

2010年2月8日 原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ  
事業報告・募集説明会 プログラム

# 高経年配管系に対する耐震裕度の定量 評価に関する研究

【戦略的原子力共同研究プログラム】

実施年度：平成20年度～平成22年度

防災科学技術研究所

中村いずみ（研究代表者）

【連携機関】

横浜国立大学、（株）IHI

# 高経年配管系に対する耐震裕度の定量評価に関する研究

(実施期間：平成20年度～平成22年度)

## 目的

高経年化に伴い**減肉を生じた配管系**を対象とする。実験と解析により、設計基準における想定を超える地震動に対する配管系の裕度評価手法の提案、地震後の健全性評価、減肉を有する配管系の耐震裕度の確認と許容減肉についての検討を行い、減肉部を有する配管系の**耐震裕度を定量的に評価**することを目的とする。

## 研究の構成

### 振動台を用いた配管系に対する加振試験

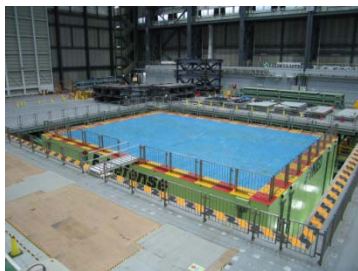
#### 中規模振動台を用いた実験 (H20年度)

比較的単純・小規模な配管系試験体を用い、三次元加振下での応答挙動、試験手法や計測手法の妥当性等を調査

#### E-ディフェンスを用いた実証実験

(H21年度試験体製作、H22年度震動台実験)

実際の原子力発電所で多用される口径の配管を用い、減肉を有する配管系の耐震信頼性を検証



各項目の検討内容を相互に反映

### 数値解析による耐震信頼性評価の検討

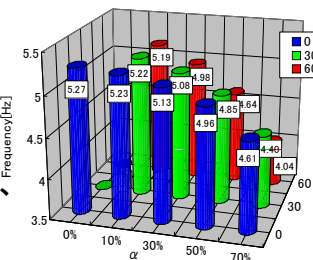
#### 実験の事前／事後解析、パラメトリック解析 (H20年度～H22年度)

配管系の全体的な応答を評価する非線形時刻歴応答解析と局所損傷を評価する静的な弾塑性解析とを組み合わせた配管の損傷評価

### 耐震裕度評価手法の構築と検証

#### 手法構築および実験・解析結果との比較検証 (H20年度～H22年度)

耐震裕度評価における弾塑性応答や減肉の影響の考慮方法を整理、実験結果・解析結果との対比による妥当性の検証、解析結果に基づく裕度に対する減肉の影響度評価



## 期待される成果

- 配管系の耐震裕度の定量評価法の提案
- 実験データの蓄積と解析モデルの信頼性向上
- 地震荷重を考慮した減肉配管の許容基準の整備に本研究の成果を活用可能

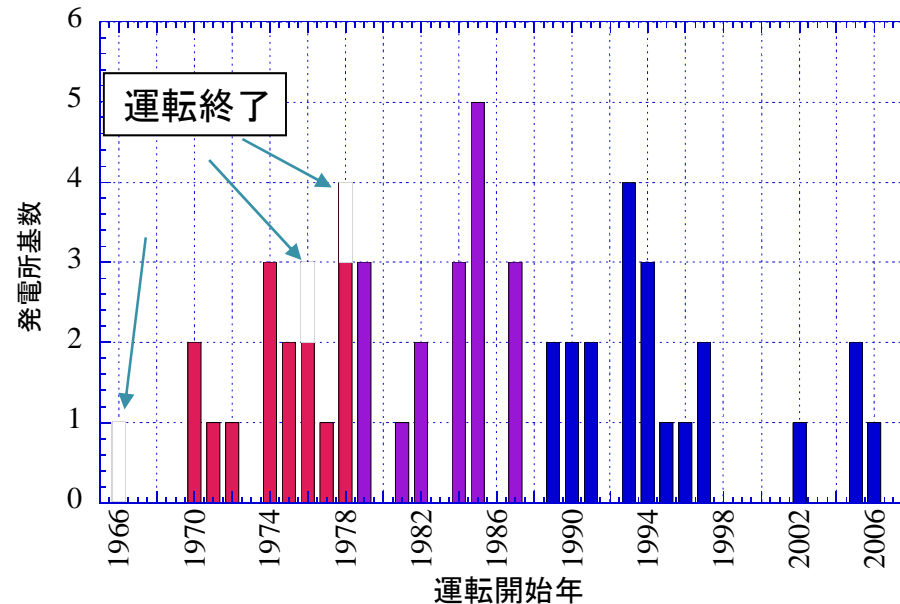
## 本研究の背景その1

### —地震に対しての安全性（耐震安全性）はどうか？

- \* 本研究では、原子力発電施設における主要な構成要素として使用されている配管系を対象として研究を進める。
- 日本は地震国であり、施設の耐震安全性の確保は重要な条件。
- 近年は地震観測機器の向上などに伴い、設計時に想定した地震動を超えるレベルの地震動が記録される例が出てきている。
  - 2007年7月16日、新潟県中越沖地震 柏崎刈羽原子力発電所の記録波など(\*)。
- 設計時に想定したレベルを超えたらどうなるのか？
  - 設計では、多くの場合部材の変形を弾性域にとどめる弾性設計が適用されているが、弾塑性領域に入ってからどのような挙動をして終局状態に至るのか？
    - 定量的な耐震裕度の評価はほとんどされていない。また、終局状態についてのデータが少ない。
- 配管系の耐震信頼性向上のためには、設計時の想定を超えた入力地震動が作用した場合を想定し、弾塑性域の応答挙動や終局状態を把握する必要がある。

(\*) 東京電力、「柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析に関わる報告（第一報）」、2007年7月30日

## 本研究の背景その2 - 高経年化施設の耐震安全性は？



### 日本における商業用原子炉の運転開始年ごとの基数 (2009年1月末時点)

(なるほど！原子力AtoZ 日本の原子力発電 原子力発電の現状

[http://www.enecho.meti.go.jp/genshi-az/atom/jp\\_generate/backbone.html](http://www.enecho.meti.go.jp/genshi-az/atom/jp_generate/backbone.html) より作成)

- 2009年1月時点で、日本では53基の商業用原子炉が稼働
  - 全体の半数以上にあたる32基が運転開始から20年以上を、そのうち15基が30年以上を経過。
- 長期間使用された施設における高経年化の影響を適切に評価した上で継続使用が必要
- 日本の場合、高経年化プラントにおける耐震安全性確保が重要な問題のひとつ
  - 地震時にどのような挙動をするか？
  - 高経年化により耐震安全性にはどのような影響があるか？

# 本研究の目的

- **健全な配管系**の耐震裕度の定量評価の考え方を整理し、設計時の想定を超えた地震動を受けた場合の配管系の耐震裕度を明らかにする。
- 配管系の耐震裕度に対し、**減肉が存在した場合**の影響を把握し、配管系の耐震性に対する劣化部の影響を明らかにする。

配管減肉：高経年化対策上重要な6つの経年劣化事象のひとつ

\* 減肉のない配管を「健全配管」、減肉のある配管を「減肉配管」と呼ぶ

**実験**と**解析**を併用することにより、多様な条件が影響する減肉配管系の耐震裕度評価を効果的に検討する。

	長所	短所
振動実験	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 実現象が把握できる</li><li>・ 過程のデータを取得可能</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 時間と費用がかかる</li></ul>
数値解析	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 汎用性がある</li><li>・ 多種の条件に対する検討が比較的簡易に行える</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 未知の現象は再現できない</li><li>・ 実現象と対比して初めて信頼性が担保される</li></ul>



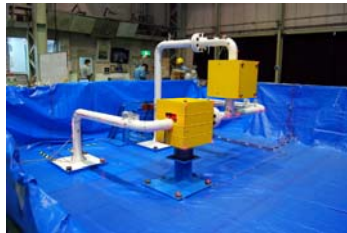
# 研究の構成

## 振動台(\*)を用いた配管系に対する加振試験

\* 振動台：  
構造物等の模型に対し振動を与え、構造物の動的な挙動を調査、検証、実証する装置

### 中規模振動台を用いた実験 (H20年度)

比較的単純・小規模な配管系試験体を用い、三次元加振下での応答挙動、試験手法や計測手法の妥当性等を調査



### E-ディフェンス(\*\*)を用いた実証実験 (H21年度試験体製作、H22年度震動台実験)

実際の原子力発電所で多用される口径の配管を用い、減肉を有する配管系の耐震信頼性を検証

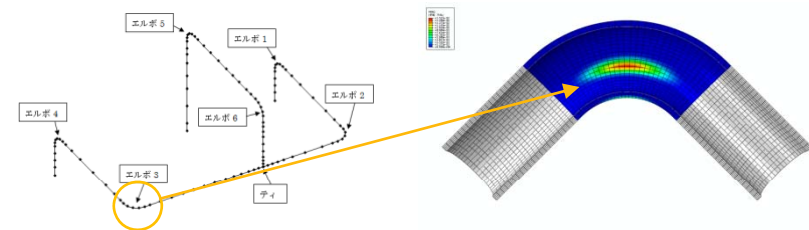


\*\* E-ディフェンス：  
防災科学技術研究所が兵庫県三木市に有する世界最大の振動実験施設

## 数値解析による耐震信頼性評価の検討

### 実験の事前／事後解析、パラメトリック解析 (H20年度～H22年度)

配管系の全体的な応答を評価する非線形時刻歴応答解析と局所損傷を評価する静的な弾塑性解析とを組み合わせた配管の損傷評価



配管系の非線形時刻歴解析  
・全体的な地震応答を得る  
・損傷が生じると考えられる配管要素とその要素の変形を求める

配管要素の弾塑性解析  
・局所のひずみや変形を求める  
・損傷発生位置の予測と寿命評価を行う

## 耐震裕度評価手法の構築と検証

### 手法構築および実験・解析結果との比較検証 (H20年度～H22年度)

耐震裕度評価における弾塑性応答や減肉の影響の考慮方法を整理、実験結果・解析結果との対比による妥当性の検証、解析結果に基づく裕度に対する減肉の影響度評価

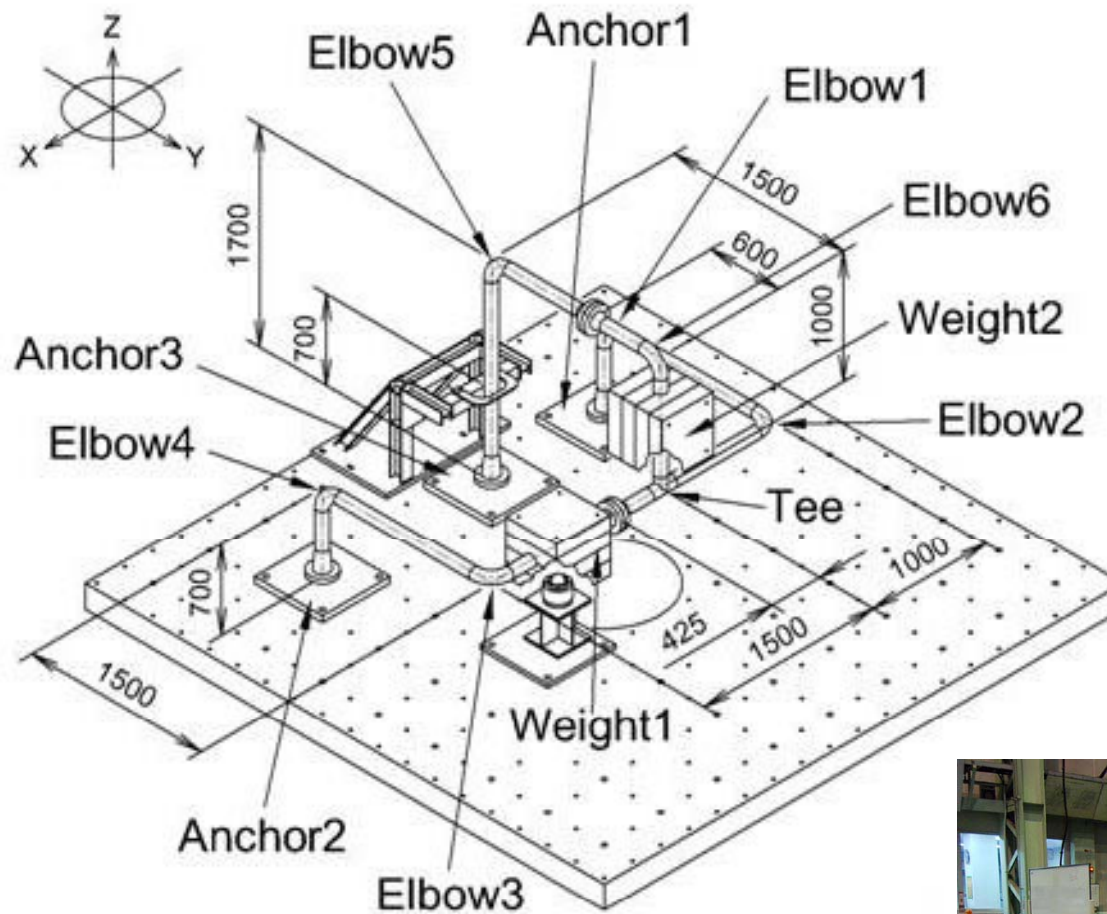


## 中規模振動台実験について（H20年度実施）

- 目的
  - 三次元加振下における健全配管と減肉配管の応答挙動を取得する。
  - H22年度に予定しているE-ディフェンス実験に向けての計測手法などの妥当性の確認
- 試験体の概要
  - エルボ6ヶ所とティ1ヶ所を有する立体配管系
  - 健全試験体（以下AP3-A31）：1体
  - 減肉試験体（以下AP3-C31）：1体
  - 使用配管：高温配管用炭素鋼鋼管 STPT370
  - 100ASch80（外径：114.3mm、肉厚：8.6mm）
  - 減肉部分はSGP配管で代用
    - （公称肉厚：4.5mm→約50%の減肉を模擬）
  - 内圧：常温水で3MPa

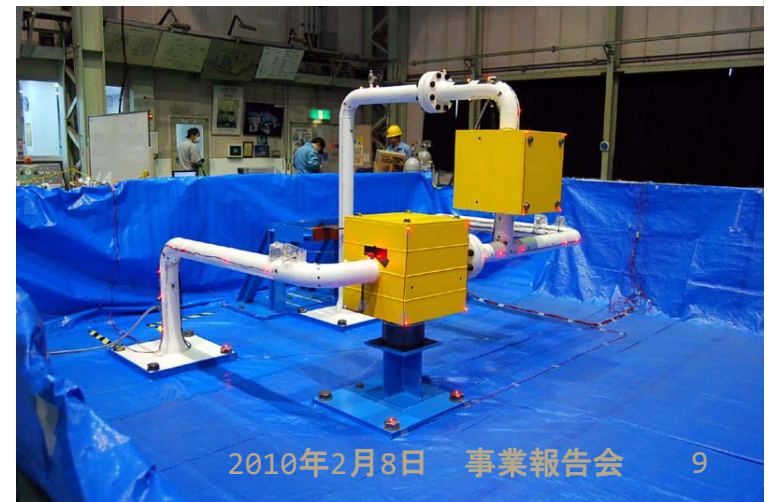


# 試験体の形状



減肉導入部：  
エルボ6を除く全ての  
エルボとティ

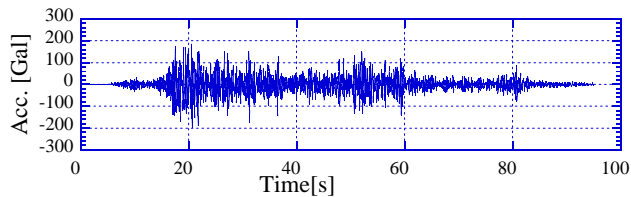
重錘質量：1ヶ所あたり795kg  
試験体の1次固有振動数（設計解析）  
AP3-A31（健全）：4.63Hz  
AP3-C31（減肉）：3.99Hz



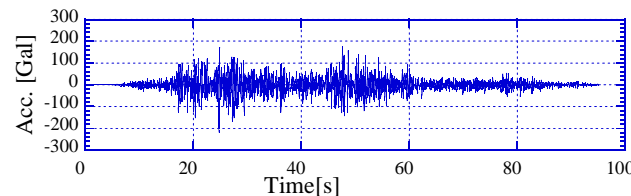
# 入力波形

- 1993年北海道南西沖地震における、JMA寿都の記録波\*に、使用する振動台の特性を考慮し、1.5Hzのハイパスフィルタをかけた波を使用（以下「地震波」と表す）

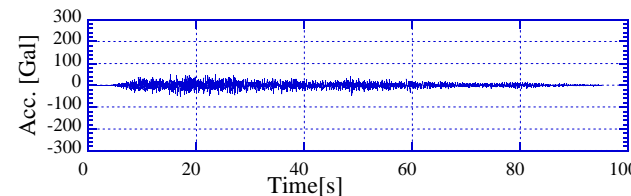
\* 気象庁提供のデータより。25秒～120秒の範囲を切り出して使用



(1) EW方向 (X軸)  
(加速度最大値 : 195Gal)



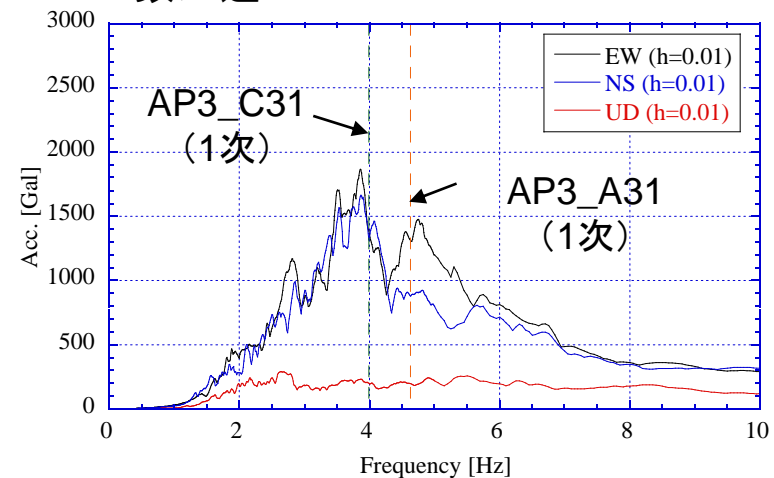
(2) NS方向 (Y軸)  
(加速度最大値 : 218Gal)



(3) UD方向 (Z軸)  
(加速度最大値 : 49Gal)

## 選定理由

- 配管損傷に影響の大きいと考えられる継続時間の長い地震動
- 地震波の卓越振動数と試験体固有振動数が近い

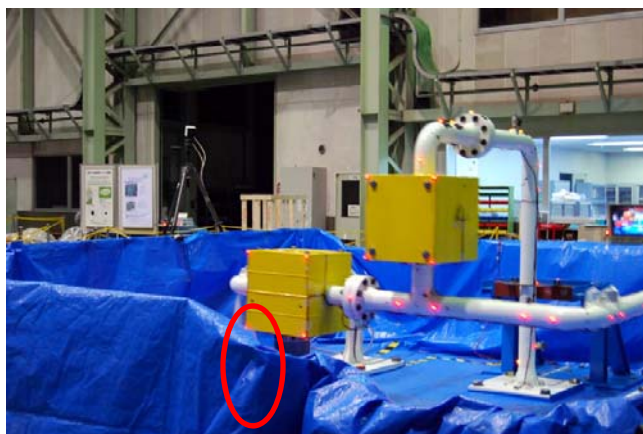


加速度応答スペクトル (h=0.01)

\* 図中の一次固有振動数は事前解析によるもの

## AP3-A31 加振結果

加振内容			備考
波形	方向	レベル	
ランダム波	X, Y, Z	0.5~2.0m/s <sup>2</sup>	各方向単軸で加振 1.0m/s <sup>2</sup> 、2.0m/s <sup>2</sup> はX方向のみ 1次固有振動数：6.17Hz (0.5m/s <sup>2</sup> )
地震波 (3軸)	X+Y+Z	40%~250%	3軸100%後に、100%1軸を実施
地震波 (1軸)	X	300%~750%	750%は2回加振
正弦波	X	9.8m/s <sup>2</sup>	振動数4.5Hz 定常状部40sec 2回目の加振途中でき裂貫通



き裂貫通時の状況 (エルボ3)



エルボ3下面の軸方向き裂

## AP3-C31 加振結果

加振内容			備考
波形	方向	レベル	
ランダム波	X, Y, Z	$0.5 \sim 1.5 \text{ m/s}^2$	各方向単軸で加振 $1.0 \text{ m/s}^2$ はX方向のみ 1次固有振動数：4.52Hz ( $0.5 \text{ m/s}^2$ )
地震波（3軸）	X+Y+Z	20%~250%	250%は2回加振
地震波（1軸）	X	750%	5回加振
正弦波	X	$9.8 \text{ m/s}^2$	振動数3.2Hz 定常状部40sec 2回目の加振途中でき裂貫通



き裂貫通時の状況（エルボ1）



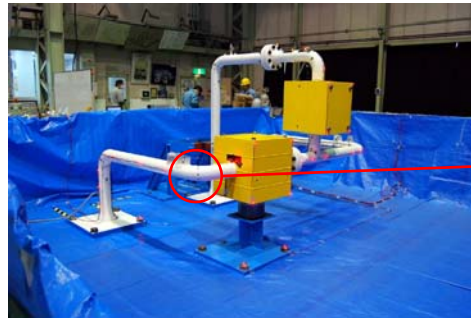
エルボ1の周方向き裂



ティ部のラチェット変形状況



# 現在の設計における耐震裕度の検討



- ・ 設計上の最大応力発生位置
- ・ 実験でのき裂貫通位置

- 加振試験条件に対応する設計上の応力レベルと累積疲労損傷度を設計手法に基づき計算（以下はAP3\_A31（健全試験体）を対象）
  - ・ 設計上は、応力として一次応力 $3S_m$ 、累積疲労損傷度1以下に制限
  - ・ 実験結果を設計手法に基づき評価すると、損傷時（配管のき裂貫通に伴う水の漏洩で定義）一次応力約 $21S_m$ 、累積疲労損傷度243となり、これらは設計手法に含まれる裕度と考えられる。

$S_m$ ：設計応力強さ。中規模振動台実験に使用した材料では125[MPa]（JSME設計・建設規格での規定値）

裕度要因	設計	実験
弾塑性応答	考慮せず	塑性変形の発生による応答低減効果
1回の地震における繰返し数	60回（BWRの場合）	20～40回（応答波形により変化）
疲労曲線	低サイクル領域で繰返し数に20倍の裕度を持たせた設計疲労曲線	材料試験に基づく最適疲労曲線

## これまでに得られている成果のまとめ

- 中規模振動台実験を実施し、健全配管系、減肉配管系の2種類についてそれぞれの振動応答特性と終局状態を調査した。
  - 中規模振動台実験から、E-ディフェンス実験での検討・準備項目などについて知見を得た。
- 中規模振動台実験の結果データを分析し、現行の耐震設計手法が有する裕度について評価を実施した。
- 配管系の弾塑性振動応答解析と、損傷が生じると予測される配管部分を対象とした要素解析を実施した。
  - 現在は解析結果と実験結果の対照を行い、解析モデルの調整、精度比較、パラメトリック解析を実施中。



## 今後の予定

- 振動台を用いた減肉配管系の耐震信頼性実証試験
  - H22年度前半にE-ディフェンス実験を実施
    - 時期は他の実験との調整によるため未確定
  - 実験結果の整理、評価
- 数値解析による減肉配管系の耐震信頼性評価の検討
  - E-ディフェンス実験の事前、事後解析と解析結果の整理、精度評価
- 耐震裕度評価手法の構築と検証
  - これまでに実施した実験および解析にもとづき耐震裕度評価の考え方をまとめ、現行の耐震設計に対する裕度を検証。
- 得られた知見の規格等への反映（H23以降？）

## この事業を始めての感想

- 「耐震」は重要であるが地味な分野。
  - 地道なデータの蓄積と考察、検証が必要。
- 「耐震」の中でも、建築構造物や土木構造物と比べて配管系は一般的には内容や必要性が認識されにくい。
- そのような状況で本事業の実施が可能となり、実験・解析とともに、中立的な立場から知見を蓄積できることは貴重な機会。