

別冊 1

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

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

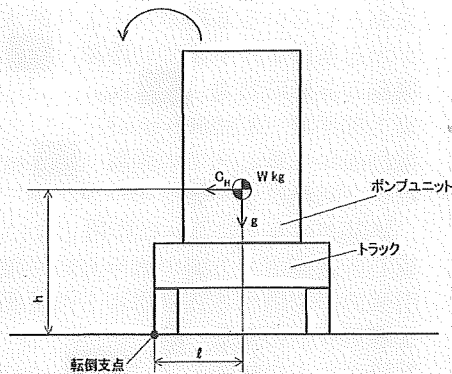
常用高台炉注水ポンプおよび非常用高台炉注水ポンプについては、ポンプユニットを、ダンパを有するトラックに搭載することにより耐震性を向上させるとともに、ボルト等で固定することで、転倒防止策を講じている。これを踏まえ、耐震性の評価として、ボルトの強度が確保されること、およびトラックが転倒しないことの評価を行った。なお、基準地震動 S_s に対する動的解析を行うことが困難であることから、耐震設計審査指針上の耐震 B クラス設備に適用される静的地震力による評価を行った。

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



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： $M_2 = W \times g \times l$

$$M_1 - M_2 = (WgC_H h) - (Wgl) = Wg(C_H h - l)$$

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

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

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

■ 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

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

1.2 タンクの構造強度および耐震性

1.2.1 処理水パuffァタンク

1.2.1.1 構造強度の評価結果

表-5 胴板の厚さ評価結果

胴板名称		胴板
材料		SM400B
水頭	H (m)	13.868
最高使用温度	(°C)	50
胴の内径	D_i (m)	11.0000
液体の比重	ρ	1
許容引張応力	S (MPa)	100
継手効率	η	0.70
必要厚さ	t_1 (mm)	■
必要厚さ	t_2 (mm)	■
必要厚さ	t_3 (mm)	■
t_1, t_2, t_3 の大きい値	t (mm)	10.7
最小厚さ (公称板厚)	t_e (mm)	12.0 (15.0)
評価 : $t_e \geq t$, よって胴板の厚さに問題ない。		

表-6 底板の厚さ評価結果

底板名称		底板
材料		SM400B
必要厚さ	t_1 (mm)	6.0
最小厚さ (公称板厚)	t (mm)	17.0 (22.0)
評価 : $t \geq t_1$, よって底板の厚さに問題ない。		

表-9 管台の厚さ評価結果 (100A)

管台名称		タンク入口管台 2
材料		STPT410
水頭	H (m)	12.890
最高使用温度	(°C)	50
管台の内径	D_i (m)	0.0971
液体の比重	ρ	1
許容引張応力	S (MPa)	103
継手効率	η	1.00
必要厚さ	t_1 (mm)	■
必要厚さ	t_2 (mm)	■
t_1, t_2 の大きい値	t (mm)	3.5
最小厚さ (公称板厚)	t_s (mm)	7.0 (8.6)
評価 : $t_s \geq t$, よって管台の厚さに問題ない。		

表-10 管台の厚さ評価結果 (200A)

管台名称		タンク入口管台 4
材料		STPT410
水頭	H (m)	0.500
最高使用温度	(°C)	50
管台の内径	D_i (m)	0.1909
液体の比重	ρ	1
許容引張応力	S (MPa)	103
継手効率	η	1.00
必要厚さ	t_1 (mm)	■
必要厚さ	t_2 (mm)	■
t_1, t_2 の大きい値	t (mm)	3.5
最小厚さ (公称板厚)	t_s (mm)	10.5 (12.7)
評価 : $t_s \geq t$, よって管台の厚さに問題ない。		

表-13 胴板の穴の補強評価結果 (100A)

部材名称		タンク入口管台1 タンク入口管台3
補強が必要な面積	A_r (mm ²)	727
断面に現れる穴の径	d (mm)	■
胴板の最小厚さ	t_s (mm)	■
胴板の計算上必要な厚さ	t_{sr} (mm)	■
管台の最小厚さ	t_n (mm)	■
管台の計算上必要な厚さ	t_{nr} (mm)	■
強め材の厚さ	t_e (mm)	■
補強に有効な範囲	l_a (mm)	■
胴板面に垂直な補強の有効な範囲 (胴より外側)	l_{b1} (mm)	■
胴板面に垂直な補強の有効な範囲 (胴より内側)	l_{b2} (mm)	■
胴板の平行面に対して強め材の外側距離	W_0 (mm)	■
胴板の平行面に対して強め材の内側距離	W_i (mm)	■
管台突出し高さ (胴板より内側)	h_1 (mm)	■
管台飛出し高さ (胴板より外側)	h_2 (mm)	■
すみ肉溶接の脚長	g_1 (mm)	■
すみ肉溶接の脚長	g_2 (mm)	■
すみ肉溶接の脚長	g_3 (mm)	■
PVC-3161.2 に規定する効率	η	1.00
PVC-3161.2-1 から求めた値	F	1.00
補強に有効な面積	A_t (mm ²)	1930
胴板部分の補強に有効な面積	A_1 (mm ²)	■
管台部分の補強に有効な面積	A_2 (mm ²)	■
強め材部分の補強に有効な面積	A_3 (mm ²)	■
管台突出し部分の補強に有効な面積	A_4 (mm ²)	■
溶接部分の補強に有効な面積	A_5 (mm ²)	■
評価 : $A_t > A_r$ よって、十分である。		

表-15 胴板の穴の補強評価結果 (200A)

部材名称		タンク入口管台 4
補強が必要な面積	A_r (mm ²)	1430
断面に現れる穴の径	d (mm)	■
胴板の最小厚さ	t_s (mm)	■
胴板の計算上必要な厚さ	t_{sr} (mm)	■
管台の最小厚さ	t_n (mm)	■
管台の計算上必要な厚さ	t_{nr} (mm)	■
強め材の厚さ	t_e (mm)	■
補強に有効な範囲	l_a (mm)	■
胴板面に垂直な補強の有効な範囲 (胴より外側)	l_{b1} (mm)	■
胴板面に垂直な補強の有効な範囲 (胴より内側)	l_{b2} (mm)	■
胴板の平行面に対して強め材の外側距離	W_o (mm)	■
胴板の平行面に対して強め材の内側距離	W_i (mm)	■
管台突出し高さ (胴板より内側)	h_1 (mm)	■
管台飛出し高さ (胴板より外側)	h_2 (mm)	■
すみ肉溶接の脚長	g_1 (mm)	■
すみ肉溶接の脚長	g_2 (mm)	■
すみ肉溶接の脚長	g_3 (mm)	■
PVC-3161.2 に規定する効率	η	1.00
PVC-3161.2-1 から求めた値	F	1.00
補強に有効な面積	A_t (mm ²)	3690
胴板部分の補強に有効な面積	A_1 (mm ²)	■
管台部分の補強に有効な面積	A_2 (mm ²)	■
強め材部分の補強に有効な面積	A_3 (mm ²)	■
管台突出し部分の補強に有効な面積	A_4 (mm ²)	■
溶接部分の補強に有効な面積	A_5 (mm ²)	■
評価 : $A_t > A_r$ よって, 十分である。		

表-17 胴板の穴の補強評価結果 (600A)

部材名称		側マンホール管台
補強が必要な面積	A_r (mm ²)	4339
断面に現れる穴の径	d (mm)	■
胴板の最小厚さ	t_s (mm)	■
胴板の計算上必要な厚さ	t_{sr} (mm)	■
管台の最小厚さ	t_n (mm)	■
管台の計算上必要な厚さ	t_{nr} (mm)	■
強め材の厚さ	t_e (mm)	■
補強に有効な範囲	l_a (mm)	■
胴板面に垂直な補強の有効な範囲 (胴より外側)	l_{b1} (mm)	■
胴板面に垂直な補強の有効な範囲 (胴より内側)	l_{b2} (mm)	■
胴板の平行面に対して強め材の外側距離	W_o (mm)	■
胴板の平行面に対して強め材の内側距離	W_i (mm)	■
管台突出し高さ (胴板より内側)	h_1 (mm)	■
管台飛出し高さ (胴板より外側)	h_2 (mm)	■
すみ肉溶接の脚長	g_1 (mm)	■
すみ肉溶接の脚長	g_2 (mm)	■
すみ肉溶接の脚長	g_3 (mm)	■
PVC-3161.2に規定する効率	η	1.00
PVC-3161.2-1から求めた値	F	1.00
補強に有効な面積	A_t (mm ²)	6805
胴板部分の補強に有効な面積	A_1 (mm ²)	■
管台部分の補強に有効な面積	A_2 (mm ²)	■
強め材部分の補強に有効な面積	A_3 (mm ²)	■
管台突出し部分の補強に有効な面積	A_4 (mm ²)	■
溶接部分の補強に有効な面積	A_5 (mm ²)	■
評価 : $A_t > A_r$ よって, 十分である。		

表-19 強め材の取付け強さ評価結果 (200A)

部材名称			タンク入口管台 4 タンク出口管台 1 タンク出口管台 2
溶接部の負うべき荷重	W	(N)	99300 [※]
管台外側のすみ肉溶接部断面におけるせん断強さ	F ₁	(N)	■■■■
管台壁断面におけるせん断強さ	F ₂	(N)	■■■■
突合せ溶接部断面における引張強さ	F ₃	(N)	■■■■
管台外側のすみ肉溶接部断面におけるせん断強さ	F ₄	(N)	■■■■
強め材のすみ肉溶接部断面におけるせん断強さ	F ₅	(N)	■■■■
突合せ溶接部断面における引張強さ	F ₆	(N)	■■■■
胴板材料の最高使用温度における許容引張応力	S	(MPa)	100
管台材料の最高使用温度における許容引張応力	S _n	(MPa)	100
管内の内径	d	(mm)	■■■■
管内の外径	d ₀	(mm)	■■■■
胴の穴の径	d' ₀	(mm)	■■■■
胴板の最小厚さ	t _s	(mm)	■■■■
胴板の計算上必要な厚さ	t _{sr}	(mm)	■■■■
管台の最小厚さ	t _n	(mm)	■■■■
補強に有効な範囲	l _a	(mm)	■■■■
胴板の平行面に対して強め材の外側距離	W ₀	(mm)	■■■■
すみ肉溶接の脚長	g ₁	(mm)	■■■■
すみ肉溶接の脚長	g ₂	(mm)	■■■■
すみ肉溶接の脚長	g ₃	(mm)	■■■■
PVC-3161.2 に規定する効率	η		1.00
PVC-3169-1 に規定する強め材の取付け強さ	η ₁		0.46
PVC-3169-1 に規定する強め材の取付け強さ	η ₂		0.70
PVC-3169-1 に規定する強め材の取付け強さ	η ₄		0.70
PVC-3161.2-1 から求めた値	F		1.00
予想される破断箇所の強さ	W ₁	(N)	361000 [※]
予想される破断箇所の強さ	W ₂	(N)	566000 [※]
予想される破断箇所の強さ	W ₃	(N)	508000 [※]
予想される破断箇所の強さ	W ₄	(N)	586000 [※]
予想される破断箇所の強さ	W ₅	(N)	439000 [※]
予想される破断箇所の強さ	W ₆	(N)	714000 [※]
評価 : W ₁ ~ W ₆ > W よって、強め材の取付け強さは問題ない。			

※ 予想される破断箇所の強さの記載値は算出値の有効数字 4 桁目を切り捨て。

1.2.1.2 耐震性の評価結果

表-21 タンク胴の応力評価結果

部材名称			タンク胴
胴の許容応力	S_a	MPa	236
水平方向設計震度	C_H		0.601
鉛直方向設計震度	C_V		0.404
胴の内径	D_i	mm	11000
胴の縦弾性係数	E	MPa	■
重力加速度	g	m/s ²	9.80665
水頭	H	mm	11464
基礎から容器重心までの距離	l_g	mm	■
容器の運転時質量	m_o	kg	■
容器の空質量	m_e	Kg	■
設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	S_u	MPa	394
胴板の厚さ	t	mm	15
液体の密度 (=比重×10 ⁻⁶)	ρ'	kg/mm ³	0.000001
胴の組合せ引張応力, 組合せ圧縮応力の Max 値	σ_o	MPa	69.6
胴の組合せ引張応力	σ_{ot}	MPa	■
胴の組合せ圧縮応力	σ_{oc}	MPa	■
静水頭により胴に生じる軸方向応力	σ_{x1}	MPa	■
胴の空質量による軸方向圧縮応力	σ_{x2}	MPa	■
胴の鉛直方向地震による軸方向応力	σ_{x3}	MPa	■
胴の水平方向地震による軸方向応力	σ_{x4}	MPa	■
胴の軸方向応力の和 (圧縮側)	σ_{xc}	MPa	■
胴の軸方向応力の和 (引張側)	σ_{xt}	MPa	■
胴の周方向応力の和	σ_ϕ	MPa	■
静水頭により胴に生じる周方向応力	$\sigma_{\phi 1}$	MPa	■
静水頭に鉛直方向地震が加わり胴に生じる周方向応力	$\sigma_{\phi 2}$	MPa	■
地震により胴に生じるせん断応力	τ	MPa	■
評価 : $S_a > \sigma_o$ よって, 算出した応力値は問題ない。			

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-23 参照）。

表-23 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

表-24 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