

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-683 改5
提出年月日	平成30年9月27日

## V-2-9-4-3-5-2 付属設備の耐震性の計算書

本書は、ペDESTAL排水系の耐震性の計算書のうち、付属設備の耐震性に関する計算を示すものである。計算書の構成は以下のとおりとする。

第1章 コリウムシールドの耐震性の計算書

第2章 管の耐震性についての計算書

第3章 導入管カバーの耐震性の計算書

下線部：本日説明資料

## 第1章 コリウムシールドの耐震性の計算書

## 目 次

1. 概要	1-1
2. 一般事項	1-2
2.1 構造計画	1-2
2.2 評価方針	1-3
2.3 適用基準	1-3
2.4 記号の説明	1-4
2.5 計算精度と数値の丸め方	1-5
3. 評価部位	1-6
4. 固有周期	1-7
5. 構造強度評価	1-7
5.1 構造強度評価方法	1-7
5.2 荷重の組合せ及び許容応力	1-8
5.3 設計用地震力	1-9
5.4 計算方法	1-10
6. 評価結果	1-15
6.1 重大事故等対処設備としての評価結果	1-15
7. 床ドレンサンプライナの機能維持について	1-17
7.1 構造の概要	1-17
7.2 機能維持の方針	1-18
7.3 評価内容	1-19

## 1. 概要

本計算書は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、コリウムシールドが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

コリウムシールドは、重大事故等対処施設においては常設重大事故緩和設備に分類される。以下、重大事故等対処設備としての構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

コリウムシールドの構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>コリウムシールドは原子炉本体の基礎（上部円筒部）に水平支持型鋼，水平支持ボルト（後打ちアンカー），鉛直支持プレート及び鉛直支持ボルト（後打ちアンカー）を介して支持される。</p>	<p>コリウムシールドは熔融炉心から原子炉本体の基礎（コンクリート）を保護するため，原子炉本体の基礎（上部円筒部及び中間スラブ）に設置される構造物である。</p> <p>コリウムシールドは融点の高いブロック状のシールド材とサポートからなる構造物である。</p>	<p>鉛直支持プレート</p> <p>水平支持型鋼， 水平支持ボルト</p> <p>コリウムシールド (高さ 1880mm, 厚さ 150mm)</p> <p>鉛直支持ボルト</p> <p>原子炉本体の基礎</p>

## 2.2 評価方針

コリウムシールドは、地震荷重に対する構造強度評価を行う。なお、強度評価部位はシールド材を原子炉本体の基礎（上部円筒部）に固定するためのサポートとする。

また、設計荷重は、シールド材に作用する水平地震荷重及び鉛直地震荷重とする。

コリウムシールドの構造強度評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針 3.1 構造強度上の制限」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2.1 構造計画」にて示すコリウムシールドの部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「5.1 構造強度評価方法」で算出した荷重に基づく応力等が許容限界内に収まることを、「5.4 計算方法」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「6. 評価結果」に示す。コリウムシールドの耐震評価フローを図 2-1 に示す。

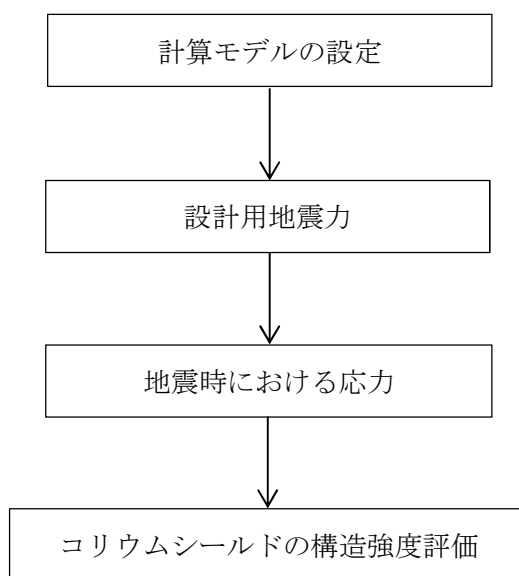


図 2-1 コリウムシールドの耐震評価フロー

## 2.3 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 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984（日本電気協会）
- (2) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987（日本電気協会）
- (3) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版（日本電気協会）
- (4) 鋼構造設計基準－許容応力度設計法－（2005 改定）  
（日本建築学会 2005 年 9 月）（以下「鋼構造設計基準」という。）

## 2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
$\rho$	密度	kg/m <sup>3</sup>
F	許容応力度の基準値	MPa
$f_b$	許容曲げ応力	MPa
$f_s$	許容せん断応力	MPa
$f_t$	許容引張応力・組合せ応力	MPa
$W_j$	荷重	N
$w_j$	等分布荷重	N/mm
$M_i$	モーメント	N・mm
$F_i$	せん断力・引張力	N
$S_s$	基準地震動 $S_s$ により定まる地震荷重	N
$A_i$	面積	mm <sup>2</sup>
$Z_i$	断面係数	mm <sup>3</sup>
$\sigma_{ti}$	引張応力	MPa
$\sigma_{bi}$	曲げ応力	MPa
$\tau_i$	せん断応力	MPa
$\sigma_i$	組合せ応力	MPa
$L_j$	長さ	mm
$S_y$	材料の設計降伏点	MPa
$S_u$	材料の設計引張強さ	MPa
$C_H$	水平方向設計震度	—
$C_V$	鉛直方向設計震度	—
K	係数	—
D	死荷重	N
$F_c$	コンクリートの設計基準強度	kg/cm <sup>2</sup>

添字  $i$  の意味は  $i=P1$  : 応力評価点番号 P1 ,  $i=P2$  : 応力評価点番号 P2,  
 $i=P3$  : 応力評価点番号 P3 ,  $i=P4$  : 応力評価点番号 P4,  
 $i=L$  : 床ドレンサンプライナ

添字  $j$  の意味は  $j=H$  : 水平方向 ,  $j=V$  : 鉛直方向



## 2.5 計算精度と数値の丸め方

表示する数値の丸め方を表 2-2 に示す。

表 2-2 表示数値の丸め方

数値の種類		単位	処理桁	処理法	表示桁
許容応力	鋼材／アンカーボルト	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
許容引抜力	コンクリート	N	小数点以下第 5 位	切捨て	小数点以下第 4 位
算出応力	鋼材／アンカーボルト	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数
引抜力	コンクリート	N	小数点以下第 5 位	四捨五入	小数点以下第 4 位

### 3. 評価部位

コリウムシールドの耐震評価は、「5.1 構造強度評価手法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる水平支持型鋼、水平支持ボルト、鉛直支持プレート、鉛直支持ボルトについて実施する。コリウムシールドの耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。また、コリウムシールドの形状及び主要寸法を図 3-1 に示す。

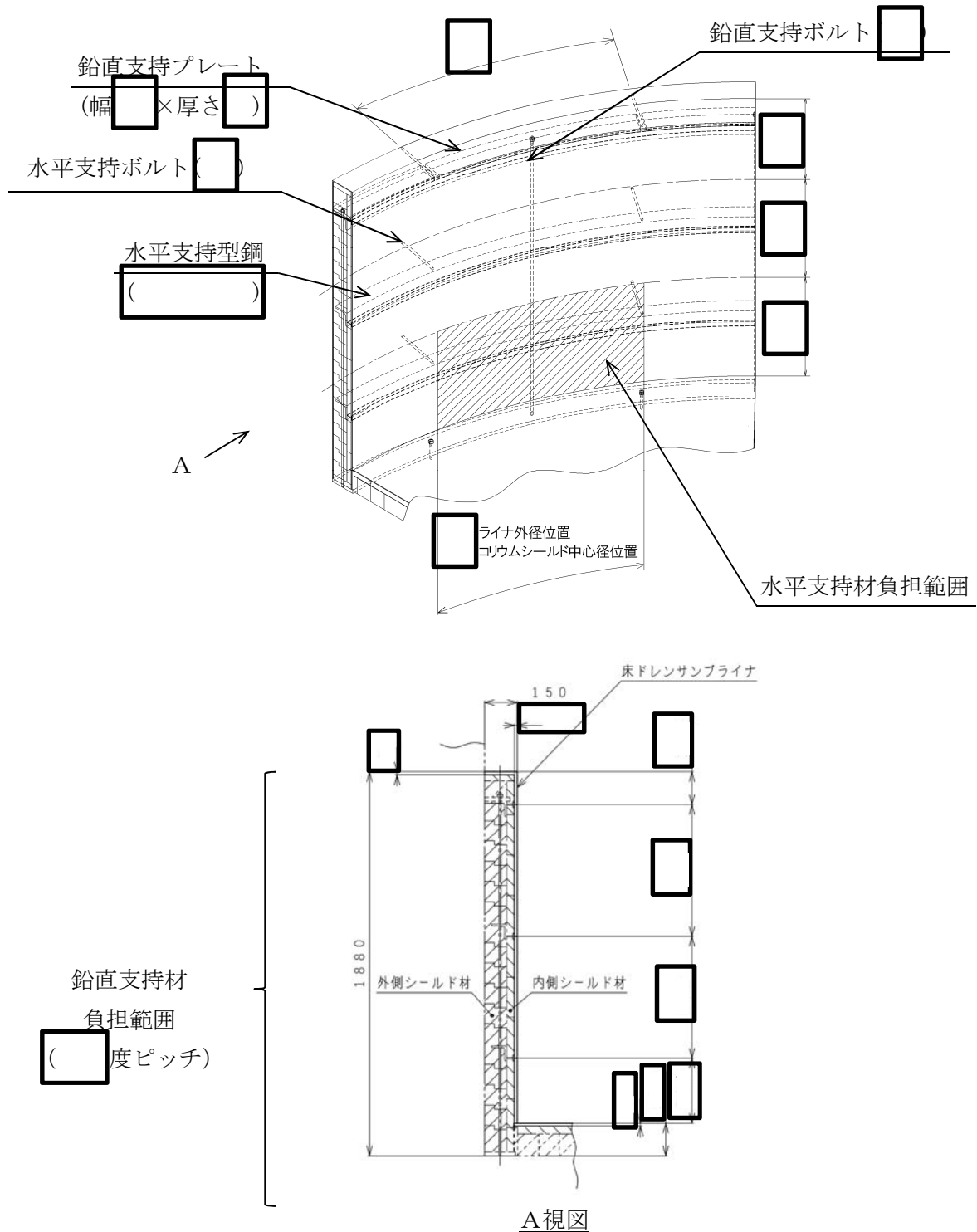


図 3-1 コリウムシールドの形状及び主要寸法 (単位: mm)

#### 4. 固有周期

コリウムシールドは鉛直支持プレート、水平支持型鋼、鉛直支持ボルト及び水平支持ボルトにより固定されており、全体的に一つの剛体とみなせるため、固有周期は十分に小さく、固有周期の計算は省略する。

#### 5. 構造強度評価

##### 5.1 構造強度評価方法

次の条件で計算する。

##### (1) 死荷重

図 3-1 に示すとおり、水平支持材及び鉛直支持材が負担する荷重範囲は、水平支持ボルト及び鉛直支持ボルトの支持スパンをそれぞれ考慮し、周方向は  度ピッチとする。その範囲のシールド材に作用する地震加速度によって、水平方向及び鉛直方向に負荷される荷重を以下に示す。

シールド材の密度  $\rho$

kg/m<sup>3</sup>

シールド材の死荷重（方向は図 3-1 参照）

水平支持材が荷重を負担する範囲の荷重  $W_H$

N

鉛直支持材が荷重を負担する範囲の荷重  $W_V$

N

##### (2) 水荷重

コリウムシールドに囲まれる空間には、通常運転時の液体廃棄物の検知機能を維持する目的と、重大事故時の熔融炉心の冷却機能を維持する目的で、常時水張りをしている。これらの水による水頭圧は最大でも  MPa であり、コリウムシールドに圧縮荷重として作用した場合でもシールド材の圧縮耐力である  MPa に比べ十分小さいため、水荷重による応力は評価対象としない。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

(1) 使用材料の許容応力評価条件

コリウムシールドの使用材料の許容応力評価条件を表 5-1 に示す。

表 5-1 使用材料の許容応力評価条件

評価部材	材料	温度条件 (°C)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)
水平支持型钢 水平支持ボルト		40	205	520
垂直支持プレート 垂直支持ボルト		40	315	490

(2) 荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として、荷重の組合せを表 5-2 に示し、許容応力を表 5-3 に示す。

表5-2 荷重の組合せ及び荷重の種類

施設区分		機器名称	設備分類*1	機器等 の区分	荷重の組合せ	荷重の種類
原子炉 格納施設	—	コリウム シールド	常設／緩和	—	D + S <sub>s</sub>	短期荷重

注記 \*1: 「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表5-3 許容応力 (単位: MPa)

材料	基準応力 F*1	許容応力*2			
		引張応力 1.5 · f <sub>t</sub>	曲げ応力 1.5 · f <sub>b</sub>	せん断応力 1.5 · f <sub>s</sub>	組合せ応力 1.5 · f <sub>t</sub>
	205	205	205	118	205
	315	315	363	181	315

注記 \*1: 基準応力Fは以下の計算式で求める。

$$F = \text{Min} (S_y, 0.7 \cdot S_u)$$

ここで、

S<sub>y</sub>: 材料の設計降伏点

S<sub>u</sub>: 材料の設計引張強さ

\*2: f<sub>t</sub>, f<sub>b</sub>, f<sub>s</sub>はそれぞれ以下の計算式で求める。

$$f_t = F / 1.5$$

$$f_b = F / 1.5 \text{ 又は } F / 1.3$$

$$f_s = F / (1.5 \cdot \sqrt{3})$$

### 5.3 設計用地震力

#### (1) 設計用地震力

コリウムシールドは、ブロック状のシールド材を原子炉本体の基礎の上部円筒部および中間スラブに隙間なく敷設することにより、原子炉本体の基礎と一体の地震応答挙動を示すことから、設計用地震荷重として、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」によって算出された設計震度を適用する。コリウムシールドの設計震度を表 5-3 に示す。

表 5-3 設計震度

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)	弾性設計用地震動 $S_d$ 又は静的震度		基準地震動 $S_s$	
		水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 30px; margin-bottom: 5px;"></div> EL. 16.624*1	—*2	—	—	$C_H =$ <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; display: inline-block;"></div>	$C_V =$ <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; display: inline-block;"></div>

注記 \*1：基準床レベルを示す。

\*2：固有周期は十分に小さく、計算は省略する。

## 5.4 計算方法

### 5.4.1 応力評価点

応力評価点を表 5-4 及び図 5-1 に示す。

表 5-4 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
P 1	水平支持型鋼
P 2	水平支持ボルト
P 3	鉛直支持プレート
P 4	鉛直支持ボルト

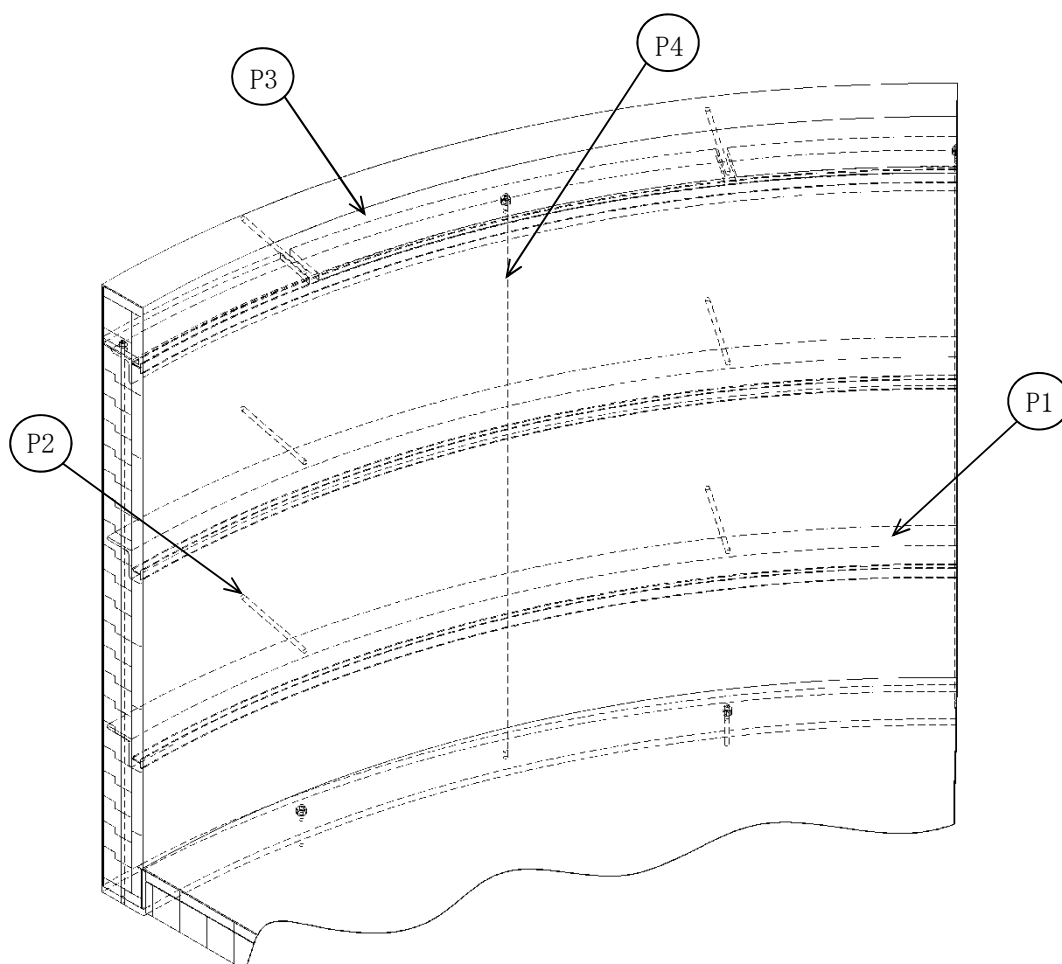


図 5-1 応力評価点

#### 5.4.2 水平支持材の応力計算（応力評価点 P 1 及び P 2）

##### (1) 計算モデル

図 3-1 に示す水平支持材が荷重を負担する範囲のシールド材の水平地震荷重が、水平支持型鋼に等分布荷重として作用することとなる。水平支持型鋼は、水平支持ボルトと溶接によって接続されるため、計算モデルは図 5-2 に示す両端固定はりとして計算する。

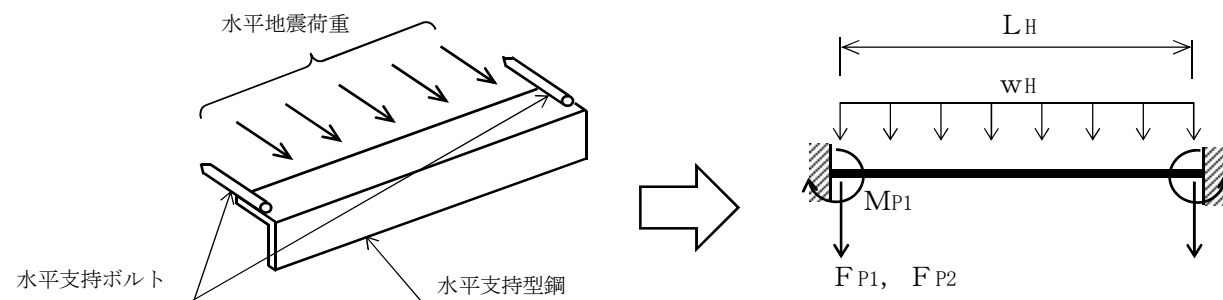


図 5-2 計算モデル

- a. 水平方向地震による等分布荷重

$$w_H = \frac{W_H \cdot C_H}{L_H}$$

ここで、

$$L_H: \text{水平支持スパン} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ mm}$$

- b. 水平支持型鋼に作用する曲げモーメント

$$M_{P1} = \frac{w_H \cdot L_H^2}{12}$$

- c. 水平支持型鋼に作用するせん断力

$$F_{P1} = w_H \cdot \left( \frac{L_H}{2} \right)$$

- d. 水平支持ボルトに作用する引張力

$$F_{P2} = 2 \cdot F_{P1}$$

##### (2) 応力計算

- a. 水平支持型鋼の曲げ応力

$$\sigma_{bP1} = \frac{M_{P1}}{Z_{P1}}$$

ここで、

$$Z_{P1} = \boxed{\phantom{0000000}} \text{ mm}^3$$

b. 水平支持型鋼のせん断応力

$$\tau_{P1} = \frac{F_{P1}}{A_{P1}}$$

ここで,

$A_{P1}$  : 水平支持型鋼のせん断断面積 =  mm<sup>2</sup>

c. 水平支持型鋼の組合せ応力

$$\sigma_{P1} = \sqrt{\sigma_{bP1}^2 + 3 \cdot \tau_{P1}^2}$$

d. 水平支持ボルトの引張応力

$$\sigma_{tP2} = \frac{F_{P2}}{A_{P2}}$$

ここで,

$A_{P2}$  : ボルト有効断面積 =  mm<sup>2</sup>



### 5.4.3 鉛直支持材の応力計算（応力評価点 P 3 及び P 4）

#### (1) 計算モデル

図 3-1 に示す鉛直支持材が荷重を負担する範囲のシールド材の鉛直地震荷重が、鉛直支持プレートに等分布荷重として作用する場合、図 5-3 に示す片持ちはりとして計算することができる。ただし、5.3 項に示すとおり、コリウムシールドに作用する鉛直震度は 1.0 未満であり、実際にはシールド材の浮き上がりによる荷重は作用しないため、発生応力は生じない。

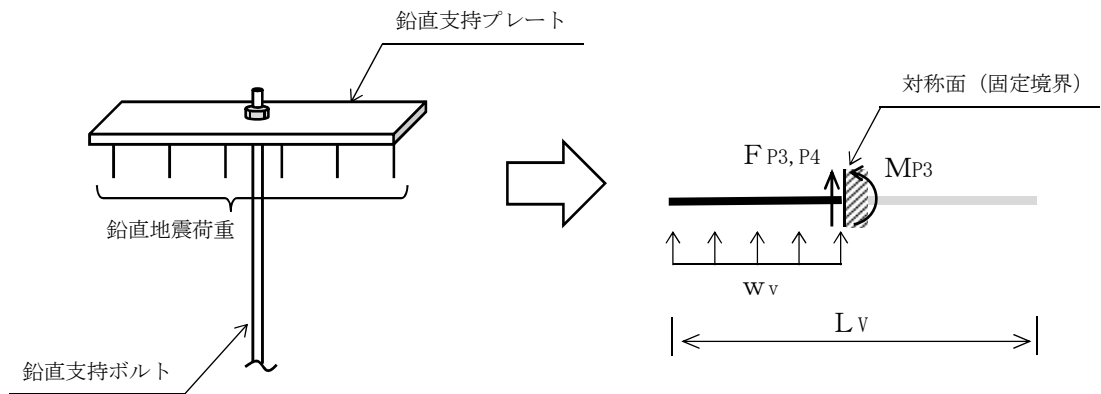


図 5-3 計算モデル

- a. 鉛直方向地震による等分布荷重

$$w_v = \frac{W_v \cdot C_v}{L_v}$$

ここで、

$L_v$  : 荷重を負担する範囲の鉛直支持プレート長さ =  mm

- b. 鉛直支持プレートに作用する曲げモーメント

$$M_{P3} = \frac{w_v \cdot \left(\frac{L_v}{2}\right)^2}{2}$$

- c. 鉛直支持プレートに作用するせん断力

$$F_{P3} = w_v \cdot \left(\frac{L_v}{2}\right)$$

- d. 鉛直支持ボルトに作用する支持反力

$$F_{P4} = 2 \cdot F_{P3}$$

(2) 応力計算

- a. 鉛直支持プレートの曲げ応力

$$\sigma_{bP3} = \frac{M_{P3}}{Z_{P3}}$$

ここで,

$$Z_{P3} = \boxed{\phantom{00000}} \text{ mm}^3$$

- b. 鉛直支持プレートのせん断応力

$$\tau_{P3} = \frac{F_{P3}}{A_{P3}}$$

ここで,

$$A_{P3} : \text{鉛直支持プレートのせん断断面積} = \boxed{\phantom{00000}} \text{ mm}^2$$

- c. 鉛直支持プレートの組合せ応力

$$\sigma_{P3} = \sqrt{\sigma_{bP3}^2 + 3 \cdot \tau_{P3}^2}$$

- d. 鉛直支持ボルトの引張応力

$$\sigma_{tP4} = \frac{F_{P4}}{A_{P4}}$$

ここで,

$$A_{P4} : \text{ボルト有効断面積} = \boxed{\phantom{00000}} \text{ mm}^2$$

## 6. 評価結果

### 6.1 重大事故等対処設備としての評価結果

コリウムシールドの重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

#### (1) 構造強度評価結果

短期荷重に対する構造強度評価結果を次頁以降の表 6-1 に示す。

表 6-1 短期荷重に対する応力評価結果 (D + S<sub>s</sub>)

部 材	応力評価点	材 料	応 力	短期荷重	
				算出応力	許容応力
				(MPa)	(MPa)
水平支持型鋼	P 1		曲げ	$\sigma_{bP1} = 47$	205
			せん断	$\tau_{P1} = 6$	118
			組合せ	$\sigma_{P1} = 49$	205
水平支持ボルト	P 2		引張り	$\sigma_{tP2} = 69$	164
鉛直支持プレート	P 3		曲げ	$\sigma_{bP3} = 0$	363
			せん断	$\tau_{P3} = 0$	181
			組合せ	$\sigma_{P3} = 0$	315
鉛直支持ボルト	P 4		引張り	$\sigma_{tP4} = 0$	252

すべて許容値以下である。

## 7. 床ドレンサンプライナの機能維持について

### 7.1 構造の概要

床ドレンサンプライナは、原子炉本体の基礎の側面及び底面に敷き詰められたコリウムシールドのシールド材の表面に、ステンレス製のライナを内張りした構造となっており、耐漏洩機能を有するよう設計されている。

床ドレンサンプライナは、コリウムシールドに囲まれる空間が、通常運転時の液体廃棄物の検知機能を維持する目的と、重大事故時の溶融炉心の冷却機能を維持する目的で常時水張りを実施しているため、原子炉本体の基礎内（ドライウェル部）に水位を形成及び維持できるように設置されている。

床ドレンサンプライナの概要を図 7-1 に示す。

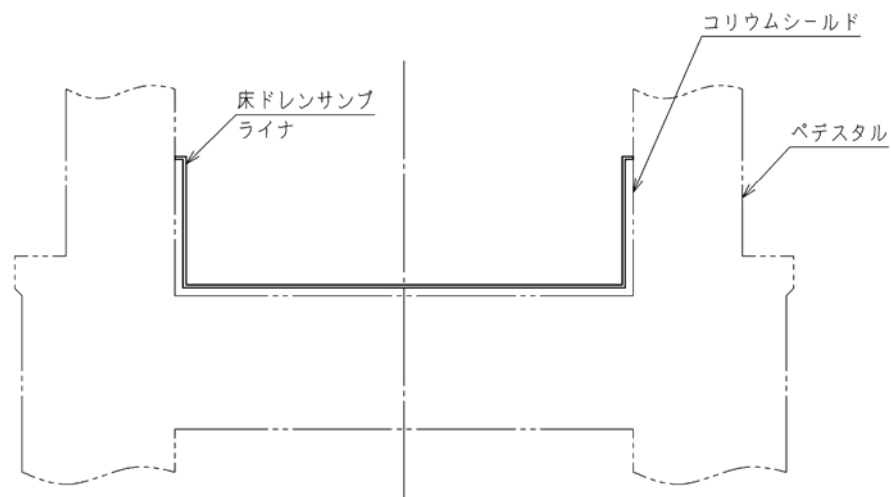


図 7-1 床ドレンサンプライナの概要

## 7.2 機能維持の方針

床ドレンサンプライナの構造、形状及び寸法を図 7-2 に示す。

床ドレンサンプライナは、原子炉本体の基礎の側面及び底面に敷き詰められたシールド材の表面に、ステンレス製のライナが内張りされる構造となっており、耐漏洩機能を有している。そのため、地震時に対してライナは強度部材として扱わず、分割したシールド材をコリウムシールドのサポートにより支持する構造としている。また、5.3 項に示すとおり、コリウムシールドに作用する鉛直震度は 1.0 未満であり、浮き上がりが生じない構造であるため、床ドレンサンプライナに対する鉛直地震荷重は作用しない。

内側シールド材は、目地材により外側シールド材に接着されており、水平方向支持材で内側シールド材の一部を拘束する構造となっている。本書では、内側シールド材にライナ方向の水平荷重が作用した場合に、全て床ドレンサンプライナが荷重負担することを仮定し、耐震評価を実施する。鉛直地震荷重に対しては、床ドレンサンプライナに対する荷重が伝達されないため、底面部のライナは評価対象外とする。

床ドレンサンプライナの評価にあたっては、水平方向支持材の高さ方向のピッチに着目し、保守的なピッチ (  mm ) を設定する。

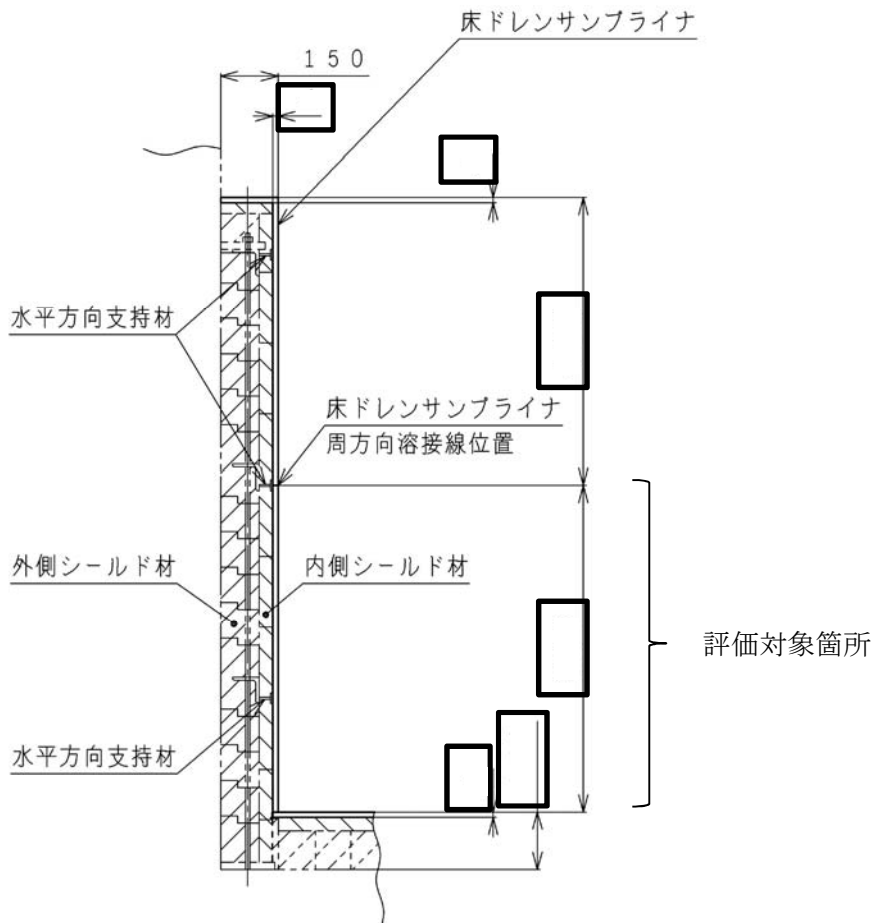


図 7-2 床ドレンサンプライナの構造、形状及び寸法

### 7.3 評価内容

#### 7.3.1 応力評価方法

##### (1) 曲げ応力

図 7-2 に示す範囲の内側シールド材の水平地震荷重がライナに等分布荷重として作用するものと考え、図 7-3 に示す両端固定はりとして計算する。

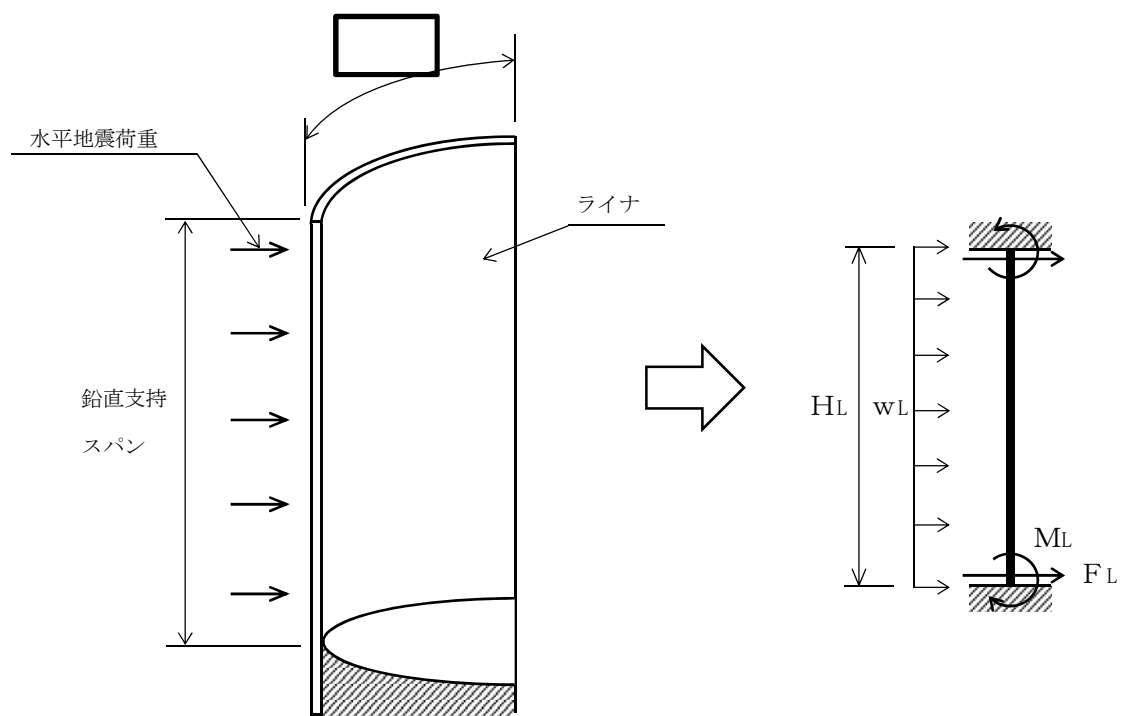


図 7-3 計算モデル

- a. 水平方向地震による等分布荷重

$$w_L = \frac{W_L \cdot C_H}{H_L}$$

ここで、

$W_L$ : ライナが負担する死荷重 =  N

$H_L$ : 鉛直支持スパン =  mm

- b. ライナに作用する曲げモーメント

$$M_L = \frac{w_L \cdot H_L^2}{12}$$

- c. ライナに作用するせん断力

$$F_L = w_L \cdot \left( \frac{H_L}{2} \right)$$

(2) 応力計算

a. ライナの曲げ応力

$$\sigma_{bL} = \frac{M_L}{Z_L}$$

ここで,

$$Z_L = \boxed{\phantom{000000}} \text{ mm}^3$$

b. ライナのせん断応力

$$\tau_L = \frac{F_L}{A_L}$$

ここで,

$$A_L : \text{ライナのせん断断面積} = \boxed{\phantom{000000}} \text{ mm}^2$$

c. ライナの組合せ応力

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_{bL}^2 + 3 \cdot \tau_L^2}$$

(3) 使用材料の許容応力評価条件

床ドレンサンプライナの使用材料の許容応力評価条件を表 7-1 に示す。

表 7-1 使用材料の許容応力評価条件

評価部材	材料	温度条件 (°C)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)
床ドレンサンプライナ	SUS304	40	205	520

(4) 荷重の組合せ及び許容応力

床ドレンサンプライナの機能維持評価として、荷重の組合せを表 7-2 に示し、許容応力を表 7-3 に示す。

表7-2 荷重の組合せ及び荷重の種類

施設区分		機器名称	耐震設計上の 重要度分類	機器等 の区分	荷重の 組合せ	荷重の 種類
放射性 廃棄物の 廃棄施設	気体、液体又は 固体廃棄物 処理設備	床ドレンサンプ ライナ	B	—	D + S <sub>s</sub>	短期荷重



表7-3 許容応力

(単位：MPa)

材料	荷重の種類	基準応力 F <sup>*1</sup>	許容応力 <sup>*2</sup>			
			引張応力 1.5・f <sub>t</sub>	曲げ応力 1.5・f <sub>b</sub>	せん断応力 1.5・f <sub>s</sub>	組合せ応力 1.5・f <sub>t</sub>
SUS304	短期荷重	205	—	236	118	205

注記 \*1：基準応力Fは以下の計算式で求める。

$$F = \text{Min} (S_y, 0.7 \cdot S_u)$$

ここで、

S<sub>y</sub>：材料の設計降伏点

S<sub>u</sub>：材料の設計引張強さ

\*2：f<sub>t</sub>、f<sub>b</sub>、f<sub>s</sub>はそれぞれ以下の計算式で求める。

$$f_t = F / 1.5$$

$$f_b = F / 1.5 \text{ 又は } F / 1.3$$

$$f_s = F / (1.5 \cdot \sqrt{3})$$

### 7.3.2 応力評価結果

床ドレンサンプライナの応力評価結果を表7-4に示す。算出応力は許容応力を満足しており、耐震性を有することを確認した。

表7-4 短期荷重に対する応力評価結果 (D+S<sub>s</sub>)

部 材	材 料	応 力	短期荷重	
			算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
床ドレンサンプ ライナ	SUS304	曲げ	σ <sub>BL</sub> = 51	236
		せん断	τ <sub>L</sub> = 1	118
		組合せ	σ <sub>L</sub> = 51	205

すべて許容値以下である。