

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

— 建屋システム —

日本原子力研究開発機構

西田明美

原子力基礎基盤戦略研究プログラム(H27-29)

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

研究代表者 東京大学大学院工学系研究科
高田 毅士

代表機関 東京大学
連携機関 東京都市大学
日本原子力研究開発機構
東京電機大学
埼玉工業大学

研究概要

- 原子カプラントの地盤－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
- クリフエッジの定義、特定・定量化
- クリフエッジ回避技術の開発

1. 地震時プラントの要求性能の俯瞰的分類と整理
(東大、都市大、JAEA)

- ・対象範囲の選定 (SSCH)
- ・安全性能
- ・運転継続性
- ・SSCHの要求性能表の作成
- ・プラント全体の要求性能表の作成

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

- (1) 建屋システムのクリフエッジ回避技術 (JAEA) } Structure
- (2) 免震化によるクリフエッジ回避技術 (電大、埼工大) }
- (3) 機器・システムのモデル化とクリフエッジ回避技術 (都市大) } System
- (4) 原子炉容器・配管のクリフエッジ回避技術 (JAEA) } Component
- (5) 人間挙動のモデル化とクリフエッジ評価 (東大) } Human

3. 既存プラントの安全性向上のための実施案の検討(全機関)

- ・各要求性能に関する fragility 評価
- ・イベントマップ

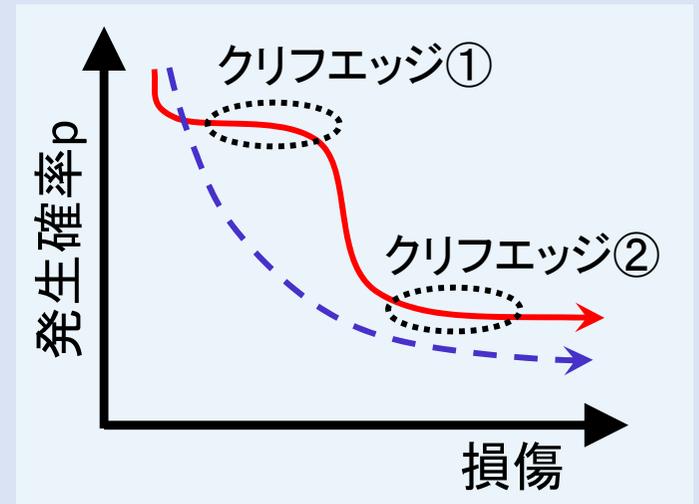
全体システムとSSCH個々のクリフエッジの関連性の把握
全体システムの理解
有効なクリフエッジ回避技術の開発

クリフエッジの定義

I. 物理的クリフエッジ (Physical Cliff-edge)

- 入力地震動の増大に伴う、系の**急激な物理状態の変化**
- 発生頻度のわずかな減少により、その**結果の重大性が顕著に増加**し得る現象 (NEI, 2013)

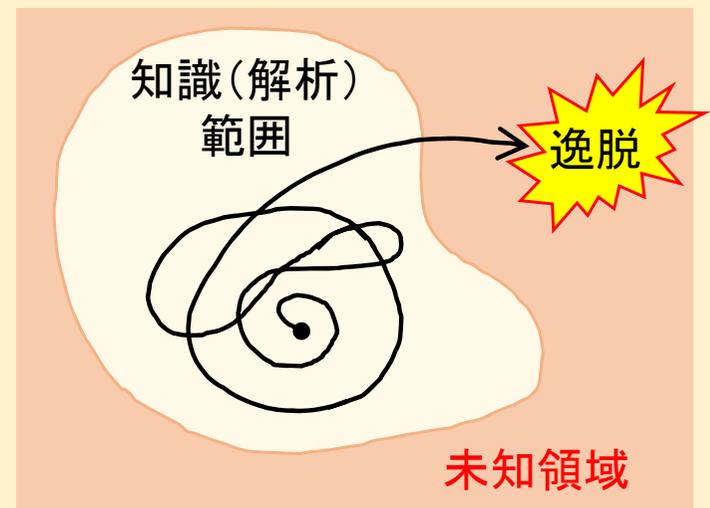
例：地震共通原因による炉心損傷の発生、免震建物の擁壁への衝突、等



II. 知識起因のクリフエッジ (Knowledge-originated Cliff-edge)

- **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
- 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

例：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



研究背景

福島第一原子力発電所事故の教訓

- 原子力プラントのクリフエッジ状態の把握と**回避技術開発**の必要性
- 原子力プラントを、**S**(構築物)、**S**(システム)、**C**(機器)、**H**(運転員)からなる全体系(トータルシステム)として取り扱う必要性



1. 地震時プラントの要求性能の俯瞰的分類と整理
2. 原子力プラントの地震時挙動の把握とクリフエッジ回避技術の開発
3. 既存プラントの安全性向上のための実施案の検討

本研究の特徴

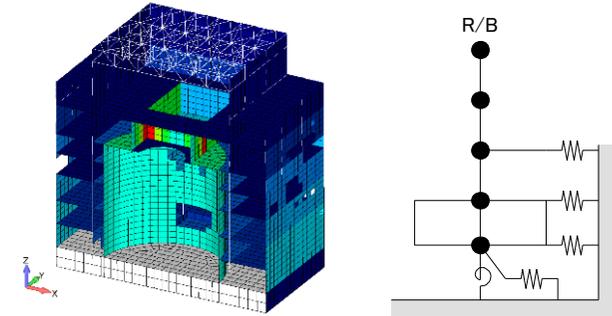
- ① プラント全体系の挙動と各部クリフエッジを**多面的かつ分野横断的**(SSCH)に評価
- ② プラント全体の挙動は要求性能分類と対応して、新たに提案する**EM (Event Map)**に表現整理し、プラント全体と個々のクリフエッジとの関係性を明確化
- ③ **新しいクリフエッジの概念**を用いて、事象を捉える
- ④ 従来のSSCに加えて、**人間(H)の地震時挙動**も対象

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の検討

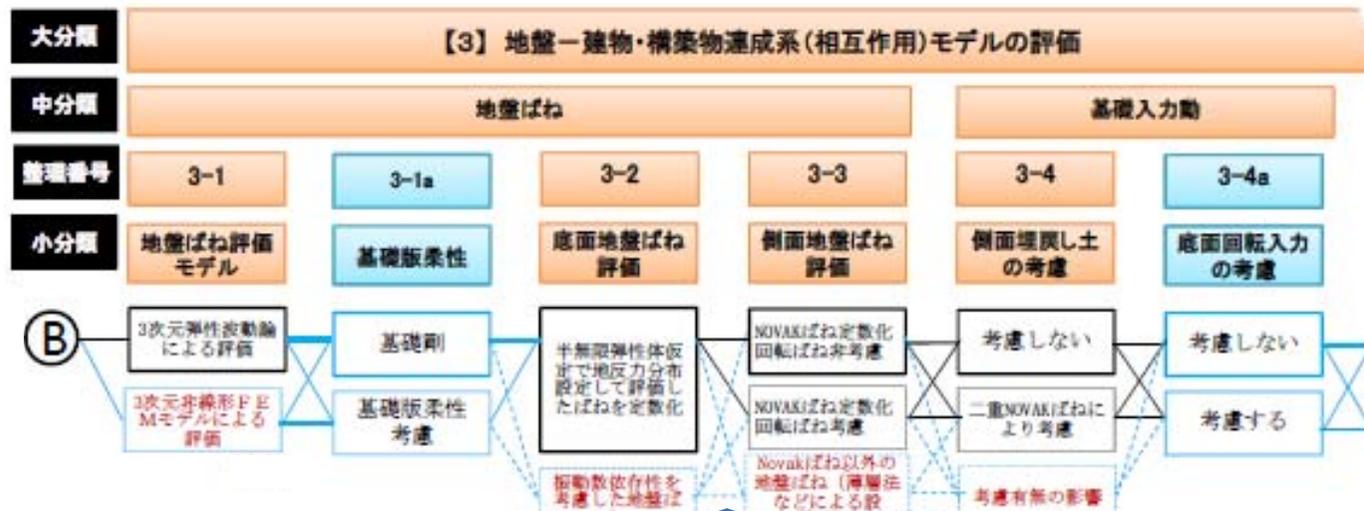
クリフエッジの分類・特定

物理的クリフエッジ	知識起因のクリフエッジ
局部変形 (FEM)、 基礎浮き上がり、 滑動、 非線形効果、 免震建物衝突、等	強非線形挙動、 3次元入力の影響、 床柔性の影響、 免震建物衝突の影響、等



原子炉建屋モデルの例

標準専門知ツリー*1の活用

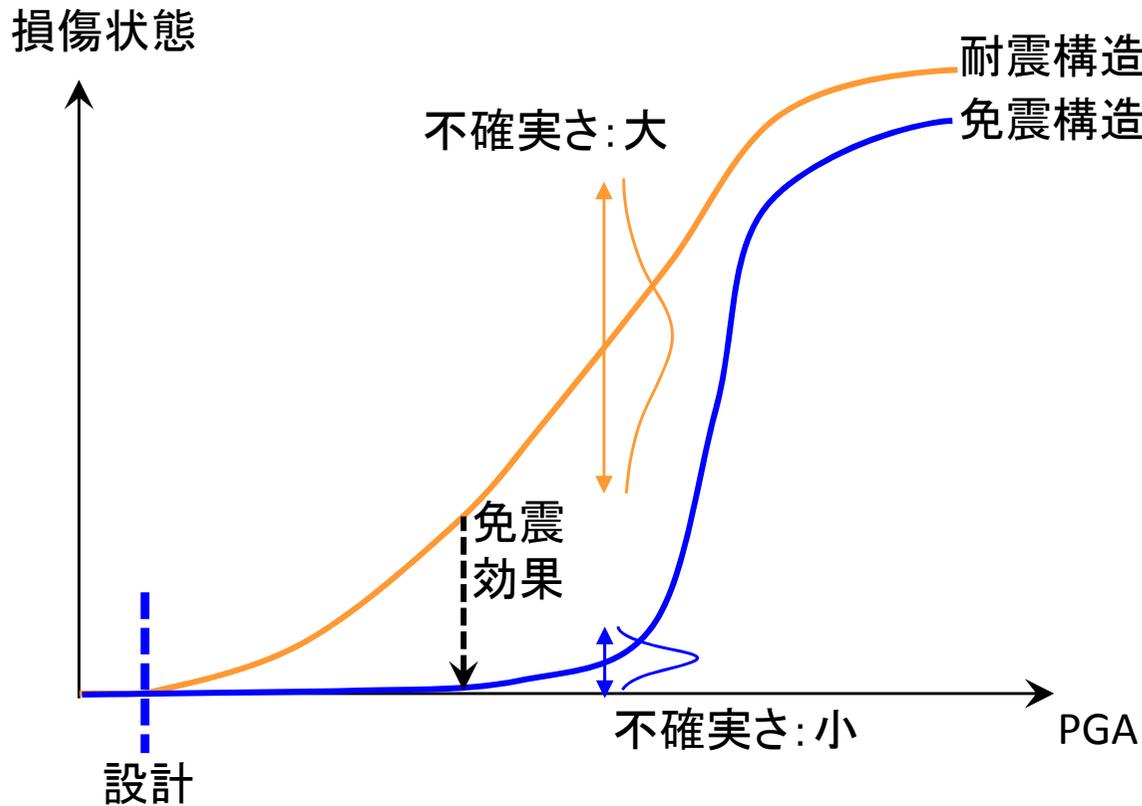


専門家による知識(専門知)の活用

*1 文科省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ
 「リスクマネジメント基盤技術としての地震リスク評価の信頼度向上に関する研究」
 (H24-26年度)

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 (1) 建屋システムのクリフエッジ回避技術の検討

物理的クリフエッジの例：免震装置の導入

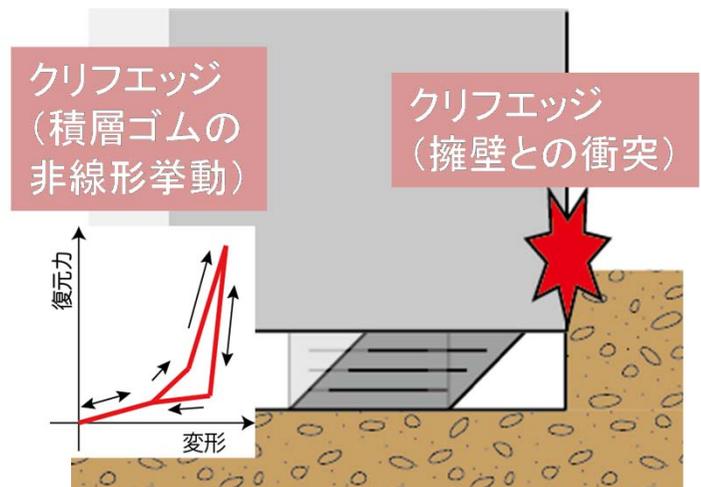


物理的クリフエッジ
の回避効果

第2の物理的クリフエッ
ジの発現の可能性

機器の弾性設計が可能
→設計用評価精度の向上

～設計を超える領域～



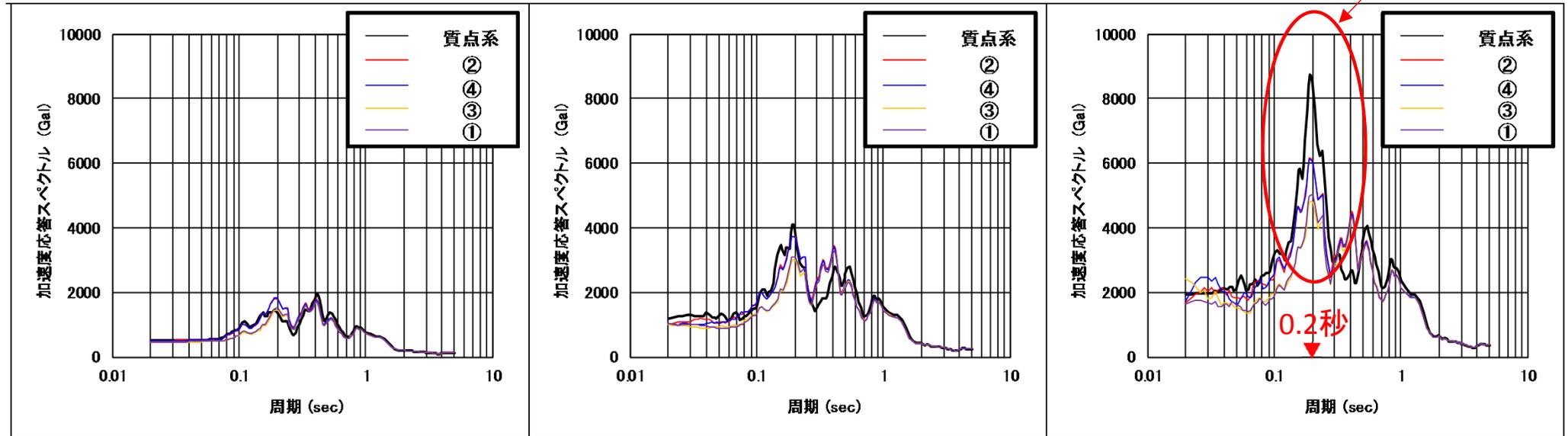
第2の物理的クリフエッジに関連

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の検討

知識起因のクリフエッジの例：モデル化による差異

質点系と3Dで差異



(a) 荷重 1.0 倍

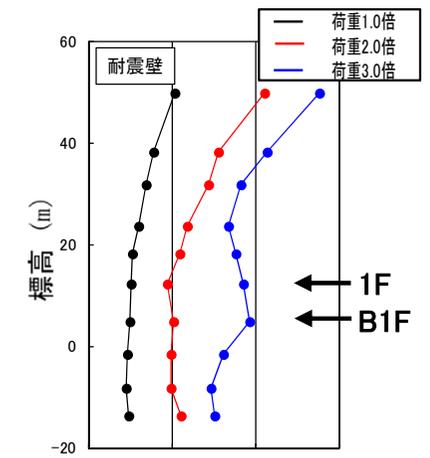
(b) 荷重 2.0 倍

(c) 荷重 3.0 倍

質点系モデルおよび3次元有限要素モデルにおける加速度応答スペクトル
 (①～④はそれぞれ外壁部4か所の応答、B1F、h=5%)

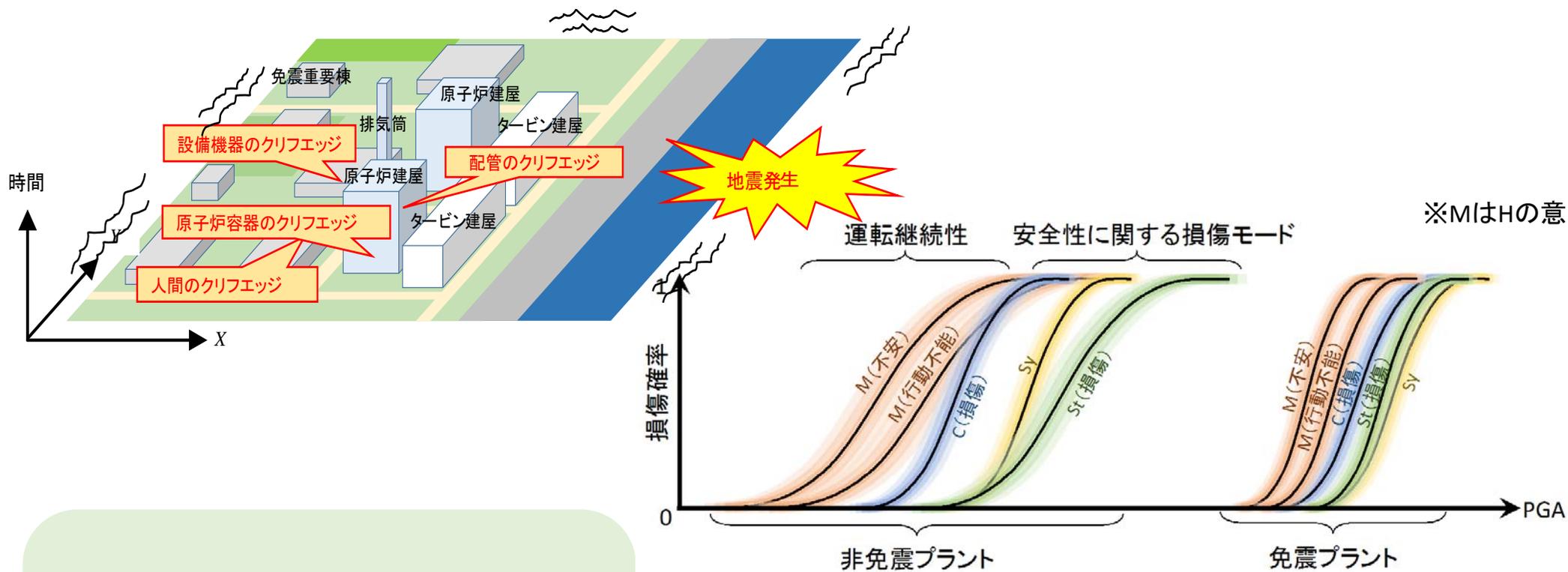
質点系モデルおよび3次元有限要素モデルの固有周期(NS方向)

次数	質点系モデル				3次元有限要素モデル			
	固有振動数 (Hz)	周期 (sec)	有効質量比		固有振動数 (Hz)	周期 (sec)	有効質量比	
			X	RZ			X	Z
1	2.278	0.439	0.756	0.096	2.268	0.441	0.778	0.000
2	5.172	0.193	0.240	0.354	5.158	0.194	0.161	0.000



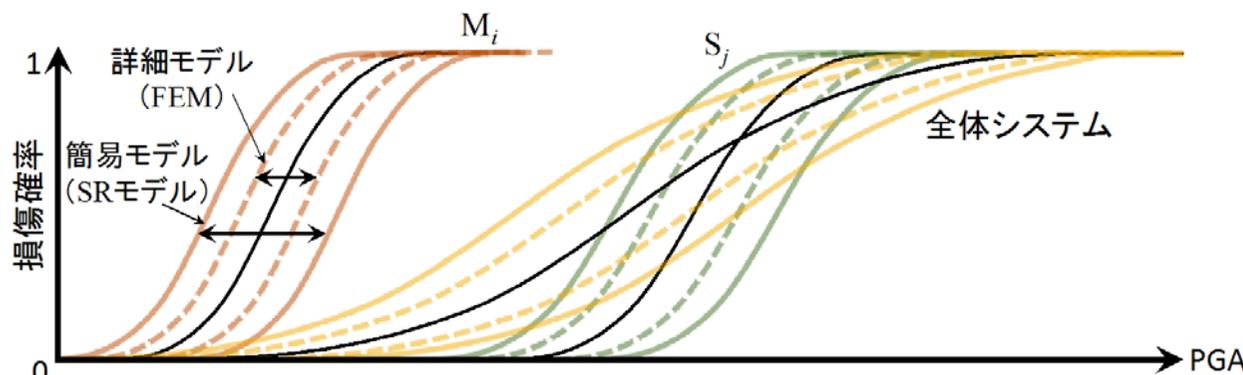
質点系モデルの最大水平加速度分布 8

3. 既存プラントの安全性向上のための実施案の検討



- プラント全体系のイベントマップ
- 免震化による有効性
- プラント・SSCHのクリフエッジ回避技術

免震化効果のEM表現(物理的クリフエッジ)



モデル化の違いによるEM表現(知識クリフエッジ)

成果の展開

1. 多様なクリフエッジを特定することにより、プラントの安全性向上に貢献
 - 1) 従来の地震PRAの**脆弱性評価技術の高度化**
 - 2) 支配的なクリフエッジの同定結果の**安全性評価、耐震設計、防災対策**へのフィードバック
 - 3) 要求性能に関わる**支配的クリフエッジの特定**と、その対応による設計へのフィードバック、効率的なクリフエッジ回避技術の実施
 - 4) **ストレステスト**(二次評価)において有用な知見を提供
2. 免震化プラントの検討結果の活用
 - 1) **免震化によるクリフエッジ回避効果**の把握と新たなクリフエッジの特定
 - 2) 免震重要棟の地震時／地震後の要求性能(**設計クライテリア**)の設定
3. 知識起因クリフエッジの特定結果の活用
 - 1) 実現象に整合する**適切なモデリング手法**への有用な知見の提供
 - 2) 地震PRAに用いる脆弱性モデルや考慮すべき**損傷モードの抽出**
4. 人間挙動に関するクリフエッジの特定結果の活用
 - 1) **人間信頼性解析**(HRA)のための有用な知見の提供
 - 2) 人間挙動に関する**クリフエッジ回避技術**の今後の可能性