

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

(受託者) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者) 山野秀将 高速炉研究開発部門

(再委託先) 国立大学法人大阪大学（平成 27 年 8 月まで）、国立研究開発法人産業技術総合研究所

(研究期間) 平成 24 年度～27 年度

1. 研究の背景とねらい

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は重要であるが、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、本研究では、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を確立することを目標として、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を開発することを目的とする。

異常な外部ハザードに対しては、長期にわたり冷却維持が求められる崩壊熱除去が重要であるため、本研究では崩壊熱除去機能に着目することとした。また、外部ハザードには、地震などの地下からハザード、津波などの海上・地表面からのハザード、火山灰などの上方からのハザードに大別できる。発電用軽水炉は最終ヒートシンクが海水であるためポンプや電源が重要機器であり、海上・地表面からの外部ハザードが重要である。一方、ナトリウム冷却高速炉は最終ヒートシンクが大気であるため建物屋上に設置している空気冷却器が重要機器（ポンプや電源がなくても自然循環が可能なシステム）であり、上方からの外部ハザードが重要である。

本研究では、外部ハザード評価と事象シーケンス評価に基づく、確率論的リスク評価（PRA）手法とマージン評価手法の両方を開発する。外部ハザード評価には、起こりやすさとハザード強さの関係を評価する手法を開発する。事象シーケンス評価には、従来のイベントツリー解析手法を拡張した手法を開発する。PRA では炉心損傷頻度を評価し、マージン評価では機器やシーケンスに対して安全裕度（マージン）を評価する。また、対象とする外部ハザードは時間進展が重要であるため、より詳細な手法として時間依存事象進展アルゴリズムに基づく事象シーケンス評価手法も開発する。

2. これまでの研究成果

2.1 マージン評価手法の開発

火山噴火に対するマージン評価手法では、各機器の吸込み風量に応じた空気取入口フィルタ閉塞による破損までの猶予時間をマージンと定義した。図 1 にマージン評価の一例を示す。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、フィルタ取替えによってマージンが大きくなる効果を示した。

森林火災・重畳ハザード（積雪と低温、強風と降雨）についてもマージン評価手法を開発した。

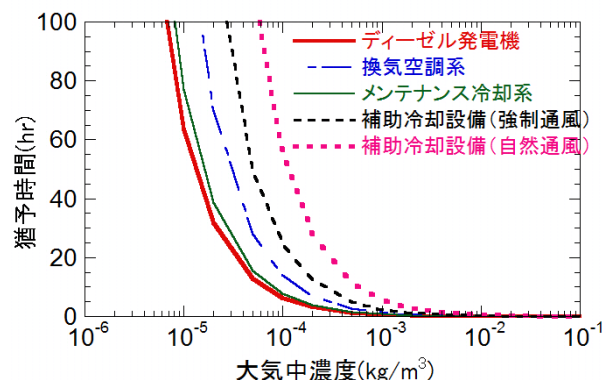


図 1 火山噴火に対する機器別マージン評価

2.2 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

外部ハザードの組み合わせを考慮し、4つの相互影響の観点から、崩壊熱除去設備（空気冷却器など）へ影響する事象を選定する方法を構築した（図2）。本研究では、代表的な重畳ハザードとして、低温と積雪、強風と降雨の重畳事象を選定した。

低温と積雪の重畳ハザード評価のため、年最低気温記録日の日降雪深、降雪継続時間、低温継続時間の年最大値を整理し、年超過確率を算出した。この超過確率に対して極値分布を当てはめて推定することにより、ハザード曲線を評価する手法を開発した。

強風と降雨の重畳ハザードについては、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する評価手法を開発した（図3）。

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った（図4）。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。

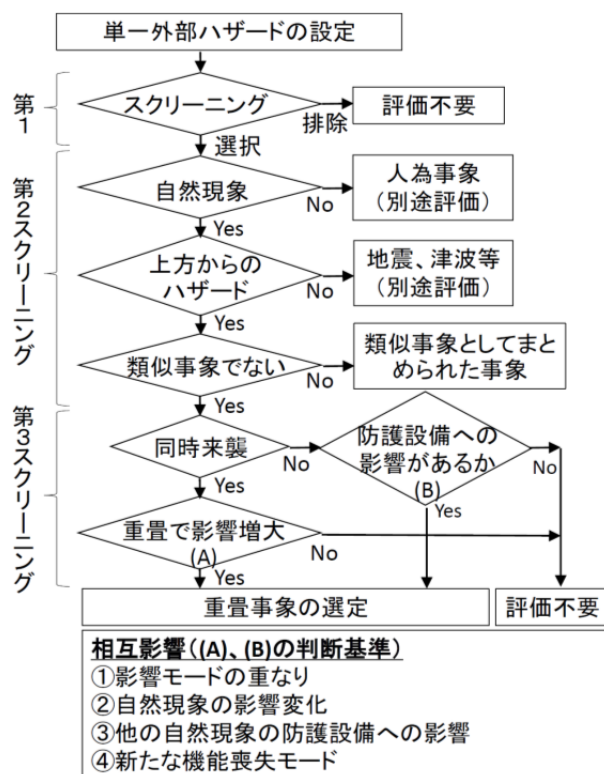


図2 重畳ハザードの選定方法

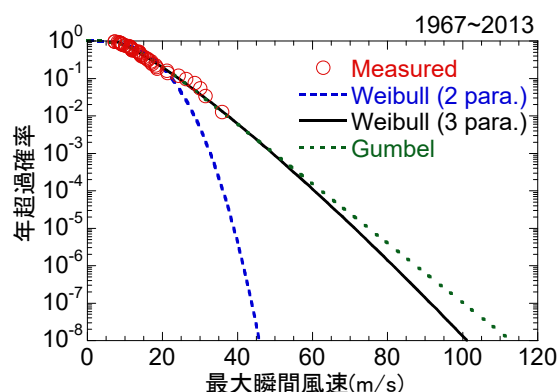


図3 年最大1時間降水量記録日の最大風速と最大瞬間風速のハザード曲線

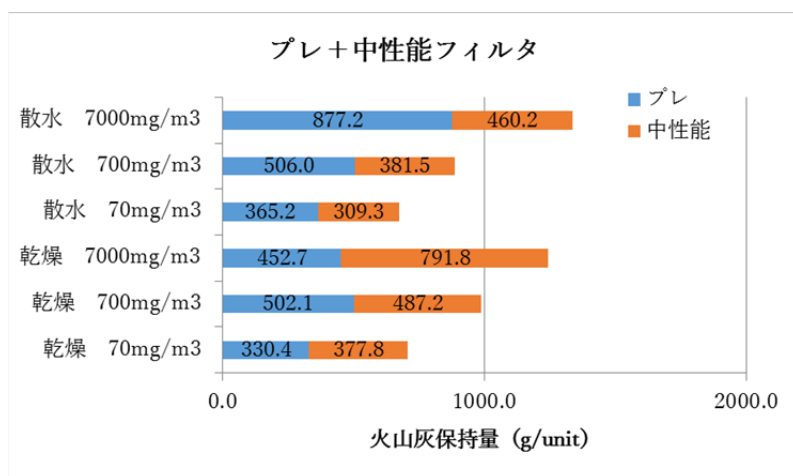


図4 プレフィルタと中性能フィルタの組み合わせによる火山灰保持量

③森林火災ハザード評価手法の開発

森林火災と雷の相関性は、要因1：全森林火災のうち雷起因によるもの、要因2：雷をもたらす気象条件である大気不安定性に関連して変化するものがあり、森林火災のハザード曲線評価のためのロジックツリーにおける条件因子としては、それぞれ「年発生頻度」と「相対湿度及び風速」に相当する。ハザード曲線を評価した福井県火災個票（2004～2012年）によれば、67件中1件が雷によるものであった。また当該地域で雷注意報が発表された時間帯の気象条件は、全対象期間と比較し、1時間平均風速が高く、また相対湿度が高い側に寄った出現確率分布となった。雷が森林火災と重畳した条件として、これら頻度割合及び気象条件をロジックツリーで与え、モンテカルロ計算によりハザード曲線を導出した。森林火災において火災進展の勢いを表す火線強度のハザード曲線（図5）は、全対象期間（2002～2012年）の気象条件で導出したものと比較し、要因1により頻度が全体的に低下しているが、高風速条件が寄与してくる約300kW/m以上では、要因2により雷重畳のハザード曲線が全対象期間の曲線に漸近する結果となった。さらに高い火線強度（約400kW/m以上）では高風速にさらに低湿度となる気象条件の寄与が高まり、高湿度側に寄った気象条件である雷重畳のハザード曲線は、全対象期間の曲線と比べて、頻度が急速に低下する結果を得た。

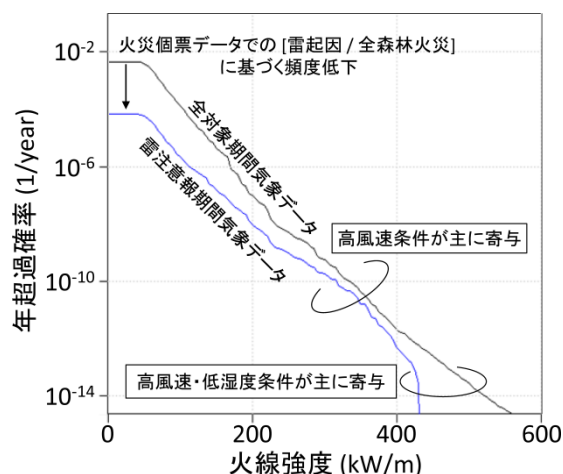


図5 森林火災－雷の重畳ハザード曲線

2.3 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

積雪と低温の重畳ハザードに着目して炉心損傷に至り得る事象シーケンスを評価した。雪の凍結によるフィルタ閉塞の有無、積雪による屋上の吸排気口閉塞防止（除雪）のためのアクセスルート確保の成否を想定し、イベントツリーを構築した。フィルタ閉塞については、ハザードの継続時間とともにフィルタ上に雪が蓄積・凍結し、ある雪の厚さに達した時に閉塞することを想定した。フィルタ閉塞を回避するために、交換を行うと想定し、その失敗確率を評価した。また、積雪と低温の発生からある程度時間が経過した後では、アクセスルート確保に必要な屋上扉の開が不可能になる考えられるため、その失敗確率を評価した。重畳事象の年超過確率及び失敗確率の評価から、イベントツリーを定量化する手法を開発した。代表的な結果として、炉心損傷頻度は、 10^{-7} /年のオーダーを得た。支配的なシーケンスは屋上扉の開失敗となった。感度解析により、

アクセスルート確保、電熱ヒータ導入によって頻度を1桁低減できる（図6）。

強風によって生じる飛来物衝突による機器の破損、破損した空気冷却器への雨水浸入による伝熱管疲労破損が

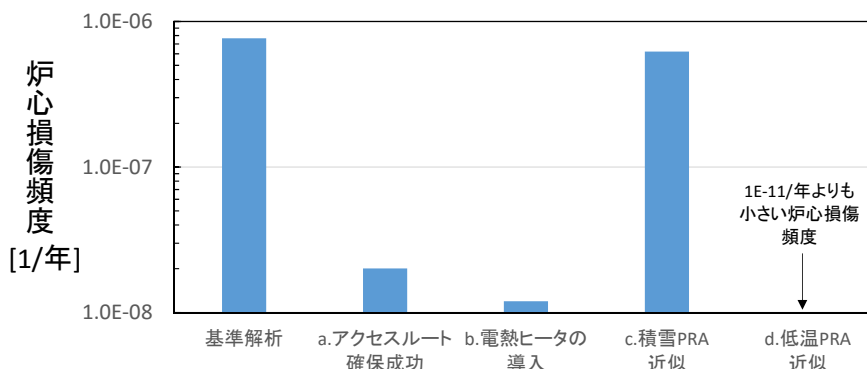


図6 積雪と低温の重畳ハザードPRAの炉心損傷頻度

考えられるため、降雨単独では炉心損傷には至ることはありえないため、強風単独及び強風と降雨の重畳の影響によって機器破損や機能喪失を考慮した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重畳の効果として評価し、炉心損傷頻度を定量化する手法を開発した。その代表的な結果として、炉心損傷頻度は 10^{-6} /年のオーダーを得た。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 のカテゴリで、強風飛来物衝突による補助冷却設備排気部破損であった。

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

本研究ではこれまでに開発した連続マルコフ過程モンテカルロ法 (CMMC 法) を用いた事象シーケンス評価手法に、降雨による浸水に伴う屋内各部屋の水位変化を評価するモデルを追加し、異常降雨における事象シーケンス評価を行った。異常降雨イベントツリー評価より、建屋屋上で 1.0m 以上の水位で内部電気室に浸水が発生し、非常用ディーゼル発電機 (DG) の機能が喪失し始めると仮定した。図 7 に機能喪失確率を示す。解析では時刻 0s で異常降雨 (降水量 126mm/hr) に伴う炉心緊急停止、ポンプモータ運転による強制対流条件での崩壊熱除去運転を仮定し、建屋内部への浸水に伴う非常用 DG 機能停止、自然循環崩壊熱除去運転への移行を評価した。炉心出口冷却材温度の解析結果を図 8 に示す。図に示すように事象開始後約 8hr 移行で自然循環除熱運転への移行が見られ、自然循環が十分に発達するまでの過程で約 50℃ の温度上昇が見られるが、いずれも 450℃ 以下であり、異常降雨に対するプラント耐性はきわめて高いことが明らかとなった。

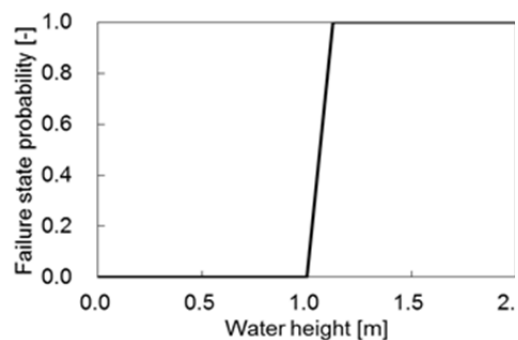


図 7 非常用 DG 機能喪失確率

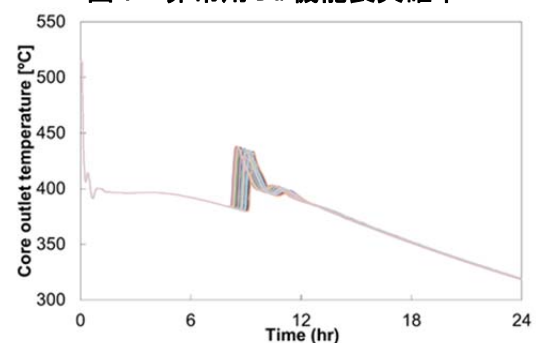


図 8 冷却材温度変化 (50 サンプル)

3. 今後の展望

採択時において計画立案された目標は予定どおり達成し、積雪・竜巻・強風・降雨・火山噴火・森林火災・重畳ハザードに対する PRA (ハザード評価と事象シーケンス評価) 及びマージン評価に関する手法開発は完了した。今後、破損確率は結果に大きく影響を与えるため、破損確率の精度向上に取り組みたい。また、外部ハザード発生時のアクシデントマネジメント策を提案したが、外部ハザード発生時の人的過誤率を評価できる手法を開発することが望ましい。時間進展を考慮した PRA 手法として連続マルコフ連鎖モンテカルロ計算を実施したが、プラント応答を詳細にモデル化して手法開発を進めていくとともに、重畳ハザードに対しても適用できるように改良を図りたい。本研究の最終年度に取り組んだ重畳ハザードは一部しか取り組めなかったため、外部ハザード重畳時のリスク評価手法を確立していきたい。外部ハザードは現実的には重畳することが多いと思われるため、重畳ハザードに対するリスク手法を開発して、原子力施設の安全性向上に努めていきたい。