

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
営業秘密又は防護上の観点から  
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-370-8 改3
提出年月日	平成30年10月2日

建物・構築物の耐震計算についての補足説明資料

補足-370-8 【使用済燃料プールの耐震性評価に関する補足説明】

平成30年10月

日本原子力発電株式会社

## 目次

1. 概要	1
2. 地震荷重以外の荷重組合せに対する検討	3
2.1 荷重の設定方針	3
2.2 荷重の組合せ及び許容限界	4
2.3 荷重及び荷重組合せ	8
2.4 解析モデル及び諸元	16
2.5 評価方法	16
2.6 評価結果	22
3. 水平地震力の算定について	32
3.1 評価方針	32
3.2 評価方法	32
3.3 算定結果	39
4. 使用済燃料プール周辺部の検討	41
4.1 評価部位	41
4.2 検討条件及び断面の評価方法	42
4.3 評価結果	42
5. 温度によるシェル壁の伸びの影響検討	45
5.1 検討概要	45
5.2 シェル壁の伸び評価	45
5.3 プール部の検討	49
6. 使用済燃料プール底版の面内せん断について	54
7. 鋼製ライナの評価について	55
8. 使用済燃料の調密化による重量変更による原子炉建屋の応答への影響検討	56
8.1 概要	56
8.2 建設工認時からの調密化による使用済み燃料等の重量変遷	56
8.3 調密化による重量増分が建屋応答に与える影響検討	57
8.4 検討結果	62
8.5 まとめ	72

## 1. 概要

本資料は、使用済燃料プールの耐震性評価についての補足説明資料であり、以下の添付資料の補足説明をするものである。

- ・添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」

以下、本資料の概要を示す。

第2章「地震荷重以外の荷重組合せに対する検討」では、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」にて実施した地震時に関する荷重の組合せ以外に対する評価（地震荷重と組み合わせないケース）について評価を行うことを目的とし、CCV規格に基づき、使用済燃料プールにおける壁及び底板の健全性評価を行い、各許容値を超えないことを確認した。

第3章「水平地震力の算定について」では、使用済燃料プールに作用する水平地震力について、せん断力分配解析によりプール部に分配されたせん断力及び曲げモーメントを用いて算定した結果を示す。また、せん断力分配解析モデルの詳細を説明し、分配解析モデルに基づき設定されるせん断力及び変形量の応力解析モデルへの入力方法について記載した。

第4章「使用済燃料プール周辺部の検討」では、使用済燃料プールが周辺部の壁と一体となって地震時の荷重伝達を担っていることから、使用済燃料プールを支持する周辺部（使用済燃料プールの北側壁、ウェル壁及び蒸気発生器・気水分離器ピットの壁）の耐震健全性について確認することを目的とし、CCV規格に基づく各許容値を超えないことを確認した。

第5章「温度によるシェル壁の伸びの影響検討」では、温度による影響が最も大きい格納容器内部における重大事故等時の温度上昇に伴うシェル壁の伸びに対する使用済燃料プール壁の検討を実施することを目的とし、使用済燃料プールの壁及び底板について、CCV規格に基づく各許容値を超えないことを確認した。

第6章「使用済燃料プール底板の面内せん断について」では、S<sub>s</sub>地震時に生じる使用済燃料プールの床部の面内せん断応力について算出しており、その結果、底板に生じる各要素の最大面内せん断応力が0.565 (N/mm<sup>2</sup>)であり、コンクリートの長期許容応力度以下となり、底板に生じる面内せん断応力は十分小さいことを確認した。

第7章「鋼製ライナの評価について」では、使用済燃料プール内面の鋼製ライナについて、鋼製ライナは躯体に追従するため、鉄筋コンクリートのひずみを鋼製ライナに生じるひずみと見做して、ひずみの評価を行った。その結果、最大ひずみは572 $\mu$ であり、許容値5000 $\mu$ に対して十分小さいことを確認した。

第8章「8. 使用済燃料の調密化による重量変更による原子炉建屋の応答への影響検討」では、建設工認時からの使用済燃料の調密化による重量の変遷及び重量変更（重量増分）を示している。また、その増分を原子炉建屋の設備の補強や追加等の改造工事に伴い重量が増加することの影響を考慮した「補強反映モデル」に重量を更に加算した「調密化反映モデル」による地震応答解析を実施し、原子炉建屋の応答への影響に

について検討した。その結果、「補強反映モデル」の建屋応答に及ぼす影響が無いこと確認した。

## 2. 地震荷重以外の荷重組合せに対する検討

使用済燃料プールは、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」にて、CCV 規格に基づく荷重組合せのうち、地震時に関する荷重の組合せに対する評価を実施している。しかしながら、地震荷重と組み合わせないケースについて建設工認の記載が不足しているため、今回工認において地震荷重と組み合わせない部分について、その差分を補うこととした。

本資料では、東海第二発電所の使用済燃料プールの応力解析に考慮する荷重の組合せに対する評価を実施する。

### 2.1 荷重の設定方針

#### (1) 固定荷重及び積載荷重

解析モデルに考慮する固定荷重のうち、躯体重量については、鉄筋コンクリートの単位体積重量による。

また、床に作用する積載荷重のうち、使用済燃料プールの機器荷重については、使用済燃料の稠密化による重量変更を考慮し、その他の部位の積載荷重及び配管荷重については、建設時の設計値による。

#### (2) 静水圧荷重

各部位の水位は、添付書類「V-1-3-1 使用済燃料貯蔵槽の温度、水位及び漏えいを監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書」に基づき設定する。

#### (3) 長期ラック荷重

解析モデルに考慮する使用済燃料プール底版に作用する長期ラック荷重は、使用済燃料の稠密化による重量変更を考慮して設定する。

#### (4) 地震荷重

地震荷重は、添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」で設定した建屋全体としての動的地震力及び静的地震力から、せん断力分配解析によりプール部に分配されたせん断力及び曲げモーメントを用いて算定する。

#### (5) 温度荷重

温度条件は建設時の設計条件に基づき設定し、1次元モデルを用いた定常温度分布解析により算出した温度分布解析結果から、各壁及び底版における表面の温度差とコンクリート基準温度からの差を設定する。

## 2.2 荷重の組合せ及び許容限界

### 2.2.1 荷重組合せケースの選定

使用済燃料プールの荷重の組合せ及び許容限界を表 2-1 に示す。

また、先行プラントにおける荷重の組合せに対する東海第二発電所の使用済燃料プールでの要否について表 2-2 に示す。

先行 ABWR は、格納容器と一次遮蔽壁が一体的で、RCCV の円筒壁及びトップスラブが使用済燃料プールの一部の壁及び床を構成する。本資料においては、原子炉格納容器内において生じる圧力荷重、配管の熱膨張によって生じる配管荷重、逃がし安全弁作動時荷重、水力的動荷重、ジェット力及びジェット力作用時配管荷重については、使用済み燃料プールに直接作用しないため、これらを除いた荷重組合せケースについて実施することとした。原子炉格納容器内において生じる荷重については、添付書類「V-1-1-4-7-1 設定根拠に関する説明書（原子炉格納容器）」にて評価を実施する。

表 2-1 荷重の組合せ及び許容限界

荷重番号	荷重時名称	荷重の組合せ	許容値
1	通常運転時	$DL_1 + T_{11}$	長期許容応力度
2	燃料交換時	$DL_2 + T_{12}$	
3	地震時 (1)	$DL_1 + T_{11} + K_1 + KH_1$	短期許容応力度
4	故障時	$DL_1 + T_3$	
5	地震時 (2)	$DL_1 + K_2 + KH_2$	終局強度

注 1 : 荷重番号 1~4 については、温度荷重のない場合も考慮する。

注 2 : 温度荷重は、夏及び冬を考慮する。

注 3 : 地震荷重は、NS 方向及び EW 方向並びに鉛直方向を考慮する。

$DL_1$  : 死荷重及び活荷重 (通常時)

$DL_2$  : 死荷重及び活荷重 (燃料交換時)

$T_{11}$  : 運転時温度荷重

$T_{12}$  : 燃料交換時温度荷重

$T_3$  : 故障時温度荷重

$K_1$  :  $S_d$  地震荷重

$K_2$  :  $S_s$  地震荷重

$KH_1$  :  $S_d$  地震荷重と同時に作用する動水圧

$KH_2$  :  $S_s$  地震荷重と同時に作用する動水圧

表 2-2 荷重の組合せの要否

荷重番号	荷重時名称	荷重の組合せ	許容値	実施要否	要否
1	通常運転時	$DL_1 + T_{11}$	長期許容応力度	○	既工認に示されていないため実施（補足説明資料）
2	燃料交換時	$DL_2 + T_{12}$		○	既工認に示されていないため実施（補足説明資料）
3	逃がし安全弁作動時	$DL_1 + T_{11}$		×	格納容器に作用する荷重であり，東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要
4	試験時	$DL_3$		×	格納容器に作用する荷重であり，東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要
5	地震時 (1)	$DL_1 + T_{11} + K_1 + KH_1$	短期許容応力度	◎	入力地震動の見直しにより実施
6	異常時 (1)	$DL_1 + T_{21}$		×	格納容器に作用する荷重であり，東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要
7	異常時 (2)	$DL_1 + T_{22}$		×	格納容器に作用する荷重であり，東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要
8	故障時	$DL_1 + T_3$		○	既工認に示されていないため実施（補足説明資料）
9	地震時 (2)	$DL_1 + K_2 + KH_2$	終局強度	◎	入力地震動の見直しにより実施
10	異常時 (3)	$DL_1$		×	格納容器に作用する荷重であり，東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要
11	ジェット力作用時	$DL_1$		×	格納容器に作用する荷重であり，東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要
12	(異常 + 地震)時	$DL_1 + K_1 + KH_1$		×	格納容器に作用する荷重であり，東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要

【凡例】 ◎：添付資料「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」に評価結果を記載する。

○：本補足説明資料に評価結果を記載する。

×：実施不要

注 1：荷重番号 1～3 及び 5～8 については，温度荷重のない場合も考慮する。

注 2：温度荷重は，夏及び冬を考慮する。

注 3：地震荷重は，NS 方向及び EW 方向並びに鉛直方向を考慮する。

注 4 : 荷重の組合せは，先行プラント（ABWR）から，圧力（P），配管荷重（R）及び格納容器内の水力学的動荷重（H）を除いたものを示す。

- DL<sub>1</sub> : 死荷重及び活荷重（通常時）
- DL<sub>2</sub> : 死荷重及び活荷重（燃料交換時）
- DL<sub>3</sub> : 死荷重及び活荷重（試験時）
- T<sub>11</sub> : 運転時温度荷重
- T<sub>12</sub> : 燃料交換時温度荷重
- T<sub>21</sub> : 異常時温度荷重（30分）
- T<sub>22</sub> : 異常時温度荷重（24時間）
- T<sub>3</sub> : 故障時温度荷重
- K<sub>1</sub> : S<sub>d</sub>地震荷重
- K<sub>2</sub> : S<sub>s</sub>地震荷重
- KH<sub>1</sub> : S<sub>d</sub>地震荷重と同時に作用する動水圧
- KH<sub>2</sub> : S<sub>s</sub>地震荷重と同時に作用する動水圧



参考

表－参考 1 荷重の組合せ及び許容限界  
(大間原子力発電所 第 1 号機の使用済燃料貯蔵プール)

荷重番号	荷重時名称	荷重の組合せ	許容値
1	通常運転時	$DL_1 + P_1 + R_1 + T_{11}$	長期許容応力度
2	燃料交換時	$DL_2 + T_{12}$	
3	逃がし安全弁作動時	$DL_1 + P_1 + R_1 + T_{11} + H_1$	
4	試験時	$DL_3 + P_0$	
5	地震時 (1)	$DL_1 + P_1 + T_{11} + H_1 + K_1 + KH_1 + R_{41}$	短期許容応力度
6	異常時 (1)	$DL_1 + P_{21} + R_2 + T_{21} + H_2$	
7	異常時 (2)	$DL_1 + P_{22} + R_2 + T_{22}$	
8	故障時	$DL_1 + P_1 + R_1 + T_3 + H_1$	終局強度
9	地震時 (2)	$DL_1 + P_1 + H_1 + K_2 + KH_2 + R_{42}$	
10	異常時 (3)	$DL_1 + 1.5 \cdot P_D + R_2$	
11	ジェット力作用時	$DL_1 + R_3$	
12	(異常 + 地震)時	$DL_1 + P_{21} + K_1 + KH_1 + R_{41}$	

注 1：荷重番号 1～3 及び 5～8 については、温度荷重のない場合も考慮する。

注 2：温度荷重は、夏及び冬を考慮する。

注 3：地震荷重は、NS 方向及び EW 方向並びに鉛直方向を考慮する。

## 2.3 荷重及び荷重組合せ

### 2.3.1 荷重

#### (1) 固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P)

解析モデルに考慮する固定荷重及び積載荷重は、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.2.1 荷重」に記載の荷重に準ずるものとする。ただし、燃料交換時には蒸気乾燥機・気水分離機ピットには機器荷重としてに表 2-3 に示す荷重を考慮する。

表 2-3 蒸気乾燥機・気水分離機ピットの機器荷重

状態	通常運転時	燃料交換時	故障時
蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット	—	88.3 kN/m <sup>2</sup>	—

#### (2) 静水圧荷重 (H<sub>s</sub>)

各状態における使用済燃料プール，原子炉ウェル及び蒸気乾燥機・気水分離器ピット内の水の有無を表 2-4 に示す。また，解析モデルに考慮するプール内の静水圧荷重の算定条件を表 2-5 に示す。

表 2-4 各状態における水の有無

状態	通常運転時	燃料交換時	故障時
使用済燃料プール	○	○	○
原子炉ウェル	×	○	×
蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット	×	○	×

表 2-5 プールの静水圧荷重の算定条件

荷重	最大水位 (m)	底面レベル (m)	最大水深 (m)
使用済燃料プール	EL. +46.195	EL. +34.689	11.506
原子炉ウェル	EL. +46.195	—	7.315
蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット	EL. +46.195	EL. +38.880	7.315

(3) 長期ラック荷重 ( $R_0$ )

解析モデルに考慮する固定荷重及び積載荷重は、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.2.1 荷重」に記載の荷重に準ずるものとする。

(4) 温度荷重 ( $T_0, T_1, T_2$ )

通常運転時 ( $T_0$ )、燃料交換時 ( $T_1$ ) 及び故障時 ( $T_2$ ) における雰囲気温度を表 2-6 に示す。原子炉建屋内雰囲気温度は、冬季及び夏季においてそれぞれ  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  及び  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、外気温はそれぞれ  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  及び  $25.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  とする。

これらの条件より各部位の表面温度を一定とした定常温度分布解析を実施し、熱応力解析に用いる温度分布を算出する。

定常温度分布解析は、応力解析モデルの各部位の板厚方向に対する 1 次元モデルを用いて行う。また、熱応力解析は、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」に示す 3 次元 FEM モデルを用いた弾性応答解析とし、解析コード「MSC NASTRAN ver 2016.1.1」を用いる。また、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-1 計算機プログラム (解析コード) の概要・MSC NASTRAN」に示す。

壁及び底版の温度分布設定箇所を図 2-1 に、壁及び底版の設定温度分布を表 2-7 に示す。

表 2-6 各状態における雰囲気温度

荷重	通常運転時 ( $^{\circ}\text{C}$ )	燃料交換時 ( $^{\circ}\text{C}$ )	故障時 ( $^{\circ}\text{C}$ )
ドライウエル	66	66	66
サプレッションプール	32	32	32
原子炉ウエル	66	52	66
使用済燃料プール	52	52	65
蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット	10 (40) *	52	10 (40) *

注記 \* : 蒸気乾燥器・気水分離器ピット内は原子炉建屋内の雰囲気温度と同一。カッコ内は夏季の温度を示す。

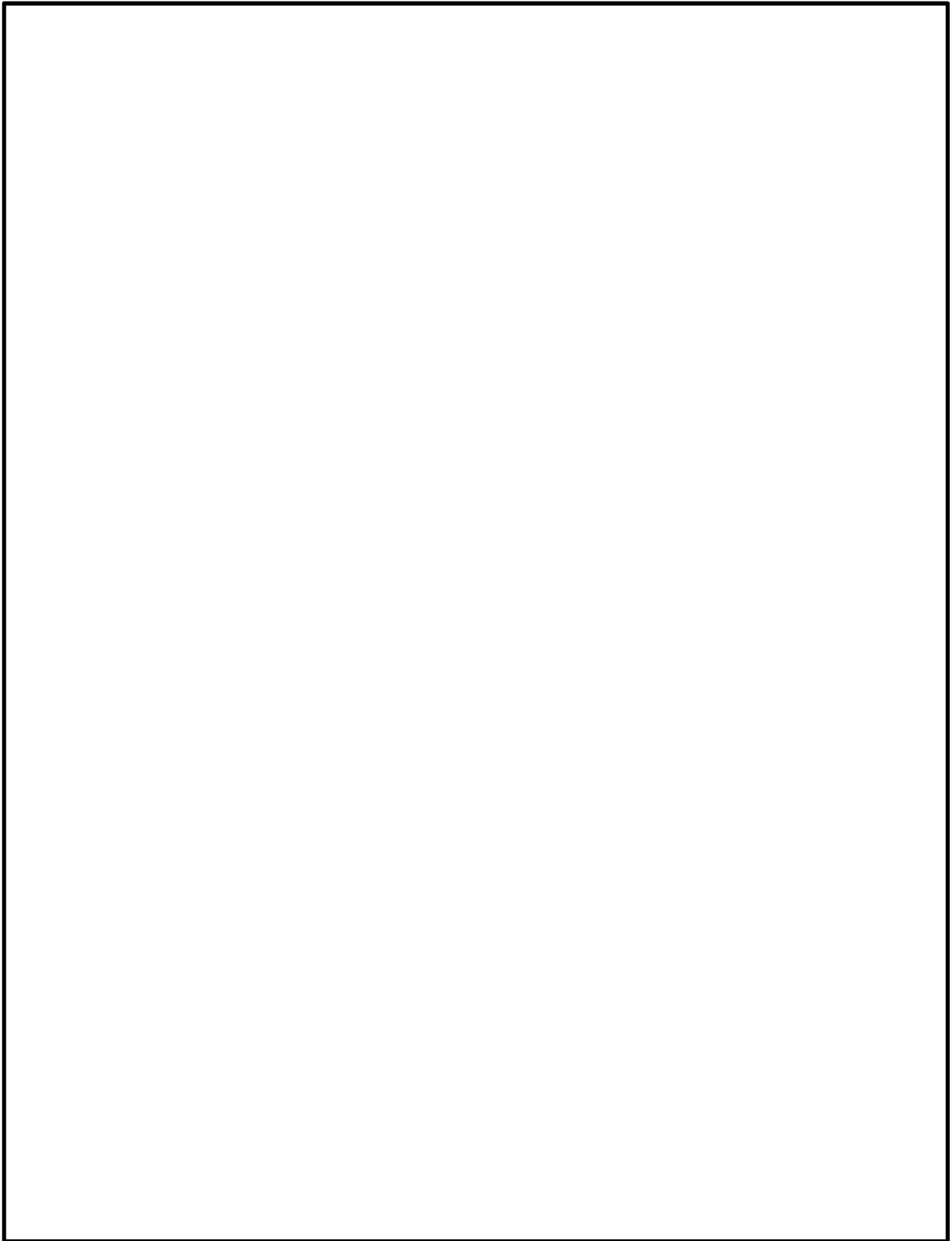
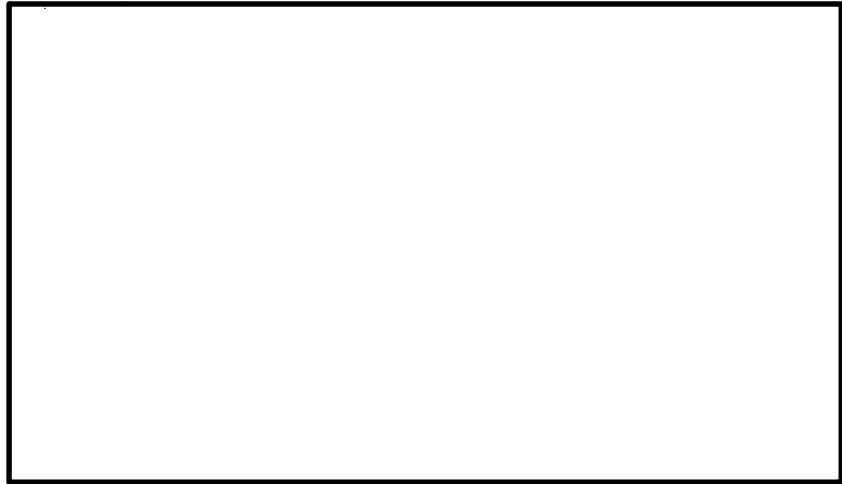
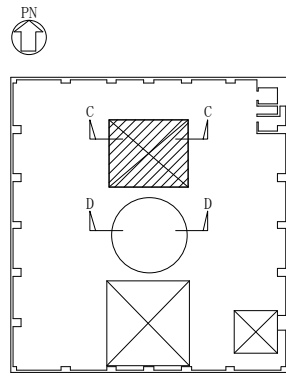


図 2-1 (1/3) 各壁及び底版の温度分布設定箇所

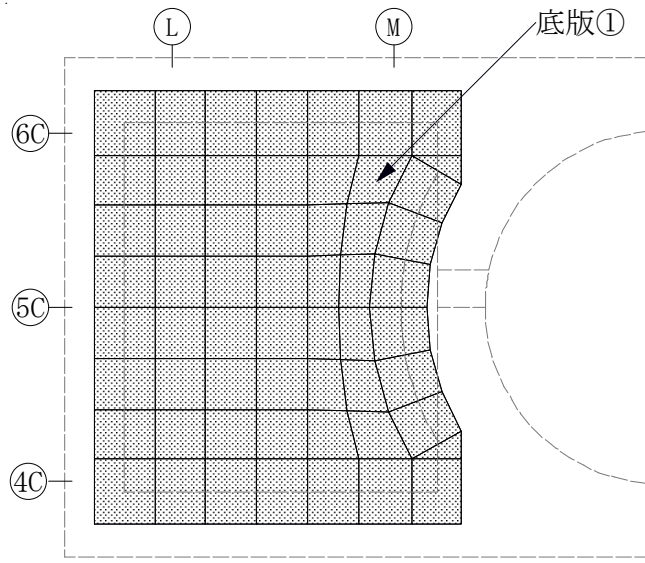


(c) 北側プール壁 (C-C 矢視)



(d) 南側ウェル壁 (D-D 矢視)

図 2-1 (2/3) 各壁及び底版の温度分布設定箇所



(e) プール底版

図 2-1 (3/3) 各壁及び底版の温度分布設定箇所

表 2-7 設定温度分布

名称	表面温度 (°C)											
	通常運転時				燃料交換時				故障時			
	冬季		夏季		冬季		夏季		冬季		夏季	
	プール 内側	プール 外側	プール 内側	プール 外側	プール 内側	プール 外側	プール 内側	プール 外側	プール 内側	プール 外側	プール 内側	プール 外側
東側壁①	52.0	17.5	52.0	42.1	52.0	17.5	52.0	42.1	65.0	19.8	65.0	44.4
西側壁①	52.0	20.7	52.0	43.0	52.0	20.7	52.0	43.0	65.0	23.9	65.0	46.3
西側壁②	52.0	17.5	52.0	42.1	52.0	17.5	52.0	42.1	65.0	19.8	65.0	44.4
南側壁①	52.0	62.8	52.0	62.8	52.0	52.0	52.0	52.0	65.0	65.8	65.0	65.8
南側壁②	52.0	62.8	52.0	62.8	52.0	62.8	52.0	62.8	65.0	65.8	65.0	65.8
南側壁③	52.0	63.2	52.0	63.2	52.0	63.2	52.0	63.2	65.0	65.8	65.0	65.8
北側壁①	52.0	17.9	52.0	42.3	52.0	17.9	52.0	42.3	65.0	20.4	65.0	44.7
底版①	52.0	19.5	52.0	42.7	52.0	19.5	52.0	42.7	65.0	22.4	65.0	45.6

### 2.3.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 2-8 に示す。

表 2-8 荷重の組合せ

外力の状態		荷重の組合せ
長期	通常運転時	$GP + H_{s1} + R_0 + T_0$
	燃料交換時	$GP + H_{s2} + R_0 + T_1$
短期	故障時	$GP + H_{s3} + R_0 + T_2$

GP : 固定荷重及び積載荷重

$H_{s1}$  : 通常運転時静水圧荷重

$H_{s2}$  : 燃料交換時静水圧荷重

$H_{s3}$  : 故障時静水圧荷重

$R_0$  : 長期ラック荷重

$T_0$  : 通常運転時温度荷重

$T_1$  : 燃料交換時温度荷重

$T_2$  : 故障時温度荷重



### 2.3.3 許容限界

応力解析による評価における使用済燃料プールの許容限界は、表 2-9 のとおり設定する。

また、コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表 2-10 及び表 2-11 に示す。

表 2-9 応力解析による評価における許容限界

外力の状態	部位	許容限界 (評価基準値)
通常運転時	使用済燃料 プール躯体	「CCV規格」に基づく 荷重状態Ⅰの許容値
燃料交換時	使用済燃料 プール躯体	
故障時	使用済燃料 プール躯体	「CCV規格」に基づく 荷重状態Ⅲの許容値

表 2-10 コンクリートの許容応力度

外力の状態	$F_c = 22.1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$			
	応力状態 1* <sup>1</sup>		応力状態 2* <sup>2</sup>	
	圧縮 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断 (N/mm <sup>2</sup> )
通常運転時 燃料交換時	7.36	0.711	9.94	0.711
故障時	14.7	1.06	16.5	1.06

注記 \*1: 「応力状態 1」とは、各荷重状態において温度荷重により生じる応力を除いた応力が生じている状態をいう。

\*2: 「応力状態 2」とは、各荷重状態において温度荷重による応力が生じている状態をいう。

表 2-11 鉄筋の許容応力度

外力の状態	SD345*	
	引張及び圧縮 (N/mm <sup>2</sup> )	面外せん断 (N/mm <sup>2</sup> )
通常運転時 燃料交換時	195	195
故障時	345	345

注記 \*: 建設当時の鉄筋の種類は SD35 であるが現在の規格 (SD345) に読み替えた応力度を示す。

## 2.4 解析モデル及び諸元

解析モデル及び諸元は、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.4.1 モデル化の基本方針」に準ずるものとする。

## 2.5 評価方法

### 2.5.1 応力解析方法

使用済燃料プールについて、3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析を実施する。

#### (1) 荷重ケース

通常運転時、燃料交換時及び故障時の応力は、単独荷重による解析で求まる応力を組み合わせて求める。

単独荷重の記号を以下に示す。

- GP : 固定荷重及び積載荷重
- $H_{s1}$  : 通常運転時静水圧荷重
- $H_{s2}$  : 燃料交換時静水圧荷重
- $R_0$  : 長期ラック荷重
- $T_{01}$  : 通常運転時温度荷重 (冬)
- $T_{02}$  : 通常運転時温度荷重 (夏)
- $T_{11}$  : 燃料交換時温度荷重 (冬)
- $T_{12}$  : 燃料交換時温度荷重 (夏)
- $T_{21}$  : 故障時温度荷重 (冬)
- $T_{22}$  : 故障時温度荷重 (夏)

(2) 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 2-12 及び表 2-13 に示す。

表 2-12 荷重の組合せケース（通常運転時及び燃料交換時）

状態		ケース No.	荷重の組合せ
応力状態 1	通常運転時	0-1	$GP + H_{s1} + R_0$
	燃料交換時	0-2	$GP + H_{s2} + R_0$
応力状態 2	通常運転時	冬	$GP + H_{s1} + R_0 + T_{01}$
		夏	$GP + H_{s1} + R_0 + T_{02}$
	燃料交換時	冬	$GP + H_{s2} + R_0 + T_{11}$
		夏	$GP + H_{s2} + R_0 + T_{12}$

表 2-13 荷重の組合せケース（故障時）

状態		ケース No.	荷重の組合せ
応力状態 2	故障時	冬	$GP + H_{s1} + R_0 + T_{21}$
		夏	$GP + H_{s1} + R_0 + T_{22}$

(3) 荷重の入力方法

荷重の入力方法は、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.5.1 応力解析方法」に準ずるものとする。

## 2.5.2断面の評価方法

使用済燃料プールの断面の評価に用いる応力は、3次元FEMモデルを用いた応力解析により得られた各荷重による応力（軸力、曲げモーメント及びせん断力）とする。

### (1) 壁

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、軸力による圧縮応力度、面内せん断力並びに面外せん断力を算定し、「CCV規格」に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

#### 【軸力、曲げモーメント及び面内せん断力に対する断面の評価方法】

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度の算定においては、「CCV規格」のCVE-3511に基づき次の2つの計算式に示す等価膜力を考慮した上で、「CCV規格」のCVE-3511.1に基づき、表2-10及び表2-11に示す各許容値を超えないことを確認する。膜力と面内せん断力の関係図を図2-2に示す。

$$N_{\phi}^* = N_{\phi} \pm |N_{\phi\theta}|$$

$$N_{\theta}^* = N_{\theta} \pm |N_{\phi\theta}|$$

ここで、

$N_{\phi}^*$ ,  $N_{\theta}^*$  :  $\phi$ ,  $\theta$  方向の等価膜力

$N_{\phi}$ ,  $N_{\theta}$  :  $\phi$ ,  $\theta$  方向の膜力

$N_{\phi\theta}$  : 面内せん断力

( $\phi$  方向は子午線方向,  $\theta$  方向は円周方向とする)

上記の式のうち、「膜力」は「軸力」に読み替えることとする。また、「子午線方向」は「縦方向」に、「円周方向」は「横方向」にそれぞれ読み替えることとする。

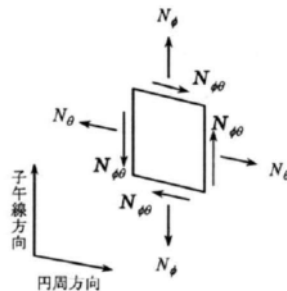


図 2-2 膜力と面内せん断力の関係図

【面内せん断力に対する断面の評価方法】

面内せん断力については、「CCV規格」の CVE-3512.1 に基づき、評価対象部位に生じる面内せん断応力度が、次の 2 つの計算式により計算した終局面内せん断応力度のいずれか小さい方の値に対し、通常運転時及び燃料交換時においては 0.5 倍、故障時においては 0.75 倍の値を超えないことを確認する。

$$\tau_u = 0.5 \left\{ (p_{t\phi} \cdot f_y - \sigma_{0\phi}) + (p_{t\theta} \cdot f_y - \sigma_{0\theta}) \right\}$$

$$\tau_u = 1.10 \sqrt{F_c}$$

ここで、

$\tau_u$  : 終局面内せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$p_{t\phi}$  : 子午線方向主筋の鉄筋比

$p_{t\theta}$  : 円周方向主筋の鉄筋比

$\sigma_{0\phi}$  : 外力による子午線方向の膜応力度 (N/mm<sup>2</sup>)  
(引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)

$\sigma_{0\theta}$  : 外力による円周方向の膜応力度 (N/mm<sup>2</sup>)  
(引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)

$f_y$  : 鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度であり、表 2-11 に示す値 (N/mm<sup>2</sup>)

$F_c$  : コンクリートの設計基準強度であり表 2-10 に示す値 (N/mm<sup>2</sup>)

上記の式のうち、「子午線方向主筋」は「縦方向主筋」に、「円周方向主筋」は「横方向主筋」にそれぞれ読み替えることとする。また、「子午線方向の膜応力度」は「縦方向の軸応力度」に、「円周方向の膜応力度」は「横方向の軸応力度」にそれぞれ読み替えることとする。

【面外せん断力に対する断面の評価方法】

面外せん断力については、「CCV規格」の CVE-3513.1 に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断応力度が、次の 2 式により計算した終局面外せん断応力度のいずれか小さい方の値に対し、通常運転時及び燃料交換時においては 0.5 倍、故障時においては 0.75 倍の値を超えないことを確認する。

$$\tau_R = \Phi \left\{ 0.1(p_t \cdot f_y - \sigma_0) + 0.5p_w \cdot f_y + 0.235\sqrt{F_c} \right\}$$

$$\tau_R = 1.10\sqrt{F_c}$$

ここで、

$\tau_R$  : 終局面外せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$p_t$  : 主筋の鉄筋比

$\sigma_0$  : 外力による膜応力度 (N/mm<sup>2</sup>) (引張の符号を正とする)  
 $p_w$  : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であって、次の計算式により計算した値

$$p_w = a_w / (b \cdot x)$$

$a_w$  : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$b$  : 断面の幅 (mm)

$x$  : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)

$\Phi$  : 低減係数であり、次の計算式により計算した値

(1 を超える場合は 1, 0.58 未満の場合は 0.58 とする)

$$\Phi = 1 / \sqrt{M / (Q \cdot d)}$$

$M$  : 曲げモーメント (N・mm)

$Q$  : せん断力 (N)

$d$  : 断面の有効せい (mm)

なお、 $F_c$ は表 2-11 に、 $f_y$ は表 2-10 による。また、上記の式のうち、「外力による膜応力度」は「外力による軸応力度」に読み替えることとする。

## (2) 底版

軸力、曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力を算定し、「CCV規格」に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

### 【軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法】

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度の算定については、「CCV規格」の CVE-3521.1 に基づき、表 2-10 及び表 2-11 に示す各許容値を超えないことを確認する。

### 【面外せん断力に対する断面の評価方法】

面外せん断力については、「CCV規格」の CVE-3522 に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断力が、次式により計算した値を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 p_w f_t (p_w - 0.002) \}$$

ここで、

$Q_A$  : 許容面外せん断力 (N)

$b$  : 断面の幅 (mm)

$j$  : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

$f_s$  : コンクリートの許容せん断応力度で、表 2-10 に示す値 (N/mm<sup>2</sup>)

$p_w$  : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であり、次の計算式により計

算した値（0.002 以上とし，通常運転時及び燃料交換時において 0.006 を超える場合は 0.006 とし，故障時において 0.012 を超える場合は 0.012 とする）

$$p_w = a_w / (b \cdot x)$$

$a_w$  : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$x$  : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)

$f_t$  : 面外せん断力に対する補強筋の許容引張応力度であり，表 2-12 に示す値 (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha$  : 割増し係数であり，次式により計算した値（2 を超える場合は 2，1 未満の場合は 1 とする）

$$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1}$$

$M$  : 曲げモーメント (N・mm)

$Q$  : せん断力 (N)

$d$  : 断面の有効せい (mm)

## 2.6 評価結果

「2.5.2 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を以下に示す。使用済燃料プールの配筋一覧は、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「4. 評価結果」に記載の配筋一覧に準ずるものとする。

### 2.6.1 通常運転時及び燃料交換時

断面の評価結果を記載する要素を、以下のとおり選定する。

#### (1) 壁

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、面外せん断力並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

#### (2) 底版

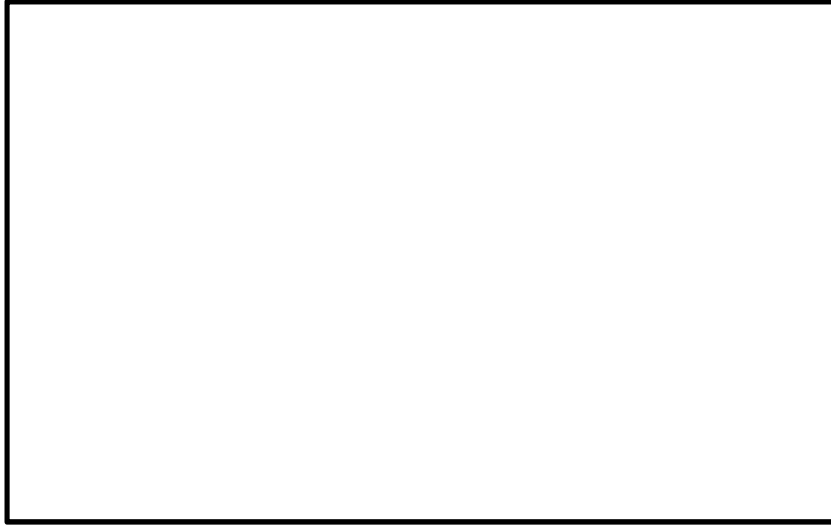
軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

選定した要素の位置を図2-3に、評価結果を表2-14に示す。

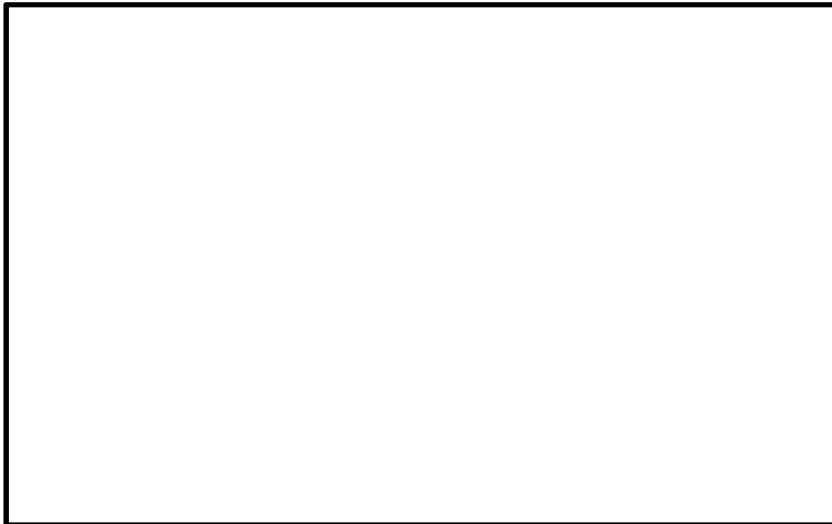
通常運転時及び燃料交換時において、壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、面内せん断力並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

また、底版については、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。





(a) 北側壁

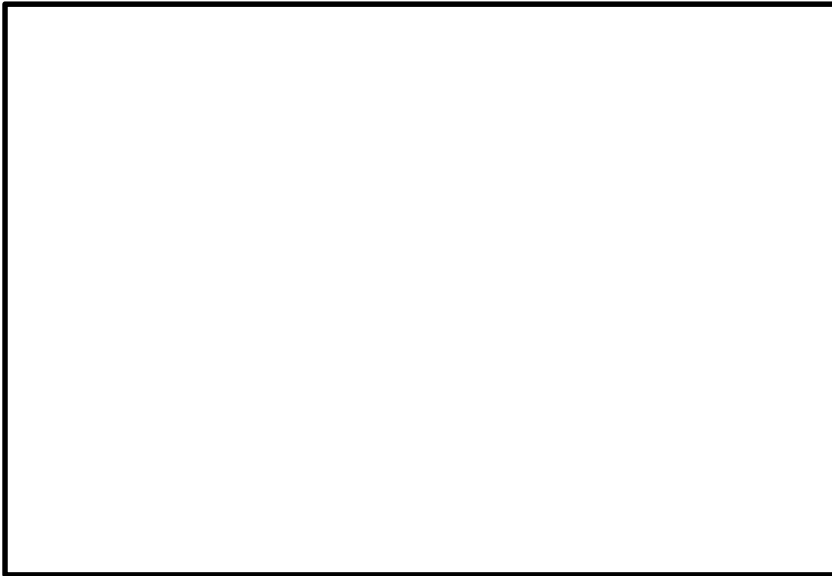


(b) 東側壁

図 2-3 (1/3) 結果を記載する要素の位置 通常運転時及び燃料交換時



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 2-3 (2/3) 結果を記載する要素の位置 通常運転時及び燃料交換時

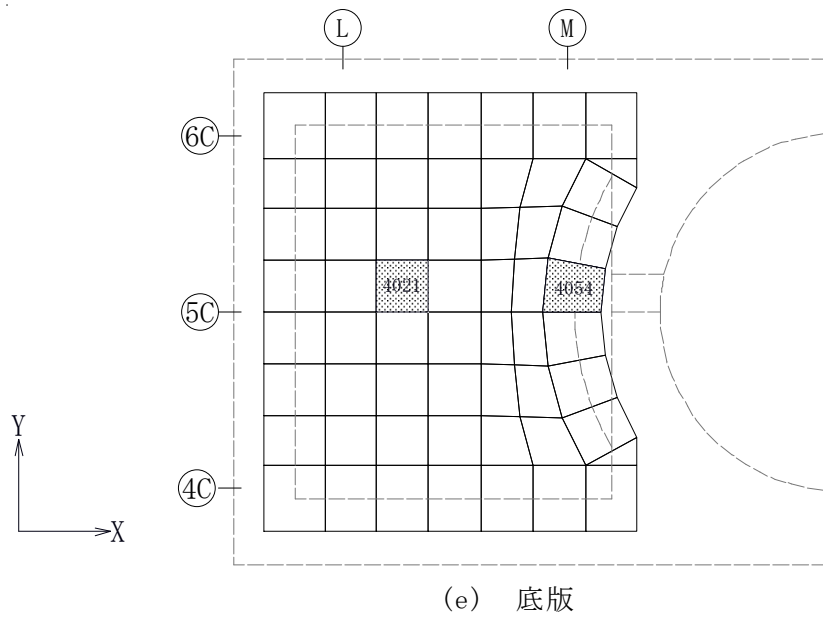


図 2-3 (3/3) 結果を記載する要素の位置 通常運転時及び燃料交換時

表 2-14 評価結果 通常運転時及び燃料交換時

		評価項目	要素位置	組合せケース	解析結果	許容値	備考
軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力*	北側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	2204	0-3	4.48	9.94	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	2239	0-3	142	195	引張側
	東側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1586	0-5	4.87	9.94	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1528	0-3	169	195	引張側
	南側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	3055	0-3	4.83	9.94	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	3037	0-5	111	195	引張側
	西側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1084	0-3	4.56	9.94	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1028	0-3	168	195	引張側
	底版	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	4021	0-3	4.02	9.94	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	4021	0-5	116	195	引張側
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	2205	0-3	0.445	1.20	
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1586	0-3	0.587	1.08	
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	3058	0-3	1.23	2.58	
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1084	0-5	0.656	1.23	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	2228	0-3	0.320	0.667	
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1536	0-5	0.221	0.459	
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	7801	0-3	0.763	1.04	
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1083	0-3	0.231	0.447	
	底版	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	4054	0-3	1.18	1.81	

\*：底版については、面内せん断力は考慮しない。

### 2.6.2 故障時

断面の評価結果を記載する要素を、以下のとおり選定する。

#### (1) 壁

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、面外せん断力並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

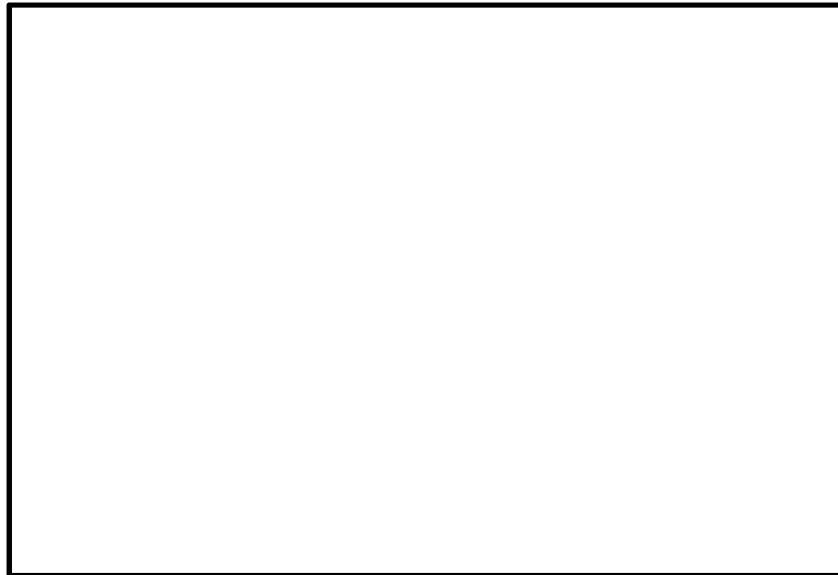
#### (2) 底版

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

選定した要素の位置を図 2-4 に、評価結果を表 2-15 に示す。

故障時において、壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、面内せん断力並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

また、底版については、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

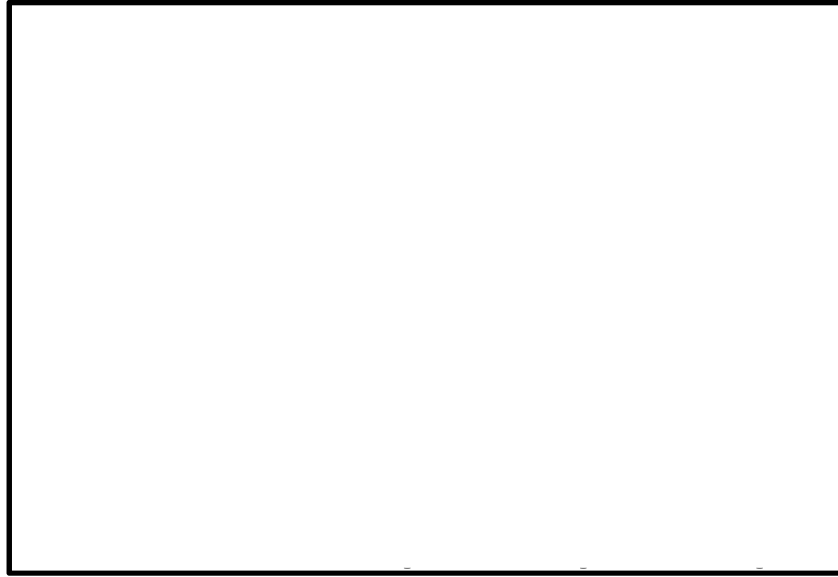


(a) 北側壁

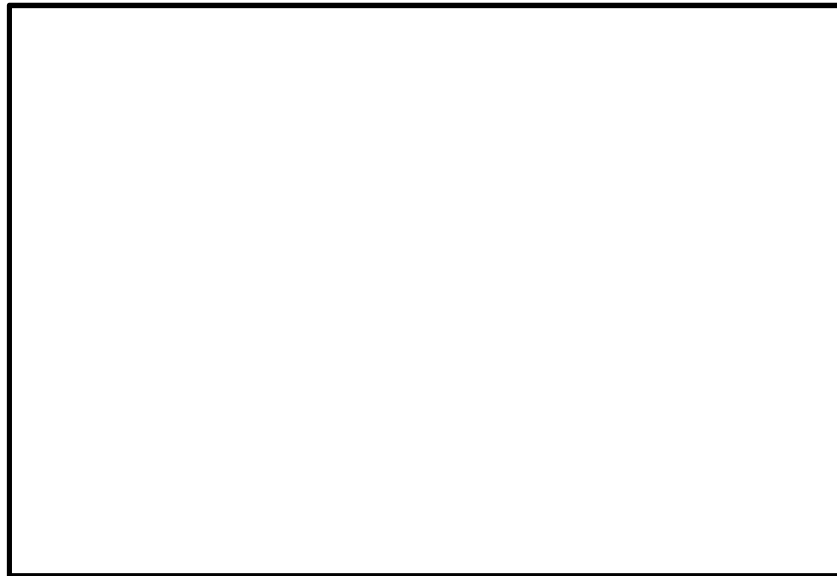


(b) 東側壁

図 2-4 (1/3) 結果を記載する要素の位置 故障時



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 2-4 (2/3) 結果を記載する要素の位置 故障時

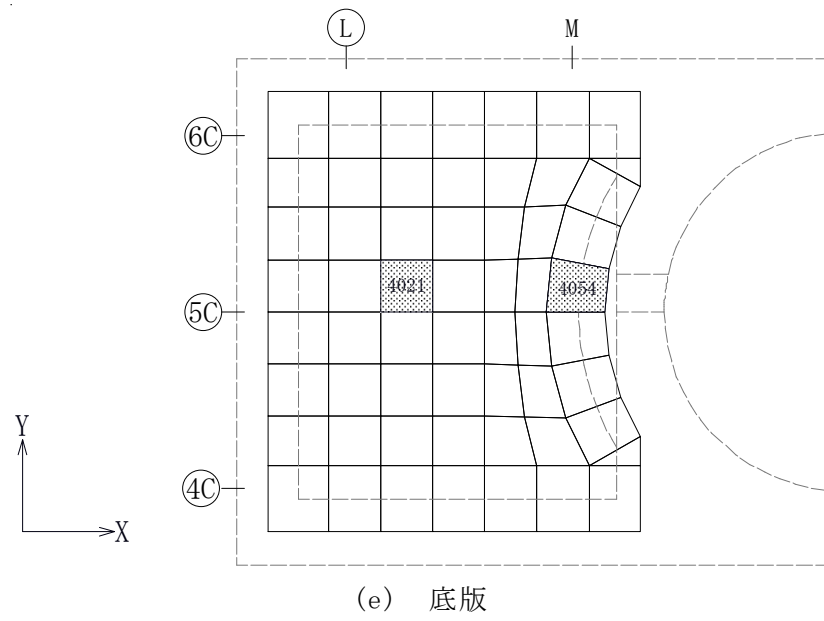


図 2-4 (3/3) 結果を記載する要素の位置 故障時



表 2-15 評価結果 故障時

		評価項目	要素位置	組合せケース	解析結果	許容値	備考
軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力*	北側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	2250	2-33	3.98	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	2213	2-33	177	345	引張側
	東側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1534	2-33	4.44	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1586	2-33	237	345	引張側
	南側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	3055	2-33	4.90	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	3007	2-33	110	345	引張側
	西側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1034	2-33	4.33	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1087	2-33	234	345	引張側
	底版	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	4021	2-33	4.57	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	4021	2-33	129	345	引張側
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	2205	2-33	0.505	1.89	
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1586	2-33	0.597	1.68	
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	3058	2-33	1.57	3.87	
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1086	2-33	0.565	1.64	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	2272	2-33	0.347	1.01	
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1583	2-33	0.214	0.590	
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	7801	2-33	0.990	1.60	
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1083	2-33	0.252	0.639	
	底版	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	4054	2-33	1.20	3.01	

注 : 底版については、面内せん断力は考慮しない。

### 3. 水平地震力の算定について

#### 3.1 評価方針

使用済燃料プールに作用する水平地震力は、せん断力分配解析によりプール部に分配されたせん断力及び曲げモーメントを用いて算定する。解析には、「MSC NASTRAN ver 2016.1.1」を用いる。また、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-1 計算機プログラム（解析コード）の概要・MSC NASTRAN」に示す。対象とする水平地震力は、弾性設計用地震動 $S_d$ に対する地震応答解析より算定される動的地震力、層せん断力係数 3.0 $C_i$  より算定される静的地震力及び基準地震動 $S_s$ に対する地震応答解析より算定される動的地震力である。なお、動的地震力は添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に基づく応答値の最大値に地盤物性のばらつきを考慮して設定する。

#### 3.2 評価方法

##### 3.2.1 応力解析方法

原子炉建屋について、シェル壁、内部ボックス壁及び外部ボックス壁をそれぞれ曲げ及びせん断剛性を評価した梁要素としてモデル化し、弾性応力解析を実施する。

##### (1) 解析モデル

解析モデルは、シェル壁、内部ボックス壁及び外部ボックス壁をそれぞれ曲げ及びせん断剛性を評価した梁要素とする5軸モデルとし、NS方向及びEW方向についてそれぞれ設定する。

各軸の水平変位は、各階の床位置において同一とする。せん断力分配解析モデルを図3-1に、解析モデル諸元を表3-1に示す。

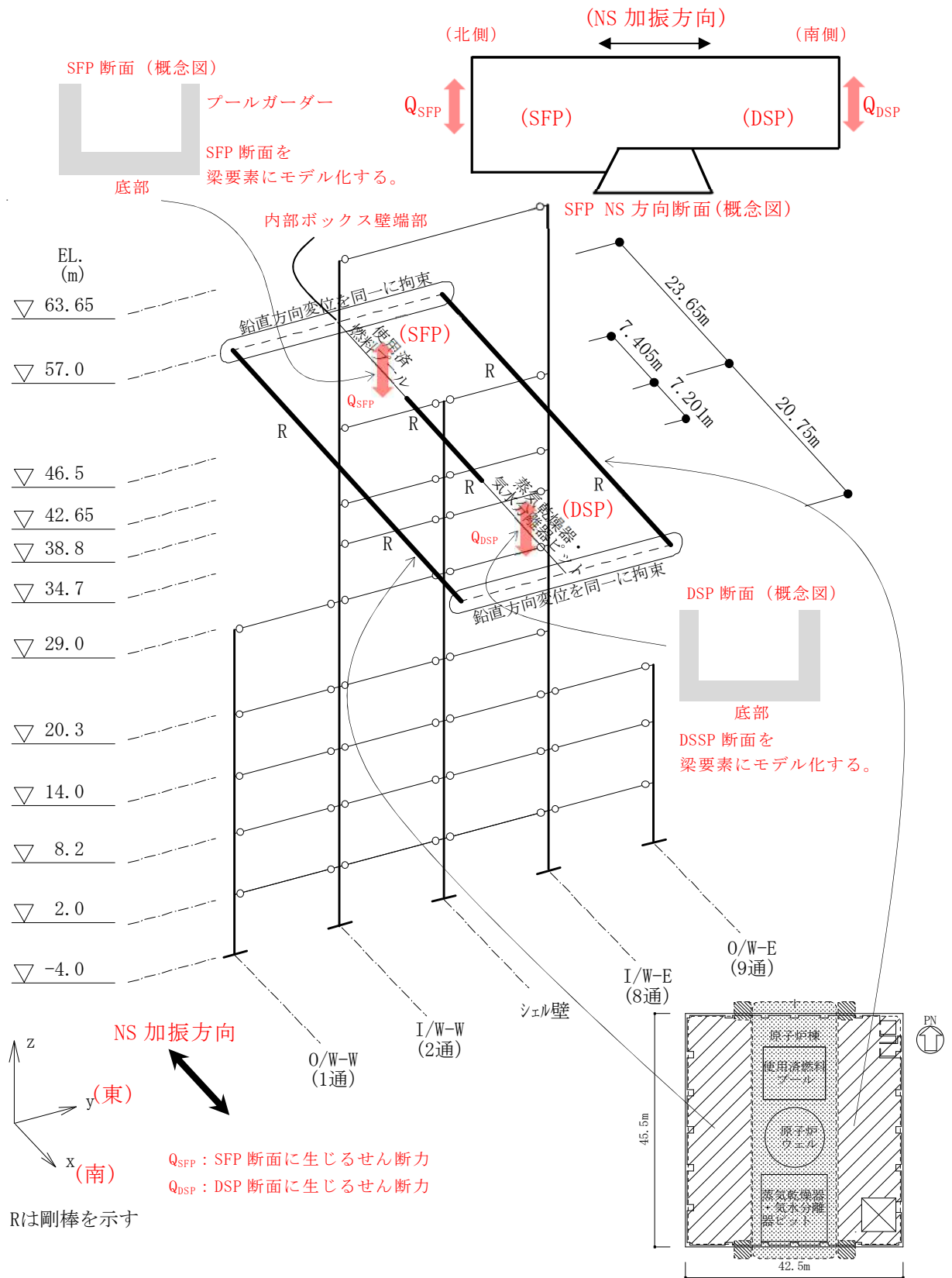
NS方向モデルについて、SFP及びDSPに相当する梁要素は、NS方向のEL. 42.65mの位置に設定する。それらの断面のモデル化では、SFP及びDSPの壁及び底版を含むコの字型状の断面のせん断断面積及び断面2次モーメントが等しい梁要素としてモデル化する。また、それらの拘束については、SFP及びDSPの内部ボックス壁側端部と両サイドに存在する内部ボックス壁の曲げ変形により生じる北端部及び南端部の鉛直変位が同一となるように拘束する。

梁要素に生じる鉛直方向のせん断力( $Q_{SFP}$ ,  $Q_{DSP}$ )は、シェル壁と内部ボックス壁の曲げ剛性の差に伴い生じるせん断力で、NS方向の地震荷重として応力解析に考慮する。

EW方向地震時には、SFP及びDSPの南北方向の材軸に対し、シェル壁と内部ボックス壁の曲げ剛性の差異に伴いねじりが生じる。このねじりを評価するために、せん断力分配解析により、EL. 34.7m～EL. 46.5mのシェル壁及び内部ボックス壁の曲げ変形に伴う回転角を算出する。

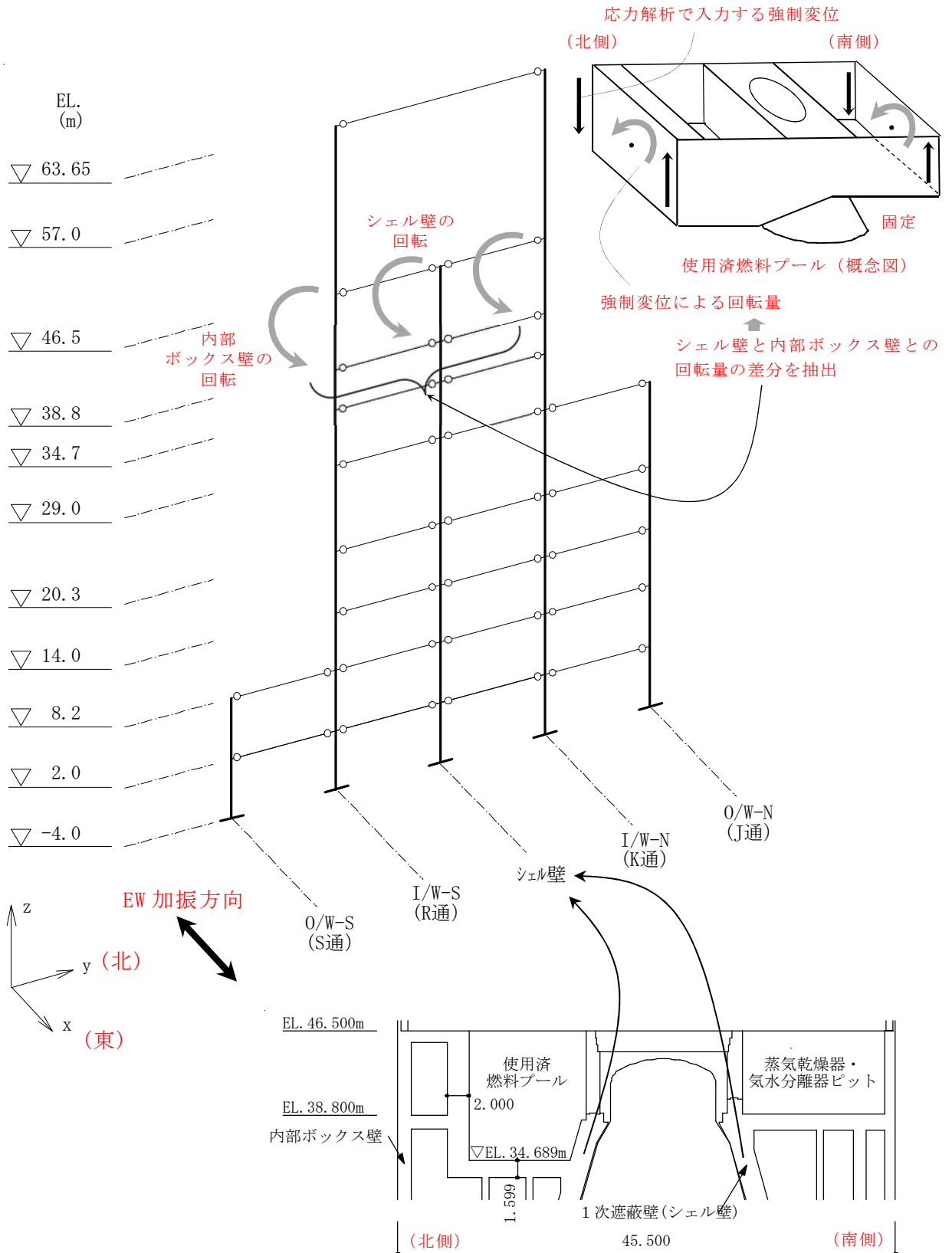
##### (2) 境界条件

せん断力分配解析モデルの各軸の下端を固定とする。



(a) NS 方向モデル

図 3-1 (1/2) せん断力分配解析モデル



(b) EW方向モデル

図3-1 (2/2) せん断力分配解析モデル

表 3-1 (1/2) 解析モデル諸元

(a) NS 方向

EL. (m)	せん断断面積 (m <sup>2</sup> )					断面二次モーメント (×10 <sup>3</sup> m <sup>4</sup> )				
	O/W-W	I/W-W	S/W	I/W-E	O/W-E	O/W-W	I/W-W	S/W	I/W-E	O/W-E
63.65										
57.0		13.65		13.65			10.2		10.2	
46.5		13.65		13.65			10.2		10.2	
38.8		21.0	170	21.0			13.3	37.8	13.3	
34.7		28.5	76.0	28.5			20.6	3.8	20.6	
29.0		28.5	86.0	28.5			20.6	4.2	20.6	
20.3	36.0	41.0	100	41.0		8.2	26.4	16.6	26.4	
14.0	36.0	45.5	115	45.5		8.2	27.9	22.3	27.9	
8.2	40.0	68.5	115	68.5	102	9.1	40.4	30.4	40.4	58.2
2.0	102	68.5	123	68.5	102	58.2	40.4	21.2	40.4	58.2
-4.0	102	68.5	123	68.5	102	58.2	40.4	21.6	40.4	58.2

(b) NS 方向 プール壁モデル諸元

	せん断断面積 (m <sup>2</sup> )	断面二次モーメント (m <sup>4</sup> )
使用済燃料プール	57.8	1380
蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット	25.5	346

表 3-1 (2/2) 解析モデル諸元

(c) EW 方向

EL. (m)	せん断断面積 (m <sup>2</sup> )					断面二次モーメント (×10 <sup>3</sup> m <sup>4</sup> )				
	O/W-S	I/W-S	S/W	I/W-N	O/W-N	O/W-S	I/W-S	S/W	I/W-N	O/W-N
63.65										
57.0		12.75		12.75			9.2		9.2	
46.5		12.75		12.75			9.2		9.2	
38.8		19.5	115	19.5			12.0	10.7	12.0	
34.7		32.5	76.0	32.5			17.3	2.7	17.3	
29.0		32.5	91.0	32.5			17.3	4.1	17.3	
20.3		44.0	96.0	44.0	53.0		23.1	12.1	23.1	14.6
14.0		42.5	104	42.5	35.0		25.1	17.3	25.1	10.1
8.2		64.0	115	64.0	102		36.4	23.8	36.4	50.8
2.0	102	64.0	122	64.0	102	57.4	36.4	20.9	36.4	57.4
-4.0	102	64.0	122	64.0	102	57.4	36.4	21.3	36.4	57.4

### 3.2.2 地震荷重の算定方法

せん断力分配解析より求まる層せん断力及び曲げモーメントに対し，ねじれ補正係数を乗じて建屋の各部の偏心を評価する。ねじれ補正係数は，次式により算定し，1.0以上とする。

$$\alpha = 1 + \frac{\sum D_x \cdot e}{J_x + J_y} \cdot Y$$

ここで，

$\alpha$  : ねじれ補正係数

$J_x$  :  $\sum(D_x \cdot y^2)$

$J_y$  :  $\sum(D_y \cdot x^2)$

$D_x$  : X方向の各耐震壁の剛性

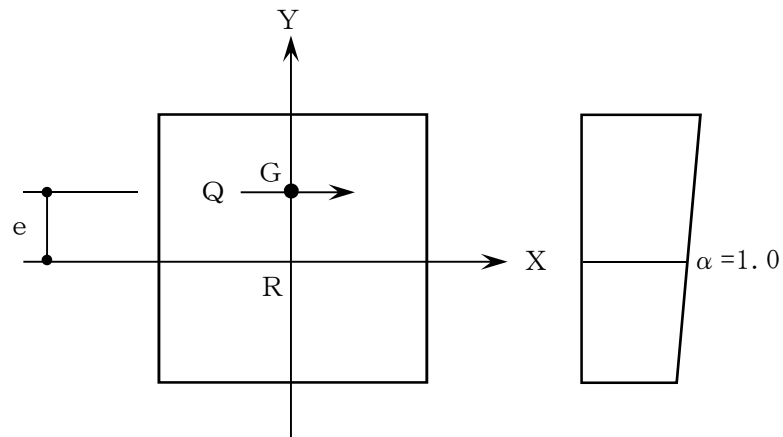
$D_y$  : Y方向の各耐震壁の剛性

$e$  : 偏心距離

$G$  : 重心（層せん断力作用中心）

$R$  : 剛心

$Q$  : 層せん断力



NS 方向の地震力のうち、プール壁モデルに生じる応力は、NS 方向のせん断力分配解析モデルの使用済燃料プール及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットに作用する鉛直方向のせん断力として評価する。

EW 方向の地震力のうち、プール壁に生じるねじれは、S/W 軸に対する I/W 軸の相対変形角により評価する。相対変形角は、せん断力分配解析モデルにおけるシェル壁の EL. 34.7 m（応力解析モデルの下端相当）の変形角に対する内部ボックス壁の EL. 38.8 m 及び EL. 46.5 m の相対変形角を平均した値を用いる。相対変形角の算出の概念図を図 3-2 に示す。

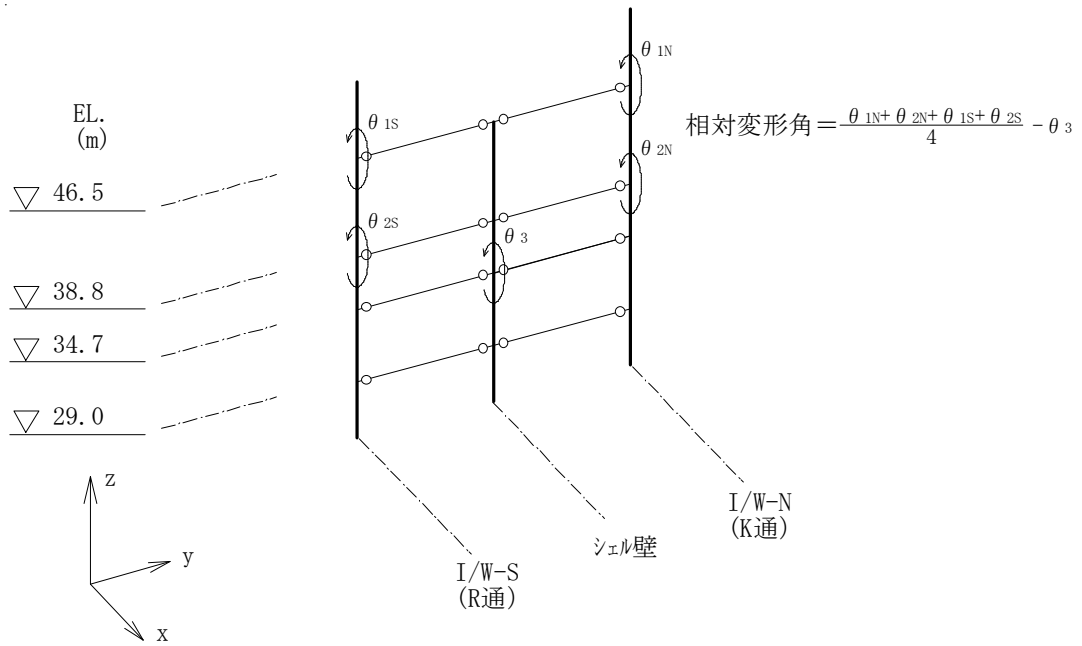


図 3-2 相対変形角の概念図



### 3.3 算定結果

「3.2 評価方法」に基づいて算定した使用済燃料プール部の地震荷重として、 $S_d$ 地震時及び $S_0$ 地震時について、せん断力、曲げモーメント、NS方向地震力によるプール側壁に作用するせん断力及びEW方向地震力によるプール壁に作用するねじりとしてシェル壁と内部ボックス壁の相対変形角を表3-2～表3-4に示す。

表3-3に示すせん断力は、NS方向の地震荷重として応力解析モデルの使用済燃料プール及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットの内部ボックス壁側端部に荷重として作用させる。また、表3-4に示す相対変形角は、EW方向の地震荷重として、応力解析モデルの使用済燃料プール及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットの内部ボックス壁側端部に強制変位として作用させる。

表 3-2 地震荷重（せん断力及び曲げモーメント）

(a) NS 方向

EL. (m)	せん断力 (kN)		曲げモーメント (kN・m)	
	S <sub>d</sub> 地震時	S <sub>s</sub> 地震時	S <sub>d</sub> 地震時	S <sub>s</sub> 地震時
46.5	47400	65000	76300	151000
38.8	-1670	-2200	8010	15400

(b) EW 方向

EL. (m)	せん断力 (kN)		曲げモーメント (kN・m)	
	S <sub>d</sub> 地震時	S <sub>s</sub> 地震時	S <sub>d</sub> 地震時	S <sub>s</sub> 地震時
46.5	28000	31900	27000	66700
38.8	970	4850	3680	10500

表 3-3 NS 方向地震荷重（プール壁に作用するせん断力）

部位	せん断力 (kN)	
	S <sub>d</sub> 地震時	S <sub>s</sub> 地震時
使用済燃料プール	16300	24600
蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット	6660	10100

表 3-4 EW 方向地震荷重（プール壁端部の相対変形角）

相対変形角 (×10 <sup>-4</sup> rad.)	
S <sub>d</sub> 地震時	S <sub>s</sub> 地震時
0.980	1.33

#### 4. 使用済燃料プール周辺部の検討

使用済燃料プールは、使用済燃料プールの東面及び西面のプール壁がウェル壁に直接支持されているとともに、東面及び西面のプール壁に連続する北側の壁により北側の内部ボックス壁(I/W)に支持されている。また、ウェル壁を挟んで、蒸気発生器・気水分離器ピット(以下「DSP」という。)の壁により南側の内部ボックス壁(I/W)に支持されている。ここでは、使用済燃料プールが周辺部の壁と一体となって地震時の荷重伝達を担っていることから、使用済燃料プールを支持する周辺部の耐震健全性について確認する。

##### 4.1 評価部位

評価部位は使用済燃料プールと一体となって地震時の荷重伝達を担うウェル壁、内南北方向の使用済燃料プールの壁に連続する北側壁及び DSP 壁とする。評価部位を図 4-1 に示す。



図 4-1 評価部位

#### 4.2 検討条件及び断面の評価方法

解析モデル，荷重及び荷重組合せ並びに断面の評価方法については，添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」に準ずるものとする。また，評価部位の配筋一覧をに示す。

表 4-1 評価部位の配筋一覧

部位	レベル EL. (m)	壁厚 (cm)	配筋	
			縦筋	横筋
北側壁	34.689～ 46.5	215	D29@200 2段 内外共	D29@200 2段 内外共
ウェル壁	38.8～ 46.5	242.1	D38@200 2段 内外共	D38@200 2段 内外共
DSP 壁	38.88～ 46.5	140	D35@200 2段 内 D29@200 2段 外	D29@200 2段 内外共

#### 4.3 評価結果

軸力，曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度，面内せん断力並びに面外せん断力に対する評価については，発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

選定した要素の位置を図 4-2 に，評価結果を表 4-2 に示す。

地震時において，プール部の壁については，軸力，曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋，面内せん断力並びに面外せん断力が，各許容値を超えないことを確認した。



(a) 東側壁



(b) 西側壁

図 4-2 結果を記載する要素の位置

表 4-2 評価結果

		評価項目	要素位置	組合せケース	解析結果	許容値	備考
軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	北側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1501	2-21	4.32	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1519	1-16	336	345	引張側
	ウェル壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1601	2-13	3.86	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1606	2-7	169	345	引張側
	DSP	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1699	2-7	2.45	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1656	2-8	138	345	引張側
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1012	2-8	1.30	1.61	
	ウェル壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1599	3-7	0.707	2.78	
	DSP	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1699	2-7	1.47	3.37	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1022	2-7	0.524	0.998	
	ウェル壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1094	2-6	0.263	0.729	
	DSP	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1651	2-13	0.824	1.08	

## 5. 温度によるシェル壁の伸びの影響検討

### 5.1 検討概要

温度による影響が最も大きい格納容器内部における重大事故等時の温度上昇に伴うシェル壁の伸びに対する使用済燃料プール壁の検討を実施する。

### 5.2 シェル壁の伸び評価

#### 5.2.1 解析モデル

重大事故等時の温度上昇に伴うシェル壁の伸び量は 3 次元 F E M モデルによる熱応力解析により算定する。モデル化範囲は、原子炉棟の基礎版上端からオペフロまでとし、補足 470-7「水平 2 方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について 別紙 3 3 次元 F E M モデルによる地震応答解析」に示す「建屋模擬モデル」から基礎盤、付属棟及びオペフロより上部のモデルを取り除いた解析モデルを用い、解析モデル下端 (EL-4.0m) を固定とする。解析モデルを図 5-1 に、材料定数を表 5-1 に示す。

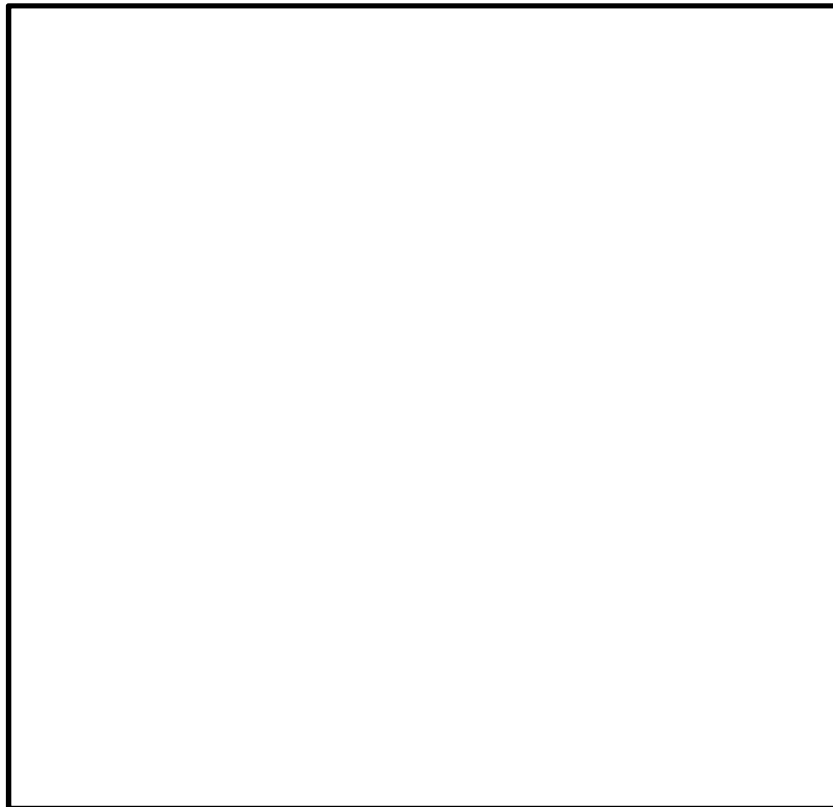


図 5-1 解析モデル (1/2 表示)

表 5-1 材料定数

ヤング係数	$2.21 \times 10^4$ N/mm <sup>2</sup>
ポアソン比	0.2
線膨張係数	$1.0 \times 10^{-5}$ 1/°C

### 5.2.2 温度条件

温度条件はについて、ドライウエル及びサプレッション・チェンバの温度は、添付書類「V-1-1-4-7-1 設定根拠に関する説明書（原子炉格納容器）」に基づき設定し、原子炉ウエルは、ドライウエルと同じ温度を用いる。その他の部位の温度は、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」に基づき、**冬季及び夏季においてそれぞれ**設定する。

重大事故等時の雰囲気温度を表 5-2 及び (b) 夏季

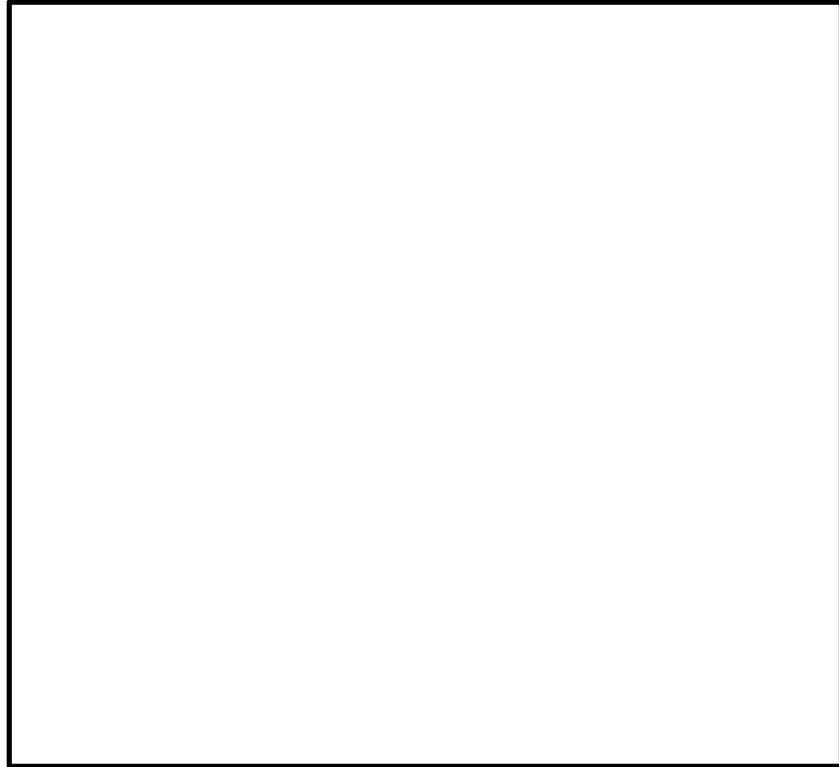
図 5-2 に示す。なお、解析には各壁の平均温度を用いる。

表 5-2 重大事故等時の雰囲気温度

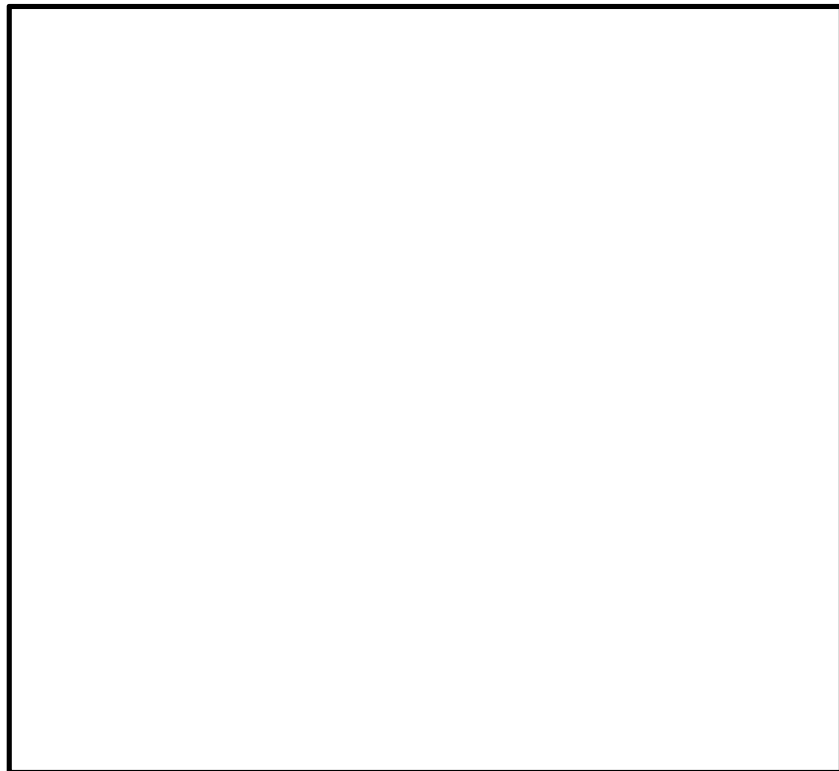
部 位	雰囲気温度 (°C)
使用済燃料プール	52
蒸気乾燥器・気水分離機ピット	10 (40) *
原子炉ウエル	157
ドライウエル	157
サプレッション・チェンバ	143
原子炉棟（室温）	10 (40) *
外気温	10 (40) *

注記 \*：カッコ内は夏季の温度を示す。





(a) 冬季



(b) 夏季

図 5-2 重大事故等時の雰囲気温度

### 5.2.3 評価結果

熱応力解析より求めた使用済燃料プール及び蒸気乾燥器・気水分離機ピットに生じる鉛直方向の最大せん断力を表 5-3 に示す。なお、表 5-3 に示すせん断力は

図 5-3 に示すように使用済燃料プール及び蒸気乾燥器・気水分離機ピット壁の同一断面上の要素に生じる面内せん断力を合計した値のうち最大値を示している。

表 5-3 最大せん断力

部 位	せん断力 (kN)	
	冬季	夏季
使用済燃料プール	128000	94100
蒸気乾燥器・気水分離機ピット	99900	75600

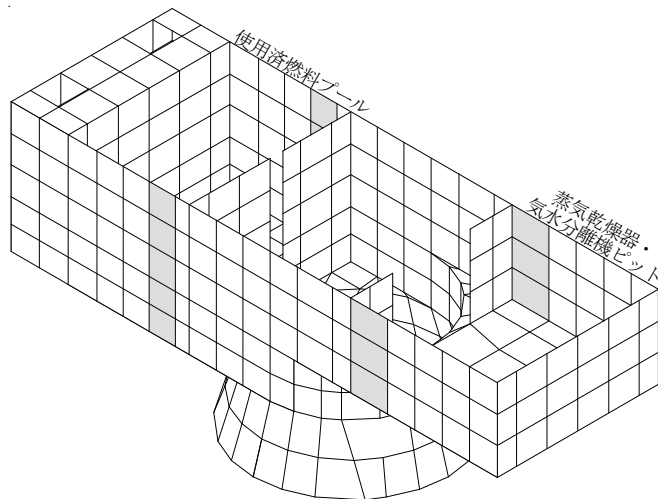


図 5-3 せん断力を合計する要素の例

### 5.3 プール部の検討

使用済燃料プール部の検討は、プール部の応力解析により実施する。応力解析は、プール部の応力解析モデルの端部にあたる内部ボックス壁に表 5-3 に示す鉛直方向のせん断力を作用させ実施する。境界条件及び荷重の入力方法を図 5-4 に示す。

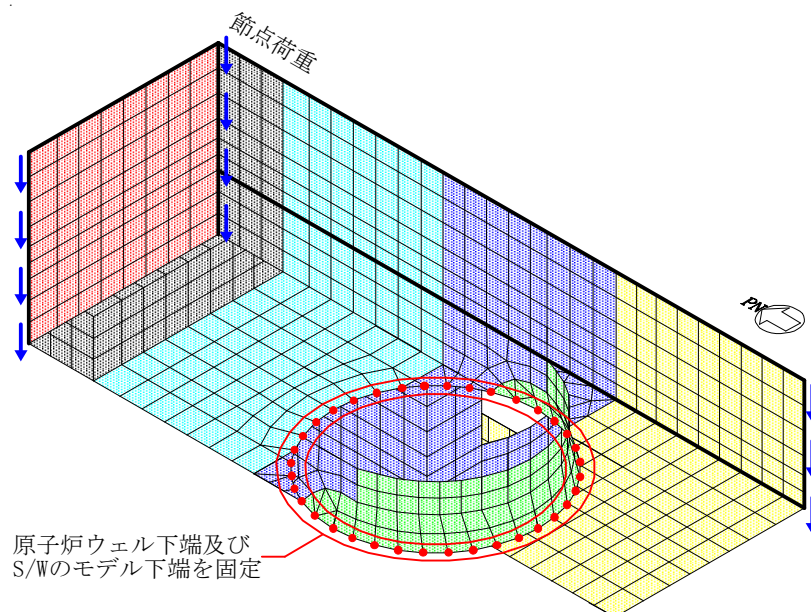


図 5-4 境界条件及び荷重の入力方法

#### 5.3.1 荷重組合せ

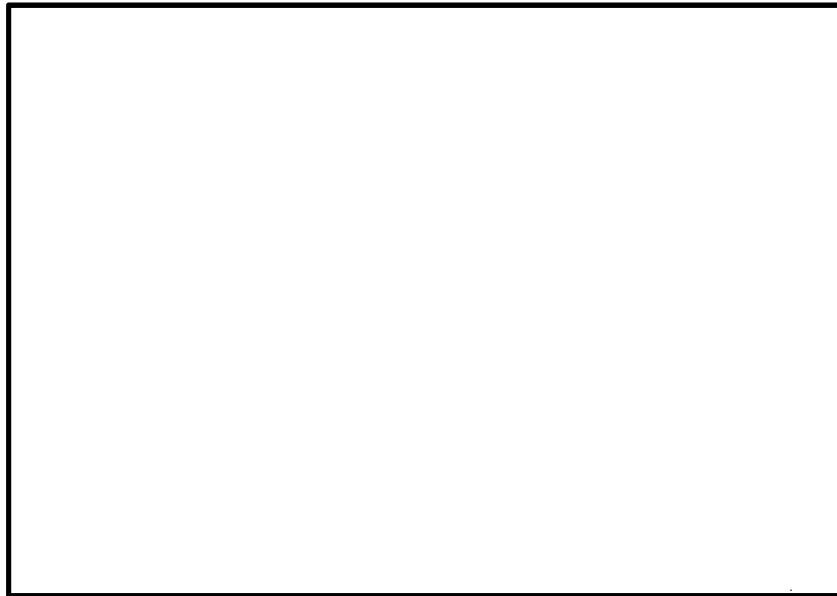
荷重の組合せは、冬季においては表 2-12 に示すケース No. 0-3 (通常運転時/冬季) と、夏季においては表 2-12 に示すケース No. 0-4 (通常運転時/夏季) と組合せる。なお、シェル壁の伸びに伴う応力は温度応力とし、ひび割れ断面法を用いて断面算定を実施する。

#### 5.3.2 評価結果

使用済燃料プールの評価結果を表 5-4 に示す。

重大事故等時の温度上昇に伴うシェル壁の伸びに対し、使用済燃料プールの壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、面内せん断力並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

また、底版については、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

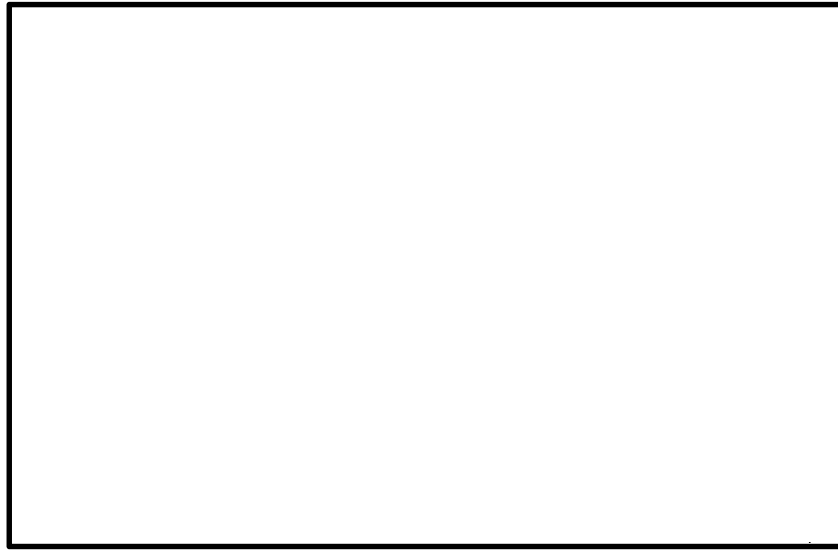


(a) 北側壁

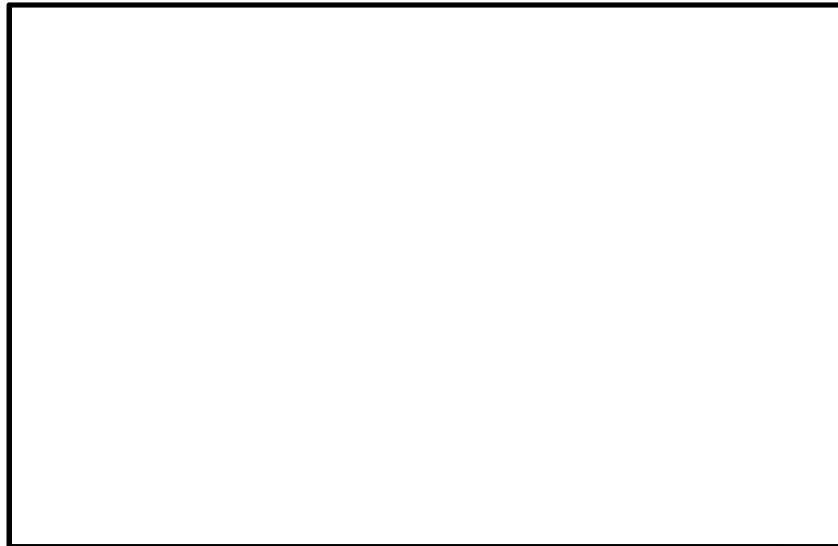


(b) 東側壁

図 5-5 (1/3) 結果を記載する要素の位置 重大事故等時



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 5-5 (2/3) 結果を記載する要素の位置 重大事故等時

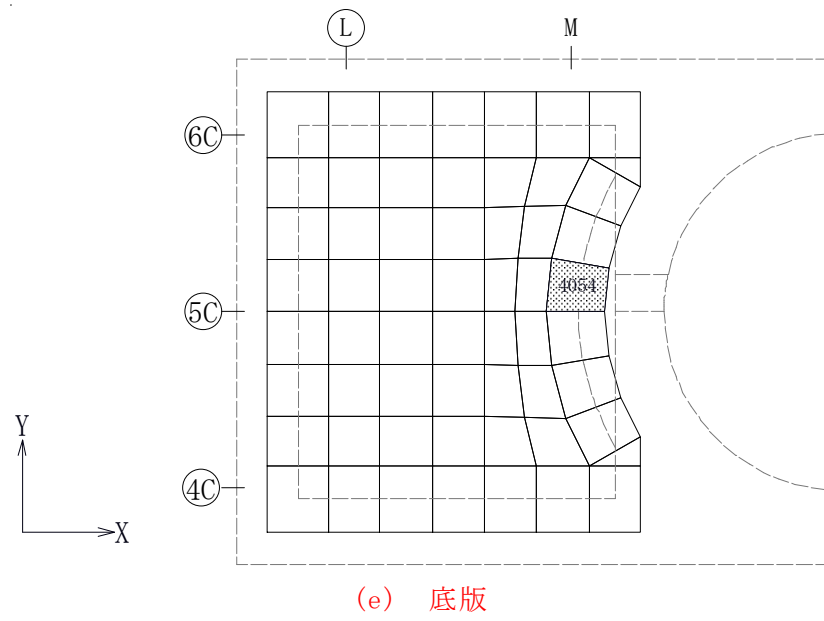


図 5-5 (2/3) 結果を記載する要素の位置 重大事故等時

表 5-4 使用済燃料プールの評価結果

		評価項目	要素位置	ケース	解析結果	許容値	備考
軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力*	北側壁	コンクリート ( $\times 10^{-3}$ )	2250	冬季	0.208	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	2213	冬季	0.710	5.00	引張側
	東側壁	コンクリート ( $\times 10^{-3}$ )	1582	冬季	0.557	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	1582	冬季	1.46	5.00	引張側
	南側壁	コンクリート ( $\times 10^{-3}$ )	3056	冬季	0.510	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	3058	冬季	0.795	5.00	引張側
	西側壁	コンクリート ( $\times 10^{-3}$ )	1082	冬季	0.552	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	1082	冬季	1.43	5.00	引張側
	底版	コンクリート ( $\times 10^{-3}$ )	4054	冬季	0.603	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	4054	夏季	0.596	5.00	引張側
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	2205	冬季	0.497	2.44	
	東側壁	面内せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	1577	冬季	1.03	2.23	
	南側壁	面内せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	3058	冬季	2.04	5.17	
	西側壁	面内せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	1077	冬季	1.01	2.12	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	2209	冬季	0.288	1.35	
	東側壁	面外せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	1583	冬季	0.205	0.815	
	南側壁	面外せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	7801	冬季	1.04	2.20	
	西側壁	面外せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	1083	冬季	0.242	0.812	
	底版	面外せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	4054	冬季	1.49	2.55	

注記 \* : 底版については、面内せん断力は考慮しない。

6. 使用済燃料プール底版の面内せん断について

添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」に示す使用済燃料プール底版の評価では、CCV 規格に基づき、応力解析モデルの要素に生じる面内せん断力は考慮していない。

ここでは、S s 地震時に生じる床部の面内せん断応力について確認する。底版に生じる各要素の最大面内せん断応力度を図 6-1 に示す。図 6-1 に示すように底版に生じる最大面内せん断応力度は  $0.565 \text{ N/mm}^2$  であり、表 2-10 に示すコンクリートの長期許容応力度 ( $0.711 \text{ N/mm}^2$ ) 以下となっており、S s 地震時に底版に生じる面内せん断応力は十分小さいことを確認した。

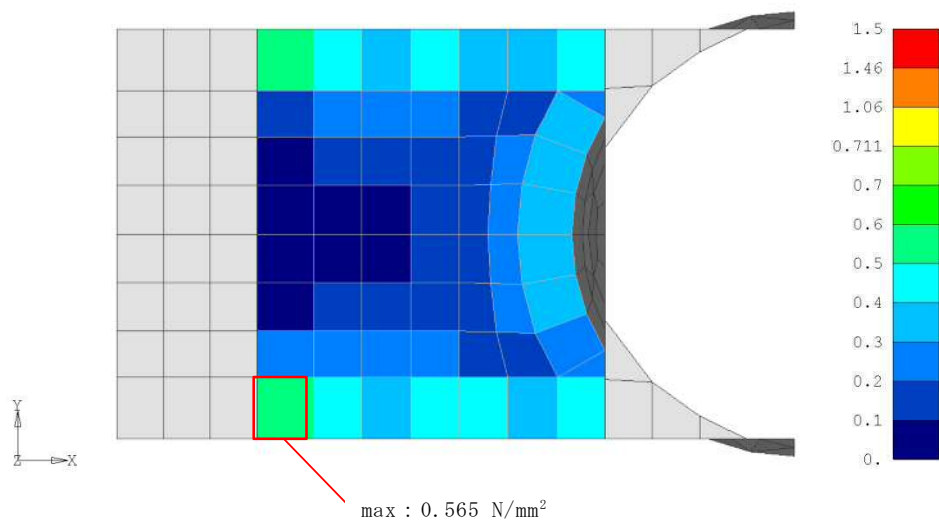


図 6-1 S s 地震時に底版に生じる最大面内せん断応力度



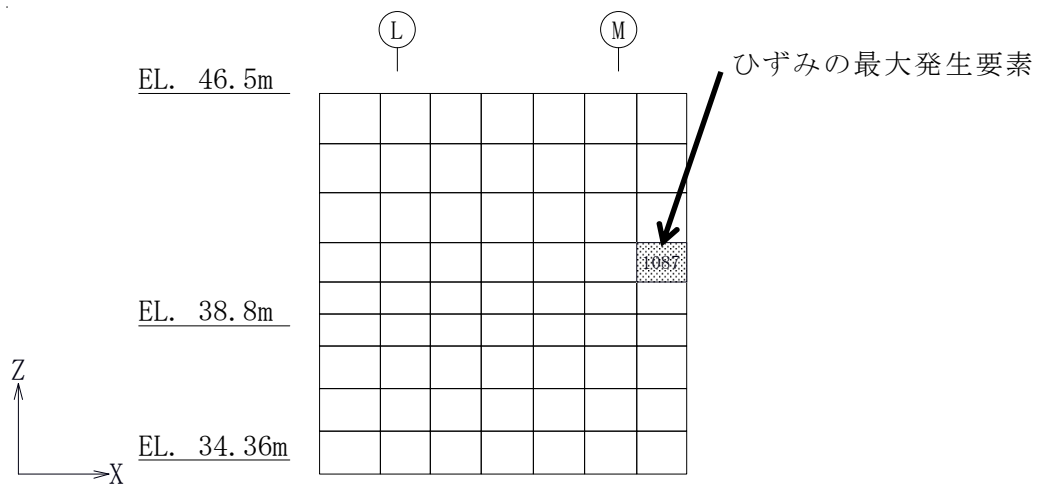
7. 鋼製ライナの評価について

使用済燃料プール内面の鋼製ライナについては、躯体に追従するため、鉄筋コンクリートのひずみを鋼製ライナに生じるひずみと見做して、ひずみの評価を行うことで、耐漏洩機能の確認を行う。

確認結果を表 7-1 に示す。

表 7-1 確認結果

評価項目	ひずみの最大発生要素	解析結果	許容値
ひずみ	1087	$0.572 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$



## 8. 使用済燃料の調密化による重量変更による原子炉建屋の応答への影響検討

### 8.1 概要

本検討では、添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の補足説明として、建設工認時からの使用済燃料の調密化による重量の変遷及び重量変更による原子炉建屋の応答への影響について確認したものである。

### 8.2 建設工認時からの調密化による使用済み燃料等の重量変遷

東海第二発電所 工事計画認可申請 第25回申請 (I. 工事計画)及び添付書類「IV-1-2 燃料および制御棒貯蔵設備の耐震性についての計算書」より、建設工認時のラック容量は、燃料集合体1740個分であり、ラック及びプール水を含めた重量は2279 tである。

その後、使用済燃料の調密化について以下の工事認可申請を行っている。

今回申請において燃料の変更申請はなく、燃料集合体2250個分、重量は2349 tとなる。

建設時からの重量増分は、70 tであり、建屋モデルの総重量の約0.04 %、使用済燃料を含む質点の重量に対し、約0.7 %と小さいことから、今回工認モデル重量には反映していない。

以下に調密化による重量増分が建屋応答に与える影響について検討する。-

### 8.3 調密化による重量増分が建屋応答に与える影響検討

#### 8.3.1 検討方針

使用済燃料の調密化による重量増分が原子炉建屋の応答に与える影響を検討するため、原子炉建屋の設備の補強や追加等の改造工事に伴い重量が増加することの影響を考慮したモデル（以下「補強反映モデル」という。）と補強反映モデルにさらに使用済燃料の調密化による重量増分を考慮したモデル（以下「調密化反映モデル」という。）の諸元及び地震応答解析結果を比較する。

影響検討は、位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動  $S_s - D1$  に対して実施することとする。

#### 8.3.2 検討条件

##### (1)燃料調密化による増加重量

補強反映モデル及び調密化反映モデルの振動諸元を表 8-1 に示す。なお、使用済燃料の調密化による地震応答解析モデルの振動諸元の変更箇所は質点番号 4 の質点重量のみである。

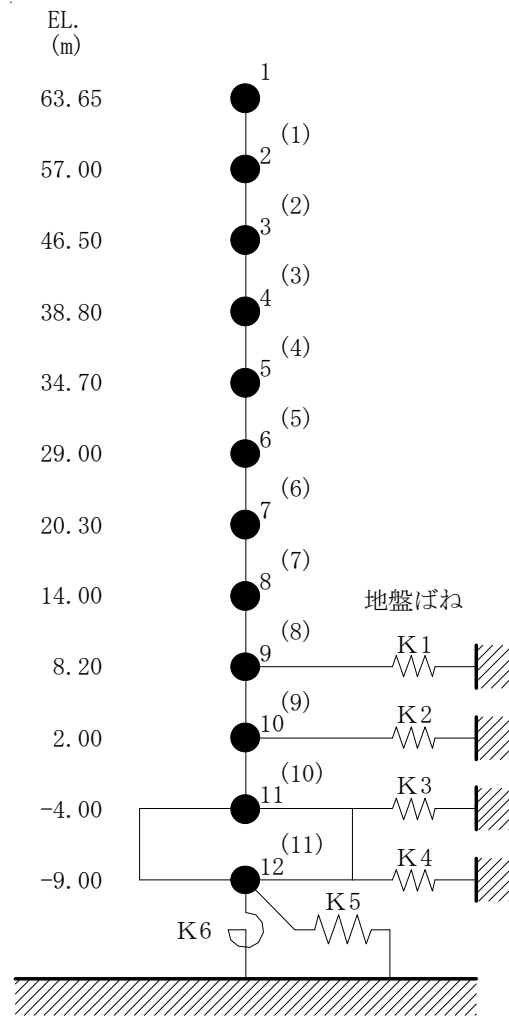
表 8-1 増加重量と使用済燃料の調密化後の振動諸元

標高 EL. (m)	質点 番号	補強反映モデル			増加重量 (kN)	調密化反映モデル		
		質点重量 (kN)	回転慣性重量 ( $\times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}^2$ )			質点重量 (kN)	回転慣性重量 ( $\times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}^2$ )	
			NS方向	EW方向			NS方向	EW方向
63.65	1	15870	35.7	31.5	0	15870	35.7	31.5
57.00	2	17910	56.7	49.5	0	17910	56.7	49.5
46.50	3	67940	121.4	105.6	0	67940	121.4	105.6
38.80	4	98460	163.9	101.2	690	99150	163.9	101.2
34.70	5	85220	115.6	70.3	0	85220	115.6	70.3
29.00	6	125380	357.5	256.8	0	125380	357.5	256.8
20.30	7	164920	498.0	554.2	0	164920	498.0	554.2
14.00	8	237120	728.7	788.2	0	237120	728.7	788.2
8.20	9	202660	908.2	901.9	0	202660	908.2	901.9
2.00	10	222250	838.2	836.5	0	222250	838.2	836.5
-4.00	11	440910	1731.5	1718.9	0	440910	1731.5	1718.9
-9.00	12	275090	1081.4	1073.5	0	275090	1081.4	1073.5
総重量		1953730			690	1954420		

## (2)燃料調密化による増加重量

水平方向の地震応答解析モデルを図 8-1 に，地盤ばね定数を表 8-2 及び表 8-3 に示す。鉛直方向の地震応答解析モデルを図 8-2 に，地盤ばね定数を表 8-4 に示す。地盤ばね定数については，重量の増加が小さく，地盤－建屋連成系の 1 次固有振動数に有意な差が生じないため，補強反映モデル及び調密化反映モデルで同値を用いる。

また，重量増分に伴うせん断及び曲げスケルトンへの影響は軽微であるため，今回工認評価に用いている質点系モデルの諸元を用いる。



- 数字は質点番号を示す。
- ( ) 内は要素番号を示す。

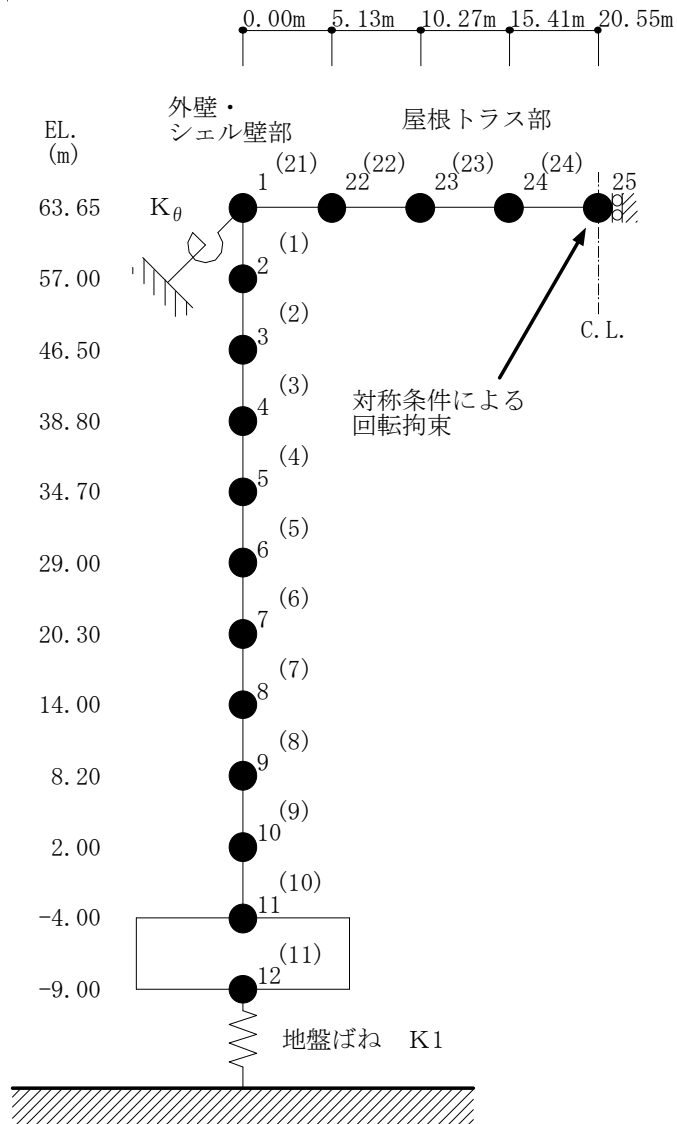
図 8-1 地震応答解析モデル (水平方向)

表 8-2 地盤ばね定数と減衰係数 (S s - D 1, NS 方向)

ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね定数 $K_c$	減衰係数 $C_c$
K1	側面・水平	$5.46 \times 10^5$ (kN/m)	$2.48 \times 10^5$ (kN·s/m)
K2	側面・水平	$1.22 \times 10^6$ (kN/m)	$4.20 \times 10^5$ (kN·s/m)
K3	側面・水平	$6.64 \times 10^6$ (kN/m)	$9.07 \times 10^5$ (kN·s/m)
K4	側面・水平	$1.92 \times 10^7$ (kN/m)	$8.69 \times 10^5$ (kN·s/m)
K5	底面・水平	$6.41 \times 10^7$ (kN/m)	$3.44 \times 10^6$ (kN·s/m)
K6	底面・回転	$9.26 \times 10^{10}$ (kN·m/rad)	$1.58 \times 10^9$ (kN·m·s/rad)

表 8-3 地盤ばね定数と減衰係数 (S s - D 1, EW 方向)

ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね定数 $K_c$	減衰係数 $C_c$
K1	側面・水平	$5.46 \times 10^5$ (kN/m)	$2.46 \times 10^5$ (kN·s/m)
K2	側面・水平	$1.22 \times 10^6$ (kN/m)	$4.21 \times 10^5$ (kN·s/m)
K3	側面・水平	$6.64 \times 10^6$ (kN/m)	$9.05 \times 10^5$ (kN·s/m)
K4	側面・水平	$1.92 \times 10^7$ (kN/m)	$8.68 \times 10^5$ (kN·s/m)
K5	底面・水平	$6.42 \times 10^7$ (kN/m)	$3.45 \times 10^6$ (kN·s/m)
K6	底面・回転	$9.17 \times 10^{10}$ (kN·m/rad)	$1.56 \times 10^9$ (kN·m·s/rad)



- 数字は質点番号を示す。
- ( ) 内は要素番号を示す。

図 8-2 地震応答解析モデル (UD 方向)

表 8-4 地盤ばね定数と減衰係数 (UD 方向,  $S_s - D_1$ )

ばね番号	地盤ばね成分	ばね定数 $K_c$	減衰係数 $C_c$
K1	底面・鉛直	$1.08 \times 10^8$ (kN/m)	$8.20 \times 10^6$ (kN·s/m)

## 8.4 検討結果

### 8.4.1 固有値解析結果

「調密化考慮モデル」及び「補強反映モデル」の固有値解析結果（固有周期及び固有振動数）の比較を表 8-5 に示す。

使用済燃料の調密化による重量増の影響は微小であり，固有値解析結果は「補強反映モデル」とほぼ同程度となることを確認した。



表 8-5 固有値解析結果 (S s - D 1)

(a) NS 方向

次 数	固有周期 (s)		固有振動数 (Hz)	
	補強反映モデル	調密化 反映モデル	補強反映モデル	調密化 反映モデル
1	0.413	0.413	2.42	2.42
2	0.203	0.203	4.93	4.93
3	0.105	0.105	9.51	9.50
4	0.086	0.086	11.66	11.65
5	0.064	0.064	15.51	15.51
6	0.053	0.053	18.96	18.95

(b) EW 方向

次 数	固有周期 (s)		固有振動数 (Hz)	
	補強反映モデル	調密化 反映モデル	補強反映モデル	調密化 反映モデル
1	0.415	0.415	2.41	2.4
2	0.203	0.203	4.93	4.93
3	0.108	0.108	9.22	9.22
4	0.087	0.087	11.49	11.48
5	0.065	0.065	15.40	15.40
6	0.051	0.051	19.52	19.52

(c) UD 方向

次 数	固有周期 (s)		固有振動数 (Hz)	
	補強反映モデル	調密化 反映モデル	補強反映モデル	調密化 反映モデル
1	0.399	0.399	2.50	2.50
2	0.275	0.275	3.63	3.63
3	0.093	0.093	10.79	10.79
4	0.060	0.060	16.58	16.56
5	0.057	0.057	17.64	17.64
6	0.048	0.048	20.70	20.70

#### 8.4.2 最大応答値

基準地震動  $S_s - D1$  による最大応答値図を図 8-3～図 8-13 に示す。

「調密化反映モデル」の最大値は、「補強反映モデル」の結果とほぼ同程度であることを確認した。

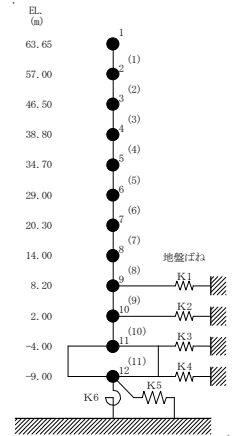
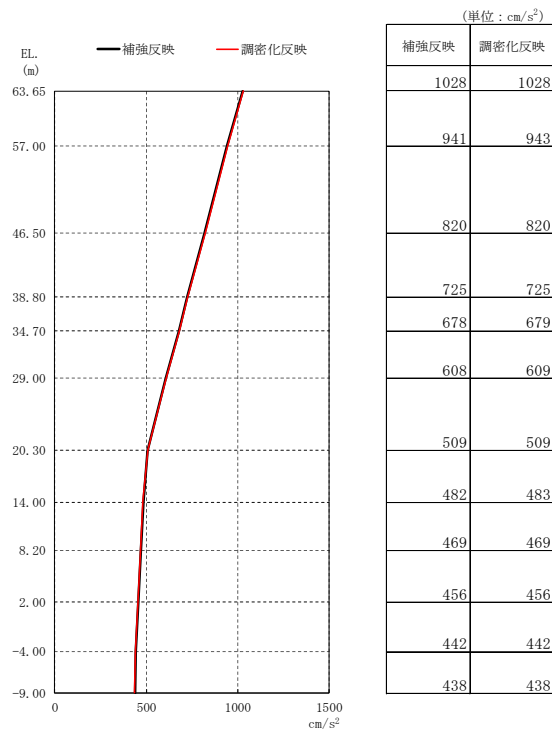


图 8-3 最大応答加速度 (S s - D 1, NS 方向)

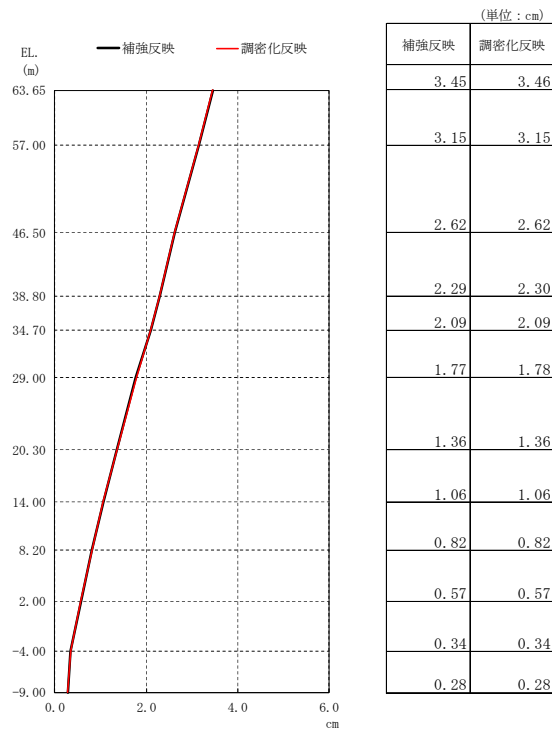


图 8-4 最大応答変位 (S s - D 1, NS 方向)

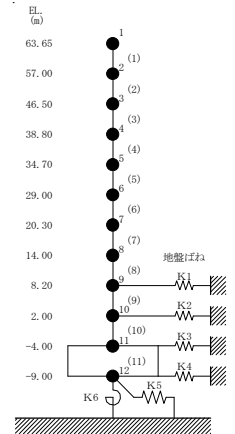
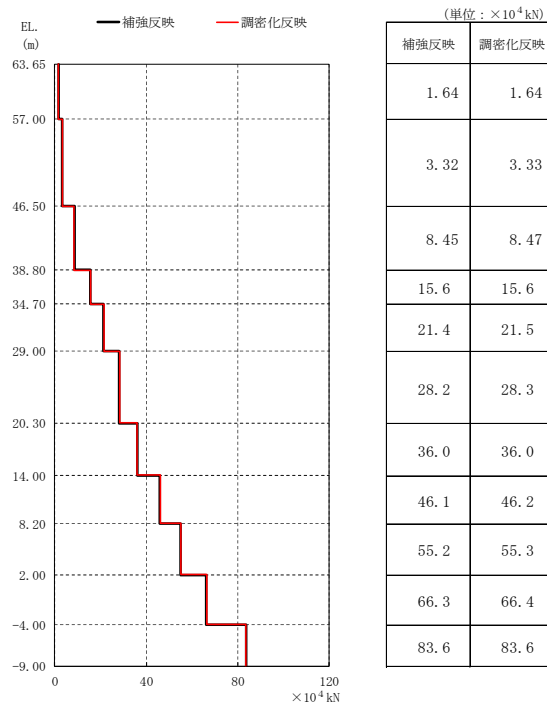


図 8-5 最大応答せん断力 (S s - D 1, NS 方向)

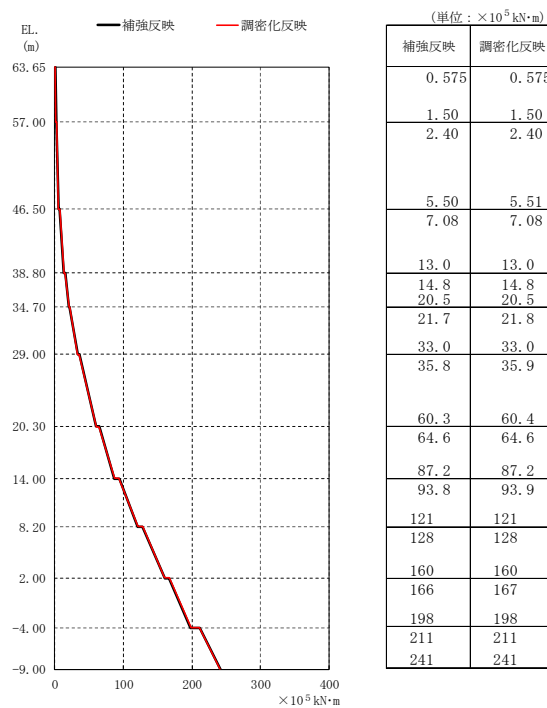


図 8-6 最大応答曲げモーメント (S s - D 1, NS 方向)

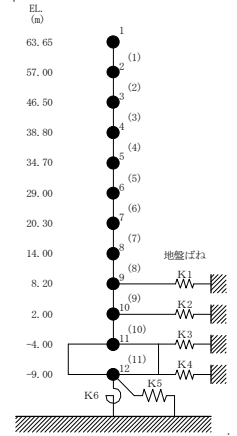
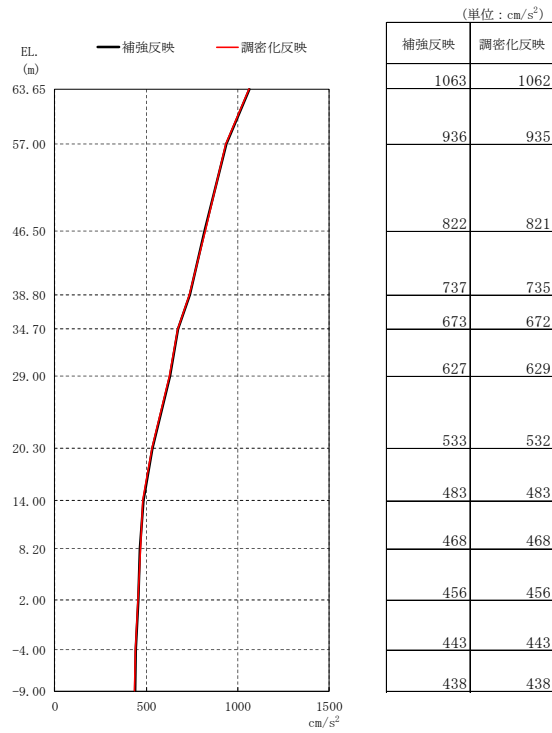


図 8-7 最大応答加速度 (S s - D 1, EW 方向)

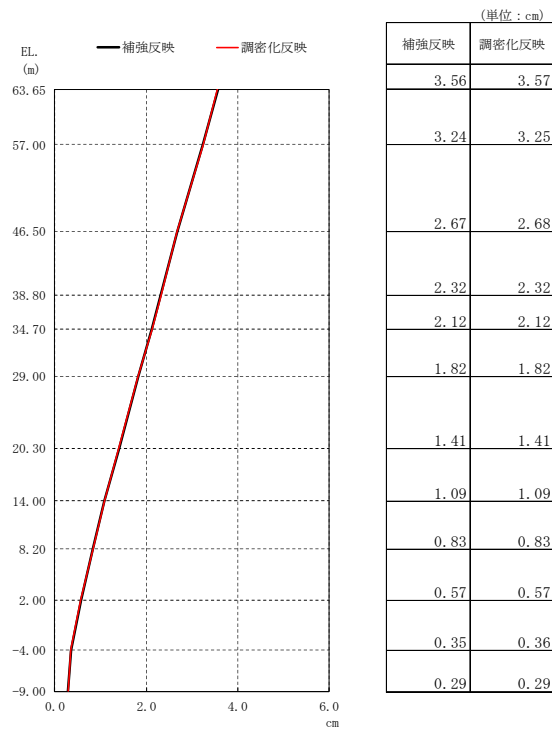
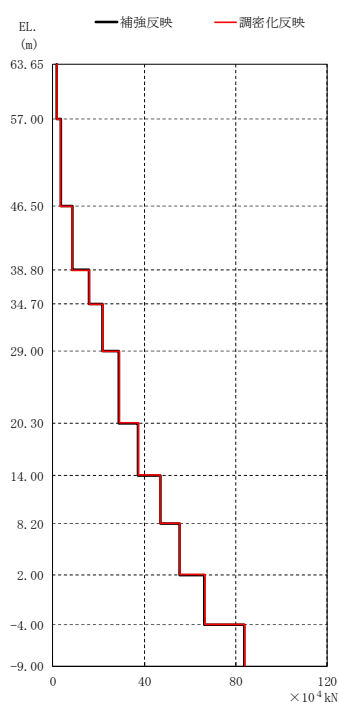


図 8-8 最大応答変位 (S s - D 1, EW 方向)



(単位:  $\times 10^4$  kN)

補強反映	調密化反映
1.73	1.73
3.45	3.44
8.55	8.54
15.9	15.9
21.8	21.8
29.0	29.1
37.3	37.4
47.0	47.0
55.4	55.5
66.4	66.5
83.6	83.7

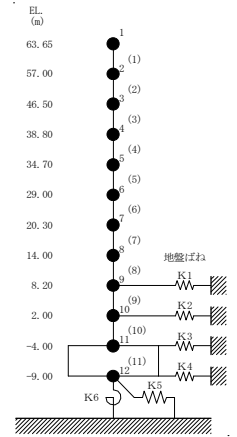
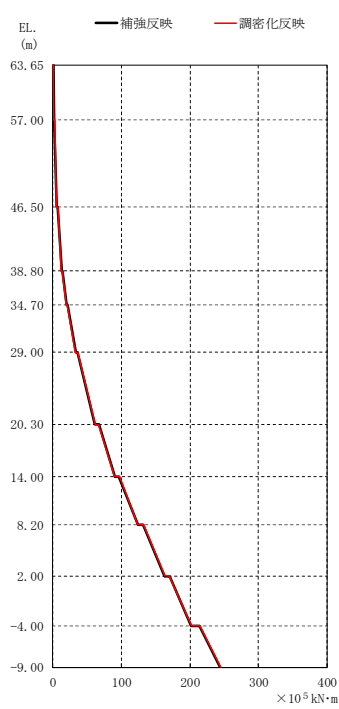


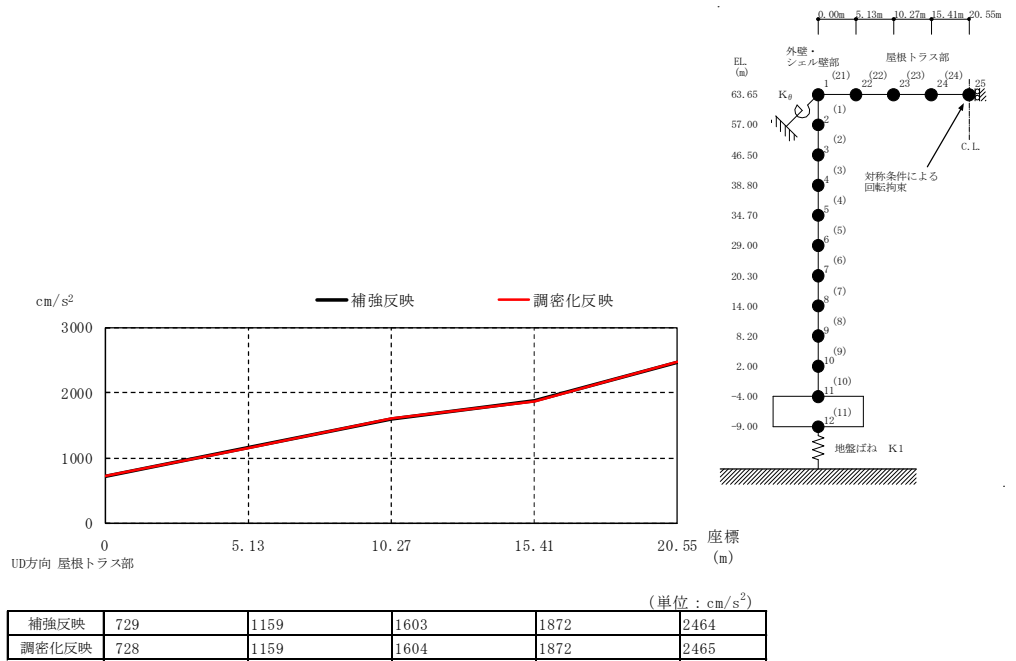
図 8-9 最大応答せん断力 (S s - D 1, EW 方向)



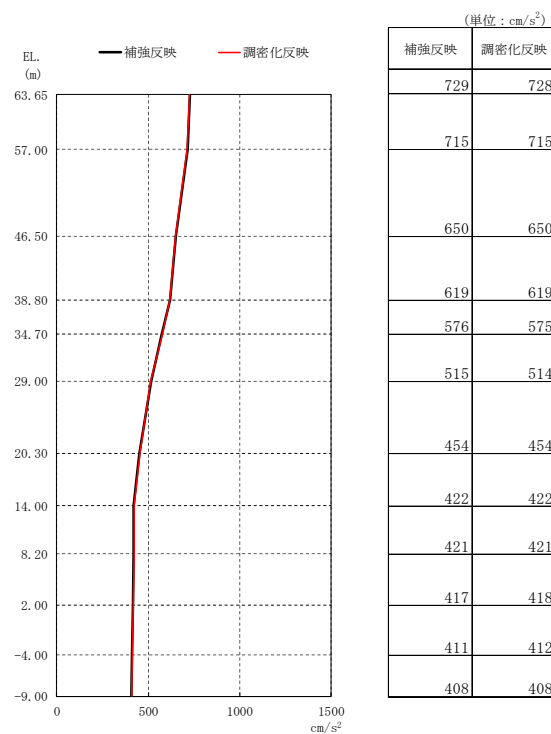
(単位:  $\times 10^5$  kN·m)

補強反映	調密化反映
0.532	0.532
1.49	1.49
2.32	2.32
5.58	5.57
6.92	6.92
12.7	12.7
13.8	13.8
20.1	20.1
20.9	20.9
33.1	33.2
36.0	36.0
61.3	61.3
66.9	67.0
89.8	89.8
96.8	96.9
124	124
132	132
163	163
170	170
202	202
214	214
244	244

図 8-10 最大応答曲げモーメント (S s - D 1, EW 方向)

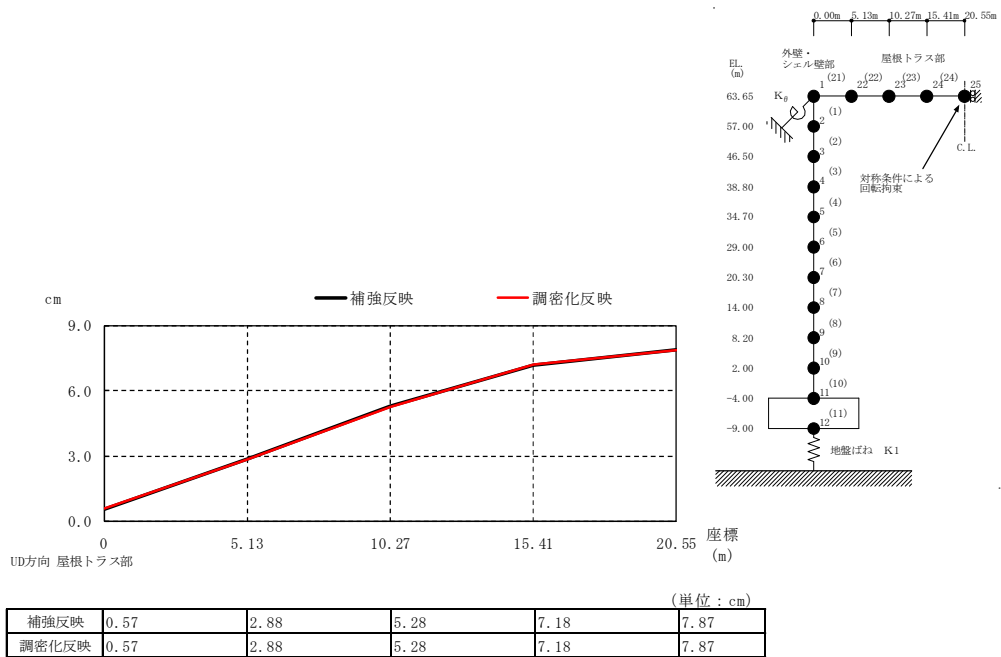


(a) 屋根トラス部

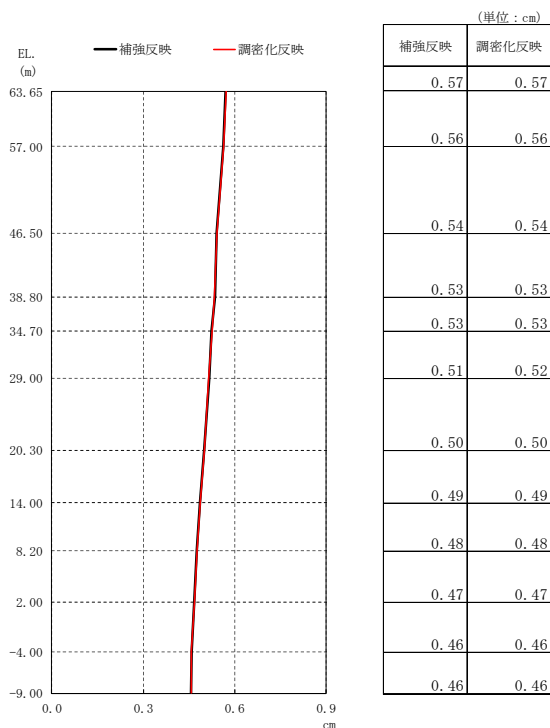


(b) 外壁及びシェル部

図 8-11 最大応答加速度 (S s - D 1, UD 方向)



(a) 屋根トラス部



(b) 外壁及びシェル部

図 8-12 最大応答変位 ( $S_s - D 1$ , UD 方向)



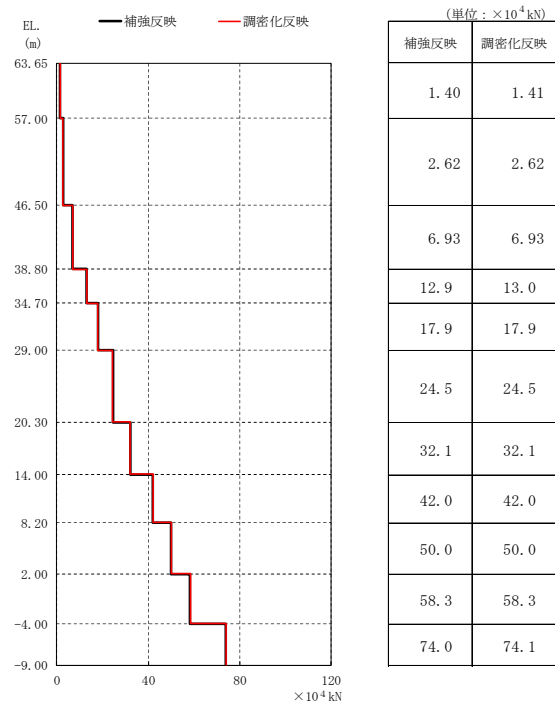
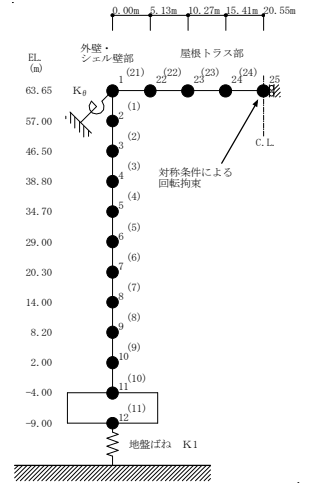


図 8-13 最大応答軸力 ( $S_s - D 1$ , UD 方向)

## 8.5 まとめ

使用済燃料の調密化による重量増分が原子炉建屋の応答に与える影響を検討するため、「補強反映モデル」と「調密化反映モデル」の地震応答解析結果を比較した結果、補強反映モデルの建屋応答に及ぼす影響が無いこと確認した。