

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、周辺環境、建屋や機器、それらを操作・制御する人間を含めた、複雑で巨大な系であり、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。以下では、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の環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、社会に及ぼす影響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、本プロジェクトでは次節以降に示す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

本研究では、クリフエッジを大きく二種類に分類、定義した。一つは物理的クリフエッジであり、もう一つは知識起因クリフエッジとする。クリフエッジの概念を図 1, 2 に示す。物理クリフエッジは、入力地震動の大きさ或いは超過確率が少し変わることによって、事故の影響が大きく増加する状態（NRC near term task force の定義）をいう。例えば、地震共通原因による炉心損傷の発生、免震建物の擁壁への衝突等である。一方、知識起因クリフエッジは、想定外事象の発生や入力地震動の増大に伴う解析対象範囲を超えた領域への突入をいうものとする。例えば、強非線形挙動、脆性破壊、モデル化対象外領域の挙動、免震建物の擁壁衝突による影響等が挙げられる。

本研究では、要求性能を「ある設備がある特定の目的を果たすための機能に要求される性能」と定義した。要求性能は大きく二つに分類できると考えられ、一つは、「設計で想定する事象において発揮されるべき能力を指

標化したもの」と考えられる。即ち、設計で要求される能力、設計仕様である。もう一つは、性能指標で要求される能力、例えば、設備・システムの信頼度や炉心損傷リスク等を指標とするものである。尚、こ

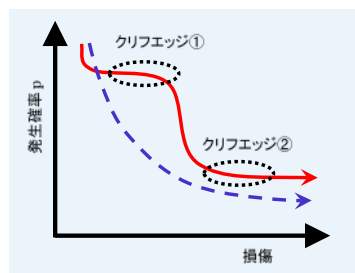


図 1 物理クリフエッジ

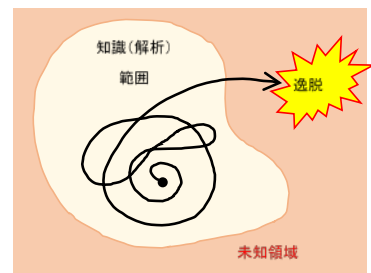


図 2 知識起因クリフエッジ

ここでは、後者の性能指標で要求される能力に対するクリフエッジを検討対象とし、物理クリフエッジ及び知識起因クリフエッジの観点から検討する。

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

ここでは、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。具体的には、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、文献等をもとに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込みを実施した。また原子炉建屋に対し、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3、4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。

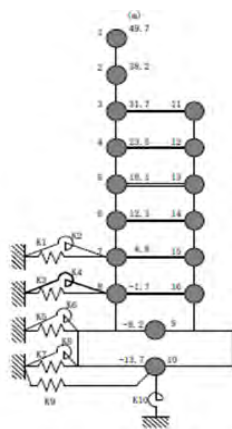


図3 質点系モデル

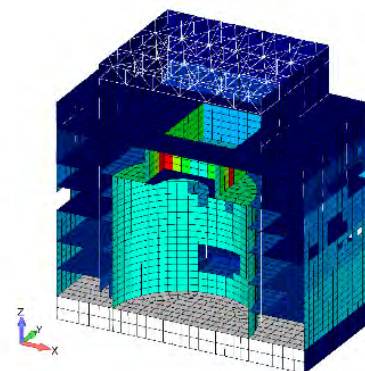


図4 FEMモデル

2. 2. 2 免震化によるクリフエッジ回避技術

本節では、大地震入力時の免震構造における非線形性を考慮した解析モデルを構築した。積層ゴムは、水平、上下方向ともに、通常使用の範囲においては復元力が変形量に比例する線形挙動を示す。しかしながら、大変形時には、水平方向にはハードニング、鉛直方向（特に引張り側）にはソフトニングし、さらにはそれらが連成することが知られている。さらに、免震層の擁壁との衝突を考慮し、図5に示す積層ゴムの非線形解析モデルを構築した。ここでは、衝突により擁壁が弾塑性変形すると仮定し、衝突後に擁壁が崩れることも考慮して、一度経験した塑性変形分は衝突しないようなモデルとした。

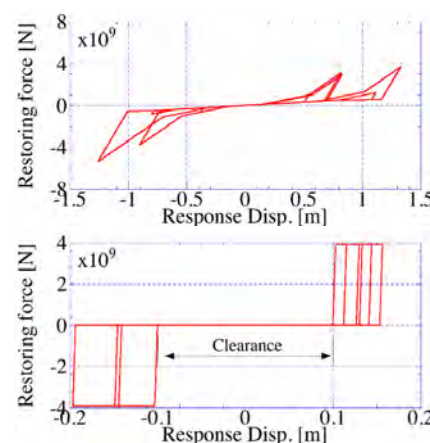


図5 免震モデル

ここでは、免震構造の非線形性を考慮した解析モデルを構築した。今後、本モデルを使用して、様々な条件下でのシミュレーションを実施する。

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

本節では、機器及びシステムのモデル化とクリフエッジ回避技術について検討した。要求性能を「ある設備がある特定の目的を果たすための機能に要求される性能」と定義し、炉心損傷リスク等を指標とするものとする。まずは、プラントシステム全体の構成要素と要求性能との関

係を明確化するために、深層防護のレベル毎に、構築物、システム、機器及び人間系 (SSCH) を整理した。地震時に各要求性能を満足するために必要な機能は、各深層防護層により異なっている。ここでは、図 6 に例示したように、要求性能を構造化することを考えた。

次に、前節の整理結果を基に、原子炉施設の地震時の要求性能の機能達成条件を明確

化し、各構成要素のクリフエッジ、更にクリフエッジ回避技術の有効性を評価するための論理モデルを検討した。また、地震発生時の要求性能に対する各クリフエッジと事故シナリオ・回避技術の関係を明確化するために要求性能に対する SSCH の論理モデルを構築した。

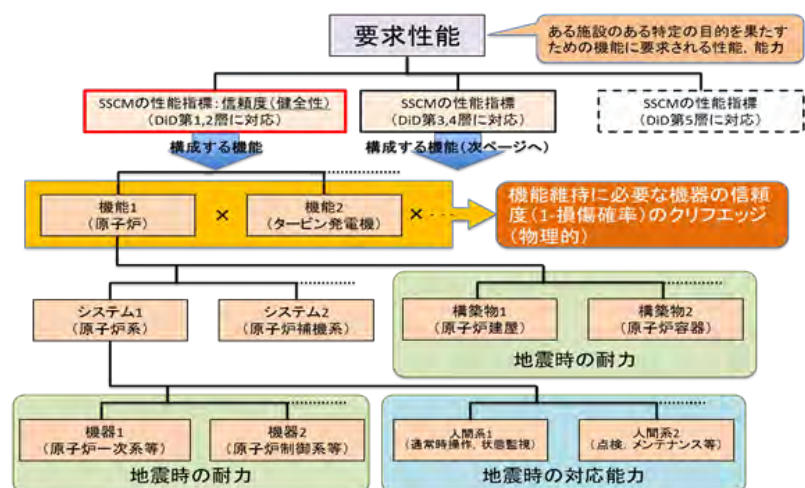


図 6 要求性能の構造(DiD 第 1 層)

2. 2. 4 原子炉容器・配管のクリフエッジ回避技術

既往の地震 PRA 及び fragility 評価等を調査・整理し、クリフエッジ回避対策の項目を抽出するとともに、原子炉容器・配管の地震時挙動を調査・整理し、破損モードを設定した。また、水平免震の採用、積層ゴムの非線形特性の適切な設定及び水平方向の減衰機能の強化を取り込む対策を前提として、原子炉容器・配管を質点系でモデル化し、予備的な fragility 評価を行い、これらの対策が、重大な事象の発生条件を地震動の高い側に移動させるという意味で、クリフエッジ回避対策として有効であることを確認した。

2. 2. 5 人間挙動のモデル化とクリフエッジ評価

原子力プラントにおいて、大地震発生後の事故拡大防止のためには、作業員による対応が極めて重要である。本研究では、地震発生時における人体挙動や受傷可能性、事故後対応の継続可能性を推定するため、地震体験実験に基づき、人体の地震応答解析モデルを構築する。

地震体験実験状況を図 7 に示す。可搬型加振機に被験者を着座させ、数種類の地震波を入力した。加振機と人体各所にマーカーを貼付し、モーションキャプチャによって挙動を抽出した。人体頭部の加速度と加振機の入力加速度を用いて、逐次部分空間法によるシステム同定を行い、人体の振動特性を分析した。その結果、人体の固有振動数は 1 Hz でほぼ変動せず、減衰定数は時々刻々変動していることが明らかとなった。特に、入力波の振幅が大きい時間帯で減衰定数が大きくなる傾向が見られるが、この傾

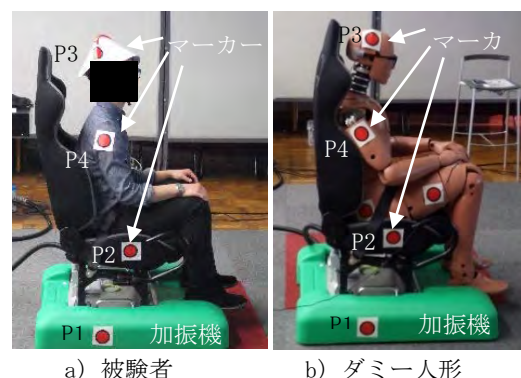


図 7 地震体験実験の状況

向は被験者によって異なることが確認された。

今後は、実験結果をさらに分析し、人体の地震応答解析モデルの構築と、それを用いた人間の怪我等に関するフラジリティカーブを作成する予定である。

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、深層防護の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フラジリティ曲線を描くことにより、図 8 に示すような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）に関するフラジリティ曲線を表現することができる。

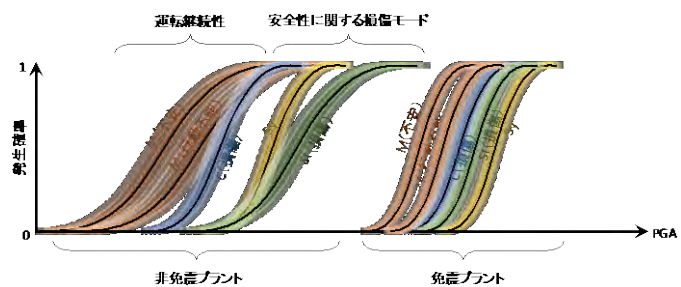


図 8 免震と非免震プラント全体と SSCH の地震時フラジリティ曲線のイメージ

3. 今後の展望

「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。

4. 参考文献

- (1) 高田毅士，糸井達哉，肥田剛典，古屋治，村松健，牟田仁，藤田聡，皆川佳祐，山野秀将，西田明美：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 その 1：研究計画，日本原子力学会 2016 年春の大会，1I06，2016
- (2) 崔炳賢，西田明美，郭智宏，山野秀将，高田毅士：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 その 2：建屋システムと原子炉容器・配管の検討，日本原子力学会 2016 年秋の大会，2L08，2016
- (3) 皆川佳祐，藤田聡，古屋治，高田毅士：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 その 3：免震構造の解析モデル，日本原子力学会 2016 年秋の大会，3G10，2016
- (4) 牟田仁，村松健，高田毅士，糸井達哉：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 その 4：機器・システムのクリフエッジ評価モデルの検討，日本原子力学会 2016 年秋の大会，3G11，2016
- (5) 肥田剛典，高田毅士，糸井達哉：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 その 5：地震時人間挙動の検討，日本原子力学会 2016 年秋の大会，3G12，

2016