

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

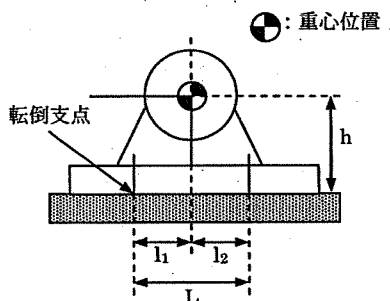
常用高台炉注水ポンプおよび非常用高台炉注水ポンプについては、ポンプユニットを、ダンパを有するトラックに搭載することにより耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで、転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること、およびトラックが転倒しないことの評価を行った。なお、基準地震動 S_s に対する動的解析を行うことが困難であることから、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行った。

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
- 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 ()

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

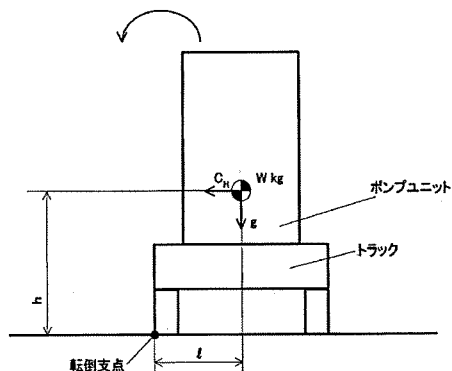
$$\text{ボルトの引張応力 : } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

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

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

b. トラックの転倒評価

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

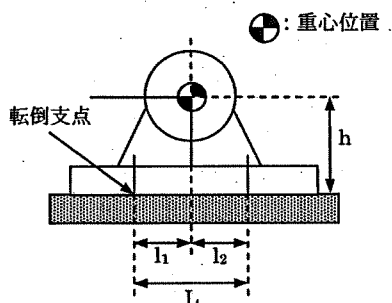
純水タンク脇炉注水ポンプは、常用高台炉注水ポンプと同様の構造（ポンプユニットをトラックに搭載し、ボルト等で固定）であることから、耐震性についても同様に評価を行った。なお、基準地震動 S_s に対する動的解析を行うことが困難であることから、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行った。

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 (■)

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

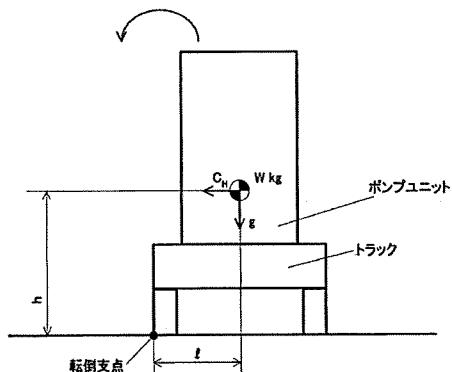
$$\text{ボルトの引張応力 : } \sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

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

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

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： $M_2 = W \times g \times \ell$

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

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

$C_H = 0.72$ 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

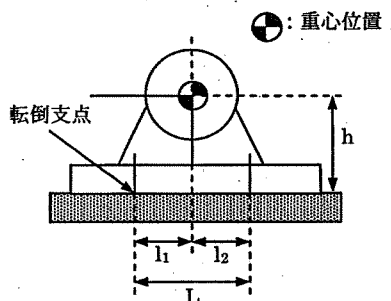
タービン建屋内炉注水ポンプは、基礎ボルトによりタービン建屋 1 階の床面に固定されていることを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されることの評価を行った。なお、基準地震動 S_s に対する動的解析を行うことが困難であることから、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行った。

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
 (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 (■)

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

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

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

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

1.1.4 CST 炉注水ポンプ

(1) 耐震性

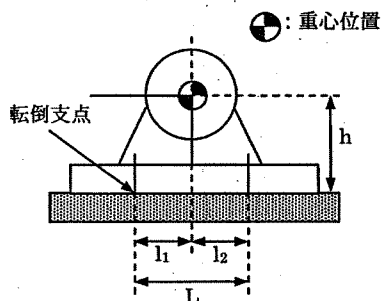
CST 炉注水ポンプは、基礎ボルトによりタービン建屋 1 階の床面に固定されていることを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されることの評価を行う。なお、耐震 S クラス相当の設備に求められる解析評価を行うことが困難であることから、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行う。

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-	引張応力	作用しない	180	2	207
1/2/3	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
 l_1 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

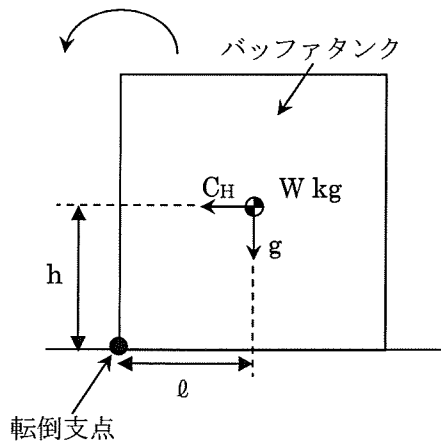
1.2.1 処理水バッファタンク

(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、それらと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	60.5	0.96	103	3.9	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