

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	工認-149 改3
提出年月日	平成30年6月28日

#### 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

NT2 補② V-2-4-2-1 R2

平成30年6月

日本原子力発電株式会社

## 目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	2
2.1 位置.....	2
2.2 構造概要.....	3
2.3 評価方針.....	6
2.4 適用規格・基準等.....	8
3. 応力解析による評価方法.....	9
3.1 評価対象部位及び評価方針.....	9
3.2 荷重及び荷重の組合せ.....	11
3.3 許容限界.....	16
3.4 解析モデル及び諸元.....	18
3.5 評価方法.....	24
4. 評価結果.....	39

別紙 鉄筋コンクリート構造物の重大事故等時の高温による影響（使用済燃料プール）

## 1. 概要

本資料は、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、使用済燃料プールの地震時の構造強度及び機能維持の確認について説明するものであり、その評価は、応力解析による評価により行う。

使用済燃料プールは、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設」に、重大事故等対処施設においては「常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備」に分類される。

以下、それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

## 2. 基本方針

### 2.1 位置

使用済燃料プールは原子炉建屋の一部を構成している。使用済燃料プールを含む原子炉建屋の設置位置を図 2-1 に示す。

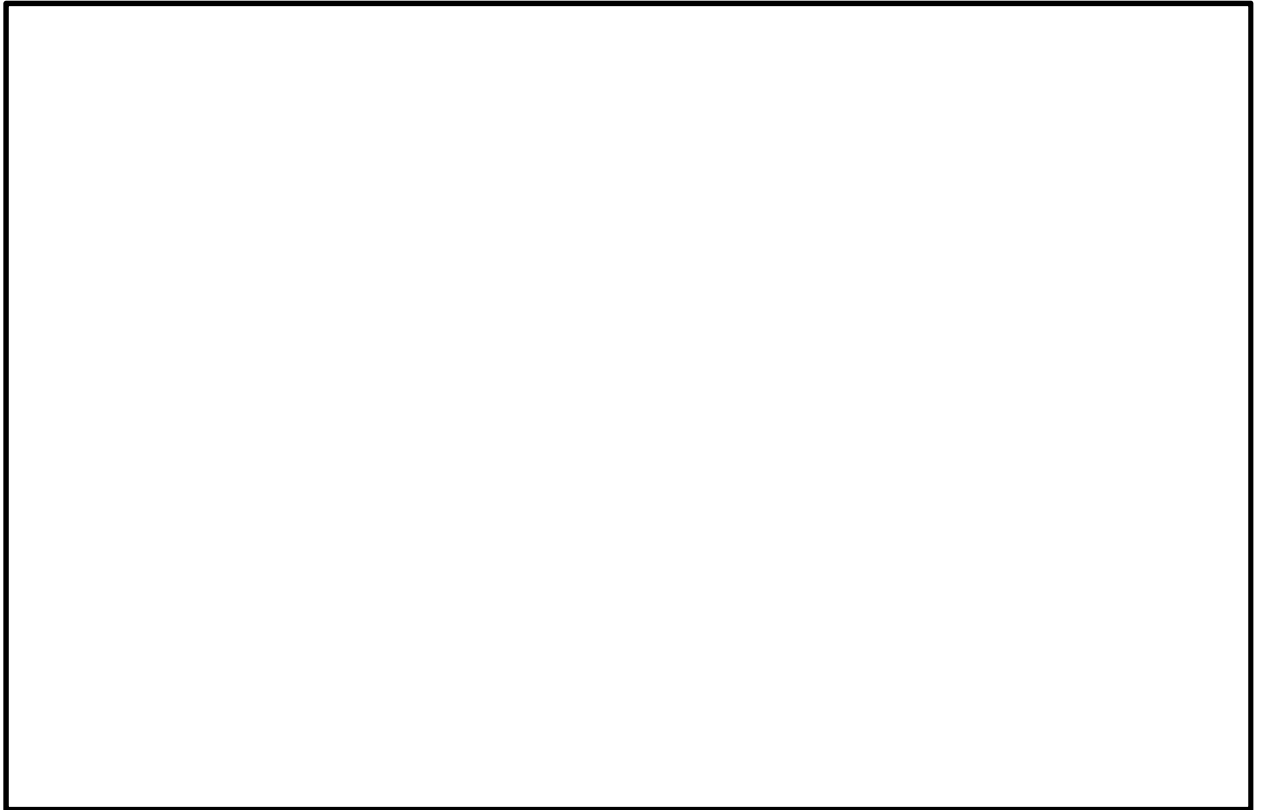


図 2-1 使用済燃料プールを含む原子炉建屋の設置位置

## 2.2 構造概要

原子炉建屋は、大きく区分して原子炉建屋原子炉棟（以下「原子炉棟」という。）、原子炉建屋付属棟（以下「付属棟」という。）及び基礎から構成される。

使用済燃料プールは原子炉棟の燃料取替床（EL. 46.50 m）付近に位置する鉄筋コンクリート構造物で、使用済燃料、制御棒及び使用済燃料輸送容器が収容される。使用済燃料プール内には、収容される機器の遮蔽及び冷却のため常時水が張られている。使用済燃料プール内面はステンレス鋼でライニングされており、漏水を防ぐと共に、保守、点検についても考慮されている。なお、J E A G 4 6 0 1 -1987に基づき、鋼製ライナは耐漏洩機能を、鉄筋コンクリート部分は支持機能を有する。

また、使用済燃料プールの反対側には、原子炉ウェルをはさんで燃料交換時に蒸気乾燥器と気水分離器を仮置きする蒸気乾燥器・気水分離器ピットがある。（以下、使用済燃料プール、原子炉ウェル及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットの全てを示す場合は、これを「プール部」という。）

使用済燃料プールはほぼ長方形で、その大きさは、内面寸法で12.192 m×10.363 m、壁厚2.154 m、底面スラブ厚1.599 mである。

使用済燃料プールを含む原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図2-2及び図2-3に、使用済燃料プール周りの概略平面図及び概略断面図を図2-4及び図2-5に示す。

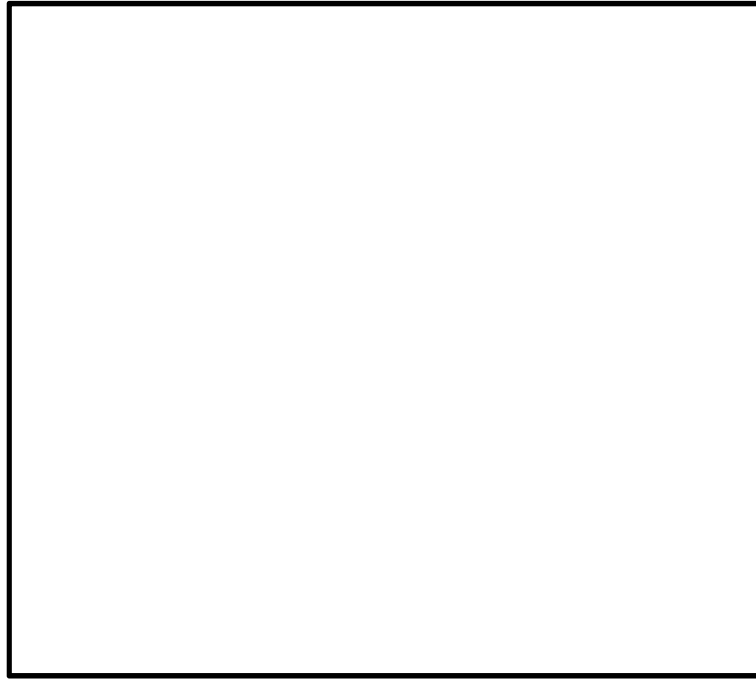


図 2-2 使用済燃料プールを含む原子炉建屋の概略平面図

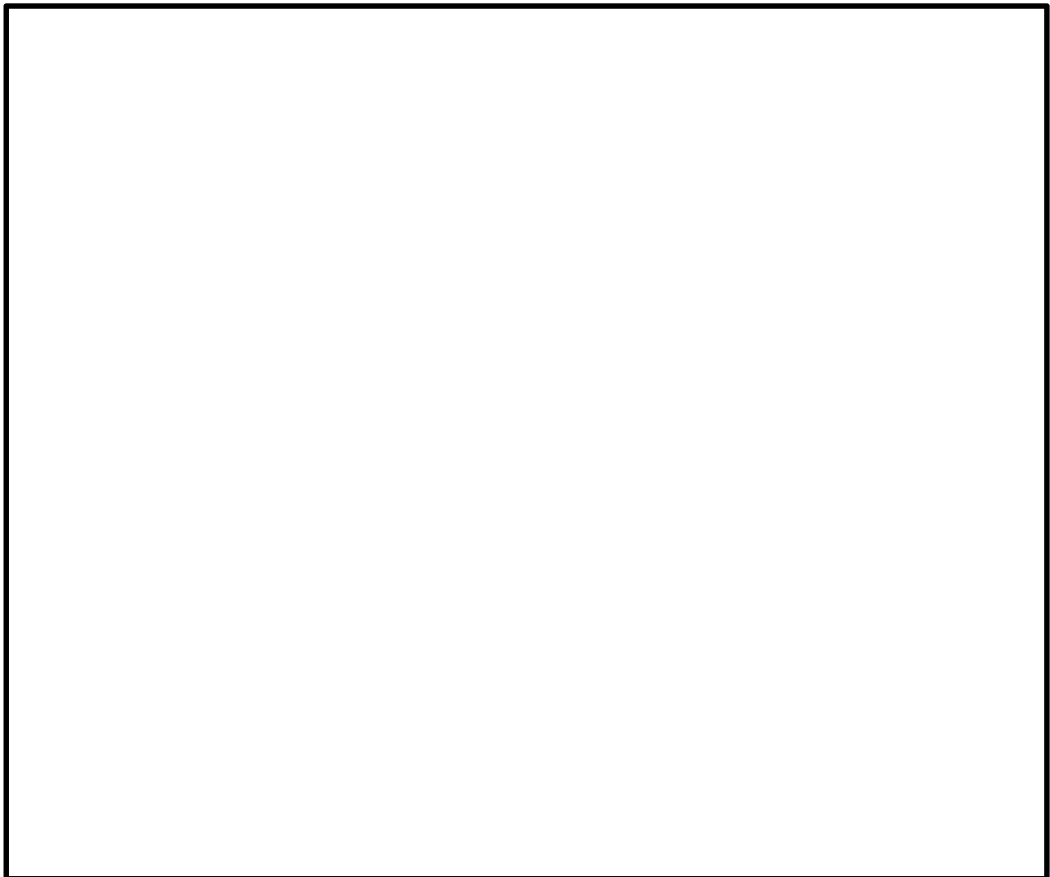


図 2-3 使用済燃料プールを含む原子炉建屋の概略断面図 (A-A 断面)

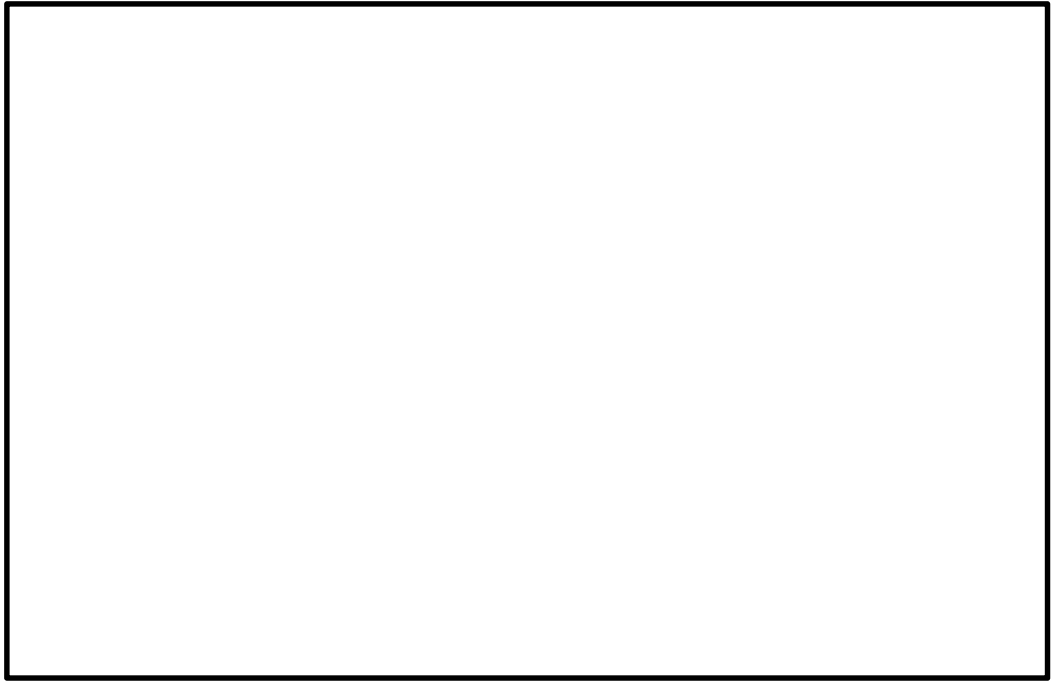


図 2-4 使用済燃料プール周りの概略平面図

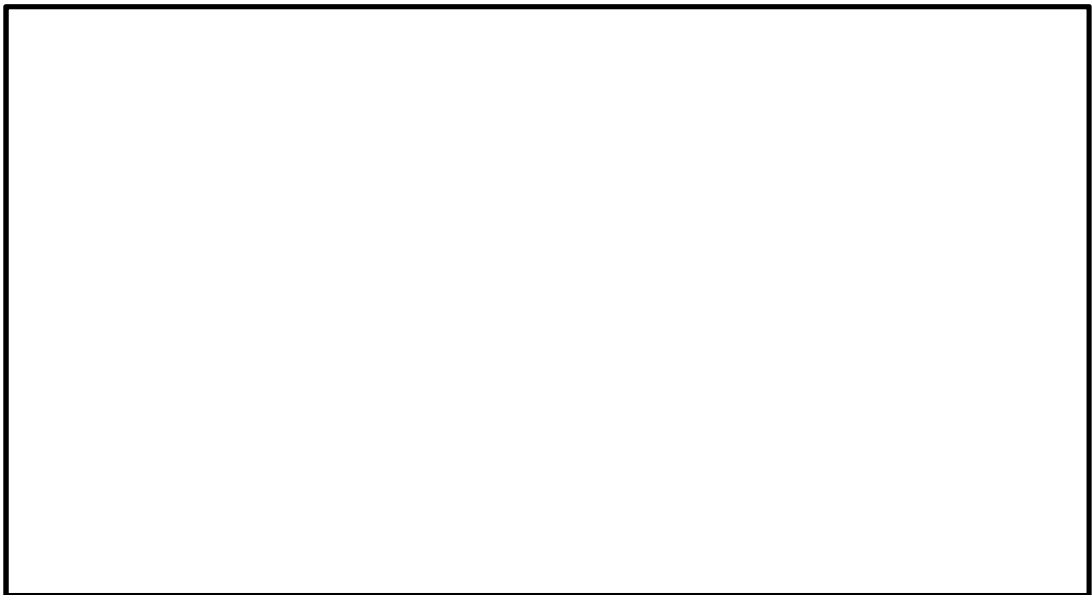


図 2-5 使用済燃料プール周りの概略断面図 (A-A 断面)

### 2.3 評価方針

使用済燃料プールは、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設」に、重大事故等対処施設においては「常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備」に分類される。

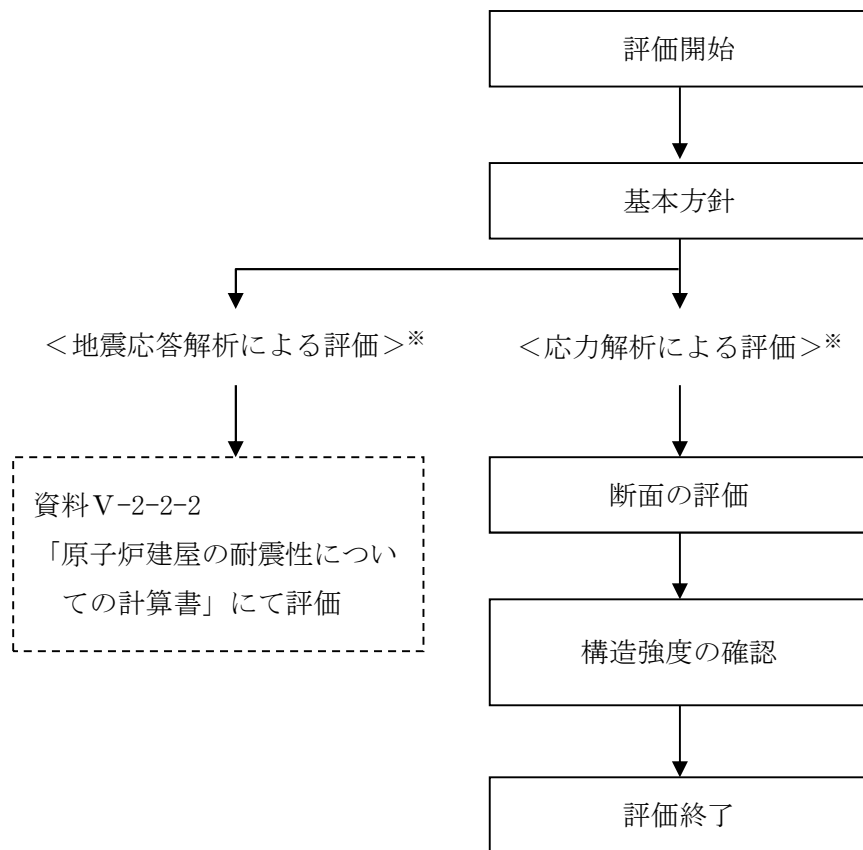
使用済燃料プールの設計基準対象施設としての評価においては、弾性設計用地震動 $S_d$ による地震力または静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対する評価（以下「 $S_d$ 地震時に対する評価」という。）及び基準地震動 $S_s$ による地震力に対する評価（以下「 $S_s$ 地震時に対する評価」という。）を行うこととし、それぞれの評価は、資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえたものとする。

使用済燃料プールの評価は、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、応力解析による評価において断面の評価を行うことで、使用済燃料プールの地震時の構造強度の確認を行う。なお、使用済燃料プールの地震時の構造強度の確認には、地震応答解析による評価においてせん断ひずみ及び保有水平耐力の評価が必要であるが、使用済燃料プールが原子炉建屋の一部であることを踏まえ、使用済燃料プールを含む原子炉建屋全体としての評価結果を資料V-2-2-2「原子炉建屋の耐震性についての計算書」に示すこととする。評価に当たっては、地盤物性のばらつきを考慮する。

また、重大事故等対処施設としての評価においては、 $S_s$ 地震時に対する評価を行う。ここで、使用済燃料プールでは、運転時、設計基準事故時及び重大事故等時の状態において、温度の条件が異なるが、コンクリートの温度が上昇した場合においても、コンクリートの圧縮強度の低下は認められず、剛性低下は認められるがその影響は小さいと考えられる（別紙1「鉄筋コンクリート構造物の重大事故等時の高温による影響（使用済燃料プール）」参照）こと、また、「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」では部材内の温度差及び拘束力により発生する熱応力は自己拘束的な応力であり十分な塑性変形能力がある場合は終局耐力に影響しないこととされていることから、重大事故等対処施設としての評価は、設計基準対象施設としての評価と同一となる。

使用済燃料プールの評価フローを図2-6に示す。





※：V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえた評価を行う。

図 2-6 使用済燃料プールの評価フロー

## 2.4 適用規格・基準等

使用済燃料プールの評価において、適用する規格、基準等を以下に示す。

- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補一 1984 ((社) 日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 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)
- ・ 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)
- ・ 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。)

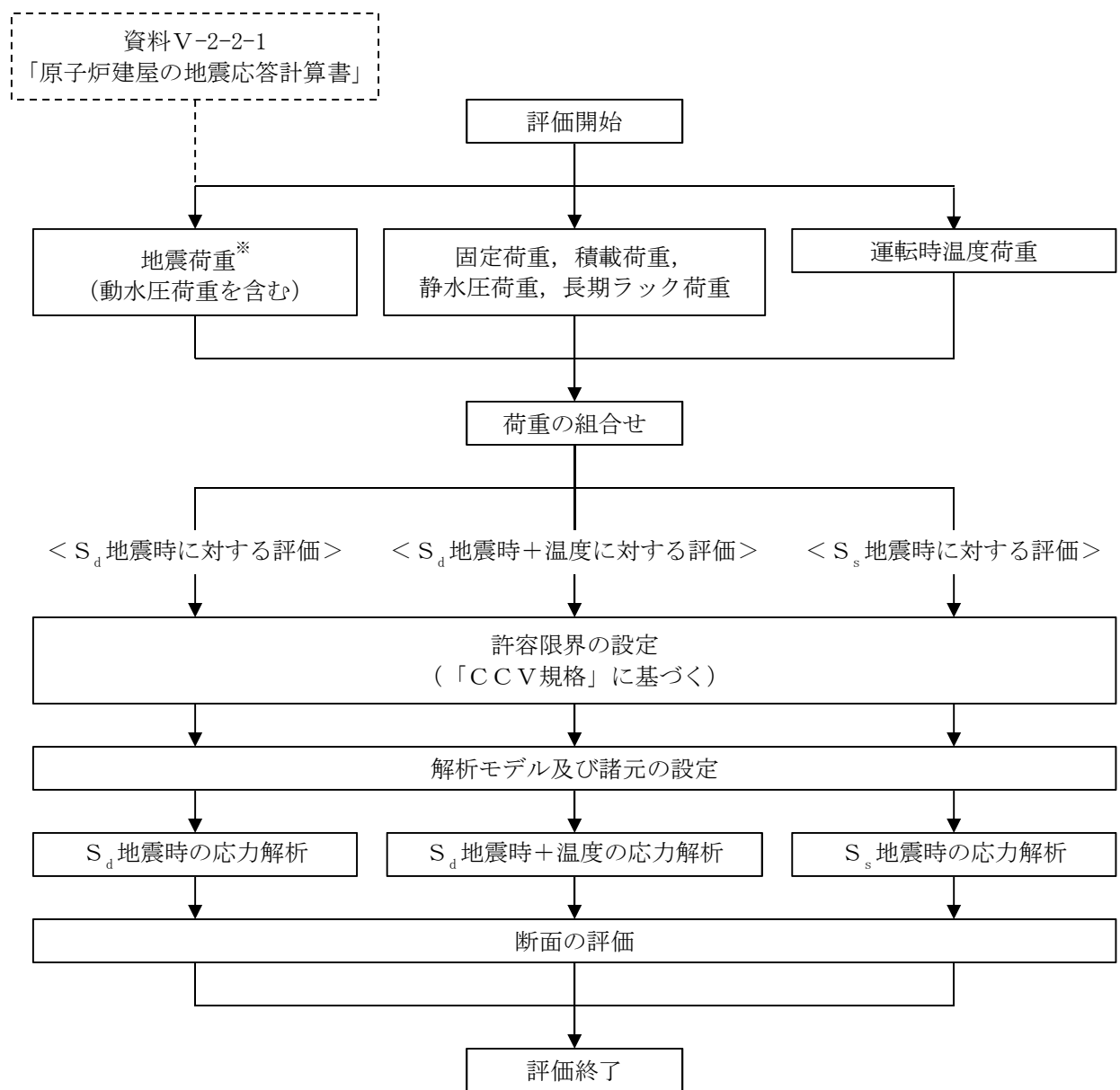
### 3. 応力解析による評価方法

#### 3.1 評価対象部位及び評価方針

使用済燃料プールの応力解析による評価対象部位は、プールを構成する壁及び底版とし、以下の方針に基づき評価を行う。

**S<sub>d</sub>地震時及びS<sub>s</sub>地震時**に対する評価は、3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析によることとし、地震力と地震力以外の荷重の組合せの結果、発生する応力が、「CCV規格」に基づき設定した許容限界を超えないことを確認する。

3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析に当たっては、資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」により得られた結果を用いて、荷重の組合せを行う。また、断面の評価については、地盤物性のばらつきを考慮した断面力に対して行うこととする。応力解析による評価フローを図3-1に示す。



※: 地盤物性のばらつきを考慮する。

図3-1 応力解析による評価フロー

### 3.2 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している荷重及び荷重の組合せを用いる。

### 3.2.1 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を表 3-1 に示す。

解析モデルの床に考慮する積載荷重を表 3-2 に示す。これらは、床の FEM 要素に面荷重として与える。また、プール部に連続する床が負担する荷重のうち、プール部に考慮する荷重を表 3-3 に示す。これらは、床が取りつくプール部の要素の一辺に線荷重として与える。

表 3-1 固定荷重 (床及び壁)

部位	使用済燃料プール (kN/m <sup>3</sup> )	蒸気乾燥器・気水分離器ピット (kN/m <sup>3</sup> )
床	24.0	24.0
壁	24.0	24.0

表 3-2 積載荷重 (床)

荷重	使用済燃料プール (kN/m <sup>2</sup> )	蒸気乾燥器・気水分離器ピット (kN/m <sup>2</sup> )	EL. 46.5 m 床 (kN/m <sup>2</sup> )	EL. 38.8 m 床 (kN/m <sup>2</sup> )
機器荷重	58.4	88.3	48.1 (積載荷重含む)	9.32 (積載荷重含む)
配管荷重	2.94	2.94	2.94	2.94
積載荷重	4.90	4.90	—	—

表 3-3 プール部に連続する床に作用する荷重

荷重	EL. 46.5 m 東側床	EL. 46.5 m 西側床	EL. 38.8 m 東側床	EL. 38.8 m 西側床
躯体自重 (kN/m <sup>2</sup> )	25.9	16.1	16.8	14.4
機器荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	48.1	48.1	9.32	9.32
配管荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	2.94	2.94	2.94	2.94
考慮する床の幅 (m)	2.15	2.30	2.15	2.30

(2) 静水圧荷重 ( $H_s$ )

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 3-4 に示す。なお、プール部の水位は通常運転時の状態を対象とし、使用済燃料プールが満水で蒸気乾燥器・気水分離器ピット及び原子炉ウェルには水が無い状態とする。

表 3-4 プールの静水圧荷重の算定条件

荷重	最大水位 (m)	プール底面レベル (m)	最大水深 (m)
使用済燃料プール	EL. +46. 195	EL. +34. 689	11. 506

(3) 長期ラック荷重 ( $R_0$ )

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を表 3-5 に示す。

表 3-5 長期ラック荷重

部位	鉛直方向荷重
使用済燃料プール	20.7 kN/m <sup>2</sup>

(4) 地震荷重 (S<sub>d</sub>, S<sub>s</sub>)

a. S<sub>d</sub>地震荷重 (S<sub>d</sub>)

S<sub>d</sub>地震荷重は、水平地震力、鉛直地震力、プール内の水のスロッシングによる動水圧（以下「水平地震力による動水圧荷重」という。）及びプール内の水の鉛直地震力による動水圧（以下「鉛直地震力による動水圧荷重」という。）により構成される。S<sub>d</sub>地震荷重のうち、水平地震力は弾性設計用地震動S<sub>d</sub>に対する地震応答解析より算定される動的地震力及び静的地震力に、鉛直地震力は弾性設計用地震動S<sub>d</sub>に対する地震応答解析より算定される動的地震力に、材料物性の不確かさ等を考慮した余裕を踏まえて設定する。

b. S<sub>s</sub>地震荷重 (S<sub>s</sub>)

S<sub>s</sub>地震荷重は、水平地震力、鉛直地震力、プール内の水のスロッシングによる動水圧（以下「水平地震力による動水圧荷重」という。）及びプール内の水の鉛直地震力による動水圧（以下「鉛直地震力による動水圧荷重」という。）により構成される。S<sub>s</sub>地震荷重のうち水平地震力及び鉛直地震力は、基準地震動S<sub>s</sub>に対する地震応答解析より算定される動的地震力に材料物性の不確かさ等を考慮した余裕を踏まえて設定する。

水平地震荷重（水平地震力による動水圧荷重を含む）と鉛直地震荷重（鉛直地震力による動水圧荷重を含む）の組合せは、組合せ係数法を用いて次のとおりとする。

- ①  $1.0 \times \text{水平地震荷重} + 0.4 \times \text{鉛直地震荷重}$
- ②  $0.4 \times \text{水平地震荷重} + 1.0 \times \text{鉛直地震荷重}$

(5) 運転時温度荷重 (T)

運転時温度荷重は、通常運転時の夏季及び冬季の通常運転時温度荷重を考慮するものとする。



### 3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

外力の状態		荷重の組合せ
短期	$S_d$ 地震時	$GP + H_s + R_0 + S_d$
	$S_d$ 地震時+温度	$GP + H_s + R_0 + S_d + T$
$S_s$ 地震時		$GP + H_s + R_0 + S_s$

GP : 固定荷重及び積載荷重

$H_s$  : 静水圧荷重

$R_0$  : 長期ラック荷重

$S_d$  :  $S_d$ 地震荷重

$S_s$  :  $S_s$ 地震荷重

T : 運転時温度荷重

### 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、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に記載の構造強度上の制限の方針に基づき、表3-7及び表3-8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3-9及び表3-10に、コンクリート及び鉄筋の許容ひずみを表3-11に示す。

表3-7 応力解析による評価における許容限界  
(設計基準対象施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 $S_s$	使用済燃料プール躯体	部材に生じる応力及びひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「CCV規格」における荷重状態Ⅳの許容値
		弾性設計用地震動 $S_d$ 及び静的地震力	使用済燃料プール躯体	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「CCV規格」における荷重状態Ⅲの許容値

表3-8 応力解析による評価における許容限界  
(重大事故等対処施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 $S_s$	使用済燃料プール躯体	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「CCV規格」における荷重状態Ⅳの許容値

表 3-9 コンクリートの許容応力度

荷重状態	Fc=22.1 (N/mm <sup>2</sup> )			
	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> )
Ⅲ	14.7	1.06	16.5	1.06
Ⅳ	18.7	— <sup>※3</sup>	18.7	— <sup>※3</sup>

※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。

※3：荷重状態Ⅳの場合は、荷重状態Ⅲの値とする。

表 3-10 鉄筋の許容応力度

荷重状態	SD345 <sup>※</sup>	
	引張及び圧縮 (N/mm <sup>2</sup> )	面外せん断 (N/mm <sup>2</sup> )
Ⅲ	345	345

※：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。

表 3-11 コンクリート及び鉄筋の許容ひずみ

荷重状態	コンクリート	鉄筋
	圧縮ひずみ	圧縮ひずみ及び引張ひずみ
Ⅳ	0.003	0.005

### 3.4 解析モデル及び諸元

#### 3.4.1 モデル化の基本方針

##### (1) 基本方針

応力解析は、3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析を実施する。解析には、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、付録15「計算機プログラム（解析コード）の概要・MSC NASTRAN」に示す。

解析モデルは、使用済燃料プール、原子炉ウェル及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットを一体としてモデル化する。また、プール部に連続する壁及び床については、これらのプール部に対する拘束効果を適切に反映した解析モデルとする。

解析モデル概要図を図3-2に示す。

##### (2) 使用要素

解析モデルに使用するFEM要素は、プール部についてはシェル要素とする。プール部の要素分割展開図を図3-3に示す。有限要素分割は四角形及び三角形で、この要素は均質等方性な板要素である。各要素には板の曲げと軸力を同時に考えるが、板の曲げには面外せん断変形の影響も考慮する。

##### (3) 境界条件

###### a. 固定荷重、動水圧荷重及び鉛直地震力作用時

応力解析モデルの原子炉ウェル及びI/W下端を固定とし、プール部との境界については、床及び壁の面内剛性による拘束効果を考慮する。

###### b. 水平地震力作用時

応力解析モデルの原子炉ウェル下端を固定とし、プール部との境界については、床及び壁の面内剛性による拘束効果と周辺構造物との間で生じる荷重の伝達を考慮する。

###### c. 温度荷重時

応力解析モデルの原子炉ウェル及びI/W下端について鉛直方向変位及び回転の拘束とし、プール部との境界については、床及び壁の面内剛性による拘束効果を考慮する。

節点数 : 1028  
要素数 : 1038

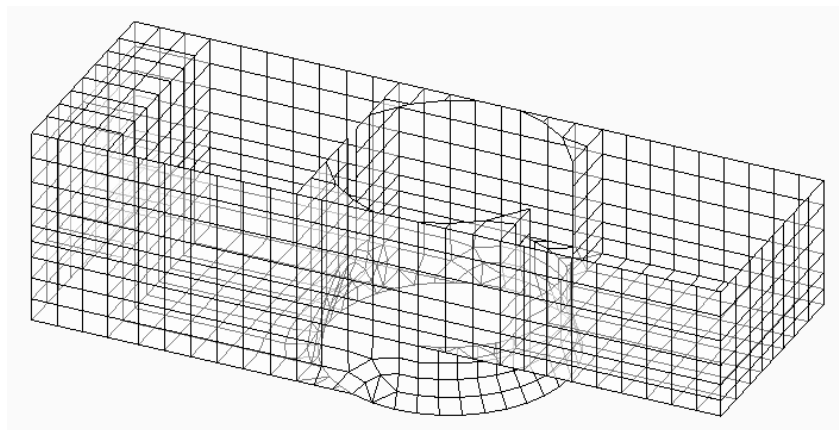


図 3-2 解析モデル概要図

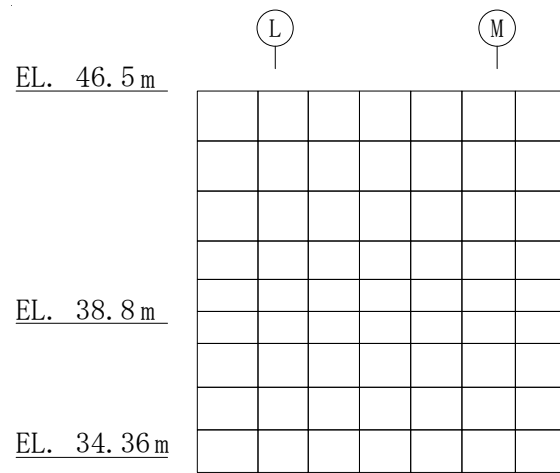
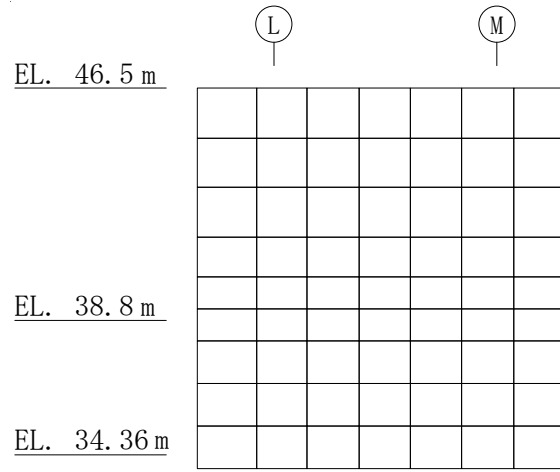
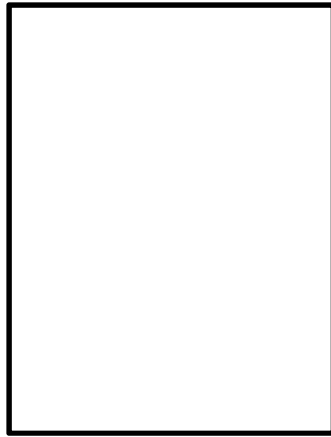
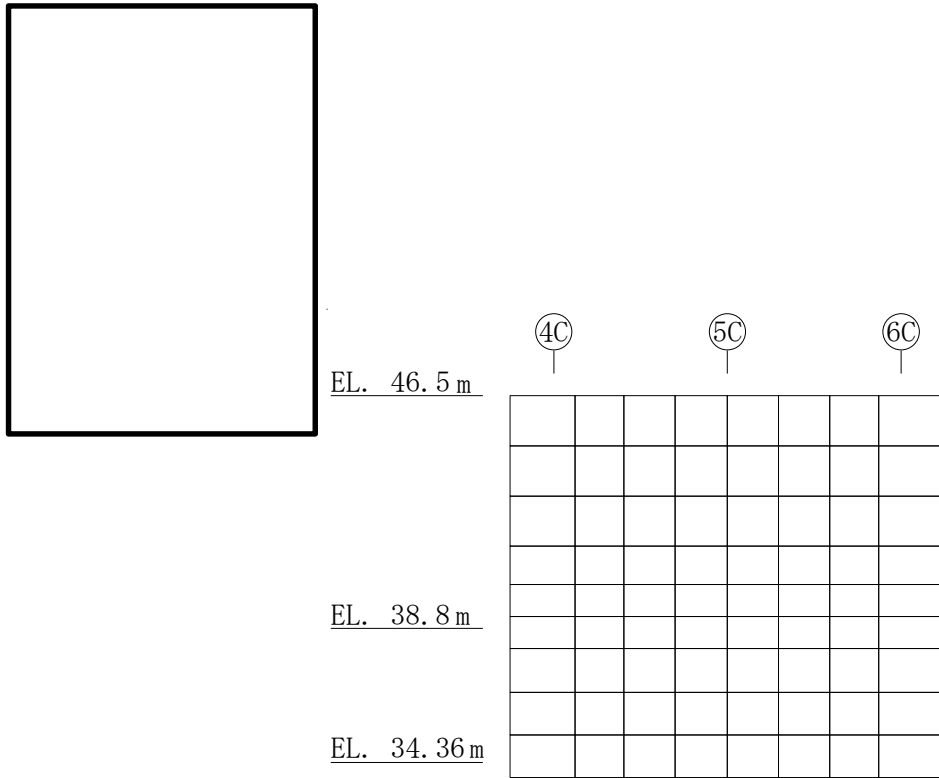
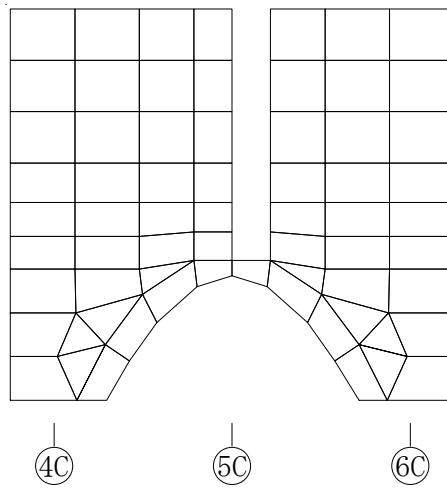


図 3-3 (1/3) プール部の要素分割展開図



北側プール壁 (C-C 断面)



南側ウェル壁 (D-D 断面)

図 3-3 (2/3) プール部の要素分割展開図

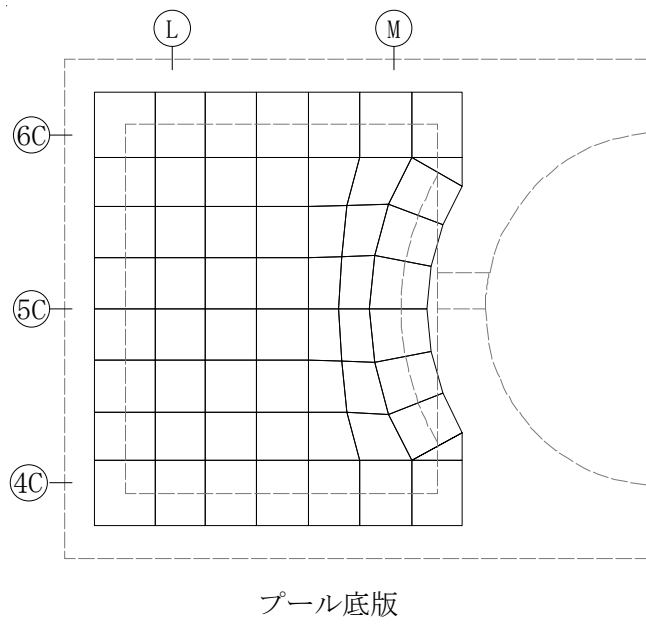


図 3-3 (3/3) プール部の要素分割展開図



### 3.4.2 解析諸元

コンクリート及び鉄筋の物性値を表 3-12 に示す。なお、鉄筋は SD345 (SD35) を使用しているが、弾性解析において鉄筋はモデル化しない。

表 3-12 (1/2) コンクリートの物性値

コンクリートの 設計基準強度 Fc (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング 係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$
22.1	$2.21 \times 10^4$	0.2

表 3-12 (2/2) 鉄筋の物性値

鉄筋の種類	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )
SD345 相当 (SD35)	$2.05 \times 10^5$

### 3.5 評価方法

#### 3.5.1 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

$S_d$ 地震時、 $S_d$ 地震時+温度及び $S_s$ 地震時の応力は、単独荷重による解析で求まる応力を組合せて求める。

単独荷重の記号を以下に示す。

GP	:	固定荷重及び積載荷重
$H_s$	:	静水圧荷重
$R_0$	:	長期ラック荷重
$S_{d_{WE}}^{**}$	:	$S_d$ 地震荷重 W→E方向 GPによる慣性力
$S_{d_{SN}}^{**}$	:	$S_d$ 地震荷重 S→N方向 GPによる慣性力
$S_{d_{DU}}^{**}$	:	$S_d$ 地震荷重 鉛直方向 GPによる慣性力
$H_{d_{WE}}^{**}$	:	$S_d$ 地震荷重 W→E方向 水平地震力による動水圧荷重
$H_{d_{SN}}^{**}$	:	$S_d$ 地震荷重 S→N方向 水平地震力による動水圧荷重
$H_{d_{DU}}^{**}$	:	$S_d$ 地震荷重 鉛直方向 鉛直地震力による動水圧荷重
$S_{S_{WE}}^{**}$	:	$S_s$ 地震荷重 W→E方向 GPによる慣性力
$S_{S_{SN}}^{**}$	:	$S_s$ 地震荷重 S→N方向 GPによる慣性力
$S_{S_{DU}}^{**}$	:	$S_s$ 地震荷重 鉛直方向 GPによる慣性力
$H_{S_{WE}}^{**}$	:	$S_s$ 地震荷重 W→E方向 水平地震力による動水圧荷重
$H_{S_{SN}}^{**}$	:	$S_s$ 地震荷重 S→N方向 水平地震力による動水圧荷重
$H_{S_{DU}}^{**}$	:	$S_s$ 地震荷重 鉛直方向 鉛直地震力による動水圧荷重
$T_{01}$	:	運転時温度荷重 (冬)
$T_{02}$	:	運転時温度荷重 (夏)

※：加力方向により絶対値の差異はないため、計算上の座標軸を基本として、EW方向はW→E方向加力、NS方向はS→N方向加力、鉛直方向は上向き加力を記載している。

(2) 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-13～表 3-15 に示す。

水平地震力と鉛直地震力による応力の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規定 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。

表 3-13 荷重の組合せケース (S<sub>d</sub>地震時)

組合せ係数	鉛直方向	水平方向	ケース No.	荷重の組合せケース
水平 1.0 鉛直 0.4	上	W→E	1-1	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{WE}} + 1.0H_{d_{WE}} + 0.4S_{d_{DU}}$
		E→W	1-2	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{WE}} - 1.0H_{d_{WE}} + 0.4S_{d_{DU}}$
		S→N	1-3	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{SN}} + 1.0H_{d_{SN}} + 0.4S_{d_{DU}}$
		N→S	1-4	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{SN}} - 1.0H_{d_{SN}} + 0.4S_{d_{DU}}$
	下	W→E	1-5	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{WE}} + 1.0H_{d_{WE}} - 0.4S_{d_{DU}}$
		E→W	1-6	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{WE}} - 1.0H_{d_{WE}} - 0.4S_{d_{DU}}$
		S→N	1-7	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{SN}} + 1.0H_{d_{SN}} - 0.4S_{d_{DU}}$
		N→S	1-8	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{SN}} - 1.0H_{d_{SN}} - 0.4S_{d_{DU}}$
水平 0.4 鉛直 1.0	上	W→E	1-9	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{WE}} + 0.4H_{d_{WE}} + 1.0S_{d_{DU}}$
		E→W	1-10	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{WE}} - 0.4H_{d_{WE}} + 1.0S_{d_{DU}}$
		S→N	1-11	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{SN}} + 0.4H_{d_{SN}} + 1.0S_{d_{DU}}$
		N→S	1-12	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{SN}} - 0.4H_{d_{SN}} + 1.0S_{d_{DU}}$
	下	W→E	1-13	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{WE}} + 0.4H_{d_{WE}} - 1.0S_{d_{DU}}$
		E→W	1-14	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{WE}} - 0.4H_{d_{WE}} - 1.0S_{d_{DU}}$
		S→N	1-15	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{SN}} + 0.4H_{d_{SN}} - 1.0S_{d_{DU}}$
		N→S	1-16	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{SN}} - 0.4H_{d_{SN}} - 1.0S_{d_{DU}}$

表 3-14 荷重の組合せケース (S<sub>d</sub>地震時+温度)

	組合せ 係数	鉛直 方向	水平 方向	ケース No.	荷重の組合せケース
冬	水平 1.0 鉛直 0.4	上	W→E	2-1	$GP+H_s+R_0+1.0S_{d_{WE}}+1.0H_{d_{WE}}+0.4S_{d_{DU}}+T_{01}$
			E→W	2-2	$GP+H_s+R_0-1.0S_{d_{WE}}-1.0H_{d_{WE}}+0.4S_{d_{DU}}+T_{01}$
			S→N	2-3	$GP+H_s+R_0+1.0S_{d_{SN}}+1.0H_{d_{SN}}+0.4S_{d_{DU}}+T_{01}$
			N→S	2-4	$GP+H_s+R_0-1.0S_{d_{SN}}-1.0H_{d_{SN}}+0.4S_{d_{DU}}+T_{01}$
		下	W→E	2-5	$GP+H_s+R_0+1.0S_{d_{WE}}+1.0H_{d_{WE}}-0.4S_{d_{DU}}+T_{01}$
			E→W	2-6	$GP+H_s+R_0-1.0S_{d_{WE}}-1.0H_{d_{WE}}-0.4S_{d_{DU}}+T_{01}$
			S→N	2-7	$GP+H_s+R_0+1.0S_{d_{SN}}+1.0H_{d_{SN}}-0.4S_{d_{DU}}+T_{01}$
			N→S	2-8	$GP+H_s+R_0-1.0S_{d_{SN}}-1.0H_{d_{SN}}-0.4S_{d_{DU}}+T_{01}$
	水平 0.4 鉛直 1.0	上	W→E	2-9	$GP+H_s+R_0+0.4S_{d_{WE}}+0.4H_{d_{WE}}+1.0S_{d_{DU}}+T_{01}$
			E→W	2-10	$GP+H_s+R_0-0.4S_{d_{WE}}-0.4H_{d_{WE}}+1.0S_{d_{DU}}+T_{01}$
			S→N	2-11	$GP+H_s+R_0+0.4S_{d_{SN}}+0.4H_{d_{SN}}+1.0S_{d_{DU}}+T_{01}$
			N→S	2-12	$GP+H_s+R_0-0.4S_{d_{SN}}-0.4H_{d_{SN}}+1.0S_{d_{DU}}+T_{01}$
		下	W→E	2-13	$GP+H_s+R_0+0.4S_{d_{WE}}+0.4H_{d_{WE}}-1.0S_{d_{DU}}+T_{01}$
			E→W	2-14	$GP+H_s+R_0-0.4S_{d_{WE}}-0.4H_{d_{WE}}-1.0S_{d_{DU}}+T_{01}$
			S→N	2-15	$GP+H_s+R_0+0.4S_{d_{SN}}+0.4H_{d_{SN}}-1.0S_{d_{DU}}+T_{01}$
			N→S	2-16	$GP+H_s+R_0-0.4S_{d_{SN}}-0.4H_{d_{SN}}-1.0S_{d_{DU}}+T_{01}$
夏	水平 1.0 鉛直 0.4	上	W→E	2-17	$GP+H_s+R_0+1.0S_{d_{WE}}+1.0H_{d_{WE}}+0.4S_{d_{DU}}+T_{02}$
			E→W	2-18	$GP+H_s+R_0-1.0S_{d_{WE}}-1.0H_{d_{WE}}+0.4S_{d_{DU}}+T_{02}$
			S→N	2-19	$GP+H_s+R_0+1.0S_{d_{SN}}+1.0H_{d_{SN}}+0.4S_{d_{DU}}+T_{02}$
			N→S	2-20	$GP+H_s+R_0-1.0S_{d_{SN}}-1.0H_{d_{SN}}+0.4S_{d_{DU}}+T_{02}$
		下	W→E	2-21	$GP+H_s+R_0+1.0S_{d_{WE}}+1.0H_{d_{WE}}-0.4S_{d_{DU}}+T_{02}$
			E→W	2-22	$GP+H_s+R_0-1.0S_{d_{WE}}-1.0H_{d_{WE}}-0.4S_{d_{DU}}+T_{02}$
			S→N	2-23	$GP+H_s+R_0+1.0S_{d_{SN}}+1.0H_{d_{SN}}-0.4S_{d_{DU}}+T_{02}$
			N→S	2-24	$GP+H_s+R_0-1.0S_{d_{SN}}-1.0H_{d_{SN}}-0.4S_{d_{DU}}+T_{02}$
	水平 0.4 鉛直 1.0	上	W→E	2-25	$GP+H_s+R_0+0.4S_{d_{WE}}+0.4H_{d_{WE}}+1.0S_{d_{DU}}+T_{02}$
			E→W	2-26	$GP+H_s+R_0-0.4S_{d_{WE}}-0.4H_{d_{WE}}+1.0S_{d_{DU}}+T_{02}$
			S→N	2-27	$GP+H_s+R_0+0.4S_{d_{SN}}+0.4H_{d_{SN}}+1.0S_{d_{DU}}+T_{02}$
			N→S	2-28	$GP+H_s+R_0-0.4S_{d_{SN}}-0.4H_{d_{SN}}+1.0S_{d_{DU}}+T_{02}$
		下	W→E	2-29	$GP+H_s+R_0+0.4S_{d_{WE}}+0.4H_{d_{WE}}-1.0S_{d_{DU}}+T_{02}$
			E→W	2-30	$GP+H_s+R_0-0.4S_{d_{WE}}-0.4H_{d_{WE}}-1.0S_{d_{DU}}+T_{02}$
			S→N	2-31	$GP+H_s+R_0+0.4S_{d_{SN}}+0.4H_{d_{SN}}-1.0S_{d_{DU}}+T_{02}$
			N→S	2-32	$GP+H_s+R_0-0.4S_{d_{SN}}-0.4H_{d_{SN}}-1.0S_{d_{DU}}+T_{02}$

表 3-15 荷重の組合せケース (S<sub>s</sub>地震時)

組合せ 係数	鉛直 方向	水平 方向	ケース No.	荷重の組合せケース
水平 1.0 鉛直 0.4	上	W→E	3-1	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SWE} + 1.0H_{SWE} + 0.4S_{SDU}$
		E→W	3-2	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SWE} - 1.0H_{SWE} + 0.4S_{SDU}$
		S→N	3-3	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SSN} + 1.0H_{SSN} + 0.4S_{SDU}$
		N→S	3-4	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SSN} - 1.0H_{SSN} + 0.4S_{SDU}$
	下	W→E	3-5	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SWE} + 1.0H_{SWE} - 0.4S_{SDU}$
		E→W	3-6	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SWE} - 1.0H_{SWE} - 0.4S_{SDU}$
		S→N	3-7	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SSN} + 1.0H_{SSN} - 0.4S_{SDU}$
		N→S	3-8	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SSN} - 1.0H_{SSN} - 0.4S_{SDU}$
水平 0.4 鉛直 1.0	上	W→E	3-9	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SWE} + 0.4H_{SWE} + 1.0S_{SDU}$
		E→W	3-10	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SWE} - 0.4H_{SWE} + 1.0S_{SDU}$
		S→N	3-11	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SSN} + 0.4H_{SSN} + 1.0S_{SDU}$
		N→S	3-12	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SSN} - 0.4H_{SSN} + 1.0S_{SDU}$
	下	W→E	3-13	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SWE} + 0.4H_{SWE} - 1.0S_{SDU}$
		E→W	3-14	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SWE} - 0.4H_{SWE} - 1.0S_{SDU}$
		S→N	3-15	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SSN} + 0.4H_{SSN} - 1.0S_{SDU}$
		N→S	3-16	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SSN} - 0.4H_{SSN} - 1.0S_{SDU}$

### (3) 荷重の入力方法

#### a. 固定荷重及び積載荷重

固定荷重は、プール部の要素に作用する物体力として入力する。また、表 3-2 示す積載荷重は面荷重として、表 3-3 に示す連続する床の荷重は線荷重として入力する。

#### b. 静水圧荷重

表 3-4 に示す静水圧荷重を、底版に面荷重として、壁に面荷重及び節点荷重として入力する。

#### c. 長期ラック荷重

表 3-5 に示す長期ラック荷重を使用済燃料プール底版に面荷重として入力する。

#### d. $S_s$ 地震荷重

##### (a) 固定・積載荷重による慣性力

水平地震力及び鉛直地震力は、**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及び静的地震力並びに**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に地盤物性のばらつき等を考慮した余裕を踏まえて設定する。

NS 方向の水平地震力は、プール部の壁が負担するせん断力をプール部の壁の内部ボックス壁端部に線荷重として入力する。EW 方向の水平地震力は、内部ボックス壁の回転変形をプール壁の内部ボックス壁端部の節点に変形量として入力する。

鉛直地震力は、**弾性設計用地震動  $S_d$  及び**基準地震動  $S_s$  により算出される動的地震力を包絡したプール部における鉛直震度とし、固定荷重及び機器荷重、配管荷重及び積載荷重に乗じて入力する。

(b) 動水圧荷重

水平地震力による動水圧荷重は、各弾性設計用地震動  $S_d$  及び各基準地震動  $S_s$  による応答解析結果から衝撃圧及び揺動圧を算定し、それらのうち最大となるケースの評価値に対してばらつきを考慮した割増係数を乗じ、プール部の壁及び床の各要素に面荷重として入力する。水平地震力による動水圧荷重を図 3-4 及び図 3-5 に示す。

鉛直地震力による動水圧荷重は、弾性設計用地震動  $S_d$  及び基準地震動  $S_s$  により算出される動的地震力を包絡したプール部における鉛直震度とし、静水圧荷重に乘じ面荷重として入力する。鉛直地震力による動水圧荷重の算定に用いる鉛直震度を表 3-16 及び表 3-17 に示す。

表 3-16  $S_d$ 地震時 鉛直地震力による動水圧荷重の算定に用いる鉛直震度

質点番号	基本 <sup>※1</sup> (cm/s <sup>2</sup> )	地盤 + $\sigma$ <sup>※2</sup> (cm/s <sup>2</sup> )	地盤 - $\sigma$ <sup>※2</sup> (cm/s <sup>2</sup> )	最大値 (cm/s <sup>2</sup> )	鉛直震度
3	435	474	404	474	0.49
4	414	451	384	451	
5	383	416	353	416	

※1:  $S_d-D1$ ,  $S_d-11$ ,  $S_d-12$ ,  $S_d-13$ ,  $S_d-14$ ,  $S_d-21$ ,  $S_d-22$  及び  $S_d-31$  の最大値

※2:  $S_d-D1$ ,  $S_d-21$ ,  $S_d-22$  及び  $S_d-31$  の最大値

表 3-17  $S_s$ 地震時 鉛直地震力による動水圧荷重の算定に用いる鉛直震度

質点番号	基本 <sup>※1</sup> (cm/s <sup>2</sup> )	地盤 + $\sigma$ <sup>※2</sup> (cm/s <sup>2</sup> )	地盤 - $\sigma$ <sup>※2</sup> (cm/s <sup>2</sup> )	最大値 (cm/s <sup>2</sup> )	鉛直震度
3	823	913	729	913	0.94
4	785	869	693	869	
5	726	799	640	799	

※1:  $S_s-D1$ ,  $S_s-11$ ,  $S_s-12$ ,  $S_s-13$ ,  $S_s-14$ ,  $S_s-21$ ,  $S_s-22$  及び  $S_s-31$  の最大値

※2:  $S_s-D1$ ,  $S_s-21$ ,  $S_s-22$  及び  $S_s-31$  の最大値

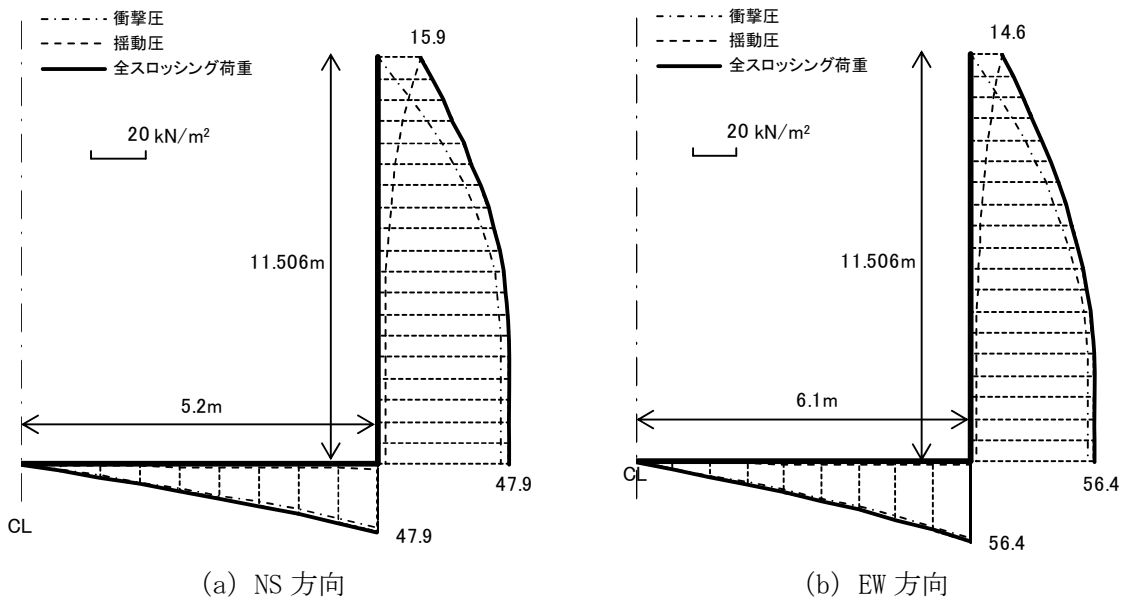


図 3-4  $S_d$ 地震時 水平地震力による動水圧荷重

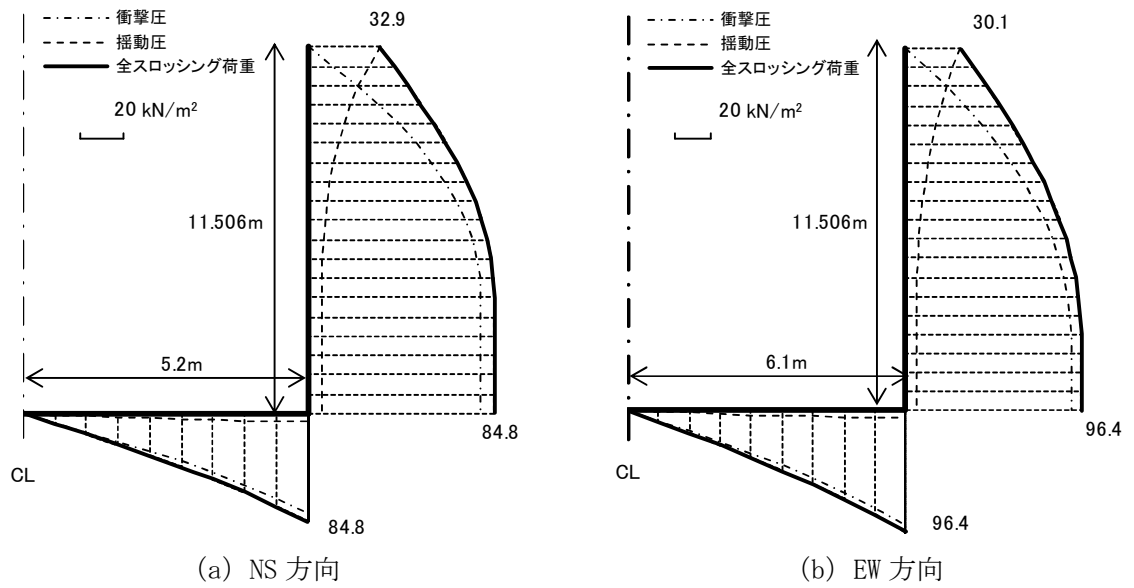


図 3-5  $S_s$ 地震時 水平地震力による動水圧荷重

e. 運転時温度荷重

運転時温度荷重は、シェル要素に対し、要素の平均温度と温度勾配を入力する。



### 3.5.2 断面の評価方法

#### (1) $S_d$ 地震時及び $S_d$ 地震時+温度

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。

##### a. 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3-9及び表3-10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3-6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、「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。

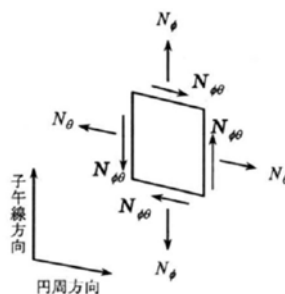


図3-6 膜力と面内せん断力の関係図

### 【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0.75倍の値を超えないことを確認する。

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

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

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3-10に示す値

$F_c$  : コンクリートの設計基準強度 (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0.75倍の値を超えないことを確認する。

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

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

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、 $F_c$ 及び $f_y$ は、表 3-9 及び表 3-10 による。

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。

b. 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 3-9 及び表 3-10 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。

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

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)

$c f_s$  : コンクリートの許容せん断応力度で、表 3-9 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、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)

$wf_t$  : 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 3-10 に示す値 (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha$  : 割増係数であり, 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)  $S_s$ 地震時

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。

## a. 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ひずみ、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ひずみの算定においては、「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-3511.2に基づき、表3-11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3-6に示す。ここで、鉄筋のひずみ算定において、発生応力が鉄筋の降伏応力度を超える場合は、エネルギー一定則に基づきひずみを算定する。

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を算定する際のコンクリートと鉄筋の応力度及びひずみ関係図を図3-7に示す。

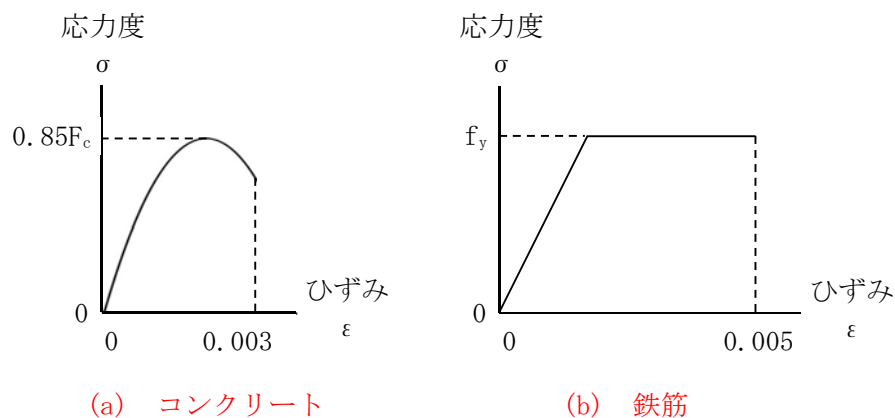


図3-7 コンクリートと鉄筋の応力度及びひずみ関係図

### 【軸力に対する断面の評価方法】

軸力による圧縮応力度については、「CCV規格」のCVE-3511.3に基づきコンクリートの設計基準強度の2/3倍の値を超えないことを確認する。

### 【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-3512.2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を超えないことを確認する。

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

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

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3-9に示す荷重状態Ⅲの値

$F_c$  : コンクリートの設計基準強度 (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-3513.2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を超えないことを確認する。

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

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

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、 $F_c$ 及び $f_y$ は、表 3-9 及び表 3-10 の荷重状態Ⅲによる。

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。

#### b. 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ひずみ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ひずみの算定については、「CCV規格」の CVE-3521.2 に基づき、表 3-11 に示す各許容値を超えないことを確認する。ここで、鉄筋のひずみ算定において、発生応力が鉄筋の降伏応力度を超える場合は、エネルギー一定則に基づきひずみを算定する。

##### 【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。

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

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)
- $c f_s$  : コンクリートの許容せん断応力度で, 表 3-9 に示す値 (N/mm<sup>2</sup>)
- p<sub>w</sub>** : 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, 0.012 を超える場合は 0.012 とする)
- $$p_w = a_w / (b \cdot x)$$
- a<sub>w</sub>** : 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)
- $w f_t$  : 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 3-10 に示す荷重状態Ⅲの値 (N/mm<sup>2</sup>)
- α** : 割増係数であり, 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)



#### 4. 評価結果

「3.5.2 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。また、使用済燃料プールの配筋一覧を表4-1に示す。

##### (1) $S_d$ 地震時及び $S_d$ 地震時+温度

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。

###### a. 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。

###### b. 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4-1及び図4-2に、評価結果を表4-2及び表4-3に示す。

$S_d$ 地震時において、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。

##### (2) $S_s$ 地震時

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。

###### a. 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ひずみ、軸力による圧縮応力度、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。

###### b. 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ひずみ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4-3に、評価結果を表4-4に示す。

S<sub>s</sub>地震時において、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ひずみ、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。

表 4-1 使用済燃料プールの配筋一覧

(a) 壁

部位	レベル EL. (m)	壁厚 (cm)	配筋	
			縦筋	横筋
北側壁	+34.689～ +39.191	200	D35@200 2段 内 D29@200 2段 外	D29@200 2段 内外共
	+39.191～ +46.5	200	D29@200 2段 内外共	D29@200 2段 内外共
東側壁	+34.689～ +39.191	215.4	D35@200 2段 内 D29@200 2段 外	D29@200 2段 内外共
	+39.191～ +46.5	215.4	D29@200 2段 内外共	D29@200 2段 内外共
南側壁	+34.689～ +46.5	157.6	D38@200 2段 内外共	D38@200 2段 内外共
西側壁	+34.689～ +41.547	215.4	D29@200 2段 内外共	D29@200 2段 内外共
	+41.547～ +43.198	137.2	D29@200 2段 内外共	D29@200 2段 内外共
	+43.198～ +46.5	137.2	D29@200 2段 内外共	D29@150 2段 内外共

(b) 底版

部位	壁厚 (cm)	配筋	
		EW 方向	NS 方向
底版	159.9	D38@200 2段 内外共	D38@200 2段 内外共

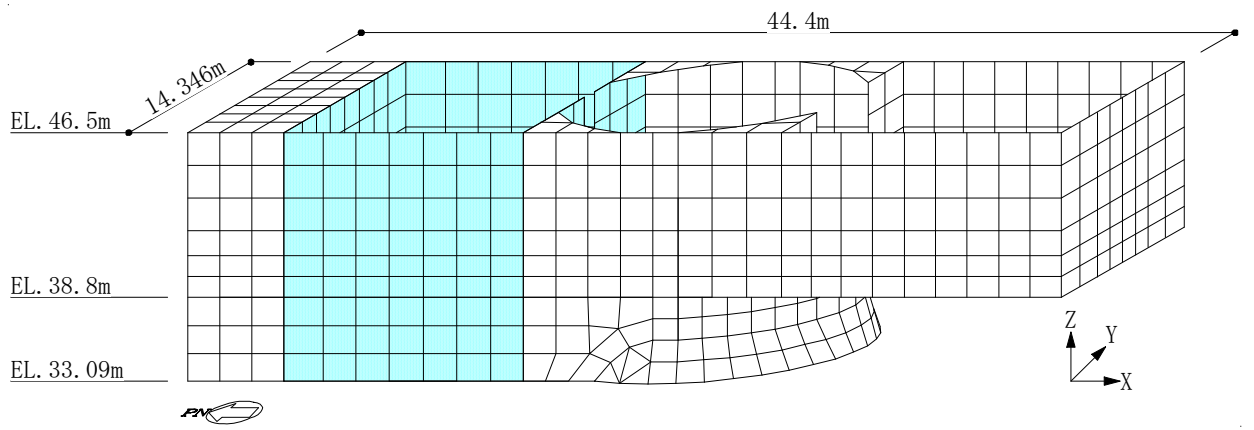
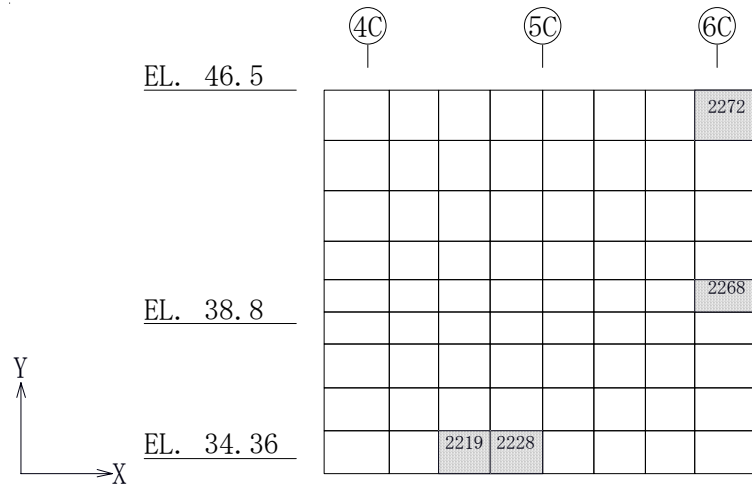
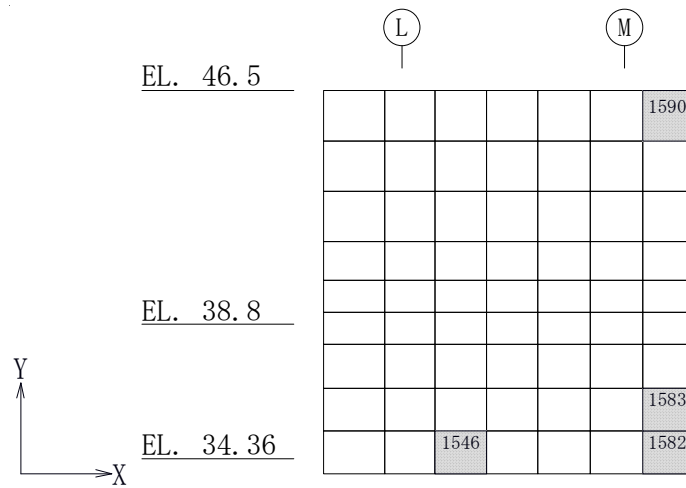


図 4-1 (1/4) 結果を記載する要素の位置 S<sub>a</sub>地震時

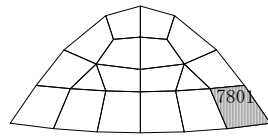
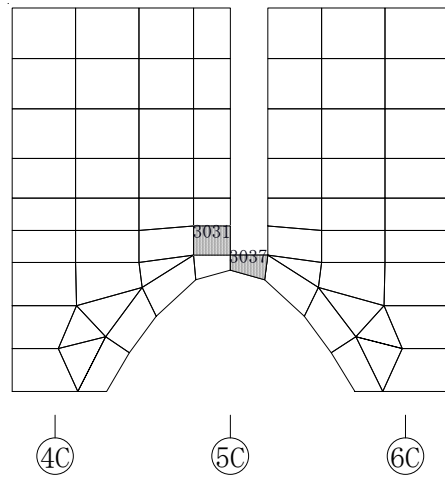


(a) 北側壁

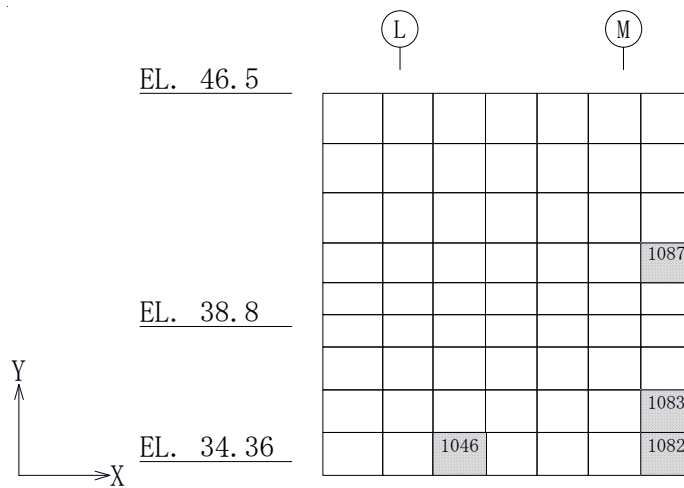


(b) 東側壁

図 4-1 (2/4) 結果を記載する要素の位置 S<sub>a</sub>地震時



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 4-1 (3/4) 結果を記載する要素の位置 S<sub>a</sub>地震時

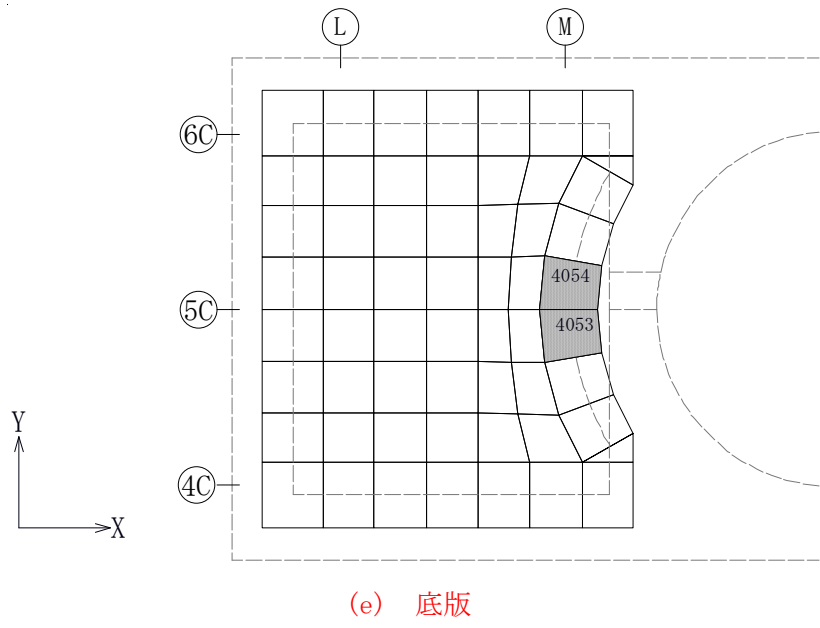
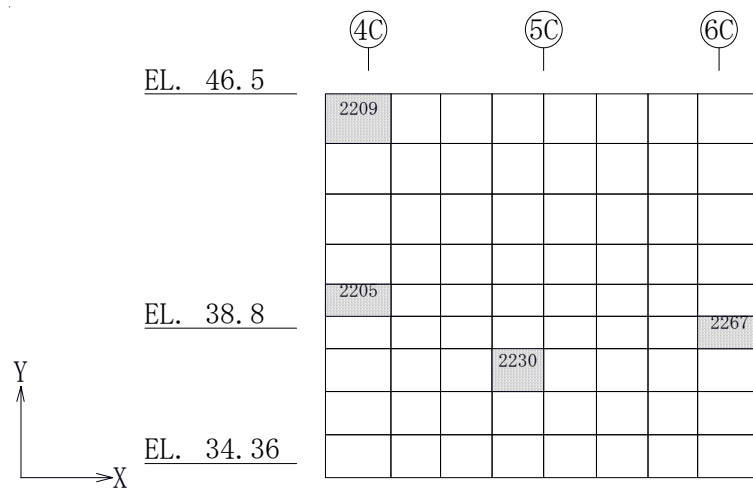
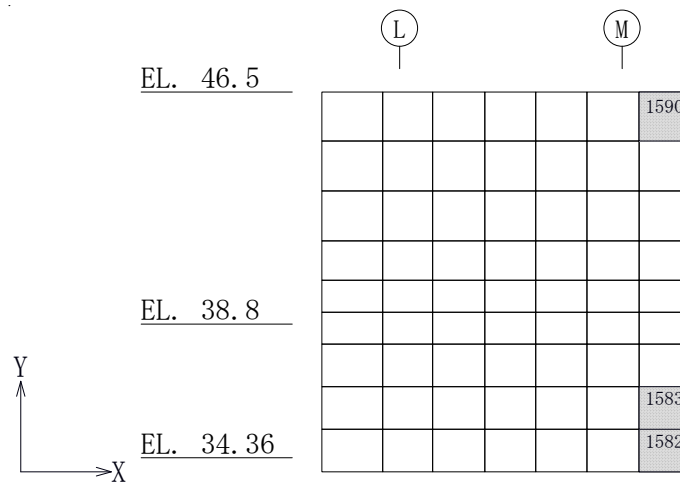


図 4-1 (4/4) 結果を記載する要素の位置 S<sub>a</sub>地震時



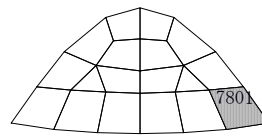
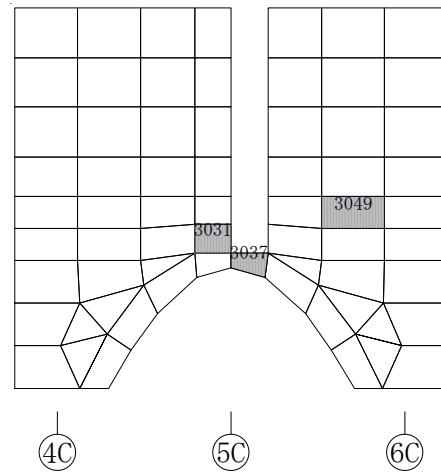
(a) 北側壁



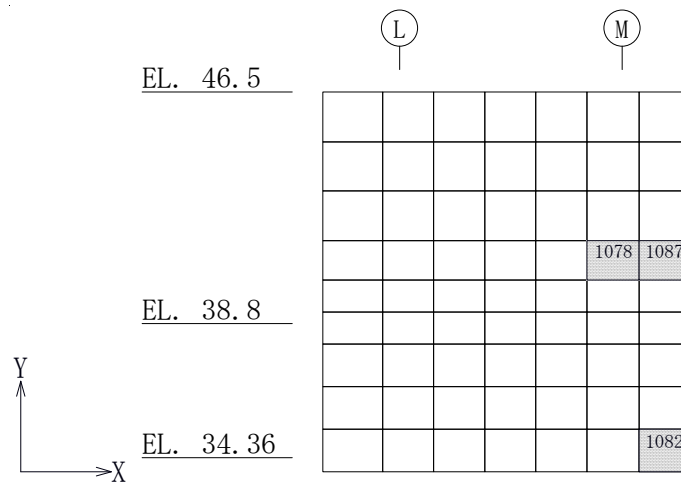
(b) 東側壁

図 4-2 (1/3) 結果を記載する要素の位置 S<sub>d</sub>地震時+温度





(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 4-2 (2/3) 結果を記載する要素の位置 S<sub>d</sub>地震時+温度

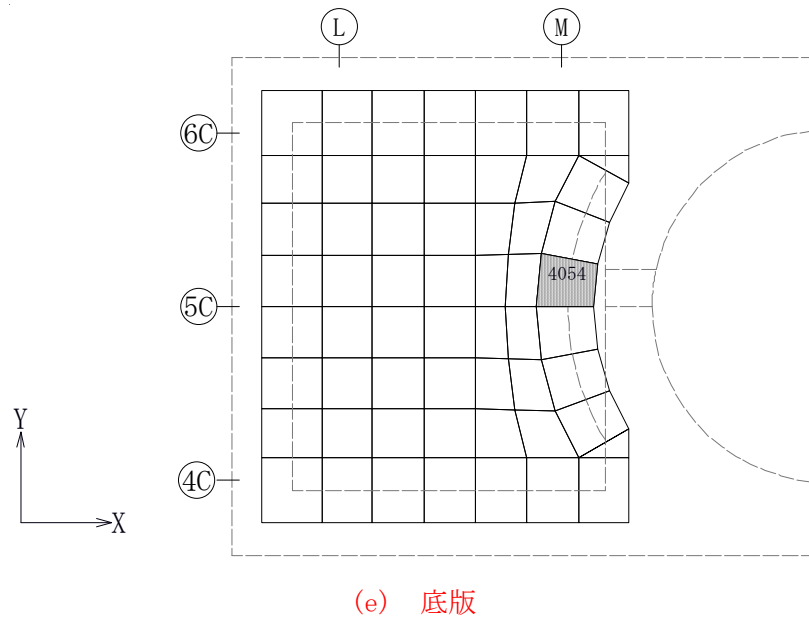
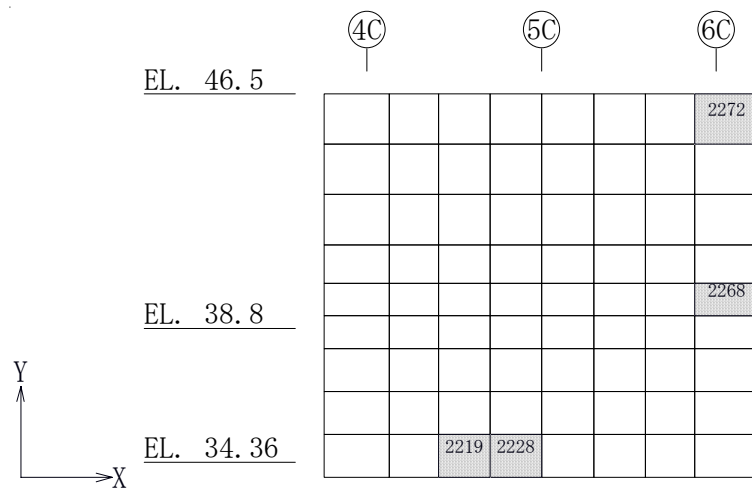
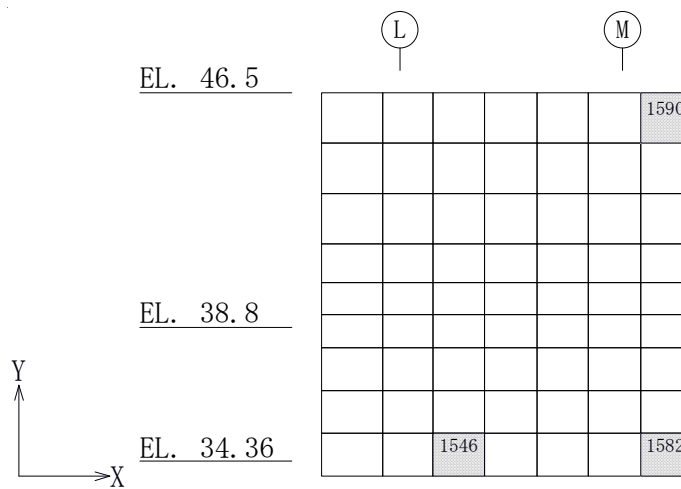


図 4-2 (3/3) 結果を記載する要素の位置 S<sub>d</sub>地震時+温度

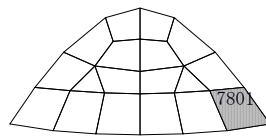
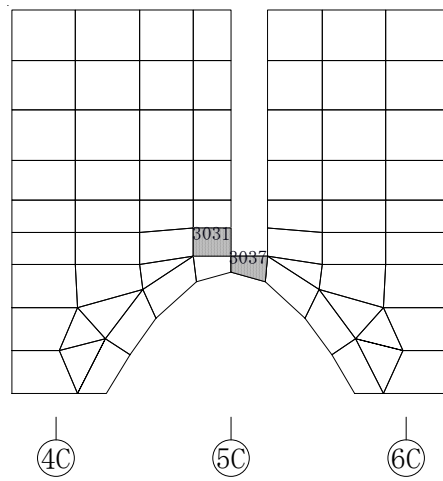


(a) 北側壁

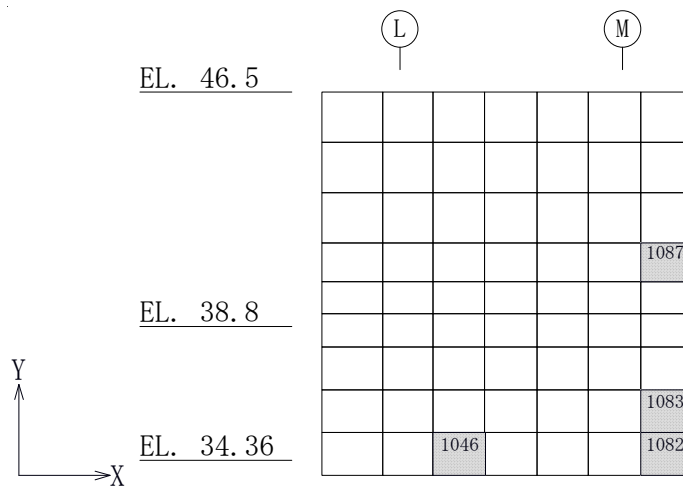


(b) 東側壁

図4-3 (1/3) 結果を記載する要素の位置 S<sub>0</sub>地震時



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 4-3 (2/3) 結果を記載する要素の位置 S。地震時

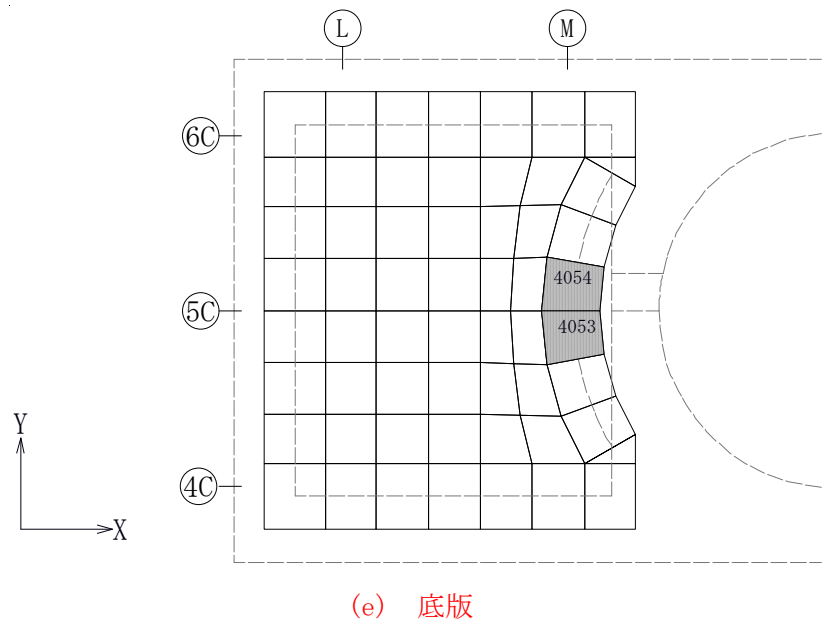


図 4-3 (3/3) 結果を記載する要素の位置 S<sub>0</sub>地震時

表 4-2 評価結果 S<sub>d</sub>地震時

		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> )	2219	1-7	1.25	14.7	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	2272	1-5	177	345	引張側
	東側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1582	1-5	2.17	14.7	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1590	1-8	199	345	引張側
	南側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	3031	1-5	3.14	14.7	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	3031	1-6	181	345	引張側
	西側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1082	1-6	2.08	14.7	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1087	1-8	217	345	引張側
底版	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	4053	1-16	7.58	14.7	圧縮側	
	鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	4054	1-15	232	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> )	2268	1-13	0.524	1.55	
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1583	1-16	1.03	1.73	
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	3037	1-5	1.77	3.87	
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1083	1-16	0.995	1.73	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	2228	1-15	0.455	1.02	
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1546	1-13	0.308	1.02	
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	7801	1-6	0.733	1.54	
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1046	1-14	0.302	1.01	
	底版	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	4054	1-16	1.73	2.87	

※：底版については、面内せん断力は考慮しない。

表 4-3 評価結果 S<sub>d</sub>地震時+温度

		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> )	2267	2-8	6.80	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	2230	2-7	202	345	引張側
	東側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1582	2-8	8.10	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1590	2-8	246	345	引張側
	南側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	3037	2-2	7.39	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	3031	2-6	190	345	引張側
	西側壁	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	1082	2-8	8.05	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	1078	2-8	208	345	引張側
底版	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	4054	2-32	7.62	16.5	圧縮側	
	鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	4054	2-31	224	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	2-14	0.791	1.66	
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1590	2-24	0.914	1.23	
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	3049	2-2	2.17	3.74	
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1087	2-24	0.943	1.33	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	2209	2-16	0.721	1.08	
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1583	2-8	0.419	0.643	
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	7801	2-6	1.18	1.60	
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1082	2-8	0.591	0.837	
	底版	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	4054	2-16	1.59	1.81	

※：底版については、面内せん断力は考慮しない。

表 4-4 評価結果 S<sub>s</sub>地震時

		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 ( $\times 10^{-3}$ )	2219	3-15	0.078	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	2272	3-5	1.18	5.00	引張側
	東側壁	コンクリート ( $\times 10^{-3}$ )	1582	3-5	0.132	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	1590	3-8	1.56	5.00	引張側
	南側壁	コンクリート ( $\times 10^{-3}$ )	3031	3-5	0.207	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	3031	3-6	1.31	5.00	引張側
	西側壁	コンクリート ( $\times 10^{-3}$ )	1082	3-6	0.126	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	1087	3-8	1.51	5.00	引張側
	底版	コンクリート ( $\times 10^{-3}$ )	4053	3-16	0.446	3.00	圧縮側
		鉄筋 ( $\times 10^{-3}$ )	4054	3-15	1.41	5.00	引張側
軸力	北側壁	圧縮応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	2272	3-2	1.03	14.7	
	東側壁	圧縮応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	1582	3-8	3.47	14.7	
	南側壁	圧縮応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	3031	3-5	5.53	14.7	
	西側壁	圧縮応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	1082	3-8	3.46	14.7	
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	2268	3-13	0.693	2.01	
	東側壁	面内せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	1590	3-8	0.986	1.64	
	南側壁	面内せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	3037	3-5	2.73	5.17	
	西側壁	面内せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	1083	3-16	1.35	2.30	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	2228	3-15	0.617	1.34	
	東側壁	面外せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	1546	3-13	0.410	1.34	
	南側壁	面外せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	7801	3-6	1.01	2.07	
	西側壁	面外せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	1046	3-14	0.402	1.34	
	底版	面外せん断応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	4054	3-16	2.27	2.87	

※：底版については、面内せん断力は考慮しない。



別紙 鉄筋コンクリート構造物の重大事故等時の高温による影響

(使用済燃料プール)

## 目次

1. 概要.....	別紙-1
2. コンクリート及び鉄筋の温度の影響に関する調査.....	別紙-1
2.1 鉄筋コンクリートの高温時の特性.....	別紙-1
2.2 既往の文献による高温時のコンクリートの特性.....	別紙-2
3. 施設を構成する部材の構造特性.....	別紙-4
4. まとめ.....	別紙-4

## 1. 概要

原子炉建屋原子炉棟内の燃料貯蔵設備である使用済燃料プールは、主要構造体を鉄筋コンクリート造の壁と床で構成する。使用済燃料プールの冷却機能や注水機能を喪失する重大事故等時において、使用済燃料プールの水温は高温状態が一定期間継続すると推定される。

よって、使用済燃料プールについて、既往の文献・規格等に基づき、高温時の健全性を確認する。

## 2. コンクリート及び鉄筋の温度の影響に関する調査

### 2.1 鉄筋コンクリートの高温時の特性

鉄筋コンクリートは、コンクリートと鉄筋で構成され、日本建築学会「構造材料の耐火性ガイドブック（(社)日本建築学会，2009）」によると、一般に、コンクリート・鉄筋は、温度の上昇と共に強度・剛性は劣化し、ひずみが大きくなる傾向にあるとされている。

コンクリートについては、セメント水和物及びその吸着水、水和物で構成される細孔内に存在する毛管水、毛管より大きな空隙に存在する自由水から成る多孔体である。一般的にコンクリートの温度が70℃程度では、コンクリートの基本特性に大きな影響を及ぼすような自由水の逸散は生じず、100℃以下では圧縮強度の低下は小さいとされる。また、コンクリートの温度が大気圧において100℃を超すと自由水が脱水し始め、その温度作用時間が長期間になると結晶水も脱水し始める。コンクリート温度が190℃付近では結晶水が解放され始め、さらに高温になると脱水現象が著しくなるため、コンクリートの特性に影響が出始めるとされる。

鉄筋については、「構造材料の耐火性ガイドブック（(社)日本建築学会，2009）」によると、強度及び剛性は、概ね200℃から300℃までは常温時の特性を保持するとされている。

## 2.2 既往の文献による高温時のコンクリートの特性

使用済燃料プールは、ステンレス鋼によりライニングされており、また、重大事故等時には、代替注水設備によりプールへの注水が行われるため、高温によるコンクリートからの水分逸散のないシール状態にある。それを踏まえ、シール状態で高温加熱を受けたコンクリートの文献収集を行った。高温を受けたコンクリートの圧縮強度に関する文献を表 2-1 に示す。

文献 No. 1 及び No. 2 では、加熱温度 175 °C のコンクリートへの影響について検討されている。文献 No. 1 では、シール状態において強度は熱水反応により一様な変化は示さないとされており、加熱期間 91 日までは、概ね加熱前と強度は同等と考えられる。アンシール状態では加熱期間 28 日までの低下率は 10 % 以内に収まるとされている。文献 No. 2 では、シール状態においては、加熱期間 91 日まで強度の低下は認められない。

また、文献 No. 3～No. 7 は、加熱温度 110 °C のコンクリートへの影響について検討されている。No. 4 は加熱期間 50 日について検討されており、強度低下は認められないとされている。また、No. 3 は加熱期間 3.5 年間、No. 5～No. 7 は加熱期間 2 年間について検討され、いずれも強度の低下傾向は認められないとされている。

それぞれの加熱温度における剛性に着目すると、加熱温度 175 °C において、アンシールの条件下では、加熱期間 1 日でも急激に低下する場合があるとされており、水分の逸散と高い相関があると考えられる。一方、シール状態では大きな低下はなく、加熱温度 110 °C では加熱後ごく初期に剛性の変化は収束するとされている。

以上より、175 °C 程度までの高温環境によるコンクリート強度への影響は小さい。また、コンクリートの剛性については、高温環境による水分逸散の影響が大きく、シール状態においても剛性の低下の傾向は認められるが、加熱後ごく初期に収束するため影響はない。

表 2-1 高温を受けたコンクリートの圧縮強度に関する文献一覧

No.	文献名 (出典)	著者	試験条件		
			温度	加熱期間	水分
1	高温 (175 °C) を受けたコンクリートの強度性状 (セメント・コンクリート No. 449, July 1984)	川口 徹, 高橋久雄	175 °C	1~91 日	シール アンシール
2	高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究 (日本建築学会構造系論文集 第 457 号, 1994 年 3 月)	長尾覚博, 中根 淳	40~175, 300, 600°C	1~91 日 (~175°C) 7 日 (300, 600°C)	シール アンシール
3	熱影響下におけるコンクリートの劣化に関する研究 (第 48 回セメント技術大会講演集, 1994)	長尾覚博, 鈴木智巳, 田淵正昭	①65, 90, 110°Cの一定 加熱 ②20~110°Cのサイクル 熱	1 日~3.5 年間	シール アンシール
4	長期高温加熱がコンクリートの力学特性に及ぼす影響の検討 (日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 2010 年 9 月)	木場将雄, 山本知弘, 久野通也, 島本 龍, 一瀬賢一, 佐藤 立	①20°Cの一定加熱 ②110°Cのサイクル加熱	①50 日 ②1~50 サイクル (1 サイクル: 1 日) (注) 110°Cの期間: 9h	シール アンシール
5	長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究 (その 1 実験計画と結果概要) (日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999 年 9 月)	藪田 敏, 長尾覚博, 北野剛人, 守屋正裕, 池内俊之, 大池 武	①20, 110, 180, 325°C の一定加熱 ②~110°C, ~180°C ~325°Cのサイクル加 熱	①1 日~24 か月 ②1~180 サイクル (1 サイクル: 72 時間) (注) 高温保持時間: 24 時間	シール アンシール
6	長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究 (その 2 普通コンクリートの力学特性試験結果) (日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999 年 9 月)	池内俊之, 長尾覚博, 北野剛人, 守屋正裕, 藪田 敏, 大池 武			
7	長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究 (その 3 耐熱コンクリートの力学特性試験結果) (日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999 年 9 月)	大池 武, 池内俊之, 北野剛人, 長尾覚博, 藪田 敏, 守屋正裕			

### 3. 施設を構成する部材の構造特性

部材内の温度差及び拘束により発生する熱応力は、使用済燃料プールの壁が周囲の壁，床に比べて厚く，さらに取り付く床が少ないため，拘束応力のレベルが低いことに加え，「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）」では，自己拘束的な応力であることから，十分な塑性変形能力がある場合，終局耐力に影響しないこととされている。

以上を踏まえ，施設を構成する部材の構造特性については，高温時においても設計基準状態との相違は小さい。

### 4. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の高温時の健全性について，既往の文献・規格基準に基づき評価を行い，使用済燃料プールの重大事故等時における高温状態に対しても，鉄筋コンクリート構造物の強度及び剛性への影響は小さいことを確認した。