

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-他-235改01
提出年月日	2022年11月16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. 詳細設計申送り事項への対応	7
5. 3次元はりモデル（ 工認用 地震応答解析モデル）の 設定	8
6. 3次元はりモデル（ 工認用 地震応答解析モデル）の 妥当性確認	12
7. 地震応答解析における高振動数領域の影響について	17
8. スロッシング荷重に関する詳細設計について	18
9. 耐震評価における水位条件の設定について	20
10. まとめ	22
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	23
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）	24
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	25
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	26
参考 5 水平 2 方向入力によるスロッシング荷重への影響	33

詳細設計申送り事項に対する回答

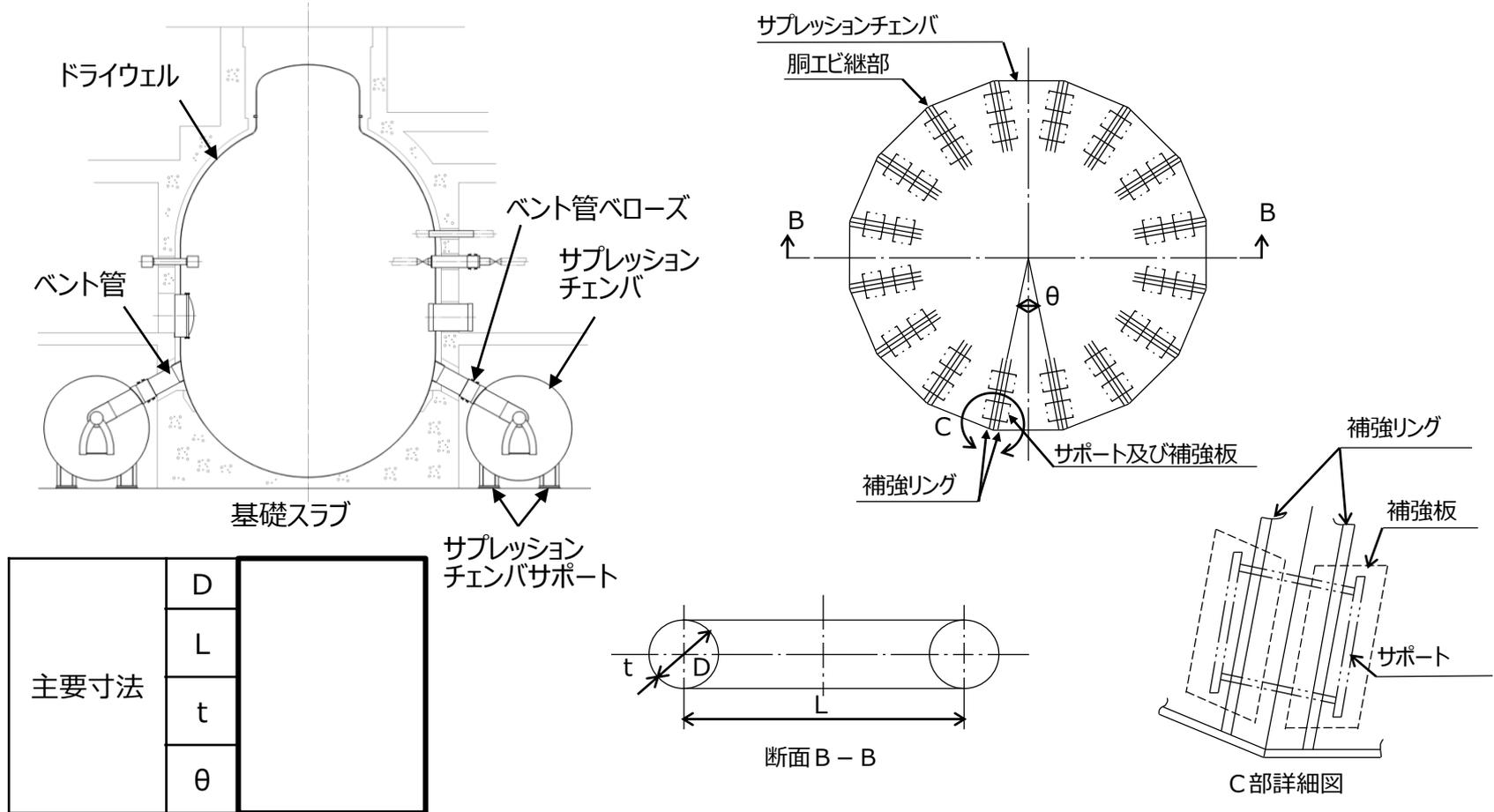
設置変更許可審査（第814回審査会合，2019年12月17日）で審査を行った，「サブレッションチェンバの耐震評価」に関して以下の詳細設計へ申送りした事項（詳細設計申送り事項）があったことから，詳細設計申送り事項に対する回答について説明する。

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には剛性を模擬し，サポート間のはり要素には3つの節点を設定したモデルとした。また，設計用床応答スペクトルでは高振動数領域（0.02秒（50Hz）から0.05秒（20Hz））の範囲に床面の最大応答加速度を上回る震度を設定しており，スペクトルモーダル解析において50Hzまでの振動モードを考慮した。 	P.17
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，過小評価とし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"> サブレッションチェンバの3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）と3次元シェルモデル（適用性確認用解析モデル）の比較検討を行い，振動モードが同様であり，発生応力の相違が耐震評価上問題ないことを確認したため，島根2号機へ用いることは妥当と判断した。 	P.12～16
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"> 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，水平2方向入力を鑑みて裕度を持った値を応力評価用の荷重として設定した。 	P.18～19
4	<ul style="list-style-type: none"> 水位によりサブ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ブ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。（まとめ資料における当社の記載） 	B*	<ul style="list-style-type: none"> 耐震評価においては，通常運転時及び重大事故等と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，発生荷重が大きく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しないことを確認した。 	P.20～21

注記*：分類の定義（A：詳細設計の対応方針に変更や追加検討項目があるもの，B：具体的数値をもって設計成立性の説明が必要なもの）

1. サプレッションチェンバの構造概要 (1/2)

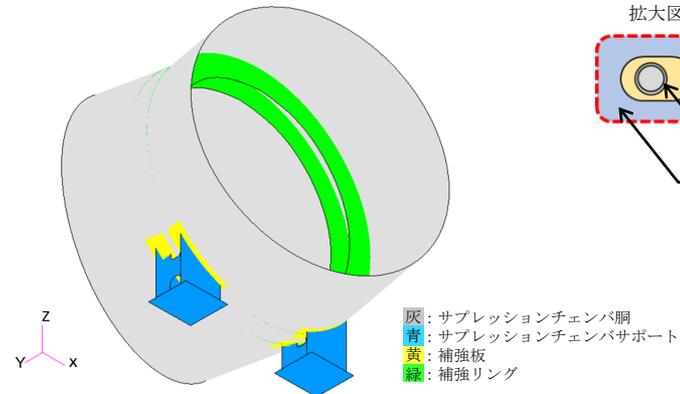
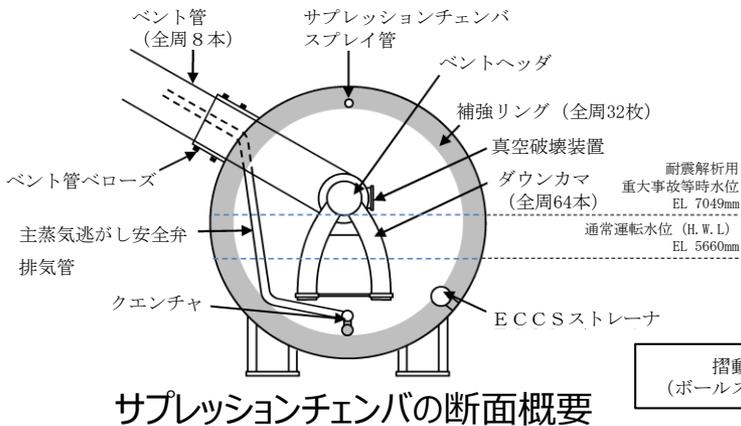
- サプレッションチェンバは、円筒（合計16セグメント）を繋ぎ合わせた円環形状の構造物であり、内部に水を有している。また、円筒胴内部には円筒（小円）の変形を抑制するための補強リング（合計32枚）を設置している。



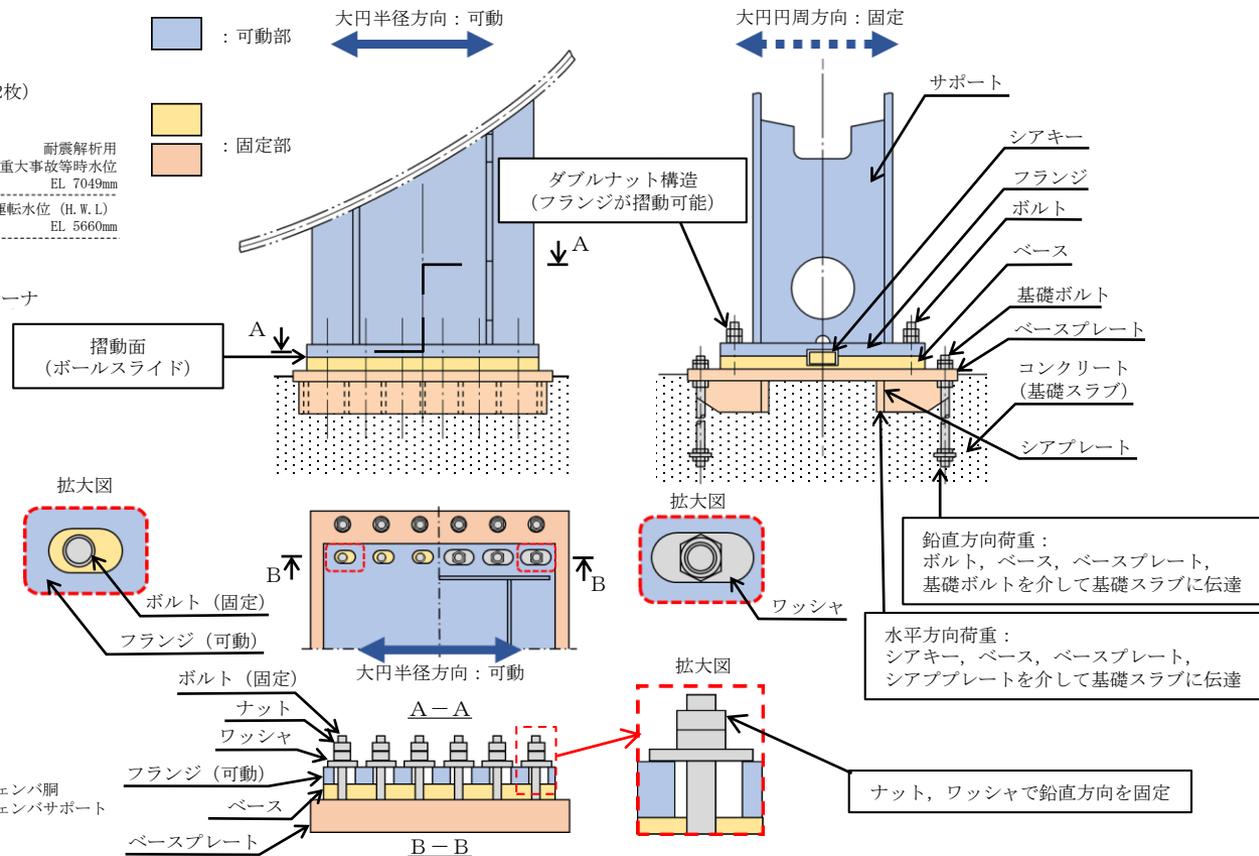
サプレッションチェンバの構造概要

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。



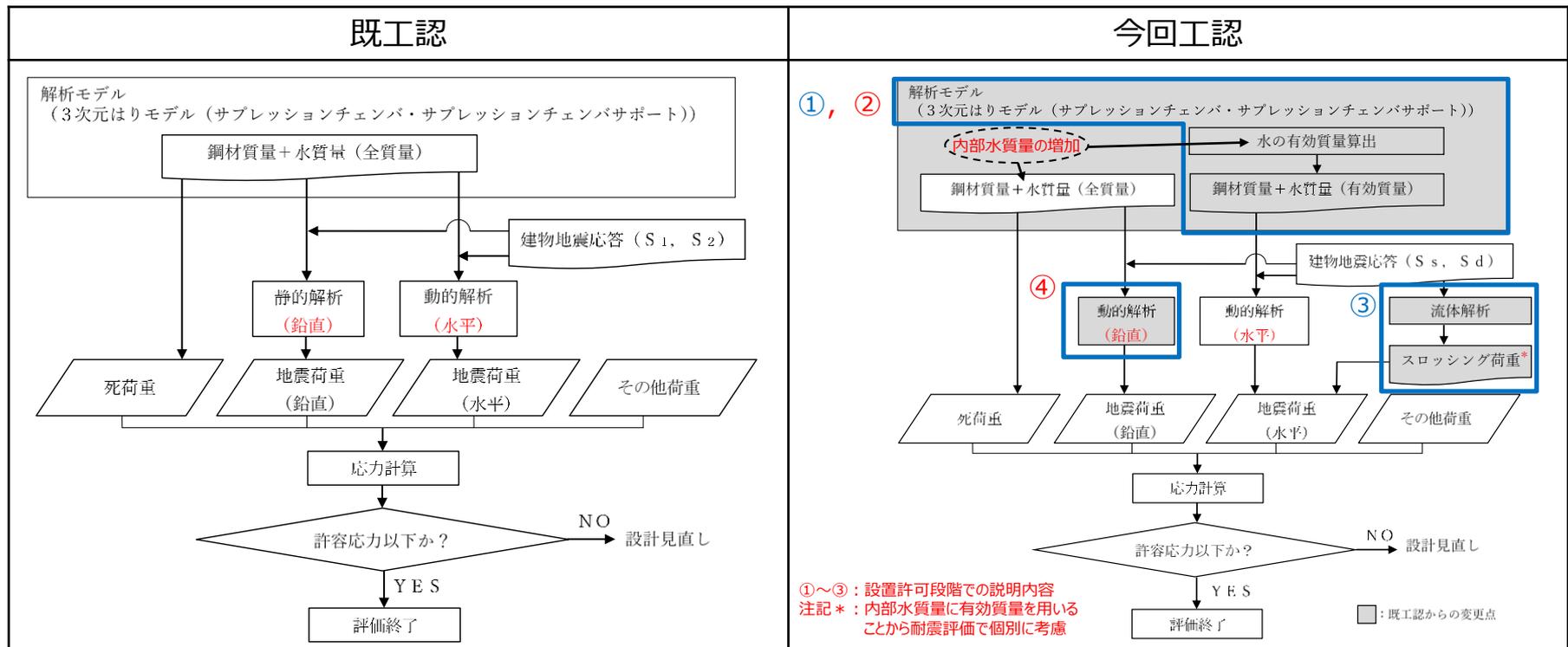
サプレッションチェンバサポートの取付概要



サプレッションチェンバサポートの構造詳細

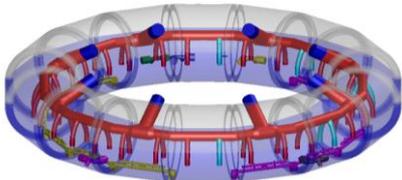
2. 耐震評価における既工認からの変更内容

- 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 地震応答解析手法の変更（内部水の有効質量をGuyan縮約により設定：参考 2）
 - ③ 流体解析によるスロッシング荷重の個別評価
 - ④ 鉛直方向の動的解析としてスペクトルモーダル解析の適用（工認段階での変更）
- 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、より詳細にモデル化を行った。



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"> ➤ シェル要素で算出したサプレッションチェンバ内部水の有効質量の3次元はりモデルにおけるモデル化には，Guyan縮約を適用する。
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ブ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。

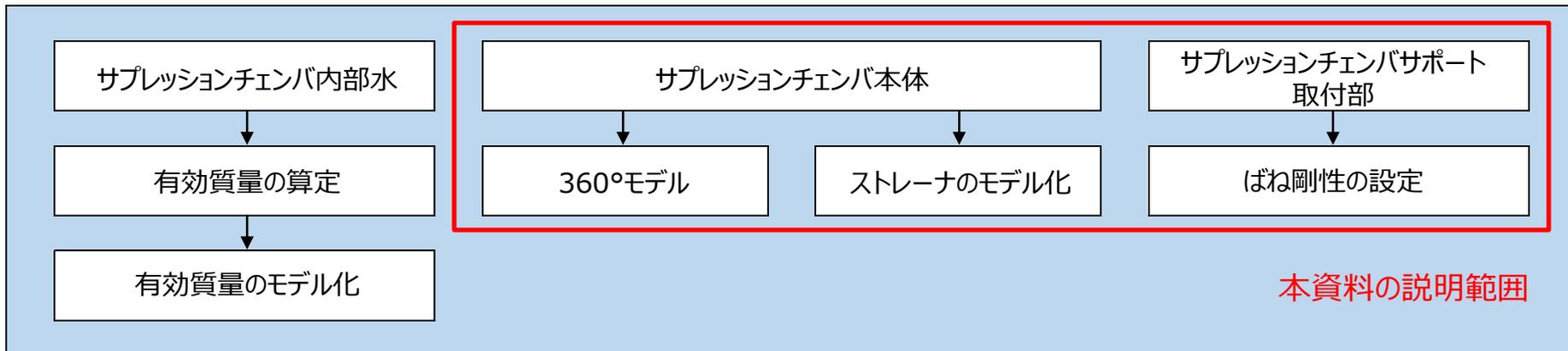
詳細設計申送り事項	今回工認での検討結果	備考
<p>スペクトルモーダル解析モデルについて、サブレッション・チェンバサポート位置の質点はサブレッション・チェンバの円周方向に剛に固定されており、構造上の特徴から支持点付近の円周方向は高振動数にならないと振動しないので、詳細設計段階で高次モードの影響も評価して説明する。</p>	<p>サブレッションチェンバの地震応答解析モデルでは、サブレッションチェンバサポート及び取付部には剛性を模擬し、サポート間のはり要素には3つの節点を設定したモデルとした。また、設計用床応答スペクトルでは高振動数領域（0.02秒（50Hz）から0.05秒（20Hz））の範囲に床面の最大応答加速度を上回る震度を設定しており、スペクトルモーダル解析において50Hzまでの振動モードを考慮した。</p>	<p>7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、過小評価とならないことを詳細設計段階で説明する。</p>	<p>サブレッションチェンバの3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）と3次元シェルモデル（適用性確認用解析モデル）の比較検討を行い、振動モードが同様であり、発生応力の相違が耐震評価上問題ないことを確認したため、島根2号機へ用いることは妥当と判断した。</p>	<p>6項にて説明</p>
<p>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。</p>	<p>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、水平2方向入力を鑑みて裕度を持った値を応力評価用の荷重として設定した。</p>	<p>8項にて説明</p>
<p>水位によりサブ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ブ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>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、発生荷重が大きく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。</p>	<p>9項にて説明</p>

5. 3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）の設定

5.1 3次元はりモデルの概要

- 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（工認用地震応答解析モデル（以降、地震応答解析モデル）とする。）は、既工認から以下の変更を行っている。
 - ① サプレッションチェンバ内部水に対する有効質量の適用（設置許可段階での説明内容）
 - ② サプレッションチェンバ全体の360°モデルへの変更
 - ③ E C C S ストレーナをモデル化
 - ④ サプレッションチェンバサポート取付部のばね剛性を考慮
- 次頁以降、②～④について既工認からの変更内容を説明する。

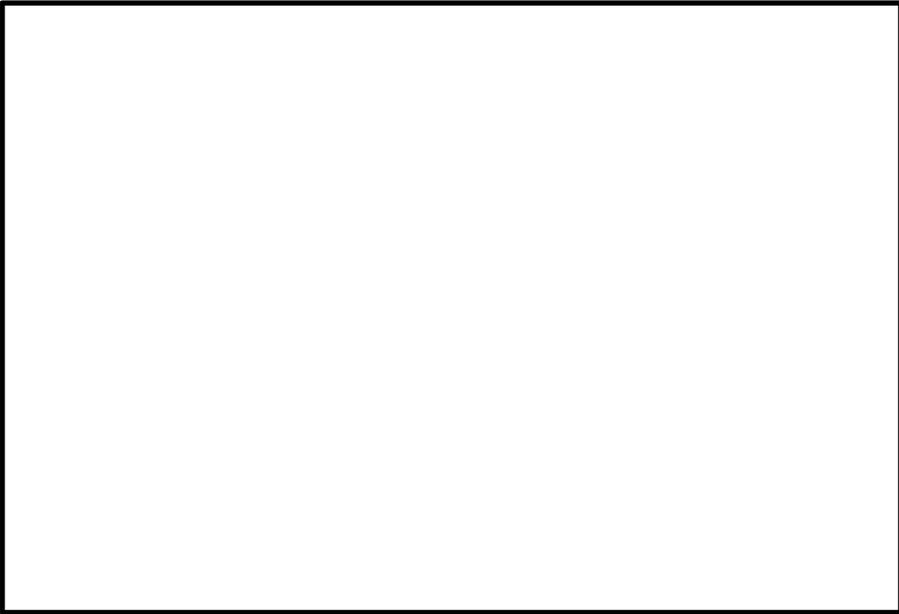
3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の設定にあたっての既工認からの変更点



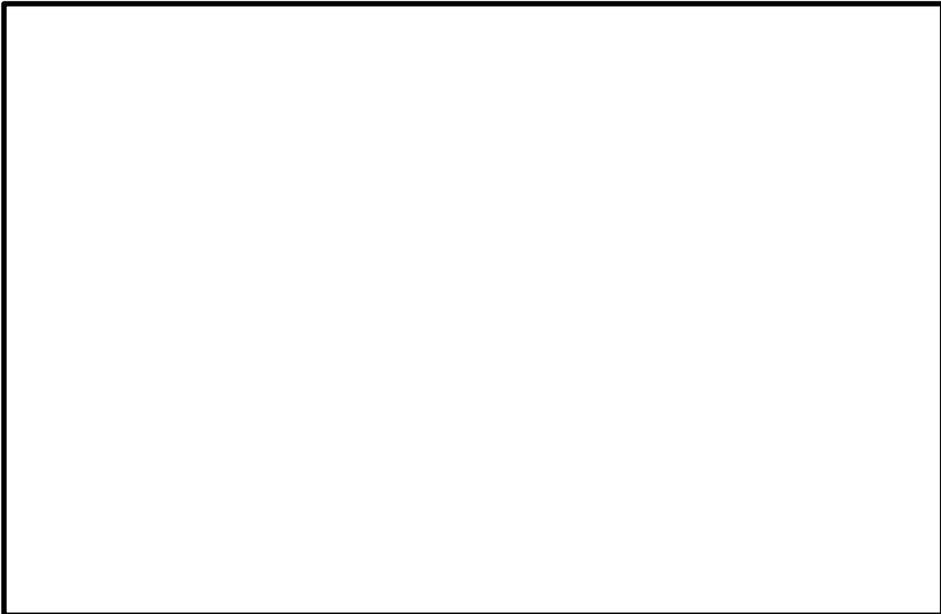
5. 3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）の設定

5.2 サプレッションチェンバのモデル化

- 既工認ではサプレッションチェンバの地震応答解析モデルは180°モデルとしていたが、今回工認では360°モデルに変更する。
- 既工認ではサプレッションチェンバの地震応答解析モデル（サプレッションチェンバ単体）とE C C Sストレーナの地震応答解析モデル（サプレッションチェンバとE C C Sストレーナを連成）としてそれぞれの地震応答解析モデルを適用していたが、今回工認では地震応答解析モデルの共通化を行うため、サプレッションチェンバと併せてE C C Sストレーナを解析モデルに含める。



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（水平方向）

5. 3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）の設定

5.3 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（1/2）

- サプレッションチェンバサポート取付部は補強リング及び補強板により補強された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のばね剛性は十分に高いと判断していた。
- 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算定する。

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（水平方向）

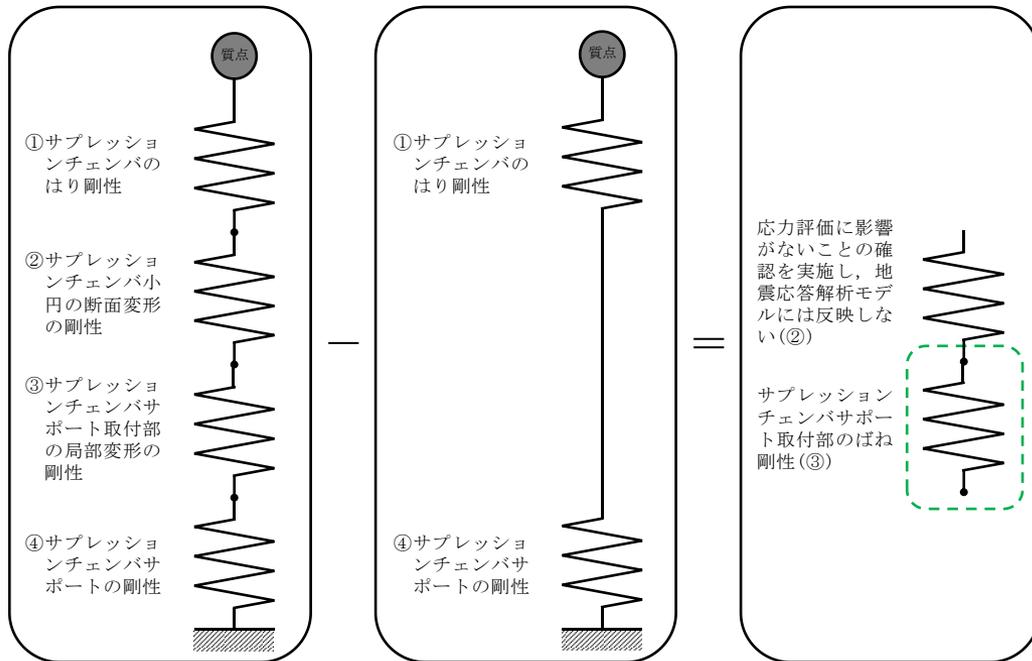
5. 3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）の設定

5.3 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（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(下図の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（並進1方向，回転2方向）について算定した。

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

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

変位算出用シェルモデル

変位算出用はりモデル

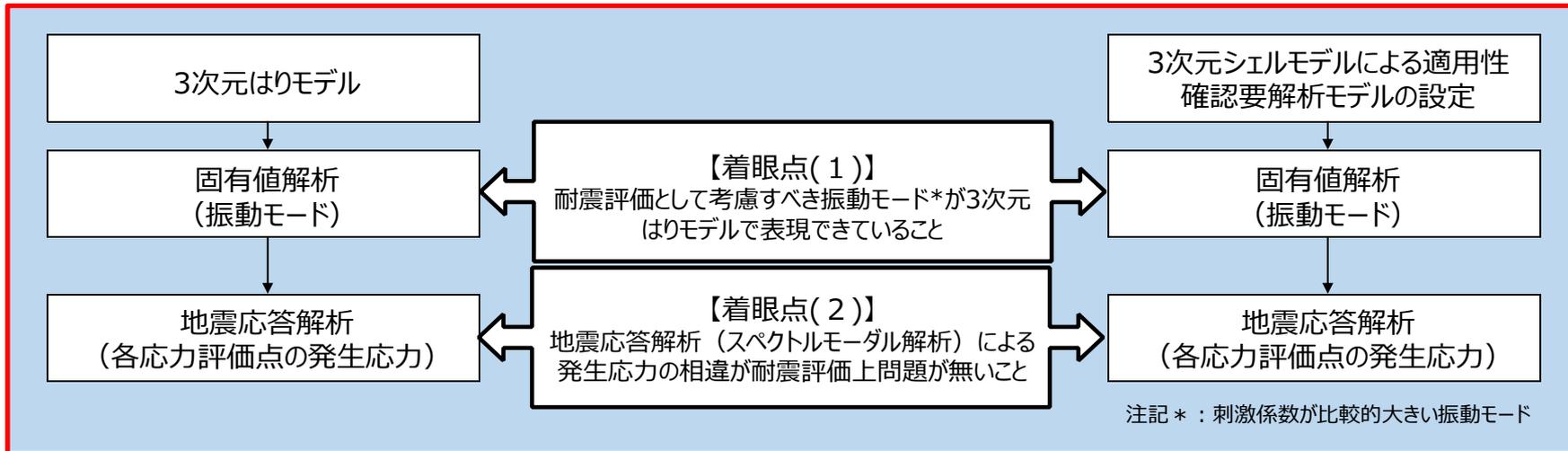
6. 3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）の妥当性確認

6.1 妥当性確認に係る対応方針

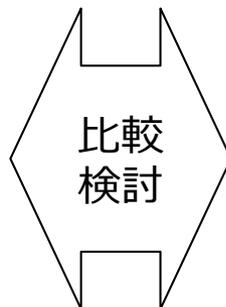
- 3次元はりモデル（地震応答解析モデル）と3次元シェルモデル（適用性確認用解析モデル）の比較検討を行い，以下の観点で，島根2号機への適用が**妥当**であることを確認する。

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

本資料の説明範囲



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）

6. 3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）の妥当性確認

6.2 振動モードの比較結果

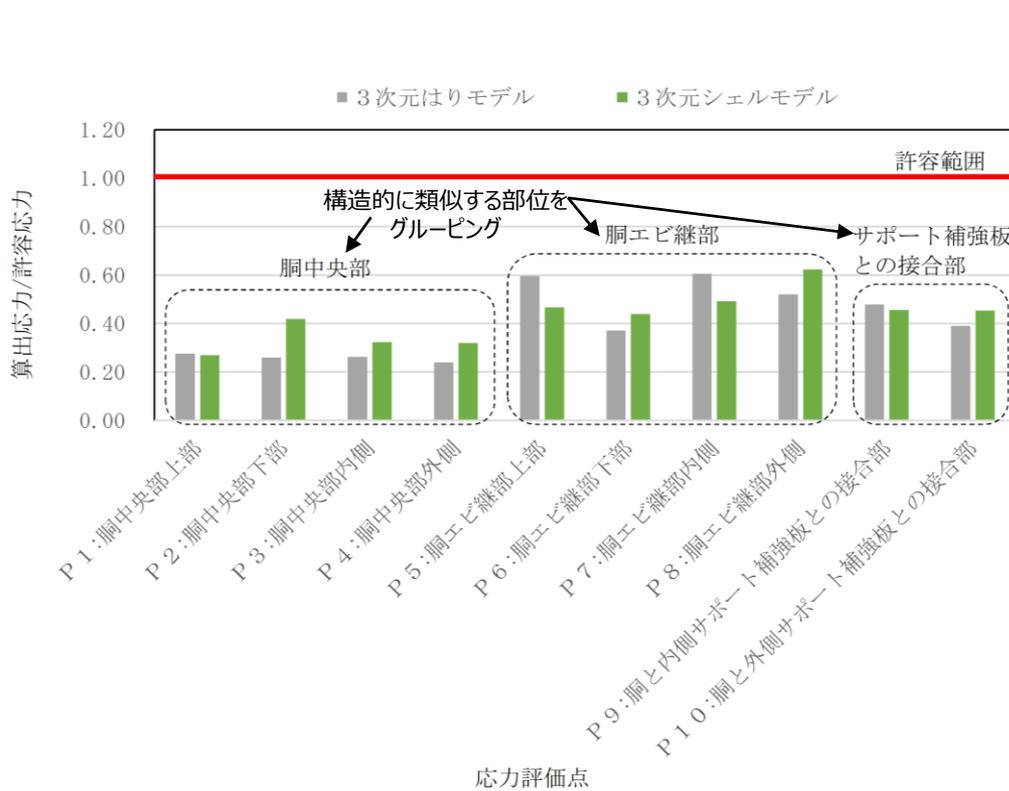
- 耐震評価として考慮すべき振動モードは、おおむね同様であることを確認した。
- 固有周期については、3次元シェルモデルではオーバル振動が発生するために3次元はりモデルと差異が生じ、3次元シェルモデルに対して3次元はりモデルの水平方向の固有周期は小さくなることを確認した。鉛直方向の固有周期は両者でおおむね一致していることを確認した。

3次元はりモデル（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）		振動の特徴
振動モード (固有周期)	赤線：変形前 黒線：変形後	振動モード (固有周期)	赤線：変形前 黒線：変形後	

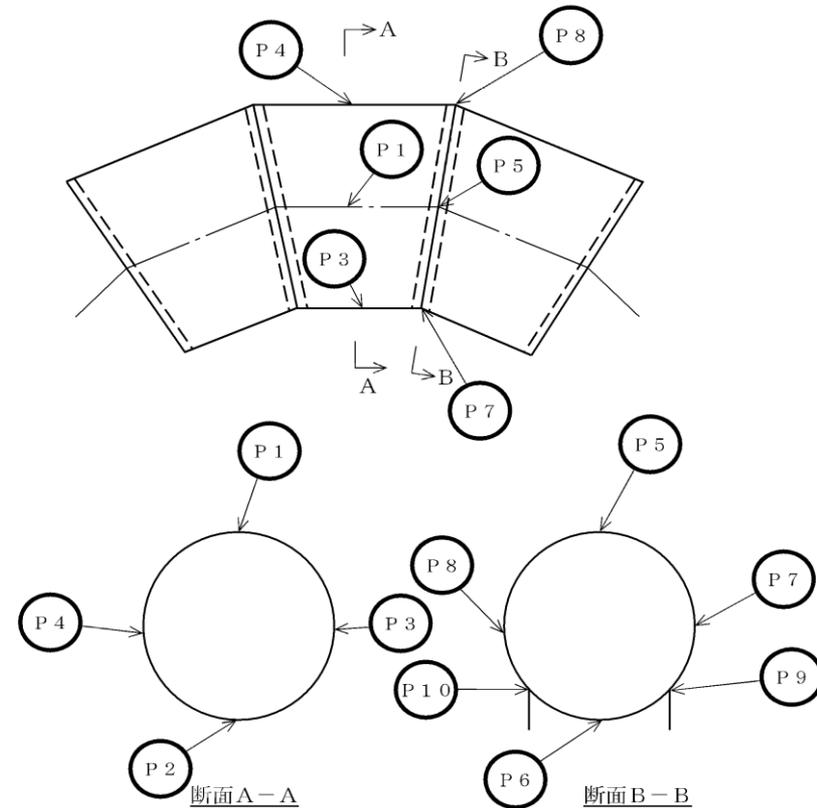
6.3 応力評価結果（1/3）

(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であることを確認した。



サプレッションチェンバの一次応力評価結果



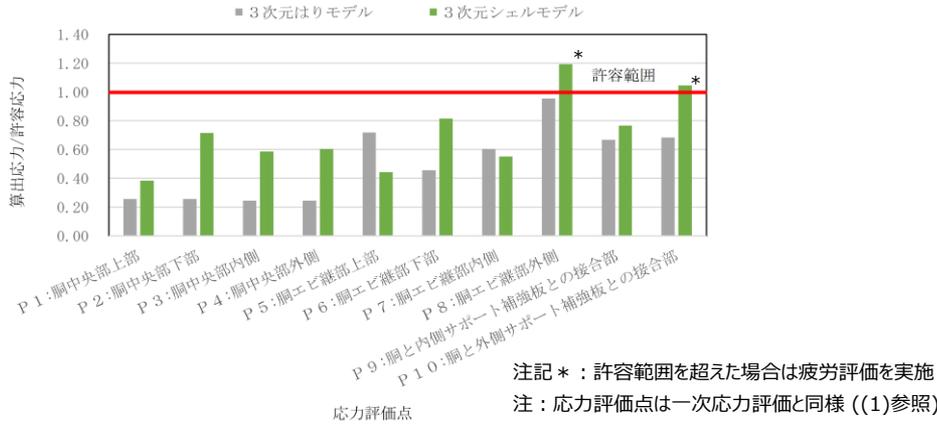
サプレッションチェンバの応力評価点

6. 3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）の妥当性確認

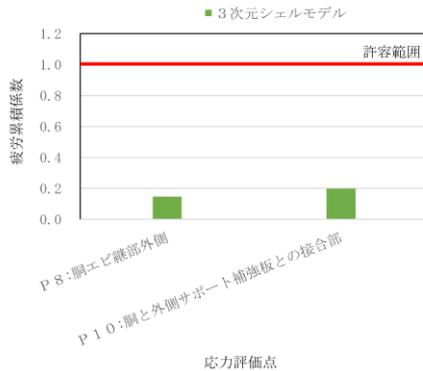
6.3 応力評価結果（2/3）

(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

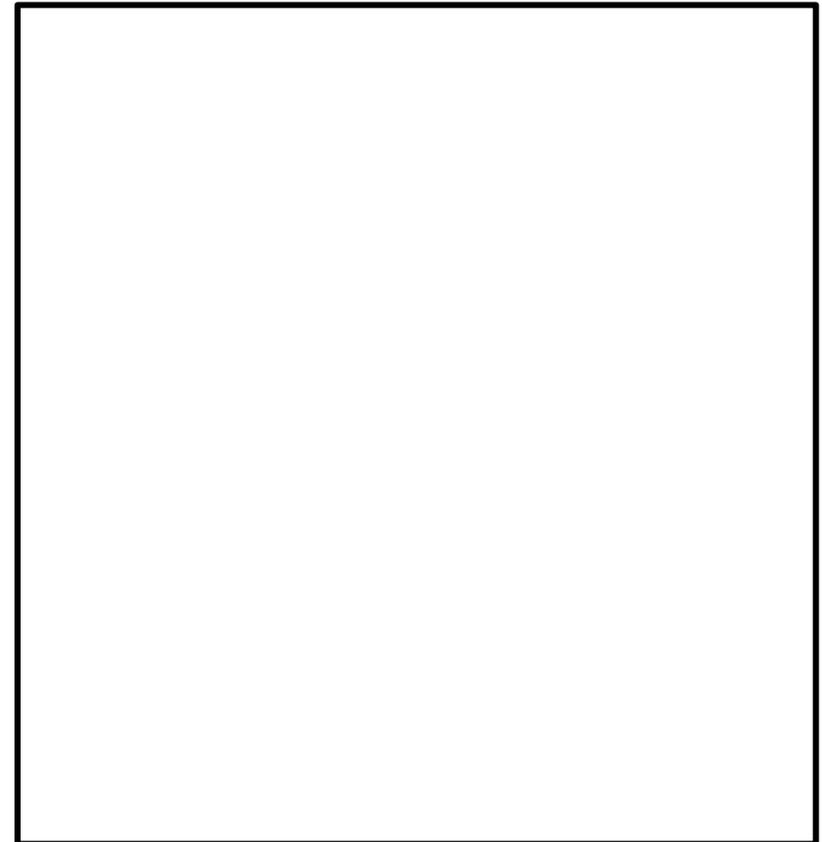
- サプレッションチェンバの一次＋二次応力評価については、オーバル振動により3次元はりモデルに対して3次元シェルモデルの発生応力が大きい傾向となるが、疲労評価を含めた評価結果には十分な余裕があり、サプレッションチェンバの耐震評価上問題がないことを確認した。



サプレッションチェンバの一次＋二次応力評価結果



サプレッションチェンバの疲労評価結果



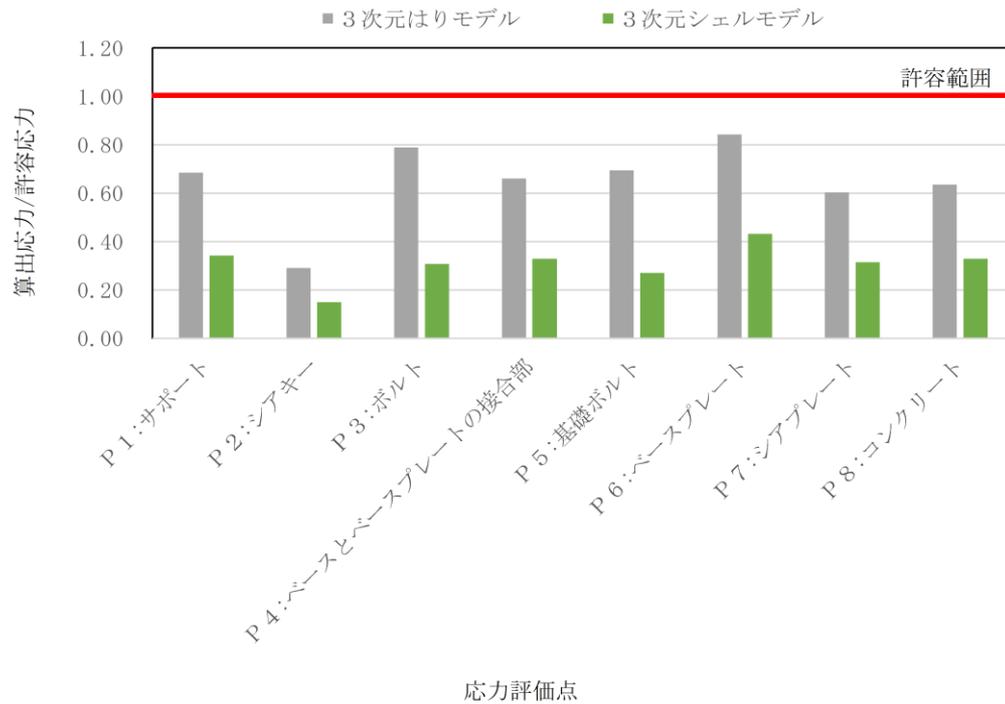
3次元シェルモデルの変形図
(オーバル振動の例)

6. 3次元はりモデル（工認用地震応答解析モデル）の妥当性確認

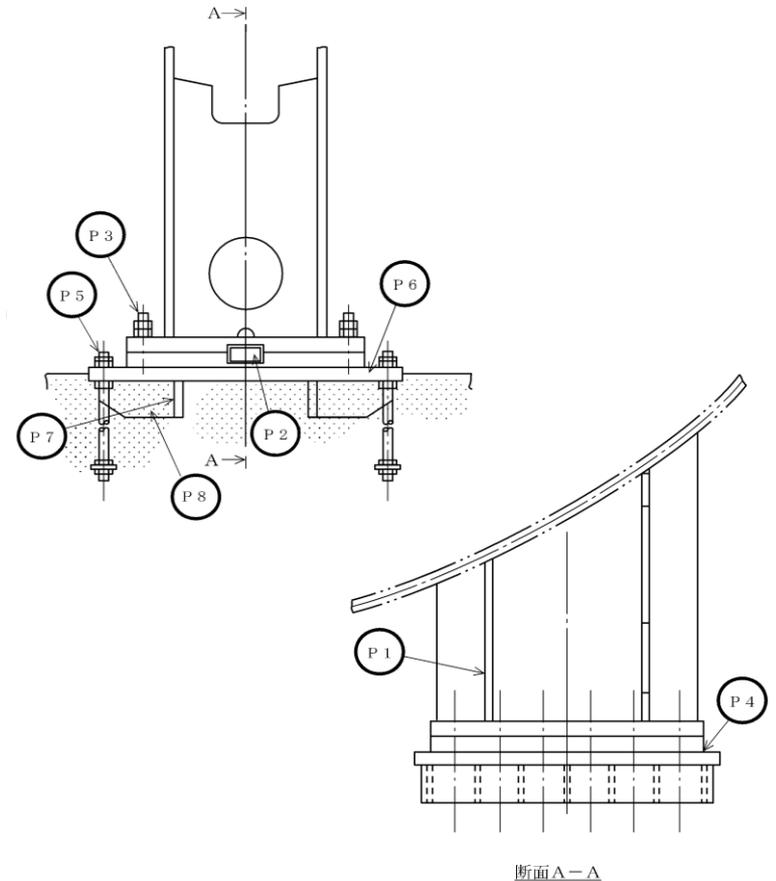
6.3 応力評価結果（3/3）

(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次元シェルモデルの発生応力はオーバル振動の発生に伴うモードの分散により3次元はりモデルに対して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

7. 地震応答解析における高振動数領域の影響について

- 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には剛性を模擬し、サポート間のはり要素には3つの節点を設定したモデルとした。
- 設計用床応答スペクトルでは高振動数領域（0.02秒（50Hz）から0.05秒（20Hz））の範囲に床面の最大応答加速度を上回る震度を設定しており、スペクトルモーダル解析において50Hzまでの振動モードを考慮した。
- 固有値解析により、高振動数領域においてサポート間のはり要素の振動モードは主要な振動モードとして現れないことを確認した。

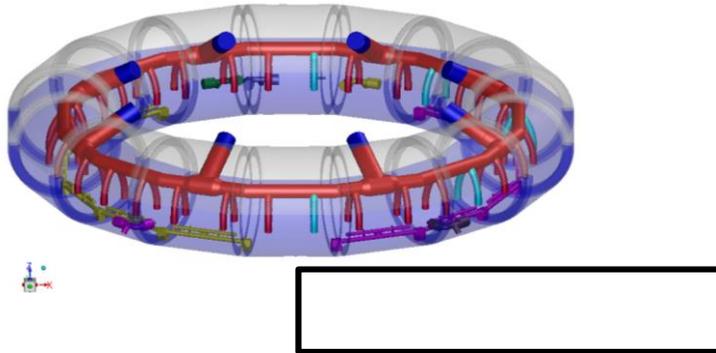
3次元はりモデル
(地震応答解析モデル：水平方向)

高振動数領域における振動モード図
(水平方向の並進モード)

8. スロッシング荷重に関する詳細設計について

8.1 解析条件

- 既工認では、サプレッションチェンバ内部水全体を死荷重としていたため、スロッシング荷重は水平方向の地震荷重に包含される扱いとしていたが、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、スロッシング荷重は流体解析により算出する。

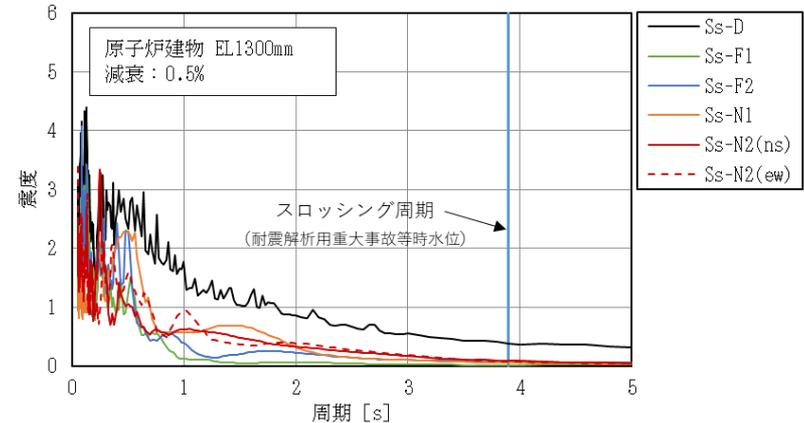


流体解析モデル

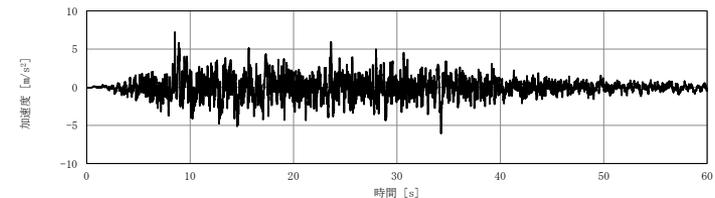
解析条件

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 S s - D (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 (水平1方向 (N S) + 鉛直方向入力)
解析コード	汎用流体解析コード F l u e n t (V O F 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

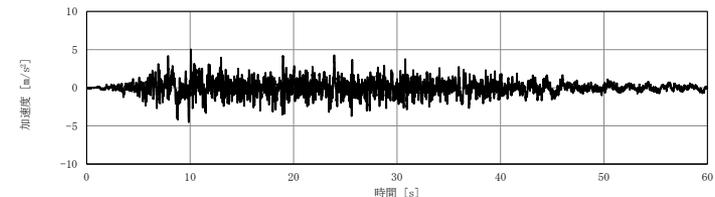
注記* : スロッシングの卓越周期帯及びサプレッションチェンバの一次固有周期帯で応答加速度が大きい S s - D を用いる。



サプレッションチェンバ設置床の床応答スペクトル (N S 方向, 拡幅無し)



流体解析に適用する入力加速度 (N S 方向)

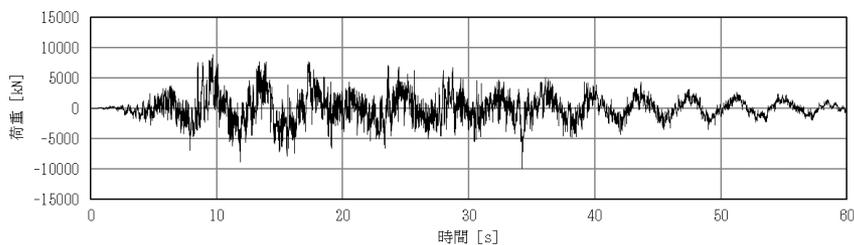


流体解析に適用する入力加速度 (鉛直方向)

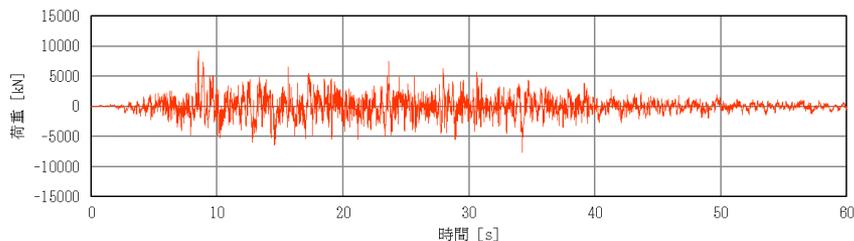
8. スロッシング荷重に関する詳細設計について

8.2 耐震評価における考慮方法

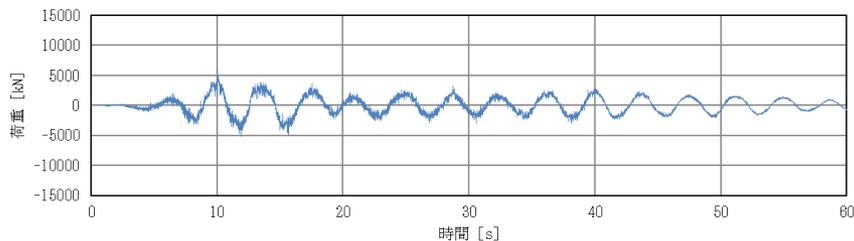
- 流体解析によるスロッシング荷重算定結果を以下に示す。スロッシング荷重は、流体解析で算出される内部水全体による荷重から、容器と一体となって振動する有効質量による荷重を減ずることで算出する。
- サプレッションチェンバの応力評価に用いるスロッシング荷重は水平 2 方向入力による影響を鑑みて√2倍の余裕を考慮した8597kNとする。(水平 2 方向入力に対する影響検討は参考 5 参照。)



内部水全体による荷重F



容器と一体となって振動する有効質量による荷重 $M_E \cdot \ddot{x}$



スロッシングによる荷重 F_S

各時刻歴荷重 (S s - D, 耐震解析用重大事故等時水位)

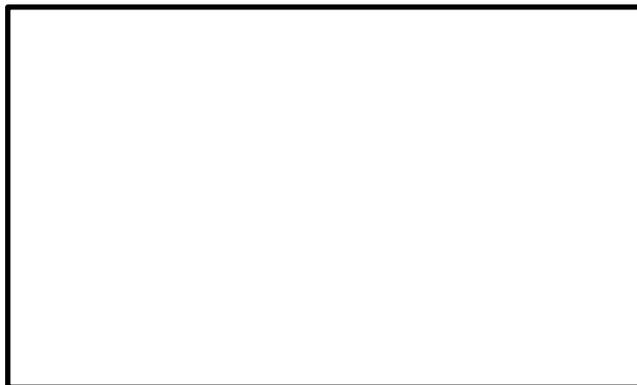
【運動方程式】

$$F_S = F - M_E \cdot \ddot{x}$$
 ここで、
 F : 流体解析で算出される内部水全体による荷重
 F_S : スロッシングによる荷重
 $M_E \cdot \ddot{x}$: 容器と一体となって振動する有効質量による荷重
 M_E : 流体解析により算出した有効質量
 \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 (最大)
S s - D	耐震解析用 重大事故等時水位	6060kN (8597kN*)

注記* : 水平 2 方向入力の影響を考慮した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。

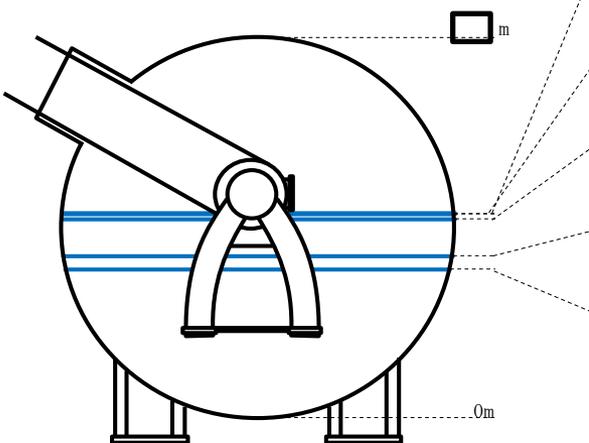
スロッシング解析結果例
 (S s - D, 耐震解析用重大事故等時水位, 最大荷重発生時刻付近)

9. 耐震評価における水位条件の設定について

9.1 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バント 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。

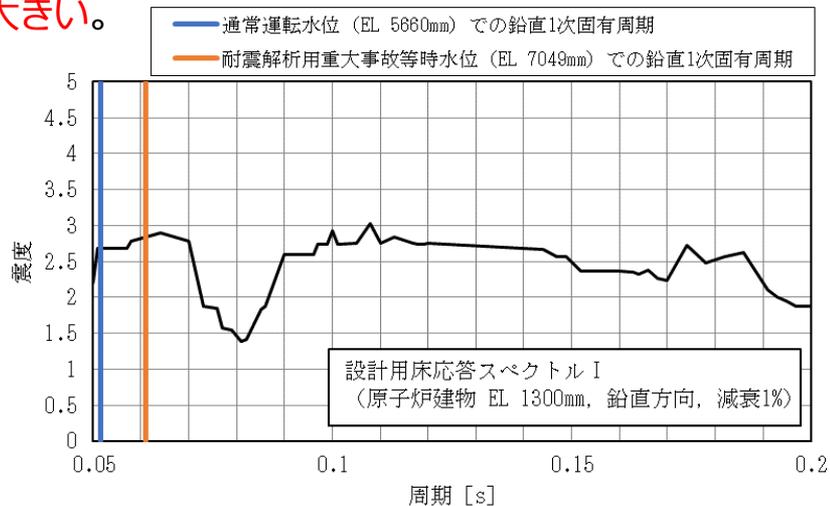
9. 耐震評価における水位条件の設定について

9.2 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

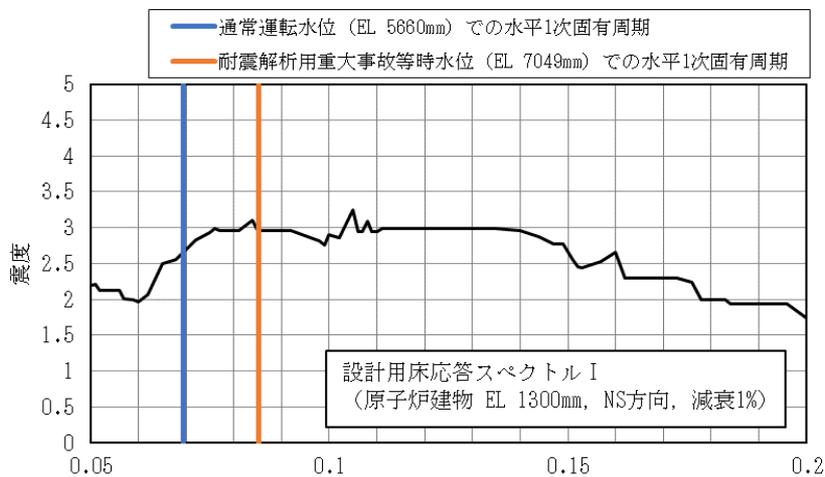
➤ 以下の設計用床応答スペクトルに示すとおり、通常運転水位の固有周期における震度に対して、耐震解析用重大事故等時水位の固有周期における震度は大きい。

各水位の固有周期における震度

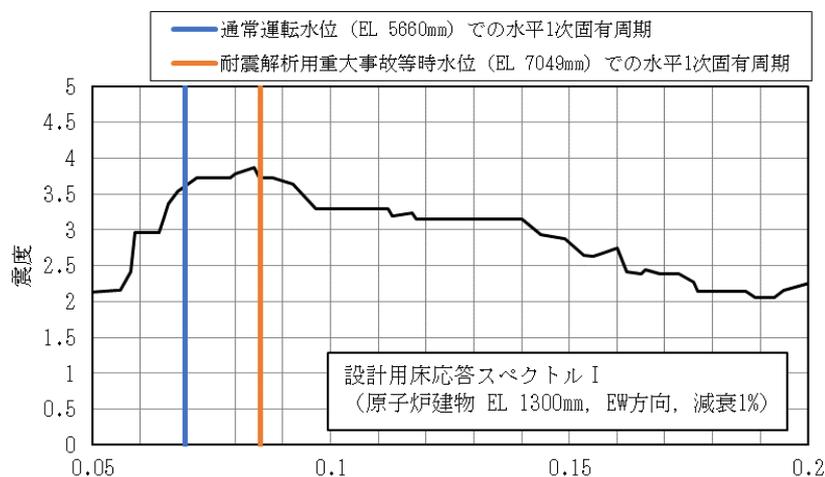
方向	通常運転水位	耐震解析用重大事故等時水位
NS		
EW		
鉛直		



鉛直方向



NS方向



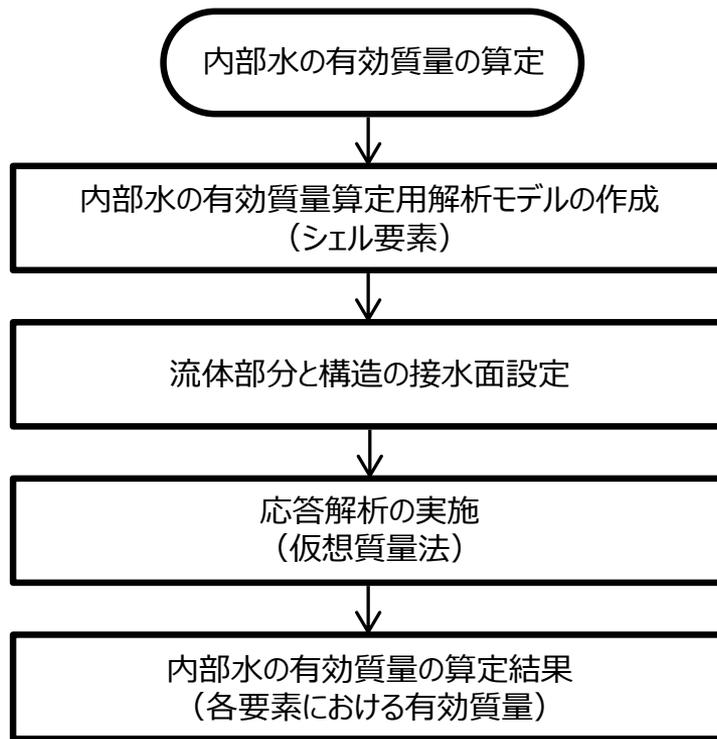
EW方向

10. まとめ

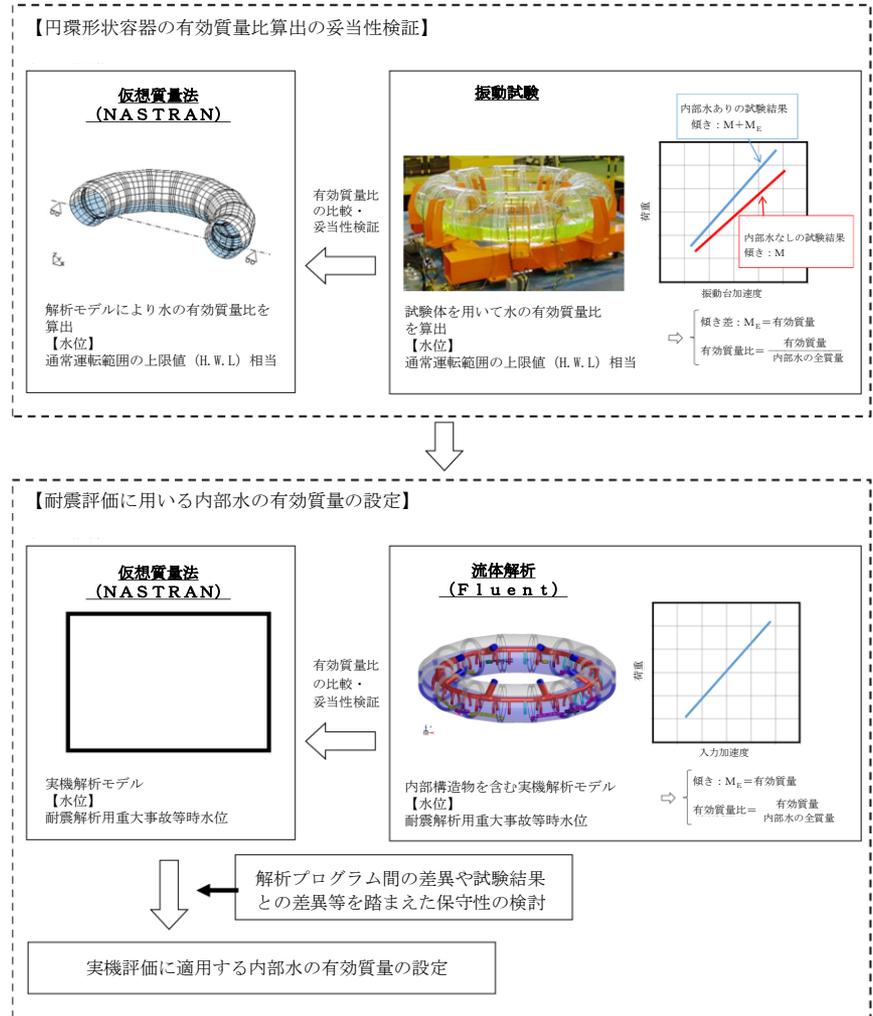
- 島根 2 号機の今回工認におけるサプレッションチェンバの耐震評価にあたり、設置変更許可段階では考慮されていなかった以下の項目に対する検討を実施した。
 1. 地震応答解析モデルの**妥当性**確認に関する検討
 2. **高振動数領域**の影響に関する検討
 3. スロッシング荷重の**詳細設計**に関する検討
 4. 耐震評価で**適用する**水位条件に関する検討
- 上記に係る検討結果は、以下のとおり。
 1. サプレッションチェンバの 3 次元はりモデル（地震応答解析モデル）と 3 次元シェルモデル（適用性確認用解析モデル）の比較検討を行い、振動モードが同様であり、**発生応力の相違が耐震評価上問題ない**ことを確認したため、島根 2 号機へ用いることは妥当と判断した。
 2. 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には剛性を**模擬**し、サポート間のはり要素には 3 つの節点を設定したモデルとした。また、**設計用床応答スペクトル**では高振動数領域（0.02 秒（50Hz）から 0.05 秒（20Hz））の範囲に床面の最大応答加速度を上回る震度を設定しており、スペクトルモーダル解析において 50Hz までの振動モードを考慮した。
 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、**水平 2 方向入力を鑑みて**裕度を持った値を応力評価用の荷重として設定した。
 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**大きく**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。

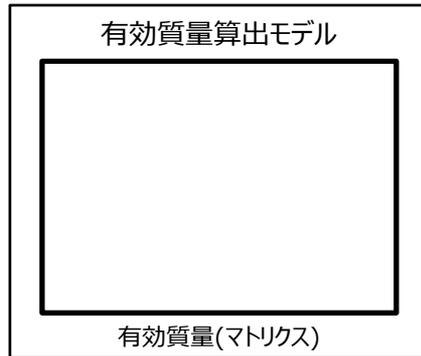


内部水の有効質量の算定フロー

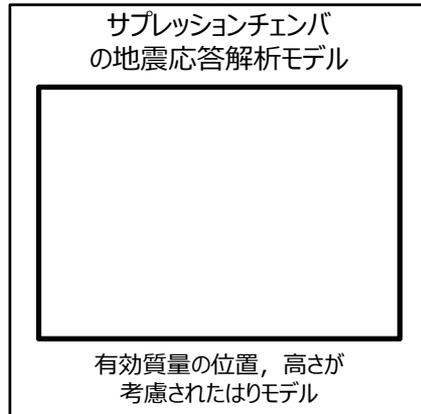


内部水の有効質量算定に係る妥当性確認フロー

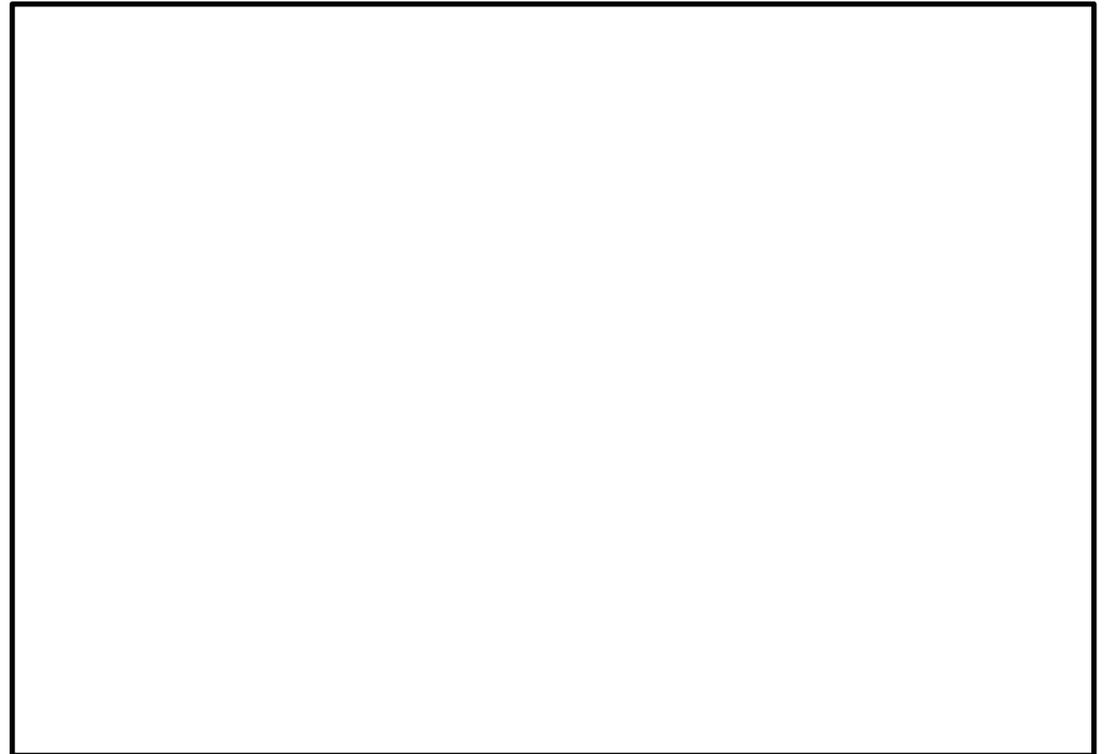
- 仮想質量法を用いて算定した内部水の有効質量は，N A S T R A Nの機能（Guyan縮約）を用いて，サブレーションチェンバの3次元はりモデル（地震応答解析モデル）の各質点に縮約し，設定する。



Guyan縮約により、
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

➤ 5.3項で示したように、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。

➤ 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)	<p>[検討1]</p> <p>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。</p> <p>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)</p>	<p>【影響あり】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。
			<p>[検討2]</p> <p>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。</p> <p>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)</p>	<p>【影響あり】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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)	<p>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。</p> <p>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</p>	<p>【影響なし】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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)	振動モードの有効質量比			解析モデル	モード	振動モードの有効質量比		
		X方向	Y方向	Z方向			X方向	Y方向	Z方向
2次					反对称	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。

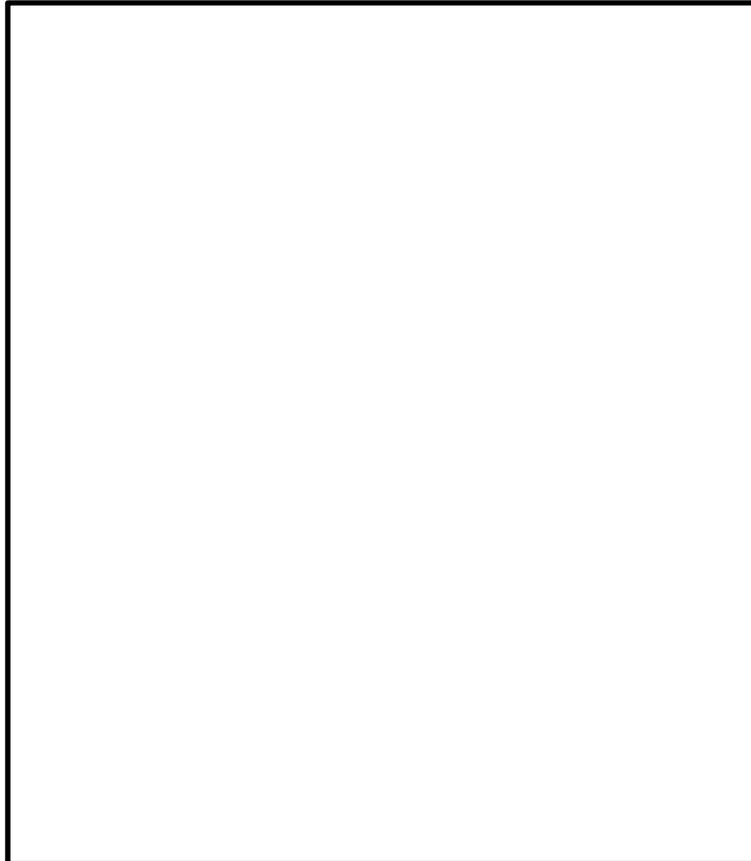
卓越方向	① 3次元はりモデル (地震応答解析モデル)	② 3次元はりモデル (ストレーナなし)	(A) ②/①
X方向			1.00
			-
Y方向			1.00
			-
Z方向			1.00
			-

注記* : E C C Sストレーナの連成により卓越したモード

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

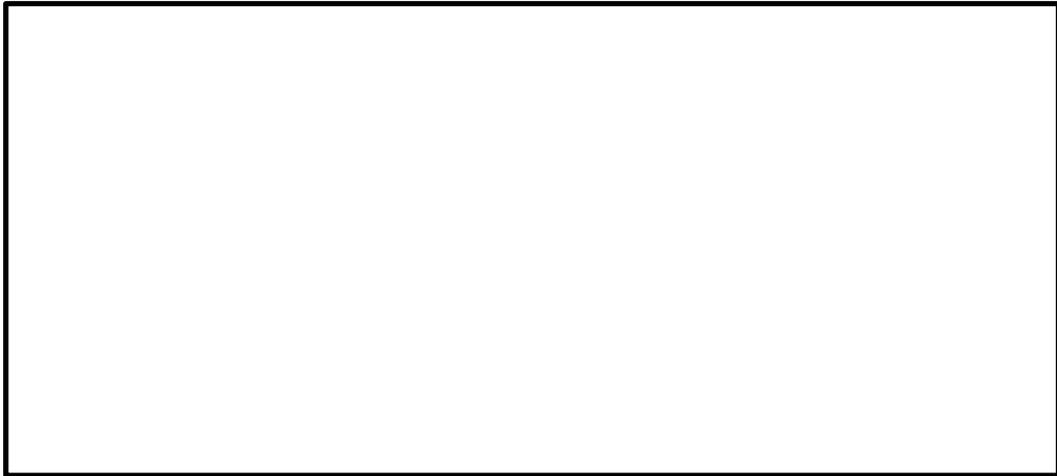
➤ サプレッションチェンバ胴のモデル化の相違については以下のとおり確認した。

- 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。

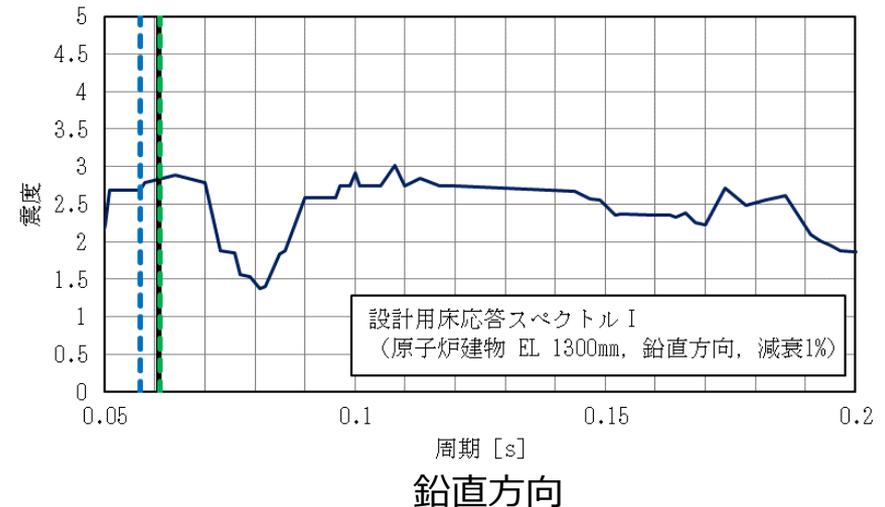
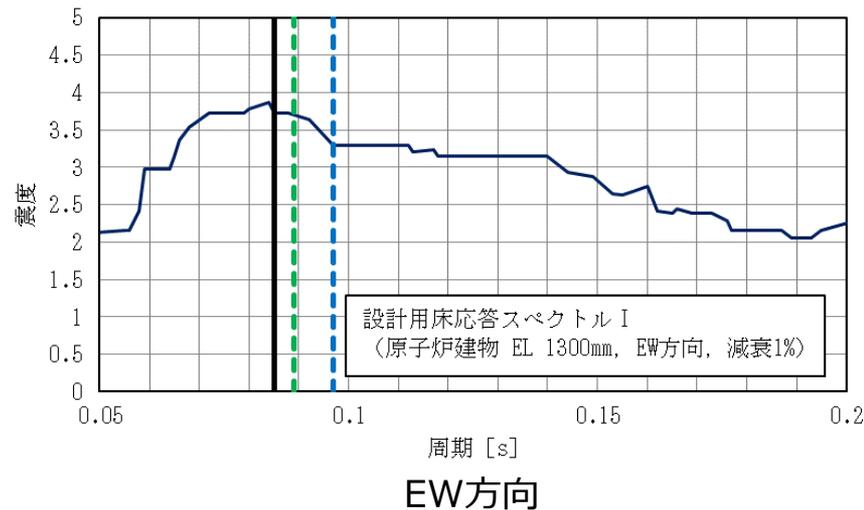
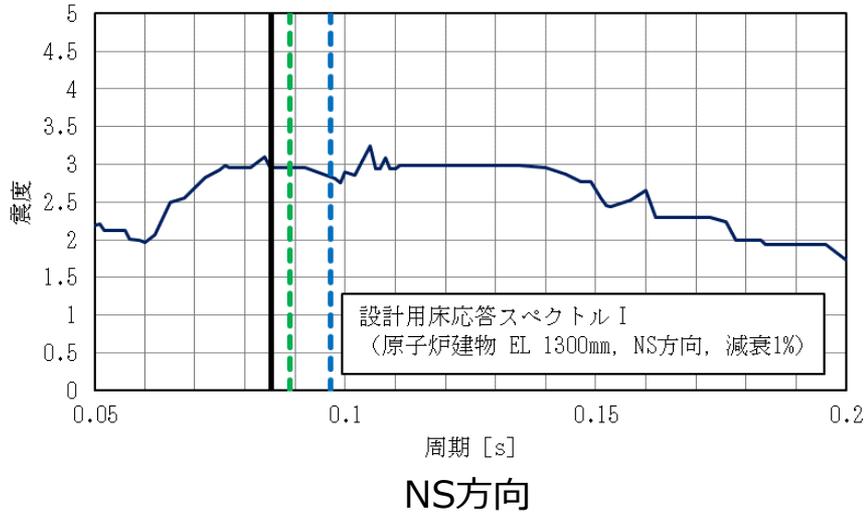


卓越方向	固有周期 (s)			(A) ③/①	(B) ③/②
	① 3次元はりモデル (地震応答解析モデル)	② 3次元はりモデル (サポート剛性精緻化)	③ 3次元シェルモデル (胴一般部断面保持)		
X方向				1.14	1.09
Y方向				1.14	1.09
Z方向				0.93	0.93

【まとめ】

- 3次元はりモデルと3次元シェルモデルの相違点のうちモデル化範囲，ストレーナのモデル化，内部水有効質量のモデル化及びサプレッションチェンバサポート取付部ばね剛性のモデル化による固有周期への影響はないことを確認した。
- 3次元はりモデルの水平方向の固有周期が3次元シェルモデルの固有周期に対して小さくなる要因として，以下の二点を確認した。
 - サプレッションチェンバ胴のモデル化方法
 - サプレッションチェンバサポートの剛性の設定方法

➤ 3次元はりモデルの水平方向の固有周期が3次元シェルモデルの固有周期に対して小さくなることに対する影響検討として、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評価上の問題がないことを確認した。



(参考5) 水平2方向入力によるスロッシング荷重への影響

- 8章の水平1方向+鉛直方向の地震動入力により算出した値を $\sqrt{2}$ 倍したスロッシング荷重（基本ケース）に対して，入力条件を水平2方向+鉛直方向とした場合のスロッシング荷重（影響検討ケース）を比較した。
- 影響検討ケースで算出したスロッシング荷重は，基本ケースで算出したスロッシング荷重より小さいことを確認した。

解析条件

項目	基本ケース	影響検討ケース
解析コード	Fluent	同左
解析モデル	実機解析モデル	同左
入力波	Ss-D	NS方向：Ss-D EW方向：位相特性の異なるSs-D
地震動の入力方向	水平1方向 +鉛直方向	水平2方向 +鉛直方向
水位	EL 4000mm	同左

評価結果

検討ケース		①基本ケース (水平1方向入力)	②影響検討ケース (水平2方向入力)	①/②
スロッシング 最大荷重 (kN)	NS	5,363	5,364	1.00
	EW	—	3,699	1.45
	合成荷重	7,584* ¹	5,372* ²	1.41
有効質量比	NS	0.23	0.23	1.00
	EW		0.23	1.00

注記*1：基本ケースの最大荷重の $\sqrt{2}$ 倍の荷重

*2：各方向に加わるスロッシング荷重を時刻毎に合成 ($\sqrt{NS^2 + EW^2}$) した値の最大値



変位コンター図（基本ケース）



変位コンター図（影響検討ケース）