

# 原子力発電所の機器等の 地震安全に関する技術課題と 研究・開発ロードマップの検討

高木 敏行(東北大学) 岡本 孝司(東京大学)

## 背景

日本機械学会 動力エネルギーシステム部門では、柏崎刈羽発電所の被害と現状について、公開されている情報を元に、技術的な立場から中立的な評価を行うことを目的として「中越沖地震の柏崎原子力発電所の影響評価研究分科会」を設置

日本原子力学会 原子力発電所の地震に対する「原子力安全」の確保に関してロードマップを作成し、「原子力安全」の観点よりその見解を社会に発信するため、「原子力発電所地震安全特別専門委員会」を設置

ワーキンググループ 研究分科会と特別専門委員会の下に機器等の耐震設計上の技術課題について抽出、検討するために構造WGを設置。具体的には、原子力発電所の機器等の地震安全に関する課題を検討評価し、研究・開発のロードマップの原案を検討

## 活動の状況

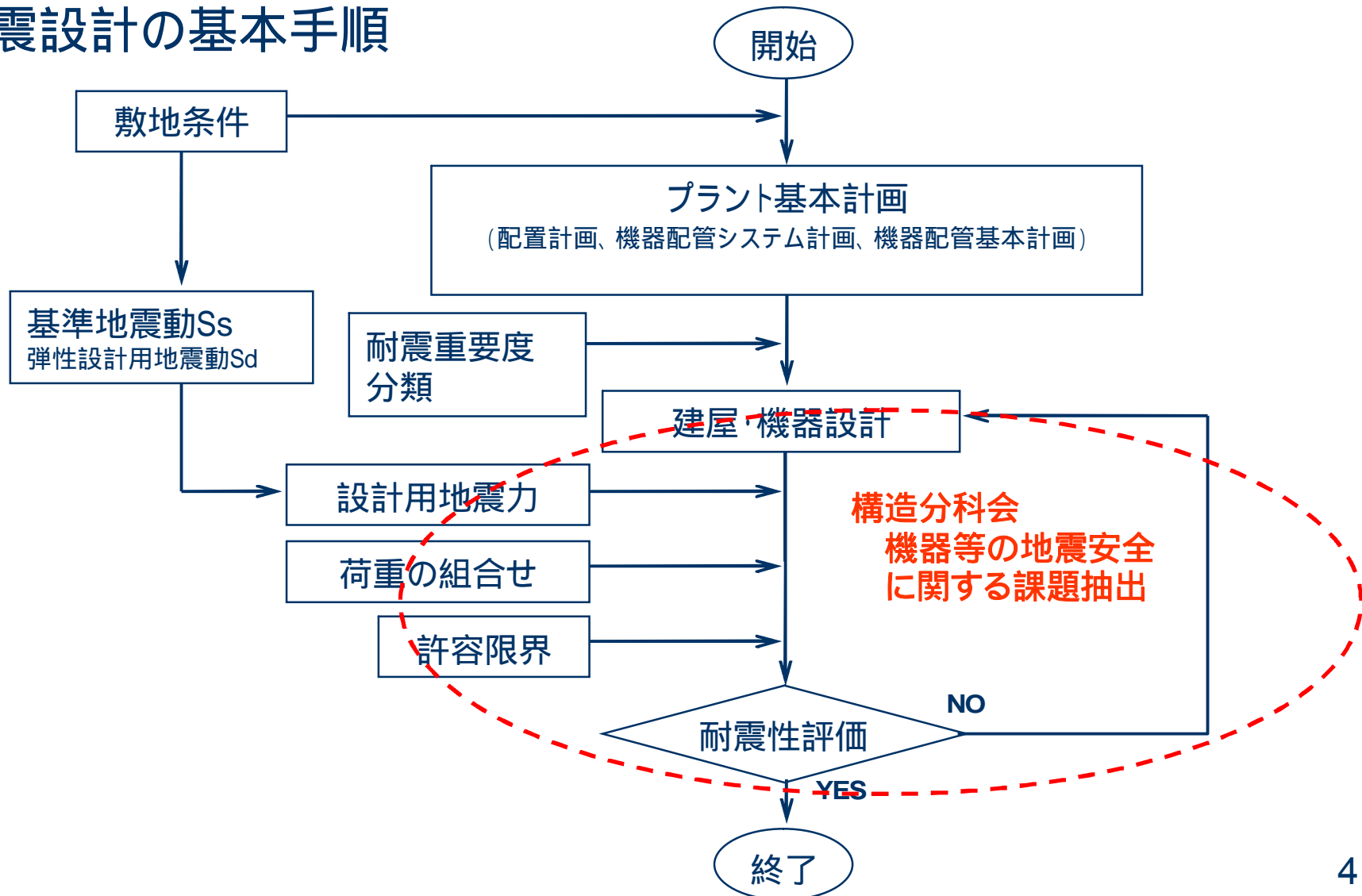
- 学識経験者, (独立行政法人)原子力安全基盤機構, (有限責任中間法人)日本原子力技術協会, 電気事業者, 企業にて委員を構成
- 課題の選定及びロードマップ案を作成し, また, 他組織の研究計画との整合を検討

機器等の地震安全に関する課題  
安全裕度、影響の指標化  
健全性評価、設計手法の高度化

- これまで4回の会合をもち, そのなかで課題の抽出及び各課題に対するロードマップ案作成や内容を検討
  - ・ 本年5月を目途に一旦検討内容を取り纏める

# 検討範囲

## 耐震設計の基本手順



# 課題と検討項目の検討

国、学協会等で進められる研究もあるが、今後必要となる機器等の地震安全に関する技術課題について抽出し、研究・開発のロードマップを検討

## 課題分類

・安全裕度(設計裕度)の把握

・健全性評価手法・検査手法

・耐震設計の高度化

・影響の指標化

## 具体的検討項目

1. 「安全裕度の定量化」
2. 「減衰定数」
3. 「動的ひずみ」
4. 「健全性評価基準」
5. 「点検項目策定と点検方法の高度化」
6. 「弾塑性解析手法の適用」
7. 「動的応答評価モデル」
8. 「プラントデータ採取」
9. 「免震技術の適用」
10. 「地震動指標の検討」



11. 規格基準への反映

# 1. 安全裕度の定量化

## 目 的

・これまでの国、学協会等の検討を参考に、地震時に設備がもつ実際の余裕がどれだけあるか、耐震設計手法に内在する裕度や荷重等の因子のばらつきを考慮し把握する。

・これをもとに各種基準等の検討も踏まえ、構造基準の高度化を目指す。

## 実施項目

(1)耐震設計手法の内在する裕度の定量的把握(短～中期)

(2)信頼性評価法を活用した構造基準の高度化検討

a.「荷重・耐力係数設計法」概念の導入検討(中～長期)

b.「システム化規格」概念の導入検討(長期)

機械学会を中心に、高圧力協会、溶接協会、火力原子力発電技術協会等の検討成果も適宜活用しながら、今後の日本電気協会のJEAC反映事項への取り組み方針や国の関連動向を踏まえつつ実施。

## 2. 減衰定数

### 目的

機器種別、地震力に応じた設計用減衰定数の設定  
現実に即した応答評価



現行の機器・配管系の設計用減衰定数は、振動試験データの下限值に基づき保守的に設定  
米国Regulatory Guide 1.61では、安全停止地震SSE (Safe Shutdown Earthquake) の減衰定数は運転規準地震OBE (Operating Basis Earthquake) に比べ大きく、地震力に応じた値としている。  
合理的な耐震設計、耐震裕度の適切な評価のため、より現実的な設計用減衰定数の設定が必要

- ・機器種別に応じた減衰定数の設定
- ・地震入力のおおきさに応じた減衰定数の設定

### 実施項目

設計用減衰定数の設定法の調査  
対象設備の選定  
既往振動試験結果による減衰定数の評価  
新規振動試験に基づく減衰定数の評価  
基準化の検討



### 成果の適用

**JEAC4601改訂**

- ・耐震設計への適用
- ・耐震バックチェック等への適用

地震PSA標準改訂\*

- ・設備のフラジリティ評価への適用

\*: 日本原子力学会標準 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全性評価実施基準：2007 7

# 3. 材料強度に及ぼす地震時動的ひずみの影響

## 目的

原子力機器・構造物に対する地震による動的ひずみの影響は小さいと想定されるが、その影響を定量的に評価し、取り纏めた事例は少ない。  
本研究では、その影響を調査し、規格・基準へ反映することを目的とする。

## 実施項目

- (1) 原子力機器・構造物で地震により発生し得るひずみ速度の調査(短期)
- (2) 材料の機械的性質に及ぼす地震時ひずみ速度の影響度の評価(中期)

## 参考 一般建築鉄骨構造物

- ・地震被害の多くは脆性破壊
- ・動的繰返し変形が主要な原因
- ・ひずみが高速かつその集中部に破壊が発生
- ・脆性破壊評価法が規格化\*1

## 原子力機器・構造物

- ・延性材料を使用し、脆性破壊は生じ難い
- ・延性材料の動的繰返し大変形挙動に関する系統的研究少ない
- ・ひずみ集中を回避した設計
- ・JSME 設計・建設規格\*2

\*1: (社) 溶接協会「動的繰返し大変形を受ける溶接構造物の脆性破壊性能評価方法」WES 2808:2003

\*2: 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2007年追補版)



## 4. 地震の影響を受けた機器の健全性評価基準(1 / 2)

### 目的

- ・設備点検の結果と解析結果は、相互に関連づけて解析の結果に応じて重点的な点検を実施する等、解析及び点検の目的、評価を総合的に実施
- ・損傷モードに応じた許容レベル(損傷防止レベル)を検討し、点検の目的、評価を整理して、体系的な評価が可能となるように健全性評価基準を策定

### 実施項目

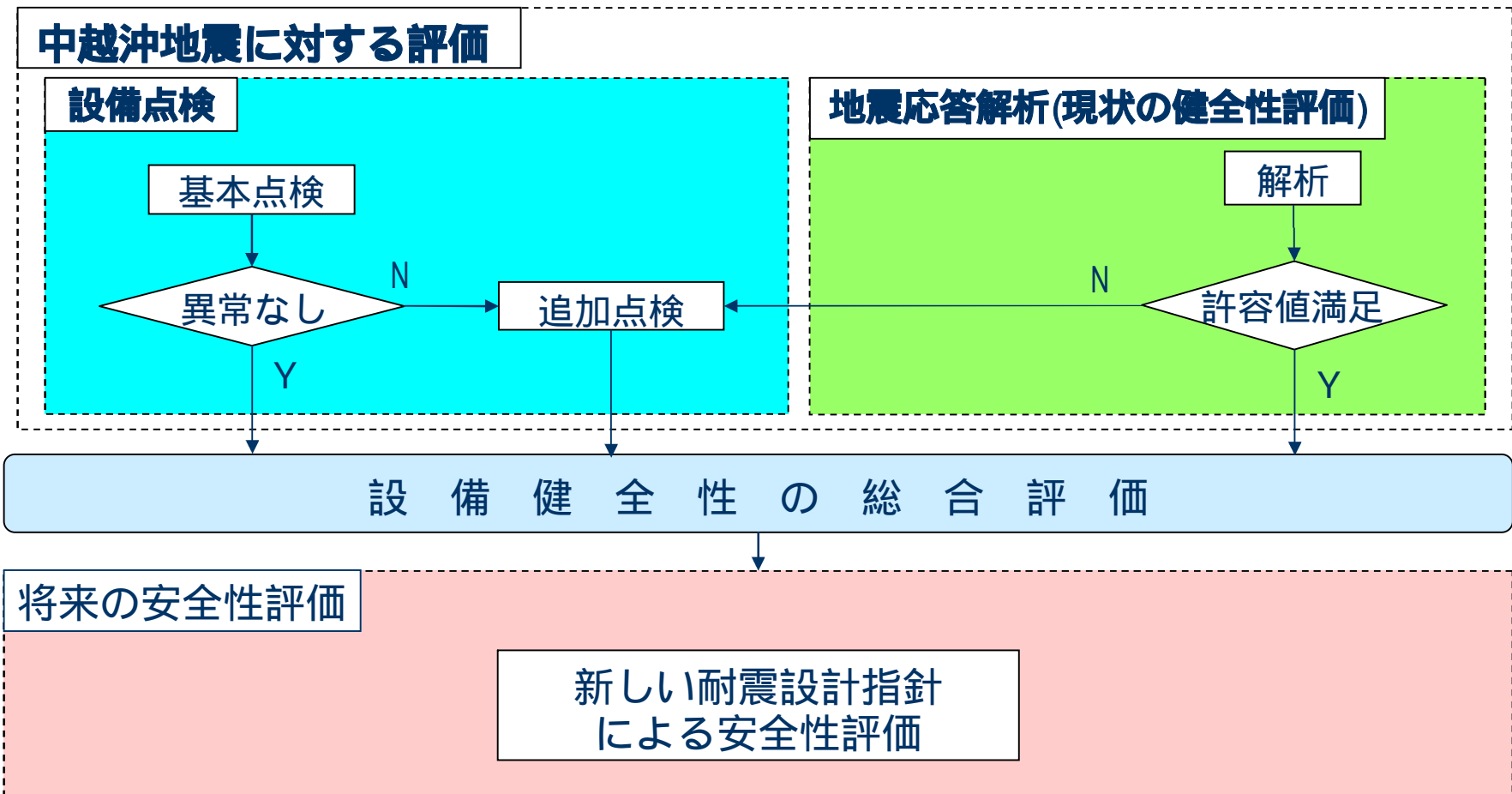
- (1) 評価基準の基本的な考え方(短期)
- (2) 評価基準の策定(短期)
- (3) 上記のためのバックデータ(材料特性、疲労強度・・・)(短期～中期)
- (4) 評価手法の高度化に伴う基準の改訂(継続的)

### NISA委員会、JANTI委員会の活動成果を適宜反映

- (1)(2)は現在進められている国、学協会、民間での検討成果を活用
- (1)(2)から抽出された課題解決に向けて(3)を実施
- (4)は解析手法等の関連研究動向を踏まえて実施

## 4. 地震の影響を受けた機器の健全性評価基準(2 / 2)

設備点検の結果と解析結果はそれぞれ独立に捉えるのではなく、相互に関連づけて解析の結果に応じて重点的な点検を実施する等、解析及び点検の目的、評価を総合的に実施する



## 5. 点検項目の策定と点検方法の高度化

### 目 的

- ・地震後の設備点検の基本的な点検項目を整理し、点検項目に応じた高精度かつ効率的な点検方法を開発
- ・損傷モードに応じた点検項目を策定し、適切な点検方法で実施

### 実施項目

- (1)点検の基本的な考え方(点検と評価の関係)(短期)
  - (2)点検方法への要求事項の整理(短期)
  - (3)点検方法の高度化に向けた検討及び開発(基礎データ採取)  
(短期～中期)
  - (4)実プラント適用化検討(中期)  
NISA委員会、JANTI委員会の活動成果を適宜反映
- (1)(2)は現在進められている国、学協会、民間での検討成果を活用  
(3)(4)は検査手法の基礎研究動向を踏まえて実プラント適用に向け実施

### 参 考(評価の観点)

- ・塑性ひずみの検出方法 「硬さ」、「音速比法」など

# 6. 弾塑性解析手法の適用

目的: 弾塑性解析による設計裕度評価及び耐震評価手法の確立

## 実施項目(短期)

弾塑性解析による設計裕度検証  
 EPD規格の裕度評価(現行規格との比較)  
 地震荷重の合理的評価手法検討  
 弾塑性解析による耐震手法の規格案検討

## 実施項目(中期)

動的応答解析の取り込み  
 (3D動的応答FEM解析 + 耐震評価規格による構造強度評価)

## 参考

現行許認可設計規格  
 (JSME設計・建設規格)

- ・弾性解析(簡易弾塑性)
- ・シェル・ビーム理論
- ・応力分類による評価
- ・対象設備広範囲

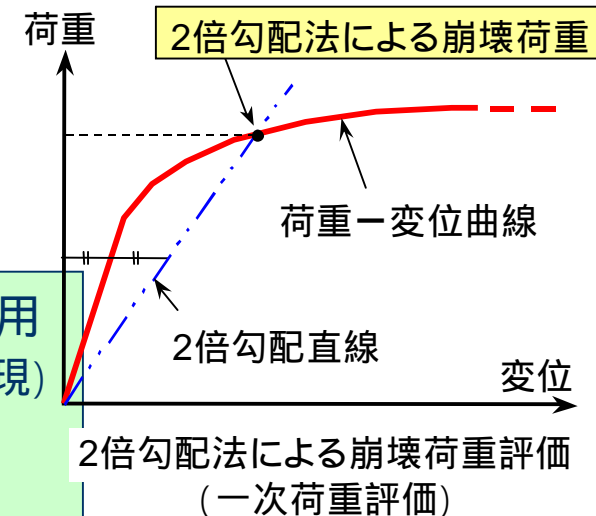
代替化  
 (設計合理化)

JSME事例規格  
 (EPD規格)

- ・弾塑性解析の部分的採用
- ・有限要素法(複雑形状表現)
- ・応力分類不要
- ・クラス1種容器を対象

## 成果の適用

- ・耐震バックチェック評価
- ・残余のリスク評価
- ・クラス1種容器以外の機器への適用展開



# 7. 動的応答評価法の高度化

## 目的

合理的な地震応答解析モデルの策定  
現実に即した応答評価

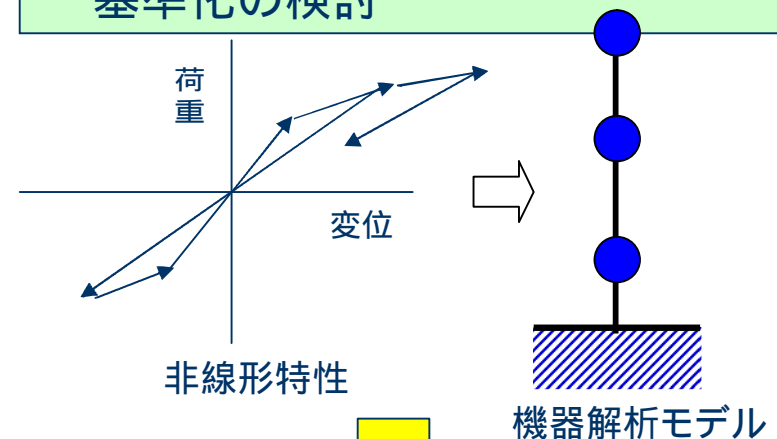


現状の耐震設計における地震応答解析  
・建屋：耐震壁の復元力特性を考慮  
・機器設備：線形解析  
機器設備の地震応答解析には保守性が含まれる  
合理的な耐震設計、耐震裕度の適切な評価のため、非線形応答解析等のより現実的な応答評価法の構築が必要

\*:日本原子力学会標準 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全性評価実施基準：2007

## 実施項目

対象選定、解析モデル、手法の検討  
試験の実施(又は既往試験の評価)  
非線形応答評価モデルの策定  
非線形応答評価手法の構築  
基準化の検討



## 成果の適用

JEAC4601改訂  
・耐震設計への適用  
・耐震バックチェックへの適用  
地震PSA標準改訂\*  
・設備の脆弱性評価への適用

# 8.地震時の機器応答データ取得

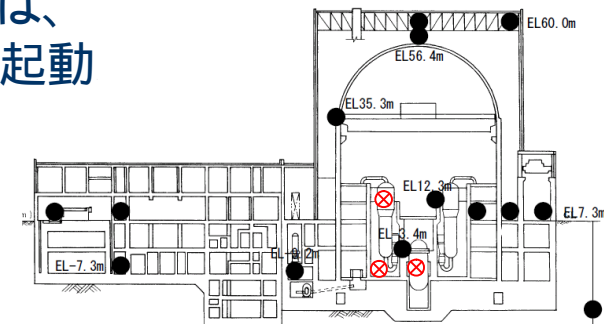
## 1. 目的

地震時に受けた機器等の応答データが直接取得出来れば、設計時点での応答と直接比較することで、早期プラント起動が可能となること及び耐震設計の高度化が期待される。

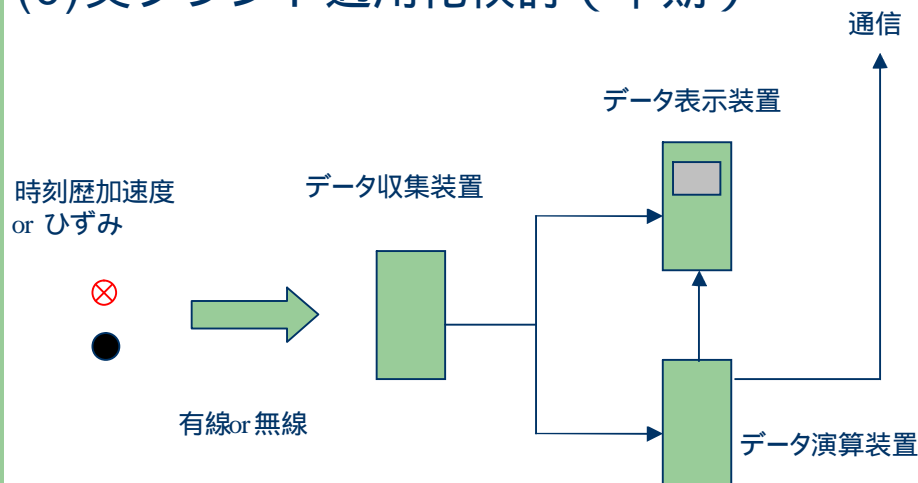
機器応答データを計測するシステムの構築を検討する

## 2. 実施項目

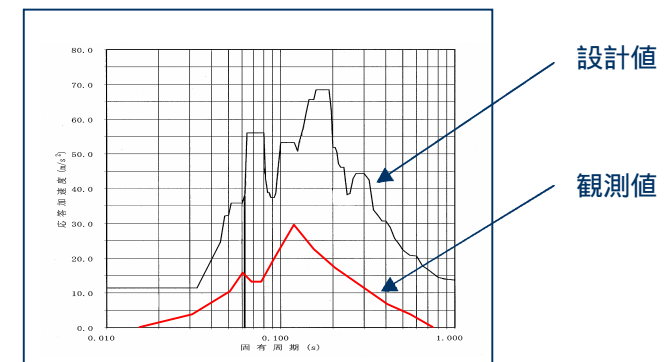
- (1) 機器応答データ取得の基本的な考え方 短期
- (2) データ取得の要求事項整理 短期
- (3) 具体的部位、測定機器・システムの構築 短期～中期
- (4) データの活用、評価手法等 短期～中期
- (5) 実プラント適用化検討（中期）



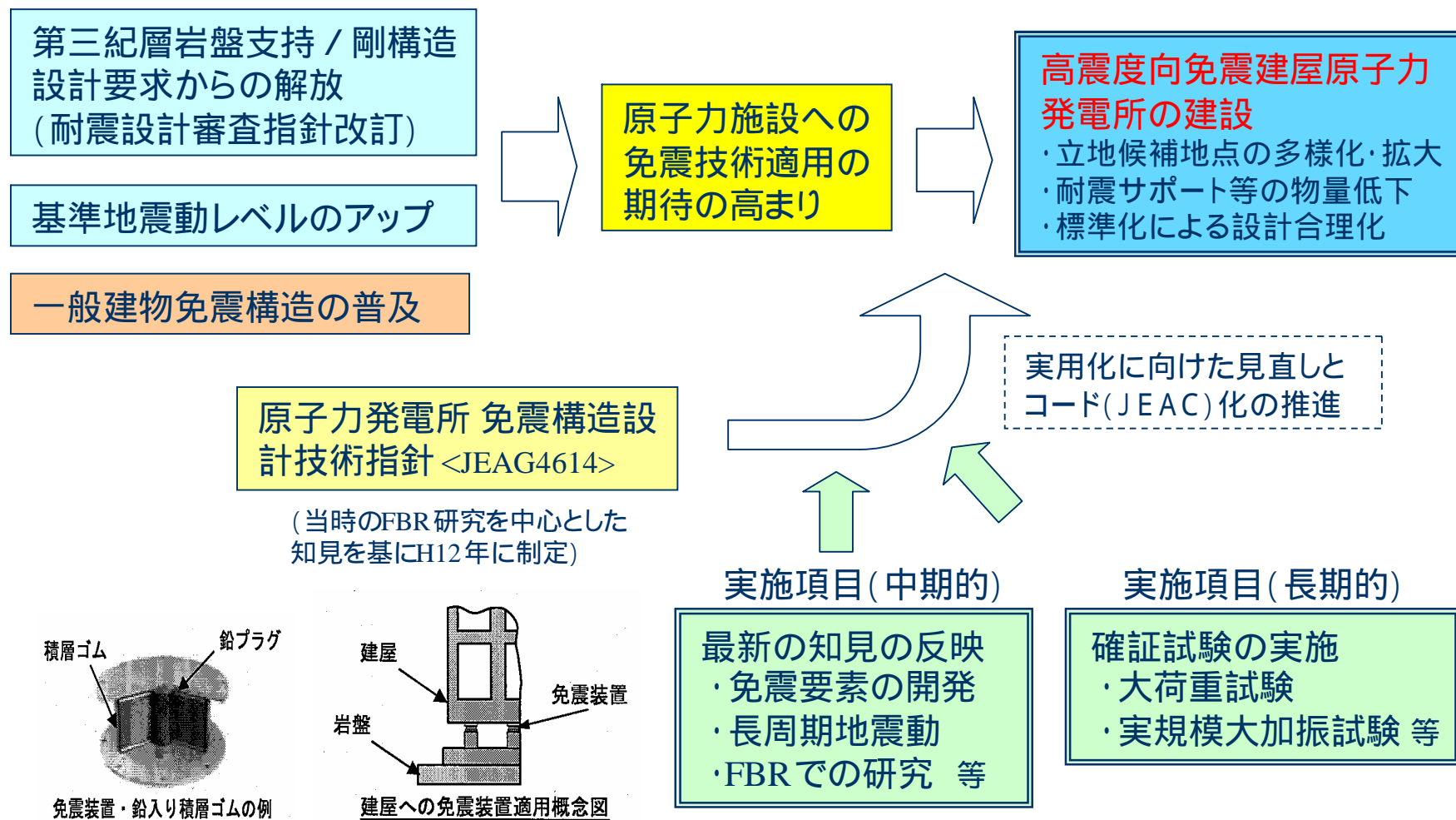
- 建物、地盤加速度計
- ⊗ 機器加速度計(加速度計orひずみ計)



## 評価例



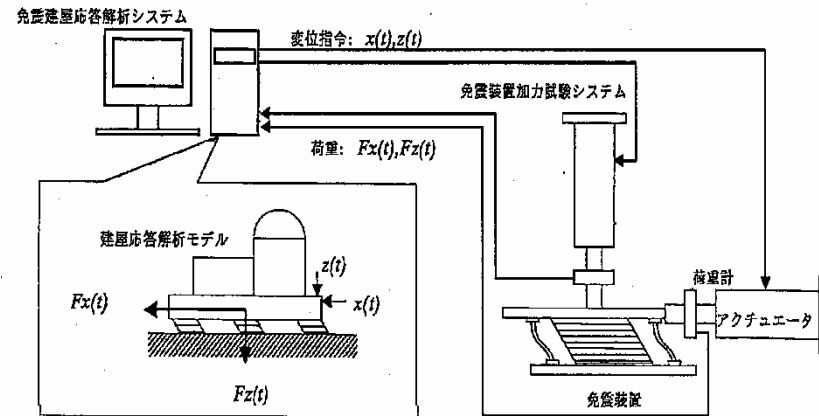
# 9. 建屋免震技術の原子炉施設への適用 (1 / 2)



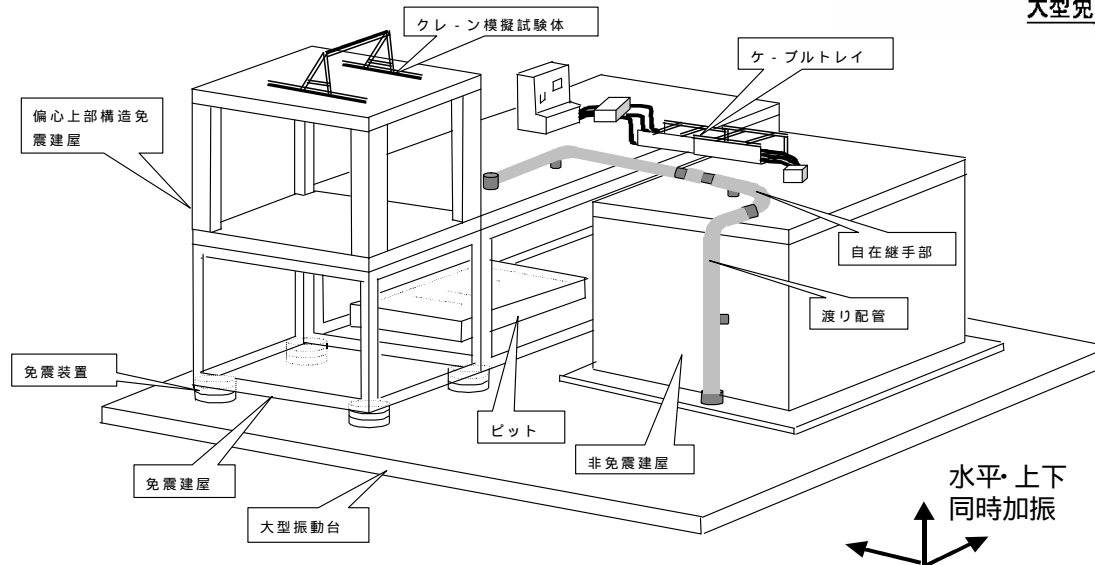
# 9. 建屋免震技術の原子炉施設への適用 (2 / 2)

## 各種確証試験の実施イメージ

大容量免震装置の限界  
耐力試験の例  
(1000ト、超級積層ゴム)



大型免震装置の実証試験概念図 (動的模擬試験)



免震構造建屋多方向入力試験の例

## 実機規模建屋振動試験の例

<免震特有の機器設計法も検証>

- ・非免震建屋との渡り配管 / トレイ類
- ・長周期設備 (クレーン類 / プールのスロッシング) 等



# 10. 地震動指標の検討

## 目的

サイト発生地震動記録には一過性の大きな加速度が記録されることがよくある

現行の設計法は地震慣性力に対する設計が基本  
 $F = M \times$

実際の地震や耐震試験においては、地震慣性力により破損する事例は少ない

設計入力加速度を僅かでも超えると直ちに大きな問題。

国民の不安

米国における地震対応指針では、CAV指標を対応判断に活用

破壊を引起す応答変位や運動エネルギーを代表する速度成分に着目した新たな『地震動指標』の検討が望まれる

実機への活用

・地震直後の迅速な安全評価  
・健全性点検レベルの判断基準

## 実施項目(方向性)

- ・原子力施設の安全性に適切な指標候補の調査(CAV,速度スペクトル等) 短期
- ・指標を用いた過去の被害や実験結果の整理(必要に応じて試験の実施) 中期

成果の適用

## まとめ

1. 国、学協会、民間での地震安全に関わる構造分野での検討状況を参考に議論を実施。(活動継続中)
2. 現在の活動を今後の耐震設計のあり方(高度化)や地震後の健全性評価の標準化及び高度化に繋げていくために「安全裕度(設計裕度)の把握」、「健全性評価手法・検査手法」、「耐震設計の高度化」に関連する検討項目を課題として抽出した。  
また、社会的責務を果たしていくため「地震動指標の検討」については今後取り組んでいくべき課題と考える。
3. 今後、他の関連する分科会や研究会とも協調し検討を進めていく。