

女川原子力発電所2号炉 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の 変更について(コメント回答)

設計基準対象施設について（第4条 地震による損傷の防止）

平成31年1月29日
東北電力株式会社

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

目次

1. 審査会合での指摘事項一覧
2. 審査会合での指摘事項に対する回答
3. 追加検討結果

参考資料

第583回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料 資料1-2-3

「女川原子力発電所2号炉 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更について(平成30年6月7日)」

1. 審査会合での指摘事項一覧

1. 審査会合での指摘事項一覧

No	項目	審査会合日	対応状況	回答
1	サプレッションチェンバの耐震設計の全体像を整理した上で、今回実施している評価の妥当性を提示すること。	H30.6.7	本日回答	既工認からの変更点及び目的を踏まえ、各変更点に対する検討内容、検討結果及び耐震設計への配慮事項について整理し、今回実施している評価の妥当性を確認した。本資料P5, 6にて回答
2	内部水の有効質量を適用して地震荷重を設定するにあたり、今回実施した振動試験や解析と、実機との相違をどのように設計へ反映するのか、整理して提示すること。	H30.6.7	本日回答	各段階で検討に用いた解析モデルと実機との相違を整理し、この相違に対する設計への配慮事項について整理した。本資料P7, 8にて回答
3	振動試験に用いている水が常温であることの妥当性を実機における水温との関係等も踏まえて整理して提示すること。	H30.6.7	本日回答	振動試験に用いている水が常温であることの妥当性を実機における水温との関係等も踏まえて整理した。本資料P9にて回答
4	サプレッションチェンバに地震荷重として作用する有効質量は均一でないことを踏まえ、サプレッションチェンバ各部の地震荷重を算出するのに適した地震応答解析モデルとなっているか整理して提示すること。	H30.6.7	本日回答	内部水による流体圧力の観点、容器設計における配慮(強め輪)を踏まえ、3次元はりでモデルを用いることは妥当であることを確認した。本資料P10, 11にて回答
5	スロッシングによる内部構造物の影響について、水平2方向の地震入力による影響も含めた評価を提示すること。	H30.6.7	本日回答	水平2方向の地震入力による影響も含めた評価を行い、設計基準事故に想定される水力学的動荷重と同程度であることを確認した。本資料P12にて回答
6	Nastran とOpenFOAM の有効質量の算出結果について、縮小体モデルと実機モデルにおける解析結果の比率に差異があることの要因を提示すること。	H30.6.7	本日回答	NASTRANによる試験(試験体解析モデル)及び実機(実機解析モデル)による有効質量比の差が内部構造物(強め輪)の影響であることを、まとめ資料(4条-別紙4-23 5.1.3 解析結果)に追記

2. 審査会合での指摘事項に対する回答

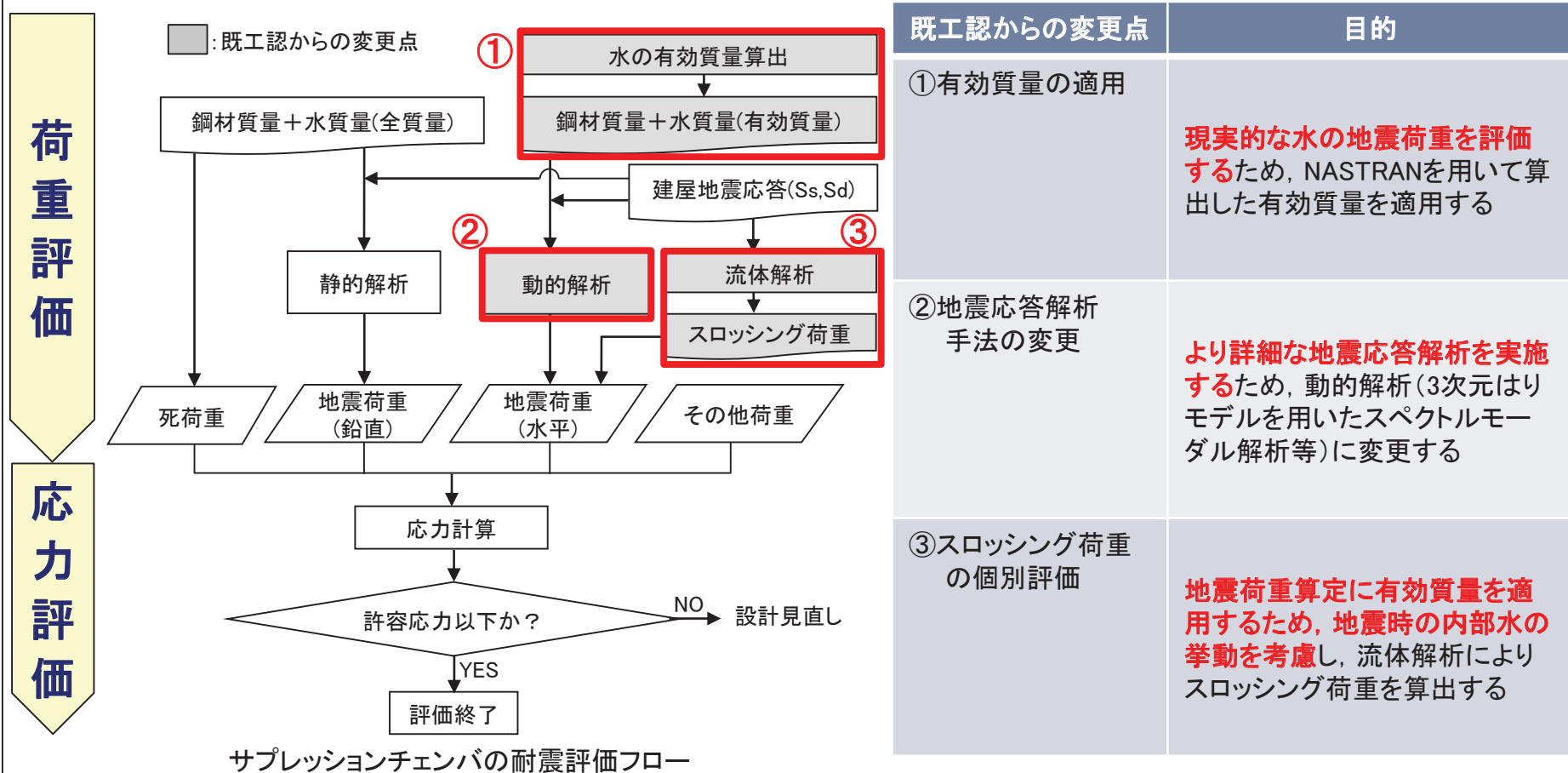
2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 1】

(1) 指摘事項

- ・サプレッションチェンバの耐震設計の全体像を整理した上で、今回実施している評価の妥当性を提示すること。

(2) 回答

工認段階におけるサプレッションチェンバの耐震評価フローを示し、既工認からの変更点とその目的について整理した。






2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 1】

(2) 回答

- 既工認からの変更点及び目的を踏まえ、各変更点に対する検討内容、検討結果及び耐震設計への配慮事項について、下表の通り整理した。
- また、各変更に対して耐震設計への配慮を行うことで、既工認からの3つの変更点に対して適切に対応できることを確認した。

表1 今回工認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

既工認からの変更点	検討内容	検討結果	耐震設計への配慮事項
① 有効質量の適用 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ NASTRANにより算出される有効質量の妥当性 ・実機を縮小模擬した試験体を用いた振動試験結果及び汎用流体解析コードOpenFOAMから算出される有効質量との比較・検証 ・実機解析モデルに対してOpenFOAMから算出される有効質量との比較・検証 ・容器構造設計指針・同解説に示される球形タンク等の有効質量との比較 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ NASTRANにより算出される有効質量が試験及び他の評価手法と同等若しくは概ね保守的な傾向を示すことを確認 ➢ NASTRANと他の評価手法(振動試験, OpenFOAM)との差異は、振動試験及びOpenFOAMにより算出される有効質量に内部水の流動が考慮されるためと考察 ➢ 振動試験の結果より、有効質量には再現性があり、ほとんどばらつきがないことを確認 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ NASTRANにより算出される有効質量は、保守的に算出されるため、地震応答解析には、NASTRANにより算出される有効質量を適用し、地震荷重を算出する ➢ 有効質量が保守的に算出されることを踏まえると、サプレッションチェンバの固有周期が変動することが考えられるため、地震応答解析に用いる床応答スペクトルとの関係にも配慮する
② 地震応答解析手法の変更 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 動的解析の適用実績の確認 ➢ NASTRANにより算出された有効質量の3次元はりモデルへの設定方法(Guyanの縮約法)の妥当性 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 他プラントのサプレッションチェンバに対して、3次元はりモデルによるスペクトルモーダル解析の適用実績あり ➢ 簡易モデル(自由表面を有する円筒容器)を検討対象として、Guyanの縮約法及びFEMで直接的に算出した地震荷重(水平反力, 回転モーメント)を比較した結果、一致することを確認 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 動的解析(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 ➢ Guyanの縮約法を適用する
③ スロッシング荷重の個別評価 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 流体解析(OpenFOAM)によるスロッシング荷重の算定 ➢ 地震荷重とスロッシング荷重の比較 ➢ スロッシング荷重に対する入力地震動、入力方向の組合せ及び水位条件の影響 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ OpenFOAMの荷重時刻歴からスロッシング荷重を算出可能であることを確認 ➢ スロッシング荷重は、地震荷重に比べて十分に小さいことを確認。 ➢ 各評価条件に対してスロッシング荷重は、地震荷重に比べて十分に小さいことを確認。また、水平1方向+鉛直方向によるスロッシング荷重の$\sqrt{2}$倍は、水平2方向+鉛直方向のスロッシング荷重よりも保守的に算出されることを確認(実機との相違点に対する検討結果も同様) 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点に対する検討結果から、OpenFOAMにより算出されるスロッシング荷重は、水平1方向+鉛直方向のスロッシング荷重の$\sqrt{2}$倍の荷重を考慮することにより保守的に評価する ➢ 地震荷重とスロッシング荷重の最大値が発生する時刻は、互いに異なると考えられるが、保守的に各荷重の最大値を組み合わせる ➢ 地震荷重とスロッシング荷重の最大値は、入力地震動によって異なるが、保守的に各荷重の最大値を組み合わせる

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 2】

(1) 指摘事項

- ・内部水の有効質量を適用して地震荷重を設定するにあたり、今回実施した振動試験や解析と、実機との相違をどのように設計へ反映するのか、整理して提示すること。

(2) 回答

- 内部水の有効質量を適用して地震荷重を設定するにあたり、各段階で検討に用いた解析モデルと実機との相違について抽出し、この相違に対する設計への配慮事項について表2の通り整理した。

2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 2】

(2)回答

表2 実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点を踏まえた設計反映事項

既工認からの変更点	実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点						設計への反映事項
	寸法・形状	内部構造物		水位	流動	地震動	
		強め輪	左記以外				
① 有効質量の適用 ①-1 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証  NASTRAN (振動試験体モデル)	相違あり 縮小モデルで実施。 有効質量への 影響なし : 容器の形状及び水位により定まる(「4.4 妥当性検証」参照)	相違あり 強め輪なし 有効質量への 影響なし : 実機解析で強め輪をモデル化(「5.1.1 NASTRANの実機解析モデル」参照)	相違あり 内部構造物なし 有効質量への 影響なし : 実機解析(OpenFOAM)で内部構造物の有無による影響がないことを確認(「別紙3 4.3.3.3 内部構造物による影響」参照)	相違あり 設計で想定される水位よりも高い水位まで実施 有効質量への 影響なし : 実機解析で水位をモデル化(「5.1.1 NASTRANの実機解析モデル」参照)	相違あり 考慮出来ない 有効質量への 影響有り(保守的) : 流動を考慮できる振動試験及びOpenFOAMよりも保守的に算出(「4.4 妥当性検証」参照)	相違あり 考慮出来ない 有効質量への 影響なし : 加速度振幅、周期特性の違い、鉛直地震動による影響を確認(「参考資料3 有効質量比に対する入力地震動の影響について」及び「別紙3 4.3.3.1 鉛直方向地震動による影響」参照)	> 実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点に対する検討結果から、NASTRANにより算出される有効質量は、保守的に算出されるため、地震応答解析には、NASTRANにより算出される有効質量を適用し、地震荷重を算出する
①-2 耐震評価で用いる有効質量の設定  NASTRAN (実機解析モデル)	相違なし	相違なし	相違あり 内部構造物なし 有効質量への 影響なし : OpenFOAMで内部構造物の有無による影響がないことを確認(「別紙3 4.3.3.3 内部構造物による影響」参照)	相違あり DB: 通常運転水位 SA: 重大事故時水位よりも高く設定 有効質量への 影響有り(保守的) : 重大事故時水位よりも保守的に算出(「4.4 妥当性検証」及び「5.1.3 解析結果」参照)	相違あり 考慮出来ない 有効質量への 影響有り(保守的) : 流動を考慮できるOpenFOAMよりも保守的に算出(「5.1.3 解析結果」参照)	相違あり 考慮出来ない 有効質量への 影響なし : 地震動の違いによる影響がないことを確認(「5.1.3 解析結果」参照)	> 有効質量が保守的に算出されることを踏まえると、サプレッションチェンバの固有周期が変動することが考えられるため、地震応答解析に用いる床応答スペクトルとの関係にも配慮する
② 地震応答解析手法の変更  NASTRAN (実機解析モデル)	相違なし	相違なし	相違なし	相違なし	相違なし	相違なし	> なし
③ スロッシング荷重の個別評価  OpenFOAM (実機解析モデル)	相違なし	相違なし	相違なし	相違あり DB: 通常運転水位 SA: 重大事故時水位よりも高く設定 スロッシング荷重への 影響有り(保守的) : 重大事故時水位よりも保守的に算出(「別紙3 4.3.2 スロッシング荷重算定結果」参照)	相違なし	相違あり 水平1方向+鉛直方向 スロッシング荷重への 影響有り(保守的) : 水平1方向+鉛直方向によるスロッシング荷重の√2倍は、水平2方向+鉛直方向のスロッシング荷重よりも保守的に算出(「別紙3 4.3.3 スロッシング荷重及び有効質量に与える各種影響検討」参照)	> 実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点に対する検討結果から、OpenFOAMにより算出されるスロッシング荷重は、水平1方向+鉛直方向のスロッシング荷重の√2倍の荷重を考慮することにより保守的に評価する

* サプレッションチェンバの耐震設計については、4条だけでなく、39条にも該当するため、重大事故時の設計条件も考慮。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 3】

(1) 指摘事項

振動試験に用いている水が常温であることの妥当性を実機における水温との関係等も踏まえて整理して提示すること。

(2) 回答

今回実施した振動試験の温度条件については、以下の検討を踏まえ、常温下で振動試験を実施している

- ① サプレッションチェンバの耐震評価において考慮する運転状態(重大事故時の荷重の組合せについては、39条審査で説明予定)
 - サプレッションチェンバの耐震評価は、設計基準事故及び重大事故時ともに、事故の発生確率、継続時間及び地震の年超過確率を踏まえ、地震荷重と事故時の荷重の組合せを考慮するため、今回実施した振動試験の温度条件(水温)は、基準地震動 S_s と荷重の組合せが必要となる運転状態を考慮
 - 設計基準事故時は、基準地震動 S_s との組合せは不要であるため、温度条件は通常運転状態(飽和温度以下)
 - 重大事故時は、事象発生後 2×10^{-1} 年以降の荷重と基準地震動 S_s との組合せとなるため、温度条件は飽和温度以下(沸騰状態ではない)
- ② 水温による有効質量比への影響
 - 有効質量に関連する内部水の質量は、密度の関数であり、水温が飽和温度以下では温度変化に対する影響は小さい

なお、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及び応力評価に用いる部材温度は、運転状態を考慮した温度条件を用いる

2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 4】

(1) 指摘事項

サプレッションチェンバに地震荷重として作用する有効質量は均一でないことを踏まえ、サプレッションチェンバ各部の地震荷重を算出するのに適した地震応答解析モデルとなっているか整理して提示すること。

(2) 回答

- 薄肉円筒容器の振動モードでは、既往の知見*から3つの振動モードが発生するとされており、それらの振動モード(特徴)に対して、サプレッションチェンバの耐震設計における考え方について整理した

表3 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における配慮

振動モード		振動の特徴	サプレッションチェンバの耐震評価における考え方
スロッシング		大きな液面変動を伴い揺動	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して振動	外圧によるS/Cシェルの座屈防止を目的として、S/C内に合計64枚の強め輪を設置し、S/Cの変形を防止(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(第2報)—曲げ振動とオーバル振動の連成効果—, INSS JOURNAL, Vol.13, pp.78-89(2006)

2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 4】

(2)回答

- S/Cには外圧によるS/Cシェルの座屈防止を目的として、板厚24mmもしくは30mmの強め輪が設置されている。この強め輪はS/C内に合計64枚設置されており、S/Cの変形防止(小円断面(1セグメントの断面)のオーバル振動抑制)を図っている



図1 サプレッションチェンバ断面図

枠囲みの内容は商業機密に属しますので
公開できません。

2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 4】

(2)回答

- OpenFOAMによるサプレッションチェンバ内部水の流動解析を実施した結果、サプレッションチェンバ内面の局所的な圧力は、10kPa程度であり、サプレッションチェンバの設計圧力(427kPa)及びSA耐性条件(854kPa)と比較し、十分に小さく、部分的であるため、内部水の流動による局所的な圧力がサプレッションチェンバへ与える影響はない(図2, 3)
- 圧力コンター図に示すような圧力の分布については、NASTRANも同様であり、NASTRANによる有効質量をGuyanの縮約することにより、サプレッションチェンバのはりモデルへ適切に反映される



図2 サプレッションチェンバの圧力コンター図
(SA水位より高い水位, Ss-D1(水平方向))



図3 最大圧力発生位置の圧力時刻歴
(SA水位より高い水位, Ss-D1(水平方向))

枠囲みの内容は商業機密に
属しますので公開できません。

2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 4】

(2)回答

- ▶ したがって、サプレッションチェンバの耐震評価は、強め輪の効果により小円断面(1セグメントの断面)のオーバル振動が抑制されること、流動によるサプレッションチェンバ内面の局所的な圧力が設計圧力等よりも十分に小さく、部分的であることを踏まえると、サプレッションチェンバに有効質量を考慮したはりモデルにより、ビーム振動及び大円(円環)の変形を模擬できることから、サプレッションチェンバ各部の地震荷重を算出するのに適した地震応答解析モデルと考える
- ▶ なお、今回工認におけるサプレッションチェンバの耐震評価では、3次元はりモデルを用いた地震応答解析により変位及び荷重を求め、それらを3次元FEM(シェル)モデルに入力し、各評価部位の応力評価を実施する。この評価手法は、女川2号炉の既工認における原子炉圧力容器等の耐震評価で用いられる手法であり、他社プラントのサプレッションチェンバの耐震評価でも用いられている



図4 地震応答解析モデル

- : 流体質量マトリクスが考慮された質点
- : 変位抽出点(水平方向地震)
- : 荷重抽出点(鉛直方向地震, 死荷重)
- ↔ : 水平地震入力方向
- ↕ : 鉛直地震入力方向



図5 応力評価モデル

枠囲みの内容は商業機密に
属しますので公開できません。

2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 5】

(1) 指摘事項

スロッシングによる内部構造物の影響について、水平2方向の地震入力による影響も含めた評価を提示すること。

(2) 回答

- ▶ 本検討では、サプレッションチェンバの内部構造物のうち表面積が大きく、スロッシング荷重の影響が大きいと考えられるダウンカマ(SA時水位より高い水位)を代表として、水平1方向入力及び水平2方向入力によるスロッシング荷重を比較し、その影響を確認した
- ▶ スロッシングによる内部構造物への影響は、サプレッションチェンバに関連する設備に対する、スロッシング影響検討の要否を整理した結果を踏まえ、影響検討を必要とした設備について工認段階で詳細に説明する方針

【影響確認結果】

- ・ 水平2方向入力によるスロッシング荷重は、水平1方向入力によるスロッシング荷重(水平1方向荷重のSRSS)よりも小さく、設計基準事故に想定されるダウンカマに対するチャギング荷重と同程度

表4 内部構造物に対するスロッシング荷重

対象構造物	水位条件	入力方向	荷重(kN) (水平1方向)	荷重(kN) (水平2方向)	チャギング荷重 (kN)
ダウンカマ	SA時水位より高い水位	水平1方向+鉛直方向	5.29	7.48(SRSS)	7.69※
		水平2方向+鉛直方向	-	7.10	

※ ダウンカマの応力評価の結果、応力強さは72MPaであり、許容応力380MPaを下回る

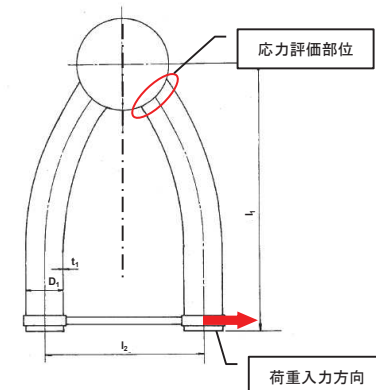


図6 ダウンカマの構造図

3. 追加検討結果

3. 今後の追加検討とした事項

前回審査会合(平成30年6月7日)にて今後の追加検討とした以下の項目について説明する。

- ① サプレッションチェンバのスロッシング荷重及び有効質量に与える影響検討
 - a 水平方向地震力のみの評価と水平方向及び鉛直方向の地震力を組合せた場合の影響
 - b 水平2方向の地震入力による影響
 - c 流体解析における内部構造物のモデル化の有無による影響
- ② サプレッションチェンバの地震応答解析モデルにおける内部水の有効質量の設定方法の妥当性検討

3. 追加検討結果①

(1) 検討内容

- ① スロッシング荷重及び有効質量に与える影響検討
 - a 水平方向地震力のみの評価と水平方向及び鉛直方向の地震力を組合せた場合の影響
 - b 水平2方向の地震入力による影響
 - c 流体解析における内部構造物のモデル化の有無による影響

(2) 検討結果(①-a)

【影響確認結果(スロッシング荷重)】

- 基本ケースが影響検討ケースよりも1割程度大きく算出されるが、鉛直方向地震動の影響は小さいことを確認

【影響確認結果(有効質量比)】

- 基本ケースと影響検討ケースの有効質量比は一致

表5 鉛直方向の地震力を組合せた場合の影響確認結果

検討ケース	①基本ケース (水平+鉛直)	②影響検討ケース (水平のみ)	①/②
スロッシング 最大荷重 (MN) *	2.91	2.70	1.08
有効質量比	0.28	0.28	1.00

* スロッシング最大荷重は、地震波に依存することから、今後作成する建屋応答に対するスロッシング荷重を確認する必要があるため暫定値

3. 追加検討結果①

(1) 検討内容

① スロッシング荷重及び有効質量に与える影響検討

- a 水平方向地震力のみの評価と水平方向及び鉛直方向の地震力を組合せた場合の影響
- b 水平2方向の地震入力による影響
- c 流体解析における内部構造物のモデル化の有無による影響

(2) 検討結果(①-b)

【影響確認結果(スロッシング荷重)】

- 基本ケース(合成荷重:水平1方向入力の最大荷重値の $\sqrt{2}$ 倍)に比べ、影響検討ケース(水平2方向入力の時刻歴荷重の最大値)は、やや小さいことを確認。これは、スロッシング荷重が周方向へ分散していること及びEW方向地震動の位相特性によるものと考えられる
- よって、サプレッションチェンバのスロッシング荷重評価は、基本ケースのとおり、入力地震動を水平1方向+鉛直方向とすることで保守的になることを確認

【影響確認結果(有効質量比)】

- 基本ケースと影響検討ケースの有効質量比は一致

表6 水平2方向入力による影響確認結果

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(MN) *1	NS	2.91	2.88 *2	1.01
	EW	—	2.76 *2	1.05
	合成荷重	4.12 *3	3.23 *4	1.28
有効質量比	NS	0.28	0.28	1.00
	EW	—	0.28	1.00

*1 スロッシング最大荷重は、地震波に依存することから、今後作成する建屋応答に対するスロッシング荷重を確認する必要があるため暫定値

*2 1方向成分(NS若しくはEW)のみに着目した場合の最大荷重

*3 基本ケースの最大荷重の $\sqrt{2}$ 倍の荷重

*4 時刻歴合成($\sqrt{NS^2 + EW^2}$)の最大荷重

3. 追加検討結果①

(1) 検討内容

① スロッシング荷重及び有効質量に与える影響検討

- a 水平方向地震力のみの評価と水平方向及び鉛直方向の地震力を組合せた場合の影響
- b 水平2方向の地震入力による影響
- c 流体解析における内部構造物のモデル化の有無による影響

(2) 検討結果(①-c)

【影響確認結果(スロッシング荷重)】

- 基本ケースが影響検討ケースよりもやや小さく算出されることを確認。これは、内部構造物によりスロッシングが抑制されることによるものと考えられる

【影響確認結果(有効質量比)】

- 基本ケースと影響検討ケースの有効質量比は一致

表7 内部構造物のモデル化の有無の影響確認結果

検討ケース	①基本ケース (内部構造物有)	②影響検討ケース (内部構造物無)	①/②
スロッシング 最大荷重(MN)*	2.91	3.06	0.95
有効質量比	0.28	0.28	1.00

*スロッシング最大荷重は、地震波に依存することから、今後作成する建屋応答に対するスロッシング荷重を確認する必要があるため暫定値

3. 追加検討結果②

(1) 検討内容

② サプレッションチェンバの地震応答解析モデルにおける内部水の有効質量の設定方法の妥当性検討

(サプレッションチェンバの内部水における有効質量について、地震応答解析モデルを作成する際の縮約が適切になされていることを確認するため、簡易な容器形状に対する検討を行い、その適切性を説明する)

(2) 検討結果(評価モデル, 解析モデル)

- NASTRANによるGuyanの縮約法の妥当性確認は、自由表面を有する円筒容器評価モデル(1質点系)を用いて、NASTRANのGuyanの縮約法とFEMから直接的に求めた質点位置における有効質量、地震荷重及び回転質量を比較
- 参考として、Housner理論による方法で求めた有効質量及び地震荷重も比較

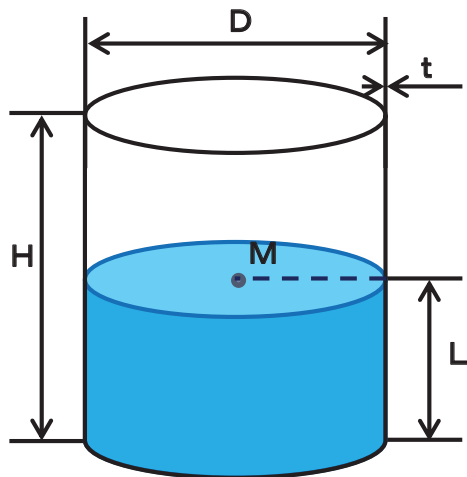


図7 評価モデル

表8 評価モデルの諸元

部位	寸法
容器直径 D	1000mm
容器板厚 t	50mm
容器高さ H	2000mm
容器重心高さ M	1000mm
水位 L	1000mm
水の密度 ρ	10^{-6}kg/mm^3

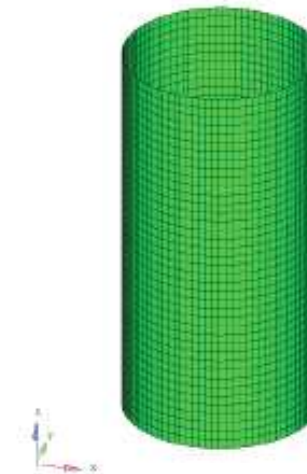


図8 NASTRAN解析モデル

3. 追加検討結果②

(2) 検討結果 (検討条件)

表9 検討条件

検討条件	検討モデル	
	容器のモデル化	内部水のモデル化
Guyan縮約	1 質点系モデル	Guyanの縮約法により容器の質点位置に有効質量を付加
直接的評価	1 質点系モデル	FEMから直接的に求めた等価高さ*に有効質量を付加
(参考) Housner理論	1 質点系モデル	Housner理論に基づく有効質量に対する等価高さ*に有効質量を付加

* Housner理論による底面圧力を考慮した評価式を用いて等価高さを算出

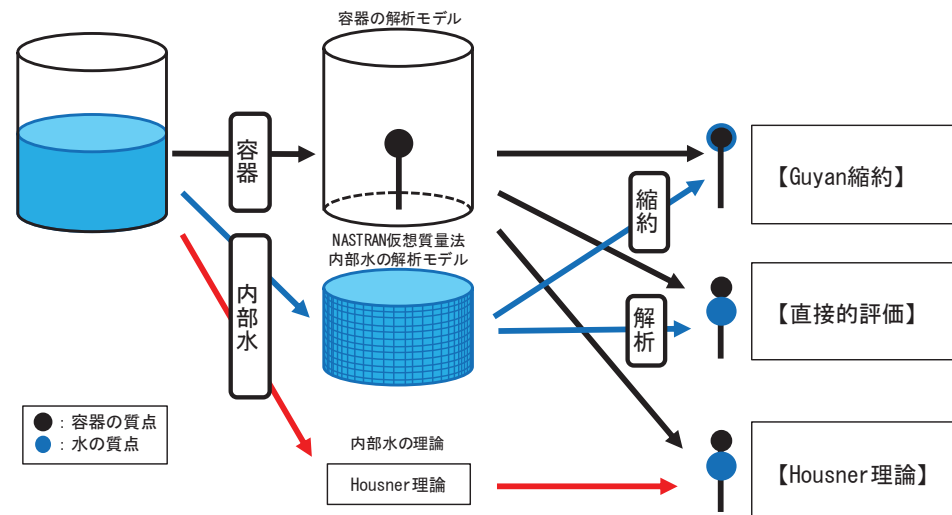


図9 妥当性確認に用いる検討モデルのイメージ

3. 追加検討結果②

(2) 検討結果(妥当性確認結果)

- NASTRANのGuyanの縮約法と直接的評価の有効質量及び地震荷重は一致しており、NASTRANのGuyanの縮約法が妥当であることを確認
- Housner理論による有効質量及び地震荷重もNASTRANのGuyanの縮約法による有効質量及び地震荷重とほぼ一致していることを確認

表10 Guyanによる縮約法の妥当性確認結果

	有効質量 (kg)	等価高さ (mm)	地震荷重 (1G)		回転質量 (kg・m)
			水平反力 (N)	回転モーメント (N・mm)	
Guyan 縮約	603.591	—	3.010×10^4	2.714×10^7	-302.613
直接的評価	603.591	498.646	3.010×10^4	2.714×10^7	—
(参考) Housner理論	614.000	506.000	3.021×10^4	2.723×10^7	—

3. 追加検討結果②

直接的評価による有効質量及び等価高さから回転質量を算出し、Guyan縮約から求めた回転質量と比較する

- ① 直接的評価による有効質量及び等価高さから容器底部での回転モーメントを算出

$$603.591 \times 0.498646 \times 9.80665 = 2,951.588 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

- ② 直接的評価による有効質量を容器重心位置（Guyan縮約による内部水質量の縮約位置）にオフセットし、容器底部での回転モーメントを算出

$$603.591 \times 1 \quad \times 9.80665 = 5,919.206 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

- ③ ①と②の回転モーメントの差を重力加速度で除した値が回転質量となる

$$(2,951.588 - 5,919.206) / 9.80665 = -302.613 \text{ (kg} \cdot \text{m)}$$

上記回転質量-302.613 (kg・m) は、Guyan縮約から求めた回転質量-302.613 (kg・m) と一致するため、内部水をGuyanの縮約によりはりモデルへ縮約する手法は、妥当である

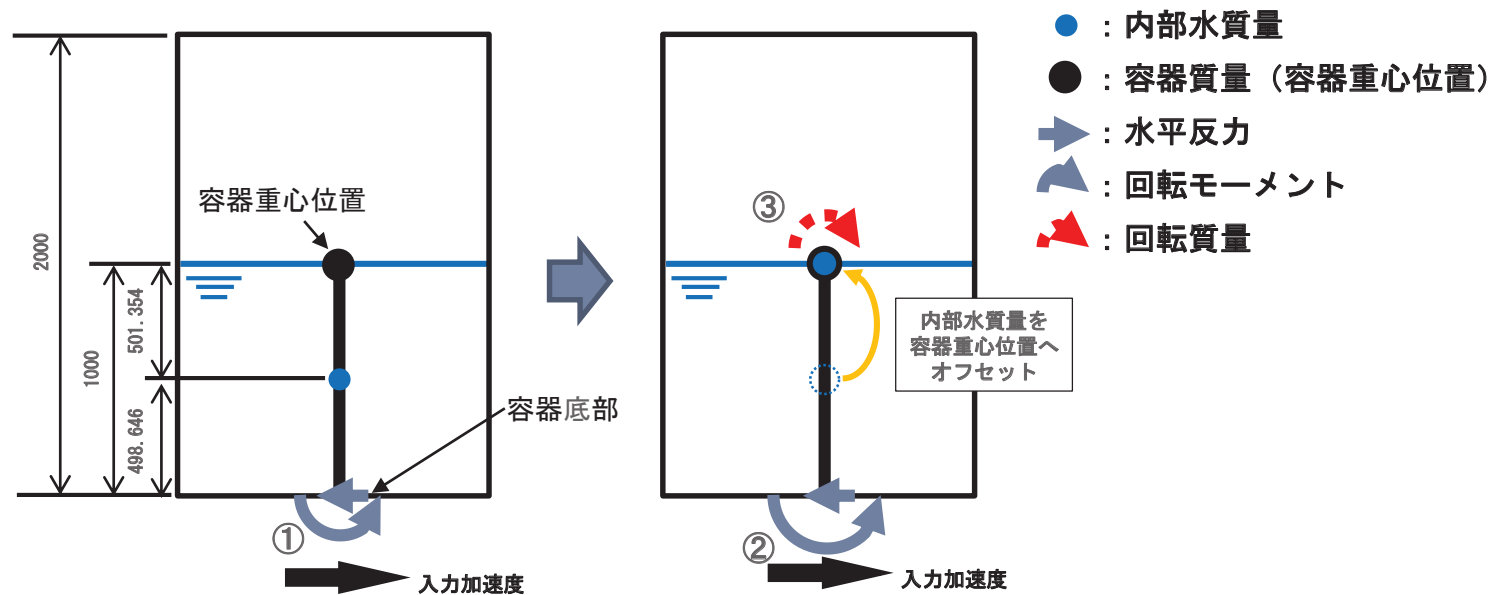


図10 Guyan縮約による回転質量のイメージ

参考資料

前回審査会合(平成30年6月7日)資料

女川原子力発電所2号炉 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の 変更について

設計基準対象施設について（第4条 地震による損傷の防止）

平成30年6月7日
東北電力株式会社

目次

1. 概要
2. 既工認と今回工認の耐震評価手法
 - 2.1 有効質量の概要
 - 2.2 サプレッションチェンバの構造
 - 2.3 既工認と今回工認の耐震評価手法の比較
 - 2.4 有効質量を適用する目的と効果
3. 有効質量の適用方針
 - 3.1 概要
 - 3.2 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証
 - 3.3 耐震評価に用いる有効質量の設定
4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証
 - 4.1 構造解析による有効質量比の算出
 - 4.2 振動試験
 - 4.3 流体解析による有効質量比の算出
 - 4.4 妥当性検証
5. 耐震評価に用いる有効質量の設定
 - 5.1 実機の有効質量比の算出
 - 5.2 実機評価に適用する有効質量
6. 今回工認の地震応答解析
7. まとめ
8. 今後の追加検討

1. 概要

1. 概要

- 女川2号炉の既工認では、サプレッションチェンバ(容器)の内部水による地震荷重の算出に当たっては、保守的な扱いとして内部水を容器とともに一体で挙動する剛体として内部水の全質量を用いていたが、容器の内部水が自由表面を有する場合、実際に地震荷重として付加される内部水の質量は一部であることから、女川2号炉の今回工認では、これを考慮して地震荷重を算出する
- 他産業における球形タンクや円筒タンクの耐震設計では、容器の内部水が自由表面を有する場合、実際に地震荷重として付加される内部水の質量は、有効質量(又は付加質量、仮想質量等)として定義されており、一般的に適用されている
- 本資料では、女川2号炉の今回工認において、サプレッションチェンバに対する地震荷重を算出するにあたりサプレッションチェンバの内部水に対して有効質量を適用することの考え方及びその妥当性について説明する

<有効質量の概念>

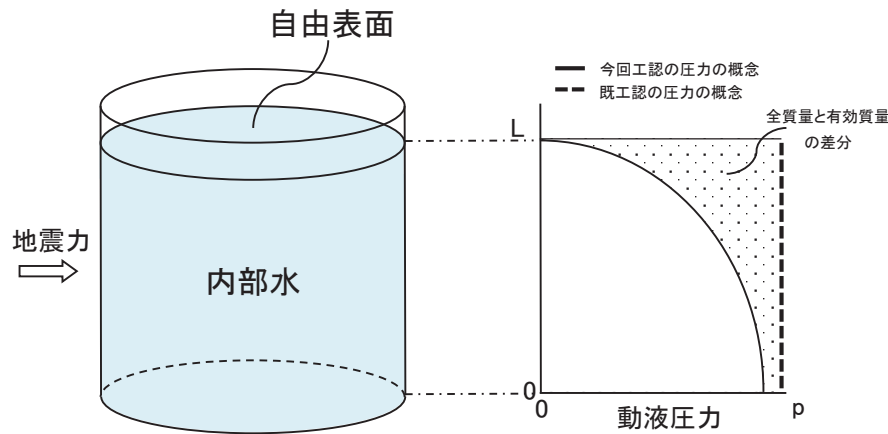


図1-1 円筒タンクの内容液 (イメージ)

図1-2 加速度に対する側板の動液圧分布

<球形タンクの適用例>

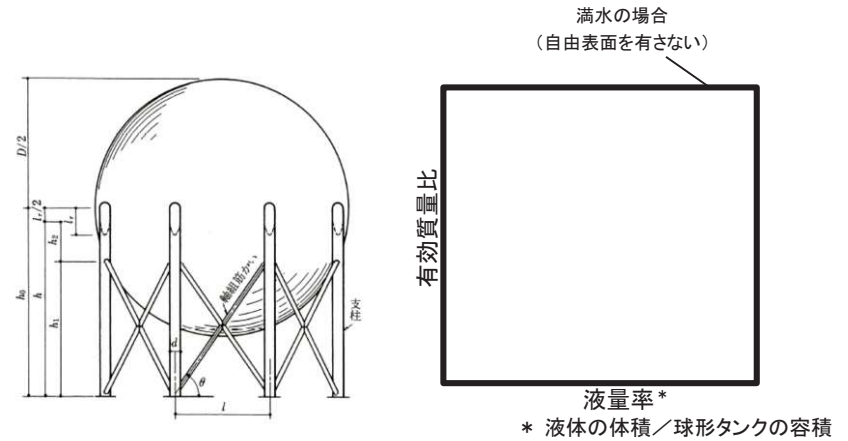


図1-3 球形タンクの概要

図1-4 球形タンクの有効質量比

容器構造設計指針・同解説(2010年3月改訂版)より引用

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

2. 既工認と今回工認の耐震評価手法

2.1 有効質量の概要

2.2 サプレッションチェンバの構造

2.3 既工認と今回工認の耐震評価手法の比較

2.4 有効質量を適用する目的と効果

2. 既工認と今回工認の耐震評価手法

2.1 有効質量の概要

- 容器の内部水が自由表面を有する場合、容器の振動方向に対する**実際の地震荷重として付加される質量(有効質量)**は、**内部水の全質量と異なる**ことが一般に知られている
- 有効質量は、「容器構造設計指針・同解説(日本建築学会)」にも定義されており、例えば、**円筒タンク内の水位が低くなるに伴って有効質量比(全質量に対する有効質量の割合)も小さくなる**
- また、**有効質量は、容器の形状と水位が既知であれば、汎用構造解析プログラムNASTRANを用いて算出可能**である
- 女川2号炉のサプレッションチェンバ(円環形状容器)は、内部水が自由表面を有しているため、NASTRANを用いて有効質量を算出し、地震荷重を評価する

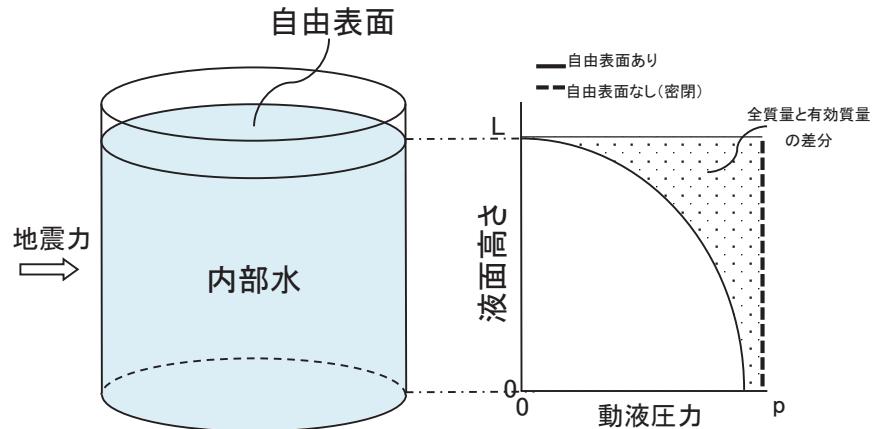


図2.1-1 円筒タンクの内容液 (イメージ) 図2.1-2 加速度に対する側板の動液圧分布(イメージ)

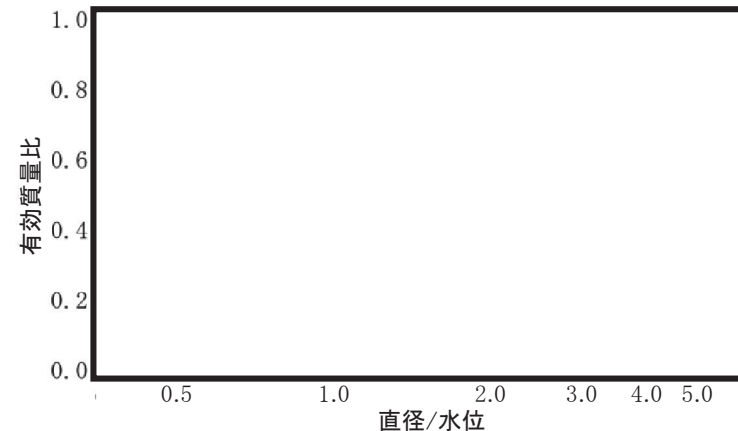
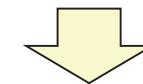
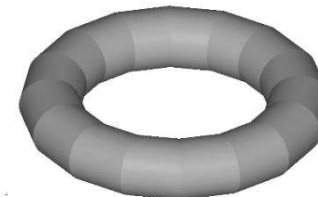


図2.1-3 有効質量比(円筒タンクの例)



女川2号炉サプレッションチェンバへ有効質量を適用



NASTRANで算出した有効質量により地震荷重を評価

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

2. 既工認と今回工認の耐震評価手法

2.2 サプレッションチェンバの構造

- サプレッションチェンバは、16セグメントの円筒を繋ぎ合わせた円環形状容器であり、各セグメントの継ぎ目に2箇所ずつ設けられた全32箇所の支持脚(以下「ボックスサポート」という。)により、原子炉建屋基礎版上に自立している。
- また、サプレッションチェンバは、ドライウェルとベント管を介して接続されており、ベント管に設けられたベント管ベローズにより相対変位を吸収する構造となっている
- サプレッションチェンバの内部には、自由表面を有する内部水が貯留されている

表2.2-1 サプレッションチェンバ緒元

項目	内容	備考	
耐震クラス	Sクラス		
設置建屋	原子炉建屋		
設置高さ	O.P.-8,100	基礎版上	
主要寸法	D	9,400 mm	記号は図2.2-2に示す
	L	37,860 mm	
	t	19 mm	
	Θ	22.5°	
サプレッションチェンバ質量 (内部水及びボックスサポート含む)	約4,200 ton	通常運転水位	
	約5,470 ton	重大事故時水位	
内部水質量	約2,900 ton	通常運転水位	
	約4,170 ton	重大事故時水位	

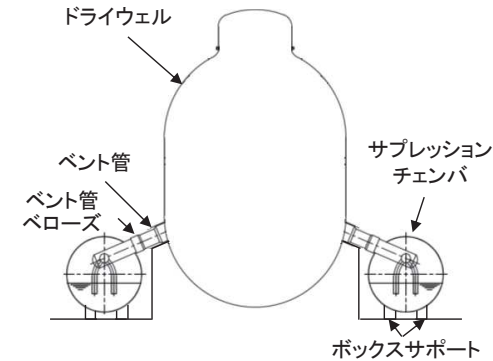


図2.2-1 原子炉格納容器全体概要図

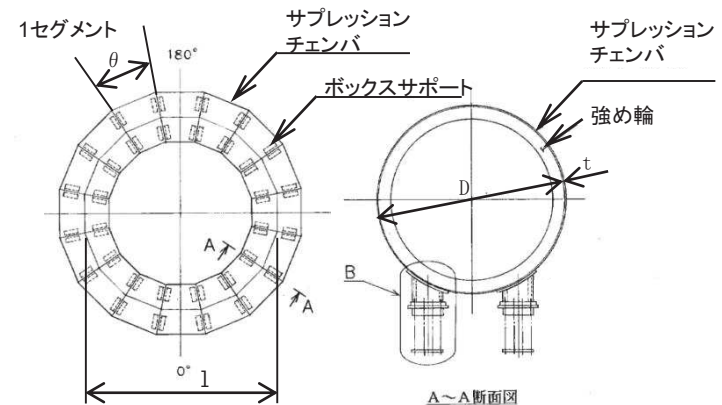


図2.2-2 サプレッションチェンバ・ボックスサポート概要図

2. 既工認と今回工認の耐震評価手法

2.3 既工認と今回工認の耐震評価手法の比較

- ▶ 女川2号炉のサプレッションチェンバの耐震評価における既工認からの変更は以下のとおり
- ① 水平方向の地震荷重算出は、より現実的な内部水による地震荷重を考慮するため、**サプレッションチェンバの内部水質量に対して有効質量を適用**
 - ② 有効質量の適用に伴い、**スロッシング荷重を流体解析により個別評価**
 - ③ 重大事故時のサプレッションチェンバ内の水位上昇に伴う内部水の質量増加を踏まえ、より詳細な地震応答解析を実施するため、**3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**

表2.3-1 既工認と今回工認との比較

項目		既工認	今回工認*1	変更理由	
荷重評価	地震荷重算出に考慮する質量	水平	鋼材質量+水質量(全質量)	鋼材質量+ 水質量(有効質量)	現実的な水の地震荷重を評価するため、水の有効質量を適用
		鉛直	鋼材質量+水質量(全質量)	同左	—
	スロッシング荷重	*2	個別評価	有効質量の適用に伴いスロッシング荷重を個別評価	
	死荷重(自重)に考慮する質量	鋼材質量+水質量(全質量)	同左	—	
	地震荷重算出手法	水平	静的解析	スペクトルモーダル解析	より詳細な地震応答解析を実施
鉛直		静的解析	静的解析	—	
応力評価	応力評価手法	サプレッションチェンバシェル(数値解析) ボックスサポート(定型式)	同左	—	
	許容応力	JEAG4601に基づく	同左	—	

*1 静的地震力による評価は、水質量(全質量)を用いて既工認と同様に評価

*2 サプレッションチェンバ内部水全体を剛体とみなし保守的に地震荷重を考慮しており、スロッシング荷重は水平地震荷重に包含される

2.3 既工認と今回工認の耐震評価手法の比較

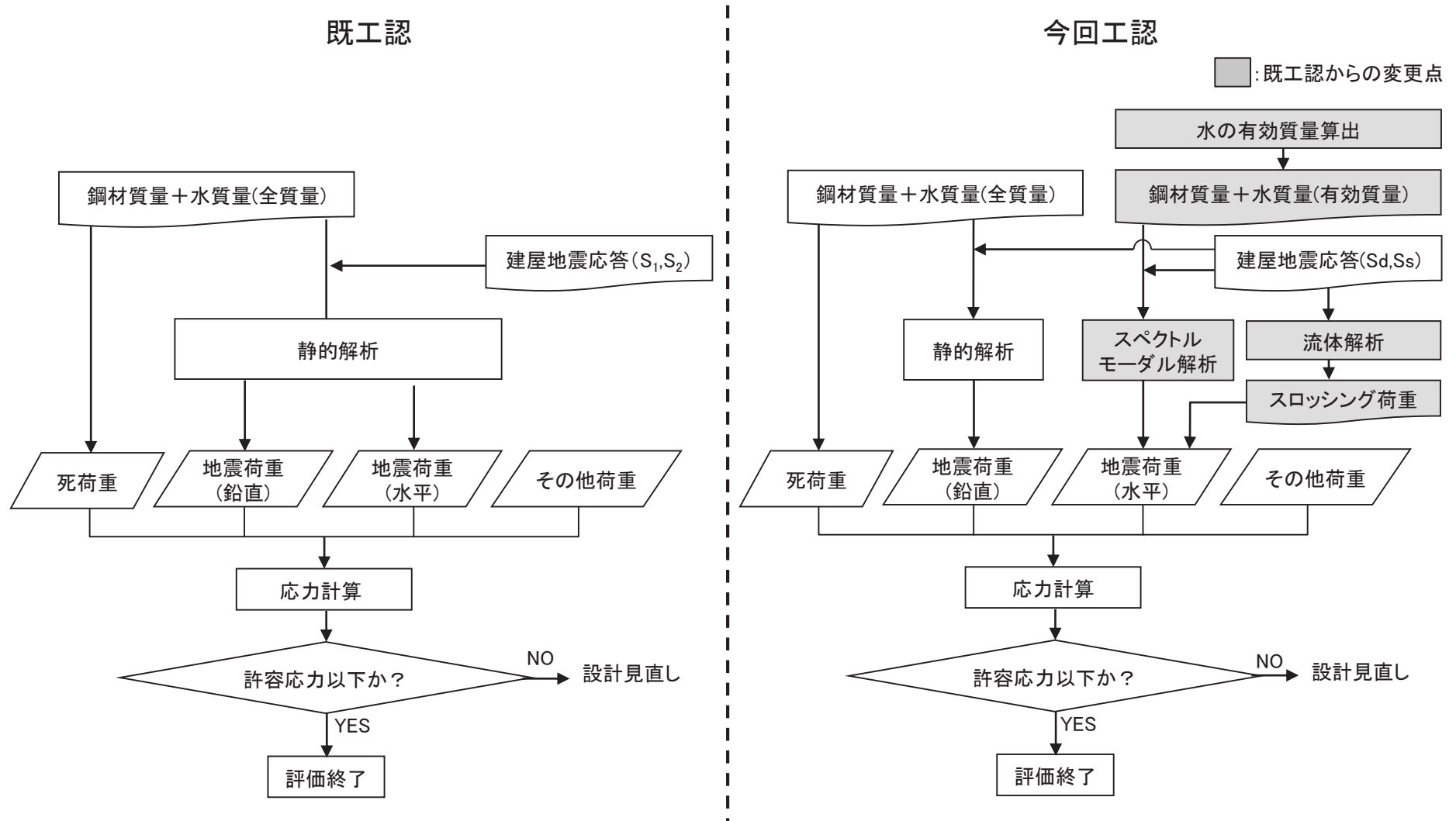
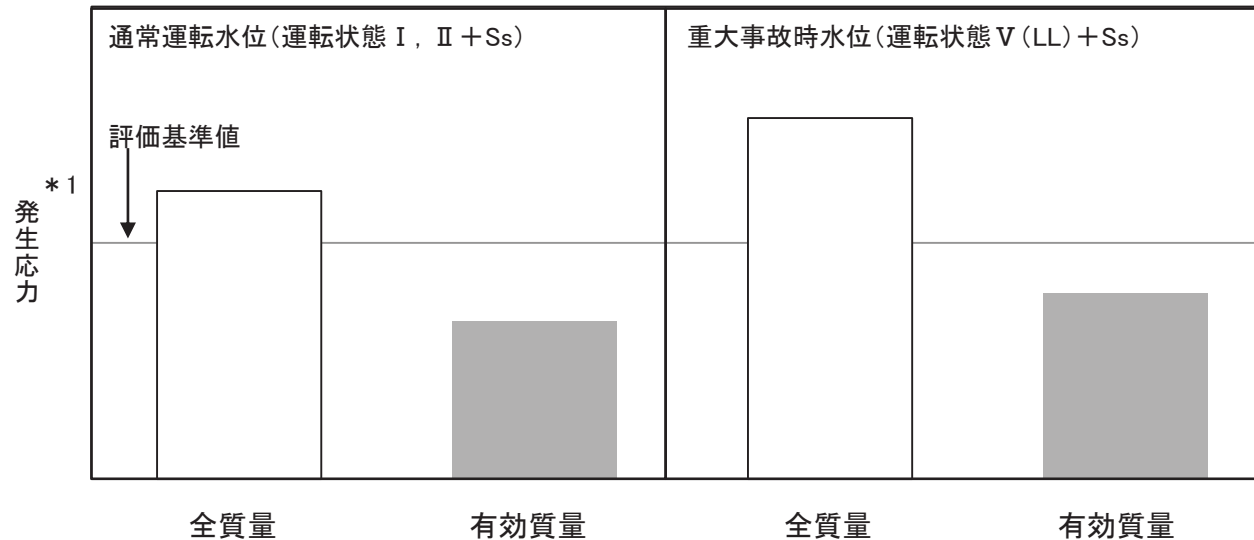


図2.3-1 サプレッションチェンバの動的地震力による耐震評価フロー

2. 既工認と今回工認の耐震評価手法

2.4 有効質量を適用する目的と効果

- 容器の内部水が自由表面を有する場合、**実際に地震荷重として付加される内部水の質量は、内部水の全質量でなく、一部の質量（有効質量）である**
- この知見に基づいて、女川2号炉の今回工認では、**より現実に近いサプレッションチェンバの内部水の挙動を考慮した評価を行うことを目的に、耐震計算における内部水の扱いとして、汎用構造解析プログラムNASTRANを用いて算出した有効質量を適用**
- **本有効質量を用いて、サプレッションチェンバボックスサポートの構造強度評価を実施する場合、発生応力が低減する見込み**



*1 いずれの条件に対しても補強工事を考慮

図2.4-1 通常運転状態及び重大事故時のボックスサポートの評価の見通し

3. 有効質量の適用方針

3.1 概要

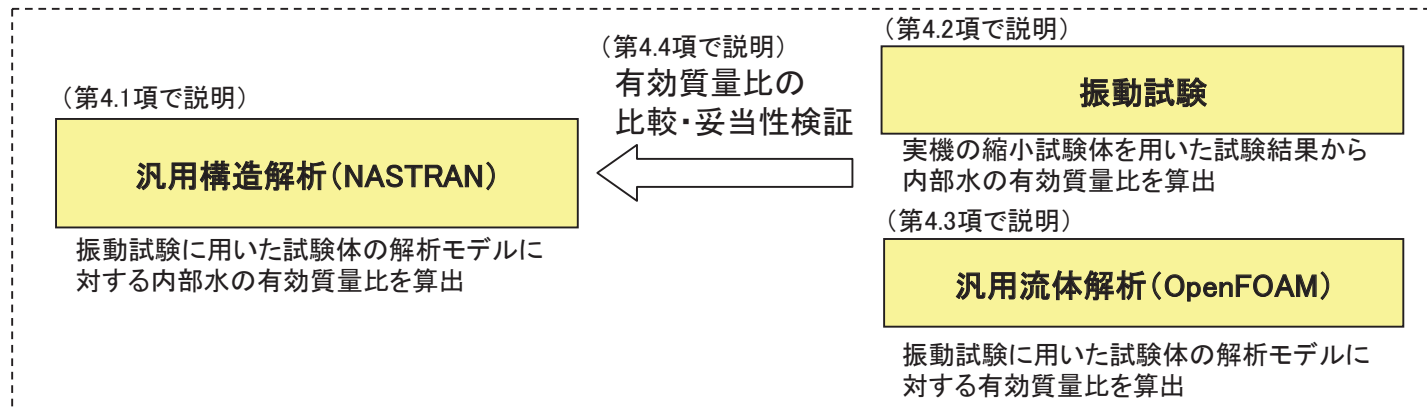
3.2 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

3.3 耐震評価に用いる有効質量の設定

3.1 概要

➤ 女川2号炉のサプレッションチェンバの耐震評価に適用する有効質量は、汎用構造解析プログラムNASTRANを用いて算出するため、その妥当性を以下の流れで確認する

【円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証】



【耐震評価で用いる有効質量の設定】

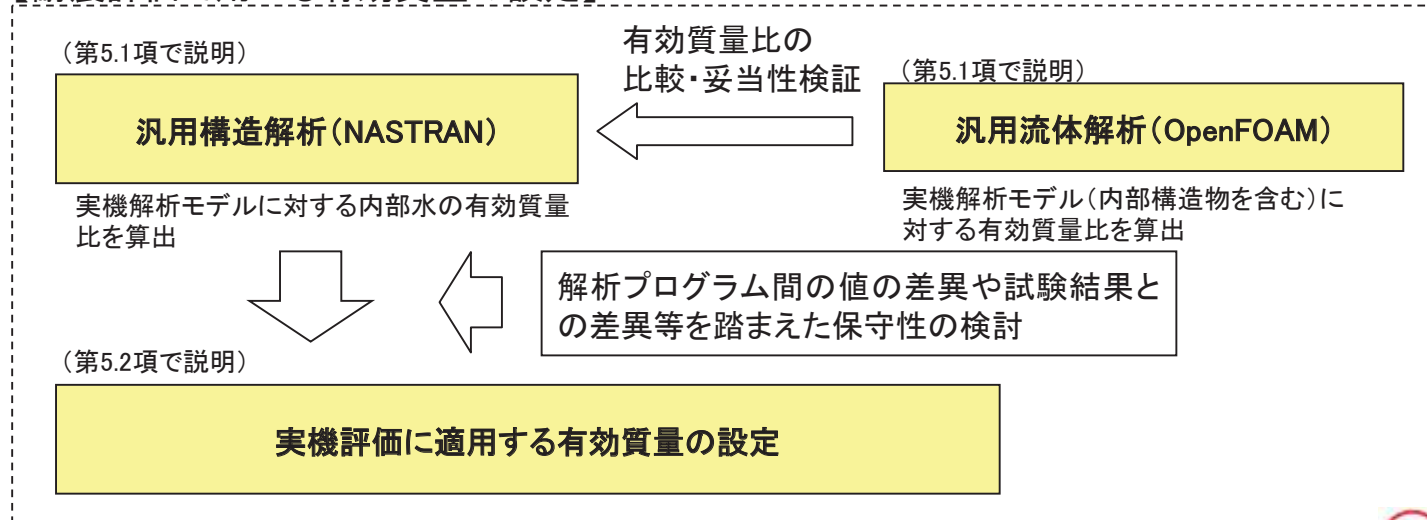


図3.1-1 有効質量の設定の流れ

3. 有効質量の適用方針

3.2 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

- ① 振動試験に用いた試験体の構造解析モデルを作成し、**NASTRAN**により有効質量比を算出
- ② **実機を縮小模擬した円環形状容器の試験体を用いて振動試験を行い、試験データから有効質量比を算出**
- ③ 振動試験に用いた試験体の流体解析モデルを作成し、**OpenFOAM**により有効質量比を算出
- ④ **上記①～③で得られた有効質量比を比較し、NASTRANで算出した円環形状容器の内部水の有効質量比の妥当性を検証**

【円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証】

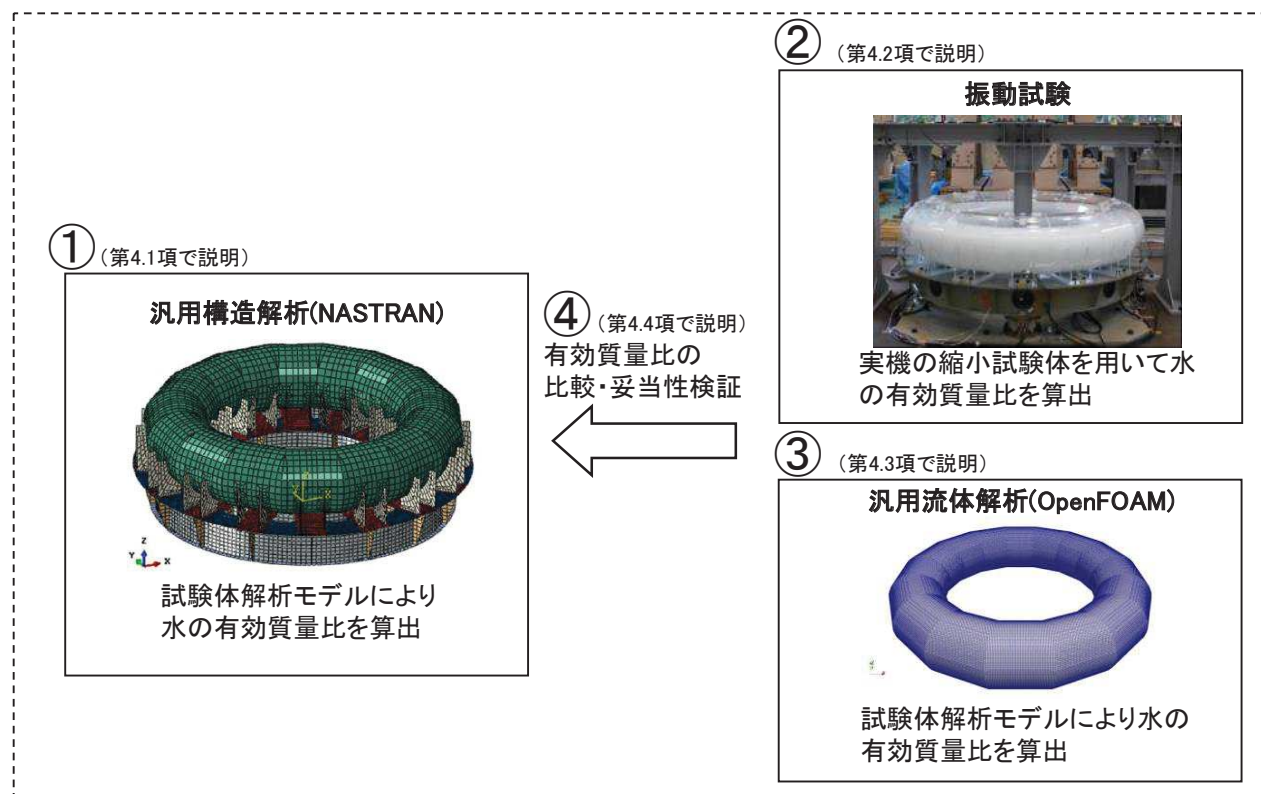


図3.2-1 有効質量の設定の流れ

3. 有効質量の適用方針

3.3 耐震評価に用いる有効質量の設定

- ① 第3.2項により妥当性を確認した**NASTRAN**を用いて、女川2号炉の実機解析モデルにより有効質量比を算出
- ② **NASTRAN**の実機解析の妥当性を検証するため、**OpenFOAM**を用いて、女川2号炉の主要な内部構造物をモデル化した**実機解析モデル**により有効質量比を算出し比較
- ③ **NASTRAN**に対する流体解析及び振動試験の値の差異等を踏まえ、**NASTRAN**で算出された値の保守性を検討し、女川2号炉の**実機評価に適用する有効質量を設定**

【耐震評価で用いる有効質量の設定】

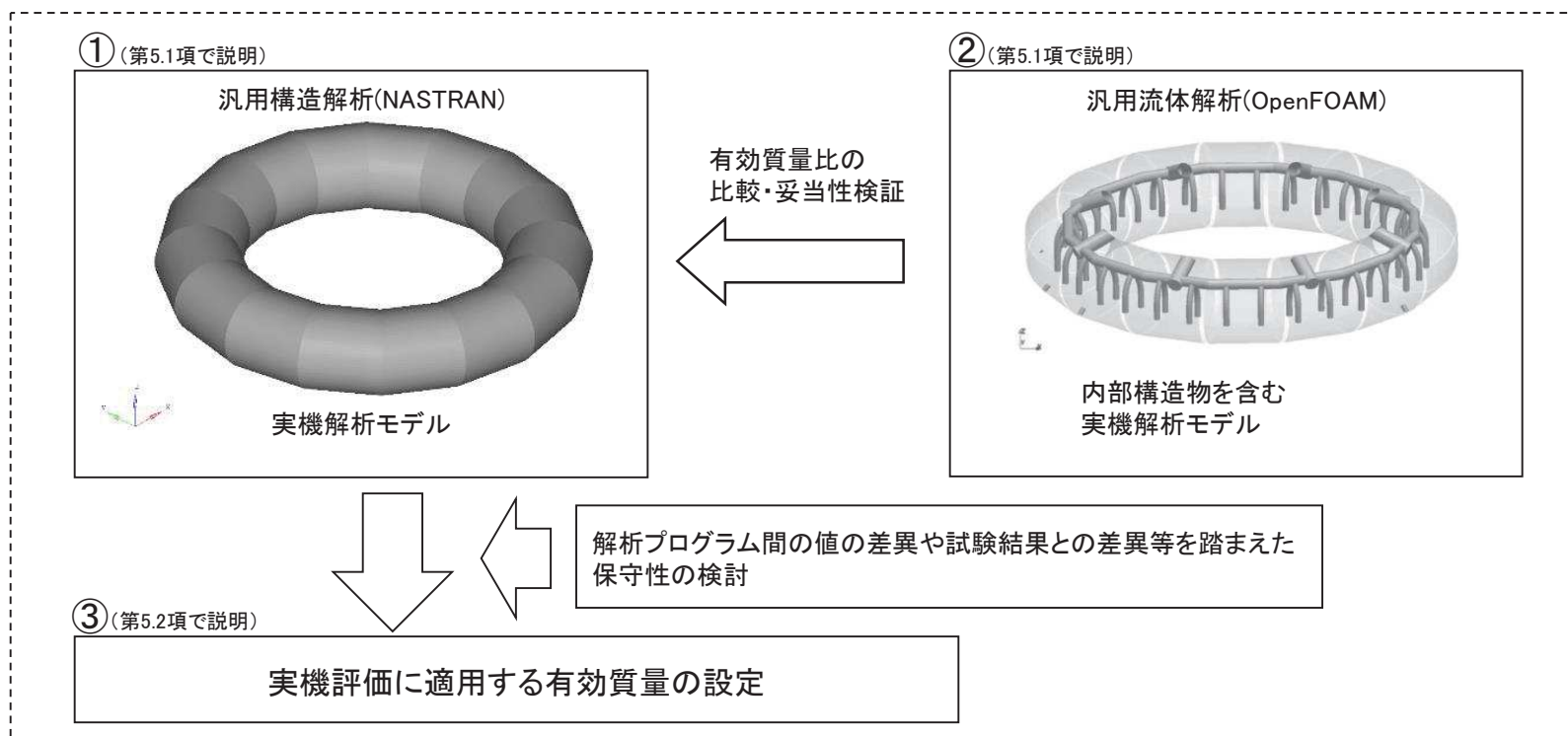


図3.3-1 有効質量の設定の流れ

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

- 4.1 構造解析による有効質量比の算出
- 4.2 振動試験
- 4.3 流体解析による有効質量比の算出
- 4.4 妥当性検証

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

4.1 構造解析による有効質量比の算出

- 円環形状容器の内部水の**有効質量は、NASTRANにて算出可能であり、入力波によらず、容器の構造(形状及び寸法)と内部水の水位により有効質量が定まる。**なお、NASTRANで算出される有効質量には、スロッシング荷重は考慮されない
- 検討対象は、振動試験(第4.2項)と同様、女川2号炉の実機サプレッションチェンバを縮小模擬した円環形状容器(実機寸法の約1/25)
- 解析モデルは、振動試験に用いた試験体及び架台をシェル要素でモデル化し、内部水の水位は、通常運転水位、重大事故時水位を考慮して、振動試験と同様、4段階を設定
- NASTRANにより算出された**有効質量比は、内部水の水位上昇に伴い増加**する傾向を確認

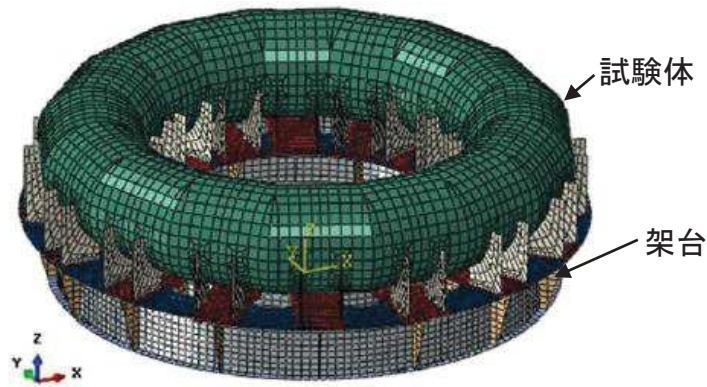


図4.1-1 構造解析モデル(試験体解析モデル)

表4.1-1 NASTRANによる有効質量比の算出結果

水位*1	有効質量比(—)	備考
低(146mm)	0.15	通常運転水位
中(203mm)	0.22	
高(259mm)	0.30	真空破壊装置上端水位*2
高高(325mm)	0.41	

*1 試験体底面からの高さ(第4.2項参照)

*2 重大事故時水位(真空破壊装置下端水位)より高い水位

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

4.2 振動試験(試験体)

- 円環形状容器の内部水の**有効質量算出にNASTRANを用いることの妥当性を検証するため、試験体を用いて振動試験**を行う
- **試験体は、女川2号炉のサプレッションチェンバの実機寸法の約1/25とし**、材質は、内部水の挙動を確認するためアクリルにて製作し、内部水の流動現象を単純化させるため、強め輪やダウンコマ等の内部構造物は模擬しない
- 振動台上には、試験体を支持する架台を設け、架台の脚部には、水平及び鉛直方向の荷重を測定するための分力計を設置し、架台は、内部水からの荷重を分力計に確実に伝達させるため強固な構造とし、ボックスサポートは模擬していない

【研究体制】 東北電力(株), 中部電力(株)
- 一般財団法人電力中央研究所 他

【研究時期】 平成26年度～平成29年度

【試験場所】 一般財団法人電力中央研究所

表4.2-1 試験体と実機との相似比

物理量	相似比*1	設定値
長さ	1/L	1/24.7
加速度	1/1	1
時間	1/√L	1/√24.7

*1 L:実機と試験体の縮尺比(L=9,400/380=24.7)

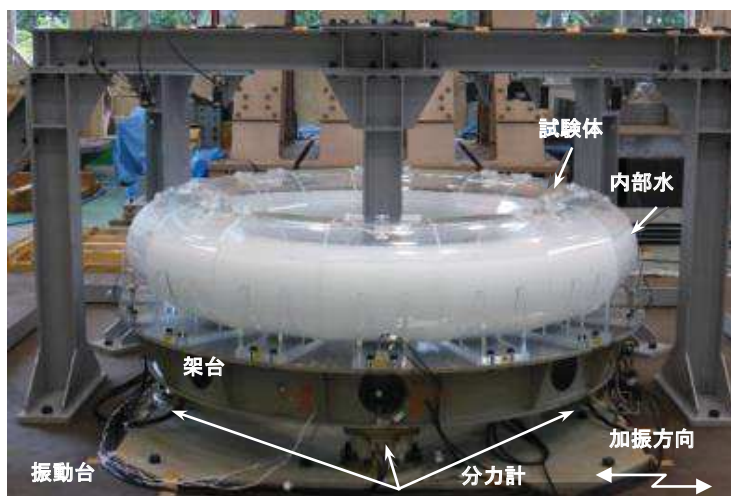


図4.2-1 試験装置写真

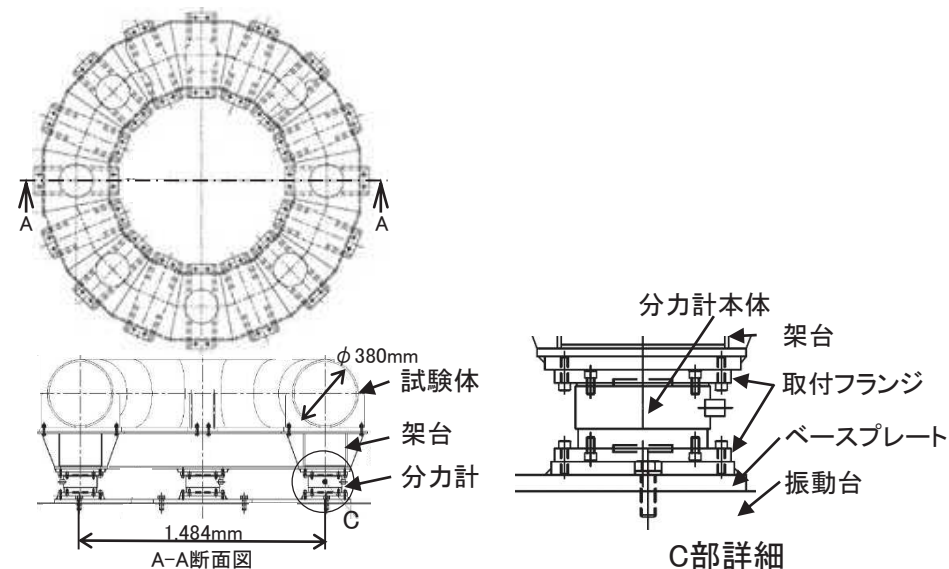


図4.2-2 試験装置概要

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

4.2 振動試験(計測項目及び計測機器設置位置)

表4.2-2 計測項目

計測項目	計測機器	位置	計測チャンネル数
反力	分力計	架台下方	3成分(X,Y,Z) : 4(0° ,90° ,180° ,270°)
加速度	加速度計	振動台上	X成分 : 2 (0° ,180°) Y成分 : 2 (90° , 270°) Z成分 : 4 (0° , 90° , 180° , 270°)
		架台上	X成分 : 2 (0° , 180°) Y成分 : 2 (90° , 270°) Z成分 : 4 (0° , 90° , 180° , 270°)
		試験体上	X成分 : 4 (0° , 45° , 135° , 180°) Y成分 : 4 (45° , 90° , 135° , 270°) Z成分 : 6 (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 270°)

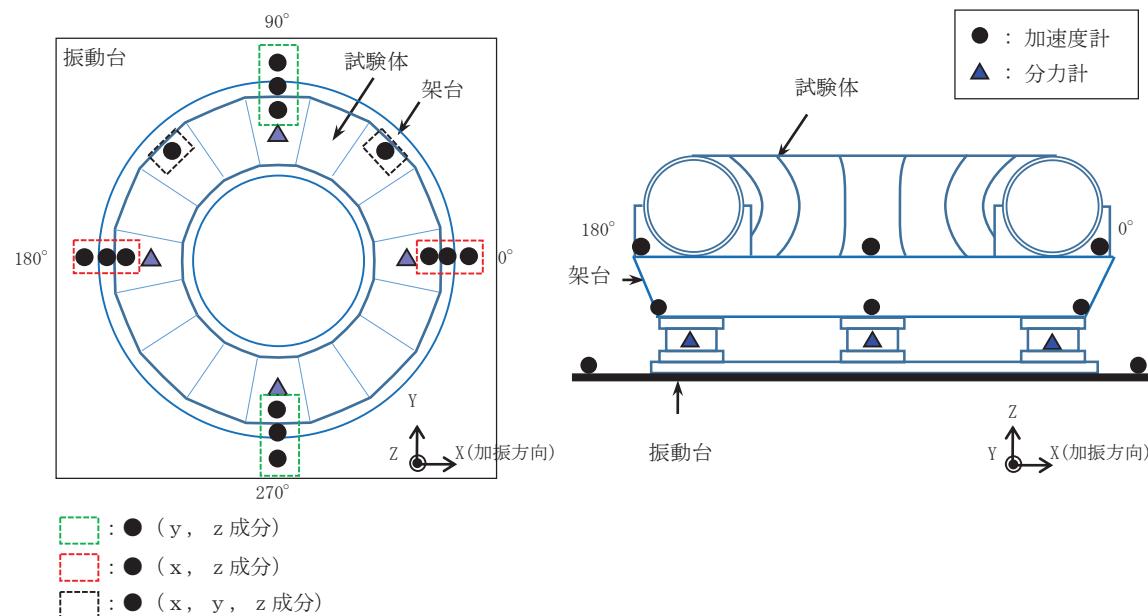


図4.2-3 計測機器設置位置

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

4.2 振動試験(試験条件)

- 振動台への入力波は、女川2号炉のサプレッションチェンバ設置床の基準地震動 S_s 相当*の応答加速度時刻歴とし、時間軸は、試験体と実機の相似則により圧縮。なお、振動台の加振限界振動数以上の成分はフィルタ処理している。
- 加振方向は、水平1方向とし、**振幅依存性を確認するため、入力波倍率として3ケース(0.5倍, 1.0倍, 1.5倍)**を設定
- 試験水位は、**水位依存性を確認するため、水を入れない空状態、通常運転水位、重大事故時水位を考慮し、5ケース(空, 低, 中, 高, 高高)**を設定
- 試験は、同条件で3回以上の試験を実施

* 平成25年12月設置変更許可申請時基準地震動 S_s のうち試験体内部水のスロッシングの固有周期帯で応答加速度が大きい S_s -2を採用

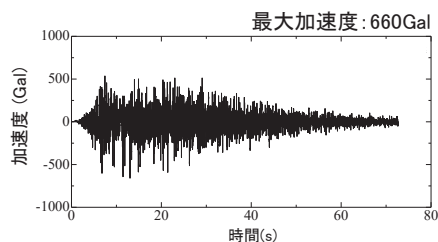


図4.2-4 基準地震動 S_s 相当の
応答加速度時刻歴波形

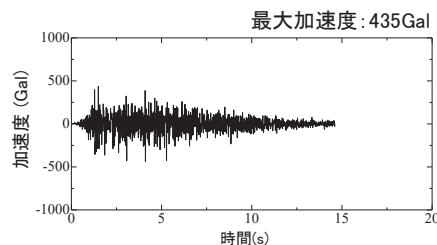


図4.2-5 振動台入力加速度
時刻歴波形
(相似則適用)

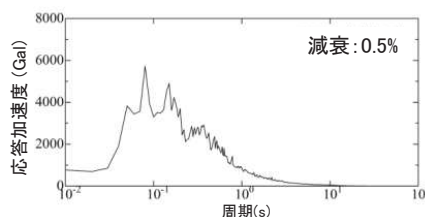


図4.2-6 基準地震動 S_s 相当の
応答加速度スペクトル

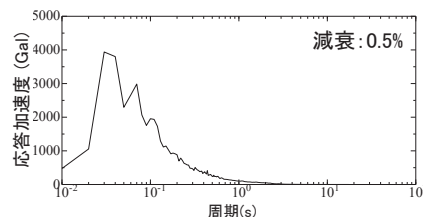


図4.2-7 振動台入力応答
加速度スペクトル
(相似則適用)

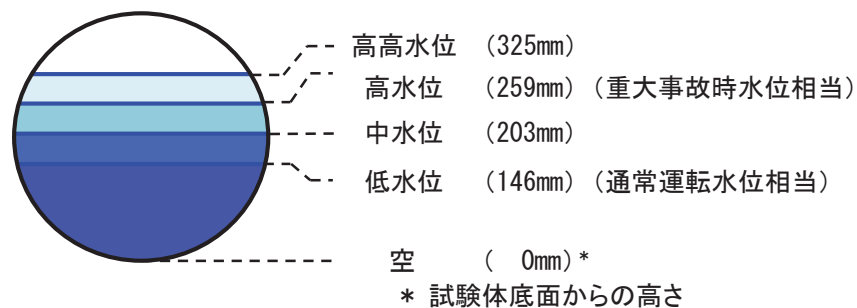


図4.2-8 試験水位レベル

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

4.2 振動試験(試験結果(その1))

- 計測荷重 F^* と架台上の計測加速度 \ddot{x} (=試験体への入力加速度)との関係は、下記の運動方程式で表されるため、**試験体(構造体)の質量 M と内部水の有効質量 M_E の合計値($M + M_E$)は、計測加速度 \ddot{x} に対する計測荷重 F の比(傾き)となる**
 - **水有りの試験結果及び空の試験結果の計測加速度 \ddot{x} と計測荷重 F の関係から回帰直線の傾きをそれぞれ求め、両者の回帰直線の傾きの差から内部水の有効質量が算出可能**
- * 有効質量の算出においては、計測荷重 F からスロッシング周期成分を取り除いている

【運動方程式】

$$F = (M + M_E) \ddot{x}$$

ここで、

M : 試験体(構造体)の質量

M_E : 内部水の有効質量

\ddot{x} : 計測加速度

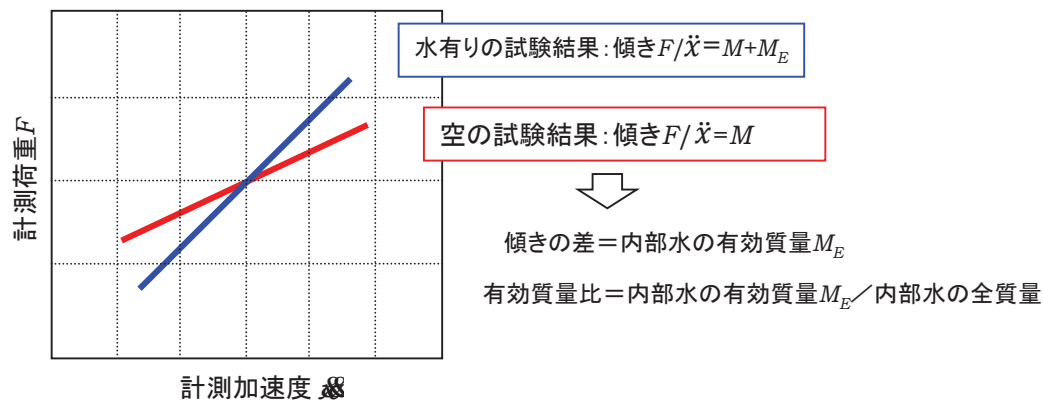


図4.2-9 内部水の有効質量及び有効質量比の算出方法

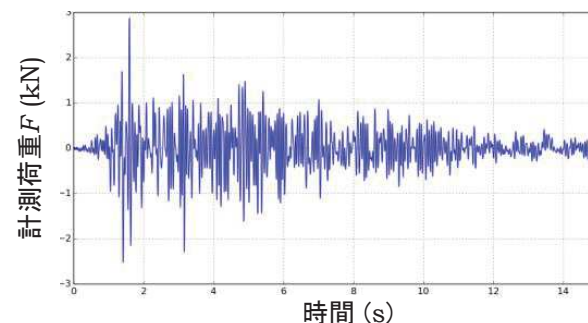


図4.2-10 計測荷重 F の時刻歴
(水位条件: 低水位, 入力波倍率: 1.0倍の例)

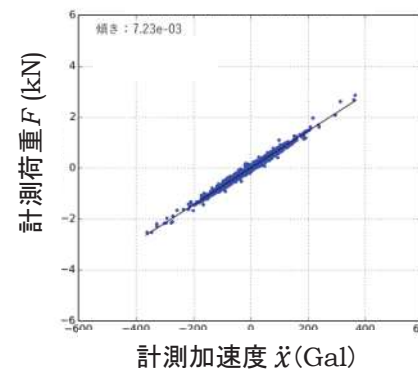


図4.2-11 計測加速度 \ddot{x} と計測荷重 F の関係

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

4.2 振動試験(試験結果(その2))

各ケースの試験結果から、以下について確認した

- 水位の上昇に伴い有効質量比も増加すること
- 入力波倍率の違いによる有効質量比の差は小さいこと
- いずれも再現性があり、有効質量比に対するばらつきがほとんどないこと

表4.2-3 振動試験結果から算出した有効質量比

水位	入力波倍率*		
	0.5倍	1.0倍	1.5倍
低 (146mm)	0.14 (0.0047)	0.12 (0.0212)	0.14 (0.0161)
中 (203mm)	0.20 (0.0047)	0.21 (0.0080)	0.21 (0.0074)
高 (259mm)	0.28 (0.0032)	0.28 (0.0015)	0.28 (0.0040)
高高 (325mm)	0.41 (0.0029)	0.42 (0.0032)	0.41 (0.0040)

* 括弧内は、複数回実施した試験結果から得られた有効質量比の標準偏差

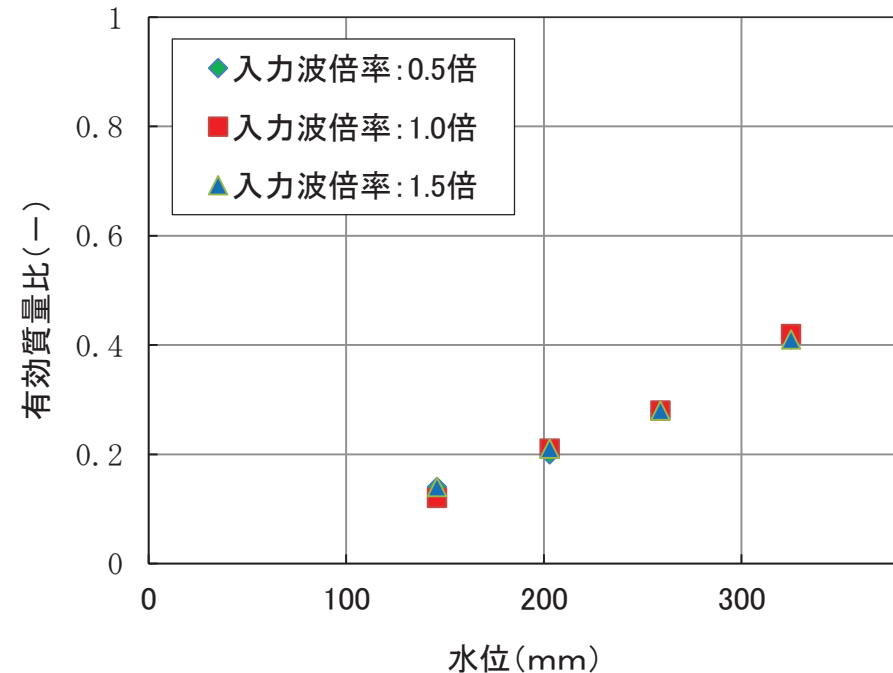


図4.2-12 振動試験における水位と有効質量比の関係

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

4.3 流体解析による有効質量比の算出

- 円環形状容器の内部水の有効質量算出にNASTRANを用いることの妥当性を検証するため、振動試験に加えて、汎用流体解析コードOpenFOAMにより有効質量比を算出し比較する
- 解析モデルは、振動試験に用いた試験体をもとにモデル化。流体解析に用いる入力波は、振動試験で計測された試験体への入力波(入力波倍率1.0倍)とし、内部水の水位は、代表として低水位及び高水位の2ケースを設定
- 有効質量比は、振動試験と同様、入力加速度 \ddot{x} と荷重 F の関係から回帰直線の傾きを求めて算出

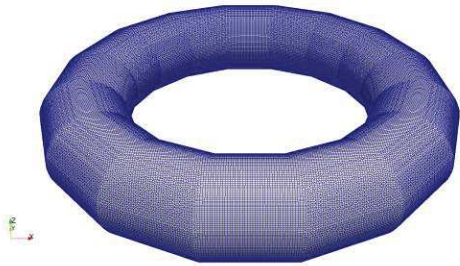


図4.3-1 流体解析モデル(試験体解析モデル)

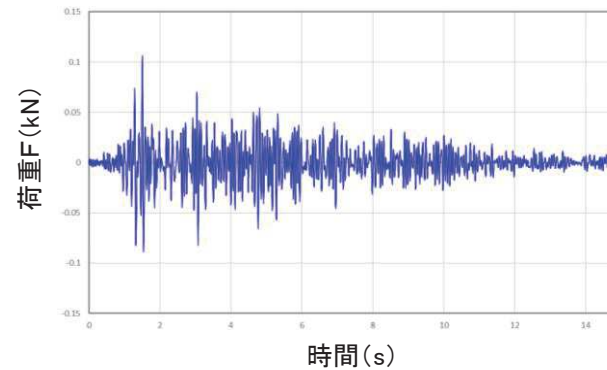


図4.3-2 荷重時刻歴

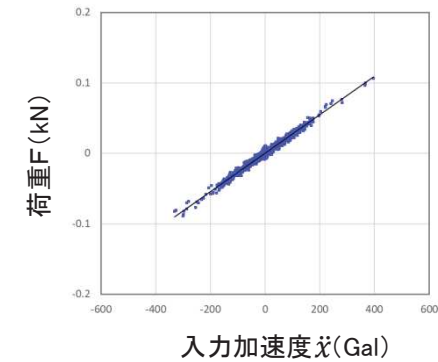


図4.3-3 入力加速度と荷重の関係

表4.3-1 OpenFOAMにより算出した有効質量比

水位	有効質量比(—)	備考
低(146mm)	0.14	通常運転水位
高(259mm)	0.28	真空破壊装置上端水位*2

*1 試験体底面からの高さ(第4.2項参照)

*2 重大事故時水位(真空破壊装置下端水位)より高い水位

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

4.4 妥当性検証

- 女川2号炉の実機サプレッションチェンバを縮小模擬した円環形状容器の内部水に対して汎用構造解析プログラム**NASTRAN**で算出した有効質量比は、スロッシング等の流体の挙動を直接考慮される振動試験及び汎用流体解析コード**OpenFOAM**から算出した有効質量比と同等若しくは、やや大きい値となっていることを確認
- いずれも評価手法においても、内部水の水位上昇に伴い、有効質量比が増加する傾向を確認

表4.4-1 各方法による有効質量比の評価結果

水位	NASTRAN	振動試験*	OpenFOAM
低 (146mm)	0.15	0.12	0.14
中 (203mm)	0.22	0.21	
高 (259mm)	0.30	0.28	0.28
高高 (325mm)	0.41	0.42	

* 入力波倍率1.0倍ケースの値

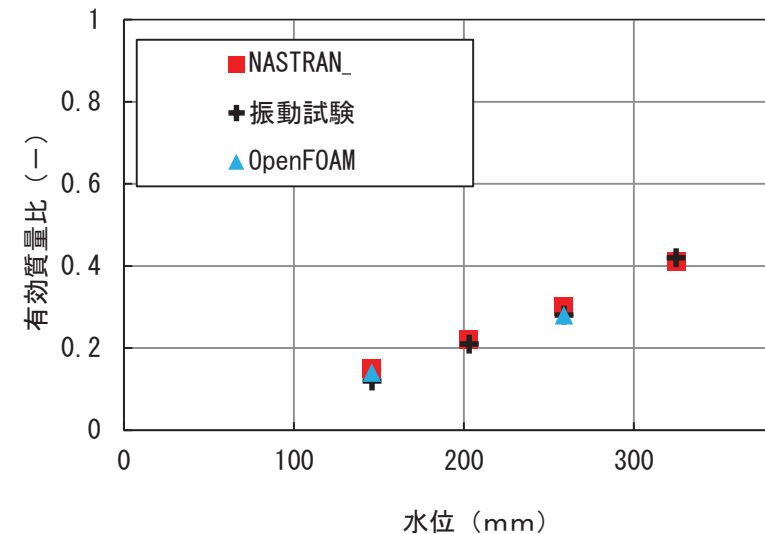


図4.4-1 各手法の有効質量比評価結果

5. 耐震評価に用いる有効質量の設定

5.1 実機の有効質量比の算出

5.2 実機評価に適用する有効質量

5. 耐震評価に用いる有効質量の設定

5.1 実機の有効質量比の算出

- 円環形状容器の内部水に対する**有効質量比の妥当性を確認したNASTRANを用いて、女川2号炉の実機サブプレッションチェンバの内部水に対する有効質量を算出**
 - 実機の内部構造物による**内部水の流動影響を確認するため、内部構造物をモデル化したOpenFOAMにより算出した有効質量比と比較し、妥当性を確認**する
 - 水位条件は、NASTRAN及びOpenFOAMともに通常運転水位及び重大事故時水位(真空破壊装置下端水位)の2ケースとし、OpenFOAMの入力地震動は、基準地震動 S_s (S_s -D1, S_s -D2及び S_s -F2 *)を用いた
 - **各水位条件においてNASTRANにより算出した有効質量比は、OpenFOAMよりもやや大きい値**であることを確認。この差異は、内部水の流動を考慮しないNASTRANに対し、OpenFOAMでは内部水の流動を考慮されることから、液面変動による効果と推定
- * 基準地震動 S_s の特徴(設備及びスロッシングの固有周期の応答加速度, 地震動の継続時間)を踏まえ、3波に対して検討

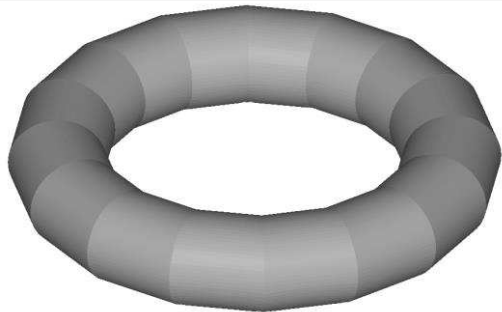


図5.1-1 NASTRANの実機解析モデル

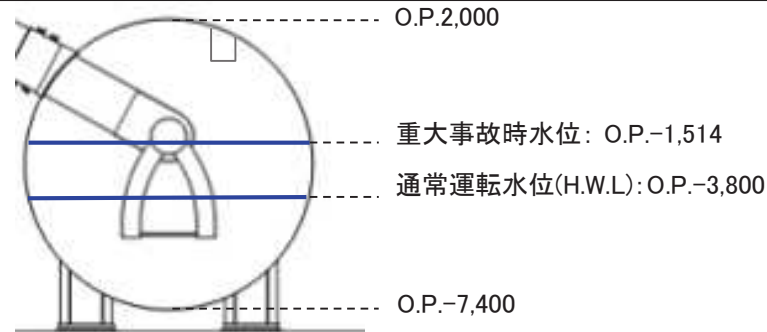


図5.1-3 解析水位ケース



図5.1-2 OpenFOAMの実機解析モデル

表5.1-1 女川2号炉の実機有効質量比算出結果

水位	NASTRAN	OpenFOAM		
		S_s -D1	S_s -D2	S_s -F2
通常運転水位(H.W.L)	0.22	0.17	0.17	0.17
重大事故時水位	0.32	0.28	0.28	0.28

5. 耐震評価に用いる有効質量の設定

5.2 実機評価に適用する有効質量

- 女川2号炉の実機評価に適用する有効質量の設定にあたり、NASTRANにより算出される有効質量比に対する解析プログラム間の値の差異や試験結果との差異等を踏まえ、NASTRANにより算出される有効質量に係る保守性を検討する
 - 試験体モデルに対する有効質量比は、NASTRAN、振動試験及びOpenFOAMにより算出した有効質量比はほぼ一致している、若しくは、NASTRANの値が保守的な傾向となっている。なお、振動試験の有効質量比は、再現性があり、ばらつきがほとんどない
 - 実機解析モデルに対する有効質量比は、NASTRANにより算出される有効質量比がOpenFOAMにより算出される有効質量比よりも保守的な値となっている
 - 容器構造設計指針・同解説に記載されている球形タンク及び円筒タンクの有効質量比に対して、NASTRANを用いて有効質量比の確認解析を実施したところ、いずれのタンクに対しても有効質量比がほぼ一致している、若しくはNASTRANの値が保守的な傾向となっている
- したがって、**女川2号炉の地震応答解析に考慮する有効質量は、NASTRANにより算出される有効質量比が、試験及び他評価手法に対してほぼ一致もしくは保守的な傾向を示すことから、NASTRANにより算出される有効質量を適用する**

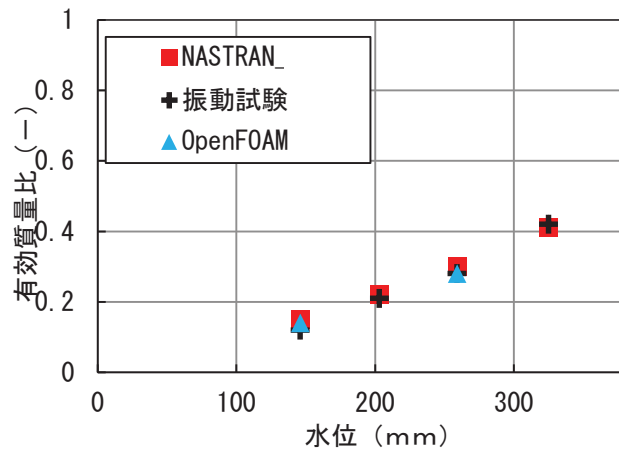


図4.4-1 各手法の有効質量比評価結果
(再掲)

表5.1-1 女川2号炉の実機有効質量比算出結果
(再掲)

水位	NASTRAN	OpenFOAM		
		Ss-D1	Ss-D2	Ss-F2
通常運転水位 (H.W.L)	0.22	0.17	0.17	0.17
重大事故時水位	0.32	0.28	0.28	0.28

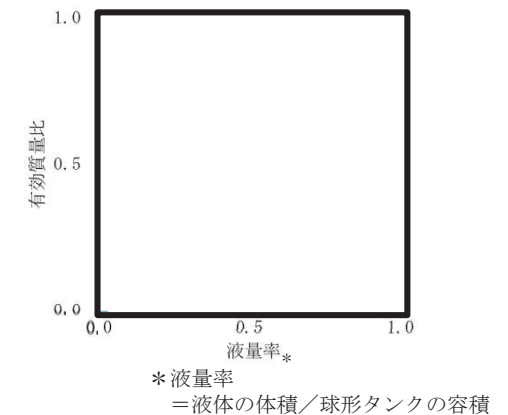


図5.2-1 球形タンクの有効質量比

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

6. 今回工認の地震応答解析

6. 今回工認の地震応答解析

- 女川2号炉のサプレッションチェンバの耐震評価について、より詳細な地震応答解析を実施するため、水平方向の地震応答解析は、NASTRANから算出される内部水の有効質量、容器の質量及び容器の剛性を考慮したはり要素による3次元解析モデルを構築し、スペクトルモーダル解析により地震荷重を算出する
- サプレッションチェンバ内部水の有効質量は、**NASTRANの実機解析モデルにより算定された各要素の有効質量及び位置(高さ)を考慮し、サプレッションチェンバシェル(はり要素による3次元解析モデル)の各質点に付加(縮約)する**
- 水平方向の地震荷重に考慮するスロッシング荷重は、流体解析により個別評価する

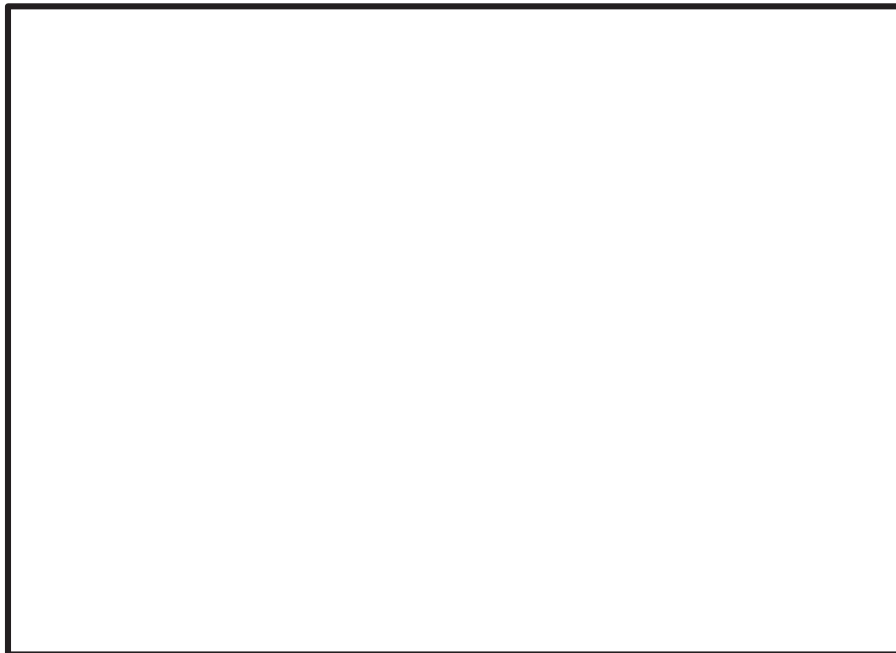


図6-1 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル全体図
(動的地震力)



図6-2 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル断面概略図
(動的地震力)

7. まとめ

7. まとめ

- 女川2号炉サプレッションチェンバの水平方向の地震応答解析に用いるサプレッションチェンバの内部水質量に対して汎用構造解析プログラムNASTRANを用いて算出した有効質量を適用する。この妥当性を確認するため、以下に示す比較・検証を行い、NASTRANから算出される有効質量が試験及び他の評価手法と同等若しくは、概ね保守的な傾向を示すことを確認した
 - ・実機を縮小模擬した試験体を用いた振動試験結果及び汎用流体解析コードOpenFOAMから算出される有効質量との比較・検証
 - ・実機解析モデルに対してOpenFOAMから算出される有効質量との比較・検証
 - ・容器構造設計指針・同解説の球形タンク等の有効質量と比較
- 有効質量の適用に伴い、より詳細な地震応答解析を実施するため、水平方向の地震応答解析は、3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する
- サプレッションチェンバの評価に用いるスロッシング荷重は、流体解析により個別評価する

8. 今後の追加検討

8. 今後の追加検討

今後、以下の追加検討を行い、設置変更許可に対する適合性審査において説明

① サプレッションチェンバの評価に用いるスロッシング荷重の算定に対する検討を行う

- ・ 流体解析における内部構造物のモデル化の有無による影響
- ・ 水平方向地震力のみでの評価と水平方向及び鉛直方向の地震力を組合せた場合の影響
- ・ 水平2方向の地震入力による影響



有効質量による地震荷重に対し、スロッシング荷重が小さく、耐震評価に与える影響は小さい見通し

② サプレッションチェンバの内部水における有効質量について、地震応答解析モデルを作成する際の縮約が適切になされていることについて検討を行う

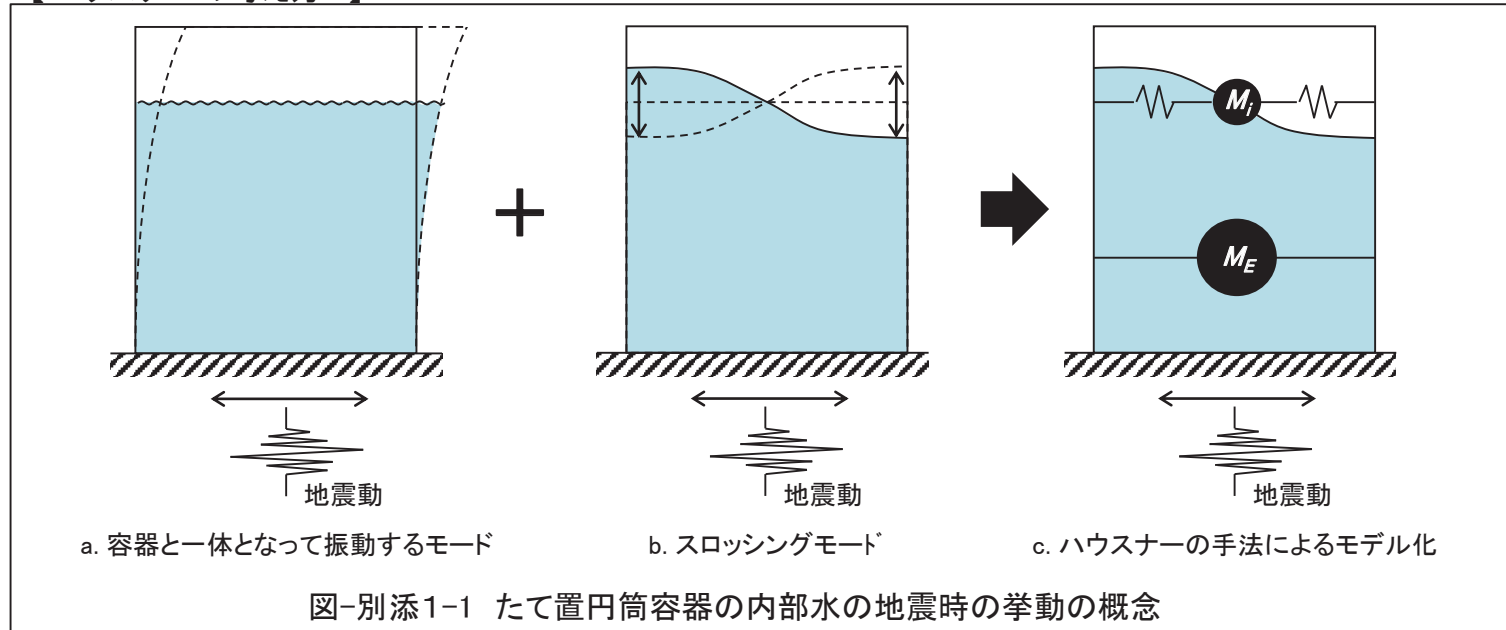


縮約は、有限要素法による解析に広く一般的に使われている手法であり、簡易な容器形状に対する検討結果を用いて適切性を説明

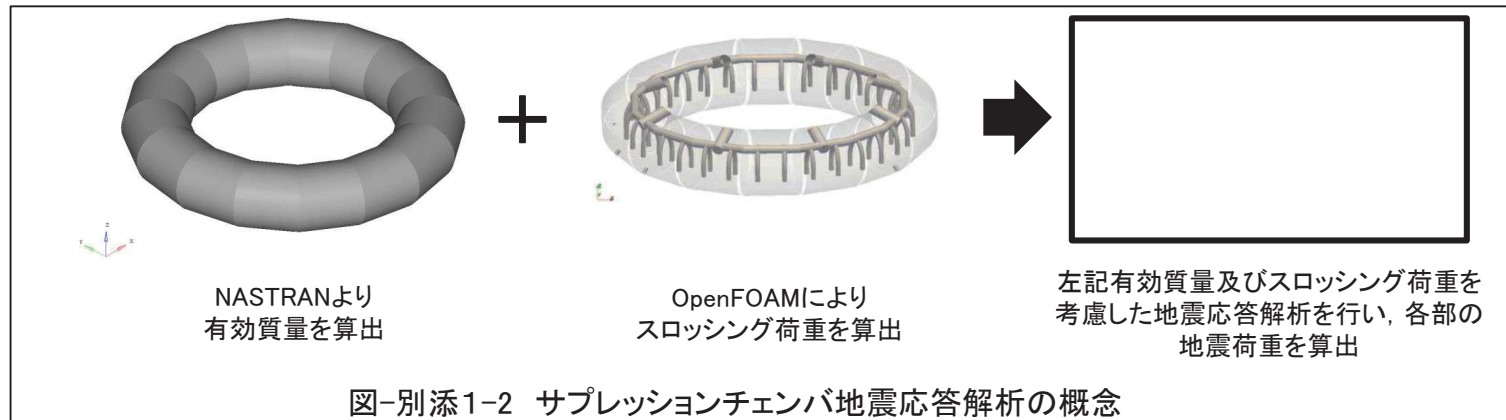
③ 上記を踏まえ、サプレッションチェンバの耐震設計への配慮について検討を行う

別添1 内部水の地震時の挙動の概念

【ハウスナーの考え方^[1]】



【今回工認で適用】



参考文献[1]: Housner, G. W.: Nuclear Reactors And Earthquakes, TID Rep. 7024, 1963.

別添2 実機スロッシング荷重の算定方法

- 今回工認では水平方向の地震荷重算出に有効質量を適用するため、地震時の内部水の挙動を考慮し、スロッシング荷重を流体解析により算出し、スロッシング荷重の最大値をサプレッションチェンバ等の耐震評価に考慮する



図-別添2-1 解析モデル図

表-別添2-1 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	通常運転水位(H.W.L) 重大事故時水位(真空破壊装置下端水位)
評価用地震動	基準地震動Ss(水平方向と鉛直方向)に対する 原子炉建屋基礎版上の建屋床応答
解析コード	OpenFOAM Ver.4.1(汎用流体解析コード) VOF法を用いた流体解析
その他	内部構造物としてベントヘッダ、ダウンカマ、T-クエンチャ 及びその配管、ECCSストレナーナ取付配管を考慮

【スロッシング荷重算定式】

$$F_s = F - M_E \cdot \ddot{x}$$

ここで、

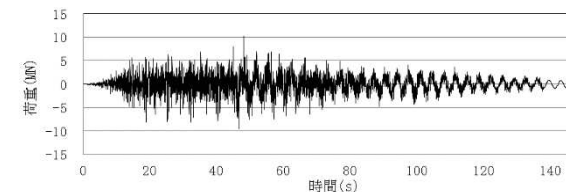
F : OpenFOAMで算出される荷重

F_s : スロッシング荷重

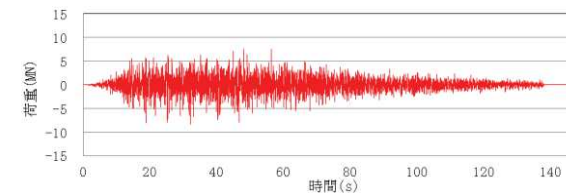
$M_E \cdot \ddot{x}$: 容器と一体となって振動するモードによる荷重

M_E : 有効質量

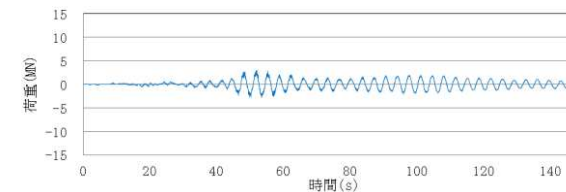
\ddot{x} : 入力加速度



(a) OpenFOAMで算出される荷重 F



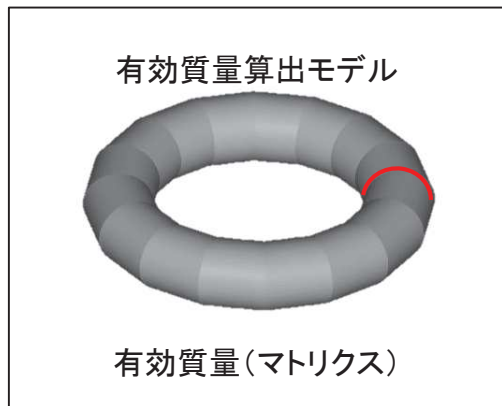
(b) 容器と一体となって振動するモードによる荷重 $M_E \cdot \ddot{x}$



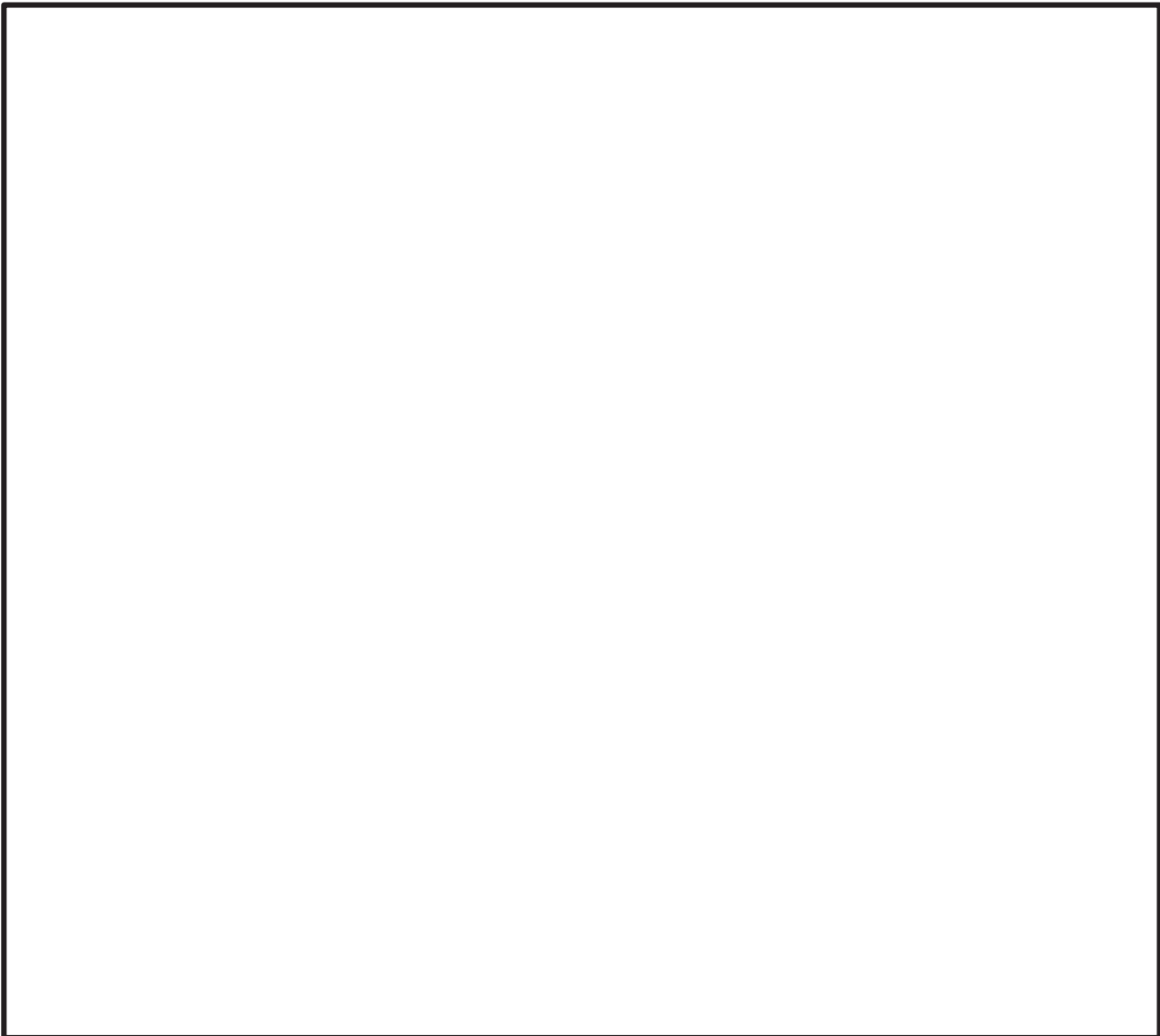
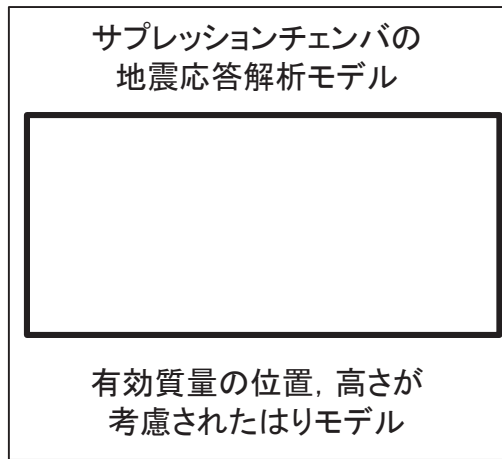
(c) スロッシング荷重 F_s

図-別添2-2 各モードの荷重時刻歴 例(Ss-D1, 重大事故時水位)

別添3 サプレッションチェンバ内部水のはりモデルへの 考慮方法について



Guyanの縮約法により、
有効質量をはりモデル
の質点に縮約



枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

図-別添3-1 Guyanの縮約法のイメージ

別添4 今回工認のサプレッションチェンバの耐震設計への配慮

既工認からの変更点		検討内容	耐震設計への配慮
有効質量の適用	NASTRANによる有効質量算出	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 以下に示す比較・検証を行い, NASTRANから算出される有効質量が試験及び他の評価手法と同等若しくは, 概ね保守的な傾向を示すことを確認 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 実機を縮小模擬した試験体を用いた振動試験結果及び汎用流体解析コードOpenFOAMから算出される有効質量との比較・検証 ✓ 実機解析モデルに対してOpenFOAMから算出される有効質量との比較・検証 ✓ 容器構造設計指針・同解説に示される球形タンク等の有効質量との比較 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 女川2号炉の実機評価における地震応答解析では, 左記の検討結果も踏まえ, NASTRANにより算出される有効質量を適用
	有効質量を適用	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 既工認では, 設計の簡便さを踏まえ, 水を剛体として扱い, 全質量を用いて地震荷重を算定することで, スロッシング荷重が包含される 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 地震荷重算出に有効質量を適用するため, 地震時の内部水の挙動を考慮し, スロッシング荷重を流体解析により算出
スペクトルモード解析	地震応答解析モデルにGuyanによる縮約法を適用	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 簡易なモデルに対しGuyanによる縮約法でモデル化した質量と理論解等の比較により, 適切に質量が設定されていることを確認する予定 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 追而 (左記の検討結果を踏まえ検討する)
スロッシング荷重の適用	OpenFOAMによるスロッシング荷重を適用	<ul style="list-style-type: none"> ➤ OpenFOAMの荷重時刻歴からスロッシング荷重を算出 ➤ 有効質量による地震荷重に比べて, スロッシング荷重は小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 有効質量による地震荷重とスロッシング荷重の最大値が発生する時刻は, 互いに異なると考えられるが, 保守的に各荷重の最大値を組み合わせることで応力評価 ➤ 有効質量による地震荷重とスロッシング荷重の最大値は, 評価用地震動によって異なるが, 保守的に各荷重の最大値を組み合わせることで応力評価