

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气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

強風に対するマージン評価手法では、最大風速のレベルに応じて破損する部位が同定される。機器別のマージン評価では、排気塔に対して風圧による破損を評価し、その他の設備に対して飛来物衝突による破損を評価することで破損限界を算出し、マージンと定義した。図 1 にマージン評価の一例を示す。シーケンス別のマージン評価では、機器毎に破損と判定される最大風速を求めて、最も低い最大風速をマージンと定義する手法を開発した。

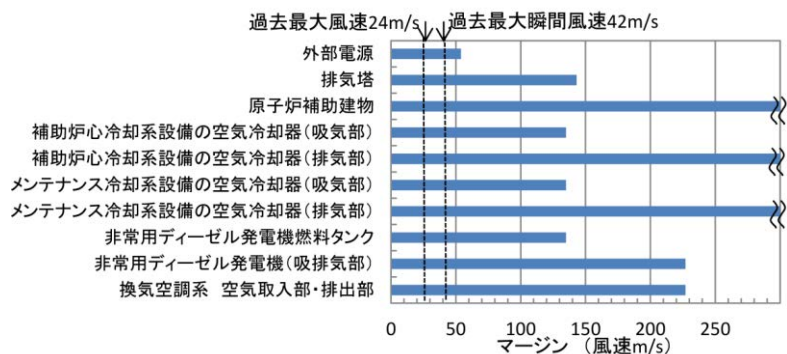


図 1 強風に対するマージン評価

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

異常降雨ハザード評価のため、気象庁データベースから得られる情報のうち、評価に必要な1時間降水量の年最大値を整理し、1時間降水量に対応する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、異常降雨ハザード曲線の評価した(図2)。PRAには異常降雨の継続時間も必要であると判断し、継続時間に対するハザード曲線も評価した。また、降水量については20mm/h~160mm/hの間を20mm/h毎に、継続時間については0~80hの間を10h毎にカテゴリ化し、それぞれ区間頻度、区間確率を算出した。それらのカテゴリを組み合わせ、異常降雨ハザードカテゴリを設定するとともにハザードカテゴリの区間頻度を算出した。

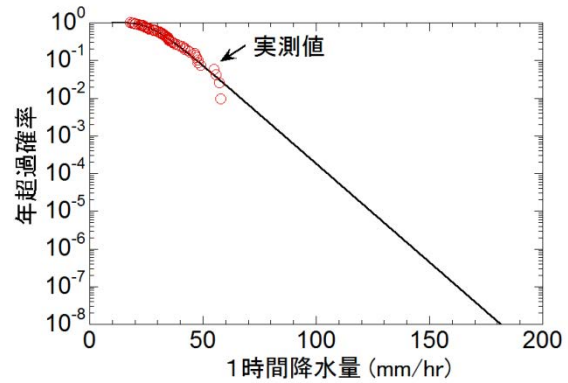


図2 異常降雨ハザード曲線

②火山噴火ハザード評価手法の開発

大山倉吉テフラ(DKP)は、約5万年前に大山火山から噴出した大規模なプリニー式降下堆積物で、敷地周辺での降灰履歴調査から、降灰最大事例として特定されたものである。そこで、Tephra2コードを使って、平成25年度に再現解析を行った。再現解析で選定された噴煙柱パラメータを用いて、現在の風条件を踏まえて、これまでに観測された9,487個の日別風データを、平成25年度解析で絞り込んだ6種類の噴煙柱パラメータを使って、

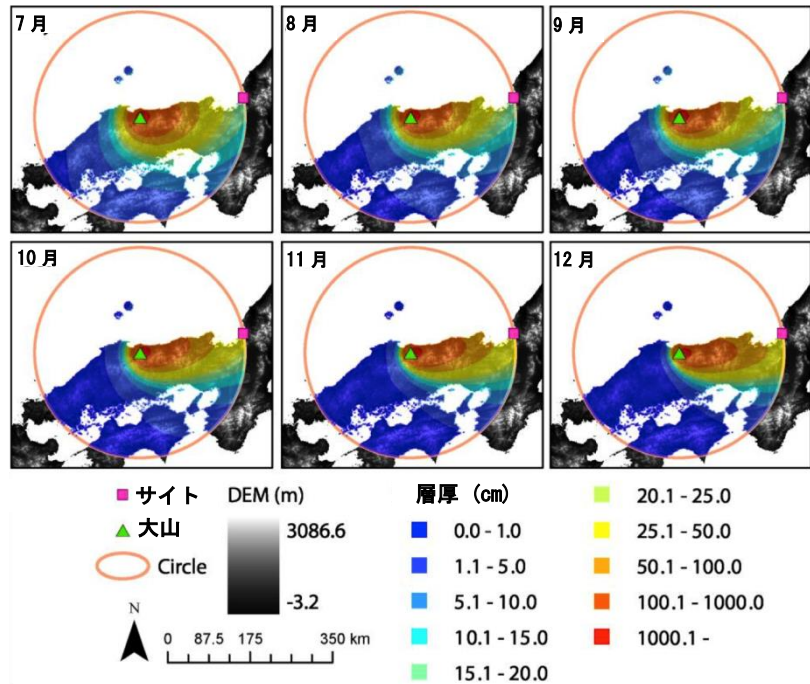


図3 Tephra2による月毎の平均降灰量分布

56,922 ケースのシミュレーションを実施した。図3に月毎の平均降灰量分布を示すが、風条件によって多少異なる結果を得た。この結果を用いて敷地における降灰量の超過確率を求めた。平成24年度に調査した結果、過去100,000年程度の間には22回の火山灰堆積が確認されたことから、 2×10^{-4} /年を考慮して、降灰ハザード曲線を求めた(図4)。10cmを超える超過確率は50%程度であり、50cmを超える超過確率は10%を下回った。

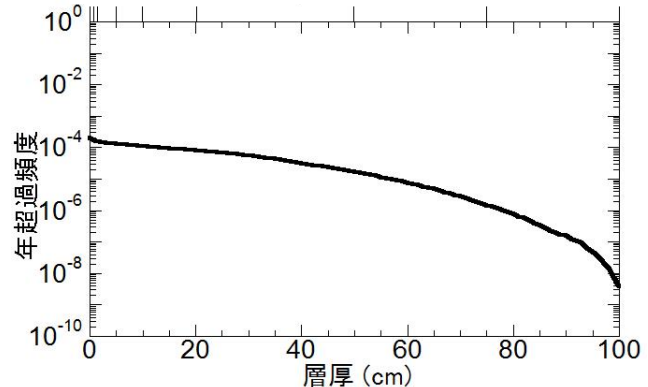


図4 降灰ハザード曲線

③森林火災ハザード評価手法の開発

熱・炎に関連しハザード曲線を導出するスキームを開発した(図5)。平成25年度に構築したロジックツリーに対し、森林火災の発生・延焼条件と天候出現条件を詳細化した。次に、確率変数を変えた森林火災延焼シミュレーションを多数実行し、結果をガウス過程補間することで強度指標(火線強度と反応強度)及び延焼到達時間の応答曲面を導出した。続いて、確率変数のランダムサンプリングを行って、モンテカルロシミュレーションを実施した。さらに、サンプル条件に対応した強度指標を応答曲面から求め、森林火災発生頻度、延焼到達確率、サンプル条件出現確率から年超過頻度を求め、多数のサンプルに対する結果を合計してハザード曲線を導出するという手法を開発した。適用にあたり、風速・相対湿度の未出現重畳確率を表す重み関数を、一般化パレート分布を用いて導出する手法を開発するとともに、重点サンプリング法を適用し、極低頻度・高強度までハザード曲線を評価できるような手法とした。得られた火線強度と反応強度のハザード曲線を図6に示す。

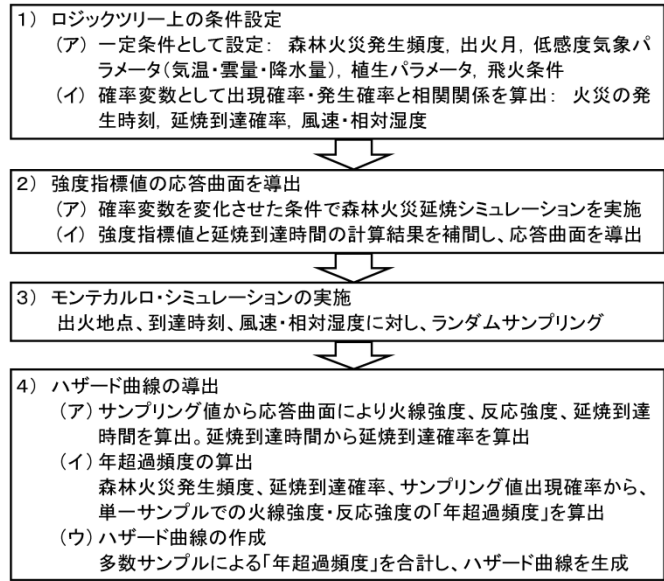


図5 森林火災ハザード曲線の評価スキーム

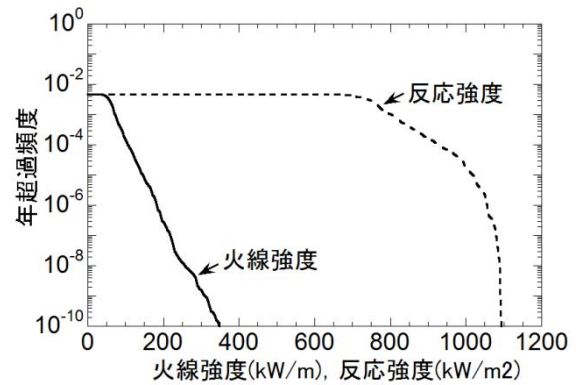


図6 火線強度・反応強度のハザード曲線

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

異常降雨に対する事象シーケンス評価手法開発のため、異常降雨によって地上や原子炉補助建物屋上の水位が上昇することにより雨水が建物内部に浸水し、没水・被水によって機器が機能喪失に至ると仮定した。水位上昇を防止するための設備として原子炉補助建物周辺及び屋上には排水設備があるが、流れて来る落ち葉などにより閉塞することを考えて閉塞確率を仮定した。閉塞時の復旧として、異常降雨発生時、及び一定時間後に作業員が閉塞物を除去する作業を行うと想定し、降水量に依存した閉塞物除去失敗確率モデルを構築した。次に、イベントツリーを構築し、閉塞除去失敗確率を取り入れてイベントツリーを定量化した。その結果、炉心損傷頻度は、10⁻⁶/年のオーダーであり、支配的なカテゴリは降水量が80mm/h、継続時間が20hであった(図7)。

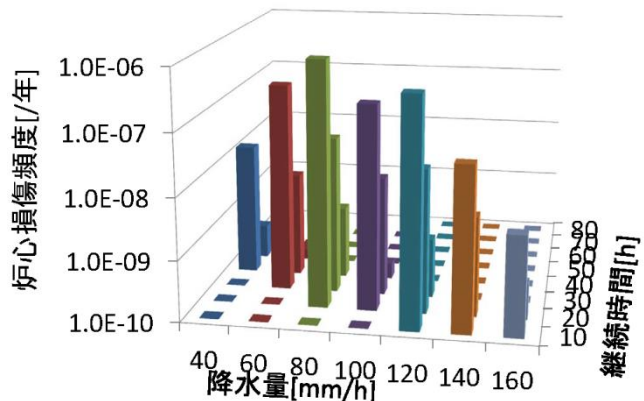


図7 異常降雨 PRA の炉心損傷頻度の内訳

活火山から適切な離隔距離があるため、火山灰のみを検討対象とした。降灰している状況では、崩壊熱除去機能への影響には空気取入口のフィルタ目詰まりが考えられ、それを考慮してイベントツリーを構築した。フィルタ閉塞には火山灰の大気中濃度と継続時間が重要である。大気中濃度は火山灰堆積物の層厚、継続時間及び降灰速度で求められ、降灰速度は火山灰粒子径を用いた終端速度と仮定した。すなわち、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る火山噴火ハザードを評価することとした。各機器の吸込み風量を用いてフィルタ破損限界までの猶予時間を求めて、それを用いて得られたフィルタ取替え失敗確率を機能喪失確率と設定した。火山噴火ハザード発生頻度と機能喪失確率を用いてイベントツリーを定量化した結果、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、ディーゼル発電機と換気空調系機能喪失後にフィルタ閉塞による自然循環除熱機能喪失であった。支配的な火山噴火ハザードは、大気中濃度 $10^{-2}\text{kg}/\text{m}^3$ 程度、粒径 0.1mm 、層厚 $50\sim 75\text{cm}$ 、継続時間 $1\sim 10\text{hr}$ であった。また、アクシデントマネジメント (AM) としてプレフィルタの設置を考案し、70%程度の低減効果があることを明らかにした (図8)。

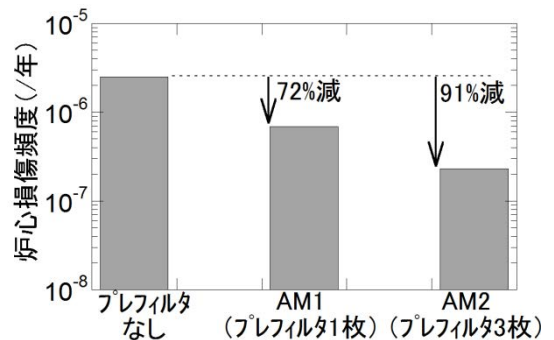


図8 火山噴火 PRA の感度解析結果

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

強風時におけるプラントへの影響は、非常用発電機 (DG) および補助冷却系空気冷却器 (ACS) の機能喪失が考えられる。そこで非常用発電機機能喪失の影響追加として、非常用ポニーモーターの機能喪失をモデル化した。またモンテカルロサンプリングについてシナリオ分析のためのツールを作成した。図9に炉心出口温度時刻歴変化 (サンプル数 200) を示す。非常用 DG が機能喪失した場合、炉心出口温度は急上昇しその後自然循環により徐々に温度は低下する。また炉心出口最高温度は自然循環モードへの切り替えに伴い一時的に発生するため、火災の最高温度に与える影響は小さい。強風発生時の非常用 DG および ACS の機能喪失確率が小さいため、確率を10倍とし、統計処理で確率を1/10に補正した終状態分布を図10に示す。強風におけるACS機能喪失は1%以下であり、また平均最高温度も積雪時における自然循環特性評価に比べ十分に低く、プラント状態はより健全であることが明らかになった。

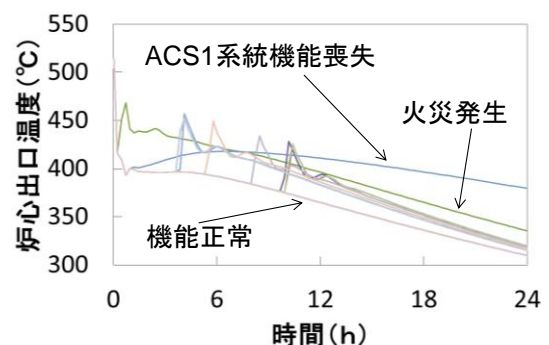


図9 炉心出口温度時刻歴変化

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、森林火災・重畳事象に対して、PRA 及びマージン評価の手法開発に取り組みたい。

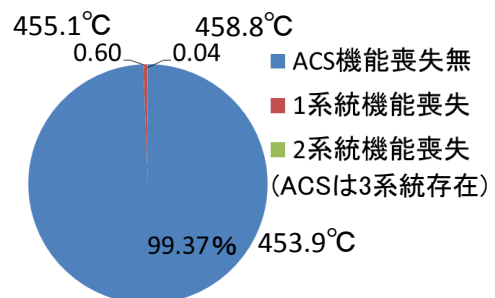


図10 終状態分布 (ACS 別)