



Japan Atomic Energy Agency

# 建屋の3次元詳細モデルを用いた 耐震評価手法に関する研究

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・構造安全研究ディビジョン  
構造健全性評価研究グループ

崔 炳賢

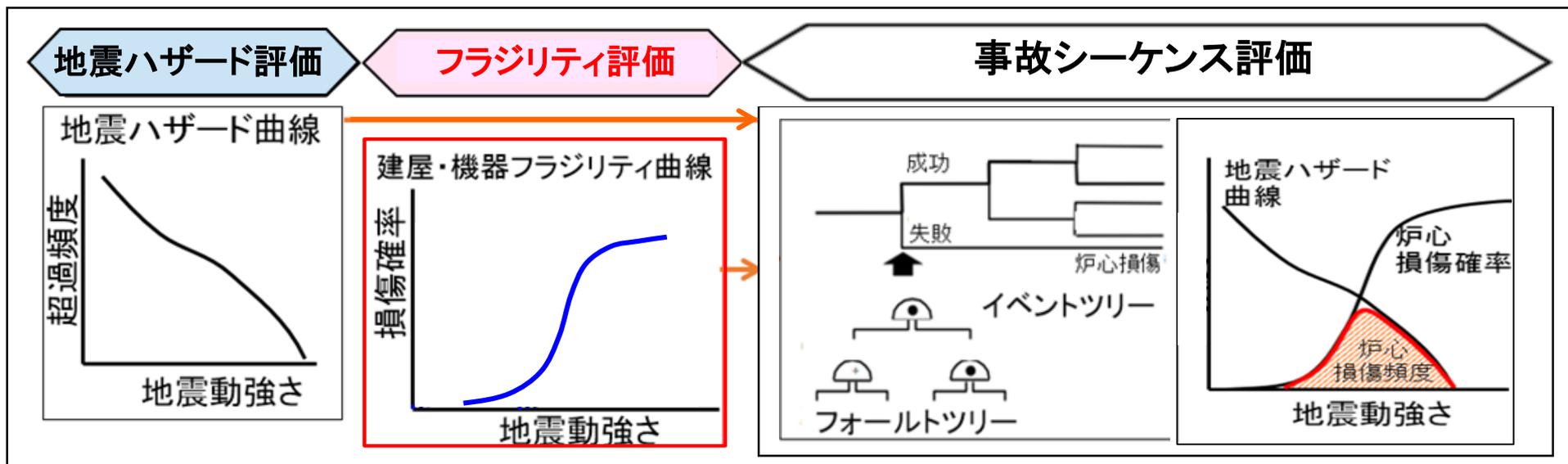
令和2年度 安全研究センター報告会  
令和2年11月27日

本発表の一部は原子力規制庁からの受託事業及び原子力規制庁との共同研究の成果です

# 研究背景

新規制基準では、地震等の外部事象評価が厳格化され、リスク評価を含めた安全性向上評価に関する運用ガイドが施行

- 確率論的地震リスク評価(地震PRA)が有効



余震ハザード評価等

建屋・配管等を対象に  
脆弱性評価手法整備

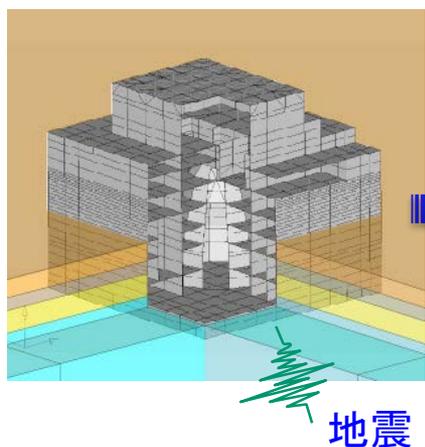
モデルプラントの事故シーケンス評価等

地震PRAの枠組み

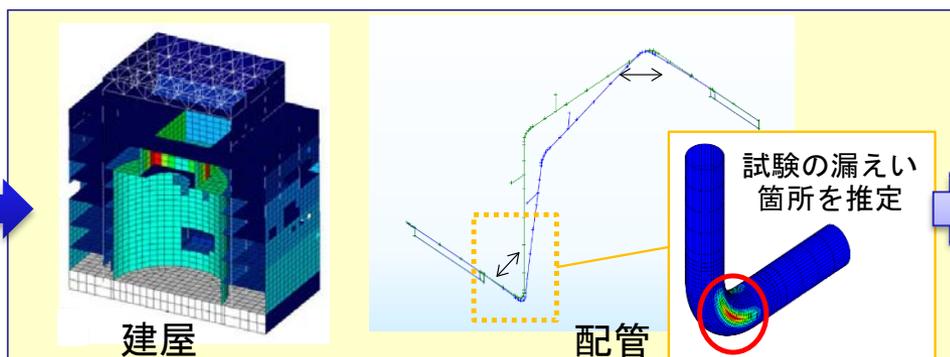
# フラジリティ評価に関する取り組み

## 地震時の建屋及び機器・配管のフラジリティ評価に関する研究

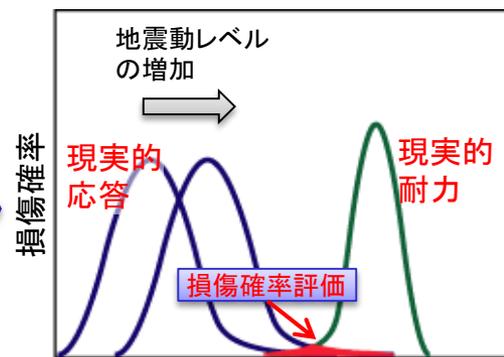
- 現実的応答に係る3次元詳細モデルを用いた地震応答解析手法の整備、標準化
- 現実的応答・耐力の評価に基づくフラジリティ評価手法の整備
  - ✓ 安全上重要な建屋・機器・配管の損傷に係る詳細挙動の把握
  - ✓ 経年事象を考慮した配管フラジリティ評価手法の整備
- 現実的応答に係る機構施設を活用した地震観測等のデータ取得（原子力規制庁との共同研究等）



地震



建屋地震応答解析モデル 配管地震応答解析モデル



損傷に係る指標

建屋・機器・配管の解析モデルの詳細化

建屋・機器・配管の地震応答評価や耐力評価

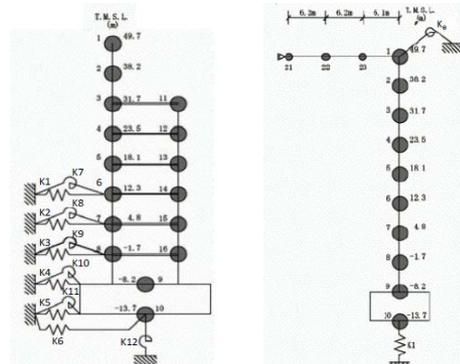
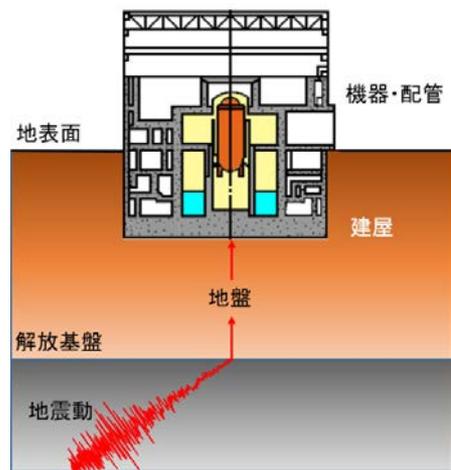
フラジリティ評価

# 建屋3次元詳細モデルを活用したフラジリティ評価

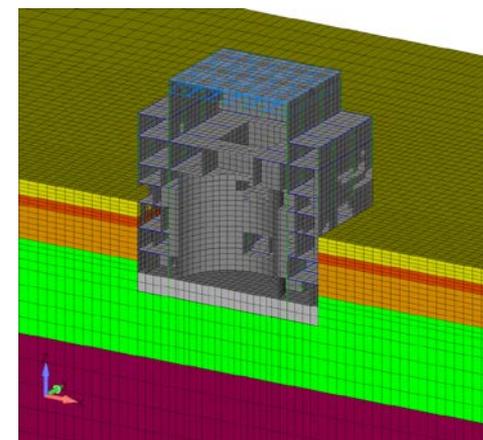
- フラジリティ評価では局部応答・局部損傷を含む現実的応答・現実的耐力評価が重要
  - 新潟県中越沖地震において従来法の課題が認識
    - 床柔性、地盤-建屋相互作用、3次元入力等
  - 3次元詳細モデルの有効性
- 局部応答・局部損傷を表現できる建屋3次元詳細モデルを活用することで、機器への入力に係るより現実的な応答・耐力評価が期待

## 本研究の目的

- 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握
- 2) 現実的耐力: より現実に近い損傷モードの同定
- 3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価



水平方向 上下方向  
従来法(質点系モデル)

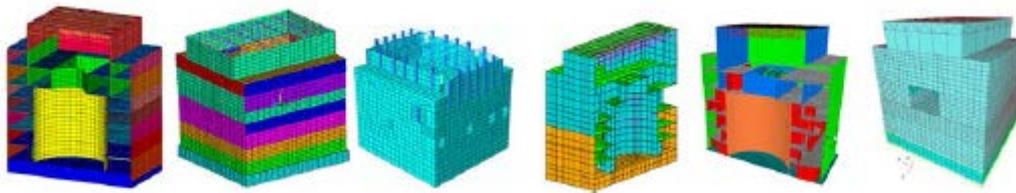


3次元詳細モデル

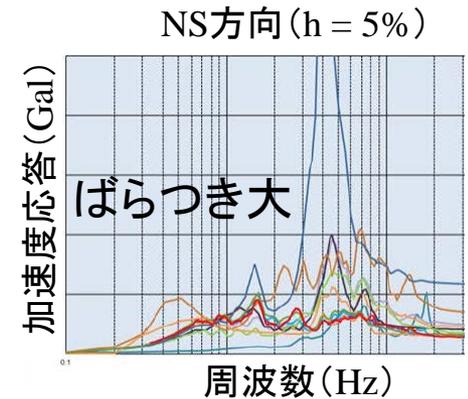
- 
- 
- 1) 現実的応答：より現実に近い地震時挙動の把握
  - 2) 現実的耐力：より現実に近い損傷モードの同定
  - 3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価

# 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握 建屋3次元詳細モデルに係る課題

建屋3次元詳細モデルのモデル化は解析者に依存 (IAEA (International Atomic Energy Agency), 2013)

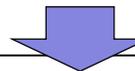


IAEAの国際ベンチマークプロジェクトにおける  
建屋3次元詳細解析モデル例



床の加速度応答スペクトルの比較 (3F)

IAEAより提供された実プラント情報をもとに建屋3次元詳細モデル  
を作成し、地震応答解析を実施⇒建屋応答のばらつき大



解析者に依存せず一定の品質を確保できる  
標準的なモデル化や解析手法の指針となるものが必要

解析者が建屋3次元詳細モデルを用いた地震応答解析を  
実施する際の手順、方法、留意すべき事項、技術的根拠等  
を標準的解析要領として整備

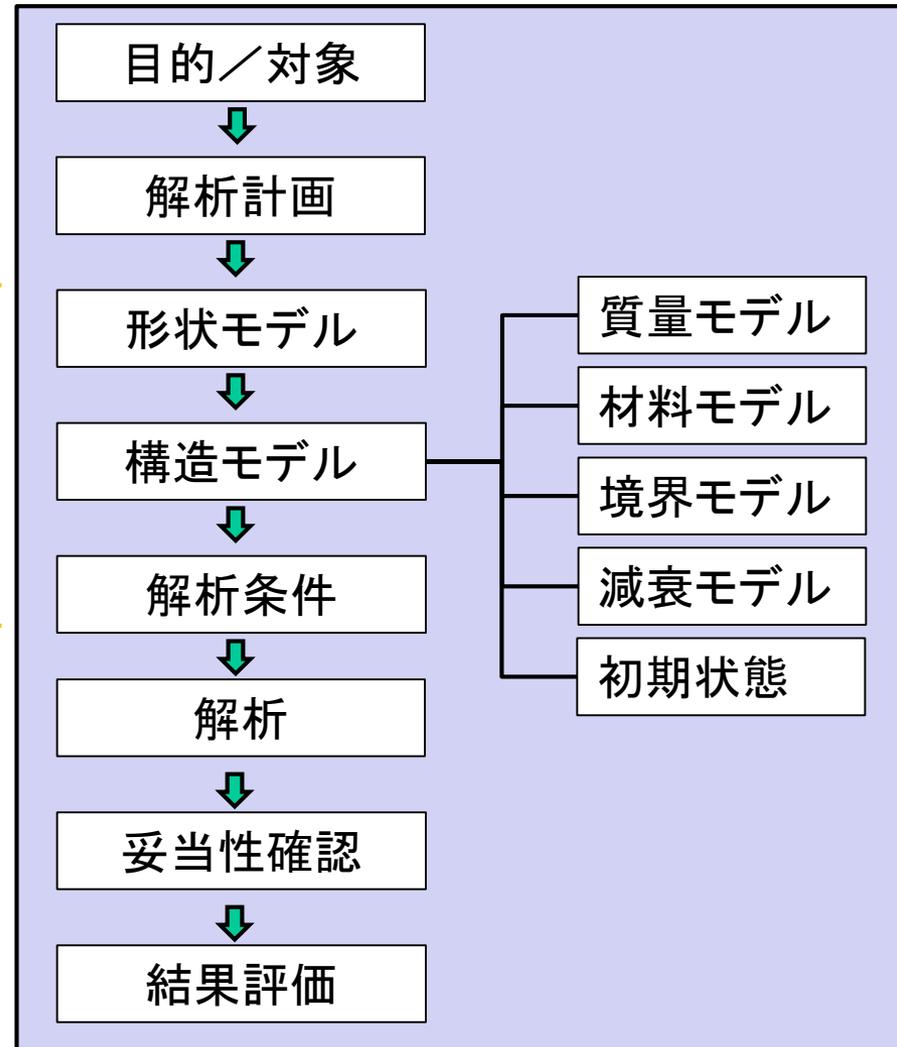
# 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握 建屋3次元詳細モデルのモデル化因子

## 解析結果に影響を及ぼす因子 (モデル化因子)

モデル化因子の感度解析により  
建屋応答への影響を評価

<代表的なモデル化因子>

- ①モデル化範囲 (非構造壁)
- ②水平2方向及び鉛直方向の地震動入力
- ③有限要素タイプ
- ④メッシュサイズ
- ⑤大型機器のモデル化
- ⑥非線形材料物性のモデル化
- ⑦地盤-建屋間の接触・剥離及び基礎浮上りのモデル化
- ⑧初期応力のモデル化
- ⑨減衰のモデル化



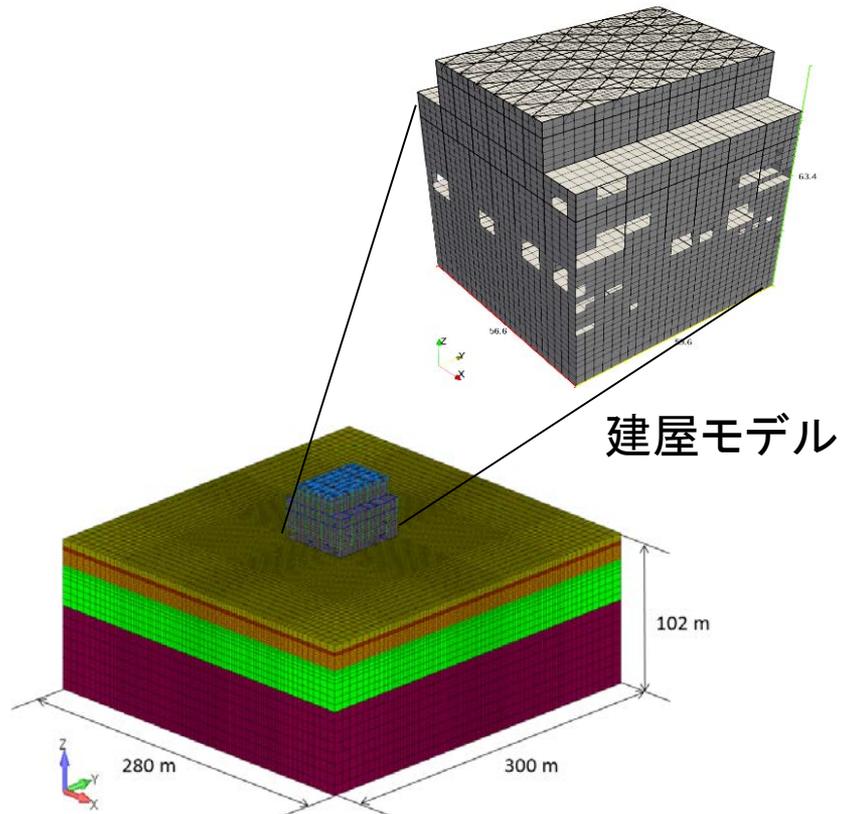
建屋3次元詳細モデルを用いた  
地震応答解析のフロー

1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握  
建屋3次元詳細モデルの概要

3次元詳細モデル構築のためのモデルプラント(BWR)建屋



モデルプラントの例



建屋モデル

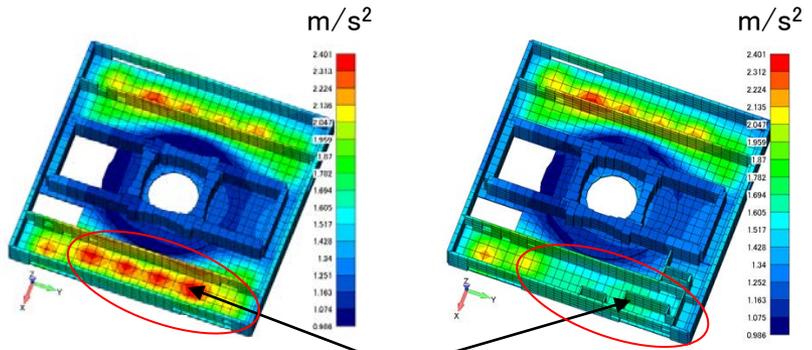
3次元詳細モデル

# 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握 感度解析によるモデル化因子の影響評価例

代表的なモデル化因子による建屋応答への影響を評価し、留意すべき事項を検討

## ① モデル化範囲による影響

耐震壁に加えて非構造壁の追加による影響を評価



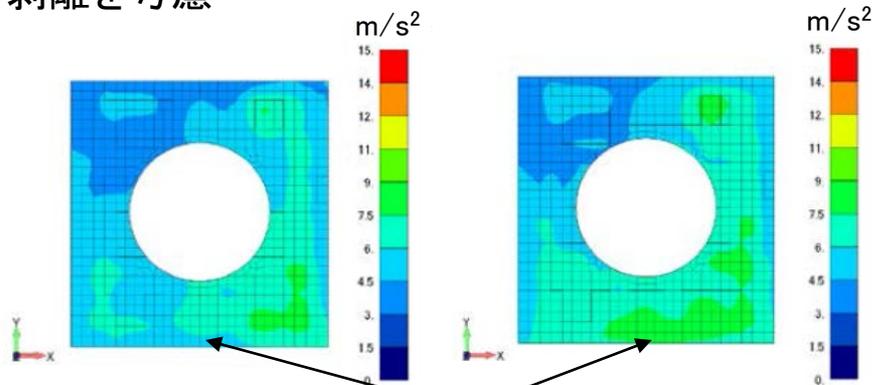
非構造壁追加前      応答の違い (約5割)      非構造壁追加後

最大応答加速度(3F, 上下方向)

より現実に忠実な壁のモデル化範囲の考慮

## ⑦ 地盤-建屋間の接触・剥離及び基礎浮上りによる影響

地盤-建屋間に非線形ジョイントを導入し、接触・剥離を考慮



接触・剥離未考慮      境界部の接触・剥離考慮 応答の違い (約3割)

最大応答加速度(B1F, 上下方向)

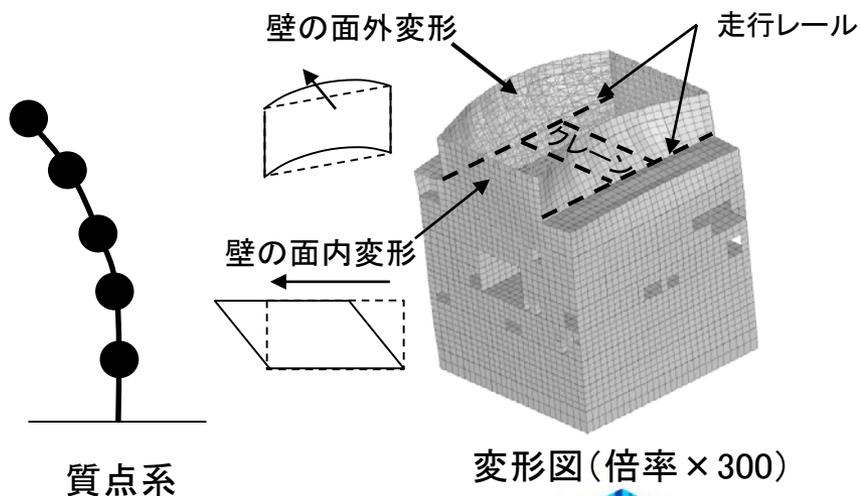
地盤-建屋間の接触・剥離考慮のためには非線形相互作用のモデル化が重要

代表的なモデル化因子の建屋応答への影響に関する知見をとりまとめ、3次元詳細モデルを用いた地震応答解析を実施する際の留意事項として整理

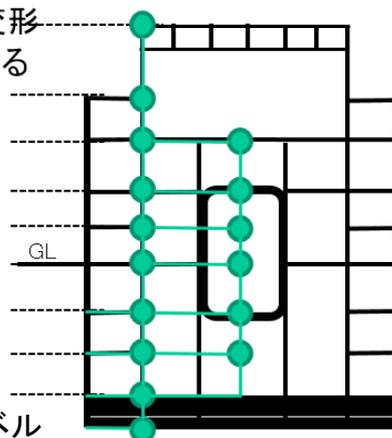
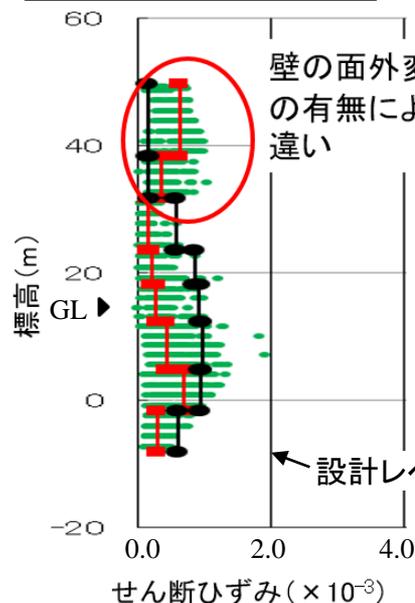
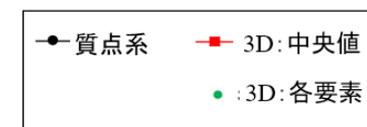
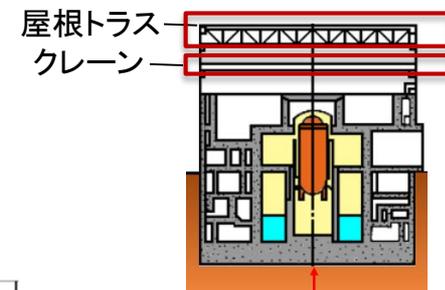
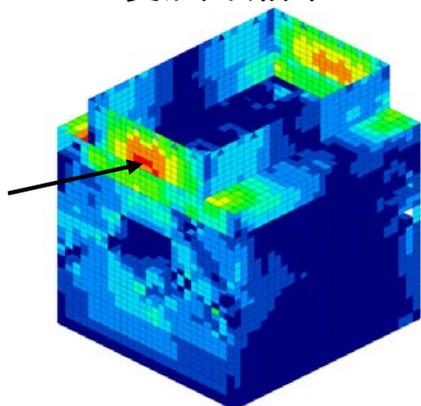
**JAEA** 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握  
**事例1: 壁の面外変形の影響**

新潟県中越沖地震において建屋の天井クレーンに損傷発生

➤ 3次元詳細モデルにより質点系モデルでは表現困難な壁の面外変形の影響を確認



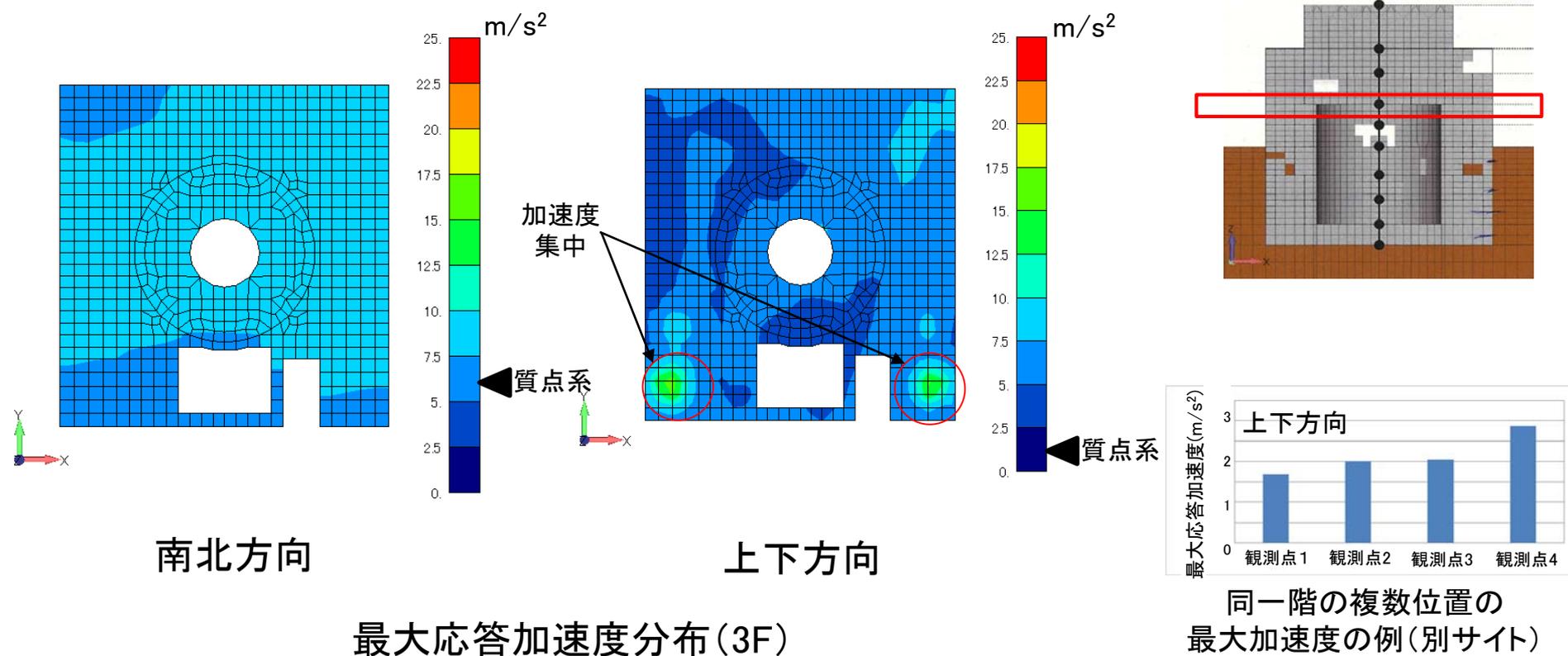
壁の面外変形に起因するせん断ひずみの発生



クレーン階や屋根トラス等の現実的かつ合理的な耐震評価のためには、壁の面外変形等のより現実的な局部応答の考慮が重要

JAEA 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握  
事例2: 床柔性の影響

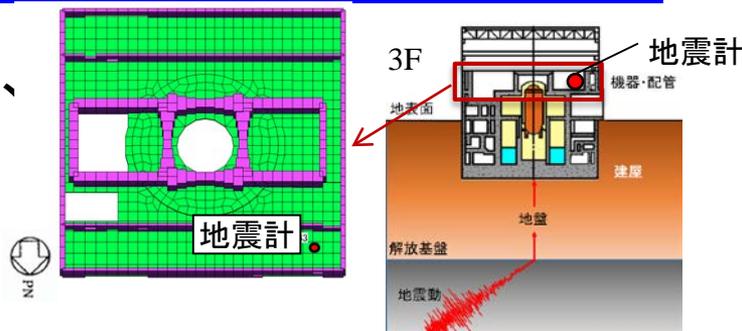
3次元詳細モデルにより質点系モデル(剛床)では表現困難な床柔性の影響を評価



重要機器や配管等の設置床位置における現実的応答評価が可能  
→ 機器や配管等への入力 of 精緻化が期待

JAEA 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握  
モデルの妥当性確認

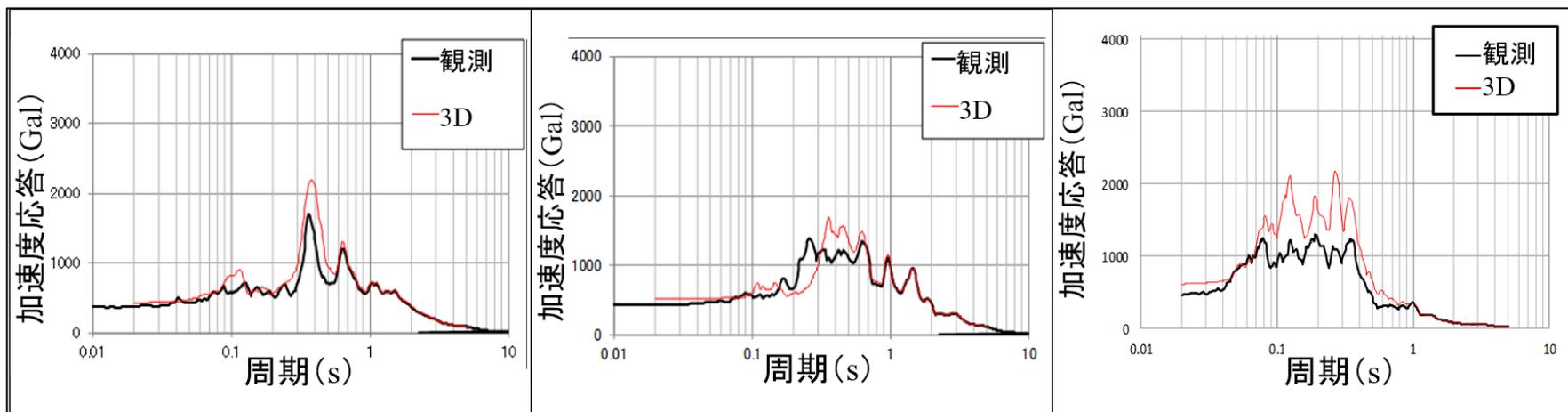
建屋3次元詳細モデルの妥当性を確認するため、  
観測記録と解析結果の比較を実施



南北方向

東西方向

上下方向

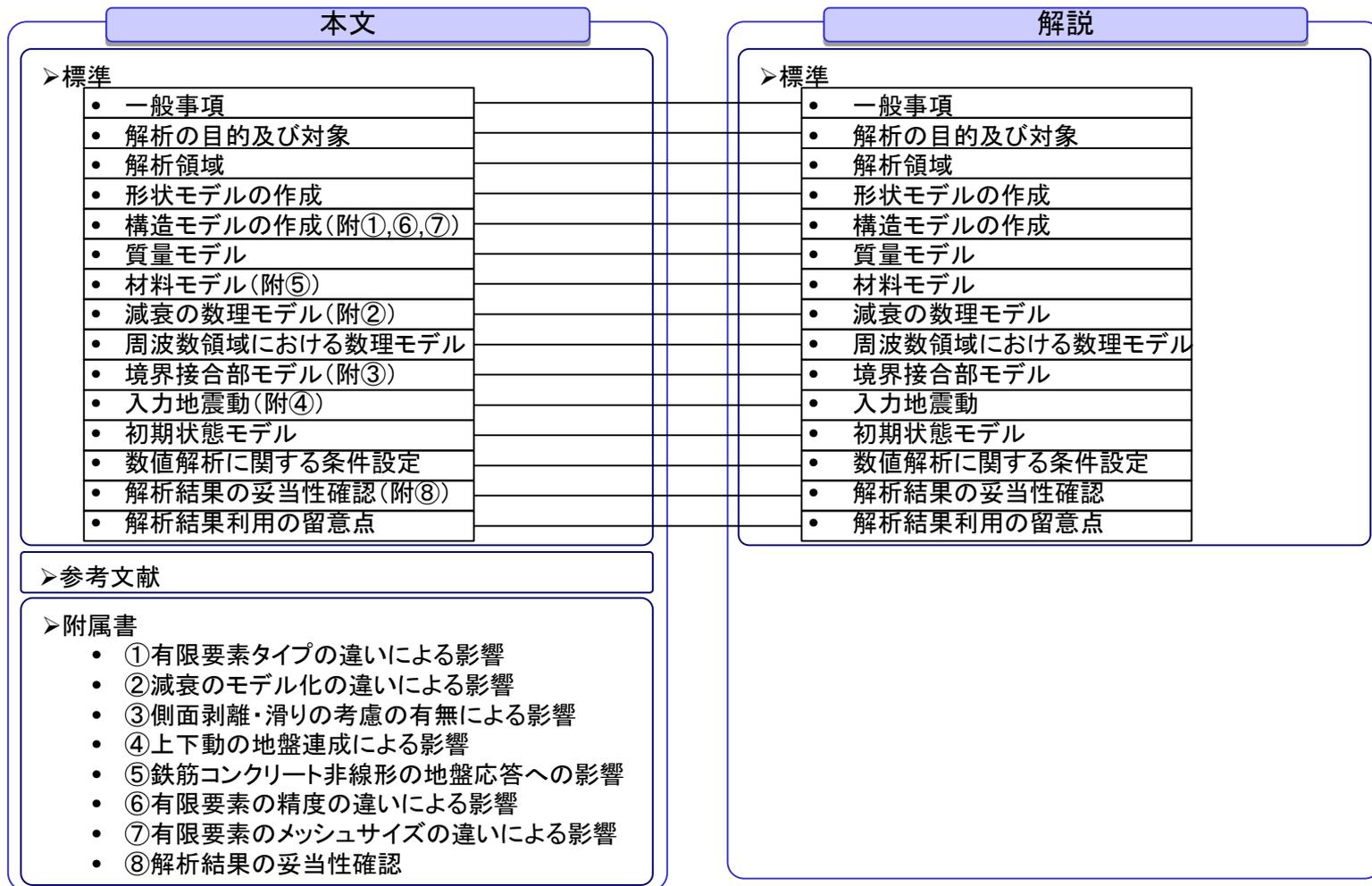


観測記録と解析結果の比較(3F)  
(2007年新潟県中越沖地震の加速度応答スペクトル(h=5%))

建屋3次元詳細モデルによる解析結果は観測記録を概ね良好に再現。

# JAEA 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握

## 建屋3次元詳細モデルを用いた地震応答解析手法の標準的解析要領の整備



3次元詳細モデルの代表的なモデル化因子の影響評価結果等を踏まえ、建屋3次元詳細モデルを用いた地震応答解析手法に係る国内初の標準的解析要領を整備(JAEAレポート) ⇒耐震安全性評価に係る技術的知見として規制庁のNRA技術報告書に反映される見込み

- 
- 
- 1) 現実的応答：より現実に近い地震時挙動の把握
  - 2) 現実的耐力：より現実に近い損傷モードの同定**
  - 3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価

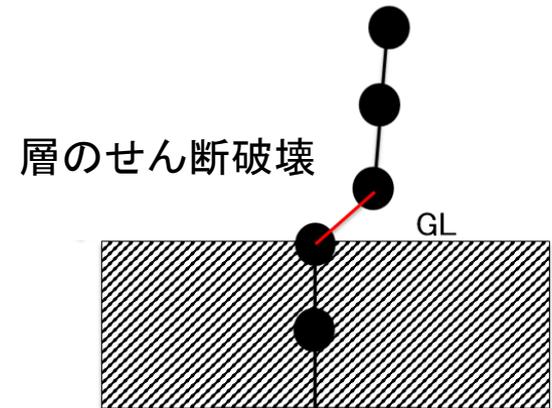
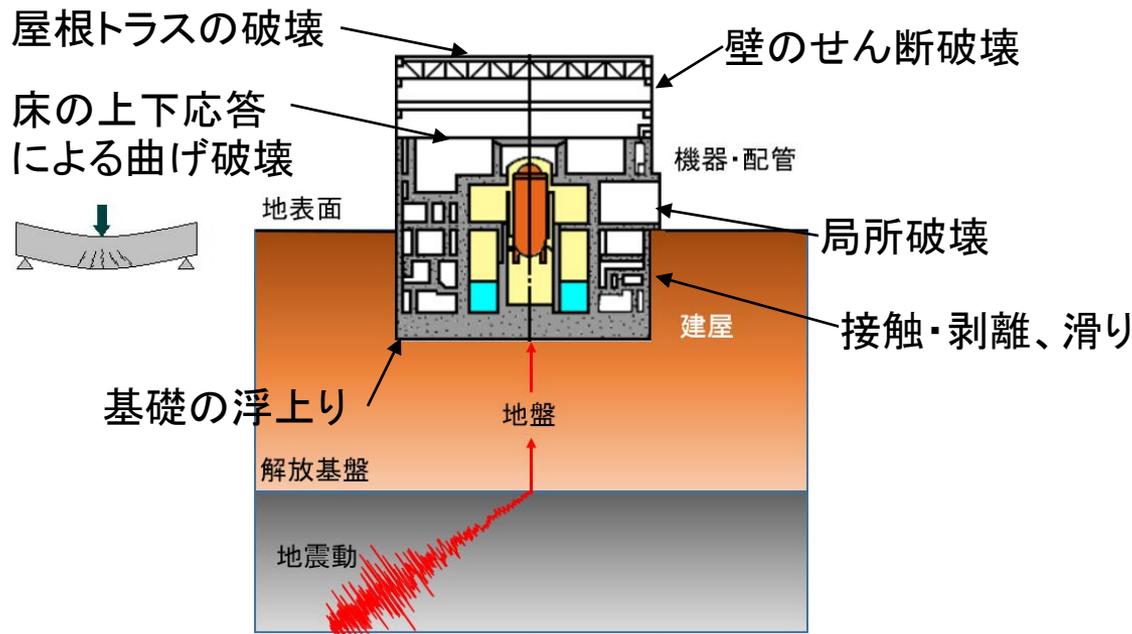
JAEA 2) 現実的耐力: より現実に近い損傷モードの同定  
地震時の建屋の損傷モード

フラジリティ評価では様々な建屋の損傷モードの考慮が必要

地震時に建屋及び周辺地盤において考えられる損傷モード

- 建屋: 壁のせん断破壊、曲げ破壊、局所破壊、鉄筋の降伏、屋根トラスの破壊、床の上下応答による曲げ破壊等
- 地盤と建屋の境界: 接触・剥離、滑り、基礎の浮上り等

質点系モデルでは上記のような詳細挙動が模擬できない

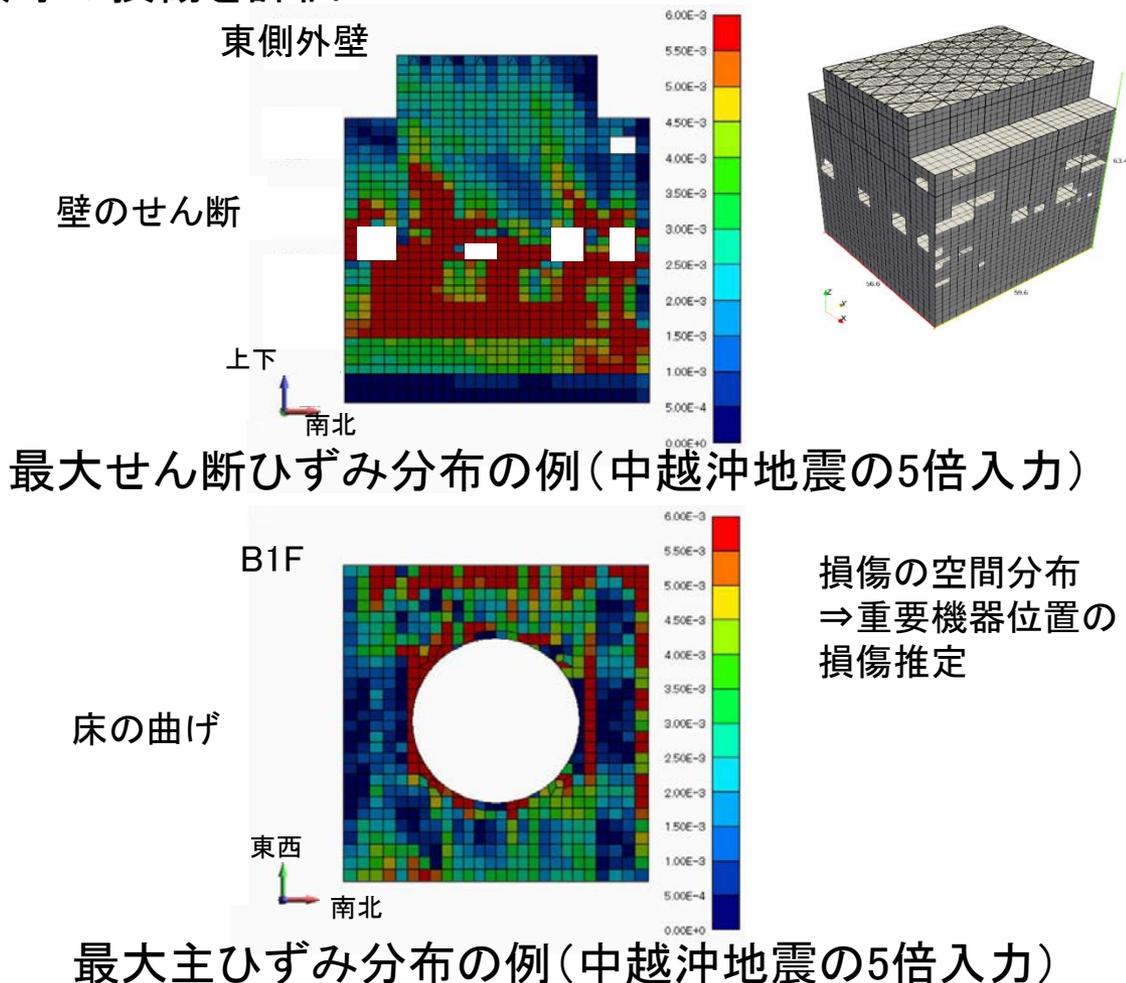
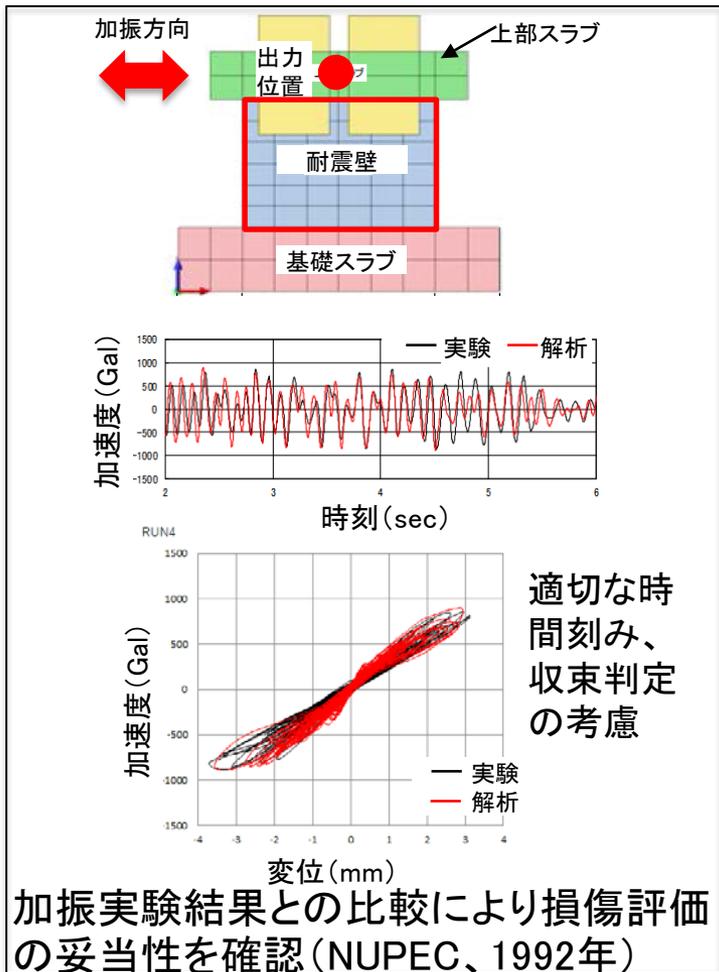


質点系モデルの  
建屋損傷モード例

# 2) 現実的耐力: より現実に近い損傷モードの同定

## 事例1: 建屋の損傷推定 (コンクリート非線形)

実験との比較により解析手法の妥当性を確認し、3次元詳細モデルにより建屋の壁や床等のせん断破壊、曲げ破壊等の損傷を評価



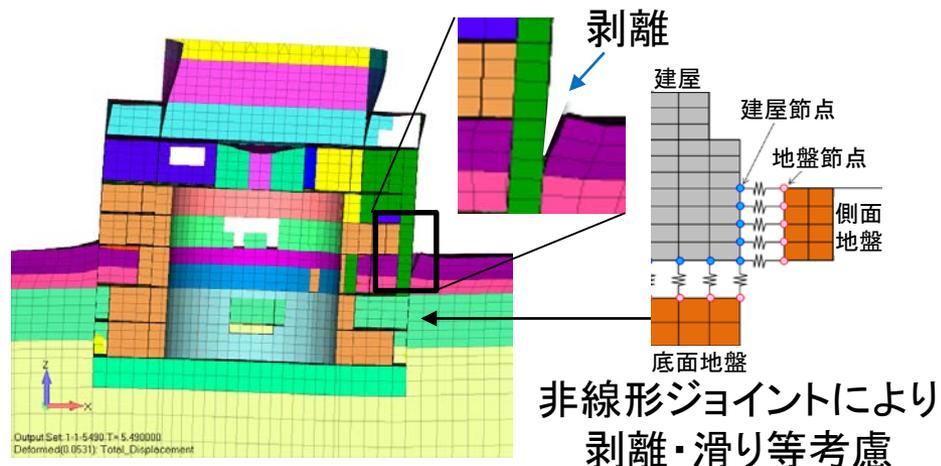
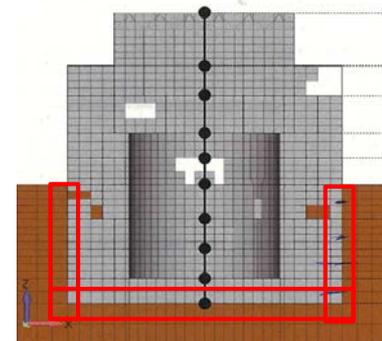
局部損傷の分析等により建屋の損傷モードを同定し、損傷過程や破損状態の推定に成功

## 事例2: 建屋の損傷推定(地盤-建屋の非線形相互作用)

建屋周辺地盤が沈下する等の地震被害の発生

- 3次元詳細モデルを用いて、地盤-建屋の非線形相互作用を考慮した剥離や滑り等の詳細挙動を分析

建屋変形よりも表層の地盤変形が大きい  
ため、建屋が傾いた側で剥離発生。



地盤と建屋の境界における剥離の例

中越沖地震における周辺地盤沈下被害例  
(東京電力、2007年)

地盤-建屋の3次元的な非線形相互作用を考慮することで、地盤と建屋の境界の損傷モードを同定し、剥離や滑り等の局部損傷を再現

3次元挙動を考慮することで建屋損傷の空間分布や損傷過程の評価を実現。これらの成果は地震リスク評価に係る技術的知見として活用可能

- 
- 
- 1) 現実的応答：より現実に近い地震時挙動の把握
  - 2) 現実的耐力：より現実に近い損傷モードの同定
  - 3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価

# フラジリティ評価手法の高度化に向けて

## 3次元挙動を考慮したフラジリティ評価手法の考え方

### 建屋の注目部位のフラジリティ評価

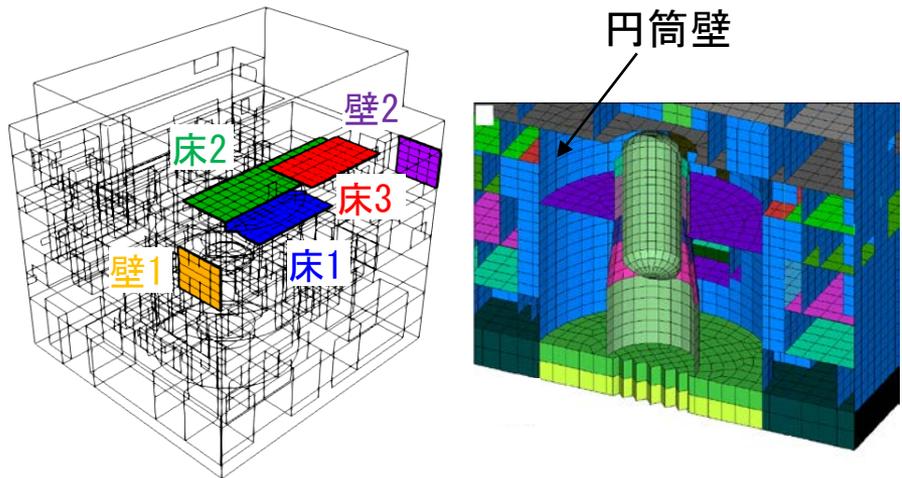
機器への影響度等により建屋の注目部位を選定

### 損傷モード

壁：せん断破壊、床：曲げ破壊

### 損傷指標

最大せん断ひずみ：5360  $\mu$  (AESJ, 2015)



注目部位の例

### 建屋各層のフラジリティ評価

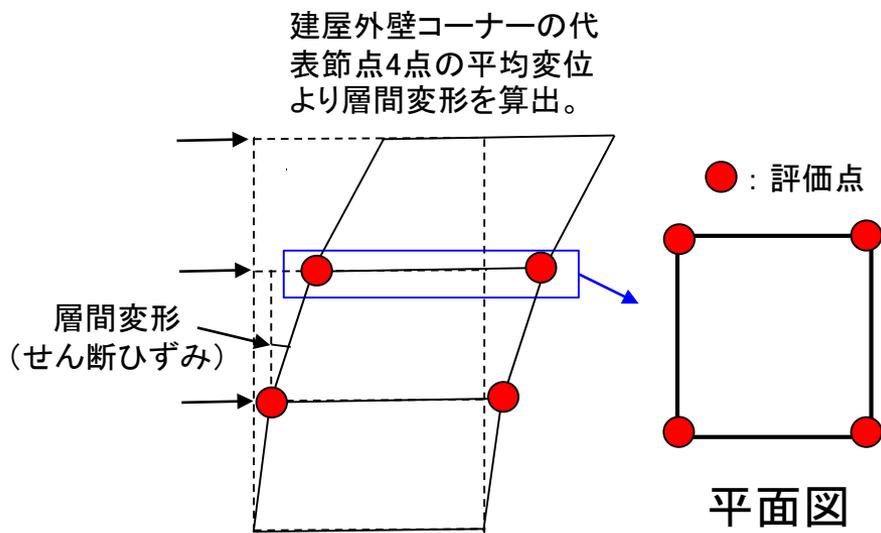
各層の層間変形による建屋のフラジリティを検討

### 損傷モード

層のせん断破壊

### 損傷指標

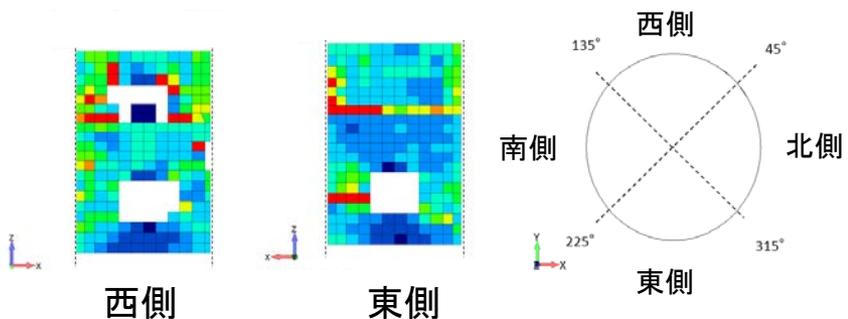
同左



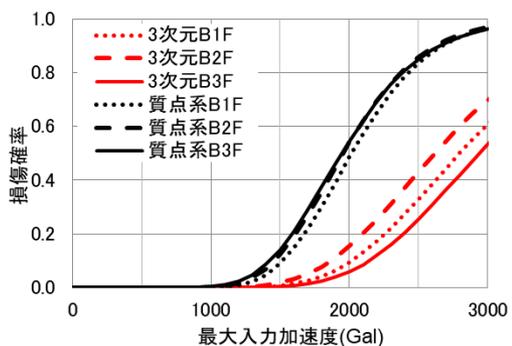
層間変形の概略図

3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価  
**フラジリティ評価の事例**

**建屋の注目部位のフラジリティ評価**  
 重要機器等の設置位置などのフラジリティ算定

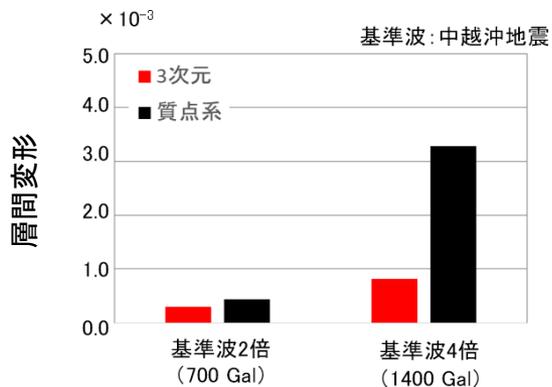


最大せん断ひずみ分布の例(円筒壁)

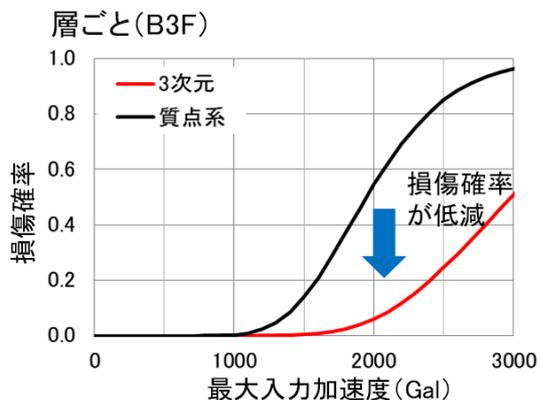


フラジリティ評価の例(円筒壁)

**建屋各層のフラジリティ評価**  
 各層の層間変形によりフラジリティ算定



最大層間変形の例(B3F)



建屋各層のフラジリティ評価の例(B3F)

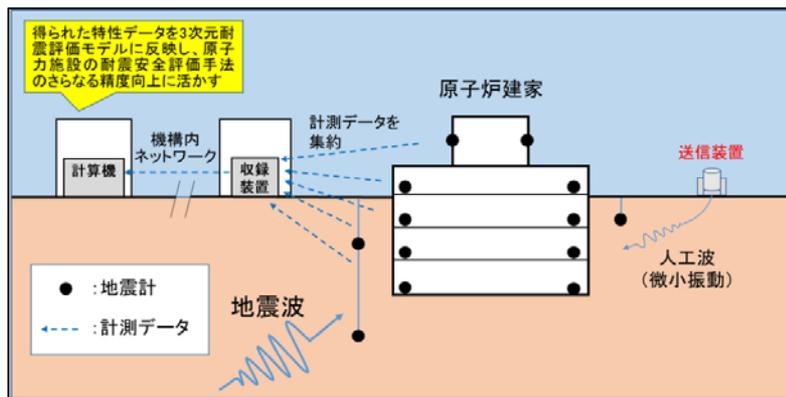
# 大規模観測システムを活用した耐震評価手法の高精度化

原子力施設の耐震安全性をさらに高い精度で評価することを目的に、原子力規制庁との共同研究の一環として、機構施設である高温工学試験研究炉 (HTTR) を対象に、地盤や建屋の床だけでなく壁にも地震計を設置し、自然地震と人工波の両方を観測可能な大規模観測システムを世界で初めて整備。(プレス発表、2020)。

- 常設地震計と任意位置を計測可能なモバイル型地震計を組み合わせることで、建屋3次元詳細モデルの妥当性確認に必要な局所の応答データを取得可能。
- 3次元詳細モデルのさらなる精緻化及び耐震評価や原子力安全にかかわる人材育成への貢献が期待。



HTTR



大規模観測システムの概要



送信装置の振動発生機

# まとめ

## 1) 現実的応答:より現実に近い地震時挙動の把握

建屋3次元詳細モデルを用いた地震応答解析に係る標準的解析要領を整備。耐震安全性評価に係る技術的知見として規制庁のNRA技術報告書に反映される見込み。

## 2) 現実的耐力:より現実に近い損傷モードの同定

3次元挙動を考慮することで建屋損傷の空間分布や損傷過程の評価を実現。地震リスク評価に係る技術的知見として活用可能。

## 3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価

建屋の3次元挙動を考慮した現実的かつ合理的なフラジリティ評価手法を整備。

## 今後の取り組み

- 地盤・建屋・機器・配管の総合的な安全性向上に係る3次元詳細解析手法の整備や標準化
- 大規模観測システムを活用した標準的解析要領の適用性確認
- リスク情報活用に向けた地震PRAの手法の高度化、等

---

---

ご静聴ありがとうございました。