

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 02
提出年月日	2023年3月17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3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

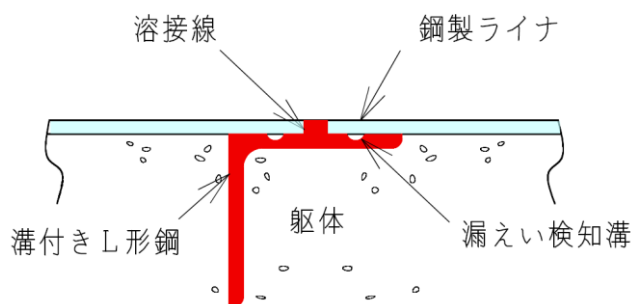
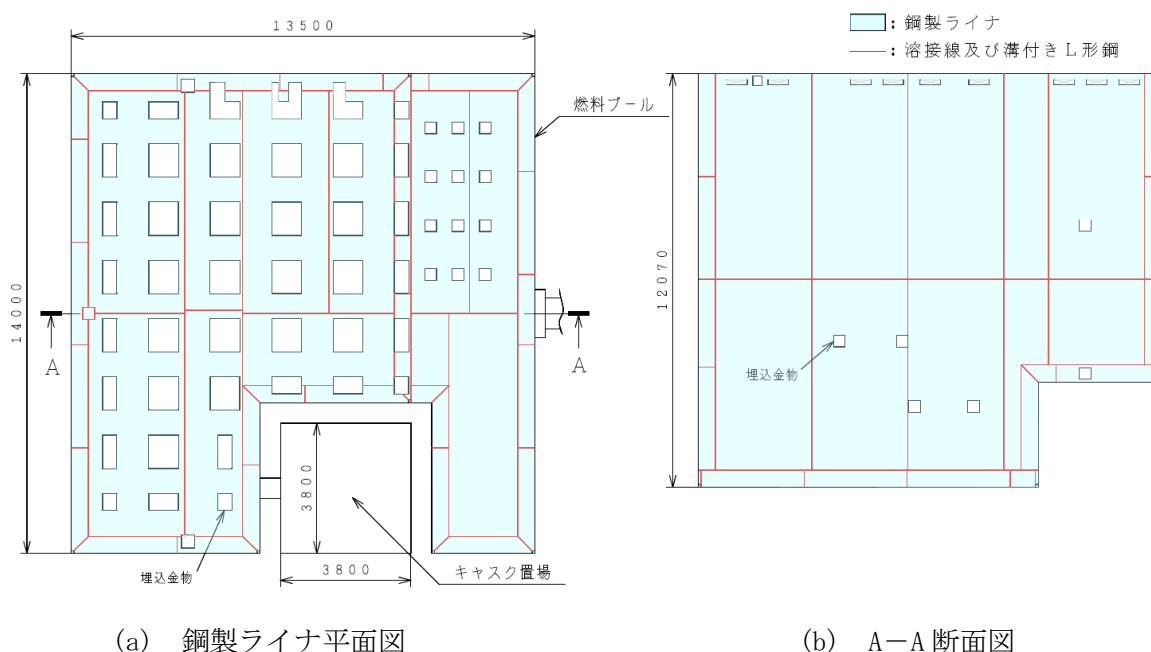
1. 概要	別紙 5-1
2. 燃料プールの鋼製ライナひずみの算出方法	別紙 5-2
3. 許容値の設定	別紙 5-3
4. 鋼製ライナひずみの検討結果	別紙 5-4
5. まとめ	別紙 5-8

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(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」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。

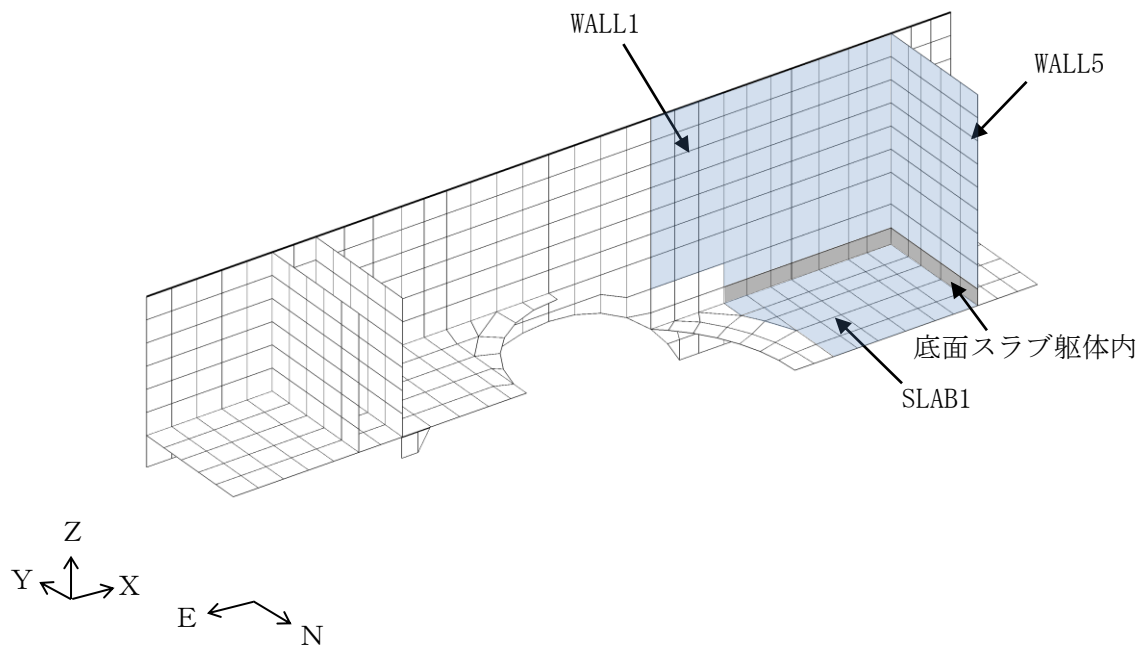


図 2-1 燃料プールの鋼製ライナひずみの算出対象要素

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： 3.0×10^{-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、**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

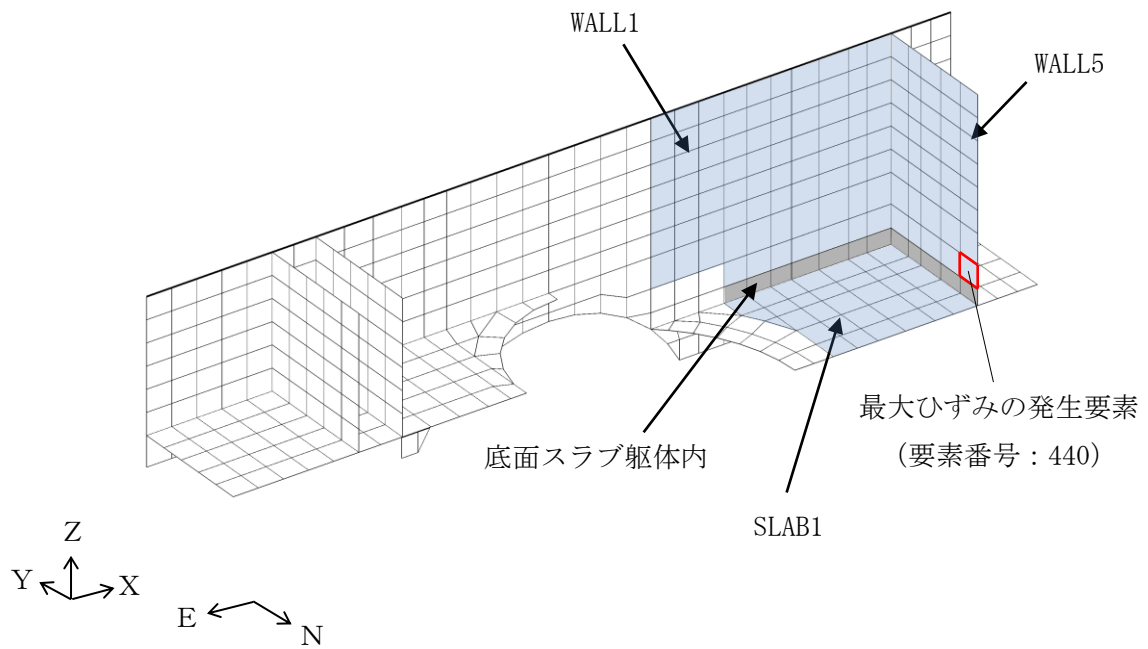
(a) 引張側

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	0.159×10^{-3}	3.0×10^{-3}	0.06
S d 地震+温度荷重	440	0.262×10^{-3}	3.0×10^{-3}	0.09
S s 地震	440	0.217×10^{-3}	3.0×10^{-3}	0.08

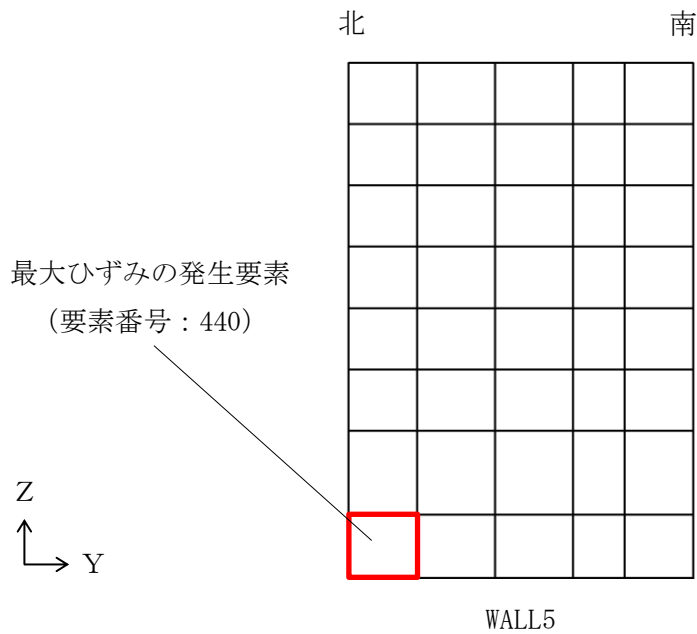
(b) 圧縮側

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	0.182×10^{-3}	5.0×10^{-3}	0.04
S d 地震+温度荷重	332	0.139×10^{-3}	5.0×10^{-3}	0.03
S s 地震	332	0.248×10^{-3}	5.0×10^{-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

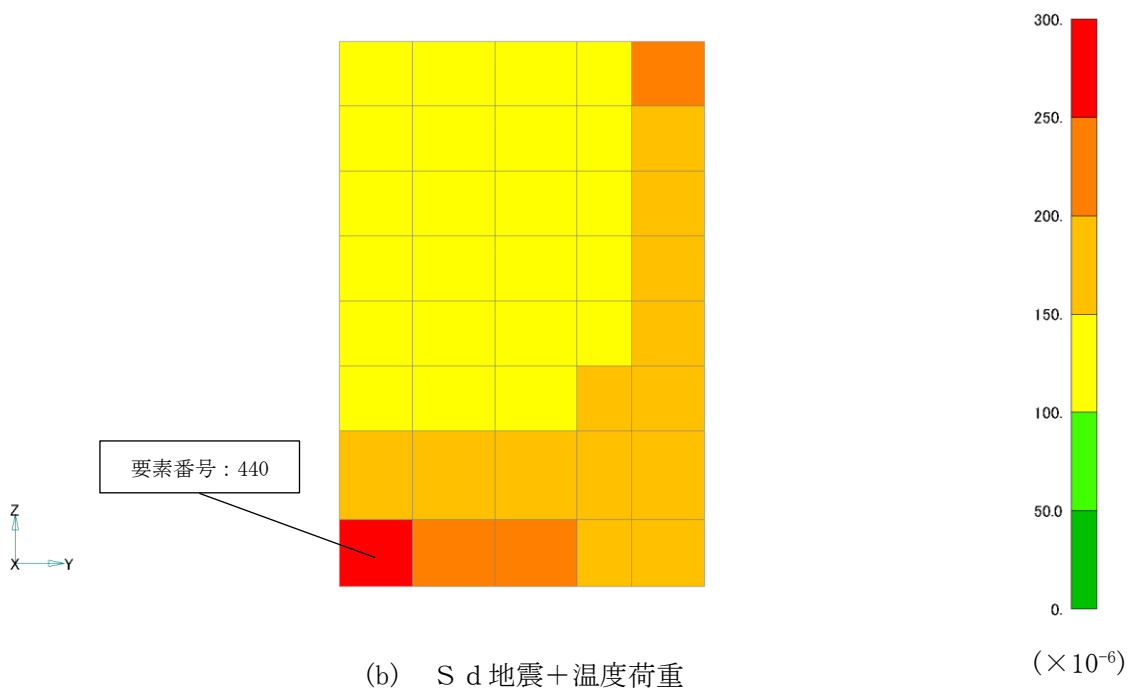
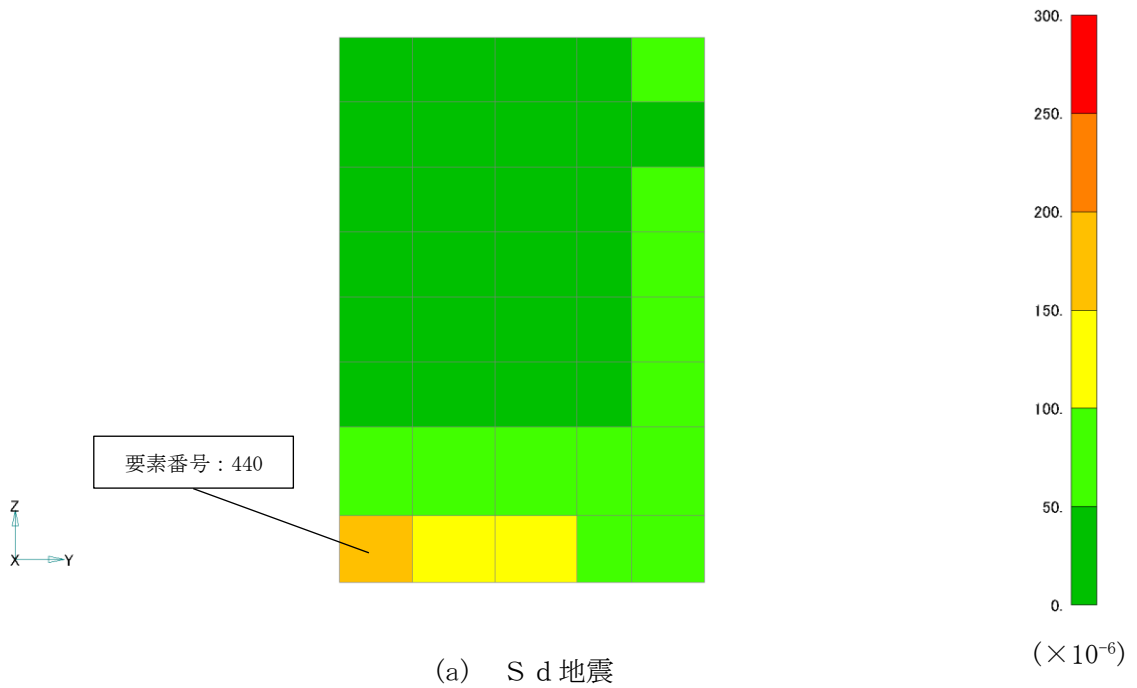


図 4-2(1) 引張側の最大ひずみコンター図 西側壁

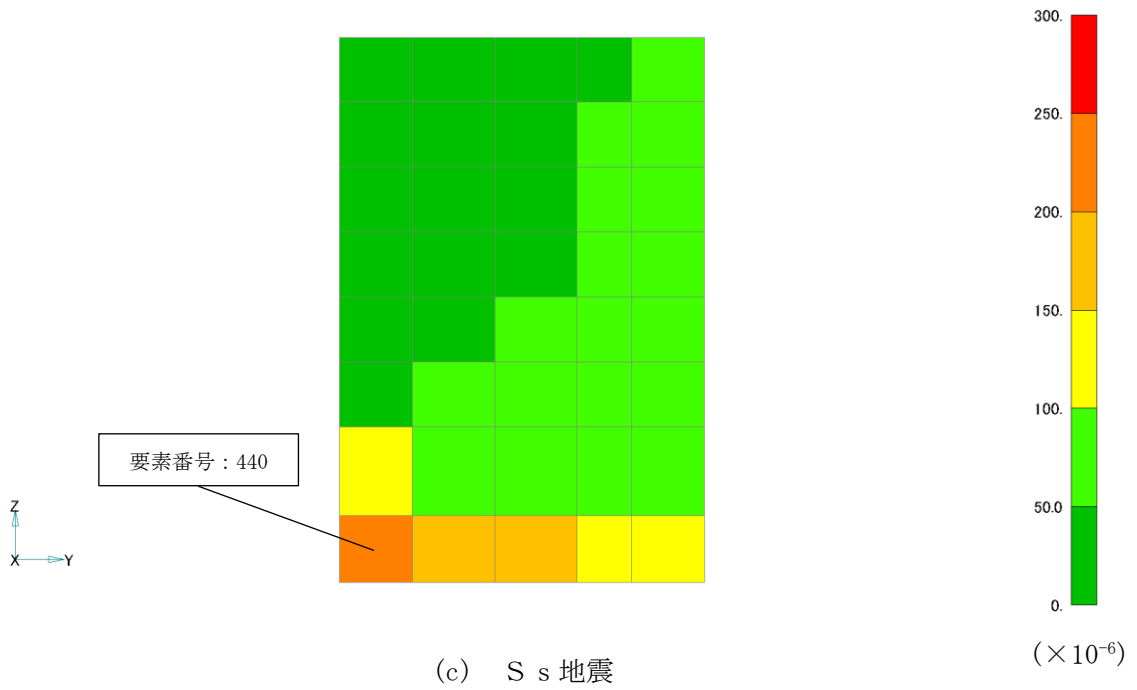


図 4-2(2) 引張側の最大ひずみコンター図 西側壁

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 6-5
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。

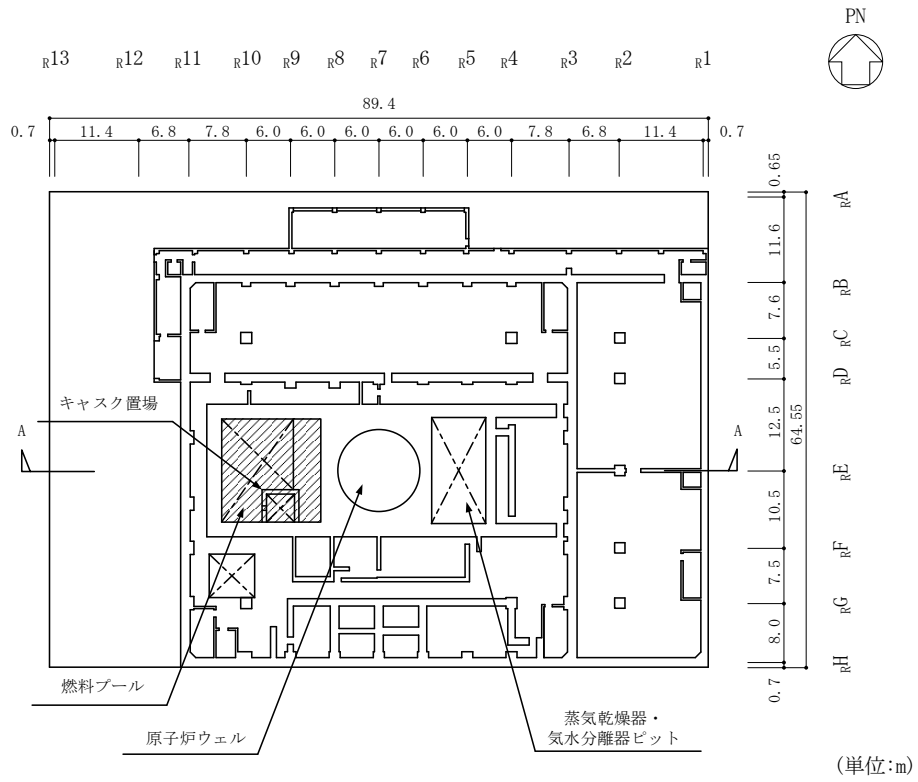


図 1-1 燃料プール及びキャスク置場を含む原子炉建物の概略平面図
(EL 34.8m)

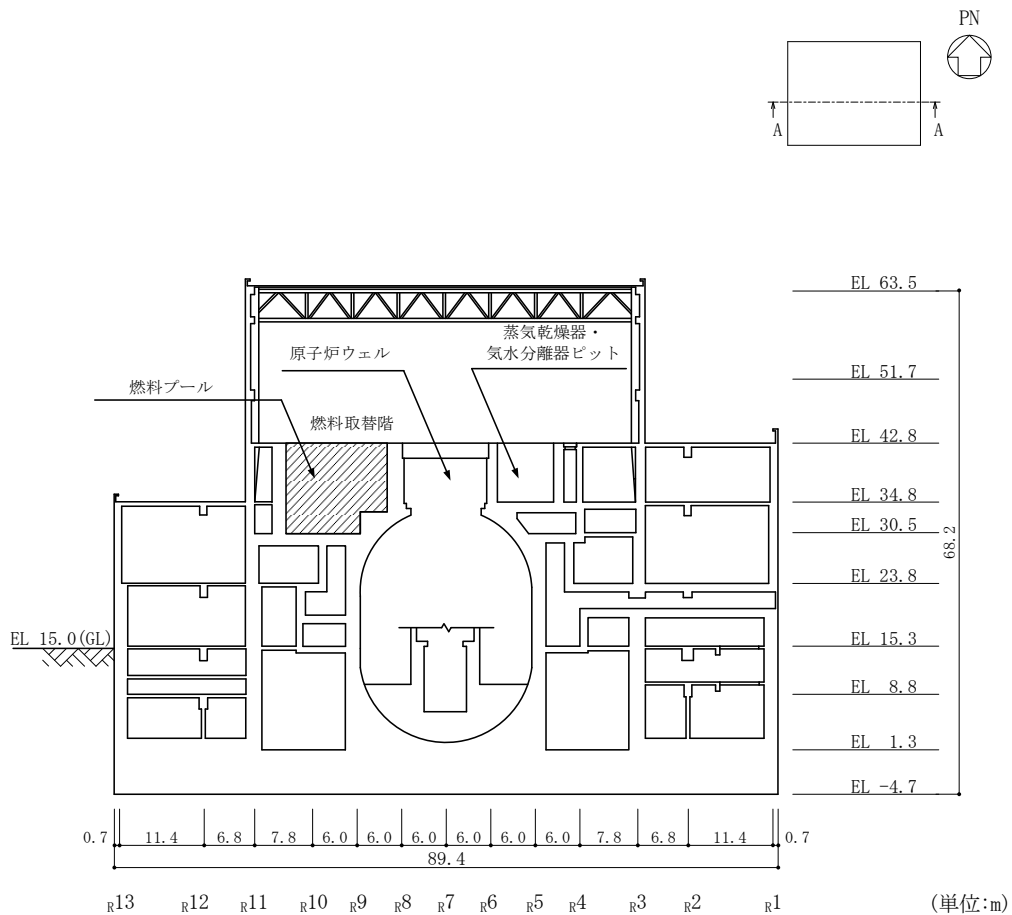


図 1-2 燃料プール及びキャスク置場を含む原子炉建物の概略断面図 (A-A断面)

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）

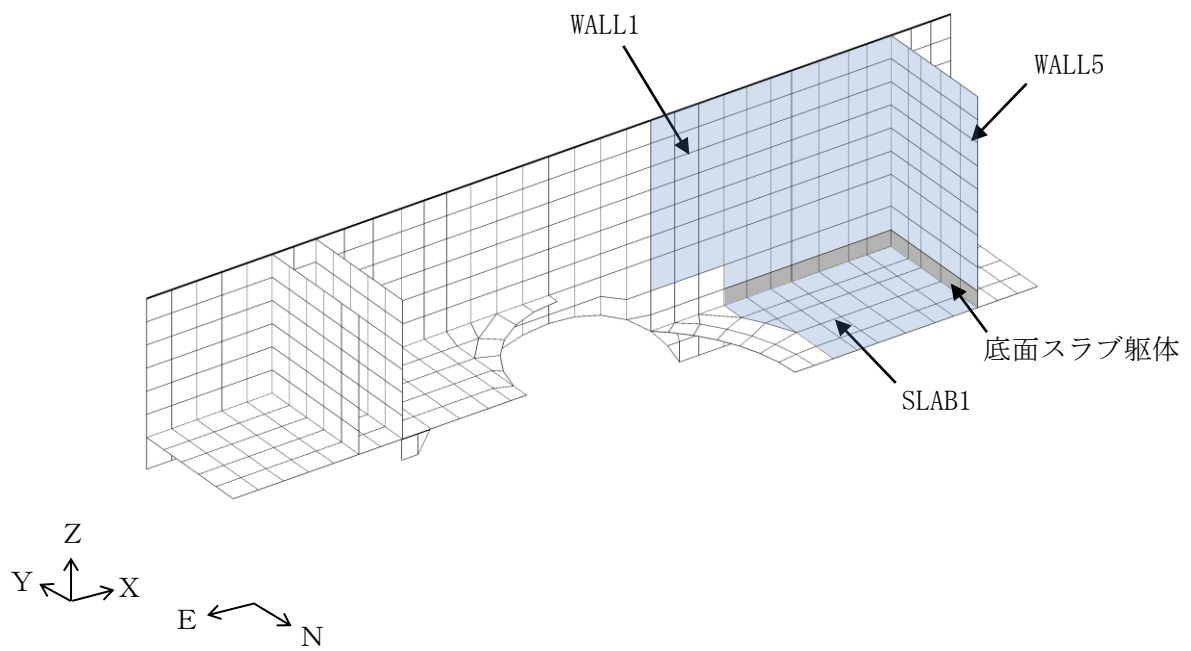
3.3 許容限界

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。

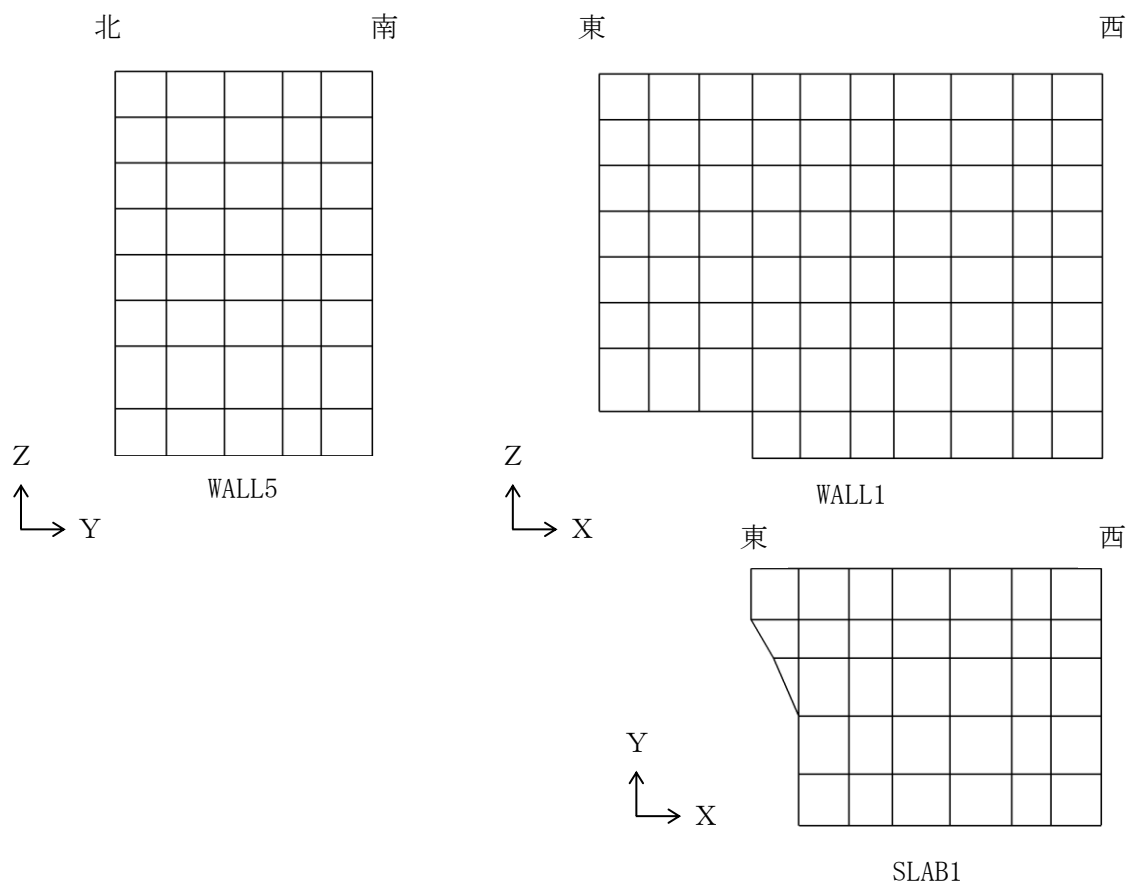
3.4 解析モデル及び諸元

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。

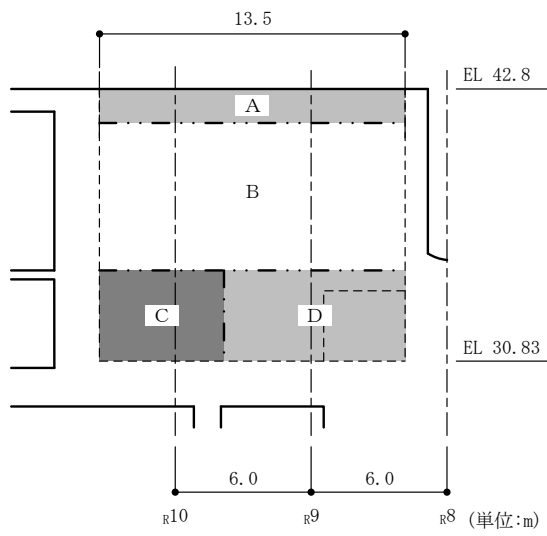
断面の評価結果を記載する要素を以下のとおり選定する。

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。

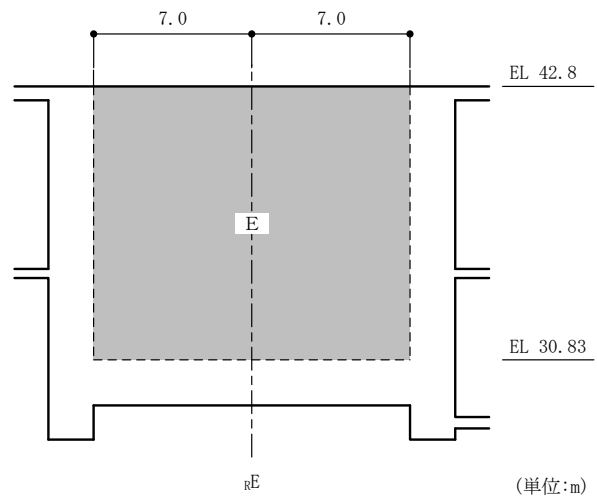
底面スラブについては、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

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。

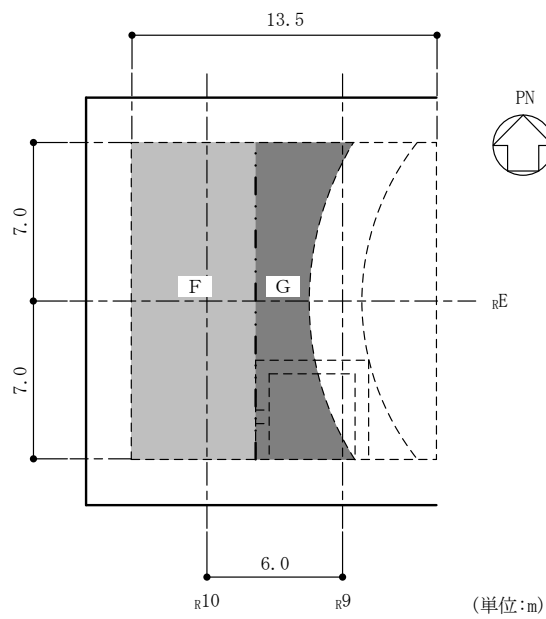
地震時ラック反力考慮ケースは、選定した要素が今回工認ケースと異なる評価項目もあるが、使用済燃料貯蔵ラックの質量を積載荷重として扱った今回工認ケースよりも発生値が増加する傾向にあることを確認した。また、壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度が各許容値を超えないことを、底面スラブについては、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度が各許容値を超えないことを確認した。



南側壁



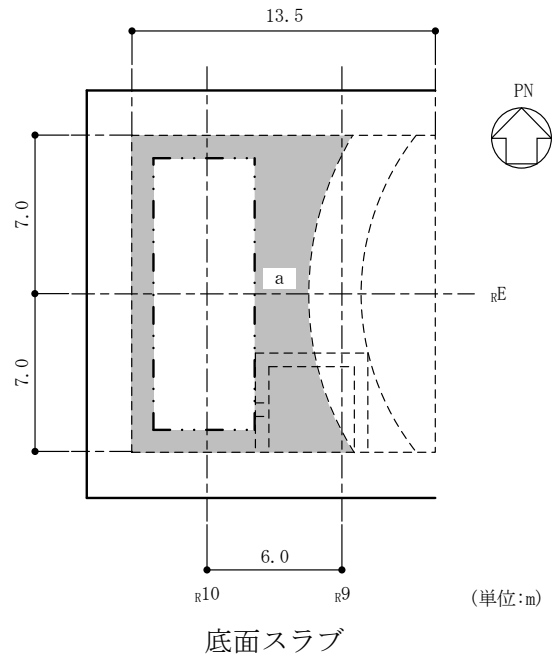
西側壁



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

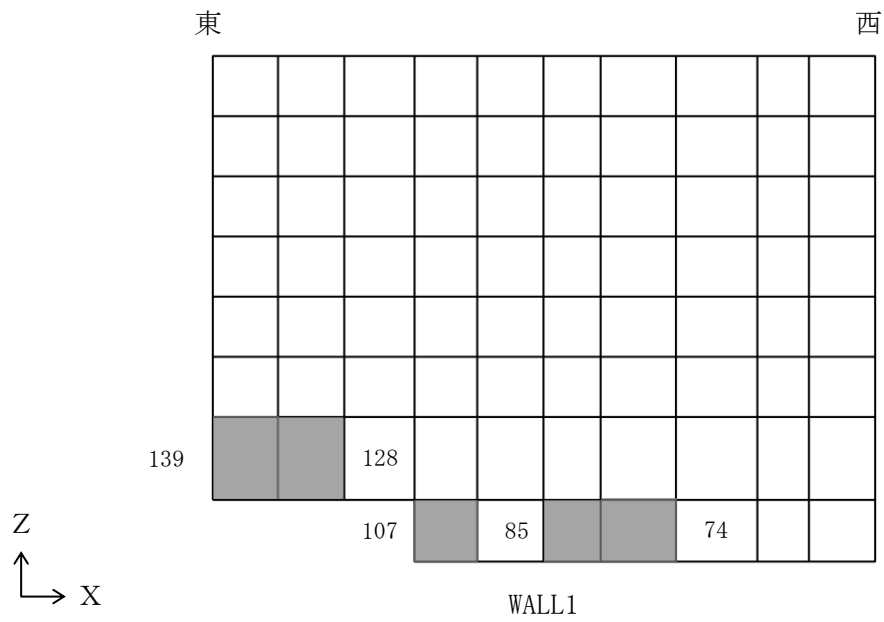
領域	タテ方向	ヨコ方向
E	(内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+D38@400	(内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+D38@400

(c) 底面スラブ主筋

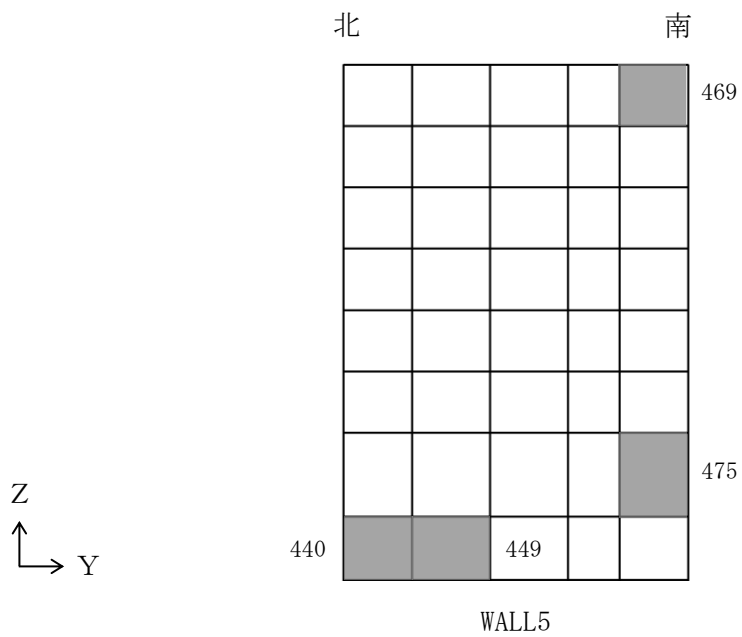
領域	N S 方向	E W 方向
F	(上ば筋) D38@200+D38@400 (下ば筋) 2-D38@200	(上ば筋) 2-D38@200 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400
G	(上ば筋) D38@200+D38@400 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400	(上ば筋) 2-D38@200 (下ば筋) 2-D38@200+D38@400

(d) 底面スラブせん断補強筋

領域	配筋
a	D19@400×200

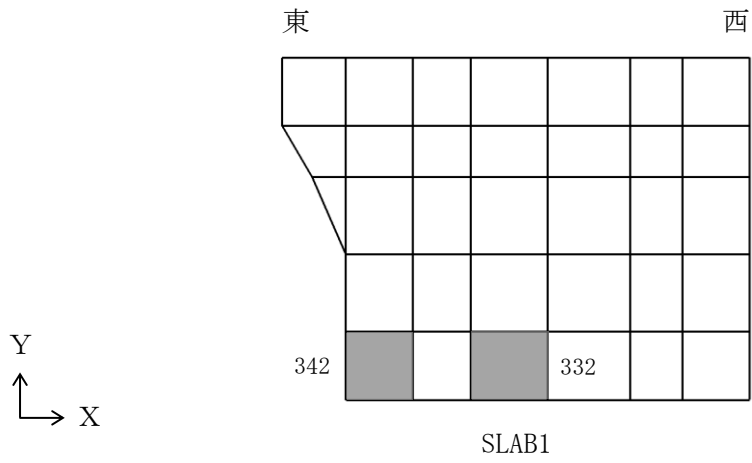


(a) 南側壁



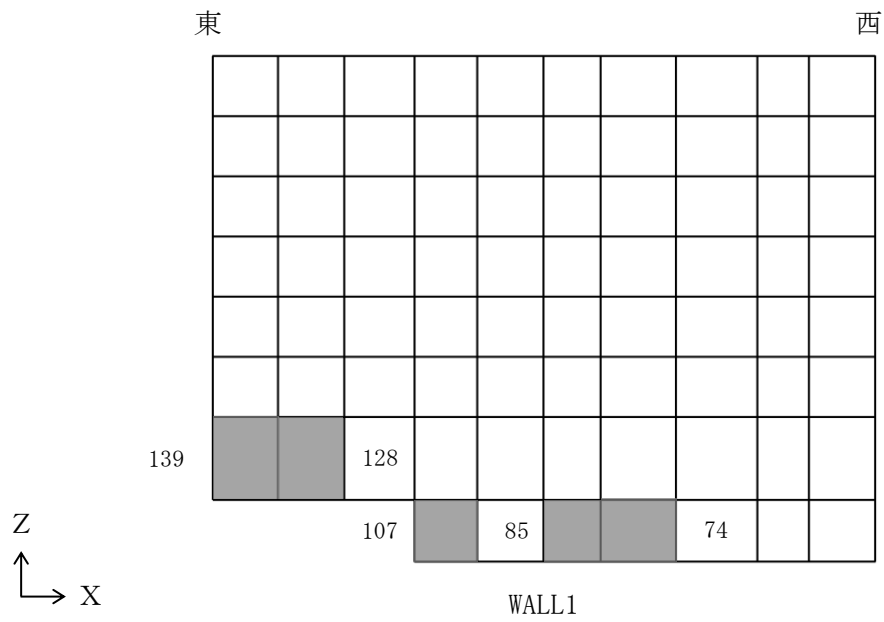
(b) 西側壁

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)

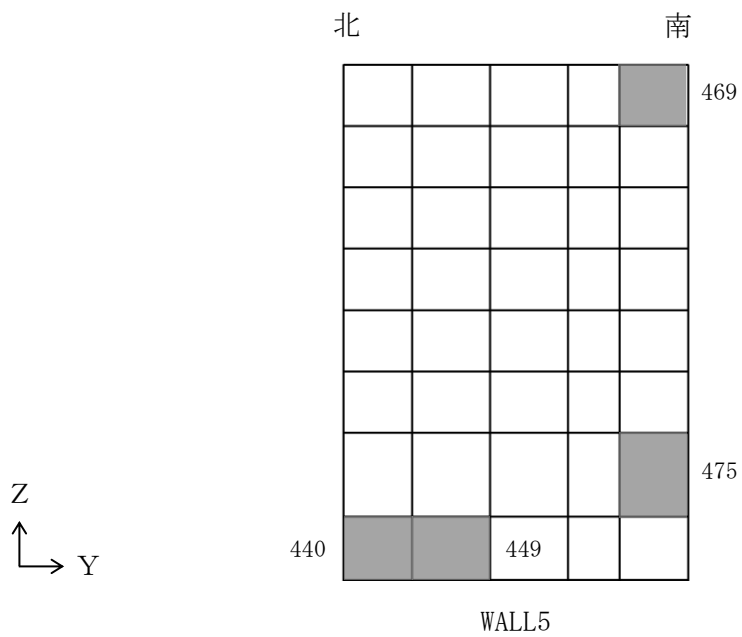


(c) 底面スラブ

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)

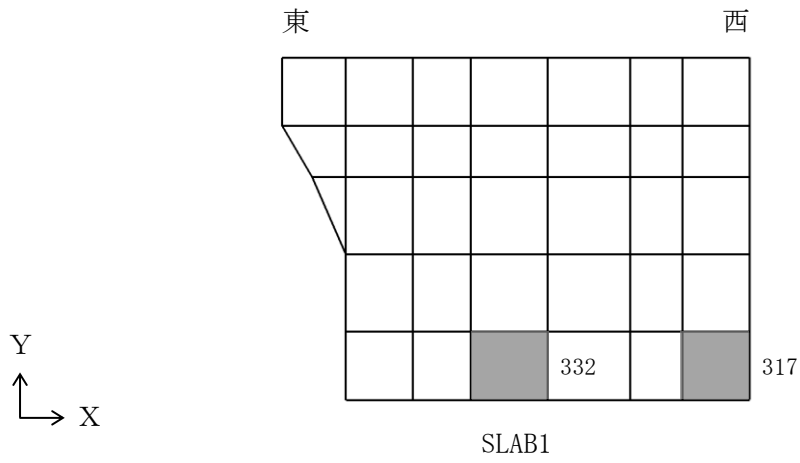


(d) 南側壁



(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 (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	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。