

泊発電所 3 号炉

耐震設計の論点整理について

令和 5 年 4 月 17 日
北海道電力株式会社

：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

本資料中の [4条-別紙1-○] は、当該記載の抜粋元として、
まとめ資料のページ番号を示している。

泊発電所3号炉 耐震設計の論点整理について

【本日の説明事項】

泊3号炉の設計基準対象施設に係る耐震設計における論点の整理結果について説明する。

- 泊3号炉の既工認との相違点，他プラントの既工認及び新規制審査での適用例を網羅的に整理し，泊3号炉の耐震設計における論点を整理した。
- 設置許可審査での論点について整理した結果をP5～9に示す。
- **泊3号炉の耐震設計における論点として，他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例のない評価手法，評価条件は，抽出されなかった。**
- 泊3号炉への適用性について個別の確認が必要な事項については，2件抽出されたことから，その概要をP10,11に示す。
- 下記の項目については，個別に審査会合にて説明しており，今回の論点整理の対象外としている。
 - ◆ 地下水位の設定（第1055回審査会合）
 - ◆ 地盤の液状化の評価方針について（第1098回審査会合）
 - ◆ 地下水排水設備について（第1118回審査会合）
 - ◆ 防潮堤の構造成立性評価方針について※（第1007,1032,1063,1089,1111回）

※：第5条（津波による損傷の防止）にて耐震成立性を含めて説明中

目次

1. 耐震設計における論点の抽出の考え方
 2. 耐震設計における論点の重み付け評価フロー
 3. 耐震設計における論点の重み付け評価結果
 4. 個別確認事項の概要【重み付け評価B1】
 4. 1 限界状態設計法の適用
(コンクリート躯体における圧縮強度, 引張強度及びせん断強度を用いた評価)
 4. 2 後施工せん断補強工法 (セラミックキャップバー工法) の適用
- (参考) 論点の概要【重み付け評価B2】

1. 耐震設計における論点の抽出の考え方

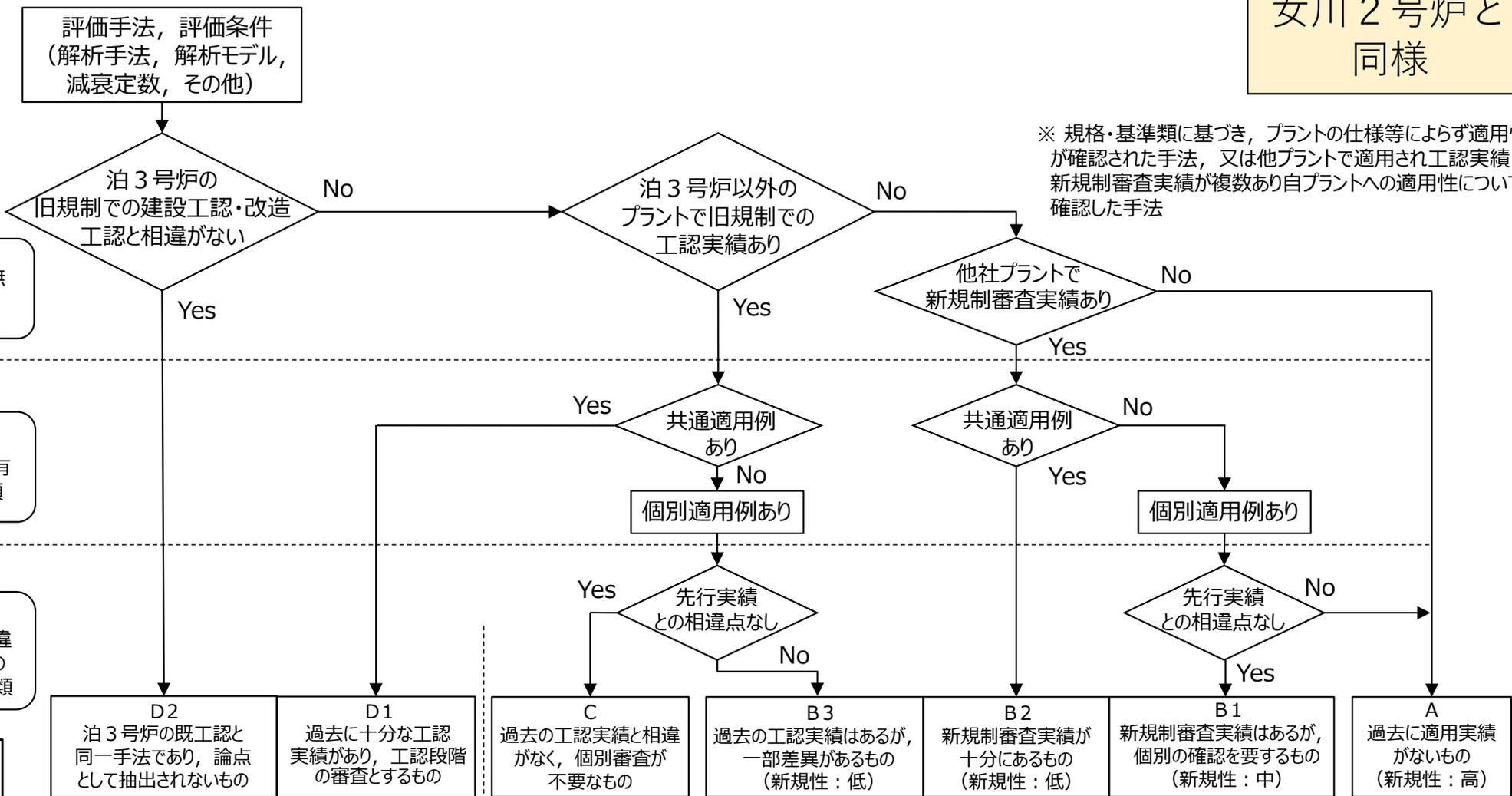
設置変更許可申請段階におけるプラントの耐震成立性確認を目的として、泊3号炉の既工認との相違点、他プラントの既工認及び新規制審査での適用例について網羅的に整理し、泊3号炉の耐震設計における論点（評価手法、評価条件）について、以下のとおり抽出する。

- Sクラス施設、Sクラス施設に波及的影響を及ぼすおそれのある施設及びSクラス施設の間接支持構造物の耐震設計における論点（評価手法、評価条件）に係る以下の4項目について、既工認と今回工認の状況を網羅的に比較・整理した。[4条-別紙1-添付1]
 - ①解析手法 ②解析モデル ③減衰定数 ④その他（評価条件の変更等）
- 耐震設計に係る論点の重み付けの考え方
 - A：過去に適用実績がないもの（新規性：高）
 - B1：新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの（新規性：中）
 - B2：新規制審査実績が十分にあるもの（新規性：低）
 - B3：過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの（新規性：低）
 - C：過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの
 - D1：過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの
 - D2：泊3号炉の既工認と同一手法であり、論点として抽出されないもの
- 泊3号炉の耐震設計における論点の抽出
次項に示す評価フローに従って論点の重み付けのランク分類を実施し、設置許可審査での論点について整理した結果及び抽出された論点のうち個別確認事項【B1】について概要を示す。

2. 耐震設計における論点の重み付け評価フロー

女川2号炉と同様

※ 規格・基準類に基づき、プラントの仕様等によらず適用性が確認された手法、又は他プラントで適用され工認実績、新規制審査実績が複数あり自プラントへの適用性について確認した手法



STEP1
既往の実績有無
で論点としての
軽重を分類

STEP2
共通適用例※の有
無で軽重を分類

STEP3
他社実績との相違
点(構造他)の
有無で軽重を分類

泊3号炉の
評価結果

機器・配管系	6件	7件	0件	0件	13件	0件	0件
建物・構築物	11件	2件	0件	0件	0件	0件	0件
屋外重要土木構造物 及び津波防護施設	5件	0件	0件	0件	6件	2件	0件

-----> 設置許可審査で論点資料を作成するもの

3. 耐震設計における論点の重み付け評価結果（1 / 5）

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	重み付け 評価結果	備考
機器・ 配管系	建屋－1次冷却ループ－主蒸気／主給水管連成モデルの適用	1次冷却ループ解析モデルとして、1次冷却ループ、主蒸気／主給水管を多質点系はりモデルに置換し、建屋モデルと連成させた「建屋－1次冷却ループ－主蒸気／主給水管連成モデル」を適用する。	PWR共通	B2	参考1 (P13)
	原子炉容器頂部／底部変位による地震荷重の考慮	一次＋二次応力及び疲労評価について、地震時における原子炉容器頂部／底部の変位も考慮した評価を適用する。	PWR共通	B2	参考2 (P14)
	照射の影響を考慮した燃料集合体の耐震評価の適用	燃料集合体への照射による影響として、支持格子強度特性や燃料集合体振動特性が変化することによる地震応答解析への影響と、燃料被覆管及び制御棒案内シンプルの許容応力への影響を考慮した耐震評価を適用する。	PWR共通	B2	参考3 (P15)
	地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持	燃料被覆管の閉じ込め機能維持の観点で、地震時の荷重を考慮した一次応力＋二次応力の評価を実施する。	PWR共通 BWR (女川2号他)	B2	参考4 (P16)

3. 耐震設計における論点の重み付け評価結果（2 / 5）

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	重み付け 評価結果	備考
機器・ 配管系	使用済燃料ラックの非線形時刻歴応答解析の適用	使用済燃料ラックの地震応答解析について、水中における水平方向の流体連成効果、燃料集合体とラックセル間の衝突（ガタ要素）を考慮したモデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。	PWR (高浜3,4号他)	B2	参考5 (P17)
	使用済燃料ラックへの加振試験に基づく減衰定数の適用	最新知見として使用済燃料ラックの加振試験により得られた結果から、非線形時刻歴応答解析において減衰定数5.0%を適用する。	PWR (高浜3,4号)	B2	参考6 (P18)
	蒸気発生器伝熱管の3次元はりモデルの適用	蒸気発生器伝熱管の地震応答解析について、3次元はりモデルを適用し、スペクトルモーダル解析を実施する。	PWR共通	B2	参考7 (P19)
	蒸気発生器伝熱管への振動試験に基づく減衰定数の適用	最新知見として蒸気発生器伝熱管の振動試験により得られた結果から、減衰定数として水平（面外）8.0%、水平（面内）15.0%、鉛直1.0%を適用する。	PWR共通	B2	参考8 (P20)
	原子炉格納容器へのFEM座屈解析モデルの適用	原子炉格納容器の座屈評価について、FEM座屈解析モデルを適用する。	PWR (高浜3,4号他)	B2	参考9 (P21)

3. 耐震設計における論点の重み付け評価結果 (3 / 5)

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	重み付け 評価結果	備考
機器・ 配管系	定ピッチスパン法を用いた評価条件の変更	定ピッチスパン法について、応力制限によるスパンの算定として、基準地震動による発生値に対しては許容値Ⅳ _A Sを、弾性設計用地震動による発生値に対しては許容値Ⅲ _A Sを適用する。	PWR共通	B2	参考10 (P22)
	制御棒挿入性評価における時刻歴解析手法の適用	地震時の制御棒挿入評価において、挿入経路機器に対して、時刻歴応答を用いて時々刻々と変化する制御棒挿入抗力を考慮した制御棒挿入時間を算定する手法を適用する。	PWR (高浜3,4号他)	B2	参考11 (P23)
	規格適用範囲外の動的機能維持評価の実施	ディーゼル発電機燃料油移送ポンプの動的機能維持評価について、JEAG4601の動的機能維持評価の考え方及び既往研究の知見を用いて詳細評価（異常要因分析や構造強度評価）を実施する。	PWR共通 BWR (女川2号他)	B2	参考12 (P24)
	一定の余裕を考慮した弁の動的機能維持評価	弁等の動的機能維持評価にあたって、応答加速度が当該機器を支持する配管の地震応答により増加すると考えられるときには、配管の地震応答の影響を考慮し、一定の裕度を見込んだ評価を実施する。	PWR共通 BWR (女川2号他)	B2	参考13 (P25)

3. 耐震設計における論点の重み付け評価結果 (4 / 5)

分類	項目		内容	適用実績・ 審査実績	重み付け 評価結果	備考
屋外重要土木構造物及び津波防護施設	土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化	限界状態設計法の適用（コンクリート躯体における引張強度及びせん断強度を用いた評価）	取水口の護岸コンクリートの貯水機能に対する評価に適用する。 護岸コンクリートの貯水機能に対する目標性能は、護岸コンクリートを貫通するような顕著なひび割れが発生しないこととする。具体的な評価方法は、護岸コンクリートに該当する要素の局所安全係数を算出し、破壊領域（引張破壊及びせん断破壊）が護岸コンクリートの背面から前面にかけて連続していないことを確認する。	BWR (女川2号)	B1	4.1 (P10)
	後施工せん断補強工法（セラミックキャップバー工法）の適用		耐震補強工法として、せん断耐力の向上を目的に、後施工せん断補強筋（セラミックキャップバー工法）による耐震補強工法を採用する。	BWR (女川2号)	B1	4.2 (P11)
	土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化	時刻歴応答解析（有効応力解析）の適用	構造物や周辺地盤の非線形性を、より精緻に再現できる時刻歴応答解析を用いて照査用応答値を算出する。構造物の非線形性は、構造モデルをフレームモデル（部材非線形性）とすることで考慮する。繰り返し载荷に伴う間隙水圧の上昇による有効応力の低下の影響を考慮するため、構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる二次元動的有限要素解析において、有効応力を用いた時刻歴応答解析により地震時の応答を算定する。	BWR (女川2号他)	B2	参考14 (P26)

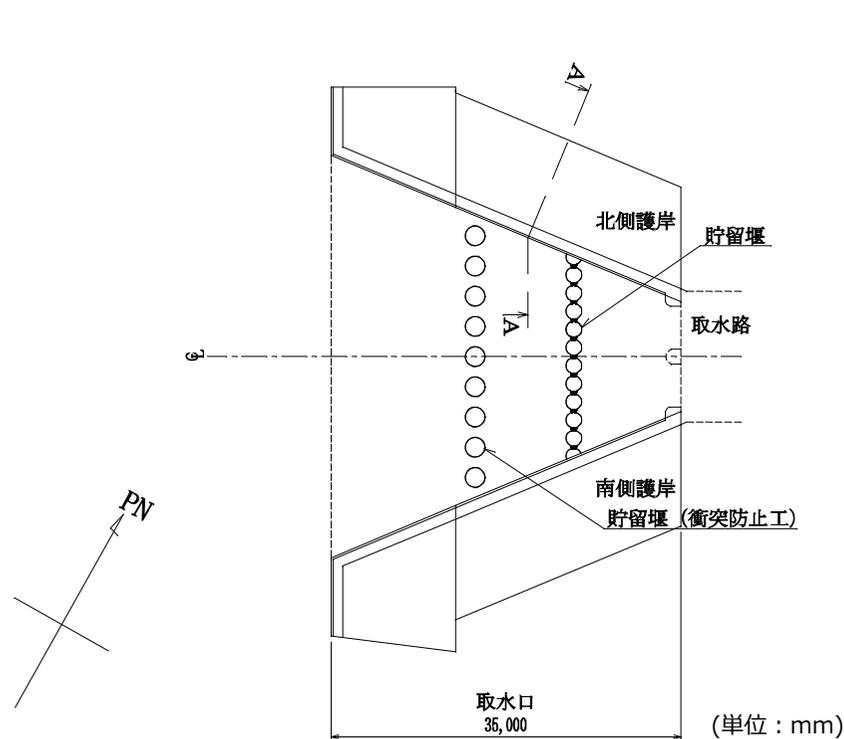
3. 耐震設計における論点の重み付け評価結果 (5 / 5)

分類	項目		内容	適用実績・ 審査実績	重み付け 評価結果	備考
屋外重要土木構造物及び津波防護施設	土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化	時刻歴応答解析における構造物の履歴減衰及びRayleigh減衰の適用	時刻歴応答解析に非線形性を考慮するにあたり、現実的な挙動特性を把握することを目的として、非線形の程度に応じた減衰（履歴減衰）を考慮する。また、解析上の安定のためにモデル全体にRayleigh減衰を考慮する。	BWR (女川2号他)	B2	参考15 (P27)
		Rayleigh減衰の適用			B2	
		隣接構造物のモデル化の適用	評価対象構造物に隣接する構造物の現実的な地震時挙動を考慮する必要がある場合について、隣接する構造物を等価剛性でモデル化する。	BWR (女川2号他)	B2	参考16 (P28)
	滑動・転倒に対する評価の適用	取水口の護岸コンクリート、その上部に設置されるL型擁壁及び3号炉バックフィルコンクリートの耐震評価において適用する。 滑動評価については、地震時の滑動力に対する抵抗力の比が所定の安全率を上回ることを、転倒評価については、地震時の転倒モーメントに対する抵抗力の比が所定の安全率を上回ることをそれぞれ確認する。	PWR (伊方3号他)	B2	参考17 (P29)	
土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化	限界状態設計法の適用（限界層間変形角，曲げ耐力，終局曲率及びせん断耐力による評価）	構造部材の曲げ系の破壊については限界層間変形角，曲げ耐力及び終局曲率，せん断破壊についてはせん断耐力に対して妥当な裕度を持つことを確認する。	BWR (柏崎7号他)	B2	参考18 (P30)	

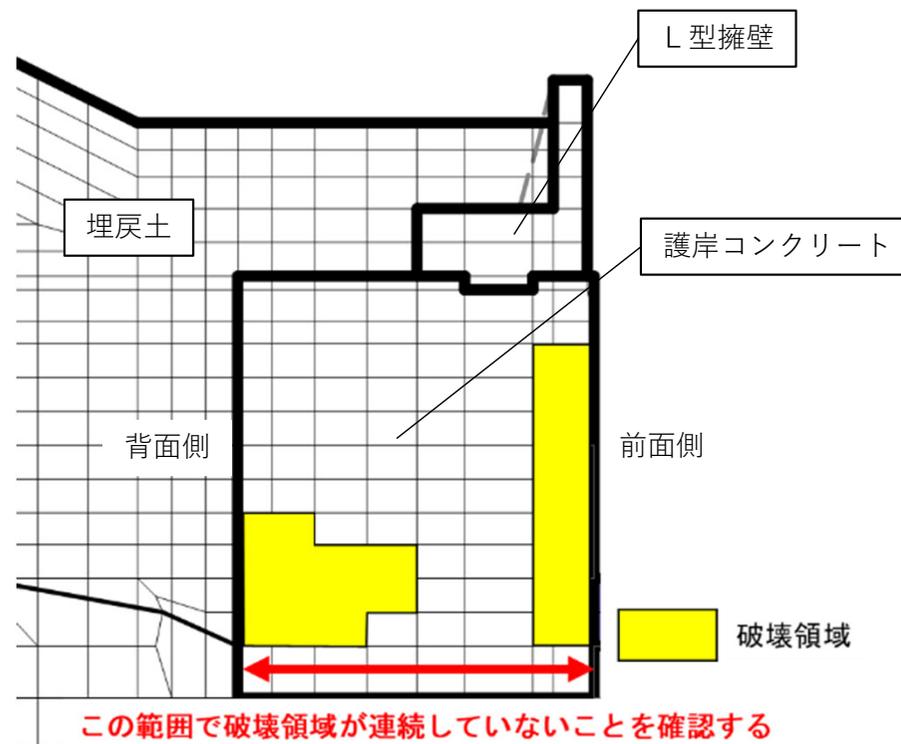
4. 個別確認事項の概要【重み付け評価B1】

4. 1 限界状態設計法の適用（コンクリート躯体における引張強度及びせん断強度を用いた評価）

- 取水口の護岸コンクリートの貯水機能に対する評価に適用する。
- 護岸コンクリートの貯水機能に対する目標性能は、護岸コンクリートを貫通するような顕著なひび割れが発生しないこととする。具体的な評価方法は、護岸コンクリートに該当する要素の局所安全係数を算出し、破壊領域（引張破壊及びせん断破壊）が護岸コンクリートの背面から前面にかけて連続していないことを確認する。
- 局所安全係数の算出に当たっては、コンクリートの材料強度を使用する。
- 引張強度はコンクリート標準示方書2002，せん断強度はコンクリート標準示方書（ダムコンクリート編，2013）に準拠して設定する。
- 材料強度の適用は、女川2号炉の新規制審査のうち取放水路流路縮小工で個別適用例があるものの、構造部材等が異なるため個別に適用性を確認する。



取水口 平面図

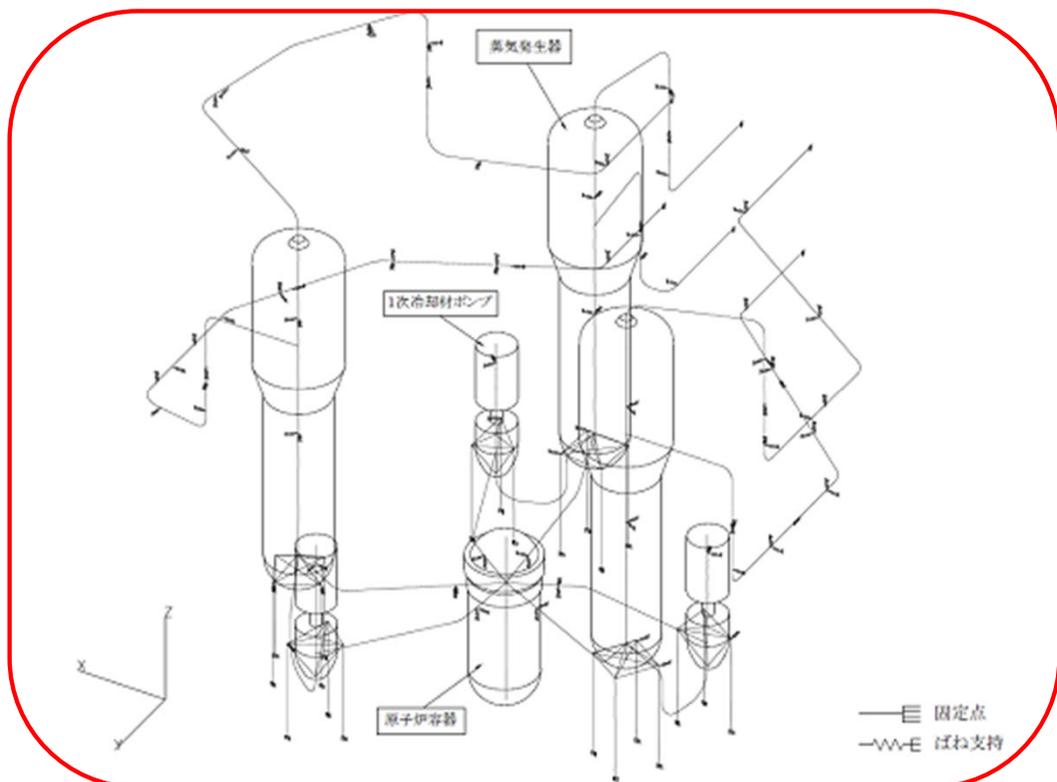


局所安全係数による評価 イメージ図 (A-A断面)

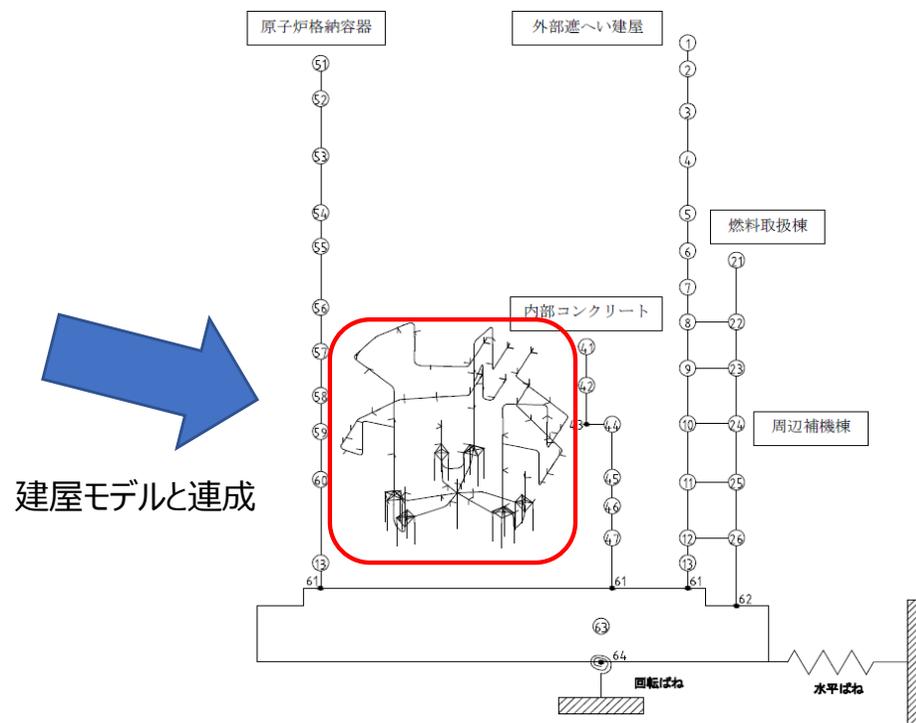
(参考) 論点の概要【重み付け評価B2】

(参考 1) 建屋 - 1次冷却ループ - 主蒸気 / 主給水管連成モデルの適用

- 既工認では、1次冷却ループ解析モデルとして、建屋と1次冷却ループを連成した評価モデルを用いていたが、今回工認では、より精緻化を図り、主蒸気 / 主給水管も連成させた「建屋 - 1次冷却ループ - 主蒸気 / 主給水管連成モデル」を適用する。
- 1次冷却ループは、原子炉容器を中心として蒸気発生器・1次冷却材ポンプ・1次冷却材管からなる複数の設備から構成され、蒸気発生器には主蒸気 / 主給水管が接続されており、これらの機器・配管は耐震性を考慮して内部コンクリートに設置された各支持構造物により支持されている。
- これらの地震応答解析のために、1次冷却ループ、主蒸気 / 主給水管を多質点系はりモデルに置換し、建屋モデルと連成させたモデルを用いて評価を実施する。
- 1次冷却ループに主蒸気 / 主給水管も連成させた本モデルは、川内1,2号炉、高浜3,4号炉、伊方3号炉、高浜1,2号炉、美浜3号炉、大飯3,4号炉及び玄海3,4号炉の新規制審査において適用例がある。



1次冷却ループ - 主蒸気 / 主給水管多質点はりモデル



建屋モデルと連成

建屋 - 1次冷却ループ - 主蒸気 / 主給水管連成モデル

(参考2) 原子炉容器頂部／底部変位による地震荷重の考慮

○ 原子炉容器頂部／底部変位による地震荷重の考慮

- 制御棒駆動装置及び原子炉容器ふた管台の一次＋二次応力及び疲労評価について、既工認では、原子炉容器は十分に剛構造であるとして、原子炉容器自体の変位による地震荷重は考慮していなかったが、今回工認では評価の精緻化のため、原子炉容器頂部の変位も考慮した評価を適用する。
- 炉内計装筒の一次＋二次応力及び疲労評価について、既工認では、原子炉容器は十分に剛構造であるとして、原子炉容器自体の変位による地震荷重は考慮していなかったが、今回工認では評価の精緻化のため、原子炉容器底部の変位も考慮した評価を適用する。
- 原子炉容器頂部／底部の変位の考慮は、川内1,2号炉，高浜3,4号炉，伊方3号炉，高浜1,2号炉，美浜3号炉，大飯3,4号炉及び玄海3,4号炉の新規制審査において適用例がある。

既工認と今回工認の解析手法の比較

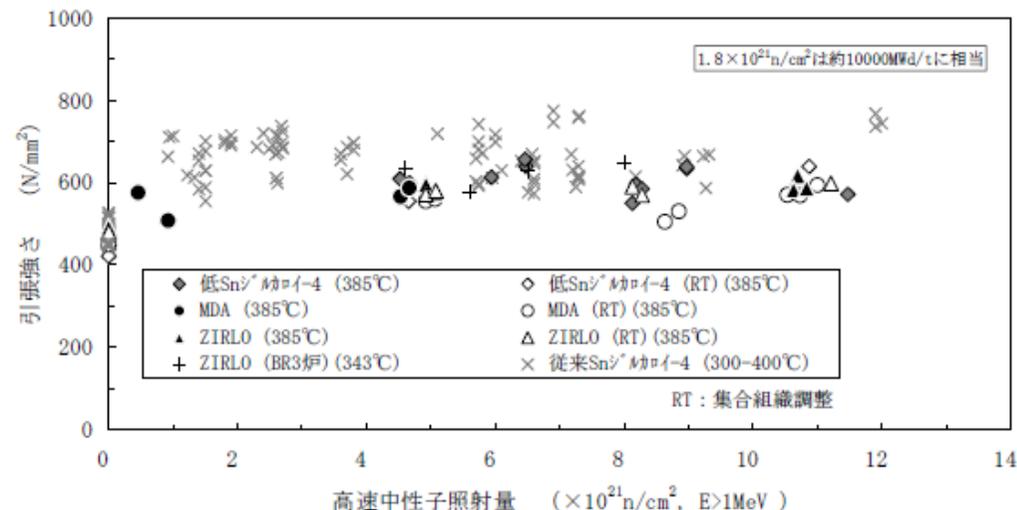
	応答解析	応力解析
既工認	① スペクトルモーダル解析	公式等による評価（はり理論） （①の結果を用いる）
今回工認	① スペクトルモーダル解析 ② 原子炉容器頂部／底部の変位を用いた解析	公式等による評価（はり理論） （①と②の結果を用いる）

(参考3) 照射の影響を考慮した燃料集合体の耐震評価の適用

- 既工認では、未照射条件で燃料集合体の耐震評価を実施していたが、今回工認では、照射の影響を考慮した耐震評価を適用する。
- 燃料集合体への照射による影響として、支持格子強度特性や燃料集合体振動特性が変化することによる地震応答解析への影響と、燃料被覆管及び制御棒案内シンプルの許容応力への影響を考慮する。
- 照射の影響を考慮した燃料集合体の耐震評価の適用は、川内1,2号炉，高浜3,4号炉，伊方3号炉，高浜1,2号炉，美浜3号炉，大飯3,4号炉及び玄海3,4号炉の新規制審査において適用例がある。



固有振動数の振幅依存特性
(未照射及び照射考慮, A型燃料集合体)



燃料被覆管の機械特性の燃焼による変化
(公開文献 三菱原子燃料株式会社「三菱PWR高燃焼度ステップ2 燃料の機械設計」MNF-1001 改1 (平成23年3月) より引用)

□ : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

(参考4) 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持

- 平成29年9月に新たな規制要求として、地震時の燃料被覆管閉じ込め機能の維持についての要求が追加された。
- 既工認では、崩壊熱除去可能な形状維持の観点から、地震時の一次応力を考慮した応力評価を実施している。今回工認では、崩壊熱除去可能な形状維持の観点に追加して、燃料被覆管の閉じ込め機能維持の観点で、地震時の荷重を考慮した一次応力+二次応力の評価を実施する。
- 当該評価については、川内1,2号炉、高浜3,4号炉、伊方3号炉、高浜1,2号炉、美浜3号炉、大飯3,4号炉及び玄海3,4号炉のバックフィット工認や女川2号炉の新規制審査において適用例がある。

追加要求事項を踏まえた燃料被覆管応力評価条件の整理

<既工認>

■ 崩壊熱除去可能な形状の維持

許容応力状態	許容応力
Ⅲ _{AS} (一次応力 (S ₁))	降伏応力(S _y)
Ⅳ _{AS} (一次応力 (S ₂))	

変更なし



<今回工認>

■ 崩壊熱除去可能な形状の維持

許容応力状態	許容応力
Ⅲ _{AS} (一次応力 (S _d))	降伏応力(S _y)
Ⅳ _{AS} (一次応力 (S _s))	

追加要求

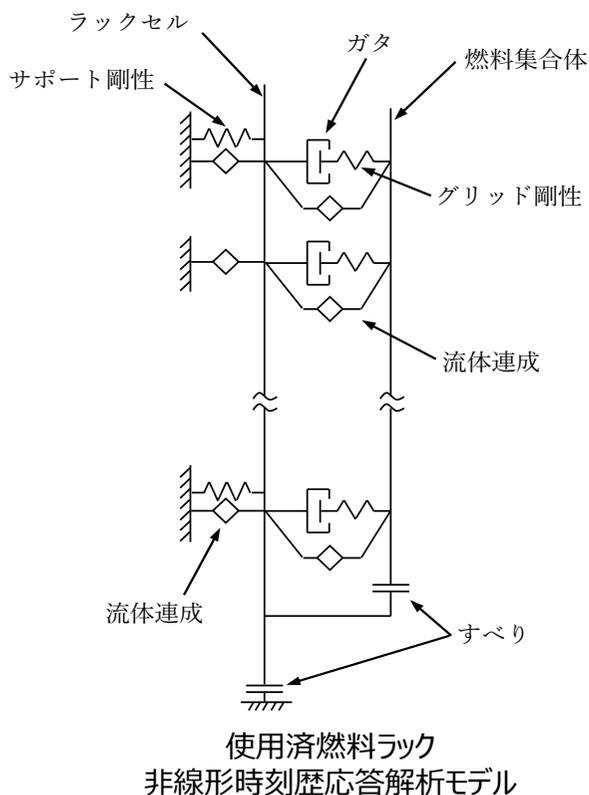


■ 燃料被覆管の閉じ込め機能維持

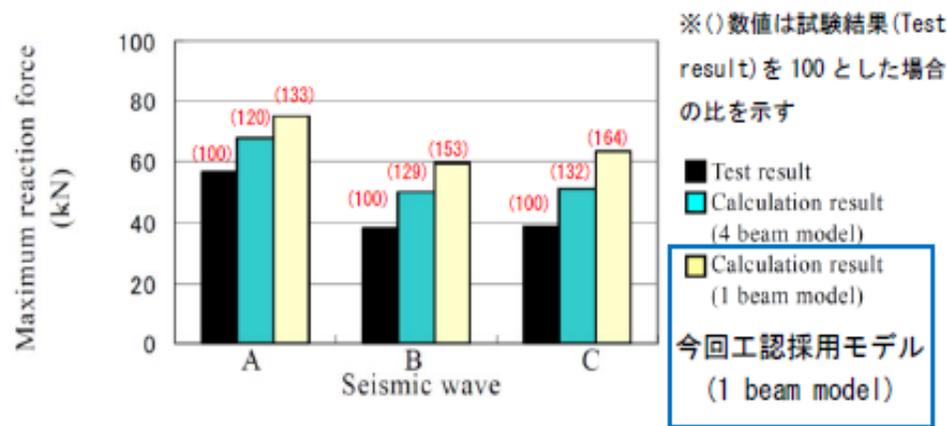
考慮すべき応力と地震動	許容応力
一次応力 (S _d) + 二次応力	降伏応力(S _y)
一次応力 (S _s) + 二次応力	引張強さ(S _u)

(参考5) 使用済燃料ラックの非線形時刻歴応答解析の適用

- 既工認の使用済燃料ラックの地震応答解析では、2次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析を実施していたが、今回工認では、水中における水平方向の流体連成効果、燃料集合体とラックセル間の衝突（ガタ要素）を考慮したモデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。
- 今回適用する非線形時刻歴応答解析手法は、既往の研究により泊3号炉の使用済燃料ラックと同等な実機を用いた加振試験結果を十分安全側に模擬できることが確認されている解析手法である。
- 使用済燃料ラックの非線形時刻歴応答解析の適用については、高浜3,4号炉及び高浜1,2号炉の新規制審査において適用例がある。



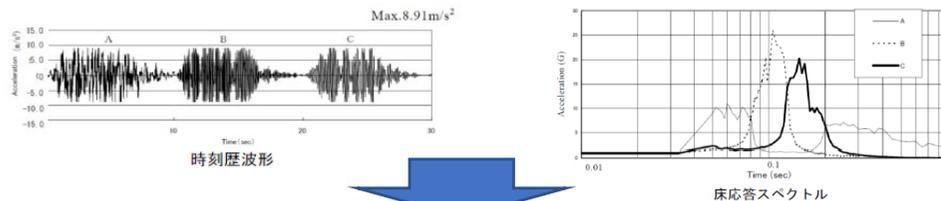
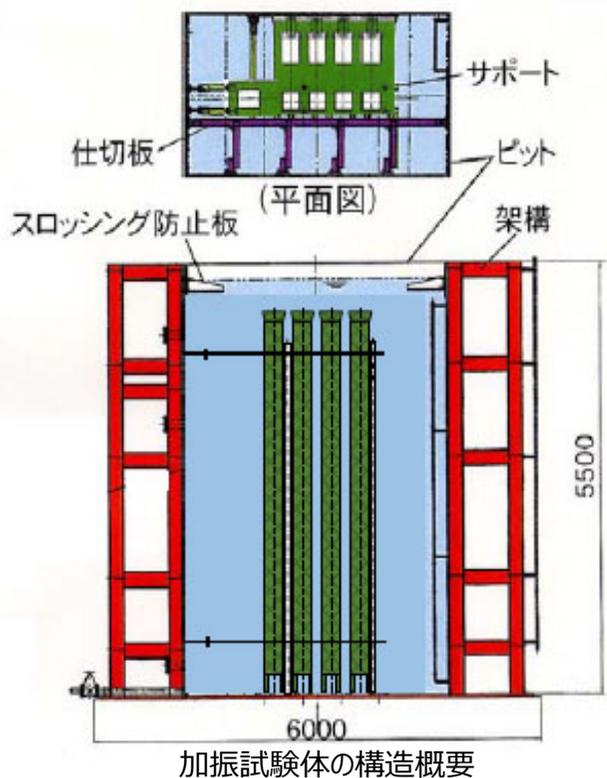
評価に用いるモデルは、試験結果と比較しサポート反力は最低でも30%以上の保守的な値となっていることを確認しており、設計用床応答曲線における振幅相当以上の余裕を確保している。



試験結果と解析結果の比較

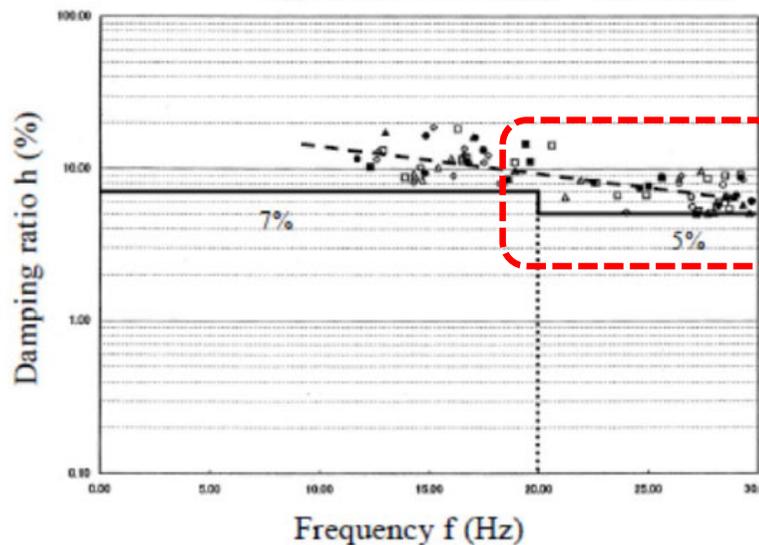
(参考6) 使用済燃料ラックへの加振試験に基づく減衰定数の適用

- 既工認では、使用済燃料ラックの水平方向の減衰定数として1.0%を適用していたが、今回工認では、最新知見として使用済燃料ラックの加振試験により得られた結果から、非線形時刻歴応答解析において減衰定数5.0%を適用する。
- 今回適用する減衰定数は、泊3号炉と同じ壁支持型式のキャン型ラックを模擬した実物大試験供試体で実機と同等な試験条件により実施した加振試験を基に設定した減衰定数である。
- 今回適用する減衰定数は、高浜3,4号炉の新規制審査において適用例がある。
- 日本電気協会「PWR使用済燃料貯蔵ラック設計用減衰定数の適正化に関する調査報告書」で減衰定数の妥当性と適用性について詳細に検討されており、JEAC4601-2021に規定されている減衰定数について適用条件を踏まえて採用しており、プラントの仕様等によらず適用性が確認された手法として共通適用例ありと判断した。



加振試験結果から
減衰定数を評価

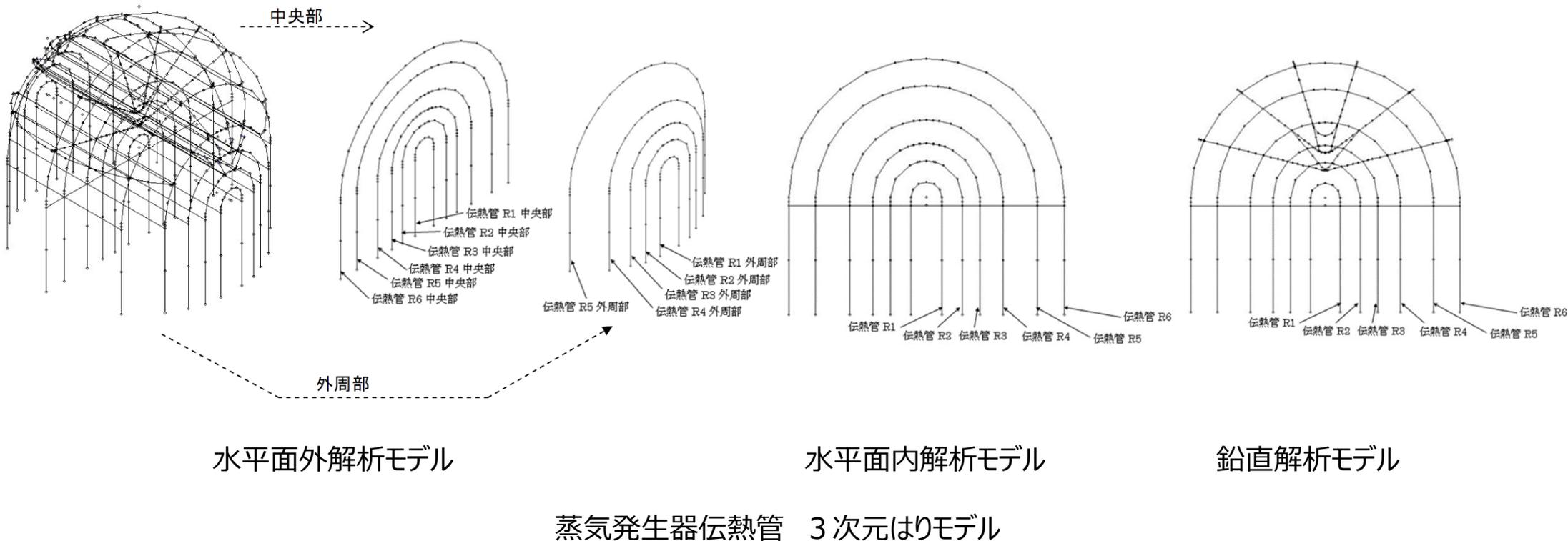
—: Design damping coefficient
- - -: Approximate function $\log(h) = -0.0184f + 1.34$



泊3号炉
使用済燃料ラックの卓越振動数：
20Hz以上30Hz未満
→減衰定数5.0%を適用

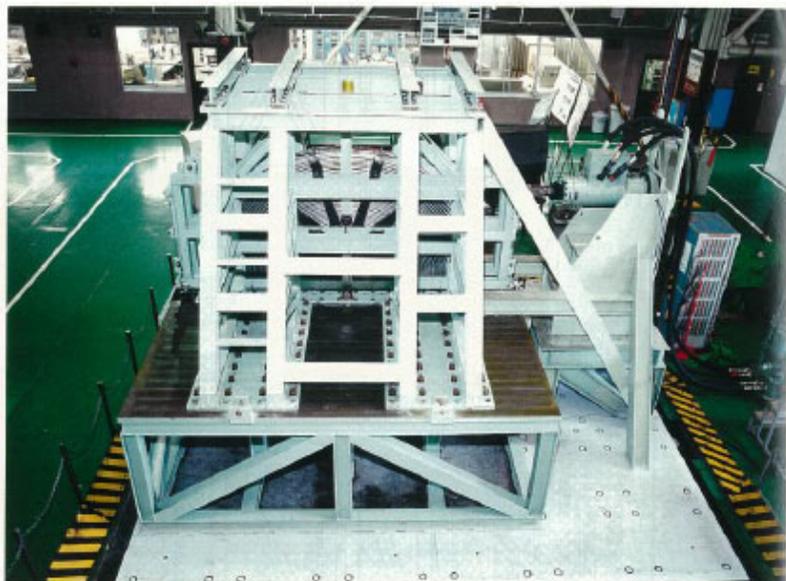
(参考 7) 蒸気発生器伝熱管の3次元はりモデルの適用

- 既工認の蒸気発生器伝熱管の地震応答解析では、蒸気発生器伝熱管は一本はりモデル化していたが、今回工認では、3次元はりモデルを適用し、スペクトルモーダル解析を実施する。
- 蒸気発生器伝熱管の3次元はりモデルは、実寸大の試験体を用いた振動試験により検証されている。
- 適用する3次元はりモデルは、川内1,2号炉，高浜3,4号炉，伊方3号炉，高浜1,2号炉，美浜3号炉，大飯3,4号炉及び玄海3,4号炉の新規制審査において適用例がある。

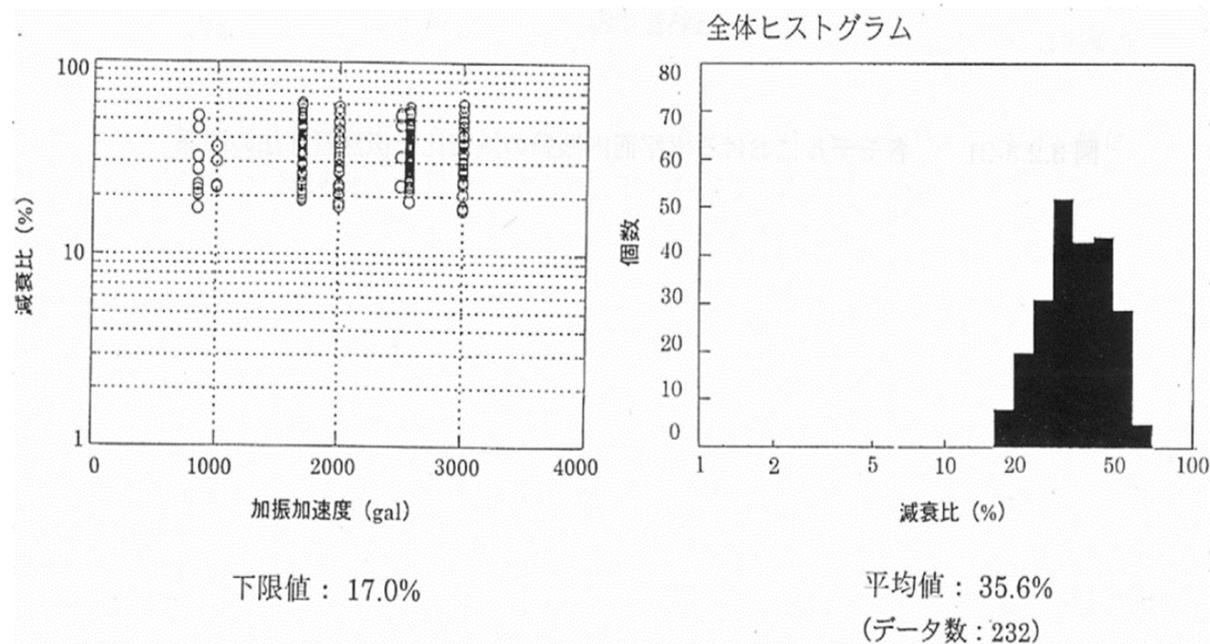


(参考 8) 蒸気発生器伝熱管への振動試験に基づく減衰定数の適用

- 既工認の蒸気発生器伝熱管の減衰定数は、1.0%（水平方向）を適用していたが、今回工認では、最新知見として蒸気発生器伝熱管の振動試験により得られた結果から、減衰定数として水平（面外）8.0%、水平（面内）15.0%、鉛直1.0%を適用する。
- 今回適用する減衰定数は、泊3号炉の蒸気発生器伝熱管と同等の実寸大の試験体を用いた振動試験により検証されている。
- 今回適用する減衰定数は、川内1,2号炉、高浜3,4号炉、伊方3号炉、高浜1,2号炉、美浜3号炉、大飯3,4号炉及び玄海3,4号炉の新規制審査において適用例がある。



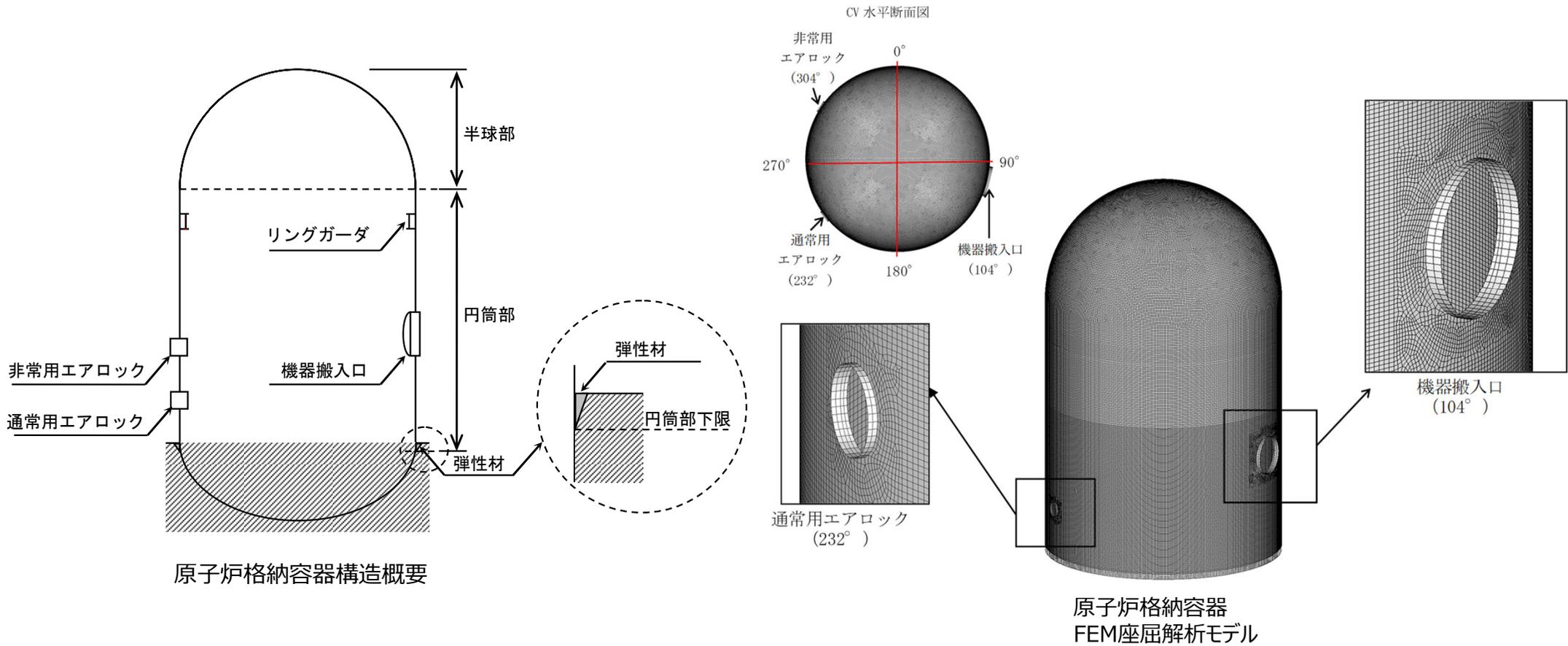
蒸気発生器伝熱管 振動試験 試験体



水平面内振動の減衰（試験結果）

(参考9) 原子炉格納容器へのFEM座屈解析モデルの適用

- 既工認における原子炉格納容器の座屈評価は、JEAG4601-1987 に基づく評価式（以下、JEAG評価式）による評価を行っていたが、今回工認での原子炉格納容器における座屈評価は、FEM座屈解析モデルを適用する。
- 今回工認では、開口部等の付属物による円筒部剛性等を考慮した原子炉格納容器のFEM座屈解析モデルを用いて、静的弾塑性座屈解析を実施し、JEAG評価式の考え方と同様に、座屈荷重に達しないように制限するCV座屈耐力（評価基準値）を算定し、基準地震動に対する原子炉格納容器の座屈に係る耐震安全性を確認する。
- FEM座屈解析モデルについては、高浜3,4号炉及び美浜3号炉の新規制審査において適用例がある。



(参考10) 定ピッチスパン法を用いた評価条件の変更

- 既工認での定ピッチスパン法では、振動数制限及び応力制限によるスパンの算定として、 S_2 の発生荷重をAクラスに基準化してⅢ_ASの許容値を用いていたが、今回工認では、応力制限によるスパンの算定として、基準地震動による発生値に対しては許容値Ⅳ_ASを、弾性設計用地震動による発生値に対しては許容値Ⅲ_ASを適用する。
- 既工認で設定したスパンと、今回工認で設定するスパンを比較し、厳しい方のスパンを採用することで、今回工認においても振動数制限を踏まえたスパンを満足することとなる。
- 定ピッチスパン法を用いた評価条件の変更は、川内1,2号炉，高浜3,4号炉，伊方3号炉，高浜1,2号炉，美浜3号炉，大飯3,4号炉及び玄海3,4号炉の新規制審査において適用例がある。

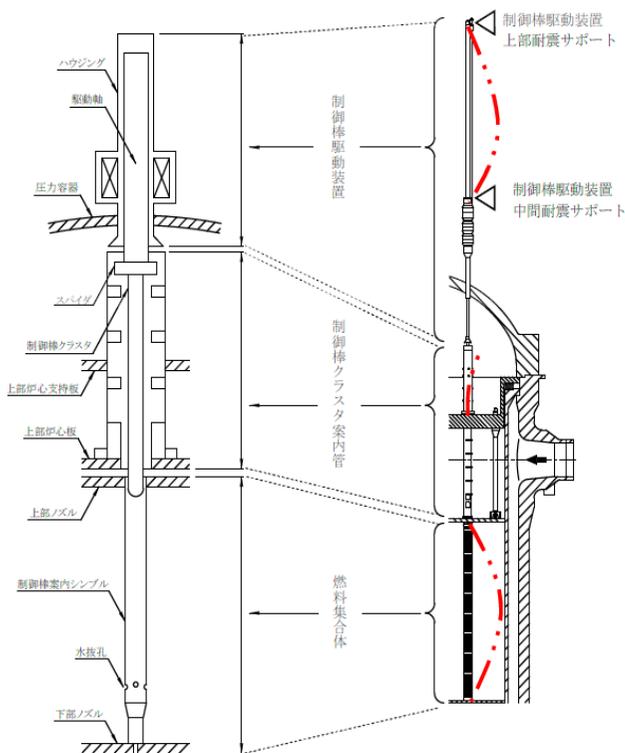
既工認と今回工認の許容応力状態

	耐震クラス	地震動	許容応力状態
既工認	A(As)	S_1	Ⅲ _A S※
		S_2	
今回工認	S	Sd	Ⅲ _A S
		Ss	Ⅳ _A S

※ 既工認時においては、基準地震動 S_2 における発生荷重を耐震Aクラスの条件で基準化して評価を実施

(参考11) 制御棒挿入性評価における時刻歴解析手法の適用

- 既工認では、地震時の制御棒挿入評価において、制御棒の挿入経路である制御棒駆動装置（CRDM）、制御棒クラスタ案内管（GT）、燃料集合体（FA）のそれぞれについて、制御棒クラスタの落下中、最大応答が継続することを仮定し、最大応答に対応する制御棒挿入抗力が落下中継続的に作用するものとして、制御棒挿入時間を算定していた。
- 今回工認では、挿入経路機器に対して、時刻歴応答を用いて時々刻々と変化する制御棒挿入抗力を考慮した制御棒挿入時間を算定する手法を適用する。
- 制御棒挿入性評価における時刻歴解析手法の適用については、高浜3,4号炉、美浜3号炉及び大飯3,4号炉の新規制審査において適用例がある。



(- - - 各機器の支配的な振動モード)

制御棒挿入経路概念図

		静的手法	時刻歴解析手法
①機器の応答	CRDM	拡幅 FRS (周期方向±10%幅広げ) によるスペクトルモデル解析により最大応答変位を算出。	CRDM、GT、FA 共通 時刻歴応答解析による時刻歴応答波 (応答変位、応答加速度) を算出 (下図実線参照)
	GT	同上	
	FA	時刻歴群振動解析による時刻歴応答波より最大応答変位を算出 (下図実線参照)	

(注1)：各機器の最大応答が同時刻に重畳することは考えにくい。

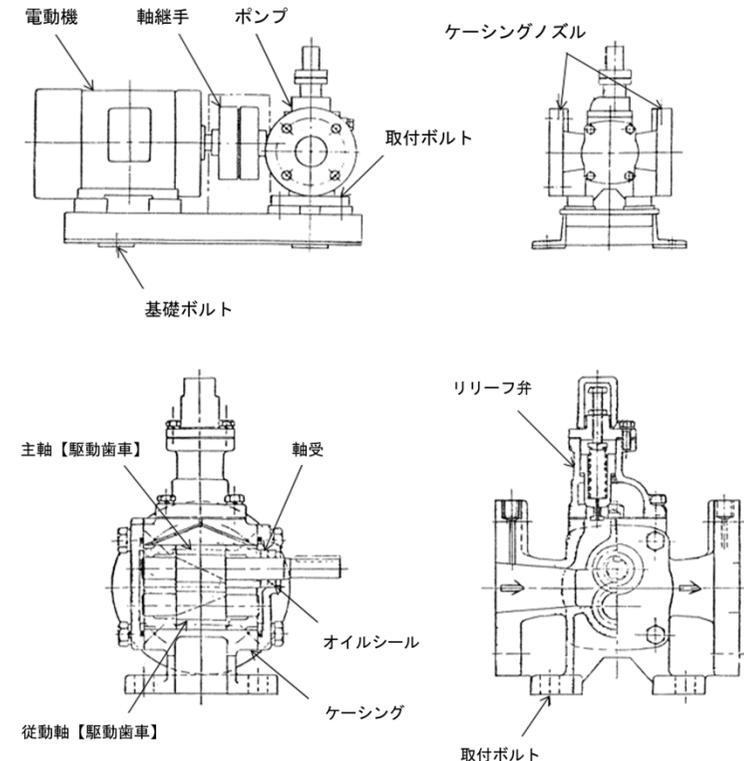
地震時制御棒クラスタ挿入時間評価における解析手法の対比

(参考12) 規格適用範囲外の動的機能維持評価の実施

- Sクラス施設のうち地震時又は地震後に動的機能が要求される設備については、基準地震動による地震応答に対して、その動作機能が維持されることが要求される。
- Sクラス施設のうち動的機能維持評価が必要となる設備に対して、JEAG4601に従って機能維持の評価を実施する。
- 泊3号炉のディーゼル発電機燃料油移送ポンプについては、JEAG4601に規格化されている型式に該当しないギヤ式ポンプであることから、JEAG4601の動的機能維持評価の考え方及び既往研究の知見を用いて詳細評価（異常要因分析や構造強度評価）を実施する。
- 泊3号炉のディーゼル発電機燃料油移送ポンプは、川内1,2号炉，高浜3,4号炉，伊方3号炉，高浜1,2号炉，美浜3号炉，大飯3,4号炉及び玄海3,4号炉のバックフィット工認において詳細評価の適用例がある燃料油移送ポンプと同型式である。

対象	要求機能	要因	現象	喪失機能	
ギヤ式ポンプ	地震後の起動・運転と輸送性能確保 A: 回転機能 B: 輸送機能 C: 流体保持機能	ポンプ本体応答過大	ケーシング転倒 モーメント 応力過大	基礎ボルト応力過大	① → A, B, C
		全体系(ケーシング)応答過大	ケーシング応力過大	摺動部の損傷 (主軸【駆動歯車】、 従動軸【従動歯車】と ケーシング接触)	②③④ → A, B
			ケーシング変形過大		
		軸系(主軸【駆動歯車】)応答過大	軸変形過大	軸損傷 (主軸【駆動歯車】)	② → A, B
			軸応力過大		⑤ → A, B
			軸受応力過大		⑥ → A, B
		電動機応答過大	電動機機能喪失	⑦ → A, B	
			電動機変形過大	軸継手相対変位過大	⑧ → A, B
		配管応答過大	配管反力過大	ケーシングノズル部損傷	⑨ → B, C
		逃し弁応答過大	弁の応答過大	弁損傷	油の外部漏えい
誤作動	ポンプ内循環 (吸込み側に戻る)	⑪ → B			

ギヤ式ポンプの異常要因分析図



ギヤ式ポンプの構造概要図

(参考13) 一定の余裕を考慮した弁の動的機能維持評価

- 弁等の動的機能維持評価に当たって、応答加速度が当該機器を支持する配管の地震応答により増加すると考えられるときには、配管の地震応答の影響を考慮し、一定の裕度を見込んだ評価を実施する。
- 当該評価は、技術基準規則解釈等の改正を踏まえて、算定するものであり、川内1,2号炉、高浜3,4号炉、伊方3号炉、高浜1,2号炉、美浜3号炉、大飯3,4号炉及び玄海3,4号炉のバックフィット工認や女川2号炉の新規制審査において適用例がある。

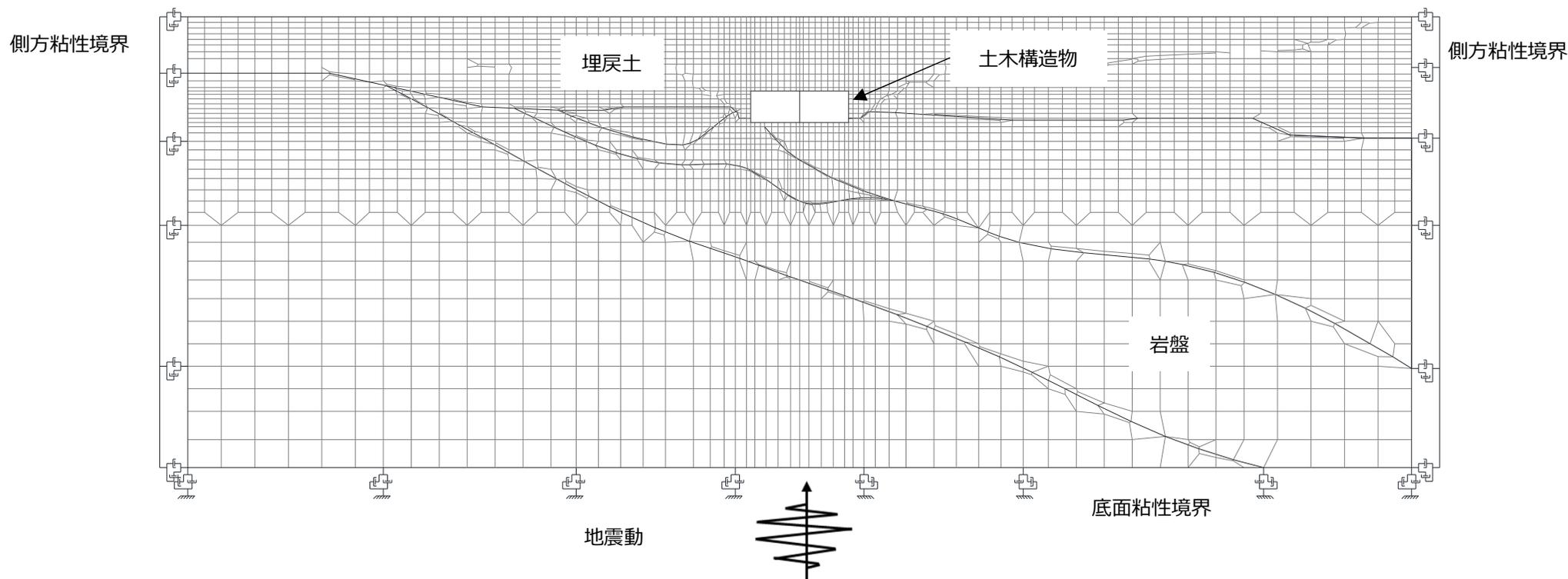
弁の機能維持評価の耐震設計手順比較

配管系の固有値	JEAG4601	泊3号炉
剛の場合	最大加速度（1.0ZPA）を適用する	最大加速度を1.2倍した値（1.2ZPA）を適用する
柔の場合	スペクトルモーダル解析により算出した弁駆動部の応答を適用する	スペクトルモーダル解析により算出した弁駆動部の応答※または最大加速度の1.2倍（1.2ZPA）のいずれか大きい方を適用する

※ 高周波数の振動モードまで考慮した地震応答解析を実施

(参考14) 時刻歴応答解析 (有効応力解析) の適用

- 今回工認では、構造物や周辺地盤の非線形性を、より精緻に再現できる時刻歴応答解析を用いて照査用応答値を算出する。
- 構造物の非線形性を考慮する場合は、構造モデルをフレームモデル (部材非線形) とすることで考慮する。
- 屋外重要土木構造物及び津波防護施設の周辺地盤には、地下水位以深に埋戻土が分布しており、繰り返し载荷による間隙水圧の上昇により有効応力の低下が懸念されることから、その影響を設計上考慮する必要がある。
- よって、構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる二次元動的有限要素解析において、有効応力を用いた時刻歴応答解析により地震時の応答を算定する。
- 本手法は、女川2号炉及び柏崎7号炉の新規制審査での適用例がある。



時刻歴応答解析 概念図

(参考15) 時刻歴応答解析における構造物の履歴減衰及びRayleigh減衰の適用

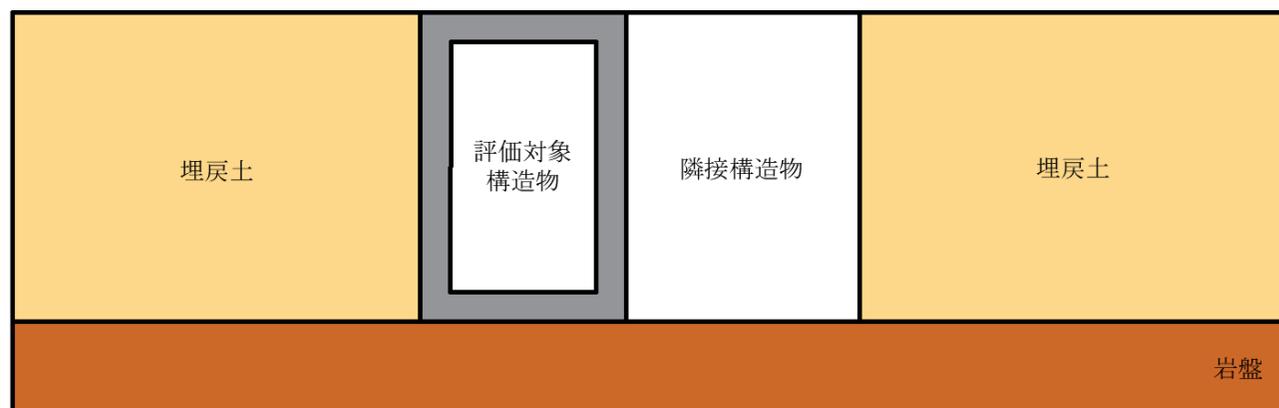
- 今回工認では、時刻歴応答解析に非線形性を考慮するにあたり、現実的な挙動特性を把握することを目的として、非線形の程度に応じた減衰（履歴減衰）を考慮する。
- また、解析上の安定のためにモデル全体にRayleigh減衰（ $\alpha = 0$, $\beta = 0.002$ ）を考慮する。
- 係数 α について、有効応力による時刻歴応答解析では、地震力による時系列での地盤剛性の軟化に伴い1次固有振動数の低振動数側へのシフトに応じて、地盤応答の保守的な評価が行えるように係数 $\alpha = 0$ として設定し、低振動数帯で減衰 α の影響がない剛性比例型減衰とする。
- 係数 β については、「FLIP研究会14年間の検討成果のまとめ「理論編」」において実施した検討結果や先行サイトでの実績を参考に、減衰定数を定めずに決めた値として $\beta = 0.002$ を設定し、解析モデル全体にRayleigh減衰を与える。
- 構造物の履歴減衰及びRayleigh減衰の適用は、原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005）に則った手法である。
- 本手法は、女川2号炉及び柏崎7号炉の新規制審査での適用例がある。

今回工認で採用する構造物の履歴減衰及びRayleigh減衰

減衰	内容
構造物の履歴減衰	構造部材の部材非線形性（曲げモーメント－曲率関係）における非線形の程度に応じた値となる。
Rayleigh減衰	$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$ [C]：減衰係数マトリックス， [M]：質量マトリックス [K]：剛性マトリックス， α , β ：係数

(参考16) 隣接構造物のモデル化の適用

- 既工認では、簡便かつ保守的に評価する観点から、評価対象構造物に隣接する建物等は地震応答解析モデルでは地盤としてモデル化している。
- 今回工認では、評価対象構造物に隣接する構造物の現実的な地震時挙動を考慮する必要がある場合について、隣接する構造物を等価剛性でモデル化する。
- 隣接構造物のモデル化は、女川2号炉及び柏崎7号炉の新規制審査での適用例がある。



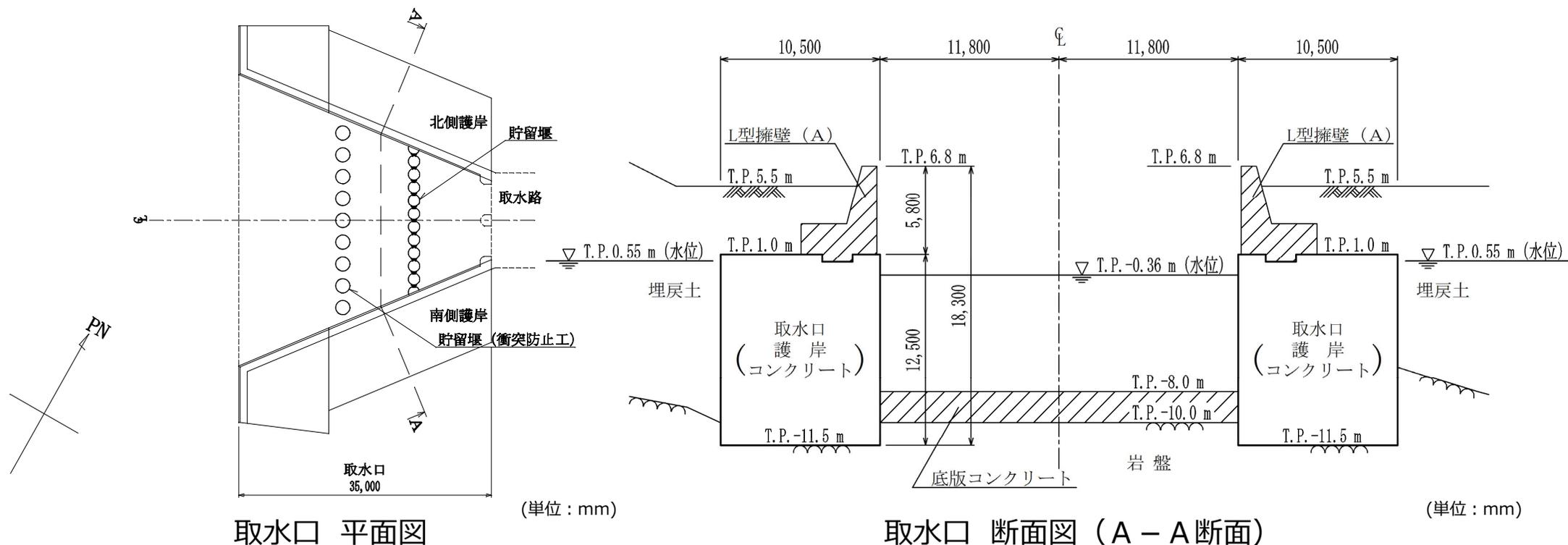
評価対象構造物と隣接構造物が接している場合

隣接構造物の地震時応答が評価対象構造物に伝達することが考えられる。よって、隣接構造物の地震時応答を考慮するため隣接構造物をモデル化する。

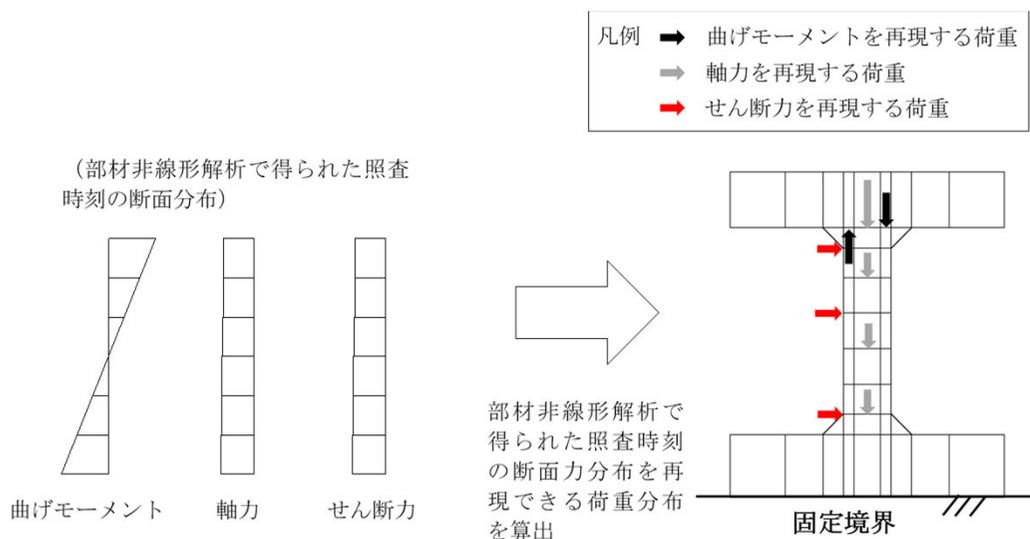
隣接構造物のモデル化例（評価対象構造物と隣接構造物が接している場合）

(参考17) 滑動・転倒に対する評価の適用

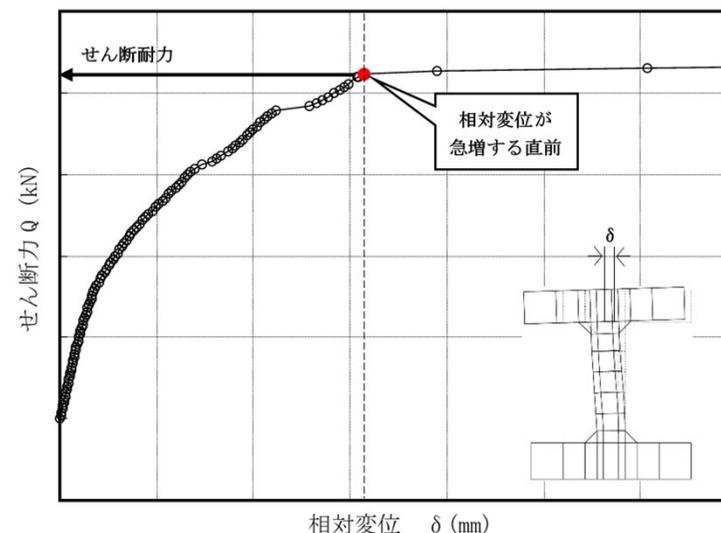
- 取水口の護岸コンクリート、その上部に設置されるL型擁壁及び3号炉バックフィルコンクリートの耐震評価において適用する。
- 護岸コンクリート及びL型擁壁は、滑動、転倒により取水口の通水断面の閉塞につながる可能性があることから、滑動、転倒しないことを確認する。
- バックフィルコンクリートは、原子炉建屋等の背後斜面に設置されており、滑動、転倒により周辺の上位クラス施設に波及的影響を与えるおそれがあることから、滑動、転倒しないことを確認する。
- 滑動評価については、地震時の滑動力に対する抵抗力の比が所定の安全率を上回ることを、転倒評価については、地震時の転倒モーメントに対する抵抗モーメントの比が所定の安全率を上回ることをそれぞれ確認する。
- 本手法は、伊方3号炉及び川内1,2号炉の新規制審査での適用例がある。



- フレームモデル (部材非線形) によりモデル化した取水路, 取水ピットスクリーン室等の耐震評価において適用する。
- 構造部材の曲げ系の破壊については限界層間変形角, 曲げ耐力及び終局曲率, せん断破壊についてはせん断耐力に対して妥当な裕度を持つことを確認することを基本とする。せん断耐力は, せん断耐力評価式 (分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法を含む) 及び材料非線形解析を用いる方法のいずれかを用いて評価する。
- 構造部材の照査において発生するせん断力が, せん断耐力評価式 (分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法を含む) によるせん断耐力を上回ることが確認された場合, 改めて材料非線形解析によりせん断耐力を算出し照査を行うこととする。
- 本手法は, 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル (土木学会, 2005) に則った手法である。
- なお, 材料非線形解析によりせん断耐力を算出する手法の適用は, 二次元時刻歴応答解析により断面力を算出して耐震安全性評価を行う構造物を対象とし, 後施工せん断補強筋 (CCb) により耐震補強を行っている部材は適用範囲外とする。
- 本手法は, 女川2号炉及び柏崎7号炉の新規制審査での適用例がある。



材料非線形解析における载荷状況



材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例