

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-025-08 改 04
提出年月日	2023年6月7日

燃料プール（キャスク置場を含む）の耐震性についての  
計算書に関する補足説明資料

2023年6月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

VI-2-4-2-1「燃料プール（キャスク置場を含む）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 鋼製ライナの検討

別紙 6 使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討

別紙 6-1 ラック反力に対する燃料プールの応力解析における応力平均化の考え方

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

## 目 次

1. 概要 ..... 別紙 1-1
2. 応力解析モデル及び手法の比較 ..... 別紙 1-2

## 1. 概要

本資料は、燃料プール（キャスク置場を含む）の既工認時及び今回工認時の応力解析モデル及び手法の比較を示すものである。

## 2. 応力解析モデル及び手法の比較

燃料プール（キャスク置場を含む）の応力解析モデル及び手法の比較を表 2-1 に示す。  
また、今回工認時の応力解析モデルを図 2-1 に示す。

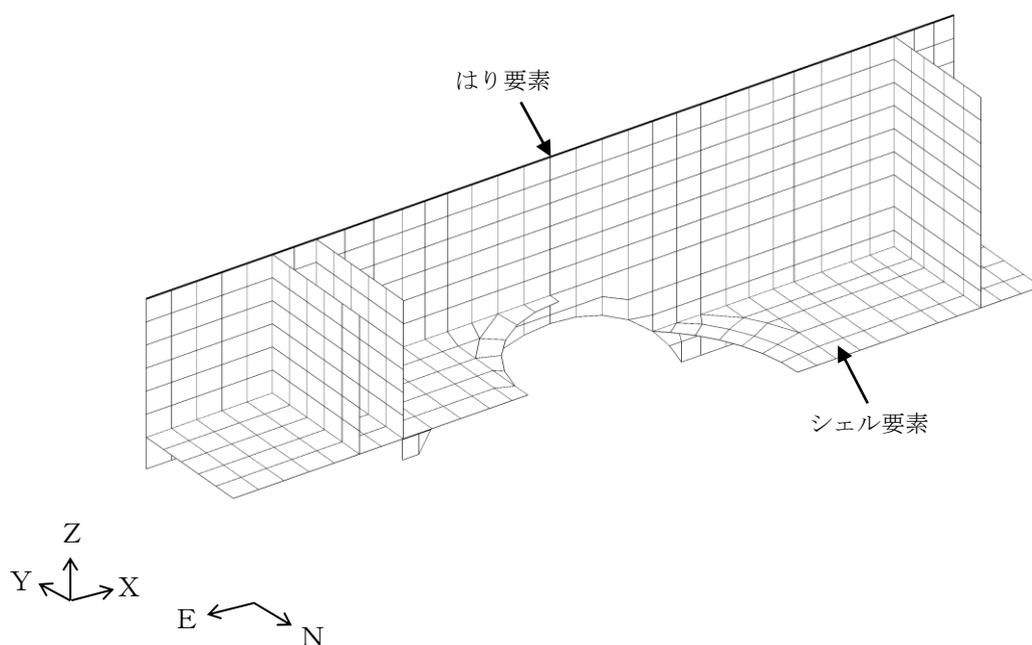
比較に用いる既工認時の応力解析モデル及び手法は、昭和 60 年 12 月 25 日付け 60 資庁第 11431 号にて認可された工事計画の IV-2-5-3 「燃料プール（キャスク置場を含む）の耐震性についての計算書」（以下「既工認」という。）のものである。

表 2-1 応力解析モデル及び手法の比較 (燃料プール (キャスク置場を含む))

項目	内容	既工認	今回工認	備考
解析手法		3次元 FEMモデルを用いた応力解析 (弾性解析)	同左	—
解析コード		NASTRAN	MSC NASTRAN	—
モデル	モデル化範囲	燃料プール, 原子炉ウェル及び蒸気乾燥器・気水分離器ピット (東西軸に対して南側半分をモデル化)	同左	—
	材料物性	検討時の規準に基づき設定 ・コンクリートのヤング係数: $E = 2.06 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (SI換算) ・コンクリートのポアソン比: $\nu = 0.167$	適用規準の見直しによる再設定 ・コンクリートのヤング係数: $E = 2.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ・コンクリートのポアソン比: $\nu = 0.2$	①
	要素種別	・シェル要素	・シェル要素 ・はり要素	—
	境界条件	・東西軸に対して対称 ・ドライウェル外側壁との接続部で固定	・東西軸に対して対称 ・ドライウェル外側壁との接続部で固定 ・プール壁に取付く床スラブの剛性をはり要素で考慮	②
	非線形特性	考慮せず	同左	—
地震荷重との組合せ	$S_1$ 地震時: $G + P + T + S_1$ $S_2$ 地震時: $G + P + T + S_2$  G : 固定荷重 P : 積載荷重 T : 運転時温度荷重 $S_1$ : $S_1$ 地震荷重 (地震時動水圧荷重を含む) $S_2$ : $S_2$ 地震荷重 (地震時動水圧荷重を含む)	$S_d$ 地震時: $G + P (+T) + S_d$ $S_s$ 地震時: $G + P + S_s$  G : 固定荷重 P : 積載荷重 T : 運転時温度荷重 $S_d$ : $S_d$ 地震荷重 (地震時動水圧荷重を含む) $S_s$ : $S_s$ 地震荷重 (地震時動水圧荷重を含む)	—	
荷重の設定	固定荷重及び積載荷重	躯体自重, 機器配管重量, 静水圧	躯体自重, 機器配管重量, 静水圧 (機器配管重量の増加を考慮)	③
	運転時温度荷重	プール部に生じる温度変化による荷重, プール部の内部と外部との温度差荷重, ドライウェル外側壁及び耐震壁からの強制変位	同左	—
	地震荷重	燃料プール (キャスク置場を含む) の位置に対応する地震力 (水平力, 曲げモーメント, 鉛直力) を入力	同左	—
	地震時動水圧荷重	Housner理論に基づく地震時動水圧荷重	同左	—
評価方法	応力解析	・ $S_1$ 地震時: 発生応力が許容応力度を超えないことを確認 ・ $S_2$ 地震時: 発生応力が終局強度を超えないことを確認	・ $S_d$ 地震時: 発生応力が評価基準値を超えないことを確認 ・ $S_s$ 地震時: 発生応力又はひずみが評価基準値を超えないことを確認	④

【具体的な反映事項】(表の備考欄に対応)

- ① コンクリートのヤング係数及びポアソン比については、「鉄筋コンクリート構造計算規  
準・同解説—許容応力度設計法— ((社) 日本建築学会, 1999 改定)」に基づき再計算す  
る。
- ② プール壁に取付く燃料取替階の床スラブの剛性を考慮し, はり要素でモデル化する。(詳  
細は別紙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」に示す。)
- ③ 機器配管重量については, 平成 14 年 3 月 26 日付け平成 13・12・13 原第 4 号にて認可さ  
れた工事計画の「I 工事計画書」による重量増加を考慮する。
- ④ 「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, 20  
03)」に基づき評価する。



全体鳥瞰図

図 2-1 応力解析モデル図

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

## 目 次

1. 概要 ..... 別紙 2-1
2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 ..... 別紙 2-2

## 1. 概要

本資料は、燃料プール（キャスク置場を含む）の応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件についての概要を示すものである。

## 2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

燃料プール（キャスク置場を含む）の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件を表 2-1 に示す。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方\*については，以下のとおり。

### ・はり要素

はり要素の場合は，曲げの変位関数が 3 次で精度が高いため，基本的に要素分割の細分化は不要であるが，部材の接合点間で変位情報出力や荷重入力がある場合には複数要素に細分し，曲線部材がある場合は，その曲線が直線近似できる程度の分割にすることが一般的である。また，分布荷重がある場合や分布質量が関係する自重荷重などの計算では，要素分割することにより質量分布がより正確になり，解析結果の精度が向上する。さらに，要素分割の細分化により，変形図やモード図で構造物の変形状態を容易に把握することが可能となる。

### ・シェル要素

要素分割は，基本的には発生する応力状態によって決まり，構造形状と荷重条件より要素分割数を考慮する。要素形状の縦横比（アスペクト比）は，重要部分で 1 : 2 以下，その他の領域や応力変化が少ない領域では，1 : 3 程度までで，分割に際しては 4 角形要素を利用して格子状とするのが一般的である。曲面板構造の場合は，平板要素や軸対称シェル要素の大きさは，集中荷重や不連続部を含む曲面部近傍では  $2.5\sqrt{R/t}$  を 10~20 分割すると適切な応力分布が求められ，構造物の半径 (R) と板厚 (t) が考慮されている。また，面内曲げ・軸力及び面外のせん断や曲げを受ける部材のシェル要素の辺の長さは，シェルの広がり方向の応力分布の状態から決まり，応力変化が大きい領域は要素を小さくする必要がある。

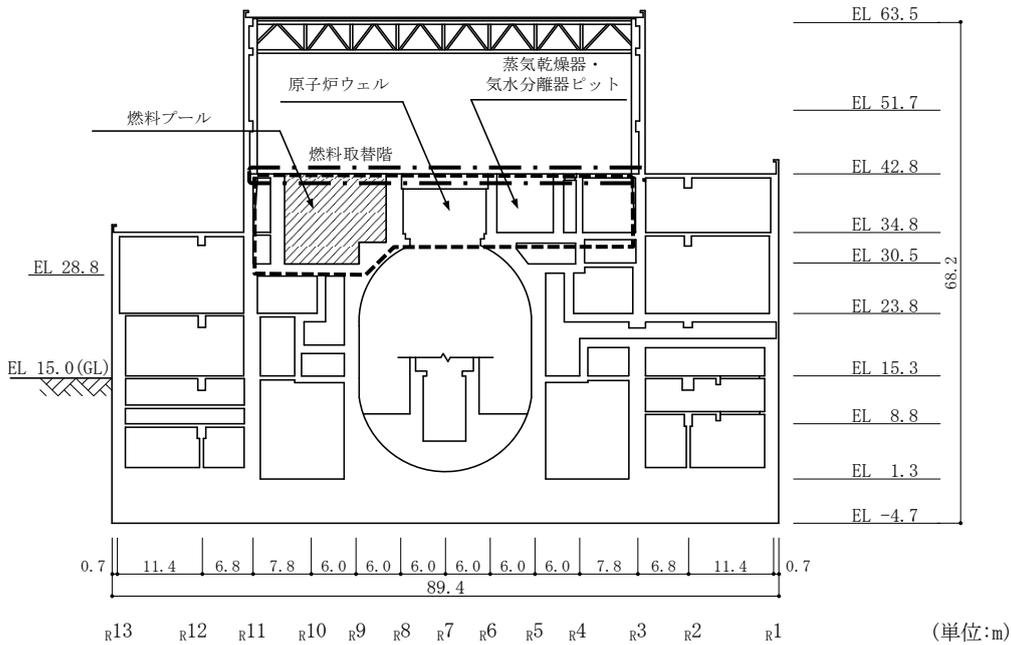
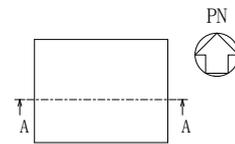
注記\*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2006 年）

表 2-1(1) モデル化, 境界条件及び拘束条件

モデル概要

○モデル化範囲

- ・原子炉建物のうち, 燃料プールとその周囲 (EL 28.8m~EL 42.8m) をモデル化する。
- ・燃料プールに作用する周辺構造物からの地震時反力を適切に評価するために, 以下のとおり, 燃料プールのほか, 原子炉ウェル及び蒸気乾燥器・気水分離器ピット (以下, 燃料プール, 原子炉ウェル及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットのすべてを示す場合は, これを「プール部」という。) をモデル化する。
- ・プール部は炉心を通る東西軸に対してほぼ対称であるため, その南側半分をモデル化する。
- ・プール壁に取付く燃料取替階の床スラブの剛性を境界条件として考慮する。



モデル化範囲

表 2-1(2) モデル化, 境界条件及び拘束条件

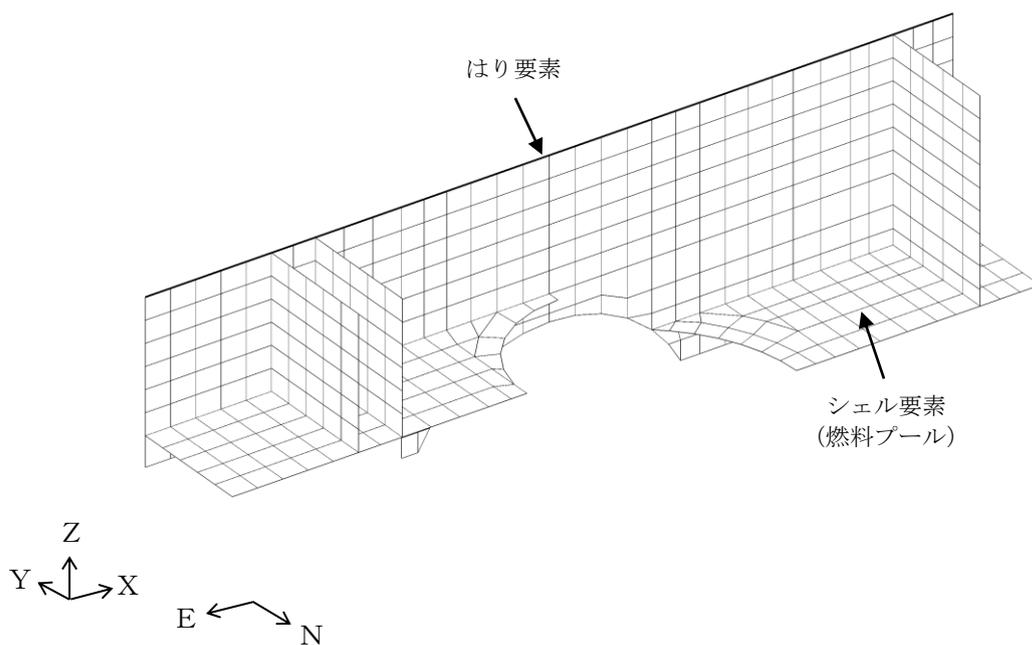
モデル概要

○使用要素

- ・シェル要素
- ・はり要素

○要素分割

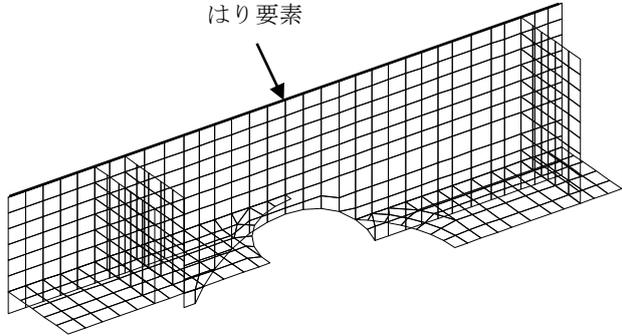
- ・要素の一边の長さを 1.0~2.0m 程度とし, 壁及びスラブの配置を考慮して分割する。



全体鳥瞰図

モデル概要

表 2-1(3) モデル化, 境界条件及び拘束条件

境界条件, 拘束条件	
プール部と周辺床スラブとの境界	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プール壁に取付く燃料取替階の床スラブの剛性をはり要素で考慮する。</li> </ul>
はり要素の剛性 (断面性能)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 曲げ剛性 (断面二次モーメント)  <math display="block">I = t \cdot L^3 / 12 + t \cdot L \cdot y^2</math> </li> <li>・ せん断剛性 (せん断断面積)  <math display="block">A_s = t \cdot L</math> </li> <li>・ 軸剛性 (軸断面積)  <math display="block">A = t \cdot b</math> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>t : 床スラブの厚さ</li> <li>L : モデル化する床スラブの幅*1</li> <li>y : プール壁の中心から床スラブの図心までの距離</li> <li>b : モデル化する床スラブの協力幅*2</li> </ul>

注記\*1 : プール壁に取付く床スラブの幅については, 下図のとおりプール部の最外端からプール壁に対して 30° の角度の範囲として設定する。

\*2 : 「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 制定)」の T 形断面部材の板部の有効幅の算定方法に基づき設定する。

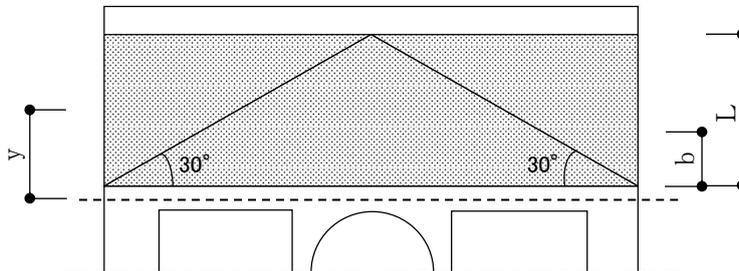


表 2-1(4) モデル化, 境界条件及び拘束条件

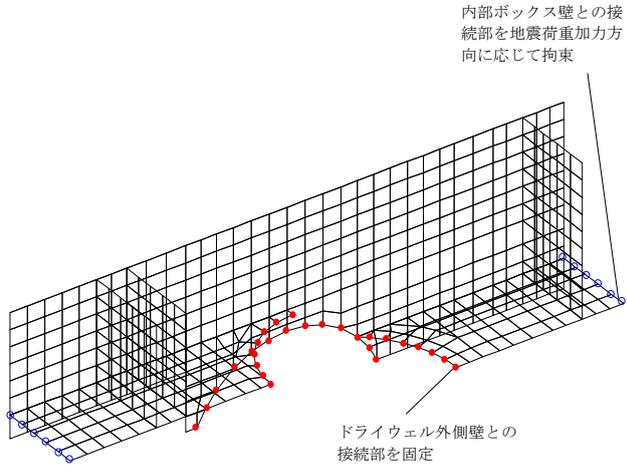
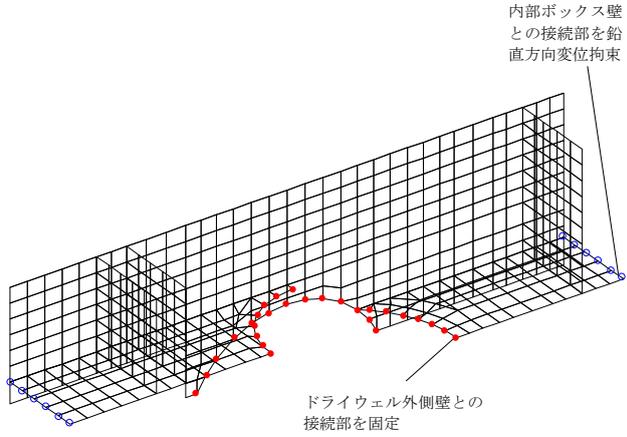
境界条件, 拘束条件	
プール部とその他周辺構造物との境界	
地震荷重時	
 <p style="text-align: center;">内部ボックス壁との接続部を地震荷重加力方向に応じて拘束</p> <p style="text-align: center;">ドライウエル外側壁との接続部を固定</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>モデル下端位置は、ドライウエル外側壁との接続部について変位及び回転を拘束、内部ボックス壁接続部について地震荷重加力方向に応じて拘束。</li> <li>NS方向地震時はモデル対称軸は逆対称条件を設定。EW方向地震時はモデル対称軸は対称条件を設定。</li> </ul>
地震荷重及び温度荷重以外の荷重時	
 <p style="text-align: center;">内部ボックス壁との接続部を鉛直方向変位拘束</p> <p style="text-align: center;">ドライウエル外側壁との接続部を固定</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>モデル下端位置は、ドライウエル外側壁との接続部について変位及び回転を拘束、内部ボックス壁接続部について鉛直方向変位を拘束。</li> <li>モデル対称軸は対称条件を設定。</li> </ul>

表 2-1(5) モデル化, 境界条件及び拘束条件

境界条件, 拘束条件	
プール部とその他周辺構造物との境界	
温度荷重時	
<p style="text-align: center;">内部ボックス壁との接続部を鉛直方向変位拘束</p> <p style="text-align: center;">ドライウエル外側壁との接続部を固定</p> <p style="text-align: center;">内部ボックス壁との接続部に鉛直方向の強制変位</p> <p style="text-align: center;">ドライウエル外側壁との接続部を回転拘束のうえ水平・鉛直方向に強制変位</p>	<p>温度作用時</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>モデル下端位置は, ドライウエル外側壁との接続部について変位及び回転を拘束, 内部ボックス壁接続部について鉛直方向変位を拘束。</li> <li>モデル対称軸は対称条件を設定。</li> </ul> <p>ドライウエル外側壁からの強制変位作用時</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉ウエルの脚部には回転拘束のうえ, 温度荷重によりドライウエル外側壁に生ずる水平・鉛直方向の変位を与える。</li> <li>内部ボックス壁接続部について温度荷重により内部ボックス壁に生ずる鉛直方向の強制変位を与える。</li> <li>モデル対称軸は対称条件を設定。</li> </ul>

## 別紙 3 地震荷重の入力方法

## 目 次

- |                    |        |
|--------------------|--------|
| 1. 概要 .....        | 別紙 3-1 |
| 2. 地震荷重の入力方法 ..... | 別紙 3-2 |

## 1. 概要

本資料は、燃料プール（キャスク置場を含む）（以下「燃料プール」という。）に作用する地震荷重の入力方法について示すものである。

## 2. 地震荷重の入力方法

燃料プールの応力解析にあたって、FEMモデルに入力する地震荷重として、水平地震力、鉛直地震力及び地震時動水圧荷重を考慮する。

地震荷重の入力は、基準地震動 $S_s$ 、弾性設計用地震動 $S_d$ に対する地震応答解析結果及び静的地震力を考慮し、FEMモデルに入力する水平力、曲げモーメント及び鉛直力が、各質点位置で地震応答解析結果と等価になるように設定する。

具体的には、水平地震力については、地震応答解析により求まる燃料プールの位置する階の最大応答せん断力に基づく水平力をFEMモデルに入力する。水平力は、地震応答解析モデルの各質点位置に相当するFEMモデルの各節点に節点荷重として入力する。

また、地震応答解析により求まる燃料プールの位置する階の最大応答曲げモーメントとFEMモデルに入力した水平力により発生する曲げモーメントの差分をFEMモデルに入力する。曲げモーメントは、三角形分布荷重に変換し節点の支配長さに応じた節点荷重として入力する。EW方向のプール部の回転ばねによる曲げモーメントについては、燃料プール側及び蒸気乾燥器・気水分離ピット（以下「DSピット」という。）側の壁の剛性比を考慮した長さで除して求めた内部ボックス壁からの鉛直方向の反力を、プールガーダの端部に節点荷重として入力する。

鉛直地震力については、地震応答解析により求まる燃料プールの位置する階の最大応答軸力から算出した鉛直震度（軸力係数）に基づく鉛直力をFEMモデルに入力する。鉛直力は、FEMモデルの各節点に、節点の支配重量に鉛直震度（軸力係数）を乗じた節点荷重として入力する。

燃料プールの壁部に作用する地震時動水圧荷重は、壁の各節点の支配面積に応じて分配し、節点荷重として入力する。

FEMモデルに入力する地震荷重の概念図を図2-1に示す。また、FEMモデルに入力する地震荷重を図2-2に示す。

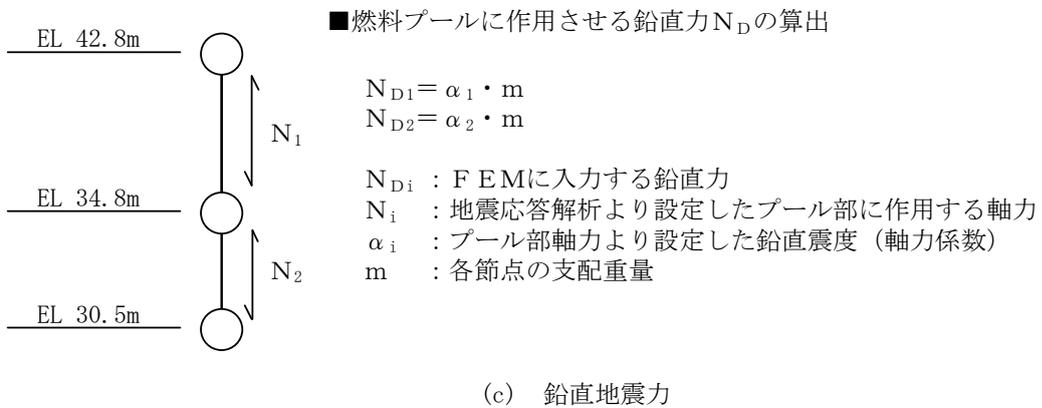
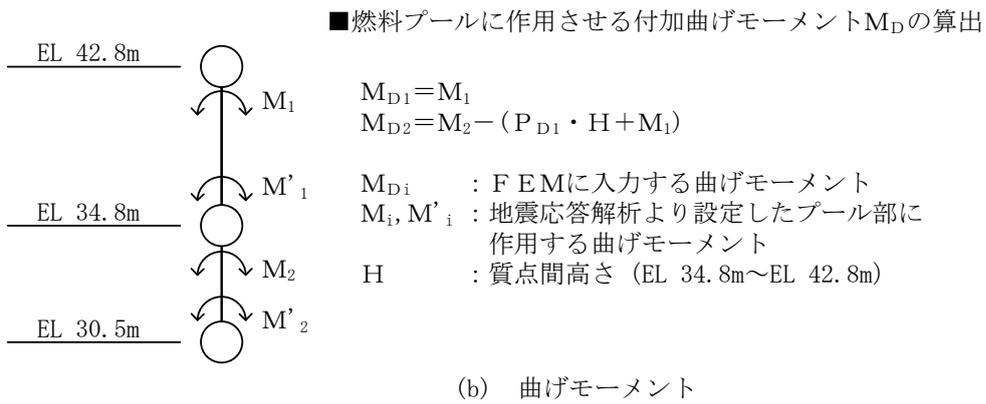
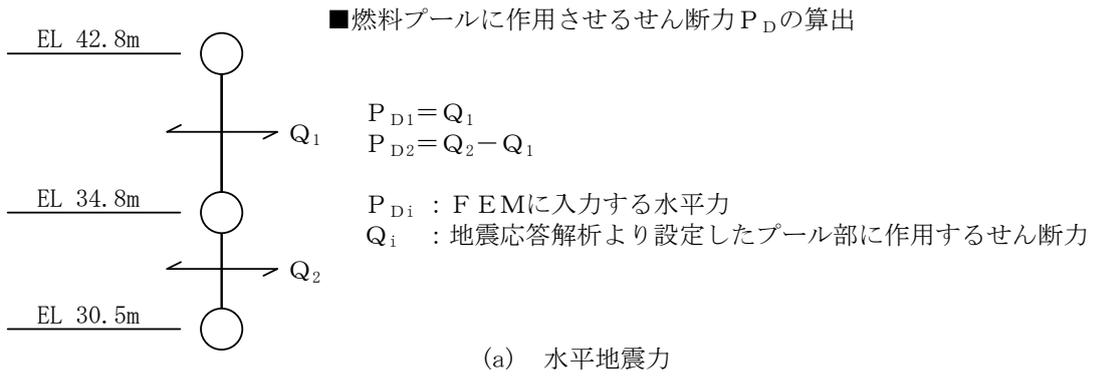
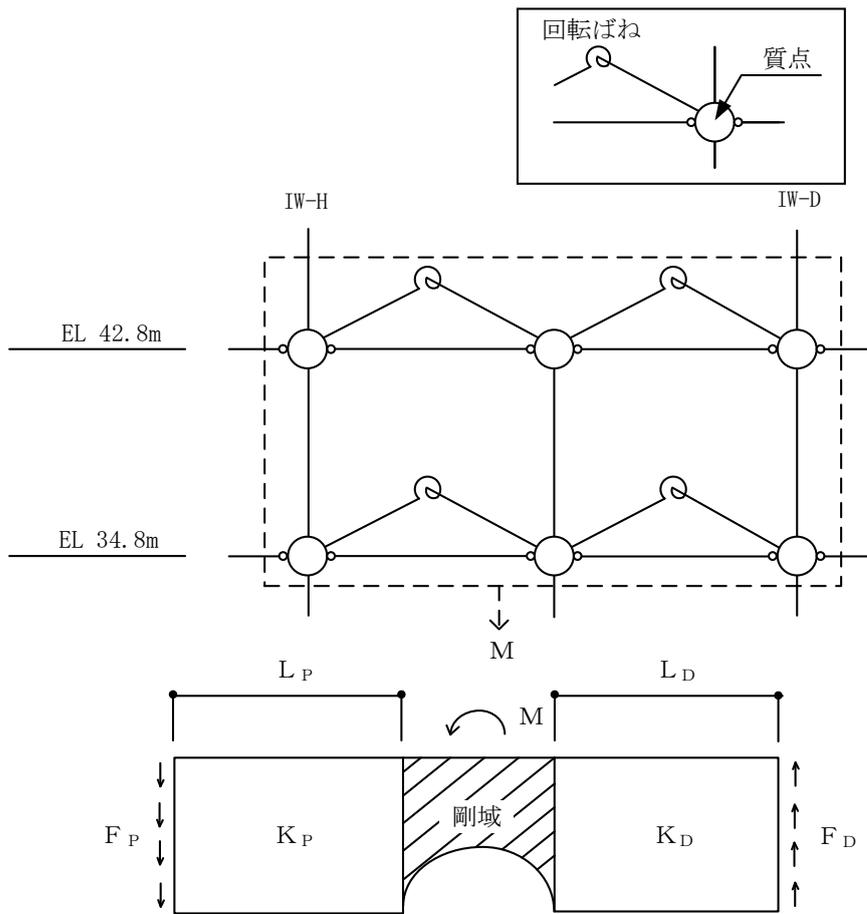


図 2-1(1) FEMモデルに入力する地震荷重の概念図



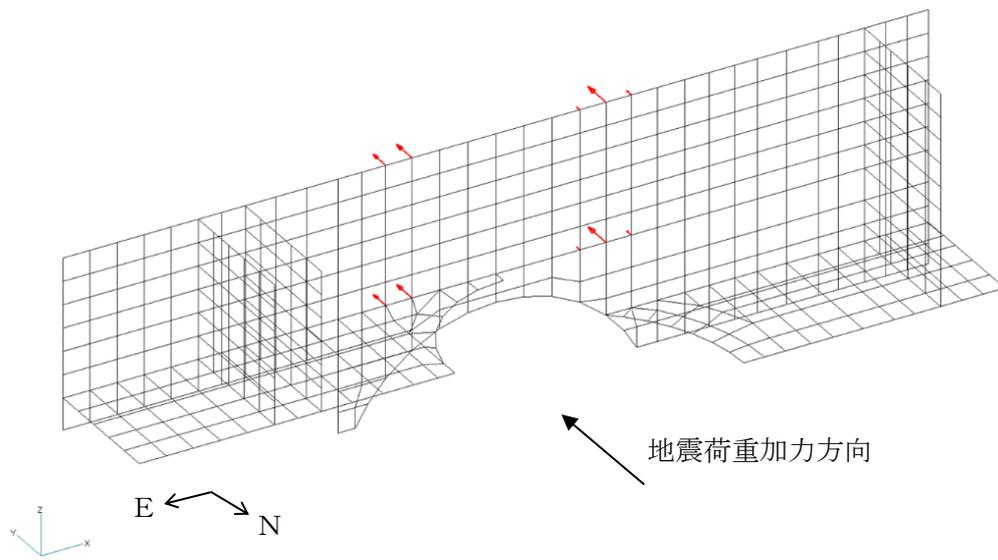
$$F_P = M \cdot K_P / (K_P \cdot L_P + K_D \cdot L_D)$$

$$F_D = M \cdot K_D / (K_P \cdot L_P + K_D \cdot L_D)$$

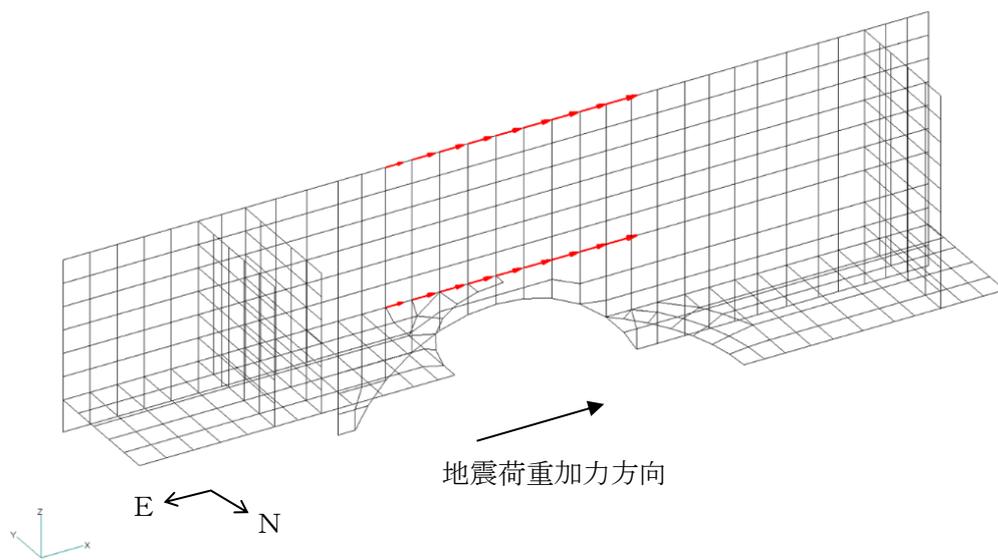
- M : 地震応答解析による回転ばねの反力 (4本の合計)
- F<sub>P</sub> : FEMの燃料プール側に入力する鉛直力
- F<sub>D</sub> : FEMのDSピット側に入力する鉛直力
- K<sub>P</sub> : 燃料プール側の壁の剛性
- K<sub>D</sub> : DSピット側の壁の剛性
- L<sub>P</sub> : 燃料プール側の壁の長さ
- L<sub>D</sub> : DSピット側の壁の長さ

(d) プール部の回転ばねによる曲げモーメント (EW方向)

図 2-1(2) FEMモデルに入力する地震荷重の概念図

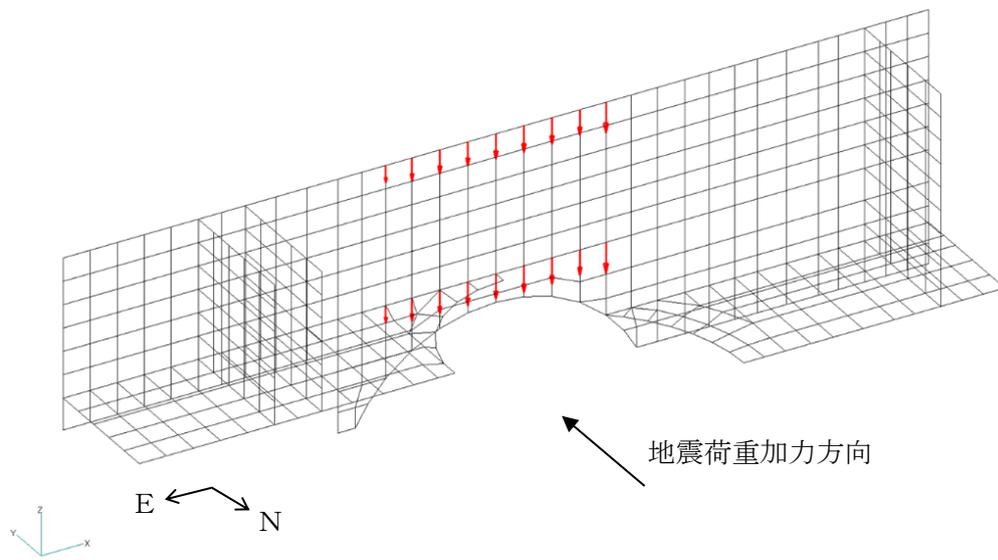


(a) 水平力 (NS方向)

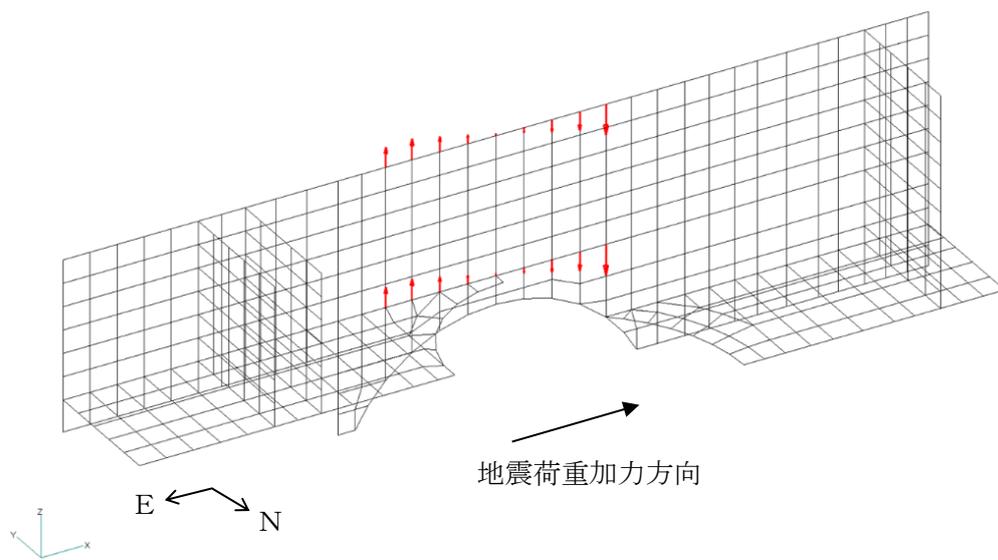


(b) 水平力 (EW方向)

図 2-2(1) FEMモデルに入力する地震荷重

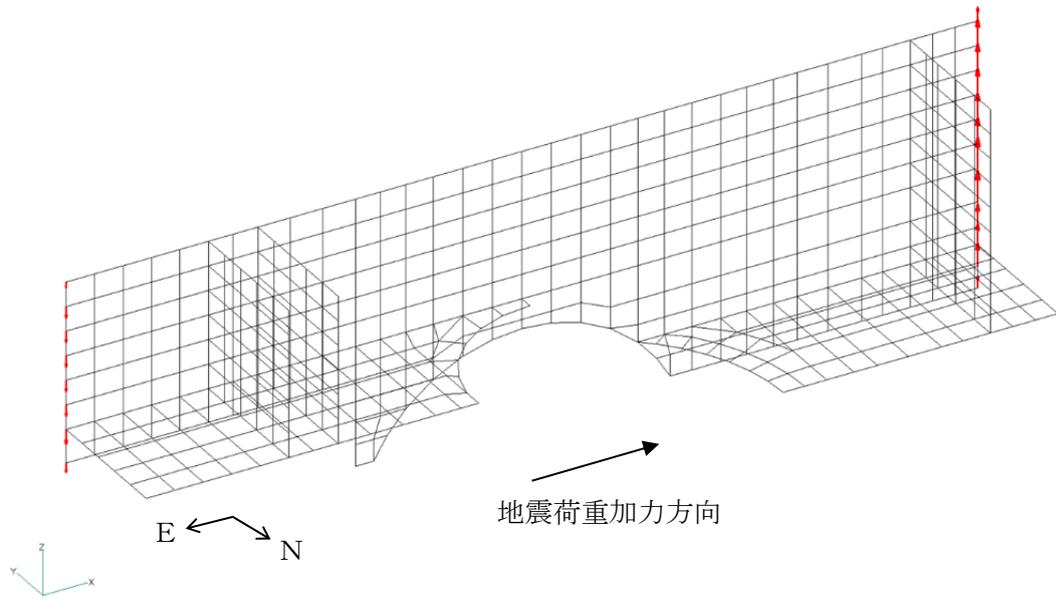


(c) 曲げモーメント (NS方向)

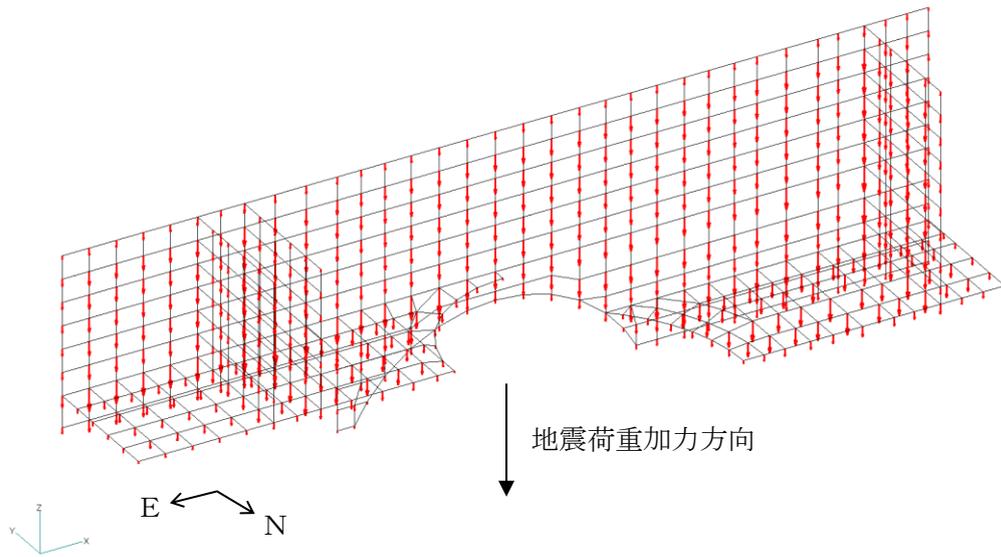


(d) 曲げモーメント (EW方向)

図 2-2(2) FEMモデルに入力する地震荷重

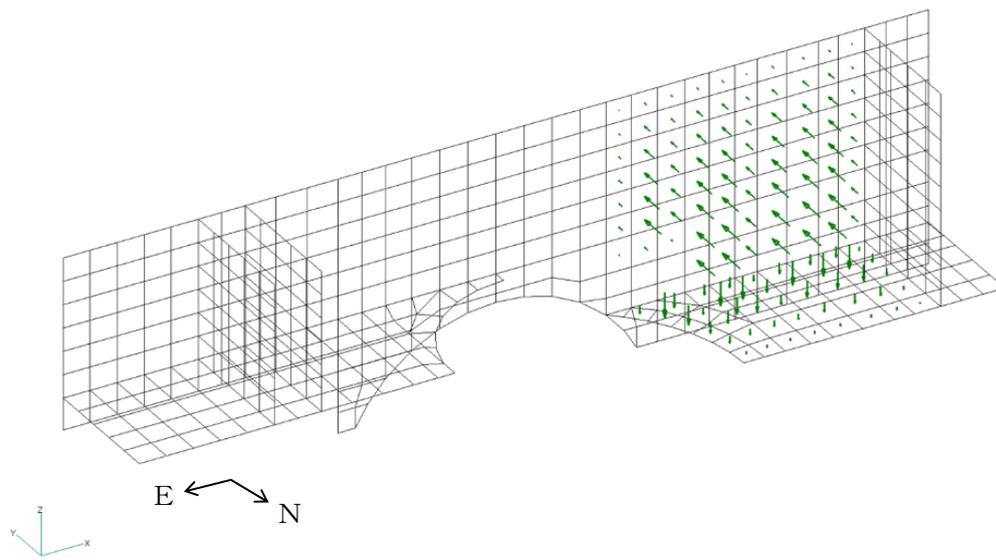


(e) 回転ばね反力 (E W方向)

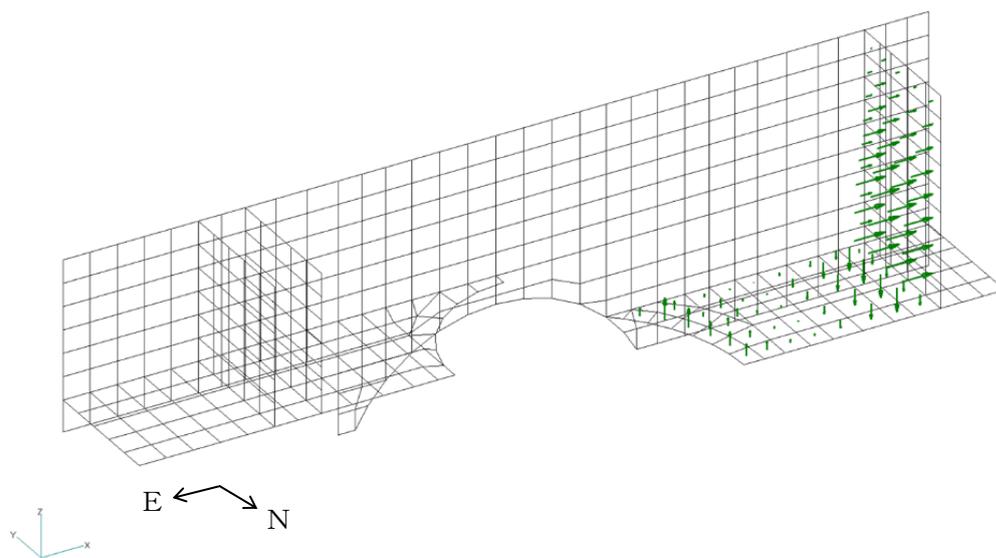


(f) 鉛直力

図 2-2(3) FEMモデルに入力する地震荷重



(g) 地震時動水圧荷重 (N S 方向)



(h) 地震時動水圧荷重 (E W 方向)

図 2-2(4) FEMモデルに入力する地震荷重

## 別紙 4 応力解析における断面の評価部位の選定

## 目 次

1. 概要 .....	別紙 4-1
2. 断面の評価部位の選定 .....	別紙 4-2

## 1. 概要

本資料は、燃料プール（キャスク置場を含む）の応力解析における断面の評価部位の選定について示すものである。

## 2. 断面の評価部位の選定

燃料プール（キャスク置場を含む）の荷重の組合せケースを表 2-1 に、配筋領域図を図 2-1 に、配筋一覧を表 2-2 に示す。

各評価項目の検定値一覧を表 2-3 に、各壁及び底面スラブに対して断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果を図 2-2 及び図 2-3 に、断面の評価部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図を図 2-4～図 2-6 に示す。

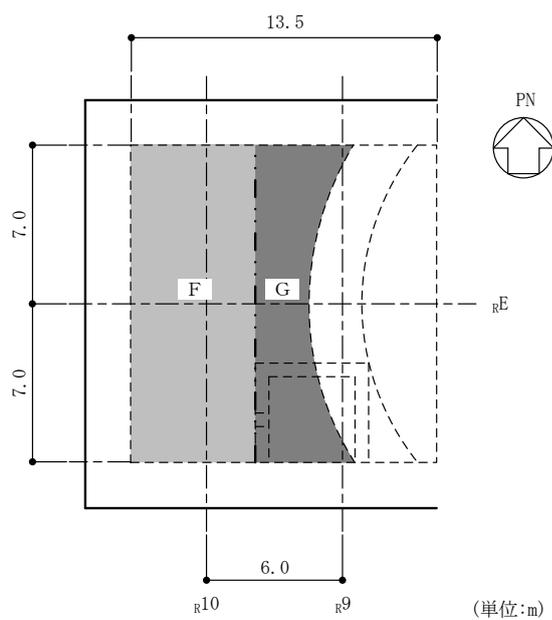
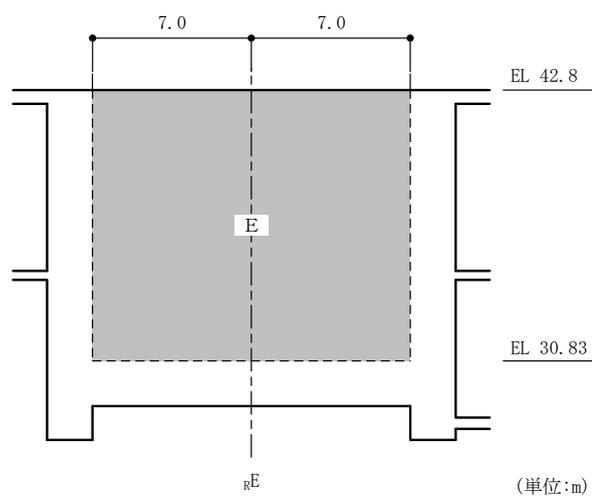
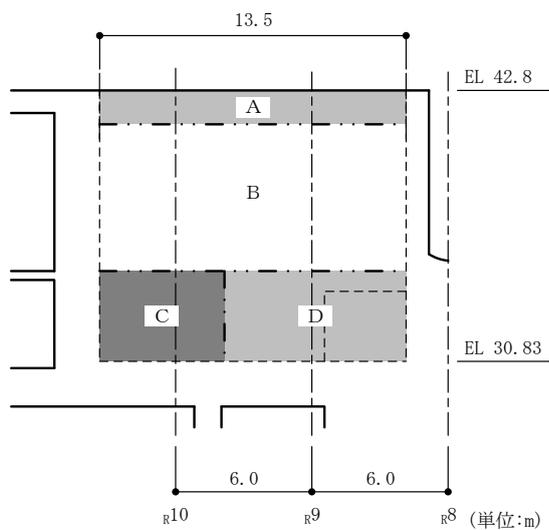
表 2-1(1) 荷重の組合せケース

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S d 地震時	1-1	$G + P + [T] + 1.0 S d_{SN} + 0.4 S d_{UD}$
	1-2	$G + P + [T] - 1.0 S d_{SN} + 0.4 S d_{UD}$
	1-3	$G + P + [T] - 1.0 S d_{WE} + 0.4 S d_{UD}$
	1-4	$G + P + [T] + 1.0 S d_{WE} + 0.4 S d_{UD}$
	1-5	$G + P + [T] + 1.0 S d_{SN} - 0.4 S d_{UD}$
	1-6	$G + P + [T] - 1.0 S d_{SN} - 0.4 S d_{UD}$
	1-7	$G + P + [T] - 1.0 S d_{WE} - 0.4 S d_{UD}$
	1-8	$G + P + [T] + 1.0 S d_{WE} - 0.4 S d_{UD}$
	1-9	$G + P + [T] + 0.4 S d_{SN} + 1.0 S d_{UD}$
	1-10	$G + P + [T] - 0.4 S d_{SN} + 1.0 S d_{UD}$
	1-11	$G + P + [T] - 0.4 S d_{WE} + 1.0 S d_{UD}$
	1-12	$G + P + [T] + 0.4 S d_{WE} + 1.0 S d_{UD}$
	1-13	$G + P + [T] + 0.4 S d_{SN} - 1.0 S d_{UD}$
	1-14	$G + P + [T] - 0.4 S d_{SN} - 1.0 S d_{UD}$
	1-15	$G + P + [T] - 0.4 S d_{WE} - 1.0 S d_{UD}$
	1-16	$G + P + [T] + 0.4 S d_{WE} - 1.0 S d_{UD}$

注：[ ]は応力状態 2 に対する荷重を示す。

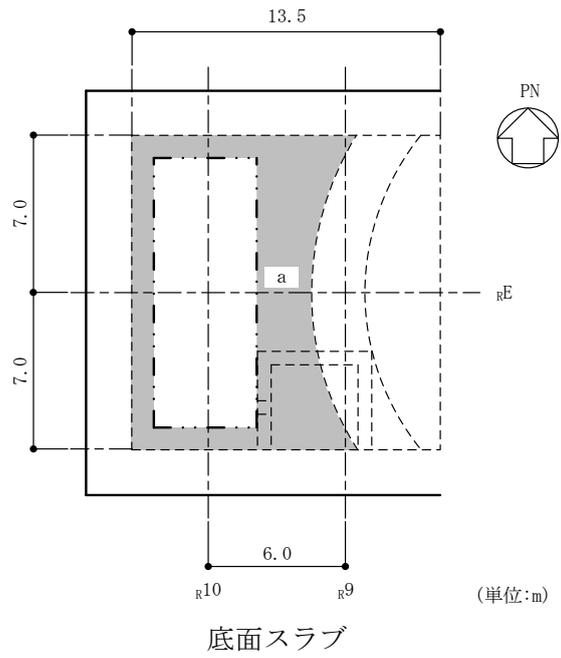
表 2-1(2) 荷重の組合せケース

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S s 地震時	2-1	$G + P + 1.0S_{SN} + 0.4S_{UD}$
	2-2	$G + P - 1.0S_{SN} + 0.4S_{UD}$
	2-3	$G + P - 1.0S_{WE} + 0.4S_{UD}$
	2-4	$G + P + 1.0S_{WE} + 0.4S_{UD}$
	2-5	$G + P + 1.0S_{SN} - 0.4S_{UD}$
	2-6	$G + P - 1.0S_{SN} - 0.4S_{UD}$
	2-7	$G + P - 1.0S_{WE} - 0.4S_{UD}$
	2-8	$G + P + 1.0S_{WE} - 0.4S_{UD}$
	2-9	$G + P + 0.4S_{SN} + 1.0S_{UD}$
	2-10	$G + P - 0.4S_{SN} + 1.0S_{UD}$
	2-11	$G + P - 0.4S_{WE} + 1.0S_{UD}$
	2-12	$G + P + 0.4S_{WE} + 1.0S_{UD}$
	2-13	$G + P + 0.4S_{SN} - 1.0S_{UD}$
	2-14	$G + P - 0.4S_{SN} - 1.0S_{UD}$
	2-15	$G + P - 0.4S_{WE} - 1.0S_{UD}$
	2-16	$G + P + 0.4S_{WE} - 1.0S_{UD}$



(a) 主筋

図 2-1(1) 配筋領域図



(b) せん断補強筋

図 2-1(2) 配筋領域図

表 2-2 配筋一覧

(a) 南側壁主筋

領域	タテ方向	ヨコ方向
A	(内側) D38@200+D38@400 (外側) 3-D38@200	(内側) 2-D38@200 (外側) 3-D38@200
B	(内側) D38@200+D38@400 (外側) 2-D38@200	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400
C	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400
D	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400

(b) 西側壁主筋

領域	タテ方向	ヨコ方向
E	(内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+D38@400	(内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+D38@400

(c) 底面スラブ主筋

領域	N S 方向	E W 方向
F	(上ば筋) D38@200+D38@400 (下ば筋) 2-D38@200	(上ば筋) 2-D38@200 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400
G	(上ば筋) D38@200+D38@400 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400	(上ば筋) 2-D38@200 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400

(d) 底面スラブせん断補強筋

領域	配筋
a	D19@400×200

表 2-3(1) 各評価項目の検定値一覧

(a) S d 地震時

部位	評価項目		方向	要素 番号	組合せ ケース	検定値
南側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮応力度	鉛直	117	1-4	0.27
		鉄筋引張応力度	鉛直	83	1-12	0.63
	面内せん断力	面内せん断応力度	—	107	1-4	0.64
	面外せん断力	面外せん断応力度	鉛直	74	1-9	0.38
西側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮応力度	鉛直	449	1-11	0.21
		鉄筋引張応力度	水平	469	1-1	0.90
	面内せん断力	面内せん断応力度	—	476	1-10	0.46
	面外せん断力	面外せん断応力度	水平	469	1-3	0.62
底面 スラブ	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮応力度	E W	332	1-11	0.56
		鉄筋引張応力度	E W	332	1-11	0.76
	面外せん断力	面外せん断応力度	E W	317	1-11	0.69

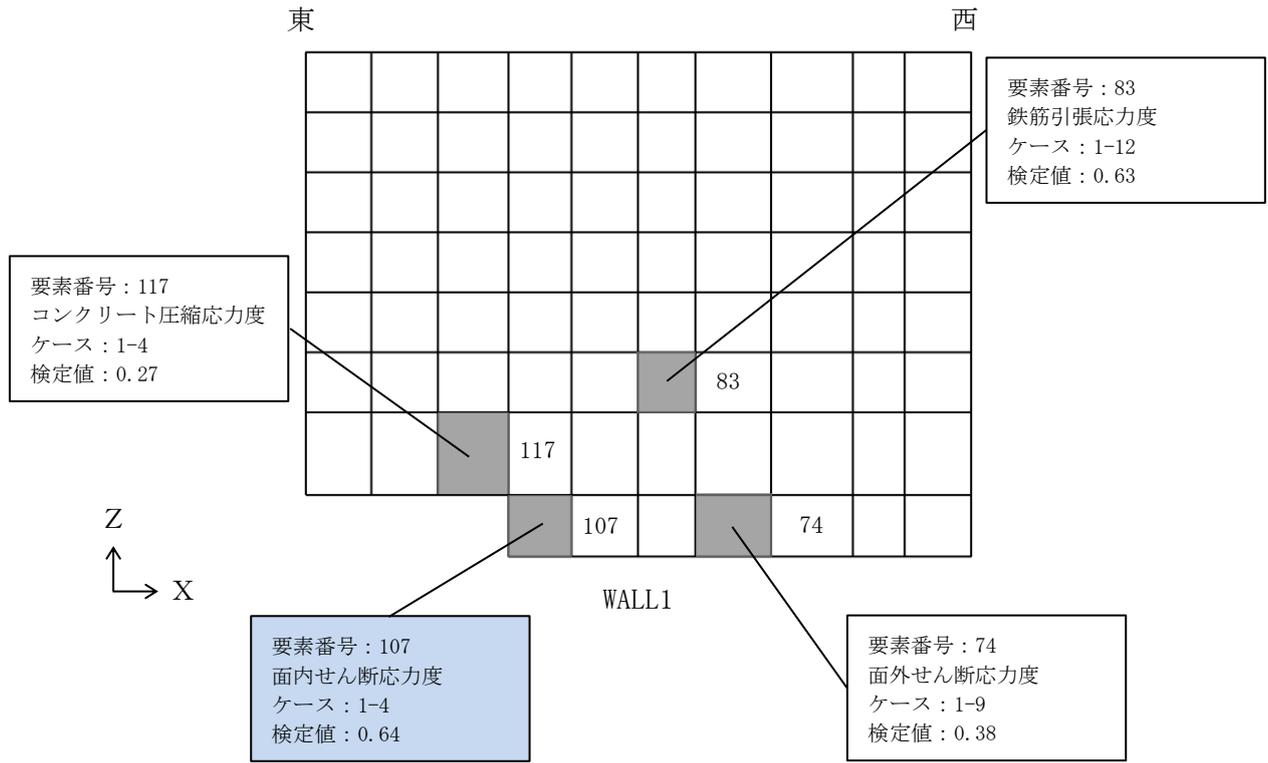
注：■ は、検定値が最大となる要素を示す。

表 2-3(2) 各評価項目の検定値一覧

(b) S s 地震時

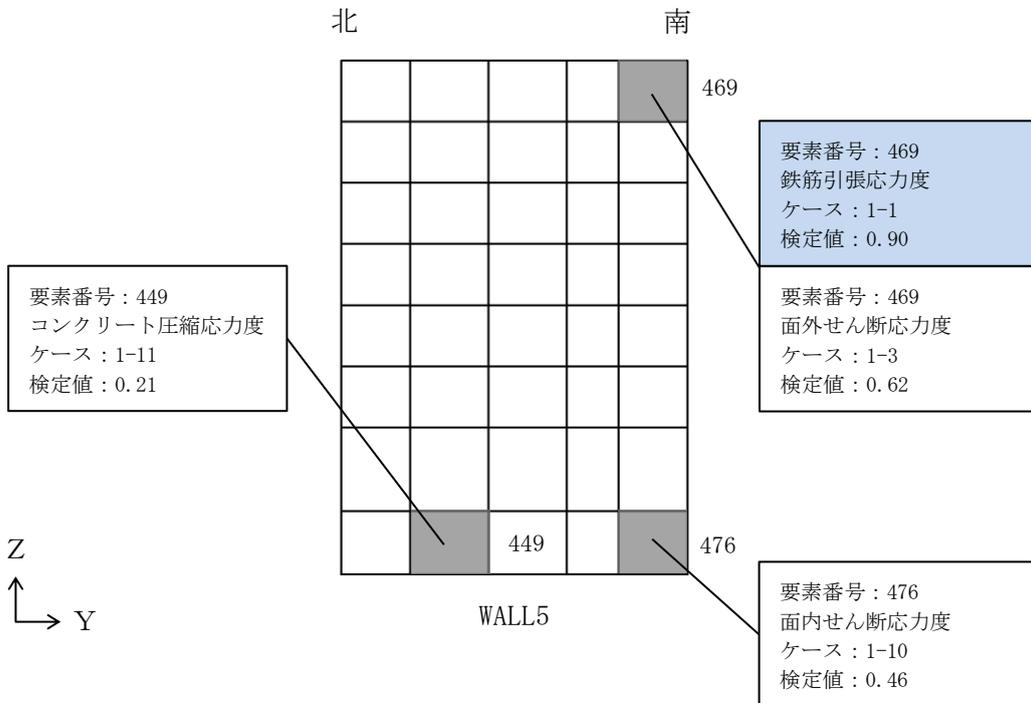
部位	評価項目		方向	要素 番号	組合せ ケース	検定値
南側壁	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	鉛直	128	2-12	0.06
		鉄筋引張ひずみ	鉛直	85	2-10	0.28
	軸力	圧縮応力度	鉛直	139	2-4	0.22
	面内せん断力	面内せん断応力度	—	107	2-12	0.54
	面外せん断力	面外せん断応力度	鉛直	74	2-9	0.39
西側壁	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	鉛直	449	2-11	0.09
		鉄筋引張ひずみ	鉛直	449	2-11	0.34
	軸力	圧縮応力度	水平	469	2-6	0.09
	面内せん断力	面内せん断応力度	—	475	2-9	0.44
	面外せん断力	面外せん断応力度	鉛直	440	2-11	0.57
底面 スラブ	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	E W	332	2-11	0.19
		鉄筋引張ひずみ	E W	332	2-11	0.31
	面外せん断力	面外せん断応力度	E W	317	2-11	0.94

注：  は、検定値が最大となる要素を示す。



注：■ は、検定値が最大となる要素を示す。

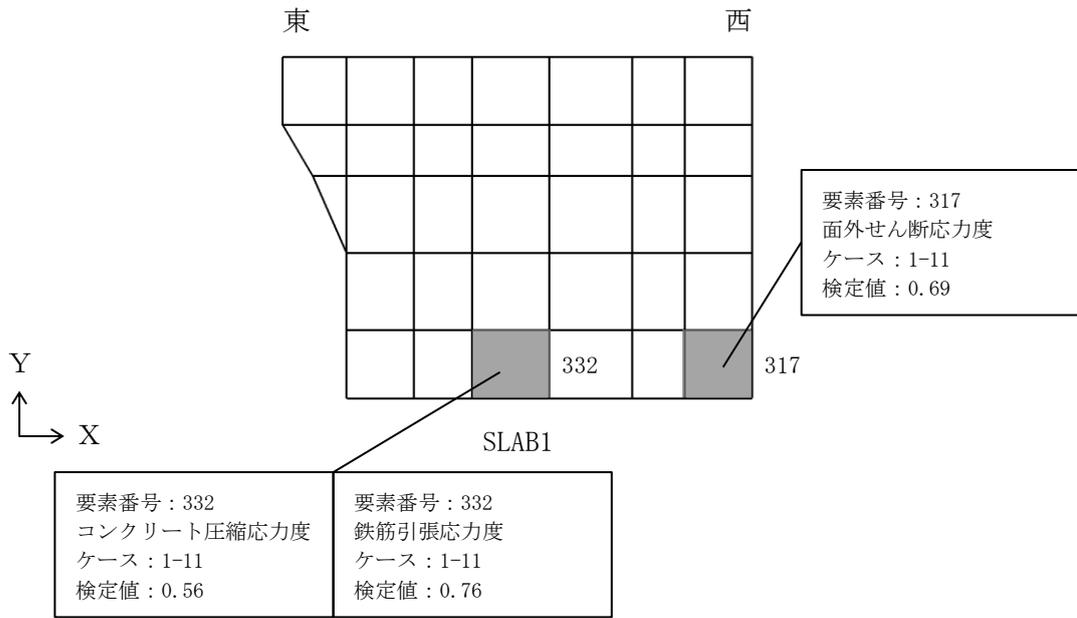
(a) 南側壁



注：■ は、検定値が最大となる要素を示す。

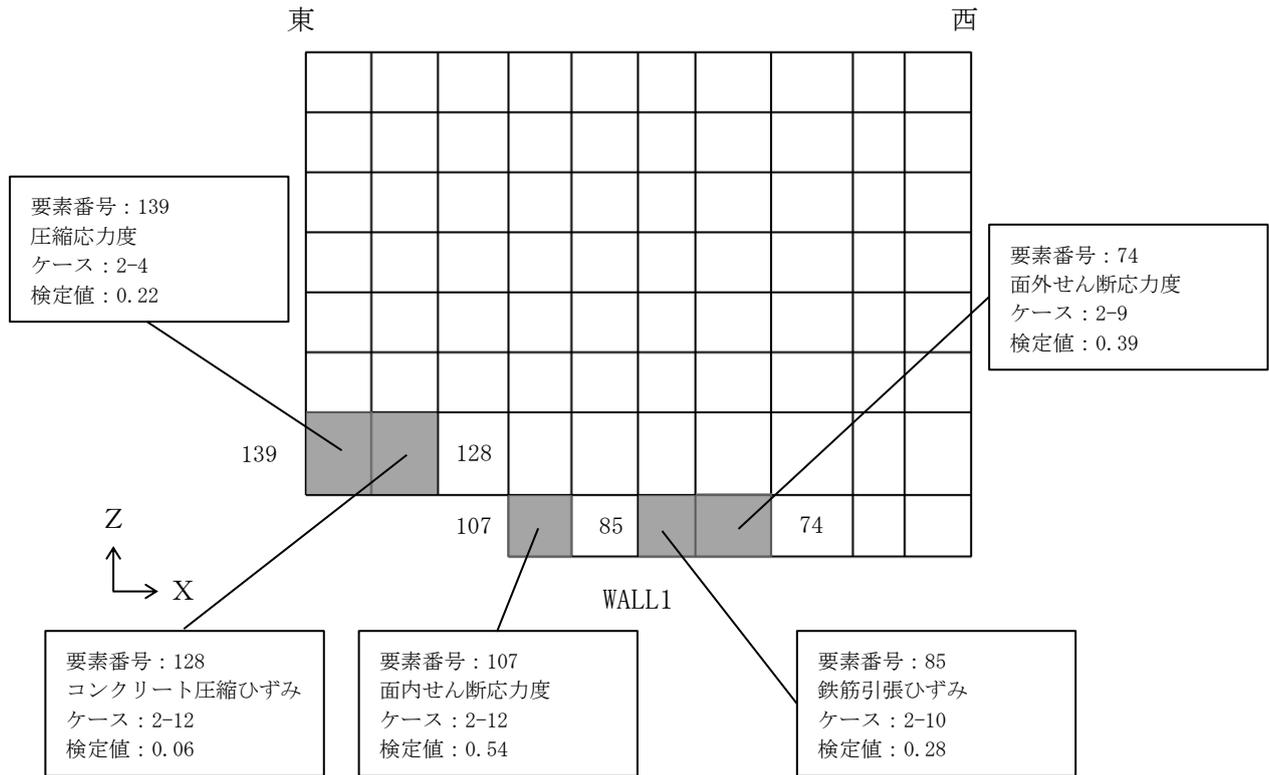
(b) 西側壁

図 2-2(1) 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 S d 地震時

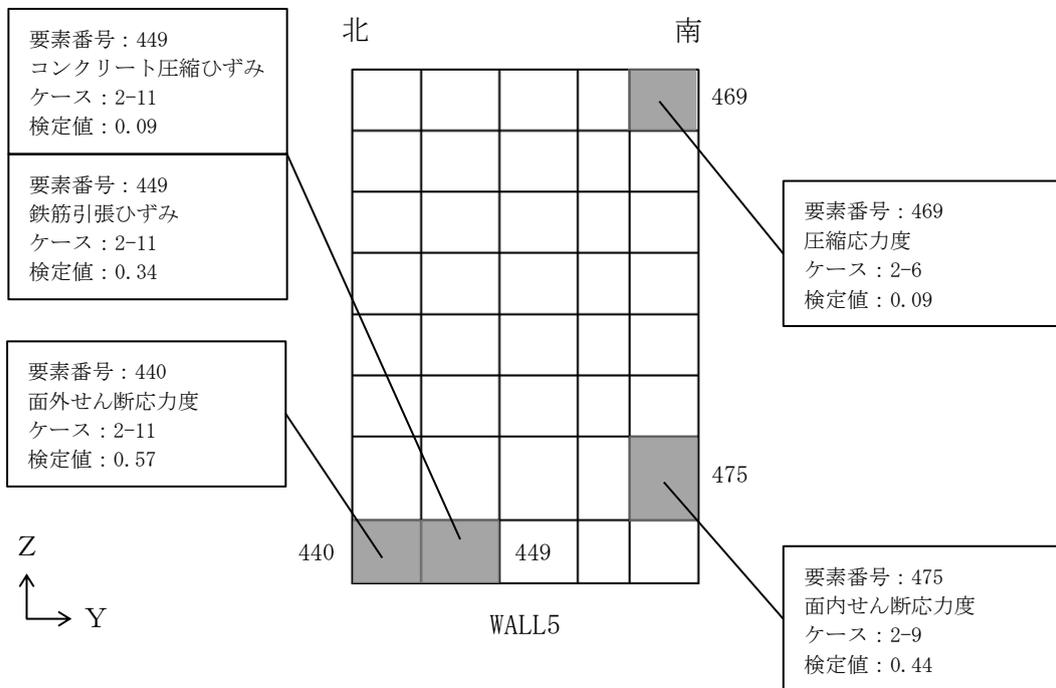


(c) 底面スラブ

図 2-2(2) 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 S d 地震時

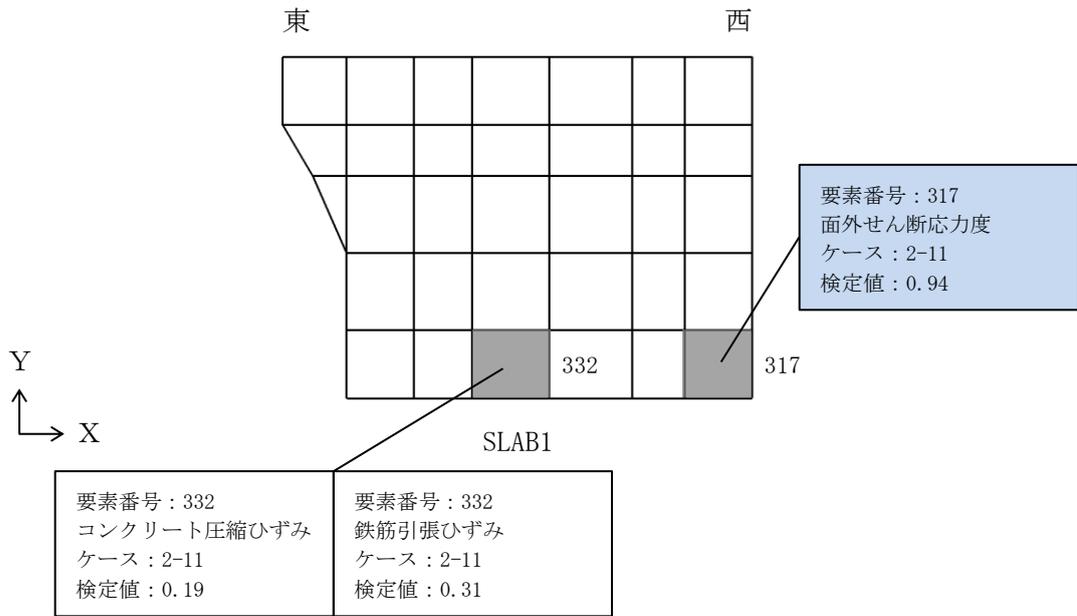


(a) 南側壁



(b) 西側壁

図 2-3(1) 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 S s 地震時



注:  は、検定値が最大となる要素を示す。

(c) 底面スラブ

図 2-3(2) 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 S s 地震時

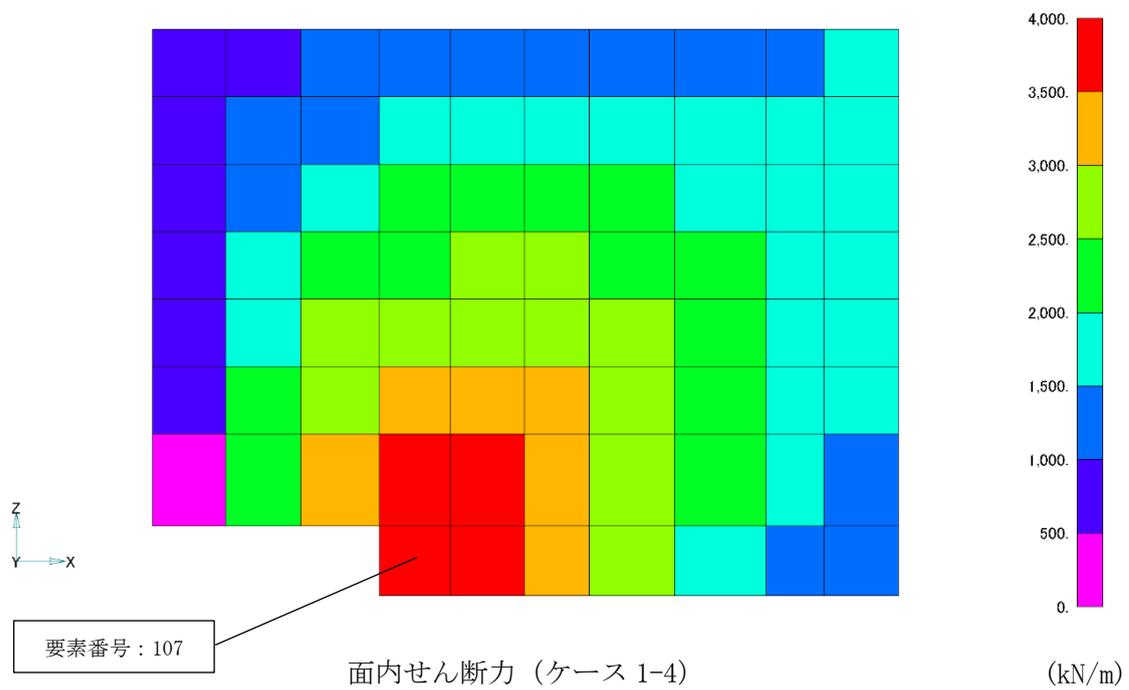


図 2-4 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 南側壁

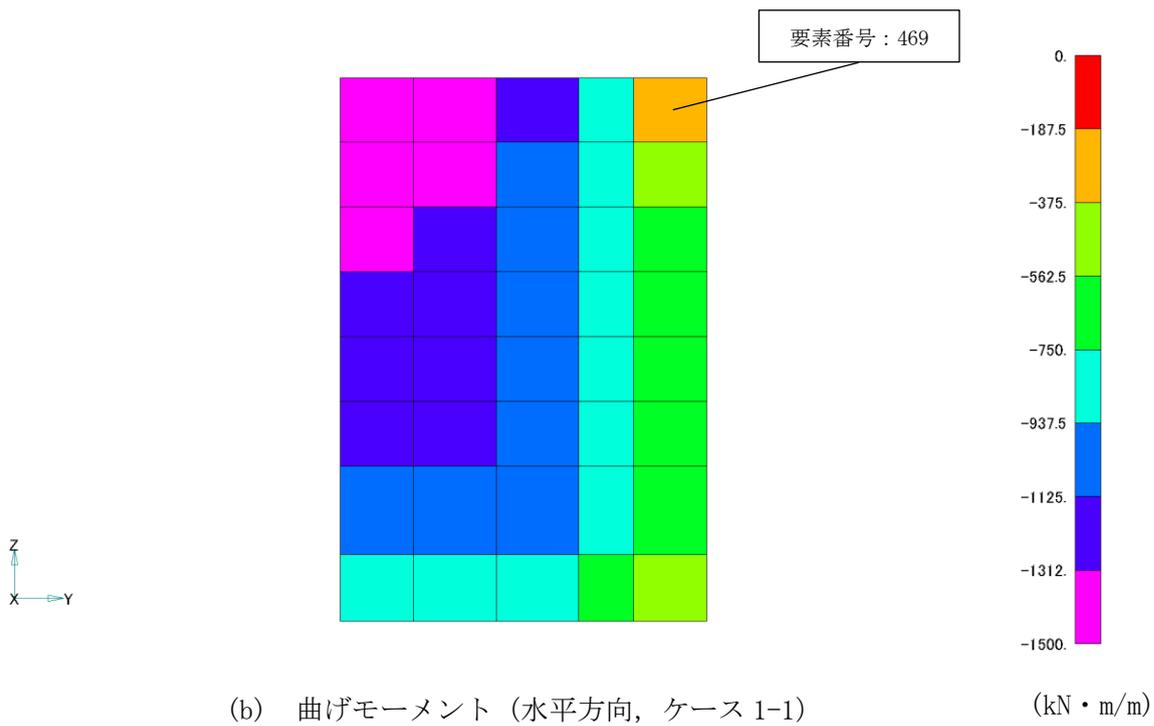
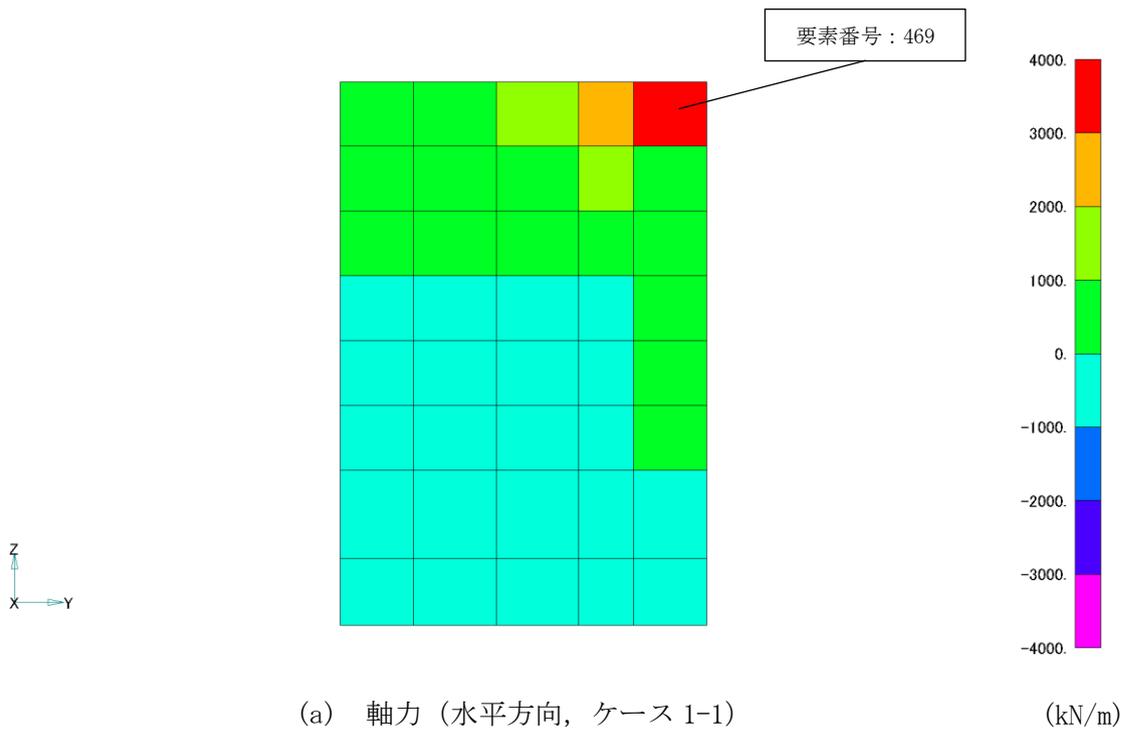


図 2-5(1) 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 西側壁

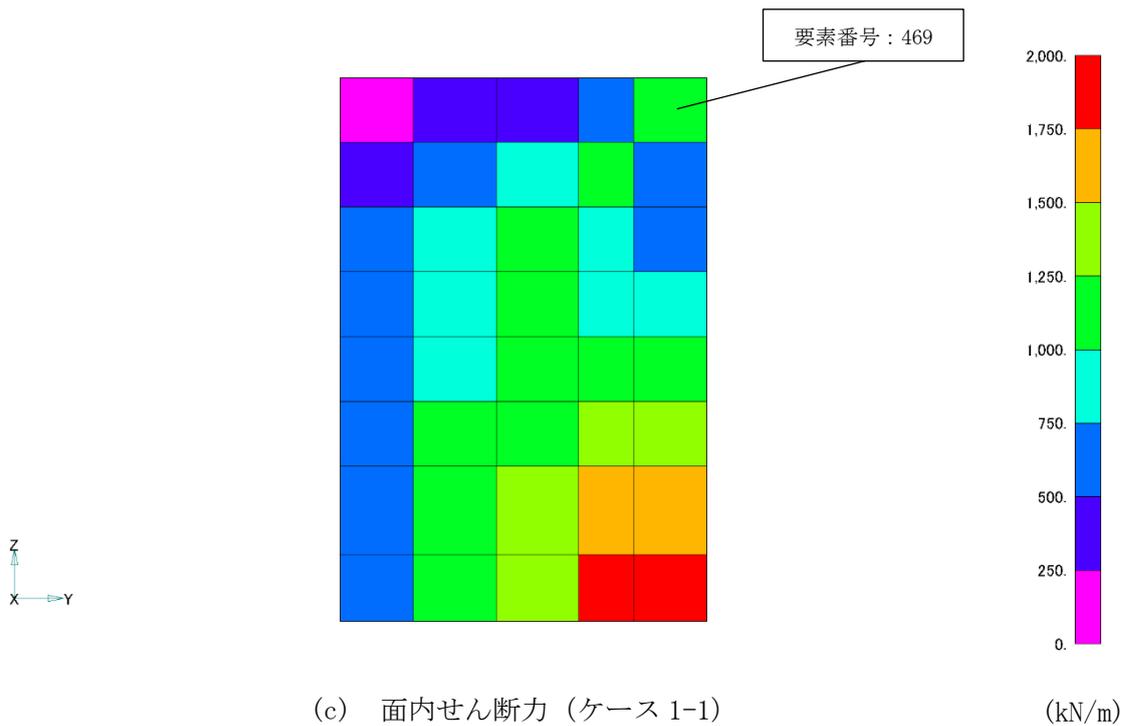


図 2-5(2) 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 西側壁

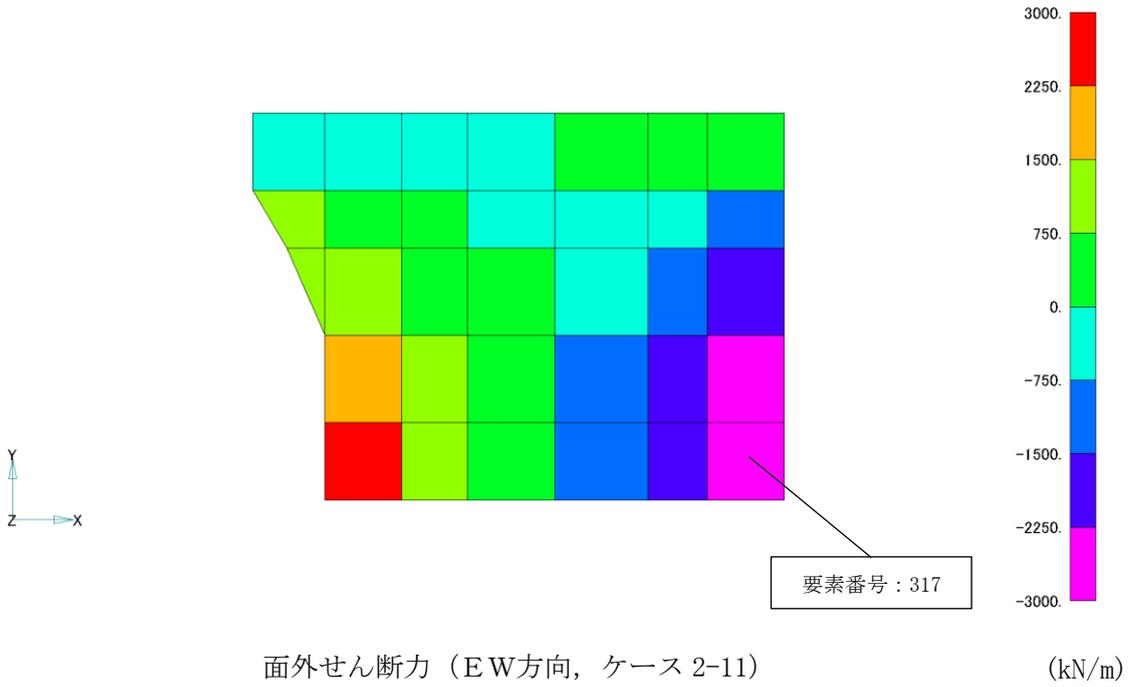


図 2-6 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 底面スラブ

## 別紙5 鋼製ライナの検討

## 目 次

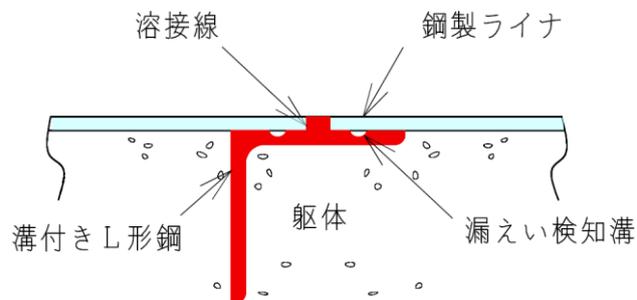
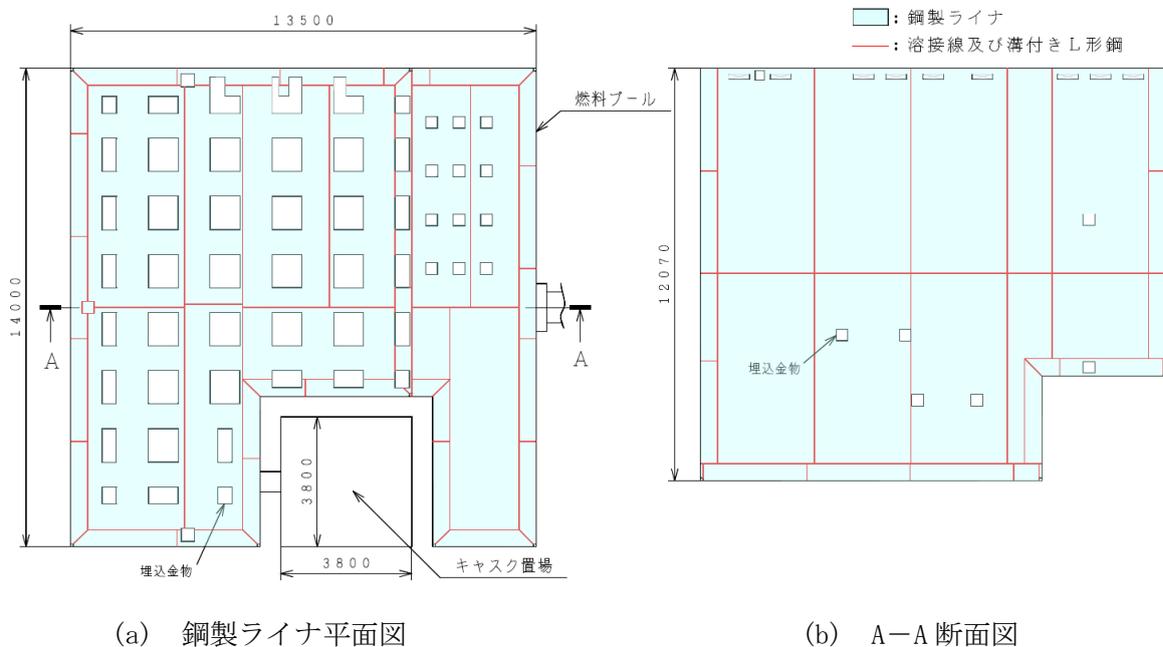
1. 概要 .....	別紙 5-1
2. 燃料プールの鋼製ライナひずみの算出方法 .....	別紙 5-2
3. 許容値の設定 .....	別紙 5-3
4. 鋼製ライナひずみの検討結果 .....	別紙 5-4
5. まとめ .....	別紙 5-8

## 1. 概要

燃料プールはコンクリート躯体に鋼製ライナ（材質：SUS304，厚さ：6mm）を内張りしたもので、鋼製ライナは耐漏えい機能を、鉄筋コンクリート部分は支持機能を有しており、内張りの下のコンクリート躯体で強度を保持しているため、VI-2-4-2-1「燃料プール（キャスク置場を含む）の耐震性についての計算書」では、鉄筋コンクリート部分の構造強度の確認による評価を実施している。

本資料は、燃料プールの内面におけるステンレス鋼製ライナひずみの検討の補足説明資料であり、VI-2-4-2-1「燃料プール（キャスク置場を含む）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。

鋼製ライナとコンクリート躯体の固定方法を図 1-1 に示す。鋼製ライナは、溝付き L 形鋼を介して鉄筋コンクリート躯体に固定されている。



(c) 埋込金物の断面詳細図

図 1-1 鋼製ライナとコンクリート躯体の固定方法

## 2. 燃料プールの鋼製ライナひずみの算出方法

燃料プールの鋼製ライナひずみは、VI-2-4-2-1「燃料プール（キャスク置場を含む）の耐震性についての計算書」に示す応力解析結果を基に、鋼製ライナ側コンクリート表面の最大主ひずみ( $\epsilon_1$ )と最小主ひずみ( $\epsilon_2$ )の絶対値が大きい方の値とする。

荷重ケース\*は、「S d 地震」、「S d 地震+温度荷重」及び「S s 地震」とする。

燃料プール内面の鋼製ライナについては、図 1-1 に示すとおり溝付き L 形鋼を介して固定されているため、鉄筋コンクリート躯体の変形に追従する。そのため、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みなして、ひずみの検討を行うことで、耐漏えい機能の確認を行う。

図 2-1 に燃料プールの鋼製ライナひずみの算出対象要素を示す。

注記\*：「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）」の CVE-3220 より、「S s 地震+温度荷重」は考慮不要。

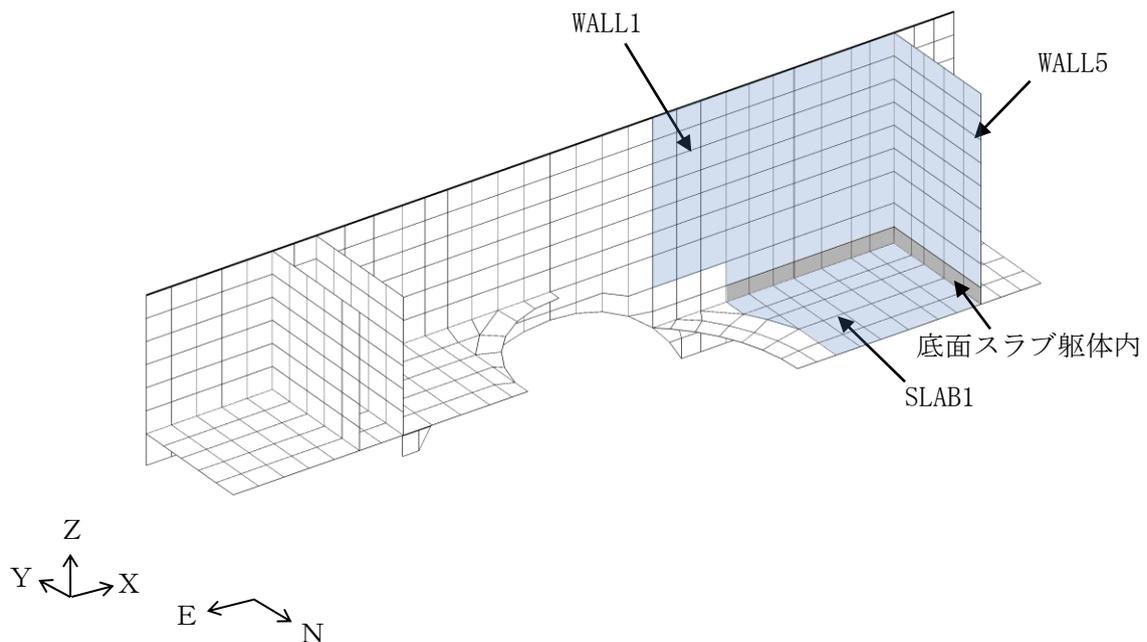


図 2-1 燃料プールの鋼製ライナひずみの算出対象要素

### 3. 許容値の設定

鋼製ライナひずみの許容値は、「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）」（以下「CCV規格」という。）を準用し，表 CVE-3611-1 ライナプレートの許容ひずみより，引張： $3.0 \times 10^{-3}$ ，圧縮： $5.0 \times 10^{-3}$ とする。

CCV規格の許容値は，コンクリート製原子炉格納容器の円筒部ライナプレートに限定されるものではなく，底部の平面のライナプレートにも適用されるものであるため，適用性について形状に依存するものではない。また，CCV規格においてライナプレートに使用する材料として燃料プール鋼製ライナの使用材料である SUS304 も規定されているため，使用材料の観点からもCCV規格を準用することは問題ない。さらに，ライナプレートは鉄筋コンクリート部分の変形によるひずみに対し，漏えいを生じることなく追従できる変形性能を有していればよい（解説 CVE-3611）。よって，要求機能の観点からも，燃料プールは鉄筋コンクリートに強度を，鋼製ライナに耐漏えい性をもたせた構造となっているため，CCV規格におけるライナプレートの許容ひずみを準用することは問題ないものと考ええる。

#### 4. 鋼製ライナひずみの検討結果

鋼製ライナひずみの検討結果を表 4-1 に示す。また、検定値が最大となる引張側の最大ひずみの要素位置を図 4-1 に、最大ひずみコンター図を図 4-2 に示す。

表 4-1 検討結果

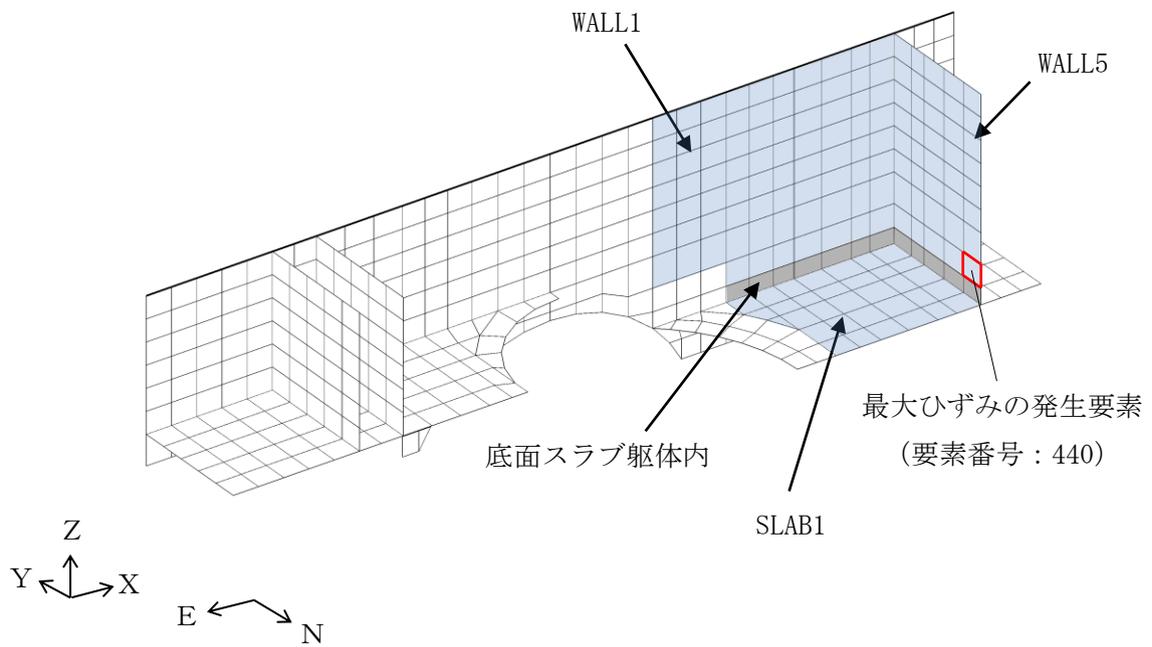
(a) 引張側

荷重ケース	最大ひずみの発生要素	解析結果	許容値	検定値
S d 地震	440	$0.159 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	0.06
S d 地震+温度荷重	440	$0.262 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	0.09
S s 地震	440	$0.217 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	0.08

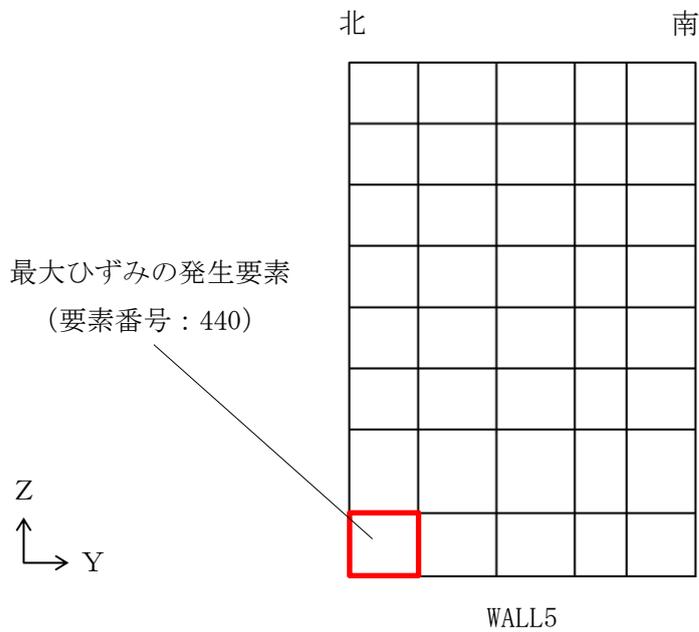
(b) 圧縮側

荷重ケース	最大ひずみの発生要素	解析結果	許容値	検定値
S d 地震	332	$0.182 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$	0.04
S d 地震+温度荷重	332	$0.139 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$	0.03
S s 地震	332	$0.248 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$	0.05

注：■ は、検定値が最大となる結果を示す。



(a) 全体鳥瞰図



(b) 西側壁

図 4-1 引張側の最大ひずみの要素位置図

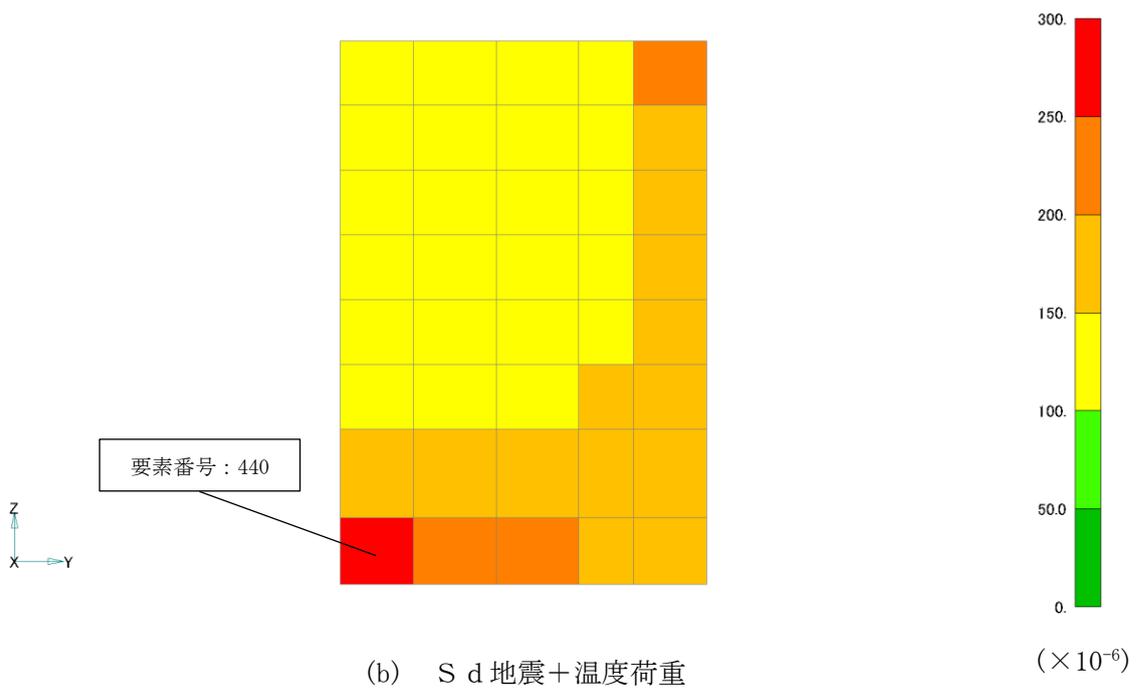
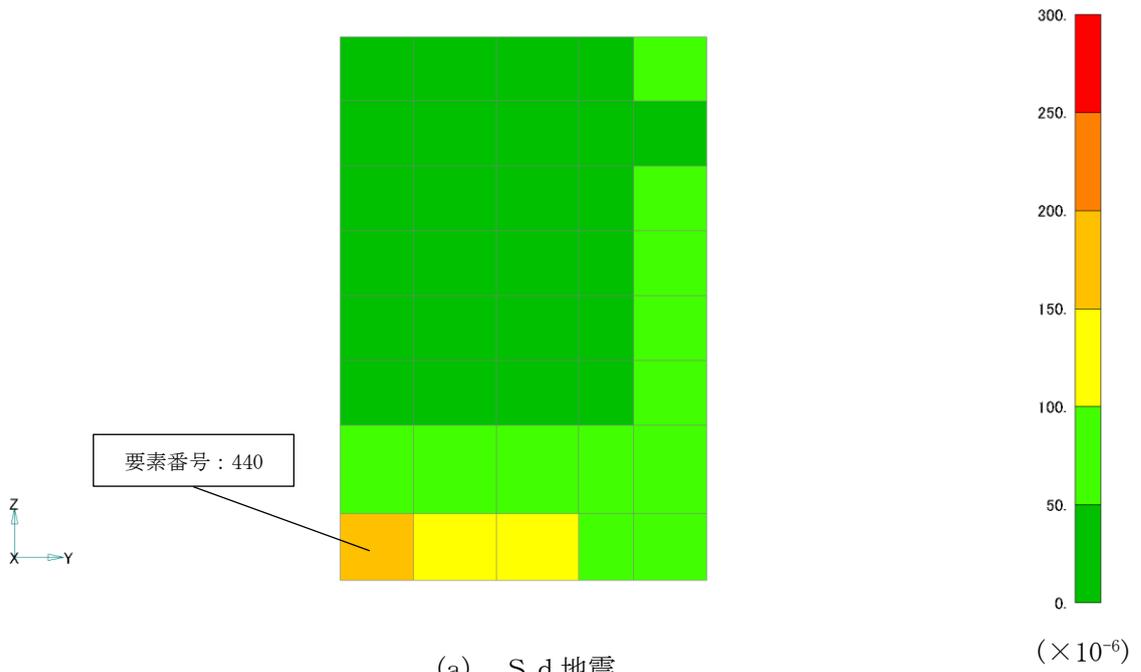


図 4-2(1) 引張側の最大ひずみコンター図 西側壁

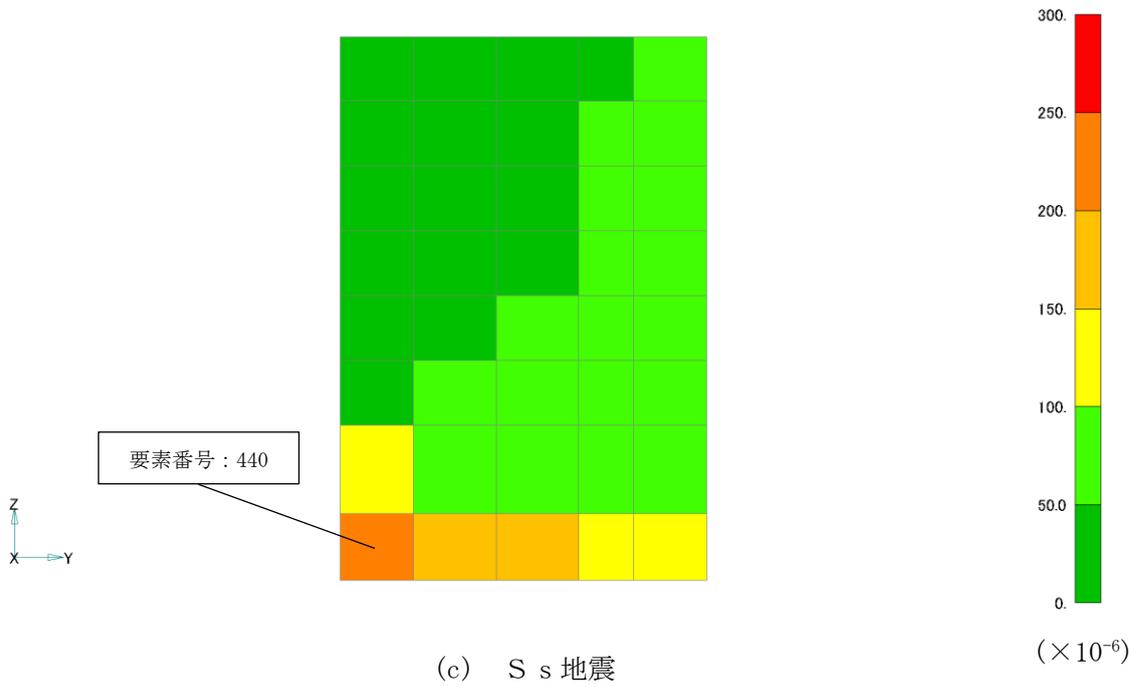


図 4-2(2) 引張側の最大ひずみコンター図 西側壁

## 5. まとめ

燃料プールの内面の鋼製ライナについて、ひずみの検討を行った。その結果、最大検定値は 0.09 (S d 地震+温度荷重, 引張側) であり、最大ひずみは許容値に対して十分小さいことを確認した。

## 別紙 6 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 6-1
2. 検討方針	別紙 6-4
3. 応力解析による評価方法	別紙 6-5
3.1 評価対象部位	別紙 6-5
3.2 荷重及び荷重の組合せ	別紙 6-5
3.3 許容限界	別紙 6-6
3.4 解析モデル及び諸元	別紙 6-6
3.5 評価方法	別紙 6-8
4. 評価結果	別紙 6-10
5. まとめ	別紙 6-20

別紙 6-1 ラック反力に対する燃料プールの応力解析における応力平均化の考え方

## 1. 概要

VI-2-4-2-1「燃料プール（キャスク置場を含む）の耐震性についての計算書」（以下「燃料プールの耐震計算書」という。）において、燃料プール及びキャスク置場の解析モデルでは、使用済燃料貯蔵ラックの質量を積載荷重として扱うことで、重量及び鉛直方向地震時に使用済燃料貯蔵ラックに作用する地震荷重を考慮している。

一方で、VI-2-4-2-2「使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書」では基準地震動  $S_s$  に対する使用済燃料貯蔵ラックの検討を行っており、燃料プールの底面スラブに作用する使用済燃料貯蔵ラックからの地震時反力が算定される。

本資料は、基準地震動  $S_s$  による使用済燃料貯蔵ラックからの地震時反力より設定した評価用反力（以下「地震時ラック反力」という。）に対し、燃料プール及びキャスク置場の検討を行うものである。

燃料プール及びキャスク置場を含む原子炉建物の概略平面図及び概略断面図を図 1-1 及び図 1-2 に示す。

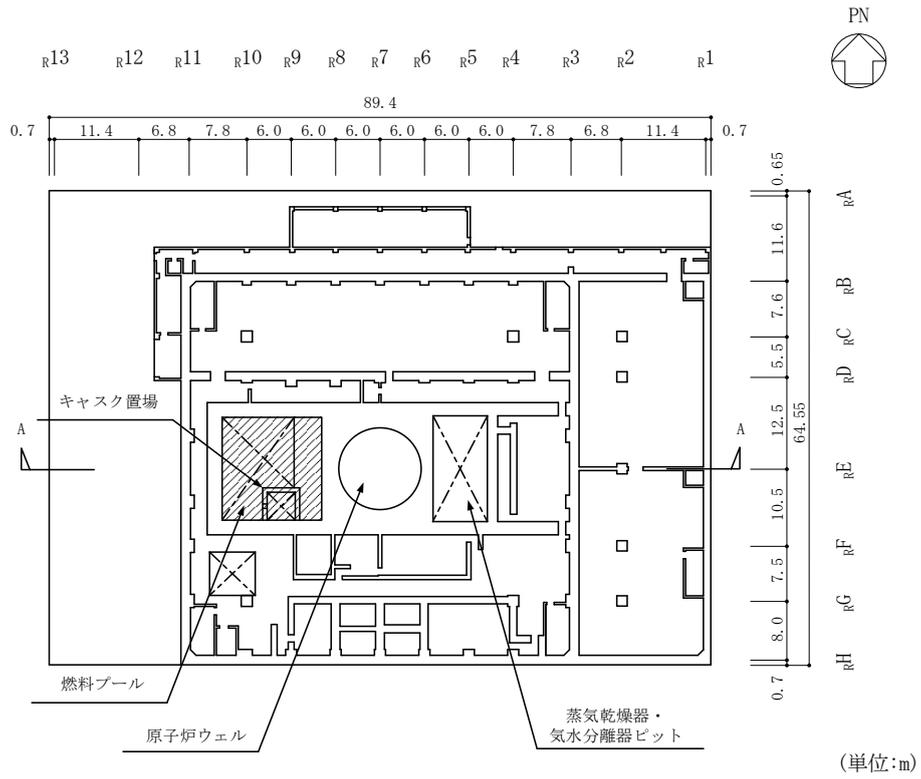


図 1-1 燃料プール及びキャスク置場を含む原子炉建物の概略平面図  
(EL 34.8m)

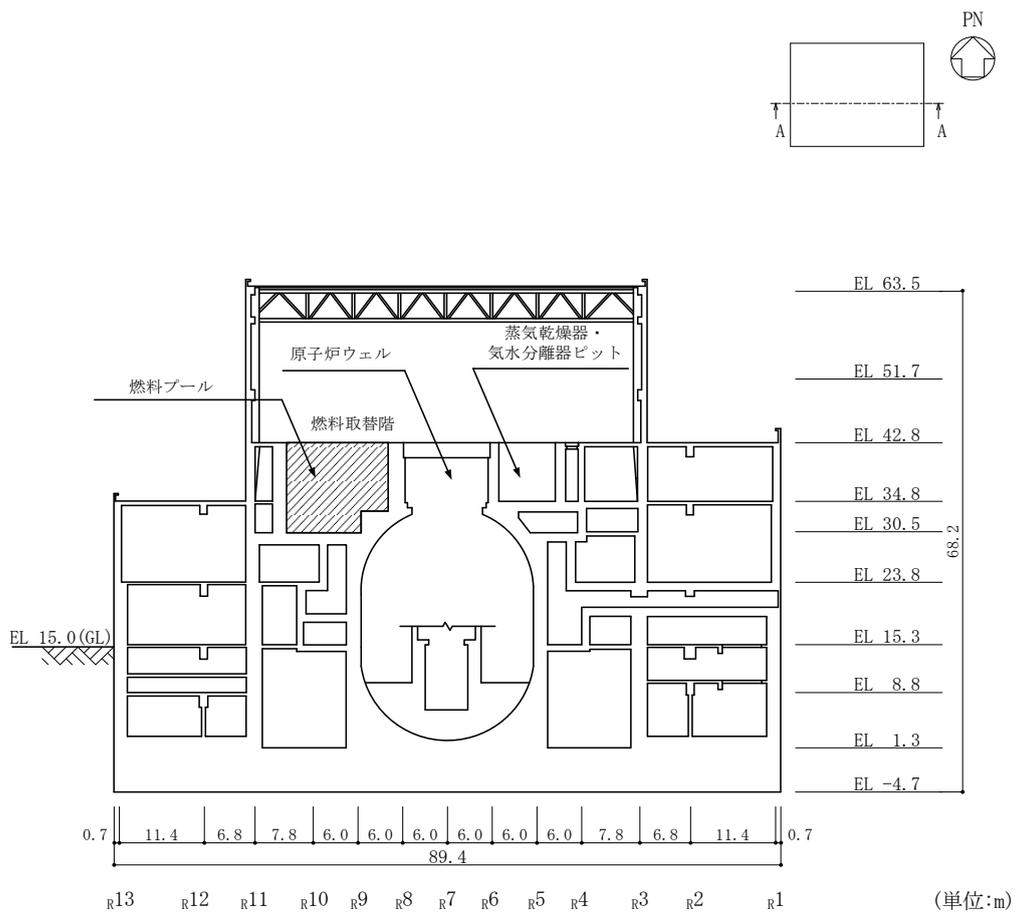


図 1-2 燃料プール及びキャスク置場を含む原子炉建物の概略断面図  
(A-A断面)

## 2. 検討方針

基準地震動  $S_s$  による地震時ラック反力に対し、燃料プール及びキャスク置場について、検討を行う。

検討は、燃料プールの耐震計算書に示す 3 次元 FEM モデルを用い、基準地震動  $S_s$  による地震時ラック反力を考慮した場合（以下「地震時ラック反力考慮ケース」という。）の応力解析を行い、断面の評価において許容値を超えないことを確認する。

### 3. 応力解析による評価方法

#### 3.1 評価対象部位

評価対象部位は、燃料プールの耐震計算書と同一とし、燃料プール及びキャスク置場を構成する壁及び底面スラブとする。

#### 3.2 荷重及び荷重の組合せ

使用済燃料貯蔵ラックの配置図を図3-1に、基準地震動 $S_s$ による地震時ラック反力の値を表3-1に示す。なお、表3-1に示す値は、反力が最大となる共通ベース（143体ラック1台及び144体ラック2台設置用）のものであり、各共通ベースに表3-1に示す反力を作用させる。

地震時ラック反力の入力方法は、曲げモーメントについては、各共通ベースごとに、共通ベース位置に対応する各節点に、節点の支配面積と中心位置からの距離に応じて偶力に置換して分配し、節点荷重として入力する。また、せん断力及び鉛直荷重については、各共通ベースごとに、共通ベース位置に対応する範囲の各要素に分布荷重として入力する。



注：図中の  部は、使用済燃料貯蔵ラックの共通ベースを示す。

図3-1 使用済燃料貯蔵ラックの配置図

表3-1 基準地震動 $S_s$ による地震時ラック反力

使用済燃料貯蔵ラック	方向	曲げモーメント (kN・m)	せん断力 (kN)	鉛直荷重 (kN)
143体ラック1台 144体ラック2台	NS方向	8385	2713	—
	EW方向	11240	3639	—
	鉛直方向	—	—	2714

荷重の組合せは、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき設定する。

荷重の組合せを表 3-2 に示す。地震時ラック反力を除く荷重の詳細は、燃料プールの耐震計算書の「3.2.1 荷重」に示す固定荷重 (G)、積載荷重 (P) 及び地震荷重 (S s) と同一である。なお、ラック重量は積載荷重 (P) に含まれている。

表 3-2 荷重の組合せ (地震時ラック反力考慮ケース)

外力の状態	荷重の組合せ
S s 地震時	G + P + S s

G : 固定荷重

P : 積載荷重

S s : 地震荷重 (地震時動水圧荷重及び地震時ラック反力を含む)

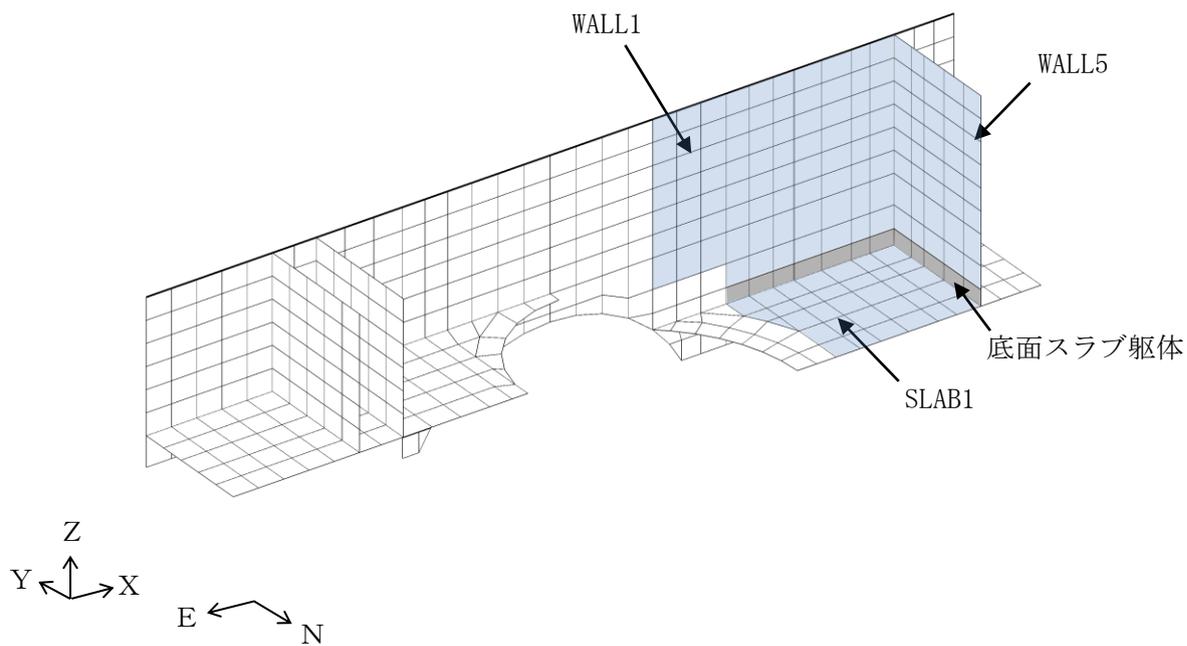
### 3.3 許容限界

許容限界の詳細は、燃料プールの耐震計算書の「3.3 許容限界」に示す内容と同一である。

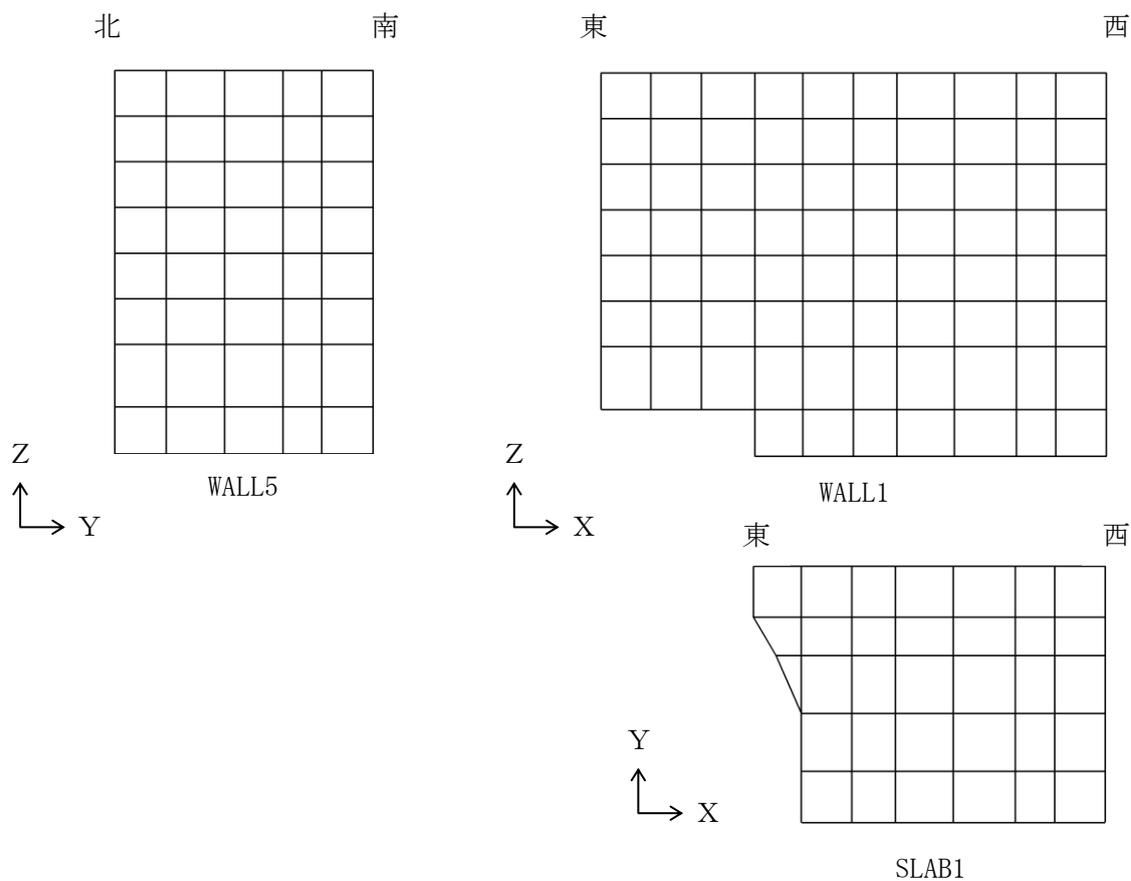
### 3.4 解析モデル及び諸元

解析モデル概要図を図 3-2 に示す。

解析モデル及び諸元の詳細は、燃料プールの耐震計算書の「3.4 解析モデル及び諸元」に示す内容と同一である。



(a) 全体鳥瞰図



(b) 燃料プール要素分割図

図 3-2 解析モデル概要図

### 3.5 評価方法

S<sub>s</sub>地震時の応力は、燃料プールの耐震計算書の「3.5.1 応力解析方法」に示す、次の荷重による応力を組み合わせて求める。

G : 固定荷重

P : 積載荷重

S<sub>SSN</sub> : S→N方向 S<sub>s</sub>地震荷重（地震時動水圧荷重及び地震時ラック反力を含む）

S<sub>SWE</sub> : W→E方向 S<sub>s</sub>地震荷重（地震時動水圧荷重及び地震時ラック反力を含む）

S<sub>SUD</sub> : 鉛直方向（下向き） S<sub>s</sub>地震荷重（地震時ラック反力を含む）

荷重の組合せケースを表3-3に示す。

水平地震力と鉛直地震力の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 -2008（（社）日本電気協会）」を参考に、組合せ係数法（組合せ係数は1.0と0.4）を用いるものとする。

また、燃料プール及びキャスク置場の壁及び底面スラブの評価方法の詳細は、燃料プールの耐震計算書の「3.5.2 断面の評価方法」に示す方法と同一である。

表 3-3 荷重の組合せケース（地震時ラック反力考慮ケース）

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S s 地震時	4-1	$G + P + 1.0 S_{SN} + 0.4 S_{UD}$
	4-2	$G + P - 1.0 S_{SN} + 0.4 S_{UD}$
	4-3	$G + P - 1.0 S_{WE} + 0.4 S_{UD}$
	4-4	$G + P + 1.0 S_{WE} + 0.4 S_{UD}$
	4-5	$G + P + 1.0 S_{SN} - 0.4 S_{UD}$
	4-6	$G + P - 1.0 S_{SN} - 0.4 S_{UD}$
	4-7	$G + P - 1.0 S_{WE} - 0.4 S_{UD}$
	4-8	$G + P + 1.0 S_{WE} - 0.4 S_{UD}$
	4-9	$G + P + 0.4 S_{SN} + 1.0 S_{UD}$
	4-10	$G + P - 0.4 S_{SN} + 1.0 S_{UD}$
	4-11	$G + P - 0.4 S_{WE} + 1.0 S_{UD}$
	4-12	$G + P + 0.4 S_{WE} + 1.0 S_{UD}$
	4-13	$G + P + 0.4 S_{SN} - 1.0 S_{UD}$
	4-14	$G + P - 0.4 S_{SN} - 1.0 S_{UD}$
	4-15	$G + P - 0.4 S_{WE} - 1.0 S_{UD}$
	4-16	$G + P + 0.4 S_{WE} - 1.0 S_{UD}$

#### 4. 評価結果

3次元FEMモデルの配筋領域図を図4-1に、配筋一覧を表4-1に示す。

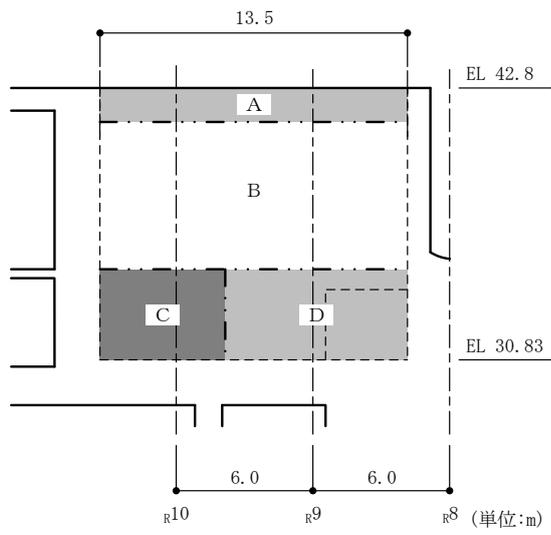
断面の評価結果を記載する要素を以下のとおり選定する。

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、軸力による圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度に対する評価において、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。

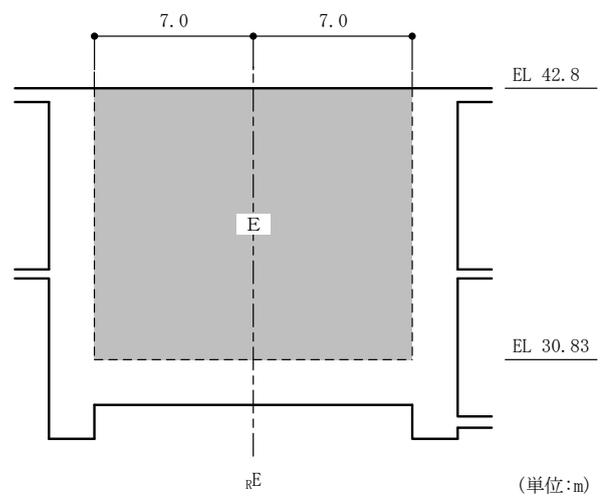
底面スラブについては、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

地震時ラック反力考慮ケース及び今回工認ケースにおけ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。

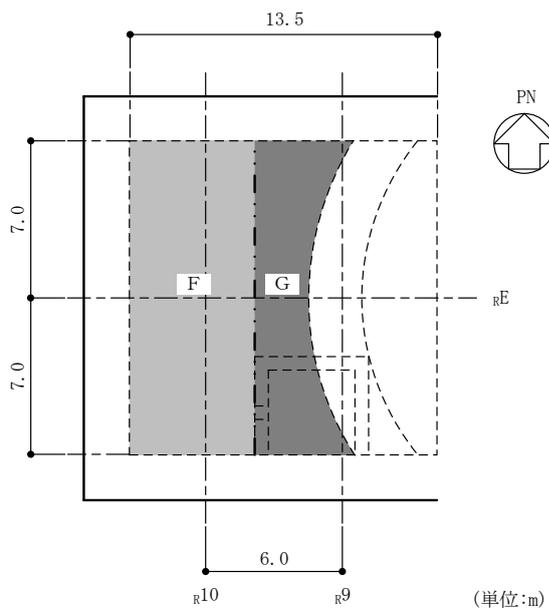
地震時ラック反力考慮ケースは、選定した要素が今回工認ケースと異なる評価項目もあるが、使用済燃料貯蔵ラックの質量を積載荷重として扱った今回工認ケースよりも発生値が増加する傾向にあることを確認した。また、壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度が各許容値を超えないことを、底面スラブについては、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度が各許容値を超えないことを確認した。



南側壁



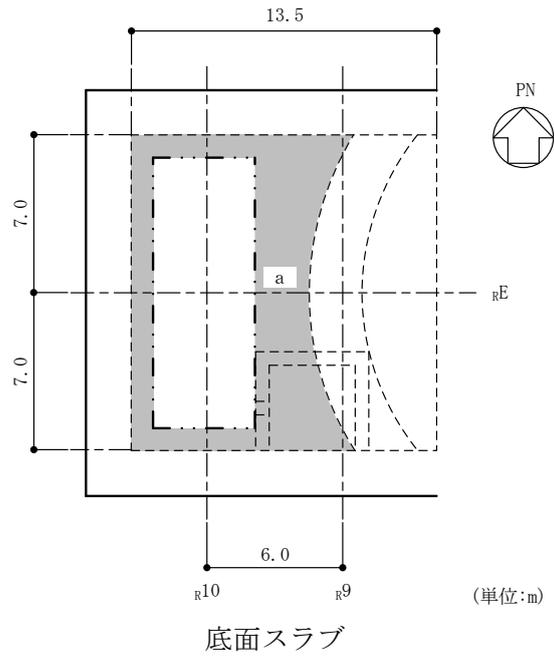
西側壁



底面スラブ

(a) 主筋

図 4-1(1) 配筋領域図



(b) せん断補強筋

図 4-1(2) 配筋領域図

表 4-1 配筋一覧

(a) 南側壁主筋

領域	タテ方向	ヨコ方向
A	(内側) D38@200+D38@400 (外側) 3-D38@200	(内側) 2-D38@200 (外側) 3-D38@200
B	(内側) D38@200+D38@400 (外側) 2-D38@200	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400
C	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400
D	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400

(b) 西側壁主筋

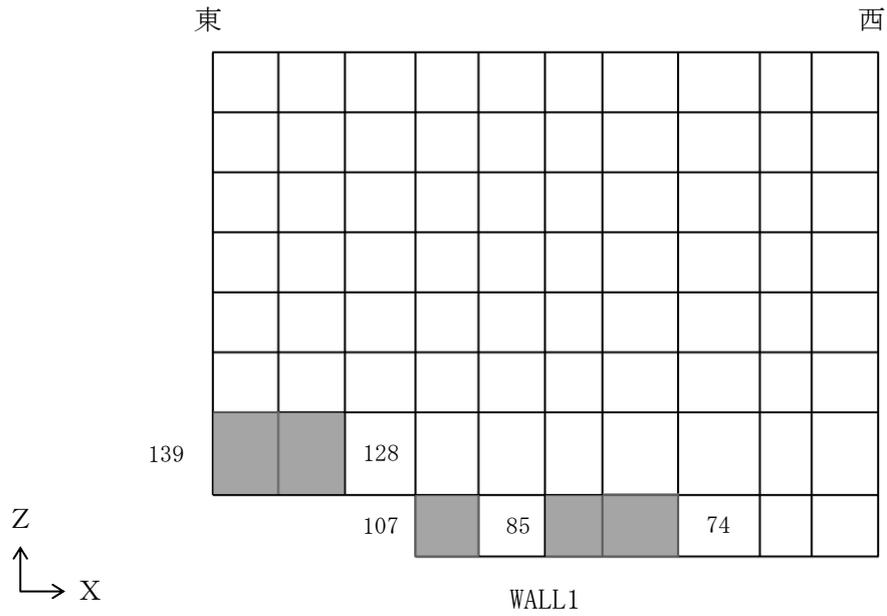
領域	タテ方向	ヨコ方向
E	(内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+D38@400	(内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+D38@400

(c) 底面スラブ主筋

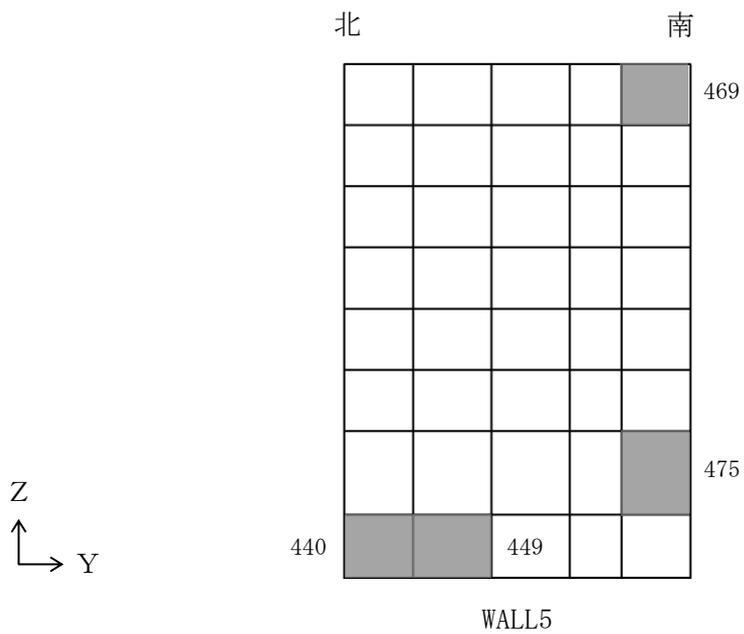
領域	N S 方向	E W 方向
F	(上ば筋) D38@200+D38@400 (下ば筋) 2-D38@200	(上ば筋) 2-D38@200 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400
G	(上ば筋) D38@200+D38@400 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400	(上ば筋) 2-D38@200 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400

(d) 底面スラブせん断補強筋

領域	配筋
a	D19@400×200

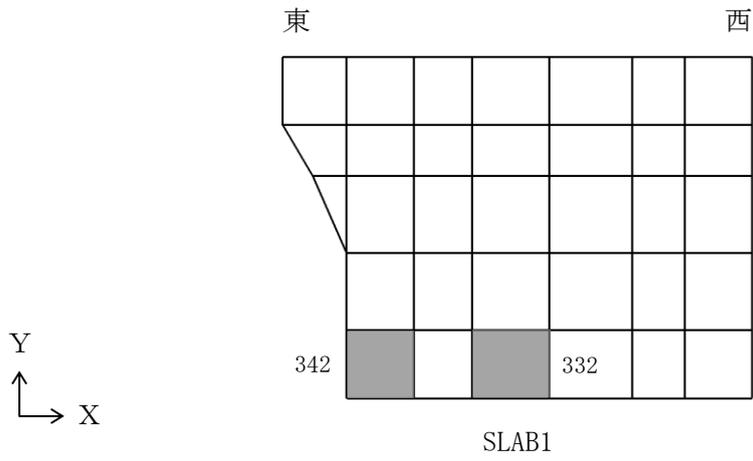


(a) 南側壁



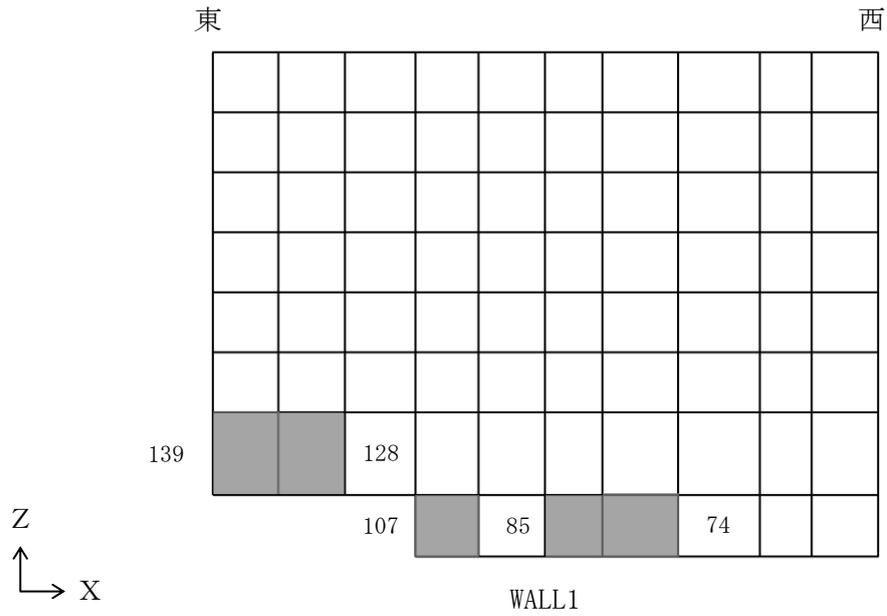
(b) 西側壁

図 4-2(1) 選定した要素の位置 S s 地震時 (地震時ラック反力考慮ケース)

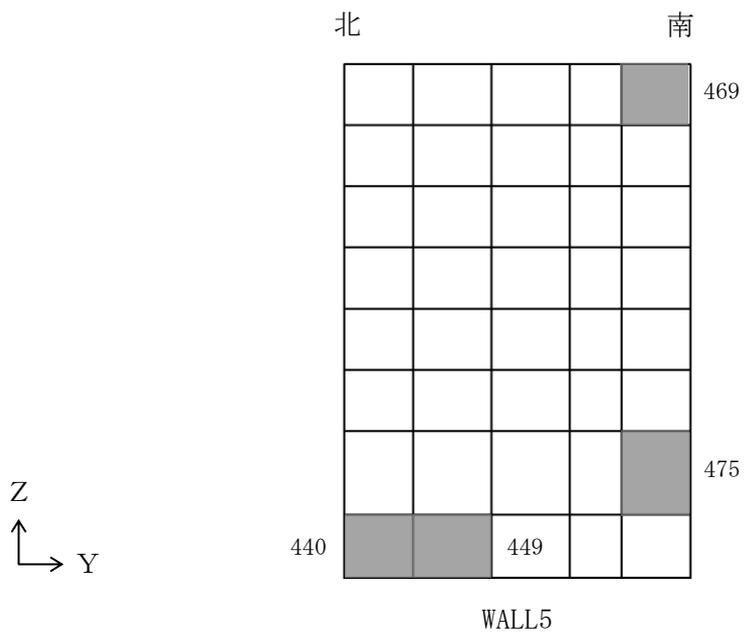


(c) 底面スラブ

図 4-2(2) 選定した要素の位置 S s 地震時 (地震時ラック反力考慮ケース)

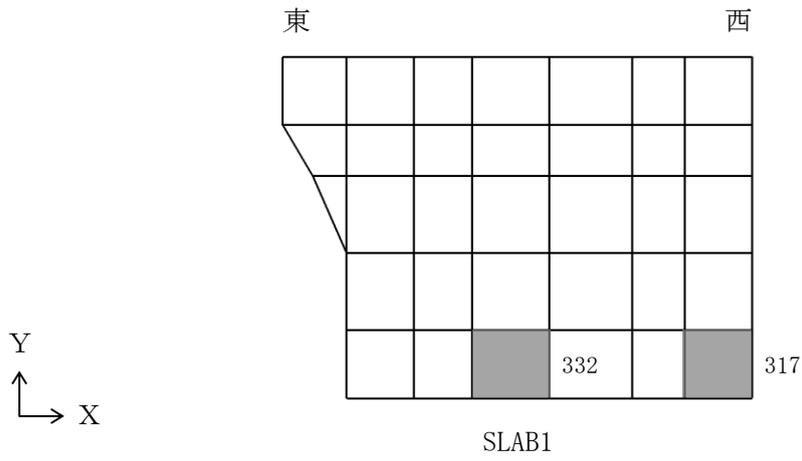


(d) 南側壁



(e) 西側壁

図 4-2(3) 選定した要素の位置 S s 地震時 (今回工認ケース)



(f) 底面スラブ

図 4-2(4) 選定した要素の位置 S s 地震時 (今回工認ケース)

表 4-2(1) 評価結果 S s 地震時

(a) 地震時ラック反力考慮ケース

部位	評価項目		方向	要素 番号	組合せ ケース	発生値	許容値
南側壁	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直	128	4-1	0.176	3.00
		鉄筋引張ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直	85	4-9	1.51	5.00
	軸力	圧縮応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	鉛直	139	4-4	3.22	15.6
	面内せん断力	面内せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	-	107	4-12	2.33	4.39
	面外せん断力	面外せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	鉛直	74	4-9	0.573	1.39
西側壁	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直	449	4-11	0.277	3.00
		鉄筋引張ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直	449	4-11	2.01	5.00
	軸力	圧縮応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	水平	469	4-5	1.31	15.6
	面内せん断力	面内せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	-	475	4-9	1.39	3.04
	面外せん断力	面外せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	鉛直	440	4-11	0.725	1.15
底面 スラブ	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	E W	332	4-11	0.597	3.00
		鉄筋引張ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	E W	332	4-11	1.73	5.00
	面外せん断力	面外せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	E W	342	4-3	2.09 (1.10*)	1.35

注記\*：応力の再配分等を考慮して、応力平均化を行った結果。

表 4-2(2) 評価結果 S s 地震時

(b) 今回工認ケース

部位	評価項目		方向	要素 番号	組合せ ケース	発生値	許容値
南側壁	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直	128	2-12	0.170	3.00
		鉄筋引張ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直	85	2-10	1.40	5.00
	軸力	圧縮応力度 ( $N/mm^2$ )	鉛直	139	2-4	3.31	15.6
	面内せん断力	面内せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	—	107	2-12	2.37	4.39
	面外せん断力	面外せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	鉛直	74	2-9	0.550	1.42
西側壁	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直	449	2-11	0.261	3.00
		鉄筋引張ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直	449	2-11	1.68	5.00
	軸力	圧縮応力度 ( $N/mm^2$ )	水平	469	2-6	1.38	15.6
	面内せん断力	面内せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	—	475	2-9	1.31	3.02
	面外せん断力	面外せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	鉛直	440	2-11	0.694	1.22
底面 スラブ	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	E W	332	2-11	0.540	3.00
		鉄筋引張ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	E W	332	2-11	1.54	5.00
	面外せん断力	面外せん断応力度 ( $N/mm^2$ )	E W	317	2-11	2.01	2.16

## 5. まとめ

基準地震動  $S_s$  による地震時ラック反力に対し、3次元FEMモデルを用いた応力解析により燃料プール及びキャスク置場の検討を行った。

検討の結果、基準地震動  $S_s$  による地震時ラック反力を考慮することで、発生値が今回工認ケースよりも増加する傾向にあることを確認した。また、鉄筋及びコンクリートのひずみ、圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。

以上のことから、基準地震動  $S_s$  による地震時ラック反力に対し、燃料プール及びキャスク置場が有する耐震性への影響はないことを確認した。

別紙 6-1 ラック反力に対する燃料プールの応力解析  
における応力平均化の考え方

## 目 次

1. 概要	別紙 6-1-1
2. 応力平均化の考え方	別紙 6-1-2
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 6-1-2
2.2 応力平均化の方法	別紙 6-1-4
2.3 応力平均化の結果	別紙 6-1-12
2.4 断面の評価	別紙 6-1-15
2.4.1 断面の評価方法	別紙 6-1-15
2.4.2 断面の評価結果	別紙 6-1-15

## 1. 概要

本資料は、別紙 6「使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討」の燃料プール及びキャスク置場（以下「燃料プール」という。）における応力平均化の考え方について示すものである。

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 制定）」（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、燃料プール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基に選定している。

燃料プールの底面スラブでは、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 に、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	E W	317	4-3 (S s 地震時)	1.12
					4-11 (S s 地震時)	1.17
			E W	318	4-3 (S s 地震時)	1.01
					4-11 (S s 地震時)	1.05
			N S	336	4-9 (S s 地震時)	1.05
			E W	342	4-3 (S s 地震時)	1.56
			E W	343	4-3 (S s 地震時)	1.24

349	346	341	336	331	326	321
348	345	340	335	330	325	320
347	344	339	334	329	324	319
343	338	333	328	323	318	313
342	337	332	327	322	317	312

Y  
↑  
X →

図 2-1 要素位置図 底面スラブ

## 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に燃料プールの3次元FEMモデルを示す。図2-2に示すように、当該部は西側壁、南側壁又はドライウェル外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、今回の燃料プール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、燃料プールの底面スラブの応力平均化範囲における鉄筋ひずみの最大値  $1.66 \times 10^{-3}$  は、鉄筋降伏時のひずみ  $1.68 \times 10^{-3}$  を下回っており、曲げ降伏状態には至っていないことを確認している。

「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、床スラブ又は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。燃料プール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、応力コンター図及び底面スラブの直上又は直下の壁配置等を考慮し、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2.03m分の範囲で行った。応力平均化範囲を図2-6に示す。

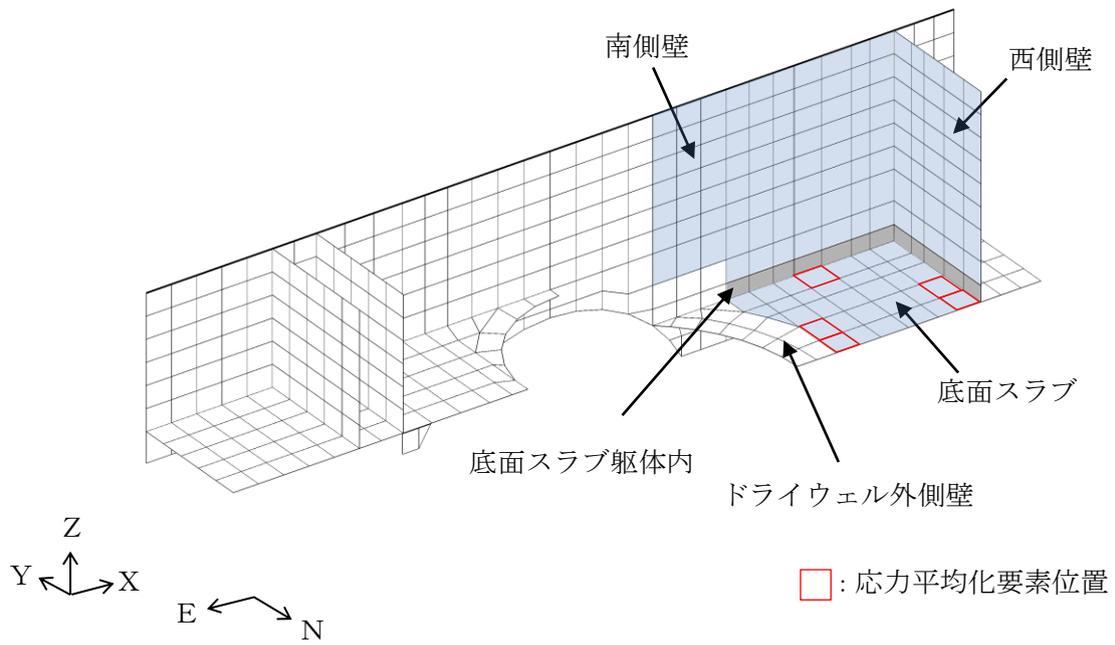


図 2-2 燃料プールの 3 次元 F E M モデル

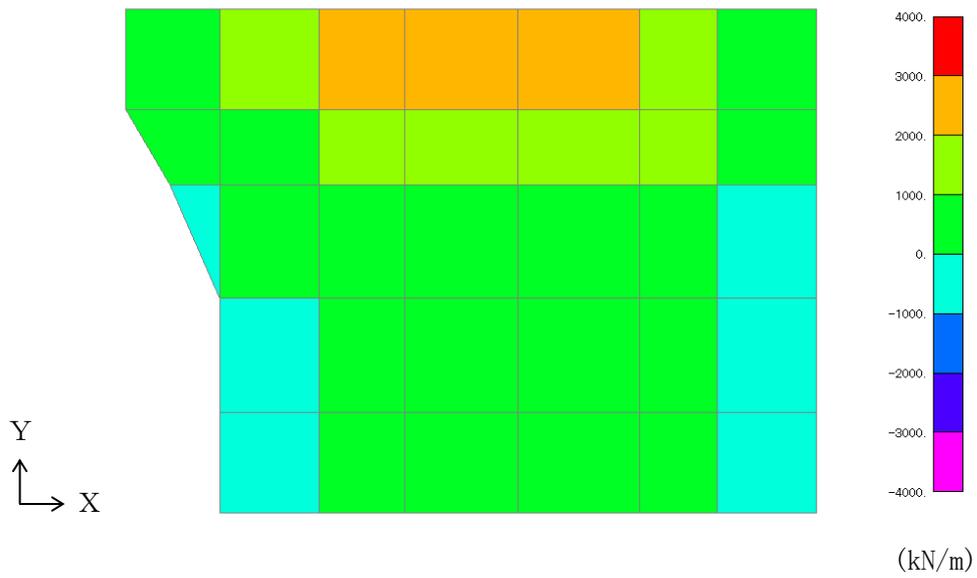
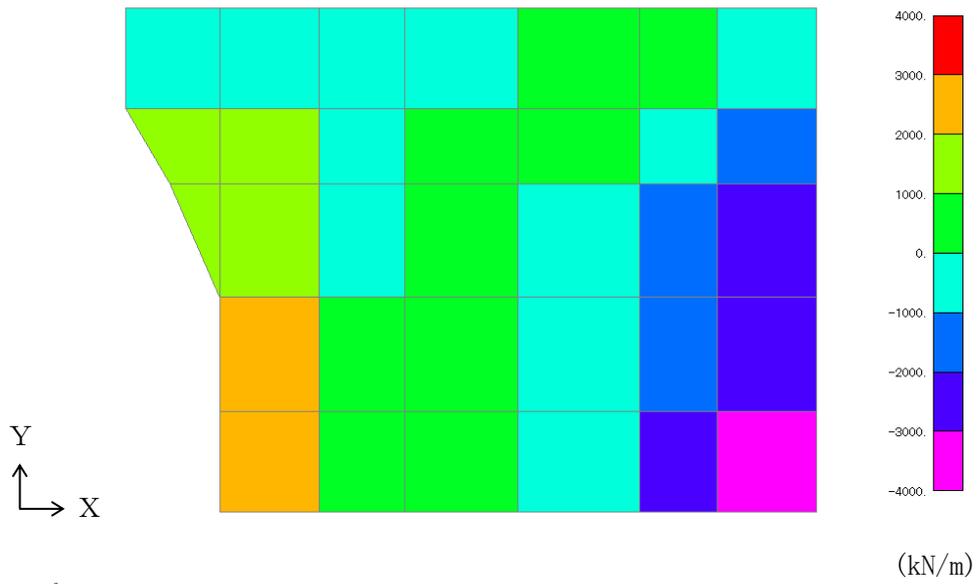
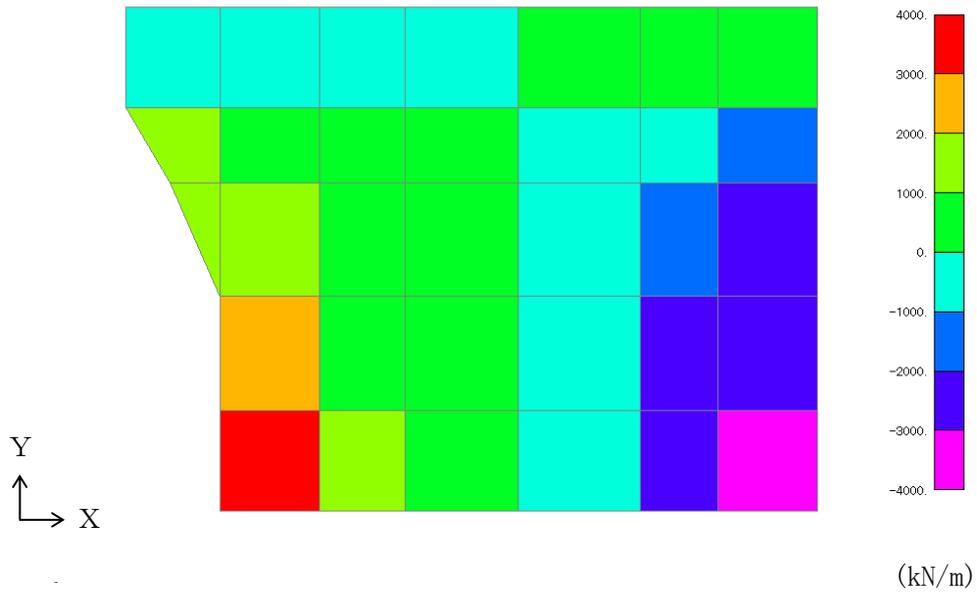


図 2-3(1) 面外せん断力のコンター図 底面スラブ



(c) 組合せケース 4-11 (E W方向)

図 2-3(2) 面外せん断力のコンター図 底面スラブ

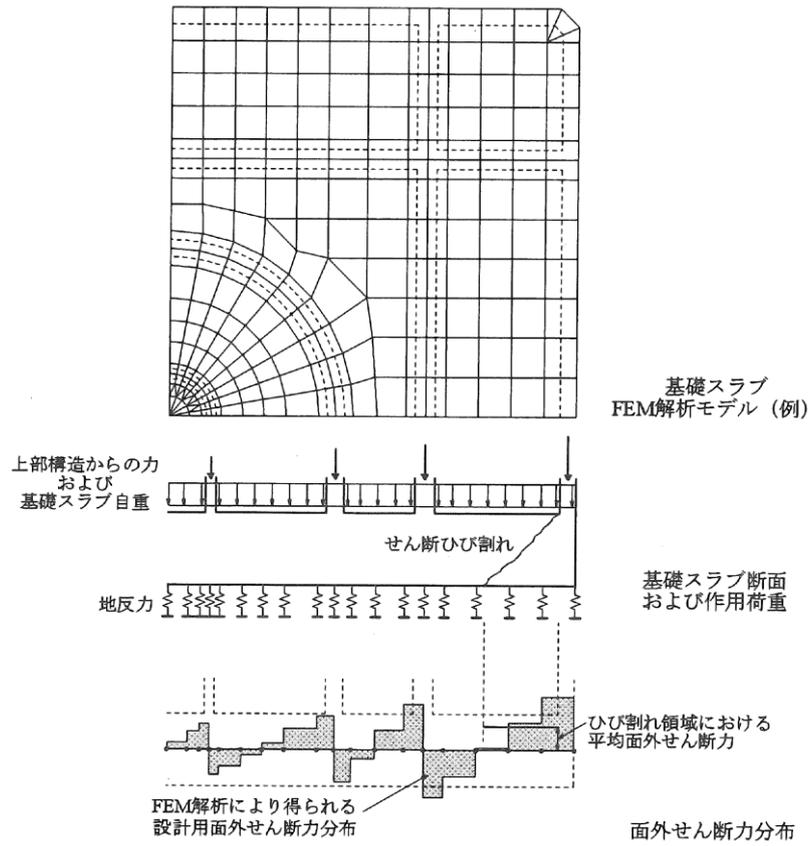


図 2-4 「RC-N規準」の付図 2.2

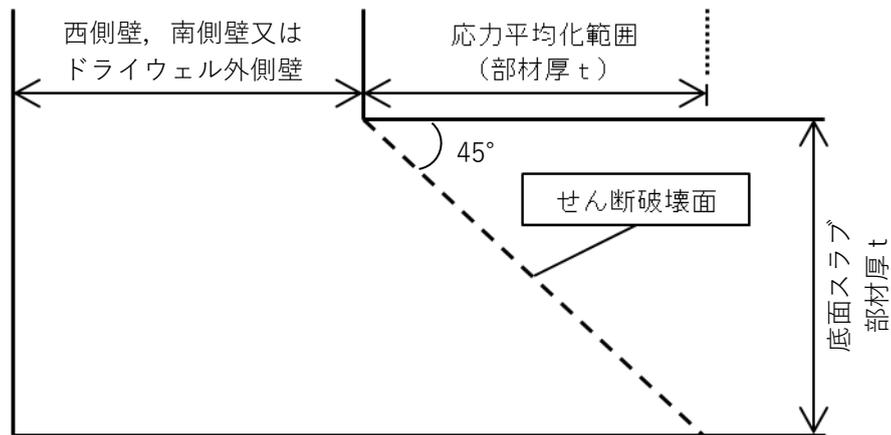
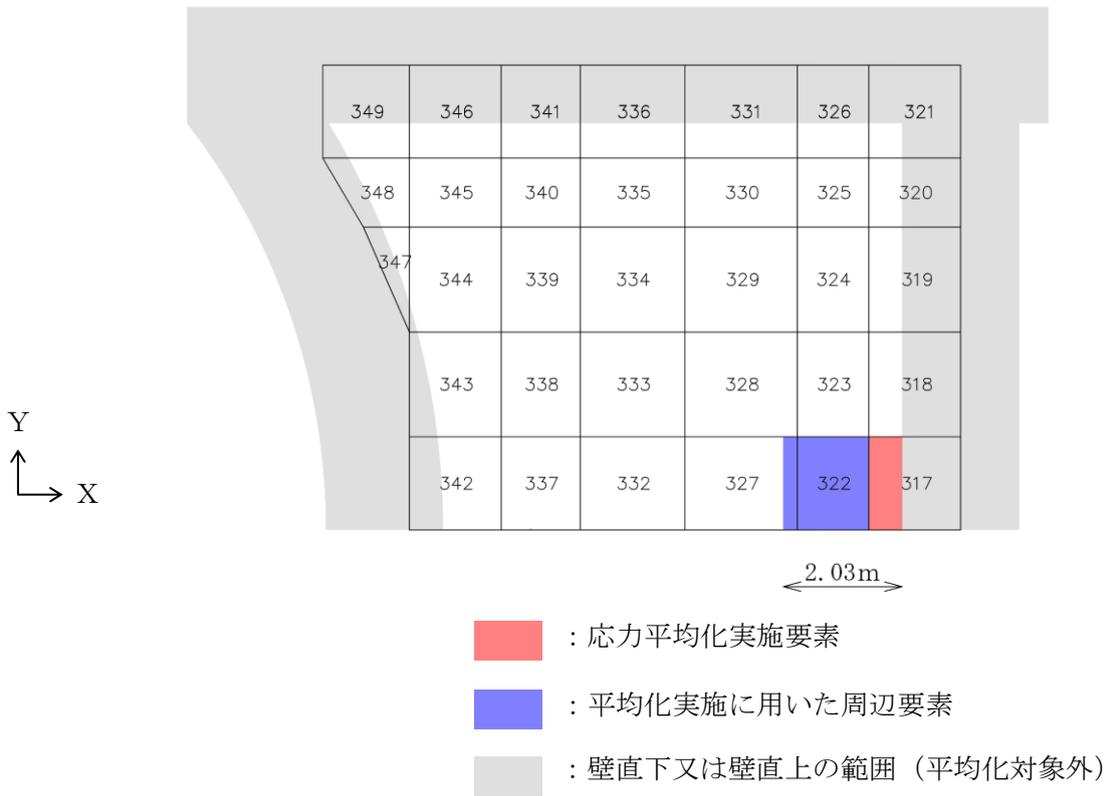
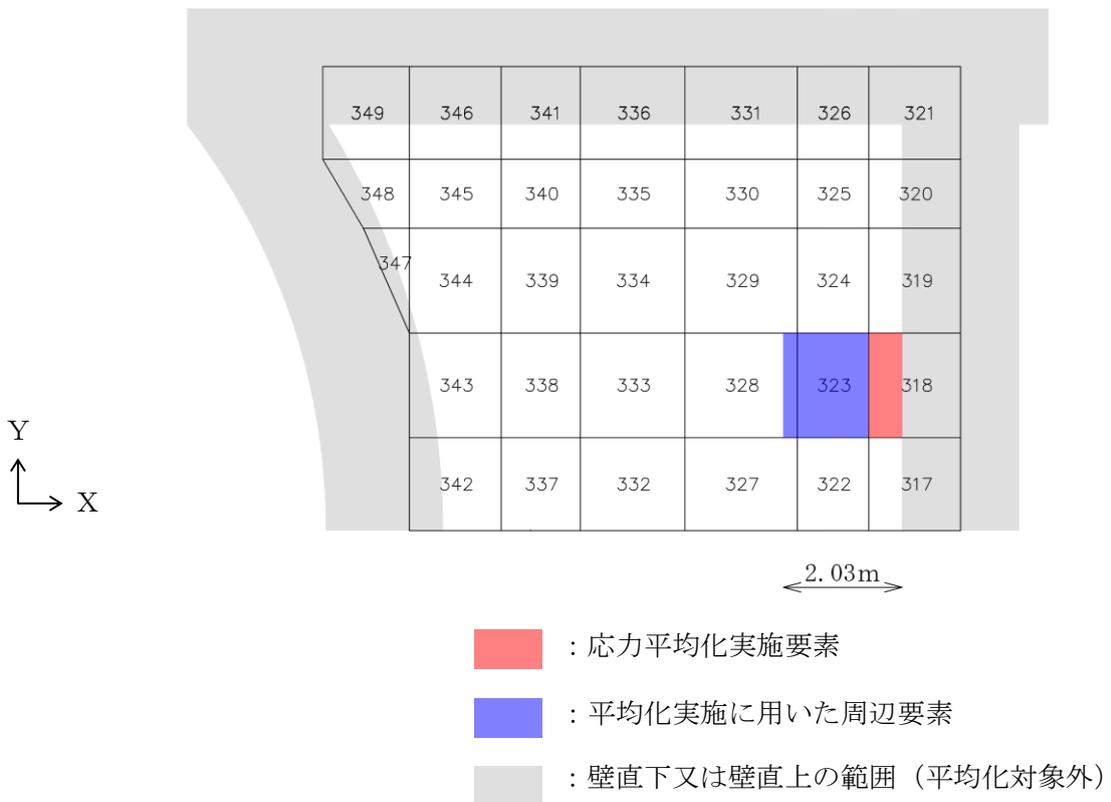


図 2-5 燃料プールの底面スラブにおける面外せん断力に対する応力平均化の考え方

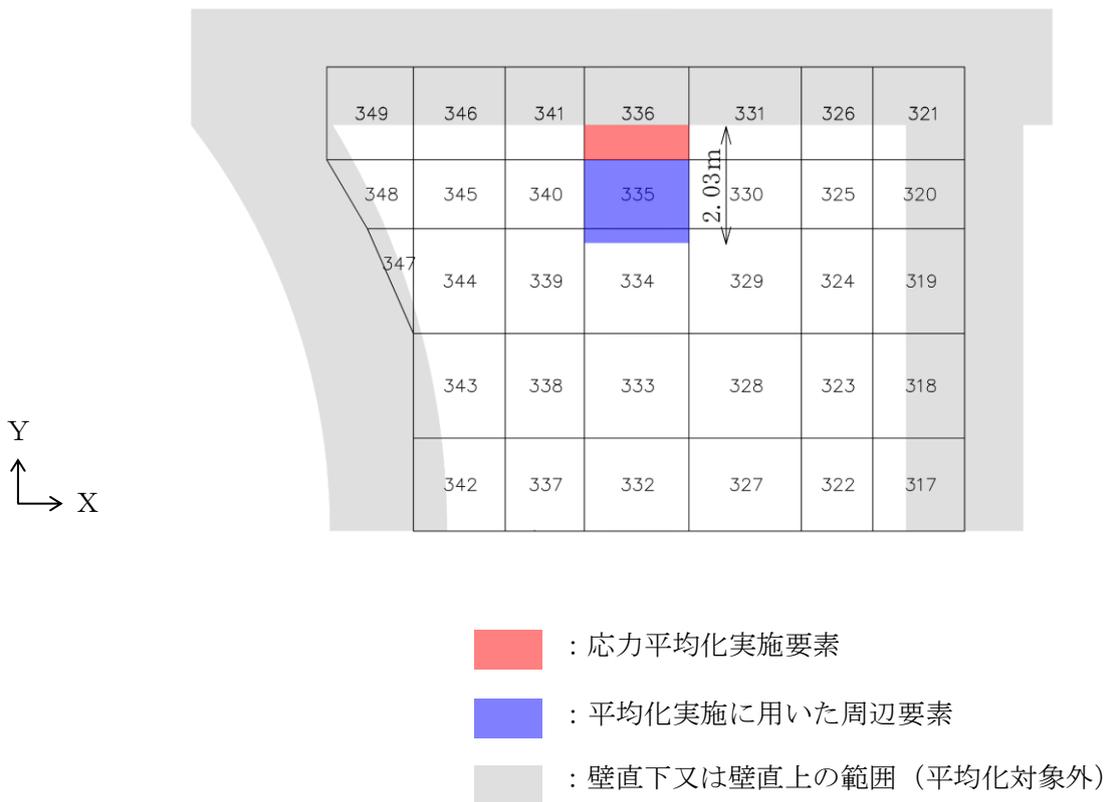


(a) 要素番号 317

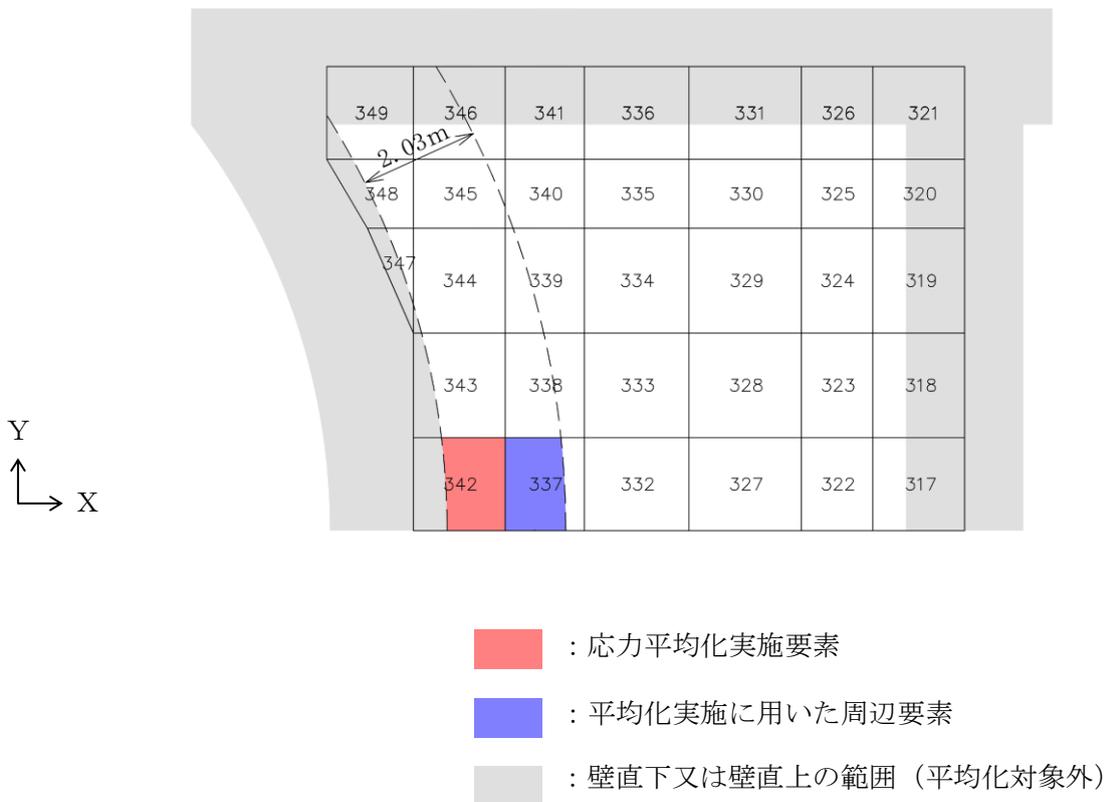


(b) 要素番号 318

図 2-6(1) 応力平均化範囲 底面スラブ



(c) 要素番号 336



(d) 要素番号 342

図 2-6(2) 応力平均化範囲 底面スラブ



(e) 要素番号 343

図 2-6(3) 応力平均化範囲 底面スラブ

### 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、

$\tau_{ave}$  : 平均化後の面外せん断応力度

$\tau_i$  : 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 $\tau_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	要素面積 $A_i$ (m <sup>2</sup> )	重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ( $\times 10^6$ N)
317	E W	4-3	317	2.41	0.912	2.20
			322	1.61	1.952	3.15
			327	0.354	0.384	0.136
合計					3.248	5.48
317	E W	4-11	317	2.51	0.912	2.29
			322	1.80	1.952	3.51
			327	0.660	0.384	0.253
合計					3.248	6.06
318	E W	4-3	318	2.18	1.029	2.24
			323	1.44	2.202	3.17
			328	0.277	0.433	0.120
合計					3.664	5.52
318	E W	4-11	318	2.25	1.029	2.32
			323	1.60	2.202	3.53
			328	0.569	0.433	0.246
合計					3.664	6.09
336	N S	4-9	334	0.761	0.430	0.327
			335	1.28	2.130	2.73
			336	2.26	1.074	2.42
合計					3.634	5.48
342	E W	4-3	337	0.0769	1.612	0.124
			342	2.09	1.643	3.44
合計					3.255	3.56
343	E W	4-3	338	0.0677	1.486	0.101
			343	1.67	2.237	3.73
合計					3.723	3.83

表 2-3 応力平均化の結果

要素 番号	方向	組合せ ケース	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	
			平均化前	平均化後
317	EW	4-3	2.41	1.69
		4-11	2.51	1.87
318	EW	4-3	2.18	1.51
		4-11	2.25	1.66
336	NS	4-9	2.26	1.51
342	EW	4-3	2.09	1.10
343	EW	4-3	1.67	1.03

## 2.4 断面の評価

### 2.4.1 断面の評価方法

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)」に基づき算定する。

### 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 <sup>2</sup> )		平均化後の検定値 (発生値/許容値)
			発生値	許容値	
317	E W	4-3	1.69	2.03	0.84
		4-11	1.87	2.03	0.92
318	E W	4-3	1.51	2.03	0.75
		4-11	1.66	2.03	0.82
336	N S	4-9	1.51	2.03	0.75
342	E W	4-3	1.10	1.35	0.82
343	E W	4-3	1.03	1.35	0.77

注：許容せん断応力度は、発生値と同様に要素面積を考慮した重み付け平均値とする。