

別冊 9

放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設に係る補足説明

## I 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設の構造強度及び耐震性について

放射性液体廃棄物処理設備等を構成する設備の構造強度及び耐震性等の評価結果のうち、設備の代表性を考慮し許容値に対する裕度が小さい設備に対して、計算手順を示し、評価の妥当性を示す。

強度評価は必要肉厚に対する裕度が小さい処理カラム及び吊り耳の強度評価を行った HIC、耐震性評価は安定モーメントに対する裕度が小さい処理済水移送ポンプ、バッチ処理タンクスキッド、HIC、処理カラム交換用クレーン及び一次一般膜応力に対する裕度が小さい処理カラムを代表設備とし、評価手順を以下に示す。

### 1.1 基本方針

#### 1.1.1 構造強度評価の基本方針

多核種除去設備等を構成する機器は、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」において、廃棄物処理設備に相当するクラス3機器と位置付けられる。この適用規格は、「JSME S NC-1 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」（以下、「設計・建設規格」という。）で規定される。ただし、福島第一原子力発電所構内の作業環境、機器等の設置環境等が通常時と大幅に異なっているため、設計・建設規格の要求を全て満足して設計・製作・検査を行うことは困難である。

従って、可能な限り設計・建設規格のクラス3機器相当の設計・製作・検査を行うものの、JIS等の規格に適合した一般産業品の機器等や、設計・建設規格に定める材料と同等の信頼性を有する材料・施工方法等を採用する。

#### 1.1.2 耐震性評価の基本方針

多核種除去設備等を構成する機器のうち放射性物質を内包するものは、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」のBクラス相当の設備と位置づけられ、耐震性を評価するにあたっては、「JEAC4601 原子力発電所耐震設計技術規程」（以下、「耐震設計技術規程」という。）等に準用する。

また、参考評価として、基準地震動  $S_s$  相当の水平震度に対して健全性が維持されることを確認する。

### 1.2 評価結果

#### 1.2.1 ポンプ類

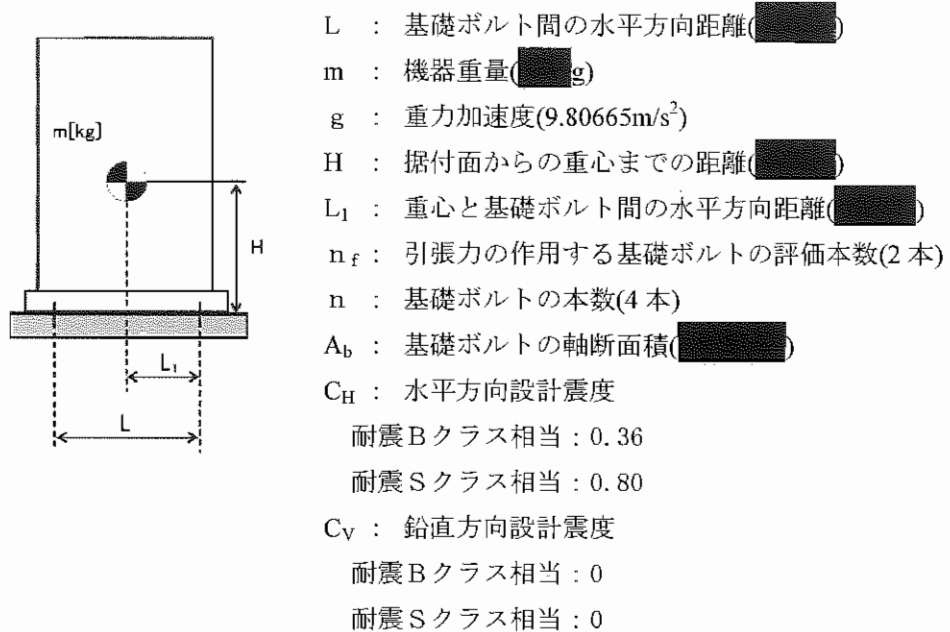
##### (1) 構造強度評価

ポンプは一般産業品とするため、設計・建設規格の要求には必ずしも適合しない。しかしながら、以下により高い信頼性を確保した。

- ・ 公的規格に適合したポンプを選定する。
- ・ 耐腐食性（塩分対策）を有したポンプを選定する。
- ・ 試運転により，有意な変形や漏えい，運転状態に異常がないことを確認する。

(2)耐震性評価（代表設備：処理済水移送ポンプ）

a. 基礎ボルトの強度評価耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果，基礎ボルトの強度が確保されることを確認した（表1）。



$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_b = \frac{1}{L} (m \times g \times C_H \times H - m \times g \times (1 - C_V) \times L_1)$$

$C_H = 0.36$  の場合  $F_b = -625\text{N} < 0$  よって，引張力は発生しない。

$C_H = 0.80$  の場合  $F_b = 1218\text{N}$

$$\text{基礎ボルトの引張応力} : \sigma_b = \frac{F_b}{n_f \times A_b}$$

$C_H = 0.36$  の場合  $\sigma_b = -1\text{MPa} < 0$  よって，引張応力は発生しない。

$C_H = 0.80$  の場合  $\sigma_b = 3\text{MPa}$

$$\text{基礎ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$

$C_H = 0.36$  の場合  $\tau_b = 2\text{MPa}$

$C_H = 0.80$  の場合  $\tau_b = 5\text{MPa}$

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力} : f = \min(f_{t_o}, f_{t_s})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F / \sqrt{3}$$

ここで、Fは日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NCI-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、設備運転温度（常温）における Sy 値、Su 値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min (S_y, 0.7S_u)$$

$$S_y : \text{表 8 より } -30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C} : 245\text{MPa}$$

$$S_u : \text{表 9 より } -30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C} : 400\text{MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min (S_y, 0.7S_u) = \min (245, 0.7 \times 400) = 245 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容引張応力：

$$f = \min(f_{t_o}, f_{t_s}) = (183, 253) = 183 \text{ MPa } (C_H=0.36 \text{ の場合})$$

$$f = \min(f_{t_o}, f_{t_s}) = (183, 249) = 183 \text{ MPa } (C_H=0.80 \text{ の場合})$$

$$f_{t_o} = F/2 \times 1.5 = 183$$

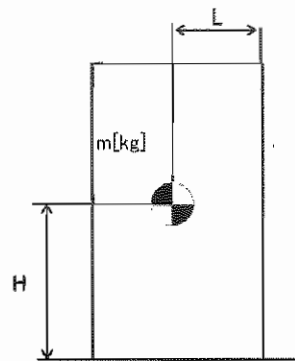
$$f_{t_s} = 1.4 \times f_{t_o} - 1.6 \times \tau_b$$
$$= 253 \text{ (} C_H=0.36 \text{ の場合)}$$

$$= 249 \text{ (} C_H=0.80 \text{ の場合)}$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F / \sqrt{3} = 141 \text{ MPa}$$

b. 転倒評価

地震による転倒モーメントと自重による安定モーメントを算出し、それらを比較することにより転倒評価を実施した。評価の結果、地震による転倒モーメントは自重による安定モーメントより小さくなることから、転倒しないことを確認した。また、地震による転倒モーメント > 自重による安定モーメントとなるものについては、a. での計算により基礎ボルトの強度が確保されることから転倒しないことを確認した(表 1)。



$C_H$  : 水平方向設計震度

耐震Bクラス相当 : 0.36

耐震Sクラス相当 : 0.80

$m$  : 機器重量( )

$g$  : 重力加速度(9.80665m/s<sup>2</sup>)

$H$  : 据付面からの重心までの距離( )

$L$  : 転倒支点から機器重心までの距離( )

地震による転倒モーメント :  $M_1 = m \times g \times C_H \times H$

$C_H = 0.36$  の場合  $M_1 = 8.30 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{mm}$

$C_H = 0.80$  の場合  $M_1 = 1.90 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{mm}$

自重による安定モーメント :  $M_2 = m \times g \times L = 1.10 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{mm}$

表 1 : 処理済水移送ポンプ耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
処理済水移送ポンプ	本体	転倒	0.36	$8.30 \times 10^5$	$1.10 \times 10^6$	N・mm
	基礎 ボルト	引張	0.36	-	-	MPa
		せん断	0.36	2	141	MPa
	本体	転倒	0.80	$1.90 \times 10^6$	$1.10 \times 10^6$	N・mm
	基礎 ボルト	引張	0.80	3	183	MPa
		せん断	0.80	5	141	MPa

※引張評価の算出値「-」については、引張応力が作用していない。

## 1.2.2 タンク類，吸着塔及び処理カラム

### (1) 構造強度評価（代表設備：処理カラム）

タンク類は，SUS316L もしくは炭素鋼（ライニング付）とするが材料の調達において一般産業品とするため，材料証明がなく，設計・建設規格の要求には必ずしも適合しない。しかしながら，以下により高い信頼性を確保した。

- ・工場にて溶接を行い高い品質を確保する。
- ・水張りによる溶接部の漏えい確認等を行う。

また，吸着塔及び処理カラムは，SUS316L とするが材料の調達において一般産業品とするため，材料証明がなく，設計・建設規格の要求には必ずしも適合しない。しかしながら，以下を考慮することで，高い信頼性を確保した。

- ・公的規格に適合した一般産業品の SUS316L を用いて吸着塔，処理カラムを製作する。
- ・溶接継手は，PT 検査，運転圧による漏えい確認等を行う。
- ・工場にて溶接を行い高い品質を確保する。

#### a. スカート支持たて置円筒形容器

スカート支持たて置円筒形容器については，設計・建設規格に準拠し，板厚評価を実施した。評価の結果，水頭圧（開放型タンク），最高使用圧力（密閉型タンク）に耐えられることを確認した（表 2）。

（密閉型の場合）

① 胴板の必要肉厚

$$t = \frac{PD_i}{2S\eta - 1.2P}$$
$$= 12.29\text{mm}$$

t : 胴の計算上必要な厚さ

Di : 胴の内径(1354mm)

P : 最高使用圧力 (1.37MPa)

S : 最高使用温度における材料の許容引張応力 (109MPa)

η : 長手継手の効率 (0.7)

ただし，t の値は炭素鋼，低合金鋼の場合は  $t = 3.00[\text{mm}]$  以上，その他の金属の場合は  $t = 1.50[\text{mm}]$  以上とする。

② 鏡板の必要肉厚

$$t = \frac{PRW}{2S\eta - 0.2P}$$
$$= 13.09\text{mm}$$

t : 鏡の計算上必要な厚さ

P : 最高使用圧力(1.37MPa)

R : 鏡板の中央部における内面の半径(1350mm)

W : さら形鏡板の形状による係数(1.54)

r : さら形鏡板のすみの丸みの内半径(135mm)

S : 最高使用温度における材料の許容引張応力(109MPa)

η : 継手の効率(1.0)

表 2 : 処理カラム板厚評価結果

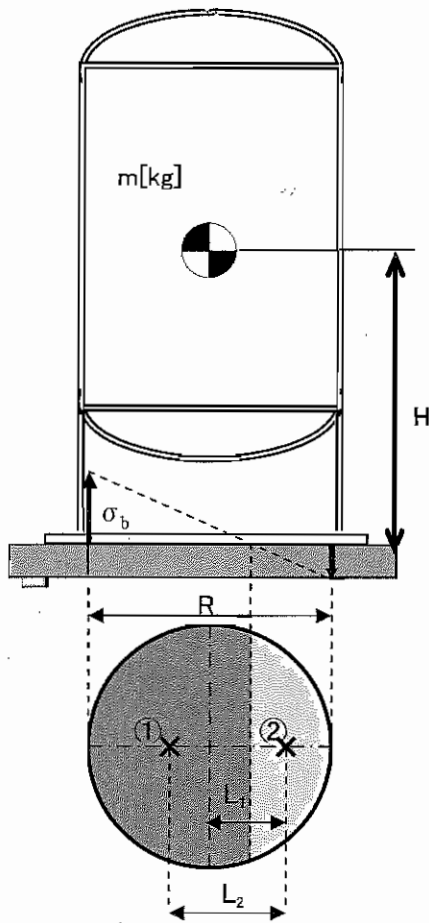
機器名称	評価部位	必要肉厚 [mm]	実厚 [mm]
処理カラム	胴板	12.29	18.70
	鏡板	13.09	20.70

(2)耐震性評価 (代表設備：処理カラム)

a. スカート支持たて置円筒形容器

(a)基礎ボルトの強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルトの強度が確保されることを確認した (表3)。



$m$  : 機器重量 ( )

$g$  : 重力加速度 (9.80665m/s<sup>2</sup>)

$H$  : 据付面からの重心までの距離 ( )

$n$  : 基礎ボルトの本数 (4本)

$A_b$  : 基礎ボルトの軸断面積 ( )

$C_H$  : 水平方向設計震度

耐震Bクラス相当 : 0.36

耐震Sクラス相当 : 0.80

$C_V$  : 鉛直方向設計震度

耐震Bクラス相当 : 0

耐震Sクラス相当 : 0

$C_t$  : 中立軸の位置より求める係数

$C_H = 0.36$  において : 2.245

$C_H = 0.80$  において : 3.056

$\sigma_b$  : 基礎ボルトに作用する引張応力

$F_t$  : 基礎ボルトに作用する引張力

① : 基礎ボルトに作用する引張力の作用点

② : 基礎部に作用する圧縮力の作用点

$R$  : 基礎ボルトのピッチ円直径 (1258mm)

$L_1$  : 基礎ボルトのピッチ円中心から②までの距離

$C_H = 0.36$  において : ( )

$C_H = 0.80$  において : ( )

$L_2$  : ①から②までの距離

$C_H = 0.36$  において : ( )

$C_H = 0.80$  において : ( )

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_t = \frac{1}{L_2} (m \times g \times C_H \times H - m \times g \times (1 - C_V) \times L_1)$$

$C_H = 0.36$  の場合  $F_t = 218$  N

$C_H = 0.80$  の場合  $F_t = 34303$  N



$$\text{基礎ボルトに作用する引張応力} : \sigma_b = \frac{2\pi \times F_t}{n \times A_b \times C_t}$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 } \sigma_b = 1 \text{ MPa}$$

$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } \sigma_b = 39 \text{ MPa}$$

$$\text{基礎ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 } \tau_b = 12 \text{ MPa}$$

$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } \tau_b = 26 \text{ MPa}$$

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力} : f = \min(f_{t0}, f_{ts})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F / \sqrt{3}$$

ここで、Fは日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、設計温度 50°Cにおける Sy 値、Su 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min(1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT))$$

$$S_y : \text{表 8 より } 40^\circ\text{C} : 175 \text{ MPa}, 75^\circ\text{C} : 154 \text{ MPa}$$

$$S_y = 154 + (175 - 154) \times (75 - 50) / (75 - 40) = 169 \text{ MPa}$$

$$S_y(RT) : \text{表 8 より } \text{室温} : 175 \text{ MPa}$$

$$S_y(RT) = 175 \text{ MPa}$$

$$S_u : \text{表 9 より } 40^\circ\text{C} : 480 \text{ MPa}, 75^\circ\text{C} : 452 \text{ MPa}$$

$$S_u = 452 + (480 - 452) \times (75 - 50) / (75 - 40) = 472 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min(1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)) = \min(228, 330, 175) = 175 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容引張応力：

$$f = \min(f_{t0}, f_{ts}) = \min(131, 164) = 131 \text{ MPa } (C_H=0.36 \text{ の場合})$$

$$f = \min(f_{t0}, f_{ts}) = \min(131, 141) = 131 \text{ MPa } (C_H=0.80 \text{ の場合})$$

$$f_{t0} = F / 2 * 1.5 = 131$$

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

$$= 164 \text{ (} C_H=0.36 \text{ の場合)}$$

$$= 141 \text{ (} C_H=0.80 \text{ の場合)}$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F / \sqrt{3} = 101 \text{ MPa}$$

(b) 胴板の強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して、胴板の強度評価を実施した。

一次一般膜応力  $\sigma_0$  を下記の通り評価し、許容値を下回ることを確認した(表3)。

$$\sigma_0 = \text{Max}\{\sigma_{0t}, \sigma_{0c}\}$$

$C_H=0.36$  の場合 48 MPa

$C_H=0.80$  の場合 48 MPa

$$\sigma_{0t} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sigma_\phi + \sigma_{xt} + \sqrt{(\sigma_\phi - \sigma_{xt})^2 + 4 \cdot \tau^2} \right\}$$

$C_H=0.36$  の場合 48 MPa

$C_H=0.80$  の場合 48 MPa

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

$\sigma_{xc} < 0$  となるため評価不要

$\sigma_{0t}$  : 一次一般膜応力 (引張側)

$\sigma_{0c}$  : 一次一般膜応力 (圧縮側)

$\sigma_\phi$  : 胴の周方向応力の和

$C_H=0.36$  の場合 47.20 MPa

$C_H=0.80$  の場合 47.20 MPa

$\sigma_{xt}$  : 胴の軸方向応力の和 (引張側)

$C_H=0.36$  の場合 24.96 MPa

$C_H=0.80$  の場合 26.10 MPa

$\sigma_{xc}$  : 胴の軸方向応力の和 (圧縮側)

$C_H=0.36$  の場合 -22.42 MPa

$C_H=0.80$  の場合 -21.29 MPa

$\tau$  : 地震により胴に生じるせん断応力

$C_H=0.36$  の場合 0.49 MPa

$C_H=0.80$  の場合 1.09 MPa

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{胴板一次一般膜応力の許容応力} : \sigma = \text{MAX}(\text{Min}(\text{Sy}, 0.6 \cdot \text{Su}), 1.2 \cdot \text{S})$$

ここで、 $\sigma$  は日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 5、表 8 及び表 9 より、設計温度 60°C における S 値、Sy 値及び Su 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

S : 表 5 より 40°C : 111MPa、75°C : 108 MPa

$$S = 108 + (111 - 108) \times (75-60)/(75-40) = 109 \text{ MPa}$$

Sy : 表 8 より 40°C : 175MPa、75°C : 154 MPa

$$\text{Sy} = 154 + (175 - 154) \times (75-60)/(75-40) = 163 \text{ MPa}$$

Su : 表 9 より 40°C : 480MPa、75°C : 452MPa

$$\text{Su} = 452 + (480 - 452) \times (75-60)/(75-40) = 464 \text{ MPa}$$

$$\text{胴板一次一般膜応力の許容応力} : \sigma = \text{MAX}(\text{Min}(\text{Sy}, 0.6 \cdot \text{Su}), 1.2 \cdot \text{S})$$

$$= \text{MAX}(\text{Min}(163, 278), 130) = 163 \text{ MPa}$$

(c) スカートの強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して、スカートの強度評価を実施した。  
組合せ応力  $\sigma_s$  を下記の通り評価し、許容値を下回ることを確認した(表3)。

$$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

$C_H=0.36$  の場合 4 MPa

$C_H=0.80$  の場合 8 MPa

$\sigma_1$  : スカートの質量による軸方向応力

$C_H=0.36$  の場合 1.20 MPa

$C_H=0.80$  の場合 1.20 MPa

$\sigma_2$  : スカートの鉛直方向地震による軸方向応力

$C_H=0.36$  の場合 0 MPa

$C_H=0.80$  の場合 0 MPa

$\sigma_3$  : スカートの曲げモーメントによる軸方向応力

$C_H=0.36$  の場合 2.29 MPa

$C_H=0.80$  の場合 5.07 MPa

$\tau$  : 地震によるスカートに生じるせん断応力

$C_H=0.36$  の場合 0.865 MPa

$C_H=0.80$  の場合 1.93 MPa

また、許容応力は、以下の式で設定した。

スカート組合せ応力の許容応力 :  $\sigma = F$

ここで、 $\sigma$  は日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NCI-2005 付属図表 Part 5 表 5、表 8 及び表 9 より、設計温度 50°C における  $S_y$  値、 $S_y(RT)$  値及び  $S_u$  値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min(1.35 \cdot S_y, 0.7 \cdot S_u, S_y(RT))$$

$S_y$  : 表 8 より 40°C : 205MPa、75°C : 183 MPa

$$S_y = 183 + (205 - 183) \times (75-50)/(75-40) = 198 \text{ MPa}$$

$S_y(RT)$  : 表 8 より 室温 : 205MPa

$$S_y(RT) = 205 \text{ MPa}$$

$S_u$  : 表 9 より 40°C : 520MPa、75°C : 466MPa

$$S_u = 466 + (520 - 466) \times (75-50)/(75-40) = 504 \text{ MPa}$$

従って、 $F = \min(1.35 \cdot S_y, 0.7 \cdot S_u, S_y(RT)) = \min(268, 353, 205) = 205 \text{ MPa}$

スカート組合せ応力の許容応力 :  $\sigma_s = F = 205 \text{ MPa}$

また、座屈評価を下記の式により行い、スカートに座屈が発生しないことを確認した(表5)。

$$\frac{\eta \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)}{f_c} + \frac{\eta \cdot \sigma_3}{f_b} \leq 1$$

$C_H=0.36$  の場合 0.02

$C_H=0.80$  の場合 0.03

$\sigma_1$  : スカートの質量による軸方向応力

$C_H=0.36$  の場合 1.20 MPa

$C_H=0.80$  の場合 1.20 MPa

$\sigma_2$  : スカートの鉛直方向地震による軸方向応力

$C_H=0.36$  の場合 0 MPa

$C_H=0.80$  の場合 0 MPa

$\sigma_3$  : スカートの曲げモーメントによる軸方向応力

$C_H=0.36$  の場合 2.29 MPa

$C_H=0.80$  の場合 5.07 MPa

$f_c$  : 軸圧縮荷重に対する許容座屈応力 205 MPa

$f_b$  : 曲げモーメントに対する許容座屈応力 205 MPa

$\eta$  : 座屈応力に対する安全率 1

表3 : 処理カラム耐震評価結果

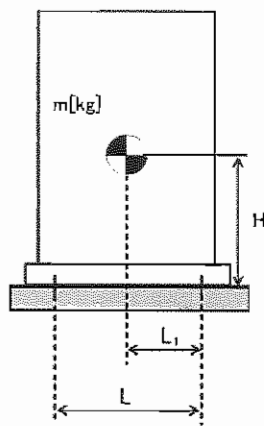
機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
処理カラム	胴板	一次一般膜	0.36	48	163	MPa
	スカート	組合せ	0.36	4	205	MPa
		座屈	0.36	0.02	1	-
	基礎 ボルト	引張	0.36	1	131	MPa
		せん断	0.36	12	101	MPa
	胴板	一次一般膜	0.80	48	163	MPa
	スカート	組合せ	0.80	8	205	MPa
		座屈	0.80	0.03	1	-
	基礎 ボルト	引張	0.80	39	131	MPa
		せん断	0.80	26	101	MPa

### 1.2.3 スキッド

(1)耐震性評価 (代表設備：バッチ処理タンクスキッド)

#### a. 基礎ボルトの強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルトの強度が確保されることを確認した (表4)。



- L : 基礎ボルト間の水平方向距離( )
- m : 機器重量( )
- g : 重力加速度(9.80665m/s<sup>2</sup>)
- H : 据付面からの重心までの距離( )
- L<sub>1</sub> : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離( )
- n<sub>f</sub> : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数(12本)
- n : 基礎ボルトの本数(48本)
- A<sub>b</sub> : 基礎ボルトの軸断面積( )
- C<sub>H</sub> : 水平方向設計震度
  - 耐震Bクラス相当 : 0.36
  - 耐震Sクラス相当 : 0.80
- C<sub>V</sub> : 鉛直方向設計震度
  - 耐震Bクラス相当 : 0
  - 耐震Sクラス相当 : 0

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_b = \frac{1}{L} (m \times g \times C_H \times H - m \times g \times (1 - C_V) \times L_1)$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 } F_b = -43692 \text{ N}$$

$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } F_b = 278068 \text{ N}$$

$$\text{基礎ボルトの引張応力} : \sigma_b = \frac{F_b}{n_f \times A_b}$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 } \sigma_b = -18.1 \text{ MPa} < 0 \text{ よって、引張応力は発生しない。}$$

$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } \sigma_b = 116 \text{ MPa}$$

$$\text{基礎ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 } \tau_b = 23 \text{ MPa}$$

$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } \tau_b = 51 \text{ MPa}$$

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力} : f = \min(f_{t_o}, f_{t_s})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F/\sqrt{3}$$

ここで、Fは日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、設計温度 50°Cにおける Sy 値、Su 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min (S_y, 0.7S_u)$$

$$S_y : \text{表 8 より } 40^\circ\text{C} : 245\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 231 \text{ MPa}$$

$$S_y = 231 + (245 - 231) \times (75-50)/(75-40) = 241 \text{ MPa}$$

$$S_u : \text{表 9 より } 40^\circ\text{C} : 400\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 381\text{MPa}$$

$$S_u = 381 + (400 - 381) \times (75-50)/(75-40) = 394 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min (S_y, 0.7S_u) = \min (241, 0.7 \times 394) = 241 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容引張応力 ;

$$f = \min(f_{t_o}, f_{t_s}) = (180, 216) = 180 \text{ MPa } (C_H=0.36 \text{ の場合})$$

$$f = \min(f_{t_o}, f_{t_s}) = (180, 171) = 171 \text{ MPa } (C_H=0.80 \text{ の場合})$$

$$f_{t_o} = F/2 \times 1.5 = 180$$

$$f_{t_s} = 1.4 \times f_{t_o} - 1.6 \times \tau_b$$

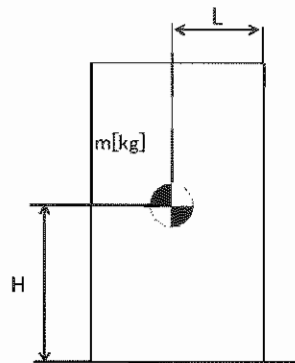
$$= 216 \text{ } (C_H=0.36 \text{ の場合})$$

$$= 171 \text{ } (C_H=0.80 \text{ の場合})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F/\sqrt{3} = 139 \text{ MPa}$$

b. 転倒評価

地震による転倒モーメントと自重による安定モーメントを算出し、それらと比較することにより転倒評価を実施した。評価の結果、地震による転倒モーメントは自重による安定モーメントより小さく、転倒しないことを確認した。また、地震による転倒モーメント > 自重による安定モーメントとなるものについては、a. での計算により基礎ボルトの強度が確保されることから転倒しないことを確認した（表4）。



$C_H$  : 水平方向設計震度

耐震Bクラス相当 : 0.36

耐震Sクラス相当 : 0.80

$m$  : 機器重量 ( )

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

$H$  : 据付面からの重心までの距離 ( )

$L$  : 転倒支点から機器重心までの距離 ( )

地震による転倒モーメント :  $M_1 = m \times g \times C_H \times H$

$C_H = 0.36$  の場合  $M_1 = 9.27 \times 10^8 \text{N}\cdot\text{mm}$

$C_H = 0.80$  の場合  $M_1 = 2.06 \times 10^9 \text{N}\cdot\text{mm}$

自重による安定モーメント :  $M_2 = m \times g \times L = 1.08 \times 10^9 \text{N}\cdot\text{mm}$

表4 : バッチ処理タンクスキッド耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
バッチ処理タンク スキッド	本体	転倒	0.36	$9.27 \times 10^8$	$1.08 \times 10^9$	N・mm
	基礎 ボルト	引張	0.36	-	-	MPa
		せん断	0.36	23	139	MPa
	本体	転倒	0.80	$2.06 \times 10^9$	$1.08 \times 10^9$	N・mm
	基礎 ボルト	引張	0.80	116	171	MPa
		せん断	0.80	51	139	MPa

※引張評価の算出値「-」については、引張応力が作用していない。

## 1.2.4 高性能容器

### (1) 構造強度評価

高性能容器本体は、ポリエチレン製の容器であり設計・建設規格の要求に適合するものではない。しかしながら、高性能容器（タイプ1）は、米国において低レベル放射性廃棄物の最終処分に使用されている容器であり、米国 NRC (Nuclear Regulatory Commission, 原子力規制委員会) から権限を委譲されたサウスカロライナ州健康環境局 (S.C. Department of Health and Environmental Control) の認可を得ており、多数の使用実績がある。また、高性能容器（タイプ1）から更に落下に対する強度を向上させた高性能容器（タイプ2）を併せて使用する。

#### a. 重量に対する評価

・高性能容器（タイプ1）は設計収容重量約 4.5t で米国認可を受けており、多核種除去設備で使用する場合の収容物重量は最大 3.5t であることから設計収容重量に対して十分な裕度がある。高性能容器（タイプ2）は多核種除去設備で使用する場合の収容物重量を最大 3.2t としている。

・多核種除去設備で使用する場合の高性能容器の補強体等を含んだ総重量はタイプ1で約 5.2t、タイプ2で約 4.7t である。これに対し、設計総重量は裕度を考慮しタイプ1において 6.0t、タイプ2において 5.5t とし、高性能容器の転倒評価及び吊り上げ時の吊り耳の構造強度確認を行っている。

高性能容器は、交換時にクレーンによる吊り上げ作業が発生するため、その際の吊り耳の強度評価を実施した。評価の結果、吊り耳の強度が確保されることを確認した（表11）。

#### (a) 高性能容器（タイプ1）

吊り耳に作用する引張応力：

$$\sigma_1 = \frac{m \times g}{A1 \times n} = 11 \text{ MPa}$$

但し、 $A1 = w1 \times t$

吊り耳に作用するせん断応力：

$$\tau_1 = \frac{m \times g}{A2 \times n} = 12 \text{ MPa}$$

但し、 $A2 = w2 \times t$

m : 機器重量 ( )

g : 重力加速度 (9.80665m/s<sup>2</sup>)

n : 吊り耳考慮本数 (2本)

w1 : 吊り耳幅 ( )

w2 : 吊り耳幅 ( )

t : 吊り耳厚さ ( )

A1 : 引張荷重が作用する吊り耳断面積/本

A2 : せん断荷重が作用する吊り耳断面積/本

$\sigma_1$  : 吊り耳に作用する引張応力 (MPa)

$\tau_1$  : 吊り耳に作用するせん断応力 (MPa)

w3 : 吊り耳幅 (下端) ( )

a : 各すみ肉溶接のど厚 ( )

l : 各すみ肉溶接の長さ



吊り耳（溶接部）に作用するせん断応力：

$$\tau_2 = \frac{m \times g}{A3 \times n} = 6 \text{ MPa}$$

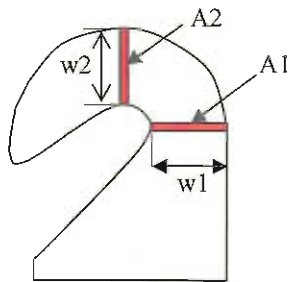
但し、 $A3 = \sum(al)$

$$= (w3+t) \times a \times 2$$

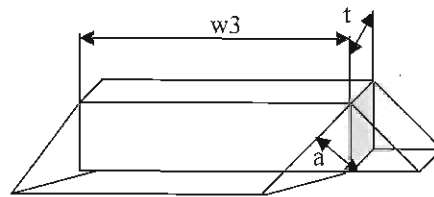
A3：吊り耳溶接部の面積

$\tau_2$ ：吊り耳溶接部に作用するせん断応力

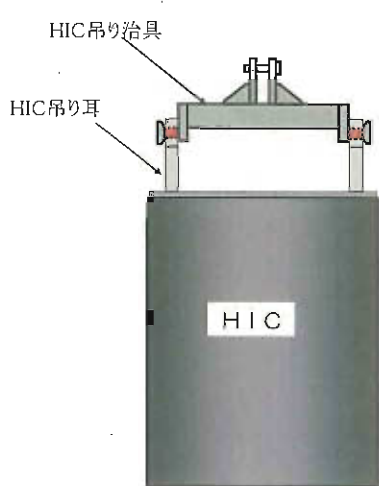
$\beta$ ：溶接部係数 (0.45)



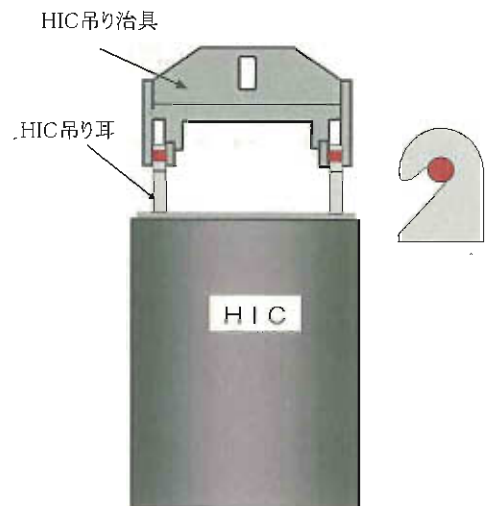
吊り耳



吊り耳 (溶接部)



HIC 吊り上げ条件  
(多核種除去設備設置エリア)



HIC 吊り上げ条件  
(一時保管施設)

F 値は、日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part5 表 8 及び表 9 より、設計温度 (76.6°C) における Sy 値, Su 値 (SUS316L 相当) を線形補間した値を用い、下記式に設定した。

$$F = \min (1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT))$$

$$S_y : \text{表 8 より } 75^\circ\text{C} : 154 \text{ MPa}, 100^\circ\text{C} : 143 \text{ MPa}$$

$$S_y = 143 + (154 - 143) \times (100 - 76.6) / (100 - 75) = 153 \text{ MPa}$$

$$S_y(RT) : \text{表 8 より 室温} : 175 \text{ MPa}$$

$$S_y(RT) = 175 \text{ MPa}$$

$$S_u : \text{表 9 より } 75^\circ\text{C} : 452 \text{ MPa}, 100^\circ\text{C} : 439 \text{ MPa}$$

$$S_u = 439 + (452 - 439) \times (100 - 76.6) / (100 - 75) = 451 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min (1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)) = \min (206, 315, 175) = 175 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳の許容引張応力 } f_t = \frac{F}{1.5} = 116 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳の許容せん断応力 } f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 67 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳 (溶接部) の許容せん断応力 } f_{wt} = \frac{\beta \cdot F}{1.5\sqrt{3}} = 30 \text{ MPa}$$

(b) 高性能容器 (タイプ 2)

吊り耳に作用する引張応力:

$$\sigma_1 = \frac{m \times g}{A1 \times n} = 7 \text{ MPa}$$

但し、 $A1 = w1 \times t$

吊り耳に作用するせん断応力:

$$\tau_1 = \frac{m \times g}{A2 \times n} = 7 \text{ MPa}$$

但し、 $A2 = w2 \times t$

吊り耳 (溶接部) に作用するせん断応力:

$$\tau_2 = \frac{m \times g}{A3 \times n} = 5 \text{ MPa}$$

但し、 $A3 = \sum (al)$

$$= (w3 + t) \times a \times 2$$

m : 機器重量 ( )

g : 重力加速度 (9.80665 m/s<sup>2</sup>)

n : 吊り耳考慮本数 (2本)

w1 : 吊り耳幅 ( )

w2 : 吊り耳幅 ( )

t : 吊り耳厚さ ( m)

A1 : 引張荷重が作用する吊り耳断面積 / 本

A2 : せん断荷重が作用する吊り耳断面積 / 本

$\sigma_1$  : 吊り耳に作用する引張応力 (MPa)

$\tau_1$  : 吊り耳に作用するせん断応力 (MPa)

w3 : 吊り耳幅 (下端) ( )

a : 各すみ肉溶接のど厚 ( )

l : 各すみ肉溶接の長さ

A3 : 吊り耳溶接部の面積

$\tau_2$  : 吊り耳溶接部に作用するせん断応力

$\beta$  : 溶接部係数 (0.45)

F 値は、日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part5 表 8 及び表 9 より、設計温度 (76.6°C) における Sy 値、Su 値 (SUS304 相当) を線形補間した値を用い、下記式に設定した。

$$F = \min (1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT))$$

Sy : 表 8 より 75°C : 183MPa、100°C : 171 MPa

$$S_y = 171 + (183 - 171) \times (100 - 76.6) / (100 - 75) = 182 \text{ MPa}$$

Sy(RT) : 表 8 より 室温 : 205MPa

$$S_y(RT) = 205 \text{ MPa}$$

Su : 表 9 より 75°C : 466MPa、100°C : 441MPa

$$S_u = 441 + (466 - 441) \times (100 - 76.6) / (100 - 75) = 464 \text{ MPa}$$

従って、 $F = \min (1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)) = \min (246, 325, 205) = 205 \text{ MPa}$

$$\text{吊り耳の許容引張応力 } f_t = \frac{F}{1.5} = 136 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳の許容せん断応力 } f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 78 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳 (溶接部) の許容せん断応力 } f_{wt} = \frac{\beta \cdot F}{1.5\sqrt{3}} = 35$$

表 1 1 高性能容器 (タイプ 1, 2) 強度評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	算出値	許容値	単位
高性能容器 (タイプ 1)	吊り耳	引張	11	116	MPa
		せん断	12	67	
	吊り耳 (溶接部)	せん断	6	30	
高性能容器 (タイプ 2)	吊り耳	引張	7	136	MPa
		せん断	7	78	
	吊り耳 (溶接部)	せん断	5	35	

b. 圧力に対する評価

高性能容器 (タイプ 1) の外圧に対する設計圧力は 25 kPa である。多核種除去設備で用いる高性能容器の外圧は屋外設置のため大気圧程度であることから、設計圧力を満足している。なお、高性能容器 (タイプ 2) については外圧に対する設計要求はないが、高性能容器 (タイプ 1) と同一の材質及び厚さであることから、同程度の強度を有していると考えられる。

一方、内圧に対しては、高性能容器 (タイプ 1) は、米国認可に当たり 50kPa で試験を行い、容器に歪みがないことを確認している。

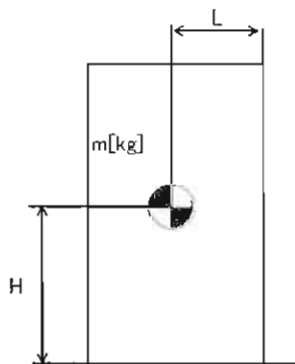
また、高性能容器の工場製作段階において、タイプ 1, 2 とも最大 50kPa で試験を行い、容器に漏えいがないことを確認している。なお、これらの容器には、ベント機能を設けていることから、多核種除去設備で使用する際の内圧は、静水頭程度となるため、試験圧力を満足している。

(2)耐震性評価

a. 転倒評価

地震による転倒モーメントと自重による安定モーメントを算出し、それらと比較することにより転倒評価を行った。評価の結果、地震による転倒モーメントは自重による安定モーメントより小さく、転倒しないことを確認した（表5）。

なお、耐震Sクラス相当の転倒評価については、高性能容器内部水を満水（HIC全高）とし重心までの距離を算出した場合、高性能容器（タイプ2）の転倒モーメントが自重による安定モーメントより大きくなる。そのため、高性能容器内部水を運用上の最高液位とし重心までの距離を算出し転倒評価を行った。



$C_H$ ：水平方向設計震度

耐震Bクラス相当：0.36

耐震Sクラス相当：0.80

$m$ ：機器重量

タイプ1： [redacted]

タイプ2： [redacted]

$g$ ：重力加速度(9.80665m/s<sup>2</sup>)

$H$ ：据付面からの重心までの距離

タイプ1： [redacted] ※1 ( $C_H=0.36$ )

： [redacted] ※2 ( $C_H=0.80$ )

タイプ2： [redacted] ※1 ( $C_H=0.36$ )

： [redacted] ※2 ( $C_H=0.80$ )

※1 HIC内部水を満水（HIC全高）とし重心までの距離を算出。

※2 HIC内部水を運用上の最高液位とし重心までの距離を算出。

運用上の最高液位： [redacted] (タイプ1)

[redacted] (タイプ2)

$L$ ：転倒支点から機器重心までの距離

タイプ1： [redacted]

タイプ2： [redacted]

地震による転倒モーメント： $M_1 = m \times g \times C_H \times H$

(タイプ1)

$C_H=0.36$  の場合  $M_1 = 2.04 \times 10^7 \text{N}\cdot\text{mm}$

$C_H=0.80$  の場合  $M_1 = 4.19 \times 10^7 \text{N}\cdot\text{mm}$

(タイプ2)

$C_H=0.36$  の場合  $M_1 = 1.91 \times 10^7 \text{N}\cdot\text{mm}$

$C_H=0.80$  の場合  $M_1 = 3.84 \times 10^7 \text{N}\cdot\text{mm}$

自重による安定モーメント： $M_2 = m \times g \times L$

(タイプ1)

$M_2 = 4.56 \times 10^7 \text{N}\cdot\text{mm}$

(タイプ2)

$M_2 = 4.03 \times 10^7 \text{N}\cdot\text{mm}$

表5 高性能容器評価結果

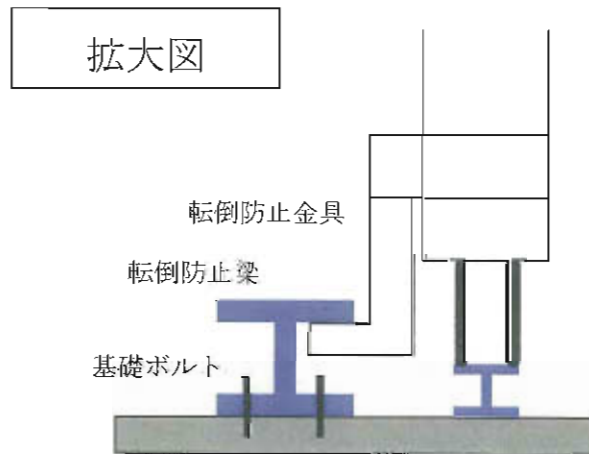
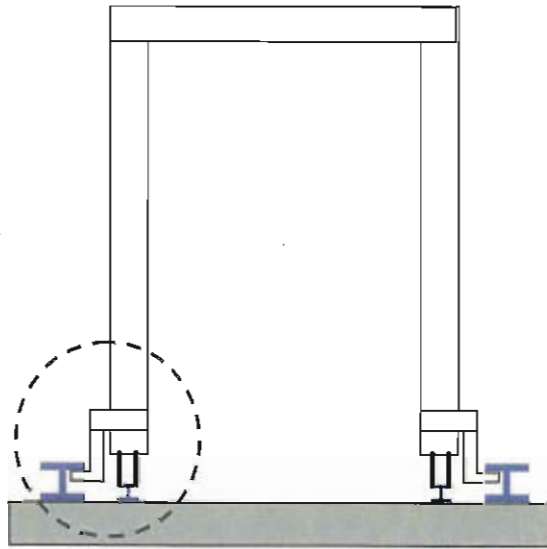
機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
高性能容器 (タイプ1) (補強体付き)	本体	転倒	0.36	$2.04 \times 10^7$	$4.56 \times 10^7$	N・mm
			0.80	$4.19 \times 10^7$		
高性能容器 (タイプ2) (補強体付き)	本体	転倒	0.36	$1.91 \times 10^7$	$4.03 \times 10^7$	N・mm
			0.80	$3.84 \times 10^7$		

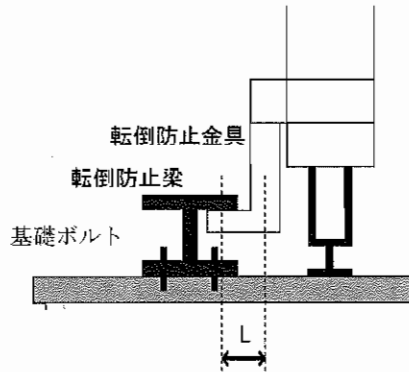
### 1.2.5 クレーン類

(1)耐震性評価（代表設備：処理カラム交換用クレーン）

#### a. 基礎ボルト等の強度評価

耐震設計技術規程並びに「クレーン構造規格」（平成7年労働省告示第134号）の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルト・転倒防止金具・転倒防止梁の強度が確保されることを確認した（表6）。





- L : 転倒防止金具の中心軸と転倒防止梁  
接触点までの距離( )
- g : 重力加速度(9.80665m/s<sup>2</sup>)
- Z<sub>1</sub> : 転倒防止金具の形状係数(7.90×10<sup>4</sup>mm<sup>3</sup>)
- Z<sub>2</sub> : 転倒防止梁の形状係数 (8.60×10<sup>5</sup>mm<sup>3</sup>)
- d : ボルトの断面積( )
- l : 転倒防止梁のアンカー固定ピッチ ( )
- C<sub>H</sub> : 水平方向設計震度  
耐震Bクラス相当 : 0.36  
耐震Sクラス相当 : 0.80
- C<sub>V</sub> : 鉛直方向設計震度  
耐震Bクラス相当 : 0  
耐震Sクラス相当 : 0

「b. 転倒評価」にて、地震による転倒モーメント>自重による安定モーメントとなる場合について、評価を行う。

転倒防止金具に作用する浮き上がり荷重をFとして、

$$\begin{aligned}
 F &= (\text{地震による転倒モーメント} - \text{自重による安定モーメント}) / (\text{クレーン両脚の距離}) \\
 &= (22400 - 22500) / 4.9 = -20 \text{ kg (Bクラス評価の場合)} \quad \leftarrow \text{浮き上がり荷重は発生しない} \\
 &= (49600 - 22500) / 4.9 = 5600 \text{ kg (Sクラス評価の場合)}
 \end{aligned}$$

転倒防止金具は片側に4個設置しているが、うち3個が転倒時に有効に作用するものとする。また、転倒防止梁の基礎ボルトは1箇所あたり4本で固定されている。

$$\text{転倒防止金具にかかる応力} : \sigma_1 = \frac{F \times g \times L}{3 \times Z_1}$$

C<sub>H</sub>=0.36 の場合 応力が発生しない

$$C_H=0.80 \text{ の場合 } \sigma_1 = 32.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_b = \frac{F}{3 \times 4}$$

C<sub>H</sub>=0.36 の場合 引張力が発生しない

$$C_H=0.80 \text{ の場合 } F_b = 467 \text{ kg}$$

$$\text{転倒防止用梁にかかる応力} : \sigma_2 = \frac{F \times g \times l}{3 \times 4 \times Z_2}$$

C<sub>H</sub>=0.36 の場合 応力が発生しない



$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } \sigma_2 = 10.7 \text{ N/mm}^2$$

また、許容応力はクレーン構造規格に基づき以下の式で設定した。

$$\begin{aligned} \text{許容引張応力: } \sigma_{te} &= \min ( \text{降伏点応力}/1.5 , \text{引張強さ}/1.8 ) \\ &= \min ( 2400/1.5 , 4100/1.8 ) \\ &= \min ( 1600 , 2278 ) = 1600 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

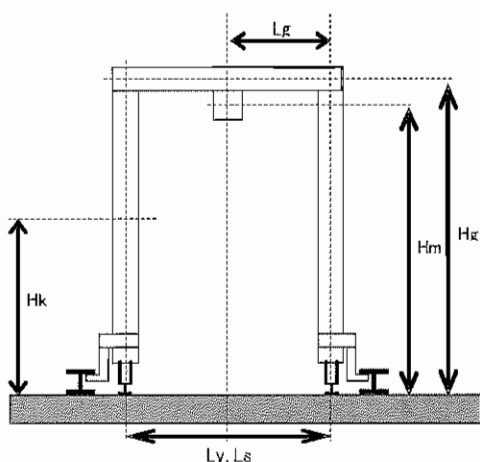
$$\begin{aligned} \text{基礎ボルトの許容引張力: } F_{Ba} &= \sigma_{ta} \times d \times 0.6 \\ &= 1435 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{許容圧縮応力: } \sigma_{ca} = \sigma_{ta} / 1.15 = 1391 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{転倒防止金具, 転倒防止梁の許容曲げ応力: } \sigma_{bac} = 1.30 \times \sigma_{ca} = 1800 \text{ kg/cm}^2 = 175 \text{ N/mm}^2$$

b. 転倒評価

地震による転倒モーメントと自重による安定モーメントを算出し、それらと比較することにより転倒評価を実施した。評価の結果、地震による転倒モーメントが自重による安定モーメントより小さくなるものについては、転倒しないことを確認した。また、地震による転倒モーメントが自重による安定モーメントより大きくなるものについては、a. での計算により基礎ボルト・転倒防止金具・転倒防止梁の強度が確保されることから転倒しないことを確認した（表6）。



$C_H$  : 水平方向設計震度

耐震Bクラス相当 : 0.36

耐震Sクラス相当 : 0.80

$m$  : 機器重量

$m_g$  : ガータ重量( )

$m_k$  : 脚重量( )

$m_m$  : 巻上機重量( )

$m_y$  : 揺脚重量( )

$m_s$  : サドル重量( )

$g$  : 重力加速度( $9.80665\text{m/s}^2$ )

$H$  : 据付面からの重心までの距離

$H_g$  : ガータ重心高さ( )

$H_k$  : 脚重心高さ( )

$H_m$  : 巻上機重心高さ( )

$L$  : 転倒支点から機器重心までの距離

$L_g$  : ガータ重心距離( )

$L_y$  : 揺脚重心距離( )

$L_s$  : サドル重心距離( )

$$\text{地震による転倒モーメント} : M_1 = m \times C_H \times H$$

$$M_{1g} = m_g \times H_g \times C_H$$

$$M_{1k} = m_k \times H_k \times C_H$$

$$M_{1m} = m_m \times H_m \times C_H$$

$$M_1 = M_{1g} + M_{1k} + M_{1m}$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 } M_1 = 2.24 \times 10^4 \text{kg}\cdot\text{m}$$

$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } M_1 = 4.96 \times 10^4 \text{kg}\cdot\text{m}$$

自重による安定モーメント： $M_2 = m \times L$

$$M_{2g} = m_g \times L_g$$

$$M_{2y} = m_y \times L_y$$

$$M_{2s} = m_s \times L_s$$

$$M_2 = M_{2g} + M_{2y} + M_{2s} = 2.25 \times 10^4 \text{kg} \cdot \text{m}$$

表6：クレーン類耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
処理カラム 交換用クレーン	本体	転倒	0.36	$2.24 \times 10^4$	$2.25 \times 10^4$	kg・m
	基礎ボルト	引張	0.36	-	1435	kg
	転倒防止金具	変形	0.36	-	175	N/mm <sup>2</sup>
	転倒防止梁	変形	0.36	-	175	N/mm <sup>2</sup>
	本体	転倒	0.80	$4.96 \times 10^4$	$2.25 \times 10^4$	kg・m
	基礎ボルト	引張	0.80	467	1435	kg
	転倒防止金具	変形	0.80	32.5	175	N/mm <sup>2</sup>
	転倒防止梁	変形	0.80	10.7	175	N/mm <sup>2</sup>

※ 算出値「-」については、引張荷重・応力が作用していない。

### 1.2.6 配管

#### (1) 構造強度評価

##### a. 配管（鋼管）

配管（鋼管）はステンレスまたは炭素鋼の一般産業品とするため、設計・建設規格の要求には必ずしも適合しない。しかしながら、以下により高い信頼性を確保する。

- ・公的規格に適合した配管（鋼管）を選定する。
- ・溶接継手は、運転圧による漏えい確認もしくは代替検査を行う。
- ・可能な限り工場にて溶接を行い、現地での溶接作業を少なくする。

また、配管（鋼管）には保温材を取り付け凍結防止対策を施す。

##### b. 配管（ポリエチレン管）

配管（ポリエチレン管）は鋼材ではなく、一般産業品であるため、設計・建設規格の要求に適合するものではない。しかしながら、配管（ポリエチレン管）は、一般に耐食性、電気特性（耐電気腐食）、耐薬品性を有しており、鋼管と同等の信頼性を有している。また、以下により高い信頼性を確保する。

- ・日本水道協会規格に適合したポリエチレン管を採用する。
- ・継手は、可能な限り融着構造とする。

また、配管（ポリエチレン管）には保温材を取り付け凍結防止対策を施す。なお、本対策は、配管（ポリエチレン管）の紫外線劣化対策を兼ねる。

#### c. 配管（耐圧ホース）

配管（耐圧ホース）は鋼材ではなく、一般産業品であるため、設計・建設規格の要求に適合するものではない。しかしながら、以下により高い信頼性を確保する。

- ・耐圧ホースで発生した過去の不適合のうち、チガヤによる耐圧ホースの貫通に関してはチガヤが生息する箇所においては鉄板敷き等の対策を施す。
- ・継手金属と樹脂の結合部（カシメ部）の外れ防止対策として、結合部に外れ防止金具を装着する。
- ・通水等による漏えい確認を行う。

また、配管（耐圧ホース）には保温材を取り付け凍結防止対策を施す。

### (2) 耐震性評価

#### a. 配管（鋼管）

配管（鋼管）は、原子力発電所の耐震設計に用いられている定ピッチスパン法等によりサポートスパンを確保する。

#### b. 配管（ポリエチレン管）

配管（ポリエチレン管）は、可撓性を有しており地震により有意な応力は発生しない。

#### c. 配管（耐圧ホース）

配管（耐圧ホース）は、可撓性を有しており地震により有意な応力は発生しない。

以上