

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-他-F-19-0031_改2
提出年月日	2021年6月11日

女川原子力発電所第2号機 サブプレッションチェンバの耐震評価

2021年6月11日
東北電力株式会社

本日のご説明内容

1. はじめに
2. サプレッションチェンバの構造概要
3. 耐震評価における既工認からの変更内容
4. 設置許可段階での説明内容
5. 詳細設計申送り事項に対する回答内容
6. 今回工認における地震応答解析モデルの検討
 6. 1 サプレッションチェンバの振動挙動に対するバルジングの影響検討
 6. 2 ボックスサポート取付部における局部変形による影響検討
 6. 3 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
 6. 4 サプレッションチェンバの地震応答解析モデル(3次元はりモデル)
7. まとめ
 - 参考 1 サプレッションチェンバの耐震補強対策
 - 参考 2 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
 - 参考 3 サプレッションチェンバ本体のバルジングに対する影響検討
 - 参考 4 ボックスサポート取付部のばね剛性の算定
 - 参考 5 ボックスサポートのモデル化
 - 参考 6 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る確認結果

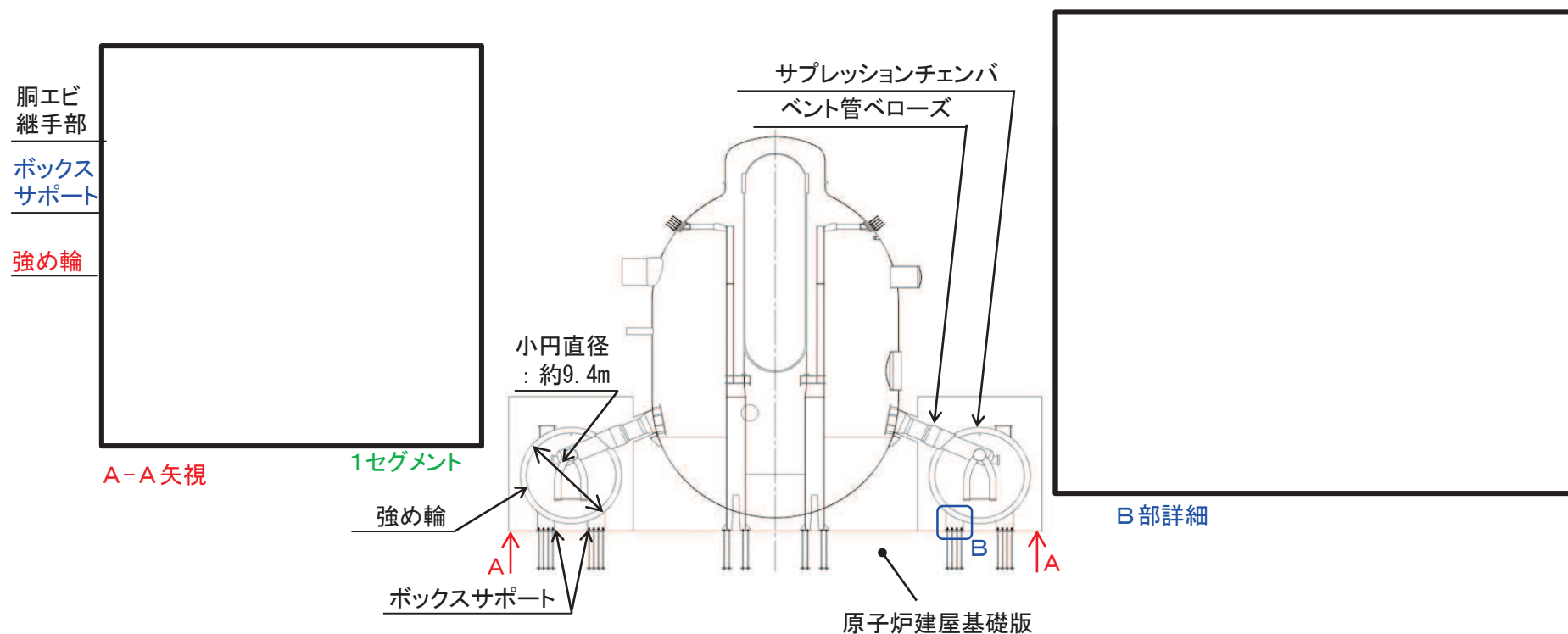
- サプレッションチェンバの耐震評価について、詳細設計申送り事項(第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 2020年7月14日)に対する回答(詳細設計段階における検討結果)を説明する。

詳細設計申送り事項(第876回審査会合, 2020年7月14日)

No.	項目	概要
2-3	サプレッションチェンバの耐震評価	サプレッションチェンバの耐震評価における地震応答解析モデルに3次元はりモデルを適用すること等について詳細を説明する。

2. サプレッションチェンバの構造概要

- 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、その内部には円筒の変形を抑制するための強め輪(合計64枚)を設置。
- 円筒の継ぎ目部(胴エビ継手部)には、ボックスサポート(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屋基礎版上に自立する構造。
- ボックスサポートは、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、大円周方向に地震荷重を原子炉建屋基礎版に伝達させる構造。
- 今回工認では、詳細設計を踏まえて、サプレッションチェンバの強め輪、ボックスサポート取付部及びボックスサポートを補強。【参考1】



サプレッションチェンバの構造概要

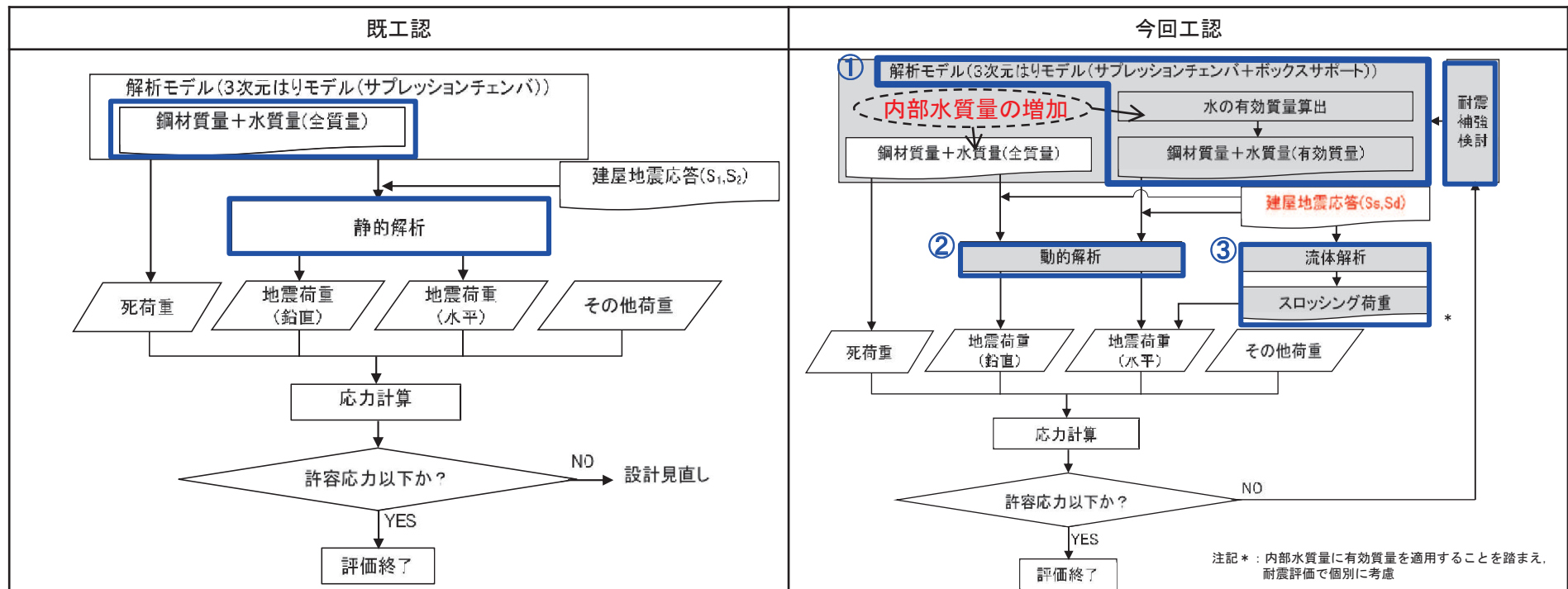
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3. 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の変更。【参考2】
 - ① 内部水質量に対する有効質量の適用
 - ② 地震応答解析手法の変更（動的解析として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，大型機器（原子炉圧力容器，原子炉格納容器等）の地震応答解析モデルもはりモデルを適用していることを踏まえ，今回工認では，3次元はりモデルを踏襲した検討を実施した。

既工認及び今回工認における耐震評価フロー




①～③：設置許可審査での説明内容



4. 設置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配慮事項)

- 設置許可審査(第698回審査会合, 2019年4月2日他)においては, 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配慮事項を纏めた。

項目	耐震設計への配慮事項(設置許可審査での説明内容)
<p>①内部水質量に対する有効質量の適用</p> 	<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によっては, 固有周期が変動することを踏まえ, 床応答スペクトルとの関係にも配慮する。
<p>②地震応答解析手法の変更</p> 	<ul style="list-style-type: none">➤ サプレッションチェンバの動的解析として, 3次元はりモデルによるスペクトルモーダル解析等を適用する。➤ 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。
<p>③スロッシング荷重の個別評価</p> 	<ul style="list-style-type: none">➤ 流動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, 保守的に評価(水平1方向+鉛直方向の$\sqrt{2}$倍の荷重を考慮)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, 地震荷重との組合せとして保守的に最大値を考慮する。

5. 詳細設計申送り事項に対する回答内容

- 今回工認でのサプレッションチェンバの耐震評価にあたり、設置許可審査(第698回審査会合, 2019年4月2日他)を踏まえ、サプレッションチェンバの耐震評価における地震応答解析モデルに3次元はりモデルを適用することに関して、以下の詳細設計申送り事項に対する検討結果を説明する。

詳細設計申送り事項	回答内容(今回工認における対応)	備考
1. サプレッションチェンバの振動挙動に対するバルジング*の影響 * : サプレッションチェンバの円筒(小円断面)が変形するような振動	<ul style="list-style-type: none">サプレッションチェンバの円筒内部にある既設強め輪の効果によって、バルジング(小円断面が花びら状の変形する振動:オーバル振動)の影響が抑制されていること確認した。	6.1項で説明
2. サプレッションチェンバのボックスサポート取付部における局部変形による影響	<ul style="list-style-type: none">上記を確認した上で、地震応答解析モデル(3次元はりモデル)においては、サプレッションチェンバのボックスサポート取付部に、小円断面の変形の影響及び局部変形の影響を考慮したばね剛性を設定した。	6.2項で説明

6. 今回工認における地震応答解析モデルの検討

6.1 サプレッションチェンバの振動挙動に対するバルジングの影響検討(1)

《詳細設計申送り事項1に対する検討結果》

- サプレッションチェンバの円筒内部にある既設強め輪の効果によって、バルジング(小円断面が花びら状の変形する振動:オーバル振動)の影響が小さく、発生応力が大きく低減されていることを確認した。【参考3】
- 支配的な振動モードは、1次モード(水平方向)及び2次モード(鉛直方向)であり、いずれもボックスサポート取付部が最大応力発生部位であることを確認した。

発生応力の比較結果*1,2

モデル化条件	強め輪		なし	あり
	内部水		考慮	考慮
発生応力【MPa】	水平方向	オーバル振動含まない(0~20Hz)	5104	105
		オーバル振動含む(0~40Hz)	5104	105
	鉛直方向	オーバル振動含まない(0~20Hz)	2129	46
		オーバル振動含む(0~40Hz)	2129	46

*1: スペクトルモーダル解析(1Gスペクトル)による発生応力

*2: ここでいうオーバル振動は、花びら状の変形のこと

強め輪による
応力低減効果大

オーバル振動の影響小

応力コンター図*4

振動モード	水平方向	鉛直方向
	1次モード	
2次モード		

*3: 最大応力発生部位

*4: サプレッションチェンバ本体の範囲 枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 今回工認における地震応答解析モデルの検討

6.1 サプレッションチェンバの振動挙動に対するバルジングの影響検討(2)

- サプレッションチェンバの小円断面の変形影響については、1次モード(水平方向)及び2次モード(鉛直方向)に対するばね剛性をそれぞれ算定し、地震応答解析モデル(3次元はりモデル)に考慮する。
- 今回工認では、サプレッションチェンバ本体の更なる剛性向上を目的とした強め輪の耐震補強対策を実施し、小円断面の変形を抑制する。【参考1】

振動モード	モード図*	ばね剛性算定イメージ
1次モード		
2次モード		

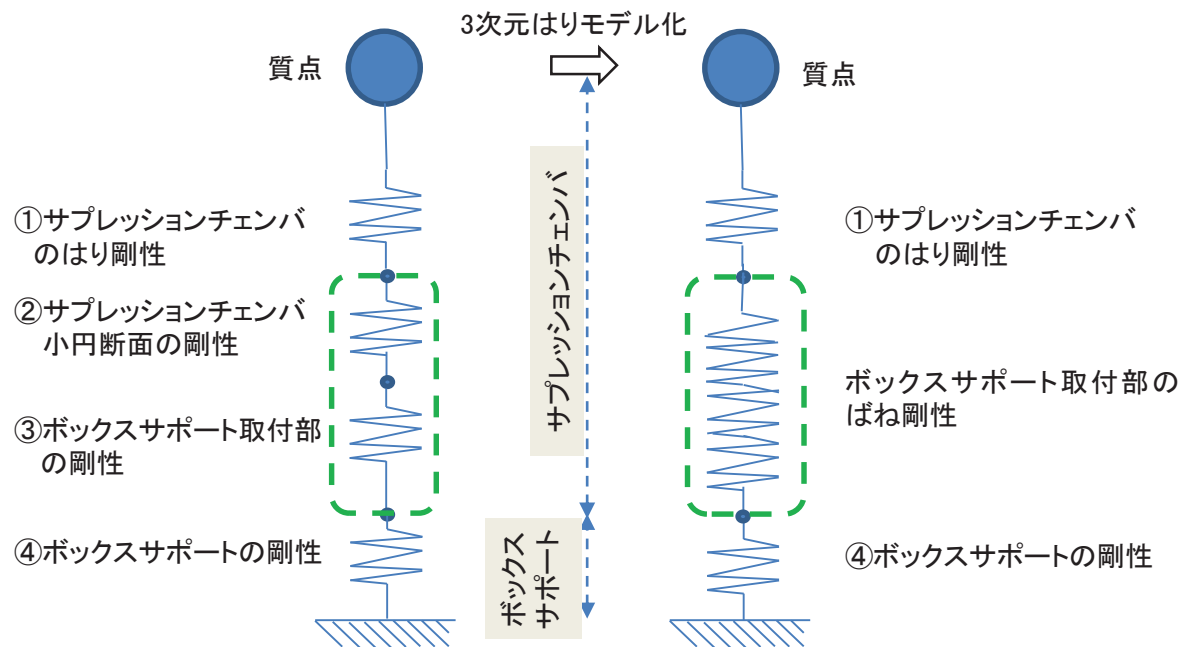
*:各モード図は、変形前を青線で示し、最大変位量を0.5mとして表記。

6. 今回工認における地震応答解析モデルの検討

6.2 ボックスサポート取付部における局部変形による影響検討(1)

《詳細設計申送り事項2に対する検討結果》

- サプレッションチェンバの地震応答解析モデル(3次元はりモデル)に対して, サプレッションチェンバ本体(図Aの①)及びボックスサポート(図Aの④)に加えて, 以下を考慮した。
 - バルジングの影響検討結果(詳細設計申送り事項1)を踏まえ, サプレッションチェンバの小円断面の変形影響(図Aの②)
 - サプレッションチェンバのボックスサポート取付部における局部変形の影響(図Aの③)
- 3次元はりモデルにおける上記影響(図Aの②, ③)のモデル化は, ボックスサポート取付部にばね剛性として設定した。

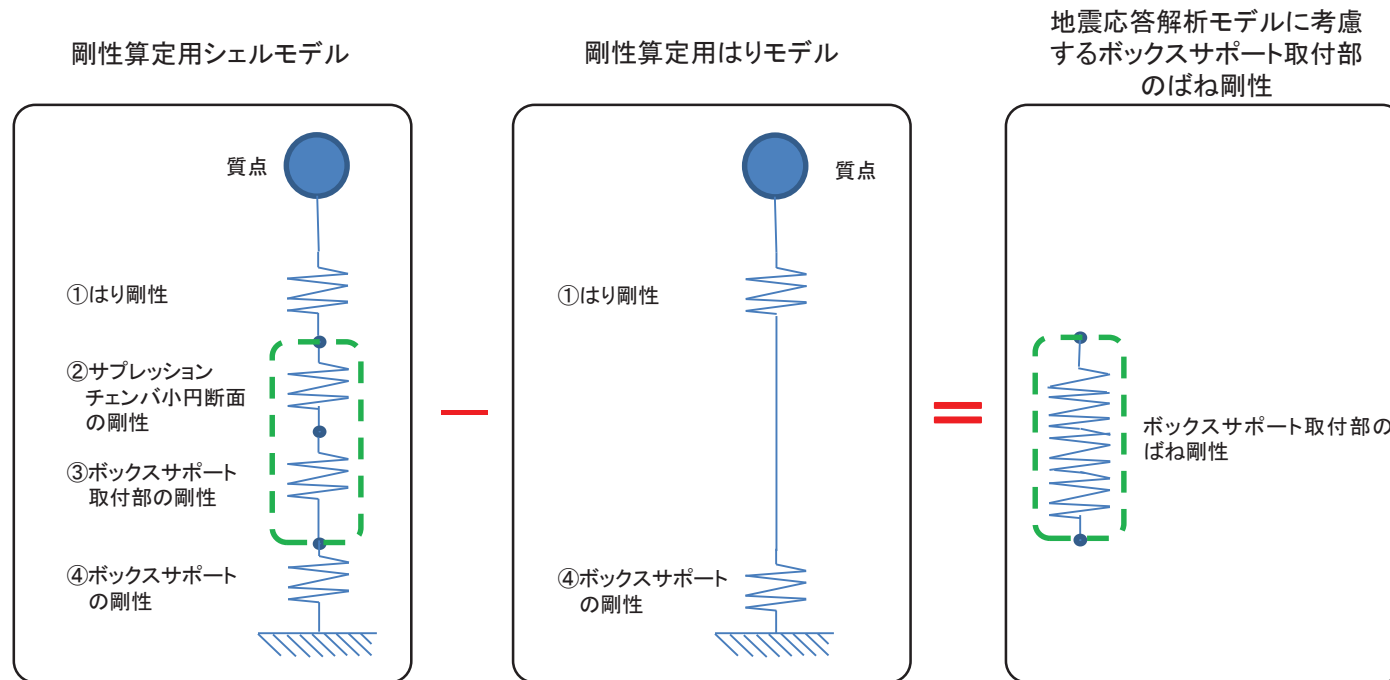


図A サプレッションチェンバとボックスサポートの質量・剛性模式図

6. 今回工認における地震応答解析モデルの検討

6.2 ボックスサポート取付部における局部変形による影響検討(2)

- 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)に設定するボックスサポート取付部のばね剛性は、ばね剛性算定用のシェルモデル及びはりモデル作成し、両者の剛性差から算定した。【参考4】

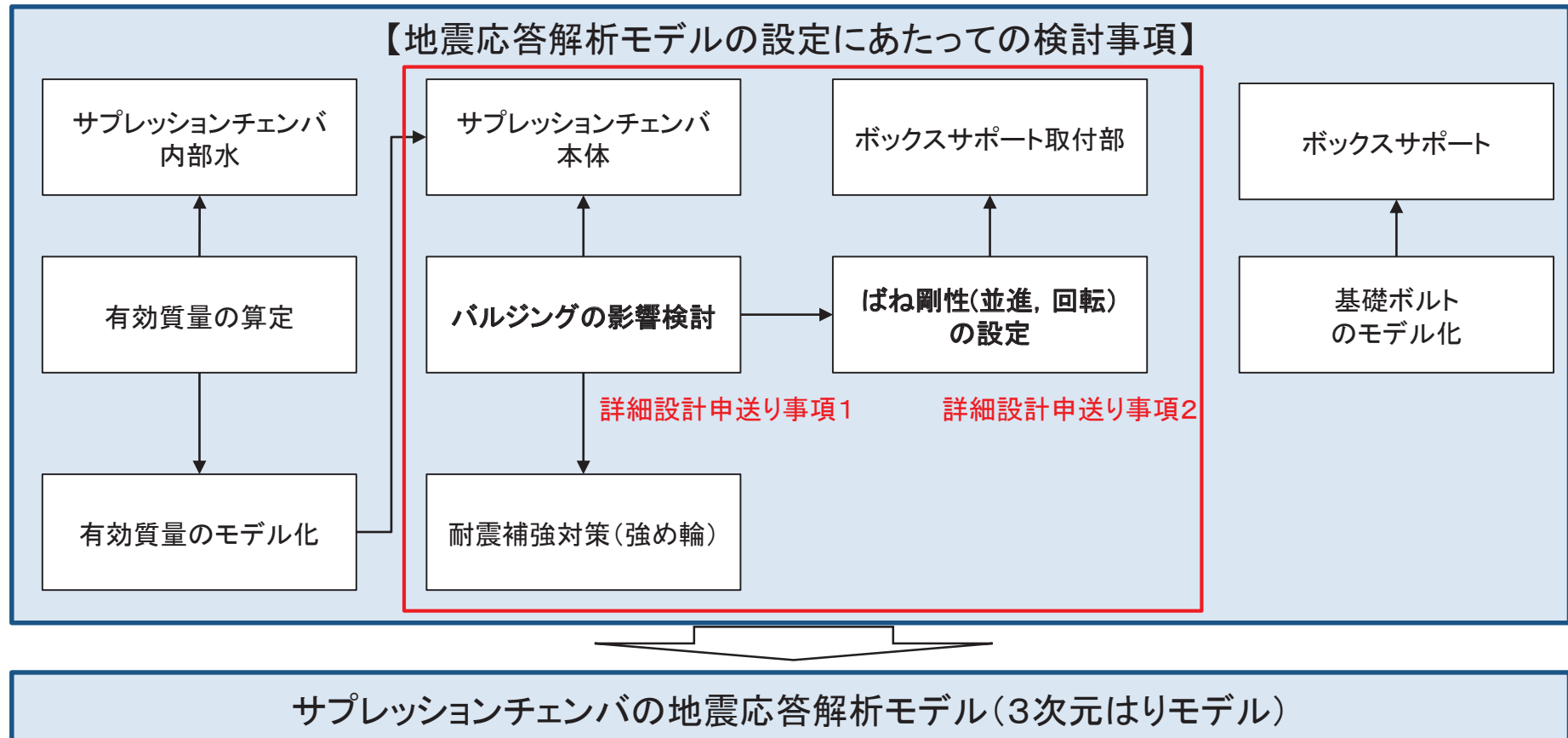


ボックスサポート取付部のばね剛性算定模式図

6. 今回工認における地震応答解析モデルの検討

6.3 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

- サプレッションチェンバ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、ボックスサポート取付部及びボックスサポートに対する検討事項を反映し、今回工認の地震応答解析に用いる3次元はりモデルを設定した。
 - サプレッションチェンバ本体は、内部水の有効質量をモデルに反映し、バルジングの影響検討を踏まえて耐震補強対策を実施
 - ボックスサポート取付部は、バルジングの影響及び局部変形を考慮したばね剛性を設定



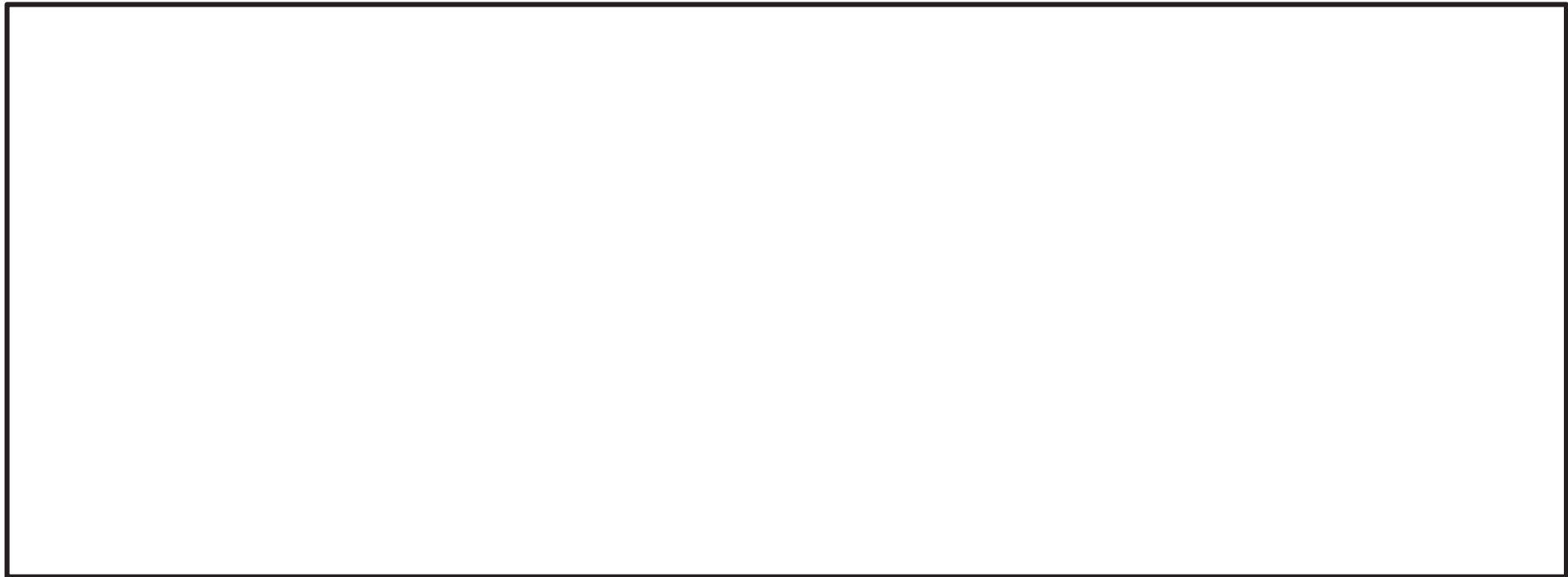
6. 今回工認における地震応答解析モデルの検討

12

6.4 サプレッションチェンバの地震応答解析モデル(3次元はりモデル)

- 詳細設計申送り事項等を踏まえて設定した今回工認におけるサプレッションチェンバの地震応答解析モデル(3次元はりモデル)を下図の通り。
- サプレッションチェンバの地震応答解析モデル(3次元はりモデル)については、妥当性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)との振動モード、発生応力が概ね一致し、ともに許容応力を満足することを確認した。【参考6】

サプレッションチェンバ



●: サプレッションチェンバの鋼材質量及び内部水質量が考慮された質点

(a)境界条件

A部詳細

(b)部材

サプレッションチェンバの地震応答解析モデル

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

7. まとめ

- 女川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、詳細設計申送り事項を踏まえ、地震応答解析モデルに3次元はりモデルを適用することに関して、以下の検討を実施した。
 - ①サプレッションチェンバの振動挙動に対するバルジングによる影響
 - ②サプレッションチェンバのボックスサポート取付部における局部変形による影響
- 上記に係る検討結果として、
 - ①サプレッションチェンバの円筒内部にある既設強め輪の効果によって、バルジング（小円断面が花びら状の変形する振動：オーバル振動）の影響が抑制されていること確認した。
 - ②地震応答解析モデル（3次元はりモデル）においては、サプレッションチェンバのボックスサポート取付部に、小円断面の変形の影響及び局部変形の影響を考慮したばね剛性を設定した。
- サプレッションチェンバの地震応答解析モデル（3次元はりモデル）については、妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）との比較検討を行い、振動モード、発生応力が概ね一致し、ともに許容応力を満足することを確認したため、女川2号機への適用性があると判断した。

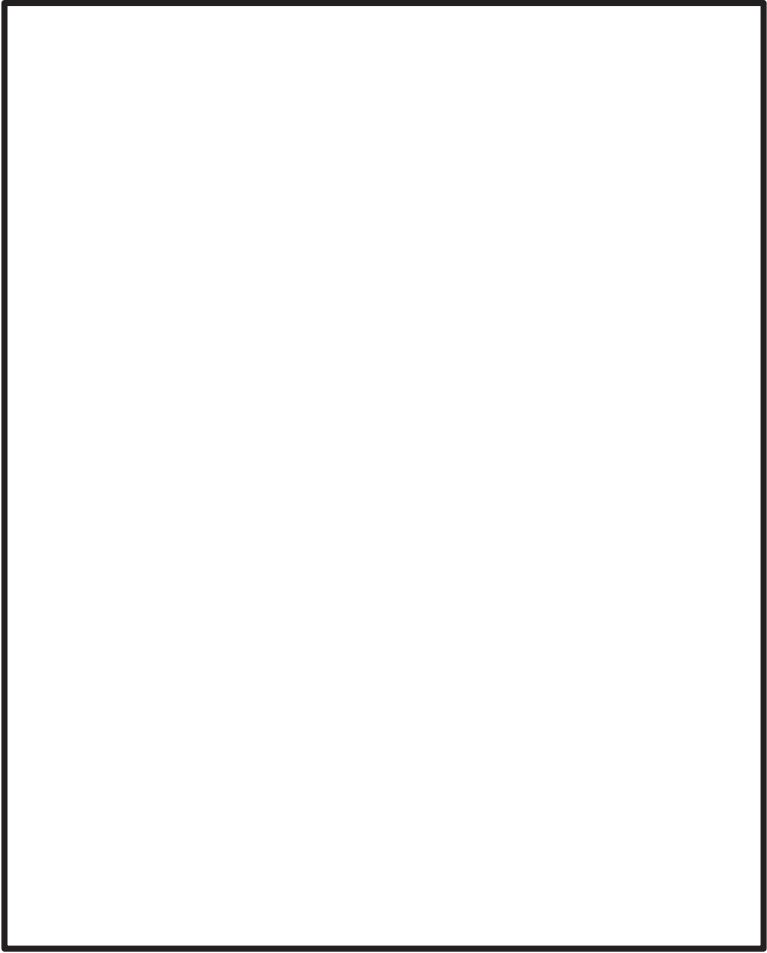
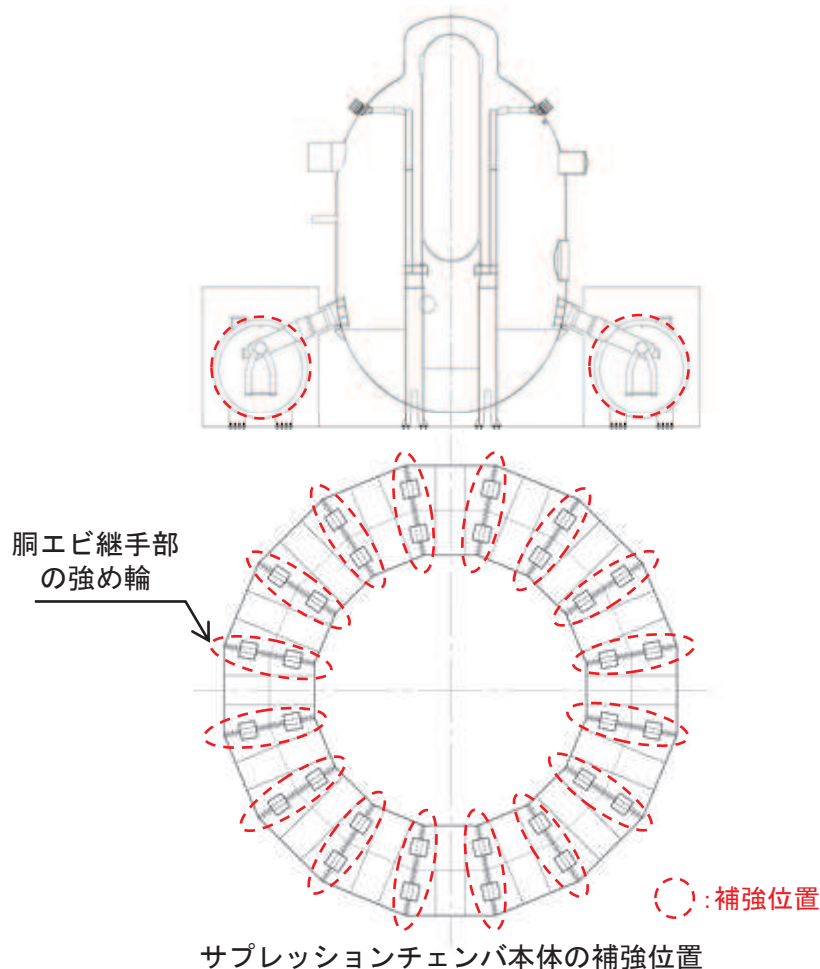
参考資料

- 参考 1 サプレッションチェンバの耐震補強対策
- 参考 2 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
- 参考 3 サプレッションチェンバ本体のバルジングに対する影響検討
- 参考 4 ボックスサポート取付部のばね剛性の算定
- 参考 5 ボックスサポートのモデル化
- 参考 6 今回工認に3次元はりモデルを適用することの妥当性確認

【参考1】 サプレッションチェンバの耐震補強対策

(1) サプレッションチェンバ本体

- サプレッションチェンバ本体は、既設強め輪への追加補強及び強め輪間の連結板追加によって、胴エビ継手部の強め輪の剛性を向上し、小円の断面変形を更に抑制する。
- ボックスサポート取付部は、パッド(当て板)及び補強リブを追加し、応力低減を図る。

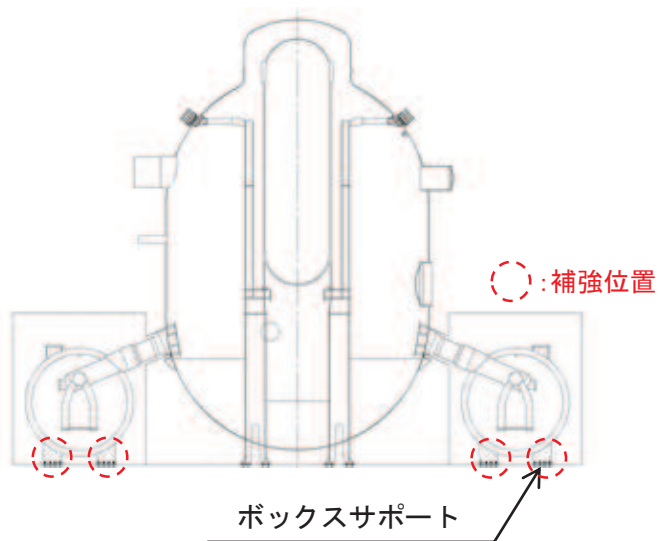


耐震補強対策 (サプレッションチェンバ本体)

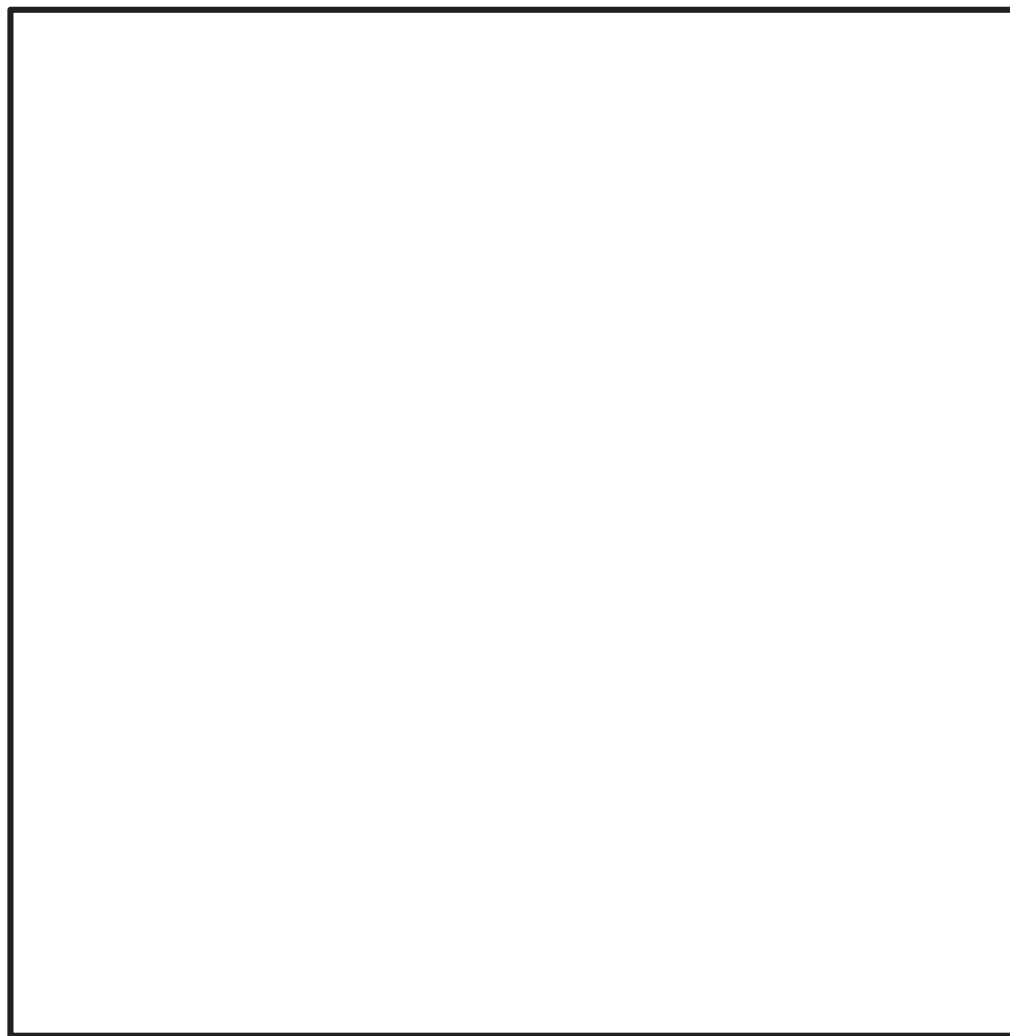
【参考1】 サプレッションチェンバの耐震補強対策

(2) ボックスサポート

- ボックスサポートは、既設ベースプレート外側に新設ベースプレート、新設シヤコネクタ、新設シヤラゲを追加するとともに、ボックスプレートに追加リブを追加し、応力低減を図る。



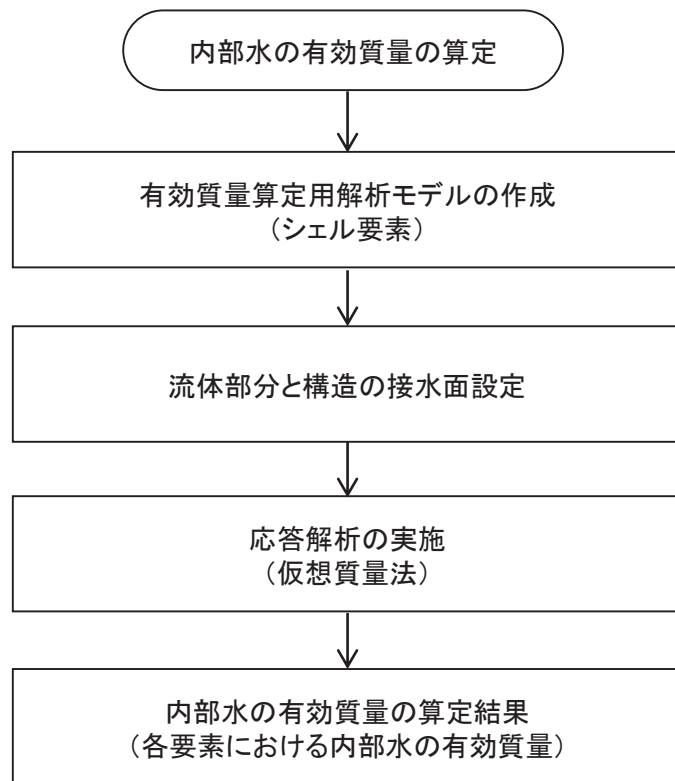
ボックスサポートの補強位置



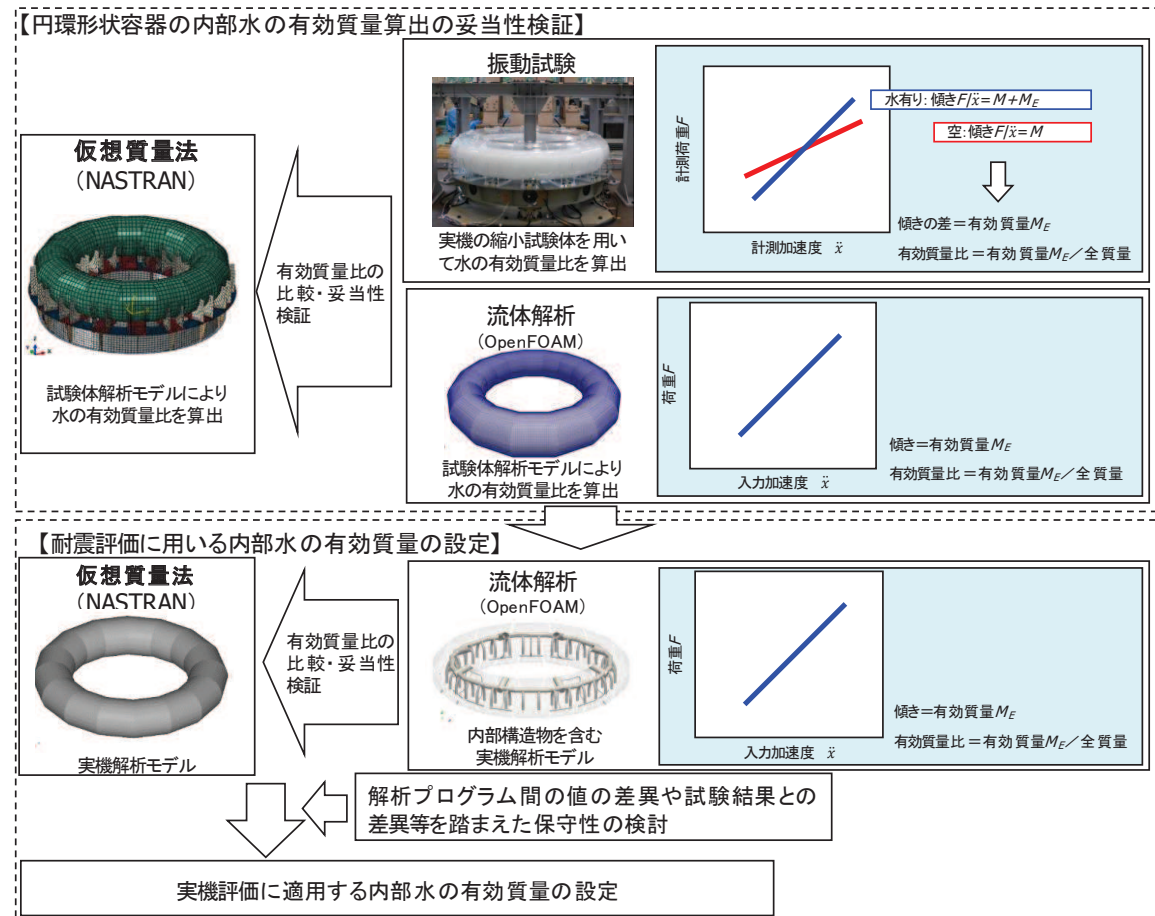
耐震補強対策（ボックスサポート）

【参考2-1】 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(有効質量算定)

- 振動試験, 流体解析 (OpenFOAM) との比較により妥当性を確認した NASTRAN の仮想質量法を用いて内部水の有効質量を算定
- 算定した内部水の有効質量は, NASTRAN の機能 (Guyan 縮約法) を用いて, サプレッションチェンバの地震応答解析モデル (3次元はりモデル) の各質点に縮約し付加



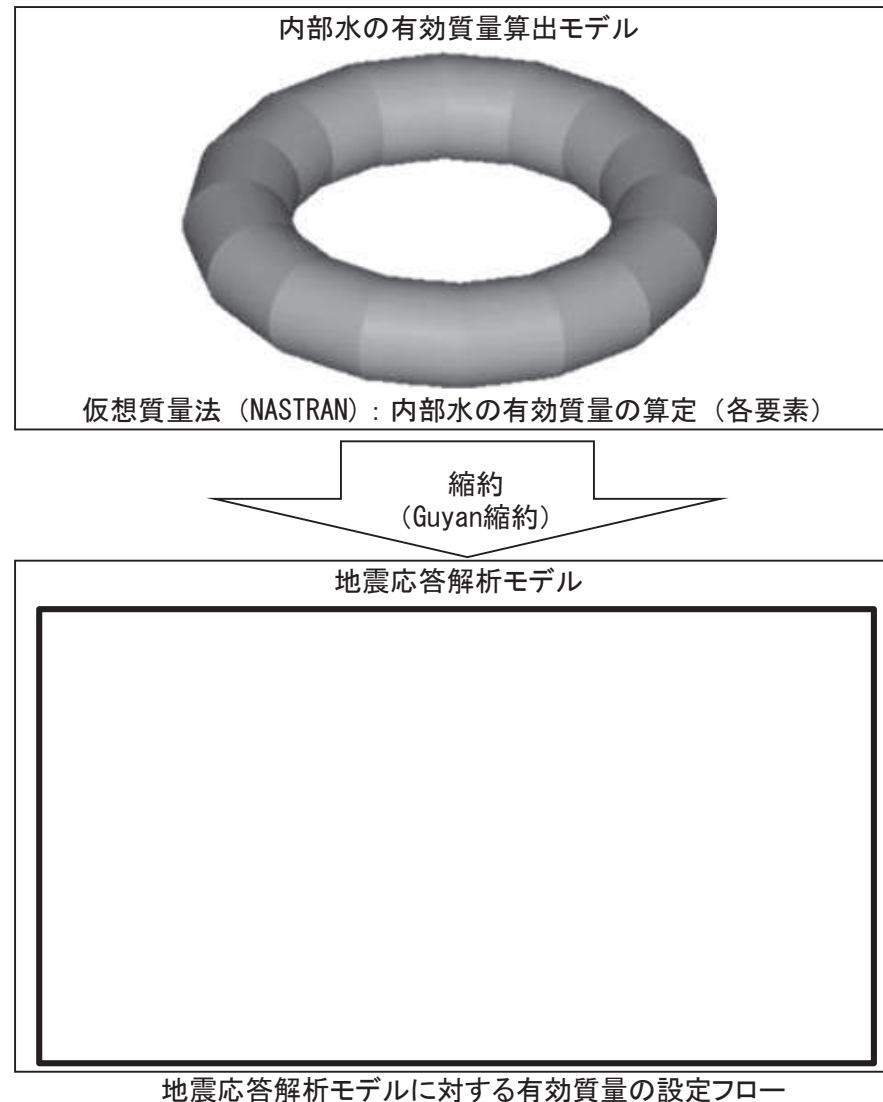
内部水の有効質量の算定フロー



内部水の有効質量算定に係る妥当性確認フロー

【参考2-2】 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 (Guyan縮約)

- 仮想質量法を用いて算定した内部水の有効質量は, NASTRANの機能 (Guyan縮約法) を用いて, サプレッションチェンバの地震応答解析モデル (3次元はりモデル) の各質点に縮約し, 付加



【参考3-1】 サプレッションチェンバ本体のバルジングに対する影響検討

- サプレッションチェンバの耐震設計においては、内部水及び容器の振動モードを考慮し、3次元はりモデルによる地震応答解析を実施
- ここで、内部水を有する容器に対する既往知見[※]として、特に薄肉円筒容器(縦置き)については、バルジング(ビーム振動及びオーバル振動に分類)が生じることが知られていることから、サプレッションチェンバの耐震設計では、ビーム振動を3次元はりモデルを用いた地震応答解析により地震荷重を評価し、オーバル振動については、強め輪によりサプレッションチェンバの変形を防止する設計

表1 振動モードに対するサプレッションチェンバの耐震設計

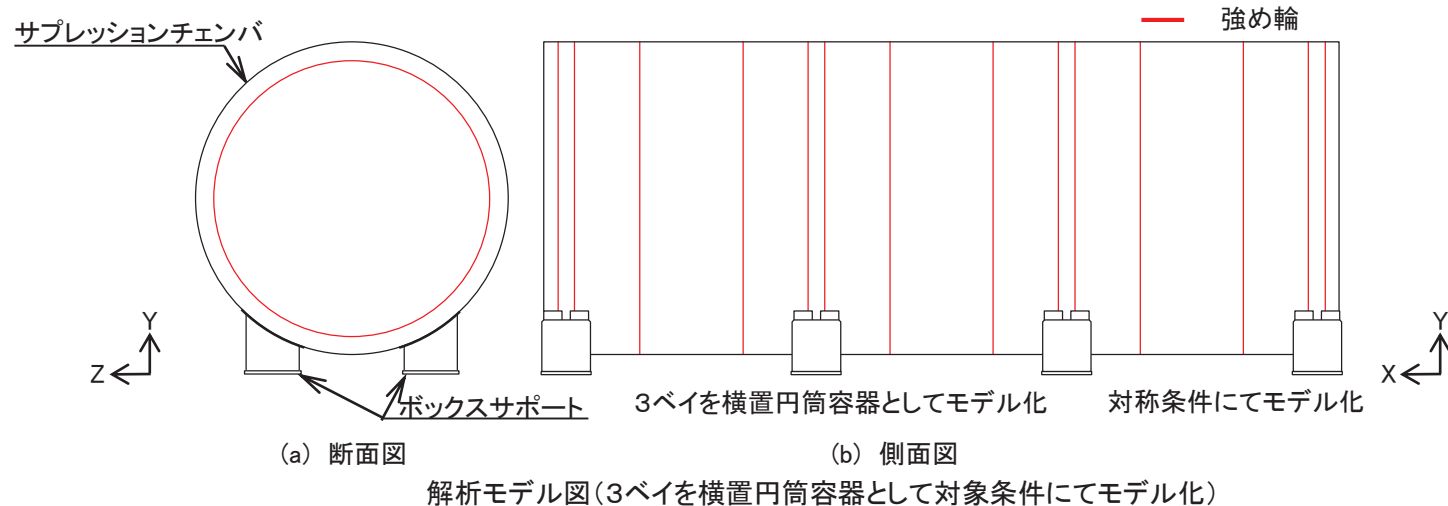
振動モード (既往知見 [※] に基づく定義)		振動の特徴	サプレッションチェンバの耐震設計
スロッシング		大きな液面変動を伴い揺動	汎用流体解析コードOpenFOAMにより算出したスロッシング荷重を考慮
バルジング	ビーム振動	タンクがあたかも梁のように振動	NASTRANにより算出した有効質量を考慮した3次元はりモデルによる地震荷重を考慮
	オーバル振動	タンク壁面が花びら状に変形する振動	S/C内部に強め輪(合計64枚)を取り付け、サプレッションチェンバの変形を防止(サプレッションチェンバのオーバル振動を抑制)

※ 振動試験による円筒形貯水タンクの耐震性評価—動液圧分布の入力加速度依存性について—, INSS JOURNAL, Vol.11, pp.117-128(2004)

【参考3-1】 サプレッションチェンバ本体のバルジングに対する影響検討(検討条件)

➤ バルジングに対する強め輪及び内部水の影響検討のための検討条件

項目	内容
検討モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・サプレッションチェンバの断面を簡便に横置円筒容器(3ベイ分)に模擬した3次元シェルモデル ・強め輪の有無, 内部水の有無を組み合わせた4ケースを検討
解析内容	<ul style="list-style-type: none"> ・固有値解析 ・応答解析(1Gフラットスペクトルを用いたスペクトルモーダル解析)
検討項目	<ul style="list-style-type: none"> ・サプレッションチェンバの振動特性 ・サプレッションチェンバのオーバル振動(花びら状の変形)の影響(応力影響) → 振動モード, 強め輪の効果及び内部水の影響を定量的に評価



【参考3-2】 サプレッションチェンバ本体のバルジングに対する影響検討(振動特性)

- 振動モードは，強め輪及び内部水の有無によらず，各検討ケースともに同様な傾向
- 強め輪がある場合の固有振動数は，強め輪がない場合に比べて20倍程度高い傾向
- 強め輪の効果によって，円筒部の変形が抑制

振動特性の比較結果(各モード図は，最大変位を1mとして示し，着色は変位コンターを示す。)

検討ケース		1*	2*	3*	4*
モデル化条件	強め輪	なし	あり	なし	あり
	内部水	なし	なし	考慮	考慮
振動モード 固有振動数	1次モード	(図表領域)			
	2次モード				
	3次モード				
	オーバル振動 (花びら状の振動)				

枠囲みの内容は
商業機密の観点
から公開できま
せん。

【参考4】 ボックスサポート取付部のばね剛性の算定

- 剛性算定用のシェルモデルとはりモデルの剛性差によりボックスサポート取付部のばね剛性を算定

剛性算定用シェルモデルのばね剛性算定方法

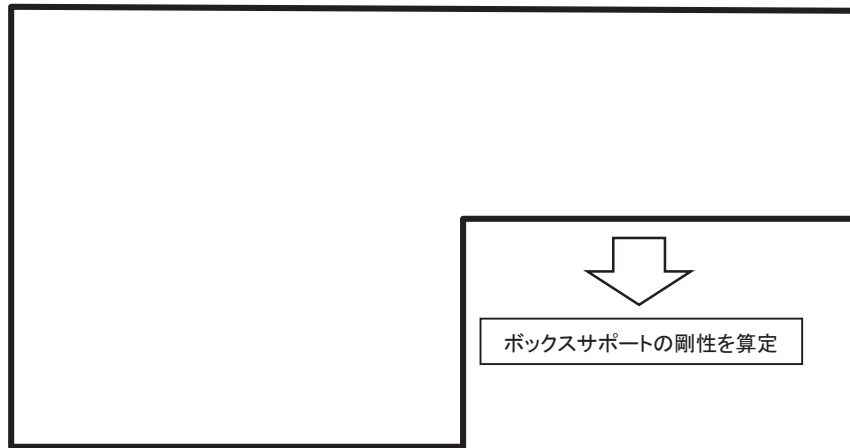
ばねの成分		部分シェルモデルの荷重、モーメント作用点	ばね定数の算出方法
並進	大円半径軸 (X)		
	大円円周軸 (Y)		
	上下軸 (Z)		
回転	大円半径軸回り (X)		
	大円円周軸回り (Y)		
	上下軸回り (Z)		

剛性算定用はりモデルのばね剛性算定方法

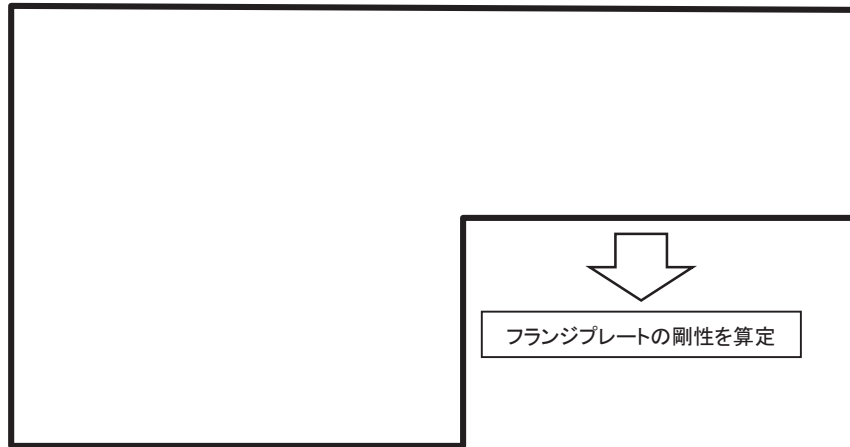
ばねの成分		部分はりモデルの荷重、モーメント作用点	ばね定数の算出方法
並進	大円半径軸 (X)		
	大円円周軸 (Y)		
	上下軸 (Z)		
回転	大円半径軸回り (X)		
	大円円周軸回り (Y)		
	上下軸回り (Z)		

【参考5】 ボックスサポートのモデル化

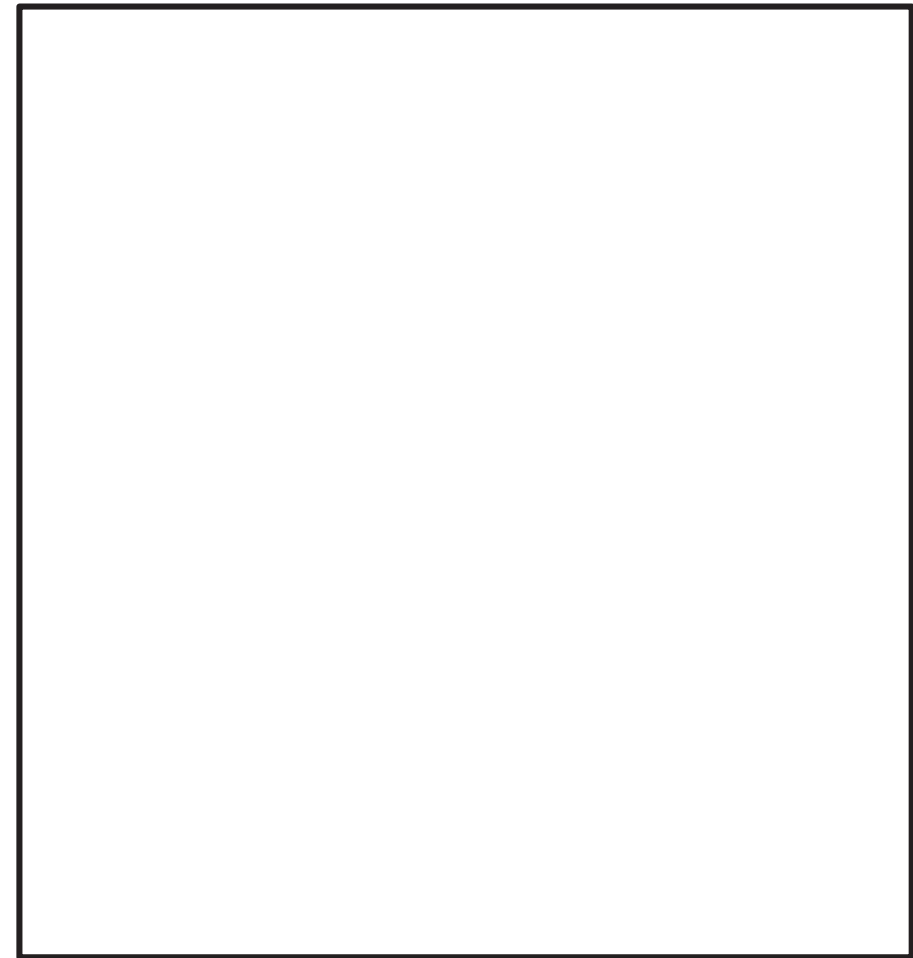
- より詳細に地震応答を考慮するため、ボックスサポート及びフランジプレートをモデル化し、剛性を算定



① ボックスサポート剛性算定用モデル



② フランジプレート剛性算定用モデル



ボックスサポートの解析モデル

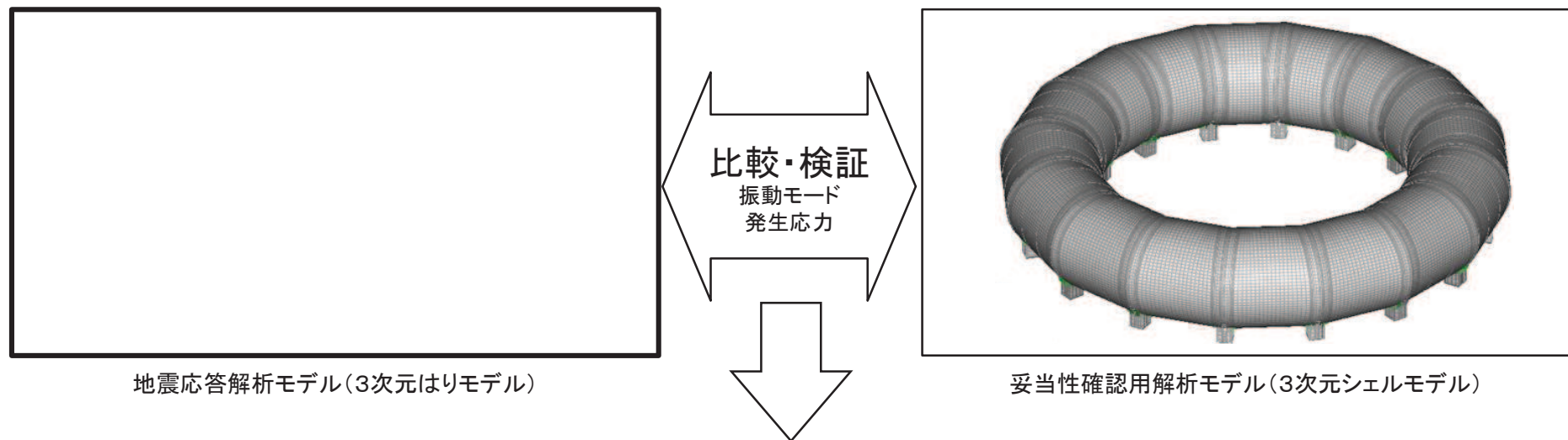
【参考6】地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る確認結果

(1) 検討方針及び検討結果

24

- 妥当性確認用解析モデルとの振動モードの比較や発生応力の比較により検証
- 振動モードの比較は、耐震評価として考慮すべき振動モード*が3次元はりモデルで表現可能か確認

注記* : 妥当性確認用解析モデルにおいて、各応力評価点における発生応力に対して、有意に影響する振動モード



以下の観点から、女川2号機の今回工認に3次元はりモデルを適用することの妥当性を確認

- ① 耐震評価として考慮すべき振動モードが概ね同様な傾向
- ② サプレッションチェンバ及びボックスサポートの発生応力が許容応力の範囲内で同程度
- ③ 最大応力発生部位であるボックスサポート取付部は、発生応力が概ね一致

【参考6】地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る確認結果

(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、概ね同様な傾向を示すことを確認
- 固有周期の差異は、主要な振動モードである水平1次モード(全体の3, 4次モード)で9.3%, 鉛直1次モード(全体の5次モード)で9.6%

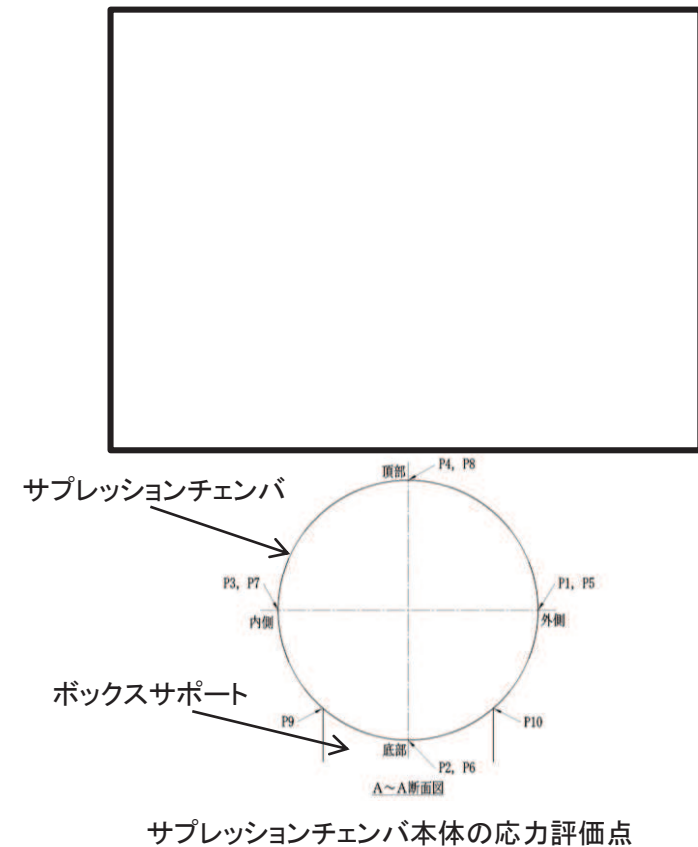
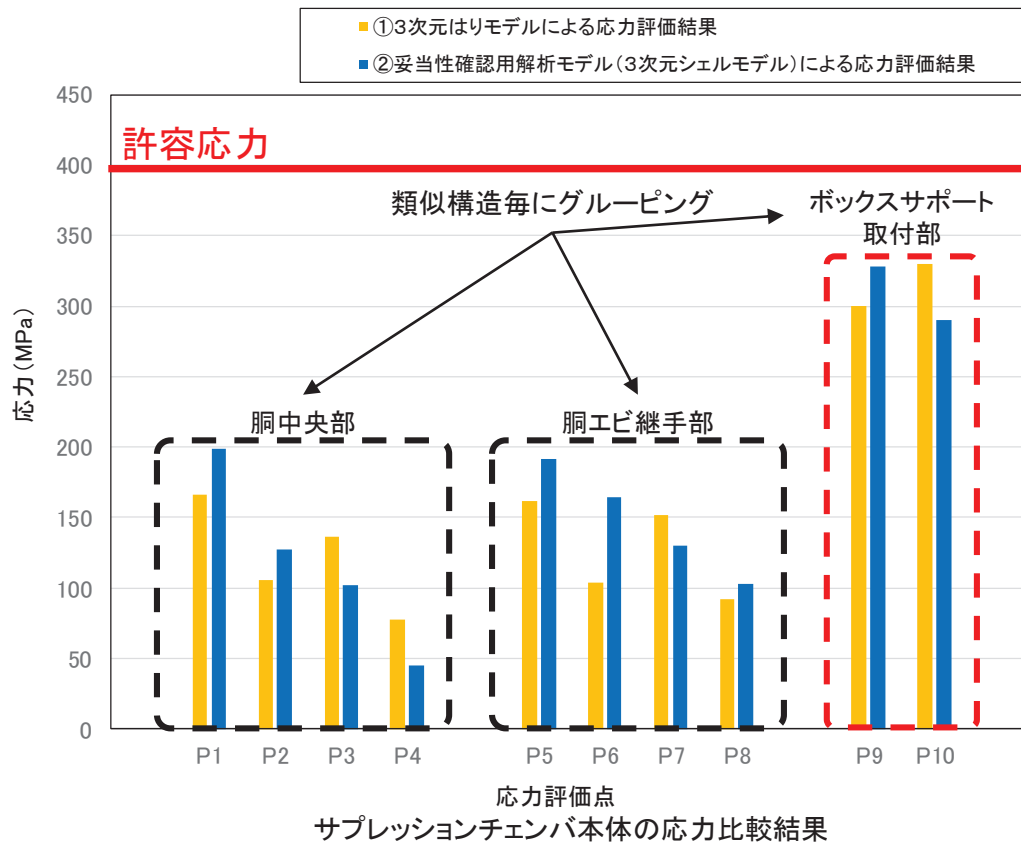
固有値解析結果

① 妥当性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)		② 3次元はりモデル		固有値 の比較 (②/①)	
振動モード (固有周期)	黒線:変形前	振動モード (固有周期)	青線:変形前		
				0.907	差は9.3%
				0.904	差は9.6%

【参考6】地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る確認結果

(3) - 1 発生応力の比較結果(サプレッションチェンバ本体)

- 応力評価部位によって大小関係は異なるものの、構造的に類似する胴中央部, 胴エビ継手部及びボックスサポート取付部の各分類において許容応力の範囲内で同程度
- 最大応力発生部位であるボックスサポート取付部は, 発生応力が概ね一致

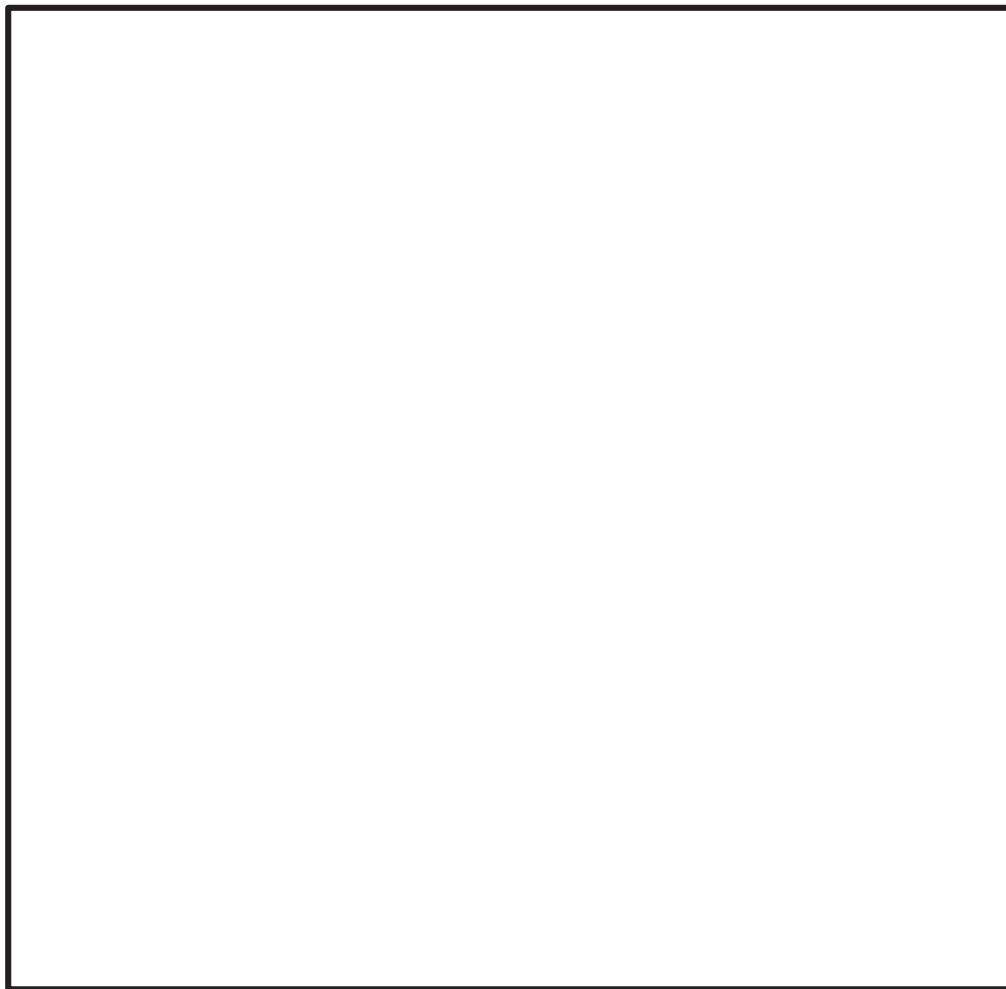


【参考6】地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る確認結果

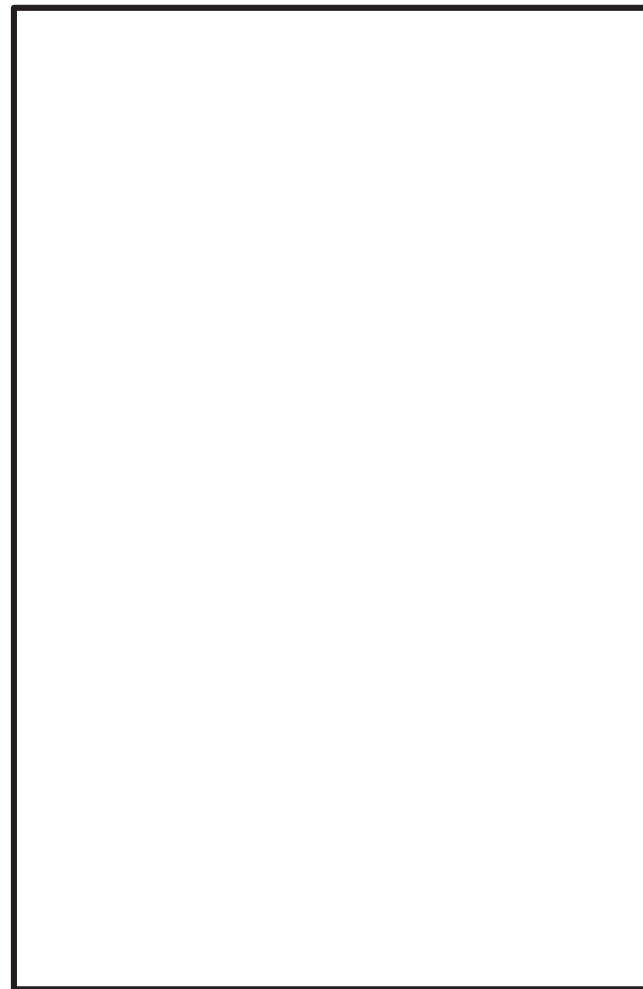
(3) - 2 発生応力の比較結果(ボックスサポート)

27

- 応力評価部位による大小関係は類似しており, 両者の発生応力の差は小さく, 発生応力は許容応力の範囲内で同程度



ボックスサポートの応力比較結果



ボックスサポートの応力評価部位

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。