

1号機 PCV内ペDESTALの状況を踏まえた対応状況 (コメント回答)

2023年7月21日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

No.	実施日	指摘事項	回答内容
1	2023.6.5 技術会合	被ばく評価について、過去の調査でPCV内の汚染度合いとして、α核種による汚染も確認されたデータがあるので、これまでに認められた事実に基づき評価すること。	7/11資料でご説明済。
2	2023.6.5 技術会合	大型力バーでどの程度直接放出量を低減ができるのかを示すこと。	7/11資料でご説明済。
3	2023.6.5 技術会合	RPVペDESTAL支持機能低下における機動的対応で示された「影響の緩和措置」は、具体的に何をどのくらいの時間で行うのか整理すること。	7/11資料でご説明済。
4	2023.6.5 技術会合	万が一のRPV等の傾斜・沈下によるダスト飛散に対する影響緩和策として、最も有効であると思われる、窒素封入の停止について、今後以下を示すこと。 ・窒素封入を停止するトリガーとなる事象。 ・窒素封入停止をする時間、窒素封入停止後ダスト濃度の低下を確認し、窒素封入を再開する手順等の対策の一連の具体的な流れ。 ・実施計画における運転上の制限（LCO）との関係の整理。	7/11資料でご説明済。
5	2023.6.5 技術会合	次回以降、ペDESTALの支持機能が失われた場合のRPV、PCVの構造上への影響を技術会合で議論するので検討を進めること。	本資料で一部をご説明。
6	2023.6.5 技術会合	閉じ込め機能強化に向けた試験の検討状況（試験の優先度、タイミング）について、1号機の優先度は高く、試験のタイミングはなるべく早くすべき。引き続き、試験の時期・意義について検討すること。	7/11資料でご説明済。
7	2023.6.5 技術会合	PCVの鋼材に対する腐食の進展の影響について、局所的な腐食の懸念を次回以降の会合で具体的な説明をすること。	7/11資料でご説明済。

1. 1号機 PCVインナースカート の構造健全性評価

- ・原子力発電所耐震設計技術規定（JEAC 4601-2008）を準用
- ・アクセス開口の影響を考慮
- ・クラスMC容器としての座屈判定の実施
- ・Ss900地震動による評価を追加（今回実施したSs600連成解析を反映）

2. 1号機 RPVが転倒に至らないことに関する見解

- － 現在検討実施中のため、準備ができ次第、別途説明 －

1. 1号機PCVインナースカートへの構造健全性評価

- 「原子力発電所耐震設計技術規定（JEAC 4601-2008）」を準用し、インナースカート開口部の影響を考慮してSs600地震動によりインナースカート単体に発生する応力（「鉛直」「曲げ」「せん断」），座屈防止の判定を実施。
- 「耐火性ガイドブック（2008）」より400MPa級炭素鋼材料の熱履歴(800℃)による許容応力の低下(0.9)を考慮。
 - PCV内部調査で確認された鉄筋状況を，IRID補助事業の結果と比較し保守的に800℃と設定。
- クラスMCの地震時許容応力（C/D）で評価を実施。

表1. Ss600に対するインナースカートの強度評価結果

	許容応力※1	発生応力	許容応力比※2	備考
①鉛直(σ_W)※3	297 MPa (3S')	44.6 MPa	0.16	JEAC 4601-2008 附 5.2.1-49/50より
②曲げ(σ_M)※3	297 MPa (3S')	85.4 MPa	0.29	JEAC 4601-2008 附 5.2.1-51より
②せん断(τ)	144 MPa (0.4Su')	25.8 MPa	0.18	JEAC 4601-2008 附 5.2.1-52より
④組み合わせ	297 MPa(3S')	137.5 MPa	0.47	JEAC 4601-2008 附 5.2.1-57より
⑤座屈の判定	1	0.70	—	JEAC 4601-2008 4.2.3.1-1より

表2. Ss600の荷重・加速度を1.5倍としたインナースカートの強度評価結果

	許容応力※1	発生応力	許容応力比※2	備考
①鉛直(σ_W)※3	297 MPa (3S')	52.1 MPa	0.18	JEAC 4601-2008 附 5.2.1-49/50より
②曲げ(σ_M)※3	297 MPa (3S')	128.1 MPa	0.44	JEAC 4601-2008 附 5.2.1-51より
②せん断(τ)	144 MPa (0.4Su')	38.7 Mpa	0.27	JEAC 4601-2008 附 5.2.1-52より
④組み合わせ	297 MPa(3S')	192.2 Mpa	0.65	JEAC 4601-2008 附 5.2.1-57より
⑤座屈の判定	1	0.96	—	JEAC 4601-2008 4.2.3.1-1より

※1：許容応力は，材料許容応力値 $S \cdot Su$ に熱履歴残存係数0.9を乗じた値 $S' \cdot Su'$ を設定して導出。運転していないことから，内圧/温度は常圧/常温として評価を実施。

※2：発生応力／許容応力

※3：鉛直時の評価は，自重+地震時鉛直荷重を考慮して評価を実施。

【参考1-1】インナースカート構造強度の評価内容

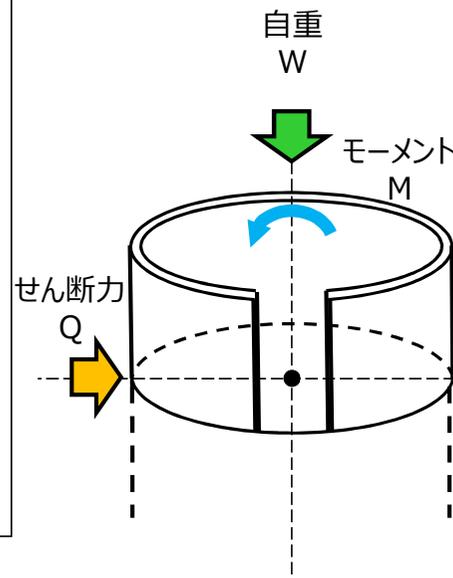
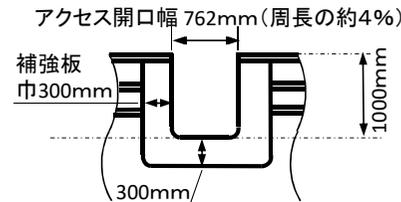
- 地震等により、上部構造物が直接応力が負荷された状態で、インナースカートの構造強度を評価。
- 評価にあたっては、以下を考慮。
 - インナースカートに負荷する荷重の範囲は、ペDESTAL上部構造物の自重、モーメント、せん断力が対象。
 - コンクリート・鉄筋等はないものとみなし、インナースカート単体での支持可否を評価。
 - インナースカートの板厚は、事故時の腐食量を保守的に考慮。
 - 上記仕様を基に、構造上、インナースカートと等価となる円筒を模擬し、構造強度を評価。
 - 構造強度の比較は、地震による「鉛直」、「曲げ」、「せん断」、「座屈防止の判定」を対象として実施。

○検討用重量・モーメント・せん断力

- ・ペDESTAL基礎上部重量 W : 1,776 ton = 17420kN
(工認重量 2,076t - 落下重量 300t = 1,776t)
- ・ペDESTAL基礎部モーメント M : 74,800 kN・m
- ・ペDESTAL基礎部せん断荷重 Q : 7,550 kN
(モーメント・せん断力はSS600 連成解析結果より)

○インナースカートの検討条件

- ・インナースカート材質 : SM41A (SM400A相当)
- ・材料降伏応力 S_y : 235MPa (板厚36mm)
- ・材料縦弾性係数 E : 203,000MPa
- ・インナースカート平均半径 r : $r = 3,118\text{mm}$
- ・インナースカート板厚 t_s : $t_s = \text{公称板厚}t_0 - (\text{腐食量}f \times 2)$
- ・腐食量 f : $f = 2.44\text{mm}$ とした。
- ・インナースカート公称板厚 t_0 : $t_0 = 36\text{mm}$
- ・インナースカート外直径 Do : $Do = 2 \times r + t_s$
- ・インナースカート内直径 Di : $Di = 2 \times r - t_s$
- ・インナースカート平均直径 Da : $Da = 2 \times r = Di + t_s$
- ・インナースカート開口幅 B : $B = 762\text{mm}$
- ・開口部長さ Y : $Y = Da \cdot \sin^{-1}(B/Da)$
- ・断面積 A_s : $A_s = (\pi \cdot Da - Y) \cdot t_s$
- ・断面二次モーメント I_s : $I_s = \frac{\pi \times Da^3 \cdot t_s}{8} - \frac{Da^2 \cdot t_s \cdot Y}{4}$
- ・断面係数 Z_s : $Z_s = I_s / (Da/2)$



○許容応力と熱履歴による許容応力低下の考え方

- ・クラスMC容器の供用状態 D_s の許容応力を適用
- ・熱履歴による材料許容応力残存率は0.9とする。

■構造強度の検討

JEAC-4601に基づく、開口部を持つ円筒構造物の評価

○通常時質量の応力及び鉛直方向地震時の質量の応力

- ・自重による応力 $\sigma_{w0} = W / ((\pi \cdot Da - Y) \cdot t_s) = W / A_s$
- ・鉛直方向加速度 C_v ($C_v: 0.5g$) による応力 σ_{w1}
$$\sigma_{w1} = C_v \cdot W / A_s$$
- ・鉛直方向応力 $\sigma_w = \sigma_{w0} + \sigma_{w1}$

○水平方向地震力による応力

- ・曲げモーメントによる応力 σ_M

$$\sigma_M = \frac{M}{Da \cdot t_s \cdot ((\pi \cdot Da) / 4 - Y / 2)}$$

- ・せん断応力 τ : $\tau = 2 \times Q / ((\pi \cdot Da - Y) \cdot t_s) = 2 \times Q / A_s$

○組み合わせ応力 σ_c (絶対値和)

- ・組み合わせ応力 $\sigma_c = ((\sigma_{w0} + \sigma_m + \sigma_{w1})^2 + 3 \cdot \tau^2)^{0.5}$

○クラスMC容器の座屈の防止の判定式

$$\text{判定式 } 1 \geq \frac{a_B \cdot ((1 + C_v)W / A_s)}{f_c} + \frac{a_B \cdot (M / Z_s)}{f_b}$$

a_B : 安全率, f_c, f_b : 許容応力 (JEAC参照)

■ 「鉛直」、「曲げ」、「せん断」の評価式

➤ 評価に用いたJEAC4601の評価式を示す。

b. スカートの応力

a) 運転時質量による応力及び鉛直方向地震時の運転時質量による応力

スカート底部に生じる運転時質量による圧縮応力及び鉛直方向地震時の運転時質量による圧縮応力は、次による。

$$\sigma_{s1} = \frac{m_0 g}{\{\pi(D_s + t_s) - Y\} t_s} \dots\dots\dots \text{(附 5.2.1-49)}$$

自重による応力の式

$$\sigma_{s3} = \frac{C_V m_0 g}{\{\pi(D_s + t_s) - Y\} t_s} \dots\dots\dots \text{(附 5.2.1-50)}$$

鉛直地震動による応力の式

b) 水平方向地震力による応力

水平方向地震力によるスカートに作用する曲げモーメントにより生じる軸方向応力及び水平方向地震力により生じるせん断応力は、次のように求める。

(a) 下端固定の場合

$$\sigma_{s2} = \frac{M_s}{(D_s + t_s) t_s \left\{ \frac{\pi}{4} (D_s + t_s) - \frac{Y}{2} \right\}} \dots\dots\dots \text{(附 5.2.1-51)}$$

曲げモーメントによる応力の式

$$\tau_s = \frac{2C_H m_0 g}{\{\pi(D_s + t_s) - Y\} t_s} \dots\dots\dots \text{(附 5.2.1-52)}$$

せん断応力の式

■ クラスMC容器の座屈防止の判定式

➤ 評価に用いたJEAC4601の評価式を示す。

c. クラスMC容器の座屈の防止

軸圧縮荷重と曲げモーメントが負荷されるクラスMC容器は、供用状態Cs及びDsにおいて次の不等式を満足しなければならない。

$$\frac{\alpha_B(P/A) + \alpha_B(M/Z)}{f_c} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (4.2.3.1-1)$$

式(4.2.3.1-1)は $l/R \leq 5$ の場合に適用できる。ただし、強め輪等により $l/R \leq 0.5$ となる場合は、強め輪の効果を考慮することができる。ここで、

P : 軸圧縮荷重 (N)

A : 容器の断面積 (mm^2)

M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)

Z : 断面係数 (mm^3)

f_c : 軸圧縮荷重に対する座屈応力 (MPa)

f_b : 曲げモーメントに対する座屈応力 (MPa)

α_B : 安全率

l : 胴長 (mm)

R : 円筒の平均半径 (mm)

a) 軸圧縮荷重に対する座屈応力 (f_c)

$$f_c = \begin{cases} F & (\eta \leq \eta_1) \\ F \left\{ 1 - \frac{1}{680g} (F - \Phi_c(\eta_2)) (\eta - \eta_1) \right\} & (\eta_1 < \eta < \eta_2) \quad \dots\dots\dots (4.2.3.1-2) \\ \Phi_c(\eta) & (\eta_2 \leq \eta \leq 800) \end{cases}$$

$$\Phi_c(\eta) = 0.6 \frac{E}{\eta} \left[1 - 0.901 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta}\right) \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (4.2.3.1-3)$$

b) 曲げモーメントに対する座屈応力 (f_b)

$$f_b = \begin{cases} F & (\eta \leq \eta_1) \\ F \left\{ 1 - \frac{1}{8400g} (F - \Phi_b(\eta_3)) (\eta - \eta_1) \right\} & (\eta_1 < \eta < \eta_3) \quad \dots\dots\dots (4.2.3.1-4) \\ \Phi_b(\eta) & (\eta_3 \leq \eta \leq 800) \end{cases}$$

$$\Phi_b(\eta) = 0.6 \frac{E}{\eta} \left[1 - 0.731 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta}\right) \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (4.2.3.1-5)$$

c) 安全率 (α_B)

安全率は、供用状態Cs及びDsに対して、

$$\alpha_B = \begin{cases} 1.0 & (\eta \leq \eta_1) \\ 1.0 + \frac{F}{13600g} (\eta - \eta_1) & (\eta_1 < \eta < \eta_2) \quad \dots\dots\dots (4.2.3.1-6) \\ 1.5 & (\eta_2 \leq \eta) \end{cases}$$

ここに、

F : 設計・建設規格SSB-3121.1において定める F の値 (MPa)

E : 材料の縦弾性係数 (MPa)

t : 円筒の板厚 (mm)

g : 重力加速度 ($=9.80665\text{m/s}^2$)

$\eta = R/t$

$\eta_1 = 1200g/F$

$\eta_2 = 8000g/F$

$\eta_3 = 9600g/F$

■ インナースカート構造材料 (SM41A(SM400A相当)) の熱履歴による強度低下

(出典) 構造材料の耐火性ガイドブック 2017(日本建築学会)より

・耐火性ガイドブックでは、SS400 及び SM490の加熱冷却後の機械的性質が記載されており、その値は以下の通りである。

SS400 : $243/266 = 0.91$

SM490 : $318/372 = 0.85$

SM41Aは、引張強さ400MPa級の炭素鋼であり、化学成分もSS400に包絡されることから、加熱・冷却による強度低下はSS400相当と考えられる。

3.2.10 加熱冷却後の機械的性質

図 3.2.28(a)に SS400 材の加熱冷却後の引張試験結果を、図 3.2.28(b)に SM490 材の加熱冷却試験結果を示す。また、加熱冷却後特性を表 3.2.25, 3.2.26 に示す。鋼材は変態点温度 (約 720°C) を超えると材質に変化が生じ、降伏点が不明瞭になる。同図より、600°C以上で引張強度に影響を与え、700°Cで引張強度は約 90%に低下する。ここでは限られた加熱冷却条件による結果を示したが、加熱を受けた鋼材の最高温度や加熱時間、冷却時間などによって鋼材の組織は変化するため、これらの条件を変化させた試験データの蓄積が待たれる。

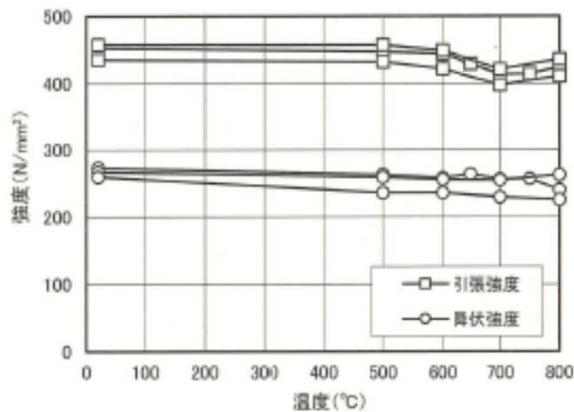


図 3.2.28 (a) SS400 の加熱冷却試験結果表 3.2.1 参照

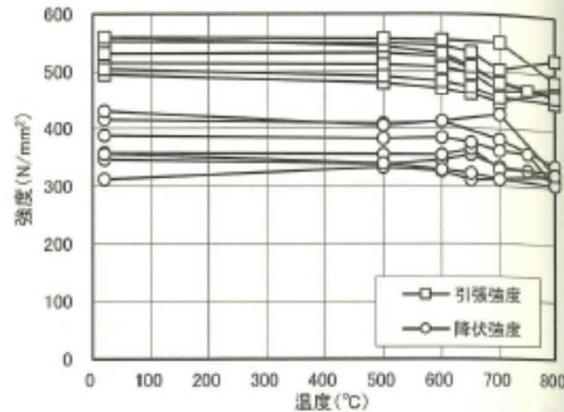


図 3.2.28 (b) SM490 の加熱冷却試験結果表 3.2.2 参照

表 3.2.25 加熱冷却後における降伏強度の平均値と標準偏差

		試験温度									
		常温	100	200	300	400	500	600	700	800	
SS400 (N/mm ²)	サンプル数	3	/	/	/	/	3	3	3	3	
	平均値	266	/	/	/	/	253	250	247	243	
	標準偏差	7	/	/	/	/	15	12	15	19	
SM490 (N/mm ²)	サンプル数	7	/	/	/	/	7	7	7	7	
	平均値	372	/	/	/	/	366	366	351	318	
	標準偏差	41	/	/	/	/	33	37	41	13	

【参考1-5】ペDESTAL構造材料の事故時の加熱・冷却による強度低下の根拠 **TEPCO**

- インナースカート構造材料（SM41A(SM400A相当)）の成分と構造強度
 - SM41AはSS400の規定に包絡されており，加熱・冷却後の強度低下は，耐火性ガイドブックに記載されているSS400相当と考えられる。
 - 上記の理由から，インナースカートの加熱冷却後の強度低下率として，0.9を採用する。

表-1 現行JISのSM400AとSS400との規定値概要の比較（耐火ガイドブック値）

材料名	化学成分					機械的性質		
	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	降伏点 σ_y (MPa)	引張強さ σ_s (MPa)	伸び (%)
SM400A (t=36)	≤ 0.23	—	$2.5 \times C$	≤ 0.035	≤ 0.035	$235 \leq$	400~510	$22 \leq$
SS400	—	—	—	≤ 0.050	≤ 0.050	$235 \leq$	400~510	$21 \leq$

表-2 JIS G3106「溶接構造用圧延鋼材」（1959版）の概要（実材料の規格）

材料名	化学成分					機械的性質		
	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ σ_s (kg/mm ²)	伸び (%)
SM41A (t=36)	≤ 0.23	—	$2.5 \times C$	≤ 0.040	≤ 0.050	$\sigma_s/2 \leq$	41~50	$21 \leq$