

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-353 改2
提出年月日	平成30年9月18日

## V-1-2-1 原子炉本体の基礎に関する説明書

## 目次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 設計条件	3
3. 耐震評価	4
3.1 一般事項	4
3.2 評価部位	8
3.3 地震応答解析及び構造強度評価	9
3.4 評価結果	22
4. 強度評価	26
4.1 一般事項	26
4.2 評価部位	27
4.3 構造強度評価	28
4.4 評価結果	29
5. コリウムシールドの機能維持について	30
5.1 構造の概要	30
5.2 機能維持の評価結果	31
6. 中間スラブ部の構造変更に伴う機能維持への影響について	32
6.1 中間スラブ内に設置される流路の機能維持について	32
6.2 中間スラブの強度維持対策の影響検討結果	33

## 1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその付属設備の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第5条及び第50条並びにそれらの「実用発電用原子炉及びその付属設備の技術基準に関する規則の解釈」に基づき、原子炉本体の基礎が設計上定める条件において要求される強度を確保していることを説明するものである。

## 2. 一般事項

### 2.1 構造計画

原子炉本体の基礎の構造概要を図 2-1 に示す。原子炉本体の基礎は、円筒形の鉄筋コンクリート製の構造物であり、原子炉本体を原子炉压力容器スカートを介して支持している。また原子炉本体の基礎の下端は原子炉建屋基礎盤に支持される。今回、基準地震動  $S_s$  の策定及び原子炉本体の基礎が重大事故等対処施設の直接支持構造物となることから、「2.2. 設計条件」に示す荷重条件及び地震荷重に対して十分な構造を有することができる設計とする。

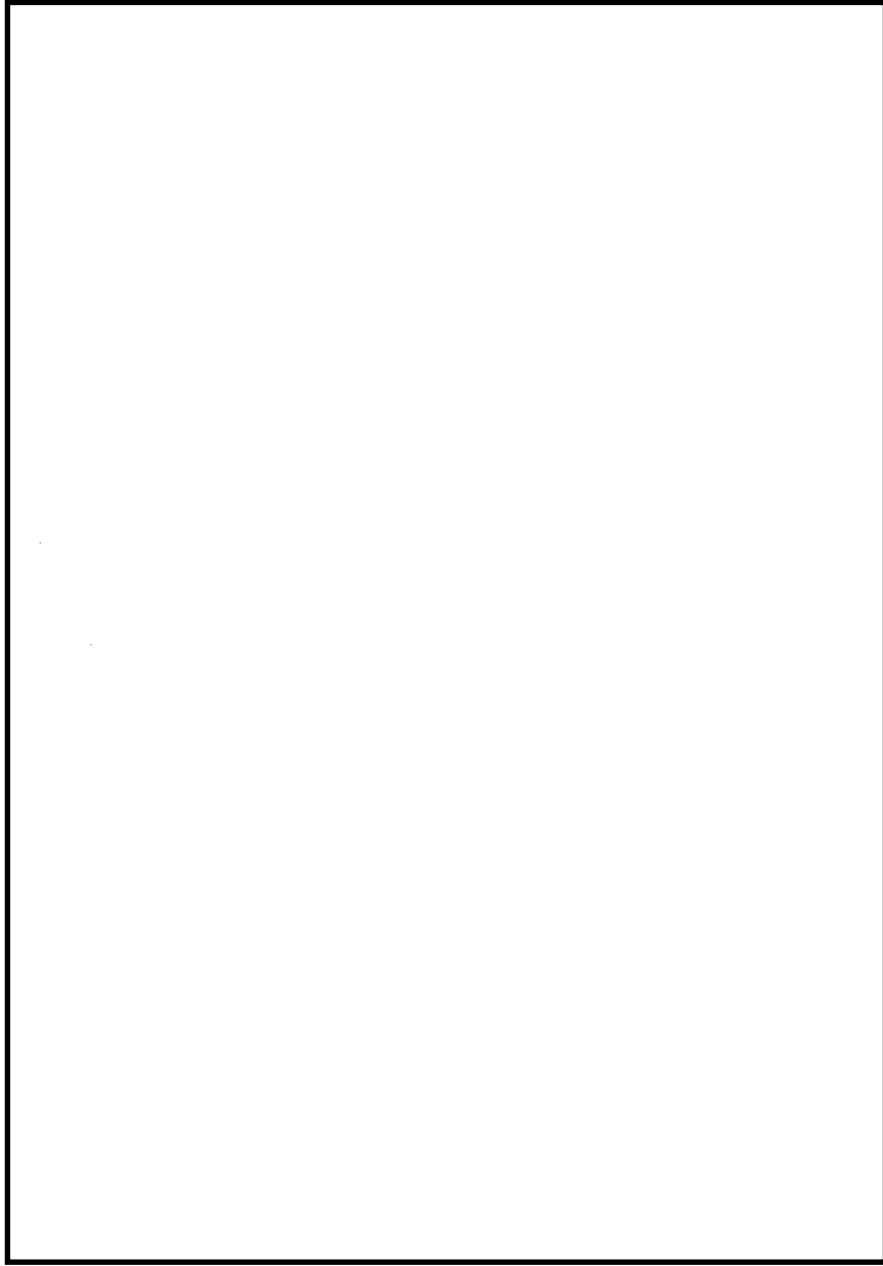


図 2-1 構造概要図 (単位 : m)

## 2.2 設計条件

原子炉本体の基礎の主要諸元として構造材料及び設計上考慮する質量等について、以下(1)及び(2)に示す。本主要諸元等に基づく原子炉本体の基礎は、各設計条件として定めた添付書類「V-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」による荷重条件及び添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉压力容器及び压力容器内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」による地震荷重を考慮しても構造上十分な強度を有する設計としている。

「3.耐震評価」及び「4.強度評価」において、各設計条件に対して構造上十分な強度を有することを説明する。

### (1) 原子炉本体の基礎の構造材料

・コンクリート 設計基準強度  $F_c=22 \text{ N/mm}^2$  (225 kg/cm<sup>2</sup>)

・鉄筋

### (2) 原子炉本体の基礎の設計上考慮する質量

- |  |  |    |
|--|--|----|
| ・原子炉本体                                   |  | kN |
| ・原子炉遮蔽                                   |  | kN |
| ・コリウムシールド等の重大事故等時に<br>対処するための設備 (水重量を含む) |  |    |
| 通常運転時                                    |  | kN |
| 重大事故等時                                   |  | kN |
| ・原子炉本体の基礎                                |  | kN |

### 3. 耐震評価

#### 3.1 一般事項

##### 3.1.1 評価方針

原子炉本体の基礎の応力評価は、「2.2. 設計条件」に示す荷重条件及び「3.3.2 荷重の組合せ及び許容限界」にて定める荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2. 構造計画」にて示す原子炉本体の構造を踏まえた「3.2 評価部位」にて設定する箇所において、設計用地震力により発生する応力等が許容限界に収まることを「3.3 地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「3.4 評価結果」に示す。

原子炉本体の基礎の耐震評価フローを図 3-1 に示す。

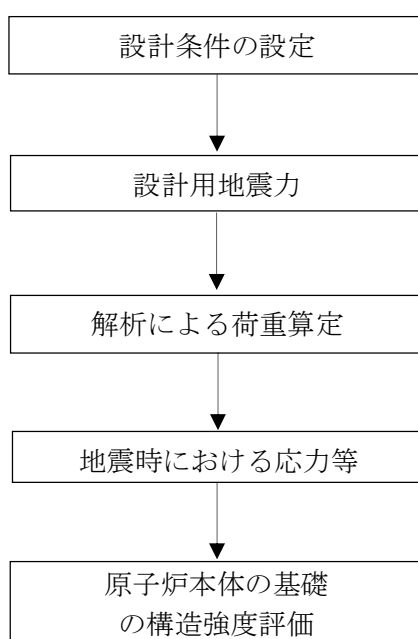


図 3-1 原子炉本体の基礎の耐震評価フロー

##### 3.1.2 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1987 (社) 日本電気協会
- (2) 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 4601・補-1984 (社) 日本電気協会
- (3) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1991 追補版 (社) 日本電気協会
- (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 J S M E S N E 1-2003) (日本機械学会 2003年12月) (以下「CCV規格」という。)

3.1.3 記号の説明

記号	記号の説明	単位
$a_{ty}$	単位幅当りの鉄筋断面積	$\text{mm}^2/\text{m}$
$a_w$	面外せん断力に対する補強筋の断面積	$\text{mm}^2$
$A$	アンカーボルトの断面積	$\text{mm}^2$
$A_0$	アンカーボルトの断面積	$\text{mm}^2/\text{本}$
$A_1$	アンカーボルトのねじ部有効断面積	$\text{mm}^2/\text{本}$
$A_c$	コーン破壊面の有効投影面積	$\text{mm}^2$
$b$	断面の幅	$\text{mm}$
$C$	アンカーボルトの計算モデルにおける係数	—
$d$	断面の有効せい	$\text{mm}$
$f_s$	コンクリートの許容せん断応力度	$\text{N}/\text{mm}^2$
$f_y$	鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度	$\text{N}/\text{mm}^2$
$f_c$	コンクリートの許容圧縮応力度	$\text{N}/\text{mm}^2$
$f_{c_s}$	鉄筋の許容圧縮応力度	$\text{N}/\text{mm}^2$
$f_{t_s}$	鉄筋の許容引張応力度	$\text{N}/\text{mm}^2$
$f_{t_w}$	鉄筋の面外せん断力に対する許容引張応力度	$\text{N}/\text{mm}^2$
$F$	アンカーボルトの引抜き力	$\text{N}$
$F_c$	コンクリートの設計基準強度	$\text{N}/\text{mm}^2$
$j$	断面の応力中心間距離	$\text{mm}$
$K_1$	0.6 (定数)	—
$l$	中心軸から中立軸までの距離	$\text{mm}$
$M$	曲げモーメント	$\text{N} \cdot \text{mm}$
$M_{ci}$	$N_{ci}$ によるモーメント ( $i=1, 2, 3$ )	$\text{N} \cdot \text{mm}$
$M_{ti}$	$N_{ti}$ によるモーメント ( $i=1, 2, 3$ )	$\text{N} \cdot \text{mm}$
$M_y$	単位幅当りの曲げモーメント	$\text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$
$n$	アンカーボルトとコンクリートのヤング係数比	—
$N$	軸力	$\text{N}$
$N_{ci}$	ベアリングプレートに生じる荷重の合計 ( $i=1, 2, 3$ )	$\text{N}$
$N_{ti}$	アンカーボルトに生じる軸力の合計 ( $i=1, 2, 3$ )	$\text{N}$
$N_y$	単位幅当りの軸力	$\text{kN}/\text{m}$
$p_t$	主筋の鉄筋比	—
$p_{t\theta}$	円周方向主筋の鉄筋比	—
$p_w$	面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比	—
$Q$	せん断力	$\text{N}$
$Q_{A1}$	コンクリートの許容面外せん断力	$\text{N}$
$Q_{A2}$	鉄筋で補強した場合のコンクリートの許容面外せん断力	$\text{N}$
$Q_{pa}$	コンクリートの短期許容せん断力	$\text{N}$
$r$	円筒胴の厚さの中心までの半径	$\text{mm}$
$r_i$	等価円筒の中心半径 ( $i=1, 2, 3$ )	$\text{mm}$
$t$	円筒胴の厚さ	$\text{mm}$

記号	記号の説明	単位
$t_{ci}$	ベアリングプレートの幅 (i=1, 2, 3)	mm
$t_i$	アンカーボルトの等価円筒板厚 (i=1, 2, 3)	mm
$w_i$	ベアリングプレートに生じる最大圧縮応力度 (i=1, 2, 3)	N/mm <sup>2</sup>
$x$	面外せん断力に対する補強筋の間隔	mm
$\alpha_i$	中立軸の位置を示す角度 (i=1, 2, 3)	rad
$\beta$	$r / t$	—
${}_c \epsilon_c$	圧縮側コンクリートのひずみ	$\times 10^{-6}$
${}_s \epsilon_c$	圧縮側鉄筋のひずみ	$\times 10^{-6}$
${}_s \epsilon_t$	引張側鉄筋のひずみ	$\times 10^{-6}$
${}_c \epsilon_{cu}$	圧縮側コンクリートの許容ひずみ	$\times 10^{-6}$
${}_s \epsilon_{cu}$	圧縮側鉄筋の許容ひずみ	$\times 10^{-6}$
${}_s \epsilon_{tu}$	引張側鉄筋の許容ひずみ	$\times 10^{-6}$
$\sigma_0$	外力による膜応力度	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{ti}$	アンカーボルトの最大引張応力度 (i=1, 2, 3)	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{ta}$	ねじ部有効断面でのアンカーボルトの引張応力度	N/mm <sup>2</sup>
${}_c \sigma_c$	圧縮側のコンクリート応力度	N/mm <sup>2</sup>
${}_s \sigma_c$	圧縮側の鉄筋応力度	N/mm <sup>2</sup>
${}_s \sigma_t$	引張側の鉄筋応力度	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{H1}$	荷重状態Ⅲのコンクリートの許容面外せん断応力度	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{H2}$	荷重状態Ⅳ及びⅤのコンクリートの許容面外せん断応力度	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{R1}$	荷重状態Ⅲのコンクリートの許容面外せん断応力度	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{R2}$	荷重状態Ⅳ及びⅤのコンクリートの許容面外せん断応力度	N/mm <sup>2</sup>
$\Phi$	低減係数	—



### 3.1.4 計算精度と数値の丸め方

精度は6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表3-1に示すとおりとする。

表3-1 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
震度	—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
モーメント	kN・m	小数点以下第1位	切上げ	整数位
せん断力	kN	小数点以下第1位	切上げ	整数位
温度	°C	—	—	整数位
長さ	mm	—	—	整数位 *1
断面積	mm <sup>2</sup>	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 *2
算出応力	MPa	小数点以下第2位	切上げ	小数点以下第1位
許容応力	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注 \*1：設計上定める値が小数点以下第1位の場合は、小数点以下第1位表示とする。

\*2：絶対値が1000以上のときは、べき数表示とする。

### 3.2 評価部位

原子炉本体の基礎の耐震評価は、「2.1 構造計画」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる原子炉本体の基礎円筒部（A部～D部）及び脚部アンカー部について実施する。原子炉本体の基礎の耐震評価部位について、図 3-2 の概略構造図に示す。

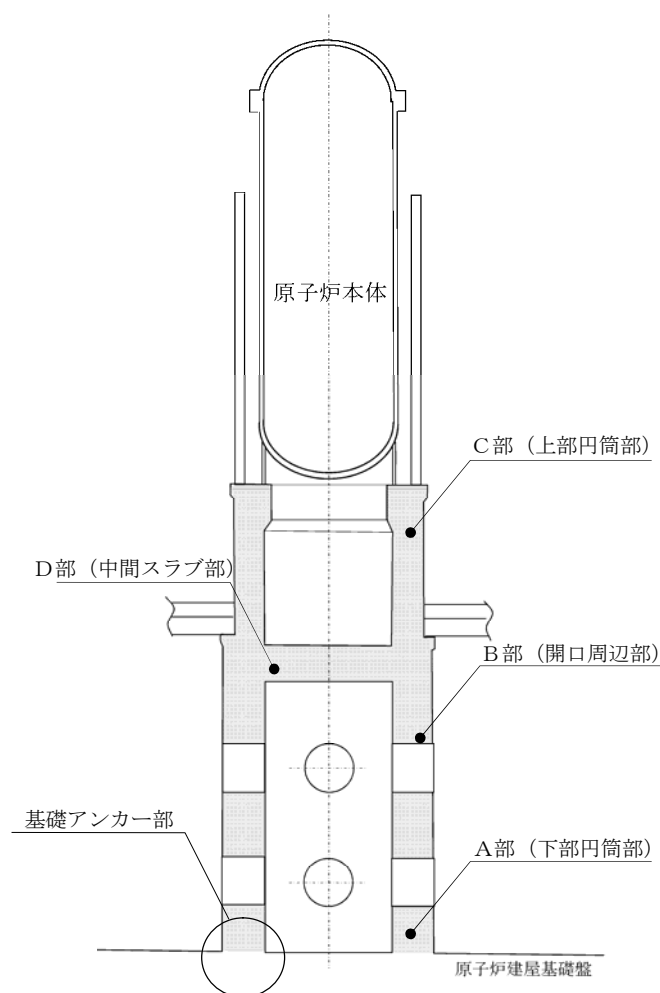


図 3-2 原子炉本体の基礎の評価部位

### 3.3 地震応答解析及び構造強度評価

#### 3.3.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) 原子炉本体の基礎は、その最下端が原子炉建屋の基礎版上 (EL. -4.0 m) に固定された円筒形で平面的に軸対称形の構造をしているが、非対称形の荷重に対応できるように中間スラブと円筒部全体を三次元的にモデル化し有限要素法による弾性解析を行う。
- (2) 原子炉本体の基礎の解析モデルを図 3-3 に示す。有限要素分割は四辺形及び三角形を用いて行うが、この要素は均質等方性材料による板要素で、板の曲げと膜力とが同時に考慮されている。
- (3) 解析コードは「MSC NASTRAN」を使用し、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-1 計算機プログラム (解析コード) の概要MSC NASTRAN」に示す。

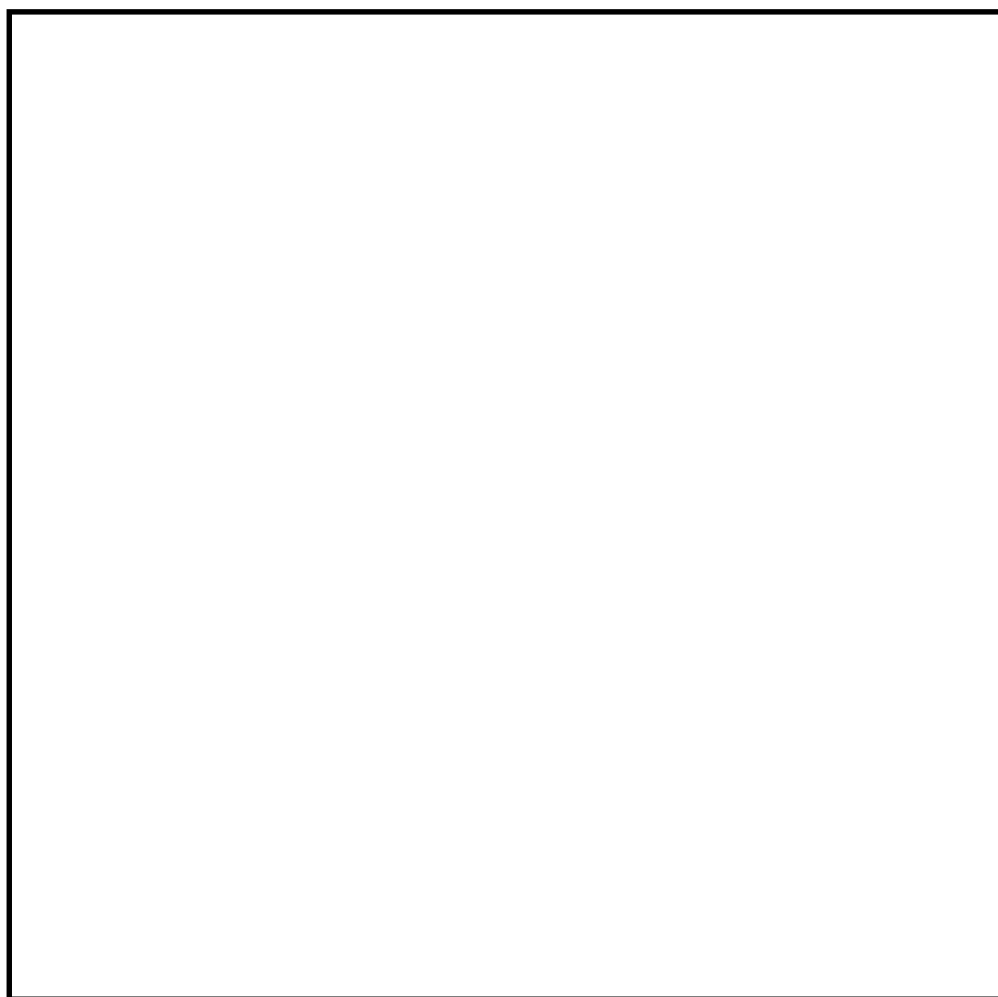


図 3-3 原子炉本体の基礎の解析モデル

### 3.3.2 荷重の組合せ及び許容限界

#### 3.3.2.1 荷重の組合せ

荷重の組み合わせは、添付書類「V-1-8-1 原子炉格納施設的设计条件に関する説明書」に基づき設定する。設計基準対象施設としての荷重の組合せを表 3-2 に、重大事故等時の機能維持評価における荷重の組合せを表 3-3 に示す。

表 3-2 設計基準対象施設としての荷重の組合せ

荷重番号	荷重の組合せ	設計条件	備考* <sup>1</sup>
(3)	$D + O + S_d^*$	短期	No. 13
(4)	$D + O + S_s$	機能維持 の検討	No. 14
(5)	$D + O + L^* + S_d^*$		No. 15及び16

注記：\*1 添付書類「V-1-8-1 原子炉格納施設的设计条件に関する説明書」の表 3-10 設計基準対象施設の荷重の組合せとの関連を示す。

- \*2 異常時荷重の圧力と温度については時間のずれを考慮する。
- \*3 地震荷重と組合せる場合は、異常発生直後を除くその後の状態の荷重と組合せる。

D : 鉛直荷重  
 O : 通常運転時荷重  
 L : 異常時荷重  
 $S_d^*$  : 弾性設計用地震動  $S_d$  により定まる地震力又は静的地震力  
 $S_s$  : 基準地震動  $S_s$  により定まる地震力

表 3-3 重大事故等時の機能維持評価における荷重の組合せ

荷重記号	荷重の組合せ	設計条件	備考* <sup>1</sup>
(b)	$D_{SA} + O + L_{SA(L)} + S_d$	機能維持 の検討	SA7
(c)	$D_{SA} + O + L_{SA(LL)} + S_s$		SA8

注記：\*1 添付書類「V-1-8-1 原子炉格納施設的设计条件に関する説明書」の表 3-11 重大事故等時の荷重の組合せとの関連

$D_{SA}$  : 鉛直荷重  
 O : 通常運転時荷重  
 $L_{SA(L)}$  : 重大事故後長期に想定される異常時荷重  
 $L_{SA(LL)}$  : 重大事故後長々期に想定される異常時荷重  
 $S_d$  : 弾性設計用地震動  $S_d$  により定まる地震力  
 $S_s$  : 基準地震動  $S_s$  により定まる地震力

### 3.3.2.2 許容限界

原子炉本体の基礎における設計基準対象施設としての許容限界を表 3-4～表 3-6 に示す。また重大事故等時の機能維持評価における許容限界を表 3-7 に示す。

表 3-4 コンクリートの許容応力度（設計基準対象施設）

荷重状態	圧縮応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
	応力状態 1	応力状態 2	
Ⅲ	14.6	16.5	1.06

表 3-5 鉄筋の許容応力度（設計基準対象施設）

荷重状態	圧縮 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り (N/mm <sup>2</sup> )	せん断 (N/mm <sup>2</sup> )
Ⅲ	345	345	345

表 3-6 コンクリート及び鉄筋の許容ひずみ（設計基準対象施設）

荷重状態	コンクリートひずみ	鉄筋ひずみ	
	圧縮	圧縮	引張り
Ⅳ	0.003	0.005	0.005

表 3-7 コンクリート及び鉄筋の許容ひずみ（重大事故等時における機能維持評価）

荷重状態	コンクリートひずみ	鉄筋ひずみ	
	圧縮	圧縮	引張り
Ⅴ	0.003	0.005	0.005

### 3.3.3 解析モデル及び諸元

- (1) 原子炉本体の基礎は、原子炉圧力容器、原子炉遮蔽を支持する構造物であるため、解析における各構造物の重量については、原子炉本体の基礎上面に等分布荷重として負荷させる。また、原子炉圧力容器内の冷却水については、保守的に通常運転時における状態として評価する。
- (2) コリウムシールド等の中間スラブに設置する構造物の重量は、中間スラブ上に等分布荷重として負荷させる。
- (3) 原子炉本体の基礎の鉄筋コンクリートの解析諸元を表 3-8 に示す。
- (4) 設計基準対象施設に対する評価及び重大事故等時の機能維持評価において考慮する圧力荷重及び水力学的動荷重を表 3-9 に示す。

表 3-8 鉄筋コンクリートの解析諸元

解析諸元	数 値
コンクリートの縦弾性係数	$2.06 \times 10^7$ kN/m <sup>2</sup>
コンクリートのせん断弾性係数	$8.83 \times 10^6$ kN/m <sup>2</sup>
コンクリートのポアソン比	0.167
コンクリートの線膨張係数	$1.0 \times 10^{-5}$ /°C
鉄筋コンクリートの単位体積重量	24 kN/m <sup>3</sup>

表 3-9 考慮する圧力荷重及び水力的動的荷重

	設計基準対象施設 としての評価	重大事故等時の 機能維持評価
圧力荷重 (kN/m <sup>2</sup> )		
水力的動的荷重 (kN/m <sup>2</sup> )		
熱荷重 (°C)		

注記 \* 1 重大事故等時の機能維持評価に考慮するSRV作動時直接作用荷重は1.1倍を適用する。

\* 2 事故時の熱荷重は、「CCV規格」CVE-3330の規定に基づき、評価荷重として考慮しない。

### 3.3.4 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表3-10に示す。設計用地震力は、原子炉本体の基礎の標高に応じて原子炉建屋基礎盤位置 (EL.  m), 中間スラブ部位置 (EL.  m) 及び原子炉基礎の本体上端部位置 (EL.  m) を適用する。

「弾性設計用地震動  $S_d$  又は静的震度」及び「基準地震動  $S_s$ 」による地震力は、添付書類「V-2-3-2 炉心, 原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」で算出された地震荷重を用いる。

表 3-10 設計用地震力

標高 (m)	弾性設計用地震動 $S_d$ 又は静的震度		基準地震動 $S_s$	
	せん断力 (kN)	曲げ モーメント (kN・m)	せん断力 (kN)	曲げ モーメント (kN・m)

注記 \* 1 静的震度による値。

\* 2 弾性設計用地震動  $S_d$  による値。水平方向と鉛直方向との組合せに組合せ係数法「水平×1.0+鉛直×0.4」を適用するため、静的震度のほうが大きくなる。



### 3.3.5 計算方法

#### (1) 基本方針

鉄筋コンクリート躯体の構造の検討は構造解析で得られた荷重を基に実施する。

荷重状態Ⅲについては、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋の引張応力度及びコンクリートの圧縮応力度並びに面外せん断力を算定し、「CCV規格」に基づき設定した各許容値を超えないことを確認する。荷重状態Ⅳ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を算定し、「CCV規格」に基づき設定した各許容値を超えないことを確認する。

#### (2) 軸力と曲げモーメントに対する検討

##### a. 荷重状態Ⅲ

各断面は、軸力及び曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート造長方形仮想柱として算定する。

荷重状態Ⅲにおいて、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋の引張応力度及びコンクリートの圧縮応力度を算定する際は、「CCV規格」のCVE-3511.1に基づき、表3-4及び表3-5に示す許容応力度を超えないことを確認する。

##### b. 荷重状態Ⅳ

各断面は、軸力及び曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート造長方形仮想柱として算定する。

荷重状態Ⅳにおいて、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は、「CCV規格」のCVE-3511.2に基づき、表3-6及び表3-7に示す許容ひずみ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、発生応力度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及び鉄筋の応力度－ひずみ関係図を図3-4に示す。

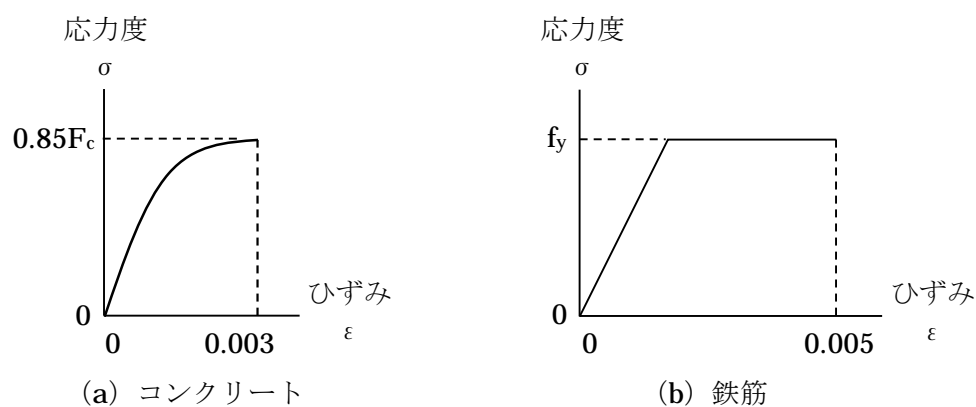


図3-4 コンクリート及び鉄筋の応力度－ひずみ関係図

(3) 面外せん断力に対する検討

断面の評価は、「CCV規格」に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断力が、評価部位毎に定められた計算式を基に算定した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

評価部位の形状から、評価部位A部を「CCV規格」の「シェル部の基部」、評価部位B部及びC部を「CCV規格」の「シェル部」、D部を「トップスラブ部および底部」とみなして評価を行う。

a. 評価部位A部

評価部位A部には、以下の計算式を基に算定したCVE-3514の「シェル部の基部」の許容面外せん断応力度を用いる。

(a) 荷重状態Ⅲ

$$\tau_{H1} = \tau_{H2} \times 0.75$$

ここで、

$\tau_{H1}$  : 荷重状態Ⅲのコンクリートの許容面外せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\tau_{H2}$  : (b)に定める荷重状態Ⅳ及びⅤのコンクリートの許容面外せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

(b) 荷重状態Ⅳ

$$\tau_{H2} = 10 \cdot p_{t\theta} \cdot f_y / (13.2 \cdot \sqrt{\beta} - \beta)$$

ここで、

$\tau_{H2}$  : 荷重状態Ⅳのコンクリートの許容面外せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$p_{t\theta}$  : 円周方向主筋の鉄筋比 (-)

$f_y$  : 鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\beta$  : 次の式により求めた値

$$\beta = r / t$$

$r$  : 円筒胴の厚さの中心までの半径 (mm)

$t$  : 円筒胴の厚さ (mm)

b. 評価部位B部及びC部

評価部位B部及びC部には、以下の計算式を基に算定したCVE-3513の「シェル部」の許容面外せん断応力度を用いる。

(a) 荷重状態Ⅲ

$$\tau_{R1} = \tau_{R2} \times 0.75$$

ここで、

$\tau_{R1}$  : 荷重状態Ⅲのコンクリートの許容面外せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\tau_{R2}$  : (b)に定める荷重状態Ⅳのコンクリートの許容面外せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

(b) 荷重状態Ⅳ

$$\tau_{R2} = \min(\tau_{R21}, \tau_{R22})$$

$$\tau_{R21} = \Phi \cdot \{0.1 \cdot (p_t \cdot f_y - \sigma_0) + 0.5p_w \cdot f_y + 0.235 \cdot \sqrt{F_c}\}$$

$$\tau_{R22} = 1.10\sqrt{F_c}$$

ここで、

$\tau_{R2}$  : 荷重状態IVのコンクリートの許容面外せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$p_t$  : 主筋の鉄筋比 (—)

$f_y$  : 鉄筋の許容引張応力度および許容圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_0$  : 外力による膜応力度 (引張の符号を正とする) (N/mm<sup>2</sup>)

$p_w$  : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比 (—)

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

$a_w$  : 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)

#### b. 評価部位D部

評価部位D部には、以下の計算式を基に算定したCVE-3522の「トップスラブ部および底部」の許容面外せん断力を用いる。

##### (a) 荷重状態III, IV

$$Q_{A1} = b \cdot j \cdot f_s$$

ここで、

$Q_{A1}$  : コンクリートの許容面外せん断力 (N)

$b$  : 断面の幅 (mm)

$j$  : 断面の応力中心間距離 (mm)

$f_s$  : コンクリートの許容せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

面外せん断力が $Q_{A1}$ を超える場合にあっては、次式で計算した値

$$Q_{A2} = b \cdot j \cdot \{\alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot p_w \cdot f_t \cdot (p_w - 0.002)\}$$

ここで、

$Q_{A2}$  : 鉄筋で補強した場合のコンクリートの許容面外せん断力 (N)

$b$  : 断面の幅 (mm)

$j$  : 断面の応力中心間距離 (mm)

$f_s$  : コンクリートの許容せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$p_w$  : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比 (ただし、0.002以上とする。) (—)

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

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

$b$  : 断面の幅 (mm)

$x$  : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)

$f_t$  : 鉄筋の面外せん断力に対する許容引張応力度 (荷重状態IVの場合は、荷重状態IIIの値とする) (N/mm<sup>2</sup>)

(4) アンカー部の検討

a. アンカーボルトの計算モデル

アンカーボルトの応力は次に示す仮定にもとづいて計算する。

- ① アンカーボルトの等価円筒及び荷重分布は図3-5に示す円周上3列のボルトサークルの平均径とする。また、そのボルトサークル上にボルトの全本数がある。
- ② 応力は最大引張応力 ( $\sigma_t$ ) から最大圧縮応力 ( $n_w$ ) まで直線的に変化する。
- ③ アンカーボルトに加わる荷重は平均径のサークル上のボルトの全断面積に等しい厚さの等価円筒に加わるものとする。

荷重と応力の釣合いを、図3-5に示す。このときの中立軸の位置と応力の関係は、次式で表される。

$$\frac{\sigma_{ti}}{n \cdot w_i} = \frac{1 + \cos \alpha_i}{1 - \cos \alpha_i} \dots \dots \dots (3.1)$$

また、軸力N及び曲げモーメントMの釣合いより、

..... (3.2)


..... (3.3)

アンカーボルトに生じる応力の合計 $N_{ti}$ 、ベアリングプレートに生じる応力の合計 $N_{ci}$ とそれぞれの応力によるモーメント $M_{ti}$ 、 $M_{ci}$ は、次式により表せる。

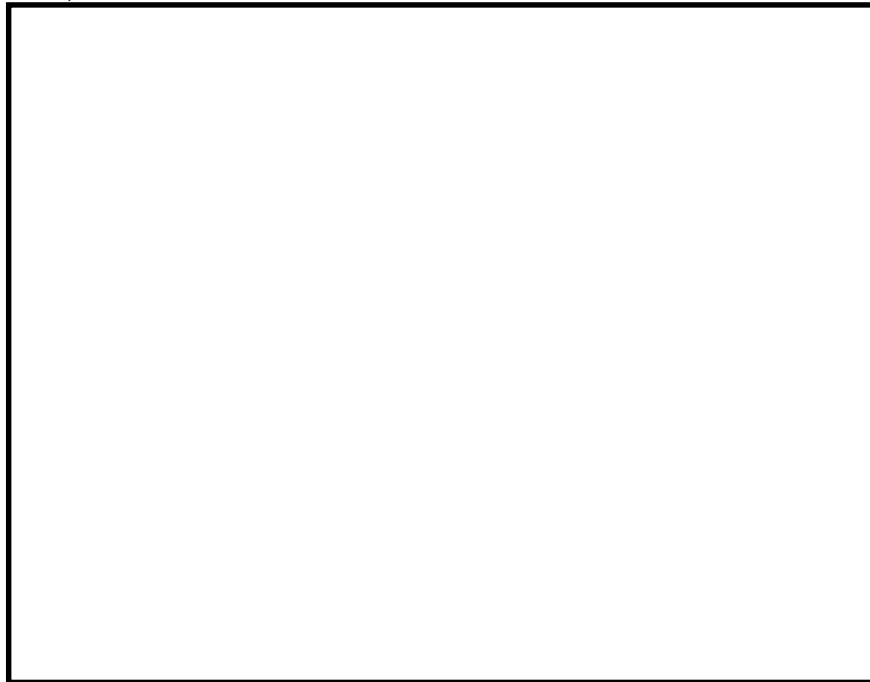


前述の関係より  $\sigma_t$  及び  $w$  は、次式で表される。

 ..... (3.4)

 ..... (3.5)

ここで、



実際の釣合い状態は、(3.1) 式の  $\alpha$  を仮定して求める。

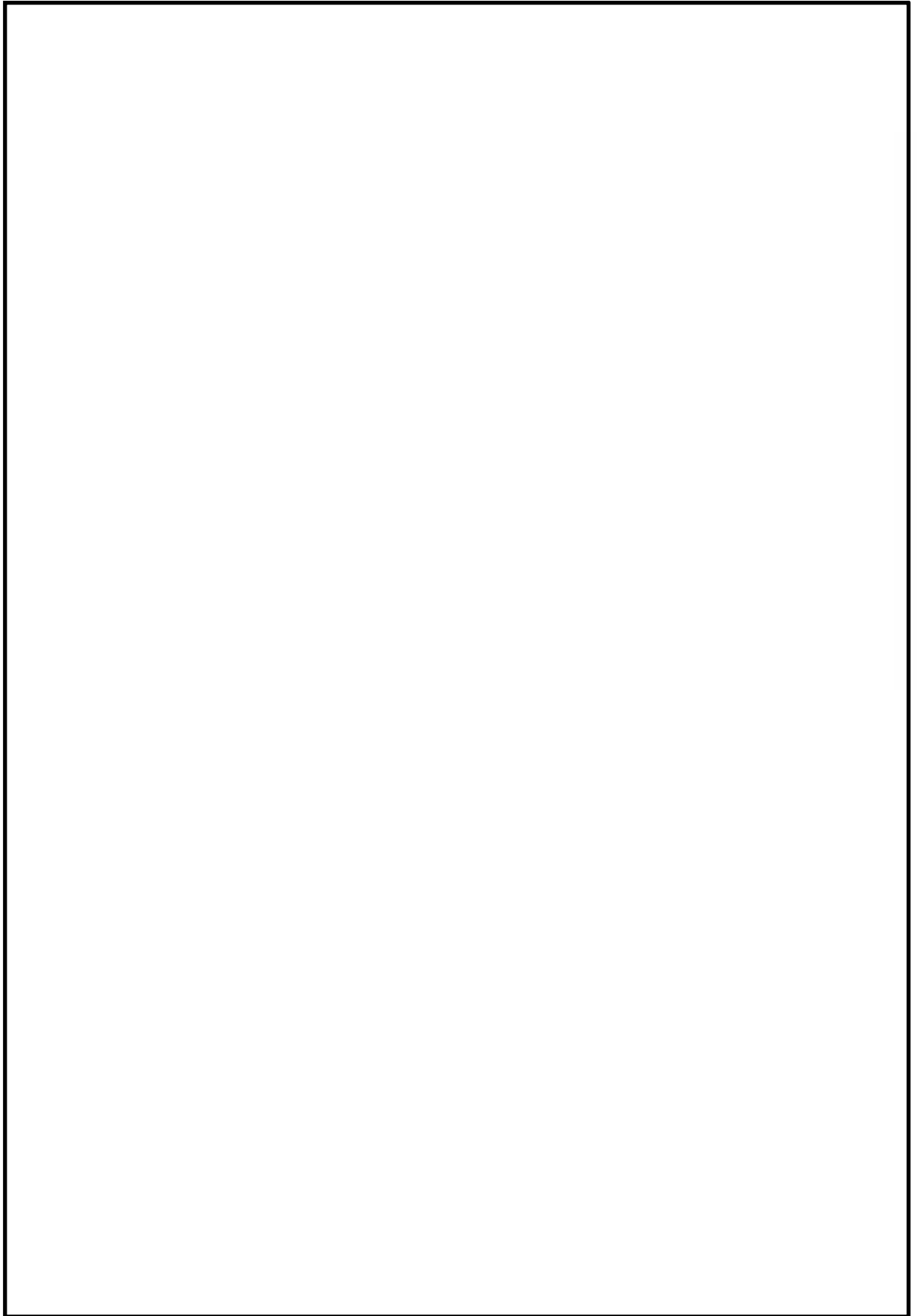


図3-5 アンカー部の計算モデル

## b. アンカーボルトの最大引張応力度

図3-5に示すモデルを用いた計算により、円筒断面のコンクリート柱としてアンカーボルトに生じる最大引張応力度 $\sigma_t$ を求める。

この値より、ねじ部有効断面でのアンカーボルトの引張応力度 $\sigma_{t_a}$ を以下の式で求める。

$$\sigma_{t_a} = \sigma_t \cdot \frac{A_0}{A_1}$$

ここで、

$A_0$  : アンカーボルトの断面積 (mm<sup>2</sup>/本)

$A_1$  : アンカーボルトのねじ部有効断面積 (mm<sup>2</sup>/本)

## a. アンカーボルトの定着

アンカーボルトの引抜き力は、せん断力により原子炉格納容器底部へ伝達させる。

アンカーボルトの引抜き力Fは

$$F = \sigma_t \cdot A$$

で求められ、下式で示すコンクリートの短期許容せん断力 $Q_{p_a}$ 未満であることを確認する。

$$Q_{p_a} = K_1 \cdot A_c \cdot \sqrt{F_c} \cdot \sqrt{\frac{9.80665}{100}}$$

ここで、

$A$  : アンカーボルトの断面積 (mm<sup>2</sup>/ )

$K_1$  : 0.6 (定数)

$A_c$  : コーン破壊面の有効投影面積

$F_c$  : コンクリートの設計基準強度

## 3.3.6 計算条件

応力解析に用いる荷重条件等は、「3.3.3項 解析モデル及び諸元」及び「3.3.4項 設計用地震力」に示す。

## 3.3.7 応力等の評価

「3.3.5項 計算方法」で求めた応力等が、表3-4～表3-7に記載される値以下であること。

### 3.4 評価結果

#### 3.4.1 設計基準対象施設としての評価結果

原子炉本体の基礎の設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容値を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有することを確認した。

##### (1) 原子炉本体の基礎円筒部

原子炉本体の基礎円筒部の設計基準対象施設としての断面算定結果を表 3-11～表 3-13 に示す。全ての評価箇所において許容値以下である。

表 3-11 荷重状態Ⅲ 軸力及び曲げモーメントによる応力検討結果（たて方向）

箇所名	荷重番号	応力状態	設計応力		a ty (mm <sup>2</sup> /m)	引張応力及び圧縮応力			許容値			判定
			N <sub>y</sub> (kN/m)	M <sub>y</sub> (kN・m/m)		c σ <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	s σ <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	s σ <sub>t</sub> N/mm <sup>2</sup>	c f <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	s f <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	s f <sub>t</sub> N/mm <sup>2</sup>	
A	3	2	3784	-842	11998	0.0	115.1	200.4	-16.5	-345	345	可
B	3	2	8778	-1091	15970	0.0	233.4	316.4	-16.5	-345	345	可
C	3	2	815	-297	9697	0.0	13.0	71.1	-16.5	-345	345	可
D	3	2	-508	-39	7095	-0.8	-10.3	-4.8	-16.5	-345	345	可

注1:  は検討応力の最大値を示す。

表 3-12 荷重状態Ⅳ 軸力及び曲げモーメントによるひずみ検討結果（たて方向）

箇所名	荷重番号	応力状態	設計応力		a ty (mm <sup>2</sup> /m)	引張ひずみ及び圧縮ひずみ			許容値			判定
			N <sub>y</sub> (kN/m)	M <sub>y</sub> (kN・m/m)		c ε <sub>c</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	s ε <sub>c</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	s ε <sub>t</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	c ε <sub>cu</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	s ε <sub>cu</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	s ε <sub>tu</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	
A	4	1	5521	-1912	11998	0	651	1595	-3000	-5000	5000	可
B	4	1	8439	-969	15970	0	1109	1470	-3000	-5000	5000	可
C	4	1	2182	-224	9697	0	443	656	-3000	-5000	5000	可
D	4	1	127	-117	7095	-67	-19	183	-3000	-5000	5000	可

注1:  は検討ひずみの最大値を示す。



表 3-13 面外せん断の検討結果 (たて方向)

箇所名	荷重状態	荷重番号	応力状態	設計応力		Q (N/mm)	許容値 面外(Q <sub>A</sub> ) (N/mm)	p <sub>w</sub> (%)	判定
				M (kN・m/m)	Q (kN/m)				
A	Ⅲ	3	2	-295	618	618	2992	0.54	可
	Ⅳ	4	1	-1913	-803	803	3990	0.54	可
B	Ⅲ	3	2	-1092	-577	577	1551	0.00	可
	Ⅳ	4	1	-1114	-712	712	1757	0.00	可
C		3	2	-297	-123	123	1364	0.00	可
		4	1	-224	-117	117	1717	0.00	可
D	Ⅲ	3	2	-40	-160	160	576	0.00	可
	Ⅳ	4	1	-118	-170	170	576	0.00	可

注1:   は面外せん断力の最大値を示す。

(2) 脚部アンカー部

原子炉本体の基礎脚部アンカー部の設計基準対象施設としての評価結果を表 3-14 に示す。全ての評価箇所において許容値以下である。

表 3-14 脚部アンカー部の評価結果

荷重状態	荷重番号	アンカー引抜力		許容値		判定
		アンカー ボルト (N/mm <sup>2</sup> )	アンカー 定着部 (N/ <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </span> )	アンカー ボルト (N/mm <sup>2</sup> )	アンカー 定着部 (N/ <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </span> )	
Ⅲ	3	164	$7.312 \times 10^5$	651	$8.084 \times 10^5$	可
Ⅳ	4	233	$1.061 \times 10^6$		$1.077 \times 10^6$	可

3.4.2 重大事故等時の機能維持の評価結果

原子炉本体の基礎の重大事故等時の機能維持における耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容値を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有することを確認した。

(1) 原子炉本体の基礎円筒部

原子炉本体の基礎円筒部における重大事故等時の機能維持としての断面算定結果を表3-15～表3-16に示す。全ての評価箇所において許容値以下である。

表 3-15 荷重状態V 軸力及び曲げモーメントによるひずみ検討結果 (たて方向)

箇所名	荷重記号	応力状態	設計応力		a ty (mm <sup>2</sup> /m)	引張ひずみ及び圧縮ひずみ			許容値			判定
			N <sub>y</sub> (kN/m)	M <sub>y</sub> (kN・m/m)		c ε c (×10 <sup>-6</sup> )	s ε c (×10 <sup>-6</sup> )	s ε t (×10 <sup>-6</sup> )	c ε cu (×10 <sup>-6</sup> )	s ε cu (×10 <sup>-6</sup> )	s ε tu (×10 <sup>-6</sup> )	
A	(b)	1	2745	-1748	11998	0	127	990	-3000	-5000	5000	可
	(c)	1	3426	-1479	11998	0	332	1062	-3000	-5000	5000	可
B	(b)	1	5876	-1155	15970	0	683	1112	-3000	-5000	5000	可
	(c)	1	7974	-1384	15970	0	962	1475	-3000	-5000	5000	可
C	(b)	1	-211	-167	9697	-35	-25	29	-3000	-5000	5000	可
	(c)	1	1156	-234	9697	0	180	403	-3000	-5000	5000	可
D	(b)	1	135	-244	7095	-147	-55	335	-3000	-5000	5000	可
	(c)	1	142	-256	7095	-153	-58	351	-3000	-5000	5000	可

注1:   は検討ひずみの最大値を示す。

表 3-16 面外せん断の検討結果 (たて方向)

箇所名	荷重状態	荷重記号	応力状態	設計応力		Q (N/mm)	許容値 面外(Q <sub>A</sub> ) (N/mm)	pw (%)	判定
				M (kN・m/m)	Q (kN/m)				
A	V	(b)	1	-1749	-678	678	3990	0.54	可
	V	(c)	1	-1480	-432	432	3990	0.54	可
B	V	(b)	1	-1156	-701	701	2296	0.00	可
	V	(c)	1	-1384	-616	616	2131	0.00	可
C	V	(b)	1	-166	-80	80	1896	0.00	可
	V	(c)	1	-235	-120	120	1794	0.00	可
D	V	(b)	1	-246	-407	407	576	0.00	可
	V	(c)	1	-256	-418	418	576	0.00	可

(2) 脚部アンカー部

原子炉本体の基礎脚部アンカー部の設計基準対象施設としての評価結果を表 3-17 に示す。全ての評価箇所において許容値以下である。

表 3-17 脚部アンカー部の評価結果

荷重状態	荷重番号	アンカー引抜力		許容値		判定
		アンカー ボルト (N/mm <sup>2</sup> )	アンカー 定着部 (N/□)	アンカー ボルト (N/mm <sup>2</sup> )	アンカー 定着部 (N/□)	
V	(c)	233	1.061×10 <sup>6</sup>	651	1.077×10 <sup>6</sup>	可

## 4. 強度評価

### 4.1 一般事項

#### 4.1.1 評価方針

原子炉本体の基礎の応力評価は、「2.2. 設計条件」に示す荷重及び「4.3.2 荷重の組合せ及び許容限界」にて定める荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2. 構造計画」にて示す原子炉本体の構造を踏まえた「4.2 評価部位」にて設定する箇所において、重大事故等時に発生する応力等が許容限界に収まることを「4.3 構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「4.4 評価結果」に示す。なお、応力評価は原子炉本体の基礎として新たな機能要求となる重大事故等時に対する状態について実施する。

原子炉本体の基礎の強度評価フローを図 4-1 に示す。

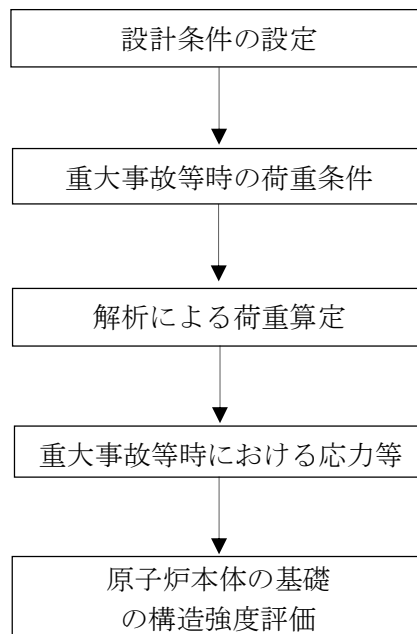


図 4-1 原子炉本体の基礎の強度評価フロー

#### 4.1.2 適用基準

「3.1.2 項 適用基準」に示す適用基準を適用する。

#### 4.1.3 記号の説明

「3.1.3 項 記号の説明」に示す記号を適用する。

#### 4.1.4 計算精度と数値の丸め方

「3.1.4 項 計算精度と数値の丸め方」に示す計算精度と数値の丸め方を適用する。

## 4.2 評価部位

原子炉本体の基礎の強度評価は、「2. 構造計画」に示す条件に基づき、強度評価上厳しくなる原子炉本体の基礎円筒部（A部～D部）について実施する。原子炉本体の基礎の耐震評価部位について、図 4-2 の概略構造図に示す。

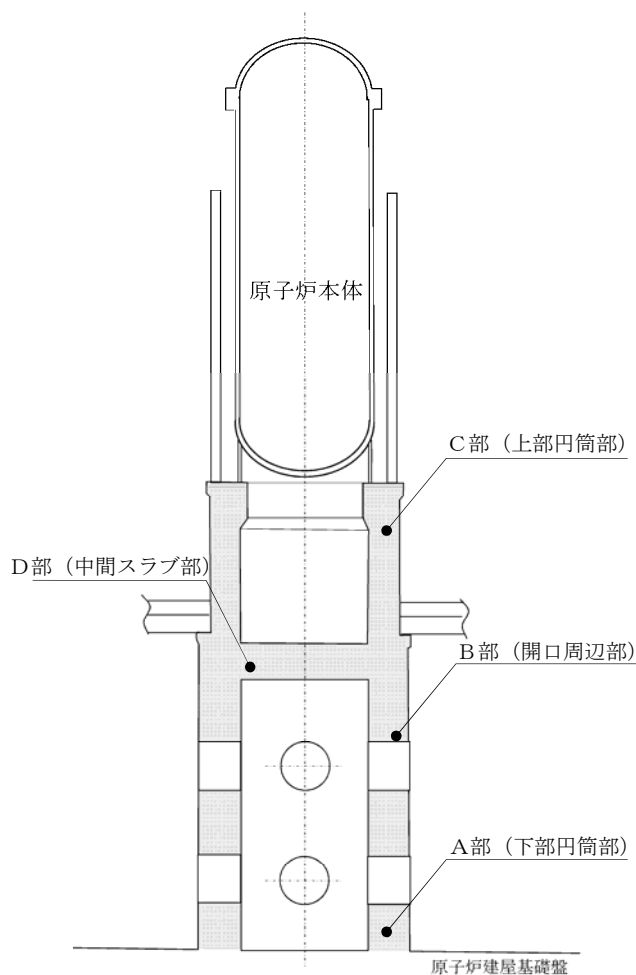


図 4-2 の原子炉本体の基礎の評価部位

### 4.3 構造強度評価

#### 4.3.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

「3.3.1 地震応答解析及び構造強度評価方法」に示す応答解析及び構造強度評価方法に基づき実施する。ただし、荷重状態Ⅳを荷重状態Ⅴに読み替える。

#### 4.3.2 荷重の組合せ及び許容限界

##### 4.3.2.1 荷重の組合せ

荷重の組み合わせは、添付書類「V-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」に基づき設定する。重大事故等時の機能維持評価における荷重の組合せを表 4-1 に示す。

表 4-1 重大事故等時の機能維持評価における荷重の組合せ

荷重記号	荷重の組合せ	設計条件	備考* <sup>1</sup>
(a)	$D_{SA} + O + L_{SA(S)}$	機能維持 の検討	SA2 <sup>1</sup>

注記：\*1 添付書類「V-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」の表 3-11 重大事故等時の荷重の組合せとの関連を示す。

$D_{SA}$  : 鉛直荷重

O : 通常運転時荷重

$L_{SA(S)}$  : 重大事故後短期に想定される異常時荷重

##### 4.3.2.2 許容限界

「3.3.2.2 許容限界」に示す重大事故等時の機能維持評価における許容限界を適用する。

#### 4.3.3 解析モデル及び諸元

「3.3.3 解析モデル及び諸元」に示す解析モデル及び諸元を適用する。

#### 4.3.4 計算方法

「3.3.5 計算方法」に示す計算方法を適用する。

#### 4.3.5 計算条件

「3.3.6 計算条件」に示す計算条件を適用する。

#### 4.3.6 応力等の評価

「4.3.4 計算方法」で求めたひずみ等が、「4.3.2.2 許容限界」に記載される値以下であること。

#### 4.4 評価結果

##### 4.4.1 重大事故等時の機能維持の評価結果

原子炉本体の基礎の重大事故等時の機能維持における強度評価結果を以下に示す。発生値は許容値を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有することを確認した。

##### (1) 原子炉本体の基礎円筒部

原子炉本体の基礎円筒部における重大事故等時の機能維持としての断面算定結果を表4-2～表4-3に示す。全ての評価箇所において許容値以下である。

表 4-2 荷重状態V 軸力及び曲げモーメントによるひずみ検討結果 (たて方向)

箇所名	荷重記号	応力状態	設計応力		a ty (mm <sup>2</sup> /m)	引張ひずみ及び圧縮ひずみ			許容値			判定
			N <sub>y</sub> (kN/m)	M <sub>y</sub> (kN・m/m)		c ε c (×10 <sup>-6</sup> )	s ε c (×10 <sup>-6</sup> )	s ε t (×10 <sup>-6</sup> )	c ε cu (×10 <sup>-6</sup> )	s ε cu (×10 <sup>-6</sup> )	s ε tu (×10 <sup>-6</sup> )	
A	(a)	1	-3021	-650	11998	-112	-104	-39	-3000	-5000	5000	可
B	(a)	1	-7135	-83	15970	-170	-169	-161	-3000	-5000	5000	可
C	(a)	1	-2267	-4	9697	-74	-74	-73	-3000	-5000	5000	可
D	(a)	1	96	-193	7095	-116	-44	260	-3000	-5000	5000	可

注1:  は検討ひずみの最大値を示す。

表 4-3 面外せん断の検討結果 (たて方向)

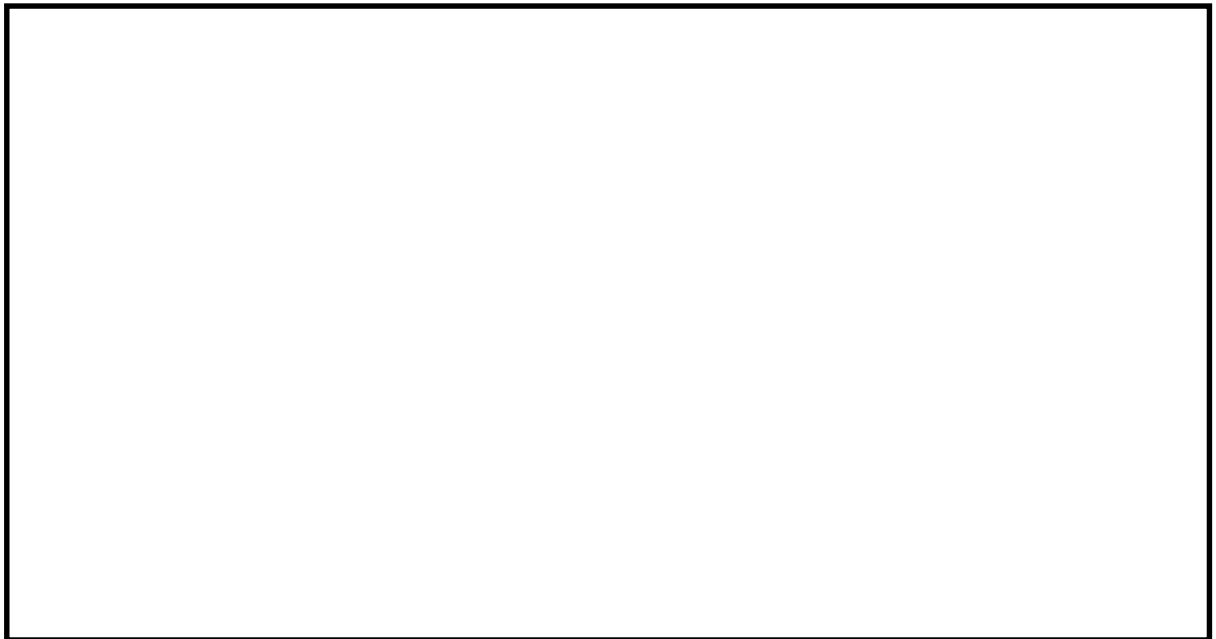
箇所名	荷重状態	荷重記号	応力状態	設計応力		Q (N/mm)	許容値 面外(Q <sub>A</sub> ) (N/mm)	p w (%)	判定
				M (kN・m/m)	Q (kN/m)				
A	V	(a)	1	599	526	526	2992	0.54	可
B	V	(a)	1	-83	-254	254	2488	0.00	可
C	V	(a)	1	-4	38	38	1538	0.00	可
D	V	(a)	1	-195	-347	347	576	0.00	可

## 5. コリウムシールドの機能維持について

### 5.1 構造の概要

コリウムシールドは、格納容器下部注水系（常設）によるペDESTAL（ドライウエル部）への注水、格納容器下部注水系（可搬型）によるペDESTAL（ドライウエル部）への注水及び代替循環冷却系による原子炉注水（原子炉圧力容器破損後は原子炉へ注入した水がペDESTALへ落下）と合わせて、溶融炉心が原子炉圧力容器から原子炉格納容器下部のペDESTAL（ドライウエル部）へ落下する場合にペDESTAL（ドライウエル部）のコンクリートの侵食を抑制し、溶融炉心が原子炉格納容器バウンダリに接触することを防止するためにペDESTAL（ドライウエル部）に設置されるものである。

コリウムシールドは、溶融炉心が原子炉格納容器下部のペDESTAL（ドライウエル部）へと落下した場合において、ペDESTAL（ドライウエル部）のコンクリートの侵食を抑制する設計とする。ペDESTAL（ドライウエル部）のコンクリートの侵食を抑制するためのコリウムシールドの構造、寸法及び仕様を図5-1に示す。



単位：mm

注1：\*寸法はシールド材寸法を示す。

注2：シールド材の材質はジルコニア（ZrO<sub>2</sub>）である。

図5-1 コリウムシールドの構造、寸法及び仕様



## 5.2 機能維持の評価結果

コリウムシールドは溶融炉心によるペDESTAL（ドライウェル部）のコンクリートの侵食を抑制するため、耐熱性の高いシールド材（ジルコニア）で構成されており、原子炉压力容器下部から落下した溶融炉心の堆積高さ及び拡がり範囲に基づきペDESTAL（ドライウェル部）のコンクリート表面を覆うように敷設される。

コリウムシールドの機能維持確認結果は、「V-2-9-4-3-5-2 付属設備の耐震性の計算書」に示す。

## 6. 中間スラブ部の構造変更に伴う機能維持への影響について

### 6.1 中間スラブ内に設置される流路の機能維持について

ペDESTALの中間スラブには、重大事故等時に想定される溶融炉心の落下に備え、中間スラブの貫通を防止するためのステンレス製の矩形流路を設置する。(以下、スリットと称する。)

スリットは、設計基準対象施設としては液体廃棄物処理系の流路としての機能を有する設備である。また、重大事故等対処設備としては、炉心の著しい損傷が発生した場合においてペDESTAL内に蓄水される水量を適切に維持するためのペDESTAL排水系の流路としての機能を有するとともに、原子炉圧力容器から原子炉格納容器下部のペDESTALへと溶融炉心が落下した場合に、ペDESTAL外へ溶融炉心が流出することを防止するためにスリット中で溶融炉心の凝固機能を有する設備である。当該設備は耐震Bクラスに分類され、基準地震動 $S_s$ に対する機能維持が求められる。本項は、基準地震動 $S_s$ に対するスリットの機能維持を確認した結果を示すものである。

スリットの構造及び主要寸法を図6-1に示す。

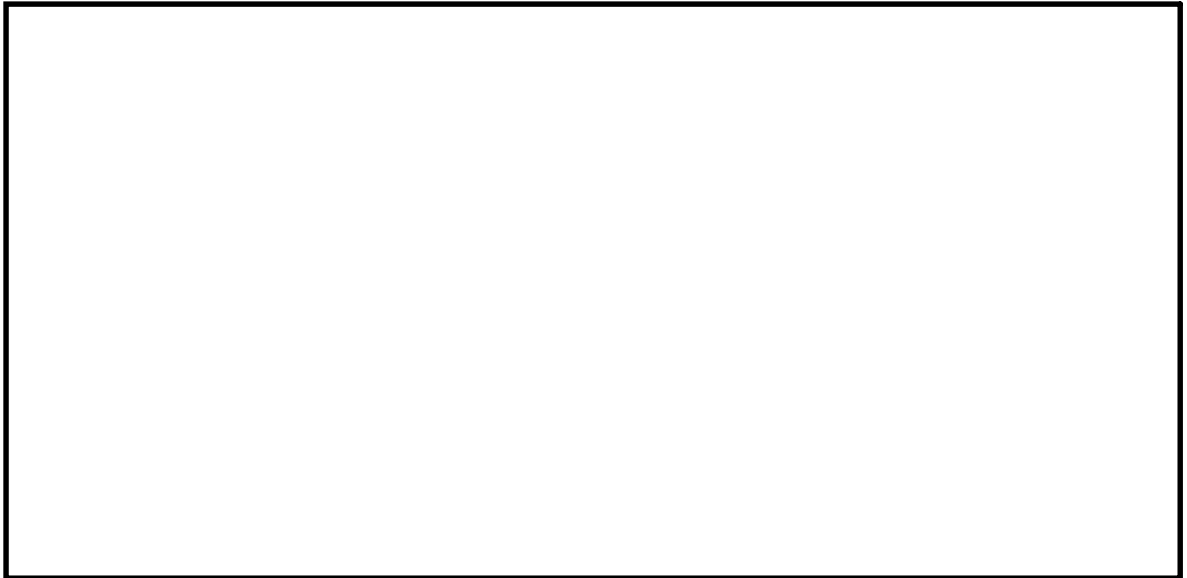


図6-1 スリットの構造及び主要寸法 (単位: mm)

図6-1に示す通り、スリットは上部スリット、垂直スリット、及び下部スリットから構成される中空角形断面の流路であり、液体廃棄物処理系の流路として十分な流路面積を確保するとともに、溶融炉心を凝固させるのに十分な流路長さを備えた設計となっている。

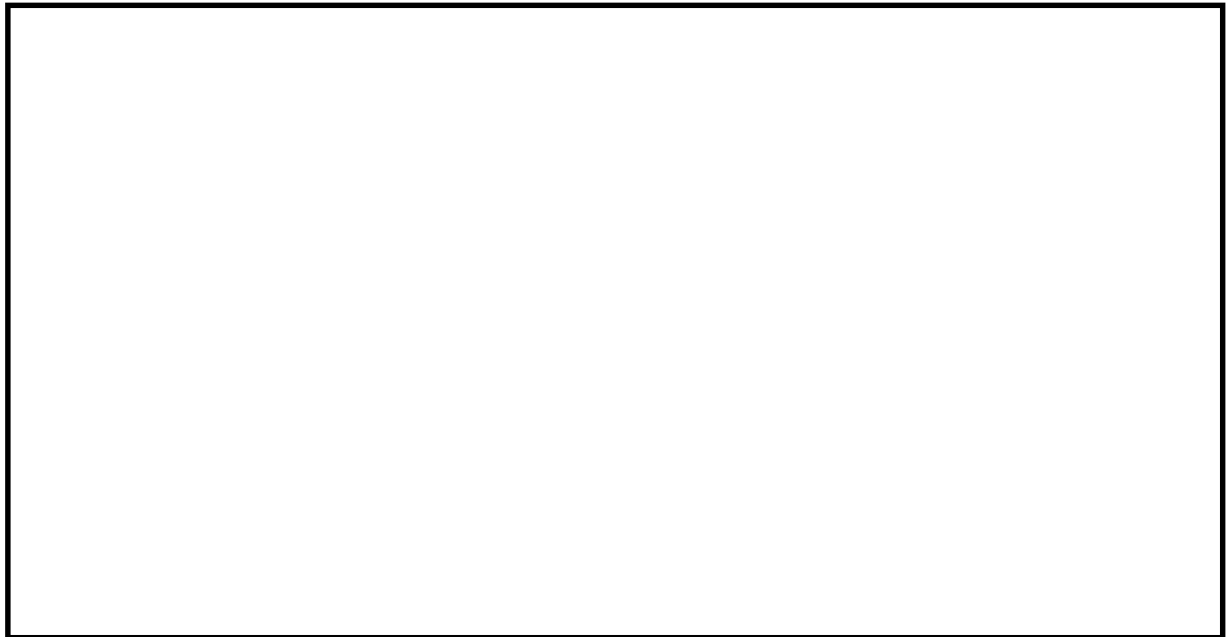
スリットは、上部スリットと垂直スリットの一部を除きペDESTAL中間スラブのコンクリート層に埋設される。そのため、スリットの変位は周囲のコンクリート層によって拘束され、垂直スリット及び下部スリットの地震時の挙動は中間スラブの挙動に支配される。また、下部スリットについてはより一層の耐震性の確保、並びに施工性の観点から、下部の鉄筋コンクリート層への固定を目的としたサポートを設置することとしている。

ここで、スリットの材料は[ ]を採用しており、周囲のコンクリート材料に比べ延性に富んだ材料であることから、中間スラブの健全性が確保されている限りはスリットの地震慣性力による変位は拘束され、有意な応力は生じない。ここで中間スラブの耐震健全性については本書4.章に示す通りであり、基準地震動 $S_s$ に対するスリットの健全性は維持されている。

## 6.2 中間スラブの強度維持対策の影響検討結果

4.章で示した構造強度及び耐震評価では、中間スラブ（厚さ[ ]mm）のうちの鉄筋コンクリート層（厚さ[ ]mm）を強度部材としてモデル化し、評価している。

一方で、重大事故等時を想定した場合でもペDESTALの構造強度が維持できることを確認しており、その評価においては、コンクリート層（厚さ[ ]mm）も強度部材として考慮している。ここで、6.1節で示すスリットを施工するため、厚さ[ ]mmのコンクリート層はスリットの施工前に一度撤去し、スリットの施工後に再度コンクリート層として形成されることとなっており、コンクリート層と既存躯体との一体性をより確実なものとするを目的に、補強鉄筋を追加施工する方針としている。各部位の構造を図6-2に示す。



注：\*寸法はシールド材寸法を示す。

図6-2 ペDESTAL床スラブ構造図（単位：mm）

本項では、図 6-2 に示す補強鉄筋がペDESTAL全体荷重伝達機構に悪影響を及ぼさないことを評価する。補強鉄筋施工前後のペDESTALの強度評価モデルの比較を図 6-3 に示し、各モデルでの応力評価結果を表 6-1 に示す。

表 6-1 に示すとおり、補強鉄筋施工後において、施工前に比べ床スラブ剛性が増加したことにより荷重伝達割合が増加しているものの、許容値に対し裕度が十分確保されているため、補強鉄筋の施工による悪影響はない。



: 表 6-1 に示す応力評価部

図 6-3 ペDESTAL評価モデルの比較（左：補強鉄筋追加前 右：補強鉄筋追加後）

表 6-1 補強鉄筋追加前後の応力評価結果

状態	荷重状態	評価応力		許容値	評価裕度
		曲げ M (kN・m/m)	面外せん断 (kN/m)	面外せん断 (kN/m)	
補強鉄筋追加前	IV	764	467	1880	4.02
補強鉄筋追加後	IV	756	491		3.82