

福島第一原子力発電所
特定原子力施設に係る実施計画

別冊集

本資料は、「福島第一原子力発電所特定原子力施設に係る実施計画」の内容を補足するものです。

本資料は、東京電力株式会社またはその他の企業の秘密情報が含まれていることから、一部マスキングを実施しております。

平成 25 年 4 月 12 日

東京電力株式会社

別冊 1 原子炉圧力容器・格納容器注水設備に係る補足説明

I. 原子炉圧力容器・格納容器注水設備の構造強度及び耐震性について

別冊 2 原子炉格納容器内窒素封入設備に係る補足説明

I. 原子炉格納容器内窒素封入設備の構造強度及び耐震性について

別冊 3 使用済燃料プール設備に係る補足説明

I. 使用済燃料プール設備の構造強度及び耐震性について

別冊 4 原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備に係る補足説明

I. 原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備の構造強度及び耐震性について

別冊 5 汚染水処理設備等に係る補足説明

I. 汚染水処理設備等の構造強度及び耐震性について

別冊 6 原子炉格納容器ガス管理設備に係る補足説明

I. 原子炉格納容器ガス管理設備の構造強度及び耐震性について

別冊 7 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備に係る補足説明

I. 燃料取り出し用カバー換気設備の構造強度及び耐震性について

別冊 8 使用済燃料乾式キャスク仮保管設備に係る補足説明

I. 乾式キャスク仮保管設備の構造強度及び耐震性について

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

別冊 1

原子炉圧力容器・格納容器注水設備に係る補足説明

I 原子炉圧力容器・格納容器注水設備の構造強度及び耐震性について

1. 新設設備の構造強度および耐震性

1.1 ポンプ

1.1.1 常用高台炉注水ポンプおよび非常用高台炉注水ポンプ

(1) 耐震性

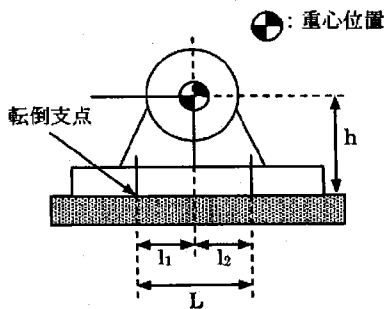
常用高台炉注水ポンプおよび非常用高台炉注水ポンプについては、ポンプユニットを、ダンパを有するトラックに搭載することにより耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで、転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること、およびトラックが転倒しないことの評価を行った。なお、基準地震動 S_s に対する動的解析を行うことが困難であることから、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行った。

a. ボルトの強度評価

原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601-2008)の横型ポンプの強度評価方法に準拠して評価を行った結果、ボルトの強度が確保されることを確認した。なお、耐震 S クラス設備に適用される静的地震力に対しても、ボルトの強度が確保されることを確認した（表-1 参照）。

表-1 常用および非常用高台炉注水ポンプのボルトの強度評価結果

	耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価		耐震 S クラス設備に適用される静的地震力による評価	
	算出応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	算出応力 [MPa]	許容応力 [MPa]
引張応力	作用しない	158	5	190
せん断応力	3	122	5	146



- L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離 (mm)
 m 機器の運転時質量 (kg)
 g 重力加速度 (9.80665 m/s²)
 h 据付面から重心までの距離 (mm)
 M_P ポンプ回転により働くモーメント
 ※基礎ボルトに M_P は作用しない
 l_1 重心と基礎ボルト間の水平方向距離 (mm)
 n_f 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数
 n 基礎ボルトの本数
 A_b 基礎ボルトの軸断面積 (mm²)
 C_H 水平方向設計震度
 [耐震 B クラス設備に適用される加速度 : 0.36 (1.8Ci)
 耐震 S クラス設備に適用される加速度 : 0.72 (3.6Ci)]
 C_V 鉛直方向設計震度
 [耐震 B クラス設備に適用される加速度 : -
 耐震 S クラス設備に適用される加速度 : 0.29]
 C_P ポンプ振動による震度

$$\text{ボルトに作用する引張力 : } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

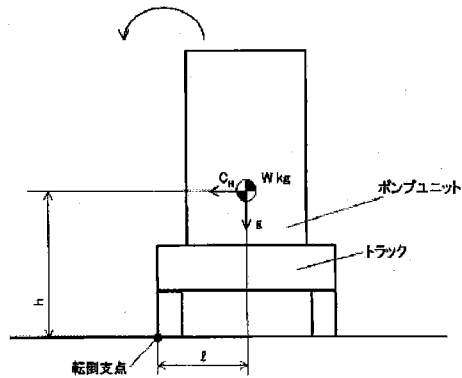
$$\text{ボルトの引張応力 : } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

$$\text{ボルトに作用するせん断力 : } Q_b = mg(C_H + C_P)$$

$$\text{ボルトのせん断応力 : } \tau_b = \frac{Q_b}{n A_b}$$

b. トラックの転倒評価

ポンプユニット、およびそれを搭載しているトラックについて、地震によるモーメントと自重によるモーメントを算出し、それらを比較することで転倒評価を行った。ポンプユニットおよびトラックが転倒するのは、地震によるモーメント > 自重によるモーメントとなる場合であるが、耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価の結果、地震によるモーメント < 自重によるモーメントとなることから、ポンプユニットおよびトラックが転倒しないことを確認した。なお、耐震 S クラス設備に適用される静的地震力に対しても、トラックが転倒しないことを確認した。



C_H 水平方向設計震度

〔耐震 B クラス設備に適用される加速度：0.36 (1.8Ci)
耐震 S クラス設備に適用される加速度：0.72 (3.6Ci)〕

W 機器重量

g 重力加速度

h 据付面から重心までの距離 (mm)

l 転倒支点から機器重心までの距離 (mm)

■ 転倒評価

地震によるモーメント： $M_1 = W \times g \times C_H \times h$

自重によるモーメント： $M_2 = W \times g \times l$

$$M_1 - M_2 = (WgC_Hh) - (Wgl) = Wg(C_Hh - l)$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合：} (C_Hh - l) = -$$

$$C_H = 0.72 \text{ の場合：} (C_Hh - l) = -$$

1.1.2 純水タンク脇炉注水ポンプ

(1) 耐震性

純水タンク脇炉注水ポンプは、常用高台炉注水ポンプと同様の構造（ポンプユニットをトラックに搭載し、ボルト等で固定）であることから、耐震性についても同様に評価を行った。なお、基準地震動 S_s に対する動的解析を行うことが困難であることから、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行った。

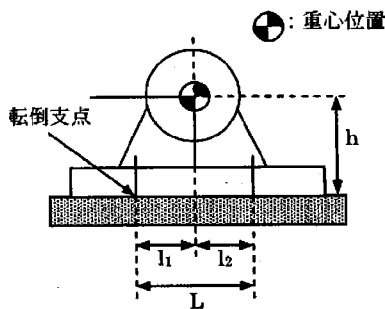
a. ボルトの強度評価

常用高台炉注水ポンプと同様の手法でボルトの評価を行った結果、ボルトの強度が確保されることを確認した。なお、耐震 S クラス設備に適用される静的地震力に対しても、ボルトの強度が確保されることを確認した（表-2 参照）。

表-2 純水タンク脇炉注水ポンプのボルトの強度評価結果

	耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価		耐震 S クラス設備に適用される静的地震力による評価	
	算出応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	算出応力 [MPa]	許容応力 [MPa]

引張応力	作用しない	158	6	190
せん断応力	3	122	5	146



- L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離 (■ mm)
- m 機器の運転時質量 (■ kg)
- g 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- h 据付面から重心までの距離 (■ mm)
- M_P ポンプ回転により働くモーメント
※基礎ボルトに M_P は作用しない
- l₁ 重心と基礎ボルト間の水平方向距離 (■ mm)
- n_f 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数 (■)
- n 基礎ボルトの本数 (■)
- A_b 基礎ボルトの軸断面積 (■ mm²)
- C_H 水平方向設計震度
〔耐震 B クラス設備に適用される加速度 : 0.36 (1.8Ci)
耐震 S クラス設備に適用される加速度 : 0.72 (3.6Ci)〕
- C_V 鉛直方向設計震度
〔耐震 B クラス設備に適用される加速度 : -
耐震 S クラス設備に適用される加速度 : 0.29〕
- C_P ポンプ振動による震度 (■)

$$\text{ボルトに作用する引張力 : } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

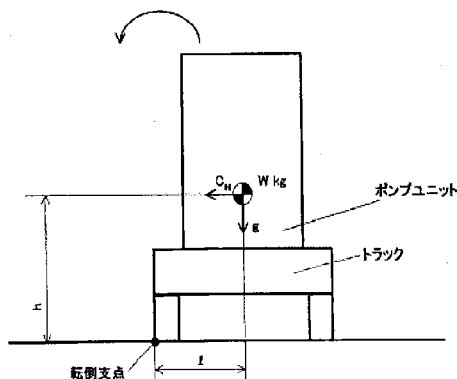
$$\text{ボルトの引張応力 : } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

$$\text{ボルトに作用するせん断力 : } Q_b = mg(C_H + C_P)$$

$$\text{ボルトのせん断応力 : } \tau_b = \frac{Q_b}{n A_b}$$

b. トラックの転倒評価

常用高台炉注水ポンプと同様に、耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行った結果、地震によるモーメント < 自重によるモーメントとなることから、純水タンク脇ポンプのポンプユニットおよびトラックが転倒しないことを確認した。



- C_H 水平方向設計震度
〔耐震 B クラス設備に適用される加速度 : 0.36 (1.8Ci)
耐震 S クラス設備に適用される加速度 : 0.72 (3.6Ci)〕
- W 機器重量
- g 重力加速度
- h 据付面から重心までの距離 (■ mm)
- l 転倒支点から機器重心までの距離 (■ mm)

■ 転倒評価

地震によるモーメント： $M_1 = W \times g \times C_H \times h$

自重によるモーメント： $M_2 = W \times g \times \ell$

$$M_1 - M_2 = (WgC_H h) - (Wg\ell) = Wg(C_H h - \ell)$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合：} (C_H h - \ell) = -$$

$$C_H = 0.72 \text{ の場合：} (C_H h - \ell) =$$

1.1.3 タービン建屋内炉注水ポンプ

(1) 耐震性

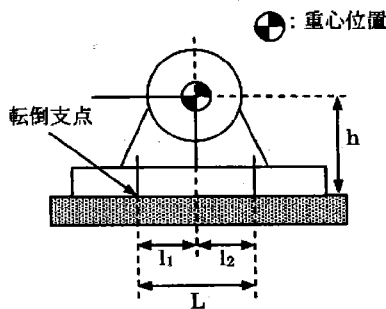
タービン建屋内炉注水ポンプは、基礎ボルトによりタービン建屋 1 階の床面に固定されていることを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されることの評価を行った。なお、基準地震動 S_s に対する動的解析を行うことが困難であることから、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行った。

a. ボルトの強度評価

常用高台炉注水ポンプと同様の手法でボルトの評価を行った結果、ボルトの強度が確保されることを確認した。なお、耐震 S クラス設備に適用される静的地震力に対しても、ボルトの強度が確保されることを確認した（表-3 参照）。

表-3 タービン建屋内炉注水ポンプのボルトの強度評価結果

号機	応力分類	耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価		耐震 S クラス設備に適用される静的地震力による評価	
		算出応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	算出応力 [MPa]	許容応力 [MPa]
1F-1	引張応力	作用しない	158	2	190
	せん断応力	2	122	3	146
1F-2/3	引張応力	作用しない	180	3	207
	せん断応力	3	139	4	159



- L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離 (1 号機 ■ mm、2/3 号機 ■ mm)
- m 機器の運転時質量 (1 号機 ■ kg、2/3 号機 ■ kg)
- g 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- h 据付面から重心までの距離 (1 号機 ■ mm、2/3 号機 ■ mm)
- M_P ポンプ回転により働くモーメント
※基礎ボルトに M_P は作用しない
- l₁ 重心と基礎ボルト間の水平方向距離 (1 号機 ■ mm、2/3 号機 ■ mm)
- n_f 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数 (1 号機 ■ 本、2/3 号機 ■ 本)
- n 基礎ボルトの本数 (1/2/3 号機 ■ 本)
- A_b 基礎ボルトの軸断面積 (1/2/3 号機 ■ mm²)
- C_H 水平方向設計震度
 $\left[\begin{array}{l} \text{耐震 B クラス設備に適用される加速度: } 0.36 \text{ (1.8Ci)} \\ \text{耐震 S クラス設備に適用される加速度: } 0.72 \text{ (3.6Ci)} \end{array} \right]$
- C_V 鉛直方向設計震度
 $\left[\begin{array}{l} \text{耐震 B クラス設備に適用される加速度: } - \\ \text{耐震 S クラス設備に適用される加速度: } 0.29 \end{array} \right]$
- C_P ポンプ振動による震度 (■)

$$\text{ボルトに作用する引張力: } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

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

$$\text{ボルトに作用するせん断力: } Q_b = mg(C_H + C_P)$$

$$\text{ボルトのせん断応力: } \tau_b = \frac{Q_b}{n A_b}$$

1.1.4 CST 炉注水ポンプ

(1) 耐震性

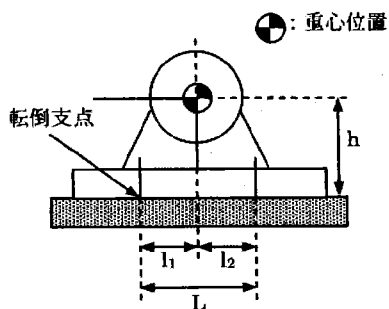
CST 炉注水ポンプは、基礎ボルトによりタービン建屋 1 階の床面に固定されていることを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されることの評価を行う。なお、耐震 S クラス相当の設備に求められる解析評価を行うことが困難であることから、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行う。

a. ボルトの強度評価

常用高台炉注水ポンプと同様の手法でボルトの評価を行った結果、ボルトの強度が確保されることを確認した。なお、耐震 S クラス設備に適用される静的地震力に対しても、ボルトの強度が確保されることを確認した。(表-4 参照)。

表-4 CST 炉注水ポンプのボルトの強度評価結果

号機	応力分類	耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価		耐震 S クラス設備に適用される静的地震力による評価	
		算出応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	算出応力 [MPa]	許容応力 [MPa]
1F-1/2/3	引張応力	作用しない	180	2	207
	せん断応力	3	139	4	159



- L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離 (1/2/3 号機 ■ mm)
- m 機器の運転時質量 (1/2/3 号機 ■ kg)
- g 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- h 据付面から重心までの距離 (1/2/3 号機 ■ mm)
- M_P ポンプ回転により働くモーメント
※基礎ボルトに M_P は作用しない
- l₁ 重心と基礎ボルト間の水平方向距離 (1/2/3 号機 ■ mm)
- n_f 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数 (1/2/3 号機 ■ 本)
- n 基礎ボルトの本数 (1/2/3 号機 ■ 本)
- A_b 基礎ボルトの軸断面積 (1/2/3 号機 ■ mm²)
- C_H 水平方向設計震度
 { 耐震 B クラス設備に適用される加速度 : 0.36 (1.8Ci)
 { 耐震 S クラス設備に適用される加速度 : 0.72 (3.6Ci) }
- C_V 鉛直方向設計震度
 { 耐震 B クラス設備に適用される加速度 : -
 { 耐震 S クラス設備に適用される加速度 : 0.29 }
- C_P ポンプ振動による震度 (■)

$$\text{ボルトに作用する引張力 : } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

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

$$\text{ボルトに作用するせん断力 : } Q_b = mg(C_H + C_P)$$

$$\text{ボルトのせん断応力 : } \tau_b = \frac{Q_b}{n A_b}$$

1.2 タンクの構造強度および耐震性

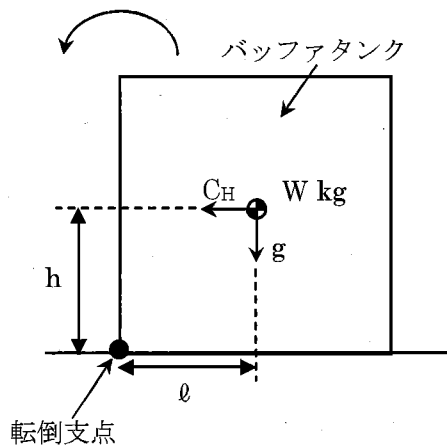
1.2.1 処理水バッファタンク

(1) 耐震性

処理水バッファタンクは、事務本館脇海側駐車場に設置されており、ボルトによる固定はされていないことを踏まえ、耐震性の評価として、タンクが転倒しないことの評価を行った。なお、基準地震動 S_s に対する動的解析を行うことが困難であることから、静的地震力を用いて、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス相当の評価を行った。

a. 処理水バッファタンクの転倒評価

タンクについて、地震によるモーメントと自重によるモーメントを算出し、それらを比較することで転倒評価を行った。タンクが転倒するのは、地震によるモーメント > 自重によるモーメントの場合であるが、評価の結果、地震によるモーメント < 自重によるモーメントであり、タンクが転倒しないことを確認した。



C_H 水平方向設計震度

〔耐震 B クラス設備に適用される加速度 : 0.36 (1.8Ci)
耐震 S クラス設備に適用される加速度 : 0.72 (3.6Ci)〕

W 機器重量

g 重力加速度

h 据付面から重心までの距離 (■■■■ mm)

l 転倒支点から機器重心までの距離 (■■■■ mm)

■ 転倒評価

地震によるモーメント : $M_1 = W \times g \times C_H \times h$

自重によるモーメント : $M_2 = W \times g \times l$

$$M_1 - M_2 = (WgC_Hh) - (Wgl) = Wg(C_Hh - l)$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 : } (C_Hh - l) = -■■■■$$

$$C_H = 0.72 \text{ の場合 : } (C_Hh - l) = -■■■■$$

1.3 管の構造強度及び耐震性

1.3.1 鋼管

(1) 構造強度

鋼管については、「設計・建設規格」に基づき、最高使用圧力に対して十分な厚さを有していることを確認しており、原子炉注水系における使用条件に対し、十分な構造強度を有していると評価している（表-4 参照）。

表-4 原子炉注水系における鋼管の構造強度評価結果※¹

	材料	外径 : D0 [mm]	最高 使用 圧力 : P [MPa]	許容引張 応力 : S [MPa]	公称 肉厚 [mm]	管の計算上 必要な 厚さ : t [mm]	炭素鋼 鋼管の必要 最小厚さ※ ² [mm]
【1～3 号機高台 炉注水ライン】 ポンプユニット	SUS304TP	60.5	1.4	128	3.5	0.33	—
	SUS304TP	76.3	1.4	128	3.5	0.42	—
	SUS304TP	89.1	1.4	128	4.0	0.49	—
【1～3 号機高台 炉注水ライン】	SUS304TP	60.5	0.98	128	3.9	0.24	—
	SUS304TP	89.1	0.98	128	5.5	0.35	—
	SUS304TP	165.2	0.98	128	7.1	0.64	—
	STPT370	89.1	0.98	93	5.5	0.47	3.0
	STPT370	60.5	0.98	93	5.5	0.32	2.4
	STPT410	318.5	0.98	103	10.3	1.51	3.8
	STPG370	60.5	0.98	93	3.9	0.32	2.4
	STPG370	76.3	0.98	93	5.2	0.41	2.7
	STPG370	89.1	0.98	93	5.5	0.47	3.0
	STPG370	60.5	0.98	93	5.5	0.32	2.4
【1～3 号機純水 タンク脇炉注水ラ イン】 ポンプユニット	SUS304TP	60.5	1.4	128	3.5	0.33	—
	SUS304TP	76.3	1.4	128	3.5	0.42	—
	SUS304TP	89.1	1.4	128	5.5	0.49	—
【1～3 号機純水 タンク脇炉注水ラ イン】	SGP	165.2	0.98	74	5.0	1.09	3.8
	SGP	216.3	0.98	74	5.8	1.43	3.8
【1～3 号機ター ビン建屋内炉注水 ライン】 ポンプユニット	STPT370	76.3	1.4	93	5.2	0.41	2.7
	STPT370	60.5	1.4	93	5.5	0.32	2.4
	SUS304TP	60.5	1.4	128	5.5	0.33	—
【1～3 号機ター ビン建屋内炉注水 ライン】	STPT370	76.3	0.98	93	5.2	0.41	2.7
	STPT370	89.1	0.98	93	5.5	0.47	3.0
	STPT370	114.3	0.98	93	6.0	0.6	3.4
	STPT370	165.2	0.98	93	7.1	0.87	3.8

	STPT370	60.5	0.98	93	8.7	0.32	2.4
	STPG370	89.1	0.98	93	5.5	0.47	3.0
	STPG370	165.2	0.98	93	7.1	0.87	3.8
	STPG370	318.5	0.98	93	10.3	1.68	3.8
	STPG370	60.5	0.98	93	5.5	0.32	2.4
【1～3 号機 CST 炉注水ライン】 ポンプユニット	STPT410	34.0	0.96	103	4.5	0.16	1.7
	STPT410	60.5	0.96	103	5.5	0.29	2.4
	STPT410	89.1	0.96	103	5.5	0.42	3.0
【1～3 号機 CST 炉注水ライン】	STPT410	60.5	0.96	103	5.5	0.29	2.4
	STPT410	76.3	0.96	103	5.2	0.36	2.7
	STPT410	89.1	0.96	103	5.5	0.42	3.0
	STPT410	114.3	0.96	103	6.0	0.54	3.4
	STPT410	165.2	0.96	103	7.1	0.77	3.8

※1 長手継手の効率 η は全て 1

※2 表-5 に定める値

■ 内圧を受ける直管

最高使用圧力に対する直管の厚さは、(式 1-1) により計算した値および表-5 に定める値のいずれか大きい方の値以上でなければならない。

$$t = \frac{PD_0}{2S\eta + 0.8P} \quad (\text{式 1-1})$$

t : 管の計算上必要な厚さ (mm)

P : 最高使用圧力 (MPa)

D₀ : 管の外径 (mm)

S : 最高使用温度における「設計・建設規格 付録材料図 表 Part5 表 5」に規定する材料の許容引張応力 (MPa)

η : 長手継手の効率で、「設計・建設規格 PVC-3130」に定めるところによる。

表-5 炭素鋼鋼管の必要最小厚さ

管の外径 (mm)	管の厚さ (mm)
25 未満	1.4
25 以上 38 未満	1.7
38 以上 45 未満	1.9
45 以上 57 未満	2.2
57 以上 64 未満	2.4
64 以上 82 未満	2.7
82 以上 101 未満	3.0
101 以上 127 未満	3.4
127 以上	3.8

別冊 2

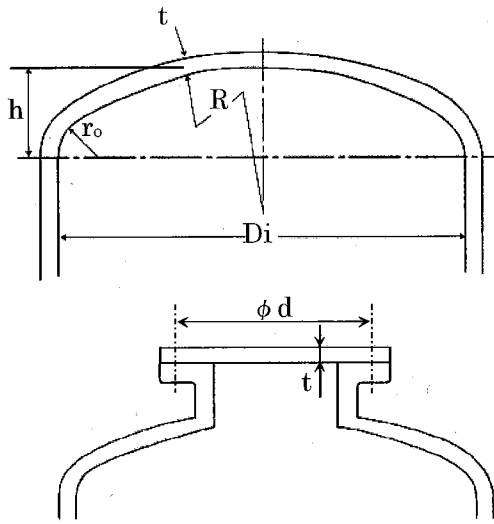
原子炉格納容器内窒素封入設備に係る補足説明

I 原子炉格納容器内窒素封入設備の構造強度及び耐震性について

1. 窒素ガス分離装置の構造強度及び耐震性

(1) 構造強度

窒素ガス分離装置 (A), (B), (C) 及び非常用窒素ガス分離装置に用いる容器の一部については、圧力容器構造規格の第二種圧力容器構造規格を適用しており、JIS B 8265 (圧力容器の構造—一般事項) の規格計算を行い、必要板厚を満足することを確認する。



- t : 必要計算厚さ (mm)
- P : 設計圧力 (MPa)
- D_i : 胴の内径 (mm)
- σ_a : 設計温度における材料の許容引張応力 (N/mm²)
- η : 溶接継手効率
- α : 腐れ代 (mm)
- M : 皿形鏡板の形状による係数
- R : 皿形鏡板の中央の球形部の内半径 (mm)
- r_o : 皿形鏡板のすみの丸みの内半径 (mm)
- D : 半だ円形鏡板のだ円の内長径 (mm)
- $2h$: 半だ円形鏡板のだ円の内短径 (mm)
- K : 半だ円形鏡板の形状による係数
- d : 円形平ふた板のボルト中心円の直径 (mm)

$$\text{円筒胴の計算厚さ (内径基準)} : t = \frac{PD_i}{2\sigma_a\eta - 1.2P} + \alpha \quad P \leq 0.385\sigma_a\eta \text{ の場合}$$

$$\text{皿形鏡板の計算厚さ (内径基準)} : t = \frac{PRM}{2\sigma_a\eta - 0.2P} + \alpha$$

$$\text{皿形鏡板の形状による係数} : M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{R}{r_o}} \right)$$

$$\text{半だ円形鏡板の計算厚さ (内径基準)} : t = \frac{PDK}{2\sigma_a\eta - 0.2P} + \alpha$$

$$\text{半だ円形鏡板の形状による係数} : K = \frac{1}{6} \left(2 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2 \right)$$

$$\text{円形平ふた板の計算厚さ} : t = d \sqrt{\frac{0.25P}{\sigma_a\eta}}$$

必要板厚計算に用いるパラメータは下表の通り。

設備名		部位	P	D_i	σ_a	η	α
窒素ガス 分離装置 (A)	吸着槽	胴板					
	製品槽						
窒素ガス 分離装置 (B)	吸着槽						
	製品槽						
窒素ガス 分離装置 (C)	活性炭槽						
	空気槽						
	吸着槽						
	製品槽						
非常用 窒素ガス 分離装置	活性炭槽						
	吸着槽						
	製品槽						

設備名		部位	P	R	σ_a	η	α	r_o
窒素ガス 分離装置 (A)	吸着槽	皿形鏡板						
	製品槽							
窒素ガス 分離装置 (B)	吸着槽							
	製品槽							
非常用 窒素ガス 分離装置	活性炭槽							
	製品槽							

設備名		部位	P	D	σ_a	η	α	2h
窒素ガス 分離装置 (A)	吸着槽	半だ円形 鏡板						
窒素ガス 分離装置 (B)	吸着槽							
窒素ガス 分離装置 (C)	活性炭槽							
	空気槽							
	吸着槽							
	製品槽							
非常用 窒素ガス 分離装置	吸着槽							

設備名		部位	P	σ_a	η	d
窒素ガス 分離装置 (A)	吸着槽	円形 平ふた板				
窒素ガス 分離装置 (B)	吸着槽					
窒素ガス 分離装置 (C)	活性炭槽					
	吸着槽					

表一1に板厚計算の結果を示す。当該機器は必要板厚を満足しており、原子炉格納容器内窒素封入設備の最高使用圧力に十分耐えうる構造強度を有していることを確認した。

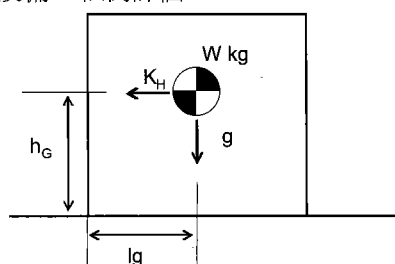
表一1 第二種压力容器 板厚計算結果

設備名		部位	必要板厚 (mm)	使用板厚 (mm)
窒素ガス 分離装置 (A)	吸着槽	胴板	5.56	9
		皿形鏡板	5.86	9
		半楕円形鏡板	4.17	12
		平ふた板	21.93	26
	製品槽	胴板	5.21	6
		皿形鏡板	5.49	6
窒素ガス 分離装置 (B)	吸着槽	胴板	4.86	6
		皿形鏡板	5.11	6
		半楕円形鏡板	3.69	9
		平ふた板	21.93	26
	製品槽	胴板	4.86	6
		皿形鏡板	5.11	6
窒素ガス 分離装置 (C)	活性炭 槽	胴板	3.51	4.5
		半楕円形鏡板	2.75	4.5
		平ふた板	11.94	22
	空気槽	胴板	4.23	4.5
		半楕円形鏡板	3.24	4.5
	吸着槽	胴板	4.23	4.5
		半楕円形鏡板	3.24	4.5
		平ふた板	17.67	24
	製品槽	胴板	4.23	4.5
		半楕円形鏡板	3.24	4.5
非常用 窒素ガス 分離装置	活性炭 槽	胴板	4.07	6
		皿形鏡板	4.27	5
	吸着槽	胴板	4.39	6
		半楕円形鏡板	4.19	5
	製品槽	胴板	3.77	6
		皿形鏡板	3.94	5

(2) 耐震性

窒素ガス分離装置（A）、（B）、（C）及び非常用窒素ガス分離装置については、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を参考とし、静的地震力を用いて、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス相当の地震力（ $1.2C_i = 0.24$ ）にて設備が転倒しないことの評価を行う。

・設備の転倒評価



K_H 水平方向設計震度
 W 機器重量
 g 重力加速度
 h_G 据付面から重心までの距離
 l_g 転倒支点から機器重心までの距離

地震によるモーメント： $M_1 = W \times g \times K_H \times h_G$

自重によるモーメント： $M_2 = W \times g \times l_g$

転倒評価に用いるパラメータは下表の通り。

	K_H	g	W	h_G	l_g
窒素ガス分離装置（A）	0.24	9.80665	■	■	■
窒素ガス分離装置（B）			■	■	■
窒素ガス分離装置（C）			■	■	■
非常用窒素ガス分離装置			■	■	■

表一2に転倒評価の結果を示す。当該機器は地震力に対して転倒せず、必要な耐震性を有していることを確認した。

表一2 窒素ガス分離装置 転倒評価結果（耐震Cクラス相当の静的震度）

設備名称	地震によるモーメント M_1 [N・m]	自重によるモーメント M_2 [N・m]	評価
窒素ガス分離装置（A）	4920	14023	転倒しない
窒素ガス分離装置（B）	3602	9169	転倒しない
窒素ガス分離装置（C）	7259	15877	転倒しない
非常用窒素ガス分離装置	24172	85219	転倒しない

なお、非常用窒素ガス分離装置については耐震Ｓクラス相当の静的震度（ $3.6C_i = 0.72$ ）での評価も行い、転倒しないことを確認した。表－３に転倒評価の結果を示す。

表－３ 非常用窒素ガス分離装置 転倒評価結果（耐震Ｓクラス相当の静的震度）

設備名称	地震によるモーメント M_1 [N・m]	自重によるモーメント M_2 [N・m]	評価
非常用窒素ガス分離装置	72515	85219	転倒しない

２. ゴムホース

(1) 構造強度

ゴムホースは設計・建設規格に記載がない材料であるが、通常運転状態における漏えい確認試験を行い、有意な変形や漏えいがないことを確認していることから、必要な構造強度を有しているものと判断する。

(2) 耐震性

ゴムホースは、フレキシビリティを有しており、地震変位による有意な応力は発生しないと考えられる。

３. 既設設備の耐震性

原子炉圧力容器及び原子炉格納容器への窒素の封入ライン（既設配管）の耐震性は以下の表－３の通り。

表－３ 窒素封入ライン（既設配管）の耐震性

	原子炉圧力容器	原子炉格納容器
１号機	原子炉圧力容器頂部冷却系 (耐震Ｓクラス)	不活性ガス系 (耐震Ｃクラス)
２号機	原子炉圧力容器水位計装ライン (耐震Ｓクラス)	可燃性ガス濃度制御系 (耐震Ｓクラス)
３号機	原子炉圧力容器水位計装ライン (耐震Ｓクラス)	原子炉格納容器漏えい率検査用予備ライン (耐震Ｓクラス)

２／３号機については、原子炉圧力容器及び原子炉格納容器とも耐震Ｓクラス配管より窒素が供給されており、耐震上問題はない。

１号機については原子炉格納容器への窒素の封入は耐震Ｃクラス設備である不活性ガス系より行われているため、大きな地震が発生した場合、既設配管の影響が懸念される。しかし、原子炉圧力容器への窒素封入ラインが耐震Ｓクラスであることから、原子炉圧

力容器へ封入した窒素が原子炉格納容器側に流入し窒素で満たされるため問題はない。
これらの既設封入ラインは東北地方太平洋沖地震でも健全性が維持されていたものであることから、実力的にSクラス相当の耐震性を有しているものと考えられる。

なお、既設設備の強度、耐震性等については以下の工事計画認可申請書等による。

- ・ 1号機 原子炉圧力容器頂部冷却系

建設時第7回工事計画認可申請書（43公第13412号 昭和44年4月7日認可）

建設時第4回工事計画軽微変更届出書（総官第503号 昭和45年7月2日届出）

工事計画認可申請書（53資庁第10621号 昭和53年9月25日認可）

工事計画認可申請書（平成20・08・26原第10号 平成20年9月10日認可）

- ・ 2号機 原子炉圧力容器水位計装ライン

建設時第14回工事計画認可申請書（46公第11145号 昭和46年8月17日認可）

建設時第3回工事計画軽微変更届出書（総官第685号 昭和47年9月28日届出）

工事計画認可申請書（53資庁第13643号 昭和54年1月5日認可）

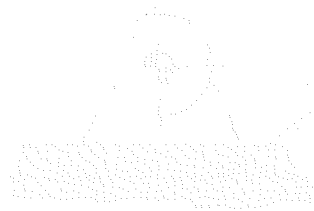
- ・ 3号機 原子炉圧力容器水位計装ライン

建設時第11回工事計画認可申請書（47公第8267号 昭和47年9月28日認可）

建設時第26回工事計画軽微変更届出書（総官第459号 昭和49年7月11日届出）

別冊 3

使用済燃料プール設備に係る補足説明



I 使用済燃料プール設備の構造強度及び耐震性について

1. ポンプ

1.1 1号機二次系ポンプ

(1) 耐震性

1号機二次系ポンプについては、サージタンクや配管、弁等と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（以下、二次系ユニット）することで耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで転倒防止策を講じている。また、二次系ユニットについては、1号機原子炉建屋脇の屋外に設置し、敷鉄板と溶接等を行い転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること及び二次系ユニットが転倒しないことの評価を行った。なお、評価においては水平方向震度を耐震 B クラス相当の評価である 0.36G とし、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス相当の評価を行った。

a. ボルトの強度評価

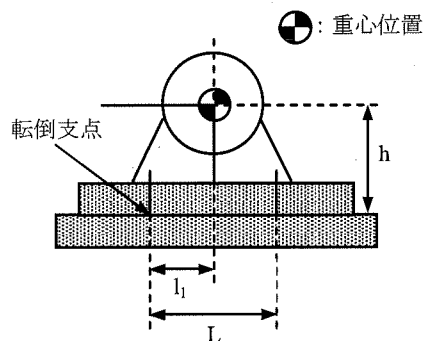
原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601-2008)の横型ポンプの強度評価方法に準拠して評価を行った。また、ボルトの許容応力については、供用状態 Cs における許容応力を適用し、ボルトの評価温度は 100℃とみなして、許容応力を求めた。

評価結果を以下に示す。算出応力は全て許容応力以下となっている。

(i) 評価方法及び条件

適用基準：原子力発電所耐震設計技術規定「JEAC4601 (2008)」

横形ポンプの強度評価方法に準拠して計算を行う。



- ・評価部位：基礎ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重 / ポンプ振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力 } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

$$\text{引張応力 } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

$$\text{せん断力 } Q_b = mg(C_H + C_P)$$

$$\text{せん断応力 } \tau_b = \frac{Q_b}{n A_b}$$

L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる
基礎ボルトまでの距離

m 機器の運転時質量

g 重力加速度(=9.80665)

h 据付面から重心までの距離

M_P ポンプ回転により働くモーメント

※基礎ボルトに M_P は作用しない

l₁ 重心と基礎ボルト間の水平方向距離

n_f 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数

n 基礎ボルトの本数

A_b 基礎ボルトの軸断面積

C_H 水平方向設計震度

C_V 鉛直方向設計震度 (=0)

C_P ポンプ振動による震度

・許容応力：供用状態 Cs における許容応力を適用し、以下の式で設定

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力} : 1.5f_t = \min(f_{to}, f_{ts})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : 1.5f_s = F/\sqrt{3}$$

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、以下となる。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

Sy : 表 8 より 100℃ : 194MPa

Su : 表 9 より 100℃ : 373MPa

従って、

$$F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(194, 0.7 \times 373) = 194 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{基礎ボルトの許容引張応力} : 1.5f_t &= \min(f_{to}, f_{ts}) = (145, 199) \\ &= 145 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 145.5 \text{MPa} \rightarrow 145 \text{MPa}$$

$$f_{ts} = 1.4 \times f_{to} - 1.6 \times \tau_b = 1.4 \times 145 - 1.6 \times 2 = 199.8 \text{MPa}$$

$$\rightarrow 199 \text{MPa}$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : 1.5f_s = F/\sqrt{3} = 112.0 \text{MPa}$$

$$\rightarrow 112 \text{MPa}$$

・設計震度：水平方向のみを考慮

$$C_H=0.36$$

(ii) 機器要目

L	m	g	h	l ₁
■[mm]	■[kg]	9.80665	■[mm]	■[mm]

n _f	n	A _b	C _H	C _P
■	■	■[mm ²]	0.36	■

S _y	S _u	F
194*[MPa] (40mm<径≦100mm)	373*[MPa] (40mm<径≦100mm)	194[MPa]

* 保守的な評価となるように‘40mm<径≦100mm’の値を使用。

(iii) 評価結果

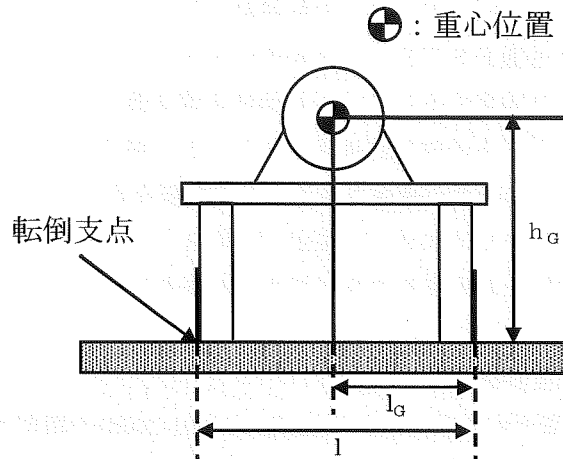
	算出応力	許容応力
引張	作用しない	145[MPa]
せん断	2[MPa]	112[MPa]

※ 浮き上がりが生じないため引張応力は評価不要

b. 二次系ユニットの転倒評価

「建築設備耐震設計・施工指針（2005 年版）」を準用し、敷鉄板との溶接を考慮しない状態で、二次系ユニットに発生する垂直力により転倒評価を行った。

発生する垂直力は以下の計算式で算出することができる。



$$R_b = \frac{F_H \cdot h_G - (W - F_V) \cdot l_G}{l \cdot n_t}$$

$$= \frac{\{0.36 \times \text{[redacted]} \times \text{[redacted]} - (\text{[redacted]} - 0) \times \text{[redacted]} \times 9.80665}{\text{[redacted]} \times \text{[redacted]}}$$

$$= -1938.9[N] \rightarrow -1938[N]$$

ここに、 F_H : 設計水平地震力 ($K_H \cdot W$) = $0.36 \times \text{[redacted]} = \text{[redacted]} [kg]$

K_H : 設計用水平震度 = 0.36

W : 機器重量 = $\text{[redacted]} [kg]$

h_G : 据付面より機器重心までの高さ = $\text{[redacted]} [mm]$

F_V : 設計用鉛直地震力 = 0

l_G : 検討する方向からみた評価点から機器重心までの距離 = $\text{[redacted]} [mm]$

l : 検討する方向から見た評価点スパン = [redacted]

n_t : 機器転倒を考えた場合の引張を受ける評価点の数 = [redacted]

転倒評価結果

設備名称	発生する垂直力[N]	評価
1号機二次系ユニット	-1938	転倒しない

1.2 2号機一次系ポンプ

(1) 耐震性

2号機一次系ポンプについては、熱交換器、弁等と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（以下、熱交換器ユニット）することで耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで転倒防止策を講じている。また、熱交換器ユニットについては2号機FSTR（フィルター・スラッジタンクルーム）建屋の床面にアンカボルトにより固定することで、転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること、熱交換器ユニットが転倒しないこと及びアンカボルトの強度が確保されることの評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の評価である0.36Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

a. ボルトの強度評価

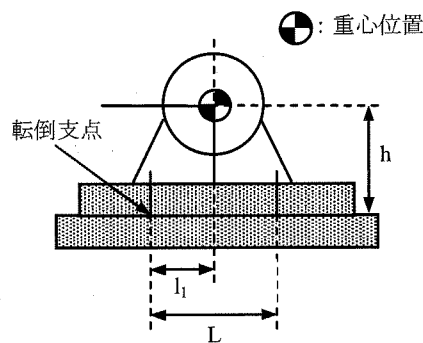
原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601-2008)の横型ポンプの強度評価方法に準拠して評価を行った。また、ボルトの許容応力については、供用状態Csにおける許容応力を適用し、ボルトの評価温度は100℃とみなして、許容応力を求めた。

評価結果を以下に示す。算出応力は全て許容応力以下となっている。

(i) 評価方法及び条件

適用基準：原子力発電所耐震設計技術規定「JEAC4601 (2008)」

横形ポンプの強度評価方法に準拠して計算を行う。



- ・評価部位：基礎ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重 / ポンプ振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力 } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

$$\text{引張応力 } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

$$\text{せん断力 } Q_b = mg(C_H + C_P)$$

$$\text{せん断応力 } \tau_b = \frac{Q_b}{n A_b}$$

L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる
基礎ボルトまでの距離

m 機器の運転時質量

g 重力加速度(=9.80665)

h 据付面から重心までの距離

M_p ポンプ回転により働くモーメント

※基礎ボルトに M_p は作用しない

l₁ 重心と基礎ボルト間の水平方向距離

n_f 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数

n 基礎ボルトの本数

A_b 基礎ボルトの軸断面積

C_H 水平方向設計震度

C_V 鉛直方向設計震度 (=0)

C_P ポンプ振動による震度

・許容応力：供用状態 Cs における許容応力を適用し、以下の式で設定

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力} : 1.5f_t = \min(f_{to}, f_{ts})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : 1.5f_s = F/\sqrt{3}$$

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、以下となる。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

$$Sy : \text{表 8 より } 100^\circ\text{C} : 194\text{MPa}$$

$$Su : \text{表 9 より } 100^\circ\text{C} : 373\text{MPa}$$

従って、

$$F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(194, 0.7 \times 373) = 194 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{基礎ボルトの許容引張応力} : 1.5f_t = \min(f_{to}, f_{ts}) &= (145, 198) \\ &= 145 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 145.5\text{MPa} \rightarrow 145\text{MPa}$$

$$f_{ts} = 1.4 \times f_{to} - 1.6 \times \tau_b = 1.4 \times 145 - 1.6 \times 3 = 198.2\text{MPa}$$

→ 198MPa

基礎ボルトの許容せん断応力： $1.5f_s = F/\sqrt{3} = 112.0 \text{ MPa}$

→ 112 MPa

・設計震度：水平方向のみを考慮

$C_H=0.36$

(ii) 機器要目

L	m	g	h	l_1
■[mm]	■[kg]	9.80665	■[mm]	■[mm]

n_f	n	A_b	C_H	C_p
■	■	■[mm ²]	0.36	■

S_y	S_u	F
194*[MPa] (40mm<径≤100mm)	373*[MPa] (40mm<径≤100mm)	194[MPa]

* 保守的な評価となるように '40mm<径≤100mm' の値を使用。

(iii) 評価結果

	算出応力	許容応力
引張	作用しない	145[MPa]
せん断	3[MPa]	112[MPa]

※ 浮き上がりが生じないため引張応力は評価不要

b. 熱交換器ユニットの転倒評価及びアンカボルトの強度評価

後述の「3.2 2号機熱交換器ユニット(1)耐震性」において、水平方向震度 0.36G で、熱交換器ユニットは転倒しない及び熱交換器ユニットを固定しているアンカボルトの強度が確保される評価となっている。

1.3 2号機二次系ポンプ

(1) 耐震性

2号機二次系ポンプについては、2号機FSTR（フィルター・スラッジタンクルーム）建屋の屋外にハウスを設置し、ハウスにボルト等で固定することで転倒防止策を講じている。

これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されることの評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の評価である0.36Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

a. ボルトの強度評価

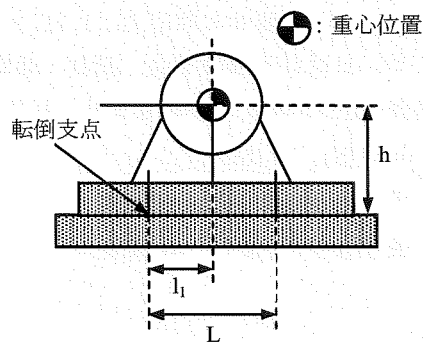
原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601-2008)の横型ポンプの強度評価方法に準拠して評価を行った。また、ボルトの許容応力については、供用状態Csにおける許容応力を適用し、ボルトの評価温度は100℃とみなして、許容応力を求めた。

評価結果を以下に示す。算出応力は全て許容応力以下となっている。

(i) 評価方法及び条件

適用基準：原子力発電所耐震設計技術規定「JEAC4601（2008）」

横形ポンプの強度評価方法に準拠して計算を行う。



- ・評価部位：基礎ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重 / ポンプ振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力 } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

$$\text{引張応力 } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

$$\text{せん断力 } Q_b = mg(C_H + C_P)$$

$$\text{せん断応力 } \tau_b = \frac{Q_b}{nA_b}$$

L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる
基礎ボルトまでの距離

m 機器の運転時質量

g 重力加速度(=9.80665)

h 据付面から重心までの距離

M_p ポンプ回転により働くモーメント

※基礎ボルトに M_p は作用しない

l₁ 重心と基礎ボルト間の水平方向距離

n_f 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数

n 基礎ボルトの本数

A_b 基礎ボルトの軸断面積

C_H 水平方向設計震度

C_V 鉛直方向設計震度 (=0)

C_P ポンプ振動による震度

・許容応力：供用状態 Cs における許容応力を適用し、以下の式で設定

基礎ボルトの許容引張応力 : $1.5f_t = \min(f_{to}, f_{ts})$

基礎ボルトの許容せん断応力 : $1.5f_s = F/\sqrt{3}$

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、以下となる。

$F = \min(Sy, 0.7Su)$

Sy : 表 8 より 100℃ : 194MPa

Su : 表 9 より 100℃ : 373MPa

従って、

$F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(194, 0.7 \times 373) = 194 \text{ MPa}$

基礎ボルトの許容引張応力 : $1.5f_t = \min(f_{to}, f_{ts}) = (145, 198)$
= 145 MPa

$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 145.5 \text{ MPa} \rightarrow 145 \text{ MPa}$

$f_{ts} = 1.4 \times f_{to} - 1.6 \times \tau_b = 1.4 \times 145 - 1.6 \times 3 = 198.2 \text{ MPa}$
 $\rightarrow 198 \text{ MPa}$

基礎ボルトの許容せん断応力 : $1.5f_s = F/\sqrt{3} = 112.0 \text{ MPa}$

→ 112 MPa

・設計震度：水平方向のみを考慮

$C_H=0.36$

(ii) 機器要目

L	m	g	h	l_1
■[mm]	■[kg]	9.80665	■[mm]	■[mm]

n_f	n	A_b	C_H	C_p
■	■	■[mm ²]	0.36	■

S_y	S_u	F
194*[MPa] (40mm<径≤100mm)	373*[MPa] (40mm<径≤100mm)	194[MPa]

* 保守的な評価となるように '40mm<径≤100mm' の値を使用。

(iii) 評価結果

	算出応力	許容応力
引張	2[MPa]	145[MPa]
せん断	3[MPa]	112[MPa]

1.4 3号機一次系ポンプ

(1) 耐震性

3号機一次系ポンプについては、熱交換器、弁等と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（以下、熱交換器ユニット）することで耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで転倒防止策を講じている。また、熱交換器ユニットについては3号機廃棄物処理建屋の床面にアンカボルトにより固定することで、転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること、熱交換器ユニットが転倒しないこと及びアンカボルトの強度が確保されることの評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震 B クラス相当の評価である 0.36G とし、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス相当の評価を行った。

a. ボルトの強度評価

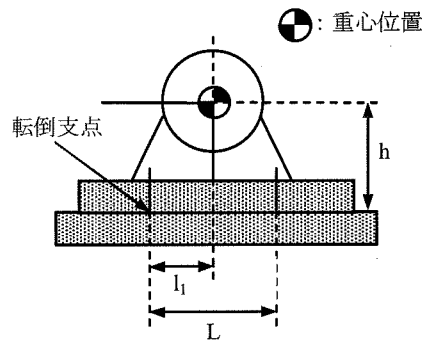
原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601-2008)の横型ポンプの強度評価方法に準拠して評価を行った。また、ボルトの許容応力については、供用状態 Cs における許容応力を適用し、ボルトの評価温度は 100℃とみなして、許容応力を求めた。

評価結果を以下に示す。算出応力は全て許容応力以下となっている。

(i) 評価方法及び条件

適用基準：原子力発電所耐震設計技術規定「JEAC4601 (2008)」

横形ポンプの強度評価方法に準拠して計算を行う。



- ・評価部位：基礎ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重 / ポンプ振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力 } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

$$\text{引張応力 } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

せん断力 $Q_b = mg(C_H + C_P)$

せん断応力 $\tau_b = \frac{Q_b}{nA_b}$

L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる
基礎ボルトまでの距離

m 機器の運転時質量

g 重力加速度(=9.80665)

h 据付面から重心までの距離

M_p ポンプ回転により働くモーメント

※基礎ボルトに M_p は作用しない

l_1 重心と基礎ボルト間の水平方向距離

n_r 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数

n 基礎ボルトの本数

A_b 基礎ボルトの軸断面積

C_H 水平方向設計震度

C_V 鉛直方向設計震度 (=0)

C_P ポンプ振動による震度

・許容応力：供用状態 Cs における許容応力を適用し、以下の式で設定

基礎ボルトの許容引張応力 : $1.5f_t = \min(f_{t_o}, f_{t_s})$

基礎ボルトの許容せん断応力 : $1.5f_s = F/\sqrt{3}$

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、以下となる。

$F = \min(Sy, 0.7Su)$

Sy : 表 8 より 100℃ : 194MPa

Su : 表 9 より 100℃ : 373MPa

従って、

$F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(194, 0.7 \times 373) = 194 \text{ MPa}$

基礎ボルトの許容引張応力 : $1.5f_t = \min(f_{t_o}, f_{t_s}) = (145, 198)$
= 145 MPa

$f_{t_o} = F/2 \times 1.5 = 145.5 \text{ MPa} \rightarrow 145 \text{ MPa}$

$f_{t_s} = 1.4 \times f_{t_o} - 1.6 \times \tau_b = 1.4 \times 145 - 1.6 \times 3 = 198.2 \text{ MPa}$
 $\rightarrow 198 \text{ MPa}$

基礎ボルトの許容せん断応力 : $1.5f_s = F/\sqrt{3} = 112.0 \text{ MPa}$

→ 112 MPa

・設計震度：水平方向のみを考慮

$$C_H=0.36$$

(ii) 機器要目

L	m	g	h	l ₁
■[mm]	■[kg]	9.80665	■[mm]	■[mm]

n _r	n	A _b	C _H	C _P
■	■	■[mm ²]	0.36	■

S _y	S _u	F
194*[MPa] (40mm<径≤100mm)	373*[MPa] (40mm<径≤100mm)	194[MPa]

* 保守的な評価となるように '40mm<径≤100mm' の値を使用。

(iii) 評価結果

	算出応力	許容応力
引張	作用しない	145[MPa]
せん断	3[MPa]	112[MPa]

※ 浮き上がりが生じないため引張応力は評価不要

b. 熱交換器ユニットの転倒評価及びアンカボルトの強度評価

後述の「3.4 3号機熱交換器ユニット(1)耐震性」において、水平方向震度 0.36G で、熱交換器ユニットは転倒しない及び熱交換器ユニットを固定しているアンカボルトの強度が確保される評価となっている。

1.5 3号機二次系ポンプ

(1) 耐震性

3号機二次系ポンプについては、3号機廃棄物処理建屋の屋外にハウスを設置し、ハウスにボルト等で固定することで転倒防止策を講じている。

これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されることの評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の評価である0.36Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

a. ボルトの強度評価

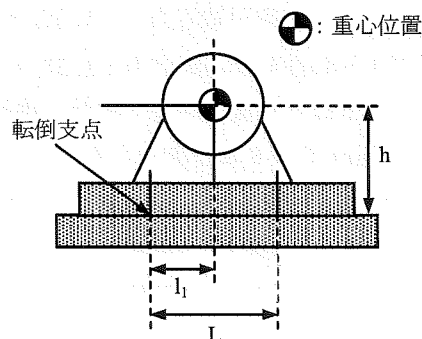
原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601-2008)の横型ポンプの強度評価方法に準拠して評価を行った。また、ボルトの許容応力については、供用状態Csにおける許容応力を適用し、ボルトの評価温度は100℃とみなして、許容応力を求めた。

評価結果を以下に示す。算出応力は全て許容応力以下となっている。

(i) 評価方法及び条件

適用基準：原子力発電所耐震設計技術規定「JEAC4601 (2008)」

横形ポンプの強度評価方法に準拠して計算を行う。



- ・評価部位：基礎ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重 / ポンプ振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力 } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

$$\text{引張応力 } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

$$\text{せん断力 } Q_b = mg(C_H + C_P)$$

$$\text{せん断応力 } \tau_b = \frac{Q_b}{nA_b}$$

L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる
基礎ボルトまでの距離

m 機器の運転時質量

g 重力加速度(=9.80665)

h 据付面から重心までの距離

M_P ポンプ回転により働くモーメント

※基礎ボルトに M_P は作用しない

l₁ 重心と基礎ボルト間の水平方向距離

n_f 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数

n 基礎ボルトの本数

A_b 基礎ボルトの軸断面積

C_H 水平方向設計震度

C_V 鉛直方向設計震度 (=0)

C_P ポンプ振動による震度

・ 許容応力：供用状態 Cs における許容応力を適用し、以下の式で設定

基礎ボルトの許容引張応力 : $1.5f_t = \min(f_{t0}, f_{ts})$

基礎ボルトの許容せん断応力 : $1.5f_s = F/\sqrt{3}$

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、以下となる。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

Sy : 表 8 より 100℃ : 194MPa

Su : 表 9 より 100℃ : 373MPa

従って、

$$F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(194, 0.7 \times 373) = 194 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{基礎ボルトの許容引張応力 : } 1.5f_t &= \min(f_{t0}, f_{ts}) = (145, 198) \\ &= 145 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$f_{t0} = F/2 \times 1.5 = 145.5 \text{ MPa} \rightarrow 145 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} f_{ts} &= 1.4 \times f_{t0} - 1.6 \times \tau_b = 1.4 \times 145 - 1.6 \times 3 = 198.2 \text{ MPa} \\ &\rightarrow 198 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{基礎ボルトの許容せん断応力 : } 1.5f_s &= F/\sqrt{3} = 112.0 \text{ MPa} \\ &\rightarrow 112 \text{ MPa} \end{aligned}$$

・設計震度：水平方向のみを考慮

$$C_H=0.36$$

(ii) 機器要目

L	m	g	h	l_1
■[mm]	■[kg]	9.80665	■[mm]	■[mm]

n_f	n	A_b	C_H	C_P
■	■	■[mm ²]	0.36	■

S_y	S_u	F
194*[MPa] (40mm<径≤100mm)	373*[MPa] (40mm<径≤100mm)	194[MPa]

* 保守的な評価となるように‘40mm<径≤100mm’の値を使用。

(iii) 評価結果

	算出応力	許容応力
引張	2[MPa]	145[MPa]
せん断	3[MPa]	112[MPa]

1.6 4号機一次系ポンプ

(1) 耐震性

4号機一次系ポンプについては、熱交換器、弁等と共に架台に組み込み、架台含めてユニット化（以下、熱交換器ユニット）することで、耐震性を向上させるとともに、ボルト等に固定することで転倒防止策を講じている。また、熱交換器ユニットについては4号機廃棄物処理建屋の床面にアンカボルトにより固定することで、転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること、熱交換器ユニットが転倒しないこと及びアンカボルトの強度が確保されることの評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震 B クラス相当の評価である 0.36G とし、耐震設計審査規定「JEAC4601 (2008)」の耐震 B クラス相当の評価を行った。

a. ボルトの強度評価

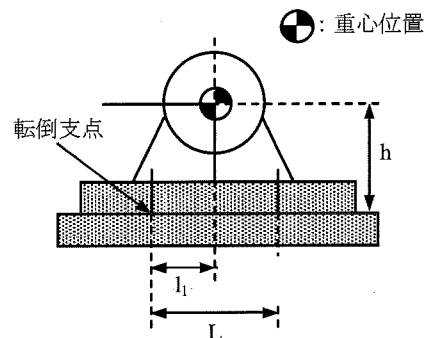
原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601-2008)の横型ポンプの強度評価方法に準拠して評価を行った。また、ボルトの許容応力については、供用状態 Cs における許容応力を適用し、ボルトの評価温度は 100℃とみなして、許容応力を求めた。

評価結果を以下に示す。算出応力は全て許容応力以下となっている。

(i) 評価方法及び条件

適用基準：原子力発電所耐震設計技術規定「JEAC4601 (2008)」

横形ポンプの強度評価方法に準拠して計算を行う。



- ・評価部位：基礎ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重 / ポンプ振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力 } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

$$\text{引張応力 } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

$$\text{せん断力 } Q_b = mg(C_H + C_P)$$

$$\text{せん断応力 } \tau_b = \frac{Q_b}{nA_b}$$

L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離

m 機器の運転時質量

g 重力加速度(=9.80665)

h 据付面から重心までの距離

M_P ポンプ回転により働くモーメント

※基礎ボルトに M_P は作用しない

l₁ 重心と基礎ボルト間の水平方向距離

n_r 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数

n 基礎ボルトの本数

A_b 基礎ボルトの軸断面積

C_H 水平方向設計震度

C_V 鉛直方向設計震度 (=0)

C_P ポンプ振動による震度

・許容応力：供用状態 Cs における許容応力を適用し、以下の式で設定

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力} : 1.5f_t = \min(f_{t0}, f_{ts})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : 1.5f_s = F/\sqrt{3}$$

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、以下となる。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

Sy : 表 8 より 100℃ : 194MPa

Su : 表 9 より 100℃ : 373MPa

従って、

$$F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(194, 0.7 \times 373) = 194 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{基礎ボルトの許容引張応力} : 1.5f_t &= \min(f_{t0}, f_{ts}) = (145, 195) \\ &= 145 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$f_{t0} = F/2 \times 1.5 = 145.5 \text{ MPa} \rightarrow 145 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} f_{ts} &= 1.4 \times f_{t0} - 1.6 \times \tau_b = 1.4 \times 145 - 1.6 \times 5 = 195 \text{ MPa} \\ &\rightarrow 195 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : 1.5f_s = F/\sqrt{3} = 112.0 \text{ MPa}$$

→ 112 MPa

・設計震度：水平方向のみを考慮

$C_H=0.36$

(ii) 機器要目

L	m	g	h	l_1
■[mm]	■[kg]	9.80665	■[mm]	■[mm]

n_f	n	A_b	C_H	C_P
■	■	■[mm ²]	0.36	■

S_y	S_u	F
194*[MPa] (40mm<径≤100mm)	373*[MPa] (40mm<径≤100mm)	194[MPa]

* 保守的な評価となるように‘40mm<径≤100mm’の値を使用。

(iii) 評価結果

	算出応力	許容応力
引張	作用しない	145[MPa]
せん断	5[MPa]	112[MPa]

※ 浮き上がりが生じないため引張応力は評価不要

b. 熱交換器ユニットの転倒評価及びアンカボルトの強度評価

後述の「3.6 4号機熱交換器ユニット(1)耐震性」において、水平方向震度 0.36G で、熱交換器ユニットは転倒しない及び熱交換器ユニットを固定しているアンカボルトの強度が確保される評価となっている。

1.7 4号機二次系ポンプ

(1) 耐震性

4号機二次系ポンプについては、サージタンクや配管、弁等と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（以下、二次系ユニット）することで耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで転倒防止策を講じている。また、二次系ユニットについては、共用プール建屋脇の屋外に設置し、敷鉄板と溶接等を行い転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること及び二次系ユニットが転倒しないことの評価を行った。なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の評価である0.36Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

a. ボルトの強度評価

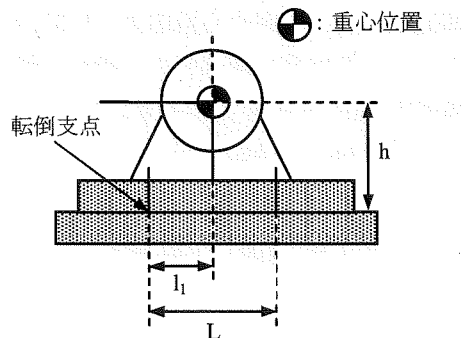
原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601-2008)の横型ポンプの強度評価方法に準拠して評価を行った。また、ボルトの許容応力については、供用状態Csにおける許容応力を適用し、ボルトの評価温度は100℃とみなして、許容応力を求めた。

評価結果を以下に示す。算出応力は全て許容応力以下となっている。

(i) 評価方法及び条件

適用基準：原子力発電所耐震設計技術規定「JEAC4601（2008）」

横形ポンプの強度評価方法に準拠して計算を行う。



- ・評価部位：基礎ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重 / ポンプ振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力 } F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H + C_P)h + M_P - mg(1 - C_V - C_P)l_1 \}$$

$$\text{引張応力 } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

せん断力 $Q_b = mg(C_H + C_P)$

せん断応力 $\tau_b = \frac{Q_b}{nA_b}$

L 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる
基礎ボルトまでの距離

m 機器の運転時質量

g 重力加速度(=9.80665)

h 据付面から重心までの距離

M_p ポンプ回転により働くモーメント

※基礎ボルトに M_p は作用しない

l_1 重心と基礎ボルト間の水平方向距離

n_f 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数

n 基礎ボルトの本数

A_b 基礎ボルトの軸断面積

C_H 水平方向設計震度

C_V 鉛直方向設計震度 (=0)

C_P ポンプ振動による震度

・許容応力：供用状態 Cs における許容応力を適用し、以下の式で設定

基礎ボルトの許容引張応力 : $1.5f_t = \min(f_{to}, f_{ts})$

基礎ボルトの許容せん断応力 : $1.5f_s = F/\sqrt{3}$

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、以下となる。

$F = \min(Sy, 0.7Su)$

Sy : 表 8 より 100℃ : 194MPa

Su : 表 9 より 100℃ : 373MPa

従って、

$F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(194, 0.7 \times 373) = 194 \text{ MPa}$

基礎ボルトの許容引張応力 : $1.5f_t = \min(f_{to}, f_{ts}) = (145, 199)$
= 145 MPa

$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 145.5 \text{ MPa} \rightarrow 145 \text{ MPa}$

$f_{ts} = 1.4 \times f_{to} - 1.6 \times \tau_b = 1.4 \times 145 - 1.6 \times 2 = 199.8 \text{ MPa}$
 $\rightarrow 199 \text{ MPa}$

基礎ボルトの許容せん断応力 : $1.5f_s = F/\sqrt{3} = 112.0 \text{ MPa}$

→ 112 MPa

・設計震度：水平方向のみを考慮

$C_H=0.36$

(ii) 機器要目

L	m	g	h	l_1
■[mm]	■[kg]	9.80665	■[mm]	■[mm]

n_f	n	A_b	C_H	C_p
■	■	■[mm ²]	0.36	■

S_y	S_u	F
194*[MPa] (40mm<径≤100mm)	373*[MPa] (40mm<径≤100mm)	194[MPa]

*保守的な評価となるように‘40mm<径≤100mm’の値を使用。

(iii) 評価結果

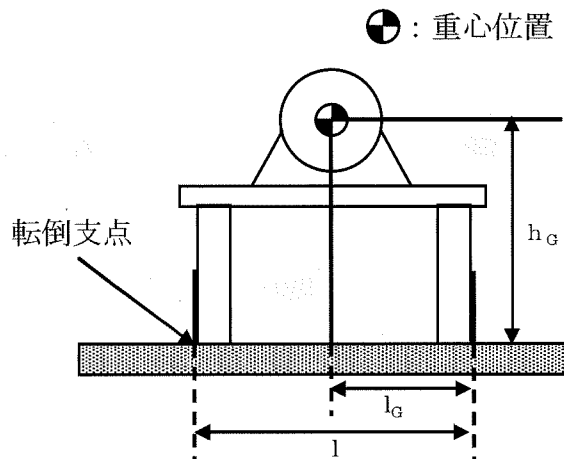
	算出応力	許容応力
引張	作用しない	145[MPa]
せん断	2[MPa]	112[MPa]

※ 浮き上がりが生じないため引張応力は評価不要

b. 二次系ユニットの転倒評価

「建築設備耐震設計・施工指針（2005 年版）」を準用し、敷鉄板との溶接を考慮しない状態で、二次系ユニットに発生する垂直力により転倒評価を行った。

発生する垂直力は以下の計算式で算出することができる。



$$R_b = \frac{F_H \cdot h_G - (W - F_V) \cdot l_G}{l \cdot n_t} \times 9.80665$$

$$= \frac{0.36 \times \blacksquare \times \blacksquare - (\blacksquare - 0) \times \blacksquare}{\blacksquare \times \blacksquare} \times 9.80665$$

$$= -1938.9[N] \rightarrow -1938[N]$$

ここに、
 F_H : 設計水平地震力 ($K_H \cdot W$) = $0.36 \cdot \blacksquare = \blacksquare$ [kg]
 K_H : 設計用水平震度 = 0.36
 W : 機器重量 = $\blacksquare$ [kg]
 h_G : 据付面より機器重心までの高さ = $\blacksquare$ [mm]
 F_V : 設計用鉛直地震力 = 0
 l_G : 検討する方向からみた評価点から機器重心までの距離 = $\blacksquare$ [mm]
 l : 検討する方向から見た評価点スパン = $\blacksquare$ [mm]
 n_t : 機器転倒を考えた場合の評価点の数 = $\blacksquare$

転倒評価結果

設備名称	機器に発生する垂直力[N]	評価
4号機二次系ユニット	-1938	転倒しない

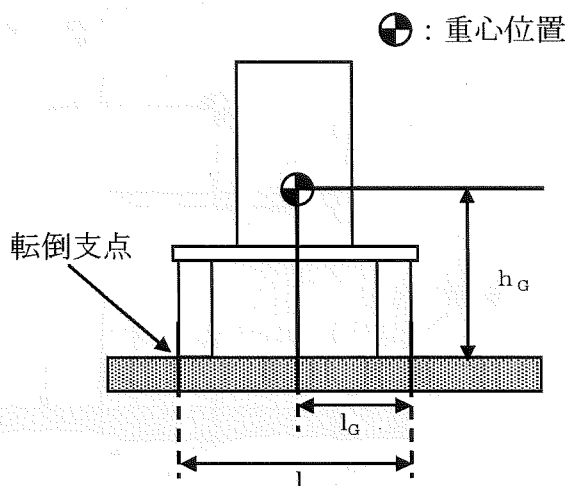
2. タンク

2.1 1号機サージタンク

(1) 耐震性

1号機サージタンクについては、二次系ポンプや配管、弁等と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（二次系ユニット）することで耐震性を向上させている。二次系ユニットは、1号機原子炉建屋脇の屋外に設置し、敷鉄板と溶接等を行い転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、二次系ユニットに発生する垂直力により転倒評価を行った。

1.1 の「b.二次系ユニットの転倒評価結果」より、二次系ユニットに発生する垂直力は圧縮の方向に働いているため、本条件における転倒は発生しないといえる。



（機器重心までの高さおよび評価点から機器重心までの距離は、1号機二次系ポンプと同様の値となる。）

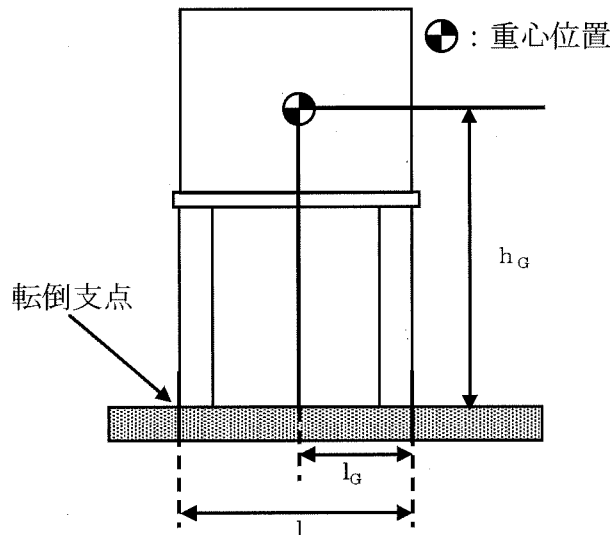
2.2 2号機サージタンク

(1) 耐震性

2号機サージタンクについては、2号機FSTR（フィルター・スラッジタンクルーム）建屋の屋外に設置し、杭またはワイヤーロープ等を用いた転倒防止策を講じているが、これら転倒防止策を考慮せず、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、サージタンクに発生する垂直力により転倒評価を行った。なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の評価である0.36Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

a. 転倒評価

機器に発生する垂直力は以下の計算式で算出することができる。



$$R_b = \frac{F_H \cdot h_G - (W - F_V) \cdot l_G}{l \cdot n_t} \times 9.80665$$

$$= \frac{\blacksquare \times \blacksquare - (\blacksquare - 0) \times \blacksquare}{\blacksquare \times \blacksquare} \times 9.80665$$

$$= 292.3[N] \rightarrow 293[N]$$

ここに、 F_H ：設計水平地震力 ($K_H \cdot W$) = $0.36 \cdot \blacksquare = \blacksquare$ [kg]

K_H ：設計用水平震度 = 0.36

W ：機器重量 = $\blacksquare$ [kg]

h_G ：据付面より機器重心までの高さ = $\blacksquare$ [mm]

F_V ：設計用鉛直地震力 = 0

l_G ：検討する方向からみた評価点から機器重心までの距離 = $\blacksquare$ [mm]

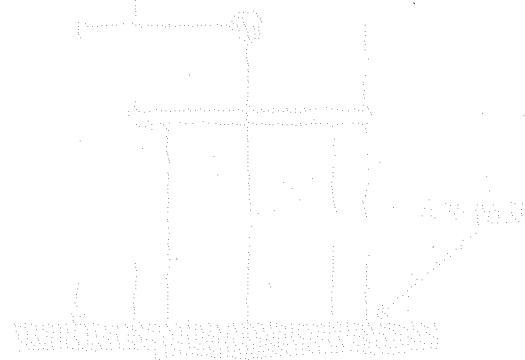
ℓ : 検討する方向から見た評価点スパン = [mm]

n_t : 機器転倒を考えた場合の評価点の数 =

転倒評価結果

設備名称	機器に発生する垂直力[N]	評価
2号機サージタンク	293	転倒する

なお、耐震 B クラス相当の評価(静的震度 0.36G)では転倒の恐れがあることから、杭またはワイヤー等を用いた転倒防止策を講じている。



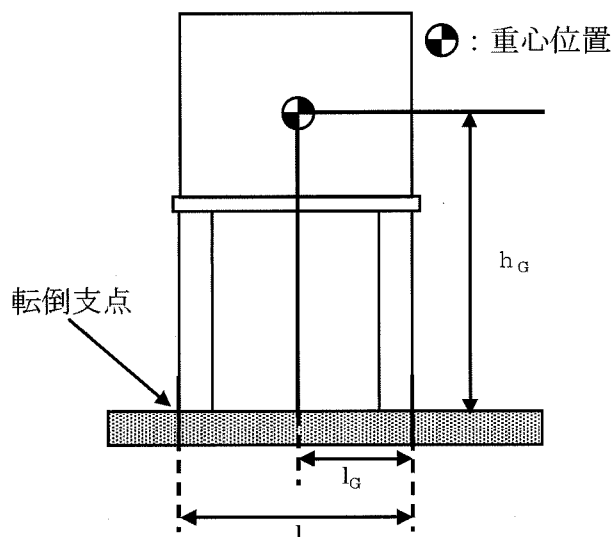
2.3 3号機サージタンク

(1) 耐震性

3号機サージタンクについては、3号機廃棄物処理建屋の屋外に設置し、杭またはワイヤーロープ等を用いた転倒防止策を講じているが、これら転倒防止策を考慮せず、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、サージタンクに発生する垂直力により転倒評価を行った。なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の評価である0.36Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

a. 転倒評価

機器に発生する垂直力は以下の計算式で算出することができる。



$$R_b = \frac{F_H \cdot h_G - (W - F_V) \cdot \ell_G}{\ell \cdot n_t} \times 9.80665$$

$$= \frac{\blacksquare \times \blacksquare - (\blacksquare - 0) \times \blacksquare}{\blacksquare \times \blacksquare} \times 9.80665$$

$$= 292.3 [N] \rightarrow 293 [N]$$

ここに、 F_H : 設計水平地震力 ($K_H \cdot W$) = $0.36 \cdot \blacksquare = \blacksquare [kg]$

K_H : 設計用水平震度 = 0.36

W : 機器重量 = $\blacksquare [kg]$

h_G : 据付面より機器重心までの高さ = $\blacksquare [mm]$

F_V : 設計用鉛直地震力 = 0

ℓ_G : 検討する方向からみた評価点から機器重心までの距離 = $\blacksquare [mm]$

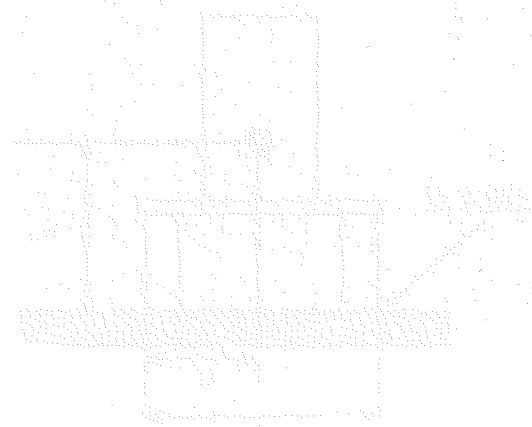
ℓ : 検討する方向から見た評価点スパン = [mm]

n_t : 機器転倒を考えた場合の評価点の数 =

転倒評価結果

設備名称	機器に発生する垂直力[N]	評価
3号機サージタンク	293	転倒する

なお、耐震 B クラス相当の評価（静的震度 0.36G）では転倒の恐れがあることから、杭またはワイヤー等を用いた転倒防止策を講じている。

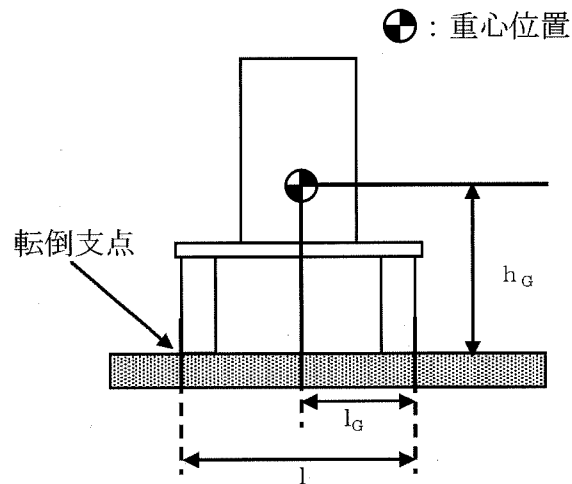


2.4 4号機サージタンク

(1) 耐震性

4号機サージタンクについては、二次系ポンプや配管、弁等と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（以下、二次系ユニット）することで耐震性を向上させている。二次系ユニットは、共用プール建屋脇の屋外に設置し、敷鉄板と溶接等を行い転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、二次系ユニットに発生する垂直力により転倒評価を行った。

1.7 の「b.二次系ユニットの転倒評価結果」より、二次系ユニットに発生する垂直力は圧縮の方向に働いているため、本条件における転倒は発生しないといえる。



(機器重心までの高さおよび評価点から機器重心までの距離は、4号機二次系ポンプと同様の値となる。)

3.熱交換器

3.1 2号機熱交換器

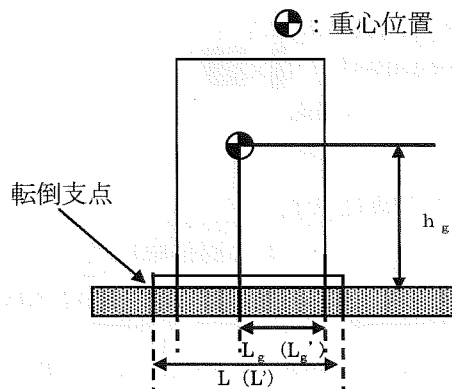
(1) 耐震性

2号機プレート式熱交換器については、一次系ポンプや配管、弁等と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（以下、熱交換器ユニット）することで耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで転倒防止策を講じている。また、熱交換器ユニットについては2号機FSTR（フィルター・）建屋の床面にアンカボルトにより固定することで、転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること、熱交換器ユニットが転倒しないこと及びアンカボルトの強度が確保されることの評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の評価である0.36Gに余裕を持たせた0.66G、耐震Bクラス相当の評価では求められていないが、メーカー基準として設定した垂直方向震度0.33Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

また、許容応力については、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」の短期許容応力度（ボルト材質SS400）を適用した。

a. ボルトの強度評価



(i) 評価条件

- ・機器質量 $W = \text{[mm]}$ [kg]
- ・重心高さ $h_g = \text{[mm]}$ [mm]
- ・重心位置（長辺） $L_g = \text{[mm]}$ [mm]
- ・重心位置（短辺） $L_g' = \text{[mm]}$ [mm]
- ・基礎ボルト片側本数 $n_t = \text{本}$
- ・基礎ボルト総本数 $n = \text{本}$
- ・基礎ボルト断面積 $A = \text{[mm}^2\text{]}$ ()
- ・ボルトスパン（長辺） $L = \text{[mm]}$

・ ボルトスパン（短辺） $L' = \blacksquare$ [mm]

・ 水平震度 $K_h = 0.66$

・ 鉛直震度 $K_v = 0.33$

(ii) 評価結果

・ 基礎ボルトにかかる長辺方向の引張応力 σ_1

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= (K_h \times W \times G \times h_g - (W - K_v \times W) \times L_g \times G) / (L \times n \times t \times A) \\ &= (0.66 \times \blacksquare \times 9.80665 \times \blacksquare - (\blacksquare - 0.33 \times \blacksquare) \times \blacksquare \times 9.80665) / \\ &\quad (\blacksquare \times \blacksquare \times \blacksquare) \\ &= 9.6 \text{ [MPa]} \rightarrow 10 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

・ 基礎ボルトにかかる短辺方向の引張応力 σ_2

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= (K_h \times W \times G \times h_g - (W - K_v \times W) \times L_g' \times G) / (L' \times n \times t \times A) \\ &= (0.66 \times \blacksquare \times 9.80665 \times \blacksquare - (\blacksquare - 0.33 \times \blacksquare) \times \blacksquare \times 9.80665) / \\ &\quad (\blacksquare \times \blacksquare \times \blacksquare) \\ &= 46.2 \text{ [MPa]} \rightarrow 47 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

・ 基礎ボルト 1 本にかかるせん断応力 τ_1

$$\begin{aligned}\tau_1 &= K_h \times W \times G / (n \times A) \\ &= 0.66 \times \blacksquare \times 9.80665 / (\blacksquare \times \blacksquare) \\ &= 11.0 \text{ [MPa]} \rightarrow 11 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

許容応力との比較を下表に示す。

応力評価結果

部位	材料	応力種類	算出応力[MPa]	許容応力[MPa]
基礎ボルト	SS400	引張	47	176
		せん断	11	101

発生する引張応力、せん断応力は、基礎ボルト許容応力を下回っており十分な強度を有している。

b. 熱交換器ユニットの転倒評価及びアンカボルトの強度評価

後述の「3.2 2号機熱交換器ユニット（1）耐震性」において、水平方向震度 0.36G で熱交換器ユニットは転倒しない及び熱交換器ユニットを固定しているアンカボルトの強度が確保される評価となっている。

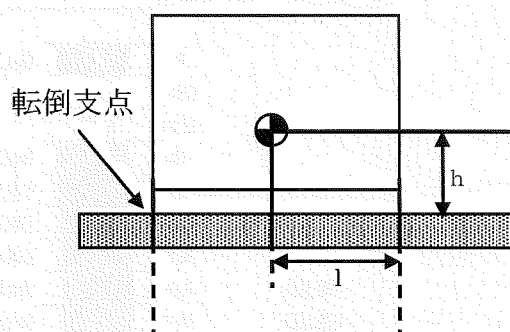
3.2 2号機熱交換器ユニット

(1) 耐震性

2号機熱交換器ユニットは、熱交換器、一次系ポンプ、配管及び弁等をトレーラ上に組み込んだものであり、トレーラ含めて重心が低い構造となっている。熱交換器ユニットは、床面での転倒及び滑り防止のため、2号機FSTR（フィルター・スラッジタンクルーム）建屋の床面にアンカボルトにより固定することで、転倒防止策を講じている。また、ユニット内に組み込まれる各機器はフレームにボルト等で強固に固定される構造とし、ユニット内における転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、熱交換器ユニットに対して、転倒に伴う引張力が発生しない水平力を算出するとともに、アンカボルトの評価を行った。

なお、アンカボルトの許容荷重はカタログ値を適用した。

●：重心位置



a. 転倒評価

熱交換器ユニット及びそれを搭載するトレーラの固定部に、転倒に伴う引張力が発生しない水平力を算出した結果、転倒しない水平力は、水平震度 0.71G の地震時であり、耐震 B クラス相当の水平方向震度 0.36G に対して余裕があることを確認した。

b. アンカボルト評価

a. 転倒評価にて算出した水平力によるアンカボルトの評価結果を以下に示す。アンカボルトに発生する荷重は、許容荷重を下回っており十分な強度を有している。

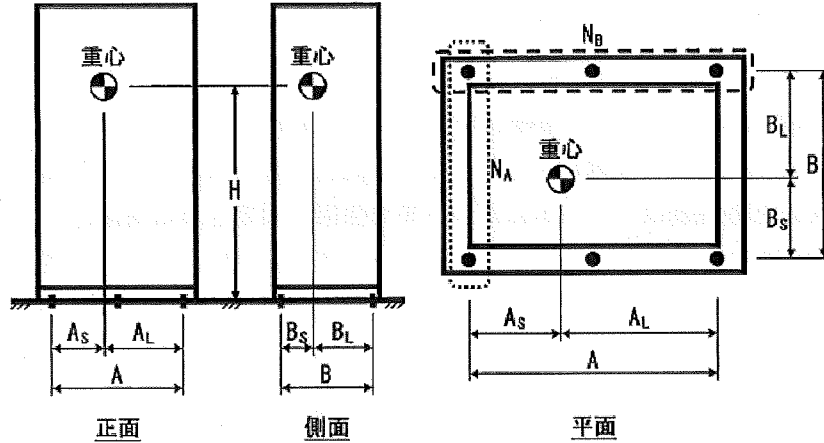
評価結果

部位	材料	荷重	算出荷重[N]	許容荷重[N]
アンカボルト	SUS304	引張	作用しない	41000
		せん断	30114	58000

※ 浮き上がりが生じないため引張荷重は評価不要

遮へい板は、熱交換器ユニットの側壁に設置しており、熱交換器ユニットの最大機器荷重に含み評価している。

< アンカボルト健全性評価 後打ちアンカ検討 >



・機器名称	アンカボルト健全性評価		
・耐震クラス	-		
・最大機器荷重	W=	0	(kg)
・鉛直設計震度	CV=	0	
・水平設計震度	CH=	0.71	
・重心位置までの高さ	H=	0	(mm)
・後打ちアンカ総数	N=	0	(本)
・引張を受ける後打ちアンカ数	N _A =	0	(本)
	N _B =	0	(本)
・重心位置までの距離	<短辺>	A _s =	0 (mm) (A _s ≤ A _L)
	<長辺>	A _L =	0 (mm)
	<短辺>	B _s =	0 (mm) (B _s ≤ B _L)
	<長辺>	B _L =	0 (mm)
・後打ちアンカスパン	<A側>	A=	0 (mm)
	<B側>	B=	0 (mm)
・後打ちアンカサイズ (ﾌﾞﾗﾝﾄ)	1F-2	(ﾏﾙｱﾝｶ)	0
・後打ちアンカ許容荷重	(長期) T0=	0	(N) (短期) 0 (N)
	T1=	0	(N) 0 (N)
	S0=	0	(N) 0 (N)

・転倒モーメント	MA=	35534250	(N・cm)	MB=	35534250	(N・cm)
・最大水平力	S=	30114	(N)			
・垂直力(引張)	TA=	-48971	(N)	TB=	-11991	(N)
・垂直力(圧縮)	PA=	120685	(N)	PB=	72837	(N)

表-3 基礎荷重表							
設計震度		地震時				最大 機器荷重 (kg)	耐震ｸﾗｽ
水平	垂直	転倒モーメント (N・cm)	最大 水平力 (N)	最大垂直力			
				引張 (N)	圧縮 (N)		
0.71	0	35534250	30114	0	120685	34600	-

後打ちアンカ検討	引張T=	0	(N)	K=	0.520
	せん断S=	30114	(N)	判定:	OK

3.3 3号機熱交換器

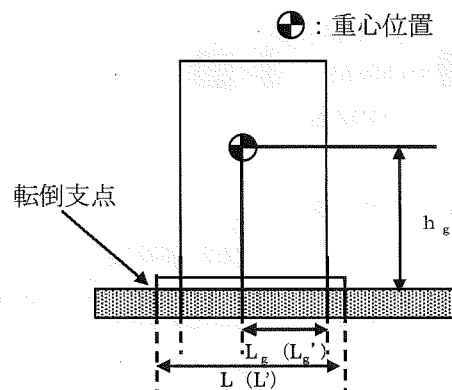
(1) 耐震性

3号機プレート式熱交換器については、一次系ポンプや配管、弁等と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（以下、熱交換器ユニット）することで耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで転倒防止策を講じている。また、熱交換器ユニットについては3号機廃棄物処理建屋の床面にアンカボルトにより固定することで、転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること、熱交換器ユニットが転倒しないこと及びアンカボルトの強度が確保されることの評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震 B クラス相当の評価である $0.36G$ に余裕を持たせた $0.66G$ 、耐震 B クラス相当の評価では求められていないが、メーカー基準として設定した垂直方向震度 $0.33G$ とし、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス相当の評価を行った。

また、許容応力については、「建築設備耐震設計・施工指針（2005 年版）」の短期許容応力度（ボルト材質 SS400）を適用した。

a. ボルトの強度評価



(i) 評価条件

- ・機器質量 $W = \text{■} [\text{kg}]$
- ・重心高さ $h_g = \text{■} [\text{mm}]$
- ・重心位置（長辺） $L_g = \text{■} [\text{mm}]$
- ・重心位置（短辺） $L_g' = \text{■} [\text{mm}]$
- ・基礎ボルト片側本数 $n_t = \text{■} \text{本}$
- ・基礎ボルト総本数 $n = \text{■} \text{本}$
- ・基礎ボルト断面積 $A = \text{■} [\text{mm}^2]$ (■)
- ・ボルトスパン（長辺） $L = \text{■} [\text{mm}]$

・ボルトスパン（短辺） $L' = \blacksquare$ [mm]

・水平震度 $K_h = 0.66$

・鉛直震度 $K_v = 0.33$

(ii) 評価結果

・基礎ボルトにかかる長辺方向の引張応力 σ_1

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= (K_h \times W \times G \times h_g - (W - K_v \times W) \times L_g \times G) / (L \times n \times t \times A) \\ &= (0.66 \times \blacksquare \times 9.80665 \times \blacksquare - (\blacksquare - 0.33 \times \blacksquare) \times \blacksquare \times 9.80665) / \\ &\quad (\blacksquare \times \blacksquare \times \blacksquare) \\ &= 9.6 \text{ [MPa]} \rightarrow 10 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

・基礎ボルトにかかる短辺方向の引張応力 σ_2

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= (K_h \times W \times G \times h_g - (W - K_v \times W) \times L_g' \times G) / (L' \times n \times t \times A) \\ &= (0.66 \times \blacksquare \times 9.80665 \times \blacksquare - (\blacksquare - 0.33 \times \blacksquare) \times \blacksquare \times 9.80665) / \\ &\quad (\blacksquare \times \blacksquare \times \blacksquare) \\ &= 46.2 \text{ [MPa]} \rightarrow 47 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

・基礎ボルト1本にかかるせん断応力 τ_1

$$\begin{aligned}\tau_1 &= K_h \times W \times G / (n \times A) \\ &= 0.66 \times \blacksquare \times 9.80665 / (\blacksquare \times \blacksquare) \\ &= 11.0 \text{ [MPa]} \rightarrow 11 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

許容応力との比較を下表に示す。

応力評価結果

部位	材料	応力種類	算出応力[MPa]	許容応力[MPa]
基礎ボルト	SS400	引張	47	176
		せん断	11	101

発生する引張応力、せん断応力は、基礎ボルト許容応力を下回っており十分な強度を有している。

b. トレーラの転倒評価及びアンカボルトの強度評価

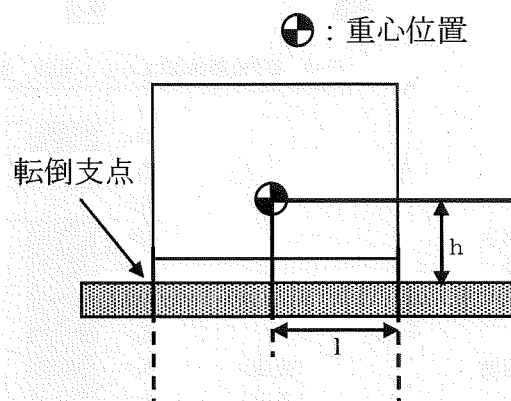
後述の「3.4 3号機熱交換器ユニット（1）耐震性」において、水平方向震度 0.36G で熱交換器ユニットは転倒しない及び熱交換器ユニットを固定しているアンカボルトの強度が確保される評価となっている。

3.4 3号機熱交換器ユニット

(1) 耐震性

3号機熱交換器ユニットは、熱交換器、一次系ポンプ、配管及び弁等をトレーラ上に組み込んだものであり、トレーラ含めて重心が低い構造となっている。熱交換器ユニットは、床面での転倒及び滑り防止のため、3号機廃棄物処理建屋の床面にアンカボルトにより固定することで、転倒防止策を講じている。また、ユニット内に組み込まれる各機器はフレームにボルト等で強固に固定される構造とし、ユニット内における転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、熱交換器ユニットに対して、転倒に伴う引張力が発生しない水平力を算出するとともに、アンカボルトの評価を行った。

なお、アンカボルトの許容荷重はカタログ値を適用した。



a. 転倒評価

熱交換器ユニット及びそれを搭載するトレーラの固定部に、転倒に伴う引張力が発生しない水平力を算出した結果、転倒しない水平力は、水平震度 1G の地震時であり、耐震 B クラス相当の水平方向震度 0.36G に対して余裕があることを確認した。

b. アンカボルト評価

a. 転倒評価にて算出した水平力によるアンカボルトの評価結果を以下に示す。アンカボルトに発生する荷重は、許容荷重を下回っており十分な強度を有している。

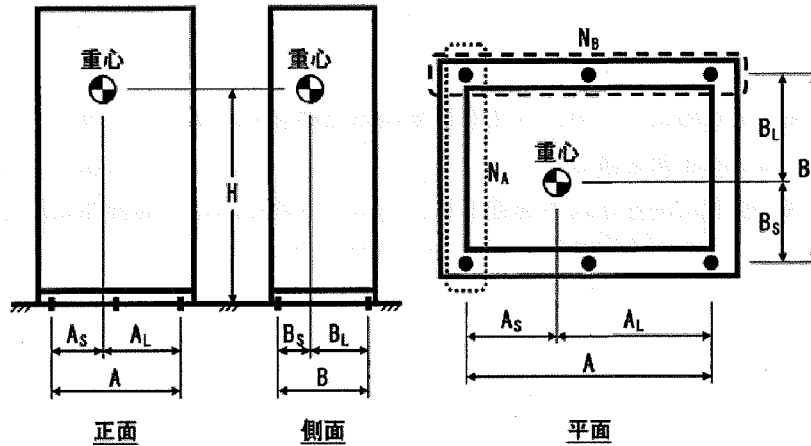
評価結果

部位	材料	荷重	算出荷重[N]	許容荷重[N]
アンカボルト	SUS304	引張	作用しない	41000
		せん断	23782	58000

※ 浮き上がりが生じないため引張荷重は評価不要

遮へい板は、熱交換器ユニットの側壁に設置しており、熱交換器ユニットの最大機器荷重に含み評価している。

< 1F-3 SFP代替冷却ユニット検討 転倒限界加速度 検討 >



1F-3 SFP代替冷却ユニット検討 転倒限界加速度	
・機器名称	-
・耐震クラス	-
・最大機器荷重	W= (kg)
・鉛直設計震度	CV= 0
・水平設計震度	CH= 1.00
・重心位置までの高さ	H= (mm)
・後打ちアンカ総数	N= (本)
・引張を受ける後打ちアンカ数	N _A = (本)
	N _B = (本)
・重心位置までの距離	<短辺> A_s= (mm) <長辺> A_L= (mm) <短辺> B_s= (mm) <長辺> B_L= (mm)
・後打ちアンカスパン	<A側> A= (mm) <B側> B= (mm)
・後打ちアンカサイズ (ブラント)	1F-3 (マルアンカ)
・後打ちアンカ許容荷重	(長期) T0= (N) (短期) (N) T1= (N) (N) S0= (N) (N)
・転倒モーメント	MA= 40180591 (N・cm) MB= 40180591 (N・cm)
・最大水平力	S= 23782 (N)
・垂直力(引張)	TA= -26699 (N) TB= -34 (N)
・垂直力(圧縮)	PA= 115989 (N) PB= 47529 (N)

表-3 基礎荷重表							
設計震度		地震時				最大 機器荷重 (kg)	耐震クラス
水平	垂直	転倒モーメント (N・cm)	最大 水平力 (N)	最大垂直力			
				引張 (N)	圧縮 (N)		
1	0	40180591	23782	0	115989	29100	-

後打ちアンカ検討	引張T=	0 (N)	K=	0.411
	せん断S=	23782 (N)	判定:	OK

3.5 4号機熱交換器

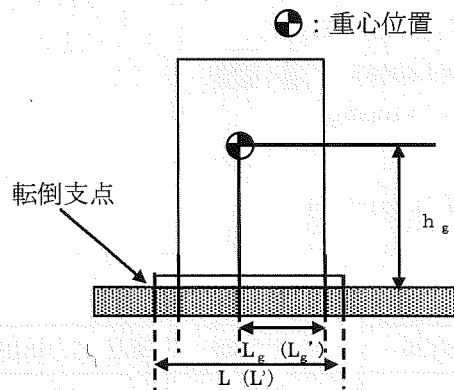
(1) 耐震性

4号機プレート式熱交換器については、一次系ポンプや配管、弁等と共に架台に組み込み、架台含めてユニット化（以下、熱交換器ユニット）することで耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで転倒防止策を講じている。また、熱交換器ユニットは4号機廃棄物処理建屋の床面にアンカボルトにより固定することで、転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること、熱交換器ユニットが転倒しないこと及びアンカボルトの強度が確保されることの評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震 B クラス相当の評価である 0.36G に余裕を持たせた 0.66G、耐震 B クラス相当の評価では求められていないが、メーカー基準として設定した垂直方向震度 0.33G とし、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス相当の評価を行った。

また、許容応力については、「建築設備耐震設計・施工指針（2005 年版）」の短期許容応力度（ボルト材質 SS400）を適用した。

a. ボルトの強度評価



(i) 評価条件

- ・機器質量 $W = \text{[kg]}$
- ・重心高さ $h_g = \text{[mm]}$
- ・重心位置（長辺） $L_g = \text{[mm]}$
- ・重心位置（短辺） $L_g' = \text{[mm]}$
- ・基礎ボルト片側本数 $n_t = \text{本}$
- ・基礎ボルト総本数 $n = \text{本}$
- ・基礎ボルト断面積 $A = \text{[mm}^2\text{]}$ ()
- ・ボルトスパン（長辺） $L = \text{[mm]}$

・ボルトスパン（短辺） $L' = \blacksquare$ [mm]

・水平震度 $K_h = 0.66$

・鉛直震度 $K_v = 0.33$

(ii) 評価結果

・基礎ボルトにかかる長辺方向の引張応力 σ_1

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= (K_h \times W \times G \times h_g - (W - K_v \times W) \times L_g \times G) / (L \times n \times t \times A) \\ &= (0.66 \times \blacksquare \times 9.80665 \times \blacksquare - (\blacksquare - 0.33 \times \blacksquare) \times \blacksquare \times 9.80665) / \\ &\quad (\blacksquare \times \blacksquare \times \blacksquare) \\ &= 13.3 \text{ [MPa]} \rightarrow 14 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

・基礎ボルトにかかる短辺方向の引張応力 σ_2

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= (K_h \times W \times G \times h_g - (W - K_v \times W) \times L_g' \times G) / (L' \times n \times t \times A) \\ &= (0.66 \times \blacksquare \times 9.80665 \times \blacksquare - (\blacksquare - 0.33 \times \blacksquare) \times \blacksquare \times 9.80665) / \\ &\quad (\blacksquare \times \blacksquare \times \blacksquare) \\ &= 54.1 \text{ [MPa]} \rightarrow 55 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

・基礎ボルト1本にかかるせん断応力 τ_1

$$\begin{aligned}\tau_1 &= K_h \times W \times G / (n \times A) \\ &= 0.66 \times \blacksquare \times 9.80665 / (\blacksquare \times \blacksquare) \\ &= 12.9 \text{ [MPa]} \rightarrow 13 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

許容応力との比較を下表に示す。

表1 応力評価結果

部位	材料	応力種類	算出応力[MPa]	許容応力[MPa]
基礎ボルト	SS400	引張	55	176
		せん断	13	101

発生する引張応力、せん断応力は、基礎ボルト許容応力を下回っており十分な強度を有している。

b. 熱交換器ユニットの転倒評価及びアンカボルトの強度評価

後述の「3.6 4号機熱交換器ユニット（1）耐震性」において、水平方向震度0.36Gで熱交換器ユニットは転倒しない及び熱交換器ユニットを固定しているアンカボルトの強度が確保される評価となっている。

3.6 4号機熱交換器ユニット

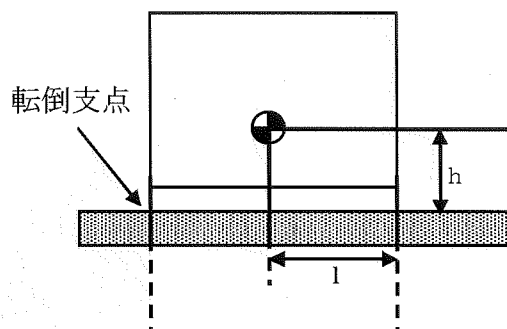
(1) 耐震性

4号機熱交換器ユニットは、熱交換器、一次系ポンプ、配管及び弁等を架台上に組み込んだものであり、架台含めて重心が低い構造となっている。熱交換器ユニットは、床面の転倒及び滑り防止のため、4号機廃棄物処理建屋の床面にアンカボルトにより固定することで、転倒防止策を講じている。また、ユニット内に組み込まれる各機器はフレームにボルト等で強固に固定される構造とし、ユニット内における転倒防止策を講じている。

これを踏まえ、耐震性の評価として地震の水平荷重による転倒モーメントよりも自重による安定モーメントが大きいことを確認するとともに、アンカボルトの評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震 B クラス相当の評価である 0.36G とし、アンカボルトの許容荷重はカタログ値を適用した。

● : 重心位置



- ・製品重量 [N]
- ・水平重心距離 $l =$ [mm]
- ・重心高さ $h =$ [mm]
- ・水平震度 0.36[G]

a. 転倒評価

計算過程を以下に示す。

$$[\text{水平荷重}] = [\text{水平震度}] \times [\text{製品重量}] = 28224[\text{N}]$$

$$[\text{転倒モーメント}] = [\text{水平荷重}] \times [\text{重心高さ}] = 31611 [\text{N} \cdot \text{m}]$$

$$[\text{安定モーメント}] = [\text{製品重量}] \times [\text{水平重心距離}] = 47040 [\text{N} \cdot \text{m}]$$

以上から、転倒モーメント < 安定モーメントであり、水平震度 0.36G に対しユニットは転倒しないことを確認した。

b. アンカボルト評価

アンカボルトの評価結果を下表に示す。水平震度 0.36G によりアンカボルトに発生する荷重は許容荷重を下回っており、十分な強度を有している。

部位	材料	荷重種類	算出荷重[N]	許容荷重[N]
アンカボルト	SS400 相当	引張	作用しない	381000
		せん断	28224	286000

※ 浮き上がりが生じないため引張応力は評価不要

4.配管

4.1 1号機配管

(1) 耐震性

二次系設備のうち、配管の耐震性についての評価結果を示す。

1. 評価条件

配管は、基本的に、配管軸直角2方向拘束サポートを用いた、両端単純支持の配管系（両端単純支持はり構造）とする。また、配管は水平方向主体のルートを想定し、管軸方向については、サポート設置フロアの水平方向震度を鉄と鉄の静止摩擦係数 0.52^{注)}よりも小さいものとし、地震により管軸方向は動かないものと仮定する。

水平方向震度は、耐震Bクラス相当の評価である 0.36G とする。

2. 評価方法

水平方向震度が静止摩擦係数よりも小さく、地震により管軸方向は動かないと考えられることから、水平方向震度による管軸直角方向の配管応力評価を考える。

管軸直角方向の地震による応力は、下図に示す自重による応力の震度倍で表現でき(4.2)式で表すことができる。

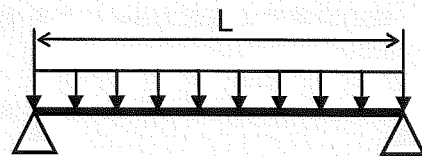
$$\bullet S_w = \frac{wL^2}{8Z}$$

S_w : 自重による応力[MPa]

L : サポート支持間隔[mm]

Z : 断面係数[mm³]

w : 等分布荷重[N/mm]



両端単純支持はりの等分布荷重より求まる自重による応力

$$\bullet S_s = \alpha S_w$$

(4.2)

S_w : 自重による応力[MPa]

S_s : 地震による応力[MPa]

α : 水平方向震度

注) 日本機械学会編 機械工学便覧 α . 基礎編 表 4-1, α 2-27

また、崩壊制限に「JEAG4601 (1984 年版)」のクラス2 配管の供用状態 D_s の場合の一次応力制限を用いるとすると、地震評価としては(4.3)式で表すことができる。

$$\bullet S=Sp+Sw+Ss=Sp+Sw+\alpha Sw=Sp+(1+\alpha)Sw \leq 0.9Su \quad (4.3)$$

Sp:内圧による応力[MPa]

Sw:自重による応力[MPa]

Ss:地震による応力[MPa]

S:内圧、自重、地震による応力[MPa]

α :水平方向震度

従って、上記(4.3)式を満足するように、配管サポート配置を設定することにより、配管は十分な強度を有していると考えることができる。

3. 評価結果

両端単純支持はりで自重による応力 $Sw=40$ [MPa]の配管サポート配置を仮定する。

配管設置フロアの水平方向震度を前述の 0.36、内圧による応力 $Sp=10$ [MPa]、自重による応力 $Sw=40$ [MPa]、許容応力を STPT370[100℃]の $0.9Su=315$ [MPa]とし、(4.3)に代入すると以下となる。

$$\bullet S=Sp+(1+\alpha)Sw = 10+(1+0.36) \times 40= 64.4\text{[MPa]} \leq 0.9Su = 315\text{[MPa]} \quad (4.4)$$

また、継手がある場合には、応力係数も存在する。例えば応力係数を 3 とし、(4.4)式の自重による応力 Sw に 3 を乗じ、 $Sw=120$ [MPa]とすると以下となる。

$$\bullet S=Sp+(1+\alpha)Sw \times 3= 10+(1+0.36) \times 120= 173.2\text{[MPa]} \leq 0.9Su = 315\text{[MPa]} \quad (4.5)$$

以上のことから、両端単純支持はりで自重による応力 Sw を 40[MPa]程度の配管サポート配置とした場合、発生応力は許容応力に対して十分な裕度を有する結果となった。

なお、1号機代表配管に対するサポート支持間隔等の値を以下に示す。

(サポート支持間隔が最も長くなる配管を選定)

口径	材質	サポート 支持間隔 (mm)	断面係数 (mm ³)	配管自重 (N/mm)	配管自重による応力 (MPa)
50A/Sch80	STPT370	■	■	■	■

4.2 2号機配管

(1) 耐震性

一次系設備のうち、既設取合～熱交換器ユニット間の配管についての耐震性の評価結果を示す。

1. 解析条件

・解析モデル：

既設 FG69A～熱交換器ユニット：KFPC-901

熱交換器ユニット～既設 FE52A：KFPC-902

・水平地震力：耐震 B クラス相当の評価である 0.36G

・鉛直地震力：耐震 B クラス相当の評価では求められていないが、鉛直方向における地震加速度大トリップ設定値である 100Gal の担保として 0.10G

・配管仕様：解析に用いた配管仕様を以下に示す。

配管仕様	
呼び径／厚さ	100A／Sch. 40
	150A／Sch. 40
	200A／Sch. 40
材質	STPG370
最高使用圧力	1.0MPa
最高使用温度	100℃

2. 評価結果

以下に配管の応力評価結果を示す。

応力評価結果

	一次応力[MPa]	許容応力[MPa]
既設 FG69A ～熱交換器ユニット	77	189
熱交換器ユニット ～既設 FE52A	46	189

解 析 結 果 及 び 評 価

固 有 周 期 及 び 設 計 震 度

鳥 瞰 図

KFPC-901

耐震クラス		B		
適用する地震動等		S _B 及び静的震度		
モード	固有周期 (s)	応 答 水 平 震 度		鉛直震度
		X 方 向	Z 方 向	Y 方 向
1 次	0.134	0.00	0.00	——
2 次	0.109	0.00	0.00	——
3 次	0.104	0.00	0.00	——
4 次	0.097	0.00	0.00	——
5 次	0.093	0.00	0.00	——
6 次	0.089	0.00	0.00	——
7 次	0.087	0.00	0.00	——
8 次	0.086	0.00	0.00	——
15 次	0.051	0.00	0.00	——
16 次	0.047	——	——	——
動 的 震 度		0.36	0.36	0.10
静 的 震 度		——	——	——

各モードに対応する刺激係数

鳥瞰図 KFPC-901

モード	固有周期 (s)	刺激係数		
		X 方向	Y 方向	Z 方向
1 次	0.134	0.177	0.018	0.127
2 次	0.109	0.308	0.001	0.083
3 次	0.104	0.007	0.007	0.102
4 次	0.097	0.303	0.036	0.076
5 次	0.093	0.012	0.251	0.020
6 次	0.089	0.059	0.016	0.241
7 次	0.087	0.440	0.005	0.026
8 次	0.086	0.048	0.068	0.214
15 次	0.051	0.067	0.084	0.068

結 論

下表に示すごとく最大応力はすべて許容応力以下である。

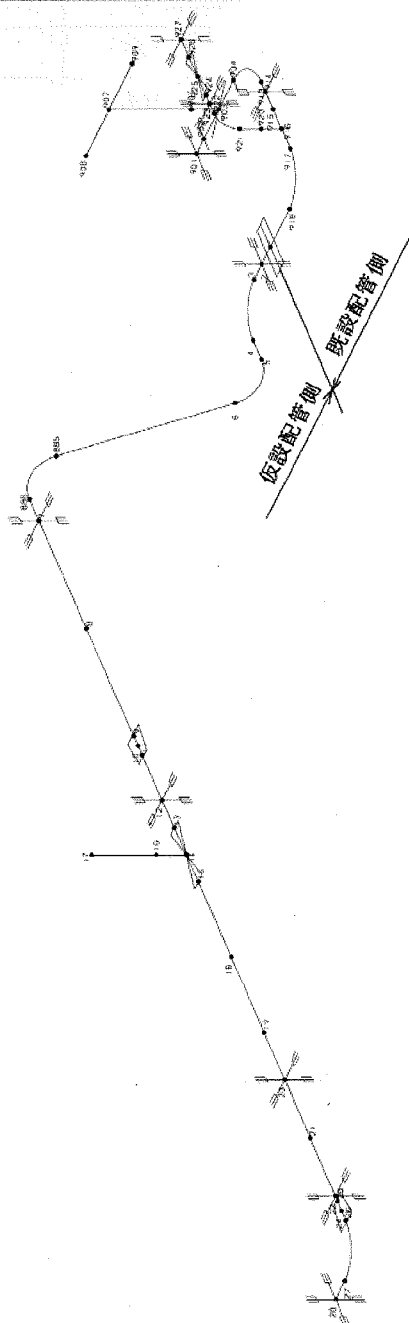
クラス 2 管

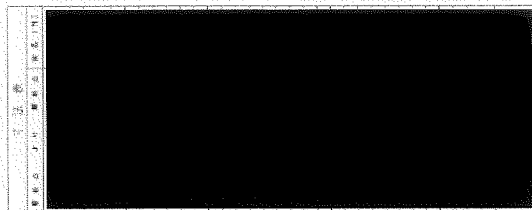
鳥 瞰 図	供 用 状 態	最大応力 評価点	最大応力 区 分	一 次 応 力 評 価 (MPa)		一 次 + 二 次 応 力 評 価 (MPa)		疲労評価 疲れ累積係数
				計算応力 ①+② ①+②+③	許容応力 $1.5 \cdot S_h$ $1.8 \cdot S_h$ S_y^* $0.9 \cdot S_u$	計算応力 ①+②+④ ①+②+③+④ $S_s (S_1)$ $S_s (S_2)$	許容応力 $S_a (c)$ $S_a (d)$ $2 \cdot S_y$ $2 \cdot S_y$	
KFPC-901	(A, B)	811	①+②	61	139	33	232	—
	(A, B)	101	①+②+④	29	139	115	232	—
	(A, B)	811	①+②+③	61	167	34	251	—
	(A, B)	101	①+②+③+④	30	167	116	251	—
	C (Ⅲ _A S)	101	①+②+③	77	189	74	378	—
	C (Ⅲ _A S)	114	$S_s (S_1)$	73	189	74	378	—
	D (Ⅳ _A S)	—	①+②+③	—	—	—	—	—
	D (Ⅳ _A S)	—	$S_s (S_2)$	—	—	—	—	—

注記*: オーステナイト系ステンレス鋼 及び 高ニッケル合金については S_y と $1.2 \cdot S_h$ のうち大きい方の値とする。

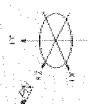
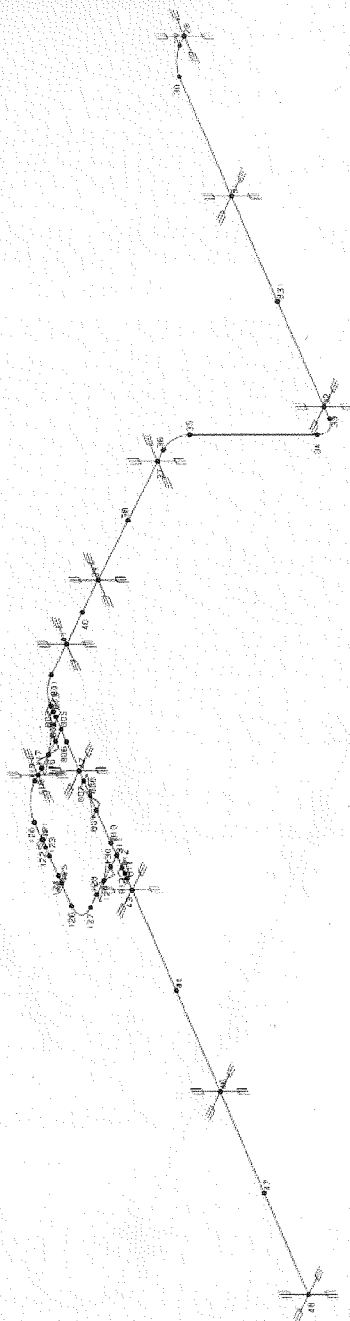
注: ①は内圧応力(S P (S P m))②は自重応力(S M a)③は地震応力(他の短期的機械荷重による応力を含む)(S M b)

④は二次応力(S M c)を示す。

47

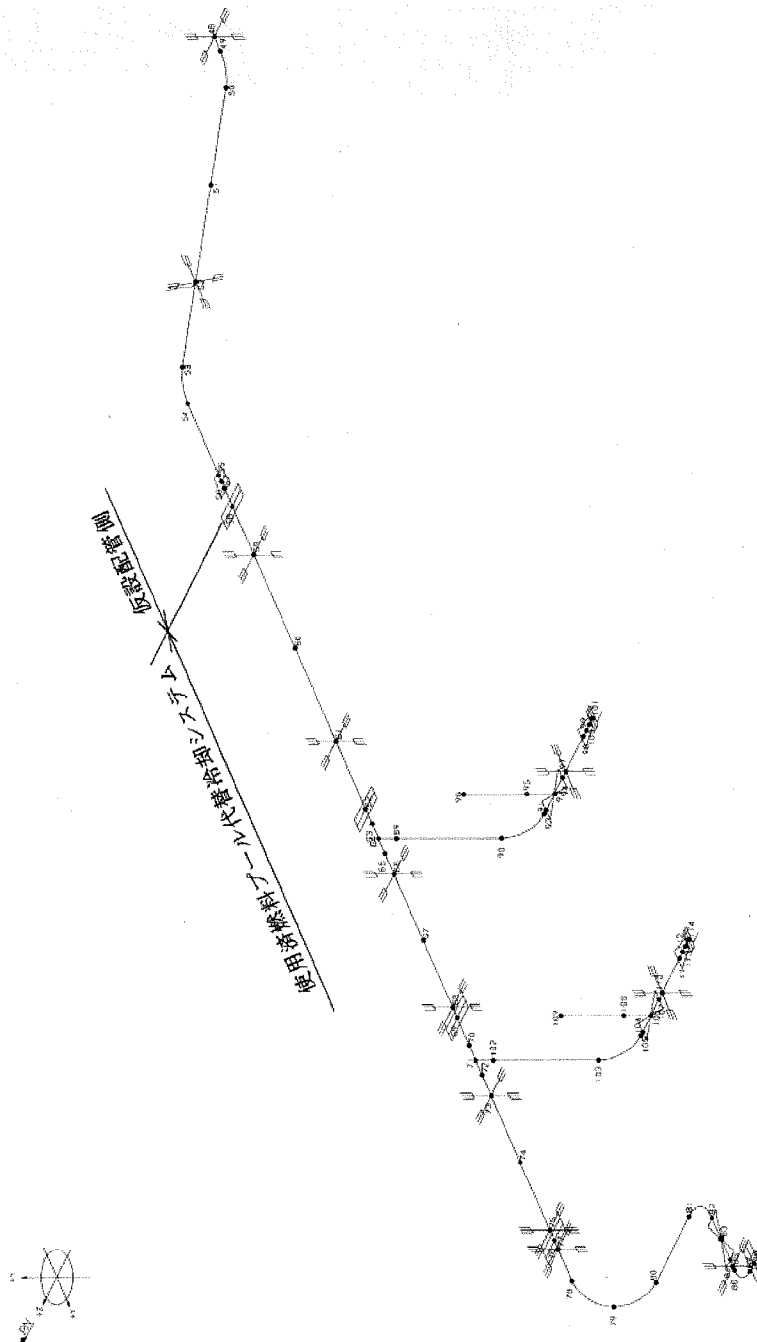


152 KPC-901
 25 4 273



資料名	丁 法 表
図 号	側 面 図 (1/3)

図 号	IF-2 KFC-501
部 分 図	3/3



解析結果及び評価

固有周期及び設計震度

鳥瞰図 KFPC-902

耐震クラス		B		
適用する地震動等		S _B 及び静的震度		
モード	固有周期 (s)	応答水平震度		鉛直震度
		X方向	Z方向	Y方向
1次	0.089	0.00	0.00	—
2次	0.087	0.00	0.00	—
3次	0.072	0.00	0.00	—
4次	0.067	0.00	0.00	—
5次	0.061	0.00	0.00	—
6次	0.058	0.00	0.00	—
7次	0.057	0.00	0.00	—
8次	0.055	0.00	0.00	—
11次	0.051	0.00	0.00	—
12次	0.048	—	—	—
動的震度		0.36	0.36	0.10
静的震度		—	—	—

各モードに対応する刺激係数

鳥 瞰 図 KFPC-902

モード	固有周期 (s)	刺激係数		
		X 方向	Y 方向	Z 方向
1 次	0.089	0.287	0.001	0.002
2 次	0.087	0.124	0.003	0.078
3 次	0.072	0.010	0.002	0.156
4 次	0.067	0.095	0.003	0.089
5 次	0.061	0.072	0.032	0.128
6 次	0.058	0.014	0.067	0.020
7 次	0.057	0.054	0.002	0.033
8 次	0.055	0.353	0.005	0.007
11 次	0.051	0.034	0.050	0.009

結 論

下表に示すごとく最大応力はすべて許容応力以下である。

ク ラ ス 2 管

鳥 瞰 図	供 用 状 態	最大応力 評価点	最大応力 区 分	一 次 応 力 評 価 (MPa)		一 次 + 二 次 応 力 評 価 (MPa)		疲労評価 疲れ累積係数
				計算応力 ①+② ①+②+③	許容応力 $1.5 \cdot S_h$ $1.8 \cdot S_h$ S_y^* $0.9 \cdot S_u$	計算応力 ①+②+④ ①+②+③+④ $S_s(S_1)$ $S_s(S_2)$	許容応力 $S_a(c)$ $S_a(d)$ $2 \cdot S_y$ $2 \cdot S_y$	
KFPC-902	(A, B)	2	①+②	25	139	20	232	—
	(A, B)	104	①+②+④	23	139	107	232	—
	(A, B)	2	①+②+③	25	167	20	251	—
	(A, B)	104	①+②+③+④	24	167	108	251	—
	C (Ⅲ _A S)	104	①+②+③	46	189	30	378	—
	C (Ⅲ _A S)	114	$S_s(S_1)$	44	189	30	378	—
	D (Ⅳ _A S)	—	①+②+③	—	—	—	—	—
	D (Ⅳ _A S)	—	$S_s(S_2)$	—	—	—	—	—

注記*: オーステナイト系ステンレス鋼 及び 高ニッケル合金については S_y と $1.2 \cdot S_h$ のうち大きい方の値とする。

注: ①は内圧応力(S P (S P m)) ②は自重応力(S M a) ③は地震応力(他の短期的機械荷重による応力を含む)(S M b)
④は二次応力(S M c)を示す。

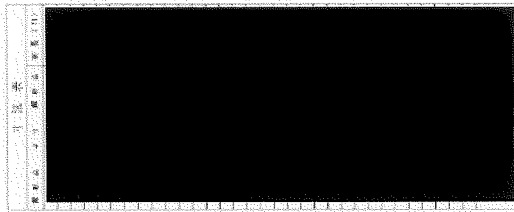
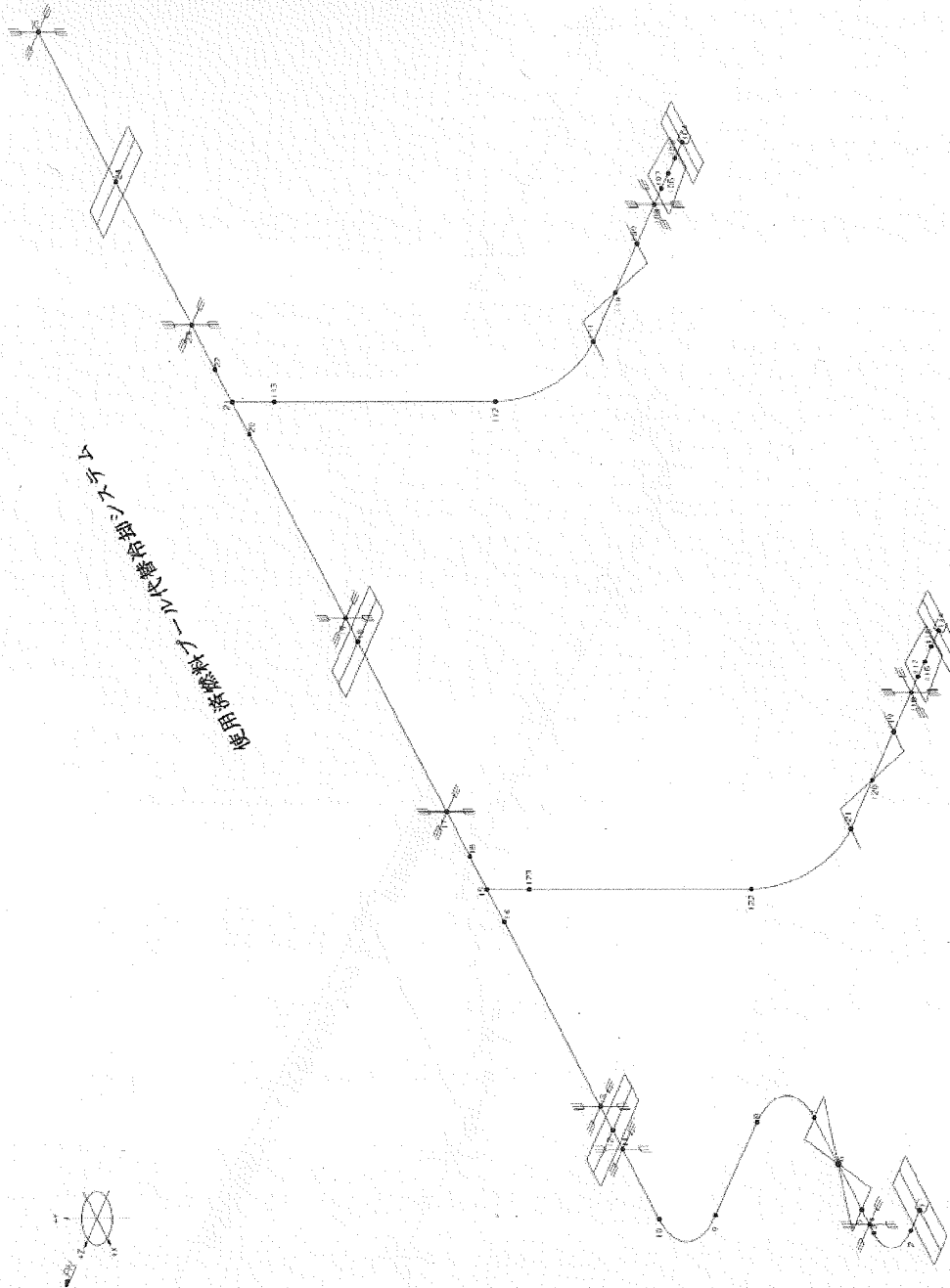
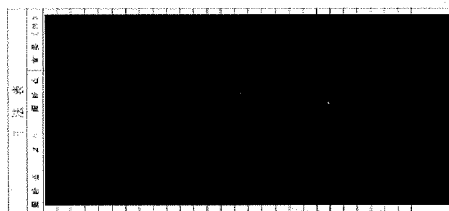


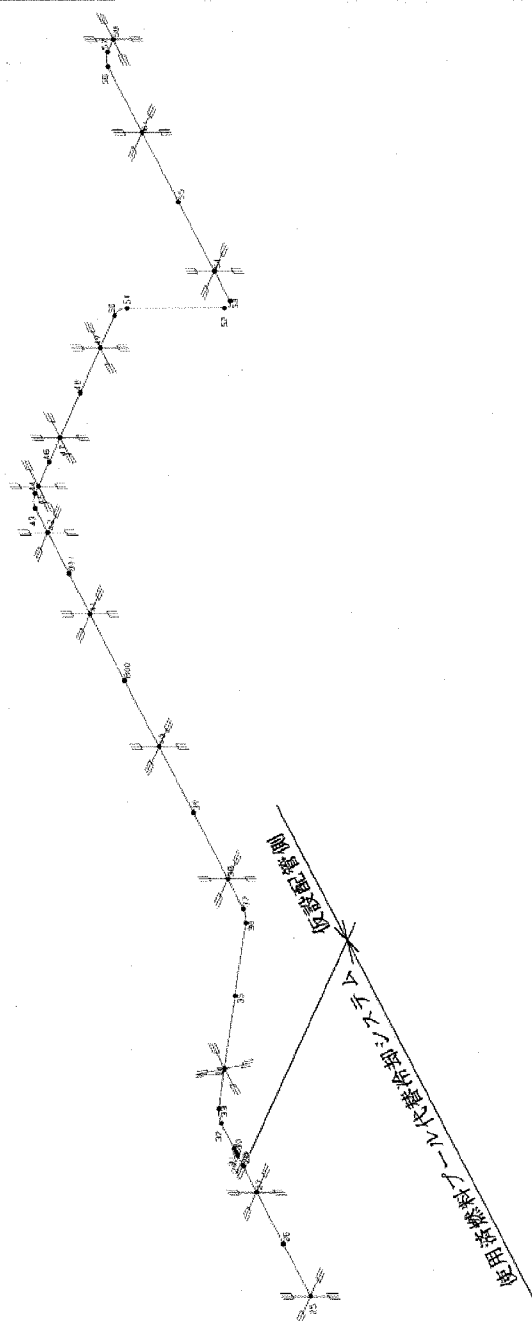
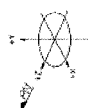
図 13 図
 IF-2 KIPC-902
 冊 分 図 1/23

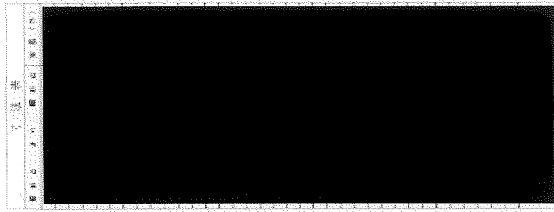
使用済燃料プールの冷却回路





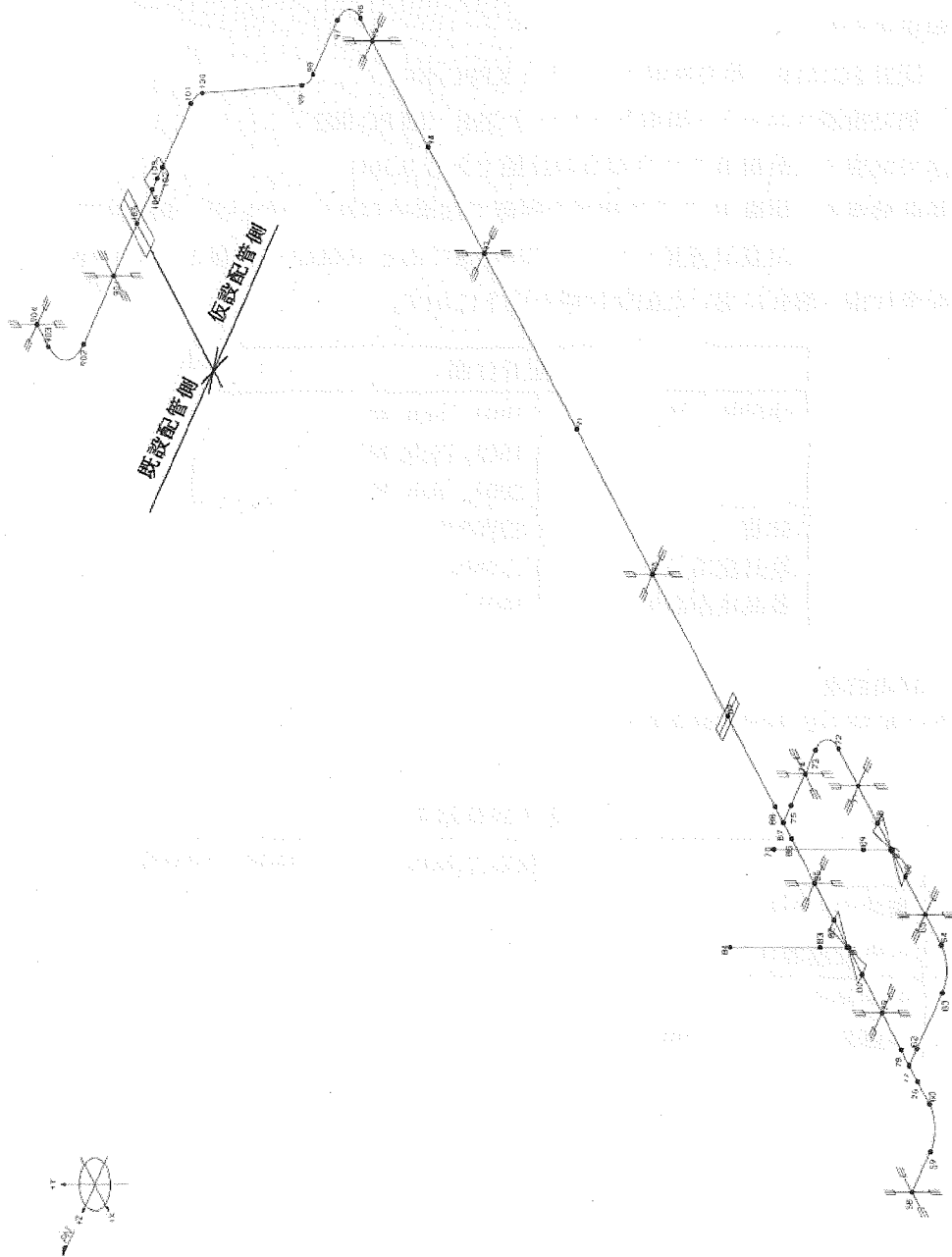
送付区	区
工区	KFC-902
部令	273





1. 設計者
 2. 監理者
 3. 承認者
 4. 図面番号

1. 設計者
 2. 監理者
 3. 承認者
 4. 図面番号



4.3 3号機配管

(1) 耐震性

一次系設備のうち、既設取合～熱交換器ユニット間の配管についての耐震性の評価結果を示す。

1. 解析条件

・解析モデル：

既設 FG101B～熱交換器ユニット：KFPC-901

熱交換器ユニット～既設ストレーナ 29B：KFPC-902

- ・水平地震力：耐震 B クラス相当の評価である 0.36G
- ・鉛直地震力：耐震 B クラス相当の評価では求められていないが、鉛直方向における地震加速度大トリップ設定値である 100Gal の担保として 0.10G
- ・配管仕様：解析に用いた配管仕様を以下に示す。

配管仕様	
呼び径／厚さ	100A／Sch. 40 150A／Sch. 40 200A／Sch. 40
材質	STPG370
最高使用圧力	1.0MPa
最高使用温度	100℃

2. 評価結果

以下に配管の応力評価結果を示す。

応力評価結果

	一次応力[MPa]	許容応力[MPa]
既設 FG101B ～熱交換器ユニット	83	173
熱交換器ユニット ～既設ストレーナ 29B	53	173

解析結果及び評価

固有周期及び設計震度

鳥 瞰 図 KFPC-901

耐震クラス		B		
適用する地震動等		S _B 及び 静 的 震 度		
モード	固有周期 (s)	応 答 水 平 震 度		鉛 直 震 度
		X 方 向	Z 方 向	Y 方 向
1 次	0.146	0.00	0.00	0.00
2 次	0.132	0.00	0.00	0.00
3 次	0.119	0.00	0.00	0.00
4 次	0.107	0.00	0.00	0.00
5 次	0.102	0.00	0.00	0.00
6 次	0.100	0.00	0.00	0.00
7 次	0.074	0.00	0.00	0.00
8 次	0.070	0.00	0.00	0.00
17 次	0.050	0.00	0.00	0.00
18 次	0.049	—	—	—
動的震度		0.00	0.00	—
静的震度		0.36	0.36	0.10

結 論

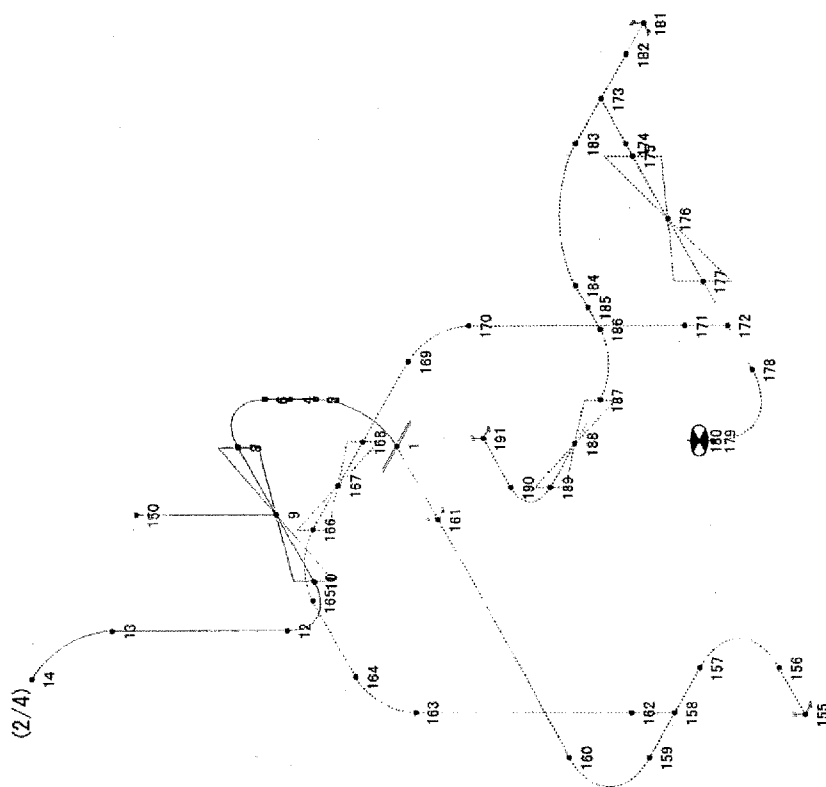
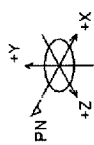
下表に示すごとく最大応力はすべて許容応力以下である。

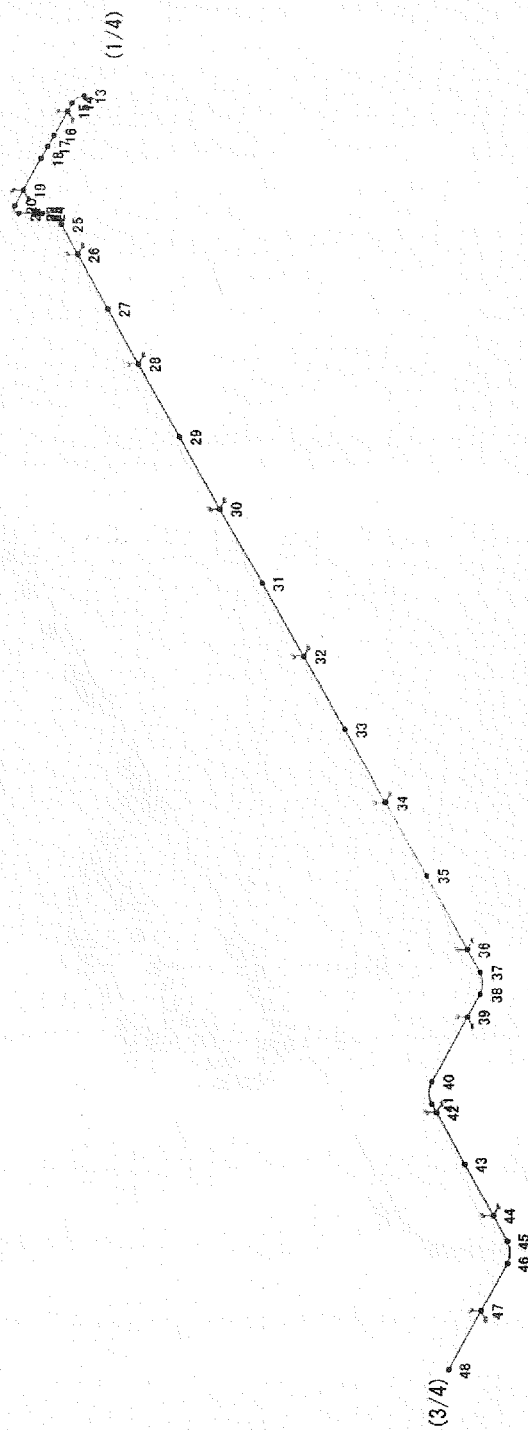
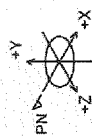
クラス 3 配管

鳥 瞰 図	供 用 状 態	最大応力 評価点	最大応力 区分	一 次 応 力 評 価 (MPa)		一 次 + 二 次 応 力 評 価 (MPa)	
				計 算 応 力 ①+② ①-②+③	許 容 応 力 1.5・S _h 1.8・S _h S _y *	計 算 応 力 ①+②+④ ①-②+③+④ S _s (S _t)	許 容 応 力 S _a (c) S _a (d) 2・S _y
KFPC-901	(A, B)	121	①+②	39	139	84	232
	(A, B)	23	①+②+④	11	139	124	232
	(A, B)	121	①+②+③	39	167	85	251
	(A, B)	23	①+②+③+④	12	167	125	251
	C (B・S)	121	①+②+③	83	173	85	346
	C (B・S)	133	S _s (S _a)	73	173	94	346

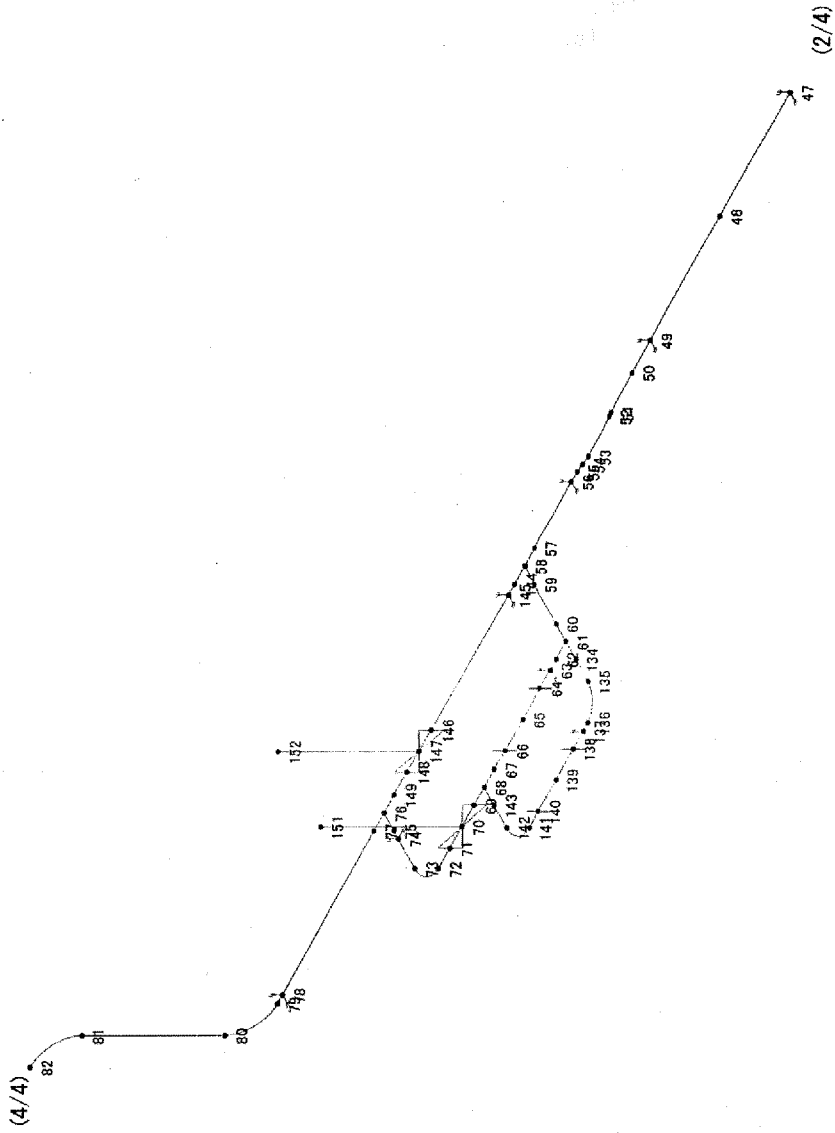
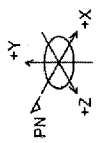
注記 * : オーステナイト系ステンレス鋼 及び 高ニッケル合金については S_y と 1.2・S_h のうち大きいほうの値とする。

注 : ①は内圧応力(S_{Pm}) ②は自重応力(S_{Ma}) ③は地震応力(他の短期的機械的荷重による応力を含む)(S_{Mb})を示す。

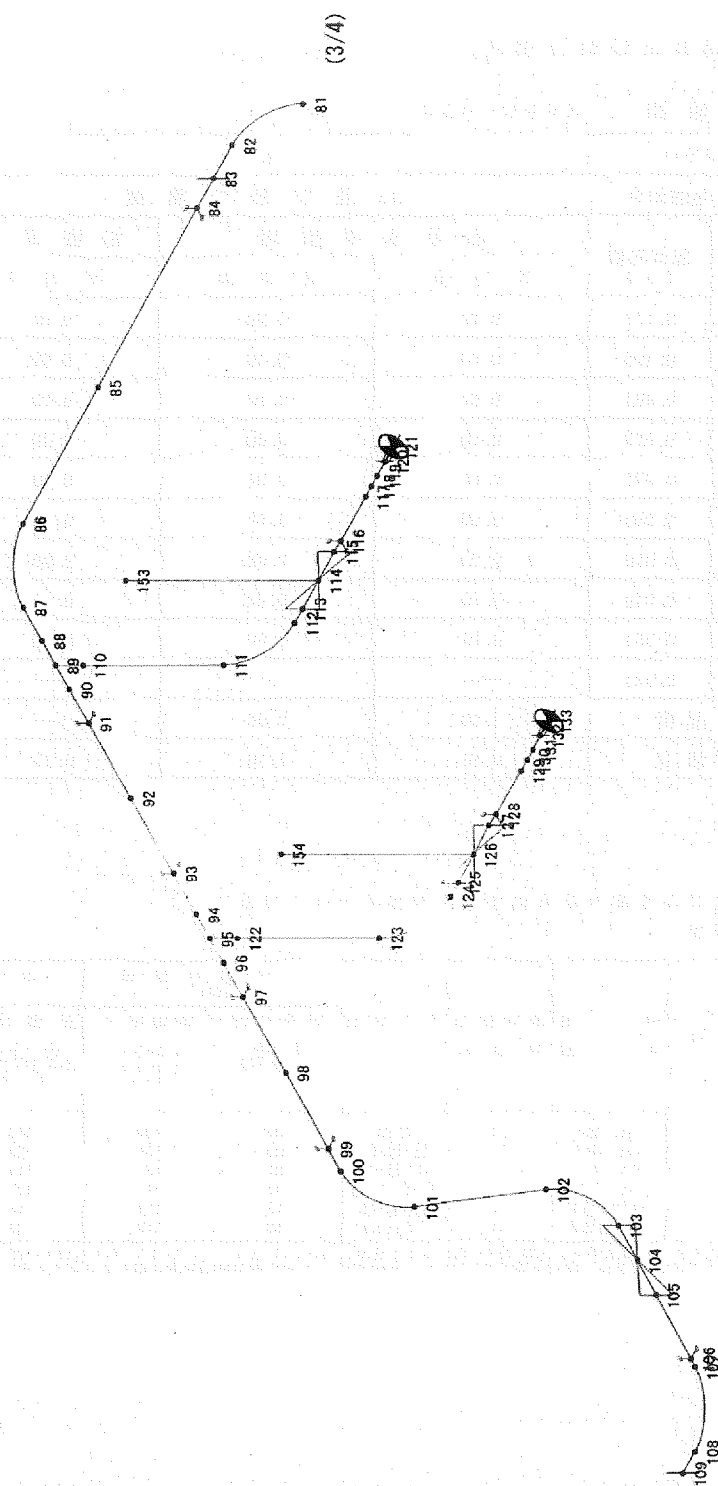




鳥瞰図 KFC-901 (2/4)



鳥瞰図 KFPC-901 (3/4)



鳥瞰図 KFPC-901 (4/4)

解析結果及び評価

固有周期及び設計震度

鳥 瞰 図 K F P C - 9 0 2

耐震クラス		B		
適用する地震動等		S _B 及び 静的 震 度		
モード	固有周期 (s)	応 答 水 平 震 度		鉛 直 震 度
		X 方 向	Z 方 向	Y 方 向
1 次	0.137	0.00	0.00	0.00
2 次	0.105	0.00	0.00	0.00
3 次	0.081	0.00	0.00	0.00
4 次	0.077	0.00	0.00	0.00
5 次	0.072	0.00	0.00	0.00
6 次	0.062	0.00	0.00	0.00
7 次	0.056	0.00	0.00	0.00
8 次	0.054	0.00	0.00	0.00
9 次	0.051	0.00	0.00	0.00
10 次	0.045	—	—	—
動的震度		0.00	0.00	—
静的震度		0.36	0.36	0.10

結 論

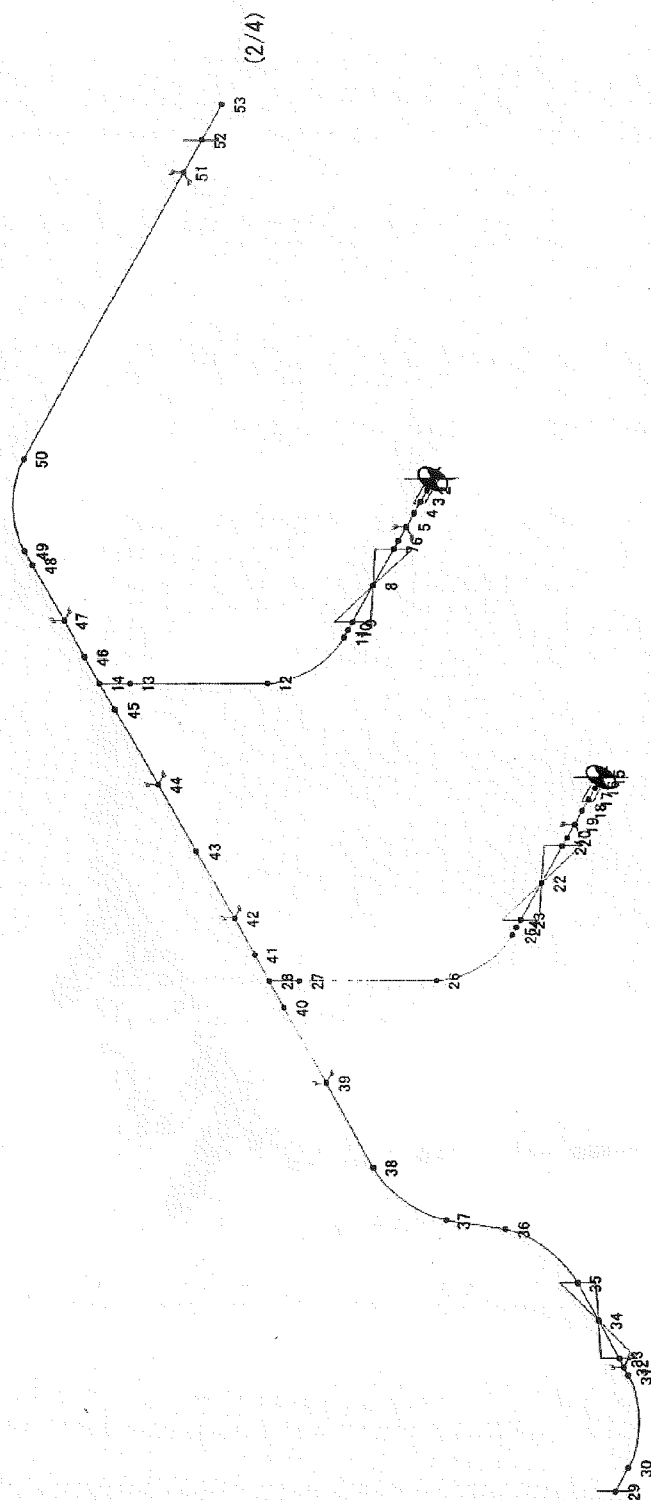
下表に示すごとく最大応力はすべて許容応力以下である。

クラス 3 配管

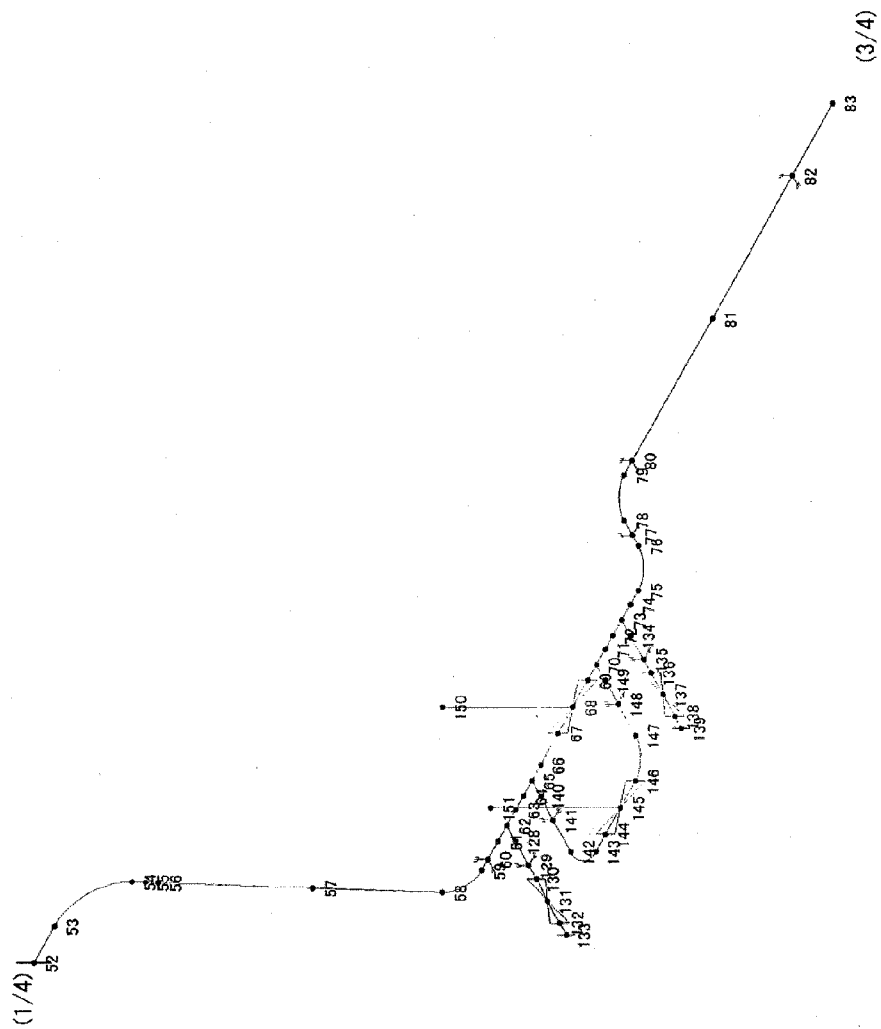
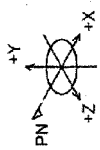
鳥 瞰 図	供 用 状 態	最大応力 評 価 点	最大応力 区 分	一 次 応 力 評 価 (MPa)		一 次 + 二 次 応 力 評 価 (MPa)	
				計 算 応 力 ①+② ①+②+③	許 容 応 力 1.5・S _h 1.8・S _h S _y *	計 算 応 力 ①+②+④ ①+②+③+④ S _s (S _a)	許 容 応 力 S _a (c) S _a (d) 2・S _y
K F P C - 9 0 2	(A, B)	1	①+②	30	139	115	232
	(A, B)	15	①+②+④	29	139	126	232
	(A, B)	1	①+②+③	31	167	116	251
	(A, B)	15	①+②+③+④	30	167	127	251
	C (Ba S)	1	①+②+③	53	173	48	346
	C (Ba S)	1	S _s (S _b)	53	173	48	346

注記 * : オーステナイト系ステンレス鋼 及び 高ニッケル合金については S_y と 1.2・S_h のうち大きいほうの値とする。

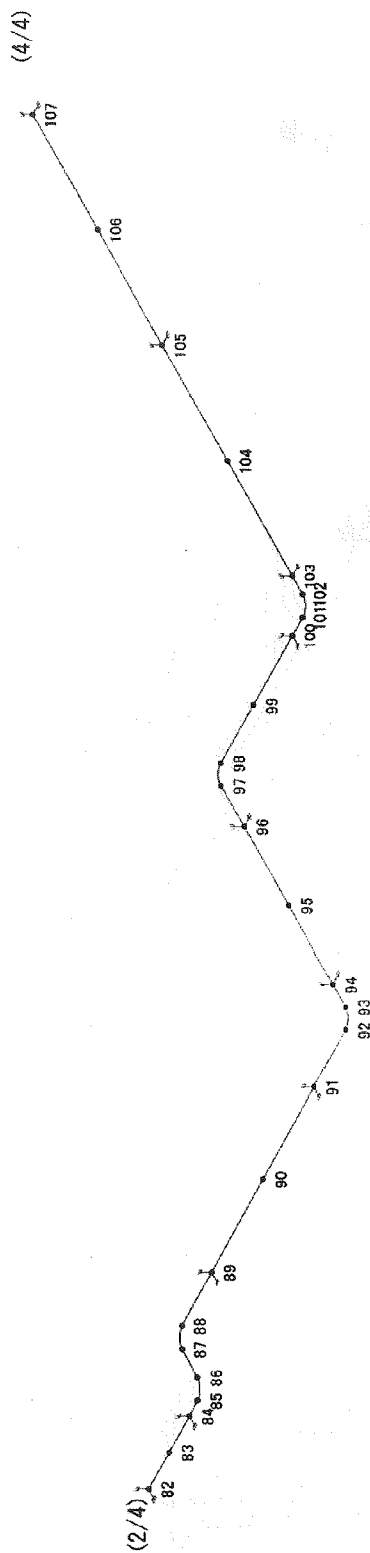
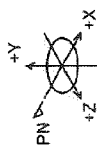
注 : ①は内圧応力 (S_{Pm}) ②は自重応力 (S_{Ma}) ③は地震応力 (他の短期的機械的荷重による応力を含む) (S_{Mb}) を示す。



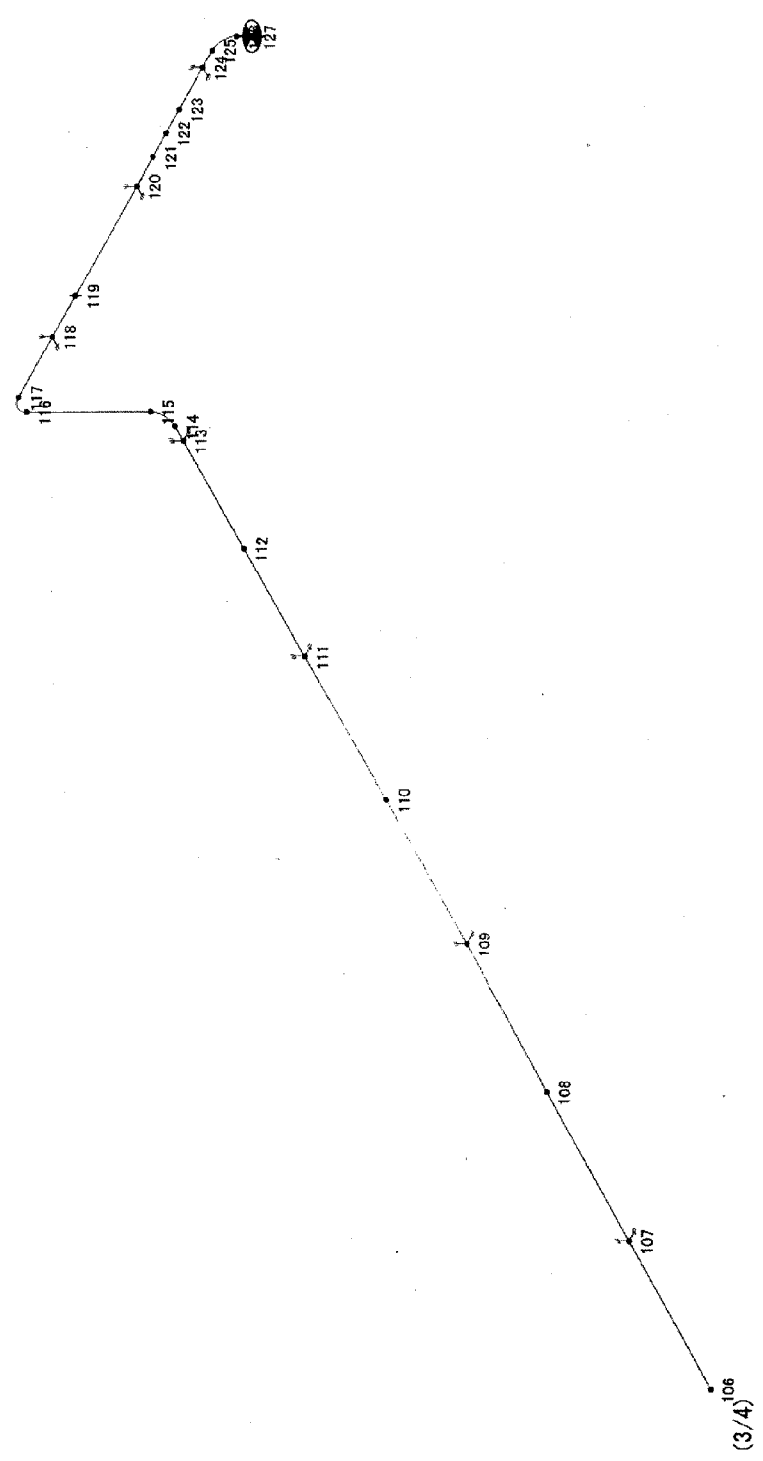
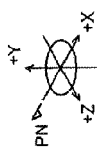
鳥瞰図 KFPC-902 (1/4)



鳥瞰図 KFC-902 (2/4)



鳥瞰図 KFC-902 (3/4)



4.4 4号機配管

(1) 耐震性

一次系、二次系設備のうち、配管の耐震性についての評価結果を示す。

1. 評価条件

配管は、基本的に、配管軸直角2方向拘束サポートを用いた、両端単純支持の配管系（両端単純支持はり構造）とする。また、配管は水平方向主体のルートを想定し、管軸方向については、サポート設置フロアの水平方向震度を鉄と鉄の静止摩擦係数0.52^{注)}よりも小さいものとし、地震により管軸方向は動かないものと仮定する。

水平方向震度は、耐震Bクラス相当の評価である0.36Gとする。

2. 評価方法

水平方向震度が静止摩擦係数よりも小さく、地震により管軸方向は動かないと考えられることから、水平方向震度による管軸直角方向の配管応力評価を考える。

管軸直角方向の地震による応力は、下図に示す自重による応力の震度倍で表現でき(4.6)式で表すことができる。

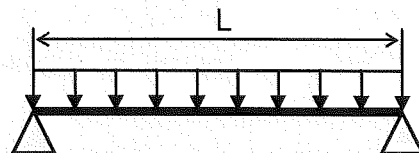
$$\bullet S_w = \frac{wL^2}{8Z}$$

S_w : 自重による応力[MPa]

L : サポート支持間隔[mm]

Z : 断面係数[mm³]

w : 等分布荷重[N/mm]



両端単純支持はりの等分布荷重より求まる自重による応力

$$\bullet S_s = \alpha S_w$$

(4.6)

S_w : 自重による応力[MPa]

S_s : 地震による応力[MPa]

α : 水平方向震度

注) 日本機械学会編 機械工学便覧 α . 基礎編 表 4-1, α 2-27

また、崩壊制限に「JEAG4601（1984 年版）」のクラス 2 配管の供用状態 Ds の場合の一次応力制限を用いるとすると、地震評価としては(4.7)式で表すことができる。

$$\bullet S = S_p + S_w + S_s = S_p + S_w + \alpha S_w = S_p + (1 + \alpha) S_w \leq 0.9 S_u \quad (4.7)$$

S_p : 内圧による応力 [MPa]

S_w : 自重による応力 [MPa]

S_s : 地震による応力 [MPa]

S : 内圧、自重、地震による応力 [MPa]

α : 水平方向震度

従って、上記(4.7)式を満足するように、配管サポート配置を設定することにより、配管の崩壊は抑制できる。

3. 評価結果

両端単純支持はりで自重による応力 $S_w=40$ [MPa]の配管サポート配置を仮定する。

配管設置フロアの水平方向震度を前述の 0.36、内圧による応力 $S_p=10$ [MPa]、自重による応力 $S_w=40$ [MPa]、許容応力を STPT370[100°C]の $0.9S_u=315$ [MPa]とし、(4.7)に代入すると以下となる。

$$\bullet S = S_p + (1 + \alpha) S_w = 10 + (1 + 0.36) \times 40 = 64.4 \text{ [MPa]} \leq 0.9 S_u = 315 \text{ [MPa]} \quad (4.8)$$

また、継手がある場合には、応力係数も存在する。例えば応力係数を 3 とし、(4.8)式の自重による応力 S_w に 3 を乗じ、 $S_w=120$ [MPa]とすると以下となる。

$$\bullet S = S_p + (1 + \alpha) S_w \times 3 = 10 + (1 + 0.36) \times 120 = 173.2 \text{ [MPa]} \leq 0.9 S_u = 315 \text{ [MPa]} \quad (4.9)$$

以上のことから、両端単純支持はりで自重による応力 S_w を 40[MPa]程度の配管サポート配置とした場合、発生応力は許容応力に対して十分な裕度を有する結果となった。

なお、4 号機代表配管に対するサポート支持間隔等の値を以下に示す。

(サポート支持間隔が最も長くなる配管を選定)

口径	材質	サポート支持間隔(mm)	断面係数 (mm ³)	配管自重 (N/mm)	配管自重による応力 (MPa)
150A/Sch40	STPT370	■	■	■	■

4.5 1～4号機フレキシブルチューブ

(1) 耐震性

1～4号機フレキシブルチューブは、フレキシビリティを有しており、地震変位による有意な応力は発生しないと考えられる。フレキシブルチューブの仕様を以下に示す。

フレキシブルチューブ仕様

名 称	仕 様	
1号機二次系フレキシブルチューブ	呼び径／厚さ 材質 最高使用圧力 最高使用温度	150A 相当／0.5mm SUS304 1.0MPa 60℃
2号機二次系フレキシブルチューブ	呼び径／厚さ 材質 最高使用圧力 最高使用温度	150A 相当／0.5mm 200A 相当／0.6mm SUS304 0.5MPa 100℃
3号機二次系フレキシブルチューブ	呼び径／厚さ 材質 最高使用圧力 最高使用温度	150A 相当／0.5mm 200A 相当／0.6mm SUS304 0.5MPa 100℃
4号機一次系フレキシブルチューブ	呼び径／厚さ 材質 最高使用圧力 最高使用温度	100A 相当／0.4mm 150A 相当／0.5mm SUS316L 1.0MPa 100℃
4号機二次系フレキシブルチューブ	呼び径／厚さ 材質 最高使用圧力 最高使用温度	150A 相当／0.5mm SUS316L 1.0MPa 60℃

4.6 1号機／4号機ポリエチレン管

(1) 耐震性

1／4号機ポリエチレン管は、フレキシビリティを有しており、地震変位による有意な応力は発生しないと考えられる。ポリエチレン管の仕様を以下に示す。

ポリエチレン管仕様

名 称	仕 様	
1号機二次系ポリエチレン管	呼び径／厚さ	100A 相当／11.4mm 150A 相当／16.4mm
	材質	ポリエチレン
	最高使用圧力	1.0MPa
	最高使用温度	40℃
4号機二次系ポリエチレン管	呼び径／厚さ	50A 相当／5.8mm 150A 相当／16.4mm
	材質	ポリエチレン
	最高使用圧力	1.0MPa
	最高使用温度	40℃

5. エアフィンクーラ、冷却塔

5.1 1号機エアフィンクーラ

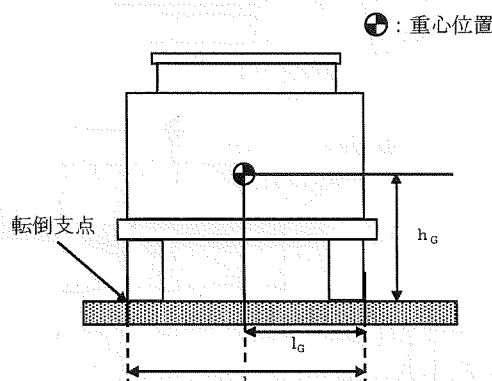
(1) 耐震性

1号機エアフィンクーラは、弁、配管と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（以下、エアフィンクーラユニット）することで耐震性を向上させている。また、エアフィンクーラユニットについては、1号機原子炉建屋脇の屋外に設置し、敷鉄板と溶接等を行い転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、敷鉄板との溶接を考慮しない状態で、エアフィンクーラユニットに発生する垂直力により転倒評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震 B クラス相当の評価である 0.36G とし、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス相当の評価を行った。

a. 転倒評価

機器に発生する垂直力は以下の計算式で算出することができる。



$$R_b = \frac{F_H \cdot h_G - (W - F_V) \cdot l_G}{l \cdot n_t}$$

$$= \frac{\{0.36 \times \text{[]} \times \text{[]} - (\text{[]} - 0) \times \text{[]}\} \times 9.80665}{\text{[]} \times \text{[]}}$$

$$= -2248.5[N] \rightarrow -2248[N]$$

ここに、 F_H : 設計水平地震力 ($K_H \cdot W$) = $0.36 \cdot \text{[]} = \text{[]}[kg]$

K_H : 設計用水平震度 = 0.36

W : 機器重量 = $\text{[]}[kg]$

h_G : 据付面より機器重心までの高さ = $\text{[]}[mm]$

F_V : 設計用鉛直地震力 = 0

l_G : 検討する方向からみた評価点から機器重心までの距離 = $\text{[]}[mm]$

l : 検討する方向からみた評価点スパン = $\text{[]}[mm]$

n_t : 機器転倒を考えた場合の引張を受ける評価点の数 = []

転倒評価結果

設備名称	機器に発生する垂直力[N]	評価
1号機エアフィンクーラユニット	-2248	転倒しない

5.2 2号機冷却塔

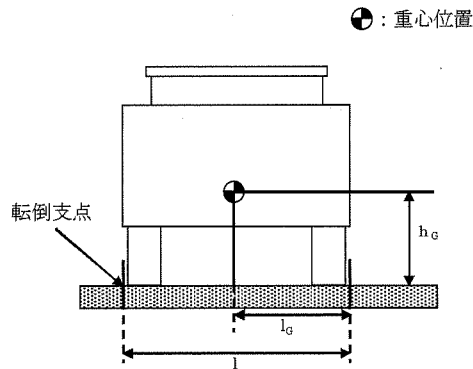
(1) 耐震性

2号機冷却塔は、2号機FSTR建屋（フィルター・スラッジタンクルーム）の屋外に設置し、杭またはワイヤーロープ等を用いた転倒防止策を講じているが、これら転倒防止策を考慮せず、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、冷却塔に発生する垂直力により転倒評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の0.36Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

a. 転倒評価

機器に発生する垂直力は以下の計算式で算出することができる。



$$R_b = \frac{F_H \cdot h_G - (W - F_V) \cdot l_G}{l \cdot n_t}$$

$$= \frac{\{0.36 \times \text{[]} \times \text{[]} - (\text{[]} - 0) \times \text{[]}\} \times 9.80665}{\text{[]} \times \text{[]}}$$

$$= -680.3[N] \rightarrow -680[N]$$

ここに、
 F_H : 設計水平地震力 ($K_H \cdot W$) = $0.36 \cdot \text{[]} = \text{[]} [kg]$
 K_H : 設計用水平震度 = 0.36
 W : 機器重量 = $\text{[]} [kg]$
 h_G : 据付面より機器重心までの高さ = $\text{[]} [mm]$
 F_V : 設計用鉛直地震力 = 0
 l_G : 検討する方向からみた評価点から機器重心までの距離 = $\text{[]} [mm]$
 l : 検討する方向から見た評価点スパン = $\text{[]} [mm]$
 n_t : 機器転倒を考えた場合の引張を受ける評価点の数 = []

転倒評価結果

設備名称	機器に発生する垂直力[N]	評価
2号機冷却塔	-680	転倒しない

5.3 3号機冷却塔

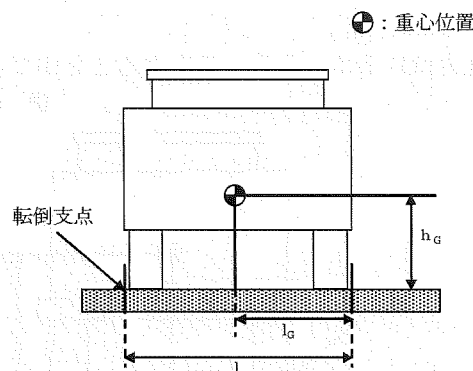
(1) 耐震性

3号機冷却塔は、3号機廃棄物処理建屋の屋外に設置し、杭またはワイヤーロープ等を用いた転倒防止策を講じているが、これら転倒防止策を考慮せず、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、冷却塔に発生する垂直力により転倒評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の0.36Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

a. 転倒評価

機器に発生する垂直力は以下の計算式で算出することができる。



$$R_b = \frac{F_H \cdot h_G - (W - F_V) \cdot l_G}{l \cdot n_t}$$

$$= \frac{\{0.36 \times \text{[redacted]} \times \text{[redacted]} - (\text{[redacted]} - 0) \times \text{[redacted]} \times 9.80665}{\text{[redacted]} \times \text{[redacted]}}$$

$$= -3587.3[N] \rightarrow -3587[N]$$

ここに、
 F_H : 設計水平地震力 ($K_H \cdot W$) = $0.36 \cdot \text{[redacted]} = \text{[redacted]}[kg]$
 K_H : 設計用水平震度 = 0.36
 W : 機器重量 = $\text{[redacted]}[kg]$
 h_G : 据付面より機器重心までの高さ = $\text{[redacted]}[mm]$ (機器重心高さ $\text{[redacted]}[mm]$ + 架台高さ $\text{[redacted]}[mm]$)
 F_V : 設計用鉛直地震力 = 0
 l_G : 検討する方向からみた評価点から機器重心までの距離 = $\text{[redacted]}[mm]$
 l : 検討する方向から見た評価点スパン = $\text{[redacted]}[mm]$
 n_t : 機器転倒を考えた場合の引張を受ける評価点の数 = [redacted]

転倒評価結果

設備名称	機器に発生する垂直力[N]	評価
3号機冷却塔	-3587	転倒しない

5.4 4号機エアフィンクーラ

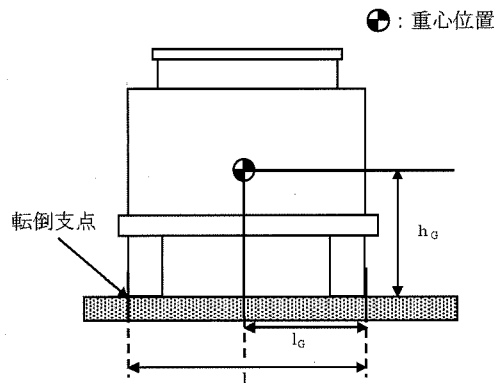
(1) 耐震性

4号機エアフィンクーラは、弁、配管と共にトレーラ上に搭載し、トレーラ含めてユニット化（以下、エアフィンクーラユニット）することで耐震性を向上させている。また、エアフィンクーラユニットについては、4号機共用プール建屋脇の屋外に設置し、敷鉄板と溶接等を行い転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を準用し、敷鉄板との溶接を考慮しない状態で、エアフィンクーラユニットに発生する垂直力により転倒評価を行った。

なお、評価においては水平方向震度を耐震Bクラス相当の評価である0.36Gとし、耐震設計審査指針上の耐震Bクラス相当の評価を行った。

a. 転倒評価

機器に発生する垂直力は以下の計算式で算出することができる。



$$R_b = \frac{F_H \cdot h_G - (W - F_V) \cdot l_G}{l \cdot n_t}$$

$$= \frac{\{0.36 \times \text{[]} \times \text{[]} - (\text{[]} - 0) \times \text{[]}\} \times 9.80665}{\text{[]} \times \text{[]}}$$

$$= -2248.5[N] \rightarrow -2248[N]$$

ここに、
 F_H : 設計水平地震力 ($K_H \cdot W$) = $0.36 \cdot \text{[]} = \text{[]}[kg]$
 K_H : 設計用水平震度 = 0.36
 W : 機器重量 = $\text{[]}[kg]$
 h_G : 据付面より機器重心までの高さ = $\text{[]}[mm]$
 F_V : 設計用鉛直地震力 = 0
 l_G : 検討する方向からみた評価点から機器重心までの距離 = $\text{[]}[mm]$
 l : 検討する方向からみた評価点スパン = $\text{[]}[mm]$
 n_t : 機器転倒を考えた場合の引張を受ける評価点の数 = []

転倒評価結果

設備名称	機器に発生する垂直力[N]	評価
4号機エアフィンクーラユニット	-2248	転倒しない

別冊 4

原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備に係る補足説明

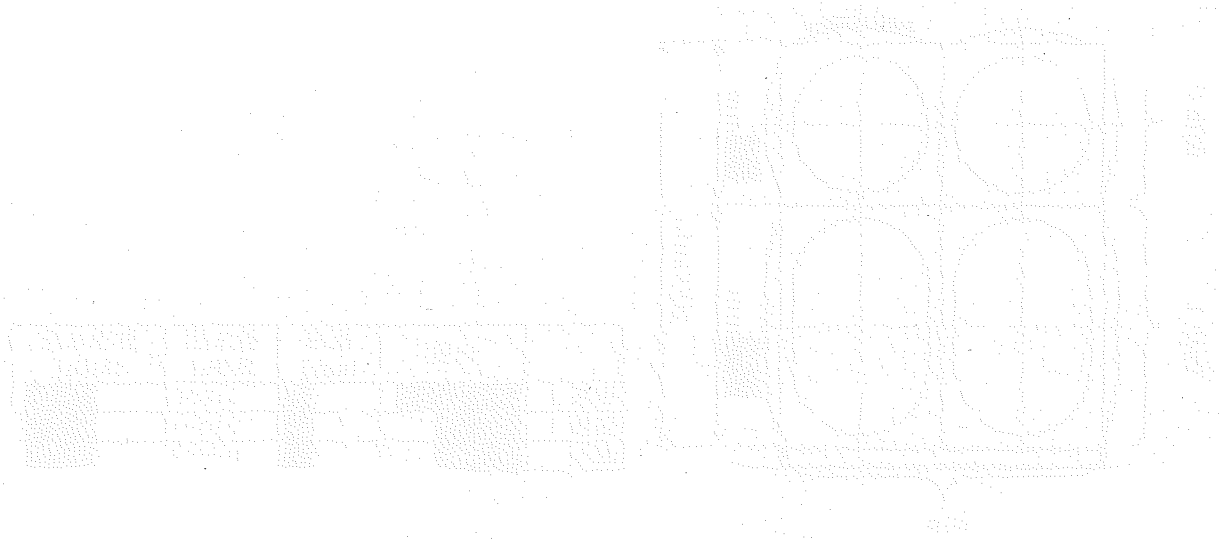


図 1 格納容器の構造図（左側面図）

図 2

本図は、原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備の構造を示す。図 1 は、格納容器の左側面図であり、図 2 は、格納容器の上面図である。図 1 に示すように、格納容器は、上部にホウ酸水注入口があり、下部にホウ酸水貯留槽がある。図 2 に示すように、格納容器は、四角形の形状であり、中央にホウ酸水注入口がある。

図 1 格納容器の構造図（左側面図）

本図は、原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備の構造を示す。図 1 は、格納容器の左側面図であり、図 2 は、格納容器の上面図である。

図 2 格納容器の構造図（上面図）

本図は、原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備の構造を示す。図 1 は、格納容器の左側面図であり、図 2 は、格納容器の上面図である。

図 3 格納容器の構造図（右側面図）

本図は、原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備の構造を示す。図 1 は、格納容器の左側面図であり、図 2 は、格納容器の上面図である。

I 原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備の構造強度及び耐震性について

1. ホウ酸水タンク

(1) 構造強度

ホウ酸水タンクについては、定格容量 20m^3 （水位 2m）における静水圧に対し、実験により確認した側板及び底板の許容水圧が大きいことを確認しており、ほう酸水注入系における使用条件に対し、十分な構造強度を有していると評価している（図-1 参照）。

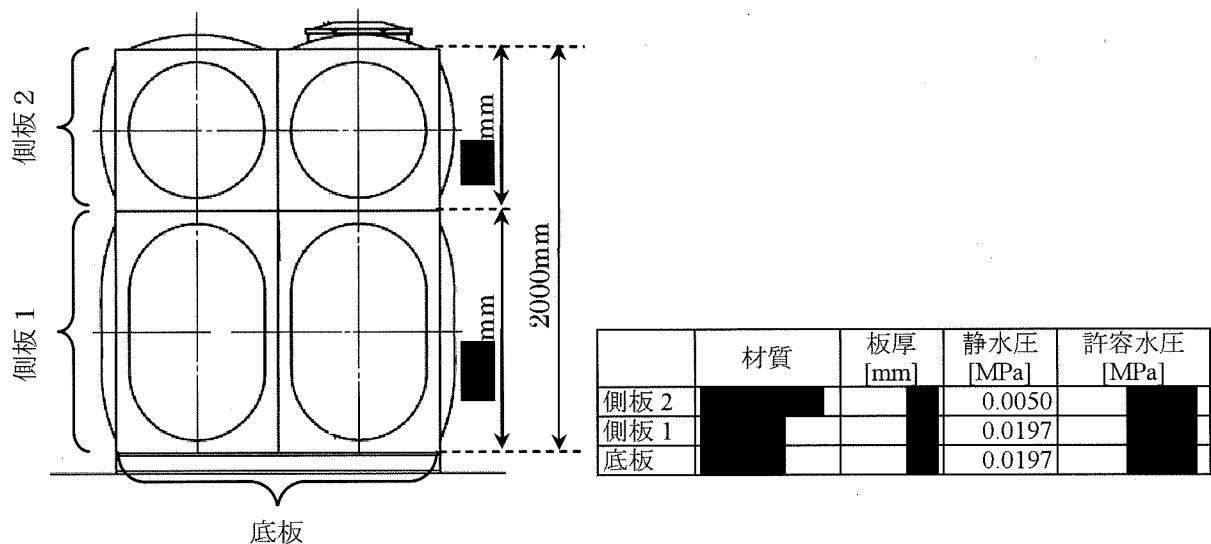


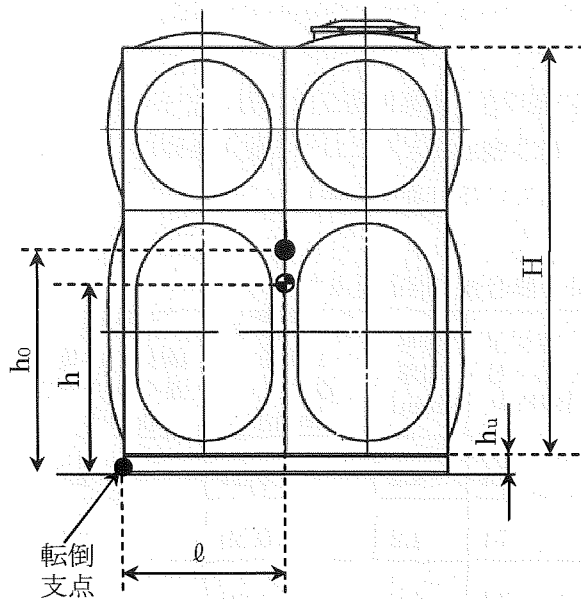
図-1 ホウ酸水タンクの構造強度評価結果

(2) 耐震性

ホウ酸水タンクは、事務本館脇海側駐車場に設置されており、ボルトにより固定されていないことを踏まえ、耐震性の評価として、タンクが転倒しないことの評価を行った。なお、基準地震動 S_s に対する動的解析を行うことが困難であることから、静的地震力を用いて、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス相当の評価を行った。

a. ホウ酸水タンクの転倒評価

地震によるモーメントと自重によるモーメントを算出し、それらを比較することで転倒評価を行った。タンクが転倒するのは、地震によるモーメント > 自重によるモーメントの場合であるが、評価の結果、地震によるモーメント < 自重によるモーメントであり、タンクが転倒しないことを確認した。



C_H : 水平方向加速度

〔耐震 B クラス設備に適用される加速度 : 0.36 (1.8Ci) 〕
〔耐震 S クラス設備に適用される加速度 : 0.72 (3.6Ci) 〕

W : 機器重量 (kg)

g : 重力加速度

H : 水槽の高さ (mm)

h : 据付面から水槽の重心までの高さ (mm)
(保有水ありの場合)

h_0 : 据付面から水槽の重心までの高さ (mm)
(保有水なしの場合)

h_u : 受台高さ (mm)

ℓ : 転倒支点から機器重心までの距離 (mm)

地震によるモーメント : $M_1 = W \times g \times C_H \times h$

自重によるモーメント : $M_2 = W \times G \times \ell$

■ 転倒評価 (保有水がある場合)

地震によるモーメント : $M_1 = W \times g \times C_H \times h$

自重によるモーメント : $M_2 = W \times g \times \ell$

$$M_1 - M_2 = (WgC_Hh) - (Wg\ell) = Wg(C_Hh - \ell)$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 : } (C_Hh - \ell) = - \text{ }$$

$$C_H = 0.72 \text{ の場合 : } (C_Hh - \ell) = - \text{ }$$

■ 転倒評価 (保有水がない場合)

地震によるモーメント : $M_1 = W \times g \times C_H \times h_0$

自重によるモーメント : $M_2 = W \times g \times \ell$

$$M_1 - M_2 = (WgC_Hh_0) - (Wg\ell) = Wg(C_Hh_0 - \ell)$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 : } (C_Hh - \ell) = - \text{ }$$

$$C_H = 0.72 \text{ の場合 : } (C_Hh - \ell) = - \text{ }$$

2. 鋼管

(1) 構造強度

鋼管については、「設計・建設規格」に基づき、最高使用圧力に対して十分な厚さを有していることを確認しており、ほう酸水注入系における使用条件に対し、十分な構造強度を有していると評価している（表-1 参照）。

表-1 ホウ酸水注入系における鋼管の構造強度評価結果※1

	材料	外径 : D ₀ [mm]	最高 使用 圧力 : P [MPa]	許容引張 応力 : S [MPa]	公称 肉厚 [mm]	管の計算上 必要な 厚さ : t [mm]	炭素鋼 鋼管の必要 最小厚さ※2 [mm]
ホウ酸水タンクから ホウ酸水タンク出口ヘッダ まで	SGP	76.3	0.98	74	4.2	0.51	2.7
	SGP	89.1	0.98	74	4.2	0.59	3.0
	SGP	165.2	0.98	74	5.0	1.09	3.8

※1 長手継手の効率 η は全て 1

※2 表-2 に定める値

■ 内圧を受ける直管

最高使用圧力に対する直管の厚さは、(式 1-1) により計算した値および表-2 に定める値のいずれか大きい方の値以上でなければならない。

$$t = \frac{PD_0}{2S\eta + 0.8P} \quad (\text{式 1-1})$$

t : 管の計算上必要な厚さ (mm)

P : 最高使用圧力 (MPa)

D₀ : 管の外径 (mm)

S : 最高使用温度における「設計・建設規格 付録材料図 表 Part5 表 5」に規定する材料の許容引張応力 (MPa)

η : 長手継手の効率で、「設計・建設規格 PVC-3130」に定めるところによる。

表-2 炭素鋼鋼管の必要最小厚さ

管の外径 (mm)	管の厚さ (mm)
25 未満	1.4
25 以上 38 未満	1.7
38 以上 45 未満	1.9
45 以上 57 未満	2.2
57 以上 64 未満	2.4
64 以上 82 未満	2.7
82 以上 101 未満	3.0
101 以上 127 未満	3.4
127 以上	3.8

I 汚染水処理設備等の構造強度及び耐震性について

汚染水処理設備等を構成する設備について、構造強度評価の基本方針及び耐震性評価の基本方針に基づき構造強度及び耐震性等の評価を行う。

1. 汚染水処理設備、貯留設備（タンク等）及び関連設備（移送配管、移送ポンプ等）

1.1. 基本方針

1.1.1. 構造強度評価の基本方針

汚染水処理設備、貯留設備及び関連設備を構成する機器は、「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。）で規定されるものであるが、設計・建設規格は、鋼材を基本とした要求事項を設定したものであり、ポリエチレン管等の非金属材料についての基準がない。

従って、鋼材を使用している設備については、設計・建設規格のクラス 3 機器相当での評価を行い、非金属材料については、当該設備に加わる機械的荷重により損傷に至らないことをもって評価を行う。この際、JIS や独自の製品規格等を有している場合や、試験等を実施した場合はその結果などを活用できるものとし、評価を行う。

また、構造強度に関連して経年劣化の影響を評価する観点から、原子力発電所での使用実績がない材料を使用する場合は、他産業での使用実績等を活用しつつ、必要に応じて試験等を行うことで、経年劣化の影響についての評価を行う。なお、試験等の実施が困難な場合にあっては、巡視点検等による状態監視を行うことで、健全性を確保する。

1.1.2. 耐震性評価の基本方針

汚染水処理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付けられる。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。）等に準拠して構造強度評価を行うことを基本とするが、評価手法、評価基準について実態にあわせたものを採用する。B クラス施設に要求される水平震度に対して耐震性を確保できない場合は、その影響について評価を行う。支持部材がない等の理由によって、耐震性に関する評価ができない設備を設置する場合においては、可撓性を有する材料を使用するなどし、耐震性を確保する。

なお、汚染水処理設備等のうち高濃度の滞留水を扱う設備等については、参考として S クラス相当の評価を行う。

1.2. 評価結果

1.2.1. 滞留水移送装置

(1) 構造強度評価

材料証明書がなく，設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが，漏えい試験等を行い，有意な変形や漏えい，運転状態に異常がないことを確認した。従って，滞留水移送装置は必要な構造強度を有すると評価した。

(2) 耐震性評価

移送ポンプは，水中ポンプのため地震により有意な応力は発生しない。

1.2.2. 油分分離装置

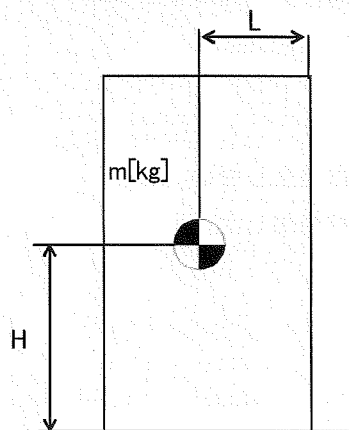
(1) 構造強度評価

材料証明書がなく，設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが，漏えい試験等を行い，有意な変形や漏えい，運転状態に異常がないことを確認した。従って，油分分離装置は必要な構造強度を有すると評価した。

(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いことから，転倒しないことを確認した（表－1）。



m : 機器質量 (kg)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

H : 据付面からの重心までの距離 (m)

L : 転倒支点から機器重心までの距離 (m)

C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.57)

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

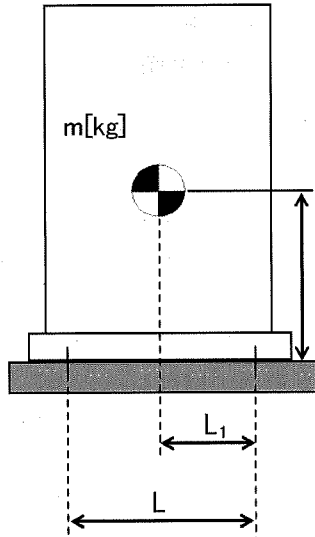
$C_H=0.36$ の場合 $M_1 = 49,615 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow 50 \text{ kN} \cdot \text{m}$

$C_H=0.57$ の場合 $M_1 = 78,558 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow 79 \text{ kN} \cdot \text{m}$

自重による安定モーメント : $M_2 [N \cdot m] = m \times g \times L = 83,942 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow 83 \text{ kN} \cdot \text{m}$

b. 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）。



- m : 機器質量 (kg)
 g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
 H : 据付面からの重心までの距離 (mm)
 L : 基礎ボルト間の水平方向距離 (mm)
 L_1 : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離 (mm)
 n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数 (本)
 n : 基礎ボルトの本数 (本)
 A_b : 基礎ボルトの軸断面積 (mm²)
 C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.57)
 C_V : 鉛直方向設計震度 (0)

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

$C_H=0.36$ の場合 $F_b = -16,481 \text{ N} < 0$ よって、引張力は発生しない。

$C_H=0.57$ の場合 $F_b = -2,585 \text{ N} < 0$ よって、引張力は発生しない。

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

$C_H=0.36$ の場合 $F_b < 0$ のため、引張応力は発生しない。

$C_H=0.57$ の場合 $F_b < 0$ のため、引張応力は発生しない。

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

$C_H=0.36$ の場合 $\tau_b = 23.04 \rightarrow 24 \text{ MPa}$

$C_H=0.57$ の場合 $\tau_b = 36.48 \rightarrow 37 \text{ MPa}$

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

ここで、F は設計・建設規格 付属図表 part5 表 8 及び表 9 より、SS400 の設計温度 66℃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。

$$F = \min (Sy, 0.7Su)$$

・ Sy : 表 8 より 40℃ : 235 MPa, 75℃ : 222 MPa

$$Sy = 222 + (235 - 222) \times (75-66)/(75-40) = 225 \text{ MPa}$$

・ Su 40℃ : 400 MPa, 75℃ : 381 MPa

$$Su = 381 + (400 - 381) \times (75-66)/(75-40) = 385 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min (Sy, 0.7Su) = \min (225, 0.7 \times 385) = 225 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容せん断応力は以下の通りとなる。

$$f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 129 \text{ MPa}$$

表－1 油分分離装置耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
油分分離装置	本体	転倒	0.36	50	83	kN・m
			0.57	79		
	基礎ボルト	せん断	0.36	24	129	MPa
			0.57	37		
		引張	0.36	<0	-	MPa
			0.57	<0		

1.2.3. 処理装置（セシウム吸着装置）

(1) 構造強度評価

材料証明書がなく、設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満たすものではないが、漏えい試験等を行い、有意な変形や漏えい、運転状態に異常がないことを確認した。

また、吸着塔の円筒型容器については、設計・建設規格に準拠し、板厚評価を実施した。評価の結果、内圧に耐えられることを確認した（表－2）。

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

$$= 6.76 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 6.8 \text{ mm}$$

t : 胴の計算上必要な厚さ

D_i : 胴の内径 (mm)

P : 最高使用圧力 (0.97 MPa)

S : 最高使用温度 (66℃) における
材料 (SUS316L) の許容引張応力 (108 MPa)

η : 長手継手の効率 (0.60)

ただし、t の値は炭素鋼、低合金鋼の場合は t=3[mm] 以上、その他の金属の場合は t=1.5[mm] 以上とする。

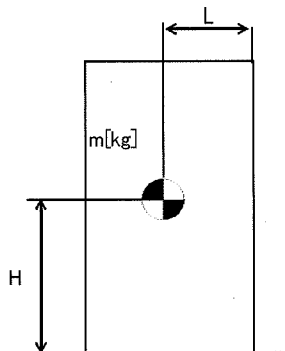
表－2 セシウム吸着装置構造強度結果

機器名称	評価部位	必要肉厚[mm]	実厚[mm]
セシウム吸着装置 吸着塔	板厚	6.8	9.5

(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、それらを比較することにより転倒評価を行った。評価に用いた数値を表－3－1に示す。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いことから、転倒しないことを確認した（表－3－3）。



m : 機器質量

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

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

C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.51, 0.57)

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

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

表－３－１ セシウム吸着装置の転倒評価数値根拠

機器名称	m [kg]	H [m]	L [m]	C_H	M_1 [N・m]	M_2 [N・m]
セシウム 吸着塔				0.36	89,879 → 90 kN・m	130,209 → 130 kN・m
				0.51	127,328 → 128 kN・m	
スキッド (本体)				0.36	512,018 → 513 kN・m	881,804 → 881 kN・m
				0.57	810,695 → 811 kN・m	
スキッド (基礎)				0.36	615,632 → 616 kN・m	958,825 → 958 kN・m
				0.57	974,751 → 975 kN・m	
セシウム吸着 処理水タンク				0.36	143,165 → 144 kN・m	175,759 → 175 kN・m
				0.57	226,677 → 227 kN・m	
セシウム吸着 処理水移送 ポンプ				0.36	2,086 → 2.1 kN・m	7,293 → 7.2 kN・m
				0.57	3,303 → 3.4 kN・m	

b. 滑動評価

地震時の水平荷重によるすべり力と接地面の摩擦力を比較することにより、滑動評価を実施した。評価の結果、地震時の水平荷重によるすべり力は接地面の摩擦力より小さいことから、滑動しないことを確認した（表－３－３）。なお、Sクラス相当の評価では、セシウム吸着塔において地震時の水平荷重によるすべり力が接地面の摩擦力より大きくなったことから、FEMによるトラニオンとピンガイドの強度評価を行った。

地震時の水平荷重によるすべり力： $F_L = C_H \times m \times g \rightarrow F_L / (m \times g) = C_H$

接地面の摩擦力： $F_\mu = \mu \times m \times g \rightarrow F_\mu / (m \times g) = \mu$

m ：機器質量

g ：重力加速度

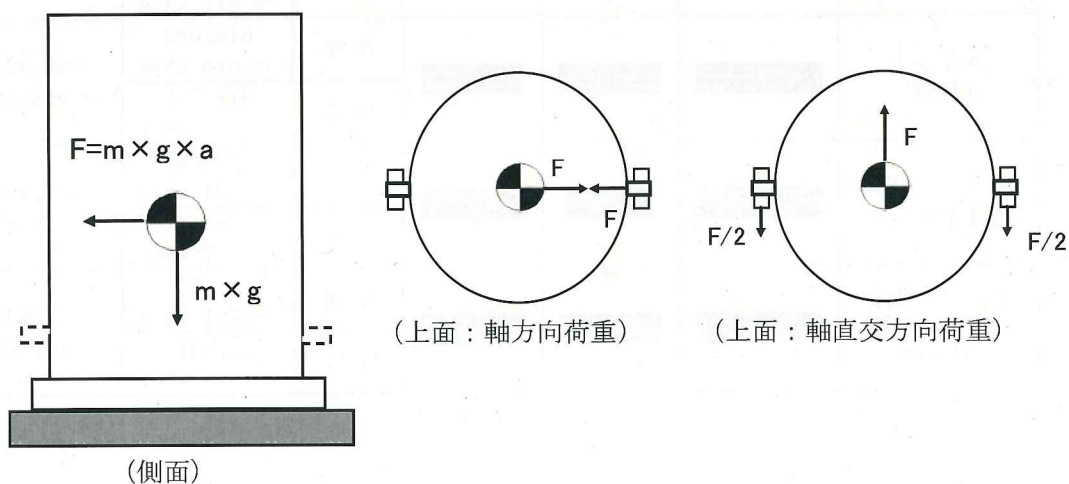
C_H ：水平方向設計震度（0.36, 0.57）

μ ：摩擦係数（鉄／鉄：0.52）

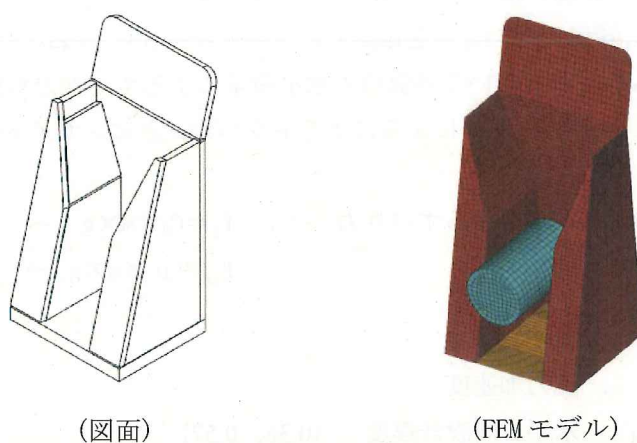
c. FEMによるトラニオンとピンガイドの強度評価

セシウム吸着塔は、本体下部に位置決めのためのトラニオンが施工されており、スキッド側ピンガイドと取合構造となっている（図－1 参照）。

b. 滑動評価において、地震時の水平荷重によるすべり力が接地面の摩擦力より大きくなったことから、軸方向荷重及び軸直交方向荷重を想定し、トラニオンとピンガイドの強度をFEMにより確認する。なお、FEMモデルは、ピンガイドについては各部材の中立面にシェル要素で、トラニオンはソリッド要素で作成した（図－2 参照）。FEMによる強度評価の結果ピンガイドは破断せず吸着塔を支持することを確認した（表－3－3）。



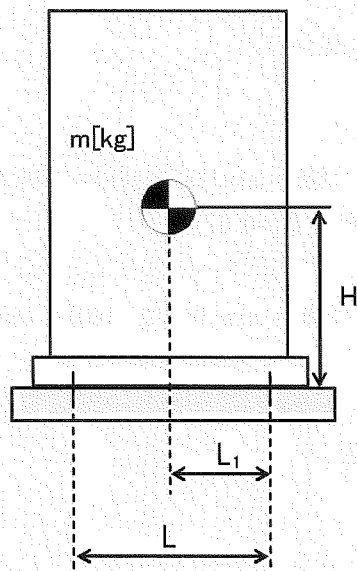
図－1 トラニオン～ピンガイド概要



図－2 FEMモデル形状

d. 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。評価に用いた数値を表－3－2に示す。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－3－3）。



- m : 機器質量
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- H : 据付面からの重心までの距離
- L : 基礎ボルト間の水平方向距離
- L₁ : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離
- n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数
- n : 基礎ボルトの本数
- A_b : 基礎ボルトの軸断面積
- C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.57)
- C_V : 鉛直方向設計震度 (0)

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

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

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

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力: } f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力: } f_{ts} = \min(1.4f_{to} - 1.6\tau_b, f_{to})$$

ここで、F は設計・建設規格 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、SS400 の設計温度 66℃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。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

$$\bullet Sy \quad 40^\circ\text{C} : 235 \text{ MPa}, 75^\circ\text{C} : 222 \text{ MPa}$$

$$Sy = 222 + (235 - 222) \times (75 - 66) / (75 - 40) = 225 \text{ MPa}$$

・ Su 40℃ : 400 MPa, 75℃ : 381 MPa

$$S_u = 381 + (400 - 381) \times (75-66)/(75-40) = 385 \text{ MPa}$$

従って, $F = \min (S_y, 0.7S_u) = \min (225, 0.7 \times 385) = 225 \text{ MPa}$

基礎ボルトの許容引張応力は以下の通りとなる。

・ スキッドの場合 ($C_H=0.57$)

$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 168 \text{ MPa}$$

$$f_{ts} = \min(1.4 \times 168 - 1.6 \times 52, 168) = \min(152, 168) = 152 \text{ MPa}$$

・ セシウム吸着設備処理水タンクの場合 ($C_H=0.57$)

$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 168 \text{ MPa}$$

$$f_{ts} = \min(1.4 \times 168 - 1.6 \times 30, 168) = \min(187.2, 168) = 168 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容せん断応力は以下の通りとなる。

・ 処理装置 (セシウム吸着装置) 共通

$$f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 129 \text{ MPa}$$

表-3-2 セシウム吸着装置の基礎ボルト強度評価数値根拠

機器名称	m [kg]	H [mm]	L [mm]	L _i [mm]	n _f [本]	n [本]	A _b [mm ²]	C _q	F _b [N]	σ_b [MPa]	τ_b [MPa]
スキッド	■	■	■	■	■	■	■	0.36	-135, 115	<0	32.8 → 33
								0.57	6, 270	1.4 → 2	51.9 → 52
セシウム吸着 処理水タンク	■	■	■	■	■	■	■	0.36	-17, 909	<0	18.45 → 19
								0.57	27, 977	22.27 → 23	29.22 → 30
セシウム吸着 処理水移送 ポンプ	■	■	■	■	■	■	■	0.36	-3, 641	<0	5.62 → 6
								0.57	-2, 790	<0	8.90 → 9

表-3-3 セシウム吸着装置耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
セシウム 吸着塔	本体	転倒	0.36	90	130	kN・m
			0.51	128		
		滑動	0.36	0.36	0.52	-
			0.57	0.57		
	ピンガイド	相当応力	0.57	182	Sy=159 Su=459	MPa
スキッド	本体	転倒	0.36	513	881	kN・m
			0.57	811		
	基礎	転倒	0.36	616	958	kN・m
			0.57	975		
	基礎ボルト	せん断	0.36	33	129	MPa
			0.57	52		
		引張	0.36	<0	-	MPa
			0.57	2	152	
セシウム吸着 処理水タンク	本体	転倒	0.36	144	175	kN・m
			0.57	227		
	基礎ボルト	せん断	0.36	19	129	MPa
			0.57	30		
		引張	0.36	<0	-	MPa
			0.57	23	168	
セシウム吸着 処理水移送ポンプ	本体	転倒	0.36	2.1	7.2	kN・m
			0.57	3.4		
	基礎ボルト	せん断	0.36	6	129	MPa
			0.57	9		
		引張	0.36	<0	-	MPa
			0.57	<0		

1.2.4. 処理装置（第二セシウム吸着装置）

(1) 構造強度評価

材料証明書がなく，設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが，漏えい試験等を行い，有意な変形や漏えい，運転状態に異常がないことを確認した。

また，吸着塔の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，内圧に耐えられることを確認した（表－4）。

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

$$= 9.53$$

$$\rightarrow 9.6$$

t : 胴の計算上必要な厚さ

Di : 胴の内径 (1200 mm)

P : 最高使用圧力 (1.37 MPa)

S : 最高使用温度 (66℃) における
材料 (SUS316L) の許容引張応力 (108 MPa)

η : 長手継手の効率 (0.60)

ただし，t の値は炭素鋼，低合金鋼の場合は t=3[mm] 以上，その他の金属の場合は t=1.5[mm] 以上とする。

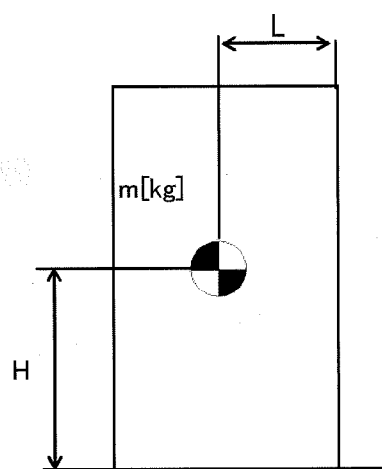
表－4 第二セシウム吸着装置構造強度結果

機器名称	評価部位	必要肉厚[mm]	実厚[mm]
第二セシウム吸着装置 吸着塔	板厚	9.6	12

(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実施した。評価に用いた数値を表－５－１に示す。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いことから、転倒しないことを確認した（表－５－３）。



- m : 機器質量
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- 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
- C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.42, 0.60)

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

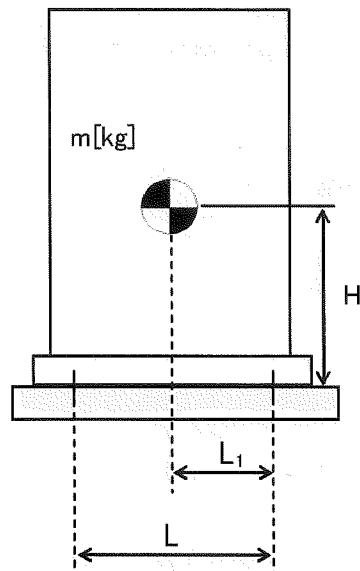
自重による安定モーメント： $M_2[\text{N} \cdot \text{m}] = m \times g \times L$

表－５－１ 第二セシウム吸着装置の転倒評価数値根拠

機器名称	m [kg]	H [m]	L [m]	C_H	M_1 [N・m]	M_2 [N・m]
第二セシウム 吸着塔				0.36	143,794 → 144 kN・m	169,194 → 169 kN・m
				0.42	167,760 → 168 kN・m	
ポンプ スキッド				0.36	3,839.7 → 3.9 kN・m	6,936.1 → 6.9 kN・m
				0.60	6,399.5 → 6.4 kN・m	

b. 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。評価に用いた数値を表－５－２に示す。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－５－３）。



- m : 機器質量
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- H : 据付面からの重心までの距離
- L : 基礎ボルト間の水平方向距離
- L₁ : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離
- n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数
- n : 基礎ボルトの本数
- A_b : 基礎ボルトの軸断面積
- C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.55, 0.60)
- C_V : 鉛直方向設計震度 (0)

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

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

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

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力: } f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力: } f_{ts} = \min(1.4f_{to} - 1.6\tau_b, f_{to})$$

ここで、F は設計・建設規格 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、SS400 の設計温度 50℃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。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

・ Sy : 表 8 より 40℃ : 235 MPa, 75℃ : 222 MPa

$$Sy = 222 + (235 - 222) \times (75 - 50) / (75 - 40) = 231 \text{ MPa}$$

・ Su : 表 9 より 40℃ : 400 MPa, 75℃ : 381 MPa

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

従って, $F = \min (S_y, 0.7S_u) = \min (231, 0.7 \times 394) = 231 \text{ MPa}$

基礎ボルトの許容引張応力は以下の通りとなる。

- ・ 第二セシウム吸着塔の場合 ($C_H=0.55$)

$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 173 \text{ MPa}$$

$$f_{ts} = \min(1.4 \times 173 - 1.6 \times 108, 173) = \min(69.4, 173) = 69 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容せん断応力は以下の通りとなる。

- ・ 処理装置 (第二セシウム吸着装置) 共通

$$f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 133 \text{ MPa}$$

表-5-2 第二セシウム吸着装置の基礎ボルト強度評価数値根拠

機器名称	m [kg]	H [mm]	L [mm]	L ₁ [mm]	n _f [本]	n [本]	A _b [mm ²]	C _u	F _b [N]	σ _b [MPa]	τ _b [MPa]
第二セシウム 吸着塔	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■	0.36	-14,519	<0	70.2 → 71
								0.55	42,466	67.6 → 68	107.3 → 108
ポンプ スキッド	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■	0.36	-2,258	<0	3.76 → 4
								0.60	-391	<0	6.27 → 7

表－５－３：第二セシウム吸着装置耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
第二セシウム 吸着塔	本体	転倒	0.36	144	169	kN・m
			0.42	168		
	基礎ボルト	せん断	0.36	71	133	MPa
			0.55	108		
		引張	0.36	<0	69	MPa
			0.55	68		
ポンプスキッド	本体	転倒	0.36	3.9	6.9	kN・m
			0.60	6.4		
	基礎ボルト	せん断	0.36	4	133	MPa
			0.60	7		
		引張	0.36	<0	-	MPa
			0.60	<0		

69/69

1.2.5. 処理装置（除染装置）

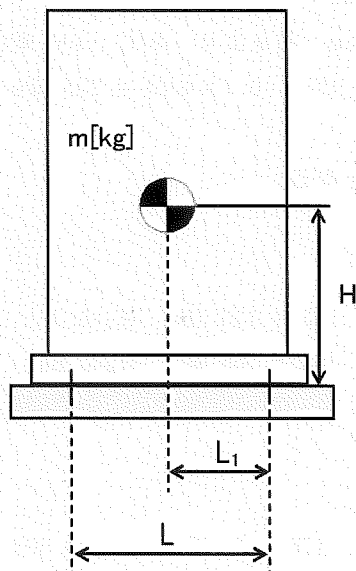
(1) 構造強度評価

材料証明書がなく，設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが，漏えい試験等を行い，有意な変形や漏えい，運転状態に異常がないことを確認した。従って，除染装置は必要な構造強度を有すると評価した。

(2) 耐震性評価

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。評価に用いた数値を表－6－1に示す。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－6－2）。



- m : 機器質量
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)
- H : 据付面からの重心までの距離
- L : 基礎ボルト間の水平方向距離
- L_1 : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離
- n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数
- n : 基礎ボルトの本数
- A_b : 基礎ボルトの軸断面積
- C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.50, 0.60)
- C_V : 鉛直方向設計震度 (0)

基礎ボルトに作用する引張力：

・反応槽
$$: F_b = \frac{4}{nD} (m \times g \times C_H \times H) - \frac{m \times g \times (1 - C_V)}{n}$$

・凝集沈殿装置（マルチフロー）
$$: F_b = \frac{1}{L} (m \times g \times C_H \times H - m \times g \times (1 - C_V) \times L_1)$$

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

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

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力: } f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力: } f_{ts} = \min(1.4f_{to} - 1.6\tau_b, f_{to})$$

ここで、F は設計・建設規格 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、設計温度（常温）における Sy 値、Su 値を用いて設定した。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

・反応槽 (SUS304)

$$Sy: \text{表 8 より } 40^\circ\text{C}: 205 \text{ MPa}, Su: \text{表 9 より } 40^\circ\text{C}: 520 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(205, 0.7 \times 520) = 205 \text{ MPa}$$

・凝集沈殿装置（マルチフロー）(SS400)

$$Sy: \text{表 8 より } 40^\circ\text{C}: 235 \text{ MPa}, Su: \text{表 9 より } 40^\circ\text{C}: 400 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(235, 0.7 \times 400) = 235 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容引張応力は以下の通りとなる。

・反応槽

$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 153 \text{ MPa}$$

$$f_{ts} = \min(1.4 \times 153 - 1.6 \times 49, 153) = 135 \text{ MPa} \quad (C_H=0.36)$$

$$f_{ts} = \min(1.4 \times 153 - 1.6 \times 68, 153) = 105 \text{ MPa} \quad (C_H=0.60)$$

・凝集沈殿装置（マルチフロー）

$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 176 \text{ MPa}$$

$$f_{ts} = \min(1.4 \times 176 - 1.6 \times 119, 176) = 56 \text{ MPa} \quad (C_H=0.60)$$

基礎ボルトの許容せん断応力は以下の通りとなる。

・反応槽

$$f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 118 \text{ MPa}$$

・凝集沈殿装置（マルチフロー）

$$f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 135 \text{ MPa}$$

表-6-1 除染装置の基礎ボルト強度評価数値根拠

機器名称	m [kg]	H [mm]	L又はD [mm]	L ₁ [mm]	n _f [本]	n [本]	A _b [mm ²]	C _u	F _b [N]	σ _b [MPa]	τ _b [MPa]
反応槽	■	■	■	■	■	■	■	0.36	3,260	16.2 → 17	48.9 → 49
								0.50	15,134	75.3 → 76	67.8 → 68
凝集沈殿装置 マルチフロー	■	■	■	■	■	■	■	0.36	-226,926	<0	70.8 → 71
								0.60	13,075	6.94 → 7	118.1 → 119

b. 有限要素法によるフレーム構造解析

主要設備についてはコンクリートにアンカーを打った上で架台にて強固に据え付けられていることから、加圧浮上分離装置 (DAF)、凝集沈殿装置 (アクチフロー)、ディスクフィルタについて有限要素法によるフレーム構造解析を用いて基礎ボルトの強度評価を実施した。評価の結果、基礎ボルトの強度に問題がないことを確認した (表-6-2)。

① 加圧浮上分離装置 (DAF)

設計用水平震度 : 0.6G

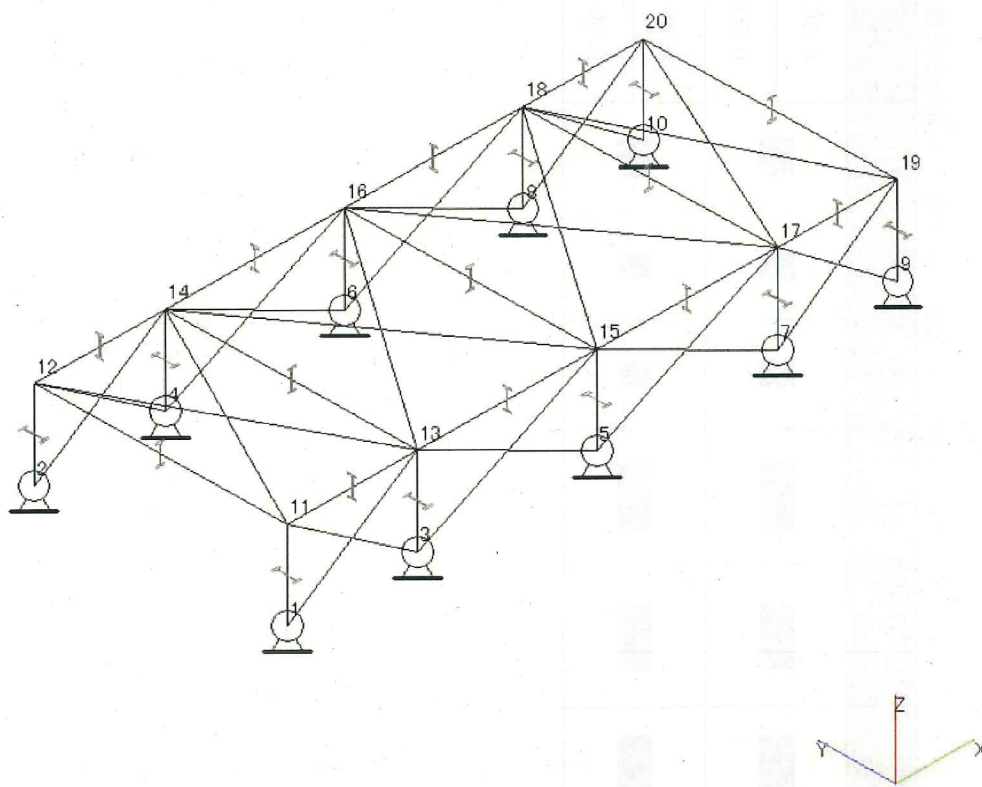
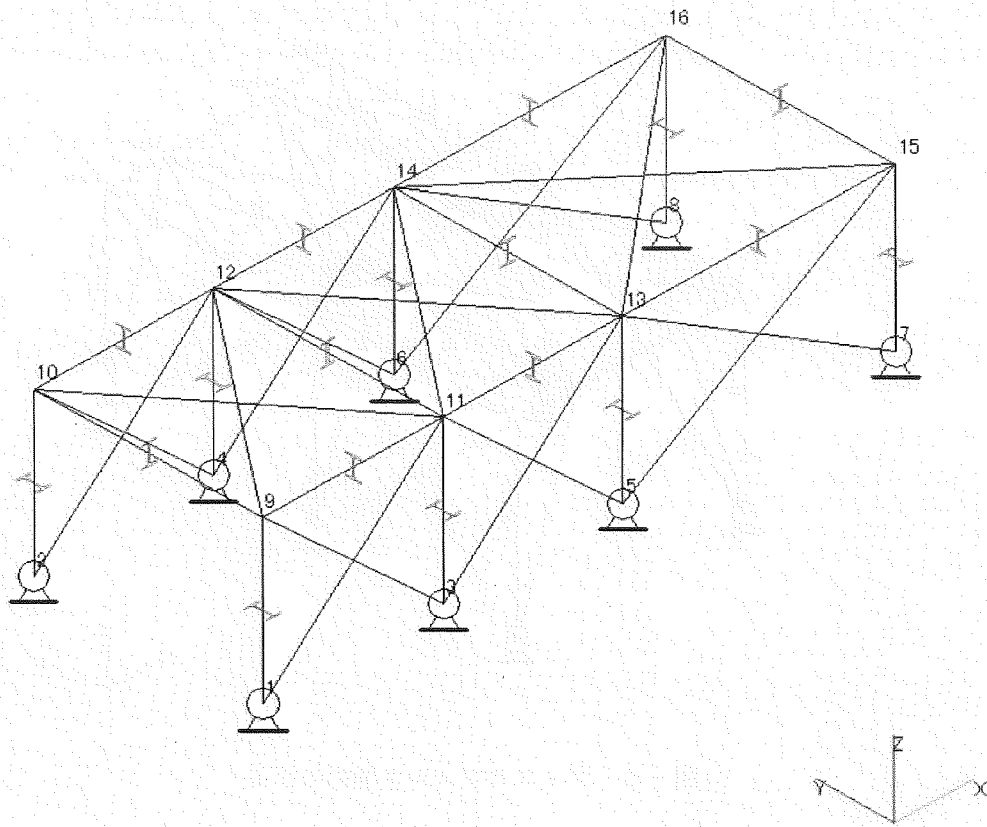


図-3 加圧浮上分離装置 (DAF) 解析モデル

② 凝集沈殿装置（アクチフロー）

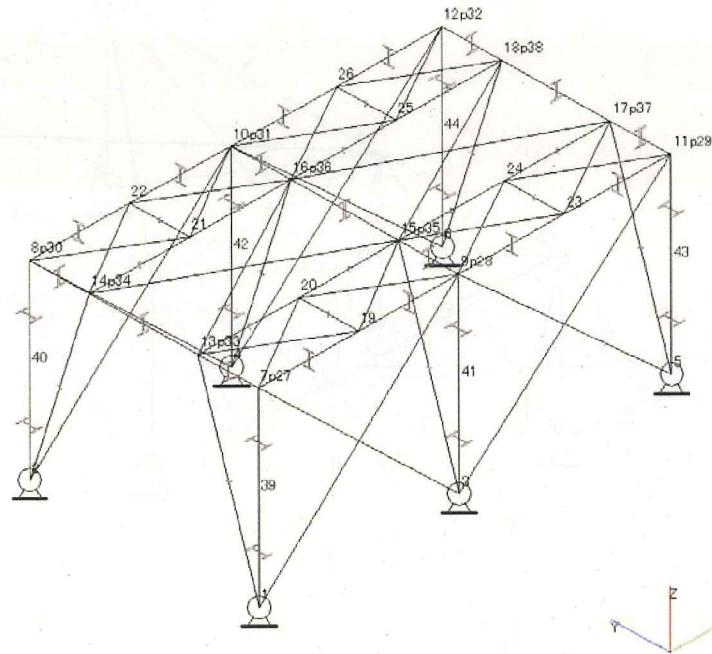
設計用水平震度：0.6G



図ー４ 凝集沈殿装置（アクチフロー）解析モデル

③ ディスクフィルタ

設計用水平震度：0.6G



図ー5 ディスクフィルタ解析モデル

c. 架台強度評価

加圧浮上分離装置（DAF）、凝集沈殿装置（マルチフロー）、凝集沈殿装置（アクチフロー）、ディスクフィルタについて有限要素法によるフレーム構造解析を用いて各部材に発生するたわみ量の評価を実施した。評価の結果、架台強度に問題がないことを確認した（表ー6ー2）。

表-6-2 除染装置耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
加圧浮上分離装置 (DAF)	架台 (柱脚)	変位	0.60	1/290	1/120	変位量
	基礎 ボルト	せん断	0.60	27	118	MPa
		引張	0.60	6	153	MPa
反応槽	基礎 ボルト	せん断	0.36	49	118	MPa
			0.50	68		
		引張	0.36	17	135	MPa
			0.50	76	105	
凝集沈殿装置 (マルチフロー)	本体 (壁パネル)	変位	0.60	1/515	1/120	変位量
	基礎 ボルト	せん断	0.36	71	135	MPa
			0.60	119		
		引張	0.36	<0	-	MPa
			0.60	7	56	
凝集沈殿装置 (アクチフロー)	架台 (柱脚)	変位	0.6	1/936	1/120	変位量
	基礎 ボルト	せん断	0.60	38	118	MPa
		引張	0.60	51	153	MPa
ディスク フィルタ	架台 (柱脚)	変位	0.6	1/527	1/120	変位量
	基礎 ルト	せん断	0.60	44	118	MPa
		引張	0.60	19	143	MPa

1.2.6. 淡水化装置

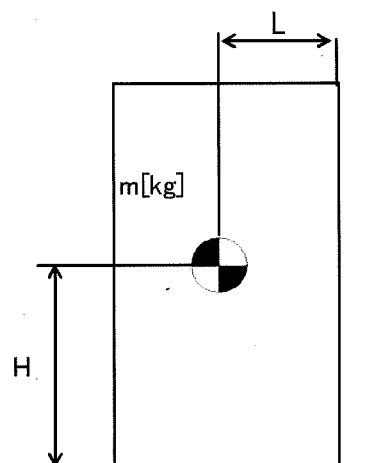
(1) 構造強度評価

材料証明書がなく，設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満たすものではないが，漏えい試験等を行い，有意な変形や漏えい，運転状態に異常がないことを確認した。従って，淡水化装置は必要な構造強度を有すると評価した。

(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実施した。評価に用いた数値を表-7-1，2に示す。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いことから，転倒しないことを確認した（表-7-6）。



- m : 機器質量
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- 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
- C_H : 水平方向設計震度 (0.36)

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

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

(a) ポンプ、配管・弁モジュール

転倒モーメント及び安定モーメントの評価式を以下の様に変更し、評価を実施した。

$$\text{地震による転倒モーメント: } M_1 [\text{N} \cdot \text{m}] = m \times g \times C_H \times H \rightarrow M_1 / (m \times g) = C_H \times H$$

$$\text{自重による安定モーメント: } M_2 [\text{N} \cdot \text{m}] = m \times g \times L \rightarrow M_2 / (m \times g) = L$$

表－７－１ 淡水化装置（ポンプ、配管・弁モジュール）の転倒評価数値根拠

機器名称	水平 震度	H [m]	算出値 $C_H \times H$ [m]	許容値 L [m]
SPT 受入水移送ポンプ	0.36	■	0.202 → 0.21	■ → 0.77
廃液 R0 供給ポンプ	0.36	■	0.200 → 0.21	■ → 0.92
R0 処理水供給ポンプ	0.36	■	0.202 → 0.21	■ → 0.77
R0 処理水移送ポンプ	0.36	■	0.467 → 0.47	■ → 0.77
R0 濃縮水供給ポンプ	0.36	■	0.202 → 0.21	■ → 0.77
R0 濃縮水貯槽移送ポンプ	0.36	■	0.350 → 0.36	■ → 0.77
R0 濃縮水移送ポンプ	0.36	■	0.347 → 0.35	■ → 0.71
濃縮水供給ポンプ	0.36	■	0.194 → 0.20	■ → 0.78
蒸留水移送ポンプ	0.36	■	0.202 → 0.21	■ → 0.86
濃縮処理水供給ポンプ	0.36	■	0.194 → 0.20	■ → 0.78
濃縮処理水移送ポンプ	0.36	■	0.347 → 0.35	■ → 0.71
濃縮水移送ポンプ	0.36	■	0.194 → 0.20	■ → 0.77
配管・弁モジュール	0.36	■	0.185 → 0.19	■ → 0.28

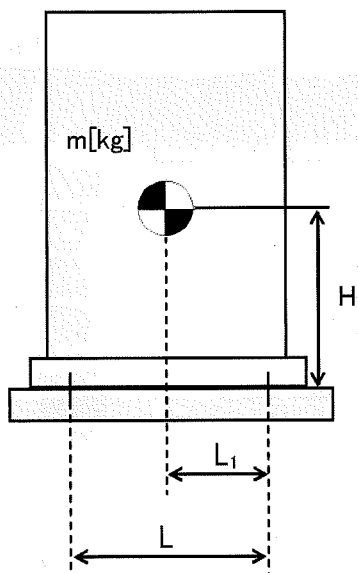
(b) 逆浸透膜装置（R0-2, R0-3）

表－７－２ 淡水化装置（R0-2, R0-3）の転倒評価数値根拠

機器名称	m [kg]	H [m]	L [m]	M_1 [kN・m]	M_2 [kN・m]
逆浸透膜装置 R0-2	■	■	■	19.06 → 19.1	20.83 → 20.8
逆浸透膜装置 R0-3	■	■	■	1.691 → 1.70	1.801 → 1.80

b. 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。評価に用いた数値を表－７－３，４，５に示す。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－７－６）。



- m : 機器質量
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- H : 据付面からの重心までの距離
- L : 基礎ボルト間の水平方向距離
- L₁ : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離
- n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数
- n : 基礎ボルトの本数
- A_b : 基礎ボルトの軸断面積
- C_H : 水平方向設計震度 (0.36)
- C_V : 鉛直方向設計震度 (0)

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

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

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

$$\text{アンカーに作用するせん断荷重 : } Q = \frac{m \times g \times C_H}{n}$$

(a) 淡水化装置（逆浸透膜装置 RO-1A, 1B）

表－７－３ 淡水化装置（逆浸透膜装置 RO-1A, 1B）の基礎ボルト強度評価数値根拠

	m [kg]	h [mm]	L [mm]	L ₁ [mm]	n _f [本]	n [本]	C _H	F _b [N]	Q [N]
逆浸透膜装置 (RO-1A)	■	■	■	■	■	■	0.36	-7,700 → <0	1,147.4 → 1,148
逆浸透膜装置 (RO-1B)	■	■	■	■	■	■	0.36	-7,781 → <0	1,059.1 → 1,060

アンカーの許容せん断荷重は以下の式で設定した。

$$Qa = 0.74 \cdot \phi_{s3} \left(0.5 \cdot a_{sc} \cdot a \cdot \sqrt{F_c \cdot E_c} \right)$$

$$= 23,419.7$$

$$\rightarrow 23,419 \text{ N}$$

ϕ_{s3} : 短期荷重に対する低減係数
(0.6)

a_{sc} : 定着部の断面積 (mm)

F_c : コンクリートの圧縮強度
(N/mm²)

E_c : コンクリートのヤング率
(N/mm²)

(b) 淡水化装置 (蒸発濃縮装置-1A, 1B, 1C)

表-7-4 淡水化装置 (蒸発濃縮装置-1A, 1B, 1C) の基礎ボルト強度評価数値根拠

	m	h	L	L ₁	n _f	n	A _b	C _H	F _b	τ
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[本]	[本]	[mm]		[N]	[MPa]
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-1A)								0.36	-9,373 → <0	29.3 → 30
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-1B)								0.36	-9,567 → <0	38.1 → 39
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-1C)								0.36	-4,000 → <0	35.1 → 36

また、基礎ボルトの許容せん断応力は以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力: } f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

ここで、Fは設計・建設規格 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、SS400 の設計温度 60℃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。

$$F = \min (Sy, 0.7Su)$$

$$\bullet Sy \quad 40^\circ\text{C} : 235 \text{ MPa}, 75^\circ\text{C} : 222 \text{ MPa}$$

$$Sy = 222 + (235 - 222) \times (75-60)/(75-40) = 227 \text{ MPa}$$

$$\bullet Su \quad 40^\circ\text{C} : 400\text{Pa}, 75^\circ\text{C} : 381 \text{ MPa}$$

$$Su = 381 + (400 - 381) \times (75-60)/(75-40) = 389 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min (Sy, 0.7Su) = \min (227, 0.7 \times 389) = 227 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容せん断応力は以下の通りとなる。

$$f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 131 \text{ MPa}$$

(c) 淡水化装置（蒸発濃縮装置-2A, 2B, 3A, 3B, 3C）

表－７－５ 淡水化装置（蒸発濃縮装置-2A, 2B, 3A, 3B, 3C）の
基礎ボルト強度評価数値根拠

	m [kg]	h [mm]	L [mm]	L ₁ [mm]	n _f [本]	n [本]	A _b [mm ²]	C _H	F _b [N]	τ [MPa]
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-2A, B) (濃縮装置)	■	■	■	■	■	■	■	0.36	-55,702 → <0	87.8 → 88
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-3A, B, C) (濃縮装置)	■	■	■	■	■	■	■	0.36	-106,472 → <0	97.5 → 98

また、基礎ボルトの許容せん断応力は以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力：} f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

ここで、F は設計・建設規格 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、SUS304 の設計温度 66℃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。

$$F = \min (Sy, 0.7Su)$$

・ Sy 40℃ : 205 MPa, 75℃ : 183 MPa

$$Sy = 183 + (205 - 183) \times (75-66)/(75-40) = 188 \text{ MPa}$$

・ Su 40℃ : 520 MPa, 75℃ : 466 MPa

$$Su = 466 + (520 - 466) \times (75-66)/(75-40) = 479 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min (Sy, 0.7Su) = \min (188, 0.7 \times 479) = 188 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容せん断応力は以下の通りとなる。

$$f_{sb} = 1.5 \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 108 \text{ MPa}$$

c. 滑動評価

地震時の水平荷重によるすべり力と接地面の摩擦力を比較することにより、滑動評価を実施した。評価の結果、地震時の水平荷重によるすべり力は接地面の摩擦力より小さいことから、滑動しないことを確認した（表－７－６）。

地震時の水平荷重によるすべり力 : $F_L = C_H \times m \times g \rightarrow F_L / (m \times g) = C_H$

接地面の摩擦力 : $F_\mu = \mu \times m \times g \rightarrow F_\mu / (m \times g) = \mu$

m : 機器質量

g : 重力加速度

C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.57)

μ : 摩擦係数 (コンクリート鉄 : 0.40)

表-7-6 淡水化装置耐震評価結果 (1/2)

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
SPT 受入水移送ポンプ	本体	転倒	0.36	0.21	0.77	m
廃液 R0 供給ポンプ	本体	転倒	0.36	0.21	0.92	m
R0 処理水供給ポンプ	本体	転倒	0.36	0.21	0.77	m
R0 処理水移送ポンプ	本体	転倒	0.36	0.47	0.77	m
R0 濃縮水供給ポンプ	本体	転倒	0.36	0.21	0.77	m
R0 濃縮水貯槽移送ポンプ	本体	転倒	0.36	0.36	0.77	m
R0 濃縮水移送ポンプ	本体	転倒	0.36	0.35	0.71	m
濃縮水供給ポンプ	本体	転倒	0.36	0.20	0.78	m
蒸留水移送ポンプ	本体	転倒	0.36	0.21	0.86	m
濃縮処理水供給ポンプ	本体	転倒	0.36	0.20	0.78	m
濃縮処理水移送ポンプ	本体	転倒	0.36	0.35	0.71	m
濃縮水移送ポンプ	本体	転倒	0.36	0.20	0.77	m
配管・弁モジュール	本体	転倒	0.36	0.19	0.28	m
逆浸透膜装置 (R0-1A)	基礎 ボルト	せん断	0.36	1,148	23,419	N
		引張	0.36	<0	-	N
逆浸透膜装置 (R0-1B)	基礎 ボルト	せん断	0.36	1,060	23,419	N
		引張	0.36	<0	-	N
逆浸透膜装置 (R0-2)	本体	転倒	0.36	19.1	20.8	kN・m
		滑動	0.36	0.36	0.40	-
逆浸透膜装置 (R0-3)	本体	転倒	0.36	1.70	1.80	kN・m

表－7－6 淡水化装置耐震評価結果 (2/2)

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-1A)	基礎	せん断	0.36	30	131	MPa
	ボルト	引張	0.36	<0	－	MPa
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-1B)	基礎	せん断	0.36	39	131	MPa
	ボルト	引張	0.36	<0	－	MPa
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-1C)	基礎	せん断	0.36	36	131	MPa
	ボルト	引張	0.36	<0	－	MPa
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-2A, B) (濃縮装置)	本体	転倒	0.36	<0	－	kN
	基礎 ボルト	せん断	0.36	88	108	MPa
		引張	0.36	<0	－	MPa
蒸発濃縮装置 (蒸発濃縮-3A, B, C) (濃縮装置)	本体	転倒	0.36	<0	－	kN
	基礎 ボルト	せん断	0.36	98	108	MPa
		引張	0.36	<0	－	MPa

1.2.7. 高濃度滞留水受タンク

(1) 構造強度評価

材料証明書がなく、設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが、気密試験等を行い、漏えいがないことを確認した。

また、設計・建設規格に準拠し、板厚評価を実施し、内圧に耐えられることを確認した（表－8）。

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

$$= 5.34 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 5.4 \text{ mm}$$

t : 胴の計算上必要な厚さ
 D_i : 胴の内径 (mm)
 P : 最高使用圧力 (0.2 MPa)
 S : 最高使用温度 (66℃) における材料 (SS400) の許容引張応力 (100 MPa)
 η : 長手継手の効率 (0.6)

ただし、 t の値は炭素鋼、低合金鋼の場合は $t \geq 3[\text{mm}]$ 以上、その他の金属の場合は $t \geq 1.5[\text{mm}]$ 以上とする。

表－8 円筒型タンク（横置き）板厚評価結果

機器名称		評価部位	必要肉厚[mm]	実厚[mm]
高濃度滞留水受タンク	100t 容量 円筒型（横置き）	タンク板厚	5.4	9

(2) 耐震性評価

当該タンクは地中に埋設され、タンク内部に高濃度滞留水を保管するものであり、設備全体としては耐震クラス B に相当することから、地中構造物の耐震 B クラスに要求される水平地震力 $K_h=0.3$ に対する静的解析により、その耐震安全性を評価した。その結果、B クラスに要求される強度を有するものと評価した（表－9）。詳細は別添－1 に示す。

表－9 円筒型タンク（横置き）耐震評価結果

機器名称		評価項目	作用震度	算出値	許容値	単位
高濃度滞留水 受タンク	100t 容量 円筒型 （横置き）	曲げ	B クラス	21.9	210	N/mm ²
			S クラス	60.0	245	
		せん断	B クラス	0.019	120	N/mm ²
			S クラス	0.311	141	

1.2.8. 中低濃度タンク

(1) 構造強度評価

材料証明書がなく、設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが、水頭圧による漏えい試験を行い、有意な変形や漏えいがないことを確認した。また、タンクは全て大気開放のため、水頭圧以上の内圧が作用することは無い。

以上のことから、中低濃度タンクは必要な構造強度を有していると評価できる。

また、円筒型タンクについては、主要仕様から必要肉厚を評価し、十分な肉厚を有していることを確認した。

なお、サプレッションプール水サージタンクは、工事計画認可申請書(57 資庁第 2974 号 昭和 57 年 4 月 20 日認可)において確認を実施している。

a. 円筒型タンク

円筒型タンクについては、設計・建設規格に準拠し、板厚評価を実施した。評価に用いた数値を表-10-1 に示す。評価の結果、水頭圧に耐えられることを確認した(表-10-2)。

$$t = \frac{DiH\rho}{0.204S\eta}$$

t : 胴の計算上必要な厚さ

Di : 胴の内径

H : 水頭

ρ : 液体の比重

S : 最高使用温度における
材料の許容引張応力

η : 長手継手の効率

ただし、t の値は炭素鋼、低合金鋼の場合は $t=3[\text{mm}]$ 以上、その他の金属の場合は $t=1.5[\text{mm}]$ 以上とする。また、内径の区分に応じた必要厚さを考慮する。

表-10-1 円筒型タンク板厚評価の数値根拠

機器名称		Di [m]	H [m]	ρ	材料	温度 [°C]	S [MPa]	η	t [mm]
RO 処理水貯槽	300t 容量	■	■	1	SS400	常温	100	1.00	2.88 → 4.5 ^{※1}
	450t 容量	■	■	1	SS400	常温	100	1.00	3.24 → 4.5 ^{※1}
RO 濃縮水貯槽	500t 容量	■	■	1	SS400	常温	100	1.00	3.83 → 4.5 ^{※1}
RO 処理水貯槽 RO 濃縮水貯槽 蒸発濃縮処理水貯槽	1100t 容量	■	■	1	SS400	常温	100	1.00	5.69 → 5.7
多核種処理水貯槽	1100t 容量 (溶接)	■	■	1	SS400	常温	100	0.65	8.78 → 8.8
濃縮廃液貯槽	100t 容量 円筒型 (横置き)	■	■	1	SS400	常温	100	0.60	0.84 → 3.0 ^{※2}
RO 濃縮水貯槽	120t 容量 円筒型 (横置き)	■	■	1	SS400	常温	100	0.60	0.94 → 3.0 ^{※2}

※1 : 内径5[m]以上のため、内径区分により4.5[mm]となる。

※2 : 炭素鋼の必要厚さにより3[mm]となる。

表-10-2 円筒型タンク板厚評価結果

機器名称		評価部位	必要肉厚[mm]	実厚[mm]
RO 処理水貯槽	300t 容量	タンク板厚	4.5	9.0
	450t 容量	タンク板厚	4.5	9.0 [※]
RO 濃縮水貯槽	500t 容量	タンク板厚	4.5	9.0 [※]
RO 処理水貯槽 RO 濃縮水貯槽 蒸発濃縮処理水貯槽	1100t 容量	タンク板厚	5.7	12.0
多核種処理水貯槽	1100t 容量 (溶接)	タンク板厚	8.8	12.0
濃縮廃液貯槽	100t 容量 (円筒型 (横置き))	タンク板厚	3.0	9.0
RO 濃縮水貯槽	120t 容量 (円筒型 (横置き))	タンク板厚	3.0	9.0

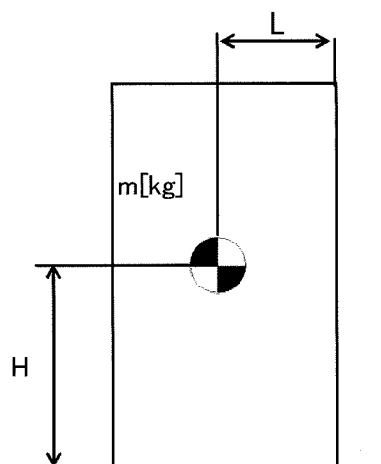
※ 最小値

(2)耐震性評価

サプレッションプール水サージタンクは, 工事計画認可申請書(57 資庁第 2974 号 昭和 57 年 4 月 20 日認可) において確認を実施している。その他の中低濃度タンクに関する耐震性評価を以下に示す。

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実施した。評価に用いた数値を表-11-1, 2に示す。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いことから, 転倒しないことを確認した(表-11-3)。



- m : 機器質量
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- 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
- C_H : 水平方向設計震度 (0.36)

各記号の下付文字は, 下記を意味する。

t : タンク, w : 保有水,
b : ベースを意味する。

地震による転倒モーメント :

$$\begin{aligned} M_1 [\text{N} \cdot \text{m}] &= m \times g \times C_H \times H \\ &= g \times C_H \times (m_t \times H_t + m_w \times H_w + m_b \times H_b) \end{aligned}$$

自重による安定モーメント :

$$\begin{aligned} M_2 [\text{N} \cdot \text{m}] &= m \times g \times L \\ &= (m_t \times L_t + m_w \times L_w + m_b \times L_b) \times g \end{aligned}$$

表-111-1 タンク・槽類の転倒評価計算根拠

機器名称	m_t (t)	m_w (t)	H_t (m)	H_w (m)	L_{t1} (m)	L_{t2} (m)	M_1 (kN・m)	M_2 (kN・m)
SPT 受入水タンク							$574 \rightarrow 5.8 \times 10^2$	$2,927 \rightarrow 2.9 \times 10^3$
廃液 R0							$170.3 \rightarrow 1.8 \times 10^2$	$425 \rightarrow 4.2 \times 10^2$
供給							$223 \rightarrow 2.3 \times 10^2$	$544 \rightarrow 5.4 \times 10^2$
タンク							$194 \rightarrow 2.0 \times 10^2$	$557 \rightarrow 5.5 \times 10^2$
110t 容量							$574 \rightarrow 5.8 \times 10^2$	$2,927 \rightarrow 2.9 \times 10^3$
R0 処理水受タンク							$574 \rightarrow 5.8 \times 10^2$	$2,927 \rightarrow 2.9 \times 10^3$
16t 容量							$68.2 \rightarrow 6.9 \times 10^1$	$178 \rightarrow 1.7 \times 10^2$
R0 処理水							$159 \rightarrow 1.6 \times 10^2$	$389.7 \rightarrow 3.8 \times 10^2$
一時貯槽							$189 \rightarrow 1.9 \times 10^2$	$534 \rightarrow 5.3 \times 10^2$
42t 容量							$5,234 \rightarrow 5.3 \times 10^3$	$11,553 \rightarrow 1.1 \times 10^4$
300t 容量							$6,658 \rightarrow 6.7 \times 10^3$	$22,079 \rightarrow 2.2 \times 10^4$
R0 処理水							$20,183 \rightarrow 2.1 \times 10^4$	$70,252 \rightarrow 7.0 \times 10^4$
貯槽							$574 \rightarrow 5.8 \times 10^2$	$2,927 \rightarrow 2.9 \times 10^3$
1100t 容量							$9,016 \rightarrow 9.1 \times 10^3$	$26,320 \rightarrow 2.6 \times 10^4$
R0 濃縮水受タンク							$20,183 \rightarrow 2.1 \times 10^4$	$70,252 \rightarrow 7.0 \times 10^4$
500t 容量							$19,911 \rightarrow 2.0 \times 10^4$	$69,408 \rightarrow 6.9 \times 10^4$
R0 濃縮水							$205 \rightarrow 2.1 \times 10^2$	$544 \rightarrow 5.4 \times 10^2$
貯槽							$205 \rightarrow 2.1 \times 10^2$	$544 \rightarrow 5.4 \times 10^2$
多核種処理水貯槽							$205 \rightarrow 2.1 \times 10^2$	$544 \rightarrow 5.4 \times 10^2$
濃縮水受タンク							$20,183 \rightarrow 2.1 \times 10^4$	$70,252 \rightarrow 7.0 \times 10^4$
蒸留水タンク							$205 \rightarrow 2.1 \times 10^2$	$544 \rightarrow 5.4 \times 10^2$
濃縮処理水タンク							$205 \rightarrow 2.1 \times 10^2$	$544 \rightarrow 5.4 \times 10^2$
蒸発濃縮処理水貯槽							$20,183 \rightarrow 2.1 \times 10^4$	$70,252 \rightarrow 7.0 \times 10^4$
濃縮水タンク							$205 \rightarrow 2.1 \times 10^2$	$544 \rightarrow 5.4 \times 10^2$

表-11-2 円筒横置きタンクの転倒評価計算根拠

機器名称	m (t)		H (m)		L (m)		M_1 (kN・m)	M_2 (kN・m)
	m_t		H_t		L_t			
RO 濃縮水貯槽 120t 容量	m_w		H_w		L_w		$1,332 \rightarrow 1.4 \times 10^3$	$3,264 \rightarrow 3.2 \times 10^3$
	m_{b1}		H_{b1}		L_{b1}			
	m_{b2}		H_{b2}		L_{b2}			
	m_t		H_t		L_t			
濃縮廃液貯槽	m_w		H_w		L_w		$1,023 \rightarrow 1.1 \times 10^3$	$2,330 \rightarrow 2.3 \times 10^3$
	m_{b1}		H_{b1}		L_{b1}			
	m_{b2}		H_{b2}		L_{b2}			
	m_t		H_t		L_t			

表-1 1-3 タンク・槽類の転倒評価結果

機器名称		評価部位	評価項目	水平地震動	算出値	許容値	単位
SPT 受入水タンク		本体	転倒	0.36	5.8×10^2	2.9×10^3	kN・m
廃液 RO 供給タンク	35t 容量	本体	転倒	0.36	1.8×10^2	4.2×10^2	kN・m
	40t 容量	本体	転倒	0.36	2.3×10^2	5.4×10^2	kN・m
	42t 容量	本体	転倒	0.36	2.0×10^2	5.5×10^2	kN・m
	110t 容量	本体	転倒	0.36	5.8×10^2	2.9×10^3	kN・m
RO 処理水受タンク		本体	転倒	0.36	5.8×10^2	2.9×10^3	kN・m
RO 処理水 一時貯槽	16t 容量	本体	転倒	0.36	6.9×10^1	1.7×10^2	kN・m
	35t 容量	本体	転倒	0.36	1.6×10^2	3.8×10^2	kN・m
	42t 容量	本体	転倒	0.36	1.9×10^2	5.3×10^2	kN・m
RO 処理水 貯槽	300t 容量	本体	転倒	0.36	5.3×10^3	1.1×10^4	kN・m
	450t 容量	本体	転倒	0.36	6.7×10^3	2.2×10^4	kN・m
	1100t 容量	本体	転倒	0.36	2.1×10^4	7.0×10^4	kN・m
RO 濃縮水受タンク		本体	転倒	0.36	5.8×10^2	2.9×10^3	kN・m
RO 濃縮水 貯槽	120t 容量	本体	転倒	0.36	1.4×10^3	3.2×10^3	kN・m
	500t 容量	本体	転倒	0.36	9.1×10^3	2.6×10^4	kN・m
	1100t 容量	本体	転倒	0.36	2.1×10^4	7.0×10^4	kN・m
多核種処理水貯槽		本体	転倒	0.36	2.0×10^4	6.9×10^4	kN・m
濃縮水受タンク		本体	転倒	0.36	2.1×10^2	5.4×10^2	kN・m
蒸留水タンク		本体	転倒	0.36	2.1×10^2	5.4×10^2	kN・m
濃縮処理水タンク		本体	転倒	0.36	2.1×10^2	5.4×10^2	kN・m
蒸発濃縮処理水貯槽		本体	転倒	0.36	2.1×10^4	7.0×10^4	kN・m
濃縮水タンク		本体	転倒	0.36	2.1×10^2	5.4×10^2	kN・m
濃縮廃液貯槽		本体	転倒	0.36	1.1×10^3	2.3×10^3	kN・m

b. 基準地震動 S_s に対する評価

円筒型タンクに対し、基準地震動 S_s による地震力にて発生する応力等を算出し許容値と比較することにより、タンクの貯水機能維持について評価を実施した。評価の結果、基準地震動による地震力に対して発生する応力等は許容値よりも小さく、機能が維持されることを確認した（表－１２）。

表－１２ 円筒型タンクの基準地震動 S_s に対する評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	算出値	許容値	単位
RO 処理水貯槽 RO 濃縮水貯槽 蒸発濃縮処理水貯槽	側板	膜応力	246	360	MPa
		座屈	0.66	1	—
	接続ボルト (水平方向)	引張	355	525	MPa
	接続ボルト (鉛直方向)	引張	506	525	MPa

1.2.9. 地下貯水槽

(1) 構造強度評価

設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが、社団法人雨水貯留浸透技術協会「プラスチック製地下貯留浸透施設技術指針」に準じたプラスチック製枠材及び日本遮水工協会により製品認定を受けている遮水シートを使用することで、高い信頼性を確保する。

(2) 耐震性評価

(2)-1.1. 評価の項目・目的

地下貯水槽の耐震性評価は次の 2 項目について実施する。

- ① 地下貯水槽の地震発生時の止水シートの強度（止水性）の確認
- ② 地下貯水槽に地震が作用した場合の貯水槽内部の貯水枠材の強度の確認
 - a) 地表面載荷荷重として 10kN/m^2 を考慮した場合
 - b) 地下貯水槽の上盤に車両が載った場合

表－13 に、それぞれの評価項目の目的及び内容についてまとめたものを示す。このうち、最も重要なのは①にあげた地震発生時の止水性の確認であり、貯水枠材の強度に関しては、仮に貯水枠材が破壊に至っても不具合事象としては上盤の陥没等が発生する程度と想定され、最も重要な貯水槽の性能である止水性に悪影響はないと考えられる。

表－13 評価項目毎の目的・内容

評価項目	目的・内容	想定不具合事象
①止水シート強度	○ 地震力が作用した場合の止水シートの発生ひずみ量を解析し、シートが破断しないか、即ち漏えい事象が発生しないかを確認する。	○ 止水シートが破断すると、地中に貯水が漏えい拡散するリスクが生じる。
②貯水枠材強度 a) 地表面載荷荷重 10kN/m^2	○ 貯水枠材に地震力が作用した場合の貯水枠材応力度を検討して枠材の強度を確認する。	○ 貯水枠材が破壊すると、枠材が崩れて貯水槽の上盤が陥没する。それにより、上盤に敷設している PE シートが破断する可能性があるが、このシートは雨水混入防止用のものであり、漏えいには直接関係ない。
②貯水枠材強度 b) 車両荷重	○ 貯水槽の上盤に車両が載った場合（自動車荷重を考慮した場合）の貯水枠材の強度を確認する。	

(2)-1.2. 計算条件

各評価項目の作用荷重等の与条件の概要を表－14に示す。

表－14 評価項目毎の与条件

評価項目	作用震度	作用荷重
①止水シート強度	Bクラス：水平震度 0.3 Sクラス：水平震度 0.6	各自重
②貯水枠材強度 a) 地表面載荷荷重 10kN/m ²	Bクラス：水平震度 0.3 Sクラス：水平震度 0.6 鉛直震度 0.3	地表載荷荷重 覆土荷重 貯水枠材荷重 地震時水平土圧
②貯水枠材強度 b) 車両荷重	鉛直震度 0.3	自動車荷重 (T-25) 覆土荷重

(2)-1.3. 照査結果

照査結果を表－15に示す。また各項目の検討の詳細は表－15に示す別添資料に示す。

表－15 評価項目毎の照査結果

評価項目	照査対象	作用震度	計算結果	許容値	詳細
①止水シート強度	止水シートの ひずみ量	Bクラス	0.148%	560%	別添－2
		Sクラス	0.206%	560%	
②貯水枠材強度 a) 地表面載荷荷重 10kN/m ²	貯水枠材の 水平・鉛直 強度	Bクラス	水平：23.0kN/m ²	30.0kN/m ²	別添－3
		Sクラス	水平：46.8kN/m ² 垂直：33.7kN/m ²	52.5kN/m ² 102.1kN/m ²	
②貯水枠材強度 b) 車両荷重	貯水枠材の 鉛直強度	—	77.3kN/m ²	102.1kN/m ²	別添－4

(3)スロッシングに対する評価

地下貯水槽の場合、プラスチック製枠材で構築される水室の中で最も大きなものの寸法は幅 25cm 以下と小規模であり、スロッシングのような長周期問題は顕在化しないと考えられる。なお、検討の詳細については別添－5に示す。

(4) 地下貯水槽を設置する地盤の評価

地下貯水槽は地盤を掘削して設置するため、掘削完了時の地盤は加圧密状態となっている。また設置するプラスチック製枠材と貯留する水の重量は、掘削した土砂（地盤）よりも小さいことから、地下貯水槽が掘削完了後の地盤上に設置されても、地盤が強度破壊等の不具合を発生することはないと考えられる。しかしながら、念のため、表層 0.5m の部分にはセメント系改良材による地盤改良を施し、地盤を補強する。

1.2.10. ポンプ

(1) 構造強度評価

材料証明書がなく、設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが、漏えい試験等を行い、有意な変形や漏えい、運転状態に異常がないことを確認した。従って、ポンプは必要な構造強度を有すると評価した。

なお、海外製の一部ポンプを除き、JIS 規格に準用したポンプを使用している。

1.2.11. 配管等

(1) 構造強度評価

a. 配管（鋼製）

材料証明書がなく、設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが、漏えい試験等を行い、有意な変形や漏えい、運転状態に異常がないことを確認した。従って、配管は必要な構造強度を有すると評価した。

また、配管の主要仕様から設計・建設規格に基づき板厚評価を実施した。評価に用いた数値を表-16-1 に示す。評価の結果、最高使用圧力に耐えられることを確認した（表-16-2）。

$$t = \frac{PD_0}{2S\eta + 0.8P}$$

t : 管の計算上必要な厚さ

D₀ : 管の外径

P : 最高使用圧力[MPa]

S : 最高使用温度における
材料の許容引張応力[MPa]

η : 長手継手の効率

表－１６－１ 配管構造強度評価の計算根拠

評価 機器	口径	Sch.	材質	P [MPa]	温度 [℃]	Do [mm]	S [MPa]	η	t [mm]
配管①	100A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	114.3	93	1.00	0.837 → 0.84
配管②	200A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	216.3	93	1.00	1.584 → 1.6
配管③	50A	40	SUS316L	1.37	66	60.5	108	1.00	0.382 → 0.39
配管④	80A	40	SUS316L	1.37	66	89.1	108	1.00	0.562 → 0.57
配管⑤	50A	20S	SUS316L	0.3	50	60.5	110	0.60	0.137 → 0.14
配管⑥	80A	20S	SUS316L	0.3	50	89.1	110	0.60	0.202 → 0.21
配管⑦	100A	20S	SUS316L	0.3	50	114.3	110	0.60	0.259 → 0.26
配管⑧	150A	20S	SUS316L	0.3	50	165.2	110	0.60	0.375 → 0.38
配管⑨	200A	20S	SUS316L	0.3	50	216.3	110	0.60	0.491 → 0.50
配管⑩	50A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	60.5	93	1.00	0.443 → 0.45
配管⑪	80A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	89.1	93	1.00	0.652 → 0.66
配管⑫	150A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	165.2	93	1.00	1.210 → 1.3
配管⑬	25A	80	STPG370	0.5	66	34.0	93	1.00	0.091 → 0.10
配管⑭	50A	80	STPG370	0.5	66	60.5	93	1.00	0.162 → 0.17
配管⑮	80A	80	STPG370	0.5	66	89.1	93	1.00	0.239 → 0.24
配管⑯	100A	80	STPG370	0.5	66	114.3	93	1.00	0.307 → 0.31
配管⑰	50A	40	SUS316L	0.97	66	60.5	108	1.00	0.271 → 0.28
配管⑱	80A	40	SUS316L	0.97	66	89.1	108	1.00	0.399 → 0.40
配管⑲	50A	40	SUS316L	1.37	66	60.5	108	0.60	0.634 → 0.64
配管⑳	80A	40	SUS316L	1.37	66	89.1	108	0.60	0.934 → 0.94

表一 1 6 - 2 配管構造強度評価結果

評価機器	口径	Sch.	材質	最高使用 压力 (MPa)	最高使用 温度 (℃)	必要肉厚 (mm)	肉厚 (mm)
配管①	100A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	0.84	8.6
配管②	200A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	1.6	12.7
配管③	50A	40	SUS316L	1.37	66	0.39	3.9
配管④	80A	40	SUS316L	1.37	66	0.57	5.5
配管⑤	50A	20S	SUS316L	0.3	50	0.14	3.5
配管⑥	80A	20S	SUS316L	0.3	50	0.21	4.0
配管⑦	100A	20S	SUS316L	0.3	50	0.26	4.0
配管⑧	150A	20S	SUS316L	0.3	50	0.38	5.0
配管⑨	200A	20S	SUS316L	0.3	50	0.50	6.5
配管⑩	50A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	0.45	5.5
配管⑪	80A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	0.66	7.6
配管⑫	150A	80	STPG370 STPT370	1.37	66	1.3	11.0
配管⑬	25A	80	STPG370	0.5	66	0.10	4.5
配管⑭	50A	80	STPG370	0.5	66	0.17	5.5
配管⑮	80A	80	STPG370	0.5	66	0.24	7.6
配管⑯	100A	80	STPG370	0.5	66	0.31	8.6
配管⑰	50A	40	SUS316L	0.97	66	0.28	3.9
配管⑱	80A	40	SUS316L	0.97	66	0.40	5.5
配管⑲	50A	40	SUS316L	1.37	66	0.64	3.9
配管⑳	80A	40	SUS316L	1.37	66	0.94	5.5

b. 耐圧ホース（樹脂製）

設計・建設規格上のクラス 3 機器に対する規定を満足する材料ではないが，系統の温度，圧力を考慮して仕様を選定した上で，漏えい試験等を行い，漏えい，運転状態に異常がないことを確認する。従って，耐圧ホースは，必要な構造強度を有していると評価した。

c. ポリエチレン管

設計・建設規格上のクラス 3 機器に対する規定を満足する材料ではないが，系統の温度，圧力を考慮して仕様を選定している。また，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している。

- ・ 日本水道協会規格に適合したポリエチレン管を採用。
- ・ 継手は可能な限り融着構造とする。
- ・ 敷設時に漏えい試験等を行い，運転状態に異常がないことを確認している。

以上のことから，ポリエチレン管は，必要な構造強度を有するものと評価した。

2. 使用済セシウム吸着塔保管施設及び廃スラッジ貯蔵施設

2.1. 基本方針

2.1.1. 構造強度評価の基本方針

使用済セシウム吸着塔保管施設及び廃スラッジ貯蔵施設を構成する機器のうち放射性物質を内包する機器は、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」で定めるクラス 3 機器と位置づけられ、原則としてクラス 3 機器に要求される基準を満足するように設計する。万一適合しないものがある場合においても、温度、圧力、使用環境等を考慮し、一般民間規格に従う産業品を使用するとともに、機器の設計、製作、設置、検査等の各段階において、適切なものとなっていることを確認し、クラス 3 機器と同等以上の構造強度を持たせる。

2.1.2. 耐震性評価の基本方針

使用済セシウム吸着塔保管施設、廃スラッジ貯蔵施設を構成する機器は、「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る。

使用済セシウム吸着塔保管施設、廃スラッジ貯蔵施設の耐震性に関する評価にあたっては、「JEAC4601 原子力発電所耐震設計技術規程」に準拠することを基本とするが、必要に応じて現実的な評価を行う。

また、配管に関しては、変位による破壊を防止するため、定ピッチスパン法による配管サポート間隔の設定や、可撓性のある材料を使用する。

なお、廃スラッジ一時保管施設等は、高濃度の放射性物質を貯蔵することから参考として S クラス相当の評価を行う。

2.2. 評価結果

2.2.1. 使用済セシウム吸着塔仮保管施設

(1) 構造強度評価

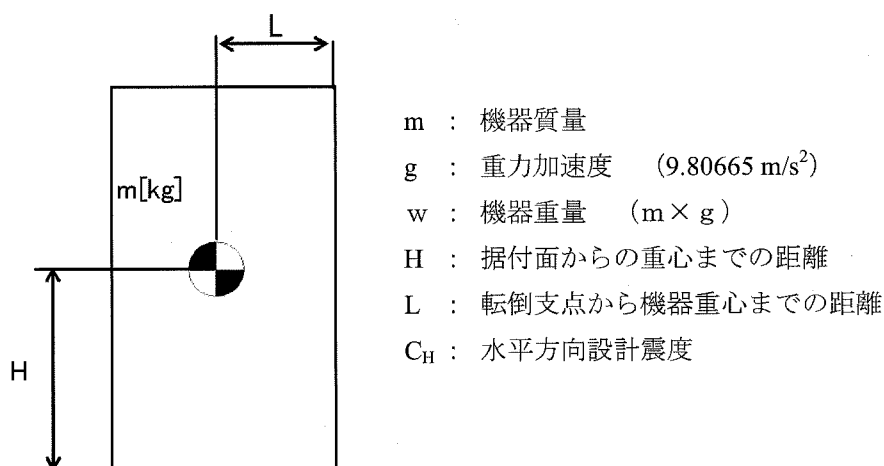
材料証明書がなく、設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが、漏えい試験等を行い、有意な変形や漏えい、運転状態に異常がないことを確認した。また、吸着塔の主要仕様から必要肉厚を評価し十分な肉厚を有していることを確認した。

以上のことから、吸着塔は必要な構造強度を有すると評価した。

(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。評価に使用した数値を表－１７－１に示す。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（表－１７－２）。



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

自重による安定モーメント : $M_2 [\text{N} \cdot \text{m}] = m \times g \times L$

表－１７－１ 使用済セシウム吸着塔仮保管施設の転倒評価数値根拠

機器名称		m / w	$H[\text{m}]$	$L[\text{m}]$	C_H	$M_1 [\text{kN} \cdot \text{m}]$	$M_2 [\text{kN} \cdot \text{m}]$
ボックス カルバート		■ [kN]	■	■	0.30	136 → 1.4×10^2	298 → 2.9×10^2
セシウム吸着装置 吸着塔		■ [kN]	■	■	0.36	81.1 → 8.2×10^1	124 → 1.2×10^2
第二セシウム 吸着装置吸着塔	吸着塔	■ [t]	■	■	0.36	180.3 → 1.9×10^2	421 → 4.2×10^2
	架台	■ [t]	■	■	0.60	300.1 → 3.1×10^2	

b. 滑動評価

地震時の水平荷重によるすべり力と接地面の摩擦力を比較することにより、滑動評価を実施した。評価の結果、地震時の水平荷重によるすべり力は接地面の摩擦力より小さいことから、滑動しないことを確認した（表－１７）。

$$\text{地震時の水平荷重によるすべり力} : F_L = C_H \times m \times g \rightarrow F_L / (m \times g) = C_H$$

$$\text{接地面の摩擦力} : F_\mu = \mu \times m \times g \rightarrow F_\mu / (m \times g) = \mu$$

m : 機器質量

g : 重力加速度

C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.57)

μ : 摩擦係数 (コンクリート/鉄 : 0.40, 鉄/鉄 : 0.52)

表－１７－２ 使用済セシウム吸着塔仮保管施設耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
ボックス カルバート	本体	転倒	0.30	1.4×10^2	2.9×10^2	kN・m
		滑動	0.30	0.30	0.40	－
セシウム吸着装置 吸着塔	本体	転倒	0.36	8.2×10^1	1.2×10^2	kN・m
		滑動	0.36	0.36	0.52	－
第二セシウム 吸着装置吸着塔	本体	転倒	0.36	1.9×10^2	4.2×10^2	kN・m
			0.60	3.1×10^2		
		滑動	0.36	0.36	0.52	－
			0.52	0.52		

2.2.2. 使用済セシウム吸着塔一時保管施設

(1) 構造強度評価

材料証明書がなく、設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが、漏えい試験等を行い、有意な変形や漏えい、運転状態に異常がないことを確認した。また、吸着塔の主要仕様から必要肉厚を評価し十分な肉厚を有していることを確認した。

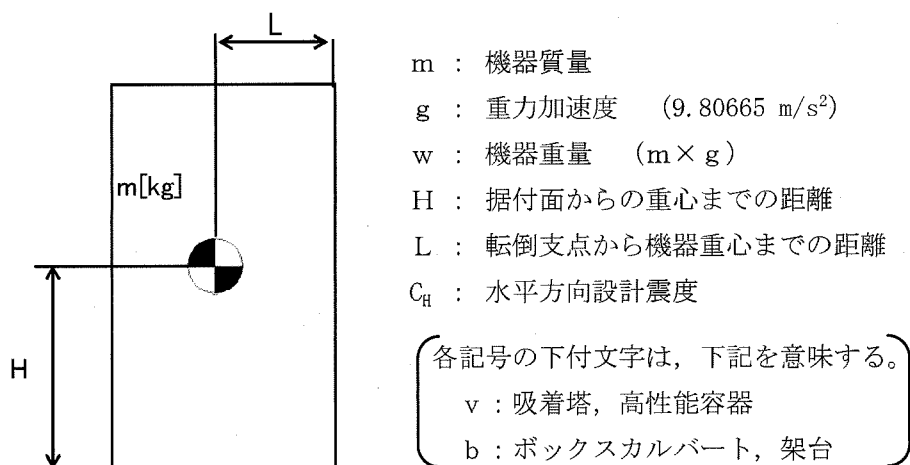
以上のことから、吸着塔は必要な構造強度を有すると評価した。

(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、それらを比較することにより転倒評価を行った。なお、セシウム吸着装置吸着塔はそれを格納するボックスカルバートと合わせて吸着塔 32 塔と蓋付ボックスカルバート 16 基での評価、第二セシウム吸着装置吸着塔はそれを格納する架台と合わせて吸着塔 10 塔と架台 2 台（一組）で評価を実施した。

評価に用いた数値を表－18－1 に示す。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（表－18－2）。



$$\begin{aligned}
 \text{地震による転倒モーメント : } M_1 [\text{N} \cdot \text{m}] &= m \times g \times C_H \times H \\
 &= g \times C_H \times (m_v \times H_v + m_b \times H_b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{自重による安定モーメント : } M_2 [\text{N} \cdot \text{m}] &= m \times g \times L \\
 &= (m_v \times L_v + m_b \times L_b) \times g
 \end{aligned}$$

表-18-1 使用済セシウム吸着塔一時保管施設の耐震評価数値根拠

機器名称	数量	m / w	H [m]	L [m]	水平 震度	M ₁ [kN・m]	M ₂ [kN・m]
吸着塔+カルバート (セシウム吸着装置 吸着塔 32 塔と ボックスカルバート 16 基)	吸着塔	■ [kN]	■ ※1				
	ボックス カルバート	■ [kN]	■		0.36	7,864 → 7.9×10 ³ ※2	18,120 → 1.8×10 ⁴ ※3
	ボックス カルバート蓋	■ [kN]	■		0.60	13,107 → 1.4×10 ⁴ ※2	
	遮へい	■ [kN]	■				
吸着塔+架台 (第二セシウム吸着装置 吸着塔 10 本と架台 2 台)	吸着塔	■ [kg]	■		0.36	1,685 → 1.7×10 ³	3,775 → 3.7×10 ³
	架台	■ [kg]	■		0.60	2,808 → 2.9×10 ³	
高性能容器	1	■ [kg]	■	■	0.36	20.3 → 2.1×10 ¹	45.6 → 4.5×10 ¹
					0.60	33.9 → 3.4×10 ¹	

※1：ボックスカルバートへの荷重用高さ

※2：吸着塔の水平荷重の半分がボックスカルバートに作用するとして評価

※3：ボックスカルバート及び遮へい（吸着塔を含まず）の評価

b. 滑動評価

セシウム吸着装置吸着塔については、ボックスカルバートとあわせ地震時の水平荷重によるすべり力と接地面の摩擦力を比較することにより、滑動評価を実施した。評価の結果、地震時の水平荷重によるすべり力は接地面の摩擦力より小さいことから、滑動しないことを確認した（表－１８－２）。なお、S クラス相当の評価では、地震時の水平荷重によるすべり力が設置面の摩擦力より大きくなり、滑動する結果となったことから、別途すべり量の評価を実施した。

$$\begin{aligned} \text{地震時の水平荷重によるすべり力} & : F_L = C_H \times m \times g \rightarrow F_L / (m \times g) = C_H \\ \text{接地面の摩擦力} & : F_\mu = \mu \times m \times g \rightarrow F_\mu / (m \times g) = \mu \end{aligned}$$

m : 機器質量

g : 重力加速度

C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.57)

μ : 摩擦係数 (コンクリート/鉄 : 0.40, 鉄/鉄 : 0.52)

第二セシウム吸着装置吸着塔については、基礎ボルトにて固定していることから基礎ボルトに作用するせん断荷重と許容せん断荷重を比較することより滑動評価を実施した。基礎ボルトの許容せん断荷重は「日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説」に基づき次式を用いた。評価の結果、基礎ボルトの破断による滑動が生じないことを確認した（表－１８－２）。

$$\begin{aligned} q &= mg(C_H - \alpha) \div n \\ &= g(m_v + m_b)(C_H - \alpha) \div n \\ q_a &= 0.75 \cdot \phi_{s3} (0.5 \cdot s_c a \cdot \sqrt{F_c \cdot E_c}) \end{aligned}$$

q : アンカーボルト一本に作用するせん断荷重

q_a : アンカーボルト一本当たりの許容せん断荷重

C_H : 水平方向設計震度 (0.36, 0.60)

m : 機器重量 (吸着塔 m_v : ■ kg, 架台 m_b : ■ kg)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

α : 機器と床版の摩擦係数 (0.4)

n : 機器あたりのアンカーボルト本数 (■ 本)

ϕ_{s3} : 短期荷重に対する低減係数 (0.6)

$s_c a$: アンカーボルトの定着部の断面積 (■ mm²)

F_c : コンクリート設計基準強度 (■ N/mm²)

E_c : コンクリートのヤング率 (■ N/mm²)

$C_H=0.36$ の場合 $q = -1.6 \text{ kN} \rightarrow$ せん断荷重は発生しない。

$C_H=0.60$ の場合 $q = 7.9 \text{ kN} \rightarrow 8 \text{ kN}$

$q_a = 77.4 \text{ kN} \rightarrow 77 \text{ kN}$

c. すべり量評価

吸着塔と架台等の地震時におけるすべり量は、剛体の地震時変形量評価手法である Newmark 法を用いて算出する。評価の結果すべり量が架台間の許容値を超えないことを確認した（表－１９）。

表－１８－２ 使用済セシウム吸着塔一時保管施設耐震評価結果

機器名称	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
吸着塔＋カルハート (セシウム吸着装置 吸着塔 32 塔と ボックルカルハート 16 基)	転倒	0.36	7.9×10^3	1.8×10^4	$\text{kN} \cdot \text{m}$
		0.60	1.4×10^4		
	滑動	0.36	0.36	0.40	—
		0.60	0.60		
吸着塔＋架台 (第二セシウム吸着装置 吸着塔 10 本と架台 2 台)	転倒	0.36	1.7×10^3	3.7×10^3	$\text{kN} \cdot \text{m}$
		0.6	2.9×10^3		
	滑動 (ボルトせん断)	0.36	<0	77	kN
		0.6	8		
高性能容器	転倒	0.36	2.1×10^1	4.5×10^1	$\text{kN} \cdot \text{m}$
		0.60	3.4×10^1		
	滑動	0.36	0.36	0.40	—
		0.60	0.60		

表－１９ 使用済セシウム吸着塔一時保管施設すべり量評価結果

機器名称	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
吸着塔＋カルハート (セシウム吸着装置 吸着塔 32 塔と ボックルカルハート 16 基)	すべり量	0.60	93.3	494	mm

2.2.3. 廃スラッジ一時保管施設

(1) 構造強度評価

スラッジ貯槽について、設計・建設規格に準拠し、板厚評価を実施した（表－２０）。

$$t = \frac{D_i H \rho}{0.204 S \eta}$$

t : 胴の計算上必要な厚さ
 D_i : 胴の内径 (mm)
 H : 水頭 (mm)
 ρ : 液体の比重 (1.2)
 S : 最高使用温度 (50℃) における材料 (SS400) の許容引張応力 (100 MPa)
 η : 長手継手の効率 (0.7)

$= 0.86$
 $\rightarrow 0.9$

ただし、 t の値は炭素鋼，低合金鋼の場合は $t=3$ [mm] 以上，その他の金属の場合は $t=1.5$ [mm] 以上とする。また，内径の区分に応じた必要厚さを考慮する。

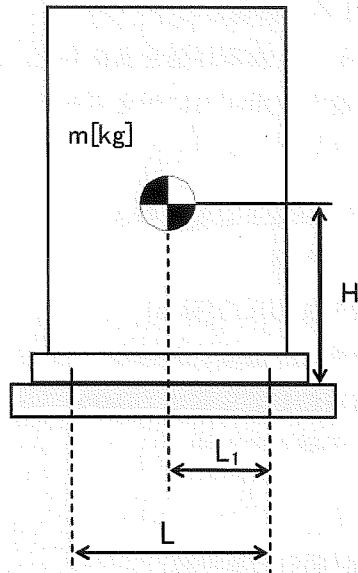
表－２０ スラッジ貯槽板厚評価結果

機器名称		評価部位	必要肉厚 [mm]	実厚 [mm]
スラッジ貯槽	円筒型（横置き）	タンク板厚	3.0	25.0

(2) 耐震性評価

a. 基礎ボルトの強度評価

耐震設計技術規程に準拠して評価を行った結果、基礎ボルトの強度が確保されることを確認した（表－２１）。



- m : 機器質量
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- H : 据付面からの重心までの距離
- L : 基礎ボルト間の水平方向距離
- L_1 : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離
- n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数
- n : 基礎ボルトの本数
- A_b : 基礎ボルトの軸断面積
- C_H : 水平方向設計震度
- C_V : 鉛直方向設計震度 (0)

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

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

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

表－２１ スラッジ貯槽の基礎ボルトの強度評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
スラッジ貯槽	基礎ボルト	引張	0.36	11	439	MPa
			0.94	131		
		せん断	0.36	42	337	MPa
			0.94	122		

2.2.4. 配管等

(1) 構造強度評価

a. 配管（鋼製）

材料証明書がなく，設計・建設規格におけるクラス 3 機器の要求を満足するものではないが，漏えい試験等を行い，有意な変形や漏えい，運転状態に異常がないことを確認した。従って，配管は必要な構造強度を有すると評価した。

また，配管の主要仕様から設計・建設規格に基づき板厚評価を実施した。評価に用いた数値を表－22－1に示す。評価の結果，最高使用圧力に耐えられることを確認した（表－22－2）。

$$t = \frac{P D_o}{2 S \eta + 0.8 P}$$

t : 管の計算上必要な厚さ
 D_o : 管の外径
 P : 最高使用圧力[MPa]
 S : 最高使用温度における
 材料の許容引張応力[MPa]
 η : 長手継手の効率

表－22－1 配管構造強度評価の計算根拠

評価 機器	口径	Sch.	材質	温度 [℃]	P [MPa]	Do [mm]	S* [MPa]	η	t [mm]
配管①	50A	20S	SUS316L	50	0.3	60.5	110	1.00	0.082 → 0.09
配管②	80A	20S	SUS316L	50	0.3	89.1	110	1.00	0.121 → 0.13
配管③	50A	20S	SUS316L	50	0.98	60.5	110	1.00	0.269 → 0.27
配管④	80A	20S	SUS316L	50	0.98	89.1	110	1.00	0.395 → 0.40
配管⑤	50A	40	SUS316L	50	0.98	60.5	110	1.00	0.269 → 0.27
配管⑥	80A	40	SUS316L	50	0.98	89.1	110	1.00	0.395 → 0.40
配管⑦	80A	40	SUS329J4L	50	0.98	89.1	110	1.00	0.395 → 0.40
配管⑧	100A	40	SUS329J4L	50	0.98	114.3	110	1.00	0.507 → 0.51
配管⑨	125A	40	SUS329J4L	50	0.98	139.8	110	1.00	0.621 → 0.63
配管⑩	100A	40	SUS316L	50	0.98	114.3	110	1.00	0.507 → 0.51

※：SUS329J4Lの許容引張応力は設計・建設規格にて定められていないため，保守的にSUS316Lの値を使用。

表－２２－２ 配管構造強度評価結果

評価機器	口径	Sch.	材質	最高使用 圧力 (MPa)	最高使用 温度 (℃)	必要肉厚 (mm)	肉厚 (mm)
配管①	50A	20S	SUS316L	0.3	50	0.09	3.5
配管②	80A	20S	SUS316L	0.3	50	0.13	4.0
配管③	50A	20S	SUS316L	0.98	50	0.27	3.5
配管④	80A	20S	SUS316L	0.98	50	0.40	4.0
配管⑤	50A	40	SUS316L	0.98	50	0.27	3.9
配管⑥	80A	40	SUS316L	0.98	50	0.40	5.5
配管⑦	80A	40	SUS329J4L	0.98	50	0.40	5.5
配管⑧	100A	40	SUS329J4L	0.98	50	0.51	6.0
配管⑨	125A	40	SUS329J4L	0.98	50	0.63	6.6
配管⑩	100A	40	SUS316L	0.98	50	0.51	6.0

b. 耐圧ホース（樹脂製）

設計・建設規格上のクラス 3 機器に対する規定を満足する材料ではないが、系統の温度、圧力を考慮して仕様を選定した上で、漏えい試験等を行い、漏えい、運転状態に異常がないことを確認する。従って、耐圧ホースは、必要な構造強度を有していると評価した。

以上

別冊 6

原子炉格納容器ガス管理設備に係る補足説明

I 原子炉格納容器ガス管理設備の構造強度及び耐震性について

1. 1号機

(1) 排気ファンの構造強度及び耐震性

(a) 構造強度

排気ファンについては、工場試験にて締切運転（約 6kPa）を実施し、異常がないことを確認しており、排気ファンの運転にあたり十分な構造強度を有していると評価する。

(b) 耐震性

排気ファンの耐震性評価として、「JEAG4601(1987 年度)」を準用し、ファン基礎ボルトの評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震 C クラス設備に適用される静的地震力（1号機：0.21G）を採用した。基礎ボルトの許容応力については、供用状態 D における許容応力を適用し、ボルトの評価温度は 100℃とした。ボルト 1 本当たりの引張荷重及びせん断荷重を評価した結果、ボルトに生じる引張及びせん断荷重は許容荷重以下であり、ボルトの強度が確保されることを確認した（表-1 参照）。

$$\text{ボルトに作用する引張力} : F_b = \frac{W(C_H + C_P) \cdot h + M_P - W(1 - C_P) \cdot l_1}{1/2 \cdot n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

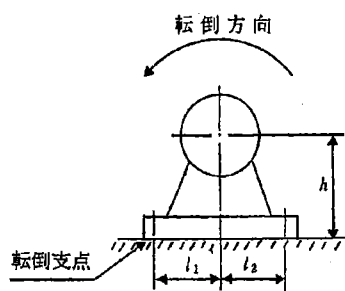
$$\text{ボルトの引張応力} : \sigma_b = \frac{F_b}{A_b}$$

$$\text{ボルトに作用するせん断力} : Q_b = W(C_H + C_P)$$

$$\text{ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A_b}$$

$$\text{ボルトの許容引張応力} : 1.5f_t^* = 1.5 \times \frac{F^*}{2} \quad , \quad F^* = \min[1.2S_y, 0.7S_u]$$

$$\text{ボルトの許容せん断応力} : 1.5f_s^* = 1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}}$$



C_H : 水平方向設計震度 (0.21)
 C_p : ファン振動による震度 ()
 M_P : ファン回転により働くモーメント (N・mm)
 l_1 : 軸心と基礎ボルト間の距離 (mm)
 l_2 : 軸心と基礎ボルト間の距離 ($l_1 \leq l_2$) (mm)
 d : 基礎ボルトの呼び径 (mm)
 n : 基礎ボルトの本数 ()
 n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数 ()
 h : 据付面から重心までの距離 (mm)
 W : 据付面に作用する重量 (N)
 A_b : 基礎ボルトの軸断面積 (mm²)
 S_y : 設計降伏応力 (MPa,)
 S_u : 設計引張強さ (MPa,)

表-1 排気ファンの基礎ボルトの強度評価結果

号機	系統	応力種類	耐震Cクラス設備に適用される 静的地震力による評価	
			発生荷重[MPa]	許容荷重[MPa]
1	A, B	引張	5	174
		せん断	2	133

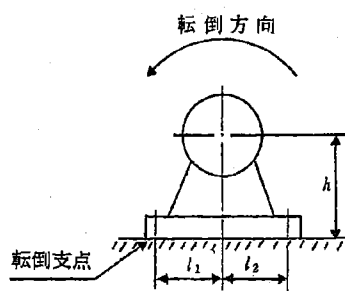
(2) フィルタユニットの構造強度及び耐震性

(a) 構造強度

フィルタユニットについては、最高使用圧力 0.35MPa に対し、工場にて 0.5MPa の耐圧試験を実施し、破損等の異常がないことを確認している。以上のことから、フィルタユニットについては、通常運転時の内圧に十分耐えうる構造強度を有していると判断する。

(b) 耐震性

フィルタユニットの耐震性評価として、「JEAG4601(1987 年度)」を準用し、1.(1)(b)と同様の方法で基礎ボルトの評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震 C クラス設備に適用される静的地震力 (1 号機 : 0.21G) を採用した。基礎ボルトの許容応力については、共用状態 D における許容応力を適用し、ボルトの評価温度は 100℃とした。ボルト 1 本当たりの引張荷重及びせん断荷重を評価した結果、ボルトに生じる引張及びせん断荷重は許容荷重以下であり、ボルトの強度が確保されることを確認した (表-2 参照)。



C_H : 水平方向設計震度 (0.21)
 C_p : ファン振動による震度 ()
 M_P : ファン回転により働くモーメント (N・mm)
 l_1 : 軸心と基礎ボルト間の距離 (mm)
 l_2 : 軸心と基礎ボルト間の距離 ($l_1 \leq l_2$) (mm)
 d : 基礎ボルトの呼び径 (mm)
 n : 基礎ボルトの本数 ()
 n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数 ()
 h : 据付面から重心までの距離 (mm)
 W : 据付面に作用する重量 (N)
 A_b : 基礎ボルトの軸断面積 (mm²)
 S_y : 設計降伏応力 (MPa,)
 S_u : 設計引張強さ (MPa,)

ボルトに作用する引張力 :
$$F_b = \frac{W(C_H + C_p) \cdot h + M_P - W(1 - C_p) \cdot l_1}{1/2 \cdot n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

ボルトの引張応力 :
$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b}$$

ボルトに作用するせん断力 :
$$Q_b = W(C_H + C_p)$$

ボルトのせん断応力 :
$$\tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A_b}$$

ボルトの許容引張応力 :
$$1.5f_t^* = 1.5 \times \frac{F^*}{2}, \quad F^* = \min[1.2S_y, 0.7S_u]$$

ボルトの許容せん断応力 :
$$1.5f_s^* = 1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}}$$

表-2 フィルタユニットの基礎ボルトの強度評価結果

号機	系統	応力種類	耐震Cクラス設備に適用される 静的地震力による評価	
			発生荷重[MPa]	許容荷重[MPa]
1	A, B	引張	作用しない	174
		せん断	10	133

(3) 管の構造強度及び耐震性

(a) 構造強度

配管については、「設計・建設規格(2005年版)」に基づき、クラス4配管の必要最小厚さに対して十分な厚さを有していることを確認しており、十分な構造強度を有していると評価している(表-3 参照)。

表-3 配管強度確認結果

外径[mm]	型式	公称肉厚 [mm]	設計・建設規格上の 必要最小厚さ[mm]
34.0	円型	4.5	0.5
60.5	円型	5.5	0.5
89.1	円型	5.5	0.5
114.3	円型	6.0	0.5
165.2	円型	7.1	0.5

(b) 耐震性

a. 評価条件

配管は、配管軸直角 2 方向拘束サポートを用いた両端単純支持の配管系（両端単純支持はり構造）とする。また、配管は水平方向主体のルートを想定し、管軸方向については地震により管軸方向は動かないものとし、水平方向震度による管軸直角方向の配管応力評価を考える。水平方向震度は、0.21G とする。

b. 評価方法

管軸直角方向の地震による応力は、下図に示す自重による応力の震度倍で表現でき(1)式で表すことができる。

$$S_s = \alpha S_w \quad (1)$$

S_s : 地震による応力 [MPa]

α : 水平方向震度[-]

S_w : 自重による応力[MPa]

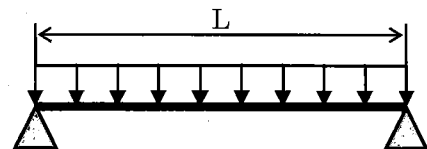
$$\text{ここで, } S_w = \frac{wL^2}{8Z}$$

S_w : 自重による応力[MPa]

L : サポート支持間隔[mm]

Z : 断面係数[mm³]

w : 等分布荷重[N/mm]



両端単純支持はりの等分布荷重より
求まる自重による応力

また、崩壊制限に「JEAG4601（1984 年度）」を準用し、供用状態 D の場合の一次応力制限を用いるとすると、地震評価としては(2)式で表すことができる。

$$S = S_p + S_w + S_s = S_p + S_w + \alpha S_w = S_p + (1 + \alpha) S_w \leq 0.9 S_u \quad (2)$$

S_p : 内圧による応力[MPa]

S_w : 自重による応力[MPa]

Ss:地震による応力[MPa]

S:内圧, 自重, 地震による応力[MPa]

α :水平方向震度[-]

従って, 上記(2)式を満足するように, 配管サポート配置を設定することにより, 配管の崩壊は抑制できる。

c. 評価結果

両端単純支持はりで自重による応力 S_w が 40 MPa 程度の配管サポート配置とした場合, 発生応力は許容応力に対して十分な裕度を有すると評価した。

一例として, この時の 150A (Sch. 40) 配管のサポート間隔 L は約 9.7m となる。

Z : 断面係数 ($1.337 \times 10^5 \text{ mm}^3$)

w : 等分布荷重 (0.45 N/mm)

- ・内圧による応力 $S_p=10 \text{ MPa}$, 許容応力を STPT370(100℃)の $0.9S_u=315 \text{ MPa}$ とし, (2)式に代入すると以下となる。

$$S = 59 \text{ MPa} \leq 0.9S_u = 315 \text{ MPa} \quad (3)$$

- ・継手がある場合には, 応力係数も存在する。応力係数を 3 とし, 以下となる。

$$S = S_p + (1 + \alpha)S_w \times 3 = 156 \text{ MPa} \leq 0.9S_u = 315 \text{ MPa} \quad (4)$$

2. 2／3号機

(1) 排気ファンユニットの構造強度及び耐震性

(a) 構造強度

排気ファンについては、系統最高使用圧力 5.2kPa に対し、工場にて 7.0kPa の気密試験を実施し、漏えい等の異常がないことを確認していることから、ファンの最高使用圧力に十分耐えうる構造強度を有していると判断する。

(b) 耐震性

ファンを鋼材と共にユニット化し、支持しているキャスタの回転をストッパ（車輪止め）で防止し、ストッパをボルト（2号：鋲アンカ，3号：メカニカルアンカ）で固定している。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること及びキャスタがストッパを乗り越えないことの評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力（2，3号機：0.21G）による評価を行った。

a. ボルトの強度評価及び転倒評価

ボルト強度評価に当たっては、JEAC4601-2008 を準用し、ボルト1本当たりの引張荷重及びせん断荷重を評価した。その結果、ボルトに生じる引張及びせん断荷重は許容荷重以下であり、ボルトの強度が確保されることを確認した（表-4 参照）。

表-4 排気ファンユニットの基礎ボルトの強度評価結果

号機	系統	応力種類	耐震Cクラス設備に適用される 静的地震力による評価	
			発生荷重[N]	許容荷重[N]
2	A	引張	作用しない	200
		せん断	158	200
	B	引張	作用しない	200
		せん断	167	200
3	A	引張	作用しない	2843
		せん断	474	1725
	B	引張	作用しない	2843
		せん断	502	1725

ボルトに作用するせん断力： $Q = \frac{C_H \cdot m \cdot g}{n}$

ボルトに作用する引張力： $F = \frac{C_H \cdot m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot L_1}{n_f \cdot (L_1 + L_2)}$

C_H ：水平方向設計震度（0.21）

m ：機器の運転時質量（A系：■ kg、B系：■ kg），

h ：重心高さ（A系：■ mm、B系：■ mm）

L_1, L_2 ：重心とボルト間の水平距離（ $L_1 \leq L_2$ ）

（A系： $L_1 = \text{■ mm}$, $L_2 = \text{■ mm}$ 、B系： $L_1 = \text{■ mm}$, $L_2 = \text{■ mm}$ ）

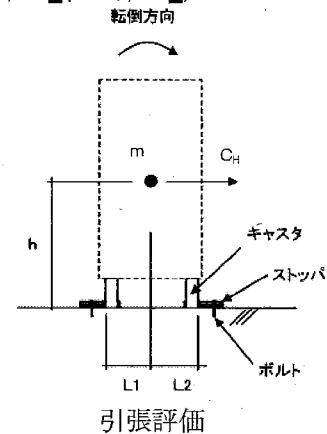
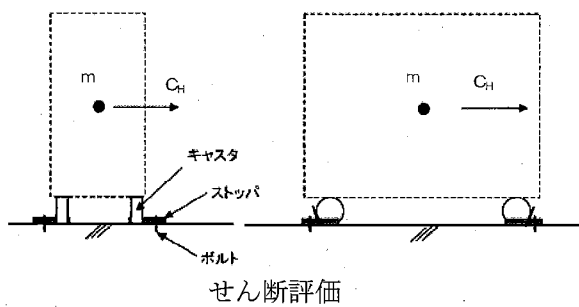
n_f ：評価上引張力を受けるボルト本数

2号機（A系：■、B系：■）、3号機（A系：■、B系：■）

n ：評価上せん断力を受けるボルト本数

2号機（A系：■、B系：■）、3号機（A系：■、B系：■）

g ：重力加速度（9.80665m/s²）

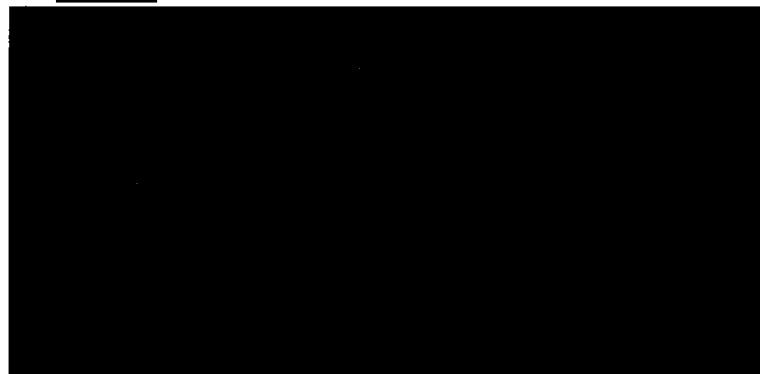


ここで、2号機の鉋アンカ及び3号機のメカニカルアンカの許容荷重の設定については以下の通り。

- 2号機（鉋メーカーの製品カタログから ■ の値を採用）

許容安全荷重			
ピンコンクリート貫入長	$14\text{mm} \leq h_{\text{pin}} < 18\text{mm}$	$18\text{mm} \leq h_{\text{pin}} < 22\text{mm}$	$22\text{mm} \leq h_{\text{pin}}$
引張荷重	■		
せん断荷重	■		

- 3号機（柏崎刈羽原子力発電所6号機建設時の後打ちアンカ使用基準に基づき、 ■ のメカニカルアンカの許容荷重を採用）



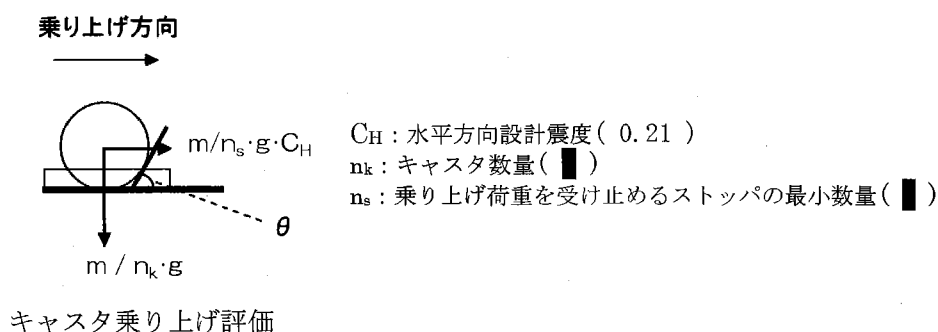
b. キャスタ乗り上げ評価

キャスタが回転する方向に対し、地震力によりキャスタがストッパ斜め部を乗り越えないことを力の釣り合いにより確認した。その結果、乗り越え最大角度は約 23° と計算され、実際の据え付け角度 60° より小さいことから、キャスタの乗り越えは発生しないことを確認した（表-5 参照）。

表-5 排気ファンユニットのキャスタ乗り上げ評価結果

号機	系統	ストッパ角度	乗り越え最大角度
2, 3	A, B	60°	約 23°

$$\text{乗り越えないためのストッパ角度： } \theta \geq \tan^{-1} \left(\frac{\frac{m}{n_s} \cdot g \cdot C_H}{\frac{m}{n_k} \cdot g} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{C_H \cdot n_k}{n_s} \right)$$



(2) フィルタユニットの構造強度及び耐震性

(a) 構造強度

フィルタユニットについては、系統最高使用圧力 5.2kPa に対し、工場にて 7.0kPa の気密試験を実施し、漏えい等の異常がないことを確認している。以上のことから、フィルタユニットについては、系統の最高使用圧力に十分耐えうる構造強度を有していると判断する。

(b) 耐震性

フィルタを鋼材と共にユニット化し、支持しているキャスタの回転をストッパ（車輪止め）で防止し、ストッパをボルト（2号：鉚アンカ、3号：メカニカルアンカ）で固定している。これを踏まえ、耐震性の評価として、2.(1)(b)と同様、ボル

トの強度が確保されること及びキャストがストッパを乗り越えないことの評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力（2, 3号機：0.21G）による評価を行った。

a. ボルトの強度評価及び転倒評価

ボルト強度評価に当たっては、JEAC4601-2008を準用し、ボルト1本当たりの引張荷重及びせん断荷重を評価した。その結果、ボルトに生じる引張及びせん断荷重は許容荷重以下であり、ボルトの強度が確保されることを確認した（表-6 参照）。

$$\text{ボルトに作用するせん断力} : Q = \frac{C_H \cdot m \cdot g}{n}$$

$$\text{ボルトに作用する引張力} : F = \frac{C_H \cdot m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot L_1}{n_f \cdot (L_1 + L_2)}$$

C_H ：水平方向設計震度（0.21）

m ：機器の運転時質量（ $\blacksquare$ kg）

h ：重心高さ（ $\blacksquare$ mm）

L_1, L_2 ：重心とボルト間の水平距離（ $L_1 \leq L_2$ ）（ $L_1 = \blacksquare$ mm、 $L_2 = \blacksquare$ mm）

n_f ：評価上引張力を受けるボルト本数 2号機（ $\blacksquare$ ）、3号機（ $\blacksquare$ ）

n ：評価上せん断力を受けるボルト本数 2号機（ $\blacksquare$ ）、3号機（ $\blacksquare$ ）

g ：重力加速度（9.80665m/s²）

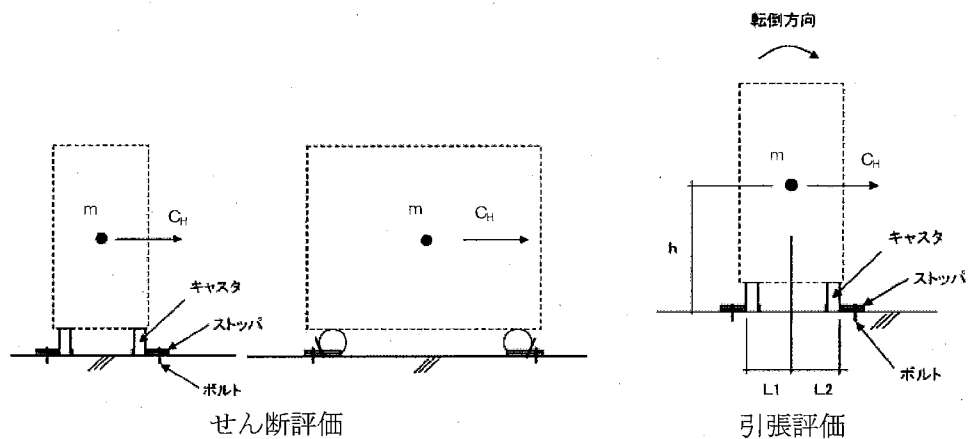


表-6 フィルタユニットの基礎ボルトの強度評価結果

号機	系統	応力種類	耐震Cクラス設備に適用される 静的地震力による評価	
			発生荷重[N]	許容荷重[N]
2	—※	引張	作用しない	200
		せん断	169	200
3	—※	引張	作用しない	2843
		せん断	506	1725

※ フィルタは2つ(2系統)で1つのユニットとなっている。

b. キャスタ乗り上げ評価

キャスタが回転する方向に対し、地震力によりキャスタがストッパ斜め部を乗り越えないことを力の釣り合いにより確認した。その結果、乗り上げ最大角度は約23°と計算され、実際の据え付け角度60°より小さいことから、キャスタの乗り上げは発生しないことを確認した(表-7 参照)。

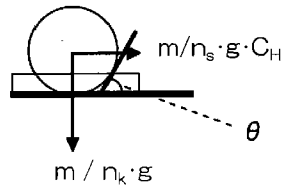
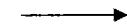
表-7 フィルタユニットのキャスタ乗り上げ評価結果

号機	系統	ストッパ角度	乗り上げ最大角度
2, 3	—※	60°	約23°

※ フィルタは2つ(2系統)で1つのユニットとなっている。

$$\text{乗り越えないためのストッパ角度: } \theta \geq \tan^{-1} \left(\frac{\frac{m}{n_s} \cdot g \cdot C_H}{\frac{m}{n_k} \cdot g} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{C_H \cdot n_k}{n_s} \right)$$

乗り上げ方向



C_H : 水平方向設計震度(0.21)

n_k : キャスタ数量()

n_s : 乗り上げ荷重を受け止めるストッパの最小数量()

キャスタ乗り上げ評価

(3) 放熱器ユニットの構造強度及び耐震性

(a) 構造強度

放熱器ユニットについては、系統最高使用圧力 5.2kPa に対し、工場にて 7.0kPa の気密試験を実施し、漏えい等の異常がないことを確認している。以上のことから、放熱器ユニットについては、通常運転時の内圧に十分耐えうる構造強度を有していると判断する。

(b) 耐震性

放熱器を鋼材と共にユニット化し、支持しているキャスタの回転をストッパ（車輪止め）で防止し、ストッパをボルト（2号：鋲アンカ、3号：メカニカルアンカ）で固定している。これを踏まえ、耐震性の評価として、2.（1）（b）同様、ボルトの強度が確保されること、及びキャスタがストッパを乗り越えないことの評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力（2, 3号機：0.21G）による評価を行った。

a. ボルトの強度評価及び転倒評価

ボルト強度評価に当たっては、JEAC4601-2008を準用し、ボルト1本当たりの引張荷重及びせん断荷重を評価した。その結果、ボルトに生じる引張及びせん断荷重は許容荷重以下であり、ボルトの強度が確保されることを確認した（表-8 参照）。

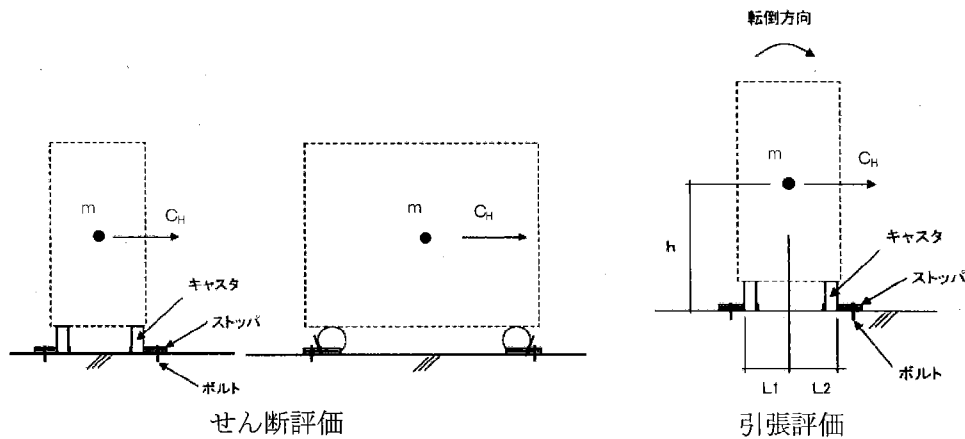
表-8 放熱器ユニットの基礎ボルトの強度評価結果

号機	系統	応力種類	耐震Cクラス設備に適用される 静的地震力による評価	
			発生荷重[N]	許容荷重[N]
2	A, B	引張	作用しない	200
		せん断	149	200
3	A, B	引張	作用しない	2843
		せん断	447	1725

$$\text{ボルトに作用するせん断力： } Q = \frac{C_H \cdot m \cdot g}{n}$$

$$\text{ボルトに作用する引張力： } F = \frac{C_H \cdot m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot L_1}{n_f \cdot (L_1 + L_2)}$$

C_H : 水平方向設計震度 (0.21)
 m : 機器の運転時質量 (A/B 系 : ■ kg)
 h : 重心高さ (A/B 系 : ■ mm)
 $L1, L2$: 重心とボルト間の水平距離 ($L1 \leq L2$) (A/B 系 : $L1 = \text{■ mm}$, $L2 = \text{■ mm}$)
 n_f : 評価上引張力を受けるボルト本数 2 号 (A/B 系 : ■), 3 号 (A/B 系 : ■)
 n : 評価上せん断力を受けるボルト本数 2 号 (A/B 系 : ■), 3 号 (A/B 系 : ■)
 g : 重力加速度 (9.80665m/s²)



b. キャスタ乗り上げ評価

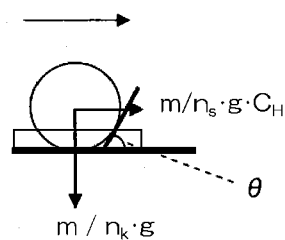
キャスタが回転する方向に対し、地震力によりキャスタがストッパ斜め部を乗り越えないことを力の釣り合いにより確認した。その結果、乗り越え最大角度は約 37° と計算され、実際の据え付け角度 60° より小さいことから、キャスタの乗り越えは発生しないことを確認した (表-9 参照)。

表-9 放熱器ユニットのキャスタ乗り上げ評価結果

号機	系統	ストッパ角度	乗り越え最大角度
2, 3	A, B	60°	約 37°

$$\text{乗り越えないためのストッパ角度 : } \theta \geq \tan^{-1} \left(\frac{\frac{m}{n_s} \cdot g \cdot C_H}{\frac{m}{n_k} \cdot g} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{C_H \cdot n_k}{n_s} \right)$$

乗り越え方向



キャスタ乗り上げ評価

C_H : 水平方向設計震度 (0.21)
 n_k : キャスタ数量 (■)
 n_s : 乗り越え荷重を受け止めるストッパの最小数量 (■)

(4) 管の構造強度及び耐震性

(4) - 1 鋼管及び鋼板ダクト

(a) 構造強度

鋼管及び鋼板ダクトについては、「設計・建設規格(2005年版)」を準用し、クラス4配管の必要最小厚さに対して十分な厚さを有していることを確認しており、原子炉格納容器ガス管理設備における使用条件に対し、十分な構造強度を有していると判断する(表-10参照)。

表-10 配管強度確認結果

外径[mm]	型式	公称肉厚 [mm]	設計・建設規格上の 必要最小厚さ[mm]
27.2	円型	2.8	0.5
60.5	円型	3.5	0.5
60.5	円型	3.8	0.5
139.8	円型	2.0	0.5
216.3	円型	6.5	0.6
260.0	角型	5.0	0.8
267.4	円型	4.0	0.6
267.4	円型	6.5	0.6

(b) 耐震性

鋼管及び鋼板ダクトは分岐ヘッダ等の短い部分に使用しているが、その前後はフレキシビリティを有したフレキシブルチューブ(SUS製)・ダクトホース(シリコン製)・防振継手と接続されており地震変位による有意な応力は発生しないと考える。

(4) - 2 ダクトホース

(a) 構造強度

ダクトホースは設計・建設規格に記載がない機器であるが、通常運転状態における漏えい確認試験を行い、有意な変形や漏えいがないことを確認していることから、必要な構造強度を有しているものと判断する。

(b) 耐震性

ダクトホースは、フレキシビリティを有しており、地震変位による有意な応力は発生しないと考えられる。

(4) - 3 フレキシブルホース

(a) 構造強度

フレキシブルホースは設計・建設規格に記載がない機器であるが、通常運転状態における漏えい確認試験を行い、有意な変形や漏えいがないことを確認していることから、必要な構造強度を有しているものと判断する。

(b) 耐震性

フレキシブルホースは、フレキシビリティを有しており、地震変位による有意な応力は発生しないと考えられる。

別冊 7

使用済燃料プールからの燃料取り出し設備に係る補足説明

I 燃料取り出し用カバー換気設備の構造強度及び耐震性について

1. 構造強度

燃料取り出し用カバー換気設備は、その用途から換気空調設備に類似すると考える。当該設備は、「JSME S NC-1 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」に定められた内包する流体の放射性物質の濃度が $37\text{mBq}/\text{cm}^3$ 未満であることから適用除外の設備と位置付けられるが、系統機能試験等を行い、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ことで、必要な構造強度を有するものと評価する。

2. 耐震性

2.1 基本方針

燃料取り出し用カバーの換気設備は、換気空調系であるCクラス相当と位置付けられることから、一般構造物と同等の耐震性を有する設計とする。

2.2 主要設備の耐震構造

「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」等を準用し、静的震度（1.2Ci）に基づく主要機器の転倒等の評価を行い、Cクラス相当の耐震性を有するものと評価する。

2.3 第4号機燃料取り出し用カバー換気設備の耐震性

2.3.1 送風機・排風機の耐震性

送風機・排風機の耐震性評価として、「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」を準用し、送風機・排風機基礎の溶接部の評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた $0.36G$ を採用した。基礎の溶接部の許容応力については、供用状態Dにおける許容応力を適用し、溶接部の評価温度は 50°C とした。基礎の溶接部のせん断応力を評価した結果、基礎の溶接部に生じるせん断応力は許容応力以下であり、基礎の溶接部の強度が確保されることを確認した（表4 参照）。

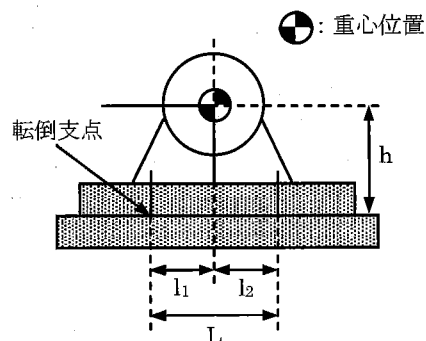


図1 送風機・排風機の耐震評価モデル

- ・評価部位：基礎の溶接部
- ・考慮する荷重：地震荷重 / 送風機・排風機振動による荷重

・計算に用いる数式

$$\text{鉛直方向のせん断力 } Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_P) \cdot h + M_p - W \cdot g \cdot (1 - C_P) \cdot l_1}{\frac{1}{2} n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$\text{鉛直方向のせん断応力 } \tau_v = \frac{Q_v}{A_w}$$

$$\text{水平方向のせん断力 } Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_P)$$

$$\text{水平方向のせん断応力 } \tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_w}$$

W : 据付面に作用する重量

g : 重力加速度 (=9.80665)

h : 据付面から重心までの距離

M_p : 送風機・排風機回転により働くモーメント

※基礎溶接部に M_p は作用しない

l₁ : 送風機・排風機重心と基礎の溶接部間の距離

l₂ : 送風機・排風機重心と基礎の溶接部間の距離 (l₁ ≤ l₂)

n_f : 鉛直方向のせん断力の作用する基礎の溶接部の評価箇所数

n : 基礎の溶接部の箇所数

A_w : 基礎の溶接部の断面積

C_H : 水平方向設計震度

C_P : 送風機・排風機振動による震度

表 1 送風機緒言

W (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
2520	9.80665	860	305	345
n _f	n	A _w (mm ²)	C _H	C _P
2	4	353.6	0.36	0.1
Sy (MPa) ※	Su (MPa) ※	F (MPa) ※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

表 2 排風機緒言

W (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
3460	9.80665	1130	365	425
n _f	n	A _w (mm ²)	C _H	C _P
2	4	353.6	0.36	0.1
Sy (MPa) ※	Su (MPa) ※	F (MPa) ※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

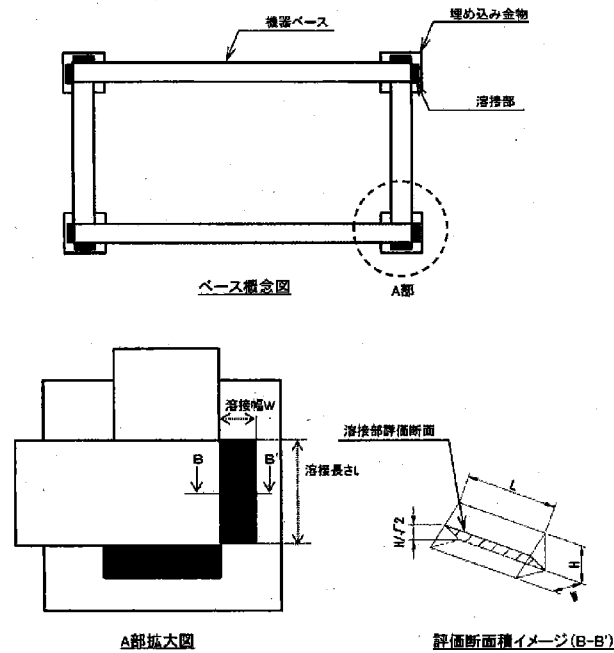


図2 送風機・排風機機器ベース溶接箇所概念図

表3 送風機・排風機機器ベース緒言

機器名称	溶接長さ L (mm)	溶接幅 W (mm)	溶接高さ H (mm)	のど厚 [(H/√2)] (mm)	溶接部 断面積 A _w (mm ²)
送風機	50	10	10	7.071	353.6
排風機	50	10	10	7.071	353.6

以下に代表として送風機の計算過程を示す。

<算出応力>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_P) \cdot h + M_P - W \cdot g \cdot (1 - C_P) \cdot l_1}{\frac{1}{2} n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{2520 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.0968679) \times 860 + 0 - 2520 \times 9.80665 \times (1 - 0.0968679) \times 305}{\frac{1}{2} \times 2 \times (305 + 345)} = 4465.45(\text{N})$$

$$\tau_v = \frac{Q_v}{A_w} = \frac{4465.45}{353.553} = 12.6303(\text{MPa}) \rightarrow 13(\text{MPa})$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_P) = 2520 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.0968679) = 11290.5(\text{N})$$

$$\tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_w} = \frac{11290.5}{4 \times 353.553} = 7.98360(\text{MPa}) \rightarrow 8(\text{MPa})$$

鉛直方向のせん断応力 τ_v と水平方向のせん断応力 τ_H の最大値が 13 (MPa) となる。

<許容応力>

許容応力については、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) による。

F は、 $1.2S_y$ と $0.7S_u$ の小さい値の 0.45 倍。

$$\text{許容せん断応力} = \frac{F}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = \frac{114}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = 65.8179 (\text{MPa}) \rightarrow 65 (\text{MPa})$$

表 4 送風機・排風機基礎の溶接部の強度評価

評価対象機器	部位	材料	応力種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
送風機	基礎の溶接部	SS400 相当	せん断	13	65
排風機	基礎の溶接部	SS400 相当	せん断	23	65

2.3.2 フィルタユニットの耐震性

フィルタユニットの耐震性評価として、「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」を準用し、2.3.1 項と同様の方法で基礎の溶接部の評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震 C クラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた $0.36G$ を採用した。基礎の溶接部の許容応力については、供用状態 D における許容応力を適用し、溶接部の評価温度は 50°C とした。基礎の溶接部のせん断応力を評価した結果、基礎の溶接部に生じるせん断応力は許容応力以下であり、基礎の溶接部の強度が確保されることを確認した (表 9 参照)。

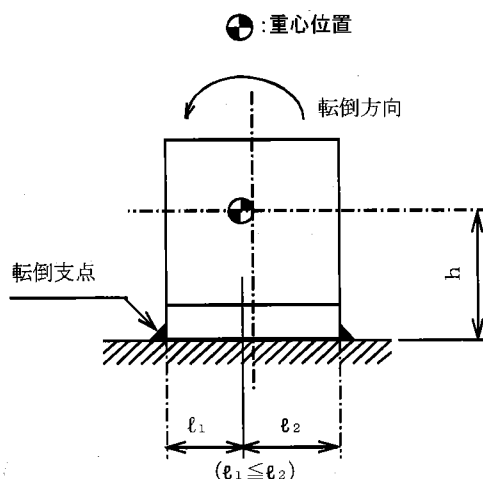


図 3 フィルタユニットの耐震評価モデル

- ・評価部位：基礎の溶接部
- ・考慮する荷重：地震荷重

・計算に用いる数式

$$\text{鉛直方向せん断力 } Q_v = \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$\text{鉛直方向せん断応力 } \tau_v = \frac{Q_v}{A_w}$$

$$\text{水平方向せん断力 } Q_H = W \cdot g \cdot C_H$$

$$\text{水平方向せん断応力 } \tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_w}$$

W : 据付面に作用する重量

g : 重力加速度(=9.80665)

h : 据付面から重心までの距離

l_1 : フィルタユニット重心と基礎の溶接部間の距離

l_2 : フィルタユニット重心と基礎の溶接部間の距離 ($l_1 \leq l_2$)

n_f : 鉛直方向のせん断力の作用する基礎の溶接部の評価箇所数

n : 基礎の溶接部の箇所数

A_w : 基礎の溶接部の断面積

C_H : 水平方向設計震度

C_v : 鉛直方向設計震度

表5 給気フィルタユニット (プレフィルタ) 緒言

W(kg)	g(m/s ²)	h(mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)
4139	9.80665	1471	1043.4	1856.6
n_f	n	A_w (mm ²)	C_H	C_v
2	4	353.6	0.36	0
Sy(MPa)※	Su(MPa)※	F(MPa)※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

表6 給気フィルタユニット (高性能粒子フィルタ) 緒言

W(kg)	g(m/s ²)	h(mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)
3600	9.80665	1326.5	1010	1240
n_f	n	A_w (mm ²)	C_H	C_v
2	4	353.6	0.36	0
Sy(MPa)※	Su(MPa)※	F(MPa)※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

表 7 排気フィルタユニット緒言

W (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
6215	9.80665	1404	1012	1238
n _f	n	A _w (mm ²)	C _H	C _V
2	4	495.0	0.36	0
Sy (MPa)※	Su (MPa)※	F (MPa)※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

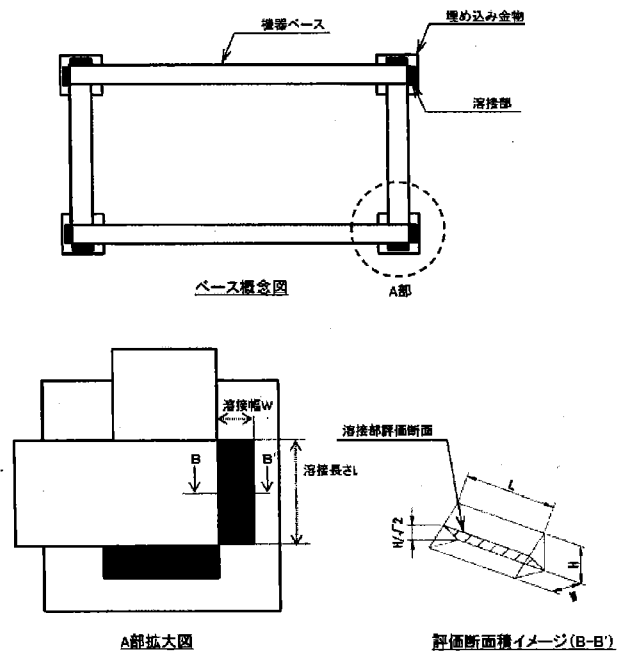


図 4 フィルタユニット機器ベース溶接箇所概念図

表 8 フィルタユニット機器ベース緒言

機器名称	溶接長さ L (mm)	溶接幅 W (mm)	溶接高さ H (mm)	のど厚 [(H/√2)] (mm)	溶接部断面積 A _w (mm ²)
給気フィルタユニット (プレフィルタ)	50	10	10	7.071	353.6
給気フィルタユニット (高性能粒子フィルタ)	50	10	10	7.071	353.6
排気フィルタユニット	50	14	14	9.899	495.0

以下に代表として給気フィルタユニット（プレフィルタ）の計算過程を示す。

<計算応力>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{4139 \times 9.80665 \times 0.36 \times 1471 - 4139 \times 9.80665 \times (1 - 0) \times 1043.4}{2 \times (1043.4 + 1856.6)} = -3595.96(\text{N})$$

$$\tau_v = \frac{Q_v}{A_w} = \frac{-3595.96}{353.553} = -10.1709(\text{MPa}) \rightarrow -10(\text{MPa})$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot C_H = 4139 \times 9.80665 \times 0.36 = 14612.3(\text{N})$$

$$\tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_w} = \frac{14612.3}{4 \times 353.553} = 10.3325(\text{MPa}) \rightarrow 11(\text{MPa})$$

鉛直方向のせん断応力 τ_v と水平方向のせん断応力 τ_H の最大値が 11 (MPa) となる。

<許容応力>

許容応力については、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) による。

F は、1.2Sy と 0.7Su の小さい値の 0.45 倍。

$$\text{許容せん断応力} = \frac{F}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = \frac{114}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = 65.8179(\text{MPa}) \rightarrow 65(\text{MPa})$$

表 9 フィルタユニット基礎の溶接部の強度評価

評価対象機器	部位	材料	応力種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
給気フィルタユニット (プレフィルタ)	基礎の 溶接部	SS400 相当	せん断	11	65
給気フィルタユニット (高性能粒子フィルタ)	基礎の 溶接部	SS400 相当	せん断	9	65
排気フィルタユニット	基礎の 溶接部	SS400 相当	せん断	11	65

2.3.3 ダクトの耐震性

ダクトの耐震性評価として、許容座屈曲げモーメント以下となる基準支持間隔の評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた0.36Gを採用した。ダクトは基準支持間隔（表11）よりも小さい間隔で支持することで耐震性を確保する計画である。

なお、燃料取り出し用カバー内のダクトは、燃料取り出し用カバーのクレーン支持用架構を利用している（添付資料－3－1 図2.2参照）。クレーン支持用架構は、添付資料－4－2「燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性に関する説明書」で、基準地震動Ssに対する地震応答解析を実施し崩壊しないことを確認していることから、使用済燃料プールへ波及的影響は与えない。

①角ダクトの耐震計算

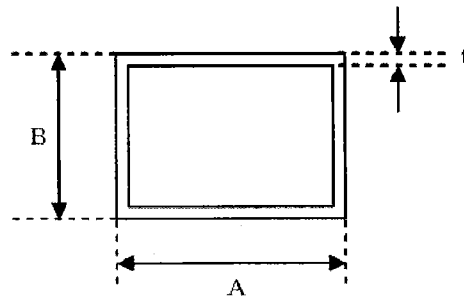


図7 角ダクトの評価モデル

- ・評価部位：角ダクト
- ・考慮する荷重：地震荷重
- ・計算に用いる数式

自重による許容座屈曲げモーメント以下とする基準支持間隔

$$L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_x \cdot 1000}{W \cdot g}}$$

地震による許容座屈曲げモーメント以下とする基準支持間隔

$$L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_y \cdot 1000}{W \cdot g} \cdot \frac{1}{C_H}}$$

許容曲げモーメントとの関係は次式となる

$$\frac{M_x}{M_{x_a}} = \frac{M_y}{M_{y_a}} = 1$$

上記式を解くと

$$\text{基準支持間隔} \quad L = \frac{1}{\sqrt{\frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{x_a}} + C_H \frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{y_a}}}}$$

L : 基準支持間隔

M_x : 水平方向座屈曲げモーメント
 $M_{x a}$: 水平方向許容座屈曲げモーメント
 M_y : 鉛直方向座屈曲げモーメント
 $M_{y a}$: 鉛直方向許容座屈曲げモーメント
 W : ダクト単位長さ当たり質量
 g : 重力加速度 (=9.80665)
 C_H : 水平方向設計震度

表 10 角ダクトの基準支持間隔

A (mm)	B (mm)	t (mm)	W (kg/m)	$M_{x a}$ (N・mm)	$M_{y a}$ (N・mm)	C_H	L (mm)
1100	1100	1.0	66.3	13371009	13371009	0.36	10998
850	850	1.0	41.0	12835422	12835422	0.36	13703

以下に計算過程の 1 例を示す。

<計算基準支持間隔>

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{\sqrt{\frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{x a}} + C_H \frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{y a}}}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{\frac{66.3 \times 9.80665}{1000 \times 8 \times 13371009} + 0.36 \frac{66.3 \times 9.80665}{1000 \times 8 \times 13371009}}} = 10998.7(\text{mm}) \rightarrow 10998(\text{mm})
 \end{aligned}$$

表 11 角ダクトの評価

評価対象ダクト	材料	基準支持間隔 (mm)
1100×1100×1.0t	溶融亜鉛めっき鋼板	10998
850×850×1.0t	溶融亜鉛めっき鋼板	13703

2.4 第3号機燃料取り出し用カバー換気設備の耐震性

2.4.1 排風機の耐震性

排風機の耐震性評価として、「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」を準用し、排風機の基礎ボルト・取付ボルトの評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた 0.36G を採用した。基礎ボルトの許容荷重及び取付ボルトの許容応力については、評価温度 50℃とした。基礎ボルト・取付ボルトのせん断・引張を評価した結果、基礎ボルト・取付ボルトに生じる荷重・応力は許容値以下であり、基礎ボルト・取付ボルトの強度が確保されることを確認した(表 13, 15 参照)。

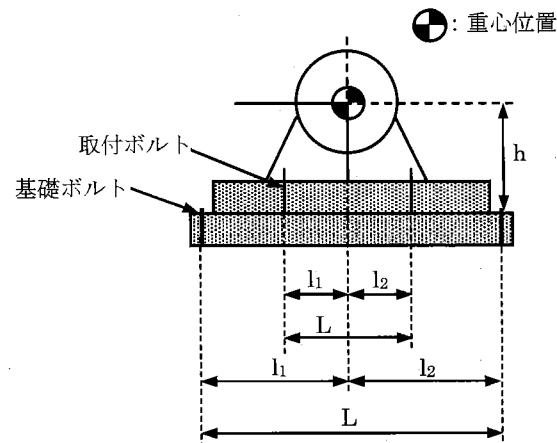


図5 排風機の耐震評価モデル

- ・評価部位：基礎ボルト・取付ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重 / 排風機振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力} \quad Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_P) \cdot h + M_p - W \cdot g \cdot (l - C_P) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$\text{引張応力} \quad \tau_v = \frac{Q_v}{A_b}$$

$$\text{せん断力} \quad Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_P)$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_b}$$

W : 据付面に作用する重量

g : 重力加速度 (=9.80665)

h : 据付面から重心までの距離

M_p : 排風機回転により働くモーメント

※基礎ボルト・取付ボルト部に M_p は作用しない

l₁ : 排風機重心と基礎ボルト・取付ボルト間の距離

l₂ : 排風機重心と基礎ボルト・取付ボルト間の距離 (l₁ ≤ l₂)

n_f : 評価上引張を受けるボルト本数

- n : 全ボルト本数
 A_b : 基礎ボルト・取付ボルトの断面積
 C_H : 水平方向設計震度
 C_p : 排風機振動による震度

①排風機基礎ボルトの耐震計算

表 12 排風機基礎ボルト緒言

W (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)
4250	9.80665	1688	1074.5	1418
n_f	n	A_b (mm ²)	C_H	C_p
3	8	113.1	0.36	0.11

以下に計算過程を示す。

<計算荷重>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_p) \cdot h + M_p - W \cdot g \cdot (1 - C_p) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{4250 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.11) \times 1688 + 0 - 4250 \times 9.80665 \times (1 - 0.11) \times 1074.5}{3 \times (1074.5 + 1418)} = -908.226(\text{N})$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_p) = 4250 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.11) = 19588.8(\text{N})$$

引張荷重 Q_v はマイナスとなるため作用しない。

せん断荷重 Q_H は 19588.8 (N) となり、ボルト 8 本で取り付けられていることから、ボルト 1 本当たり荷重は 2449 (N) となる。

<許容荷重>

許容荷重（せん断：3900 (N)，引張：4900 (N)）は設計値

表 13 排風機の基礎ボルトの強度評価

評価対象 機器	部位※	材料	評価 項目	算出荷重 (N) / 本		許容荷重 (N) / 本※	
				せん断	引張	せん断	引張
排風機	基礎 ボルト	SS400	荷重	2449	作用 しない	3900	4900

※基礎ボルトの評価部位及び許容荷重は、ケミカルアンカー部を示す。

②排風機取付ボルトの耐震計算

表 14 排風機取付ボルト緒言

W (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
2220	9.80665	900	528	652
n _f	n	A _b (mm ²)	C _H	C _P
5	10	314	0.36	0.11
Sy (MPa)※	Su (MPa)※	F (MPa)※		
241	394	276		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

以下に計算過程を示す。

<計算応力>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_P) \cdot h + M_P - W \cdot g \cdot (1 - C_P) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{2220 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.11) \times 900 + 0 - 2220 \times 9.80665 \times (1 - 0.11) \times 528}{5 \times (528 + 652)} = -173.132(\text{N})$$

$$\tau_v = \frac{Q_v}{A_b} = \frac{-173.132}{314} = -0.551375(\text{MPa})$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_P) = 2220 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.11) = 10232.3(\text{N})$$

$$\tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_b} = \frac{10232.3}{10 \times 314} = 3.25870(\text{MPa}) \rightarrow 4(\text{MPa})$$

引張応力 τ_v はマイナスとなるため作用しない。

せん断応力 τ_H は, 4 (MPa) となる。

<許容応力>

許容応力については, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) による。

F は, 1.2Sy と 0.7Su の小さい値。

$$\text{許容引張応力} = \frac{F}{2} \times 1.5 = \frac{276}{2} \times 1.5 = 207(\text{MPa}) \rightarrow 207(\text{MPa})$$

$$\text{許容せん断応力} = \frac{F}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = \frac{276}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = 159.348(\text{MPa}) \rightarrow 159(\text{MPa})$$

表 15 排風機の取付ボルトの強度評価

評価対象 機器	部位	材料	評価 項目	算出応力 (MPa)		許容応力 (MPa)	
				せん断	引張	せん断	引張
排風機	取付 ボルト	SS400	応力	4	作用 しない	159	207

2.4.2 フィルタユニットの耐震性

フィルタユニットの耐震性評価として、「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」を準用し、2.4.1 項と同様の方法で基礎ボルト・取付ボルトの評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた0.36Gを採用した。基礎ボルトの許容荷重及び取付ボルトの許容応力については、評価温度50℃とした。基礎ボルト・取付ボルトのせん断・引張を評価した結果、基礎ボルト・取付ボルトに生じる荷重及び応力は許容値以下であり、基礎ボルト・取付ボルトの強度が確保されることを確認した（表 17, 19 参照）。

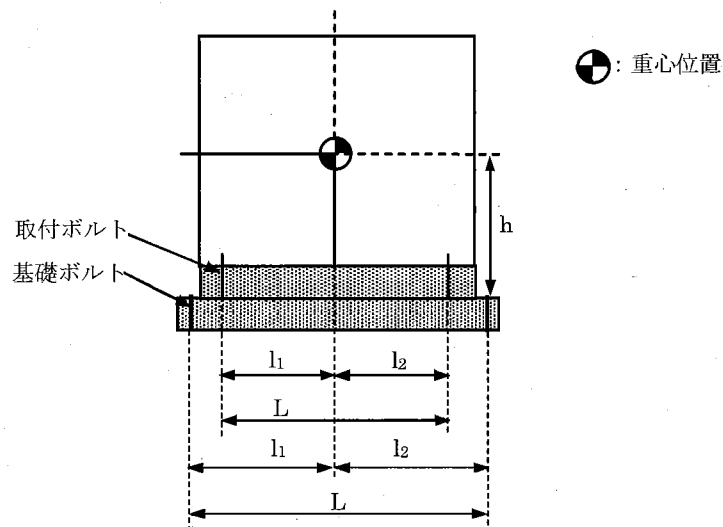


図6 フィルタユニットの耐震評価モデル

- ・評価部位：基礎ボルト・取付ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力} \quad Q_v = \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$\text{引張応力} \quad \tau_v = \frac{Q_v}{A_b}$$

$$\text{せん断力} \quad Q_H = W \cdot g \cdot C_H$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_b}$$

W : 据付面に作用する重量

g : 重力加速度(=9.80665)

h : 据付面から重心までの距離

l₁ : フィルタユニット重心と基礎ボルト・取付ボルト間の距離

l₂ : フィルタユニット重心と基礎ボルト・取付ボルト間の距離

(l₁ ≤ l₂)

n_f : 評価上引張を受けるボルト本数
 n : 全ボルト本数
 A_b : 基礎ボルト・取付ボルトの断面積
 C_H : 水平方向設計震度
 C_V : 鉛直方向設計震度

①フィルタユニットの基礎ボルトの耐震計算

表 16 フィルタユニットの基礎ボルト緒言

W(kg)	g(m/s ²)	h(mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
6110	9.80665	2020	1221	1704
n _f	n	A _b (mm ²)	C _H	C _V
4	10	113.1	0.36	0

以下に計算過程を示す。

<計算荷重>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{6110 \times 9.80665 \times 0.36 \times 2020 - 6110 \times 9.80665 \times (1 - 0) \times 1221}{4 \times (1221 + 1704)} = -2528.87(\text{N})$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot C_H = 6110 \times 9.80665 \times 0.36 = 21570.8(\text{N})$$

引張荷重 Q_v はマイナスとなるため作用しない。

せん断荷重 Q_H は 21570.8(N) となり、ボルト 10 本で取り付けられていることから、ボルト 1 本当たり荷重は 2158(N) となる。

<許容荷重>

許容荷重（せん断：3900(N)，引張：4900(N)）は設計値

表 17 フィルタユニットの基礎ボルトの強度評価

評価対象機器	部位※	材料	評価項目	算出荷重(N)/本		許容荷重(N)/本※	
				せん断	引張	せん断	引張
排気フィルタユニット	基礎ボルト	SS400	荷重	2158	作用しない	3900	4900

※基礎ボルトの評価部位及び許容荷重は、ケミカルアンカー部を示す。

②フィルタユニットの取付ボルトの耐震計算

表 18 フィルタユニットの取付ボルト緒言

W(kg)	g(m/s ²)	h(mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
1150	9.80665	1100	329	329
n _f	n	A _b (mm ²)	C _H	C _V
4	8	113.1	0.36	0
Sy(MPa)※	Su(MPa)※	F(MPa)※		
231	394	276		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

以下に計算過程を示す。

<計算応力>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{1150 \times 9.80665 \times 0.36 \times 1100 - 1150 \times 9.80665 \times (1 - 0) \times 329}{4 \times (329 + 329)} = 287.083(\text{N})$$

$$\tau_v = \frac{Q_v}{A_b} = \frac{287.083}{113.1} = 2.53832(\text{MPa}) \rightarrow 3(\text{MPa})$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot C_H = 1150 \times 9.80665 \times 0.36 = 4059.96(\text{N})$$

$$\tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_b} = \frac{4059.96}{8 \times 113.1} = 4.48714(\text{MPa}) \rightarrow 5(\text{MPa})$$

引張応力 τ_v は、3 (MPa) となる。

せん断応力 τ_H は、5 (MPa) となる。

<許容応力>

許容応力については、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) による。

F は、1.2Sy と 0.7Su の小さい値。

$$\text{許容引張応力} = \frac{F}{2} \times 1.5 = \frac{276}{2} \times 1.5 = 207(\text{MPa}) \rightarrow 207(\text{MPa})$$

$$\text{許容せん断応力} = \frac{F}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = \frac{276}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = 159.348(\text{MPa}) \rightarrow 159(\text{MPa})$$

表 19 フィルタユニットの取付ボルトの強度評価

評価対象機器	部位	材料	評価項目	算出応力 (MPa)		許容応力 (MPa)	
				せん断	引張	せん断	引張
排気フィルタユニット	取付ボルト	SS400	応力	5	3	159	207

2.4.3 ダクトの耐震性

ダクトの耐震性評価として、許容座屈曲げモーメント以下となる基準支持間隔の評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた 0.36G を採用した。ダクトは基準支持間隔（表 21, 23 参照）よりも小さい間隔で支持することで耐震性を確保する計画である。

なお、燃料取り出し用カバー内のダクトは、使用済燃料プール上に配置しないことから、使用済燃料プールへ波及的影響は与えない。

①角ダクトの耐震計算

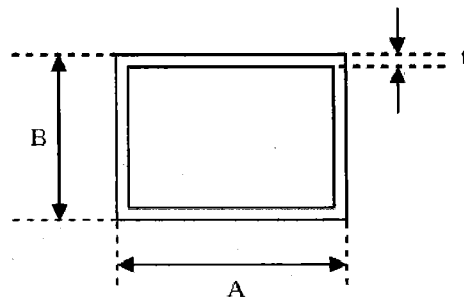


図7 角ダクトの評価モデル

- ・評価部位：角ダクト
- ・考慮する荷重：地震荷重
- ・計算に用いる数式

自重による許容座屈曲げモーメント以下とする基準支持間隔

$$L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_x \cdot 1000}{W \cdot g}}$$

地震による許容座屈曲げモーメント以下とする基準支持間隔

$$L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_y \cdot 1000}{W \cdot g} \cdot \frac{1}{C_H}}$$

許容曲げモーメントとの関係は次式となる

$$\frac{M_x}{M_{x_a}} = \frac{M_y}{M_{y_a}} = 1$$

上記式を解くと

$$\text{基準支持間隔 } L = \frac{1}{\sqrt{\frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{x_a}} + C_H \frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{y_a}}}}$$

- L : 基準支持間隔
- M_x : 水平方向座屈曲げモーメント
- M_{x_a} : 水平方向許容座屈曲げモーメント
- M_y : 鉛直方向座屈曲げモーメント

M_{Y_a} : 鉛直方向許容座屈曲げモーメント
 W : ダクト単位長さ当たり質量
 g : 重力加速度 (=9.80665)
 C_H : 水平方向設計震度

表 20 角ダクトの基準支持間隔

A (mm)	B (mm)	t (mm)	W (kg/m)	M_{X_a} (N・mm)	M_{Y_a} (N・mm)	C_H	L (mm)
1100	1100	3.2	161.0	380135185	380135185	0.36	37633
900	900	3.2	132.0	364014675	364014675	0.36	40671
650	500	3.2	85.4	262049779	300286615	0.36	43643
1100	1100	2.3	127.7	144288561	144288561	0.36	26033
1300	1300	1.2	148.5	23486326	23486326	0.36	9740
1300	1000	1.2	126.7	22241400	23486326	0.36	10334
1100	1100	1.2	101.2	22662712	22662712	0.36	11589
900	900	1.2	67.9	21816667	21816667	0.36	13882
700	700	1.2	53.3	20975522	20975522	0.36	15364

以下に計算過程の 1 例を示す。

<計算基準支持間隔>

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{\sqrt{\frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{X_a}} + C_H \frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{Y_a}}}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{\frac{161.0 \times 9.80665}{1000 \times 8 \times 380135185} + 0.36 \frac{161.0 \times 9.80665}{1000 \times 8 \times 380135185}}} = 37633.2(\text{mm}) \rightarrow 37633(\text{mm})
 \end{aligned}$$

表 21 角ダクトの評価

評価対象ダクト	材料	基準支持間隔 (mm)
1100×1100×3.2t	ガルバニウム鋼板	37633
900×900×3.2t	ガルバニウム鋼板	40671
650×500×3.2t	ガルバニウム鋼板	43643
1100×1100×2.3t	ガルバニウム鋼板	26033
1300×1300×1.2t	ガルバニウム鋼板	9740
1300×1000×1.2t	ガルバニウム鋼板	10334
1100×1100×1.2t	ガルバニウム鋼板	11589
900×900×1.2t	ガルバニウム鋼板	13882
700×700×1.2t	ガルバニウム鋼板	15364

①丸ダクトの耐震計算

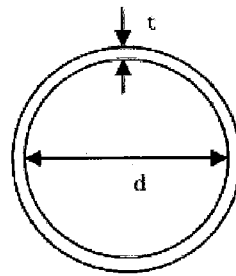


図 8 丸ダクトの評価モデル

- ・評価部位：丸ダクト
- ・考慮する荷重：地震荷重
- ・計算に用いる数式

自重と地震を合成した座屈曲げモーメント

$$M = \sqrt{1^2 + C_H^2} \cdot \frac{W \cdot g}{1000} \cdot \frac{L^2}{8}$$

$$\frac{M}{M_a} = 1$$

上記式を解くと

$$\text{基準支持間隔} \quad L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_a}{\frac{W \cdot g}{1000} \sqrt{(1 + C_H^2)}}}$$

L : 基準支持間隔

M : 座屈曲げモーメント

M_a : 許容座屈曲げモーメント
 W : ダクト単位長さ当たり質量
 g : 重力加速度 (=9.80665)
 C_H : 水平方向設計震度

表 22 丸ダクトの基準支持間隔

d (mm)	t (mm)	W (kg/m)	M_a (N・mm)	C_H	L (mm)
1200	3.2	132.2	313826615	0.36	42685
700	3.2	77.6	184113325	0.36	42674

以下に計算過程の 1 例を示す。

<計算基準支持間隔>

$$\begin{aligned}
 L &= \sqrt{\frac{8 \cdot M_a}{\frac{W \cdot g}{1000} \sqrt{(1 + C_H^2)}}} \\
 &= \sqrt{\frac{8 \times 313826615}{\frac{132.2 \times 9.80665}{1000} \times \sqrt{(1 + 0.36^2)}}} = 42685.7(\text{mm}) \rightarrow 42685(\text{mm})
 \end{aligned}$$

表 23 丸ダクトの評価

評価対象ダクト	材料	基準支持間隔 (mm)
1200 ϕ $\times$ 3.2t	鋼板	42685
700 ϕ $\times$ 3.2t	鋼板	42674

別冊 8

使用済燃料乾式キャスク仮保管設備に係る補足説明

I 乾式キャスク仮保管設備の構造強度及び耐震性について

乾式キャスク仮保管を構成する設備の耐震性の評価結果のうち、応力評価式を用いた評価の妥当性を示す。

構造強度評価と耐震性評価は評価手法が酷似することから、評価範囲の広い耐震性評価について、各設備について評価手順を示す。

1. 輸送貯蔵兼用キャスク A

1.1. 設計荷重

設計加速度を以下のように定める。

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= C_H \cdot G \\ G_2 &= (1 + C_V) \cdot G \end{aligned} \right\} \text{(軸方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重の場合)}$$

ここで、 C_H ：水平方向設計震度 (=0.79)

C_V ：鉛直方向設計震度 (=0.49)

$$\left. \begin{aligned} G_3 &= C_H \cdot G \\ G_2 &= (1 + C_V) \cdot G \end{aligned} \right\} \text{(軸直角方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重の場合)}$$

ここで、 C_H ：水平方向設計震度 (=0.79)

C_V ：鉛直方向設計震度 (=0.49)

1.2. 応力評価

1.2.1. キャスク容器及び二次蓋

1.2.1.1. 底板

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_1}{A}$$

ここで、 G_1 ：1.1. と同じ

m_G ：バスケット及び燃料の質量 (kg)

A ：底板の接触面積 (mm²)

1.2.1.2. 一次蓋

バスケット上面との接触部である一次蓋に発生する平均支圧応力 (σ_p) は底板の平均支圧応力と同じ式で計算する。

ただし、 m_G, G_1 ：1.2.1.1. と同じ

A : 一次蓋の接触面積 (mm²)

1.2.2. バスケット

1.2.2.1 平均支圧応力

最大応力が発生するのはバスケット底板で、軸方向水平地震と鉛直方向地震が作用する場合である。

水平方向（軸方向）加速度により発生する応力（ σ_x ）は、次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m \cdot G_1}{A}$$

ここで、 G_1 : 1.1. と同じ

m : バスケットの合計質量 (kg)

A : バスケット底板の接触面積 (mm²)

1.2.3. トラニオン

1.2.3.1. 一次応力

1.2.3.1.1. 圧縮応力

軸直角方向水平地震力＋鉛直方向地震力＋自重が作用する場合に図 1 に示す上部トラニオンの評価点③及び下部トラニオンの評価点④に最大応力が発生する。圧縮応力（ σ_c ）は、次式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{F_m}{A}$$

$$F_m = \frac{m}{2} \cdot G_3$$

ここで、 G_3 : 1.1. と同じ

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (N)

m : 金属キャスクの質量 (kg)

A : 評価点の断面積 (mm²)

1.2.3.1.2. せん断応力

軸方向水平地震力＋鉛直方向地震力＋自重が作用する場合に、図 1 に示す下部トラニオンの評価点②に最大応力が発生する。せん断応力（ τ ）は、次式で計算する。

$$\tau = \frac{F_m}{A}$$

$$F_m = \sqrt{\left(\frac{m}{2} \cdot G_1\right)^2 + \left(\frac{m}{4} \cdot G_2\right)^2}$$

ここで、 G_1 : 1.1. と同じ

G_2 : 1.1. と同じ

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (N)

m : 1.2.3.1.1. と同じ

A : 評価点の断面積 (mm²)

1.2.3.1.3. 曲げ応力

軸方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重が作用する場合に図 1 に示す下部トラニオンの評価点②に最大応力が発生する。曲げ応力 (σ_b) は、次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$M = F_m \cdot L$$

ここで、 M : 曲げモーメント (N・mm)

Z : 評価点の断面係数 (mm³)

L : 評価点と荷重作用位置との距離 (mm)

F_m : 1.2.3.1.2. と同じ

1.2.3.1.4. 組合せ応力

1.2.3.1.4.1. せん断応力と曲げ応力

軸方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重が作用する場合に図 1 に示す下部トラニオンの評価点②に最大応力が発生する。せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_b) との組合せ応力 (σ_T) は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

ここで、 τ : 1.2.3.1.2. と同じ

σ_b : 1.2.3.1.3. と同じ

1.2.3.2. 一次+二次応力

1.2.3.2.1. 引張・圧縮応力

軸直角方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重が作用する場合に、図 1 に示す上部トラニオンの評価点③及び下部トラニオンの評価点④に最大応力が発生する。

地震力のみにより発生する引張応力は 0 である。一方、地震力のみにより発生する圧縮応力は 1.2.3.1.1. で計算された圧縮応力と同じ値である。

したがって、地震力のみによって発生する引張・圧縮応力による応力範囲は 1.2.3.1.1. で計算された値と同じ値となる。

1.2.3.2.2. せん断応力

軸方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重が作用する場合に、図 1 に示す下部トラニオンの評価点②に最大応力が発生する。地震力のみによるせん断応力（ τ ）の全振幅は、次式で計算する。

$$\tau = \frac{F_m}{A}$$

$$F_m = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{2} \cdot G_1\right)^2 + \left(\frac{m}{4} \cdot G_2\right)^2}$$

ここで、 $G_2 = C_v \cdot G$

G_1 : 1.1.1.と同じ

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (N)

C_v : 1.1.1.と同じ

m : 1.2.3.1.2.と同じ

A : 1.2.3.1.2.と同じ

1.2.3.2.3. 曲げ応力

軸方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重が作用する場合に、図 1 に示す下部トラニオンの評価点②に最大応力が発生する。地震力のみによる曲げ応力（ σ_b ）の全振幅は、次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$M = F_m \cdot L$$

ここで、 M : 曲げモーメント (N・mm)

Z, L : 1.2.3.1.3.と同じ

F_m : 1.2.3.2.2.と同じ

1.3. 評価結果

計算結果（キャスク容器）

（単位：MPa）

部 位	材 料	許容応力 区分	平均支圧応力	
			計算値	許容応力
底板	低合金鋼	供用状態 D (IVAS)	1	377
一次蓋	低合金鋼	供用状態 D (IVAS)	1	377

計算結果（バスケット）

（単位：MPa）

部 位	材 料	許容応力 区分	平均支圧応力	
			計算値	許容応力
バスケット プレート	アルミニウム合金	供用状態 D (IVAS)	1	174

計算結果（トラニオン）

（単位：MPa）

部 位	材 料	許容応力 区分	一次応力					
			圧縮応力		せん断応力		曲げ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	ステンレス鋼	供用状態 D (IVAS)	18	577	50	341	72	592
							113	592

計算結果（トラニオン）

（単位：MPa）

部 位	材 料	許容応力 区分	一次＋二次応力					
			引張・圧縮応力		せん断応力		曲げ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	ステンレス鋼	供用状態 D (IVAS)	18	1184	75	683	109	1184

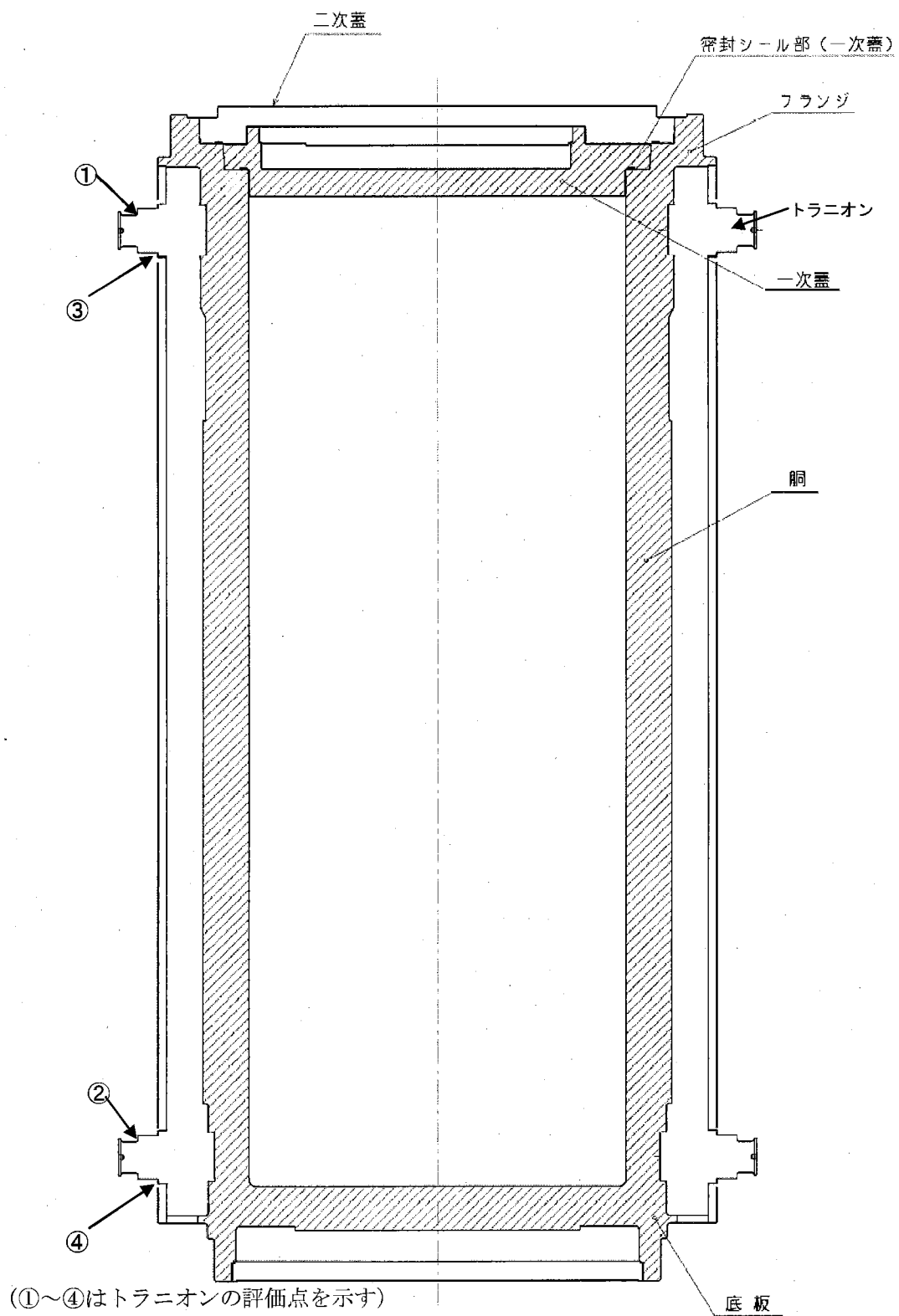


図1 キャスク容器等の応力解析箇所

2. 輸送貯蔵兼用キャスク B

2.1. 設計荷重

設計加速度を以下のように定める。

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= C_H \cdot G \\ G_2 &= (1 + C_V) \cdot G \end{aligned} \right\} \text{(軸方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重の場合)}$$

ここで、 C_H ：水平方向設計震度（=0.79）

C_V ：鉛直方向設計震度（=0.49）

$$\left. \begin{aligned} G_3 &= C_H \cdot G \\ G_2 &= (1 + C_V) \cdot G \end{aligned} \right\} \text{(軸直角方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重の場合)}$$

ここで、 C_H ：水平方向設計震度（=0.79）

C_V ：鉛直方向設計震度（=0.49）

2.2. 応力評価

2.2.1. キャスク容器及び二次蓋

胴とバスケット側面との接触部に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_2}{A}$$

ここで、 G_2 ：2.1. と同じ

m_G ：バスケットプレート及び燃料の質量（ kg ）

A ：胴の接触面積（ mm^2 ）

2.2.2. バスケット

2.2.2.1. 地震力が鉛直方向と軸直角方向に作用する場合

2.2.2.1.1. 一次一般膜応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部（図3 ①部）である。

鉛直方向加速度により発生する一次一般膜応力（ σ_x ）は次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 ：2.1. 同じ

m_A ：使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量（ kg ）

A_1 ：バスケットプレートの断面積（ mm^2 ）

2.2.2.1.2. 一次一般膜＋一次曲げ応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部（図3 ②部）である。

水平方向加速度により発生する一次一般膜応力（ σ_y ）は次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{m_A \cdot G_3}{A_1}$$

ここで G_3 : 2.1.と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

鉛直方向加速度により発生する一次曲げ応力(σ_y)は次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{m_B \cdot G_2 \cdot l_p}{12 \cdot \frac{l_w}{2}}$$

ここで G_2 : 2.1.と同じ

M : バスケットプレート格子端部の単位幅当たりの曲げモーメント (N・mm/mm)

Z : バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数 (■■■■ mm³/mm)

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (■■■■ kg)

l_p : バスケットプレートの内り (■■■■ mm)

l_w : バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (■■■■ mm)

ただし, バスケットプレート同士の嵌合のため切欠きがあり, 実際の荷重負荷面の長さを $l_w/2$ とする。

鉛直方向加速度によりバスケットプレート格子端部 (図 3 ②部) に発生する平均せん断応力(τ_{xy})は, 次式で計算する。

$$\tau_{xy} = \frac{m_B \cdot G_2}{2 \cdot \frac{A_1}{2}}$$

ここで G_2 : 2.1.と同じ

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

2.2.2.1.3. 平均せん断応力

バスケットプレート格子端部 (図 3 ②部) に発生する平均せん断応力(σ_s)は次式で計算する。

$$\sigma_s = \frac{m_B \cdot G_2}{2 \cdot \frac{A_1}{2}}$$

ここで G_2 : 2.1.と同じ

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

2.2.2.1.4. 平均支圧応力

バスケットプレート端部 (図 3 ①部) に発生する平均支圧応力(σ_p)は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 : 2.1.と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

2.2.2.1.5. 圧縮応力

バスケットプレート端部 (図 3 ①部) に発生する圧縮応力 (σ_c) は次式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 : 2.1. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

2.2.2.2. 地震力が鉛直方向と軸水平方向に作用する場合

2.2.2.2.1. 一次一般膜応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部 (図 3 ①部) である。

鉛直方向加速度により発生する一次一般膜応力 (σ_x) は次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで, G_2 : 2.1. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

水平方向加速度により発生する一次一般膜応力 (σ_z) は次式で計算する。

$$\sigma_z = \rho \cdot l_w \cdot G_1$$

ここで, G_1 : 2.1. と同じ

ρ : バスケットプレートの密度 (■■■■ kg/mm³)

l_w : バスケットプレートの全長 (■■■■ mm)

2.2.2.2.2. 一次一般膜＋一次曲げ応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部 (図 3 ②部) である。

鉛直方向加速度により発生する一次曲げ応力 (σ_y) は次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{m_B \cdot G_2 \cdot l_p}{12 \cdot \frac{l_w}{2}}$$

ここで G_2 : 2.1. と同じ

M : バスケットプレート格子端部の単位幅当たりの曲げモーメント (N・mm/mm)

Z : バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数 (■■■■ mm³/mm)

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (■■■■ kg)

l_p : バスケットプレートの内り (■■■■ mm)

l_w : バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (■■■■ mm)

ただし, バスケットプレート同士の嵌合のため切欠きがあり, 実際の荷重負荷面の長さを $l_w/2$ とする。

水平方向加速度により発生する一次一般膜応力 (σ_z) は次式で計算する。

$$\sigma_z = \rho \cdot l_w \cdot G_1$$

ここで, G_1 : 2.1. と同じ

ρ : バスケットプレートの密度 (■■■■ kg/mm³)

l_w : バスケットプレートの全長 (■■■■ mm)

鉛直方向加速度により発生するバスケットプレート格子端部 (図 3 ②部) に発生する平均せん断応力 (τ_{xy}) は次式で計算する。

$$\tau_{xy} = \frac{m_B \cdot G_2}{2 \cdot \frac{A_1}{2}}$$

ここで G_2 : 2.1. と同じ

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

2.2.2.2.3. 平均せん断応力

バスケットプレート格子端部 (図 3 ②部) に発生する平均せん断応力 (σ_s) は次式で計算する。

$$\sigma_s = \frac{m_B \cdot G_2}{2 \cdot \frac{A_1}{2}}$$

ここで G_2 : 2.1. と同じ

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

2.2.2.2.4. 平均支圧応力

バスケットプレート端部 (図 3 ①部) に発生する平均支圧応力 (σ_p) は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 : 2.1. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

2.2.2.2.5. 圧縮応力

バスケットプレート端部 (図 3 ①部) に発生する圧縮応力 (σ_c) は次式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 : 2.1. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (■■■■ kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (■■■■ mm²)

2.2.3 トラニオン

2.2.3.1. 地震力が鉛直方向と軸直角方向に作用する場合

2.2.3.1.1. 一次応力

2.2.3.1.1.1. せん断応力

最大応力が発生する箇所は図 2 に示す下部トラニオンの評価点①である。

鉛直方向加速度により発生するせん断応力(τ)は、次式で計算する。

$$\tau = \frac{F_m}{A}$$

$$F_m = \frac{m_2 \cdot G_2}{4}$$

ここで、 G_2 : 2.1. と同じ

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重(N)

m_2 : 保管時における金属キャスクの質量([] kg)

A : 評価点①の断面積([] mm²)

2.2.3.1.1.2. 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は図2に示す下部トラニオンの評価点②である。

鉛直方向加速度により発生する曲げ応力(σ_b)は次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$M = F_m \cdot L$$

ここで、 F_m : 2.2.3.1.1.1. と同じ

Z : 評価点②の断面係数([] mm³)

L : 評価点②と荷重作用位置との距離([] mm)

2.2.3.1.1.3. 圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図2に示す下部トラニオンの評価点②である。

水平方向加速度により発生する圧縮応力(σ_c)は、次式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{F_m}{A}$$

$$F_m = \frac{m_2 \cdot G_3}{2}$$

ここで、 G_3 : 2.1. と同じ

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重(N)

m_2 : 保管時における金属キャスクの質量([] kg)

A : 評価点②の断面積([] mm²)

2.2.3.1.1.4. 組合せ応力

2.2.3.1.1.4.1. せん断応力と曲げ応力

最大応力が発生する箇所は図2に示す下部トラニオンの評価点①である。

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_p)は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

ここで、 τ : 2.2.3.1.1.1.と同じ

σ_b : 2.2.3.1.1.2.と同じ

ただし、 Z : 評価点①の断面係数 (mm³)

L : 評価点①と荷重作用位置との距離 (mm)

2.2.3.1.2. 一次+二次応力

2.2.3.1.2.1. セン断応力

地震力によるせん断応力(τ)の全振幅は、2.2.3.1.1.1.で求めたせん断応力(τ)の2倍とする。

2.2.3.1.2.2. 曲げ応力

地震力による曲げ応力(σ_b)の全振幅は、2.2.3.1.1.2.で求めた曲げ応力(σ_b)の2倍とする。

2.2.3.1.2.3. 圧縮応力

地震力による圧縮応力(σ_c)は左右方向荷重により作用し、左右方向が反転した場合、対向する別のトラニオンで荷重を受ける。地震力による圧縮応力(σ_c)の最大値は、2.2.3.1.1.3.で求めた圧縮応力(σ_c)と同様である。

2.2.3.2. 地震力が鉛直方向と軸水平方向に作用する場合

2.2.3.2.1. 一次応力

2.2.3.2.1.1. セン断応力

最大応力が発生する箇所は図2に示す下部トラニオンの評価点①である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力(τ)は、次式で計算する。

$$\tau = \frac{F_m}{A}$$

$$F_m = \frac{m_2 \sqrt{4G_1^2 + G_2^2}}{4}$$

ここで、 F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重(N)

m_2 : 保管時における金属キャスクの質量 (kg)

A : 評価点①の断面積 (mm²)

2.2.3.2.1.2. 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は図2に示す下部トラニオンの評価点②である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力(σ_b)は次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$M = F_m \cdot L$$

ここで、 F_m : 2.2.3.2.1.1.と同じ

Z : 評価点②の断面係数(mm^3)

L : 評価点②と荷重作用位置との距離(mm)

2.2.3.2.1.3. 組合せ応力

2.2.3.2.1.3.1. せん断応力と曲げ応力

最大応力が発生する箇所は図2に示す下部トラニオンの評価点①である。

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

ここで、 τ : 2.2.3.2.1.1.と同じ

σ_b : 2.2.3.2.1.2.と同じ

ただし、 Z : 評価点①の断面係数(mm^3)

L : 評価点①と荷重作用位置との距離(mm)

2.2.3.2.2. 一次+二次応力

2.2.3.2.2.1. せん断応力

地震力によるせん断応力(τ)の全振幅は、2.2.3.2.1.1.で求めたせん断力(τ)の2倍とする。

2.2.3.2.2.2. 曲げ応力

地震力による曲げ応力(σ_b)の全振幅は、2.2.3.2.1.2.で求めた曲げ応力(σ_b)の2倍とする。

2.3. 評価結果

計算結果 (キャスク容器)

(単位：MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	平均支圧応力	
			計算値	許容応力
胴	炭素鋼	供用状態 D (IVAS)	2	377

計算結果 (バスケット)

(単位：MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	一次一般膜応力強さ		一次一般膜＋一次曲げ応力強さ	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
バスケット プレート	ボロン添加 ステンレス鋼板	供用状態 D (IVAS)	2	291	7	437

計算結果 (バスケット)

(単位：MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	平均せん断応力		平均支圧応力		圧縮応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
バスケット プレート	ボロン添加 ステンレス鋼板	供用状態 D (IVAS)	1	175	2	404	2	176

計算結果 (トラニオン)

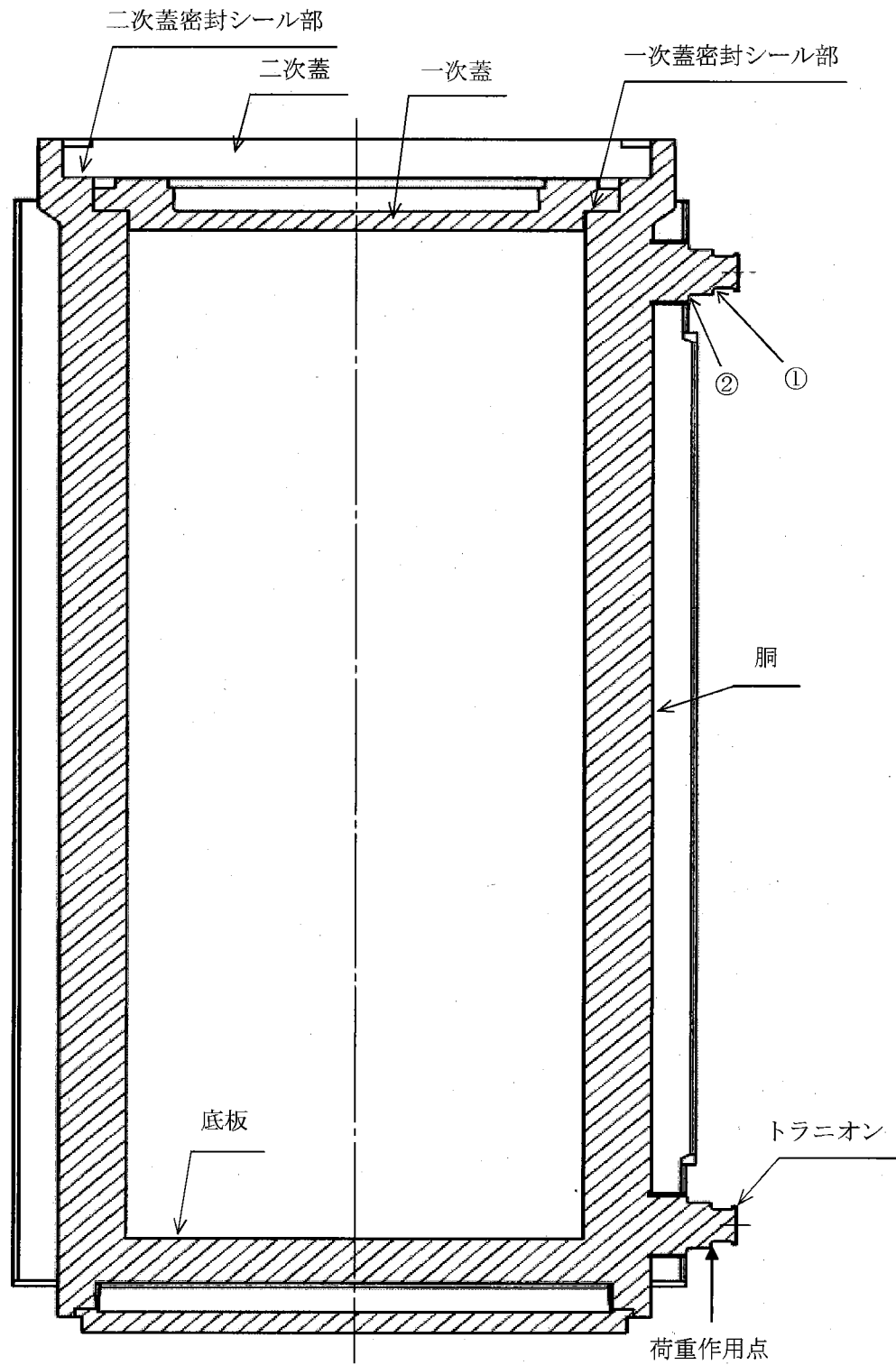
(単位 : MPa)

部 位	材 料	許容応力 区 分	一次応力							
			圧縮応力		せん断応力		曲げ応力		垂直応力とせん断 応力の組合せ	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	ステンレス鋼	供用状態 D (IVAS)	13	590	42	341	81	591	96	591

計算結果 (トラニオン)

(単位 : MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	一次+二次応力					
			圧縮応力		せん断応力		曲げ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	ステンレス鋼	供用状態 D (IVAS)	13	590	84	682	163	1182



①、②はトラニオンの評価点を示す

図2 キャスク容器等の応力解析箇所

A～A矢視図

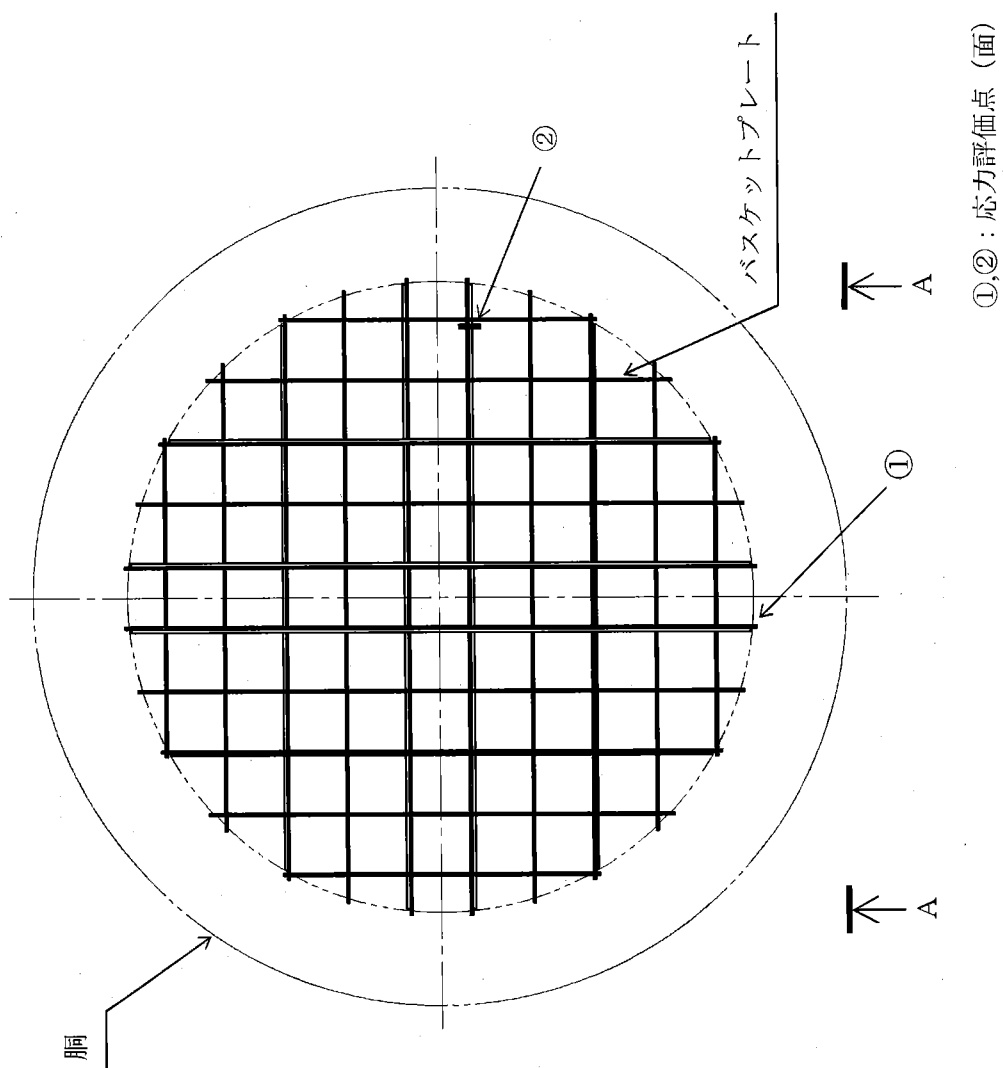
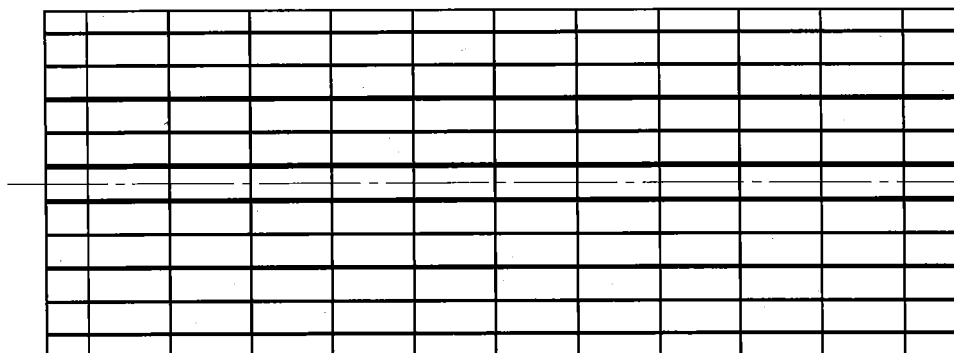


図3 バスケットの応力解析箇所

3. 輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台

3. 1. 設計荷重

図 4 に示す鋼製支持架台 1 脚に作用するキャスクの自重 (F_{WU} , F_{WL}) は次式で表される。

$$F_{WU} = \frac{P_W}{2} \cdot \frac{b}{(a+b)}$$

$$F_{WL} = \frac{P_W}{2} \cdot \frac{a}{(a+b)}$$

$$P_W = W \cdot g$$

ここで、

F_{WU} : 鋼製支持架台 1 脚 (上部側) に作用するキャスクの自重 (N)

F_{WL} : 鋼製支持架台 1 脚 (下部側) に作用するキャスクの自重 (N)

P_W : キャスク自重 (N)

a : キャスク重心から上部トラニオン軸心までの距離 (NEO mm, HDP mm)

b : キャスク重心から下部トラニオン軸心までの距離 (NEO mm, HDP mm)

W : キャスク設計質量 (kg)

g : 重力加速度 (=9.80665m/s²)

図 4 に示す鋼製支持架台 1 脚に作用する鉛直方向地震力 (F_{VU} , F_{VL}) は次式で表される。

$$F_{VU} = \frac{P_V}{2} \cdot \frac{b}{(a+b)}$$

$$F_{VL} = \frac{P_V}{2} \cdot \frac{a}{(a+b)}$$

$$P_V = W \cdot C_V \cdot g$$

ここで、

F_{VU} : 鋼製支持架台 1 脚 (上部側) に作用する鉛直方向地震力 (N)

F_{VL} : 鋼製支持架台 1 脚 (下部側) に作用する鉛直方向地震力 (N)

P_V : キャスクに作用する鉛直方向地震力 (N)

a : キャスク重心から上部トラニオン軸心までの距離 (NEO mm, HDP mm)

b : キャスク重心から下部トラニオン軸心までの距離 (NEO mm, HDP mm)

W : キャスク設計質量 (kg)

C_V : 鉛直方向震度 (=0.49)

g : 重力加速度 (=9.80665m/s²)

図 4 に示す鋼製支持架台 1 脚に作用する軸方向水平地震力 (F_{HXU} , F_{HXL}) は次式で表される。
 なお、上部側のトラニオン受けには、キャスク軸方向にスライドする機構を備えており、
 軸方向水平地震力は作用しない。

$$F_{HXU} = 0$$

$$F_{HXL} = \frac{P_{HX}}{2}$$

$$P_{HX} = W \cdot C_H \cdot g$$

ここで、

F_{HXU} : 鋼製支持架台 1 脚 (上部側) に作用する軸方向水平地震力 (N)

F_{HXL} : 鋼製支持架台 1 脚 (下部側) に作用する軸方向水平地震力 (N)

P_{HX} : キャスクに作用する軸方向水平地震力 (N)

W : キャスク設計質量 (■■■■ kg)

C_H : 水平方向震度 (=0.79)

g : 重力加速度 (=9.80665m/s²)

図 4 に示す鋼製支持架台 1 脚に作用する軸直角方向水平地震力 (F_{HYU} , F_{HYL}) は次式で表される。
 なお、トラニオン受けには、鋼製支持架台に作用する軸直角方向荷重が、キャスクから
 支持架台の方向のみ作用する機構を備えている。

$$F_{HYU} = P_{HY} \cdot \frac{b}{(a+b)}$$

$$F_{HYL} = P_{HY} \cdot \frac{a}{(a+b)}$$

$$P_{HY} = W \cdot C_H \cdot g$$

ここで、

F_{HYU} : 鋼製支持架台 1 脚 (上部側) に作用する軸直角方向水平地震力 (N)

F_{HYL} : 鋼製支持架台 1 脚 (下部側) に作用する軸直角方向水平地震力 (N)

P_{HY} : キャスクに作用する軸直角方向水平地震力 (N)

a : キャスク重心から上部トラニオン軸心までの距離 (NEO ■■■ mm, HDP ■■■ mm)

b : キャスク重心から下部トラニオン軸心までの距離 (NEO ■■■ mm, HDP ■■■ mm)

W : キャスク設計質量 (■■■■ kg)

C_H : 水平方向震度 (=0.79)

g : 重力加速度 (=9.80665m/s²)

3.2. 応力評価

3.2.1. 自重+鉛直方向地震力+軸方向水平地震力

3.2.1.1. 鋼製支持架台 (評価断面①)

3.2.1.1.1. 一次応力

図 5 において自重のみによる圧縮応力(σ_{cW})と鉛直方向地震力による圧縮応力(σ_{cV})の合成圧縮応力(σ_{cT})は次式で表される。

$$\sigma_{cW} = \frac{F_W}{B \cdot t}$$

$$\sigma_{cV} = \frac{F_V}{B \cdot t}$$

$$\sigma_{cT} = \sigma_{cW} + \sigma_{cV}$$

図 5 において軸方向水平地震力による曲げ応力(σ_{bHX})は次式で表される。

$$\sigma_{bHX} = \frac{F_{HX} \cdot l}{t \cdot B^2 / 6}$$

図 5 において軸方向水平地震力による平均せん断応力(τ_{HX})は次式で表される。

$$\tau_{HX} = \frac{F_{HX}}{B \cdot t}$$

以上の合成圧縮応力(σ_{cT})、曲げ応力(σ_{bHX})、平均せん断応力(τ_{HX})による組合せ応力(σ_{THX})は次式で表される。

$$\sigma_{THX} = \sqrt{(\sigma_{cT} + \sigma_{bHX})^2 + 3 \cdot \tau_{HX}^2}$$

ここで、

F_W : 図 4 に示す自重の設計用値(N)

F_V : 図 4 に示す鉛直方向地震力の設計用値(N)

F_{HX} : 図 4 に示す軸方向水平地震力の設計用値(N)

B : 図 5 に示す評価断面の幅(mm)

t : 図 5 に示すトラニオン受部の板厚(mm)

l : 図 5 に示す軸方向水平地震力に対するモーメントアーム(mm)

3.2.1.1.2. 一次+二次応力

地震力のみによる引張・圧縮の応力範囲($\Delta \sigma_c$)、曲げの応力範囲($\Delta \sigma_b$)、せん断の応力範囲($\Delta \tau$)、及び座屈応力(σ_{bc})は次式により表される。

なお、この部位では支圧応力、せん断座屈、曲げ座屈は生じないので圧縮応力に対する座屈応力を評価する。

$$\Delta \sigma_c = 2 \cdot \sigma_{cV}$$

$$\Delta \sigma_b = 2 \cdot \sigma_{bHX}$$

$$\Delta \tau = 2 \cdot \tau_{HX}$$

$$\sigma_{bc} = \sigma_{cT}$$

3.2.1.2. 鋼製支持架台(評価断面②)

3.2.1.2.1. 一次応力

図6において自重のみによる圧縮応力 (σ_{cW}) と鉛直方向地震力による圧縮応力 (σ_{cV}) の合成圧縮応力 (σ_{cT}) は次式で表される。

$$\sigma_{cW} = \frac{F_W}{B_1 \cdot t_1 + 2B_2 \cdot t_2}$$

$$\sigma_{cV} = \frac{F_V}{B_1 \cdot t_1 + 2B_2 \cdot t_2}$$

$$\sigma_{cT} = \sigma_{cW} + \sigma_{cV}$$

図6において自重による曲げ応力 (σ_{bW1} , σ_{bW2}) , 鉛直方向地震力による曲げ応力 (σ_{bV1} , σ_{bV2}) , 及び軸方向水平地震力による曲げ応力 (σ_{bHX1} , σ_{bHX2}) の合成曲げ応力 (σ_{bT1} , σ_{bT2}) は次式で表される。

$$\sigma_{bW1} = \frac{F_W \cdot (L_1 - t_1/2)}{I_X} \cdot L_1 \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{bW2} = \frac{F_W \cdot (L_1 - t_1/2)}{I_X} \cdot L_2 \quad (\text{リブ側})$$

$$\sigma_{bV1} = \frac{F_V \cdot (L_1 - t_1/2)}{I_X} \cdot L_1 \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{bV2} = \frac{F_V \cdot (L_1 - t_1/2)}{I_X} \cdot L_2 \quad (\text{リブ側})$$

$$\sigma_{bHX1} = \frac{F_{HX} \cdot l}{I_Y} \cdot L_3 \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{bHX2} = \frac{F_{HX} \cdot l}{I_Y} \cdot L_4 \quad (\text{リブ側})$$

$$\sigma_{bT1} = \sigma_{bW1} + \sigma_{bV1} + \sigma_{bHX1} \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{bT2} = \sigma_{bW2} + \sigma_{bV2} + \sigma_{bHX2} \quad (\text{リブ側})$$

図6において軸方向水平地震力による平均せん断応力 (τ_{HX}) は次式で表される。

$$\tau_{HX} = \frac{F_{HX}}{B_1 \cdot t_1 + 2B_2 \cdot t_2}$$

以上の合成圧縮応力 (σ_{cT}) , 合成曲げ応力 (σ_{bT1} , σ_{bT2}) , 平均せん断応力 (τ_{HX}) による組合せ応力 (σ_{THX1} , σ_{THX2}) は次式で表される。

$$\sigma_{THX1} = \sqrt{(\sigma_{cT} + \sigma_{bT1})^2 + 3 \cdot \tau_{HX}^2} \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{THX2} = \sqrt{(\sigma_{cT} + \sigma_{bT2})^2 + 3 \cdot \tau_{HX}^2} \quad (\text{リブ側})$$

ここで,

- F_w : 図4 に示す自重の設計用値 (N)
- F_v : 図4 に示す鉛直方向地震力の設計用値 (N)
- F_{HX} : 図4 に示す軸方向水平地震力の設計用値 (N)
- B_1 : 図6に示すトラニオン受部の幅 (mm)
- B_2 : 図6に示すリブの幅 (NEO mm, HDP mm)
- t_1 : 図6に示すトラニオン受部の板厚 (mm)
- t_2 : 図6に示すリブの板厚 (mm)
- L_1 : 図6に示す中立軸(X 軸)からトラニオン受け端部までのY方向距離 (NEO mm, HDP mm)
- L_2 : 図6に示す中立軸(X 軸)からリブ端部までのY方向距離 (NEO mm, HDP mm)
- L_3 : 図6に示す中立軸(Y 軸)からトラニオン受け端部までのX方向距離, L_3' 及び L_3'' の大きい方の値 (NEO mm, HDP mm)
- L_4 : 図6に示す中立軸(Y軸)からリブ端部までのX 方向距離, L_4' 及び L_4'' の大きい方の値 (NEO mm, HDP mm)
- l : 図6に示す軸方向水平地震力に対するモーメントアーム (NEO mm, HDP mm)
- I_x : 図6に示す断面の中立軸(X 軸)に関する断面二次モーメント (NEO mm⁴, HDP mm⁴)
- I_y : 図6に示す断面の中立軸(Y 軸)に関する断面二次モーメント (NEO mm⁴, HDP mm⁴)

3.2.1.2.2. 一次＋二次応力

地震力のみによる引張・圧縮の応力範囲 ($\Delta \sigma_c$), 曲げの応力範囲 ($\Delta \sigma_{b1}, \Delta \sigma_{b2}$), せん断の応力範囲 ($\Delta \tau$), 及び座屈応力 (σ_{bc}) は次式により表される。なお, この部位では支圧応力, せん断座屈, 曲げ座屈は生じないので圧縮応力に対する座屈応力を評価する。

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= 2 \cdot \sigma_{cV} \\ \Delta \sigma_{b1} &= 2 \cdot (\sigma_{bV1} + \sigma_{bHX1}) \quad (\text{トラニオン受側}) \\ \Delta \sigma_{b2} &= 2 \cdot (\sigma_{bV2} + \sigma_{bHX2}) \quad (\text{リブ側}) \\ \Delta \tau &= 2 \cdot \tau_{HX} \\ \sigma_{bc} &= \sigma_{cT} \end{aligned}$$

3.2.1.3. 鋼製支持架台(評価断面③)

3.2.1.3.1. 一次応力

図7において自重，鉛直方向地震力及び軸方向水平地震力により基礎ボルトから引張力を受けて発生する曲げ応力（ σ_{bHXb} ），コンクリート支持架台から圧縮力を受けて発生する曲げ応力（ σ_{bHXc} ）は次式で表される。

$$\sigma_{bHXb} = \frac{T_{HX} \cdot L_1}{B \cdot t^2 / 6}$$

$$\sigma_{bHXc} = \frac{\sigma_{ccHX} \cdot L_2^2 / 2}{t^2 / 6}$$

$$T_{HX} = \sigma_{tbHX} \cdot A_m$$

ここで，

σ_{tbHX} ：図7に示す基礎ボルトに発生する本荷重条件下における引張応力（N/mm²）

σ_{ccHX} ：図7に示すコンクリートに発生する本荷重条件下における圧縮応力（N/mm²）

T_{HX} ：図7に示す基礎ボルトに発生する本荷重条件下における引張力（N）

t ：図7に示す鋼製支持架台底板の板厚（ $\blacksquare$ mm）

B ：図7に示す基礎ボルトから引張力を受けて発生する曲げ応力の評価断面幅
（NEO $\blacksquare$ mm, HDP $\blacksquare$ mm）

L_1 ：図7に示す基礎ボルトから引張力を受けて発生する曲げモーメントのモーメントアーム長さ（NEO $\blacksquare$ mm, HDP $\blacksquare$ mm）

L_2 ：図7に示すコンクリートから圧縮力を受ける長さ（NEO $\blacksquare$ mm, HDP $\blacksquare$ mm）

A_m ：基礎ボルト呼び径断面積（ $\blacksquare$ mm²）

図7において自重，鉛直方向地震力及び軸方向水平地震力により基礎ボルトから引張力を受けて発生する平均せん断応力（ τ_{HXb} ），コンクリート支持架台から圧縮力を受けて発生する平均せん断応力（ τ_{HXc} ）は次式で表される。

$$\tau_{HXb} = \frac{T_{HX}}{B \cdot t}$$

$$\tau_{HXc} = \frac{\sigma_{ccHX} \cdot L_2}{t}$$

ここで，各記号は上記と同様である。

以上の曲げ応力（ σ_{bHXb} ， σ_{bHXc} ），平均せん断応力（ τ_{HXb} ， τ_{HXc} ）による組合せ応力（ σ_{THXb} ， σ_{THXc} ）は次式で表される。

$$\sigma_{THXb} = \sqrt{\sigma_{bHXb}^2 + 3 \cdot \tau_{HXb}^2}$$

$$\sigma_{THXc} = \sqrt{\sigma_{bHXc}^2 + 3 \cdot \tau_{HXc}^2}$$

3.2.1.3.2. 一次＋二次応力

地震力のみによる曲げの応力範囲 ($\Delta \sigma_b$) , せん断の応力範囲 ($\Delta \tau$) は次式により表される。

$$\Delta \sigma_b = \sigma_{bHXb} + \sigma_{bHXc}$$

$$\Delta \tau = \tau_{HXb} + \tau_{HXc}$$

3.2.1.4. 埋め込み金物

自重及び鉛直方向地震力により埋め込み金物に発生する応力は微小であるためこれらの荷重は無視する。

3.2.1.4.1. 一次応力

自重及び鉛直方向地震力は無視する。

図8において軸方向水平地震力により発生する曲げ応力 (σ_{bHX1}) , 軸方向水平地震力作用点の偏心により発生する最大曲げ応力 (σ_{bHX2}) とその合成曲げ応力 (σ_{bHX}) は次式で表される。

$$\sigma_{bHX1} = \frac{F_{HX} \cdot H / 2}{4 \cdot B \cdot t^2 / 6}$$

$$\sigma_{bHX2} = \sigma_{bHX1} \cdot \frac{\tau_{HX2}}{\tau_{HX1}}$$

$$\sigma_{bHX} = \sigma_{bHX1} + \sigma_{bHX2}$$

ここで,

F_{HX} : 図4に示す軸方向水平地震力の設計用値 (N)

H : 図8に示すシアプレート部の高さ (mm)

B : 図8に示すシアプレート部の幅 (mm)

t : 図8に示すシアプレート部の板厚 (mm)

τ_{HX1} : 図8において軸方向水平地震力により発生する平均せん断応力 (N/mm²)

τ_{HX2} : 図8において軸方向水平地震力作用点の偏心により発生する最大せん断応力 (N/mm²)

図8において軸方向水平地震力により発生する平均せん断応力 (τ_{HX1}) , 軸方向水平地震力作用点の偏心により発生する最大せん断応力 (τ_{HX2}) とその合成せん断応力 (τ_{HX}) は次式で表される。

$$\tau_{HX1} = \frac{F_{HX}}{4 \cdot B \cdot t}$$

$$\tau_{HX2} = \frac{F_{HX} \cdot l}{I_p} \cdot r_{\max}$$

$$\tau_{HX} = \tau_{HX1} + \tau_{HX2}$$

ここで、

F_{HX} : 図8に示す軸方向水平地震力の設計用値 (N)

B : 図8に示すシアプレートの幅 (mm)

t : 図8に示すシアプレート部の板厚 (mm)

l : 図8に示す軸方向水平地震力作用点から振りせん断中心までのY 方向距離
(NEO mm, HDP mm)

I_p : 図8に示すシアプレートの断面二次極モーメント (mm⁴)

$r_{\max}$: 図8に示す振りせん断中心からシアプレートまでの最大距離 (mm)

以上の合成曲げ応力 (σ_{bHX}) , 合成せん断応力 (τ_{HX}) による組合せ応力 (σ_{THX}) は次式で表される。

$$\sigma_{THX} = \sqrt{\sigma_{bHX}^2 + 3 \cdot \tau_{HX}^2}$$

3.2.1.4.2. 一次+二次応力

地震力のみによる曲げの応力範囲 ($\Delta \sigma_b$) , せん断の応力範囲 ($\Delta \tau$) は次式により表される。なお、この部位では圧縮応力、支圧応力、せん断座屈、曲げ座屈は生じない。

$$\Delta \sigma_b = 2 \cdot \sigma_{bHX}$$

$$\Delta \tau = 2 \cdot \tau_{HX}$$

3.2.1.5. 基礎ボルト

3.2.1.5.1. 一次応力

3.2.1.5.1.1. 自重(-Z) + 鉛直方向地震力(+Z) + 軸方向水平地震力(±X)

基礎ボルトに発生する合成引張応力 (σ_{tT}) 及び合成せん断応力 (τ_T) は次式で表される。

$$\sigma_{tT} = \sigma_{tV} + \sigma_{tHX}$$

$$\tau_T = \tau_{tHX1} + \tau_{tHX2}$$

ここで、

σ_{tV} : 自重及び鉛直方向地震力により発生する引張応力 (N/mm²)

σ_{tHX} : 軸方向水平地震力により発生する引張応力 (N/mm²)

τ_{tHX1} : 軸方向水平地震力により発生する平均せん断応力 (N/mm²)

τ_{tHX2} : 軸方向水平地震力作用点の偏心により発生する最大せん断応力 (N/mm²)

3.2.1.5.1.1.1. 自重及び鉛直方向地震力による引張応力

図9において自重及び鉛直方向地震力により基礎ボルトに発生する引張応力（ σ_{tv} ）は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2010 年版）より次式で表される。

$$\sigma_{tv} = \sigma_{cc} \cdot n \cdot \frac{(D - d_t - X_n)}{X_n} \cdot \frac{A_b}{A_m}$$

$$\sigma_{cc} = N \cdot X_n / S_n$$

$$S_n = \left\{ X_{n1}^2 / 2 - n \cdot P_t \cdot (1 - d_{t1} - X_{n1}) \right\} b \cdot D^2$$

$$I_n = \left\{ X_{n1}^3 / 3 + n \cdot P_t \cdot (1 - d_{t1} - X_{n1})^2 \right\} b \cdot D^3$$

$$X_{n1} = X_n / D$$

$$d_{t1} = d_t / D$$

$$P_t = a_t / (b \cdot D)$$

$$a_t = A_b \cdot N_b$$

ここで、

σ_{cc} : 図9に示すコンクリートの最大圧縮応力 (N/mm²)

n : ヤング係数比 ()

D : 図9に示す断面高さ (NEO mm, HDP mm)

b : 図9に示す断面幅 (mm)

d_t : 図9に示す引張側ボルトに関する距離 (mm)

d_{t1} : 引張側ボルトに関する係数 (-)

X_n : 図9に示す中立軸距離 (mm)

$$X_n - D / 2 + e = I_n / S_n$$

ただし、 e : 図9に示す鉛直力偏心距離 (mm) (NEO mm, HDP mm)

X_{n1} : 中立軸比 (-)

N : 図9に示す鉛直力であり、次式により算出した値 (N)

$$N = [\text{自重の設計用値}] - [\text{鉛直方向地震力の設計用値}]$$

a_t : 有効ボルト総断面積 (mm²)

P_t : 引張鉄筋比 (-)

A_b : 基礎ボルト有効断面積 (mm²)

A_m : 基礎ボルト呼び径断面積 (mm²)

N_b : 有効引張側ボルト本数 (本)

S_n : 有効等価断面一次モーメント (mm³)

I_n : 有効等価断面二次モーメント (mm⁴)

3.2.1.5.1.1.2. 軸方向水平地震力による引張応力

図9において軸方向水平地震力により基礎ボルトに発生する引張応力（ σ_{tHX} ）は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2010 年版）より次式で表される。

$$\sigma_{tHX} = \frac{F_{HX} \cdot l_1}{I} \cdot n \cdot (d - X_n) \cdot \frac{A_b}{A_m}$$

$$\sigma_{cc} = \frac{F_{HX} \cdot l_1}{I} \cdot X_n$$

$$X_{n1} = -n \cdot P_t + \sqrt{n \cdot P_t \cdot (2 + n \cdot P_t)}$$

$$X_n = d \cdot X_{n1}$$

$$a_t = A_b \cdot N_b$$

$$P_t = a_t / (b \cdot d)$$

ここで、

σ_{cc} : 図9に示すコンクリートの最大圧縮応力 (N/mm²)

F_{HX} : 図4 に示す軸方向水平地震力の設計用値 (N)

I : 断面の断面二次モーメント (NEO [] mm⁴, HDP [] mm⁴)

n : ヤング係数比 ()

l_1 : 軸方向水平地震力作用点から鋼製支持架台下面までのZ 方向距離
(NEO [] mm, HDP [] mm)

b : 図9に示す断面幅 (NEO [] mm, HDP [] mm)

d : 図9に示す断面有効高さ ([] mm)

X_n : 図9に示す中立軸距離 (mm)

X_{n1} : 中立軸比 (-)

a_t : 有効ボルト総断面積 (mm²)

P_t : 引張鉄筋比 (-)

A_b : 基礎ボルト有効断面積 ([] mm²)

A_m : 基礎ボルト呼び径断面積 ([] mm²)

N_b : 有効引張側ボルト本数 ([] 本)

3.2.1.5.1.1.3. 軸方向水平地震力により発生するせん断応力

軸方向水平地震力により基礎ボルトに発生する平均せん断応力（ τ_{HX1} ），及び軸方向水平地震力作用点が図9に示す基礎ボルト重心位置から偏心していることにより発生する最大せん断応力（ τ_{HX2} ）は次式で表される。

$$\tau_{HX1} = \frac{F_{HX}}{A_b \cdot N_{bs}}$$

$$\tau_{HX2} = \frac{F_{HX} \cdot l_2}{I_p} \cdot r_{\max}$$

ここで、

F_{HX} : 図4に示す軸方向水平地震力の設計用値 (N)

N_{bs} : 図9に示す基礎ボルト本数 (本)

A_b : 図9に示す基礎ボルト有効断面積 (mm^2)

I_p : 図9に示す基礎ボルトの断面二次極モーメント (mm^4)

l_2 : 図9に示す軸方向水平地震力作用点から基礎ボルト有効断面の図心位置 (振りせん断中心) までのY 方向距離 (NEO mm , HDP mm)

$r_{\max}$: 上記図心位置から基礎ボルトまでの最大距離 (mm)

3. 2. 1. 5. 1. 2. 自重(-Z) + 鉛直方向地震力(-Z) + 軸方向水平地震力(±X)

基礎ボルトに発生する合成引張応力 (σ_{tT}) 及び合成せん断応力 (τ_T) は次式で表される。

$$\sigma_{tT} = \sigma_{tV} + \sigma_{tHX}$$

$$\tau_T = \tau_{HX1} + \tau_{HX2}$$

ここで、

σ_{tV} : 自重及び鉛直方向地震力により発生する引張応力 (N/mm^2)

σ_{tHX} : 軸方向水平地震力により発生する引張応力 (N/mm^2)

τ_{HX1} : 軸方向水平地震力により発生する平均せん断応力 (N/mm^2)

τ_{HX2} : 軸方向水平地震力作用点の偏心により発生する最大せん断応力 (N/mm^2)

3. 2. 1. 5. 1. 2. 1. 自重及び鉛直方向地震力による引張応力

図 10 において自重及び鉛直方向地震力により基礎ボルトに発生する引張応力 (σ_{tV}) は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (2010 年版) より次式で表される。

$$\sigma_{tV} = \sigma_{cc} \cdot n \cdot \frac{(D - d_t - X_n)}{X_n} \cdot \frac{A_b}{A_m}$$

$$\sigma_{cc} = N \cdot X_n / S_n$$

$$S_n = \{X_{n1}^2 / 2 - n \cdot P_t (1 - d_{t1} - X_{n1})\} b \cdot D^2$$

$$I_n = \{X_{n1}^3 / 3 + n \cdot P_t (1 - d_{t1} - X_{n1})^2\} b \cdot D^3$$

$$X_{n1} = X_n / D$$

$$d_{t1} = d_t / D$$

$$P_t = a_t / (b \cdot D)$$

$$a_t = A_b \cdot N_{bt}$$

ここで、

σ_{cc} : 図 10 に示すコンクリートの最大圧縮応力 (N/mm²)

n : ヤング係数比 ()

D : 図 10 に示す断面高さ (NEO mm, HDP mm)

b : 図 10 に示す断面幅 (mm)

d_t : 図 10 に示す引張側ボルトに関する距離 (mm)

d_{t1} : 引張側ボルトに関する係数 (-)

X_n : 図 10 に示す中立軸距離を表し、次式を満足する値 (mm)

$$X_n - D/2 + e = I_n / S_n$$

ただし、 e : 図 10 に示す鉛直力偏心距離 (NEO mm, HDP mm)

X_{n1} : 中立軸比 (-)

N : 図 10 に示す鉛直力であり、次式により算出した値 (N)

$$N = [\text{自重の設計用値}] + [\text{鉛直方向地震力の設計用値}]$$

a_t : 有効ボルト総断面積 (mm²)

P_t : 引張鉄筋比 (-)

A_b : 基礎ボルト有効断面積 (mm²)

A_m : 基礎ボルト呼び径断面積 (mm²)

N_{bt} : 有効引張側ボルト本数 (本)

S_n : 有効等価断面一次モーメント (mm³)

I_n : 有効等価断面二次モーメント (mm⁴)

3.2.1.5.1.2.2. 軸方向水平地震力により発生する引張応力

図 10 において軸方向水平地震力により基礎ボルトに発生する引張応力 (σ_{tHX}) は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(2010 年版)より次式で表される。

$$\sigma_{tHX} = \frac{F_{HX} \cdot l_1}{I} \cdot n \cdot (d - X_n) \cdot \frac{A_b}{A_m}$$

$$\sigma_{cc} = \frac{F_{HX} \cdot l_1}{I} \cdot X_n$$

$$X_{n1} = -n \cdot P_t + \sqrt{n \cdot P_t \cdot (2 + n \cdot P_t)}$$

$$X_n = d \cdot X_{n1}$$

$$a_t = A_b \cdot N_b$$

$$P_t = a_t / (b \cdot d)$$

ここで、

σ_{cc} : 図 10 に示すコンクリートの最大圧縮応力 (N/mm²)

F_{HX} : 図 4 に示す軸方向水平地震力の設計用値 (N)

I : 断面の断面二次モーメント (NEO [] mm⁴, HDP [] mm⁴)

n : ヤング係数比 ([])

l₁ : 軸方向水平地震力作用点から鋼製支持架台下面までの Z 方向距離
(NEO [] mm, HDP [] mm)

b : 図 10 に示す断面幅 (NEO [] mm, HDP [] mm)

d : 図 10 に示す断面有効高さ ([] mm)

X_n : 図 10 に示す中立軸距離 (mm)

X_{nl} : 中立軸比 (-)

a_t : 有効ボルト総断面積 (mm²)

P_t : 引張鉄筋比 (-)

A_b : 基礎ボルト有効断面積 ([] mm²)

A_m : 基礎ボルト呼び径断面積 ([] mm²)

N_b : 有効引張側ボルト本数 ([] 本)

3. 2. 1. 5. 1. 2. 3. 軸方向水平地震力により発生するせん断応力

軸方向水平地震力により基礎ボルトに発生する平均せん断応力 (τ_{HX1}), 及び軸方向水平地震力作用点が図 10 に示す基礎ボルト重心位置から偏心していることにより発生する最大せん断応力 (τ_{HX2}) は次式で表される。

$$\tau_{HX1} = \frac{F_{HX}}{A_b \cdot N_{bs}}$$
$$\tau_{HX2} = \frac{F_{HX} \cdot l_2}{I_p} \cdot r_{max}$$

ここで,

F_{HX} : 図 4 に示す軸方向水平地震力の設計用値 (N)

N_{bs} : 図 10 に示す基礎ボルト本数 ([] 本)

A_b : 図 10 に示す基礎ボルト有効断面積 ([] mm²)

I_p : 図 10 に示す基礎ボルトの断面二次極モーメント ([] mm⁴)

l₂ : 図 10 に示す軸方向水平地震力作用点から基礎ボルト有効断面の図心位置 (振りせん断中心) までの Y 方向距離 (NEO [] mm, HDP [] mm)

r_{max} : 上記図心位置から基礎ボルトまでの最大距離 ([] mm)

3. 2. 2. 自重+鉛直方向地震力+軸直角方向水平地震力

3. 2. 2. 1. 鋼製支持架台 (評価断面①)

3. 2. 2. 1. 1. 一次応力

図 11 において自重のみによる圧縮応力 (σ_{cw}) と鉛直方向地震力による圧縮応力 (σ_{cy}) の合

成圧縮応力(σ_{cT})は次式で表される。

$$\sigma_{cW} = \frac{F_W}{B \cdot t}$$

$$\sigma_{cV} = \frac{F_V}{B \cdot t}$$

$$\sigma_{cT} = \sigma_{cW} + \sigma_{cV}$$

図 11 において軸直角方向水平地震力による曲げ応力(σ_{bHY})は次式で表される。

$$\sigma_{bHY} = \frac{F_{HY} \cdot l}{B \cdot t^2 / 6}$$

図 11 において軸直角方向水平地震力による平均せん断応力(τ_{HY})は次式で表される。

$$\tau_{HY} = \frac{F_{HY}}{B \cdot t}$$

以上の合成圧縮応力(σ_{cT})、曲げ応力(σ_{bHY})、平均せん断応力(τ_{HY})による組合せ応力(σ_{THY})は次式で表される。

$$\sigma_{THY} = \sqrt{(\sigma_{cT} + \sigma_{bHY})^2 + 3 \cdot \tau_{HY}^2}$$

ここで、

F_W : 図 4 に示す自重の設計用値(N)

F_V : 図 4 に示す鉛直方向地震力の設計用値(N)

F_{HY} : 図 4 に示す軸直角方向水平地震力の設計用値(N)

B : 図 11 に示す評価断面の幅(mm)

t : 図 11 に示すトラニオン受部の板厚(mm)

l : 図 11 に示す軸方向水平地震力に対するモーメントアーム(mm)

3.2.2.1.2. 一次＋二次応力

地震力のみによる引張・圧縮の応力範囲($\Delta \sigma_c$)、曲げの応力範囲($\Delta \sigma_b$)、せん断の応力範囲($\Delta \tau$)、及び座屈応力(σ_{bc})は次式により表される。

なお、この部位では支圧応力、せん断座屈、曲げ座屈は生じないので圧縮応力に対する座屈応力を評価する。

$$\Delta \sigma_c = 2 \cdot \sigma_{cV}$$

$$\Delta \sigma_b = \sigma_{bHY}$$

$$\Delta \tau = \tau_{HY}$$

$$\sigma_{bc} = \sigma_{cT}$$

3.2.2.2. 鋼製支持架台(評価断面②)

3.2.2.2.1. 一次応力

図12において自重のみによる圧縮応力 (σ_{cW}) と鉛直方向地震力による圧縮応力 (σ_{cV}) の合成圧縮応力 (σ_{cT}) は次式で表される。

$$\sigma_{cW} = \frac{F_W}{B_1 \cdot t_1 + 2B_2 \cdot t_2}$$

$$\sigma_{cV} = \frac{F_V}{B_1 \cdot t_1 + 2B_2 \cdot t_2}$$

$$\sigma_{cT} = \sigma_{cW} + \sigma_{cV}$$

図12において自重による曲げ応力 (σ_{bW1} , σ_{bW2}) , 鉛直方向地震力による曲げ応力 (σ_{bV1} , σ_{bV2}) , 及び軸直角方向水平地震力による曲げ応力 (σ_{bHY1} , σ_{bHY2}) の合成曲げ応力 (σ_{bT1} , σ_{bT2}) は次式で表される。

$$\sigma_{bW1} = \frac{F_W \cdot (L_1 - t_1 / 2) \cdot L_1}{I_X} \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{bW2} = \frac{F_W \cdot (L_1 - t_1 / 2) \cdot L_2}{I_X} \quad (\text{リブ側})$$

$$\sigma_{bV1} = \frac{F_V \cdot (L_1 - t_1 / 2) \cdot L_1}{I_X} \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{bV2} = \frac{F_V \cdot (L_1 - t_1 / 2) \cdot L_2}{I_X} \quad (\text{リブ側})$$

$$\sigma_{bHY1} = \frac{F_{HY} \cdot l \cdot L_1}{I_X} \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{bHY2} = \frac{F_{HY} \cdot l \cdot L_2}{I_X} \quad (\text{リブ側})$$

$$\sigma_{bT1} = \sigma_{bW1} + \sigma_{bV1} + \sigma_{bHY1} \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{bT2} = \sigma_{bW2} + \sigma_{bV2} + \sigma_{bHY2} \quad (\text{リブ側})$$

図12において軸直角方向水平地震力による平均せん断応力 (τ_{HY}) は次式で表される。

$$\tau_{HY} = \frac{F_{HY}}{B_1 \cdot t_1 + 2B_2 \cdot t_2}$$

以上の合成圧縮応力 (σ_{cT}) , 合成曲げ応力 (σ_{bT1} , σ_{bT2}) , 平均せん断応力 (τ_{HY}) による組合せ応力 (σ_{THY1} , σ_{THY2}) は次式で表される。

$$\sigma_{THY1} = \sqrt{(\sigma_{cT} + \sigma_{bT1})^2 + 3 \cdot \tau_{HY}^2} \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{THY2} = \sqrt{(\sigma_{cT} + \sigma_{bT2})^2 + 3 \cdot \tau_{HY}^2} \quad (\text{リブ側})$$

ここで,

F_W : 図4 に示す自重の設計用値 (N)

F_V : 図4 に示す鉛直方向地震力の設計用値 (N)

F_{HX} : 図4 に示す軸直角方向水平地震力の設計用値 (N)

B_1 : 図12に示すトラニオン受部の幅 (mm)

B_2 : 図12に示すリブの幅 (NEO mm, HDP mm)

t_1 : 図12に示すトラニオン受部の板厚 (mm)

t_2 : 図12に示すリブの板厚 (mm)

L_1 : 図12に示す中立軸(X 軸)からトラニオン受け端部までのY方向距離
(NEO mm, HDP mm)

L_2 : 図12に示す中立軸(X 軸)からリブ端部までのY方向距離 (NEO mm, HDP mm)

1 : 図12に示す軸直角方向水平地震力に対するモーメントアーム
(NEO mm, HDP mm)

I_X : 図12に示す断面の中立軸(X 軸)に関する断面二次モーメント
(NEO mm⁴, HDP mm⁴)

3. 2. 2. 2. 一次+二次応力

地震力のみによる引張・圧縮の応力範囲 ($\Delta \sigma_c$), 曲げの応力範囲 ($\Delta \sigma_{b1}, \Delta \sigma_{b2}$), せん断の応力範囲 ($\Delta \tau$), 及び座屈応力 (σ_{bc}) は次式により表される。なお, この部位では支圧応力, せん断座屈, 曲げ座屈は生じないので圧縮応力に対する座屈応力を評価する。

$$\Delta \sigma_c = 2 \cdot \sigma_{cV}$$

$$\Delta \sigma_{b1} = 2 \cdot \sigma_{bV1} + \sigma_{bHY1} \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\Delta \sigma_{b2} = 2 \cdot \sigma_{bV2} + \sigma_{bHY2} \quad (\text{リブ側})$$

$$\Delta \tau = \tau_{HY}$$

$$\sigma_{bc} = \sigma_{cT}$$

3. 2. 2. 3. 鋼製支持架台(評価断面③)

3. 2. 2. 3. 1. 一次応力

図13において自重, 鉛直方向地震力及び軸直角方向水平地震力により基礎ボルトから引張力を受けて発生する曲げ応力 (σ_{bHYb}), コンクリート支持架台から圧縮力を受けて発生する曲げ応力 (σ_{bHYc}) は次式で表される。

$$\sigma_{bHYb} = \frac{T_{HY} \cdot L_1}{B \cdot t^2 / 6}$$

$$\sigma_{bHYc} = \frac{\sigma_{ccHY} \cdot L_2^2 / 2}{t^2 / 6}$$

$$T_{HY} = \sigma_{tbHY} \cdot A_m$$

ここで、

σ_{tbHY} : 図13に示す基礎ボルトに発生する本荷重条件下における引張応力 (N/mm²)

σ_{ccHY} : 図13に示すコンクリートに発生する本荷重条件下における圧縮応力 (N/mm²)

T_{HY} : 図13に示す基礎ボルトに発生する本荷重条件下における引張力 (N)

t : 図13に示す鋼製支持架台底板の板厚 (mm)

B : 図13に示す基礎ボルトから引張力を受けて発生する曲げ応力の評価断面幅
(NEO mm, HDP mm)

L_1 : 図13に示す基礎ボルトから引張力を受けて発生する曲げモーメントのモーメントアーム長さ (NEO mm, HDP mm)

L_2 : 図13に示すコンクリートから圧縮力を受ける長さ (NEO mm, HDP mm)

A_m : 基礎ボルト呼び径断面積 (mm²)

図13において自重、鉛直方向地震力及び軸直角方向水平地震力により基礎ボルトから引張力を受けて発生する平均せん断応力 (τ_{HYb})、コンクリート支持架台から圧縮力を受けて発生する平均せん断応力 (τ_{HYc}) は次式で表される。

$$\tau_{HYb} = \frac{T_{HY}}{B \cdot t}$$

$$\tau_{HYc} = \frac{\sigma_{ccHY} \cdot L_2}{t}$$

ここで、各記号は上記と同様である。

以上の曲げ応力 (σ_{bHYb} , σ_{bHYc})、平均せん断応力 (τ_{HYb} , τ_{HYc}) による組合せ応力 (σ_{THYb} , σ_{THYc}) は次式で表される。

$$\sigma_{THYb} = \sqrt{\sigma_{bHYb}^2 + 3 \cdot \tau_{HYb}^2}$$

$$\sigma_{THYc} = \sqrt{\sigma_{bHYc}^2 + 3 \cdot \tau_{HYc}^2}$$

3. 2. 2. 3. 2. 一次+二次応力

地震力のみによる曲げの応力範囲 ($\Delta \sigma_b$)、せん断の応力範囲 ($\Delta \tau$) は次式により表

される。なお、この部位では圧縮応力、支圧応力、せん断座屈、曲げ座屈は生じない。

$$\Delta\sigma_b = \sigma_{bHYb} + \sigma_{bHYc}$$

$$\Delta\tau = \tau_{HYb} + \tau_{HYc}$$

3.2.2.4. 埋め込み金物

3.2.2.4.1. 一次応力

図14において軸直角方向水平地震力により発生する曲げ応力 (σ_{bHY}) は次式で表される。

$$\sigma_{bHY} = \frac{F_{HY} \cdot H / 2}{(L - 4 \cdot t) \cdot t^2 / 6}$$

ここで、

F_{HY} : 図4 に示す軸直角方向水平地震力の設計用値 (N)

H : 図14に示すシアプレート部の高さ (mm)

L : 図14に示すシアプレート部の幅 (mm)

t : 図14に示すシアプレート部の板厚 (mm)

図 14 において軸直角方向水平地震力により発生する平均せん断応力 (τ_{HY}) は次式で表される。

$$\tau_{HY} = \frac{F_{HY}}{(L - 4 \cdot t) \cdot t}$$

ここで、

F_{HY} : 図4 に示す軸直角方向水平地震力の設計用値 (N)

L : 図14に示すシアプレート部の幅 (mm)

t : 図14に示すシアプレート部の板厚 (mm)

以上の曲げ応力 (σ_{bHY})、平均せん断応力 (τ_{HY}) による組合せ応力 (σ_{THY}) は次式で表される。

$$\sigma_{THY} = \sqrt{\sigma_{bHY}^2 + 3 \cdot \tau_{HY}^2}$$

3.2.2.4.2. 一次+二次応力

軸直角方向水平地震力は一方向のみ (図14に示す-Y 方向のみ) に作用し、応力の振幅は片側のみとなるため、地震力のみによる曲げの応力範囲 ($\Delta\sigma_b$)、せん断の応力範囲 ($\Delta\tau$) は次式により表される。なお、せん断座屈、曲げ座屈は生じない。

$$\Delta\sigma_b = \sigma_{bHY}$$

$$\Delta\tau = \tau_{HY}$$

3.2.2.5. 基礎ボルト

3.2.2.5.1. 一次応力

3.2.2.5.1.1. 自重(-Z) + 鉛直方向地震力(+Z) + 軸方向水平地震力(-Y)

3.2.2.5.1.1.1. 自重, 鉛直方向地震力, 軸直角水平方向地震力による引張応力

図15において自重, 鉛直方向地震力及び軸直角方向水平地震力により基礎ボルトに引張応力が発生するかは下記条件により定まる。

(i) $e_T < -(D/6 + d_t'/3)$ のとき

基礎ボルトに引張応力が発生する。

(ii) $-(D/6 + d_t'/3) \leq e_T < -D/6$ のとき

鋼製支持架台底板の一部が圧縮となり, 基礎ボルトに引張応力が発生しない。

(iii) $-D/6 \leq e_T < D/6$ のとき

鋼製支持架台底板の全面が圧縮となり, 基礎ボルトに引張応力が発生しない。

(iv) $D/6 \leq e_T < D/6 + d_t/3$ のとき

鋼製支持架台底板の一部が圧縮となり, 基礎ボルトに引張応力が発生しない。

(v) $D/6 + d_t/3 \leq e_T$ のとき

基礎ボルトに引張応力が発生する。

ただし,

$$e_T = e_N + e_M$$

$$e_M = -F_{HY} \cdot l / N$$

ここで,

D : 図15に示す断面高さ (NEO mm, HDP mm)

d_t : 図15に示す引張側ボルトに関する距離 (キャストと反対側) (mm)

d_t' : 図15に示す引張側ボルトに関する距離 (キャスト側) (NEO mm, HDP mm)

e_T : 合成荷重偏心距離 (mm)

e_N : 図15に示す鉛直力偏心距離 (NEO mm, HDP mm)

e_M : 曲げモーメント置換偏心距離 (mm)

l : 図15に示す軸直角方向水平地震力作用点から鋼製支持架台下面までのZ 方向距離
(NEO mm, HDP mm)

F_{HY} : 図15に示す軸直角方向水平地震力の設計用値 (N)

N : 図15に示す鉛直力であり, 次式により算出した値 (N)

$$N = [\text{自重の設計用値}] - [\text{鉛直方向地震力の設計用値}]$$

各条件で発生する基礎ボルトの引張応力は以下に示すとおり計算する。

(i) $e_T < -(D/6 + d_t'/3)$ のとき

基礎ボルトに引張応力が発生する。図15において自重，鉛直方向地震力，軸直角方向水平地震力により基礎ボルトに発生する引張応力 (σ_{tHY}) は，鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (2010 年版) より次式で表される。

$$\sigma_{tHY} = \sigma_{cc} \cdot n \cdot \frac{(D - d_t' - X_n)}{X_n} \cdot \frac{A_b}{A_m}$$

$$\sigma_{cc} = N \cdot X_n / S_n$$

$$S_n = \{X_{n1}^2 / 2 - n \cdot P_t (1 - d_{t1} - X_{n1})\} b \cdot D^2$$

$$I_n = \{X_{n1}^3 / 3 + n \cdot P_t (1 - d_{t1} - X_{n1})^2\} b \cdot D^3$$

$$X_{n1} = X_n / D$$

$$d_{t1} = d_t' / D$$

$$P_t = a_t / (b \cdot D)$$

$$a_t = A_b \cdot N_{bt}'$$

ここで，

σ_{cc} : 図15に示すコンクリートの最大圧縮応力 (N/mm²)

n : ヤング係数比 ()

D : 上記と同じ

b : 図15に示す断面幅 (mm)

d_t' : 上記と同じ

d_{t1} : 引張側ボルトに関する係数 (-)

X_n : 図15に示す中立軸距離を表し，次式を満足する値 (mm)

$$X_n - D/2 + |e_T| = I_n / S_n$$

ただし， e_T : 上記と同じ

X_{n1} : 中立軸比 (-)

N : 上記と同じ

a_t : 有効ボルト総断面積 (mm²)

P_t : 引張鉄筋比 (-)

A_b : 基礎ボルト有効断面積 (mm²)

A_m : 基礎ボルト呼び径断面積 (mm²)

N_{bt}' : 有効引張側ボルト本数 (本)

S_n : 有効等価断面一次モーメント (mm³)

I_n : 有効等価断面二次モーメント (mm⁴)

(ii) $-(D/6+d_t'/3) \leq e_T < -D/6$ のとき

鋼製支持架台底板の一部が圧縮となり、基礎ボルトに引張応力が発生しないが、ここでは、コンクリート支持架台に発生する最大圧縮応力を算出する。図15において自重、鉛直方向地震力、軸直角方向水平地震力によりコンクリート支持架台に発生する最大圧縮応力 (σ_{cc}) は、次式で表される。

$$\sigma_{cc} = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot b \cdot (D/2 - |e_T|)}$$

ここで、

N, e_T , D, b: 上記と同じ

(iii) $-D/6 \leq e_T < D/6$ のとき

鋼製支持架台底板の全面が圧縮となり、基礎ボルトに引張応力が発生しないが、ここでは、コンクリート支持架台に発生する最大圧縮応力を算出する。図15において自重、鉛直方向地震力、軸直角方向水平地震力によりコンクリート支持架台に発生する最大圧縮応力 (σ_{cc}) は、次式で表される。

$$\sigma_{cc} = \frac{N \cdot |e_T|}{b \cdot D^2/6} + \frac{N}{b \cdot D}$$

ここで、

N, e_T , D, b: 上記と同じ

(iv) $D/6 \leq e_T < D/6 + d_t/3$ のとき

鋼製支持架台底板の一部が圧縮となり、基礎ボルトに引張応力が発生しないが、ここでは、コンクリート支持架台に発生する最大圧縮応力を算出する。図15において自重、鉛直方向地震力、軸直角方向水平地震力によりコンクリート支持架台に発生する最大圧縮応力 (σ_{cc}) は、次式で表される。

$$\sigma_{cc} = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot b \cdot (D/2 - |e_T|)}$$

ここで、

N, e_T , D, b: 上記と同じ

(v) $D/6 + d_t/3 \leq e_T$ のとき

基礎ボルトに引張応力が発生する。図15において自重、鉛直方向地震力、軸直角方向水平地震力により基礎ボルトに発生する引張応力 (σ_{thV}) は、鉄筋コンクリート構造計算規準・

同解説(2010 年版)より次式で表される。

$$\sigma_{tHY} = \sigma_{cc} \cdot n \cdot \frac{(D - d_t - X_n) \cdot A_b}{X_n \cdot A_m}$$

$$\sigma_{cc} = N \cdot X_n / S_n$$

$$S_n = \{X_{n1}^2 / 2 - n \cdot P_t \cdot (1 - d_{t1} - X_{n1})\} b \cdot D^2$$

$$I_n = \{X_{n1}^3 / 3 + n \cdot P_t \cdot (1 - d_{t1} - X_{n1})^2\} b \cdot D^3$$

$$X_{n1} = X_n / D$$

$$d_{t1} = d_t / D$$

$$P_t = a_t / (b \cdot D)$$

$$a_t = A_b \cdot N_{bt}$$

ここで、

σ_{cc} : 図15に示すコンクリートの最大圧縮応力 (N/mm²)
 n : ヤング係数比 ()
 D : 上記と同じ
 b : 上記と同じ
 d_t : 上記と同じ
 d_{t1} : 引張側ボルトに関する係数 (-)
 X_n : 図15に示す中立軸距離を表し、次式を満足する値 (mm)
 $X_n - D/2 + |e_T| = I_n / S_n$
 ただし、 e_T : 上記と同じ

X_{n1} : 中立軸比 (-)
 N : 上記と同じ
 a_t : 有効ボルト総断面積 (mm²)
 P_t : 引張鉄筋比 (-)
 A_b : 基礎ボルト有効断面積 (mm²)
 A_m : 基礎ボルト呼び径断面積 (mm²)
 N_{bt} : 有効引張側ボルト本数 (本)
 S_n : 有効等価断面一次モーメント (mm³)
 I_n : 有効等価断面二次モーメント (mm⁴)

3.2.2.5.1.1.2. 軸直角方向水平地震力によるせん断応力

軸直角方向水平地震力により基礎ボルトに発生する平均せん断応力 (τ_{HY}) は次式で算

出する。

$$\tau_{HY} = \frac{F_{HY}}{A_b \cdot N_{bs}}$$

ここで、

F_{HY} : 図4に示す軸直角方向水平地震力の設計用値 (N)

N_{bs} : 図15に示す基礎ボルト本数 (■本)

A_b : 図15に示す基礎ボルト有効断面積 (■mm²)

3.2.2.5.1.2. 自重(-Z) + 鉛直方向地震力(-Z) + 軸直角方向水平地震力(-Y)

3.2.2.5.1.2.1. 自重, 鉛直方向地震力, 軸直角方向水平地震力による引張応力

図16において自重, 鉛直方向地震力及び軸直角方向水平地震力により基礎ボルトに引張応力が発生するかは3.2.2.5.1.1.と同様に求められる。ただし, 鉛直力 (N) については以下のとおりとする。

N : 図16に示す鉛直力であり, 次式により算出した値 (N)

$$N = [\text{自重の設計用値}] + [\text{鉛直方向地震力の設計用値}]$$

3.2.2.5.1.2.2. 軸直角方向水平地震力によるせん断応力

軸直角方向水平地震力により基礎ボルトに発生する平均せん断応力 (τ_{HY}), は次式で算出する。

$$\tau_{HY} = \frac{F_{HY}}{A_b \cdot N_{bs}}$$

ここで、

F_{HY} : 図4に示す軸直角方向水平地震力の設計用値 (N)

N_{bs} : 図16に示す基礎ボルト本数 (■本)

A_b : 図16に示す基礎ボルト有効断面積 (■mm²)

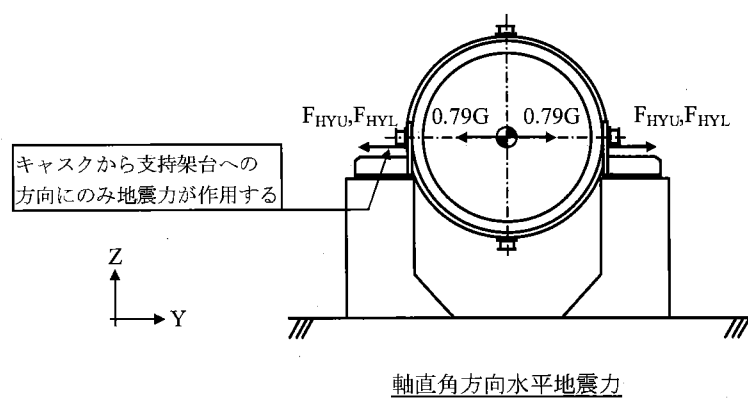
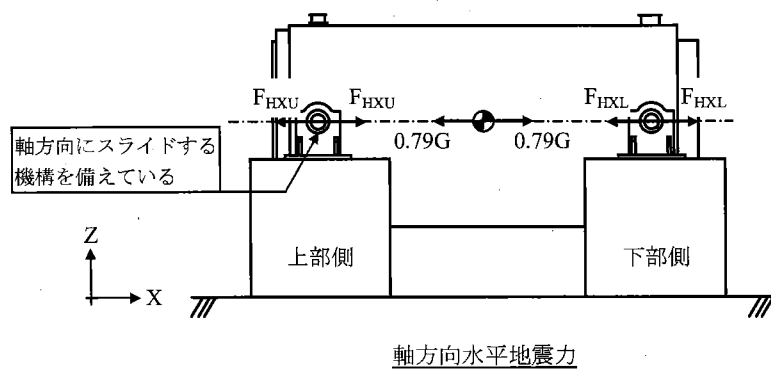
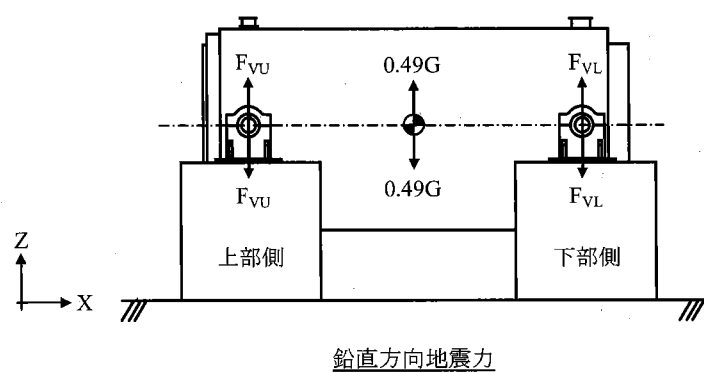
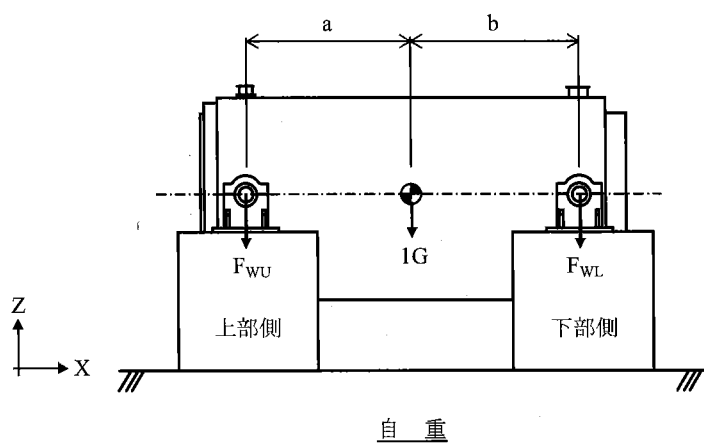


図4 鋼製支持架台に作用する荷重

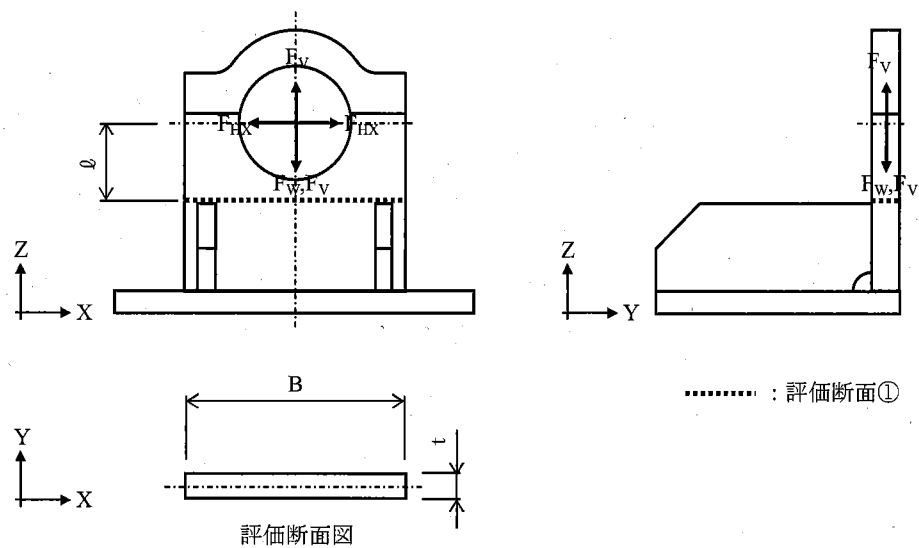


図5 計算モデル図（鋼製支持架台,評価断面①）

[設計事象 I + S_s, 自重+鉛直方向地震力+軸方向水平地震力]

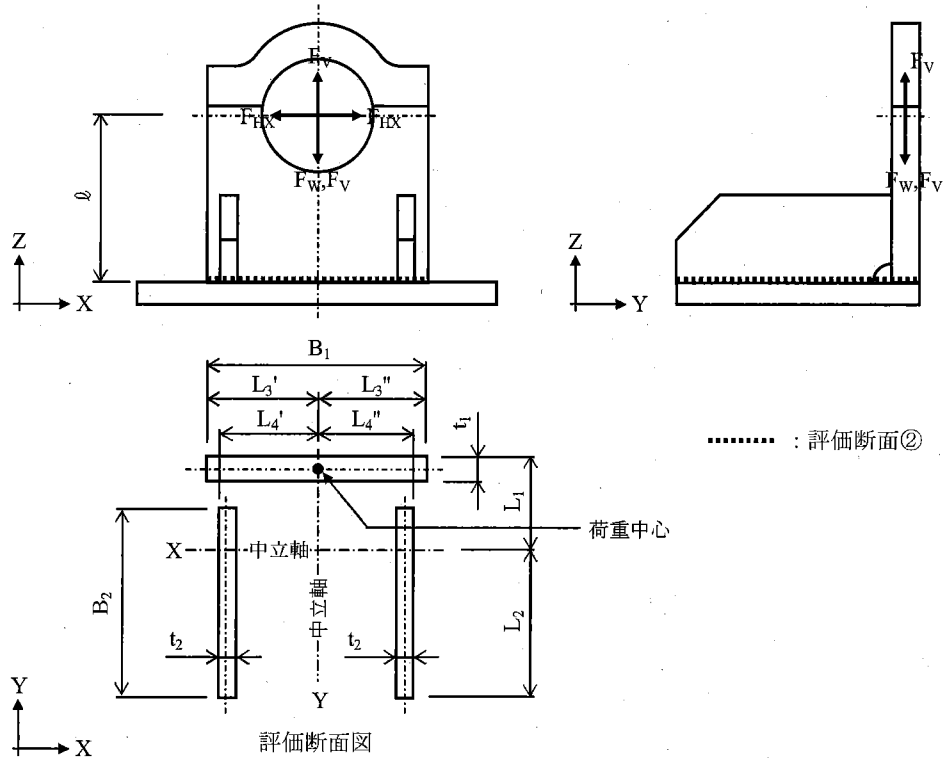


図6 計算モデル図（鋼製支持架台,評価断面②）

[設計事象 I + S_s, 自重+鉛直方向地震力+軸方向水平地震力]

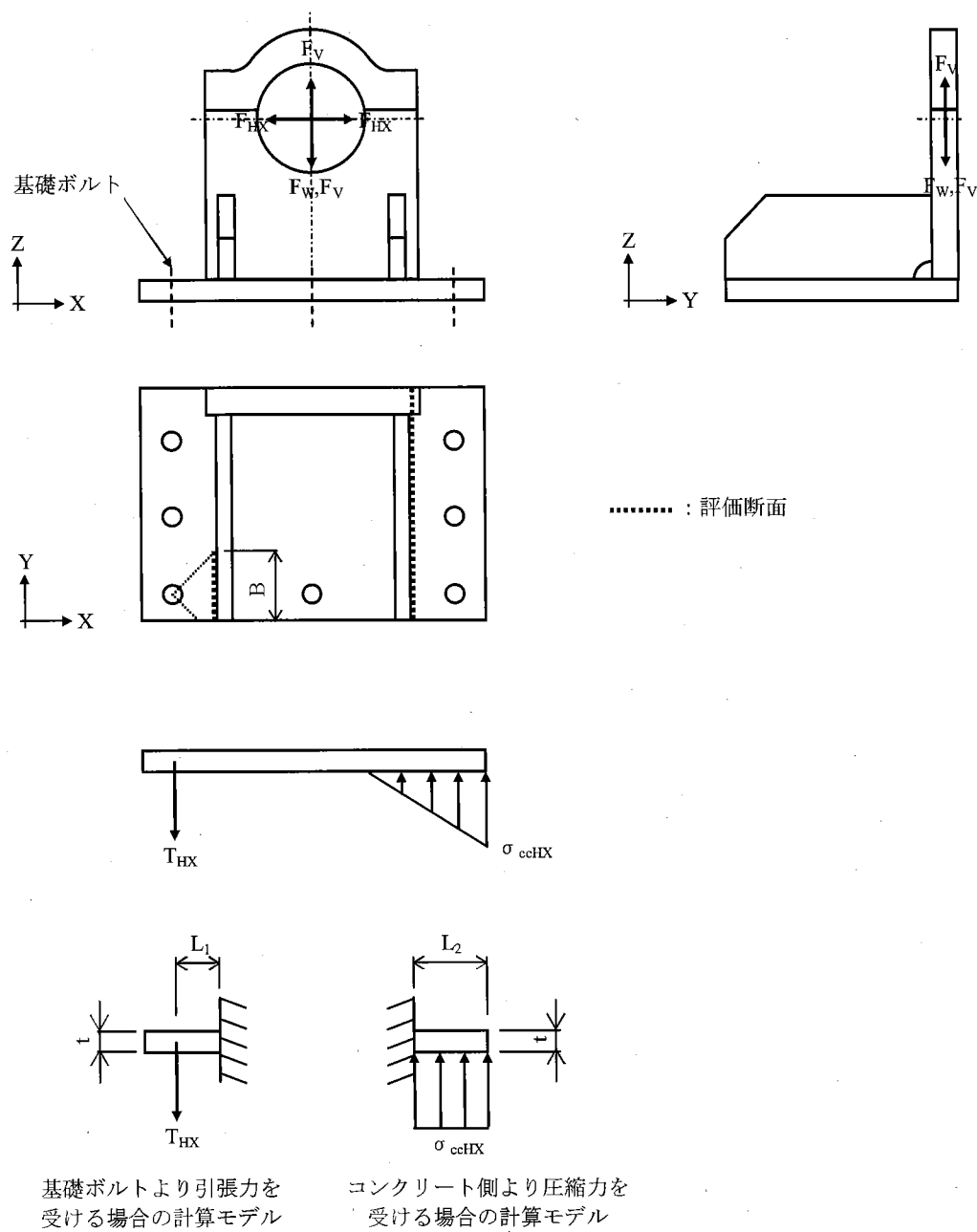


図7 計算モデル図 (鋼製支持架台, 評価断面③)
 [設計事象 I + S_s, 自重+鉛直方向地震力+軸方向水平地震力]

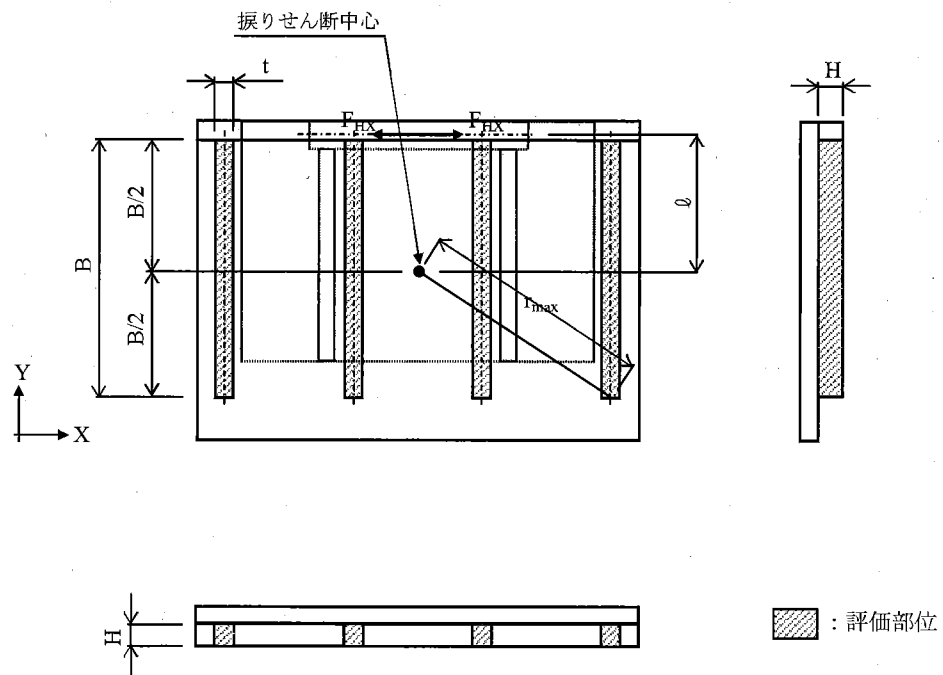


図8 計算モデル図（埋め込み金物）
 [設計事象 I + S_s, (自重+鉛直方向地震力+軸方向水平地震力)]

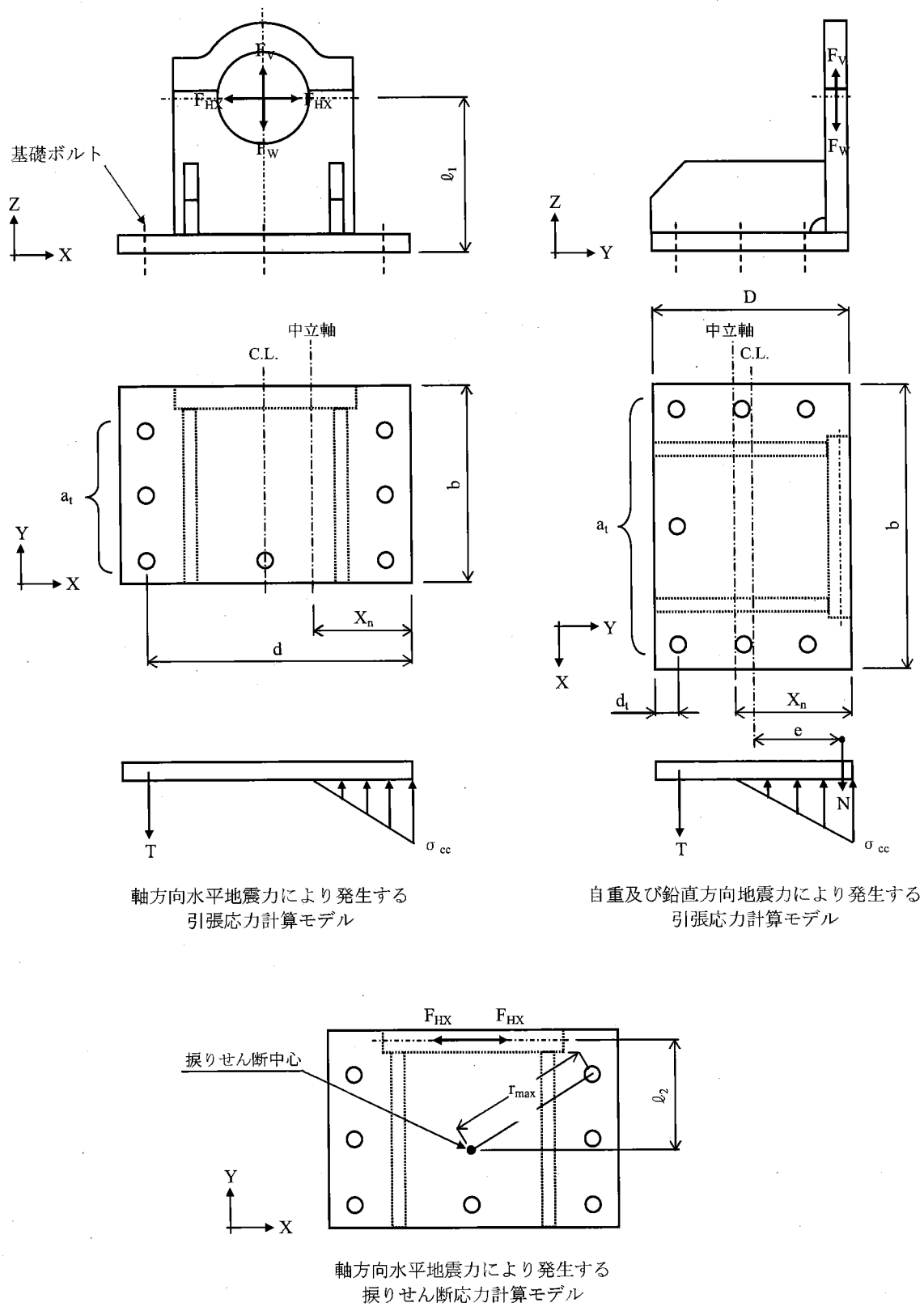


図9 計算モデル図（基礎ボルト）

[設計事象 I + S_s, 自重(-Z)+鉛直方向地震力(+Z)+軸方向水平地震力(±X)]

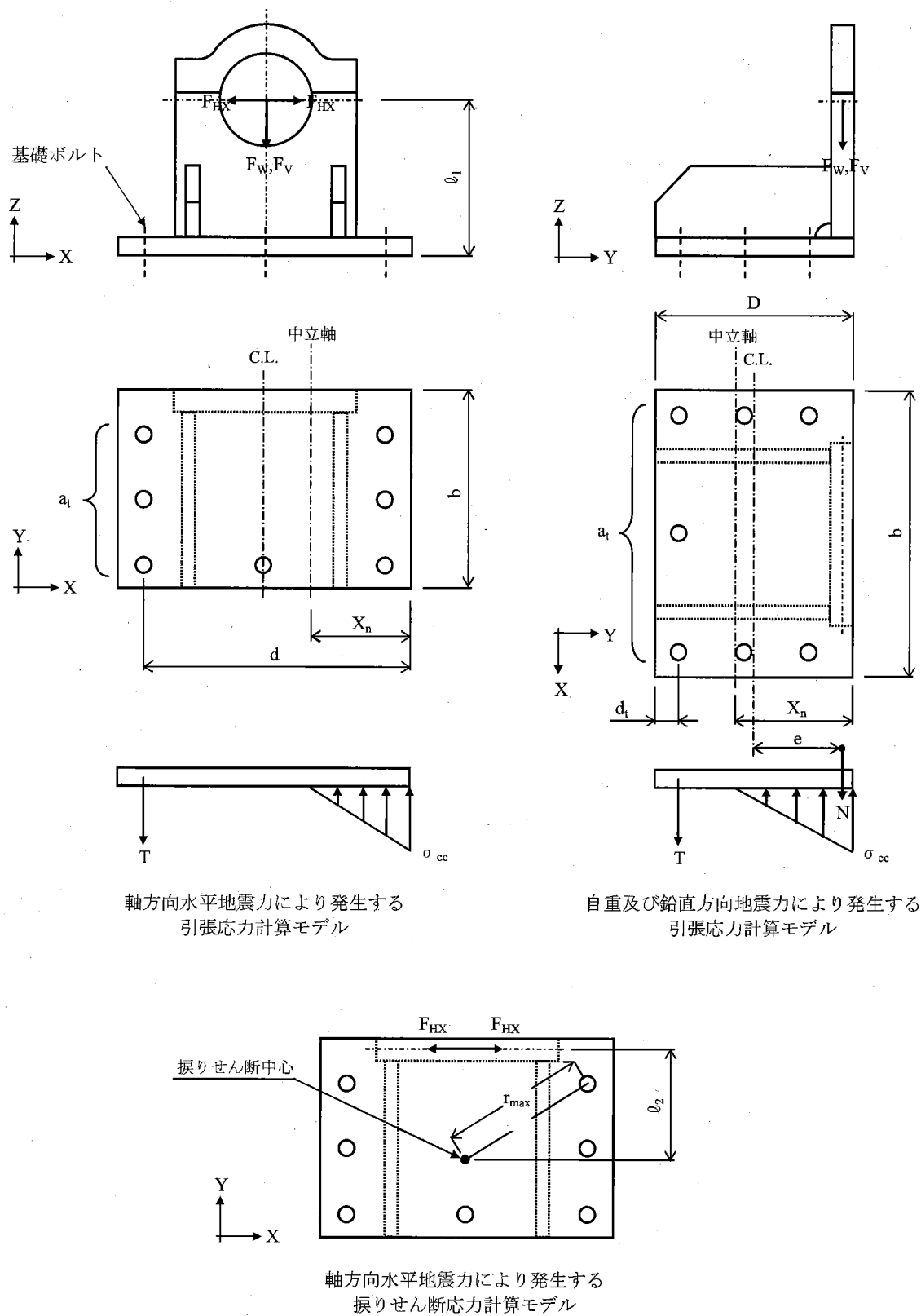


図 10 計算モデル図 (基礎ボルト)

[設計事象 I + S_s, 自重(-Z)+鉛直方向地震力(-Z)+軸方向水平地震力(±X)]

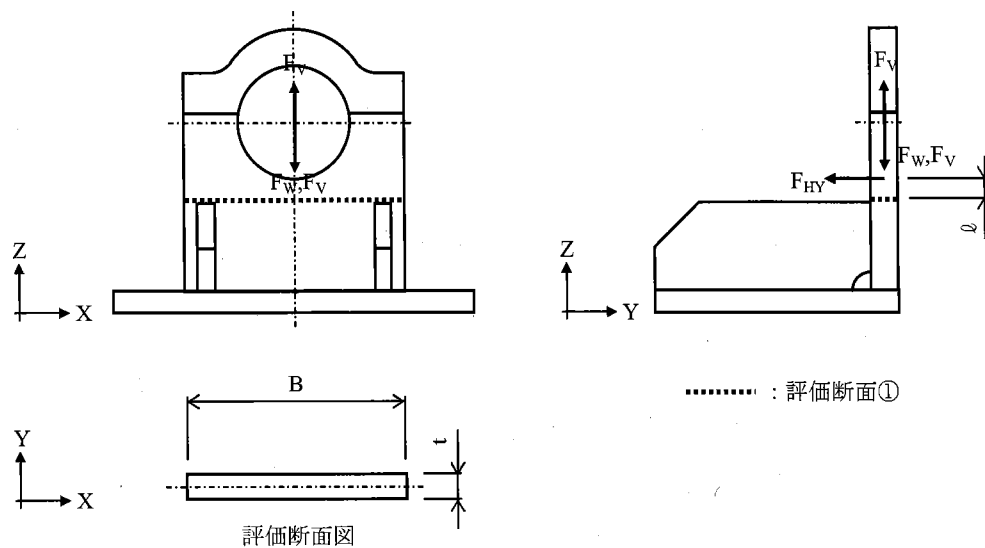


図 11 計算モデル図 (鋼製支持架台, 評価断面①)

[設計事象 I + S_{ss}, 自重 + 鉛直方向地震力 + 軸直角方向水平地震力]

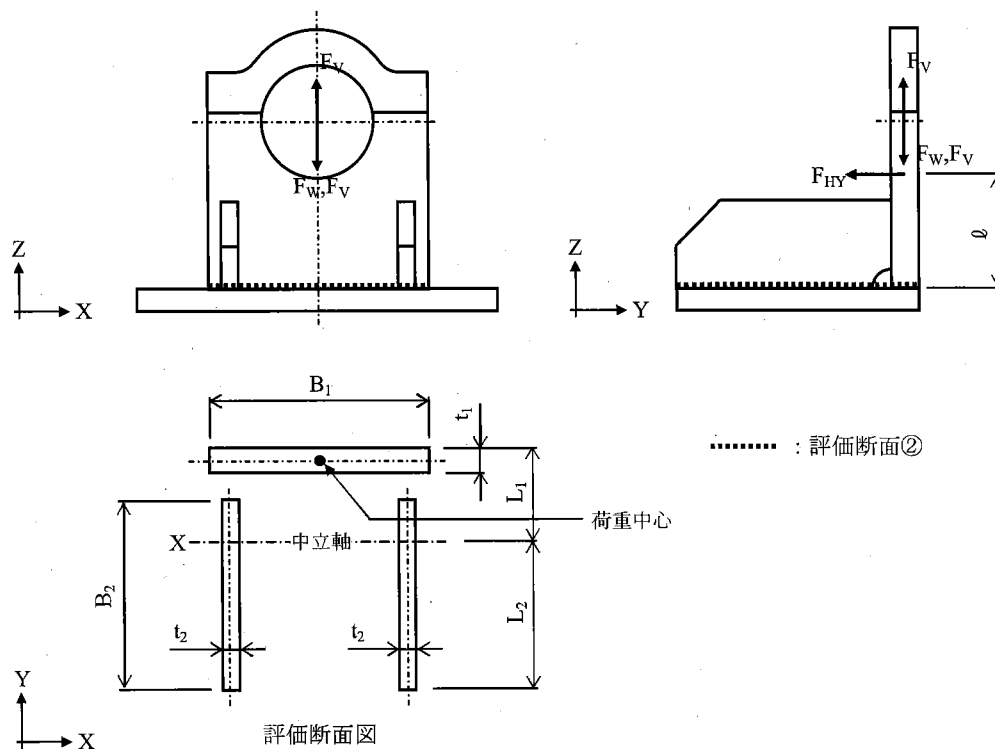


図 12 計算モデル図 (鋼製支持架台, 評価断面②)

[設計事象 I + S_s, 自重 + 鉛直方向地震力 + 軸直角方向水平地震力]

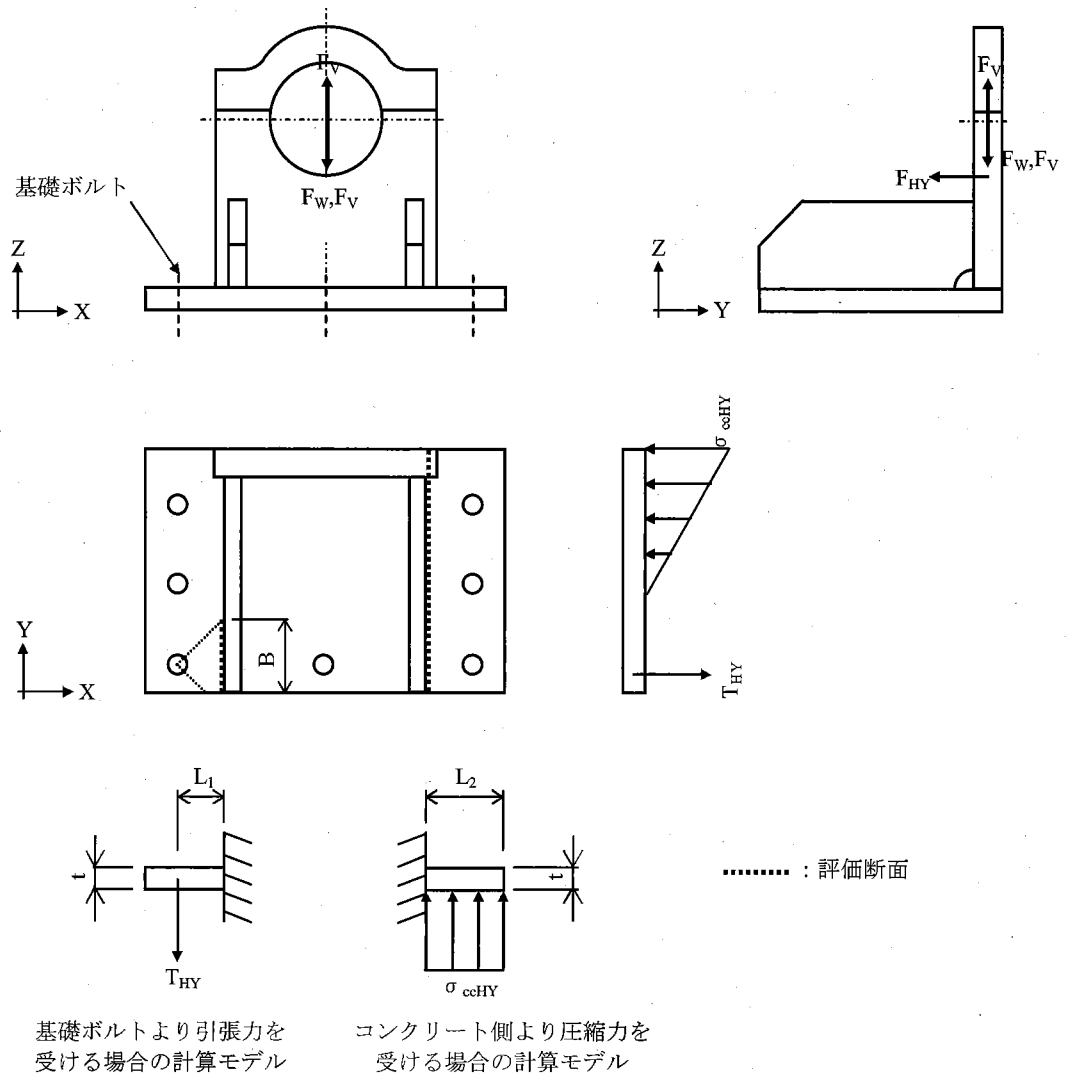


図 13 計算モデル図 (鋼製支持架台, 評価断面③)
 [設計事象 I + S, 自重 + 鉛直方向地震力 + 軸直角方向水平地震力]

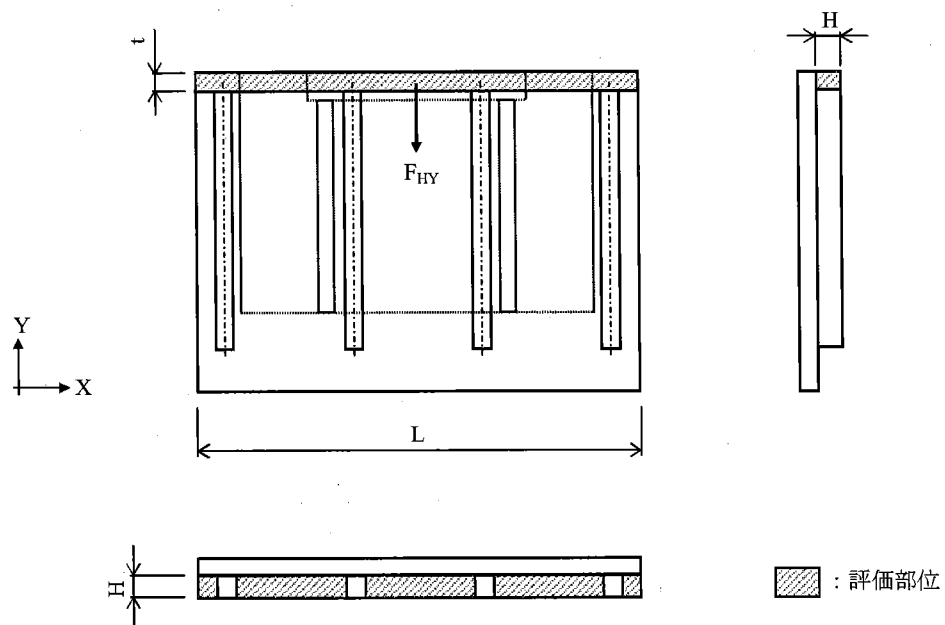


図 14 計算モデル図 (埋め込み金物)

[設計事象 I + S_s , 自重 + 鉛直方向地震力 + 軸直角方向水平地震力]

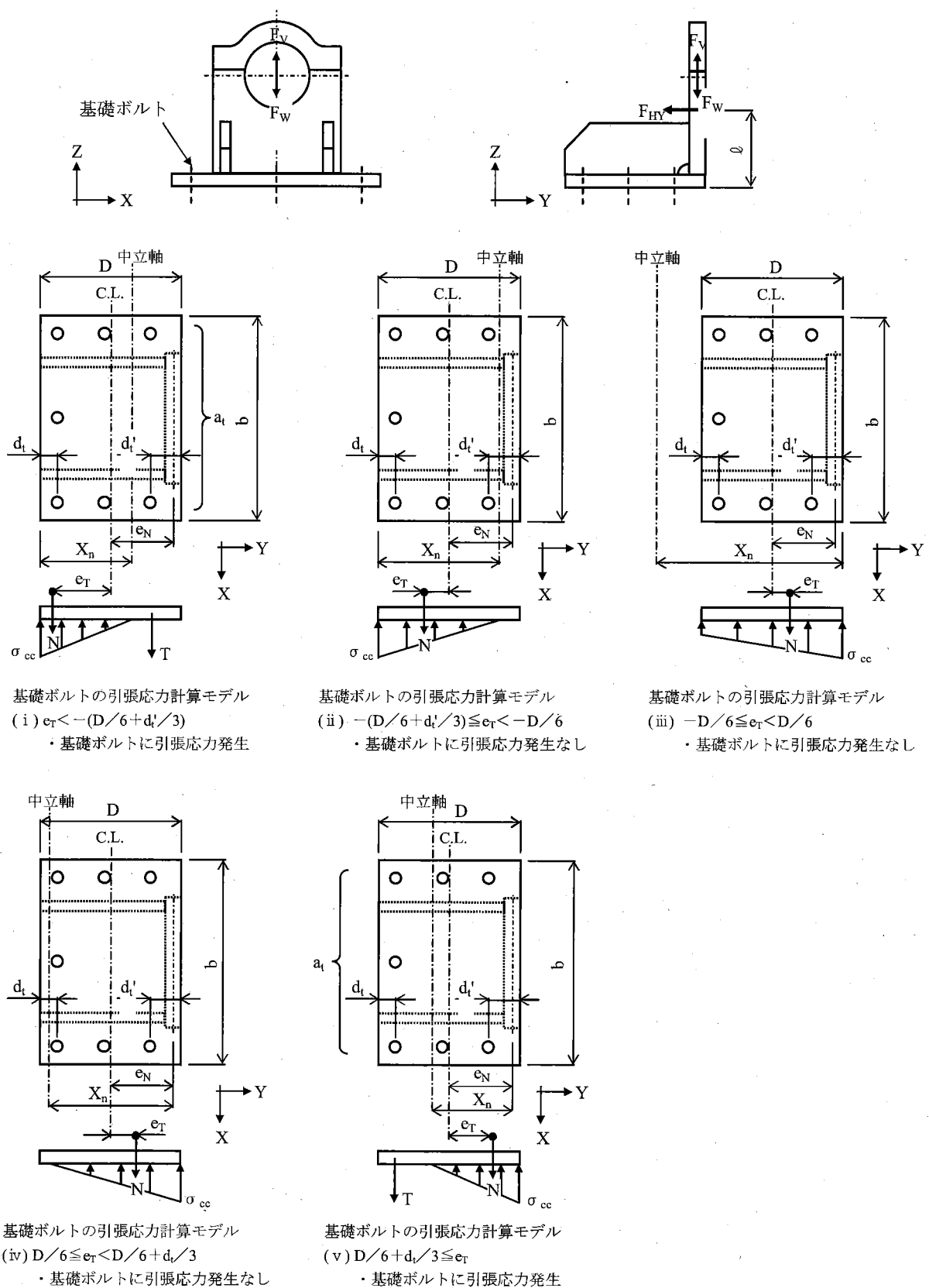
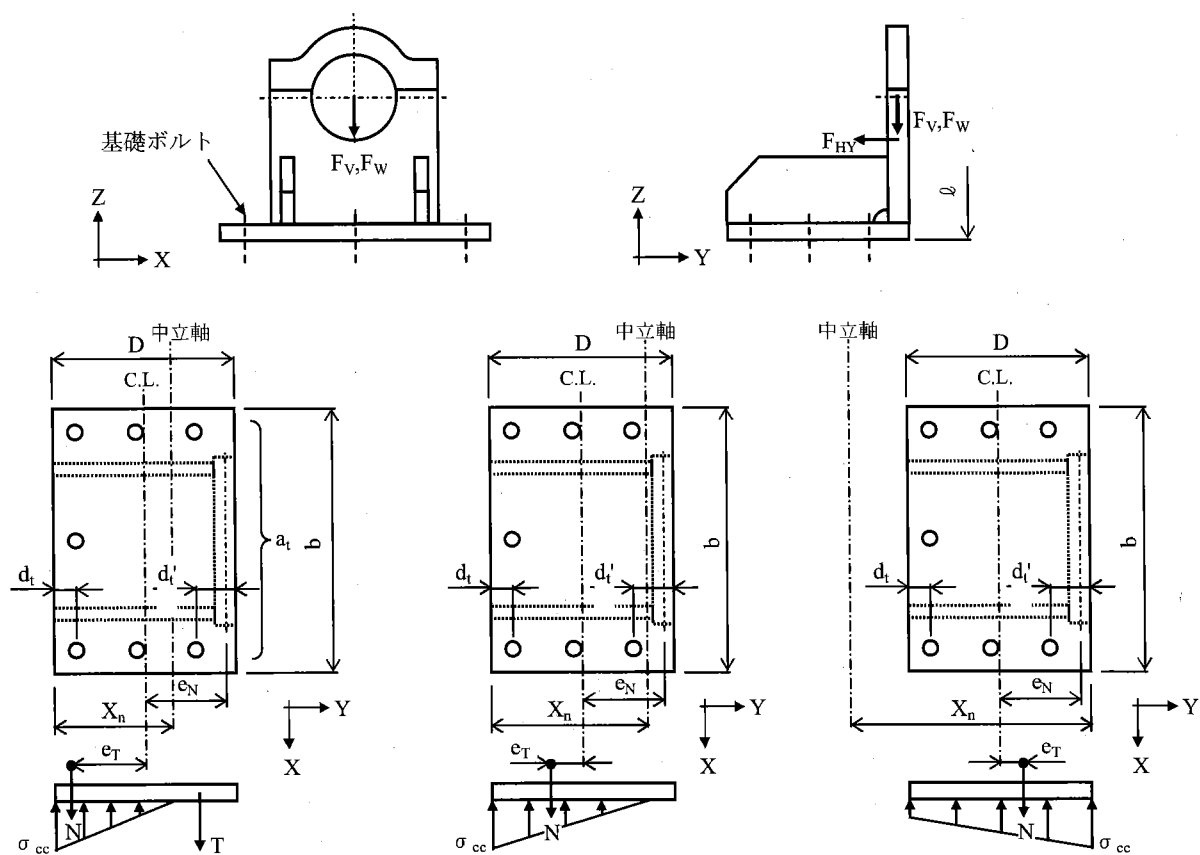


図 15 計算モデル図 (基礎ボルト)

[設計事象 I + S s, 自重(-Z) + 鉛直方向地震力(+Z) + 軸直角方向水平地震力(-Y)]



基礎ボルトの引張応力計算モデル

(i) $e_T < -(D/6 + d_t'/3)$

・基礎ボルトに引張応力発生

基礎ボルトの引張応力計算モデル

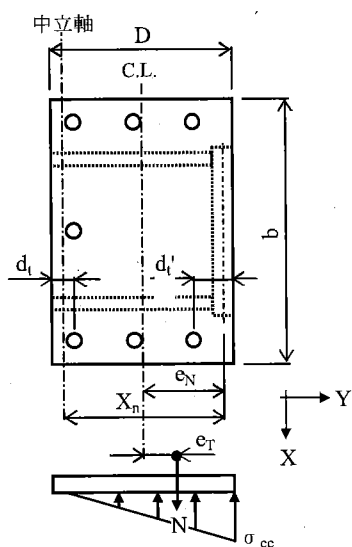
(ii) $-(D/6 + d_t'/3) \leq e_T < -D/6$

・基礎ボルトに引張応力発生なし

基礎ボルトの引張応力計算モデル

(iii) $-D/6 \leq e_T < D/6$

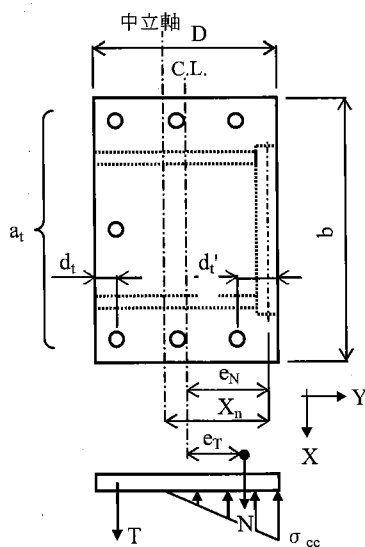
・基礎ボルトに引張応力発生なし



基礎ボルトの引張応力計算モデル

(iv) $D/6 \leq e_T < D/6 + d_t'/3$

・基礎ボルトに引張応力発生なし



基礎ボルトの引張応力計算モデル

(v) $D/6 + d_t'/3 \leq e_T$

・基礎ボルトに引張応力発生

図 16 計算モデル図 (基礎ボルト)

[設計事象 I + S s, 自重(-Z) + 鉛直方向地震力(-Z) + 軸直角方向水平地震力(-Y)]

3.3. 評価結果

鋼製支持架台の応力評価（設計事象 I + Ss, 輸送貯蔵兼用キャスクA）

（単位：N/mm²）

部 位		応力の種類		計 算 値 (注)		許容応力	評価
				ケース 1	ケース 2		
鋼製 支持架台	評価 断面①	一次応力	圧縮	15	15	322	OK
			曲げ	37	150	326	OK
			せん断	15	16	188	OK
			組合せ	58	167	326	OK
		一次 + 二次応力	引張・圧縮	10	10	564	OK
			曲げ	74	150	564	OK
			せん断	30	16	324	OK
			座屈	15	15	279	OK
	評価 断面②	一次応力	圧縮	7	7	325	OK
			曲げ	32	37	326	OK
			せん断	7	7	188	OK
			組合せ	41	45	326	OK
		一次 + 二次応力	引張・圧縮	5	5	564	OK
			曲げ	47	32	564	OK
			せん断	14	7	324	OK
			座屈	7	7	280	OK
	評価 断面③	一次応力	曲げ	276	185	326	OK
			せん断	29	20	188	OK
			組合せ	280	188	326	OK
		一次 + 二次応力	曲げ	449	337	564	OK
			せん断	45	33	324	OK

（注）ケース 1：自重＋鉛直方向地震力＋軸方向水平地震力

ケース 2：自重＋鉛直方向地震力＋軸直角方向水平地震力

埋め込み金物，基礎ボルトの応力評価（設計事象 I + Ss，輸送貯蔵兼用キャスク A）

（単位：N/mm²）

部 位	応力の種類		計 算 値 ^(注1)		許容応力 ^(注2)	評価
			ケース 1	ケース 2		
埋め込み金物	一次応力	曲げ	58	85	270	OK
		せん断	13	18	155	OK
		組合せ	62	90	270	OK
	一次＋二次応力	曲げ	115	85	450	OK
		せん断	25	18	258	OK
基礎ボルト ^(注3)	一次応力	引張	124	126	ケース 1：196	OK
			144	－	ケース 2：333	
		せん断	174	88	261	OK
			174	88		

（注 1） ケース 1：自重＋鉛直方向地震力＋軸方向水平地震力

ケース 2：自重＋鉛直方向地震力＋軸直角方向水平地震力

（注 2） 基礎ボルトの許容引張応力は，発生せん断応力を考慮し低減させた値

（注 3） 上段の値は鉛直方向地震力が上向き（+Z 方向）のときの値を示し，下段の値は鉛直方向地震力が下向き（-Z 方向）のときの値を示す

鋼製支持架台の応力評価（設計事象 I + Ss, 輸送貯蔵兼用キャスク B）

（単位：N/mm²）

部 位		応力の種類		計 算 値 ^(注)		許容応力	評価
				ケース 1	ケース 2		
鋼製 支持架台	評価 断面①	一次応力	圧縮	15	15	322	OK
			曲げ	37	151	326	OK
			せん断	15	16	188	OK
			組合せ	58	168	326	OK
		一次 + 二次応力	引張・圧縮	10	10	564	OK
			曲げ	74	151	564	OK
			せん断	30	16	324	OK
			座屈	15	15	279	OK
	評価 断面②	一次応力	圧縮	7	7	325	OK
			曲げ	27	28	326	OK
			せん断	7	7	188	OK
			組合せ	35	36	326	OK
		一次 + 二次応力	引張・圧縮	5	5	564	OK
			曲げ	37	24	564	OK
			せん断	13	7	324	OK
			座屈	7	7	280	OK
	評価 断面③	一次応力	曲げ	201	111	326	OK
			せん断	23	13	188	OK
			組合せ	205	114	326	OK
		一次+ 二次応力	曲げ	347	201	564	OK
			せん断	38	22	324	OK

（注）ケース 1：自重＋鉛直方向地震力＋軸方向水平地震力

ケース 2：自重＋鉛直方向地震力＋軸直角方向水平地震力

埋め込み金物，基礎ボルトの応力評価（設計事象 I + Ss，輸送貯蔵兼用キャスク B）

（単位：N/mm²）

部 位	応力の種類		計 算 値 ^(注1)		許容応力 ^(注2)	評価
			ケース 1	ケース 2		
埋め込み金物	一次応力	曲げ	66	85	270	OK
		せん断	14	19	155	OK
		組合せ	70	91	270	OK
	一次＋二次応力	曲げ	131	85	450	OK
		せん断	28	19	258	OK
基礎ボルト ^(注3)	一次応力	引張	109	79	ケース 1：165	OK
			129	－	ケース 2：332	
		せん断	193	89	261	OK

（注 1） ケース 1：自重＋鉛直方向地震力＋軸方向水平地震力

ケース 2：自重＋鉛直方向地震力＋軸直角方向水平地震力

（注 2） 基礎ボルトの許容引張応力は，発生せん断応力を考慮し低減させた値

（注 3） 上段の値は鉛直方向地震力が上向き（＋Z 方向）のときの値を示し，下段の値は鉛直方向地震力が下向き（－Z 方向）のときの値を示す

4. クレーン

4.1. 設計震度

設計震度を以下のように定める。

$$C_H=0.15$$

$$C_{H1}=2.43$$

$$C_{H2}=0.15$$

$$C_{V1}=1.6$$

$$C_{V2}=1.38$$

C_H ：最大静止摩擦係数より求めた水平方向設計震度（EW 方向）

C_{H1} ：水平方向設計震度（NS 方向）

C_{H2} ：最大静止摩擦係数より求めた水平方向設計震度（NS 方向）

C_{V1} ：ガータ中央にトロリがある場合の固有周期より求まる鉛直方向設計震度

C_{V2} ：ガータ端部にトロリがある場合の固有周期より求まる鉛直方向設計震度

4.2. 応力評価

4.2.1. クレーン本体ガータ

4.2.1.1. 曲げ応力

ガーダに対する最大曲げ応力は図 17 の場合である。

$$M_1 = \frac{m_g \cdot g \cdot l}{8}$$

$$M_2 = \frac{m_t \cdot g \cdot l_1}{4}$$

$$M_3 = \frac{m_m \cdot g \cdot l_1}{4}$$

$$M_v = M_1 + M_2 + M_3$$

$$\sigma_{vt} = \frac{M_v}{Z_{xt}} \cdot (1 + C_{v1})$$

$$M_4 = M_1 \cdot C_H$$

$$M_5 = M_2 \cdot C_H$$

$$M_H = M_4 + M_5$$

$$\sigma_H = \frac{M_H}{Z_{y1}}$$

$$\sigma_t = \sigma_{vt} + \sigma_H$$

g : 重力加速度 (=9.80665m/s²)

l : 走行レール間距離 (=19000mm)

l_1 : トロリがクレーン中央部にある場合の走行レールとトロリ車輪との距離 (mm)

m_g : ガーダ 1 本当たりの質量 (kg)

m_m : 主巻定格荷重 (=150000kg)

m_t : トロリ質量 (kg)

M_1 : ガーダ質量によるガーダ中央部の垂直曲げモーメント (N・mm)

M_2 : トロリ質量によるガーダ中央部の垂直曲げモーメント (N・mm)

M_3 : 主巻定格荷重 (質量) によるガーダ中央部の垂直曲げモーメント (N・mm)

M_4 : 水平地震力によるガーダ質量に対するガーダ中央部の水平曲げモーメント (N・mm)

M_5 : 水平地震力によるトロリ質量に対するガーダ中央部の水平曲げモーメント (N・mm)

M_H : ガーダ中央部の合計水平曲げモーメント (N・mm)

M_v : ガーダ中央部の合計垂直曲げモーメント (N・mm)

Z_{xt} : ガーダ中央部の X 軸に関する断面係数 (下フランジ側) (mm³)

Z_{y1} : ガーダ中央部の Y 軸に関する断面係数 (横行レール側) (mm³)

σ_H : M_H によるガーダ中央部の曲げ (引張) 応力 (N/mm²)

σ_t : ガーダ中央部の曲げ (引張) 応力 (N/mm²)

σ_{vt} : M_v によるガーダ中央部の曲げ (引張) 応力 (N/mm²)

4.2.1.2. せん断応力

ガーダに対する最大せん断応力は図 18 の場合である。

$$Q_1 = \frac{m_g \cdot g}{2} \cdot (1 + C_{v2})$$

$$Q_2 = \frac{m_t \cdot g}{2} \cdot \frac{(\frac{l_2}{2} + l_4)}{l} (1 + C_{v2})$$

$$Q_3 = \frac{m_m \cdot g}{2} \cdot \frac{(\frac{l_2}{2} + l_4)}{l} \cdot (1 + C_{v2})$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$\tau = \frac{Q}{A_v}$$

A_v : ガーダ端部のウェブの断面積 (mm²)

g : 重力加速度 (=9.80665m/s²)

l : 走行レール間距離 (=19000mm)

l_2 : トロリ車輪間距離 (mm)

l_4 : トロリが走行給電側クレーン端部にある場合の走行レールとトロリ車輪との距離 (mm)

m_g : ガーダ 1 本当たりの質量 (kg)

m_m : 主巻定格荷重 (=150000kg)

m_t : トロリ質量 (kg)

Q_1 : ガーダ質量によるガーダ端部のせん断力 (N)

Q_2 : トロリ質量によるガーダ端部のせん断力 (N)

Q_3 : 主巻定格荷重(質量)によるガーダ端部のせん断力 (N)

Q : ガーダ端部の合計せん断力 (N)

τ : ガーダ端部のせん断応力 (N/mm²)

4.2.1.3. 組合せ応力

$$Q_4 = \left(\frac{m_t \cdot g}{4} + \frac{m_m \cdot g}{4} \right) \cdot (1 + C_{v1})$$

$$\tau_3 = \frac{Q_4}{A_{v1}}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau_3^2}$$

A_{v1} : ガータ中央部の断面積 (mm²)

m_m : 主巻定格荷重 (=150000kg)

m_t : トロリ質量 (kg)

Q_4 : 主巻定格荷重(質量)及びトロリ質量によるガータ中央部(横行車輪位置)のせん断力(N)

τ_3 : ガータ中央部(横行車輪位置)のせん断応力 (N/mm²)

σ_T : ガータ中央部の組合せ応力 (N/mm²)

σ_t : ガータ中央部の曲げ(引張)応力 (N/mm²)

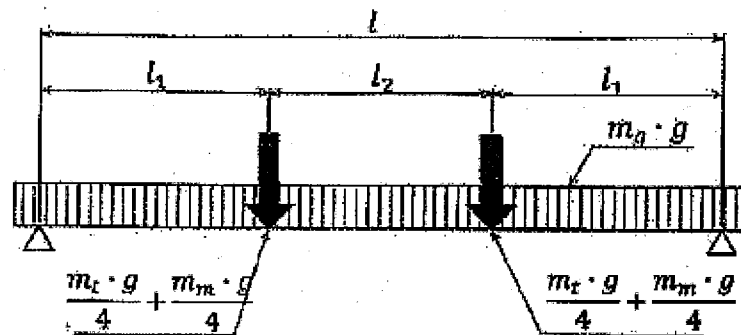


図 17

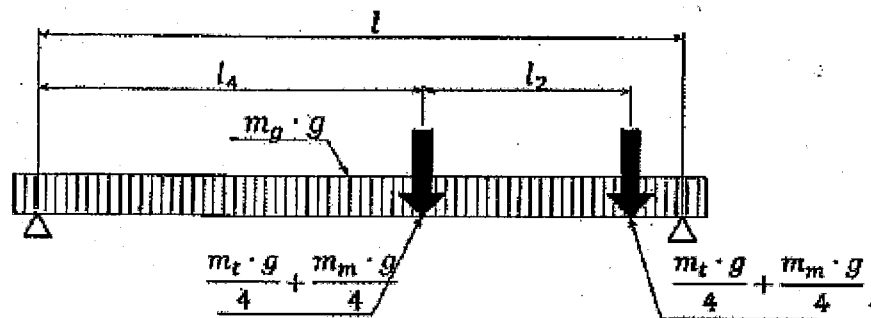


図 18

4. 2. 2. クレーン脚部

4. 2. 2. 1. 曲げ応力

$$k_1 = \frac{I_{x14} \cdot l_{24}}{I_{x11} \cdot l_{22}}$$

$$m_1 = 3 + 2 \times k_1$$

$$M_{B11} = \left| -\frac{P_{k11} \cdot l_{22}}{4 \cdot m_1} \right|$$

$$P_{k11} = \frac{m_g \cdot g + m_{g2} \cdot g}{2} + m_{g3} \cdot g$$

$$V_{a11} = \frac{P_{k11}}{2}$$

$$M_{B11a} = M_{B11} \cdot \frac{l_{26}}{l_{23}}$$

$$M_{B12} = |V_{a12} \cdot l_{25} - H_{a12} \cdot l_{23}|$$

$$P_{k12} = \frac{m_t \cdot g}{2} \cdot \frac{l_4 + \frac{l_2}{2}}{l}$$

$$H_{a12} = \frac{P_{k12} \cdot l_{25}}{l_{23}} + P_{k12} \cdot l_9 \cdot (l_8 + l_9) \cdot \frac{3}{l_{22} \cdot l_{23} \cdot m_1}$$

$$V_{a12} = P_{k12}$$

$$M_{B12a} = M_{B12} \cdot \frac{l_{26}}{l_{23}}$$

$$M_{B13} = |V_{a13} \cdot l_{25} - H_{a13} \cdot l_{23}|$$

$$P_{k13} = \frac{m_m \cdot g}{2} \cdot \frac{l_4 + \frac{l_2}{2}}{l}$$

$$H_{a13} = \frac{P_{k13} \cdot l_{25}}{l_{23}} + P_{k13} \cdot l_9 \cdot (l_8 + l_9) \cdot \frac{3}{l_{22} \cdot l_{23} \cdot m_1}$$

$$V_{a13} = P_{k13}$$

$$M_{B13a} = M_{B13} \cdot \frac{l_{26}}{l_{23}}$$

$$M_{V1} = (M_{B11} + M_{B12} + M_{B13}) \times (1 + C_{V1})$$

$$M_{V1a} = (M_{B11a} + M_{B12a} + M_{B13a}) \times (1 + C_{V1})$$

$$M_{B14} = \left| \frac{V_{a14} \cdot l_{22}}{2} \right|$$

$$P_{k14} = (P_{k11} + 2 \times P_{k12} + m_{l1} \cdot g) \times C_H$$

$$V_{a14} = \frac{P_{k14} \cdot l_{23}}{l_{21}}$$

$$M_{B14a} = M_{B14} \cdot \frac{l_{26}}{l_{23}}$$

$$\sigma_{Vt1} = \frac{M_{V1} + M_{B14}}{Z_{x11}}$$

$$\sigma_{Vt1a} = \frac{M_{V1a} + M_{B14a}}{Z_{x13}}$$

$$M_{B15} = \frac{P_{k15} \cdot l_{23}}{2}$$

$$P_{k15} = \frac{m_g \cdot g + m_{g2} \cdot g + m_{g3} \cdot g + m_{g4} \cdot g + m_{l1} \cdot g + m_{l2} \cdot g}{2} \times C_{H1} + P_{k12} \times C_{H2}$$

$$V_{a15} = \frac{P_{k15} \cdot l_{23}}{l}$$

$$M_{B15a} = M_{B15} \cdot \frac{l_{26}}{l_{23}}$$

$$\sigma_{Ht1} = \frac{M_{B15}}{Z_{y11}}$$

$$\sigma_{Ht1a} = \frac{M_{B15a}}{Z_{y13}}$$

$$\sigma_{t11} = \sigma_{Vt1} + \sigma_{Ht1}$$

$$\sigma_{t11a} = \sigma_{Vt1a} + \sigma_{Ht1a}$$

ここで

g : 重力加速度(=9.80665m/s²)

H_{a12} : トロリ質量による剛脚下部の水平方向反力(N)

H_{a13} : 主巻定格荷重(質量)による剛脚下部の水平方向反力(N)

I_{x11} : 剛脚上部の X 軸に関する断面二次モーメント (mm⁴)

I_{x14} : 剛脚側ガータつなぎの X 軸に関する断面二次モーメント (mm⁴)

k_1 : 剛脚の剛比(-)

l : 走行レール間距離(=19000mm)

l_2 : トロリ車輪間距離 (mm)

l_4 : トロリが走行給電側クレーン端部にある場合の走行レールとトロリ車輪との距離 (mm)

l_8 : トロリスパン (mm)

l_9 : 剛脚上側軸芯～横行レール中心までの距離 (mm)
 l_{21} : 剛脚軸芯間距離 (下側) (mm)
 l_{22} : 剛脚軸芯間距離 (上側) (mm)
 l_{23} : 剛脚高さ (mm)
 l_{24} : 剛脚長さ (mm)
 l_{25} : 剛脚上下軸芯の差 (mm)
 l_{26} : 剛脚最小断面までの高さ (mm)
 m_1 : 剛脚の不静定時数 (-)
 m_g : ガーダ 1 本当たりの質量 (kg)
 m_{g2} : 反横行給電側ガーダの質量 (kg)
 m_{g3} : 走行給電側剛ガーダつなぎ質量 (kg)
 m_{g4} : 反走行給電側ガーダつなぎ質量 (kg)
 m_{11} : 走行給電側剛脚の質量 (kg)
 m_{12} : 反走行給電側剛脚の質量 (kg)
 m_m : 主巻定格荷重 (質量) (=150000kg)
 m_t : トロリ質量 (ワイヤ, フック含む) (kg)
 M_{B11} : ガーダ質量による剛脚の最大曲げモーメント (N・mm)
 M_{B11a} : ガーダ質量による剛脚最小断面位置 (下部) での曲げモーメント (N・mm)
 M_{B12} : トロリ質量による剛脚の最大曲げモーメント (N・mm)
 M_{B12a} : トロリ質量による剛脚最小断面位置 (下部) での曲げモーメント (N・mm)
 M_{B13} : 主巻定格荷重 (質量) による剛脚の最大曲げモーメント (N・mm)
 M_{B13a} : 主巻定格荷重 (質量) による剛脚最小断面位置 (下部) での曲げモーメント (N・mm)
 M_{B14} : 走行方向水平地震力による剛脚の曲げモーメント (N・mm)
 M_{B14a} : 走行方向水平地震力による剛脚最小断面位置 (下部) での曲げモーメント (N・mm)
 M_{B15} : 横行方向水平地震力による剛脚の曲げモーメント (N・mm)
 M_{B15a} : 横行方向水平地震力による剛脚最小断面位置 (下部) での曲げモーメント (N・mm)
 M_{v1} : 剛脚の垂直荷重による合計曲げモーメント (N・mm)
 M_{v1a} : 垂直荷重による剛脚最小断面位置 (下部) での合計曲げモーメント (N・mm)
 P_{k11} : ガーダ質量による剛脚に加わる荷重 (N)
 P_{k12} : トロリ質量による剛脚に加わる荷重 (N)
 P_{k13} : 主巻定格荷重 (質量) による剛脚に加わる荷重 (N)
 P_{k14} : 走行方向水平地震力 (N)
 P_{k15} : 剛脚 1 本に作用する横行方向水平地震力 (N)
 V_{a11} : ガーダ質量による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)
 V_{a12} : トロリ質量による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)
 V_{a13} : 主巻定格荷重 (質量) による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)

V_{a14} : 走行方向水平地震力による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)

V_{a15} : 横行方向水平地震力による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)

Z_{x11} : 剛脚上部の X 軸に関する断面係数 (mm³)

Z_{x13} : 剛脚下部の X 軸に関する断面係数 (mm³)

Z_{y11} : 剛脚上部の Y 軸に関する断面係数 (mm³)

Z_{y13} : 剛脚下部の Y 軸に関する断面係数 (mm³)

σ_{vt1} : 剛脚の走行方向曲げ応力 (N/mm²)

σ_{ht1} : 剛脚の横行方向曲げ応力 (N/mm²)

σ_{t11} : 剛脚の曲げ応力 (N/mm²)

σ_{vt1a} : 剛脚最小断面位置 (下部) での走行方向曲げ応力 (N/mm²)

σ_{ht1a} : 剛脚最小断面位置 (下部) での横行方向曲げ応力 (N/mm²)

σ_{t11a} : 剛脚最小断面位置 (下部) での曲げ応力 (N/mm²)

4. 2. 2. 2. 圧縮応力

$$P_{k16} = (V_{a11} + V_{a12} + V_{a13}) \times (1 + C_{v1}) + V_{a14} + V_{a15}$$

$$\sigma_{c11} = \frac{P_{k16}}{A_{13}}$$

A_{13} : 剛脚下部の断面積 (mm²)

P_{k16} : 剛脚軸方向の圧縮力 (N)

V_{a11} : ガーダ質量による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)

V_{a12} : トロリ質量による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)

V_{a13} : 主巻定格荷重 (質量) による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)

V_{a14} : 走行方向水平地震力による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)

V_{a15} : 横行方向水平地震力による剛脚下部の鉛直方向反力 (N)

σ_{c11} : 剛脚の圧縮応力 (N/mm²)

4.3. 評価結果

クレーン各部応力の評価結果

	応力の種類	算出応力 (N/mm ²)	許容応力 (N/mm ²)	評価結果
本体ガーダ	曲げ	146	343	O. K.
	せん断	51	198	O. K.
	組合せ	148	343	O. K.
剛脚（上部）	曲げ	115	280	O. K.
	圧縮	76	246	O. K.
剛脚（下部）	曲げ	174	280	O. K.
	圧縮	76	246	O. K.

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、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（処理済水移送ポンプ）

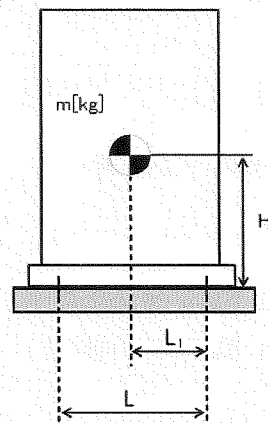
(1) 構造強度評価

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

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）。



- 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^2)
 H : 据付面からの重心までの距離
 L_1 : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離
 n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数(2本)
 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

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

$C_H = 0.36$ 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。

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

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

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。

$$F = \min (Sy, 0.7Su)$$

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

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

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

基礎ボルトの許容引張応力：

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

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

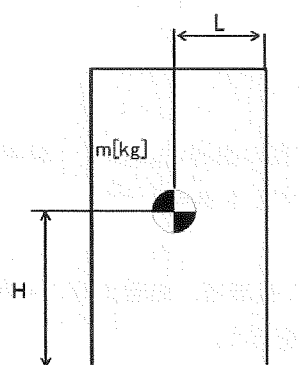
$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 183$$

$$\begin{aligned} f_{ts} &= 1.4 \times f_{to} - 1.6 \times \tau_b \\ &= 253 \text{ (} C_H=0.36 \text{ の場合)} \\ &= 249 \text{ (} C_H=0.80 \text{ の場合)} \end{aligned}$$

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

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^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 $M_1 = 8.30 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{mm}$

$C_H = 0.80$ 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	8.30×10^5	1.10×10^6	$\text{N} \cdot \text{mm}$
	基礎 ボルト	引張	0.36	-	-	MPa
		せん断	0.36	2	141	MPa
	本体	転倒	0.80	1.90×10^6	1.10×10^6	$\text{N} \cdot \text{mm}$
	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(処理カラム)

(1) 構造強度評価

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)

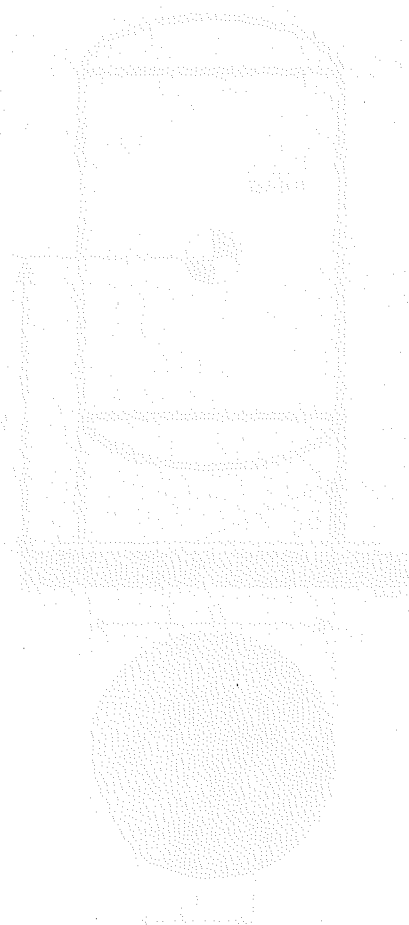
r : さら形鏡板のすみの丸みの内半径(135mm)

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

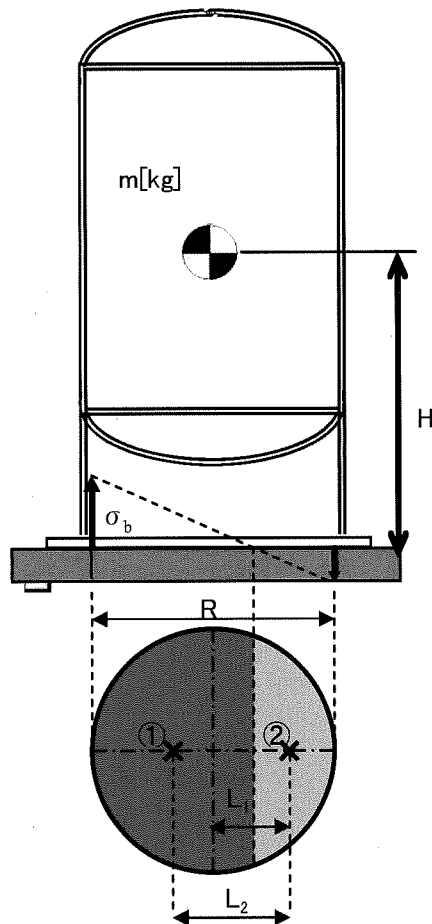


(2)耐震性評価

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^2)

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

σ_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 $F_t = 218 \text{ N}$

$C_H = 0.80$ の場合 $F_t = 34303 \text{ N}$

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

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

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

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

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

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

また、許容応力は、以下の式で設定した。

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

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

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℃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：

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

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

$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 131$$

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

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

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

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

(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 σ_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

σ_{0t} : 一次一般膜応力 (引張側)

σ_{0c} : 一次一般膜応力 (圧縮側)

σ_ϕ : 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

σ_{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

σ_{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

τ : 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。

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、 σ 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℃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℃ : 111MPa、75℃ : 108 MPa

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

Sy : 表 8 より 40℃ : 175MPa、75℃ : 154 MPa

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

Su : 表 9 より 40℃ : 480MPa、75℃ : 452MPa

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

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 σ_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

σ_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

σ_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

σ_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

τ : 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、 σ 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 50℃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℃ : 205MPa、75℃ : 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℃ : 520MPa、75℃ : 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

σ_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

σ_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

σ_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

η : 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

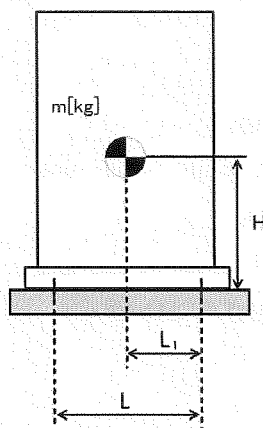
機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
処理カラム	胴板	一次一般膜	0.36	48	163	MPa
	スカート	組合せ	0.36	4	205	MPa
		座屈	0.36	0.02	1	-
	基礎 ボルト	引張	0.36	1	131	MPa
		せん断	0.36	12	101	MPa
	胴板	一次一般膜	0.80	48	163	MPa
	スカート	組合せ	0.80	8	205	MPa
		座屈	0.80	0.03	1	-
	基礎 ボルト	引張	0.80	39	131	MPa
		せん断	0.80	26	101	MPa

1.2.3 スキッド (バッチ処理タンクスキッド)

(1) 耐震性評価

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^2)

H : 据付面からの重心までの距離()

L_1 : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離()

n_f : 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_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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

また、許容応力は、以下の式で設定した。

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

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

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。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

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

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

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

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

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

基礎ボルトの許容引張応力：

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

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

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

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

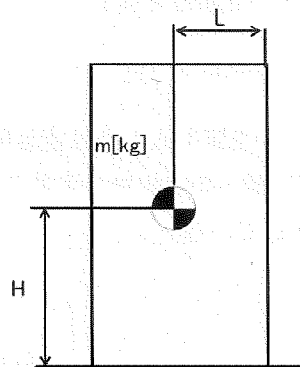
$$= 216 \text{ } (C_H=0.36 \text{ の場合})$$

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

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

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、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 (9.80665m/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 ()

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

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

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

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

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	9.27×10^8	1.08×10^9	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	2.06×10^9	1.08×10^9	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、高い信頼性を有している。

a. 収容物重量に対する評価

高性能容器の収容物重量は容積から決定しており、当該型式の高性能容器の設計重量は約 4.5t である。多核種除去設備で使用する高性能容器への収容物の重量は最大で 3.5t とすることから、収容物重量に対して十分な強度を有している。

b. 圧力に対する評価

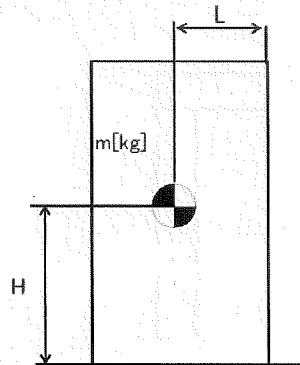
当該型式の高性能容器の外圧に対する設計圧力は、25 kPa である。多核種除去設備で用いる高性能容器の外圧は屋外設置のため大気圧程度であることから、設計圧力を満足している。

一方、内圧に対しては、サウスカロライナ州健康環境局の認可に当たり、50 kPa で試験を行い、容器に歪みがないことを確認している。高性能容器は、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、大気圧程度となり、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、それらを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）。



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^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 $M_1 = 2.04 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

$C_H=0.80$ の場合 $M_1 = 4.52 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

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

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

表 5 高性能容器評価結果

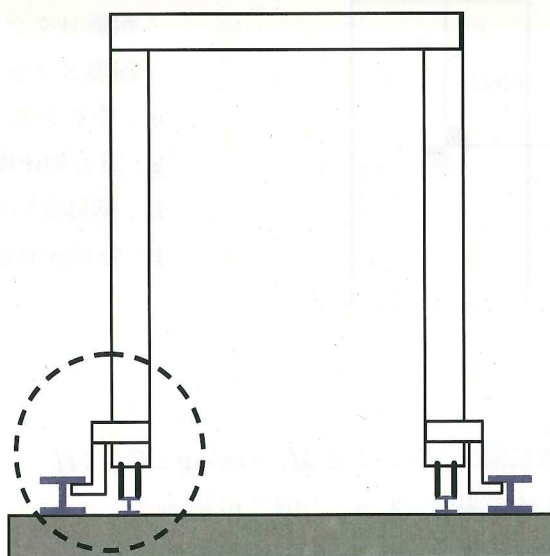
機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
高性能容器 (補強体付き)	本体	転倒	0.36	2.04×10^7	4.56×10^7	N・mm
			0.80	4.52×10^7		

1.2.5 クレーン類（処理カラム交換用クレーン）

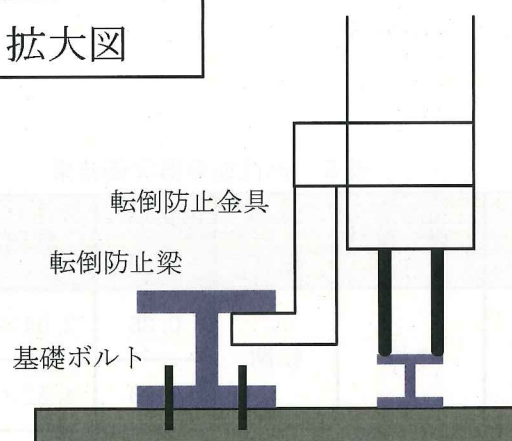
(1) 耐震性評価

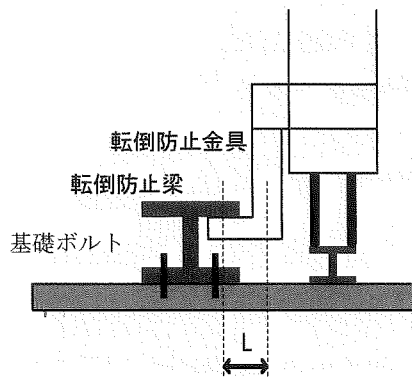
a. 基礎ボルト等の強度評価

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）。



拡大図





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(140mm)

g : 重力加速度(9.80665m/s²)

Z₁ : 転倒防止金具の形状係数(7.90×10⁴mm³)

Z₂ : 転倒防止梁の形状係数 (8.60×10⁵mm³)

d : ボルトの断面積(149.50mm²)

l : 転倒防止梁のアンカー固定ピッチ (2000mm)

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

「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、

$$F = (\text{地震による転倒モーメント} - \text{自重による安定モーメント}) / (\text{クレーン両脚の距離})$$

$$= (22400 - 22500) / 4.9 = -20 \text{ kg (Bクラス評価の場合)} \quad \leftarrow \text{浮き上がり荷重は発生しない}$$

$$= (49600 - 22500) / 4.9 = 5600 \text{ kg (Sクラス評価の場合)}$$

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_H=0.36 の場合 応力が発生しない

C_H= 0.80 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_H= 0.36 の場合 引張力が発生しない

C_H= 0.80 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_H= 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。

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

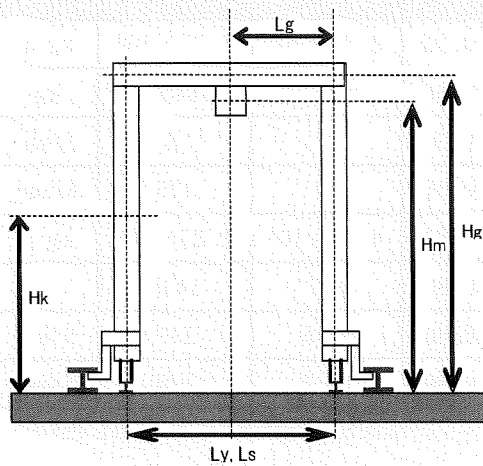
$$\begin{aligned} \text{基礎ボルトの許容引張力: } F_{Ba} &= \sigma_{ta} \times d \times 0.6 \\ &= 1435 \text{ kg} \end{aligned}$$

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

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

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 (9.80665m/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 ()

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	2.24×10^4	2.25×10^4	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 ²
	転倒防止梁	変形	0.36	—	175	N/mm ²
	本体	転倒	0.80	4.96×10^4	2.25×10^4	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 ²
	転倒防止梁	変形	0.80	10.7	175	N/mm ²

※ 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