

No.	高浜 2－熱時効－ 5 rev6	事象：2相ステンレス鋼の熱時効
質 問	<p>(別冊-5配管-4 1 次冷却材管-14, 15頁)</p> <p>母管の熱時効に係る健全性評価について、重大事故等時(原子炉停止機能喪失)におけるプラント条件(ピーク温度360℃、ピーク圧力18.5MPa)を考慮しても、配管は不安定破壊することはないとした考え方及び具体的根拠を提示すること。</p>	
回 答	<p>重大事故等時のプラント条件を考慮した 1 次冷却材管に係る健全性評価の具体的評価内容を添付－1 に示します。</p> <p>重大事故等時における健全性評価への入力条件としては、プラント条件が最も厳しくなるピーク温度360℃、ピーク圧力18.5MPaとしており、地震荷重はS s 地震動による荷重としております。当該の重大事故等時のプラント条件は高浜 2 号機 工事計画認可申請書(平成28年2月29日補正申請)に記載されております。</p> <p>なお、通常運転時の条件から温度、圧力が異なっておりますが、重大事故等時の条件においても従来評価方法が問題なく適用できると判断しており、評価結果として配管は不安定破壊することはないことを確認しております。</p> <p>添付－1 の評価は過去の電共研で得られたデータに基づき、き裂進展抵抗 (<math>J_{mat}</math>) とき裂進展力 (<math>J_{app}</math>) を算出していますが、材料データ採取時の試験温度と、重大事故等時のプラント条件の温度とは差があります。温度差を考慮しても健全性評価結果に影響がないことを添付－2 に示します。</p> <p>1 次冷却材ポンプ (ケーシング) については、重大事故等時における発生応力とフェライト量の比較でより厳しい条件となる 1 次冷却材管の評価に包絡されることを確認しており、重大事故等時における 1 次冷却材管の健全性を確認できたことで、1 次冷却材ポンプ (ケーシング) も健全であると確認しています。</p> <p>1 次冷却材ポンプ (ケーシング) の発生応力とフェライト量の 1 次冷却材管との比較を添付－3 に示します。</p>	

1. 代表点の抽出

重大事故等時の健全性を確認するにあたっては、評価対象部位の中で応力が最大であり、通常運転時の評価における評価点となっているホットレグ直管、エルボの曲率部で応力が大きく評価の厳しくなるSG出口40° エルボを代表点とする。

なお、重大事故等時の入力条件において応力最大部位に変更がないことを確認するため、通常運転時の応力が3番目に高いSG入口50° エルボについても重大事故等時の応力を算出し、評価部位における応力の大小関係に逆転が無いことを確認している。

評価部位	フェライト量 [%]	使用温度 [°C]	通常運転時 (参考) ※	重大事故等時※
			応力 [MPa]	応力 [MPa]
ホットレグ直管	約 12.3	322.8	約 173	約 183
SG入口50° エルボ	約 13.8	322.8	約 128	約 135
SG出口40° エルボ	約 11.9	288.6	約 155	約 161

※小数点第1位切り上げ

2. フェライト量の算出

フェライト量は、ミルシートの化学成分から、ASTM A800に基づき算出している。

評価部位	化学成分 (溶鋼分析) %								Cre/Nie (注1)	フェライト量 (注2)
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb(Nb)	N		F%
ホットレグ直管										約12.3
SG出口40° エルボ										約11.9

(注1) ASTM A800の7.1.2参照

(注2) ASTM A800のFig. X1.1参照

3. 評価用Jmatの決定

き裂進展抵抗値 (Jmat値) は、電共研で改良された脆化予測モデル (H3Tモデル: Hyperbolic-Time, Temperature Toughness) を用いて、評価部位のフェライト量を基に求める。

なお、重大事故等時の温度条件(360°C)と [ ] の温度条件で採取されたデータの下限值 (H3Tモデルの下限線) には温度条件に違いがあるが、過去に実施した破壊靱性試験の結果 (添付 - 2 参照) から [ ] のJmat値と [ ] のJmat値に大きな差が認められず、それぞれのJmat値はH3Tモデルの下限線以上であることから、360°CのJmat値をH3Tモデルの下限線として想定する現在の評価は重大事故時の条件においても適用でき、妥当であると判断している。

JmatのJ<sub>1c</sub>、J<sub>6</sub>の値は以下のとおりである。

き裂進展抵抗 (Jmat)	J <sub>1c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>6</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
ホットレグ直管		
SG出口40° エルボ		

4. 評価部位の応力

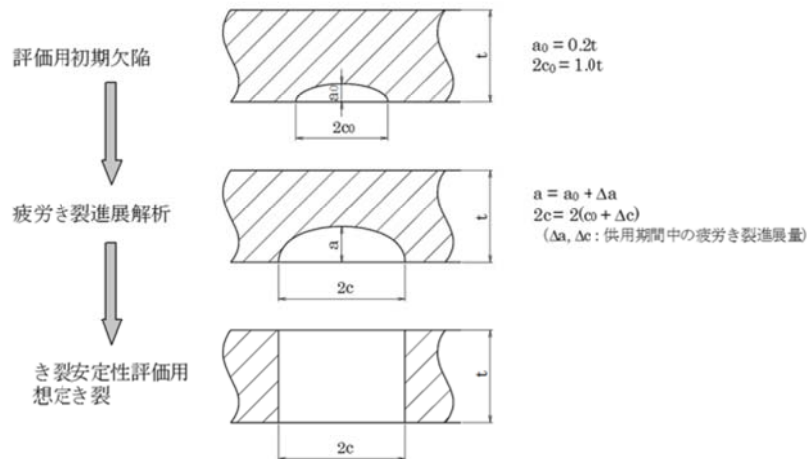
重大事故等時の内圧、自重、熱膨張及び地震荷重(Ss地震動)を考慮した応力値を示す。

評価部位	評価条件	内圧による 応力 (MPa)	曲げ応力				軸力による応力				合算値 (MPa) (小数点第1位 切り上げ)
			自重 (%)	熱 (%)	地震 (Ss) (%)	合計 (MPa)	自重 (%)	熱 (%)	地震 (Ss) (%)	合計 (MPa)	
ホットレグ 直管	重大事故等時										約183
	通常運転時 (参考)										約173
SG出口40° エルボ	重大事故等時										約161
	通常運転時 (参考)										約155

5. Jappの決定

(1) 評価用き裂

き裂安定性評価を保守的に行うために評価用き裂を貫通き裂とする。



評価部位	内径(mm)	初期き裂(mm)	き裂進展解析(mm)	評価用き裂(mm)
ホットレグ 直管				
SG出口40° エルボ				

(2) FEM解析

評価用き裂と表 1 に示す評価条件を入力条件として、FEM (有限要素法) 解析により、き裂進展力 (Japp値) を求める。

Jappの算出には、作用荷重 (Ss地震動による荷重を含む) と材料物性 (応力-ひずみ関係) を使用する。また、材料物性 (応力-ひずみ関係) には、通常運転時の評価では、保守的な条件としてフェライト量が小さく、時効していない材料の応力-ひずみ関係を使用しているが、重大事故時等条件を考慮した評価においても同じものを使用している。重大事故時等条件 (360°C) を考慮した場合の応力-ひずみ関係はフェライト量、温度条件、時効劣化の有無の影響を総合すると、通常運転時の評価に使用する応力-ひずみ関係より大きくなるため、今回の評価で使用した応力-ひずみ関係は保守的な評価条件となる。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません



なお、各き裂長さにおけるJappは以下のとおり。

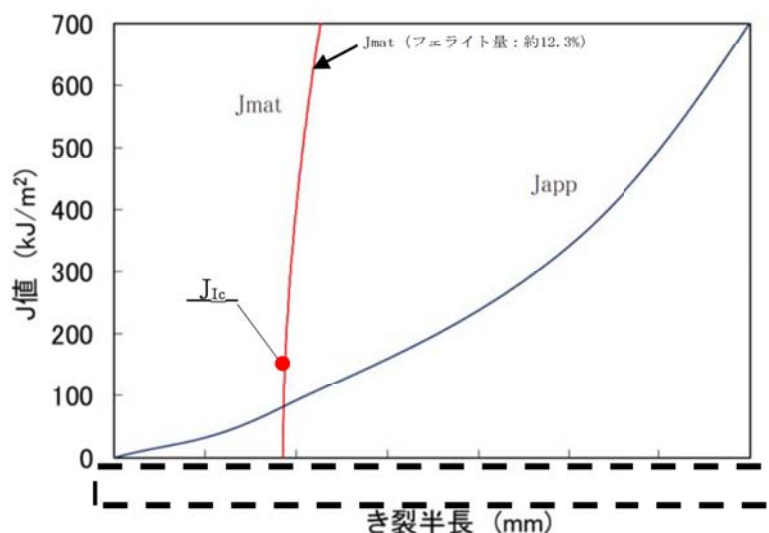
き裂長さ	1t	3t	5t
ホットレグ直管 (kJ/m <sup>2</sup> )			
SG出口40° エルボ (kJ/m <sup>2</sup> )			

### 6. き裂安定性評価

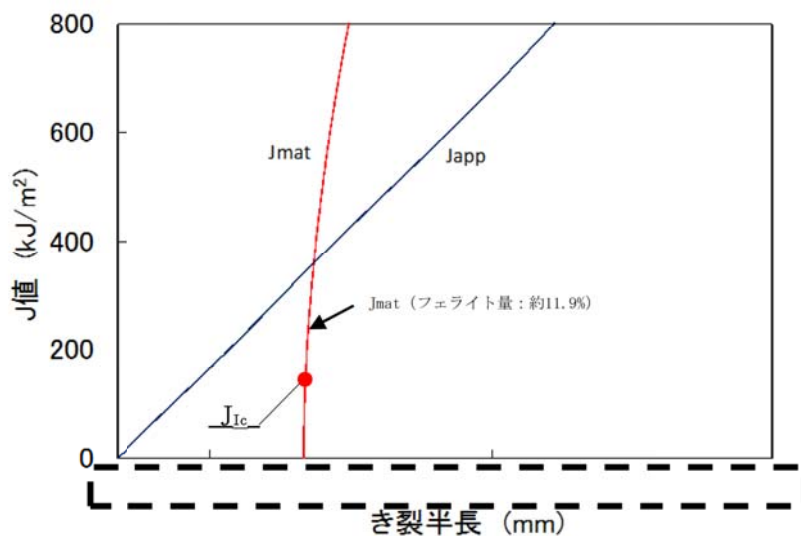
重大事故等時のホットレグ直管およびSG出口40° エルボにおけるき裂安定性評価結果を下図に示す。

重大事故等時においても、き裂進展抵抗がき裂進展力と交差し、き裂進展抵抗がき裂進展力を上回ることを、およびき裂進展抵抗とき裂進展力の交点で、き裂進展抵抗の傾きがき裂進展力の傾きを上回ることから、配管は不安定破壊することではなく、重大事故等時のプラント条件を考慮しても健全であることが判断できる。

ホットレグ直管のき裂安定性評価結果



SG出口40° エルボのき裂安定性評価結果



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

表1 評価条件

	ホットレグ直管	SG出口40° エルボ																		
内径 [mm]																				
外径 [mm]																				
き裂形状	周方向貫通き裂(き裂長さ: 1t、3t、5t の3種類)																			
荷重																				
内圧 [MPa]																				
軸力 [kN]	自重	自重																		
	地震	地震																		
	熱	熱																		
	合計	合計																		
曲げモーメント [kN・m]	自重	自重																		
	地震	地震																		
	熱	熱																		
	合計	合計																		
	My Mz	My Mz																		
	My Mz	My Mz																		
物性値																				
ヤング率 [MPa]																				
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。本評価データは電共研「1次冷却材管の時効劣化に関する研究 (STEP1)」で得られた知見を参考に行っている。本電共研では2つの試験片について引張り試験を実施し、結果がほぼ同等であったことから1つの試験片のデータを用いて応力-ひずみ線図を導出した。Japp 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ります。</p>																			
		<p>非時効材のフェライト量</p> <table border="1"> <tr> <td colspan="8">化学成分 (詳細分析) %</td> <td>フェライト量</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>Si</td> <td>Mn</td> <td>Cr</td> <td>Ni</td> <td>Mo</td> <td>Nb</td> <td>N</td> <td>F%</td> </tr> </table>	化学成分 (詳細分析) %								フェライト量	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	N	F%
化学成分 (詳細分析) %								フェライト量												
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	N	F%												

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

## 重大事故等時の条件を考慮した一次冷却材管の熱時効に対する健全性評価について

高浜2号炉の一次冷却材管（主冷却材管及び蓄圧注入系管台等）について、重大事故等時の温度、圧力条件を考慮した熱時効に対する健全性評価への影響の評価を以下に示す。

### 1. Jappの算出における重大事故等時条件（360℃）の考慮について

Jappの算出には、作用荷重（Ss地震動による荷重を含む）と材料物性（応力-ひずみ関係）を使用する。そのうち、作用荷重には重大事故等時条件（360℃）を考慮している。

また、材料物性（応力-ひずみ関係）には、通常運転時 [ ] の評価では、保守的な条件としてフェライト量が小さく、時効していない材料の [ ] における応力-ひずみ関係を使用しているが、重大事故等時条件を考慮した評価においても同じものを使用している。

なお、重大事故等時条件（360℃）を考慮した場合の時効後の応力-ひずみ関係は図1に示す通り、通常運転時 [ ] の評価に使用する応力-ひずみ関係（非時効）より大きくなるため、今回の評価で使用した応力-ひずみ関係は保守的な評価条件となる。



図1. 通常運転時 [ ] の評価に使用する応力-ひずみ関係と時効した360℃における応力-ひずみ関係

また、応力-ひずみ関係は、通常運転時の評価を目的とするため、 [ ] におけるデータしか取得していないため、360℃における応力-ひずみ関係は次頁の方法にて予想している。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

(1) 熱時効により強度は上昇する。電共研において時効条件（時効温度・時間）と強度上昇の関係が整理されており、時効していない材料の耐力（ $\sigma_{y0}$ ）と [ ] にて時効した後の耐力の比を図 2 に示す。高浜 2 号炉の運転時間は約 22 万時間であり、約 22 万時間時効した材料の強度は時効前と比べて [ ] 上昇することがわかる。



図 2 時効時間と強度上昇の関係

(出典：電共研「1 次冷却材管等の時効劣化に関する研究 (STEP III) (その 2) (平成 10 年度)」)

(2) 温度上昇により強度は低下する。JSME 設計・建設規格において各温度における設計降伏点応力（ $S_y$ ）がまとめられており、図 3 に [ ] における強度と各温度における強度の比を示す。360℃ における降伏点応力は [ ] に比べて [ ] 低下することがわかる。

(3) (1) 及び (2) の関係から応力-ひずみ関係は、熱時効により [ ] 上昇し、温度上昇により [ ] 低下することから、[ ] 上昇すると考えられる。なお、高浜 2 号炉ホットレグ直管のフェライト量は約 12.3%、SG 出口 40° エルボのフェライト量は約 11.9% であり、応力-ひずみ関係には依然保守性が含まれる。

表 1. 各応力-ひずみ関係の条件

条件	評価条件	実機の 重大事故等時条件	備考
熱時効の有無			
温度		360℃	
フェライト量		約 12.3% (ホットレグ直管) 約 11.9% (SG 出口 40° エルボ)	

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません





図3. 材料強度と温度の関係

(出典：JSME S NC1 - 2005/2007「設計・建設規格」(日本機械学会))

## 2. Jmatの算出(破壊靱性値)における重大事故等時条件(360℃)の考慮について

Jmatについては、          の温度条件で採取されたデータの下限值(H3Tモデルの下限線)を用いて設定しているが、重大事故等時の条件(360℃)を考慮した評価において、          で求めたJmatを用いることの妥当性を確認するため、以下のとおり破壊靱性試験を行った。

### (1) 供試材



### (2) 試験内容

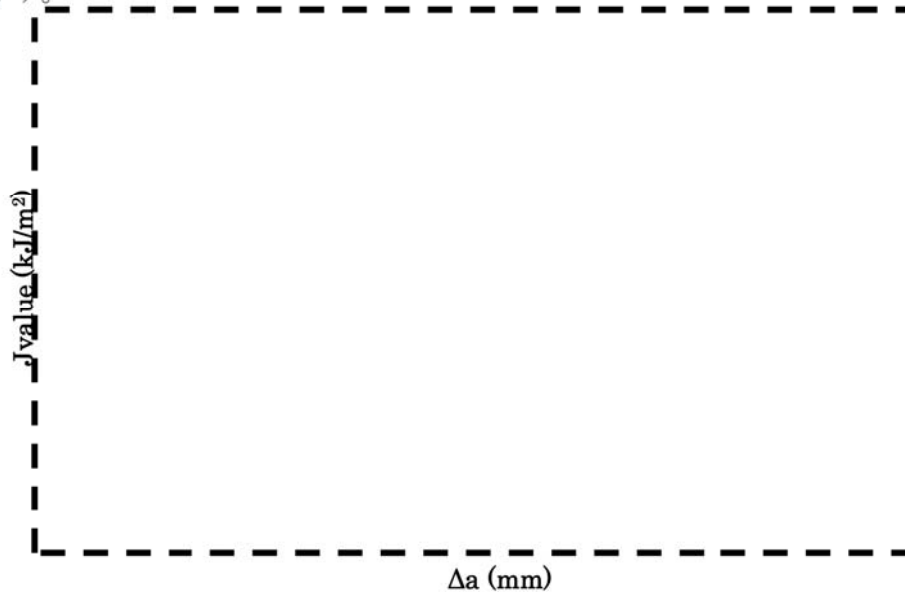


枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません



(3) 試験結果

今回の試験で採取された破壊靱性試験結果のプロットと $J_{Ic}$ 試験の結果、 $J_Q$ 値を以下に示す。



試験温度	試験片番号	$J_{Ic}$ 試験結果	$J_Q(J_{Ic})$

以上の結果より、          の $J_{mat}$ 値と          の $J_{mat}$ 値に大きな差は認められない。また、今回取得された          の $J_{mat}$ 値および          の $J_{mat}$ 値はH3Tモデルの下限線以上であることから、360℃の $J_{mat}$ 値をH3Tモデルの下限線として想定する現在の評価は妥当であると判断できる。



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

### 重大事故等時における1次冷却材ポンプの熱時効評価

高浜2号炉の1次冷却材ポンプのケーシングの発生応力（重大事故等時+Ss地震力）、フェライト量に対して、1次冷却材管との比較を以下に示す。

重大事故等時の条件で応力、フェライトが1次冷却材管の条件で包絡されることを確認しており、重大事故等時でも1次冷却材管の評価を代表として健全性が示される。

1次冷却材ポンプケーシング熱時効評価結果

部位	重大事故等時 応力※1 (MPa)	(参考) 通常運転時 応力※1 (MPa)	フェライト量 (%)	使用温度※2 (°C)
1次冷却材 ポンプケーシング (吐出ノズル)	約117	約111	約16.0	約289
1次冷却材管 (コールドレグ直管)	約117	約111	約17.0	約289

※1 Ss地震荷重含む

※2 通常使用時温度、SA条件は360°Cとする。