

島根原子力発電所第2号機 審査資料

資料番号

NS2-他-235

提出年月日

2022年11月1日

島根原子力発電所第2号機 サブプレッションチェンバの耐震評価

2022年11月
中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

Energia

1. サプレッションチェンバの構造概要	3
2. 耐震評価における既工認からの変更内容	5
3. 設置変更許可段階での説明内容（既工認からの変更内容を踏まえた耐震設計への考慮事項）	6
4. 詳細設計送付事項への対応	7
5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討	8
6. スロッシング荷重に関する詳細設計について	19
7. 耐震評価における水位条件の設定について	21
8. まとめ	23
参考1 サプレッションチェンバ内部水の有効質量の算定	24
参考2 地震応答解析モデルへの内部水の有効質量の設定（Guyan縮約）	25
参考3 サプレッションチェンバサポート取付部のばね剛性の算定	26
参考4 サプレッションチェンバのモデル化に係る固有周期への影響検討	27

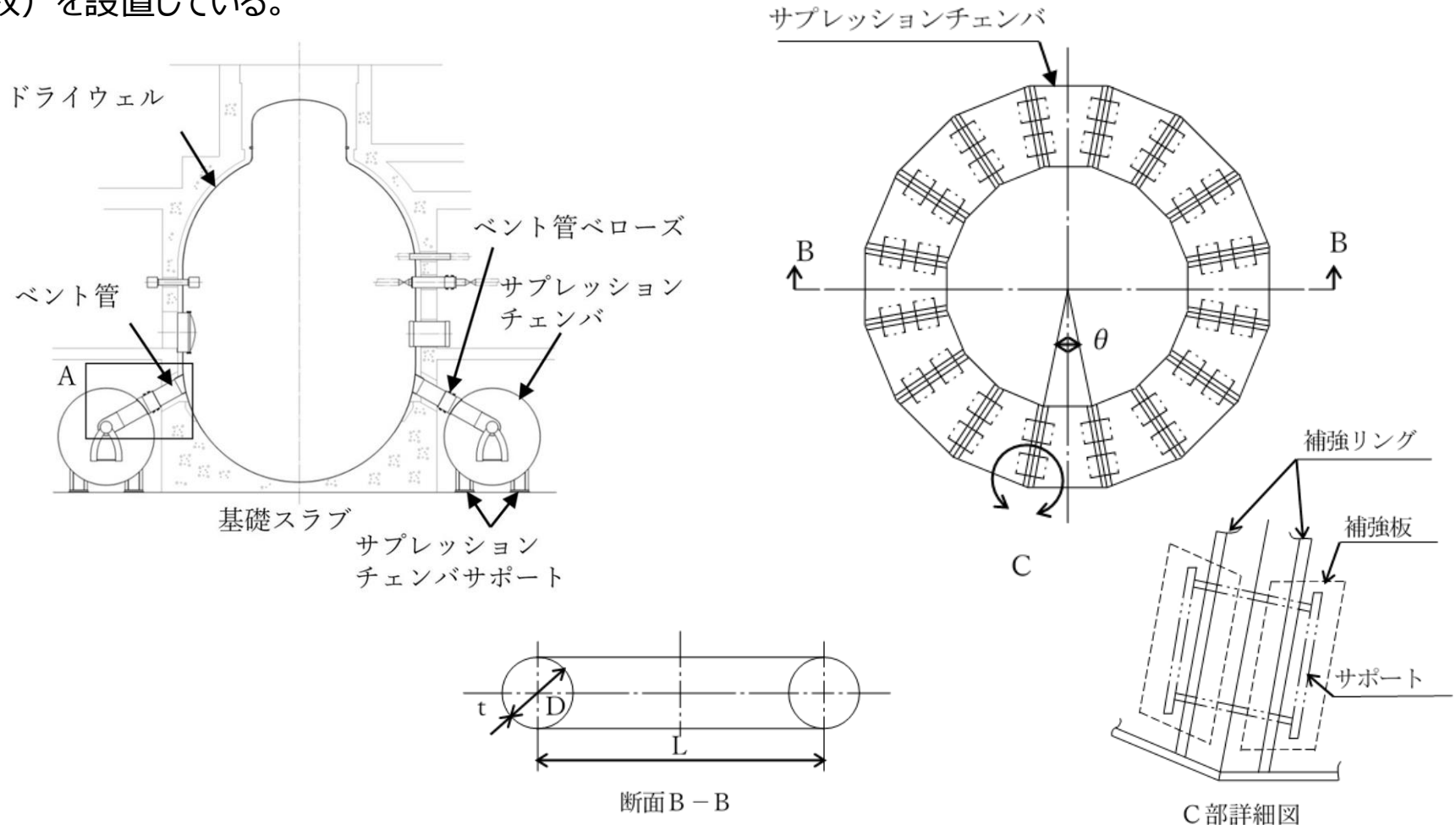
詳細設計申送り事項に対する回答

設置変更許可審査時において、「サブレッションチェンバの耐震評価」に関して以下の詳細設計へ申送りした事項（詳細設計申送り事項）があったことから、詳細設計申送り事項に対する回答について説明する。

No.	詳細設計申送り事項	分類	回答	回答頁
1	<ul style="list-style-type: none"> スペクトルモーダル解析モデルについて、サブレッション・チェンバサポート位置の質点はサブレッション・チェンバの円周方向に剛に固定されており、構造上の特徴から支持点付近の円周方向は高振動数にならないと振動しないので、詳細設計段階で高次モードの影響も評価して説明する。 (第814回審査会合(2019年12月17日)) 	B	<ul style="list-style-type: none"> サブレッションチェンバの地震応答解析モデルでは、サブレッションチェンバサポート及び取付部は剛性を考慮したモデル化をしており、サポート間のはり要素については3つの節点を設定していることから、高振動数領域での応答を表現可能なモデル化とした。 	P.12
2	<ul style="list-style-type: none"> 3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析について、過小評価とならないことを詳細設計段階で説明する。 (第272回ヒアリング(2019年12月4日)) 	A	<ul style="list-style-type: none"> 3次元はりモデルと適用性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)の耐震評価結果の比較により、評価上厳しい部位であるサブレッションチェンバサポートに対して、3次元はりモデルは保守的な結果が得られることを確認しました。またサブレッションチェンバについては、オーバル振動を考慮した場合においても評価結果には十分余裕があることを確認した。 	P.13~18
3	<ul style="list-style-type: none"> サブレッションチェンバの耐震評価において、流体解析で算出したスロッシング荷重の考慮法を詳細設計段階で説明する。 (第264回ヒアリング(2019年11月19日)) 	B	<ul style="list-style-type: none"> サブレッションチェンバの耐震評価において、スロッシング荷重による応力の評価方法を記載した。 	P.19~20
4	<ul style="list-style-type: none"> スペクトルモーダル解析モデルについて、サブレッション・チェンバサポート位置の質点はサブレッション・チェンバの円周方向に剛に固定されており、構造上の特徴から支持点付近の円周方向は高振動数にならないと振動しないので、詳細設計段階で高次モードの影響も評価して説明する。 (まとめ資料における当社の記載) 	B	<ul style="list-style-type: none"> 通常運転時の耐震評価に重大事故等時に考慮する水位条件を適用することについて、固有周期と床応答スペクトルの関係を考慮した場合においても保守的な条件であることを確認した。 	P.21~22

1. サプレッションチェンバの構造概要 (1/2)

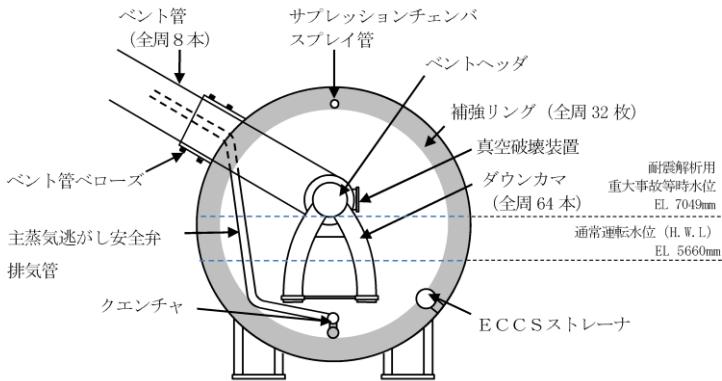
- サプレッションチェンバは、円筒（合計16セグメント）を繋ぎ合わせた円環形状の構造物であり、内部に水を有している。また、円筒胴内部には円筒（小円）の変形を抑制するための補強リング（合計32枚）を設置している。



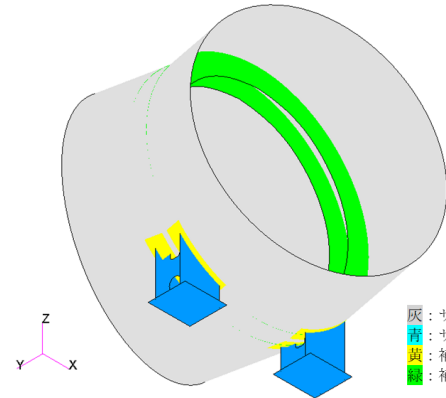
サプレッションチェンバの構造概要

1. サプレッションチェンバの構造概要 (2/2)

- 円筒の各セグメントの継ぎ目部（胴エビ継部）には、サプレッションチェンバサポート（内外に合計32箇所）が取り付けられており、基礎ボルトを介して原子炉建物基礎スラブ上に自立している。
- サプレッションチェンバサポートは、サプレッションチェンバの大円半径方向の熱膨張を吸収するように可動し、大円周方向の地震荷重を原子炉建物基礎スラブに伝達させる構造となっている。

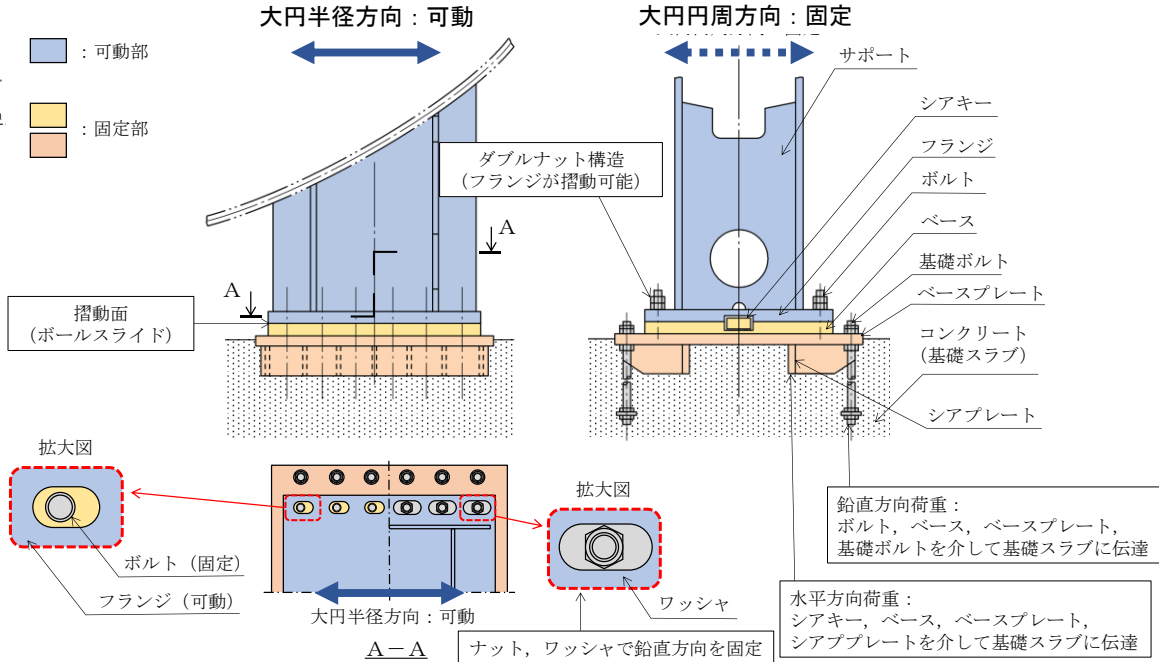


サプレッションチェンバの断面概要



サプレッションチェンバサポートの取付概要

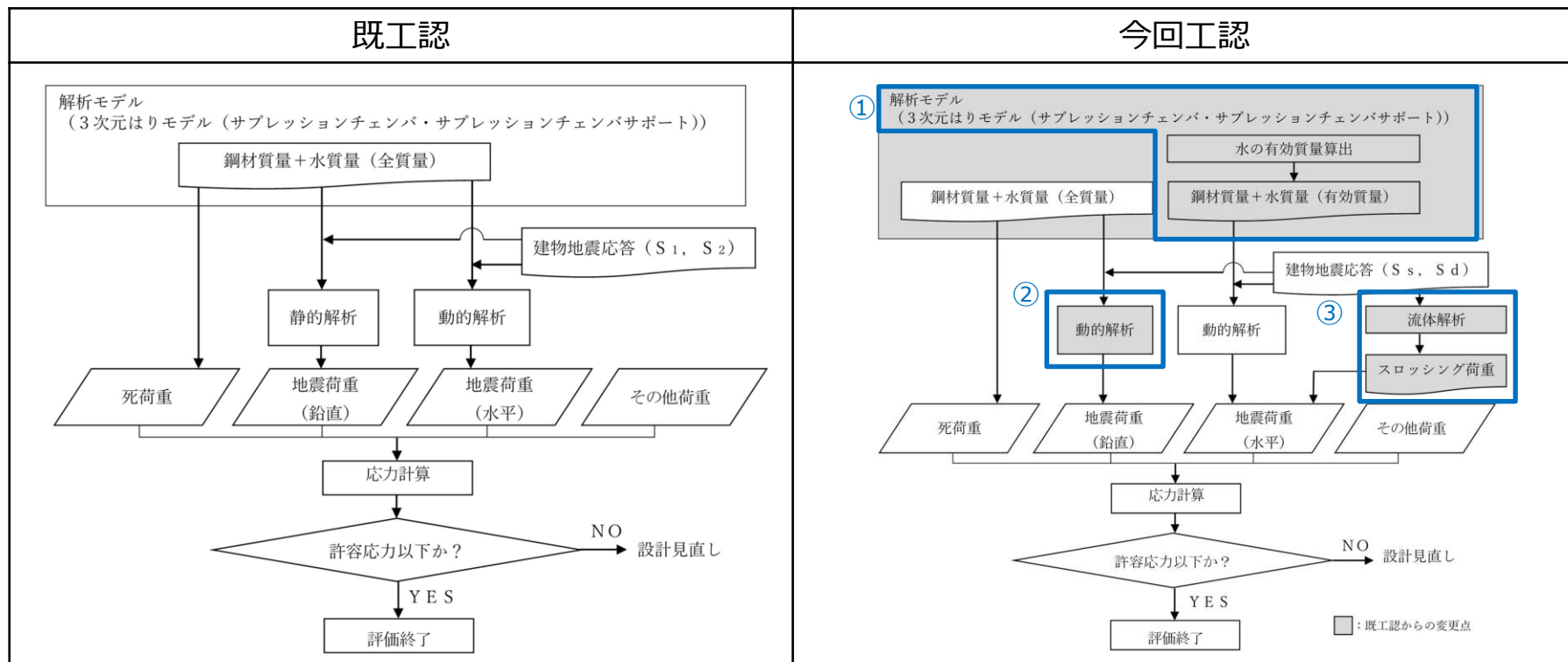
■ 灰：サプレッションチェンバ胴
■ 青：サプレッションチェンバサポート
■ 黄：補強板
■ 緑：補強リング



サプレッションチェンバサポートの構造詳細




2. 耐震評価における既工認からの変更内容

- 今回工認の耐震評価は、重大事故等時のサプレッションチェンバ内部水質量の増加，基準地震動 S_s の増大等を踏まえて既工認より以下を変更した。
 - ① 内部水質量に対する有効質量の適用（参考 1， 2）
 - ② 地震応答解析手法の変更（鉛直方向の動的解析：スペクトルモーダル解析）
 - ③ 流体解析によるスロッシング荷重の個別評価
- サプレッションチェンバの地震応答解析モデルについては，既工認がはりモデルであったことを踏まえ，今回工認でも 3 次元はりモデルを適用し，より詳細な検討を実施した。



3. 設置変更許可段階での説明内容 (既工認からの変更内容を踏まえた耐震設計への考慮事項)

- 設置変更許可審査（第814回審査会合，2019年12月17日）において，既工認からの変更内容を踏まえて，工認段階におけるサブプレッションチェンバの耐震設計への考慮事項を纏めた。

項目	耐震設計への考慮事項（設置変更許可段階での説明内容）
①内部水質量に対する有効質量の適用 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 汎用構造解析プログラム（NASTRAN）の仮想質量法を用いて，サブプレッションチェンバ内部水の有効質量を算定する。 ➤ サプレッションチェンバ内部水の有効質量が固有周期に関連することを踏まえ，流体解析で算出された有効質量に対する固有周期と床応答スペクトルとの関係も確認し，地震応答解析への影響を確認する。
②地震応答解析手法の変更 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サプレッションチェンバの動的解析に3次元はりモデルによるスペクトルモーダル解析を適用する（既工認と同様）。 ➤ サプレッションチェンバ内部水の有効質量のモデル化は，Guyanの縮約法を適用する。
③流体解析によるスロッシング荷重の個別評価 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 流体解析によるサブプレッションチェンバ内部水のスロッシング荷重は，水平2方向+鉛直方向の荷重の組合せを考慮し，保守的に評価する。 ➤ スロッシング荷重は，時刻及び地震動によって異なるが，地震荷重の組合せとして保守的に最大値を考慮する。

4. 詳細設計申送り事項への対応

- 本資料では、今回工認におけるサプレッションチェンバの耐震評価に関して、耐震設計への考慮事項及び詳細設計申送り事項を踏まえ、設置変更許可段階では考慮されていなかった以下の項目の検討結果について説明する。

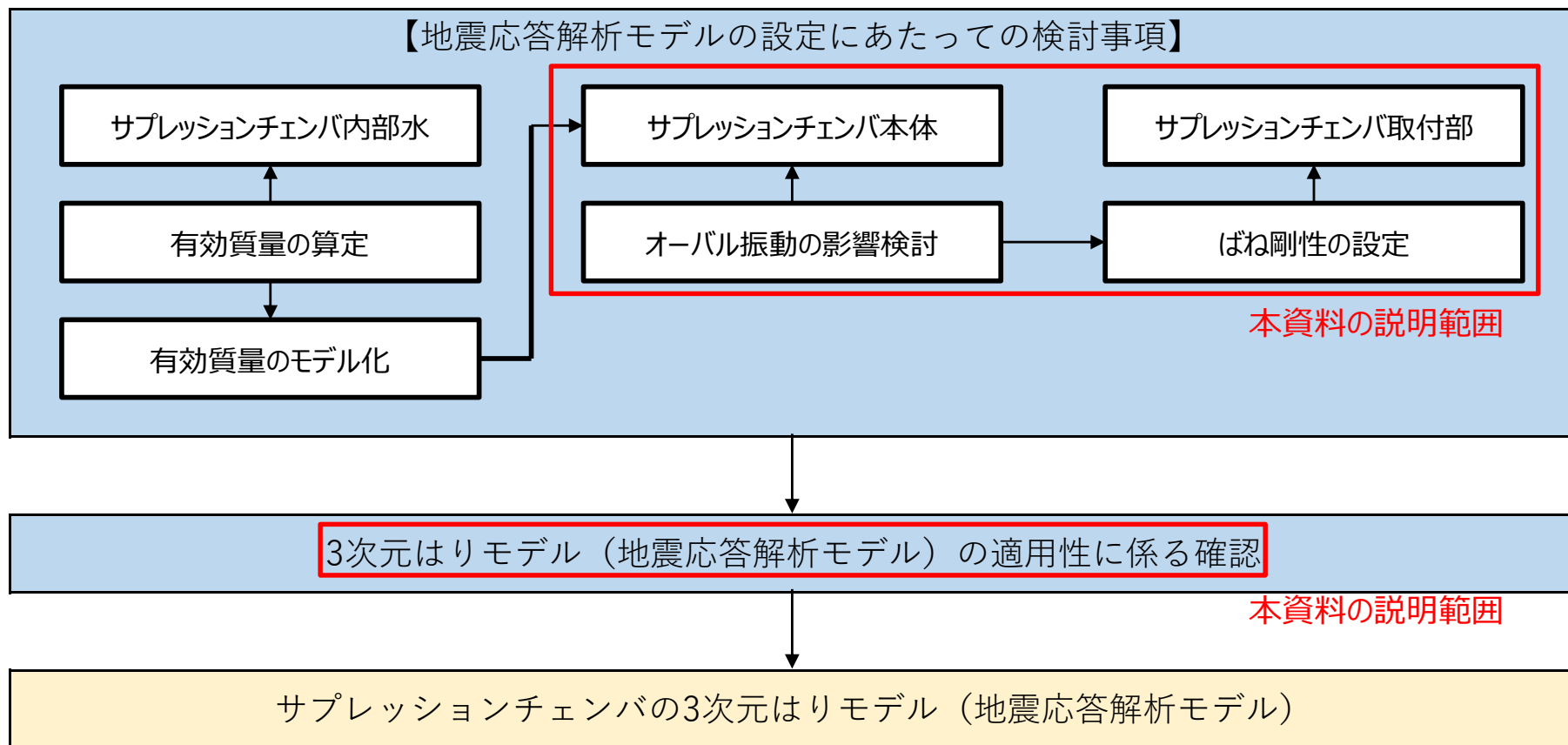
詳細設計申送り事項	今回工認での検討結果	備考
<p>スペクトルモーダル解析モデルについて、サプレッション・チェンバサポート位置の質点はサプレッション・チェンバの円周方向に剛に固定されており、構造上の特徴から支持点付近の円周方向は高振動数にならないと振動しないので、詳細設計段階で高次モードの影響も評価して説明する。</p>	<p>サプレッションチェンバの地震応答解析モデルでは、サプレッションチェンバサポート及び取付部は剛性を考慮したモデル化をしており、サポート間のはり要素については3つの節点を設定していることから、高振動数領域での応答を表現可能なモデル化とした。</p>	<p>5.4項にて説明</p>
<p>3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析について、過小評価としないことを詳細設計段階で説明する。</p>	<p>3次元はりモデルと適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の耐震評価結果の比較により、評価上厳しい部位であるサプレッションチェンバサポートに対して、3次元はりモデルは保守的な結果が得られることを確認しました。またサプレッションチェンバについては、オーバル振動を考慮した場合においても評価結果には十分余裕があることを確認した。</p>	<p>5.5項にて説明</p>
<p>サプレッションチェンバの耐震評価において、流体解析で算出したスロッシング荷重の考慮法を詳細設計段階で説明する。</p>	<p>サプレッションチェンバの耐震評価において、スロッシング荷重による応力の評価方法を記載した。</p>	<p>6項にて説明</p>
<p>水位によりサプレッションチェンバの固有周期が変動するため、耐震評価に用いる床応答スペクトルと固有周期の関係に配慮したサプレッションチェンバの耐震評価における水位条件の設定について説明する。</p>	<p>通常運転時の耐震評価に重大事故等時に考慮する水位条件を適用することについて、固有周期と床応答スペクトルの関係を考慮した場合においても保守的な条件であることを確認した。</p>	<p>7項にて説明</p>

5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

5.1 サプレッションチェンバの地震応答解析モデルの設定フロー

- 今回工認の地震応答解析モデルの設定にあたっては、サプレッションチェンバ内部水、サプレッションチェンバ本体、サプレッションチェンバサポート取付部及びサプレッションチェンバサポートに係る検討に加えて、3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る確認を実施した。

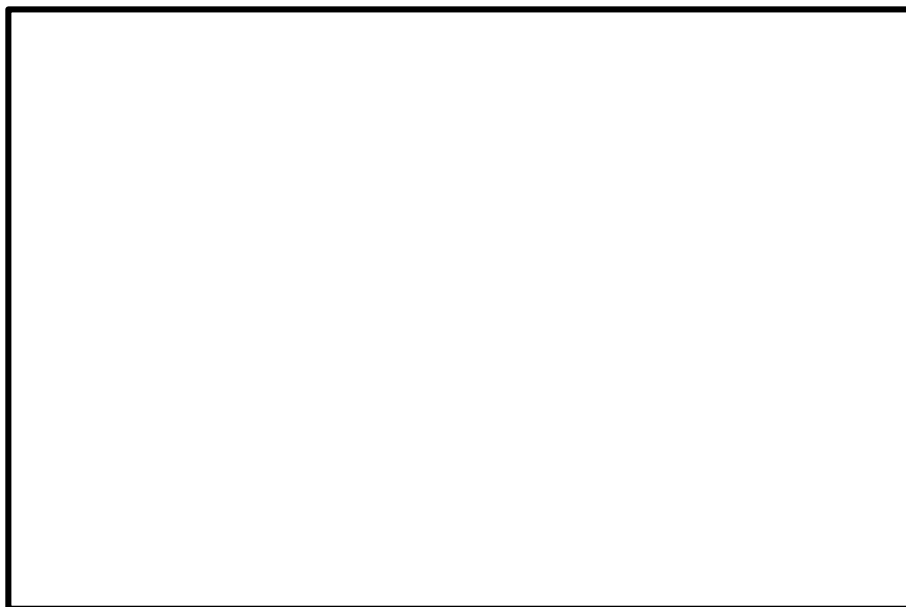
【地震応答解析モデルの設定にあたっての検討事項】



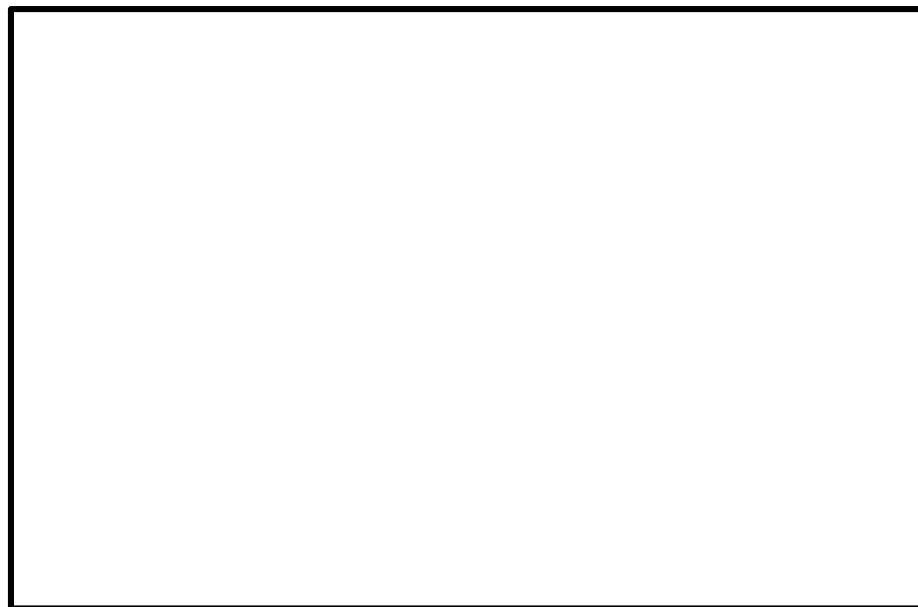
5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

5.2 サプレッションチェンバの3次元はりモデル（地震応答解析モデル）

- 今回工認で設定したサプレッションチェンバの3次元はりモデル（地震応答解析モデル）は下図のとおり。
- 次頁以降，以下の項目に対する検討結果を説明する。
 - サプレッションチェンバサポート取付部の剛性の考慮
 - 高次モードの影響の考慮
 - 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性確認（オーバル振動の影響確認含む）



水平方向



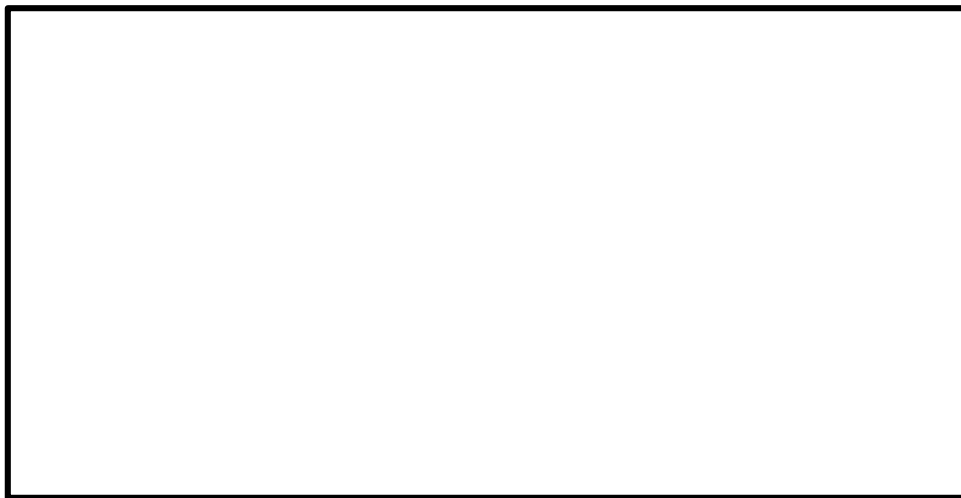
鉛直方向

サプレッションチェンバ及びサプレッションチェンバサポートの3次元はりモデル（地震応答解析モデル）

5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

5.3 サプレッションチェンバサポート取付部の剛性の考慮（1/2）

- サプレッションチェンバサポート取付部は局部変形を防止する構造であることから、既工認ではサプレッションチェンバサポート取付部を剛構造として扱っていた。
- 今回工認における地震応答解析モデルのモデル化にあたっては、各部材に負荷される地震荷重を詳細に評価するため、サプレッションチェンバサポート取付部の局部変形の剛性を考慮する。
- サプレッションチェンバ小円の断面変形及びサプレッションチェンバ胴のオーバル振動による応力評価への影響は5.5項にて確認する。



既工認での地震応答解析モデル



今回工認での地震応答解析モデル

5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

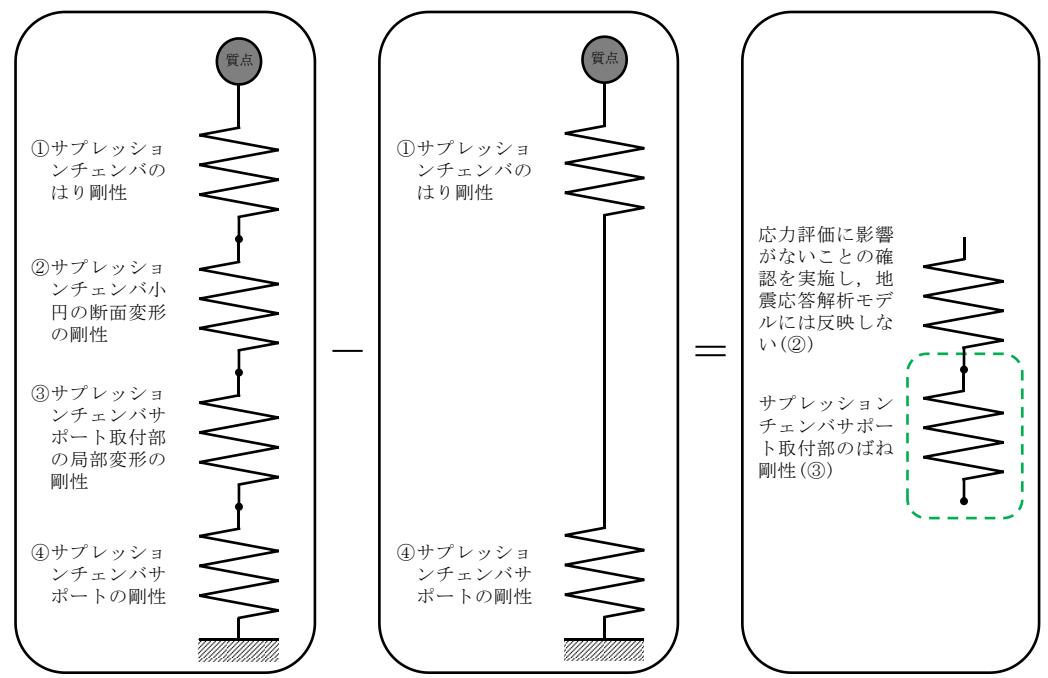
5.3 サプレッションチェンバサポート取付部の剛性の考慮（2/2）

- 今回工認の3次元はりモデル（地震応答解析モデル）に設定するサプレッションチェンバサポート取付部のばね剛性(③サプレッションチェンバサポート取付部の局部変形の剛性)は、剛性算定用のシェルモデル及びはりモデルを作成し、両者の剛性差から算定した。（参考3）
- 取付部のばね剛性は、地震応答解析で影響の大きい面外方向を考慮した。

剛性算定用シェルモデル

剛性算定用はりモデル

地震応答解析モデルに考慮する
サプレッションチェンバサポート
取付部のばね剛性



変位算出用シェルモデル



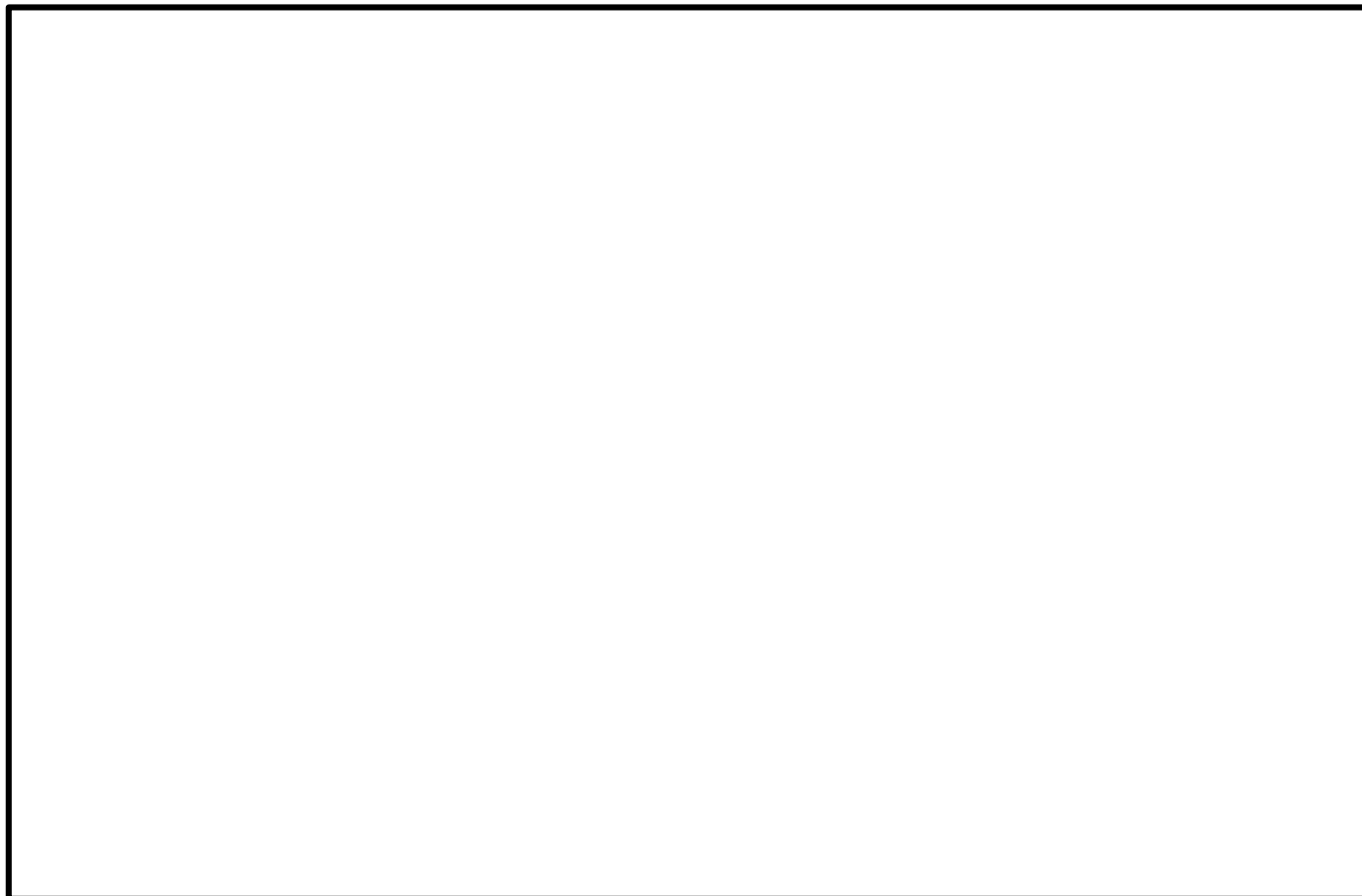
変位算出用はりモデル

サプレッションチェンバサポート取付部のばね剛性算定模式図

5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

5.4 高次モードの影響の考慮

- サプレッションチェンバの地震応答解析モデルでは、サプレッションチェンバサポート及び取付部は剛性を考慮したモデルとしており、サポート間のはり要素については3つの節点を設定していることから、高振動数領域での応答を表現可能なモデルとしている。



サプレッションチェンバ及びサプレッションチェンバサポートの3次元はりモデル（地震応答解析モデル）

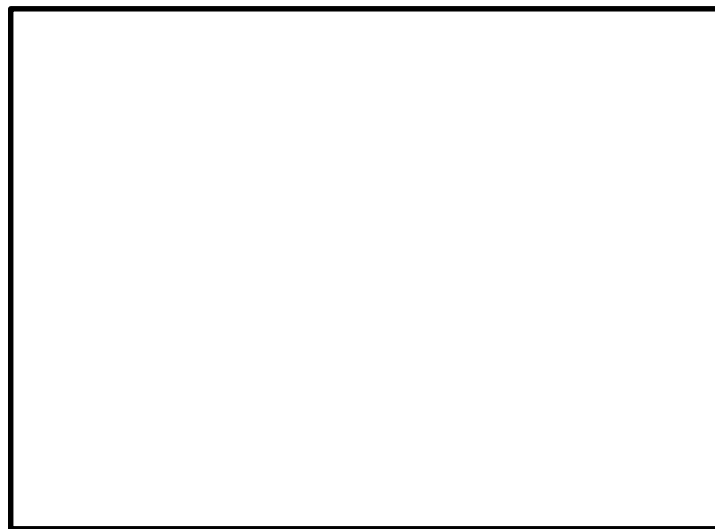
5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

5.5 3次元はりモデルの適用性確認（1/6）

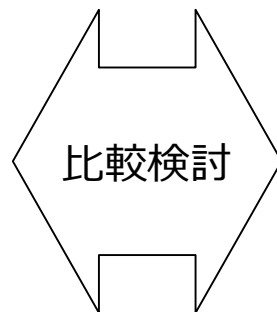
（1）適用性確認に係る対応方針

- サプレッションチェンバの3次元はりモデル（地震応答解析モデル）については、3次元シェルモデル（適用性確認用解析モデル）との比較検討を行い、以下の観点で、島根2号機への適用性があることを確認する。
 - 固有値解析による耐震評価として考慮すべき振動モード*が3次元はりモデルにて表現できていること
 - 地震応答解析による発生応力の相違について、耐震評価上支障が無いこと

注記*：刺激係数が比較的大きい振動モード



3次元はりモデル（地震応答解析モデル）



3次元シェルモデル（適用性確認用解析モデル）

5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

5.5 3次元はりモデルの適用性確認（2/6）

(2) - 1 振動モードの比較結果（水平方向）

- 3次元はりモデル及び3次元シェルモデルともに振動モードは全体が水平方向に並進するモードであり、おおむね同様な傾向を示すことを確認した。また、固有周期についてもおおむね一致していることを確認した。

3次元 はりモデル	
3次元 シェルモデル (適用性確認 用解析モデル)	

固有振動数と有効質量比の関係（水平方向）

卓越方向	固有周期 (s)		比率 (シェル/はり)
	はりモデル	シェルモデル	
X方向			1.28
			1.16
Y方向			1.28
			1.16

5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

5.5 3次元はりモデルの適用性確認（3/6）

(2) - 2 振動モードの比較結果（鉛直方向）

➤ 鉛直方向についても水平方向と同様な結果であることを確認した。

3次元 はりモデル	
3次元 シェルモデル (適用性確認 用解析モデル)	

固有振動数と有効質量比の関係（鉛直方向）

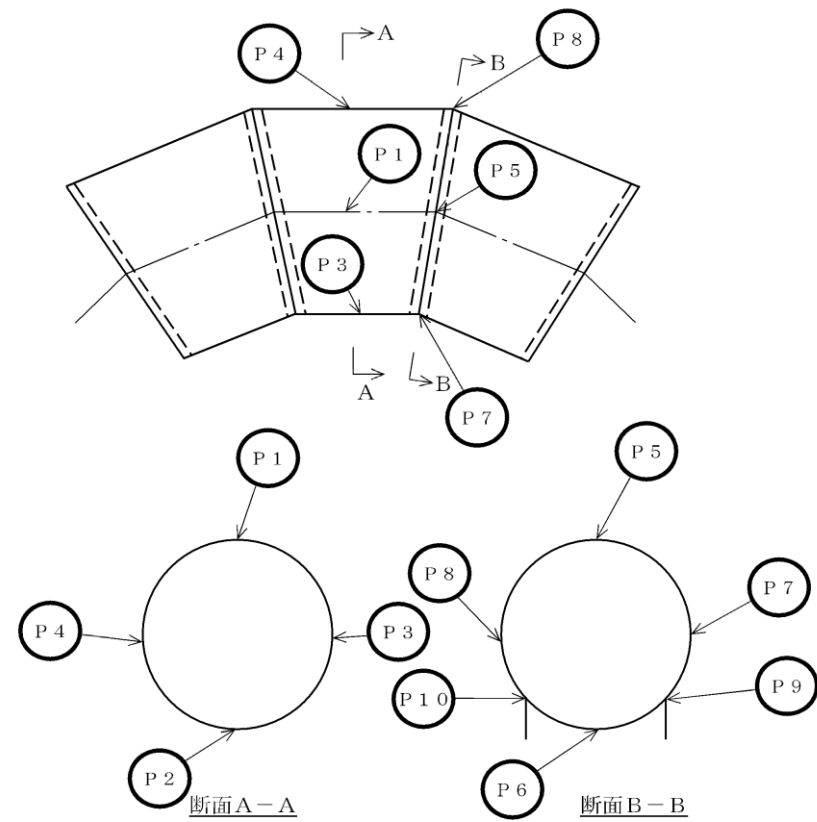
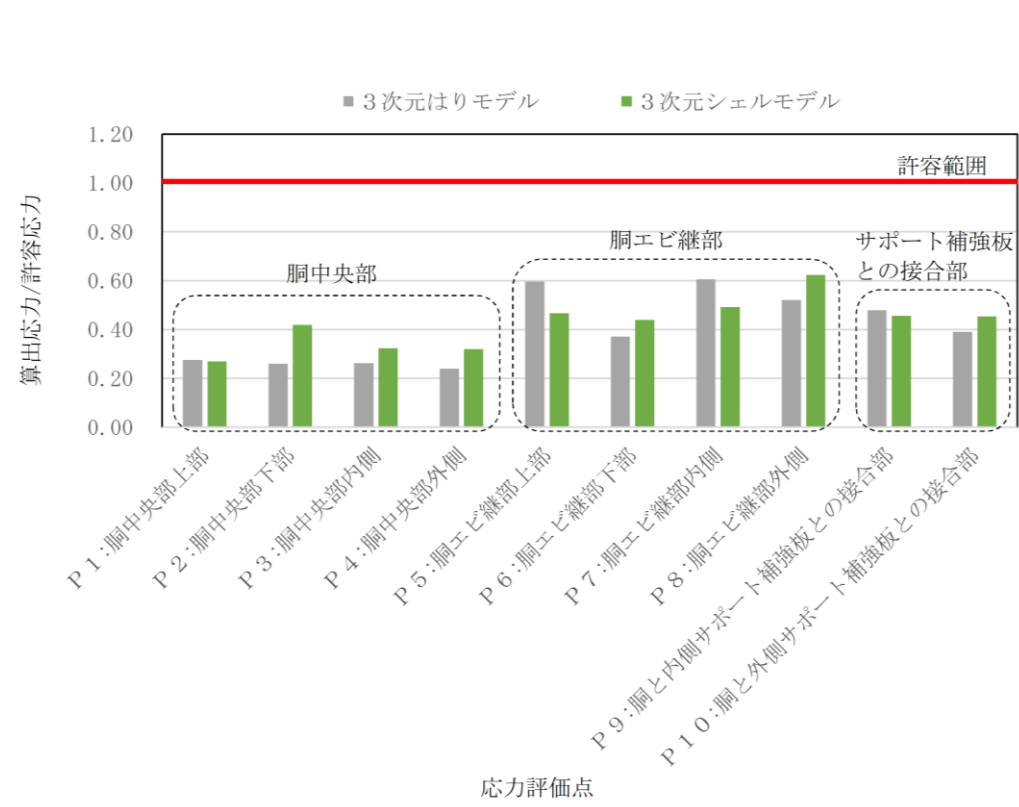
卓越方向	固有周期 (s)		比率 (シェル/はり)
	はりモデル	シェルモデル	
Z方向			1.10
			1.07
			0.98
			0.95
			0.92
			0.89
			0.85

5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

5.5 3次元はりモデルの適用性確認（4/6）

(3) - 1 サプレッションチェンバの一次応力評価結果

- サプレッションチェンバの一次応力評価については、3次元はりモデルと3次元シェルモデルで一次応力が許容応力の範囲内で同程度の結果が得られることを確認した。



サプレッションチェンバサポートの一次応力評価結果

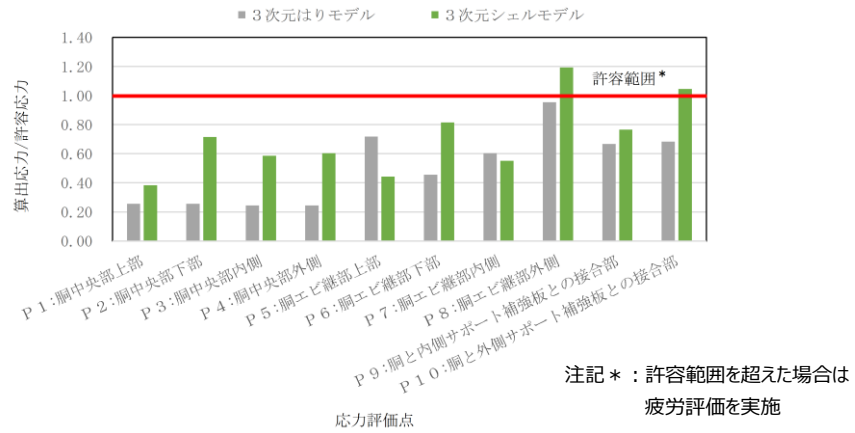
サプレッションチェンバサポートの応力評価点

5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

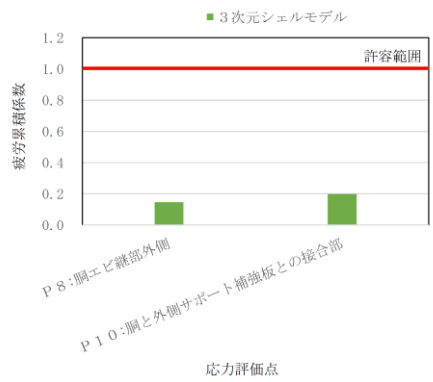
5.5 3次元はりモデルの適用性確認（5/6）

(3) - 2 サプレッションチェンバの一次 + 二次応力評価及び疲労評価結果

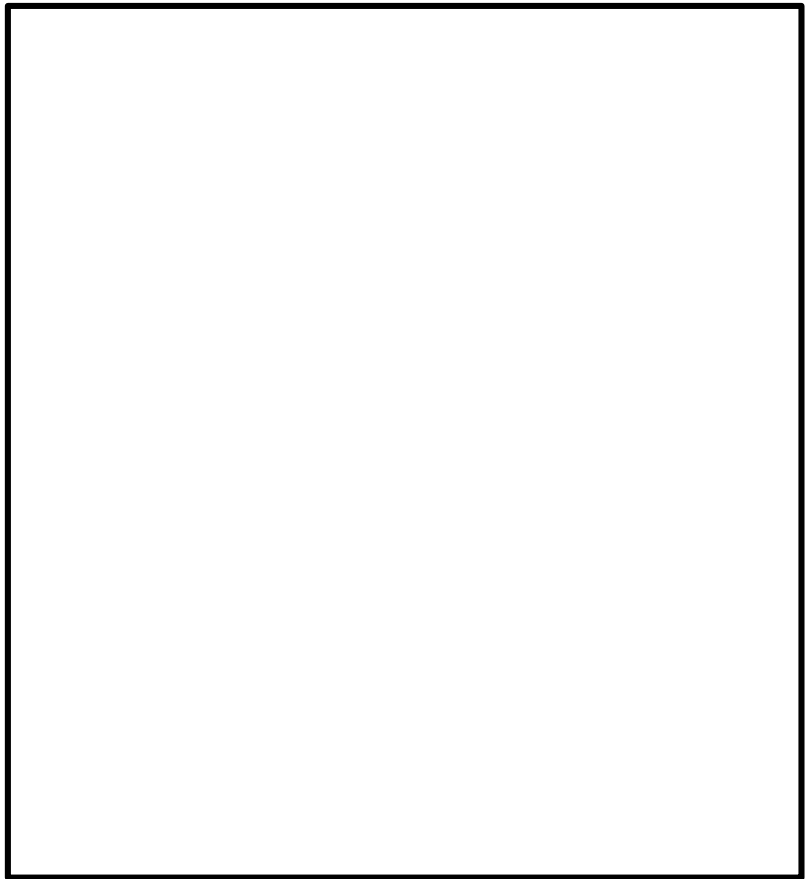
➤ サプレッションチェンバの一次 + 二次応力は、オーバル振動により3次元はりモデルに対して3次元シェルモデル（適用性確認用解析モデル）の発生応力が大きい傾向となるが、評価結果には十分な余裕があり、サプレッションチェンバの健全性への影響は小さいことを確認した。



サプレッションチェンバサポートの一次 + 二次応力評価結果



サプレッションチェンバサポートの疲労評価結果



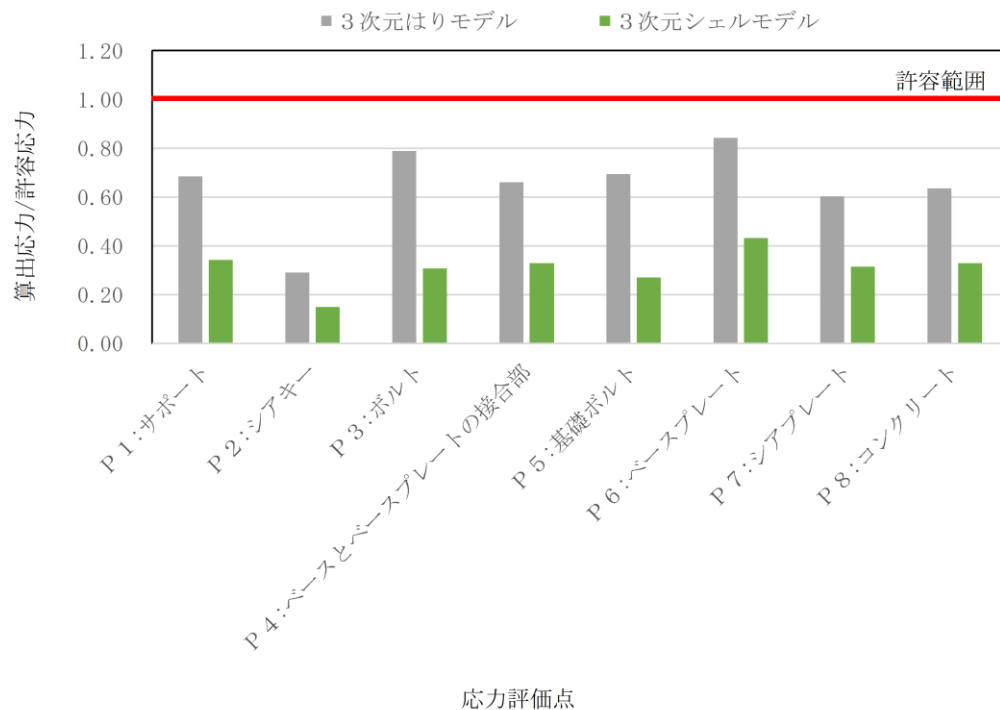
3次元シェルモデルの変形図

5. 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の適用性に係る検討

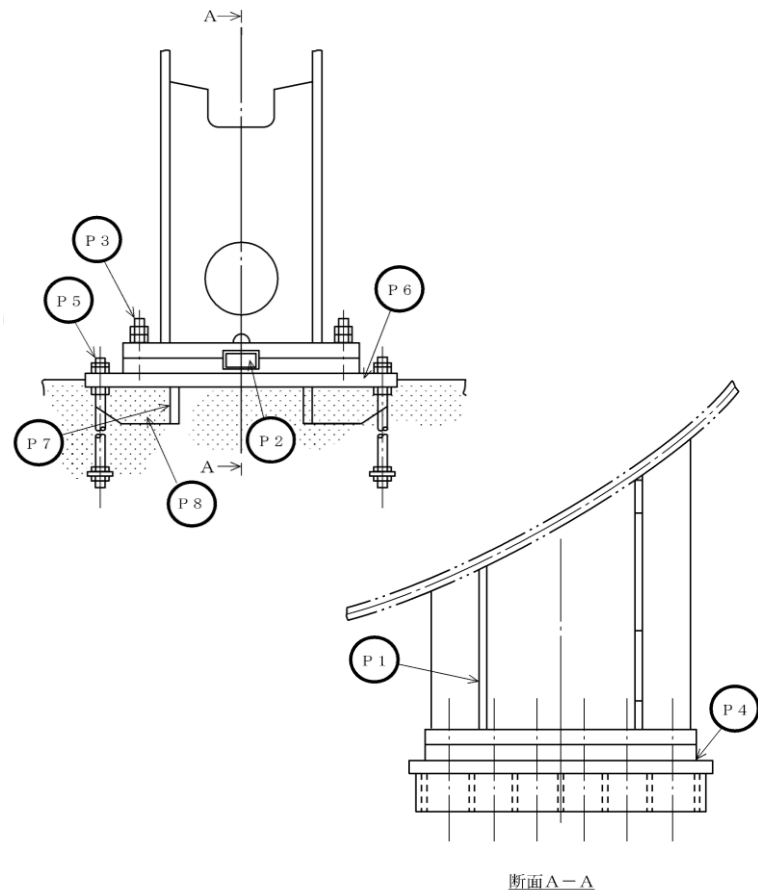
5.5 3次元はりモデルの適用性確認（6/6）

(3)–3 サプレッションチェンバサポートの応力評価結果

- サプレッションチェンバサポートについて、サプレッションチェンバの耐震評価において最も厳しい部位であるベースプレートを含むすべての応力評価点において、3次元はりモデルに対して3次元シェルモデル（適用性確認用解析モデル）の発生応力が小さい結果が得られることを確認した。



サプレッションチェンバサポートの応力評価結果



サプレッションチェンバサポートの応力評価点

6. スロッシング荷重に関する詳細設計について

6.1 解析条件

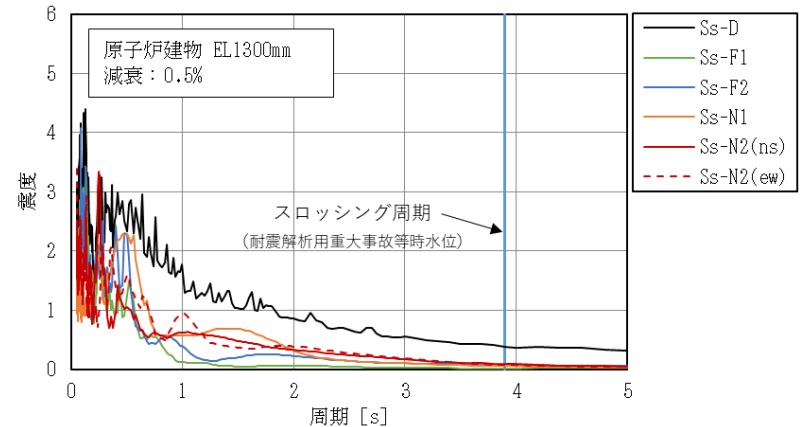
- 今回工認では水平方向の地震荷重算出に有効質量を用いるため、地震時の内部水の挙動を考慮し、スロッシング荷重を汎用流体解析コード *F l u e n t* を用いた流体解析により算出する。設置変更許可審査以降、今回工認において評価に用いる水位条件及び地震動を詳細設計にて決定し、解析を実施した。



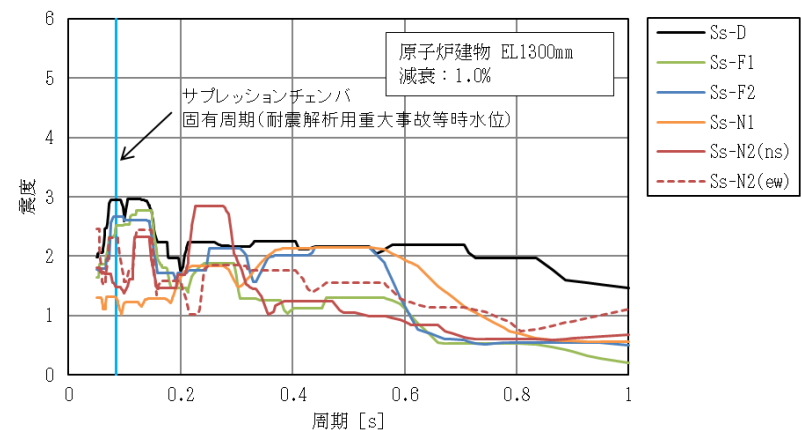
流体解析モデル
解析条件

項目	内容
モデル化範囲	サプレッションチェンバ内
水位	耐震解析用重大事故等時水位 (ダウンカム取付部下端位置: EL 7049mm)
評価用地震動	基準地震動 <i>S s - D</i> (水平方向と鉛直方向) * に対する原子炉建物 EL1300mm における建物床応答
解析コード	<i>F l u e n t</i> Ver.18.2 (汎用流体解析コード) VOF法を用いた流体解析
その他	内部構造物のモデル化範囲: ベントヘッダ, ダウンカム, クエンチャ, E C C S ストレーナ

注記*: スロッシングの卓越周期体及びサプレッションチェンバの一次固有周期で応答加速度が大きい *S s - D* を用いる。



サプレッションチェンバ設置床の床応答スペクトル (NS方向, 拡幅無し)

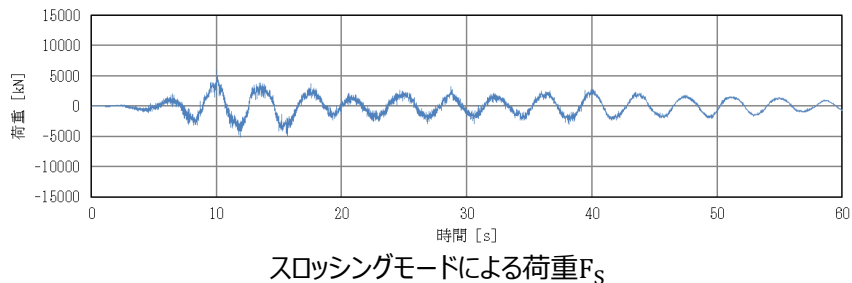
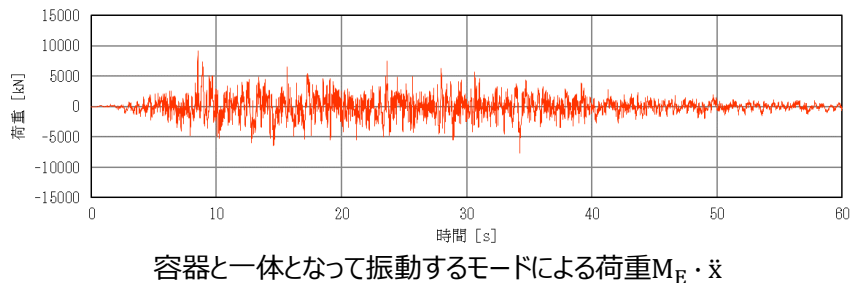
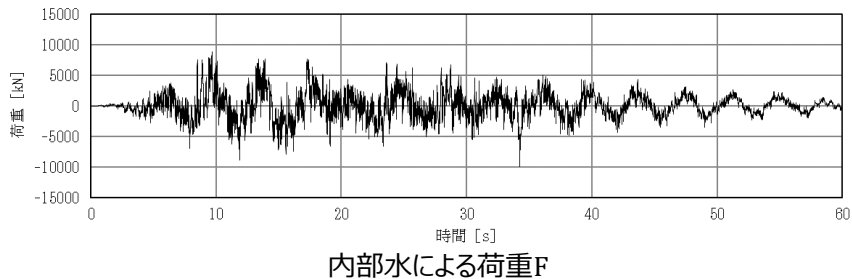


サプレッションチェンバ設置床の床応答スペクトル (NS方向, 拡幅有り)

6. スロッシング荷重に関する詳細設計について

6.2 耐震評価における考慮方法

- F l u e n t を用いた流体解析によるスロッシング荷重算定結果を以下に示す。サプレッションチェンバの応力評価に用いるスロッシング荷重は裕度を考慮して8597kNとする。
- スロッシング荷重により作用する応力は、地震応答解析モデルの水平方向に単位加速度を作用させた静解析により得られる発生応力について係数倍した結果として算出する。



各時刻歴荷重 (S s - D, 耐震解析用重大事故等時水位)

【運動方程式】

$$F_S = F - M_E \cdot \ddot{x}$$
 ここで、
 F : F l u e n t で算出される荷重
 F_S : スロッシング荷重
 $M_E \cdot \ddot{x}$: 容器と一体となって振動するモードによる荷重
 M_E : 有効質量
 \ddot{x} : 入力加速度

スロッシング荷重及び内部水の有効質量比

地震動	水位条件	スロッシング荷重*1 (最大)
S s - D	耐震解析用 重大事故等時水位	6060kN (8597kN*2)

注記 * 1 : 水平 2 方向入力の影響を考慮

* 2 : 耐震評価用スロッシング荷重



注：色の違いは、水面高さの違いを表す。また、高さは初期水位を0mとしたものを表している。

スロッシング解析結果例

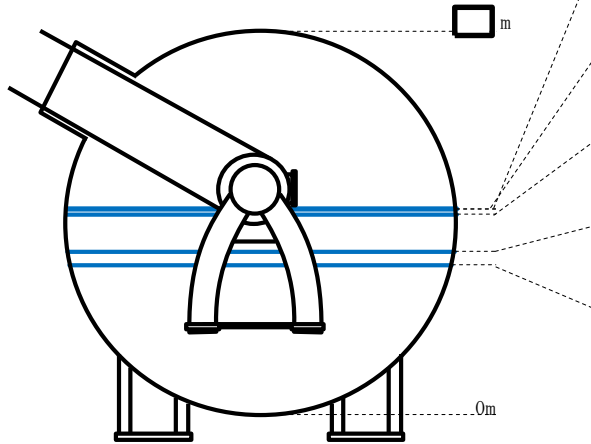
(S s - D, 耐震解析用重大事故等時水位, 最大荷重発生時刻付近)

7. 耐震評価における水位条件の設定について

7.1 耐震評価で考慮する水位条件

- 通常運転時及び重大事故等時ともに内部水質を大きく設定した耐震解析用重大事故等時水位を評価に用いることで、発生荷重が大きくなるような保守的な水位条件を設定する。

サプレッションチェンバ水位



水位	位置	水位の範囲		警報等	事故シーケンス等 ^{*1}	備考 耐震評価に用いる水位
		DB	SA			
約5.05m	ダウンコマ取付部下端位置					重大事故等時の耐震評価 (S s, S d) に用いる水位 ^{*2} (耐震解析用重大事故等時水位) 通常運転時の耐震評価 (S s, S d) に用いる水位 ^{*2, *3}
約5.03m					格納容器過圧・過温破損 残留熱代替除去系を使用しない場合 (不確かさケース: 2Pdに到達)	
約4.9m	真空破壊弁 下端位置 - 0.4m			事故時操作要領書 に基づくPCVベント 実施水位	格納容器過圧・過温破損 残留熱代替除去系を使用しない場合 (ベースケース)	
約4m					格納容器過圧・過温破損 残留熱代替除去系を使用する場合	重大事故等時 (長期 (L) 及び長期 (LL)) の荷重条件の設定で基本とするケースでの水位
3.66m	通常運転水位 (H. W. L)			トラス水位“高”	通常運転時	通常運転時の最大水位
3.56m	通常運転水位 (L. W. L)			トラス水位“低”		

注記*1: 島根原子力発電所第2号炉審査資料「島根原子力発電所2号炉 重大事故等対策の有効性評価」(EP-015改78 (令和3年9月6日))における事故シーケンス等を示す。

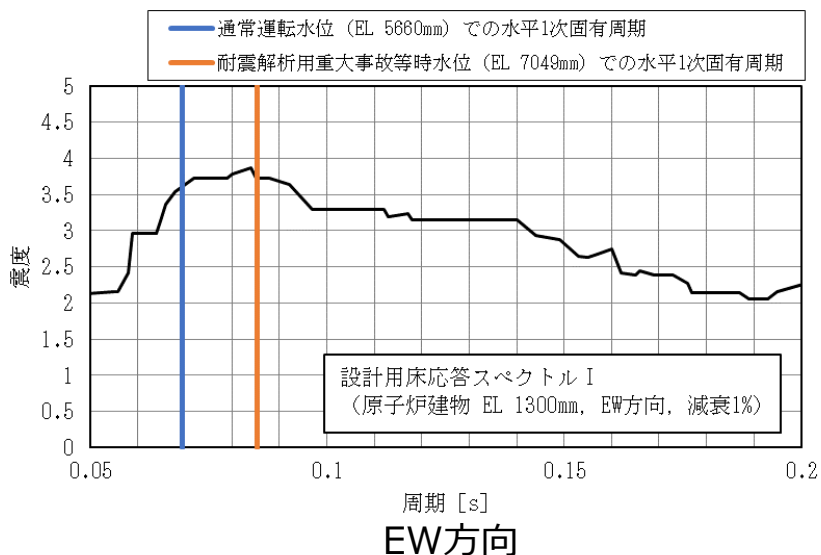
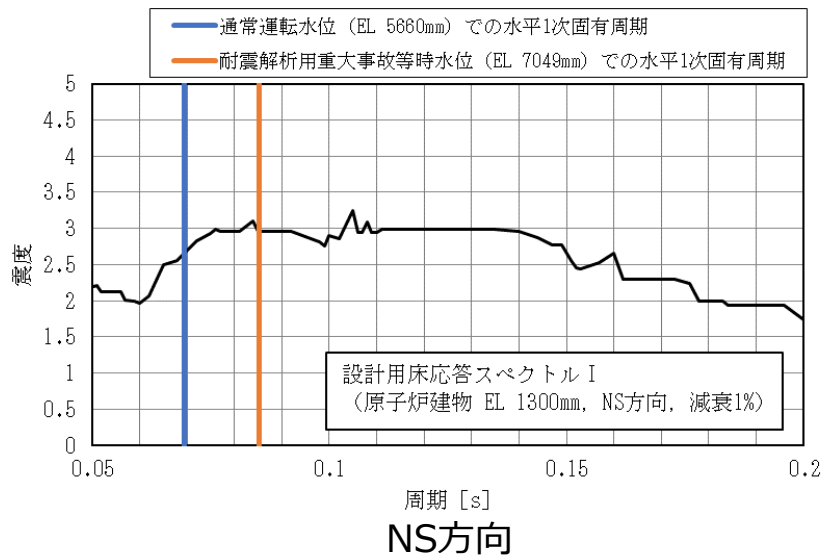
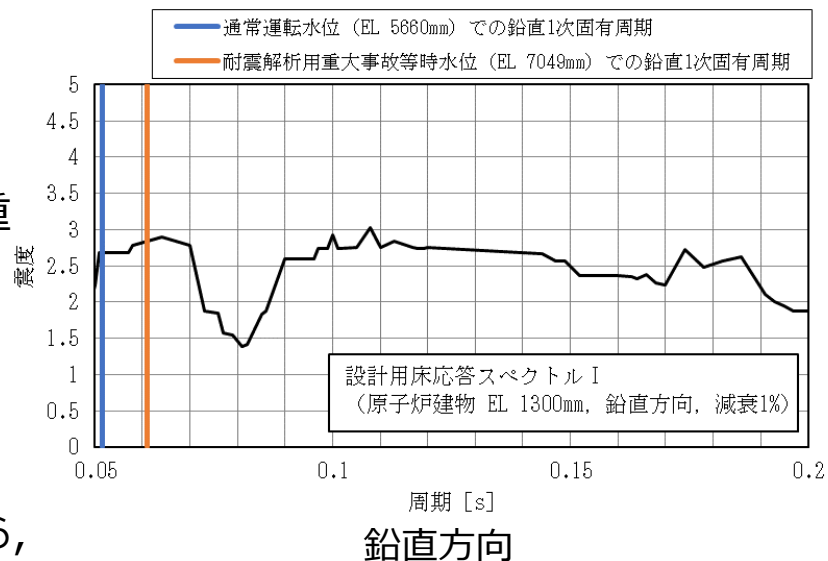
*2: 耐震評価に用いる水位については、「VI-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」に示す。

*3: 対象条件によらず共通の解析モデルを適用するため、耐震評価上保守的な水位を考慮する。

7. 耐震評価における水位条件の設定について

7.2 サプレッションチェンバ固有周期と設計用床応答スペクトルの関係

- 以下の設計用床応答スペクトルに示すとおり、床応答スペクトルと固有周期の関係においても通常運転時の水位に対して、耐震解析用重大事故等時水位は保守的な条件となる。
- 通常運転時の水位における固有周期と、耐震解析用重大事故等時水位における固有周期の間に床応答スペクトルのピークが存在するが、耐震解析用重大事故等時水位の固有周期における床応答スペクトルの値に対して5%以内の増分であること、床応答スペクトルのピークの固有周期に対応する水位は耐震解析用重大事故等時水位よりも低い水位であり、内部水質量が少ないことから、床応答スペクトルのピークの影響は軽微である。

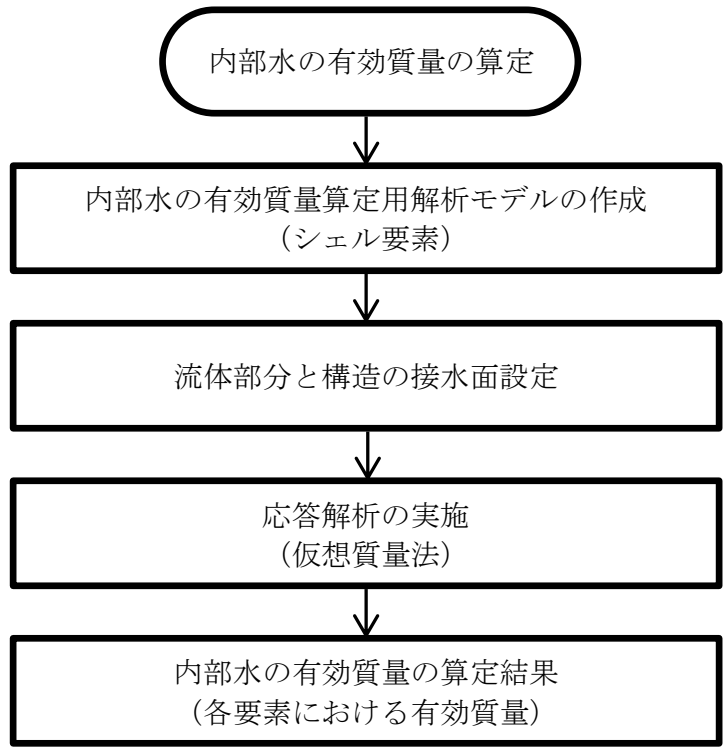


8. まとめ

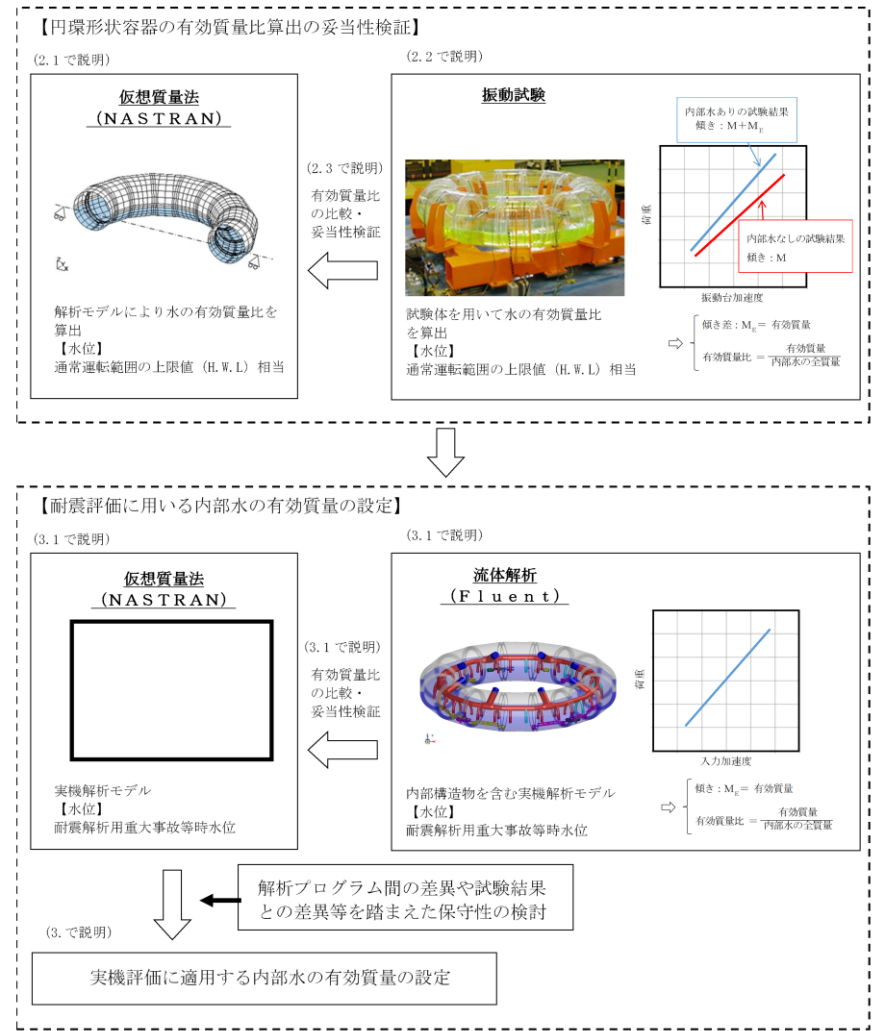
- 島根 2 号機の今回工認におけるサプレッションチェンバの耐震評価にあたり，設置変更許可段階では考慮されていなかった以下の項目に対する検討を実施した。
 1. 高次モードの影響に関する検討
 2. 地震応答解析モデルの適用性の確認に関する検討
 3. スロッシング荷重の応力評価への適用に関する検討
 4. 耐震評価における水位条件の設定方法に関する検討
- 上記に係る検討結果は，以下のとおり。
 1. サプレッションチェンバの地震応答解析モデルでは，サプレッションチェンバサポート及び取付部は剛性を考慮したモデル化をしており，サポート間のはり要素については 3 つの節点を設定していることから，高振動数領域での応答を表現可能なモデル化としている。
 2. サプレッションチェンバの 3 次元はりモデル（地震応答解析モデル）については，3 次元シェルモデル（適用性確認用解析モデル）との比較検討を行い，振動モードが同様であり，ともに許容応力を満足することを確認したため，島根 2 号機へ用いることは妥当であると判断した。
 3. 詳細設計におけるスロッシング荷重を工認条件としての水位条件及び地震動の条件を用いて流体解析により算出し，算出した値に対して裕度を持った値を応力評価用の荷重として設定した。スロッシング荷重により作用する応力は，水平方向に単位加速度を作用させた静解析により得られる発生応力について係数倍した結果として算出した。
 4. 耐震評価においては，通常運転時及び重大事故等時ともに内部水質量を大きく設定した耐震解析用重大事故等時水位を評価に用いることで，発生荷重が最大となるような保守的な評価とした。また，保守的に水位を大きく設定したことによる固有周期に対する影響についても評価上問題とならないことを確認した。

(参考 1) サプレッションチェンバ内部水の有効質量の算定

➤ サプレッションチェンバ内部水の有効質量は、振動試験及び流体解析との比較により妥当性を確認した汎用構造解析プログラムである N A S T R A N の仮想質量法を用いて算定する。

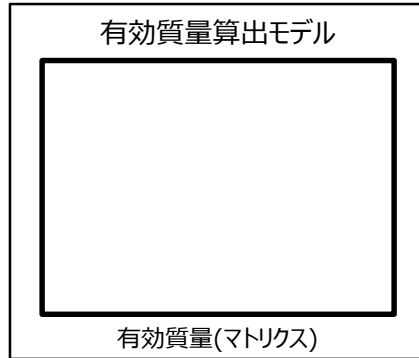


内部水の有効質量の算定フロー

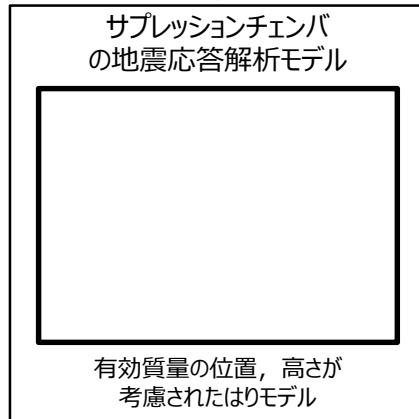


内部水の有効質量算定に係る妥当性確認フロー

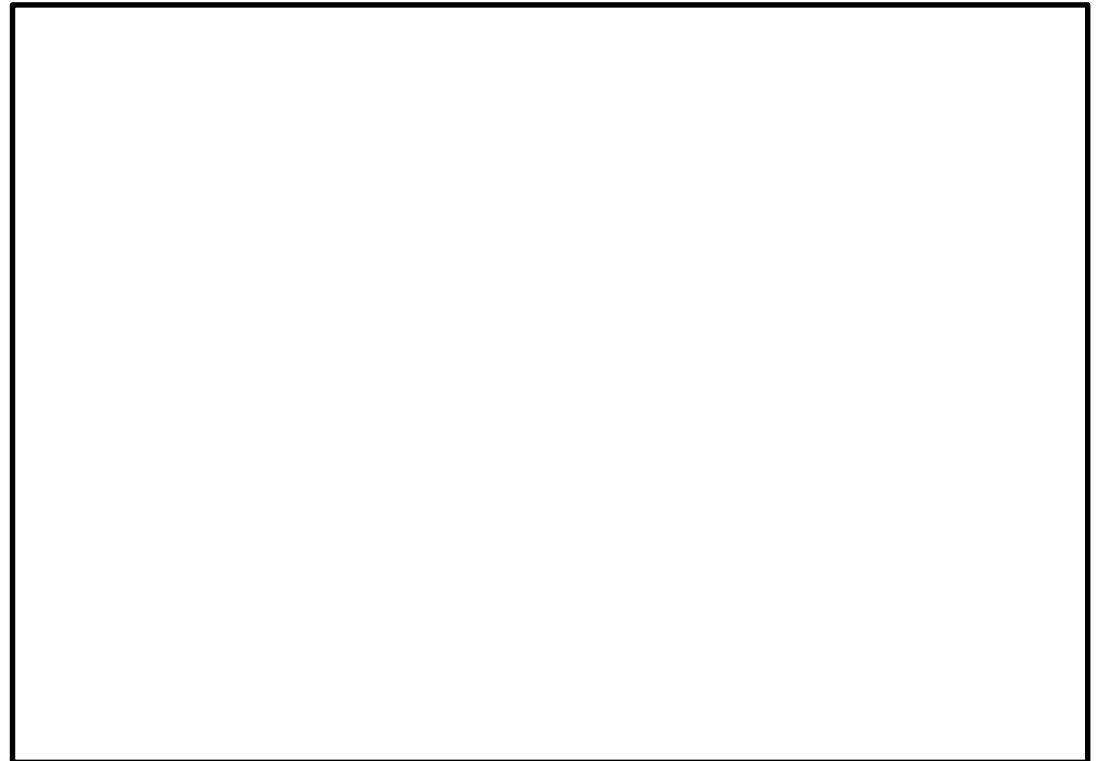
- 仮想質量法を用いて算定した内部水の有効質量は，N A S T R A Nの機能（Guyan縮約）を用いて，サブレーションチェンバの3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の各質点に縮約し，設定する。



Guyanの縮約法により、
有効質量をはりモデルの
質点に縮約



内部水の有効質量の算出モデル
(3次元シェルモデル)



3次元はりモデル（地震応答解析モデル）に
対する内部水の有効質量の設定

(参考3) サプレッションチェンバサポート取付部のばね剛性の算定

➤ 変位算定用のシェルモデルとはりモデルの変位差を用いてばね剛性を以下のとおり設定する。

- 並進ばね：ばね定数 = 荷重 / 並進変位
- 回転ばね：ばね定数 = モーメント / 回転変位

変位算出用シェルモデルの変位算定方法

ばねの成分		解析条件	変位算出方法
並進	上下軸 (Z)		
	大円半径軸回り (X)		
回転	大円円周軸回り (Y)		

変位算出用はりモデルの変位算定方法

ばねの成分		解析条件	変位算出方法
並進	上下軸 (Z)		
	大円半径軸回り (X)		
回転	大円円周軸回り (Y)		

サプレッションチェンバサポート取付部のばね剛性

考慮する方向		ばね剛性	
		内側	外側
並進	P : 上下方向 (N/mm)		
回転	M L : 大円半径軸回り (N・mm/rad)		
	M C : 大円円周軸回り (N・mm/rad)		

- 3次元はりモデルと3次元シェルモデルのモデル化方法の相違による固有周期への影響検討及び検討結果の概要は以下のとおり。

モデル化 検討項目	モデル化方法		固有周期の影響検討	
	3次元はりモデル (地震応答解析モデル)	3次元シェルモデル (適用性確認用解析モデル)	検討内容	検討結果の概要
モデル化範囲	サプレッションチェンバ全体 (360°) をモデル化	サプレッションチェンバの半分 (180°) をモデル化	以下の固有値解析結果の比較により、モデル化範囲の違いによる固有周期への影響を確認する。 ①180°モデル (原子炉格納容器ベント系解析モデル) ②360°モデル (原子炉格納容器ベント系解析モデル)	【影響なし】 ・①と②で同じ固有値解析結果が得られることを確認した。
ストレーナの扱い	ストレーナ連成あり	ストレーナ連成なし	以下の固有値解析結果の比較により、ストレーナの連成による固有周期への影響を確認する。 ①はりモデル ②はりモデル (ストレーナなし)	【影響なし】 ・①と②で同じ固有周期が現れることからストレーナの連成が与える影響は軽微であることを確認した。
内部水の有効質量	質点に縮約して設定 (NASTRANの仮想質量法により算出した有効質量をGuyan縮約によりはりモデルに設定)	シェル要素に設定 (NASTRANの仮想質量法により算出)	以下の固有値解析結果の比較により、内部水のモデル化方法の違いによる影響を確認する。 ①はりモデル ②はりモデル (内部水なし) ③シェルモデル ④シェルモデル (内部水なし)	【影響なし】 ・固有周期の比率が①/②と③/④で同程度であり、はりモデルはシェルモデルと同等に内部水をモデル化できていることを確認した。
サプレッションチェンバ胴	はり要素でモデル化 (材料物性、断面情報から理論式により剛性を設定)	シェル要素でモデル化 (実機を模擬した材料物性及び構造を設定)	以下の解析モデルの固有値解析結果の比較により、胴のモデル化方法の違いによる固有周期への影響を確認する。 ①はりモデル ②シェルモデル ③シェルモデル (胴一般部断面保持)	【影響あり】 ・オーバル振動の影響により②で分散して現れていた振動モードは③では集約されることを確認した。 ・しかし、①と③で水平方向の固有周期に差異があることから、サプレッションチェンバサポート及び取付部のモデル化の差異による固有周期への影響を確認する (2.2.5～6項)。

➤ 3次元はりモデルと3次元シェルモデルのモデル化方法の相違による固有周期への影響検討及び検討結果の概要は以下のとおり。

モデル化 検討項目	モデル化方法		固有周期の影響検討	
	3次元はりモデル (地震応答解析モデル)	3次元シェルモデル (適用性確認用解析モデル)	検討内容	検討結果の概要
サプレッション チェンバ サポート	はり要素でモデル化 (材料物性, 断面情報から理論式により剛性を設定)	シェル要素でモデル化 (実機を模擬した材料物性及び構造を設定)	[検討1] 以下の解析モデルの固有値解析結果の比較により, サプレッションチェンバサポートの影響による固有周期の違いを確認する。 ①はりモデル (サポート以外剛体) ②シェルモデル (サポート以外剛体)	【影響あり】 ・①と②の固有周期を比較し, 鉛直方向は同程度であるが, 水平方向は差異が生じていることを確認した。 ・[検討2]にて, はりモデルのサポートの剛性を精緻化することによる, 固有周期への影響検討を行う。
			[検討2] 以下の解析モデルの固有値解析結果の比較により, はりモデルのサポートの剛性を精緻化することによる固有周期への影響を確認する。 ①はりモデル ②はりモデル (サポート剛性精緻化) ③シェルモデル (胴一般部断面保持)	【影響あり】 ・鉛直方向は①と②で固有周期が同程度であることから, サポートのモデル化は適切であることを確認した。 ・水平方向の固有周期について, ②は①より大きく, ③に近い結果が得られるため, サポートのモデル化方法の違いがはりモデルとシェルモデルの固有周期に差異が生じる要因の一つであることを確認した。
サプレッション チェンバ サポート 取付部	面外方向の剛性をばね要素でモデル化 (シェル要素を用いて局部変形を模擬したばね剛性を設定)	シェル要素でモデル化 (実機を模擬した材料物性及び構造を設定)	以下の解析モデルの固有値解析結果の比較により, 取付部のばね剛性のモデル化方法の違いによる固有周期への影響を確認する。 ①はりモデル ②はりモデル (取付部ばね要素なし) ③シェルモデル	【影響なし】 ・鉛直方向の固有周期は②より①が大きくなり, ①と③で同程度であることから, 取付部のモデル化は適切であることを確認した。 ・水平方向の固有周期は①と②が同程度であることから, 取付部のモデル化方法ははりモデルとシェルモデルの固有周期の差異に関係がないことを確認した。

- モデル化範囲の相違については以下のとおり固有周期への影響がないことを確認した。

固有周期 sのY方向有効質量比の合計： (端数処理前の合計) 固有周期 sのY方向有効質量比：

360° モデル				180° モデル						
モード	固有周期 (s)	有効質量比			解析モデル	モード	固有周期 (s)	有効質量比		
		X方向	Y方向	Z方向				X方向	Y方向	Z方向
2次					反対称	2次				
3次					対称	1次				

- 内部水有効質量のモデル化の相違については以下のとおり影響がないことを確認した。

解析モデル	① 3次元はりモデル (地震応答解析モデル)	② 3次元はりモデル (内部水なし)	③ 3次元シェルモデル (適用性確認用解析モデル)	④ 3次元シェルモデル (内部水なし)	(A) ①/②	(B) ③/④
水平1次	0.085	0.051	0.109	0.063	1.67	1.73

- 取付部のモデル化の相違については以下のとおり固有周期への影響がないことを確認した。

検討ケース	①	②	③	(A) ①/③	(B) ②/③
解析モデル	3次元はりモデル (地震応答解析モデル)	3次元はりモデル (取付部ばね要素なし)	3次元シェルモデル (適用性確認用解析モデル)		
水平1次	0.085	0.081	0.109	0.78	0.74
鉛直1次	0.061	0.026	0.067	0.91	0.39

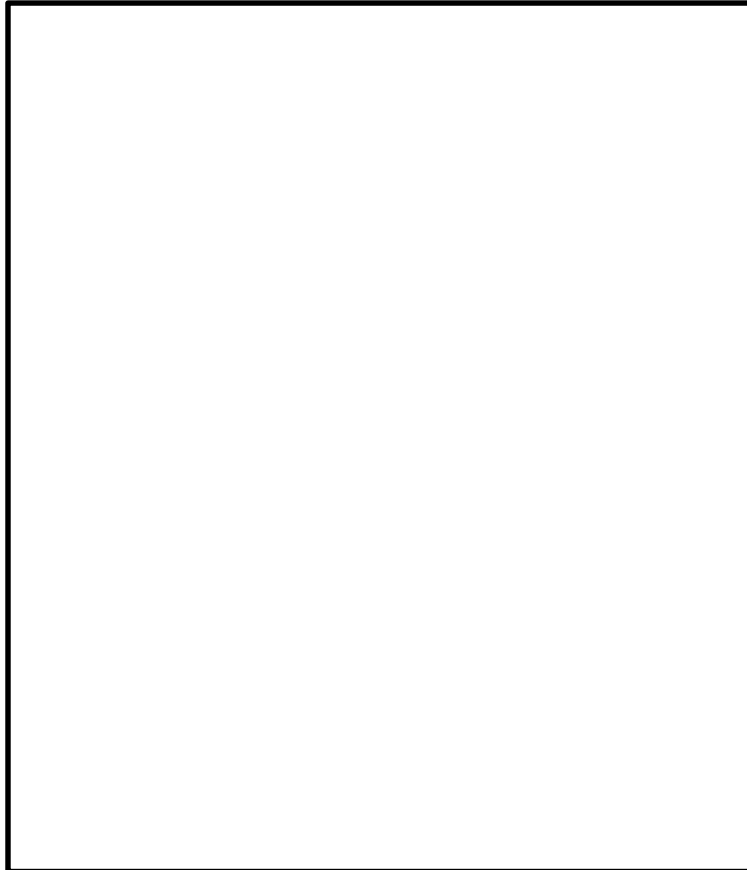
➤ ストレーナの有無による相違については以下のとおり固有周期への影響がないことを確認した。

卓越方向	① 3次元はりモデル (地震応答解析モデル)	② 3次元はりモデル (ストレーナなし)	(A) ②/①
X方向			1.00
			—
Y方向			1.00
			—
Z方向	1.00		
	—		

① 3次元はりモデル (地震応答解析モデル) :水平方向		② 3次元はりモデル (ストレーナなし) :水平方向	
モード次数 (固有周期)	赤線 : 変形前 黒線 : 変形後	モード次数 (固有周期)	赤線 : 変形前 黒線 : 変形後

➤ サプレッションチェンバ胴のモデル化の相違については以下のとおり確認した。

- オーバル振動の影響により3次元シェルモデルで分散して現れていた振動モードは3次元シェルモデル（胴一般部断面保持）では集約されることを確認した。
- 3次元はりモデルと3次元シェルモデル（胴一般部断面保持）で水平方向の固有周期に有意な差異が現れることを確認した。



卓越方向	固有周期 (s)			(A) ②/①	(B) ③/①
	① 3次元 はりモデル	② 3次元 シェルモデル	③ 3次元シェルモデル (胴一般部断面保持)		
X方向				1.28	1.14
				1.16	
Y方向				1.28	1.14
				1.16	
Z方向				1.10	0.93
				1.07	
				0.98	
				0.95	
				0.92	
				0.89	
0.85					

- サプレッションチェンバサポートのモデル化の相違については以下のとおり確認した。
 - サプレッションチェンバサポートの剛性の設定方法が3次元はりモデルと3次元シェルモデルの水平方向の固有周期の差異に影響を与える主な要因の一つであることを確認した。



卓越方向	固有周期 (s)			(A) ③/①	(B) ③/②
	① 3次元はりモデル (地震応答解析モデル)	② 3次元はりモデル (サポート剛性精緻化)	③ 3次元シェルモデル (胴一般部断面保持)		
X方向				1.14	1.09
Y方向				1.14	1.09
Z方向				0.93	0.93

➤ 床応答スペクトルと固有周期の関係の比較により水平方向の固有周期の相違による耐震性への影響がないことを確認した。

