

平成 29 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業  
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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

成果報告書

平成 30 年 3 月  
国立大学法人 東京大学

本報告書は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業による委託業務として、国立大学法人 東京大学が実施した平成 27-29 年度「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」の成果を取りまとめたものです。



3.2.3.1	要求性能の構造と論理モデルの構築	3.2.3-1
3.2.3.2	原子炉建屋のモデル化方法	3.2.3-2
3.2.3.3	物理的クリフエッジ回避策の有効性評価	3.2.3-3
3.2.3.4	知識起因クリフエッジの検討	3.2.3-3
3.2.3.5	まとめ	3.2.3-4
3.2.4	原子炉容器・配管のクリフエッジ回避技術	3.2.4-1
3.2.4.1	はじめに	3.2.4-1
3.2.4.2	フラジリティ評価上重要な因子の抽出	3.2.4-1
3.2.4.3	フラジリティ評価	3.2.4-3
3.2.4.4	応答低減効果の定量的評価	3.2.4-4
3.2.4.5	クリフエッジ回避技術の考案	3.2.4-5
3.2.4.6	まとめ	3.2.4-7
3.2.5	人間挙動のモデル化とクリフエッジ評価	3.2.5-1
3.2.5.1	はじめに	3.2.5-1
3.2.5.2	振動台搭乗実験に基づく人間挙動の分析	3.2.5-1
3.2.5.3	強震記録と運転員へのインタビューによる地震時の人間挙動の分析	3.2.5-3
3.2.5.4	技術指導	3.2.5-4
3.2.5.5	まとめ	3.2.5-5
3.3	既存プラントの安全性向上のための実施案	3.3-1
3.4	研究推進	3.4-1
4.	結言	4-1
	付録	A1-1

表一覧

	頁
表 3.1-1 深層防護各レベルと喪失条件, 物理的クリフエッジの対応 . . . . .	3.1-6
表 3.1-2 知識起因クリフエッジの領域分類 . . . . .	3.1-6
表 3.1-3 深層防護各層に対する要求性能を実現する SSCH . . . . .	3.1-7
表 3.1-4 要求性能に対する SSCH の分類 . . . . .	3.1-7
表 3.2.1-1 免震重要棟の固有値解析結果 . . . . .	3.2.1-9
表 3.2.1-2 建屋システムで想定されるクリフエッジの例 . . . . .	3.2.1-9
表 3.2.1-3 入力地震動の最大加速度 . . . . .	3.2.1-9
表 3.2.1-4 免震導入建屋の解析条件 . . . . .	3.2.1-9
表 3.2.1-5 コンクリート及び鉄筋の材料定数 . . . . .	3.2.1-10
表 3.2.1-6 免震重要棟 地震応答解析 解析ケース . . . . .	3.2.1-10
表 3.2.1-7 地震応答解析結果 水平(NS)方向 最大応答一覧 (入力地震動 A) . . . . .	3.2.1-11
表 3.2.1-8 地震応答解析結果 水平(NS)方向 最大応答一覧 (入力地震動 B) . . . . .	3.2.1-12
表 3.2.1-9 地震応答解析結果 鉛直方向 最大応答一覧 . . . . .	3.2.1-13
表 3.2.1-10 免震特性 . . . . .	3.2.1-14
表 3.2.1-11 検討ケース及び荷重スケール . . . . .	3.2.1-14
表 3.2.2-1 積層ゴム設計結果の一例 . . . . .	3.2.2-6
表 3.2.2-2 天然ゴム系積層ゴムの水平剛性の変動係数 . . . . .	3.2.2-6
表 3.2.2-3 解析条件 . . . . .	3.2.2-6
表 3.2.2-4 解析パラメータ . . . . .	3.2.2-7
表 3.2.2-5 免震構造におけるクリフエッジ . . . . .	3.2.2-8
表 3.2.2-6 免震構造におけるクリフエッジの相関 . . . . .	3.2.2-9
表 3.2.3-1 高圧炉心スプレイ系(HPCS)を対象とした SSCH 整理例 . . . . .	3.2.3-6
表 3.2.3-2 フラジリティ評価条件のまとめ . . . . .	3.2.3-6
表 3.2.4-1 耐震(非免震)プラントの薄肉容器のフラジリティ評価における 安全係数及び不確実さ . . . . .	3.2.4-9
表 3.2.4-2 免震プラントの薄肉容器のフラジリティ評価における 安全係数及び不確実さ . . . . .	3.2.4-9

表 3. 2. 4-3	耐震（非免震）プラントの厚肉容器のフラジリティ評価における 安全係数及び不確実さ	3. 2. 4-9
表 3. 2. 4-4	免震プラントの厚肉容器のフラジリティ評価における 安全係数及び不確実さ	3. 2. 4-9
表 3. 2. 4-5	耐震（非免震）プラントの薄肉配管のフラジリティ評価における 安全係数及び不確実さ	3. 2. 4-10
表 3. 2. 4-6	免震プラントの薄肉配管のフラジリティ評価における 安全係数及び不確実さ	3. 2. 4-10
表 3. 2. 4-7	耐震（非免震）プラントの厚肉配管のフラジリティ評価における 安全係数及び不確実さ	3. 2. 4-10
表 3. 2. 4-8	免震プラントの厚肉配管のフラジリティ評価における 安全係数及び不確実さ	3. 2. 4-10
表 3. 2. 4-9	薄肉容器における機器応答係数の不確実さをパラメータ とした場合の HCLPF	3. 2. 4-11
表 3. 2. 4-10	薄肉配管における機器応答係数の不確実さをパラメータ とした場合の HCLPF	3. 2. 4-12
表 3. 2. 5-1	被験者のパラメータ	3. 3. 5-7
表 3. 2. 5-2	入力波形一覧	3. 3. 5-7
表 3. 2. 5-3	フラジリティカーブの中央値と対数標準偏差	3. 3. 5-7
表 3. 2. 5-4	インタビュー者一覧	3. 3. 5-8
表 3. 3-1	物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジの関係と分類	3. 3-3
表 A1-1	地震応答解析結果 水平(NS)方向 最大応答一覧(入力地震動 A)	A1-1
表 A1-2	地震応答解析結果 水平(NS)方向 最大応答一覧(入力地震動 B)	A1-2
表 A1-3	地震応答解析結果 鉛直方向 最大応答一覧【H29】	A1-3
表 A1-4	3次元詳細モデル結果 水平(NS)方向 最大応答一覧(入力地震動 A)	A1-4

図一覧

	頁	
図 3. 1-1	物理的クリフエッジのイメージ	3. 1-8
図 3. 1-2	知識起因クリフエッジ	3. 1-8
図 3. 1-3	物理的クリフエッジの領域分類と状態遷移	3. 1-8
図 3. 1-4	知識起因クリフエッジの領域分類と状態遷移	3. 1-9
図 3. 1-5	深層防護レベルと対象 SSCH の耐力との関係	3. 1-9
図 3. 1-6	物理的クリフエッジの回避・緩和手段(1/2)	3. 1-10
図 3. 1-7	物理的クリフエッジの回避・緩和手段(2/2)	3. 1-10
図 3. 1-8	知識起因クリフエッジの回避・緩和手段(1/2)	3. 1-11
図 3. 1-9	知識起因クリフエッジの回避・緩和手段(2/2)	3. 1-11
図 3. 1-10	物理及び知識起因クリフエッジの相関	3. 1-12

図 3.2.1-1	対象とする原子炉建屋モデル	3.2.1-15
図 3.2.1-2	質点系モデルと 3 次元詳細モデルの最大せん断ひずみの比較	3.2.1-15
図 3.2.1-3	外壁位置の加速度応答スペクトル (h=5.0%)	3.2.1-16
図 3.2.1-4	免震重要棟モデルの例	3.2.1-16
図 3.2.1-5	免震建屋のクリフエッジ概念	3.2.1-17
図 3.2.1-6	解析に用いた入力地震動	3.2.1-17
図 3.2.1-7	加速度応答スペクトル	3.2.1-17
図 3.2.1-8	免震建屋の解析モデル例	3.2.1-18
図 3.2.1-9	免震装置の設定	3.2.1-18
図 3.2.1-10	基礎版位置の積層ばねの配置イメージ	3.2.1-19
図 3.2.1-11	前川モデルの応力-ひずみ関係 (圧縮側)	3.2.1-19
図 3.2.1-12	付着パラメータ C によるテンションスティフニング (引張側)	3.2.1-19
図 3.2.1-13	最大せん断ひずみの高さ方向分布 (入力地震動 A)	3.2.1-20
図 3.2.1-14	最大せん断ひずみの高さ方向分布 (入力地震動 B)	3.2.1-20
図 3.2.1-15	質点系モデルおよび 3 次元詳細モデルにおける最大せん断ひずみの 高さ分布 (耐震建屋、入力地震動 A(NS))	3.2.1-21
図 3.2.1-16	建屋上部壁のせん断ひずみ分布	3.2.1-21
図 3.2.1-17	免震重要棟の床加速度応答スペクトル	3.2.1-22
図 3.2.1-18	免震装置の履歴モデルのイメージ図	3.2.1-23
図 3.2.1-19	解析モデルのイメージ図	3.2.1-23
図 3.2.1-20	基礎上 (B3F, 質点 9) の加速度応答スペクトル	3.2.1-24
図 3.2.1-21	3 次元詳細モデルにおける最大せん断ひずみの高さ分布 (入力地震動 A (NS) × 3)	3.2.1-24
図 3.2.1-22	耐震建屋の最大せん断ひずみ及び最大加速度の高さ方向分布	3.2.1-25
図 3.2.1-23	免震導入建屋の最大せん断ひずみ及び最大加速度の高さ方向分布	3.2.1-25
図 3.2.1-24	3 次元詳細モデルの最大せん断ひずみの中央値に対する対数標準偏差 高さ方向分布	3.2.1-26
図 3.2.1-25	3 次元詳細モデルの最大せん断ひずみの応答比 (3 次元中央値/質点系) 高さ方向分布	3.2.1-26
図 3.2.1-26	3 次元詳細モデルの最大加速度の応答比 (3 次元中央値/質点系) 高さ方向分布	3.2.1-27
図 3.2.1-27	建屋各層のフラジリティ曲線	3.2.1-27
図 3.2.1-28	3 次元詳細モデル各要素 (外壁) におけるフラジリティ曲線 (B1F)	3.2.1-27
図 3.2.2-1	免震構造特有の特性を考慮したモデル	3.2.2-10
図 3.2.2-2	解析モデル	3.2.2-10
図 3.2.2-3	入力地震動	3.2.2-10
図 3.2.2-4	入力加速度と応答加速度・変位の関係 (原子炉建屋モデル 水平)	3.2.2-11
図 3.2.2-5	入力加速度と応答加速度・変位の関係 (原子炉建屋モデル 上下)	3.2.2-11
図 3.2.2-6	入力加速度と応答加速度・変位の関係 (免震重要棟モデル 水平)	3.2.2-11

図 3.2.2-7	擁壁までの距離と応答の関係（検討 1、原子炉建屋モデル 水平）	3.2.2-12
図 3.2.2-8	擁壁までの距離と応答の関係（検討 1、免震重要棟モデル 水平）	3.2.2-12
図 3.2.2-9	入力地震動の大きさと免震構造におけるクリフエッジの関係	3.2.2-13
図 3.2.3-1	深層防護レベル 1 の要求性能の構造	3.2.3-7
図 3.2.3-2	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	3.2.3-8
図 3.2.3-3	異常発生防止（運転継続性）に係るイベントマップ	3.2.3-9
図 3.2.3-4	深層防護レベル 3 の要求性能の構造	3.2.3-9
図 3.2.3-5	深層防護レベル 3 の物理的クリフエッジの論理モデルのイメージ	3.2.3-10
図 3.2.3-6	炉心損傷に係るイベントマップ	3.2.3-10
図 3.2.3-7	評価対象シナリオ	3.2.3-11
図 3.2.3-8	建屋損傷を考慮した論理モデルのイメージ	3.2.3-12
図 3.2.3-9	建屋各所の損傷確率の与え方のイメージ	3.2.3-13
図 3.2.3-10	ECCS 関連人間系のフラジリティの合成方法の例	3.2.3-13
図 3.2.3-11	大 LOCA のイベントマップ（非免震建屋）	3.2.3-14
図 3.2.3-12	大 LOCA のイベントマップ（免震建屋）	3.2.3-14
図 3.2.4-1	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	3.2.4-13
図 3.2.4-2	厚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	3.2.4-13
図 3.2.4-3	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	3.2.4-14
図 3.2.4-4	厚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	3.2.4-14
図 3.2.4-5	機器応答係数の不確かさを考慮した薄肉容器のフラジリティ曲線	3.2.4-15
図 3.2.4-6	薄肉容器における機器応答係数の不確かさと HCLPF（Ss に対する 倍率）の関係	3.2.4-15
図 3.2.4-7	機器応答係数の不確かさを考慮した厚肉容器のフラジリティ曲線	3.2.4-16
図 3.2.4-8	厚肉容器における機器応答係数の不確かさと HCLPF（Ss に対する 倍率）の関係	3.2.4-16
図 3.2.4-9	機器応答係数の不確かさを考慮した薄肉配管のフラジリティ曲線	3.2.4-17
図 3.2.4-10	薄肉配管における機器応答係数の不確かさと HCLPF（Ss に対する 倍率）の関係	3.2.4-17
図 3.2.4-11	物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジの関係(1/2)	3.2.4-18
図 3.2.4-12	物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジの関係(2/2)	3.2.4-18
図 3.2.5-1	振動台搭乗実験	3.2.5-9
図 3.2.5-2	被験者	3.2.5-10
図 3.2.5-3	フォースプレート	3.2.5-11
図 3.2.5-4	入力波形加速度応答スペクトル	3.2.5-12
図 3.2.5-5	Case 3, CoG, CoP の振動台に対する相対変位及び入力波形（Y 方向）	3.2.5-12
図 3.2.5-6	Case 6, CoG, CoP の振動台に対する相対変位及び入力波形（Y 方向）	3.2.5-12
図 3.2.5-7	Case 3, CoP, CoG と支持基底面の時刻歴波形	3.2.5-12

図 3.2.5-8	振動台加速度と足の踏み出し距離の関係（新潟県中越沖地震）	3.2.5-13
図 3.2.5-9	人間の転倒に関するフラジリティーカーブ	3.2.5-13
図 3.2.5-10	加速度時刻歴	3.2.5-14
図 3.2.5-11	加速度応答スペクトル( $h=5\%$ )	3.2.5-14
図 3.2.5-12	振動台実験の行動難度評価曲線	3.2.5-14
図 3.2.5-13	行動難度の比較	3.2.5-14
図 3.2.5-14	コロンビア大学でのディスカッションの様子	3.2.5-15
図 3.2.5-15	アイダホ国立研究所訪問時の様子	3.2.5-15
図 3.3-1	免震と非免震プラント全体と SSCH の地震時フラジリティー曲線のイメージ	3.3-3
図 3.4-1	公開ワークショップの状況	3.4-2

## 略語一覧

AM	: Accident Management	(アクシデントマネジメント)
BWR	: Boiling Water Reactor	(沸騰水型原子炉)
CoG	: Center of Gravity	(重心)
CoM	: Center of Mass	(質量中心)
CoP	: Center of Pressure	(圧力中心)
CST	: Condensate Storage Tank	(復水貯蔵タンク)
CV	: Containment Vessel	(格納容器)
DiD	: Defence in Depth	(深層防護)
ECCS	: Emergency Core Cooling System	(非常用炉心冷却装置)
FEM	: Finite Element Method	(有限要素法)
HCLPF	: High Confidence of Low Probability of Failure	(高信頼度低損傷確率値)
HPCS	: High Pressure Core Spray	(高圧炉心スプレイ)
IAEA	: International Atomic Energy Agency	(国際原子力機関)
LOCA	: Loss of Coolant Accident	(冷却材喪失事故)
LPCI	: Low Pressure Coolant Injection	(低圧注水)
LPCS	: Low Pressure Core Spray	(低圧炉心スプレイ)
LRB	: Lead Rubber Bearing	(鉛プラグ入り積層ゴム支承)
NRC	: Nuclear Regulatory Commission	(アメリカ合衆国原子力規制委員会)
PCV	: Primary Containment Vessel	(格納容器)
PFA	: Peak Floor Acceleration	(最大床加速度)
PRA	: Probabilistic Risk Assessment	(確率論的リスク評価)
PWR	: Pressurized Water Reactor	(加圧水型原子炉)
RC	: Reinforced Concrete	(鉄筋コンクリート)
RPV	: Reactor Pressure Vessel	(原子炉圧力容器)
SR モデル	: Sway-Rocking モデル	
SSCH	: Structure System Component Human	(構築物・システム・機器・人間)

## 概略

### 1. 本研究の背景および目的

原子力発電所は、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な系であり、地震時の安全性を議論する際には、その全体系を包括的に、相互関連性も考慮しながら検討することが極めて重要である。本研究では、原子力プラントの地盤－建屋－設備機器－安全系－人間システム全体系を各分野領域横断的に取り扱い、全体系および各部の要求性能を明確化した後、それに係るクリフエッジを特定・定量化し、これらを回避する技術を開発することを目的とする。

### 2. 本研究の実施内容

本研究の実施内容は、次のとおりである。

#### (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・整理する。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する。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う。

#### (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

##### ① 建屋システムのクリフエッジ回避技術(再委託先: 日本原子力研究開発機構)

建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフエッジ特定のための応答解析を実施し、クリフエッジ回避技術について検討する。また、建屋システムのフラジリティ曲線の評価を行い、クリフエッジ回避技術についてまとめる。

##### ② 免震化によるクリフエッジ回避技術(再委託先: 東京電機大学・埼玉工業大学)

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。

##### ③ 機器・システムのモデル化とクリフエッジ回避技術(再委託先: 東京都市大学)

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を構築する。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。

##### ④ 原子炉容器・配管のクリフエッジ回避技術(再委託先: 日本原子力研究開発機構)

クリフエッジ回避技術の確立のため、地震応答解析で評価された建屋応答波形を用いて原子炉容器・配管のフラジリティ評価を行う。また、建屋の免震化による原子炉容器・配管の応答低減効果の定量的評価によってクリフエッジを評価するとともに、クリフエッジ回避技術を考案してまとめる。

##### ⑤ 人間挙動のモデル化とクリフエッジ評価

人間を対象に振動台搭乗実験を行い、揺れの最中における人間の挙動と心理状態、人体に生じる揺れ等に関する調査を行う。これにより、人間の地震応答解析モデルの構築に必要な

データを収集する。また、文献調査やヒアリング調査等によって、シビアアクシデント後における余震の有無が対応時間の遅れ等に及ぼす影響も検討する。

### (3) 既存プラントの安全性向上のための実施案

SSCHの個々の要素およびプラント全体系のクリフエッジに対するフラジリティを俯瞰的に把握するための手法の枠組み（イベントマップ）について検討する。

### (4) 研究推進

外部専門家で構成する技術会合および、原子力関連技術者や専門家を対象とした公開ワークショップを実施し、本業務で得られた検討内容等に関する対する幅広い多様な技術的知見を収集する。

## 3. 本研究の成果

### (1) 地震時プラントの要求性能の分類と整理

物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジを定義し、さらに原子力プラントの地震時要求性能を定義した。また、各クリフエッジの要求性能の指標について整理を行った。

次に、深層防護の各レベルと物理的クリフエッジおよび要求性能との関係を整理し、考慮すべき物理的クリフエッジの特定に関する検討を行った。

分類・整理された地震時の原子力関連施設の要求性能について、炉心損傷や格納容器破損といったリスクに関して、構築物、システム、機器のクリフエッジに対する構成要素を抽出した。要求性能との関係を、イベントツリー論理モデルを用いて可視化し、現状の地震時の原子力施設の要求性能に対する指標で評価したクリフエッジの評価を行った。また、プラントシステムの要求性能とそれに対応する構築物・系統・機器（SSC）の機能に加えて人員（H）に要求される機能を同定した。

### (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

#### 1. 建屋システムのクリフエッジ回避技術

平成 27 年度は平成 28 年度以降実施する 2 つのクリフエッジ（物理的クリフエッジと知識起因のクリフエッジ）の特定と特徴、その回避技術の検討、および、機器や人間挙動評価のための入力条件提示のために、モデル整備を行った。平成 28 年度は、平成 27 年度に整備した建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフエッジ特定のための応答解析を実施し、機器等の評価作業のために結果データを提供した。また、クリフエッジ回避のための予備的な検討を行った。平成 29 年度は、これまでに整備した建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフエッジ特定のための応答解析を継続するとともにクリフエッジ回避のための検討をすすめた。また、建屋システムのフラジリティ曲線の評価を行い、クリフエッジ回避技術についてまとめた。

#### 2. 免震化によるクリフエッジ回避技術

平成 27 年度は、免震スペックの選定手法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。平成 28 年度は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及び知識起因のクリフエッジの明示を実施した。平成

29年度は、免震構造特有の非線形性を考慮した解析モデルを用いて地震応答解析を実施し、免震化によるプラント損傷抑制効果について検討した。また、平成28年度に引き続き、免震構造における物理的クリフエッジ及び知識起因のクリフエッジの明示を実施した。

### 3. 機器・システムのモデル化とクリフエッジ回避技術

物理的クリフエッジに対しては、深層防護各レベルに対して物理的クリフエッジを設定し、対応するSSCHを整理し、更に、建屋システム、原子炉容器・配管、人間系に分けて検討を行なった成果を統合し、これらを全体システムとしてモデル化する手法を提案し、免震建屋を想定した場合の回避効果の試解析を通して、回避策の有効性を示すことができた。

### 4. 原子炉容器・配管のクリフエッジ回避技術

平成27年度は、免震化による効果が大きい薄肉の容器・配管の高速炉プラントを検討対象とし、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、予備的なフラジリティ評価を実施した。平成28年度は、薄肉に加えて厚肉の軽水炉の原子炉容器・配管を対象として、フラジリティ評価上重要な因子を抽出するとともに、フラジリティ評価を実施した。これらを踏まえて、平成29年度は、地震応答解析で評価された建屋応答波形を用いて原子炉容器・配管のフラジリティ評価を行うとともに、両プラントを対象とした免震化による応答低減効果の定量的評価によってクリフエッジを評価するとともに、クリフエッジ回避技術を考案してまとめた。

### 5. 人間挙動のモデル化とクリフエッジ評価

振動台搭乗実験に基づき、地震の揺れの最中の人間の挙動を分析し、人体の転倒に関するフラジリティカーブを評価した。また、平成19年新潟県中越沖地震時における柏崎刈羽原子力発電所で観測された強震記録と、同発電所の運転員へのインタビュー調査から、揺れが地震時・地震後対応に及ぼす影響について検討した。平成19年新潟県中越沖地震時において、原子力発電所における地震後対応を遅延させた主な要因は余震であったことが分かった。また、対応を阻害する要因は様々であるため、多面的に対策を施していくことが必要であることが明らかとなった。

## (3) 既存プラントの安全性向上のための実施案

イベントマップに多様なSSCHを配して、相互の関係性を視覚的に考慮できる方法について検討した。

## (4) 研究推進

研究期間中の各年度末に公開ワークショップを実施した。活発な意見交換を通して、システムインテグレーションやインターフェイスマネジメントの重要性に関する指摘等の貴重なコメントを収集することができた。

## 1. はじめに

原子力発電所は、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な系であり、地震時の安全性を議論する際には、その全体系を包括的に、相互関連性も考慮しながら検討することが極めて重要である。本研究では、原子力プラントの地盤、建屋－設備機器－人間システム全体系を各分野領域横断的に取り扱い、全体系としての要求性能を明確化した後、それに係るクリフエッジを特定・定量化し、これらを回避する技術を開発することが目的である。

実施方法としては、各要求性能に対して、プラント全体の詳細なモデルによる解析的な方法に加え、モデル化されていない実機の部分などに着目しモデルプラントの損傷評価を行う。回避技術の一つとして、建屋や重要棟の免震化による効果を把握するとともに、地震時における人間の挙動とクリフエッジを実験的に評価し、地震時における人間信頼性解析手法を実施する。最後に、原子力プラント全体系のクリフエッジを回避可能な対策を提案することにより、地震リスク低減効果も評価する。

## 2. 業務計画

### 2.1 背景

平成 23 年東北地方太平洋沖地震の発生により、福島第一原子力発電所は強い地震動と大津波の襲来により全電源喪失を経て大事故に発展した。この事故は、非常用電源装置をはじめとした設備機器の故障や、全電源喪失を想定していなかった訓練体制、さらにはプラント設計の問題点等、構造物・システム・設備機器・人間に関する様々な要因が重なって生じたものであり、プラント全体がいわゆるクリフェッジ状態となって大事故に発展したものである。

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を鑑みれば、原発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に入れ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ェッジを把握し、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。

### 2.2 目的

本研究は、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ェッジの特定が適切な安全性向上には必須であるとの考え、原子力発電所プラントの安全性確保のために、プラントをトータルシステムとして取り扱い、リスク概念と深層防護の考え方に基づいて、様々なクリフェッジ状態の特定と、それらの回避技術（ハード及びソフト技術の両面で）を検討し提案するものである。

本プロジェクトでは次の各項目について検討を行う。以下に技術的な検討内容を示す。

#### (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・整理するための予備検討を行う。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する。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) 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予備的な検討を行い、方法論を確立する。

#### (2) 原子力プラントの地震時挙動とクリフェッジ回避技術の開発

##### 1. 建屋システムのクリフェッジ回避技術

平成 27 年度は平成 28 年度以降実施する 2 つのクリフェッジ（物理的クリフェッジと知識起因のクリフェッジ）の特定と特徴、その回避技術の検討、および、機器や人間挙動評価のための入力条件提示のために、モデル整備を行う。平成 28 年度は、平成 27 年度に整備した建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフェッジ特定のための応答解析を実施し、機器等の評価作業のために結果データを提供する。また、クリフェッジ回避のための予備的な検討を行う。平成 29

年度は、これまでに整備した建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフエッジ特定のための応答解析を継続するとともにクリフエッジ回避のための検討を行う。また、建屋システムのフラジリティ曲線の評価を行い、クリフエッジ回避技術についてまとめる。

## 2. 免震化によるクリフエッジ回避技術

平成 27 年度は、免震スペックの選定手法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する。平成 28 年度は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及び知識起因のクリフエッジの明示を実施する。平成 29 年度は、免震構造特有の非線形性を考慮した解析モデルを用いて地震応答解析を実施し、免震化によるプラント損傷抑制効果について検討する。また、平成 28 年度に引き続き、免震構造における物理的クリフエッジ及び知識起因のクリフエッジの明示を実施する。

## 3. 機器・システムのモデル化とクリフエッジ回避技術

分類・整理された地震時の原子力関連施設の要求性能について、炉心損傷や格納容器破損といったクリエッジ、構築物、システム、機器のクリフエッジを評価する指標を定義する。

分類・整理された地震時の原子力関連施設の要求性能について、炉心損傷や格納容器破損といったクリエッジ、構築物、システム、機器のクリフエッジを評価する指標を定義する。これらの指標に対し、要求仕様を構成する構築物、システム、機器、人間系、インフラ等の関係を、イベントツリーを用いて可視化する。このイベントツリーを用いて、指標に対するクリフエッジを明示すると共に、クリフエッジを回避するための手段を論理モデル化し、クリフエッジ回避手段の有効性評価を行う手法を開発、本研究で検討される手段の有効性を評価する。

## 4. 原子炉容器・配管のクリフエッジ回避技術

平成 27 年度は、免震化による効果が大きい薄肉の容器・配管の高速炉プラントを検討対象とし、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、予備的なフラジリティ評価を実施する。平成 28 年度は、薄肉に加えて厚肉の軽水炉の原子炉容器・配管を対象として、フラジリティ評価上重要な因子を抽出するとともに、フラジリティ評価を実施する。これらを踏まえて、平成 29 年度は、地震応答解析で評価された建屋応答波形を用いて原子炉容器・配管のフラジリティ評価を行うとともに、両プラントを対象とした免震化による応答低減効果の定量的評価によってクリフエッジを評価し、クリフエッジ回避技術を考案してまとめる。

## 5. 人間挙動のモデル化とクリフエッジ評価

人間を対象に振動台搭乗実験を行い、揺れの最中における人間の挙動と心理状態、人体に生じる揺れ等に関する調査を行う。これにより、人間の地震応答解析モデルの構築に必要なデータを収集する。また、原子力発電所運転員へのインタビュー調査を行い、地震の揺れが人間行動に及ぼす影響や、余震の有無が対応時間の遅れ等に及ぼす影響等も検討する。

### (3) 既存プラントの安全性向上のための実施案

SSCHの個々の要素およびプラント全体系のクリフエッジに対する脆弱性を俯瞰的に把握するための手法の枠組み（イベントマップ）について検討する。

### (4) 研究推進

外部専門家で構成する技術会合および、原子力関連技術者や専門家を対象とした公開ワークショップを実施し、本業務で得られた検討内容等に関する幅広い多様な技術的知見を収集する。

### 3. 業務の実施内容及び成果

#### 3.1 地震時プラントの要求性能の分類と整理

##### 3.1.1 クリフエッジと要求性能との関係 (H27~H29)

本研究では、原子力プラントを対象として、運転継続性、炉心損傷等の様々なクリフエッジ状態を特定、これらに対する要求性能を明確化し、より幅広く SSCH をモデル化することにより、プラント全体システムと考える。地震時の様々な相互作用、個々の挙動の関係を考慮し、全体システムを対象としなければ得られない知見を抽出することができるかと期待される。

##### (1) クリフエッジの定義

本研究では、クリフエッジを大きく二種類に分類、定義する。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。

物理的クリフエッジの概念を図 3.1-1 に示す。物理的クリフエッジは、入力地震動の大きさ或いは超過確率が少し変わること、事故の影響が大きく増加する状態 (NRC near term task force<sup>[3.1-1]</sup>の定義) をいう。構築物・系統・機器 (SSC) の機能に加えて人員 (H) や組織の機能が同時喪失することで顕在化すると考えられる。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が挙げられる。

知識起因クリフエッジの概念を図 3.1-2 に示す。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。即ち、これまでの経験からでは想定出来ないような未知の領域への突入や、予想外の現象 (挙動) の発生をいう。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。

##### (2) 要求性能の定義

本研究における要求性能とは、「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」であり、これを「満足する程度」を表す指標と共に表現されるものである。もう少し具体的に述べると、原子力プラント等の設計で想定する事象において、発揮されるべき性能は何か、発揮すべき性能の水準はどの程度である必要があるのか、ということである。

物理的クリフエッジに対しては、例えば、設計基準地震時の耐力のように、設計で要求される性能を設計仕様として表す場合と任意の地震動に対する SSCH の損傷確率のように性能指標で要求される性能を表す場合がある。前者については、従来のストレステストにおいて評価対象とされた。従って本研究では後者の性能指標を検討対象とする。

知識起因クリフエッジに対しては、設計や解析で想定しているプラント挙動や事象等の範囲が要求性能であり、その性能は定量的に表現できる場合と定性的にしか表現できない場合がある。

##### (3) クリフエッジの分類と各々の性能指標

物理的クリフエッジは、プラントの状態が大きく変わる物理的な事象であり、例えば、プラント設備の損傷や炉心損傷等がこれにあたる。NRC の”near term task force”<sup>[3.1-1]</sup>では、入力地震動の大きさ或いは超過確率が少し変わること、事故の影響が大きく増加する状態であると定義されている。一般的に、原子力プラントの構築物・系統・機器 (SSC) の機能に加えて人員 (H) や組織の機能が同時喪失することで顕在化するといった特徴がある。従って、物理的クリフエッジ

ジの要求性能は、事象の発生確率（SSCH 損傷確率）で表すことができる。この考え方に基づくると、クリフエッジとなるのは以下の場合であると考えることができる。

$$\text{物理的クリフエッジ} = \text{Max}[P'(\alpha)]$$

P：要求性能に関わる SSCH の損傷確率

$\alpha$ ：地震動の強さ

一方、知識起因クリフエッジは、プラントの状態があらかじめ想定した範囲から逸脱する事象であり。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これにあたる。即ち、入力地震動の増大に伴う解析対象範囲を超えた領域、或いはこれまでの経験からでは想定出来ないような未知の領域への突入、想定外の事象や現象（挙動）の発生が知識起因クリフエッジとなる。従って、知識起因クリフエッジの要求性能は以下で表すことができる。

- SSCH の健全性に対する入力地震動の物理量（変位、加速度等）
- 設計及び解析で対象とする具体的なプラント挙動
- モデル化の範囲、詳細さ等の度合い

この考え方に基づくると、クリフエッジとなるのは以下の場合であると考えられる。

$$\text{知識起因クリフエッジ} = \text{Max}[K'(x)]$$

K：要求性能に関わる知識量

x：地震動の強さ等のパラメータやスコープの範囲

知識起因クリフエッジの回避は、地震時応答を想定内に収める等、想定外の範囲を狭めることで対処することになる。

#### (4) 各クリフエッジと要求性能

原子力プラントの安全設計は深層防護<sup>[3.1-2]</sup>の考え方に基づいており、設計で考慮する過渡事象や事故のようなプラントの状態が大きく変わる物理現象への対処を行う設備は深層防護に対応して設計されている。従って、深層防護の各レベルと物理的クリフエッジ及び要求性能との関係を整理することで考慮すべき物理的クリフエッジを特定することができる。

まず、深層防護の各レベルが喪失する条件を明確にする必要がある。表 3.1-1 に深層防護各レベルとその喪失条件、更に物理的クリフエッジの対応の整理結果を示す。物理的クリフエッジは深層防護の各レベルを跨ぐところで発生しており、深層防護各レベルの喪失条件が発生することで顕在化する。

物理的クリフエッジに対する要求性能は、以下のように表すことができる。

- 「第 1 のレベル、異常事象の発生防止」のクリフエッジ：  
原子力プラントの SSCH の損傷発生確率
- 「第 2 のレベル、異常事象の拡大防止と事故への発展防止」のクリフエッジ：  
設計基準地震発生時に原子炉を自動で緊急停止させる設備、関連する人間系の損傷発生確率

- 「第3のレベル、放射性物質の異常な放出の防止」のクリフェッジ：  
設計基準事故への対応設備、緊急時対応手順等の喪失が重畳し発生する炉心損傷の発生頻度
- 「第4のレベル、アクシデントマネジメント対策」のクリフェッジ：  
炉心損傷事故、格納容器破損による早期大規模放出事象への対応設備、SAMG、緊急時対策所、その他インフラ等の喪失が重畳し発生する格納容器機能喪失の発生頻度

また、物理的クリフェッジの領域分類と状態遷移を整理すると図 3.1-3 に示すような図となる。この考え方に基づき、プラントシステムの要求性能とそれに対応する構築物・系統・機器（SSC）の機能に加えて人員（H）の機能を同定する。

一方、知識起因クリフェッジは、表 3.1-2 に示すような領域分類が可能である。更に、図 3.1-4 に知識起因クリフェッジの領域分類と状態遷移を示す。

### 3.1.2 地震時 SSCH の要求性能の分類と整理(H27～H29)

分類・整理された地震時の原子力関連施設の要求性能について、炉心損傷や格納容器破損といったリスク、構築物、システム、機器の各レベルにおける耐力、施設自体や外部インフラの健全性維持等のクリフェッジに対する構成要素を抽出する。要求性能との関係を、イベントツリー論理モデルを用いて可視化し、現状の地震時の原子力施設の要求性能に対する指標におけるクリフェッジの評価を行う。

更に、クリフェッジを回避するための免震装置等の技術や地震時の人間信頼性解析手法の論理モデルへの組み込みを検討する。

#### (1) 深層防護と物理的クリフェッジ、SSCH の関係

表 3.1-1 で示したように、深層防護各レベル、対応する物理的クリフェッジと要求性能との関係は整理できるが、各要求性能に対し性能を満足している度合いを評価するためには、深層防護各レベルに関連する SSCH の関係を明らかにする必要がある。図 3.1-5 に深層防護レベルと対象 SSCH の耐力との関係のイメージを示す。深層防護のレベル 1 は原子力プラントを構成するあらゆる SSCH が対象であり、設計用の基準地震動を下回る範囲から上回る範囲まで幅広く分布している。一方、レベル 2 以上のレベルにおいては、設計用の基準地震動を上回り、大きな地震動にも対応できるような耐力を備えること、更により高度な多重化或いは多様化が求められる。

#### (2) 要求性能に対する SSCH の分類

上記を詳細化し、プラントシステムの要求性能とそれに対応する構築物・系統・機器（SSC）の機能に加えて人員（H）の機能を同定する。表 3.1-3 に、原子力発電プラントを対象とした、深層防護各レベルに対する要求性能を実現する SSCH を示す。この表は、各深層防護レベルにおける要求性能を満足するために必要な具体的な SSCH を示すが、原子炉建屋、格納容器、原子炉容器のように、複数の防護レベルにまたがって分類されているものがある。この場合、各々のレベルにおける役割や機能は異なっており、深層防護の精神に照らし合わせると各レベルの間は機能的に独立してはならないことになる。

現実的には、例えば、原子炉建屋が壊滅的に損傷した場合は、深層防護レベル1からレベル4までが脅かされる可能性がある。このような整理によって、SSCHそれぞれにおける、深層防護各レベルの間の、地震の影響に対する独立性の確認が可能となる。

### (3) 物理的クリフエッジの回避策

物理的クリフエッジの回避策としては、大きく2つの方策があると考えられる。一つは深層防護の各々の防護レベルにおいてクリフエッジに至りにくくすることである(図3.1-6参照)。すなわち、クリフエッジの指標となるSSCH損傷確率の変化率を緩やかにすることである。これは、SSCH各々の損傷確率の変化率が最も大きくなる中央値が特定の地震加速度に集中しないように配慮することで可能となる。もう一つの方策はクリフエッジ事象自体を起りにくくすることである(図3.1-7参照)。このためには免震装置の導入や多重性、多様性といったシステム設計での対応といった方策が考えられる。

### (4) 知識起因クリフエッジの回避策

知識起因クリフエッジの全体を俯瞰して整理したものを表3.1-4に示す。ここでは、機器システムに限らず、SSCH全てのカテゴリーにおいて整理を行っている。

知識起因クリフエッジの回避策としては、大きく2つの方策があると考えられる。一つは知識起因クリフエッジのカテゴリー境界においてクリフエッジに至りにくくすることである(図3.1-8参照)。すなわち、クリフエッジの指標となる知識量の変化を緩やかにすることである。これは、知識量の変化が小さい範囲に現象をとどめることで可能となる。もう一つの方策はクリフエッジ事象自体を起りにくくすることである(図3.1-9参照)。このためには知識量を増やす、すなわち、モデル範囲外、想定外、未知領域を減らす方策が考えられる。

物理的及び知識起因クリフエッジの相関を図3.1-10に示す。クリフエッジを回避するためには、物理的及び知識起因クリフエッジ双方の効果を低減させることが重要となる。

### 3.1.3 まとめ

地震時におけるプラント全体の要求性能を定義し、これに対するクリフエッジを物理的クリフエッジ及び知識起因クリフエッジとして整理した。

物理的クリフエッジに関して、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、個々の構成要素(SSCH: Structure, System, Component, Human)のプラント状態に応じた要求性能をブレークダウンし、クリフエッジ評価を行うための論理モデルを構築するための考え方をまとめた。

また、知識起因クリフエッジに関して、要求性能を表現する指標を明確にし、これに基づき、原子炉建屋、原子炉、配管系及び機器・システムの各観点における検討の基礎となる考え方をまとめた。

物理的および知識起因クリフエッジ定義し、各クリフエッジの回避・緩和手段の概念についてまとめた。

### 参考文献

- [3.1-1] U.S.NRC, Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21<sup>st</sup> Century.  
-THE NEAR-TERM TASK FORCE REVIEW OF INSIGHTS FROM THE FUKUSHIMA DAI-ICHI  
ACCIDENT-
- [3.1-2] IAEA, INSAG-10, Defense in Depth in Nuclear Safety, A report by the International  
Nuclear Safety Advisory Group.

表 3.1-1 深層防護各レベルと喪失条件、物理的クリフエッジの対応

深層防護	定義	物理的クリフエッジ 及び深層防護レベルの喪失条件
レベル 1	異常事象の発生防止	異常事象の発生
レベル 2	異常事象の拡大防止と 事故への発展防止	<u>原子力プラントの SSCH の一部に損傷発生</u> 異常事象発生後、事故へ発展
レベル 3	放射性物質の異常な放出の防止	<u>原子炉緊急停止設備、原子炉一次冷却材バウンダリ喪失等</u> 炉心損傷、放射性物質の異常な放出
レベル 4	アクシデントマネジメント対策	<u>工学的安全設備の機能喪失</u> 格納容器破損
レベル 5	原子力災害時の防災対策	<u>アクシデントマネジメント対策の不調</u>

表 3.1-2 知識起因クリフエッジの領域分類

			知識起因クリフエッジ
既知	発生事象 想定範囲内	モデル化範囲内	
		モデル化範囲外	
想定範囲外	モデル化範囲外		
未知	想定範囲外	モデル化範囲外	

表 3.1-3 深層防護各層に対する要求性能を実現する SSCH

深層防護レベル	構築物(S)	システム(S)	機器(C)	人間系(H)
レベル 1	原子炉建屋、格納容器、原子炉容器	-	-	-
レベル 2	原子炉建屋、格納容器、原子炉容器	原子炉緊急停止機能、未臨界維持機能、除熱機能、サポート機能	センサー、論理回路等	手動スクラム操作 崩壊熱除去操作 状態監視
レベル 3	原子炉建屋、格納容器、原子炉容器	工学的安全設備（炉心冷却、FP 放出抑制） アクシデントマネジメント設備、サポート機能	ポンプ、弁、制御回路、電源等	緊急時対応手順（EOP、EPG 等） （プラント状態把握も含む）
レベル 4	原子炉建屋、格納容器、緊急時対策所、関連するインフラ等	アクシデントマネジメント、重大事故対策設備、サポート機能	AM 機器、恒設設備、モバイル機器等	SAMG、重大事故設備に係る操作 （プラント状態把握も含む）
レベル 5	-	-	-	防災に係る行動 （プラント状態把握も含む）

表 3.1-4 要求性能に対する SSCH の分類

	構築物(S)	システム(S)	機器(C)	人間系(H)	
<b>【参考】物理的クリフエッジ</b>	プラント建屋・設備の損傷 基礎浮き上がり、滑動、非線形効果、免震建屋の擁壁衝突による影響など	異常事象の発生 事故へ発展 炉心損傷、放射性物質の異常な放出 格納容器破損	左記に包含	人間の転倒 周辺の障害物への衝突 落下物の衝突	
<b>ランダム性に係る知識不足</b>	ここでは対象外とする				
<b>現象に対する知識不足</b>	データ不足	...	ハザード、フラジリティ、応答・耐力の相関係数に関するデータ不足	同左	人間転倒のクライテリア（足の踏み出し幅）の設定
	モデル化範囲外単純化	強非線形挙動、モデル化対象外領域の挙動、免震建屋の擁壁衝突による影響など 積層ゴムは線形範囲内での使用することを前提としており、非線形挙動の発現は想定外事象 擁壁との衝突は発生しないことを前提としており、衝突の発生は想定外事象	<b>従来の地震リスク評価モデルの対象となっていない事象 例)機器間の従属性(現状、完全従属と想定)</b>	左記に包含	人間転倒評価モデルの外挿
	モデル不完全性	既知	...	<b>モデル化が困難な事象 例)複合事象、動的事象等</b>	左記に包含
	未知	地震動の位相などに起因すると考えられる応答の不確実性があるが、地震動を正確に予測することは困難で、知識の範囲を逸脱	想定すら出ていない事象 例)原子炉容器損傷後の格納容器内の物理現象に対する地震の影響全く未知の事象	左記に包含	...

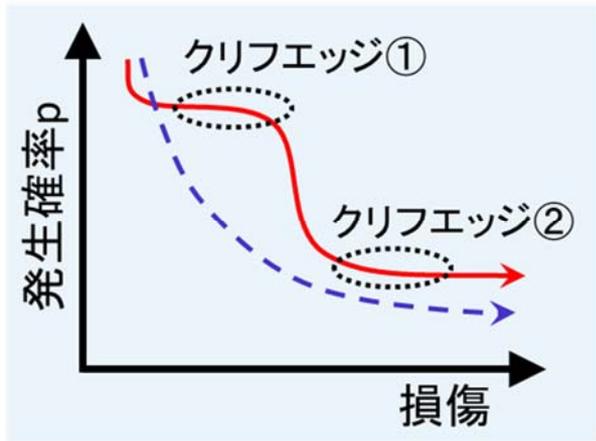


図 3.1-1 物理的クリフエッジのイメージ

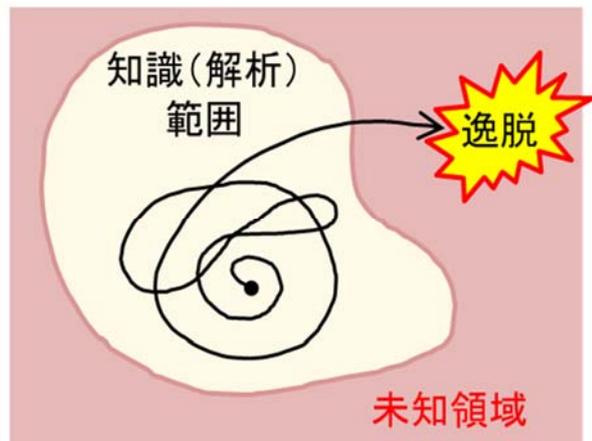


図 3.1-2 知識起因クリフエッジ

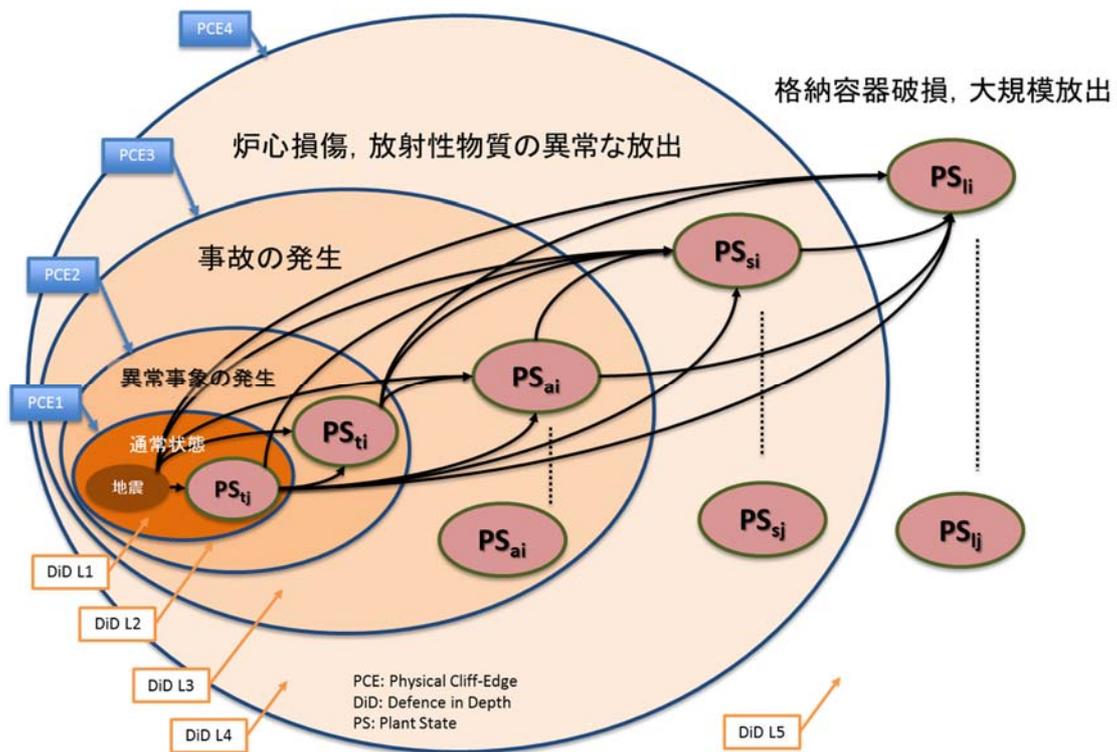


図 3.1-3 物理的クリフエッジの領域分類と状態遷移

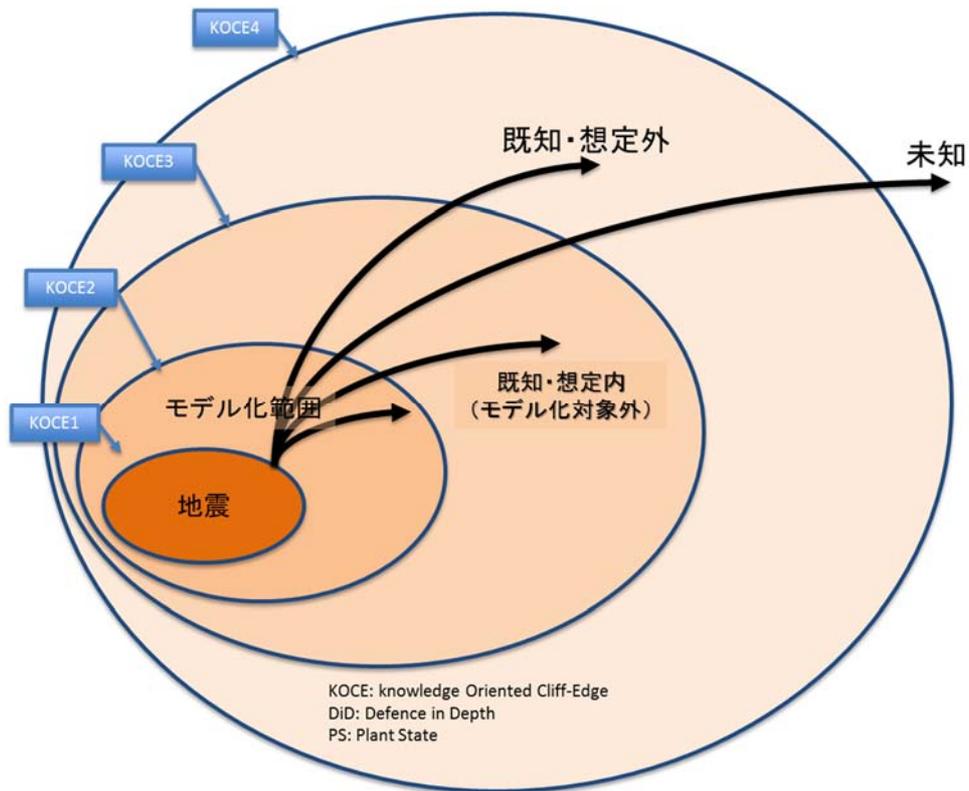


図 3.1-4 知識起因クリフエッジの領域分類と状態遷移

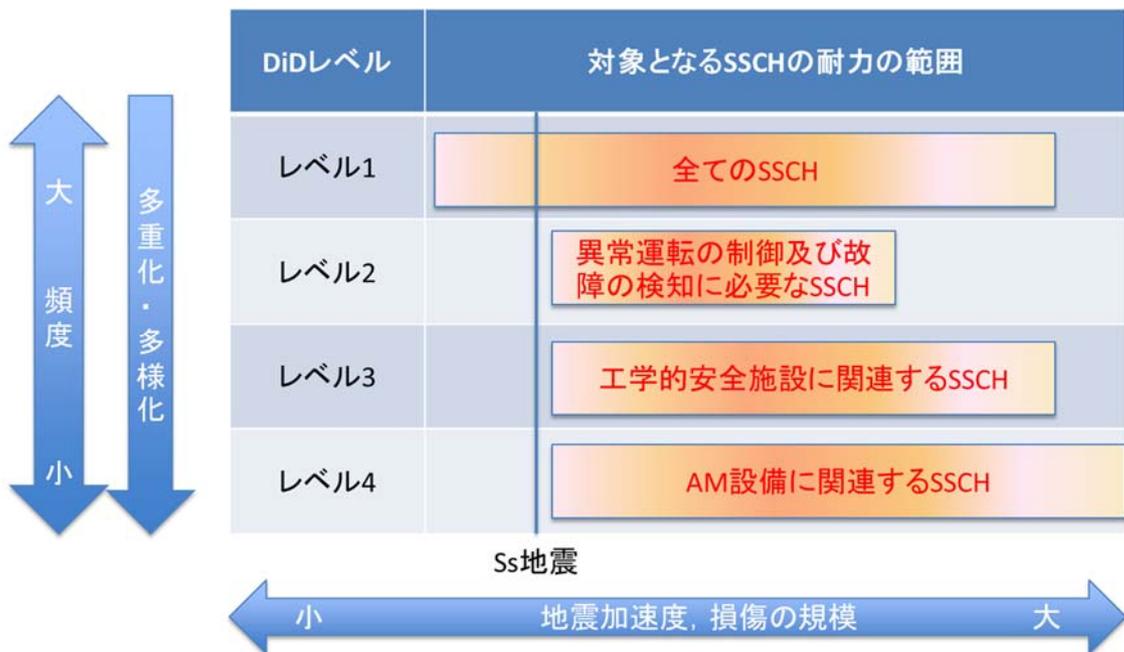


図 3.1-5 深層防護レベルと対象 SSCH の耐力との関係

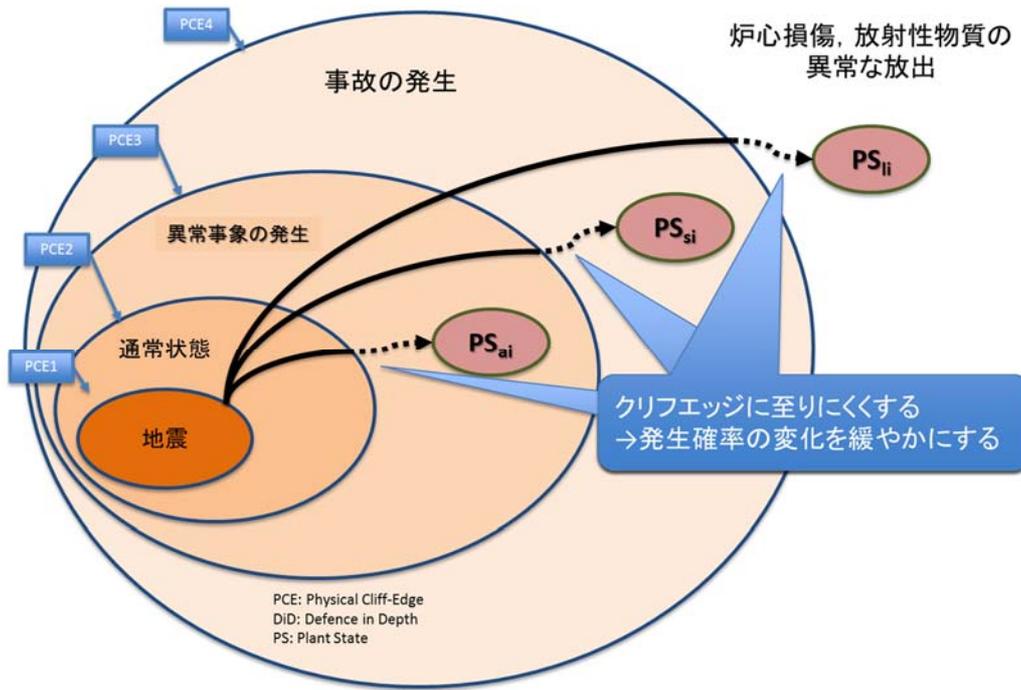


図 3.1-6 物理的クリフエッジの回避・緩和手段 (1/2)

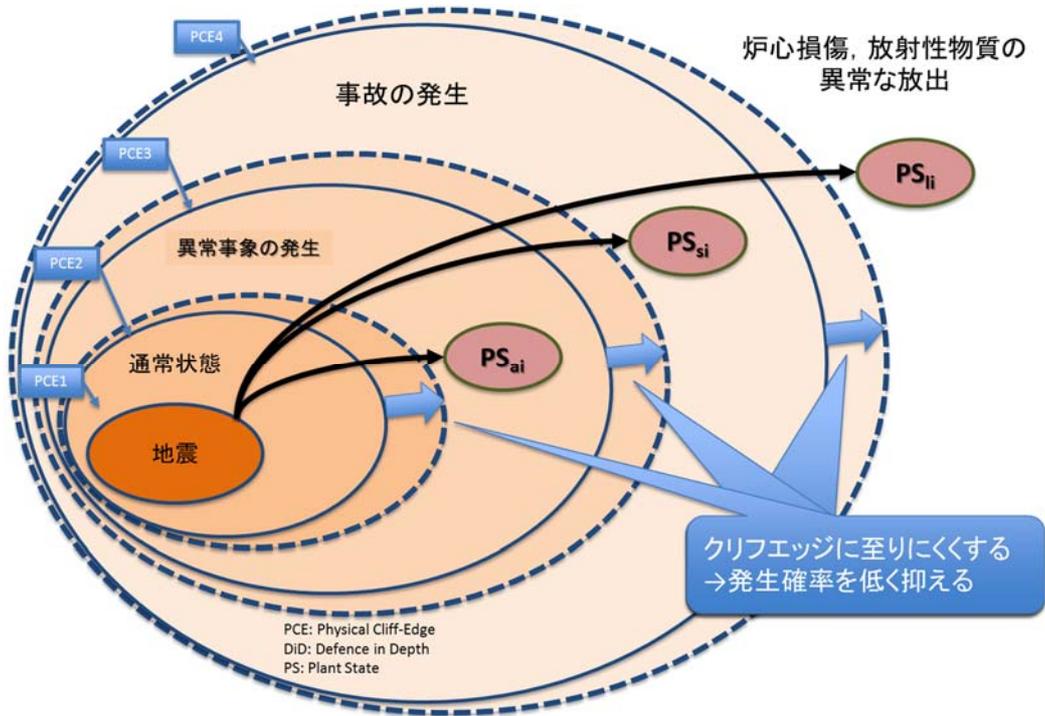


図 3.1-7 物理的クリフエッジの回避・緩和手段 (2/2)

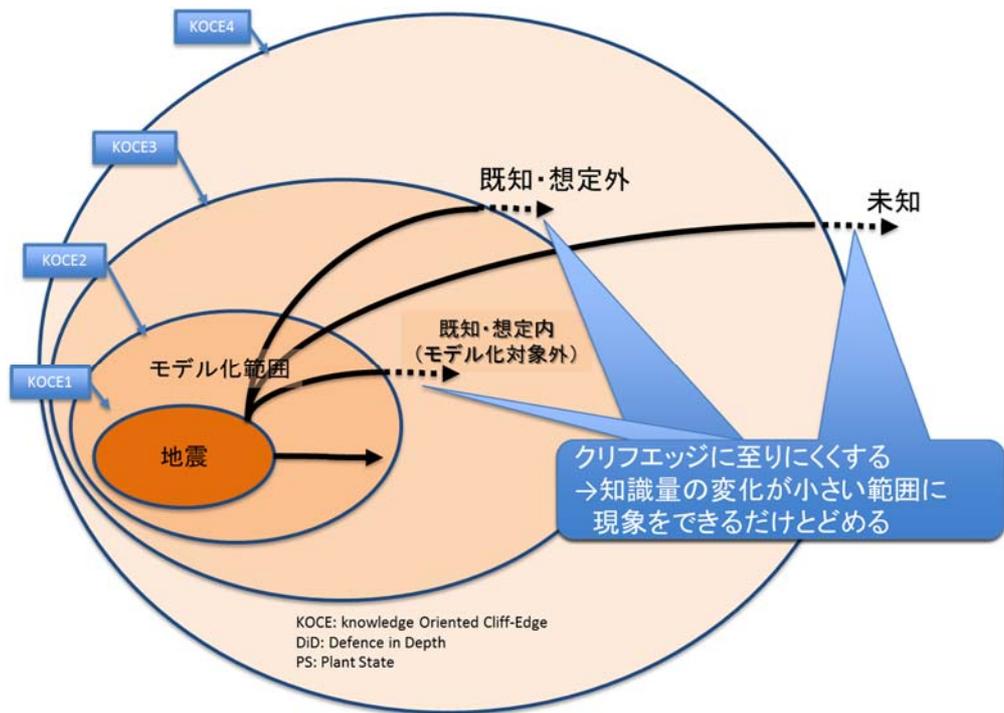


図 3.1-8 知識起因クリフエッジの回避・緩和手段 (1/2)

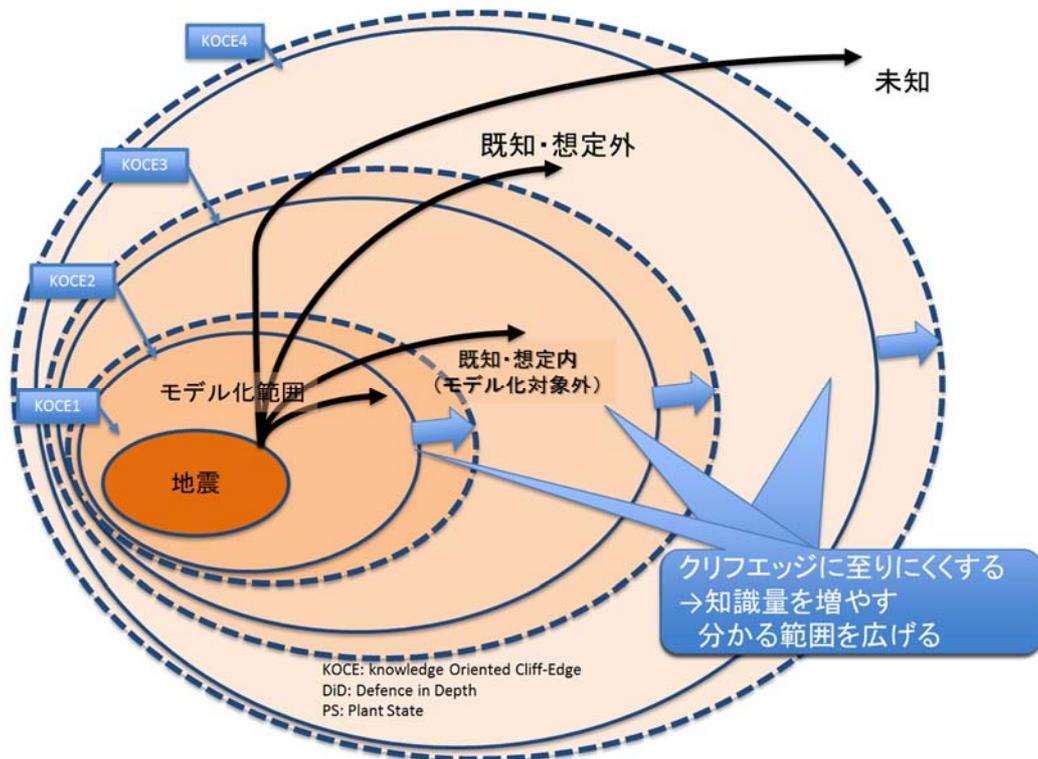


図 3.1-9 知識起因クリフエッジの回避・緩和手段 (2/2)

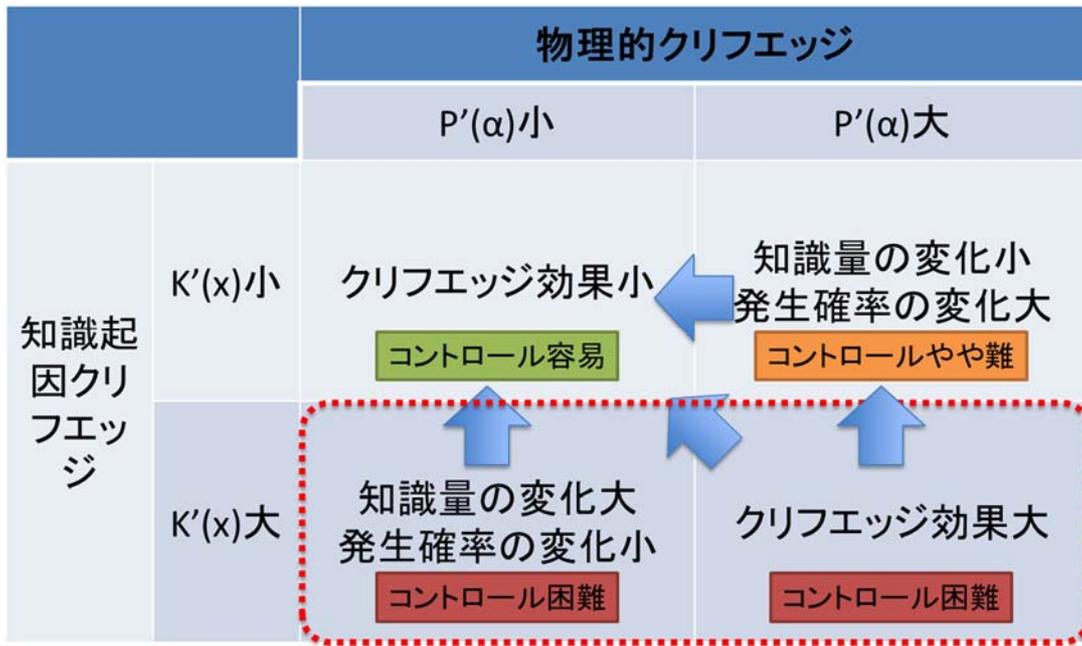


図 3.1-10 物理的及び知識起因クリフエッジの相関

## 3.2 原子カプラントの地震時挙動とクリフエッジ回避技術の開発

### 3.2.1 建屋システムのクリフエッジ回避技術（再委託先：日本原子力研究開発機構）

これまでに整備した建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフエッジ特定のための応答解析を継続するとともにクリフエッジ回避のための検討をすすめた。また、建屋システムのフラジリティ曲線の評価を行い、クリフエッジ回避技術についてまとめた。

#### 3.2.1.1 はじめに

本業務では、建屋システムのクリフエッジ回避技術の開発を行う。平成 27 年度は平成 28 年度以降実施する 2 つのクリフエッジ（物理的クリフエッジと知識起因のクリフエッジ）の特定と特徴、その回避技術の検討、および、機器や人間挙動評価のための入力条件提示のために、モデル整備を行った。平成 28 年度は、平成 27 年度に整備した建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフエッジ特定のための応答解析を実施し、機器等の評価作業のために結果データを提供した。また、クリフエッジ回避のための予備的な検討を行った。平成 29 年度は、これまでに整備した建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフエッジ特定のための応答解析を継続するとともにクリフエッジ回避のための検討をすすめた。また、建屋システムのフラジリティ曲線の評価を行い、クリフエッジ回避技術についてまとめた。

#### 3.2.1.2 応答解析を行う対象施設の設定【H27】

応答解析を行う対象施設として、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、IAEA の KARISMA プロジェクト（東京電力柏崎刈羽原子力発電所 7 号機の建屋や機器を対象とする国際ベンチマーク解析プロジェクト）<sup>[3.2.1-1]</sup> で用いられ IAEA Report として公開となっているプラント情報およびサイト情報を利用して設定することとした。

#### 3.2.1.3 モデルデータの整備【H27】

##### (1) 原子炉建屋のモデルデータの整備

##### a. 原子炉建屋の弾塑性モデル化

本業務では建屋システムのクリフエッジを特定する必要があることから、既存原子炉建屋モデルをもとに構造材料の非線形特性を考慮したモデルデータを整備した。物理的クリフエッジは地震入力を増大させて構造物の挙動を分析することにより評価し、知識起因のクリフエッジの評価については、解析手法の違い（弾性と弾塑性解析）、解析モデルの違い（質点系モデルと 3 次元詳細モデル）による結果の違いを考察することとする。

既存原子炉建屋モデルは、IAEA の KARISMA プロジェクトにおけるプラント情報をもとに H24-26 年度原子力基礎基盤研究委託事業による委託業務<sup>[3.2.1-2]</sup> として原子力機構が作成したものである。図 3.2.1-1 に今回対象とした原子炉建屋モデルを示す。

3 次元詳細モデルへの RC 非線形特性の設定では、耐震壁、補助壁のシェル要素に対して、前川モデル<sup>[3.2.1-3]</sup> を用いることとし、今回のモデルでは床、基礎スラブの非線形性は考慮せず弾性として扱うこととした。

鉄筋は、耐震壁・補助壁のシェル要素に対して鉄筋比で設定することとし、鉄筋比は、既往研

究<sup>[3.2.1-2]</sup>で整備した原子炉建屋モデルの値を用いた。

## b. 整備した原子炉建屋モデルの妥当性検証

### ① 妥当性検証のための解析条件および解析ケース

本業務で整備した 3 次元原子炉建屋モデルの妥当性を検証するために、既存地震動による弾塑性地震応答解析を実施した。また比較のために同建屋の既存質点系モデル (SR モデル) による解析も実施し比較を行った。今回は入力地震動 (Ss 相当) を 1、2、3 倍として NS 方向単一入力とした解析を実施した。

### ② 質点系モデルの解析結果

質点系モデルの出力内容は、最大応答分布 (水平加速度、せん断ひずみ)、せん断応力-せん断ひずみ関係 (1F、質点 5-6)、加速度応答スペクトル (h=5.0%) である。

最大応答分布の傾向について、入力地震動 1 倍の入力では弾性範囲内の応答となった。2 倍の入力では全体的に第 1 折れ点を超え、3F~B2F (質点 4~8) では第 2 折れ点を超えるひずみ量となっている (1000  $\mu$  程度)。3 倍の入力では 3F~B2F (質点 4~8) でひずみが大幅に増加し、2000  $\mu$  を超える。最大加速度分布の傾向も変化する。せん断力-せん断ひずみ関係からも同様の傾向を確認できる。また、入力を 2 倍、3 倍と大きくするほど加速度応答スペクトルが増大する傾向を確認できる。特に、B1F~1F のレベルでは入力が 3 倍となったときに加速度応答スペクトルが増大しており、これは 3 倍の入力において特にひずみの増大が著しいことに起因すると推測される。特に質点 6 下の壁でひずみの増幅が顕著であり、その振動数帯は 5Hz 付近であることを確認できる。

### ③ 3 次元詳細モデルの解析結果

3 次元詳細モデルの地震応答解析結果について考察する。

出力内容は、

- ・最大値分布：加速度、せん断ひずみ、ひび割れ面直交方向のひずみ、
- ・指定時刻分布：ひび割れ、最小主ひずみ (2000  $\mu$  に達していないことを確認)

※指定時刻図は 1F~2F のフロア間相対変位が最大となる T=23.37s、23.58s の 2 時刻で出力

- ・加速度応答スペクトル：機器位置、外壁位置

である。

最大加速度分布を確認したところ、入力を 2 倍とした場合、波形で比較すると 3 次元詳細モデルと質点系モデルの応答傾向は似た傾向を示した。また、入力を 3 倍とした場合も、全体的な傾向は入力を 2 倍とした場合と同様の傾向である。

最大せん断ひずみについては、3 次元詳細モデルでは 1F (開口が多いフロア) より上層階ではほとんどひずみが生じていない結果が得られた。2 倍の入力時よりも 3 倍の入力時の方がひずみが顕著に増大していることが確認できた。また、図 3.2.1-2 に質点系モデルと 3 次元詳細モデルの最大せん断ひずみの高さ方向分布の比較を示す。3 次元詳細モデルのせん断ひずみの比較においては、3 倍の入力時には両者の差が大きくなっていることが確認できる。これは質点系モデルの方が非線形化が進み、ひずみ量が大きくなったためと考えられる。

3 次元詳細モデルの各階外壁 4 辺のそれぞれ中央付近の加速度応答スペクトルと、質点系モデ

ルの各階の加速度応答スペクトルを比較した結果、同一階における 3 次元詳細モデルの外壁 4 辺の応答はほぼ同様な値を示しており、外壁位置による差は小さい結果となった。一方、3 次元詳細モデルと質点系モデルの結果を比較すると、3 倍の入力時において 3 次元詳細モデルと質点系モデルでひずみの値が異なっているため、加速度応答に差が表れていると推測される。外壁位置における加速度応答スペクトル(減衰  $h$  は 5%)を図 3.2.1-3 に示す。

機器位置における加速度応答スペクトル(減衰  $h$  は 5%)については、外壁の場合と同様、機器位置においても同一階における 3 次元詳細モデルの応答結果はほぼ同様な値を示しており、機器位置(床位置)でのばらつきは小さいことがわかった。一方、3 次元詳細モデルと質点系モデルの結果を比較すると、1、2 倍の入力時はほぼ同様な値を示しているが、3 倍の入力時は、3 次元詳細モデルと質点系モデルの応答に外壁位置の場合と同様の違いが表れている。すなわち、B1F、1F において、質点系モデルの応答は周期 0.2 秒付近で 3 次元詳細モデルのそれぞれ 1.5~2 倍の応答スペクトルを示している。

これらの違いは、3 つのモデルの非線形領域における応答特性が異なるために生じていると推測されることから、知識起因に基づくクリフエッジの事例ととらえることができる。0.2 秒付近は配管系の固有周期近傍であり、過大入力の場合には、質点系モデルではクリフエッジとなるような事例も 3 次元詳細モデルを用いることで回避できる可能性を示唆している。

## (2) 原子炉建屋モデルの基礎免震化

### a. 原子炉建屋モデルへの免震装置の組み込み

免震装置による建屋応答への影響を実構造で検討するために、原子炉建屋の 3 次元詳細モデルおよび質点系モデルへの免震装置の組み込みを実施した。免震ばねは基礎底面に追加した剛板と基礎底面の間に追加するものとし、底面地盤ばねおよび側面地盤ばねは追加した剛板に接続し、基礎側面と剛板の間の遊間部は衝突を考慮するモデル化とすることとした。質点系モデルについても同様の組み込み方法を採用した。ここでは、耐震設計された原子炉建屋に免震装置を導入しているため、以下、「免震導入建屋」とよぶこととする。

### b. 原子炉建屋モデルの免震化妥当性検証

免震化妥当性を確認するために、固有値解析を実施した。地盤ばねモデルは有効質量比が各方向 2 次モード程度まで分散しているのに対し、免震ばねモデルの有効質量比はほとんど 1 次モードに集中しており、免震装置導入の効果を確認した。また、時刻歴応答解析を実施し、安定的に解析可能であることを確認した。

## (3) 免震重要棟における検討

### a. 免震重要棟の諸元

資料「東北地方太平洋沖地震における福島第二原子力発電所免震重要棟の挙動」<sup>[3.2.1-4]</sup>における免震重要棟情報を参考とし、免震重要棟のモデル化を実施した。免震重要棟の解析モデル例を図 3.2.1-4 に示す。

### b. 免震重要棟モデルの検討

免震重要棟モデルを検証するために、固有値解析を実施した。NS 方向、EW 方向それぞれ 1 次

モードが有効質量比 1 となることを確認した。固有振動数や固有周期の値については、文献 [3.2.1-4] と整合していることを確認済みである。固有値解析結果を表 3.2.1-1 に示す。

#### 3.2.1.4 建屋システムのクリフエッジの定義【H28】

##### (1) 2つのクリフエッジ

建屋システムで想定されるクリフエッジの例を表 3.2.1-2 に示す。今年度は免震建屋のクリフエッジに着目する。

##### (2) 免震建屋のクリフエッジの例

免震建屋のクリフエッジのイメージを図 3.2.1-5 に示す。免震装置を導入することで、建屋応答は大幅に低減し、通常の耐震建屋の物理的クリフエッジの回避効果が期待される。また、耐震建屋が非線形領域にはいる入力地震動レベルにおいて、免震建屋では線形領域となり、機器の弾性設計が可能となることから、設計用評価精度の向上が期待される。一方、免震建屋のクリフエッジとして、免震装置の損傷や、免震建屋と擁壁との衝突による損傷等が考えられる（図 3.2.1-5 の免震建屋の物理的クリフエッジに相当）。そこで、これらの損傷の発生を想定した免震建屋の応答解析を実施した。

#### 3.2.1.5 入力地震動【H28】

入力地震動は図 3.2.1-6 に示す 2 種類の模擬地震動を用いた。それぞれの加速度応答スペクトルを図 3.2.1-7 に示す。入力地震動 A は断層モデルを用いて生成した波、入力地震動 B はスペクトル波である。それぞれの最大加速度は基準地震動レベル（2010 年以前）であり、数値を表 3.2.1-3 に示す。

#### 3.2.1.6 建屋システムのクリフエッジ特定のための応答解析 1【H28】

##### (1) 原子炉建屋

免震導入建屋モデルの解析条件を表 3.2.1-4 に示す。比較のために耐震建屋モデルでも一部解析を実施した。表 3.2.1-4 に記載の条件でそれぞれ 2 種類の入力地震動に対して応答解析を実施した。

免震導入建屋の解析モデル例を図 3.2.1-8 に示す。免震装置の履歴特性および 3 次元詳細モデルの免震装置の配置イメージをそれぞれ図 3.2.1-9 および図 3.2.1-10 に示す。3 次元詳細モデルの免震履歴特性は、質点系モデルの LRB モデルと等価なノーマルバイリニアとして定義する。免震装置の設定に当たっては、文献 [3.2.1-5] および [3.2.1-6] を参照した。

3 次元詳細モデルの RC 非線形モデルの設定は、耐震壁、補助壁のシェル要素に対して、前川モデルを用いるものとし、ピークひずみは、初期の傾きをヤング率と一致させるため、 $3000\mu$  に設定した。シェル要素は、単層シェル要素としてモデル化した。ひび割れモデルは、非直交 4 方向ひび割れモデルとした。鉄筋の付着係数は、 $C=1.0$  とし、シェル要素に対して鉄筋比で設定した。3 次元詳細モデルの減衰は剛性比例型減衰を設定し、質点系モデル(基礎固定/免震あり)の 2 次振動数で 5%となるよう設定した。(免震装置の減衰は履歴減衰で考慮される為、2 次モードをターゲットとした)コンクリートおよび鉄筋の材料定数を表 3.2.1-5 に、前川モデルの応力ひずみ関

係を図 3.2.1-11 および図 3.2.1-12 に示す。

## (2) 免震重要棟

免震重要棟の地震応答解析の解析ケース表を表 3.2.1-6 に示す。

### 3.2.1.7 建屋システムのクリフェッジ特定のための応答解析結果 1【H28】

#### (1) 原子炉建屋

##### a 質点系モデルの解析結果

入力地震動 A、B の NS 方向入力による質点系モデルの水平方向（NS 方向）応答解析結果をそれぞれ表 3.2.1-7 と表 3.2.1-8 に、鉛直方向の応答解析結果を表 3.2.1-9 に示す。

図 3.2.1-13 および図 3.2.1-14 に、耐震建屋と免震導入建屋の解析結果の比較を示す。両図 (a) (b) より、建屋への免震導入効果を確認できる。また、入力地震動 B のように入力地震動が長周期成分を多く含んでいる場合には、水平変位が過大となる傾向があることがわかる。その場合、擁壁への衝突の可能性が高くなり、擁壁との衝突が生じた場合には図 3.2.1-14(c) のように局所的に大きなせん断ひずみが生じ損傷が生じる可能性があることがわかる。また、衝突時を模擬するための衝突バネの剛性等をどのように仮定するかにより衝突時の応答が大きく異なることが分かったため、衝突バネの剛性を変化させて解析を実施し、クリフェッジ回避のための予備的な検討を行った。これらの入力地震動の周期成分の違いや衝突時のモデル設定の違い等に起因する応答の違いは、フラジリティ評価に影響する可能性があることから、知識起因のクリフェッジの一因となりうることを示唆される。なお、得られた床応答を機器等の評価作業のために提供した。

##### b 質点系モデルと 3 次元詳細モデルの解析結果の比較

図 3.2.1-15 に入力地震動 A の NS 方向入力に対する質点系モデルおよび 3 次元詳細モデルにおける NS 方向の最大せん断ひずみの高さ分布を示す。荷重 1 倍ではせん断ひずみは許容範囲内であり、質点系モデルの結果は 3 次元詳細モデルの結果の中央値と近い結果となっている。建屋の一階より下層の階では、3 次元詳細モデルの結果の中央値は質点系モデルの結果より低い値となる傾向を確認できる。一方、建屋の上層階では、建屋の屋根トラス下の大空間の壁の面外変形により、その壁と垂直な壁のせん断ひずみが大きくなる傾向があり<sup>[3.2.1-4]</sup>（図 3.2.1-16 参照）、質点系モデルよりも 3 次元詳細モデルの結果の中央値が大きい値となっていることを確認できる。この結果は、質点系モデルでは考慮していない 3 次元効果により、質点系モデルで評価した最大ひずみよりも（2、3 倍）大きな最大ひずみが発生する可能性を示唆しており、フラジリティ曲線が前倒しとなるような知識起因のクリフェッジの一因となる可能性がある。

## (2) 免震重要棟

入力地震動 A、B の NS 方向入力による免震重要棟モデルの解析結果を図 3.2.1-17 に示す。入力地震動のオリジナルを 0.6、1、2 倍として得られた床の加速度応答スペクトルを、それぞれ黒線、青線、赤線で示す。0.1-0.2 秒の卓越周期は建屋の固有周期であり、建屋上部の質点 1 でははっきりと確認できる。4-6 秒近傍の卓越周期は、入力地震動の周期成分であり、入力地震動によって成分が異なっていることを確認できる。

### 3.2.1.8 建屋システムのクリフェッジ特定のための応答解析 2【H29】

平成 29 年度は、免震導入建屋モデルの解析条件を見直し、以下の免震特性を用いて解析を実施した。

○履歴特性

水平：大ひずみ領域でのハードニングを考慮(平成 28 年度はバイリニア型)

ゴムの特性(多点折れ線)を考慮した要素とダンパーの特性(バイリニア)を考慮した要素の 2 要素(鉛直を含め 3 要素)で免震装置をモデル化 (図 3.2.1-18)

鉛直：非線形性を考慮(平成 28 年度は弾性ばね)

※ロッキング挙動に抵抗するよう、水平モデルにも設定 (図 3.2.1-19)

○衝突防止フェールセーフ機構

剛性型：ばね定数については以下で設定 (衝突剛性の剛条件は平成 28 年度実施)

→文献[3.2.1-6]より、 $1.0E+6\text{kN/m}$  を設定

(文献では積層ゴム 360 基相当として上記を設定)

粘性型：減衰定数については以下で設定(衝突剛性の剛条件は平成 28 年度実施)

→文献[3.2.1-6]より、 $1.0E+5\text{ kN}\cdot\text{s/m}$  を設定

(文献では既製品最大仕様のダンパー 80 基相当として上記を設定)

免震特性をまとめて表 3.2.1-10 に示す。また、検討ケースを表 3.2.1-11 に示す。

### 3.2.1.9 建屋システムのクリフエッジ特定のための応答解析結果 2【H29】

#### (1) 質点系モデルの解析結果

入力地震動 A、B の NS 方向入力 (一部水平 (NS) 上下 (UD) 同時入力) による質点系モデルの水平方向 (NS 方向) 応答解析結果をそれぞれ付録の表 A1-4 と表 A1-5 に示す。また、上下単独入力および水平上下同時入力時の鉛直方向の応答解析結果を付録の表 A1-6 に示す。また、基礎上の加速度応答スペクトルの解析結果例を図 3.2.1-20 に示す。

免震構造は耐震構造に比べ応答が低減されるが、擁壁と衝突するような事象が起きると、耐震構造と同様に非常に大きなせん断ひずみ量となる。また、加速度応答スペクトルで見ると短周期側が大きな応答となっている。しかしながら、緩衝材及びダンパーを考慮することで、衝突時の応答が低減できることがわかる。ダンパーを考慮したモデルのほうがより低減される傾向となる。上下方向の応答については、一部パルスが発生し最大値が非常に大きい値となっている。

#### (2) 質点系モデルと 3 次元詳細モデルの解析結果の比較

図 3.2.1-21 に入力地震動 A (NS) に対する耐震建屋および免震導入建屋の最大せん断ひずみの高さ方向分布を示す。免震導入による大きな応答低減を確認できる。

図 3.2.1-22 に同じく入力地震動 A (NS) の 1~5 倍の荷重に対する耐震建屋および免震導入建屋の質点系モデルおよび 3 次元詳細モデルにおける NS 方向の最大せん断ひずみおよび最大加速度の高さ分布を示す。3.2.1.7 と同様、荷重 1 倍では最大せん断ひずみ分布、最大加速度分布ともに弾性範囲内であり、質点系モデルの結果は 3 次元詳細モデルの結果の中央値と近い結果となっている。荷重が増えるにつれ、建屋の一階より下層の階では、3 次元詳細モデルの結果の中央値は質点系モデルの結果より低い値となる傾向を確認できる。一方、建屋の上層階では、建屋の屋根トラス下の大空間の壁の面外変形により、その壁と垂直な壁のせん断ひずみが大きくなる傾

向があり、質点系モデルよりも 3 次元詳細モデルの結果の中央値が大きい値となっていることを確認できる。

免震導入建屋についても同様の解析を実施し、結果を図 3.2.1-23 に示す。耐震建屋よりもひずみや加速度レベルが小さく、非線形性がそれほど大きくないことから、質点系モデルと 3 次元詳細モデルの結果の違いは耐震建屋よりも小さい結果となっている。3 次元詳細モデルの最大応答値をまとめて付録の表 A1-7 に示す。

### 3.2.1.10 建屋システムのフラジリティ評価【H29】

#### (1) 建屋の 3 次元詳細モデルの解析結果に基づくばらつき評価

フラジリティ評価に先立ち、3 次元詳細モデルの入力地震動 A (NS) の荷重 1~5 倍に対する解析結果を用いて応答のばらつき評価を行う。3 次元詳細モデルの各層の中央値に対する対数標準偏差、および、質点系モデルの結果に対する 3 次元詳細モデルの結果の比（応答比）を図 3.2.1-24 および図 3.2.1-25 に示す。建屋各層の中央値に対する対数標準偏差は、全層平均 0.4 程度で、免震導入建屋よりも耐震建屋の方が各層の違いが大きい傾向が確認できる。応答比については、3.2.1.9 の結果と同様に、下層部で 1 より小さく、上層部で 1 より大きい値となっており、耐震建屋のほうが免震導入建屋よりも各層の値の違いが大きくなっている。

参考までに、最大加速度についても応答比を算出し、図 3.2.1-26 に示す。最大せん断ひずみと比較して、応答比のばらつきが小さいことが確認できる。

#### (2) フラジリティ評価の試行

入力地震動 A (NS) の荷重 1~5 倍に対する 3 次元詳細モデルおよび質点系モデルを用いた解析結果にもとづき、建屋システムの各層におけるフラジリティ評価を実施した。ここでは、最大せん断ひずみに着目して建屋システムの壁のフラジリティを評価した。

図 3.2.1-27 に質点系モデルおよび 3 次元詳細モデルの中央値を用いて算出したフラジリティ曲線の例を示す。評価の仮定は図 3.2.1-27 に示している。図より、質点系モデルを用いて評価した場合のクリフエッジは横軸  $S_s$  相当の 2, 3 倍にあり、3 次元詳細モデルを用いて評価することで回避できる可能性を示している。

図 3.2.1-28 に質点系モデルおよび 3 次元詳細モデル各要素（外壁）の結果を用いて算出した B1F のフラジリティ曲線の例を示す。図より、各層のばらつきを考慮した場合には質点系モデルの結果は保守的に妥当な評価結果にもみえる。しかしながら、要素ごとのフラジリティ曲線は当該層の損傷を示しているわけではなく、局所的な損傷を示しているに過ぎないことから、今後詳細な分析が必要である。

### 3.2.1.11 まとめ

本事業では、建屋システムのクリフエッジ回避技術の開発を実施した。

平成 27 年度は、応答解析を行う対象施設を設定し、モデルデータの整備作業を行った。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、文献や資料をもとに標準的な原子炉建屋および周辺地盤をモデル化した。メッシュデータ作成、材料定数、境界条件の設定などを行い、建屋および周辺地盤のモデルデータを整備した。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、文献を基に免震重要棟のモデルを作成した。それぞれのモデルについて応答解析や固有値解析により応答特性を確認した。これにより、モデルデータの整備を完了した。

平成 28 年度は、平成 27 年度に整備した建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフエッジ特定のための応答解析を実施し、機器等の評価作業のために結果データを提供した。また、クリフエッジ回避のための予備的な検討を行った。具体的には、物理的クリフエッジ特定のために免震導入建屋の応答解析を実施し、免震の応答低減効果を確認するとともに、入力地震動の周期成分により応答が大きく異なること、擁壁衝突を考慮する際には衝突条件設定により損傷の程度が異なることなどを確認した。一方、知識起因のクリフエッジの評価として、質点系モデルでは考慮していない建屋床応答の空間分布が 3 次元詳細モデルを用いることで定量的に得られることを確認した。

平成 29 年度は、これまでに整備した建屋および地盤のモデルデータを用いて、クリフエッジ特定のための応答解析を継続するとともにクリフエッジ回避のための検討をすすめた。また、建屋システムのフラジリティ曲線の評価を行い、クリフエッジ回避技術についてまとめた。具体的には、物理的クリフエッジ特定のため、H28 年度よりもより現実的な免震特性を用いた免震導入建屋と耐震建屋の応答解析を実施し、入力波ごとに免震装置が応答限界値に達する荷重レベルを確認した。また、緩衝材等を工夫することで免震装置が応答限界値に達する以前に擁壁衝突させ物理的クリフエッジを回避する方策の可能性を示唆した。一方、知識起因のクリフエッジ特定のため、建屋の 3 次元詳細モデルを用いた応答解析結果から建屋応答の空間分布を統計的に分析してフラジリティ曲線を求め、質点系モデルの結果と比較した。その結果、両モデルの結果の違いとして知識起因クリフエッジを特定し、3 次元詳細モデルを用いることで知識起因クリフエッジを回避できる可能性を見出した。

## 参考文献

- [3.2.1-1] IAEA、Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise、IAEA TECDOC、No. 1722、2013 年。
- [3.2.1-2] 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ「モデルプラント建屋・地盤応答解析による情報提供」事後報告書
- [3.2.1-3] 前川宏一他、疑似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築、土木学会論文集、No. 634、V-45、pp. 157-176、1999. 11.
- [3.2.1-4] 佐古他 4 名、日本建築学会大会（東海）、21625、2012 年 9 月
- [3.2.1-5] 浅原信吾他、原子力施設の免震技術の開発（その 33）開発成果の概要（その 2）免震建屋の設計・評価、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、2016. 8.
- [3.2.1-6] 島哲也他、原子力施設の免震技術の開発（その 34）開発成果の概要（その 3）残余のリスク評価、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、2016. 8.

表 3. 2. 1-1 免震重要棟の固有値解析結果

No	モデル	免震	1次振動数 (Hz)	1次周期 (s)
1	NS	なし	5.522	0.181
2	NS	あり	0.591	1.691
3	EW	なし	4.791	0.209
4	EW	あり	0.591	1.692

※免震なしは基礎固定を表す。

表 3. 2. 1-2 建屋システムで想定されるクリフエッジの例

物理的クリフエッジ	知識起因のクリフエッジ
発生頻度のわずかな減少により、その結果の <b>重大性が顕著に増加</b> し得る現象 (NEI, 2013) (地震による建屋局部損傷に起因する重要設備の機能不全による炉心損傷の発生等)	<b>想定外事象の発生や解析範囲を超えた未知の領域への突入</b> (モデル化対象外領域の挙動、破壊などの強非線形挙動等)

表 3. 2. 1-3 入力地震動の最大加速度

入力地震動	水平		上下
	EW	NS	UD
A	1209	848	466
B	600		400

表 3. 2. 1-4 免震導入建屋の解析条件【H28】

No	モデル	埋込み	免震	衝突	入力波	入力方向	入力倍率
1	A-1	埋込み無	耐震構造	—	地震動A	NS方向 一方向入力	×1.0倍 ×2.0倍 ×3.0倍
2	A-2		免震構造	衝突非考慮			
3	B-1	埋込み有	耐震構造	—			
4	B-2		免震構造	衝突非考慮			
5	B-2-1			衝突(縦衝材)考慮 衝突剛性1			
6	B-2-3			衝突(縦衝材)考慮 衝突剛性2			
7	A-1	埋込み無	耐震構造	—	地震動B	NS方向 一方向入力	×1.0倍 ×2.0倍 ×3.0倍
8	A-2		免震構造	衝突非考慮			
9	B-1	埋込み有	耐震構造	—			
10	B-2		免震構造	衝突非考慮			
11	B-2-1			衝突(縦衝材)考慮 衝突剛性1			
12	B-2-3			衝突(縦衝材)考慮 衝突剛性2			

※ 衝突剛性2は衝突剛性1の1/100の剛性としている

表 3.2.1-5 コンクリートおよび鉄筋の材料定数

コンクリート				鉄筋	
圧縮強度 Fc N/mm2	引張強度 $\sigma_{cr}$ N/mm2	ポアソン比 $\nu$ -	ヤング係数 Ec N/mm2	降伏点 $\sigma_y$ N/mm2	ヤング係数 Es N/mm2
49.0	3.08	0.2	3.13E+04	235	205000

表 3.2.1-6 免震重要棟 地震応答解析 解析ケース

No	モデル		入力波	入力方向	入力倍率
1	NS	質点系モデル	地震動A	NS方向	×0.6倍 ×1.0倍 ×2.0倍
2	NS		地震動B	NS方向	
3	EW	質点系モデル	地震動A	EW方向	×0.6倍 ×1.0倍 ×2.0倍
4	EW		地震動B	EW方向	

表 3.2.1-7 地震応答解析結果 水平(NS)方向 最大応答一覧 (入力地震動 A) 【H28】

入力地震動A NS方向					解析結果 最大応答値一覧					
					建屋				免震装置	
					加速度 (水平)		せん断 ひずみ	せん断 応力	相対変位	ひずみ
モデル	埋込み	免震	衝突	入力 倍率	1F (cm/s <sup>2</sup> )	基礎上 (cm/s <sup>2</sup> )	B2F (×10 <sup>-3</sup> )	B2F (N/mm <sup>2</sup> )	(cm)	(-)
A-1	なし	なし	-	×1.0	958	1003	0.44	3.36	/	
				×2.0	1719	1809	2.06	5.53		
				×3.0	2471	2142	3.03	6.69		
A-2	なし	あり	なし	×1.0	169	201	0.07	0.86	13.8	0.53
				×2.0	226	268	0.09	1.12	32.6	1.25
				×3.0	294	335	0.10	1.31	54.6	2.10
B-1	あり	なし	-	×1.0	502	444	0.20	2.64	/	
				×2.0	932	989	0.95	4.20		
				×3.0	1852	1466	2.22	5.72		
B-2	あり	あり	なし	×1.0	159	264	0.07	0.94	9.5	0.36
				×2.0	222	446	0.12	1.61	28.0	1.08
				×3.0	290	805	0.19	2.43	44.5	1.71
B-2-1	あり	あり	あり	×1.0	159	264	0.07	0.94	9.5	0.36
				×2.0	222	446	0.12	1.61	28.0	1.08
				×3.0	-	-	1.16	4.45	40.2	1.55
B-2-3	あり	あり	あり	×1.0	159	264	0.07	0.94	9.5	0.36
				×2.0	222	446	0.12	1.61	28.0	1.08
				×3.0	-	-	0.19	2.43	43.3	1.66

※ 衝突ばね剛性 衝突なし K=0.1(kN/m) 衝突あり K=1.0E+9(kN/m)

※ 地震動Aは入力倍率1倍および2倍では衝突しない為、B-1～B-2-3の応答は変化しない

※ 衝突時の加速度はパルスを拾ってしまう為、ここでは表記していない

表 3.2.1-8 地震応答解析結果 水平(NS)方向 最大応答一覧 (入力地震動B) 【H28】

入力地震動B NS方向					解析結果 最大応答値一覧					
					建屋				免震装置	
					加速度 (水平)		せん断 ひずみ	せん断 応力	相対変位	ひずみ
モデル	埋込み	免震	衝突	入力 倍率	1F (cm/s <sup>2</sup> )	基礎上 (cm/s <sup>2</sup> )	B2F (×10 <sup>-3</sup> )	B2F (N/mm <sup>2</sup> )	(cm)	(-)
A-1	なし	なし	-	×1.0	1175	909	0.89	4.12	/	
				×2.0	1933	1977	3.52	7.28		
				×3.0	2357	2776	4.23	8.13		
A-2	なし	あり	なし	×1.0	286	321	0.10	1.27	52.9	2.03
				×2.0	616	604	0.20	2.58	178.7	6.87
				×3.0	985	1384	0.82	4.03	331.5	12.75
B-1	あり	なし	-	×1.0	590	603	0.24	2.89	/	
				×2.0	1201	1238	1.55	4.91		
				×3.0	2101	1874	4.61	8.59		
B-2	あり	あり	なし	×1.0	281	373	0.09	1.22	49.2	1.89
				×2.0	602	845	0.27	2.96	154.0	5.92
				×3.0	1023	1569	1.17	4.46	314.8	12.11
B-2-1	あり	あり	あり	×1.0	-	-	1.04	4.31	40.2	1.54
				×2.0	-	-	5.84	10.07	40.6	1.56
				×3.0	-	-	10.52	15.68	41.0	1.58
B-2-3	あり	あり	あり	×1.0	-	-	0.23	2.87	43.7	1.68
				×2.0	-	-	4.34	8.26	55.9	2.15
				×3.0	-	-	9.60	14.58	69.4	2.67

※ 衝突ばね剛性 衝突なし K=0.1(kN/m) 衝突あり K=1.0E+9(kN/m)

※ 衝突時の加速度はパルスを拾ってしまう為、ここでは表記していない

表 3.2.1-9 地震応答解析結果 鉛直方向 最大応答一覧【H28】

						解析結果 最大応答値一覧			
						建屋		免震装置	
						加速度 (鉛直)		相対変位	ひずみ
モデル	埋込み	免震	衝突	地震動	入力 倍率	1F (cm/s <sup>2</sup> )	基礎上 (cm/s <sup>2</sup> )	(cm)	(-)
A-1	なし	なし	-	A	× 1.0	544	486	/	
					× 2.0	934	827		
					× 3.0	1401	1241		
A-2	あり	あり	-		× 1.0	507	451		
					× 2.0	1014	902		
					× 3.0	1521	1353		
A-1	なし	なし	-	B	× 1.0	455	404	/	
					× 2.0	910	808		
					× 3.0	1366	1212		
A-2	あり	あり	-		× 1.0	492	439		
					× 2.0	985	878		
					× 3.0	1477	1317		

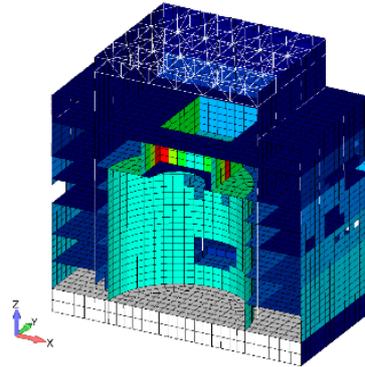
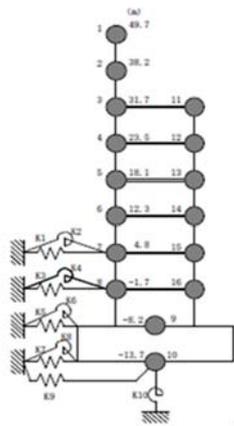
表 3. 2. 1-10 免震特性

履歴特性	水平	ゴム特性：多点折れ線	平成 29 年度	平成 28 年度
	鉛直	ゴム特性：多点折れ線		バイリニア
衝突	擁壁との クリアランス	40cm (154%) または 71.5cm (275%)		弾性 40cm (154%)
	剛性型	71.5cm (275%)		K=1.0E+9 kN/m
	フェールセーフ	K=1.0E+6 kN/m		
	粘性型	71.5cm (275%)		
	フェールセーフ	C=1.0E+5kN・s/m		-

表 3. 2. 1-11 検討ケース及び荷重スケール【H29】

No	モデル	埋込み	免震	衝突	衝突するまでの クリアランス	入力波	入力方向	入力倍率
1	B-1	埋込み有	耐震構造	-	-	地震動A	NS方向 一方向入力	×1.0倍 ×2.0倍 ×3.0倍 ×4.0倍 ×5.0倍 ×6.0倍
2	B-2		免震構造	-	-			
3	B-2-1			衝突考慮 衝突剛性1	40cm			
4	B-2-2			衝突考慮 衝突剛性1	71.5cm			
5	B-2-3			衝突(緩衝材)考慮 衝突剛性3				
6	B-2-4			衝突(粘性ダン パー)考慮				
7	B-2-5			-	-			
8	B-1	埋込み有	耐震構造	-	-	地震動B	NS方向 一方向入力	×1.0倍 ×1.5倍 ×2.0倍 ×2.5倍 ×3.0倍
9	B-2		免震構造	-	-			
10	B-2-1			衝突考慮 衝突剛性1	40cm			
11	B-2-2			衝突考慮 衝突剛性1	71.5cm			
12	B-2-3			衝突(緩衝材)考慮 衝突剛性2				
13	B-2-4			衝突(粘性ダン パー)考慮				
14	B-2-5			-	-			
15	C-1	埋込み有	耐震構造	衝突(緩衝材)考慮 衝突剛性1		地震動A	NS方向 一方向入力	×1.0倍 ×2.0倍 ×3.0倍 ×4.0倍 ×5.0倍 ×6.0倍
16	C-2	埋込み有	免震構造	-				
17	C-2-4	埋込み有		衝突(粘性ダン パー)考慮				

※衝突剛性3は衝突剛性1の1/1000の剛性としている



(a) 質点系モデル (SR)                      (b) 3次元詳細モデル (地盤ばねモデル) (3D)

図 3.2.1-1 対象とする原子炉建屋モデル

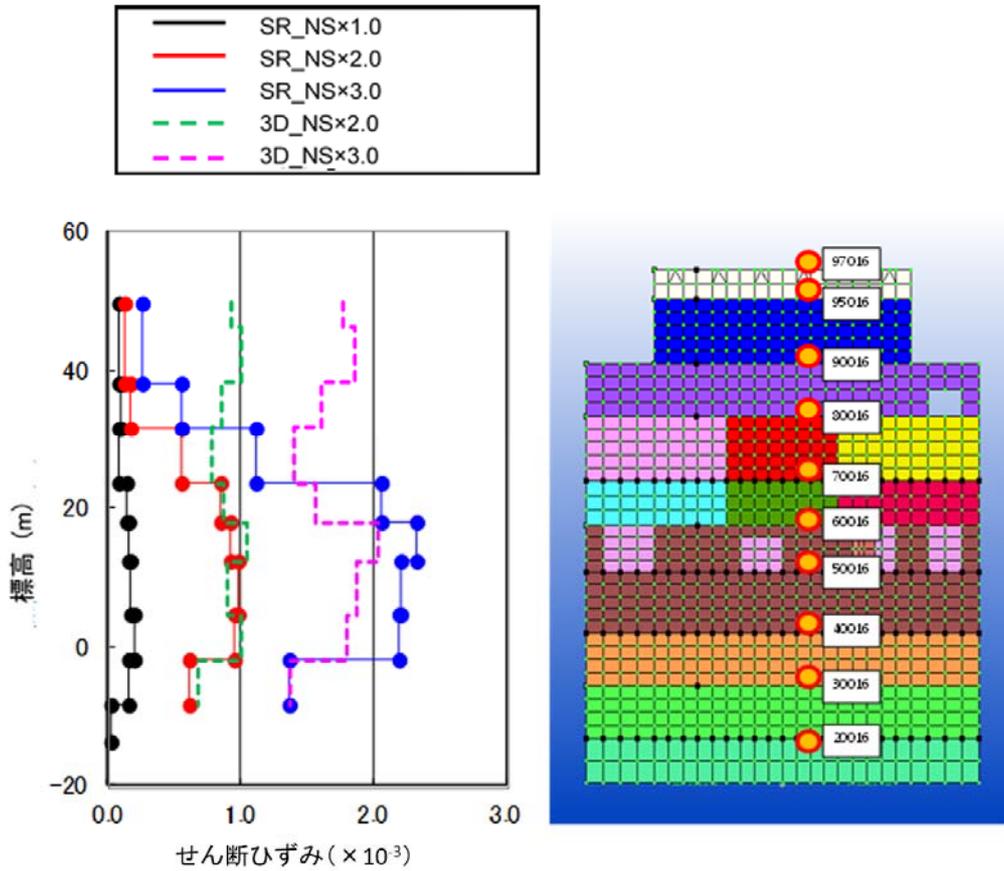


図 3.2.1-2 質点系モデルと 3次元詳細モデルの最大せん断ひずみの比較

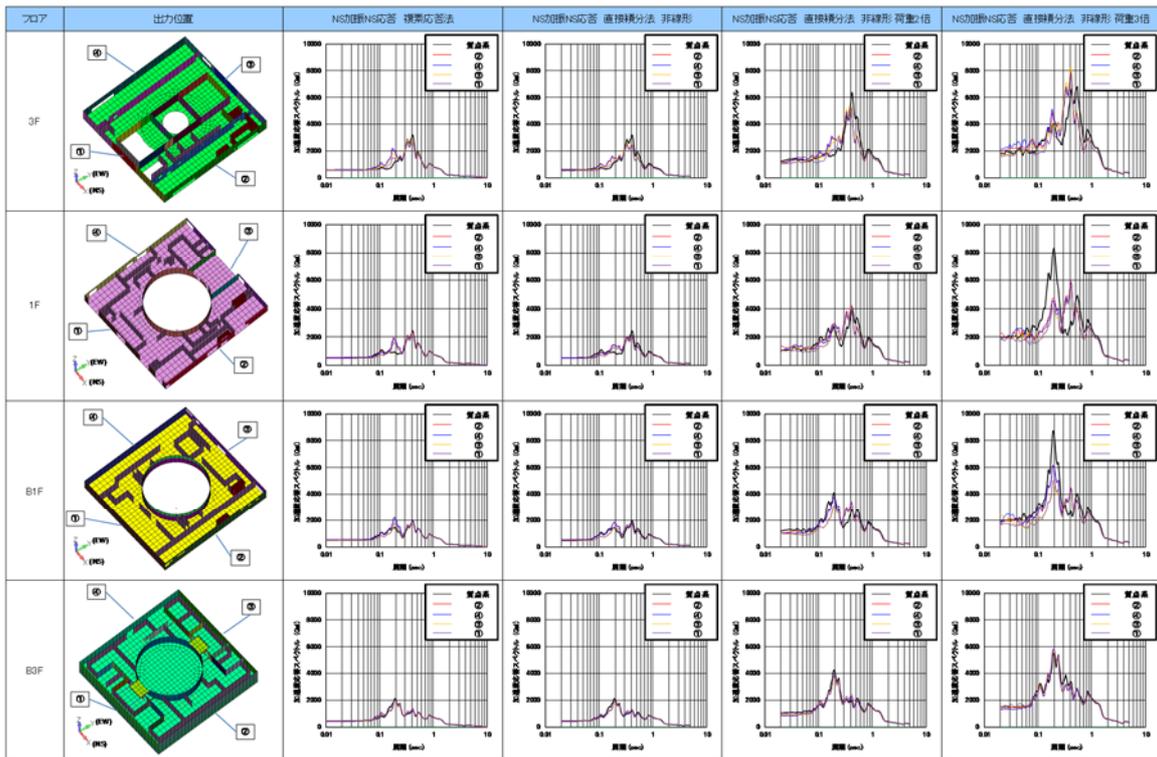


図 3. 2. 1-3 外壁位置の加速度応答スペクトル(h=5. 0%)

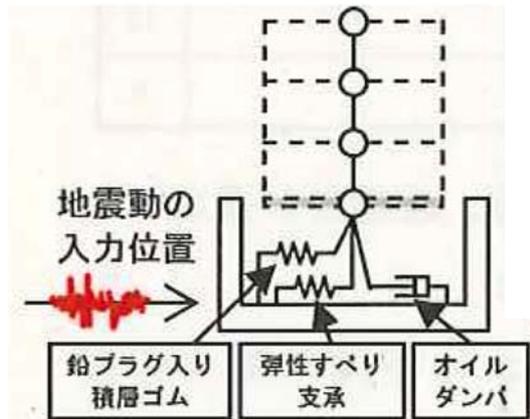


図 3. 2. 1-4 免震重要棟モデルの例<sup>[3.2.1-4]</sup>

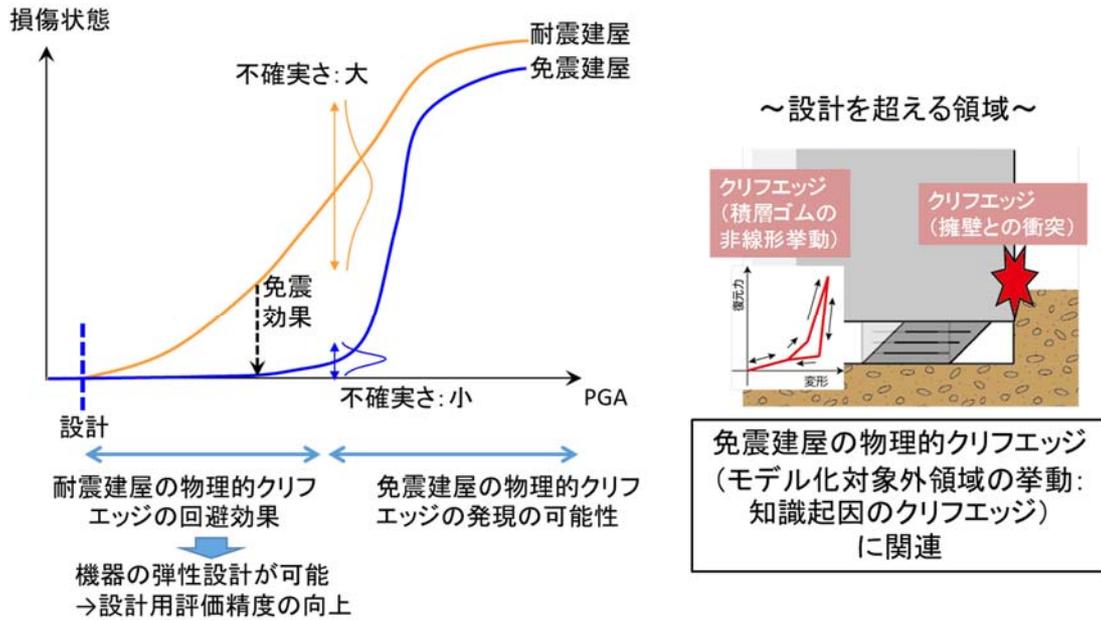


図 3.2.1-5 免震建屋のクリフエッジ概念

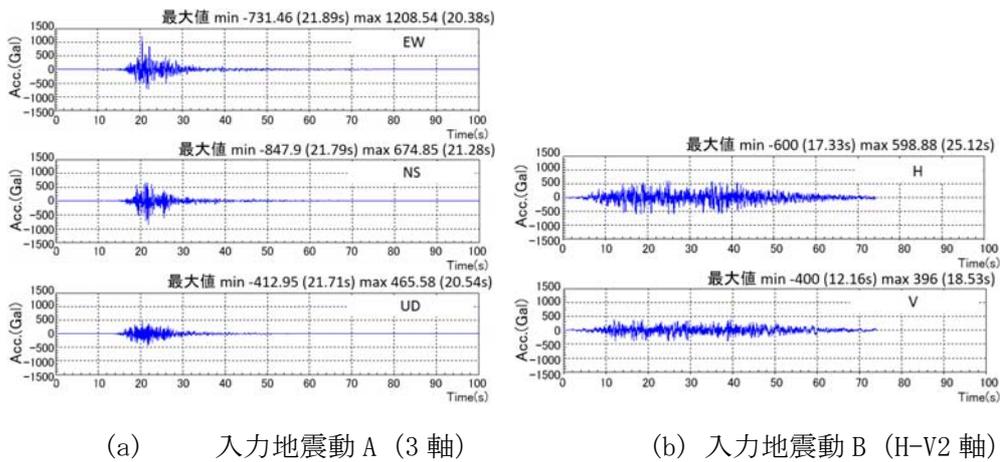


図 3.2.1-6 解析に用いた入力地震動

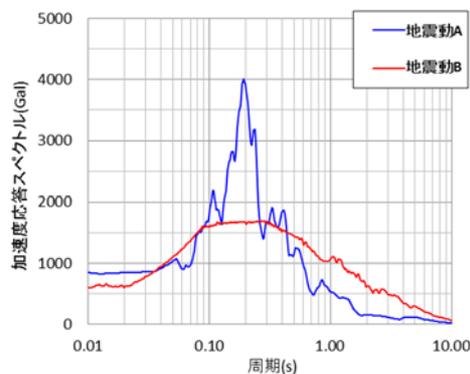
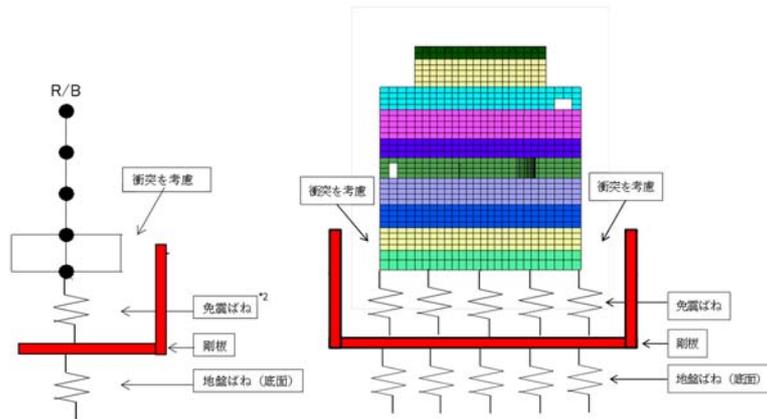
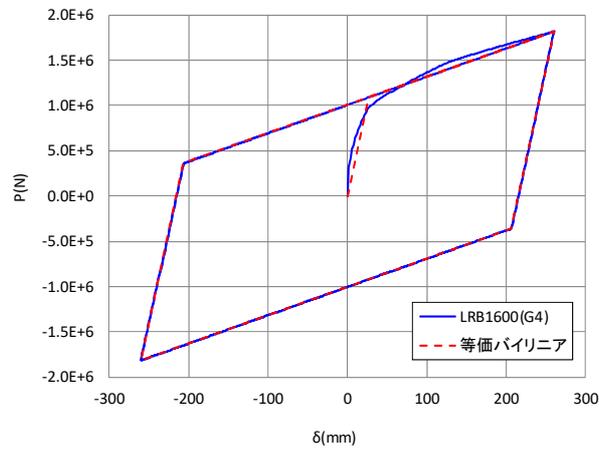


図 3.2.1-7 加速度応答スペクトル



(a) 質点系モデル (b) 3次元詳細モデル

図 3.2.1-8 免震導入建屋の解析モデル例



免震装置 初期剛性	$K_u$	40591	N/mm
鉛プラグ 降伏荷重	$Q_d$	1005326	N
パイリニア 降伏荷重	$Q_y$	1089194	N
勾配率	$\alpha$	0.077	-

$$\ast Q_d = CQ_d \cdot \sigma_{pd} \cdot A_p$$

$$Q_y = Q_d \cdot (1 - \alpha)$$

ここで、  $CQ_d$ : ひずみ依存補正係数 ( $\gamma \geq 0.5$  の場合、1.0)

$\sigma_{pd}$ : 鉛の降伏せん断応力度 (8.33N/mm<sup>2</sup>)

$A_p$ : 鉛プラグの断面積

図 3.2.1-9 免震装置の設定

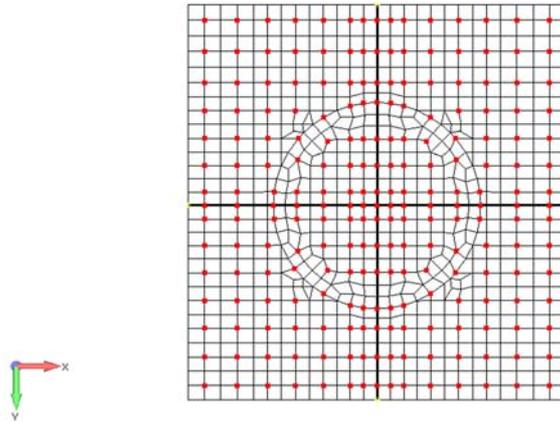


図 3. 2. 1-10 基礎版位置の積層ばねの配置イメージ (赤○印：免震ばねの取り付け位置)

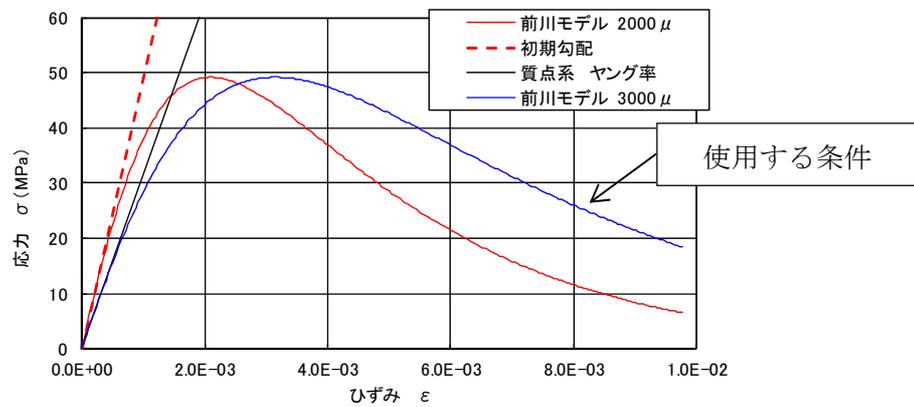


図 3. 2. 1-11 前川モデルの応力-ひずみ関係 (圧縮側)

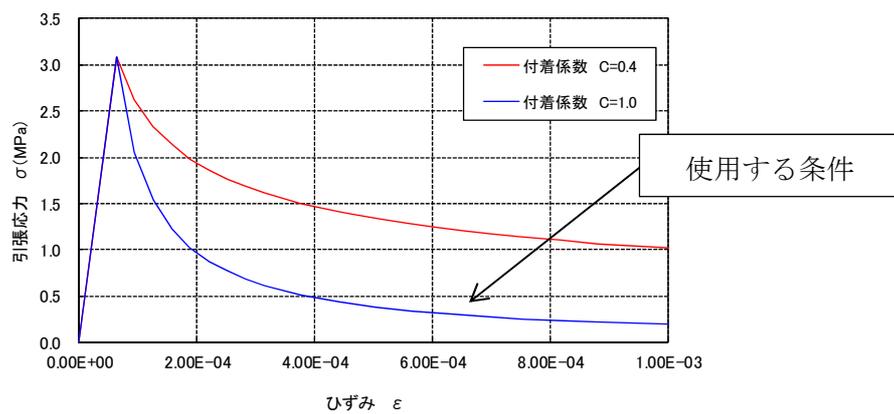
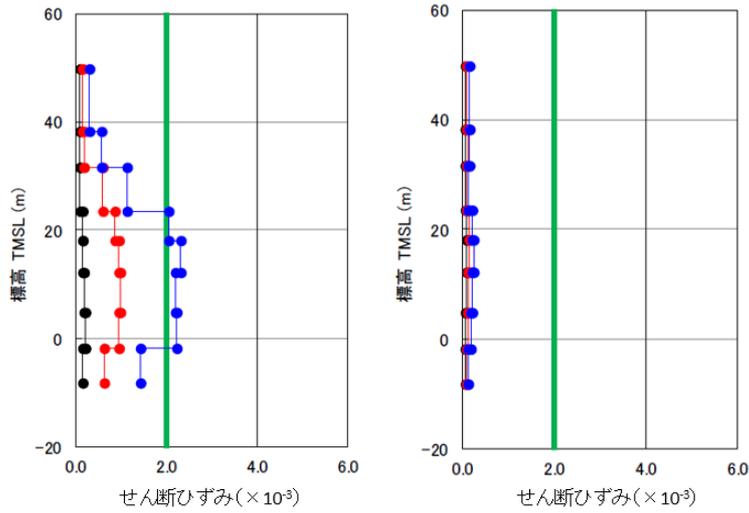
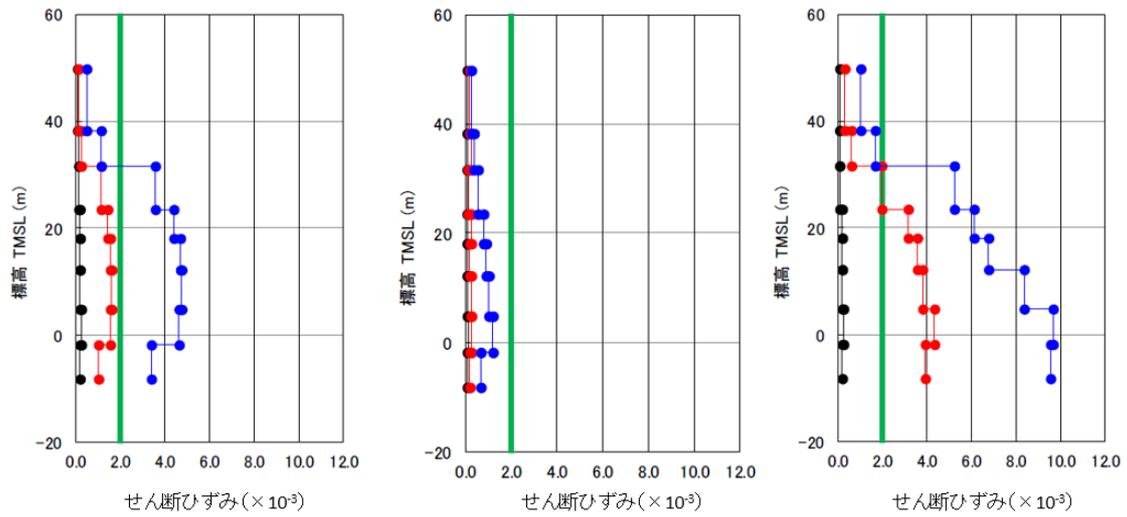


図 3. 2. 1-12 付着パラメータ C によるテンションスティフニング (引張側)



(a) 耐震建屋 (b) 免震導入建屋 (衝突未考慮)

図 3.2.1-13 最大せん断ひずみの高さ方向分布 (入力地震動 A)



(a) 耐震建屋 (b) 免震導入建屋 (衝突未考慮) (c) 免震導入建屋 (衝突考慮)

図 3.2.1-14 最大せん断ひずみの高さ方向分布 (入力地震動 B)

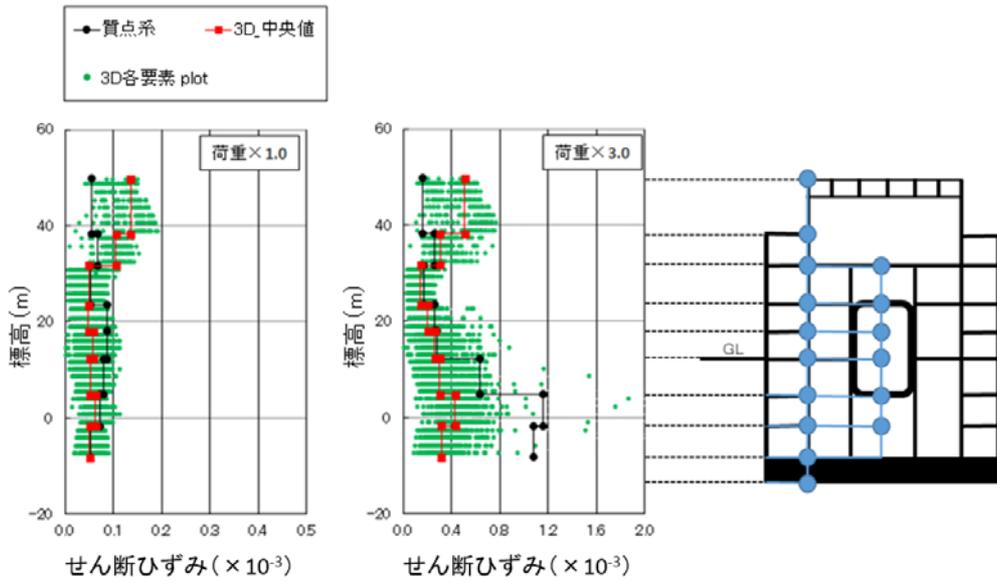
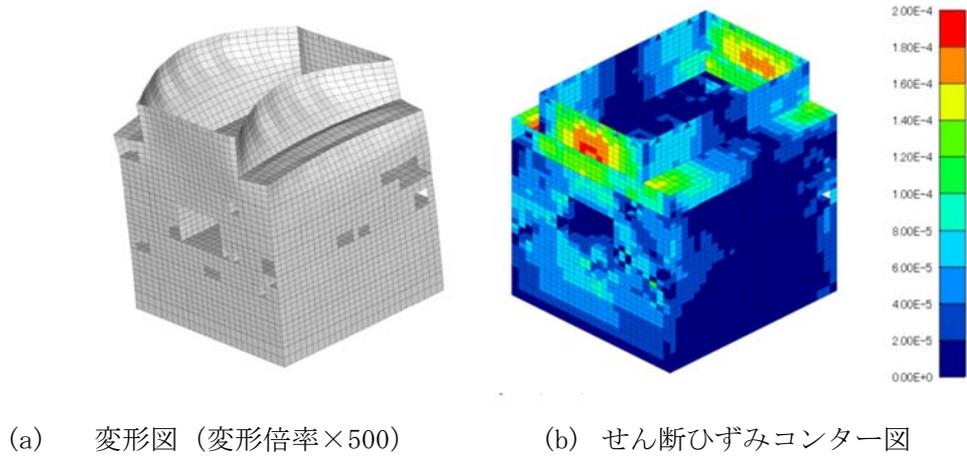


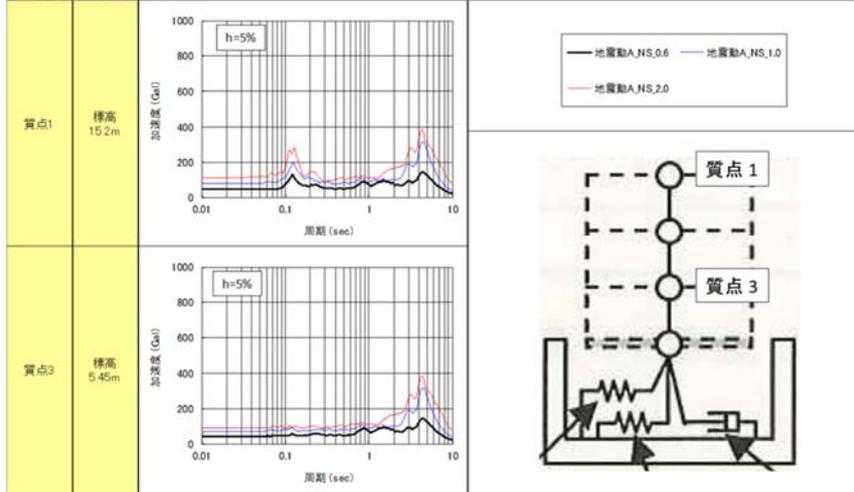
図 3.2.1-15 質点系モデルおよび 3次元詳細モデルにおける最大せん断ひずみの高さ分布  
(耐震建屋、入力地震動 A (NS))



(a) 変形図 (変形倍率×500) (b) せん断ひずみコンター図

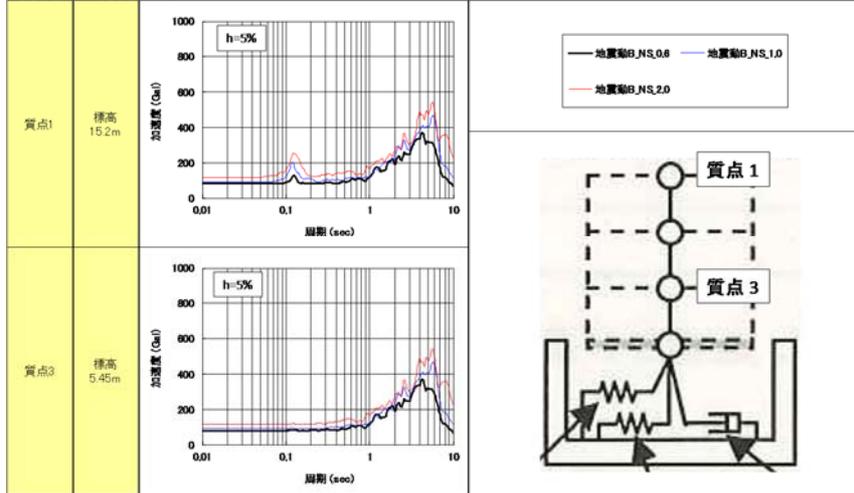
図 3.2.1-16 建屋上部壁のせん断ひずみ分布

地震動A NS方向 FRS



(a) 入力地震動 A(NS)

地震動B NS方向 FRS



(b) 入力地震度 B(NS)

図 3.2.1-17 免震重要棟の床加速度応答スペクトル

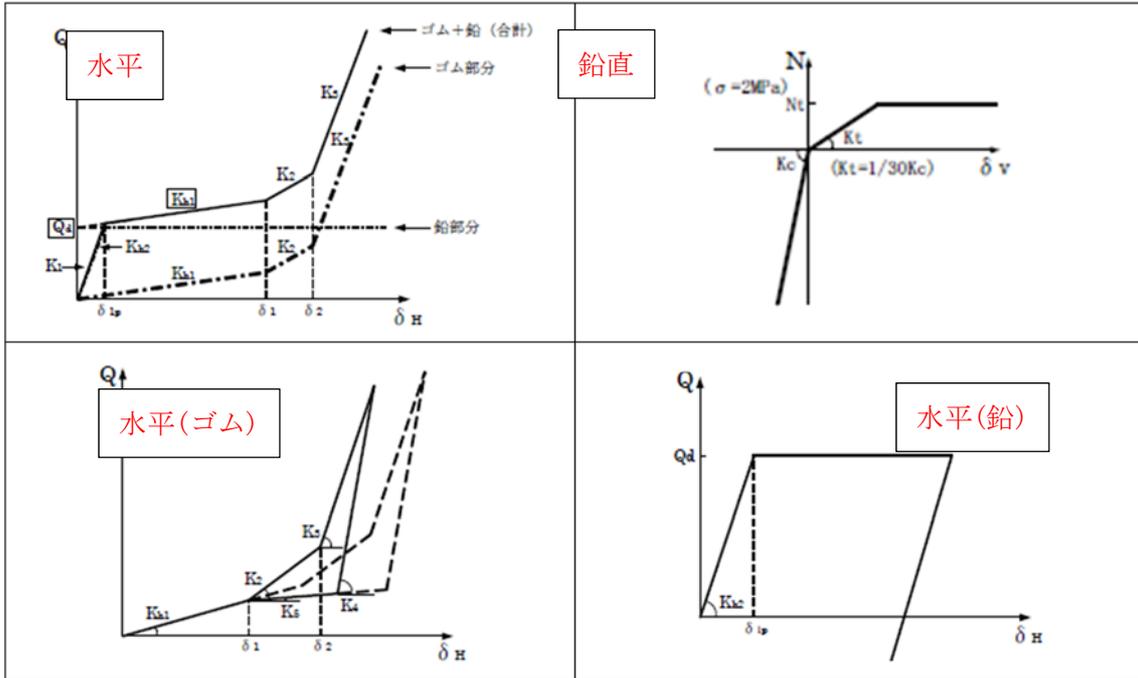


図 3.2.1-18 免震装置の履歴モデルのイメージ図

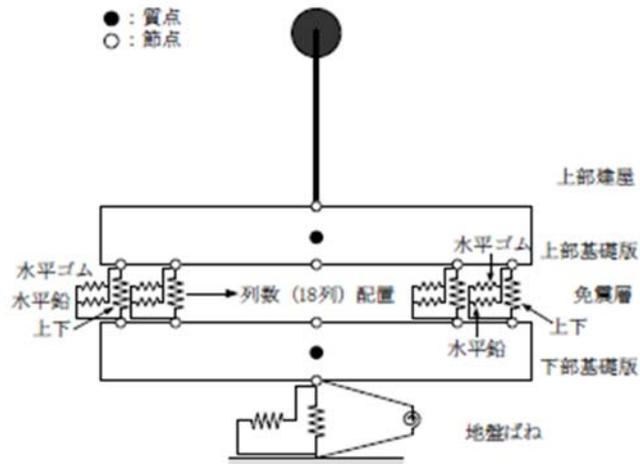


図 3.2.1-19 解析モデルのイメージ図

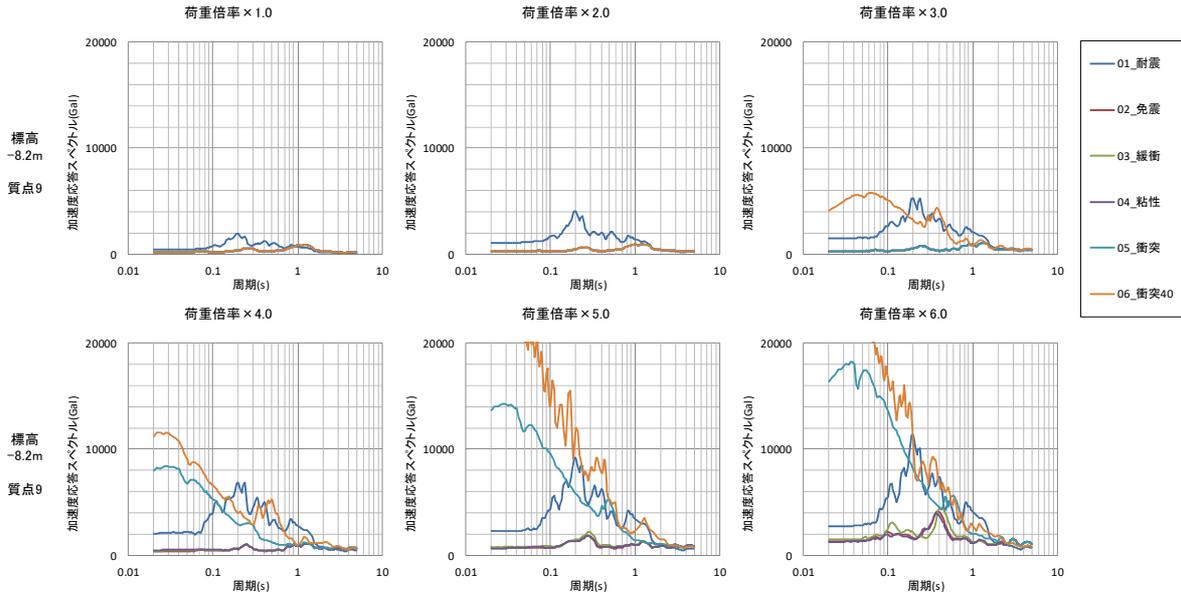
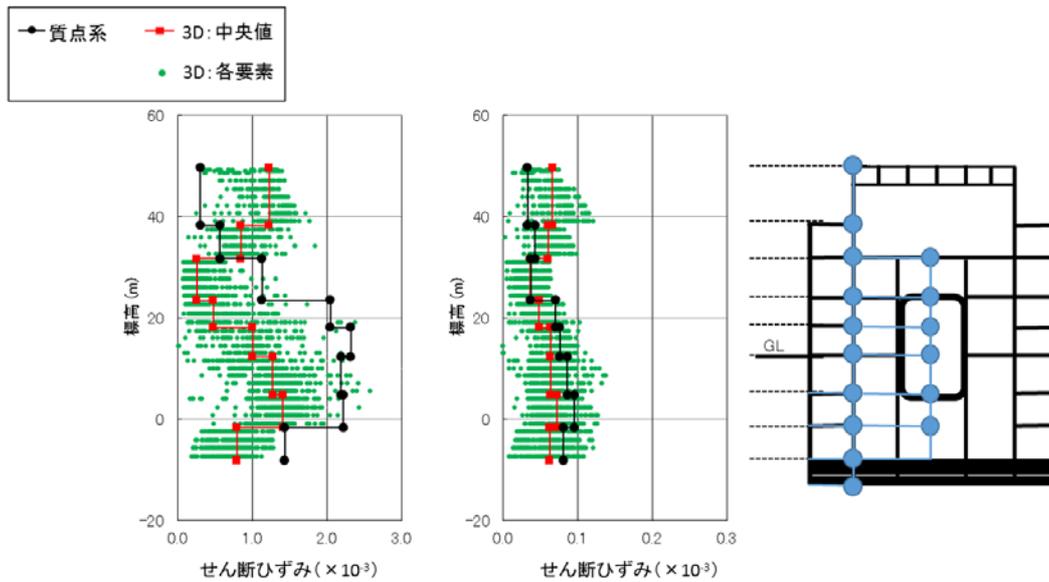


図 3.2.1-20 基礎上 (B3F、質点 9) の加速度応答スペクトル  
( $h=5.0\%$ 、荷重倍率 $\times 1\sim 6$ 、入力地震動 A(NS) 入力)



(a) 耐震建屋 (横軸最大  $3000\mu$ )

(b) 免震導入建屋 (横軸最大  $300\mu$ )

図 3.2.1-21 3次元詳細モデルにおける最大せん断ひずみの高さ分布 (入力地震動 A(NS) $\times 3$ )

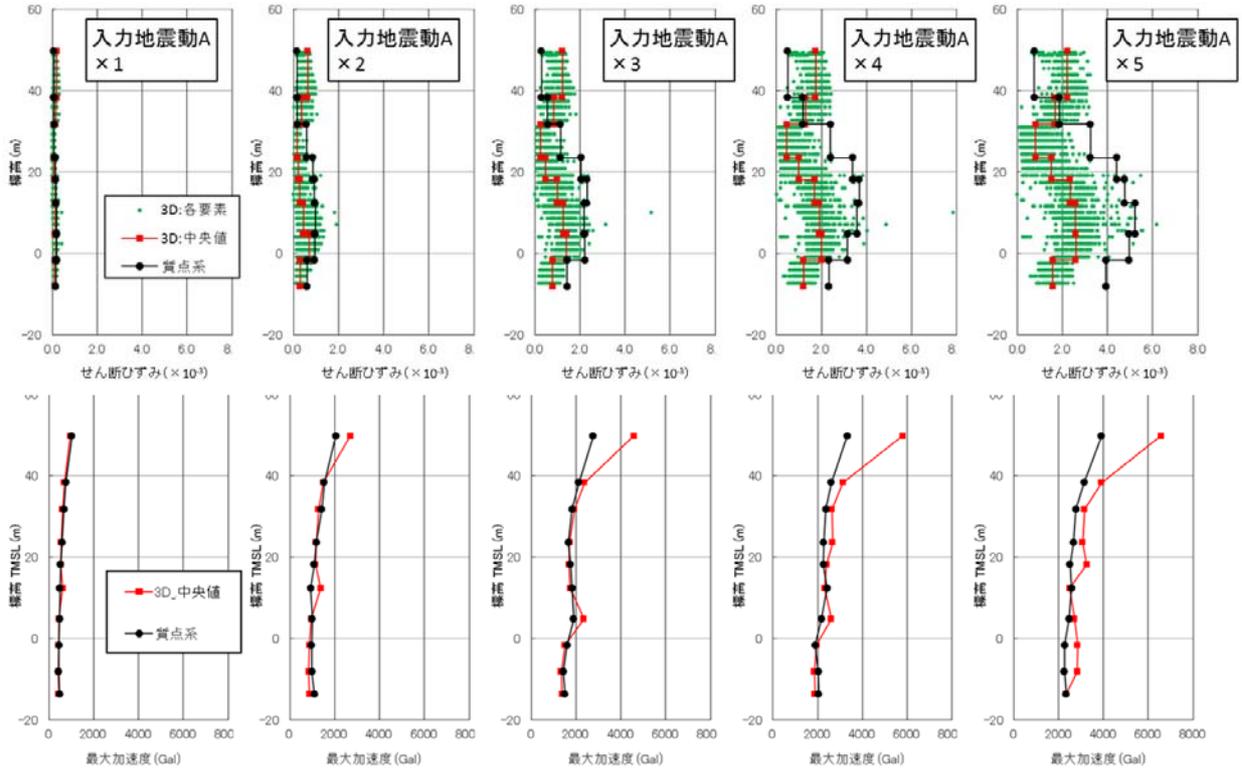


図 3. 2. 1-22 耐震建屋の最大せん断ひずみ（上段）及び最大加速度（下段）の高さ方向分布

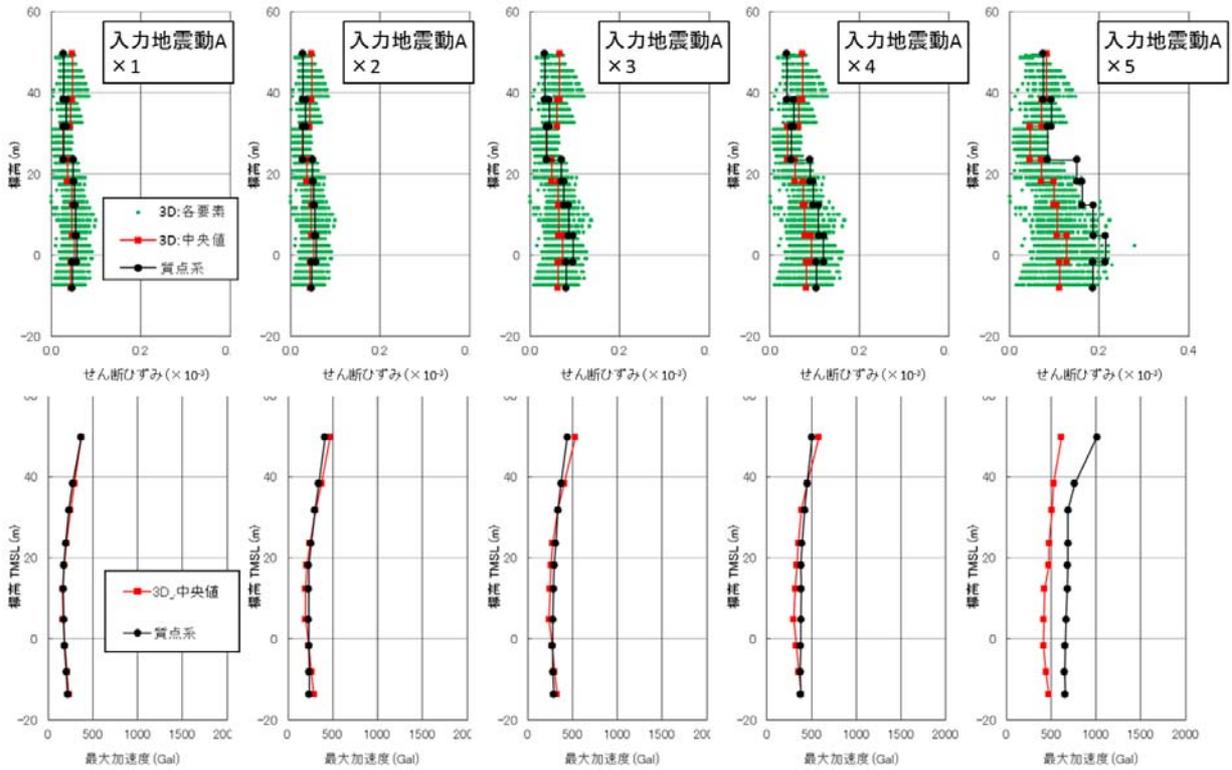
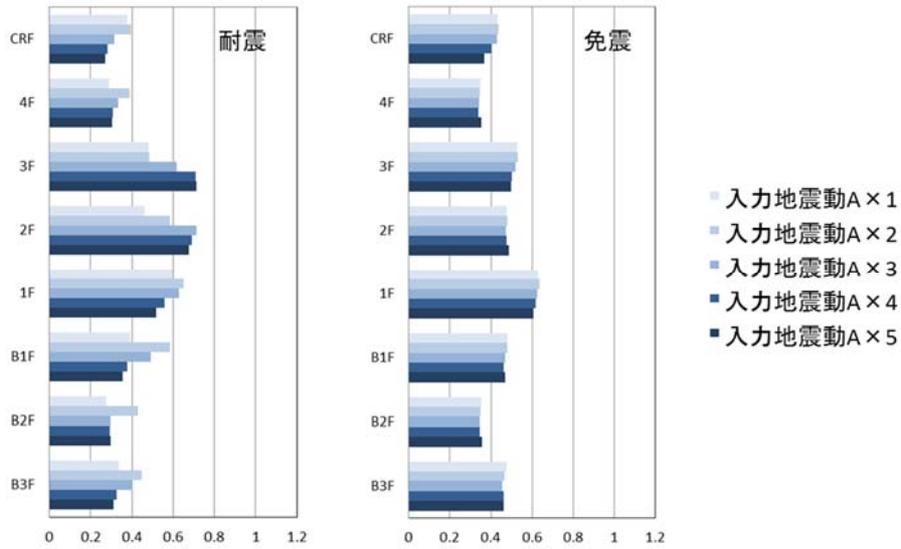


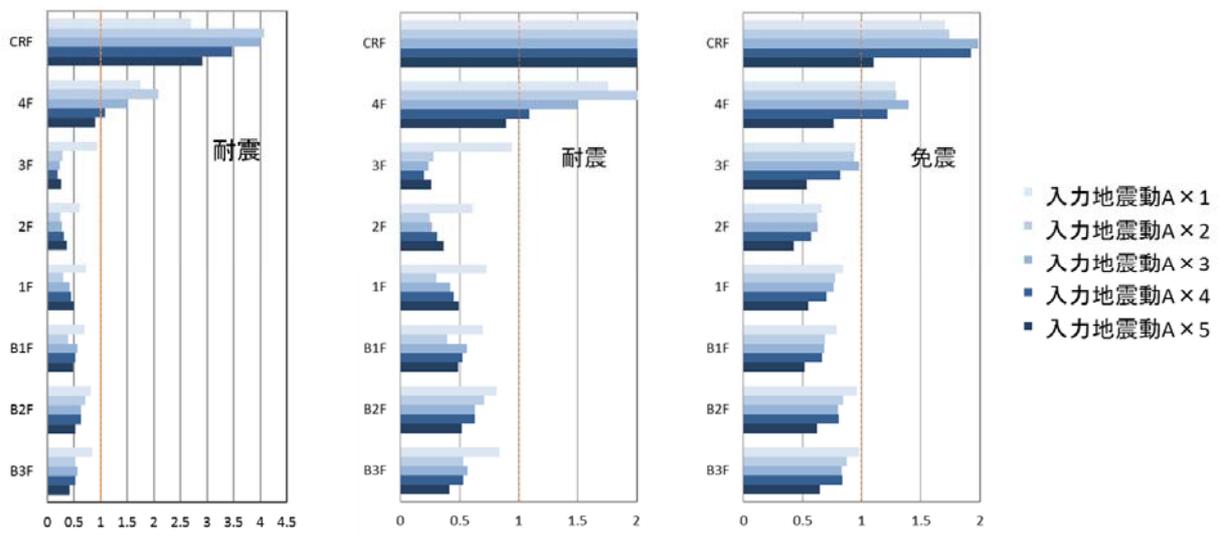
図 3. 2. 1-23 免震導入建屋の最大せん断ひずみ（上段）及び最大加速度（下段）の高さ方向分布



(a) 耐震建屋

(b) 免震導入建屋

図 3.2.1-24 3次元詳細モデルの最大せん断ひずみの中央値に対する対数標準偏差高さ方向分布



(a) 耐震建屋 (Full scale)

(b) 耐震建屋

(c) 免震導入建屋

図 3.2.1-25 3次元詳細モデルの最大せん断ひずみの応答比(3次元中央値/質点系)高さ方向分布

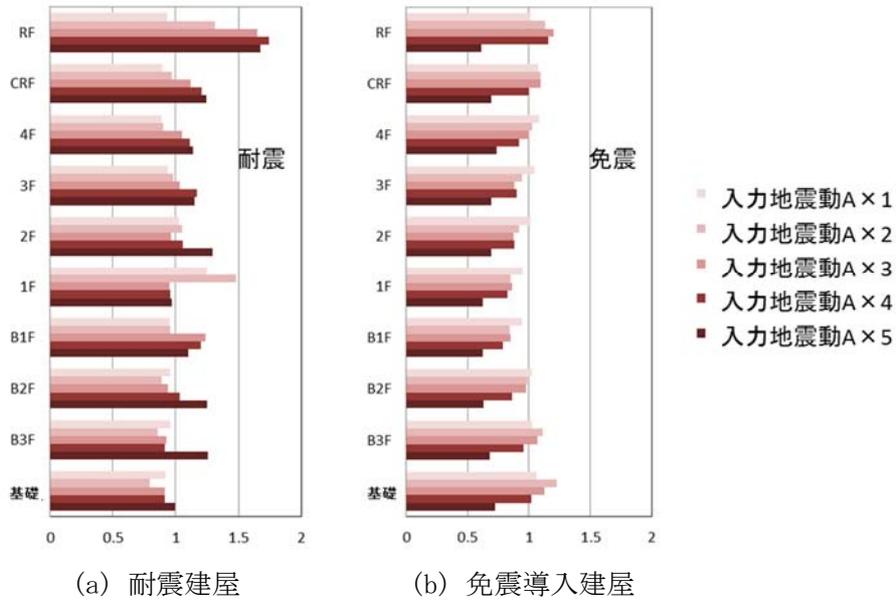


図 3.2.1-26 3次元詳細モデルの最大加速度の応答比(3次元中央値/質点系)高さ方向分布

評価の仮定:

- ・応答の中央値:  
入力地震動(の定数倍)に対する応答
- ・応答の対数標準偏差:0.3
- ・耐力の中央値:せん断ひずみ5300 $\mu$
- ・耐力の対数標準偏差:0.3

応答 $Y$ と入力の最大加速度 $a$ が

$$\log Y = p \cdot \log a + q$$

で近似できると仮定し、対数正規分布として fragility curves を評価

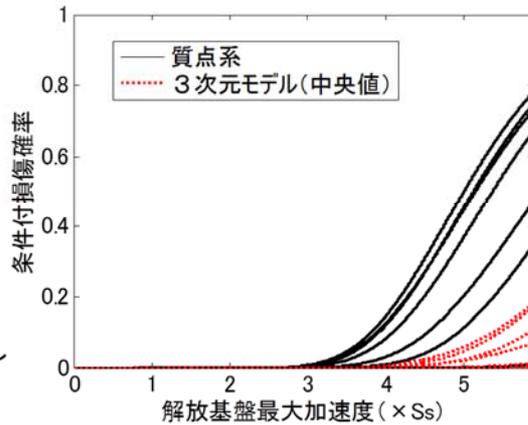


図 3.2.1-27 建屋各層の fragility curves

(質点系モデルと 3次元詳細モデル中央値の比較)

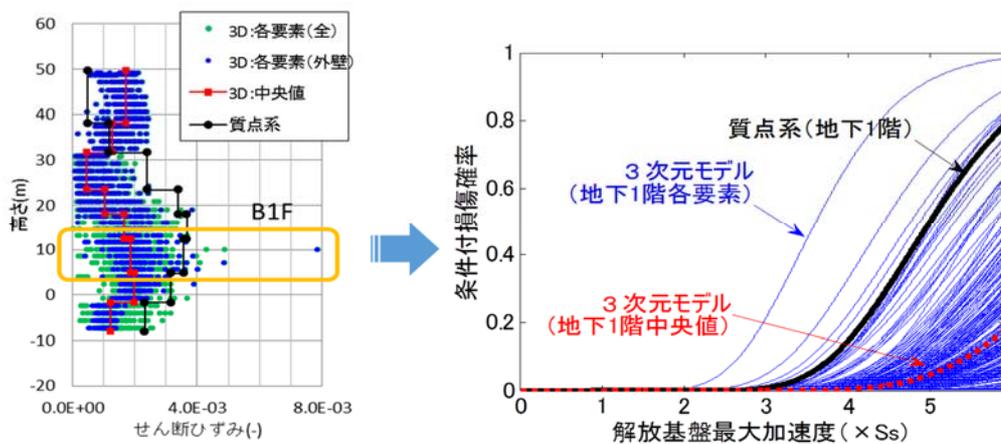


図 3.2.1-28 3次元詳細モデル各要素 (外壁) における fragility curves (B1F)

3.2.1-27

### 3.2.2 免震化によるクリフエッジ回避技術（再委託先：東京電機大学・埼玉工業大学）

#### 3.2.2.1 はじめに

原子炉建屋や重要棟に免震構造を採用することで、設計地震動に対しては上部構造物に伝わる入力を低減できることから、プラント各部のクリフエッジ回避につながる。他方、入力地震動の規模が大きくなると、積層ゴムが非線形挙動を示したり建屋が周囲の擁壁に衝突したりすることから、クリフエッジの要因になりうる。

そこで、本項では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とを目的とする。平成27年度は、免震スペックの選定手法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。平成28年度は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及び知識起因のクリフエッジの明示を実施した。平成29年度は、免震構造特有の非線形性を考慮した解析モデルを用いて地震応答解析を実施し、免震化によるプラント損傷抑制効果について検討した。また、平成28年度に引き続き、免震構造における物理的クリフエッジ及び知識起因のクリフエッジの明示を実施した。それぞれ、東京電機大学は原子炉建屋について、埼玉工業大学は免震重要棟について検討を行った。

#### 3.2.2.2 免震対象にあわせた免震スペックの選定（H27）

ここでは、原子炉建屋を免震対象として免震スペックの選定方法を検討する。試算として重量1955110 [kN]（質量 $199.4 \times 10^6$  [kg]）の原子炉建屋を免震対象とし、既往の検討結果を基に免震周期を2.5、3.0、3.5秒とした際のスペック選定を検討した。

積層ゴムの設計パラメータとして、ゴムの種類、ゴムシートの外径 $D_1$ と内径 $D_2$ 、ゴム層厚さ $t$ 、ゴム層数 $n$ 、面圧 $\sigma$ などがある。目標とする免震周期になるように、一次形状係数 $S_1$ （ゴム1層の自由表面積に対する拘束面積の比）、二次形状係数 $S_2$ （ゴム総厚に対する直径の比）に留意しながら、これらの設計パラメータを決定する<sup>[3.2.2-1]</sup>。

設計例の一例を表3.2.2-1に示す。表3.2.2-1より、概ね目標値通りに設計可能であることがわかる。ただし、本結果は一例であり、今後の検討においては既往の文献を参考にスペックを選定する。

#### 3.2.2.3 免震装置の特性ばらつきに関する調査（H27）

免震によるクリフエッジ回避技術を検討するにあたり、ここでは積層ゴムの特性のばらつきを文献<sup>[3.2.2-2]</sup>により調査した。

表3.2.2-2に積層ゴム製造会社5社のばらつきをまとめたものを示す。製造会社により、ばらつきに差があることが確認できる。また、製造によるばらつきが他の要因よりも大きく、経年変化により剛性が小さくなることは無いことがわかる。なお、製造ばらつきは一つの免震構造におけるばらつきであり、製品個々ではばらつきはさらに大きくなる。

#### 3.2.2.4 免震装置の非線形特性及び建屋と擁壁との衝突を考慮した解析モデルの作成（H27～H28）

免震構造では、入力地震動の規模が大きくなるにつれ積層ゴムが非線形挙動を示したり、建屋が周囲の擁壁に衝突したりし、免震構造特有のクリフエッジの要因になる。そこで、これらの非線形挙動を表現する解析モデルを構築した。図 3.2.2-1 に本研究で構築した免震構造特有の特性を考慮したモデルを示す。本モデルでは、積層ゴムの非線形性、擁壁との衝突、建屋弾塑性挙動、建屋回転挙動を考慮した。

積層ゴムの非線形性では、積層ゴムのハードニング、ソフトニングを考慮した。積層ゴムは、通常使用の範囲において、水平、上下方向ともに変形量と復元力が比例する線形挙動を示す。しかしながら、大変形をする場合、水平方向にはハードニング、鉛直方向には引張り方向にソフトニングすることが知られている<sup>[3.2.2-3]</sup>。

積層ゴムが水平方向に大変形すると、ゴム材料のひずみ硬化によるハードニングが発生する。実際の剛性変化は曲線的であるが、本研究では積層ゴムの水平方向の復元力特性を 5 つの直線からなる折線モデルで表現した<sup>[3.2.2-4]</sup>。また、ハードニングが始まる線形限界変位は、最大変位に依存して大きくなったり（最大変位依存性）、上下荷重に依存して小さくなったり（鉛直荷重依存性）する。これらの条件も考慮し、モデルを作成した。

積層ゴムが上下方向に大変形すると、圧縮側では剛性が変わらず線形挙動を示すが、引張側ではソフトニングが発生する。このソフトニングは、積層ゴムの引張側と圧縮側の剛性の違いに起因するもので、積層ゴムが自然長になる荷重でソフトニングが始まる。実際の剛性変化は曲線的であるが、本研究では積層ゴムの上下方向の復元力特性を、3 つの直線からなる折線モデルで表現した<sup>[3.2.2-4]</sup>。

また、免震装置の変形により生じる、免震構造と周囲の擁壁との衝突もモデル化した。通常、免震構造は周囲の地面や擁壁と衝突しないように、十分な隙間（クリアランス）を設けている。しかしながら、強大地震動を考慮した場合、クリアランス以上に免震構造物が応答し、擁壁と衝突する恐れがある。本モデルでは、衝突により擁壁が弾性変形すると仮定し、衝突後の変位に比例して衝突力を発生させるモデル<sup>[3.2.2-5]</sup>を構築した。

通常入力では建屋は弾性範囲にとどまるが、本検討では大入力時に塑性変形に至ることも想定し、建屋の復元力特性はトリリニアでモデル化した。また、通常入力においては積層ゴムの上下剛性が水平剛性に比べて小さく、回転挙動の影響は小さいが、本検討では大入力時に積層ゴムが上下方向にソフトニングすることを想定し、回転挙動も考慮した。

### 3.2.2.5 クリフエッジ特定のための応答解析（H28）

#### (1) 検討方法

免震構造におけるクリフエッジを特定するための解析を実施した。図 3.2.2-2 に解析モデルを示す。本モデルでは、3.2.2.4 項で示した免震構造特有の挙動を考慮し、免震対象となる構造物を 2 質点 5 自由度系（建屋上部の水平・上下、免震層の水平・上下・回転）でモデル化したものである。また、積層ゴムを左右に配置することでロッキング振動を考慮できるようにした他、既往の研究<sup>[3.2.2-6]</sup>を参考に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。

以上の解析モデルに表 3.2.2-3 に示す解析条件を適用し、各条件が応答に与える影響を確認する。免震対象は原子炉建屋モデルと免震重要棟モデルであり、パラメータは表 3.2.2-4 に示す通りである。いずれも文献<sup>[3.2.2-6]</sup>、<sup>[3.2.2-7]</sup>を参考にしたが、文献中になく変数は適宜設定した。た

だし、免震重要棟モデルの上部構造物の非線形特性、積層ゴムの上下の二次ソフトニングは、考慮しなかった。また、擁壁との距離などは、その影響が現れやすいように極端な値を採用している。

入力波は、図 3.2.2-3 に示す 2 波を使用した。地震動 A は断層モデルを用いて作成した波、地震動 B はスペクトル波であり、応答スペクトルからわかる通り、地震動 B のほうが長周期成分を含んでいる。これらの入力波を 0.25～5.0 倍して使用した。

## (2) 解析結果（原子炉建屋モデル）

解析結果の一例として、原子炉建屋モデルに地震動 B を入力した際の入力加速度と応答の関係を図 3.2.2-4、3.2.2-5 に示す。

図 3.2.2-4 に示した水平入力加速度と建屋の水平応答加速度の関係より、全非線形性を考慮しない条件 0 および積層ゴムの非線形性を考慮しない条件 2 は応答が概ね単調増加しているのに対し、それ以外は増減があることがわかる。これより、積層ゴムの非線形性が応答のばらつきに影響することがわかる。また、同じく条件 0 および衝突を考慮しない条件 6 の応答は他に比べて小さい傾向があり、衝突が応答増加に影響することがわかる。全ての非線形性を考慮した条件 1 およびロッキングを考慮しない条件 4 は応答が類似しており、ロッキングの影響は小さいといえる。

同じく、図 3.2.2-4 に示した水平入力加速度と免震層の水平応答変位の関係より、建屋の応答加速度と同様に、積層ゴムの非線形性が応答のばらつきに影響することがわかる。また、条件 0 および擁壁との衝突を考慮しない条件 6 の応答が大きいことから、擁壁との衝突が応答変位抑制に影響しているといえる。

図 3.2.2-5 に示した上下入力加速度と建屋の上下応答加速度、免震層の上下応答変位の関係より、条件 0 と条件 2 の結果が同じであり、そのほかの応答は条件 0 と条件 2 より大きいことから、積層ゴムの非線形性が応答増加に影響することがわかる。また、条件 0 および条件 2 以外の応答が同程度であり、積層ゴム以外の非線形性の種類の影響はないといえる。

## (3) 解析結果（免震重要棟モデル）

解析結果の一例として、原子炉建屋モデルに地震動 B を入力した際の、水平入力加速度と建屋の水平応答加速度、免震層の水平応答変位の関係を図 3.2.2-6 に示す。なお、上部構造物の復元力特性が不明であったため、条件 5 は解析していない。図 3.2.2-6 より、定性的には (2) に示した原子炉建屋と同様の傾向を確認できた。

### 3.2.2.6 免震化による損傷抑制効果の検討（H29）

#### (1) 検討方法

3.2.2.5 項では、擁壁との衝突や積層ゴムの非線形性が応答に大きな影響を与えることがわかった。そこで、ここでは衝突や積層ゴムのパラメータを適宜変更し、それらのパラメータが損傷抑制効果に与える影響を検討した。

ここでは、以下に示す 5 つの検討を実施した。検討 1 として、積層ゴムハードニング・ソフトニング考慮したモデルで、擁壁までの距離の影響を検討した。検討 2 として、積層ゴムハードニング・ソフトニング考慮しないモデルで、擁壁までの距離の影響を検討した。検討 1、2 では、擁壁までの距離を 0.2～1.8m で変化させて解析を実施した。検討 3 として、擁壁の剛性、減衰を

変化させて解析を実施し、擁壁の影響を検討した。検討4として、衝突を考慮しないモデルで表3.2.2-3の条件1～5の解析を実施し、衝突の影響を考察した。検討5として、免震周期を変化させて解析を実施（積層ゴムの非線形特性も連動）し、免震周期の影響を検討した。

## (2) 解析結果（原子炉建屋モデル）

解析結果の一例として、ここでは検討1の結果を示す。原子炉建屋モデルに地震動Bを入力した際の入力加速度と水平方向の応答の関係を図3.2.2-7に示す。

図3.2.2-7に示した水平入力加速度と建屋の水平応答加速度の関係より、クリアランスが小さいほど小さい入力でも衝突が生じ、応答加速度が大きくなることがわかる。また、応答変位に着目すると、クリアランスが小さいほど応答変位を抑制できていることがわかる。以上より、衝突条件により、損傷抑制効果に違いが生じることが確認できた。また、クリアランスが小さすぎると応答加速度が非免震構造よりも大きくなる傾向があるが、適切にクリアランスを設定すればほとんどの入力レベルにおいて非免震構造よりも応答を小さくすることができ、想定外の地震動でも損傷抑制効果を発揮できることが確認できた。なお、上下方向については、擁壁までの距離により応答は変化するものの、顕著な傾向は見られなかったことから、上下方向の応答に対する衝突の影響は小さいと考えられる。

本項では省略した検討2～5からも、擁壁の剛性、減衰、免震周期などを適切に設定することで、想定外の地震動でも損傷抑制効果を発揮でき、クリフエッジとなり得る事象をより大きな入力レベルに回避できることが確認できた。

## (3) 解析結果（免震重要棟モデル）

解析結果の一例として、ここでは検討1の結果を示す。免震重要棟モデルに地震動Bを入力した際の入力加速度と水平方向の応答の関係を図3.2.2-8に示す。図3.2.2-8より、定性的には(2)に示した原子炉建屋と同様の傾向を確認できた。ただし、上部構造物の塑性変形を考慮しなかったため、全ての入力レベルにおいて免震構造の応答加速度が非免震構造を下回る結果となった。

### 3.2.2.7 免震構造におけるクリフエッジ（H28～H29）

本検討より明らかになった免震構造におけるクリフエッジを表3.2.2-5に示す。表3.2.2-5に示す通り、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明らかになった。

同じく、免震構造におけるクリフエッジを物理的クリフエッジ、知識起因のクリフエッジの相関を表3.2.2-6に示す。表3.2.2-6より、物理的、知識起因の双方のクリフエッジが小さい要素として、上部構造物の塑性変形、ロッキング挙動があげられる。3.2.2.5項の結果より、これらを考慮しなくても免震構造自身の応答に大きな影響はなく、物理的クリフエッジとしての影響は小さいといえる。また、上部構造物の塑性変形やロッキングに関しては従来の耐震構造において多くの知見があることから、知識起因のクリフエッジも小さいといえる。他方、物理的、知識起因の双方のクリフエッジが大きい要素として、積層ゴムのハードニング、ソフトニング、それらの連成、擁壁との衝突があげられる。3.2.2.5項及び3.2.2.6項の結果より、これらは応答に大きな影響を与えることが明らかになっており、免震構造特有の物理的クリフエッジとしての大きな影響を与えるといえる。また、これまで実験で明らかになっている積層ゴムの非線形性、擁

壁との衝突に関する知見は限定的な条件に基づくものであり、未知の領域がまだあるといえる。

3.2.2.5 項、3.2.2.6 項の結果に基づき入力地震動の大きさと免震構造におけるクリフエッジの関係をまとめたイメージを図 3.2.2-9 に示す。図 3.2.2-9 の通り、入力加速度の増大に伴い積層ゴムのソフトニング、ハードニングが生じ始める。特にハードニングはそれまでに経験した最大変位に応じて開始変位が変わることから、広い入力レベルでクリフエッジとなり得ると考えられる。その後、ロッキングや建屋・機器の塑性変形等の影響が現れるが、免震構造自身としての影響は小さい。最後に衝突の影響が現れるが、最大変位がクリアランスを超えることで急激に発生するものであり、クリフエッジとしての範囲は狭い。また、図中の黒い曲線に注目すると、様々な挙動を考慮したモデルを採用することで、未知の領域が狭くなることがわかる。

### 3.2.2.8 まとめ (H27~H29)

本項では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検討した。そのために、免震スペックの選定手法や免震装置のばらつきの調査、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の作成、クリフエッジ特定のための応答解析、免震構造におけるクリフエッジの明示を実施した。その結果、免震構造特有の挙動の中でも積層ゴムのハードニング、ソフトニング、衝突が大きな物理的ならびに知識起因のクリフエッジになることを確認した。また、衝突特性や免震周期を調整することで、より大きな入力レベルに免震構造特有のクリフエッジを回避できる見込みがあることを確認した。また、免震構造では通常想定される地震動における大きなクリフエッジがなく、免震構造の有用性を確認した。

### 参考文献

- [3.2.2-1] 一般社団法人 日本電気協会原子力規格委員会、原子力発電所免震構造設計技術指針 JEAG4614-2013、(2013)
- [3.2.2-2] (独) 建築研究所、免震建築物の設計用地震層せん断力係数に関する検討 付録1 各免震部材のばらつき幅の整理、(2014)
- [3.2.2-3] 藤田 隆史 他、“建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第3報、100トン用積層ゴムの破断実験)”、日本機械学会論文集 C 編、Vol. 54、No. 507 (1988)、pp. 2618-2623
- [3.2.2-4] 皆川 佳祐 他、積層ゴムの非線形特性を考慮した免震構造の地震時挙動に関する解析的研究(水平・上下方向特性が独立の場合)、日本機械学会論文集 C 編、Vol. 79、No. 804 (2013-8)、pp. 2684-2693
- [3.2.2-5] 三輪田 吾郎 他、実大免震建物の擁壁衝突実験とそのシミュレーション解析、日本建築学会構造系論文集、Vol. 76、No. 663 (2011-5)、pp. 899-908
- [3.2.2-6] 小杉慎司 他、“原子力施設の免震技術の開発(その32) 開発成果の概要(その1) 免震装置特性試験”、日本建築学会大会学術講演梗概集(2016)、pp. 1357-1358
- [3.2.2-7] 佐古大 他、“東北地方太平洋沖地震における福島第二原子力発電所免震重要棟の挙動”、日本建築学会大会学術講演梗概集(2012)、pp. 1249-1245

表 3.2.2-1 積層ゴム設計結果の一例

	積層ゴム 1	積層ゴム 2	積層ゴム 3
水平固有周期 [s]	2.50	3.06	3.48
鉛直固有振動数 [Hz]	17.6	14.0	11.8
免震装置個数[個]	196	196	196
外径 $D_1$ [mm]	1600	1600	1600
内径 $D_2$ [mm]	80	80	80
ゴム層厚さ $t$ [mm]	8	10	12
ゴム層数 $n$ [層]	21	25	27
一次形状係数	47.5	38.0	31.7
二次形状係数	9.52	6.40	4.94

表 3.2.2-2 天然ゴム系積層ゴムの水平剛性の変動係数 (全 5 社)

	ばらつき (+側)	ばらつき (-側)
製造ばらつき	0.10~0.15	-0.10~-0.15
経年劣化	0.07~0.15	0
環境温度変化	0.04~0.06	-0.02~-0.08

表 3.2.2-3 解析条件

条件	積層ゴムの非線形性	積層ゴムの水平上下連成	ロッキング	建屋塑性	衝突
0	×	×	×	×	×
1	○	○	○	○	○
2	×	×	○	○	○
3	○	×	○	○	○
4	○	○	×	○	○
5	○	○	○	×	○
6	○	○	○	○	×

表 3.2.2-4 解析パラメータ

		原子炉建屋モデル	免震重要棟モデル
全質量[kN]		1,955,110	67,338
上部質量 [kN]		1,396,620	43,341
免震層質量 [kN]		558,490	23,997
上部水平固有振動数[Hz]		4.673	4.999
上部上下固有振動数[Hz]		13.838	6
上部減衰[%]		5	3
幅×トータル高さ[m]		90×63.4	27×15.2
積層ゴム特性	水平	3.4 秒	4.24 秒 (ゴムのみの場合)
	上下	16Hz	24.2 Hz
衝突特性		クリアランス：0.400m、衝突減衰：7% 衝突剛性：積層ゴムの1次剛性×12.0 (原子炉建屋) 積層ゴムの1次剛性×19.6 (免震重要棟)	

表 3.2.2-5 免震構造におけるクリフエッジ

	物理的クリフエッジ	知識起因のクリフエッジ
設計範囲	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐震構造より応答は小さく、揺れによる建物や機器・配管系、人間への影響も小さくなり、クリフエッジ回避に有効</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>免震装置、上部の建屋、機器・配管系が弾性範囲内で応答するため、振動論的に明解な特性を有することから、解析結果の不確実さが低い</li> </ul>
積層ゴムの非線型性	<ul style="list-style-type: none"> <li>水平方向では、ハードニングにより剛性が急激に増加することで、大きな荷重が働くとともに、免震周期が短くなり、応答が急激に変化</li> <li>上下方向では、ソフトニングにより剛性が急激に低下することで、引張側の変位が急激に大きくなり、それにより圧縮（着地）側では荷重が急激に増加</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>積層ゴムは線形範囲内で使用することを前提としており、非線形挙動の発現は想定外事象</li> <li>モデル化のための十分な実験が行われておらず、最大変位依存性と水平上下連成効果の関係など、各種条件下での特性解明が不十分であり、知識の範囲を逸脱</li> </ul>
擁壁との衝突	<ul style="list-style-type: none"> <li>大きな衝突力が発生し、上部構造物の応答が急激に変化</li> <li>衝突力が上部構造物にパルス状の大きな加速度を発生させ、機器・配管系の応答増加や人間の転倒などを誘発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>擁壁との衝突は発生しないことを前提としており、衝突の発生は想定外事象</li> <li>実験による検証が困難で、精緻な数値モデルを構築することが難しいことから、知識の範囲を逸脱</li> </ul>
全体傾向	<ul style="list-style-type: none"> <li>免震構造特有の非線形性を考慮することで、応答加速度が増加</li> <li>地震動の大きさに対し、応答が単調増加しなくなる</li> <li>免震層で非線形挙動が生じると上部構造物も塑性変形する恐れがある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震動の位相などに起因すると考えられる応答の不確実性があるが、地震動を正確に予測することは困難で、知識の範囲を逸脱</li> </ul>

表 3.2.2-6 免震構造におけるクリフエッジの相関

		物理的クリフエッジ	
		小	大
知識起因の クリフエッジ	小	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 上部構造物の塑性変形</li> <li>・ ロッキング挙動</li> </ul>	
	大		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 積層ゴムのハードニング</li> <li>・ 積層ゴムのソフトニング</li> <li>・ 上記の連成</li> <li>・ 擁壁との衝突</li> </ul>

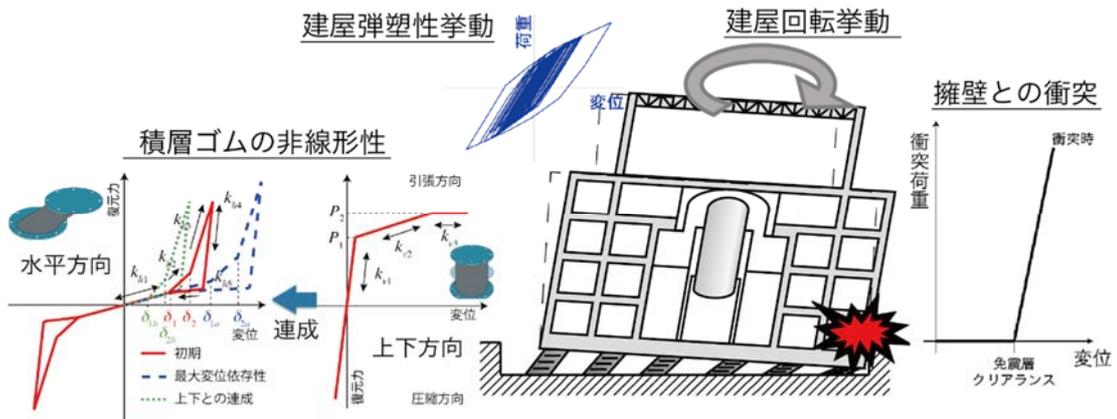


図 3.2.2-1 免震構造特有の特性を考慮したモデル

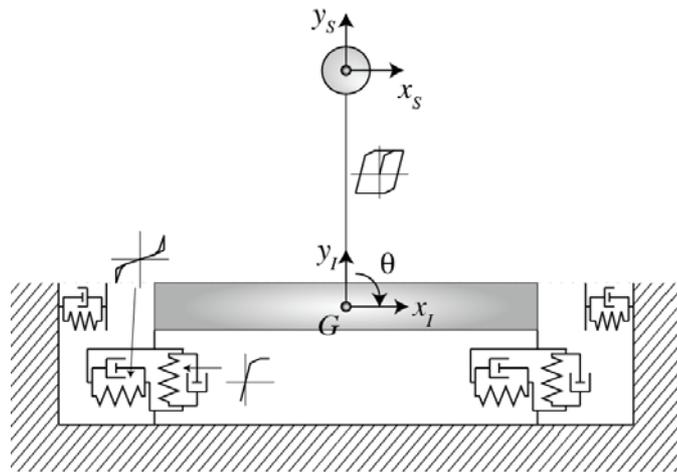


図 3.2.2-2 解析モデル

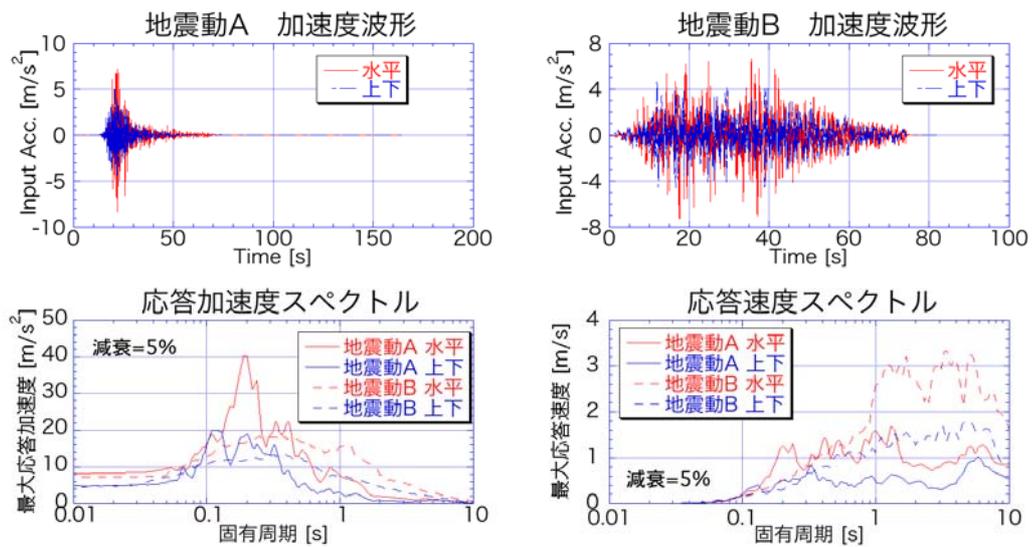
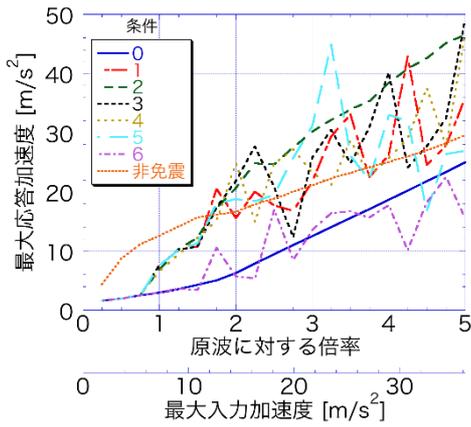
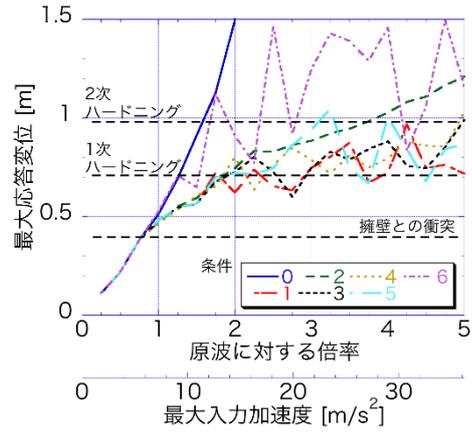


図 3.2.2-3 入力地震動

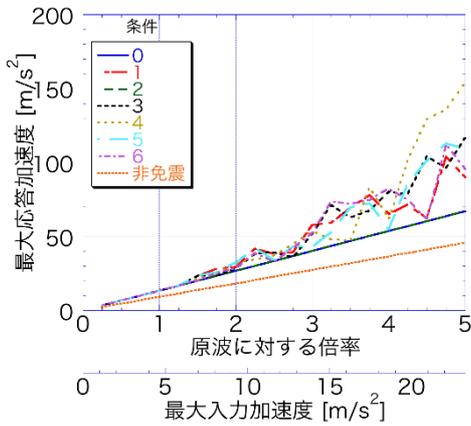


(a) 建屋加速度

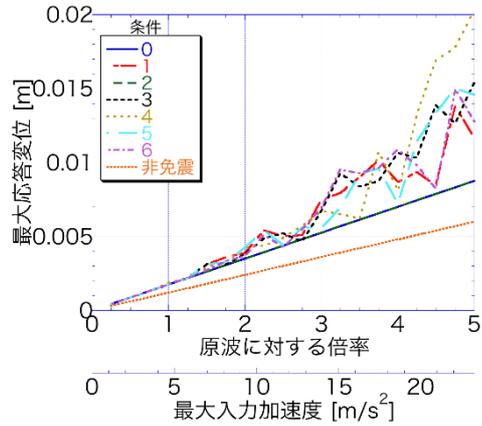


(b) 免震層変位

図 3.2.2-4 入力加速度と応答加速度・変位の関係 (原子炉建屋モデル 水平)

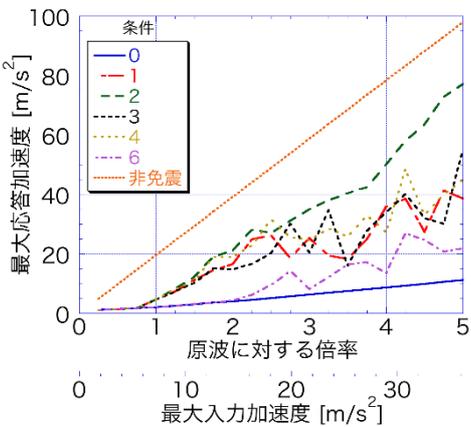


(a) 建屋加速度

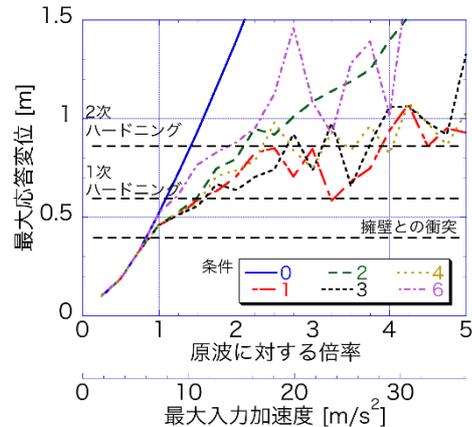


(b) 免震層変位

図 3.2.2-5 入力加速度と応答加速度・変位の関係 (原子炉建屋モデル 上下)

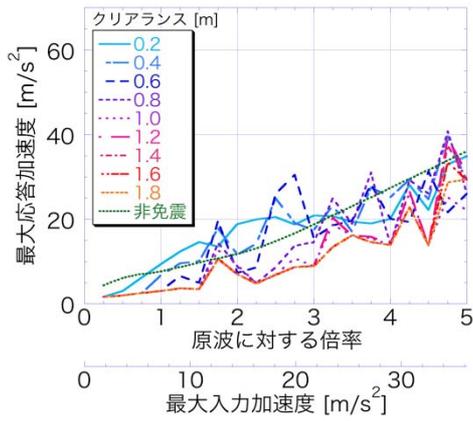


(a) 建屋加速度

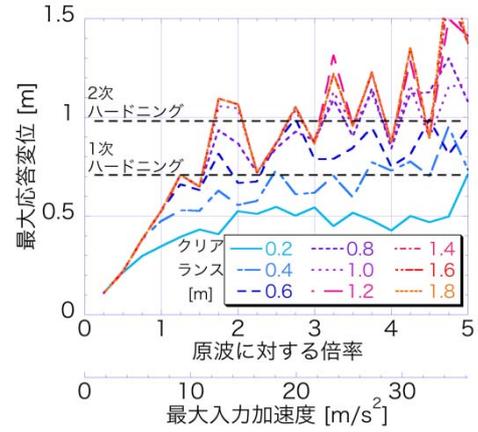


(b) 免震層変位

図 3.2.2-6 入力加速度と応答加速度・変位の関係 (免震重要棟モデル 水平)

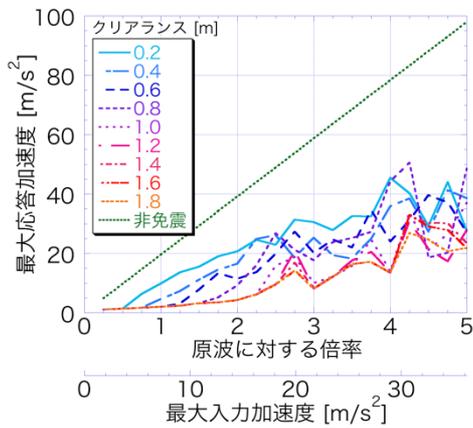


(a) 建屋加速度

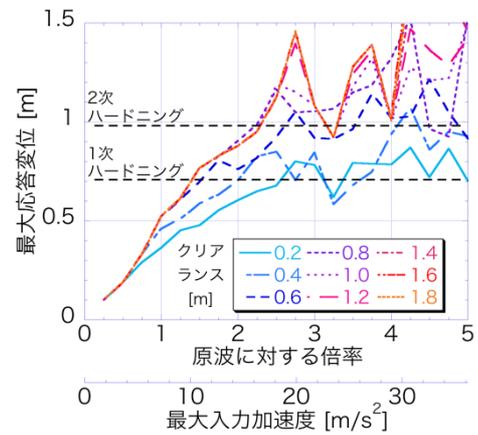


(b) 免震層変位

図 3.2.2-7 擁壁までの距離と応答の関係 (検討1、原子炉建屋モデル 水平)



(a) 建屋加速度



(b) 免震層変位

図 3.2.2-8 擁壁までの距離と応答の関係 (検討1、免震重要棟モデル 水平)

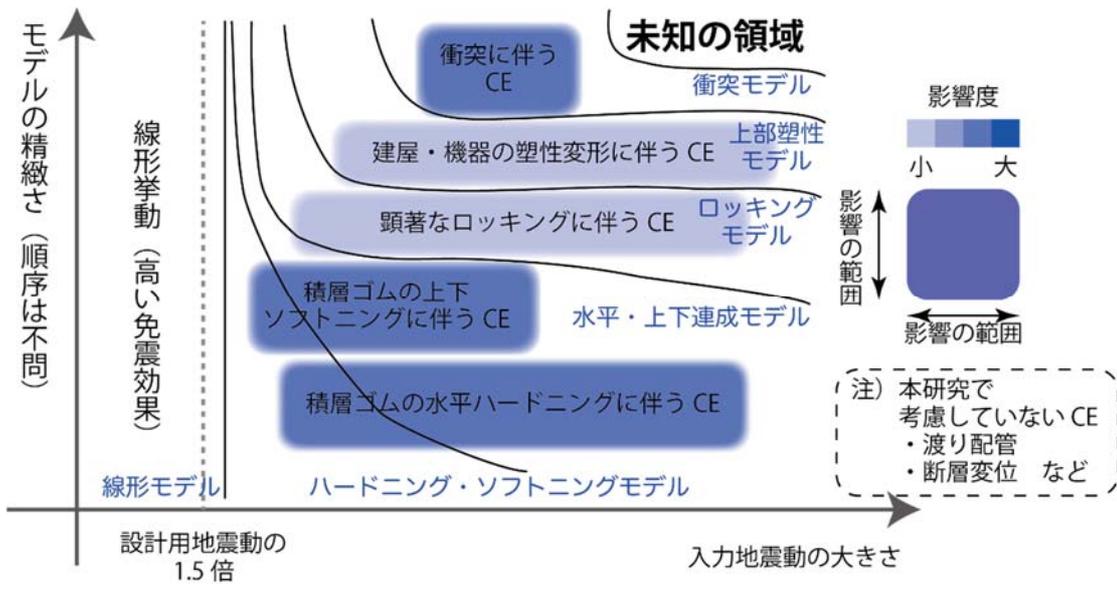


図 3.2.2-9 入力地震動の大きさと免震構造におけるクリフエッジの関係

### 3.2.3 機器・システムのモデル化とクリフエッジ回避技術(H27～H29)

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を構築する。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。

#### 3.2.3.1 要求性能の構造と論理モデルの構築

前述のように、クリフエッジは物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジとに大きく分類できる。物理的クリフエッジに対する要求性能は、深層防護の考え方を基に、各レベルに対し、表 3.1-1 のように定義することができる。これらの要求性能に対して、クリフエッジ評価、更にはクリフエッジ回避技術の有効性評価を行うためには、要求性能を満足している度合いを評価する必要があり、地震時に各要求性能を満足するために必要な機能を論理モデルとして表す必要がある。要求性能は深層防護各レベルにより異なっており、論理モデルを構築するために、ここでは要求性能を構造化することを考える。

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、弁等の機器及び人間系が挙げられる。これらの構造を図 3.2.3-1 に示す。

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 3.2.3-2 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。イベントマップのイメージを図 3.2.3-3 に示す。レベル 1 においては、最も小さい地震加速度で損傷する SSCH が律速となり、異常状態発生 of クリフエッジ、即ち運転継続性に影響するものとなる。この全体システムに免震装置を考慮することで地震加速度に対する損傷確率を相対的に下げることが可能であれば、これがクリフエッジの回避効果と考えることが出来る。

深層防護レベル 3 では、地震動により炉心が損傷しないことが求められ、これを表す指標として、地震時の炉心損傷確率が挙げられる。この指標を構成する安全機能として原子炉未臨界維持、原子炉冷却、格納容器除熱機能があり、各システム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、非常用炉心冷却系等のシステム、更にこれらのシステムを構成する、ポンプ、弁等の機器及び人間系が挙げられる。これらの構造を図 3.2.3-4 に示す。

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 3 の要求性能、即ち炉心損傷を引き起こす事象の組合せであるミニマルカットセットを構成する SSCH の損傷確率を評価することが出来る。図 3.2.3-5 に深層防護レベル 3 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、レベル 1 と同様

に、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、プラントの炉心損傷シナリオに関連する SSCH の損傷確率を、論理式に従って合成したものが、プラント全体システムの深層防護レベル 3 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炉心損傷確率で表される。イベントマップのイメージを図 3.2.3-6 に示す。レベル 3 においては、冗長性がある部分は論理積で結合されるため、レベル 1 の場合と異なり、相対的に損傷確率は低下する。これは、多重化や多様化によるシステム設計に基づくクリフエッジの回避効果と考えることが出来る。また、この全体システムに免震装置を考慮することで地震加速度に対する損傷確率を相対的に下げることが可能であれば、これがクリフエッジの回避効果と考えることが出来る。

尚、深層防護レベル 4 は格納容器機能喪失を対象としたものであり、炉心損傷と同様に考えることが出来る。

### 3.2.3.2 原子炉建屋のモデル化方法

物理的クリフエッジに関する最も大きな検討課題は、建屋等の構築物のモデル化である。原子炉建屋、或いは原子炉格納容器がどのように損傷するか、損傷個所と要求性能の関係をどう考えるか、深層防護のレベル間のインタラクションをどのようにモデル化するか等、多くの技術的な課題を含んでいる。また、構築物自体が担っている安全機能の喪失が他の安全機能に影響を及ぼさないような壊れ方を論理モデルにどう取り込むか、も難しい課題である。

地震時は、損傷が同時に発生し、深層防護の各レベルを 1 段階ごとに突破されるわけではない。従って、各防護レベルでクリフエッジに対処できるようにするべきである。このためには、深層防護の各レベルに対応して原子炉本体、原子炉格納容器、原子炉建屋等も含めて論理モデル化を行う必要がある。

計算機技術が発達した現在では 3D モデリングで原子炉建屋等、構築物の詳細な挙動を解析することが可能となっている<sup>[3.2.3-1]</sup>。具体的には建屋各所のフラジリティを計算することが可能となるため、建屋各所の損傷により、内包する機器の損傷を想定することが可能である。このため、構築物 S とシステム S、機器 C、人間系 H の関係を再整理し、原子炉建屋の各箇所の損傷が安全機能を有する SCH の喪失の原因となるような論理モデルを構築する。このために、SSCH の関係は、システム S を軸に関連を整理する必要がある。表 3.2.3-1 に BWR5 の高圧炉心スプレイ系 (HPCS) を対象とした整理例を示す。

原子炉建屋の部分的な損傷による安全機能の喪失をモデル化するためには、評価対象とする地震時のシナリオを定義する必要がある。ここでは深層防護レベル 3 を対象にシナリオの選定を行った。具体的には、地震 PRA 評価例<sup>[3.2.3-2]</sup>の炉心損傷シーケンスを参考に図 3.2.3-7 に示す大破断 LOCA 及び RPV 損傷シーケンスを選定した。

これらのシナリオを基に、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する。表 3.3-1 の整理結果に基づき、図 3.2.3-8 に建屋損傷を考慮した論理モデルのイメージを示す。このフォールトツリーでは、地震動による HPCS ポンプ、電動弁、逆止弁、手動弁の損傷に加えて、原子炉建屋の特定の場所、即ち HPCS ポンプ室の損傷により HPCS ポンプが損傷するという損傷モードを考慮している。同様に、原子力プラント内のあらゆるシステム S、機器 C、人間系 H に対し、構築物 S の損傷が影響を及ぼすケースを論理モデルに組み込み、更に

建屋内の各所間の相関性をモデル上で考慮することで、構築物 S と SCH 間の従属性をより適切に表現することができる。このモデルにより、原子炉建屋内のあらゆる箇所の損傷により、どの安全機能が喪失するかを、様々な炉心損傷シナリオとの組み合わせで評価することができる。

3次元の応答解析は、原子炉建屋内の様々な箇所の応答評価を行うことができるため、これを基にシステム S、機器 C、人間系 H の耐力と比較することでフラジリティ評価を行うことができる（図 3.2.3-9 参照）。

原子炉建屋の他に、シビアアクシデント時の運転員によるアクシデントマネジメント操作の判断に影響を及ぼす可能性がある構築物として、緊急時対策所が設置される建屋がある。これには免震構造を採用した免震重要棟や耐震性を大幅に向上させた建屋を用いる場合がある。緊急時対策所のクリフェッジ効果、更には免震重要棟の有効性については重要な検討課題であると考えられる。

また、シビアアクシデントに至るシナリオは、事故の進展によって大きく以下のように分類できる。

- 地震のみによる事故シナリオ
- 地震発生後の安全機能の喪失により進展する事故シナリオ

これらの事故シナリオは区別して検討されるべきであり、このためにはクリフェッジ評価における対象事故シナリオを設定する必要がある。

また、地震発生時に深層防護のどのレベルまで喪失し、そのための適切な対応操作を行うためには、地震発生時のプラントの状況を的確に把握する必要があるが、地震による人間への影響の他に、プラントの物理的な状態の把握に課題があると考えられる。この点については、中央制御室にいる運転員の判断にだけ頼るのではなく、免震重要棟等の緊急時対策室のサポートが重要であると考えられる。図 3.2.3-10 に人間系のフラジリティの結合方法の例として、ECCS 起動信号のバックアップ操作にかかる運転員操作の評価例を示す。

### 3.2.3.3 物理的クリフェッジ回避策の有効性評価

BWR5 プラントを評価対象として選定し、RPV 損傷（炉心損傷直結事象）及び LOCA 時注水失敗（AUV）を対象シーケンスとした場合の物理的クリフェッジ回避策の有効性を評価する。クリフェッジ回避技術として、建屋免震による応答を基に SSCH のフラジリティを評価、適用、システムの多重化、多様化の効果も確認する。なお、ここでは 3.2.1 で実施した原子炉建屋の 3D-FEM による応答解析の結果を使用する。

フラジリティ評価の条件は表 3.2.3-2 に示す通りである。

試評価の一例として、LOCA 時注水失敗時の事故シーケンス発生頻度をイベントマップで表したものを図 3.2.3-11、12 に示す。

非免震／免震建屋の SSCH 損傷頻度の中央値で両者を比較すると、免震建屋の中央値が、約 2500gal から 2600gal と若干地震動が大きい側に移行しており、一定の効果があることが分かる。但しこの例では原子炉建屋以外の SSCH の免震効果が得られないため、穏やかな改善効果となっている。

### 3.2.3.4 知識起因クリフェッジの検討

知識起因のクリフエッジは、プラントシステムの要求性能に対し、人間の知識が及ばないことによるクリフエッジが対象であり、物理的クリフエッジに直交する概念である。以下の観点から系統的に検討する必要がある。

- a. モデル化範囲外事象  
従来の地震リスク評価モデルの対象となっていない事象  
⇒例) 機器間の完全従属の想定は、多重化・多様化の効果を無効化
- b. 想定外現象  
そもそも想定できていないクリフエッジ要因  
⇒可能性につき、定性的系統的に検討
- c. 解析技術が及んでいない事象  
⇒例) モデル化が困難な事象、複合事象、動的事象など

知識起因のクリフエッジ検討において、解析対象範囲に関するものは、主に以下の点であると考えられる。

- a. PRA モデルの範囲に含まれないもの
- b. 操作の判断に作用するもの  
緊急時対策所等
- c. 時系列の考慮  
津波、余震
- d. 設備毎に機能・リスク寄与度は異なる

モデル化の限界に関するものは、例えば、地震時の CV 内の物理現象、地震時の人間挙動或いは人的過誤が挙げられる。また、解析技術が及ばない例としては、余震、地震随伴津波等の複合事象の動的解析、地震時の物理現象のモデル、地震時の人的過誤確率算出方法等が挙げられる。余震、地震随伴津波等の複合事象の動的解析については、DQFM法を用いた地震時津波事象に対する PRA 手法の構築<sup>[3.2.3-3]</sup>、機器の状態遷移及び経時的変化の影響を考慮した PRA 手法の開発<sup>[3.2.3-4]</sup>が行われており、既知領域であるがモデル化ができていない範囲をカバーできるようになってきている。

知識起因のクリフエッジは、物理的クリフエッジと異なり、具体的に論理モデルに組み込むことは非常に難しい。従って、まずはどのような知識起因のクリフエッジがあるか、定性的な検討を行い、整理をする必要がある。その上で、論理モデルへの適用やクリフエッジ効果の回避方法を検討しなくてはならない。

### 3.2.3.5 まとめ

物理的クリフエッジに対しては、深層防護各レベルに対して物理的クリフエッジを設定し、対応する SSCH を整理し、更に、建屋システム、原子炉容器・配管、人間系に分けて検討を行なった成果を統合し、これらを全体システムとしてモデル化する手法を提案し、免震建屋を想定した場合の回避効果の試解析を通して、回避策の有効性を示すことができた。

なお、SSCH 各々のクリフエッジと本項で検討対象としたプラント全体システムのクリフエッジ

は必ずしも一致しないことが分かった。即ち、プラントを全体システムと捉えた場合、SSCHの構成要素がクリフエッジとなる状態であっても、全体システムのクリフエッジとはならないケースがある。このことは図 3.2.3-11、12 で示したイベントマップからも明らかである。

知識起因クリフエッジに対しては、モデル化範囲外事象、想定外現象及び解析技術が及んでいない事象に関して検討を行い、これらに対応するクリフエッジ項目を整理した。更に、関連する技術の検討を通して、知識起因クリフエッジの低減、回避への道筋を示すことができた。

以上をまとめると、現状の地震時の原子力施設の要求性能に対する物理的クリフエッジの評価及びクリフエッジを回避するための免震装置等の技術の有効性を評価するための論理モデルを構築した。このモデルにおいては、要求性能と SSCH との関連を明確にする必要があり、原子炉建屋や格納容器といった大型の構築物のモデル化方法や人間信頼性の組み込み方法の検討も実施した。また、知識起因クリフエッジとして、従来の技術では論理モデルに組み込まれていない、原子力発電プラント内の構築物や機器間の部分的な相関を取り扱うための手法や複数の外的事象の重畳を考慮した複合事象等の評価手法を検討対象として抽出した。

#### 参考文献

- [3.2.3-1] Byunghyun Choi et Al. Transactions, SMiRT-24, UNCERTAINTY ASSESSMENT OF STRUCTURAL MODELING IN THE SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF NUCLEAR FACILITIES.
- [3.2.3-2] JAEA, JAERI-Research 99-035, 軽水炉モデルプラント地震 PSA 報告書.
- [3.2.3-3] 牟田 仁他, DQFM 法を用いた地震および津波の重畳事象の事故シーケンス評価手法の提案, 日本原子力学会和文論文誌/16 卷(2017) 1 号 p. 49-56
- [3.2.3-4] 牟田 仁他, 機器の状態遷移および経時的変化の影響を考慮した PRA 手法の提案, 日本原子力学会和文論文誌/15 卷(2016) 2 号 p. 70-83

表 3.2.3-1 高圧炉心スプレイ系 (HPCS) を対象とした SSCH 整理例

DiD	クリフェッ シ定義	要求性能	クリフェッ シ指標						機能喪失条件		
				構築物St	部位	システムSy	機能	CH分類		機器C/人間 系H	
第3層	大規模な炉 心損傷を回 避するため の安全機能 を阻害する 地震動の強 さ (炉心損傷 頻度が急激 に立ち上が る地震動の 強さ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>大規模な炉心損傷を回避するために必要な安全機能 (原子炉停止機能, 炉心冷却機能, 崩壊熱除去機能) に係るSSCが破損しないこと。</li> <li>関連する運転員操作, 復旧操作, DECでの運転員対応操作が阻害されないこと。</li> </ul>	地震による炉心損傷頻度 (条件付炉心損傷確率)	...	...	...	...	...	...	...	
				原子炉建屋	HPCSポンプ室	高圧炉心スプレイ系			HPCSポンプ	機器損傷	
				原子炉建屋内					電動弁	機器損傷	
				PCV内					逆止弁	機器損傷	
				S/P					手動弁	機器損傷	
				復水貯蔵タンク					注入弁, 配	機器損傷	
				原子炉補助建屋	中央制御室						
				...	...	...	...	...	...	...	
										S/P本体	構造損傷
										タンク本体	構造損傷
						信号系	機器損傷				
					人間系H	運転員 (中央制御室)	負傷等により業務遂行が不可				

建屋の挙動とシステム、機器の損傷を論理的に結合

表 3.2.3-2 フラジリティ評価条件のまとめ

構築物 (S)	原子炉建屋 (R/B)、PCV
システム (S)、機器 (C) を内包する部屋：原子炉建屋各所、中央制御室	3D-FEM によるフラジリティ評価結果 建屋各所の壁、天井等の損傷確率を入力 対象となる部位がモデルにない場合は近隣の壁の損傷を参照
システム (S)、機器 (C)	3D-FEM による応答評価結果 建屋各所の床応答スペクトルとSCHの耐力よりフラジリティを算出
人間系 (H)	現状、転倒のフラジリティのみ評価のため、モデルには含めず

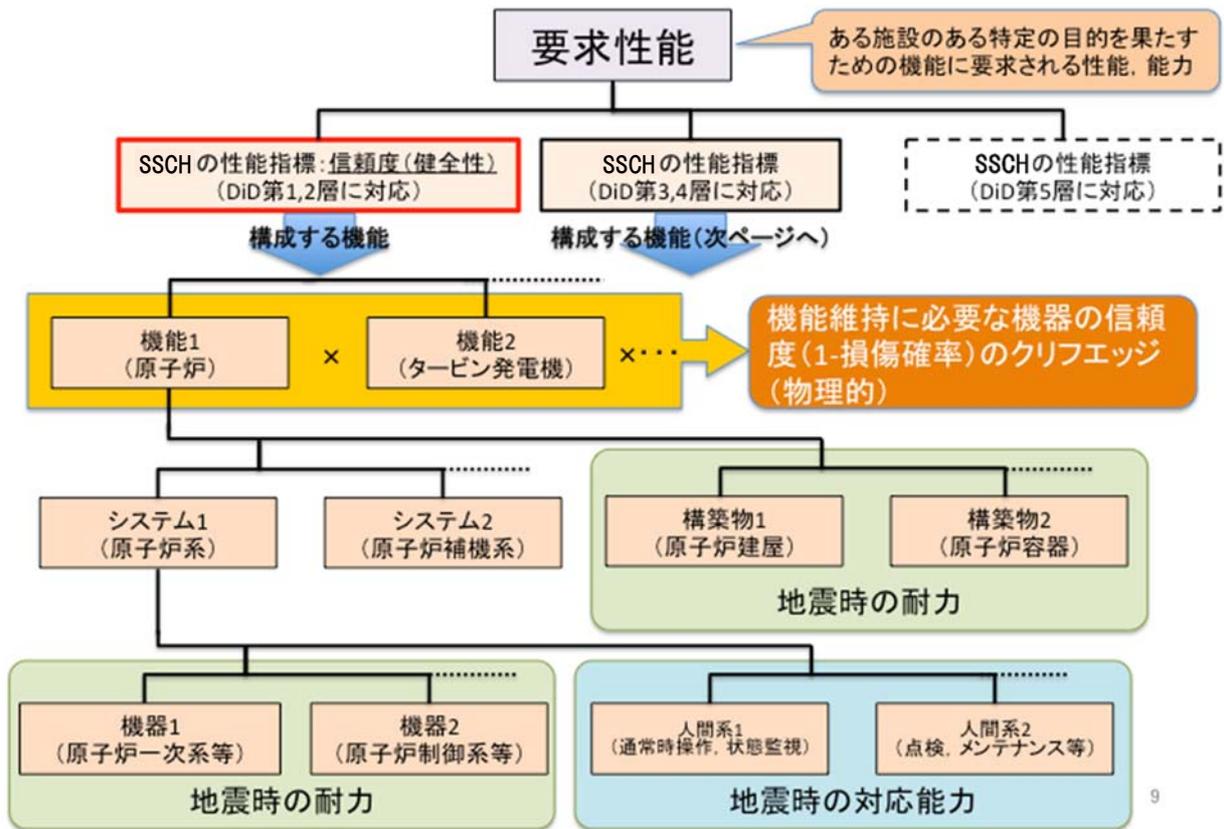


図 3.2.3-1 深層防護レベル1の要求性能の構造

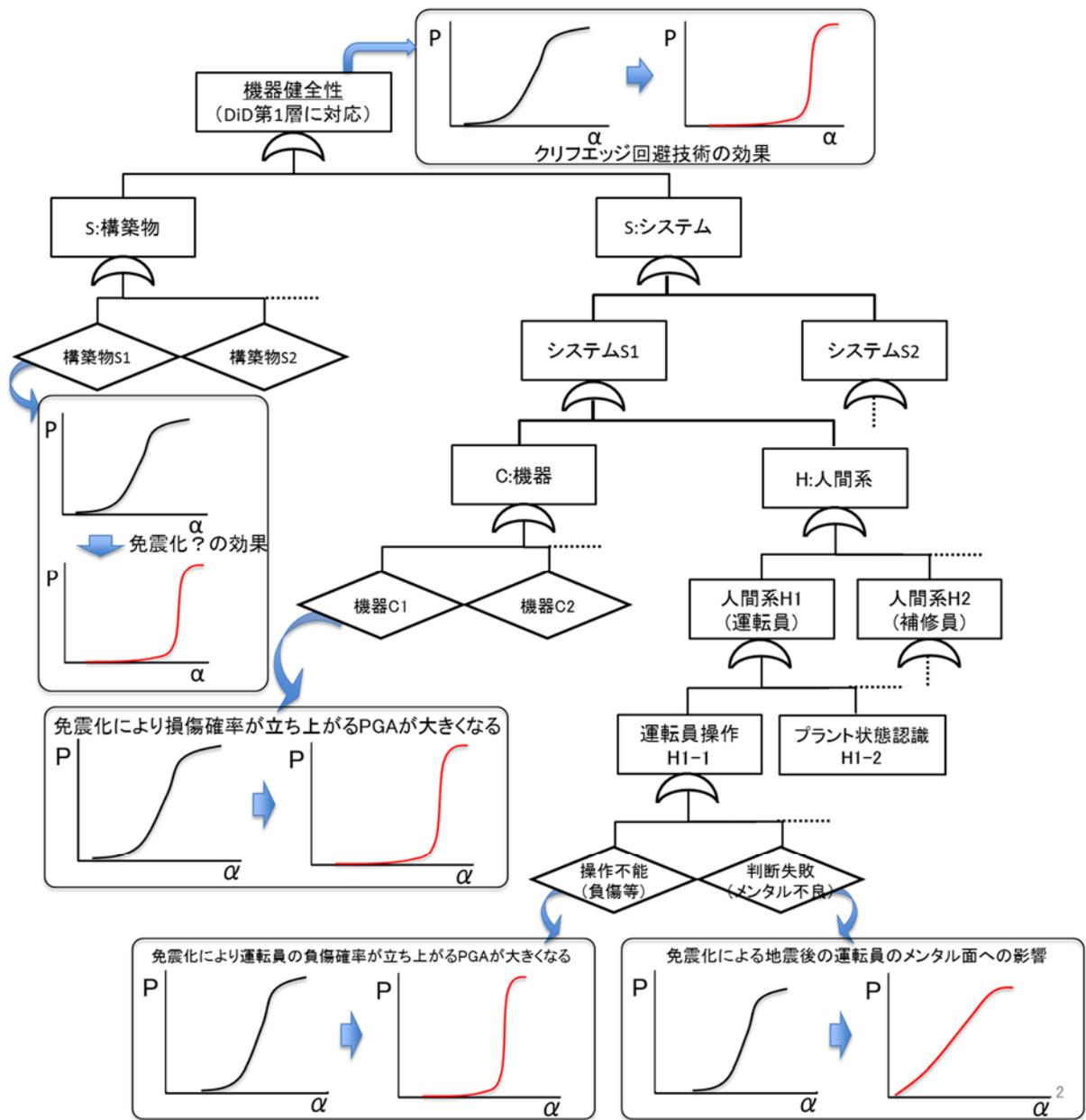


図 3.2.3-2 深層防護レベル1の物理的クリフエッジの論理モデルのイメージ

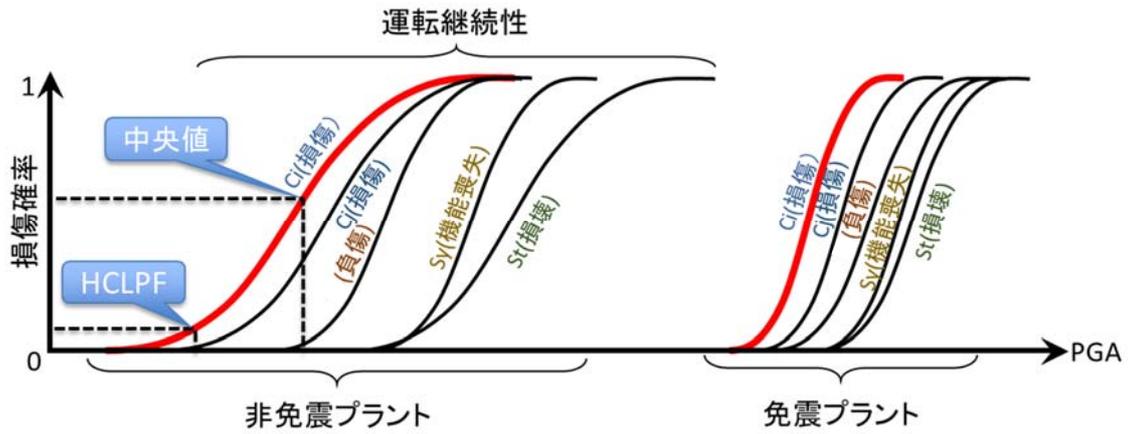


図 3.2.3-3 異常発生防止（運転継続性）に係るイベントマップ

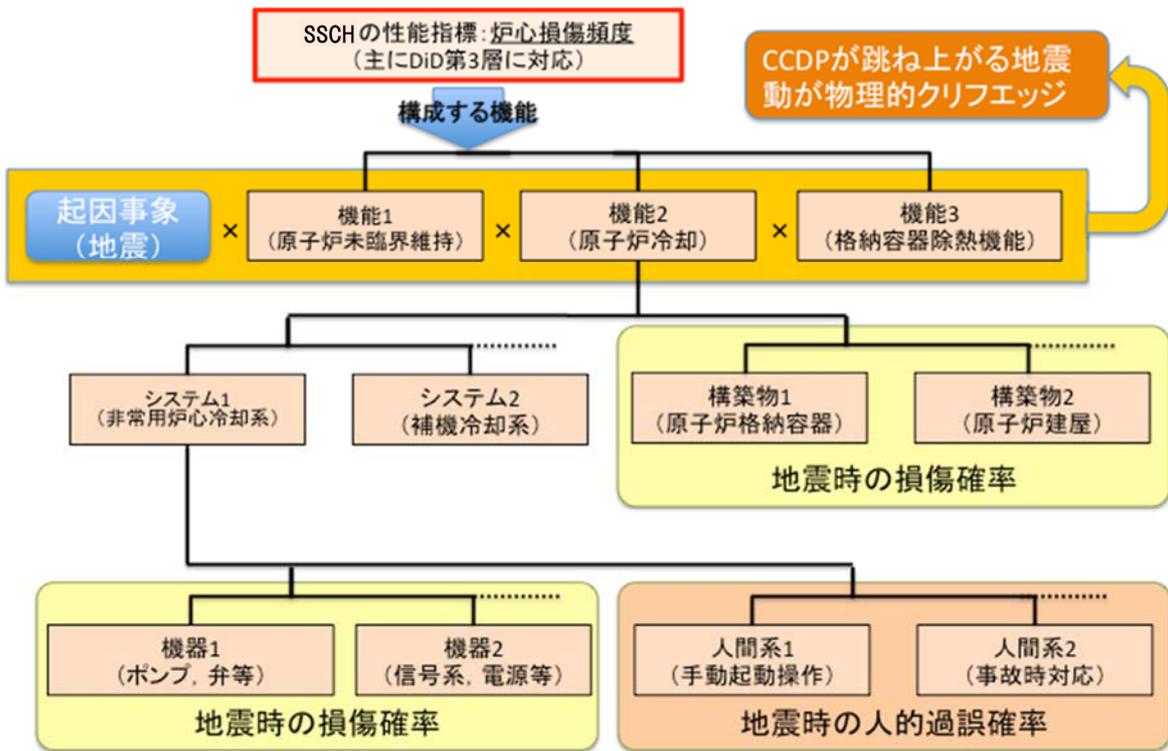


図 3.2.3-4 深層防護レベル3の要求性能の構造

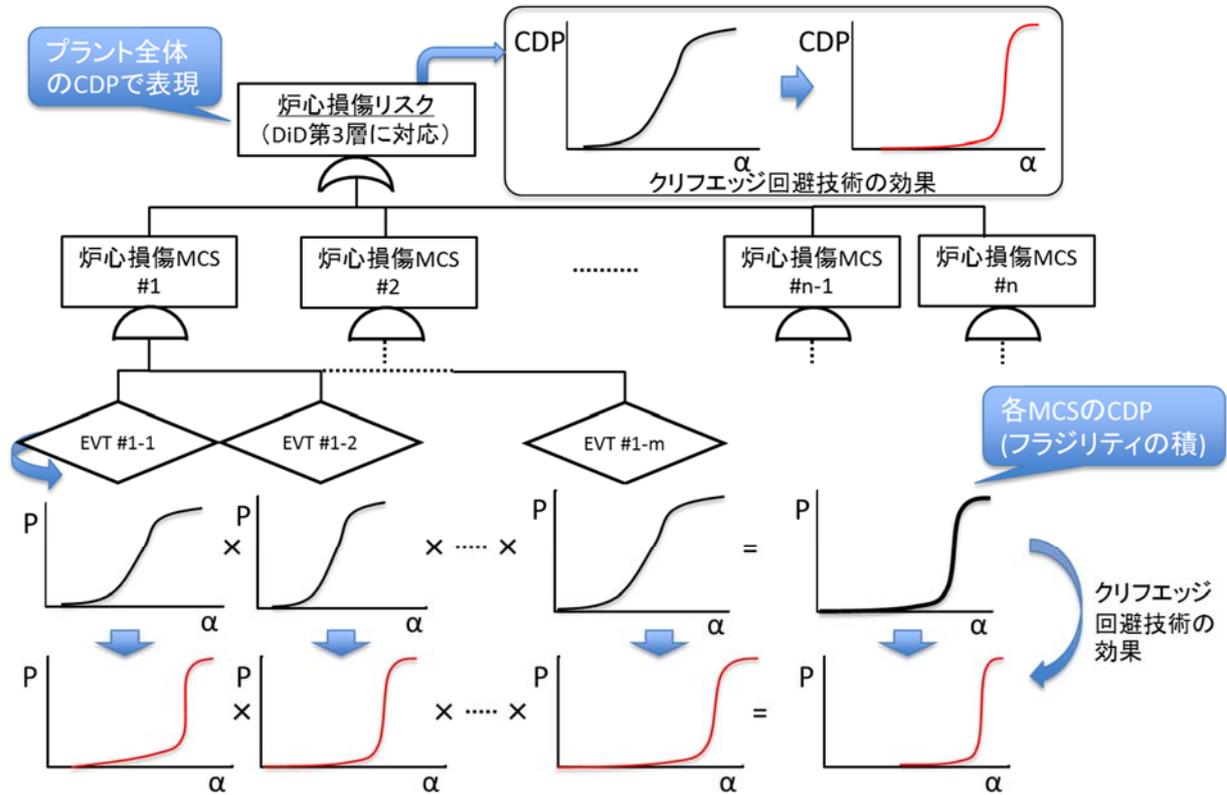


図 3. 2. 3-5 深層防護レベル 3 の物理的クリフエッジの論理モデルのイメージ

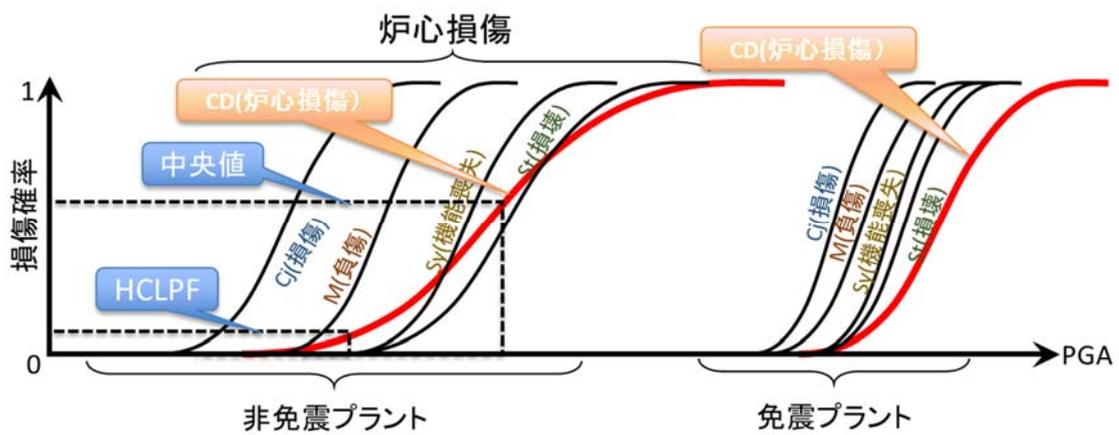


図 3. 2. 3-6 炉心損傷に係るイベントマップ

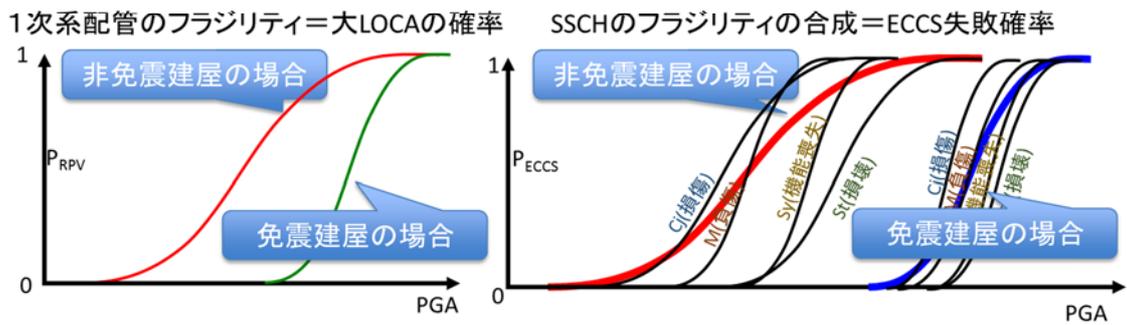
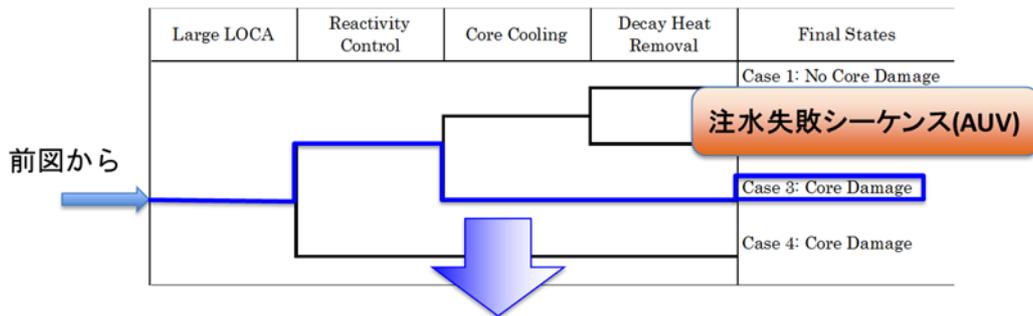
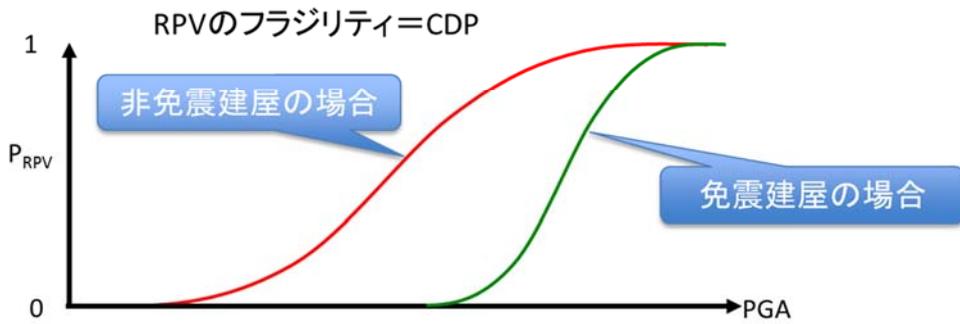
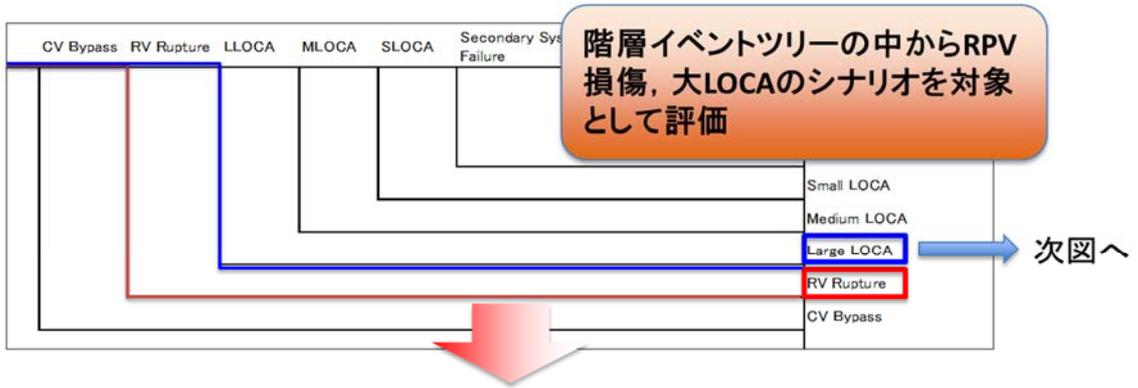


図 3. 2. 3-7 評価対象シナリオ

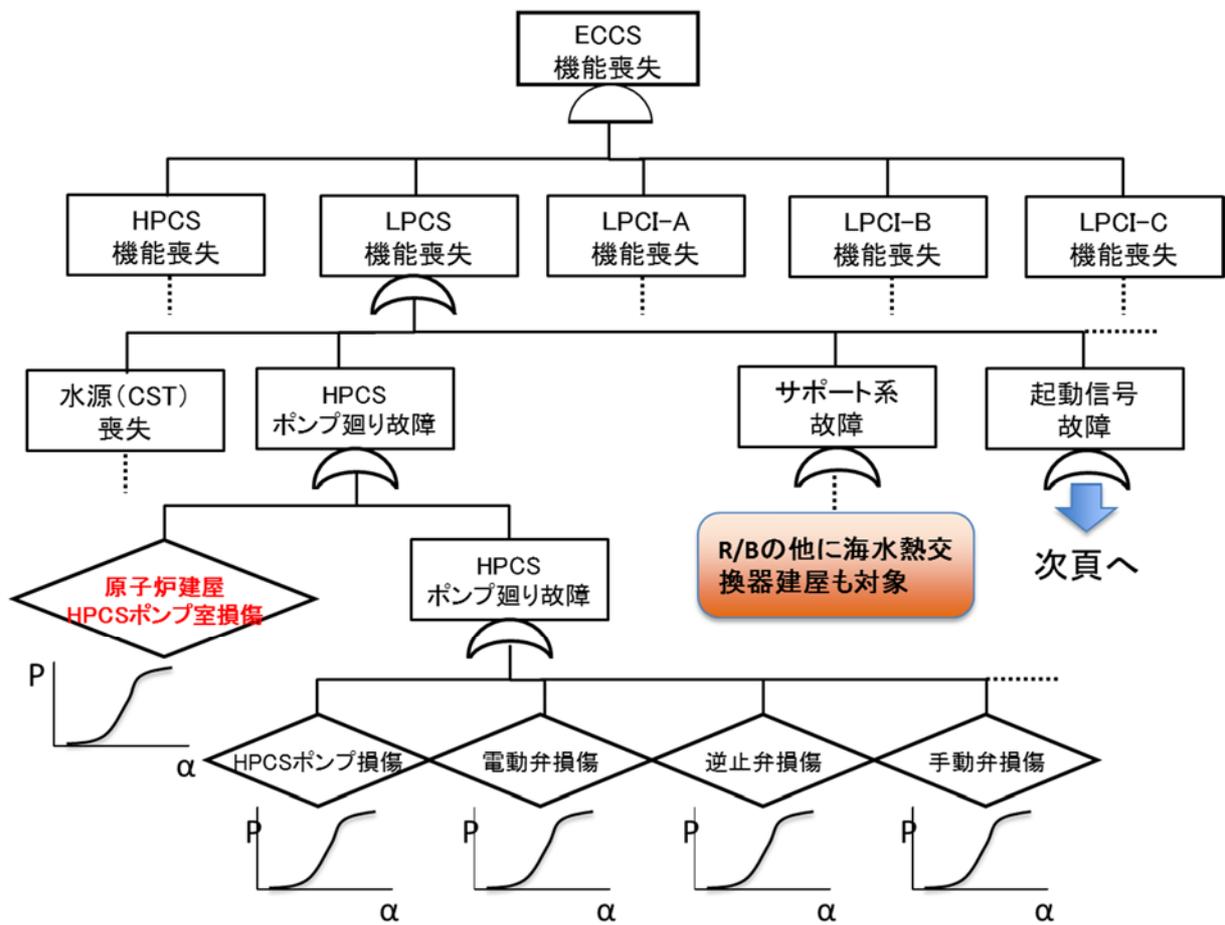


図 3.2.3-8 建屋損傷を考慮した論理モデルのイメージ

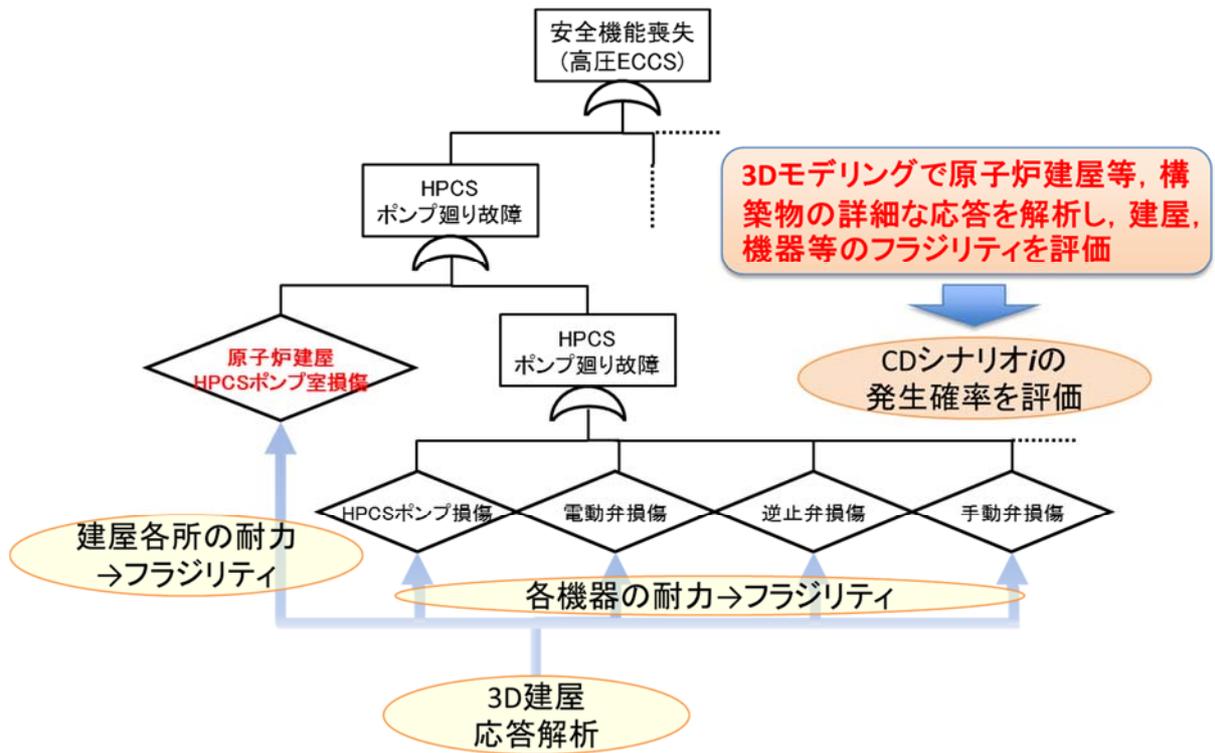


図 3. 2. 3-9 建屋各所の損傷確率の与え方のイメージ

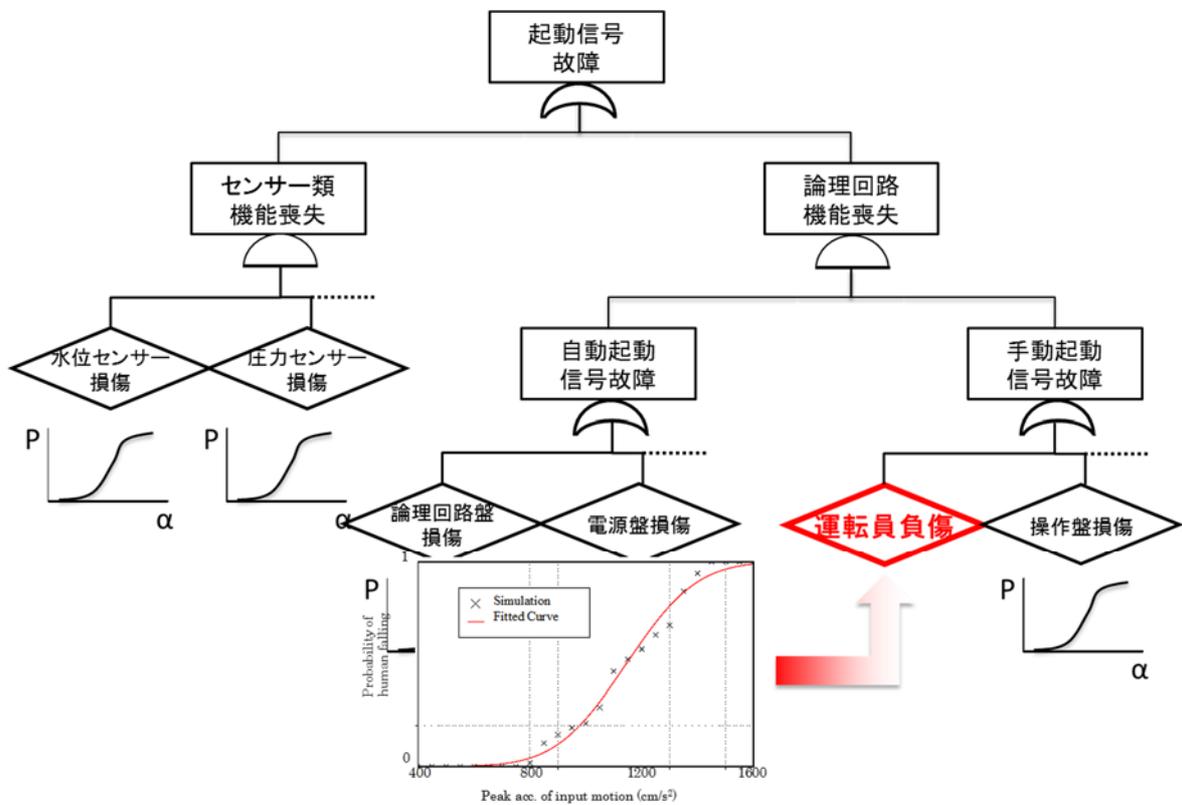


図 3. 2. 3-10 ECCS 関連人間系のフラジリティの合成方法の例

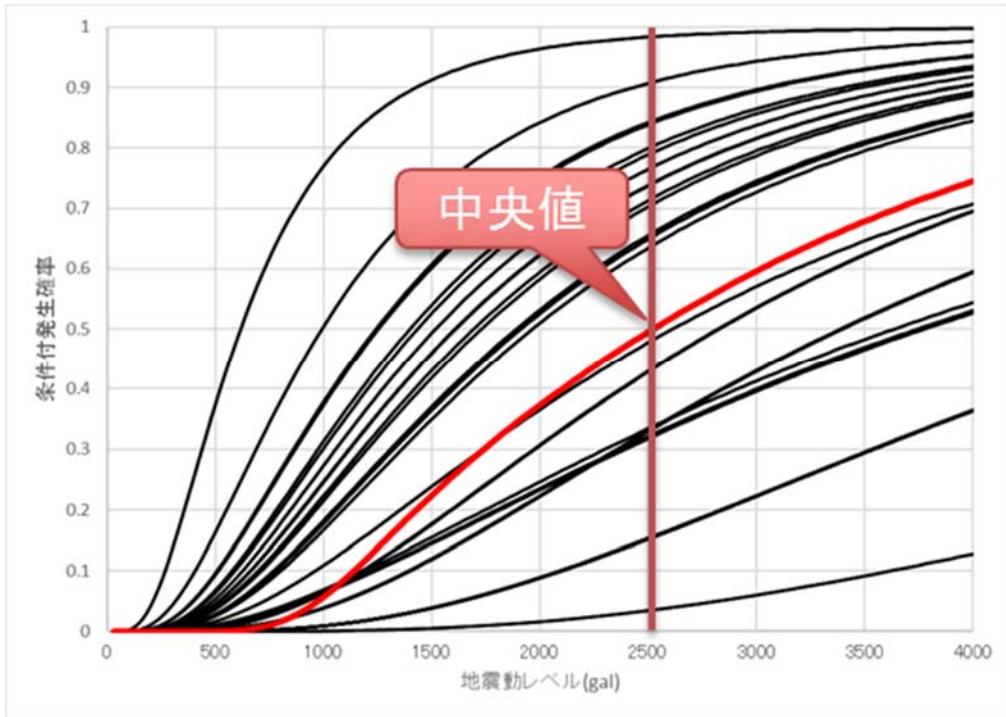


図 3.2.3-11 大 LOCA のイベントマップ（非免震建屋、赤字が事故シーケンス発生頻度）

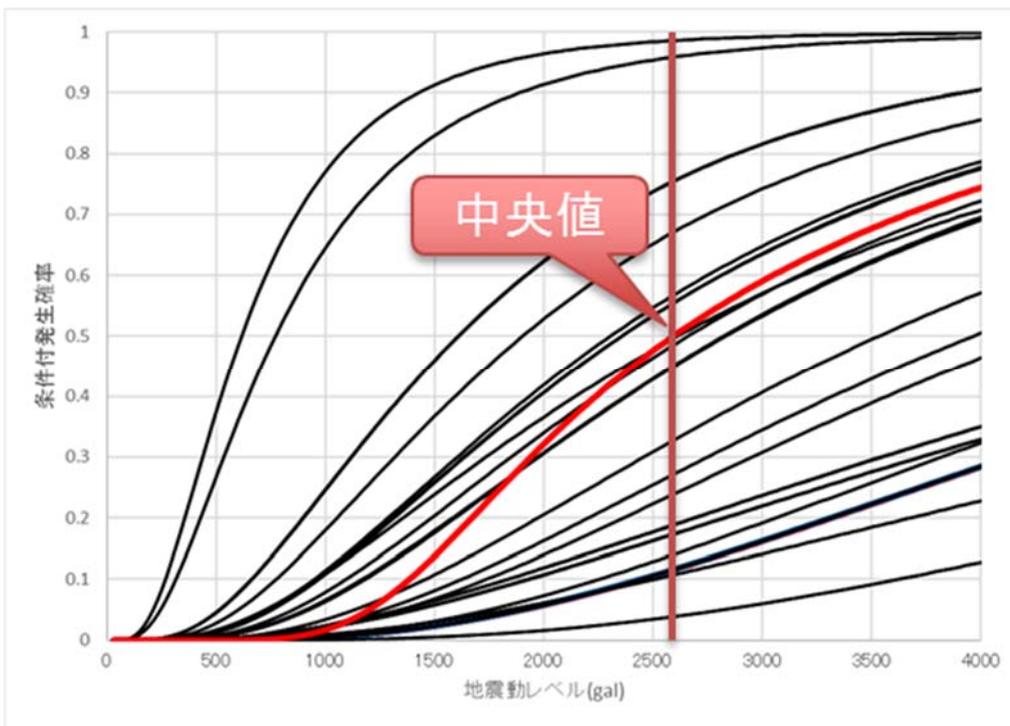


図 3.2.3-12 大 LOCA のイベントマップ（免震建屋、赤字が事故シーケンス発生頻度）

### 3.2.4 原子炉容器・配管のクリフエッジ回避技術（再委託先：日本原子力研究開発機構）

クリフエッジ回避技術の確立のため、平成28年度に地震応答解析で評価された建屋応答波形を用いて原子炉容器・配管のフラジリティ評価を行った。また、建屋の免震化による原子炉容器・配管の応答低減効果の定量的評価によってクリフエッジを評価するとともに、クリフエッジ回避技術を考案してまとめた。

#### 3.2.4.1 はじめに

近年、緊急時対策室として免震重要棟を建設し、平成23年の東京電力福島第一原子力発電所の事故においても、余震が続く中で現場作業員が待機する重要な拠点として機能した。次世代軽水炉および第4世代ナトリウム冷却高速炉は、安全性向上技術として免震構造採用の検討が進められている。

一方、免震技術の国際標準化のためには、新規基準でも要求されている確率論的リスク評価（PRA）の手法に基づいて、定量的に安全性を評価することは重要である。軽水炉プラントの地震PRA研究、薄肉構造である高速炉の特徴を考慮したPRA研究から、地震力を低減できる免震装置の導入がクリフエッジ回避技術として有効であることから、本研究では、建屋の免震化による原子炉容器および配管のフラジリティ評価等を通じて、クリフエッジの評価・回避技術を確立する。平成27年度は、免震化による効果が大きい薄肉の容器・配管の高速炉プラントを検討対象とし、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、予備的なフラジリティ評価を実施した。平成28年度は、薄肉に加えて厚肉の軽水炉の原子炉容器・配管を対象として、フラジリティ評価上重要な因子を抽出するとともに、フラジリティ評価を実施した。これらを踏まえて、平成29年度は、地震応答解析で評価された建屋応答波形を用いて原子炉容器・配管のフラジリティ評価を行うとともに、両プラントを対象とした免震化による応答低減効果の定量的評価によってクリフエッジを評価するとともに、クリフエッジ回避技術を考案してまとめる。

#### 3.2.4.2 フラジリティ評価上重要な因子の抽出【H27、H28】

##### (1) 免震システムの調査

平成27年度検討結果において、水平免震システムの採用を前提とした場合のクリフエッジ回避対策として、耐震補強や免震の導入による応答の軽減、積層ゴムの正確な非線形挙動の応答解析への反映、水平方向の減衰機能の強化が挙げられている。ここでは、これらの回避対策のうち免震システムに係る検討状況を調査した。

高速炉は、水平方向のみならず上下方向の応答低減も念頭に、高速炉の主要機器の特徴（固有振動数）を反映した免震システムを採用している<sup>[3.2.4-1]</sup>。また、上下方向の機器応答が重要であるため、上下方向の応答増幅抑制に着目した建屋解析モデルの検討もなされている。重要機器を支持する縦壁を厚くしたうえで格納容器内をFEMによってモデル化し、従来の集中質点モデルと比較した結果、機器の解析に用いる床応答スペクトルに大きな差異がないことを確認している<sup>[3.2.4-2]</sup>。これは、集中質点モデルの妥当性が示されているだけでなく、高速炉で用いている免震システムは、積層ゴスを厚肉化することで、上下方向の振動特性を制御していることから、よ

り集中質点モデルと FEM 解析の整合性が図り易くなっていると考えられる。

原子力発電所に採用する積層ゴムについても研究開発が進んでいる。軽水炉を適用対象に、直径 1600mm の実機スケールの鉛プラグ入り積層ゴムの静的な単調载荷による破断試験が実施されている。その結果、実機スケールの線形限界や破断特性等の特性が、1/2 スケール（直径 800mm）の試験結果と整合しており、1/2 スケールによる代替試験が適用できること等が確認されている [3.2.4-3]。

高速炉に適用する厚肉積層ゴムにおいては、1/2 スケール（直径 800mm）による破断試験や経年化による試験が実施されている。破断試験においては、単調载荷、繰返し载荷、上下水平の重畳下での試験が行われており、各条件における線形限界および破断限界（破断曲面）がまとめられている。また、設計範囲での剛性のばらつきは 95%信頼度で 5%程度であることも確認されている [3.2.4-4]。経年化試験では、無負荷で 30 年および 60 年相当に促進劣化させた積層ゴムの特性試験を実施しており、設計範囲での剛性の増加は 5%程度であること等が確認されている [3.2.4-5]。

## (2) 薄肉原子炉容器におけるフラジリティ評価上重要な因子の抽出

高速炉における薄肉原子炉容器は、規格の健全性評価では弾塑性座屈の評価がクリティカルになり、フラジリティ評価上重要な因子として抽出される。ただし、座屈が生じても直ちに機能喪失に至るわけではなく、まずは容器が座屈し、座屈発生個所に大きいひずみが繰返し発生することで疲労によりき裂貫通に至るのが実際の破損モードである。なお、薄肉原子炉容器の外側にはガードベッセルがあるので、原子炉容器単独の破損では安全性の喪失には至らないが、薄肉原子炉容器の破損からガードベッセルの破損までを解析によって定量的に評価するのは難しい。そのため、ここではかなり保守側の想定ではあるが、薄肉原子炉容器単独の破損に着目し、平成 27 年度と同様に座屈発生をもって破損に至ると仮定し検討する。

## (3) 厚肉原子炉容器におけるフラジリティ評価上重要な因子の抽出

軽水炉の厚肉原子炉容器を対象にフラジリティ評価上重要な因子を抽出するため、耐震裕度の小さい部位について文献調査を実施した。まず、日本原子力学会地震 PRA 標準 [3.2.4-6] によれば、耐震裕度が最も小さいのは沸騰水型軽水炉 (BWR) では基礎ボルト、加圧水型軽水炉 (PWR) では原子炉圧力容器 (RPV) 支持構造物と示されている。柏崎刈羽原子力発電所では、新潟県中越沖地震以降に各種設備について耐震強化工事が行われ RPV スタビライザが一式取替えられた [3.2.4-7]。島根原子力発電所 2 号機の安全性に関する総合評価 (ストレステスト) 一次評価結果 [3.2.4-8] によると、安全対策実施後の原子炉周りのクリフエッジとなる設備は RPV スタビライザとの記載があった。東海第二発電所の安全性に関する総合評価 (ストレステスト) [3.2.4-9] には、耐震裕度として RPV スタビライザが損傷するまでの裕度が示された。柏崎刈羽原子力発電所 7 号機の工事認可申請書 [3.2.4-10] を見ると、RPV 本体および周りの部位では、ペDESTAL (原子炉本体基礎) のブラケット部 (RPV ブラケット) が比較的耐震裕度の小さい部位であることが分かった。新規制基準適合性審査資料 [3.2.4-11] によると、RPV 本体および周りの部位では、高信頼度低損傷確率値 (HCLPF) となる地震加速度が最小となるものは RPV ペDESTAL (アンカ部) と RPV ペDESTAL (円筒部・リブ) との記載があった。川内原子力発電所 1 号機の工事認可申請書 [3.2.4-12] によると、原子炉容器本体および周りの部位では、原子炉容器支持構造物埋込金物が比較的耐震裕度の小さい部位であった。

調査の結果、軽水炉のうち、BWRについては、RPV 本体および周りの部位では、RPV の側面を支持している RPV スタビライザおよび RPV を下から支持しているペDESTAL、PWR については、RPV の側面を支持している RPV 支持構造物が比較的耐震裕度の小さい部位として抽出され、フラジリティ評価上重要であることが分かった。

#### (4) 配管におけるフラジリティ評価上重要な因子の抽出

平成 27 年度検討結果によると、米国で軽水炉配管のエルボおよび T 字管を対象に加振試験を行った結果、一次応力制限の許容応力の 20 倍超の大きさの入力を与えても、延性破断や塑性崩壊は生じず、最後は疲労によって破損したとの結果がある。また、国内で行われた軽水炉および高速炉用の配管要素の加振試験においても、同様の結果が得られた。これらのことから、配管の破損モードは、平成 27 年度と同様に地震によって変形が繰り返されることによる疲労破損であり、それがフラジリティ評価上重要と言える。

### 3.2.4.3 フラジリティ評価【H28、H29】

#### (1) 薄肉原子炉容器のフラジリティ評価

薄肉の原子炉容器を想定し、固有振動数が水平：4Hz、上下：10Hz となるように設定した形状・質量の容器を 1 質点でモデル化して地震応答解析を行った。容器の材料は SUS304、温度は 400℃である。平成 28 年度建屋側検討において用いられた基準地震動 B（以下、 $S_s$  という）の非免震と免震建屋の床応答曲線を用い、容器の座屈評価を行った結果、設計裕度は非免震建屋では 1.1、免震建屋では 2.8 であった。これを用いて、フラジリティ評価を行うため、平成 27 年度検討を踏まえて安全係数および不確実さを設定した（表 3.2.4-1、表 3.2.4-2 参照）。作成したフラジリティ曲線を図 3.2.4-1 に示す。HCLPF（95%信頼度曲線で破損確率が 0.05 となる荷重）は、非免震建屋では  $1.7 \times S_s$ 、免震建屋では  $3.5 \times S_s$  となった。免震技術を採用することで HCLPF は 2 倍程度大きくなり、免震化による応答低減効果が大きい。

一方、破損確率 0.5 に注目すると、非免震建屋と免震建屋では差がなくなる。免震建屋は非免震建屋よりも応答を低減できるため、ハードニング等が生じない地震動領域までは非免震建屋よりも破損確率は小さく抑えられる。ただし、免震建屋の応答は、ある入力を超えると積層ゴムのハードニングで増加するため、入力地震動がハードニングを生じる大きな地震動範囲になると破損確率は大きくなる。応答を単純に線形で大きくすると想定した非免震建屋と応答の増加が非線形性を有する免震建屋の特徴を表している。

#### (2) 厚肉原子炉容器のフラジリティ評価

厚肉の RPV およびその周りの構造物を想定し、ペDESTAL を評価対象部位として RPV とペDESTAL を質点系でモデル化して地震応答解析を行った。固有振動数は水平：1 次 12Hz、2 次 26Hz、上下：1 次 20Hz、2 次 38Hz である。支持部に相当する地上 1 階に地震荷重を与えた薄肉容器の場合とは異なり、基礎と地上 1 階（RPV 支持部相当）に地震荷重を入力した。強度評価を行った結果、設計裕度は非免震建屋では 0.9、免震建屋 1.8 であった。薄肉容器の場合と同様に、表 3.2.4-3、表 3.2.4-4 の安全係数および不確実さを考慮してフラジリティ曲線を作成したところ、図 3.2.4-2 に示すように、HCLPF は、非免震建屋では  $0.9 \times S_s$ 、免震建屋では  $2.1 \times S_s$  となった。一方、破損確率 0.5 となる地震加速度は、非免震建屋では  $4.1 \times S_s$ 、免震建屋では  $3.7 \times S_s$  と若干逆転したが、 $S_s$  の 3 倍程度を超えると外挿精度が十分でなく非線形性を過大評価している可能

性や、剛構造に対する非線形性を過大評価している可能性がある。また、 $S_s$  の 3 倍程度を超えると、免震装置が損傷する可能性があり、評価精度は低下することに留意が必要である。

### (3) 薄肉配管のフラジリティ評価

配管モデルを対象に破損モードを疲労破損として地震応答解析を行った。安全係数および不確かさは表 3.2.4-5、表 3.2.4-6 のように設定した。フラジリティ曲線を図 3.2.4-3 に示す。配管は地震による破損が生じにくく、HCLPF は、非免震建屋では  $6.3 \times S_s$ 、免震建屋では  $7.8 \times S_s$  となった。免震技術を採用することで HCLPF は 1.2 倍程度大きくなるが、配管は破損しにくいため、免震化による応答低減効果の感度は小さくなる。

### (4) 厚肉配管のフラジリティ評価

薄肉配管モデルを参考に、固有振動数が 20Hz を超えるように配管を厚くし、サポートを追加したモデルを作成して地震応答解析を行った。強度評価の結果、設計裕度は非免震建屋では 62、免震建屋では 82 であり、剛構造設計の厚肉配管本体は地震による破損が極めて生じにくい。安全係数および不確かさは表 3.2.4-7、表 3.2.4-8 のように設定し評価した結果、フラジリティ曲線は図 3.2.4-4 のように得られた。評価してみたものの、両建屋とも HCLPF は非常に大きい結果となった。

## 3.2.4.4 応答低減効果の定量的評価【H29】

前節では、建屋応答係数、機器応答係数、耐力係数を用いて不確かさを表現した。ここでは、原子炉容器と配管を取り扱っており、建屋に任意の機器・設備が据付けられた場合として、機器応答係数に注目して、免震化による応答低減効果を定量的に評価することとした。

一方、本研究では、知識起因クリフエッジとして従来知見を超えたところにクリフエッジがあるかもしれないことを考慮している。ここでは、機器応答係数を物理的に発生するかもしれない厳しい条件の下でクリフエッジとなりうるか、すなわちクリフエッジの特定を試みた。

### (1) 薄肉原子炉容器における応答低減効果

表 3.2.4-9 に示すように、機器応答係数は 0.5 から 2 の係数を乗じることとした。表中には耐震（非免震）と免震に分けて記している。これらの機器応答係数の不確かさを考慮したフラジリティ曲線を図 3.2.4-5 に示す。HCLPF 加速度（ $S_s$  に対する倍率）を表 3.2.4-9 に整理するとともに、図 3.2.4-6 にも示す。機器応答係数の不確かさを 2 倍とした場合の HCLPF は、耐震（非免震）プラントで  $0.9 \times S_s$ 、免震プラントで  $2.4 \times S_s$  であった。HCLPF を高い信頼度を有する耐力限界と見なすと、機器応答係数の不確かさの大きさに係らず水平免震を採用することで、HCLPF は耐震（非免震）プラントの場合の 2 倍以上となった。これらの不確かさを考慮しても、免震化による応答低減効果は大きいことが示された。

### (2) 厚肉原子炉容器における応答低減効果

薄肉原子炉容器と同じように、機器応答係数は 0.5 から 2 の係数を乗じることとし、フラジリティ曲線を作成した（図 3.2.4-7 参照）。また、HCLPF 加速度（ $S_s$  に対する倍率）を図 3.2.4-8 に示す。機器応答係数の不確かさを 2 倍とした場合の HCLPF は、耐震（非免震）プラントで  $0.5 \times S_s$ 、免震プラントで  $1.3 \times S_s$  であった。厚肉原子炉容器の場合にも、水平免震を採用することで、HCLPF は耐震（非免震）プラントの場合の 2 倍以上となり、免震化による応答低減効果は大

きいことが示された。

### (3) 薄肉配管における応答低減効果

薄肉原子炉容器と同じように、機器応答係数は 0.5 から 2 の係数を乗じることとした（表 3.2.4-10 参照）。耐震プラントにおける 2 倍の偶然的不確実さは 0.98 と 1 に非常に近くなっており物理的に考えられる範囲でほぼ最大を考慮している。これらの機器応答係数の不確実さを考慮した fragility 曲線を図 3.2.4-9 に示す。HCLPF 加速度 ( $S_s$  に対する倍率) を表 3.2.4-10 に整理するとともに、図 3.2.4-10 にも示す。機器応答係数の不確実さを 2 倍とした場合の HCLPF は、耐震（非免震）プラントで  $2.7 \times S_s$ 、免震プラントで  $4.8 \times S_s$  であった。HCLPF を高い信頼度を有する耐力限界と見なすと、機器応答係数の不確実さの大きさに係らず、免震化による応答低減効果は大きいことが示された。

### (4) 厚肉配管における応答低減効果

3.2.4.3 節で述べたように、剛構造設計の厚肉配管は破損しにくく  $S_s$  の倍率で表示する意味がないほど HCLPF は高いため、応答低減評価は実施しなかった。

## 3.2.4.5 クリフエッジ回避技術の考案【H27-H29】

### (1) 既往研究の調査結果から見られる地震時のクリフエッジ

#### a. 既往研究の調査

米国では 1975 年に原子力発電所に対する PRA が報告され、1983 年に適用指針が報告された。地震等の外部事象を含む PRA も実施した。日本では、1984 年頃から軽水炉を対象に地震 PRA の研究や試評価が行われ、限界耐力を把握するための試験も行われた。また、高速炉用配管の破損限界試験も行われた。免震プラントでは、高速炉への適用を想定した免震装置（積層ゴム）の試験研究が行われ、その後、免震プラントの PRA が検討された。免震設計として「原子力発電所免震構造設計技術指針」が平成 12 年に発行され、さらに、3 次元免震装置の開発も行われた。

諸々の知見や研究成果を反映して、平成 19 年に「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価に関する実施基準」（平成 27 年改定、以下、「原子力学会基準」と呼ぶ）が日本原子力学会から発行された。その後、積層ゴムの適用に向けて力学特性や終局挙動が確認された。容器及び配管等の終局耐力試験も行われ、エネルギーを用いた疲労破損限界と fragility 評価手法も検討された。また、積層ゴムの水平・上下の連成を考慮した地震 PRA の研究や、水平免震された高速炉プラントを対象とした地震 PRA が行われた。

#### b. 軽水炉プラント及び高速炉プラントのクリフエッジ

軽水炉及び高速炉プラントの地震 PRA より、非免震軽水炉プラントでは崩壊熱除去に係る補機冷却系や電源系の機能喪失が、一方高速炉プラントでは冷却材バウンダリを構成する機器の機能喪失が物理起因のクリフエッジとなる。そのため、クリフエッジ回避対策としては、これらの機器・設備の耐震補強を行うか、あるいは免震の採用によって、機能喪失限界を高地震動側にすることが有効である。

#### c. 免震プラントにおけるクリフエッジ

入力地震動が大きくなって積層ゴムの線形挙動限界を超えると、水平方向ではハードニングが、上下方向にはソフトニングが生じる。ハードニングやソフトニングが顕著に生じると、機器・設

備等に生じる荷重が大幅に増え、機能喪失する確率が増大する傾向があるが、そのような水平上下連成挙動は十分に解明されておらず、知識起因のクリフエッジとなりうる。免震プラントにおいては積層ゴムのハードニングやソフトニングが顕著に生じる状態がクリフエッジとなることから、クリフエッジ回避対策としては、次の方法が考えられる。

#### ① 積層ゴムのハードニングやソフトニング効果の緩和

積層ゴムのハードニングやソフトニングの正確な挙動を把握し、それを応答解析に反映する。なお、高速炉用に開発されたやや厚肉の積層ゴムの試験では、ハードニングやソフトニングの程度が軽減している。

#### ② 積層ゴムの変形量の抑制

水平方向の減衰機能の強化によって積層ゴムの水平変形を抑制し、ハードニング領域に入りやすくする。一方、顕著な上下方向のソフトニングを抑制するには、上下免震を取り入れることが必要になる。

### (2) 免震技術の効果

今回検討対象とした高速炉を想定した薄肉の容器のモデルは、破損モードに寄与する水平方向の固有振動数が 4Hz 程度と低振動数（柔構造）であるとともに、地震時に応答増幅し易い建屋上部に設置されている。そのため、フラジリティ解析で示されたように、水平免震採用時により HCLPF は非免震建屋の場合の 2 倍以上となり、応答低減効果は大きい。一方、配管については、非免震建屋の場合の裕度が比較的大きかったため、水平免震を採用しても HCLPF は 1.2 倍程度であり、応答低減効果の感度は小さい。

軽水炉を想定した厚肉の容器として BWR ペDESTAL は、水平免震化により HCLPF は 2 倍程度に改善することがわかった。一方、剛構造設計の厚肉配管については、破損モードに寄与する水平方向の固有振動数が高く非免震建屋であっても耐震裕度が大きいと考えられるため、水平免震採用による効果が小さい（HCLPF は大きく変化しない）。

以上から、免震技術の採用によって機能喪失限界を高地震動側にすることができ、免震技術はクリフエッジ回避技術に有効である。

### (3) クリフエッジ回避技術の考案

本研究では、物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジを考慮している。物理的クリフエッジは従来どおりのある程度の地震動が大きくなると破損に至り終局挙動としてふるまうことになることである。一方、知識起因クリフエッジは従来知見を超えたところにクリフエッジがあるかもしれないことを考慮している。前節で示したように、免震技術を使ったプラントでは、従来考慮していた不確かさ幅を物理的に起こりうる範囲で未知の範囲を考慮してもクリフエッジは発現しにくいことを示した。

ここでは、物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジとの関係を用いて、免震技術のクリフエッジ回避技術の有用性を示す概念を考案することとした。図 3.2.4-11 には従来技術の範囲で設計している免震プラントと非免震プラントにおける機器等のクリフエッジの位置づけを示している。従来技術は知識起因クリフエッジの発現しない範囲であり、物理的クリフエッジが発現しない、すなわち破損しない範囲で設計している。この設計では、不確かさを考慮して保守側に考慮しても物理的クリフエッジが発現することはない。

地震動が大きくなると経験したことのない未知の領域に入り知識起因クリフエッジが顕在化する可能性がある。そのような場合の概念を示したものが図 3.2.4-12 である。非免震プラントでは非線形効果など従来技術では考慮しきれていない可能性があり制御できる範囲を超える可能性がある。すなわち、地震動が大きくなっていくと、破損するかもしれないという制御困難なクリフエッジが発現する可能性がある。一方、免震プラントでは地震動が大きくなっても免震装置の特性（ハードニング、ソフトニング、水平上下連成、非線形効果等）は既知であるため未知の領域は狭く、破損するかもしれないというクリフエッジが発現する可能性は低い。したがって、免震技術はクリフエッジ回避技術として有用であると言える。以上のように、クリフエッジ回避技術の有用性を示す概念を考案することができた。

### 3.2.4.6 まとめ

新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、平成 28 年度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かさを設定して、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、免震効果が大きいことが明らかとなった。また、配管については、破損が生じにくく、非免震と免震を比較しても免震効果は小さいことがわかった。機器応答係数に注目して、0.5~2 の係数を乗じて不確かさに対する幅を見込んでフラジリティを評価した結果、2 倍まで考慮したとしても、建屋の免震化による原子炉容器・配管の応答低減効果は大きいことが示され、定量的に把握することができた。水平免震を導入することにより、クリフエッジになりにくいことを示し、免震がクリフエッジ回避技術として有効であることを示すことができた。最後に、3 年間の検討結果を踏まえて、物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジとの関係を用いて、免震技術のクリフエッジ回避技術の有用性を示す概念を考案した。

### 参考文献

- [3.2.4-1] S. Okamura, et al, “Seismic Isolation Design for JSFR,” Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 48, No.4, p.688-692 (2011).
- [3.2.4-2] T. Yamamoto, et al, “Study on Reduction of Vertical Seismic Response for Sodium-cooled Fast Reactor Building,” ICAPP 2016, April 17-20, 2016.
- [3.2.4-3] 小杉慎司 他, “破断試験による大型鉛プラグ入り積層ゴムの終局特性評価”, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 732 号, 203-213, 2017 年 2 月.
- [3.2.4-4] T. Fukasawa, et al, “Development on Rubber Bearings for Sodium-Cooled Fast Reactor (Part 3) Ultimate Properties of a Half Scale Thick Rubber Bearings Based on Breaking Test,” Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, July 17-21, 2016.
- [3.2.4-5] T. Watakabe, et al, “Development on Rubber Bearings for Sodium-Cooled Fast Reactor Part4 - Aging Properties of a Half Scale Thick Rubber Bearings

Based on Breaking Test,” Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, July 17-21, 2016.

- [3.2.4-6] 日本原子力学会, “原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015,” AESJ-SC-P006:2015, 2015年12月25日.
- [3.2.4-7] 東京電力, “柏崎刈羽原子力4号機原子炉圧力容器付属構造物の耐震強化工事について,” 平成23年6月23日.
- [3.2.4-8] 中国電力, “島根原子力発電所2号機の安全性に関する総合評価(ストレステスト)一次評価結果について,” 平成24年8月3日.
- [3.2.4-9] 日本原子力発電, “東海第二発電所の安全性に関する総合評価(ストレステスト)の結果について,” 平成24年8月31日.
- [3.2.4-10] 東京電力, “柏崎刈羽原子力発電所7号機 工事計画認可申請書,” 原管発官25第226号, 平成25年9月27日.
- [3.2.4-11] 東京電力, “柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉 確率論的リスク評価、事故シナリオグループ及び重要事故シナリオ等の選定について(指摘事項に対する回答),” 平成28年3月.
- [3.2.4-12] 九州電力, “工事計画認可申請書(川内原子力発電所第1号機の変更の工事),” 発本原第88号, 平成25年7月8日.

表 3.2.4-1 耐震（非免震）プラントの薄肉容器のフラジリティ評価における安全係数及び不確かさ

		安全係数 F	不確かさ $\beta$	
安全率 1.5 を有する座屈評価の裕度		1.05	偶然的な不確かさ $\beta_r$	認識論的な不確かさ $\beta_u$
建屋 応答係数	地盤挙動：F1	1.0	0.40	0.15
	免震装置挙動：F2	—	—	—
	建屋挙動：F3	1.0	0.30	0.20
機器 応答係数	モデル：F4	1.3	0.13	0.15
	減衰率：F5	1.2	0.08	0.10
	水平と上下の重ね合わせ：F6	1.38	0.14	0.15
	塑性による応答低減効果：F7	1.6	—	0.20
耐力係数	座屈評価式：F8	1.77	0.10	0.05
	降伏応力：F9	1.27	0.10	0.05
安全係数：F		8.13	0.56	0.40

表 3.2.4-2 免震プラントの薄肉容器のフラジリティ評価における安全係数及び不確かさ

		安全係数 F					不確かさ $\beta$	
地震条件		Ss	1.5Ss	2Ss	2.5Ss	3Ss	偶然的な不確かさ $\beta_r$	認識論的な不確かさ $\beta_u$
安全率 1.5 を有する座屈評価の裕度		2.76	1.68	0.90	0.59	0.44		
建屋 応答 係数	地盤挙動：F1	1.0					—	—
	免震装置挙動：F2	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	0.14	0.20
	建屋挙動：F3	1.0					—	—
機器 応答 係数	モデル：F4	1.3					0.13	0.15
	減衰率：F5	1.2					0.08	0.10
	水平と上下の重ね合わせ：F6	1.38					0.14	0.15
	塑性による応答低減効果：F7	1.6					—	0.20
耐力 係数	座屈評価式：F8	1.77 (=1.5×1.18)					0.10	0.05
	降伏応力：F9	1.27					0.10	0.05
安全係数：F		21.37	13.01	8.36	5.48	4.09	0.29	0.37

表 3.2.4-3 耐震（非免震）プラントの厚肉容器のフラジリティ評価における安全係数及び不確かさ

	安全係数 F	偶然的な不確かさ $\beta_r$	認識論的な不確かさ $\beta_u$
安全係数：F	4.4	0.56	0.40

表 3.2.4-4 免震プラントの厚肉容器のフラジリティ評価における安全係数及び不確かさ

		安全係数 F					不確かさ $\beta$	
地震条件		Ss	1.5Ss	2Ss	2.5Ss	3Ss	偶然的な不確かさ $\beta_r$	認識論的な不確かさ $\beta_u$
安全係数：F		4.4	4.0	3.4	2.8	2.5	0.29	0.37

表 3.2.4-5 耐震（非免震）プラントの薄肉配管のフラジリティ評価における安全係数及び不確かさ

		安全係数 F		不確かさ $\beta$	
エルボ部の座屈評価の裕度		2.38		偶然的な不確かさ $\beta_r$	認識論的不確かさ $\beta_u$
建屋 応答係数	地盤挙動：F1	1.0		0.40	0.15
	免震装置挙動：F2	—		—	—
	建屋挙動：F3	1.0		0.30	0.20
機器 応答係数	モデル：F4	1.1		0.06	—
	モーメントの合成方法：F5	1.0		—	—
	減衰率：F6	1.2		0.08	0.10
	水平と上下の重ね合わせ：F7	1.38		0.14	0.30
	塑性による応答低減効果：F8	1.6		—	0.10
	エルボの変形（角変位）とひずみの関係：F9	1.0		0.32	0.05
耐力係数	疲労と座屈の耐力比：F10	3.14		—	—
	設計疲労曲率の裕度：F11	2.0		0.42	0.10
安全係数：F		43.56		0.75	0.43

表 3.2.4.4-6 免震プラントの薄肉配管のフラジリティ評価における安全係数及び不確かさ

		安全係数 F				不確かさ $\beta$	
地震条件		Ss	2Ss	3Ss	4Ss	偶然的な不確かさ $\beta_r$	認識論的不確かさ $\beta_u$
エルボ部の座屈評価の裕度		6.15	2.14	1.17	0.82		
建屋 応答係数	地盤挙動：F1	1.0				—	—
	免震装置挙動：F2	1.0	1.2	1.2	1.2	0.14	0.20
	建屋挙動：F3	1.0				—	—
機器 応答係数	モデル：F4	1.1				0.06	—
	モーメントの合成方法：F5	1.0				—	—
	減衰率：F6	1.2				0.08	0.10
	水平と上下の重ね合わせ：F7	1.38				0.14	0.30
	塑性による応答低減効果：F8	1.6				—	0.10
	エルボの変形（角変位）とひずみの関係：F9	1.0				0.32	0.05
耐力係数	疲労と座屈の耐力比：F10	3.14				—	—
	設計疲労曲率の裕度：F11	2.0				0.42	0.10
安全係数：F		113	47.0	25.7	18.0	0.57	0.40

表 3.2.4-7 耐震（非免震）プラントの厚肉配管のフラジリティ評価における安全係数及び不確かさ

	安全係数 F	偶然的な不確かさ $\beta_r$	認識論的不確かさ $\beta_u$
安全係数：F	18.3	0.75	0.43

表 3.2.4-8 免震プラントの厚肉配管のフラジリティ評価における安全係数及び不確かさ

		安全係数 F				不確かさ $\beta$	
地震条件		Ss	2Ss	3Ss	4Ss	偶然的な不確かさ $\beta_r$	認識論的不確かさ $\beta_u$
安全係数：F		18.3	15.3	12.6	11.7	0.57	0.40

表 3.2.4-9 薄肉容器における機器応答係数の不確実さをパラメータとした場合の HCLPF※

(a) 耐震（非免震）プラント

係数	条件				結果 HCLPF※ (Ss に対する倍率)
	機器応答係数		偶然的 不確実さ	認識論的 不確実さ	
$\alpha$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	
0.5	0.10	0.15	0.53	0.30	2.06
1.0	0.21	0.31	0.56	0.40	1.66
1.5	0.31	0.46	0.61	0.53	1.25
2.0	0.41	0.62	0.66	0.67	0.89

1) 50%信頼度曲線で破損確率が 0.5 となる荷重 :  $8.13 \times S_s$

2) 建屋応答係数の  $\beta_r=0.50$ 、 $\beta_u=0.25$ 、耐力係数の  $\beta_r=0.14$ 、 $\beta_u=0.07$

(b) 免震プラント

係数	条件				結果 HCLPF※ (Ss に対する倍率)
	機器応答係数		偶然的 不確実さ	認識論的 不確実さ	
$\alpha$	$\beta_r$	$\beta_u$	$\beta_r$	$\beta_u$	
0.5	0.10	0.15	0.22	0.26	4.03
1.0	0.21	0.31	0.29	0.37	3.52
1.5	0.31	0.46	0.37	0.51	2.92
2.0	0.41	0.62	0.46	0.65	2.35

1) 50%信頼度曲線で破損確率が 0.5 となる荷重 :  $5.64 \times S_s$

2) 建屋応答係数の  $\beta_r=0.14$ 、 $\beta_u=0.20$ 、耐力係数の  $\beta_r=0.14$ 、 $\beta_u=0.07$

(c) 耐震（非免震）プラントと免震プラントの HCLPF 比較

係数 $\alpha$	耐震（非免震） プラントの HCLPF※① (Ss に対する倍率)	免震プラントの HCLPF※② (Ss に対する倍率)	HCLPF※比較 ②/①
0.5	2.06	4.03	1.95
1.0	1.66	3.52	2.12
1.5	1.25	2.92	2.33
2.0	0.89	2.35	2.62

※HCLPF : 95%信頼度曲線で破損確率が 0.05 となる荷重

表 3.2.4-10 薄肉配管における機器応答係数の不確実さをパラメータとした場合の HCLPF

(a) 耐震（非免震）プラント

係数	機器応答係数		偶然的 不確実さ	認識論的 不確実さ	HCLPF** (S <sub>s</sub> に対する倍率)
	$\beta_r$	$\beta_v$	$\beta_r$	$\beta_v$	
$\alpha$	$\beta_r$	$\beta_v$	$\beta_r$	$\beta_v$	
0.5	0.18	0.17	0.68	0.32	8.48
1.0	0.36	0.34	0.75	0.43	6.28
1.5	0.54	0.50	0.85	0.57	4.19
2.0	0.73	0.67	0.98	0.72	2.65

1) 50%信頼曲線で破損確率が 0.5 となる荷重 :  $43.56 \times S_s$

2) 建屋応答係数の  $\beta_r=0.50$ 、 $\beta_v=0.25$ 、耐力係数の  $\beta_r=0.42$ 、 $\beta_v=0.10$

(b) 免震プラント

係数	機器応答係数		偶然的 不確実さ	認識論的 不確実さ	HCLPF** (S <sub>s</sub> に対する倍率)
	$\beta_r$	$\beta_v$	$\beta_r$	$\beta_v$	
$\alpha$	$\beta_r$	$\beta_v$	$\beta_r$	$\beta_v$	
0.5	0.18	0.17	0.48	0.28	9.07
1.0	0.36	0.34	0.57	0.40	7.78
1.5	0.54	0.50	0.70	0.55	6.26
2.0	0.73	0.67	0.85	0.71	4.76

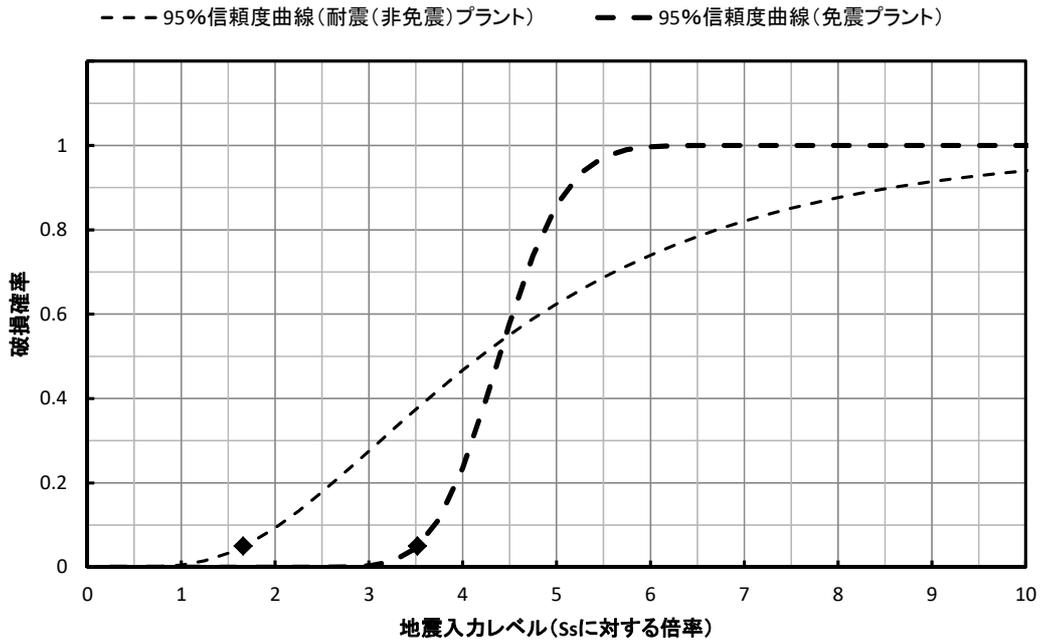
1) 50%信頼曲線で破損確率が 0.5 となる荷重 :  $14.29 \times S_s$

2) 建屋応答係数の  $\beta_r=0.14$ 、 $\beta_v=0.20$ 、耐力係数の  $\beta_r=0.42$ 、 $\beta_v=0.10$

(c) 耐震（非免震）プラントと免震プラントの HCLPF 比較

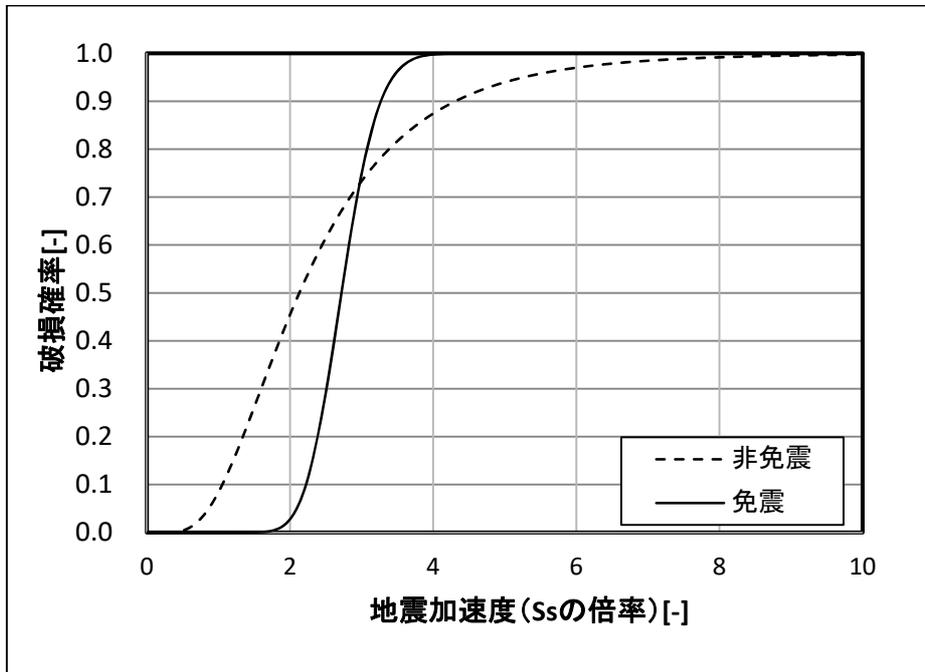
係数 $\alpha$	耐震（非免震） プラントの HCLPF**① (S <sub>s</sub> に対する倍率)	免震プラントの HCLPF**② (S <sub>s</sub> に対する倍率)	HCLPF**比較 ②/①
0.5	8.48	9.07	1.07
1.0	6.28	7.78	1.24
1.5	4.19	6.26	1.49
2.0	2.65	4.76	1.80

※HCLPF : 95%信頼度曲線で破損確率が 0.05 となる荷重



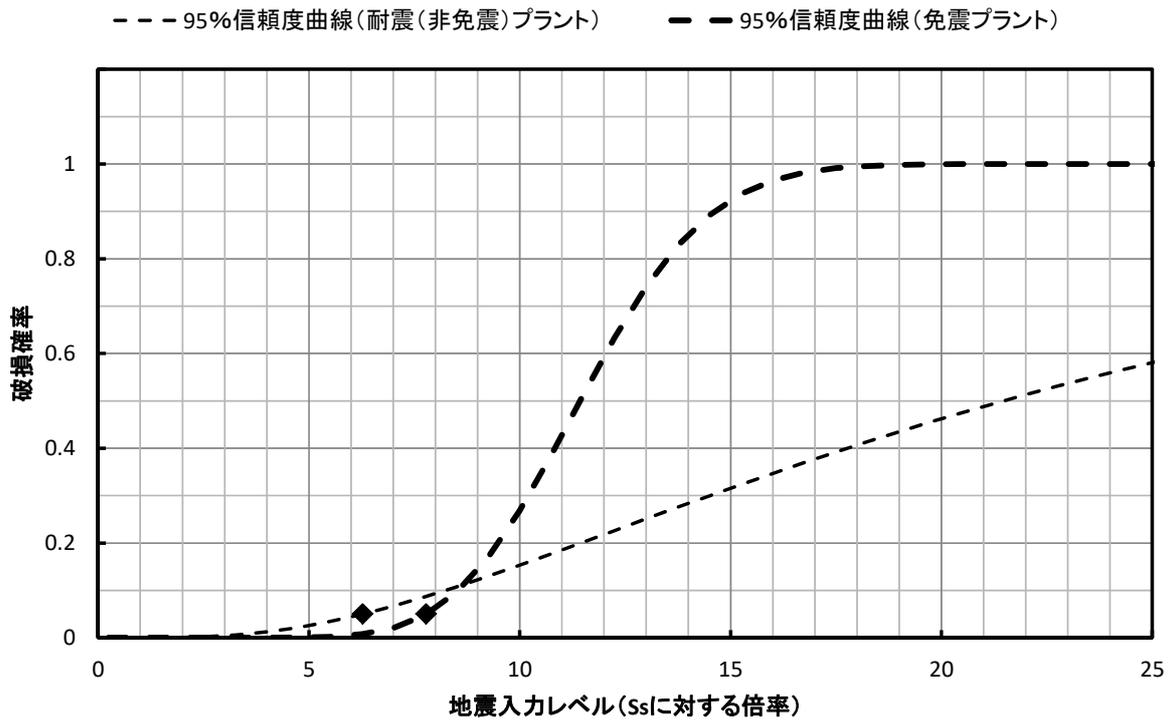
非免震建屋の HCLPF :  $1.7 \times S_s$ 、免震建屋の HCLPF :  $3.5 \times S_s$   
 (HCLPF : 95%信頼曲線で破損確率が 0.05 となる荷重)

図 3.2.4-1 薄肉原子炉容器の fragility 曲線における非免震と免震建屋の比較



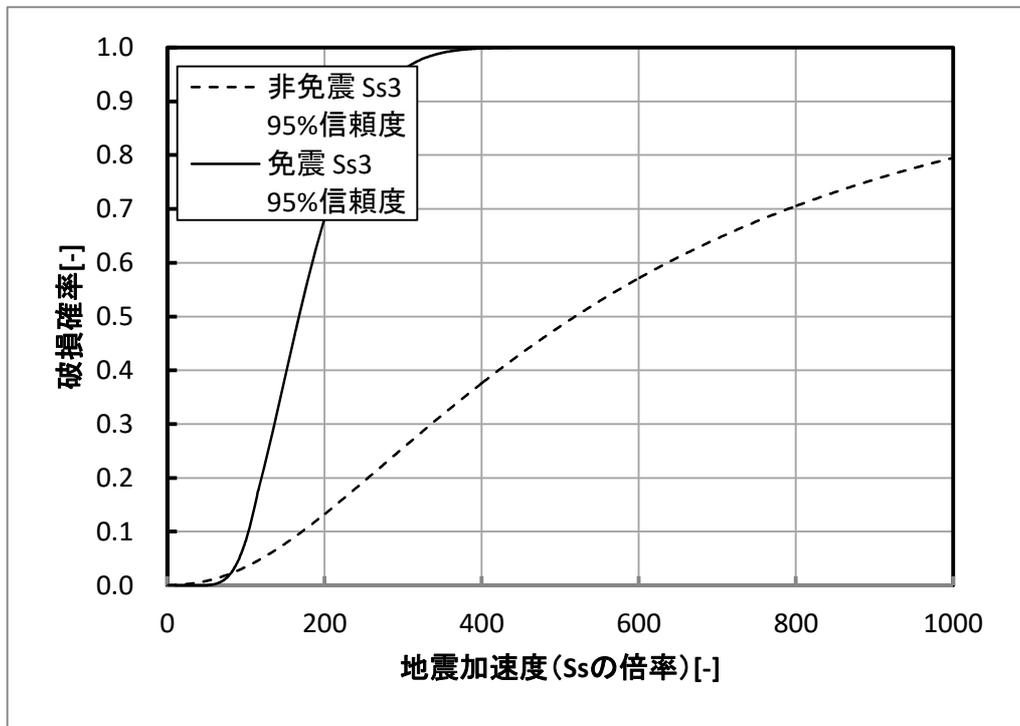
非免震建屋の HCLPF :  $0.9 \times S_s$ 、免震建屋の HCLPF :  $2.1 \times S_s$

図 3.2.4-2 厚肉原子炉容器の fragility 曲線における非免震と免震建屋の比較



非免震建屋の HCLPF :  $6.3 \times S_s$ 、免震建屋の HCLPF :  $7.8 \times S_s$

図 3.2.4-3 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



非免震建屋の HCLPF :  $164 \times S_s$ 、免震建屋の HCLPF :  $76 \times S_s$

図 3.2.4-4 厚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

耐震(非免震)プラント: .....  $\alpha=0.5$     —  $\alpha=1.0$     - - -  $\alpha=1.5$     - · - ·  $\alpha=2.0$   
 免震プラント: .....  $\alpha=0.5$     —  $\alpha=1.0$     - - -  $\alpha=1.5$     - · - ·  $\alpha=2.0$     ( $\alpha \times \beta_R, \alpha \times \beta_U$ )

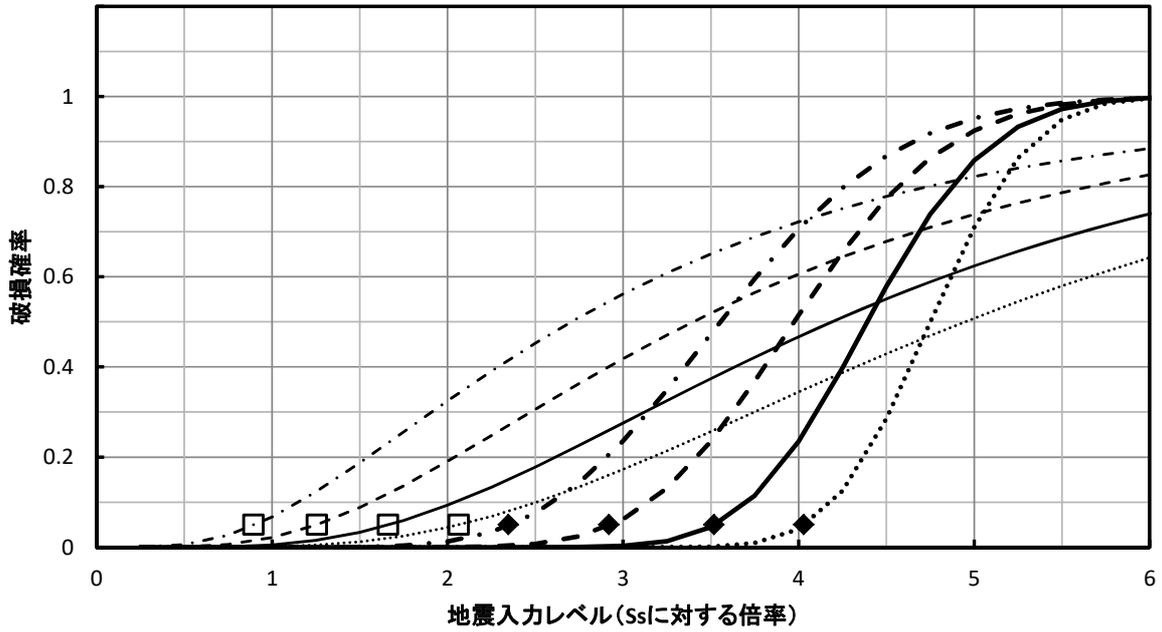


図 3.2.4-5 機器応答係数の不確実さを考慮した薄肉容器の fragility 曲線

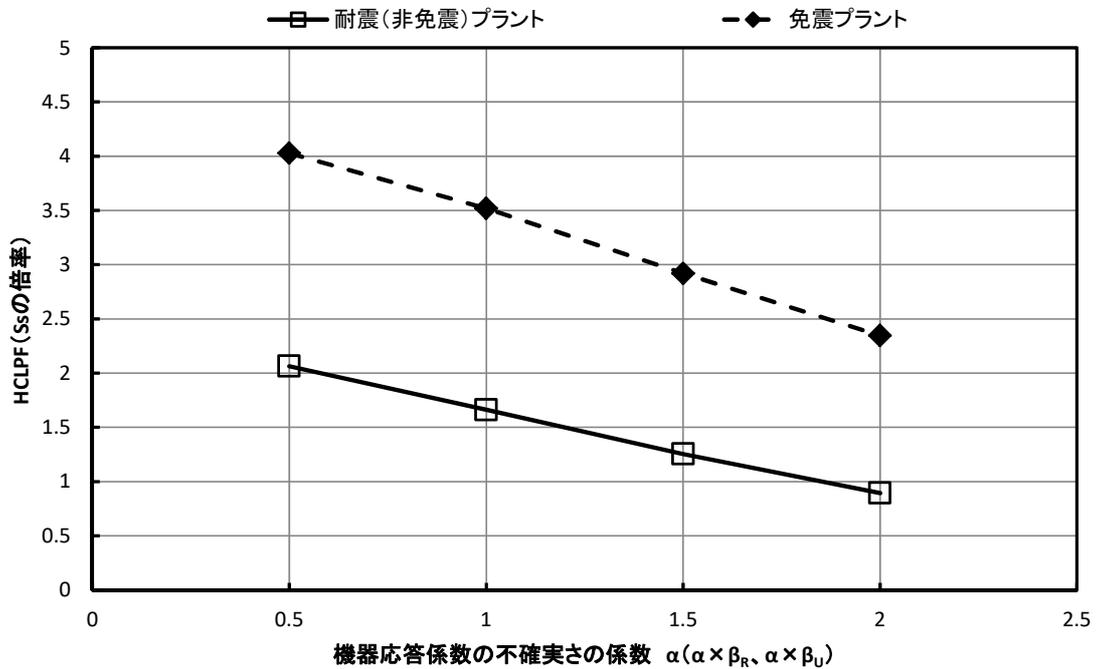


図 3.2.4-6 薄肉容器における機器応答係数の不確実さと HCLPF (Ss に対する倍率) の関係

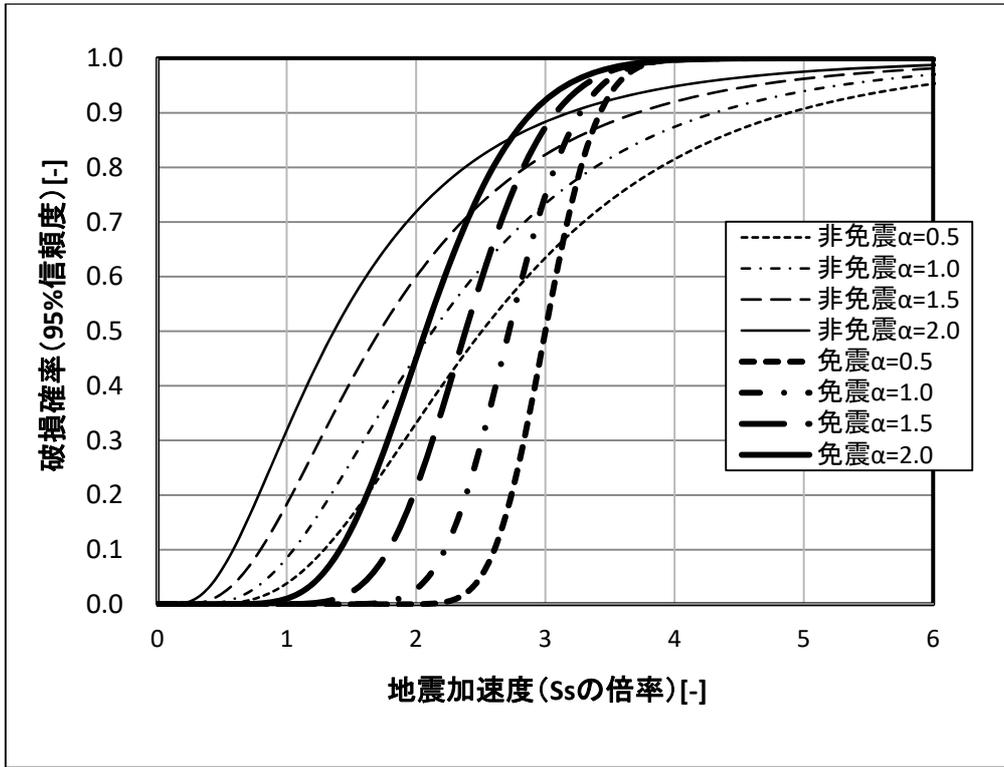


図 3.2.4-7 機器応答係数の不確かさを考慮した厚肉容器の fragility 曲線

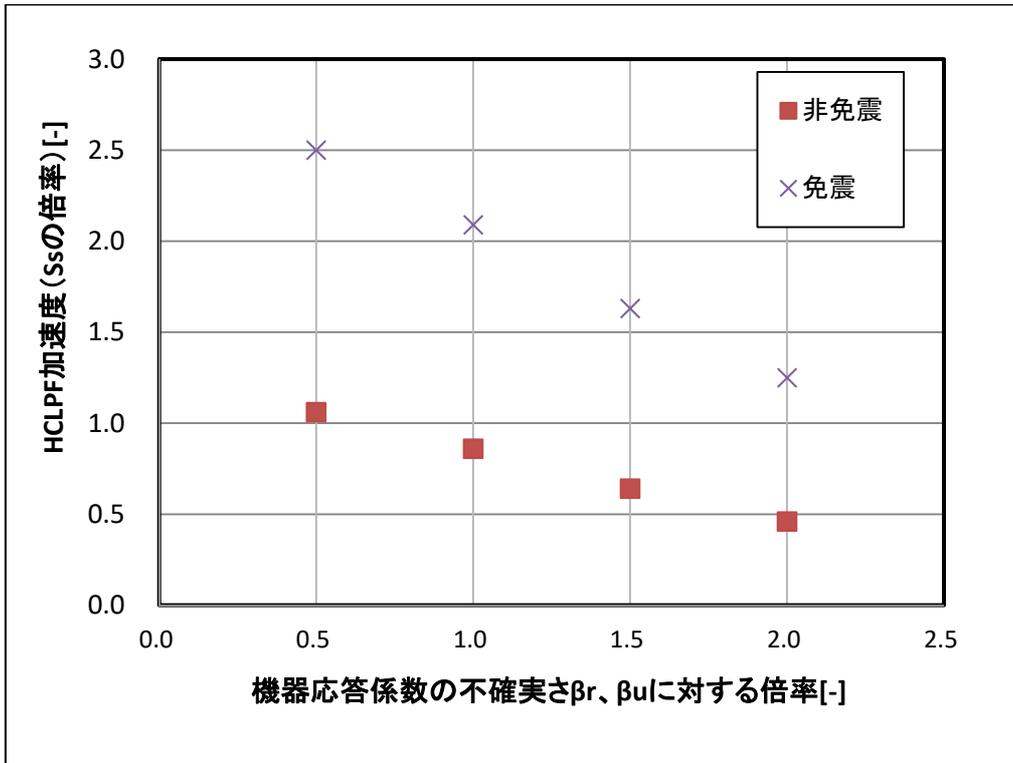


図 3.2.4-8 厚肉容器における機器応答係数の不確かさと HCLPF ( $S_s$  に対する倍率) の関係

耐震(非免震)プラント:   .....  $\alpha=0.5$    —  $\alpha=1.0$    ---  $\alpha=1.5$    -·-·  $\alpha=2.0$   
 免震プラント:   .....  $\alpha=0.5$    —  $\alpha=1.0$    ---  $\alpha=1.5$    -·-·  $\alpha=2.0$    ( $\alpha \times \beta_R, \alpha \times \beta_U$ )

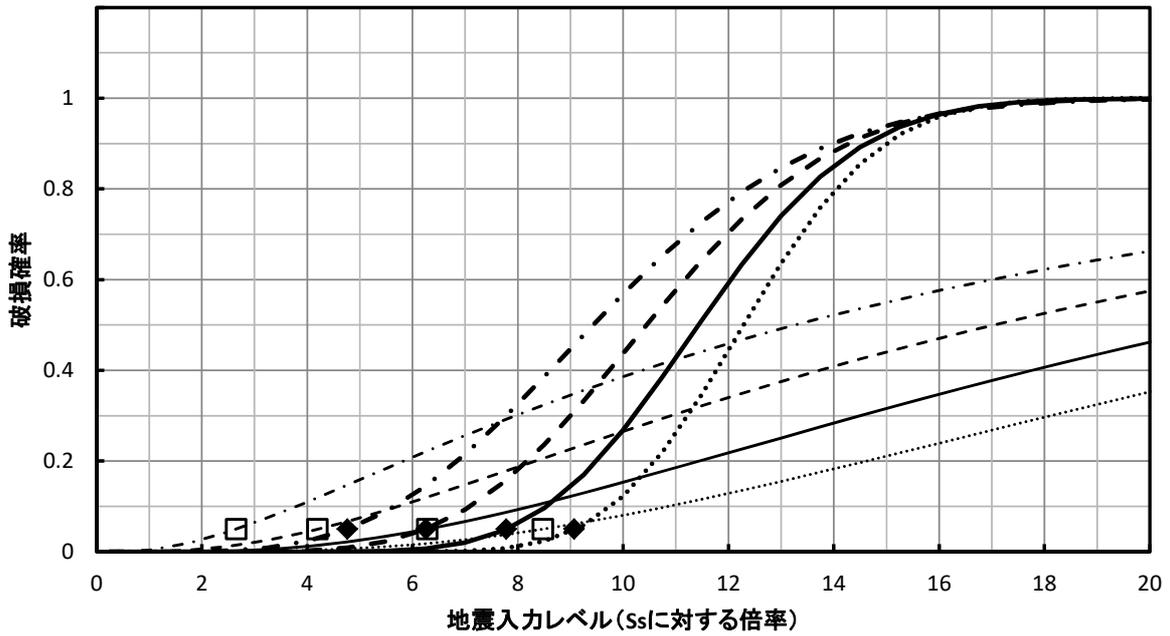


図 3.2.4-9 機器応答係数の不確実さを考慮した薄肉配管の fragility 曲線

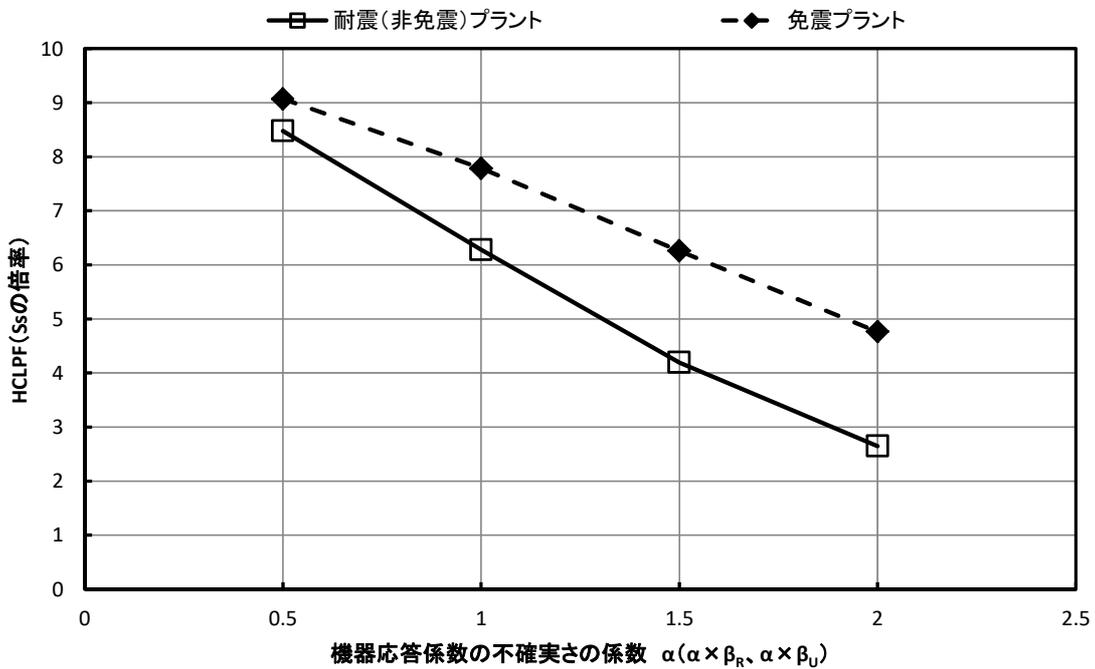


図 3.2.4-10 薄肉配管における機器応答係数の不確実さと HCLPF (Ss に対する倍率) の関係

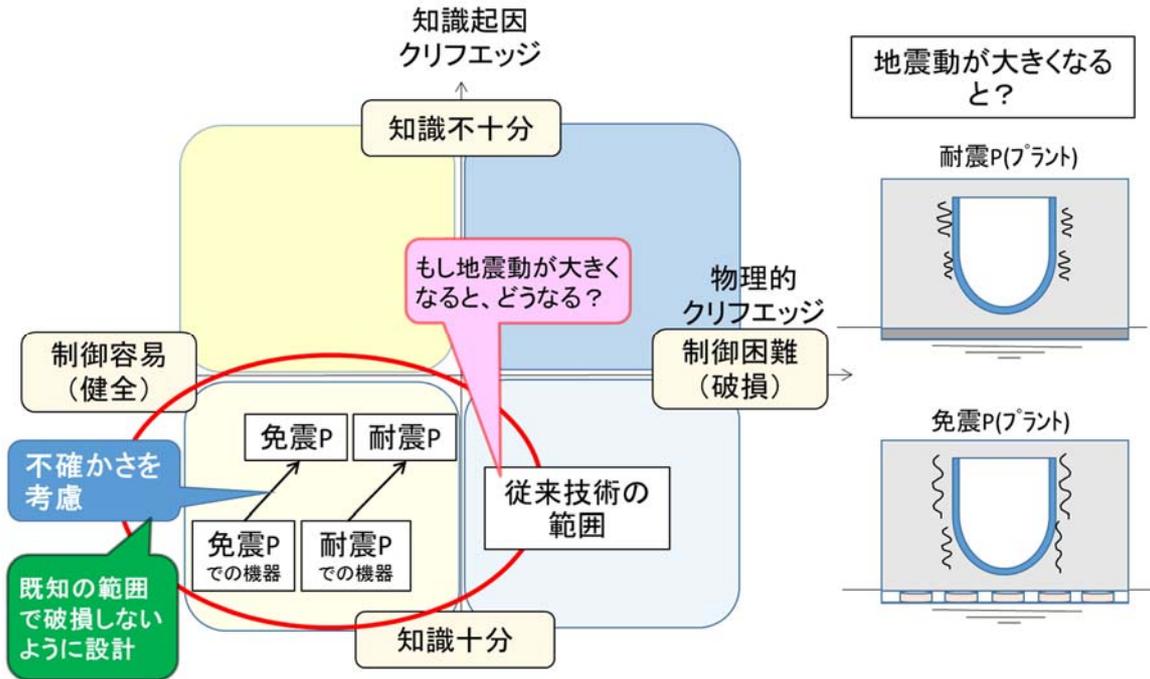


図 3. 2. 4-11 物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジの関係 (1/2)

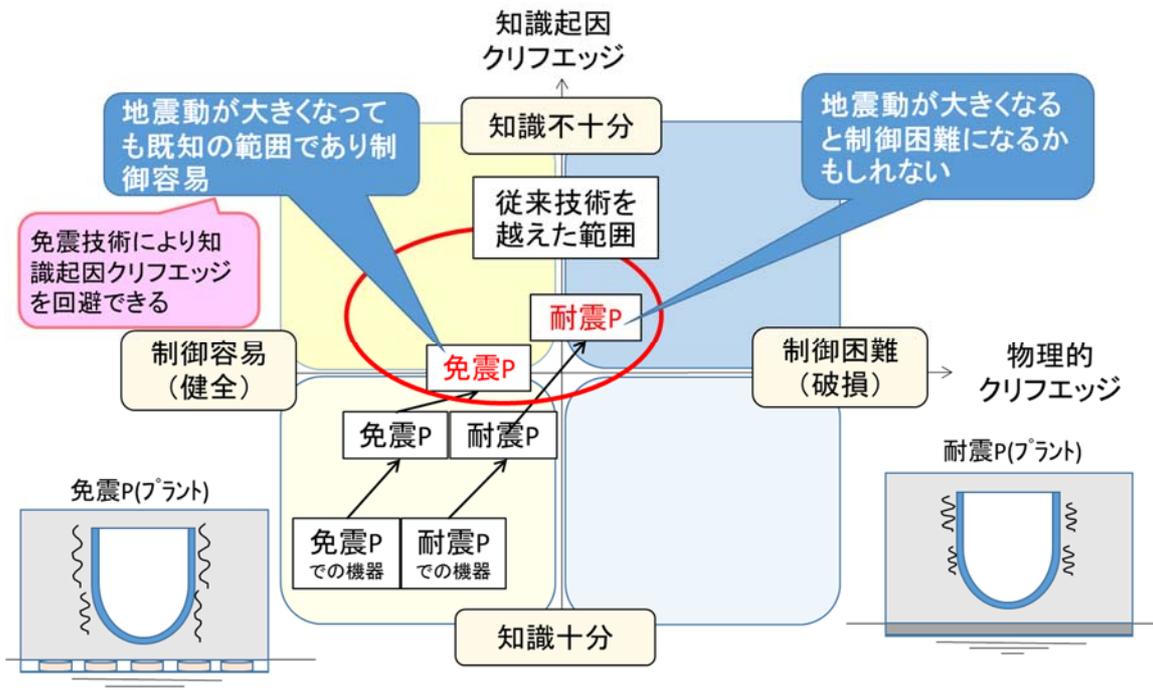


図 3. 2. 4-12 物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジの関係 (2/2)

### 3.2.5 人間挙動のモデル化とクリフエッジ評価（東京大学）

#### 3.2.5.1 はじめに

平成 23 年東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故の際、発電所所長や作業員の長期にわたる対応により事故拡大防止が図られた。また平成 28 年熊本地震では、熊本港の岸壁へのアクセスが地震により絶たれたが、現場職員が迂回路を確保したことで迅速な復旧支援に繋がった。将来起こり得るとされる首都直下地震や南海トラフ地震等の巨大地震災害に対して、全てを想定し事前に対応策を講じることは技術的・経済的に難しい。事前に対応しきれない事象に対して、人間による被災後の減災活動や復旧支援活動が大いに期待されている。そのため地震後に人間が減災・復旧活動を行えるかを評価すること（人間の地震後活動可能性評価と呼ぶ）が今まで以上に求められているといえる。

以上を踏まえて、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。

#### 3.2.5.2 振動台搭乗実験に基づく人間挙動の分析【H27-H29】

振動台搭乗実験は 2 回実施した。第 1 回目は、平成 28 年 7 月 20 日に UR 都市機構の技術・コスト管理部所有の振動台を用いて行った。第 2 回目は、東京大学柏キャンパスの千葉実験所において、平成 29 年 12 月 20 日および 21 日に実施した。

振動台搭乗実験の状況を図 3.2.5-1 に示す。第 1 回目の実験では、振動台外部に設置した脚立の上に三脚を立て、さらにその上に 6 台のビデオカメラを設置した。第 2 回目の実験では、振動台内の周囲に単管パイプを用いて手すりを作成し、手すりの上部に 6 台のビデオカメラを設置し、加振中の被験者の挙動を撮影した。ビデオカメラは振動台上面から 2.6m（4 台）と 2.0m（2 台）の高さに設置した。以降、第 2 回目の実験について詳述する。

被験者の詳細を図 3.2.5-2 および表 3.2.5-1 に示す。被験者にはヘルメットを被せ、肘、掌、臀部および膝にプロテクタを装着させた。また、被験者にはゴム底のスニーカーを履かせた。モーションキャプチャにより身体各部位の挙動を記録するため、ヘルメット上部、両肩、両肘、両手首、腰の左右、両膝、両足の踝および足の甲側部に球形発泡スチロール製のマーカー（直径 35 mm）を貼付した。マーカーの色はピンク色とし、プロテクタや靴（黒）、衣服（濃紺）の色と区別できるよう配慮した。

第 2 回目の実験では、被験者の床反力を計測するため、振動台上にフォースプレートを設置した。フォースプレートとロードセルの配置および人体の質量中心 (Center of Mass, CoM)、重心 (Center of Gravity, CoG) および床反力中心 (Center of Pressure, CoP) の位置関係を図 3.2.5-3 a), b) に示す。フォースプレートは、高剛性かつ重量を最小限にするため、アルミニウム製のハニカムパネル（質量約 28 kg）を用いた。パネル上に作用する鉛直方向の荷重を計測するため、4 台のロードセルで支持した。4 台のロードセルで床板を支え、各ロードセルの荷重値から、次式を用いて、x 方向の CoP 変位  $x_{CoP}$  および y 方向の CoP 変位  $y_{CoP}$  が求められる。

$$x_{CoP} = \frac{L_x}{2} \left\{ 1 + \frac{F_{x0} + F_{xy} - (F_{00} + F_{0y})}{F_{sum}} \right\} \quad (1)$$

$$y_{CoP} = \frac{L_y}{2} \left\{ 1 + \frac{F_{0y} + F_{xy} - (F_{00} + F_{x0})}{F_{sum}} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $L_x$  および  $L_y$  は  $x$  方向および  $y$  方向のロードセル間距離、 $F_{00}$ ,  $F_{x0}$ ,  $F_{0y}$ ,  $F_{xy}$  は図 3.2.5-3 a) に示した各位置のロードセルによる荷重値、 $F_{sum}$  は 4 つのロードセルの荷重の合計である。

ロードセル周囲の詳細を図 3.2.5-3 c) に示す。4 台のロードセルが均等にハニカムパネルを支持できるように、ロードセルはアジャスターボルトで支持することで高さの調整が可能な仕様とした。ローラーでハニカムパネルの水平方向の移動を拘束した。ハニカムパネル上面にはタイルカーペットを敷設した。また、被験者のフォースプレートからの落下を防ぐため、フォースプレートと同じ高さの木製のデッキをフォースプレートの周囲を囲うように配置した。

入力波形一覧を表 3.2.5-2 に、入力波<sup>[3.2.5-1]</sup>, <sup>[3.2.5-2]</sup>の加速度応答スペクトルを図 3.2.3-4 に示す。

再現性の考察のため、実験データのうち、図 3.2.5-5 に Case 3 被験者 C、図 3.2.5-6 に Case 6 被験者 C の CoG, CoP の振動台に対する相対変位、入力加速度を示す。人間が転倒する場合、後方への転倒が最も危険であることから、以下では Y 方向について考察する。

Y 方向の CoG, CoP とともに加振 1, 2 回目の波形は概ね対応している。位相は概ね一致しており、入力の大きな図 3.2.5-5 の 13 秒付近、図 3.2.5-6 の 87 秒付近では CoG, CoP の振動形状が一致している。図 3.2.5-5 加振開始から 7 秒付近までは殆ど波形が一致しており、映像でも初期姿勢から同一の動きを続けている様子が確認された。Y 方向に対し、人間の地震応答にはある程度の再現性があると考えられる。

Y 方向の CoG, CoP と支持基底面について議論する。図 3.2.5-3 b) に示した両足を内包する青色の凸領域を指し、左右のつま先位置、踵位置を  $y_{F,YB}$  と表す。図 3.2.5-7 に Case 3 被験者 C の Y 方向における支持基底面, CoG, CoP の振動台に対する相対変位の時刻歴波形を示す。支持基底面が変化していることから、片足を踏み出す途中の片足立位状態の区間を斜線で示した。

7 秒, 13 秒付近では、遊脚期（片足支持状態）であり、CoP が支持脚前部に移動し、停止している。同時に体の傾きの増大とともに CoG が前方に変位し、CoP を追い抜くが、足を着地させた直後に CoP が急激に前方に変位し、CoG に対しオーバーシュートしている。また、CoP は CoG より高い振動数で変動する。これは地震動で体が前方に傾きバランスを崩しつつある時、足を体より前方に踏み出し、体の傾きを修正し、バランスを保持する一連の挙動を表している。

これは、静止立位時の姿勢保持<sup>[3.2.5-3]</sup>と同様の傾向を示しており、CoP の位置を変化させることで加振による CoG の変位を制御していることを示唆している。

人間の前後方向に対する入力加速度を受けた結果、その場で揺れに抵抗する方略では適応不可となり足を踏み出す方略をとる際、バランスを取り戻すのに必要となる踏み出す距離を  $D$  (cm) とする。床応答加速度と踏み出し距離の関係について、被験者 A, B および C の回帰直線とその 95% および 5% 信頼区間を図 3.2.5-8 に示す。

本研究では、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  $d_{max}$  を超えた場合に転倒するとした。ここで、被験者が自らの意思で一歩踏み出した時の距離を地上で測定し、被験者 A, B とともに  $d_{max} = 80$  cm (一定値) とした。

次に、人間の転倒 fragility 評価を行う。振動台加速度の水平 2 方向のベクトル和の最大値 (最大床応答加速度 Peak Floor Acc. 以降、PFA と記す) が  $200 \sim 2000$  cm/s<sup>2</sup> で  $50$  cm/s<sup>2</sup> 刻み

となるように定数倍し、それぞれに対して転倒確率を求める。

ある PFA に対する人間の転倒確率を求める。人間の初期立位方向は不確実であるので、ここでは 360 度全ての向きに一律の確率で立っていると仮定する。人間の各立位方向における入力加速度の絶対値の最大値を得る。加速度を受けて足を踏み出す方略を取る際には、人間の姿勢や各部位の速度などの応答、踏み出す方向、人間の強軸方向の加速度などにより踏み出す距離  $D$  がばらつくと考えられる。これらを考慮し、踏み出す距離  $D$  は平均を図 3.2.5-8 の回帰直線とし、分散は回帰による残差分散とした正規分布に従うと仮定する。

人間の転倒確率のフラジリティカーブを図 3.2.5-9 に、転倒確率の中央値および対数標準偏差を表 3.2.5-3 に示す。被験者 A、B および C は比較的似た身体諸元を持つが、そのフラジリティは大きく異なることがわかる。全ての人間に対して個別のモデルを構築することは不可能であるため、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。

### 3.2.5.3 強震記録と運転員へのインタビューによる地震時の人間挙動の分析【H29】

続いて、平成 19 年新潟県中越沖地震時における強震記録と原子力発電所運転員への地震時の行動に関するインタビュー調査に基づき、地震の揺れの最中および地震後の対応状況等に関する考察を行う。

図 3.2.5-10 に 1,7 号機中央操作室近傍の加速度時刻歴<sup>[3.2.5-1]</sup>を示す。1~4 号機では、時刻歴後半に大振幅のパルス波が観測されており、地震中に行動することを困難にしたと考えられる。図 3.2.5-11 に 1,7 号機中央操作室近傍の加速度応答スペクトル<sup>[3.2.5-1]</sup>、図 3.2.5-12 に振動台実験により評価された行動難度評価曲線<sup>[3.2.5-4]</sup>を示す。図中には、最大加速度と卓越周期から算出した各中央操作室近傍の行動難度も併せて示す。なお、図 3.2.5-11 より、0.3~0.7[s]の周期帯で卓越していることが分かるが、本検討では、応答加速度が最大となる周期を卓越周期として用いる。図 3.2.5-12 より、1~4 号機の中央操作室近傍では行動難度 2 より高く、歩いたり動いたりすることに支障があったと推測される。特に 1 号機では行動難度 3 となっており、立っていることが困難であったと考えられる。一方、5~7 号機の中央操作室近傍では、行動難度 1 程度であり、はっきりした揺れを感じたが、行動に支障をきたさなかったと推測される。

平成 19 年新潟県中越沖地震時に柏崎刈羽原子力発電所に勤務していた 7 名(表 3.2.5-4)に対して平成 30 年 1 月 24, 25 日にインタビューを行った。以下においてインタビュー者 A~G をそれぞれ A~G と記す。

本震の最中の行動に関するインタビュー記録を以下に示す。

- ・机につかまるので精一杯で机の下にもぐることはできなかった。立つことも困難な状況だった。(A)
- ・手すりを掴み、しゃがんで揺れが収まるのを待った。動ける状況ではなく、揺れている最中は周囲のことは考えられなかった。(B)
- ・机の下に潜り込もうと思ったが、当直長の「スクラムしたぞ」という声に反応して主盤に移動した。(C)
- ・自由に動くことはできず、中腰で何とか耐えながら様子を見るのが精一杯であった。(D)

- ・照明が自分にも落ちてくると思い、目の前のテレビモニターで自分の頭を守った。立ってられない状況ではなかった。(E)
- ・揺れ出したので自席から立ち上がって主盤に向かった。無我夢中で移動していたため、揺れは気にならなかった。(F)
- ・地震発生時立っていたが、揺れによってよろめいて、咄嗟に壁にもたれかかった。(G)

上記のインタビュー記録より、中央操作室にいた 6, 7 号機の運転員(E, F)は揺れている最中においても、自分の身を守ったりプラントの対応を行ったりと自分の意志で行動することができている。一方で、2~4号機の運転員(A~D)は揺れに翻弄され、立っていることも困難で、自らの意志で行動できていないことが分かる。前項の行動難度による考察と比較すると、文献[3.2.5-4]による行動難度 2 を境に地震時に自由に動くことができなくなる人が多くなると考えられる。

図 3.2.5-13 に強震記録による行動難度と本インタビュー及び文献[3.2.5-5]によるヒアリングから想定される行動難度を比較した結果を示す。強震記録による行動難度の方が過小評価になっている場合もあるものの、両者は概ね対応していることが分かる。行動難度評価曲線は 1 軸正弦波加振による振動台実験により得られたものであるが、実地震動は 3 方向に不規則に揺れるため、行動難度評価曲線における行動難度+1 が実地震動の行動難度に概ね対応することが文献[3.2.5-6]で指摘されている。このことが、本検討において強震記録による行動難度が過小評価となった一因であると考えられる。しかし、文献[3.2.5-6]は周期 1~3[s]の長周期帯域を対象としており、短周期帯については検討の余地がある。

次に、地震後の対応行動を阻害した事象に関するインタビュー記録を以下に示す。

- ・埃で火災報知器が鳴ったため、消防署に連絡しようとしたが繋がらなかった。また、緊急対策室の扉が変形したため開かずなかなか連絡ができなかった。(A)
- ・火災を消火する際に消火配管が破断していて放水開始する時に水が出てこなかった。119 番通報をしたが消防車が来るまでには時間を要した。(B)
- ・漏洩しているものがないかなど全域をパトロールしなければならないため、プラントの健全性のチェックに時間が取られた。また、余震の度に運転員の安否確認をしなければならなかったため、余震の発生が対応を遅らせた。(D)
- ・多くの作業員が現場に出っていたので、避難する際にゲートに人が集まってしまった。(F)
- ・中央操作室にたくさん電話がかかってくるため、連絡がとれない時があった。(G)

余震の発生に伴い運転員の安否確認を行う必要があるため、これらの中で最も対応を遅らせる事象は余震であることが分かった。また、プラントの健全性を確認する現場パトロールが地震後対応の中で最も時間を要することが分かった。以上より、原子力発電所の地震後対応の円滑化には安否確認の効率化や設備の誤作動防止など様々な面から対策を講じることが必要であると言える。

#### 3.2.5.4 技術指導

コロンビア大学（アメリカ、ニューヨーク）およびアイダホ国立研究所（Idaho National

Labolatory, INL、アメリカ、アイダホ)に赴き、技術指導を受けた。コロンビア大学での George Deodatis 教授とのディスカッションの様子を図 3.2.5-14 に示す。構造物の振動等に関する技術指導を受けたほか、コロンビア大学の構造実験室の見学等を行った。

INL 訪問時の様子を図 3.2.5-15 に示す。INL では、Justin Coleman 氏、Annie Kammerer 博士、Ronald Boring 博士および Chandu Bolisetti 博士とディスカッションを行った。原子力発電所における運転員の安全性に関する議論を行った他、INL 所有の原子力発電所中央操作室のシミュレータの見学を行った。

### 3.2.5.5 まとめ

ここでは、振動台搭乗実験に基づき、地震の揺れの最中の人間の挙動を分析し、人体の転倒に関するフラジリティーカーブを評価した。また、平成 19 年新潟県中越沖地震時における柏崎刈羽原子力発電所で観測された強震記録と、同発電所の運転員へのインタビュー調査から、揺れが地震時・地震後対応に及ぼす影響について検討した。その結果、人間の地震暴露時の人体正面方向の CoG、CoP の位置の時間変化には一定の再現性があることが分かった。また、人間の姿勢保持は、人体正面方向において、静止立位時と同じく、地震暴露時にも CoP の制御によって CoG の位置を維持していることも明らかとなった。さらに、平成 19 年新潟県中越沖地震時において、原子力発電所における地震後対応を遅延させた主な要因は余震であったことが分かった。また、対応を阻害する要因は様々であるため、多面的に対策を施していくことが必要であることが分かった。

以上をまとめると、振動台搭乗実験を行い、加振の最中における被験者の挙動を 3D モーションキャプチャによって抽出した。そのデータに基づいて、入力地震動の最大加速度と人間挙動の関係を検討した。これに基づき、人間の地震時転倒確率を評価するためのフラジリティーカーブを作成した。また、文献調査や原子力発電所運転員への地震体験時のインタビューから、余震等の複数回の地震体験が人間の行動可能性に及ぼす影響を調査した。

なお、当初は技術指導を受けるために USNRC (ワシントン D.C.) および UC Berkeley (カリフォルニア) に赴く予定であったが、USNRC から、より有益な知見の得られる米国内の別機関を推薦されたため、行き先を変更した。

### 参考文献

- [3.2.5-1] 日本地震工学会：東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所における強震データ全記録<改訂版> (DVD)
- [3.2.5-2] 日本地震工学会：東京電力(株)平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震における福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所で観測された強震観測記録等の強震データ記録 <改訂版> (DVD)
- [3.2.5-3] Winter, D. A., F. Prince, J. S. Frank, C. Powell, and K. F. Zabjek: Unified Theory Regarding A/P and M/L Balance in Quiet Stance, *J. Neurophysiology*. 75:2334-2343, 1996
- [3.2.5-4] Takahashi, T., Suzuki, T., Saito, T., Azuhata, T., and Morita, K. : Shaking Table Test for Indoor Human Response and Evacuation Limit, *journal of 5th International*

*Conference on Earthquake Engineering*, pp. 187-193, 2010. 3

- [3.2.5-5] 経済産業省：中越沖地震における原子力施設に関する調査・対策委員会 運営管理・評価ワーキンググループ(第2回)資料5 添付資料, 2007. 10
- [3.2.5-6] 肥田剛典, 永野正行: アンケート調査と強震記録に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の室内被害-不安度と行動難度および家具の転倒率の検討-日本建築学会構造系論文集 Vol. 77, No. 677, 1065-1072, 2012. 7

表 3. 2. 5-1 被験者のパラメータ

被験者名	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	性別
A	23	165	51	男
B	23	169	51	男
C	24	168	57	男

表 3. 2. 5-2 入力波形一覧

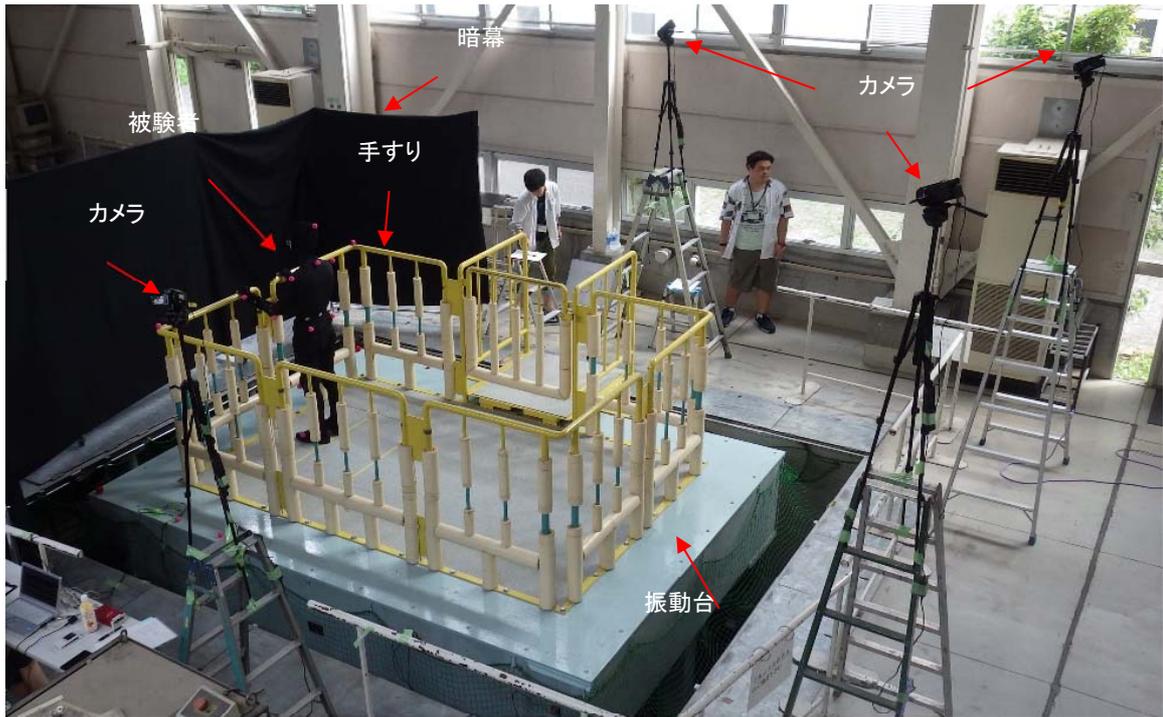
入力波一覧				
番号	地震	観測点	倍率	加振回数
Case 1	2007年新潟県中越沖地震	柏崎刈羽原子力発電所 7号機原子炉建屋 3F	0.50	各2回
Case 2			0.70	
Case 3			1.00	
Case 4	2011年東日本大震災	福島第一原子力発電所6号機オペフロ	0.50	各2回
Case 5			0.85	
Case 6			1.00	
Case 7			福島第一原子力発電所免震重要棟 1F	1.00

表 3. 2. 5-3 フラジリティーカーブの中央値と対数標準偏差

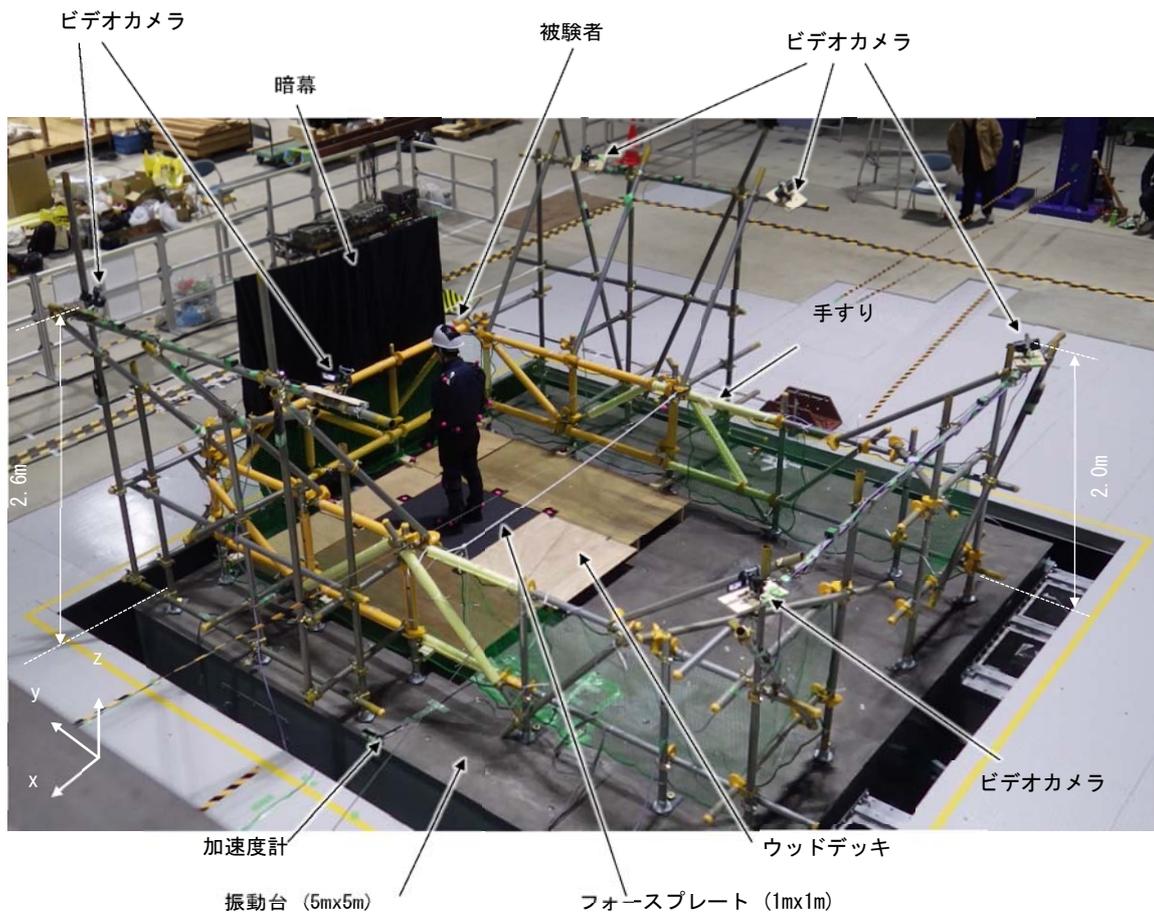
	回帰式	95% 信頼区間	5% 信頼区間
A:	中央値	962. 0	1702
	対数標準偏差	0. 1645	0. 1802
B	中央値	809. 4	4086
	対数標準偏差	0. 2154	0. 4253
C	中央値	746. 0	1390. 0
	対数標準偏差	0. 2338	0. 2861

表 3.2.5-4 インタビュー者一覧

インタビュー者	当時の役職及び業務内容	当時の年齢	性別
A	3号機当直副長 プラント全体の管理 (指揮者)	47	M
B	3号機当直副主任 プラント設備管理 (主に現場対応)	30	M
C	4号機主機操作員 中央制御室に勤務	30	M
D	2号機当直長 プラント運転の責任者	57	M
E	6号機運転員 定期点検業務	32	M
F	7号機当直主任 中央制御室に勤務	38	M
G	7号機補機操作員 現場のパトロール	19	M



a) 第1回目 (UR都市機構, 平成28年7月20日)



b) 第2回目 (東京大学柏キャンパス千葉実験所, 平成29年12月20日, 21日)

図 3. 2. 5-1 振動台搭乘実験

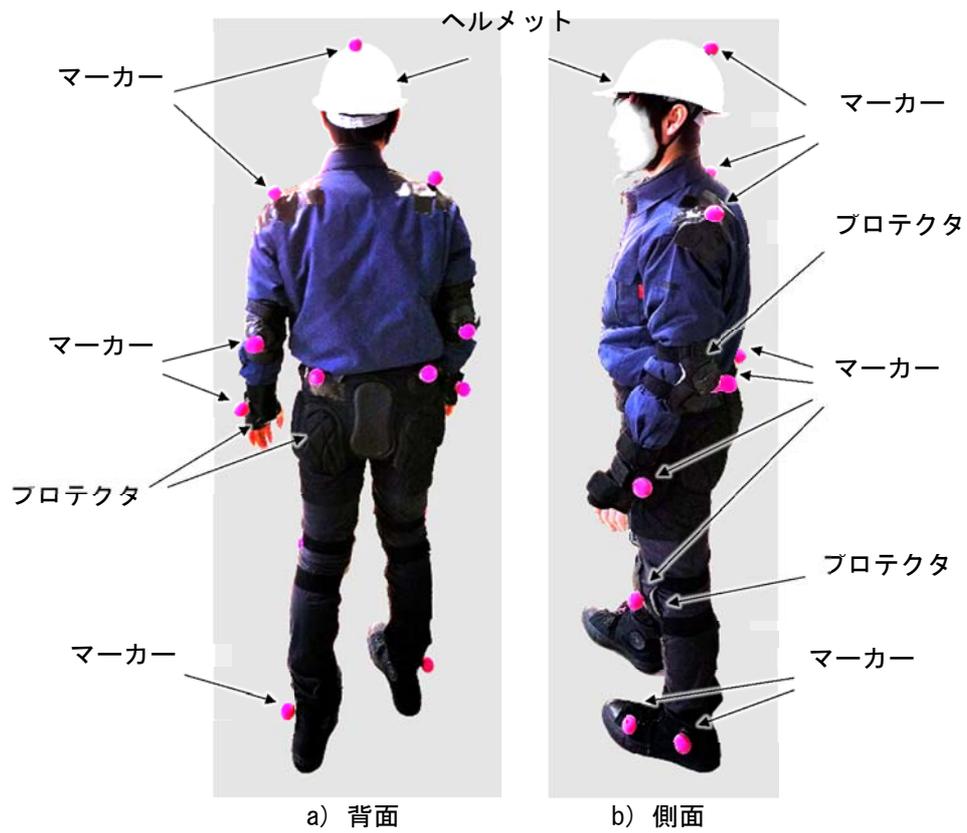


図 3. 3. 5-2 被験者

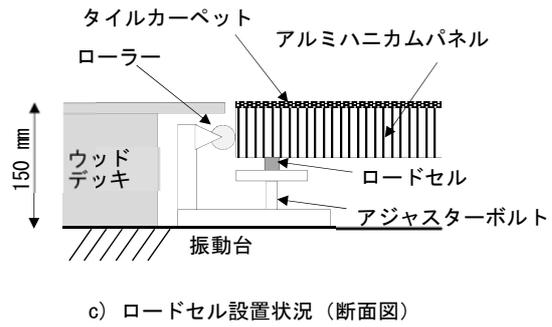
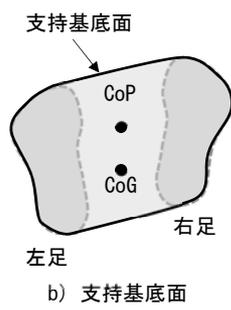
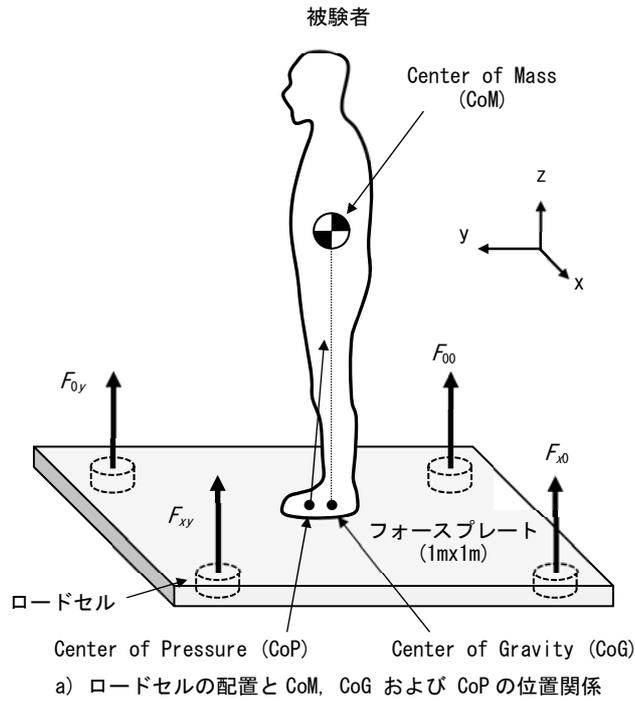


図 3.2.5-3 フォースプレート

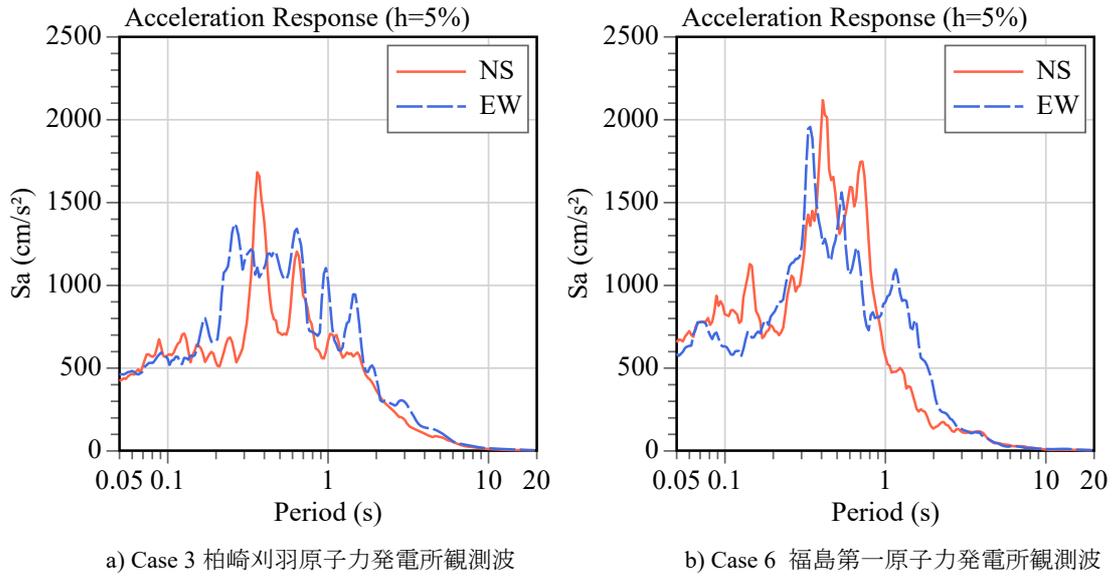


図 3.2.5-4 入力波形加速度応答スペクトル<sup>[3.2.5-1], [3.2.5-2]</sup>

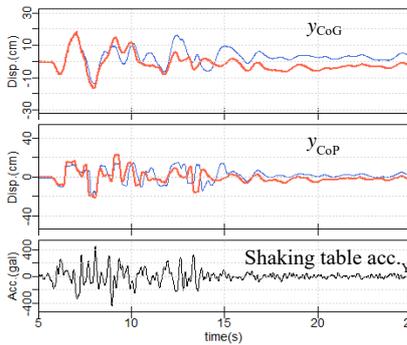


図 3.2.5-5 Case 3, CoG, CoP の振動台に対する相対変位及び入力波形 (Y 方向)

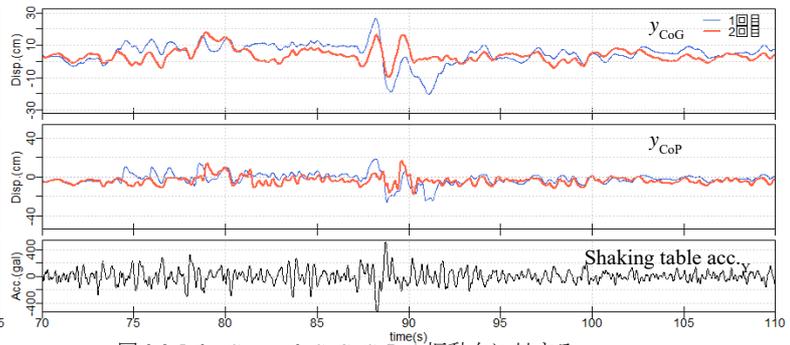


図 3.2.5-6 Case 6, CoG, CoP の振動台に対する相対変位及び入力波形 (Y 方向)

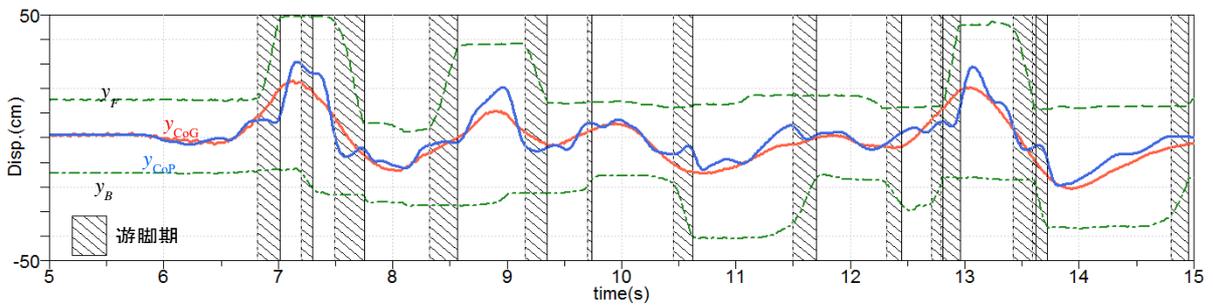


図 3.2.5-7 Case 3, CoP, CoG と支持基底面の時刻歴波形

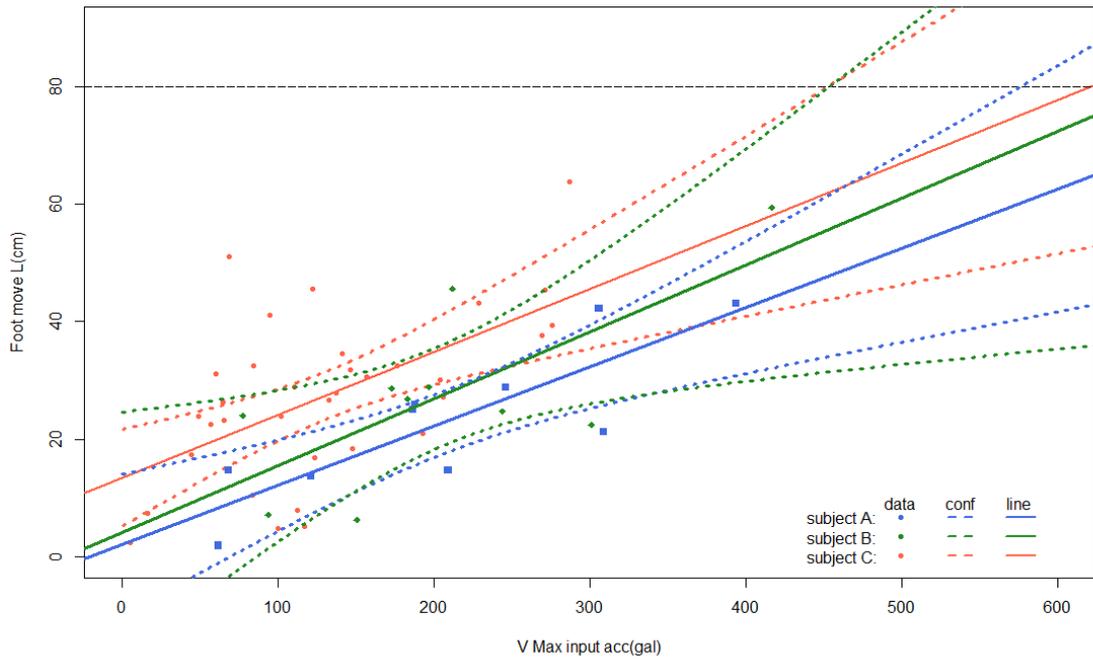


図 3.2.5-8 振動台加速度と足の踏み出し距離の関係（新潟県中越沖地震）

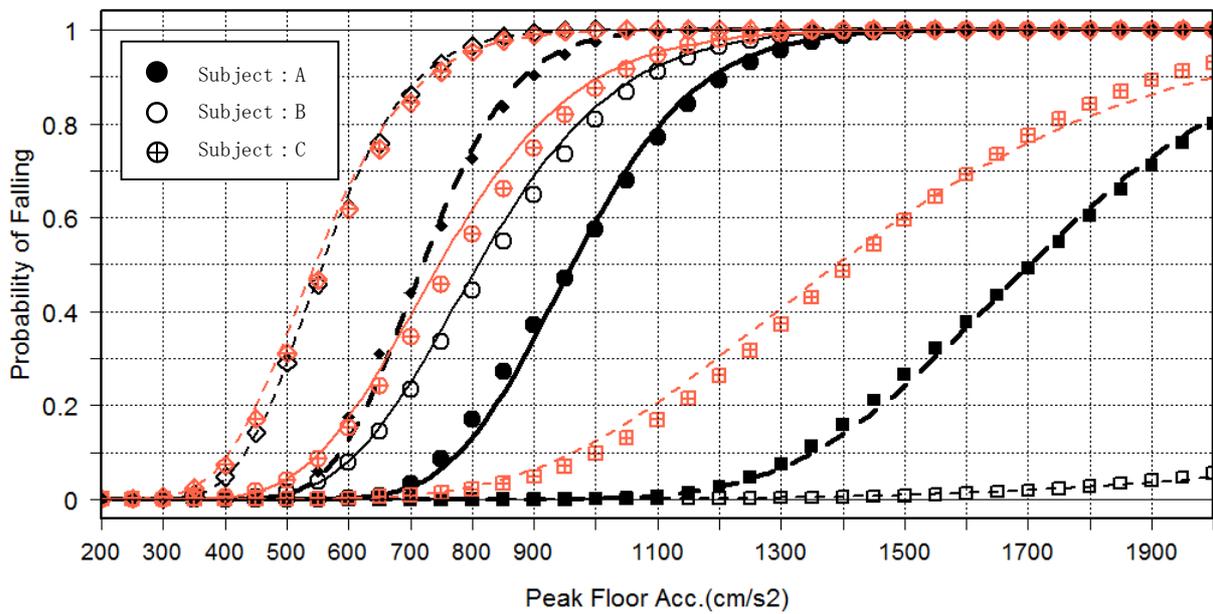


図 3.2.5-9 人間の転倒に関する fragility カurve

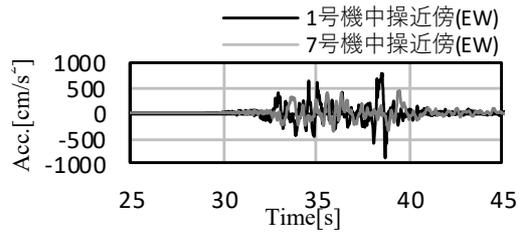


図 3.2.5-10 加速度時刻歴<sup>[3.2.5-1]</sup>

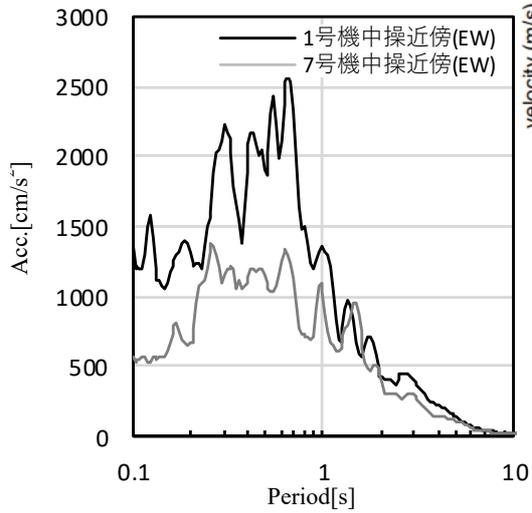
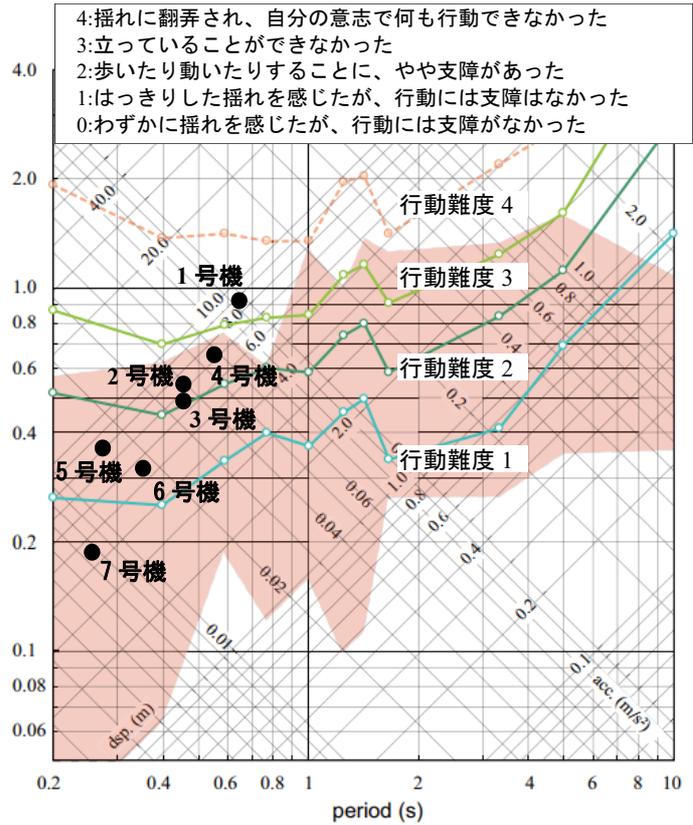


図 3.2.5-11 加速度応答スペクトル(h=5%)<sup>[3.2.5-1]</sup>



(A) Action difficulty

図 3.2.5-12 振動台実験の行動難度評価曲線<sup>[3.2.5-4]</sup>

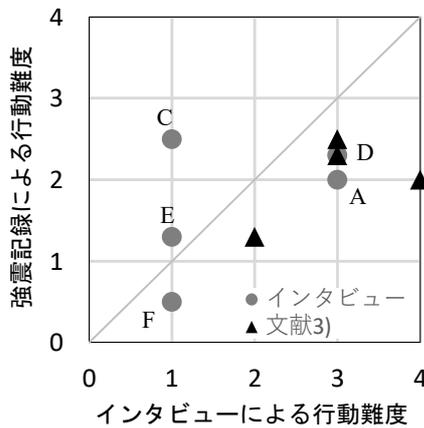


図 3.2.5-13 行動難度の比較



図 3. 2. 5-14 コロンビア大学でのディスカッションの様子



図 3. 2. 5-15 アイダホ国立研究所訪問時の様子

### 3.3 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脆弱性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）に関する脆弱性曲線を表現することができる。この概念を図 3.3-1 に示す。

各深層防護レベルにおけるイベントマップは、各々のレベルにおいて物理的クリフエッジをもたらす SSCH を明示している。例えば深層防護レベル 1 においては、地震動による影響が原子炉の再稼働に支障を及ぼさないために、原子力プラント全体システムの全ての SSCH に損傷がないことが求められる。従って、物理的クリフエッジは、最も地震加速度が低い範囲で損傷する SSCH によって決まることになり、当該 SSCH の脆弱性曲線の変化率が最も大きい点、即ち地震加速度が物理的クリフエッジとなる。物理的クリフエッジを回避或いは緩和するためには主に二つの方法があると考えられ、一つは SSCH の損傷確率を下げること、もう一つは損傷確率の変化率を小さくすることである。前者は SSCH の耐力を向上させることで対応可能であり、後者は原子炉建屋の免震化によって実現できる可能性がある。本研究プロジェクトでは、深層防護レベル 1 に対しては主に原子炉建屋の免震化によって物理的クリフエッジ効果を緩和する方針に基づき、検討を行っている。

また、深層防護レベル 3 では、地震動により炉心が損傷しないために、原子力プラント全体システムにおいて事故収束のための安全機能が喪失しないことが求められる。レベル 3 の物理的クリフエッジは、炉心損傷を引き起こす事故シナリオを構成する、最も加速度が低い範囲で損傷する SSCH の組合せであると考えられ、当該 SSCH の組合せの脆弱性曲線の変化率が最も大きい点、即ち地震加速度が物理的クリフエッジとなる。なお、各安全機能には多重性或いは多様性があり、アクシデントマネジメント設備においても多重化或いは多様化の対策が取られていることから、単独の SSCH ではレベル 3 の物理的クリフエッジはもたらされない。従って、レベル 3 の物理的クリフエッジを回避或いは緩和するためには主に以下の三つの方法があると考えられる。

(1) レベル 1 と同様に、SSCH の損傷確率を下げること、(2) 損傷確率の変化率を小さくすることであり、(2) は更に、(2-1) 原子炉建屋の免震化による方法、或いは(2-2) 安全機能の多重化或いは多様化による方法、更にはこれらを組み合わせる方法が考えられる。

物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジの関係と分類を表 3.3-1 に示す。それぞれのクリフエッジを大・小で分類し、各クリフエッジの関係を 4 つの象限で整理した。物理的クリフエッジも知識起因クリフエッジも小さい場合には、検討対象がよく分かっており、既知の理論や知識で見通すことが出来る。物理的には安定しており、明快な状態である。物理的クリフエッジが大きく、知識起因クリフエッジが小さい場合、対象の見通しは可能であるものの、物理的に極めて不安定で、急激な状態変化を伴うことになる。物理的クリフエッジが小さく知識起因クリフエッジが大きい場合には、未知の領域となるため対象の挙動は不明であるものの、物理的には安定しており、状態変化は小さい。物理的および知識起因クリフエッジが両方とも大きい場合には、未知の領域であり、かつ対象の挙動は極めて不安定で急激な状態変化を伴うこととなる。

以上の検討から、原子力プラントのクリフエッジを回避するために有効な技術を、下記の通り提案する。

(1) 建屋システムのクリフエッジ回避技術

物理的クリフエッジ回避技術としては、免震化によりクリフエッジを遠ざけることが挙げられる。また、知識起因クリフエッジ回避技術としては、免震化による機器設備の弾性域内に留めることや、高次元・強非線形モデル化による未知領域の低減が挙げられる。

#### (2) 免震化によるクリフエッジ回避技術

物理的クリフエッジ回避技術として、免震化によるクリフエッジの遠方化が挙げられる。ただし、免震化による新たに生じるクリフエッジを確認することが重要となる。知識起因クリフエッジ回避技術としては、免震装置の多次元連成モデル化による仮定条件の緩和が考えられる。

#### (3) 機器・システムにおけるクリフエッジ回避技術

物理的クリフエッジ回避技術としては、深層防護概念によるシステムの多重化・多様化が挙げられる。また、人間因子のポジティブな面の組み込みによるクリフエッジ回避も考えられる。知識起因クリフエッジ回避技術としては、深層防護概念に対応する理念的防護の概念を導入することが挙げられる。

#### (4) 原子炉容器・配管のクリフエッジ回避技術

物理的クリフエッジ回避技術として、深層防護概念によるシステムの多重化・多様化が挙げられる。知識起因クリフエッジ回避技術として、上述の理念的防護の概念を導入することが考えられるが、これは今後の課題である。

#### (5) 人間挙動に関するクリフエッジ回避技術

物理的クリフエッジ回避技術として、人間の地震時挙動を再現するためのモデル化が挙げられる。知識起因クリフエッジ回避技術としては、未知領域の低減のための実験的検討が挙げられるが、人間の負傷に関するデータ確保は今後の課題である。

表 3.3-1 物理的クリフエッジと知識起因クリフエッジの関係と分類

		物理的クリフエッジ	
		小	大
知識起因クリフエッジ	小	対象が良く分かっており、既存の理論や知識で見通せる 物理的には安定し明快な状態である (明快な領域で状態変化も小)	対象が良く分かっており見通しも可能であるが、物理的には極めて不安定、予想通り不安定で急激な状態変化を伴う (明快な領域であるが状態変化は大)
	大	未知の領域であり対象に関する挙動は不明であるが、物理的には安定している。状態変化も少ない。 (想定外の領域であるが状態変化は小)	未知の領域であり、挙動は極めて物理的に不安定、急激な状態変化を伴う (想定外の領域で状態変化が大)

物理的クリフエッジ	1) 急激な状態変化 2) 感度が大きくロバスト性に乏しい
知識起因クリフエッジ	1) 理論(仮定・前提条件を含む)やモデリング適用範囲外への逸脱 2) データや情報が不足している領域 3) 想定外の問題領域

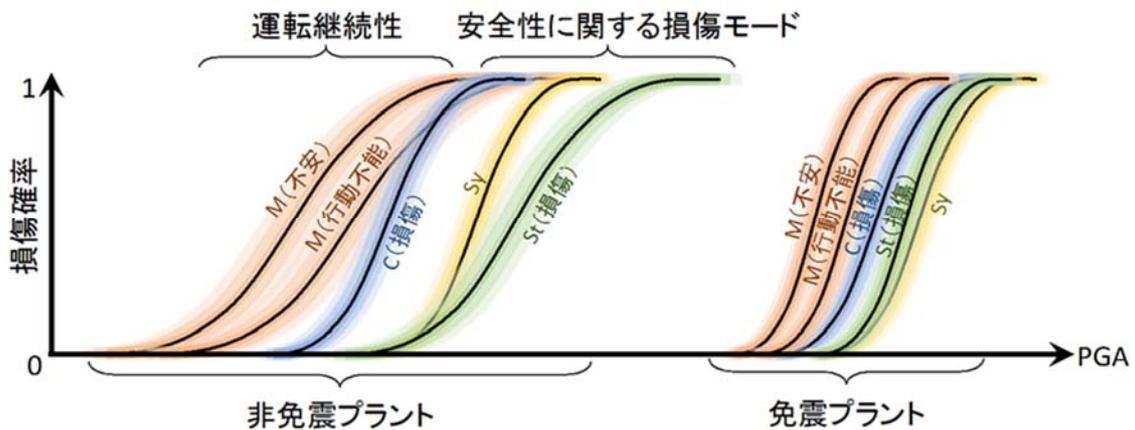


図 3.3-1 免震と非免震プラント全体と SSCH の地震時フラジリティ曲線のイメージ

### 3.4 研究推進

研究期間中の各年度末に公開ワークショップを実施した。平成 29 年度の公開ワークショップの状況を図 3.4-1 に示す。ワークショップには、外部専門委員 18 名、一般 24 名の参加者があり、活発な議論がなされた。

討論の中では、クリフエッジの定義について、国際的に発信すべきであるという意見があった。また、クリフエッジの評価方法を示したことは重要な成果であるとの意見があった。また、機械系、熱流体、電気系、計測制御の検討がなされておらず、それらの分野でもクリフエッジがあると考えられることが指摘された。さらに、インターフェイスマネジメントが重要であるという指摘もあった。本研究で扱ったテーマは重要なもので、今後、他の分野に展開して続けるべきという指摘もあった。



図 3.4-1 公開ワークショップの状況

## 4. 結言

平成 27～29 年度において、原子力プラントの地震時クリフエッジに関して、まず、地震時の要求性能の分類整理を行って、プラントのクリフエッジの特定・定量化を行い、それらを回避する技術について検討した。対象とする部位は、プラントの地盤、建屋、設備機器、安全系、および人間システムであり、プラント全体としてのクリフエッジの検討も行った。

### (1) 地震時プラントの要求性能の分類と整理

要求性能の分類においては、地震時のプラント状態と深層防護レベルとの関連付けを行い、分類と整理を行った。ここでは、プラントを構成する要素として、SSCH (Structure, System, Component, Human)を考慮して整理を実施した。なお、クリフエッジの定義として、物理的クリフエッジと知識起因のクリフエッジに明確に分類した。

### (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

プラントの地震時挙動の評価と関連クリフエッジ回避技術の検討においては、建屋システム、免震システム、機器・システム、原子炉容器・配管、および人間系を対象に検討を実施した。なお、クリフエッジには物理的・知識起因のクリフエッジがあることを示し、それぞれの回避技術について検討を行った。

### (3) 既存プラントの安全性向上のための実施案

SSCHおよびプラント全体系のクリフエッジを相互俯瞰的に把握するために地震時フラジリティ曲線を用いた検討を行った。

### (4) 研究推進

活動期間において、計3回の公開ワークショップを開催し、より広範な分野から専門家に対して研究成果を報告すると同時に、多様な意見を抽出した。そして、最後に、本研究の成果の確認、今後の課題についても整理した。

付録 3.2.1 に関する図表

表 A1-1 地震応答解析結果 水平(NS)方向 最大応答一覧 (入力地震動 A) 【H29】

入力地震動A NS方向				解析結果 最大応答値一覧							
				建屋					免震装置		
				加速度 (水平)		せん断 ひずみ		接地率	相対変位	ひずみ	
モデル	免震	フェールセーフ 機構	入力 倍率	1F (cm/s <sup>2</sup> )	基礎上 (cm/s <sup>2</sup> )	1F (×10 <sup>-3</sup> )	E2F (×10 <sup>-3</sup> )	(-)	(cm)	(-)	
B-1	なし	-	×1.0	502	444	0.16	0.20	0.85			
			×2.0	931	989	0.94	0.95	0.56			
			×3.0	1836	1440	2.32	2.22	0.51			
			×4.0	2423	2082	3.68	3.16	0.43			
			×5.0	2586	2259	4.76	4.96	0.37			
			×6.0	2832	2742	5.80	6.62	0.33			
B-2	あり	なし	×1.0	170	205	0.05	0.06		17.9	0.69	
			×2.0	230	235	0.07	0.08		35.3	1.36	
			×3.0	289	282	0.08	0.10		51.5	1.98	
			×4.0	384	376	0.10	0.12		75.0	2.88	
			×5.0	681	651	0.16	0.21		100.0	3.85	
			×6.0	1189	1329	0.50	1.20		119.6	4.60	
B-2-1	あり	衝突 (40cm)	×1.0	170	205	0.05	0.06		17.9	0.69	
			×2.0	230	235	0.07	0.08		35.3	1.36	
			×3.0	1824	3741	0.64	1.79		40.3	1.55	
			×4.0	2461	7881	1.89	3.49		40.5	1.56	
			×5.0	4360	17829	3.22	4.46		40.7	1.57	
			×6.0	5569	16446	3.82	5.80		40.8	1.57	
B-2-2	あり	衝突 (71.5cm)	×1.0	170	205	0.05	0.06		17.9	0.69	
			×2.0	230	235	0.07	0.08		35.3	1.36	
			×3.0	289	282	0.08	0.10		51.5	1.98	
			×4.0	1652	5510	0.29	0.94		71.7	2.76	
			×5.0	2200	9383	1.36	3.04		71.9	2.77	
			×6.0	3191	10783	2.90	4.39		72.1	2.77	
B-2-3	あり	剛性型	×1.0	170	205	0.05	0.06		17.9	0.69	
			×2.0	230	235	0.07	0.08		35.3	1.36	
			×3.0	289	282	0.08	0.10		51.5	1.98	
			×4.0	404	394	0.10	0.12		74.9	2.88	
			×5.0	767	746	0.20	0.30		98.1	3.77	
			×6.0	1323	1457	0.74	1.50		114.9	4.42	
B-2-4	あり	粘性型	×1.0	170	205	0.05	0.06		17.9	0.69	
			×2.0	230	235	0.07	0.08		35.3	1.36	
			×3.0	289	282	0.08	0.10		51.5	1.98	
			×4.0	445	449	0.10	0.13		74.8	2.88	
			×5.0	664	627	0.17	0.23		98.2	3.78	
			×6.0	1150	1231	0.47	1.06		116.5	4.48	
B-2-5	あり	なし	×1.0	171	207	0.05	0.06		17.9	0.69	
			×2.0	232	232	0.06	0.07		35.4	1.36	
			×3.0	368	311	0.10	0.10		52.0	2.00	
			×4.0	633	569	0.22	0.17		75.5	2.90	
			×5.0	1052	858	0.38	0.30		99.4	3.82	
			×6.0	1238	1598	0.59	1.24		118.8	4.57	

表 A1-2 地震応答解析結果 水平(NS)方向 最大応答一覧 (入力地震動 B) 【H29】

入力地震動B NS方向			解析結果 最大応答値一覧							
			建屋					免震装置		
			入力 倍率	加速度 (水平)		せん断 ひずみ		接地率 (-)	相対変位 (cm)	ひずみ (-)
1F (cm/s <sup>2</sup> )	基礎上 (cm/s <sup>2</sup> )	1F (×10 <sup>-3</sup> )		B2F (×10 <sup>-3</sup> )						
モデル	免震	フェールセーフ 機構								
B-1	なし	-	×1.0	590	591	0.18	0.22	0.83		
			×1.5	845	929	0.50	0.78	0.63		
			×2.0	1197	1178	1.53	1.43	0.47		
			×2.5	1632	1447	3.36	2.66	0.40		
			×3.0	2097	1846	4.71	4.56	0.32		
			-	-	-	-	-	-		
B-2	あり	なし	×1.0	285	316	0.08	0.10		51.1	1.97
			×1.5	510	511	0.12	0.16		88.3	3.40
			×2.0	1028	1091	0.85	0.66		113.5	4.37
			×2.5	1485	2003	2.49	1.98		131.5	5.06
			×3.0	2197	2689	4.34	3.45		152.8	5.88
			-	-	-	-	-		-	-
B-2-1	あり	衝突 (40cm)	×1.0	1743	2657	0.36	1.03		40.2	1.55
			×1.5	3607	6972	2.26	3.44		40.5	1.56
			×2.0	6230	20538	4.02	4.69		40.9	1.57
			×2.5	6458	18157	5.20	7.25		41.0	1.58
			×3.0	7124	24130	4.69	9.18		41.1	1.58
			-	-	-	-	-		-	-
B-2-2	あり	衝突 (71.5cm)	×1.0	285	316	0.08	0.10		51.1	1.97
			×1.5	2529	5252	0.77	2.06		71.8	2.76
			×2.0	3821	16831	2.93	5.21		72.2	2.78
			×2.5	6915	23946	4.81	8.92		72.6	2.79
			×3.0	7413	19596	5.38	9.87		72.7	2.80
			-	-	-	-	-		-	-
B-2-3	あり	剛性型	×1.0	285	316	0.08	0.10		51.1	1.97
			×1.5	571	549	0.14	0.18		86.5	3.33
			×2.0	1221	1526	1.23	1.15		110.7	4.26
			×2.5	1731	2442	3.03	2.62		130.0	5.00
			×3.0	3592	4497	4.69	5.54		160.1	6.16
			-	-	-	-	-		-	-
B-2-4	あり	粘性型	×1.0	285	316	0.08	0.10		51.1	1.97
			×1.5	520	508	0.13	0.17		87.1	3.35
			×2.0	961	941	0.36	0.61		109.6	4.21
			×2.5	1335	1786	1.97	1.12		124.3	4.78
			×3.0	1778	2424	3.06	2.67		138.6	5.33
			-	-	-	-	-		-	-
B-2-5	あり	なし	×1.0	285	317	0.08	0.10		51.1	1.97
			×1.5	510	514	0.12	0.16		88.3	3.40
			×2.0	1019	1079	0.76	0.65		112.9	4.34
			×2.5	1479	2007	2.19	1.97		132.2	5.08
			×3.0	2240	2598	3.55	3.37		152.0	5.85
			-	-	-	-	-		-	-

表 A1-3 地震応答解析結果 鉛直方向 最大応答一覧【H29】

				解析結果 最大応答値一覧			
				建屋		免震装置	
				加速度 (鉛直)		相対変位	ひずみ
モデル	免震	地震動	入力 倍率	1F (cm/s <sup>2</sup> )	基礎 上 (cm/s <sup>2</sup> )	(cm)	(-)
B-1	なし	A	×1.0	544	486	/	
			×2.0	1088	972		
			×3.0	1633	1459		
			×4.0	2177	1945		
			×5.0	2721	2431		
			×6.0	3265	2917		
B-2-5	あり	A	×1.0	553	491	/	
			×2.0	999	1044		
			×3.0	1624	1561		
			×4.0	5598	4764		
			×5.0	6857	11052		
			×6.0	12846	20696		
B-2	あり	A	×1.0	553	491	/	
			×2.0	1075	1066		
			×3.0	1565	1749		
			×4.0	5850	9817		
			×5.0	5725	6653		
			×6.0	12922	23611		
B-1	なし	B	×1.0	581	572	/	
			×1.5	872	859		
			×2.0	1162	1145		
			×2.5	1453	1431		
			×3.0	1743	1717		
			-	-	-		
B-2-5	あり	B	×1.0	597	583	/	
			×1.5	896	875		
			×2.0	1254	1167		
			×2.5	3725	5821		
			×3.0	6133	4274		
			-	-	-		
B-2	あり	B	×1.0	597	583	/	
			×1.5	896	875		
			×2.0	1194	1167		
			×2.5	1767	2783		
			×3.0	2840	4816		
			-	-	-		

表 A1-4 3次元詳細モデル結果 水平(NS)方向 最大応答一覧 (入力地震動 A) 【H29】

地震動 Ss-2_NS方向 三次元モデル 中央値				解析結果 最大応答値一覧					
				建屋				免震装置	
				加速度 (水平)		せん断 ひずみ		相対変位	ひずみ
モデル	免震	フェールセーフ 機構	入力 倍率	1F (cm/s <sup>2</sup> )	基礎上 (cm/s <sup>2</sup> )	1F (×10 <sup>-3</sup> )	B2F (×10 <sup>-3</sup> )	(cm)	(-)
C-1	なし	-	×1.0	629	425	0.12	0.16		
			×2.0	1377	847	0.28	0.68		
			×3.0	1746	1333	0.98	1.40		
			×4.0	2319	1858	1.66	1.99		
			×5.0	2502	2837	2.35	2.58		
			×6.0	5016	3053	3.11	3.30		
C-2	あり	なし	×1.0	162	211	0.04	0.06	12.8	0.49
			×2.0	195	262	0.05	0.06	23.9	0.92
			×3.0	250	301	0.06	0.08	40.1	1.54
			×4.0	317	359	0.07	0.10	58.7	2.26
			×5.0	426	442	0.09	0.13	78.7	3.03
			×6.0	668	642	0.14	0.22	99.5	3.83
C-2-4	あり	粘性型	×1.0	162	211	0.04	0.06	12.8	0.49
			×2.0	195	262	0.05	0.06	23.9	0.92
			×3.0	250	301	0.06	0.08	40.1	1.54
			×4.0	317	359	0.07	0.10	58.7	2.26
			×5.0	490	527	0.10	0.15	78.4	3.01
			×6.0	661	666	0.15	0.22	97.9	3.77

※ 三次元モデルの加速度は角4点の平均値とする  
 三次元モデルのせん断ひずみはNS方向壁の中央値とする