

**敦賀発電所2号機の定期検査の状況について
(蒸気発生器入口管台溶接部の傷の原因と対策)****1. 発生状況**

敦賀発電所2号機(加圧水型軽水炉:定格電気出力116万キロワット)は、平成19年8月26日から第16回定期検査中であり、今定期検査において、国内外で発生した600系ニッケル基合金溶接部での応力腐食割れ事象を踏まえ、蒸気発生器(全4台)の1次冷却水出口および入口管台の溶接部*1(計8箇所)内面について、応力腐食割れ予防保全としてショットピーニング工事*2を実施する計画としていました。

この工事のため、事前に当該溶接部内面について渦流探傷試験(ECT)*3を実施したところ、A蒸気発生器の入口管台溶接部で1箇所、B蒸気発生器の入口管台溶接部で5箇所の有意な信号指示が認められました。なお、B蒸気発生器の出口管台溶接部では信号指示は認められませんでした。

有意な信号指示が認められた個所について、超音波探傷試験(UT)を実施した結果、B蒸気発生器入口管台溶接部の指示部で、最大指示長さ約2.1mm、最大指示深さ約1.2mm(管台部の厚さ:約7.9mm)の傷と評価されました。

この傷の深さを考慮すると、当該部位の板厚は電気事業法に基づく工事計画認可申請書に記載している板厚(7.5mm)を下回ると評価されました。

今後、A蒸気発生器出口管台、CおよびD蒸気発生器出入口管台について、ECTを実施するとともに、今回発見された傷について、原因調査を実施することとしました。

本事象による周辺環境への影響はありません。

(平成19年10月18日 発表済)

2. 点検結果と今後の予定

A蒸気発生器の出口管台溶接部、CおよびD蒸気発生器出入口管台溶接部内面について、ECTを実施したところ、C蒸気発生器入口管台溶接部で2.3箇所の有意な信号指示が認められました。

なお、AおよびC蒸気発生器の出口管台溶接部およびD蒸気発生器の出入口管台溶接部では信号指示は認められませんでした。

有意な信号指示が認められたC蒸気発生器の入口管台溶接部の指示部について、UTを実施した結果、最大指示長さ約1.4mm、最大指示深さ約1.3mm(管台部の厚さ:約7.8mm)の傷と評価されました。

今後、傷が確認された箇所について、スンプ観察*4等を実施するとともに、試料採取をして、試験研究機関に搬出し、傷の形態観察、破面観察、化学成分分析等の詳細な調査を実施する予定です。

(平成19年11月2日 発表済)

*1: 蒸気発生器(全4台)の1次冷却水出口および入口管台の溶接部

蒸気発生器の出入口管台では、蒸気発生器(炭素鋼製)と1次冷却材管(ステンレス製)とを溶接するため、蒸気発生器の出入口端部(炭素鋼製)にステンレス製の短管(セーフエンド)を600系ニッケル基合金にて溶接している。

* 2 : ショットピーニング工事

国内外プラントでの600系ニッケル基合金溶接部での応力腐食割れ事象を踏まえ、600系ニッケル基合金溶接部について計画的に点検を行い、予防保全として溶接部表面の残留応力を低減させる工事（ショットピーニング）を実施している。

ショットピーニングとは、金属表面に金属の玉を高速度でたたきつけることにより、金属表面の引張残留応力を圧縮応力に変化させる工事。

* 3 : 渦流探傷試験（ECT）

材料表面に渦電流を流して、材料に発生する電磁誘導の変化から検査対象の傷を検出する方法。

* 4 : スンプ観察

金属の表面を磨いた後、表面にフィルム等を貼り付け写し取り、これを顕微鏡で観察。金属サンプルを切り出すのと同様に、損傷部の金属組織の調査が可能。

3. 原因調査結果

(1) A 蒸気発生器の入口管台溶接部

有意な信号指示のあった1箇所について、スンプ観察等による金属組織観察を実施しました。その結果は以下のとおりです。

○割れは軸方向の複数の割れが繋がったもので、全体の長さは約5mmであり、応力腐食割れに特有な結晶境界に沿った割れでした。

○また、手直し溶接と思われる跡（直径約10mm）が確認され、その周囲では微細な割れが多数確認されました。

○微細な割れが確認された領域の表面では、細かい筋状の模様が認められ、微細な割れのない領域では、筋状模様が部分的に薄くなっていることが確認されました。

(2) B 蒸気発生器の入口管台溶接部

有意な信号指示のあった部分のうち、最も深いと評価された2箇所について、スンプ観察等による金属組織観察を実施しました。その結果は以下のとおりです。

○2箇所の割れは、いずれも長さ約1～6mmの複数の割れが繋がったもので、全体の長さは、約9mmと約11mmであり、いずれも応力腐食割れに特有な結晶境界に沿った割れでした。

○また、2箇所の割れの間には、手直し溶接と思われる跡（直径約7mm）が確認され、その周囲では、微細な割れが多数確認されました。

○微細な割れが確認された領域の表面では、細かい筋状の模様が認められ、微細な割れのない領域では、筋状模様が部分的に薄くなっていることが確認されました。

(3) C 蒸気発生器の入口管台溶接部

有意な信号指示のあった部分のうち、2箇所の指示部を含むように管台溶接部の一部を試料採取し、試験研究機関に搬出して詳細な調査を実施しました。その結果は以下のとおりです。

○試料表面には、全域で細かい筋状の模様が認められました。また、筋状模様はA、B蒸気発生器に比べ明瞭でした。

○2箇所の割れの破面を観察した結果、表面の割れの長さはともに約5.8mm、最大深さは、それぞれ約6.4mm、約3.4mmで、応力腐食割れに特有な結晶の粒界に沿った破面が確認されました。

○表面の残留応力を測定した結果、周方向が263～591MPaで、軸方向が244～

546MPaの圧縮残留応力が確認されました。

(4) 製造履歴調査

敦賀発電所2号機の蒸気発生器は、昭和57年7月から昭和60年4月に製造され、昭和60年2月から同年7月に現地据付工事が行われており、当時の工事記録、検査記録を確認するとともに、関係者への聞き取りにより製造履歴を調査しました。その結果、入口管台は製作手順どおり製造されていることが確認されました。また、溶接後、施工面の凹凸を除去するため、グラインダ及びバフ*5で研磨され、その後、浸透探傷試験により異常のないことが確認されました。

また、応力腐食割れ以外の原因として、延性割れや高温割れ、疲労損傷についても確認しましたが、使用環境条件、使用材料、製造履歴、検査記録等から可能性は低いことが確認されました。

* 5 : バフ

溶接後、溶接部表面の手入れ加工（研磨）を実施するが、その際、電動工具に取り付けた円形状の砥石で粗い研磨を行うことをグラインダ研磨といい、砥粒を付着させた布ペーパーを何枚も円形状に組み合わせたもの（バフ）で、細かな研磨を行うことをバフ研磨という。

(5) 表面加工状態確認試験

以上の調査により確認された割れは、応力腐食割れと推定され、その発生要因の一つである応力を確認するため、表面加工状態を模擬した試験体を製作し、その残留応力を求めました。その結果は以下のとおりです。

- A及びB蒸気発生器で割れの発生している領域は、グラインダ及びバフ研磨後に補修溶接を行い、その後、仕上げのために弾力性のある砥石で研磨をしたものと推定され、その表面を模擬した試験体では、平均で約470MPaの引張残留応力が確認されました。
- C蒸気発生器は、グラインダ（A及びB蒸気発生器よりも粗い施工）及びバフ研磨したものと推定され、その表面を模擬した試験体では、平均で約210MPaの応力が確認され、実機と同じく圧縮応力であった。測定領域を小さくして残留応力を測定したところ、グラインダ研磨の溝の底部では、引張残留応力が存在することが確認されました。
- C蒸気発生器実機から採取した試料で確認された残留応力を表面加工状態確認試験の結果を用いて補正すると、グラインダ溝底部では約90MPa～420MPaの引張応力が残留していたと評価され、応力腐食割れが発生する可能性がある引張応力（約300MPa）を超えている可能性があることが確認されました。

4. 推定原因

割れや破面の特徴等から、以下の3因子が重畳して発生・進展した応力腐食割れであると推定されました。

- 環境（高温、高圧など、1次冷却材水質環境にある）
- 材料（溶接金属に、応力腐食割れが確認されている600系ニッケル基合金が使われている）
- 応力（蒸気発生器製作時の溶接及び溶接後の研磨加工により、管台内面の表層部に高い引

張残留応力が発生した)

5. 対策

A蒸気発生器で確認された微細な割れについては、内表面が滑らかになるようきずを除去した後、ECTを行い、きずが除去されたことを確認します。その後、ショットピーニングを行い、溶接部表面の残留応力を低減させます。

B及びC蒸気発生器については、内面全周を切削して浅いきずを除去した後、グラインダにて部分的な深いきずを除去します。その後、深いきずを除去した部位に600系ニッケル基合金で肉盛溶接を行ったうえで、内面全周を耐食性に優れた690系ニッケル基合金で肉盛溶接を行います。

また、念のため、肉盛溶接を行った箇所の残留応力を低減させる観点から、当該部についてバフ研磨を行います。

これらの作業は、1次冷却水入口配管を取外して行います。

なお、周溶接部の補修は、必要な工事計画の手続きを行った後、実施します。

また、きずが認められなかったD蒸気発生器の入口管台溶接部及びA～D蒸気発生器出口管台溶接部については、応力腐食割れの予防保全としてショットピーニングを実施します。

これらの対策工事には、数ヶ月を要し、原子炉起動は今年秋頃になる見込みです。

添付資料 敦賀発電所2号機の定期検査状況について
(蒸気発生器入口管台溶接部でのきずの原因と対策)

(経済産業省によるINESの暫定評価)

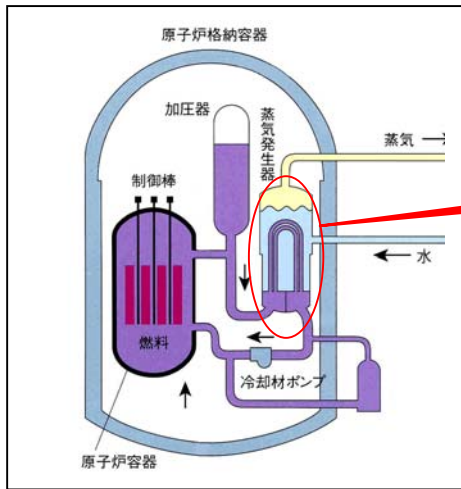
基準1	基準2	基準3	評価レベル
—	—	0—	0—

INES：国際原子力事象評価尺度

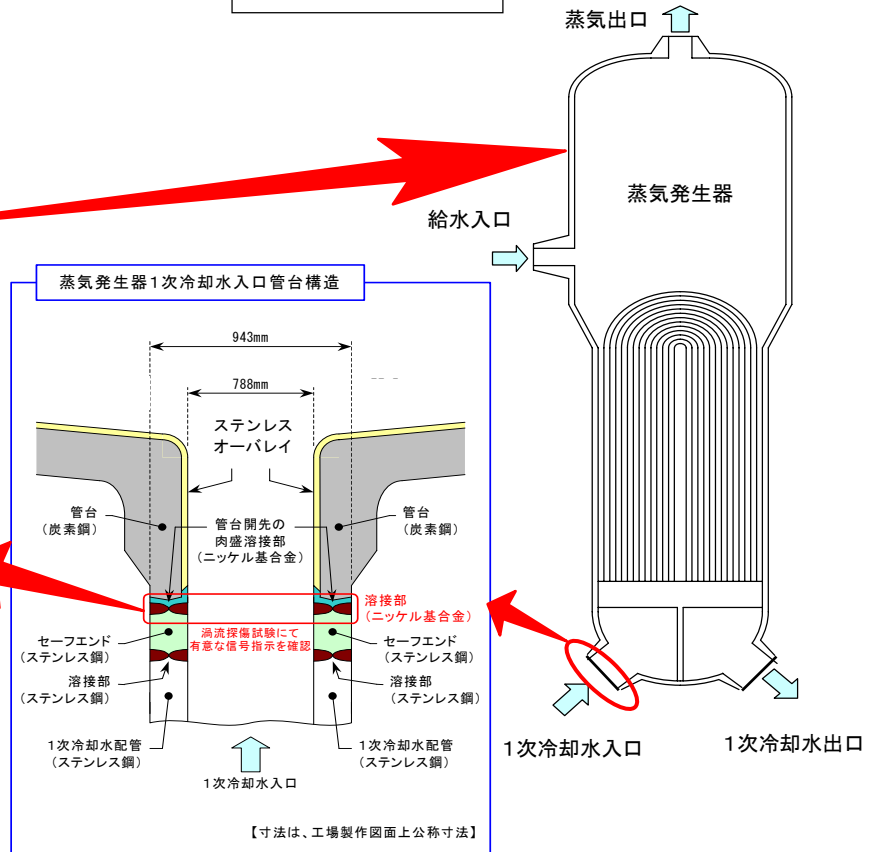
以上

敦賀発電所 2号機の定期検査状況について (蒸気発生器入口管台溶接部でのきずの原因と対策)

発生場所

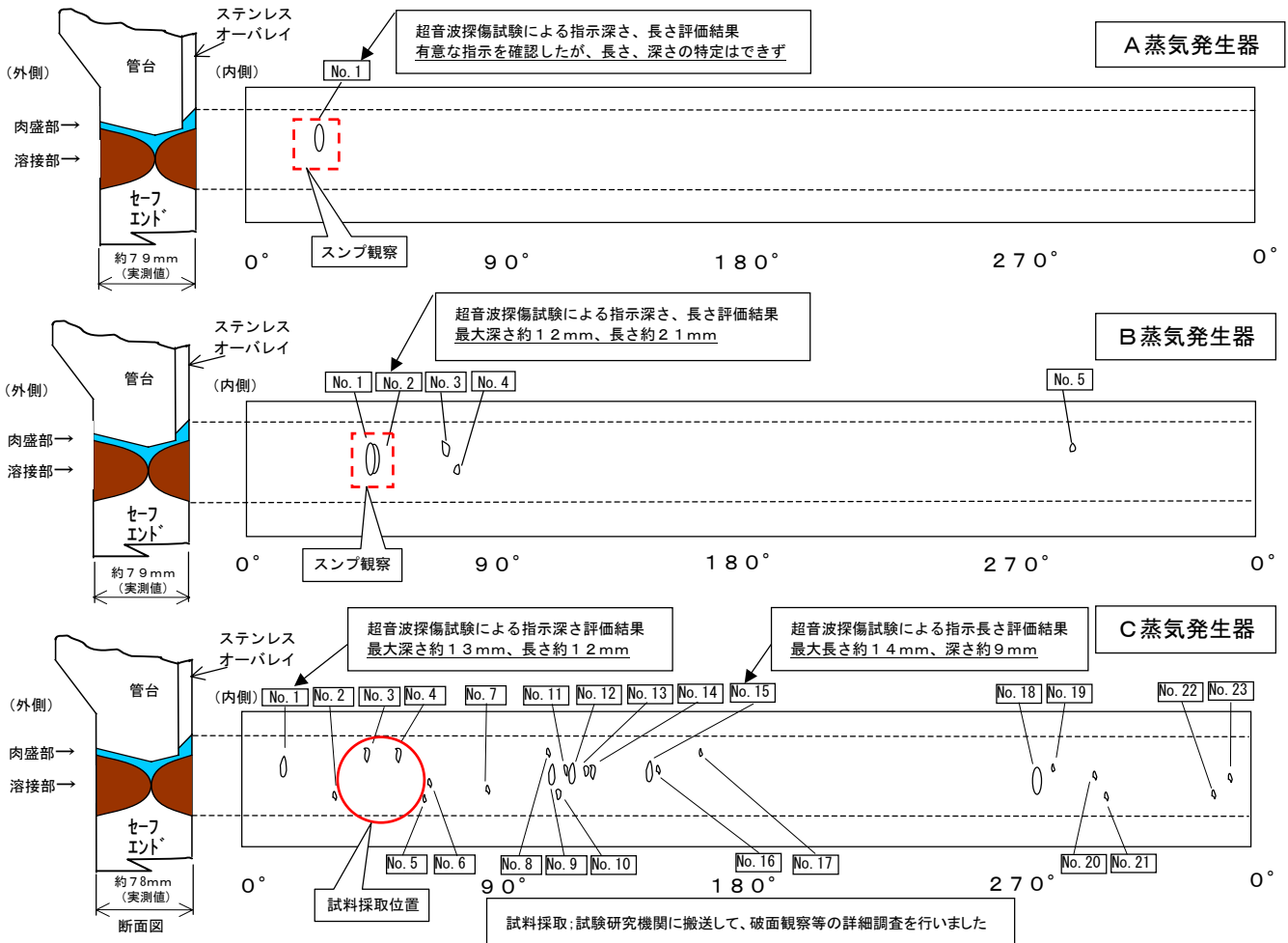
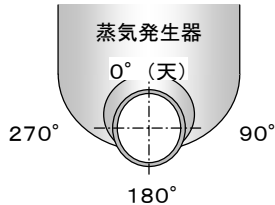


蒸気発生器概要図



E C T 結果 (有意な指示箇所)

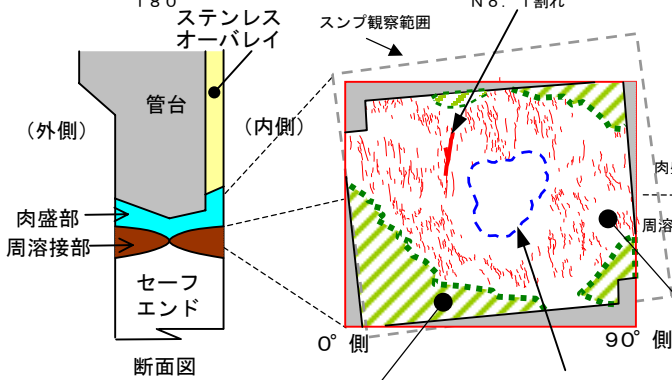
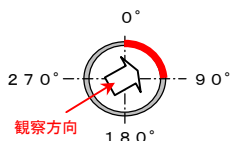
蒸気発生器側から見た図



原因調査結果

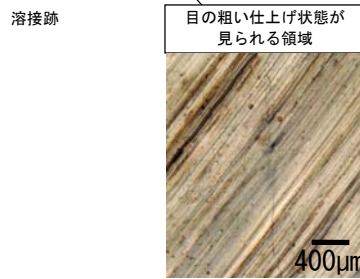
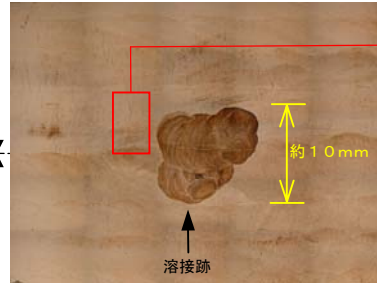
A 蒸気発生器 No. 1 の割れ

蒸気発生器側から見た図



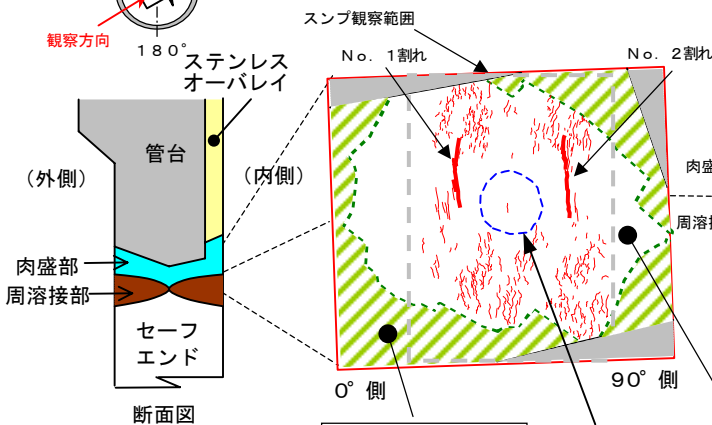
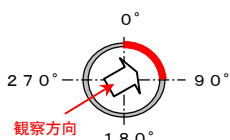
- No. 1 の割れは、軸方向の微細なきずの集まりで、最大長さは約5mmでした。
- 微細なきずの領域には、直径約10mmの手直し溶接跡を確認しました。
- 割れが発生していない領域は、パフにより仕上げられたと推定されました。
- 割れは、結晶境界に沿って枝分かれしていることを確認しました。

スンプ観察結果



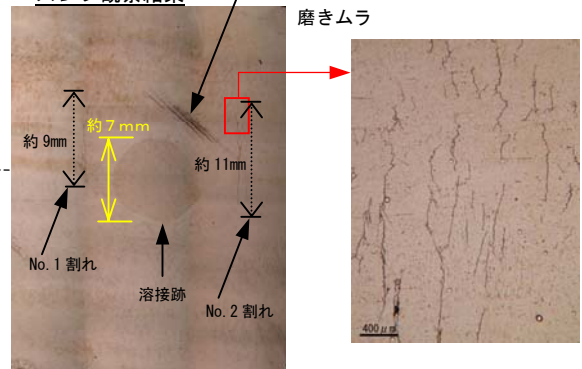
B 蒸気発生器 No. 1, No. 2 の割れ

蒸気発生器側から見た図



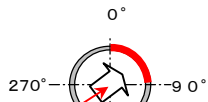
- 2箇所割れは、いずれも軸方向に長さ約9mmと約11mmでした。
- これらの割れの周辺には、微細なきずが認められました。
- 2箇所割れの間には、直径約7mmの手直し溶接跡を確認しました。
- 割れが発生していない領域は、パフにより仕上げられたと推定されました。
- 割れは、結晶境界に沿って枝分かれしていることを確認しました。

スンプ観察結果

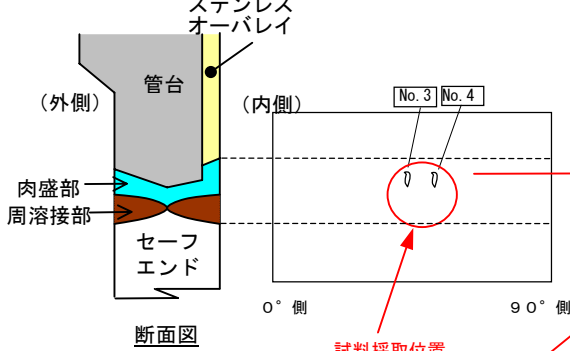


C蒸気発生器 No. 3, No. 4の割れ

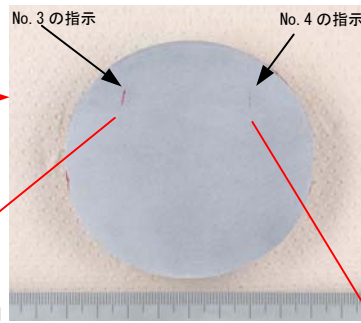
蒸気発生器側から見た図



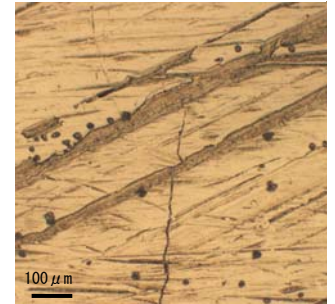
- 浸透探傷試験の結果、No. 3の割れは約5.5mm、No. 4の割れは約4.7mmの指示を確認しました。
- 試料表面全域にわたり、筋状模様が認められ、A及びB蒸気発生器に確認された筋状模様と比べ明瞭でした。
- 破面観察の結果、No. 3の割れは最大深さが約6.4mm、No. 4の割れは最大深さが約3.4mmでした。
- 溶接金属結晶の粒界に沿って枝分かれた破面を確認しました。



採取試料の浸透探傷試験結果



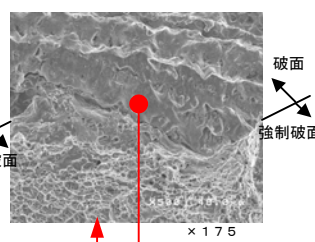
採取試料の表面観察結果



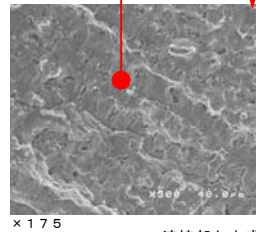
No. 3割れの破面観察結果



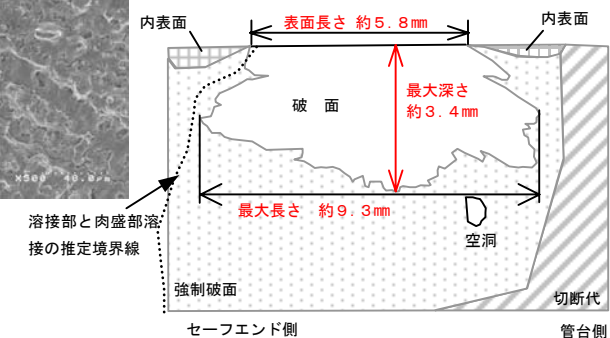
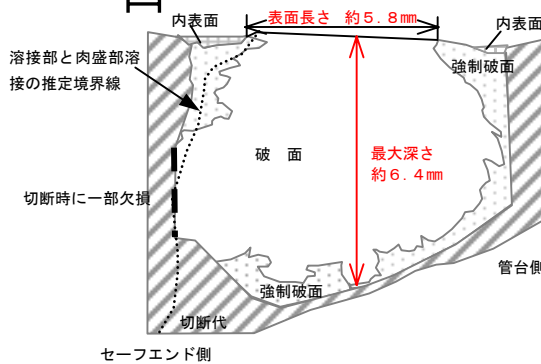
走査型電子顕微鏡観察結果 (拡大)



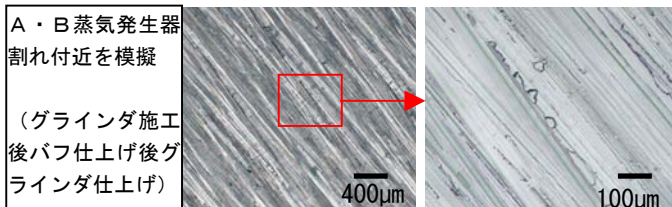
結晶の境界破面



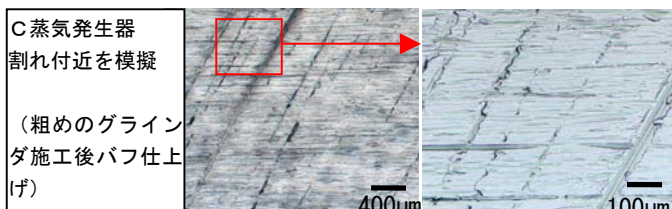
No. 4割れの破面観察結果



表面加工状態確認試験



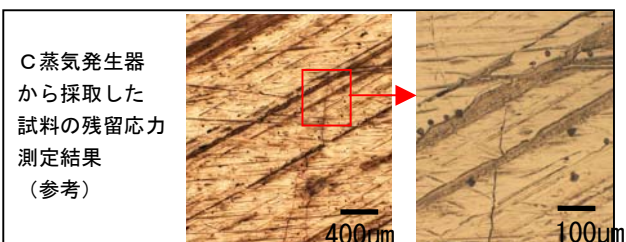
平均約470MPa (引張応力)



平均約210MPa (圧縮応力)

表面加工状態確認試験の評価

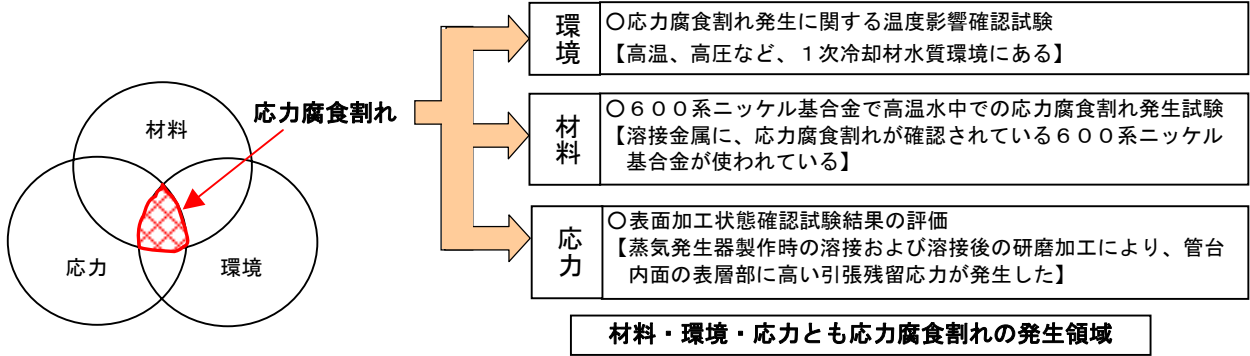
- ・グラインダ施工面とその上にバフ仕上げを施工した面では約680MPaの差があることを確認しました。
- ・グラインダの溝が深い部位では一般的な測定値に対し、約680MPaの補正を加えることで溝底部の残留応力を推定できると考えられます。
- ・C蒸気発生器から採取した試料の残留応力測定結果に680MPaを加えるとグラインダ溝底部の残留応力は90~420MPaの引張残留応力であると評価しました。



263~591MPa (圧縮応力)

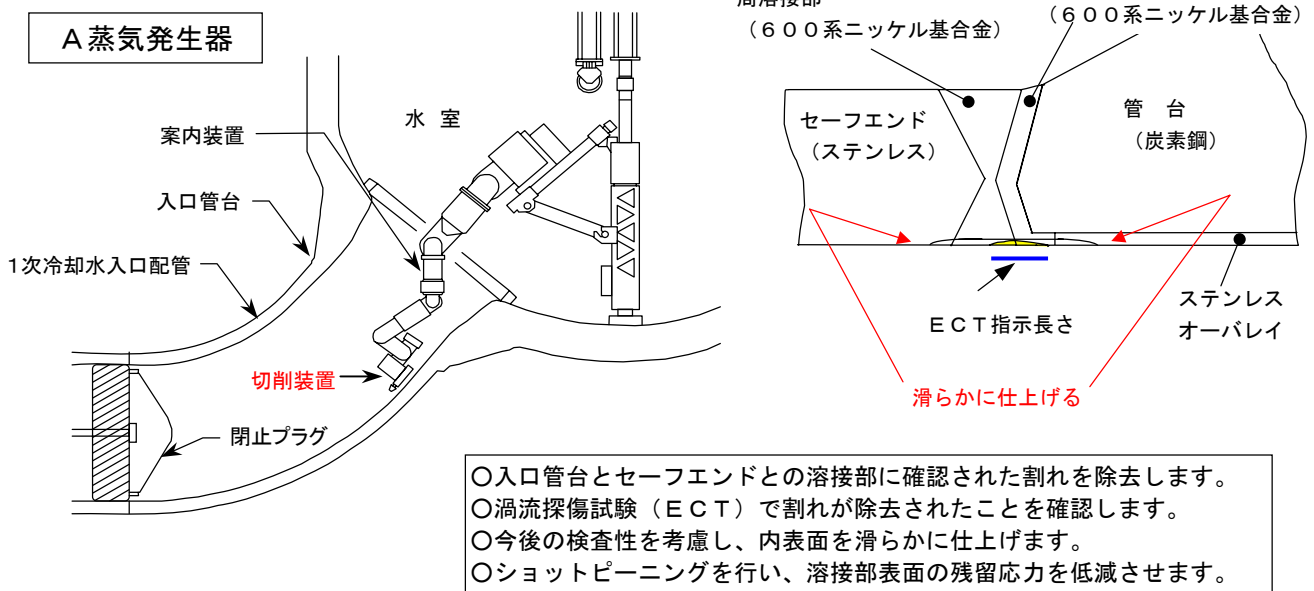
推定原因

割れや破面の特徴等から、以下の３因子が重畳して発生・進展した応力腐食割れであると推定されました。

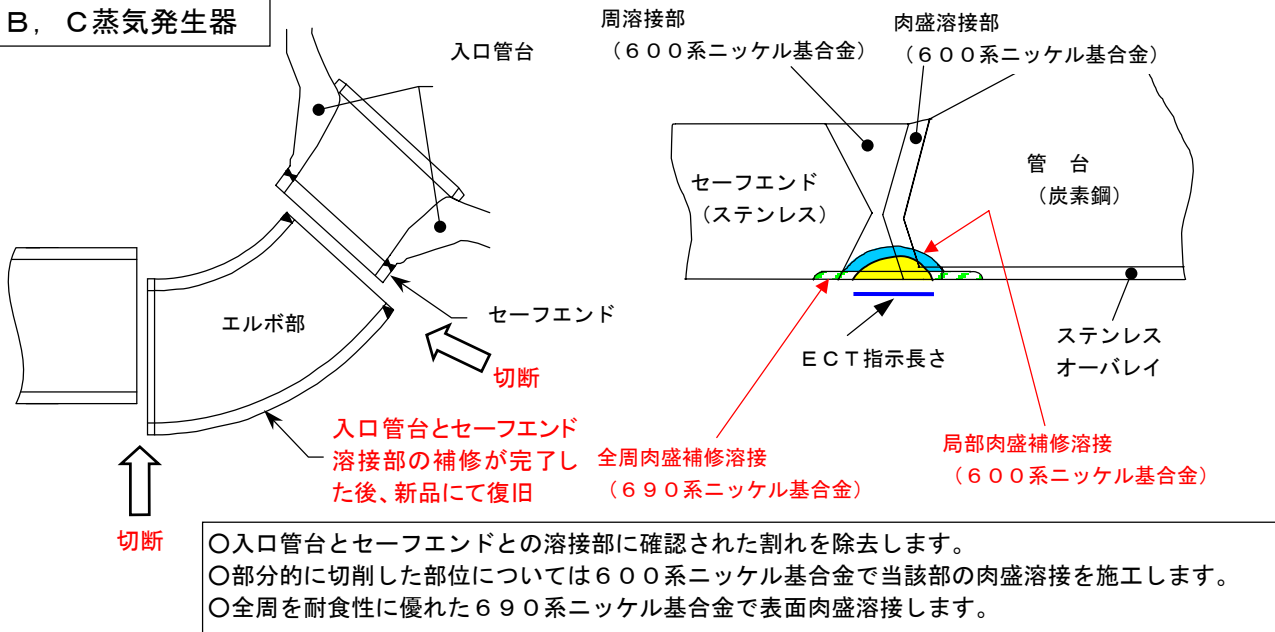


対策

A 蒸気発生器



B, C 蒸気発生器



必要な工事計画の強度評価に際しては、セーフエンドの肉厚（75mm）等の計算条件について現行の評価手法に従い評価を実施します。