

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

研究代表者 山野 秀将 独立行政法人日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門
炉システム開発計画室

参画機関 独立行政法人日本原子力研究開発機構、独立行政法人産業技術総合研究所、
国立大学法人大阪大学

研究開発期間 平成24年度～27年度

1. 研究開発の背景とねらい

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、本事業では、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。図1に本事業で対象とするスコープを示す。本事業では、外部ハザード評価と事象シーケンス評価に基づくマージン評価手法を開発する。外部ハザード評価には、起こりやすさと影響（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。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手法も開発する。

2. 研究開発成果

2.1 マージン評価手法の開発

既往研究からマージン評価手法を調査した結果、地震・津波のストレステストと同様の手法を適用できる見通しを得た。そこで、ハザード曲線とイベントツリーを組み合わせたマージン評価手法の概念を構築した（図2）。ハザードの定量化が可能なら確率論的リスク評価となるが、定量化が困難ならマージン进行评估することとなる。また、外部ハザードのスクリーニング方法を構築し、本事業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明確にした。

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

気象データベースから敦賀測候所に

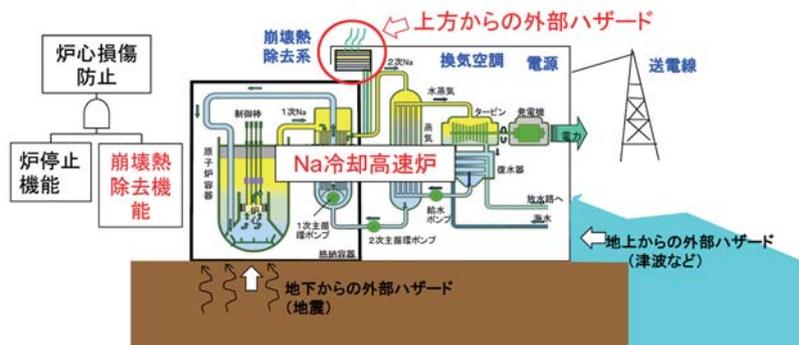


図1 本事業で対象とするスコープ

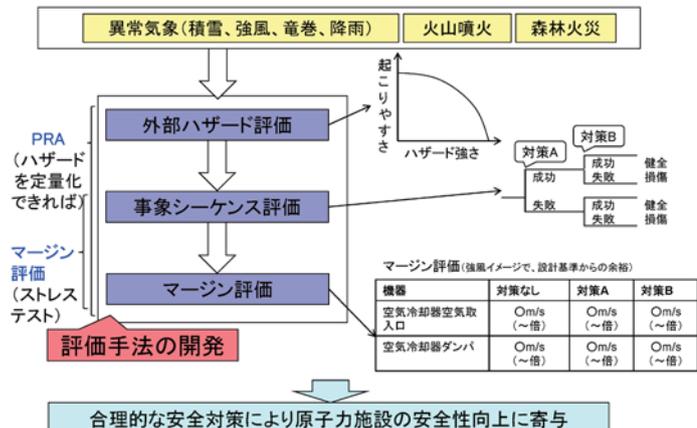


図2 マージン評価手法の概念

における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て、積雪ハザード曲線を描くことにした。敦賀測候所の1961年(寒候年は1962年)から49年分の年最大積雪深及び年最大日降雪深を図3に示す。

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。そこで、本研究では、この推定方法に基づいて積雪ハザードを評価することとした。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、非超過確率を求めた。グンベル分布とワイブル分布を仮定して、最小二乗法で近似された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(図4)。グンベル分布はワイブル分布より保守側に評価している。また、適合度評価及び安定性評価の結果、グンベル分布が最適であった。このように積雪ハザードを評価できる手法を開発した。

②火山噴火ハザード評価手法の開発

ナトリウム冷却高速炉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中部地方の白山^{はくさん}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す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、ナトリウム冷却高速炉の敷地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。

若狭湾沿岸及び琵琶湖付近のボーリングコア試料に挟在する降下火山灰の文献調査より、敷地付近では、約0.21回/1000年(加久藤(Kkt:約33万年前~34万年前)以降)の降下火山灰が堆積したと考えられる。降下火山灰の層厚は、大部分で10cm以下であるが、BB943-3火山灰で88cm(琵琶湖付近)、阿蘇1火山灰で41cm(琵琶湖付近)、始良Tn(AT)火山灰で30cm(三方湖:若狭湾沿岸)、阿多鳥浜で11cm(琵琶湖付近)等のものもあり、層厚5cm以上の降下火山灰の堆積頻度は2回以下/10万年間である。また、降下火山灰の最大粒径は、軽石・岩片で平均約1.3mm(最大約2.5mm:大山倉吉、大山関金、大山生竹等)、火山ガラスで平均0.44mm(最大0.95mm:AT)を有する(琵琶湖)。

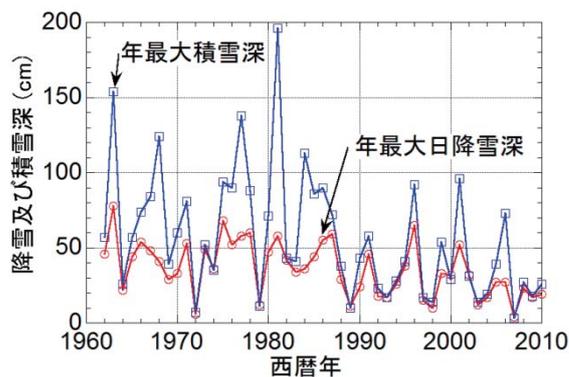


図3 年最大積雪深と年最大日降雪深(敦賀 1962~2010年)

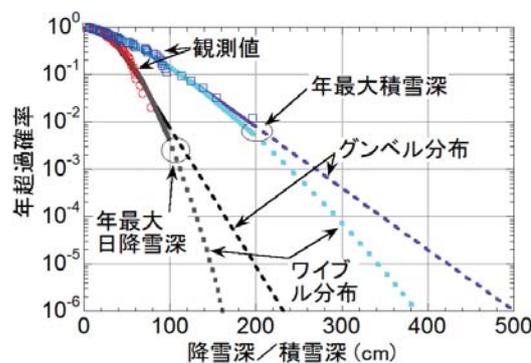


図4 年最大積雪深と年最大日降雪深に関する積雪ハザード曲線(敦賀)

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。しかし、 $1\mu\text{m}$ 前後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。そこで、本研究では、噴火後の改変を受けていない細粒粒子を含む火山灰粒子を得るため、日本で最も噴火頻度の高い鹿児島県の桜島火山を対象に噴火の観測及び火山灰試料の採取を行った。粒子の測定は1試料につき1万個以上行い、粒子の面積から換算される円に相当する直径とその体積を頻度で比較した。火山近傍の黒神（火口から2.5km）で採取した試料の粒径分布は $120\mu\text{m}$ 前後に最頻値（モード）があり、比較的幅広い粒径分布を示す（図5）。一方、距離を置いて垂水で降灰した火山灰試料は最頻値が $80\mu\text{m}$ 前後になり、粒径分布の幅は狭いことがわかった。以上から、距離による粒径分布の変化が把握できた。

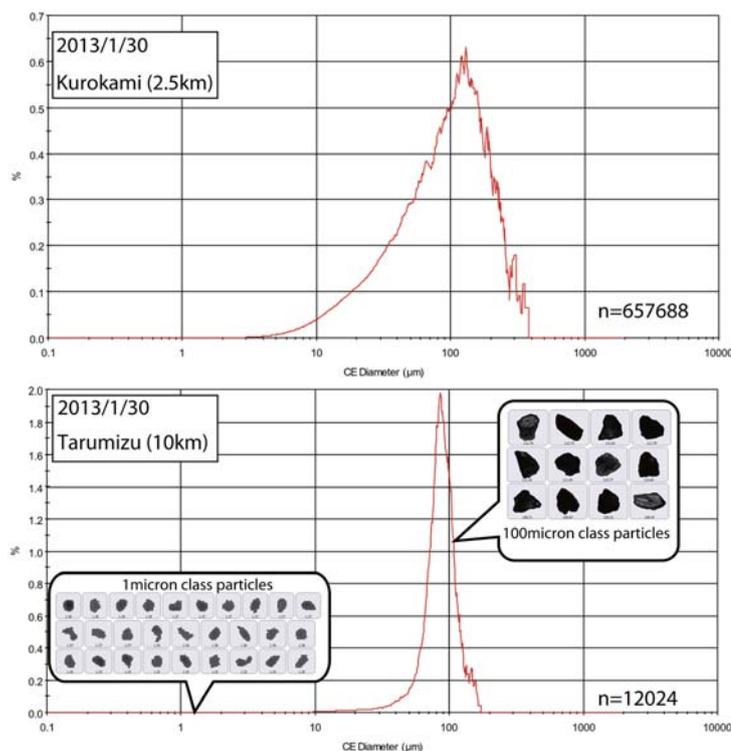


図5 火山灰細粒粒度分析装置を用いた火山灰試料の粒径分布

③森林火災ハザード評価手法の開発

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、延焼継続時間など）、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. 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

積雪の崩壊熱除去への代表的な影響として、補助冷却系及びメンテナンス冷却系の空気冷却器、非常用電源系（換気空調系）などの給排気設備における給排気口の閉塞による機能喪失を想定した。崩壊熱除去機能を担う給排気口の閉塞の判定には積雪深が指標になり、降雪速度と降雪継続時間の積で表される。本研究では、降雪速度の超過頻度及び降雪継続時間の超過確率を求め、それらの組み合わせで表される積雪ハザードカテゴリを設定した。積雪によるこれらの機能喪失を回避する代表的な手段として除雪を想定した。除雪の能力は不確実さ分布を有する一定の速度で表されると仮定し、ある降雪速度と降雪継続時間で表される積雪事象が発生した場合、除雪必要性の認知失敗又は認知成功下で除雪速度が降雪速度を下回る場合を除雪失敗とみなして除雪失敗

確率を評価した。また、降雪継続時間が長いほど必要な除雪作業が増加することにより失敗確率が增大する評価モデルとした。イベントツリーを定量化した結果、炉心損傷頻度は 10^{-7} /炉年のオーダーとなり、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となった。次に、認知失敗確率、除雪速度、ダンパ手動操作失敗確率をパラメータにして感度解析を実施した結果、確実な認知と除雪速度の向上が炉心損傷頻度の低減にとって重要であることが示された(図6)。

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

連続マルコフ連鎖モンテカルロ(CMMC)法を用いた時間依存事象進展アルゴリズムを構築し、積雪時におけるナトリウム冷却高速炉の自然循環特性評価に適用した。CMMC法のプラント動特性解析への適用では、各コンポーネントの温度等の情報をもとに事象(機器故障等)の生起確率を算出する。次に乱数によりプラント状態を決定し、状態に応じた物理モデルを動特性解析に組み込むことで、次の時刻におけるプラント動特性を評価する。これをモンテカルロ計算により統計処理することで、起こりうるシナリオを網羅的に評価する。

解析対象はループ型ナトリウム冷却高速炉とし、動特性解析にはLEDHERコードを用いた。積雪の影響として、補助冷却系(ACS)の空気冷却器の機能喪失状態確率を積雪量の関数とし、積雪(降雪)速度を与えることで時間依存を考慮した。解析では、時刻0で積雪のため原子炉トリップおよび全電源喪失を想定し、自然循環崩壊熱除去モードとした。その後、プラント各グループのACSの機能喪失および人的復旧作業に伴うプラント状態を評価した。なおACSの機能喪失はACSへの冷却用空気流入量の低下で模擬した。図7に解析結果(炉心出口温度)を示す。ここでは積雪速度を0.1m/hとし、1時間に1回で成功確率0.5の人的復旧を考慮した。図に示すようにACSの機能喪失に伴う冷却材の昇温、人的復旧に伴う降温が動特性に反映されており、本結果を統計処理することでシナリオの定量化、最適な安全対策の定量化が可能な見通しを得た。

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、積雪ハザードに対するハザード評価及び事象シーケンス評価は完了した。今後、竜巻、強風、降雨、火山噴火、森林火災に対してハザード評価を進めるとともに、事象シーケンス評価を行うことでマージン評価手法を開発していく予定である。

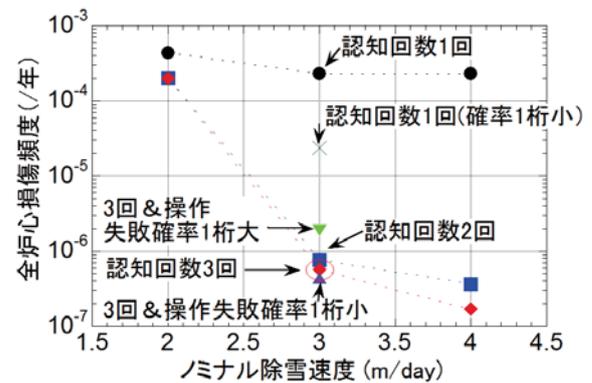


図6 感度解析結果

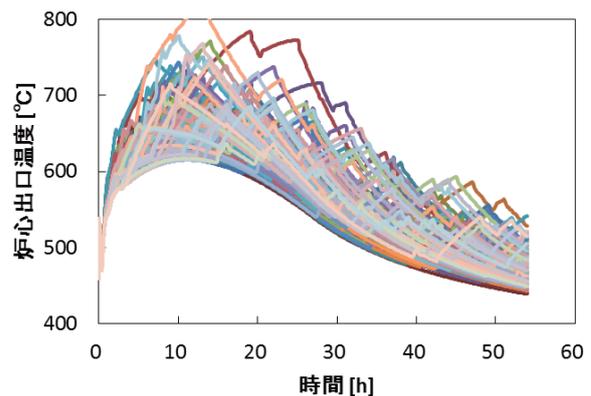


図7 試解析結果(100サンプルを用いた炉心出口温度推移)