

川内原子力発電所1, 2号炉 運転期間延長認可申請に係るヒアリング
コメント反映整理表<熱時効>

資料 2 - 2

2023年7月5日 九州電力株

No	対象号機	日付	資料名	該当ページ	コメント内容	コメント対応	回答日	完了日
1	1/2号機	2月3日	熱時効 劣化状況評価 補足説明資料	10	表3の機械設備のフェライト量及び発生応力のマスキング理由について確認すること。(1, 2号)	フェライト量及び発生応力は、メーカーの設計ノウハウとして非公開情報としていたが、先行プラントの状況を踏まえメーカーと調整した結果、公開情報とすることとし、補足説明資料の当該箇所を修正する。	2023.3.2	2023.3.3
2	1/2号機	2月3日	熱時効 劣化状況評価 補足説明資料	10	表3のスイング逆止弁のフェライト量が1, 2号で大きく異なる理由について説明すること。	回答資料 川内1, 2号炉-熱時効-1のとおり。	2023.3.2	2023.3.3
3	1/2号機	2月3日	熱時効 劣化状況評価 補足説明資料	12	エルボ部の評価箇所について、エルボ部のどの部分か具体的に示すこと。	回答資料 川内1, 2号炉-熱時効-2のとおり。	2023.3.2	2023.3.3
4	1/2号機	2月3日	熱時効 劣化状況評価 補足説明資料	12	エルボ、直管の応力について、算出方法を別途示すこと。(表4)	回答資料 川内1, 2号炉-熱時効-3のとおり。	2023.3.2	2023.3.3
5	1/2号機	3月6日	ヒアリング資料 劣化状況評価 (熱時効)	11	破壊評価による健全性評価結果について、補足説明資料に合わせて、JICのプロットを追記すること。	JICのプロットを追記した評価結果に修正する。 [スライド p.11,12]	2023.4.14	2023.5.16
6	1/2号機	3月6日	ヒアリング資料 劣化状況評価 (熱時効)	11	破壊評価による健全性評価結果について、補足説明資料に合わせて、グラフの説明を記載すること。	健全性評価結果の説明について、追記する。 [スライド p.11,12]	2023.4.14	2023.5.16
7	1/2号機	3月6日	ヒアリング資料 劣化状況評価 (熱時効)	資料全般	亀裂不安定性評価等、同一の意味の文言については記載を統一すること。また申請書で使用している場合には、申請書の文言を使用すること。	審査基準の記載に合わせ、「亀裂不安定性評価」で統一する。 なお申請書においては、本用語を用いている箇所はない。 [スライド p.10]	2023.4.14	2023.5.16
8	1/2号機	5月16日	川内1, 2号炉 劣化状況評価 2層ステンレス鋼の熱時効	14	30年目と40年目で評価部位が異なる部位についてはその理由を説明資料に明記すること。	評価部位の相違理由について、追記する。 [スライド p.14]	2023.6.15	2023.6.15
9	1/2号機	5月16日	川内1, 2号炉-熱時効-4	12	エルボ部の形状を考慮した応力の算出方法を示すこと。	回答資料 川内1, 2号炉-熱時効-9のとおり。	2023.6.15	2023.6.15
10	1/2号機	5月16日	川内1, 2号炉 劣化状況評価 2層ステンレス鋼の熱時効	7	H3Tモデル用いたJmatの算出過程について示すこと。	回答資料 川内1, 2号炉-熱時効-10のとおり。	2023.6.15	2023.6.15

川内原子力発電所1, 2号炉 運転期間延長認可申請に係るヒアリング
コメント反映整理表<熱時効>

2023年7月5日 九州電力株

11	1/2号機	6月15日	ヒアリング資料 (熱時効)	11,12	亀裂不安定評価のグラフ縦軸の単位を追記すること。	それぞれグラフ縦軸に単位を追加した。 [スライドp.13,14]		
12	1/2号機	6月15日	ヒアリング資料 (熱時効)	—	2相ステンレス鋼、2相ステンレス鋳鋼など語句の統一をすること。	「2相ステンレス鋼」に語句を統一した。 [スライドp.2,4]		
13	1/2号機	6月15日	ヒアリング資料 (熱時効)	—	破壊評価において基準地震動Ssを考慮している旨記載を追記すること。	破壊評価において、基準地震動Ssを考慮している旨を追加した。 [スライドp.13]		
14	1/2号機	6月15日	ヒアリング資料 (熱時効)	5	「※1」の記載を適正化すること。	「※1」の記載を適正化した。 [スライドp.7]		
15	1/2号機	6月15日	ヒアリング資料 (熱時効)	10	誤記を修正すること。 誤:5.2項 正:5.1項(2)	左記の通り、記載を適正化した。 [スライドp.12]		
16	1/2号機	6月15日	ヒアリング資料 (熱時効)	-	他の事象とあわせ、代表機器以外の評価結果を追加すること。	代表機器以外の評価結果を追加した。 [スライドp.5,6]		
17	1/2号機	6月15日	ヒアリング資料 (熱時効)	10	亀裂進展量の評価において、1/3Sdを用いる理由を説明すること。	回答資料 川内1, 2号炉—熱時効—17のとおり。		
18	1/2号機	6月15日	コメント回答資料(熱時効) No.9,10	—	コメント回答資料No.9, 10の内容を補足説明資料に追加すること。	左記の内容を、補足説明資料—別紙に追加する。 (反映版については、コメントNo.19、20の内容を踏まえて提示する。)		
19	1/2号機	6月15日	コメント回答資料(熱時効) No.9	—	()内の曲がり部の形状を考慮した応力値の説明を追記すること。	回答資料 川内1, 2号炉—熱時効—19のとおり。		
20	1/2号機	6月27日	コメント回答資料(熱時効) No.10	—	σ_y 、 σ_u の関係式について、出典元を記載すること。	回答資料 川内1, 2号炉—熱時効—20のとおり。		

川内1, 2号炉-熱時効-17

タイトル	亀裂進展量の評価において、1/3Sd を用いる理由を説明すること。
説明	<p>JEAG4613-1998 (解説) 中に、1/3Sd を用いる考え方について記載されており、当該記載を参照して亀裂進展量の評価を実施している。 該当箇所を、添付資料-1 に示す。</p> <p style="text-align: right;">以上</p>

(解説3-1) 配管破損想定位置

(1) 基本的考え方

運転期間中における配管破損の原因として最も重要な因子は応力であり、破損が生じる箇所は、変形（応力）あるいは疲れ累積係数の大きな箇所であるとする事ができる。従って応力値または疲れ累積係数が所定の値を超える位置を破損想定位置として定めている。

付録の「LBB成立性評価」では、この破損の仮定に対しLBB概念を設計に導入し、より精度の高い設計条件に置き換えるための手法を示している。すなわち、具体的評価では、一般に欠陥は溶接部に存在する可能性が大きいことを考慮し、溶接部に初期欠陥が存在すると仮定し、初期欠陥のき裂進展評価より求まる想定欠陥に対し破壊力学評価を行い破損形式を決定している。従って、破損形式の決定にあたって破損想定部位の溶接部に対しLBB成立性評価を行うことが基本的な考え方であるが、本指針では便宜上破損想定位置に溶接部があるものとして評価を行うこととしている。

なお、本指針で破損を想定する原子炉冷却材圧力バウンダリに属するオーステナイト系ステンレス鋼管の溶接部は全て周継手であることから、付録「LBBの成立性評価」では周方向欠陥のみを評価対象とした。

(2) 破損想定位置

破損想定位置は、発生応力または疲れ累積係数が大きい点を強度的に厳しい点とし、発生応力が $2.4 S_m$ または疲れ累積係数が0.1を超える場合に破損を想定するものとする。さらに、配管系において一般に構造の不連続部で比較的高い応力の発生する可能性のあるターミナルエンドも破損想定位置とする。

- a. ターミナルエンドとは、機器との配管接続部、配管のアンカー点、またはアンカー点相当の配管分岐部、及びそれ等に準じる点で配管系の可撓性を拘束または制限するような箇所であり、一般に配管系の中で不連続部性により、より比較的高い応力が生じる可能性があることから、原則として破損を想定する。
- b. 応力制限の $2.4 S_m$ は、構造物のシェークダウン限界である $3 S_m$ の80%の値であり、20%の裕度をとったものである。この20%の裕度は工学的判断により設定したものである。

疲れ累積係数の0.1については、設計疲れ線図における繰り返しピーク応力と許容繰り返し回数の関係が両対数グラフでなめらかな曲線で表されることから、告示の許容値である1.0に対し、オーダーで制限し1/10の0.1を工学的判断により設定した。

呼径1B以下の配管に破損を想定しないのは、1B以下の配管が破損したとしても、防護設計上の想定事象として考慮する程の大きな影響を与えるものではないとの工学的判断によるものである。

(3) 応力及び疲れ累積係数の算定上考慮すべき荷重

応力及び疲れ累積係数の算定上考慮する運転状態は、運転期間中に働く応力又は累積していく疲れ損傷により配管が破損するという考えにより、プラントの運転継続が可能である状態を意味する運転状態Ⅰ、Ⅱを考えるものとする。同様に、運転継続が可能である地震としての地震動 S_0 の組み合わせを考える。地震動 S_0 として電気技術指針（JEAG 4601-補-1984）「原子力発電所耐震設計技術指針」では60 Gal程度を設定しているが、最大加速度値が比較的小さいサイトでは基準地震動 S_1 として180 Galであること及び基準としては繁雑さを避けることから、

$$60 \text{ Gal} = 180 \text{ Gal} / 3 \leq (1/3) S_1$$

という関係より上記運転状態Ⅰ、Ⅱと組み合わせて考える地震荷重として安全側に(1/3) S_1 を設定した。

川内 1, 2 号炉－熱時効－ 1 9
 (川内 1, 2 号炉－熱時効－ 9 r 1)

タイトル	エルボ部の形状を考慮した応力の算出方法を示すこと。																																									
説明	<p>エルボ部の評価点における応力については、ASME SecIII NB-3685 に基づき曲がり部の形状を考慮して算出する。SG 入口 50° エルボの各応力値の内訳については、以下の通り。</p> <p>なお、エルボ部の応力値の算出方法については、添付資料－ 1 に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 応力値詳細 (SG 入口 50° エルボ)</p> <table border="1" data-bbox="413 707 1335 967"> <thead> <tr> <th rowspan="2">号炉</th> <th rowspan="2">内圧による 応力(MPa)</th> <th colspan="4">曲げ応力</th> <th colspan="4">軸力による応力</th> <th rowspan="2">合算値 (MPa)</th> </tr> <tr> <th>自重 (MPa)</th> <th>熱 (MPa)</th> <th>地震 (MPa)</th> <th>合計 (MPa)</th> <th>自重 (MPa)</th> <th>熱 (MPa)</th> <th>地震 (MPa)</th> <th>合計 (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 号炉</td> <td>40.9 (40.9)^{※1}</td> <td>2.4</td> <td>41.0</td> <td>18.7</td> <td>62.1 (92.2)^{※1}</td> <td>0.0</td> <td>3.0</td> <td>7.7</td> <td>10.7 (10.7)^{※1}</td> <td>114 (144)^{※1}</td> </tr> <tr> <td>2 号炉</td> <td>40.9 (40.9)^{※1}</td> <td>2.4</td> <td>40.1</td> <td>18.7</td> <td>61.2 (90.8)^{※1}</td> <td>0.0</td> <td>3.0</td> <td>7.7</td> <td>10.7 (10.7)^{※1}</td> <td>113 (143)^{※1}</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1 () 内の数字は曲がり部の形状を考慮した応力値。</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>	号炉	内圧による 応力(MPa)	曲げ応力				軸力による応力				合算値 (MPa)	自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)	自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)	1 号炉	40.9 (40.9) ^{※1}	2.4	41.0	18.7	62.1 (92.2) ^{※1}	0.0	3.0	7.7	10.7 (10.7) ^{※1}	114 (144) ^{※1}	2 号炉	40.9 (40.9) ^{※1}	2.4	40.1	18.7	61.2 (90.8) ^{※1}	0.0	3.0	7.7	10.7 (10.7) ^{※1}	113 (143) ^{※1}
号炉	内圧による 応力(MPa)			曲げ応力				軸力による応力					合算値 (MPa)																													
		自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)	自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)																																	
1 号炉	40.9 (40.9) ^{※1}	2.4	41.0	18.7	62.1 (92.2) ^{※1}	0.0	3.0	7.7	10.7 (10.7) ^{※1}	114 (144) ^{※1}																																
2 号炉	40.9 (40.9) ^{※1}	2.4	40.1	18.7	61.2 (90.8) ^{※1}	0.0	3.0	7.7	10.7 (10.7) ^{※1}	113 (143) ^{※1}																																

○応力算出方法概要

ASME Sec. III NB-3685 の応力指数を用いた応力算出方法について、以下に示す。

$$\text{軸方向応力 } \sigma_{\phi} = \frac{M}{Z} \sigma_t \text{ [MPa]}$$

ただし、M：曲げモーメント [N・mm]

$$Z：断面係数 \quad Z = 0.0982 \times (D_o^4 - D_i^4) / D_o \text{ [mm}^3\text{]}$$

D_o ：外径 [mm]

D_i ：内径 [mm]

t_m ：板厚 [mm]

σ_t ：軸方向の応力指数

曲げモーメントには2方向（面内方向、面外方向）あるが、応力がより大きくなる面外方向に作用させている。ただし、曲げモーメントの算出には、保守性を考慮し曲げモーメント（面内方向、面外方向）の二乗和平方根としている。なお、応力のピーク値は横腹（エルボの円周における背と腹の中央部）（ $\phi=0$ ）において発生する。

軸方向の応力指数は以下の式で算出する。

σ_t は、面外曲げモーメント M に対応して以下で算出する。

$$\sigma_t = \cos \phi + [(1.5X_2 - 18.75) \cos 3\phi + 11.25 \cos 5\phi] / X_4$$

ただし、 ν ：ポアソン比

$$X_1 = 5 + 6\lambda^2 + 24\varphi$$

$$X_2 = 17 + 600\lambda^2 + 480\varphi$$

$$X_3 = X_1 X_2 - 6.25$$

$$X_4 = (1 - \nu^2)(X_3 - 4.5X_2)$$

$$\lambda = t_m R / (r^2 \sqrt{1 - \nu^2})$$

$$\varphi = PR^2 / Ert_m$$

E：ヤング率 [MPa]

P：内圧 [MPa]

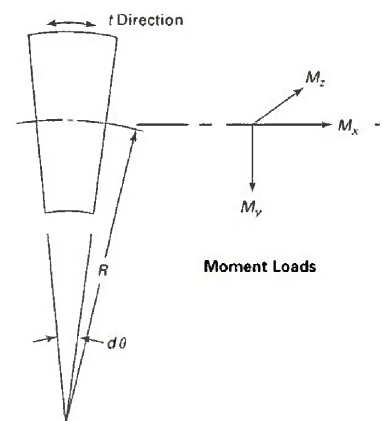
t_m ：板厚 [mm]

R：曲げ半径 [mm]

r：配管平均半径 [mm]

ϕ ：横腹からの角度 [deg]

Figure NB-3685.2-1
Elbow Nomenclature



Round Cross Section

○具体的算出過程

一例として、川内1号炉における評価点115の応力算出過程を以下に示す。

—計算条件—

外径	$D_o=943$ [mm]
内径	$D_i=787.4$ [mm]
板厚	$t_m=77.8$ [mm]
曲げ半径	$R=1208.5$ [mm]
平均半径	$r=(943-77.8)/2 = 432.6$ [mm]
ポアソン比	$\nu=0.3$
圧力	$P=0$ [MPa]
曲げモーメント	$M=2.628 \times 10^9$ [N・mm]
断面係数	$Z=42317152$ [mm ³]

—以下計算過程—

$$\lambda = (77.8 \times 1208.5) / \{ 432.6^2 \times \sqrt{(1 - 0.3^2)} \} = 0.526663 \dots$$

$$\Phi = 0 \quad (\because \text{圧力 } P=0)$$

$$X_1 = 5 + 6 \times 0.526663 \dots^2 + 24 \times 0 = 6.664 \dots$$

$$X_2 = 17 + 600 \times 0.526663 \dots^2 + 480 \times 0 = 183.424 \dots$$

$$X_3 = 6.664 \dots \times 183.424 \dots - 6.25 = 1216.133 \dots$$

$$X_4 = (1 - 0.3^2) \times (1216.133 \dots - 4.5 \times 183.424 \dots) = 355.558 \dots$$

$\phi=0$ においては、

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \cos 0^\circ + [(1.5 \times 183.424 \dots - 18.75) \times \cos 0^\circ + 11.25 \times \cos 0^\circ] / 355.558 \dots \\ &= 1.7527 \dots \end{aligned}$$

従って、

$$\sigma_\phi = (2.628 \times 10^9 / 42317152) \times 1.7527 \dots = 108.848 \dots \text{ [MPa]}$$

以下の図に平均応力算出法の模式図を示す。上記の算出法によって、応力を 10° 刻みで $\phi=0$ から $\phi=0+\theta$ の範囲について算出する。ここで、 θ を板厚中央の周長が $5t_m/2$ となるときの角度とする。算出されたそれぞれの角度における応力値を基に図のような台形の面積の和を近似して算出し、 $\phi=0$ から $\phi=0+\theta$ の範囲で割り、平均曲げ応力を算出する。

なお、エルボ部における平均応力の算出は、もっとも厳しい部位を選定するためにも実施している評価であり、評価の過程において仮想欠陥として $5t_m$ の欠陥を想定している。

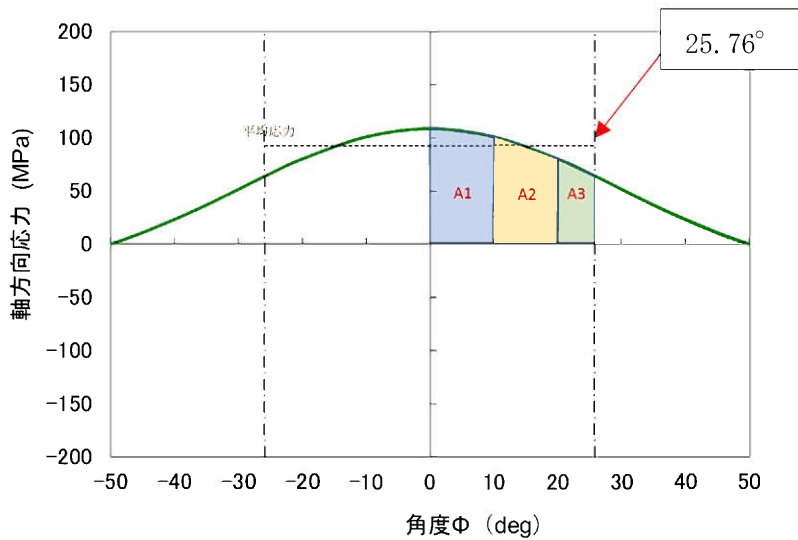


図 平均応力算出法の模式図

$$\theta = 25.76 \dots (\text{deg})$$

$$A1 : 1050.25 \dots$$

$$A2 : 908.04 \dots$$

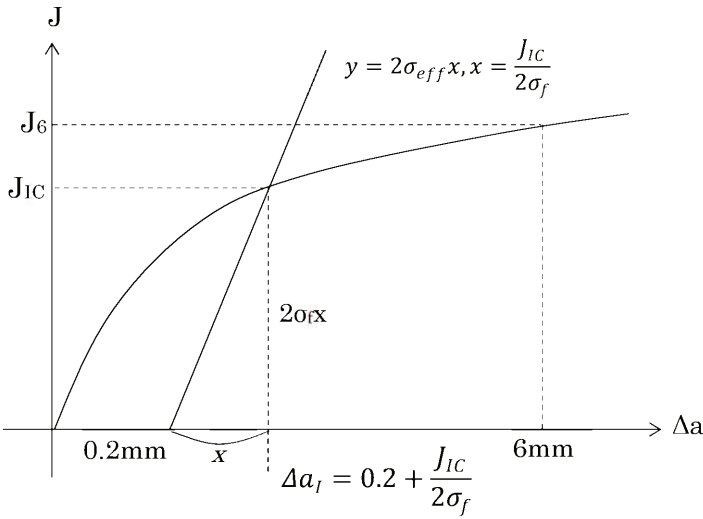
$$A3 : 417.54 \dots$$

以上より、曲がり部の形状を考慮して算出した曲げ応力は、以下の通り。

$$(A1+A2+A3) / \theta \doteq \underline{\underline{92.22 [\text{MPa}]}}$$

以 上

川内 1, 2 号炉 - 熱時効 - 2 0
 【川内 1, 2 号炉 - 熱時効 - 1 0 r1】

<p>タイトル</p>	<p>H3T モデル用いた Jmat の算出過程について示すこと。</p>
<p>説明</p>	<p>H3T モデルを用いた Jmat 曲線の算出過程について、川内 1 号機の「ホットレグ直管」の例を以下の通り示す。</p> <p>(1) 評価条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フェライト量：17.8% ・σ_y^* (0.2%耐力) (室温)：<input type="text"/> ・σ_u^* (引張り強さ) (室温)：<input type="text"/> <p>※ 対象材料のミルシートにより算出。</p> <p>(2) 算出過程</p> <p>○Jmat 曲線の算出</p> <p>Jmat 曲線は亀裂長さ (Δa) のべき乗則でフィットできると考え、以下の式で表す。</p> $Jmat = C_1(\Delta a)^{C_2} \dots \dots \dots \textcircled{1}$ <p>H3T モデルの式より推定した J_{IC}、J_6 を算出し、上式に代入することで、定数 C_1、C_2 を決定し、Jmat 曲線を決定する。</p> $J_{IC} \text{ or } J_6 = A + \frac{B_{325}}{t + (t_F + C)_{325} - t_{F325}}$ <p>保守的に評価するため、t (時効時間) については、$t = \infty$ と考えることから、右辺の分数の項は 0 となり、上式は以下の通り変換できる。</p> $J_{IC} \text{ or } J_6 = A$  <p>図 J-R 曲線導出のイメージ</p>

○ J_{IC} 及び J_6 の算出

J_{IC} 、 J_6 については、以下の図表（PVP2005-71528 より引用）から、それぞれのパラメータを読み取り、以下の値とする。なお、指数部分の第3項は $-2S$ （ S ：標準偏差）であり、データのばらつきの下限線とするために追加している。

$$J_{IC} = 10^{(3.2961 - 0.0530 \times F\% - 2 \times 0.2518)} = 70.65$$

$$J_6 = 10^{(3.6699 - 0.0490 \times F\% - 2 \times 0.1490)} = 316.0$$

表 各係数の算出式一覧

		Predicted equation	S
J_{IC} -HT (J_{IC} at 325°C, kJ/m ²)	A	$\text{Log}_{10} (A \text{ of } J_{IC}\text{-HT}) = 3.2961 - 0.0530 \times F\%$	0.2518
	B_{325}	$\text{Log}_{10} B_{325} = 5.7869 + 0.9256 \times Mn$	0.1514
	t_{F325}	$\text{Log}_{10} t_{F325} = 4.3047 - 19.1095 \times N$	0.2732
	$(t_F + C)_{325}$	$\text{Log}_{10} (t_F + C)_{325} = 1.5354 + 0.2062 \times Ni$	0.1417
J_6 -HT (J_6 at 325°C, kJ/m ²) J_6 : J value at Δa 6mm	A	$\text{Log}_{10} (A \text{ of } J_6\text{-HT}) = 3.6699 - 0.0490 \times F\%$	0.1490
	B_{325}	$\text{Log}_{10} B_{325} = -1.7907 + 0.4130 \times Cr$	0.1783
	t_{F325}	$\text{Log}_{10} t_{F325} = 7.6362 - 0.3670 \times Ni - 16.108 \times N$	0.0892
	$(t_F + C)_{325}$	$\text{Log}_{10} (t_F + C)_{325} = -2.9645 + 0.3438 \times Cr - 0.1648 \times Mo$	0.0702

F%: Ferrite content(%) by ASTM A800 diagram C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo, N(wt%)

J_{IC} : 安定亀裂成長へと移行する時の破壊靱性値

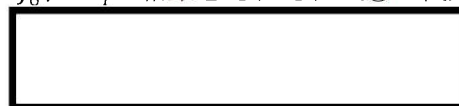
J_6 : 亀裂長さ 6mm の時の破壊靱性値

F% : フェライト量

○ C_1 及び C_2 の導出の計算例*



J_{IC} 、 J_6 、 Δa_1 の結果をそれぞれ式①に代入すると、



となり、連立方程式を解くと、



* σ_y 、 σ_u の関係式の出典については、添付資料-1 参照。

以 上

内は商業機密に属しますので公開できません

<<抜粋>> 「(電共研) 1次冷却材管等の時効劣化に関する研究 (ステップⅢ) (その2)」

