

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	02-補-E-19-0600-40-42_改3
提出年月日	2021年10月21日

補足-600-40-42 【サブプレッションチェンバ内設備に対するスロッシング荷重等の影響評価について】

## 1. 概要

女川2号機の今回工認では、サプレッションチェンバ内部水に対して有効質量を適用し、水平方向の地震荷重を算出するとともに、スロッシング荷重を個別評価し、耐震評価に考慮することとしている。

本書では、これに関連して、サプレッションチェンバに関連する設備に対する有効質量の適用の有無及びスロッシング影響について、個別に検討した結果について示すものである。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・VI-2-5-3-1-2 管の耐震性についての計算書（主蒸気系）
- ・VI-2-5-4-1-3 残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書
- ・VI-2-5-4-1-5 ストレーナ部ティーの耐震計算書（残留熱除去系）
- ・VI-2-5-5-1-2 高压炉心スプレイ系ストレーナの耐震性についての計算書
- ・VI-2-5-5-1-4 ストレーナ部ティーの耐震計算書（高压炉心スプレイ系）
- ・VI-2-5-5-2-2 低压炉心スプレイ系ストレーナの耐震性についての計算書
- ・VI-2-5-5-2-4 ストレーナ部ティーの耐震計算書（低压炉心スプレイ系）
- ・VI-2-5-6-1-3 管の耐震性についての計算書（原子炉隔離時冷却系）
- ・VI-2-9-4-1 ダウンカマの耐震性についての計算書
- ・VI-2-9-4-2 ベント管の耐震性についての計算書
- ・VI-2-9-4-3-1 原子炉格納容器スプレイ冷却系の耐震性についての計算書
- ・VI-3-3-6-2-6 ベント管ベローズの強度計算書

## 2. 対象設備の整理

対象設備の整理に当たっては、サプレッションチェンバに関連する設備を抽出し、抽出された設備に対して、有効質量適用の有無及びスロッシング影響検討の要否を整理する。サプレッションチェンバの断面概要図を図1に示す。

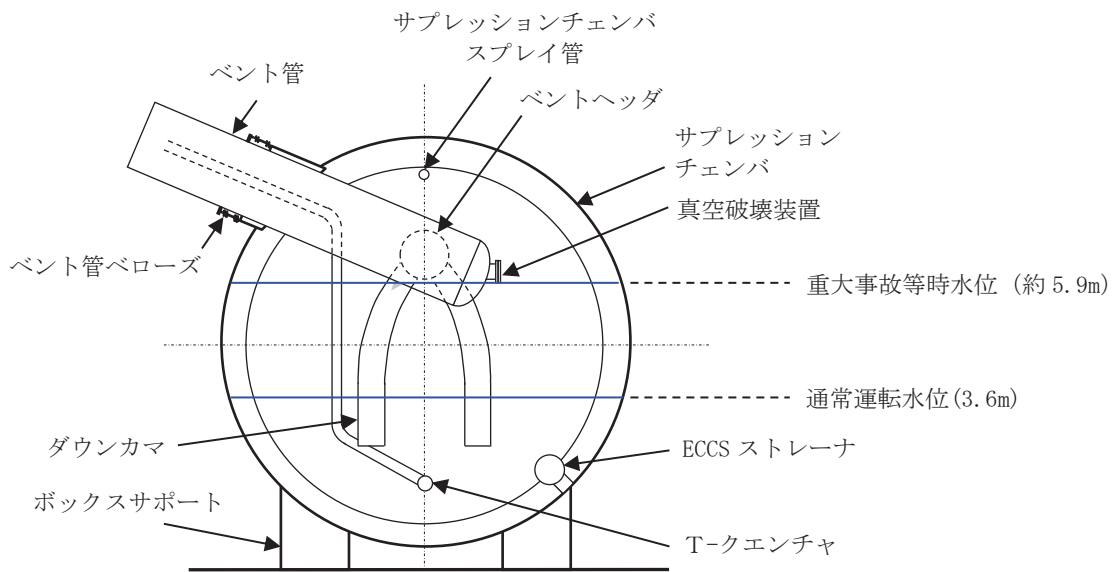


図1 サプレッションチェンバ断面概要図

(1) 有効質量適用の有無

より実態に応じた地震荷重を算定するために有効質量を適用する設備は、サプレッションチェンバ、ボックスサポートである。また、ベント管ベローズについては、有効質量を適用したサプレッションチェンバの地震応答解析から得られる変位を用いて評価を行っているため、有効質量を適用する設備とする。

有効質量を適用することで、地震による発生応力が低減すると考えられる。

(2) スロッシング影響検討の要否

サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング影響検討の要否は、水位（水位変動含む）と設備の設置位置との関係、設備の構造及び運転状態と地震との組合せの観点から判断し、スロッシング影響は、応力評価と要求機能（圧力抑制機能、蒸気凝縮機能）が維持されることについて検討する。

なお、サプレッションチェンバ、ボックスサポート、ベント管ベローズは、スロッシング荷重を考慮した耐震評価を行っているため、本検討の対象外としている。

(3) 整理結果

(1) 及び (2) を踏まえた有効質量適用の有無及びスロッシング影響検討の要否の整理結果を表 1 に示す。

表1 有効質量適用の有無及びスロッシング影響検討の要否の整理結果

対象設備	評価項目	耐震クラス	重大事故等対処設備の設備分類	有効質量適用の有無 (○：適用， －：適用外)		スロッシング影響 検討の要否 (○：要，－：否)		スロッシング影響検討 を否とする理由
				DB	SA	DB	SA	
サブプレッションチェンバ	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	○	○	－	－	スロッシング荷重を耐震評価に考慮している
ボックスサポート	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	○	○	－	－	スロッシング荷重を耐震評価に考慮している
真空破壊装置	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	－	○	DB 条件では真空破壊装置の設置位置に比べ水位が十分低いことからスロッシング影響はない
ダウンカマ	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	○	○	* 2, * 3
	圧力抑制機能					－* 2	－* 3	
ベントヘッダ	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	－	○	水位条件から DB 時のスロッシング影響はない
ベント管	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	－	○	水位条件から DB 時のスロッシング影響はない
サブプレッションチェンバ スプレイ管	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	－	－	水位条件から DB/SA 時のスロッシング影響はない
ECCS ストレーナ*1	応力評価	S	常設重大事故防止設備 (設計基準拡張) 常設重大事故緩和設備	－	－	－	－	ストレーナがメッシュ構造であり，ストレーナに接続するティー配管面積が十分に小さいことからスロッシング影響は小さい
T-クエンチャ (サブプレッションチェンバ 内配管を含む)	応力評価	B	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	－	○	* 3
	蒸気凝縮機能					○	－* 3	
ベント管ベローズ	応力評価 (疲労評価)	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	○	○	－	－	スロッシング荷重を耐震評価に考慮している

\* 1 ストレーナ部ティーを含む。また，耐震 S クラスの原子炉隔離時冷却系配管も含む。

\* 2 機能要求時(運転状態 IV (S))において，独立事象として地震との組合せの発生確率が  $10^{-7}$ /年以下となるため，地震時の圧力抑制機能の検討が不要

\* 3 機能要求時(運転状態 V (S))において，独立事象として地震との組合せの発生確率が  $10^{-8}$ /年以下となるため，地震時の圧力抑制機能及び蒸気凝縮機能の検討が不要

### 3. スロッシング影響検討

#### 3.1 スロッシング影響検討方針

スロッシング影響検討が必要な設備及びその影響検討方針について表 2 に示す。各設備の応力評価では、流体解析から得られるスロッシング荷重に対する影響を確認する。また、T-クエンチャの要求機能である蒸気凝縮機能は、流体解析結果から得られる T-クエンチャ位置でのスロッシングによる水位と既往知見\*で機能確認された水位との比較によりスロッシングによる影響を確認する。

注記\* : NUREG-0783 “Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containment” (試験の詳細は、補足-370-1 重大事故等時における原子炉格納容器の放射性物質閉じ込め機能健全性について 別紙 20 に記載。)

表 2 スロッシング影響検討設備及びその影響検討方針

対象設備	評価項目	スロッシング影響検討の要否 (○:要, -:否)		影響検討方針
		DB	SA	
真空破壊装置	応力評価	-	○	スロッシング荷重による発生応力(ダウンカマ, ベントヘッド, ベント管の最大値)を真空破壊装置の地震荷重による発生応力に加えて評価する。
ダウンカマ	応力評価	○	○	スロッシング荷重(ダウンカマ, ベントヘッド, ベント管に対する最大荷重の合算値)をダウンカマの下端に負荷させて応力評価を実施する。
ベントヘッド	応力評価	-	○	
ベント管	応力評価	-	○	
T-クエンチャ	応力評価	-	○	スロッシング荷重による応力評価を実施する。
	蒸気凝縮機能	○	-	既往知見で機能確認された水位との比較を実施する。

### 3.2 影響検討に用いるスロッシング荷重及び水位

スロッシング荷重及び水位は、流体解析により算出する。流体解析の詳細を別紙に示し、流体解析により算出したスロッシング荷重を表 3 に、スロッシングによるT-クエンチャ位置の最低水位を表 4 に、水位コンター図を図 2 に示す。

なお、スロッシングによる水位変動によってT-クエンチャ位置の水位がT-クエンチャに求められる蒸気凝縮機能に必要な水位（没水高さ）を下回らないことを確認するため、流体解析によりT-クエンチャ位置の最低水位を求めている。

表 3 スロッシング荷重

対象設備	スロッシング荷重*1	
	通常運転水位条件*2	耐震評価用重大事故等時水位条件*3
真空破壊装置		*4
ダウンコマ	2.58kN	5.17kN
ベントヘッド		1.25kN
ベント管		2.64kN
T-クエンチャ		3.76kN

注記\*1：スロッシング荷重の絶対値を示す。

\*2：DBの水位条件（3.6m）

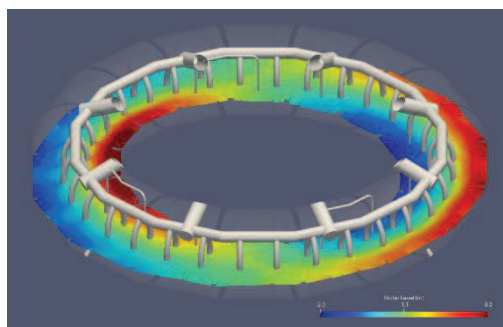
\*3：SAの水位条件（約5.9m）

\*4：スロッシング荷重による発生応力（ダウンコマ、ベントヘッド、ベント管の最大値）を真空破壊装置の地震荷重による発生応力に加えて評価

表 4 スロッシングによる最低水位（通常運転水位条件\*1）

対象設備	最低水位
T-クエンチャ	3.0m

注記\*1：DBの水位条件（3.6m）



注記\*：色の違いは、水面高さの違いを表す。また、高さは、サブプレッションチェンバセル中心位置を0mとしたものを表しており、初期水位は、約-1.1mである。

図 2 水位コンター図（水平1方向入力，S s - D 1，最低水位時点 52 秒）

### 3.3 影響検討結果

#### (1) 応力評価

今回工認の耐震評価結果とスロッシング荷重を考慮した影響検討結果との比較を表5に、疲労評価の詳細を表6に示す。応力評価部位は、裕度最小部位としている。比較結果から、スロッシング影響による応力の増分は保守的な評価として最大で13%程度であり、いずれの設備も許容値を満足することを確認した。

なお、表3に示すスロッシング荷重を水平2方向の各方向に入力することで保守的にスロッシング荷重を考慮している。また、ベント系（ダウンカマ、ベントヘッド、ベント管）の評価にあたっては、ベント系の拘束点が設備の上端位置（ドライウェルとベント管の接続位置）であることを踏まえ、保守的にダウンカマ、ベントヘッド、ベント管のスロッシング荷重の総和をダウンカマの下端に入力している。また、T-クエンチャ（接続配管を含む）の評価にあたっては、荷重算定領域毎に個別のスロッシング荷重（別紙 表4参照）を入力している。なお、水平2方向の考慮方法は、図3の評価フローの通り。

表5 スロッシング荷重による影響評価結果

対象設備	運転状態	応力評価部位	応力分類	今回工認		スロッシング荷重考慮		応力比 (②/①)
				①算出 応力	許容 応力	②算出 応力	許容 応力	
真空破壊装置	SA	真空破壊装置スリーブ	一次+二次応力	309	393	348	393	1.13
ダウンカマ	DB	ダウンカマ (一般部以外)	一次+二次応力	457	458	472	458	1.03
			疲労評価	—	—	0.300	1	—
	SA		一次+二次応力	481*	473	518*	473	1.08
			疲労評価	0.320	1	0.444	1	—
ベントヘッド	DB	ベントヘッド (一般部以外)	一次+二次応力	516*	458	528*	458	1.02
			疲労評価	0.284	1	0.307	1	—
	SA		一次+二次応力	592*	473	620*	473	1.05
			疲労評価	0.547	1	0.715	1	—
ベント管	DB	ベント管 (一般部以外)	一次+二次応力	371	393	387	393	1.04
	SA		一次+二次応力	418*	393	457*	393	1.09
			疲労評価	0.489	1	0.710	1	—
T-クエンチャ	SA	配管本体	一次+二次応力	408*	386	410*	386	1.00
			疲労評価	0.5960	1	0.5995	1	—

\* 一次+二次応力評価は許容値を満足しないが、設計・建設規格 PVB-3300 に基づいて疲労評価を行い、十分な構造強度を有していることを確認している。

表6 疲労評価結果の詳細

対象設備	評価部位	運転状態	スロッシング荷重の考慮の有無	$S_n$ (MPa)	$K_e$	$S_p$ (MPa)	$S_\ell$ (MPa)	$S'_\ell$ (MPa)	$N_a$ (回)	$N_c$ (回)	疲労累積係数 $N_c/N_a$
ダウン カマ	ダウンカマ (一般部以外)	DB	有	472	1.29	803	518	545	1137	340	0.300
		SA	無	481	1.29	818	528	559	1063	340	0.320
		SA	有	518	1.34	881	591	626	766	340	0.444
ベント ヘッド	ベントヘッド (一般部以外)	DB	無	516	1.31	774	507	534	1201	340	0.284
			有	528	1.32	792	523	550	1110	340	0.307
		SA	無	592	1.43	888	635	672	622	340	0.547
			有	620	1.5	930	698	739	476	340	0.715
ベント管	ベント管 (一般部以外)	SA	無	418	1.39	878	611	647	696	340	0.489
			有	457	1.45	960	696	737	479	340	0.710
T-クエン チャ	配管本体	SA	無	408	1.54	1015	782	862	332	198*	0.5960
			有	410	1.54	1017	783	864	330	198*	0.5995

注記\* : T-クエンチャを含む配管モデル (MS-004) の評価で用いる個別に設定する等価繰返し回数を適用している。



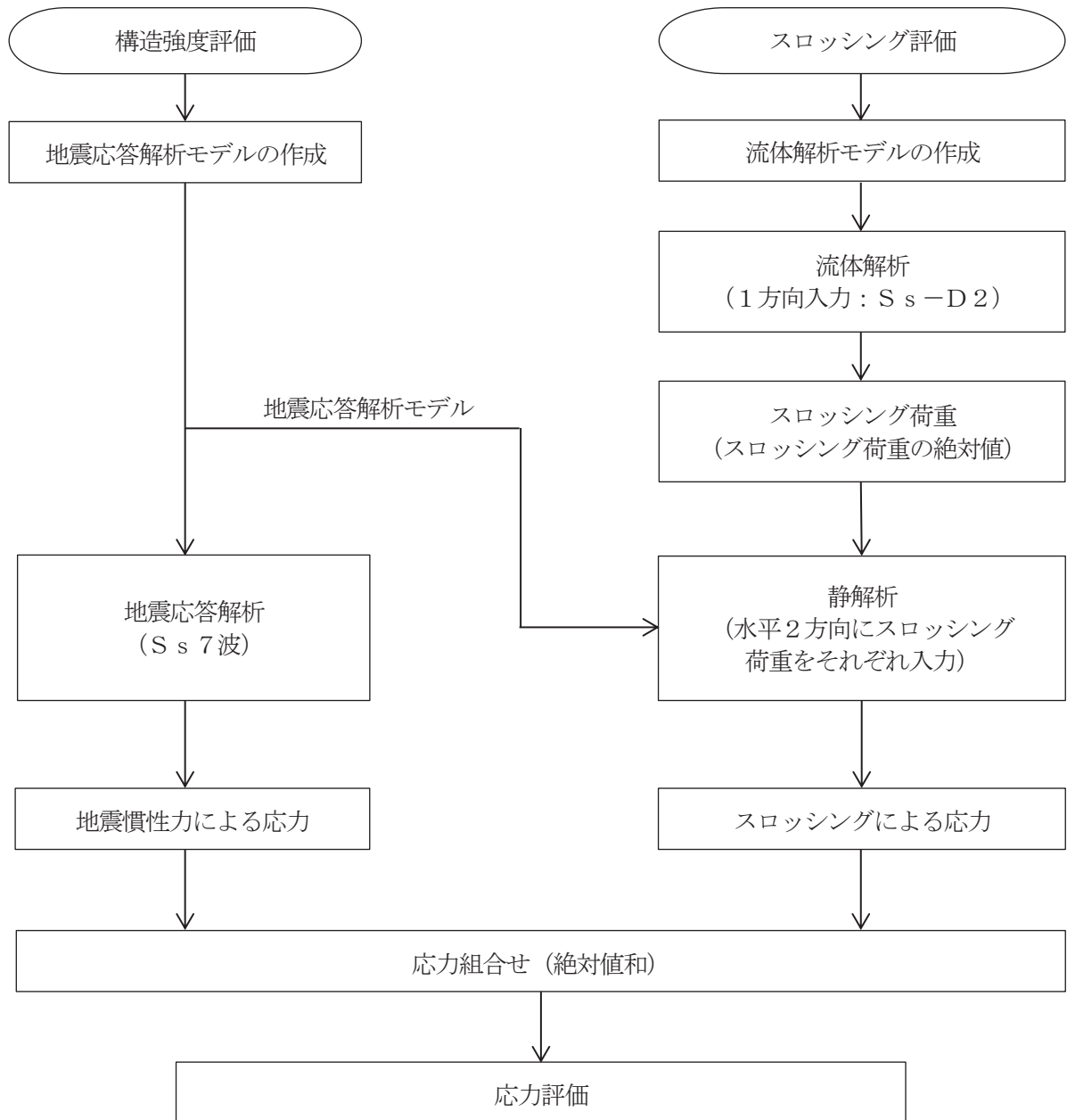


図3 スロッシング影響評価フロー (水平2方向考慮)

(2) 蒸気凝縮機能

既往知見では、サブマージェンス（水面からT-クエンチャ上端位置までの没水高さ）が  m 以上あれば蒸気凝縮機能が確保できることが確認されている。

スロッシングによる最低水位が3.0mに対してT-クエンチャ上端位置が約1.5mであることからサブマージェンスは約1.5mとなり、既往知見を踏まえると蒸気凝縮機能が確保される。

また、スロッシング評価に水平2方向入力した場合の水位を考慮した場合でも、サブマージェンスに余裕があることを確認した。

表5 スロッシングによる最低水位（通常運転水位条件\*1）

対象設備	水平地震動の入力方向	最低水位	サブマージェンス
T-クエンチャ	水平1方向	3.0m	1.5m
	水平2方向	2.84m*2	1.34m

注記\*1：DBの水位条件（3.6m）

\*2：「補足-600-11 サプレッションチェンバの耐震評価における内部水質量の考え方の変更等についての補足説明資料 別紙15 サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重及び有効質量の影響評価 4.水平2方向入力による影響」にて実施した流体解析における水位評価結果を示す。なお、水平2方向入力による影響検討で用いた解析モデルでは、サプレッションチェンバ補強（強め輪補強）を考慮していない違いがあるが、補強の有無による水位への影響は軽微である（別紙参照）。

## サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重等の算定

## 1. はじめに

サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング影響を評価するため、流体解析を行い、各設備に加わるスロッシング荷重及び T-クエンチャ位置の水位について算定する。本書では、流体解析の詳細について説明する。なお、本解析内容は、補足説明資料「補足-600-11 サプレッションチェンバの耐震評価における内部水質量の考え方の変更等についての補足説明資料別紙6」の解析モデル及び解析条件と同様である。

## 2. 流体解析方法

## 2.1 解析モデル

解析モデルを図1に、解析諸元を表1に示す。

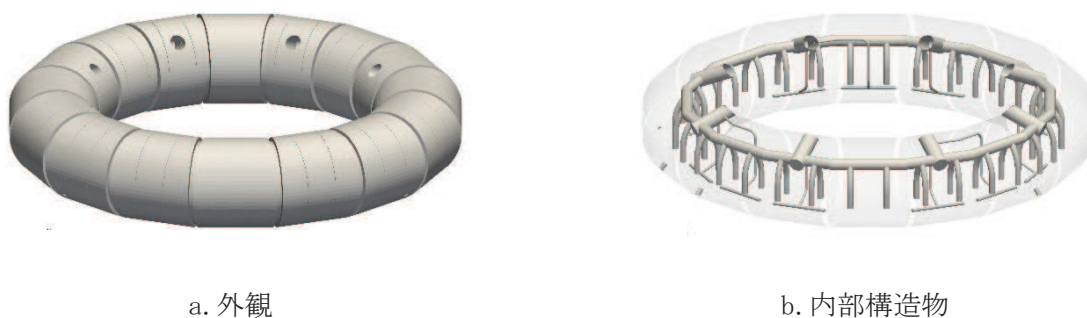


図1 解析モデル図

表1 解析諸元

項目	解析諸元
格子数	約 1200 万
格子幅	約 0.1cm～22cm

## 2.2 解析条件

解析条件を表2、基準地震動S<sub>s</sub>におけるサプレッションチェンバ設置床の応答加速度スペクトルを図2に示す。

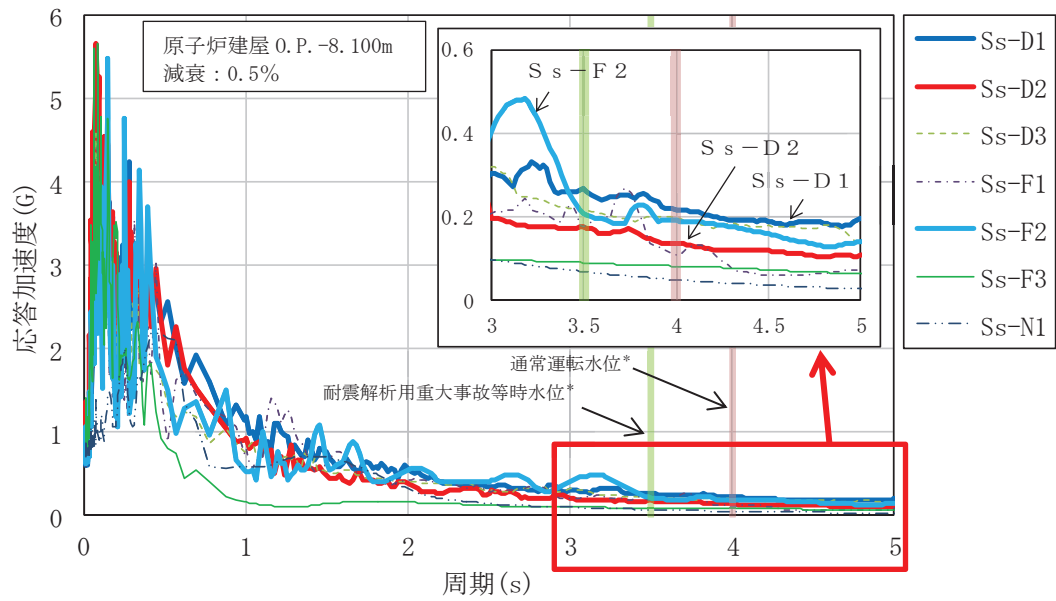
表2 解析条件

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 : O. P. -3, 800) 耐震解析用重大事故等時水位 (真空破壊装置下端水位 : O. P. -1, 514) *1
評価用地震動	スロッシング荷重の卓越周期帯で応答加速度が大きい基準地震動S <sub>s</sub> -D1 (水平方向と鉛直方向) *2に対する原子炉建屋O. P. -8.100mにおける建屋床応答
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	内部構造物のモデル化範囲：強め輪，ベントヘッド，ダウンカメラ，T-クエンチャ及びその配管，ECCS ストレーナ取付配管
解析条件	気相物性*3 動粘度：1.51×10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s 密度：1.205kg/m <sup>3</sup> 液相物性*3 動粘度：1.0038×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s 密度：998.2kg/m <sup>3</sup> 境界条件：全境界面で不透過滑りなし条件

注記\*1：重大事故等時水位よりも高い水位

\*2：「補足-600-11 サプレッションチェンバの耐震評価における内部水質量の考え方の変更等についての補足説明資料 別紙15 サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重及び有効質量の影響評価」における地震動による影響検討結果においてもS<sub>s</sub>-D1の条件でサプレッションチェンバに対するスロッシング荷重が最大となることを確認している。なお、地震動による影響検討で用いた解析モデルでは、サプレッションチェンバ補強（強め輪補強）をモデル化していないところに違いがあるが、地震動の違いによるスロッシング荷重の大小関係には、影響を与えない。

\*3：理科年表 2008 (20℃, 1気圧の値)



注記\*：各水位条件におけるサプレッションチェンバ内部水のスロッシングの卓越周期を表す。

図2 サプレッションチェンバ設置床の応答加速度スペクトル（水平方向，拡幅無し）

### 2.3 スロッシング荷重算定方法

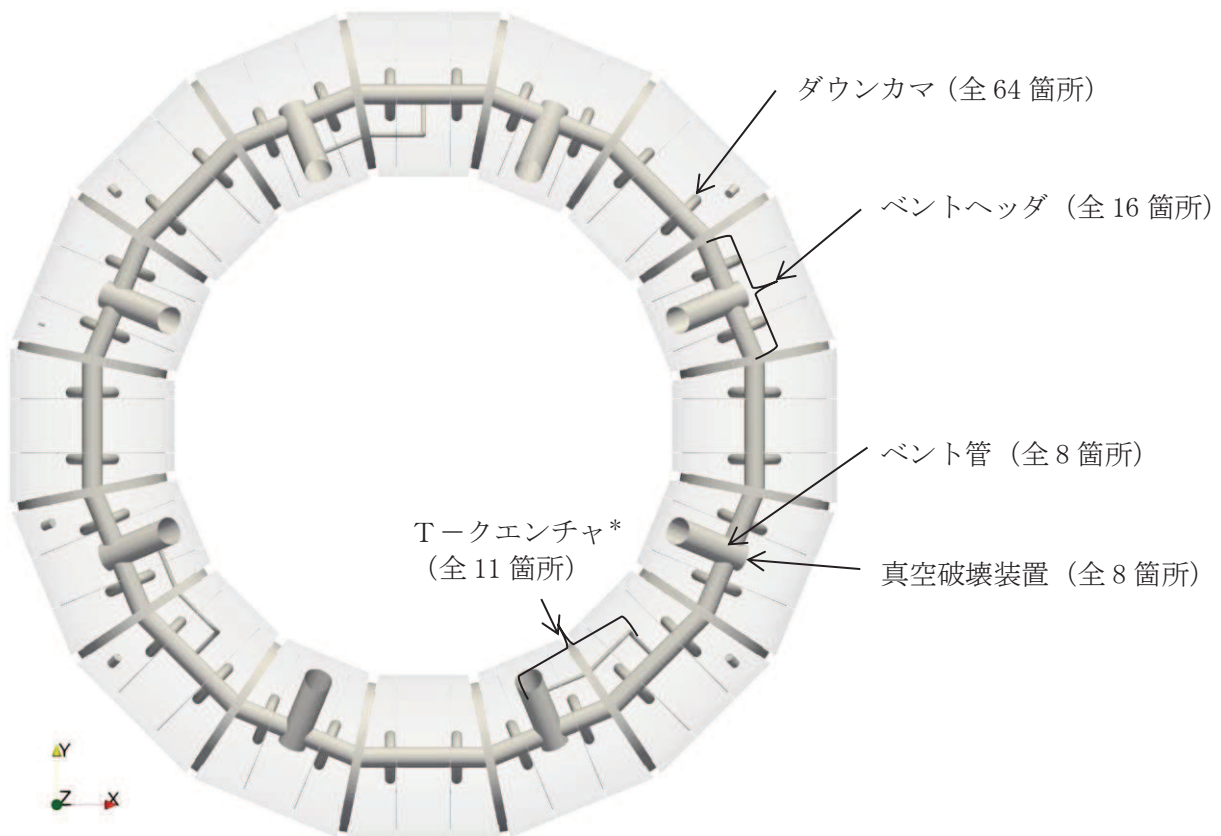
流体解析から求めるスロッシング荷重 $F$ は、影響検討を行う設備の表面 $S$ について、圧力 $p$ と表面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ の積を積分したものをを用い、下式で表される。

$$F = \oint_S npdS$$

ここで、上式の荷重 $F$ は、スロッシング荷重とサプレッションチェンバ内部水の有効質量による荷重が含まれるが、ここでは簡便に両者の荷重をスロッシング荷重として扱い、それに対する影響を検討する。

### 2.4 スロッシング荷重算定位置

スロッシング荷重算定位置について、図3に示す。



注記\*：Tークエンチャの荷重算定領域の詳細を図4に示す。

図3 スロッシング荷重算定位置

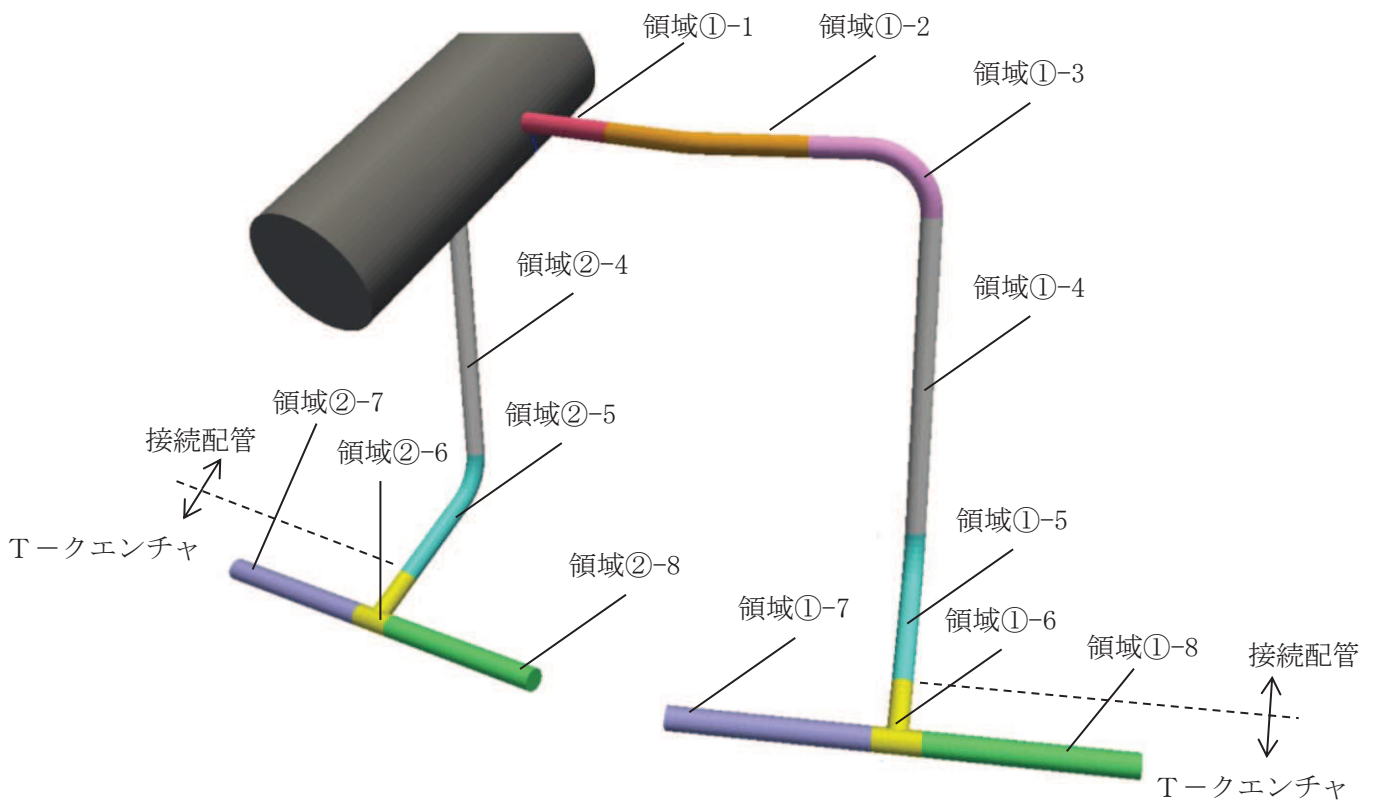


図4 T-クエンチャ（接続配管含む）の荷重算定領域

### 3. 解析結果

スロッシング解析から求めたスロッシング荷重の最大値を表3に、T-クエンチャの荷重算定領域毎の荷重を表4に、T-クエンチャ位置でのスロッシングによる最小水位を表5に、スロッシング荷重時刻歴及びT-クエンチャ位置での水位時刻歴を図5~11に示す。スロッシング荷重は、いずれもベクトルの絶対値で表す。また、水平2方向入力によるT-クエンチャ位置の最低水位も表5に合わせて示す。

表3 スロッシング荷重

対象設備	スロッシング荷重*1	
	通常運転水位条件*2	耐震解析用 重大事故等時水位条件*3
真空破壊装置（1箇所）		1.72kN*4
ダウンカマ（1本）	2.58kN	5.17kN
ベントヘッダ（1ベイ分）		1.25kN
ベント管（1本）		2.64kN
T-クエンチャ（1本）		3.76kN

注記\*1：スロッシング荷重のベクトルの絶対値を示す。

\*2：DBの水位条件（3.6m）

\*3：SAの水位条件（約5.9m）

\*4：真空破壊装置を詳細にモデル化していないため、ベント管先端部における最大圧力と、真空破壊装置（取付部のスリーブを含む）の表面積から簡便に算出。

表4 T-クエンチャの荷重算定領域毎の荷重値

荷重算定領域*1 (領域位置は、図4参照)	荷重 kN
領域①-1	0
領域①-2	0
領域①-3	0
領域①-4	0.16
領域①-5	1.17
領域①-6	1.38
領域①-7	2.09
領域①-8	2.06
総和	3.76*2

注記\*1：T-クエンチャ（接続配管含む）に加わるスロッシング荷重が最大となる配管について、代表評価をしており、図4の領域①の配管を評価対象としている。

\*2：荷重算定領域毎の最大値の合計値と荷重算定領域毎の荷重を各時刻で総和したものの最大値は、最大荷重発生時刻のずれ等により、値が異なるが、領域毎に荷重を入力しているため、総和値を影響評価に用いていない。



表5 スロッシングによる最低水位（通常運転水位条件\*1）

対象設備	解析モデルへの強め輪補強の考慮の有無	水平地震動の入力方向	最低水位
T-クエンチャ	無*2	水平1方向	3.08m
	無*2	水平2方向	2.84m
	有	水平1方向	3.0m

注記\*1：DBの水位条件（3.6m）

\*2：「補足-600-11 サプレッションチェンバの耐震評価における内部水質量の考え方の変更等についての補足説明資料 別紙15 サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重及び有効質量の影響評価 4. 水平2方向入力による影響」にて実施した流体解析における水位評価結果を示す。なお、水平2方向入力による影響検討で用いた解析モデルでは、サプレッションチェンバ補強（強め輪補強）を考慮していない違いがあるが、補強の有無による水位への影響は軽微である。

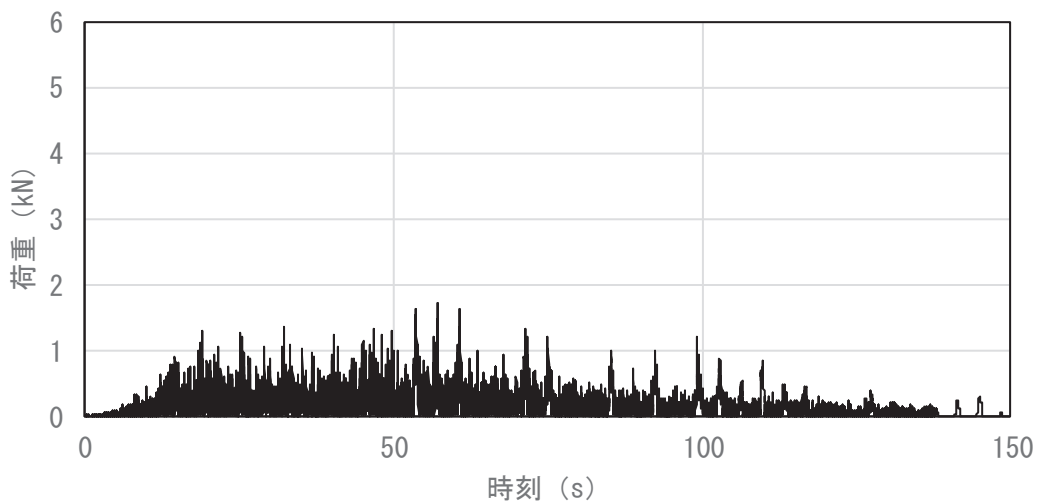


図5 真空破壊装置のスロッシング荷重時刻歴（耐震解析用重大事故等時水位）

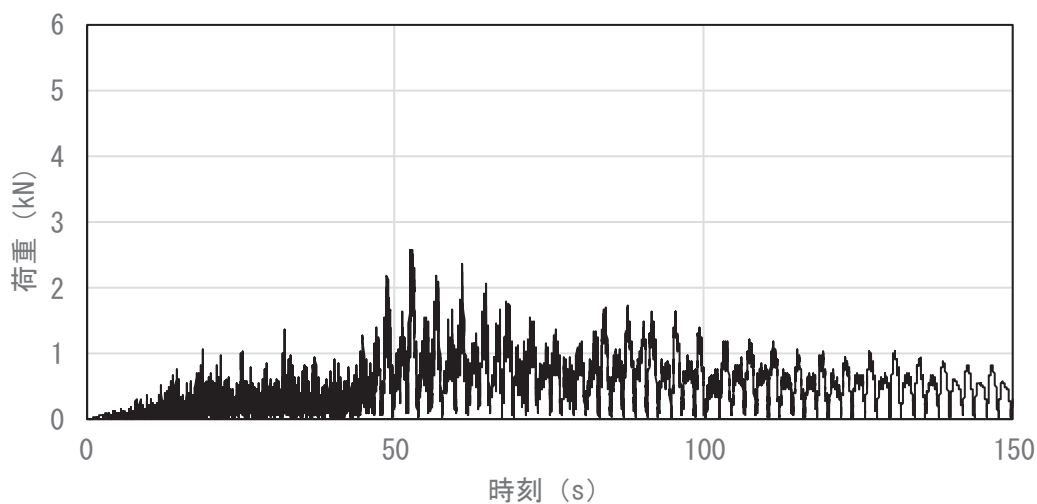


図6 ダウンカマのスロッシング荷重時刻歴（通常運転時水位）

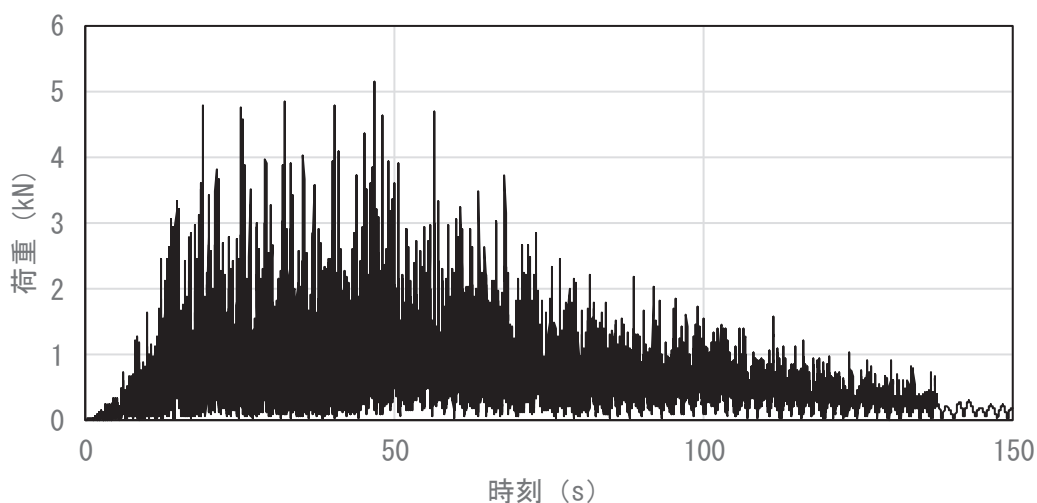


図7 ダウンカマのスロッシング荷重時刻歴（耐震解析用重大事故等時水位）

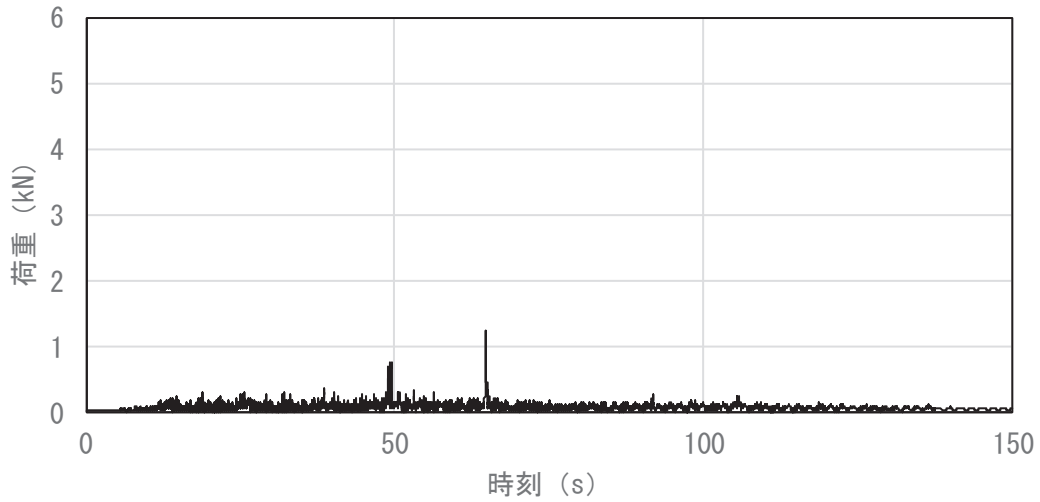


図8 ベントヘッドのスロッシング荷重時刻歴（耐震解析用重大事故等時水位）

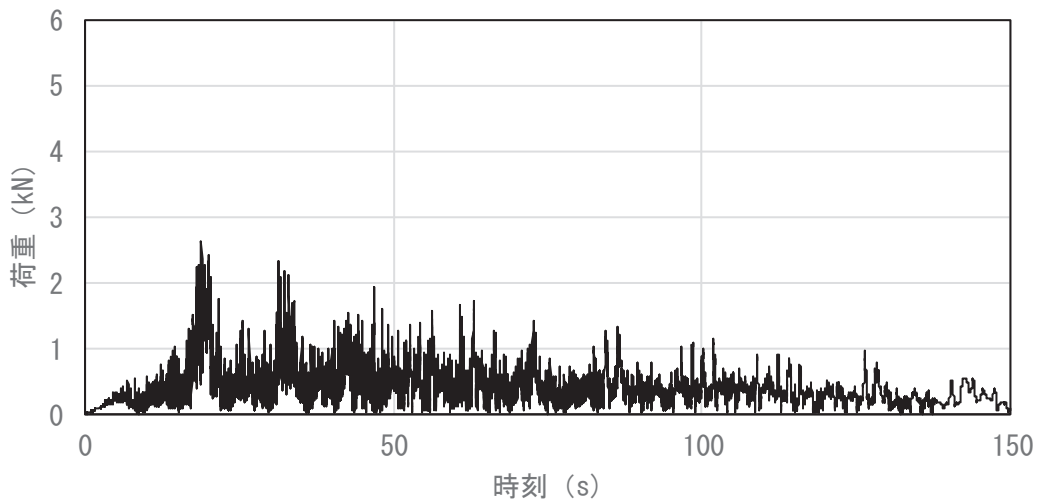


図9 ベント管のスロッシング荷重時刻歴（耐震解析用重大事故等時水位）

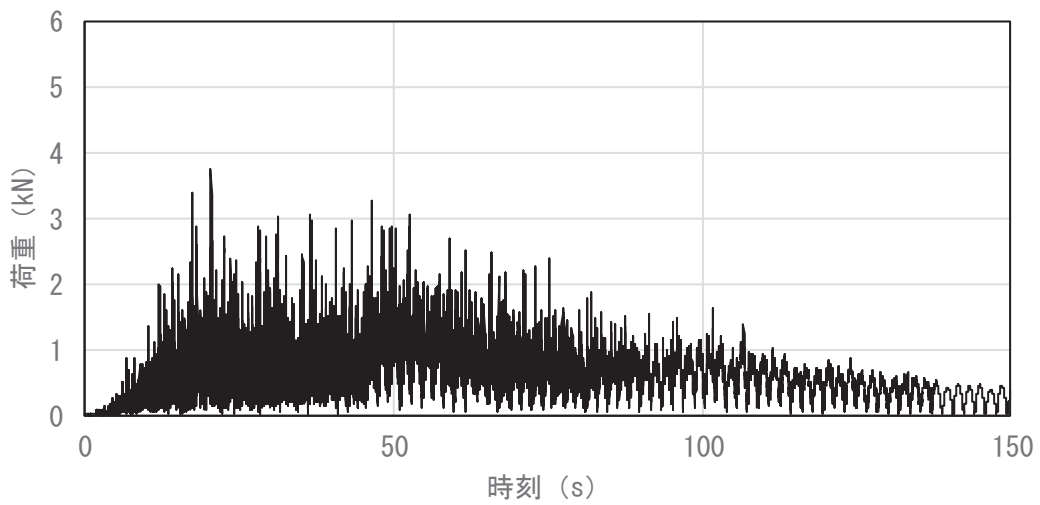


図10 Tークエンチャのスロッシング荷重時刻歴（耐震解析用重大事故等時水位）

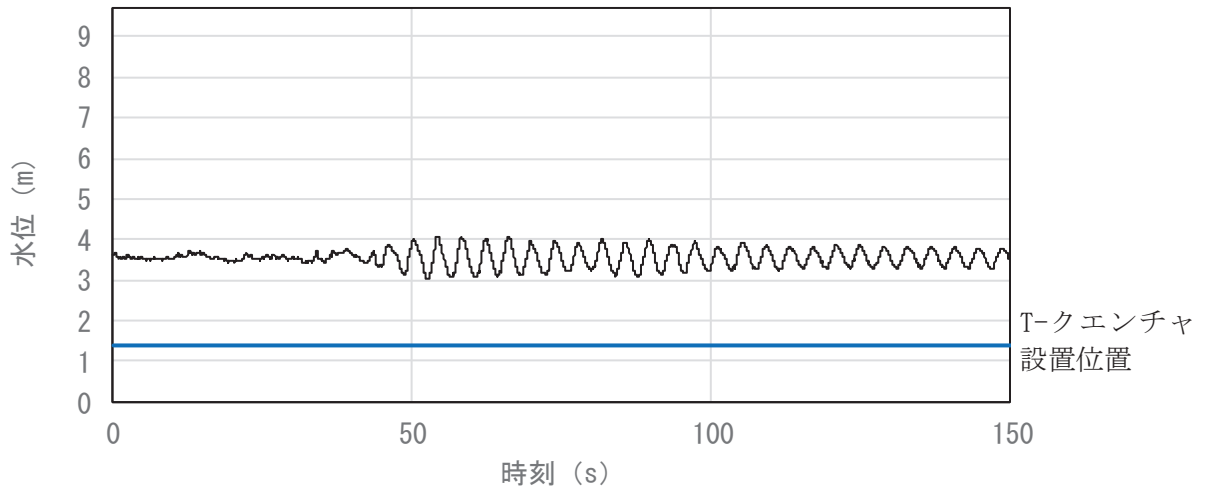


図 11 T-クエンチャ位置の水位時刻歴 (通常運転水位)