



Japan Atomic Energy Agency

# 原子力施設建屋システムの クリフエッジの特定および回避技術に関する検討

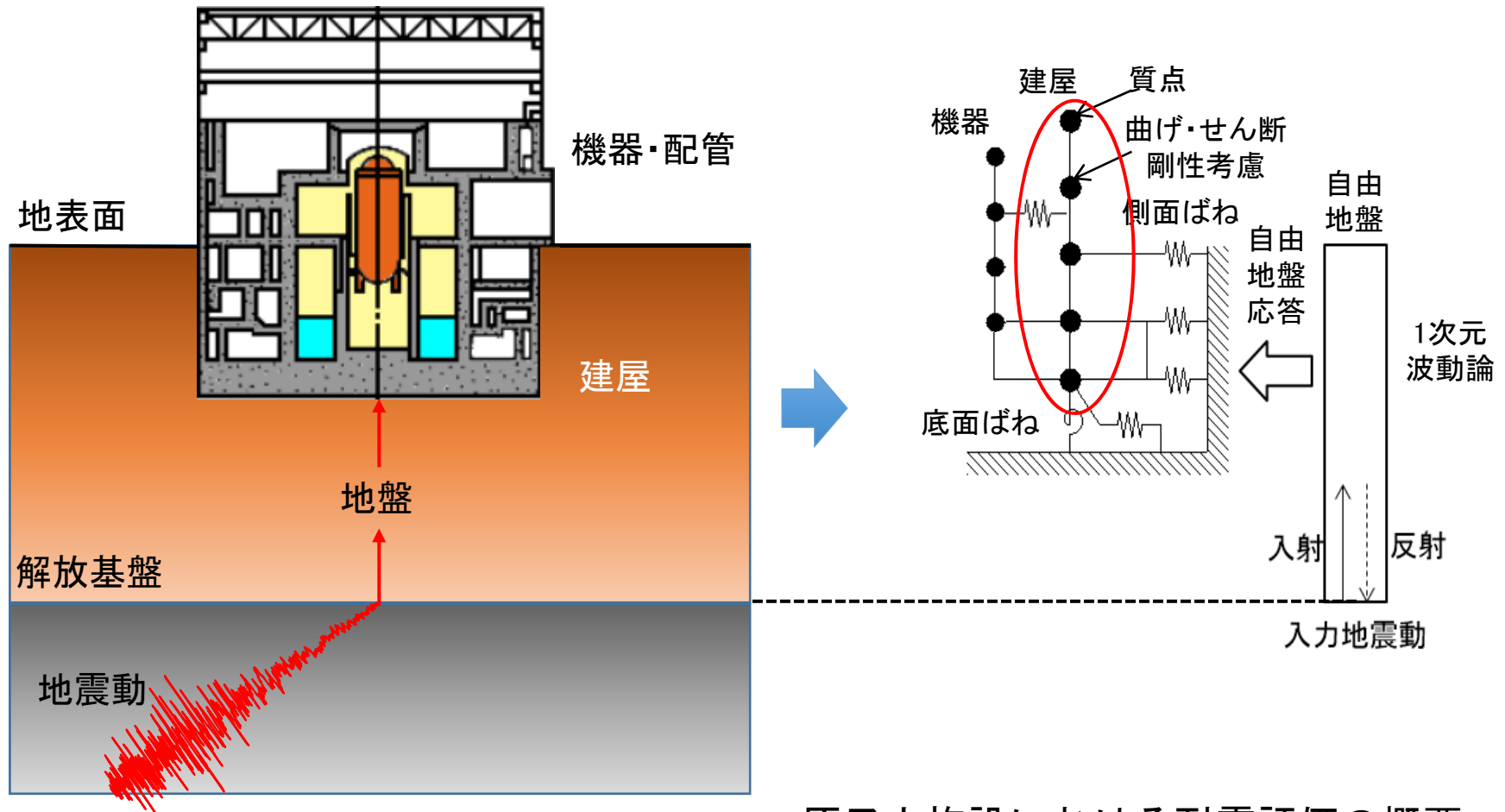
日本原子力研究開発機構  
安全研究・防災支援部門  
安全研究センター  
材料・構造安全性研究ディビジョン  
構造健全性評価研究グループ

崔 炳賢

平成29年度 安全研究センター報告会  
平成29年11月29日  
富士ソフト アキバプラザ

本発表の一部は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」の成果です。

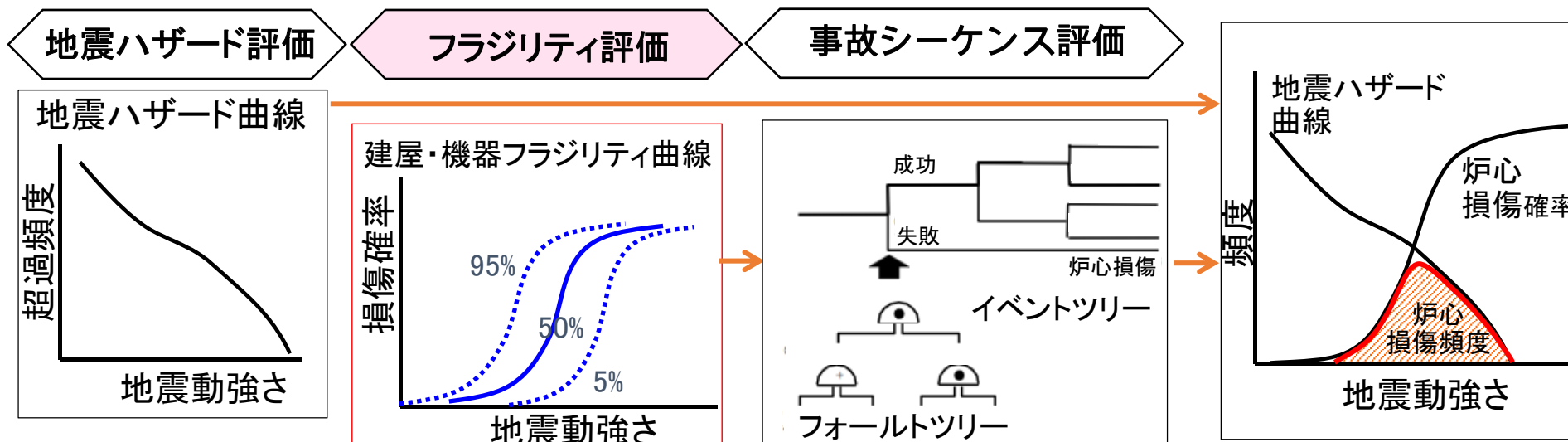
- 日本は世界でも有数の地震国であり、原子力施設のような重要構造物は十分な耐震性能が求められる。



原子力施設における地震動伝播

原子力施設における耐震評価の概要  
(質点系モデルの例)

- 原子力規制委員会の実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイドでは、確率論的リスク評価(PRA)が明記
  - 近年大きな地震記録
  - PRAにおける損傷評価の精緻化
- フラジリティ評価の信頼度、不確かさの定量化が課題
  - 構造健全性評価の観点から損傷(フラジリティ)評価に着目



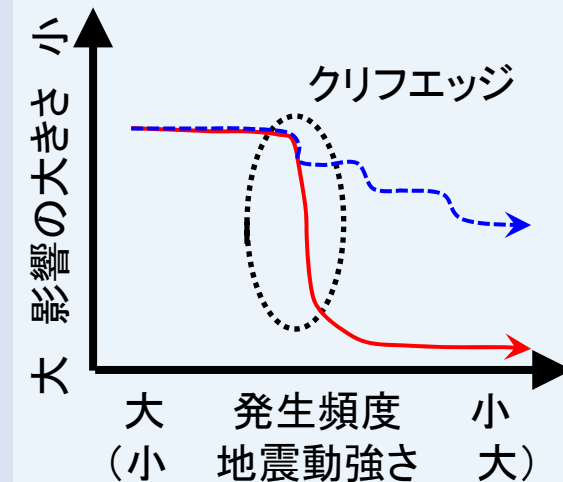
地震PRAの枠組み

- 原子炉建屋のフラジリティ評価の信頼度向上に資するため、**クリフエッジ**の特定・回避にかかる評価法を確立する

## I. 物理的クリフエッジ

- 発生頻度のわずかな減少により、その**結果の重大性が顕著に増加**し得る現象 (NEI, 2013)

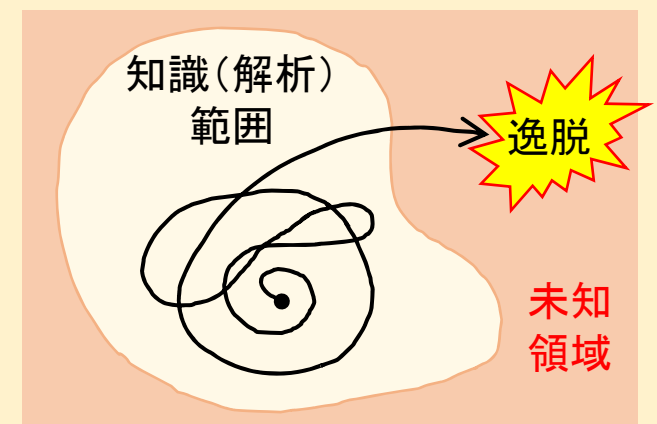
例：地震による建屋局部損傷～重要設備の機能不全等による炉心損傷の発生、等



## II. 知識起因のクリフエッジ

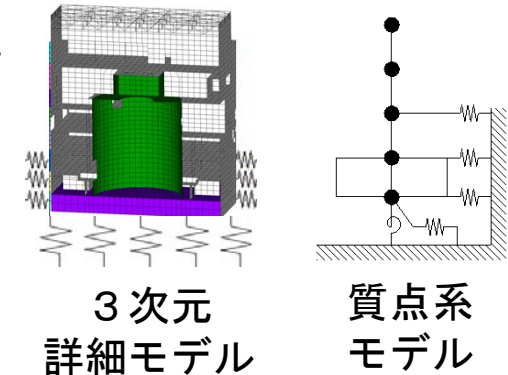
- 想定外事象の発生や解析範囲を超えた未知の領域への突入**

例：モデル化対象外領域の挙動、破壊などの強非線形挙動、等



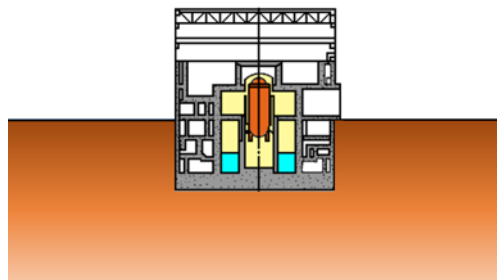
## (1) 原子炉建屋の詳細挙動を把握する解析モデル・評価法の構築

- 従来の設計用モデル(質点系モデル)に対して、局部損傷まで評価可能な3次元詳細モデルの構築手順を確立
  - ・ クリフエッジ特定のための詳細な解析モデルの構築
  - ・ 観測記録による妥当性確認

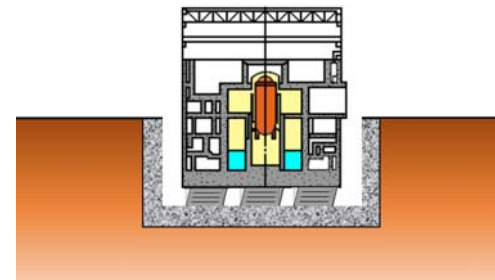


## (2) 設計上の想定を超える地震(大地震)時の挙動評価

- ・ クリフエッジ特定のため、大地震時詳細挙動の解析・分析
- ・ クリフエッジ回避技術の一つ免震導入による大地震時の詳細挙動の把握



耐震建屋の例

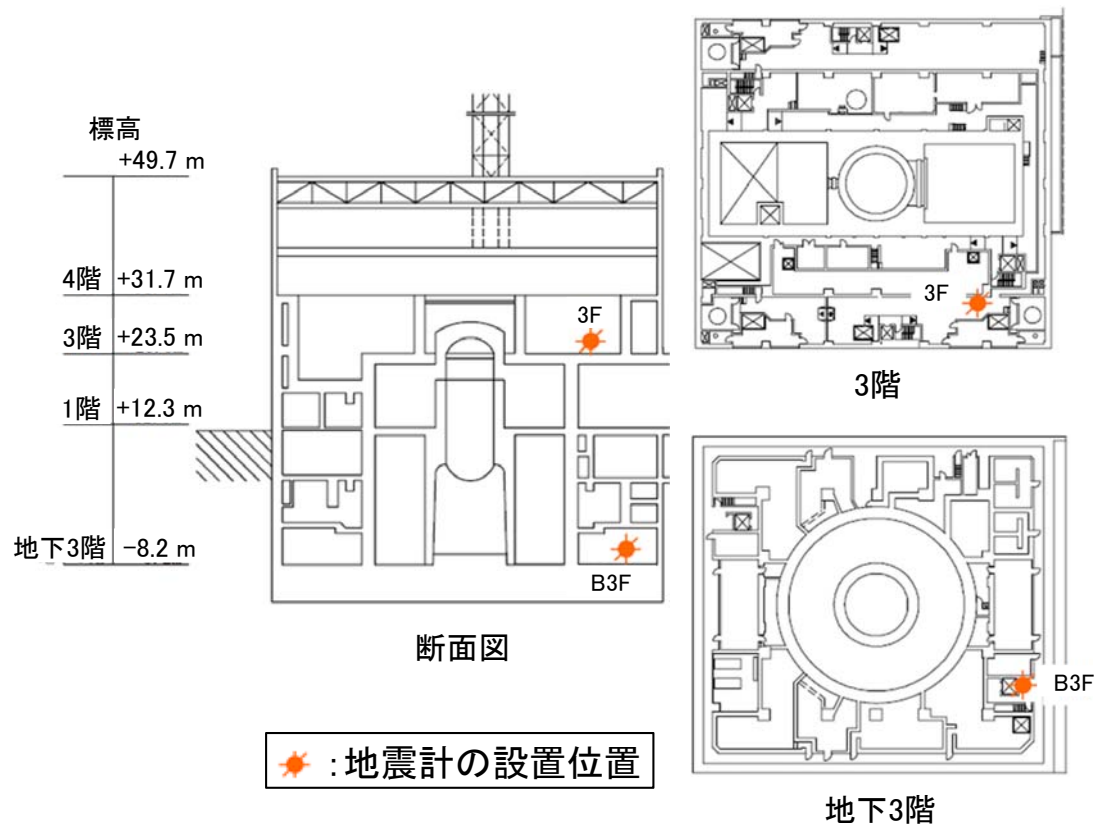


免震導入の例

- 3次元詳細モデル構築のためのモデルプラント(BWR)建屋



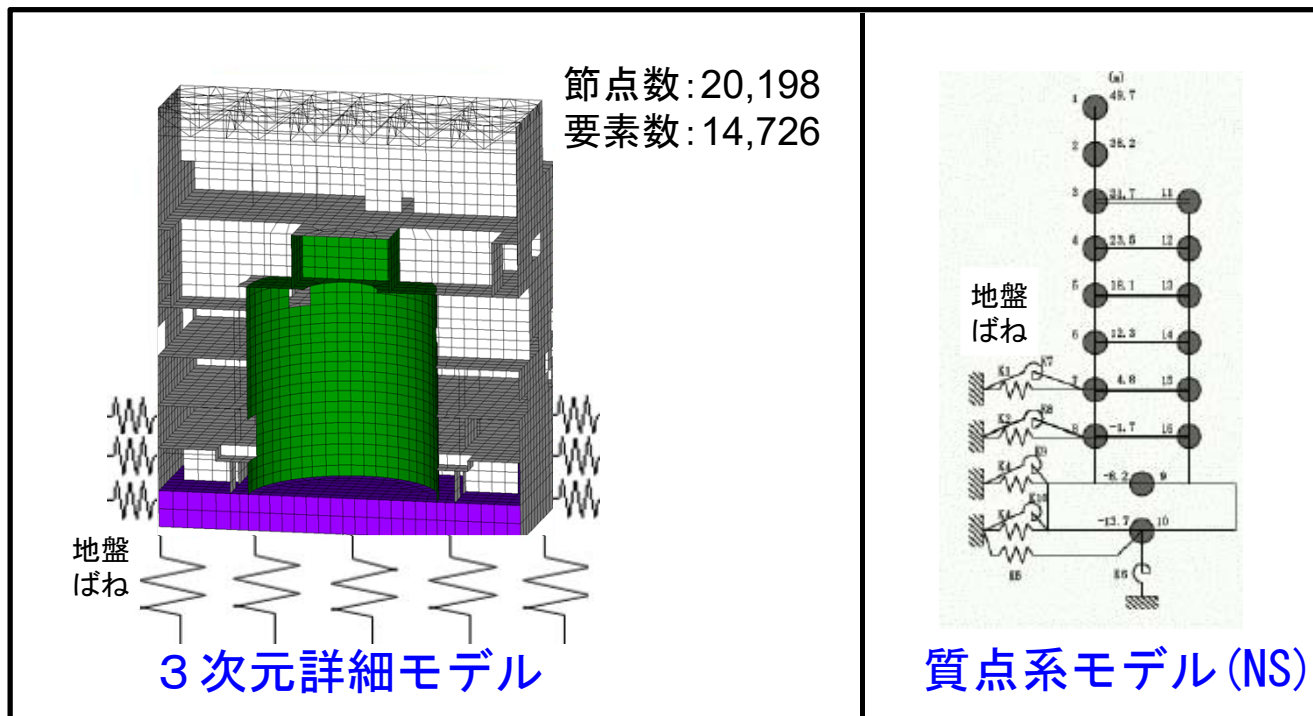
プラントの代表例



建屋内の地震計位置

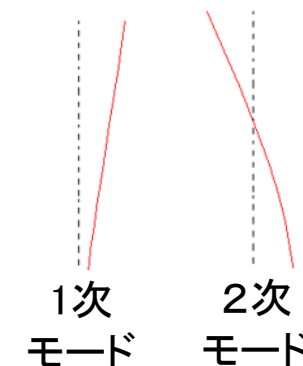
## 解析モデルの概要

- ・対象：モデルプラント(BWR)建屋
- ・解析モデル：3次元詳細モデル、質点系モデル

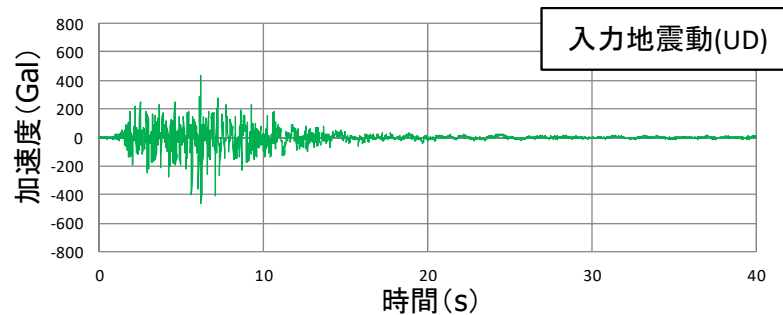
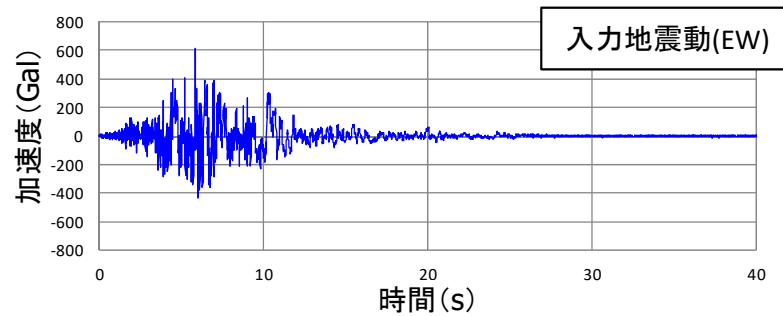
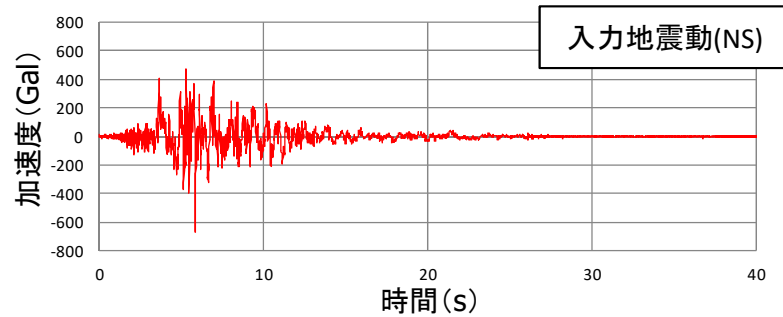


- ・重要機器等は重量として考慮
- ・フロア毎の重量は両モデルで整合性確認
- ・建屋振動特性を確認

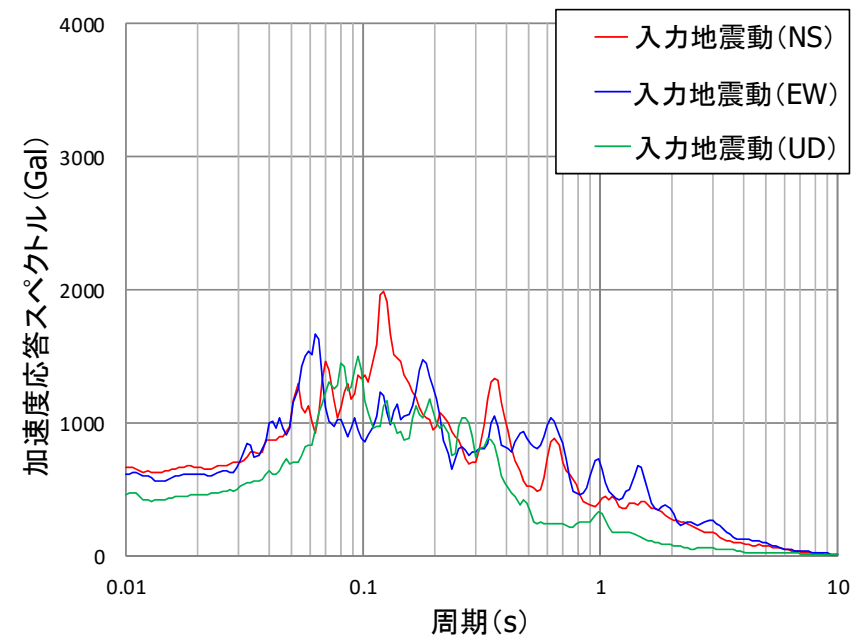
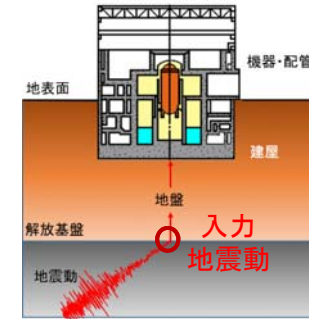
建屋モード	3次元詳細			質点系		
	固有振動数 [Hz]	固有周期 [sec]	有効質量比	固有振動数 [Hz]	固有周期 [sec]	有効質量比
1	2.268	0.441	0.778	2.278	0.439	0.756
2	5.158	0.194	0.161	5.172	0.193	0.240



## 妥当性確認のための入力地震動



入力地震動の加速度時刻歴波形



入力地震動の加速度応答スペクトル (h=5%)

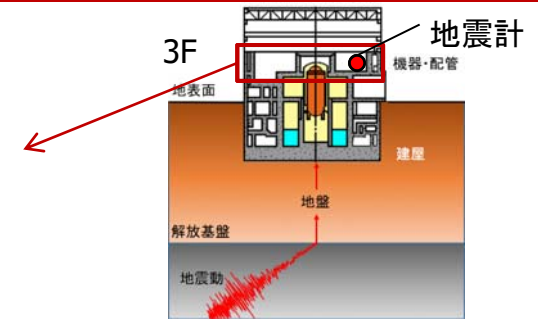
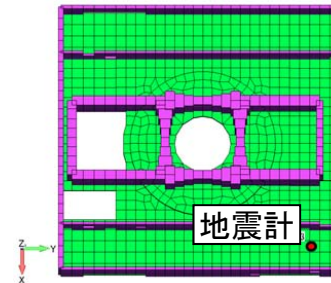
解析に用いた入力地震動(新潟県中越沖地震)



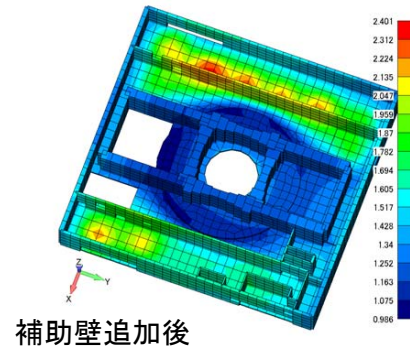
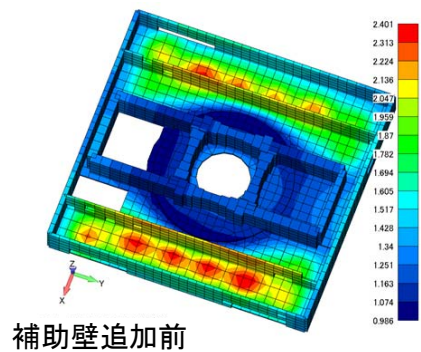
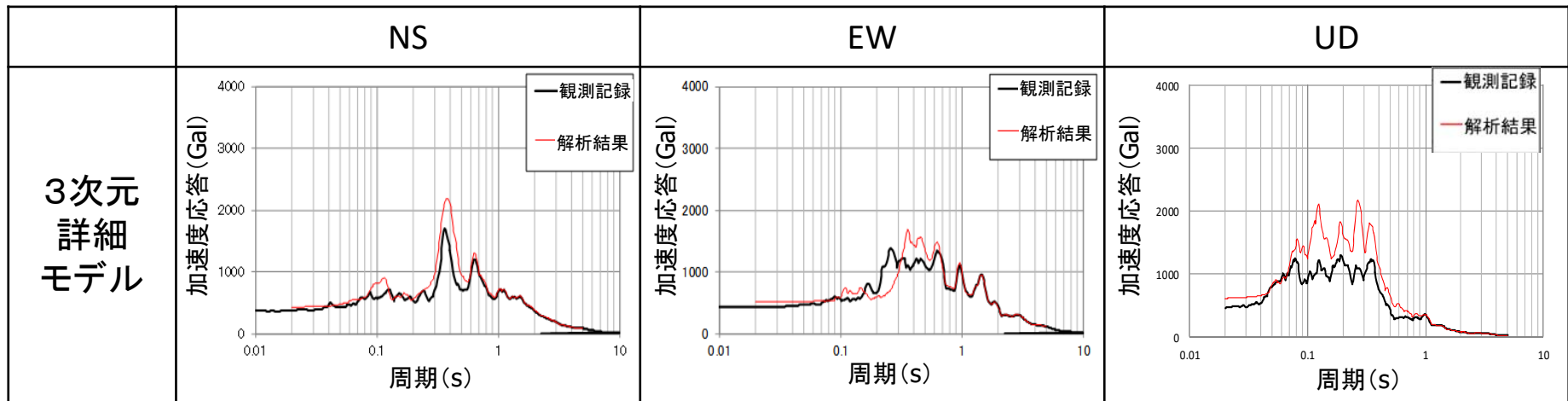
## 観測記録との比較による妥当性確認

観測記録と解析結果の対応を検討。

- ・上下動応答評価  
 詳細な壁のモデル化等も重要



観測記録と解析結果の比較(3F)



補助壁の影響確認(3F)

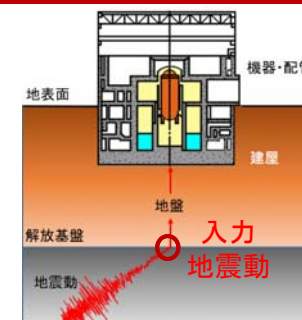
詳細な壁のモデル化  
 ⇒より現実的な上下応答

## 模擬入力地震動

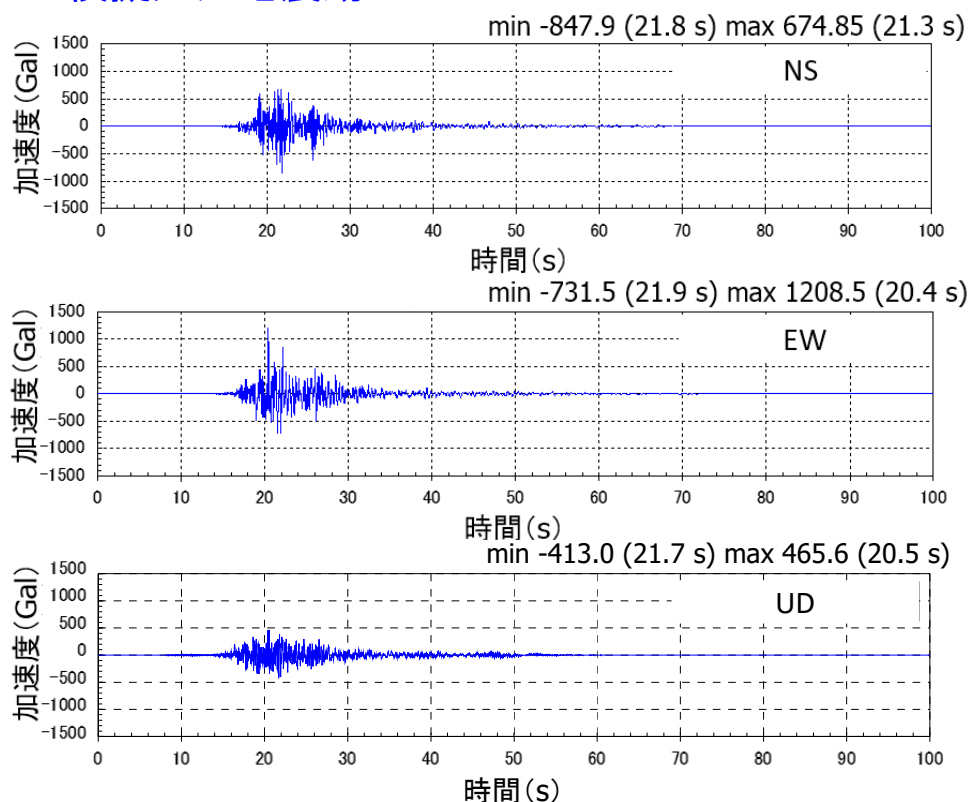
### PRAのための大地震時の応答確認

模擬入力地震動の最大加速度 (Gal)

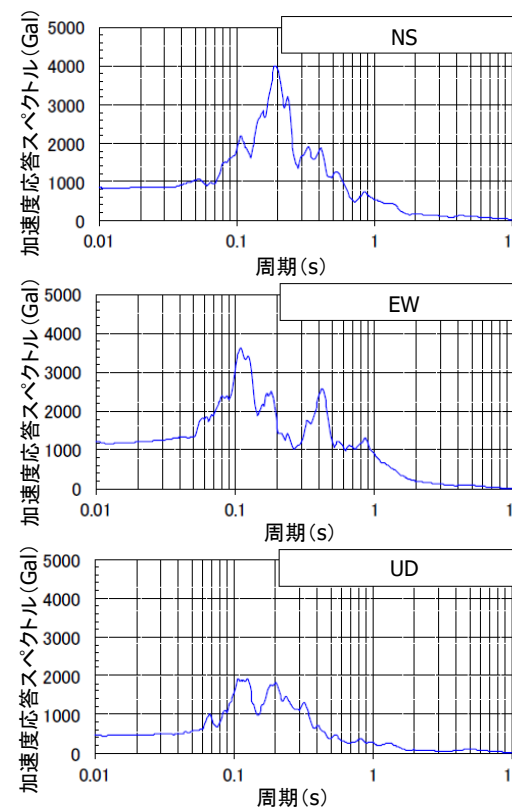
水平		上下
NS	EW	UD
848	1209	466



### 模擬入力地震動



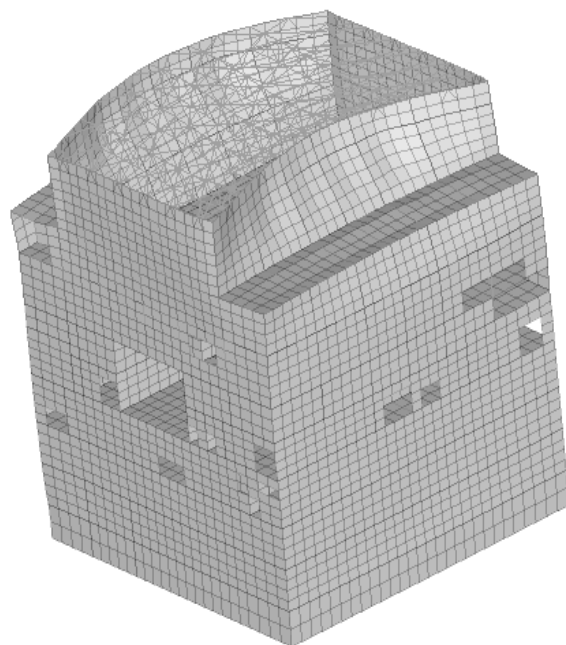
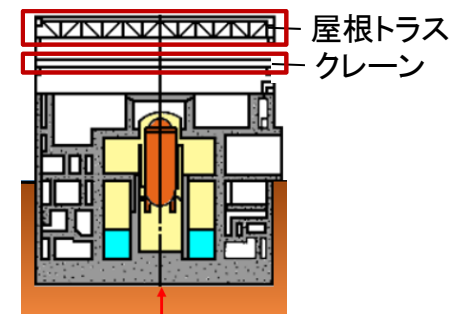
模擬入力地震動の加速度時刻歴波形



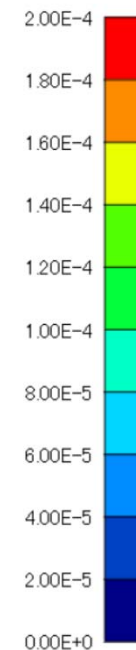
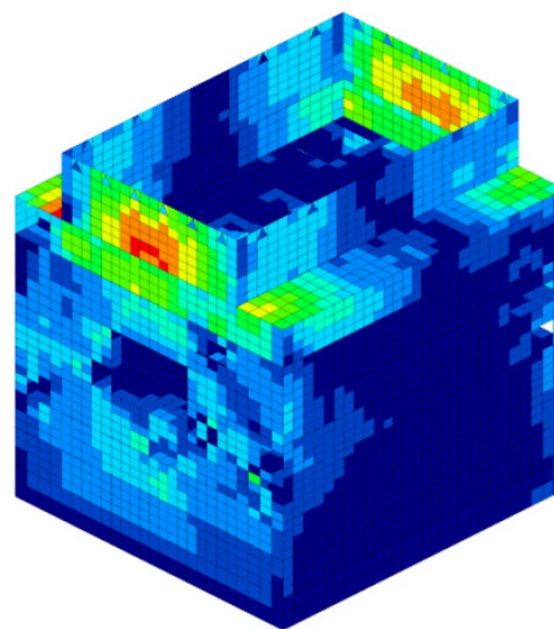
模擬入力地震動の加速度応答スペクトル (h=5%)

## 壁応答

### 3次元詳細モデルの地震応答解析結果の一例



変形図 倍率×300



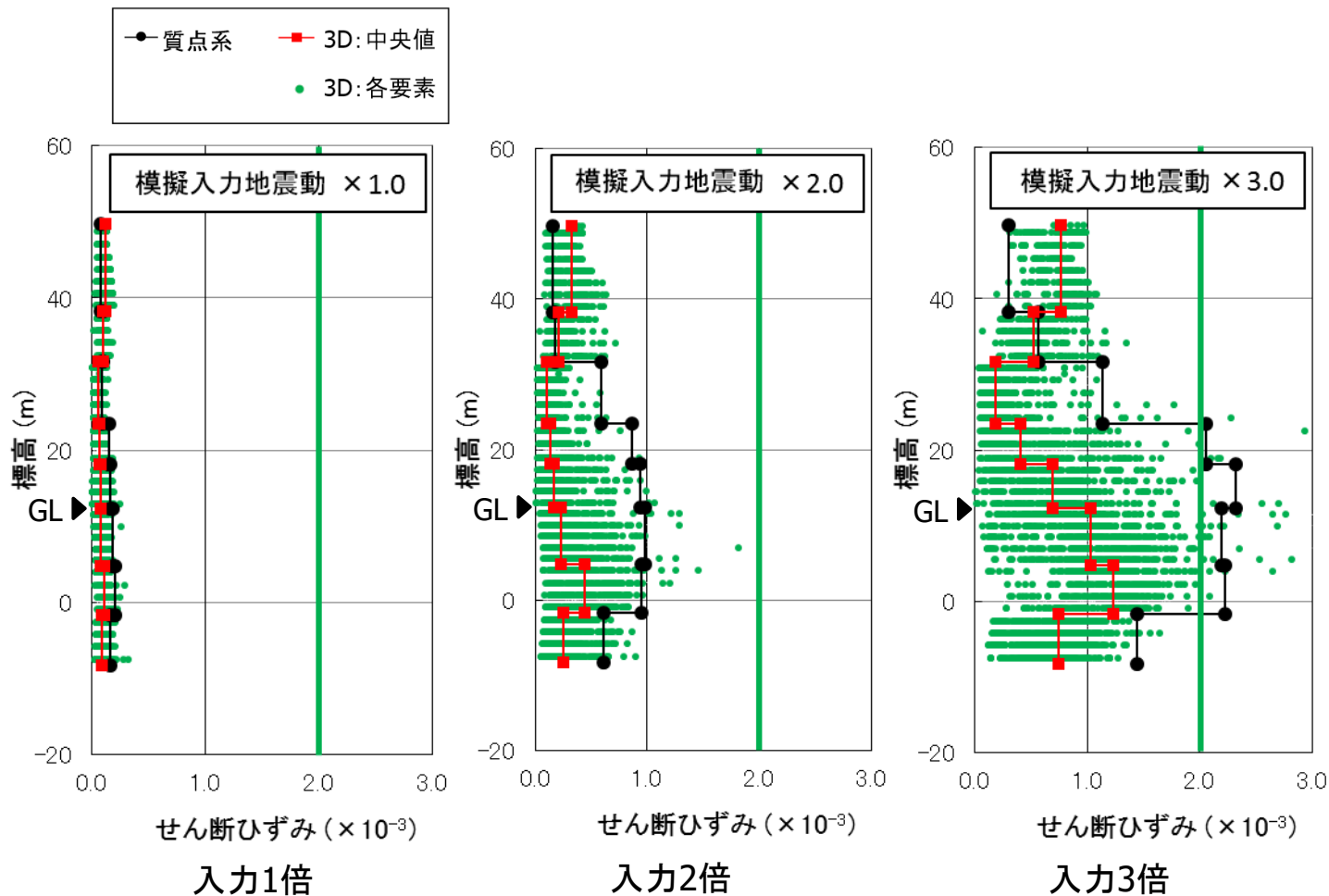
せん断ひずみコンター図

屋根トラスやクレーン階の評価への影響大



より現実的な応答を表現できる  
モデル構築が重要

## 層せん断ひずみ

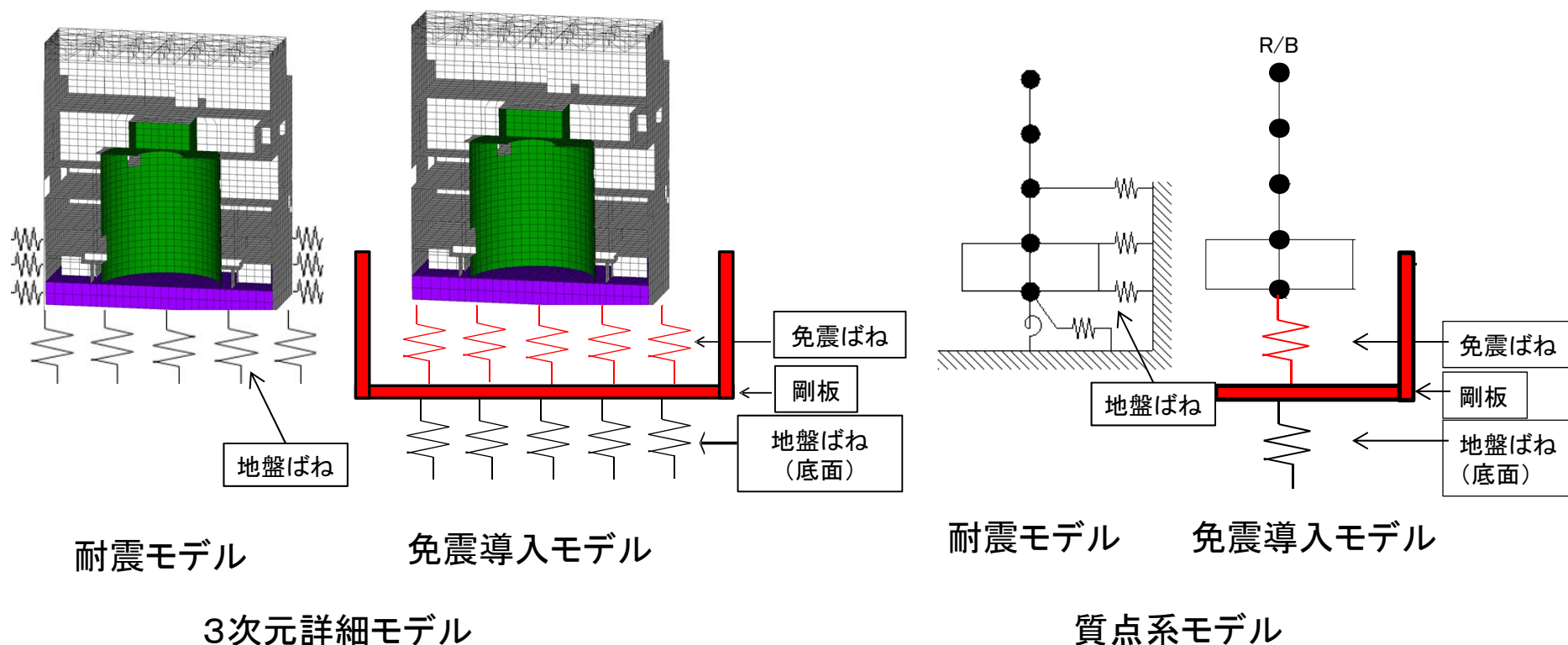


最大せん断ひずみの高さ分布

建屋が損傷→クリフエッジ→回避案(免震)について検討

# 大地震時層せん断破壊の回避: 解析モデル

クリフエッジの特定及び回避の確認のための解析モデルの例



## 大地震時層せん断破壊の回避: 解析結果

免震により層せん断破壊を回避

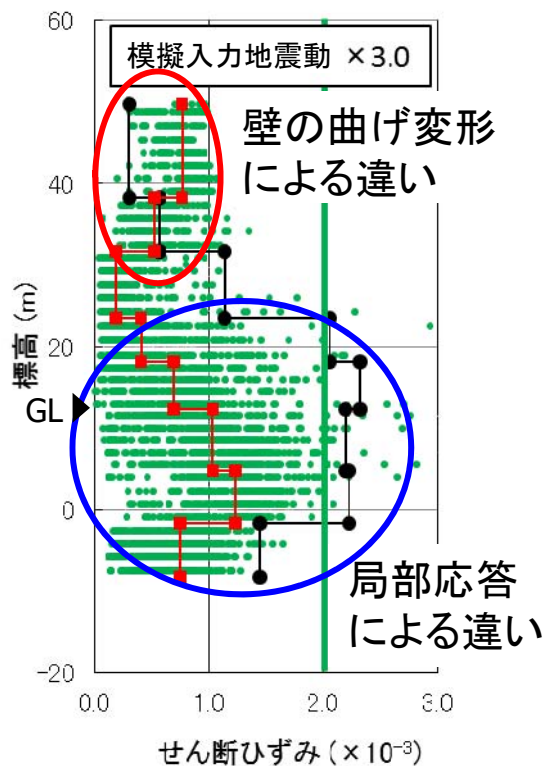
⇒ 物理的クリフエッジの回避

モデル化対象外領域の挙動を評価

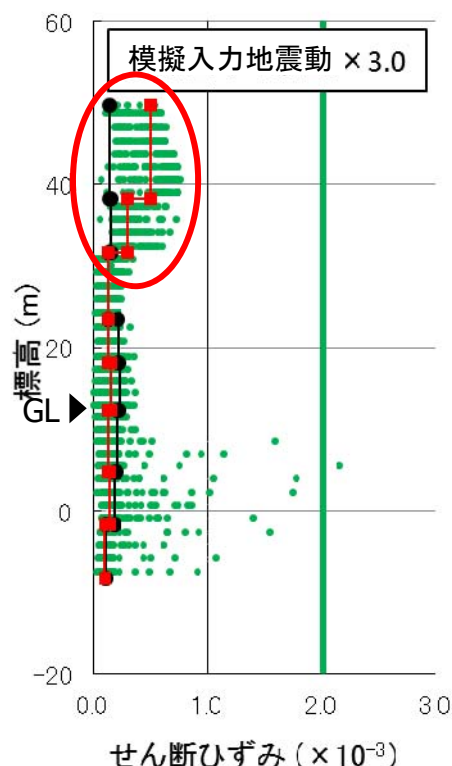
⇒ 知識起因クリフエッジの回避



■ 3次元詳細モデルにより  
局部応答を確認

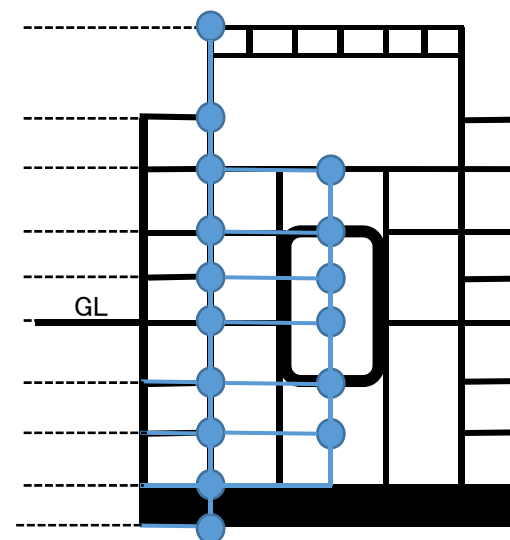


耐震モデル



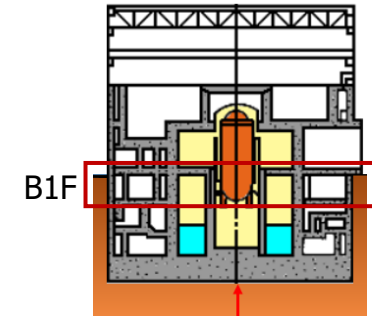
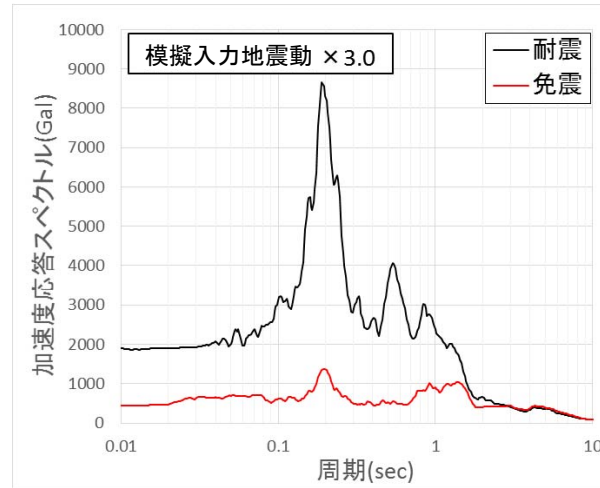
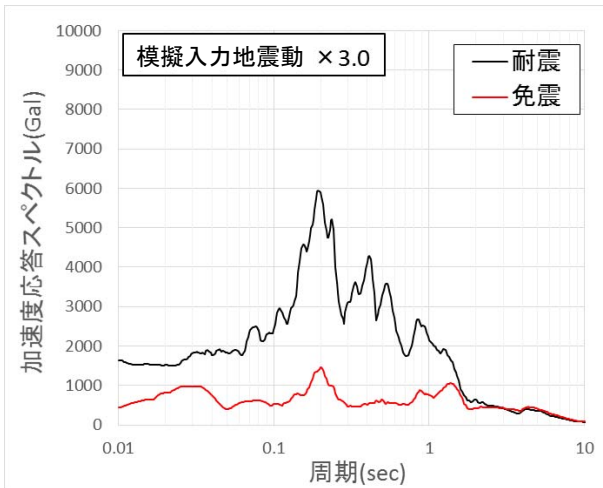
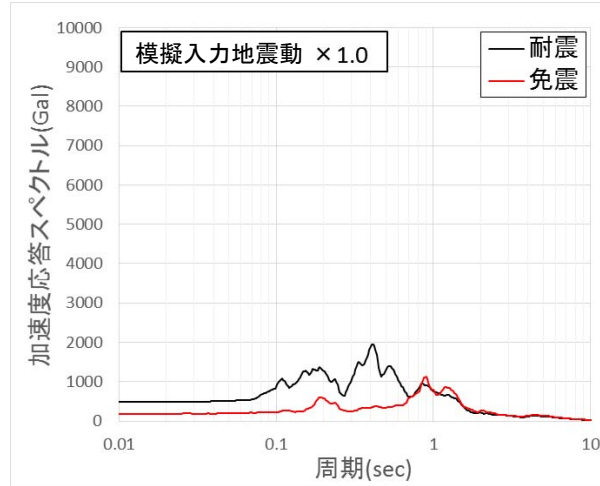
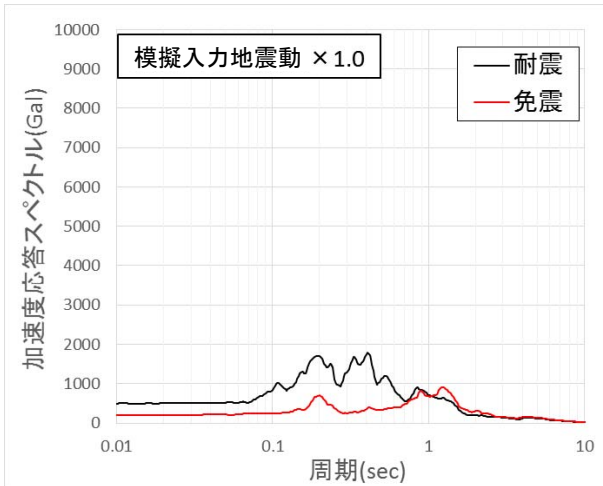
免震導入モデル

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  
(参考: 質点系モデル)



## 大地震時の床応答：免震効果の確認

### 免震導入による床応答低減の確認



3次元詳細モデル

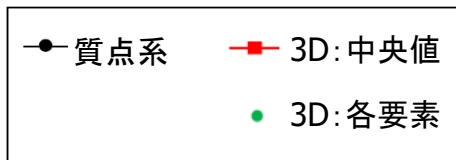
質点系モデル

免震有無の加速度応答スペクトル(h=5%)の比較(B1F)

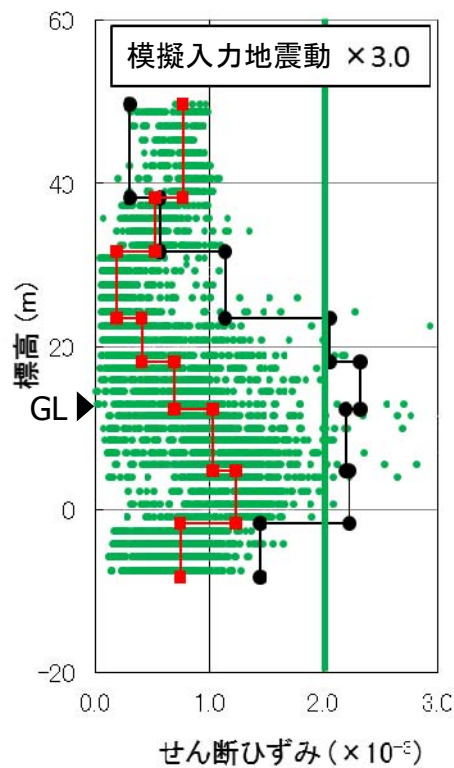
免震ゴムの最大変位  
(模擬入力地震動×3.0)  
中央値で約40 cm

## さらなるクリフエッジ発生の可能性

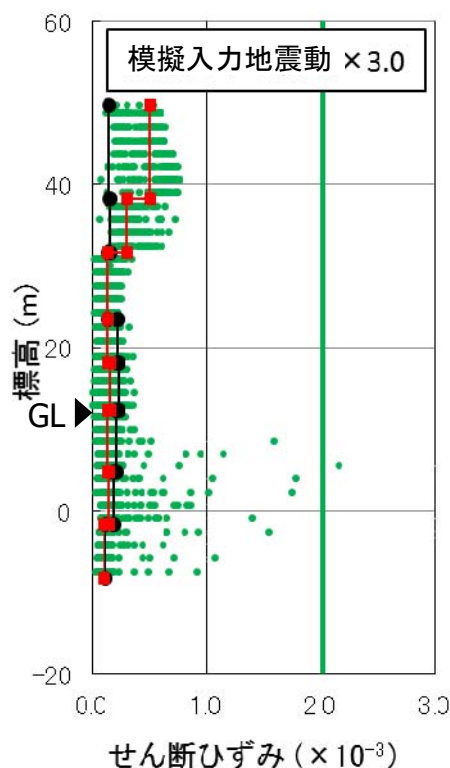
### 建屋と擁壁の衝突の例



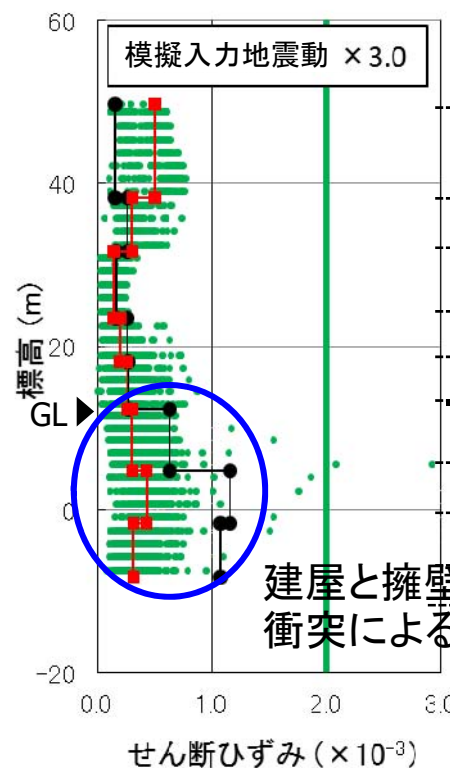
■ 3次元詳細モデルにより  
局部応答を確認



耐震モデル



免震導入モデル



建屋と擁壁の  
衝突による影響

免震導入モデル(衝突あり)

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  
(参考: 質点系モデル)



地震PRAにおける原子炉建屋のフラジリティ評価の信頼度向上に資するため、大地震時に想定されるクリフエッジ特定・回避にかかる評価法の確立を目的とし、得られた成果を報告した。

## (1) 原子炉建屋の詳細挙動を把握する解析モデル・評価法の構築

従来の設計用モデル(質点系モデル)に対して、局部損傷まで評価可能な3次元詳細モデルの構築手順を確立し、観測記録による妥当性を確認

## (2) 設計上の想定を超える地震(大地震)時の挙動評価

大地震時の詳細挙動を解析・分析し、クリフエッジを特定するとともに、免震導入によるクリフエッジの回避を確認し、大地震時の詳細挙動を評価

## 今後の予定

- ・地震時フラジリティ評価における3次元詳細評価法の標準化
- ・3次元挙動を考慮した質点系モデルによるフラジリティ評価法の検討
- ・原子力施設の機器・配管のフラジリティ評価への反映