

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK 補-Ⅲ-4 改13
提出年月日	平成30年7月26日

東海第二発電所 劣化状況評価
(2相ステンレス鋼の熱時効)

補足説明資料

平成30年7月26日
日本原子力発電株式会社

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 評価対象と評価手法	4
(1) 評価対象機器の選定	4
(2) 評価手法	10
4. 代表機器の技術評価	11
(1) 健全性評価	11
(2) 現状保全	18
(3) 総合評価	19
(4) 高経年化への対応	19
5. 代表機器以外の技術評価	20
6. まとめ	20
(1) 審査基準適合性	20
(2) 保守管理に関する方針として策定する事項	20
別紙 1. 亀裂進展抵抗の算出過程	26
別紙 2. 疲労亀裂進展速度式の比較	29
別紙 3. 亀裂進展力 (J_{app}) の算出過程	30
別紙 4. 代表機器以外の機器に関する現状保全等について	35
別紙 5. 評価対象外機器の熱時効への対応について	41

＜亀裂進展力 (J_{app}) の算出過程＞

亀裂進展力 (J_{app}) は, HANDBOOK の Zahoor の J 積分の解析解により算出しており, volume1 1章2項 2.1～2.3 節のうち主に, 2.3 節 Combined Tension and Bending にある以下の式を用いて算出した。

$$J = f_t \cdot P^2 / 4Rt^2 E + f_b \cdot M^2 / R^3 t^2 E + \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 R(\pi - \theta) \cdot (\theta / \pi) \cdot h_1 \cdot (P/P_0')^{n+1}$$

$$P_0' = 0.5[-\lambda R P_0^2 / M_0 + \{(\lambda R P_0^2 / M_0)^2 + 4P_0^2\}^{0.5}]$$

$$\lambda = M / PR$$

$$P_0 = 2\sigma_0 R t [\pi - \theta - 2\sin^{-1}(0.5 \sin \theta)]$$

$$M_0 = 4\sigma_0 R^2 t [\cos(\theta/2) - 0.5 \sin \theta]$$

$$f_t = (\theta_e / \pi) [1 + A \{5.3303(\theta_e / \pi)^{1.5} + 18.773(\theta_e / \pi)^{4.24}\}]^2$$

$$f_b = (\theta_e / \pi) [1 + A \{4.5967(\theta_e / \pi)^{1.5} + 2.6422(\theta_e / \pi)^{4.24}\}]^2$$

$$\theta_e = \theta \cdot [1 + (1/\beta) \cdot \{(n-1)/(n+1)\} \cdot \{(\sigma_t F_t + \sigma_b F_b)^2 / \sigma_0^2\} / \{1 + (P/P_0')^2\}]$$

$$\sigma_t = P / 2\pi R t$$

$$\sigma_b = M / \pi R^2 t$$

$$F_t = 1 + A [5.3303(\theta / \pi)^{1.5} + 18.773(\theta / \pi)^{4.24}]$$

$$F_b = 1 + A [4.5967(\theta / \pi)^{1.5} + 2.6422(\theta / \pi)^{4.24}]$$

(F_t, F_b はそれぞれ HANDBOOK volume1 1章2項の 2.1 節 Axial Tension 及び
2.2 節 Bending Moment の値を使用している。)

$$A = [0.125(R/t) - 0.25]^{0.25} \quad \text{for } 5 \leq R/t \leq 10$$

$$A = [0.4(R/t) - 3.0]^{0.25} \quad \text{for } 10 \leq R/t \leq 20$$

なお, 同解法における定数 α 及び加工硬化指数 n は Ramberg-Osgood の応力-ひずみ関係において下記のとおり与えられる。

$$\varepsilon / \varepsilon_0 = \sigma / \sigma_0 + \alpha (\sigma / \sigma_0)^n$$

$$\alpha = -0.011 \sigma_f + 6.054$$

$$n = -0.005 \sigma_f + 6.763$$

ここで σ_f は時効材の流動応力であり, 下記のとおり未時効材の流動応力 $\sigma_{f(0)}$ に時効効果を考慮することにより求まる。

$\sigma_{f(0)}$ は、H3T モデルにある以下の予測式を用いて算出する。

$$\sigma_{f(0)} = 105.472 + 6.96F + 16.062Mo + 1535.398C$$

F : フェライト量 [%], Mo : モリブデン重量組成 [wt%], C : 炭素重量組成 [wt%]

$$\sigma_f = \sigma_{f(0)} \left(\frac{1+1.161}{2} - \frac{1-1.161}{2} \times \tanh \frac{P(t,T)-2.996}{0.929} \right) \quad \dots (F[\%] < 23[\%])$$

$$\sigma_f = \sigma_{f(0)} \left(\frac{1+1.247}{2} - \frac{1-1.247}{2} \times \tanh \frac{P(t,T)-3.148}{0.919} \right) \quad \dots (F[\%] \geq 23[\%])$$

$$P(t, T) = \log(t) + 0.4343 \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{673.2} - \frac{1}{T} \right)$$

t : 熱時効時間 [h] (= 341, 079 h)

Q : 活性化エネルギー [kJ/mol] (= 100 kJ/mol)

R : ガス定数 [kJ/ (mol · K)] (= 0.008368 kJ/mol · K)

T : 熱時効温度 [K] (= 285 °C+273.2 = 558.2 K)

さらに、Zahoor の解析解における σ_0 は時効効果を考慮した 0.2 %耐力を用いる。未時効材の 0.2 %耐力 σ_{y0} は、ASME Boiler & Pressure Vessel Code (2013) Section II の Part A Table 3 から引用した。 σ_0 は、 σ_{y0} に時効効果を考慮し、下記のとおり算出した。

$$\sigma_0 = \sigma_{y0} \left(\frac{1+1.071}{2} - \frac{1-1.071}{2} \times \tanh \frac{P(t,T)-1.617}{0.916} \right) \quad \dots (F[\%] < 23[\%])$$

$$\sigma_0 = \sigma_{y0} \left(\frac{1+1.144}{2} - \frac{1-1.144}{2} \times \tanh \frac{P(t,T)-3.02}{1.462} \right) \quad \dots (F[\%] \geq 23[\%])$$

J_{app} 算出に使用した値と記号の説明を表 1 に示す。

表 1 J_{app} 算出に使用した値と記号の説明

J _{app} 算出に 使用したパラメータ		評価 対象	J _{app} 算出に 使用した値	単位	備考
t	板厚	①	33.4	mm	①②の板厚
		②	37.0	mm	
R ₀	外半径	①	309.65	mm	①の外径 619.3 ÷ 2 ②の外径 609.6 ÷ 2
		②	304.80	mm	
R _i	内半径	①	276.25	mm	R _i = R ₀ -t
		②	267.80	mm	
R	平均半径	①	292.95	mm	R = R ₀ -t/2
		②	286.30	mm	
σ _t	軸方向応力	①	43.2	MPa	—
		②	45.0	MPa	
σ _b	曲げ応力	①	207.3	MPa	—
		②	109.6	MPa	
σ _{y0}	未時効材の 0.2 %耐力	①	205	MPa	ASME (2013) Section II Part A 材料表より
		②	205	MPa	
σ ₀	0.2%耐力	①	219	MPa	σ _{y0} に時効効果を考慮したもの
		②	227	MPa	
ε ₀	0.2%耐力のひずみ	①	1.24×10 ⁻³	—	ε ₀ = σ ₀ /E
		②	1.29×10 ⁻³	—	
σ _{f(0)}	未時効材の流動応力	①	369	MPa	H3T モデルにある予測式から求めたもの
		②	399	MPa	
σ _f	流動応力	①	421	MPa	σ _{f(0)} に時効効果を考慮したもの
		②	483	MPa	
α	定数	①	1.423	—	Ramberg-Osgood の 応力-ひずみ関係における定数
		②	0.741	—	
n	加工硬化指数	①	4.658	—	Ramberg-Osgood の 応力-ひずみ関係における加工硬化指数
		②	4.348	—	
β	補正定数	①	2.0	—	平面ひずみの補正定数
		②	2.0	—	
E	縦弾性係数	①	1.76×10 ⁵	MPa	ASME (2013) Section II Part D 材料表より
		②	1.76×10 ⁵	MPa	
P	軸方向荷重	①	2.66×10 ⁶	N	P = 2πRt × σ _t
		②	3.00×10 ⁶	N	
M	曲げモーメント	①	1.87×10 ⁹	N・mm	M = πR ² t × σ _b
		②	1.04×10 ⁹	N・mm	
λ	軸力と曲げモーメント の比率	①	2.400	—	λ = M/PR
		②	1.218	—	

① : 原子炉再循環ポンプのケーシング

② : 原子炉再循環ポンプ入口弁の弁箱

また、 θ/π , R/t , $\lambda/(1+\lambda)$ については、 h_1 が大きいほど J_{app} も高いことは自明であることから、以下、表2に示す HANDBOOK の h_1 選定表から保守的に h_1 が大きい値となるよう設定し、評価を行っている。

h_1 の設定方法の一例として、 R/t (平均半径と板厚の比) の例を挙げる。本評価の対象機器は、 R/t が約 8~9 であるが、 $R/t=10$ における h_1 の選定表を用いて h_1 の値を設定している。これは、 R/t が大きくなる (薄肉になる) ほど、 h_1 が大きくなる傾向が 2.1 節及び 2.2 節から読み取れることから、表2の $R/t=10$ における h_1 選定表を用いることにより、保守的な評価としている。

表2 J_{app} 算出において設定した定数 h_1

h_1 for Throughwall Cracks in Combined Tension and Bending
 $\theta/\pi = 0.0625, R/t = 10$

$\lambda / (1 + \lambda)$	$n = 2$	$n = 5$	$n = 7$	$n = 10$
0.00	3.967	5.567	6.104	6.510
0.05	4.313	6.500	6.500	7.969
0.10	4.736	7.375	7.080	9.721
0.15	5.125	8.250	7.875	11.250
0.20	5.614	9.080	8.787	12.937
0.25	6.000	9.750	9.875	14.250
0.30	6.438	10.501	11.078	15.463
0.35	6.789	11.000	12.125	16.375
0.40	7.140	11.457	13.188	17.063
0.45	7.500	11.875	14.000	17.500
0.50	7.901	12.150	14.610	17.839
0.55	8.094	12.313	15.000	17.550
0.60	8.287	12.236	15.130	17.241
0.65	8.344	11.938	14.875	16.375
0.70	8.257	11.642	14.408	15.500
0.75	8.125	11.125	13.625	14.500
0.80	7.811	10.617	12.729	13.366
0.85	7.500	9.875	11.688	12.125
0.90	7.063	9.190	10.447	10.738
0.95	6.563	8.500	9.250	9.313
1.00	6.018	7.620	8.160	7.928

□ : 原子炉再循環ポンプのケーシング

□□□ : 原子炉再循環ポンプ入口弁の弁箱

亀裂長さを板厚の1倍, 3倍, 5倍, 60年想定亀裂としたときの各亀裂における J_{app} を表3に示す。

表3 亀裂安定性評価用想定亀裂における J_{app} 算出について

J_{app} 算出に 使用した値		単位	評価 対象	評価用初期欠陥 (板厚の1倍)	60年想定亀裂 進展解析結果	亀裂想定 (板厚の3倍)	亀裂想定 (板厚の5倍)
2c	亀裂長さ	mm	①	33.4	35.6	100.2	167.0
			②	37.0	38.2	111.0	185.0
θ/π	亀裂の角度 $c/(\pi R_i)$	—	①	0.019	0.021	0.058	0.096
			②	0.022	0.022	0.066	0.110
h_l	定数	—	①	11.642	11.642	11.642	11.642
			②	12.313	12.313	12.313	12.313
J_{app}	亀裂進展力	kJ/m^2	①	44	47	172	398
			②	7	8	25	53

① : 原子炉再循環ポンプのケーシング

② : 原子炉再循環ポンプ入口弁の弁箱

なお, HANDBOOK の volume1 1章2項2.3節に「Applicability:R/t=10」との記載があるが, 以下の表4に示すとおり実機条件で J_{app} を算出した方がより保守的な評価となるため, 実機の値を用いて J_{app} を算出している。

R/t=10 となる条件及び実機条件で, 原子炉再循環ポンプのケーシングの J_{app} の算出値を比較した結果を表4に示す。評価において管平均半径 R の値を以下の(2)のとおり, 実機よりも大きく設定することにより R/t=10 とした。

(1) 実機の値での評価(現評価) : 管平均半径 R=292.95[mm], 板厚 t=33.4[mm]

(2) R/t=10 とした場合 : 管平均半径 R=334.00[mm], 板厚 t=33.4[mm]

J_{app} の評価結果の比較表を表4に示す。

表4 原子炉再循環ポンプのケーシングの亀裂進展力の比較表

評価条件		初期欠陥 (板厚の1倍)	60年想定亀裂 進展解析結果	亀裂想定 (板厚の3倍)	亀裂想定 (板厚の5倍)
		亀裂長さ 2c[mm]	33.4	35.6	100.2
(1)	亀裂進展力 J_{app} [kJ/m ²]	44	47	172	398
(2)	亀裂進展力 J_{app} [kJ/m ²]	43	46	162	355