

別冊 1 5 使用済燃料共用プール設備に係る補足説明

I. 使用済燃料貯蔵ラックおよび使用済燃料収納缶に係る要目表

表-1 使用済燃料貯蔵ラック (49 体)

名 称		使用済燃料貯蔵ラック	
種 類	—	たて置ラック式	
容 量	体	49	
主 要 寸 法	高 さ	mm	(4680)
	中 心 間 距 離	mm	( )
	内 の り	mm	( ) *1
			( ) *2
	ス ペ ー サ 間 距 離	mm	( ) *1
厚 さ	mm	( )	
材 質	—	SUS304	
個 数	—	1	

注：主要寸法の（ ）内は公称値を示す。

\*1：使用済燃料収納缶（小）を貯蔵するスペース

\*2：変形燃料を貯蔵するスペース

表-2 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) の許容寸法

主要寸法	公称値	公差	公差の考え方
高さ(mm)	4680	( )	製造メーカー社内技術標準*1における「普通公差の通則」に基づいて設定。
中心間距離(mm)	( )	( )	ラックの製造性*2を考慮して設定。
内のり(mm)	( )	( )	ラックの製造性*2を考慮して設定。
	( )	( )	ラックの製造性*2を考慮して設定。
	( )	( )	ラックの製造性*2を考慮して設定。
スペーサ間距離(mm)	( )	( )	ラックの製造性*2を考慮して設定。
厚さ(mm)	( )	( )	材料メーカーの製造能力を考慮した上で設定。

\*1：製造メーカー社内技術標準について

JIS B 0405「普通公差—第1部：個々に公差の指示がない長さ寸法及び角度寸法に対する公差」に基づき、公差を設定している。

\*2：ラックの製造性について

ラックの製造過程における SUS304 の切断精度、ラックの組立精度、溶接変形（溶接入

熱による縮み、歪みによる変形)等に起因するもの。

表-3 使用済燃料貯蔵ラック (25 体)

名	称	使用済燃料貯蔵ラック							
種	類	たて置ラック式							
容	量	25							
主 要 寸 法	高	さ	mm	(4680)					
	中	心	間	距	離	mm	( )		
	内	の	り	mm	( )				
	ス	ペ	ー	サ	間	距	離	mm	( )
	厚	さ	mm	( )					
材	質	—	SUS304						
個	数	—	1						

注：主要寸法の ( ) 内は公称値を示す。

表-4 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) の許容寸法

主要寸法	公称値	公差	公差の考え方
高さ (mm)	4680	■	製造メーカー社内技術標準 <sup>*1</sup> における「普通公差の通則」に基づいて設定。
中心間距離 (mm)	■	■	ラックの製造性 <sup>*2</sup> を考慮して設定。
内のり (mm)	■	■	ラックの製造性 <sup>*2</sup> を考慮して設定。
スペーサ間距離 (mm)	■	■	ラックの製造性 <sup>*2</sup> を考慮して設定。
厚さ (mm)	■	■	材料メーカーの製造能力を考慮した上で設定。

\*1：製造メーカー社内技術標準について

JIS B 0405「普通公差—第1部：個々に公差の指示がない長さ寸法及び角度寸法に対する公差」に基づき、公差を設定している。

\*2：ラックの製造性について

ラックの製造過程における SUS304 の切断精度、ラックの組立精度、溶接変形（溶接入熱による縮み、歪みによる変形）等に起因するもの。

表-5 使用済燃料収納缶 (小)

名称			使用済燃料収納缶 (小)
容量	量	体	1
主要寸法	全長	mm	(4551)
	内寸	mm	(153)
	厚さ	mm	(5)
材質	質	-	SUS304

注：主要寸法の ( ) 内は公称値を示す。

表-6 使用済燃料収納缶 (小) の許容寸法

主要寸法	公称値	公差	公差の考え方
全長 (mm)	4551	■	製造性を考慮して設定
内寸 (mm)	153	■	製造性を考慮して設定
厚さ (mm)	5	■	製造性を考慮して設定

表-7 使用済燃料収納缶 (大)

名称			使用済燃料収納缶 (大)
容量	量	体	1
主要寸法	角缶	全長	mm (4551)
		内寸	mm (209)
		厚さ	mm (6)
	中性子吸収材	全長	mm (4530)
		板幅	mm (190)
		厚さ	mm (4)
材質	角缶	-	SUS304
	中性子吸収材	-	B-A1 なお, $^{10}\text{B}$ の面密度は ■ g/cm <sup>2</sup> 以上

注：主要寸法の ( ) 内は公称値を示す。

表-8 使用済燃料収納缶（大）の許容寸法

主要寸法		公称値	公差	公差の考え方
角缶	全長(mm)	4551	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
	内寸(mm)	209	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
	厚さ(mm)	6	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
中性子吸収材	全長(mm)	4530	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
	板幅(mm)	190	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
	厚さ(mm)	4	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定

## II. 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震性について

### 1. 一般事項

本計算書は、使用済燃料貯蔵ラック（49 体）（以下「ラック」という。）の耐震性についての計算方法と計算結果を示す。

#### 1.1 計算条件

- (1) ラックは、使用済燃料共用プール（以下「共用プール」という。）の底部に基礎ボルトを介して据え付けられたコモンベース上にラック取付ボルトで固定されるものとする。
- (2) ラックの質量には、使用済燃料収納缶（小）及びこれに収納されている使用済燃料の質量とラック自身の質量のほか、使用済燃料収納缶（小）とラックに含まれる水の質量及びラック外形の排除水質量<sup>\*</sup>を考慮する。  
尚、49 ヶ所の貯蔵セルのうち、中央のセル1 ヶ所については、使用済燃料収納缶（小）ではなく変形した使用済燃料を貯蔵するものとする。
- (3) 水平方向地震動と鉛直方向地震動を解析モデルへ別々に入力して地震荷重、応力を求め、それらを適切に組み合わせて評価を行う。  
構造概要図を図1-1に示す。

注記\*：排除水質量とは、水中の機器の容積により排除される機器の周囲の流体の質量である。

#### 1.2 準拠基準等

本検討は原則として下記に準拠して行う。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601・補-1984）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1987）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1991 追補版）
- ・原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC 4601-2008）
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005/2007）
- ・鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（社団法人 日本建築学会（2005年9月））
- ・日本産業規格（JIS）

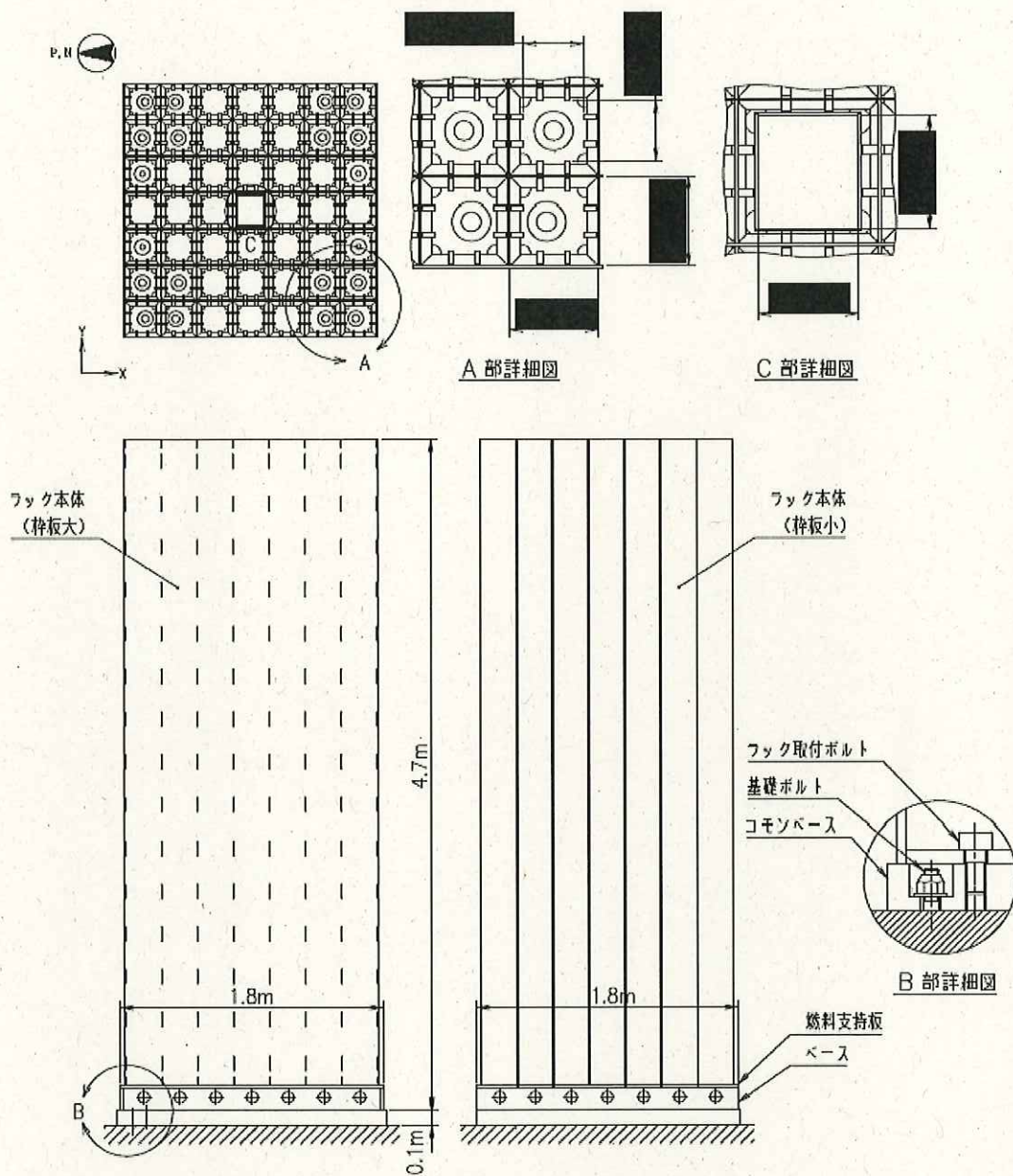


図1-1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (49体))

### 1.3 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	スペーサ下部支持部材の断面積	mm <sup>2</sup>
A <sub>b</sub>	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積	mm <sup>2</sup>
A <sub>f</sub>	圧縮フランジの断面積	mm <sup>2</sup>
A <sub>s</sub>	スペーサの面積	mm <sup>2</sup>
C <sub>H</sub>	水平方向設計震度	—
C <sub>V</sub>	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
F <sup>*</sup>	設計・建設規格 SSB-3121.3 又は SSB-3133 に定める値	MPa
F <sub>i</sub>	ベース又はコモンベース底部に作用するせん断力	N
f <sub>j</sub>	ベース又はコモンベース端から $l_j$ の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトに作用する引張力（1本当り）	N
f <sub>o</sub>	スペーサ下部支持部材の許容組合せ応力	MPa
f <sub>c b</sub>	スペーサ下部支持部材の許容曲げ応力	MPa
f <sub>c</sub>	スペーサの許容圧縮応力	MPa
f <sub>s</sub>	部材の許容せん断応力	MPa
f <sub>s b</sub>	せん断力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f <sub>s s</sub>	スペーサ下部支持部材の許容せん断応力	MPa
f <sub>t</sub>	部材の許容引張応力	MPa
f <sub>t o</sub>	引張力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f <sub>t s</sub>	引張力とせん断力を同時に受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s <sup>2</sup>
H	スペーサ下部支持部材の高さ	mm
H'	スペーサの高さ	mm
L	支点間の距離	mm
L <sub>1</sub>	スペーサ下部支持部材とセル壁面との距離	mm
$l_{i g}$	ベース又はコモンベース端から重心までの距離	mm
$l_j$	ベース又はコモンベース端からラック取付ボルト又は基礎ボルトまでの距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
M <sub>i</sub>	ベース又はコモンベース底部の転倒モーメント	N・mm
m	使用済燃料収納缶（小）貯蔵時のラック全質量	kg



記号	記号の説明	単位
mF	使用済燃料収納缶（小）に収納した燃料及び 1F-4 変形燃料の質量	kg
mR	ラックの質量	kg
mW	ラックに含まれる水の質量	kg
mFC	使用済燃料収納缶（小）の質量	kg
mCB	コモンベースの質量	kg
n	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの全本数	—
n <sub>j</sub>	ベース又はコモンベース端から $l_j$ の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトの本数	—
P	スペーサおよびスペーサ下部支持部材への荷重	N
S <sub>u</sub>	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に定める値	MPa
S <sub>y</sub>	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に定める値	MPa
Z	スペーサ下部支持部材の断面係数	mm <sup>3</sup>
Λ	スペーサの限界細長比	—
λ	スペーサの有効細長比	—
σ <sub>0</sub>	スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力	MPa
σ <sub>b</sub>	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ <sub>c</sub>	スペーサに生じる圧縮応力	MPa
σ <sub>cb</sub>	スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力	MPa
σ <sub>fa</sub>	部材に生じる組合せ応力	MPa
σ <sub>x</sub> , σ <sub>y</sub>	部材に生じる引張応力	MPa
τ <sub>b</sub>	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ <sub>s</sub>	スペーサ下部支持部材に作用するせん断応力	MPa
τ <sub>xy</sub>	部材に生じるせん断応力	MPa

注記

- 1) 添字 i の意味は、以下のとおりとする。また、添字 j は 1 ~ 12 までの数字を示すものとする。

i = X : X 方向

i = Y : Y 方向

- 2) クラス 3 支持構造物及びその他支持構造物に対する  $f_t$ ,  $f_s$ ,  $f_c$ ,  $f_{cb}$  の値の算出において、 $F$  値は次の値を用いる。

$$F = \text{Min}[S_y, 0.7S_u]$$

ただし、使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあっては、

$$F = \text{Min}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)]$$

ここで,

$F$  : 許容応力算定用基準値, 材料の許容応力を決定する場合の基準値

## 2. 計算方法

### 2.1 固有周期の計算方法

ラックはシェル要素を用いた有限要素モデルとする。

ラックの計算モデルを図2-1に示す。固有周期は、計算機コード「NASTRAN」を用いて求める。

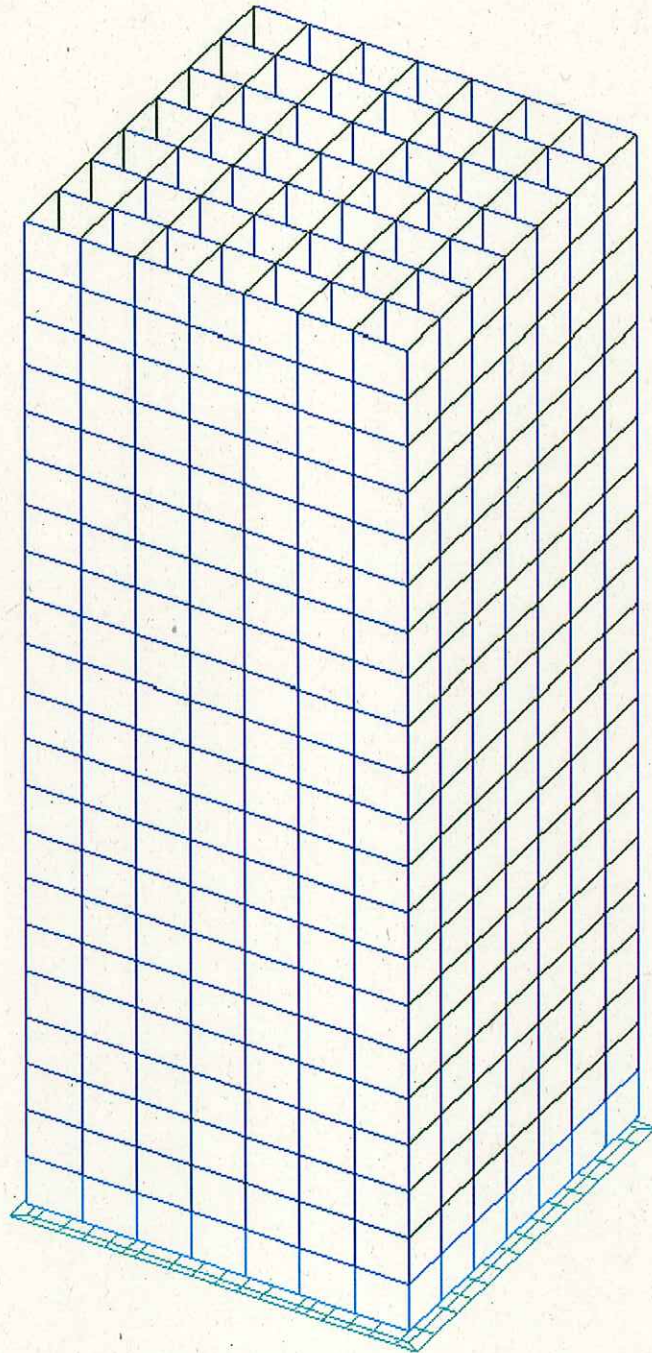


図 2-1 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) 計算モデル

## 2.2 応力の計算方法

### 2.2.1 部材の応力

部材についての応力計算は、図2-1の計算モデルにて計算機コードを使用し、引張応力、せん断応力を求め、本項に示す計算方法に従って組合せ応力を計算する。

計算機コード内では、各部材の局所座標系及びせん断応力 $\tau_{xy}$ 、引張応力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ の作用する向きを、図2-2に示すように設定している。

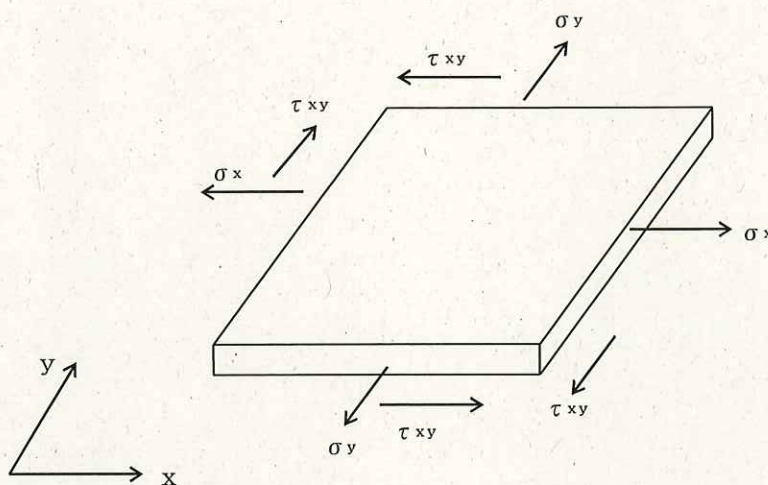


図2-2 部材の応力

各部材の組合せ応力 $\sigma_{fa}$ は、上記で計算したせん断応力 $\tau_{xy}$ 、引張応力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ を用いて、次式より求める。

$$\sigma_{fa} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

### 2.2.2 ラック取付ボルトの応力

X方向地震時を例にとり、以下に計算方法を説明する。

図2-1の計算モデルにて荷重計算を計算機コードを使用して行い、求められた地震時にラックに作用する転倒モーメント $M_x$ 及びベース底部に作用するせん断力 $F_x$ が、ラックに図2-3のように負荷されるものとしてラック取付ボルトの応力を求める。

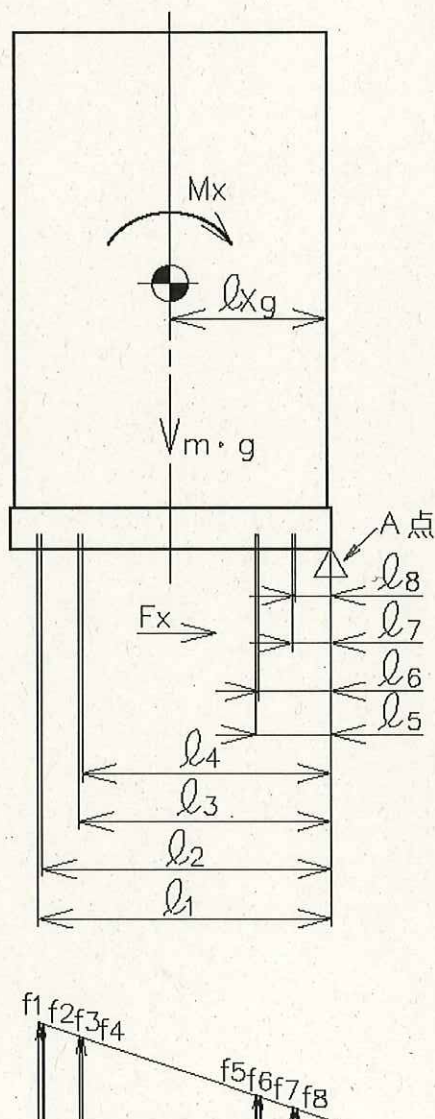


図2-3 ラック取付ボルトの応力

(1) 引張応力

A点まわりのモーメントの平衡によりラック取付ボルト1本当りの引張力  $f_i$  を求める。

$f_1 > f_2 > f_3 > f_4 > f_5 > f_6 > f_7 > f_8$  の関係にあるので  $f_1$  のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_x - (1 - C_V) \cdot m \cdot g \cdot l_{Xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2 + n_5 \cdot l_5^2 + n_6 \cdot l_6^2 + n_7 \cdot l_7^2 + n_8 \cdot l_8^2}$$

引張力  $f_1$  によりラック取付ボルトに生じる引張応力  $\sigma_b$  は、次式により求める。

$$\sigma_b = \frac{f_1}{A_b}$$

ただし、 $f_1$  の値が負のときはラック取付ボルトに引張力が生じないので、引張応力の計算は行わない。

(2) せん断応力

ラック取付ボルトに対するせん断力はラック取付ボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力  $F_x$  によりラック取付ボルトに生じるせん断応力  $\tau_b$  は、次式により求める。

$$\tau_b = \frac{F_x}{n \cdot A_b}$$

### 2.2.3 基礎ボルトの応力

X方向地震時を例にとり、以下に計算方法を説明する。

図2-1の計算モデルにて荷重計算を計算機コードを使用して行い、求められた地震時にラックに作用する転倒モーメント $M_x$ 及びコモンベース底部に作用するせん断力 $F_x$ が、ラックに図2-4のように負荷されるものとして基礎ボルトの応力を求める。

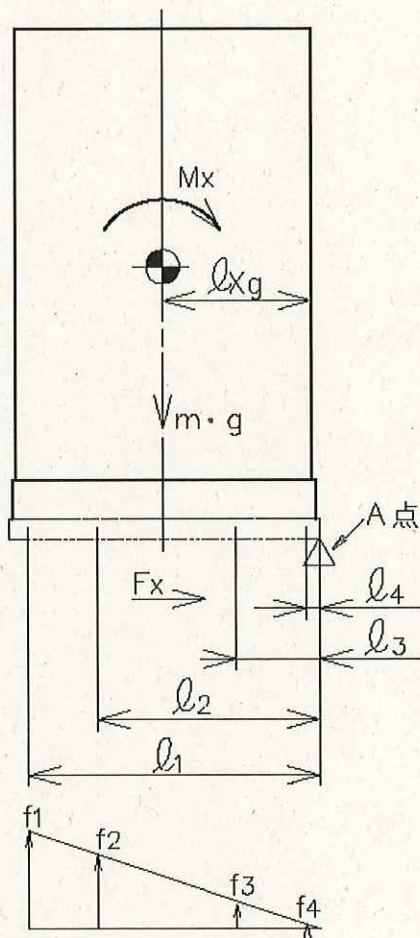


図2-4 基礎ボルトの応力

(1) 引張応力

A点まわりのモーメントの平衡により基礎ボルト1本当りの引張力  $f_i$  を求める。

$f_1 > f_2 > f_3 > f_4$  の関係にあるので  $f_1$  のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_x - (1 - C_V) \cdot m \cdot g \cdot l_{xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2}$$

引張力  $f_1$  により基礎ボルトに生じる引張応力  $\sigma_b$  は、次式により求める。

$$\sigma_b = \frac{f_1}{A_b}$$

ただし、 $f_1$  の値が負のときは基礎ボルトに引張力が生じないので、引張応力の計算は行わない。

(2) せん断応力

基礎ボルトに対するせん断力は基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力  $F_x$  により基礎ボルトに生じるせん断応力  $\tau_b$  は、次式により求める。

$$\tau_b = \frac{F_x}{n \cdot A_b}$$



### 3. 評価方法

#### 3.1 固有周期の評価

2.1 項で求めた固有周期から「添付資料-9-1 別添-2 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) の耐震設計の基本方針」に基づき、水平方向設計震度を求める。

#### 3.2 応力の評価

##### 3.2.1 部材の応力評価

2.2.1 項で求めた各部材の引張応力  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  及び組合せ応力  $\sigma_{fa}$  が、許容引張応力  $f_t$  以下であること。

また、2.2.1 項で求めた各部材のせん断応力  $\tau_{xy}$  が、許容せん断応力  $f_s$  以下であること。

ただし、 $f_t$  及び  $f_s$  は下表による。

地震力の種類	基準地震動 $S_s$
許容引張応力 $f_t$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容せん断応力 $f_s$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

### 3.2.2 ラック取付ボルト及び基礎ボルトの応力評価

2.2.2 項及び 2.2.3 項で求めたラック取付ボルト及び基礎ボルトの引張応力  $\sigma_b$  が、次式より求めた許容引張応力  $f_{ts}$  以下であること。

また、2.2.2 項及び 2.2.3 項で求めたラック取付ボルト及び基礎ボルトのせん断応力  $\tau_b$  が、せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力  $f_{sb}$  以下であること。

$$f_{ts} = 1.4 f_{to} - 1.6 \tau_b$$

かつ、

$$f_{ts} \leq f_{to}$$

ただし、 $f_{to}$  及び  $f_{sb}$  は下表による。

地震力の種類	基準地震動 $S_s$
許容引張応力 $f_{to}$	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 $f_{sb}$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

4. 評価条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	次数	基準地震動 $S_s$		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)	
				水平方向 <sup>*5</sup> 設計震度	鉛直方向設計震度			
使用済燃料貯蔵ラック (49体)	S	運用補助共用施設 G. L. -1.3 <sup>*1</sup>	1次	*2	C <sub>v</sub> = 0.49	66	-	
			2次					*3
			3次					

注記 \*1: 基準床レベルを示す。

\*2: 基準地震動  $S_s$  に基づく動的解析より得られる応答値 (1次固有周期:  $C_H = 0.84$ )

\*3: 基準地震動  $S_s$  に基づく動的解析より得られる応答値 (2次固有周期:  $C_H = 0.89$ )

\*4: 基準地震動  $S_s$  に基づく動的解析より得られる応答値 (3次固有周期:  $C_H = 0.89$ )

\*5: 基準地震動  $S_s$  により定まる動的震度 ( $C_H = 0.67$ ) についても考慮する。

別冊15では、G. L. ±0m = T. P. 8.5m (※) とする。

(※) 震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O. P. から T. P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づき換算している。

(換算式) T. P. = 旧 O. P. - 1, 436mm

## 5. 機器要目

### 5.1 固有周期の算出及び部材の応力評価に用いる要目

項目 部材	材 料	t (mm)	E* <sup>1</sup> (MPa)	G* <sup>1</sup> (MPa)	S <sub>y</sub> * <sup>1</sup> (MPa)	S <sub>y</sub> * <sup>2</sup> (MPa)	S <sub>u</sub> * <sup>1</sup> (MPa)	F* (MPa)
ラック本体 (枠板大)	SUS304	■	192000	73800	188.66	205	479.89	205
ラック本体 (枠板小)	SUS304	■	192000	73800	188.66	205	479.89	205
燃料支持板	SUS304	■	192000	73800	188.66	205	479.89	205

注記 \*1：最高使用温度（66℃）で算出

\*2：室温で算出

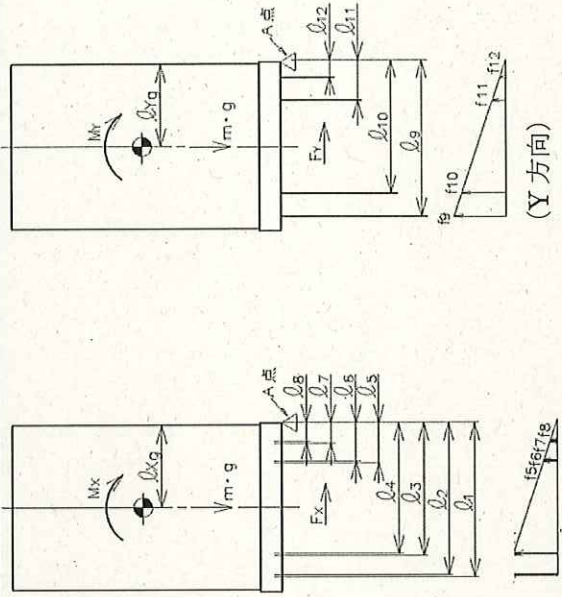
5.2 ラック取付ボルトの応力評価に用いる要目

機器名称	m (kg)	m <sub>F</sub> (kg)	m <sub>R</sub> (kg)	m <sub>W</sub> (kg)	m <sub>FC</sub> (kg)
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	■	■	■	■	■

l <sub>1</sub> (mm)	l <sub>2</sub> (mm)	l <sub>3</sub> (mm)	l <sub>4</sub> (mm)	l <sub>5</sub> (mm)	l <sub>6</sub> (mm)	l <sub>7</sub> (mm)	l <sub>8</sub> (mm)	l <sub>9</sub> (mm)	l <sub>10</sub> (mm)	l <sub>11</sub> (mm)	l <sub>12</sub> (mm)	l <sub>Xg</sub> (mm)	l <sub>Yg</sub> (mm)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

A <sup>b</sup> (mm <sup>2</sup> )	n	n <sup>1</sup>	n <sup>2</sup>	n <sup>3</sup>	n <sup>4</sup>	n <sup>5</sup>	n <sup>6</sup>	n <sup>7</sup>	n <sup>8</sup>	n <sup>9</sup>	n <sup>10</sup>	n <sup>11</sup>	n <sup>12</sup>
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

ラック取付 ボルト材料	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	M <sub>x</sub> (N・mm)	M <sub>y</sub> (N・mm)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)	F <sup>*</sup> (MPa)
SUS630H1150	2.002 × 10 <sup>5</sup>	1.978 × 10 <sup>5</sup>	8.134 × 10 <sup>8</sup>	7.841 × 10 <sup>8</sup>	■	■	■



(X 方向)

(Y 方向)

注記 \*1: 最高使用温度 (66°C) で算出

5.3 基礎ボルトの応力評価に用いる要目

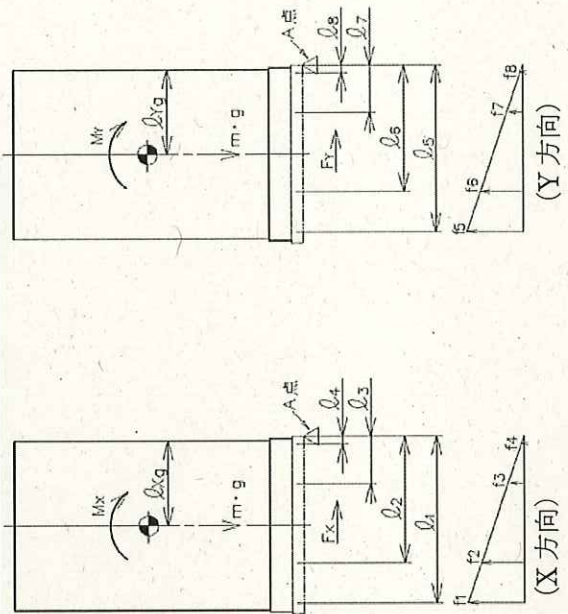
機器名称	m	m <sub>F</sub>	m <sub>R</sub>	m <sub>W</sub>	m <sub>PC</sub>	m <sub>CB</sub>
コモンベース						

l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>	l <sub>4</sub>	l <sub>5</sub>	l <sub>6</sub>	l <sub>7</sub>	l <sub>8</sub>	l <sub>Xg</sub>	l <sub>Yg</sub>

A <sup>b</sup>	n	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	n <sub>4</sub>	n <sub>5</sub>	n <sub>6</sub>	n <sub>7</sub>	n <sub>8</sub>
	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

基礎ボルト 材料	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	S <sub>y</sub>	S <sub>u</sub>	F*
SUS630H1150	2.002 × 10 <sup>5</sup>	1.978 × 10 <sup>5</sup>	8.134 × 10 <sup>8</sup>	7.841 × 10 <sup>8</sup>			

注記 \*1: 最高使用温度 (66°C) で算出



## 6. 計算結果

### 6.1 部材に生じる応力

(単位：MPa)

ラ ッ ク	部 材	地震の方向	応 力	基準地震動 Ss
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	ラック本体 (枠板大)	X方向	引張り	$\sigma_x = 27$
			引張り	$\sigma_y = 4$
			せん断	$\tau_{xy} = 5$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 27$
		Y方向	引張り	$\sigma_x = 28$
			引張り	$\sigma_y = 4$
			せん断	$\tau_{xy} = 4$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 28$
	ラック本体 (枠板小)	X方向	引張り	$\sigma_x = 5$
			引張り	$\sigma_y = 29$
			せん断	$\tau_{xy} = 6$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 29$
Y方向		引張り	$\sigma_x = 4$	
		引張り	$\sigma_y = 24$	
		せん断	$\tau_{xy} = 5$	
		組合せ	$\sigma_{fa} = 24$	

### 6.2 ラック取付ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラ ッ ク	地震の方向	応 力	基準地震動 Ss
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	X方向	引張り	$\sigma_b = 33$
		せん断	$\tau_b = 8$
	Y方向	引張り	$\sigma_b = 32$
		せん断	$\tau_b = 8$

### 6.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラ ッ ク	地震の方向	応 力	基準地震動 Ss
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	X方向	引張り	$\sigma_b = 63$
		せん断	$\tau_b = 17$
	Y方向	引張り	$\sigma_b = 59$
		せん断	$\tau_b = 17$

#### 6.4 許容応力

(1) ラック部材 (SUS304→オーステナイト系ステンレス鋼)

$$F^* = \text{Min}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)]$$



S <sub>y</sub> : 付録材料図表Part5表8	-30°C~40°C	75°C
	205 (MPa)	183 (MPa)
S <sub>u</sub> : 付録材料図表Part5表9	-30°C~40°C	75°C
	520 (MPa)	466 (MPa)

温度66°Cで線形補間すると

$$S_y(66^\circ\text{C}) = 205 - \frac{(205-183)}{75-40} \times (66-40) = 188.66 \text{ (MPa)}$$

$$S_u(66^\circ\text{C}) = 520 - \frac{(520-466)}{75-40} \times (66-40) = 479.89 \text{ (MPa)}$$

したがって、 $F^* = S_y(RT) = 205 \text{ (MPa)}$

(許容引張応力)

$$f_t = \frac{F^*}{1.5} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容せん断応力)

$$f_s = \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} = 118 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容組合せ応力)

$$f_t \geq \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

ここで、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  : 互いに直交する垂直応力

$\tau_{xy}$  :  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ の作用する面内のせん断応力



(2) ボルト類 (SUS630H1150→オーステナイト系ステンレス鋼ではない)

$$F^* = \text{Min}[1.2S_y, 0.7S_u]$$

S<sub>y</sub> : 付録材料図表Part5表8                    -30°C~40°C    75°C  
  ■ (MPa)            ■ (MPa)

S<sub>u</sub> : 付録材料図表Part5表9                    -30°C~40°C    75°C  
  ■ (MPa)            ■ (MPa)

温度66°Cで線形補間すると

$$S_y(66^\circ\text{C}) = \text{■} - \frac{(\text{■})}{75-40} \times (66-40) = \text{■} \text{ (MPa)}$$

$$S_u(66^\circ\text{C}) = \text{■} - \frac{(\text{■})}{75-40} \times (66-40) = \text{■} \text{ (MPa)}$$

したがって、 $F^* = \text{■} \text{ (MPa)}$

(許容引張応力)

$$f_{t0} = \frac{F^*}{2} \cdot 1.5 = \text{■} \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容せん断応力)

$$f_{sb} = \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5 = \text{■} \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容組合せ応力)

$$f_{ts} = 1.4f_{t0} - 1.6\tau_b$$

かつ

$$f_{ts} \leq f_{t0}$$

## 7. 結論

### 7.1 固有周期

ラック	次数	固有周期T (s)
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	1 次	■
	2 次	■
	3 次	■

### 7.2 評価結果

#### (1) 部材に生じる応力

(単位 : MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	ラック本体 (桝板大)	SUS304	引張り	$\sigma_x = 28$	$f_t = 205$
			引張り	$\sigma_y = 4$	$f_t = 205$
			せん断	$\tau_{xy} = 4$	$f_s = 118$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 28$	$f_t = 205$
	ラック本体 (桝板小)	SUS304	引張り	$\sigma_x = 5$	$f_t = 205$
			引張り	$\sigma_y = 29$	$f_t = 205$
			せん断	$\tau_{xy} = 6$	$f_s = 118$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 29$	$f_t = 205$

すべて許容応力以下である。

#### (2) ラック取付ボルトに生じる応力

(単位 : MPa)

ラック	材 料	応 力	基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	SUS630	引張り	$\sigma_b = 33$	$f_{ts} = 455$
	H1150	せん断	$\tau_b = 8$	$f_{sb} = 350$

すべて許容応力以下である。

## (3) 基礎ボルトに生じる応力

(単位 : MPa)

ラック	材 料	応 力	基準地震動 S <sub>s</sub>	
			算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	SUS630	引張り	$\sigma_b = 63$	$f_{ts} = 455$
	H1150	せん断	$\tau_b = 17$	$f_{sb} = 350$

すべて許容応力以下である。

#### 8. スペーサおよびスペーサ下部支持部材の応力

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）セル内の上下端に取付けるスペーサおよびスペーサ下部支持部材の条件は図 8-1 の a 部もしくは a' 部のどちらかに属すると考えられる。

a と a' の部位を比較すると、図 8-1 の矢印方向から荷重を受けたとき、a' 部は隣り合うセルのスペーサおよびスペーサ下部支持部材も強度部材として寄与するが、a 部は隣り合うセルが無いいため、a' に比べ、強度上不利である。

したがって、代表して a 部を評価し、強度を満足することを確認する。

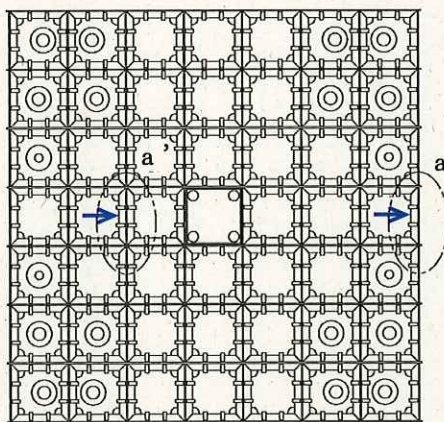


図 8-1 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）上面図

8.1 作用荷重

使用済燃料収納缶（小）に働く地震力が、セルの1面の上下部スペーサ部に作用するものとする。

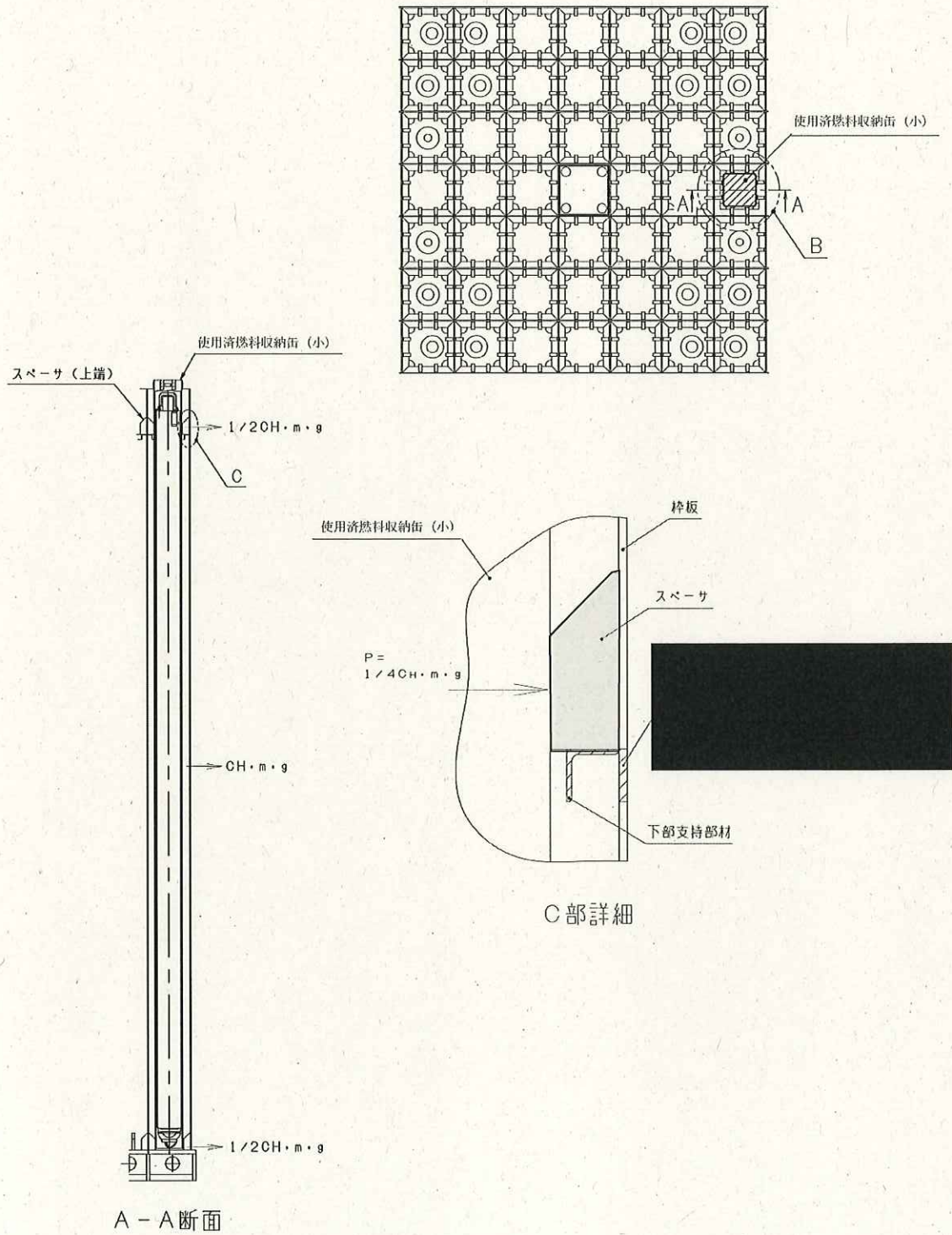
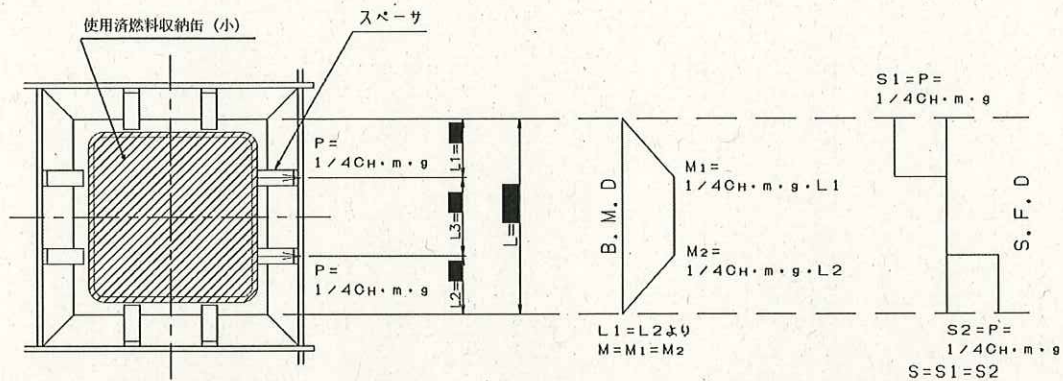


図8-2 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の作用荷重 (1/2)



B部詳細

図 8-3 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の作用荷重 (2/2)

作用荷重 :  $P = 1/4 C_H \cdot m \cdot g$   
 $= 1/4 \times 0.89 \times \blacksquare \times 9.80665$   
 $= \blacksquare \text{ (N)}$

適用震度 :  $C_H = 0.89 (-)$

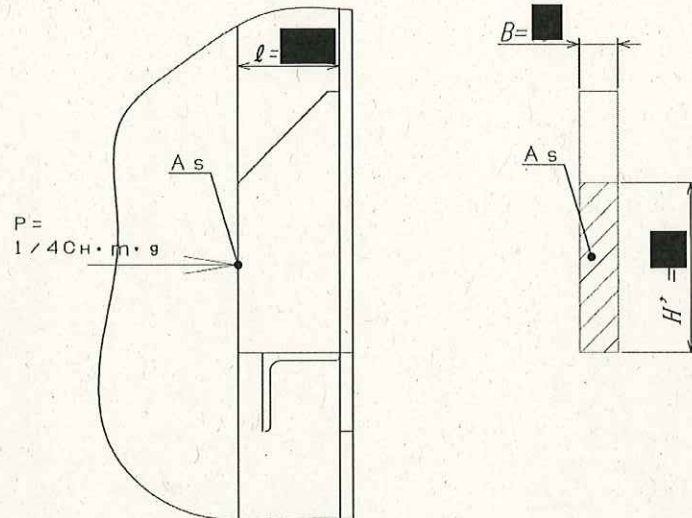
質量 :  $m_s = \blacksquare \text{ (kg)}$   
 $m_s$  : 燃料, 使用済燃料収納缶 (小) 及び使用済燃料収納缶 (小) 内包水の合計質量

重力加速度 :  $g = 9.80665 \text{ (m/s}^2\text{)}$

長さ :  $L = \blacksquare \text{ (mm)}$   
長さ :  $L_1 = \blacksquare \text{ (mm)}$   
長さ :  $L_2 = \blacksquare \text{ (mm)}$

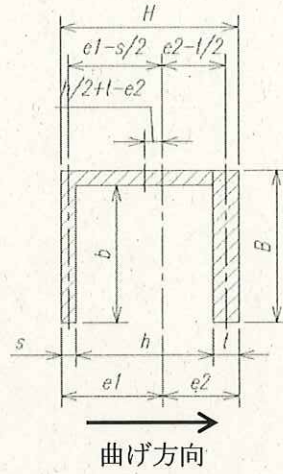
## 8.2 断面特性

### 8.2.1 スペーサの断面特性



断面形状	項目	記号	値	単位	数式
長方形断面	幅	B	■	mm	
	高さ	H'	■	mm	
	断面積	A <sub>s</sub>	■	mm <sup>2</sup>	= H' × B
	断面二次モーメント(弱軸)	I	■	mm <sup>3</sup>	= $\frac{H' \times B^3}{12}$
	断面二次半径	i	■	mm	= $\sqrt{\frac{I}{A_s}}$
	長さ	ℓ	■	mm	
	座屈長さ	ℓ <sub>k</sub>	■	mm	= 2.1ℓ
	有効細長比	λ	19.169	-	= ℓ <sub>k</sub> /i

8.2.2 スペーサ下部支持部材の断面特性



断面形状	項目	記号	値	単位	数式
コの字断面 (非対称断面)	幅	B	■	mm	
		b	■	mm	
	高さ (はりのせい)	H	■	mm	
	高さ	h	■	mm	
	厚さ	s	■	mm	
		t	■	mm	
	重心の距離	e1	■	mm	$= \frac{b \cdot s^2 + (B - b) \cdot H^2 + b \cdot t \cdot (2H - t)}{2(b \cdot s + (B - b) \cdot H + b \cdot t)}$
		e2	■	mm	$= H - e1$
	断面二次モーメント	I	■	mm <sup>4</sup>	$= \frac{B \cdot t^3}{12} + B \cdot t \left( e2 - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{B \cdot s^3}{12} + B \cdot s \left( e1 - \frac{s}{2} \right)^2 + \frac{(B - b)h^3}{12} + (B - b) \cdot h \cdot \left( \frac{h}{2} + t - e2 \right)^2$
	断面係数	Z1	■	mm <sup>3</sup>	$= I / e1$
		Z2	■	mm <sup>3</sup>	$= I / e2$
	断面積	A	■	mm <sup>2</sup>	$= B \cdot H - b \cdot h$
	断面二次半径	i	■	mm	$= \sqrt{I / A}$
	支点間距離	L	■	mm	
	圧縮フランジの断面積	Af	■	mm <sup>2</sup>	$= B \cdot s$
板幅比	B/s	■	-		
$24 / \sqrt{\frac{F}{100}} = 16.76 \geq B / s$ なので板幅比を満足する。					



### 8.3 許容応力

SUS304 (オーステナイト系ステンレス鋼)

基準強度 :  $F^* = 205$  (MPa)

縦弾性係数 :  $E = 1.92 \times 10^5$  (MPa)

地震力の種類	基準地震動 $S_s$
許容圧縮応力 $f_c$	$\left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5$
許容曲げ応力 $f_{cb}$	$\min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot Af}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\}$
許容せん断応力 $f_{ss}$	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}}$
許容組合せ応力 $f_o$	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5}$

#### 8.3.1 スペーサの許容応力

設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007) SSB-3121.3, SSB-3121.1 に従い、許容応力を算出する。

##### (1) 許容圧縮応力

SSB-3121.1(3)より

有効細長比  $\lambda = 19.169$

$$\text{限界細長比 } \Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F^*}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 1.92 \times 10^5}{0.6 \times 205}} = 124.12$$

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 = 1.5 + \frac{2}{3} \left( \frac{19.169}{124.12} \right)^2 = 1.516$$

$\lambda < \Lambda$  より

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5$$

$$= \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{19.169}{124.12} \right)^2 \right\} \frac{205}{1.516} \times 1.5$$

= 200 (MPa) (整数位, 小数点以下第一位切り捨て)

### 8.3.2 スペーサ下部支持部材の許容応力

設計・建設規格(JSME S NC1-2005/2007) SSB-3121.3, SSB-3121.1に従い、許容応力を算出する。

#### (1) 許容曲げ応力

設計・建設規格 SSB-3121.1(4) c より荷重面内に対称軸を有しないため

$$\begin{aligned} f_{eb} &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot A_f}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\} \\ &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \times 1.92 \times 10^5 \times \blacksquare}{\blacksquare}, 1.5 \times \frac{205}{1.5} \right\} \\ &= \min\{1714, 205\} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

#### (2) 許容せん断応力

$$\begin{aligned} f_{ss} &= 1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} \\ &= 1.5 \times \frac{205}{1.5\sqrt{3}} = 118 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

#### (3) 許容組合せ応力

$$\begin{aligned} f_0 &= 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \\ &= 1.5 \times \frac{205}{1.5} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

## 9. スペーサおよびスペーサ下部支持部材の強度評価

### 9.1. スペーサの強度評価

前項の作用荷重：Pによりスペーサは圧縮荷重を受ける。以下に、その圧縮の強度評価を行う。

#### (1) 圧縮応力

$$A_s = \text{[redacted]} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$P = \text{[redacted]} \text{ (N)}$$

$$\sigma_c = \frac{P}{A_s} = \frac{\text{[redacted]}}{\text{[redacted]}} = 2 \text{ (MPa)}$$

### 9.2. スペーサの支持部材の強度評価

前項の作用荷重：Pによりスペーサ下部支持部材は曲げとせん断荷重を受ける。以下に、その曲げとせん断の強度評価を行う。

#### (1) 曲げ応力

$$\text{曲げモーメント } M = P \times L_1$$

$$= \text{[redacted]}$$

$$= \text{[redacted]} \text{ (Nmm)}$$

$$\text{断面係数 } Z = \text{[redacted]} \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$\sigma_{cb} = \frac{M}{Z} = \frac{\text{[redacted]}}{\text{[redacted]}} = 21 \text{ (MPa)}$$

#### (2) せん断応力

$$\text{断面積 } A = \text{[redacted]} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$\tau_s = \frac{P}{A} = \frac{\text{[redacted]}}{\text{[redacted]}} = 4 \text{ (MPa)}$$

#### (3) 組合せ応力

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \times \tau^2} \\ &= \sqrt{21^2 + 3 \times 4^2} = 23 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

10. スペーサおよびスペーサ下部支持部材の強度評価まとめ

10.1. スペーサの強度評価まとめ

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 $S_s$	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵ラック (49 体)	スペーサ	SUS304	圧縮	$\sigma_c = 2$	$f_c = 200$

すべて許容応力以下である。

10.2. スペーサ下部支持部材の強度評価まとめ

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 $S_s$	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵ラック (49 体)	スペーサ 下部支持部材	SUS304	曲げ	$\sigma_{cb} = 21$	$f_{cb} = 205$
			せん断	$\tau_s = 4$	$f_{ss} = 118$
			組合せ	$\sigma_0 = 23$	$f_0 = 205$

すべて許容応力以下である。

### III. 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) の核燃料物質が臨界に達しないことを説明する書類に係る補足説明

#### 1. 基本的考え方

使用済燃料共用プールの使用済燃料貯蔵ラック (25 体) (以下「ラック」という。) は、想定される厳しい状態において貯蔵する燃料が臨界に達することを防止する設計とする。また、ラックは、臨界防止のため以下の配慮を行う。

- ・ 貯蔵する燃料の中心間距離をラックの格子および格子内のスペーサで確保する。
- ・ ラック構造材にはステンレス鋼を使用する。

#### 2. 設計基準

想定される厳しい状態において、実効増倍率 ( $k_{eff}$ ) を 0.95 以下とすることを設計基準とする。

#### 3. 評価条件

臨界解析モデルを図-1, 2 に示す。実効増倍率を大きく見積るため、評価条件を下記の通りとした。

##### 3.1 燃料条件

ラックは変形燃料を収納対象としているが、変形燃料が取扱い中に破損する又は、破損していることが明らかになる可能性がある。想定される厳しい状態においても臨界にならないことを確認するため、保守的に燃料棒の形状が維持されていない状態を想定する。評価に用いる燃料条件を表-1 に示す。

- ・ ラックには使用済燃料収納缶 (大) (以下「収納缶」という。) に収納された燃料集合体 25 体を貯蔵する。
- ・ 収納缶に収納された燃料集合体は、燃料棒の形状が維持されていないとして、以下の条件を設定する。
  - ・ 燃料被覆管が破損しペレットが収納缶内に放出されたことを仮定し、収納缶内に燃料粒子と水が非均質に混ざった状態とする。
  - ・ 水/ウラン比、燃料粒子径が最適な状態とする。
  - ・ U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、福島第一原子力発電所 (1F) にある燃料で、ペレット最高濃縮度が最も高い  $9 \times 9$  燃料の 4.9wt% とする。また、中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。

表-1 臨界防止機能評価で用いる燃料条件

項目	評価条件	備考
燃料の状態	燃料被覆管の破損を想定	
燃料の形態	燃料粒子+水	燃料粒子と水による非均質燃料粒子セル体系
ウラン同位体組成	U-235 : 4.9 wt% U-238 : 95.1 wt%	1Fにある燃料でペレット最高濃縮度が最も高い
核分裂生成物	核分裂生成物、及びアクチニドは考慮しない	
燃料粒子	粒子径による影響を考慮	

### 3.2 ラック条件

ラックの製造公差としては、板厚、貯蔵ピッチ、内のり、スペーサ間距離があり、これらのパラメータについて保守的に設定する。ラックの主要寸法を表-2に示す。

- ラックの貯蔵ピッチ及び内のりは、製造公差を考慮した最小値とする。(燃料間隔が近くなり実効増倍率が大きくなるため、保守的な条件となる。)なお、ラックの板厚は、貯蔵ピッチと内のりによって決まるため、公称値とする。
- ラック内の収納缶配置は、スペーサ間の範囲で偏心配置(ラック中心寄り)を考慮する。(燃料間隔が近くなり実効増倍率が大きくなるため、保守的な条件となる。)(図-1)

表-2 ラックの主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
板厚(mm)	■	■	■
貯蔵ピッチ(mm)	■	■	■
内のり(mm)	■	■	■
スペーサ間距離(mm)	■	■	■
ラック間ギャップ(mm)	■	■	■

### 3.3 収納缶条件

収納缶の製造公差としては、板厚、内寸、中性子吸収材板厚、中性子吸収材板幅等があり、これらのパラメータについて保守的に設定する。収納缶の主要寸法を表-3に示す。

- 収納缶の板厚は、製造公差を考慮した最大値とする。(板厚を厚くすると、板の外側にある中性子吸収材が燃料領域の中心から遠ざかるため実効増倍率は大きくなるので保守的な条件となる。)

- 内寸は、製造公差を考慮した最大値とする。(2次元モデルなので燃料物質が増加し、実効増倍率が大きくなるため保守的な条件となる。)
- 中性子吸収材板厚及び板幅は、製造公差を考慮した最小値とする。(中性子吸収反応を起こすボロン添加量 ( $^{10}\text{B}$ の量) は少ないほうが保守的な条件となる。)
- 地震などによる収納缶のたわみを考慮し、偏心量に加える。たわみ量は製造公差を考慮した最大値とする。(燃料間隔が近くなるため実効増倍率は大きくなるので保守的な条件となる。)

表-3 収納缶の主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
板厚(mm)	6.0		
内寸(mm)	209		
中性子吸収材板厚(mm)	4		
中性子吸収材板幅(mm)	190		
ボロン添加量 (g/cm <sup>2</sup> ) ( $^{10}\text{B}$ 面密度) ※			
たわみ量(mm)			

※：ボロンに含まれる  $^{10}\text{B}$  の存在比は天然ボロンとする。

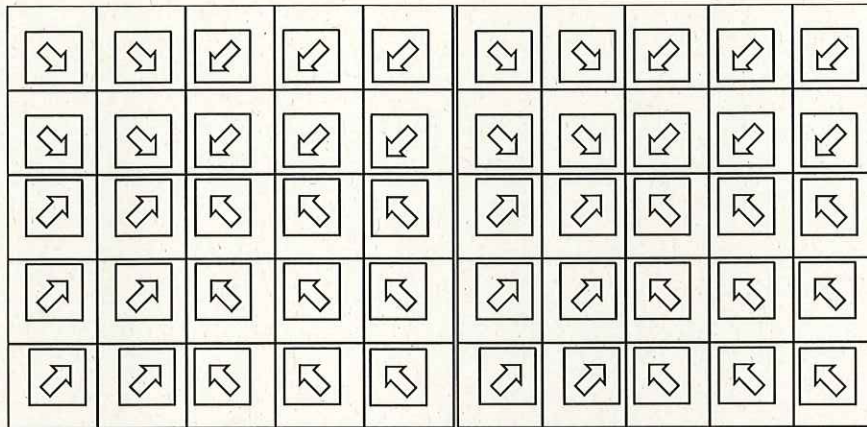
### 3.4 その他の条件

- プール水温は、実効増倍率が最も高くなる状態で臨界を防止できることを確認するため、水密度が最大の4℃とする。
- 収納缶のラック内偏心配置を考慮し、実効増倍率が高くなるようラック中心部に向けて偏心させる。
- 3号機の燃料はガレキの付着が想定されるが、ガレキの主成分であるコンクリートより水の方が減速効果が大きく、ガレキを考慮すると実効増倍率が小さくなるのでガレキの付着は考慮しない。

### 3.5 計算モデル

計算モデルは、ラック・収納缶の幾何学形状を模擬した2次元体系とする。概念図を図-1、2に示す。なお、収納缶には中性子吸収材を固定するボルト穴があるが、2次元モデルを作成するにあたっては、溝で再現している。

- チャンネルボックスおよび溝で再現した中性子吸収材固定用ボルト穴は水に置き換える。
- ラックが無限に並んだ状態として、高さ方向無限、かつラック周囲での境界条件を完全反射とする。



ラック間ギャップ：           

図-1 ラックセル内偏心配置概念





※燃料粒子径と水対燃料体積比  
(ピッチ) をパラメータとする。

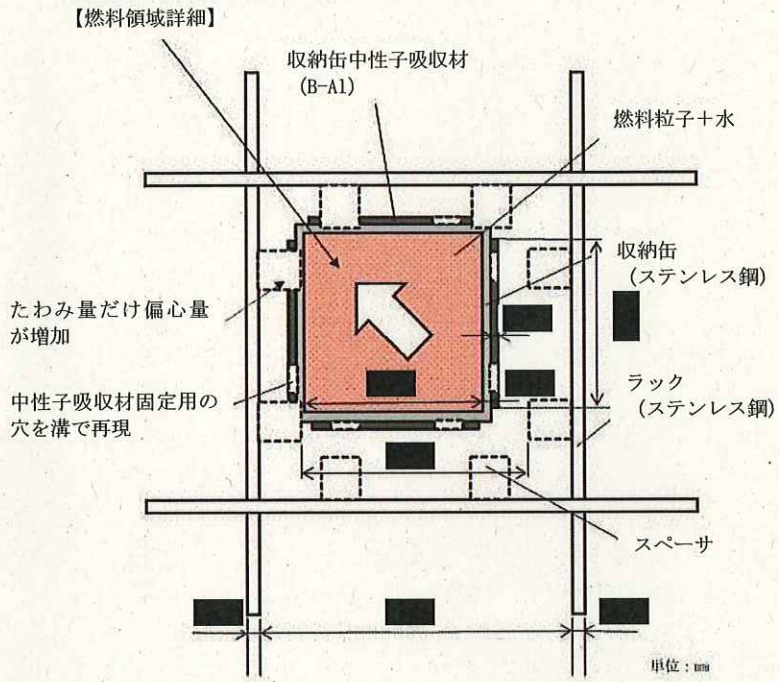


図-2 収納缶のラックセル内偏心配置

#### 4. 評価方法

ラックの実効増倍率は、収納缶、ラックの形状を模擬した計算モデルを用い、計算には KENO-V.a コードを用いる。

#### 5. 評価結果

ラックの水対燃料体積比に対する中性子実効増倍率の変化を、燃料粒子径毎に図-3 に示す。ここで、燃料粒子径は            mm とした。また、それぞれの燃料粒子径において実効増倍率が最大となる評価結果を表-4 と図-4 に示す。

ラックの実効増倍率は、表-5 に示す通り設計基準を満足している。

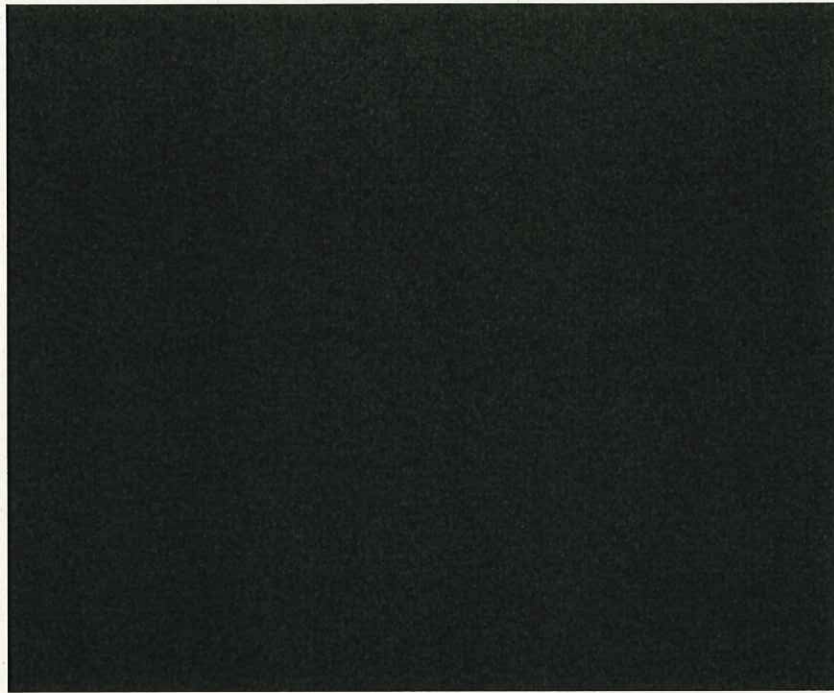


図-3 (1) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径  $\blacksquare$  mm)

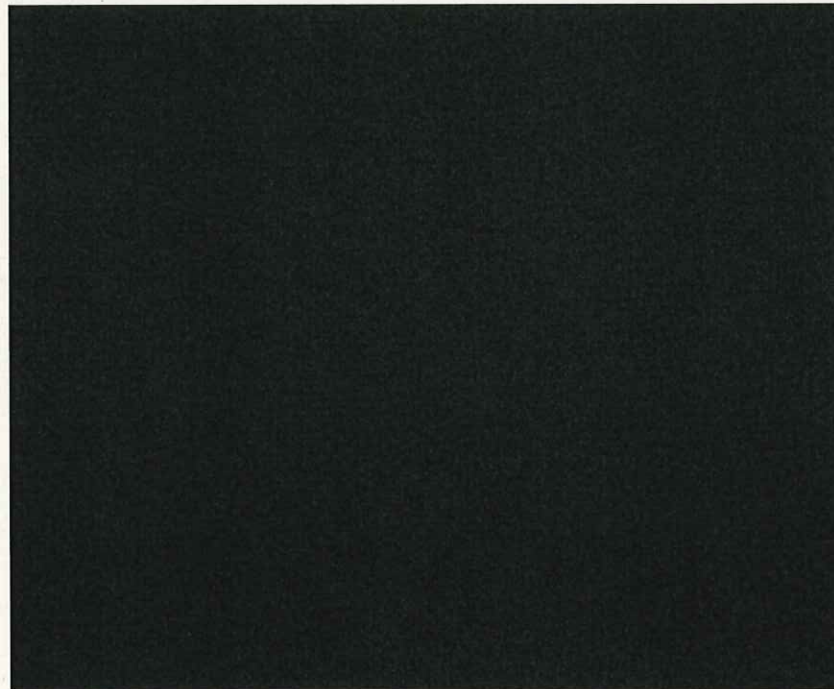


図-3 (2) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径  $\blacksquare$  mm)

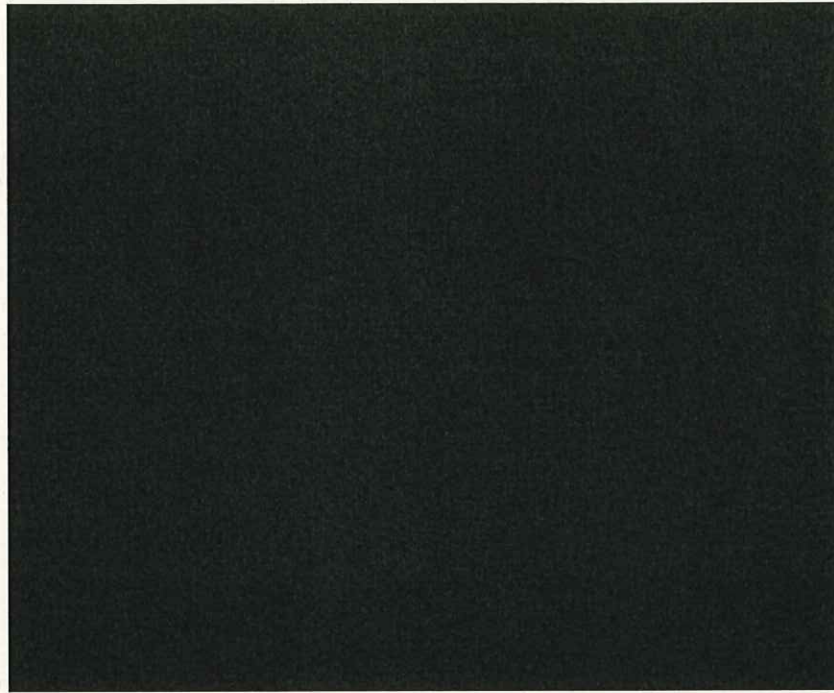


図-3 (3) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径  $\blacksquare$  mm)

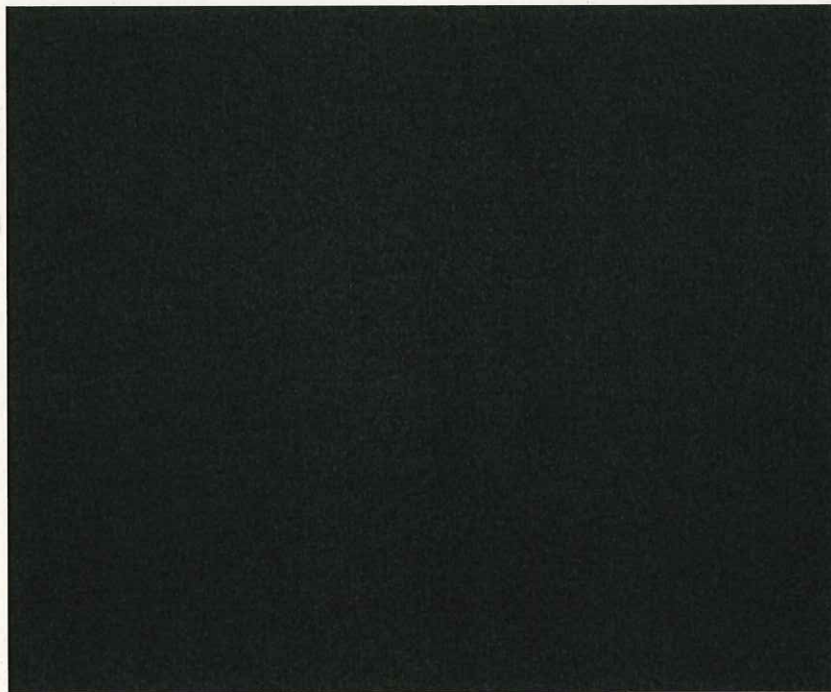


図-3 (4) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径  $\blacksquare$  mm)

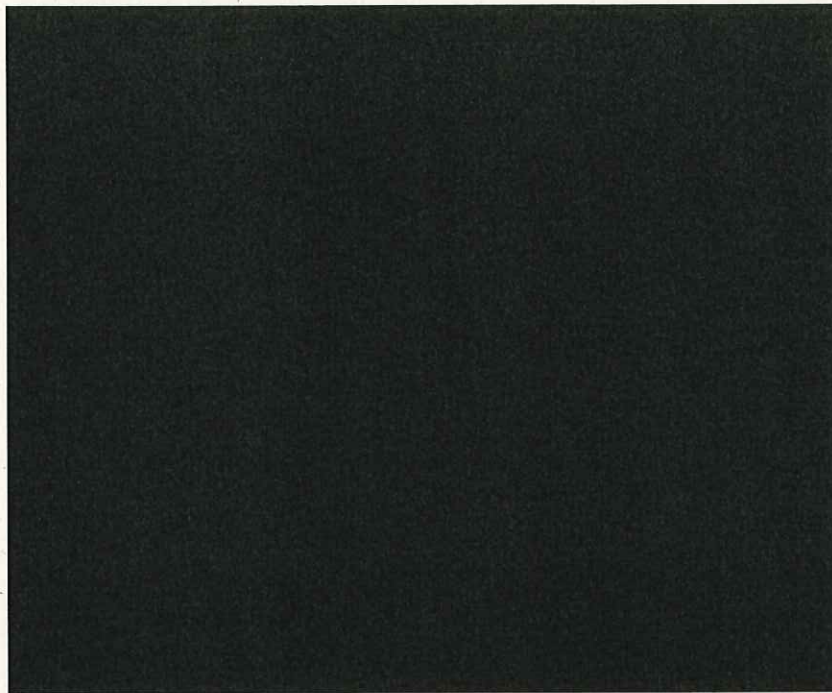


図-3 (5) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径  $\blacksquare$  mm)

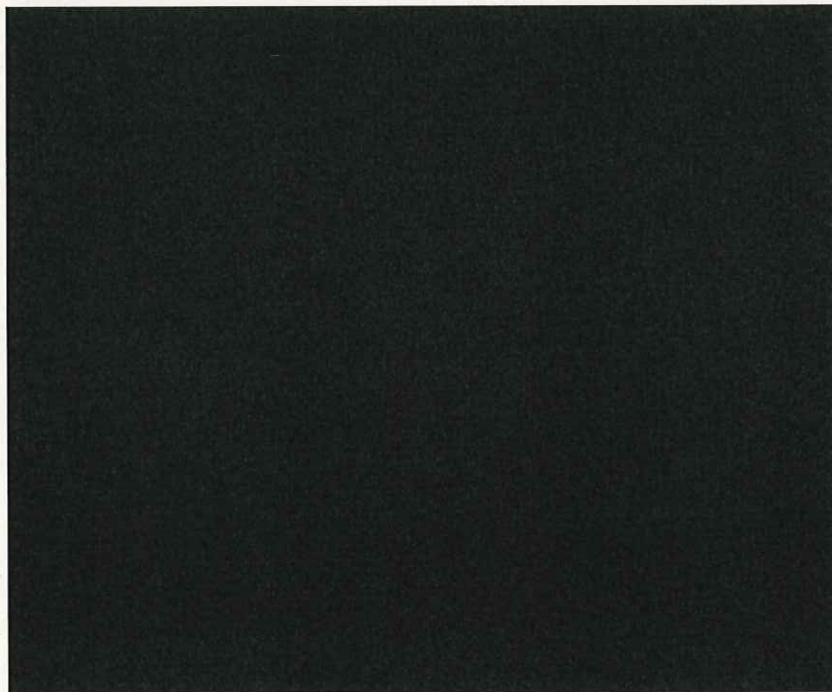


図-4 ラックの実効増倍率の変化

表-4 ラックの実効増倍率

燃料粒子径(mm)	水対燃料体積比	実効増倍率	
		keff	keff+3σ <sup>※1, 2</sup>

※1 モンテカルロ計算の統計誤差 (3σ) を考慮した値

※2 本評価は最も厳しい燃料偏心配置によるもの

表-5 評価結果

収納缶内の燃料条件	実効増倍率 <sup>※1</sup>	設計基準
燃料棒の形状が維持されていない燃料	0.91	0.95

※1 モンテカルロ計算の統計誤差 (3σ) を考慮した値

#### IV. 使用済燃料貯蔵ラック（25体）の耐震性について

##### 1. 一般事項

###### 1.1 構造計画

###### 1.2 評価方針

###### 1.3 準拠基準等

###### 1.4 記号の説明

###### 1.5 計算精度と数値の丸め方

##### 2. 評価部位

##### 3. 地震応答解析及び構造強度評価

###### 3.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

###### 3.2 荷重の組合せ及び許容限界

###### 3.3 解析モデル及び諸元

###### 3.4 固有周期

###### 3.5 設計用地震力

###### 3.6 応力の計算方法

###### 3.7 計算条件

###### 3.8 応力の評価

##### 4. 評価結果

## 1. 一般事項

本計算書は、使用済燃料貯蔵ラック（25 体）（以下「ラック」という。）の耐震性についての計算方法と計算結果を示す。

### 1.1 構造計画

ラックの構造計画を表 1-1 に示す。



表 1-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造物	主体構造	
<p>ラックは、縦置型で共用プールの床に置かれたコモンベース上に設置されラック取付ボルトで固定している。コモンベースは、共用プール床に取り付けられている基礎ボルトにより固定している。</p>	<p>ステンレス鋼製角形枠組構造</p>	<p>ラック本体 (枠板小)</p> <p>ラック本体 (枠板大)</p> <p>燃料支持板 ベース コモンベース</p>

## 1.2 評価方針

ラックの応力評価は、「3.2 荷重の組合せ及び許容限界」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、「1.1 構造計画」にて示すラックの部位を踏まえ「2. 評価部位」にて設定する箇所において、「3.3 解析モデル及び諸元」及び「3.4 固有周期」で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、「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「4. 評価結果」に示す。

ラックの耐震評価フローを図1-1に示す。

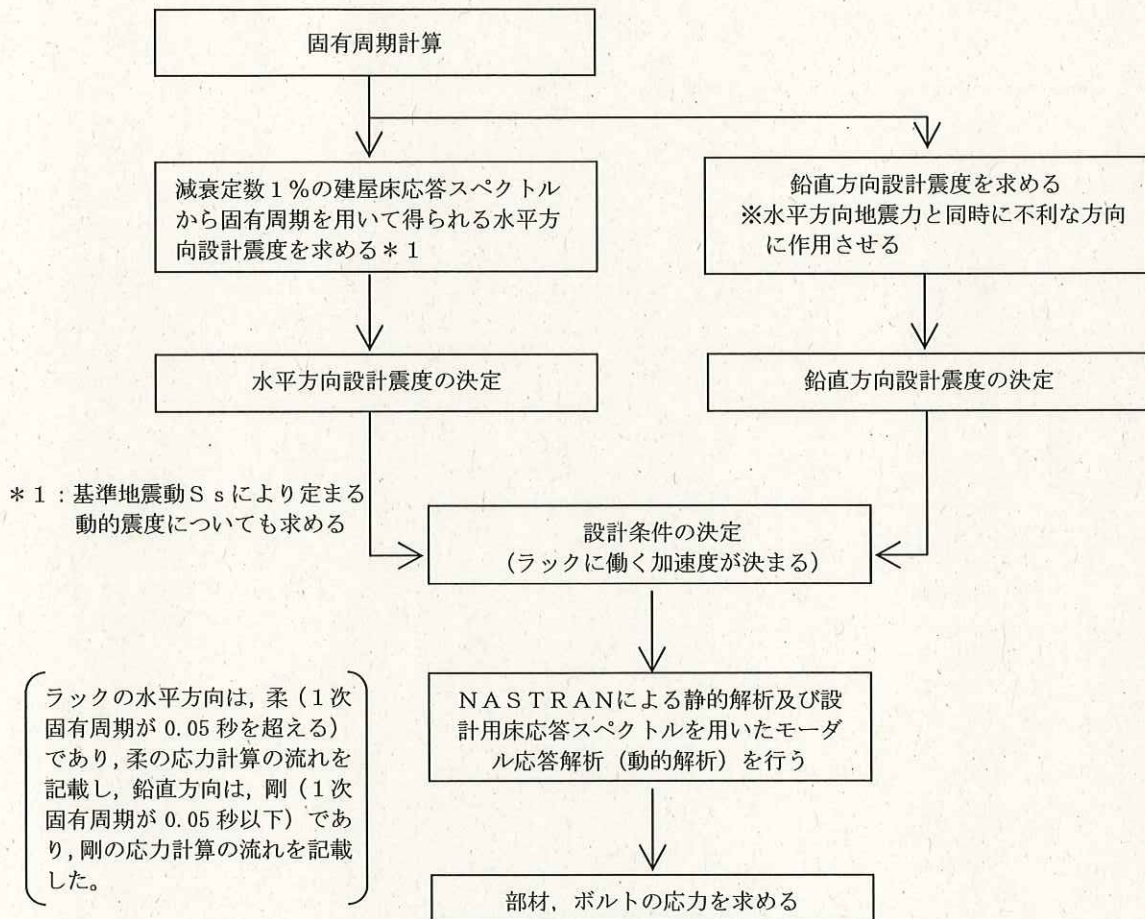


図1-1 ラックの耐震評価フロー

### 1.3 準拠基準等

本評価は原則として下記に準拠して行う。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG 4601・補-1984)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG 4601-1987)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG 4601-1991 追補版)
- ・原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC 4601-2008)
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007)
- ・鋼構造設計規準—許容応力度設計法— (社団法人 日本建築学会 (2005年9月))
- ・日本産業規格 (JIS)

1.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	スペーサ下部支持部材の断面積	mm <sup>2</sup>
A <sub>b</sub>	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積	mm <sup>2</sup>
A <sub>f</sub>	圧縮フランジの断面積	mm <sup>2</sup>
A <sub>s</sub>	スペーサの面積	mm <sup>2</sup>
C <sub>H</sub>	水平方向設計震度	—
C <sub>v</sub>	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
F*	設計・建設規格 SSB-3121.3 又は SSB-3133 に定める値	MPa
F <sub>i</sub>	ベース又はコモンベース底部に作用するせん断力	N
f <sub>j</sub>	ベース又はコモンベース端から $l_j$ の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトに作用する引張力 (1本当り)	N
f <sub>o</sub>	スペーサ下部支持部材の許容組合せ応力	MPa
f <sub>c b</sub>	スペーサ下部支持部材の許容曲げ応力	MPa
f <sub>c</sub>	スペーサの許容圧縮応力	MPa
f <sub>s</sub>	部材の許容せん断応力	MPa
f <sub>s b</sub>	せん断力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f <sub>s s</sub>	スペーサ下部支持部材の許容せん断応力	MPa
f <sub>t</sub>	部材の許容引張応力	MPa
f <sub>t o</sub>	引張力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f <sub>t s</sub>	引張力とせん断力を同時に受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s <sup>2</sup>
H	スペーサ下部支持部材の高さ	mm
H'	スペーサの高さ	mm
L	支点間の距離	mm
L <sub>1</sub>	スペーサ下部支持部材とセル壁面との距離	mm
$l_{i g}$	ベース又はコモンベース端から重心までの距離	mm
$l_j$	ベース又はコモンベース端からラック取付ボルト又は基礎ボルトまでの距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
M <sub>i</sub>	ベース又はコモンベース底部の転倒モーメント	N・mm
m	使用済燃料収納缶 (大) 貯蔵時のラック全質量	kg

記号	記号の説明	単位
mF	使用済燃料収納缶（大）に収納した燃料	kg
mR	ラックの質量	kg
mW	ラックに含まれる水の質量	kg
mFC	使用済燃料収納缶（大）の質量	kg
mCB	コモンベースの質量	kg
n	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの全本数	—
n <sub>j</sub>	ベース又はコモンベース端から l <sub>j</sub> の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトの本数	—
P	スペーサおよびスペーサ下部支持部材への荷重	N
S <sub>u</sub>	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S <sub>y</sub>	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
Z	スペーサ下部支持部材の断面係数	mm <sup>3</sup>
Λ	スペーサの限界細長比	—
λ	スペーサの有効細長比	—
σ <sub>0</sub>	スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力	MPa
σ <sub>b</sub>	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ <sub>c</sub>	スペーサに生じる圧縮応力	MPa
σ <sub>cb</sub>	スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力	MPa
σ <sub>fa</sub>	部材に生じる組合せ応力	MPa
σ <sub>x</sub> , σ <sub>y</sub>	部材に生じる引張応力	MPa
τ <sub>b</sub>	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ <sub>s</sub>	スペーサ下部支持部材に作用するせん断応力	MPa
τ <sub>xy</sub>	部材に生じるせん断応力	MPa

注記

- 1) 添字 i の意味は、以下のとおりとする。また、添字 j は 1～10 までの数字を示すものとする。

i = X : X 方向

i = Y : Y 方向

- 2) クラス 3 支持構造物及びその他支持構造物に対する  $f_b$ ,  $f_s$ ,  $f_c$ ,  $f_{cb}$  の値の算出において、 $F$  値は次の値を用いる。

$$F = \text{Min}[S_y, 0.7S_u]$$

ただし、使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては、

$$F = \text{Min}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)]$$

ここで、

$F$  : 許容応力算定用基準値、材料の許容応力を決定する場合の基準値

### 1.5 計算精度と数値の丸め方

表示する数値の丸め方は表 1-2 に示すとおりとする。

表 1-2 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
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁目
モーメント	N・mm	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁目
算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力*1	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記 \*1：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設計引張強さ及び設計降伏点は、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

## 2. 評価部位

ラックの耐震評価は、耐震評価上厳しくなるラック本体、ラック取付ボルト、基礎ボルト、スペーサ、スペーサ下部支持部について実施する。ラックの耐震評価部位については、図3-1、図3-10、図3-11に示す。

## 3. 地震応答解析及び構造強度評価

### 3.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) 地震応答解析には、シェル要素を用いた有限要素モデルによるモーダル解析を用いる。
- (2) ラックは、使用済燃料共用プール（以下「共用プール」という。）の底部に基礎ボルトを介して据え付けられたコモンベース上にラック取付ボルトで固定されるものとする。
- (3) ラックの質量には、使用済燃料収納缶（大）及びこれに収納されている使用済燃料の質量とラック自身の質量のほか、使用済燃料収納缶（大）とラックに含まれる水の質量及びラック外形の排除水質量<sup>\*</sup>を考慮する。
- (4) 水平方向地震動と鉛直方向地震動を解析モデルへ別々に入力して地震荷重、応力を求め、それらを適切に組み合わせて評価を行う。
- (5) 構造概要図を図3-1に示す。また、使用済燃料貯蔵ラックに係る要目表を表3-1、表3-2に示す。

注記\*：排除水質量とは、水中の機器の容積により排除される機器の周囲の流体の質量である。

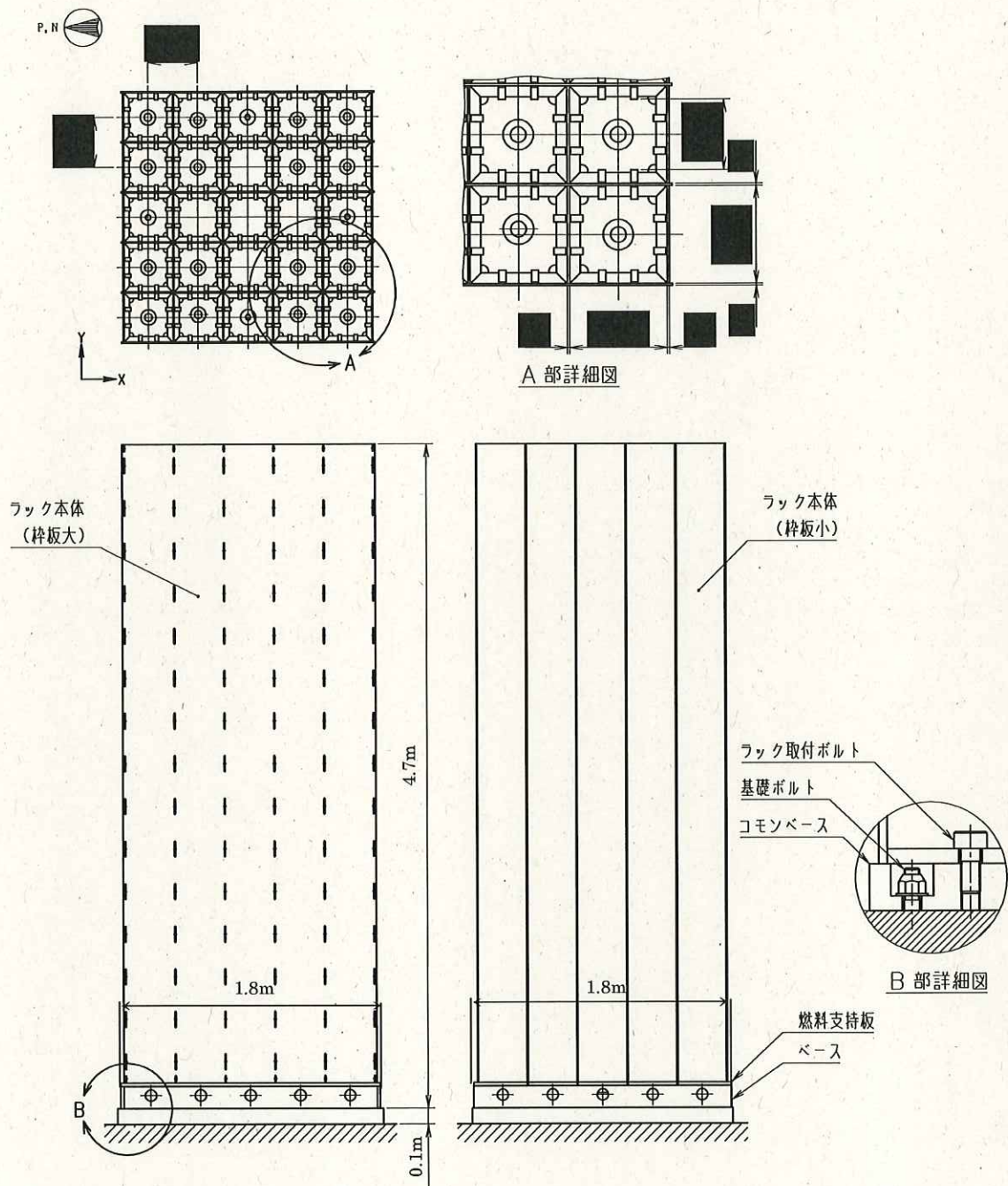


図 3-1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (25 体))



表3-1 使用済燃料貯蔵ラック (25体) に係る要目表

名	称	使用済燃料貯蔵ラック							
種	類	たて置ラック式							
容	量	25							
主 要 寸 法	高	さ	mm	(4680)					
	中	心	間	距	離	mm	( )		
	内	の	り	mm	( )				
	ス	ペ	ー	サ	間	距	離	mm	( )
	厚	さ	mm	( )					
材	質	—	SUS304						
個	数	—	1						

注：主要寸法の ( ) 内は公称値を示す。

表3-2 使用済燃料貯蔵ラック (25体) の主要寸法

主要寸法	解析使用値
高さ(mm)	4680
中心間距離(mm)	( )
内のり(mm)	( )
スペーサ間距離(mm)	( )
厚さ(mm)	( )

### 3.2 荷重の組合せ及び許容限界

#### 3.2.1 荷重の組み合わせ許容限界

ラックの荷重の組み合わせ許容限界を表 3-3 に示す。

#### 3.2.2 使用材料の許容応力評価条件

ラックの許容応力評価条件を表 3-4 に示す。

表 3-3 許容限界

耐震クラス	荷重組合せ	供用状態	一次応力					適用範囲
			引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ	
S	$D+P_D+M_D+S_S$	D s	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ラック本体</li> <li>・スペーサ</li> <li>・スペーサ下部支持部材</li> </ul>
			$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	—	—	$\text{Min}\{1.5f_t^*, (2.1f_c^* - 1.6\tau_b)\}$	

## 記号の説明

- $D$  : 死荷重
- $P_b$  : 地震と組合わすべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲがある場合はこれを含む）における圧力荷重又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重
- $M_b$  : 地震と組合わすべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲがある場合はこれを含む）における機械的荷重又は当該設備に設計上定められた機械的荷重
- $S_s$  : 基準地震動  $S_s$  により定まる地震力
- $f_t^{(注)}$  : ボルト材以外の支持構造物に対しては設計・建設規格SSB-3121.1, ボルト材に対しては設計・建設規格SSB-3131により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
- $f_s^{(注)}$  : ボルト材以外の支持構造物に対しては設計・建設規格SSB-3121.1, ボルト材に対しては設計・建設規格SSB-3131により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
- $f_c^{(注)}$  : ボルト材以外の支持構造物に対して設計・建設規格SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容圧縮応力
- $f_b^{(注)}$  : ボルト材以外の支持構造物に対して設計・建設規格SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容曲げ応力
- $f_t^*, f_s^*, f_c^*, f_b^*$  : 供用状態D s に対する許容応力算定に用いる応力であって、上記の  $f_t, f_s, f_c, f_b$  の値を算出する際、以下の読み替えを行って算出した値。その他の支持構造物の場合、下記（注）の  $S_y$  を  $1.2S_y$  と読み替える。ただし、ステンレス鋼及び高ニッケル合金を除く。
- $\tau_b$  : 基礎ボルトに生じるせん断応力

### (注)

クラス3支持構造物及びその他支持構造物に対する  $f_t, f_s, f_c, f_b$  の値の算出において、 $F$  値は次の値を用いる。

$$F = \text{Min}[S_y, 0.7S_u]$$

ただし、使用温度が  $40^\circ\text{C}$  を超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては、

$$F = \text{Min}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)]$$

ここで、

$F$  : 許容応力算定用基準値、材料の許容応力を決定する場合の基準値

表 3-4 使用材料の許容応力評価条件\*3

項目 部材	材 料	S <sub>y</sub> *1 (MPa)	S <sub>y</sub> *2 (MPa)	S <sub>u</sub> *1 (MPa)	F * (MPa)
ラック本体 (枠板大)	SUS304	188.66	205	479.89	205
ラック本体 (枠板小)	SUS304	188.66	205	479.89	205
燃料支持板	SUS304	188.66	205	479.89	205

注記 \*1：最高使用温度 (66℃) で算出

\*2：室温で算出

\*3：ラック取付ボルト，基礎ボルト，スパーサ及びスペース下部支持部材については，3.7.2項～3.7.5項に示す

### 3.3 解析モデル及び諸元

ラックはシェル要素を用いた有限要素モデルとする。ラックの計算モデルを図3-2に示す。また、機器の諸元を表3-5に示す。

ラックは、共用プールの底部に基礎ボルトを介して据え付けられたコモンベース上にラック取付ボルトで固定されるものとする。

使用済燃料収納缶（大）及びこれに収納されている使用済燃料の質量と使用済燃料収納缶（大）に含まれる水の質量はセル内の上下スペーサで支持されるためラックセルの上下端に与える。また、ラックセル内に含まれる水の質量、ラック外形の排除水質量は、ラック全高にわたって等分布に与える。

また、計算に用いる設計条件、固有周期の算出及び部材、ラック取付ボルト、基礎ボルト、スペーサ、スペーサ下部支持部材の応力評価に用いる要目を「3. 地震応答解析及び構造強度評価」に示す。

解析コードは、「NASTRAN」を使用する。

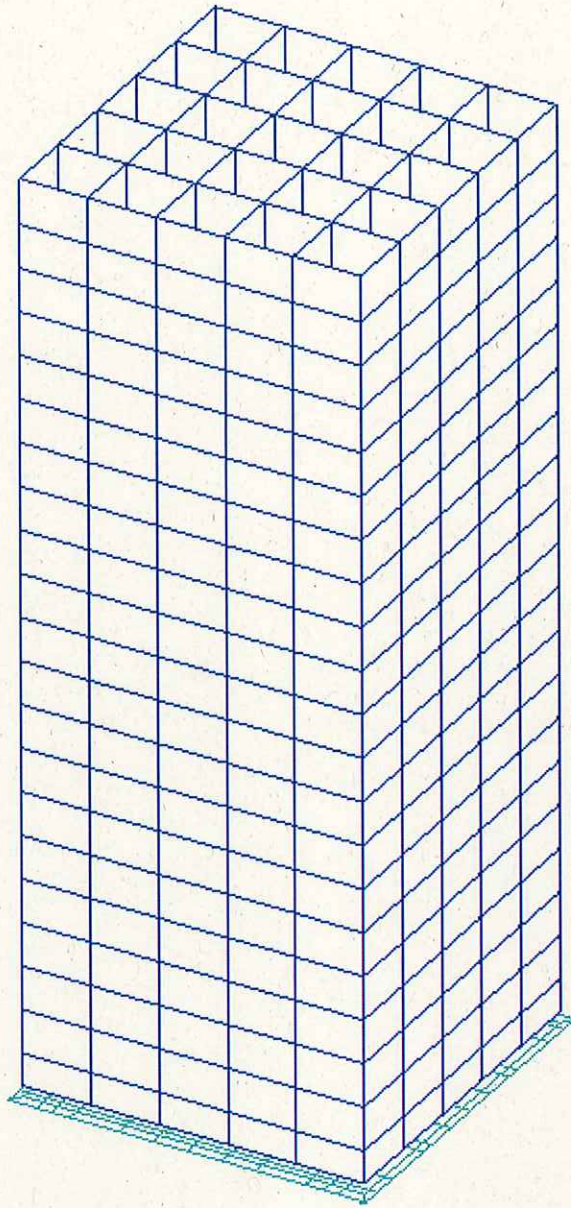


図3-2 使用済燃料貯蔵ラック (25体) 計算モデル

表 3-5 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	SUS304 (ラック本体, スペーサ 及びスペーサ下部支持部材), SUS630H1150 (ラック取付ボルト 及び基礎ボルト)
質量	m	kg	■
温度条件 (最高使用温度)	T	°C	66
縦弾性係数	E*1	MPa	192000 (ラック本体, スペーサ 及びスペーサ下部支持部材)
ポアソン比	$\nu$	—	0.3

注記 \*1: 最高使用温度 (66°C) で算出



### 3.4 固有周期

固有周期は、計算機コード「NASTRAN」を用いて求める。

固有値解析の結果を表3-6に、振動モード図を図3-3～図3-5に示す。鉛直方向は、4次モード以降で卓越し、固有周期は0.05秒以下であり、剛であることを確認した。

表3-6 固有値解析結果

ラック種類	次数	固有周期 (s)	刺激係数		
			X方向	Y方向	Z方向
使用済燃料貯蔵 ラック (25 体)	1	██████	██████	██████	██████
	2	██████	██████	██████	██████
	3	██████	██████	██████	██████

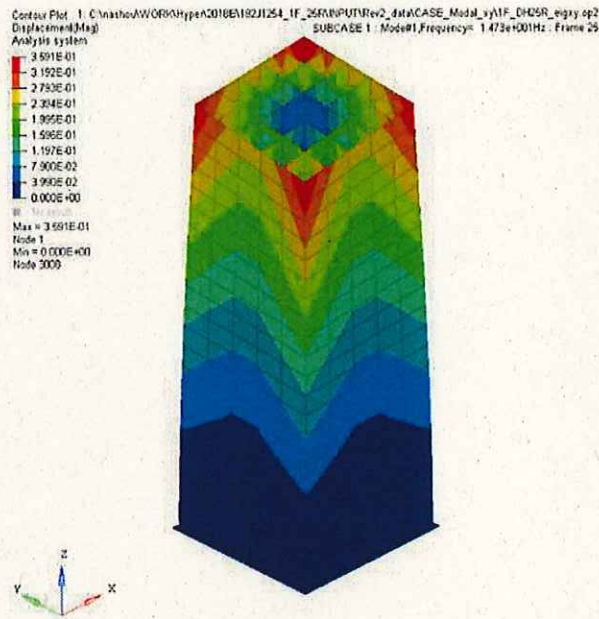


図3-3 振動モード (1次モード)

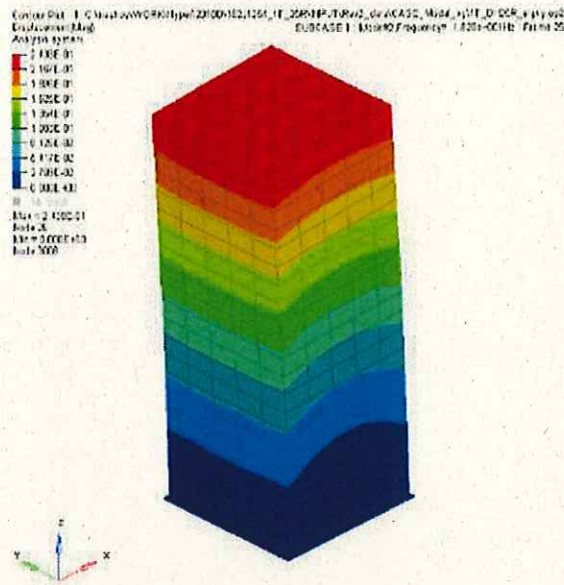


図 3-4 振動モード (2次モード)

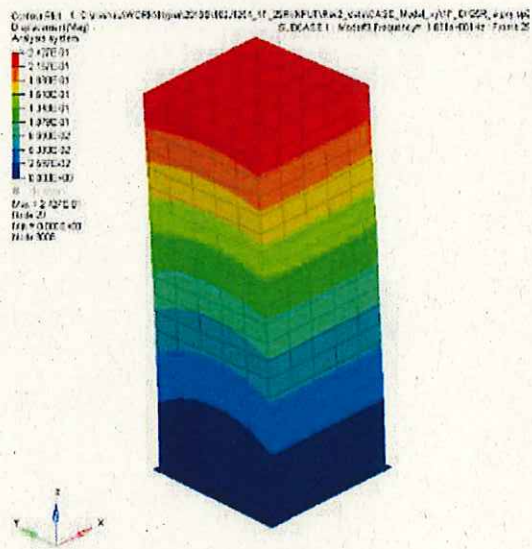


図 3-5 振動モード (3次モード)

### 3.5 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 3-7 に示す。

表 3-7 設計用地震力

据付場所及び 床面高さ (m)	次数	固有周期 (s)	基準地震動 $S_s$ *7		減衰定数 (%)	
			水平方向*5 設計震度	鉛直方向*6 設計震度	水平方向	鉛直方向
運用補助共用施設 G. L. -1.3*1	1次	■	*2	$C_v=0.49$	1.0	-
	2次	■	*3			
	3次	■	*4			

注記 \*1: 基準床レベルを示す。

\*2: 基準地震動  $S_s$  に基づく動的解析より得られる応答値 (1次固有周期:  $C_H=0.89$ )

\*3: 基準地震動  $S_s$  に基づく動的解析より得られる応答値 (2次固有周期:  $C_H=0.70$ )

\*4: 基準地震動  $S_s$  に基づく動的解析より得られる応答値 (3次固有周期:  $C_H=0.70$ )

\*5: 基準地震動  $S_s$  により得られる 1.2ZPA ( $C_H=0.67$ ) についても考慮する。

\*6: 基準地震動  $S_s$  により得られる 1.2ZPA ( $C_v=0.49$ )

\*7:  $S_s-1\sim 3$  の 3 波を包絡する地震動

### 3.6 応力の計算方法

#### 3.6.1 部材の応力

部材についての応力計算は、図3-2の計算モデルにて計算機コードを使用して行い、引張応力、せん断応力を求め、本項に示す計算方法に従って組合せ応力を計算する。

計算機コード内では、各部材の局所座標系及びせん断応力 $\tau_{xy}$ 、引張応力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ の作用する向きを、図3-6に示すように設定している。

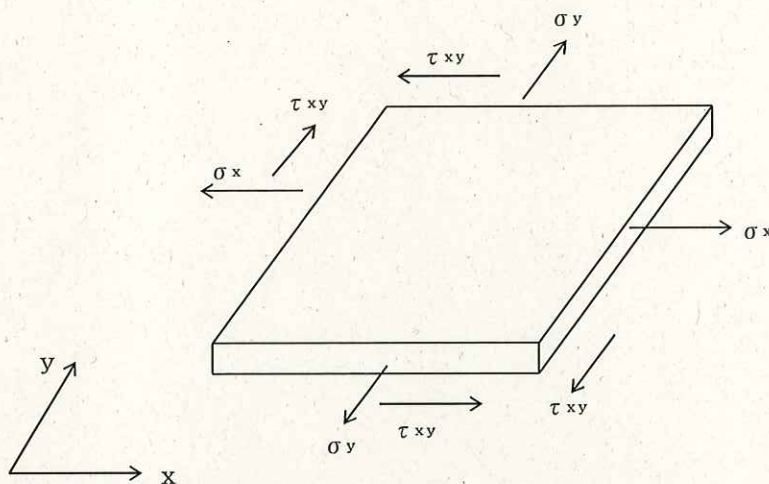


図3-6 部材の応力

各部材の組合せ応力 $\sigma_{fa}$ は、上記で計算したせん断応力 $\tau_{xy}$ 、引張応力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ を用いて、次式より求める。

$$\sigma_{fa} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

### 3.6.2 ラック取付ボルトの応力

X方向地震時を例にとり、以下に計算方法を説明する。なお、Y方向も同様の計算方法により応力を求める。

図3-2の計算モデルにて荷重計算を計算機コードを使用して行い、求められた地震時にラックに作用する転倒モーメント $M_x$ 及びベース底部に作用するせん断力 $F_x$ が、ラックに図3-7のように負荷されるものとしてラック取付ボルトの応力を求める。

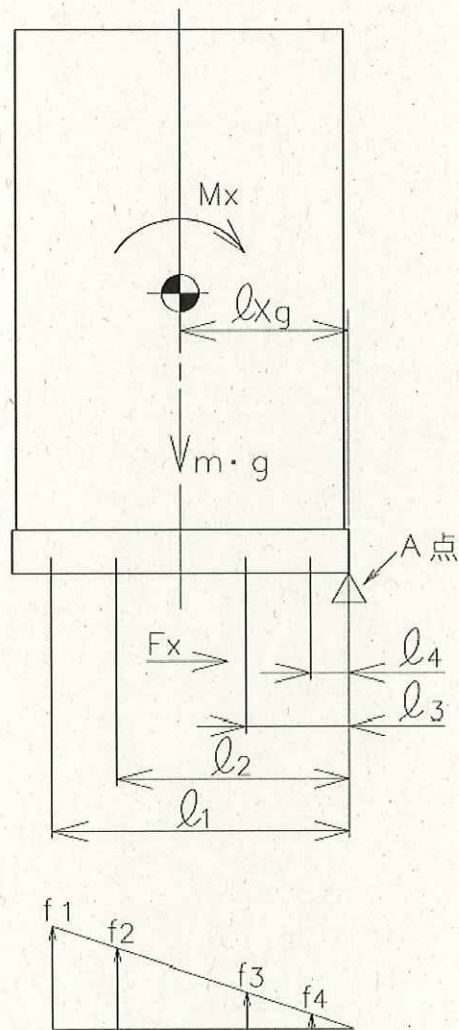


図3-7 ラック取付ボルトの応力

#### (1) 引張応力

A点まわりのモーメントの平衡によりラック取付ボルト1本当りの引張力 $f_j$ を求める。

$f_1 > f_2 > f_3 > f_4$ の関係にあるので  $f_1$ のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_X - (1 - C_V) \cdot m \cdot g \cdot l_{Xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2}$$

引張力  $f_1$ によりラック取付ボルトに生じる引張応力  $\sigma_b$ は、次式により求める。

$$\sigma_b = \frac{f_1}{A_b}$$

ただし、 $f_1$ の値が負のときはラック取付ボルトに引張力が生じないので、引張応力の計算は行わない。

(2) せん断応力

ラック取付ボルトに対するせん断力はラック取付ボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力  $F_X$ によりラック取付ボルトに生じるせん断応力  $\tau_b$ は、次式により求める。

$$\tau_b = \frac{F_X}{n \cdot A_b}$$

### 3.6.3 基礎ボルトの応力

X方向地震時を例にとり、以下に計算方法を説明する。なお、Y方向も同様の計算方法により応力を求める。

図3-2の計算モデルにて荷重計算を計算機コードを使用して行い、求められた地震時にラックに作用する転倒モーメント $M_x$ 及びコモンベース底部に作用するせん断力 $F_x$ が、ラックに図3-8のように負荷されるものとして基礎ボルトの応力を求める。

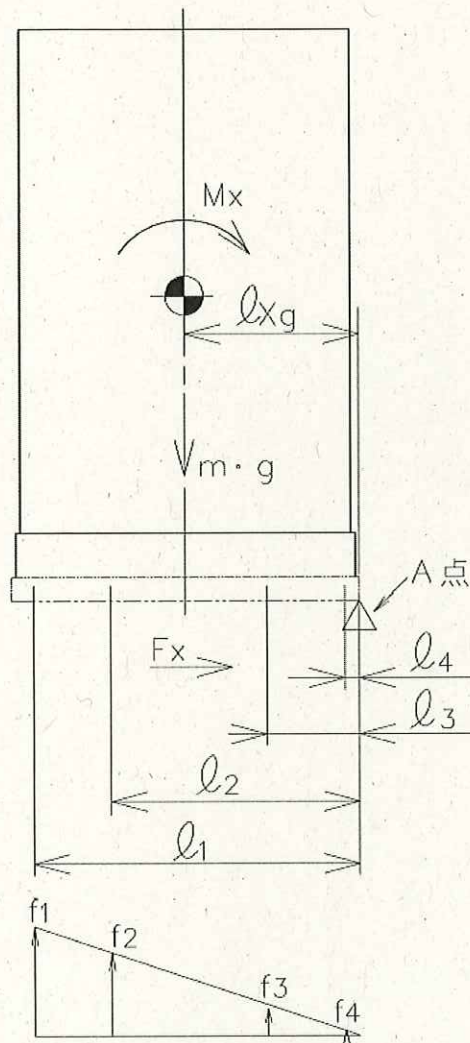


図3-8 基礎ボルトの応力

(1) 引張応力

A点まわりのモーメントの平衡により基礎ボルト1本当りの引張力  $f_1$  を求める。

$f_1 > f_2 > f_3 > f_4$  の関係にあるので  $f_1$  のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_x - (1 - C_V) \cdot m \cdot g \cdot l_{xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2}$$

引張力  $f_1$  により基礎ボルトに生じる引張応力  $\sigma_b$  は、次式により求める。

$$\sigma_b = \frac{f_1}{A_b}$$

ただし、 $f_1$  の値が負のときは基礎ボルトに引張力が生じないので、引張応力の計算は行わない。

(2) せん断応力

基礎ボルトに対するせん断力は基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力  $F_x$  により基礎ボルトに生じるせん断応力  $\tau_b$  は、次式により求める。

$$\tau_b = \frac{F_x}{n \cdot A_b}$$



### 3.6.4 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の応力

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）セル内の上下に取付けるスペーサおよびスペーサ下部支持部材の条件は図3-9のa部もしくはa'部のどちらかに属すると考えられる。

aとa'の部位を比較すると、図3-9の矢印方向から荷重を受けたとき、a'部は隣り合うセルのスペーサおよびスペーサ下部支持部材も強度部材として寄与するが、a部は隣り合うセルが無いいため、a'に比べ、強度上不利である。

したがって、代表してa部を評価し、強度を満足することを確認する。

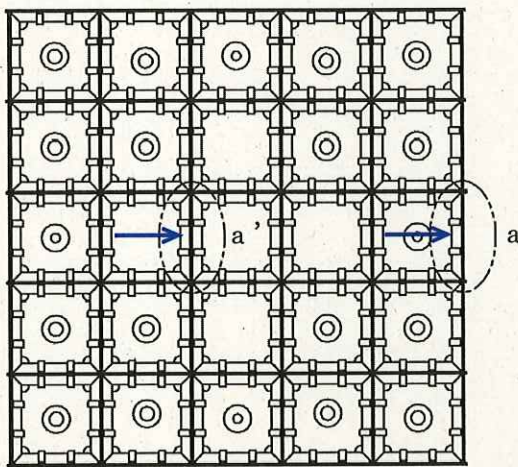


図3-9 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）上面図

(1) 作用荷重

図3-10, 図3-11に示すとおり使用済燃料収納缶(大)に働く地震力が、セルの1面の上下部スペーサ部に作用するものとする。

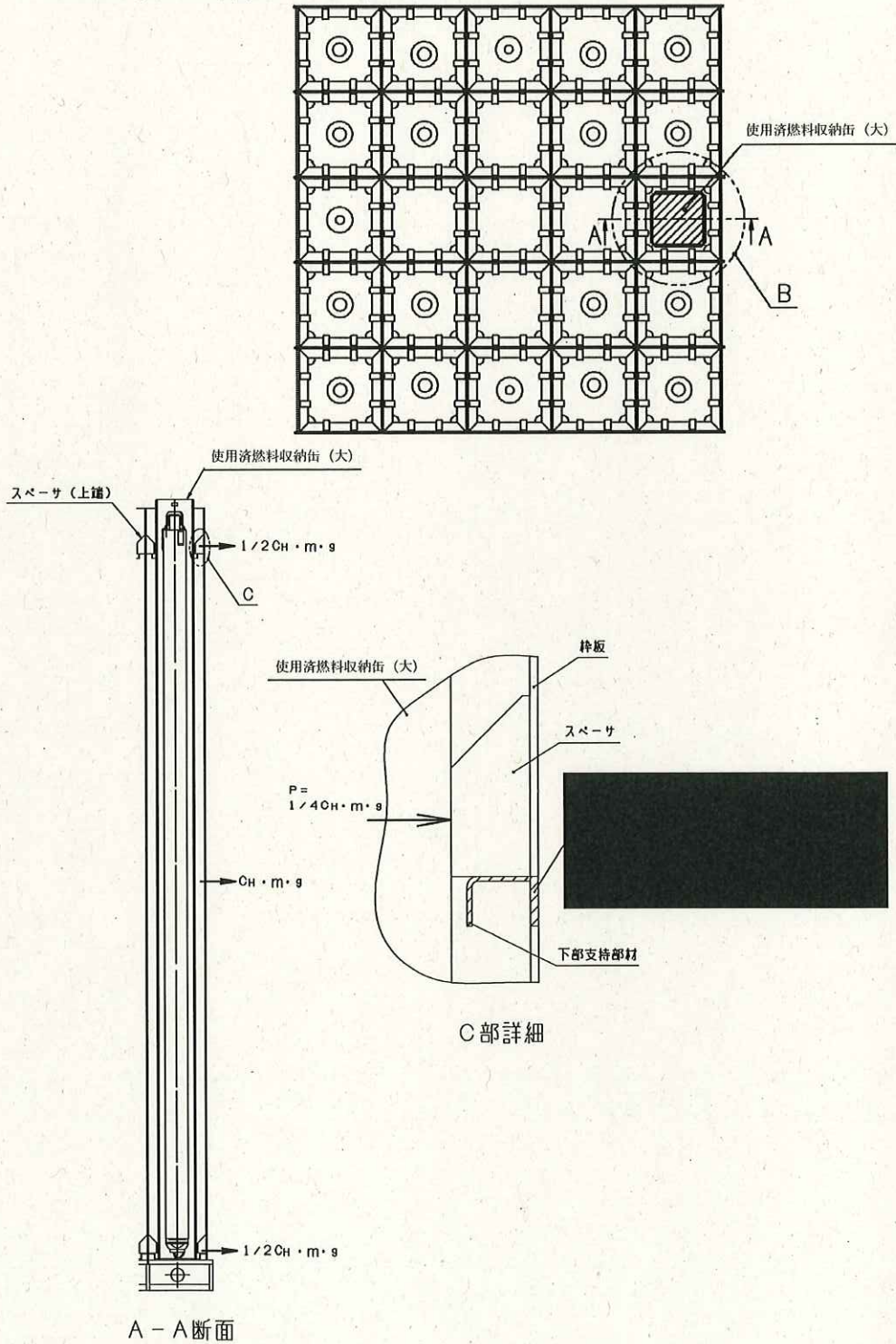
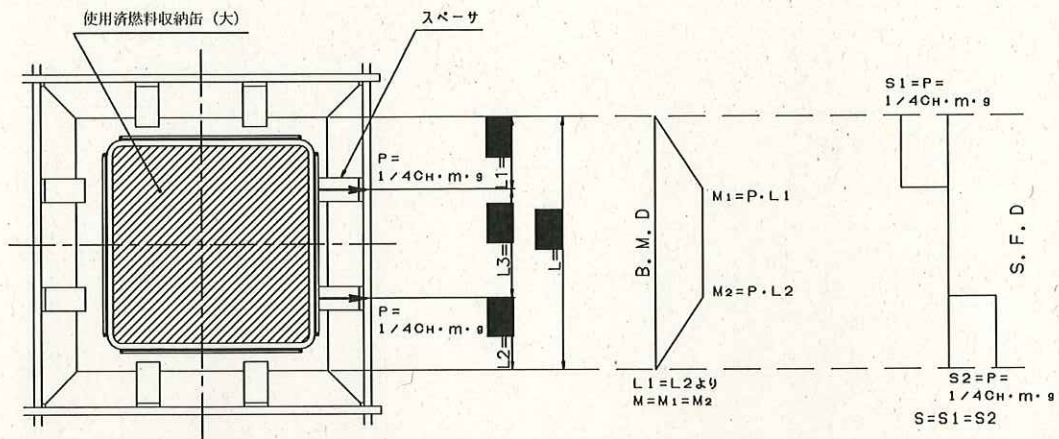


図3-10 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の作用荷重 (1/2)



B部詳細

図3-11 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の作用荷重 (2/2)

作用荷重：

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{4} \cdot C_H \cdot m \cdot g \\
 &= 1/4 \times 0.89 \times \blacksquare \times 9.80665 \\
 &= \blacksquare \text{ (N)}
 \end{aligned}$$

適用震度： $C_H = 0.89$  (-)

質量： $m_s = \blacksquare$  (kg)

$m_s$ ：燃料 (1F にある燃料で最大の質量)，使用済燃料収納缶 (大) 及び使用済燃料収納缶 (大) 内包水の合計質量

重力加速度： $g = 9.80665$  (m/s<sup>2</sup>)

長さ： $L = \blacksquare$  (mm)

長さ： $L_1 = \blacksquare$  (mm)

長さ： $L_2 = \blacksquare$  (mm)

(2) スペーサに生じる圧縮応力

$$\sigma_c = \frac{P}{A_s}$$

(3) スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力

$$M = P \cdot L_1$$

$$\sigma_{cb} = \frac{M}{Z}$$

(4) スペーサ下部支持部材に生じるせん断応力

$$\tau_s = \frac{P}{A}$$

(5) スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{cb}^2 + 3 \cdot \tau_s^2}$$

3.7 計算条件  
3.7.1 設計条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	次数	基準地震動 $S_s^{*7}$		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
				水平方向 <sup>*5</sup> 設計震度	鉛直方向 <sup>*6</sup> 設計震度		
使用済燃料貯蔵ラック (25体)	S	運用補助共用施設 G. L. -1.3 <sup>*1</sup>	1次	*2	*3	66	-
			2次				
			3次				

注記 \*1: 基準床レベルを示す。

\*2: 基準地震動  $S_s$  に基づく動的解析より得られる応答値 (1次固有周期:  $C_H=0.89$ )

\*3: 基準地震動  $S_s$  に基づく動的解析より得られる応答値 (2次固有周期:  $C_H=0.70$ )

\*4: 基準地震動  $S_s$  に基づく動的解析より得られる応答値 (3次固有周期:  $C_H=0.70$ )

\*5: 基準地震動  $S_s$  により得られる 1.2ZPA ( $C_H=0.67$ ) についても考慮する。

\*6: 基準地震動  $S_s$  により得られる 1.2ZPA ( $C_v=0.49$ )

\*7:  $S_s-1\sim 3$  の3波を包絡する地震動。

3.7.2 ラック取付ボルトの応力評価に用いる要目

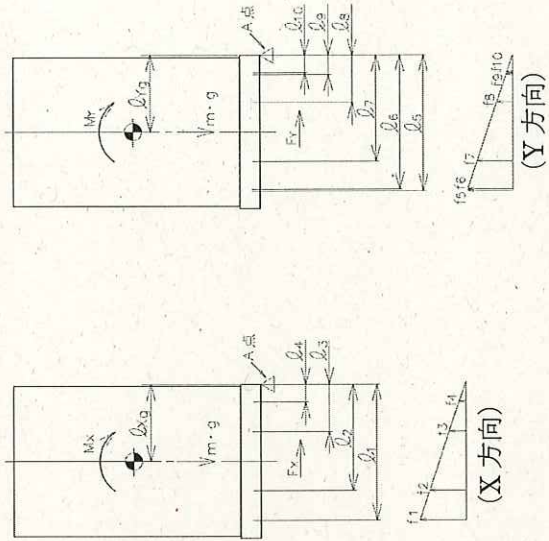
機器名称	m (kg)	m <sup>F</sup> (kg)	m <sup>R</sup> (kg)	m <sup>W</sup> (kg)	m <sup>FC</sup> (kg)
使用済燃料貯蔵 ラック (25 体)	■	■	■	■	■

φ <sub>1</sub> (mm)	φ <sub>2</sub> (mm)	φ <sub>3</sub> (mm)	φ <sub>4</sub> (mm)	φ <sub>5</sub> (mm)	φ <sub>6</sub> (mm)	φ <sub>7</sub> (mm)	φ <sub>8</sub> (mm)	φ <sub>9</sub> (mm)	φ <sub>10</sub> (mm)	φ <sub>X5</sub> (mm)	φ <sub>Y5</sub> (mm)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

A <sup>b</sup> (mm <sup>2</sup> )	n	n <sup>1</sup>	n <sup>2</sup>	n <sup>3</sup>	n <sup>4</sup>	n <sup>5</sup>	n <sup>6</sup>	n <sup>8</sup>	n <sup>7</sup>	n <sup>9</sup>	n <sup>10</sup>
■	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

ラック取付 ボルト材料	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	M <sub>x</sub> (N・mm)	M <sub>y</sub> (N・mm)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)	F <sup>*</sup> (MPa)
SUS630H1150	1.368 × 10 <sup>5</sup>	1.380 × 10 <sup>5</sup>	5.291 × 10 <sup>8</sup>	5.333 × 10 <sup>8</sup>	■	■	■

注記 \*1 : 最高使用温度 (66°C) で算出



3.7.3 基礎ボルトの応力評価に用いる要目

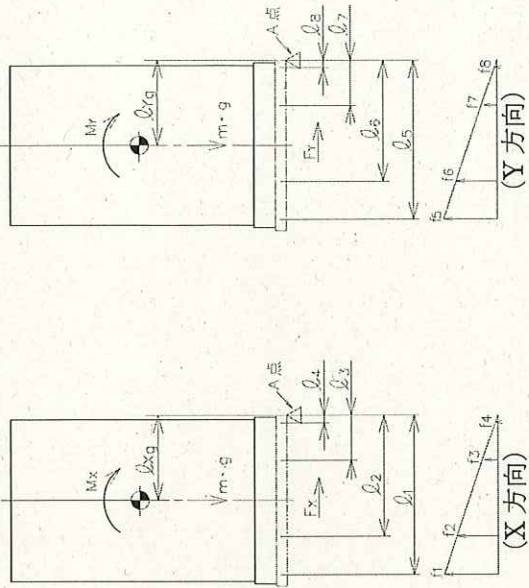
機器名称	m (kg)	m <sup>F</sup> (kg)	m <sup>R</sup> (kg)	m <sup>W</sup> (kg)	m <sup>FC</sup> (kg)	m <sup>CB</sup> (kg)
コモンベース	■	■	■	■	■	■

φ <sub>1</sub> (mm)	φ <sub>2</sub> (mm)	φ <sub>3</sub> (mm)	φ <sub>4</sub> (mm)	φ <sub>5</sub> (mm)	φ <sub>6</sub> (mm)	φ <sub>7</sub> (mm)	φ <sub>8</sub> (mm)	φ <sub>X5</sub> (mm)	φ <sub>Y5</sub> (mm)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

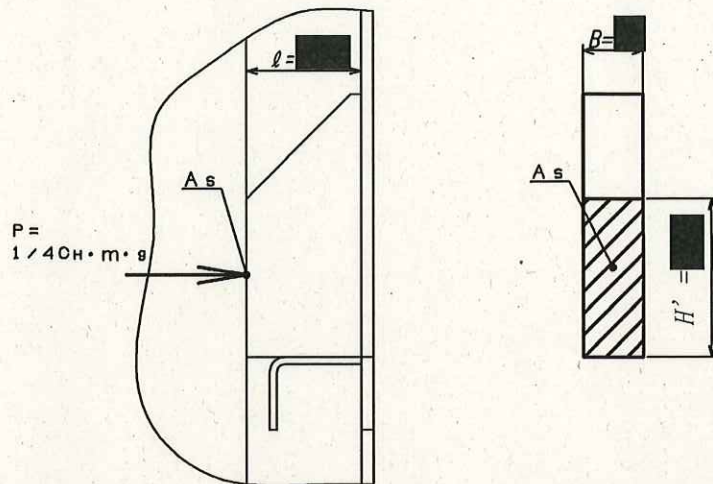
A <sup>b</sup> (mm <sup>2</sup> )	n (-)	n <sup>1</sup> (-)	n <sup>2</sup> (-)	n <sup>3</sup> (-)	n <sup>4</sup> (-)	n <sup>5</sup> (-)	n <sup>6</sup> (-)	n <sup>7</sup> (-)	n <sup>8</sup> (-)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

基礎ボルト 材料	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	M <sub>x</sub> (N・mm)	M <sub>y</sub> (N・mm)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)	F <sup>*</sup> (MPa)
SUS630H1150	1.368 × 10 <sup>5</sup>	1.380 × 10 <sup>5</sup>	5.291 × 10 <sup>8</sup>	5.333 × 10 <sup>8</sup>	■	■	■

注記 \*1: 最高使用温度 (66°C) で算出



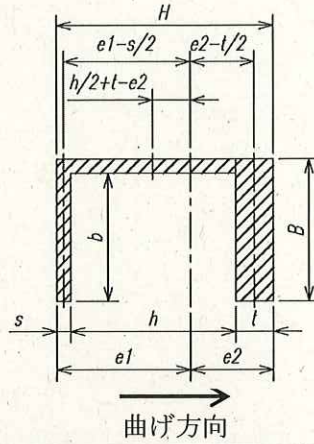
### 3.7.4 スペーサの断面特性



断面形状	項目	記号	値	単位	数式
長方形断面	幅	B	■	mm	
	高さ	H'	■	mm	
	断面積	As	■	mm <sup>2</sup>	= H' × B
	断面二次モーメント(弱軸)	I	■	mm <sup>4</sup>	= $\frac{H' \times B^3}{12}$
	断面二次半径	i	■	mm	= $\sqrt{I/As}$
	長さ	ℓ	■	mm	
	座屈長さ	ℓk	■	mm	= 2.1ℓ
	有効細長比	λ	13.828	-	= $\frac{\ell k}{i}$



3.7.5 スペーサ下部支持部材の断面特性



断面形状	項目	記号	値	単位	数式
コの字断面 (非対称断面)	幅	B	■	mm	
		b	■	mm	
	高さ (はりのせい)	H	■	mm	
	高さ	h	■	mm	
	厚さ	s	■	mm	
		t	■	mm	
	重心の距離	e1	■	mm	$= \frac{b \cdot s^2 + (B-b) \cdot H^2 + b \cdot t \cdot (2H-t)}{2(b \cdot s + (B-b) \cdot H + b \cdot t)}$
		e2	■	mm	$= H - e1$
	断面二次 モーメント	I	■	mm <sup>4</sup>	$= \frac{B \cdot t^3}{12} + B \cdot t \cdot (e2 - t/2)^2$ $+ \frac{B \cdot s^3}{12} + B \cdot s \cdot (e1 - s/2)^2$ $+ \frac{(B-b)h^3}{12} + (B-b) \cdot h \cdot (h/2 + t - e2)^2$
	断面係数	Z1	■	mm <sup>3</sup>	$= I/e1$
		Z2	■	mm <sup>3</sup>	$= I/e2$
	断面積	A	■	mm <sup>2</sup>	$= B \cdot H - b \cdot h$
	断面二次半径	i	■	mm	$= \sqrt{I/A}$
	支点間距離	L	■	mm	
	圧縮フランジの 断面積	Af	■	mm <sup>2</sup>	$= B \cdot s$
板幅比	B/s	■	-		
$24/\sqrt{F^*/100} = 16.76 \geq B/s$ なので板幅比を満足する。					

### 3.8 応力の評価

#### 3.8.1 部材の応力評価

3.6.1 項で求めた各部材の引張応力  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  及び組合せ応力  $\sigma_{fa}$  が, 許容引張応力  $f_t$  以下であること。

また, 3.6.1 項で求めた各部材のせん断応力  $\tau_{xy}$  が, 許容せん断応力  $f_s$  以下であること。

ただし,  $f_t$  及び  $f_s$  は下表による。

地震力の種類	基準地震動 $S_s$
許容引張応力 $f_t$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容せん断応力 $f_s$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

#### 3.8.2 ラック取付ボルト及び基礎ボルトの応力評価

3.6.2 項で求めたラック取付ボルト及び3.6.3 項で求めた基礎ボルトの引張応力  $\sigma_b$  が, 次式より求めた引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力  $f_{ts}$  以下であること。

また, 3.6.2 項で求めたラック取付ボルト及び3.6.3 項で求めた基礎ボルトのせん断応力  $\tau_b$  が, せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力  $f_{sb}$  以下であること。

$$f_{ts} = 1.4 f_{to} - 1.6 \tau_b$$

かつ,

$$f_{ts} \leq f_{to}$$

ただし,  $f_{to}$  及び  $f_{sb}$  は下表による。

地震力の種類	基準地震動 $S_s$
許容引張応力 $f_{to}$	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 $f_{sb}$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

### 3.8.3 スペーサ及びスペーサ下部支持部材の応力評価

SUS304 (オーステナイト系ステンレス鋼)

基準強度 :  $F^* = 205$  (MPa)

縦弾性係数 :  $E = 1.92 \times 10^5$  (MPa)

地震力の種類	基準地震動 $S_s$
許容圧縮応力 $f_c$	$\left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5$
許容曲げ応力 $f_{cb}$	$\min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot Af}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\}$
許容せん断応力 $f_{ss}$	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}}$
許容組合せ応力 $f_o$	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5}$

### 3.8.4 許容応力

#### 3.8.4.1 ラック部材 (SUS304→オーステナイト系ステンレス鋼)

$$F^* = \text{Min}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)]$$



S <sub>y</sub> : 付録材料図表Part5表8	-30°C~40°C	75°C
	205 (MPa)	183 (MPa)
S <sub>u</sub> : 付録材料図表Part5表9	-30°C~40°C	75°C
	520 (MPa)	466 (MPa)

温度66°Cで線形補間すると

$$S_y(66^\circ\text{C}) = 205 - \frac{(205-183)}{75-40} \times (66-40) = 188.66 \text{ (MPa)}$$

$$S_u(66^\circ\text{C}) = 520 - \frac{(520-466)}{75-40} \times (66-40) = 479.89 \text{ (MPa)}$$

したがって、 $F^* = S_y(RT) = 205 \text{ (MPa)}$

(許容引張応力)

$$f_t = \frac{F^*}{1.5} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容せん断応力)

$$f_s = \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} = 118 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容組合せ応力)

$$f_t \geq \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

ここで、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  : 互いに直交する垂直応力

$\tau_{xy}$  :  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ の作用する面内のせん断応力

3.8.4.2 ボルト類 (SUS630H1150→オーステナイト系ステンレス鋼ではない)

$$F^* = \text{Min}[1.2S_y, 0.7S_u]$$

S <sub>y</sub> : 付録材料図表Part5表8	-30°C~40°C	75°C
	■ (MPa)	■ (MPa)
S <sub>u</sub> : 付録材料図表Part5表9	-30°C~40°C	75°C
	■ (MPa)	■ (MPa)

温度66°Cで線形補間すると

$$S_y(66^\circ\text{C}) = \frac{\text{■} - \text{■}}{75-40} \times (66-40) = \text{■} \text{ (MPa)}$$

$$S_u(66^\circ\text{C}) = \frac{\text{■} - \text{■}}{75-40} \times (66-40) = \text{■} \text{ (MPa)}$$

したがって、 $F^* = \text{■} \text{ (MPa)}$

(許容引張応力)

$$f_{to} = \frac{F^*}{2} \cdot 1.5 = \text{■} \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容せん断応力)

$$f_{sb} = \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5 = \text{■} \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容組合せ応力)

$$f_{ts} = 1.4f_{to} - 1.6\tau_b$$

かつ

$$f_{ts} \leq f_{to}$$

### 3.8.4.3 スペーサ

設計・建設規格(JSME S NC1-2005/2007) SSB-3121.3, SSB-3121.1に従い、許容応力を算出する。

#### (1) 許容圧縮応力

SSB-3121.1(3)より

有効細長比  $\lambda = 13.828$

$$\text{限界細長比 } \Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F^*}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 1.92 \times 10^5}{0.6 \times 205}} = 124.12$$

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 = 1.5 + \frac{2}{3} \left( \frac{13.828}{124.12} \right)^2 = 1.508$$

$\lambda < \Lambda$ より

$$\begin{aligned} f_c &= \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5 \\ &= \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{13.828}{124.12} \right)^2 \right\} \frac{205}{1.508} \times 1.5 \\ &= 202 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

### 3.8.4.4 スペーサ下部支持部材

設計・建設規格(JSME S NC1-2005/2007) SSB-3121.3, SSB-3121.1に従い、許容応力を算出する。

#### (1) 許容曲げ応力

設計・建設規格 SSB-3121.1(4) cより荷重面内に対称軸を有しないため

$$\begin{aligned} f_b &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot Af}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\} \\ &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \times 1.92 \times 10^5 \times \blacksquare}{\blacksquare}, 1.5 \times \frac{205}{1.5} \right\} \\ &= \min \{ 910, 205 \} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

#### (2) 許容せん断応力

$$\begin{aligned} f_{ss} &= 1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} \\ &= 1.5 \times \frac{205}{1.5\sqrt{3}} = 118 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

(3) 許容組合せ応力

$$\begin{aligned} f_0 &= 1.5 \times \frac{F}{1.5} \\ &= 1.5 \times \frac{205}{1.5} = 205 \text{ (MPa)} \text{ (整数位, 小数点以下第一位切り捨て)} \end{aligned}$$

#### 4. 評価結果

##### (1) 部材に生じる応力

(単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (25 体)	ラック本体 (枠板大)	SUS304	引張り	$\sigma_x = 14$	$f_t = 205$
			引張り	$\sigma_y = 2$	$f_t = 205$
			せん断	$\tau_{xy} = 2$	$f_s = 118$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 13$	$f_t = 205$
	ラック本体 (枠板小)	SUS304	引張り	$\sigma_x = 14$	$f_t = 205$
			引張り	$\sigma_y = 2$	$f_t = 205$
			せん断	$\tau_{xy} = 3$	$f_s = 118$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 14$	$f_t = 205$

すべて許容応力以下である。

##### (2) ラック取付ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラック	材 料	応 力	基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (25 体)	SUS630	引張り	$\sigma_b = 21$	$f_{ts} = 455$
	H1150	せん断	$\tau_b = 6$	$f_{sb} = 350$

すべて許容応力以下である。

##### (3) 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラック	材 料	応 力	基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (25 体)	SUS630	引張り	$\sigma_b = 36$	$f_{ts} = 455$
	H1150	せん断	$\tau_b = 12$	$f_{sb} = 350$

すべて許容応力以下である。



## (4) スペーサに生じる応力

(単位 : MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵ラック (25 体)	スペーサ	SUS304	圧縮	$\sigma_c = 1$	$f_c = 202$

すべて許容応力以下である。

## (5) スペーサ下部支持部材に生じる応力

(単位 : MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵ラック (25 体)	スペーサ 下部支持部材	SUS304	曲げ	$\sigma_{cb} = 28$	$f_{cb} = 205$
			せん断	$\tau_s = 4$	$f_{ss} = 118$
			組合せ	$\sigma_0 = 29$	$f_0 = 205$

すべて許容応力以下である。