

高浜発電所1、2号炉 劣化状況評価 (2相ステンレス鋼の熱時効)

平成27年12月2日
関西電力株式会社

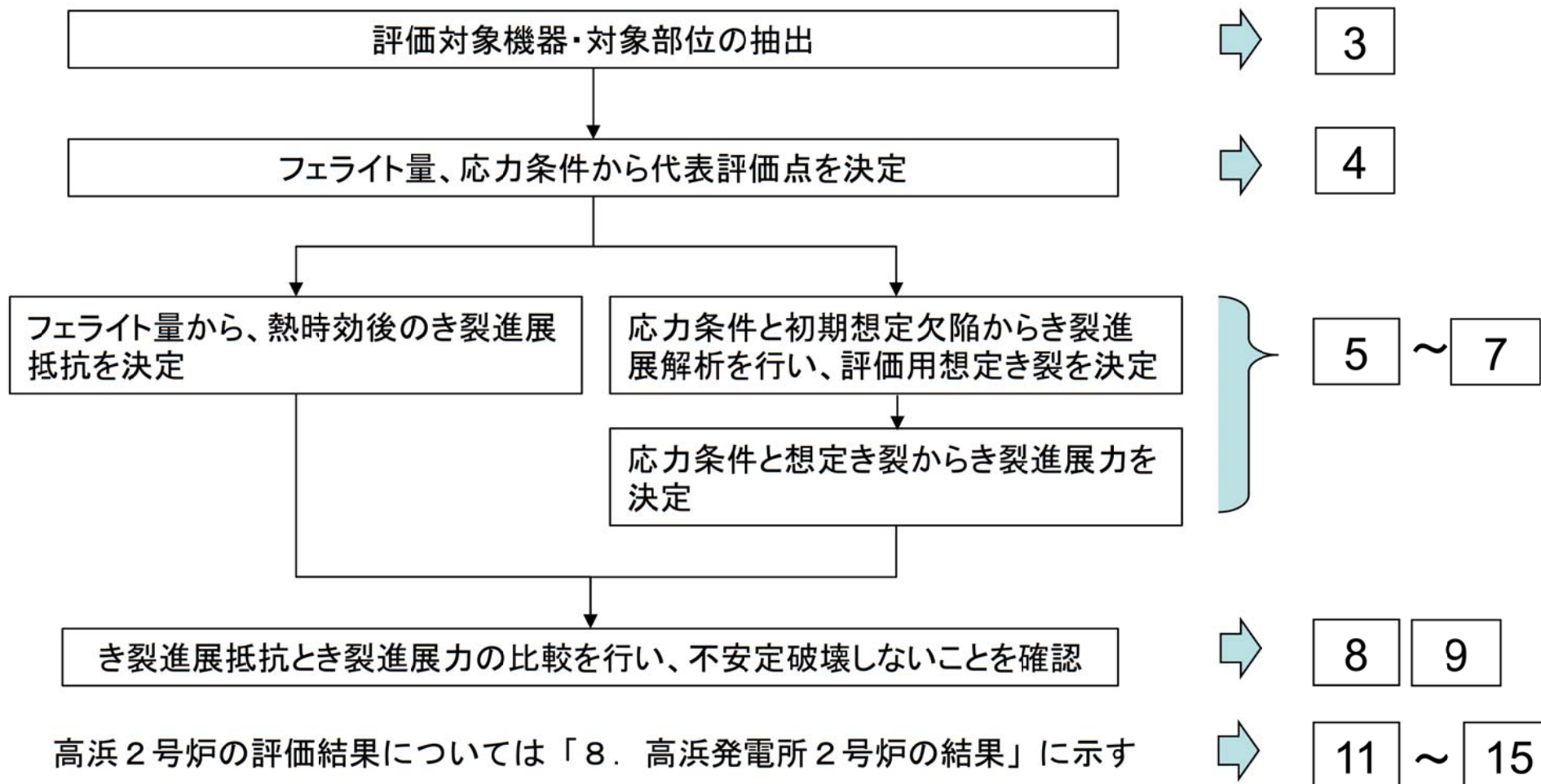
| | |
|--------------------------|----|
| 1. 2相ステンレス鋼の熱時効について..... | 2 |
| 2. 評価対象設備..... | 3 |
| 3. 健全性評価..... | 4 |
| 4. 現状保全..... | 10 |
| 5. 総合評価..... | 10 |
| 6. 高経年化への対応..... | 10 |
| 7. 代表機器以外の評価..... | 10 |
| 8. 高浜発電所2号炉の結果..... | 11 |
| 9. まとめ..... | 16 |

1. 2相ステンレス鋼の熱時効について

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。

【熱時効評価の流れ】



2. 評価対象設備(1/2)

2-1 評価対象機器・部位の抽出

2相ステンレス鋼の熱時効の評価においては、日本原子力学会標準「原子力発電所の高経年化対策実施基準」に基づき、以下の条件に該当する機器、部位を評価対象機器・部位として抽出する。

- 使用温度が250℃以上
- 使用材料が2相ステンレス鋼
- 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)

これらの条件に該当し、抽出された機器・部位を下表に示す。

これらの部位で設備の重要度および熱時効への影響が大きいと考えられる条件(発生応力およびフェライト量の多寡)で比較を行い、より厳しい条件となる1次冷却材管を代表機器として具体的な評価内容を説明する。

高浜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 | 11 | 約289 | 約107 | ※ |
| 1次冷却材管 | 直管他 | 15.5 | 約289～ 323 | 215 | ○ |
| 炉内構造物 | 下部炉心支持柱 | 約11.2 | 約289 | 約133 | ※ |

※：発生応力およ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。

□ 内は商業機密に属しますので公開できません。

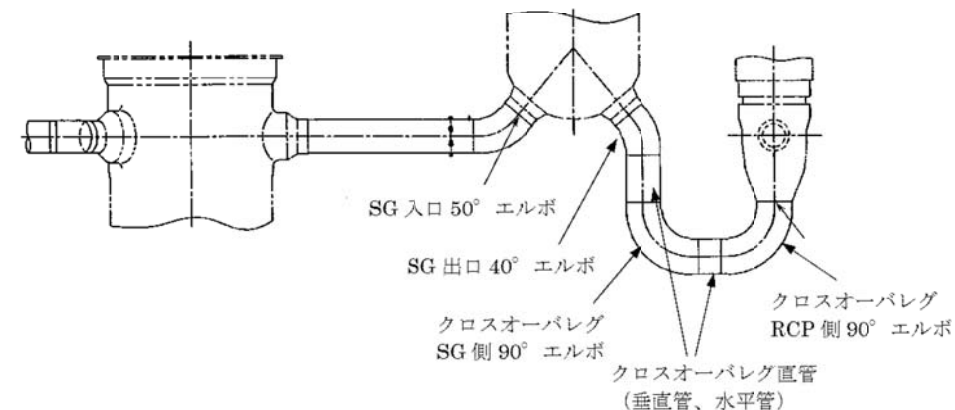
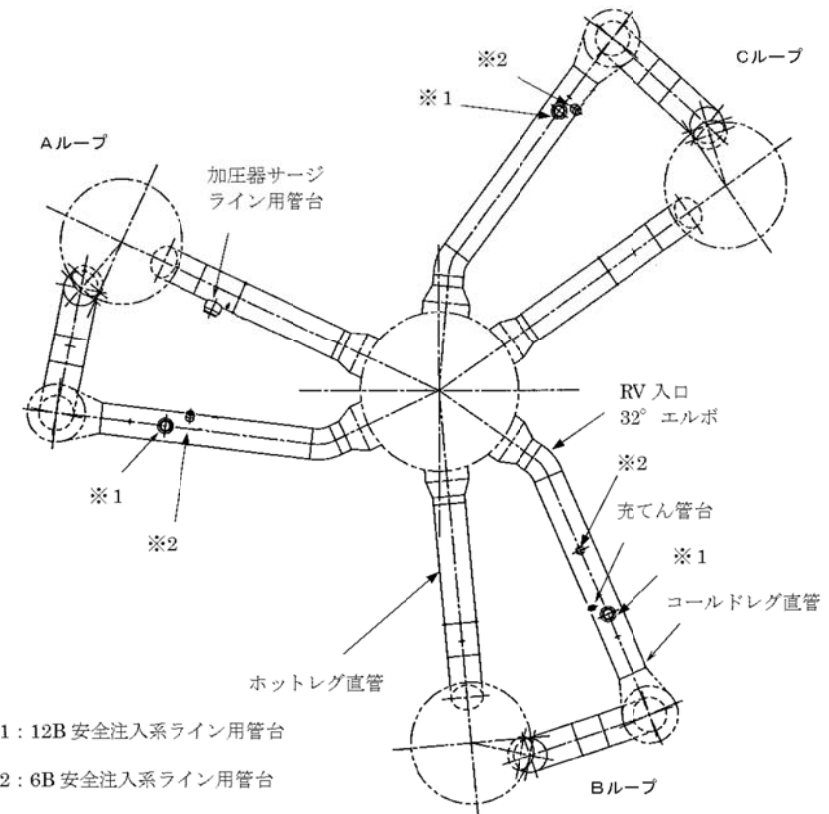
2.評価対象設備(2/2)

2-2 評価点の抽出

日本原子力学会標準「原子力発電所の高経年化対策実施基準(2008)」より、フェライト相の割合、応力の観点から、それぞれ1点ずつ評価点を抽出する。

高浜1号炉 1次冷却材管のフェライト量および応力一覧

| 評価部位 | フェライト量 [%] | 使用温度 [°C] | 応力 [MPa] | 選定 |
|----------------------|------------|-----------|----------|----|
| ホットレグ直管 | | | | |
| SG入口50° エルボ | | | | |
| SG出口40° エルボ | | | | |
| クロスオーバレグ直管 (垂直管) | | | | |
| クロスオーバレグ SG側90° エルボ | | | | |
| クロスオーバレグ直管 (水平管) | | | | |
| クロスオーバレグ RCP側90° エルボ | | | | |
| コールドレグ直管 | | | | |
| RV入口32° エルボ | | | | |
| 加圧器サージライン用管台 | 約13.7 | 322.8 | 約215 | ○ |
| 12B安全注入系ライン用管台 | | | | |
| 充てん管台 | | | | |
| 6B安全注入系ライン用管台 | 約15.5 | 288.6 | 約208 | ○ |



1次冷却材管熱時効評価対象部位

内は商業機密に属しますので公開できません。

3. 健全性評価(1/5)

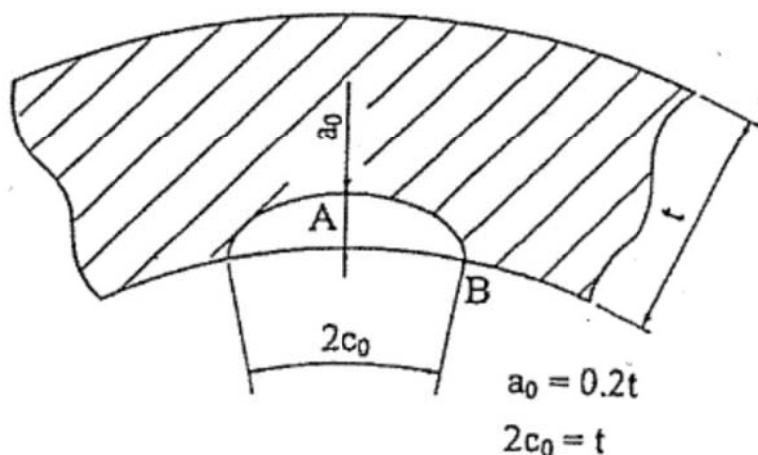
3-1 評価対象期間の脆化予測

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鑄鋼は、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鑄鋼のき裂進展抵抗を予測した。

3-2 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※²し、超音波探傷試験の検出能力を考慮して設定している。



初期欠陥の形状

※¹ : H3Tモデルは、熱時効により低下するき裂進展抵抗（靱性）を予測するために開発され、電共研「1次冷却材管等の時効劣化に関する研究(STEPⅢ)（その2）」で改良されたものであり、複数の鋼種や製造方法の材料に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き裂進展抵抗を予測するものである。き裂進展抵抗は時効と共に低下するが、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底値を使用している

※² : 本規格は、オーステナイト系ステンレス鋼鑄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「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およびサイジング精度の確認に関するもの）」において、ステンレス鋼鑄鋼の深さ約0.18tの疲労き裂を検出可能であることが確認されている

3. 健全性評価(2/5)

3-2 想定き裂の評価(続き)

延長しようとする期間を踏まえて、60年供用時の評価を実施する。配管内面に仮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。

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

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

$$\left[\begin{array}{l} da/dN : \text{疲労き裂進展速度 (m/cycle)} \\ C : \text{定数 (7.77} \times 10^{-12}) \\ m : \text{定数 (3.5)} \\ \Delta K : \text{応力拡大係数変動幅 (MPa}\sqrt{\text{m)}} \\ K_{max}, K_{min} : \text{最大および最小応力拡大係数 (MPa}\sqrt{\text{m)}} \end{array} \right]$$

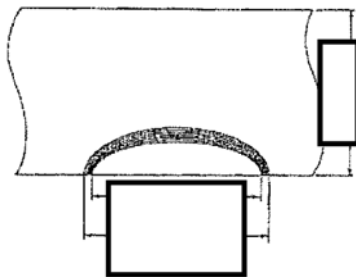
応力拡大係数は、供用状態A・Bおよび地震加速度を考慮した内圧・熱応力・曲げモーメント荷重を用いて算出している。また、定数C、mは、同規格に基づく、軽水炉水環境下におけるオーステナイト系ステンレス鋼管に適用される値を用いている。

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。

高浜1号炉のき裂進展解析結果

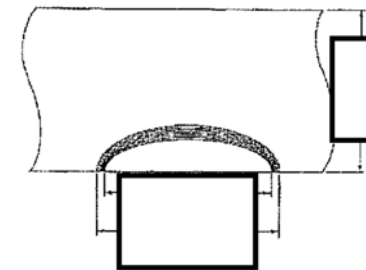
加圧器サージライン用管台

| | き裂深さ (mm) | き裂長さ (mm) | 備 考 |
|------|--------------|--------------|-----|
| 初 期 | | | |
| 60年後 | | | |



6B安全注入系ライン用管台

| | き裂深さ (mm) | き裂長さ (mm) | 備 考 |
|------|--------------|--------------|-----|
| 初 期 | | | |
| 60年後 | | | |

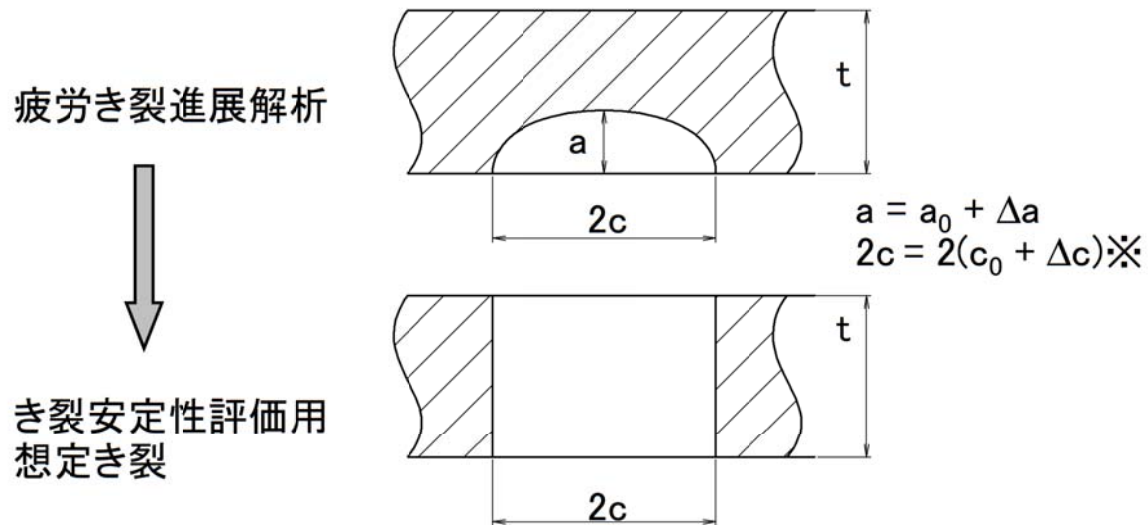


内は商業機密に属しますので公開できません。

3. 健全性評価(3/5)

3-3 き裂安定性評価用想定き裂

き裂安定性評価では、安全側に評価するため、3-2項で算出した疲労き裂を貫通き裂に置換える(下図参照)。き裂安定性評価に用いる想定き裂を下表に示す。



※ (Δa , Δc : 供用期間中の疲労き裂進展量)

図 想定き裂置換えイメージ

表 高浜1号炉のき裂安定性評価用想定き裂

| | き裂長さ (mm) | 板厚 (mm) |
|---------------|--------------|------------|
| 加圧器サージライン用管台 | | |
| 6B安全注入系ライン用管台 | | |

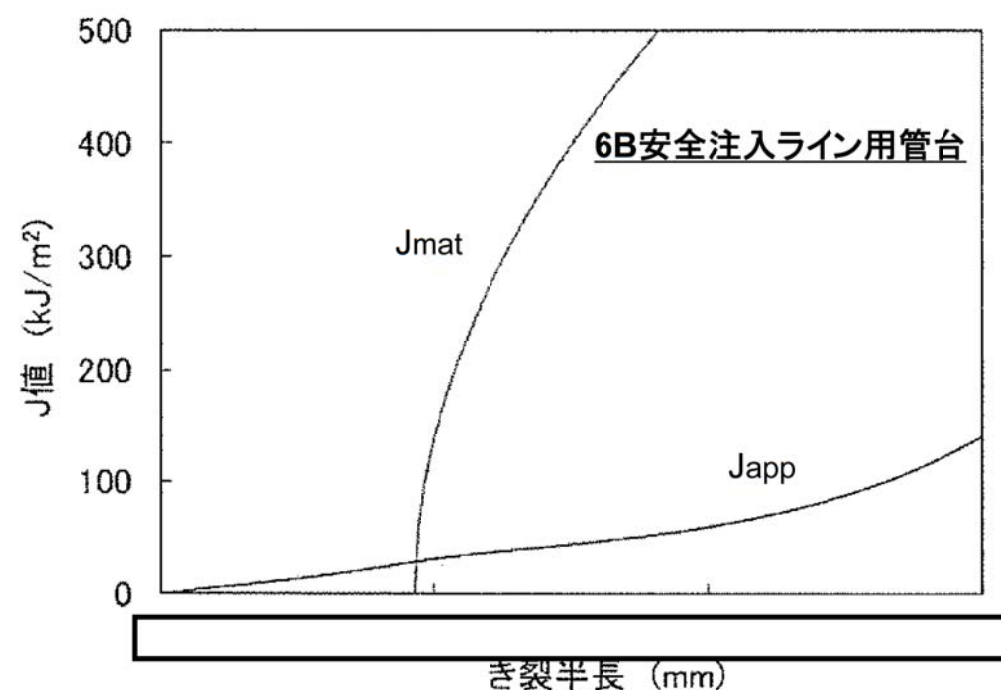
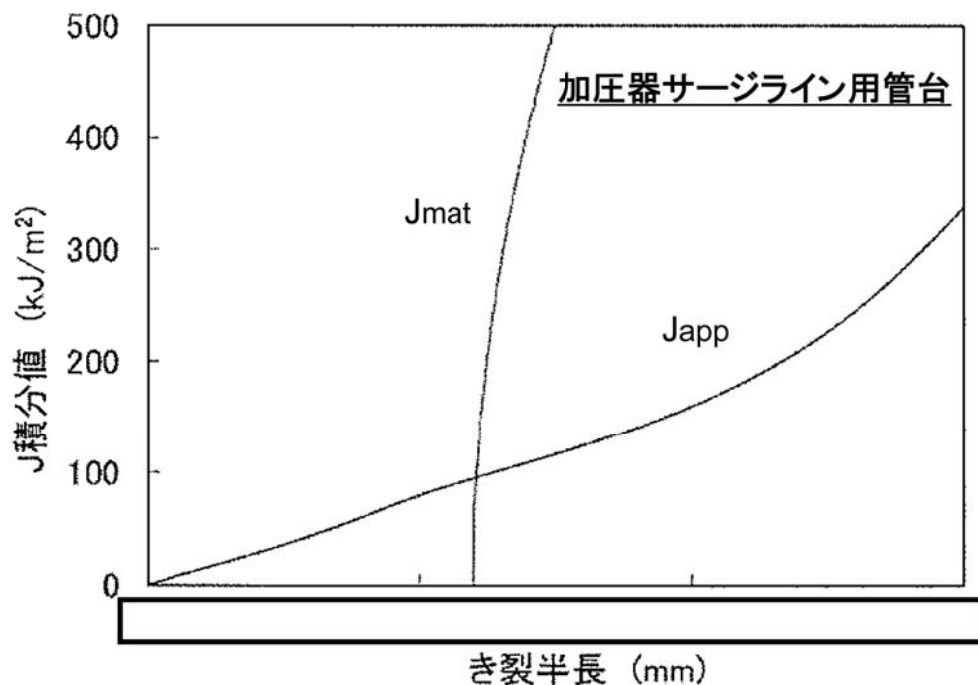
3. 健全性評価(4/5)

3-4 破壊力学による健全性の評価

き裂安定性評価用想定き裂および脆化予測モデルを用いて決定した評価対象部位の熱時効後の材料のき裂進展抵抗(J_{mat})と構造系に与えられた荷重とき裂長さから算出されるき裂進展力(J_{app})を求めてその比較を行った。

その結果、評価部位においてき裂進展抵抗がき裂進展力を上回ることで、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っていることから、配管は不安定破壊することなく、母管および管台の熱時効は、健全性評価上問題ない。

高浜1号炉のき裂安定性評価結果



初期き裂の想定、き裂進展、貫通き裂の想定およびき裂進展力は「(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、き裂進展力の評価については内圧、自重、熱応力に加えて、Ss地震を考慮した。

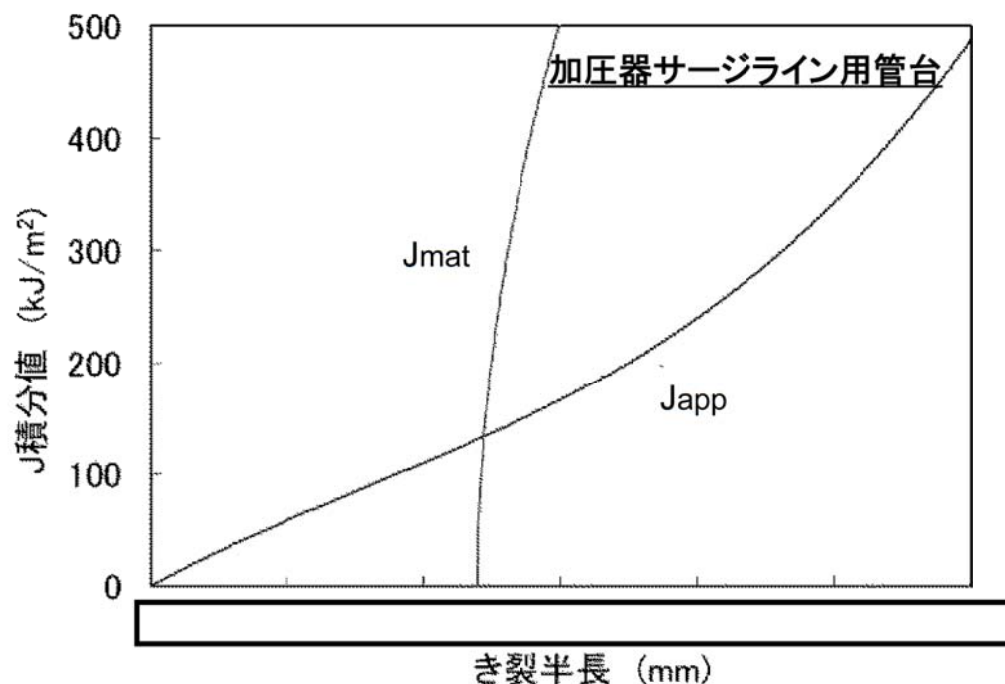
3. 健全性評価(5/5)

3-5 重大事故等時を考慮した破壊評価による健全性評価結果

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）を考慮した場合の評価として、発生応力が最大となる加圧器サージライン用管台の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を上回ることで、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っていることから、配管は不安定破壊することなく、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。

高浜1号炉のき裂安定性評価結果(重大事故等時)



初期き裂の想定、き裂進展、貫通き裂の想定およびき裂進展力は「(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、き裂進展力の評価については内圧、自重、熱応力に加えて、Ss地震を考慮した。

4. 現状保全 5. 総合評価 6. 高経年化への対応 7. 代表機器以外の評価

4. 現状保全

母管および管台の熱時効に対しては、供用期間中検査時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。また、定期的に漏えい検査を実施し健全性を確認している。

5. 総合評価

60年間の供用を想定した1次冷却材管の健全性評価結果から判断して、1次冷却材管は不安定破壊することはない、延長しようとする期間において熱時効が構造健全性で問題となる可能性はない。

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。

6. 高経年化への対応

母管およ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。

7. 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されており同様に問題ないと判断する。

8. 高浜発電所2号炉の結果(1/5)

8-1 2号炉の評価結果

高浜発電所2号炉についても、1号炉と同様に2相ステンレス鋼の熱時効に対する劣化状況評価を行った。その結果、評価代表機器とした1次冷却材管は延長しようとする期間の劣化を考慮しても不安定破壊することはない、健全であることを確認した。また、評価代表以外の1次冷却材ポンプについても、1次冷却材管の評価に包絡されることを確認した。以下に評価詳細を示す。

8-2 評価対象機器・部位、評価点の抽出


評価対象設備は1次冷却材ポンプ(ケーシング)及び1次冷却材管であり、熱時効に対する影響が大きい1次冷却材管を対象として評価を行う。

1次冷却材管の部位のうち、フェライト量、応力最大部位を選定するとともに、フェライト量、応力の組合せを考慮して厳しくなる部位、エルボの曲率部で応力が大きく評価が厳しくなる部位を選定した。

高浜2号炉 1次冷却材管のフェライト量および応力一覧

| 評価部位 | フェライト量 [%] | 使用温度 [°C] | 応力 [MPa] | 選定 |
|----------------------|------------|-----------|----------|-------|
| ホットレグ直管 | 約12.3 | 322.8 | 約173 | ○ |
| SG入口50° エルボ | 約13.8 | 322.8 | 約128 | △*1 |
| SG出口40° エルボ | 約11.9 | 288.6 | 約155 | △*2 |
| クロスオーバレグ直管 (垂直管) | 約15.5 | 288.6 | 約118 | △*1,3 |
| クロスオーバレグ SG側90° エルボ | | | | |
| クロスオーバレグ直管 (水平管) | | | | |
| クロスオーバレグ RCP側90° エルボ | | | | |
| コールドレグ直管 | 約17.0 | 288.6 | 約111 | ○ |
| RV入口32° エルボ | | | | |

高浜2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 [°C] | 応力 [MPa] | 選定結果 |
|----------|-------|------------|-----------|---|------|
| 1次冷却材ポンプ | ケーシング | 約16 | 約289 | 約111 | ※ |
| 1次冷却材管 | 直管他 | 約11.9~17.0 | 約289~323 |  173 | ○ |

※：発生応力およ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。1号炉で対象となっていた炉内構造物(下部炉心支持柱)は2号炉は2相ステンレス鋼でないため、対象外である。

 内は商業機密に属しますので公開できません。

- *1：フェライト量、応力の組合せを考慮して選定した部位
- *2：エルボの曲率部で応力大であるため選定した部位
- *3：コールドレグの評価で代表させる

8. 高浜発電所2号炉の結果(2/5)

8-3 健全性評価結果

1号炉と同様に、60年供用時までの亀裂進展解析を行う。その疲労き裂を貫通させたものを想定き裂とし、き裂安定性評価を行う。

高浜2号炉のき裂進展解析結果

ホットレグ直管

| | き裂深さ (mm) | き裂長さ (mm) | 備 考 |
|------|--------------|--------------|-----|
| 初期 | | | |
| 60年後 | | | |

SG入口50° エルボ

| | き裂深さ (mm) | き裂長さ (mm) | 備 考 |
|------|--------------|--------------|-----|
| 初期 | | | |
| 60年後 | | | |

コールドレグ直管

| | き裂深さ (mm) | き裂長さ (mm) | 備 考 |
|------|--------------|--------------|-----|
| 初期 | | | |
| 60年後 | | | |

SG出口40° エルボ

| | き裂深さ (mm) | き裂長さ (mm) | 備 考 |
|------|--------------|--------------|-----|
| 初期 | | | |
| 60年後 | | | |

8. 高浜発電所2号炉の結果(3/5)

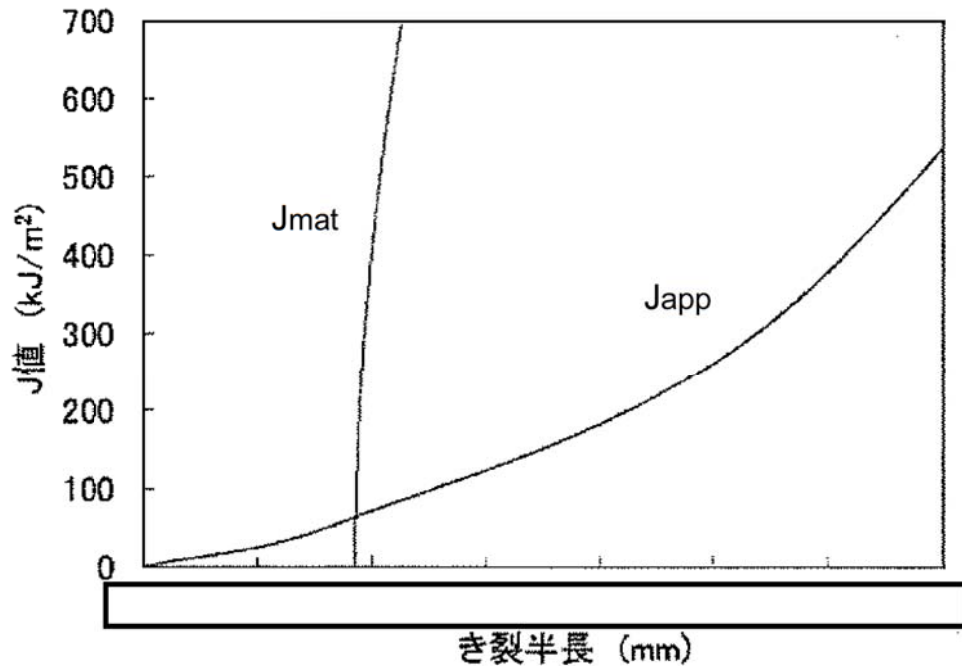
8-3 健全性評価結果(続き)

前頁の想定き裂に基づき、き裂進展抵抗 (J_{mat}) とき裂進展力 (J_{app}) を求めてその比較を行った。

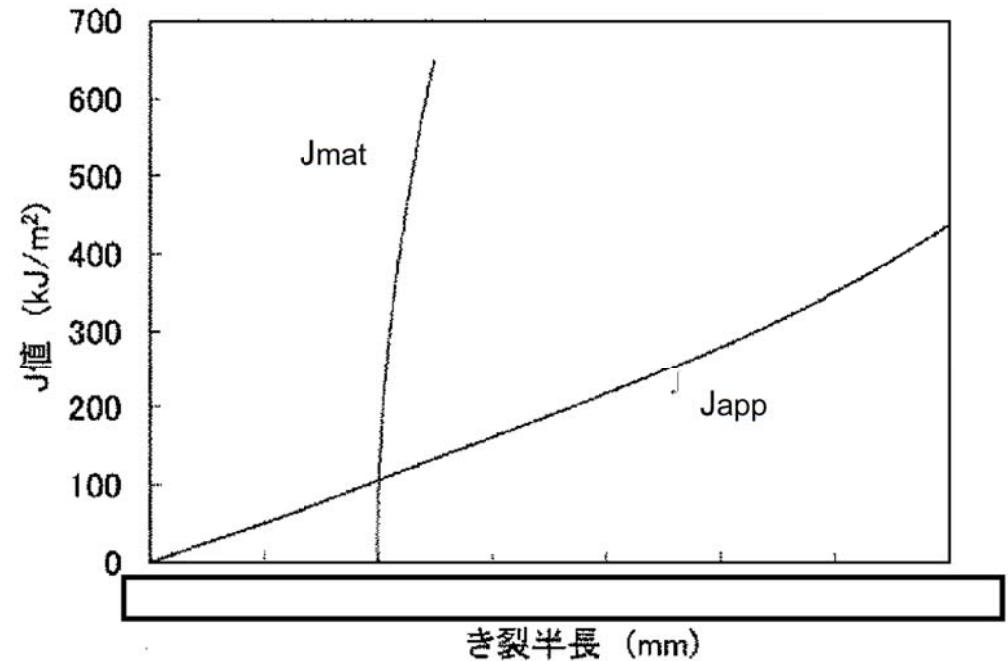
その結果、評価部位においてき裂進展抵抗がき裂進展力を上回ること、およびき裂進展抵抗とき裂進展力の交点でき裂進展抵抗の傾きがき裂進展力の傾きを上回っていることから、配管は不安定破壊することはなく、母管および管台の熱時効は、健全性評価上問題ない。

高浜2号炉のき裂安定性評価結果(1/2)

ホットレグ直管



SG入口50° エルボ

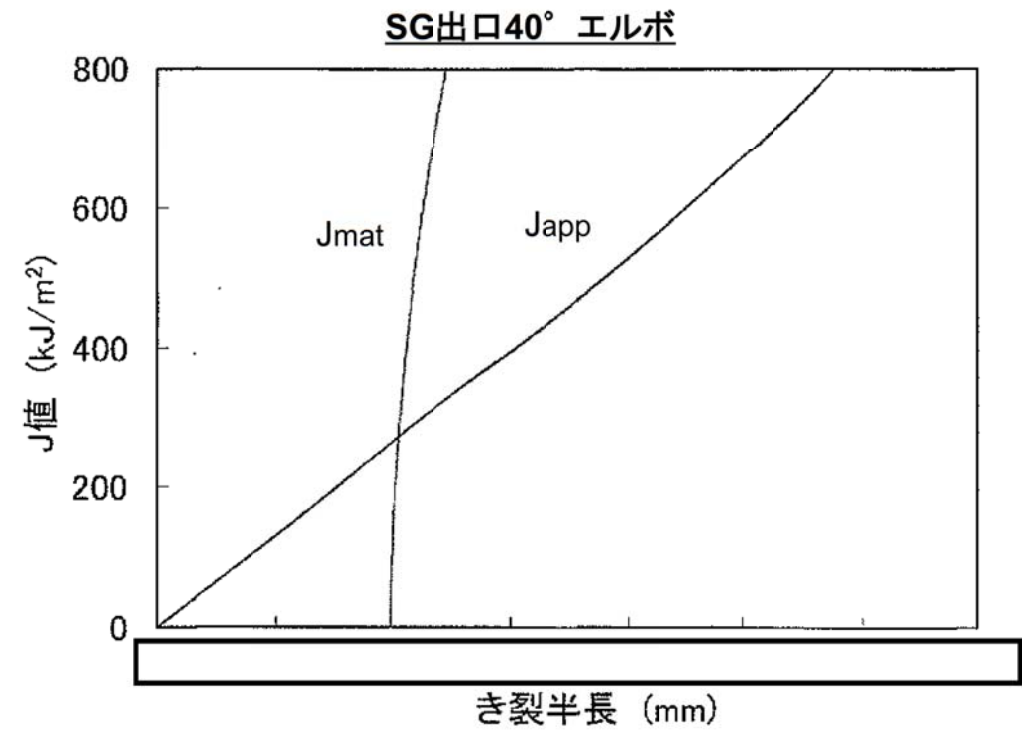
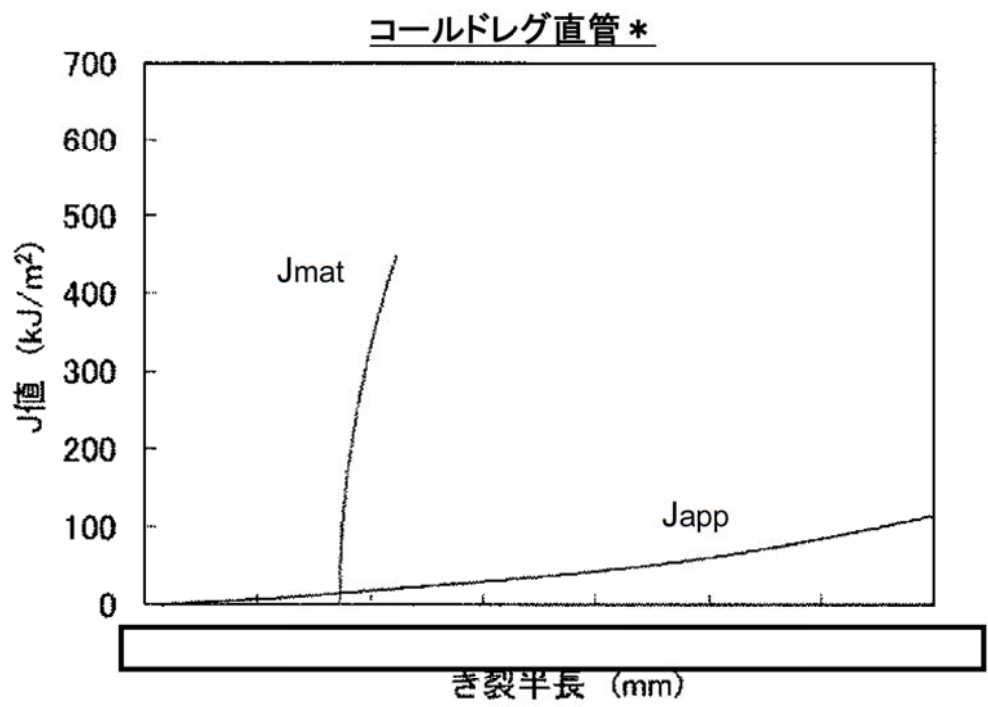


初期き裂の想定、き裂進展、貫通き裂の想定およびき裂進展力は「(社)日本機械学会 配管破損防護設計規格 (JSME S ND1-2002)」の評価手法に準拠した。そのため、き裂進展力の評価については内圧、自重、熱応力に加えて、Ss地震を考慮した。

8. 高浜発電所2号炉の結果(4/5)

8-3 健全性評価結果(続き)

高浜2号炉のき裂安定性評価結果(2/2)



* : クロスオーバーレグ直管の評価はフェライト量、応力条件がほぼ包絡されるコールドレグ直管の評価で代表させる。

初期き裂の想定、き裂進展、貫通き裂の想定およびき裂進展力は「(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、き裂進展力の評価については内圧、自重、熱応力に加えて、Ss地震を考慮した。

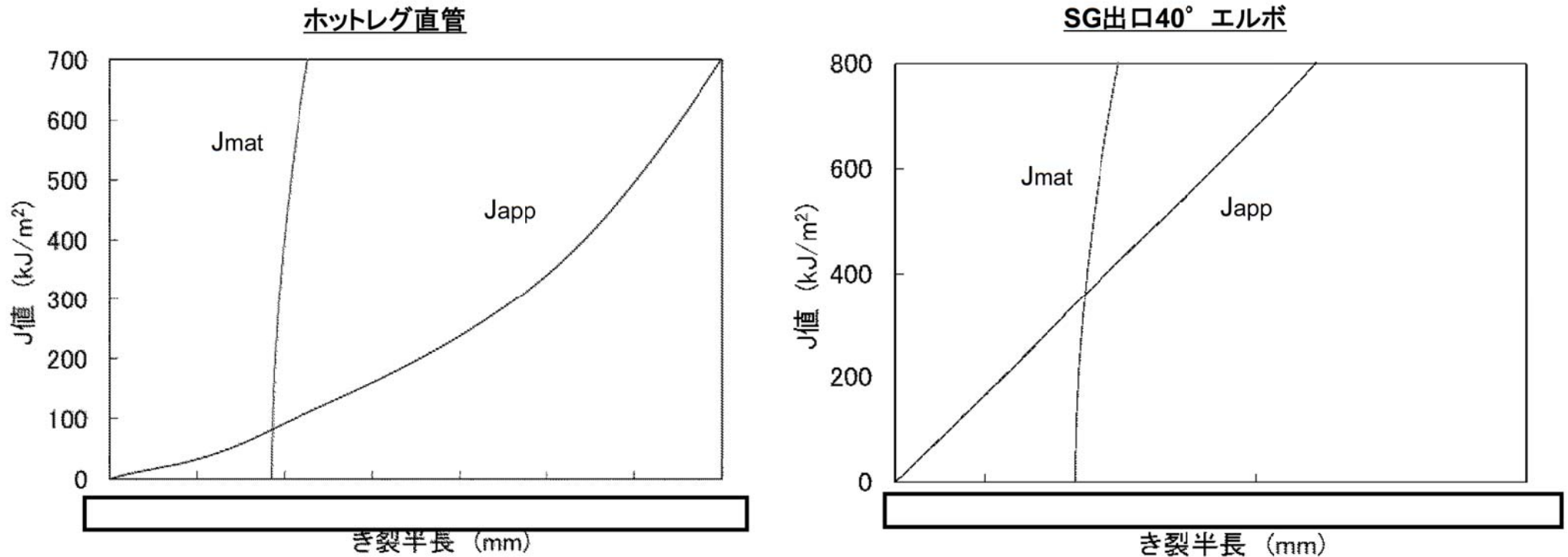
8. 高浜発電所2号炉の結果(5/5)

8-4 重大事故等時を考慮した健全性評価結果

2号炉も同様に重大事故等時（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°C、ピーク圧18.5MPa）を考慮した場合の評価を行った。評価代表箇所として発生応力が最大となるホットレグ直管と、通常時にき裂安定性評価が相対的に厳しい結果となったSG出口40° エルボの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を上回ること、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っていることから、配管は不安定破壊することはなく、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。

高浜2号炉のき裂安定性評価結果(重大事故時)



初期き裂の想定、き裂進展、貫通き裂の想定およびき裂進展力は「(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、き裂進展力の評価については内圧、自重、熱応力に加えて、Ss地震を考慮した。

9. まとめ

以上の評価結果について、原子力規制委員会「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」(以下、審査基準)に規定されている延長しようとする期間における要求事項との対比を下表に示す。

延長しようとする期間における要求事項との対比

| 評価対象事象 または 評価事項 | 要求事項 | 健全性評価結果 |
|-----------------------|---|---|
| 2相ステンレス鋼 の熱時効 | <p>○延性亀裂進展性評価の結果、評価対象部位において亀裂進展抵抗が亀裂進展力を上回ること。</p> <p>○亀裂不安定性評価の結果、評価対象部位において亀裂進展抵抗と亀裂進展力が等しい状態で亀裂進展抵抗の微小変化率が亀裂進展力の微小変化率を上回ること。</p> | <p>1号炉 「3-4 破壊力学による健全性の評価」、「3-5 重大事故等時を考慮した破壊評価による健全性評価結果」に示すとおり、配管は不安定破壊せず、健全であることを確認した。</p> |
| | | <p>2号炉 「8-3 健全性評価結果」、「8-4 重大事故等時を考慮した健全性評価結果」に示すとおり、配管は不安定破壊せず、健全であることを確認した。</p> |