

川内原子力発電所 1号炉の 30年目の高経年化技術評価結果について (熱時効について)

本資料は川内 1号炉30年目高経年化技術評価のN R A 審査会合時(2014年)に用いたもので、一部追記をしています。(追記箇所については青字にて記載。)

2022年9月6日

目 次

1. 審査会合における代表機器の選定	2
2. 健全性評価	4
3. 現状保全	8
4. 総合評価	8
5. 高経年化への対応	8
6. 代表機器以外の評価	8

1 審査会合における代表機器の選定

1.1 評価対象の機器及び代表機器

ステンレス鋼は、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、高温で加熱されると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し、相分離が起こり靱性が低下する可能性がある。

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）が大きいほど厳しくなる。

【ステップ1】

これらを踏まえ、以下の条件に該当する全ての部位に対して、フェライト量、使用温度及び地震時の発生応力を考慮し評価対象機器・部位を抽出した。

- 使用温度が250℃以上
- 使用材料が2相ステンレス鋼
- き裂の原因となる劣化事象の発生が想定される部位

（当該部位の疲労評価を実施し健全性を確認しているが、保守的に疲労き裂を想定している。）

【ステップ2】

上記の結果、抽出された部位（全てグループ内代表機器）を表1に示す。

【ステップ3】

これらの部位のうち、フェライト量が最も多く、発生応力も最も厳しい1次冷却材管を審査会合における代表機器として選定した。

表1 川内1号炉 熱時効評価対象機器・部位

機器	部位	フェライト量[%]	使用温度[℃]	応力[MPa]	選定結果
1次冷却材ポンプ	ケーシング	約10.9	約283.6	約69~105	※
1次冷却材管	直管他	約14.8~ 22.3	約283.6~ 321.1	約61~152	○
RHRS入口隔離弁	弁箱				※
蓄圧タンク出口第2逆止弁	弁箱				※

()内は負荷喪失時を示す。

※：発生応力及びフェライト量の比較から1次冷却材管の評価に包絡される。

内は商業機密に係る事項であるため公開できません

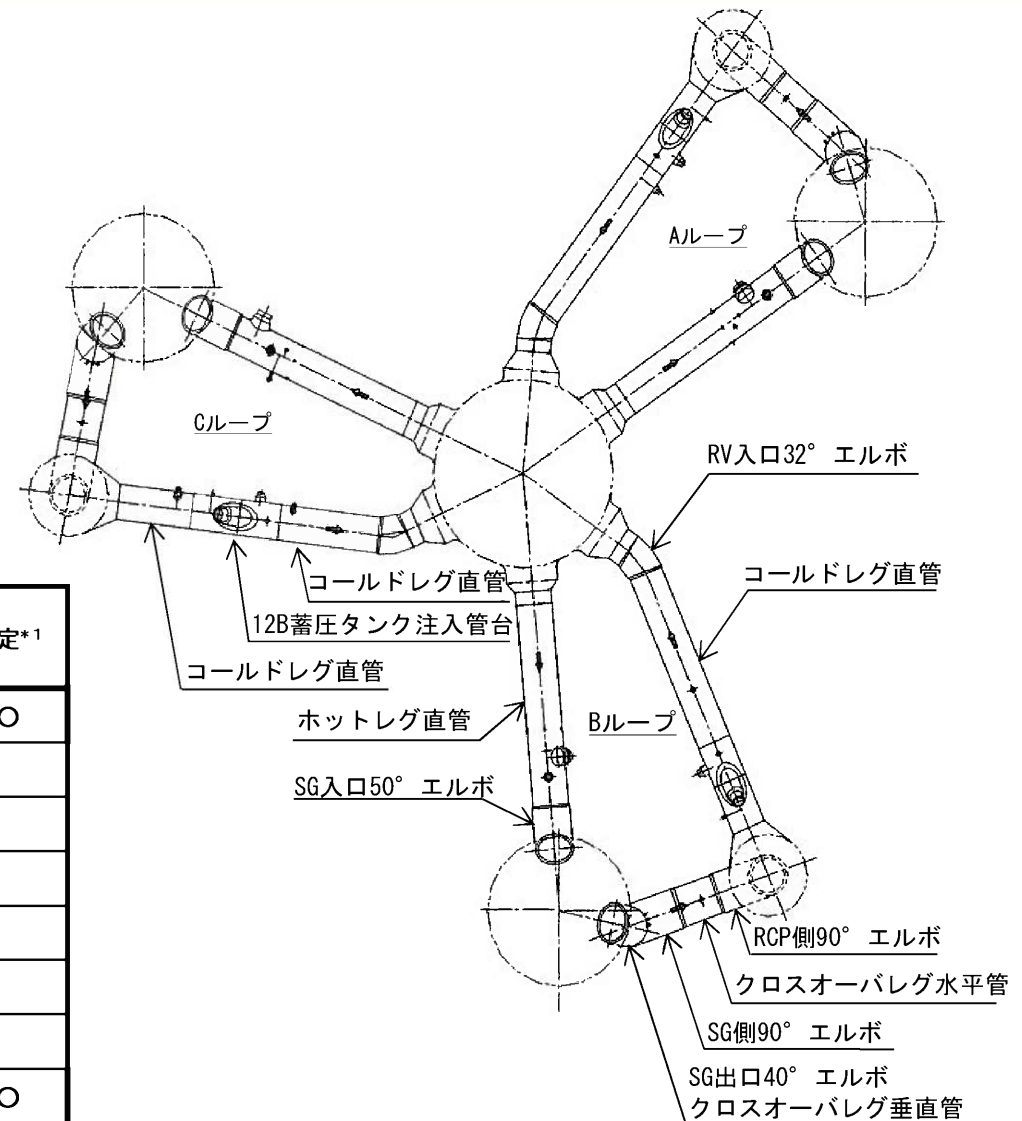
1.2 評価点の抽出

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ことから、1次冷却材管の全ての部位から評価点として以下を選定した。

【評価点】

- ① 応力が最も大きい : ホットレグ直管
- ② フェライト量が最も多い : コールドレグ直管

評価部位	フェライト量 [%]	使用温度 [°C]	応力 [MPa]	選定*1
ホットレグ直管	約17.8	約321.1	約152	○
SG入口50° エルボ	約20.5	約321.1	約117	
SG出口40° エルボ	約14.8	約283.6	約69	
クロスオーバーレグ直管 (垂直管)	約14.9	約283.6	約66	
クロスオーバーレグSG側90° エルボ	約18.1	約283.6	約62	
クロスオーバーレグ直管 (水平管)	約17.0	約283.6	約61	
クロスオーバーレグRCP側90° エルボ	約15.9	約283.6	約69	
コールドレグ直管	約22.3	約283.6	約105	○
RV入口32° エルボ	約18.1	約283.6	約91	
蓄圧タンク注入管台	約20.5	約283.6	約143	



川内1号炉 1次冷却材管の熱時効評価対象部位

*1 : 弾塑性破壊力学的解析手法に基づく評価を実施

2 健全性評価

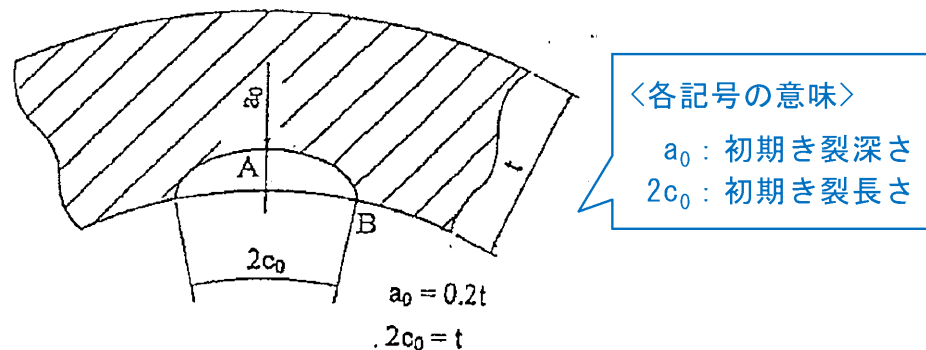
2.1 評価対象期間の脆化予測

プラントの長期間の運転により熱時効したステンレス鋼は、引張強さは増加するので材料強度の評価上の余裕は向上するが、材料の靱性が低下する。

ここでは、脆化予測モデル（H3Tモデル*¹）を用いて熱時効後のステンレス鋼の破壊抵抗値を予測した。

2.2 想定き裂の評価

初期き裂については、「（社）日本機械学会 配管破損防護設計規格（JSME S ND1-2002）」に準拠し*²、超音波探傷試験の検出能力を考慮して設定している。



*1 : H3Tモデルは、熱時効により低下する破壊抵抗値(靱性)を予測するため開発され、電共研で改良されたもの*であり、複数の鋼種や製造方法の材料より取得された材料データに基づき、フェライト量から熱時効後の材料の破壊抵抗値を予測するものである。なお、破壊抵抗値は時効と共に低下し、最終的には底値に落ち着くため、今回の評価では、保守的に破壊抵抗値の底値を使用している。（※：PVP2005-71528）

*2 : 本規格は、オーステナイト系ステンレス鋼にも適用できるものである。また、過去に実施された国の実証事業において、ステンレス鋼の深さ $0.2t$ 以下の疲労き裂を検出可能であることが確認されている。

配管内面に想定した初期き裂がプラント運転時に生じる応力サイクルにより60年間に進展する量を「(社)日本機械学会 配管破損防護設計規格 (JSME S ND1-2002)」に基づき算出した。

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

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

{

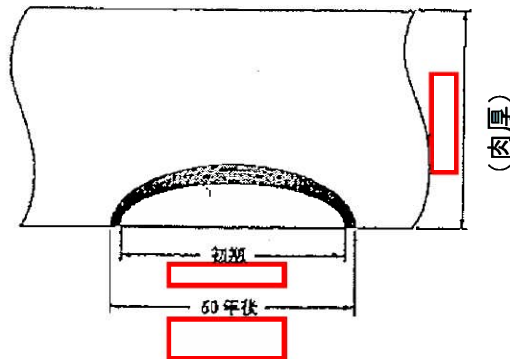
- da/dN : 疲労き裂進展速度 (m/cycle)
- C : 定数 (7.77×10^{-12})
- m : 定数 (3.5)
- ΔK : 応力拡大係数変動幅 ($\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$)
- K_{max}, K_{min} : 最大及び最小応力拡大係数 ($\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$)

なお、応力拡大係数は、供用状態A・B及び1/3Sd地震時における内圧・熱応力・曲げモーメント荷重を用いて算出している。また、定数C, mは、上記規格に基づく、軽水炉水環境下におけるオーステナイト系ステンレス鋼管に適用される値を用いている。

疲労き裂進展解析の結果は下表のとおりであり、60年間の進展を想定しても貫通に至らない。

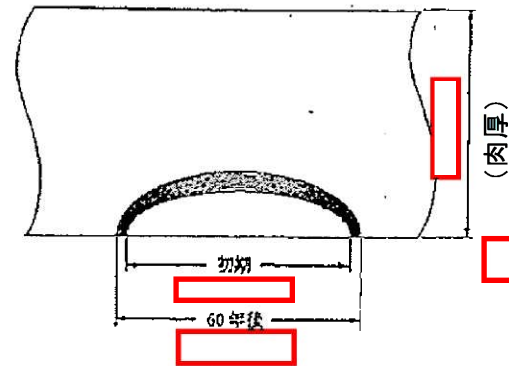
き裂進展解析結果 (ホットレグ)

	き裂深さ (mm) (a)	き裂長さ (mm) (2c)	備考
初期			
60年後			



き裂進展解析結果 (コールドレグ)

	き裂深さ (mm) (a)	き裂長さ (mm) (2c)	備考
初期			
60年後			

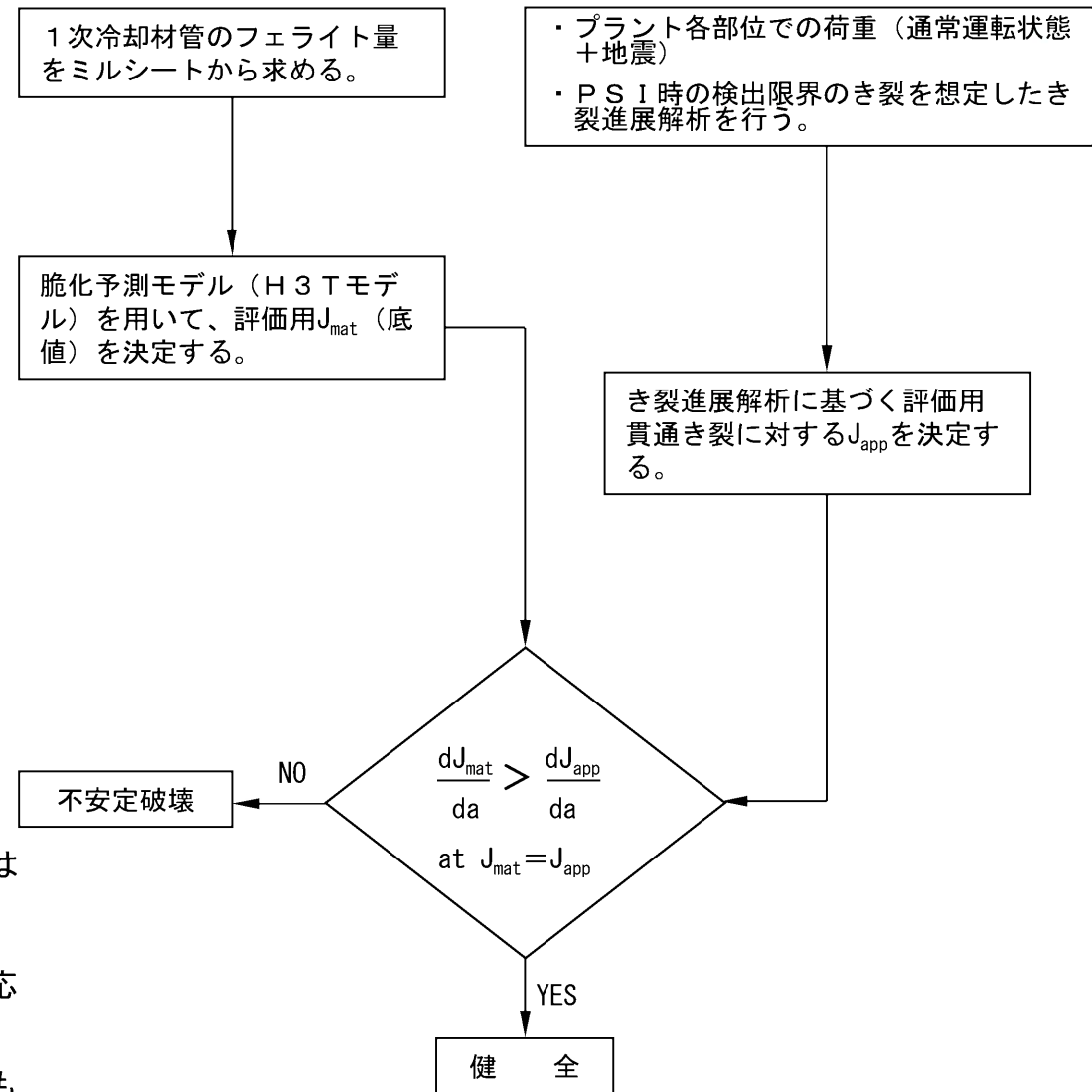


内は商業機密に係る事項であるため公開できません

2.3 破壊力学による健全性の評価

評価対象部位の熱時効後の材料の破壊抵抗値 (J_{mat}) と構造系に与えられた荷重から算出される破壊力 (J_{app})*1 を求めてその比較を行った。

結果は、運転期間60年での疲労き裂*2 を想定しても、破壊力 (J_{app}) と破壊抵抗値 (J_{mat}) の交点において、 J_{mat} の傾きが J_{app} の傾きを上回っていることから、配管は不安定破壊することはない、母管及び管台の熱時効は、健全性評価上問題ない。



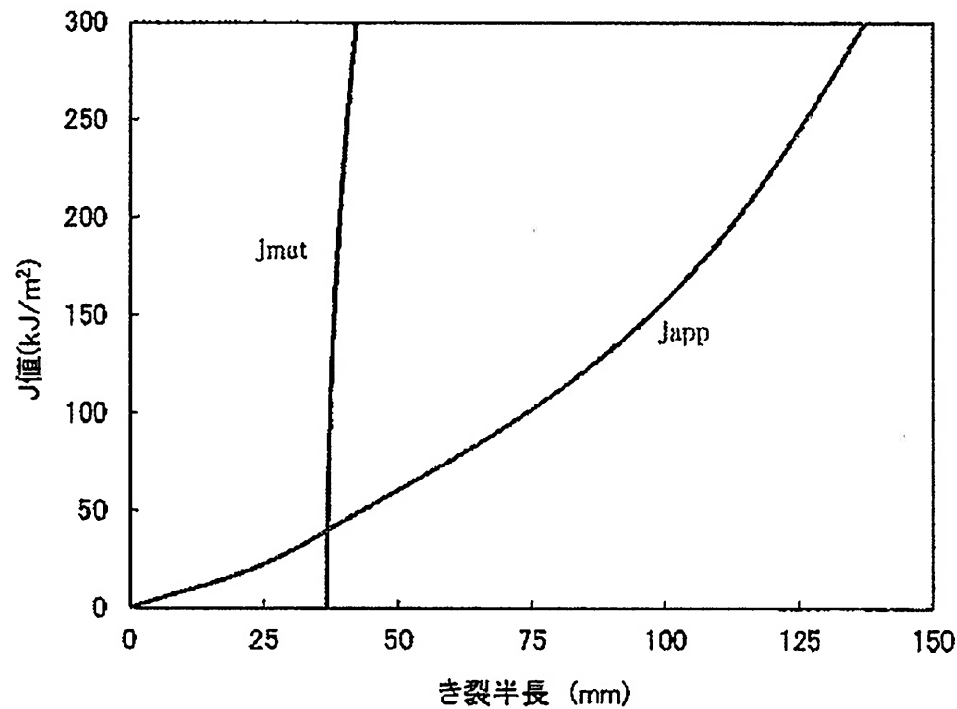
*1 : 初期き裂の想定、き裂進展、貫通き裂の想定及び破壊力は「(社)日本機械学会 配管破損防護設計規格 (JSME S ND1-2002)」の評価手法に準拠した。そのため、破壊力の評価については通常運転状態の荷重 (内圧、自重、熱応力) に加えて、地震荷重 (Ss地震) を考慮した。

*2 : 運転開始後60年時点までの疲労き裂の進展を考慮しても、当該き裂は配管を貫通しない評価結果となったが、その後の弾塑性破壊力学解析においては、解析の簡便性のため、保守的に貫通き裂を想定した。

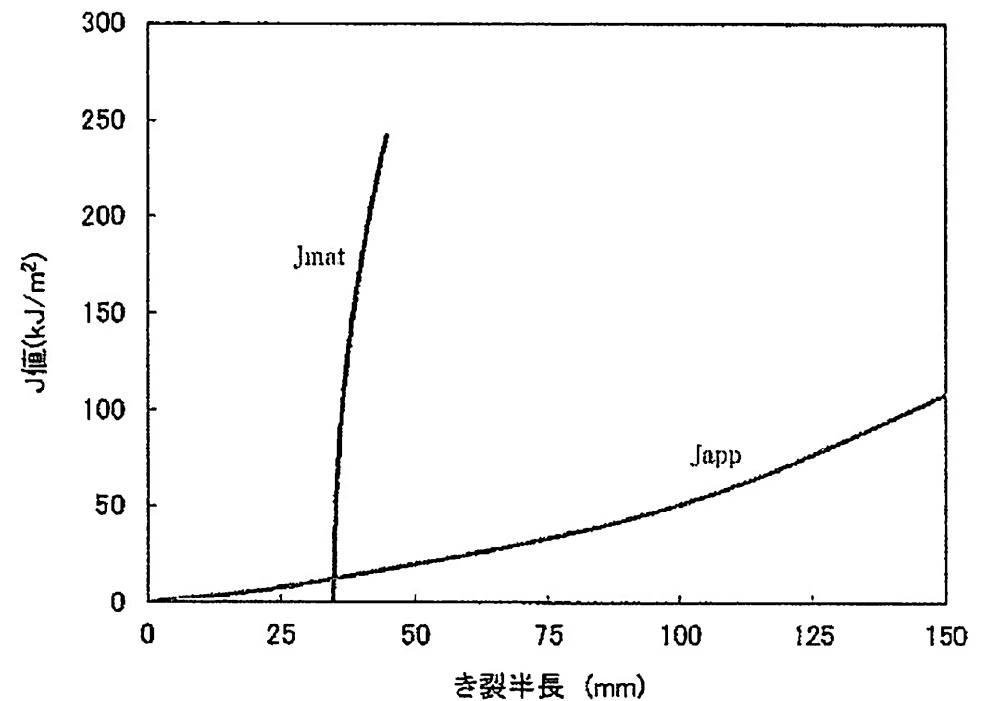
熱時効に対する評価フロー

破壊評価による健全性評価結果

JmatとJappの交点において、Jmatの傾きがJappの傾きより大きければ、延性き裂の成長は止まり、不安定破壊しない。



破壊力学による健全性評価結果（ホットレグ直管）



破壊力学による健全性評価結果（コールドレグ直管）

3 現状保全

3.1 検査方法、範囲等

母管及び管台の熱時効に対しては、定期的に溶接部の超音波探傷検査を実施し、評価で想定した初期き裂のないことを確認している。

4 総合評価

健全性評価結果から判断して、現時点の知見においては、母管及び管台の熱時効は高経年化上問題となる可能性はないと考える

内面からの割れは、溶接部の超音波探傷検査により検知可能(*)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。

冷温停止状態においては温度が低く、事象の進展が考え難いことから十分に保守的な評価であり、現状の保全を実施することで健全性を維持できると考える。

(*)過去に実施された国の実証事業における欠陥検出性《ISIで適用されている縦波斜角UT》

- ・原子力発電施設検査技術実証事業【UTS】、ステンレス鋼の高精度非破壊検査技術検証【NCS】
⇒深さ0.2t以下の疲労き裂が検出可能であることを確認されている。

5 高経年化への対応

母管及び管台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。

6 代表機器以外の評価

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ことから、1次冷却材管の評価結果に包絡できる。