

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の耐震性についての計算書

1. 一般事項
 - 1.1 構造計画
 - 1.2 評価方針
 - 1.3 適用基準
 - 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 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あ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 (枠板大)</p> <p>ラック本体 (枠板小)</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。

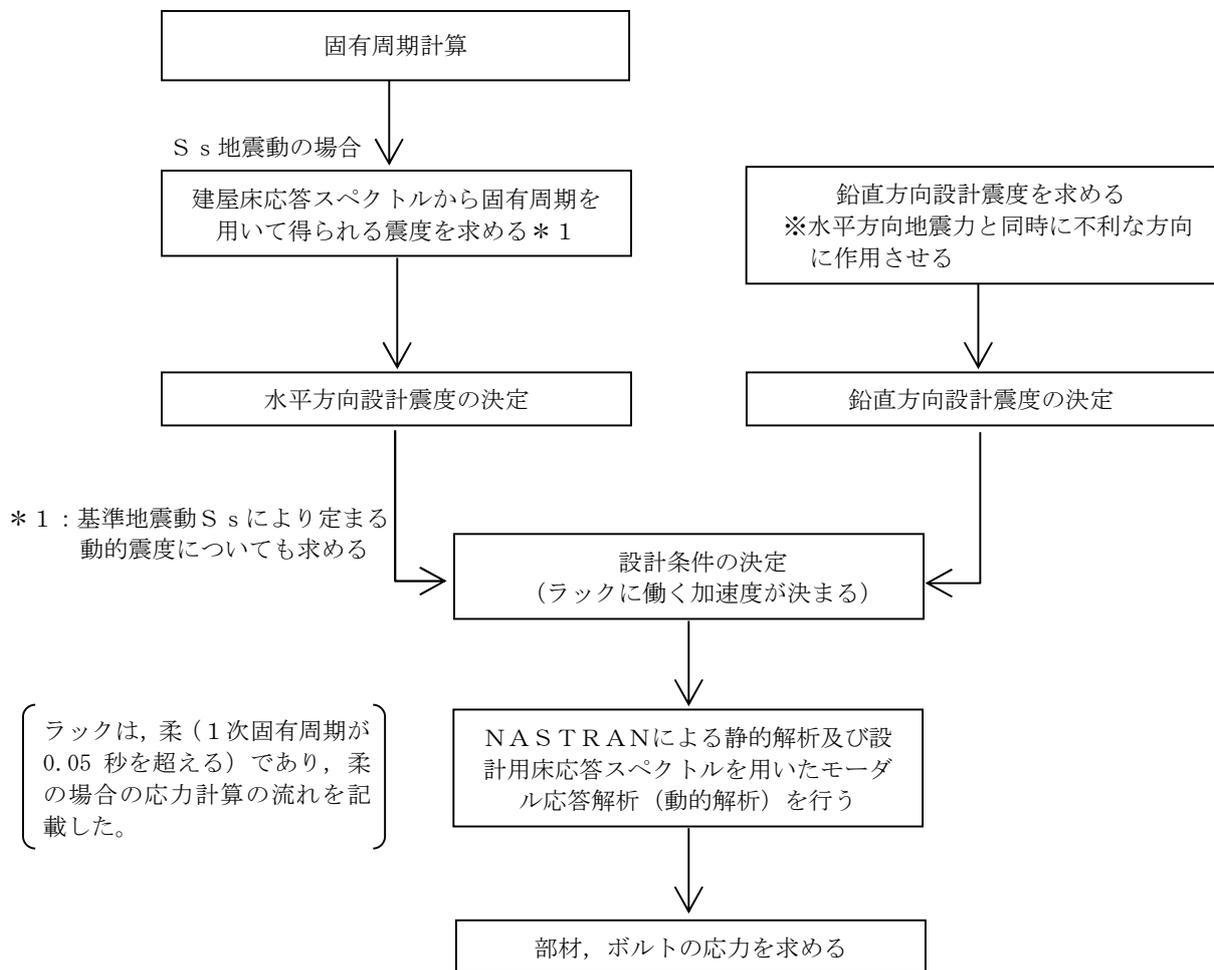


図1-1 ラックの耐震評価フロー

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 ²
A _b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積	mm ²
A _f	圧縮フランジの断面積	mm ²
A _s	スペーサの面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	—
C _v	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 _i	ベース又はコモンベース底部に作用するせん断力	N
f _j	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本当たり）	N
f _o	スペーサ下部支持部材の許容組合せ応力	MPa
f _{c b}	スペーサ下部支持部材の許容曲げ応力	MPa
f _c	スペーサの許容圧縮応力	MPa
f _s	部材の許容せん断応力	MPa
f _{s b}	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 _{s s}	スペーサ下部支持部材の許容せん断応力	MPa
f _t	部材の許容引張応力	MPa
f _{t o}	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 _{t s}	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 ²
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 ₁	スペーサ下部支持部材とセル壁面との距離	mm
l_{ig}	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 _i	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 _j	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 _u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S _y	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 ³
Λ	スペーサの限界細長比	—
λ	スペーサの有効細長比	—
σ ₀	スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力	MPa
σ _b	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 _c	スペーサに生じる圧縮応力	MPa
σ _{cb}	スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力	MPa
σ _{f a}	部材に生じる組合せ応力	MPa
σ _x , σ _y	部材に生じる引張応力	MPa
τ _b	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 _S	スペーサ下部支持部材に作用するせん断応力	MPa
τ _{x y}	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_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℃ 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

精度は6桁以上を確保する。

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の構造概要図に示す。

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^{*}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3-1～2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。

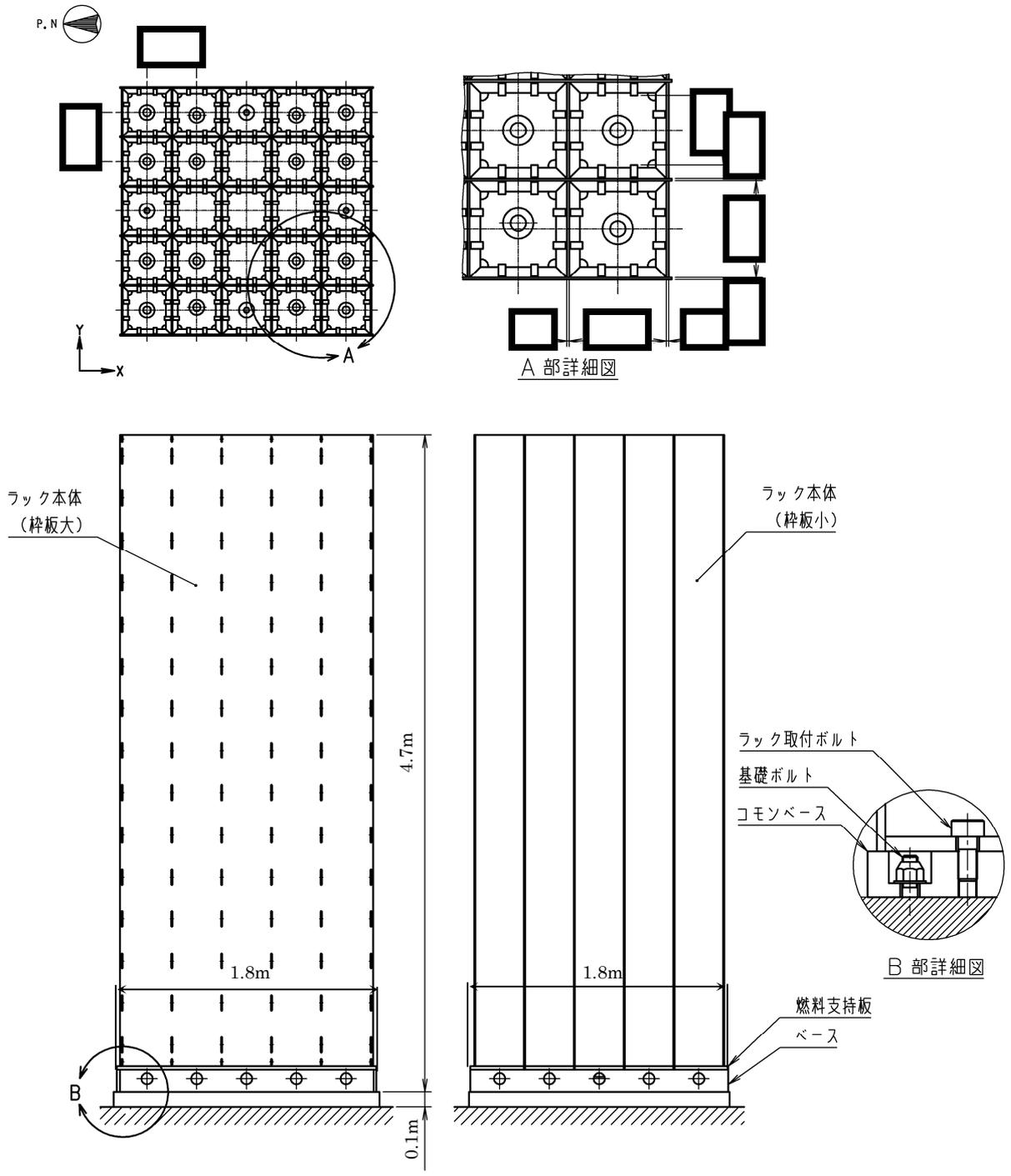


図 3 - 1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (25 体))

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	体	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"> ・ラック本体 ・スパーサ ・スパーサ下部支持部材
			$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	—	—	$\text{Min}\{1.5f_t^* , (2.1f_t^* - 1.6 \tau_b)\}$	<ul style="list-style-type: none"> ・ラック取付ボルト ・基礎ボルト

記号の説明

- D : 死荷重
- P_D : 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_D : 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。
- τ_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℃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

項目 部材	材 料	板厚 t (mm)	縦弾性係数 E ^{*1} (MPa)	せん断弾性係数 G ^{*1} (MPa)	S _y ^{*1} (MPa)	S _y ^{*2} (MPa)	S _u ^{*1} (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

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 章に示す。

解析コードは、「NASTRAN」を使用する。

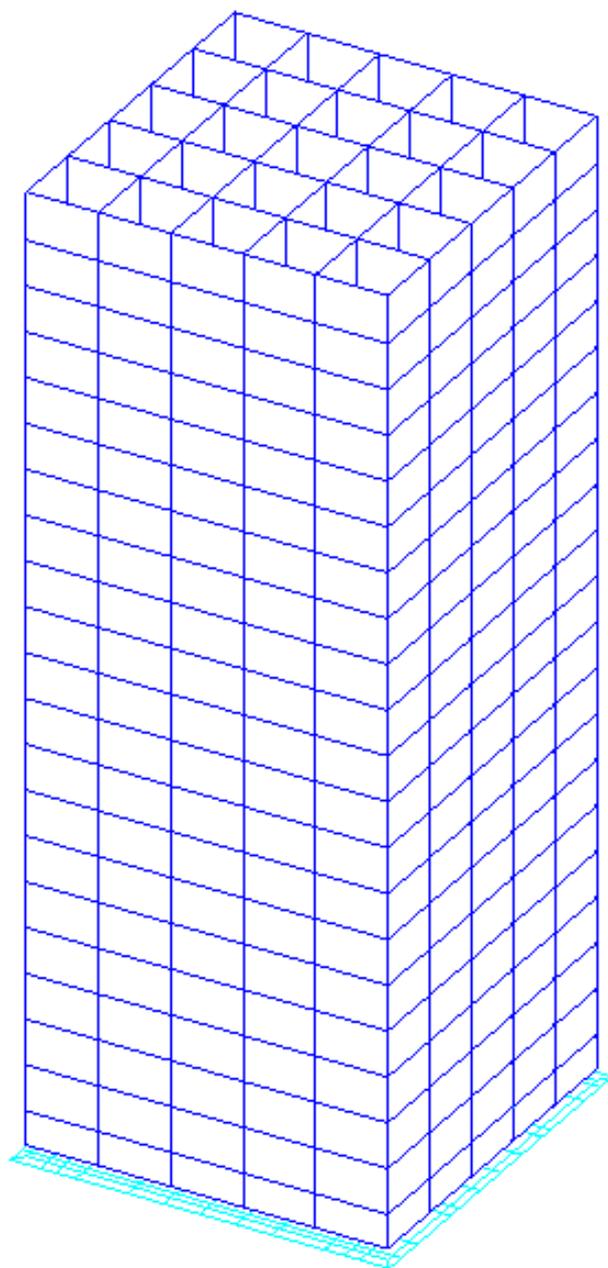


図3-2 使用済燃料貯蔵ラック (25体) 計算モデル

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	ν	—	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				

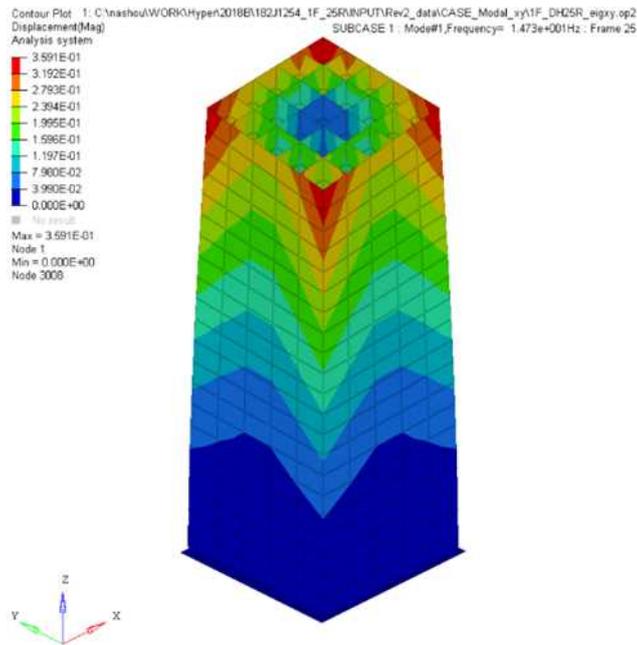


図3-3 振動モード (1次モード)

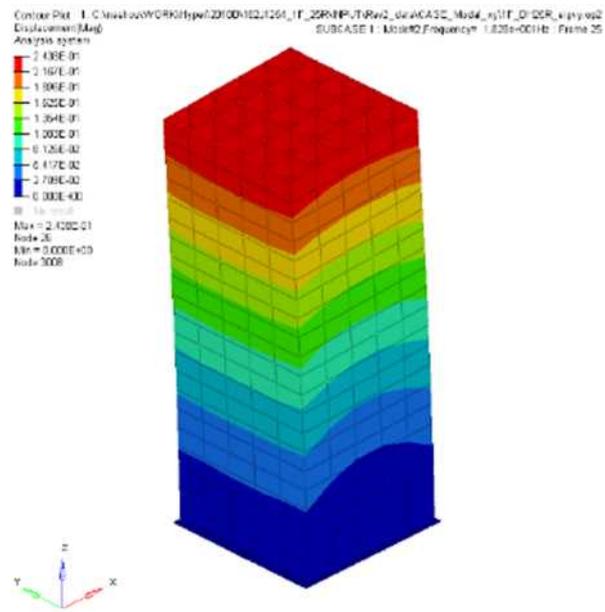


図 3-4 振動モード (2次モード)

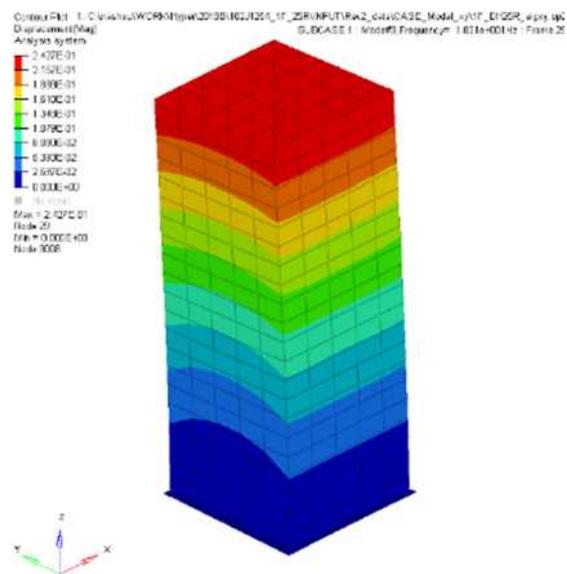


図 3-5 振動モード (3次モード)

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		減衰定数 (%)	
			水平方向 ^{*5} 設計震度	鉛直方向 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 により定まる動的震度 ($C_H=0.67$) についても考慮する。

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 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_y の作用する向きを、図3-6に示すように設定している。

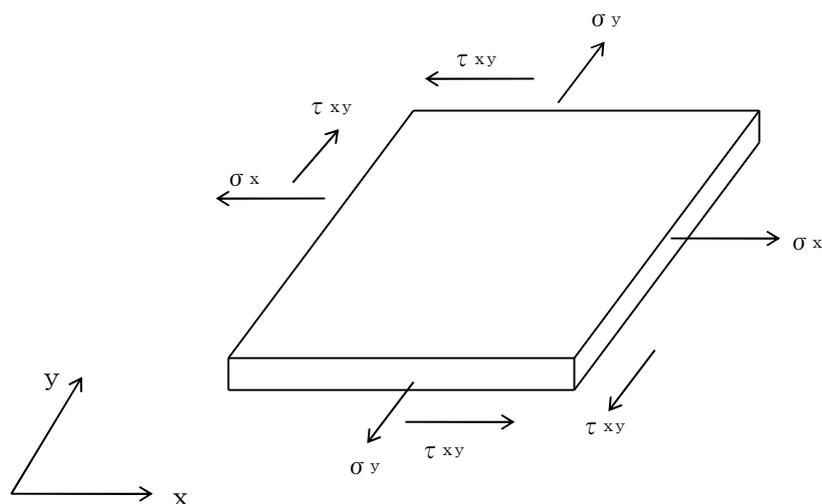


図3-6 部材の応力

各部材の組合せ応力 σ_{fa} は、上記で計算したせん断応力 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_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。

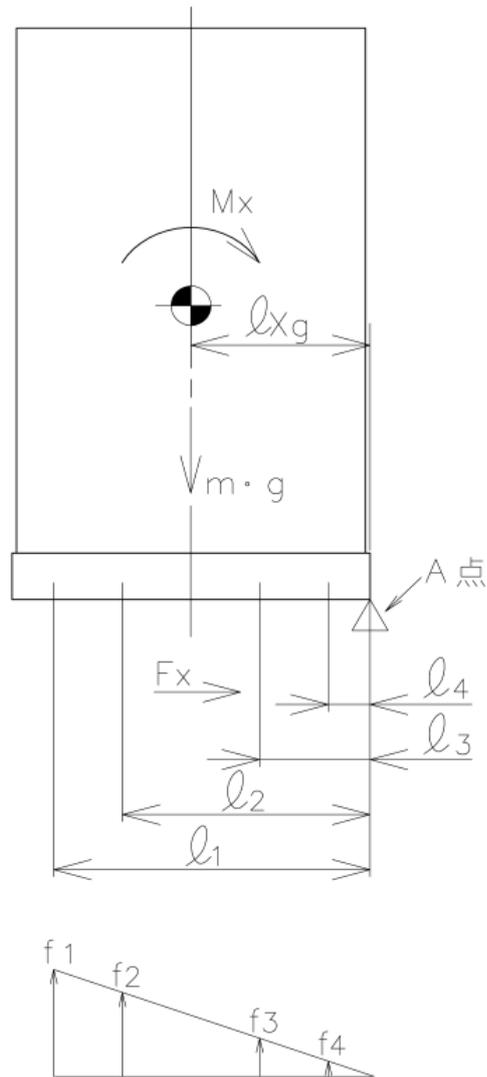


図3-7 ラック取付ボルトの応力

(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本当たりの引張力 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 σ_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 τ_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。

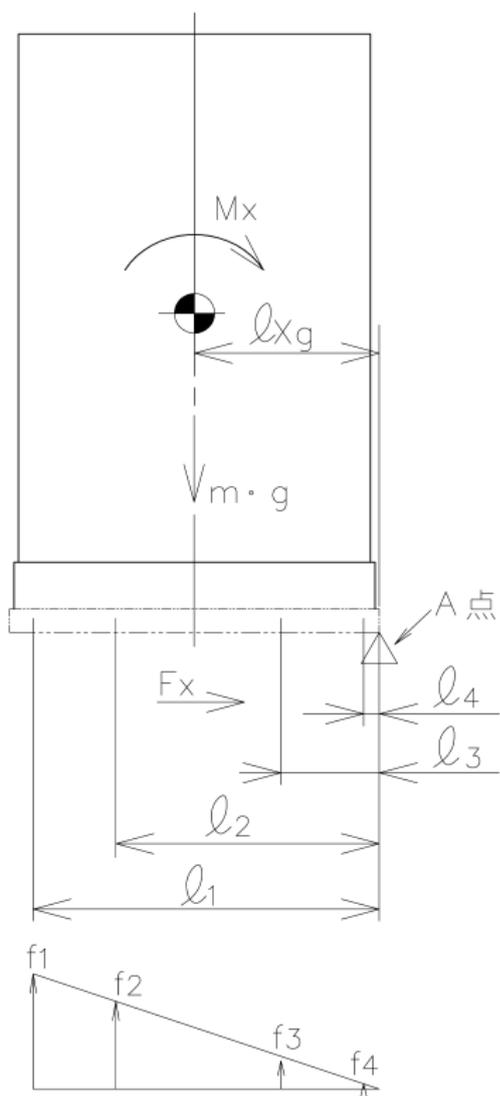


図3-8 基礎ボルトの応力

(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_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 により基礎ボルトに生じる引張応力 σ_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 τ_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。

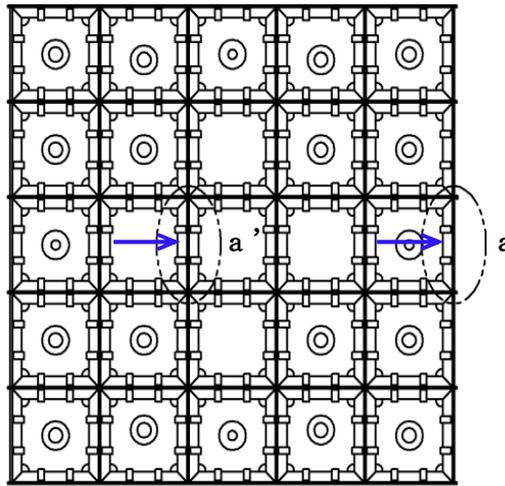


図 3-9 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）上面図

(1) 作用荷重

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。

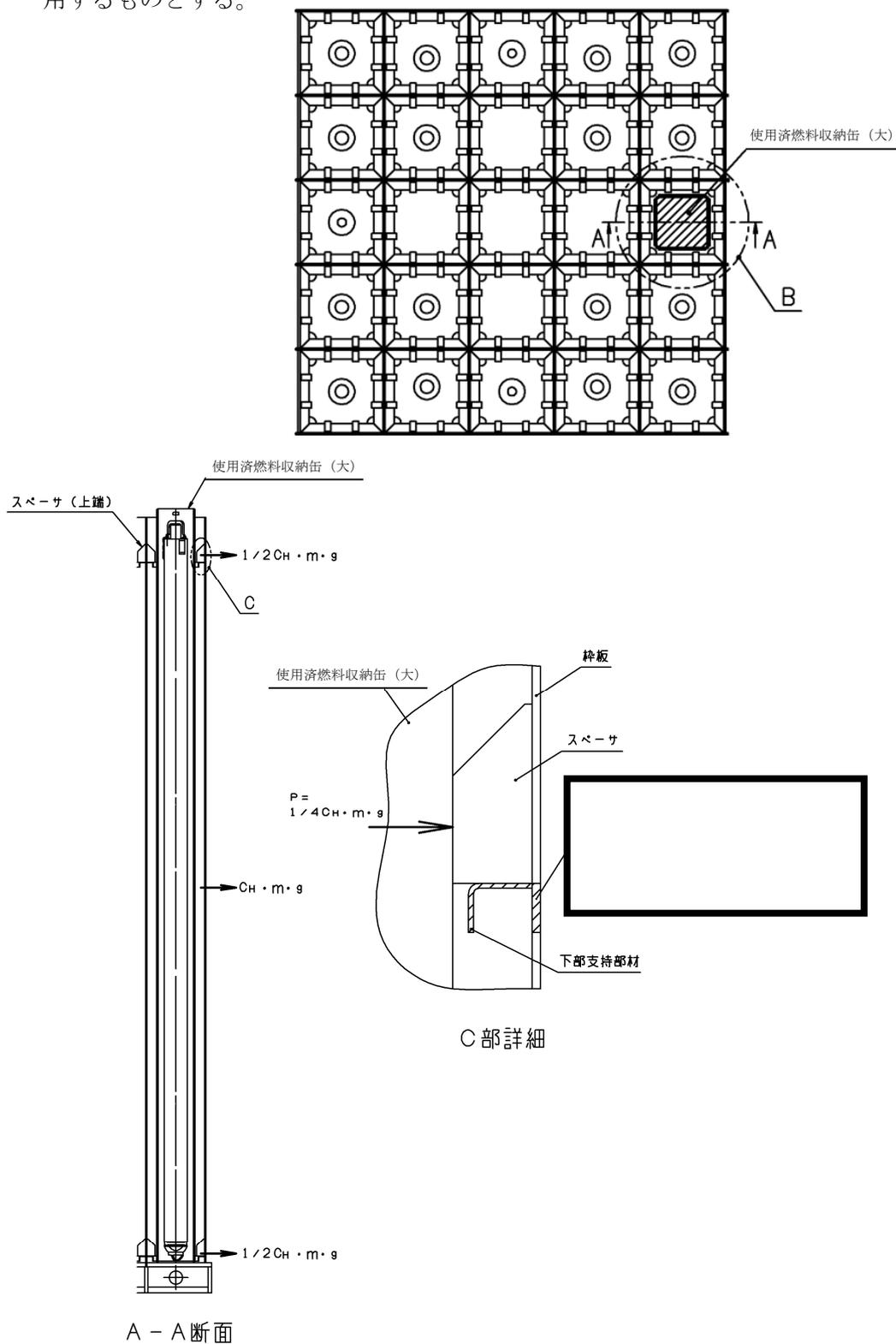
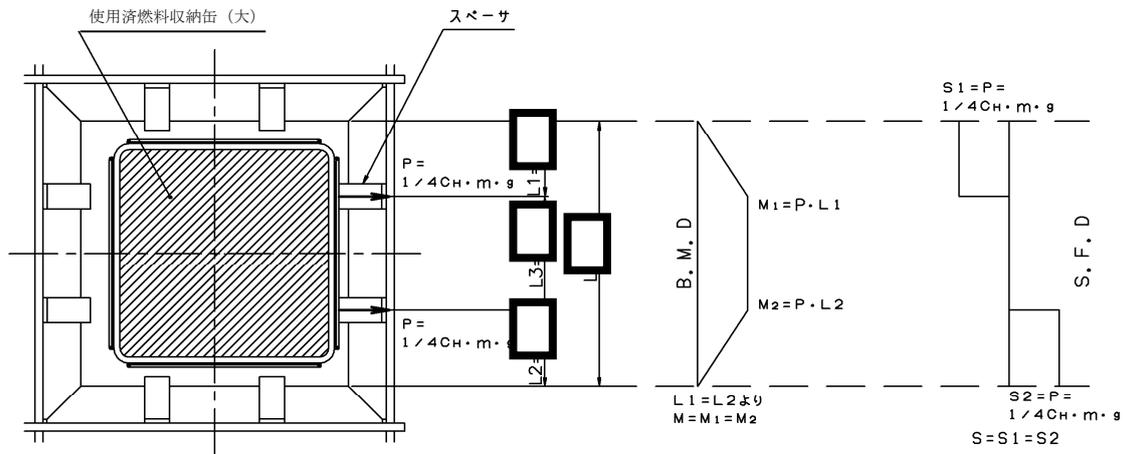


図3-10 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の作用荷重 (1/2)



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：

$$P = \frac{1}{4} \cdot C_H \cdot m \cdot g$$

$$= 1/4 \times 0.89 \times \boxed{} \times 9.80665$$

$$= \boxed{} \text{ (N)}$$

適用震度： $C_H = 0.89$ (-)

質量： $m_s = \boxed{}$ (kg)

m_s ：燃料，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： $g = 9.80665 \text{ (m/s}^2\text{)}$

長さ： $L = \boxed{}$ (mm)

長さ： $L_1 = \boxed{}$ (mm)

長さ： $L_2 = \boxed{}$ (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		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
				水平方向*5 設計震度	鉛直方向 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 *1	1 次	*2	C _v = 0.49	66	—
			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 により定まる動的震度（ $C_H = 0.67$ ）についても考慮する。

3. 7. 2 ラック取付ボルトの応力評価に用いる要目

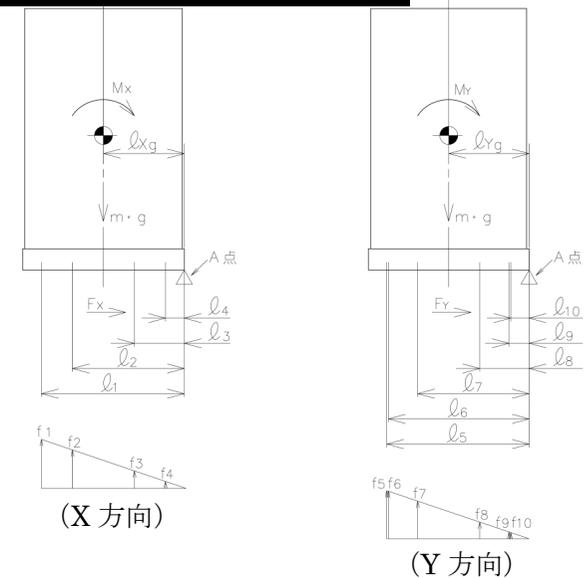
機器名称	m (kg)	m ^F (kg)	m ^R (kg)	m ^W (kg)	m ^{FC} (kg)
使用済燃料貯蔵 ラック (25 体)					

ℓ ₁ (mm)	ℓ ₂ (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ ₄ (mm)	ℓ ₅ (mm)	ℓ ₆ (mm)	ℓ ₇ (mm)	ℓ ₈ (mm)	ℓ ₉ (mm)	ℓ ₁₀ (mm)	ℓ _{Xg} (mm)	ℓ _{Yg} (mm)

A ^b (mm ²)	n (-)	n ¹ (-)	n ² (-)	n ³ (-)	n ⁴ (-)	n ⁵ (-)	n ⁶ (-)	n ⁷ (-)	n ⁸ (-)	n ⁹ (-)	n ¹⁰ (-)

ラック取付 ボルト材料	F _x (N)	F _y (N)	M _x (N・mm)	M _y (N・mm)	S _v (MPa)	S _u (MPa)	F* (MPa)
SUS630H1150	1.368 × 10 ⁵	1.380 × 10 ⁵	5.291 × 10 ⁸	5.333 × 10 ⁸			

注記* : 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

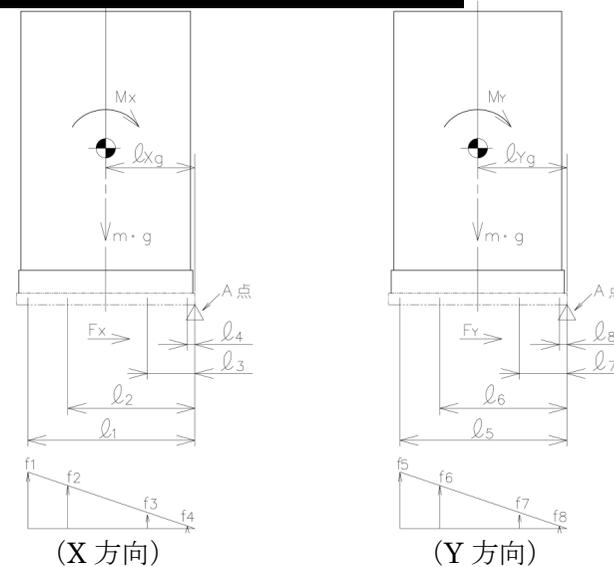
機器名称	m (kg)	m ^F (kg)	m ^R (kg)	m ^W (kg)	m ^{FC} (kg)	m ^{CB} (kg)
コモンベース						

ℓ ₁ (mm)	ℓ ₂ (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ ₄ (mm)	ℓ ₅ (mm)	ℓ ₆ (mm)	ℓ ₇ (mm)	ℓ ₈ (mm)	ℓ _{Xg} (mm)	ℓ _{Yg} (mm)

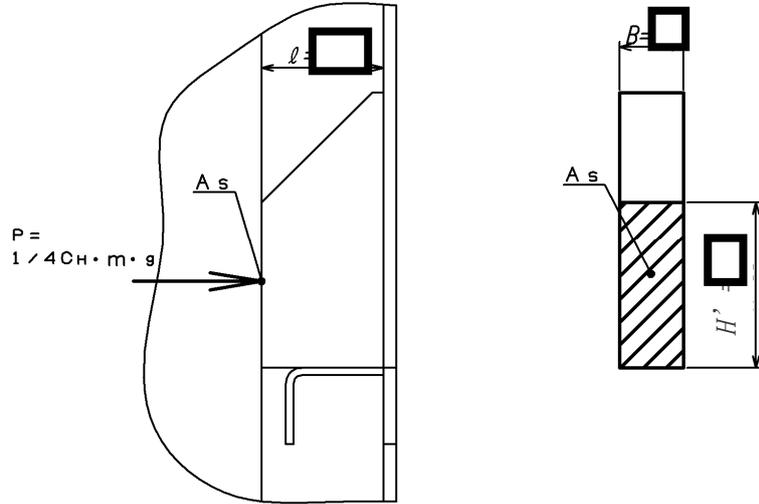
A _b (mm ²)	n (-)	n ¹ (-)	n ² (-)	n ³ (-)	n ⁴ (-)	n ⁵ (-)	n ⁶ (-)	n ⁷ (-)	n ⁸ (-)

基礎ボルト 材料	F _x (N)	F _y (N)	M _x (N・mm)	M _y (N・mm)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F* (MPa)
SUS630H1150	1.368×10 ⁵	1.380×10 ⁵	5.291×10 ⁸	5.333×10 ⁸			

注記*：最高使用温度（66℃）で算出

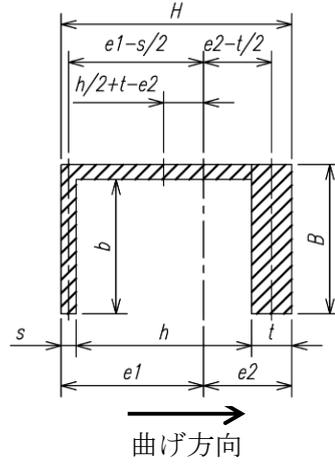


3. 7. 4 スペーサの断面特性



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	A _s		mm ²	= H' × B
	断面二次モーメント (弱軸)	I		mm ⁴	= $\frac{H' \times B^3}{12}$
	断面二次半径	i		mm	= $\sqrt{I/A_s}$
	長さ	ℓ		mm	
	座屈長さ	ℓ _k		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	[REDACTED]	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 ⁴	$= \frac{B \cdot t^3}{12} + B \cdot t \cdot (e2 - t/2)^2 + \frac{B \cdot s^3}{12} + B \cdot s \cdot (e1 - s/2)^2 + \frac{(B-b)h^3}{12} + (B-b) \cdot h \cdot (h/2 + t - e2)^2$
	断面係数	Z1		mm ³	$= I/e1$
		Z2		mm ³	$= I/e2$
	断面積	A		mm ²	$= B \cdot H - b \cdot h$
	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 ²	$= B \cdot s$
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 σ_x , σ_y 及び組合せ応力 σ_{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 τ_{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 σ_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, 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 τ_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_y : 付録材料図表Part5表8	-30°C~40°C	75°C
	205 (MPa)	183 (MPa)
S_u : 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)

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

(許容せん断応力)

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

(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、 σ_x 、 σ_y : 互いに直交する垂直応力

τ_{xy} : σ_x 、 σ_y の作用する面内のせん断応力

3. 8. 4. 2 ボルト類

$$F^* = Mi$$

S_y : 付録材料図表Part5表8

−30°C~40°C 75°C

S_u : 付録材料図表Part5表9

−30°C~40°C 75°C

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

$$\begin{aligned} f_c &= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5 \\ &= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{13.828}{124.12} \right)^2 \right\} \frac{205}{1.508} \times 1.5 \end{aligned}$$

= 202(MPa) (整数位, 小数点以下第一位切り捨て)

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

$$\begin{aligned} f_b &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot Af}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\} \\ &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \times 1.92 \times 10^5 \times \square}{\square}, 1.5 \times \frac{205}{1.5} \right\} \end{aligned}$$

= min{910, 205} = 205(MPa) (整数位, 小数点以下第一位切り捨て)

(2) 許容せん断応力

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

(3) 許容組合せ応力

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

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 (桝板大)	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 (桝板小)	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。

【補足説明資料】
使用済燃料共用プールに係る実施計画Ⅱ章の変更について

2019年10月1日

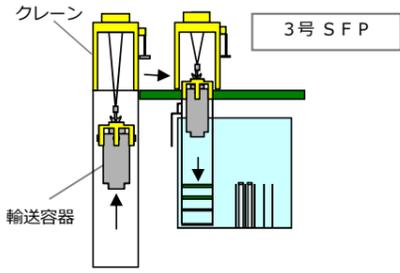
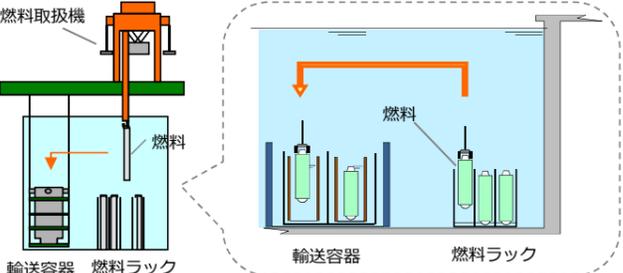
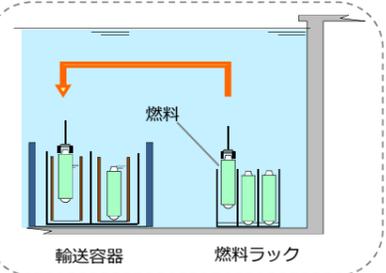
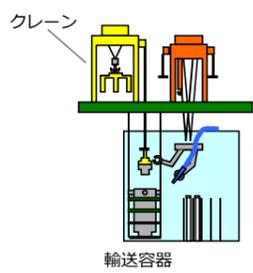
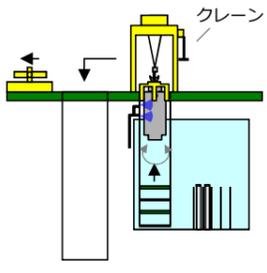
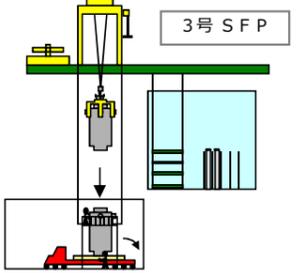
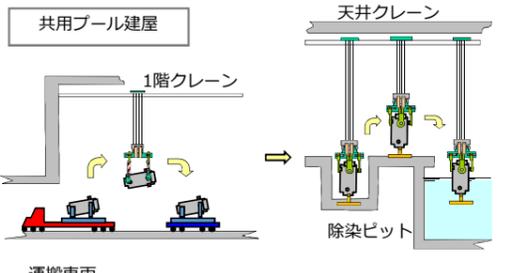
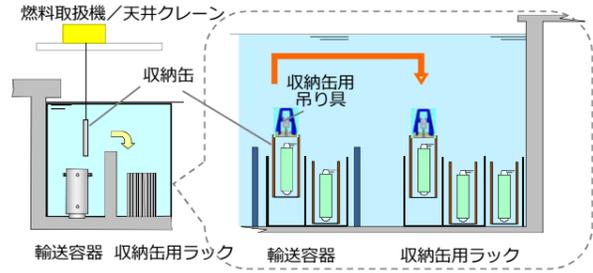
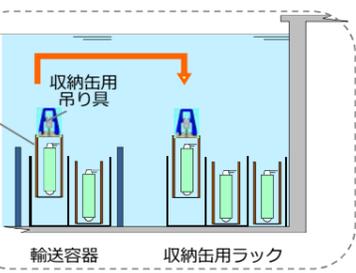
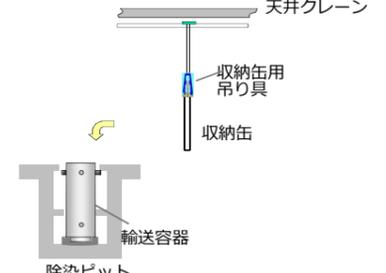
TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

損傷・変形等燃料の取り出し関連工程について

燃料取り出し工程		2019年度			2020年度				
		2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	
		燃料取り出し			燃料取り出し				
		設備点検			設備点検				変形燃料等 取り出し
使用済燃料プール 取扱い	<ul style="list-style-type: none"> ハンドル変形燃料の取扱い方法に係る実施計画変更申請 取扱い作業手順の作成 取扱い訓練 	取扱い方法の検討			▽実施計画変更申請①				訓練②※
使用済燃料プール ～共用プール輸送	<ul style="list-style-type: none"> 輸送容器に係る実施計画審査対応（8月申請済み） 収納缶（大）用の輸送容器バスケットの製造 	▼実施計画変更申請④			バスケット材料手配・製造				作業手順の作成③
共用プール 取扱い・保管	<ul style="list-style-type: none"> 収納缶（大）用ラック、収納缶（大）、吊り具に係る実施計画審査対応（7月申請済み） 収納缶（大）取扱い時の遮へい水深に係る実施計画変更申請 収納缶（大）の製造 収納缶（大）用吊り具の製造 収納缶（大）用ラックの製造、設置 収納缶取扱い作業手順の作成 取扱い訓練 	▼実施計画変更申請⑤（ラック等）			▽実施計画変更申請（遮へい水深）⑥				設置工事※
		収納缶(大)／吊り具材料手配・製造			訓練⑦※				作業手順の作成⑧
		収納缶（大）用ラック材料手配・製造							

損傷・変形等燃料の取り出し関連作業について

		SFP取扱い				
主な燃料取出しのステップ	輸送容器をSFP内に移動	ハンドル変形燃料 ^{※1} をラックから吊り上げ	ハンドル変形燃料を輸送容器へ装填	輸送容器の蓋締め	輸送容器の吊り上げ	
						
	・クレーン ・輸送容器（7体収納、2体収納） ・輸送カスク支持架台	・燃料取扱機	・燃料取扱機 ・輸送容器（7体収納、2体収納）	・クレーン ・蓋締め装置 ・輸送容器（7体収納、2体収納）	・クレーン ・輸送容器（7体収納、2体収納）	
	クレーン等3号機燃料取扱設備で輸送容器のハンドリングができるか（寸法・重量）	燃料取扱機で損傷・変形等燃料がハンドリングできるか（実施計画・訓練・手順）	輸送容器に損傷・変形等燃料を装填できるか（実施計画・訓練・手順）	クレーン等、3号機燃料取扱設備で輸送容器の蓋締めができるか（寸法）	クレーン等、3号機燃料取扱設備で輸送容器のハンドリングができるか（寸法・重量）	
	既存の3号機構内輸送容器を使用するため、取扱い手順は現在と同じ。但し、2体収納時はカスク重量が低減するため、クレーンの荷重は軽減する	ハンドル変形燃料を取扱うため、ラック上での燃料の把持に係る取扱い実施計画変更申請（①）、訓練（②）、手順の整備（③）が必要	ハンドル変形燃料を取扱うため、輸送容器内の収納缶への装荷に係る取扱い実施計画変更申請（①）、訓練（②）、手順の整備（③）が必要	既存の3号機構内輸送容器を使用するため、取扱い手順は現在と同じ	既存の3号機構内輸送容器を使用するため、取扱い手順は現在と同じ。但し、2体収納時はカスク重量が低減するため、クレーンの荷重は軽減する	
主な燃料取出しのステップ	SFP～共用プール輸送	共用プール取扱い・保管				
	構内輸送	輸送容器をプール内に移動・蓋開け	収納缶（損傷・変形等燃料入り）を輸送容器から取出し・移動	収納缶（損傷・変形等燃料入り）を収納缶用ラックへ装荷・貯蔵	空の収納缶を輸送容器へ設置	
						
	・輸送容器（7体収納 ^{※2} 、2体収納 ^{※3} ） ・運搬車両	・天井クレーン	・燃料取扱機 ・収納缶（小） ・収納缶用吊り具（小） ・天井クレーン ・収納缶（大） ・収納缶用吊り具（大）	・収納缶（小）用ラック ・収納缶（大）用ラック	・天井クレーン ・収納缶（小） ・収納缶用吊り具（小） ・天井クレーン ・収納缶（大） ・収納缶用吊り具（大）	
	損傷・変形等燃料の輸送時における安全機能が問題ないか（実施計画）		天井クレーンで収納缶（大）がハンドリングできるか（実施計画・訓練・手順）	損傷・変形等燃料入りの収納缶をの貯蔵時における安全機能が問題ないか（実施計画）	天井クレーンで収納缶（大）のハンドリングができるか（寸法・重量）	
ハンドル変形燃料を取扱うため、輸送容器に係る安全評価（構造強度、除熱機能、密封機能、遮へい機能、臨界防止機能）実施計画変更申請（④）が必要	既存の3号機構内輸送容器を使用するため、取扱い手順は現在と同じ。但し、2体収納時はカスク重量が低減するため、クレーンの荷重は軽減する	ハンドル変形燃料を取扱うため、プールでの収納缶の落下防止及び遮へい水深に係る取扱い実施計画変更申請（⑤、⑥）、訓練（⑦）、手順の整備（⑧）が必要	ハンドル変形燃料を取扱うため、収納缶用ラックの貯蔵時安全評価（耐震性、臨界防止機能、遮へい機能）実施計画変更申請（⑤）が必要	既存の3号機構内輸送容器を使用するため、取扱い手順は現在と同じ。		

赤字：通常の燃料の取出しからの変更箇所

※1：CB無し燃料及び漏えい燃料も含む

※2：ハンドル変形燃料の輸送に用いるため運用を変更

※3：容器本体は7体収納と同じでバスケットを取り替え

※4：①～⑧は損傷・変形等燃料の取り出し関連工程を参照