

伊方発電所 3 号炉 審査資料	
資料番号	SIN3-PLM30-熱時効

伊方発電所 3 号炉 高経年化技術評価
(2 相ステンレス鋼の熱時効)

補足説明資料

令和 6 年 1 月
四国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る
事項ですので公開することはできません。

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 評価対象と評価手法	3
3.1 評価対象機器・対象部位の選定	3
3.2 評価手法	14
4. 代表機器の技術評価	15
4.1 健全性評価	15
4.2 現状保全	27
4.3 総合評価	27
4.4 高経年化への対応	28
5. 代表機器以外の技術評価	29
6. まとめ	30
6.1 審査ガイド等に対する確認結果	30
6.2 長期施設管理方針として策定する事項	31
別紙1. 熱時効評価対象スクリーニングの詳細プロセス	1-1
別紙2. 1次冷却材ポンプの構造および評価部位	2-1
別紙3. NUREG/CR-4513R2 を用いたフェライト量および亀裂安定性評価	3-1
別紙4. EPRI の簡易式と FEM による亀裂進展力 (Japp) の比較	4-1
別紙5. 亀裂安定性評価における重大事故時のプラント条件の考慮	5-1
別紙6. 破断前漏えい概念を適用している配管系に対する熱時効の影響	6-1
別紙7. 代表評価機器以外の機器に対する製造時の検査内容および現状保全の内容	7-1
別紙8. 代表機器以外の機器に対する技術評価	8-1
別紙9. 評価対象外機器の使用温度の根拠	9-1
別紙10. 電力共通研究における亀裂進展試験の条件について	10-1
別紙11. H3T モデルを用いた Jmat の算出過程について	11-1

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」第82条第1項の規定に基づき実施した高経年化技術評価のうち、2相ステンレス鋼（ステンレス鋼鋳鋼）の熱時効の評価結果について、補足説明するものである。

1次冷却材管等に使用しているステンレス鋼鋳鋼は、オーステナイト相中に一部フェライト相を含む2相組織であるため、運転中の系統機器が高温の場合に時間とともにフェライト相内でより安定な組織形態へ移行しようとする相分離が起こること（熱時効）により、材料の靱性の低下等、材料特性変化を起こす。

熱時効による靱性低下への影響は、フェライト量が多く、使用温度が高いほど大きくなる。また、使用条件としては、応力（荷重）が大きいほど健全性評価への影響は大きくなる。

そのため、破壊力学的手法による亀裂の安定性評価を実施することにより、ステンレス鋼鋳鋼製の使用温度が高い機器で、フェライト量が多く、応力が大きい部位が不安定破壊せず健全であることを確認することが必要である。

したがって、フェライト量の多寡および応力条件の観点で評価対象機器・対象部位を選定し、熱時効の代表評価点は1次冷却材管ホットレグ直管およびSG入口50°エルボとして「4. 代表機器の技術評価」にて評価を実施する。

2. 基本方針

ステンレス鋼鋳鋼の熱時効に対する評価の基本方針は、「実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド」および「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」の記載事項（以下、「審査ガイド等記載事項」という。）を踏まえ、評価機器について運転開始後60年時点までの期間におけるステンレス鋼鋳鋼の熱時効に対して、高経年化に関する技術評価を適切に実施し、その結果に基づき長期施設管理方針を適切に策定していることを確認することである。

ステンレス鋼鋳鋼の熱時効についての審査ガイド等記載事項を表1に整理する。

表1 ステンレス鋼鋳鋼の熱時効についての審査ガイド等記載事項

審査基準、ガイド	記載事項
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド</p>	<p>3. 高経年化技術評価等の審査の視点・着眼点</p> <p>(1) 高経年化技術評価の審査</p> <p>⑫健全性の評価 実施ガイド3. 1⑤に規定する期間の満了日までの期間について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の発生又は進展に係る健全性を評価していることを審査する。</p> <p>⑬現状保全の評価 健全性評価結果から現状の保全策の妥当性が評価されていることを審査する。</p> <p>⑭追加保全策の抽出 現状保全の評価結果から、現状保全に追加する必要がある新たな保全策が抽出されていることを審査する。</p> <p>(2) 長期施設管理方針の審査</p> <p>①長期施設管理方針の策定 すべての追加保全策について長期保守管理方針として策定されているかを審査する。</p>
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド</p>	<p>3. 1 高経年化技術評価の実施及び見直し 高経年化技術評価の実施及び見直しに当たっては、以下の要求事項を満たすこと。</p> <p>⑤抽出された高経年化対策上着目すべき経年劣化事象について、以下に規定する期間の満了日までの期間について機器・構造物の健全性評価を行うとともに、必要に応じ現状の施設管理に追加すべき保全策（以下「追加保全策」という。）を抽出すること。</p> <p>イ 実用炉規則第82条第1項の規定に基づく高経年化技術評価プラントの運転を開始した日から60年間</p> <p>3. 2 長期施設管理方針の策定及び変更 長期施設管理方針の策定及び変更にあたっては、以下の要求事項を満たすこと。</p> <p>①高経年化技術評価の結果抽出された全ての追加保全策（発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたもの及び冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたものの全て。）について、発電用原子炉ごとに、施設管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期施設管理方針を策定すること。</p> <p>なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたもの間で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期施設管理方針を策定すること。</p>

3. 評価対象と評価手法

ステンレス鋼鋳鋼の熱時効評価フローを図1に示す。熱時効の評価に当たっては評価フローに沿って評価を実施する。

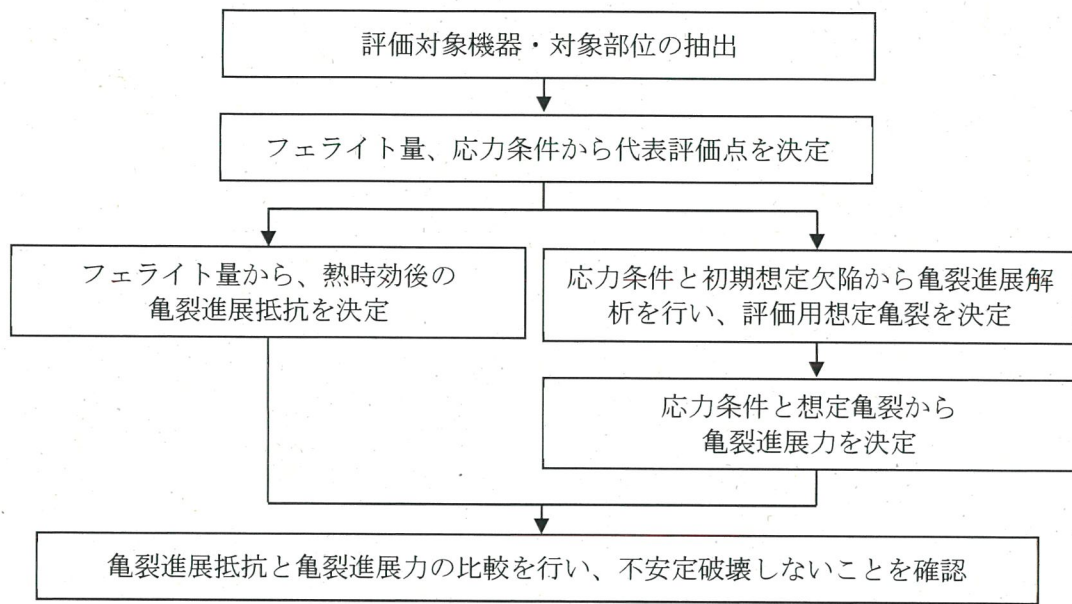


図1 ステンレス鋼鋳鋼の熱時効評価フロー

3.1 評価対象機器・対象部位の選定

(1) 評価対象機器・対象部位の抽出

熱時効の評価対象機器・対象部位については、「日本原子力学会 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2008 (AESJ-SC-P005:2008)」に基づき、以下の条件を含んだ機器、部位を評価対象として抽出する。

- 使用温度が 250°C以上
- 使用材料が 2 相ステンレス鋼 (ステンレス鋼鋳鋼)
- 亀裂の原因となる経年劣化事象の発生が想定される。

熱時効評価対象スクリーニングフローを図2に示す。また、スクリーニングの詳細プロセスを別紙1に示す。

なお、スクリーニングフローにおける「亀裂の原因となる経年劣化事象」とは、疲労割れまたは応力腐食割れが想定されるか否かについて確認を実施している。

熱時効評価対象のスクリーニング結果一覧を表2に示す。

(2) 代表評価点の決定

伊方3号炉で熱時効の代表評価対象機器とした1次冷却材管を構成する**ステンレス鋼**各部位を図3に示す。また、各部位のフェライト量および応力の一覧を表4に示す。

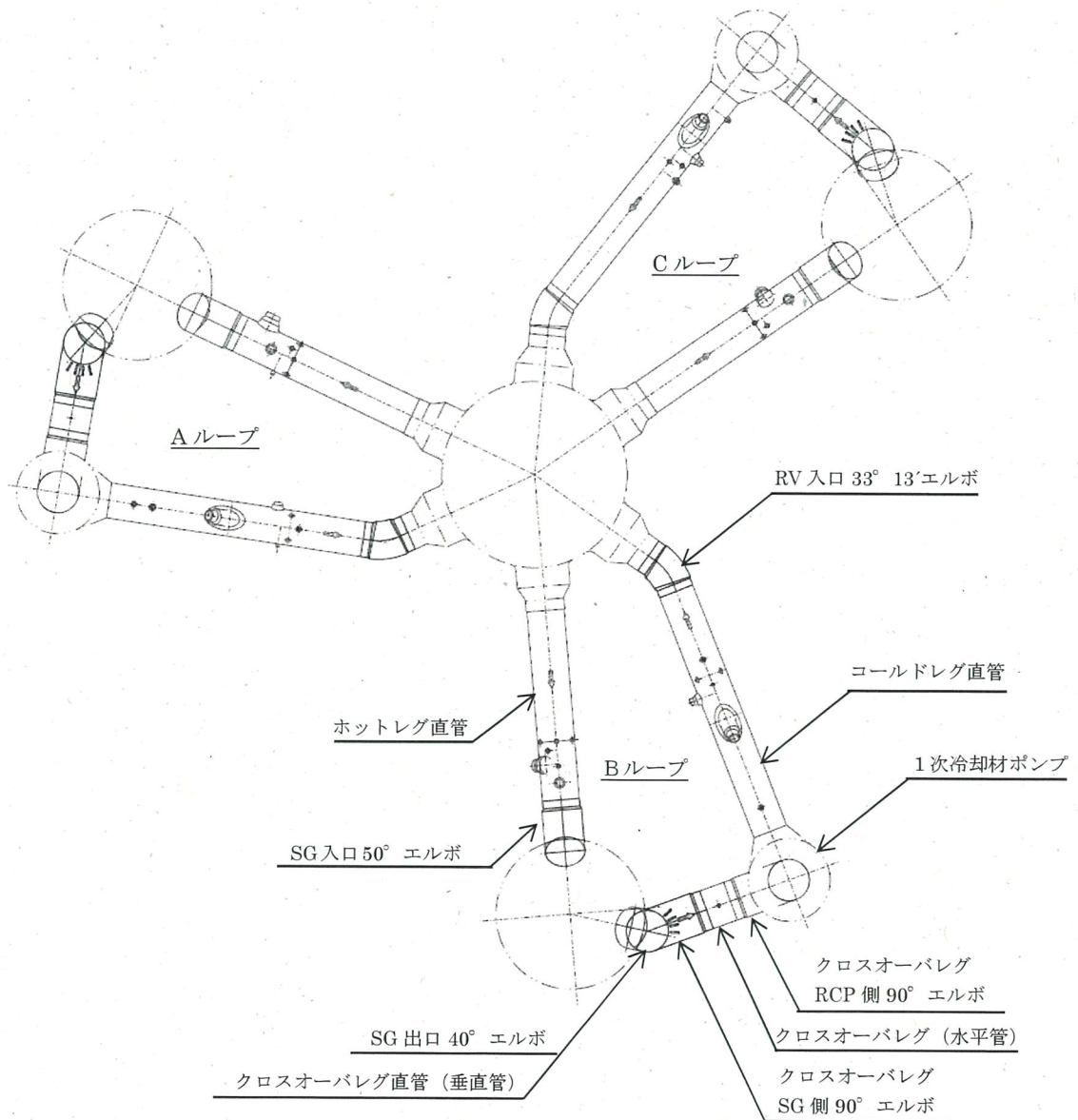


図3 1次冷却材管の熱時効評価対象部位

3.2 評価手法

選定した評価対象部位に対して、以下の手順で評価を実施する。

(1) 評価用初期欠陥の想定

初期欠陥の大きさは、「JEAG4613-1998」に準拠し定める。

(2) 疲労亀裂進展解析

配管の内面に想定する評価用初期欠陥が、プラント運転時に生じる応力サイクルにより供用期間 60 年の間に進展する量を求める。

(3) 亀裂安定性評価用想定亀裂の想定

亀裂安定性評価では、安全側に評価するため、前項の疲労亀裂進展解析で算出した疲労亀裂を貫通亀裂に置換える。

(4) 亀裂安定性評価

供用状態 A、B の条件よりも厳しい重大事故等時（原子炉停止機能喪失）（以下、「SA」という。）の荷重条件を包絡した評価を行う。このため、自重+SA 熱膨張+SA 圧力+S_s 地震動により想定亀裂に生じる亀裂進展力を評価し、亀裂進展抵抗 J_{mat}^{*} と比較して延性不安定破壊しないことを確認する。

※「H3T モデル」を用いて評価部位のフェライト量を基に完全時効後の飽和値として決定する。

ステンレス鋼の熱時効の評価に用いた規格および評価手法を以下に示す。

- a. 「日本原子力学会 原子力発電所の高経年対策実施基準：2008
(AESJ-SC-P005：2008)」
- b. 「日本電気協会 原子力発電所配管破損防護設計技術指針
(JEAG 4613-1998)」 (以下、「JEAG4613-1998」という。)
- c. 電力共通研究「1 次冷却材管等の時効劣化に関する研究 (STEPⅢ)
(その 2) 1998 年度」で改良された脆化予測モデル (H3T モデル：
Hyperbolic-Time, Temperature Toughness) (以下、「H3T モデル」
という。)

6. まとめ

6.1 審査ガイド等に対する確認結果

「2. 基本方針」で示す審査ガイド等記載事項に対して、高経年化に関する技術評価を適切に実施していることを確認した。ステンレス鋼鋳鋼の熱時効についての審査ガイド等記載事項との対比表を表13に示す。

表13 ステンレス鋼鋳鋼の熱時効についての審査ガイド等記載事項との対比

審査基準、ガイド	記載事項	技術評価結果
実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド	3. 高経年化技術評価等の審査の視点・着眼点 (1) 高経年化技術評価の審査 ⑫健全性の評価 実施ガイド3.1⑤に規定する期間の満了日までの期間について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の発生又は進展に係る健全性を評価していることを審査する。	4.1の「健全性評価」に示すとおり、運転開始後60年時点を想定した健全性評価を実施した。
	⑬現状保全の評価 健全性評価結果から現状の保全策の妥当性が評価されていることを審査する。	4.2の「現状保全」に示すとおり、現状保全の評価結果から、現状の保全策が妥当であることを確認した。
	⑭追加保全策の抽出 現状保全の評価結果から、現状保全に追加する必要がある新たな保全策が抽出されていることを審査する。	4.4の「高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に高経年化対策の観点から追加すべきものはないと判断した。
	(2) 長期施設管理方針の審査 ①長期施設管理方針の策定 全ての追加保全策について長期保守管理方針として策定されているかを審査する。	6.2の「長期施設管理方針として策定する事項」に示すとおり、長期施設管理方針として策定する事項は抽出されなかった。
実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド	3.1 高経年化技術評価の実施及び見直し 高経年化技術評価の実施及び見直しに当たっては、以下の要求事項を満たすこと。 ⑤抽出された高経年化対策上着目すべき経年劣化事象について、以下に規定する期間の満了日までの期間について機器・構造物の健全性評価を行うとともに、必要に応じ現状の施設管理に追加すべき保全策（以下「追加保全策」という。）を抽出すること。 イ 実用炉規則第82条第1項の規定に基づく高経年化技術評価 プラントの運転を開始した日から60年間	4.4の「高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に高経年化対策の観点から追加すべきものはないと判断した。 6.2の「長期施設管理方針として策定する事項」に示すとおり、長期施設管理方針として策定する事項は抽出されなかった。
	3.2 長期施設管理方針の策定及び変更 長期施設管理方針の策定及び変更にあたっては、以下の要求事項を満たすこと。 ①高経年化技術評価の結果抽出された全ての追加保全策（発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたもの及び冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたものの全て。）について、発電用原子炉ごとに、施設管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期施設管理方針を策定すること。 なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたもの間で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期施設管理方針を策定すること。	

別紙

- 別紙 1. 熱時効評価対象スクリーニングの詳細プロセス
- 別紙 2. 1次冷却材ポンプの構造および評価部位
- 別紙 3. NUREG/CR-4513R2 を用いたフェライト量および亀裂安定性評価
- 別紙 4. EPRI の簡易式と FEM による亀裂進展力 (J_{app}) の比較
- 別紙 5. 亀裂安定性評価における重大事故時のプラント条件の考慮
- 別紙 6. 破断前漏えい概念を適用している配管系に対する熱時効の影響
- 別紙 7. 代表評価機器以外の機器に対する製造時の検査内容および現状保全の内容
- 別紙 8. 代表機器以外の機器に対する技術評価
 - 別紙 8-1. 余熱除去系第 1 入口弁
 - 別紙 8-2. 蓄圧タンク出口注入ライン第 1 逆止弁
 - 別紙 8-3. 制御棒クラスタ
- 別紙 9. 評価対象外機器の使用温度の根拠
 - 添付. 加圧器安全弁の弁箱の使用温度について
- 別紙 10. 電力共通研究における亀裂進展試験の条件について
- 別紙 11. H3T モデルを用いた J_{mat} の算出過程について

別紙 1 1. H3T モデルを用いた J_{mat} の算出過程について

H3T モデルを用いた J_{mat} 曲線の算出過程について、伊方 3 号炉の「ホットレグ直管」の例を以下の通り示す。

(1) 評価条件

- ・フェライト量 : 10.1%
 - ・ σ_y (0.2%耐力) (室温) : MPa*
 - ・ σ_u (引張り強さ) (室温) : MPa*
- ※対象材料のミルシートにより算出。

(2) 算出過程

○ J_{mat} 曲線の算出

J_{mat} 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。

$$J_{mat} = C_1(\Delta a)^{C_2} \quad \dots \dots \textcircled{1}$$

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、 J_{mat} 曲線を決定する。

$$J_{IC \text{ or } J_6} = A + \frac{B_{325}}{t + (t_F + C)_{325} - t_{F325}}$$

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。

$$J_{IC \text{ or } J_6} = A$$

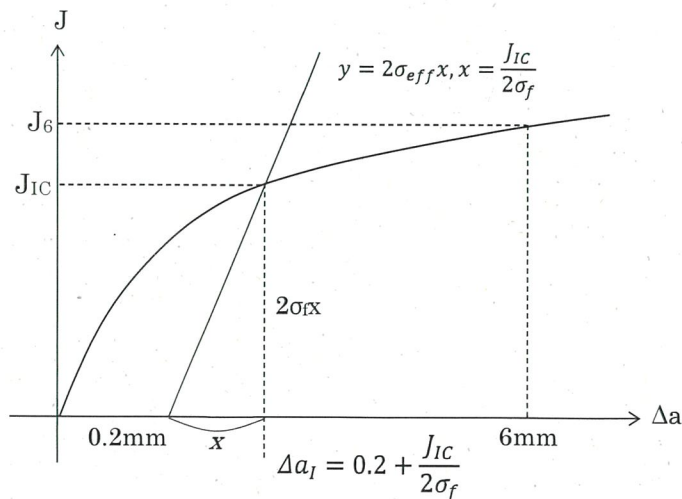


図 J-R 曲線導出のイメージ

○ J_{IC} および J_6 の導出

J_{IC} および 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。

$$J_{IC} = 10^{(3.2961 - 0.0530 \times F\% - 2 \times 0.2518)} = 180.80$$

$$J_6 = 10^{(3.6699 - 0.0490 \times F\% - 2 \times 0.1490)} = 753.36$$

表 各係数の算出式一覧

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

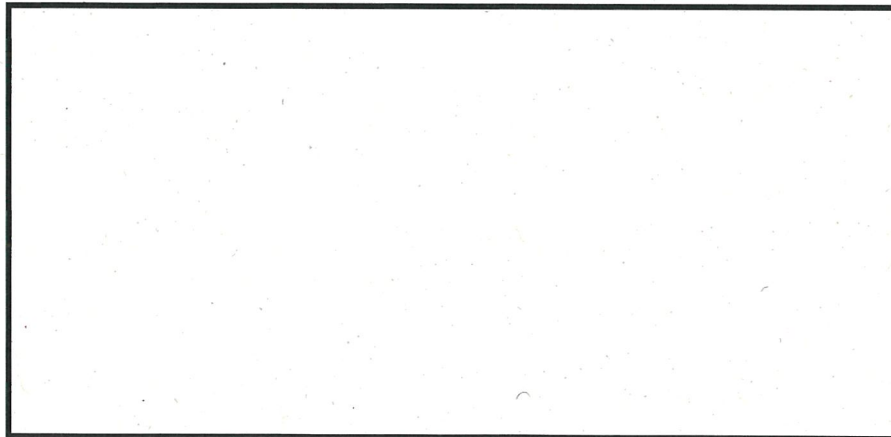
F%: Ferrite content (%) by ASTM A800 diagram C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo, N (wt%)

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 および C_2 の導出の計算例*



以上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、

$$C_1 = \square \quad C_2 = \square$$

※出典：(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)