

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 補足-026-7 改2
提出年月日	2020年6月10日

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

2020年6月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

V-2-4-2-1「使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 応力解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 2 応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 3 地震荷重の入力方法

別紙 4 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 5 応力解析における応力平均化の考え方

別紙 6 地震時動水圧荷重の算定方法

別紙 7 原子炉格納容器コンクリート部の荷重組合せに対する影響検討

別紙 8 壁の面内せん断力及び面外せん断力の許容値について

別紙 9 鋼製ライナの検討

別紙 10 使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討

下線：今回ご提示資料

別紙 5 応力解析における応力平均化の考え方

目 次

1. 概要	別紙 5-1
2. 応力平均化の考え方	別紙 5-2
2.1 応力平均化を実施した領域における断面の評価要素	別紙 5-2
2.2 応力平均化の方法	別紙 5-4
2.3 応力平均化の結果	別紙 5-10
2.4 断面の評価結果	別紙 5-12

1. 概要

3次元 FEM モデルを用いた応力の算定において、FEM 要素に応力集中等が見られる場合については、「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005）」（以下「RC-N 規準」という。）に基づき、応力の再配分等を考慮してある一定の領域の応力を平均化したうえで断面の評価を行っている。この場合、当該要素における応力度ではなく、周囲の複数の要素で平均化した応力度に対して断面の評価を実施していることから、本資料では、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピット（以下「SFP」という。）における複数の要素での応力平均化の考え方及びその結果を示す。

2. 応力平均化の考え方

2.1 応力平均化を実施した領域における断面の評価要素

断面の評価要素は、応力平均化を行うことによって応力が変わることから、応力平均化前の断面力に対する検定値を元を選定している。

SFPの底面スラブでは、応力平均化前の応力分布において、局所的に大きな面外せん断力が発生している要素を断面の評価要素とし、応力平均化を行い、応力平均化後の値に対する断面の評価を実施した。

応力平均化を実施した要素を表2-1、要素位置図を図2-1に示す。

表2-1 応力平均化要素

部位	評価項目		方向	要素番号	組合せケース	平均化前の検定値 (発生値/許容値)
底面 スラブ	面外 せん断力	面外 せん断 応力度	NS	1607	2-14 (S _s 地震時)	1.06
			NS	1607	4-14 ((異常+S _s 地震)時)	1.05
			NS	101607	2-14 (S _s 地震時)	1.06
			NS	101607	4-14 ((異常+S _s 地震)時)	1.05

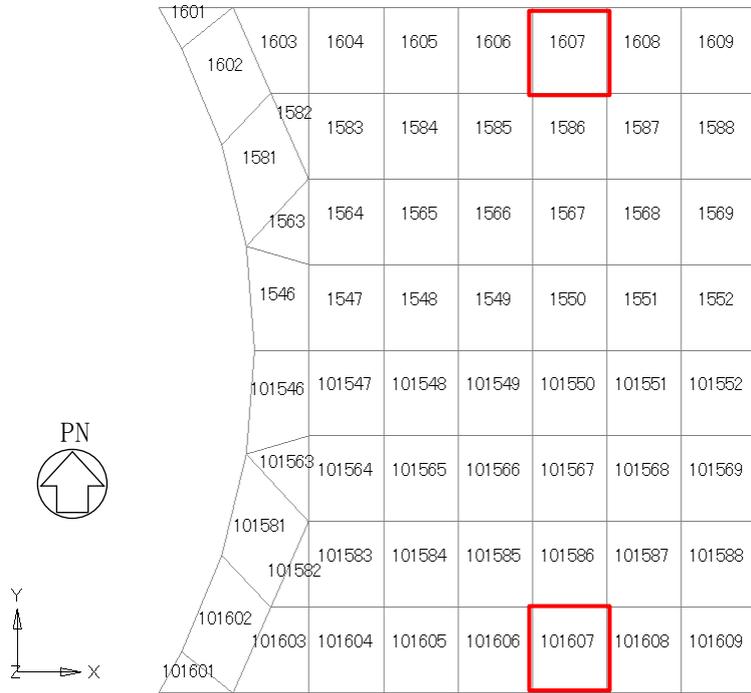


図 2-1 要素位置図

2.2 応力平均化の方法

3次元 FEM モデルを用いた応力解析においては、部材断面やモデル形状が大きく変化して不連続になっている箇所は、局所的な応力集中が発生しやすい。

図 2-2 に SFP の 3次元 FEM モデルを示す。図 2-2 に示すように、当該部は北側壁又は南側壁との接続部分であり、応力が集中しやすい。図 2-3 に示す面外せん断力のコンター図を見ると、当該要素周辺では大きな面外せん断力が発生していることが分かる。

そこで、今回の SFP の応力解析においては、RC-N 規準を参考に、コンクリートのひび割れによる応力の再配分を考慮し、応力の平均化を行った。なお、今回の SFP の応力解析には弾塑性解析を採用し、材料の非線形特性を設定しているが、面外せん断力に対しては非線形特性を考慮できないことから、算出された応力に対して平均化を行った。

RC-N 規準においては、「線材では、部材端に生じる斜めせん断ひび割れによって部材有効せい程度離れた断面の引張鉄筋の応力度が部材端と同じ大きさまで増大する現象（テンションシフト）が生じるが、面材では、斜めひび割れが発生した場合においても、材軸直交方向への応力再配分によって、線材におけるテンションシフトのような現象は生じにくいと考えられる。」とされており、耐震壁の面外せん断力について、「面材であるため、局所的に応力の集中があったとしても、応力の再配分を生じ、破壊に至ることはない。」とされている。また、基礎スラブのような大断面を有する面材の面外せん断力について、「通常の場合、FEM 解析の要素サイズは、基礎スラブ版厚より小さいため、付図 2.2 に模式的に示されるように設計用面外せん断力は想定されるひび割れ領域での平均面外せん断力に対して大きめの評価となっているといえる。また、基礎スラブにおいても、耐震壁と同様、面材における面外せん断力の再配分も期待できる。」とされている。RC-N 規準の付図 2.2 を図 2-4 に示す。

壁、床スラブ、基礎スラブのような面材については、RC-N 規準に示されるように、面材に荷重を作用させる直交部材からせん断破壊面が 45 度の角度で進展すると考えられることから、せん断破壊面が面材の表面から裏面まで貫通する範囲、すなわち部材厚の範囲に応力が再配分されると考えられる。SFP の底面スラブにおける面外せん断力に対する応力平均化の考え方を図 2-5 に示す。

以上より、応力の平均化は、当該要素の壁から離れる側の**応力方向に位置する隣接要素**に対して、壁面から底面スラブの部材厚である 2.3m 分の範囲で行った。

各要素について応力平均化範囲を図 2-6 に示す。

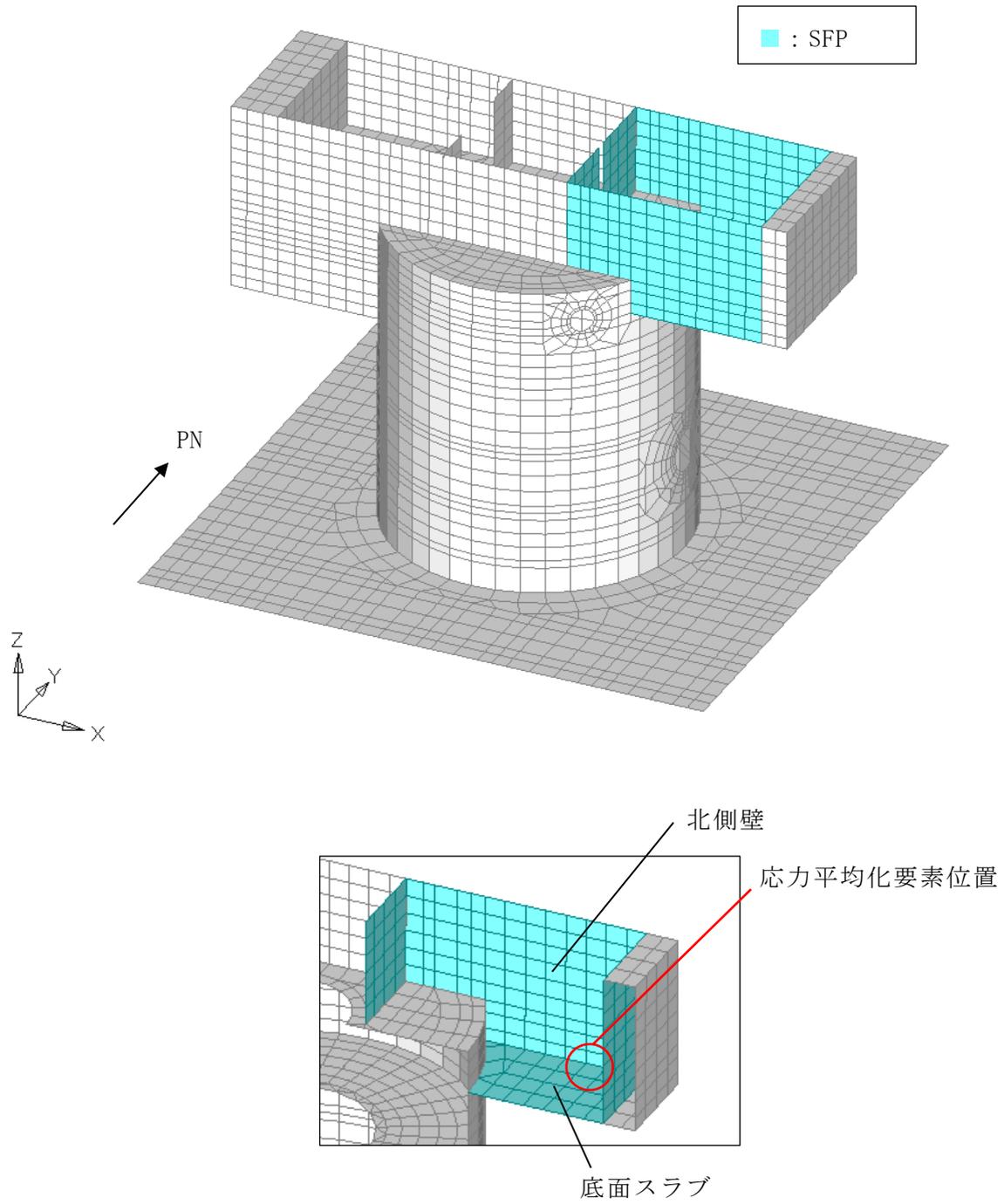
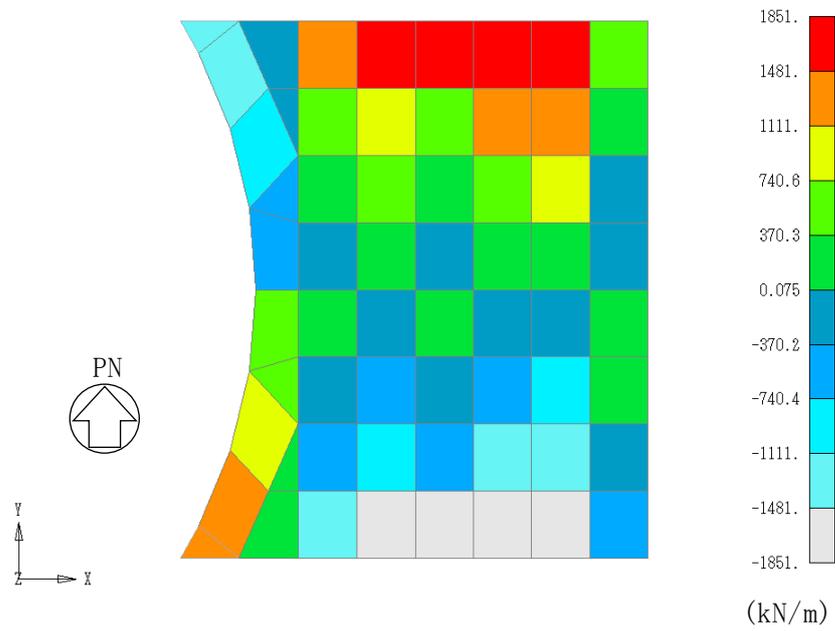
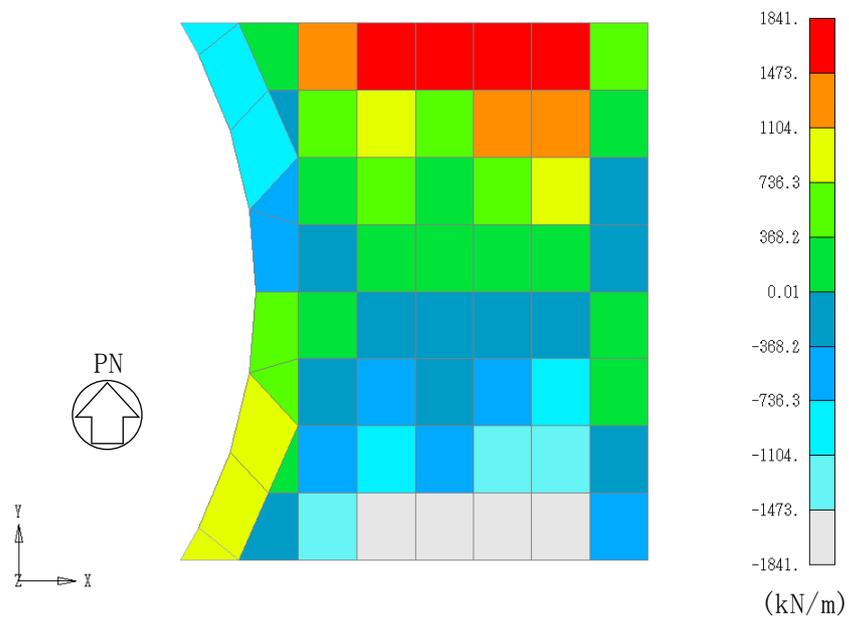


図 2-2 SFP の 3 次元 FEM モデル



(a) 組合せケース 2-14 (NS 方向)



(b) 組合せケース 4-14 (NS 方向)

図 2-3 面外せん断力のコンター図

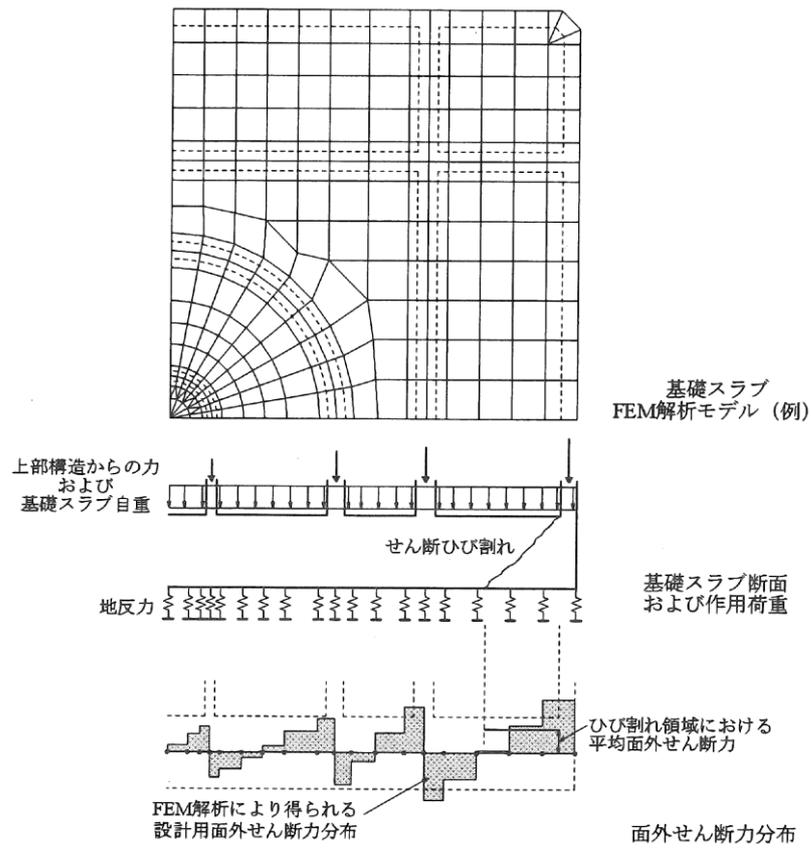


図 2-4 RC-N 規準の付図 2.2

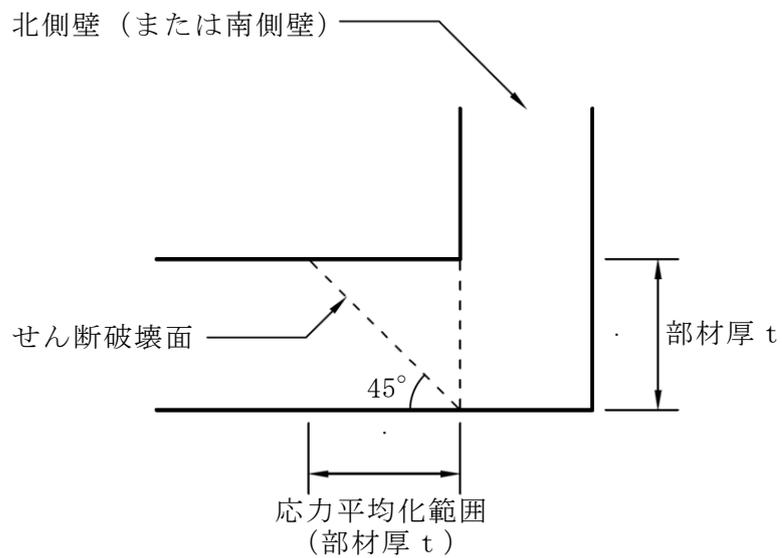
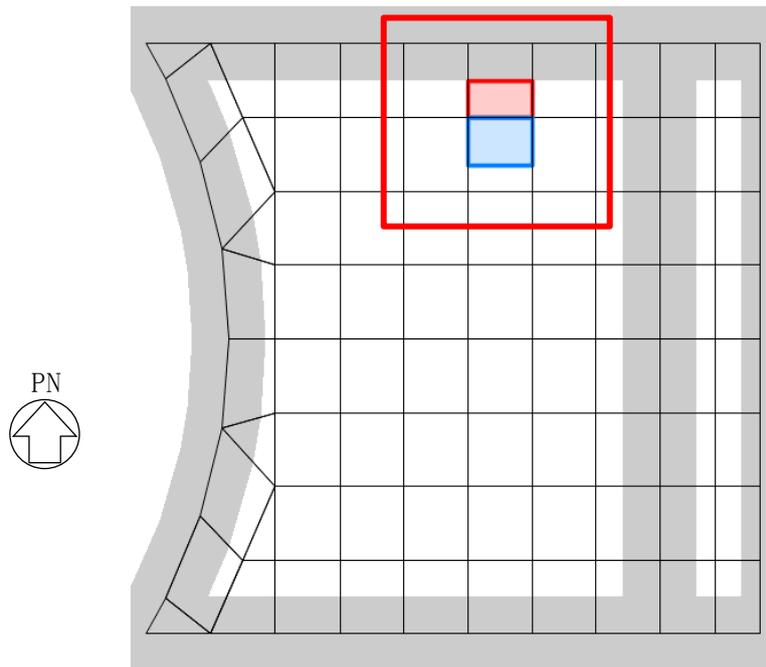


図 2-5 SFP の底面スラブにおける面外せん断力に対する応力平均化の考え方

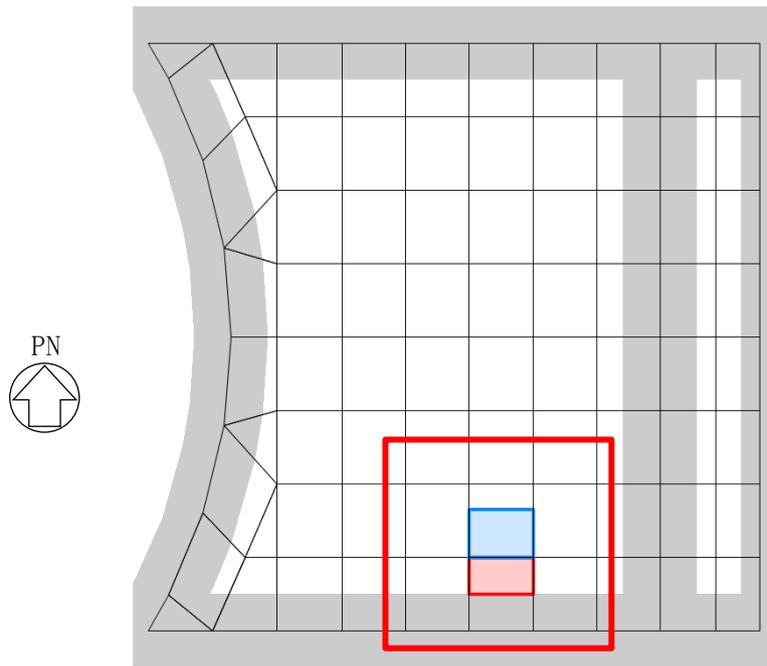


	1606	1607	1608
1585		1586	1587
1566	1567	1568	

- 応力平均化実施要素
- 平均化実施に用いた周辺要素
- 壁直下の範囲（平均化対象外）

(a) 要素番号 1607

図 2-6 応力平均化範囲 (1/2)



101566	101567	101568
101585	101586	101587
101606	101607	101608

- 応力平均化実施要素
- 平均化実施に用いた周辺要素
- 壁直下の範囲（平均化対象外）

(b) 要素番号 101607

図 2-6 応力平均化範囲 (2/2)

2.3 応力平均化の結果

応力平均化の手法として、下式のとおり、要素面積を考慮した重み付け平均で平均化を行っている。応力平均化に用いる各要素の発生値、面積及び重み付け値を表2-2に示す。また、応力平均化の結果を表2-3に示す。

$$\tau_{ave} = \Sigma (\tau_i \times A_i) / \Sigma A_i$$

ここで、

τ_{ave} : 平均化後の面外せん断応力度

τ_i : 平均化前の各要素の面外せん断応力度 (発生値)

A_i : 応力平均化範囲における各要素の面積

表2-2 応力平均化に用いる各要素の発生値、面積及び重み付け値

応力平均化対象要素	方向	組合せケース	要素番号	発生値 τ_i (N/mm ²)	要素面積 A_i (m ²)	重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ($\times 10^6$ N)
1607	NS	2-14	1586	0.831	2.24	1.86
			1607	1.28	1.72	2.20
合計					3.96	4.05
1607	NS	4-14	1586	0.823	2.24	1.84
			1607	1.27	1.72	2.18
合計					3.96	4.03
101607	NS	2-14	101586	0.831	2.24	1.86
			101607	1.28	1.72	2.20
合計					3.96	4.06
101607	NS	4-14	101586	0.824	2.24	1.84
			101607	1.27	1.72	2.18
合計					3.96	4.03

表2-3 応力平均化結果

要素番号	方向	組合せケース	面外せん断応力度 (N/mm ²)	
			平均化前	平均化後
1607	NS	2-14	1.28	1.03
		4-14	1.27	1.02
101607	NS	2-14	1.28	1.03
		4-14	1.27	1.02

2.4 断面の評価結果

2.4.1 断面の評価方法

S s 地震時及び（異常＋S s 地震）時の面外せん断応力度について、発生値が許容値を超えないことを確認する。許容値は、「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（（社）日本機械学会，2003）」に基づき算出する。

2.4.2 断面の評価結果

応力平均化後の評価結果を表 2-4 に示す。表 2-4 より、応力平均化後の面外せん断応力度の発生値が許容値を超えないことを確認した。

表 2-4 応力平均化後の評価結果

要素番号	方向	組合せケース	面外せん断応力度 (N/mm ²)		平均化後の検定値 (発生値/許容値)
			発生値	許容値	
1607	NS	2-14	1.03	1.21	0.852
		4-14	1.02	1.21	0.843
101607	NS	2-14	1.03	1.21	0.852
		4-14	1.02	1.21	0.843

別紙 6 地震時動水圧荷重の算定方法

目 次

1. 概要	別紙 6-1
2. 地震時動水圧荷重の算定方法	別紙 6-1
3. 地震時動水圧荷重の算定諸元	別紙 6-2
3.1 単位長さ当たり液体の質量	別紙 6-2
3.2 寸法及び固有周期	別紙 6-2
3.3 応答最大加速度	別紙 6-3
3.4 床応答スペクトラム	別紙 6-4
4. 地震時動水圧荷重の算定結果	別紙 6-5

1. 概要

本資料は、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの応力解析における地震時動水圧荷重の算定方法について示すものである。

2. 地震時動水圧荷重の算定方法

地震時動水圧荷重は、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)」(以下「J E A G 4 6 0 1 -1987」という。)における Housner 理論に基づき、衝撃圧と揺動圧に分けて考える。表 2-1 に J E A G 4 6 0 1 -1987 における動水圧算定式を示す。

表 2-1 J E A G 4 6 0 1 -1987 における動水圧算定式

	側 壁	底 版
衝撃圧	${}_i P_w = \rho L \ddot{X} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{H}{L} \left[1 - \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right] \tanh \left(\sqrt{3} \frac{L}{H} \right)$	${}_i P_s = \rho L \ddot{X} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{H}{L} \frac{\sinh \left(\sqrt{3} \frac{x}{H} \right)}{\cosh \left(\sqrt{3} \frac{L}{H} \right)}$
揺動圧	${}_c P_w = \rho L S_A(\omega_1) \frac{10}{12} \frac{\cosh \left(\sqrt{\frac{5}{2}} \frac{y}{L} \right)}{\cosh \left(\sqrt{\frac{5}{2}} \frac{H}{L} \right)}$	${}_c P_s = \rho L S_A(\omega_1) \frac{5}{4} \left[\frac{x}{L} - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{L} \right)^3 \right] \frac{1}{\cosh \left(\sqrt{\frac{5}{2}} \frac{H}{L} \right)}$

ここで、

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{g}{L} \tanh \left(\sqrt{\frac{5}{2}} \frac{H}{L} \right) \quad ; \text{自由水の1次円振動数}$$

ρ : 単位長さ当たり液体の質量 (tf・s²/m²)

h : 液体の深さ

H : $H=h$ ($h \leq 1.5L$), $H=1.5L$ ($h > 1.5L$)

$2L$: 矩形プール幅(m)

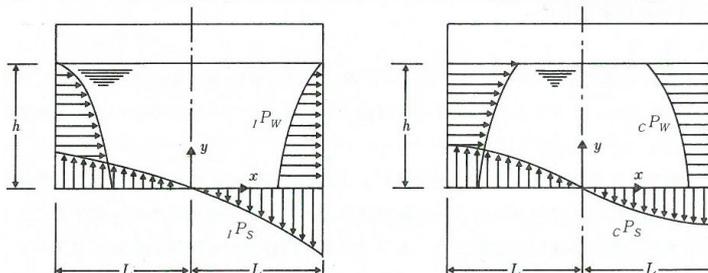
\ddot{X} : プール設置床の応答最大加速度 (m/s²) 又は設置床とその上階床との平均の応答最大加速度 (m/s²)

$S_A(\omega_1)$: $\ddot{X}(t)$ に対する ω_1 の床応答スペクトラム

g : 重力加速度 (m/s²)

x : プール底版の中心を原点とする水平方向座標

y : プール底版の中心を原点とする鉛直方向座標



(a) 衝撃圧分布形状

(b) 揺動圧分布形状

3. 地震時動水圧荷重の算定諸元

3.1 単位長さ当たり液体の質量

液体は水であり，単位長さ当たり液体の質量 ρ は $1.0(\text{tf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2)$ とする。

3.2 寸法及び固有周期

表 3-1 に液体の深さ h 及び矩形プール幅 $2L$ 並びに H を示す。また，表 3-2 の寸法より算定した自由水の 1 次円振動数 ω_1 及び固有周期を示す。

表 3-1 液体の深さ h 及び矩形プール幅 $2L$ 並びに H (単位: m)

	h	11.51
$2L$	NS 方向	14.00
	EW 方向	17.90
H	NS 方向	10.50
	EW 方向	11.51

表 3-2 自由水の 1 次円振動数 ω_1 及び固有周期

	NS 方向	EW 方向
ω_1 (rad/s)	1.475	1.293
固有周期 (s)	4.26	4.86

3.3 応答最大加速度

衝撃圧の算定に用いるプール設置床の応答最大加速度 \ddot{X} は、「工事計画に係る説明資料（建屋・構築物の地震応答計算書）」のうち「原子炉建屋の地震応答計算書に関する補足説明資料」の別紙 3-2「材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果」に示す地震応答解析結果の最大加速度のうち、T.M.S.L. 18.1m及びT.M.S.L. 23.5mの包絡値とする。表 3-3 にプール設置床の応答最大加速度 \ddot{X} を示す。

表 3-3 プール設置床の応答最大加速度 \ddot{X}

(a) 弾性設計用地震動 S_d

T.M.S.L. (m)	地震応答解析結果から得られた 最大加速度 (m/s ²)		\ddot{X} (m/s ²)
	NS 方向	EW 方向	
23.5	4.94	5.21	5.21
18.1	4.50	4.75	

(b) 基準地震動 S_s

T.M.S.L. (m)	地震応答解析結果から得られた 最大加速度 (m/s ²)		\ddot{X} (m/s ²)
	NS 方向	EW 方向	
23.5	9.84	9.87	9.88
18.1	8.89	9.22	

3.4 床応答スペクトラム

揺動圧の算定に用いる $\ddot{X}(t)$ に対する ω_1 の床応答スペクトラム $S_A(\omega_1)$ は、V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した T.M.S.L. 18.1m, T.M.S.L. 23.5m 及び T.M.S.L. 31.7m の減衰定数 0.5% の床応答スペクトラムより、表 3-2 に示した固有周期における加速度を読み取った値（以下「読み取り値」という。）を包絡するように設定した値である。

表 3-4 に $\ddot{X}(t)$ に対する ω_1 の床応答スペクトラム $S_A(\omega_1)$ を示す。

表 3-4 $\ddot{X}(t)$ に対する ω_1 の床応答スペクトラム $S_A(\omega_1)$

(a) 弾性設計用地震動 S_d

T. M. S. L. (m)	読み取り値 (m/s^2)		$S_A(\omega_1)$ (m/s^2)	
	NS 方向	EW 方向	NS 方向	EW 方向
31.7	7.75	8.34	10.0	10.9
23.5	7.75	8.34		
18.1	7.75	8.34		

(b) 基準地震動 S_s

T. M. S. L. (m)	読み取り値 (m/s^2)		$S_A(\omega_1)$ (m/s^2)	
	NS 方向	EW 方向	NS 方向	EW 方向
31.7	15.6	16.9	20.2	21.9
23.5	15.6	16.8		
18.1	15.6	16.8		

4. 地震時動水圧荷重の算定結果

「3. 地震時動水圧荷重の算定諸元」の各諸元を表 2-1 の動水圧算定式に代入することで算定した衝撃圧を表 4-1 に、揺動圧を表 4-2 に示す。また、衝撃圧と揺動圧を合計することで算定した地震時動水圧荷重を表 4-3 に示す。

表 4-1 衝擊圧

(単位：kN/m²)

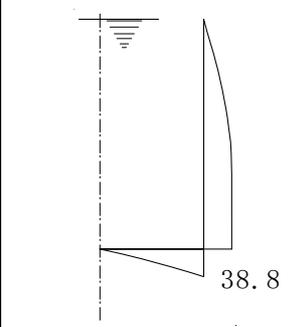
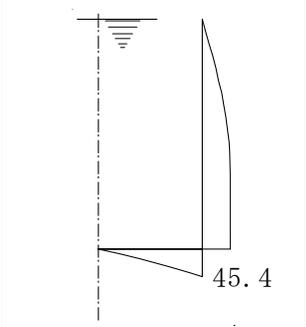
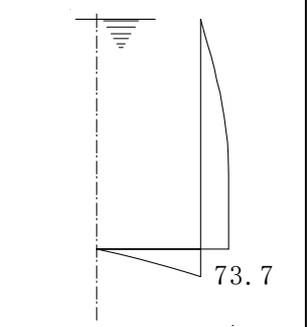
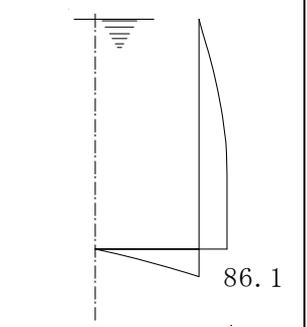
弾性設計用地震動 S d		基準地震動 S s	
NS 方向	EW 方向	NS 方向	EW 方向
			

表 4-2 揺動圧

(単位：kN/m²)

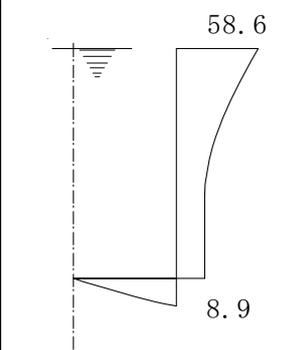
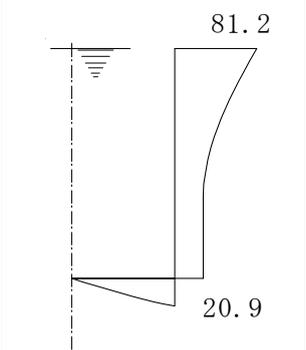
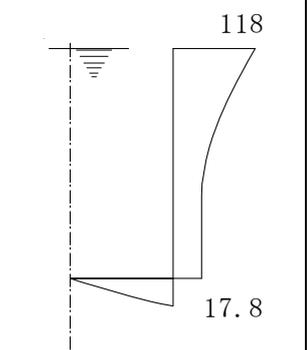
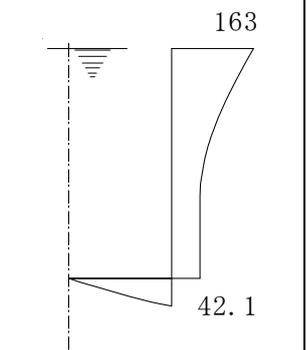
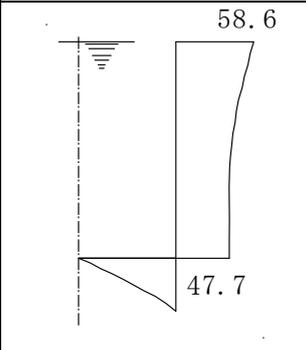
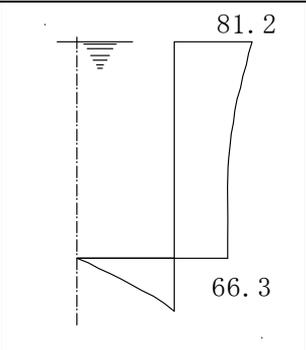
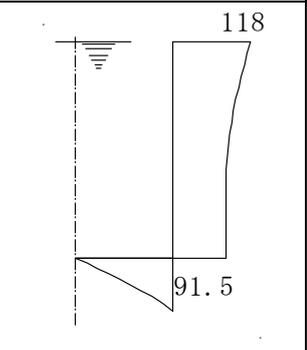
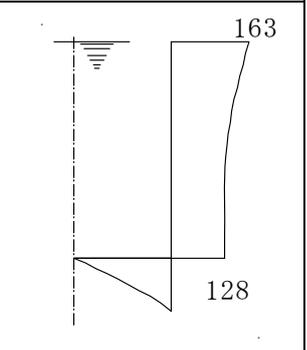
弾性設計用地震動 S d		基準地震動 S s	
NS 方向	EW 方向	NS 方向	EW 方向
			

表 4-3 地震時動水圧荷重

(単位：kN/m²)

弾性設計用地震動 S d		基準地震動 S s	
NS 方向	EW 方向	NS 方向	EW 方向
			

別紙 10 使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討

目 次

1. 概要	別紙 10-1
2. 解析モデルについて	別紙 10-1
3. 使用済燃料貯蔵ラックと原子炉建屋の質量比較について	別紙 10-1
4. まとめ	別紙 10-1

1. 概要

本資料は、使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討に関する説明資料であり、V-2-4-2-1「使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの耐震性についての計算書」の補足説明をするものである。

2. 解析モデルについて

使用済燃料貯蔵プールの解析モデルでは、使用済燃料貯蔵ラックの質量は固定荷重として扱っている。これは、使用済燃料貯蔵ラックの質量が、躯体に対して大きくないことから、評価上連成させる必要がないと考えられるためである。以下に、使用済燃料貯蔵ラックと躯体の質量比較を行う。

3. 使用済燃料貯蔵ラックと原子炉建屋の質量比較について

使用済燃料貯蔵ラックと原子炉建屋の質量比較検討結果を表3-1に示す。算出した使用済燃料貯蔵ラックの質量と原子炉建屋の質量を比較した結果、使用済燃料貯蔵ラックの質量は躯体の質量に対して、割合が小さいことを確認した。

表3-1 質量比較検討結果

検討項目	使用済燃料貯蔵ラック [kg]	原子炉建屋 [kg]
質量	1,283,688 ^{*1}	199,365,736 ^{*2}

注記*1：使用済燃料貯蔵プール内の使用済燃料貯蔵ラック総質量

*2：V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」より質点重量の合計値

4. まとめ

使用済燃料貯蔵ラックの地震時の挙動について、原子炉建屋との質量比較の検討を行った結果、使用済燃料貯蔵ラックは原子炉建屋に対して十分質量が小さいことを確認した。よって、使用済燃料貯蔵ラックの質量はモデル上、固定荷重として考慮すれば、連成の考慮は不要であることを確認した。

以上のことから、使用済燃料貯蔵プール躯体側の評価としては、固定荷重のみ考慮すれば問題なく、反力の考慮は不要といえる。