

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 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 国立大学法人東京大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構、
株式会社シー・エス・エー・ジャパン
研究開発期間 平成24年度～26年度

1. 研究開発の背景とねらい

福島第一原子力発電所事故を受けて原子力発電所の安全強化が進められているが、中長期的には、安全向上への継続的努力が必要である。地震起因事象の確率論的リスク評価（地震PRA）は、合理的な改善方策を検討するうえで有力な技術基盤であるが、一方で、その活用は円滑に進んで来たとは言えない。その原因の一つとして、不確かさの評価やその意思決定での考慮方法に関する十分な検討及び合意形成がなされていないことが考えられる。

そこで、本研究では、地震PRAの手法について炉心損傷頻度評価に伴う不確か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フラジリティ評価の手法を検討・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することにより、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て、次の4項目を実施する。

- 1) 確率モデル及び認識論的不確かさの取り扱いに関する検討
- 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
- 3) モデルプラントでの試行研究による有用性の実証
- 4) とりまとめ

2. 研究開発成果

(1) 確率モデル及び認識論的不確かさの取り扱いに関する検討

1) 確率モデルの検討

24年度には、炉心損傷頻度を評価するための数学的な枠組みについて既往手法をレビューし、その結果として、従来法の数学的枠組みにおける地震ハザードをサイト解放基盤での最大加速度など1個のパラメータで表すこと、建屋/機器応答評価において比較的単純な質点系モデルや応答係数法を使うこと、などの要因が、損傷確率やシステム信頼性の不確かさを低減するうえで障害となっていることを明らかにし、それを改善するための新たな枠組みとして、3次元建屋応答モデルを用いた確率論的応答解析の利用を中心とする手法を提案し、25年度からその具体化に向けた検討を進めた。

提案した枠組みでは、イベントツリーやフォールトツリーを用いたシステムモデルへ入力する多数の機器のフラジリティ評価のための建屋応答解析について、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を基本手法として、その実施手順を示した。また、これに加えて第2の方法として、効率的に不確かさ評価を行うために、多数の地震波に対する応答解析結果を応答係数等の形式に整理した上で入力する方法を提案した。その特徴は、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といったものである。さらに26年度には、第3の方法として、より従来法に近い方法として、

3 次元解析による個別的な感度解析結果を、専門家判断を介して、従来法の枠組みにおける応答係数の不確実さ幅や相関係数の設定に用いる方法についても検討した。

2) 計算コードの開発

24年度には原子力機構で開発されたシステム信頼性解析コードSECOM2-DQFMコードをベースとして不確実さ解析を現実的な計算時間で実施するために並列計算の枠組みを実装した。25年度は、1)で提案された数学的枠組みを実装するための計算コード設計を進め、応答係数法に基づく炉心損傷頻度計算について、不確実さ解析を実施可能とした。さらに26年度には機器耐力の炉心損傷への影響度を表現する重要度指標の不確実さ解析を可能とした。

(2) フラジリティ評価における認識論的不確実さの評価に関する検討

1) 全体総括

建屋・機器フラジリティ評価においては認識論的不確実さの評価が不可欠である。しかしながら既往のPRA手法の研究においては、認識論的不確実さに関して十分な評価がなされているとは言い難い。そこで本研究ではハザード評価において開発されてきた専門家の意見を活用する手法を用いて、建屋・機器の地震応答解析モデルに関する認識論的不確実さの特定と定量化を試みる。

24年度には専門家グループの立ち上げ及び基礎的検討を行い、25年度には特に建屋のモデル化に焦点を当て、専門知の抽出とその整理を試みた。原子炉建屋のモデル化に関わる認識論的不確実さに対処するため、専門家意見を利用する枠組みについてアンケートと意見交換の会議を組み合わせる方法で実施した。その結果、専門家の意見に基づいて感度解析を行い、その結果をフィードバックする手順が極めて有用であることを確認した。

具体的には、解析モデルや建屋モデル化に関する認識論的不確実さに関して、専門家から専門知を抽出するためにアンケート調査を実施してその結果を整理した。さらに、それを基にして専門家グループによる会議を開催して議論を深め、出された意見から専門知に関して整理を行った。また、整理した結果を基に、地震時の確率論的リスク評価(PRA)を行う際のフラジリティ評価のためのガイド骨子案の作成を行った。

26年度には、得られた専門知を体系化するための枠組みとして、ロジックツリーを用いる手法を提案した。この手法は、いわゆる「ロジカルシンキング」の基本的な手法であり、思考の過程を視覚化しやすいこと、作成のルールがある程度決まっていること、また何人かと共同で作成することができる、といった点で、不確実さの整理にも適している。これを用いて影響因子の分類と各因子の影響を検討するための手法や知見の整理を進めた。図1にロジックツリーの例を示す。



図1 不確実さ因子に関する専門知の整理のためのロジックツリー (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、JAEAにおいて建屋応答の感度解析を実施している。平成24年度には、このための質点系モデル及びFEMモデル作成用のデータを整備し、25年度にはこれを用いた感度解析や応答解析を実施するとともに、原子炉建屋や機器のフラジリティ評価において考慮すべき建屋関連の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試作した。具体的には次の通りである。パラメータ選定のための資料調査では、応答に影響を与えると思定される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) 質点系モデルなどについて、旧(独)原子力安全基盤機構等の国内資料の調査を実施した。

次いで上記調査等をもとに、建屋や機器の応答の不確かさにかかわるパラメータを選定した。

さらに、使用するモデル等の妥当性検証のために、新潟県中越沖地震の応答シミュレーション解析を実施し、解析結果と観測記録を比較し、妥当性を確認した。また、地盤及び建屋に関する影響因子の感度解析からは、設定したパラメータによっては、面外振動等に感度がある事を確認した。また基本モデルに対する応答比とばらつきについて整理を行った。

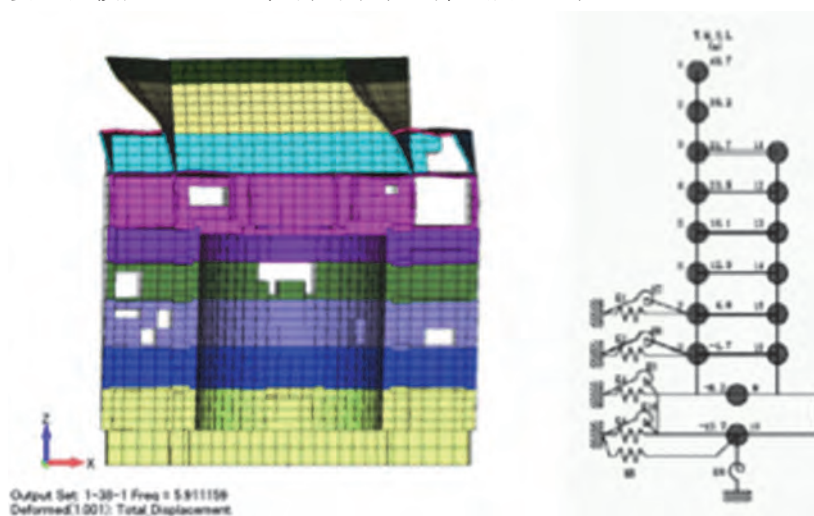


図2 感度解析に用いた質点系モデル及びFEMモデル

また3次元FEMモデルを用いて地震応答解析を実施し重要機器の取り付け位置における応答結果を整理した。質点系モデルと3次元FEMモデルで解析結果を比較し、3次元FEMモデルでは短周期側で耐震壁の面外振動による感度がある事を確認した。また、入力による影響(3方向同時、1方向入力)についても感度解析を実施し、若干の影響がみられる事を確認した。

26年度には、感度解析から得られた結果を、ロジックツリーで分類された不確かさ因子の項目分類に沿って整理して専門家に提示すると共に、引き続き観測地震動との比較も含めて感度解析等を実施し、専門家グループへの参考情報提供を行うと共にガイドの検討を進めている。

3) 機器配管に関する検討

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て、平成24年度に機械系の専門家グループを組織するとともに、参考情報の収集及び専門家意見抽出を開始した。25年度には、引き続き代表的な機器及び配管系を2例程度選定して、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。試験データの分析においては、計算機といくつかのコードを用いて解析・評価を行った。また、専門家グループにおいては、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った。これら

の調査、コードによる解析、専門家会議の開催により、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できた。

(3) モデルプラントでの試行研究による有用性の実証

炉心損傷頻度及びそれへの寄与度を表す重要度指標、並びにそれらの不確かさを評価し、提案手法の有用性を示すことを3年間の目標とし、24年度に検討した方針を基に、25年度には応答係数法に基づく評価手順を定めた。またさらに、できる限り現実的な評価が行えるよう24年度に調査、収集した安全設備のシステム設計の情報を拡充するとともに既往の地震PRAで用いられている耐力データ等の情報を収集した。

モデル構築と試解析・分析として、上述で示された手順に従ってFT、ET等のシステムモデルについて見直し・拡充を行うとともに、SECOM2-DQFMコードによる解析を行った。

25年度には、改良したSECOM2-DQFMコードにより、応答係数法に基づく事故シーケンス発生頻度の不確かさ評価が可能なることを、BWR5及びABWRの2種のシステムモデルにより確認した。また26年度には、機器の重要度指標に関する不確かさ解析の機能についても確認した。試算例を図3に示す。

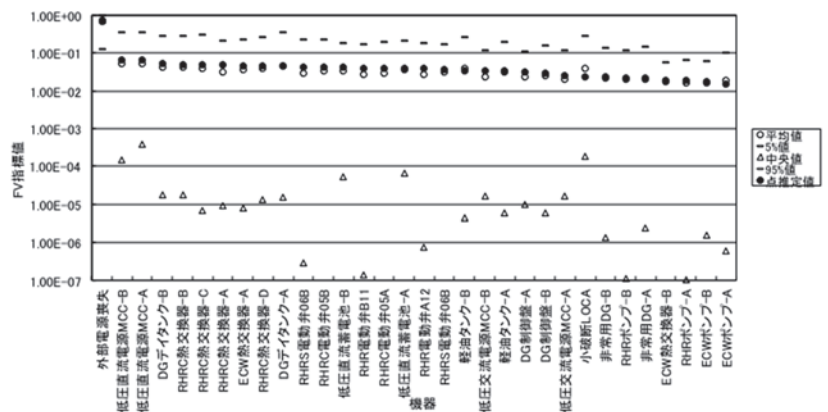


図3 機器に関する重要度指標の不確かさ試算例

(4) とりまとめ

本事業の的確な運営と効果的な成果伝達を図るため、有識者及び産業界関係者6名で構成するレビュー委員会を設置し助言を受けるとともに、公開のワークショップを開催し、電気事業者、メーカー、建設会社等の地震PRAの実務者・専門家約60名の参加者を得て25年度成果の報告と意見交換を行った。さらに24年及び25年の日本原子力学会秋の大会及び24年及び25年の地震工学会にてそれぞれシリーズ発表を行った。

3. 今後の展望

確率モデルの検討では、SECOM2-DQFMコードの改良を進め、従来法の枠組みに加えて、3次元の確率論的応答解析の結果を反映できる枠組みにより炉心損傷頻度評価を行うコードを作成する。またモデルプラントを想定した地震PRAモデルを用いて試算を行う予定である。さらに専門知の活用については、建屋・地盤系及び機器系の専門家グループを中心に、質点系モデルとFEMモデルを用いた感度解析を活用しつつ、不確かさ因子の検討を進め、不確かさ評価を実施する際の参考となる事項を整理し、ガイドにまとめる。

4. 参考文献

- (1) 「Study on Next Generation Seismic PRA Methodology Part II: Quantifying Effects of Epistemic Uncertainty on Fragility Assessment」、Akemi Nishida、Tsuyoshi Takada、Tatsuya Itoi、Osamu Furuya、and Ken Muramatsu、PSAM12、Probabilistic Safety Assessment and Management、No. 539、2014.