

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-004-07改01
提出年月日	2022年 10月 20日

VI-2-4-3-1-1 燃料プール冷却系熱交換器の耐震性についての計算書

S2 補 VI-2-4-3-1-1 R0

2022年 10月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	3
2.3 適用規格・基準等	4
2.4 記号の説明	5
2.5 計算精度と数値の丸め方	9
3. 評価部位	10
4. 固有周期	10
4.1 固有周期の計算方法	10
4.2 固有周期の計算条件	11
4.3 固有周期の計算結果	12
5. 地震応答解析及び構造強度評価	13
5.1 地震応答解析及び構造強度評価方法	13
5.2 荷重の組合せ及び許容応力	13
5.3 解析モデル及び諸元	18
5.4 設計用地震力	20
5.5 計算方法	21
5.6 計算条件	28
5.7 応力の評価	28
6. 評価結果	30
6.1 重大事故等対処設備としての評価結果	30

## 1. 概要

本計算書は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、燃料プール冷却系熱交換器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。

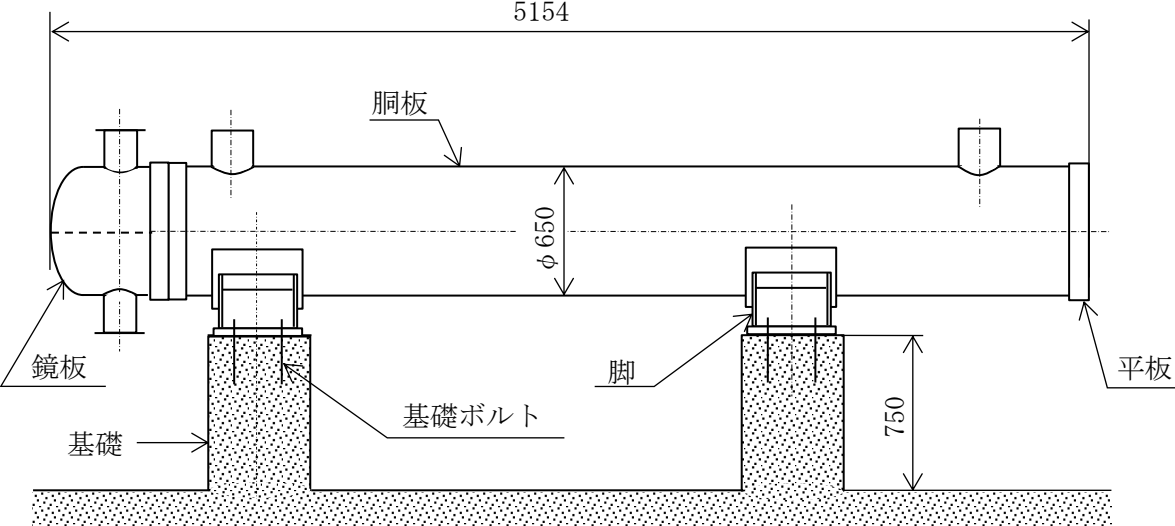
燃料プール冷却系熱交換器は、重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備に分類される。以下、重大事故等対処設備としての構造強度評価を示す。

## 2. 一般事項

### 2.1 構造計画

燃料プール冷却系熱交換器の構造計画を表 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>胴を2個の脚で支持し、脚をそれぞれ基礎ボルトで基礎に据え付ける。</p>	<p>水室側に鏡板，胴側に平板を有する横置一胴円筒形容器</p>	 <p style="text-align: right;">(単位：mm)</p>

## 2.2 評価方針

燃料プール冷却系熱交換器の応力評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」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」にて示す燃料プール冷却系熱交換器の部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4. 固有周期」にて算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「5. 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「6. 評価結果」に示す。

燃料プール冷却系熱交換器の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

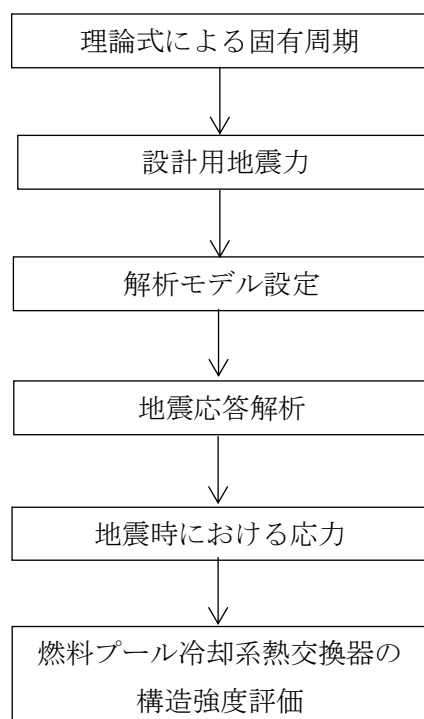


図 2-1 燃料プール冷却系熱交換器の耐震評価フロー

### 2.3 適用規格・基準等

本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 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-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 -1987 （（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）
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格（（社）日本機械学会，2005/2007）（以下「設計・建設規格」という。）

## 2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
$A_b$	基礎ボルトの軸断面積	$\text{mm}^2$
$A_s$	第1脚の断面積	$\text{mm}^2$
$A_{s1}$	第1脚の長手方向に対する有効せん断断面積	$\text{mm}^2$
$A_{s2}$	第1脚の横方向に対する有効せん断断面積	$\text{mm}^2$
$A_{s3}$	第1脚の長手方向に対するせん断断面積	$\text{mm}^2$
$A_{s4}$	第1脚の横方向に対するせん断断面積	$\text{mm}^2$
$a$	第1脚底板の長手方向幅	$\text{mm}$
$b$	第1脚底板の横方向幅	$\text{mm}$
$C_H$	水平方向設計震度	—
$C_v$	鉛直方向設計震度	—
$D_i$	胴の内径	$\text{mm}$
$d$	基礎ボルトの呼び径	$\text{mm}$
$d_1$	第1脚底板端面から基礎ボルト中心までの長手方向の距離	$\text{mm}$
$d_2$	第1脚底板端面から基礎ボルト（外側）中心までの横方向の距離	$\text{mm}$
$E$	胴の縦弾性係数	$\text{MPa}$
$E_s$	脚の縦弾性係数	$\text{MPa}$
$e$	第1脚中心から偏心荷重作用点までの距離	$\text{mm}$
$F^*$	設計・建設規格 SSB-3121.3又はSSB-3133に定める値	$\text{MPa}$
$F_{c1}$	横方向及び鉛直方向地震時に脚底面に生じるせん断荷重	$\text{N}$
$F_{\ell 3}$	長手方向及び鉛直方向地震時に脚底面に生じるせん断荷重	$\text{N}$
$F_{sb c}$	横方向及び鉛直方向地震時に脚に生じるせん断荷重	$\text{N}$
$F_{sb \ell}$	長手方向及び鉛直方向地震時に脚に生じるせん断荷重	$\text{N}$
$F_{ts c}$	横方向及び鉛直方向地震時に脚に生じる引張荷重	$\text{N}$
$F_{ts \ell}$	長手方向及び鉛直方向地震時に脚に生じる引張荷重	$\text{N}$
$f_{sb}$	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	$\text{MPa}$
$f_{tm}$	脚の許容引張応力	$\text{MPa}$
$f_{to}$	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	$\text{MPa}$
$f_{ts}$	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力（許容組合せ応力）	$\text{MPa}$
$G_s$	脚のせん断弾性係数	$\text{MPa}$
$g$	重力加速度（=9.80665）	$\text{m/s}^2$
$h_1$	基礎から第1脚の胴付け根部までの高さ	$\text{mm}$
$h_2$	基礎から胴の中心までの高さ	$\text{mm}$

記号	記号の説明	単位
$I_{s x}$	第1脚の長手方向軸に対する断面二次モーメント	$\text{mm}^4$
$I_{s y}$	第1脚の横方向軸に対する断面二次モーメント	$\text{mm}^4$
$K_c$	第1脚のばね定数（胴の横方向に水平力が作用する場合）	$\text{N/m}$
$K_\ell$	第1脚のばね定数（胴の長手方向に水平力が作用する場合）	$\text{N/m}$
$K_v$	第1脚のばね定数（胴に鉛直力が作用する場合）	$\text{N/m}$
$M$	長手方向及び鉛直方向地震時に脚底面に生じる曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
$M_3$	横方向及び鉛直方向地震時に脚底面に生じるねじりモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
$M_{c 1}$	横方向及び鉛直方向地震時に脚底面に生じる曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
$M_{s c}$	横方向及び鉛直方向地震時に第1脚に生じる曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
$M_{s \ell}$	長手方向及び鉛直方向地震時に第1脚に生じる曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
$M_{s z}$	横方向及び鉛直方向地震時に第1脚に生じるねじりモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
$m_0$	容器の運転時質量	$\text{kg}$
$n$	脚1個当たりの基礎ボルトの本数	—
$n_1$	長手方向及び鉛直方向地震時に引張を受ける基礎ボルトの本数	—
$n_2$	横方向及び鉛直方向地震時に引張を受ける基礎ボルトの本数	—
$P_s$	長手方向及び鉛直方向地震により生じる鉛直荷重	$\text{N}$
$P_{s 1}$	横方向及び鉛直方向地震により生じる鉛直荷重	$\text{N}$
$S$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表5に定める値	$\text{MPa}$
$S_a$	胴の許容応力	$\text{MPa}$
$S_u$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	$\text{MPa}$
$S_y$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	$\text{MPa}$
$S_y(R T)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める材料の 40°Cにおける値	$\text{MPa}$
$s$	基礎ボルトと基礎の縦弾性係数比	—
$T_1$	長手方向固有周期	$\text{s}$
$T_2$	横方向固有周期	$\text{s}$
$T_3$	鉛直方向固有周期	$\text{s}$
$t$	第1脚側胴板の厚さ	$\text{mm}$
$t_0$	第1脚付け根部における胴の当板厚さ	$\text{mm}$
$Z_{s x}$	第1脚の長手方向軸における断面係数	$\text{mm}^3$
$Z_{s y}$	第1脚の横方向軸における断面係数	$\text{mm}^3$
$Z_{s p}$	第1脚のねじり断面係数	$\text{mm}^3$
$\pi$	円周率	—
$\sigma_0$	胴の組合せ一次一般膜応力の最大値	$\text{MPa}$
$\sigma_{0 c}$	横方向及び鉛直方向地震により胴に生じる一次一般膜応力	$\text{MPa}$
$\sigma_{0 \ell}$	長手方向及び鉛直方向地震により胴に生じる一次一般膜応力	$\text{MPa}$



記号	記号の説明	単位
$\sigma_{0xc}, \sigma_{0yc}$	一次一般膜応力の算出における横方向及び鉛直方向地震により 胴に生じる長手方向及び周方向の垂直応力	MPa
$\sigma_{0xl}, \sigma_{0yl}$	一次一般膜応力の算出における長手方向及び鉛直方向地震により 胴に生じる長手方向及び周方向の垂直応力	MPa
$\sigma_1$	胴に生じる一次応力の最大値	MPa
$\sigma_{1c}$	横方向及び鉛直方向地震により胴に生じる一次応力	MPa
$\sigma_{1l}$	長手方向及び鉛直方向地震により胴に生じる一次応力	MPa
$\sigma_{1xc}, \sigma_{1yc}$	一次応力の算出における横方向及び鉛直方向地震により胴に生 じる長手方向及び周方向の垂直応力	MPa
$\sigma_{1xl}, \sigma_{1yl}$	一次応力の算出における長手方向及び鉛直方向地震により胴に 生じる長手方向及び周方向の垂直応力	MPa
$\sigma_2$	胴に生じる一次+二次応力の最大値	MPa
$\sigma_{2c}$	横方向及び鉛直方向地震により胴に生じる一次+二次応力	MPa
$\sigma_{2l}$	長手方向及び鉛直方向地震により胴に生じる一次+二次応力	MPa
$\sigma_{2xc}, \sigma_{2yc}$	一次+二次応力の算出における横方向及び鉛直方向地震により 胴に生じる長手方向及び周方向の垂直応力	MPa
$\sigma_{2xl}, \sigma_{2yl}$	一次+二次応力の算出における長手方向及び鉛直方向地震によ り胴に生じる長手方向及び周方向の垂直応力	MPa
$\sigma_b$	基礎ボルトに生じる引張応力の最大値	MPa
$\sigma_{b1}$	長手方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
$\sigma_{b2}$	横方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
$\sigma_{cs}$	脚に生じる組合せ応力の最大値	MPa
$\sigma_{csc}$	横方向及び鉛直方向地震時の脚に生じる組合せ応力	MPa
$\sigma_{csl}$	長手方向及び鉛直方向地震時の脚に生じる組合せ応力	MPa
$\sigma_s$	第1脚の組合せ応力の最大値	MPa
$\sigma_{sc}$	横方向及び鉛直方向地震時の脚に生じる引張応力	MPa
$\sigma_{sl}$	長手方向及び鉛直方向地震時の脚に生じる引張応力	MPa
$\tau_{0xyc}$	一次一般膜応力の算出における横方向及び鉛直方向地震により 胴に生じるせん断応力	MPa
$\tau_{0xyl}$	一次一般膜応力の算出における長手方向及び鉛直方向地震によ り胴に生じるせん断応力	MPa
$\tau_{1xyc}$	一次応力の算出における横方向及び鉛直方向地震により胴に生 じるせん断応力	MPa
$\tau_{1xyl}$	一次応力の算出における長手方向及び鉛直方向地震により胴に 生じるせん断応力	MPa
$\tau_{2xyc}$	一次+二次応力の算出における横方向及び鉛直方向地震により 胴に生じるせん断応力	MPa

記号	記号の説明	単位
$\tau_{2xy\theta}$	一次＋二次応力の算出における長手方向及び鉛直方向地震により胴に生じるせん断応力	MPa
$\tau_b$	基礎ボルトに生じるせん断応力の最大値	MPa
$\tau_{b1}$	長手方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
$\tau_{b2}$	横方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
$\tau_{sc}$	横方向及び鉛直方向地震により脚に生じるせん断応力	MPa
$\tau_{s\theta}$	長手方向及び鉛直方向地震により脚に生じるせん断応力	MPa

## 2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字 6 桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表 2-2 に示すとおりである。

表 2-2 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
固有周期		s	小数点以下第 4 位	四捨五入	小数点以下第 3 位
震度		—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
最高使用圧力		MPa	—	—	小数点以下第 2 位
温度		℃	—	—	整数位
質量		kg	—	—	整数位
長さ	下記以外の長さ	mm	—	—	整数位 <sup>*1</sup>
	胴板の厚さ	mm	—	—	小数点以下第 1 位
面積		mm <sup>2</sup>	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 <sup>*2</sup>
モーメント		N・mm	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 <sup>*2</sup>
力		N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 <sup>*2</sup>
算出応力		MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力 <sup>*3</sup>		MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記\*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：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の間における引張強さ及び降伏点は、比例法により補間した値の小数点以下第 1 位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

燃料プール冷却系熱交換器の耐震評価は、「5.1 地震応答解析及び構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる胴、脚及び基礎ボルトについて実施する。燃料プール冷却系熱交換器の耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。

4. 固有周期

4.1 固有周期の計算方法

燃料プール冷却系熱交換器の固有周期の計算方法を以下に示す。

(1) 計算モデル

モデル化に当たっては次の条件で行う。

- a. 容器及び内容物の質量は胴の中心軸に集中するものとする。
- b. 容器の胴は 2 個の脚で支持され、脚はそれぞれ基礎ボルトで基礎に固定されており、固定端とする。
- c. 胴は剛体とし、脚をはりと考え、変形モードは脚の曲げ及びせん断変形を考慮する。
- d. 脚が長手方向に変形する場合、脚を基礎に取り付ける基礎ボルトが、脚の変形方向に直角な方向より見て脚 1 個につき 2 列以上であるため、下端を固定とする。
- e. 第 2 脚は長手方向にスライドすることから、その方向の力はすべて第 1 脚で受けるものとする。
- f. 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

本容器は、前記の条件より図 4-1、図 4-2 及び図 4-3 のような 1 質点系振動モデルとして考える。

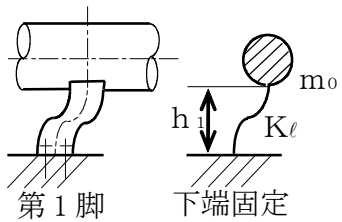


図 4-1 長手方向の固有周期  
計算モデル

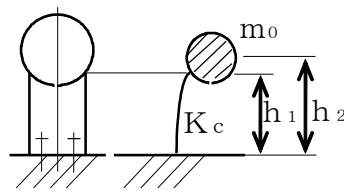


図 4-2 横方向の固有周期  
計算モデル

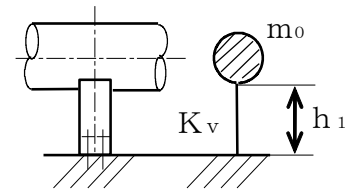


図 4-3 鉛直方向の固有周期  
計算モデル

(2) 長手方向の固有周期

図 4-1 におけるばね定数は次式で求める。

$$K_{\ell} = \frac{1000}{\frac{h_1^3}{12 \cdot E_s \cdot I_{s y}} + \frac{h_1}{G_s \cdot A_{s 1}}} \dots\dots\dots (4.1.1)$$

固有周期は次式で求める。

$$T_1 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{K_{\ell}}} \dots\dots\dots (4.1.2)$$

(3) 横方向の固有周期

図 4-2 におけるばね定数は次式で求める。

$$K_c = \frac{1000}{\frac{h_1^2 \cdot (3 \cdot h_2 - h_1)}{6 \cdot E_s \cdot I_{s x}} + \frac{(h_2 - h_1) \cdot h_1 \cdot (h_2 - h_1 / 2)}{E_s \cdot I_{s x}} + \frac{h_1}{G_s \cdot A_{s 2}}} \dots\dots\dots (4.1.3)$$

固有周期は次式で求める。

$$T_2 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{2 \cdot K_c}} \dots\dots\dots (4.1.4)$$

(4) 鉛直方向の固有周期

図 4-3 におけるばね定数は次式で求める。

$$K_v = \frac{1000}{\frac{h_1}{A_s \cdot E_s}} \dots\dots\dots (4.1.5)$$

固有周期は次式で求める。

$$T_3 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{2 \cdot K_v}} \dots\dots\dots (4.1.6)$$

4.2 固有周期の計算条件

固有周期の計算に用いる計算条件は、本計算書の【燃料プール冷却系熱交換器の耐震性についての計算結果】の機器要目に示す。

#### 4.3 固有周期の計算結果

固有周期の計算結果を表 4-1 に示す。計算の結果、固有周期は 0.05 秒以下であり、剛構造であることを確認した。

表 4-1 固有周期 (単位 : s)

水平	
鉛直	

## 5. 地震応答解析及び構造強度評価

### 5.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) 「5.3 解析モデル及び諸元」に示す解析モデルを用いた解析により胴の応力を求める。
- (2) 「5.3 解析モデル及び諸元」に示す解析モデルを用いた解析により求めた荷重（脚底面に作用する荷重及びモーメント）をもとに、脚及び基礎ボルトの応力を求める。
- (3) 地震力は、燃料プール冷却系熱交換器に対して水平方向及び鉛直方向から個別に作用するものとする。胴については、強度評価において組み合わせるものとする。また、脚及び基礎ボルトにおいては、作用する荷重の算出において組み合わせるものとする。ここで、水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには、S R S S法を用いる。
- (4) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

### 5.2 荷重の組合せ及び許容応力

#### 5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

燃料プール冷却系熱交換器の荷重の組合せ及び許容応力状態のうち、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 5-1 に示す。

#### 5.2.2 許容応力

燃料プール冷却系熱交換器の許容応力は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表 5-2 及び表 5-3 のとおりとする。

#### 5.2.3 使用材料の許容応力評価条件

燃料プール冷却系熱交換器の使用材料の許容応力評価条件のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 5-4 に示す。

表 5-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類 <sup>*1</sup>	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の 取扱施設及び 貯蔵施設	使用済燃料 貯蔵槽冷却 浄化設備	燃料プール冷却系熱交換器	常設耐震／防止	重大事故等 <sup>*2</sup> クラス 2 容器	$D + P_D + M_D + S_s$ <sup>*3</sup>	IVAS
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	VAS (VASとして IVASの許容限界 を用いる。)

注記\*1：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備を示す。

\*2：重大事故等クラス 2 容器の支持構造物を含む。

\*3：「 $D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$ 」の評価に包絡されるため、評価結果の記載を省略する。



表 5-2 許容応力（重大事故等クラス 2 容器）

許容応力状態	許容限界*1			
	一次一般膜応力	一次膜応力+ 一次曲げ応力	一次+二次応力	一次+二次+ ピーク応力
IVAS	0.6・S <sub>u</sub>	左欄の 1.5 倍の値	<p style="text-align: right;">*2</p> 基準地震動 S <sub>s</sub> のみによる疲労解析を行い、疲労累積係数が 1.0 以下であること。 ただし、地震動のみによる一次+二次応力の変動値が 2・S <sub>y</sub> 以下であれば、疲労解析は不要	
VAS (VASとしてIVASの 許容限界を用いる。)				

注記\*1：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

\*2：2・S<sub>y</sub>を超えるときは弾塑性解析を行う。この場合，設計・建設規格 PVB-3300（PVB-3313を除く。S<sub>m</sub>は2/3・S<sub>y</sub>と読み替える。）の簡易弾塑性解析を用いる。

表 5-3 許容応力 (重大事故等クラス 2 支持構造物)

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト等以外)	許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力	一次応力	
	引張	引張	せん断
IV <sub>A</sub> S	1.5・f <sub>t</sub> *	1.5・f <sub>t</sub> *	1.5・f <sub>s</sub> *
V <sub>A</sub> S (V <sub>A</sub> SとしてIV <sub>A</sub> Sの許容限界 を用いる。)			

注記\*1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

\*2：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 5-4 使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)	S <sub>y</sub> (R T) (MPa)
		最高使用温度	100				
胴	SM41A* <sup>1</sup> (厚さ ≤ 16mm)	最高使用温度	100	—	221	373	—
脚	SM41A* <sup>1</sup> (16mm < 厚さ ≤ 40mm)	最高使用温度	100	—	212	373	—
基礎ボルト	SS41* <sup>2</sup> (16mm < 径 ≤ 40mm)	周囲環境温度	100	—	212	373	—

注記 \*1 : SM400A 相当

\*2 : SS400 相当

### 5.3 解析モデル及び諸元

燃料プール冷却系熱交換器の解析モデルを図5-1に、解析モデルの概要を以下に示す。また、機器の諸元を表5-5、本計算書の【燃料プール冷却系熱交換器の耐震性についての計算結果】の機器要目及びその他の機器要目に示す。

- (1) 燃料プール冷却系熱交換器の胴及び脚をシェル要素でモデル化した3次元FEMモデルを用いる。
- (2) 拘束条件は、固定脚(第1脚)を脚底面ボルト位置で変位3方向(X, Y, Z)拘束、脚底面を鉛直方向(Z)拘束とする。また、摺動脚(第2脚)を脚底面ボルト位置で変位2方向(X, Z)拘束、脚底面を鉛直方向(Z)拘束とする。
- (3) 解析コードは、「Simcenter Nastran」を使用し、胴の応力を求める。また脚底面に発生する荷重及びモーメントを求め、脚及び基礎ボルトの応力を評価する。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

表5-5 機器諸元

項目		記号	単位	入力値
材質	胴	—	—	SM41A*
	脚	—	—	SM41A*
質量		$m_0$	kg	
温度条件	胴	—	℃	100
	脚	—	℃	100
縦弾性係数	胴	E	MPa	198000
	脚	$E_s$	MPa	198000
ポアソン比		$\nu$	—	0.3
要素数		—	個	13728
節点数		—	個	13697

注記\* : SM400A相当

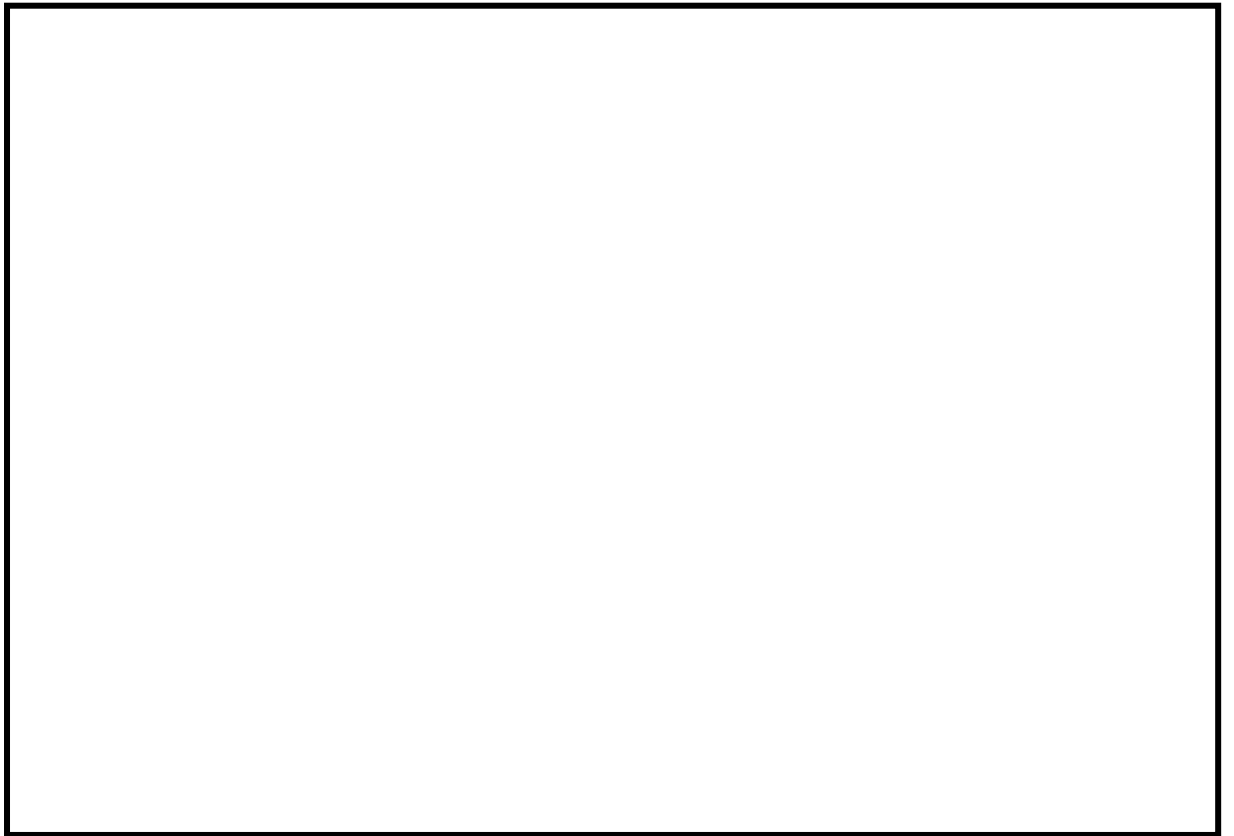


図5-1 解析モデル

#### 5.4 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 5-6 に示す。

「基準地震動 S<sub>s</sub>」による地震力は、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。

表 5-6 設計用地震力（重大事故等対処設備）

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 <sub>d</sub> 又は静的震度		基準地震動 S <sub>s</sub>	
	水平方向	鉛直方向	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
原子炉建物 EL 34.8 <sup>*1</sup>			—	—	C <sub>H</sub> =2.07 <sup>*2</sup>	C <sub>V</sub> =2.39 <sup>*2</sup>

注記\*1：基準床レベルを示す。

\*2：設計用震度Ⅱ（基準地震動 S<sub>s</sub>）

## 5.5 計算方法

### 5.5.1 応力の計算方法

#### 5.5.1.1 胴の計算方法

胴については、解析により得られるFEMモデルの各要素の応力成分から、以下の式を用いて応力を算出する。FEM解析による胴の応力成分を表5-7に、評価点の位置を図5-2に示す。

#### (1) 鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

##### a. 一次一般膜応力

$$\sigma_{0l} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{0xl} + \sigma_{0yl}) + \sqrt{(\sigma_{0xl} - \sigma_{0yl})^2 + 4 \cdot \tau_{0xyl}^2} \right\}$$

..... (5.5.1.1.1)

##### b. 一次応力

$$\sigma_{1l} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{1xl} + \sigma_{1yl}) + \sqrt{(\sigma_{1xl} - \sigma_{1yl})^2 + 4 \cdot \tau_{1xyl}^2} \right\}$$

..... (5.5.1.1.2)

##### c. 一次+二次応力

$$\sigma_{2l} = (\sigma_{2xl} + \sigma_{2yl}) + \sqrt{(\sigma_{2xl} - \sigma_{2yl})^2 + 4 \cdot \tau_{2xyl}^2}$$

..... (5.5.1.1.3)

#### (2) 鉛直方向と横方向地震が作用した場合

##### a. 一次一般膜応力

$$\sigma_{0c} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{0xc} + \sigma_{0yc}) + \sqrt{(\sigma_{0xc} - \sigma_{0yc})^2 + 4 \cdot \tau_{0xyc}^2} \right\}$$

..... (5.5.1.1.4)

##### b. 一次応力

$$\sigma_{1c} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{1xc} + \sigma_{1yc}) + \sqrt{(\sigma_{1xc} - \sigma_{1yc})^2 + 4 \cdot \tau_{1xyc}^2} \right\}$$

..... (5.5.1.1.5)

##### c. 一次+二次応力

$$\sigma_{2c} = (\sigma_{2xc} + \sigma_{2yc}) + \sqrt{(\sigma_{2xc} - \sigma_{2yc})^2 + 4 \cdot \tau_{2xyc}^2}$$

..... (5.5.1.1.6)

(3) 胴に生じる最大応力

(1)及び(2)より求められた胴の応力のうち最大のものを $\sigma_0$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ とする。

a. 一次一般膜応力

$$\sigma_0 = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{0\ell}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{0c}) \} \dots\dots\dots (5.5.1.1.7)$$

b. 一次応力

$$\sigma_1 = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{1\ell}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{1c}) \} \dots\dots\dots (5.5.1.1.8)$$

c. 一次+二次応力

$$\sigma_2 = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{2\ell}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{2c}) \} \dots\dots\dots (5.5.1.1.9)$$

表5-7 FEM解析による胴の応力成分 (基準地震動Ss)

応力	内訳		応力値				単位
			鉛直+長手方向		鉛直+横方向		
一次一般膜応力	垂直応力	長手方向	$\sigma_{0x\ell}$	51	$\sigma_{0xc}$	51	MPa
		周方向	$\sigma_{0y\ell}$	29	$\sigma_{0yc}$	29	MPa
	せん断応力		$\tau_{0xy\ell}$	3	$\tau_{0xyc}$	3	MPa
一次応力	垂直応力	長手方向	$\sigma_{1x\ell}$	49	$\sigma_{1xc}$	50	MPa
		周方向	$\sigma_{1y\ell}$	28	$\sigma_{1yc}$	30	MPa
	せん断応力		$\tau_{1xy\ell}$	13	$\tau_{1xyc}$	31	MPa
一次+二次応力	垂直応力	長手方向	$\sigma_{2x\ell}$	22	$\sigma_{2xc}$	82	MPa
		周方向	$\sigma_{2y\ell}$	16	$\sigma_{2yc}$	68	MPa
	せん断応力		$\tau_{2xy\ell}$	17	$\tau_{2xyc}$	59	MPa



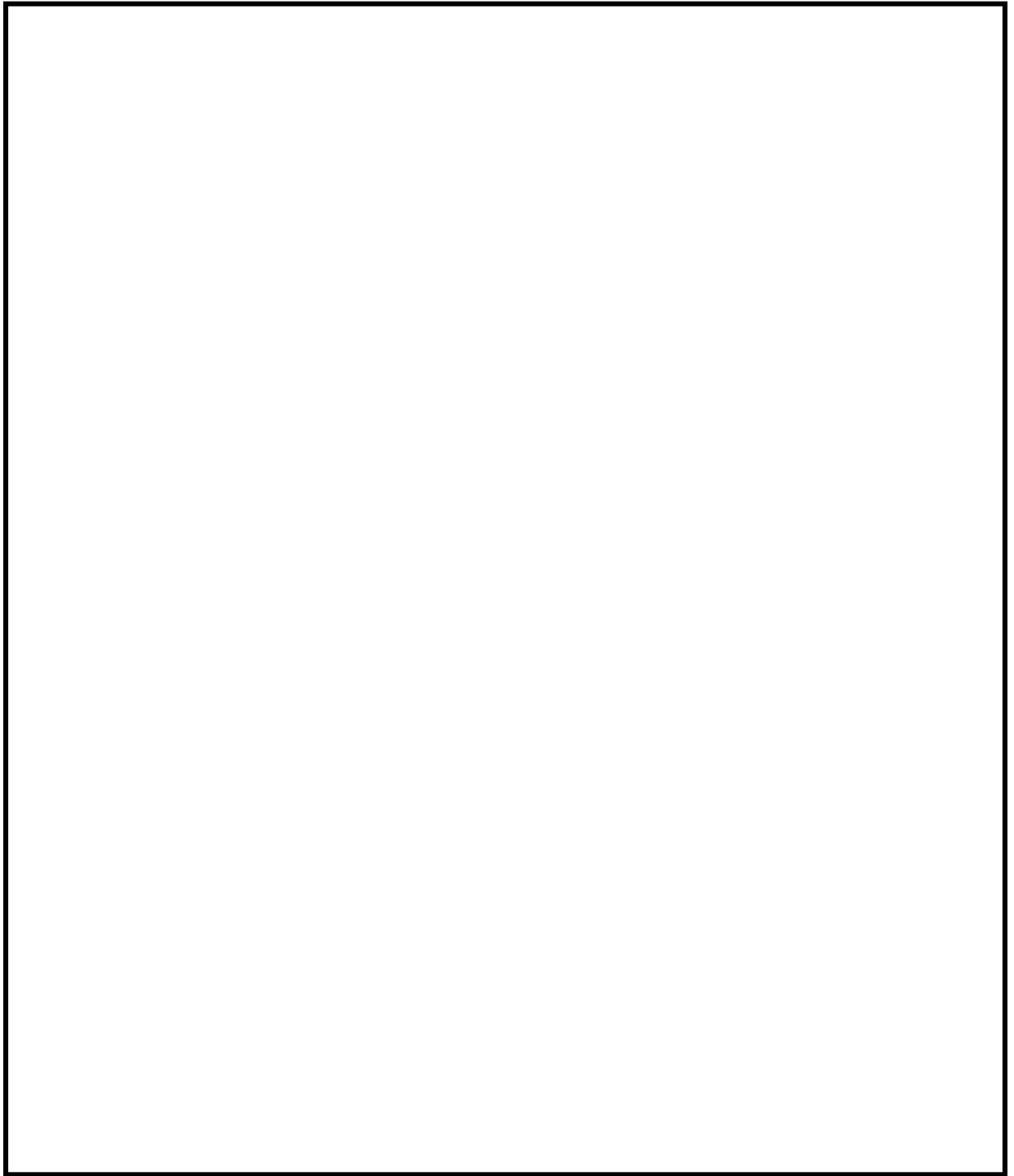


図5-2 評価点の位置

5.5.1.2 脚の計算方法

脚については、解析により得られる荷重及びモーメントから、以下の式を用いて応力を算出する。

(1) 鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

a. 引張応力

$$\sigma_{s\ell} = \frac{F_{t s \ell}}{A_s} + \frac{M_{s \ell}}{Z_{s y}} \dots\dots\dots (5.5.1.2.1)$$

b. せん断応力

$$\tau_{s\ell} = \frac{F_{s b \ell}}{A_{s 3}} \dots\dots\dots (5.5.1.2.2)$$

c. 組合せ応力

$$\sigma_{c s \ell} = \sqrt{\sigma_{s \ell}^2 + 3 \cdot \tau_{s \ell}^2} \dots\dots\dots (5.5.1.2.3)$$

(2) 鉛直方向と横方向地震が作用した場合

a. 引張応力

$$\sigma_{s c} = \frac{F_{t s c}}{A_s} + \frac{M_{s c}}{Z_{s x}} \dots\dots\dots (5.5.1.2.4)$$

b. せん断応力

$$\tau_{s c} = \frac{F_{s b c}}{A_{s 4}} + \frac{M_{s z}}{Z_{s p}} \dots\dots\dots (5.5.1.2.5)$$

c. 組合せ応力

$$\sigma_{c s c} = \sqrt{\sigma_{s c}^2 + 3 \cdot \tau_{s c}^2} \dots\dots\dots (5.5.1.2.6)$$

(3) 脚に生じる最大応力

(1)及び(2)より求められた脚の組合せ応力のうち最大のものを $\sigma_{c s}$ とする。

$$\sigma_{c s} = \text{Max} (\sigma_{c s \ell}, \sigma_{c s c}) \dots\dots\dots (5.5.1.2.7)$$

5.5.1.3 基礎ボルトの計算方法

(1) 鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

a. 引張応力

長手方向地震が作用した場合に脚底面に作用するモーメント $M$ 及び鉛直荷重 $P_s$ は、解析により求める。

ここで、モーメントと鉛直荷重の比を

$$e = M / P_s \quad \dots\dots\dots (5.5.1.3.1)$$

とする。

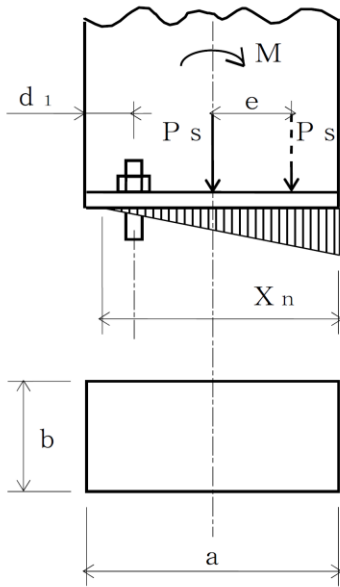


図5-3 基礎部に作用する外荷重より生じる荷重の関係 (その1)

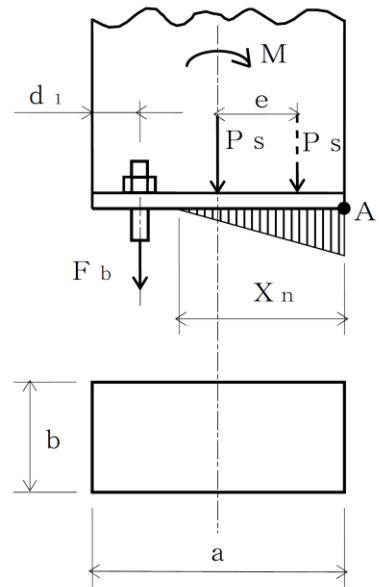


図5-4 基礎部に作用する外荷重より生じる荷重の関係 (その2)

図5-3のように脚底面においてボルト位置に圧縮荷重がかかる状況では基礎ボルトに引張力は作用しないため、引張力の評価は行わない。

一方、図5-4のように、ボルト位置に圧縮荷重がかからない状況に相当する

$$e > \frac{a}{6} + \frac{d_1}{3} \quad \dots\dots\dots (5.5.1.3.2)$$

の場合及び $e$ が負の場合に、基礎ボルトに引張力が生じる。

このとき図5-3において、鉛直荷重の釣合い、A点回りのモーメントの釣合い、基礎ボルトの伸びと基礎の縮みの関係から中立軸の位置 $X_n$ は

$$X_n^3 + 3 \cdot \left(e - \frac{a}{2}\right) \cdot X_n^2 - \frac{6 \cdot s \cdot A_b \cdot n_1}{b} \cdot \left(e + \frac{a}{2} - d_1\right) \cdot (a - d_1 - X_n) = 0 \quad \dots\dots\dots (5.5.1.3.3)$$

より求めることができ、基礎ボルトに生じる引張力は

$$F_b = \frac{P_s \cdot \left(e - \frac{a}{2} + \frac{X_n}{3}\right)}{a - d_1 - \frac{X_n}{3}} \quad \dots\dots\dots (5.5.1.3.4)$$

となる。

したがって、基礎ボルトに生じる引張応力は次のようになる。

$$\sigma_{b1} = \frac{F_b}{n_1 \cdot A_b} \quad \dots\dots\dots (5.5.1.3.5)$$

ここで、基礎ボルトの軸断面積 $A_b$ は次式により求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \dots\dots\dots (5.5.1.3.6)$$

b. せん断応力

長手方向地震が作用した場合に脚底面に生じるせん断力 $F_{\ell 3}$ は、解析により求める。このとき基礎ボルトに生じるせん断応力は次のようになる。

$$\tau_{b1} = \frac{F_{\ell 3}}{n \cdot A_b} \quad \dots\dots\dots (5.5.1.3.7)$$

(2) 鉛直方向と横方向地震が作用した場合

横方向地震が作用した場合に脚底面に作用するモーメント $M_{c1}$ 及び鉛直荷重 $P_{s1}$ は、解析により求める。

a. 引張応力

(1)と同様にして引張応力は求められるが、 $M$ を $M_{c1}$ 、 $P_s$ を $P_{s1}$ 、 $d_1$ を $d_2$ 、 $a$ を $b$ 、 $b$ を $a$ 及び $n_1$ を $n_2$ に置き換え、得られた基礎ボルトの応力を $\sigma_{b2}$ とする。

b. せん断応力

横方向地震が作用した場合に脚底面に生じるせん断力 $F_{c1}$ 及びねじりモーメント $M_3$ は、解析により求める。このとき基礎ボルトに生じるせん断応力は次のようになる。

$$\tau_{b2} = \frac{F_{c1}}{n \cdot A_b} + \frac{M_3}{n \cdot A_b \cdot \sqrt{\left(\frac{a - 2 \cdot d_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{b - 2 \cdot d_2}{2}\right)^2}} \dots\dots\dots (5.5.1.3.8)$$

(3) 基礎ボルトに生じる最大応力

(1)及び(2)より求められた基礎ボルトの応力のうち最大のものを $\sigma_b$ 及び $\tau_b$ とする。

a. 基礎ボルトの最大引張応力

$$\sigma_b = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{b1}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{b2}) \} \dots\dots\dots (5.5.1.3.9)$$

b. 基礎ボルトの最大せん断応力

$$\tau_b = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\tau_{b1}), \text{横方向地震時応力}(\tau_{b2}) \} \dots\dots\dots (5.5.1.3.10)$$

### 5.6 計算条件

応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【燃料プール冷却系熱交換器の耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

### 5.7 応力の評価

#### 5.7.1 胴の応力評価

5.5.1.1項で求めた組合せ応力が胴の最高使用温度における許容応力  $S_a$  以下であること。ただし、 $S_a$  は下表による。

応力の種類	許容応力 $S_a$
	基準地震動 $S_s$ による荷重との組合せの場合
一次一般膜応力	$0.6 \cdot S_u$
一次応力 (一次膜応力+ 一次曲げ応力)	上記の 1.5 倍の値
一次+二次応力	地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値が $2 \cdot S_y$ 以下であれば、疲労解析は不要とする。
一次+二次 +ピーク応力	

#### 5.7.2 脚の応力評価

5.5.1.2項で求めた脚の組合せ応力が許容引張応力  $f_{tm}$  以下であること。ただし、 $f_{tm}$  は下表による。

	基準地震動 $S_s$ による荷重との組合せの場合
許容引張応力 $f_{tm}$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

5.7.3 基礎ボルトの応力評価

5.5.1.3項で求めた基礎ボルトの引張応力 $\sigma_b$ は次式より求めた許容組合せ応力 $f_{ts}$ 以下であること。ただし、 $f_{to}$ は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \quad \dots\dots\dots (5.7.3.1)$$

せん断応力 $\tau_b$ はせん断力のみ受ける基礎ボルトの許容せん断応力 $f_{sb}$ 以下であること。ただし、 $f_{sb}$ は下表による。

	基準地震動 $S_s$ による荷重との組合せの場合
許容引張応力 $f_{to}$	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 $f_{sb}$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

## 6. 評価結果

### 6.1 重大事故等対処設備としての評価結果

燃料プール冷却系熱交換器の重大事故等時の状態を考慮した場合の耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており、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) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。



【燃料プール冷却系熱交換器の耐震性についての計算結果】

1. 重大事故等対処設備

1.1 設計条件

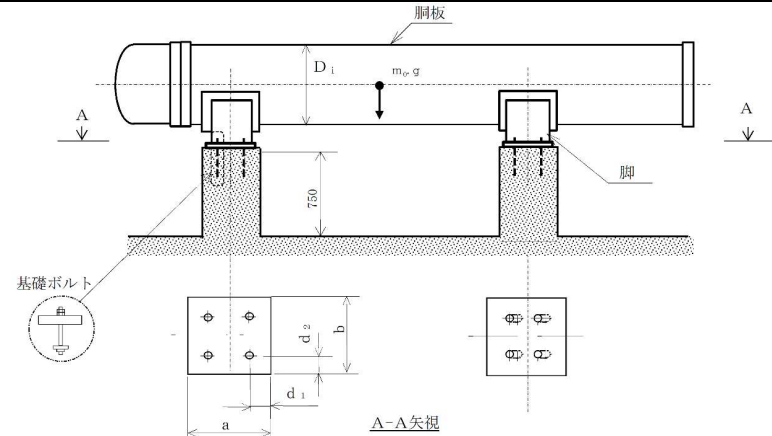
機器名称	設備分類	据付場所及び 床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S <sub>d</sub> 又は静的震度		基準地震動 S <sub>s</sub>		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度			
燃料プール冷却系 熱交換器	常設耐震/防止	原子炉建物 EL 34.8*1			—	—	C <sub>H</sub> =2.07*2	C <sub>V</sub> =2.39*2	1.37	100	100

注記\*1: 基準床レベルを示す。

\*2: 設計用震度Ⅱ (基準地震動 S<sub>s</sub>)

1.2 機器要目

m <sub>0</sub> (kg)	D <sub>i</sub> (mm)	t (mm)	t <sub>0</sub> (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	h <sub>2</sub> (mm)
	650	9.0	9.0	345	550



I <sub>sx</sub> (mm <sup>4</sup> )	I <sub>sy</sub> (mm <sup>4</sup> )	Z <sub>sx</sub> (mm <sup>3</sup> )	Z <sub>sy</sub> (mm <sup>3</sup> )	Z <sub>sp</sub> (mm <sup>3</sup> )
1.156×10 <sup>9</sup>	1.147×10 <sup>9</sup>	4.205×10 <sup>6</sup>	5.734×10 <sup>6</sup>	6.773×10 <sup>6</sup>

A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> )	E <sub>s</sub> (MPa)	G <sub>s</sub> (MPa)	A <sub>s1</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>s2</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>s3</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>s4</sub> (mm <sup>2</sup> )	F <sub>c1</sub> (N)	F <sub>l3</sub> (N)	F <sub>tsc</sub> (N)	F <sub>tsl</sub> (N)	F <sub>sbc</sub> (N)	F <sub>sbl</sub> (N)
4.500×10 <sup>4</sup>	198000	76100	2.000×10 <sup>4</sup>	2.750×10 <sup>4</sup>	1.481×10 <sup>4</sup>	2.037×10 <sup>4</sup>	5.208×10 <sup>4</sup>	9.744×10 <sup>4</sup>	8.519×10 <sup>4</sup>	8.560×10 <sup>4</sup>	5.208×10 <sup>4</sup>	9.744×10 <sup>4</sup>

M (N·mm)	M <sub>3</sub> (N·mm)	M <sub>c1</sub> (N·mm)	M <sub>sc</sub> (N·mm)	M <sub>sθ</sub> (N·mm)	M <sub>sz</sub> (N·mm)	s	n	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	a (mm)	b (mm)	d (mm)	A <sub>b</sub> (mm <sup>2</sup> )	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)
3.387×10 <sup>7</sup>	1.183×10 <sup>7</sup>	3.788×10 <sup>7</sup>	3.788×10 <sup>7</sup>	3.387×10 <sup>7</sup>	1.183×10 <sup>7</sup>	15	4	2	2	450	600	30 (M30)	706.9	115	75

S <sub>y</sub> (銅板) (MPa)	S <sub>u</sub> (銅板) (MPa)	S <sub>y</sub> (脚) (MPa)	S <sub>u</sub> (脚) (MPa)	F* (脚) (MPa)	S <sub>y</sub> (基礎ボルト) (MPa)	S <sub>u</sub> (基礎ボルト) (MPa)	F* (基礎ボルト) (MPa)
221 (厚さ ≤ 16mm)	373 (厚さ ≤ 16mm)	212 (16mm < 厚さ ≤ 40mm)	373 (16mm < 厚さ ≤ 40mm)	254	212 (16mm < 径 ≤ 40mm)	373 (16mm < 径 ≤ 40mm)	254

1.3 計算数値

1.3.1 胴に生じる応力

(1) 一次一般膜応力

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度				基準地震動 S s			
	鉛直方向+長手方向		鉛直方向+横方向		鉛直方向+長手方向		鉛直方向+横方向	
	長手方向応力	周方向応力	長手方向応力	周方向応力	長手方向応力	周方向応力	長手方向応力	周方向応力
垂直応力	—	—	—	—	$\sigma_{0x\theta} = 51$	$\sigma_{0y\theta} = 29$	$\sigma_{0xc} = 51$	$\sigma_{0yc} = 29$
せん断応力	—		—		$\tau_{0xy\theta} = 3$		$\tau_{0xyc} = 3$	
一次一般膜応力	—		—		$\sigma_{0\ell} = 51$		$\sigma_{0c} = 51$	

(2) 一次応力

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度				基準地震動 S s			
	鉛直方向+長手方向		鉛直方向+横方向		鉛直方向+長手方向		鉛直方向+横方向	
	長手方向応力	周方向応力	長手方向応力	周方向応力	長手方向応力	周方向応力	長手方向応力	周方向応力
垂直応力	—	—	—	—	$\sigma_{1x\theta} = 49$	$\sigma_{1y\theta} = 28$	$\sigma_{1xc} = 50$	$\sigma_{1yc} = 30$
せん断応力	—		—		$\tau_{1xy\theta} = 13$		$\tau_{1xyc} = 31$	
一次応力	—		—		$\sigma_{1\ell} = 55$		$\sigma_{1c} = 73$	

(3) 一次+二次応力

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度				基準地震動 S s			
	鉛直方向+長手方向		鉛直方向+横方向		鉛直方向+長手方向		鉛直方向+横方向	
	長手方向応力	周方向応力	長手方向応力	周方向応力	長手方向応力	周方向応力	長手方向応力	周方向応力
垂直応力	—	—	—	—	$\sigma_{2x\theta} = 22$	$\sigma_{2y\theta} = 16$	$\sigma_{2xc} = 82$	$\sigma_{2yc} = 68$
せん断応力	—		—		$\tau_{2xy\theta} = 17$		$\tau_{2xyc} = 59$	
一次+二次応力	—		—		$\sigma_{2\ell} = 70$		$\sigma_{2c} = 269$	

1.3.2 脚に生じる応力

(単位 : MPa)

地震の種類 地震の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
	長手方向	横方向	長手方向	横方向
引張応力	—	—	$\sigma_{s\theta} = 8$	$\sigma_{sc} = 9$
せん断応力	—	—	$\tau_{s\theta} = 7$	$\tau_{sc} = 5$
組合せ応力	—	—	$\sigma_{csl} = 14$	$\sigma_{csc} = 12$

## 1.3.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

	地震の種類	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
		地震の方向	長手方向	横方向	長手方向
鉛直方向地震及び水平方向地震による応力	引張	—	—	$\sigma_{b1} = 76$	$\sigma_{b2} = 57$
水平方向地震による応力	せん断	—	—	$\tau_{b1} = 35$	$\tau_{b2} = 36$

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位: s)

方向	固有周期
長手方向	
横方向	
鉛直方向	

1.4.2 応力

(単位: MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 $S_a$ 又は静的震度		基準地震動 $S_s$	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
胴板	SM41A*1 (厚さ ≤ 16mm)	一次一般膜	—	—	$\sigma_o = 51$	$S_a = 223$
		一次	—	—	$\sigma_1 = 73$	$S_a = 334$
		一次+二次	—	—	$\sigma_2 = 269$	$S_a = 442$
脚	SM41A*1 (16mm < 厚さ ≤ 40mm)	組合せ	—	—	$\sigma_s = 14$	$f_{tm} = 254$
基礎ボルト	SS41*2 (16mm < 径 ≤ 40mm)	引張	—	—	$\sigma_b = 76$	$f_{ts} = 190^{*3}$
		せん断	—	—	$\tau_b = 36$	$f_{sb} = 146$

すべて許容応力以下である。

注記 \*1: SM400A 相当

\*2: SS400 相当

\*3:  $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

1.5 その他の機器要目

項目	記号	単位	入力値
胴の縦弾性係数	E	MPa	198000*
ポアソン比	$\nu$	—	0.3
要素数	—	個	13728
節点数	—	個	13697

注記\*: 最高使用温度