

原子力プラントの包括的安全性向上のための地震時クリフエッジ回避技術の開発

(受託者) 国立大学法人 東京大学

(研究代表者) 高田 毅士 大学院工学系研究科

(再委託先) 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構、

東京電機大学、埼玉工業大学、東京都市大学

(研究期間) 平成 27 年度～ 29 年度

1. 研究の背景とねらい

原子力発電所プラントは、建屋や機器、それらを操作・制御する人間を含めた、複雑な系であり、地震時における事故を回避するためには、プラントを全体系（トータルシステム）として評価することが重要となる。以下、全体系を構成する要素として、建屋(Structures)、システム(Systems)や機器設備(Components)、人間(Human)を SSCH と称する。炉心損傷等のシビアアクシデントが発生した場合には、周辺環境への放射性物質の拡散による汚染が問題となることから、事故の被害が敷地内のみならず敷地外的环境やインフラに及ぼす影響も考慮した広範囲にわたる防災計画の策定が望まれる。そのためには、原子炉建屋だけでなく、プラントのトータルシステムや、プラントを制御する人間等のそれぞれのクリフエッジを把握し、それらを回避する技術を確立することが必要不可欠である。このような背景から、原子力発電所とその周辺環境を含む包括的な安全性評価とクリフエッジの特定が安全性向上のために必須であると考え、各項目について検討を行う。

2. これまでの研究成果

2.1 地震時プラントの要求性能の分類と整理

地震時におけるプラント全体の要求性能をリスク評価の観点から分類・整理した。地震時のプラント状態と深層防護レベルとを関係づけながら、プラント全体に要求される性能、相互依存関係などを明確化した。プラント全体からプラントの個々の構成要素(SSCH: Structure, System, Component, Human)およびプラント周辺のインフラ施設（電気供給、道路ライフライン等）まで含めて、プラントの状態に応じた要求性能をブレイクダウンして抽出・整理し、要求性能表を作成するための検討を行った。

2.2 原子力プラントの地震時挙動とクリフエッジ回避技術の開発

2.2.1 建屋システムのクリフエッジ回避技術

応答解析を行う対象施設を設定し、モデルデータの整備および予備的解析を行った。現実のサイトに設置された仮想的なプラントを設定することとし、標準的な原子炉建屋および免震重要棟を対象としてモデル化を実施した。特に、クリフエッジを特定するために必要となる建屋の弾塑性モデルデータを整備するとともに、建屋への免震装置の組み込みを実施した。また原子炉建屋に

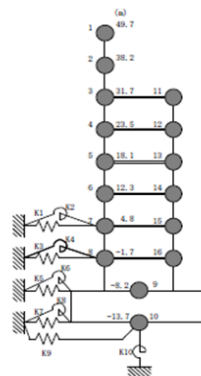


図 1 質点系モデル

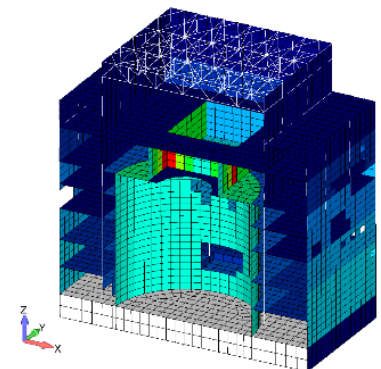


図 2 FEM モデル

対し、設計用モデルである質点系モデルと 3 次元詳細モデルの双方で大入力時の予備的弾塑性解析を実施し、モデルによる応答の違いについて検討を行った。各モデルの概要を図 1, 2 に示す。検討の結果、入力が大きいほどモデルの違いによる差異が大きくなることを確認した。

2.2.2 免震化によるクリフエッジ回避技術

免震構造がクリフエッジに与える影響や免震構造におけるクリフエッジを検討し、免震構造のクリフエッジ回避技術としての有効性を確認する。これまで、免震スペックの選定や免震装置のばらつきの調査を実施し、また、免震装置の非線形モデルや擁壁との衝突を考慮した解析モデルを作成した。さらに、免震装置の非線形モデルと擁壁との衝突モデルの統合、原子炉建屋モデルを用いた

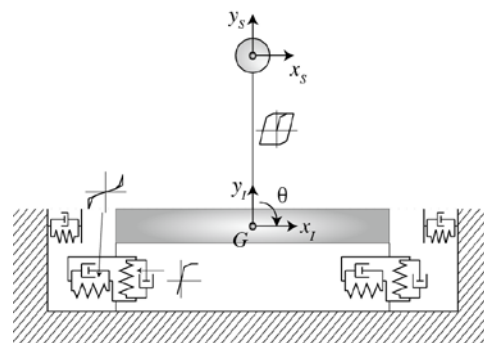


図 3 統合した解析モデル

クリフエッジ特定のための応答解析、免震重要棟モデルを用いたクリフエッジ特定のための応答解析、免震構造における物理的クリフエッジ、知識起因のクリフエッジについて検討した。

統合した解析モデルを図 3 に示す。本モデルでは、免震装置の非線形モデルと擁壁との衝突モデルを一つのモデルに統合し、免震対象となる構造物をモデル化し、建屋上部の復元力特性をトリリニアモデルで表現した。また、ロッキング振動を考慮するため積層ゴムを左右に配置し、免震装置として鉛プラグ入り積層ゴムを使用するモデルとした。断層モデルを用いて作成した波とスペクトル波の 2 種類の入力波を使用して地震応答解析を実施した。

解析の結果、免震構造は設計範囲内ではクリフエッジ回避技術として有効であるものの、設計範囲を超えると、免震構造特有の非線形挙動に基づくクリフエッジが生じることが分かった。

2.2.3 機器・システムのモデル化とクリフエッジ回避技術

従来の PRA モデルを拡張した、クリフエッジ効果の評価枠組みの構築について検討した。この枠組みを利用して他の研究項目の検討結果を反映し、クリフエッジ回避技術の有効性評価が可能となることが期待される。

深層防護レベル 1 では、地震動による影響が原子炉システムの再稼働に支障のないことが求められ、これを表す指標として、地震に対する原子炉の全体システムの信頼度、即ち地震加速度に対する損傷確率が挙げられる。この指標を構成するサブ機能として原子炉、タービン発電機等があり、原子炉を構成する要素として、原子炉建屋、原子炉容器等の構築物、原子炉系、原子炉補機系等のシステム、更にこれらのシステムを構成する、ポンプ、弁等の機器および人間系が挙げられる。

この構造を基に論理モデルを構築し、各要素の耐力や対応能力（人的過誤確率）を与えることで、レベル 1 の要求性能の信頼度（ここでは、(1-損傷確率) で表される）を評価することが出来る。

図 4 に深層防護レベル 1 の物理的クリフエッジの論理モデルのイメージを示す。論理モデルを構成する SSCH は、このフォールトツリーに表されるように結合される。この論理モデルを基に、プラントすべての SSCH の損傷確率を重ね合わせたもの（論理和）が、プラント全体システムの深層防護レベル 1 のイベントマップとなり、クリフエッジの確率は地震加速度に対する累積の損傷

確率で表される。

シナリオを基に、原子炉建屋の破損による安全機能の喪失を考慮した炉心損傷の論理モデルを構築した。

2.2.4 原子炉容器・配管のクリフエッジ回避技術

クリフエッジ回避技術の定量的評価のため、原子炉容器・配管のフラジリティ評価上重要な因子を抽出するとともに、地震応答解析で評価される建屋応答波形を用いてフラジリティ評価を行った（図5、6）。

新規規制基準対応等を調査した結果、既設軽水炉において原子炉容器下部のペDESTALという部位の設計裕度が低く、フラジリティ評価上重要であることから、評価対象部位として抽出した。次に、建屋応答解析で得られた床応答波形を用いて安全係数および不確実性を設定して、非免震と免震建屋に対する薄肉原子炉容器・配管のフラジリティ評価を行った。その結果、原子炉容器については、95%信頼度曲線における5%破損確率（所謂、HCLPF 値）を指標として比較すると、非免震より免震の場合は2倍以上あり、免

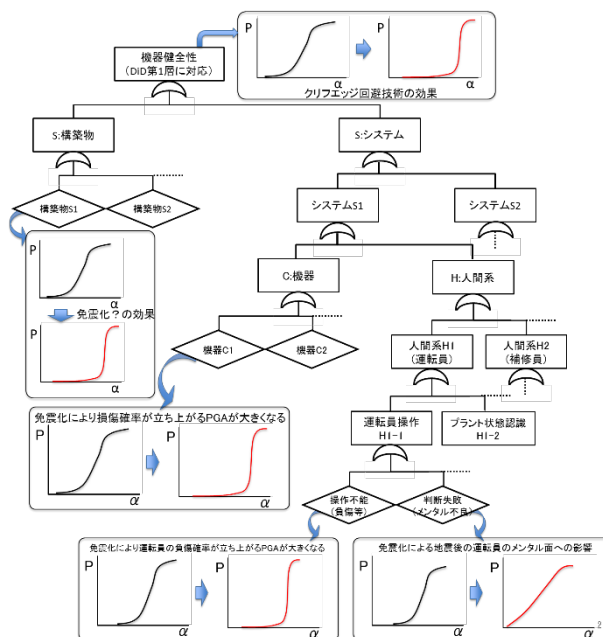


図4 深層防護レベル1の物理的クリフエッジの論理モデルのイメージ

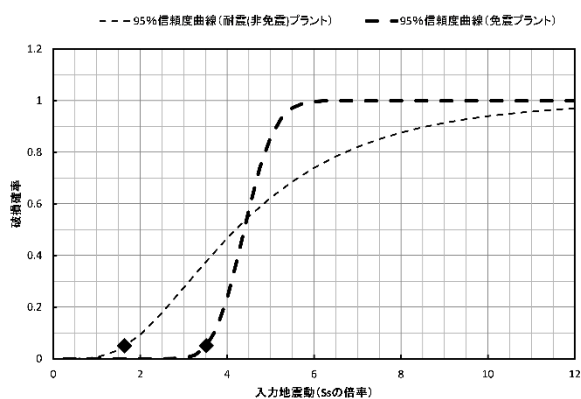


図5 薄肉原子炉容器のフラジリティ曲線における非免震と免震建屋の比較

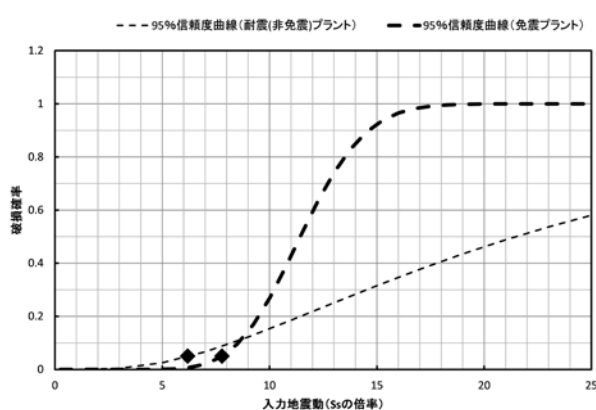


図6 薄肉配管のフラジリティ曲線における非免震と免震建屋の比較

震効果が大きく、クリフエッジ回避技術として有効であることを定量的に示すことができた。また、配管については、破損が生じにくく、免震化による応答低減効果は小さいことを明らかにした。

2.2.5 人間挙動のモデル化とクリフエッジ評価

人間の地震後活動可能性評価に向けて、振動台搭乗実験を行い、人間の地震時挙動を分析する。さらに、得られた実験結果に基づき、人間の転倒に関するフラジリティ曲線を導出する。

振動台搭乗実験の状況を図 7 に示す。3D モーションキャプチャーによって被験者の各部位の挙動を測定するため、身体各位置にマーカーを付けた状態で加振を行う。

人間の転倒クライテリアとして、足の踏み出し距離が、最大踏み出し可能幅（80 cm）を超えた場合に転倒とした。

被験者 A、B の転倒 fragility 曲線を求めた。被験者 A、B の fragility は大きく異なり、個体差が大きい。従って、将来的には年齢や性別、身長・体重といった諸元もパラメータとして考慮されたモデル化が望ましい。また地震波や入力条件の違いなどの不確実性を考慮した転倒評価が今後の課題である。

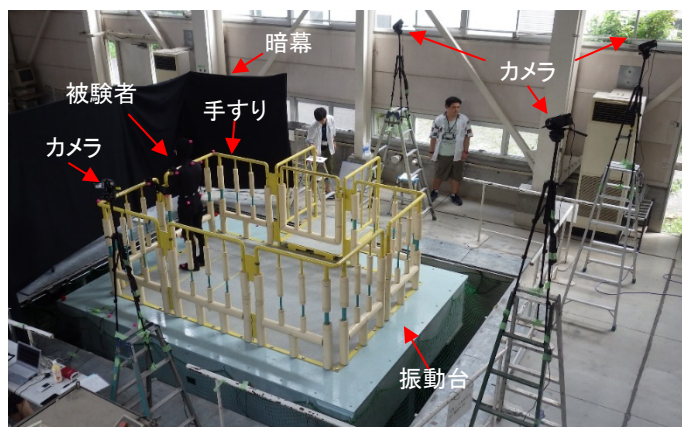


図 7 振動台搭乗実験の状況

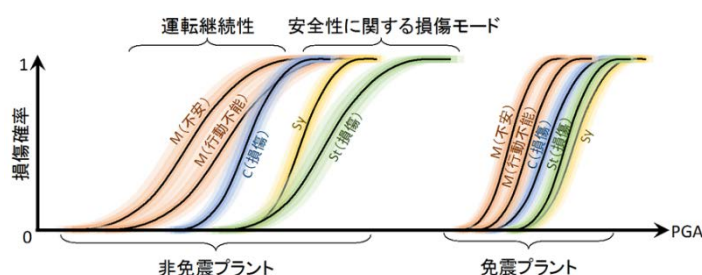


図 8 免震と非免震プラント全体と SSCH の

2.3 既存プラントの安全性向上のための実施案

原子力プラントを構成する SSCH の個々の要素の挙動とプラント全体の挙動について、深層防護概念に基づく要求性能の関係を明確にし、SSCH の物理的クリフエッジに関する地震 fragility 曲線を描くことにより、プラントシステム全体のクリフエッジ（例えば、炉心損傷、放射性物質の放出、等）に関する fragility 曲線を表現した（図 8）。

2.4 研究推進

2017 年 3 月 10 日に公開ワークショップを実施した。外部専門委員 20 名、一般 26 名の参加者があり、活発な議論がなされた。討論の中では、知識起因のクリフエッジの定義を明確にし、各機関で共通認識を持つべきであるとの意見があった。また、本研究の個々の検討項目を結びつけるためのインターフェースマネジメントが特に重要である等の意見があった。

3. 今後の研究

「地震時プラントの要求性能の分類と整理」については、プラント全体の地震時／地震後の要求性能を深層防護の概念と関連づけて SSCH について再分類するとともに、相互の関連性についても考察を行う。「原子力プラントの地震時挙動とクリフエッジ回避技術の開発」については、各々に対して、物理的クリフエッジおよび知識起因クリフエッジを特定するとともに、それらのクリフエッジを回避する方策について具体的に検討する。「既存プラントの安全性向上のための実施案」については個々のクリフエッジを統合することを考える。その際、プラント要求性能の程度に応じた重要度も考慮に入れた検討を行う。