

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01
提出年月日	2023年2月13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2月

中国電力株式会社

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。

今回提出範囲：

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 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。

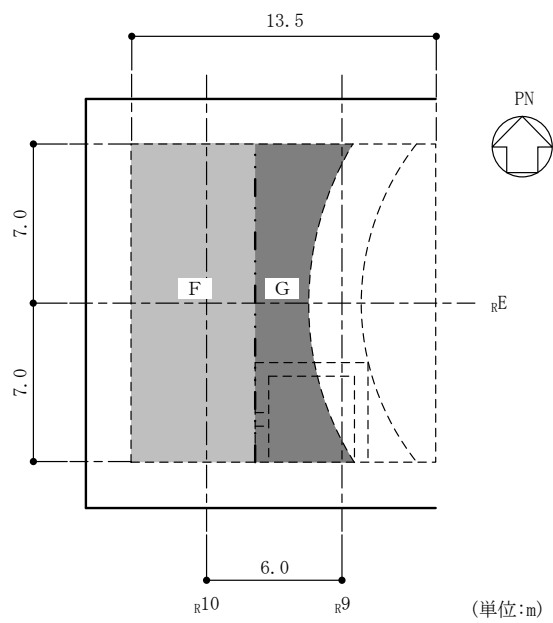
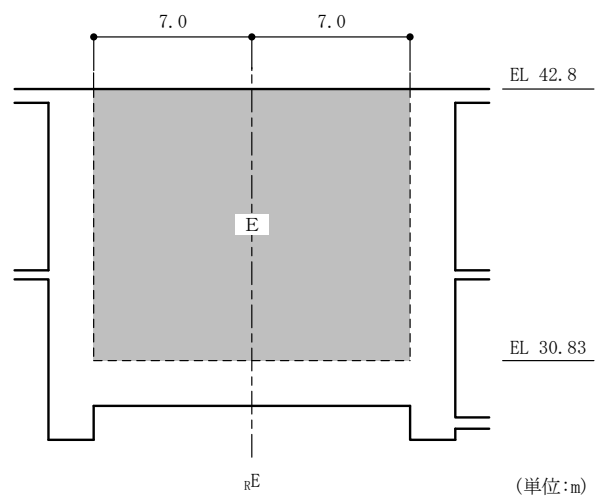
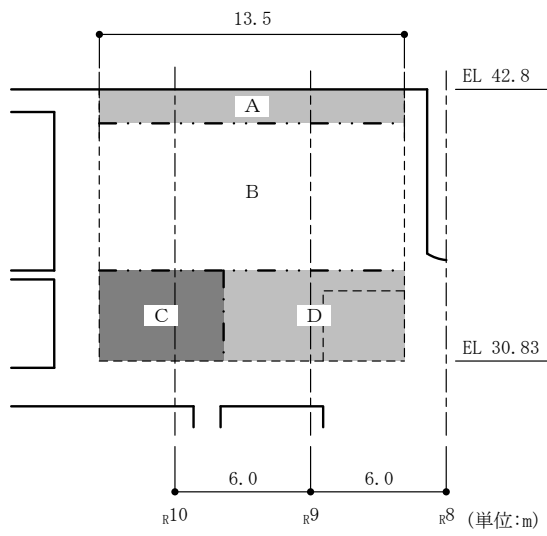
表 2-1(1) 荷重の組合せケース

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。

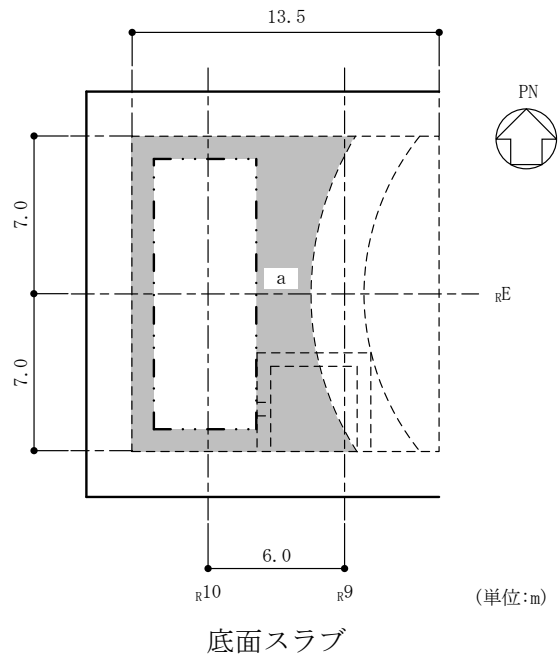
表 2-1(2) 荷重の組合せケース

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

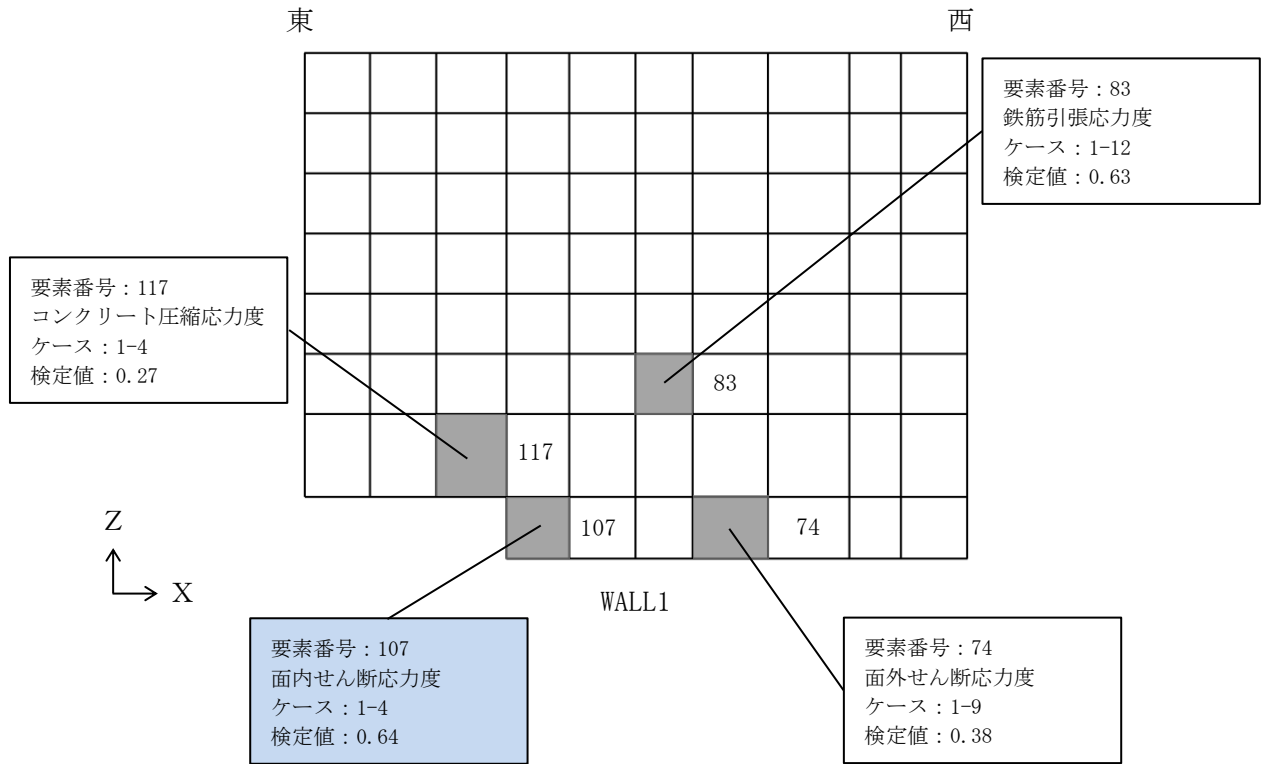
注：■ は、検定値が最大となる要素を示す。

表 2-3(2) 各評価項目の検定値一覧

(b) S s 地震時

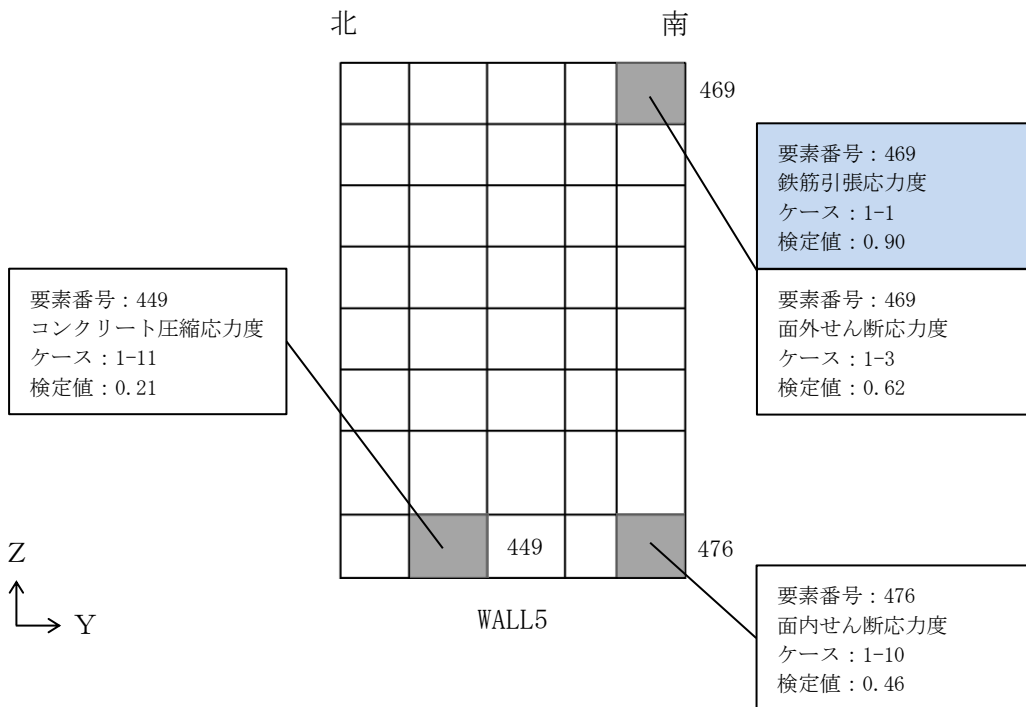
部位	評価項目		方向	要素 番号	組合せ ケース	検定値
南側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ	鉛直	128	2-12	0.06
		鉄筋引張ひずみ	鉛直	85	2-10	0.28
	軸力	圧縮応力度	鉛直	139	2-4	0.22
	面内せん断力	面内せん断応力度	—	107	2-12	0.54
	面外せん断力	面外せん断応力度	鉛直	74	2-9	0.39
西側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ	鉛直	449	2-11	0.09
		鉄筋引張ひずみ	鉛直	449	2-11	0.34
	軸力	圧縮応力度	水平	469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

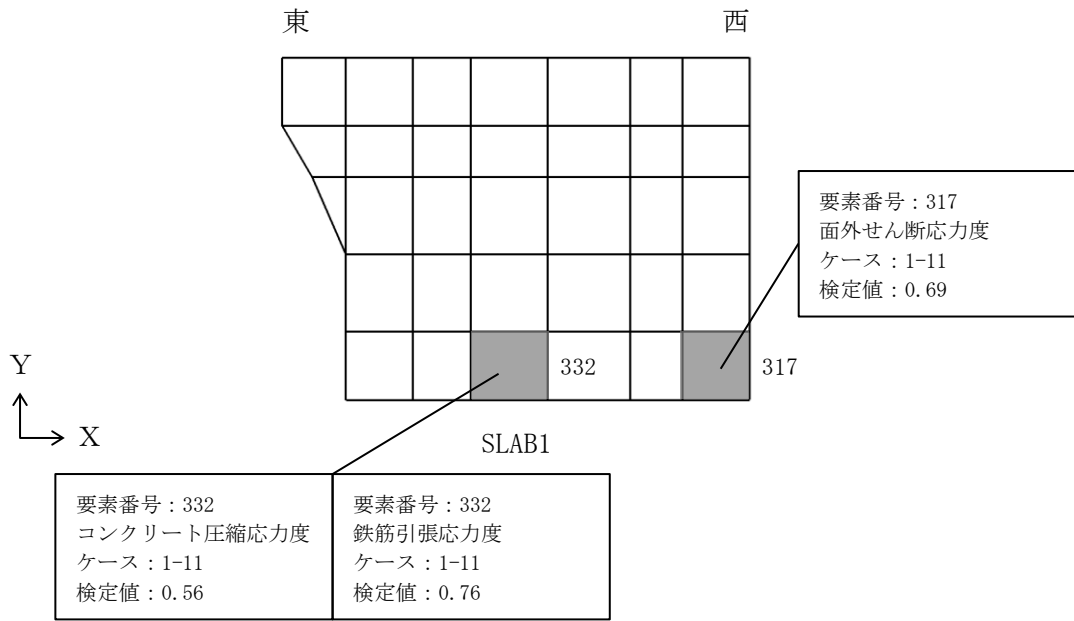
(a) 南側壁



注：■ は、検定値が最大となる要素を示す。

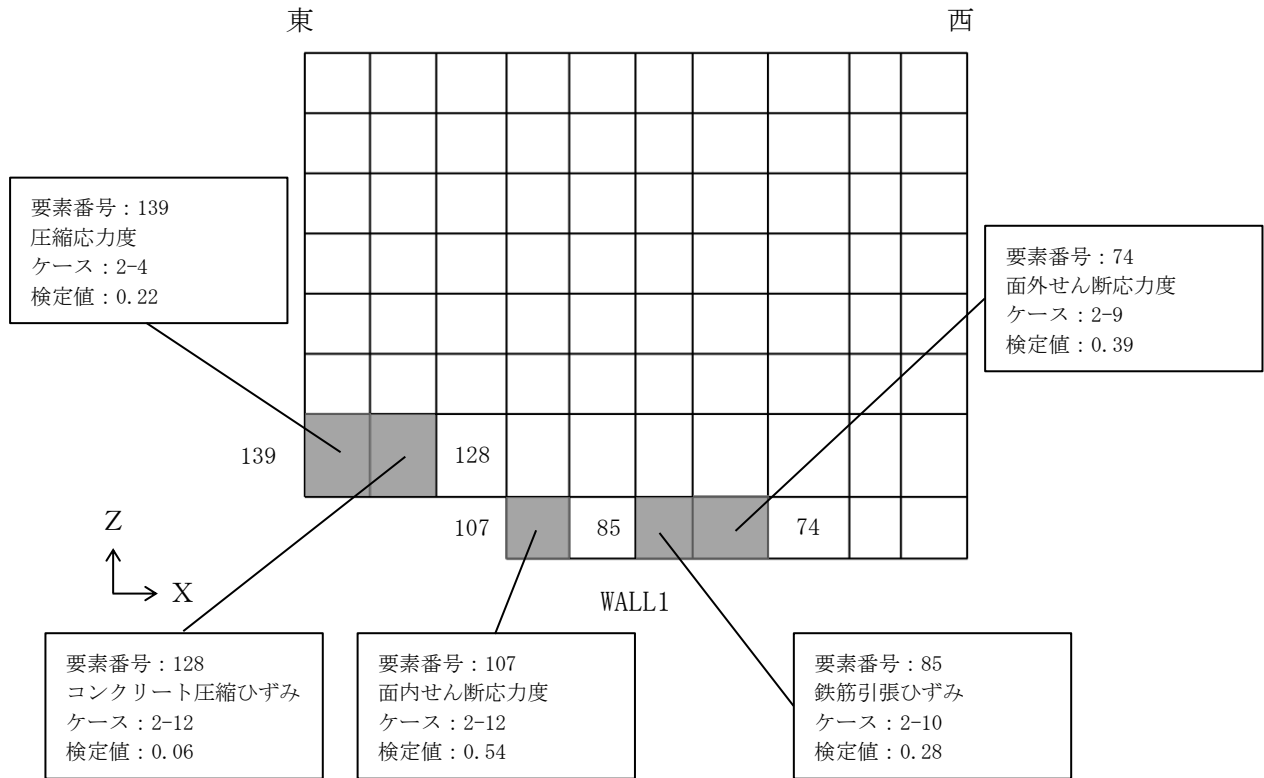
(b) 西側壁

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

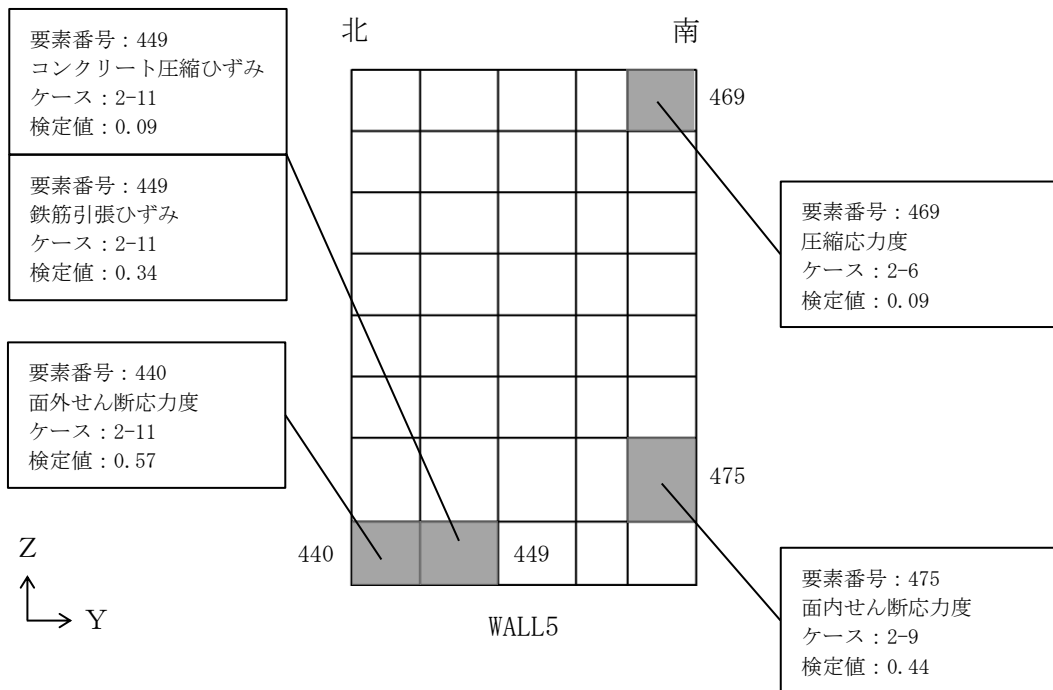


(c) 底面スラブ

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

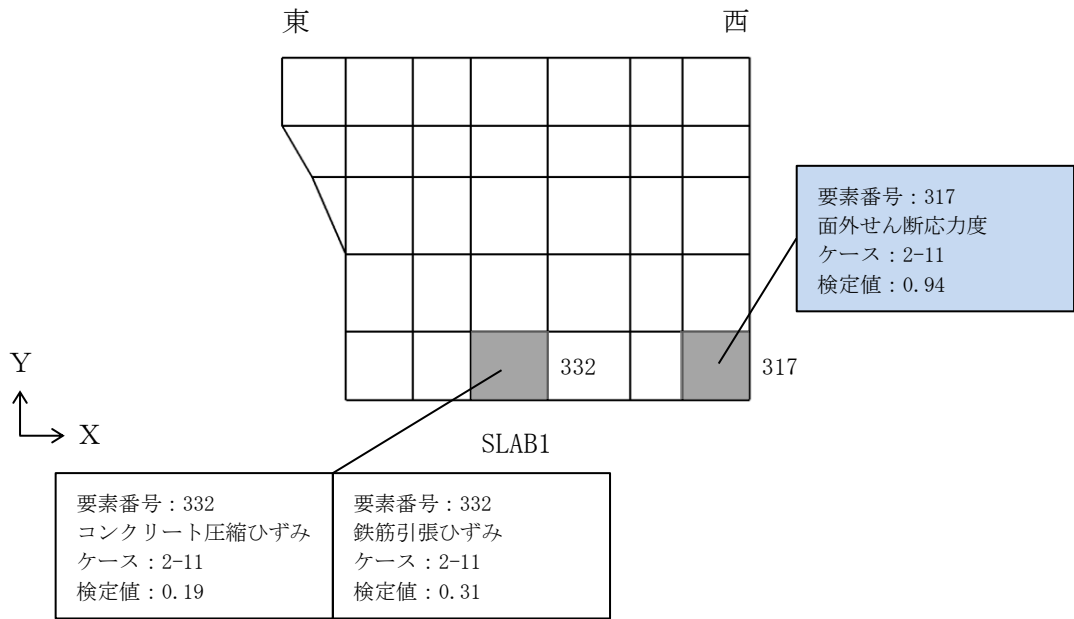


(a) 南側壁



(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

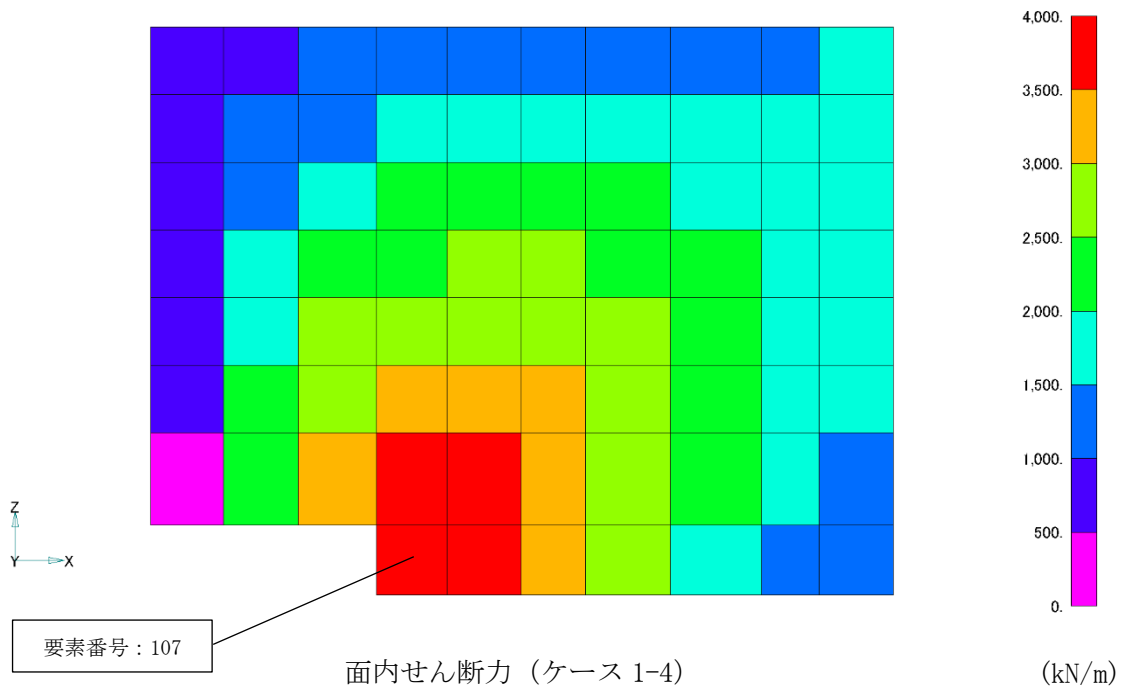


図 2-4 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 南側壁

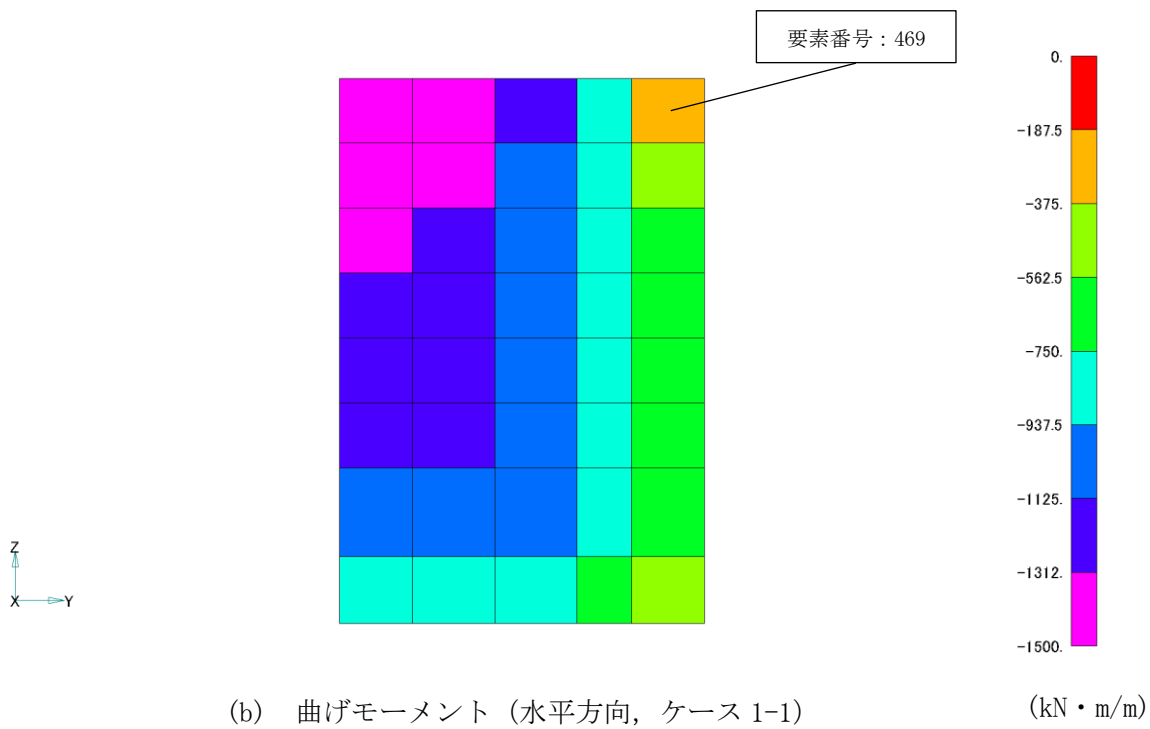
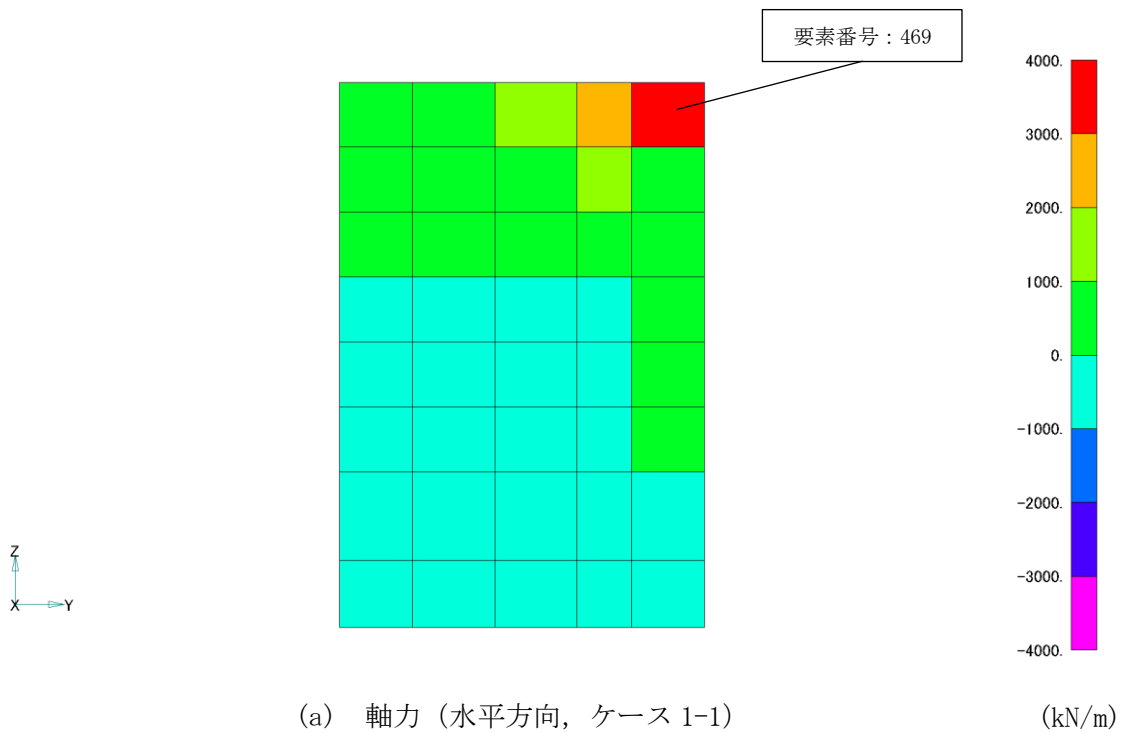


図 2-5(1) 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 西側壁

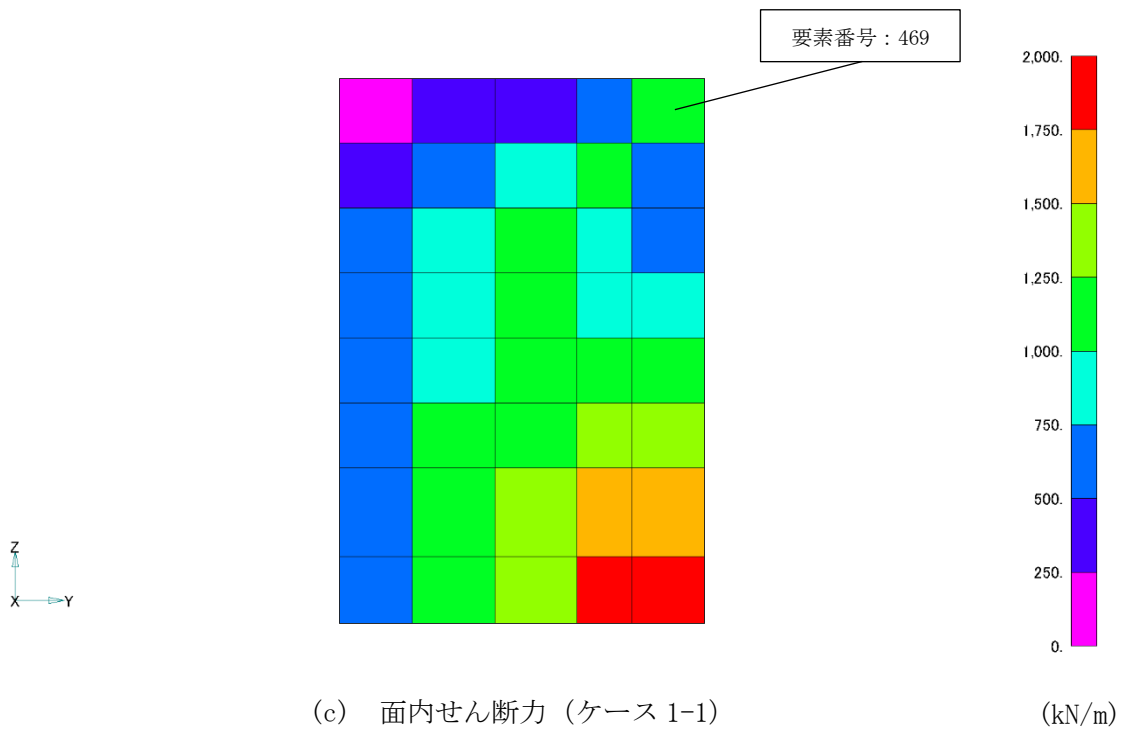


図 2-5(2) 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 西側壁

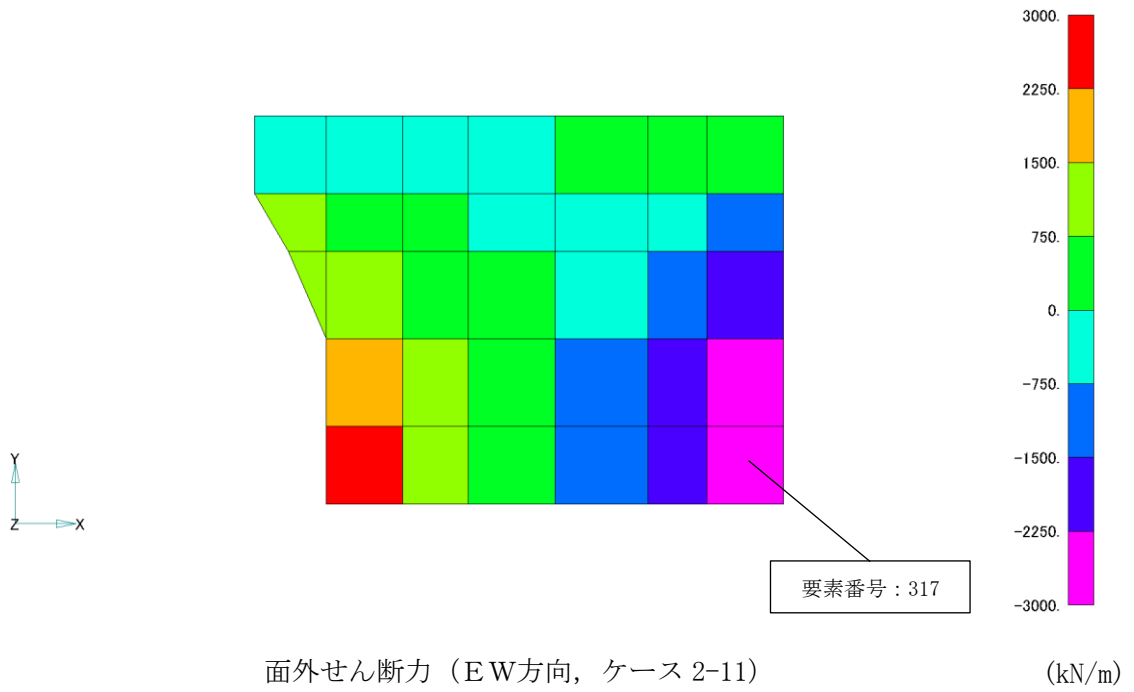


図 2-6 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 底面スラブ

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 5-5

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。

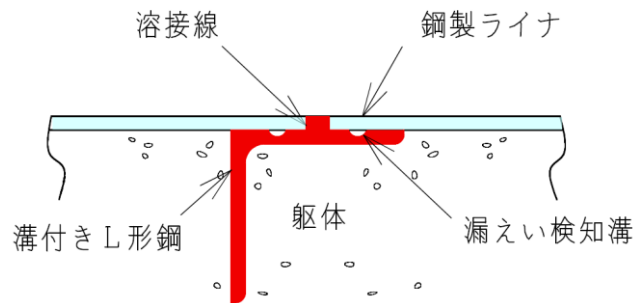
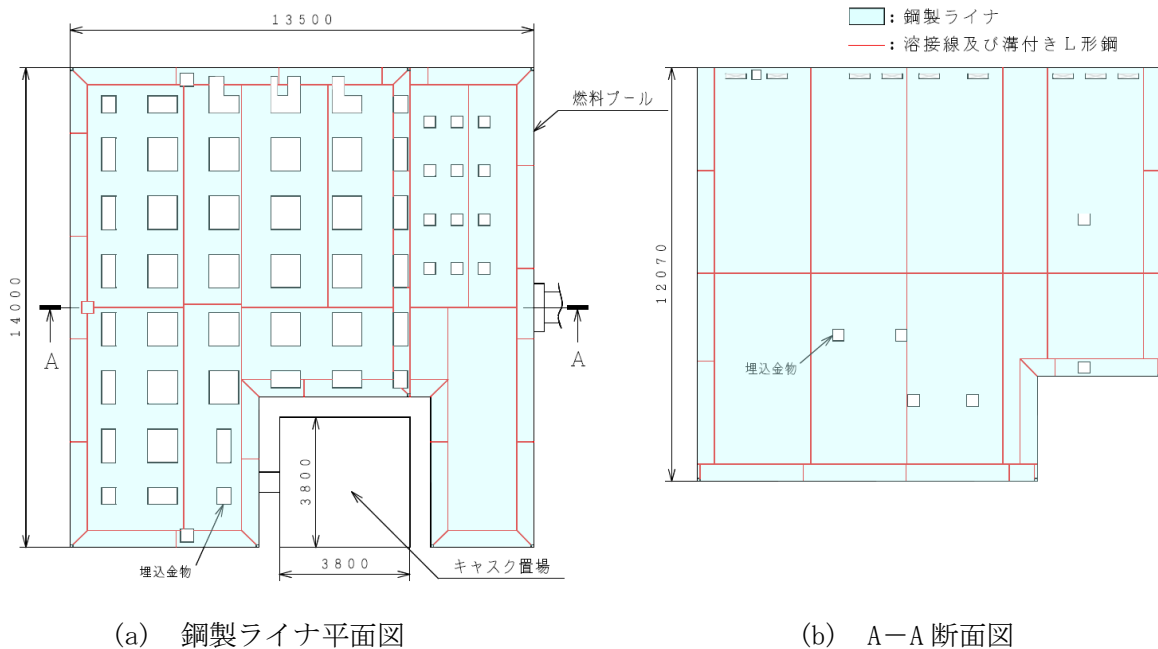


図1-1 鋼製ライナとコンクリート躯体の固定方法

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(ϵ_1)と最小主ひずみ(ϵ_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」の中で、最も厳しいケースである「S d 地震+温度荷重」とする。

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。

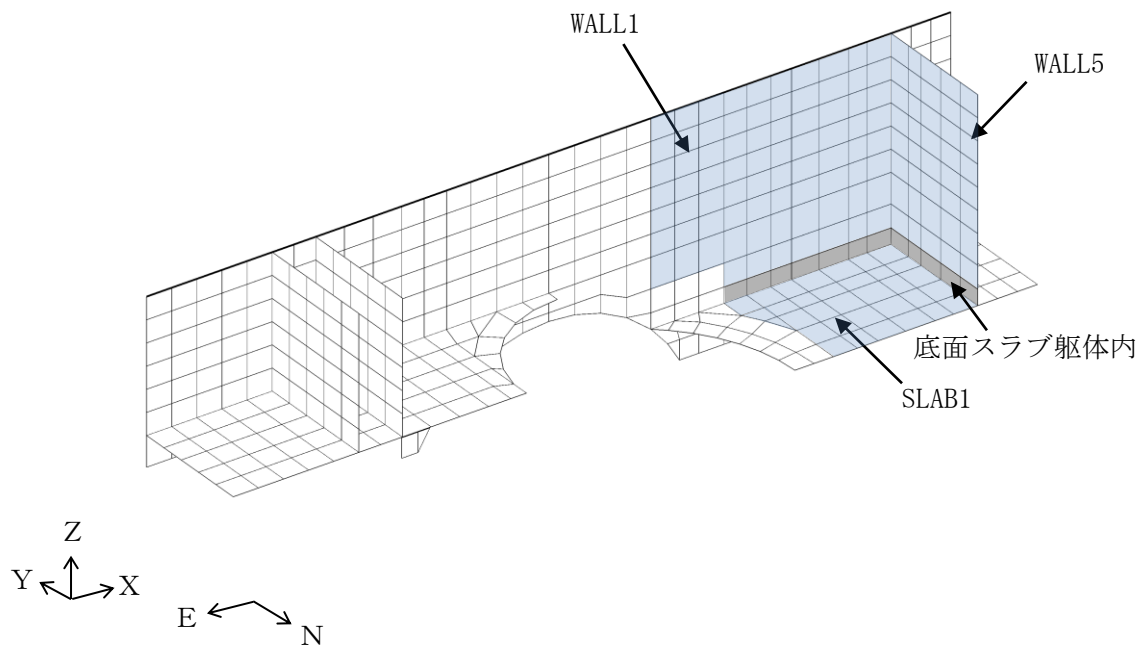


図 2-1 燃料プールの鋼製ライナひずみの算出対象要素

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： 3.0×10^{-3} ，圧縮： 5.0×10^{-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，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，鉄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する。

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、図 4-1 に最大ひずみの要素位置を示す。

表 4-1 検討結果

検討項目	最大ひずみの発生要素	解析結果	許容値	備考
ひずみ	440	0.262×10^{-3}	3.0×10^{-3}	荷重ケース：S d 地震+温度荷重

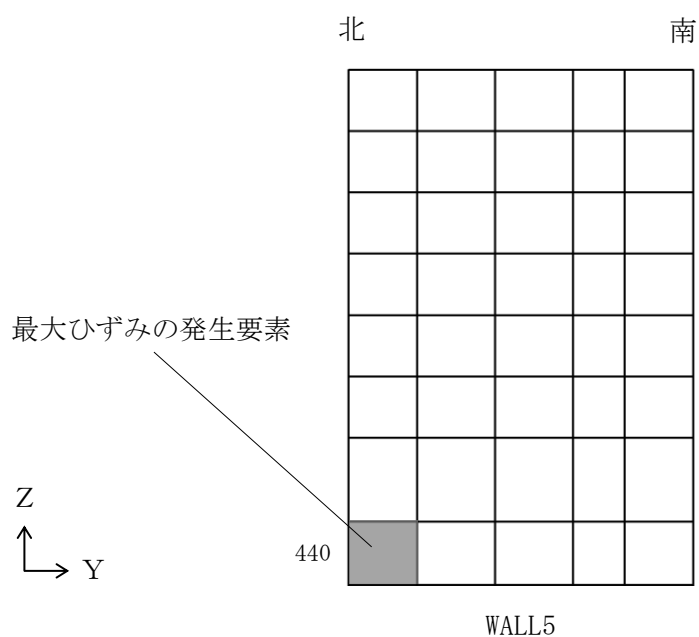


図 4-1 最大ひずみの要素位置図（西側壁）

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、最大ひずみは 0.262×10^{-3} であり、許容値 3.0×10^{-3} 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 6-5
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。

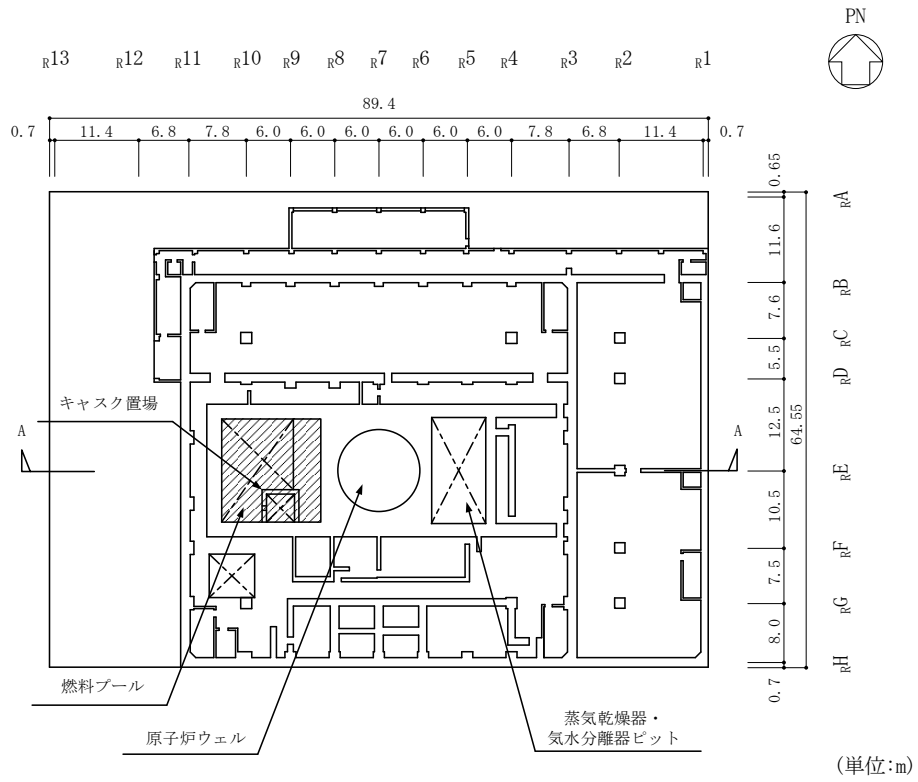


図 1-1 燃料プール及びキャスク置場を含む原子炉建物の概略平面図
(EL 34.8m)

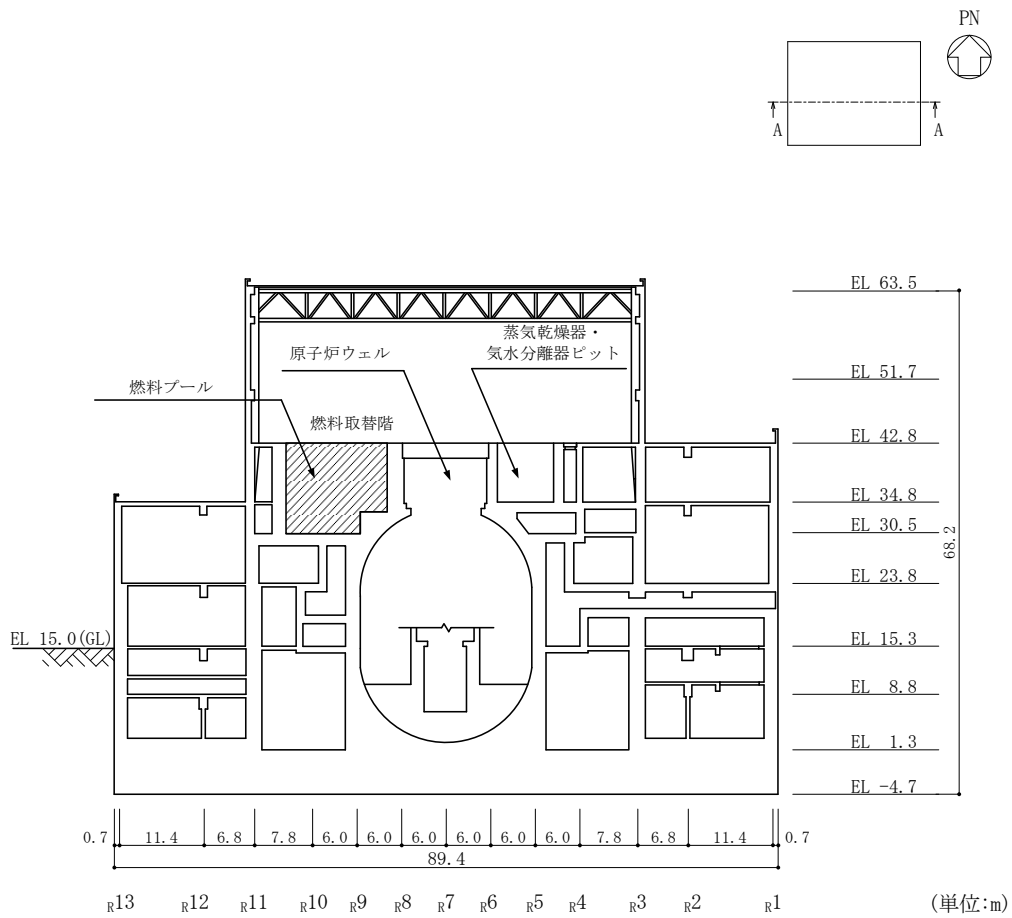


図 1-2 燃料プール及びキャスク置場を含む原子炉建物の概略断面図 (A-A断面)

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

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。

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	N S 方向	8385	2713	—
	E W 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）

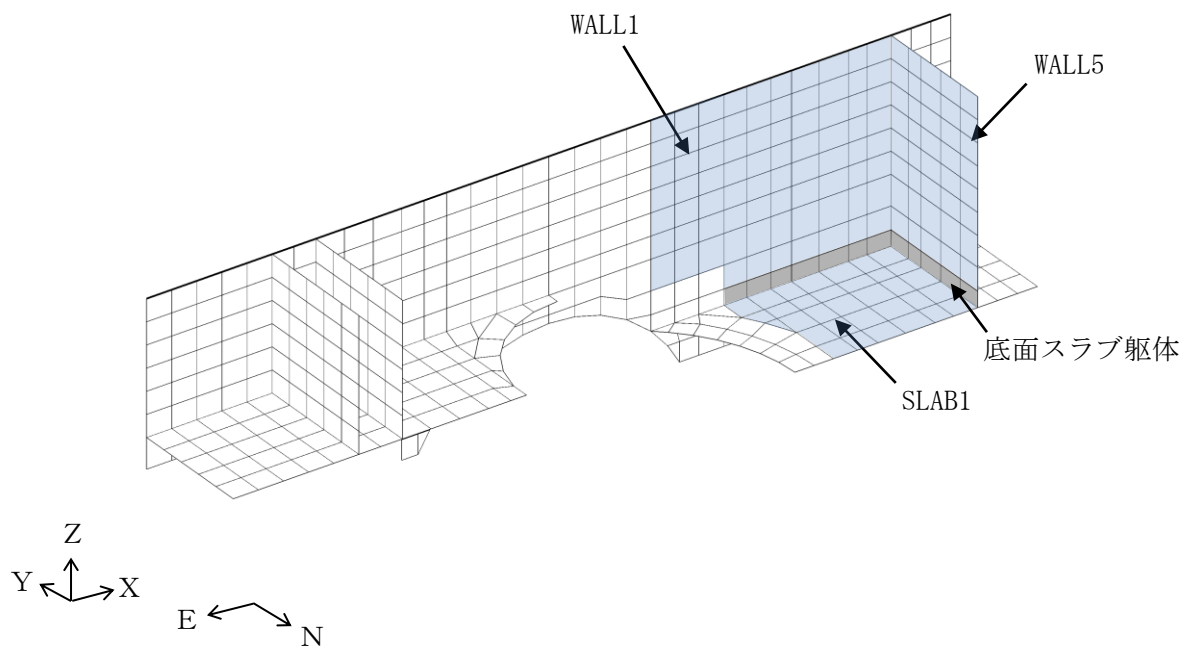
3.3 許容限界

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。

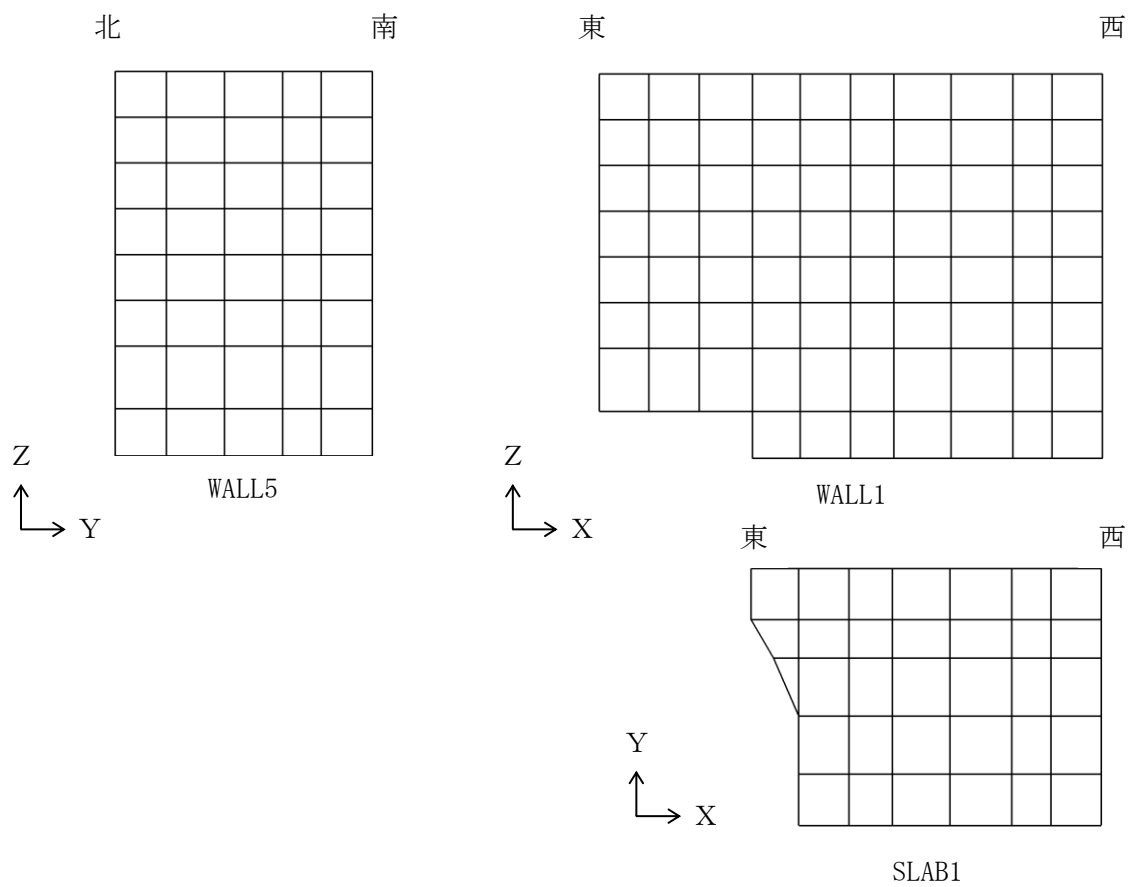
3.4 解析モデル及び諸元

解析モデル概要図を図 3-1 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 3-1 解析モデル概要図

3.5 評価方法

S_s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_{SSN} : S→N方向 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）

S_{SWE} : W→E方向 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）

S_{SUD} : 鉛直方向（下向き） S_s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。

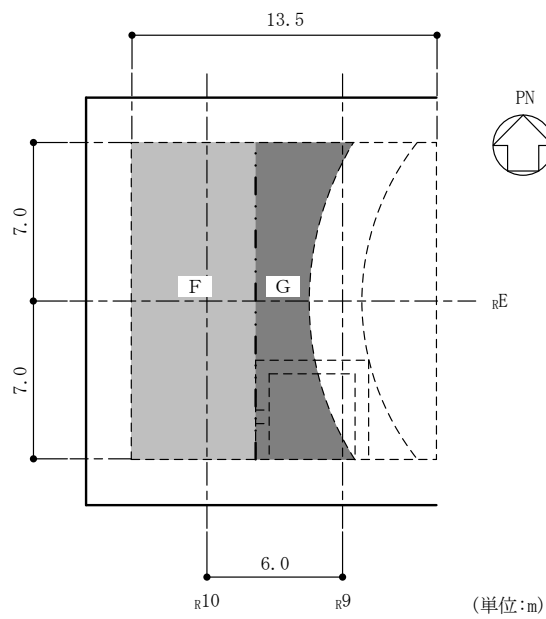
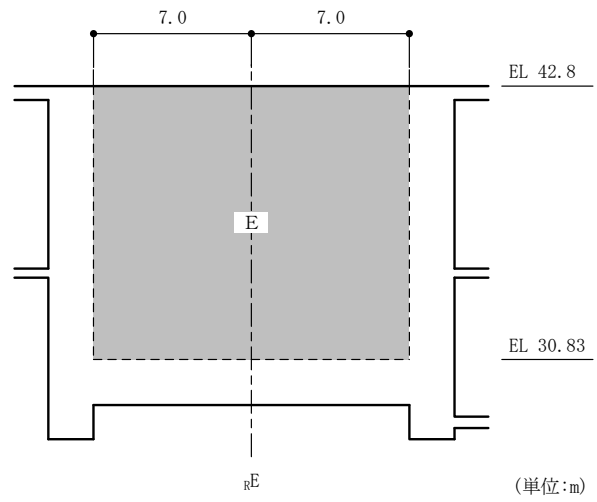
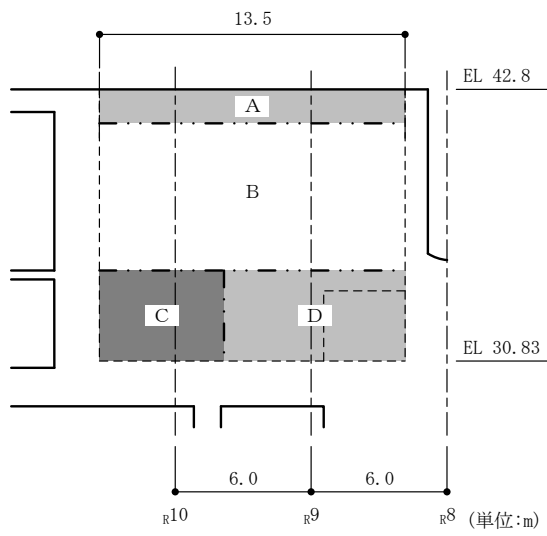
断面の評価結果を記載する要素を以下のとおり選定する。

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。

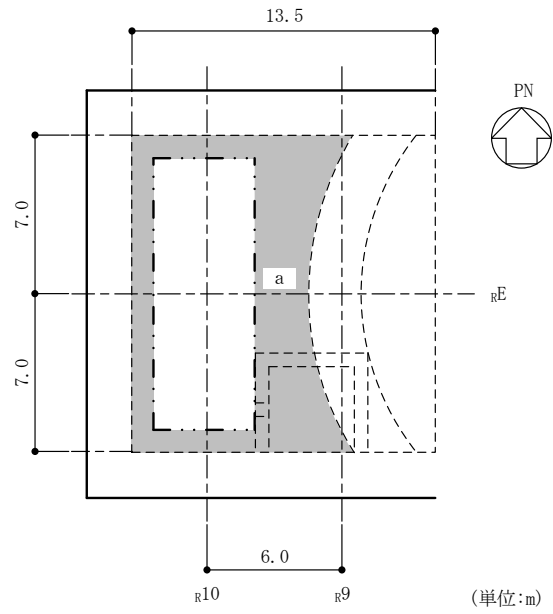
地震時ラック反力考慮ケース及び今回工認ケースにおける選定した要素の位置を図4-2に、評価結果を表4-2に示す。

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。



(a) 主筋

図 4-1(1) 配筋領域図



底面スラブ

(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

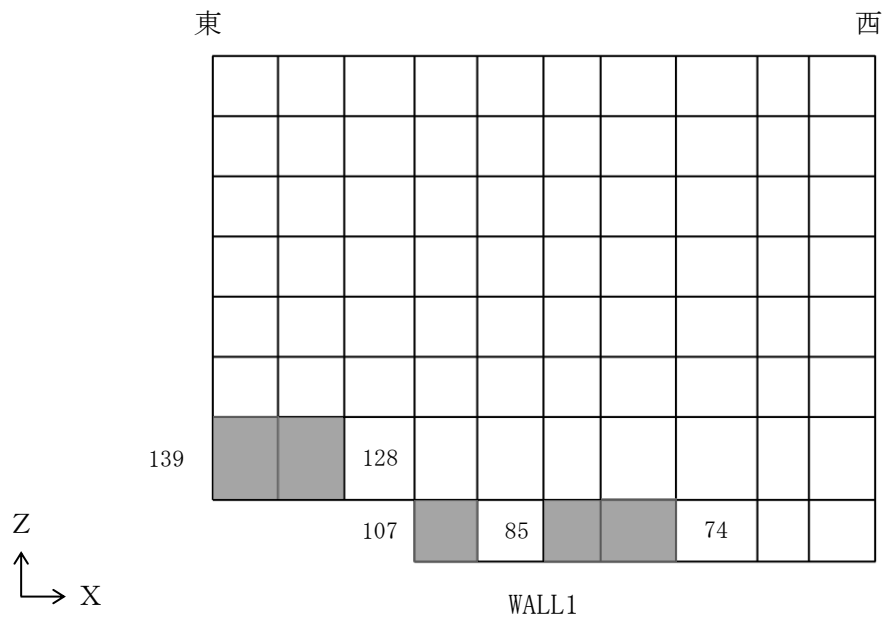
領域	タテ方向	ヨコ方向
E	(内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+D38@400	(内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+D38@400

(c) 底面スラブ主筋

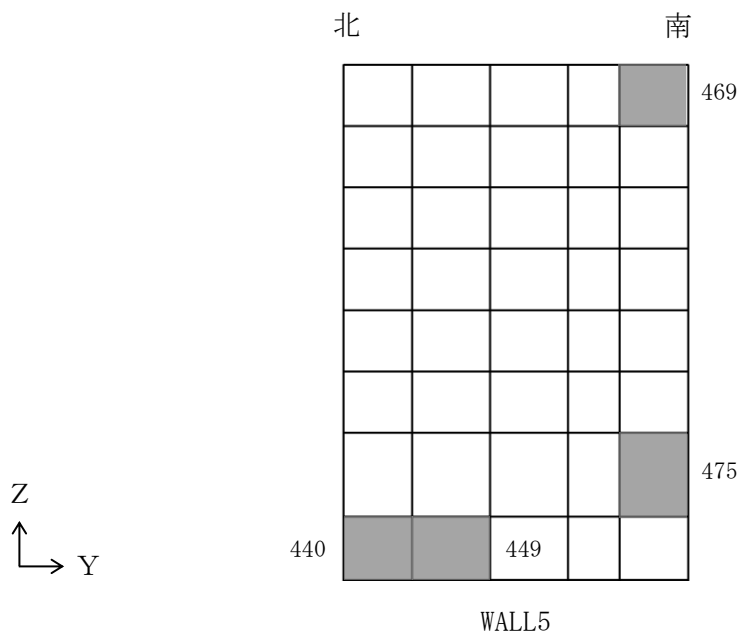
領域	N S 方向	E W 方向
F	(上ば筋) D38@200+D38@400 (下ば筋) 2-D38@200	(上ば筋) 2-D38@200 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400
G	(上ば筋) D38@200+D38@400 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400	(上ば筋) 2-D38@200 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400

(d) 底面スラブせん断補強筋

領域	配筋
a	D19@400×200

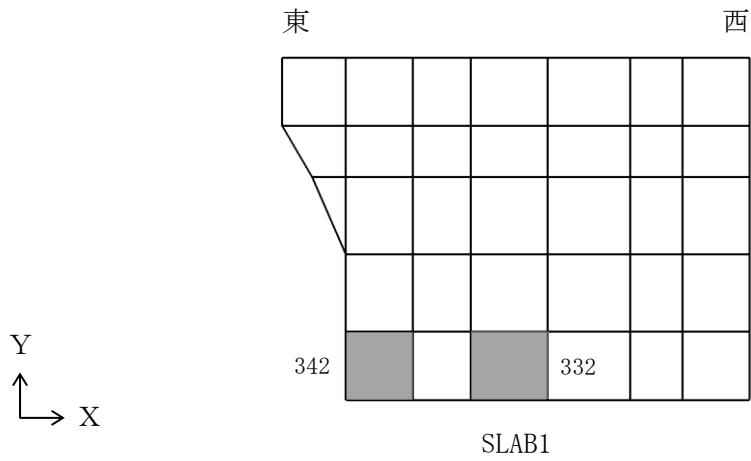


(a) 南側壁



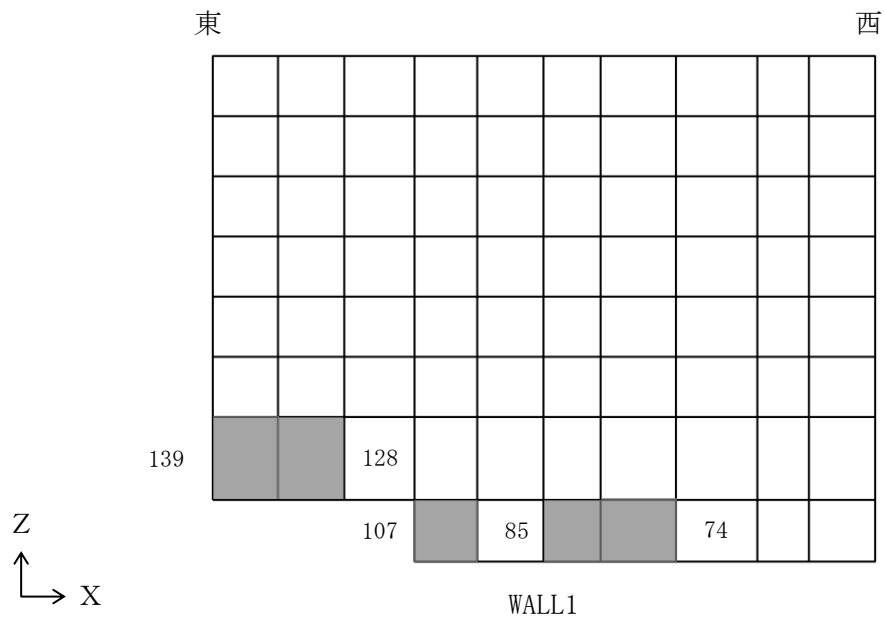
(b) 西側壁

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)

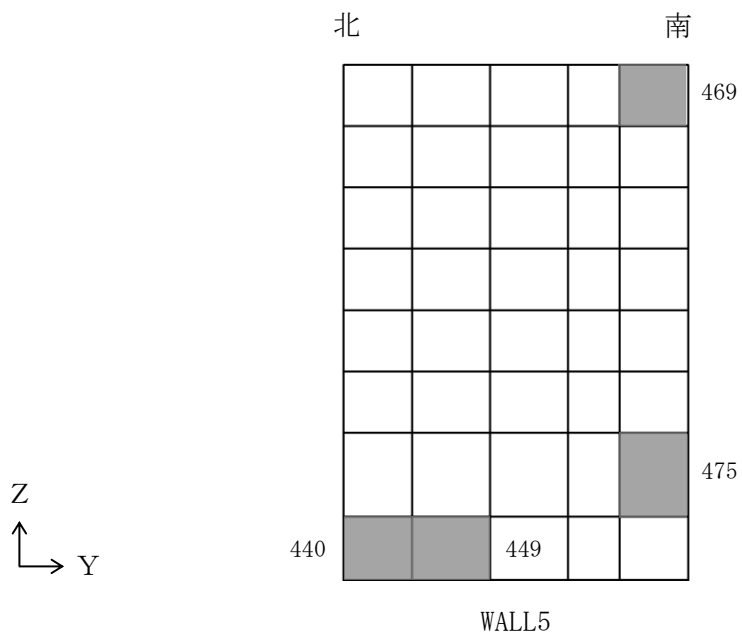


(c) 底面スラブ

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)

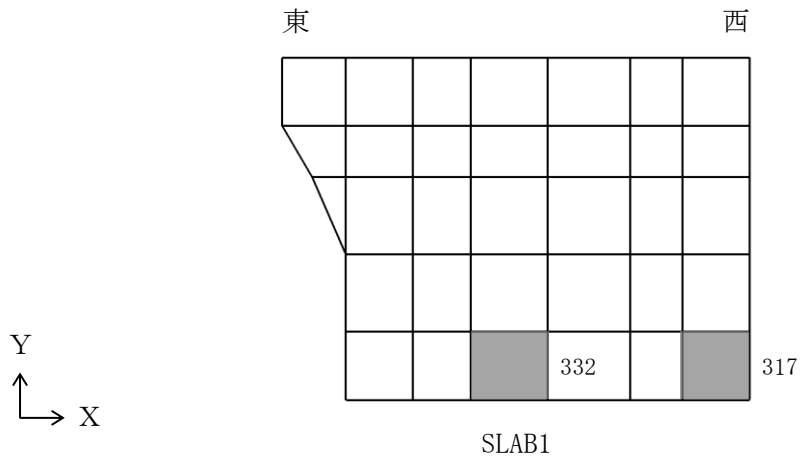


(d) 南側壁



(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 (N/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 (N/mm^2)	-	107	4-12	2.33	4.39
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/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 (N/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 (N/mm^2)	-	475	4-9	1.39	3.04
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/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 (N/mm^2)	E W	342	4-3	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 ($\times 10^{-3}$)	EW	332	2-11	0.540	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	EW	332	2-11	1.54	5.00
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	EW	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	
342	337	332	327	322	317	

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 1.66×10^{-3} は、鉄筋降伏時のひずみ 1.68×10^{-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。

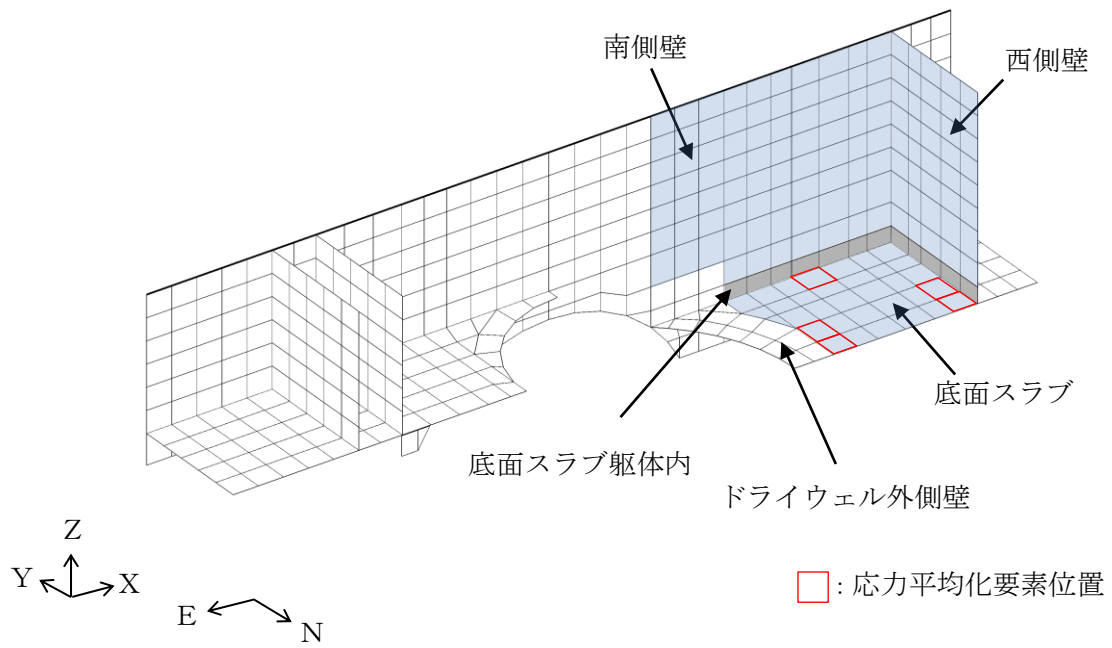


図 2-2 燃料プールの 3 次元 F E M モデル

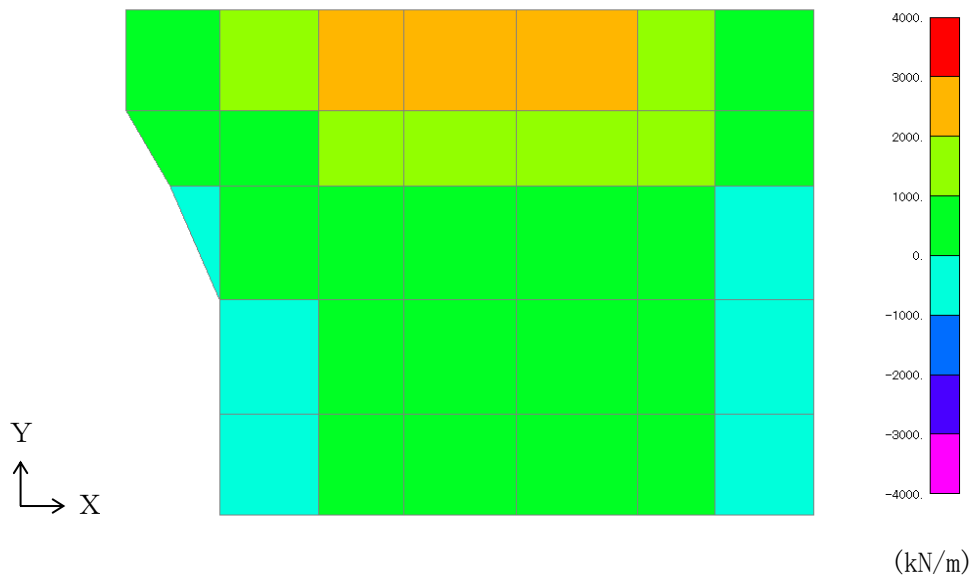
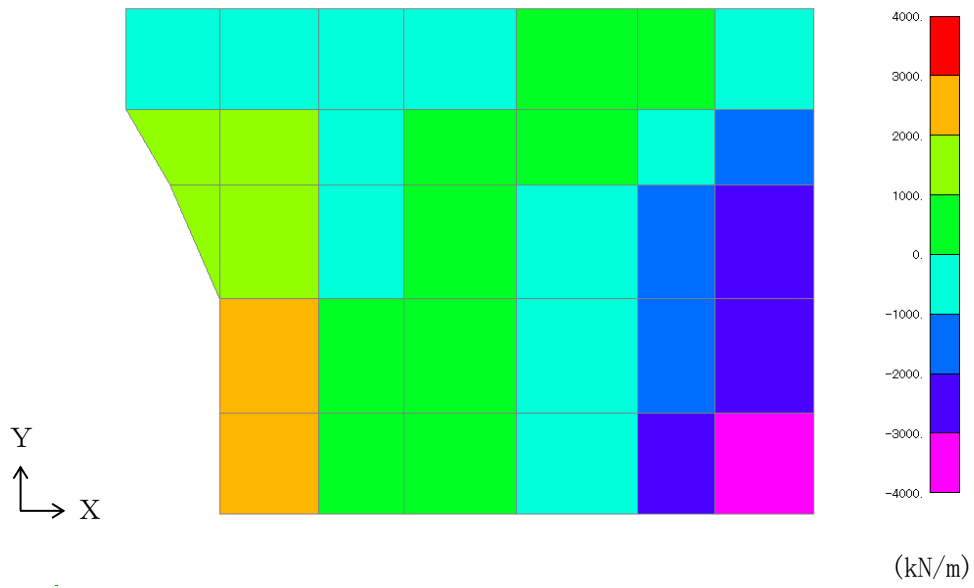
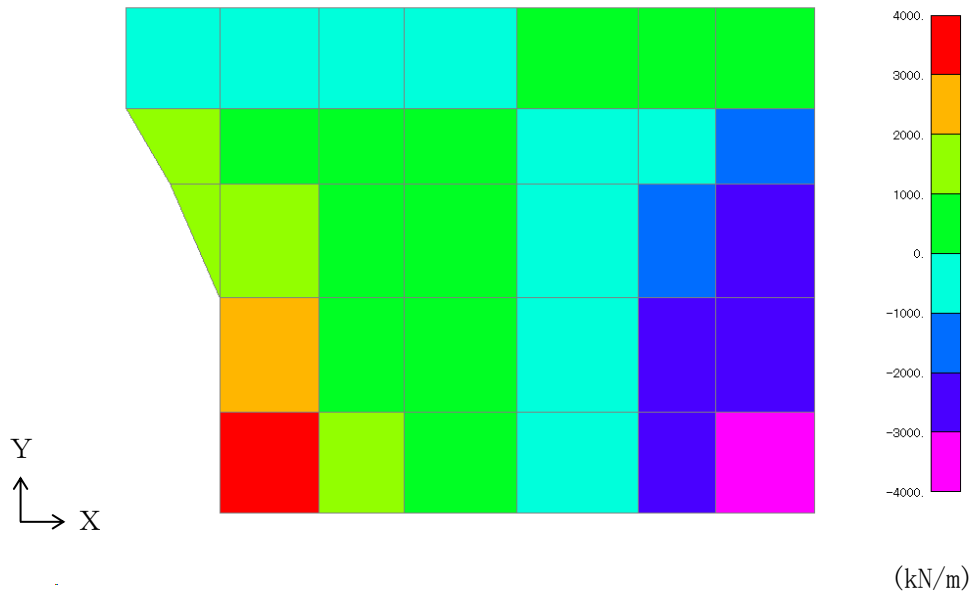


図 2-3(1) 面外せん断力のコンター図 底面スラブ



(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

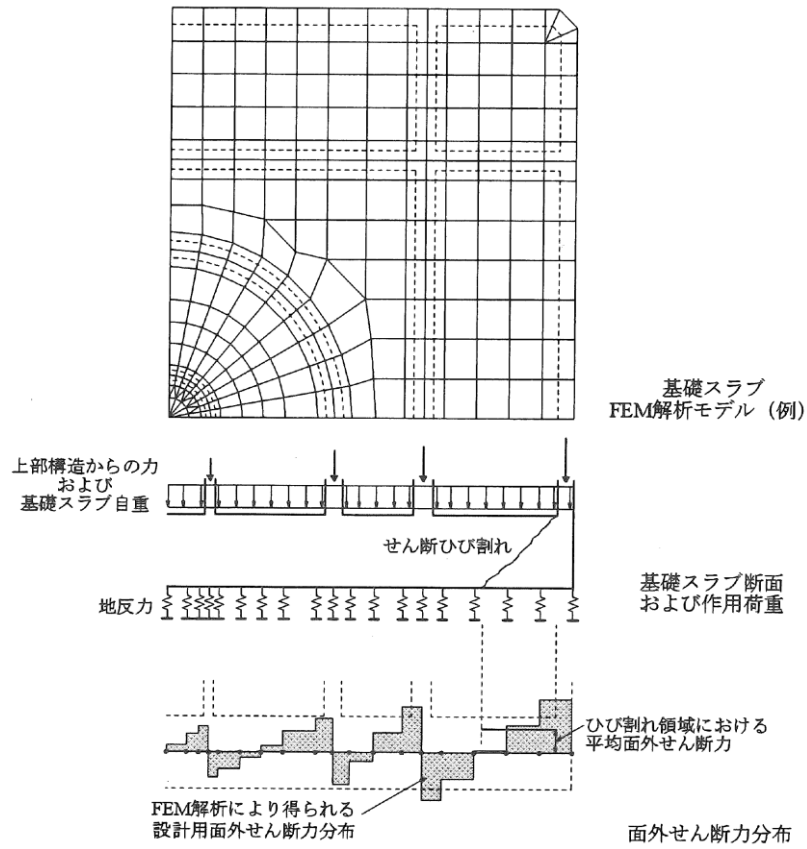


図 2-4 「RC-N規準」の付図 2.2

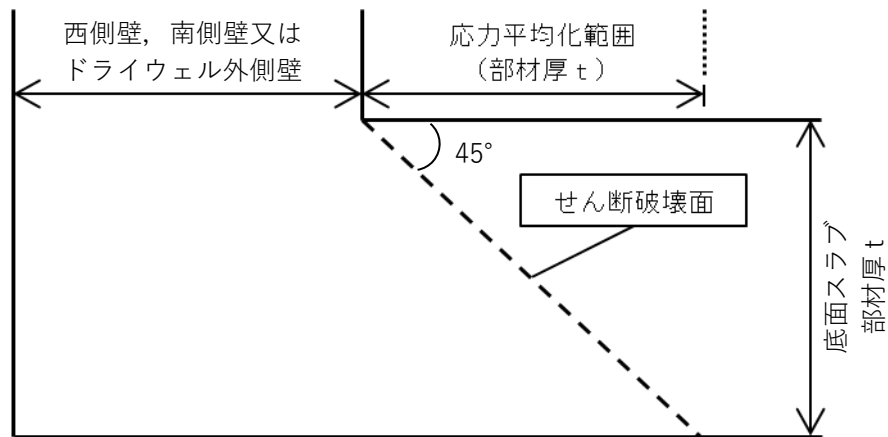
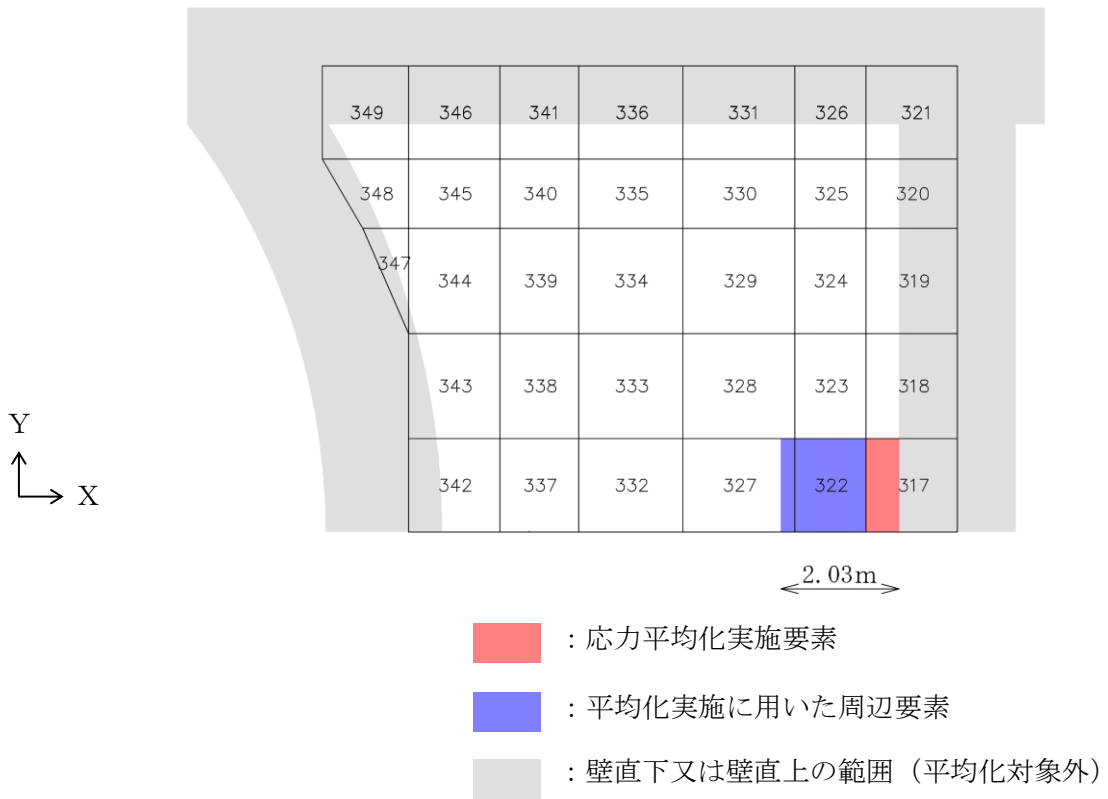
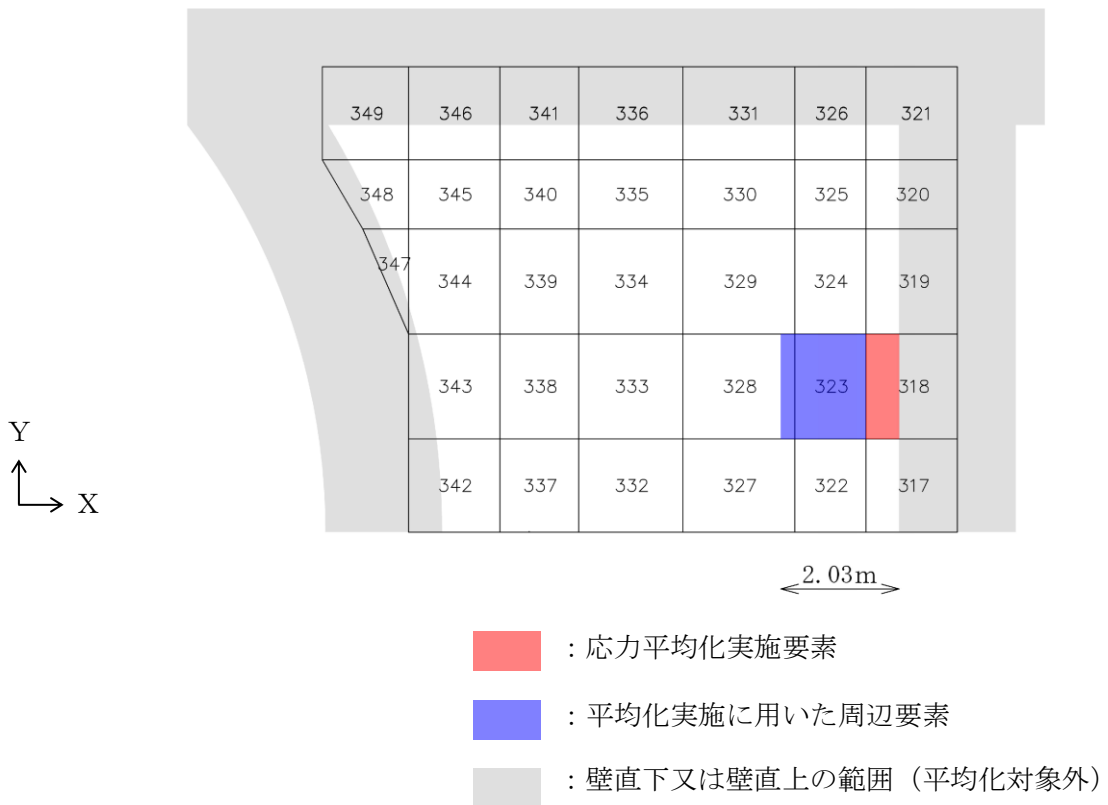


図 2-5 燃料プールの底面スラブにおける面外せん断力に対する応力平均化の考え方

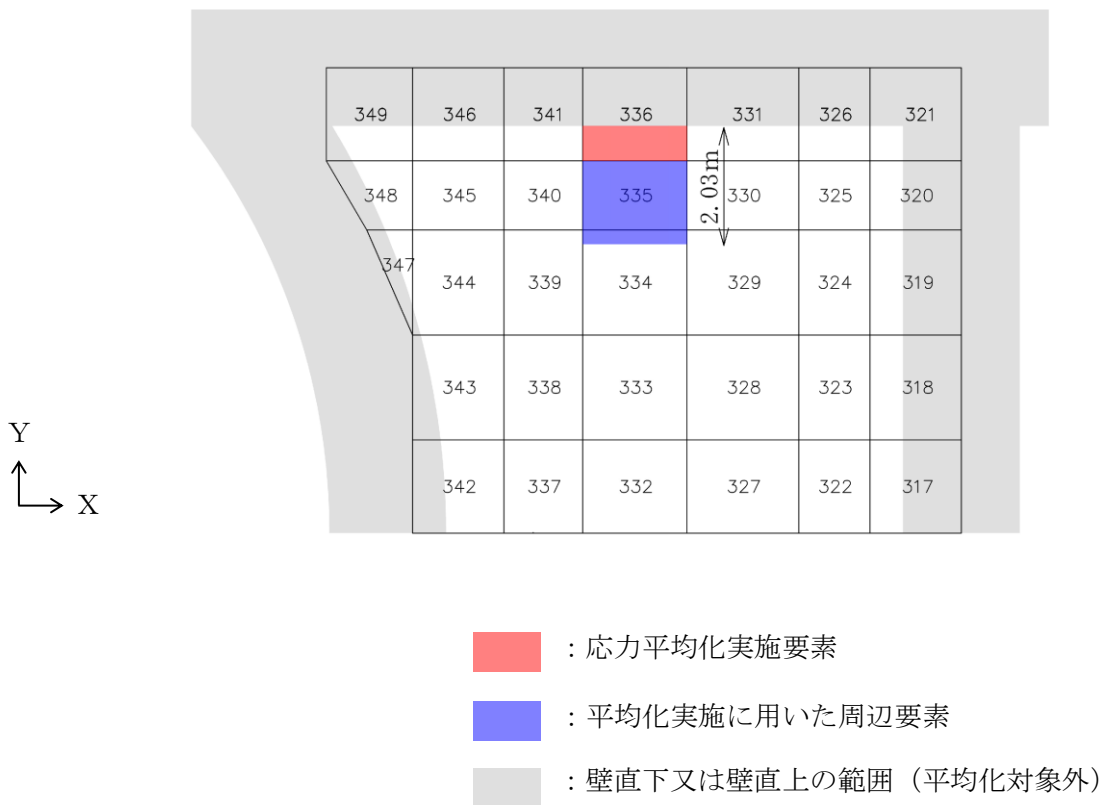


(a) 要素番号 317

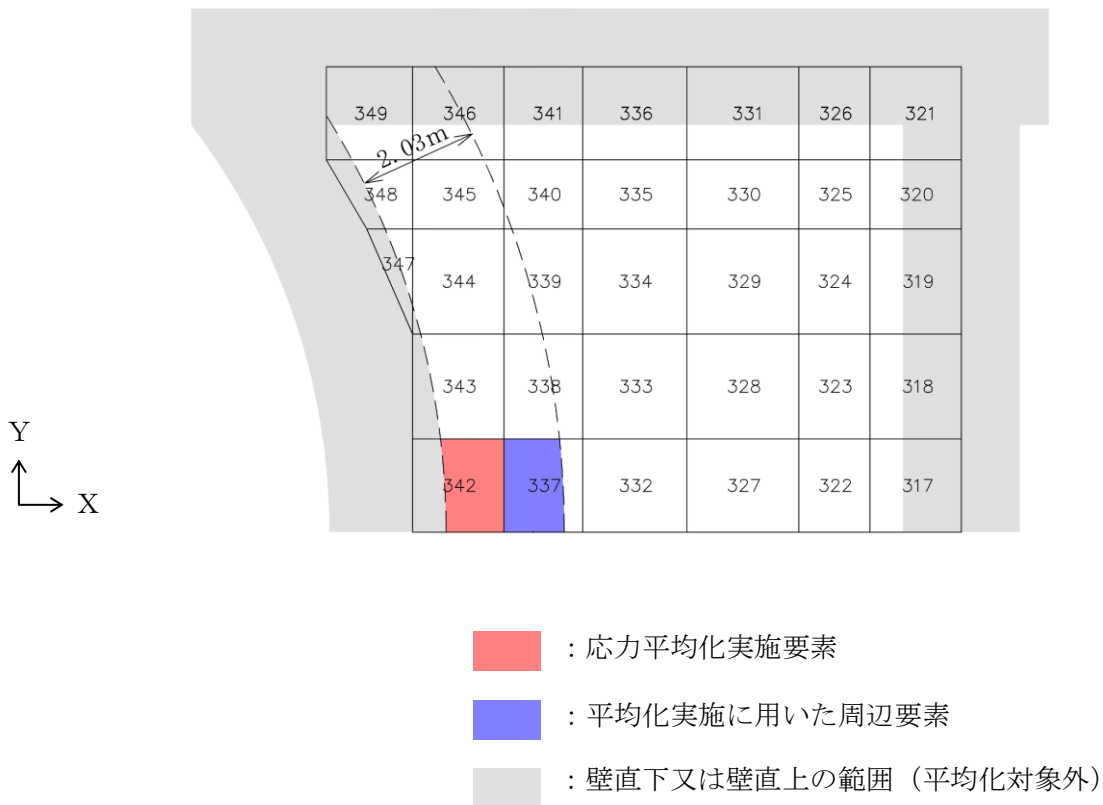


(b) 要素番号 318

図 2-6(1) 応力平均化範囲 底面スラブ

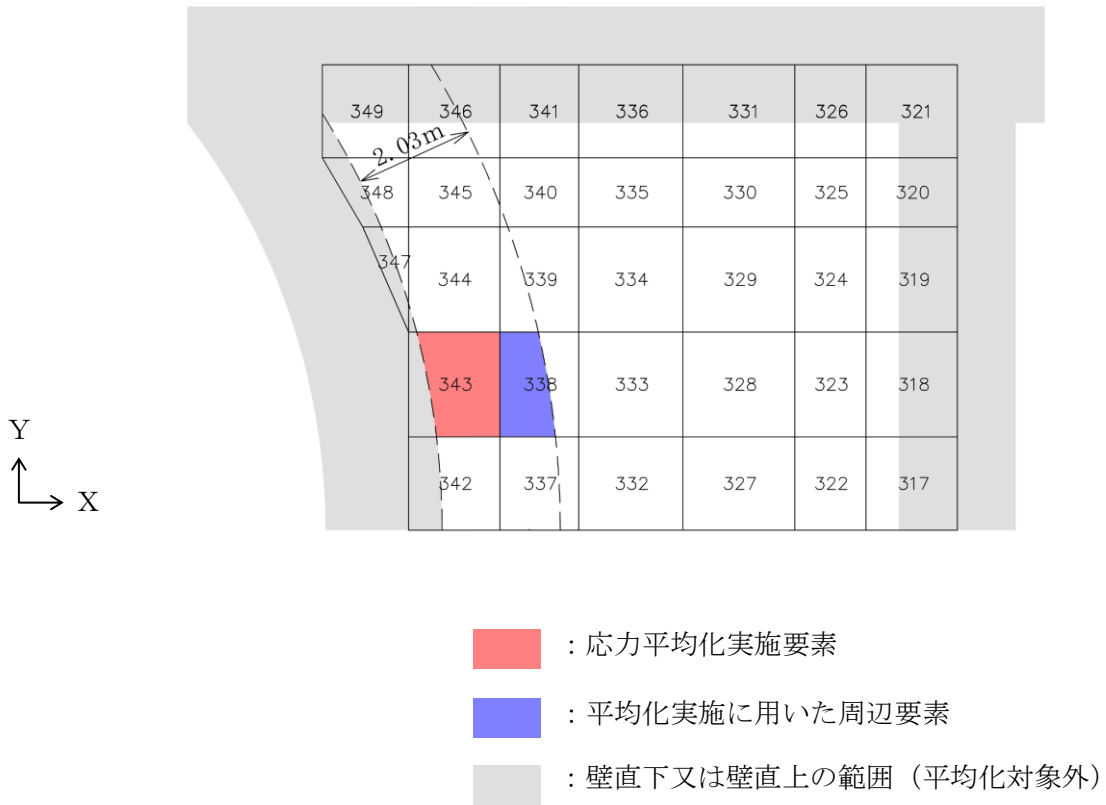


(c) 要素番号 336



(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、

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)
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 ²)	
			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 ²)		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。