

# 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) が有する受動的安全機能 (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、JSFR の炉心損傷頻度を分析すること並び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であり、外的事象 (地震) に対しては③及び④である。

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、及び高速炉に特有な受動的安全機能を考慮できる評価モデルを一般的な PSA 評価モデルへ付加した高速炉の炉心損傷頻度評価手法の開発。

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不確実さパラメータの影響を考慮できる受動的な安全機能の失敗確率評価手法の開発。

③従来考慮されない水平免震特性に及ぼす地震動の上下と水平方向の連成効果を考慮できる地震応答解析手法の開発。

④免震建屋に特有の非線形の地震応答特性を考慮できる地震時の主要な建屋・機器の損傷確率の評価手法の開発。

## 2. 研究開発成果

上記①～④の平成22年度成果を順に述べる。

### 2.1 炉停止失敗事象の評価手法

原子炉停止機能に係るレベル1 PSA 解析手法を開発するため、図1に示す受動的な安全機能のうち自己作動型炉停止機構 (SASS) を備えた JSFR を対象に、原子炉停止機能喪失に伴う炉心損傷の発生頻度を解析評価した。評価にあたっては、JSFR の設計情報等を基に起因事象として原子炉の運転を障害する制御棒誤引き抜きなどを選定するとともに、原子炉停止機能の成功基準として原子炉停止に必要な制御棒挿入本数などを設定した。

さらに、後述の2.2で評価する SASS の失敗確率を適切に反映するためのモデルとして、図3に示

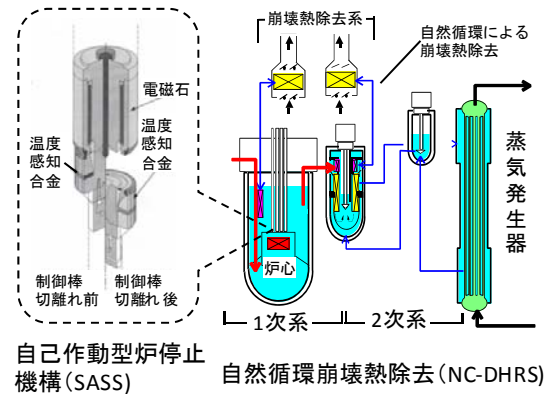


図1 JSFRの受動的な安全機能

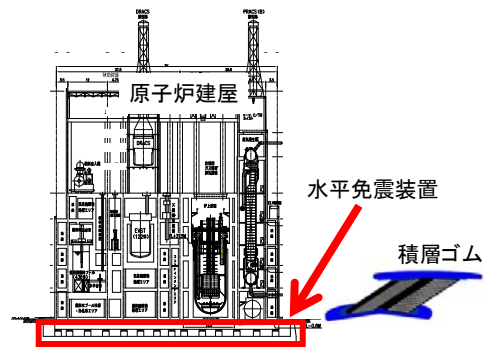


図2 JSFRの水平免震装置

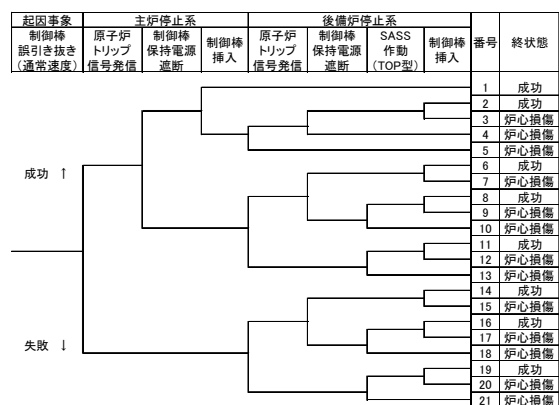


図3 SASSを考慮したイベントツリー

すように制御棒誤引き抜き時の原子炉トリップ信号発信失敗などに対して SASS による受動的原子炉停止の成功/失敗の分岐を展開したイベントツリー (ET) を構築した。ここで、図 3 の 4 番及び 5 番に至る炉心損傷シーケンスにおいて SASS による成功の分岐が無い理由は、主炉停止系制御棒保持電源遮断によるポンプトリップにより厳しい過渡事象へ移行することから SASS に期待できないことを考慮したからである。また、原子炉停止機能喪失に伴う炉心損傷シーケンスとして、起回事象発生時の原子炉トリップ信号発信失敗と SASS による受動的原子炉停止の失敗の組合せなどを同定し、その発生頻度の評価値及び不確かさ幅を得た。機器故障率及び起回事象発生頻度の評価にあたっては、観測データの存在しない新しいプラントの評価を行う必要があることから、類似とみなせるプラントの観測データを基に、プラント間の個性の評価が可能な階層ベイズ法を新たに適用した。炉心損傷頻度の不確かさ解析において、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、炉心損傷頻度の評価値への影響を調べた。相関性を無しとした場合と完全相関とした場合を比較すると、炉心損傷頻度の評価値に 1 桁程度の差異が生じる結果となった。これより、不確かさがもたらす影響の一つとして炉心損傷頻度の評価値への相関性の度合いの感度を調べることは重要と言える。

## 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 を行うに当たり、図 1 に示すような SASS や自然循環崩壊熱除去 (NC-DHRS) といった受動的安全機能の信頼性評価を行い、その機能喪失の確率を求める必要がある。一方、通常のレベル 1 PSA で用いられる機器故障確率と異なり、受動的安全機能の信頼性は安全機能に関係する現象の不確かさにより決まる。そこで、新たな手法として、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する。平成 22 年度は、図 4 のうち、①及び②を実施した。

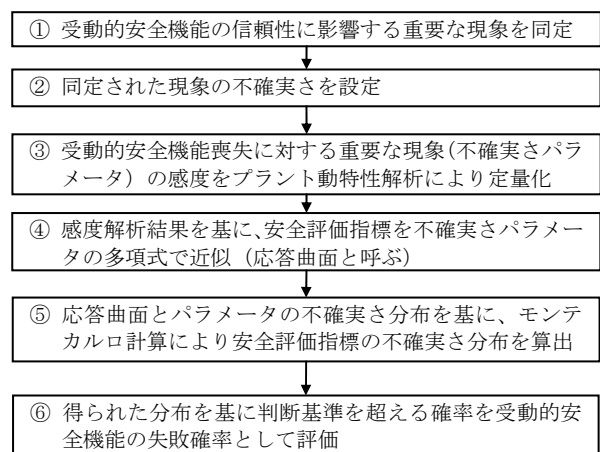


図 4 受動的安全機能の失敗確率評価の流れ

SASS に関する評価対象事象として、異常な過渡変化時炉停止失敗事象のうち下記の典型的な 3 事象を設定した。注目すべき安全評価の指標には、事象推移の特徴を考慮して、流量喪失時スクラム失敗事象では冷却材最高温度、過出力型スクラム失敗事象では燃料溶融割合、除熱源喪失型スクラム失敗事象では冷却材バウンダリ最高温度を設定した。炉心や炉心上部等の物理領域毎に SASS の不作動要因として SASS 初期温度、SASS 切離れ温度などを抽出した。それらの要因の中から、炉心およびバウンダリの健全性に及ぼす影響度や不確かさを考慮して、SASS 作動に関する重要現象の同定 (SASS 不作動要因の抽出) を実施し、重要度ランキングテーブルを作成した。炉心損傷と判定する判断基準値までの余裕を考慮して、感度解析対象を絞り込んだ。既往試験データ等を基に正規分布や一様分布等の不確かさ分布を設定した。

自然循環崩壊熱除去機能の評価対象事象として、1 次系共用型炉心冷却系 2 系統の同時機能喪失事象を設定した。注目すべき安全評価の指標には、事象推移の特徴を考慮して、冷却材バウンダリ最高温度を設定した。炉心や炉心上部等の物理領域毎に自然循環による崩壊熱除去の阻害要因として炉心部全体の圧損などを抽出した。それらの要因の中から、バウンダリの健全性に及ぼ

す影響度や不確実さを考慮して、自然循環崩壊熱除去機能に関する重要現象の同定（自然循環崩壊熱除去機能喪失要因の抽出）を実施し、重要度ランキングテーブルを作成した。また、感度解析対象を絞り込んで、正規分布等の不確実さ分布を設定した。

### 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。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シミュレーション解析により検討した。解析では建屋を質点系モデル、積層ゴムの復元力特性を折線モデルで表現した。

積層ゴムが水平方向に持つハードニング特性が応答に与える影響を検討した。基準地震動相当の地震波を入力波とし、入力振幅（地震レベル）を 5 倍まで増加させた際の応答の変化を検討した。図 5 に地震動レベルと応答の関係を示す。図 5 より、地震動レベルが 2.4 倍でハードニングが発生し、ハードニングの進展に合わせて建屋の応答加速度が非線形に増加していくことが確認出来る。一方、一度ハードニングが発生するとハードニング開始変位が伸びることから、積層ゴムの変形量は地震動レベルに比例して増加している。

積層ゴムや建屋の各パラメータが地震応答に与える影響を検討するため、感度解析を実施した。解析結果として、図 6 に建屋応答加速度に対する各パラメータの感度を示す。図 6 に示す通り、基準地震動では積層ゴムが線形域で変形するため建屋のパラメータの感度が高いのに対し、基準地震動の 5 倍では積層ゴムにハードニングが発生するため積層ゴムの感度が高くなることを確認できる。これは、ハードニングにより、積層ゴムによる周期と上部建屋の周期とが近接するためである。

### 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、免震システムにおける既存知見の整理を行うとともに、機器応答の不確かさが損傷確率曲線におよぼす影響について検討した。

免震システムでは、機器の損傷に関する指標（損傷確率曲線における横軸）として地動最大速度 (PGV) もしくは免震装置の固有周期での速度応答スペクトル (Sv) が好ましいとされる<sup>[1], [2], [3]</sup>。図 7 に地震動をパラメータとした建屋応答の不確かさ評価例<sup>[1]</sup>を示す。200kine 以降で免震装置

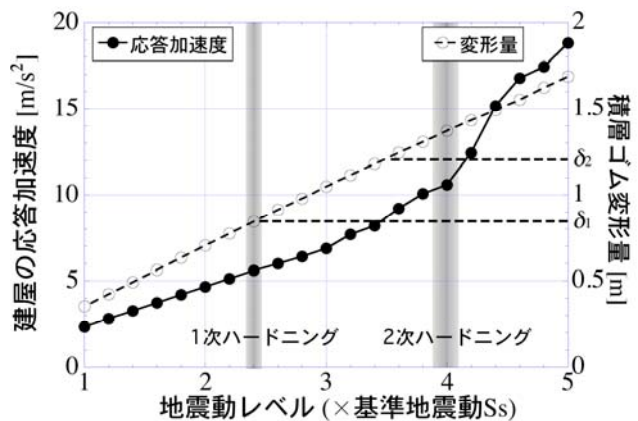


図 5 地震動レベルと応答

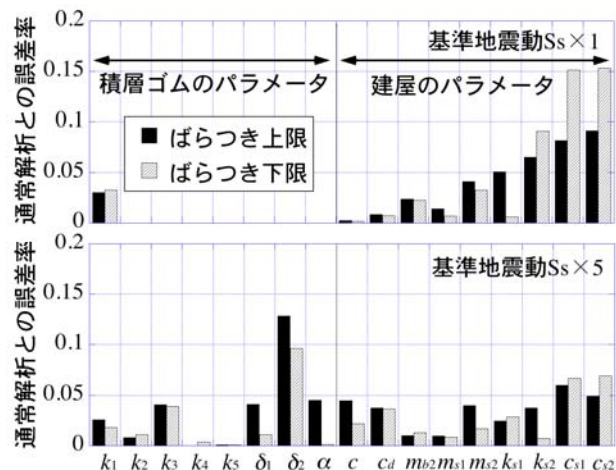


図 6 各パラメータの感度

を構成する積層ゴムのハードニングが生じ、300kine 以降で建屋の塑性応答開始領域となっており、非線形挙動が顕著となっている。機器の損傷確率  $F(V)$  は、耐力  $R$  と応答  $S$  の比  $(R/S)$  が対数正規分布（応答および耐力が対数正規分布に従う）

とすると、以下の式で表される<sup>[1]</sup>。

$$F(V) = \Phi\left(\frac{\ln(Rm(V)/Sm) + \beta_u \Phi^{-1}(Q)}{\beta_r}\right) \quad (1)$$

ここで、 $Rm(V)$  は地震動強度  $V$  における応答の中央値、 $Sm$  は耐力の中央値である。 $\Phi$  は標準正規分布であり、 $Q$  はシステム不確かさを考慮した非超過確率である。 $\beta_r$ 、 $\beta_s$  はそれぞれシステム不確かさおよびランダム不確かさを表す対数標準偏差である。

従来手法<sup>[1]</sup>では、 $\beta_r$ 、 $\beta_s$  を一定値としているが、図7に示すように応答の不確かさ（ばらつき）はそれぞれの領域（ハードニング開始前後等）で異なっている。図8に各領域での不確かさを文献値より計算した結果を示す。ハードニング開始に伴い不確かさは急激に上昇し、徐々に一定値へと減少する。図8を基に(1)式より損傷確率曲線を再評価した結果を図9に示す。なおばらつき一定については従来手法と同様（450kine 近傍での値）とした。図9に示すように各領域での不確かさが損傷確率曲線に与える影響は大きい。

免震システムにおける既存知見を整理するとともに、機器応答の不確かさが損傷確率曲線におよぼす影響について検討した結果、損傷確率曲線の指標として、PGV または免震装置の固有周期における  $S_v$  が有効である結論を得た。また、免震システムの非線形挙動にともなう不確かさ幅の変動が損傷確率曲線に与える影響は大きいことが明らかになった。

### 3. 今後の展望

冒頭の1. で述べた目的を達成するため、既存の高速炉への評価手法の適用性を検討するとともに、具体的課題として以下を予定している。①自然循環崩壊熱除去を考慮した炉心冷却機能に係るレベル1 PSA 解析を実施するとともに炉心損傷頻度を分析する。②自然循環崩壊熱除去を対象にプラント動特性解析の感度解析を行い、失敗確率を評価する。③上下動が積層ゴムの水平免震特性に及ぼす影響を把握するため、水平と上下を連成させた解析を実施する。④水平動と上下動の組合せ等を考慮した損傷確率評価のための応答係数の設定法を提示する。

### 4. 参考文献

- [1] 平田他, 電力中央研究所研究報告, U92021, 1992.
- [2] K. Hirata et al., Nucl. Eng. and Design, 128, 227-236, 1991.
- [3] J. M. Nau et al., J. of Structural Engineering, ASCE, 110, No. 7, 1984.

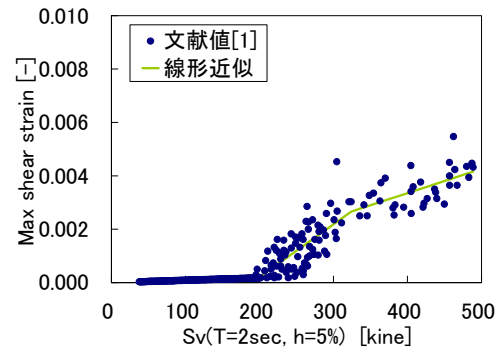


図7 応答中央値<sup>[1]</sup>評価

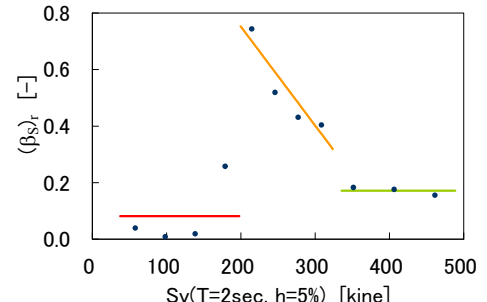


図8 応答の不確かさ

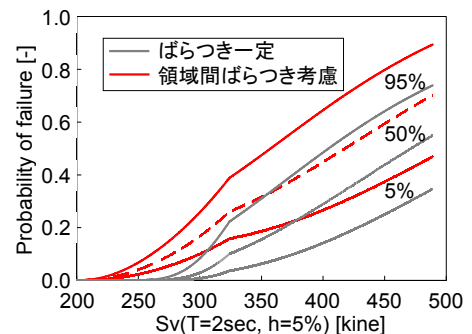


図9 損傷確率曲線への影響