

# リスクマネジメント基盤技術としての地震リスク評価の 信頼度向上に関する研究

(受託者) 学校法人五島育英会 東京都市大学

(研究代表者) 村松健 工学部原子力安全工学科

(再委託先) 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構、国立大学法人 東京大学、

株式会社 シー・エス・エー・ジャパン

(研究期間) 平成 24 年度～26 年度

## 1. 研究の背景とねらい

原子力発電所の安全性向上への継続的努力を合理的に進めるための技術基盤として、地震起因事象の確率論的リスク評価(地震 PRA)は有力な検討手段である。しかし、地震 PRA の一層の活用を図る上で、不確実さの評価や意思決定における不確実さの考慮方法が課題となっている。

本研究では、地震 PRA における炉心損傷頻度評価に伴う不確実さをより適切に取り扱うための新たな数学的枠組みと専門知を活用した脆弱性評価の手法を検討・提案するとともに、その適用に必要な地震時システム信頼性解析用計算コードを開発し、試解析によりその有用性を示すことにより、地震 PRA の信頼度を向上させ、活用促進に資することを目的とした。

## 2. これまでの研究成果

### (1) 確率モデル及び認識論的不確実さの取り扱いに関する検討

#### 1) 確率モデルの検討

まず地震 PRA の数学的な枠組みについてレビューし、従来法の数学的枠組みでは、次のような課題があり、それが不確実さの低減に障害となっていることを指摘した。

- 地震ハザードを最大加速度という 1 個のパラメータで表すため、震源特性とサイトで生じる地震動のスペクトルの関係を十分に表現できない場合がある
- 建屋/機器の応答評価では比較的単純な質点系モデルや応答係数法を使うことから、機器応答の相関性を表現しにくい
- システム信頼性解析においてミニマルカットセット法を使うという数値計算上の制約から炉心損傷頻度にかかなりの誤差が生じる可能性がある

このレビューに基づき、改善方法を検討し、次の 4 要素からなる枠組みを提案した。

- ① 地震ハザードを発生頻度の重み付きの時系列波形の集合で表現する。
- ② 建屋応答解析を 3 次元の確率論的応答解析により行う。
- ③ 炉心損傷頻度評価には、モンテカルロ法によるフォールトツリー定量化手法を用いる。
- ④ 以上の計算を実現するためにスーパーコンピュータによる並列計算を活用する。

次いで、この枠組みで炉心損傷頻度の不確実さを評価する計算手順を検討した。その結果、システムモデルへ多数の地震波に対する応答解析結果を直接入力する方法(直接法)が望ましいものの、3 次元の建屋応答解析を個別機器の応答のバラツキや相関まで表現するだけの回数行うことは現実には不可能であるため、将来それを実現することを念頭に、当面の現実的な手順を検討すべきとの結論に至り、現実的方法として次の 2 種類の、より簡略な方法を提案した。

第 1 の方法： 3 次元解析の結果の確率的分布をある程度の精度で模擬できる数だけ実施して、その結果を応答係数法で再現するように、最小二乗法などの統計分析によって応答係数の中央値、標準偏差、相関係数などを定める

第2の方法： より少数の3次元モデルまたは質点モデルによる感度解析に基づいて、応答係数の不確かさの幅を解析者の判断で設定する

今後は、第1及び第2の方法の適用を先ず実用化し、並行して最初に述べた直接法の実現方法を検討して行くことが有効なアプローチと考えられる。

2) 計算コードの開発

JAEA で開発された地震起因事象による炉心損傷頻度評価用コード SECOM2 コードをベースとして、上述の提案手法に対応するための改良を行った。これにより応答係数法に基づく炉心損傷頻度の不確かさ解析が実施可能となった。さらに発展的な不確かさ解析を行うために、コードを改良し、重要度指標の不確かさ解析機能と、相関性を考慮した炉心損傷頻度の不確かさ解析機能を追加した。これらの機能は、世界的にも、同種コードにない特徴である。(後述の計算結果参照)

(2) フラジリティ評価における認識論的不確かさの評価に関する検討

1) 認識論的不確かさに関する専門知の抽出とガイドの作成

建屋・機器のフラジリティ評価では認識論的不確かさの評価が不可欠であるが、既往の研究においては、十分な評価がなされているとは言い難い。本研究では地震ハザード評価の分野で開発されてきた専門家の意見を活用する手法をベースとして、建屋・機器の地震応答解析に関する認識論的不確かさの特定と定量化の方法論を構築した。

まず、建屋・地盤・地盤-建屋の相互作用のモデル化に係る既往資料の調査・整理を行い、意見抽出のための参考として専門家に提供すると共に質問項目の設定に用いた。次に、専門家委員会を設置して、解析モデルに関する認識論的不確かさに関する専門知を抽出するためのアンケート調査を行い結果を整理した。さらに、それを基に専門家グループによる議論を深め、個別プラントの特性によらない共通部分について、「標準専門知ツリー」(図1に例を示す)として整理した。

最後に、整理した結果を基に、フラジリティ評価のためのガイドの作成を行った。認識論的不確かさの評価フローでは、専門知を標準専門知とサイトやプラント固有の専門知(固有専門知)に分類し、前者は「標準専門知ツリー」により、後者については複数専門家を活用して個別に評価するという流れとした。

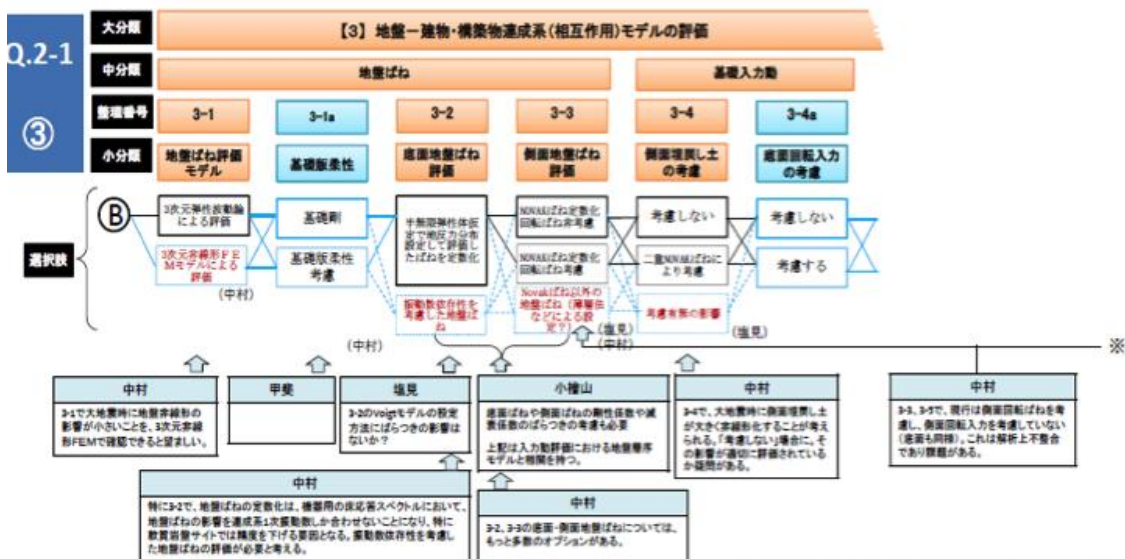


図1 専門家知を整理して提示するために用いたロジックツリーの例

## 2) 建屋・地盤に関する検討

専門家意見抽出時の参考情報として、モデルプラントを設定して建屋・応答解析のための3次元FEM及び質点系モデルモデルを整備し、様々な感度解析を行った。

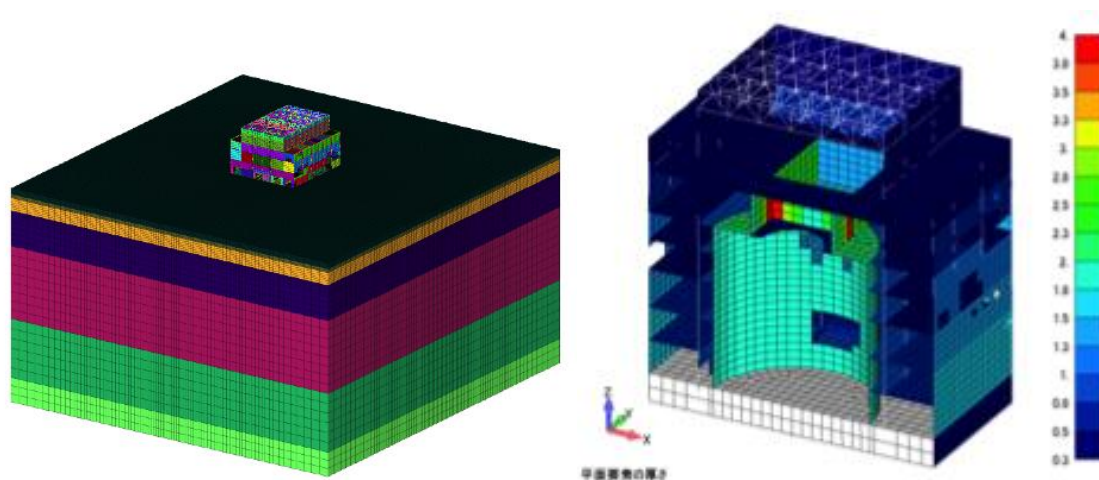


図2 3次元FEM解析に用いた地盤モデルと建屋モデル

まず、評価結果に大きい影響を与えるパラメータを選定するために、専門家が挙げた不確かさ因子を参考に、1) コンクリート強度の影響、2) 解析対象壁の影響、3) 側面回転ばねの影響、4) FEMモデルとSRモデルの比較、床柔・床剛モデルの影響、5) 地盤の物性値、6) 質点系モデルのイメージなどについて国内機関の研究成果の調査・整理を行った。次いで、この調査結果等をもとに、建屋や機器の応答の不確かさにかかわる感度解析項目を選定した。

解析に先立って、モデル妥当性検証のために、新潟県中越沖地震の観測シミュレーション解析を実施し観測記録と比較し、間仕切り壁の考慮などモデル上の調整を行った。次いで、これらのモデルを用いて広範な地震応答の感度解析を実施し、重要機器の取り付け位置における床応答を整理した。最後に、感度解析の結果を整理して専門家グループへの参考情報として提供すると共に、得られた結果をガイドに反映させた。

## 3) 機器・配管に関する検討

機器・配管等に関する検討では、機器のフラジリティとその不確かさを解析的に評価する手法を検討し、不確かさ因子の選定や不確かさ幅設定に関するガイドを提示することを目的とした。

まず代表的な機器タイプを選定して、入手可能な限界耐力に関する試験データを調査、分析することにより、損傷モード、損傷基準、不確かさ因子等に関する情報を導出した。

また、機器・配管系に関する専門家サブグループを設置し、不確かさ因子の同定と定量化について調査及び試行を行い、専門家の知識の活用手法を検討した。

試験データの調査、コードによる解析、専門家会議の開催を通して、機器・配管系のフラジリティ評価を行う上でのガイド作成に向けた基礎情報を収集することが出来た。

### (3)モデルプラントでの試行研究による有用性の実証

提案した手法及び開発した解析コードの有用性を示すことを目的として、モデルプラントでの炉心損傷頻度評価の試行を行った。モデルプラントのモデルは、JAEAで実施された軽水炉モデルプラント(BWR5)の地震PRAをベースとし、ABWRに関する公開情報等を感度解析の参考とした。この試行により、重要度指標の不確かさを定量化するとともに、感度解析により機器応答の相関性の考慮及び応答や耐力の不確かさの低減が炉心損傷頻度の評価に与える影響を検討した。その

結果、応答の相関を無視すると炉心損傷頻度の不確かさを過小評価する可能性があるという新たな知見を得ると共に、応答及び耐力の不確かさが低減されると炉心損傷頻度の評価値が大きく低減される可能性があることを確認した。解析結果の例として、図3に、各安全設備の耐震性向上が炉心損傷頻度をどれほど低下させるかを表すFV指標を不確かさと共に示す。この図から点推定値はほぼ平均値と一致するが、数値の不確かさは相当に大きいことが明らかになった。

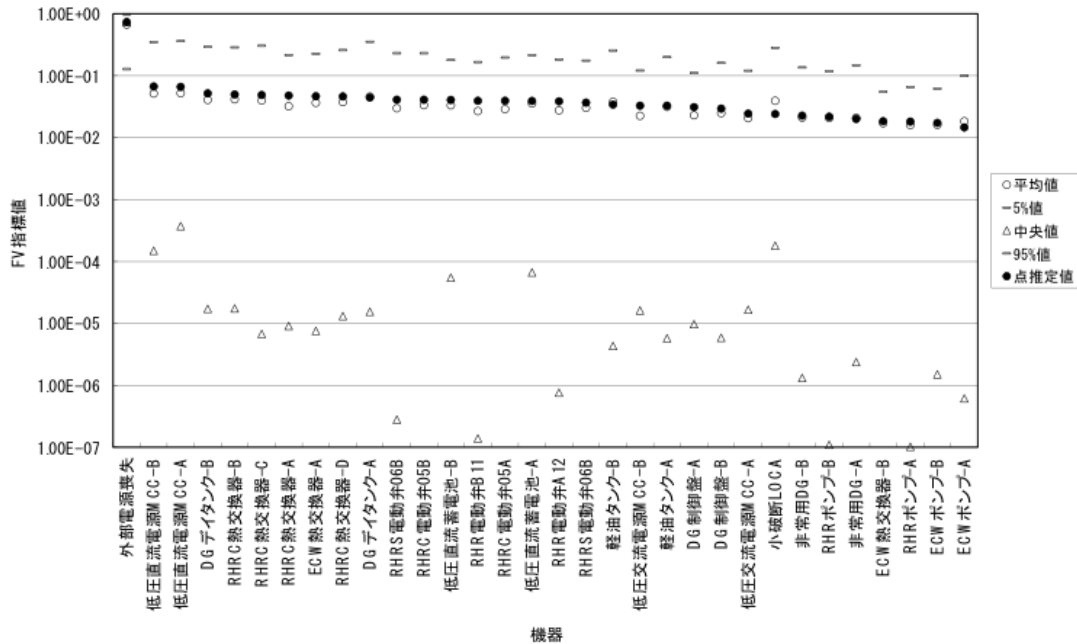


図3 重要度指標の不確かさ解析結果

### 3. 今後の展望

本研究で作成されたフラジリティ評価に関するガイドは、認識論的不確かさを評価する際に大いに参考となるものであり、地震リスク評価の実施手順などの学協会規格等の充実化に役立てるよう努めたい。また、SECOM-2コードの改良版は、プログラミングの検証、ユーザーインタフェースの整備などを行って、公開し、我が国における地震リスク評価の活用に使われる予定である。

### 4. 参考文献

- (1) H. Muta, K. Muramatsu, O. Furuya, T. Uchiyama, A. Nishida, T. Takada, “Reliability Enhancement of Seismic Risk Assessment of NPP as Risk Management Fundamentals, “Part I: Uncertainty Analysis with the SECOM2 Code”, Transactions, SMiRT-23, Manchester, United Kingdom - August 10-14, 2015, Division VII, Paper ID 330.
- (2) T. Takada, T. Itoi, A. Nishida, O. Furuya, K. Muramatsu, “Reliability Enhancement of Seismic Risk Assessment of NPP as Risk Management Fundamentals, Part II Quantifying Epistemic Uncertainty in Fragility Assessment Using Expert Opinions”, Transactions, SMiRT-23, Manchester, United Kingdom - August 10-14, 2015, Division VII, Paper ID 448.
- (3) A. Nishida, B. Choi, T. Itoi, T. Takada, O. Furuya, K. Muramatsu, “Reliability Enhancement of Seismic Risk Assessment of NPP as Risk Management Fundamentals, Part III Sensitivity Analysis for the Quantification of Epistemic Uncertainty on Fragility Assessment”, Transactions, SMiRT-23, Manchester, United Kingdom - August 10-14, 2015, Division VII, Paper ID 336.