

本資料のうち、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。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7-031 改4
提出年月日	2020年9月18日

## 原子炉格納容器の地震時のスロッシングに対する考え方について

### 1. 概要

原子炉格納容器のサプレッションチェンバは原子炉圧力容器等の冷却に必要な水（以下「プール水」という。）を保有している特徴から、地震時にプール水によるスロッシングが生じる。そのため、柏崎刈羽原子力発電所7号機の原子炉格納容器（RCCV型）に対するスロッシングによる影響を確認する必要がある。

建屋機器連成の地震応答解析では、ベント管の内部水質量を原子炉本体基礎の質点に、それ以外のプール水質量を原子炉建屋の質点に固定水として付加したモデルを用いている。

これらを踏まえ、今回の工事計画における地震応答解析方法の考え方や原子炉格納容器と内部構造物への影響について以下に示す。

### 2. MARK-II型原子炉格納容器のスロッシング影響評価

原子炉格納容器の地震応答解析は、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987(日本電気協会)に基づき、地盤、原子炉建屋及び原子炉圧力容器を連成したモデルで評価しており、サプレッションチェンバのプール水質量の全てを固定質量とみなしている。一方、スロッシングという実現象を考慮する場合には、図1に示すように揺動しない部分は固定質量、揺動する部分は自由質量となると考えられる。

上記のとおり地震応答解析と実現象としてのスロッシングでは水質量の取り扱い方法に相違があるものの、既往の試験\*でスロッシングの影響を検討しており、以下のことが確認されている。

- ・縮尺した MARK-II 型原子炉格納容器を用いてスロッシングの影響を確認し、スロッシングにより発生する応力（動水圧）は、図2より水による慣性力の [ ] 程度のオーダーである。
- ・スロッシングの固有振動数は図2より1次～3次で [ ] Hz～ [ ] Hz であり、原子炉格納容器(水有条件)の固有振動数は [ ] Hz～ [ ] Hz であり、共振しない。

図2に既往の試験に用いた試験体を示す。

注記 \* : 原子力発電施設 信頼性実証実験の現状 ((財) 原子力発電技術機構)

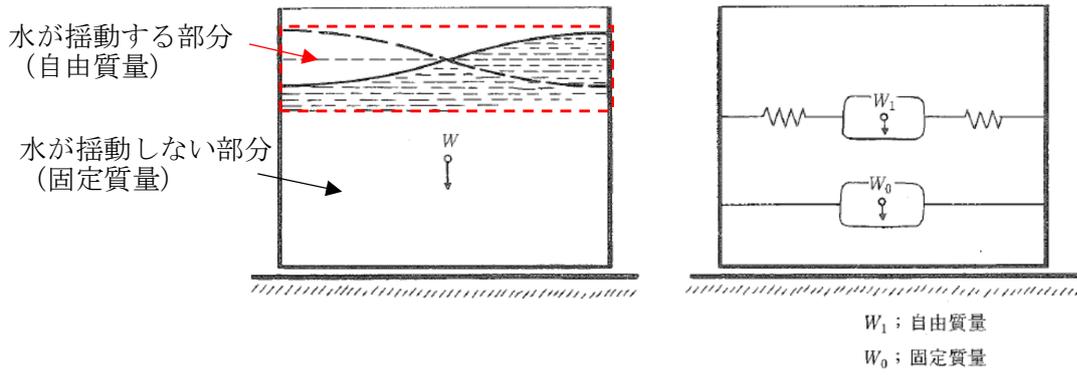


図1 スロッシングの解析モデル\*

注記 \* : 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987(日本電気協会)

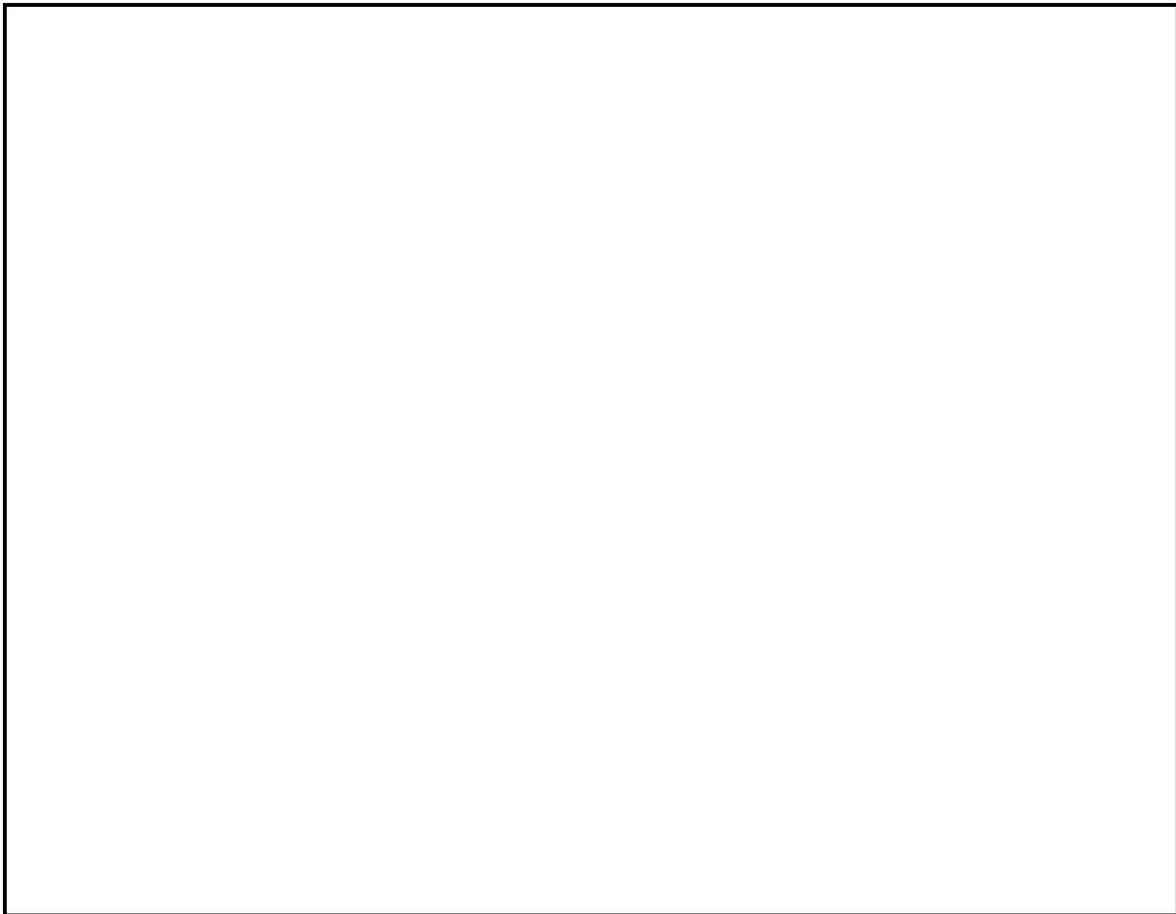


図2 既往の試験概要および結果

3. 柏崎刈羽原子力発電所7号機の原子炉格納容器(RCCV型)に対するスロッシング評価  
 既往の試験において、スロッシングの影響が小さいことを確認したが、柏崎刈羽原子力発電所7号機の原子炉格納容器は既往試験の試験体(Mark-II型)と型式が異なること、基準地震動Ssと既往試験の地震も異なることから、その影響について確認する。

### 3.1 固有周期の影響

単純円筒モデルのハウスナー理論(USAEC, Nuclear Reactors and Earthquakes, TID-7024, Chapter 6, Appendix F, 1963.8)に基づいて、スロッシングの固有周期を算出する。

単純円筒モデルのハウスナー理論を用いることで、スロッシングに対して障害物として働く原子炉本体の基礎が無視され、原子炉格納容器に作用する動水圧などを保守的に算出できる。また、ハウスナー理論はスロッシングを考慮するための方法としてJEA G4601-1987で引用もされている。

記号	記号の説明	値	単位
h	S/Cの水位	<input type="text"/>	m
R	S/Cの半径(外側)	<input type="text"/>	m
g	重力加速度	9.80665	m/sec <sup>2</sup>
ω	スロッシング固有円振動数	—	rad/sec
T	スロッシング固有周期	—	sec

ハウスナー理論より、スロッシングの固有円振動数は以下の式より算出できる。

$$\omega^2 = \frac{1.84g}{R} \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1.84g}{R} \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right)}$$

$$= \sqrt{\frac{1.84 \cdot 9.80665}{\text{} \tanh\left(1.84 \frac{\text{}}{\text{}\right)}$$

$$= \text{} \text{ rad/sec}$$

よって、スロッシングの固有周期は以下となる。

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\text{}} = \text{} \text{ sec}$$

原子炉格納容器の固有周期と比較した結果を表1に示す。表1で示すように原子炉格納容器はスロッシング時において共振しないことを確認した。

表 1 固有周期の比較

	スロッシングの固有周期	原子炉格納容器の固有周期*1
固有周期(秒) (H. W. L 時(水位 7.1m))		

注記 \*1：V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書より，建屋-地盤連成モデルのうち一次モード固有周期が最長（スロッシングの固有周期に近い）の値を記載

### 3.2 スロッシングによる荷重の影響

#### 3.2.1 スロッシングによる荷重影響検討設備

サプレッションチェンバ内のプール水に接している設備及びスロッシングによる荷重影響検討の必要有無について，表 2 に示す。

表 2. スロッシングによる荷重影響検討設備

設備	影響検討	理由
原子炉格納容器	要	—
原子炉本体の基礎	要	—
アクセストンネル	不要	本文に記載のとおり，追加の考慮は不要
ベント管	要	—
クエンチャ	不要	スロッシングの影響が大きい水面から離れた設備のため
ストレーナ	不要	

RCCV 型特有の内部構造物であり，サプレッションチェンバプール水に下部が浸かっている下部ドライウェルアクセストンネル（以下「アクセストンネル」という。）については，建設時からサプレッションチェンバプール水の揺動による荷重影響を考慮した評価を行っている。既工認の設計条件の浮力の項に記載の通り，考慮の仕方としては，アクセストンネルが完全水没した浮力による荷重をスロッシングによる荷重とみなし，地震による荷重を組み合わせた評価を行っている。ただし，アクセストンネルの評価上，浮力が厳しい側に作用するとは限らないため，浮力を組み合わせない評価も行っている。本申請のアクセストンネルの耐震性評価（V-2-9-4-8-1 下部ドライウェルアクセストンネルの耐震性についての計算書）でも既工認と同様の組合せを考慮することでスロッシングによる荷重影響を考慮した評価を実施している。また，アクセストンネルは通常下部の 1/3 程度が水に沈んでおり（水に接している），スロッシング時の気中への露出もわずかなため，スロッシング時にプール水がアクセストンネルに衝突する際の衝撃荷重は考慮する必要はないと考える。以上より，この項ではアクセストンネルの影響確認は対象外とする。

表 2 より，原子炉格納容器並びに内部構造物であるベント管及び原子炉本体の基礎を影響検討設備として，スロッシングによる荷重の設備への影響を次項以降で確認する。

### 3.2.2 影響検討設備へのスロッシングによる荷重影響

スロッシングによる荷重の影響は3.1項に示すように長周期領域が卓越する地震動を受けた時に共振し、プール水表面のスロッシングによるモーメントが大きくなる。一方、原子炉格納容器本体は固有周期が短いため、スロッシング時のプール水の固有周期と共振せず、短周期領域が卓越する地震動を受けた時にプール水質量の地震慣性力により原子炉格納容器に与えるモーメントが大きくなる。このため、長周期領域が卓越する基準地震動 Ss-7 のときにスロッシングによるモーメントが大きくなり、短周期領域が卓越する基準地震動 Ss-2 のときに地震慣性力によるモーメントが大きくなる。

また、基準地震動 Ss-7 と基準地震動 Ss-2 は重畳しないことから、設備への影響検討は、基準地震動 Ss-7 と基準地震動 Ss-2 を区別して実施する。

さらに、現状の地震応答解析ではプール水を100%固定質量で解析していることから現状の取り扱いの妥当性を確認する。現状の取り扱いの妥当性は、プール水を100%固定質量とするときのモーメント（以下「100%固定質量によるモーメント」という。）とプール水を固定質量+自由質量とするときのモーメント（以下「スロッシングによるモーメント（固定質量+自由質量）」という。）と比較し、プール水を100%固定質量とするときのモーメントの方が大きいことを確認する。このことにより、現状の取り扱いの方が保守的であることを確認する。

上記の考えに基づき、スロッシングによる荷重（モーメント）の影響評価を実施した結果を表3に示す。

表3 スロッシングによる荷重（モーメント）影響評価

対象設備	スロッシングによる モーメント*1 (kN・m)		100%固定質量に よる モーメント*2 (kN・m)	本申請の地震に よる モーメント*2 (kN・m)
	Ss-2	Ss-7	包絡波*3	包絡波*3
原子炉格納 容器				
ベント管				
原子炉本体 の基礎				

注記\*1：プール水質量を固定質量と自由質量に分けた場合の評価結果

\*2：プール水質量の全てを固定質量とみなした場合の評価結果

\*3：基準地震動 Ss として選定している 8 つの波を包絡するもの

\*4：①～⑫は以下の荷重を示す。（添付資料 2 に算出過程を示す）

- ①地震動 Ss-2 によるプール水質量の地震慣性力（固定質量）モーメント
- ②地震動 Ss-2 によるプール水表面のスロッシング（自由質量）モーメント
- ③地震動 Ss-7 によるプール水質量の地震慣性力（固定質量）モーメント
- ④地震動 Ss-7 によるプール水表面のスロッシング（自由質量）モーメント
- ⑤原子炉格納容器の 100%固定質量によるモーメント
- ⑥V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」より本申請の原子炉格納容器の地震モーメント（参考）
- ⑦地震動 Ss-2 によるベント管のスロッシングモーメント
- ⑧地震動 Ss-7 によるベント管のスロッシングモーメント
- ⑨ベント管の本申請の地震によるモーメント
- ⑩地震動 Ss-2 による原子炉本体の基礎のスロッシングモーメント
- ⑪地震動 Ss-7 による原子炉本体の基礎のスロッシングモーメント
- ⑫V-2-2-4「原子炉本体の基礎の地震応答計算書」より本申請の原子炉本体の基礎の地震モーメント

#### (1) 原子炉格納容器へのスロッシング影響

原子炉格納容器へのスロッシング影響については、プール水を 100%固定質量とみなした方が保守的な取り扱いになることを確認した。確認の詳細を以下に示す。

原子炉格納容器では短周期領域が卓越する基準地震動 Ss-2 は、プール水質量の地震慣性力（固定質量）によるモーメント(①)が大きくなるものの、プール水表面のスロッシング（自由質量）によるモーメント(②)は小さくなる。また、長周期領域が卓越する基準地震動 Ss-7 は、プール水表面のスロッシング（自由質量）によるモーメント(④)が大きくなるものの、プール水質量の地震慣性力（固定質量）によるモーメント(③)が小さくなる。

このとき、100%固定質量によるモーメント(⑤)とスロッシングによるモーメント（固定質量+自由質量）(③+④)を比較し、100%固定質量によるモーメントの方が大きいことを確認した(③+④<⑤)。これにより、現状のプール水を 100%固定質量とみなして評価する方法は妥当であるといえる。なお、100%固定質量によるモーメント(⑤)の荷重の算出は、スロッシングによる荷重の算出と同様にするため、水質量に原子炉建屋基礎盤の加速度(1.0ZPA)を考慮して算出した。

#### (2) ベント管及び原子炉本体の基礎へのスロッシング影響

ベント管及び原子炉本体の基礎へのスロッシング影響については地震とスロッシングによる荷重のピークが重畳しないこと、および本申請の地震によるモーメントに対して、保守的に計算したスロッシングによるモーメントが非常に小さく結果に影響を与えないことを確認した。確認の詳細を以下に示す。

ベント管及び原子炉本体の基礎については、ハウスナー理論で算出した原子炉格納容器に作用する最大動水圧がそれぞれの投影面積に作用すると保守的に仮定し、動水圧×投影面積より荷重を算出して、モーメントアーム（例．動水圧が等分布荷重で作用すると仮定したため、ベント管なら水平吐出管突出し長さの 1/2）を乗じることでスロッシングによるモーメント（⑦及び⑧）を算出する。地震による荷重のピークが短周期であり、スロッシングによる荷重のピークと重畳しないことから、地震によるモーメントを超えることはないと考えられる。さらに、原子炉本体の基礎は基準地震動 Ss-2 が発生した際(⑩)、スロッシングによる最大のモーメントが重畳したとしても、本申請の地震によるモーメント(⑫)に対して 0.33%であり、原子炉本体の基礎の構造健全性に対して影響を与えない。

### 3.3 スロッシングによる蒸気凝縮性能への影響

波高の算出については、ハウスナー理論より実機形状である二重円筒構造のスロッシング現象を考慮可能な既往の文献（多重円筒型分割タンクの耐震設計（吉田ら，甲陽建設工業（株））に基づき地震時の波高を算出する。算出の詳細を以下に示す。

記号	記号の説明	値	単位
h	S/C の水位	<input type="text"/>	m
R	S/C の半径（外側）	<input type="text"/>	m
b	S/C の半径（内側）	<input type="text"/>	m
g	重力加速度	9.80665	m/sec <sup>2</sup>
S <sub>A1</sub>	スロッシング固有周期における震度（Ss-2）	<input type="text"/>	—
S <sub>A1</sub>	スロッシング固有周期における震度（Ss-7）	<input type="text"/>	—
ω <sub>1</sub>	スロッシング固有円振動数	—	rad/sec
T	スロッシング固有周期	—	sec
η <sub>max</sub> (R)	スロッシング波高	—	m

ξ<sub>1</sub>、Q<sub>1</sub>、G<sub>1</sub>(R)は、下表に記載の値を線形補完して求めた値

--

出典：多重円筒型分割タンクの耐震設計

既往文献より Ss-2 の場合の波高は以下の式より算出する。

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g}{R} \cdot \xi_1 \cdot \tanh\left(\xi_1 \frac{h}{R}\right)}$$

$$= \sqrt{\frac{9.80665}{\text{}} \cdot \text{} \cdot \tanh\left(\text{} \cdot \frac{\text{}}{\text{}}\right)}$$

$$\left(\text{ここで、} K = \frac{b}{R} = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{}, \xi_1 = \text{}\right)$$

$$= \text{} \text{rad/sec}$$

よって、既往文献（二重円筒）によるスロッシングの固有周期は以下となる。

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}} \text{sec}$$

算出した固有周期での Ss-2 地震による震度（添付資料 1 参照）を用いて波高を計算する。

$$S_{A1} = \boxed{\phantom{000}} g = \boxed{\phantom{000}} \cdot 9.80665 = \boxed{\phantom{000}} \text{m/sec}^2 \text{ (Ss - 2)}$$

$$\begin{aligned} \eta_{max}(R) &= \frac{R}{g} \cdot \omega_1 \cdot Q_1 \cdot G_1(R) \cdot S_V \\ &= \frac{R}{g} \cdot Q_1 \cdot G_1(R) \cdot S_{A1} \quad (\text{ここで、} \omega_1 \cdot S_V = S_{A1}) \\ &= \frac{\boxed{\phantom{000}}}{9.80665} \cdot \boxed{\phantom{000}} \cdot \boxed{\phantom{000}} \cdot \boxed{\phantom{000}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{ここで、} K = \frac{b}{R} = \frac{\boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}}, Q_1 = \boxed{\phantom{000}}, G_1(R) = \boxed{\phantom{000}}) \\ S_{A1} = \boxed{\phantom{000}} \\ = \boxed{\phantom{000}} \text{m} \end{aligned}$$

Ss-2 と同様に Ss-7 の場合の波高は以下の式より算出する。

$$S_A = \boxed{\phantom{000}} g = \boxed{\phantom{000}} \cdot 9.80665 = \boxed{\phantom{000}} \text{m/sec}^2 \text{ (Ss - 7)}$$

$$\begin{aligned} \eta_{max}(R) &= \frac{R}{g} \cdot Q_1 \cdot G_1(R) \cdot S_{A1} \\ &= \frac{\boxed{\phantom{000}}}{9.80665} \cdot \boxed{\phantom{000}} \cdot \boxed{\phantom{000}} \cdot \boxed{\phantom{000}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{ここで、} K = \frac{b}{R} = \frac{\boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}}, Q_1 = \boxed{\phantom{000}}, G_1(R) = \boxed{\phantom{000}}) \\ S_{A1} = \boxed{\phantom{000}} \\ = \boxed{\phantom{000}} \text{m} \end{aligned}$$

算出した地震時の波高を表 3 に示すとともに波高に伴う原子炉格納容器内の影響を図 3 に示す。スロッシング時の波高によって、水没が要求される機器のうち最も高い位置に設置されているベント管の上端であっても露出しないことを確認した。

表 3 地震の波高

	Ss-2	Ss-7
波高(m)	\boxed{\phantom{000}}	

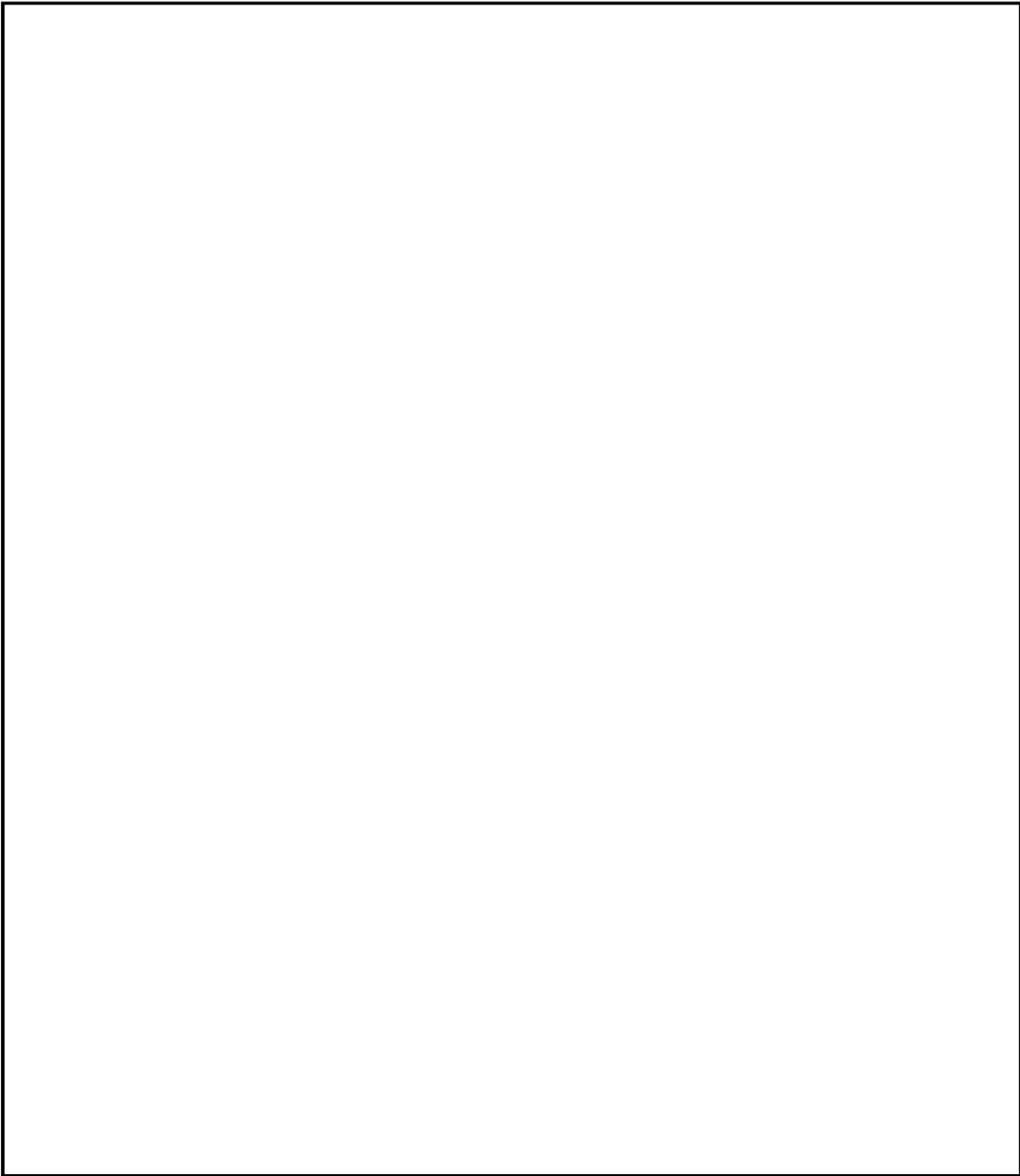


図3 スロッシングによる波高の影響

#### 4. まとめ

RCCV 型はサプレッションチェンバにプール水を保有するという特徴を踏まえ、スロッシングによる影響を確認した。確認した結果を以下に示す。

- ・表 1 より、原子炉格納容器とスロッシングの固有周期は大きく離れているため、原子炉格納容器はスロッシング時において共振しないことを確認した。
- ・スロッシングによる荷重の影響を確認した結果  
-原子炉格納容器では基準地震動  $S_s$  の固有周期の長い波 ( $S_s$ -7) および短い波 ( $S_s$ -2) それぞれのスロッシングによるモーメントを算出し、100%固定質量によるモーメ

ントと比較したところ、100%固定質量によるモーメントに対してスロッシングによるモーメントは小さいため、現状のプール水を100%固定質量として取り扱うことの妥当性を確認した。

-ベント管及び原子炉本体の基礎では、スロッシングによるモーメントは地震によるモーメントより小さいことに加え、固有周期のずれにより荷重のピークは重畳しないため、スロッシングによる影響はないことを確認した。

-アクセストンネルについては建設時よりスロッシングの影響を考慮した評価を行っており、本申請においても建設時と同じように浮力を用いてスロッシングの影響を考慮していることを確認した。

- ・スロッシングによる蒸気凝縮性能への影響はスロッシングが発生してもベント管やクエンチャが露出することはないため影響がないことを確認した。

以上より、柏崎刈羽原子力発電所7号機のサブプレッションチェンバプール水のスロッシングによる影響は、構造健全性及び蒸気凝縮性能に対して影響ないことを確認した。

プラント名 : 柏崎刈羽原子力発電所第7号機  
 構造物名 : 原子炉建屋  
 方向 : NS方向  
 波形名 : 標準地震動Ss(Ss-1~Ss-8)  
 標高 : T. M. S. L. -8.200m  
 減衰 : 0.5 (%)  
 基本ケース

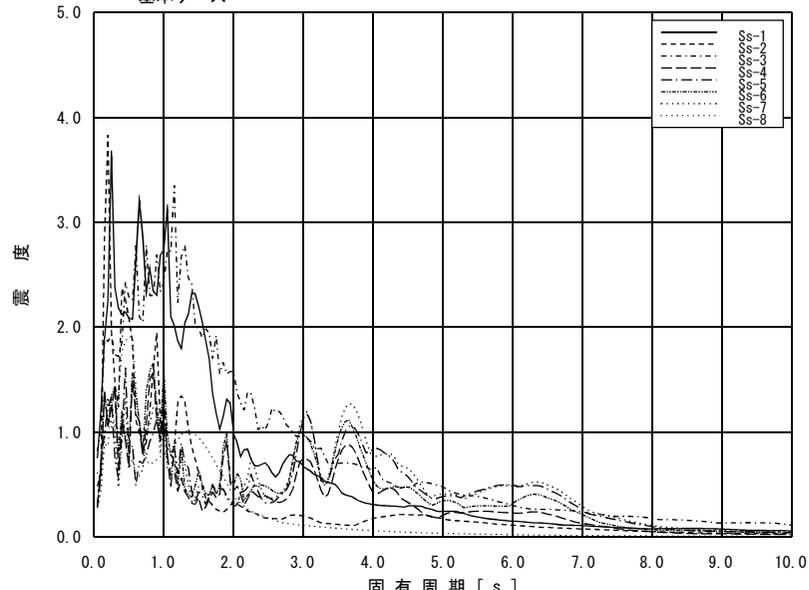


図3 - 1 応答スペクトル

設計用応答スペクトル デジタル値

周期 [s]	震度																
0.050	0.83	0.800	2.57	1.700	1.71	2.850	1.00	3.850	1.03	4.850	0.51	5.950	0.50	7.150	0.24	8.900	0.14
0.065	0.90	0.850	2.35	1.750	1.93	2.900	0.96	3.900	0.92	4.900	0.50	6.000	0.50	7.200	0.23	8.950	0.14
0.100	1.21	0.855	2.34	1.800	1.56	2.918	0.97	3.947	0.83	4.950	0.50	6.050	0.49	7.290	0.22	9.000	0.14
0.119	1.46	0.900	2.69	1.850	1.67	2.950	1.07	3.950	0.83	5.000	0.48	6.085	0.48	7.300	0.22	9.100	0.14
0.150	2.84	0.926	2.51	1.900	1.56	3.000	1.17	4.000	0.84	5.050	0.46	6.100	0.49	7.350	0.21	9.150	0.14
0.200	3.84	0.950	2.69	1.950	1.58	3.050	1.20	4.050	0.85	5.100	0.44	6.150	0.50	7.400	0.21	9.200	0.14
0.224	2.93	1.000	2.74	2.000	1.58	3.100	1.12	4.100	0.84	5.150	0.43	6.200	0.51	7.450	0.20	9.250	0.14
0.250	3.64	1.050	3.13	2.050	1.38	3.105	1.10	4.150	0.81	5.200	0.42	6.250	0.52	7.500	0.20	9.300	0.14
0.300	2.38	1.069	2.73	2.100	1.28	3.150	0.96	4.187	0.79	5.250	0.41	6.300	0.53	7.550	0.20	9.350	0.14
0.350	2.19	1.100	2.73	2.150	1.21	3.175	0.85	4.200	0.80	5.300	0.40	6.350	0.53	7.650	0.20	9.400	0.14
0.389	2.14	1.150	3.36	2.200	1.38	3.200	0.85	4.250	0.80	5.326	0.40	6.400	0.53	7.750	0.20	9.450	0.14
0.400	2.38	1.200	2.24	2.250	1.37	3.250	0.85	4.300	0.77	5.350	0.41	6.450	0.51	7.850	0.19	9.500	0.14
0.438	2.29	1.250	2.68	2.300	1.24	3.300	0.78	4.350	0.71	5.400	0.42	6.500	0.50	7.950	0.19	9.550	0.14
0.450	2.43	1.300	2.78	2.350	1.03	3.350	0.71	4.400	0.68	5.450	0.43	6.550	0.49	8.100	0.17	9.600	0.14
0.500	2.29	1.350	2.47	2.400	1.07	3.407	0.71	4.450	0.68	5.500	0.44	6.600	0.47	8.150	0.17	9.700	0.14
0.550	2.27	1.400	2.42	2.450	1.02	3.450	0.85	4.500	0.66	5.550	0.45	6.650	0.45	8.200	0.17	9.800	0.13
0.600	2.78	1.412	2.33	2.500	1.10	3.500	1.02	4.550	0.62	5.600	0.46	6.700	0.43	8.250	0.17	9.900	0.13
0.606	2.71	1.450	2.32	2.550	1.24	3.550	1.15	4.600	0.58	5.650	0.47	6.750	0.41	8.300	0.17	9.950	0.12
0.650	3.21	1.500	2.21	2.600	1.20	3.600	1.23	4.650	0.54	5.700	0.48	6.800	0.38	8.400	0.17	10.000	0.12
0.700	2.86	1.550	2.06	2.650	1.20	3.650	1.27	4.658	0.53	5.750	0.49	6.900	0.34	8.450	0.17		
0.732	2.52	1.580	1.96	2.700	1.16	3.700	1.27	4.700	0.53	5.800	0.50	7.000	0.29	8.500	0.16		
0.750	2.79	1.600	1.99	2.750	1.08	3.750	1.22	4.750	0.53	5.850	0.50	7.050	0.27	8.600	0.16		
0.782	2.48	1.650	1.94	2.800	1.04	3.800	1.14	4.800	0.52	5.900	0.50	7.100	0.25	8.850	0.15		

プラント名 : 柏崎刈羽原子力発電所第7号機  
 構造物名 : 原子炉建屋  
 方向 : EW方向  
 波形名 : 標準地震動Ss (Ss-1~Ss-8)  
 標高 : T. M. S. L. -8.200m  
 減衰 : 0.5 (%)  
 基本ケース

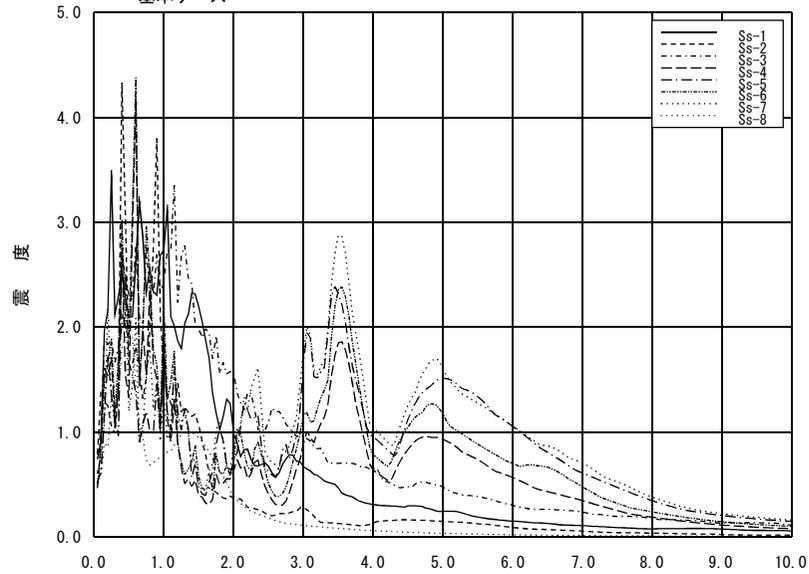


図3 - 2 応答スペクトル

設計用応答スペクトル デジタル値

周期 [s]	震度																
0.050	0.80	0.800	2.57	1.700	1.71	2.650	1.20	3.750	1.95	5.000	1.60	6.350	0.90	7.650	0.49	9.850	0.17
0.100	1.39	0.830	2.44	1.750	1.93	2.700	1.16	3.800	1.75	5.050	1.54	6.400	0.88	7.750	0.46	10.000	0.17
0.119	1.36	0.850	2.75	1.800	1.56	2.750	1.08	3.850	1.53	5.077	1.51	6.450	0.88	7.800	0.44		
0.129	1.53	0.900	3.80	1.850	1.67	2.800	1.04	3.900	1.30	5.100	1.51	6.500	0.87	7.850	0.42		
0.150	1.97	0.936	2.58	1.900	1.56	2.844	1.01	3.950	1.08	5.150	1.49	6.550	0.86	7.900	0.41		
0.200	2.18	0.950	2.69	1.950	1.58	2.850	1.02	4.000	1.05	5.200	1.46	6.600	0.85	8.100	0.36		
0.250	3.45	1.000	2.74	2.000	1.58	2.900	1.15	4.050	1.01	5.250	1.43	6.650	0.83	8.200	0.34		
0.300	2.13	1.050	3.12	2.050	1.38	2.950	1.46	4.150	0.95	5.300	1.41	6.700	0.81	8.350	0.31		
0.350	2.30	1.069	2.73	2.100	1.28	3.000	1.76	4.200	0.91	5.350	1.40	6.800	0.76	8.500	0.28		
0.366	2.37	1.100	2.73	2.130	1.24	3.050	2.01	4.250	0.88	5.400	1.39	6.900	0.74	8.600	0.27		
0.400	4.33	1.150	3.36	2.150	1.34	3.100	1.93	4.300	0.88	5.450	1.37	6.950	0.72	8.650	0.26		
0.450	3.07	1.200	2.24	2.171	1.29	3.150	1.60	4.350	0.99	5.500	1.34	7.000	0.71	8.800	0.24		
0.473	2.42	1.250	2.68	2.200	1.38	3.200	1.55	4.450	1.18	5.550	1.31	7.050	0.69	8.850	0.24		
0.500	2.31	1.300	2.78	2.239	1.38	3.250	1.63	4.500	1.27	5.600	1.28	7.100	0.67	8.900	0.24		
0.516	2.29	1.350	2.47	2.250	1.42	3.300	1.69	4.550	1.33	5.650	1.24	7.150	0.65	9.250	0.21		
0.550	3.11	1.400	2.42	2.300	1.52	3.350	1.98	4.600	1.38	5.700	1.20	7.200	0.63	9.400	0.20		
0.600	4.38	1.412	2.33	2.350	1.62	3.400	2.41	4.650	1.48	5.727	1.18	7.250	0.60	9.450	0.19		
0.625	2.92	1.450	2.32	2.400	1.22	3.450	2.70	4.700	1.55	5.850	1.13	7.300	0.58	9.500	0.19		
0.650	3.21	1.500	2.20	2.422	1.05	3.500	2.88	4.750	1.60	5.900	1.11	7.350	0.56	9.550	0.19		
0.700	2.86	1.550	2.06	2.450	1.02	3.550	2.87	4.800	1.67	6.000	1.06	7.400	0.55	9.650	0.18		
0.729	2.55	1.579	1.96	2.500	1.10	3.600	2.71	4.850	1.69	6.200	0.97	7.500	0.53	9.700	0.18		
0.750	2.97	1.600	1.99	2.550	1.24	3.650	2.44	4.900	1.71	6.250	0.95	7.550	0.52	9.750	0.18		
0.794	2.55	1.650	1.94	2.600	1.20	3.700	2.14	4.950	1.68	6.300	0.92	7.600	0.50	9.800	0.18		

プラント名 : 柏崎刈羽原子力発電所第7号機  
 構造物名 : 原子炉建屋  
 方向 : NS方向及びEW方向  
 波形名 : 標準地震動Ss-1~Ss-8  
 標高 : T. M. S. L. -8.200m  
 減衰 : 0.5 (%)  
 基本ケース

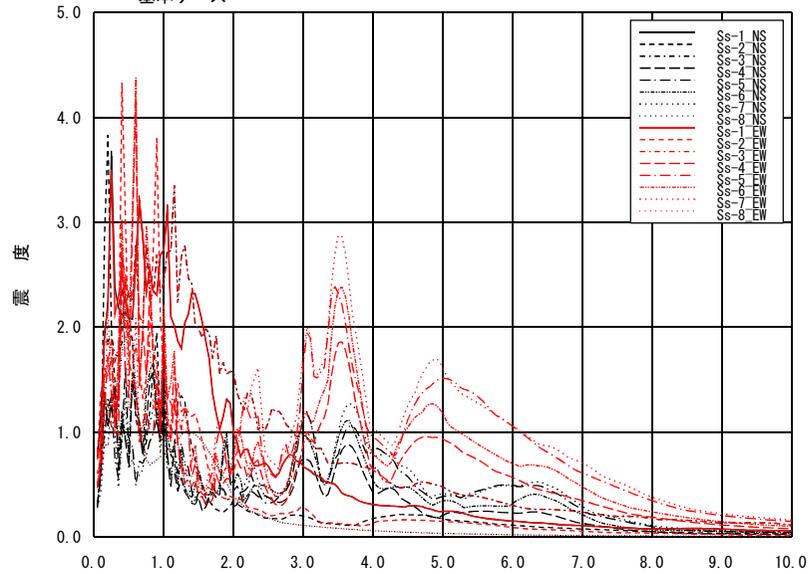


図3-3 応答スペクトル

設計用応答スペクトル デジタル値

周期 [s]	震度																
0.050	0.83	0.700	2.86	1.412	2.33	2.350	1.62	3.400	2.41	4.650	1.48	5.727	1.18	7.250	0.60	9.450	0.19
0.053	0.84	0.729	2.55	1.450	2.32	2.400	1.22	3.450	2.70	4.700	1.55	5.850	1.13	7.300	0.58	9.500	0.19
0.100	1.39	0.750	2.97	1.500	2.21	2.422	1.05	3.500	2.88	4.750	1.60	5.900	1.11	7.350	0.56	9.550	0.19
0.112	1.37	0.794	2.55	1.550	2.06	2.450	1.02	3.550	2.87	4.800	1.67	6.000	1.06	7.400	0.55	9.650	0.18
0.119	1.46	0.800	2.57	1.579	1.96	2.500	1.10	3.600	2.71	4.850	1.69	6.200	0.97	7.500	0.53	9.700	0.18
0.150	2.84	0.825	2.46	1.600	1.99	2.550	1.24	3.650	2.44	4.900	1.71	6.250	0.95	7.550	0.52	9.750	0.18
0.200	3.84	0.830	2.44	1.650	1.94	2.600	1.20	3.700	2.14	4.950	1.68	6.300	0.92	7.600	0.50	9.800	0.18
0.224	2.93	0.850	2.75	1.700	1.71	2.650	1.20	3.750	1.95	5.000	1.60	6.350	0.90	7.650	0.49	9.850	0.17
0.250	3.64	0.900	3.80	1.750	1.93	2.700	1.16	3.800	1.75	5.050	1.54	6.400	0.88	7.750	0.46	10.000	0.17
0.300	2.38	0.936	2.58	1.800	1.56	2.750	1.08	3.850	1.53	5.077	1.51	6.450	0.88	7.800	0.44		
0.334	2.25	0.950	2.69	1.850	1.67	2.800	1.04	3.900	1.30	5.100	1.51	6.500	0.87	7.850	0.42		
0.350	2.30	0.988	2.73	1.900	1.56	2.844	1.01	3.950	1.08	5.150	1.49	6.550	0.86	7.900	0.41		
0.366	2.37	1.000	2.74	1.950	1.58	2.850	1.02	4.000	1.05	5.200	1.46	6.600	0.85	8.100	0.36		
0.400	4.33	1.017	2.87	2.000	1.58	2.900	1.15	4.050	1.01	5.250	1.43	6.650	0.83	8.200	0.34		
0.450	3.07	1.050	3.13	2.050	1.38	2.950	1.46	4.150	0.95	5.300	1.41	6.700	0.81	8.350	0.31		
0.473	2.42	1.069	2.73	2.100	1.28	3.000	1.76	4.200	0.91	5.350	1.40	6.800	0.76	8.500	0.28		
0.500	2.31	1.100	2.73	2.130	1.24	3.050	2.01	4.250	0.88	5.400	1.39	6.900	0.74	8.600	0.27		
0.516	2.29	1.150	3.36	2.150	1.34	3.100	1.93	4.300	0.88	5.450	1.37	6.950	0.72	8.650	0.26		
0.550	3.11	1.200	2.24	2.171	1.29	3.150	1.60	4.350	0.99	5.500	1.34	7.000	0.71	8.800	0.24		
0.600	4.38	1.250	2.68	2.200	1.38	3.200	1.55	4.450	1.18	5.550	1.31	7.050	0.69	8.850	0.24		
0.625	2.93	1.300	2.78	2.239	1.38	3.250	1.63	4.500	1.27	5.600	1.28	7.100	0.67	8.900	0.24		
0.650	3.21	1.350	2.47	2.250	1.42	3.300	1.69	4.550	1.33	5.650	1.24	7.150	0.65	9.250	0.21		
0.686	2.96	1.400	2.42	2.300	1.52	3.350	1.98	4.600	1.38	5.700	1.20	7.200	0.63	9.400	0.20		

<スロッシング評価に用いる床応答スペクトル>



添付図1 応答スペクトル

添付図2 応答スペクトル

表3のスロッシングによるモーメント算出過程について

以下にハウスナー理論 (USAEC, Nuclear Reactors and Earthquakes, TID-7024, Chapter 6, Appendix F, 1963. 8) により, スロッシングによるモーメントの算出に用いる記号と値を示す。

記号	記号の説明	値	単位
h	S/C の水位		m
$h_0$	固定質量に対するモーメントアーム	—	m
$h_1$	自由質量に対するモーメントアーム	—	m
R	S/C の半径 (外側)		m
b	S/C の半径 (内側)		m
$b_1$	ベント管水平吐出管外径	0.74	m
$b_2$	ベント管水平吐出管長さ		m
W	S/C 水の質量		ton
$\rho$	水の比重量	1000	kg/m <sup>3</sup>
g	重力加速度	9.80665	m/sec <sup>2</sup>
$\dot{u}_0$	R/B 基礎盤 (T. M. S. L-8. 2m) の 1.0ZPA (Ss-2)		—
〃	R/B 基礎盤 (T. M. S. L-8. 2m) の 1.0ZPA (Ss-7)		—
$S_A$	スロッシング固有周期における震度 (Ss-2)		—
〃	スロッシング固有周期における震度 (Ss-7)		—
$P_i$	地震荷重	—	kN
$P_c$	スロッシング荷重	—	kN
$P_{wc}$	スロッシング時の揺動圧	—	Pa, kPa
M	モーメント	—	kN・m

1. 原子炉格納容器のスロッシングを考慮したモーメント算出過程

ハウスナー理論によりプール水質量の地震慣性力（固定質量）に対するモーメントアーム  $h_0$  を以下の式より算出する。

$$h_0 = \frac{3}{8} h = \frac{3}{8} \times 7.1 = 2.663 \text{ m}$$

同様にプール水表面のスロッシング（自由質量）に対するモーメントアーム  $h_1$  を以下の式より算出する。

$$h_1 = \left\{ 1 - \frac{\cosh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) - 1}{1.84 \frac{h}{R} \sinh\left(1.84 \frac{h}{R}\right)} \right\} h = \left\{ 1 - \frac{\cosh\left(1.84 \times \frac{7.1}{14.5}\right) - 1}{1.84 \times \frac{7.1}{14.5} \sinh\left(1.84 \times \frac{7.1}{14.5}\right)} \right\} \times 7.1$$

$$= 3.772 \text{ m}$$

① 地震動 Ss-2 によるプール水質量の地震慣性力（固定質量）モーメント

ハウスナー理論により固定質量による地震荷重  $P_i$  [kN] を以下の式より算出する。

$$P_i = \dot{u}_0 \frac{w \tanh\left(\sqrt{3} \frac{R}{h}\right)}{g \sqrt{3} \frac{R}{h}}$$

$$= \dot{u}_0 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot \frac{\tanh\left(\sqrt{3} \frac{R}{h}\right)}{\sqrt{3} \frac{R}{h}} \quad (\text{ここで } w = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot g)$$

$$= \boxed{\phantom{000}} \cdot 9.80665 \cdot 1000 \cdot \pi \cdot \boxed{\phantom{000}}^2 \cdot \boxed{\phantom{000}} \cdot \frac{\tanh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{\boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}}\right)}{\sqrt{3} \cdot \frac{\boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}}} \quad (\text{ここで } \dot{u}_0 = \boxed{\phantom{000}} \text{ g})$$

$$= \boxed{\phantom{00000}} \text{ N} = \boxed{\phantom{000}} \text{ kN}$$

(以降、 $10^3 \text{ N} = 1 \text{ kN}$  等の単位換算は記載省略)

プール水質量の地震慣性力（固定質量）モーメントは、

$$M = P_i \times h_0 = \boxed{\phantom{00000}} \times \boxed{\phantom{000}} = \boxed{\phantom{00000}} \text{ [kN} \cdot \text{m]} \quad (\text{①})$$

となる。

② 地震動 Ss-2 によるプール水表面のスロッシング（自由質量）モーメント

スロッシング荷重  $P_c$  を以下の式より算出する。

$$P_c = 1.2 \cdot W_1 \cdot \theta_h \cdot \sin(\omega t)$$

$$= 1.2 \cdot 0.318 \frac{R}{h} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot g \cdot 1.534 \frac{A_1}{R} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \cdot \sin(\omega t)$$

$$\begin{aligned} & \left( \text{ここで、} W_1 = 0.318 \frac{R}{h} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot g, \theta_h = 1.534 \frac{A_1}{R} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \right) \\ & = 1.2 \cdot 0.318 \frac{R}{h} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot g \cdot 1.534 \cdot \frac{\square g}{R \cdot \omega^2} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \cdot \sin(\omega t) \end{aligned}$$

$$\left( \text{ここで、} A_1 = \frac{S_A}{\omega^2} = \frac{\square g}{\omega^2} \right)$$

$$\begin{aligned} & = 1.2 \cdot 0.318 \cdot \frac{\square}{\square} \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{\square}{\square}\right) \cdot 1000 \cdot \pi \cdot \square^2 \cdot \square \cdot 9.80665 \cdot \\ & 1.534 \cdot \frac{\square \cdot 9.80665}{\square \cdot \square^2} \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{\square}{\square}\right) \cdot 1 \end{aligned}$$

(ここで、最大の $P_c$ を求めるために $\sin(\omega t) = 1$ とする。)

$$= \square \text{ kN}$$

プール水表面のスロッシング (自由質量) モーメントは、

$$M = Pc \times h_1 = \square \times \square = \square \text{ [kN} \cdot \text{m]} \quad (2)$$

となる。

地震動 Ss-2 によるスロッシングを考慮したモーメント

$$\begin{aligned} M &= \textcircled{1} + \textcircled{2} \\ &= \square + \square \\ &= \square \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (\textcircled{1} + \textcircled{2}) \end{aligned}$$

③ 地震動 Ss-7 によるプール水質量の地震慣性力 (固定質量) モーメント

地震荷重  $P_i$  [kN] を以下の式より算出する。

$$P_i = \dot{u}_0 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot \frac{\tanh\left(\sqrt{3} \frac{R}{h}\right)}{\sqrt{3} \frac{R}{h}}$$

$$= \square \cdot 9.80665 \cdot 1000 \cdot \pi \cdot \square^2 \cdot \square \cdot \frac{\tanh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{\square}{\square}\right)}{\sqrt{3} \cdot \frac{\square}{\square}} \quad \left( \text{ここで } \dot{u}_0 = \square g \right)$$

$$= \square \text{ kN}$$

プール水質量の地震慣性力 (固定質量) モーメントは、

$$M = P_i \times h_0 = \square \times \square = \square \text{ [kN} \cdot \text{m]} \quad (3)$$

となる。

④ 地震動 Ss-7 によるプール表面のスロッシング（自由質量）モーメント  
スロッシング荷重  $P_c$  を以下の式より算出する。

$$\begin{aligned}
 P_c &= 1.2 \cdot 0.318 \frac{R}{h} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot g \cdot 1.534 \cdot \frac{g}{R \cdot \omega^2} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \cdot \sin(\omega t) \\
 &= 1.2 \cdot 0.318 \cdot \frac{\square}{\square} \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{\square}{\square}\right) \cdot 1000 \cdot \pi \cdot \square^2 \cdot \square \cdot 9.80665 \cdot \\
 &\quad 1.534 \cdot \frac{\square \cdot 9.80665}{\square \cdot \square^2} \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{\square}{\square}\right) \cdot 1 \\
 &= \square \text{ kN}
 \end{aligned}$$

プール表面のスロッシング（自由質量）モーメントは、

$$M = P_c \times h_1 = \square \times \square = \square \text{ [kN} \cdot \text{m]} \quad (4)$$

となる。

地震動 Ss-7 によるスロッシングを考慮したモーメント

$$\begin{aligned}
 M &= \textcircled{3} + \textcircled{4} \\
 &= \square + \square \\
 &= \square \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (\textcircled{3} + \textcircled{4})
 \end{aligned}$$

⑤ 原子炉格納容器の 100%固定質量によるモーメント

$$\begin{aligned}
 M &= W \cdot \square g \cdot \frac{h}{2} \\
 &= \square \cdot \square \cdot 9.80665 \cdot \frac{\square}{2} \\
 &= \square = \square \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (5)
 \end{aligned}$$

2. ベント管のスロッシングによるモーメント算出過程

⑦ 地震動 Ss-2 によるベント管のスロッシングモーメント

スロッシングによる揺動圧（格納容器壁面に作用する）をハウスナー理論により算出し、ベント管の投影面積とモーメントアーム（突出し長さの半分）を乗じることで、ベント管に作用するスロッシングモーメントを以下の式より算出する。

$$P_{wc} = \sqrt{\frac{3}{8}} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot \theta_h \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cos^2 \varphi - \frac{1}{2} \sin^2 \varphi\right) \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)} \omega^2 \sin(\omega t)$$

$$P_{wc} = \sqrt{\frac{3}{8}} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot 1.534 \cdot \frac{\square g}{R \cdot \omega^2} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \cdot$$

$$\left(1 - \frac{1}{3} \cos^2 \varphi - \frac{1}{2} \sin^2 \varphi\right) \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)} \omega^2 \sin(\omega t)$$

$$\left(\text{ここで、} \theta_h = 1.534 \frac{A_1}{R} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right), \quad A_1 = \frac{S_A}{\omega^2} = \frac{\square g}{\omega^2}\right)$$

$$P_{wc} = \sqrt{\frac{3}{8}} \cdot 1000 \cdot \square^2 \cdot 1.534 \cdot \frac{\square \cdot 9.80665}{\square \cdot \square^2} \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{\square}{\square}\right) \cdot$$

$$\left(1 - \frac{1}{3} \cos^2(0) - \frac{1}{2} \sin^2(0)\right) \cdot \cos(0) \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{\square}{\square}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{\square}{\square}\right)} \cdot \square \cdot 1$$

$$= \square \text{ kPa}$$

$$M = (P_{wc} \cdot b_1 \cdot b_2) \cdot \frac{b_2}{2}$$

$$= (\square \cdot \square \cdot \square) \cdot \frac{\square}{2}$$

$$= \square \text{ kN} \cdot \text{m} \doteq \square \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (⑦)}$$

⑧ 地震動 Ss-7 によるベント管のスロッシングモーメント

⑦と同様に以下の式より算出する。

$$P_{wc} = \sqrt{\frac{3}{8}} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot \theta_h \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cos^2 \varphi - \frac{1}{2} \sin^2 \varphi\right) \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)} \omega^2 \sin(\omega t)$$

$$P_{wc} = \sqrt{\frac{3}{8}} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot 1.534 \cdot \frac{\square g}{R \cdot \omega^2} \cdot \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right) \cdot$$

$$\left(1 - \frac{1}{3} \cos^2 \varphi - \frac{1}{2} \sin^2 \varphi\right) \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)} \omega^2 \sin(\omega t)$$

$$P_{wc} = \sqrt{\frac{3}{8}} \cdot 1000 \cdot \square^2 \cdot 1.534 \cdot \frac{\square \cdot 9.80665}{\square \cdot \square^2} \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{\square}{\square}\right) \cdot$$

$$\left(1 - \frac{1}{3} \cos^2(0) - \frac{1}{2} \sin^2(0)\right) \cdot \cos(0) \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{\square}{\square}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{\square}{\square}\right)} \cdot \square \cdot 1$$

$$= \square \text{ kPa}$$

$$M = (P_{wc} \cdot b_1 \cdot b_2) \cdot \frac{b_2}{2}$$

$$= (\square \cdot \square \cdot \square) \cdot \frac{\square}{2}$$

$$= \square \text{ kN} \cdot \text{m} = \square \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (⑧)}$$

⑨ ベント管の本申請の地震によるモーメント

本申請工認V-2-9-4-3 「ベント管の耐震性についての計算書」より、ベント管の水平吐出管は内径 700 mm、板厚 20 mm であり、上記計算書表 5-2 の許容応力状態IV<sub>A</sub>S の評価部位 P2-B の一次+二次応力は 40 MPa である。

この一次+二次応力は、地震荷重による曲げ応力が主な成分であるため、下記のとおり、一次+二次応力に断面係数を掛けてモーメントを算出する。

$$M = \sigma \times Z$$

$$= \frac{40 \times 10^6}{2} \times \boxed{\phantom{000000}}$$

(ここで、 $\sigma = \frac{40 \times 10^6}{2}$ 、 $Z$ は建設時工認より  $\boxed{\phantom{000000}} \text{ mm}^3 (= \boxed{\phantom{000000}} \text{ m}^3)$ )

$$= \boxed{\phantom{000000}} \text{ kN} \cdot \text{m} \cong \boxed{\phantom{000000}} \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (\text{⑨})$$

3. 原子炉本体の基礎のスロッシングによるモーメント算出過程

⑩ 地震動 Ss-2 による原子炉本体の基礎のスロッシングモーメント

ベント管同様にスロッシングによる揺動圧（格納容器壁面に作用する）をハウスナー理論により算出し、原子炉本体の基礎の投影面積とモーメントアーム（水深の半分）を乗じること  
で、原子炉本体の基礎に作用するスロッシングモーメントを以下の式より算出する。

$$M = (P_{wc} \cdot 2b \cdot h) \cdot \frac{h}{2}$$

$$= (\boxed{\phantom{000000}} \cdot 2 \cdot \boxed{\phantom{000000}} \cdot \boxed{\phantom{000000}}) \cdot \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2}$$

$$= \boxed{\phantom{000000}} \cong \boxed{\phantom{000000}} \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (\text{⑩})$$

⑪ 地震動 Ss-7 による原子炉本体の基礎のスロッシングモーメント

⑩と同様に以下の式より算出する。

$$M = (P_{wc} \cdot 2b \cdot h) \cdot \frac{h}{2}$$

$$= (\boxed{\phantom{000000}} \cdot 2 \cdot \boxed{\phantom{000000}} \cdot \boxed{\phantom{000000}}) \cdot \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2}$$

$$= \boxed{\phantom{000000}} \cong \boxed{\phantom{000000}} \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (\text{⑪})$$