 4mmでは液滴のまま伝熱管に接触することになる。なお、実際には、液滴径は表面の 蒸発により小さくなるが、ここでは簡単のため、その効果を無視して計算した。また、 入口側空気温度は気象条件に左右されるが、伝熱管部で加熱された空気温度は伝熱管 内のナトリウム温度に影響を受けて入口側温度の影響は小さいと考えられるため、本 計算では入口側空気温度は20℃とした。以上より、重畳の影響を考慮する際、400℃ では2.5mm以上、500℃では3.5mm以上、600℃では4mm以上を考慮することとした。

### (c) 雨水液滴の空気冷却器伝熱管接触により発生する熱衝撃

雨水液滴が伝熱管に接触すると、伝熱管部は局所的に温度低下が生じ熱衝撃を与える。例えば、液滴直径 5mm の雨水は 600℃空気温度条件では排気ダクト通過中に約 20℃上昇するから、顕熱は 5.5J であり、潜熱 147J に対して 4%程度と小さい。ただ し、蒸発潜熱  $Lv_{drop}$ は 2.26MJ/kg を用いた。2mm の場合であっても、70℃上昇するが、 顕熱は 1.2J であり、潜熱 25J に対して 4%程度と小さい。ここでは、顕熱の効果は無 視して、潜熱分だけ考慮することとし、簡単のため局所的な温度低下のみを考慮する こととする。

伝熱管の熱容量を考えると、液滴と等価面積の伝熱管(約 3mm 厚みを仮定)の温度 低下幅 $\Delta T_{tube}$ は次式で表される。ただし、雨水の蒸発温度 100℃を超えて温度低下す ることはないため、伝熱管初期温度と蒸発温度との差で制限されることを考慮する。

$$\Delta T_{tube} = \min\left(\frac{\rho_{drop}V_{drop}Lv_{drop}}{\rho_{tube}Cp_{tube}C_{drop}A_{drop}t_{tube}}, T_{tube,init} - T_{vap,drop}\right)$$
(3. 3. 1. 5-9)

ここで、 $\rho_{drop}$ は液滴密度(998kg/m<sup>3</sup>)、 $Lv_{drop}$ は蒸発潜熱(2.26MJ/kg)、 $V_{drop}$ は液 滴体積(=(4/3) $\pi$ ( $D_{drop}$ /2)<sup>3</sup>)、 $A_{drop}$ は液滴表面積(= $\pi D_{drop}^{-2}$ )、 $C_{drop}$ は液滴広が り係数、 $\rho_{tube}$ は伝熱管密度(7980kg/m<sup>3</sup>)、 $Cp_{tube}$ は伝熱管比熱(500J/kg/K)、 $t_{tube}$ は伝熱管厚み、 $T_{tube,init}$ は伝熱管初期温度(°C)、 $T_{vap,drop}$ は液滴蒸発温度(°C)であ る。

液滴接触により発生する熱応力 $\sigma$  (kN/mm<sup>2</sup>) は次式で求められる。

$$\sigma = \frac{E_{tube} \alpha_{tube} \Delta T_{tube}}{1 - \upsilon_{tube}}$$

(3. 3. 1. 5 - 10)

ここで、 $E_{tube}$ はオーステナイト系ステンレス鋼[3.3.1.5-6]のヤング率(193kN/mm<sup>2</sup>)、空気側熱伝達係数 $\alpha_{tube}$ は熱膨張係数(1.61×10<sup>-5</sup>/°C)、 $\upsilon_{tube}$ はポアソン比(0.3を仮定)である。

(3.3.1.5-9) 式を用いて、雨水液滴接触による伝熱管温度低下を考慮した伝熱管 温度を図 3.3.1.5-15 に示す。空気温度に合わせて伝熱管初期温度は 400℃、500℃、 600℃を考慮した。実際には、液滴接触時には伝熱管表面で広がると考えられるため、 ここでは接触時液滴直径に対する元の液滴直径との比で表される液滴広がり係数を導 入した。広がり係数が大きくなると、温度低下に寄与する伝熱管面積が大きくなり熱 容量が大きくなるため、伝熱管温度低下幅は小さくなる。

伝熱管温度低下幅を(3.3.1.5-10) s 式に代入することで、液滴接触による熱応力 を計算できる。液滴広がり係数をパラメータとした伝熱管初期温度は 400℃、500℃、 600℃の場合の熱応力を図 3.3.1.5-16 に示す。

### (d)繰り返し雨水接触によって発生する熱応力による伝熱管疲労破損

オーステナイト系ステンレス鋼のような延性材は、1回の熱応力での破損は生じが たく、繰り返し雨水液滴接触による疲労破損が生じると考えられる。そこで、1時間 降水量に対して雨水液滴が接触する回数を算定し、発生応力と応力発生回数の関係か らステンレス鋼の設計疲労線図から、許容繰返し回数を超えた場合に伝熱管が破損す ると考えられる。

単位面積あたりの液滴衝突個数は、1 時間降水量 P (mm/hr) を液滴体積 $V_{drop}$  で除 することで求められ、図 3.3.1.5-17 に示される。それに液滴面積 $a_{drop}$ を乗ずること で、1 時間あたりの液滴衝突回数 $N_{drop}$ を算出することができ、図 3.3.1.5-18 に示さ れる。

$$N_{drop} = (P / V_{drop}) a_{drop}$$
(3. 3. 1. 5-11)

次に、オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労線図は日本機械学会の規格 [3.3.1.5-7]を参照することとし、プロットしたものを図 3.3.1.5-19 に示す。伝熱管 初期温度、液滴径、液滴広がり係数を設定すれば、1回の液滴接触による熱応力 のを 求めることができるため、その値と設計疲労線図の関係から、許容繰返し回数 *N<sub>limit</sub>* を求めることができる。この許容繰返し回数を1時間あたりの液滴衝突回数で除する ことで、伝熱管疲労破損までの許容時間を計算することができる。この伝熱管破損許 容時間が降雨継続時間を上回ったときに伝熱管破損とみなし機能喪失に至ると仮定す る。

#### f. 補助冷却設備空気冷却器のダンパ手動制御失敗確率

無電源下でのダンパ手動制御失敗の確率は、平成24年度の積雪時の事象シーケンス評

価と同様の想定とする。

THERP に基づき、1系統のダンパ2台の開操作に関する行動エラーの人的過誤率を設定 する。また、作業を二人一組で実施することによるリカバリの依存性は高従属とし、作業 後のプラントパラメータの監視によるリカバリの依存性は低従属と仮定する。さらに、非 常に高いストレスレベル、段階的作業、習熟者を仮定(5 倍)、エラーファクタは 10 を 仮定して平均値を算出し、無電源下での温度計測の操作失敗は無視する。その結果、上記 失敗確率に 6.5×10<sup>-3</sup>/demand を設定した。

なお、非常用電源がある場合は、補助冷却設備強制循環維持になりダンパ自動制御失敗 確率は1.0×10<sup>-6</sup>/demandと想定した。

### (6) イベントツリーの定量化

強風による破損ケースとして、平成26年度想定、感度 I、感度 II の場合を想定した。 重畳ケースとしては空気冷却器内温度 400℃、広がり係数1の場合を基準に、500℃、 600℃温度、広がり係数 2、5、10 も想定した。イベントツリーを定量化した結果、炉心損 傷頻度は、空気温度 400℃、広がり係数 1 の場合で、破損確率を平成 2 6 年度想定、感度 I、感度 II のとき、それぞれ 1.79×10<sup>-4</sup>/年、1.92×10<sup>-4</sup>/年、1.93×10<sup>-4</sup>/年と比較的高い 結果となった。感度 II ケースのシーケンス別の炉心損傷頻度と条件付除熱失敗確率を図 3.3.1.5-20 に示す。1.79×10⁻⁴/年の 71%を占める最も支配的なシーケンスは、風速 20~ 40m/s、1 時間降水量 20~40mm/h、降水継続時間 0~10h のカテゴリ(発生頻度 0.14 年) で、外部燃料タンク破損(確率 0.14)、ダンパ手動操作失敗(0.0065)のシーケンス9 であった。このとき、重畳の影響は、10°/年程度であり、炉心損傷頻度全体に比べて無視 できるほど小さくなった。しかしながら、ダンパ手動操作失敗が 10 時間程度継続したと してもプラントのもつナトリウム熱容量によって除熱失敗に至るほど高温にならず炉心損 傷を回避できる可能性が高い。また、比較的風速が低いとき、降水量が少ないときであれ ば、運転員操作が失敗の可能性が小さいと思われる。それらを考慮すれば、ダンパ手動操 作失敗による除熱失敗シーケンスは顕在化しない可能性もある。そこで、ダンパ手動操作 失敗確率ゼロを仮定して感度解析を実施した。なお、人的過誤確率に関する今後の研究動 向に着目して、より合理的な値を適用してゆくことも重要である。

強風による破損確率は平成 26 年度想定、感度 I、感度 II を考慮して計算を実施した結 果は、それぞれ 1.40×10<sup>-9</sup>/年、5.81×10<sup>-7</sup>/年、1.15×10<sup>-6</sup>/年となった。このとき、重畳 の効果は、それぞれ、~0、2.9×10<sup>-9</sup>/年、2.9×10<sup>-9</sup>/年であり、感度 II の場合に炉心損 傷頻度全体に対する寄与はそれぞれ、~0、0.25%、0.49%であり、比較的小さいものとな った。重畳の影響は、補助冷却設備排気部の雨どいが破損したときにあらわれるシーケン スであるが、強風によって雨どいが破損するような場合には内部の伝熱管も破損する可能 性が高いため、伝熱管が破損しない場合の重畳の影響は顕在化しにくいものとなるため、 炉心損傷頻度として大きく現れないことがわかった。感度 II ケースのシーケンス別の炉 心損傷頻度と条件付除熱失敗確率を図 3.3.1.5-21 に示す。1.15×10<sup>-6</sup>/年の 32%を占める 最も支配的なシーケンスは、風速 40~60m/s、1 時間降水量 20~40mm/h、降水継続時間 0 ~10h のカテゴリ(発生頻度 0.0036 年)で、外部燃料タンク破損(確率 0.17)、補助冷 却設備吸気部破損(0.0006)のシーケンス 11 であった。次いで、ほぼ同程度の頻度であ ったシーケンスが、補助冷却設備排気部破損のシーケンス 10 であった。外部ハザードの カテゴリ別炉心損傷頻度を図 3.3.1.5-22、条件付除熱失敗確率を図 3.3.1.5-23 に示す。 風速に対しては 40~60m/s、1 時間降水量に対しては 20~40mm/h、降水継続時間に対して は 0~10h が最も支配的であることが示された。これらは発生頻度が高いカテゴリであり、 起こりやすい外部ハザードと言えることから、強風飛来物からの適切な防護、ダンパ手動 操作の信頼度向上といった対策を検討する価値があることを示唆している。

重畳の影響を調べるため、液滴広がり係数を 2、5、10 にして評価を実施した。強風に よる破損確率は平成 26 年度想定、感度 I、感度 II を考慮して計算を実施した結果は、広 がり係数を変えたとしても、それぞれ 1.40×10<sup>-9</sup>/年、5.78×10<sup>-7</sup>/年、1.15×10<sup>-6</sup>/年とな った。前述のとおり、重畳の影響は小さいため、広がり係数を変更しても結果はほとんど 変わらない結果となった。また、空気温度 500℃の場合でも、それぞれ、1.40×10<sup>-9</sup>/年、 5.83×10<sup>-7</sup>/年、1.15×10<sup>-6</sup>/年となった。空気温度 600℃の場合でも、それぞれ、1.40×  $10^{-9}$ /年、5.84×10<sup>-7</sup>/年、1.15×10<sup>-6</sup>/年となり、重畳の影響は小さいため、空気温度を変 更しても結果はほとんど変わらない結果となった。

本評価では、重畳の影響は顕著でないことを示した。これは強風飛来物による破損モードは貫通だけを考慮したため、飛来物による破損が支配的な結果となったが、実際には補助冷却設備排気部一部破損などによる降雨による破損モードは起こりうると考えられる。 そこで、補助冷却設備排気部の伝熱管破損について条件付衝突確率 0.1 を仮定してみると、空気温度 400℃の場合、強風による破損確率を平成 26 年度想定、感度 I、感度 II の 3 種類に対して、炉心損傷頻度はそれぞれ 1.39×10<sup>-9</sup>/年、1.36×10<sup>-7</sup>/年、1.18×10<sup>-6</sup>/年となり多少増加となった。このうち、重畳の影響はそれぞれ 8.6×10<sup>-13</sup>/年(炉心損傷頻度に対して 0.06%)、7.64×10<sup>-8</sup>/年(56%)、7.68×10<sup>-8</sup>/年(6.5%)となり、重畳の影響が現れる傾向があることがわかった。ここで、感度 I において重畳の影響が大きくなっているのは、他の 2 ケースはシーケンス 11 であるのに対してシーケンス 10 が支配的であり、補助冷却設備排気部破損の影響が大きいからである。なお、本来は他の部位についても条件付衝突確率を与えるべきであるが、ここでは重畳の影響の有無を確認するためであったため簡易に評価した。今後、衝突確率や破損確率などのフラジリティ評価の詳細度を増す必要がある。

(7) まとめ

強風と降雨の重畳事象については、最大瞬間風速、1時間降水量、降水継続時間に応じ たハザードカテゴリを設定して、強風と降雨の重畳事象を起因とした炉心損傷シーケンス についてイベントツリーを構築した。また、空気冷却器伝熱管への雨水液滴の接触により 発生する熱応力を求め、繰返し接触による疲労破損を評価することで補助冷却設備機能喪 失を考慮した事象シーケンスを評価し、炉心損傷頻度を定量化する手法を開発した。

## 参考文献

[3.3.1.5-1] 原子力発電所の竜巻評価ガイド(案),第23回発電用軽水型原子炉の新規制基準

に関する検討チーム会合配布資料、平成25年6月3日.

- [3.3.1.5-2] 東京工芸大学 "平成21~22年度原子力安全基盤調査研究(平成22年度) 竜
   巻による原子力施設への影響に関する調査研究" 平成23年2月.
- [3.3.1.5-3] 四国電力(株) "伊方発電所発電所3号炉 竜巻影響評価説明資料"原子力規制委員会発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チーム会合,平成25年7月
   (伊方発電所安全審査資料 番号 DB-8-05 提出年月日 平成25年7月29日).
- [3.3.1.5-4] 伝熱工学資料 改訂第4版,日本機械学会(1986).
- [3.3.1.5-5] 小倉義光「一般気象学」東京大学出版会(1984).
- [3.3.1.5-6] ステンレス協会、http://www.jssa.gr.jp/contents/faq-article/q7/.
- [3.3.1.5-7] 日本機械学会、発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2011 年追補版) 〈第 I 編 軽水炉規格〉JSME S NC1-2011、第4章添付 4-2(2011 年 12 月).

表 3.3.1.5-1 年最大1時間降水量記録日の最大瞬間風速の発生頻度(グンベル分布)の離散化

風速(m/s)	超過確率	区間確率	区間頻度(/年)
$20 \sim 40$	2.07E-01	2.01E-01	2.24E-01
$40 \sim 60$	5.98E-03	5.81E-03	5.83E-03
$60 \sim 80$	1.55E-04	1.51E-04	1.51E-04
$80 \sim 100$	3.99E-06	3.89E-06	3.89E-06
$100 \sim 120$	1.03E-07	1.01E-07	1.01E-07
$120 \sim 140$	2.67E-09	2.60E-09	2.60E-09
$140\sim$	6.89E-11	6.89E-11	6.89E-11

表 3.3.1.5-2 年最大1時間降水量の超過確率(グンベル分布)の離散化

降水量(mm/h)	超過確率	区間確率
20~40	9.32E-01	7.17E-01
$40 \sim 60$	2.15E-01	1.94E-01
$60 \sim 80$	2.16E-02	1.96E-02
80~100	1.96E-03	1.78E-03
$100 \sim 120$	1.77E-04	1.61E-04
$120 \sim 140$	1.59E-05	1.45E-05
$140 \sim 160$	1.43E-06	1.30E-06
$160\sim$	1.29E-07	1.29E-07

表3.3.1.5-3 年最大1時間降水量記録日の0.5mm以上の降水継続時間の超過確率(グンベル分

布)の離散化					
継続時間(h)	超過確率	区間確率			
0~10	8.98E-01	8.53E-01			
$10 \sim 20$	4.52E-02	4.42E-02			
$20\sim\!30$	9.36E-04	9.17E-04			
$30 \sim 40$	1.90E-05	1.86E-05			
$40 \sim 50$	3.85E-07	3.77E-07			
$50 \sim 60$	7.79E-09	7.63E-09			
$60 \sim 70$	1.58E-10	1.55E-10			
$70 \sim 80$	3.20E-12	3.13E-12			
80~	6.48E-14	6.48E-14			

表 3.3.1.5-4 飛来物の空力パラメータ

飛来物	$L_1(m)$	L2 (m)	L <sub>3</sub> (m)	m(kg)	C <sub>D1</sub>	$C_{D2}$	C <sub>D3</sub>	C <sub>D</sub> A/m
砂利	0.04	0.04	0.04	0.18	2	2	2	0.0177
鋼製パイプ	2.0	0.05	0.05	8.4	2	0.7	0.7	0.0057
鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	1.2	1.2	2	0.0089
木材	2.0	0.2	0.2	48	2	0.7	0.7	0.0044
コンテナ	2.4	2.6	6	2300	2	2	2	0.0105
自動車	3.5	1.8	1.5	1100	2	2	2	0.0086

飛来物	C <sub>D</sub> A/m	<i>飛来物速度(m/s)</i>
砂利	0.0177	$\sim 65$
鋼製パイプ	0.0057	$\sim 50$
鋼製材	0.0089	$\sim$ 55
木材	0.0044	$\sim \! 45$
コンテナ	0.0105	$\sim 60$
自動車	0.0086	$\sim$ 55

表 3.3.1.5-5 風速 100m/s における飛来物の空力パラメータと飛来物速度の関係

# 表 3.3.1.5-6 飛来物による想定破損部位

設備	破損箇所	想定肉厚
	フィルタ等障害物	10mm
補助冷却系設備の空気冷却器(吸気部)	空気冷却器胴部	5mm
	空気冷却器伝熱管	2.5mm
	排気部雨どい	50mm
補助作却未設備の至べ行却奋(排入前)	空気冷却器伝熱管	2.5mm
インテナンフ没却変の空気が却空(四気	フィルタ等障害物	10mm
アンノノンへ们却未り至べ们却奋(吸火 部)	空気冷却器胴部	5mm
(1日	空気冷却器伝熱管	2.5mm
メンテナンス冷却系の空気冷却器(排気	フィルタ等障害物	50mm
部)	空気冷却器伝熱管	2.5mm
非常用ディーゼル発電機外部燃料タンク	外部燃料タンク	10mm
非常田ディーゼル双電機(四排写如)	フィルタ等障害物	10mm
か市市ノイニビル光电機 (吸护X前)	ディーゼル発電機本体	20mm
換気空調設備 空気取入部 · 排出部	換気空調吸排気口障害物	20mm

(a) 平成26年度想定

設備	破損箇所	想定肉厚
	フィルタ等障害物	10mm
補助冷却系設備の空気冷却器(吸気部)	空気冷却器胴部	5mm
	空気冷却器伝熱管	2.5mm
	排気部雨どい	5mm
補助作却未該傭り至又作却奋(排又前)	空気冷却器伝熱管	2.5mm
インテナンフ 海邦変の 空気 かお思 ( 画 気	フィルタ等障害物	10mm
>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	空気冷却器胴部	5mm
עום	空気冷却器伝熱管	2.5mm
メンテナンス冷却系の空気冷却器(排気	フィルタ等障害物	10mm
部)	空気冷却器伝熱管	2.5mm
非常用ディーゼル発電機外部燃料タンク	外部燃料タンク	5mm
非常田ディーゼル惑電機(吸捗気如)	フィルタ等障害物	10mm
か市市ノイニビル光电機 (吸护X記)	ディーゼル発電機本体	20mm
換気空調設備 空気取入部・排出部	換気空調吸排気口障害物	10mm

(b)外壁厚さの感度 I

(c)外壁厚さの感度 11		
設備	破損箇所	想定肉厚
	フィルタ等障害物	2.5mm
補助冷却系設備の空気冷却器(吸気部)	空気冷却器胴部	5mm
	空気冷却器伝熱管	2.5mm
補助冷却系設備の空気冷却器(排気部)	排気部雨どい	5mm
	空気冷却器伝熱管	2.5mm
メンテナンス冷却系の空気冷却器(吸気 部)	フィルタ等障害物	2.5mm
	空気冷却器胴部	5mm
	空気冷却器伝熱管	2.5mm
メンテナンス冷却系の空気冷却器(排気	フィルタ等障害物	2.5mm
部)	空気冷却器伝熱管	2.5mm
非常用ディーゼル発電機外部燃料タンク	外部燃料タンク	5mm
非常用ディーゼル発電機(吸排気部)	フィルタ等障害物	10mm
	ディーゼル発電機本体	20mm
換気空調設備 空気取入部・排出部	換気空調吸排気口障害物	2.5mm

(c)外壁厚さの感度 II



図 3.3.1.5-1 メインイベントツリー

※右側の番号はシーケンス番号



図 3.3.1.5-2 排気塔のイベントツリー



図 3.3.1.5-3 非常用電源外部燃料タンクのイベントツリー



(強風の影響のみ考慮して簡素化)

図 3.3.1.5-4 非常用電源のイベントツリー



(強風の影響のみ考慮して簡素化)

図 3.3.1.5-5 電気設備・換気空調機能のイベントツリー



(強風の影響のみ考慮して簡素化)

図 3.3.1.5-6 メンテナンス冷却系のイベントツリー





図 3.3.1.5-7 補助冷却設備吸気部のイベントツリー


図 3.3.1.5-8 補助冷却設備排気部のイベントツリー





# 3. 3. 1. 5 - 22



図 3.3.1.5-14 排気ダクト内雨水液滴の温度上昇履歴



図 3.3.1.5-15 1回の雨水接触による低下する伝熱管温度

### 3. 3. 1. 5 - 23



図 3.3.1.5-16 1回の雨水接触により発生する熱応力



図 3.3.1.5-17 単位面積あたりの液滴個数



図 3.3.1.5-18 1時間あたりの液滴衝突回数

3.3.1.5-24



図 3.3.1.5-19 オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労線図 (機械学会規格発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2011年追補版) 〈第 I 編 軽水炉規格〉 JSME S NC1-2011、第4章添付4-2(2011年12月)を基に作図)





図 3.3.1.5-22 カテゴリ別炉心損傷頻度(ダンパ手動操作失敗シーケンスを無視)



図 3.3.1.5-23 カテゴリ別条件付除熱失敗確率(ダンパ手動操作失敗シーケンスを無視)

# 3.3.1.5-26

### 3.3.1.6 崩壊熱除去解析(H25~H27)

(1) はじめに

外部ハザードによる影響を、ハザードが及ぼす環境要因の変動範囲を想定した上で、プ ラント動特性解析コード Super-COPD[3.3.1.6-1]を用いて崩壊熱除去解析を実施する。本 解析では、主たる外部ハザードは森林火災と重畳事象(降雪+低温)とし、その重要パラ メータは除熱能力を左右する空気冷却器の空気冷却器入口温度を考える。対象とするモデ ルプラントは、ナトリウム冷却型高速増殖炉原型炉とする。

外部ハザードによるプラントトリップ後に起動できる崩壊熱除去系には、補助冷却設備 とメンテナンス冷却系がある。メンテナンス冷却系は除熱量が小さいことから、補助冷却 設備でのみ除熱が行われると想定とする。また、補助冷却設備は原則として3系統で除熱 するが、補助冷却設備1系統でも除熱可能なため、その場合の評価も行う。なお、地震・ 津波発生時の炉心冷却性評価(いわゆる、ストレステスト)を基に、平成25年度のコー ド改修を加えたバージョンにて解析を行うこととした[3.3.1.6-1]。

平成25年度の解析では、機器・配管からの放熱により、空気冷却器空気取入口の閉塞 割合が高くても除熱されることが示された。しかしながら、電源喪失が生じた状況では換 気空調系が作動せず、配管の設置される部屋の雰囲気温度が上昇し、配管等からの放熱が 小さくなることが考えられる。そこで、これらの事象を包絡する条件として、配管等から の放熱に期待しない条件を追加した。

また、平成25年度の強風時及び森林火災時の事象シーケンス評価では燃料タンク火災 に伴う補助冷却設備空気取入口外気温度上昇による影響が大きいことが示された。そこで、 空気冷却器入口温度もパラメータとする。

平成27年度では、重畳事象として降雪と低温の重ね合わせが選定され、事象シーケン ス評価では長期の降雪及び低温が継続する場合において、電源喪失及びダンパ制御喪失を 想定したシーケンスで空気冷却器伝熱管内ナトリウム温度が低温停止温度 200℃を十分に 下回り、ナトリウムが凍結するシナリオが考慮された。そこで、平成27年度は、伝熱管 ナトリウム凍結確率モデル開発に資する崩壊熱除去解析を実施することとした。

(2) 解析条件

### a. プラント条件

- ① 初期出力は100%、ノミナル条件とする。
- ② 蒸気発生器はトリップ後、15~20 秒で給水喪失となり、蒸気発生器内の蒸気がなくなる時点で断熱とする。
- ③ 安全保護系動作に係るデータは、決定論的安全解析で使用している条件とし、動作 を考慮する設定値は解析用設定値(計測チャンネル誤差を保守側に考慮した設定値) を用いる。
- ④ 動的機器、運転条件等のデータについても決定論的安全解析で使用している条件とする。つまり、1次・2次系ポニーモータ流量及び崩壊熱については設計値とし、 補助冷却設備入口外気温度は20℃(基準条件)とする。

### 3. 3. 1. 6 - 1

### b. 閉塞条件

本解析での閉塞条件は、運動方程式を扱っている入力データで設定できる固定抵抗の項 に対し、入力データの流路断面積(m<sup>2</sup>)を変更することで設定する。すなわち、解析デー タは、閉塞がない場合の流路断面積に対する比率(%)で閉塞条件を与えることとし、本 解析では15%、50%、100%の3通りを設定する。

### c. 放熱条件

放熱を考慮している部位は、1次系、2次系、空気冷却器の配管であり、放熱を期待し ない場合は入力データで断熱条件に設定する。非常用電源が使用可能な状況では格納容器 内は換気空調系が作動しているため、その場合には1次系配管の放熱を考慮するよう入力 データを設定する。また、参考のため、電源の有無に係らず配管放熱を考慮したケースも 示す。

### d. 外気温度条件

補助冷却設備入口外気温度は20℃を基準としている。ここでは、外部火災等の状況によって外気温度が 50℃と 100℃上昇した条件を仮定する。また、降雪と低温の重畳事象時に は外気温度が 0℃以下になると想定されるため、ここでは、0℃、-5℃、-10℃をパラメー タとして設定する。

# e. ダンパ制御条件

外部電源喪失時には、無停電電源によりダンパ開度は 200℃を下回らないように制御さ れる。直流電源容量(蓄電池)は 8 時間で喪失するものとした[3.3.1.6-1]。現在の規制 基準では、スクラム後には必要最低限の電力に限定することで 24 時間維持できるととも に、仮設あるいは恒設電源を設置して 24 時間維持できるように要求されているが、ここ では無視した[3.3.1.6-2]。非常用電源による蓄電池への給電が可能な場合、デイタンク 及び7日分の燃料タンクによって、ダンパ自動制御は1週間以上維持できる。そこで、本 解析では、ダンパ自動制御が長期にわたり維持できる場合と保守的にスクラム後 120 時間 で制御不能となり開度固定になる場合を検討した。

非常用電源喪失時には、無停電電源によりダンパ開度は8時間自動制御されるが、8時 間以降はダンパ開度が全開のまま固定され、ナトリウム温度は200℃を下回る可能性があ る。本解析では、8時間ではどのケースもダンパ開度は全開となるため、スクラム後すぐ に全開で維持されるように設定した。

## f. 解析ケース

平成25年度では、電源状態及び系統数を考慮して、以下の4ケースを設定した。ケース1は外部電源使用可能とし、ケース2~3は以下に示すとおりである。

- ・ケース2:外部電源喪失及び非常用電源使用可能状態
- ・ケース3:外部電源喪失及び非常用電源使用不可能状態(無停電電源は8時間使用可能を想定)

#### 3.3.1.6-2

・ケース 4:外部電源喪失及び非常用電源使用不可能状態で補助冷却設備1系統のみ使 用可能

これらのケースのうち、平成25年度は基準条件として閉塞条件15%、外気温度20℃と したケース2~4 に対して、平成26年度解析では、閉塞条件、放熱条件、高温側外気温 度条件をパラメータとした。平成27年度では、低温側外気温度条件及びダンパ制御条件 をパラメータとした。設定した解析条件を表3.3.1.6-1に示す。

#### g. 崩壊熱除去成功の判断基準

崩壊熱除去解析においては、判断条件に対して厳しい値となるのは原子炉冷却材バウン ダリ温度である。オーステナイト系ステンレス鋼では、700℃で1,000 時間、750℃で100 時間まで健全性が維持される知見が得られている[3.3.1.6-3]。そこで、本解析の成功基 準は、原子炉冷却材バウンダリ最高温度750℃以下とし、保守的にその温度を超過する時 間は成功基準に用いないものとした。

### h. 空気冷却器伝熱管のナトリウム凍結の判断基準

常圧におけるナトリウムの融点は98℃であるが、不純物が混入していることを考慮し、 ここでは120℃となった時点で瞬時に凍結すると考えられる[3.3.1.6-4]。一方、安全解析 では、伝熱管をグルーピングして解析していることを踏まえて、局所的な凍結の恐れに配 慮して、保守的に150℃を制限温度としている[3.3.1.6-5]。そこで、本解析では、ナトリ ウム凍結温度は、空気冷却器伝熱管出口温度の120℃と150℃の両方を併記することとし た。

### (3) 解析結果

解析結果を表 3.3.1.6-1 に示す。解析結果の一例として、ケース 2-1a-1 の過渡変化の 代表的な温度や流量を図 3.3.1.6-1 に示す。本ケースでは、外部電源喪失のため 2 次系の 空調系は停止するものの、非常用電源が作動することにより格納容器内空調は作動してい ることから、1 次系の配管放熱を考慮する条件である。ポニーモータが起動しているため 1 次・2 次系のナトリウム流量は確保されているものの、15%流路となる閉塞を想定して いるため、空気冷却器3系統共に空気流量は通常時の 15%程度となる。1 次系(原子炉容 器出入口)ナトリウム温度と2 次系(空気冷却器出入口)ナトリウム温度は均温化する。 約 91 時間で 735℃まで上昇するが、その後、原子炉内ナトリウム温度は低下する。

表 3.3.1.6-1 には原子炉容器出口ナトリウム温度のピーク値とその到達時間を示してお り、750℃を超えて昇温が継続する場合はカッコ書きで示している。また、空気冷却器出 ロナトリウム温度として 120℃と 150℃に到達した時間を記載しており、到達しない場合 は計算終了時点の温度を示している。

外部電源喪失条件であるケース2-1a(1次系配管放熱考慮)では、全ての解析条件で原 子炉容器出口温度の判断基準を満足する。ケース2-1b(配管断熱)では、15%面積/20℃温 度の場合と 100%面積/100℃温度の場合のみが判断基準を満足しない。ケース 2-1c(120h 以降のダンパ開度固定)では、判断基準を満足する。これらのケースでは、ダンパ自動制

#### 3.3.1.6-3

御のため空気冷却器出口温度は 200℃で維持されるが、120h 以降のダンパ自動制御不能を 考慮した場合でも 300h 時点で 130℃超であり、10 日程度でダンパ手動操作あるいは電源 復旧によるダンパ制御が可能であれば、ナトリウム凍結の恐れはないと言える。

全交流電源喪失条件であるケース 3-2a (配管断熱)では、15%面積/20℃温度の場合と 100%面積/100℃温度の場合を除き、原子炉容器出口温度の判断基準を満足する。これらの ケースでは、ダンパ制御不能によるダンパ全開維持のため、外気温度20℃以下では空気冷 却器出口温度は 150℃を下回り、ナトリウム凍結に至ることを示している。冬場の低温時 には 3 日程度でダンパ手動操作あるいは電源復旧によるダンパ制御が必要であることを示 唆している。

全交流電源喪失が生じ1ループのみで除熱する場合のケース4-1a(配管断熱)では、外 気温度 0℃以下では原子炉容器出口温度の判断基準を満足するものの、20℃以上の解析条 件では満足しないことが示された。これらのケースでは、冬場の低温時には、3 ループ除 熱運転を1ループ除熱運転にすることで、ナトリウム凍結温度にも至らず、長期に崩壊熱 除去が可能であることを示しており、運転手順として検討する価値がある。

以上の解析結果を基に、空気冷却器入口外気温度が 20℃の場合の最高温度を図 3.3.1.6-2 にまとめた。外部電源喪失時 (Case 2-1a) には、流路面積 15%と 50%の結果を 線形外挿すれば、流路面積 13%程度で 750℃を超えると推定される。よって、外部電源喪 失時には流路面積 13%程度以上を確保すれば除熱可能と言える。同様に、全電源喪失時 (Case 3-2a) には流路面積 42%程度で 750℃を超えると推定されることから、流路面積

42%程度以上を確保すれば除熱可能と言える。

図 3.3.1.6-3には、空気冷却器流路面積 100%(全開)の場合の最高温度をまとめた。外 部電源喪失時(Case 2-1a)には外気温度 100℃の条件でも判断基準を超えない。100℃と 50℃の結果を線形外挿すれば、外気温度 171℃程度で 750℃を超えると推定される。よっ て、外部電源喪失時には火災等で外気温度が上昇した場合に外気温度 171℃程度以下であ れば除熱可能と言える。全電源喪失時(Case 3-2a)には外気温度 100℃で判断基準をやや 超えているが、100℃と 50℃の結果を線形内挿すれば、外気温度 95℃程度で 750℃を超え ると推定される。よって、全電源喪失時には外気温度 95℃程度以下あれば除熱可能と言え る。全電源喪失時の1ループ運転(Case 4-1a)では、0℃を若干上回る外気温度で判断基 準を超えると考えられることから、0℃程度以下であれば除熱可能と言える。

図 3.3.1.6-4 と図 3.3.1.6-5 は、それぞれ、流路断面積と外気温度の除熱条件を変化さ せた場合の結果である。3 ループでポニーモータ運転により強制循環除熱を行う条件では、 流路面積 13%程度まで閉塞しても除熱可能であり、除熱能力は高い。3 ループが自然循環 除熱を行う場合は流路面積 40%程度まで除熱可能であるが、1 ループのみの自然循環除熱 では十分な除熱ができないことが分かる。今回の解析では、原子炉停止直後からの崩壊熱 を用いて解析しているため、保守側の結果になったと思われる。

火山噴火では 10~20 時間継続することが、平成25年度の評価で示されている。フィ ルタ交換などを考慮する場合は、降灰継続時間が重要となる。そこで、設計基準事故解析 で考慮するナトリウム温度 650℃と今回の解析の判断基準である 750℃、それらの中間の 700℃に到達する時間について、外気温度 20℃及び流路断面積 15%とした場合の解析結果 を図 3.3.1.6-6 に示す。流路面積 15%に閉塞したとしても、3 ループで自然循環する場合 は 750℃に到達するまでに 33 時間、1 ループの自然循環では 25 時間であり、時間的な余 裕があることが分かる。

森林火災や燃料タンク火災が発生した場合、その消火には数時間~十数時間を要すると 考えられる。そこで、原子炉容器内ナトリウム温度が 650℃/700℃/750℃に到達するとき の時間について、外気温度 100℃及び流路断面積 100%とした解析結果を図 3.3.1.6-7 に示 す。外気温度 100℃が長時間継続したとしても、3 ループで自然循環する場合は 750℃に到 達するまでに54時間、1 ループの自然循環では 25 時間となった。これらの時間があれば、 実際の消火活動では十分に消火可能であることを考えると、十分な時間的余裕があること がわかる。

降雪と低温の重畳事象において低温が継続する場合ではナトリウム凍結シナリオが懸念 される。そこで、外気温度をパラメータとした原子炉容器及び空気冷却器出ロナトリウム 温度履歴を電源喪失及びダンパ制御喪失を想定したシーケンスについて図 3.3.1.6-8~ 3.3.1.6-11 で比較する。20℃から 100℃では感度が大きいことが分かる。全電源喪失時 3 ループ自然循環除熱運転の場合、外気温度が 0℃以下ではナトリウム凍結に至る。そこで、 ナトリウム凍結温度の目安として 150℃と 120℃到達時間について外気温度を横軸にして 整理した結果を図 3.3.1.6-12 に示す。本結果は、3.3.1.4節の空気冷却器伝熱管ナトリウ ム凍結確率モデル開発に供された。

### (4) 課題の整理

本解析では、原子炉停止直後から空気取入口の空気流路が閉塞した状況に対し、外気温 度を一定とした条件を与えて解析を実施した。火山噴火などの外部ハザードを実際に認知 した場合、直ちに原子炉停止を行えば崩壊熱レベルが下がり、空気流路閉塞あるいは外気 温度上昇といった異常事象においても、本解析結果より余裕時間は長くなるはずである。 今後は、外部ハザード発生後のシナリオに即した崩壊熱除去解析が必要である。

また、原子炉停止直後から外気温度は時間的に変動することなく一定として解析を実施 した。火災等により外気温度が上昇することが見込まれる場合には、直ちに原子炉停止を 行い崩壊熱レベルを下げることで余裕時間は長くなる。

低温時にはナトリウム凍結が懸念されるが、ダンパ開度調整や1ループ運転といった運転手順を考慮することで、除熱失敗シーケンスを避けられることが明らかとなったため、 今後、運転手順を考慮した崩壊熱除去解析を実施していくことが必要である。

# 参考文献

- [3.3.1.6-1] 日本原子力研究開発機構 FBR プラント工学センター、敦賀本部高速増殖炉研究開 発センター、敦賀本部経営企画部, JAEA-Evaluation 2011-004 (2012).
- [3.3.1.6-2] 原子力規制委員会「実用発電用原子炉に係る新規制基準について」 https://www.nsr.go.jp/data/000070101.pdf
- [3.3.1.6-3] http://www.jaea.go.jp/04/turuga/jturuga/press/posirase/1407/peer10.pdf
- [3.3.1.6-4] Y. Chikazawa, et al., "Evaluation of Earthquake and Tsunami on JSFR," Proc. ICAPP'12, Paper 12384, Chicago, USA, June 24-28, 2012.
- [3.3.1.6-5] Y. Chikazawa, et al., "Severe External Hazard on Hypothetical JSFR in 2010," Nucl. Technol., Vol. 192, No. 2, pp. 111-124, 2015.

	事象想定	解析条件 (注1)						解析結果				
ケース		ホ <sup>°</sup> ニー モータ	7 ロワ	タ <sup>*</sup> ン ハ <sup>° (注</sup> 2)	流路	配管放 熱 <sup>(注3)</sup>	外気 温度	炉容器出ロナトリウ ム温度 <sup>(注4)</sup>		空気冷却器出口 ナトリウム温度 <sup>(注 <sup>5)</sup></sup>		
								最大値 (時間)	評価	凍結温度 (時間)	評価	
2-1	-	起動	停止	制 御 *1	15%	考慮 *4	20°C	577°C (42. 7h)	0	_	_	
2-1-1		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	考慮 *4	20°C	437℃ (0. 8h)	0	200°C (69. 9h)	0	
2-1-2		起動	停止	制 御 *1	100%	考慮*4	0°C	435℃ (0. 8h)	0	200°C (37. 3h)	0	
2-1-3		起動	停止	制 御 *1	100%	考慮 *4	-5℃	434℃ (0. 8h)	0	200°C (33.6h)	0	
2-1-4		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	考慮 *4	−10°C	433℃ (0.8h)	0	200°C (31.5h)	0	
2-1a-1		起動	停止	制 御 *1	15%	1 次系 *5	20°C	735℃ (91.0h)	0	676°C (150h)	0	
2-1a-2		起動	停止	制 御 *1	50%	1次系*5	20°C	515℃ (30. 5h)	0	263°C (150h)	0	
2-1a-3		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	1次系*5	20°C	439℃ (0. 8h)	0	200°C (86. 3h)	0	
2-1a-4		起動	停止	制 御*1	100%	1次系*5	50°C	487°C (21. 4h)	0	228°C (150h)	0	
2-1a-5		起動	停止	制 御*1	100%	1 次系 *5	100°C	596℃ (46. 2h)	0	442°C (150h)	0	
2-1a-6		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	1次系*5	0°C	436°C (0. 8h)	0	200°C (44. 1h)	0	
2-1a-7	外部	起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	1次系*5	−5°C	435°C (0. 8h)	0	200°C (39. 3h)	0	
2-1a-8		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	1 次系 *5	−10°C	435℃ (0. 8h)	0	200°C (35. 2h)	0	
2-1b-1		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	15%	断熱 *6	20°C	[750°C (31. 2h)]	×	_	_	
2-1b-2		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	50%	断熱 *6	20°C	710°C (96. 7h)	0	649°C (150h)	0	
2-1b-3		起動	停止	制 御*1	100%	断熱 *6	20°C	449°C (8. 3h)	0	200°C (109. 4h)	0	
2-1b-4		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	断熱 *6	50°C	592°C (55. 6h)	0	405°C (150h)	0	
2-1b-5		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	断熱*6	100°C	764°C (83. 7h)	×	691°C (150h)	0	
2-1b-6			起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	断熱*6	0°C	439℃ (0. 78h)	0	200°C (54.1h)	0
2-1b-7		起動	停止	制 御 <sup>*1</sup>	100%	断熱 *6	−5°C	438°C (0. 78h)	0	200°C (47.5h)	0	
2-1b-8		起動	停止	制 御*1	100%	断熱*6	−10°C	437℃ (0. 78h)	0	200°C (42. 3h)	0	
2-1c-1		起動	停止	固 定 *2	100%	断熱 *6	0°C	439°C (0. 78h)	0	135°C (300h)	0	
2-1c-2		起動	停止	固 定 *2	100%	断熱 *6	-5℃	438°C (0. 78h)	0	134°C (300h)	0	
2-1c-3		起動	停止	固 定 *2	100%	断熱*6	−10°C	437°C (0. 78h)	0	132°C (300h)	0	
3-2	全交 流電	停止	停止	全 開 * <sup>3</sup>	15%	考慮*4	20°C	598°C (39. 6h)	0		_	

表 3.3.1.6-1 崩壊熱除去解析における解析条件と結果(1/2)

3-2-1	源喪 失	停止	停止	全 開 *3	100%	考慮 *4	20°C	486°C (1. 3h)	0	150℃ (105. 8h) 130℃ (150h)	× *a
3-2-2		停止	停止	全 開 * <sup>3</sup>	100%	考慮*4	0°C	481°C (0. 5h)	0	150°C (46. 7h) 120°C (82. 1h)	×
3-2-3		停止	停止	全 開 * <sup>3</sup>	100%	考慮 *4	−5°C	481°C (0. 5h)	0	150°C (42. 6h) 120°C (70. 3h)	×
3-2-4		停止	停止	全 開 * <sup>3</sup>	100%	考慮 *4	-10°C	480°C (0. 5h)	0	150°C (39. 3h) 120°C (60. 9h)	×
3-2a-1		停止	停止	全 開 * <sup>3</sup>	15%	断熱 *6	20°C	[750°C (27.5h)]	×	_	_
3-2a-2		停止	停止	全 開 * <sup>3</sup>	50%	断熱*6	20°C	713℃ (89. 9h)	0	599°C (150h)	0
3-2a-3		停止	停止	全 開 <sup>*3</sup>	100%	断熱*6	20°C	497°C (1. 4h)	0	150°C (133. 5h) 143. 0°C (150h)	×
3-2a-3 3-2a-4		停止停止	停止停止	全 開 全 開	100% 100%	断熱 *6 断熱 *6	20℃ 50℃	497℃ (1. 4h) 605℃ (45. 8h)	0	150°C (133. 5h) 143. 0°C (150h) 349°C (150h)	× ©
3-2a-3 3-2a-4 3-2a-5		停止 停止 停止	停止 停止 停止	全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup>	100% 100% 100%	断熱 <sup>*6</sup> 断熱 <sup>*6</sup> 断熱 <sup>*6</sup>	20°C 50°C 100°C	497℃ (1. 4h) 605℃ (45. 8h) 767℃ (78. 3h)	0 0 ×	150°C (133. 5h) 143. 0°C (150h) 349°C (150h) 641°C (150h)	× ©
3-2a-3 3-2a-4 3-2a-5 3-2a-6		停止 停止 停止	停止 停止 停止	全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup>	100% 100% 100%	断熱* <sup>6</sup> 断熱* <sup>6</sup> 断熱* <sup>6</sup> 断熱* <sup>6</sup>	20°C 50°C 100°C 0°C	497℃ (1. 4h) 605℃ (45. 8h) 767℃ (78. 3h) 487℃ (1. 3h)	0 0 ×	150°C (133. 5h) 143. 0°C (150h) 349°C (150h) 641°C (150h) 150°C (58. 7h) 120°C (94. 1h)	× © ×
3-2a-3 3-2a-4 3-2a-5 3-2a-6 3-2a-7		停止 停止 停止 停止 停止	停止 停止 停止 停止 停止	全* <sup>3</sup> 全開 全 <sup>*3</sup> 全開 全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup> 全 <sup>*3</sup>	100% 100% 100% 100%	断熱* <sup>6</sup> 断熱* <sup>6</sup> 断熱* <sup>6</sup> 断熱* <sup>6</sup> 断熱* <sup>6</sup>	20℃ 50℃ 100℃ 0℃ -5℃	497℃ (1. 4h) 605℃ (45. 8h) 767℃ (78. 3h) 487℃ (1. 3h) 484℃ (1. 3h)	0 0 × 0 0	150°C (133. 5h) 143. 0°C (150h) 349°C (150h) 641°C (150h) 150°C (58. 7h) 120°C (94. 1h) 150°C (51. 3h) 120°C (82. 0h)	× © × ×

				解析	条件 (注	1)	解析結果					
ケース	事象 想定	ホ <sup>°</sup> ニー モータ	フ゛ロワ	タ <sup>*</sup> ン ハ <sup>° (注</sup> 2)	流路	配管放 熱 <sup>(注3)</sup>	外気 温度	炉容器出ロナトリウ ム温度 <sup>(注4)</sup>		空気冷却器出口 ナトリウム温度 <sup>(注</sup> <sup>5)</sup>		
								最大値 (時間)	評価	凍結温度 (時間)	評価	
4-1			停止	停止	全 開 * <sup>3</sup>	15%	考慮 *4	20°C	624°C (44. 3h)	0	_	-
4-1-1			停止	停止	全 開* <sup>3</sup>	100%	考慮 *4	20°C	531℃ (10. 1h)	0	150℃ (111. 2h) 120℃ (135. 9h)	×
4-1-2		停止	停止	全 開 *3	100%	考慮*4	0°C	522°C (6. 3h)	0	150℃ (112. 1h) 120℃ (124. 3h)	×	
4-1-3	~	停止	停止	全 開 *3	100%	考慮 *4	−5°C	520°C (6. 3h)	0	150°C (102. 8h) 120°C (115. 0h)	×	
4-1-4	全流源失心除(A)の風止)交電喪1プ熱B	全 流 源 喪 失 +1	停止	停止	全 開 *3	100%	考慮 *4	-10°C	518°C (6. 3h)	0	150°C (92. 2h) 120°C (104. 6h)	×
4-1a-1			停止	停止	全 開 *3	15%	断熱*6	20°C	[750°C (23. 9h)]	×	_	_
4-1a-2		停止	停止	全 開 *3	50%	断熱 *6	20°C	[750°C (28. 5h)]	×	—	_	
4-1a-3		(h, b ループ の通 止)	停止	停止	全 開 * <sup>3</sup>	100%	断熱 *6	20°C	[750℃ (52. 1h)]	×	671.5℃ (150h)	0
4-1a-4			停止	停止	全 開* <sup>3</sup>	100%	断熱*6	50°C	[750°C (33. 4h)]	×	—	_
4-1a-5			停止	停止	全 開* <sup>3</sup>	100%	断熱*6	100°C	[750℃ (25. 2h)]	×	_	_
4-1a-6		停止	停止	全 開 *3	100%	断熱*6	0°C	720°C (86. 4h)	0	507. 2°C (150h)	0	
4-1a-7		停止	停止	全 開* <sup>3</sup>	100%	断熱*6	−5°C	700℃ (77.6h)	0	455. 8°C (150h)	0	
4-1a-8				停止	停止	全 開 *3	100%	断熱*6	−10°C	680°C (68. 1h)	0	405.5°C (150h)

表 3.3.1.6-1 崩壊熱除去解析における解析条件と結果(2/2)

(注1) 流路の欄は空気冷却器の空気流路閉塞条件として流路断面積に対する割合を記載。

(注 2) \*1「制御」:ナトリウムの過冷却防止のため、ダンパ開度は 200℃で自動制御が長期間維持できると想定した。

\*2「固定」:ナトリウムの過冷却防止のため、ダンパ開度は200℃で自動制御されるが、直流電源(8h) と燃料タンク(1週間)を想定すると、ダンパ開度自動制御は176h維持を想定できる。ただし、 ここでは保守的に120hで直流電源による制御不能に至ると想定し、120h時点でのダンパ開度を固 定することとした。

\*3「全開」:非常用電源喪失のため非常用電源から直流電源への供給はなく、直流電源 8h のみ期待で きる。この場合、事象発生直後にダンパ開度は全開になり、8h 後にはダンパ開度前回のまま維持 されると想定することとした。

(注3) \*4「考慮」:電源の有無にかかわらず空調稼働を想定して、配管放熱を考慮した。

\*5「1次系」:外部電源喪失時には非常用電源により格納容器内は空調稼働が期待できるため、1次系のみ配管放熱を考慮した。

\*6「断熱」:外部電源および非常用電源喪失時には空調は起動しないため、配管放熱を無視して断熱 条件を想定した。

(注 4)最大値(時間)の欄は、小数点以下を四捨五入した温度最大値とその到達時間を記載。ただし、冷却材 最高温度が判断基準である 750℃を超えて昇温が継続する場合には、カッコ書きで明記するとともに、 750℃を超える時間を記載。

\*a:120℃を上回っているが、温度履歴から判断して120℃に到達すると推定できる。

(注5) 凍結温度(時間)の欄は、150℃と120℃の到達時間を併記した。ただし、150℃に到達していないケースでは、解析終了時間150hにおけるナトリウム温度を記載し、評価は「◎」とした。また、200℃でダンパ制御されているケースでは、200℃の到達時間を記載し、評価は「◎」とした。昇温が継続する場合及び計算時間の短い15%流路の場合には、「-」を記載。



図 3.3.1.6-1 崩壊熱除去解析結果の一例 (ケース 2-1a-1) ※RV:Reactor Vessel、原子炉容器、A,B,C:ループ名





※空気冷却器入口外気温度 20℃



図 3.3.1.6-3 崩壊熱除去解析結果:外気温度の影響

※空気冷却器流路面積 100% (全開)



図 3.3.1.6-4 崩壊熱除去解析結果:除熱条件の影響(流路断面積) ※空気冷却器入口外気温度 20℃



図 3.3.1.6-5 崩壊熱除去解析結果:除熱条件の影響(外気温度)

※空気冷却器流路面積100%(全開)



図 3.3.1.6-6 崩壊熱除去解析結果:外気温度 20℃及び流路断面積 15%の場合の 650℃/700℃ /750℃到達時間

※Case 2-1a では 750℃に到達していないため最高温度を示す



図 3.3.1.6-7 崩壊熱除去解析結果:外気温度 100℃及び流路面積 100%の場合の 650℃/700℃ /750℃到達時間

※Case 2-1a では 650℃に到達していないため最高温度を示す



図 3.3.1.6-8 崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした原子炉容器出口及び空気冷却 器出口のナトリウム温度(流路断面積100%) (Case 2-1a:外部電源喪失時、ダンパ自動調 整長期可能な場合)



図 3.3.1.6-9 崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした原子炉容器出口及び空気冷却 器出口のナトリウム温度(流路断面積 100%) (Case 2-1c:外部電源喪失時、120h でダンパ 自動調整停止、120h ダンパ開度固定の場合)



図 3.3.1.6-10 崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした原子炉容器出口及び空気冷却器出口のナトリウム温度(流路断面積 100%) (Case 3-2a:全電源喪失時)

## 3.3.1.6-14



図 3.3.1.6-11 崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした原子炉容器出口及び空気冷却器出口のナトリウム温度(流路断面積 100%) (Case 4-1a:全電源喪失時1ループ運転)



図 3.3.1.6-12 崩壊熱除去解析結果:外気温度をパラメータとした空気冷却器出口ナトリウム 温度 150℃/120℃到達時間(流路断面積 100%) (Case 3-2a:全電源喪失時 3 ループ運転)

### 3.3.1.7 評価手法の整備(4年間のまとめ)

3.3.1.7.1 はじめに

平成24年度に積雪を対象として安全対策を整理するとともに、事象シーケンスを評価 した。平成25年度に竜巻・強風を対象として安全対策を整理するとともに、事象シーケ ンスを評価した。平成26年度に降雨・火山噴火を対象として安全対策を整理するととも に、事象シーケンスを評価した。平成27年度に森林火災・重畳事象を対象として安全対 策を整理するとともに、事象シーケンスを評価した。平成27年度実施内容は前節までに 記述していることから、ここでは、平成26年度までの実施内容をまとめる。

### 3.3.1.7.2 安全対策の整理(H24~H27)

平成24~27年度において検討した安全対策を図 3.3.1.7-1(強制循環除熱に対する 対策及び評価)と図3.3.1.7-2(自然循環除熱に対する対策及び評価)に示す。

### (1) 強制循環除熱(補助冷却設備、メンテナンス冷却系で共通)

a. 強風/竜巻(風、雨)

強風によって補助冷却設備の空気冷却器の排気部が破損(屋根が吹き飛ぶ等)すると、 破損部分から流入した雨水が空気冷却器の伝熱管と接触することで、2次系ナトリウムが 凍結する可能性がある。この場合、補助冷却設備による除熱機能が阻害される恐れがある ので、まず「排気部の耐風性評価」を行い、その結果に応じて「排気部の耐風性強化」や 「雨水流入防止構造」の導入を検討する必要がある。また、「ナトリウム凍結に至る雨水 流入量評価」を実施し、過酷な状態に陥る場合の雨水流入量を定量的に把握しておくこと が、事象の被害影響を判断する上で有効であると考えられる(メンテナンス冷却系につい ても同様)。

強風によって遮風柵が倒壊することで開閉所が損傷した場合や、送電線をつなぐ鉄塔が 倒壊した場合には、外部電源が長期にわたり喪失する可能性が高い。さらに、ディーゼル 発電機建物内に雨水が流入すると、非常用ディーゼル発電機が機能喪失する恐れがある。 そのため、ディーゼル発電機建物の「浸水可能性の評価」を検討しておくことが有効であ る。また、これらの事象が重畳した場合、非常用直流電源の充電機能の喪失に発展する可 能性があるため、「バックアップ用電源確保(電源車等)」の導入を検討する必要がある。

### b. 降雨

異常降雨により原子炉補助建物周りが冠水した場合、多量の雨水が建物内に流入し、流 入量によっては原子炉補助建物が浸水する可能性がある。その場合、計装品や電気盤等の 電気・制御設備が機能喪失し、崩壊熱除去系の制御機能が喪失する恐れがある。さらに、 ディーゼル発電機建物内に雨水が流入すると、非常用ディーゼル発電機が機能喪失する恐 れがある。そのため、原子炉補助建物及びディーゼル発電機建物の「浸水可能性の評価」 を検討しておくことが有効である。

### c. 積雪

積雪により補助冷却設備の取入部/排気部が閉塞する(凍結する)と、補助冷却設備の 除熱機能が喪失する恐れがあるため、「最低限の最終ヒートシンク」を目的とした対策と して「除雪」の実施や、空気取入フィルタへの「電熱線ヒータの導入」、排気部の「閉塞 防止構造」の検討が必要と考える。なお、補助冷却設備の空気取入部に関しては、「ラッ ク室扉の開放」も空気流路確保として有効と考えられる。(「ラック室扉の開放」以外は、 メンテナンス冷却系及び制御用圧空設備についても同様。)

積雪により換気空調系の空気取入部/排気部が閉塞すると、2次主循環ポンプや2次メ ンテナンス冷却系電磁ポンプ室の雰囲気温度が上昇し、機能喪失に至る恐れがある。対策 としては、空気取入部/排気部の閉塞防止のため、「除雪、風除室空気取入口の高所化」 等について考慮しておくことや、「換気空調系停止時雰囲気温度評価」を実施し、温度上 昇率の程度を確認しておくことが有効と考える。

非常用ディーゼル発電機への空気取入ガラリが、吹雪によって横殴りの雪の吹き付けに より閉塞すると、燃焼用空気の吸気不全に至り、非常用ディーゼル発電機が機能喪失する 恐れがある。さらに外部電源喪失(積雪による送電線、開閉所、変圧器等の機能喪失によ る)と重畳すると非常用直流電源の充電機能の喪失に発展する可能性があるため、「電熱 線ヒータの導入」や「バックアップ用電源確保(電源車等)」の検討が必要となる。

原子炉補助建物等が倒壊した場合、クレーン等の重量物を巻き込み、甚大な被害に拡大 する恐れがあるため、建物の倒壊は確実に回避する必要がある。したがって、設定した積 雪荷重への耐性がないと評価された場合は、建物補強により耐性強化を図る必要がある。

### d. 火山活動

火山学の専門家による指導のもと、想定する巨大噴火に対して「火山灰降灰シミュレー ション」を実施し、降灰継続時間、降灰量及び火山灰の粒子径分布、火山灰粒子の降下速 度、並びに、これらを考慮したフィルタ閉塞時間等を定量的に評価することが、後の対応 を考える際に有益な情報となる。また、フィルタの交換やフィルタの清掃ができるように、 「交換用フィルタ及びフィルタ清掃用具の準備」をしておくことが有効な対策となる。

巨大噴火の場合、降灰量が極めて大量となるため、補助冷却設備の空気取入部のフィル タが直ちに閉塞する可能性が考えられる。一方、火山灰粒子は終端速度で落下するので、 補助冷却設備の空気取入部の空気吸い込み速度が終端速度よりも十分小さければ、火山灰 粒子は吸い込まれることなく落下し、フィルタは閉塞しない。したがって、「空気取入部 の吸込速度低減」により、補助冷却設備の空気取入部に吸い込まれる火山灰粒子を粒子径 が比較的小さい粒子に限定し、フィルタ閉塞までの時間を延長することが可能である。

火山灰により、補助冷却設備の空気取入部のフィルタが閉塞すると、補助冷却設備の除 熱機能が喪失する恐れがある。そのため、対策として「フィルタ交換・清掃」を行うとと もに、「自然循環冷却への移行」を行って空気の吸込み量を低減することや、「ループ切 換運転」により運転ループ数を限定することで、フィルタの使用可能時間を延長するため の運用(フィルタの目詰まりによる流路閉塞を極力防止するための運用)を行うことが有 効であると考えられる。

メンテナンス冷却系や制御用圧空設備の空気取入部の閉塞に対しても、「フィルタ交

換・清掃」が有効と考えられる。

火山灰により換気空調系の空気取入部のフィルタが閉塞すると、2次主循環ポンプや2 次メンテナンス冷却系電磁ポンプ室の雰囲気温度が上昇し、機能喪失に至る恐れがある。 対策としては、閉塞防止のために「フィルタ交換・清掃」等について考慮しておくことや、 「換気空調系停止時雰囲気温度評価」を実施し、温度上昇率の程度を確認しておくことが 有効と考える。

非常用ディーゼル発電機の空気取入部のフィルタが閉塞すると、燃焼用空気の吸気不全 に至り、非常用ディーゼル発電機が機能喪失する恐れがある。外部電源喪失(火山灰によ る碍子のせん絡等)が重畳すると非常用直流電源の充電機能の喪失に発展する可能性があ るため、「バックアップ用電源確保(電源車等)」の検討が必要となる。

### e. 森林火災

煙(ダストを含む)がモデルサイト内に到達した場合は、補助冷却設備の冷却空気取入 部フィルタが短時間で目詰まりするのを防止するため、フィルタの差圧を監視するととも に補助冷却設備を強制循環除熱から「自然循環除熱運転」に移行させる。これにより冷却 器風量を大幅に減少させることができ、フィルタの目詰まり寿命を延長することができる。 また、原子炉の崩壊熱除去レベルに応じて、運転する補助冷却設備のループ数を減らし、 一部の補助冷却設備の運転を停止するループ切替運転を行う。フィルタの目詰まりにより 除熱能力の低下した補助冷却設備は、出口ダンパを閉鎖して、吸気ラインの「フィルタの 交換・清掃」を行うとともに、停止している補助冷却設備を立ち上げて除熱運転に移行さ せる。または、メンテナンス冷却系を起動して、吸気ラインの「フィルタの交換・清掃」 を行う補助冷却設備に代わり、崩壊熱除去運転を行う。

メンテナンス冷却系や制御用圧空設備の空気取入部の閉塞に対しても、「フィルタ交 換・清掃」が有効と考えられる。

森林火災で発生する煙(ダスト含む)により換気空調系の空気吸込フィルタが目詰まり すると、2次主循環ポンプや2次メンテナンス冷却系電磁ポンプ室の雰囲気温度が上昇し、 機能喪失に至る恐れがある。対策としては、閉塞防止のために「フィルタ交換・清掃」等 について考慮しておくことや、「換気空調系停止時雰囲気温度評価」を実施し、温度上昇 率の程度を確認しておくことが有効と考える。

非常用ディーゼル発電機の空気取入フィルタまたはディーゼル発電機入口のフィルタが 煙(ダスト含む)により目詰まりすると、燃焼用空気の吸気不全に至り、非常用ディーゼ ル発電機が機能喪失する恐れがある。外部電源の喪失と重畳するため、非常用直流電源の 充電機能の喪失に発展するので、フィルタの差圧を監視し「フィルタ交換・清掃」が必要 となる。また、非常用ディーゼル発電機が機能喪失した場合の対策として、「バックアッ プ用電源確保(電源車等)」の検討が必要となる。

熱風が施設付近に到達し補助冷却設備冷却器の吸気温度が上昇した場合(注)には「補助冷却設備を停止して、森林火災の鎮火を待って補助冷却設備を再起動」し冷却を行う。 また、「森林火災シミュレーション」を実施して、モデルサイト近傍での森林火災になる かどうかの予測を行い、「防煙マスク、安全ゴーグル、防火服」等の対策準備を行う。

(注)冷却器の吸気温度が 60℃になると、空気冷却器出口ダンパ及び送風機入口ベ ーンを全閉にするインターロックが作動し、補助冷却設備の起動信号も阻止される。こ のため、この温度以下で補助冷却設備の停止及び再起動を行う必要がある。

# (2) 自然循環除熱(補助冷却設備)(H24~H27)

自然循環除熱を行う場合、各外部ハザードで次の対策が必要である。

電気・制御設備が機能喪失した場合や、全交流電源喪失時にバックアップ用電源による 電源供給に失敗した場合には、補助冷却設備空気冷却器の「ベーン・ダンパ手動制御」が アクシデントマネジメント策として有効と考えられる。しかし、全開状態が継続するとナ トリウムが凍結する可能性があるため、「無電源下で使用できる温度計(膨張式温度計 等)の導入」等によって、現場にて制御操作が可能なアクシデントマネジメント手段を併 せて考慮しておく必要がある。

その他、各外部ハザード特有の対策候補について以下に示す。

#### a. 強風/竜巻(風、雨)

強風によって補助冷却設備の空気排気部が破損(屋根が吹き飛ぶ等)すると、破損部分 から流入した雨水が補助冷却設備の2次系配管と接触することで、2次系ナトリウムが凍 結する可能性がある。この場合、補助冷却設備による除熱機能が阻害される恐れがあるの で、まずは「空気排気部の耐風性評価」を行い、その結果に応じて「空気排気部の耐風性 強化」や「雨水流入防止構造」の導入を検討する必要がある。また、「ナトリウム凍結に 至る雨水流入量評価」を実施し、過酷な状態に陥る場合の雨水流入量を定量的に把握して おくことが、事象の被害影響を判断する上で有効であると考えられる。

### b. 積雪

積雪により補助冷却設備の冷却空気取入部/排気部が閉塞(凍結)すると、補助冷却設備の除熱機能が喪失する恐れがあるため、対策として「除雪」の実施や、空気取入フィル タへの「電熱線ヒータの導入」、空気排気部の「閉塞防止構造」の検討が必要と考える。 なお、補助冷却設備の空気取入部に関しては、「ラック室扉の開放」も空気流路確保とし て有効と考えられる。

### c. 火山活動(火山灰)

火山灰により、補助冷却設備の空気取入部のフィルタが閉塞すると、補助冷却設備の除 熱機能が喪失する恐れがある。そのため、対策として「フィルタ交換・清掃」を行って空 気の吸込み量を低減することや、「ループ切換運転」により運転ループ数を限定すること で、フィルタの使用可能時間を延長するための運用(フィルタの目詰まりによる流路閉塞 を極力防止するための運用)を行うことが有効であると考えられる。

### d. 森林火災

煙(ダストを含む)がモデルサイト内に到達した場合は、補助冷却設備の冷却空気取入 部フィルタが短時間で目詰まりするのを防止するため、フィルタの差圧を監視するととも に補助冷却設備を強制循環除熱から「自然循環除熱運転」に移行させる。これにより冷却 器風量を大幅に減少させることができ、フィルタの目詰まり寿命を延長することができる。 また、原子炉の崩壊熱除去レベルに応じて、運転する補助冷却設備のループ数を減らし、 一部の補助冷却設備の運転を停止するループ切替運転を行う。フィルタの目詰まりにより 除熱能力の低下した補助冷却設備は、出口ダンパを閉鎖して、吸気ラインの「フィルタの 交換・清掃」を行うとともに、停止している補助冷却設備を立ち上げて除熱運転に移行さ せる。

### 3.3.1.7.3 積雪ハザードに対する事象シーケンス評価(H24)

### (1) 重要機器が損傷に至る積雪深の設定

地震や津波は、作業員が対策を取る間もなく突然プラントに影響を及ぼし、ある大きさの地震動や津波高さによって機器が損傷し、起因事象を同定することができる。一方、積雪は瞬時にある積雪深でプラントに影響を及ぼすわけではなく、作業員による除雪などの対策を取ることができる。本研究では、地震や津波の PRA のように起因事象を同定せず、 起因事象を単純化して、降雪の時間依存性を考慮して事象シーケンスを評価した。つまり、降雪深と降雪継続期間を用いて積雪深を求め、積雪ハザードをカテゴリ化した。

崩壊熱除去機能喪失要因のうち、原子炉補助建物は 7m の積雪深で崩壊すると仮定して いるが、後述のように 6m を超過する積雪の発生頻度は十分に低いため、6m 以上は炉心損 傷に至ると保守的に仮定して、原子炉補助建物崩壊はイベントツリーでは表さないことと した。また、外部電源喪失は送電線が 1m の積雪深で断線することにより生じると仮定し ているが、後述のように、外部電源喪失は前提としてイベントツリーでは表さないことと した。さらに、非常用電源機能喪失は非常用ディーゼル発電機室開口部閉塞により生じる が、換気空調系開口部が閉塞すると非常用ディーゼル発電機室が高温化して非常用ディー ゼル発電機が損傷する可能性がある。それを考慮して、非常用電源機能喪失には換気空調 系機能喪失を包絡することとした。

積雪により影響を受ける崩壊熱除去機能に係る重要機器を大まかにまとめると、以下の とおりである。

·補助冷却設備

・メンテナンス冷却系

非常用電源系(換気空調系)

実際には、空気取入口と空気排気部では高さが異なり、それらの開口部閉塞に相当する 積雪深は異なる。ここでは、保守的に評価するため、空気取入口と空気排気部で低い方の 積雪深で代表させて機能喪失に至ると仮定する。重要機器を損傷とみなす積雪深を以下の ように設定した。

- •補助冷却設備: 1.5m 超過
- ・メンテナンス冷却系:
  2.0m 超過

・非常用電源系(換気空調系): 1.2m 超過

平成25年度では、吸気部、排気部の高さは、プラントウォークダウンに基づき変更した。吸気部は高い位置になっており、保守的に評価するため、排気部の高さで代表させる こととした。実際には、排気部は高温排気により融雪されると考えられるため、排気部は 積雪により閉塞するとは考えられないが、本評価では、仮想的に排気部で閉塞すると想定 した。

### (2) 積雪ハザードカテゴリの設定

実際には、極端な降雪は事前に天気予報などで認知し対策が取られると考えられるが、 ここでは、ある瞬間に一定の降雪速度で降雪が継続すると仮定した。ただし、積雪深には 限界があることから、年最大積雪深を降雪速度で除することにより、降雪継続期間を算定 した。ここで取り扱う敦賀地区の積雪ハザードは、カナン公式でグンベル分布を仮定して 評価されたハザード曲線を用いた。降雪速度 0.1m/day 以下は頻繁であるが、プラントに 影響を与える 1.2m に積雪するまで 12 日間もあるため、除雪失敗確率は極めて低く、炉心 損傷に至らないと判断して範囲外とした。また、重要機器に影響を与える積雪深は 1.2m 以上であることから、降雪継続が積雪深 1.2m 以下で完了すれば、プラントに影響しない と判断して範囲外とした。

まず、年最大日降雪深の年超過確率を年超過頻度に変換してから降雪速度を 1m/day 毎 にカテゴリ化した。つまり、 $(0.1 \sim 1m/day, @1 \sim 2m/day, @3 \sim 3m/day, @3 \sim 4m/day$  に分類した。4m/day を超過する降雪の年間頻度は  $10^{-11}$ /年以下であるため更なる分類をせず、この降雪速度超では炉心損傷に至ると保守的に仮定した。これらの降雪速度カテゴリ 毎の年発生頻度は、 $(0.3.3 \times 10^{-6})$ 年、 $(2.5 \times 10^{-3})$ 年、 $(3.5 \times 10^{-6})$ 年、 $(4.0 \times 10^{-8})$ 年となった。

降雪速度カテゴリ毎に代表的な降雪速度を設定し、保守的にその範囲内の最大値を用い た。つまり、①1m/day、②2m/day、③3m/day、④4m/day とした。また、降雪継続期間は 年最大積雪深の年超過確率を降雪速度で除することによって算出した。また、積雪深を考 慮し、2m 以上は 0.5m 毎に降雪継続期間をカテゴリ化した。つまり、A:1.2~1.5m、B: 1.5~2m, C: 2~2.5m, D: 2.5~3m, E: 3~3.5m, F: 3.5~4m, G: 4~4.5m, H: 4.5~5m, I:5~5.5m、J:5.5~6m、K:6m~に分類し、それらの積雪深まで降雪が継続するとした。 例えば、A:1.2~1.5mのときは 1.2mを超える積雪深だが 1.5m以下で積雪継続が終了す ることを意味する。これらを 1m/day 毎の4つの降雪速度で除することによって降雪継続 期間を求めた。例えば、①1m/day の降雪速度の場合、降雪が A:1.2~1.5m のときは 1.2 日間~1.5 日間継続し、③3m/day の降雪速度の場合、A:1.2~1.5m のときは降雪が 0.4 日間(9.6時間)~0.5日間(12時間)継続することを意味している。これらの降雪継続 期間毎の確率は、年最大雪積深の年超過確率から求めた。具体的には、A:4.8×10<sup>-2</sup>、B: 2.  $7 \times 10^{-2}$ , C : 6.  $1 \times 10^{-3}$ , D : 1.  $4 \times 10^{-3}$ , E : 3.  $1 \times 10^{-4}$ , F : 7.  $0 \times 10^{-5}$ , G : 1.  $6 \times 10^{-5}$ , H : 3.5×10<sup>-6</sup>、I:8.0×10<sup>-7</sup>、J:1.8×10<sup>-7</sup>、K:5.2×10<sup>-8</sup>となった。K:6m~は 10<sup>-8</sup>のオーダ ーで十分低い確率と判断して更なる分類をせず、この降雪継続期間を超えると炉心損傷に 至ると仮定した。

降雪速度カテゴリ4通りと降雪継続期間カテゴリ11通りを組み合わせて、44通りの 積雪ハザードカテゴリを設定した。この積雪ハザードカテゴリ毎の発生頻度は、前述の積 雪速度カテゴリの発生頻度に降雪継続期間カテゴリの確率を乗じることで求めた。本評価 では、発生頻度が十分に低い降雪速度4m/day超の場合または積雪深6m超に相当する降雪 継続期間の場合、そのカテゴリの発生頻度がそのまま炉心損傷頻度になると仮定している。 最も高い発生頻度を持つカテゴリは降雪速度①0.1~1m/dayと降雪継続期間K:6m~の組 み合わせであり、その発生頻度は1.7×10<sup>-7</sup>/年である。したがって、本評価では炉心損傷 頻度が1.7×10<sup>-7</sup>/年(以下、「本評価の最低値」と言う)を下回ることはないことに留意 されたい。

### (3) イベントツリーの構築

本評価では、降雪速度 0.1m/day 超過で積雪深 1.2m 超過となる降雪継続期間を対象としている。このような降雪条件では必ず外部電源喪失に至るとは言えないが、保守的に降雪 条件によらず外部電源は喪失すると仮定した。したがって、外部電源喪失を起因事象とした。

積雪深に対する3つの重要機器は、崩壊熱除去のため、非常用電源確保(換気空調系の 空気流路確保)、補助冷却設備空気冷却器の空気流路確保、及びメンテナンス冷却系の空 気冷却器の空気流路確保が必要である。対象としている原子炉システムは自然循環除熱が 特徴であるが、そのためには補助冷却設備空気冷却器のダンパ手動調整が必要となる。こ れらをヘディングとしてイベントツリーを構築することとした。実際には、天気予報等で 事前に認知すると思われるが、ここでは降雪開始時にアクシデントマネジメントが必要な 程度の降雪であることを認知すると仮定した。考えにくい想定であるが、この認知が正し く行われずに長期にわたり降雪が継続する事象シーケンスの場合はアクシデントマネジメ ントとしての除雪すら行われないことになり、炉心損傷に直結することとなる。このよう なシーケンスを考慮することとし、除雪の必要性の認知が1回の場合のイベントツリーを 構築した。

実際には多くの人が天気予報などで予知できるはずであり、現場作業員のみならず自宅 待機者や他事業所からの連絡により認知することもあると考えられる。また、1日3交代 制と想定すると1日のうちに3回の認知の機会が与えられると仮定できる。さらに、現場 作業員の巡視による認知のみならず中央制御室からの監視カメラ(今後設置予定)による 認知も可能であろう。そこで、イベントツリーに認知3回の場合の分岐を追加した。認知 1回目に失敗しても認知2回目や3回目で成功することを考慮したものである。この評価 では、認知回数は3回に留め、3回目の認知が失敗するとリカバリには期待しないことと した。

### (4) 各ヘディングの失敗確率評価

### a. 除雪の必要性の認知失敗確率

THERP (NUREG/CR-1278) [3.3.1.7.3-1]に基づき、60 分の猶予時間の認知エラーの人的 過誤率を設定した。ストレスレベルは適度・段階的作業・熟練者を仮定(1 倍)した。よ って、除雪の必要性の認知失敗確率は8.48×10<sup>-4</sup>/dとなる。

### b. 空気流路確保の失敗確率

3か所の吸排気部閉塞に対応する積雪深において機能喪失を評価する。また、除熱失敗 確率を評価するためには内的事象 PRA で考慮する緩和設備のランダム故障が必要となるが、 積雪ハザードに対する脆弱性に着目しているため、この評価では無視した。

基準ケースでは積雪による吸排気部閉塞は除雪作業失敗のみに依存と仮定した。また、 除雪作業は降雪認知から1日に1回と仮定し、除雪作業は降雪継続期間に応じて回数を増 加できると仮定した。すなわち、降雪速度の高いケース(4m/day)では早期に 6m に到達 するまでに除雪回数は1回だが、降雪速度の低いケース(1m/day)ではゆっくりと 6m に 到達するまでに除雪回数は5回と仮定した。

1回の除雪失敗確率は除雪能力(ノミナル除雪速度)の不確実さ分布を考慮して設定した。除雪作業は人員や除雪必要面積に大きく依存するため不確実さが大きい。ここでは、除雪失敗確率分布に正規分布を仮定して、分布の平均値にはノミナル除雪速度として3m/day(0.125m/hr)を仮定し、分布の幅は1σ=0.5m/dayと仮定した。

ここでは、単純に降雪速度が除雪速度を上回れば失敗と仮定した。具体的には、1回あたりの除雪失敗確率は、降雪速度 1m/day では  $3.2 \times 10^{-5}/d$ 、2m/day では  $2.3 \times 10^{-2}$ 、3m/day では  $5.0 \times 10^{-1}$ 、4m/day では  $9.8 \times 10^{-1}$ である。

### c. 空気冷却器ダンパ手動操作の失敗確率

空気冷却器ダンパ手動操作時には過冷却によるナトリウム凍結を防ぐために温度計測が 重要となるが、通常の3系統による補助冷却設備の自然循環除熱時には原子炉冷却材温度 は炉停止後3日で250℃まで低下し、その後数日で200℃近傍に漸近するような温度履歴 である。一方、本評価では、最大でも積雪深は6mを想定しており、降雪速度が最も低い 場合として1m/dayを仮定しているため、降雪継続期間は長くても6日間を考慮している。 前述のように降雪継続期間が6日を超えると炉心損傷と仮定していることから、6日間以 内を考慮すればよい。通常3系統による自然循環除熱時の原子炉冷却材温度は6日程度で 200℃程度に漸近し、ナトリウムの凝固点(1気圧で98℃)に到達しそうにないことから、 本評価ではでナトリウム凍結を考慮する必要はない。よって、ナトリウム温度計測は考慮 せず、自然循環による冷却失敗は空気冷却器ダンパ手動操作失敗にのみ依存すると仮定し た。

THERP に基づき、1系統の空気冷却器ダンパ2台の開操作に関する行動エラーの人的過 誤率を設定した。作業を二人一組で実施することによるリカバリの依存性は高従属とし、 一方、作業後のプラントパラメータの監視によるリカバリの依存性は低従属と仮定し、手 動操作失敗確率を評価した結果、2.44×10<sup>-4</sup>/d を得た。また、ストレスレベルは非常に高 い、段階的作業、熟練者を仮定して5倍を乗じた。さらに、エラーファクタは10を仮定 して平均値を算出することとした。その結果、補助冷却設備空気冷却器ダンパ手動調整の 失敗確率は6.51×10<sup>-3</sup>/dとなる。

### d. その他の安全対策の失敗確率

安全対策のうち、基準ケースでは除雪及びベーン・ダンパの手動操作のみを考慮する。 その他の安全対策は、追加的に安全対策の有効性評価として検討対象とする。ただし、閉 塞防止構造については具体的な検討が進んでいないため対象外とした。

また、積雪による吸排気部閉塞に対して、溶雪するための電熱ヒータ、及びそのための バックアップ電源による安全対策を想定した。

バックアップ電源(電源車)確保の失敗確率は、非常用ディーゼル発電機の起動失敗確率 5.0×10<sup>-3</sup>/d 及び運転継続失敗確率 1.3×10<sup>-1</sup>/d の和に等しいと仮定して、1.4×10<sup>-1</sup>/d とした。

電熱線ヒータ用電源確保の失敗確率は、バッテリの故障率を参照することとし、検査間 隔(13 か月=1.3×10<sup>4</sup>hr と仮定)が長いことを想定して起動失敗確率のみを考慮すること とし、6.5×10<sup>-3</sup>/dとした。

電熱線ヒータによる溶雪失敗確率は、電熱線は配線ケーブルの断線確率の 10 倍と仮定 して 2.4×10<sup>-8</sup>/ft/hr (IEEE std500) [3.3.1.7.3-2]を用いた。ここでは電熱線を 10ft と 仮定して、検査間隔が長いため起動失敗のみを考慮することとし、1.6×10<sup>-3</sup>/d とした。

無電源下での温度計測失敗確率は、熱電対の故障率(検査間隔が長いため起動失敗)と して 2.0×10<sup>-2</sup>/d を用いた。ただし、温度計測には予備を含めて電熱線を2本用意してい ると仮定し、かつ共通要因故障[3.3.1.7.3-3]として $\beta$ ファクタ=0.1 を考慮することとし た。すなわち、2.0×10<sup>-2</sup>/d×2.0×10<sup>-2</sup>/d+0.1×2.0×10<sup>-2</sup>/d=2.4×10<sup>-3</sup>/dとした。

### (5) 事象シーケンスの定量化

除熱失敗確率に積雪ハザードカテゴリ毎の発生頻度を乗ずることによって、炉心損傷頻 度を求めることができる。炉心損傷頻度は 6×10<sup>-7</sup>/炉年となった。除熱失敗確率は降雪速 度 4m/day が支配的であったのに対し、炉心損傷頻度は 2m/day 及び 1m/day の降雪速度が 支配的であった。また、降雪継続期間は比較的短時間が支配的であり、最も支配的な積雪 ハザードカテゴリは 2m/day の降雪速度で 0.75~1 日間の降雪継続期間であることが分か る。このように1日で大量に積雪することは日本全国でみれば珍しいことではないため、 今後の対策検討に有用な結果である。

### 3.3.1.7.4 竜巻ハザードに対する事象シーケンス評価(H25)

### (1) 竜巻ハザードカテゴリの設定

竜巻ハザードカテゴリとしてFスケールを用いた事象シーケンス評価を行う。本評価で は、保守的な評価とするため、海岸線から陸側へ 0~1km の範囲で竜巻のデータを収集し て求めた竜巻ハザード曲線を使うこととした。また、分布形の影響を調べるため、ワイブ ル分布及びグンベル分布の両方を用いて評価することとした。

# (2) 竜巻により影響を受ける崩壊熱除去機能に関する重要機器の同定

最大風速と関連づけられる F スケールにより竜巻による影響評価を行うことができる。 竜巻による崩壊熱除去機能喪失は、風圧、圧力差、飛来物衝突による機器の構造損傷が考

えられる。

竜巻発生時には、直接的には崩壊熱除去機能に関する設備ではないが、竜巻により破損 すると2次的に崩壊熱除去機能喪失に波及する恐れのある機器がある。そこで、プラント ウォークダウンを実施し、波及設備を同定した。一つは排気塔であり、倒壊するとメンテ ナンス冷却系の空気冷却器に影響を及ぼす可能性がある。ただし、メンテナンス冷却系が 損傷しても、位置的に離れたところにある補助冷却設備により崩壊熱除去は可能である。 次に、原子炉補助建物屋上の構造物の破損が飛来物化する恐れがあるが、耐震性を考えて 補強されているため、容易に破損するとは考えにくい。以上の検討をまとめて、本研究に おいて竜巻により影響を受ける可能性がある重要機器として以下を同定した。

- 原子炉補助建物(崩壊熱除去系設備の健全性維持)
- ·外部電源設備
- ・補助冷却設備(外気の吸排気)
- ・メンテナンス冷却系(外気の吸排気)
- ・ディーゼル発電機(外気の吸排気)
- ・換気空調設備(外気の吸排気、電源設備の冷却)
- 非常用発電に必要な燃料用タンク
- 原子炉補助建物の屋上構造物

### (3) 機器・設備の破損確率の評価

a. 風圧による破損

Σ

(a) 風圧(風荷重)の算定方法

竜巻の水平方向の最大風速によって施設に作用する風圧力(P<sub>n</sub>)は、建築基準法 施行令、及び文献[3.3.1.7.4-1]に準拠して、以下の式により算出される。

$$q = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot V_D^2 \tag{3. 3. 1. 7. 4-2}$$

ここで、 $\rho$ は空気密度 1.22kg/m<sup>3</sup>であり、 $V_{p}$ は竜巻の最大風速である。

### (b) 風圧による機器の破損確率評価

同定された重要機器のうち、風圧により破損する可能性のある機器・設備の損傷可 能性を評価する。

外部電源喪失

F1 または F2 スケールの竜巻が直撃した場合には、外部電源が損傷し短時間での復 旧が困難な外部電源喪失が発生すると考えられる。本研究では、F0 スケールの竜巻 でも外部電源は喪失すると想定した。

### ・排気塔の倒壊による崩壊熱除去機能(一部)喪失

風圧により、排気塔が倒壊する可能性もある。別途、排気塔への風圧について構造 評価を行った結果、支持鉄塔主柱材部について、許容応力度比が 69m/s で 0.38、 100m/s で 0.74 との評価の一例がある。本研究では、この結果を踏まえて破損確率を 算定することとした。風速による圧力は風速の二乗に比例し、風速 0m/s で極小とな る対称曲線になると仮定すると、許容応力度比が 1.0 になる風速は 117m/s と算出さ れる。ただし、この評価には保守的な想定が含まれているため、117m/s を 3 σ の下限 値、許容応力度比が 2.0 となる 168m/s を 3 σ の上限値と仮定して、正規分布型の確率 密度分布を仮定した。これより、排気塔の風圧に対する破損確率は、平均値 142.5m/s、 標準偏差 8.5m/s の確率密度となる。結果、排気塔の倒壊確率は下記のようになる。

F4	風速	117 m/s	9.12 >	$< 10^{-4}$
F5	風速	142 m/s	4.77 >	$\times 10^{-1}$

排気塔が倒壊した場合、補助冷却設備及びメンテナンス冷却系の吸排気口に影響す ることが想定される。しかしながら、全ての崩壊熱除去系の設備は分散配置を想定す るため、排気塔倒壊によって崩壊熱除去系の系統が全て同時に機能喪失に至ることは ないと考えられる。そこで、本研究では、排気塔が倒壊した場合はメンテナンス冷却 系が機能喪失すると想定し、補助冷却設備は排気塔から十分離れた距離に配置されて おり、また、分散配置されていることを想定し、排気塔の倒壊の影響は無いと仮定し た。

### ・原子炉補助建物倒壊による崩壊熱除去機能喪失

F5 レベルを超える風速の場合には、風圧により崩壊熱除去系機器を保持している 原子炉補助建物が倒壊し、崩壊熱除去機能が喪失することが懸念されるため、定量的 に評価した。その風圧に対する原子炉補助建物の壁の破損確率は、WASH-1300[3.3.1.7.4-2]を参考に、(3.3.1.7.4-1)、(3.3.1.7.4-2)式を使い、69m/s の時の荷重に裕度を考慮した値を HCLPF (High Confidence of Low Probability of Failure、高信頼度低損傷確率)と想定し、不確実さβに 0.2 を仮定することにより 原子炉補助建物の壁に対するフラジリティを評価した。その結果、現実的な竜巻の風 速の範囲では、破損する可能性は十分低いと判断できるため、本研究では、竜巻の風 圧によって原子炉補助建物が倒壊することは無いと評価した。

### b. 気圧差による破損

### (a)気圧差による圧力荷重の算定方法

軽水炉等の知見から気圧差荷重による構造物への影響には以下が考えられる。 ・完全に開かれた構造物等の施設が竜巻に曝されたとき、施設の内圧と外圧は竜巻

通過中に急速に等しくなる。したがって、施設内外の気圧の変化はゼロに近づく

とみなせる。

- ・閉じた施設(通気がない施設)では、施設内部の圧力は竜巻通過以前、以後で等しいとみなせる。一方、施設の外側の圧力は竜巻の通過中に変化し、施設内外に 圧力差を生じさせる。この圧力差により閉じた施設の障壁(構築物等の屋根・壁 及びタンクの頂部・胴部等)に外向きに作用する圧力が生じるとみなせる。
- ・部分的に閉じた施設(通気がある施設等)については、竜巻通過中の気圧変化により施設に作用する圧力は複雑な過程により決定される。

特に、高速炉の崩壊熱除去系に対して想定される事象は以下が考えられる。

・補助冷却設備及びメンテナンス冷却系の排気ダクト変形閉塞

設計基準を超える竜巻の気圧差荷重により崩壊熱除去系(補助冷却設備、メンテナンス冷却系)の排気側ダクトが変形し、流路閉塞することが懸念される。そこで、上記のような気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、内外気圧差による圧力荷重Wpを以下の式で設定する。

$$W_P = \Delta P_{MAX} \cdot A$$
 (3.3.1.7.4-3)  
ここで、 $\Delta P_{MAX}$ は最大気圧低下量、 $A$ は施設の受圧面積である。この竜巻の最大気圧  
低下量 $\Delta P_{MAX}$ は、以下の式で表される。

 $\Delta P_{MAX} = \rho V_{RM}^2 \qquad (3. 3. 1. 7. 4-4)$ ここで、 $\rho$ は空気密度 1. 22kg/m<sup>3</sup>、 $V_{RM}$  は竜巻の最大接線風速である。

(b) 気圧差による機器の破損確率評価

(3.3.1.7.4-4) 式を用いて各 F スケールの最大風速に対応する気圧低下を評価した。結果、気圧差による圧力荷重での部分的なダクト変形はありえるが、工学的に変形閉塞あるいは設備破損の可能性は小さいと判断できる。よって、本評価では、気圧差による補助冷却設備、及びメンテナンス冷却系の排気ダクト変形閉塞は発生しないと仮定した。

### c. 飛来物による破損

(a) 飛来物による影響モード

飛来物が原子力発電所へ与える影響モードは、大きく分けて以下の3つに分けられ ると考えられる。

- ・大きな運動量を持つ飛来物の地上平行移動による原子炉補助建物の裏面剥離
- ・補助冷却設備及び/またはメンテナンス冷却系の空気冷却器の吸気口、排気口等の開口部に飛来物が侵入することによる、崩壊熱除去系に係る重要機器・設備の 機能喪失
- ・原子炉補助建物外の燃料タンクなどの設備に飛来物が衝突することによる機能喪 失

# 3. 3. 1. 7 - 12

#### (b) 原子炉補助建物の裏面剥離

大きな運動量を持つ飛来物が、浮き上がらなくとも地上平行移動により、原子炉建物の壁に衝突し、原子炉建物の内側の壁が破壊され、その破壊された壁のコンクリートの塊が新たな飛来物(裏面剥離して飛来物化)となり、原子炉補助建物内にある機器・設備に2次被害を与える事象を指す。この飛来物が壁に衝突し裏面剥離が発生する確率を求めることが重要となる。この確率は、以下の手順で求める。

①: Chang の式と呼ばれる以下の評価式を用いて飛来物の速度と裏面剥離限界厚さとの関係を求める。

$$t_{s} = \alpha_{s} 1.84 \left(\frac{200}{V}\right)^{0.13} \frac{\left(MV^{2}\right)^{0.4}}{\left(D/12\right)^{0.2} \left(144F_{c}\right)^{0.4}}$$
(3. 3. 1. 7. 4-5)

ただし、 $t_s$ は裏面剥離限界肉厚[ft]、 $\alpha_s$ は飛来物低減係数、Vは飛来物の衝突速度[ft/s]、Mは飛来物の質量[1b/(ft/s<sup>2</sup>)]、Dは飛来物の直径[in]、 $F_c$ はコンクリート強度[psi]である。

②:①から、限界厚さと飛来物の速度を求め、ある風速を想定した時の裕度を評価し、 95%信頼度曲線の 5%破損確率の指標、すなわち HCLPF を設定する。破損確率の分 布を対数正規分布と仮定し、対数正規分布の対数標準偏差をβ=0.2と仮定して裏 面剥離が発生する確率を求める。

本研究では、②を行う際、文献[3.3.1.7.4-3]を参考として、風速 69m/s の時の裕 度を評価し、例として肉厚が 35cm、70cm、100cm の場合について破損確率を評価した。 ただし、飛来物は鋼製材、重量の大きなコンテナ、自動車(トラック)を想定して評 価した。既設炉を参考とし、肉厚は 70cm 以上であると想定すると、風速 100m/s を超 えなければ裏面剥離は発生せず、その確率は十分小さいことが分かった。

また、軽水炉の場合は、崩壊熱除去に必要な重要機器・設備(例えば、ポンプ、電 源設備)は原子炉補助建物の下部にあるため、裏面剥離が発生した場合は重要機器・ 設備に影響を与える可能性が大きいと考えられるが、一方、高速炉は、崩壊熱除去に 必要な重要機器・設備(例えば、空気冷却器)は原子炉補助建物の上部にあるため、 裏面剥離が仮に発生したとしても重要機器・設備に影響を与える可能性は小さいと考 えられる。また、上記とは別の視点からの検討として、仮に裏面剥離が発生しても、 その発生個所(原子炉補助建物の壁周辺)から重要設備・機器までは十分離隔距離が あるため、影響は十分小さいとも考えられる。

以上から、高速炉では、裏面剥離の影響は非常に小さいと考えられ、本研究では裏 面剥離の影響は無いと仮定して評価する。

- (c) 飛来物衝突による破損確率の評価
- i.飛来物の浮き上がり高さの算定
  - i) 飛来物の候補

一般に遠方からの飛来物は、相対的に重量が軽いものが多く、仮に衝突した場合 でも衝撃荷重は相対的に小さいと考えられることから、設計対象施設に到達する可 能性がある飛来物を検討する範囲は、発電所の敷地内とする。

敷地内にある物で、竜巻によって飛来物になる可能性のあるものは以下が考えられる。

・大きな運動エネルギーを持つ飛来物(自動車、コンテナ)

・施設の貫通抵抗を確認するための固い飛来物(鋼製パイプ、鋼製材)

・開口部等を通過することができる程度に小さくて固い飛来物(砂利等)

以降、具体的には上記括弧内の物を飛来物と想定し、衝突時の破損確率を評価する。

また、飛来物発生源の高さに着目すると、敷地内にある地上で発生する飛来物、 または、屋上建築物(配管等)が破損して発生する飛来物が想定される。前者は上 記全て(自動車から砂利まで)が対象となる。一方、後者は鋼製パイプ、鋼製材が 対象となる。

## ii) 飛来物の影響を受ける機器・設備

崩壊熱除去機能に関係する機器・設備のうち、飛来物に影響されるものとして以 下が想定される。本評価では、各機器の設置高さは、燃料タンク及びディーゼル発 電機が地上数 m、それ以外は数十 m を想定した。

# ·補助冷却設備

補助冷却設備の吸気口から飛来物が侵入し、空気冷却器あるいは2次ナトリウム 配管に衝突することで破損し、機能喪失に至ることが想定される。また、飛来物が 屋上高さより高く飛散し、落下してきた飛来物が排気口から侵入し、空気冷却器内 の伝熱管に衝突することで破損し、機能喪失に至ることが考えられる。補助冷却設 備の空気冷却器が機能喪失すれば、機能喪失した系統の補助冷却設備による崩壊熱 除去は失敗する。ただし、3系統あるため、1系統でも健全であれば除熱可能であ る。

### ・メンテナンス冷却系

冷却系の吸気口から飛来物が侵入し、空気冷却器あるいは2次ナトリウム配管に 衝突することで破損し、機能喪失に至ることが想定される。また、飛来物が屋上高 さより高く飛散し、落下してきた飛来物が排気口から侵入し、空気冷却器内の伝熱 管に衝突することで破損し、機能喪失に至ることが考えられる。メンテナンス冷却 系の空気冷却器が機能喪失すれば、メンテナンス冷却系による崩壊熱除去は失敗す る。

# ・ディーゼル発電機

# 3. 3. 1. 7 - 14
ディーゼル発電機の空気取入口から飛来物が侵入し、ディーゼル発電機に衝突、 破損し、機能喪失に至ることが想定される。本評価では外部電源は喪失すると想定 するため、ディーゼル発電機が機能喪失すれば、電源は全て機能喪失し、補助冷却 設備及びメンテナンス冷却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、崩 壊熱除去を行うためには、補助冷却設備の空気冷却器のベーン・ダンパを調整し、 自然循環による除熱に期待できる。

### ・換気空調設備の出入ロダクト

崩壊熱除去系に関連する安全系電気機器冷却用換気空調設備のダクト(屋上部よ り突出)に飛来物が衝突しダクト変形により流路閉塞に至ることが考えられる。本 評価では外部電源は喪失すると想定するため、換気空調設備の出入ロダクトが変形 し流路閉塞すれば、電源の配電設備が機能喪失するため、補助冷却設備及びメンテ ナンス冷却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、崩壊熱除去を行う ためには、補助冷却設備の空気冷却器のベーン・ダンパを調整し、自然循環による 除熱に期待できる。

## ・ディーゼル発電機燃料タンク

ディーゼル発電機用の燃料タンクに飛来物が衝突し、燃料が流出するため、ディ ーゼル発電機の機能喪失に至ることが想定される。本評価では外部電源は喪失する と想定するため、ディーゼル発電機の燃料タンクが機能喪失すればディーゼル発電 機は運転できないため、電源は全て機能喪失し、補助冷却設備及びメンテナンス冷 却系の強制循環は機能喪失すると想定する。この場合、崩壊熱除去を行うためには、 補助冷却設備の空気冷却器のベーン・ダンパを調整し、自然循環による除熱に期待 できる。

### iii)飛来物の影響による機器・設備の破損確率の算出方法

高速炉では、崩壊熱除去機能に関する重要機器は、地上より比較的高い位置にあ る。このため、飛来物衝突による機能損傷を評価する上で、地上で発生する飛来物 を対象とし、各Fスケールに対応した浮き上がり高さを算定する必要がある。地上 で発生する飛来物の浮き上がり高さが、崩壊熱除去機能に関する機器・設備の高さ 以上となる場合に、それらの機器・設備に影響を与える飛来物と同定する。ただし、 屋上で発生する飛来物は、崩壊熱除去機能に関する機器・設備とほぼ同じ高さにあ るため、浮き上がらなくても、対象機器・設備に影響を与える飛来物であると同定 する。同定された飛来物が必ず対象設備に衝突するとは限らないため、衝突確率を 算出する。次に、飛来物が衝突したときの設備の破損確率を求める。

以上をまとめると、以下のような手順で飛来物の影響による機器・設備の機能喪 失確率を算出する。

①地上からの飛来物の影響

ステップ1:浮き上がりの計算により、機器・設備に影響を与える飛来物を同定。 ステップ2:同定された飛来物を対象とし、機器・設備の機能喪失確率 P を計算す

- る。
- P=(地上からの飛来物が開口部に侵入する確率)
  - ×(地上からの飛来物の衝突による機能喪失確率)
- ②屋上からの飛来物の影響
  - ステップ1:屋上からの飛来物として鋼製パイプ及び鋼製材を同定。屋上飛来物は 落下するだけであり、浮き上がりの計算は必要ない。
  - ステップ2:同定された飛来物を対象とし、機器・設備の機能喪失確率P2を計算す
    - る。
    - P,= (屋上からの飛来物が開口部へ侵入する確率)
      - ×(屋上からの飛来物の衝突による機能喪失確率)

#### iv)飛来物の浮き上がり高さ算定のための竜巻モデル

竜巻の上昇気流による風速場の中での飛来物の浮き上がり高さを推算する。既往 評価[3.3.1.7.4-4~3.3.1.7.4-6]と同様に、本評価で仮定した風速場は、鉛直方向 に構造が変化しないランキン渦である。評価で想定するランキン渦としては、動径 方向の速度及び鉛直運動はゼロとし、摩擦も考慮しない。半径 *R<sub>m</sub>*の内側では一様 な風速増加があり、角速度及び渦度は一定に保たれると仮定する。また、半径 *R<sub>m</sub>* の外側では風速は半径に反比例すると仮定する。このときの接線風速*V*は半径 *R<sub>m</sub>* の内外で以下のように示される。

$$V = a \cdot r \qquad (r \le R_m) \tag{3.3.1.7.4-6}$$

$$V = \frac{b}{r} \qquad (r > R_m) \tag{3.3.1.7.4-7}$$

ここで、rは原点をランキン渦の中心とする径方向の変数であり、a及びbは適当な定数である。半径 $R_m$ の内側の角速度は一定であり、渦度も定数と仮定する。また、半径 $R_m$ の外側の渦度はゼロと仮定する。この場合、半径 $R_m$ における風速が最大風速 $V_{max}$ であり、

$$V_{max} = a \cdot R_m, \quad b = a \cdot R_m^2$$
 (3. 3. 1. 7. 4-8)

として表すことができる。なお、評価ガイド[3.3.1.7.4-4]を参考とし、ランキン 渦の半径は *R<sub>m</sub>* = 30*m* を用いて評価する。飛来物の飛散高さを求めるため、飛散物 の6自由度の剛体として空気力学的に記述するモデルとして、抗力 *D* は、

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A | V_W - V_M | (V_W - V_M)$$
(3. 3. 1. 7. 4-9)

と表される。ここで、 $\rho$ は空気密度、 $C_D$ は抗力係数、 $V_W$ は風速、 $V_M$ は飛来物の 速度、Aは飛来物が風を受ける面積(適切に選ばれた面積)である。この式が成り 立ち、tumbling 運動(回転しながら落下する)をしているときに平均的に流れ直 角方向の力がないと仮定すると飛散物の運動は3自由度系となり以下の式に支配さ

れる。

$$\frac{dV_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |V_W - V_M| (V_W - V_M) - gK \qquad (3. 3. 1. 7. 4-10)$$

ただし、gは重力加速度、mは飛散物の質量、Kは鉛直方向の運動方向の運動方 程式の場合は 1、それ以外の場合は 0 となる値である。本研究では、この (3.3.1.7.4-10)式に支配される方程式を用いて浮き上がり高さを算定する。なお、 (3.3.1.7.4-10)式のC<sub>p</sub>A/mは、空力パラメータと呼ばれ、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c \left( C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3 \right)}{m}$$
(3. 3. 1. 7. 4-11)

によって定義されており、 $C_{D1}$ 、 $C_{D2}$ 及び $C_{D3}$ は飛来物形状によって異なる。ただし、cは単なる係数であり 0.33 である。

また、評価ガイド[3.3.1.7.4-4]より、竜巻の移動速度 $V_r$ は  $V_r = 0.15V_D$  (3.3.1.7.4-12)

で与えられ、接線最高風速VRmは

$$V_{Rm} = V_D - V_r \tag{3.3.1.7.4-13}$$

と表現される。ただし、本評価では、 $V_D$ を竜巻最大風速と考え、Fスケールの風速 であると仮定する。一方、飛来物の鉛直方向の最大風速 $_MV_{Vmax}$ は、最大水平速度と 同様に解析により求めてもよく、また、評価ガイド[3.3.1.7.4-4]及び米国 NRC の 文献[3.3.1.7.4-6]を参考すると、以下のように設定してもよいと考えられている。

$${}_{M}V_{Vmax} = \frac{2}{3} {}_{M}V_{Hmax}$$
(3. 3. 1. 7. 4–14)

ここで、 $_MV_{Hmax}$ は最大水平速度である。この(3.3.1.7.4-14)式を仮定すると、鉛 直方向または水平方向のみに着目すればよいため、本研究では特に鉛直方向(浮き 上がる方向)に着目して解析を行う。

竜巻のモデルとしてランキン渦モデルを仮定し、(3.3.1.7.4-14)式から鉛直方 向のみに着目して運動方程式を積分し、飛来物の浮き上がり高さを計算する。この ため、改めて飛来物の浮き上がり高さ及び時間変化が分かりやすい形に (3.3.1.7.4-10)式を表示し直すと、以下のようになる。

$$m\ddot{x}(t) = \frac{1}{2}\rho C_D A \left| V(x(t)) - \dot{x}(t) \right| \left( V(x(t)) - \dot{x}(t) \right) - mgK$$
(3. 3. 1. 7. 4–15)

ここで、新しい表記である x(t) は時刻 t での飛来物の位置、V(x(t)) は時刻 t での飛 来物位置における風速を示している。飛来物の運動を解析する場合は、飛来物が浮 き上がる方向、すなわち鉛直方向の運動のみに着目するとともに、対象とする飛来 物は最大接線風速位置  $R_m$  において最高風速時に上昇運動を始めると仮定し、飛来 物自身は竜巻の水平方向力によって水平方向へは移動しないものと仮定する。この 仮定においては、竜巻によるV(x(t))は、竜巻の移動に伴い、先に述べたランキン 渦内の風速分布に基づいて変化するものと考える。

### v) ランキン渦モデルを用いた飛来物の浮き上がり高さの算定

まず、竜巻における鉛直方向の最大風速を求めた。各Fスケールにおける最大風速 $V_D$ を定義し、(3.3.1.7.4-12)式、(3.3.1.7.4-13)式、(3.3.1.7.4-14)式 及び $_MV_{Hmax} = V_{Rm}$ を仮定して、鉛直方向最大風速を評価した。この鉛直方向の最大 風速、鉛直方向の運動方程式である(3.3.1.7.4-15)式と飛来物の質量、面積を仮定し、空力パラメータを使った飛来物の浮き上がり高さを計算することによって、 各飛来物の飛散高さを算定した。

## vi)機器・設備に影響を与える地上飛来物とFスケールの同定

飛来物の浮き上がり高さと崩壊熱除去機能に関する機器・設備の設置高さを比較 することにより、機器・設備に影響を与える地上飛来物とFスケールを同定した。

## ii. 飛来物が開口部に侵入する確率の算定

前節にて同定されたFスケール毎の地上からの飛来物、または屋上からの飛来物に 対して、機器・設備の吸気口、排気口、空気取入口などの開口部へ侵入する確率、ま たは燃料タンクに飛来物が衝突する確率を算出する。飛来物が開口部へ侵入する確率 *P*<sub>IN</sub>は、以下のように与えられる[3.3.1.7.4-6]。

 $P_{IN} = \Psi \times A \times N$  (3.3.1.7.4-16) ただし、燃料タンクを対象とする場合は、燃料タンクに直接衝突する確率を算出し たことになる。 $\Psi$ は飛来物インパクトパラメータと呼ばれており、竜巻衝突あたり 単位ターゲット面積あたりかつ飛来物あたりの飛来物衝突頻度として一般に定義され、  $\Psi = 7.89 \times 10^{-8}$ と仮定した[3.3.1.7.4-6]。また、A は各開口部の面積または燃料タン クの場合はタンクを球と近似した際の2次元の射影面積であり、N は竜巻時に発生す る飛来物の数である。N については、地上からの飛来物として鋼製パイプ及び鋼製材 は $N = 2.0 \times 10^4$  と仮定し、コンテナ及び自動車はN = 50 と仮定した[3.3.1.7.4-6]。 これは鋼製パイプ及び鋼製材に比べてコンテナ及び自動車の数は少ないと想定できる からである。地上からの飛来物に対する確率 $P_{IN}$ を計算した。なお、屋上からの飛来 物は、地上からの飛来物に比べて少ないことが想定されるため、自動車やコンテナと 同じN = 50を仮定し、屋上からの飛来物に対する確率 $P_{IN}$ も算定した。

### iii. 飛来物衝突による破損確率

飛来物が対象機器・設備に衝突した時の破損確率を算出する。ここでいう破損とは、 飛来物が対象機器・設備に衝突・貫通し、力学的に破壊される状態のモードを指す。 本研究では、このようなモードに対する破損確率を求める。

### i) 各Fスケールにおける飛来物の速度の評価

飛来物の速度は、飛来物の空力パラメータとの関係図[3.3.1.7.4-1]を用いて求 めることができる。各飛来物に対して、飛来物の速度は風速に比例すると仮定する ことにより、その比例係数を求め、各Fスケールにおける飛来物の速度を計算した。

### 3.3.1.7-18

ただし、砂利の速度は算定していない。これは、後で述べるように、砂利は想定している鋼板を破損させる可能性がないためである。

### ii) 各肉厚に関する破損確率の評価

飛来物が衝突した時に鉄板を貫通させない限界厚さ(貫通限界肉厚)と各飛来物の衝突する直前の速度(衝突速度)との関係を BRL 式と呼ばれる評価式から評価する。

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2 d^{3/2}}$$
(3. 3. 1. 7. 4–17)

ここで、Tは鉄肉厚[in]、Mは飛来物の質量[1b/(ft/s<sup>2</sup>)]、Vは飛来物の衝突速度 [ft/s]、dは飛来物の直径[in]、Kは鋼板の材質に関する係数 = 1。また、衝突速 度は飛来物速度と等しいと仮定した。想定した肉厚を限界肉厚と仮定し、その肉厚 に対する各飛来物の衝突速度を求め、中央値と仮定する。破損確率に対して対数標 準偏差を $\beta = 0.2$ とした対数正規分布を仮定し、95%信頼度曲線を用いて破損確率を 評価した。

## iii)各Fスケールにおける各機器・設備の破損確率評価

想定した機器・設備に対し、適切に肉厚を想定し、破損確率評価結果から、地上 及び屋上からの飛来物衝突による破損確率を求めた。この破損確率に算定した衝突 確率を掛けることによって、最終的な機器・設備の機能喪失確率を求めた。

### (4) イベントツリーの構築

対象プラントの崩壊熱除去系は、メンテナンス冷却系1系統、補助冷却設備3系統、 ディーゼル発電機3台であり、多重性が確保されている。これらは分散配置されてい るため、飛来物による衝突によって同時破損を考慮する必要はないと考えられる。し たがって、本研究でイベントツリーを構築するための崩壊熱除去の成功条件を以下の ように3つ設定する。

①補助冷却設備による強制循環成功(3系統のうち1系統の成功でよい)
 ②補助冷却設備による自然循環成功(3系統のうち1系統の成功でよい)
 ③メンテナンス冷却系による強制循環成功

①は、補助冷却設備のポンプを使った強制循環、及び空気冷却器の空気流量を調整 するためのベーン・ダンパの自動調整の成功を意味する。ただし、非常用電源として ディーゼル発電機及び電源設備冷却用の換気空調設備が必要となる。この強制循環は 補助冷却設備が少なくとも1系統健全であれば成功とする。

②は、非常用電源が機能喪失しても、補助冷却設備が健全であれば、運転員がベーン・ダンパを手動で調整することにより、空気冷却器の空気流量を調整でき、自然循環が成功することを意味している。この自然循環は少なくとも1系統成功すれば成功とする。

③メンテナンス冷却系のポンプを使った強制循環、及び空気冷却器の空気流量を調整するためのベーン・ダンパの自動調整の成功を意味する。ただし、非常用電源が必要となる。このため、非常用電源としてディーゼル発電機が健全であり、電源設備冷却用の換気空調設備が健全である必要がある。

以上の成功条件、及び同定された重要機器から、竜巻評価のためのイベントツリー を構築した。また、プラントに影響を及ぼす竜巻の発生時には風圧により鉄塔の送電 線が切断され外部電源は喪失していると考えられることから、起因事象は外部電源喪 失とする。なお、本研究では、機器・設備などのランダムな故障には着目せず、竜巻 による影響モードによる機器・設備の機能喪失について着目して評価した。

### (5) 事象シーケンスの定量化

イベントツリーに沿って、F スケール毎に各ヘディングの分岐確率に機器の破損確 率を代入することで定量化できる。イベントツリーを定量化した結果、炉心損傷頻度 は、10<sup>-18</sup>/年のオーダーになった。

## 3.3.1.7.5 強風ハザードに対する事象シーケンス評価(H25)

### (1) 強風ハザードカテゴリの設定

強風と影響についてはサファ・シンプソン・ハリケーンスケールというカテゴリが知 られているため、このカテゴリを強風ハザードカテゴリとして採用し、事象シーケンス 評価を行うこととする。ただし、本スケールでは、70m/s 以上を一つのスケールで代表さ せており、発電所の耐風性を考えれば 70m/s 以上を詳細にカテゴリ化した方が支配的な カテゴリを同定できると考えられる。そこで本評価では、20m/s から 160m/s まで 20m/s 毎に強風ハザードカテゴリも独自に設定した。

本評価では、保守的な評価とするため、1945年(昭和20年)以降のデータに基づく 敦賀測候所の年最大風速及び年最大瞬間風速の強風ハザード曲線を使うこととした。ま た、分布形の影響を調べるため、ワイブル分布及びグンベル分布の両方を用いて評価す ることとした。

竜巻の場合、竜巻の進行方向はランダムであると想定できるが、強風の場合は風向き についての観測データを調査することによって風向きの頻度を把握することが可能であ る。そこで、敦賀測候所の最大風速・最大瞬間風速を観測した日時の風向を調べると、 風向は、北、北北西の方向あるいは南、南南東の方向の頻度が多く、その頻度もデータ から算定した。

### (2) 強風により影響を受ける崩壊熱除去機能に関する重要機器の同定

最大風速と最大瞬間風速を用いて強風による影響評価を行うことができる。強風によ る崩壊熱除去機能喪失には、竜巻と同様に、風圧、圧力差、飛来物衝突による機器の構 造損傷が考えられる。

竜巻の場合は、物理的に山側で発生することはなく海側で発生すると考えてよい。ま

た、地上設置の資材を浮き上がらせ飛来物化することが考えられる。さらに、竜巻が発 生しても、その継続時間は数十分と短期間である。一方、強風の場合は、全方位からの 風を想定できるが、頻度及び影響を考慮に入れて支配的な風向きは山側(南、南南東の 方向)からであると考えられる。この場合、山側に位置する森林の多くの木材が飛来物 化する可能性がある。また、強風は数日間も継続することも考えれるため、作業員によ るアクシデントマネジメントが困難である可能性に留意する必要がある。強風により影 響を受ける可能性がある重要機器については、竜巻と同様の考え方で、以下を同定した。

- ・原子炉補助建物(崩壊熱除去設備の健全性維持)
- ·外部電源設備
- ・補助冷却設備(外気の吸排気)
- ・メンテナンス冷却系(外気の吸排気)
- ・ディーゼル発電機(外気の吸排気)
- ・換気空調設備(外気の吸排気、電源設備の冷却)
- ・非常用発電に必要な燃料用タンク
- ·排気塔
- 原子炉補助建物の屋上構造物

## (3) 機器・設備の破損確率の評価

- a. 風圧による破損
  - (a) 風圧による機器の損傷可能性評価

同定された重要機器のうち、風圧により破損する可能性のある機器・設備の損傷可 能性を評価する。

外部電源喪失

カテゴリ2以上に相当する強風が起きた場合には、外部電源設備が損傷し、短時 間での復旧が困難な外部電源喪失に至る。また、カテゴリ1に相当する強風でも外 部電源は喪失する可能性がある。

## ・排気塔の倒壊による崩壊熱除去機能(一部)喪失

排気塔高さは100m以上であるため、排気塔が倒壊するとメンテナンス冷却系の 吸排気口まで影響が及ぶ可能性がある。しかしながら、排気塔の形状を考慮すると、 全ての崩壊熱除去系の機能喪失に至ることはないと考えられる。そこで、本研究で は、竜巻評価と同様に、排気塔が倒壊した場合はメンテナンス冷却系が機能喪失す ると想定した。また、補助冷却設備は排気塔から十分離れた距離に分散配置されて いることを考慮し、排気塔の倒壊による補助冷却設備への影響はないと仮定した。 なお、排気塔の破損確率については次節で述べる。

## ・原子炉補助建物倒壊による崩壊熱除去機能喪失

現実的な風速の範囲では破損する可能性は十分低いと判断できるため、原子炉補

助建物の倒壊に至ることはないと仮定した。

(b) 風圧による排気塔の破損確率評価

別途、排気塔への風圧について構造評価を行った結果、支持鉄塔主柱材部について、 許容応力度比が 69m/s で 0.38、100m/s で 0.74 との評価の一例がある。本研究では、 この結果を踏まえて破損確率を算定することとした。

風速による圧力は風速の二乗に比例し、風速 0m/s で極小となる対称曲線になると 仮定すると、許容応力度比が 1.0 になる風速は 117m/s と算出される。ただし、この 評価には保守的な想定が含まれているため、117m/s を 3 σ の下限値、許容応力度比 が 2.0 となる 168m/s を 3 σ の上限値と仮定して、正規分布型の確率密度分布を仮定 した。よって、排気塔の風圧に対する破損確率は、平均値 142.5m/s、標準偏差 8.5m/s の確率密度曲線となった。

この破損確率曲線に基づくと、サファ・シンプソン・ハリケーンカテゴリの範囲で は排気塔は倒壊しない見通しであるが、独自に設定した強風カテゴリにおける排気塔 倒壊確率は以下のようになる。

カテゴリ 5:4.1×10<sup>-3</sup>

カテゴリ6:3.8×10<sup>-1</sup>

カテゴリ7:9.8×10<sup>-1</sup>

b. 気圧差による破損

竜巻評価において、気圧差荷重による構造物への影響を評価した結果、有意な影響 を及ぼすとは考えにくい。

### c. 飛来物による破損

(a) 飛来物の候補

竜巻の場合には地上資材が上昇気流に乗って数 km 先まで飛来することがあるが、
強風の場合には地上資材が上昇気流で巻き上がることはなく水平方向風速を考えればよい。発電所周辺の高所には森林しかなく、資材が飛来するとは考えにくい。そこで、
竜巻評価で考慮した飛来物候補に加えて、山側森林からの木を想定した。
①大きな運動エネルギーをもつ飛来物(自動車、コンテナ)
②施設の貫通抵抗を確認するための固い飛来物(鋼製パイプ、鋼製材)
③開口部等を通過することができる程度に小さくて固い飛来物(砂利等)
④高所からの飛来物(森林からの木)

(b) 飛来物の影響を受ける機器・設備

崩壊熱除去機能に関係する飛来物に影響される機器・設備として以下を想定した。 その際、燃料タンク及びディーゼル発電機の設置高さを地上数 m、それ以外の機器の 設置高さを数十 m と想定した。

### 補助冷却設備

山側からの飛来物は、補助冷却設備の空気取入口から侵入し、空気冷却器あるいは 2次ナトリウム配管に衝突することでそれらを破損し、補助冷却設備が機能喪失に至 る可能性がある。特に、山側のうち、屋上より高い位置からの飛来物については、屋 上に配置する排気ダクト側から侵入し、空気冷却器内の伝熱管に衝突することで伝熱 管を破損し、補助冷却設備が機能喪失に至る可能性も考えられる。

### ・メンテナンス冷却系

山側からの飛来物は、その角度からメンテナンス冷却系の空気取入口側に侵入でき ないと考えられる。屋上高さより高い位置の山側からの飛来物については、落下して きた飛来物が排気ダクト側から侵入し、空気冷却器内の伝熱管に衝突することで破損 し、メンテナンス冷却系が機能喪失に至ることが考えられる。

### ・ディーゼル発電機

ディーゼル発電機の空気取入口から飛来物が侵入し、ディーゼル発電機に衝突、破 損し、機能喪失に至る可能性がある。

## ・換気空調設備の出入ロダクト

屋上高さより高い位置の山側からの飛来物については、落下してきた飛来物が排気 ダクト側から侵入し、主要な機器に衝突することで破損し、換気空調設備が機能喪失 に至ることが考えられる。

### ・ディーゼル発電機燃料タンク

ディーゼル発電機用の燃料タンクに飛来物が衝突し、燃料が流出する可能性がある。 これによりディーゼル発電機が機能喪失に至ることが考えられる。さらに、流出した 燃料が燃焼した場合、燃焼に伴う高温の外気が補助冷却設備の空気取入口へ流入する ことで外気による冷却機能を喪失する影響が考えられる。

### (c) 飛来物の飛来速度の算定

強風による飛来物評価においても、竜巻での飛来物評価と同様の手法で飛来物の飛 来速度を求める。また、風速と飛来速度の関係は、空力パラメータに対応して以下の ように算定される。

鋼製パイプ:	0.0057	$\sim \! 50 \text{ m/s}$
鋼製材:	0.0089	$\sim$ 55 m/s
木(木材):	0.0044	$\sim$ 45 m/s
コンテナ:	0.0105	$\sim 60 \text{ m/s}$
自動車:	0.0086	$\sim$ 55 m/s

これらの飛来速度の値は竜巻時の設計風速 100m/s(最大接線風速 84m/s) に対応す る速度であり、地上飛来物が飛散した場合の飛来速度は風速に比例すると仮定し、各

強風カテゴリについて以下の飛来速度を設定した。なお、サファ・シンプソン・ハリ ケーンスケールでのカテゴリ3以下では飛来物にならないと想定し、カテゴリ4及び 5 について飛来物の飛来速度を算定した。また、今回設定した強風カテゴリ2(瞬間 最大風速 60m/s)以上についても飛来物の飛来速度を算定した。

山側の森林領域からの飛来物(木) については、機器等への衝突速度を設定するために、上述の水平方向の飛来速度に加えて鉛直方向の落下速度を算定する必要がある。 以下に算定手順を述べる。強風の場合、風は水平方向にのみ流れるものとし、山側の 飛来物(木)から対象機器までの距離を 250m と想定し、カテゴリ毎の飛来速度で除 することで到達時間を概算した。この到達時間の間、飛来物が任意の高さから自由落 下すると想定して落下距離及び落下速度を概算した。例えば、サファ・シンプソン・ ハリケーンカテゴリ 5 の飛来速度は 45m/s であり、到達時間は 250m÷45m/s=5.6s と なる。落下距離は、 $y=1/2 \times gt^2$ より、 $0.5 \times 9.8 \times 5.6^2=154m$  であり、落下速度につい ては v=gt より、 $9.8m/s^2 \times 5.6s=55m/s$  となる。

### (d) 強風による開口部への衝突確率の算定

強風発生時の飛来物衝突確率を求めるにあたり、竜巻で使用した飛来物インパクト パラメータと同じ考え方を踏襲する。飛来物インパクトパラメータ Ψ は、強風発生 あたり、単位ターゲット面積あたりかつ飛来物あたりの飛来物衝突頻度として一般に 定義される。対象とする開口部に飛来物が衝突する確率は、強風頻度あたりに単位面 積に一つの飛来物が衝突する確率(/m<sup>2</sup>/(1/年))、開口部の面積、強風(竜巻)発 生頻度、強風時に発生する飛来物の数の積で表される[3.3.1.7.5-1]。

♥のデータは、米国におけるデータであり、その中で最も保守的な値を使用する。

①標的が大型構造物の場合の最大値

3.6×10<sup>-9</sup> (1ft<sup>2</sup>あたり 3.3×10<sup>-10</sup>)

②標的が小さい面積の最大値

- 7.9×10<sup>-8</sup> (1ft<sup>2</sup>あたり 7.3×10<sup>-9</sup>) (露出度高)
- 5.2×10<sup>-10</sup> (1ft<sup>2</sup>あたり 4.8×10<sup>-11</sup>) (露出度低)

### i. 強風による地上からの飛来物の衝突確率(ディーゼル燃料タンク)

強風による地上からの飛来物により破損する可能性があるのは、燃料タンクのみで あると考えられる。

・開口面積

燃料タンクを直径約8mの球体と仮定し、投影面積として50.3m<sup>2</sup>を仮定した。

・強風飛来物インパクトパラメータΨ

保守的な値として 7.9×10<sup>-8</sup>を用いた。

・強風飛来物の数 N

飛来物の数として、想定上最も大きい値として 20,000 を想定した。
以上の条件を用いると、飛来物がディーゼル燃料タンクに衝突する確率は、
7.9×10<sup>-2</sup>/(対応する強風発生)となる。

## 3.3.1.7-24

### ii. 強風による山側からの飛来物の衝突確率

先に算定したように山側からの飛来物の状態は、山側の森林からの距離を 250m と 想定、以下のような衝突確率モデルを構築した。

発電所に向けて木が飛来しうる森林の高度は 200m 程度と考えられる。このため、 山側からの飛来物によりプラントの機器が破損するのはサファ・シンプソン・ハリケ ーンスケールのカテゴリ 5 及び独自カテゴリ 4~7 の強風と想定した。

森林からの飛来物としての木が重要機器に衝突する確率を算定する。

①森林の木は、2m×2m(4m<sup>2</sup>)に一本均等に存在すると仮定した。

②森林の木はカテゴリ5の強風で10本に1本が飛来物になると仮定した。

③北から北北西への強風(22.5°)の範囲で一様に発生すると仮定した。

④森林から飛来する木は崩壊熱除去系の垂直方向空気取入口へ上方から落下衝突すると仮定し、その際の衝突面積に 5.5m<sup>2</sup>を仮定した。また、ディーゼル燃料タンクへの衝突面積には 50m<sup>2</sup>を仮定した。

⑤飛来速度の算定値に 10%の不確かさがあると仮定し、これに由来する飛来物の 到達距離の不確かさとして

 $45m/s \times 0.1 \times 5.6s = 25m$ 

を想定した。一方、風向きの変動範囲として 22.5°の範囲内の風上方面からの飛来 物が対象機器に向けて飛来すると仮定すれば、対象機器に衝突し得る飛来源の範囲は、 飛来方向に対する垂線の長さに換算して 98m (250m 半径の 22.5°の円周長さ)とな り、その線上に存在する木の数は、

### 98m/2m=49本

となる。これを踏まえて、飛来源の木1本が対象機器へ衝突し得る確率は、中心の1本については1.0、端部の25本目では0.0を仮定し、その間に位置する木の確率は中心から端部に向けて線形に分布すると想定した。さらに、飛来範囲に対して重要機器面積が占める割合は、

5.  $5m^2/(98m \times 25m) = 2.2 \times 10^{-3}$ 

同様にディーゼル燃料タンクが占める割合は、

 $50\text{m}^2$ / (98m×25m) =2.0×10<sup>-2</sup>

と仮定した。その結果、重要機器に森林からの木が衝突する確率は 5.24×10<sup>-3</sup>、ディ ーゼル燃料タンクに森林からの木が衝突する確率は 4.77×10<sup>-2</sup>と算定された。

### (e) 強風飛来物による共通要因の考え方

評価対象の崩壊熱除去系においては、補助冷却設備は3系統、ディーゼル発電機が 3台ある。機器配置上、飛来物が侵入する可能性がある開口部は、3系統間及び3台 間で互いに近接しており、開口部が同じ方向であるが、飛来物衝突においては共通要 因が少ないものとして、0.0001 を仮定した。ただし、風向きによっては、燃料タン クに飛来物が衝突して内部の燃料が流出・燃焼する可能性が考えられる。その場合に は、補助冷却設備の空気取入口に高温の外気が流入し、全系統の除熱喪失に至る可能

## 3.3.1.7-25

性が考えられる。

(f) 飛来物衝突による重要機器の破損確率の算定

竜巻評価では、評価ガイドに記載されている BRL 式を適用して貫通限界肉厚を求めた。この評価に基づくと、砂利による重要機器の破損はないものと考えられる。これらの破損個所の肉厚を調査し、強風の飛来物毎の機器貫通評価による破損確率を評価した。

### (4) イベントツリーの構築

竜巻時の事象シーケンス評価と同様に、崩壊熱除去の成功条件を設定した。また、強風 時の崩壊熱除去系機能喪失と要因を分析した上で、イベントツリー構築のためのヘディン グを設定した。強風評価では、山側からの飛来物を考慮するとともに、燃料タンクの火災 を取り入れていることが特徴である。竜巻の場合は火災が生じたとしても、短時間で通り 過ぎるため消火可能であるが、強風の場合は消火できない可能性があるため、火災を考慮 した。また、前述のとおり、火災による共通要因故障を取り入れた。なお、本研究では、 機器・設備などのランダムな故障には着目せず、竜巻による影響モードによる機器・設備 の機能喪失について着目して評価した。

以上を踏まえ、イベントツリーを構築した。

## (5) 事象シーケンスの定量化

イベントツリーに沿って、強風ハザードカテゴリ毎に各ヘディングの分岐確率に機器の 破損確率を代入することで崩壊熱除去系の機能喪失確率を定量化できる。その確率とハザ ード発生頻度を乗じることでハザードカテゴリ毎の炉心損傷頻度を評価できる。ここで、 強風ハザード曲線は 1945 年(昭和20年)以降のデータに基づくワイブル分布とグンベ ル分布を用いることとした。燃料タンク火災による除熱失敗は南及び南南西方位の強風発 生時にのみ起きると仮定して、風配図より 0.57 を乗じることとした。

サファ・シンプソン・ハリケーンスケールの場合、カテゴリ3以下では除熱失敗に至ら ないため、カテゴリ4(58m/s以上69m/s以下)とカテゴリ5(69m/s以上)のみを評価し たイベントツリーを定量化した結果、強風による炉心損傷頻度は、ワイブル分布の場合で 10<sup>-15</sup>/年のオーダー、グンベル分布の場合で約10<sup>-9</sup>/年のオーダーとなった。独自カテゴリ の場合も同様に評価すると、炉心損傷頻度はワイブル分布の場合で10<sup>-16</sup>/年のオーダー、 グンベル分布の場合で約10<sup>-9</sup>/年のオーダーとなった。サファ・シンプソン・ハリケーン スケールの場合と、オーダーはほぼ同じである。

竜巻評価に比べて炉心損傷頻度が高くなっている理由は、燃料タンク火災による共通要 因故障を取り入れているためである。

# 3.3.1.7.6 異常降雨ハザードに対する事象シーケンス評価(H26)

(1) 異常降雨ハザードカテゴリの設定

異常降雨発生時には、地上または原子炉補助建物の屋上では雨水がたまり、水位が上昇

することにより、水が原子炉補助建物内に浸入することが想定される。このような水の蓄積による水位上昇の評価には、時間あたりの降水量だけでなく、降雨の継続時間も必要である。このため、本研究では1時間降水量と継続時間の2つに着目して評価を実施した。

1時間降水量、継続時間をカテゴリに分け、評価を実施した。カテゴリの範囲について の考え方、定義は以下のとおりである。1時間降水量のデータは高々60mm/hrであり、そ の大部分は20mm/hr以上である。一方、施設周辺の状態によっては特定の箇所に雨水が集 中して流れ込んでくる可能性もあるため、その場合、降水量に流入量を加えた雨水の量は 1時間降水量データの最大値を超えると想定される。本研究で調査したような降雨データ や敷地近辺の地形の状態を考慮して排水設備が設計されたと想定すると、排水設備の排水 能力は1時間降水量データの最大値を十分上回ると考えられるため、本評価では排水能力 を140mm/hr程度と仮定した。また、この設計上想定された降水量でも排水設備が機能喪 失する可能性は否定できないことから降水量が140mm/hrまでの評価は必要であるが、設 計上の排水能力を超えた範囲も評価すべきと考え、20mm/hr~160mm/hrを対象とした。こ こで、各カテゴリ区間は20mm/hrとした。また、継続時間については、おおよそ40時間 以上降雨が続いたデータもあり、条件によってはプラントに影響を与える水位になる可能 性があるため、本評価では40時間の2倍である80時間までを評価対象とした。

事象シーケンス評価においては、ワイブル分布とグンベル分布を用いた1時間降水量の 超過確率曲線を年超過頻度に変換してカテゴリに対する区間頻度を算出した。降雨の継続 時間については、ワイブル分布とグンベル分布を用いた1時間降水量 5mm/hr 以上を対象 とした降雨継続時間の年超過確率、カテゴリに対する区間確率を算出した。ただし、1時 間降水量 160mm/hr 以上については発生頻度が低くなるため、除熱失敗確率評価は実施せ ずに炉心損傷とみなした。また、継続時間 80hr 以上についても、同様に炉心損傷とみな した。以上の異常降雨ハザードカテゴリに対して、以下の事象シーケンス評価を実施する こととした。

### (2) 異常降雨により影響を受ける崩壊熱除去に関する重要機器の同定

降雨によって影響を受ける機器は、大きく2つに分類できる。1つ目は建物内に雨水が 浸入することにより影響を受ける建物内部の機器、2つ目は屋外に配置されている機器で ある。

想定する建物は、原子炉補助建物及びディーゼル建物である。原子炉補助建物の屋上で は、屋上扉の下端高さより高く水位が上昇した場合には、屋上扉から原子炉補助建物内に 雨水が浸入することが考えられ、建物内の機器が没水する可能性がある。また、ディーゼ ル建物の場合は、1階の扉から浸入すると想定する。このため、その扉の下端高さよりも 水位が上昇した場合は、ディーゼル建物内に雨水が浸入し、機器が没水する可能性がある。

配置高さにも依存するが、建物内に雨水が浸入した場合に影響を受ける崩壊熱除去設備 の機器として、原子炉補助建物内部では非常用電源の電気設備室(自動運転に必要な制御 室にも影響)、崩壊熱除去設備である補助冷却設備やメンテナンス冷却系の空気冷却器が 挙げられ、一方、ディーゼル建物内部では非常用ディーゼル発電機が挙げられる。また、 崩壊熱除去に必要な機器のうち、屋外で降雨の影響を受けうるものは、海水ポンプ及び外

部電源設備が挙げられる。

降雨による水位上昇による建物内への雨水浸入防止のためには、排水設備も重要である。 異常な降水量により閉塞物が流れてくることを考えると、排水設備が閉塞する事象が考え られる。

以上のことから、本研究では異常降雨によって影響を受ける可能性がある重要機器として以下を同定した。

・排水設備(原子炉補助建物の屋上及び地上に配置されていると仮定)

- ・電気設備室
- · 補助冷却設備
- ・メンテナンス冷却系
- ・非常用ディーゼル発電機
- ・海水ポンプ
- ·外部電源設備

#### (3) イベントツリーの構築

高速炉の崩壊熱除去設備は、補助冷却設備、メンテナンス冷却系があり、循環ポンプを 使用した強制循環による冷却が可能である。また、補助冷却設備は自然対流を利用した自 然循環冷却が可能である。炉心損傷を防止するための成功基準は、以下のとおりである。

補助冷却設備による強制循環成功

②補助冷却設備による自然循環成功

③メンテナンス冷却系による強制循環成功

①は、補助冷却設備のポンプを使った強制循環、及び空気冷却器の空気流量の調整するためのベーン・ダンパの自動調整の成功を意味する。ただし、非常用電源としてディーゼル発電機、電気設備室が必要となる。この成功基準を満たすためには、同定した重要機器のうち、海水ポンプ、電気設備室、非常用ディーゼル発電機、補助冷却設備が健全である必要がある。

②は、非常用電源が機能喪失しても、補助冷却設備が健全であれば、運転員がベーン・ ダンパを手動で調整することにより、空気冷却器の空気流量を調整でき、自然循環が成功 することを意味している。この成功基準を満たすためには、同定した重要機器のうち、補 助冷却設備が健全である必要がある。

③メンテナンス冷却系のポンプを使った強制循環、及び空気冷却器の空気流量を調整す るためのベーン・ダンパの自動調整の成功を意味する。ただし、非常用電源としてディー ゼル発電機、電気設備室が必要となる。この成功基準を満たすためには、同定した重要機 器のうち、海水ポンプ、電気設備室、制御室、非常用ディーゼル発電機、メンテナンス冷 却系が健全である必要がある。

以上の成功基準と重要機器の同定から、イベントツリー構築のためのヘディングを定義

し、イベントツリーを構築した。イベントツリーの中には、排水設備に関するヘディング も含まれている。これは、排水設備が健全であるか、機能喪失しているかにより、屋上や 地上に蓄積する雨水の水位高さが変化することから、その変化をイベントツリー上の重要 機器の機能喪失確率に反映させるためである。

異常降雨時、敷地外では、斜面崩壊などによって鉄塔倒壊や送電線断線の可能性がある。 敷地内でも、開閉所などの地盤層が緩み、機器が機能喪失する可能性もあると考えられる。 本評価では、すべての異常降雨ハザードカテゴリで外部電源は機能喪失と仮定し、異常降 雨の発生及び外部電源喪失を起因事象とする。

### (4) 失敗確率評価

## a. 排水設備閉塞と閉塞物除去作業失敗の確率

異常降雨時は小枝、落ち葉などが大量に排水設備に流れ込むことが考えられる。その場 合、排水設備は閉塞し、設計上の排水能力が大幅に低下する可能性がある。このような場 合、設計時に考慮した排水能力を下回る降水量でも、水位は上昇していくと考えられる。 この水位上昇を緩和するため、作業員は排水設備まで駆けつけ、排水を妨げる閉塞物を取 り除く作業を行うと想定される。その作業に成功すれば、排水設備はその機能を回復し、 設計時に考慮した排水能力を下回る降水量の場合は水位が低下するものと考えられる。一 方、異常な降雨により現場作業が困難な場合は閉塞物除去作業に失敗する可能性もある。

本評価では排水設備の排水量を 140mm/hr 程度と仮定したが、一方、排水設備が落ち葉 等によって閉塞した場合でも少量は排水されると考えられるため、この場合の排水量は排 水設備の健全時の 1/10 倍である 14mm/hr の排水量を仮定した。

また、作業員の閉塞物除去作業は一度成功または失敗しても、ある時間が経過した後に 再度、閉塞物除去作業を行うと考えられる。本評価では、このような作業を2回行うと想 定し、異常降雨発生時に1回目の閉塞物除去作業を行い、40時間後に2回目の作業を行 うと仮定した。この作業間隔は短いと想定されるが、ここでは保守的な評価として2回の みを考慮した。また、これらの成功と失敗に対応して、降雨の継続時間に対する排水量も 変化する。

本評価では、異常降雨時に小枝、落ち葉などが大量に排水設備へ流れ込むことによって 閉塞する確率を 0.5 と仮定した。

気象庁によると、1 時間降水量が 50mm/hr~80mm/hr 未満の時は、滝のように雨が降り、 屋外は一面白っぽくなり、視界が悪くなるような降雨であるとの記載がある[3.3.1.7.6-1]。このような降雨の際は、作業員による屋外作業は困難となると予想される。このこと から、作業員による閉塞物除去の失敗確率は、1 時間降水量に依存するとし、70mm/hr で 失敗確率が 0.5 と仮定した。また、失敗確率は、1 時間降水量を指標とする分布とし、標 準偏差が 35mm/hr の正規分布を仮定し、作業員による閉塞物除去作業の失敗確率とした。

## b. 重要機器の機能喪失確率

(a) 海水ポンプ

海水ポンプは、周りを防水壁で囲まれており、この防水壁は地上からの雨水や海水

から海水ポンプの没水を防いでいる。また、海水ポンプはポンプ室に設置されており、 降雨による直接的な影響は設計上考慮されていると考えられるが、防水壁内部に雨水 が蓄積し、海水ポンプが完全に没水した場合は機能喪失する可能性があると想定した。 本評価では、この防水壁の高さを 1,200mm と仮定した。雨水の蓄積による水位高さが、 1,200mm を超えた場合、海水ポンプは機能喪失すると想定する。

## (b) ディーゼル発電機

ディーゼル発電機は、ディーゼル建物1階に配置されていると仮定する。このため、 屋外の水位高さがディーゼル建物1階の扉の下端高さを超えた場合にディーゼル建物 内に雨水が浸入すると想定する。また、ディーゼル発電機は台上に配置されているた め、すぐには没水しない。水位がディーゼル発電機の高さまで上昇し、没水させた場 合、ディーゼル発電機は機能喪失する可能性がある。本評価では、ディーゼル建物1 階の扉の下端高さを 500mm、ディーゼル発電機の台の高さを 1,000mm と仮定し、水位 高さが 1,000mm を超えた場合はディーゼル発電機が機能喪失すると仮定する。

(c) 電気設備室

電気設備室は、原子炉補助建物内に配置されていると想定する。原子炉補助建物内 部へ雨水が浸入する経路は屋上扉からと想定しており、屋上扉内に雨水が浸入した場 合は、原子炉補助建物内部に多量の雨水が降り注ぐことになる。このため、電気盤や 計装品等が被水し、電気設備や制御設備は機能喪失する可能性がある。本評価では、 原子炉補助建物の屋上扉の下端高さを 1,000mm と仮定し、水位高さがこの高さを超え た場合は、電気設備室は機能喪失すると仮定する。

(d) 補助冷却設備

補助冷却設備は、原子炉補助建物内部に配置されていると想定する。補助冷却設備 に影響する雨水は、原子炉補助建物屋上に蓄積した雨水が補助冷却設備の排気口から 浸入する場合を想定しており、その場合、雨水が高温の空気冷却器の伝熱管に接触す る。冷たい雨水が高温の伝熱管に接触すれば、急激な温度変化により伝熱管が破損す る可能性がある。本評価では、補助冷却設備の排気口の高さを、屋上から 3,000mm の 高さと仮定し、水位高さがこの高さを超えた場合、空気冷却器の伝熱管は破損し、補 助冷却設備は機能喪失すると仮定する。

(e) メンテナンス冷却系

メンテナンス冷却系は、原子炉補助建物内部に配置されていると想定する。メンテ ナンス冷却系に影響する雨水は、原子炉補助建物屋上に蓄積した雨水がメンテナンス 冷却系の排気口から浸入する場合を想定しており、その場合、雨水が高温の空気冷却 器の伝熱管に接触する。冷たい雨水が高温の伝熱管に接触すれば、急激な温度変化に より伝熱管が破損する可能性がある。本評価では、メンテナンス冷却系の排気口の高 さを、屋上から 1,000mm の高さと仮定し、水位高さがこの高さを超えた場合、空気冷 却器の伝熱管は破損し、メンテナンス冷却系は機能喪失すると仮定する。

### c. 水位高さ評価

## (a) 屋上の場合

屋上に蓄積する雨水の水位高さは、1時間降水量、降雨の継続時間とともに増加す るが、屋上の排水設備の排水量の分だけ緩和されると考えられるため、(3.3.1.7.6-1)式で計算される。

$$h_r = (p - d) \times t \tag{3.3.1.7.6-1}$$

ここで、*p*は1時間降水量、*d*は1時間あたりの排水量、*t*は降雨の継続時間、*h*<sub>r</sub>は *t*時間後の屋上の水位高さである。この高さが 1,000mm を超えた場合、屋上扉から原 子炉補助建物内に雨水が浸入する。(3.3.1.7.6-1)式を使い、屋上の排水設備が機 能喪失した場合の屋上における水位高さを算定した。結果、降水量が 80mm/hr の場合、 15時間程度で屋上の水位は 1m に達し、雨水が屋上扉から原子炉補助建物内へ浸入す ることとなる。

## (b) 屋外の場合

屋外、すなわち地上に蓄積する雨水の水位高さも前述と同様の考え方で計算できる が、本評価では水位上昇が緩和する因子も導入した。地上に蓄積する雨水は、海に流 れることや地面に吸収されることなどが考えられるため、本評価ではそのような地上 での水位の高さの感度を評価するために因子を導入した。この場合、地上における雨 水の水位高さ*h*,は(3.3.1.7.6-2)式のようになる。

$$h_{g} = \phi \times \left[ \left( p - d \right) \times t \right]$$
(3. 3. 1. 7. 6-2)

ここで、pは1時間降水量、dは1時間あたりの排水量、tは降雨の継続時間である。 基準解析では、 $\phi = 0.7$ を仮定し、感度解析でこの因子を変化させた時の炉心損傷頻 度の変化を評価することとした。

屋外の雨水が影響する機器として、これまでの検討から海水ポンプとディーゼル発 電機が挙げられた。このうち、(3.3.1.7.6-2)式で評価された水位高さが 1,200mm を超えた場合は、海水ポンプが機能喪失する。一方、ディーゼル発電機はディーゼル 建物内に配置されているため、ディーゼル建物1階の扉の高さまで雨水が蓄積したと 想定してもすぐには機能喪失に至らない。これは、雨水がディーゼル建物1階の扉の 隙間から浸入し、ディーゼル発電機が配置されている部屋まで浸入した後でディーゼ ル発電機が没水しなければ機能喪失には至らないからである。このため、区画部屋と 流入経路を仮定して、ディーゼル発電機を配置している部屋の水位高さを評価した。 屋外から浸入した雨水は流速v<sub>1</sub>で区画部屋1に入って部屋の水位を上昇させ、次に隣 の区画部屋2に流速v<sub>2</sub>で流出していくと想定した。これらの流速vはベルヌーイの定 理から、(3.3.1.7.6-3)式のように導出される。

## 3.3.1.7-31

$$v = \sqrt{2g\Delta h}$$

(3. 3. 1. 7. 6 - 3)

ここでgは重力加速度、 $\Delta h$ は隣の部屋との水位の高さの差を示す。本評価では、この(3.3.1.7.6-3)式を基に、体積流量を計算し、その体積流量を床面積で割ることで単位時間あたりに上昇する水位高さが評価できると考えた。このため、区画部屋1、2の水位高さを(3.3.1.7.6-4)式を使って評価できると考えた。

$$h = \frac{\omega_1 - n \times \omega_2}{S} t + h_0 \tag{3. 3. 1. 7. 6-4}$$

ここで、tは時間、hは区画部屋の水位高さ、 $h_0$ はt=0の時の水位高さ、Sは区画 部屋の床面積、nは水が流出していく隣の部屋の数を示している。また、 $\omega_1$ 及び $\omega_2$ はそれぞれ流入する体積流量及び流出する体積流量を示し、これら体積流量は、 (3.3.1.7.6-3)式の流速に縮流係数 0.61 と扉の隙間の面積を掛けた値で定義してい る。1 時間降水量 40mm/hr~160mm/hr に対して、(3.3.1.7.6-4)式を使って評価し た各区画部屋の水位高さを評価した。結果、降水量が 80mm/hr の場合、おおよそ 70 時間でディーゼル室の水位高さは 1m となり、ディーゼル発電機は没水することとな った。

### d. 補助冷却設備の自然循環のための空気冷却器のダンパ手動調整

空気冷却器ダンパ手動操作時には過冷却によるナトリウム凍結を防ぐために温度計測が 重要となるが、通常の3系統による補助冷却設備の自然循環除熱時には原子炉冷却材温度 は炉停止後3日で250℃まで低下し、その後数日で200℃近傍に漸近するような温度履歴 となる。本評価では80時間までを評価対象のカテゴリとしているため、ナトリウム凍結 を評価に取り入れる必要はない。よって、自然循環による冷却失敗は空気冷却器ダンパ手 動操作失敗にのみ依存すると仮定した。感度解析の中で、無電源下での温度計測の影響を 調べることとした。本評価は、平成24年度の事象シーケンス評価時と同様に、補助冷却 設備空気冷却器ダンパ手動調整の失敗確率を6.51×10<sup>-3</sup>/dとした。

(5) イベントツリーの定量化

イベントツリーに沿って、排水設備の機能喪失確率、及び各カテゴリに対応する水位高 さの評価に基づく機器の機能喪失の評価結果を代入するとともに、異常降雨のハザード曲 線を用いることで炉心損傷頻度を定量化できる。ハザード曲線としてグンベル分布を使っ た場合、炉心損傷頻度は 3.2×10<sup>-6</sup>/年となり、ワイブル分布を使った場合、炉心損傷頻度 は 2.8×10<sup>-6</sup>/年となった。なお、この頻度には 1 時間降水量 160mm/hr 以上の発生頻度 (グンベル分布では 1.3×10<sup>-7</sup>/年、ワイブル分布では 1.5×10<sup>-11</sup>/年)及び継続時間 80hr 以上の発生頻度 (グンベル分布ではほぼゼロ、ワイブル分布では 1.2×10<sup>-10</sup>/年)が含まれ ていない。これを含めれば、炉心損傷頻度はワイブル分布では変わらないが、グンベル分 布では 3.3×10<sup>-6</sup>/年と多少変わるものの、ほとんど影響はない。1 時間降水量 160mm/h 以 上の区間頻度をさらに細かく評価すれば、顕在化することはないと考えられるため、必要 に応じて、今後詳細化を検討することとする。

支配的なカテゴリは降水量 80mm/hr、降雨の継続時間が 20hr であった。また、支配的 なシーケンスは、屋上の排水設備が機能喪失し、原子炉補助建物内への雨水の浸入による 被水によって電気設備室が機能喪失し、非常用電源喪失、さらに補助冷却設備の自然循環 もダンパの手動調整失敗により炉心損傷に至るシーケンスであった。

### 3.3.1.7.7 火山噴火ハザードに対する事象シーケンス評価(H26)

## (1) 火山噴火により影響を受ける崩壊熱除去機能に関する重要機器の同定

平成24年度に検討したように、検討対象としているモデルプラントは活火山から適切 な離隔距離があるため、本研究では火山灰によるプラントへの影響のみを対象として評価 を行う。

降下火山灰の工学的影響としては荷重、絶縁阻害、建物・機器への侵入があげられている[3.3.1.7.7-1]。火山灰粒子の密度は、桜島では 2,000kg/m<sup>3</sup>以上とされている [3.3.1.7.7-2]が、その他の多くの文献によれば降雨により空隙が水で飽和した場合等の 湿潤密度は 1,500kg/m<sup>3</sup>に達することがあると記載されている[3.3.1.7.7-1]。最大で 1m の 火山灰堆積層厚が考えられる。これは雪の比重 0.3 で換算すると、積雪 5m の荷重に相当 することになり、平成24年度の積雪評価結果により原子炉補助建物への荷重は有意でな いと言える。

火山灰による崩壊熱除去機能喪失までのシーケンスを検討するにあたり、機器の機能喪 失として以下が考えられる。

### a. 火山灰による空気取入口閉塞

火山灰が降灰している状況において、特にプラント近傍の大気中に存在する火山灰によ り崩壊熱除去系に影響のある空気取入口閉塞としては、以下の事象が考えられる。

①崩壊熱除去系の空気冷却器の空気取入口フィルタの目詰まり

②メンテナンス冷却系の空気冷却器の空気取入口フィルタの目詰まり

③非常用ディーゼル発電機室への空気取入口フィルタの目詰まり

④換気空調系の空気取入口フィルタの目詰まり

上記を起因とする事象シーケンスは以下のように考えられる。

・巨大噴火の場合、降灰量が多量となるため、補助冷却設備の空気取入口のフィルタが 直ちに閉塞する可能性が考えられる。(ただし、火山灰粒子は終端速度で落下するので、 補助冷却設備の空気取入口の空気吸い込み速度が終端速度よりも十分小さければ、火山灰 粒子は吸い込まれることなく落下し、フィルタは閉塞しない可能性がある。)

・火山灰により、補助冷却設備の空気取入口のフィルタが閉塞すると、補助冷却設備の 除熱機能を喪失する恐れがある。

・火山灰により換気空調系の空気取入口のフィルタが閉塞すると、格納容器内や原子炉 補助建物内の雰囲気温度が上昇し、計装品や電気盤等の電気・制御設備の機能喪失に至る 恐れがある。

・非常用ディーゼル発電機建物の空気取入口のフィルタが閉塞すると、燃焼用空気の吸

気不全に至り、非常用ディーゼル発電機が機能喪失する恐れがある。外部電源喪失(火山 灰によるガイシのせん絡等)が重畳すると非常用直流電源の充電機能の喪失に発展する可 能性がある。

### b. 火山灰が空気取入口フィルタを通過し、建物内に多量に侵入

火山灰によりフィルタが目詰まりした場合には、フィルタ取替えなどのアクシデントマ ネジメントが必要になるが、外気中に多量の火山灰が降灰している状況において、アクシ デントマネジメントが失敗し、空気取入口が一定時間開放される事態にあることも予想さ れる。その場合に、多量の火山灰が建物内に侵入する可能性が生じてくる。この場合の影 響としては、以下の事象が考えられる。

①電気盤等への付着による制御系機能喪失

②ディーゼル発電機内へ侵入することによる非常用電源喪失

③ダンパ、ベーン等の動的機器の回転軸等への付着による固着

(火山から一定程度の距離がある場合には、火山ガスの影響はないと考えられることから、腐食といった化学的な影響は考慮しない。)

火山灰が多量に建物内に侵入した場合には、その付着部位により電源系への影響や湿分 が高い状態での高粘性化により以下のシーケンスに至ると考えられる。(なお、火山灰が ある相当量以上建物内へ侵入するほどの降灰の場合には、外部電源は喪失していると考え られる。)

・電気盤等へ付着した場合には、火山灰と電気機器部材の反応を想定すると崩壊熱除去 系の制御系機能喪失に至る可能性がある。(ただし、ある程度の湿分を含む)

・ディーゼル発電機内へ侵入した場合には、タービン燃焼器へ侵入した状況となり、ディーゼル発電機が損傷し、非常用電源喪失に至る可能性がある。(ディーゼル発電機は、 共通要因的に損傷すると想定)

・火山灰がディーゼル発電機内へ侵入する降灰量の場合には、外部電源も喪失している 可能性が高く、この場合には非常用蓄電池の電源もなくなり、崩壊熱除去系の制御系機能 喪失に至る可能性がある。

・ダンパ、ベーン等を動かす動的機器の回転軸等への付着を想定すると、水分による高 粘性化によりダンパ、ベーンが固着する可能性がある。火山灰の侵入はどの系統にも起こ り得ると考えると、この現象が共通要因となり、補助冷却設備3系統とも機能喪失する可 能性がある。

なお、平成26年度は、上記の建物内のシーケンスは無視して、建物内に火山灰が侵入 した場合には炉心損傷とみなして影響は保守的な評価とした。

### (2) イベントツリーの構築

火山灰の降灰量がある量を超えた場合には、外気より空気を取り入れる必要のある安全 系のフィルタが火山灰による閉塞により機能喪失に至る可能性がある。このため、近隣の 火山噴火により降灰する火山灰除去の必要性を認知する必要がある。ただし、火山から離

## 3.3.1.7 - 34

隔距離が十分にあるため、モデルサイトに火山灰が到達するほどの大規模噴火の場合は確 実に認知されると考えられることから、ここではヘディングとしない。また、大規模噴火 の場合には外部電源も喪失する可能性が高いため、起因事象として外部電源喪失を設定す る。

フィルタが閉塞した場合のマネジメントとしては、フィルタの取替えを実施する(人的 にフィルタから火山灰を除去するマネジメントは考えにくい)ことになるが、この操作に 失敗した場合にはフィルタ閉塞による機能喪失に至る。なお、フィルタ閉塞に至るレベル の火山灰が降灰する場合、外部電源は喪失しているものと考えられるため、補助冷却設備 のフィルタ閉塞が回避された場合でも非常用電源確立に失敗した場合の補助冷却設備空気 冷却器のダンパ手動調整といったマネジメントが必要となる。これらを考慮すると、イベ ントツリーを策定する場合のヘディングは以下のものとなると考えられる。

- ・非常用電源確立のための空気取入口フィルタ閉塞(フィルタ取替え失敗)
- ・換気空調系の空気取入口フィルタ閉塞(フィルタ取替え失敗)
- ・メンテナンス冷却系の空気取入口フィルタ閉塞(フィルタ取替え失敗)
- ・補助冷却設備の空気取入口フィルタ閉塞(フィルタ取替え失敗)
- ・補助冷却設備空気冷却器 ダンパ手動制御失敗

以上の検討からイベントツリーを構築した。(なお、フィルタ取替え失敗にはフィルタ 箇所へのアクセスルート確保失敗を含むものとする。)電源を確立できた場合、補助冷 却設備は強制通風モードに移行するように設計されているが、火山噴火を認知した時点 で運転員がマネジメントを行うものとして自然通風モードへ移行する。本報告書では、 自然通風モードへのマネジメントに失敗する確率については考慮しないものとする。

### (3) 火山噴火ハザードカテゴリの設定

プラント影響の観点では、上記のようにフィルタ閉塞が重要と言える。プラントにおけ る事象シーケンス評価を行う際、火山噴火ハザードの重要パラメータは、フィルタ閉塞の 影響を及ぼす火山灰の大気中濃度と継続時間である。ある大気中濃度で降灰が生じている とき、その継続時間によって火山灰堆積物の層厚が決まると仮定する。つまり、以下のよ うな関係式が成り立つと仮定する。

 $C_{tephra}V_{tephra}\Delta t_{tephra} = \rho_{tephra}L_{tephra}$  (3.3.1.7.7-1) ただし、 $C_{tephra}$ は大気中濃度(kg/m<sup>3</sup>)、 $V_{tephra}$ は降灰速度(m/s)、 $\Delta t_{tephra}$ は降灰継続時間(s)、 $\rho_{tephra}$ は火山灰密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $L_{tephra}$ は層厚(m)である。大気中濃度 $C_{tephra}$ (kg/m<sup>3</sup>)は次式で表される。

$$C_{tephra} = \frac{\rho_{tephra} L_{tephra}}{\Delta t_{tephra} V_{tephra}}$$
(3, 3, 1, 7, 7-2)

降灰速度は、火山灰の終端速度とみなすと、火山灰粒子径から下記の沈降速度式により 降灰速度を算出できる[3.3.1.7.7-3]。

$$V_{tephra} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{c_w} \frac{\rho_{tephra} - \rho_{air}}{\rho_{air}} d_{tephra}}$$
(3. 3. 1. 7. 7-3)

## 3.3.1.7 - 35

沈降速度式は火山灰粒子の沈降速度を自由沈降として考えてモデル化されたものであり、 沈降速度は単粒子が静止した気体中を自由落下し、粒子の流体抵抗、重力及び浮力の間に 釣り合いの状態が生じたときの粒子の速度である。ここで、gは重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)、  $c_w$ は抵抗係数(=0.44)[3.3.1.7.7-4]、 $\rho_{air}$ は空気密度(=1.1kg/m<sup>3</sup>)である。 $\rho_{tephra}$ は 粒子密度であり、1,000kg/m<sup>3</sup>を想定した。 $d_{tephra}$ は粒子径(m)であり、この粒子径によっ て終端速度は決まる。例えば、粒径 0.1mm、0.5mm、1mm に相当する降灰速度は、それぞれ 1.6m/s、3.7m/s、5.2m/s となる。

本研究では、火山噴火による事象シーケンス定量化に資する火山噴火ハザードの発生頻 度を算出するため、火山噴火ハザードは火山灰の粒子径、層厚、降灰継続時間のパラメー タを組み合わせて評価する。ハザードの発生頻度としては3つのパラメータのカテゴリ分 けしたそれぞれのカテゴリの割合を乗じることで算出する。すなわち、火山噴火ハザード の発生頻度[/年]=層厚の発生頻度[/年]×粒子径割合×降灰継続時間割合とする。

### a. 火山灰の層厚

層厚に関する超過確率は求めており、ここではその平均曲線を用いる。平成24年度に はモデルサイトに到達する火山灰の堆積頻度を求めており、10,000年に2.1回と評価さ れた。そこで、超過確率に2.1×10<sup>-4</sup>を掛けることで発生頻度とした。また、火山灰の層 厚を0~0.5cm、0.5~1cm、1~5cm、5~10cm、10~20cm、20~50cm、50~75cm、75~ 100cm、100cm 以上でカテゴリ分けする。つまり、それぞれの層厚の超過確率に各カテゴ リの超過頻度の差分からそれぞれの層厚の区間頻度を算出することとした。なお、火山灰 層厚を用いたハザード曲線は、モデルサイト付近で最大規模の大山倉吉噴火を対象として いるが、堆積頻度は小規模噴火を含めたものとしているため、ここで検討しているハザー ド曲線は保守側に評価していると言える。

### b. 火山灰の粒子径

平成25年度の降灰シミュレーションで再現性の高い Tephra2の計算結果 (D18V4H5 ケ ース)から粒径分布図を作成した。これを参考にし、火山灰粒子径は0.1mm、0.5mm、1mm でカテゴリ分けして、各粒子径の割合を設定した。粒径0.25mm、0.125mm、0.0625mmの割 合がそれぞれ0.26、0.1、0.02 と読み取れることから、0.1mmの粒径割合は0.25mm、 0.125mm、0.0625mmの合計値である0.38 とした。

## c. 火山灰の降灰継続時間

平成25年度の降灰シミュレーションで最盛期の噴火継続時間が 10~20 時間と評価さ れた。降灰継続時間を調べた例はほとんどないため、本研究では、火山灰の降灰継続時間 の分布を平均値、標準偏差を 15 時間、5 時間として対数正規分布で仮定し、降灰継続時 間の確率密度分布、超過確率曲線を算出した。火山灰の降灰継続時間を 1~10h、10~20h、 20~30h、30~50h、50~100h、100h 以上にカテゴリ分けし、降灰継続時間の超過確率と 区間確率を算出した。

## 3.3.1.7 - 36

上記の粒径、層厚、降灰継続時間を乗じて火山噴火ハザードの発生頻度を求めた。これ を用いて、それぞれの火山噴火ハザードカテゴリに対して、事象シーケンス評価を実施す る。

大気中濃度を求める際には、層厚区間及び降灰継続時間は大きい値を使用することとす る。例えば、0~0.5cm の場合は 0.5cm で、75~100cm の場合は 100cm で計算することとす る。100cm 以上の場合は失敗とみなし、イベントツリーに従えば、非常用電源確立失敗及 び補助冷却設備除熱機能確保失敗となり I6 シーケンスの除熱失敗確率は 1.0 とする。同 様に、降灰継続時間についても、例えば、1~10 時間の場合は 10 時間、50~100 時間の場 合は 100 時間を用いる。100 時間以上の場合は失敗とみなし、I6 シーケンスの除熱失敗確 率は 1.0 とする。また、粒径 0.1mm、0.5mm、1mm について、降灰継続時間と層厚区間に相 当する大気中濃度を評価した。結果、層厚が厚くなるほど、降灰継続時間が短くなるほど、 また粒径が小さくなるほど、大気中濃度は増加する。

### (4) 機能喪失確率の評価

## a. 各部フィルタ閉塞確率の評価

- (a) 火山灰による空気取入口フィルタ閉塞の想定
- i. 非常用電源確立のための空気取入口フィルタ閉塞

ディーゼル発電機吸気流量については、軽水炉の火山影響評価[3.3.1.7.7-5]で使 用している値を参考に、ディーゼル発電機吸気流量は 550m<sup>3</sup>/min、フィルタ表面積は 3.0m<sup>2</sup>を想定する。

# ii. 換気空調系の空気取入口フィルタ閉塞

換気空調系の吸込み側フィルタ面積は 0.6m<sup>2</sup>(0.7m×0.8m 相当)と仮定する。また、 空気吸込量としては強制通風のみとし、通気量は 50m<sup>3</sup>/min(電気設備室)と仮定する。

### iii. メンテナンス冷却系の空気取入口フィルタ閉塞

メンテナンス冷却系は、空気吸込流量は強制通風のみであり、3,000Nm<sup>3</sup>/min (30℃ 相当で約 3,330m<sup>3</sup>/min) に相当する 3,400m<sup>3</sup>/min を仮定する。また、空気取入口フィ ルタ面積は 22.5m<sup>2</sup> (4.5m×5.0m 相当) と仮定する。

## iv. 補助冷却設備の空気取入口フィルタ閉塞

補助冷却設備の強制通風時の空気吸込流量は、330,000kg/hr に相当する 5,000m<sup>3</sup>/min と仮定する。これは高速運転時であるため、ポニーモータによる低速運 転の場合には 1/3 程度に低下すると想定して、1,700m<sup>3</sup>/min と仮定する。また、自然 通風時の空気吸込流量は温度依存であり変動するが、本評価では強制通風時の 15%と 想定して、750m<sup>3</sup>/min と仮定する。また、空気取入口フィルタ面積は、36m<sup>2</sup> (4.5m×8m) と仮定する。

## (b) フィルタ取替え失敗確率

## i. フィルタ取替えの手順

フィルタ閉塞時のアクシデントマネジメントとしては、軽水炉にて想定しているも のと同じフィルタ取替えにより対応するものと考えられる。

- フィルタ取替えは以下の手順で行われると仮定する[3.3.1.4-5]。
  - (i) 層状フィルタのカバー取り付けナットを緩めて、カバーを外す。
  - (ii) 層状フィルタを外す。
  - (iii) 層状フィルタ収納部を清掃する。
  - (iv) 組立前の内部確認を行う。
  - (v) 層状フィルタを取り付ける。
  - (vi)カバーを取り付ける。(要員:3名、所要時間:1時間)

## ii. フィルタの破損限界

フィルタ目詰まり試験によれば、中性能フィルタ(0.61m×0.61m×0.5m)は約 2.8kg を吸着して、ろ材に亀裂が発生した。ここでは、これをフィルタの破損限界 (火山灰保持限界量)と定義し、2.8/(0.61×0.61)=約7.5kg/m<sup>2</sup>で破損したとみな すことができる。本研究では、保守的に7kg/m<sup>2</sup>をフィルタの破損限界と設定する。

10<sup>-2</sup>、10<sup>-3</sup>、10<sup>-4</sup>、10<sup>-5</sup>kg/m<sup>3</sup>の大気中濃度に対するフィルタ吸着量の時間履歴から、 7kg/m<sup>2</sup>を限界とすれば、10<sup>-2</sup>kg/m<sup>3</sup>の場合は、補助冷却設備自然通風時においても1時間もしないうちに限界値に到達するが、10<sup>-5</sup>kg/m<sup>3</sup>の場合は、補助冷却設備自然通風時では560時間、ディーゼル発電機でも60時間で限界に達する。

### iii. フィルタの修復猶予時間(取替え時間)

フィルタ閉塞時のアクシデントマネジメントとしては、前述のフィルタ取替えを考 え、フィルタが破損するまでの時間を修復猶予時間とする。フィルタが破損するまで の時間は、各機器の単位面積/時間あたりのフィルタ吸着量(kg/hr/m<sup>2</sup>)でフィルタ 破損限界(7kg/m<sup>2</sup>)を除することで求められる。10<sup>-2</sup>kg/m<sup>3</sup>の場合は、すべての機器で 猶予時間は 1 時間以内だが、10<sup>-5</sup>kg/m<sup>3</sup>の場合は、60 時間以上あり猶予時間が非常に 長い。

## iv. フィルタ取替え失敗確率

内的事象 PRA の実施基準を参考にすると、フィルタ交換失敗確率は、修復時間1時 間に対する猶予時間の関数として、以下を想定する。

 $P = e^{-T/\tau}$  (3.3.1.7.7-4) ここで、Pは修復失敗確率、τは平均修復時間(1時間を設定)、Tは修復猶予時間 を表している。また本研究では修復時間を1時間に仮定したときのフィルタ取替え失 敗確率を評価した。例えば、1時間の猶予時間で約 0.37、2時間で約 0.14 と評価さ れる。また。猶予時間を代入することで、大気中濃度に対する各機器の失敗確率を評 価した。10<sup>-4</sup>kg/m<sup>3</sup>程度から急激に確率が立ち上がり、10<sup>-2</sup>kg/m<sup>3</sup>を超えるとほぼ 1.0 に 近くなることが分かる。

### 3.3.1.7-38

(c) フィルタ到達率

現地調査によって、火山灰は各機器の空気取入口フィルタに到達し難い構造(外気からフィルタに至るまでの構造や空間距離、及びルーバーの存在)となっていることがわかっており、フィルタ目詰まり試験においても、フィルタに到達せずに機器内の下部に落下する火山灰の存在が確認されている。ここで、吸込み風量(流速) *V*<sub>suction</sub>が降灰速度を上回る場合のみフィルタに吸着することを考えてみる。(3.3.1.7.7-3)式を用いて粒径*d*<sub>suction</sub>を求める式に変形してみると次式で表される。

$$d_{suction} = V_{suction}^2 \left/ \left( \frac{4}{3} \frac{g}{c_w} \frac{\rho_{tephra} - \rho_{air}}{\rho_{air}} \right)$$
(3. 3. 1. 7. 7-5)

単位面積・単位時間あたりの吸気風量、すなわち吸込み流速は、ディーゼル発電機 が 3.1m/s、換気空調系は 1.4m/s、メンテナンス冷却系が 2.5m/s、補助冷却設備が 0.4m/s である。これらはそれぞれ 0.35mm、0.07mm、0.24mm、0.004mm に相当する。 これらより大きな粒径の火山灰は吸い込まれないことから、ディーゼル発電機では 0.35mm 以下の範囲で 0.38、換気空調系では 0.07mm 以下の範囲で 0.02、メンテナン ス冷却系は 0.24mm 以下の範囲では 0.12、補助冷却設備では 0.004mm 以下の範囲では ほぼゼロになり、吸込み量は低減されることが期待できる。ただし、実際には、吸込 み口は下側に向いているわけではなく、横側に向いているため粒径の大きな火山灰は 吸い込まれるはずであり、これほどの低減効果はないと考えられる。

そこで、ディーゼル発電機の吸込みが 0.38 であることを考慮して、平成26年度 の評価では火山灰がフィルタに到達するのは 0.5 と仮定し、火山灰の大気中濃度にフ ィルタ到達率 0.5 を乗じた大気中濃度を用いることとした。ただし、フィルタ到達率 については、機器の構造を模擬した試験装置を用いるなどして精緻化する必要がある と考えられる。また、火山灰侵入を防ぐための各機器の最適な吸気流量や構造の検討 を行うことも必要となると考えられ、今後精緻化すべき課題である。本節では、感度 解析としてフィルタ到達率の感度を調べることとした。

### (d) 各部フィルタ閉塞による機能喪失確率

フィルタ吸着限界を単位面積/時間あたりのフィルタ吸着量で除することで、フィ ルタ取替え時間を算出した。降灰継続時間が長い場合、取替え後に再度フィルタ閉塞 の可能性があるため、フィルタ取替えを継続的に実施する必要がある。そこで、降灰 継続時間を猶予時間で除することによりフィルタ取替え回数を算出することとした。 このフィルタ取替え時間を用いて(3.3.1.7.7-4)式に基づく失敗確率にフィルタ取 替え回数を乗じることで各部フィルタ閉塞による機能喪失確率を算出することとした。

例えば、大山倉吉テフラ相当の場合、層厚 20~50cm、粒径 0.1mm、継続時間 10~ 20 時間の場合、大気中濃度は 4.2×10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>である。上述のフィルタ到達率 0.5 を考 慮すれば、2.1×10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>となる。ディーゼル発電機の単位面積あたりの吸込み風量 11,000m<sup>3</sup>/hr/m<sup>2</sup>で乗じることにより、23.1kg/hr/m<sup>2</sup>のフィルタ吸着量となる。これで フィルタ限界 7kg/m<sup>3</sup>を除することにより猶予時間は 0.3hr と求めることができ、フィ ルタ取替え失敗確率は exp(-0.3) =0.74 となる。降灰は 20 時間継続することからフ ィルタを頻繁に取替える必要があり、この場合は 20hr/0.3hr=67 回を要する。したが って、0.74 に 67 回を乗じることになるが、1.0 を超えてしまうため、フィルタ閉塞 による機能喪失確率は 1.0 とする。一方、自然通風時補助冷却設備では、 2.63kg/hr/m<sup>2</sup>のフィルタ吸着量となり、猶予時間は 2.67hr となるが、補助冷却設備 は 3 系統あることから、フィルタ取替え失敗確率は exp(-2.67×3) =3.3×10<sup>-4</sup>とな る。取替え回数は 20hr/2.67hr=8 回であることから、機能喪失確率は 3.3×10<sup>-4</sup>×8= 2.6×10<sup>-3</sup>となる。

以上から、ディーゼル発電機、換気空調系、メンテナンス冷却系、補助冷却設備 (自然通風)の機能喪失確率を評価した。例えば、ディーゼル発電機で粒径 0.1mmの 場合、1cm 以下の層厚であれば機能喪失確率は小さいが、5cm、10cm と層厚が大きく なるにつれて機能喪失確率は大きくなり、20cm 以上では確率がほぼ 1.0 で機能喪失 する。一方、吸込み風量の低い自然通風時の補助冷却設備では、20cm、50cm の層厚 の場合でも機能喪失確率はディーゼル発電機の場合と比較して低いことが分かる。

### b. 補助冷却設備空気冷却器のダンパ手動制御失敗確率

無電源下でのダンパ手動制御失敗の確率は、平成24年度の積雪時の事象シーケンス 評価と同様の想定とする。THERP に基づき、1系統のダンパ2台の開操作に関する行動 エラーの人的過誤率を設定する。また、作業を二人一組で実施することによるリカバリ の依存性は高従属とし、作業後のプラントパラメータの監視によるリカバリの依存性は 低従属と仮定する。さらに、非常に高いストレスレベル、段階的作業、習熟者を仮定 (5倍)、エラーファクタは10を仮定して平均値を算出し、無電源下での温度計測の 操作失敗は無視する。その結果、上記失敗確率は6.51×10<sup>-3</sup>/demandとする。これはイ ベントツリーで示すシーケンス13と15に与える。

なお、非常用電源がある場合は、補助冷却設備強制循環維持になりダンパ自動制御失 敗確率は1.0×10<sup>-6</sup>/demandと想定した。これはイベントツリーで示すシーケンス I1 に 与える。

### (5) 事象シーケンスの定量化

火山噴火ハザードカテゴリ毎に、イベントツリーに沿って上記の機能喪失確率を代入 していくと、炉心損傷頻度は2.5×10<sup>-6</sup>/年を得た。支配的なシーケンスはI6(ディーゼ ル発電機と換気空調系機能喪失、補助冷却設備フィルタ閉塞)であり、68%(1.7×10<sup>-6</sup>)を占めていた。次に、シーケンスI5(ディーゼル発電機と換気空調系機能喪失、補 助冷却設備フィルタは閉塞せず、ダンパ制御失敗)が続き、32%(7.9×10<sup>-7</sup>)を占めて いた。

層厚区間に着目すると、50~75cmがリスク上支配的であり、次いで20~50cmの影響

が大きい。75~100cm は発生頻度が低いため炉心損傷頻度が低くなったと考えられる。 粒径区間に着目すると、粒径が小さいほど炉心損傷頻度は高くなっている。この評価で は 0.1mm で代表させたが、更に分割して評価して精度を上げた方がよいことを示唆して いる。降灰継続時間区間に着目すると、1~10hr がリスク上支配的であり、時間が長け れば炉心損傷頻度は低くなる。この結果は、短時間側に着目した方がよいことを示して いる。

炉心損傷頻度上位3位はすべてI6シーケンスであり、火山噴火ハザードは以下のような組み合わせであった。

- 6.6×10<sup>-7</sup>(濃度1.3×10<sup>-2</sup>kg/m<sup>3</sup>、粒径0.1mm、層厚50~75mm、継続時間1~10hr)
- 5.0×10<sup>-7</sup>(濃度 4.2×10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>、粒径 0.1mm、層厚 20~50mm、継続時間 1~10hr)
- 2.7×10<sup>-7</sup>(濃度 6.3×10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>、粒径 0.1mm、層厚 50~75mm、継続時間 10~20hr)

図 3.3.1.4-18 は火山噴火カテゴリ別の除熱失敗確率を示す。大気中濃度で見れば 10<sup>-3</sup>kg/m<sup>3</sup>を超えると除熱失敗確率はほぼ1になることが分かる。言い換えれば、高大気中 濃度では火山噴火発生頻度で決まると言える。

### 参考文献

- [3.3.1.7.3-1] A. D. Swain, and H. E. Guttmann, Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278 (1983).
- [3.3.1.7.3-2] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Reliability Data for Pumps and Drivers, Valve Actuators, and Valves, ANSI/IEEE Std 500-1984 P&V (1986).
- [3.3.1.7.3-3] 日本原子力学会,原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的安全評価に 関する実施基準(レベル1PSA編):2008, AESJ-SC-P008:2008 (2009).
- [3.3.1.7.4-1] 東京工芸大学 "平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究" 平成 23 年 2 月.
- [3.3.1.7.4-2] H. Markee, Jr. G. Becherley U. S. Atomic Energy Commission Office of Regulation, Technical Basis for Interim Regional Tornado Cirteria, WASH-1300, May, 1974.
- [3.3.1.7.4-3]四国電力株式会社 "伊方発電所発電所 3 号炉 竜巻影響評価説明資料"原子力 規制委員会 発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チーム会合,平成 25 年7月(伊方発電所安全審査資料 資料番号 DB-8-05 提出年月日 平成 25 年 7月29日.
- [3.3.1.7.4-4] 原子力発電所の竜巻評価ガイド(案),第 23 回発電用軽水型原子炉の新規制基準 に関する検討チーム会合配布資料、平成 25 年 6 月 3 日.
- [3.3.1.7.4-5] 関西電力株式会社 "高浜発電所 3 号炉及び 4 号炉 竜巻影響評価について 補 足説明資料" 原子力規制委員会 発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検 討チーム会合ヒアリング資料、平成 25 年 11 月(高浜発電所安全審査資料 2-4-

## 3.3.1.7-41

2 改1 平成25年11月13日).

- [3.3.1.7.4-6] U.S.NRC, "Shutdown Decay Heat Removal Analysis of a Westinghouse 2-Loop Pressurized Water Reactor" NUREG/CR-4458, March 1987.
- [3.3.1.7.5-1] U.S. NRC, "Shutdown Decay Heat Removal Analysis of a Westinghouse 2-Loop Pressurized Water Reactor," NUREG/CR-4458, 1987.
- [3.3.1.7.6-1]気象庁ウェブサイト、雨の強さと降り方

http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/yougo\_hp/amehyo.html

- [3.3.1.7.7-1] 土志田潔,火山の基礎知識(第2回)-降下火山灰の影響-,電力土木,352, 121-124 (2011/3).
- [3.3.1.7.7-2] 春山元寿,下川悦郎,井上利昭,桜島火山灰砂の物理的諸性質,鹿児島大学農
   学部演習林報告 5,65-92 (1977/3).
- [3.3.1.7.7-3] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, Transport Phenomena, p.182, John Wiley & Sons (1960).
- [3.3.1.7.7-4] 森川敬信, 流体-固体二相流-空気輸送と水力輸送-, 日刊工業新聞社(1979).
- [3.3.1.7.7-5] 関西電力(株),高浜3号炉及び4号炉 設置許可基準等への適合状況について
   (設計基準対象施設等)一抜粋(第6条 火山)一,高浜発電所3,4号機の新規制基準適合性審査に関する事業者ヒアリング(315),原子力規制委員会(平成26年10月23日).

外部ハザード		項目		
		対策	効果	評価*1
強環(冷 及メナ冷設制除補却備びンン却備循熱助設 びテス系)	強風/ 竜巻	<ul> <li>(1)空気排出部の耐風性強化</li> <li>(2)バックアップ用電源確保</li> <li>(3)固縛による飛来物防止策</li> </ul>	<ul> <li>(1)空気排出部の破損防</li> <li>止</li> <li>(2)非常用電源確保</li> <li>(3)鋼製パイプ、鋼製材</li> <li>による飛来化を防止</li> </ul>	・空気排出部の耐風性評価 (空気冷却器の機能確保)
	降雨	<ul> <li>(1)雨水流入防止構造</li> <li>(2)排水設備の閉塞防止</li> <li>(3)バックアップ用電源確保</li> <li>(4)建物ドアの浸水防護強化</li> </ul>	<ul> <li>(1)電源設備などの機器</li> <li>の機能喪失防止、雨水</li> <li>によるナトリウム凍結</li> <li>防止</li> <li>(2)水位上昇を防止</li> <li>(3)非常用電源の確保</li> <li>(4)建物内へ雨水浸入防止</li> <li>止</li> </ul>	<ul> <li>・建物の浸水可能性評価 (原子炉補助建物及びデ ィーゼル建物)</li> <li>・ナトリウム凍結に至る雨 水流入評価</li> </ul>
	積雪	<ul> <li>(1)最低限の最終ヒートシンク確保</li> <li>(2)除雪、電熱線ヒータの導入、ラック室扉開放、閉塞防止構造</li> <li>(3)空気取入口の高所化</li> <li>(4)吸排気口までのアクセスルート確保</li> <li>(5)バックアップ用電源確保</li> </ul>	<ul> <li>(1)崩壊熱の放熱先の確保</li> <li>(2)~(4)崩壊熱除去設備空気冷却器などの吸 排気口の確保</li> <li>(5)非常用電源の確保</li> </ul>	<ul> <li>・建物の積雪荷重への耐性 評価(必要に応じ耐性強 化)</li> <li>・換気空調系停止時雰囲気 温度評価(2次主循環ポ ンプ及び2次メンテナン ス冷却系電磁ポンプの機 能確保)</li> </ul>
	火山 活動	<ul> <li>(1)交換用フィルタ及びフ ィルタ清掃用具の準備</li> <li>(2)空気取入部の吸込速度</li> <li>低減や吸込停止</li> <li>(3)フィルタ交換、清掃</li> <li>(4)ループ切り替え運転</li> <li>(5)プレフィルターの設置</li> <li>(6)バックアップ用電源確 保</li> </ul>	<ul> <li>(1)フィルタ交換のための準備</li> <li>(2)~(4)フィルタ閉塞までの時間の延長</li> <li>(5)フィルタに到達する火山灰の濃度現象</li> <li>(6)非常用電源の確保</li> </ul>	<ul> <li>・火山灰降灰シミュレーション(空気冷却器、2次主循環ポンプ及び2次メンテナンス冷却系電磁ポンプの機能確保)</li> <li>・換気空調系停止時雰囲気温度評価(2次主循環ポンプ及び2次メンテナンス冷却系電磁ポンプの機能確保)</li> </ul>
	森林火災	<ul> <li>(1)フィルタ差圧監視</li> <li>(2)フィルタ交換、清掃</li> <li>(3)補助冷却設備を停止して、温度低下を待って補助冷却設備を再起動</li> <li>(4)防煙マスク、安全ゴーグル、防火服の準備</li> <li>(5)消火活動</li> <li>(6)森林火災到達前に樹木</li> </ul>	<ul> <li>(1)フィルタ破損防止</li> <li>(2)フィルタ閉塞まで</li> <li>の時間の延長</li> <li>(3)補助冷却設備の機</li> <li>能喪失要因の排除</li> <li>(4)森林火災対策の準備</li> <li>(5),(6)森林火災の影響</li> <li>を縮小</li> </ul>	<ul> <li>・換気空調系停止時雰囲気 温度評価(2次主循環ポンプ及び2次メンテナンス冷却系電磁ポンプの機 能確保)</li> <li>・森林火災シミュレーション(空気冷却器の機能確 保)</li> </ul>

		に水を撒く (7)防火帯を設ける (8)バックアップ用電源確 保	(7)森林火災の拡大防止 (8)非常用電源の確保	
	低温	<ul><li>(1)補機系などの水系配管</li><li>に保温材を巻く</li><li>(2)バルブを開けておく</li></ul>	(1), (2)水系配管内の凍 結防止	<ul> <li>水系配管内の水の凍結評 価</li> </ul>
	低と雪重事	<ul> <li>・重畳に対する対策         <ol> <li>(1) フィルタ交換</li> <li>・積雪に対する対策</li> <li>(2) 最低限の最終ヒートシンク確保</li> <li>(3) 除雪、電熱線ヒータの導入、閉塞防止構造ラック室扉開放、</li> <li>(4) 空気取入口の高所化</li> <li>(5) 吸排気口までのアクセスルート確保</li> <li>(6) バックアップ用電源確保</li> <li>・低温に対する対策</li> <li>(7) 補機系などの水系配管に保温材を巻く</li> <li>(8) バルブを開けておく</li> </ol> </li> </ul>	<ul> <li>(1)雪の侵入による建屋</li> <li>内の環境の変化を防止</li> <li>(低温防止)</li> <li>(2)崩壊熱の放熱先の確保</li> <li>(3)~(5)崩壊熱除去設備空気冷却器などの吸排気口の確保</li> <li>(6)非常用電源の確保</li> <li>(7),(8)水系配管内の凍結防止</li> </ul>	<ul> <li>・積雪と低温による雪のフィルタ上での凍結、閉塞評価</li> <li>・建物の積雪荷重への耐性評価(必要に応じ耐性強化)</li> <li>・換気空調系停止時雰囲気温度評価(2次主循環ポンプ及び2次メンテナンス冷却系電磁ポンプの機能確保)</li> <li>・水系配管内の水の凍結評価</li> </ul>
	強との畳象	<ul> <li>・強風         <ul> <li>(1)空気排出部の耐風性強化</li> <li>(2)バックアップ用電源確保</li> <li>(3)固縛による飛来物防止策</li> <li>・             <ul> <li>(4)雨水流入防止構造</li> <li>(5)排水設備の閉塞防止</li> <li>(6)バックアップ用電源確保</li> <li>(7)建物ドアの浸水防護強化</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul> <li>(1)空気排出部の破損防</li> <li>止</li> <li>(2)非常用電源確保</li> <li>(3)鋼製パイプ、鋼製材</li> <li>による飛来化を防止</li> <li>(4)電源設備などの機器</li> <li>の機能喪失防止、雨水</li> <li>によるナトリウム凍結</li> <li>防止</li> <li>(5)水位上昇を防止</li> <li>(6)非常用電源の確保</li> <li>(7)建物内へ雨水浸入防</li> <li>止</li> </ul>	<ul> <li>・空気排出部の耐風性評価 (空気冷却器の機能確保)</li> <li>・ナトリウム凍結に至る雨 水流入量評価(空気冷却器 の機能確保)</li> <li>・建物の浸水可能性評価 (原子炉補助建物及びディ ーゼル建物)</li> </ul>

\*1:「評価」については、アクシデントマネジメントとして必要となる項目ではないが、「対策」に記載したア クシデントマネジメント策の有効性を判断する上で必要となるという位置づけで記載している。また、()内には その評価の目的または対象となる設備を示す。

外部ハザード		項目		
		対策	効果	評価 *1
	共通	<ul> <li>(1)自然循環冷却への移行</li> <li>(2)補助冷却設備空気冷却器の</li> <li>ベーン・ダンパ手動制御</li> <li>(3)無電源下で使用できる温度</li> <li>計の導入</li> </ul>	(1)~(3)自然循環 冷却の実施	_
	強風/ 竜巻	(1)空気排出部の耐風性強化 (2)固縛による飛来物防止策	<ul> <li>(1)空気排出部の</li> <li>破損防止</li> <li>(2)鋼製パイプ、</li> <li>鋼製材による飛来</li> <li>化を防止</li> </ul>	<ul> <li>・空気排出部の耐風性評価(空気冷却器の機能確保)</li> <li>・ナトリウム凍結に至る雨水流入量評価(空気冷却器の機能確保)</li> </ul>
	降雨	(1)雨水流入防止構造 (2)排水設備の閉塞防止	<ul><li>(1)雨水によるナ</li><li>トリウム凍結防止</li><li>(2)水位上昇を防</li><li>止</li></ul>	<ul> <li>・建物の浸水可能性評価 (原子炉補助建物及び ディーゼル建物)</li> <li>・ナトリウム凍結に至る 雨水流入評価</li> </ul>
自然循 環除助 冷面)	積雪	<ul> <li>(1)最低限の最終ヒートシンク 確保</li> <li>(2)除雪、電熱線ヒータの導入、ラック室扉開放、閉塞防 止構造</li> <li>(3)空気取入口の高所化</li> <li>(4)吸排気口までのアクセスル ート確保</li> </ul>	<ul> <li>(1)崩壊熱の放熱</li> <li>先の確保</li> <li>(2)~(4)崩壊熱除</li> <li>去設備空気冷却器</li> <li>などの吸排気口の</li> <li>確保</li> </ul>	<ul> <li>・建物の積雪荷重への耐 性評価(必要に応じ耐 性強化)</li> </ul>
	火山 活動	<ul> <li>(1)交換用フィルタ及びフィル タ清掃用具の準備</li> <li>(2)空気取入部の吸込速度低減 や吸込停止</li> <li>(3)フィルタ交換、清掃</li> <li>(4)ループ切り替え運転</li> <li>(5)プレフィルターの設置</li> </ul>	<ul> <li>(1) フィルタ交換 のための準備</li> <li>(2) ~ (4) フィルタ</li> <li>閉塞までの時間 の延長</li> <li>(5) フィルタに到 達する火山灰の 濃度現象</li> </ul>	<ul> <li>・火山灰降灰シミュレーション(空気冷却器、2次主循環ポンプ及び2次メンテナンス冷却系電磁ポンプの機能確保)</li> <li>・換気空調系停止時雰囲気温度評価(2次主循環ポンプ及び2次メンテナンス冷却系電磁ポンプの機能確保)</li> </ul>
	森林 火災	<ul> <li>(1)フィルタ差圧監視</li> <li>(2)フィルタ交換、清掃</li> <li>(3)補助冷却設備を停止して、 温度低下を待って補助冷却 設備を再起動</li> <li>(4)防煙マスク、安全ゴーグ ル、防火服の準備</li> <li>(5)消火活動</li> <li>(6)森林火災到達前に樹木に水</li> </ul>	<ul> <li>(1)フィルタ破損</li> <li>防止</li> <li>(2)フィルタ閉塞</li> <li>までの時間の延長</li> <li>(3)補助冷却設備</li> <li>の機能喪失要因の排除</li> </ul>	<ul> <li>・森林火災シミュレーション(空気冷却器の機能 確保)</li> </ul>

表 3.3.1.7-2 外部ハザードに対する安全対策候補(自然循環除熱に対する対策及び評価)

	を撒く (7)防火帯を設ける (9)燃料タンク等への放水	<ul> <li>(4)森林火災対策 の準備</li> <li>(5),(6)森林火災 の影響を縮小</li> <li>(7)森林火災の拡 大防止</li> </ul>	
低温	_	-	_
低と雪重事	<ul> <li>・重畳に対する対策         <ol> <li>(1) フィルタ交換</li> <li>・積雪に対する対策</li> <li>(2) 最低限の最終ヒートシンク 確保</li> <li>(3) 除雪、電熱線ヒータの導 入、ラック室扉開放、閉塞防 止構造</li> <li>(4) 空気取入口の高所化</li> <li>(5) 吸排気口までのアクセスル ート確保</li> </ol></li></ul>	<ul> <li>(1)雪の侵入によ</li> <li>る建屋内の環境の</li> <li>変化を防止(低温</li> <li>防止)</li> <li>(2)崩壊熱の放熱</li> <li>先の確保</li> <li>(3)~(5)崩壊熱除</li> <li>去設備空気冷却器</li> <li>などの吸排気口の</li> <li>確保</li> </ul>	<ul> <li>・積雪と低温による雪の フィルタ上での凍結、 閉塞評価</li> <li>・建物の積雪荷重への耐 性評価(必要に応じ耐 性強化)</li> </ul>
強と雨重事	<u>・強風</u> (1)空気排出部の耐風性強化 (2)固縛による飛来物防止策 <u>・雨</u> (4)雨水流入防止構造 (5)排水設備の閉塞防止	<ul> <li>(1)空気排出部の</li> <li>破損防止</li> <li>(2)鋼製パイプ、</li> <li>鋼製材による飛来</li> <li>化を防止</li> <li>(4)雨水によるナ</li> <li>トリウム凍結防止</li> <li>(5)水位上昇を防止</li> <li>止</li> </ul>	・空気排出部の耐風性評 価(空気冷却器の機能確 保) ・ナトリウム凍結に至る 雨水流入量評価(空気冷 却器の機能確保) ・建物の浸水可能性評価 (原子炉補助建物及びデ ィーゼルディーゼル建 物)

\*1:「評価」については、アクシデントマネジメントとして必要となる項目ではないが、「対策」に記載したア クシデントマネジメント策の有効性を判断する上で必要となるという位置づけで記載している。また、()内には その評価の目的または対象となる設備を示す。

## 3.3.1.8 まとめ

森林火災、積雪と低温の重畳事象、強風と降雨の重畳事象によるナトリウム冷却高速炉 の崩壊熱除去機能喪失要因を抽出し、空気冷却器、電源系、換気空調系といった重要機器 を同定した。また、森林火災時の安全対策としてポンプ車による燃料タンクへの放水、積 雪と低温の重畳事象時の安全対策として除雪作業とヒータの設置などを整理するとともに、 強風と降雨の重畳事象時の安全対策として排水溝閉塞物除去作業などを整理した。

次に、森林火災については、反応強度を指標とした森林火災ハザードをカテゴリ化して、 森林火災を起因とした炉心損傷シーケンスのイベントツリーを構築した。また、燃料タン ク破損及び火災発生確率を算定して、空気冷却器外気温度高温化による機能喪失を考慮し た事象シーケンスを評価し、炉心損傷頻度を定量化する手法を開発した。

積雪と低温の重畳事象については、日降雪深、降雪継続時間と低温継続時間に応じたハ ザードカテゴリを設定して、積雪と低温の重畳事象を起因とした炉心損傷シーケンスのイ ベントツリーを構築した。また、着雪によるフィルタ閉塞確率、水配管凍結確率、ナトリ ウム凍結確率といった確率モデルを考案して、補助冷却設備機能喪失を考慮した事象シー ケンスを評価し、炉心損傷頻度を定量化する手法を開発した。

強風と降雨の重畳事象については、最大瞬間風速、1時間降水量、降水継続時間に応じ たハザードカテゴリを設定して、強風と降雨の重畳事象を起因とした炉心損傷シーケンス のイベントツリーを構築した。また、空気冷却器伝熱管への雨水液滴の接触により発生す る熱応力を求め、繰返し接触による疲労破損を評価することで補助冷却設備機能喪失を考 慮した事象シーケンスを評価し、炉心損傷頻度を定量化する手法を開発した。

さらに、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去解析として、低温時の空気冷却器伝熱管ナ トリウム凍結に着目した解析を実施した。

最後に、4年間のまとめとして、開発してきた手法を整理した。

## 3.3.2 時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発

## (再委託先:平成27年8月31日まで大阪大学、平成27年9月1日以降原子力機構)

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法を開発するため、降 雨を起因とした炉心損傷に至り得る事象シーケンスに対して適用性評価を可能とすべく、 平成26年度に開発した評価プログラムの機能追加に関するモデル化を実施した。また、 この評価手法の降雨時のシーケンスに対する適用性を評価するための予備解析を実施した。

### 3.3.2.1 はじめに

地震加速度や津波水位を指標とする地震及び津波 PRA の場合、大気を最終ヒートシンク とする崩壊熱除去系への影響は小さく、時間進展を考慮せずとも評価が可能である。一方、 本事業で対象としている外部ハザードの場合、大気を最終ヒートシンクとする崩壊熱除去 系への影響が、ハザードの影響継続時間内のいずれかの時点で顕在化すること等、プラン ト状態の時間進展挙動が重要となる。そのため、従来のイベントツリーを用いた事象シー ケンス評価手法では適切に評価できない可能性がある。そこで、本研究では、より詳細な 手法としてモンテカルロ計算を活用した時間依存事象進展アルゴリズムに基づく評価手法 を開発する。

4年間の業務計画は次のとおりである。平成24年度に既往研究から評価手法を調査し 評価手法の概念を構築するとともに、評価プログラムを作成する。平成25年度に適用性 評価ができるように評価手法を開発し、積雪への適用性を評価する。平成26年度に評価 手法の改良を行い、強風への適用性を評価する。平成27年度に評価手法の改良を行い、 降雨への適用性を評価するとともに、4年間のまとめとして手法を整備する。

平成24年度の予備検討において、本事業における事象シーケンス評価手法の形態として、

・イベントシーケンスに動特性評価を組み合わせた事象進展の評価

を選定した。平成25年度では、動特性評価ツールとして Super-COPD[3.3.2-1]を用い、 内部に時間依存事象進展アルゴリズム(連続マルコフ連鎖モンテカルロ法(Continuous Marcov Chain Monte Carlo method、以下 CMMC とする)の組み込み及び積雪を起因とした 炉心損傷に至り得る事象シーケンスへ適用した。平成26年度では、評価手法の改良を 行い、強風への適用性を評価した。平成27年度では、降雨時シーケンス評価を可能と するために必要となるモデルの追加、改良を行うとともに、降雨時シーケンスの適用性 評価を実施した。また4年間のまとめとして、CMMC 法を用いた事象シーケンス評価手法

## 3.3.2.2 評価プログラムの機能追加(H27)

降雨時のプラント動特性への影響としては、

- ・降雨そのものによる機器の機能喪失(空気冷却器出入り口破損等)
- ・内部に浸水することによる機器の機能喪失

が考えられる。この内、降雨そのものによる機能喪失は考えがたい。そこで本研究では、 降雨に伴う建物内部の浸水を評価するモデルを新たに構築し、動特性ツールとカップリン

## 3.3.2-1

グするものとする。

内部に浸入した水は、越流、浸水により部屋間を伝播する。ここで越流及び浸水の概念 を図 3.3.2-1 に示す。また、部屋内に堆積した水は排出口より流出される(図中 Drain)。 以下に考慮した各モデル及び、フローネットワークプログラム全体の概要を示す。

(1) 越流モデル

越流とは、止水板上流側の水位が止水板高さを越え、止水板を越えて水が下流側の部屋 へと流入する状態である。越流流量は、越流水深 hoverと越流流速 u を用い、(3.3.2-1) 式のような積分値に開水路における水路幅 wWを掛けることで求められる[3.3.2-2]。

$$G_{overflow} = \rho w \times \int_0^{h_{over}} u dh \qquad (3. 3. 2-1)$$

ここで、*Goverflow*: 越流流量[kg/s]、ρ:水密度[kg/m<sup>3</sup>]、w:開水路幅[m]、h: 越流水深
 [m]、u: 越流流速[m/s]となる。本研究で、開水路幅とは溢水伝播経路において、上流側の部屋と下流側の部屋が面している部分の幅である。

越流水深は、上流側水位と下流側水位若しくは止水板高さの差より求めることができる。

$$h_{over} = \min(|h_o - h_i|, |h_o - h_b|)$$
(3.3.2-2)

ここで、 $h_o$ :上流側区画の水位[m]、 $h_i$ :下流側区画の水位[m]、 $h_b$ :止水板高さ[m]である。越流流速は、以下のベルヌーイの式を解くことで求める。

$$\frac{1}{2}\rho u^{2} + p + \rho gh = \frac{1}{2}\rho u'^{2} + p' + \rho gh' \qquad (3.3.2-3)$$

ここで、*ρ*:密度[kg/m<sup>3</sup>]、 g:重力加速度(9.8) [m<sup>3</sup>/s]、u:上流側流速[m/s]、p:上 流側圧力[Pa]、h:上流側越流水深[m]、u':下流側流速[m/s]、p':下流側圧力[Pa]、h': 下流側越流水深若しくは止水版高さ[m]である。今、止水板前後の圧力は等しく、上流側 の流速は 0m/s であり、下流側水位を基準点(0m)とすると、

$$u' = \sqrt{2gh} \tag{3. 3. 2-4}$$

これを(3.3.2-1)式に代入することで、以下のとおり越流流量を評価する。

$$G_{overflow} = \frac{2}{3} \times \rho W \times \sqrt{2g} \times h_{over}^{3/2}$$
(3.3.2-5)

### (2) 浸水モデル

内部溢水 PRA の日本原子力学会標準[3.3.2-3]を参考に、(3.3.2-6) 式を用いる。止水 板の破損部位が止水板底部に生じた際、止水板で隔てられた2つの区画において破損部位 が水没している場合には、移行流量としてもぐりオリフィスの流量計算式を適用している。

$$G_{leak} = \rho c A_{leak} \sqrt{2g\left(h_o - h_i\right)}$$
(3.3.2-6)

ここで、*G<sub>leak</sub>*:浸水量[kg/s]、*A<sub>leak</sub>*:止水板破損断面積[m<sup>2</sup>]、*c*:流量係数[-]であり、本

(3) ドレインモデル

ドレインとしては前述の排水口に加え、アクシデントマネジメント(Accident Management、AM)対策としての可搬型ポンプが挙げられる。可搬型ポンプについては一定 流量の流出となるが、排水口の場合、水位の関数となる。

ドレインモデルについては泊原子力発電所で用いられている以下のモデルとする [3.3.2-4]。

$$G_{drain} = \rho A_D \sqrt{\frac{2gh}{\zeta}}$$
(3.3.2-7)

ここで、 $\zeta$ :損失係数(=1.56)、 $A_D$ :ドレイン部開口面積[m<sup>2</sup>]である。

# (4) フローネットワークモデル

### 【支配方程式】

流量計算モデル作成においては、図 3.3.2-2 のように 2 つの部屋の間での水質量の収支 計算を行い、以下に示す微分方程式による水質量の保存則を満たすフローネットワークと する。

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = G_{src\,i} - \sum G_{overflowi} - \sum G_{leak\,i} - \sum G_{draini} \tag{3. 3. 2-8}$$

ここで、W<sub>i</sub>は部屋番号 *i* における水質量[kg]であり、越流、浸水及びドレインは隣接する パス数若しくは設置される数分だけ積算される。

## 【方程式の離散化】

(3.3.2-8) 式は水質量に関する保存であり、方程式の離散化ではこれを水位(*h<sub>i</sub>*)として以下とする。

$$\rho A_i \frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t} = G_{srci}^n - \sum G_{overflowi} - \sum G_{leaki} - \sum G_{draini}$$
(3. 3. 2-9)

ここで n はタイムステップである。越流、浸水及びドレインはそれぞれ水位の関数となっている。離散化では数値計算安定性を考慮し、以下の3種類とする。

### ①陽解法(Ex.)

(3.3.2-9) 式の右辺を全て既知量(nタイムステップを基に評価)として以下のように 取り扱う。数値計算としては最もシンプルであり、質量保存も厳密に満足するが、タイム ステップを大きくすると数値不安定となる。

$$\rho A_{i} \frac{h_{i}^{n+1} - h_{i}^{n}}{\Delta t} = G_{srci}^{n} - \sum G_{overflow i}^{n} - \sum G_{leak i}^{n} - \sum G_{draini}^{n}$$
(3. 3. 2-10)

## 3.3.2-3

.
#### ②陰解法(Im.1)

越流、浸水及びドレインは全て水位の関数となっているため、以下の形で対角化を行い 反復計算により *n*+1 時刻の水位を評価する。反復計算には逐次緩和法(SOR 法)を用いる。

$$\rho A_{i} \frac{h_{i}^{n+1} - h_{i}^{n}}{\Delta t} = G_{srci}^{n} - \sum G_{overflow i}^{n+1} - \sum G_{leak i}^{n+1} - \sum G_{draini}^{n+1}$$

$$G_{i}^{n+1} = G_{i}^{n} + \frac{\partial G_{i}}{\partial h} (h_{i}^{n+1} - h_{i}^{n})$$
(3. 3. 2-11)

本手法は数値的には安定であるが、越流、浸水の評価において連通する2部屋での評価 値が反復計算の収束判定条件内で異なるため、厳密な質量保存が成り立たない。

#### ③質量保存性を向上した陰解法(Im.2)

基本的には②と同じであるが、収束後の水位(*h*<sup>\*</sup>)を用い陽的に越流、浸水、ドレインの各量を計算することで質量保存性を満足させる。

$$\rho A_{i} \frac{h_{i}^{n+1} - h_{i}^{n}}{\Delta t} = G_{srci}^{n} - \sum G_{overflow i}^{*} - \sum G_{leak i}^{*} - \sum G_{draini}^{*} \qquad (3. 3. 2-12)$$

$$G_{i}^{*} = function(h^{*})$$

#### (5) 組み込みモデルの検証

組み込みモデルの検証として、図 3.3.2-3 に示す2部屋体系での水位評価を行った。部 屋の大きさはそれぞれ1,000m<sup>2</sup>及び200m<sup>2</sup>であり、降水源としていずれかの部屋で1.0m<sup>3</sup>/hr、 水の密度は単純に1,000kg/m<sup>3</sup>とした(両部屋が完全に連通していた場合、1hr 後の水位は 3m となる)。両部屋には図に示すように2種類の流路パスがあり、ひとつは開放で0.5m の止水板を、もうひとつは水密扉ではあるが、0.01m<sup>2</sup>の破損開口を仮定した。

解析では、タイムステップを 0.01s 及び 200s とし、陰解法における反復計算の収束判 定条件は相対誤差で 10<sup>-6</sup>とした。表 3.3.2-1 に 1hr 後の質量残差(理論値:3,600kg との 相対誤差)を、図 3.3.2-4 に各部屋の水位(降水源は部屋1)を示す。

表に示すように、タイムステップが 0.01s の場合、①陽解法及び③質量保存を向上した 陰解法では、誤差が評価精度内で0となるものの、②陰解法では約2%の質量欠損が発生し ている。一方、タイムステップを200s とした場合、②陰解法においても十分な精度が得 られている。これは一度の反復計算における誤差が同じであるため、タイムステップを小 さくし、総反復回数が増加するほど誤差の蓄積が起きるためである。なお、①陽解法にお いてはタイムステップを200s とすると計算が破綻した。

各部屋の水位は図 3.3.2-4 に示すように、タイムステップを 0.01s とした場合では解法 による違いは見られない。止水板高さ(0.5m)までは部屋 2の水位上昇が抑えられている が、部屋 1 の水位が 0.5m を超えて以降、部屋 2 の水位は急激に上昇しその後ほぼ部屋 1 に追随する形となっている。タイムステップを 200s とした場合、止水板を超えた直後で 陽解法は数値不安定のため計算結果が破綻している。その一方で、②陰解法及び③質量保 存を向上した陰解法では、タイムステップを 0.01s とした結果とほぼ同様であり、陰解法 による数値計算安定化が確認された。③質量保存を向上した陰解法では、タイムステップ によらず安定した質量保存が陰的に得られており、本解法をデフォルトとする。また図 3.3.2-5 に各タイムステップで出力された越流及び浸水量とモデル値との比較を示す。図 に示すようにプログラミングで組み込まれたモデルと、基となる計算式は一致しており、 組み込みに問題が無いことを確認した。

次に同じ部屋を用い、降水源を部屋1としドレインモデルを組み込んだ解析を実施した。 解析体系を図 3.3.2-6 に示す。ドレインモデルでは、可搬型機器の組み込みも想定し、

(3.3.2-7)式で表されるドレインロからの流出に加え、一定量(入力条件)の除去モデルも組み込んでいる。

図 3.3.2-7 に各部屋の水位を、図 3.3.2-8 に (3.3.2-7) 式でのモデルとの比較をそれ ぞれ示す。図 3.3.2-7 に示すように、ドレインのため部屋の水位は図 3.3.2-4 に比べ約半 分程度となっている。③質量保存を向上した陰解法におけるタイムステップ 200s の結果 (図中×)では、若干水位を過小評価しているが、数値不安定なく計算が進行しており、 本モデルの妥当性が確認された。また図 3.3.2-8 に示すように、ドレインモデルについて もその組み込みに問題が無いことを確認した。

#### 3.3.2.3 降雨を起因とする事象シーケンスに対する評価手法の適用性評価(H27)

構築した手法の適用性評価として平成26年度に実施した異常降雨ハザードに対する事 象シーケンス評価を基に、CMMC法でプラント状態を解析した。以下に評価条件及び解析結 果を示す。

#### (1) イベントツリーからの事象抽出

図 3.3.2-9 に、平成26年度に実施した、異常降雨ハザードに対する事象シーケンス評価で用いられたイベントツリーを示す。本 CMMC モデルに関連する項目として、

- ・屋外の排水設備の閉塞防止
- ・海水ポンプ健全
- ・ディーゼル建物内への雨水の浸入防止
- ・ディーゼル発電機健全
- · 補助冷却設備空気冷却器
- ・原子炉補助建物内への雨水の浸入防止
- ·電気設備室健全

なお、従来 CMMC 法で用いている解析体系では、メンテナンス冷却設備は模擬していないため、事象抽出からは除外した。

次に各事象について、本モデルでの適用の有無を検討した。検討結果を以下に示す。

#### ・屋外の排水設備の閉塞防止

屋外の排水設備が健全な場合、本ハザードで想定する最大降雨量(140mm/hr)においても排水が可能となり、プラント状態の健全性は担保される。そこで本評価では、排水 設備が閉塞した状態を工学的判断として採用する。この場合、排水設備による排水量は

14mm/hr とする。

# ・海水ポンプ健全

平成26年度の検討では、海水ポンプの健全性の判断基準として、屋外水位1.2mであった。降雨量140mm/hrにおける機能喪失時間としては、海への流出係数0.7を用い、1,200/(126×0.7)=約13.6hrとなる。しかしながら、単純に海水面の流出をベルヌーイ則((3.3.2-5)式)に基づき評価すると、屋外水位は以下となる。

$$\mathbf{h} = \left(\frac{8}{9}g\right)^{-1/3} \left(\nu L\right)^{2/3} \tag{3. 3. 2-13}$$

ここで、v は降水量[m/s]であり、L は奥行き[m]となる。ここで降水量を  $3.5 \times 10^{-5}$  [m/s] (=140-14[mm/hr])、奥行きを 2,000[m]とすると、水位は約  $8.3 \times 10^{-4} [m]$ となり 1.2mの屋外水位は現実的ではない。したがって、海水ポンプは健全を仮定する。

## ・ディーゼル建物内への雨水の浸入防止

ディーゼル建物の出入り口(開口部)下端は0.5mの高さがあり、海水ポンプと同様に、 外部からのディーゼル建物への浸水は起こり難い。したがって、同様に雨水の浸入は 防止されるとする。

# ・ディーゼル発電機健全

ディーゼル建物内への雨水浸入は防止されているため、直接的な浸水に伴うディーゼル発電機の機能喪失は起こり得ないとする。なお、平成26年度の検討では、ディーゼル発電機の直接的な機能喪失は、降水量 140mm/hr においてハザード発生後約 50hr (図 3.3.1.3-15)となっており、仮にディーゼル発電機の機能喪失を仮定したとしても、本 CMMC 法における評価時間(ハザード発生後 24hr)内では機能喪失しない。

#### ・補助冷却設備空気冷却器及び原子炉補助建物内への雨水の浸入防止

平成26年度の検討では、補助冷却設備空気冷却器及び原子炉補助建物内への雨水の 浸入防止は同様な評価となっており、建物内の排気口からの浸水で、その基準値が建 物屋上での水位3.0mとしている。実際の建物では、周辺高さが1m以下であり、屋上 で3.0mの水位は現実的ではない。また、降雨量140mm/hr、排水機能喪失状態におい て基準値に至る時間が約24hrであり、評価時間の観点からも補助冷却設備空気冷却器 の機能喪失は起こりにくく、機能喪失は仮定しない。

#### ・電気設備室健全

電気設備室健全性の判断基準は屋上からの浸水でその水位を1.0mとしている。補助冷却設備空気冷却器と同様に屋上で1.0mの水位は起こりにくいものの、同様に基準値に 至る時間が約8hrと短く、電気設備室の健全性は本評価モデルとして検討する。 CMMC法を用いた異常降雨事象シーケンス評価では、上記事象の結果、動特性解析で影響 を受けるモデルを選定する。動特性解析で影響を受けるモデルと上記事象及びその発生の 有無をまとめたものを以下に示す。

## 【ポンプ(ポニーモータ) トリップ】

・海水ポンプ

海水ポンプが停止することで非常用ディーゼル発電機の冷却ができなくなり、結果 的に非常用電源で作動するポニーモータ駆動のポンプが1、2次冷却系で機能喪失 する(以下、ポンプ機能喪失またはポンプトリップとする)。現実的には起こり得 ないので本モデルでは除外する。

・ディーゼル建物内への雨水の浸入防止、ディーゼル発電機健全

ディーゼル発電機が機能喪失することでポンプトリップとなる。本事象も現実的に は起こり得ないため除外する。

・電気設備室健全

電気設備室が機能喪失するとことで、ポンプトリップとなる。

#### 【補助冷却設備空気冷却器】

#### ・補助冷却設備空気冷却器及び、原子炉補助建物内への雨水の浸入防止

補助冷却設備空気冷却器に雨水が浸水し、伝熱管を急激に冷却することで伝熱管が 破損し、補助冷却設備空気冷却器の機能喪失が発生する。現実的には起こり得ない ので本モデルでは除外する。

以上より、本モデルで考慮する事象としては、電気設備室の機能喪失に伴うポンプトリ ップとする。

#### (2) ポンプ(ポニーモータ)トリップ発生確率

電気設備室の機能喪失に伴うポンプトリップ発生確率については、屋上水位が 1.0m から建物内への浸水が始まるため、この位置を発生確率の開始位置とする。また浸水開始後の浸水経路及び電計設備室での直接的な機能喪失過程が不明であるため、工学的判断として、浸水開始後 1hr で完全に電気設備室が機能喪失すると仮定し、それまでは線形的に機能喪失状態確率が変化するとした。図 3.3.2-10 に降雨量 140mm/hr、排水機能喪失(排水量 14mm/hr)における電気設備室の機能喪失状態確率を示す。なお、ポンプトリップ発生確率は電気設備室の機能喪失状態確率と同じとする。

(3) 解析条件

解析体系は平成26年度と同様にループ型ナトリウム冷却高速炉(3ループ)とし、降 雨量は平成26年度に実施した最大値である140mm/hrとする。また排水設備は機能喪失 とし、最終的に水位上昇にかかる降雨量は126mm/hrとした。 解析では、時刻 0s において異常降雨のための外部電源喪失、緊急シャットダウンの成 功及び非常用ディーゼル発電機の起動成功を仮定する。その後、屋上の水位が徐々に上昇 し、図 3.3.2-10 に示した確率分布に従い、電気設備機能喪失を介したポンプトリップ (1、2次系同時に機能喪失)の発生及び自然循環崩壊熱除去への移行を評価する。なお、 本評価では異常降雨ハザードに起因する事象のみを取り扱うため、自然循環崩壊熱除去の 失敗確率は0とする。また、ポンプトリップは最終的には発生確率が1となるため、サン プル数は100とした。

#### (4) 解析結果及び考察

解析結果として図 3.3.2-11 及び図 3.3.2-12 に 1 次系流量時刻暦変化及び炉心出口温度 時刻暦変化(50 サンプル)を示す。1 次系流量時刻暦変化については、図 3.3.2-11 に示 すように、約 8hr (=1.0/0.126)後から 1hr の間にポンプトリップに伴う自然循環への移 行が見られている。ポンプトリップ直後では各サンプルにおいて流量に差異が見られるも のの、約 12hr 以降ではポンプトリップ時刻にかかわらずほぼ同じ流量となっている。

炉心出口温度については、図 3.3.2-12 に示すように、ポンプトリップ直後から温度が 急激に上昇するものの、その後自然循環の発達とともに低下に転じ、1次系流量と同様に 12hr以降ではポンプトリップの時刻に関係なく、ほぼ同様な温度履歴となっている。一連 の自然循環移行過程で約50℃冷却材温度は上昇するものの、最高温度は積雪ハザードや強 風ハザードに比べ低い。これは異常降雨ハザードでは一般的に補助冷却設備空気冷却器の 機能喪失が起こり難いためである。

図 3.3.2-13 に炉心出口冷却材最高温度の累積分布を示す。本解析では電気設備室の機 能喪失に伴うポンプトリップのみが考慮され、その状態遷移確率を直線近似したため、図 に示すように累積度数分布もほぼ直線的な変化となっている。解析結果を正規分布で近似 した結果、平均温度は435.0℃、標準偏差は1.57℃であり、炉心損傷の基準として冷却材 炉心出口最高温度650℃を仮定した場合、計算精度の範囲内で発生確率は0となった。

以上、開発したモデルを基に異常降雨ハザードにおける事象シーケンスを評価した結果、 開発した手法で事象シーケンスを評価できることを確認した。また、事象シーケンスを評 価した結果、異常降雨ハザードにおいては現実的な評価として補助冷却設備空気冷却器が 機能喪失する可能性は極めて小さく、積雪ハザードや強風ハザードに比べ、事象発生から 24hr後のプラント健全性は非常に高いことが明らかとなった。なお、本手法は、外部事象 だけではなく内部溢水に対しても適用可能である。

# 3.3.2.4 評価手法の整備(4年間のまとめ)

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発の整備として、 連続マルコフ過程モンテカルロ法(<u>Continuous Markov Chain Monte Carlo、 CMMC</u>法)を 用いた評価ツールの開発及び積雪、強風(竜巻含む)、異常降雨の事象シーケンス評価を 実施した。以下にそれぞれのまとめを示す。

#### (1) 事象シーケンス評価手法の開発(H24~H27)

#### a. 評価モデルの選定

CMMC 法を用いた既存研究の調査・整理により、本事業で開発するモデルとして、イベン トシーケンスに動特性評価を組み合わせた CMMC 法の開発を選定した。CMMC 法の概要を図 3.3.2-14に示す。マルコフ過程では、現在の状態を基に次のプラント状態が決定する。こ れを連続的に行うことでプラントの時間依存事象進展を評価する。図 3.3.2-14 に示すよ うに、プラント動特性評価により現在のプラント状態を決定する (図中左上)。次に、プ ラント状態(温度、圧力等)及び外部ハザード状態(積雪量、降雨量等)を基に、プラン トの各機能、機器の破損確率(遷移確率)を評価する(図中左下)。最後に、得られた遷 移確率よりモンテカルロサンプルを行うことで次のタイムステップにおけるプラント状態 を決定する(図中右側)。これらを解析期間中連続的に行うことでひとつのサンプルを得 る。一連の計算について複数のサンプルを取得し統計処理を行うことで、事象シーケンス の評価が可能となる。本事業では、動特性解析として Super-COPD コード[3.3.2-1]を選定 した。

上記のとおり、連続マルコフ過程を導入することにより、それぞれの事象の発生順序は、 遷移確率及びモンテカルロサンプリングに依存するため、発生順序そのものが確率として 評価することが可能である。このことは、従来のイベントツリー法と異なり、可逆変化を 含めた一連の評価が可能となる。図 3.3.2-15 にイベントツリー法との比較を示す。従来 のイベントツリー法では工学的判断により各へディング(図中 Event A、B)の生起順序を 決定した上でその分岐確率及び終状態を決定する(図中上)。このため、生起順序の変更 等を評価するためには、それぞれのシーケンスに基づく Tree 図を用意する必要がある。 また、積雪等の外部ハザードでは、積雪量等の状態変化によりイベントの発生確率が変化 するため、ひとつの Tree 図で表現することが困難である。一方、本手法では、個々のサ ンプルにおけるへディングの生起順序はそれぞれの遷移確率を基に確率として評価される ため、サンプルを統計処理することでその生起順序を含めた統計的評価が可能となる(図 中下)。

#### b. 確率分岐のモデル化

CMMC 法においてヘディングとして取り扱う確率分岐モデルは以下とする。

・デマンド型

主に人的操作に対応するもので、要求(デマンド)に対し失敗(成功)確率を与える。

・故障率型

一般に、故障率 $\lambda_f$ 及び修復率 $\lambda_s$ [1/s]が与えられた場合、その機器または機能の失敗状態確率  $P_f$ は、以下の式で与えられる。

$$\frac{\partial P_f}{\partial t} = \lambda_f P_s - \lambda_s P_f \qquad (3. 3. 2-14)$$

ここで *P*<sub>s</sub>は成功状態確率である。積雪や異常降雨の場合、これら故障率は時間単位ではなく、積雪量あるいは水位となる。最終的に失敗状態確率は以下のような関数となる。

$$p_f = \frac{\lambda_f}{\lambda_f + \lambda_s} \left( 1 - e^{-(\lambda_f + \lambda_s)t} \right)$$
(3. 3. 2-15)

故障率型確率分岐モデルは一般的な機器故障が該当する。

#### ・状態確率テーブル型

故障率が与えられるシステムの場合、(3.3.2-15)式に示される指数型の関数となる が、複雑なシステムの場合では必ずしも関数化できないものもある。そこで独立変数 とその時の状態確率をテーブルとして入力できるものとする。

また各へディングは本来生起順序が決まっているものもあり、そのヘディングの生起を モンテカルロサンプリングするための条件が必要となる。本モデルでは、以下の3つのサ ブモデル(本モデルではモードと呼ぶ)を設定した。

・条件付モード

モンテカルロサンプリングを行うための必要条件を規定する。不可逆シーケンス等が 該当する(例えば電熱ヒータが OFF の時のみの補助冷却設備空気冷却器の積雪による 機能停止)。

#### ・強制モード

対象とするヘディングの状態によらず強制的にモンテカルロサンプリングを行う機能 である(例えば補助冷却設備空気冷却器の機能喪失の有無に関わらない除雪作業)。

#### ・共通モード

ひとつのモンテカルロサンプリングが、他の機器の状態にも適用される機能である (例えば除雪成功時に全ての補助冷却設備空気冷却器が機能回復する)。

#### c. 評価プログラムの開発

本事業で構築するプログラムと動特性コードである Super-COPD との関係を図 3.3.2-16 に示す。本コードで付加される機能はなるべく独立して取り扱えるように、Super-COPD 側 の変更を最小限としている。図中塗りつぶし部分が新規に開発するモジュール及び入出力 である。

開発モジュールとしては、CMMC部のコントロールモジュール、外部ハザードのハザード 変化評価モジュール、乱数発生及びモンテカルロサンプリングモジュールとなっている。 また、出力結果を統計処理するモジュール(単独のプログラム)も併せて開発した。入力 データとしては、Super-COPDで使用するプラント計算での入力に加え、シーケンス評価で 利用するヘディングを記述する入力及び、確率データを記述する入力である。また従来の Super-COPDに加え、出力として、個別の状態量(温度、流量等)の出力及び各サンプル計 算でのシーケンス時刻暦を記述したログファイルである。

出力結果を統計処理するプログラムでは、図 3.3.2-16 に示すように、ヘディングを記述した入力、個別の状態量出力及びシーケンスログ出力に加え、統計処理を規定するため

の入力を用い、指定した統計期間及び状態量並びに終状態に関するデータを出力する。表 3.3.2-2 に、終状態別の統計処理の結果を例として示す。

# d. ヘディング選定の考え方

CMMC法では、イベントツリーに対応するヘディングのモデル化を行う必要がある。ここでは、ヘディング選定と具体的なモデル化方法について示す。

本事業では、外部ハザード発生時における崩壊熱除去機能の喪失に着目しており、基本 的に原子炉の緊急停止(スクラム)は正常に機能することを仮定している。また外部電源 については、外部ハザードのどの段階において機能喪失(外部電源喪失)が発生するかは 不明であり、外部電源の供給の有無や、スクラムの成功等は解析における境界条件とみな すことができる。これらプラント全体挙動に大きく影響を及ぼし、かつ評価目的(崩壊熱 除去機能の喪失)に対して境界条件となりうるものは、工学的判断により決定する。

上記以外の各へディングについては、イベントツリー法で各へディングの分岐確率を評 価する Fault tree 及びそのヘディングの事象進展を基に影響を及ぼす各機器を選定する。 図 3.3.2-17 に一例を示す。例えば、「積雪による補助冷却設備空気冷却器空気取り入れ 口閉塞(空気側)」については、事象進展として補助冷却設備空気冷却器が機能喪失する ことが明白であり、対応する補助冷却設備空気冷却器の機能喪失として取り扱う。また 「強風による非常用ディーゼル発電機燃料タンク破損」では、その後の事象として、非常 用ディーゼル発電機の機能喪失及び燃料タンク火災がある。非常用ディーゼル発電機自体 は動特性解析でモデル化されていないが、機能喪失の結果、ポニーモータへの電源が供給 されなくなり、冷却材の強制循環機能が喪失する(ポンプトリップ)。したがって、動特 性解析でポンプトリップのモデル化が必要となる。また、イベントツリー法では燃料タン ク火災発生の場合、保守的に補助冷却設備空気冷却器の機能喪失を仮定するが、動特性で はより詳細な評価が可能であり、火災発生に伴う補助冷却設備空気冷却器の入り口空気温 度上昇としてモデル化する。このようにイベントツリー法ではひとつのヘディングであっ ても複数の機器及び機能に影響を及ぼす場合、それぞれをモデル化する。「異常降雨によ る電気設備機能喪失」も同様に、動特性解析での直接的なモデル化は無いが、電気設備機 能喪失→非常用電源喪失→ポンプトリップという形で影響を受ける動特性解析上の機器を モデル化する。

#### (2) 評価手法の適用性評価(H25~H26)

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の適用性として、本 事業では積雪、強風(竜巻含む)、異常降雨事象について評価を行った。この内、異常降 雨については 3.3.2.3 節にて詳細を示しているため、以下では評価手法の適用性評価とし て、積雪、竜巻、強風事象における解析結果を示す。なお、対象としたプラントはループ 型ナトリウム冷却高速炉であり、いずれも独立した 3 ループ構造である。図 3.3.2-18 に 対象としたプラントの冷却系の概要を示す。

# a. 積雪を起因とする事象シーケンス評価(H25)

#### (a) 事象進展

時刻 0s において外部電源喪失及び原子炉非常停止(スクラム)が発生すると仮定 した。スクラム及び外部電源喪失から 13 分後に積雪に伴う影響で非常用ディーゼル 発電機の機能喪失(全電源喪失)を仮定した。この結果、13分以降における崩壊熱除 去は自然循環を仮定している。また基点での積雪量を 0m とし、以降積雪による補助 冷却設備空気冷却器の機能喪失等をモデル化している。以下に事象進展を示す。

時刻 0s:積雪量大による外部電源喪失、スクラム

(非常用ディーゼル発電機により低流量での冷却材循環、空気冷却器ブ ロア運転)

13 分後:想定外により全電源喪失。以降自然循環除熱による炉心冷却

## (b) 解析条件及び状態変化モデル

積雪起因のイベントツリーの各へディングを図 3.3.2-19 に示す。図を基に、補助 冷却設備空気冷却器機能喪失、アクセスルート確保失敗、除雪、電熱ヒータの4つを モデル化した。解析条件は積雪速度を 0.1m/hr (2.4m/day) とし、解析期間は 24hr、 サンプル数は 1,000 とした。以下に各状態変化モデルを示す。

# 【補助冷却設備空気冷却器機能喪失】

降雪量 1.5m における機能喪失割合が 0.95 となるように故障率を設定した(故障率 は 1.997[1/m]=5.548×10<sup>-5</sup>[1/s])。補助冷却設備空気冷却器は3系統あり、それぞ れが独立していると仮定し、機能喪失は後述する電熱ヒータが作動していない条件付 で評価する。なお、補助冷却設備空気冷却器が機能喪失した場合、除熱性能は定格の 1/100 となる。

## 【アクセスルート確保失敗】

降雪量 1.0m における確保失敗割合が 0.50 となるように故障率を設定した(故障率 は 0.693[1/m]=1.925×10<sup>-5</sup>[1/s])。図 3.3.2-20 に補助冷却設備空気冷却器及びアク セスルート確保失敗の機能喪失状態確率を示す。

【除雪】

デマンド型とし、1回あたりの除雪失敗確率を0.5とした。初回除雪は解析開始から80分後(積雪深0.2m+1hrの仮定を採用)とし、以降8hr毎に除雪を行う。なお、除雪はアクセスルート確保の条件付きとする。

#### 【電熱ヒータ】

アクセスルート確保失敗の条件付きとして、各系統独立に電熱ヒータによる補助冷 却設備空気冷却器機能確保とした(100%機能回復)。電熱ヒータはアクセスルート確 保後ただちに接続するものとし、起動失敗確率をイベントツリー解析と同じ 0.11 (/demand)とし、起動後解析期間中有効に作動するものと仮定した。なお、電熱ヒ ータは補助冷却設備空気冷却器と同様に3系統独立とした。

#### (c) 解析結果及び考察

解析結果として、図 3.3.2-21 に炉心出口温度の時刻暦変化(50 サンプル)を、図

3.3.2-22 に炉心出口最高温度の累積分布を示す。なお、最高温度は事象発生後 0.5~ 24hr の範囲で評価した(本計算において、炉心出力停止直後及び数 100s において局 所的に見られる温度ピークを排除するためである)。

図 3.3.2-21 に示すように個々のサンプルで異なる温度履歴を示しており、またその振れ幅も大きい。なお、約 18hr 後に見られる周期的な温度変化は、自然循環運転移行時に蒸気発生器まわりのライン(図 3.3.2-18 参考)が隔離されるが、弁が完全には閉じていないため、別途このラインで冷却されたナトリウムが十数時間以降に自然循環系統内に流入するためである。また図中の破線は除雪のタイミングであるが、後述するアクセスルート確保失敗の影響で、回数を重ねるにつれてその効果が曖昧になっている。

最高温度の累積分布については図 3.3.2-22 に示すように、複雑なヘディングを評価しているため、正規分布(図中実線)との整合性はあまり良くない。なお、正規分布近似では、最高温度の平均及び標準偏差はそれぞれ 495.5℃及び 47.8℃であった。 炉心損傷における冷却材温度を 650℃と仮定した場合、その確率は正規分布近似から 6.174×10<sup>-4</sup>となり、積雪ハザード発生から 24hr 後の炉心損傷確率は非常に小さいと 言える。

本事象のシナリオ分析結果(終状態別)を表 3.3.2-3 に示す。なお表中の①~③は 補助冷却設備空気冷却器を、④はアクセスルート確保、⑤は除雪、⑥~⑧は電熱ヒー タを示し、表中の0 は機能健全を、1 は機能喪失を表す。1,000 サンプルの解析では 最終的な終状態として29通りに分類された。また詳細なシナリオ分析として、アク セスルート確保の影響を図 3.3.2-23 に、また図 3.3.2-24 に終状態における補助冷却 設備空気冷却器の機能喪失別の影響を示す。図 3.3.2-23 に示すように、アクセスル ート確保の失敗が 81.5%(図中の数字はケース数)と支配的であるが、逆に伝熱ヒー タによる補助冷却設備空気冷却器の機能確保の確率が高いため(確率 0.89/demand)、 結果的に出口温度はアクセスルート確保成功シーケンスに比べ約 50℃低下しており

(486.2℃)、AM 効果が高いことがわかる。また補助冷却設備空気冷却器機能喪失別 に関しては、全基(3基)機能喪失時には 546.1℃になるが、1基でも作動を確保す ることによって約 28℃の温度低下につながる。また、健全ケースが全体の約 56%で あり、2基及び3基機能喪失の割合はいずれも約 10%であった。

図 3.3.2-25 及び図 3.3.2-26 にそれぞれの事象が発生した件数の時刻歴変化を示す。 図 3.3.2-25 に示すように、最初の除雪成功割合は約 50%と設定値と同じであるが、時間が経過するにつれ、アクセスルート確保に失敗し(図 3.3.2-25 中の実線)、以降の成功確率が徐々に下がっている。またアクセスルート確保失敗の増加に合わせる形で電熱ヒータが作動している。補助冷却設備空気冷却器の機能喪失は図 3.3.2-26 に示すように、初期の頃に機能喪失が多く、基本的に徐々に低下する傾向である。これは後半につれ電熱ヒータ作動割合が高くなるため、補助冷却設備空気冷却器の機能喪失が発生しなくなるためである。また、図にも示すように除雪後においても機能喪失が多くなっているが、これは除雪により機能回復したものが再び機能喪失することによる。 最終状態の分類別におけるワーストシナリオ及びその時の最高温度の平均を表 3.3.2-4 に示す。表に示すとおり、ワーストケースは比較的早い段階で人的過誤を伴 うケースであり、効果的な AM 対策として、アクセスルート確保の有無にかかわらず 電熱ヒータを作動させることが挙げられる。

#### b. 竜巻を起因とする事象シーケンス評価(H26)

(a) 事象進展

日本における竜巻の平均移動速度 36km/hr (そのほとんどは 60km/hr 以下、最大 100km/hr 以上もある) [3.3.2-5]であり、敷地規模(数百 m)から想定される通過時 間は数十秒程度であるが、平成25年度における想定では数十分程度とされているため、ここでは、通過時間を30minとする。また、解析開始直後では100%運転を仮定す る。

平成25年度イベントツリー評価における竜巻に伴う炉心損傷頻度は、10<sup>-18</sup>[1/y] と十分に低いため、最も影響度の高いFujita scale 5(推定風速117m/s以上、以下 F5とする)の竜巻が通過した状態におけるプラント状態を評価する。本研究における 事象進展を以下に示す。

時刻	Omin	:100%出力運転
	5min	: 竜巻(F5) 襲来に伴う、外部電源喪失
(原子	子炉緊急停止	、非常用ディーゼル発電機起動成功)
~	~35min	: 竜巻の敷地内通過
35m	in∼24hr	: 竜巻通過以降 24hr までは復旧操作は無し

#### (b) 解析条件及び状態変化モデル

解析では竜巻襲来 5min を時刻0とし、24hr までの解析を行う。サンプル数は1,000 である。竜巻起因のイベントツリーの各ヘディングを図 3.3.2-27 に示す。イベント ツリーの各ヘディングは非常用ディーゼル発電機(動特性解析ではポンプトリップに 相当)、メンテナンス冷却設備、補助冷却設備空気冷却器の3つに分類されるが、 Super-COPDではメンテナンス冷却設備は設定されていないため、メンテナンス冷却設 備は機能喪失状態を仮定する。また、イベントツリー上では3系統の補助冷却設備空 気冷却器が取り扱われているが、CMMC 法では独立として評価されるため、補助冷却設 備空気冷却器の機能喪失確率は1系統あたりとする。

各へディングを、非常用ディーゼル発電機及び補助冷却設備空気冷却器に分類する と以下となる。

【非常用ディーゼル発電機】

屋上構造物の健全、ディーゼル発電機の燃料タンク健全、ディーゼル発電機健全 換気空調用設備健全

# 【補助冷却設備空気冷却器】

屋上構造物の健全、吸気口健全、排気口健全

なお屋上構造物の健全は、屋上飛来物、地上飛来物の分岐確率となる。また、排気 塔倒壊はメンテナンス冷却設備のみに影響を与えるものである。

平成25年度に検討されたイベントツリーにおける各分岐確率(F5スケール時) を表3.3.2-5に示す。これらの分岐確率を基に、ヘディングのいずれかの機能(屋上 構造物の健全を除く)喪失により非常用ディーゼル発電機及び補助冷却設備空気冷却 器が機能喪失するとした場合、非常用ディーゼル発電機及び補助冷却設備空気冷却器 1基あたりの機能喪失確率はそれぞれ0.126及び0.108となる(表中右側)。

本評価では、解析開始後 5~35min が竜巻来襲期間であり、この期間内での故障率 [1/s]として、それぞれ 7.486×10<sup>-5</sup>(非常用ディーゼル発電機)、6.344×10<sup>-5</sup>(補助 冷却設備空気冷却器)を設定した。それぞれの各時刻における累積故障割合を図 3.3.2-28に示す。なお、CMMC では図に示す割合を 1min 間隔の表形式の入力とする。

#### (c) 解析結果及び考察

論される。

図 3.3.2-29 及び図 3.3.2-30 に1 次系流量変化並びに炉心出口温度の時刻歴変化を 示す。図 3.3.2-29 に示すように竜巻来襲中(図中 5~35min)にポンプトリップによ り流量が減少しており、組み込みモデルに問題が無いことが確認された。また、ポン プトリップ確率(=非常用ディーゼル発電機機能喪失確率)が 0.108 と比較的小さい ため、停止するサンプルもまばらである。また炉心出口温度では、一部補助冷却設備 空気冷却器の機能喪失により温度上昇するサンプルもあるが、全体的には積雪ハザー ドに比べ温度上昇は小さい。

図 3.3.2-31 に炉心出口最高温度の累積分布を示す。ポンプトリップに加え補助冷 却設備空気冷却器の機能喪失確率も 0.108 と小さく、通常運転時における最高温度 (約 400℃)のサンプルが多いため正規分布との全体的な整合性は積雪ハザードより も悪くなっている。なお、正規分布近似における平均及び標準偏差はそれぞれ、 411.5℃及び24.1℃であり、近似から推定される 24hr までの炉心損傷確率(出口温度 650℃以上)は、計算精度範囲で 0 となった。このことより、積雪ハザード(炉心損 傷確率 6.174×10<sup>-4</sup>)に比べ竜巻ハザードはより炉心損傷に及ぼす影響が小さいと結

表 3.3.2-6 に終状態別のシナリオ分析結果を、また図 3.3.2-32 にポンプトリップ 別のシナリオ分析結果を示す。本解析におけるポンプトリップは、113/1,000 ケース であり、設定値(0.126)との整合性は高い。一般に、二項分布の正規分布近似にお いて、サンプル数 n、確率 θにおけるサンプル平均の標準偏差σは以下の式となる [3.3.2-6]。本来モンテカルロサンプリングは、乱数精度およびサンプル数が十分で あれば評価結果の信頼性は高く、上記近似を用いた標準偏差の比較は不要であるが、 比較的正規分布への近似が有効である本事象および後述する強風を起因とした事象シ ーケンス評価において、理論値との比較を実施し組み込みモデルの妥当性 (Validation)を考察する。

$$\sigma = \sqrt{n\theta(1-\theta)} \tag{3. 3. 2-16}$$

1,000 サンプルにおける分散は 10.5 であり、解析結果は概ね 1 のの範囲内に収まっている。またポンプトリップに及ぼす冷却材最高温度への影響は約 12℃と比較的小さい。

図 3.3.2-33 に補助冷却設備空気冷却器機能喪失別に分類したシナリオ分析を示す。 本評価では機能喪失数0から3まで全てのシーケンスが発生した。補助冷却設備空気 冷却器1器あたりの機能喪失確率から予想されるサンプル平均及び(3.3.2-16)式か ら推定される標準偏差は表3.3.2-7 に示すとおりであり、本解析結果は設定した機能 喪失確率を概ね満たしており、本手法の妥当性が確認された。

また、図に示すように最高温度の平均値は機能喪失機器数の増加に伴いその増加幅 が大きくなっている。なお、機能喪失3器は補助冷却設備空気冷却器全器の喪失であ り、メンテナンス冷却設備を除外した本モデルでは最終ヒートシンク喪失事象にあた る。イベントツリー法では本事象は炉心損傷となるが、図に示すように 24hr 後にお いてもその平均値は炉心損傷判定値(650℃)以下であり、復旧に関する時間的余裕 があることが確認された。

表 3.3.2-8 に本解析における竜巻ハザードのワーストシナリオを示す。なお、表 3.3.2-6 では3系統ある補助冷却設備空気冷却器の個々の状態毎に分類してあるが、 ここでは補助冷却設備空気冷却器は系統にかかわらず最終時刻での喪失数で評価して いる。最悪のシナリオは前述のとおり、全補助冷却設備空気冷却器が機能喪失した状 態であり、ポンプの機能は健全であるものの、最終ヒートシンクが喪失しているため、 冷却材温度が高くなっている。24hr 後においても炉心溶融に至らないことから、竜巻 来襲後の復旧(修復)に係る AM 策、及び本解析では除外したメンテナンス冷却設備 による除熱が有効となる。

残り2つは補助冷却設備空気冷却器が2系統機能喪失したものであり、ポンプ機能 の有無により約70℃冷却材温度に違いが見られている。本解析体系のプラントでは、 補助冷却設備空気冷却器1器による自然循環崩壊熱除去が可能であり、これらのケー スにおいてはこの状態を維持することで崩壊熱の除去が可能である。

以上、竜巻を起因とする事象シーケンス評価を実施した結果、本手法の妥当性を確認するとともに、積雪ハザードに比べ炉心損傷に至る確率が小さくなることを定量的に示した。また、事象進展が比較的穏やかであり、竜巻来襲時間は比較的短いため、 来襲後の復旧(修復)に係る AM 策が有効となることを明らかにした。

#### c. 強風を起因とする事象シーケンス評価(H26)

(a) 事象進展

事象進展の大まかな流れは竜巻事象と同様であるが、継続時間は 5min~12hr まで とする。解析対象とした強風のスケールは、サファ・シンプソン・ハリケーンスケー ルでのカテゴリ5とし(Saffir-Simpson Hurricane Scale category 5、SSHS5)、イ ベントツリー評価で最大の炉心損傷頻度となった南向きの強風とした。以下に事象進 展を示す。

時刻 0min :100%出力運転

5min : 強風 (SSHS5) 開始に伴う、外部電源喪失

(原子炉緊急停止、非常用ディーゼル発電機(ディーゼル 発電機)起動成功)

~12hr : 強風の継続

12hr~24hr : 強風終了以降 24hr までは復旧操作は無し

#### (b) 解析条件及び状態変化モデル

図 3.3.2-34 に強風イベントツリーにおける各ヘディングを示す。竜巻と同様に該 当する機器を、非常用ディーゼル発電機、補助冷却設備空気冷却器で分類すると以下 となる。

【非常用ディーゼル発電機】

非常用電源燃料タンク、燃料タンクの炎上、非常用電源確立、換気空調機能確保

# 【補助冷却設備空気冷却器】

補助冷却設備空気冷却器(本体)、補助冷却設備空気冷却器(排気ダクト)

なお、非常用ディーゼル発電機における燃料タンクの炎上は燃料タンク衝突後の事 象推移であり、非常用ディーゼル発電機の機能喪失とは個別にモデル化する。同様に、 図 3.3.2-34 では共通要因故障による補助冷却設備空気冷却器機能喪失として燃料タ ンク火災が挙げられているが、このモデル化は、補助冷却設備空気冷却器の機能喪失 とは別に行う。

竜巻事象と同様に各ヘディングの分岐確率を基に、個々の機器の強風継続期間にお ける機能喪失確率を表 3.3.2-9 に示す。なお、表中では非常用ディーゼル発電機機能 喪失における燃料タンクの寄与割合も示している。表に示すように、強風発生時では 非常用ディーゼル発電機の機能喪失確率(0.0966)は竜巻事象(0.126)と同程度で あるものの、補助冷却設備空気冷却器についてはその信頼性は高い(強風:0.0019、 竜巻:0.108)。これらを継続時間(11hr55min)での故障率に換算すると、それぞれ 2.368×10<sup>-6</sup>(非常用ディーゼル発電機)、4.433×10<sup>-8</sup>(補助冷却設備空気冷却器) となる。CMMCへの入力については、20分間隔で図 3.3.2-35 に示す形とした。

強風イベントツリー解析では、非常用電源燃料タンクが機能喪失した場合、0.50 の確率で火災が発生するものとし、火災発生に伴う補助冷却設備空気冷却器の条件付 き機能喪失確率を 1.0×10<sup>-4</sup>として評価している。これは、火災発生に伴う空気冷却 器入口空気温度の上昇による機能喪失を仮定したものであるが、CMMC法では直接空気 冷却器の入口温度上昇効果をプラント動特性に反映することが可能である。したがっ て、火災発生に関する補助冷却設備空気冷却器の機能劣化は、別途以下のようにモデ ル化した。

表 3.3.2-9 に示すように、非常用ディーゼル発電機の機能喪失確率における燃料タンク機能喪失の寄与割合は、ほぼ100%である。したがって、非常用ディーゼル発電機の機能喪失と等価であると仮定し、新たに非常用ディーゼル発電機機能喪失の条件付きにおいて確率 0.50 で火災が発生するものとした。また、火災発生時ではいずれの

補助冷却設備空気冷却器においても空気入口温度が 100°C 上昇すると仮定した。

解析は、強風による外部電源喪失発生 5min 前から 24hr とし、サンプル数は 1,000 とした。また、上述のとおり補助冷却設備空気冷却器の機能喪失確率が小さいため、 設定した確率値(確率値:デフォルト)のものと、非常用ディーゼル発電機及び補助 冷却設備空気冷却器の確率値を 10 倍としたもの(確率値:10 倍)の2条件の解析を 行った。

#### (c) 解析結果及び考察

図 3.3.2-36 及び図 3.3.2-37 に 1 次系流量並びに炉心出口温度の時刻暦変化を示す。 確率値をデフォルトとした解析では、確率値が小さいため通常と異なるシーケンスの 発現は少なくなっている。また炉心出口温度については、図 3.3.2-37 上に示すよう に、非常用ディーゼル発電機機能喪失に伴うポンプトリップが発生した場合、強制循 環冷却から自然循環冷却に移行する過程で急激な温度上昇が見られる。また、補助冷 却設備空気冷却器が 1 系統機能喪失した場合では、強制循環冷却が維持されるため温 度上昇は緩やかとなっている(図中緑色)。非常用ディーゼル発電機機能喪失時に火 災が発生した場合、自然循環移行時の急激な温度上昇に引き続き、最終ヒートシンク の温度上昇に伴い冷却材温度も徐々に上昇する。なお図 3.3.2-37 下に示すように、 確率値を 10 倍とした条件では、非常用ディーゼル発電機の機能喪失確率が 0.966 と ほぼ全てのサンプルでポンプトリップが発生している。

表3.3.2-10及び表3.3.2-11に確率値をデフォルトとした条件並びに確率値を10倍 とした条件での終状態別シナリオ分析結果を、図 3.3.2-38 に炉心出口最高温度の累 積分布を示す。図 3.3.2-38 上に示すように、確率値をデフォルトとした場合、いず れの機能も正常なサンプルが多く(905 サンプル、表 3.3.2-10 No.1 に相当)、従来 行っていた全体サンプルの平均、標準偏差を用いた正規分布近似は整合性が悪い(図 3.3.2-38 黒実線)。本評価では、機能喪失時のプラント状態評価が重要であるため、 一例として、機能喪失により温度上昇が発生した累積度数(0.906)、温度並びに累 積度数 0.95 における温度を基に平均、標準偏差を算出した(図中赤実線)。この時 の値(平均:206.3℃、標準偏差:125.5℃。なお本平均値に物理的意味はないことに 注意)を基に炉心損傷確率(炉心出口温度 650℃以上)を評価すると、5.508×103と なった。この値は積雪ハザード(6.174×10<sup>-4</sup>)に比べ高い値となっているが、積雪ハ ザードにおいても同様に、累積度数 0.906 及び 0.95 での温度を基に炉心損傷確率を 評価すると、1.024×10<sup>-2</sup>となり、積雪ハザードに比べると強風ハザードでの炉心損傷 確率は低いと言える。これは、炉心出口温度履歴(積雪ハザード、図 3.3.2-21)と比 較しても、積雪ハザードにおけるシーケンス評価の方が高い解析結果が現れているこ とと一致する。なお、竜巻ハザードに比べ炉心損傷確率が大幅に増加した理由は、火 災により補助冷却設備空気冷却器の機能は損なわれないものの、空気入口温度の上昇 に伴う冷却材温度の上昇の影響であり、火災対策が有効な AM 策になると言える。

また確率を 10 倍とした条件では、何らかの機器の機能喪失のシーケンスが支配的 であり(954 サンプル、表 3.3.2-11 参考)、比較的正規分布との整合性はあるものの、 確率を変更した結果であり、このままでは参考にはならない。確率値の変更に対する 修正については別途考察する。

図 3.3.2-39 及び図 3.3.2-40 にそれぞれ火災発生別、補助冷却設備空気冷却器機能 別のシナリオ分析結果を示す。また竜巻ハザードと同様に、二項分布の正規分布近似 及び(3.3.2-16)式を基にサンプルの妥当性を評価した結果を表 3.3.2-12 に示す。

サンプルの妥当性については、確率値をデフォルトとした条件では、竜巻ハザード と同様に概ね理論値±1のの範囲に収まっており、妥当であると考えられる。一方で、 確率値を 10 倍とした条件では、理論値よりもポンプトリップ、補助冷却設備空気冷 却器機能喪失回数は低く、また、火災発生回数は理論値よりも高くなっている。本事 業では、乱数として精度の高いメルセンヌツイスター[3.3.2-7]を用いているが、条 件によっては理論値との差が大きくなるため、乱数発生及びサンプル数については、 理論値との比較によりその妥当性を確認する必要があると考えられる。また本評価プ ログラムでは、同時に複数の CPU を用いた計算を可能とするため、個々の CPU である 程度乱数を間引いている(間引く乱数数は入力データ)。入力データである間引き乱 数数の影響も妥当性確認では重要になると考えられる。

図 3.3.2-39 に示すように、火災発生の影響は大きく、確率値の大小にかかわらず 概ね 100℃程度の最高温度の差が生じている。本シーケンスでは、補助冷却設備空気 冷却器の機能喪失(火災の発生は補助冷却設備空気冷却器の機能低下であり、機能喪 失ではない)と火災発生は独立な事象であるため、図 3.3.2-40 に示すように補助冷 却設備空気冷却器機能喪失に関しては、最高温度にあまり顕著な影響が見られていな い。

本解析では確率値を 10 倍とした方が結果的に理論値からのずれが大きい結果となっているが、本来低確率事象を CMMC 法で取り扱うためには、サンプル数を増加させるか、ある程度確率値を変更する必要がある。サンプル数の増加は、計算資源を考慮すると必ずしも現実的ではなく、確率値を変更しシーケンスの発生を限られたサンプル数で発現させる方が有効となる。以下では、確率値を変更した解析結果を用い、もとの状態における統計量の推定方法について検討した。

あるシーケンスの発生確率のは、以下の式で表される。

$$\theta^{r} = \prod_{i \in sucess} (1 - p_{i}) \prod_{i \in failure} p_{i}$$
(3. 3. 2-17)

ここで、*p*は個々のイベント(ヘディング)の機能喪失(失敗)確率である。確率値 を変更した場合では、1つのシーケンスサンプルの重みとして、

$$\omega = \frac{\prod_{i \in sucess} (1 - p_i) \prod_{i \in failure} p_i}{\prod_{i \in sucess} (1 - p'_i) \prod_{i \in failure} p'_i}$$
(3. 3. 2-18)

与えることで、もとの確率と同じ状態となる。ここで $p'_i$ は変更後の確率値となる。 各サンプルに対して、重みによる修正を行った結果を図 3.3.2-41 に示す。確率値を

10 倍とした解析結果では、デフォルト値を用いた計算に比ベポンプトリップの発生確 率が小さいため、図に示すとおり累積分布の立ち上がり部分で若干過大な評価となっ ているが、デフォルト条件での累積分布との整合は高く、(3.3.2-18)式を用いた修 正により、現実的なサンプル数でシーケンス評価が可能な見通しを得た。また補助冷 却設備空気冷却器機能喪失別シナリオについても、若干デフォルト条件(図3.3.2-40) よりも機能喪失割合が小さいものの、概ね再現できていると言える。

表 3.3.2-13 に強風ハザードにおけるワーストシナリオを示す。確率値をデフォル トとした場合、補助冷却設備空気冷却器は全て健全であるが、ポンプ機能が喪失し火 災が発生するケースで最も平均温度が高くなっている。したがって、火災に対する AM 対策が強風ハザードで有効になると考えられる。一方、確率値を 10 倍とした条件で は、ほとんど同程度の最高温度になるものの、上記条件に加え補助冷却設備空気冷却 器1器が機能喪失するシナリオが最悪となっている。なお(3.3.2-18)式で補正した 発生割合(表中())は、1.2×10<sup>-4</sup>とデフォルト条件では発生が困難なシナリオとな っている。また2番目のケースは、デフォルト条件におけるワーストシナリオと同一 であり、補正した発生割合及び最高温度平均値とも概ねデフォルト値と同等である。 なお、デフォルト条件におけるワースト 2 シナリオは、確率値 10 倍条件におけるシ ナリオ No.2 (表 3.3.2-11) であり、10 倍条件における補正後の発生割合は 0.031、 最高温度平均値は 442.3℃となっており、デフォルト条件(同 0.047、444.5℃)に近 い値となっている。少なくとも、終状態別シナリオにおいてその最高温度平均値につ いては、デフォルト値と確率値 10 倍の条件でほぼ同程度であり、低頻度事象でシナ リオ発現数が増加する確率値 10 倍条件を用い、終状態のより定量的なプラント評価 が可能であると言える。

以上、強風を起因とする事象シーケンス評価を実施した結果、本手法の妥当性を確認した。また強風時において非常用ディーゼル発電機燃料タンクの火災発生を考慮した場合、竜巻を起因とする事象シーケンスよりも炉心損傷確率は増加するが、積雪ハ ザードに比べると低くなる見通しを得た。

また、低頻度事象に対する CMMC 法の適用では、サンプルの大半が通常シーケンス となり、結果的に累積分布の正規分布近似精度が悪化する。この場合、サンプル全体 を用いた近似よりも、高累積分布側(例えば、0.75、0.95)でのサンプル値を用い正 規分布近似をした方が、より妥当な評価が可能となると考えられる。また、限られた サンプル数計算を用い低頻度事象を評価するため確率値を変更した場合、個々のシナ リオの発生確率を用いた重みを用いることで、実際の事象が評価可能な見通しを得た。

# 3.3.2.5 まとめ (H24~H27)

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発として、平成 27年度では、評価プログラムの機能追加として、降雨における原子炉内各部屋の水位計 算モジュールを新たに開発した。また、開発したモジュールを基に、降雨を起因とする事 象シーケンスに対する適用性評価を実施し、その妥当性を確認した。

降雨ハザードでは、物理的に補助冷却設備空気冷却器の機能喪失は起こりにくく、結果

的に浸水による電気設備の機能喪失が主なイベント(ヘディング)であり、炉心損傷に至 る可能性は極めて小さいことを明らかにした。なお本手法は、外部事象だけではなく内部 溢水に対しても適用可能である。

また評価手法の整備として、本事業で実施した内容をまとめ、CMMC法を用いたモデル化、 プログラム構成並びに解析条件として考慮するイベント(ヘディング)の考え方及び動特 性解析で対象となるモデルの選定方法をまとめるとともに、積雪、竜巻、強風を起因とす る事象シーケンスに対する適用性評価結果を整理し、シナリオ分析から有効となる AM 策 に関する考察を実施した。

CMMC 法ではモンテカルロサンプリングを行うため、低頻度事象の定量化では、確率値を 基に適切なサンプル数を決定する必要があるが、多数のサンプル計算は計算機資源の観点 で現実的ではなくなる。本事業では、比較的低頻度の発生確率となった強風を起因とする 事象シーケンスに着目し、発生確率を増加させることでシナリオの発現確率を比較的少な いサンプル数で再現させるとともに、得られた結果から実際の低頻度事象を推定する方法 の検討も併せて実施した。ここでは従来サンプルを多数化することに伴う重みの適正化 (小さい重み付け)を参考に、存在確率の合計が1であることを考慮し、確率が増加した サンプルについては小さな重みを、逆に確率が低下したものについては大きな重みを、理 論値を基に計算する手法を提案し、低頻度事象の定量化の見通しを得た。

# 参考文献

- [3.3.2-1] 仲井 悟他、 モジュール型プラント動特性解析コードの開発 Super-COPD コードの開発、動燃技報、 No. 68、 1988.
- [3.3.2-2] 土木学会、 水理公式集、 1999.
- [3.3.2-3] 日本原子力学会標準, 原子力発電所の内部溢水を起因とした確率論的リスク評価に 関する実施基準, AESJ-SC-RK005:2012, 2012.
- [3.3.2-4] 泊原子力発電所、第51回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(2013年 11月26日開催)補足3/4、9-別紙1添付3、2013.
- [3.3.2-5] 福岡管区気象台 竜巻 Q&A,
   http://www.jma-net.go.jp/fukuoka/chosa/tatsumaki/question.html (原文献、光
   田寧他 竜巻など瞬発性気象災害の実態とその対策に関する研究(文部省科学研究費
   自然災害特別研究成果、1983))
- [3.3.2-6] I. ガットマン他、 工学系のための統計概論、 培風館、 ISBN4-563-00816-8、 1989.
- [3.3.2-7] Matumoto M and Nihimura T. Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation. 1998; 8,1, 3-30.

数值解法、Δt [s]	降水源:部屋1	降水源:部屋2
① 陽解法(Ex.)、0.01s	0.0	0.0
② 陰解法(Im.1)、0.01s	$1.974 \times 10^{-2}$	2. $056 \times 10^{-2}$
③ 陰解法(Im.2)、0.01s	0.0	0.0
② 陰解法(Im.1)、200s	6. $106 \times 10^{-6}$	$1.301 \times 10^{-5}$
③ 陰解法(Im.2)、200s	$1.667 \times 10^{-9}$	$-2.778 \times 10^{-10}$

表 3.3.2-1 1hr 後における総水質量誤差

表 3.3.2-2 統計処理結果例

-		CATE	SORY	AND	DAT								
	(U) 100	SUCC	ESS,		AILU	JRE)				COLINITO	104		204
	INF	AG 1	2	3	A	5	6	7	Q	COUNTS	104		204
		1	2	J	7	0	U	,	U		TEMP	SAMPLE VAR	TEMP
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	138	4.05442E+02	7.05415E+02	3. 97705E+02
	Ó	1	Ó	Ó	1	Ó	Ó	Ó	Ó	18	4. 59031E+02	2.51051E+03	4.36353E+02
	0	0	1	0	1	0	0	0	0	24	4. 03038E+02	1.65098E+03	4. 28347E+02
	0	1	1	0	1	0	0	0	0	75	4. 53573E+02	1.21345E+03	4. 53085E+02
	0	0	0	1	1	0	0	0	0	43	4. 36663E+02	2.74089E+03	4.16622E+02
	0	1	Q	1	1	0	0	0	0	73	4. 25891E+02	1.76284E+02	3.98748E+02
	0 0	Q	ļ	ļ	ļ	0 0	0 0	0	0	36	4. /8335E+02	2.5/114E+03	4.81699E+02
	Ŭ,	1	Ì	Ì	1	0	0	0	0	150	4.8106/E+02	1.60290E+03	4.80594E+02
	0	1	v v	0	1	V V	l t	v v	0	/4	4. 21191E+UZ	1. 29943E+03	4. 10408E+UZ
	Ň	1	1	1	1	0	1	0	Ň	24	4. 309/0E+02	0.03000E+01	3.9990/E+UZ
	Ň	0	1	0	1	Ň	0	1	Ň	12	4. 03019E+02	2.41313ETU3 9.06160E_02	4.40400ETUZ
	ň	ň	1	1	1	ň	ň	1	ň	15	1 38503E+02	0. 90109L-02	1 7/208E+02
	ŏ	1	1	1	i	ň	ň	1	ň	12	4 74720F+02	3 92452F+02	4 78126E+02
	ŏ	i	i	ò	i	ŏ	ĭ	i	ŏ	18	4.41506F+02	5. 52811F-05	4.44654F+02
	ŏ	i	i	Ť	i	ŏ	i	i	Õ	13	4. 55995E+02	2. 42314E-06	4. 59181E+02
	Ó	1	1	Ó	1	Ó	Ó	Ó	1	5	4.77426E+02	4.75800E-04	4.86194E+02
	0	0	0	1	1	0	0	0	1	19	4.04400E+02	9.97595E+02	3.90538E+02
	0	1	0	1	1	0	0	0	1	10	4. 40518E+02	1.57561E+02	4. 06305E+02
	0	0	1	1	1	0	0	0	1	2	4. 40049E+02	2.79490E+03	4. 62009E+02
	Q	1	1	1	1	0	0	0	1	24	4.89428E+02	4.10538E+02	4.99328E+02
	0	Ţ	Ì	Ì	Ì	0 0	0	ļ	ļ	13	5.55525E+02	1.46084E-01	5. /0861E+02
	Ŭ	ļ	0	0	0	0	ļ		ļ	l	5. 61652E+02	0.00000E+00	5. 61318E+02
	0	U 1	1	U 0	0	Ŭ	1		1	3	4.9/949E+02	1.249/2E-01	5. 01645E+02
	0	1	1	1	0	0	1	1	1	40	4.8313/E+UZ	3. 101/1E+03	4.81184E+UZ
	Ň	1	ň	1	0	Ň	1	1	1	10 5	0.10291E+02 5 17270E+02	3. 3244/E-02 2 60250E_02	4. 99337ETUZ
	ň	0	1	1	ň	ň	1	1	1	12	A 600/11F+02	3.00000L-03	4. 9/312L+02
	ň	1	1	1	ň	ň	i	1	1	110	5 07298E+02	1 33931E+03	5 08513E+02
	v	,			v	v	r	•	•	1000	(TOTAL)	1.000012.00	0. 00010E. 02
											· · · · · ·		

NL				ACS	-AC					Av. Temp.
NO.	1	2	3	4	5	6	$\bigcirc$	8	COUNTS	[°C]
1	1	1	1	1	0	0	0	0	150	518.9
2	0	0	0	1	0	0	0	0	138	451.2
3	1	1	1	0	0	1	1	1	110	546.1
4	1	1	0	1	0	0	0	0	75	484.7
5	1	0	0	1	0	1	0	0	74	461.0
6	1	0	1	1	0	0	0	0	73	461.6
7	0	0	1	1	0	0	0	0	43	475.5
8	1	1	0	0	0	1	1	1	40	514.6
9	0	1	1	1	0	0	0	0	36	523.5
10	1	1	1	1	0	1	0	0	26	486.2
11	0	1	0	1	0	0	0	0	24	456.7
12	1	0	1	1	0	1	0	0	24	467.8
13	1	1	1	1	0	0	0	1	24	540.9
14	0	0	1	1	0	0	0	1	19	450.4
15	1	0	0	1	0	0	0	0	18	488.1
16	1	1	0	1	0	1	1	0	18	480.2
17	0	1	0	1	0	0	1	0	13	585.6
18	1	1	1	1	0	1	1	0	13	494.3
19	1	1	1	1	0	0	1	1	13	600.7
20	0	0	1	0	0	1	1	1	13	545.3
21	0	1	1	0	0	1	1	1	13	514.4
22	1	1	1	1	0	0	1	0	12	516.2
23	1	0	1	1	0	0	0	1	10	473.3
24	0	1	1	1	0	0	1	0	5	510.7
25	1	1	0	1	0	0	0	1	5	513.7
26	1	0	1	0	0	1	1	1	5	542.5
27	0	1	0	0	0	1	1	1	3	529.4
28	0	1	1	1	0	0	0	1	2	487.6
29	1	0	0	0	0	1	1	1	1	589.0

表 3.3.2-3 シナリオ分析(積雪ハザード、終状態別)

0:健全(成功)、1:機能喪失(失敗) ACS-AC ①~③:補助冷却設備空気冷却器機能(3ループ) ④:アクセスルート確保、⑤:除雪 ⑥~⑧:電熱ヒータ(3ループ)

表 3.3.2-4 積雪ハザードワーストシナリオ

No.	最高温度(平均)	発生割合	状況
1	600.8°C	0.013	アクセスルート確保失敗、ヒータ2系統喪失 (初期除雪失敗によるACS-AC機能喪失)
2	589.0°C	0.003	アクセスルート確保成功 ( <mark>ACS-AC 2系統除雪失敗</mark> )
3	585.6°C	0.013	アクセスルート確保失敗、ヒータ1系統喪失 (初期除雪失敗によるACS-AC機能喪失)

# 表 3.3.2-5 竜巻発生時(F5)における機能喪失確率

(非常用ディーゼル発電機)

			燃料タンク機能喪失 確率	発電機機能喪失確率 (吸排気)	換気空調機能喪失 確率	条件付き機能喪失 確率
屋上構造物の	健全(地上)	0.5	1.58E-01	5.41E-02	6.02E-02	1.26E-01
機能健全確率	失敗(屋上)	0.5	4.00E-04	9.00E-05	1.36E-04	3.13E-04
					全機能喪失確率	1 26E-01

(補助冷却設備空気冷却器(1基あたり))

			吸気口機能喪失確率	排気口機能喪失確率	条件付き機能喪失 確率
屋上構造物の	健全(地上)	0.5	1.14E-01	1.14E-01	1.08E-01
機能健全確率	失敗(屋上)	0.5	2.80E-04	2.80E-04	2.80E-04
				全機能喪失確率	1 08F-01

表 3.3.2-6 シナリオ分析(竜巻ハザード、終状態)

Na	Tuin	ACS-AC			COUNTS	Av. Temp.
INO.	Trip	1	2	3	COUNTS	[°C]
1	0	0	0	0	51	397.1
2	1	0	0	0	156	448.6
3	0	1	0	0	6	424.4
4	1	1	0	0	19	461.5
5	0	0	1	0	10	425.3
6	1	0	1	0	20	473.1
7	0	1	1	0	3	486.4
8	1	1	1	0	2	548.4
9	0	0	0	1	7	417.1
10	1	0	0	1	19	464.5
11	1	1	0	1	2	559.4
12	1	0	1	1	5	562.1

0:健全(成功)、1:機能喪失(失敗)

Trip:ポンプ(1,2次系)

ACS-AC ①~③:補助冷却設備空気冷却器(3ループ)

表 3.3.2-7	サンプル妥当性評価	(竜巻ハザード	)
-----------	-----------	---------	---

	理調	解析での	
	平均サンプル数	標準偏差	サンプル数
機能喪失0器	709. 7	14.4	701
機能喪失1器	257.8	13.8	273
機能喪失2器	31.2	5.5	24
機能喪失3器	1. 3	1.1	2

# 表 3.3.2-8 竜巻ハザードワーストシナリオ

No.	最高温度(平均)	発生割合	状況
1	572.8°C	0.002	ポンプ機能正常、ACS-AC全機能喪失
2	558.9°C	0.005	ポンプ機能喪失、ACS-AC2系統機能喪失
3	488.0°C	0.011	ポンプ機能正常、ACS-AC2系統機能喪失

ACS-AC:補助冷却設備空気冷却器

表 3.3.2-9 強風発生時(SSHS5\*)における機能喪失確率

(非常用ディーゼル発電機)

非常用電源燃料タンク 機能喪失確率	非常用電源 機能喪失確率(吸排気)	換気空調 機能喪失確率	
9.66E-02	1.30E-07	3.58E-07	
		全機能喪失確率	9.66E-02
		(燃料タンク除)	4.88E-07
		(燃料タンク寄与割合)	0.999995

(補助冷却設備空気冷却器(1器あたり))

(空気冷却器)	(排気ダクト)	
機能喪失確率**	機能喪失確率	
1.90E-03	0.00E+00	
	全機能喪失確率	1.90E-

\* サファ・シンプソン・ハリケーンスケール カテゴリ5 \*\* 火災による影響は考慮していない

表 3.3.2-10 シナリオ分析(強風ハザード、終状態別、確率値:デフォルト)

N.	<b>-</b> ·			A	CS-/	٩C		Av. Temp.			
NO.	I rip	1	2	3	4	5	6	$\overline{\mathcal{I}}$	COUNTS	[°C]	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	905	397.1	
2	1	0	0	0	0	0	0	0	47	444.5	
3	0	1	0	0	0	0	0	0	1	407.6	
4	0	0	1	0	0	0	0	0	4	397.1	
5	1	0	0	0	1	1	1	1	43	536.8	

0:健全、1:機能喪失

Trip:ポンプトリップ

ACS-AC ①~③:補助冷却設備空気冷却器、④:火災(1 で発生) ACS-AC ⑤~⑦:補助冷却設備空気冷却器入口空気温度 (⑤~⑦は④と連動し全ループ同時発生する。また1で+100℃となる)

表 3.3.2-11 シナリオ分析(強風ハザード、終状態別、確率値:10倍)

Na	Tuin			A	CS-/	٩C	COUNTS	Av. Temp.			
INO.	i rip	1	2	3	4	(5)	6	$\bigcirc$	COUNTS	[°C]	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	46	397.1	
2	1	0	0	0	0	0	0	0	406	442.3	
3	1	1	0	0	0	0	0	0	8	451.2	
4	1	0	1	0	0	0	0	0	12	454.3	
5	1	0	0	1	0	0	0	0	4	457.1	
6	1	0	0	0	1	1	1	1	508	531.4	
7	1	1	0	0	1	1	1	1	4	560.8	
8	1	0	1	0	1	1	1	1	8	531.9	
9	1	0	0	1	1	1	1	1	4	521.3	

0:健全、1:機能喪失

Trip:ポンプトリップ

ACS-AC ①~③:補助冷却設備空気冷却器、④:火災(1 で発生) ACS-AC ⑤~⑦:補助冷却設備空気冷却器入口空気温度 (⑤~⑦は④と連動し全ループ同時発生する。また1で+100℃となる)

表 3.3.2-12 サンプル妥当性評価 (強風ハザード)

(確率値:デフォルト)

	理論	解析での	
	平均サンプル数	標準偏差	サンプル数
ポンプトリップ	96.6	9.3	90
火災発生*	45.0	4.7	43
補助冷却設備空気冷却器	5.7	2.4	5
機能喪失 1 器			
補助冷却設備空気冷却器	0. 01	0.1	0
機能喪失 2 器			

\*火災発生はポンプトリップ発生サンプル数をnとした。

(確率値:10倍)

	理調	解析での	
	平均サンプル数	標準偏差	サンプル数
ポンプトリップ	966.0	5.7	954
火災発生*	477.0	15.4	524
補助冷却設備空気冷却器	54.9	7.2	40
機能喪失 1器			
補助冷却設備空気冷却器	1.1	1.0	0
機能喪失 2 器			

# 表 3.3.2-13 強風ハザードワーストシナリオ

# (確率値:デフォルト)

No.	最高温度(平均)	発生割合	状況
1	536.8°C	0.043	ポンプ機能喪失、ACS-AC全機能健全、 火災発生有
2	444.5°C	0.047	ポンプ機能喪失、ACS-AC全機能健全、 火災発生無
3	399.2°C	0.005	ポンプ機能正常、ACS-AC1系統機能喪失、 火災発生無

# (確率値:10倍)

No.	最高温度(平均)	発生割合	状況
1	536.5°C	0.016 (1.2×10 <sup>-4</sup> )	ポンプ機能喪失、ACS-AC1系統機能喪失、 火災発生
2	531.4°C	0.508 (0.039)	ポンプ機能喪失、ACS-AC全機能健全、 火災発生有
3	453.7°C	0.024 (1.8×10 <sup>-4</sup> )	ポンプ機能喪失、ACS-AC1系統機能喪失、 火災発生無

ACS-AC:補助冷却設備空気冷却器

注) 表中()は(3.3.2-18)式を基に補正した値



図 3.3.2-1 越流及び浸水



図 3.3.2-2 フローネットワークコード概要



図 3.3.2-4 各部屋の水位 (ドレインなし、降水源:部屋1)



図 3.3.2-6 検証解析モデル (ドレイン含む)





<u>イベントツリー2</u>



図 3.3.2-9 降雨事象シーケンスイベントツリー(平成26年度報告書 図 3.3.1.3-1、2)









図 3.3.2-14 連続マルコフ過程モンテカルロ法(CMMC法)の概念

# イベントツリー(ET)法との比較



# 各Eventにおける発生確率(P)をプラント状態(他のEvent発生 による影響を含む)から評価し、状態変化を評価する





注)塗りつぶし部を本事業で新規開発

図 3.3.2-16 開発プログラム構成



ACS-AC:補助冷却設備空気冷却器

図 3.3.2-17 ヘディングイベントと影響機器の同定



図 3.3.2-18 冷却系構成概要

積 雪 ハ ザード	除雪 認知	の必要	を 性の	アクセ スルー ト確保	電源確保 系の空気 保)	:(空調 ,流路確	補助冷却 気冷却器 流路確保	設備空 空気	補助冷却設備空 気冷却器 ダン パ手動調整	メンテナン 設 備 の 空 空気流路確	∨ス冷却系 気 冷 却 器 深	状態	備考
	1 🗆	2 🖸	3 🖸	除雪	ヒータ	除雪	<u></u> <u></u>	除雪	-	ヒータ	除雪		

図 3.3.2-19 積雪ハザードヘディング(平成25年度検討結果)



図 3.3.2-20 積雪時における補助冷却設備空気冷却器(ACS-AC)及びアクセスルート確保の機能喪失状態確率



図 3.3.2-21 炉心出口温度解析結果(積雪ハザード、50 サンプル)



3.3.2-38



注:図中の数字はカウント数

図 3.3.2-23 シナリオ分析(積雪ハザード、アクセスルート確保の影響)



図 3.3.2-24 シナリオ分析(積雪ハザード、補助冷却設備空気冷却器機能喪失状態の影響)


図 3.3.2-25 事象発生時刻歴変化(除雪成功、伝熱ヒータ起動、アクセスルート確保)



図 3.3.2-26 事象発生時刻歴変化(積雪ハザード、補助冷却設備空気冷却器機能喪失)

		ディーゼル発電機			メンテナンス冷却設備		
排気筒倒 防止	壊 屋上構造物の 健全	0 燃料タンク健全	ディーゼル発 電機健全	換気空調 設備健全	吸気口(空気冷 却器)健全	排気口(排気 ダクト)健全	補助冷却設備 (サブイベントツリー)
メインイベントツリーヘディング							

補助冷却設備								
A系統 吸気口 (空気冷却器)) 健全	A系統 排気口 (排気ダクト)健 全	B系統 吸気口 (空気冷却器)) 健全	B系統 排気口 (排気ダクト)健 全	C系統 吸気口 (空気冷却器)) 健全	C系統 排気口 (排気ダクト)健 全			
サブイベントツリーヘディング								

図 3.3.2-27 竜巻起因イベントツリー各へディング



図 3.3.2-28 各機器累積機能喪失割合(竜巻(F5))



図 3.3.2-29 1 次系流量変化(竜巻ハザード、50 サンプル)



図 3.3.2-30 炉心出口温度変化(竜巻ハザード、50 サンプル)





図 3.3.2-32 シナリオ分析(竜巻ハザード、ポンプ機能別)



設機	備 能	外部電 確保	源	波及施設		非常用電 源確立	換気空調 機能確保	メンテナ: ス冷却系	ン 補助冷却 系 設備
		外部電 確保	源排気塔	非常用電 源燃料タン ク	燃料タンク の炎上	吸気部/排 気部	吸気部/排 気部	メンテナ: ス冷却系 (排気ダ ト)	ン 系 (サブイベ ク ントツリー)
要[	因	風圧	風圧	飛来物の 衝突		開口からの 山側飛来 物の衝突	開口からの 山側飛来 物の衝突	開口から 飛来物の 落下	の 開口からの 飛来物の 衝突/落下
	<u>メインイベントツリーヘディング</u>								
	補助冷却系(ヒートシンク確保)								
	共通に大通に大通に大通に大通に大利	重要因故 よる補助 印設備機 能喪失	補助冷却設備 (A系) (空気冷却器)	補助冷却設備 (A系) (排気ダクト)	補助冷却設 (B系) (空気冷却	2備 補助冷劫 (B系 器)(排気ダ	D設備 補助将 (C クト) (空気)	お設備 補 系) 令却器)(	前助冷却設備 (C系) 排気ダクト)
	燃料	タンク火 災	山側飛来物の 衝突+ 燃料タンク火 災	山側飛来物の 落下	山側飛来物 衝突+ 燃料タンク 災	)の 山側飛来 火 落下	山側 新の 衝 燃料	៖来物の 突+ 山 ¤ンク火 災	山側飛来物の 落下
<u>サブイベントツリーヘディング</u>									
		図 3	. 3. 2-34	強風起	因イベ	ントツリ	リー各へ	ディン	ノグ



図 3.3.2-35 各機器累積機能喪失割合(強風(SSHS5))



図 3.3.2-36 1 次系流量変化(強風ハザード、50 サンプル)



図 3.3.2-37 炉心出口温度変化(強風ハザード、50 サンプル)







図 3.3.2-39 シナリオ分析(強風ハザード、火災発生別)



図 3.3.2-40 シナリオ分析(強風ハザード、補助冷却設備空気冷却器機能別)



図 3.3.2-41 確率値の補正(強風ハザード)

# 3.4 研究推進(H27)

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意 見を聴きながら研究を進めるため委員会を開催した。

(1) はじめに

本研究開発では、学会における PRA 標準手法の標準化のベースとなりうる手法を開発す ることとしている。学会標準[3.4-1]では、品質を確保するための方策として、専門家判 断の活用、ピアレビュー及び品質保証活動が規定されている。「専門家判断の活用」とは、 関連する技術分野に深い知識、知見及び経験を有している専門家を選任し、この専門家に よる判断を集約して、必要となる技術的な判断を行うものとされている。「ピアレビュ ー」とは、確率論的安全評価の評価プロセスや評価結果を客観的に確認し、品質を確保す るために実施するとされている。そこで、本委員会では、幅広い知見を活用し、客観性を 高めつつ優れた成果とするため、外部有識者の専門家として意見を頂くことを目的とする。 平成28年1月18日に8名で構成される委員会を開催して、今後の研究開発に反映しう る貴重な意見を頂戴した。

- (2) 委員会での主な意見
  - a. 火山噴火
  - ・シミュレーションを実施する際、モデルサイトに来る火山灰はどこから放出されているのかを把握したほうが良い。
  - ・灰の粒径と噴煙柱高さとの関連について整理して欲しい。
  - ・フィルター目詰まり試験で、フィルターの手前に灰が落下するのはよいが、それは重力による効果である。そのように構造的にもフィルターに到達しにくい効果も実際の現象として有用である。
  - ・火山噴火の情報が出た際にどのタイミングで原子炉を停止するか、原子炉停止後に灰がモデルサイトまで届く時間と実際のプラント運用を考える際、本成果が活用できる。
  - b. 森林火災
  - ・重畳事象について発生が重畳する場合と、作用が重畳する場合とがある。発生と作用 とで分けて整理するとよい。
  - ・崩壊熱除去系の猶予時間を考えた方がよい。2時間も放水していれば森林火災に対しては十分効果があると考えられる。実際に本当に有効なアクシデントマネジメントを抽出しようとする場合は、プラント動特性も考慮した方がよい。
  - ・降灰後は落雷や土砂崩れなどのリスクが高くなる。燃料タンクに灰が残ればフラジリ ティも高くなると考えられる。重畳についてはもっと検討したほうがよい。
  - c. 重畳事象の選定
  - ・スクリーニングの際に、安全上重要度分類のクラス1の機器のうち、外部に出ている
    もの、例えば空気冷却器や空気取り込み口など当てはめてどのような影響が発生する
    かを考えればよい。
  - ・外部に出ている機器に対して、どのような定量的な影響が出るかを検討し、実際のプ

ラントの方にアドバイスをもらうとよい。

- d. 積雪と低温の重畳事象
- ・外部電源喪失時は無停電電源でダンパー操作しているため、そのような失敗確率はや りすぎと思われる。保守的な仮定であれば明示しておくとよい。
- e. 全体に対する意見
- ・それぞれのハザードにおいて、炉心損傷頻度まで評価するに至っており、大きな成果である。今後は学会標準となるよう、手法をまとめていってほしい。
- ・いくつもの課題があったと思うが、それらに対して大きな成果があった。
- ・炉型が異なっても適用できる部分が数多くあるように思う。
- ・このような成果は、PRA の場合、学会標準における手法の整理が進められているところであり、それにも反映できると思われる。
- 4年間のまとめ方も学会標準に役立つようにまとめて頂きたい。標準を作る際、事例が必要となるが、それを提供できる機関があることが非常に重要である。そのためにも開発した手法は是非提供できるようにまとめて頂きたい。
- ・高速増殖炉特有のものと一般的なものとが明確になるように手法を選んだ理由なども まとめで記載してほしい。
- ・将来の研究で手法を改良できる可能性がある点などもあれば留意事項として記載頂きたい。
- (3) まとめ

個別に進めている各研究項目との間で連携を深めるため、業務参加者全員が参加する全体会議を3回開催し、効率的に研究を進めた。また、外部ハザードおよびPRAの外部有識者で構成される委員会を設置し、本研究の進捗状況について議論する委員会を1回開催し、本研究に反映できる意見を得た。

# 参考文献

[3.4-1] 日本原子力学会, "原子力発電所の確率論的リスク評価の品質確保に関する実施基準: 2013 (AESJ-SC-RK006: 2013)", 平成 26 年 5 月 12 日発行.

#### 3.5 まとめ・評価 (H27)

平成24年度から平成27年度の4年間の成果をまとめた。

# 3.5.1 目標達成度

# (1) マージン評価手法の開発

外部ハザードに対するナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージン評価手法を開 発し、本課題で対象とする代表的な外部ハザードに対するマージン評価を行った。また、 外部ハザード評価手法及び事象シーケンス評価手法と併せて、標準化を目指した手法とし て整備した。具体的には次のとおり。

## 【平成24年度】

外部ハザードに対するマージン評価手法を開発するため、既往研究からマージン評価手 法を調査・整理した。また、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージン評価手法 の概念を構築した。次に、ナトリウム冷却高速炉のサイト条件及びプラント情報を調査し、 これを踏まえてナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす種々の外部ハザー ドを調査し、本研究で対象とする代表的な外部ハザードである異常気象(積雪、強風、竜 巻、降雨)、火山噴火、森林火災の代表性を検討・整理した。

# 【平成25年度】

外部ハザードに対するマージン評価手法を開発するため、ナトリウム冷却高速炉の崩壊 熱除去機能のマージン評価手法を開発した。また、積雪・竜巻に対する崩壊熱除去機能の マージンを評価した。

#### 【平成26年度】

外部ハザードに対するマージン評価手法を開発するため、強風・降雨・火山噴火に対す るナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージンを評価した。

#### 【平成27年度】

外部ハザードに対するマージン評価手法を開発するため、森林火災・重畳事象に対する ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージンを評価した。また、合理的な安全対策 とするためのコストーベネフィット評価手法を構築した。4年間のまとめとして手法を整 備した。

これらにより、異常気象、火山噴火、森林火災、重畳事象に対するマージン評価手法を 開発するという目標を達成した。外部ハザード発生頻度を考慮しないことで、簡便な手法 として有益な研究成果を得た。

# (2) 外部ハザード評価手法の開発

#### ①異常気象ハザード評価手法の開発

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)を対象として、重要パラメータを同定して、数値 シミュレーションも活用しながら、起こりやすさとハザード強さを指標としたハザード曲 線を構築して、ハザード評価手法を開発した。具体的には次のとおり。

# 【平成24年度】

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)に関する外部ハザード評価手法を開発するため、 既往の積雪ハザード強さの記録を調査・整理した。また、既往研究から異常気象ハザード 評価手法を調査・整理した。次に、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼ す異常気象ハザードの重要パラメータを同定し、起こりやすさとハザード強さを指標とし たハザード曲線を構築して、異常気象ハザードを評価した。

#### 【平成25年度】

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)に関する外部ハザード評価手法を開発するため、 既往の竜巻・強風ハザード強さの記録を調査・整理した。また、既往研究から竜巻・強風 ハザード評価手法を調査・整理した。次に、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影 響を及ぼす竜巻・強風ハザードの重要パラメータを同定し、起こりやすさとハザード強さ を指標としたハザード曲線を構築して、竜巻・強風ハザードを評価した。

#### 【平成26年度】

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)に関する外部ハザード評価手法を開発するため、 既往の異常降雨ハザード強さの記録を調査・整理した。また、既往研究から異常降雨ハザ ード評価手法を調査・整理した。次に、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影響を 及ぼす異常降雨ハザードの重要パラメータを同定し、起こりやすさとハザード強さを指標 としたハザード曲線を構築して、異常降雨ハザードを評価した。

# 【平成27年度】

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)に関する外部ハザード評価手法を開発するため、 評価対象とする重畳事象を選定した。その重畳事象に対して、既往のハザード強さの記録 を調査・整理した。また、既往研究からハザード評価手法を調査・整理した。次に、ナト リウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼすハザードの重要パラメータを同定し、 起こりやすさとハザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、重畳事象に対するハ ザードを評価した。4年間のまとめとして手法を整備した。

これらにより、異常気象として積雪、強風、竜巻、異常降雨、重畳事象(積雪と低温、 強風と降雨)に対するハザード評価手法を開発するという目標を達成した。ハザード強度 のみならず継続時間についてもハザード曲線を構築し、当初の想定を上回る成果を得て、 時間進展が重要な外部ハザードに対する対策を検討する際に重要になると考えられる。ま た、PRA 技術を担う原子力機構及びメーカ等の若手技術者を中心とした体制で研究を進め たことによって、PRA研究を先導する人材の育成に貢献した。

# ②火山噴火ハザード評価手法の開発(再委託先:産総研)

火山噴火を対象として、重要パラメータを同定して、数値シミュレーションも活用しな がら、起こりやすさとハザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、ハザード評価 手法を開発した。具体的には次のとおり。

# 【平成24年度】

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、既往の火山噴火ハザード強さ

の記録を調査・整理した。また、既往研究から火山噴火ハザード評価手法を調査・整理した。次に、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす火山噴火ハザードの重 要パラメータを同定した。さらに、火山灰細粒粒度分析装置及び火山灰微細粒子形状観察 装置を導入・活用し、火山灰粒度分析手法を開発した。

# 【平成25年度】

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、火山噴火ハザード評価手法の 概念を構築した。また、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能への影響を調べるため、 平成24年度に収集した火山噴火記録を対象とした降灰シミュレーションを実施した。さ らに、火山灰採取装置を導入・活用し、降下火山灰の粒度を分析した。

#### 【平成26年度】

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、火山噴火ハザード評価手法を 開発した。また、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能への影響を調べるため、大山周 辺の様々な風条件で降灰シミュレーションを実施するとともに、フィルタ目詰まり試験を 実施した。さらに、噴火により大気中に浮遊する火山灰粒子と降下する火山灰粒子につい て粒度分析を行い、粒子濃度に関する情報を取得した。

#### 【平成27年度】

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を選 定した。また、湿分等を考慮したフィルタ目詰まり試験を実施した。さらに、これまでの 粒度分析の総合評価を行い、火山灰粒子の特徴を整理した。4年間のまとめとして手法を 整備した。

これらにより、火山噴火に対するハザード評価手法を開発するという目標を達成した。 我が国では、火山噴火は地震・津波に続く重要な外部ハザードであり、これまで研究が進 展していなかった分野であることから、本研究によって原子力施設のための火山噴火ハザ ードに対する知見が深まり、有益な研究成果を得た。特に、破損確率(フラジリティ)評 価において重要なフィルタ目詰まり試験結果はフィルタ破損限界を定量化した新規性のあ る成果であり、当初の想定を上回る成果であった。さらに、「国民との科学・技術対話」 の推進(平成22年6月19日決定)のため、アウトリーチ活動として、小・中学生を中 心とした一般市民を対象として研究開発成果を分かりやすく説明し双方向コミュニケーシ ョンによる「国民との科学・技術対話」に積極的に取り組んだ。

#### ③森林火災ハザード評価手法の開発

森林火災を対象として、重要パラメータを同定して、数値シミュレーションも活用しな がら、起こりやすさとハザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、ハザード評価 手法を開発した。具体的には次のとおり。

# 【平成24年度】

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、既往の森林火災ハザード強さの記録を調査・整理した。また、既往研究から森林火災ハザード評価手法を調査・整理した。次に、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす森林火災ハザードの重

要パラメータを同定した。さらに、森林火災の延焼シミュレーションのための解析条件を 設定した。

# 【平成25年度】

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、森林火災ハザード評価手法の 概念を構築した。また、平成24年度に整備された入力データを基に、風の影響を受けな い森林火災の延焼シミュレーションを実施した。それを踏まえて、ナトリウム冷却高速炉 の崩壊熱除去機能に影響を及ぼす森林火災ハザードの重要パラメータを同定した。

#### 【平成26年度】

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、森林火災ハザード評価手法を 開発した。また、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能への影響を調べるため、風の影 響を受ける森林火災の延焼シミュレーションを実施した。それを踏まえて、森林火災ハザ ードを評価した。

#### 【平成27年度】

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を選 定した。その重畳事象に対して、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能への影響を調べ るため、森林火災の延焼シミュレーションを実施するとともに、森林火災ハザードを評価 した。4年間のまとめとして手法を整備した。

これらにより、森林火災に対するハザード評価手法を開発するという目標を達成した。 森林火災は、原子力規制委員会により評価ガイドが発行されるほどに重要性が高い外部ハ ザードであり、これまで研究が進展していなかった分野であることから、本研究によって 原子力施設のための森林火災ハザードに対する知見が深まり、有益な研究成果を得た。ま た、熱・炎による影響のみならず、飛び火・煙・火災灰の影響も評価できるハザード評価 手法を開発し、当初の想定を上回る成果を得て、今後の原子力施設のための森林火災に対 する対策を検討する際に重要な研究開発成果であると言える。

#### (3) 事象シーケンス評価手法の開発

#### ①安全対策の整理及び事象シーケンス評価手法の開発

ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関する重要機器を同定し、崩壊熱除去機能維 持に係る安全対策(施設対策などのハード対策とアクシデントマネジメントなどのソフト 対策)を整理し、崩壊熱除去機能に関する成功基準解析に基づき、従来のイベントツリー 解析手法を拡張した事象シーケンス評価手法を開発した。具体的には次のとおり。

# 【平成24年度】

事象シーケンス評価手法を開発するため、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関 する重要機器を同定し、積雪時の崩壊熱除去機能維持に係わる安全対策を整理した。また、 積雪を起因とした炉心損傷に至り得るイベントツリーを構築して、事象シーケンスを評価 した。さらに、積雪量をパラメータとした崩壊熱除去解析の解析条件を設定した。

#### 【平成25年度】

事象シーケンス評価手法を開発するため、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関

する重要機器を同定し、竜巻・強風時の崩壊熱除去機能維持に係わる安全対策を整理した。 また、竜巻・強風を起因とした炉心損傷に至り得るイベントツリーを構築して、事象シー ケンスを評価した。さらに、竜巻・強風の速度をパラメータとした崩壊熱除去解析を実施 した。

# 【平成26年度】

事象シーケンス評価手法を開発するため、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関 する重要機器を同定し、異常降雨・火山噴火時の崩壊熱除去機能維持に係わる安全対策を 整理した。また、異常降雨・火山噴火を起因とした炉心損傷に至り得るイベントツリーを 構築して、事象シーケンスを評価した。さらに、異常降雨・火山噴火時の崩壊熱除去解析 を実施した。

# 【平成27年度】

事象シーケンス評価手法を開発するため、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関 する重要機器を同定し、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去機能維持に係わる安全対策を 整理した。また、森林火災・重畳事象を起因とした炉心損傷に至り得るイベントツリーを 構築して、事象シーケンスを評価した。さらに、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去解析 を実施した。4年間のまとめとして手法を整備した。

これらにより、異常気象(積雪、強風、竜巻、異常降雨)、火山噴火、森林火災、重畳 事象(積雪と低温、強風と降雨)という幅広い外部ハザードに対する事象シーケンス評価 手法を開発するという目標を達成した。感度解析等を通じて、個々の外部ハザードの特徴 に応じて対策の有効性を定量的に評価し、プラントへの対策の提案まで実施したことは、 当初の想定を上回る成果であった。また、PRA 技術を担う原子力機構及びメーカ等の若手 技術者を中心とした体制で研究を進めたことによって、PRA 研究を先導する人材の育成に 貢献した。

# ②時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発(再委託先: 平成27年8月31日まで大阪大学、平成27年9月1日以降原子力機構)

外部ハザードの時間進展が重要であるため、より詳細な手法としてモンテカルロ計算を 活用した時間依存事象進展アルゴリズムに基づく評価手法を開発した。具体的には次のと おり。

# 【平成24年度】

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法を開発するため、既 往研究から時間依存事象進展アルゴリズムを調査・整理するとともに、事象シーケンス評 価手法の概念を構築した。また、プログラミング並びに試解析を通じて、評価プログラム を作成した。

# 【平成25年度】

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法を開発するため、適 用性評価を可能とすべく、時間依存事象進展アルゴリズムを組み込んだ評価プログラムを 開発した。また、積雪を起因とした炉心損傷に至り得る事象シーケンスに対して適用し、 この評価手法の適用性を評価した。

## 【平成26年度】

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法を開発するため、強 風を起因とした炉心損傷に至り得る事象シーケンスに対して適用性評価を可能とすべく、 平成25年度に開発した評価プログラムの機能追加と必要な改良を施した。また、この評 価手法の強風時のシーケンスに対する適用性を評価した。

# 【平成27年度】

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法を開発するため、降 雨を起因とした炉心損傷に至り得る事象シーケンスに対して適用性評価を可能とすべく、 平成26年度に開発した評価プログラムの機能追加と必要な改良を施した。また、この評 価手法の降雨時のシーケンスに対する適用性を評価した。4年間のまとめとして手法を整 備した。

これらにより、時間進展が重要な外部ハザードに対する先進的な事象シーケンス評価手法として、プラント動特性コードにモンテカルロ計算を組み込んで正確な事象進展を評価できる時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法を開発するという目標を達成した。また、PRA技術を担う大学の学生や若手技術者を含む体制で研究を進めたことによって、PRA研究を先導する人材の育成に貢献した。

# 3.5.2 技術の卓越性

これまで原子力発電所は地震に対する安全確保が重要視されてきたが、東京電力福島第 一原子力発電所の事故後、地震のみならず様々な外部ハザードに対して安全性を確保する ことが重要であることが認識されている。また、確率論的リスク評価(PRA)を活用して、 プラントの安全性向上に継続的に努めることが重要であることが認識されている。本研究 は、異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)、火山噴火、森林火災といった代表的な外部ハ ザードに対し、外部ハザード評価手法と事象シーケンス評価手法からなるPRA手法並び にマージン評価手法を開発するものであり、同事故後に社会が求めていることをタイムリ ーに開発したものである。世界中を見ても、これほどの多くの外部ハザードに対する評価 手法を短期間で開発した例はなく、先導的な研究であったと言える。

本研究開発成果は、既存ナトリウム冷却高速炉や軽水炉の安全性向上に資するものであ り、今後の外部ハザード対策の検討に役立つものであり、新規制基準に適合する対策の提 案及び継続的安全性向上評価における PRA に貢献できるものである。幅広く外部ハザード 対策を検討することにより合理的な対策にできるとともに、リスク低減効果を定量的に把 握しながら対策採用の意思決定に寄与できる。このように、意思決定ツールにも活用でき る有用な技術である。

世界では第4世代原子炉システムに代表される新型炉の設計及び開発が進んでいること から、本研究開発成果が外部ハザード対策の検討に資することができるとともに、IAEA 等の国際的な安全設計要求やガイドといった国際標準の検討の際に事例としても活用でき るものであり、本研究は国際標準化となりうる安全基盤技術である。 このように、本研究で開発された技術は従来の研究にない卓越性を有しており、既存高 速炉ばかりでなく、既存軽水炉や新型炉の外部ハザードに対するリスク評価、すなわち、 PRA やマージン評価に大きく貢献するものである。また、本技術は、新規制基準適合性評 価やリスク情報活用規制に対応したリスク評価研究を加速する卓越性に富んだ研究成果で ある。

# 3.5.3 研究開発効果

地震・津波以外の代表的な外部ハザードに対して PRA 及びマージン評価を行うことで、 合理的な安全対策を導入することが可能になり、プラントの安全性向上に大きく寄与でき る。特に、ナトリウム冷却高速炉の外部ハザードに対する安全対策の検討に本研究の研究 者の参画を通じて、本研究開発成果が既存炉の安全対策検討に資することができる。これ は第4世代原子炉システムにも適用できるものであり、各国で検討している外部ハザード に対する設計やアクシデントマネジメント策にも適用できるものである。既存軽水炉にお いても、空冷非常用電源などの安全対策を導入する際に本研究で開発された技術の活用が 期待される。

我が国では、既存原子力発電所に対して PRA を実施するか、それに代わりプラントのマ ージン評価を行ってもよいとされているが、幅広い外部ハザードに対する PRA 及びマージ ン評価手法は確立されておらず、本研究で開発された評価手法を適用することが可能であ り、既存軽水炉の安全性向上にも寄与できる。また、本研究開発成果は原子力学会におけ るレベル 1PRA 標準などに取り込むことが可能であり、標準的な手法として整備すること で多くのプラントの安全性評価に活用されることが大きく期待できる。さらに、得られた 知見は本研究開発の研究者が参加する第4世代原子炉システムの国際的な安全基準の策定 に関しても反映することが可能となる。最近では規制側でリスク情報活用の方針を打ち出 していたことから、本研究で開発された手法は将来の許認可において活用されると期待で きる。

本研究開発成果は、原子力発電所に限らず、空冷非常用電源を有する工場や大規模施設 や半導体工場などクリーンルームを有する空調設備の設備改善に役立ち、外部ハザードに 対する企業の事業継続の判断に資することができ、一般社会にも波及効果が高いと言える。 また、一般住民にとっても外部ハザードを定量的に評価することによってハザードマップ や避難の検討に役立つことができる。

# 3.5.4 得られた成果の外部発表

【学術雑誌論文】

- [1] Y. Okano and H. Yamano, "Forest Fire Propagation Simulations for a Risk Assessment Methodology development for a Nuclear Power Plant," Case Studies in Fire Safety, 4, pp. 1-10, Oct. 2015. DOI: 10.1016/j.csfs.2015.05.001
- [2] H. Yamano, H. Nishino, Y. Okano, T. Yamamoto, T. Takata, "Development of Risk Assessment Methodology Against External Hazards for Sodium-Cooled Fast Reactors," Earthquakes, Tsunamis and Nuclear Risks: Prediction and Assessment Beyond the Fukushima Accident, DOI 10.1007/978-4-431-55822-4,

Springer Open, Chapter 9, pp. 111-121, Jan. 2016.

- [3] Y. Okano and H. Yamano, "Hazard curve evaluation method development for a forest fire as an external hazard on nuclear power plants," Journal of Nuclear Science and Technology. DOI: 10.1080/00223131.2015.1102662, 2016 (in press).
- [4] T. Takata and E. Azuma, "Event sequence assessment of deep snow in sodiumcooled fast reactor based on continuous Markov chain Monte Carlo method with plant dynamics analysis," " Journal of Nuclear Science and Technology. DOI: 10.1080/00223131.2016.1155508, 2016 (in press).
- [5] H. Yamano, H. Nishino, K. Kurisaka, "Development of Probabilistic Risk Assessment Methodology against Extreme Snow for Sodium-Cooled Fast Reactor," Nuclear Engineering and Design (in submission).
- [6] Y. Okano and H. Yamano, "Numerical simulations of forest fire propagation and smoke transport as an external hazard assessment methodology development for a nuclear power plant", Advance Publication by J-STAGE, Mechanical Engineering Journal, DOI:10.1299/mej.15-00592 (in press)

# 【会議等における論文発表】

- [1] F. Nanayama, R. Furukawa, Y. Ishizuka, T. Yamamoto, N. Geshi, M. Oishi, "Characterization of fine volcanic ash from explosive eruption from Sakurajima volcano, South Japan," American Geophysical Union 2013 Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec. 9-13, 2013, V23C-2867.
- [2] H. Yamano, H. Nishino, K. Kurisaka, Y. Okano, T. Sakai, T. Yamamoto, Y. Ishizuka, N. Geshi, R. Furukawa, F. Nanayama, T. Takata, E. Azuma, "Development of PRA and Margin Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function against External Hazards," Proc. International Symposium on Earthquake, Tsunami and Nuclear Risks after the accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations, Kyoto, Japan, Oct. 30, 2014.
- [3] H. Yamano, H. Nishino, K. Kurisaka, Y. Okano, T. Sakai, T. Yamamoto, Y. Ishizuka, N. Geshi, R. Furukawa, F. Nanayama, T. Takata, "Development of Margin Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function Against External Hazards Project Overview and Preliminary Risk Assessment Against Snow -," Proc. of the 12th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM 12), Honolulu, Hawaii, USA, June 22-27, 2014, No. 44.
- [4] H. Yamano, H. Nishino, K. Kurisaka, Y. Okano, T. Sakai, T. Yamamoto, Y. Ishizuka, N. Geshi, R. Furukawa, F. Nanayama, T. Takata, E. Azuma, "Development of Margin Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function against External Hazards (1) Project Overview and Snow PRA Methodology, Proceedings of Proceedings of 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10), Ginowan, Okinawa, Japan, Dec. 14-18, 2014, NUTHOS10-1014.
- [5] H. Nishino, K. Kurisaka, H. Yamano, "Development of Margin Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function against External Hazards (2) Tornado PRA Methodology, Proceedings of Proceedings of 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10), Ginowan, Okinawa, Japan, Dec. 14-18, 2014, NUTHOS10-1068.
- [6] Y. Okano and H. Yamano, "Development of Margin Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function Against External Hazards (3) Forest Fire Hazard Assessment Methodology," Proc. of the 10th Int. Tpl. Mtg. on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10), Okinawa, Japan, Dec.

14-18, 2014, NUTHOS10-1018.

- [7] T. Takata and E. Azuma, "Development of Margin Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function against External Hazards (4) Event Sequence Assessment Based on Continuous Markov Chain Monte Carlo Method with Plant Dynamics Analysis," ibid., Okinawa, Japan, Dec. 14-18, 2014, NUTHOS10-1291.
- [8] Y. Okano and H. Yamano, "Development of a Hazard Curve Evaluation Method for a Forest Fire as an External Hazard," Proc. of the Int. Tpl. Mtg. on Probabilistic Safety Assessment and Analysis (PSA 2015), Sun Valley, ID, USA, April 26-30, 2015, 11923.
- [9] H. Yamano, H. Nishino, K. Kurisaka, Y. Okano, T. Sakai, T. Yamamoto, Y. Ishizuka, R. Furukawa, N. Geshi, F. Nanayama, T. Takata, E. Azuma, "Development of Risk Assessment Methodology against Natural External Hazards for Sodium-Cooled Fast Reactors: Project Overview and Strong Wind PRA Methodology," Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants(ICAPP2015), Nice, France, May 3-6, 2015; Paper 15031.
- [10]H. Yamano, H. Nishino, K. Kurisaka, Y. Okano, T. Sakai, T. Yamamoto, Y. Ishizuka, R. Furukawa, N. Geshi, F. Nanayama, T. Takata, E. Azuma, "Development of Risk Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function against External Hazards for Sodium-Cooled Fast Reactors (1) Project Overview and Margin Assessment Methodology Against Snow," Proc. of the 23rd Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-23), Makuhari, Chiba, Japan, May 17-21, 2015, ICONE23-1112.
- [11]H. Nishino, K. Kurisaka, H. Yamano, "Development of Risk Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function against External Hazards for Sodium-Cooled Fast Reactors (2) Probabilistic Risk Assessment Methodology Against Strong Wind," Proc. of the 23rd Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-23), Makuhari, Chiba, Japan, May 17-21, 2015, ICONE23-1112.
- [12]Y. Okano and H. Yamano, "Development of Risk Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function against External Hazards for Sodium-Cooled Fast Reactors (3) Numerical Simulations of Forest Fire Spread and Smoke Transport as an External Hazard Assessment Methodology Development," Proc. of the 23rd Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-23), Makuhari, Chiba, Japan, May 17-21, 2015, ICONE23-1009.
- [13]H. Yamano, H. Nishino, K. Kurisaka, Y. Okano, T. Sakai, T. Yamamoto, Y. Ishizuka, N. Geshi, R. Furukawa, F. Nanayama, T. Takata, "Development of Risk Assessment Methodology of Decay Heat Removal Function against Natural External Hazards: Project Overview and Volcanic PRA Methodology," Proceedings of the 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE24), Charlotte, North Carolina, USA, June 26-30, 2016, ICONE24-60023.
- [14]Y. Okano and H. Yamano, "Sensitivity Study on Forest Fire Breakout and Propagation Conditions for Forest Fire Hazard Curve Evaluations," Proceedings of the 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE24), Charlotte, North Carolina, USA, June 26-30, 2016, ICONE24-60047.
- [15]H. Yamano, H. Nishino, K. Kurisaka, Y. Okano, T. Sakai, T. Yamamoto, Y. Ishizuka, N. Geshi, R. Furukawa, F. Nanayama, T. Takata, "Development of Risk Assessment Methodology against Natural External Hazards for Sodium-Cooled Fast Reactors: Project Overview and Margin Assessment Methodology Against Volcanic Eruption," Proceedings of the 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-11), Gyeongju, Korea (Oct. 9-13, 2016) N11A0049.

【口頭発表】

- [1] 山野秀将,西野裕之,栗坂健一,堺公明,山元孝広,石塚吉浩,下司信夫,古川竜太, 七山太,高田孝「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究開発(1)マージン評価手法の概念の構築」日本原子力学会 2013 年秋の大会,八戸 (2013年9月3日~5日) G44.
- [2] 山元孝広,石塚吉浩,下司信夫,古川竜太,七山太「外部ハザードに対する崩壊熱除 去機能のマージン評価手法の研究開発(2)火山噴火ハザード評価手法の開発」日本 原子力学会 2013 年秋の大会,八戸(2013 年 9 月 3 日 ~ 5 日) G45.
- [3] 西野裕之,栗坂健一,山野秀将「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究開発(3)積雪ハザードに対する事象シーケンス評価」日本原子力学会2013年秋の大会,八戸(2013年9月3日~5日)G46.
- [4] 高田孝「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究開発(4) 時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発」日本原子 力学会 2013 年秋の大会,八戸(2013 年 9 月 3 日~5 日) G47.
- [5] 七山太,古川竜太「デジタル画像解析法を用いた新しい粒度分析の現状と課題」日本 地質学会第120年学術大会,仙台(2013年9月14日~16日)G32.
- [6] 山元孝広,杉山実,田島靖久「Tephra2 による大山倉吉テフラの再現計算」日本地球 惑星科学連合大会 2014 年大会,横浜(2014 年 4 月 28 日~5 月 2 日) SVC52-01.
- [7] 山野秀将,西野裕之,栗坂健一,岡野靖,堺公明,山元孝広,石塚吉浩,下司信夫, 古川竜太,七山太,高田孝,東恵美子「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究開発;(5)平成25年度進捗及び積雪・竜巻ハザードに対するマージン評価手法」日本原子力学会2014年秋の大会,京都(2014年9月8日~10日) 131.
- [8]高田孝,東恵美子「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究 開発(6)動特性解析とマルコフ連鎖モンテカルロ法のカップリングによる積雪に対 する事象シーケンス評価」日本原子力学会2014年秋の大会,京都(2014年9月8日 ~10日)I32.
- [9] 西野裕之,山野秀将,栗坂健一「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究開発;(7) 竜巻ハザードに対する事象シーケンス評価手法」日本原子力 学会 2014 年秋の大会,京都(2014 年 9 月 8 日~10 日) I33.
- [10]栗坂健一,山野秀将,西野裕之「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究開発;(8)強風ハザードに対する事象シーケンス評価手法」日本原子力 学会 2014 年秋の大会,京都(2014 年 9 月 8 日~10 日) I34.
- [11] 岡野靖,山野秀将「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究 開発;(9)森林火災ハザード評価手法」日本原子力学会 2014 年秋の大会,京都 (2014年9月8日~10日) I35.
- [12]古川竜太、山元孝広、石塚吉浩、七山太、下司信夫、及川輝樹、大石雅之「桜島火山 のブルカノ式噴火による降下火山灰の粒度特性」日本火山学会 2014 年度秋季大会, 福岡(2014年11月2日~11月4日) C1-01.
- [13]山元孝広,杉山実,田島靖久「吸気フィルタの火山灰目詰試験が示す火力発電の脆弱 性」日本地球惑星科学連合大会 2015 年大会,横浜(2015 年 5 月 24 日~5 月 28 日) SVC48-04.
- [14]山野秀将,西野裕之,栗坂健一,岡野靖,堺公明,山元孝広,石塚吉浩,下司信夫, 古川竜太,七山太,高田孝,東恵美子「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマー ジン評価手法の研究開発;(10)平成26年度進捗及び火山噴火ハザードに対する事象 シーケンス評価手法」日本原子力学会2015年秋の大会,静岡(2015年9月9日~11日)E47.
- [15]山元孝広,石塚吉浩,下司信夫,古川竜太,七山太「外部ハザードに対する崩壊熱除 去機能のマージン評価手法の研究開発;(11)火山噴火ハザード評価手法の開発」日本 原子力学会 2015 年秋の大会,静岡(2015 年 9 月 9 日~11 日) E48.
- [16] 岡野靖,山野秀将「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究

開発;(12)森林火災ハザード評価手法」日本原子力学会 2015 年秋の大会,静岡 (2015年9月9日~11日) E49.

- [17] 西野裕之,山野秀将,栗坂健一「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究開発;(13)異常降雨ハザードに対する事象シーケンス評価手法」日本原子力学会 2015 年秋の大会,静岡(2015 年 9 月 9 日~11 日) E50.
- [18]高田孝,東恵美子「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究 開発(14)動特性解析とマルコフ連鎖モンテカルロ法のカップリングによる強風に対 する事象シーケンス評価」日本原子力学会 2015 年秋の大会,静岡(2015 年 9 月 9 日 ~11 日) E51.
- [19]古川竜太、山元孝広、石塚吉浩、下司信夫、七山太、及川輝樹、大石雅之「桜島火山 におけるブルカノ式噴火の火山灰粒度特性と粒子濃度」日本火山学会 2015 年度秋季 大会、富山(2015年9月28日~9月30日) B2-07.
- [20]山野秀将、西野裕之、岡野靖、栗坂健一、堺公明、山元孝広、石塚吉浩、古川竜太、 下司信夫、七山太、高田孝、東恵美子「外部ハザードに対するナトリウム冷却高速炉 のためのリスク評価手法に関する研究開発」第8回構造物の安全性・信頼性に関する 国内シンポジウム(JCOSSAR 2015),東京, p.84-85 (2015年10月14~16日) 0S2-1B.
- [21] 岡野靖,山野秀将「ナトリウム冷却高速炉を対象とした森林火災に伴う影響要因の分析とフラジリティ簡易評価手法の開発」第8回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR 2015),東京, p. 86-91 (2015 年 10 月 14~16 日) 0S2-2A.

# 3.5.5 まとめ

4年間の実施内容を整理して、目標達成度、技術の卓越性、研究開発効果の観点で、研 究開発成果を総括してまとめるとともに、成果について自己評価を行った。

# 4.結言

本業務では、種々の外部ハザードに対する原子力施設の安全性の向上及び炉心損傷までのマ ージン(安全裕度)を定量的に評価する安全基盤技術の確立のため、代表的な外部ハザードで ある異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)、火山噴火、森林火災を対象に、ナトリウム冷却高 速炉の崩壊熱除去機能のマージン評価手法、外部ハザード評価手法及び事象シーケンス評価手 法を開発することを目的とする。

以下に、4か年計画の最終年度である平成27年度の業務の実績を述べる。

# (1) マージン評価手法の開発

外部ハザードに対するマージン評価手法を開発するため、森林火災・重畳事象に対するナト リウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能のマージンを評価した。また、合理的な安全対策とするた めのコストーベネフィット評価手法を構築した。4年間のまとめとして手法を整備した。

森林火災については、反応強度をハザード強度の指標として、評価上重要な燃料タンクを対 象に破損評価を行い、機器別のマージン評価手法を開発した。その結果、タンクが損傷発生す るまでの森林火災継続時間と、タンク損傷後にタンクの火災が生じた場合のタンク火災の継続 時間に対して、プラントの有する大きな熱容量のために冷却材温度の上限値は損傷判定温度に 対してマージンを有することを示した。さらに、イベントツリーに基づいたシーケンス別のマ ージン評価手法も開発し、森林火災時にはいずれのシーケンスでも除熱失敗は顕在化しないこ とを示した。積雪と低温の重畳事象については、フィルタに着雪することにより機能喪失に相 当するフィルタ目詰まり量までの許容時間をマージンと定義し、機器別のマージン評価手法を 開発した。積雪のみの影響の場合、機能喪失積雪深に対する除雪速度に応じたマージンを評価 した。その結果、日降雪深が増大するにつれてマージンが小さくなることを示した。また、イ ベントツリーに基づくシーケンス別のマージン評価手法も開発した。補助冷却設備が3系統あ ることを考慮すれば、マージンは3倍になることを示した。強風と降雨の重畳事象については、 強風のみの影響の場合、主に最大瞬間風速をハザード強度の指標として、風圧・気圧差・飛来 物衝突による破損評価を行い、機器別のマージン評価手法を開発した。その結果、最大瞬間風 速の過去最大値に比べて十分なマージンを有することを確認した。また、イベントツリーに基 づいてシーケンス別のマージン評価手法も開発し、強風時には補助冷却設備の全系統同時破損 は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは現れないことを示した。降雨のみの影響の場合、 機能喪失水位に対する排水設備閉塞物除去速度に応じた継続時間を指標とした機器別のマージ ン評価手法を開発し、1 時間降水量が増大するにつれてマージンが小さくなることを示した。 また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価手法も開発し、降雨時には補助 冷却設備の浸水は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは現れないことを示した。強風と 降雨の重畳時には補助冷却設備排気部雨どいの破損に続く排気ダクト内への降雨の浸入による 空気冷却器伝熱管疲労破損が考えられ、伝熱管破損までの許容時間を指標とした機器別のマー ジン評価手法を開発し、雨水液滴径が大きくなるにつれてマージンが小さくなることを示した。 また、イベントツリーに基づいてシーケンス別のマージン評価手法も開発し、補助冷却設備の 全系統同時破損は極めて考えにくいため除熱失敗シーケンスは現れないことを示した。積雪を

4 - 1

対象に、ヒータを設置する場合と除雪作業の場合のコストを定性的に分析し、炉心損傷頻度と 比較することでコストーベネフィット評価手法を開発した。最後に、4年間のまとめとして、 開発してきた手法を整理した。

# (2) 外部ハザード評価手法の開発

# ①異常気象ハザード評価手法の開発

異常気象(積雪、強風、竜巻、降雨)に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価 対象とする重畳事象を選定した。その重畳事象に対して、既往のハザード強さの記録を調査・ 整理した。また、既往研究からハザード評価手法を調査・整理した。次に、ナトリウム冷却高 速炉の崩壊熱除去機能に影響を及ぼすハザードの重要パラメータを同定し、起こりやすさとハ ザード強さを指標としたハザード曲線を構築して、重畳事象に対するハザードを評価した。4 年間のまとめとして手法を整備した。

重畳事象の選定方法を調査し、本研究における選定方法を考案して、平成27年度に評価対 象とする重畳事象として、積雪と低温、強風と降雨の重ね合わせを選定した。既往のハザード 強さの記録として、積雪と低温の重畳事象については、積雪深、日降雪深、最低気温、低温継 続時間を調査・整理した。強風と降雨の重畳事象については、最大風速、最大瞬間風速、1時 間降水量を調査・整理した。また、国内外の技術会議に参加し様々なハザード及びリスク評価 手法に関する情報を収集するとともに、既往文献に基づきハザード評価手法を調査・整理し、 統計処理的方法により年超過確率を算出できる見通しを得た。次に、積雪と低温の重畳事象に ついては、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能喪失要因には積雪によるフィルタ閉塞、低 温によるフィルタ凍結及び空気冷却器伝熱管内ナトリウム凍結が考えられるため、重要パラメ ータとして年最低気温記録日の日降雪深、降雪継続時間、低温継続時間を同定した。これらの 年最大値を極値分布に当てはめてハザード曲線を構築し、適合度評価と安定性評価で妥当性を 確認するハザード評価手法を開発した。低温継続時間については、凍結が考えられる 0℃以下 の低温が継続した時間を用いてハザードを評価した。強風と降雨の重畳事象については、ナト リウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能喪失要因には強風によって生じる飛来物衝突による機器の 破損、空気冷却器への雨水浸入による伝熱管疲労破損が考えられるため、重要パラメータとし て年最大1時間降水量記録日の最大瞬間風速、1時間降水量、降水継続時間を同定した。これ らの年最大値を極値分布に当てはめてハザード曲線を構築し、適合度評価と安定性評価で妥当 性を確認するハザード評価手法を開発した。降水継続時間については、異常降雨と考えられる 1 時間あたり 5mm 以上の降水が継続した時間を用いてハザードを評価した。最後に、4 年間の まとめとして、開発してきた手法を整理した。

# ②火山噴火ハザード評価手法の開発(再委託先:産総研)

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を選定した。また、湿分等を考慮したフィルタ目詰まり試験を実施した。さらに、これまでの粒度分析の総合評価を行い、火山灰粒子の特徴を整理した。4年間のまとめとして手法を整備した。

火山噴火に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象として、 火山灰+降雨(霧)を選定した。そして選定した重畳事象により、噴火時の降下火山灰による フィルタ目詰まりによりどのような影響が出るのかを確認するために、フィルタ試験ダクト内 に散水して火山灰を供給し、フィルタの性能変化(圧力損失、粉じん保持量、外観)を確認し た。試験は平成26年度と同様に中性能フィルタ単体、プレフィルタ単体、両者の組み合わせ で実施したが、交換圧損到達時のフィルタ火山灰保持量に乾燥時と散水時で有意な差は確認で きなかた。したがって、フィルタ損傷に対する降雨の重畳効果はほとんどないことが確認でき た。さらに、これまでの桜島噴火中に採取した降灰試料の粒度分析の総合評価を行い、粒径サ イズと粒子形状に相関があることを明らかにした。最後に、4年間のまとめとして、開発して きた手法を整理した。

## ③森林火災ハザード評価手法の開発

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、評価対象とする重畳事象を選定した。その重畳事象に対して、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能への影響を調べるため、 森林火災の延焼シミュレーションを実施するとともに、森林火災ハザードを評価した。4年間 のまとめとして手法を整備した。

森林火災に関する外部ハザード評価手法を開発するため、煤煙に関するハザード曲線を導出 した。導出にあたっては、森林火災の延焼シミュレーションを実施し、延焼量の保存性を高め た森林火災の燃焼強度と進展速度の代表値を導出し、さらに延焼進展に応じた煤煙の空間分布 を ALOFT-FT コードを用いた煤煙シミュレーションを実施することで、空気冷却設備のフィル タ目詰まり積算量に関する応答曲面を構築した。構築した応答曲面を、平成25年度及び平成 26年度に開発したロジックツリーへ適用し、モンテカルロ計算を行うことで、煤煙積算目詰 まり量を指標とした森林火災ハザードを評価した。さらに評価対象とする重畳事象として、森 林火災+強風、森林火災+雷を選定した。それらの重畳事象に対して、ナトリウム冷却高速炉 の崩壊熱除去機能への影響を調べるため、重畳条件でのハザード曲線を導出した。最後に、4 年間のまとめとして、開発してきた手法を整理した。

# (3) 事象シーケンス評価手法の開発

# ①安全対策の整理及び事象シーケンス評価手法の開発

事象シーケンス評価手法を開発するため、ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去機能に関する 重要機器を同定し、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去機能維持に係わる安全対策を整理した。 また、森林火災・重畳事象を起因とした炉心損傷に至り得るイベントツリーを構築して、事象 シーケンスを評価した。さらに、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去解析を実施した。4年間 のまとめとして手法を整備した。

森林火災、積雪と低温の重畳事象、強風と降雨の重畳事象によるナトリウム冷却高速炉の崩 壊熱除去機能喪失要因を抽出し、空気冷却器、電源系、換気空調系といった重要機器を同定し た。また、森林火災時の安全対策としてポンプ車による燃料タンクへの放水、積雪と低温の重 畳事象時の安全対策として除雪作業とヒータの設置などを整理するとともに、強風と降雨の重 畳事象時の安全対策として排水溝閉塞物除去作業などを整理した。次に、森林火災については、 反応強度を指標とした森林火災ハザードをカテゴリ化して、森林火災を起因とした炉心損傷シ ーケンスについてイベントツリーを構築して、燃料タンク破損及び火災発生確率を算定して、 空気冷却器外気温度高温化による機能喪失を考慮した事象シーケンスを評価し、炉心損傷頻度 を定量化する手法を開発した。積雪と低温の重畳事象については、日降雪深、降雪継続時間と 低温継続時間に応じたハザードカテゴリを設定して、積雪と低温の重畳事象を起因とした炉心 損傷シーケンスについてイベントツリーを構築して、着雪によるフィルタ閉塞確率、水配管凍 結確率、ナトリウム凍結確率といった確率モデルを考案して、補助冷却設備機能喪失を考慮し た事象シーケンスを評価し、炉心損傷頻度を定量化する手法を開発した。強風と降雨の重畳事 象については、最大瞬間風速、1時間降水量、降水継続時間に応じたハザードカテゴリを設定 して、強風と降雨の重畳事象を起因とした炉心損傷シーケンスについてイベントツリーを構築 した。また、空気冷却器伝熱管への雨水液滴の接触により発生する熱応力を求め、繰返し接触 による疲労破損を評価することで補助冷却設備機能喪失を考慮した事象シーケンスを評価し、 炉心損傷頻度を定量化する手法を開発した。さらに、森林火災・重畳事象時の崩壊熱除去解析 として、低温時の空気冷却器伝熱管ナトリウム凍結に着目した解析を実施した。最後に、4年 間のまとめとして、開発してきた手法を整理した。

# ②時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法の開発(再委託先:平成2 7年8月31日まで大阪大学、平成27年9月1日以降原子力機構)

時間依存事象進展アルゴリズムに基づいた事象シーケンス評価手法を開発するため、降雨を 起因とした炉心損傷に至り得る事象シーケンスに対して適用性評価を可能とすべく、平成26 年度に開発した評価プログラムの機能追加と必要な改良を施した。また、この評価手法の降雨 時のシーケンスに対する適用性を評価した。4年間のまとめとして手法を整備した。

降雨を起因とした炉心損傷に至り得る事象シーケンスに対して適用性評価を可能とすべく、 平成26年度に開発した評価プログラムに、建物内各部屋の構成、浸水、越流および排出(ド レイン)をモデル化し、建屋内部の水位評価プログラムの組み込みを実施した。開発した評価 手法を用い、降雨時のシーケンスに対する適用性評価として、降雨条件を140mm/hr、屋外排 出機能喪失時におけるプラント挙動解析を実施した。平成26年度に実施されたイベントツリ 一評価より、対象イベントとして、屋上水位上昇に伴う電気設備の機能喪失に起因する1、2 次系ポニーモータの機能喪失及び自然循環運転への移行を選定した。解析の結果、最高温度は ポニーモータの機能停止から自然循環運転へ移行する過程で発生し約50℃の温度上昇を伴う こと、統計処理の結果平均最高温度は435℃であり、炉心損傷を伴う可能性が極めて小さいこ とが明らかとなった。最後に、4年間の成果のまとめとして、これまでに開発したプログラム の入出力に関する整備を行うとともに、本手法で取り扱うイベントの設定方法に関してまとめ た。

#### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意見を 聴きながら研究を進めるため委員会を開催した。

個別に進めている各研究項目との間で連携を深めるため、業務参加者全員が参加する全体会 議を3回開催し、効率的に研究を進めた。また、外部ハザードおよび PRA の外部有識者で構成 される委員会を設置し、本研究の進捗状況について議論する委員会を1回開催し、本研究に反 映できる意見を得た。

# (5) まとめ・評価

平成24年度から平成27年度の4年間の成果をまとめた。

4年間の実施内容を整理して、研究開発成果を総括してまとめるとともに、成果について自 己評価を行った。

以上、4か年計画の最終年度として平成27年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。