

## 女川原子力発電所2号炉 耐震設計の論点に係る整理表

## I. 耐震設計に係る主な論点

分類	整理 No.	項目	適用実績・審査実績	適用実績・審査実績との共通事項	新規もしくはサイトマターの論点※	備考	審査可能時期	
共通	A	評価対象の網羅性	—	方針は先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 別表第二及び耐震重要度分類の区分に照らし, 過去の工認及び最新プラントの建設工認の評価実績を踏まえて, 評価対象施設, 評価部位, 評価項目の網羅性を確認した結果を整理	— (ただしプラント型式の相違等による施設の違いあり)	○	—	11月下旬
	B	水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針	—	方針は先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 水平2方向及び鉛直方向の組合せによる耐震設計に係る技術基準が制定されたことに伴う, 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに係る影響評価方針を整理	— (ただしプラント型式の相違等による施設の違いあり)	○	—	11月下旬
	C	耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響 (影響検討対象施設の抽出プロセス・抽出結果)	—	方針は先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 耐震重要施設の安全機能への波及的影響検討のうち, 敷地全体を俯瞰した調査・検討等の結果及び波及的影響を及ぼす可能性のある施設, 設備の選定結果を整理	プラントにより配置や施設が異なるため, 女川2号炉における抽出過程及び抽出結果を説明する	△	—	11月下旬
	D	重大事故等による荷重と地震動の組合せの設定の考え方	—	方針は先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 重大事故等対処施設に必要な耐震設計条件に適用する荷重条件と地震動の組合せを明確にし, 重大事故等対処施設の耐震設計における考え方の妥当性を整理	事故収束シナリオが異なるため, 女川2号炉における温度, 圧力等に基づく荷重条件と, Ss, Sdの組合せの考え方を説明する	△	—	11月下旬
共通 個別	G	既工認からの解析評価条件の変更	—	—	詳細については, 下表「II. 既工認からの主な解析評価条件の変更点」参照	—	—	—

※ 凡例

○: 先行電力と同様であり大きな論点はないと考えるもの

△: 基本的な考え方は先行電力と同様であるが, 一部相違点があるもの

●: 先行実績がないもの

II. 既工認からの主な解析評価条件の変更点

分類	整理 No.	変更項目	適用実績・審査実績	適用実績・審査実績との共通事項	新規もしくはサイトマターの論点*	備考	審査可能時期		
建物・構築物	3	建屋の地震応答解析モデル(女川2号)	-	-	2011年東北地方太平洋沖地震及び2011年4月7日宮城県沖の地震による建屋の応答状態を初期モデルに反映するために、モデルの初期剛性等を地震観測シミュレーション解析結果を踏まえ設定している (対象) 原子炉建屋, 制御建屋 など	●	別紙-1	11月下旬	
		入力地震動の算定	PWR (川内1号代替緊急時対策所, 高浜1号緊急時対策所建屋) BWR (柏崎6.7号)	方針は先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 建屋への入力地震動を算定する際に, 既工認では基準地震動を直接入力としていたが, 今回工認では建屋の掘り込み効果を考慮	複数の観測記録によるシミュレーション等で妥当性を説明する 解析においては, 建屋周辺地盤に対し入力地震動レベル(ひずみ)に応じた地盤の非線形特性を考慮している (対象) 原子炉建屋 など	△	別紙-1	11月下旬	
	6	弾塑性解析の適用	応力解析モデルへの弾塑性解析の適用	BWR (柏崎6.7号)	方針は柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 地震動の増大に対し, より現実的な挙動把握のため, 原子炉格納施設の基礎などの鉄筋コンクリート部材の応力解析において, 材料(コンクリート, 鉄筋)の非線形特性を考慮した弾塑性解析を適用	- (対象) 原子炉建屋, 制御建屋の基礎版 など	○	-	12月下旬
		原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の採用	PWR (川内1.2号タービン建屋, 伊方3号タービン建屋) BWR (柏崎6.7号)	方針は先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 原子炉建屋の屋根トラスの地震応答解析において, 材料(鉄骨)の非線形特性を考慮した3次元FEMモデルによる弾塑性解析を適用	- (対象) 原子炉建屋, 制御建屋の屋根トラス	○	-	12月下旬	
	屋外重要土木構築物	7	時刻歴応答解析	PWR (高浜1,2,3,4号他) BWR (柏崎6.7号)	方針は先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 現実的な挙動特性を考慮するため, 地震応答解析にFEMモデルによる非線形解析手法を適用(時刻歴応答解析) - 鉛直地震動について静的入力から動的入力に変更(水平・上下同時入力) - 評価基準値は, 限界状態設計法も考慮	- (対象) 原子炉機器冷却海水配管ダクト, 排気筒連絡ダクト, 軽油タンク連絡ダクト, 取水路蓋渠	○	-	11月中旬
			減衰定数の変更	方針は先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 地震応答解析手法の変更に伴い, 減衰定数に非線形特性を適用(履歴減衰, レーリー減衰)	- (対象) 同上	○	-	11月中旬	
8		構造解析における三次元モデルの適用	BWR (女川2号建設工認)	女川2号炉の建設工認と同様, 三次元モデルによる構造解析を実施 【女川2号(建設工認)】 海水ポンプ室および取水口について, 2次元地震応答解析(等価線形解析)によって地震時外力を評価し, これを三次元線形モデルに静的に入力して構造照査を実施	海水ポンプ室及び取水口について, 三次元材料非線形モデルを用いた構造解析を実施している - 時刻歴非線形解析により地震時外力を評価し, 三次元材料非線形モデルに静的に入力して構造照査を実施	●	別紙-2	12月下旬	
		隣接構造物のモデル化	PWR (高浜1,2,3,4号他) BWR (柏崎6.7号)	方針は先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり, 以下のとおり - 地震応答解析において, 応答を適切に評価するため隣接構造物をモデル化	- (対象) 復水貯蔵タンク基礎, 軽油タンク室, 軽油タンク連絡ダクト	○	-	11月下旬	
新規	後施工せん断補強筋による耐震補強	PWR (美浜3号)	美浜3号炉と同様であり, 以下のとおり - 耐震補強工法として, 後施工せん断補強工法を適用しており, 当該構造物のせん断耐力に補強効果を考慮 - 補強効果は, 建設技術審査証明報告書の記載内容に従い, 通常のせん断補強筋が持つ耐力に有効率を乗じて評価	女川で適用した後施工せん断補強工法(CCb工法)は, 美浜とは工法及び施設条件が異なることから, これを踏まえた補強効果の確認及び施工管理方法について説明する なお, 取水路蓋渠(漸拡部)については, 後施工せん断補強筋により耐震補強をした部材に対し, 材料非線形解析によりせん断耐力を評価しているため, この評価方針について説明する (対象) 原子炉機器冷却海水配管ダクト, 復水貯蔵タンク基礎, 軽油タンク室, 取水路蓋渠	●	-	1月下旬		

※ 凡例  
○: 先行電力と同様であり大きな論点はないと考えるもの  
△: 基本的な考え方は先行電力と同様であるが, 一部相違点があるもの  
●: 先行実績がないもの

分類	整理 No.	変更項目	適用実績・審査実績	適用実績・審査実績との共通事項	新規もしくはサイトマターの論点※	備考	審査可能時期			
機器・配管系	9	サプレッションチェンバ内部水質量の考え方変更	内部水質量の考え方	-	-	既工認では内部水を剛体とみなして地震荷重評価に水の全荷重を用いていたが、今回の評価では流体としての特性を考慮し水の有効質量(付加質量)を用いる - 容器の耐震設計に有効質量を用いることは一般的であり、また汎用構造解析ソフトにより算出可能 - サプレッションチェンバのような円環形状の容器における有効質量について、実機の縮小試験体による振動試験及び検証解析に基づき説明	●	別紙-3	11月下旬	
	10	原子炉本体基礎の復元力特性の考慮		BWR (柏崎6,7号)	柏崎6, 7号炉と同様であり、以下のとおり - SC構造設計の基礎式を参考にペDESTALの弾塑性手法を構築	柏崎6, 7号炉と女川2号炉の原子炉本体基礎の構造の違いと適用性について説明する - 下部ベDESTALは、ベント管有無の構造の相違があるが、上部ベDESTALは構造が同様であり、同じ評価式が適用可能 - ベDESTALを線形から非線形として扱うことに対するパラスタを実施し、建屋-ベDESTALの荷重分担とベDESTAL基部の荷重比較を実施	△	-	12月中旬	
	12	クレーン類のギャップ非線形モデルの採用	燃料交換機		-	-	既工認では燃料交換機の脚部がレールに固定されている3次元梁モデルでスペクトルモーダル解析を行っていたが、今回の評価では燃料交換機が地震時に落下することを防止するために設置したガイドブレードを解析モデルに反映する 併せて、動的な鉛直地震動の導入に伴い、車輪部に浮き上がり、衝突を考慮した非線形要素(ギャップ)を解析モデルに追加し、時刻歴応答解析を行う	●	別紙-4	11月下旬
			原子炉建屋クレーン	BWR (大間, 柏崎6,7号)	先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり、以下のとおり - 動的な鉛直地震動の導入に伴い、車輪部に浮き上がり、衝突を考慮した非線形要素(ギャップ)を解析モデルに追加し、時刻歴応答解析を実施	(天井クレーンの構造及び解析モデルとも大間及び柏崎6, 7号炉と類似)	○	-	11月下旬	
	13	燃料ラックの減衰定数の変更	角管並列型	BWR (柏崎6,7号)	柏崎6, 7号炉と同様であり、以下のとおり - 角管型ラックに対し、振動試験の内容及び振動試験結果に基づき減衰定数(Ss:7%, Sd:5%)を適用	ラックに対する振動試験結果と女川2号炉のSs, Sdによるラックの応答加速度に基づき、今回設定した減衰定数の適用性について説明する - 柏崎6, 7号炉は格子型ラックに対する振動試験をメインに説明し、角管型ラックに対する振動試験結果も同程度と説明 - 女川2号炉は角管型ラックに対する振動試験にて説明	△	-	11月中旬	
	15	ポンプ等の応答解析モデルの精緻化		PWR (川内1,2号, 高浜3,4号 他) BWR (大間, 柏崎6,7号, 東通1号建設工認)	先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり、以下のとおり - 最新工認実績や最新知見(JEAG4601)等を踏まえ応答解析モデルを見直し	最新工認実績や最新知見(JEAG4601)等に基づき適用する (対象) 立型ポンプ(海水系ポンプ) : 1軸モデルから3軸モデルへ見直し 局部出力領域モニタ検出器集合体 : 解析モデルへの質点追加	○	-	11月下旬	
クレーン類, 配管系の減衰定数の変更		PWR (川内1,2号, 高浜3,4号 他) BWR (大間, 柏崎6,7号)	先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり、以下のとおり - 振動試験結果を踏まえ、クレーン類及び配管系について、JEAC4601-2008に規定されている減衰定数に変更	-	○	-	11月下旬			
共通	17	鉛直方向の動的地震力の適用	地震応答解析モデルの追加及び鉛直方向の減衰定数の考慮	PWR (川内1,2号, 高浜3,4号 他) BWR (大間, 柏崎6,7号)	先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり、以下のとおり - 鉛直方向への動的地震力の適用に伴い、鉛直方向に柔な設備について鉛直方向の減衰定数を新たに考慮し、鉛直方向の解析モデルを追加	-	○	-	11月下旬	
		鉛直方向の動的地震力の適用	水平方向及び鉛直方向地震力の組合せ方法の変更	PWR (川内1,2号, 高浜3,4号 他) BWR (大間, 柏崎6,7号)	先行電力及び柏崎6, 7号炉と同様であり、以下のとおり - 鉛直方向地震力が動的地震力に変更になったことに伴い、水平方向及び鉛直方向地震力の組合せ方法を、絶対値和法から組合せ係数法やSRSS法に一部変更	-	○	-	11月下旬	

※ 凡例  
○: 先行電力と同様であり大きな論点はないと考えるもの  
△: 基本的な考え方は先行電力と同様であるが、一部相違点があるもの  
●: 先行実績がないもの

Ⅲ. その他

分類	整理 No.	項目	適用実績・審査実績	適用実績・審査実績との共通事項	新規もしくはサイトマターの論点※	備考	審査可能時期	
共通	a	地盤の液状化	PWR (高浜1,2,3,4号他) BWR (柏崎6,7号)	先行電力及び柏崎6,7号炉と同様であり、以下のとおり - 液状化の可能性のある砂層の地震時挙動を踏まえた構造物の機能が維持されることを有効応力解析などにより確認	- 液状化については、地質やその性状などがサイトにより異なるため、女川固有のものとして説明 - 液状化の可能性のある砂層の地震時挙動を踏まえた有効応力解析が必要な構造物として、防潮堤を抽出	△	別紙-5	1月上旬
	b	保管場所・アクセスルート(斜面他)	PWR (高浜1,2,3,4号他) BWR (柏崎6,7号)	先行電力及び柏崎6,7号炉と同様であり、以下のとおり - 保管場所の沈下及び斜面評価、並びにアクセスルートの段差及び斜面評価を考慮した仮復旧評価を実施	- 評価対象とする斜面を、アクセスルート等からの離隔を「1.4×斜面高さ」としていることの妥当性について説明 - 一部の斜面について一次元等価線形解析から得られる応答にて安定性評価を行っていることから、その妥当性について説明	○	-	12月下旬
	c	耐津波設計	PWR (高浜1,2,3,4号他) BWR (柏崎6,7号)	先行電力及び柏崎6,7号炉と同様であり、以下のとおり - 海水ポンプ室及び放水立坑からの津波流入を除く外郭防護及び内郭防護の考え方、漂流物選定等の設定方針については、入力津波高さが敷地高さを超える先行サイトと同様の方針としている	- 防潮堤の構造等について、女川固有のものとして説明 - 津波浸水防護の対策として、津波流入経路となる海水ポンプ室及び放水立坑からの浸水防止対策を女川固有の対策として説明	△	-	1月上旬

※ 凡例

○: 先行電力と同様であり大きな論点はないと考えるもの

△: 基本的な考え方は先行電力と同様であるが、一部相違点があるもの

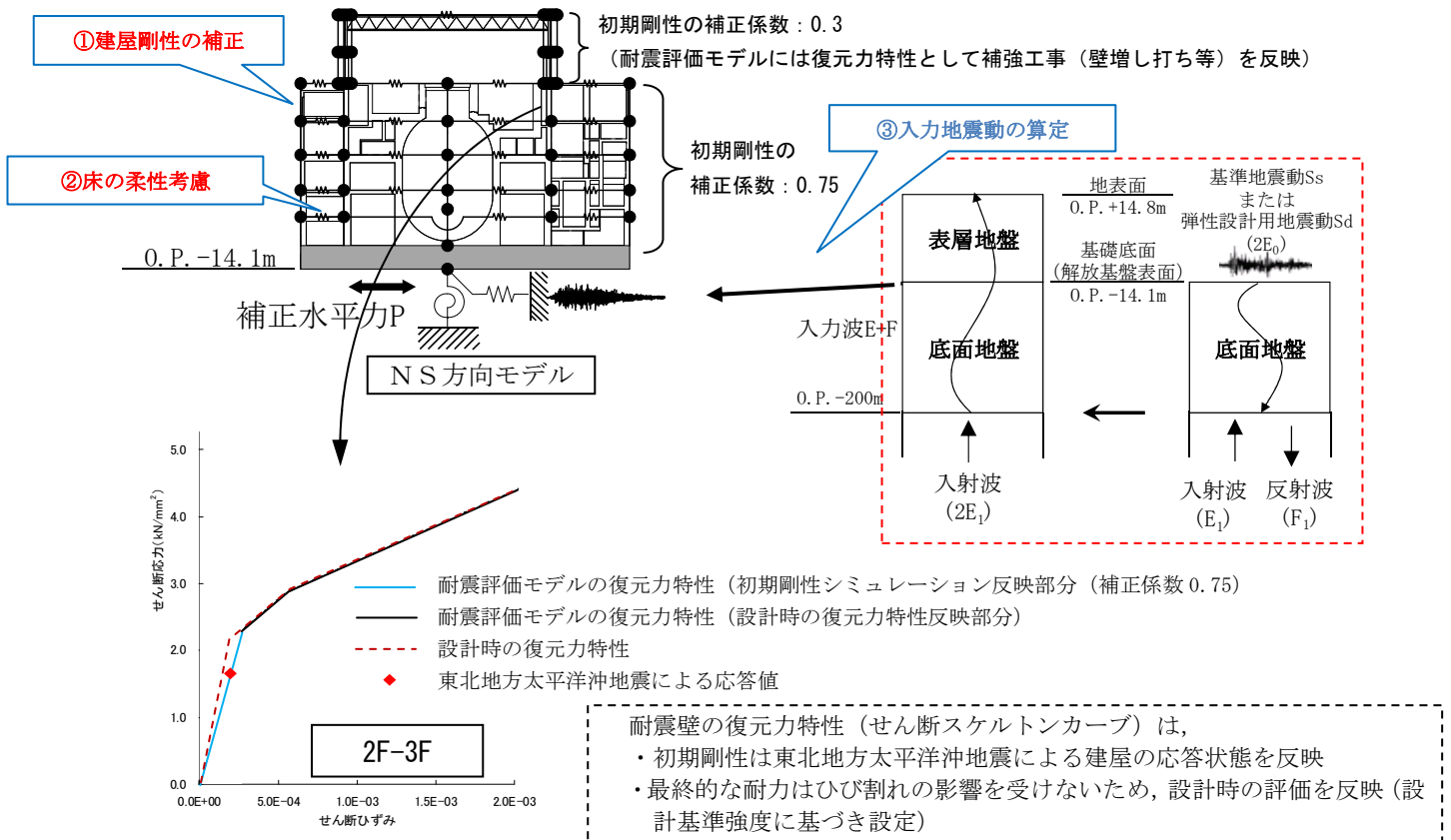
●: 先行実績がないもの

### 3. 建屋の地震応答解析モデル

女川2号機の建屋は、平成23年東北地方太平洋沖地震等によって耐震壁に細かいひび割れが発生し、そのため初期剛性が低下している。この状態を耐震評価モデルに反映するために、モデルの初期剛性等は地震観測シミュレーション解析結果を踏まえ設定している。

表1 地震応答解析モデルの変更項目

整理No.	変更項目	適合性審査（申請時）	既工認（建設時）
3	東北地方太平洋沖地震による建屋の応答状態の反映	シミュレーション解析に基づいた建屋初期剛性の採用	設計基準強度に基づく建屋剛性を設定
		考慮	非考慮
	入力地震動の算定	建屋は約29m掘り込まれており、周辺地盤による入力地震動の低減効果を考慮	基準地震動を建屋基礎下に直接入力（低減効果無視）



せん断スケルトンカーブの設定例

図1 原子炉建屋を例とした地震応答解析モデルの変更項目

## 8. 解析モデルの精緻化 —構造解析における三次元モデルの適用—

### 1. はじめに

三次元の複雑な構造物については、二次元動的解析で評価した動土圧・慣性力を三次元モデルへ作用させて構造解析を実施する。

三次元モデルには、①線形シェルモデル、②非線形シェルモデル、③非線形ソリッドモデルがある。三次元モデルによる構造解析を行っている構造物を表1に示す。

表1 三次元モデルによる構造解析を行っている構造物

三次元モデル	今回工認の対象構造物	既工認におけるモデル
① 線形シェルモデル	・地下軽油タンク室 (SA-LOT)	—
② 非線形シェルモデル	・復水貯蔵タンク基礎 (CST) ・軽油タンク基礎室 (DB-LOT)	・線形シェルモデル (CST)
③ 非線形ソリッドモデル	・海水ポンプ室 ・取水口	・線形シェルモデル (海水ポンプ室, 取水口)

### 2. 線形シェルモデル

女川2号海水ポンプ室、取水口等の建設工認と同様の三次元線形シェルモデルによる手法を適用している。

### 3. 非線形シェルモデル

非線形性を考慮可能な三次元シェルモデルによる手法を適用し、「コンクリート標準示方書(土木学会, 2012)」に準拠している。

### 4. 非線形ソリッドモデル

以下、海水ポンプ室を代表に説明する。

#### 4.1 構造解析モデル

海水ポンプ室の三次元モデルは、躯体を**非線形ソリッド要素でモデル化**し、周辺地盤を地盤ばねでモデル化している(図1)。

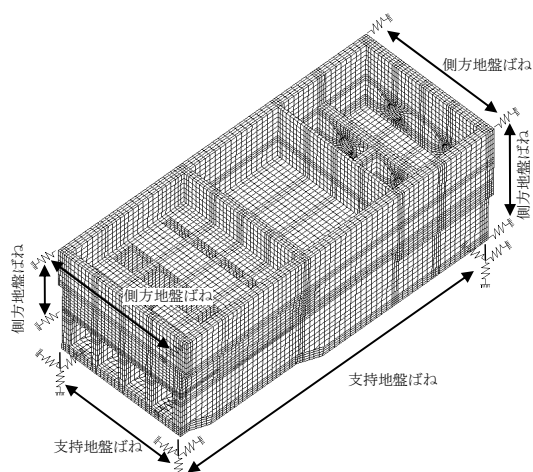


図1 海水ポンプ室の構造解析モデル

## 4.2 評価フロー

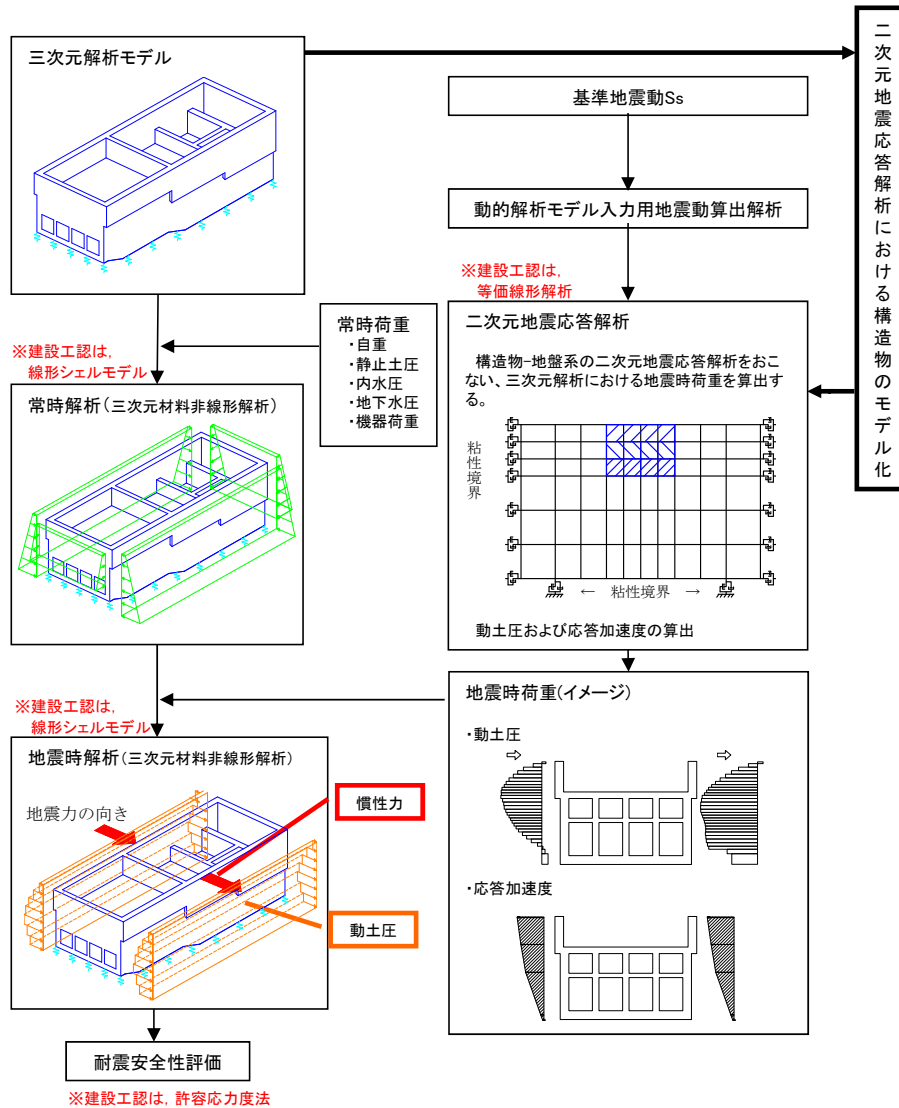


図2 評価フロー

## 4.3 耐震安全性評価

### (1) 安全係数

材料係数，部材係数，荷重係数，構造解析係数，構造物係数を適切に見込む。

部材係数については，材料非線形解析から得られる限界値の精度を適切に評価するため，既往の実験と材料非線形解析の比較等により適切に設定する。

### (2) 地震時荷重における要求性能の照査

二次元地震応答解析により評価した地震時荷重を載荷した状態について，要求性能を満足することを確認する。間接支持機能や通水性能等の要求性能毎に層間変形角や圧縮縁コンクリートひずみ，壁部材の面内せん断ひずみ，鉄筋ひずみ等により照査する。

### (3) 構造物の耐荷力に対する照査

**照査用総水平力 < 照査用総水平耐力**

**構造物の耐荷力が地震荷重載荷時の総水平力に対して十分に余裕があることを確認する。**

構造物の耐荷力は，構造解析モデルに載荷する地震時荷重を漸増させることにより確認する。構造物の荷重－変位関係において，荷重の増分に対して変位が急増する点を構造物の耐荷力と判断する。地震時に総水平力と耐荷力にはそれぞれ安全係数を考慮して照査用総水平力と照査用総水平耐力を設定する。

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）」や「コンクリート標準示方書（土木学会，2012）」に準拠しており，川内1，2号や柏崎刈羽6，7号で採用されている二次元材料非線形解析によるせん断耐力評価と同様の内容である。

$$\gamma_t \frac{P_d}{P_u} = \gamma_t \cdot \frac{\gamma_c \cdot P_0}{P/\gamma_b} \leq 1.0$$

ここに，f

- $\gamma_t$  : 構造物係数 (=1.0)
- $\gamma_c$  : 構造解析係数 (=1.05)
- $P_d$  : 照査用総水平力 (=  $\gamma_c \cdot P_0$ )
- $P_u$  : 照査用総水平耐力 (=  $P/\gamma_b$ )
- $P_0$  : 地震時増分荷重の総和
- $P$  : 三次元材料非線形解析から求めた構造物の耐荷力
- $\gamma_b$  : 部材係数 (キャリブレーション解析により設定)

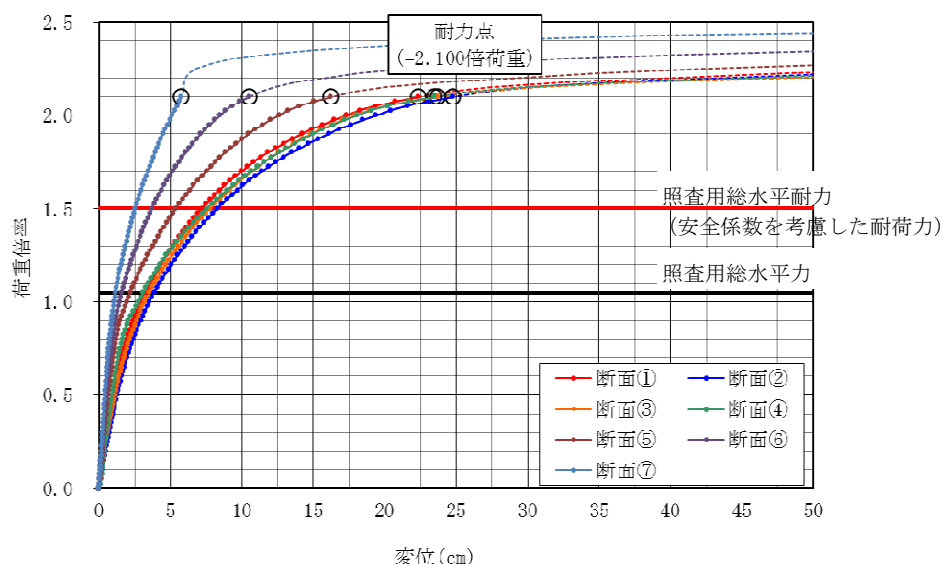


図3 荷重—変位による照査用総水平耐力の設定例

以 上



### 9. サプレッションチェンバ内部水質量の考え方変更

既工認では、水全体を剛体と見なし、地震荷重の算出に当たって水の全質量を用いていたが、今回の評価では、容器の耐震設計に一般的に用いられている水の有効質量を適用する。

水の有効質量は、汎用構造解析ソフト（NASTRAN）を用いるとことで算出可能であり、実機の縮小試験体による振動試験、構造解析（NASTRAN）、流体解析（OpenFOAM）の比較により妥当性を検証した。

（図 1）

検証の結果、振動試験、構造解析（NASTRAN）、流体解析（OpenFOAM）により得られた水の有効質量比（水の有効質量/水の全質量）がほぼ一致し、構造解析（NASTRAN）により水の有効質量比を算出することの妥当性を確認した。

実機耐震評価に適用する水の有効質量比は、内部構造物等を適切にモデル化した実機解析モデルを用いて構造解析（NASTRAN）により算定し、流体解析（OpenFOAM）との比較・妥当性検証を行い、更に保守性を考慮し設定する。（図 1）

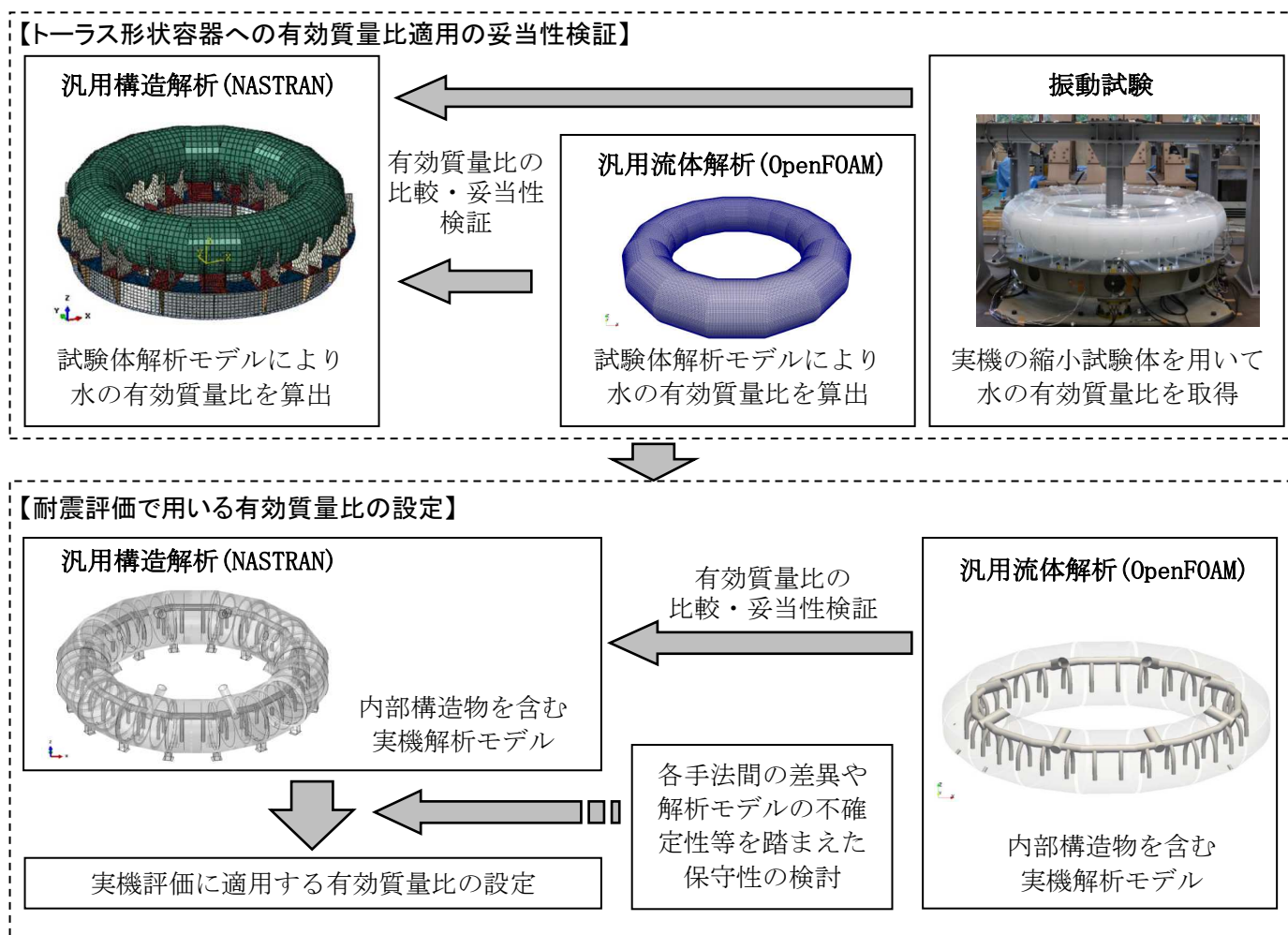


図 1 有効質量比の妥当性検証方法の概要

## 1.2. 燃料交換機のギャップ非線形モデルの採用

既工認では、燃料交換機脚部がレールに固定されている3次元梁モデルでスペクトルモーダル解析を行っていた。今回の評価では解析モデルに以下の変更を行う。

○落下防止部材として新規設置したガイドプレート解析モデルへ反映。

○動的な鉛直地震動の導入に伴い、車輪部に浮き上がり、衝突を模擬可能な非線形要素（ギャップ）を解析モデルに追加し、時刻歴応答解析を行う。

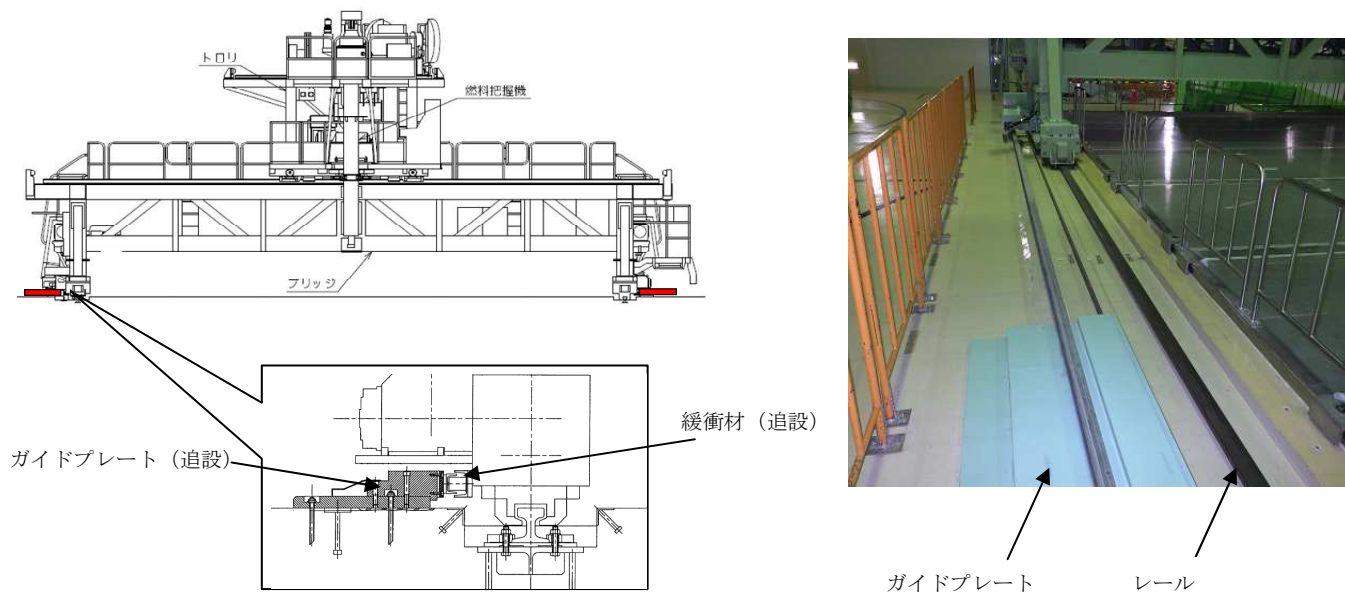


図1 燃料交換機のガイドプレートの概要

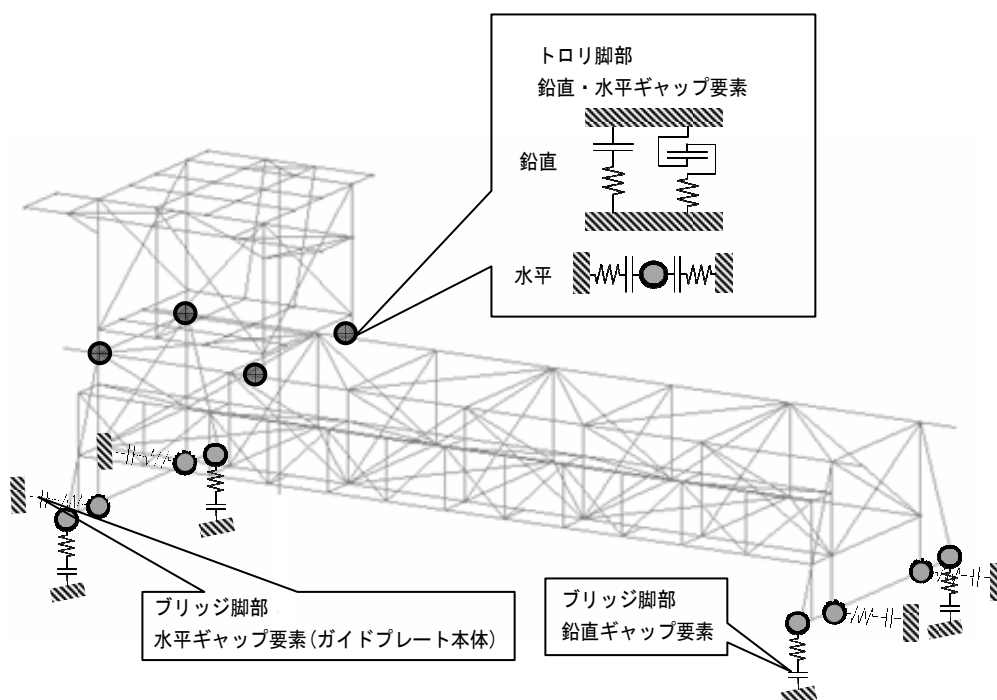


図2 燃料交換機解析モデル（今回工認）

a. 地盤の液状化

防潮堤については、杭周辺に液状化の評価が必要な層（旧表土）が存在し、直下はFL判定から液状化しないことを確認しているが、土被りの浅いエプロン部は液状化を考慮した解析が必要であることから、地盤の変形を考慮した杭の評価を行うため、有効応力解析（FLIP）を実施する。解析に用いる地盤の物性値は、物理試験および液状化試験の結果を踏まえ設定する。

なお、海水ポンプ室等の屋外重要土木構造物は、岩盤支持されており、非液状化層中に設置されている。

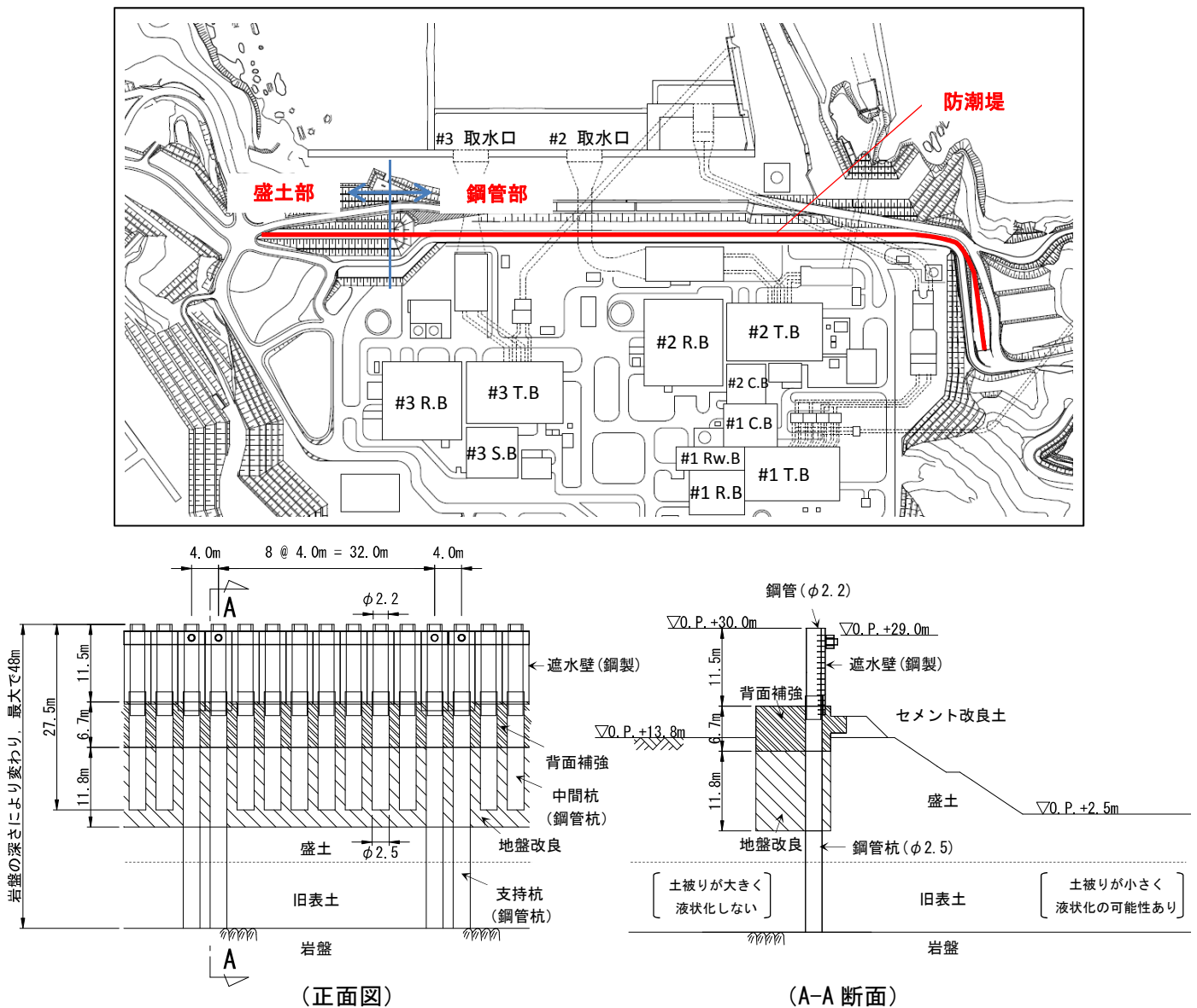


図1 防潮堤（鋼管杭部）標準断面図

(対象構造物)

- ・ 防潮堤