

ナトリウム冷却型高速増殖炉の確率論的安全評価手法（レベル1 PSA）の開発

（受託者）独立行政法人日本原子力研究開発機構

（研究代表者）栗坂健一 次世代原子力システム研究開発部門 プラント安全評価グループ

（再委託先）学校法人東京電機大学、国立大学法人大阪大学

（研究開発期間）平成22年度～23年度

1. 研究開発の背景とねらい

本事業では、FaCT プロジェクトにおいて概念設計検討を進めているナトリウム冷却型高速増殖炉（JSFR）が有する自己作動型炉停止機構（SASS）と自然循環崩壊熱除去の受動的な安全機能（図1）や水平免震装置（図2）等の設計上、安全上の特徴を踏まえ、内的事象及び外的事象（地震）に対するレベル1 確率論的安全評価（PSA）手法を開発するとともに、既存の高速炉への評価手法の適用性を検討することを目的とする。手法開発における具体的課題は内的事象に対しては以下の①及び②の開発であり、外的事象（地震）に対しては③及び④の開発である。

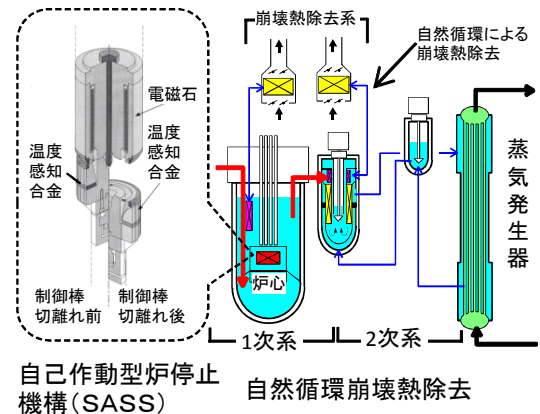


図1 JSFRの受動的な安全機能

- ①既存の高速炉での信頼性データ（運転時間、故障件数等）に基づく高速炉に特有の機器の故障率の評価手法、及び下記②に基づく高速炉に特有な受動的な安全機能を考慮した炉心損傷頻度評価手法。
- ②受動的な安全機能を考慮したプラント過渡挙動における現象の不確かさを考慮した受動的な安全機能の失敗確率評価手法。
- ③水平免震特性に及ぼす上下方向と水平方向の地震動の従来考慮されない連成効果を考慮した地震応答解析手法。
- ④免震建屋に特有な地震応答特性の非線形性を考慮した地震時の主要な建屋・機器の損傷確率の評価手法。

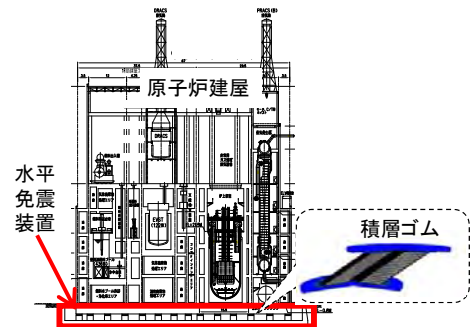


図2 JSFRの水平免震装置

2. 研究開発成果

上記①及び②については自然循環崩壊熱除去が可能な既存の高速炉へも適用可能な手法を開発し、③及び④については既存炉には適用できないが、免震装置を備えた将来の原子力施設へ適用可能な手法を開発した。以下に平成22年度～平成23年度の通年の成果を①～④の順に述べる。

2.1 高速炉の炉心損傷頻度評価手法

受動的な安全機能である自然循環崩壊熱除去機能を備えた高速炉を対象に、自然循環崩壊熱除去に係る現象の不確かさに起因する失敗を考慮した炉心冷却機能喪失に伴う炉心損傷の発生頻度を評価した。評価にあたっては、炉心冷却に必要な原子炉容器液位確保及び崩壊熱除去の成功基準を設定し、起因事象グループ毎に機能の成功・失敗の組合せによってイベントツリー（ET）を構築し、炉心冷却機能喪失に伴う炉心損傷シーケンスとして崩壊熱除去機能喪失などを同定した。崩壊熱除去の機能喪失要因をフォールトツリー（FT）で展開し、機器故障のみならず現象の不確かさによる崩壊熱除去の失敗を新たに考慮したFTを構築した（図3）。この新たに考慮した失敗とは、一般的なレベル1 PSAでの成功基準について不確かさを考慮したものと同等であり、その

失敗確率については後述の2.2節で評価した。一方、機器故障率及び起因事象発生頻度の評価にあたっては、類似プラントの運転・故障経験から評価する手法として、①類似の2プラント以上で故障事例を有する場合は、それらの観測データを基にプラント間の差異の評価が可能な階層ベイズ法を適用し、逆に、②故障事例が2プラント未満の場合はプラント間の差異が認められないことから類似プラントの観測データを一纏めにして非階層ベイズ法を適用するという新手法を提案し、観測データの無い新プラントの評価を可能とした。

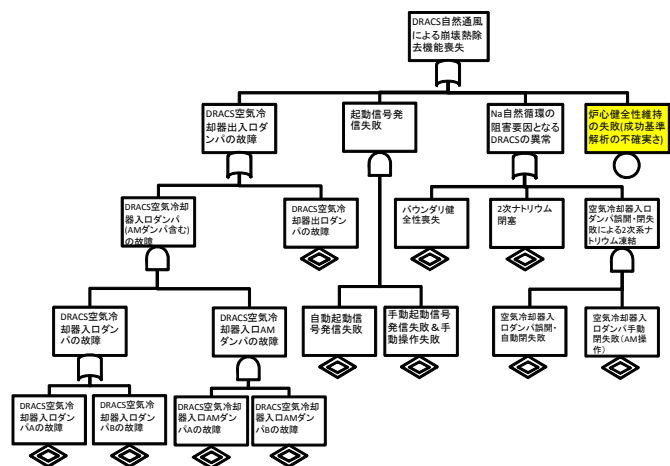


図3 自然循環崩壊熱除去に関するフォールトツリー

炉心損傷頻度をET/FT解析によって算出した結果 $\sim 10^{-8}$ /炉年であった。崩壊熱除去失敗の支配シーケンスは過渡事象に伴う原子炉停止後の崩壊熱除去系(3系統)の機能喪失かつ蒸気発生器の加圧室素による冷却機能の喪失であった。その主たる要因はサポート系である換気空調系が機能喪失して直流電源が機能喪失し、その結果、空気冷却器のダンパ制御不能に至り、かつダンパ手動制御などに失敗する場合であった。また、炉心損傷頻度の不確実さ解析において、同一データソースを取る複数の確率パラメータ間の相関性の度合いをパラメータとした感度解析を行い、相関性の度合いによって炉心損傷頻度の評価値が最大1桁程度変化することを把握した。以上より、自然循環崩壊熱除去を反映するためのモデルを構築し、炉心損傷頻度を評価した。

2.2 受動的安全機能の失敗確率評価手法

JSFRに対するレベル1 PSAを行うには、図1に示す受動的安全機能(SASS、自然循環崩壊熱除去)の信頼性評価を行い、その失敗確率を求める必要がある。この失敗確率は、通常のレベル1 PSAで用いる機器故障確率と異なり、安全機能に関する現象の不確実さにより決まる。そこで、新たに、受動的安全機能の失敗確率を図4の流れで評価する手法を構築した。

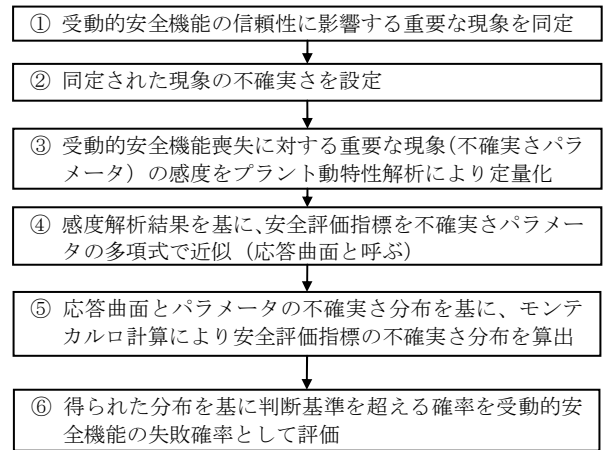


図4 受動的安全機能の失敗確率評価の流れ

自然循環による崩壊熱除去の評価対象事象として1次系共用型炉心冷却系(PRACS)2系統の同時機能喪失事象を設定した。不確実さパラメータの感度を調べるための自然循環崩壊熱除去のプラント動特性解析を実施するため、基準ケースとすべきパラメータ値及びモデルの取り扱いについて検討した。また、圧力損失及び1次・2次系統からの放熱については、予備感度解析を実施した結果、これらの影響は小さいことが示された。安全評価指標である原子炉容器出口冷却材最高温度は、基準ケースの解析結果では595°Cであることから、これを感度解析の基準とした。応答曲面作成用の感度解析を行うに当たり、対象とする不確実さパラメータとして崩壊熱、伝熱特性(IHX、DHX、DRACS空気冷却器)及び外気温度を選定した。崩壊熱及び空気冷却器の除熱量に影響する外気温度の感度は大きい、伝熱特

性は感度が小さいことが分かった。

感度解析の結果に基づき、冷却材バウンダリ最高温度を崩壊熱、伝熱特性などの多項式として表した応答曲面を作成した。応答曲面に基づき崩壊熱、伝熱特性などの不確かさを確率分布として考慮したモンテカルロ計算を実施し、その結果得られる原子炉容器出口冷却材最高温度の確率分布を基に、同温度が判断基準を超過する確率を自然循環崩壊熱除去の失敗確率と評価

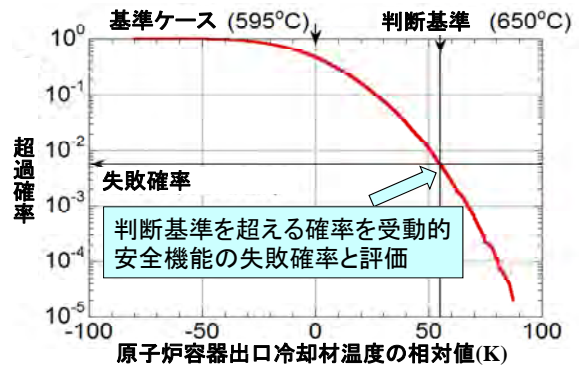


図5 1系統冷却時自然循環失敗確率評価結果

した。レファレンス条件で自然循環による崩壊熱除去失敗確率の値は $\sim 6 \times 10^{-3}/\text{demand}$ であった(図5)。また、不確かさ分布や不確かさ幅の影響を調べた結果、崩壊熱の不確かさ幅の影響は大きいものの、分布形の影響は小さく、伝熱特性の不確かさの影響は軽微であることを明らかにした。追加検討として、1系統の自然循環崩壊熱除去事象を対象にPRACS空気冷却器からの放熱を考慮した場合の失敗確率評価を行った。同様に、感度解析を行い、応答曲面を作成し、モンテカルロ計算を実施した結果、自然循環における崩壊熱除去失敗確率は $\sim 2 \times 10^{-4}/\text{demand}$ となることが分かった。以上より、受動的な安全機能の失敗確率評価手法を確立できた。

2.3 免震特性を考慮した地震応答解析手法

建屋及び内部機器への地震外力の影響を低減するため、JSFRでは図2に示す水平免震装置の導入が検討されている。免震装置は天然ゴム系積層ゴム(以下、積層ゴムと呼ぶ)とオイルダンパから構成される。積層ゴムは通常使用範囲において線形剛性を有するが、変形量が大きくなると非線形剛性を示す。そこで、積層ゴムの非線形性が建屋及び内部機器へ与える影響を解析的に検討した。

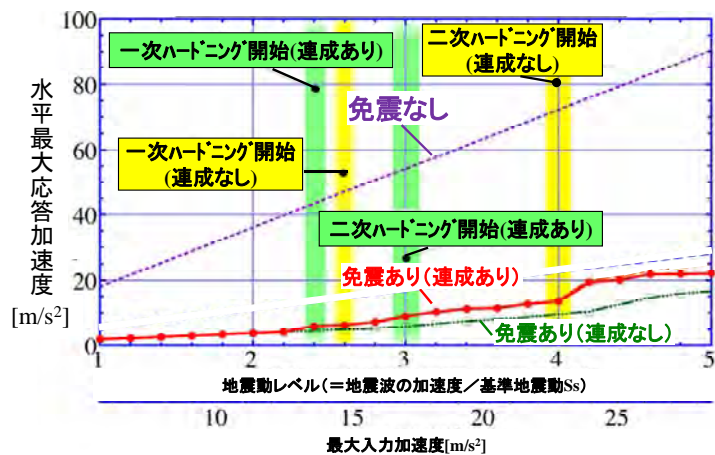


図6 原子炉容器据付け位置の加速度

水平動と上下動を連成させた免震建屋モデル、水平動と上下動の連成

を考慮した積層ゴムの水平方向の復元力モデルを構築し、同モデルのパラメータを設定した。水平方向の復元力の変形量小さい場合に線形性を示し、ある変形量を超えるとゴムのひずみ硬化に伴い、一次、二次のハードニングが生じて剛性が増加することによって復元力は非線形性を示すことも考慮した。また、積層ゴムの上下方向の復元力モデルを構築し、同モデルのパラメータを設定した。上下方向のうち、圧縮方向の復元力は常に線形性を示すが、引張り方向の復元力はある荷重を超えると一次、二次のソフトニングが生じて剛性が低下することによって非線形性を示すことも考慮した。基準地震動 S_s 相当の目標スペクトルを基に作成された設計用地震波 S_s を用いて、地震応答解析を実施した。その際、水平・上下方向それぞれ地震波の加速度を S_s の 1.0 ~ 5.0 倍まで 0.2 倍刻みで線形倍して入力し、21 ケースを解析した。その結果、図6に示すように、地震波の加速度に依存した原子炉据付位置の水平方向の最大応答加速度を得た。前述の解析

モデルと水平動と上下動を連成させない解析モデルを用いて得た解析結果と比較することによって連成効果を評価し、それらの結果を図6に示した。図6の黄色の縦帯は連成を考慮しない場合、緑の縦帯は連成を考慮した場合のハードニング開始点を表しており、加速度の小さい方から一次ハードニング、二次ハードニングを示している。図6に示すように、連成効果として剛性ハードニング開始点の変動し、より小さい地震波の加速度から最大応答加速度が非線形に増加することを明らかにした。

2.4 免震特性を考慮した損傷確率評価手法

図2の水平免震装置を導入した免震システムでは積層ゴムの非線形な挙動のため、機器の損傷確率の評価方法は耐震システムのそれとは異なることが予想される。そこで、損傷確率評価のための応答係数について、水平動と上下動の適切な組合せ等を考慮した設定方法を検討した。

応答の中央値に関する免震構造に由来する非線形性を考慮した新たな応答係数を導入し、ハードニング前後の応答加速度を解析した(図7)。また、応答の不確実さに対する非線形性を考慮するため、応答の不確実さに関する応答係数を導入し、損傷確率曲線を描いた(図8)。このように新たに2つの応答係数を用いることで、水平動のみの場合における機器損傷確率を評価する見通しが得られ、免震構造特有の応答の非線形挙動について応答の中央値と不確実さも考慮した応答係数の設定方法を提示した。さらに、上下動の非線形な水平免震特性への影響として上下動によるハードニング開始位置のずれを考慮できる応答係数の設定法も提示した。

一方、水平方向と上下方向の組合せ(それぞれを独立に評価した後の合成方法)については、耐震建屋における手法として知られているSRSS法(二乗和平方根)及び組合せ係数法の特徴を、本研究において評価した。その結果、免震構造への適用に関しSRSS法では、水平動と上下動の相関性、固有周期依存性に関する検討が必要と考えられる。また相関係数を導入することでSRSS法でも評価することは可能となるが、組合せ係数法は相関係数も含め組合せ係数を決定することのみで対応が可能のため、免震構造への適用性が高いことが分かった。

3. 今後の展望

JSFRの設計上、安全上の特徴を踏まえ、内の事象及び外的事象(地震)に対するレベル1 PSA手法を開発し、所期の目的を達成した。開発された本技術は、学協会標準に取り込むことが可能であり、波及効果は極めて高い。今後、内の事象についての本技術は受動的な安全機能であるSASSの失敗確率評価へ適用することが期待される。また、外的事象(地震)については、積層ゴムの加力試験により復元力モデルを検証し、地震応答解析手法及び損傷確率評価手法を高度化することが期待される。

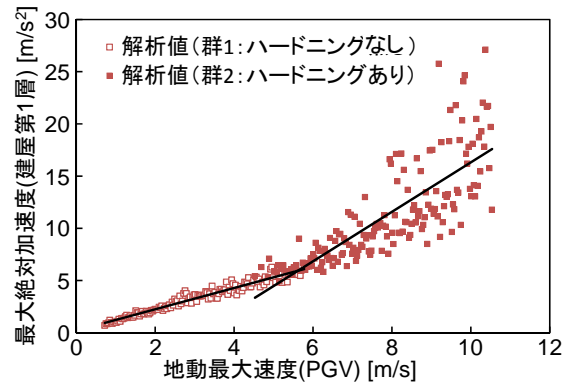


図7 免震システムでの応答の非線形挙動

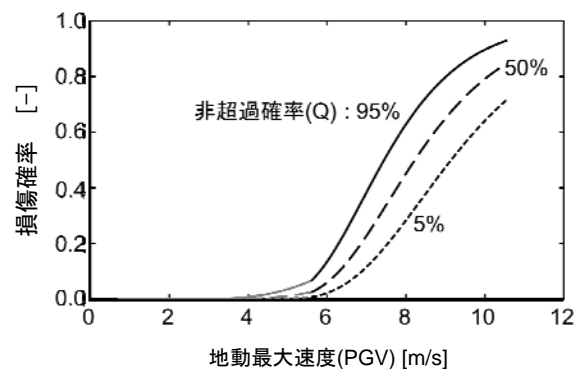


図8 免震システムを考慮した損傷確率曲線