

大飯発電所3号炉審査資料	
資料番号	KON3-PLM30(断続)-熱時効
提出年月日	令和2年12月2日

大飯発電所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2年12月2日
関西電力株式会社

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	32
4.3 総合評価	33
4.4 高経年化への対応	33
5. 代表機器以外の技術評価	34
6. まとめ	35
6.1 審査ガイド適合性	35
6.2 長期施設管理方針として策定する事項	36

別紙1. 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	1-1
別紙2. 評価対象外機器の使用温度の根拠	2-1

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2相ステンレス鋼（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、SG入口50°エルボ、クロスオーバレグRCP側90°エルボ、RV入口22°57'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

2相ステンレス鋼の熱時効に対する評価の基本方針は、2相ステンレス鋼の熱時効の影響が懸念される評価対象部位について亀裂の発生および進展を前提として技術評価を行い、運転開始後60年時点までの期間において「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」の要求事項を満たすことを確認することである。

2相ステンレス鋼の熱時効についての要求事項を表1に整理する。

表1 2相ステンレス鋼の熱時効についての要求事項

ガイド	要求事項
<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) 長期保守管理方針の審査</p> <p>①長期保守管理方針の策定 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、必要に応じ現状の保守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 長期保守管理方針の策定及び変更 長期保守管理方針の策定及び変更に当たっては、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、保守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保守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保守管理方針を策定すること。</p>

3. 評価対象と評価手法

2相ステンレス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。

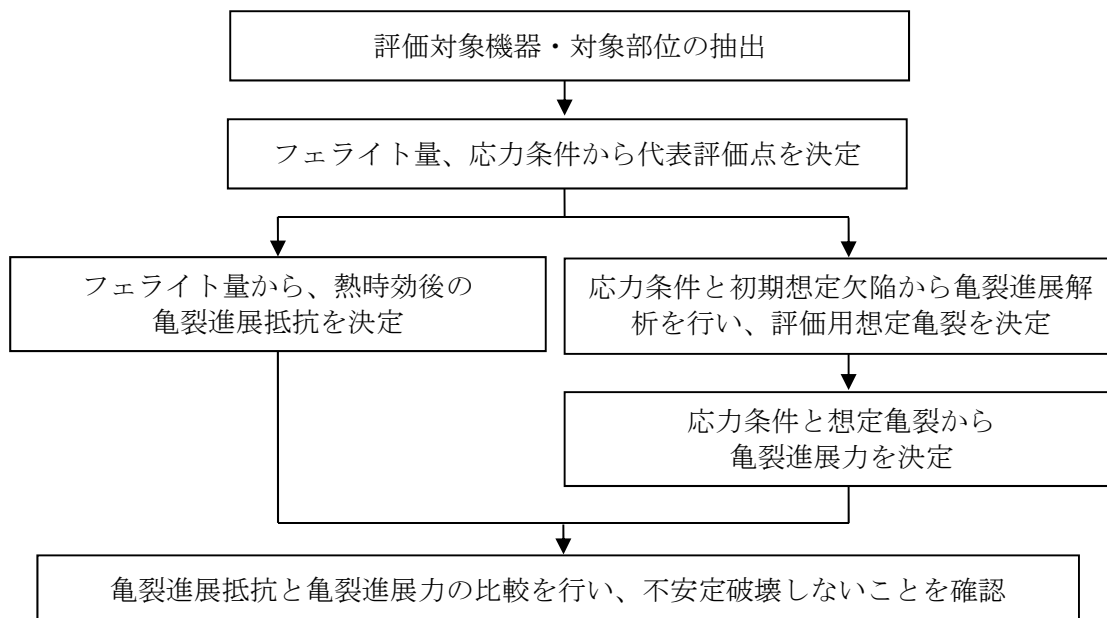


図1 2相ステンレス鋼の熱時効評価フロー

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℃以上
- 使用材料が 2相ステンレス鋼
- 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。

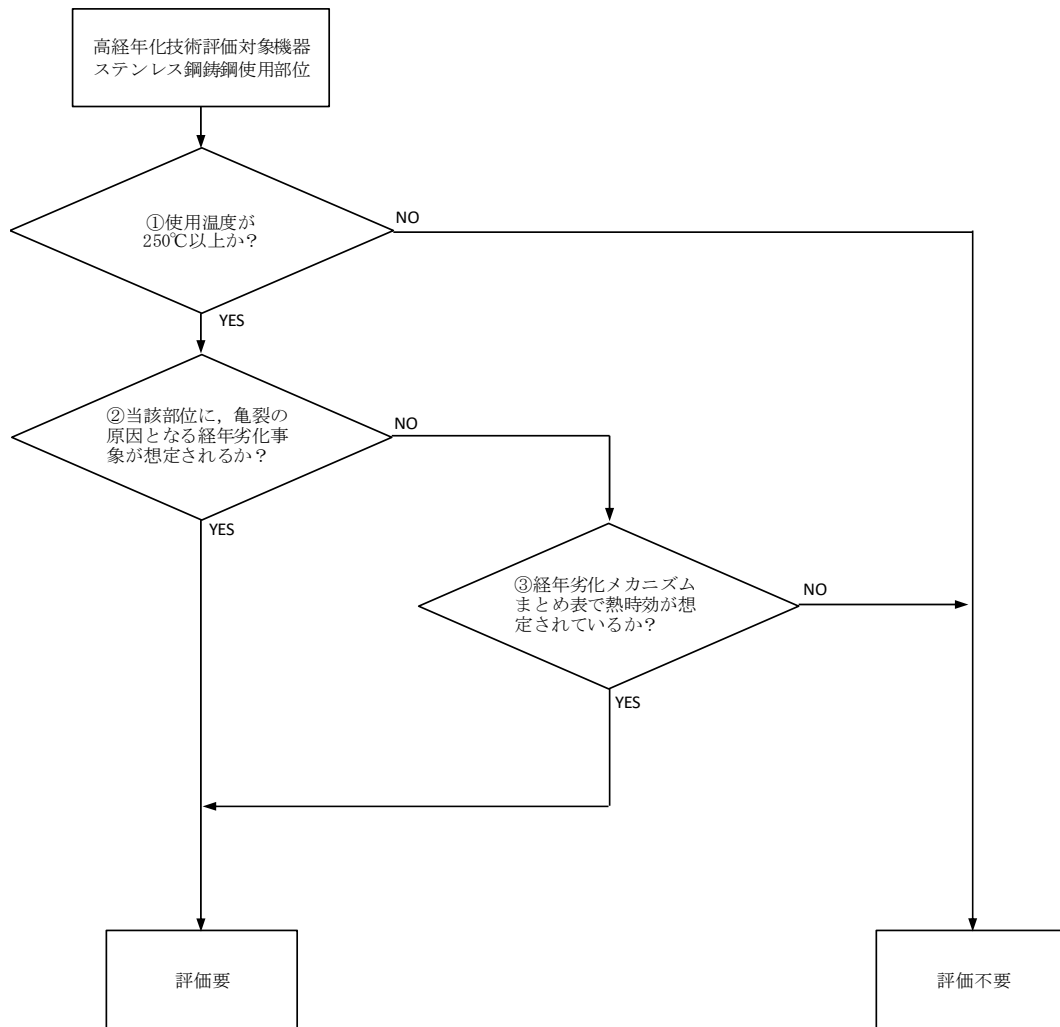


図2 熱時効評価対象スクリーニングフロー

表 2-1 熱時効評価対象のスクリーニング結果一覧 (その1)

機種	機器	部位	①最高使用温度	①使用温度	②亀裂を想定?	③熱時効想定?	PLM 評価	評価根拠
ポンプ	海水ポンプ	羽根車	約 50℃	-	-	-	不要	A
		吐出曲管	約 50℃	-	-	-	不要	A
		吐出管	約 50℃	-	-	-	不要	A
		案内羽根	約 50℃	-	-	-	不要	A
		吸込口	約 50℃	-	-	-	不要	A
		中間軸受箱、軸受箱	約 50℃	-	-	-	不要	A
		振れ止め台	約 50℃	-	-	-	不要	A
	余熱除去ポンプ	羽根車	約 200℃	-	-	-	不要	A
		ケーシング	約 200℃	-	-	-	不要	A
		ケーシングカバー	約 200℃	-	-	-	不要	A
	原子炉補機冷却水ポンプ	羽根車	約 95℃	-	-	-	不要	A
	電動補助給水ポンプ	羽根車	約 40℃	-	-	-	不要	A
		ケーシング	約 40℃	-	-	-	不要	A
	タービン動主給水ポンプ スタポンプ	羽根車	約 200℃	-	-	-	不要	A
		第1段ケーシング	約 200℃	-	-	-	不要	A
		吐出・中間ボウル	約 200℃	-	-	-	不要	A
	1次冷却材ポンプ	吸込ベル	約 200℃	-	-	-	不要	A
		羽根車	約 343℃	約 290℃	×	○	要	C
ケーシング	約 343℃	約 290℃	○	→	要	D		
	配管	1次冷却材管	直管	約 343℃	(高温側)約 325℃ (低温側)約 290℃	○	→	要
エルボ		約 343℃	(高温側)約 325℃ (低温側)約 290℃	○	→	要	D	
仕切弁	余熱除去ポンプループ高温側入口止め弁	弁箱	約 343℃	325℃以下	○	→	要	D
		弁蓋	約 343℃	325℃以下	×	○	要	C
		弁体	約 343℃	325℃以下	×	×	不要	B
	補助給水フルフロー・ミニフローライン復水ピット入口弁	弁箱	約 40℃	-	-	-	不要	A
		弁蓋	約 40℃	-	-	-	不要	A
		弁体	約 40℃	-	-	-	不要	A
玉形弁	廃液蒸発装置濃縮液循環弁	弁箱	約 150℃	-	-	-	不要	A
	弁蓋	約 150℃	-	-	-	不要	A	
バタフライ弁	余熱除去冷却器出口流量調節弁	弁箱(弁座と一体)	約 200℃	-	-	-	不要	A
		弁体	約 200℃	-	-	-	不要	A
	廃液蒸発装置濃縮液ポンプ入口弁	弁箱	約 150℃	-	-	-	不要	A
		弁蓋	約 150℃	-	-	-	不要	A
		弁体	約 150℃	-	-	-	不要	A
	安全補機開閉器室空調ユニット冷水出口絞り弁	弁体	約 45℃	-	-	-	不要	A

<評価根拠>

A: 使用温度が 250℃未満である。(評価不要)

B: 亀裂の原因となる経年劣化事象が想定されない。また、経年劣化メカニズムまとめ表で熱時効が想定されていない。(評価不要)

C: 亀裂の原因となる経年劣化事象が想定されない。但し、経年劣化メカニズムまとめ表で熱時効が想定されている。(評価要)

D: 亀裂の原因となる経年劣化事象が想定される。(評価要)

表 2-2 熱時効評価対象のスクリーニング結果一覧 (その2)

機種	機器	部位	①最高使用温度	①使用温度	②亀裂を想定?	③熱時効想定?	PLM評価	評価根拠
ダイヤフラム弁	格納容器冷却材ドレンポンプ	弁箱	約 144°C	-	-	-	不要	A
	出口格納容器第1隔離弁	弁蓋	約 144°C	-	-	-	不要	A
	格納容器冷却材ドレンタンク	弁箱	約 144°C	-	-	-	不要	A
	ガス分析ライン格納容器第1隔離弁	弁蓋	約 144°C	-	-	-	不要	A
	海水ポンプ軸受潤滑水供給ライン止め弁	弁蓋	約 50°C	-	-	-	不要	A
スイング逆止弁	格納容器冷却材ドレンタンクベントライン格納容器第1隔離弁	弁蓋	約 144°C	-	-	-	不要	A
	蓄圧タンク注入ライン第1逆止弁	弁箱	約 343°C	290°C以下	○	→	要	D
安全弁	格納容器内補給水供給ライン格納容器隔離逆止弁	弁箱	約 144°C	-	-	-	不要	A
	加圧器安全弁	弁箱	約 360°C	100°C以下	-	-	不要	A
タービン設備	起動空気圧縮機第1段安全弁	弁体	約 200°C	-	-	-	不要	A
	高压タービン	インナーグランド本体	約 200°C	-	-	-	不要	A
		翼環	約 298°C	約 270°C	×	×	不要	B
	低圧タービン	静翼(14~16段)	約 115°C	-	-	-	不要	A
	主油ポンプ	羽根車	約 80°C	-	-	-	不要	A
タービン動主給水ポンプタービン	車室	約 298°C	約 200°C	-	-	不要	A	
	高压ノズル室	約 298°C	約 200°C	-	-	不要	A	
空調設備	空調用冷凍機	冷水ポンプ羽根車	約 45°C	-	-	-	不要	A
機械設備	制御用空気圧縮装置	制御用空気乾燥器 四方弁・弁体	約 300°C	約 200°C	-	-	不要	A
		制御用空気乾燥器 四方弁・弁箱	約 300°C	約 200°C	-	-	不要	A
		制御用空気乾燥器 四方弁・弁蓋	約 300°C	約 200°C	-	-	不要	A
	制御棒クラスタ	スパイダー	約 343°C	約 325°C	×	○	要	C
		ベーン	約 343°C	約 325°C	×	○	要	C
		フィンガ	約 343°C	約 325°C	×	○	要	C
	廃液蒸発装置	濃縮液ポンプ 羽根車	約 150°C	-	-	-	不要	A
		濃縮液ポンプ ケーシング	約 150°C	-	-	-	不要	A
		蒸留水ポンプ 羽根車	約 150°C	-	-	-	不要	A
		蒸留水ポンプ ケーシング	約 150°C	-	-	-	不要	A
電源設備	燃料油第2フィルタ	ロック栓	約 50°C	-	-	-	不要	A

<評価根拠>

A: 使用温度が 250°C未満である。(評価不要)

B: 亀裂の原因となる経年劣化事象が想定されない。また、経年劣化メカニズムまとめ表で熱時効が想定されていない。(評価不要)

C: 亀裂の原因となる経年劣化事象が想定されない。但し、経年劣化メカニズムまとめ表で熱時効が想定されている。(評価要)

D: 亀裂の原因となる経年劣化事象が想定される。(評価要)

熱時効評価対象のスクリーニングの結果、評価要となった機器のうち亀裂が想定される部位についてフェライト量および応力条件で整理し比較すると、1次冷却材管は使用温度が高く、発生応力は大きいことが分かる。フェライト量^{※1}については、1次冷却材管に比べて1次冷却材ポンプケーシングの方が多いが、「日本原子力学会 原子力発電所の高経年化対策実施基準:2015(AESJ-SC-P005:2015)」で示されている評価対象の条件であるフェライト量 14%よりは小さい程度の量である。弁のフェライト量が多いが、弁は接続される配管と比較して厚板に製造されていることから発生応力は小さく、また、製造時の非破壊検査で有意な欠陥がないことを確認するとともに、疲労割れが発生する可能性が小さいことを確認している。

このため、代表評価対象機器は発生応力の大きい1次冷却材管とする。なお、評価に際しては、発生応力の大きい1次冷却材管に直接接続する機器である1次冷却材ポンプケーシングのフェライト量も考慮して行い、フェライト量が健全性に及ぼす影響を確認する。

熱時効の代表評価対象機器選定結果を表3に示す。

※1：フェライト量算出にあたっては、製造時の材料成分を用いて「Standard Practice for Steel Casting, Austenitic Alloy, Estimating Ferrite Content Thereof(ASTM A800/A800M-14)」(以下「ASTM A800」という。)に示される線図により算出した。

表3 熱時効の代表評価機器選定表

機種	機器	部位	使用温度 (°C)	亀裂の 原因	フェライト 量 (%) ※1, 2	発生応力 (MPa) ※2	選定 結果	備考 (選定理由)
ポンプ	1次冷却材 ポンプ	羽根車	約 290	—	約 16.1	約 46		1次冷却材ポンプの羽根車について、過去に亀裂に関する不具合は発生しておらず亀裂の原因となる経年劣化事象はない。また、製造時の非破壊検査で有意な欠陥がないことを確認している。 羽根車は耐圧部ではなく、亀裂の原因となる経年劣化事象の発生は想定されない。発生応力も小さいため代表評価機器とはしない。
		ケーシング	約 290	疲労割れ	約 12.7	約 126		疲労割れによる亀裂が想定されるが、疲労評価上も許容値を満足するため亀裂が発生する可能性は小さい。また、製造時の非破壊検査で有意な欠陥がないことを確認している。 1次冷却材管と比較するとフェライト量は多いが、「日本原子力学会 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2015 (AESJ-SC-P005：2015)」で示されている評価対象の条件であるフェライト量よりは小さい程度であるため、代表評価機器とはしない。 ただし、1次冷却材管に直接接続する機器であるため、1次冷却材管の評価に1次冷却材ポンプケーシングのフェライト量を考慮し、フェライト量が健全性に及ぼす影響を確認する。
配管	1次冷却材 管	直管、 エルボ	約 325 / 約 290	疲労割れ 応力腐食 割れ	約 11.1	約 180	○	疲労割れによる亀裂が想定されるが、疲労評価上も許容値を満足するため亀裂が発生する可能性は小さい。また、製造時の非破壊検査で有意な欠陥がないことを確認している。応力腐食割れについては、高温で使用する場合は水質管理を実施しており発生する可能性は小さい。 1次冷却材ポンプケーシングと比較するとフェライト量は少ないが、発生応力が大きいため、1次冷却材管を代表評価機器とする。
仕切弁	余熱除去ポ ンプループ 高温側入口 止め弁	弁箱、 弁蓋	約 325	疲労割れ	約 15.5	約 104		疲労割れによる亀裂が想定されるが、疲労評価上も許容値を満足するため亀裂が発生する可能性は小さい。また、弁は接続される配管と比較して厚板に製造されていることから発生応力は小さく、製造時の非破壊検査で有意な欠陥がないことを確認している。 亀裂の発生、進展の可能性は小さく、1次冷却材管の発生応力に包絡されるため代表評価機器とはしない。
スイング 逆止弁	蓄圧タンク 注入ライン 第1逆止弁	弁箱	約 290	疲労割れ	約 14.8	約 92		疲労割れによる亀裂が想定されるが、疲労評価上も許容値を満足するため亀裂が発生する可能性は小さい。また、弁は接続される配管と比較して厚板に製造されていることから発生応力は小さく、製造時の非破壊検査で有意な欠陥がないことを確認している。 亀裂の発生、進展の可能性は小さく、1次冷却材管の発生応力に包絡されるため代表評価機器とはしない。
機械設備	制御棒 クラスタ	スパイダ、 ベーン、 フィンガ	約 325	—	約 14.1	約 30		制御棒クラスタのスパイダ組立体について、過去に亀裂に関する不具合は発生しておらず亀裂の原因となる経年劣化事象はない。また、製造時に内部欠陥をなくす処理をしている。 スパイダ組立体は耐圧部ではなく、亀裂の原因となる経年劣化事象の発生は想定されない。発生応力も小さいため代表評価機器とはしない。

※1：フェライト量算出にあたっては、製造時の材料成分を用いて「Standard Practice for Steel Casting, Austenitic Alloy, Estimating Ferrite Content Thereof (ASTM A800/A800M-14)」(以下「ASTM A800」という。)に示される線図により算出した。

※2：対象機器が系統毎に複数ある場合、同一機能を持った機器が複数ある場合は、最も値の大きい機器を記載している。

(2) 代表評価点の決定

大飯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2相ステンレス鋼(ステンレス鋼铸鋼)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。

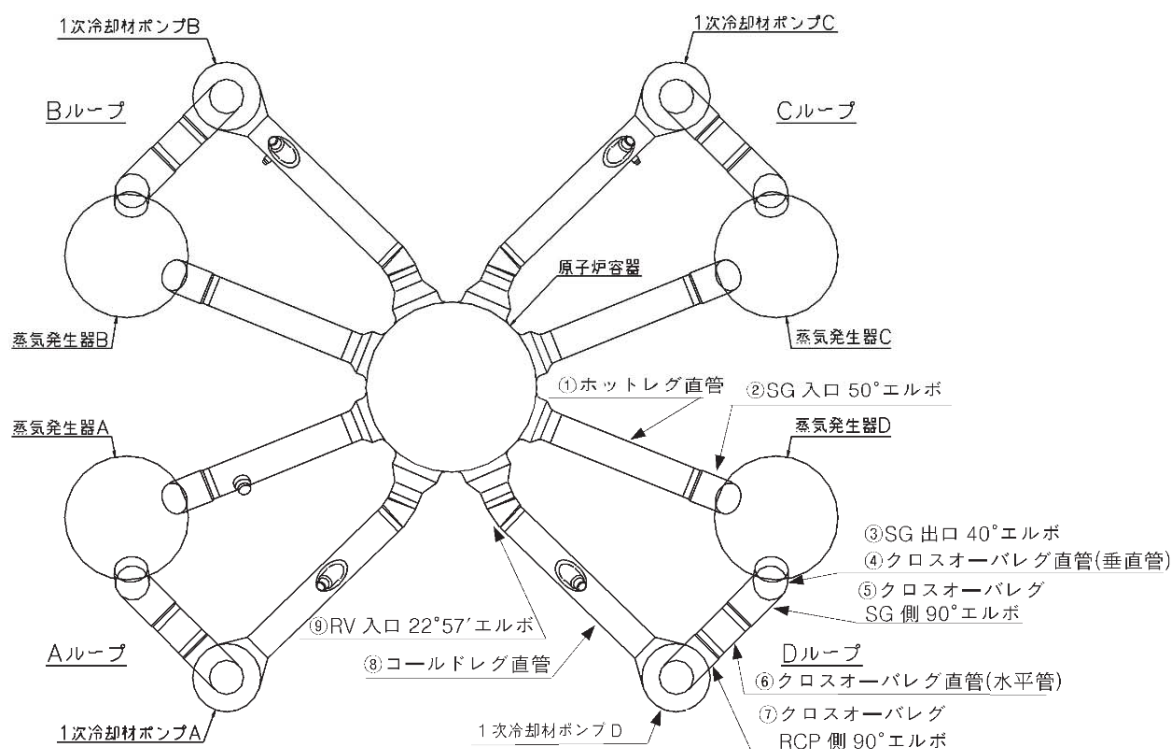


図3 1次冷却材管の熱時効評価対象部位

表4 1次冷却材管構成品のフェライト量および応力一覧

	部位	使用温度 (°C)	フェライト量 (%) ※1, 2	応力 (MPa) ※2, 3	選定
①	ホットレグ直管	324.9	約 9.9	180	○
②	SG 入口 50° エルボ	324.9	約 10.2	141	○
③	SG 出口 40° エルボ	289.2	約 10.7	91	
④	クロスオーバーレグ直管(垂直管)	289.2	約 9.8	80	
⑤	クロスオーバーレグ SG 側 90° エルボ	289.2	約 11.0	69	
⑥	クロスオーバーレグ直管 (水平管)	289.2	約 9.8	61	
⑦	クロスオーバーレグ RCP 側 90° エルボ	289.2	約 11.1	73	○
⑧	コールドレグ直管	289.2	約 9.9	126	
⑨	RV 入口 22° 57' エルボ	289.2	約 10.7	104	○

※1：フェライト量算出にあたっては、製造時の材料成分を用いて「ASTM A800」に示される線図により算出した。

※2：対象機器が系統毎に複数ある場合、同一機能を持った機器が複数ある場合は、最も値の大きい機器を記載している。

※3：応力は供用状態A、Bでの内圧、自重、熱膨張荷重、地震荷重（S s）を用いて算出した。なお、重大事故等時の応力条件でも選定結果が変わらないことを確認している。

熱時効の代表評価点は、応力が最も大きい部位としてホットレグ直管を、フェライト量が最も多い部位としてクロスオーバーレグ RCP 側 90° エルボを選定した。さらに応力とフェライト量の組合せを考慮し、RV 入口 22° 57' エルボを評価部位として選定した。また、エルボで応力が高くなると考えられる SG 入口 50° エルボについても評価部位として選定した。なお、評価に際しては、発生応力の大きい1次冷却材管に直接接続する機器である1次冷却材ポンプケーシングのフェライト量も考慮することとし、1次冷却材管の中で最も応力が大きいホットレグ直管についてフェライト量のみ1次冷却材ポンプケーシングの値を用いた評価を行い、フェライト量が健全性に及ぼす影響を確認する。

各部位の詳細な応力値を表5に、フェライト量算出に用いた材料成分を表6に示す。フェライト量は、「ASTM A800」に基づき表6に示す材料成分表および図4-1により算出した。また、1次冷却材ポンプケーシングのフェライト量を考慮した評価を実施することから、1次冷却材ポンプケーシングのフェライト量も合わせて表6および図4-2に示す。

なお、ASTM A800の他にフェライト量の算出方法として「Estimation of Fracture Toughness of Cast Stainless Steels during Thermal Aging in LWR Systems (NUREG/CR-4513, ANL-15/08, Revision2)」(以下、「NUREG/CR-4513R2」という。)で紹介されている Hull の等価係数を用いた算出式(以下、「Hull 式」という。)による方法があるが、Hull 式により算出したフェライト量を用いた亀裂進展

抵抗 (J_{mat}) を参照しても次項で実施する亀裂安定性評価結果に影響はないことを確認している。

表5 応力値詳細

部位	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)	
ホットレグ直管	41.5	10.0	81.5	40.5	132.0	0.0	0.9	5.0	5.9	180
SG 入口 50° エルボ	41.4	2.7	43.7	41.1	87.5	0.0	3.7	3.2	6.9	136
クロスオーバーレグ RCP 側 90° エルボ	41.4	3.5	3.3	21.3	28.1	0.7	0.8	1.5	3.0	73
RV 入口 22° 57' エルボ	37.4	2.2	25.2	25.3	52.7	0.0	0.7	12.7	13.4	104

表6 フェライト量算出に用いた材料成分表

部位	化学成分 (溶鋼分析) %								Cr_e/Ni_e	フェライト量 (%)
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	N		
ホットレグ直管									1.186	約 9.9
SG 入口 50° エルボ									1.192	約 10.2
クロスオーバーレグ RCP 側 90° エルボ									1.215	約 11.1
RV 入口 22° 57' エルボ									1.204	約 10.7
1次冷却材ポンプケーシング									1.249	約 12.7

※1 : Nb および N は製造時に規定が無く、測定していないが、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」で用いた供試体の化学成分を参考に同等の値とした。

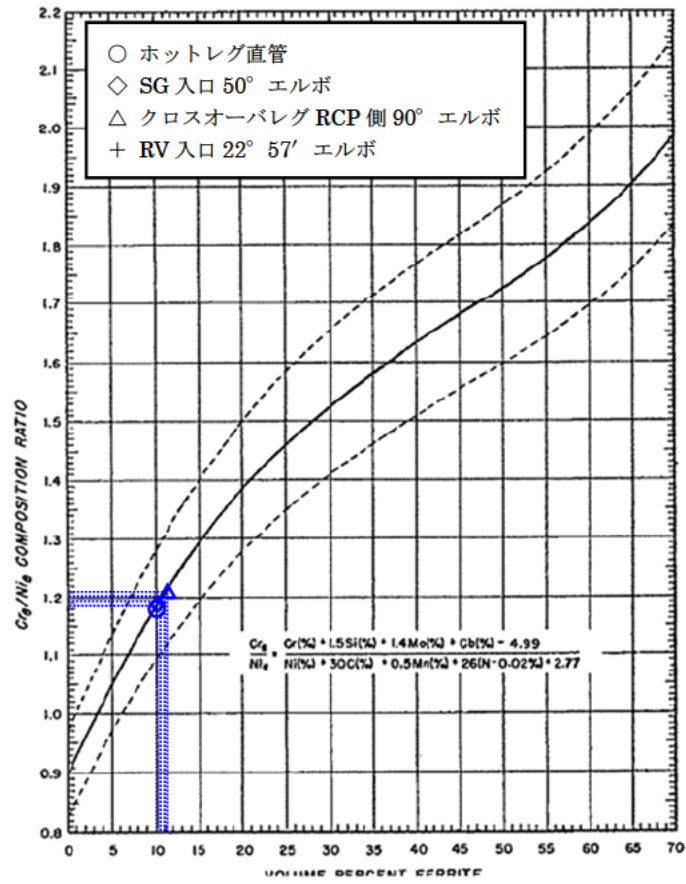


FIG. X1.1 Schofer Diagram for Estimating the Average Ferrite Content in Austenitic Iron-Chromium-Nickel Alloy Castings

図 4-1 1次冷却材管のフェライト量導出図

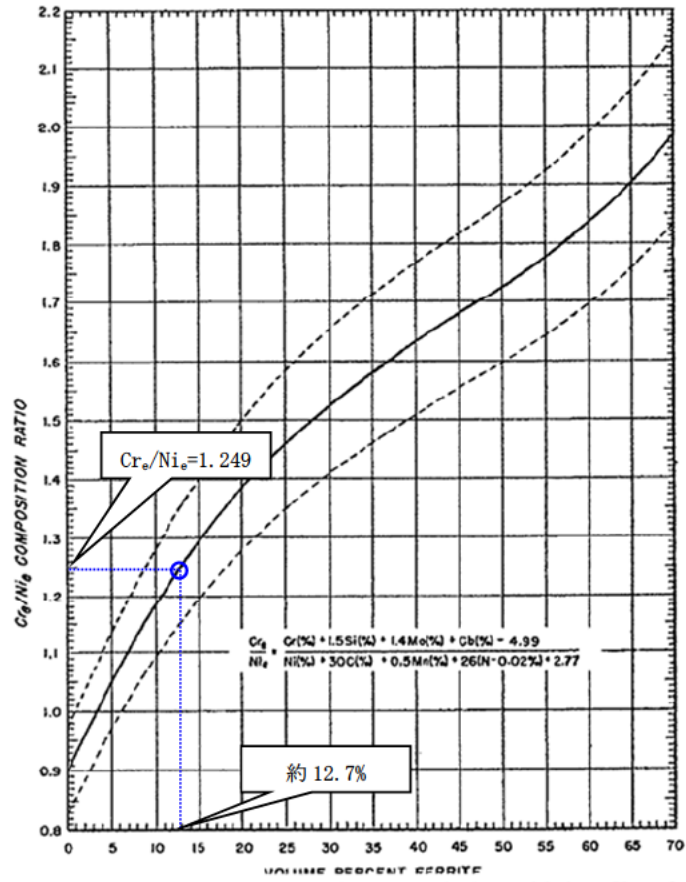


FIG. X1.1 Schofer Diagram for Estimating the Average Ferrite Content In Austenitic Iron-Chromium-Nickel Alloy Castings

図 4-2 1次冷却材ポンプケーシングのフェライト量導出図

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（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、最小破壊靱性 J (Δa) と比較して延性不安定破壊しないことを確認する。

2 相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。)

4. 代表機器の技術評価

4.1 健全性評価

(1) 評価用初期欠陥の想定

評価用初期欠陥の大きさは、「JEAG4613-1998」に準拠し、図5に示すように $0.2t$ (深さ a_0) \times $1.0t$ (表面長さ $2c_0$) (t は板厚) の半楕円形の内表面周方向欠陥とする。

なお、平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書(超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの)では、ステンレス鋼の疲労亀裂において検出率100%に達する最小欠陥深さは約 $0.18t$ であり、本評価で用いる「JEAG4613-1998」の値は保守的である。また、当該報告書の超音波探傷試験と現状保全における実機の1次冷却材管の超音波探傷試験は、同等の探触子と検査員資格で実施している。

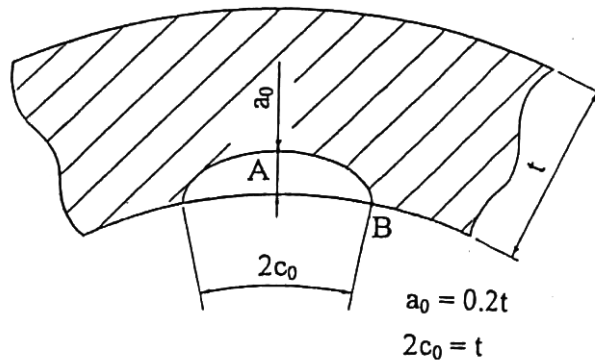


図5 初期欠陥の形状

(2) 疲労亀裂進展解析

a. 解析条件

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。

① 亀裂進展解析に用いる応力サイクル

使用する応力サイクルは実機運転状態を考慮し、実過渡条件に基づいて設定する。実過渡条件による応力サイクルを表 7. 1 から表 7. 4 に示す。

過渡回数は、2014 年度末までの実績過渡回数に基づき、運転開始から 60 年時点の過渡回数を予測したものであり、1 次冷却材管の低サイクル疲労評価で用いているものと同じである。(過渡回数の算出方法は、「大飯発電所 3 号炉 高経年化技術評価 (低サイクル疲労) 補足説明資料」を参照)

② 疲労亀裂進展速度

疲労亀裂進展速度は国内軽水炉条件下のデータに基づく以下の式を使用する。(「JEAG4613-1998」参照)

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

ここで、

da/dN ; 疲労亀裂進展速度 (m/cycle)

C ; 定数 = 7.77×10^{-12}

m ; 定数 = 3.5

ΔK ; 応力拡大係数変動幅 (MPa \sqrt{m})

K_{\max} 、 K_{\min} ; 最大および最小応力拡大係数 (MPa \sqrt{m})

ここではステンレス鑄造管に対する速度を使用している。また、時効の有無による亀裂進展速度の差異については、電力共通研究「PWR 配管破断防護設計の合理化に関する研究 (1 次冷却材管の破断想定除外) 1986 年度」において、有意な差がないことを確認している。

表7. 1 応力サイクル (ホットレグ直管)

過渡条件	過渡回数	膜応力 (MPa)	
		σ_{max} σ_{min}	σ_{bmax} σ_{bmin}
1. 起動・停止	74	129.32 9.98	71.93 -23.47
2. 負荷上昇 (15%から100%出力)	903	139.16 128.94	76.81 44.76
3. 負荷減少 (100%から15%出力)	894	139.09 128.79	75.82 44.17
4. 90%から100%へのステップ状負荷上昇	4	139.23 136.68	55.18 45.96
5. 100%から90%へのステップ状負荷減少	4	139.19 135.87	55.77 45.22
6. 100%からの大きいステップ状負荷減少	9	141.45 125.92	80.66 36.53
7. 定常負荷運転時の変動	0	139.79 136.97	51.14 43.18
8. 燃料交換	70	20.41 4.42	69.32 0.00
9. 0%から15%への負荷上昇	79	130.66 129.32	50.25 46.74
10. 15%から0%への負荷減少	68	130.66 129.32	54.16 46.74
11. 1ループ停止 / 1ループ起動 [停止]	2	138.73 123.04	124.35 37.39
12. 1ループ停止 / 1ループ起動 [起動]	2	130.97 128.59	59.62 46.20
13. 負荷の喪失	7	149.06 122.47	105.24 27.07
14. 外部電源喪失	5	144.63 133.20	56.32 39.86
15. 1次冷却材流量の部分喪失	2	139.33 119.94	125.64 37.96
16. 100%からの原子炉トリップ (I) 不注意な冷却を伴わないトリップ	8	138.23 121.09	118.30 39.82
17. 100%からの原子炉トリップ (II) 不注意な冷却を伴うトリップ	2	138.23 114.57	137.44 36.12
18. 100%からの原子炉トリップ (III) 不注意な冷却とSIを伴うトリップ	2	138.23 97.37	181.83 34.27
19. 1次冷却系の異常な減圧	2	138.23 79.91	163.81 12.25
20. 制御棒クラスタの落下	3	138.23 109.67	147.32 32.51
21. 出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	2	138.23 111.67	139.34 40.52
22. 1次冷却系停止ループの誤起動	2	141.62 119.19	112.42 -11.23
23. タービン回転試験	5	129.32 110.19	82.13 39.85
24. 1次系漏えい試験	63	111.20 14.47	76.99 -23.19
25. 1/3Sd地震	360	144.96 131.50	46.74 46.74

表7. 2 応力サイクル (SG 入口 50° エルボ)

過渡条件	過渡回数	膜応力 (MPa)		曲げ応力 (MPa)	
		σ_{mmax}	σ_{mmin}	σ_{bmax}	σ_{bmin}
1. 起動・停止	74	132.37	5.60	110.36	-34.64
2. 負荷上昇 (15%から100%出力)	903	143.16	132.13	109.23	69.86
3. 負荷減少 (100%から15%出力)	894	143.07	131.95	108.66	69.33
4. 90%から100%へのステップ状負荷上昇	4	143.22	140.55	81.71	71.66
5. 100%から90%へのステップ状負荷減少	4	143.16	139.71	82.44	70.62
6. 100%からの大きいステップ状負荷減少	9	145.53	129.03	111.72	60.63
7. 定常負荷運転時の変動	0	143.79	140.90	77.69	68.68
8. 燃料交換	70	17.13	0.62	75.59	0.00
9. 0%から15%への負荷上昇	79	133.85	132.37	77.30	72.75
10. 15%から0%への負荷減少	68	133.85	132.37	80.69	72.75
11. 1 ループ停止 / 1 ループ起動 [停止]	2	142.63	125.62	150.81	63.03
12. 1 ループ停止 / 1 ループ起動 [起動]	2	134.13	131.57	85.87	72.20
13. 負荷の喪失	7	153.33	125.69	134.39	49.39
14. 外部電源喪失	5	148.66	137.02	85.50	64.02
15. 1 次冷却材流量の部分喪失	2	143.36	122.77	150.86	60.23
16. 100%からの原子炉トリップ (I) 不注意な冷却を伴わないトリップ	8	142.19	124.01	144.74	61.99
17. 100%からの原子炉トリップ (II) 不注意な冷却を伴うトリップ	2	142.19	117.21	163.27	56.23
18. 100%からの原子炉トリップ (III) 不注意な冷却とSIを伴うトリップ	2	142.19	98.44	227.54	53.35
19. 1 次冷却系の異常な減圧	2	142.19	81.47	204.75	19.07
20. 制御棒クラスタの落下	3	142.19	112.18	174.17	50.61
21. 出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	2	142.19	113.56	180.25	63.07
22. 1 次冷却系停止ループの誤起動	2	145.54	121.77	139.54	15.79
23. タービン回転試験	5	132.37	112.00	118.29	62.03
24. 1 次系漏えい試験	63	111.85	10.57	117.94	-34.13
25. 1/3Sd地震	360	156.13	128.29	72.75	72.75

表7. 3 応力サイクル (クロスオーバーレグ RCP 側 90° エルボ)

過渡条件	過渡回数	膜応力 (MPa)		曲げ応力 (MPa)	
		σ_{mmax}	σ_{mmin}	σ_{bmax}	σ_{bmin}
1. 起動・停止	74	53.92	3.70	114.72	-44.15
2. 負荷上昇 (15%から100%出力)	903	54.59	52.19	74.59	58.08
3. 負荷減少 (100%から15%出力)	894	54.64	52.31	71.15	59.08
4. 90%から100%へのステップ状負荷上昇	4	54.67	53.25	71.56	61.93
5. 100%から90%へのステップ状負荷減少	4	54.81	52.72	71.52	60.35
6. 100%からの大きいステップ状負荷減少	9	56.12	50.04	80.73	59.81
7. 定常負荷運転時の変動	0	55.11	52.98	72.02	59.38
8. 燃料交換	70	4.21	3.43	75.21	0.00
9. 0%から15%への負荷上昇	79	53.92	53.92	65.56	65.19
10. 15%から0%への負荷減少	68	53.92	53.92	65.82	65.19
11. 1ループ停止 / 1ループ起動 [停止]	2	55.02	52.29	71.46	60.69
12. 1ループ停止 / 1ループ起動 [起動]	2	54.50	53.89	67.53	63.95
13. 負荷の喪失	7	61.99	45.50	99.43	53.47
14. 外部電源喪失	5	60.12	50.32	105.67	59.76
15. 1次冷却材流量の部分喪失	2	54.43	46.78	71.12	51.89
16. 100%からの原子炉トリップ (I) 不注意な冷却を伴わないトリップ	8	53.92	46.96	67.80	53.84
17. 100%からの原子炉トリップ (II) 不注意な冷却を伴うトリップ	2	53.93	43.06	89.36	48.00
18. 100%からの原子炉トリップ (III) 不注意な冷却とSIを伴うトリップ	2	53.94	40.50	178.00	44.80
19. 1次冷却系の異常な減圧	2	53.89	18.76	147.28	17.09
20. 制御棒クラスタの落下	3	53.89	39.45	95.83	45.35
21. 出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	2	53.92	47.17	127.30	55.00
22. 1次冷却系停止ループの誤起動	2	57.75	48.26	81.25	55.40
23. タービン回転試験	5	53.92	46.45	113.44	55.58
24. 1次系漏えい試験	63	58.09	3.92	119.34	-43.46
25. 1/3Sd地震	360	56.40	51.86	65.19	65.19

表7. 4 応力サイクル (RV 入口 22° 57' エルボ)

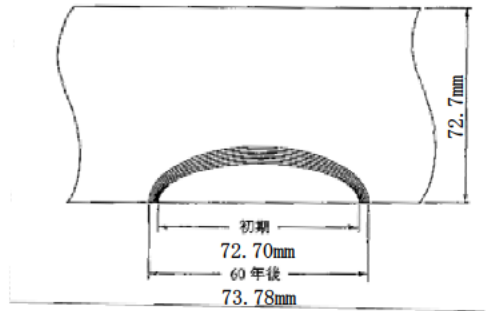
過渡条件	過渡回数	膜応力 (MPa)		曲げ応力 (MPa)	
		σ_{max}	σ_{min}	σ_{bmax}	σ_{bmin}
1. 起動・停止	74	76.80	2.67	70.70	-25.53
2. 負荷上昇 (15%から100%出力)	903	77.38	74.68	52.28	35.51
3. 負荷減少 (100%から15%出力)	894	77.63	75.03	48.84	36.90
4. 90%から100%へのステップ状負荷上昇	4	77.38	75.61	49.43	40.00
5. 100%から90%へのステップ状負荷減少	4	77.69	75.27	49.28	38.68
6. 100%からの大きいステップ状負荷減少	9	79.40	72.95	58.29	39.30
7. 定常負荷運転時の変動	0	77.88	75.43	49.76	37.80
8. 燃料交換	70	7.12	0.29	74.96	0.00
9. 0%から15%への負荷上昇	79	76.80	76.76	43.53	43.23
10. 15%から0%への負荷減少	68	76.80	76.76	43.84	43.23
11. 1ループ停止 / 1ループ起動 [停止]	2	77.81	74.79	49.01	39.36
12. 1ループ停止 / 1ループ起動 [起動]	2	77.33	76.49	45.39	41.94
13. 負荷の喪失	7	86.01	68.74	74.98	35.46
14. 外部電源喪失	5	86.20	73.21	73.41	38.63
15. 1次冷却材流量の部分喪失	2	77.46	69.56	49.18	33.07
16. 100%からの原子炉トリップ (I) 不注意な冷却を伴わないトリップ	8	76.77	69.89	45.93	35.04
17. 100%からの原子炉トリップ (II) 不注意な冷却を伴うトリップ	2	76.87	64.71	68.49	30.89
18. 100%からの原子炉トリップ (III) 不注意な冷却とSIを伴うトリップ	2	76.90	56.79	147.71	28.54
19. 1次冷却系の異常な減圧	2	76.52	38.67	120.23	11.33
20. 制御棒クラスタの落下	3	76.52	61.37	74.07	30.07
21. 出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	2	76.72	66.30	101.16	35.88
22. 1次冷却系停止ループの誤起動	2	80.15	69.69	58.06	35.88
23. タービン回転試験	5	76.80	65.23	81.11	36.86
24. 1次系漏えい試験	63	71.75	4.59	75.31	-25.23
25. 1/3Sd地震	360	78.50	75.36	43.23	43.23

b. 解析結果

疲労亀裂進展解析結果は、表8. 1から表8. 4に示すとおりである。

表8. 1 疲労亀裂進展解析結果（ホットレグ直管）

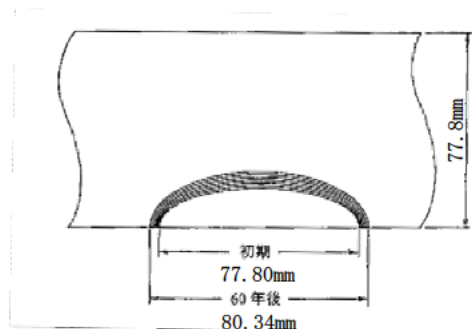
	亀裂深さ (mm)	亀裂長さ (mm)	備考
初期	$a_0 = 14.54$	$2c_0 = 72.70$	—
60年後	$a = 16.08$	$2c = 73.78$	$\Delta a = 1.54 \text{ mm}$ $2\Delta c = 1.08 \text{ mm}$



※配管外径は
882.0 mm

表8. 2 疲労亀裂進展解析結果（SG入口50°エルボ）

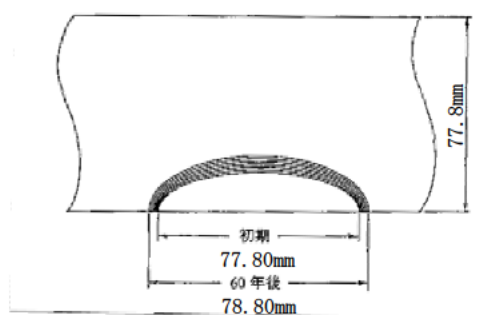
	亀裂深さ (mm)	亀裂長さ (mm)	備考
初期	$a_0 = 15.56$	$2c_0 = 77.80$	—
60年後	$a = 17.58$	$2c = 80.34$	$\Delta a = 2.02 \text{ mm}$ $2\Delta c = 2.54 \text{ mm}$



※配管外径は
943.0mm

表 8. 3 疲労亀裂進展解析結果 (クロスオーバーレグ RCP 側 90° エルボ)

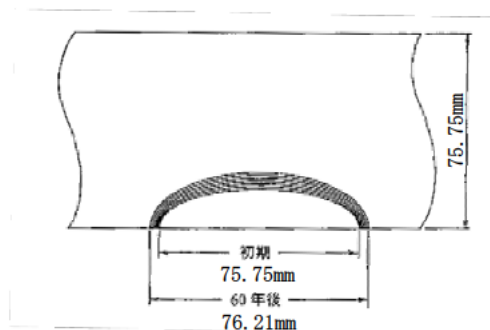
	亀裂深さ (mm)	亀裂長さ (mm)	備考
初期	$a_0 = 15.56$	$2c_0 = 77.80$	—
60 年後	$a = 16.61$	$2c = 78.80$	$\Delta a = 1.05 \text{ mm}$ $2 \Delta c = 1.00 \text{ mm}$



※配管外径は
943.0mm

表 8. 4 疲労亀裂進展解析結果 (RV 入口 22° 57' エルボ)

	亀裂深さ (mm)	亀裂長さ (mm)	備考
初期	$a_0 = 15.15$	$2c_0 = 75.75$	—
60 年後	$a = 15.68$	$2c = 76.21$	$\Delta a = 0.53 \text{ mm}$ $2 \Delta c = 0.46 \text{ mm}$



※配管外径は
850.0mm

(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。(図6参照)

亀裂安定性評価に用いる想定亀裂を表9に示す。

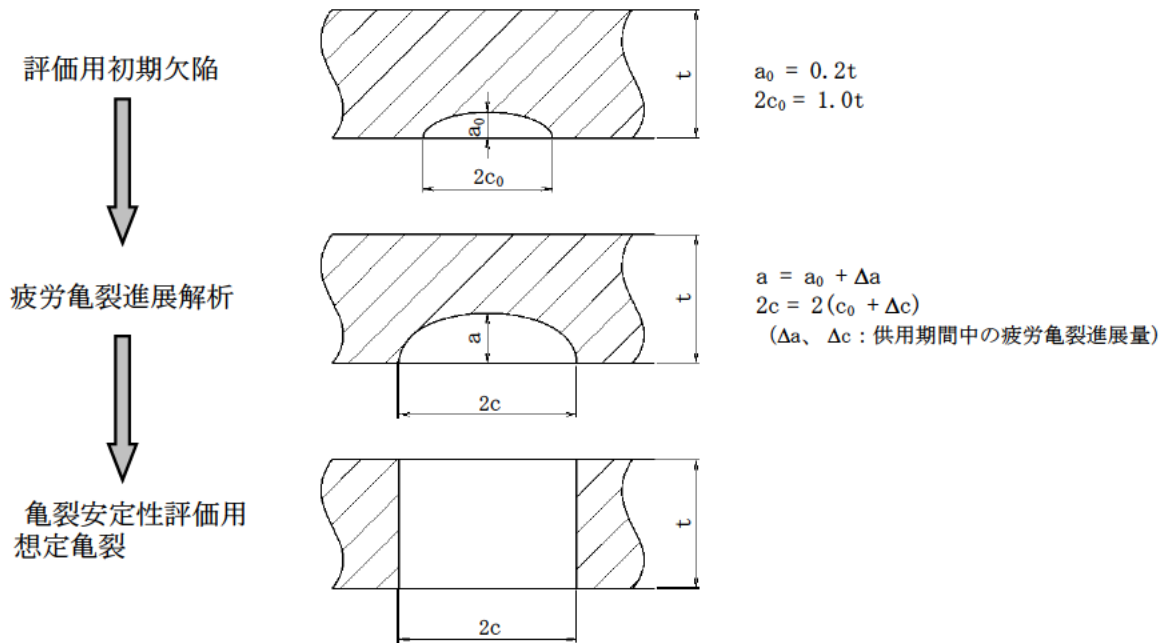


図6 想定亀裂置換えイメージ

表9 亀裂安定性評価用想定亀裂

	亀裂長さ (mm)	厚さ (mm)
ホットレグ直管	2c=73.78	t=72.70
SG 入口 50° エルボ	2c=80.34	t=77.80
クロスオーバレグ RCP 側 90° エルボ	2c=78.80	t=77.80
RV 入口 22° 57' エルボ	2c=76.21	t=75.75

(4) 亀裂安定性評価

a. 評価方法

自重+SA 熱膨張+SA 圧力+S s 地震動の荷重により想定亀裂に生じる亀裂進展力を評価し、最小破壊靱性 $J(\Delta a)$ と比較して延性不安定破壊しないことを確認する。

具体的には、各供用状態の荷重から算出される亀裂進展力を示すパラメータ J 積分値 J_{app} と熱時効後の破壊抵抗値 J_{mat} を用いて評価を行う。

b. 亀裂進展力 (J_{app})

亀裂進展力 (J_{app}) は、評価部位の荷重と亀裂長さが板厚の 1 倍、3 倍、5 倍の貫通亀裂長さを用いて有限要素法により算出する。

算出の結果、亀裂長さが 1 倍、3 倍、5 倍の時の亀裂進展力 (J_{app}) は表 10 の通りとなる。

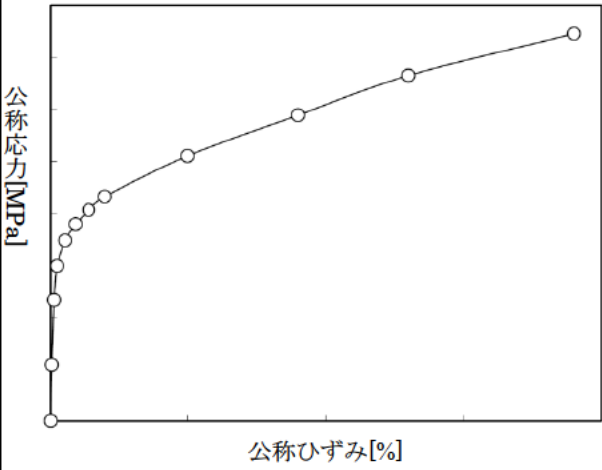
評価条件は表 11 の通りで、配管に負荷される荷重は、自重+SA 熱膨張+SA 圧力+S s 地震動とする。

なお、亀裂進展力 (J_{app}) 評価に伴う有限要素法に用いた解析コードは「Abaqus Ver. 6. 12-3」である。当該コードは理論値 (EPRI (「Ductile Fracture Handbook」 EPRI NP-6301-D) の簡易 J 積分値) と FEM で算出した J 積分値が同等となることを確認している。使用コードの中での裕度は考慮していないが、解析条件に保守性を持たせる (非時効材 (フェライト量約 10%) の応力-ひずみ線図を使用し、また、亀裂形状を貫通亀裂と想定している) ことで評価の保守性を担保している。

表 10 亀裂長さにおける J_{app} 値 [kJ/m²]

亀裂長さ	1t	3t	5t
ホットレグ直管	113	560	1670
SG 入口 50° エルボ	215	684	1422
クロスオーバーレグ RCP 側 90° エルボ	7	30	72
RV 入口 22° 57' エルボ	17	79	217

表 11. 1 評価条件 (1 / 4)

ホットレグ直管																																																									
形状																																																									
内径 [mm]	736.6																																																								
外径 [mm]	882.0																																																								
亀裂形状	周方向貫通亀裂 (亀裂長さ: 1t、3t、5t の 3 種類)																																																								
荷重																																																									
内圧 (注) [MPa]	19.3																																																								
軸力 [kN]	自重		熱		地震		合計																																																		
	-8		191		913		1,112																																																		
曲げモーメント [kN・m]	自重		熱		地震		合計																																																		
	My	Mz	My	Mz	My	Mz																																																			
	-345	8	-3,147	427	1,378	267	4,921																																																		
物性値																																																									
ヤング率 [MPa]	E=174,000																																																								
ポアソン比	$\nu=0.3$ (弾性域)、 $\nu=0.5$ (塑性域)																																																								
応力-ひずみ関係	フェライト量が低い非時効材の応力-ひずみ線図を用いる。本評価データは電力共通研究「1次冷却材管の時効劣化に関する研究 (STEP I) 1989 年度」で得られた知見を参考としている。J _{app} 値は応力-ひずみ線図の下部の面積に比例するため、強度が低い非時効材を用いることはより安全側の評価となる。																																																								
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>ひずみ [%]</th> <th>応力 [MPa]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>		ひずみ [%]	応力 [MPa]											<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">非時効材のフェライト量</th> <th rowspan="2">Cre/Nie</th> <th rowspan="2">フェライト量 (F%)</th> </tr> <tr> <th colspan="8">化学成分 (%)</th> </tr> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>Cb (Nb)</th> <th>N</th> <th> </th> <th> </th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>				非時効材のフェライト量								Cre/Nie	フェライト量 (F%)	化学成分 (%)								C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N												
ひずみ [%]	応力 [MPa]																																																								
非時効材のフェライト量								Cre/Nie	フェライト量 (F%)																																																
化学成分 (%)																																																									
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N																																																		

(注) 評価用圧力は、SA 条件の圧力とする。

表 11. 2 評価条件 (2 / 4)

SG 入口 50° エルボ																																																	
形状																																																	
内径 [mm]	787.4																																																
外径 [mm]	943.0																																																
亀裂形状	周方向貫通亀裂 (亀裂長さ: 1t、3t、5t の 3 種類)																																																
荷重																																																	
内圧 (注) [MPa]	19.3																																																
軸力 [kN]	自重	熱	地震	合計																																													
	6	868	673	1,547																																													
曲げモーメント [kN・m]	自重		熱		地震		合計																																										
	My	Mz	My	Mz	My	Mz																																											
	115	5	2,080	69	1,725	224	3,932																																										
物性値																																																	
ヤング率 [MPa]	E=174,000																																																
ポアソン比	$\nu=0.3$ (弾性域)、 $\nu=0.5$ (塑性域)																																																
応力-ひずみ関係	フェライト量が低い非時効材の応力-ひずみ線図を用いる。本評価データは電力共通研究「1次冷却材管の時効劣化に関する研究 (STEP I) 1989 年度」で得られた知見を参考にしている。J _{app} 値は応力-ひずみ線図の下部の面積に比例するため、強度が低い非時効材を用いることはより安全側の評価となる。																																																
	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="flex: 1;"> </div> <div style="flex: 0.2; border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 0 5px;"> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <th>ひずみ [%]</th> <th>応力 [MPa]</th> </tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </table> </div> <div style="flex: 2;"> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="8">非時効材のフェライト量</th> <th rowspan="2">Cre/Nie</th> <th rowspan="2">フェライト量 (F%)</th> </tr> <tr> <th colspan="8">化学成分 (%)</th> </tr> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>Cb (Nb)</th> <th>N</th> <th> </th> <th> </th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td> </tr> </tbody> </table> </div> </div>	ひずみ [%]	応力 [MPa]									非時効材のフェライト量								Cre/Nie	フェライト量 (F%)	化学成分 (%)								C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N												
ひずみ [%]	応力 [MPa]																																																
非時効材のフェライト量								Cre/Nie	フェライト量 (F%)																																								
化学成分 (%)																																																	
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N																																										

(注) 評価用圧力は、SA 条件の圧力とする。

表 11.3 評価条件 (3/4)

クロスオーバーレグ RCP 側 90°エルボ																																																								
形状																																																								
内径 [mm]	787.4																																																							
外径 [mm]	943.0																																																							
亀裂形状	周方向貫通亀裂 (亀裂長さ: 1t、3t、5t の 3 種類)																																																							
荷重																																																								
内圧 (注) [MPa]	19.3																																																							
軸力 [kN]	自重		熱		地震		合計																																																	
	154		211		307		672																																																	
曲げモーメント [kN・m]	自重		熱		地震		合計																																																	
	My	Mz	My	Mz	My	Mz																																																		
	156	14	189	4	617	733	1,221																																																	
物性値																																																								
ヤング率 [MPa]	E=174,000																																																							
ポアソン比	ν=0.3 (弾性域)、ν=0.5 (塑性域)																																																							
応力-ひずみ関係	<p>フェライト量が低い非時効材の応力-ひずみ線図を用いる。本評価データは電力共通研究「1次冷却材管の時効劣化に関する研究 (STEP I) 1989 年度」で得られた知見を参考としている。J_{app} 値は応力-ひずみ線図の下部の面積に比例するため、強度が低い非時効材を用いることはより安全側の評価となる。</p>																																																							
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>ひずみ [%]</th> <th>応力 [MPa]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>		ひずみ [%]	応力 [MPa]																			<p style="text-align: center;">非時効材のフェライト量</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">化学成分 (%)</th> <th rowspan="2">Cre/Nie</th> <th rowspan="2">フェライト量 (F%)</th> </tr> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>Cb (Nb)</th> <th>N</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>				化学成分 (%)								Cre/Nie	フェライト量 (F%)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N										
ひずみ [%]	応力 [MPa]																																																							
化学成分 (%)								Cre/Nie	フェライト量 (F%)																																															
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N																																																	

(注) 評価用圧力は、SA 条件の圧力とする。

表 11. 4 評価条件 (4 / 4)

RV 入口 22° 57' エルボ																																																	
形状																																																	
内径 [mm]	698.5																																																
外径 [mm]	850.0																																																
亀裂形状	周方向貫通亀裂 (亀裂長さ: 1t、3t、5t の 3 種類)																																																
荷重																																																	
内圧 (注) [MPa]	19.3																																																
軸力 [kN]	自重		熱		地震		合計																																										
	4		173		2,326		2,503																																										
曲げモーメント [kN・m]	自重		熱		地震		合計																																										
	My	Mz	My	Mz	My	Mz																																											
	87	11	1,276	115	270	970	1,967																																										
物性値																																																	
ヤング率 [MPa]	E=174,000																																																
ポアソン比	$\nu=0.3$ (弾性域)、 $\nu=0.5$ (塑性域)																																																
応力-ひずみ関係	<p>フェライト量が低い非時効材の応力-ひずみ線図を用いる。本評価データは電力共通研究「1次冷却材管の時効劣化に関する研究 (STEP I) 1989 年度」で得られた知見を参考としている。J_{app} 値は応力-ひずみ線図の下部の面積に比例するため、強度が低い非時効材を用いることはより安全側の評価となる。</p> <div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="flex: 1;"> </div> <div style="flex: 0.2; border: 1px solid black; padding: 2px;"> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="font-size: small;">ひずみ [%]</th> <th style="font-size: small;">応力 [MPa]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> </div> <div style="flex: 2; margin-left: 10px;"> <p style="text-align: center; font-weight: bold;">非時効材のフェライト量</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="8">化学成分 (%)</th> <th rowspan="2">Cre/Nie</th> <th rowspan="2">フェライト量 (F%)</th> </tr> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>Cb (Nb)</th> <th>N</th> </tr> </thead> <tbody> <tr style="height: 30px;"> <td colspan="10"> </td> </tr> </tbody> </table> </div> </div>							ひずみ [%]	応力 [MPa]													化学成分 (%)								Cre/Nie	フェライト量 (F%)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N										
ひずみ [%]	応力 [MPa]																																																
化学成分 (%)								Cre/Nie	フェライト量 (F%)																																								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N																																										

(注) 評価用圧力は、SA 条件の圧力とする。

c. 材料の亀裂進展抵抗 (J_{mat})

亀裂進展抵抗 (J_{mat}) は、「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した（算出方法は「S. Kawaguchi et. al.、” Prediction Method of Tensile Properties and Fracture Toughness of Thermally Aged Cast Duplex Stainless Steel Piping”、ASME PVP2005-71528」参照）。 J_{Ic} および J_6 はデータの下限值 (-2σ) を用いて算出しており、その結果は表 1 2 の通りである。なお、「H3T モデル」は「ASTM A800」にて算出したフェライト量と破壊靱性値実測データを関連付けた予測式であることから、表 6 の「ASTM A800」により算出したフェライト量を用いた。また、「NUREG/CR-4513R2」でも亀裂進展抵抗を算出する式が提唱されているが、「NUREG/CR-4513R2」の算出式による J_{mat} を参照しても次項に示す亀裂安定性評価結果は変わらないことを確認した。

なお、ホットレグ直管については、1 次冷却材ポンプケーシングのフェライト量を用いた亀裂進展抵抗による評価を実施するため、1 次冷却材ポンプケーシングのフェライト量を用いた場合の破壊靱性値も表 1 2 に示す。

表 1 2 破壊靱性値

	ホットレグ直管	ホットレグ直管 (1 次冷却材ポンプケーシング のフェライト量 を用いた場合)	SG 入口 50° エルボ	クロス オーバレグ RCP 側 90° エルボ	RV 入口 22° 57' エルボ
J_{Ic} [kJ/m ²]	185	132	179	159	168
J_6 [kJ/m ²]	767	563	746	669	705

d. 亀裂安定性評価結果

b. および c. で求めたホットレグ直管での亀裂進展力 (J_{app}) と亀裂進展抵抗 (J_{mat}) の比較を行った結果を図 7 に示す。

その結果、運転開始後 60 年時点までの疲労亀裂進展長さを考慮した評価用亀裂を想定しても、亀裂進展抵抗 (J_{mat}) と亀裂進展力 (J_{app}) の交点においては、亀裂進展抵抗 (J_{mat}) の傾きが亀裂進展力 (J_{app}) の傾きを上回ることから、配管は不安定破壊することはないと判断する。

また、1 次冷却材ポンプケーシングのフェライト量を用いた亀裂進展抵抗 (J_{mat}) との比較を行った結果を図 8 に示す。

その結果、ホットレグ直管と同様に亀裂進展抵抗 (J_{mat}) と亀裂進展力 (J_{app}) の交点においては、亀裂進展抵抗 (J_{mat}) の傾きが亀裂進展力 (J_{app}) の傾きを上

回ることから、配管は不安定破壊することはない、健全性評価上問題とならないと判断する。

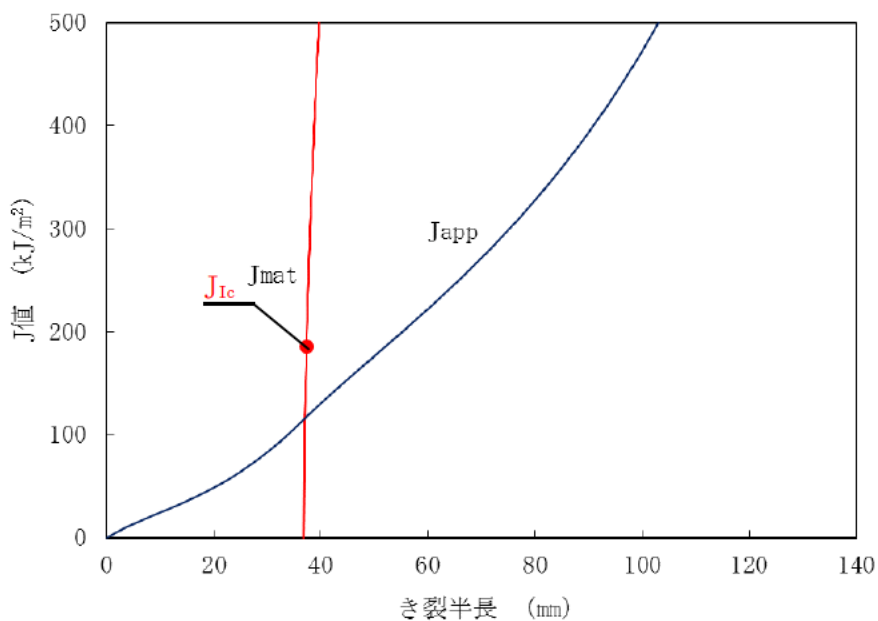


図7 ホットレグ直管の亀裂安定性評価線図

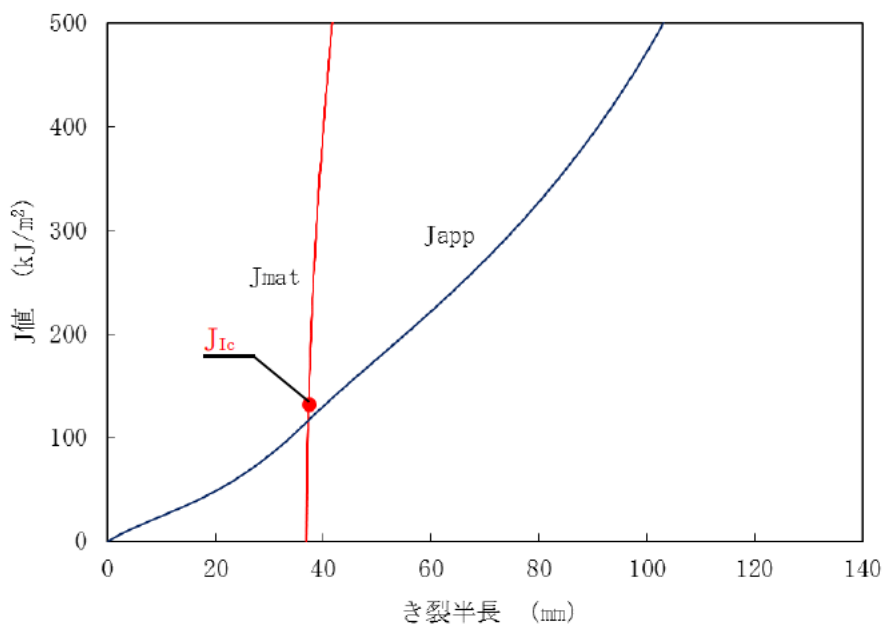


図8 ホットレグ直管（1次冷却材ポンプケーシングのフェライト量を用いた場合）の亀裂安定性評価線図

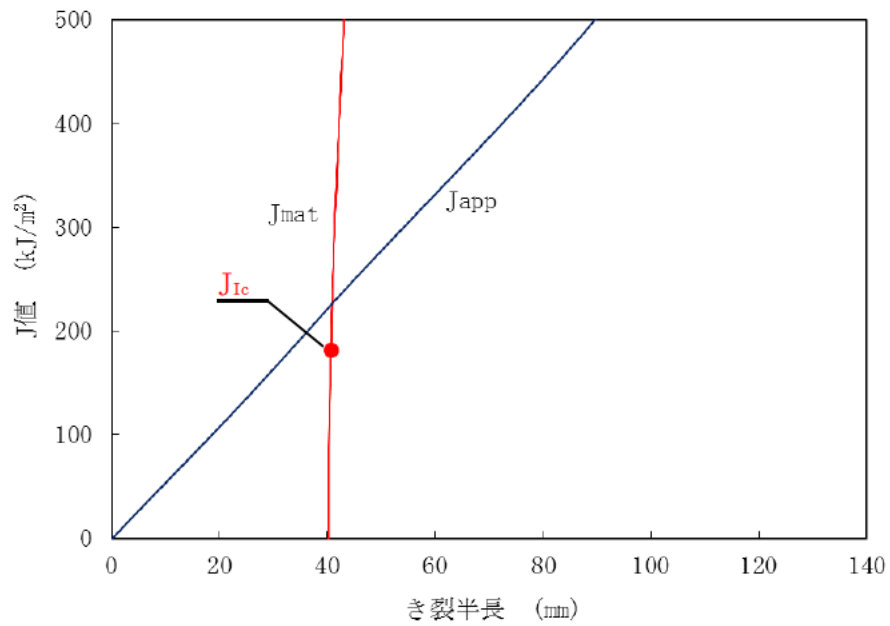


図 9 SG 入口 50° エルボの亀裂安定性評価線図

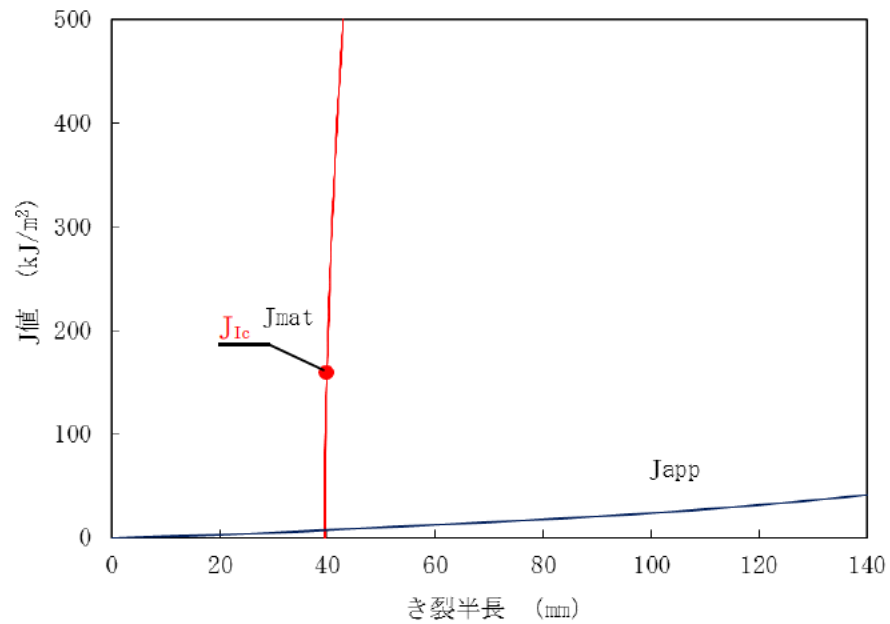


図 10 クロスオーバーレグ RCP 側 90° エルボの亀裂安定性評価線図

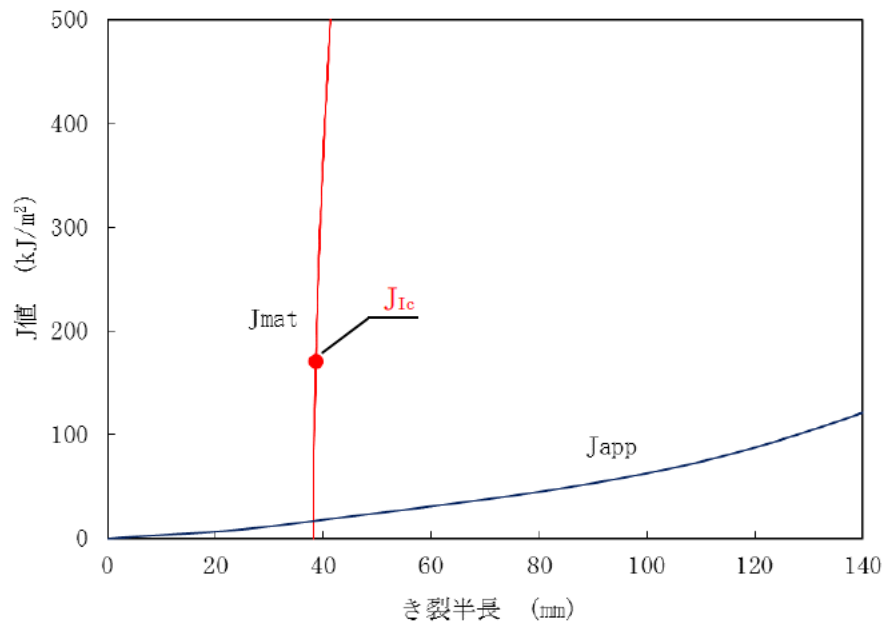


図 1.1 RV 入口 22° 57' エルボの亀裂安定性評価線図

4.2 現状保全

1 次冷却材管の製造時の検査内容および現状保全の内容を以下に示す。

(1) 製造時の検査内容、判定基準および判定結果

1 次冷却材管の製造時には、母材および溶接部に対し放射線透過試験および浸透探傷試験を実施しており、有意な欠陥のないことを確認している。

- ・ 1 次冷却材管の母材
 検査内容：放射線透過試験、浸透探傷試験
 判定基準：通商産業省告示第 501 号
 判定結果：良
- ・ 1 次冷却材管の溶接部
 検査内容：放射線透過試験、浸透探傷試験
 判定基準：通商産業省令第 81 号
 判定結果：良

(2) 現状保全の点検方法、判定基準および検査結果

1 次冷却材管の現状保全としては、「日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1)」に基づき超音波探傷検査および漏えい検査を実施している。現在までの検査で異常の無いことを確認している。至近の検査結果を以下に示す。

- ・ 1 次冷却材管の溶接部 (至近点検実施時期：第 17 回定期検査)
 点検方法：超音波探傷検査 (供用期間中検査)
 判定基準：維持規格 (JSME S NA1 2008)
 検査結果：良

- ・ 1次冷却材管全体（至近点検実施時期：第17回定期検査）
点検方法：漏えい検査（供用期間中検査）
判定基準：維持規格（JSME S NA1 2008）
検査結果：良

4.3 総合評価

運転開始後60年時点を想定した1次冷却材管の健全性評価を実施した結果、不安定破壊することはない、熱時効が構造健全性で問題となる可能性はない。

また、現在実施している溶接部の超音波探傷検査は内面からの割れを検知可能であり、また、割れが発生するとすれば応力の観点から溶接部であると判断されることから、点検手法として適切である。

4.4 高経年化への対応

1次冷却材管の熱時効については、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する。

5. 代表機器以外の技術評価

熱時効による靱性低下への影響はフェライト量が多いほど大きく、また、破壊評価は応力が大きいほど厳しくなる。代表機器以外の技術評価については、熱時効の代表評価機器である1次冷却材管のフェライト量に包絡されていないものもあるが、いずれも発生応力は包絡されており、また、製造時の非破壊検査で有意な欠陥がないことを確認するとともに、亀裂（疲労割れ）が想定される機器については疲労評価上の許容値を満足するため亀裂が発生する可能性は小さいことを確認している。したがって、代表機器以外についても問題ないと判断する。

別紙1に代表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を示す。また、別紙2に評価対象外機器の使用温度の根拠を示す。

6. まとめ

6.1 審査ガイド適合性

「2. 基本方針」で示した要求事項について技術評価を行った結果、すべての要求事項を満足していることを確認した。熱時効についての要求事項との対比表を表13に示す。

表13 2相ステンレス鋼の熱時効についての要求事項との対比

ガイド	要求事項	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) 長期保守管理方針の審査 ①長期保守管理方針の策定 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。	
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、必要に応じ現状の保守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。
	3.2 長期保守管理方針の策定及び変更 長期保守管理方針の策定及び変更に当たっては、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、保守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保守管理方針を策定すること。	

6.2 長期施設管理方針として策定する事項

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。

別紙

別紙 1. 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 2. 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 1

別紙 1. 代表評価機器以外の機器に対する製造時の検査内容及び現状保全の内容

熱時効評価対象機器のスクリーニングの結果、評価要となった代表評価機器以外の機器に関する製造時の検査内容及び現状保全の内容を下表に示す。

機種	機器	部位	製造時検査内容 判定基準：判定結果	現状保全内容 至近点検：点検結果
ポンプ	1次冷却材ポンプ	羽根車	・浸透探傷試験(全表面) ASTM E165-80：良	目視検査、浸透探傷検査 第17回定期検査：良
		ケーシング	・放射線透過試験(全体積) 告示第501号：良 ・浸透探傷試験(全表面) 告示第501号：良	目視検査(ケーシング内表面) 第17回定期検査(供用期間中検査)：良
仕切弁	余熱除去ポンプループ 高温側入口止め弁	弁箱	・放射線透過試験(全体積) 告示第501号：良 ・浸透探傷試験(全表面) 告示第501号：良 ・浸透探傷試験(機械加工面) 告示第501号：良	目視検査 第16回定期検査：異常無し (配管溶接部：超音波探傷検査 第16回定期検査(供用期間中検査)：良)
		弁蓋		
スイング逆止弁	蓄圧タンク注入ライン 第1逆止弁	弁箱	・浸透探傷試験(全表面) 告示第501号：良	目視検査 第16回定期検査：異常無し (配管溶接部：超音波探傷検査 第16回定期検査(供用期間中検査)：良)
機械設備	制御棒クラスタ	スパイダー ベーン フィンガ	外観検査 社内基準：合格	目視検査 第17回定期検査：良

別紙 2. 評価対象外機器の使用温度の根拠

熱時効評価対象機器のスクリーニングの結果、最高使用温度が 250℃以上であるが、使用温度が 250℃未満であることから評価不要とした下表の機器の根拠を示す。

機種	機器	部位	最高使用温度(℃)	使用温度(℃)
安全弁	加圧器安全弁	弁箱	約 360	100 以下
タービン設備	タービン動主給水ポンプタービン	車室、高圧ノズル室	約 298	約 200
機械設備	制御用空気圧縮装置	四方弁 (弁体、弁箱、弁蓋)	約 300	約 200

(1) 加圧器安全弁 弁箱

加圧器安全弁の弁箱が 100℃以下となる根拠を添付に示す。

(2) タービン動主給水ポンプタービン 車室、高圧ノズル室

通常運転時、駆動蒸気は低圧蒸気（高温再熱蒸気）を使用しており、車室、高圧ノズル室はタービン動主給水ポンプタービン調速段出口の条件（約 200℃）となる。よって、車室、高圧ノズル室の使用温度は 250℃未満であり評価対象外とした。

(3) 制御用空気圧縮装置 四方弁

制御用空気乾燥器の実機運転温度が約 200℃であることから、当該装置の四方弁の使用温度は 250℃未満であり評価対象外とした。

加圧器安全弁の弁箱の使用温度について

加圧器安全弁の弁箱材質はステンレス鋼鋳鋼を使用しているが、通常時の使用温度が100℃以下であるため、熱時効の評価対象外としている。

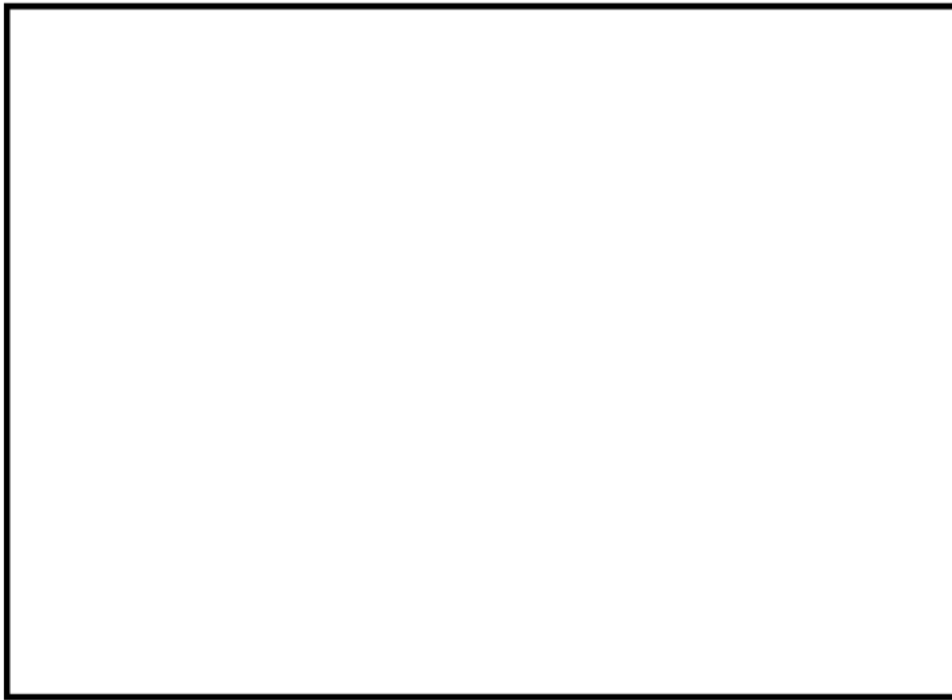
当該安全弁上流配管表面の温度は100℃以下（加圧器安全弁ループシール下部外表面最大値 ）であることが電力共通研究「加圧器安全弁におけるループシールの影響に関する研究 1986年度」で確認されている。当該電力共通研究における配管表面温度計測プラントの加圧器安全弁上流配管形状に対し、配管外面を100℃と仮定し、配管外面からの放熱を自然対流（当該部に保温がないため）、雰囲気温度を21℃（CV内温度の最低値）として保守的な熱計算を行うと配管内面温度は約100.6℃となる（付表1参照）。

大飯3号炉の加圧器安全弁上流配管は上記電力共通研究で用いられている配管と材質、長さ共に同等であり、同条件で熱計算を行った結果は100.6℃となる。

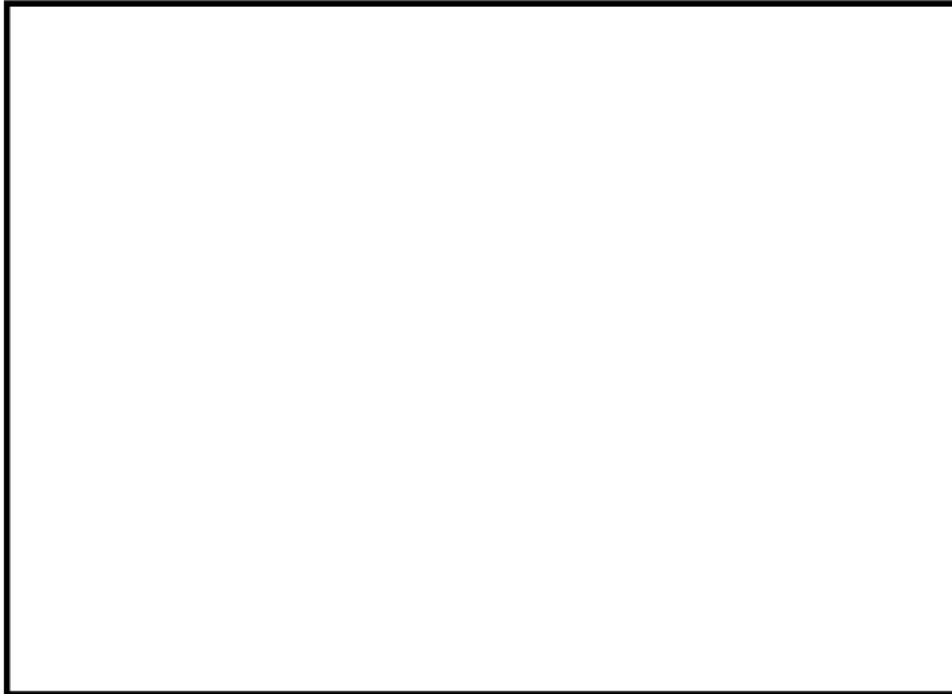
配管の温度は熱時効評価対象温度（250℃）に比べるとはるかに小さく、当配管よりも下流にある加圧器安全弁温度はさらに小さくなると考えられることから、熱時効評価対象としていない。

付表1 加圧器安全弁上流配管の内面温度算出

	配管表面温度計測プラント	大飯3号炉
配管外半径 (ro)	0.0826 m	0.0826 m
配管内半径 (ri)	0.0644 m	0.0644 m
配管材質	SUS304	SUS316
配管長さ		
配管熱伝導率 (λ)		
配管外面熱伝達率 (α)		
熱流束 (q)	$\alpha \times (100 - 21) \text{ W/m}^2$	$\alpha \times (100 - 21) \text{ W/m}^2$
配管内面温度 $= 21 + \frac{q}{\alpha} + \frac{q \times ro}{\lambda} \times \ln \left(\frac{ro}{ri} \right)$	100.6 °C	100.6 °C



付図1 電力共通研究「加圧器安全弁におけるループシールの影響に関する研究 1986年
度」配管表面温度計測プラントの加圧器安全弁上流配管形状



付図2 大飯3号炉 加圧器安全弁上流配管形状