

PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れ 発生・進展メカニズムの知見拡充成果について

原子力エネルギー協議会
(ATENA)

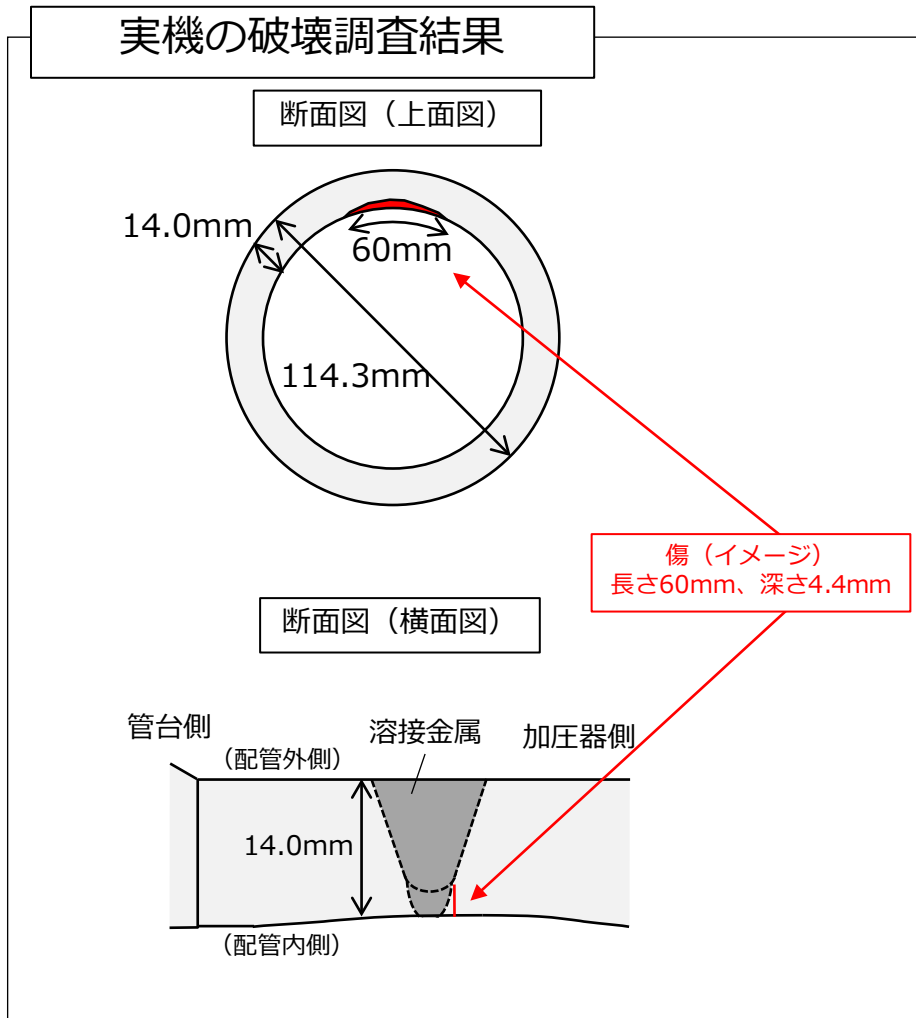
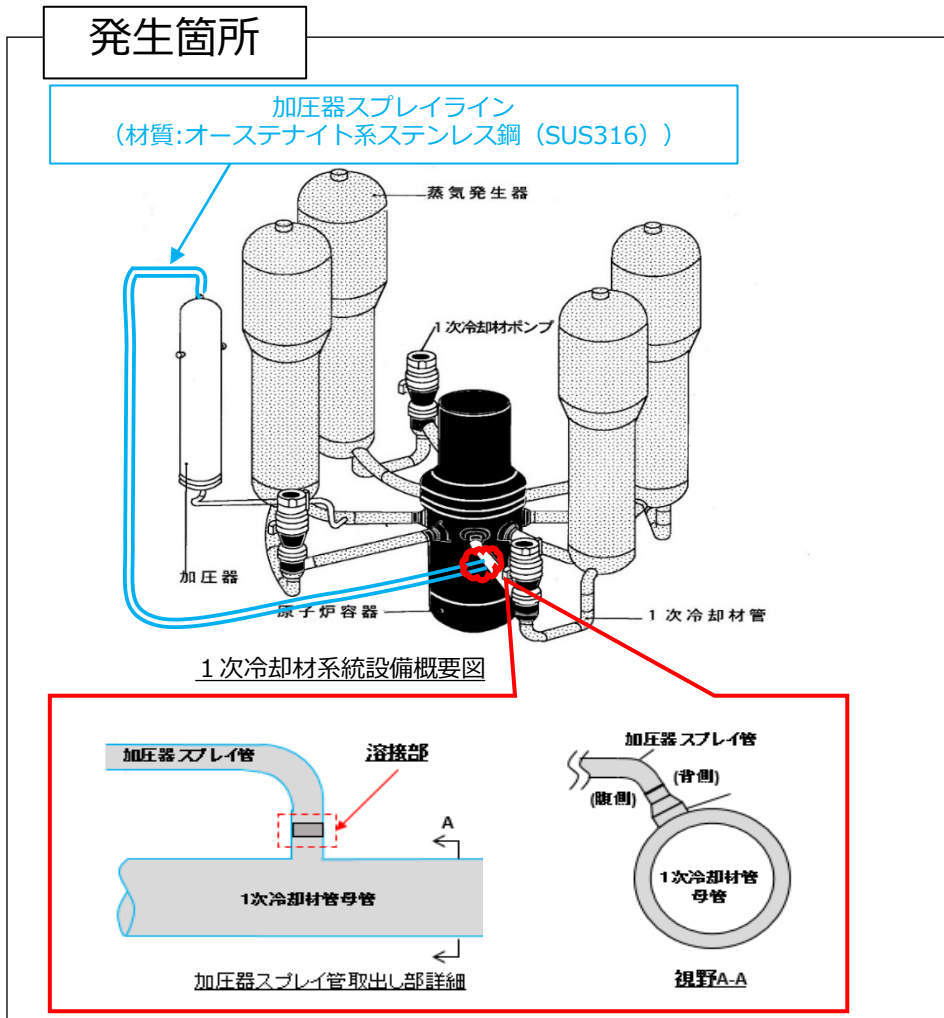
2026年1月22日

本資料には、経済産業省「令和6年度原子力の安全性向上に資する技術開発事業（原子力発電所の長期運転に向けた高経年化対策に関する研究開発）」の成果が含まれています。

1. 知見拡充の取組み
2. 知見拡充結果
3. 発生・進展メカニズム
4. 大飯3号粒界割れ事象の特異性/他との差別化
5. LBBの取り扱い方針

1. 知見拡充の取組み PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れの概要

本検討の発端となった大飯発電所 3号機加圧器スプレイ配管溶接部での事象の概要を以下に示す。



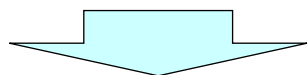
➤ 供用期間中検査 (ISI) にて、加圧器スプレイラインの1次冷却材管台と管継手 (エルボ部) の配管溶接部に有意な指示が認められた。その後の破壊調査により、**溶接熱影響部にて長さ60mm、深さ4.4mmの亀裂**があることが明らかとなった。

1. 知見拡充の取組み 配管溶接部の割れの概要

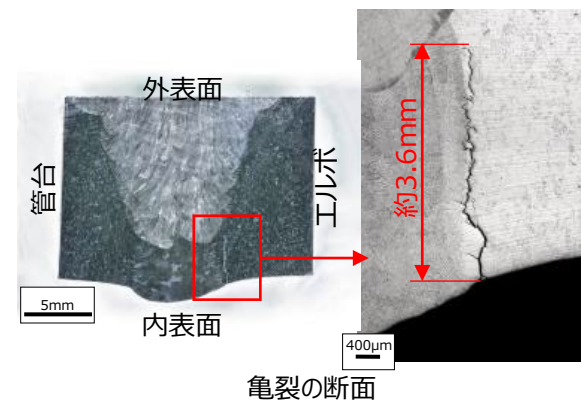
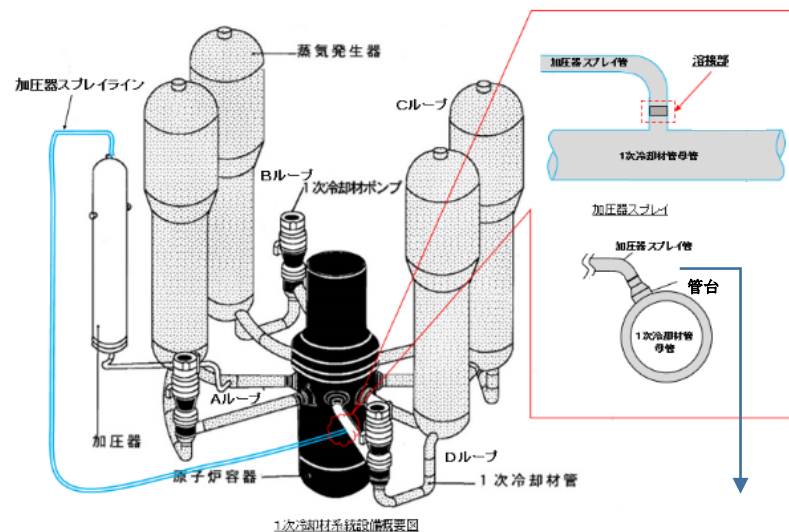
＜亀裂発生及び亀裂進展の状況整理＞

(公開会合における関西電力説明)

- 過大な溶接入熱と、管台-エルボ部の剛性の影響が重畳し、表層近傍において特異な硬化と応力が影響したことにより割れが発生と推定。
(現時点で、初期欠陥が認められていないが、溶接により微細な割れが発生していた可能性が否定できていない)
- また、**亀裂進展**に対しては、硬化したオーステナイト系ステンレス鋼の割れが進展する既存知見と合致しており、**粒界型SCC**と推定。



- ATENAとして、PWR1次系ステンレス鋼配管における割れについては特異な事象であり、発生メカニズムなど知見がほとんどなく、原因の特定および知見拡充の観点から、研究・調査が必要であると認識。



1. 知見拡充の取組み 事象発生当初の想定メカニズム概要

- ◆ メカニズム解明に向けて知見拡充を実施すべく、想定メカニズムを構築し、研究内容を計画
 - 実機詳細調査の結果、過大な溶接入熱（若手による丁寧かつ慎重な溶接や補修溶接の可能性を含む）と、形状による影響※が重畳したことで、表層近傍において特異な硬化が生じたものと考えられる。
 - この硬化部に高い応力が影響したことにより、亀裂が発生したものと考えられるが、メカニズムが全て明らかにはなっておらず、PWR一次系の配管溶接部では、これまで同様の事象が生じていないことから、今後知見の拡充に努める。
 - 亀裂は溶接熱影響部で粒界に沿って進展しており、硬化したオーステナイト系ステンレス鋼はSCCで進展することが知見としてあることから、粒界型SCCで進展したものと判断した。

※管台－エルボ形状では、変形領域が狭いため、溶接部近傍でひずみが大きくなる。

1. 知見拡充の取組み 事象発生当初の要因候補と絞り込み結果

| 事業者調査時の推定因子 | | | 事業者調査時の結果と今回得られた専門家意見 | |
|---------------------------|---------------|----------|--|--|
| 事象 | 要因 | 因子 | 事業者調査結果と今回得られた専門家意見 | 判定※ |
| 加圧器 スプレイライン 配管溶接部の傷 | 機械的疲労 | 振動による疲労 | <ul style="list-style-type: none"> マクロ・ミクロ観察により、破面からビーチマークやストライエーションは確認されなかった。 | × |
| | 熱疲労 | 高サイクル熱疲労 | <ul style="list-style-type: none"> マクロ・ミクロ観察により、破面からビーチマークやストライエーションは確認されなかった。 単一の亀裂であり、熱疲労のような亀甲状の亀裂は確認されなかった。 | × |
| | | 熱過渡による疲労 | | × |
| | SCC | 粒界型SCC | <ul style="list-style-type: none"> 破面ミクロ観察の結果、粒界割れが主に認められた。 硬さ計測の結果、表層で350HV0.01、内部で200HV1～240HV1が認められた。 <p><外部専門家意見> 有力な因子と考えられるが、粒界型SCCによる亀裂発生機構・原因と断定する（他の因子を排除するには、事業者調査では実施していないEBSD等も用いて当該部の特異性を追加調査すべき。</p> | ○ |
| | | 粒内型SCC | | × |
| | 溶接欠陥/ 溶接不良 | 溶接欠陥 | <ul style="list-style-type: none"> 破面観察の結果、ブローホール、スラグ巻き込み、融合不良、高温割れ等は認められなかった。 PT及び断面観察の結果、アンダーカットは認められなかった。 付着物EDS分析の結果、高温割れの原因となるP(リン)は認められなかった。 その他、溶接手順は通常手順で実施されていた。 | △ |
| | | 溶接不良 | | <ul style="list-style-type: none"> 破面観察の結果、補修溶接の痕跡は認められなかった。 裏波部の外観、周方向断面観察の結果、明瞭な溶接欠陥は確認されず、補修溶接の痕跡も認められなかった <p><外部専門家意見> 明確な溶接欠陥／溶接不良が存在した可能性は低いものの、微細な欠陥／特異な溶接箇所が存在した可能性を完全に否定はできず、破面SEMでの拡大観察や、EDS分析での元素同定他により確認すべき。</p> |

※：局所的な特異性による粒界型SCCや、微細な溶接欠陥／溶接不良等を念頭に置いた詳細調査の結果により、他の因子の判定に影響無きかも併せて検討

1. 知見拡充の取組み 実地項目の概要

| | 得られた課題 | 対応方針 | 実施項目 |
|-----------|---|---------------------------------------|---|
| 亀裂発生メカニズム | [粒界型SCC] 過大な溶接入熱と、管台-エルボ部の剛性の影響が重畳し、表層近傍において特異な硬化と応力が影響した可能性 | 特異な硬化、応力により割れが発生するメカニズムについて実機詳細調査交え検討 | <ul style="list-style-type: none"> ○実機詳細調査（損傷部位、比較部位含むモックアップ） ・局所ひずみ測定（SEM/EBSD） ・断面マクロ硬さ測定（裏波幅と硬さの相関取得） ・溶接欠陥の調査(SEM/EDS) ・潜在き裂の調査(SEM/EDS) ・被膜分析、亀裂先端ミクロ組織分析（SEM/EDS、TEM/EDS、ラマン分光） |
| | [溶接欠陥/不良] 溶接により微細な割れが発生していた可能性 | 高倍率の観察など詳細調査を実施 | <ul style="list-style-type: none"> ○溶接残留応力評価 |

1. 知見拡充の取組み 実施項目の詳細

<実機詳細調査>

| 項目 | 内容 |
|---------|--|
| 研究当初の認識 | <ul style="list-style-type: none"> 溶接熱収縮による硬化が亀裂発生の原因と考えているが、硬化により粒界割れに至る知見が不足。 亀裂発生機構に関し微小な潜在亀裂が存在した可能性を否定できていない。 |
| 必要な対応 | <ul style="list-style-type: none"> 実機当該管や比較管（含むモックアップ）に対する下記の調査を行い、既往知見の調査結果と併せて、亀裂発生メカニズム・原因の特定を行う。 具体的には、亀裂が生じた粒界近傍での局所的な歪や硬さ、特異な残留応力等が生じた可能性について、事業者調査では実施しなかったEBSD等も用いて実機（含むモックアップ）に対する詳細調査を実施し、硬さ、もしくは硬さ以外の粒界割れ発生要因を調査する。 併せて、SEM、EDS等を用い、微小な潜在亀裂等の初期欠陥の有無を調査する。 |
| 実施項目 | 実機詳細調査（当該管、比較管（含むモックアップ）） (1)-①局所ひずみ測定（SEM/EBSD） (1)-②断面マクロ硬さ測定（裏波幅と硬さの相関取得） (2)-①溶接欠陥の調査(SEM/EDS) (2)-②潜在亀裂の調査(SEM/EDS) (3)被膜分析、亀裂先端ミクロ組織分析（SEM/EDS、TEM/EDS、ラマン分光） |

<残留応力評価>

| 項目 | 内容 |
|---------|--|
| 研究当初の認識 | <ul style="list-style-type: none"> 溶接残留応力の基本的なFEM解析手法は国プロIAFで整備されている一方、詳細な当該部位の条件を押さえた残留応力分布は得られていない。 |
| 必要な対応 | <ul style="list-style-type: none"> 本検討で得た実機詳細調査結果を考慮に入れつつ、当該部位の条件を当てはめ、溶接残留応力分布を解析的に得る。 |
| 実施項目 | 解析条件： ①裏波垂れ下がり（大/小）、②裏波形状（対称/非対称）、③始末端と定常(溶接ビード端の重なり(有/無)) ④補修溶接有無（有/無）、⑤継手形状 |

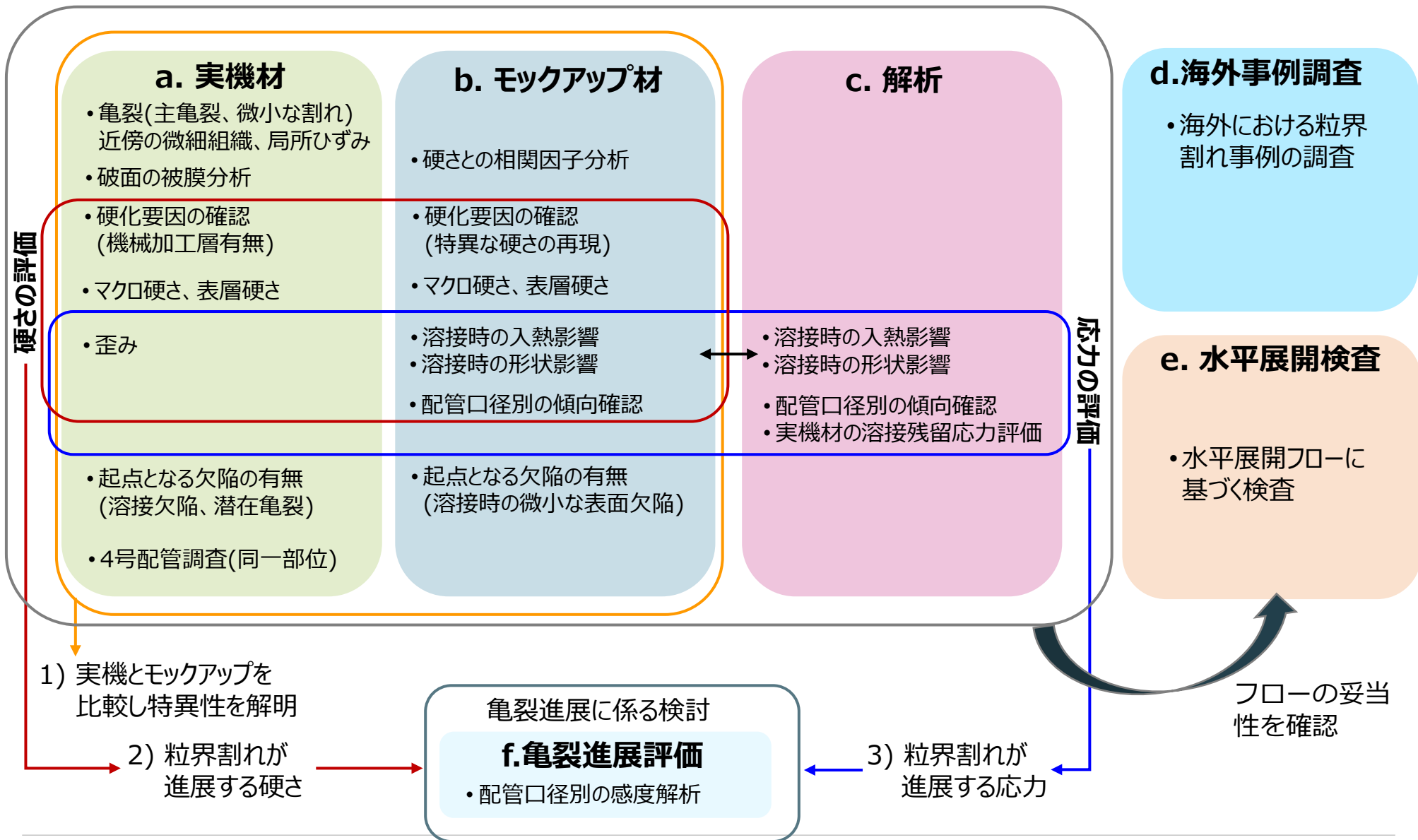
1. 知見拡充の取組み スケジュール

| 目標 | 実施項目 | 2022年度 | 2023年度 | 2024年度 | 2025年度 |
|-------------|---------------------------|----------------------------------|------------|------------|--------|
| 全般 | 1. 最新知見の調査 | [Blue bar spanning 2022 to 2025] | | | |
| 亀裂発生メカニズム解明 | 2. 実機詳細調査（損傷部位、比較部位） | 実機損傷/健全部位 | 実機/モックアップ | | |
| | (1)-①局所ひずみ測定（SEM/EBSD） | [Blue bar] | [Blue bar] | | |
| | (1)-②断面マクロ硬さ測定 | [Blue bar] | [Blue bar] | | |
| | (2)-①溶接欠陥の調査（SEM/EDS） | [Blue bar] | [Blue bar] | | |
| | (2)-②潜在き裂の調査（SEM/EDS） | [Blue bar] | [Blue bar] | | |
| | (3)被膜分析、亀裂先端マイクロ組織分析（TEM） | | | [Blue bar] | |
| | 3. 発生特性に関する調査 | | [Blue bar] | | |
| 構造健全性評価の確立 | 4. (1) SCC進展特性知見の調査 | [Blue bar] | | | |
| | 4.(2)SCC進展特性データの取得 | | | [Blue bar] | |
| | 4.(3)SCC進展速度線図案の策定 | | | [Blue bar] | |
| | 5.溶接残留応力評価 | | | [Blue bar] | |
| | 6.(1) 構造健全性評価 | | | [Blue bar] | |
| | 6.(2) LBB成立性の検討 | | | [Blue bar] | |
| 技術基盤の整備 | 7. 技術基盤の整備 | | | [Blue bar] | |

1. 知見拡充の取組み 追加調査・検証項目

- 当初計画していた研究項目に加えて、主に大飯3号機粒界割れ事象の特異性（他との差別化）に関する知見を拡充する観点から、以下の追加研究を実施

| 項目 | 方針 | 調査・検証内容 |
|---------------|---|---------------------|
| モックアップ製作 | 大飯3号当該部が硬くなっていた要因を確認するため、当該管と同形状・同材料のモックアップ供試体を製作 | 硬さ測定 |
| 残留応力解析 | 大飯3号当該部の溶接条件による高応力状況の確認及び亀裂進展評価に用いる残留応力について、配管口径ごとの応力分布を評価 | FEM解析 |
| 大飯4号 実機材調査 | 大飯3号機当該部の特徴が一般的なものであるか確認するため、大飯3号とほぼ同条件※である大飯4号加圧器スプレイライン配管（A、Dループ）の廃材を調査 （※建設時期、運転中に作用する応力、材料（材料は同一）） | 硬さ測定 断面マクロ・ミクロ観察 |



2. 知見拡充結果 メカニズム解明に向けた研究成果まとめ(1/2)

<a.実機材調査>

| 大飯3号事象発生当時 | | ATENA知見拡充WG | |
|--------------|--|------------------------|--|
| 化学分析 | <ul style="list-style-type: none"> 規格の範囲内であり異常は認められず | — | — |
| 硬さ計測 | <ul style="list-style-type: none"> 粒界割れ部において最大350HV0.01の硬さを確認【添付-1】 | 硬さ計測 | <ul style="list-style-type: none"> 粒界割れ部以外も含む複数断面の測定により粒界割れ部が最大となることを確認【添付-2】 |
| 断面マイクロ/マクロ観察 | <ul style="list-style-type: none"> 溶金近傍で粒界型の亀裂進展を確認 裏波幅、デンドライト成長方向から大入熱であったと推定 HAZ部に機械加工による微細化層は認められず | 断面マイクロ/マクロ観察 | <ul style="list-style-type: none"> 周方向の角度の異なる複数断面を確認し潜在亀裂は認められなかった HAZ部極表層において1結晶粒に達しない深さの微小な割れを確認 HAZ部にて約500μmの粗大粒化を確認【添付-3】 |
| — | — | EBSD計測 (粒界性格同定、ひずみ) | <ul style="list-style-type: none"> 機械加工による微細化層はIPFマップでもHAZ部には認められず【添付-4】 主亀裂、微小な割れ共にランダム粒界での発生を確認【添付-5】 主亀裂及び他部位で局所ひずみの有意な差は確認されず【添付-6】 |
| SEM/EDS分析 | <ul style="list-style-type: none"> 破面全体にわたって粒界割れを確認。 破面にて粗大粒を確認 破面及び断面観察の結果、溶接欠陥(空洞、介在物、融合不良等)の痕跡や、補修溶接の痕跡は確認されず。 | SEM/EDS分析 | <ul style="list-style-type: none"> 主亀裂開口部の配管内表面にて酸素を確認【添付-7】 溶接欠陥に起因するような影響ある元素(P,S等)は認められず【添付-8】 |
| — | — | TEM/EDS分析 | <ul style="list-style-type: none"> 主亀裂最先端でのNi濃化を確認。(進展性を示唆)【添付-9】 |
| — | — | 酸化物ラマン分光分析 | <ul style="list-style-type: none"> 酸化被膜形態に特異な状況は確認されず、一般的なPWR一次系環境下であったと考えられる【添付-10】 |
| — | — | 4号配管調査 | <ul style="list-style-type: none"> 大飯4号の同一部位で調査を実施【添付-11】 SEM/EDS分析：亀裂及び3号のような粗大粒化は確認されなかった。硬さ測定：最大295HV0.01であり、特異な硬さは確認されなかった |
| — | — | 微小な割れ | <ul style="list-style-type: none"> 微小な割れ周辺硬さの最大値は265HV0.01であり特異な硬化が見られない部位でも微小な割れを確認【添付-12】 微小な割れ先端ではNi濃化は認められず。(停滞を示唆)【添付-13】 |

2. 知見拡充結果 メカニズム解明に向けた研究成果まとめ(2/2)

<b.モックアップ材調査>

| 大飯3号事象発生当時 | | ATENA知見拡充WG | |
|--------------|---|--------------|--|
| 硬さ計測 | <ul style="list-style-type: none"> 管台-エルボを模擬したモックアップ(2020年度製作)において最大330HV0.01の硬さを確認。 | 硬さ計測 | <ul style="list-style-type: none"> 当該部と同じ形状の管台-エルボを用いたモックアップ(2024年度製作)を作製し、大入熱の条件で327HV0.01を確認【添付-14】 |
| 断面マイクロ/マクロ観察 | <ul style="list-style-type: none"> 実機当該管の裏波幅(8.0mm)と同等の裏波幅(7.9mm~)を確認。 | 断面マイクロ/マクロ観察 | <ul style="list-style-type: none"> 複数の断面を観察したが、製作(溶接)時には微小な表面欠陥は認められない【添付-15】 入熱量と裏波幅、硬さの相関を確認【添付-16】 入熱量が大きなモックアップでデンドライトの成長方向が当該部と同様の傾向である事を改めて確認。【添付-17】 |

<c.解析>

| 大飯3号事象発生当時 | | ATENA知見拡充WG | |
|------------|--|-------------|---|
| 残留応力 | <ul style="list-style-type: none"> 初層TIG+SMAWの溶接条件で溶接残留応力を評価。 | 残留応力 | <ul style="list-style-type: none"> 配管内表面で高応力となることを確認【添付-18】 溶接ビード端の重なりにより溶接境界部における板厚内部の軸方向応力が増加する傾向を確認【添付-19】 |

<d.海外事例調査>

| 大飯3号事象発生当時 | | ATENA知見拡充WG | |
|------------|---|-------------|--|
| — | — | 海外情報 | <ul style="list-style-type: none"> 特異な条件(硬さと高応力の重畳)となった部位で、過去に粒界割れ事象が発生していることを確認【添付-20】 |

<e.水平展開検査>

| 大飯3号事象発生当時 | | ATENA知見拡充WG | |
|------------|---|-------------|---|
| — | — | 水平展開検査 | <ul style="list-style-type: none"> 水平展開フローから実機水平展開検査を実施し、延べ1102箇所て指示は確認されなかった【添付-21】 |

<f.亀裂進展評価>

| 大飯3号事象発生当時 | | ATENA知見拡充WG | |
|------------|---|-------------|--|
| — | — | 亀裂進展評価 | <ul style="list-style-type: none"> メカニズム解明で得られた知見を用いて、4B,6B,12B,14B配管の亀裂進展速度を算出した。【添付-22、23、24】 |

【要因分析】

大飯3号の事例は、①管台-エルボ（変形が拘束されやすい）における溶接時の大入熱により生じた特異な硬さ、②内表面の高応力の要因が重畳して粒界割れが発生し、進展に至ったものと考えられる。

<硬さ>

- 当該管と同一口径（直管-直管）で通常の溶接施工要領を超えた大入熱の溶接条件を再現したモックアップを製作（2020年度）し、溶接入熱量と硬さの相関を評価した結果、入熱量が大きいほど硬さが上昇することが確認出来た。（⇒P43）
- 更に、直管-直管よりも管台-エルボの方が変形の拘束が大きいと考えられることから、当該管と同設計（製法、材料も同じ）の管台とエルボを調達し、特異な硬さを再現可能と考えられる初層大入熱、2層目以降小入熱の条件で溶接を行って、モックアップを製作（2024年度）した結果、直管-直管よりも硬くなり、実機で確認された硬さ350HV0.01に相当する硬さ（327HV0.01）が確認出来た。（⇒P38）

<応力>

- 大飯3号当該部に想定される初層大入熱、2層目以降小入熱の溶接条件における残留応力解析は、標準入熱条件のものより亀裂発生当該部において配管内表面側の残留応力が高くなっている可能性を確認した。（⇒P47）
- 内表面においては有意な増加傾向は認められなかったが、溶接ビード端の重なりが溶接境界部の板厚内部で応力増加の要因となる可能性が示された。（⇒P48）

<その他要因の可能性の排除>

- 溶接欠陥の可能性：破面SEM観察によって溶接欠陥の影響を示す元素（P,S等）は認められなかった。（⇒P30）
- 水質異常の可能性：主亀裂の酸化皮膜特性は一般的なPWR一次系環境で生じるものと差異はなかった。（⇒P32）

⇒上記の知見拡充成果によって推定要因の絞り込みが可能となった。

3. 大飯3号粒界割れ事象の発生・進展メカニズム (2/3)

【メカニズム推定】

<発生>

- 亀裂当該部の調査により特異な硬さ(350HV0.01)が見られる点 (⇒P21)、残留応力解析から高応力が生じる可能性がある点 (⇒P47) を確認したことから、粒界酸化により発生した微小な割れを起点として、粒界割れにより主亀裂が発生した (⇒P24) ものと推定。

<進展>

- 配管内部においても有意な硬さ (⇒P22)、応力が生じている (⇒P47) ことからSCCにより主亀裂が進展したと推定。主亀裂先端部のSTEM/EDS観察でNi濃化が確認されており、主亀裂は進展性を有していたSCCであった (⇒P31) ことを示唆。

【まとめ】

- 大飯3号の当該事象は、通常プロセスと異なる製造(溶接時の大入熱)による特異な硬化及び内表面の高応力が相まって粒界割れが発生し、その後のSCCによる進展に至ったものと考えられる。なお、知見拡充成果から発生のタイミングを判断できる十分な知見は得られなかった。

3. 大飯3号粒界割れ事象の発生・進展メカニズム (3/3)

① PWR環境水中にある期間曝され、内表面で酸化が進行。



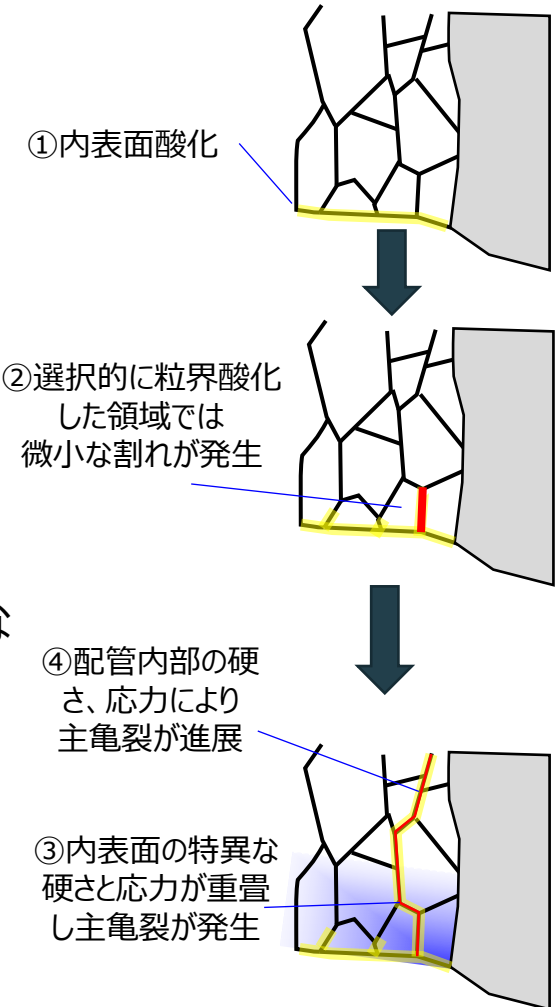
② 選択的に粒界酸化した領域で、微小な割れが発生。



③ 初層における溶接時の大入熱により配管内表面の硬さが特異 (350HV0.01)となる部位で、高い応力と重畳することで、微小な割れが成長し主亀裂が発生*。



④ 配管内部の硬さ及び応力により主亀裂が進展



<微小な割れについて>

- 大飯3号当該管の溶接部に対するラボ調査において、主亀裂以外に微小な割れが認められた。(⇒P25)
調査の結果、主亀裂のような特異な硬さは確認されず、割れの停留が確認された。(⇒P37)
そのため、微小な割れが主亀裂のように進展する可能性は低いと想定される。

4. 大飯3号粒界割れ事象の特異性/他との差別化(1/2)

<実機水平展開検査>

- 当該事象発生時に、当該部位以外の懸念箇所を抽出するため特異な硬さが他で生じていないかを確認する観点で、溶接方法や大入熱の可能性、溶接形状の影響を考慮した水平展開フローを構築した。
- 知見拡充の取組み結果から、フロー構築に用いた要因分析が妥当であることを確認し、水平展開フローで対象となった箇所以外に、新たに追加で検査が必要な選定条件は見当たらず、水平展開フローに不足がないことを確認した。
(⇒P51)
- 水平展開フローに基づいて1,100超箇所を検査を行った結果、有意な欠陥指示は確認されなかった。(⇒P52)

<残留応力解析>

- 4B,6Bでは内面側引張、外面側圧縮の傾向、12B,14Bでは板厚の約半分までは圧縮、外面側は引張の傾向を示すことが確認された。(⇒P53)

<亀裂進展評価>

- 大飯3号機当該部を模擬した条件で亀裂進展に対する感度解析を行った。口径が大きい場合(12B,14B)は亀裂進展速度が比較的遅い。一方、口径が小さい場合(4B,6B)は進展速度が比較的速く、4Bでは15.8EFPY^{※1}、6Bでは3.1EFPY^{※1}程度でUTの検出限界以上の亀裂深さになる可能性あり。(⇒P54)

<他のSCC事例>

- PWR1次系水質環境中では、SCCが発生する可能性は極めて低い。しかしながら、通常プロセスと異なる製造による特異な硬さ(加工硬化)と高応力が重畳した場合、SCCが発生・進展する可能性があることが確認された。
(⇒P49)

また、特異な硬さと高応力の重畳以外にも、過大な残留応力、溶接時の炭素の析出、滞留部の溶存酸素といった特定の因子による影響下でIGSCCが発生した米国事例もあるが、特異な状況以外で発生する可能性は低いとの見解^{※2}がNRCより出されている。(⇒P50)

※1 Effective Full Power Year : 定格負荷相当年数

※2 U.S.NRC.Risk-informed Assessment of French Stress Corrosion Cracking Operation Experience Relative to US Fleet. ML23236A052.2023.9

4. 大飯3号粒界割れ事象の特異性/他との差別化(2/2)

<4号機同一部の調査結果>

- 新たに当該管と同一部位の大飯4号の溶接部をラポ調査した結果、特異な硬化は見られず、亀裂もないことを確認した。(⇒P33,34) 大飯3号と大飯4号で、運転温度、圧力条件、設計に違いはなく供用期間もほぼ同程度であるが、大飯4号の裏波幅は6mm程度で大飯3号当該部の約8mmよりも狭く、結晶粒径も大飯3号で確認された程大きく成長した粒は確認されなかった(⇒P35)ことから、大飯4号の溶接入熱量は大飯3号に比べて低かったと推定される。
-

4. 大飯3号粒界割れ事象の特異性/他との差別化(まとめ)

【知見まとめ】

- 水平展開検査 : 約18EFPY以上供用した溶接部で延べ1,102箇所を検査を行い指示なし。
- SCC事例 : 硬さと高応力が重畳した場合に事象が発生している傾向あり。
- 残留応力解析 : 4B、6Bでは内面側で引張の傾向、12B、14Bでは内面側で圧縮の傾向を確認
- 亀裂進展評価 : 大飯3号機の状況を模擬した条件で4Bでは15.8EFPY、6Bでは3.1EFPY程度でUTの検出限界以上の亀裂深さになる可能性がある一方、12B、14Bでは亀裂進展は遅い。
- 類似部位の調査 : 大飯4号の同一部位を調査し、特異な硬さは確認されず、亀裂の発生もなかった。

【特異性、差別化の考え方】

- ◆ 過大な溶接入熱による硬化と高応力が重畳した場合に亀裂が発生すると考えられるが、延べ1102箇所の水平展開検査で有意な指示は確認されていないことから、当該部の硬化は特異なものであり、非常に稀な現象であったと考えられる。
- ◆ 大口径(12B、14B)は残留応力が内表面で圧縮傾向を示していることから、小口径(4B、6B)に比べて亀裂発生の可能性は低く、亀裂進展も遅い。小口径は内表面で残留応力が引張り傾向であり仮に溶接時に大入熱が生じていた場合には進展速度が速いため既に顕在化している可能性が高いが、水平展開検査で指示が確認されていないため、大入熱が生じていたとは考えにくい。
- ◆ 他の実機材調査から溶接入熱量が過大でなければ特異な硬さは生じず、亀裂も発生していないことを確認した。
⇒ 上記より今後類似事象が発生する可能性は極めて低いものと考えられる。

尚、2000年代中頃からメーカーにおけるステンレス鋼配管の溶接方法は全層TIGに移行しており初層入熱量が小さくできること、および2021年2月より、特異な硬化が生じないようメーカーにて事前の溶接技能トレーニングを行い、適切な溶接入熱になるよう対策を講じていることから、大飯3号当該部と同様な亀裂が発生する可能性は低い。

5. LBBの取り扱い方針

PWRプラントではLBB概念を適用していることから、本事象がLBBに与える影響に対して24年度までの研究成果を用いて取り扱い方針を検討した。

<課題認識>

(PWRにおけるLBB概念適用の考え方：JEAG4613)

- PWR一次系は、水質管理された環境であるため、SCCによる損傷は想定されない。
- このため、LBB概念適用の前提条件となっているSCCによる損傷防止対策については、水質管理がその対策となっている。

<確認結果>

- 大飯3号当該部でラマン分光分析を行い酸化被膜に特異な点はなかったことから、水質に問題はなく通常ではSCCが発生しない環境であったものと考えられる。
- 大飯3号当該部は通常プロセスと異なる製造(溶接時の大入熱)により特異な硬化が生じ、粒界割れが発生したものと推定している。
- 同様の懸念が残る箇所については、継続検査対象として3定検連続の検査を実施しているが、これまで割れは確認されていないことから、大飯3号当該部のような特異な状況にはなく、粒界割れが発生する懸念は小さいものと想定している。

<取り扱い方針>

- 大飯3号当該部の粒界割れは特異なものと想定され、その他部位については大飯と同様の特異な状況にはなく、SCCにより損傷する可能性は十分に低いと考えられることから、従来知見には変わりはなく、LBBの知見に影響を与えるものではないと考えている。

添付資料

【添付-1】亀裂発生部位での硬さ測定結果(1/2)

1. 調査内容

②c断面の亀裂周辺部の深さ（～0.5mm）の硬さを、マイクロビッカース計（10g）を用いて計測した。

2. 調査結果

硬さ計測の結果を以下に示す。

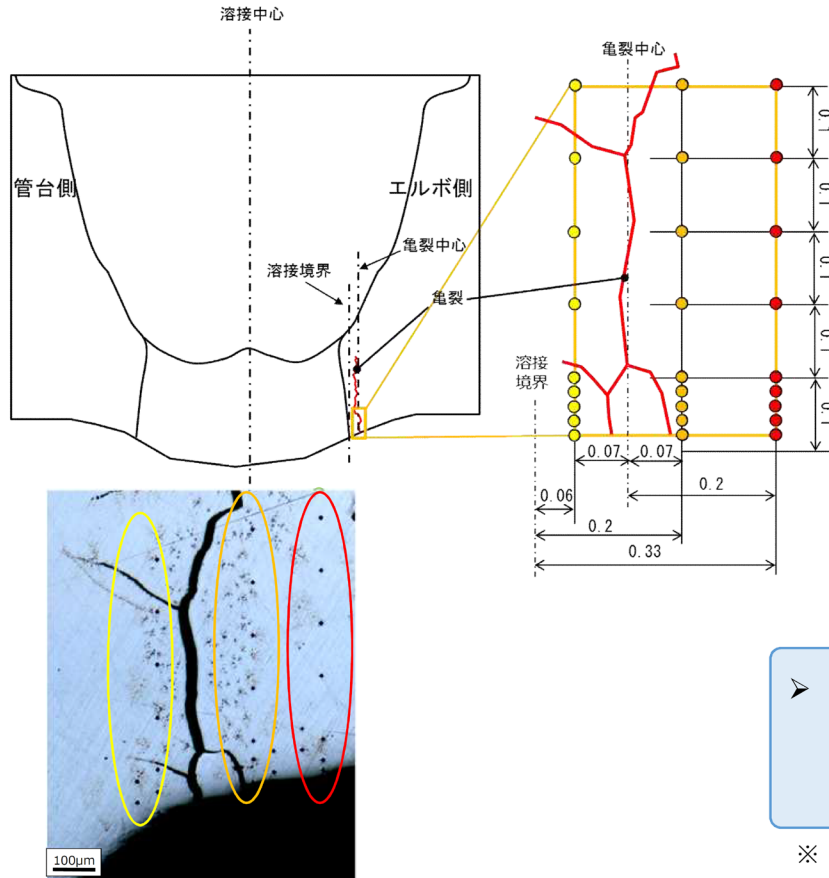


図1：硬さ計測位置

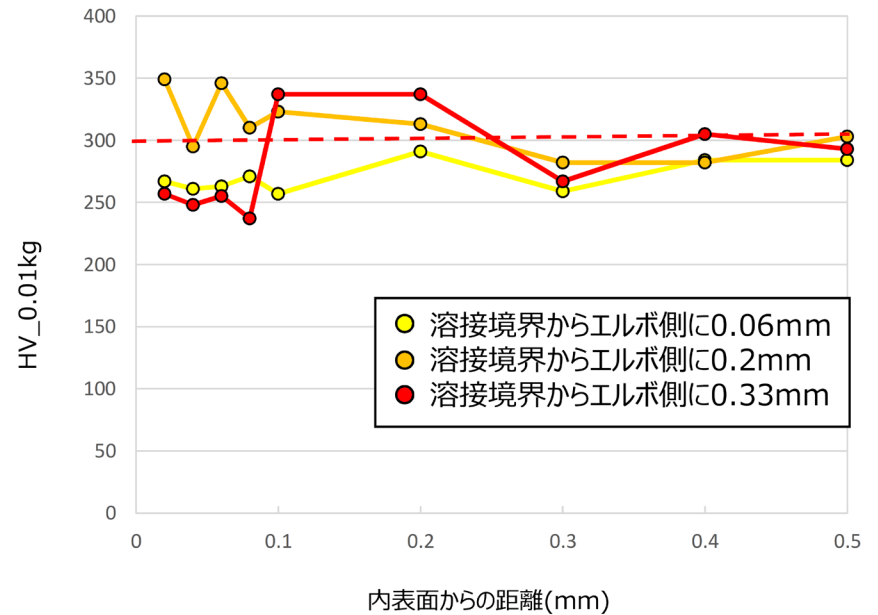


図2：硬さ計測結果

➤ 亀裂近傍（溶接境界から0.2mm）では、内表面近傍の硬さは約350HVの領域も確認されており、強加工SCC発生の知見※のある値（300HV）を超えていた。

※ 出典：M.Tsubota.et.al 7th Int. Sympo. on Environmental Degradation,(1995)
TsubotaらによるBWR条件 CBB試験結果

【添付-1】亀裂発生部位での硬さ測定結果(2/2)

1. 調査内容

②c断面の亀裂周辺部の深さ0.5～7.5mmの硬さを、ビッカース計（1kg）を用いて計測した。

2. 調査結果

硬さ計測の結果を以下に示す。

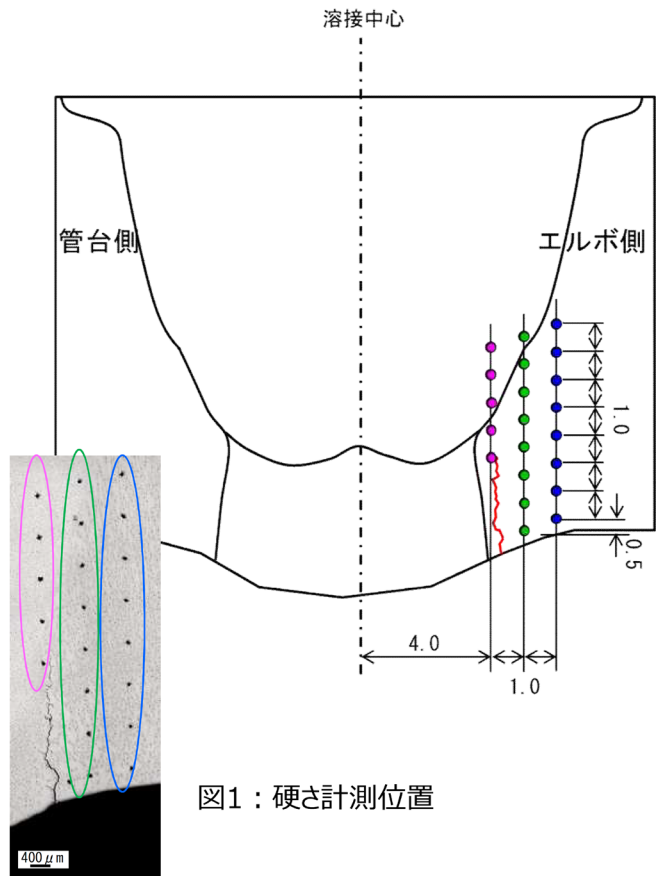


図1：硬さ計測位置

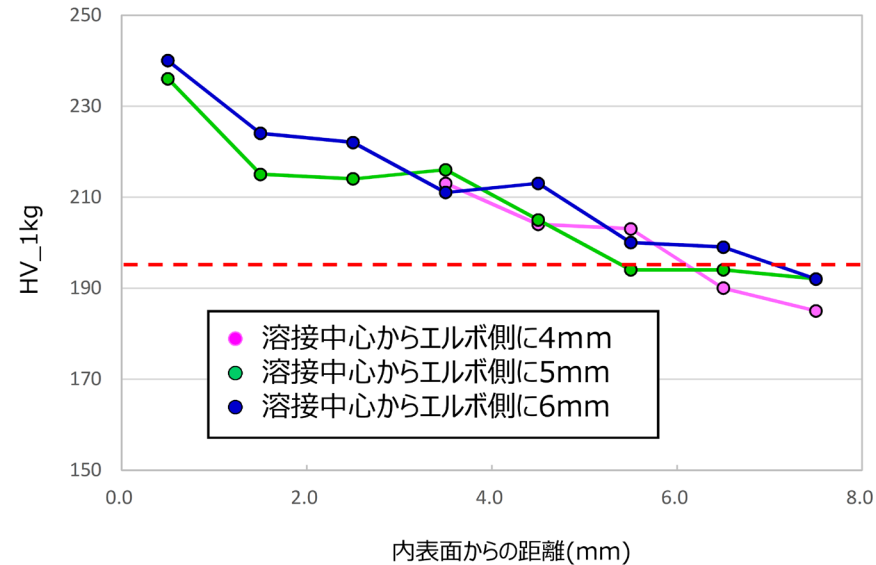


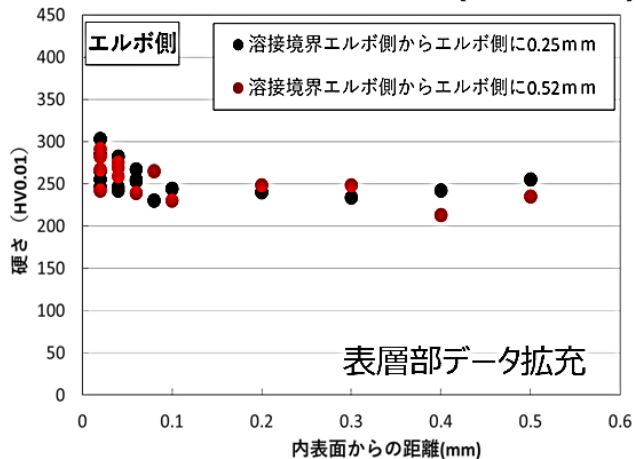
図2：硬さ計測結果

- 亀裂周辺（溶接中心から4mm、5mmのデータのうち、内表面から0.5～5.5mm）では、硬さは200～240HV程度であり、強加工SCC進展の知見※のある値（195HV）を超えていた。

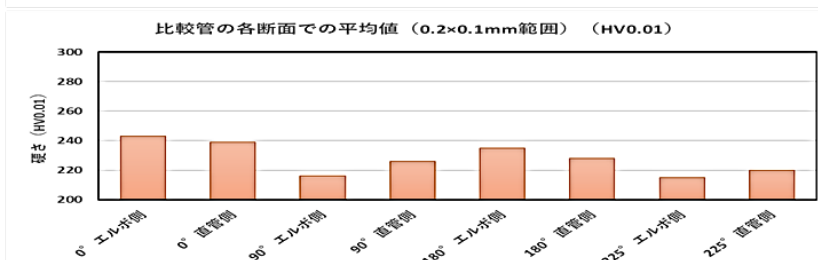
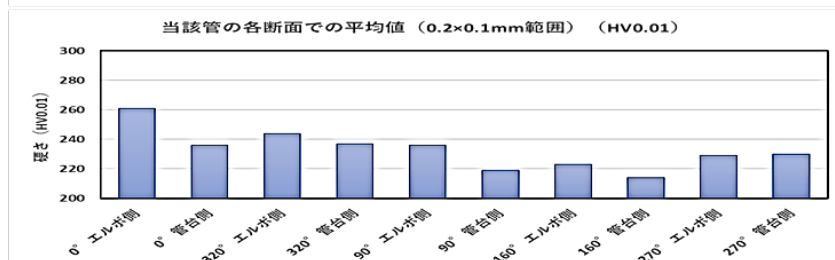
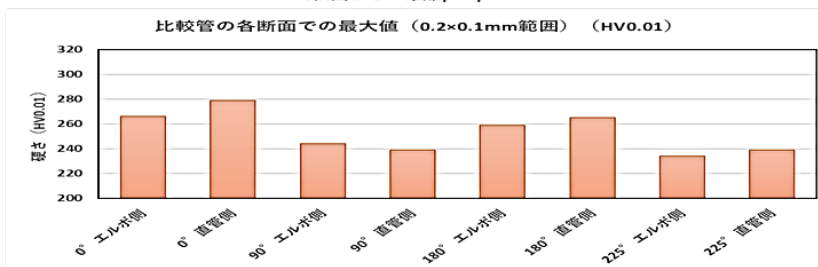
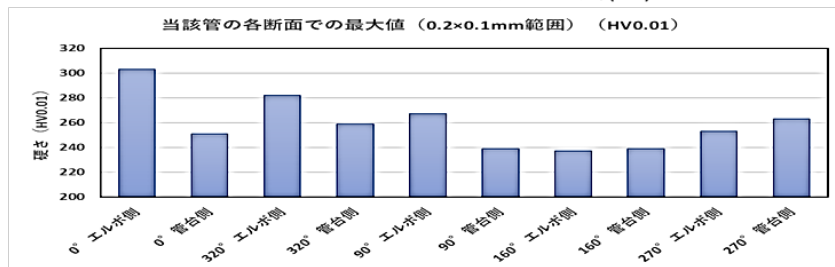
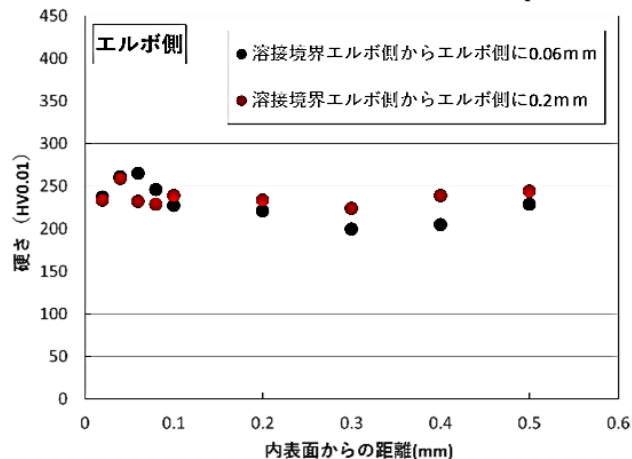
※ 出典：Matsubara.et.al 2010 Fontevraud7 O02-A099-T03-Research Programs on SCC of Cold-worked Stainless Steel in Japanese PWR N.P.P.

【添付-2】主亀裂周辺との他断面での硬さの比較

当該管0°エルボ側の硬さ計測(HV0.01)

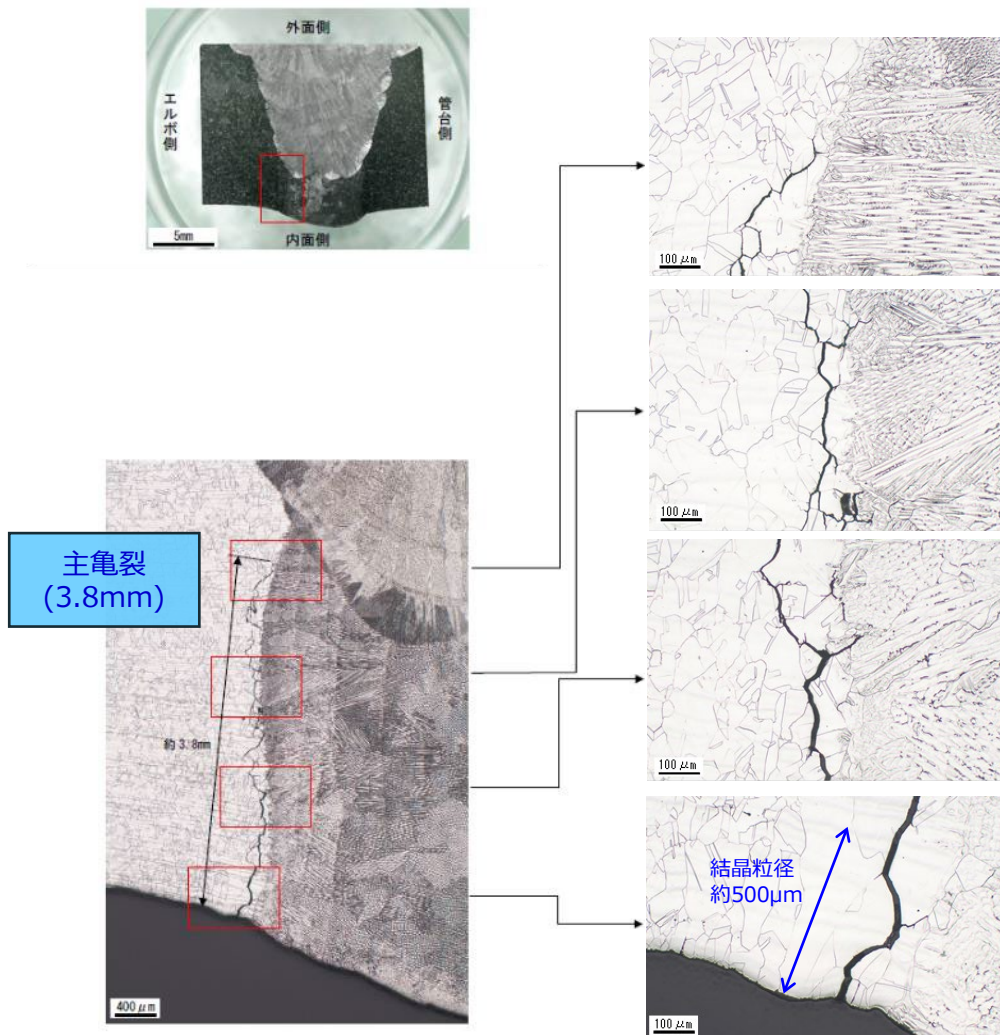


比較管0°エルボ側の硬さ計測(HV0.01)



- ミクロ硬さ(HV0.01)からは、比較管0°エルボ側、また、他の断面と比べても当該管0°エルボ側の主亀裂周辺での内表面側では硬化(最大303HV0.01)の傾向が大きかった。
- **当該管0°の主亀裂の発生には、硬さが影響している可能性が高い。**

【添付-3】 断面マイクロ/マクロ観察結果 (1/2)



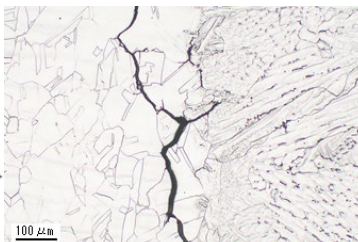
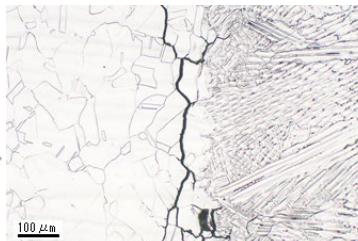
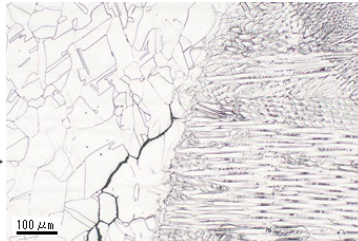
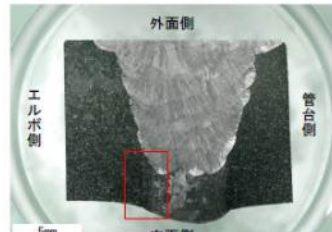
- 潜在亀裂は認められなかった。
- 本断面観察位置では、エルボ側のHAZの内表層において、先行調査で認められていた主亀裂が認められた。
- 主亀裂は、結晶粒界（境界）で進み、約3.8mm長さ（深さ）であった。
- 主亀裂の表層周辺には、母材とは色調が異なっており、表層部及び選択的な粒界での酸化挙動が認められた。

当該管0°エルボ側の主亀裂の断面マイクロ・マクロ観察結果（潜在亀裂有無の確認）

【添付-3】 断面ミクロ/マクロ観察結果 (2/2)

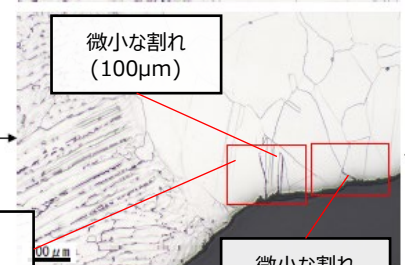
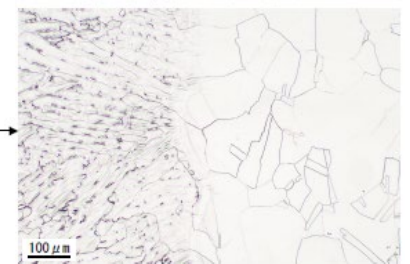
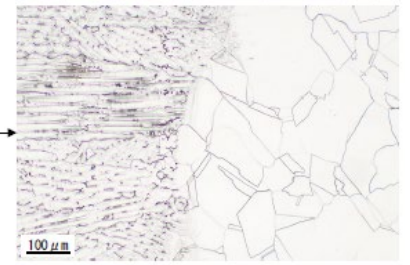
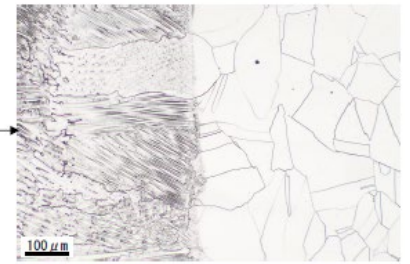
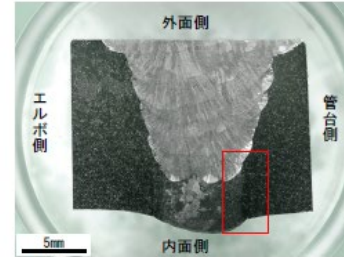
■ 比較管含む複数断面において、HAZ部極表層に1結晶粒に達しない深さの微小割れを確認。

＜当該管0°エルボ側の断面ミクロ/マクロ観察結果＞



微小な割れ (50μm)

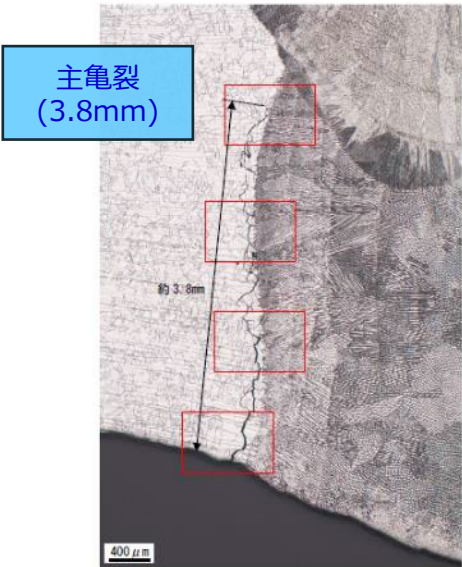
＜当該管0°管台側の断面ミクロ/マクロ観察結果＞



微小な割れ (100μm)

微小な割れ (110μm)

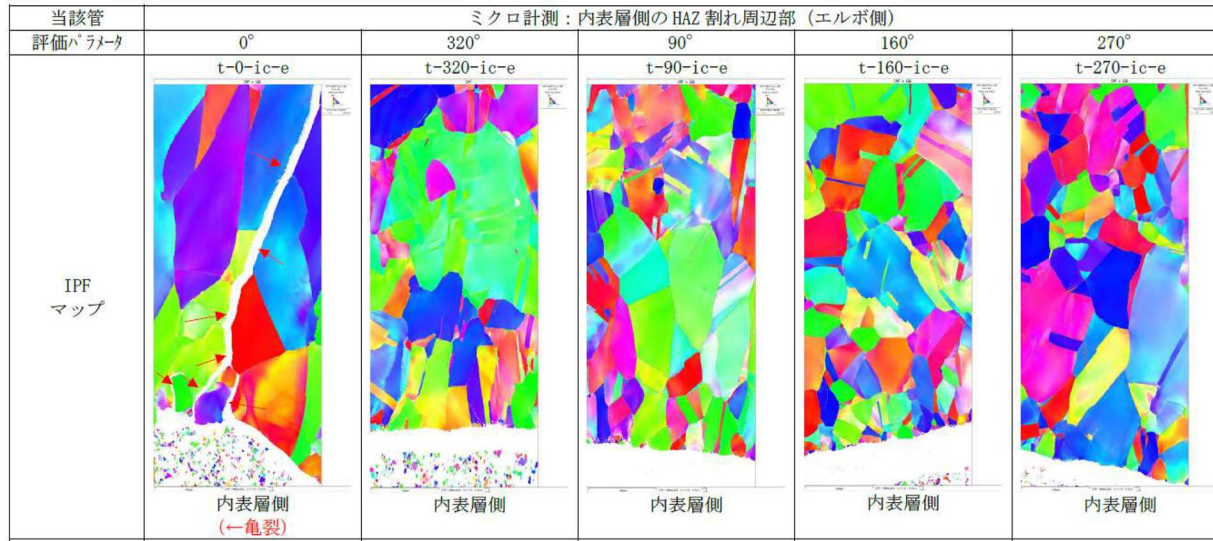
微小な割れ (40μm)



主亀裂 (3.8mm)

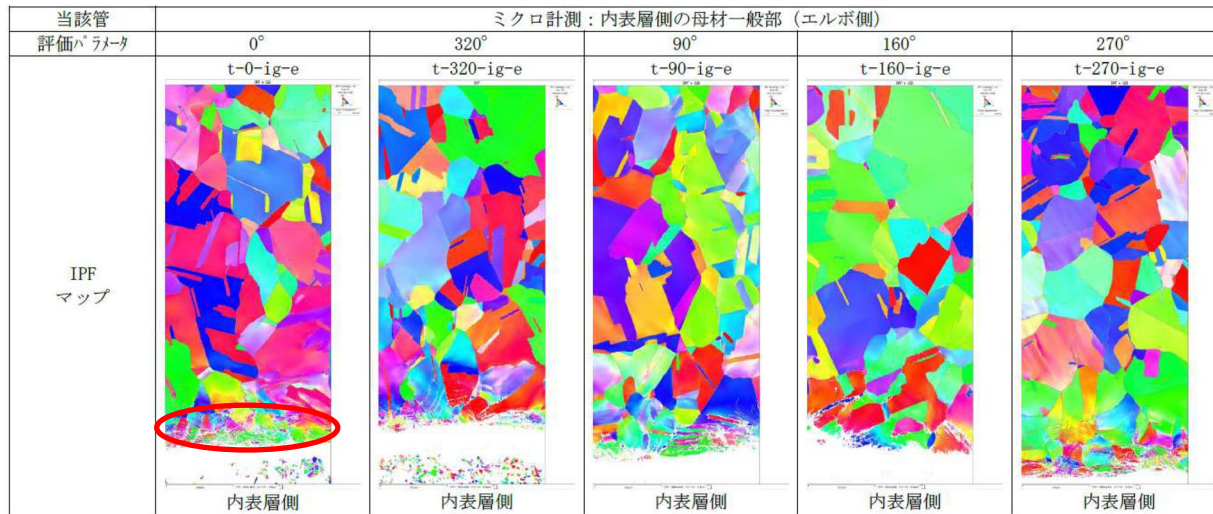
【添付-4】局所ひずみ測定(IPF : 当該管エルボ側)

●EBSD計測評価パラメータを用いたマイクロ領域データ整理 (IPFマップZ軸 (当該管エルボ側HAZ部))

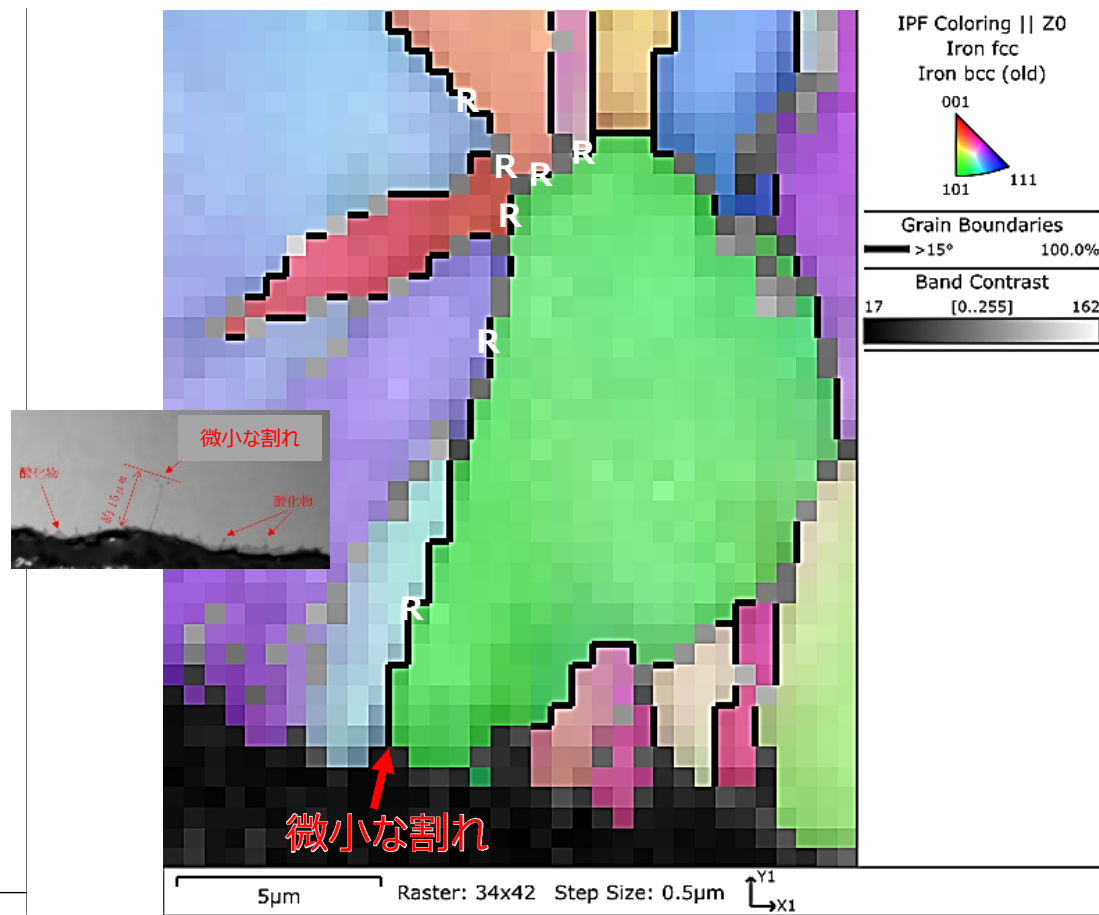
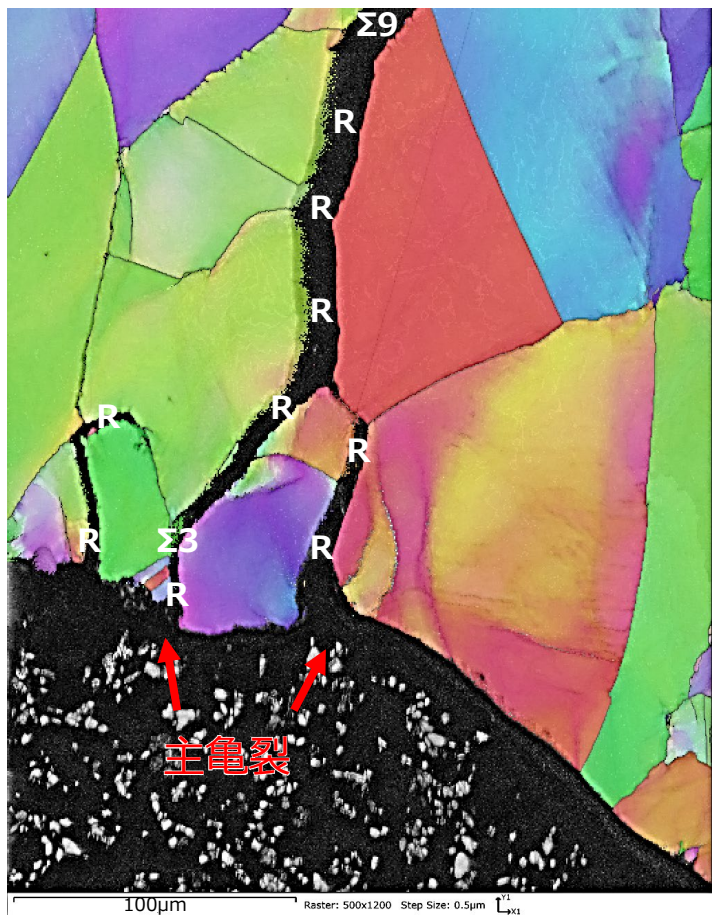


- 当該管の内表層側のエルボ側一般部では、シンニング加工の影響と考えられる結晶粒が大きく崩れた領域 (微細化層) が確認される。内部に進むにつれて、比較的均一な結晶粒 (100μm以下) であった。
- 当該管の内表面側のエルボ側HAZ部では、微細化層は認められない。内部に進むにつれて、比較的大きな結晶粒となっており、溶接の入熱により粗大化したものと考えられる。

●EBSD計測評価パラメータを用いたマイクロ領域データ整理 (IPFマップZ軸 (当該管エルボ側一般部))



粒界性格の同定（主亀裂，微小な割れ：t-0-ic-e）



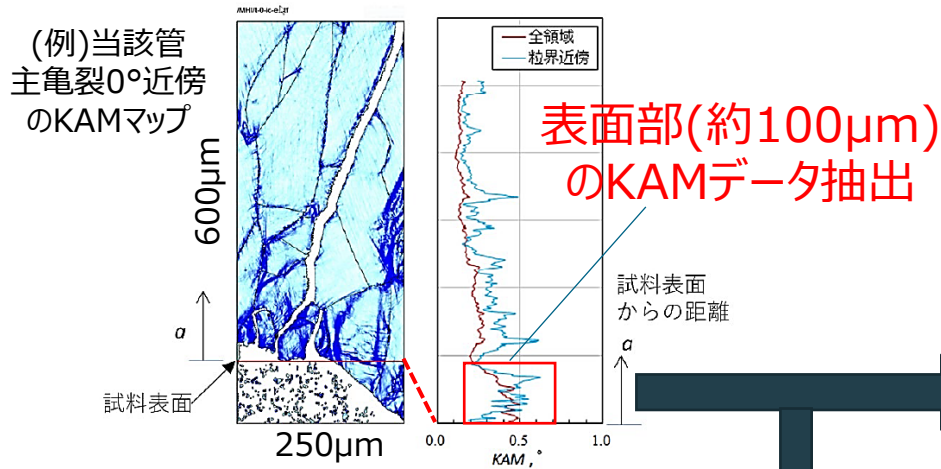
IPF Coloring || Z0
 Iron fcc
 Iron bcc (old)
 001
 101 111

Grain Boundaries
 >15° 100.0%

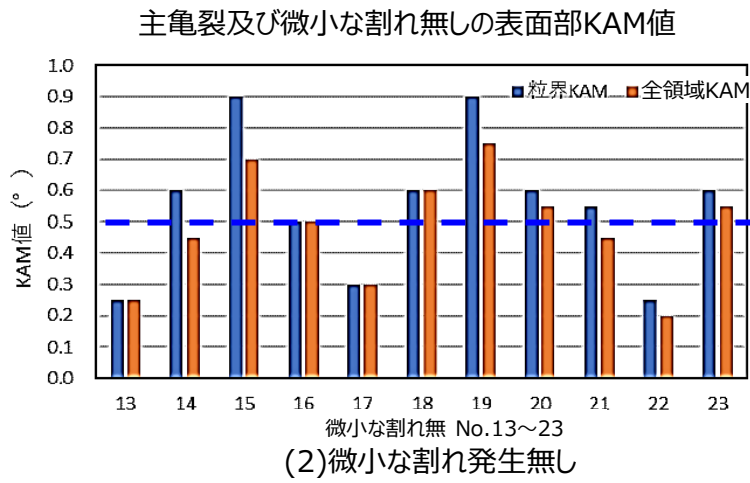
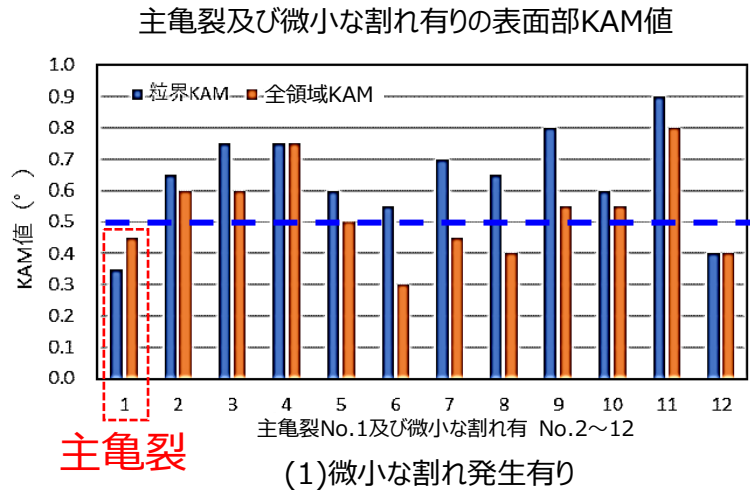
Band Contrast
 17 [0..255] 162

- 主亀裂および微小な割れ共に観察断面においてランダム粒界を起点に発生。
- **ランダム粒界は、結合力が弱く、亀裂発生が助長された可能性あり。**

【添付-6】EBSD(KAM)でのひずみ計測



EBSD(KAM)でのHAZ溶接境界の
全範囲(600×250μm)での内表面
近傍からの全領域及び粒界近傍
(6μm)でのKAM平均値で算出

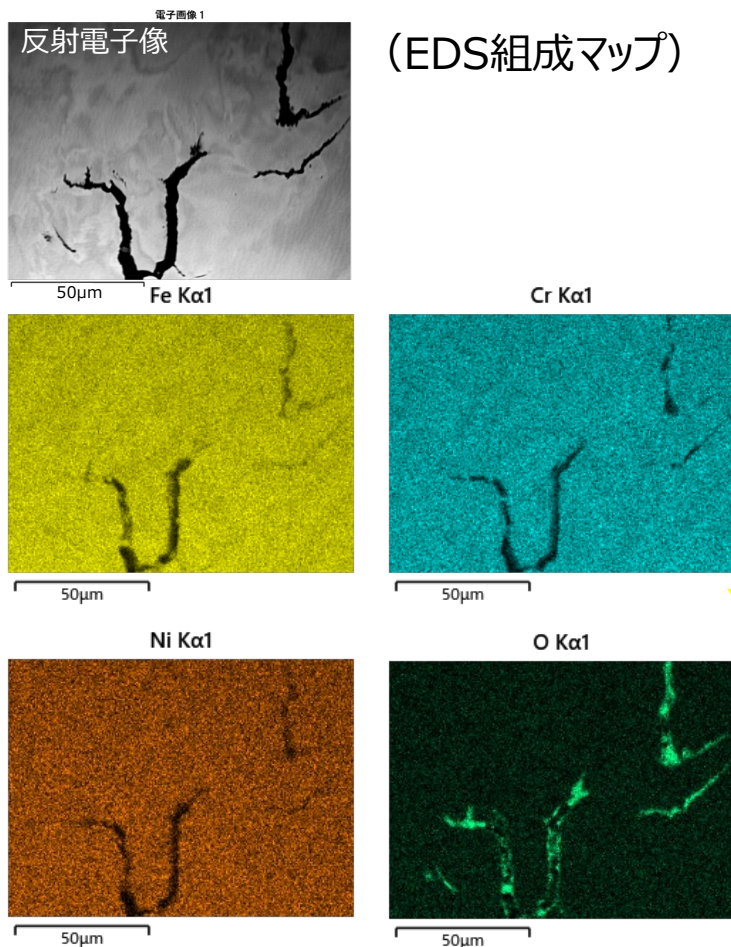


主亀裂と微小な割れに対する表面部
でのKAM平均値

- **主亀裂と他部位のEBSD計測結果(KAM分布：ひずみの特異性)からは、明確な差異は認められない。※**
- ひずみ以外に、硬さ、残留応力、粒界性格や結晶粒径等の他因子との重畳も必要と考えられる。

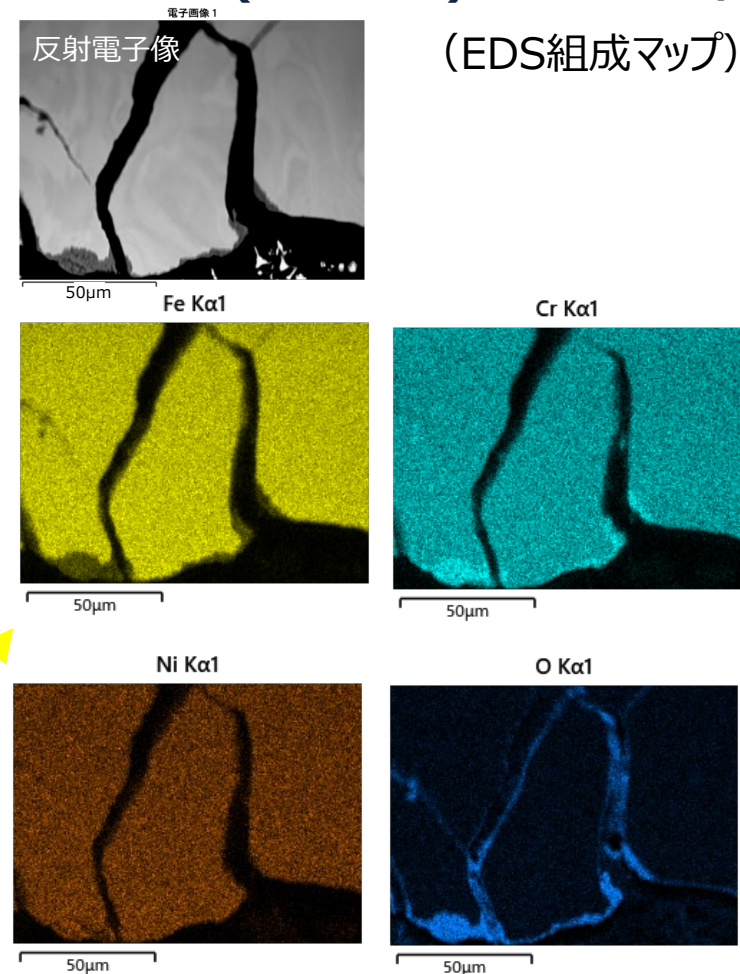
【添付-7】主亀裂先端のSEM/EDS分析

主亀裂中央域の断面SEM/EDS

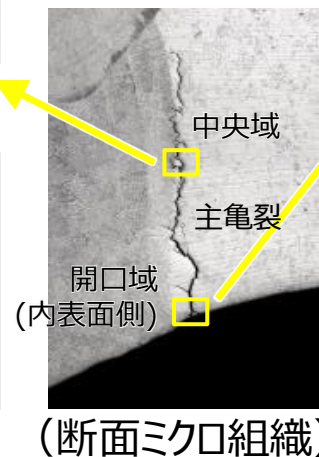


- 亀裂中央部では有意な酸素が検出されている。

主亀裂開口域(内表面側)の断面SEM/EDS



- 内表面側の亀裂開口部で有意な酸素が検出されている。



【添付-8】破面における溶接欠陥の調査(SEM/EDS)

当該管(T-2-1 : 主亀裂中央部エルボ側)の破面SEM観察結果 (代表破面)

特徴的/特異的な部位

EDS分析部位

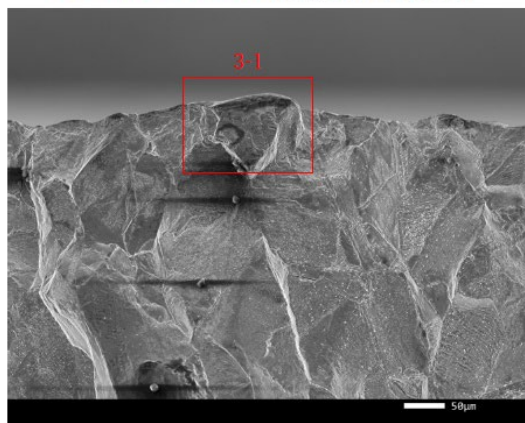


図 3.3.2.3-7-8 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 3)

特徴的/特異的な部位

EDS分析部位

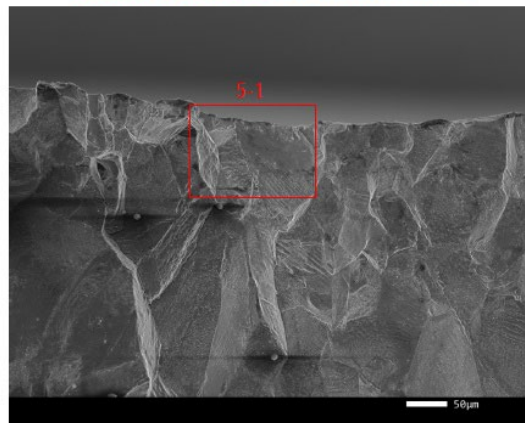


図 3.3.2.3-7-12 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 5)

特徴的/特異的な部位

EDS分析部位

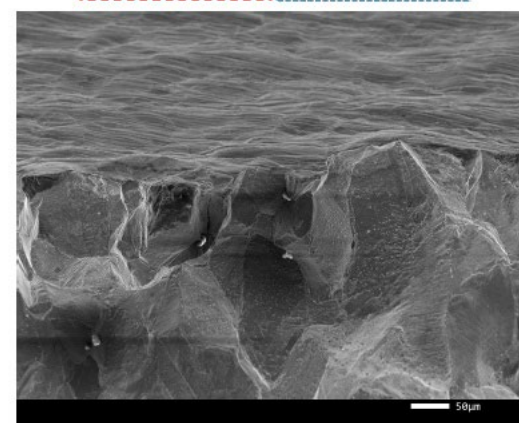


図 3.3.2.3-8-10 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 20)

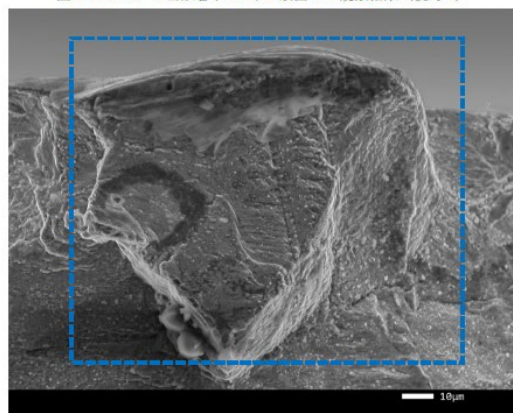


図 3.3.2.3-7-9 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 3-1)

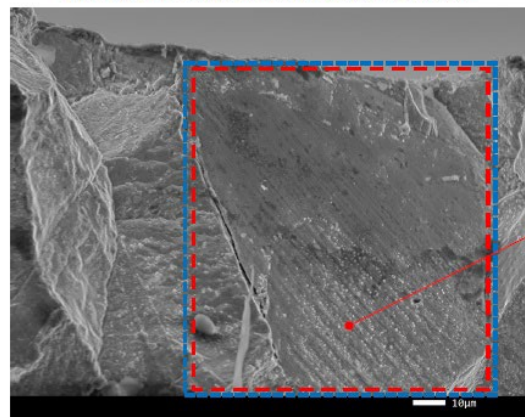


図 3.3.2.3-7-13 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 5-1)

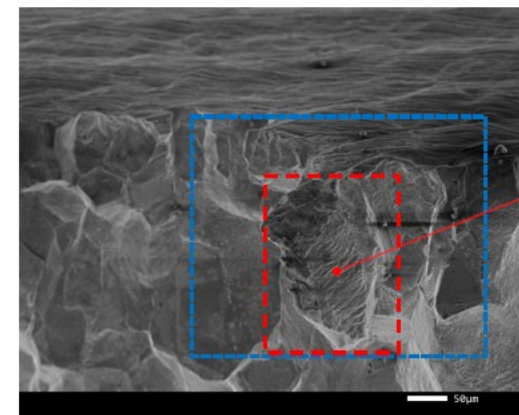


図 3.3.2.3-8-11 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 21)

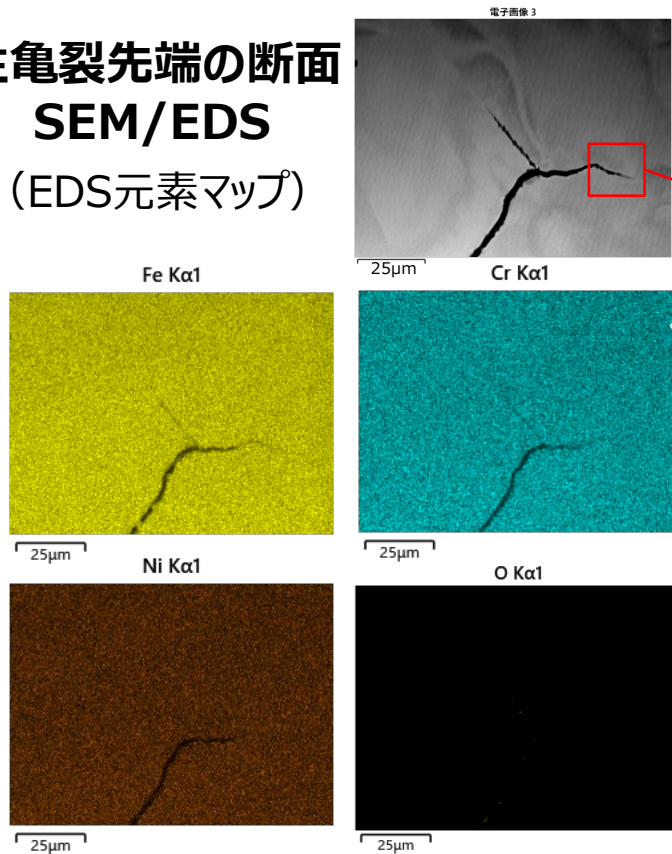
➤ 主亀裂の破面観察からは、溶接欠陥や、溶接欠陥に起因するような影響ある元素(P,S等)*は認められなかった。

* : 分析対象元素 : Fe, Cr, Ni, Mn, P, S, Ti, Si, Al, Nb, Mo, Zn, Ca, O

【添付-9】主亀裂の進展性

- 主亀裂先端の特徴を把握すべく、SEM/EDS元素マップに拠る元素確認、及び更に倍率の高いTEM-EDS定量マップを用いた線分析を実施。
- その結果、**主亀裂先端でEDS元素マップより有意な酸素は検出されず、またSTEM-EDS定量マップではNi濃化が認められ、主亀裂の進展性が示唆された。**

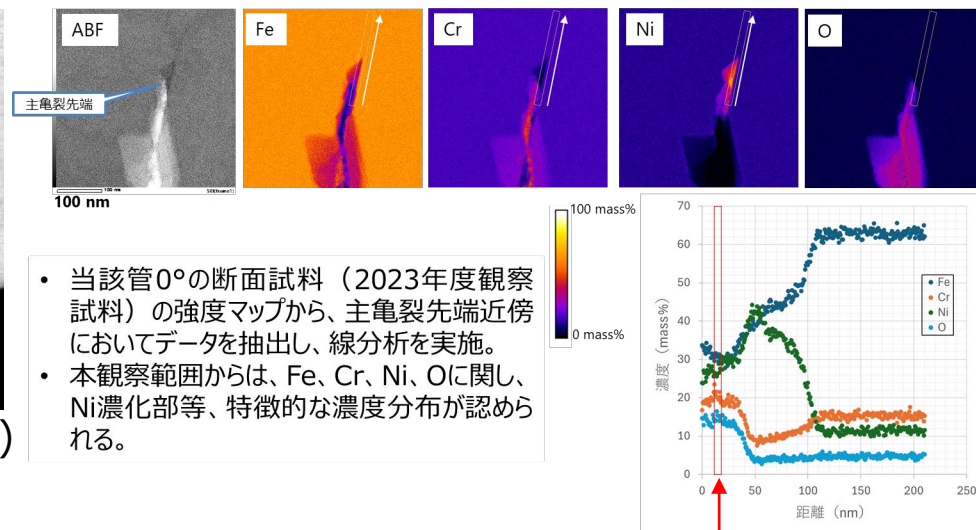
主亀裂先端の断面 SEM/EDS (EDS元素マップ)



※実際の計測位置は別断面サンプルであるが、主亀裂の先端位置にて分析を実施

主亀裂先端の断面 STEM-EDS定量マップを 用いた線分析

主亀裂先端の線分析結果 (50万倍)



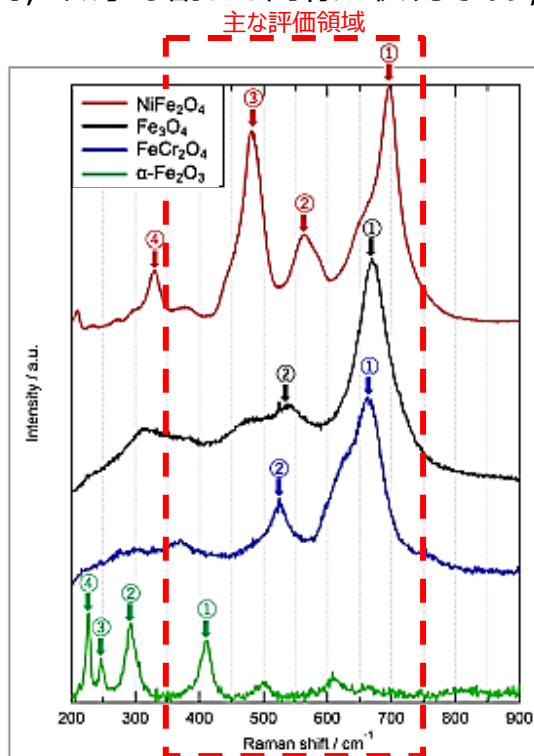
- 当該管0°の断面試料（2023年度観察試料）の強度マップから、主亀裂先端近傍においてデータを抽出し、線分析を実施。
- 本観察範囲からは、Fe、Cr、Ni、Oに関し、Ni濃化部等、特徴的な濃度分布が認められる。

主亀裂先端位置

- 主亀裂先端では有意な酸素が検出されていない。
➤ 進展性を示唆

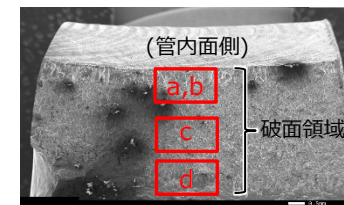
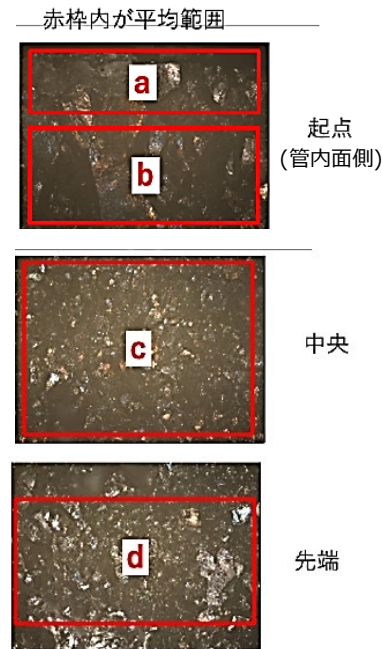
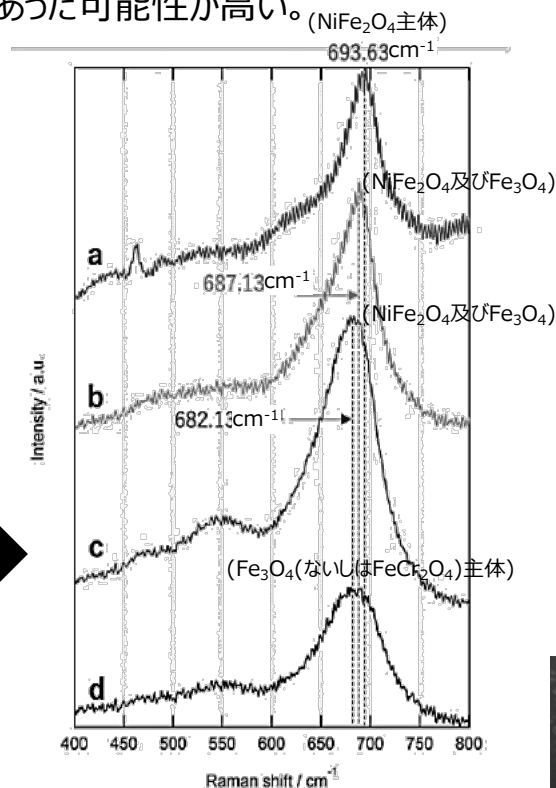
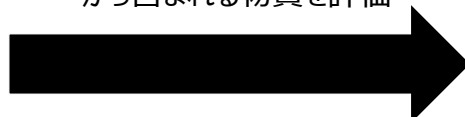
主亀裂の酸化被膜特性

- 酸化被膜特性として、内表面側になる起点部にNiFe₂O₄(及びFe₃O₄)が形成され、中央部及び先端部に進むにつれてFe₃O₄(ないしはFeCr₂O₄)が主体であり、一般的なPWR一次系環境において形成される酸化被膜特性と差はなかった。
- 尚、微小な割れも同様の状況であり、同じ環境で形成されたものであった可能性が高い。



| Oxides | Major peaks (cm ⁻¹) |
|----------------------------------|---------------------------------|
| NiFe ₂ O ₄ | ①696、②564、③481、④329 |
| Fe ₃ O ₄ | ①669、②530-540 |
| FeCr ₂ O ₄ | ①663、②525 |
| α-Fe ₂ O ₃ | ①406-410、②286-292、③246、④220-227 |

ピークの位置、強度の傾向から含まれる物質を評価



【参考】Fe-Cr-Ni系酸化物のラマンスペクトル (検量される主ピークの確認)

当該管0°近傍主亀裂(T-2-2) 破面ラマン分析結果

- 水質環境に伴う酸化被膜形態に特異な状況は確認されなかった
- 一般的なPWR一次系環境で生じたものであり、**水質の違いによる影響はないものと推定**

【添付-11】大飯4号スプレイライン配管調査結果（1/3）

- 大飯3号当該管と同一部位の大飯4号の溶接部に亀裂は認められなかった。
- HAZ部の溶接境界近傍では、結晶粒が粗大化。但し、大飯3号当該部で確認された程の大きさではない。
- 一部粒界酸化部が認められるが、大きさは3号に比べて小さく、また、微小な割れは認められない。

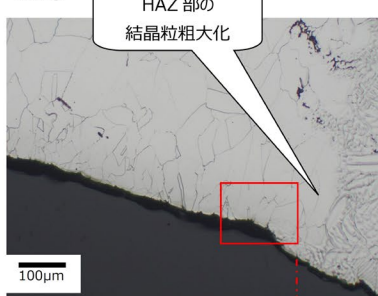
管台側

エルボ側

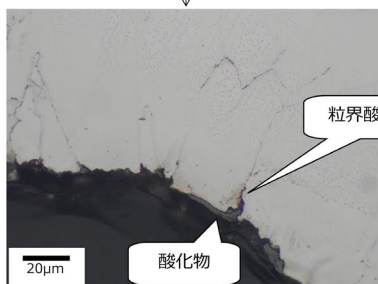


Dループ FW-4 0°断面
(管台-エルボ溶接部)

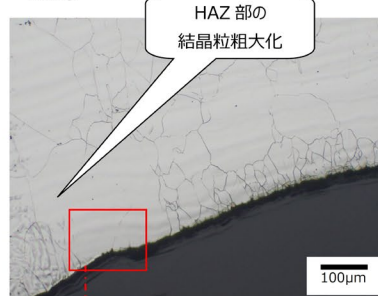
視野①



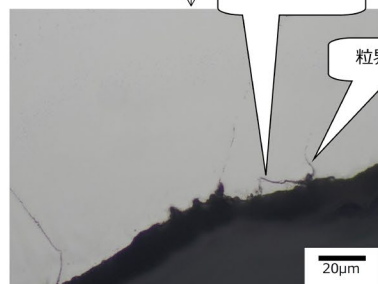
溶接境界



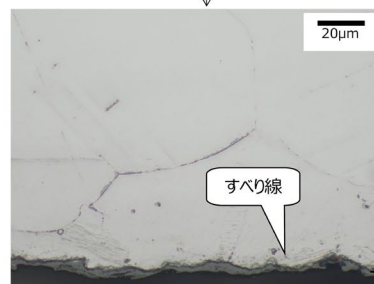
視野②



溶接境界

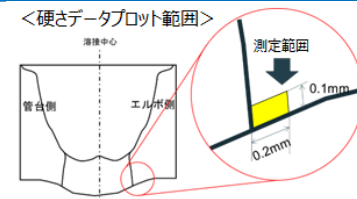


視野③

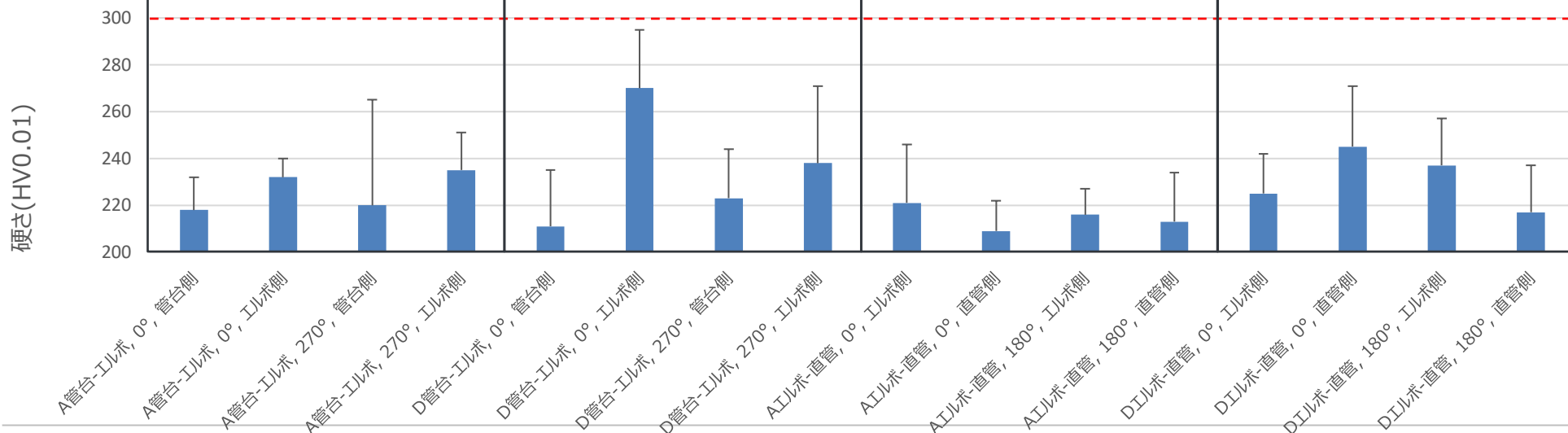


【添付-11】大飯4号スプレイライン配管調査結果 (2/3)

- 大飯3号と同様に内表面近傍の硬さ測定を実施し、300HV0.01を超える硬さは確認されず。
- 全層TIG溶接部は、他の溶接部（初層TIG+SMAW）に比べ、硬さは低い傾向。



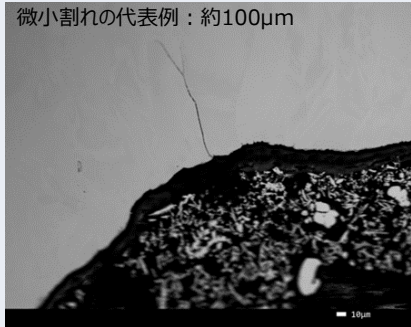
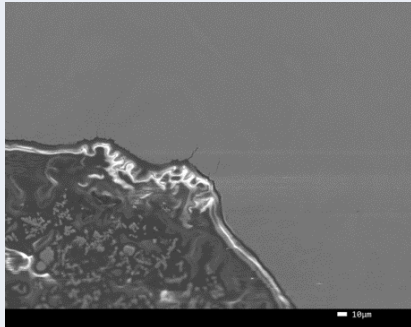
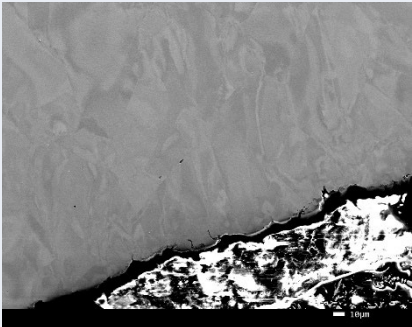
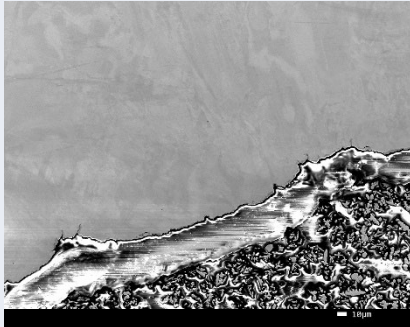
| 配管部位 | 管台-エルボ溶接部 | | | | | | | | エルボ-直管溶接部 | | | | | | | |
|------------------|-----------|-----------|------------|-------------|----------|-----------|------------|-------------|-----------|----------|-------------|------------|-----------|----------|-------------|------------|
| | Aループ | | | | Dループ※ | | | | Aループ | | | | Dループ | | | |
| 断面角度 | 0° 管台 | 0° エルボ | 270° 管台 | 270° エルボ | 0° 管台 | 0° エルボ | 270° 管台 | 270° エルボ | 0° エルボ | 0° 直管 | 180° エルボ | 180° 直管 | 0° エルボ | 0° 直管 | 180° エルボ | 180° 直管 |
| 溶接方法 | TIG+SMAW | | | | TIG+SMAW | | | | 全層TIG | | | | TIG+SMAW | | | |
| 裏波幅 (mm) | 5.8 | | 5.5 | | 5.4 | | 5.7 | | 6.2 | | 5.8 | | 6.2 | | 6.0 | |
| 最大硬さ (HV0.01) | 232 | 240 | 265 | 251 | 235 | 295 | 244 | 271 | 246 | 222 | 227 | 234 | 242 | 271 | 257 | 237 |
| 平均硬さ (HV0.01) | 218 | 232 | 220 | 235 | 211 | 270 | 223 | 238 | 221 | 209 | 216 | 213 | 225 | 245 | 237 | 217 |



※3号当該部と同ループ

【添付-11】大飯4号スプレイライン配管調査結果 (3/3)

■ 大飯3号と大飯4号の調査結果比較（亀裂発生箇所の0°断面）を以下に示す。

| | 大飯3号 | | 大飯4号 | |
|-------|--|--|---|---|
| | 管台-エルボ溶接部 (当該管) | エルボ-直管溶接部 | 管台-エルボ溶接部 | エルボ-直管溶接部 |
| 供用年数 | 約19.3EFPY | | 約20.7EFPY | |
| 材料 | SUS316 | | SUS316 | |
| 溶接 | TIG+SMAW | | TIG+SMAW | Aループ 全層TIG, Dループ TIG+SMAW |
| 裏波幅 | 8.0mm | 6.0mm | Aループ : 5.8mm Dループ : 5.4mm | Aループ : 6.2mm Dループ : 6.2mm |
| 結晶粒径 | 最大約500 μ m | 最大約250 μ m | 最大約300 μ m | 最大約300 μ m |
| 表層硬さ | 最大値 : 350HV0.01 | 最大値 : 280HV0.01 | 最大値 Aループ : 240HV0.01 Dループ : 295HV0.01 | 最大値 Aループ : 246HV0.01 Dループ : 271HV0.01 |
| 断面ミクロ | 微小な割れ : 最大約 110 μ m 微小割れの代表例 : 約100 μ m  | 微小な割れ : 最大約 15 μ m※  | 微小な割れ : なし  | 微小な割れ : なし  |

※180°断面にて最大280 μ mの微小な割れを確認

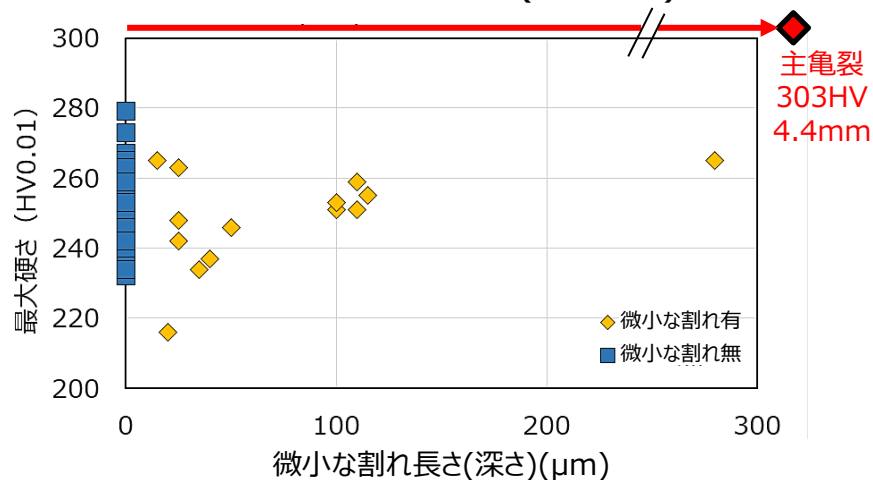
【添付-12】微小な割れ周辺硬さ

断面マイクロ観察結果からの微小な割れ長さや微小な割れ周辺ビッカース硬さとの相関性

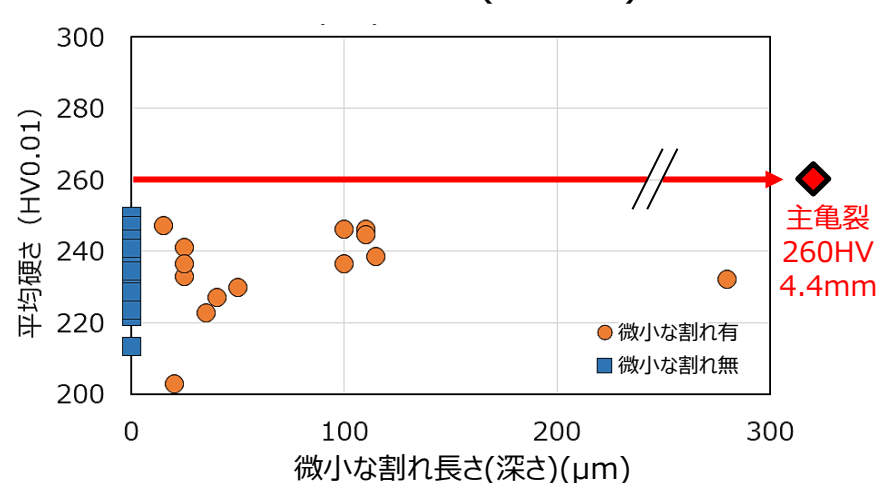
| 微小な割れ長さや 微小な割れ周辺硬さ | 当該管 0° 管台側 | 当該管 0° 管台側 | 当該管 0° 管台側 | 当該管 320° 管台側 | 当該管 320° 管台側 | 当該管 320° 管台側 | 当該管 90° エルボ側 | 当該管 270° エルボ側 | 当該管 270° エルボ側 | 当該管 270° エルボ側 | 当該管 270° 管台側 | 比較管 0° エルボ側 | 比較管 180° 直管側 | 比較管 180° エルボ側 |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| 微小な割れ長さμm | 100 | 110 | 40 | 110 | 20 | 25 | 35 | 100 | 115 | 25 | 25 | 15 | 280 | 50 |
| 硬さHV0.01① | 251 | 251 | 237 | 259 | 216 | 239 | 218 | 253 | 235 | 235 | 263 | 237 | 222 | 239 |
| 硬さHV0.01② | 246 | 246 | 232 | 246 | 205 | 242 | 212 | 246 | 225 | 240 | 251 | 261 | 265 | 246 |
| 硬さHV0.01③ | 246 | 246 | 229 | 242 | 201 | 216 | 234 | 234 | 249 | 248 | 225 | 265 | 234 | 222 |
| 硬さHV0.01④ | 244 | 244 | 225 | 244 | 196 | 232 | 224 | 221 | 229 | 240 | 213 | 246 | 213 | 229 |
| 硬さHV0.01⑤ | 244 | 244 | 212 | 232 | 196 | 235 | 225 | 229 | 255 | 242 | 230 | 227 | 227 | 213 |
| 硬さHV0.01最大 | 251 | 251 | 237 | 259 | 216 | 242 | 234 | 253 | 255 | 248 | 263 | 265 | 265 | 246 |
| 硬さHV0.01平均 | 246 | 246 | 227 | 245 | 203 | 233 | 223 | 237 | 239 | 241 | 236 | 247 | 232 | 230 |
| | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2023追加 | 2023追加 | 2022 | 2022 | 2023追加 | 2023追加 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 |

(備考) 硬さと測定範囲：MSC周辺（表層(0.02mm)から0.1mmの範囲)

微小な割れの深さと硬さ(最大値)との関係



微小な割れの深さと硬さ(平均値)との関係



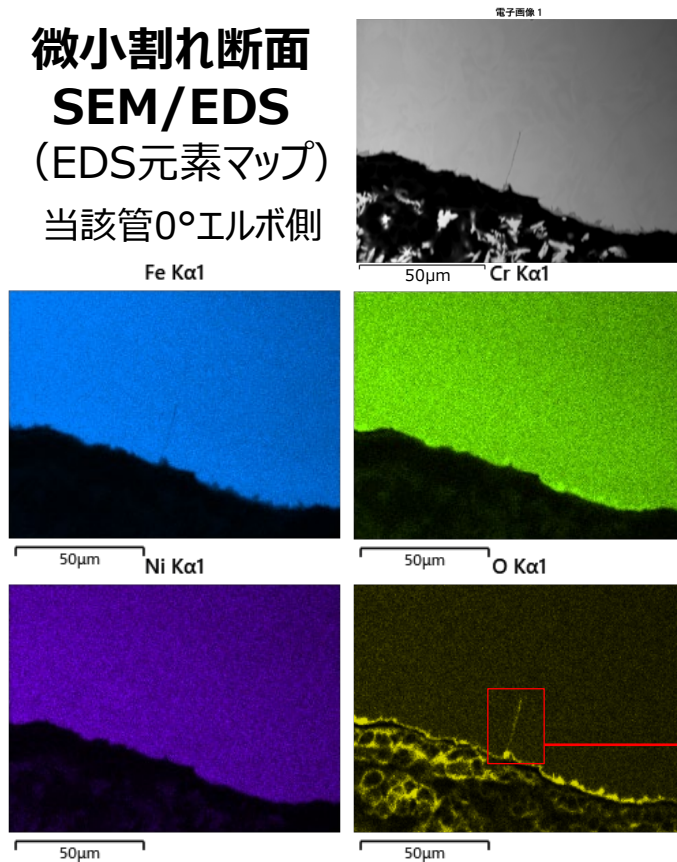
- ▶ 主亀裂(303HV最大※, 260HV平均※)は, 複数認められている微小な割れに比べて硬さが大きい。
- ▶ 微小な割れ発生には通常配管の硬さよりも硬化(200~250HV)が必要と考えられるが, 微小な割れ長さに対する周辺硬さとの関係性は乏しい。

【添付-13】 微小な割れの停滞兆候

- 潜在亀裂有無の詳細調査において、比較管を含め大飯3号の調査部位に微小割れを複数確認。*
- SEM/EDSでは主亀裂部以外では特異な硬さは確認されていないが、それら特異な硬さでない部位の**微小割れは、いずれも1結晶粒程度の大きさ**であり、更に、主亀裂先端とは異なり、**停滞を示唆する酸素(酸化物)**が検出された。
- また、STEM-EDSでは微小割れ先端では殆どNi濃化が認められず、割れの停滞が示唆された。

* :モックアップに同様な微小割れは確認されず

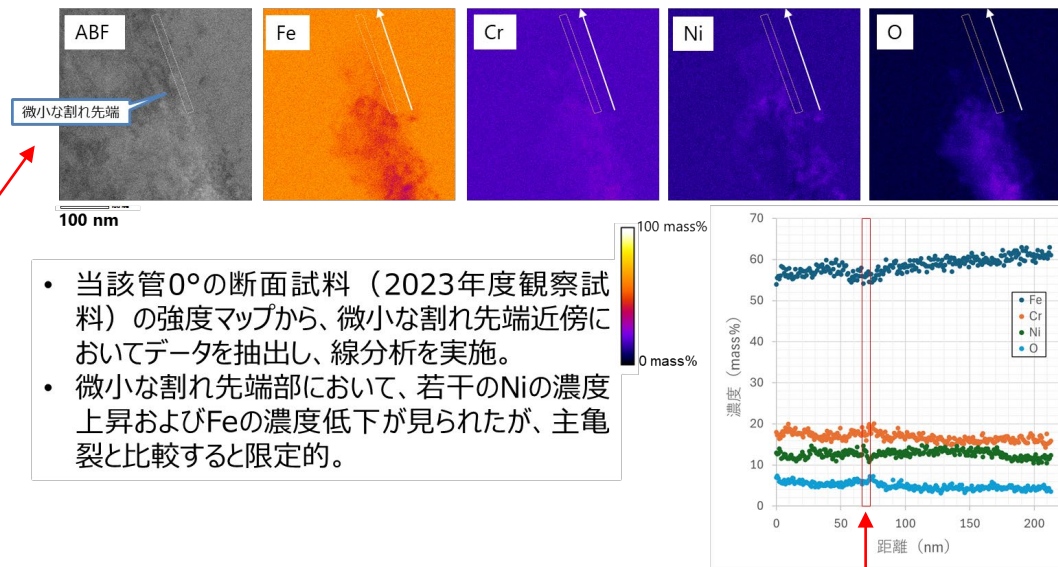
微小割れ断面 SEM/EDS (EDS元素マップ) 当該管0°エルボ側



- 微小割れでは先端まで酸素が検出されている。
➤ 長時間の停滞を示唆

微小割れ先端の断面 STEM-EDS定量マップを 用いた線分析

微小な割れ先端の線分析結果 (50万倍)

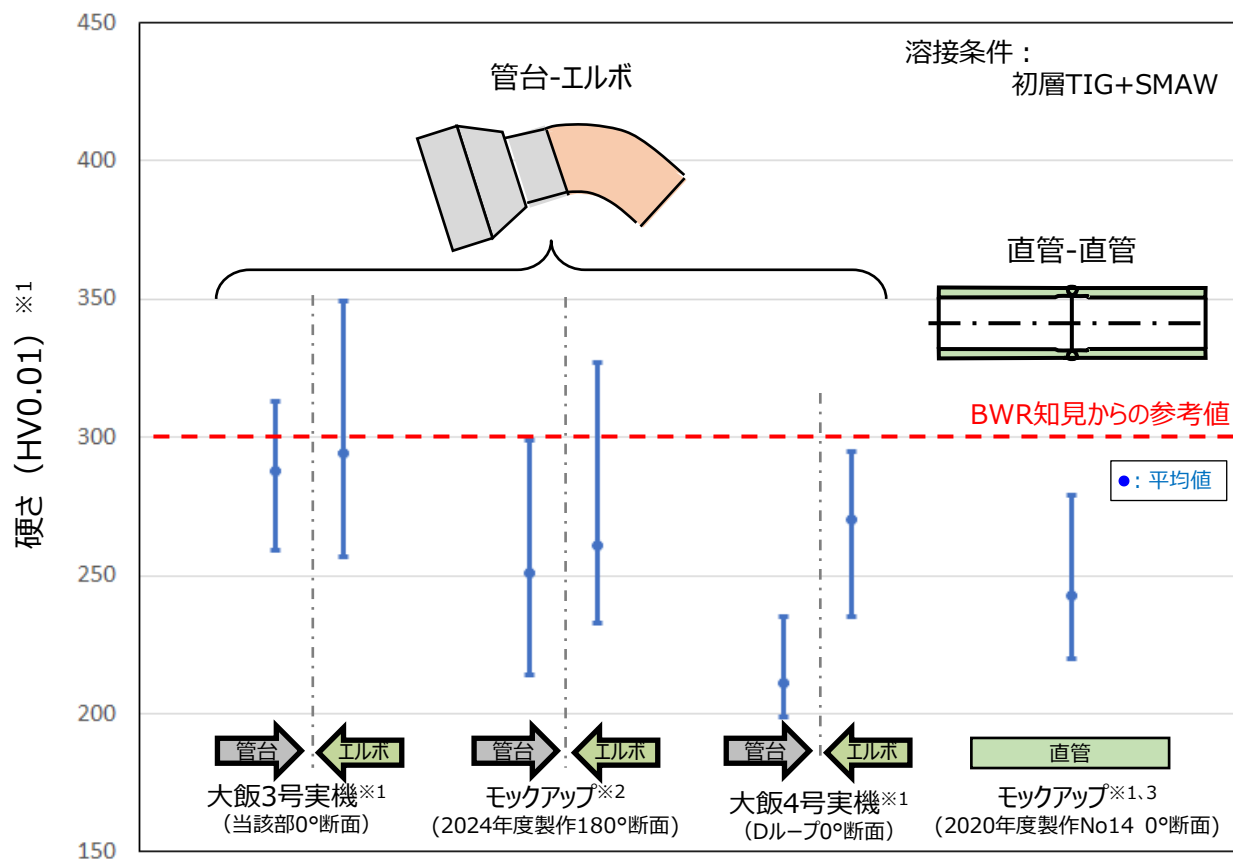


- 当該管0°の断面試料（2023年度観察試料）の強度マップから、微小な割れ先端近傍においてデータを抽出し、線分析を実施。
- 微小な割れ先端部において、若干のNiの濃度上昇およびFeの濃度低下が見られたが、主亀裂と比較すると限定的。

微小な割れ先端位置

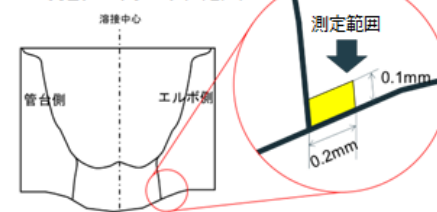
【添付-14】モックアップによる硬さの傾向確認(1/2)

- 板厚が大きく剛性の高い管台とエルボの継手と初層TIG（大入熱）+2層目以降SMAW（小入熱）の場合、327HV0.01となり、当該管に相当する硬さになることが確認された。



※1 内表面から0.1mm深さ、溶接境界から0.2mmまでの硬さ測定結果に基づくものである

＜硬さデータプロット範囲＞



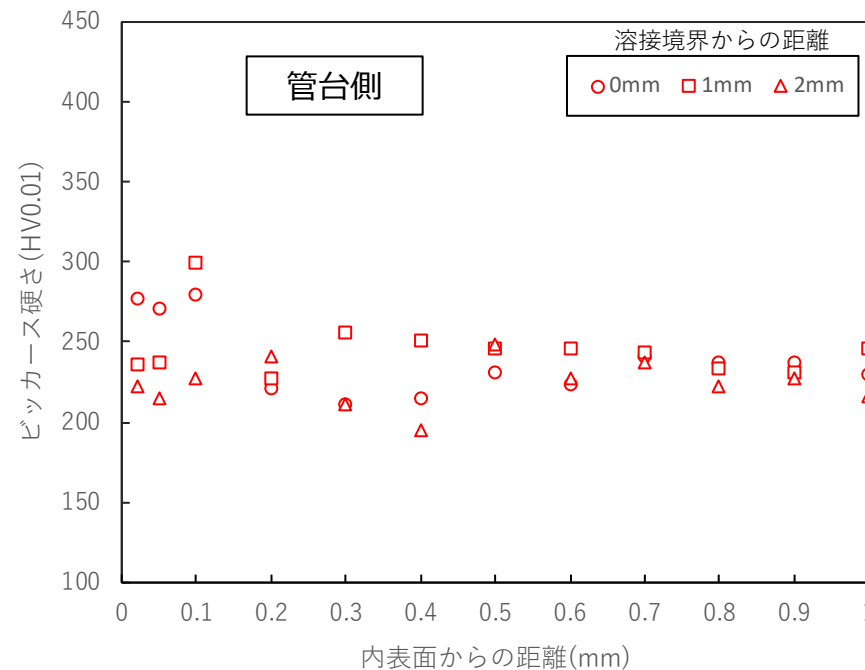
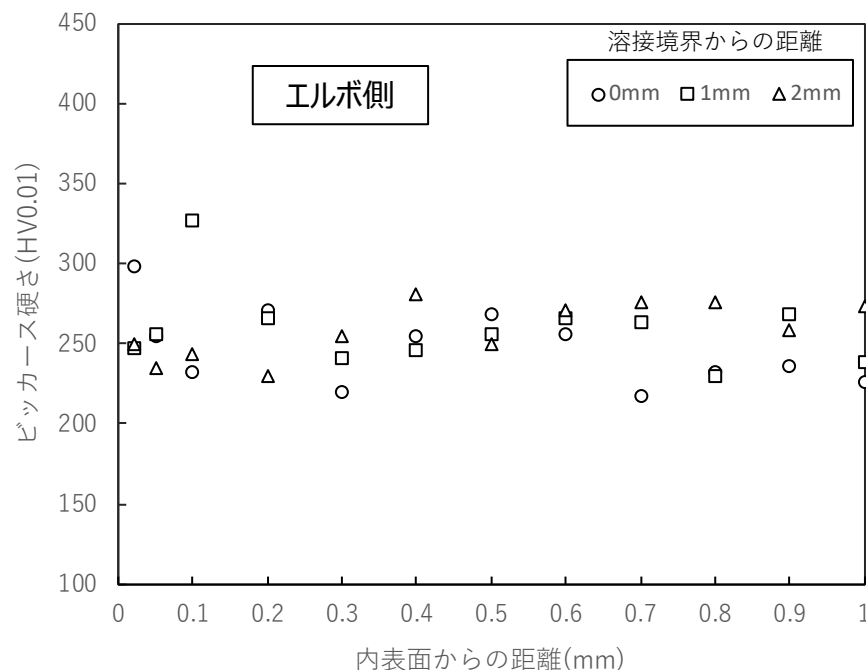
※2 内表面から0.1mm深さ、溶接境界から2mmまでの硬さ測定結果に基づくものである

※3 直管-直管モックアップについては、添付-16のNo14の値を記載

【添付-14】モックアップによる硬さの傾向確認(2/2)

- 実機と同等の管台、エルボを用い、初層入熱大（TIG）、2層目以降入熱小（SMAW）にてモックアップ（2024年度製作）を製作し、硬さ計測を実施。
- 溶接部近傍において、エルボ側の内表面が硬化する傾向が確認され、硬さは最大で327HV0.01であった。

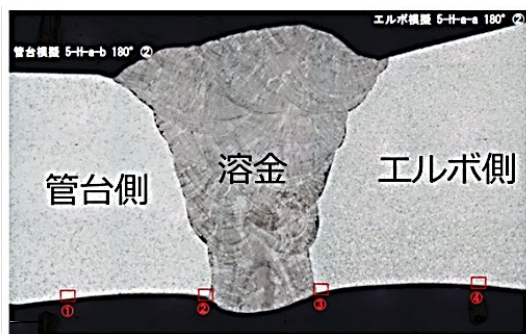
- 4B管台-エルボ（180°断面）の内表面近傍における板厚方向の硬さ分布



※内表面から0.01mm位置の計測値はJIS規格（くぼみの中心から試験片の縁までの距離,2.5d以上）を満たしていないため参考扱いであり、グラフ上にはプロットしていない

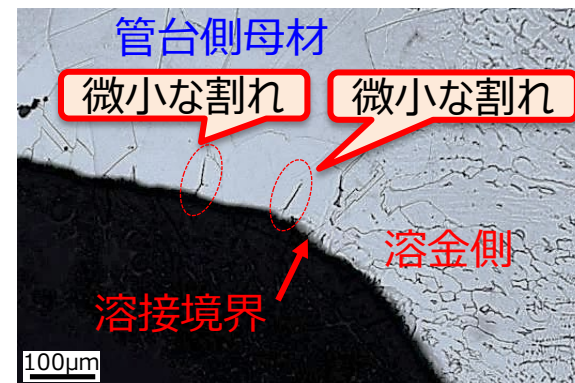
【添付-15】モックアップの断面マイクロ調査

- 溶接入熱、溶接姿勢、配管形状他をパラメータとし、実機施工条件よりも厳しい条件等も含めた約40体のモックアップ(2020年度製作)を用いて、製作（溶接）時の粒界割れの起点となり得る微細な割れ形成の可能性を調査

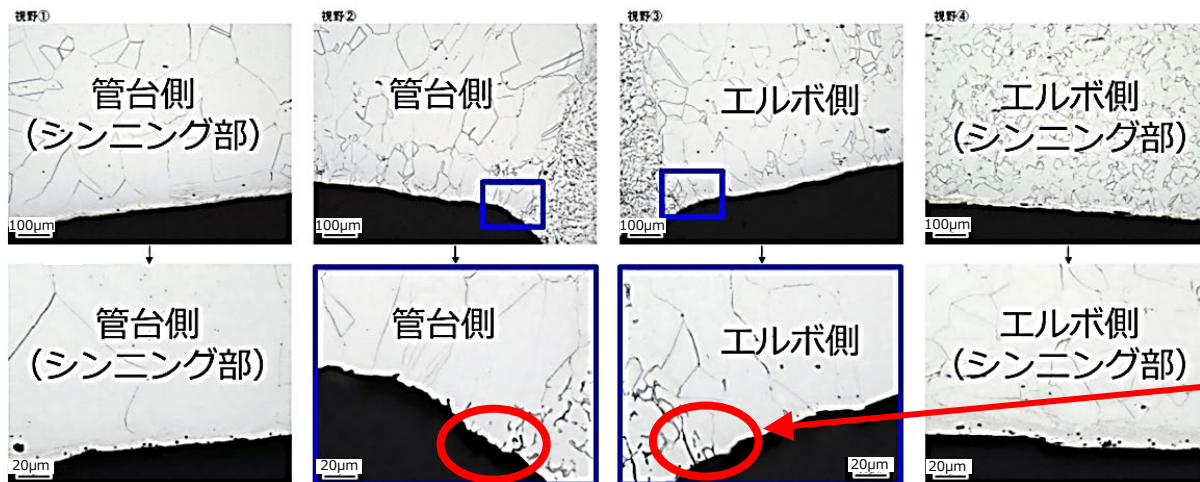


モックアップ観察
(2020年度製作No15)

【検討】断面マイクロ観察位置：
(モックアップからの微細な割れ確認)



(参考) 実機微小な割れ



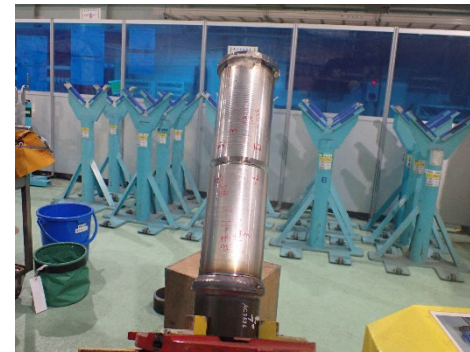
拡大

微細な割れは確認されず※

- 製作（溶接）時には微小な割れのようなものは確認されず、微小な割れはプラント運転中に生じたものであることを示唆

【添付-16】 入熱量・硬さ・裏波幅の相関関係(1/5)

- 溶接に伴うHAZ部近傍の内表面の硬化程度を系統的に把握する観点で、当該管の溶接方法を踏まえて、溶接方法(Tig+SMAW/全層Tig)、溶接姿勢(現地/工場、水平60°/下向き)、形状タイプ(直管-直管/エルボ-直管/管台-エルボ)、溶接時拘束(有/無)及び初層入熱量(大/中/小)をパラメータとした多数の溶接モックアップを製作。
- 作製した溶接モックアップについて、硬さや裏波幅の関係性を確認した。



モックアップ製作例
(現地模擬溶接姿勢60°)

制作したモックアップ一覧 (1/2)

| No | 溶接方法 | モックアップ 角度 | 溶接 姿勢 | タイプ | 溶接時拘束 有無 | 初層入熱量 | 裏波幅 (mm) | 硬さ (最小) | 硬さ (最大) |
|----|----------|--------------|----------|-------|-------------|-------|-------------|------------|------------|
| 1 | 全層TIG | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 小 | 4.4 | 187 | 225 |
| 2 | 全層TIG | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 小 | 4.3 | 179 | 237 |
| 3 | 全層TIG | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 小 | 3.0 | 199 | 246 |
| 4 | 全層TIG | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 小 | 6.7 | 181 | 220 |
| 5 | 全層TIG | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 大 | 4.2 | 195 | 233 |
| 6 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 有 | 大 | 6.2 | 204 | 235 |
| 7 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 有 | 大 | 7.2 | 214 | 262 |
| 8 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 大 | 8.8 | 204 | 269 |
| 9 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 大 | 5.2 | 207 | 248 |
| 10 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 有 | 大 | 10.3 | 181 | 225 |
| 11 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 大 | 9.0 | 211 | 274 |
| 12 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 大 | 8.5 | 170 | 279 |
| 13 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 大 | 8.3 | 222 | 269 |
| 14 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 直管-直管 | 無 | 大 | 9.0 | 220 | 279 |

【添付-16】 入熱量・硬さ・裏波幅の相関関係(2/5)

制作したモックアップ一覧 (2/2)

| No | 溶接方法 | モックアップ 角度 | 溶接 姿勢 | タイプ | 溶接時拘束 有無 | 初層入熱量 | 裏波幅 (mm) | 硬さ (最小) | 硬さ (最大) |
|----|----------|--------------|----------|--------|-------------|-------|-------------|------------|------------|
| 15 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.8 | 246 | 293 |
| 16 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.8 | 227 | 305 |
| 17 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.8 | 252 | 302 |
| 18 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.8 | 211 | 282 |
| 19 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.8 | 237 | 287 |
| 20 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.8 | 229 | 290 |
| 21 | 全層TIG | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 中 | 6.1 | 225 | 269 |
| 22 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.9 | 259 | 296 |
| 23 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.9 | 244 | 330 |
| 24 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.9 | 255 | 327 |
| 25 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.9 | 241 | 305 |
| 26 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.9 | 274 | 320 |
| 27 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.9 | 274 | 320 |
| 28 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.9 | 237 | 305 |
| 29 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 7.9 | 266 | 320 |
| 30 | TIG+SMAW | 工場模擬(0°) | 下向き | エルボ-直管 | 無 | 小 | 5.8 | 209 | 269 |
| 31 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 小 | 5.0 | 209 | 279 |
| 32 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 有 | 大 | 8.3 | 225 | 282 |
| 33 | TIG+SMAW | 現地模擬(60°) | 水平60° | 管台-エルボ | 無 | 大 | 9.1 | 211 | 290 |
| 34 | TIG+SMAW | 工場模擬(0°) | 下向き | エルボ-直管 | 無 | 大 | 9.6 | 190 | 269 |
| 35 | TIG+SMAW | 工場模擬(0°) | 下向き | エルボ-直管 | 無 | 大 | 9.4 | 198 | 264 |
| 36 | TIG+SMAW | 工場模擬(0°) | 立向+下向 | 管台-エルボ | 無 | 大 | 11.0 | 233 | 327 |

※No1~35のモックアップは2020年度製作（管台-エルボについては、形状を合わせた模擬管台およびエルボと板厚を合わせた模擬直管を使用したモックアップであり参考扱い）

※No36は2024年度製作（実機と同等の材料,形状の管台,エルボを使用）

※No1~35の硬さの最大値はいずれも溶接終端の0°付近で測定、No36は180°断面

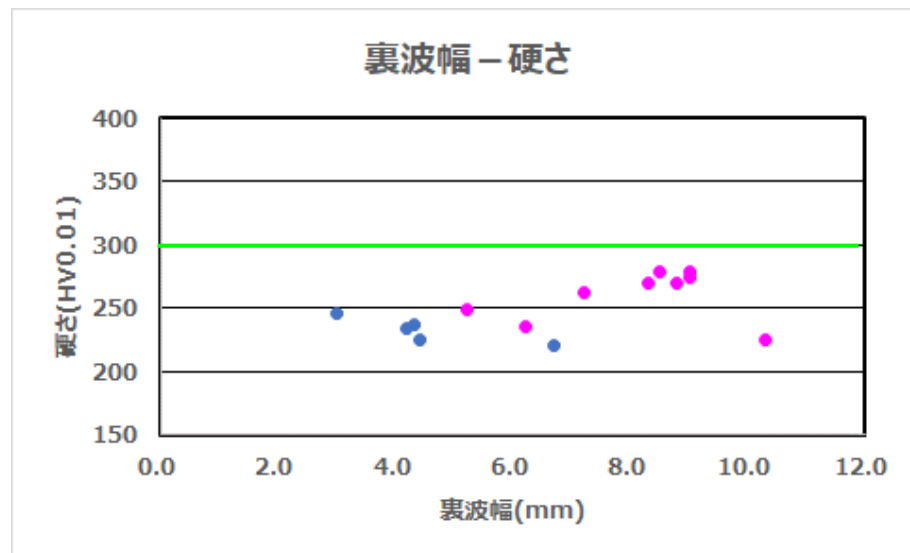
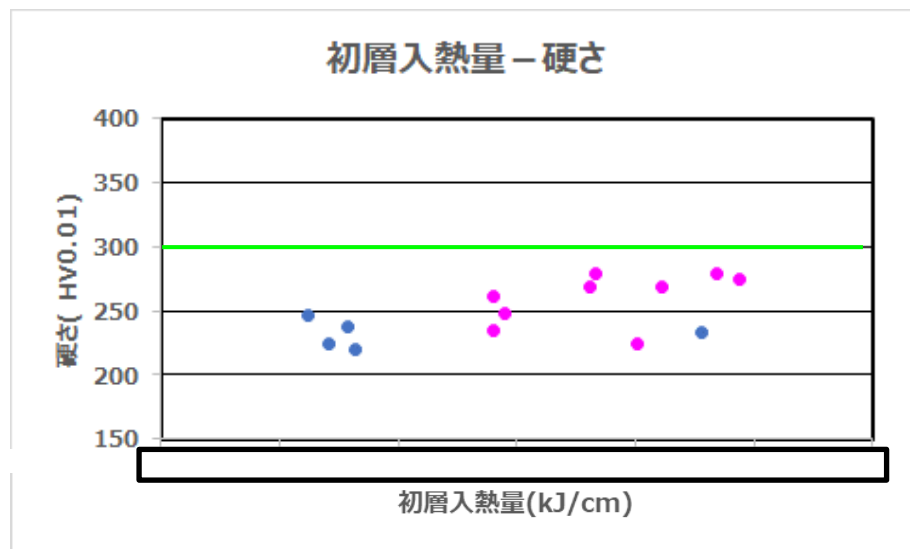
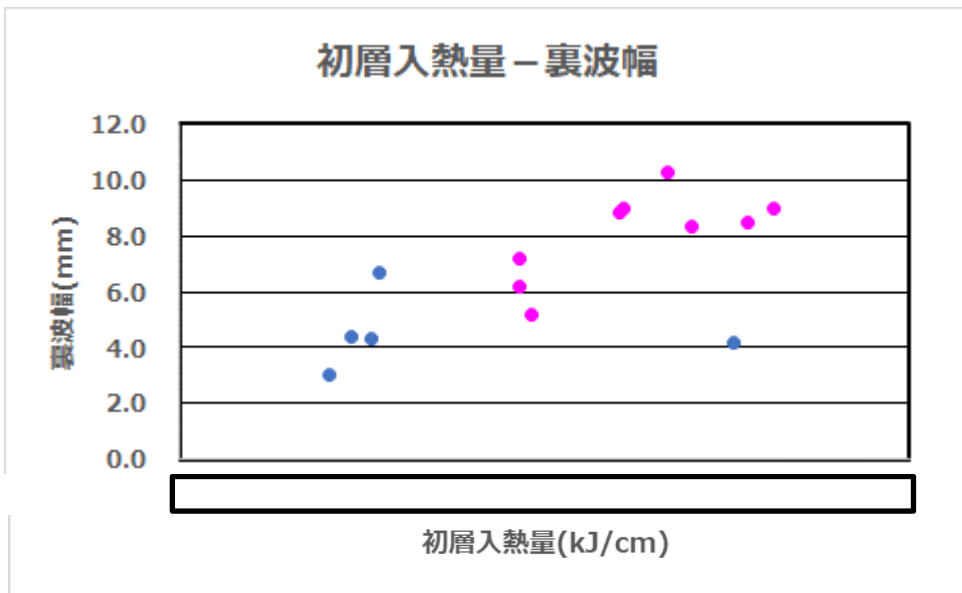
※No15~20、No22~29は1つのモックアップの0°付近で複数断面測定

□ : マスキング対象

【添付-16】 入熱量・硬さ・裏波幅の相関関係(3/5)

- 初層入熱量と硬さの相関を評価。
- **初層入熱量が大きくなると、硬さが上昇する傾向が確認された。**
- また、溶接入熱が大きくなると、裏波幅が広くなり、裏波幅と硬さの相関も確認された。
- 尚、初層入熱が大きくなると硬くなる傾向が確認されたが、一定量を超えると硬さは飽和する傾向も確認された。
 (*) 溶接入熱以外の影響要因を除く為、直管-直管のモックアップ(2020年度製作)で整理

● : 全層TIG ● : 初層TIG+SMAW

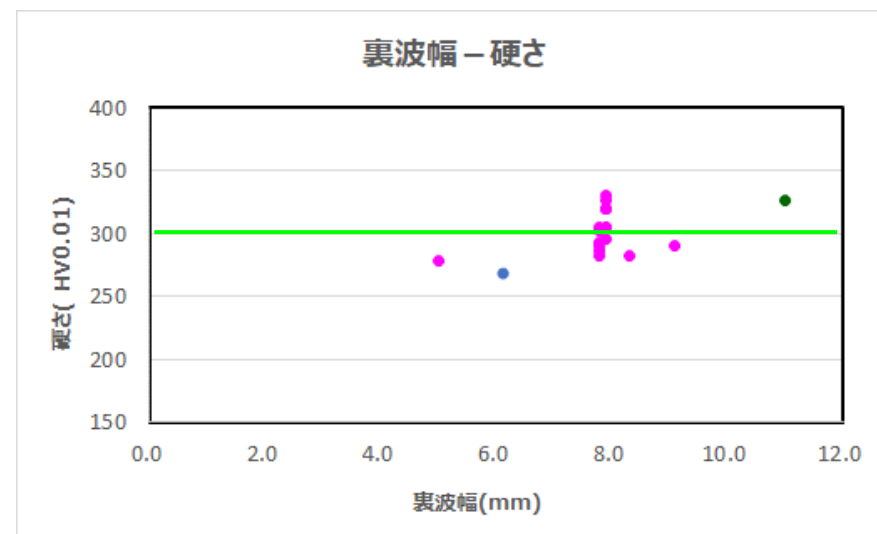
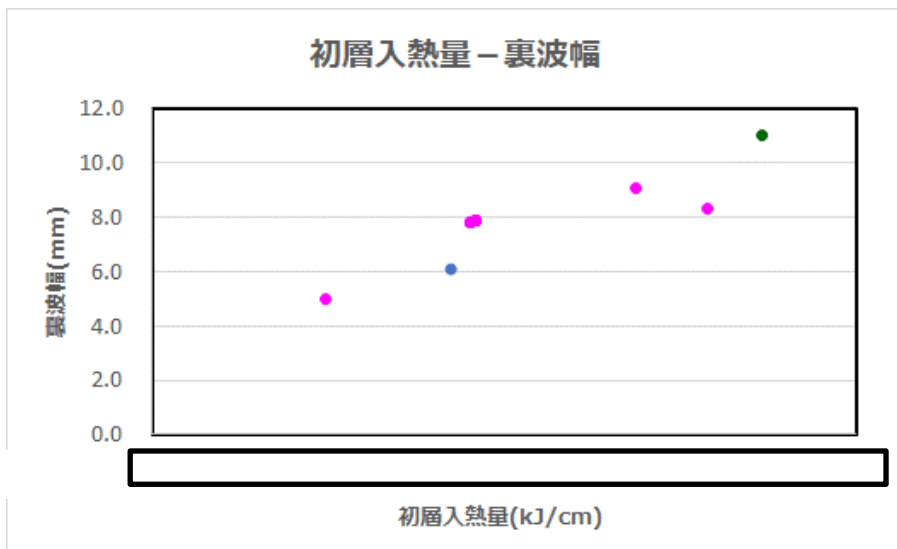
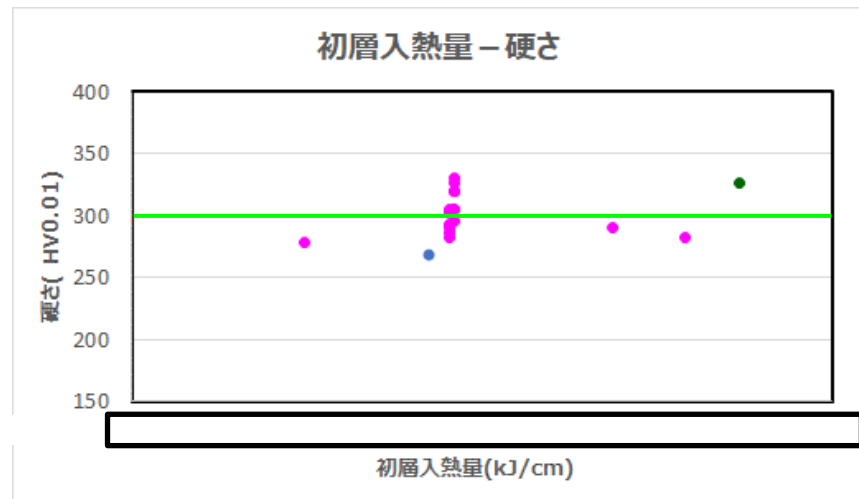


□ : マスキング対象

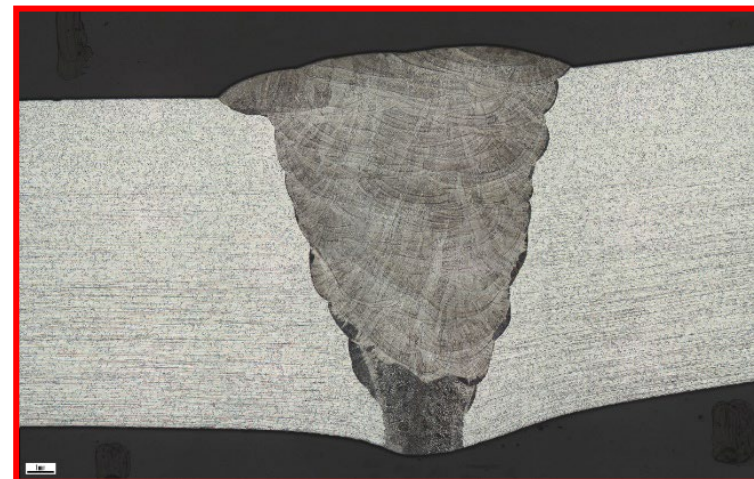
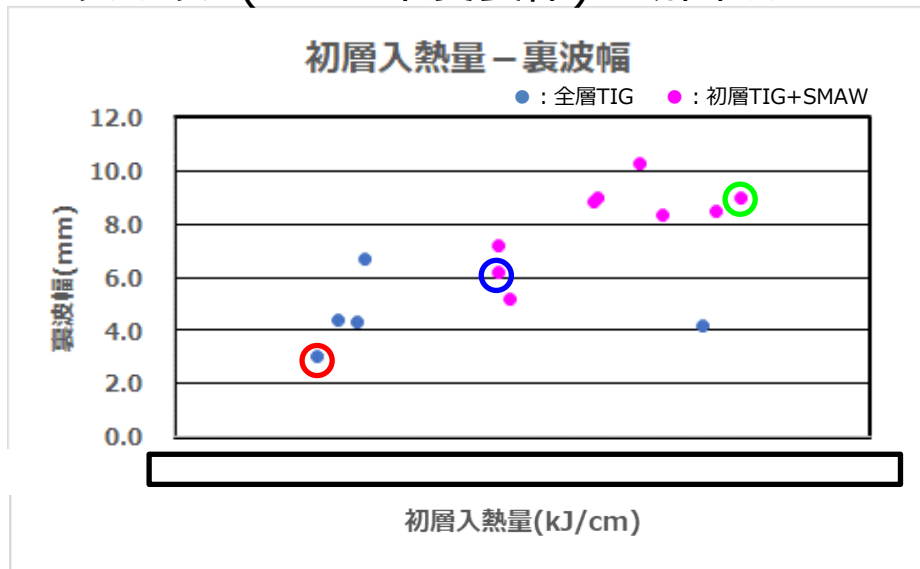
【添付-16】 入熱量・硬さ・裏波幅の相関関係(4/5)

- 初層入熱量と硬さの相関を2024年度製作のモックアップを含めて、管台-エルボについても評価。
- **初層入熱量が大きくなると、硬さが上昇する傾向にあることが確認された。**
- また、溶接入熱が大きくなると、裏波幅が広くなり、裏波幅と硬さの相関も確認された。

● : 全層TIG (2020年度製作) ● : 初層TIG+SMAW (2020年度製作)
● : 初層TIG+SMAW (2024年度製作)



モックアップ(2020年度製作)の断面マクロ



裏波幅 : 3.0mm
(2020年度製作No3)



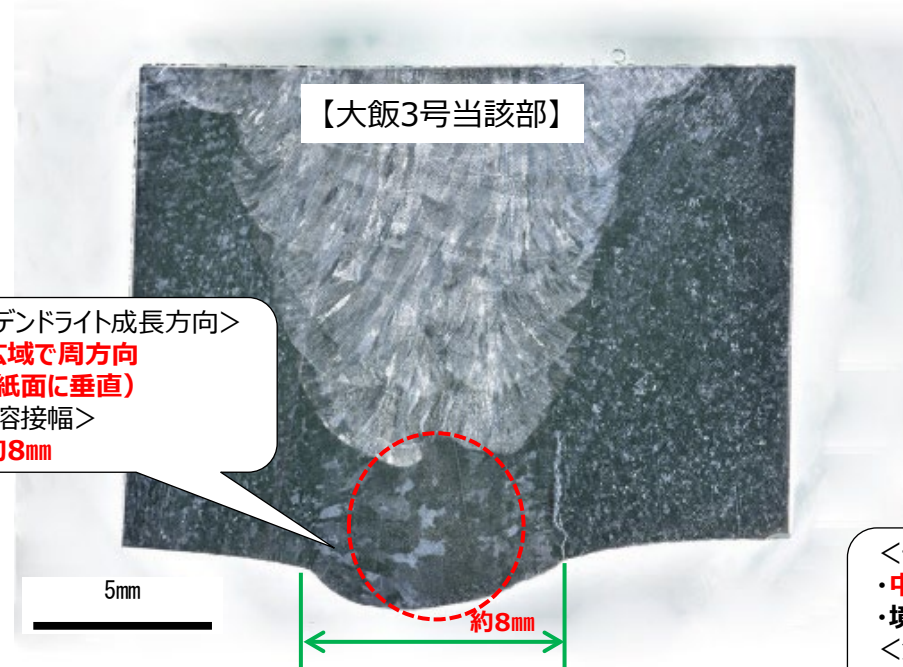
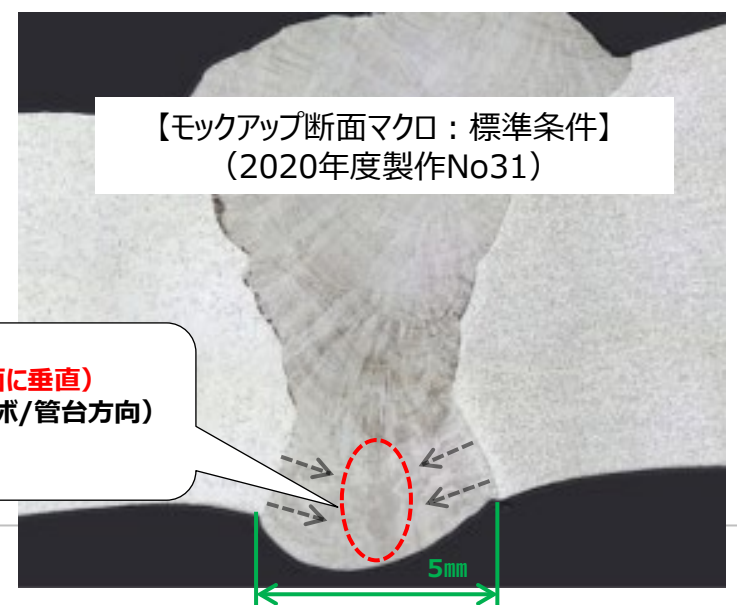
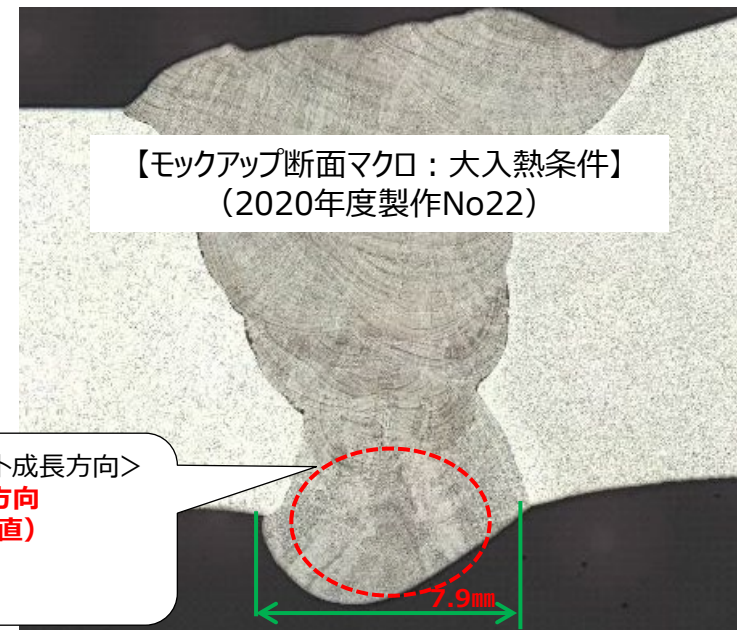
裏波幅 : 6.2mm
(2020年度製作No6)



裏波幅 : 9.0mm
(2020年度製作No11)

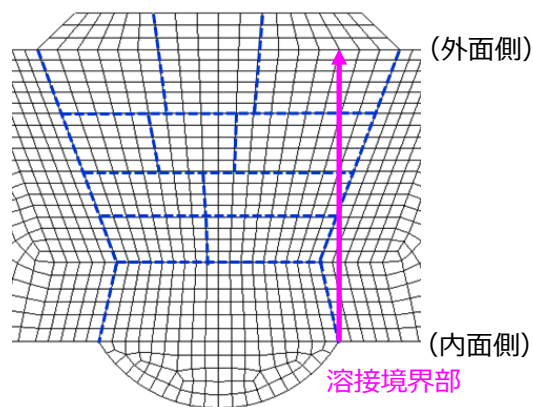
【添付-17】実機及びモックアップでの断面マクロ観察

- 大飯3号当該部の特徴は、デンドライト成長方向が周方向であり、また、溶接幅が広い状況であり、溶接入熱が大きかった（溶接速度が遅い）ことが示唆される。
- 初層大入熱で製作したモックアップ(2020年度製作)の断面マクロ観察より、大飯3号当該部と同様のデンドライト成長方向、かつ、溶接幅であることを確認。
⇒大飯3号当該部も大入熱であったことを示唆。

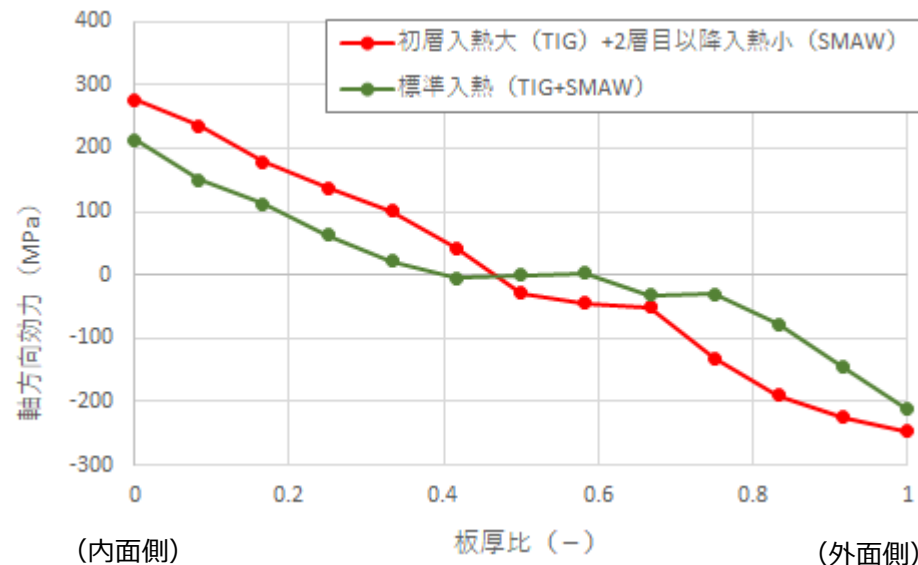


【添付-18】残留応力解析結果

- 大飯3号当該部に想定される溶接（初層入熱大（TIG）+2層目以降入熱小（SMAW））における残留応力解析を実施。
- 大飯3号事象発生当初検討していた残留応力分布（標準入熱：TIG+SMAW）に比べ、内表面側の応力が高くなる傾向を確認。
- 亀裂発生当該部は、溶接入熱の影響により残留応力も高かった可能性が考えられる。



軸方向応力出力位置
(初層入熱大+2層目以降入熱小解析モデル*)

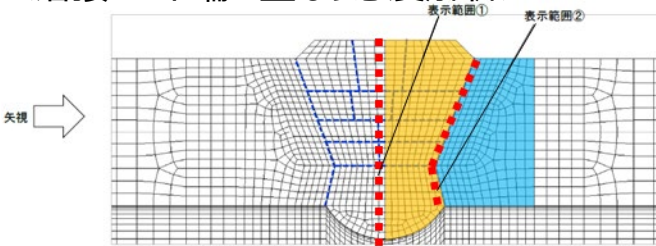


4B配管における軸方向残留応力分布

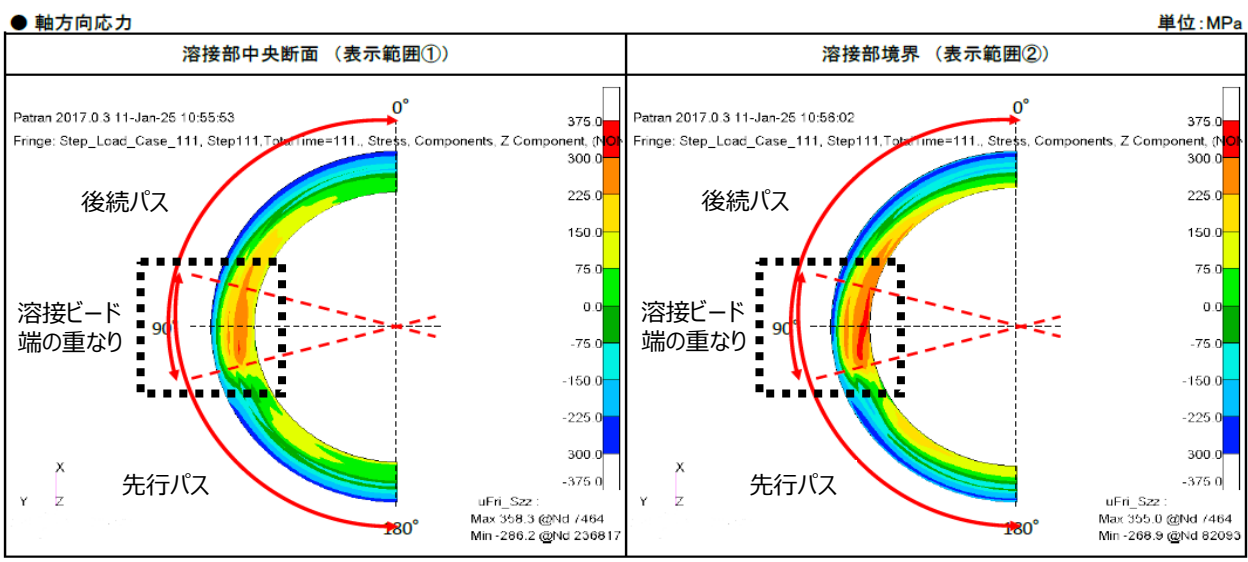
*大飯3号当該部に合わせて初層溶接部の幅（裏波幅）と高さを大きくモデル化
標準入熱は裏波の幅と高さが小さい解析モデルで実施

【添付-19】 残留応力に対する感度解析

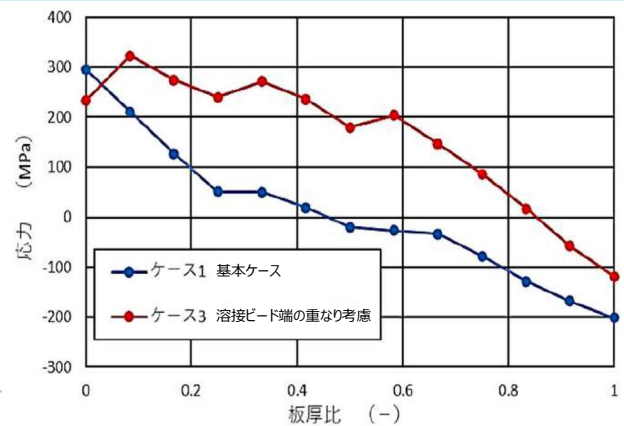
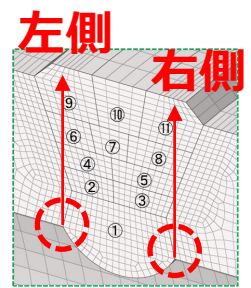
＜溶接ビード端の重なり感度解析＞



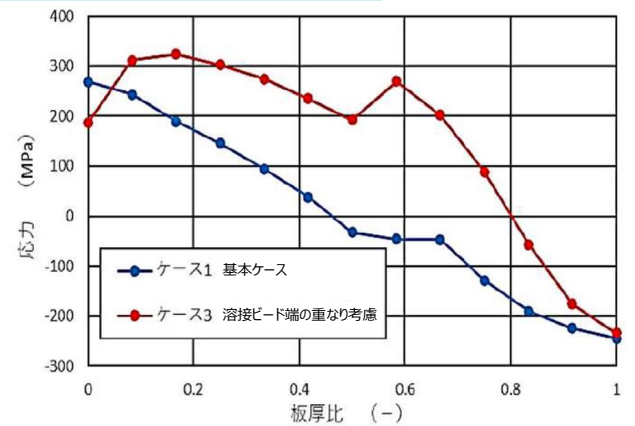
- 溶接ビード端の重なりが各パス毎、同位置となる条件で、影響が顕著になるように設定した。
- 溶接ビード端の重なり範囲 (90±15°) に対して、配管内表面側の溶接境界部で高い引張応力が認められた。
- 溶接ビード端の重なり2回目 (図中の後続パス) の入熱範囲の終端の先部分には圧縮応力が認められた。



- 基本ケースと溶接ビード端の重なり感度解析結果の比較を以下に示す。
- 溶接ビード端の重なりを考慮することにより、板厚内部で全体的に軸方向応力の増加傾向が確認された。



左側溶接境界の軸方向応力比較



右側溶接境界の軸方向応力比較

【添付-20】 過去発生した実機PWRステンレス鋼の粒界割れ事象

- PWR1次系は、水質管理された環境であるため、SCCが発生する可能性は極めて低い（図1）
- 但し、特異な条件（硬さと高応力の重畳）となった部位で、過去に粒界割れ事象が発生（表1）

PWR1次系水質管理
 ・ $\text{DO}_2 \leq 0.005\text{ppm}$
 ・ $\text{Cl}^- \leq 0.05\text{ppm}$

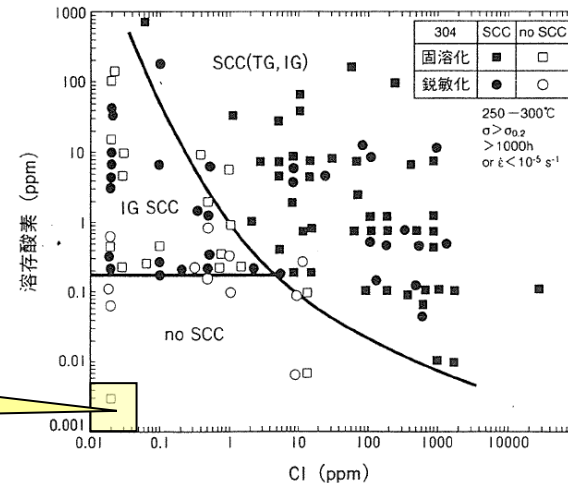


図1 304ステンレス鋼の高温高圧水による応力腐食割れにおよぼす溶存酸素とCl⁻イオンの関係
 出典：「金属の腐食損傷と防食技術」小若

表1 実機PWRステンレス鋼の粒界割れ事例

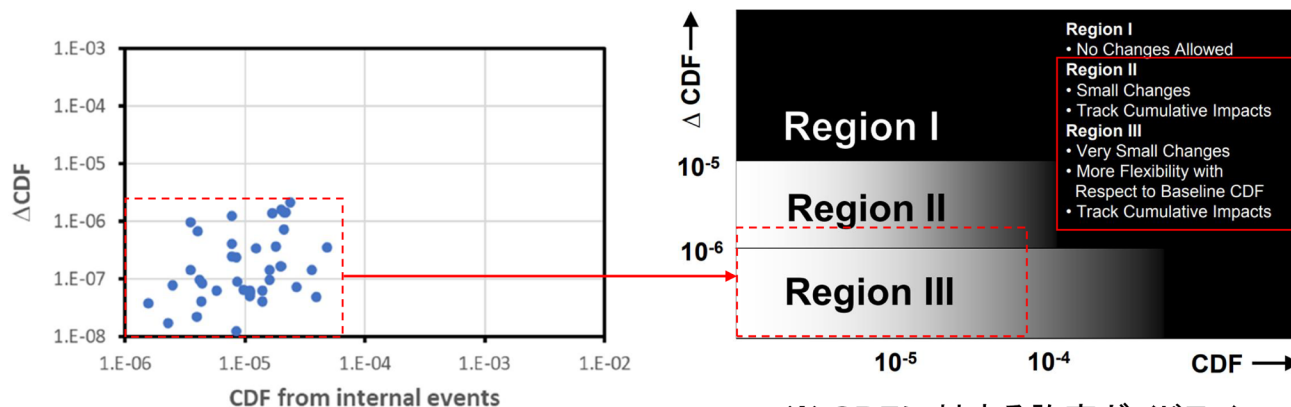
| 発生時期 | 国/プラント | 部位 | 材料 | 硬化要因 | 残留応力 | 運転温度 | 発生時運転時間 | 亀裂 | 原因と特異性 |
|-------|------------------|------------|---------|---------------------|------------|----------|------------|----------------|--|
| 1997年 | フランス | 加圧器ヒータシース | 316L | 冷間加工 (350HV) | 320~400MPa | 360℃ | 0.6~16EFPY | 貫通(約2mm) | スウェーピング(縮径)による冷間加工と高残留応力が原因 国内材は加工後に溶体化処理 |
| 2007年 | 美浜2号 | SGセーフエンド | SUSF316 | 機械加工 (368HV) | ~570MPa | 320℃ | 22EFPY | 0.9mm深さ | 一般的な機械加工による表層硬化と残留応力が原因 表層のみのため進展性なし |
| 2010年 | 中国 Daya Bay | エルボ | 316LN | 冷間加工 (300HV) | 不明 | 300℃ | 16年(炉齡) | 貫通亀裂 (37~47mm) | 冷間加工で製作したエルボの硬化と高残留応力が原因 国内は一般に、熱間加工後に溶体化処理 |
| 2020年 | 大飯3号 | 加圧器スプレイ配管 | SUS316 | HAZ (350HV) | ~300MPa | 290℃ | 19.3EFPY | 4.4mm深さ | 初層大入熱と形状拘束により、特異に硬化したものと推定 |
| 2021年 | フランス Civaux1他 | SIS, RHR配管 | 316L | HAZ、シンニング (200HV後半) | 不明 | 290~325℃ | 16.8EFPY~ | ~23mm深さ | 熱成層による応力、または負荷追従運転時の酸素供給が原因と推定 |

【添付-20】 米国の運転経験に基づくSCCに対する判断

- 仏国でのIGSCC事象を受け、NRCは米国プラントにおけるIGSCCの発生経験に基づく知見を以下の通り整理
 - 米国でのステンレス鋼のIGSCC発生事例は、いずれも過大な残留応力、溶接時の炭素の析出、滞留部の溶存酸素といった因子の影響下で生じた**限定的なものであり、特異な状況（冷間加工、溶接時の炭素の析出等）以外で発生する可能性は低い**。尚、通常のPWR条件でIGSCCが発生した事例はこれまでに確認されていない。

<参考>

NRCは、同事象が米国プラントの安全性に重大な影響を及ぼす可能性があり、規制措置が必要であるかを検討するため、確率論的破壊力学（PFM）に基づいたリスク評価を実施。安全注入系配管における小破断の冷却材喪失事故（SBLOCA）が炉心損傷頻度（CDF）に与える影響について評価した結果、炉心損傷頻度の変化量はLIC-504のガイダンスに示される「直ちに行動を起こさず、継続して業界の動向を監視する」と判断している。



※ CDFに対する許容ガイドライン

CDFの増加量(ΔCDF)を評価基準に用いる

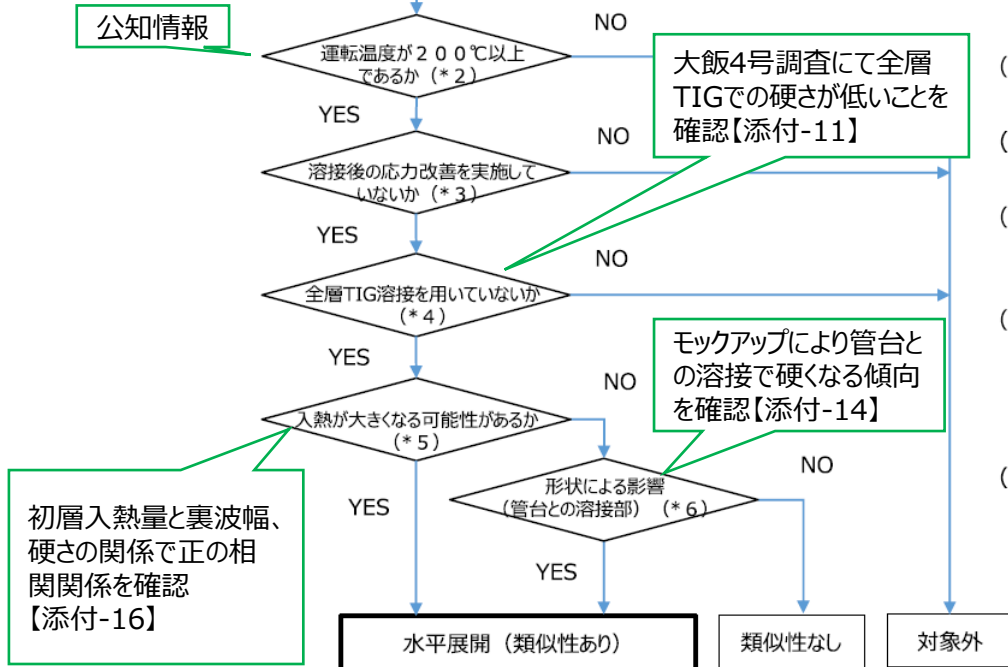
* U.S.NRC. Risk-informed Assessment of French Stress Corrosion Cracking Operational Experience Relative to US Fleet. ML23236A052. 2023. 9

【添付-21】発生メカニズムから鑑みた水平展開検査フローの妥当性

- 知見拡充に向けた取組み成果より、大飯3号事象発生当時の推定メカニズムを覆すような新たな知見は得られておらず、継続検査でも新たな指示は確認されていないことから、水平展開検査フローは問題なく機能しているものと判断される。

- 大飯3号の事象以後、PWR各プラントで大飯3号当該箇所と類似性があると考えられる溶接部を抽出し、至近3定検*に亘り超音波探傷試験を実施中。

1次系水質環境中オーステナイト系ステンレス鋼配管の
供用期間中検査（UT）対象の全系統の全溶接部（*1）



- * 1） PWR環境中のSCCの進展が認められていないステンレス鋼、初層溶接部が接液しないセットイン管台、及び初層溶接部が除去されているセットオン管台は含まれていない。
- * 2） PWR環境中のSCCの進展への温度の影響を考慮し、運転温度200℃以上の溶接部は抽出対象とする。
- * 3） 残留応力の影響を考慮し、溶接後の応力改善（バフ研磨やピーニング）を実施していない溶接部は抽出対象とする。
- * 4） 全層TIG溶接は硬化が小さいことを確認していること及び、初層入熱量が小さくできることで、応力についても小さくできることから、全層TIG溶接を用いていない溶接部は抽出対象とする。
- * 5） 経験年数が少ない溶接士が施工した場合、丁寧かつ慎重に作業することにより入熱が大きくなる可能性があることから、実務経験が3年未満の溶接士が施工した溶接部（入熱の安定する工場溶接を除く）は抽出対象とする。または、補修溶接を実施した場合は、追加で溶接をするため、入熱が大きくなる可能性があることから、補修溶接を実施した溶接部を抽出対象とする。
- * 6） 管台は他の形状と比較して溶接による硬化が生じやすく、モックアップにおいても管台を含む形状で300HVを超える硬さを確認したことから、形状の影響の大きい「管台－エルボ」及び「管台－直管」の溶接部を抽出対象とする。

*：初回検査では念の為、水平展開箇所に加え「類似性なし」とした箇所も含め検査し、大飯3号の事象と同様な事象が生じていないことを確認する。その上で、水平展開箇所について、各プラント3定検連続で検査を行う。

【添付-21】大飯3号粒界割れ事象水平展開検査実績

■ 2025年12月時点で延べ1102箇所に対し検査を実施し、有意な指示は検出されていない。

表 水平展開検査実績一覧

| プラント | 初回検査箇所*1,2 | | 継続検査1回目*1 | 継続検査2回目*1 | 継続検査3回目*1 |
|------|------------|--------|-----------|-----------|-----------|
| | 「類似性なし」の箇所 | 水平展開箇所 | 水平展開箇所 | 水平展開箇所 | 水平展開箇所 |
| 美浜3 | 0 / 77 | 0 / 21 | 0 / 21 | 0 / 21 | 0 / 21 |
| 高浜1 | 0 / 70 | 0 / 24 | 0 / 24 | 0 / 24 | - |
| 高浜2 | 0 / 115 | 0 / 17 | 0 / 17 | - | - |
| 高浜3 | 0 / 40 | 0 / 14 | 0 / 14 | 0 / 14 | 0 / 14 |
| 高浜4 | 0 / 26 | 0 / 18 | 0 / 18 | 0 / 18 | 0 / 18 |
| 大飯3 | 0 / 23 | 0 / 13 | 0 / 13 | 0 / 13 | 0 / 13 |
| 大飯4 | 0 / 34 | 0 / 9 | 0 / 7*3 | 0 / 7*3 | 0 / 7*3 |
| 伊方3 | 0 / 23 | 0 / 9 | 0 / 9 | 0 / 9 | 0 / 9 |
| 玄海3 | 0 / 25 | 0 / 6 | 0 / 6 | 0 / 6 | - |
| 玄海4 | 0 / 22 | 0 / 11 | 0 / 11 | 0 / 11 | 0 / 11 |
| 川内1 | 0 / 27 | 0 / 15 | 0 / 15 | 0 / 15 | 0 / 15 |
| 川内2 | 0 / 20 | 0 / 14 | 0 / 14 | 0 / 14 | - |
| 泊1 | - | - | - | - | - |
| 泊2 | - | - | - | - | - |
| 泊3 | 対象無し | 対象無し | 対象無し | 対象無し | 対象無し |
| 敦賀2 | - | - | - | - | - |

*1：各欄の数値は左側：検査結果の有意な指示の数(-は今後実施)、右側：検査箇所数を表す

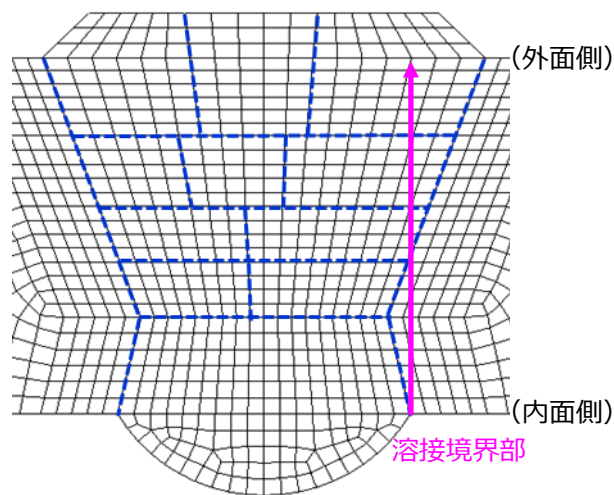
*2：初回検査では念の為、フローの水平展開箇所に加え、「類似性なし」とした箇所も含め検査している

*3：配管取替により水平展開対象外となったため、初回検査箇所と継続検査箇所に差異がある

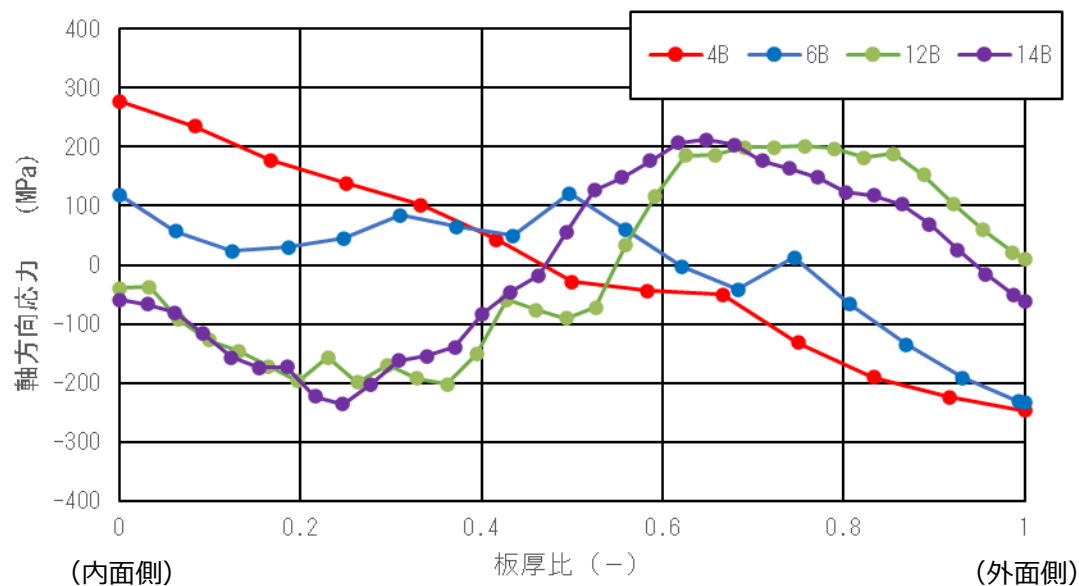
【添付-22】配管口径毎の残留応力解析結果

- 4B,6B,12B,14B配管に対し、初層入熱大（TIG）＋2層目以降入熱小（SMAW）による溶接施工を考慮した溶接残留応力解析を実施し、亀裂進展評価用の残留応力データベースを作成。
- 溶接境界部における軸方向応力について、4B,6Bでは内面側引張、外面側圧縮の傾向、12B,14Bでは板厚の約半分までは圧縮、外面側は引張の傾向を示すことが確認された。
- この結果から、12B、14Bは4B、6Bに比べて亀裂が発生する可能性は小さいものと想定される。

<配管口径毎の残留応力解析結果>



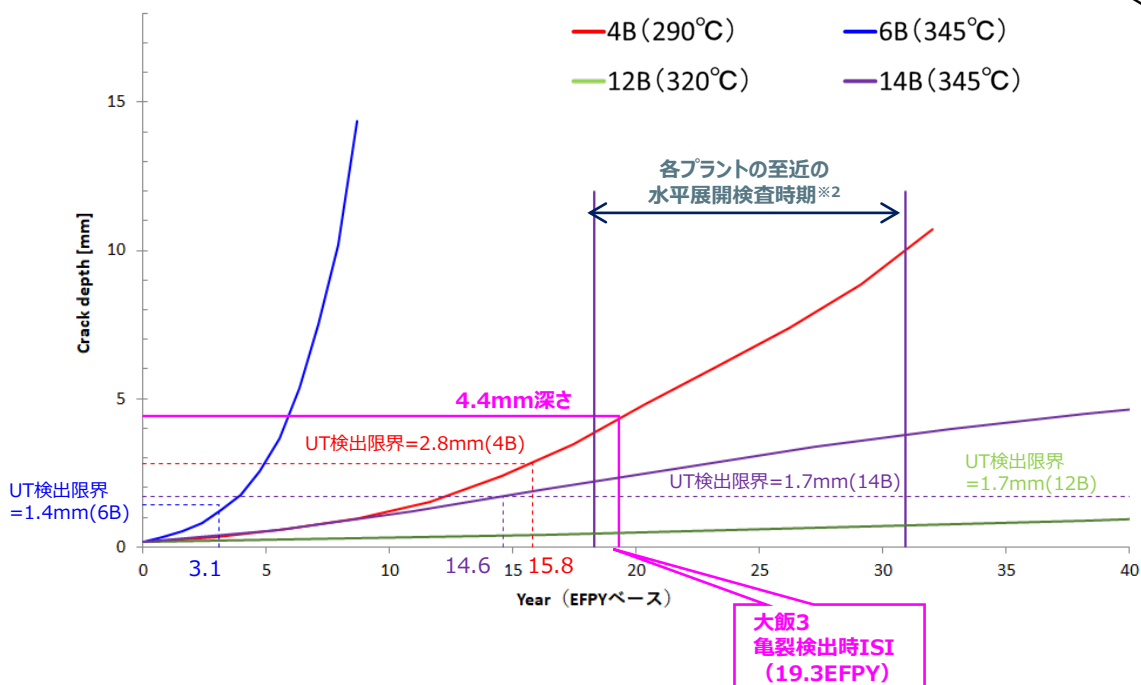
軸方向応力出力位置
(4Bのモデル図に図示)



各配管における軸方向残留応力分布

【添付-23】 亀裂進展の感度解析による水平展開検査結果の評価

- 配管口径に応じた残留応力分布の違いが亀裂進展に及ぼす影響を感度解析により確認した。
- 仮に大飯3号と同様な割れが存在すれば、4Bと6Bは比較的速く進展し、4Bでは15.8EFPY、6Bでは3.1EFPY程度でUT検出限界以上に達すると推定される。この結果を踏まえると、水平展開検査により既に亀裂を検出できているはずであるが、実際にはどのプラントでもUT指示は認められていない。また、12Bと14Bについては、運転中応力を考慮しても高い引張応力とはならないため、4Bおよび6Bよりは亀裂進展が遅い傾向にある。



<評価条件>

- 亀裂進展速度 : JSME事例規格「オーステナイト系ステンレス鋼のPWR一次系水質環境中のSCC亀裂進展速度(NA-CC-017)」
- 初期亀裂サイズ : 深さ 0.18mm 長さ 2.45mm (大飯3号で検出された亀裂の進展傾向を踏まえて初期亀裂深さ、長さを設定)
- 硬さ
4B : 大飯3号当該管の硬さ分布
4B以外 : 初層TIG+SMAWで製作したモックアップ (2024年度制作) ※1の硬さ分布【添付-24】
- 残留応力
初層入熱大 (TIG) + 2層目以降入熱小 (SMAW) の応力分布 (解析結果)

※1 電力共通研究「ステンレス鋼SCCの発生・進展条件の把握に関する研究」

※2 各プラントのEFPYは至近定検 (継続検査実施) までのEFPYを示す

玄海4#17(18.3) 大飯3#21(22.6) 美浜3#28(27.2) 高浜3#27(28.6)
玄海3#18(20.0) 大飯4#20(22.8) 高浜1#29(27.3) 川内2#27(29.1)
伊方3#18(20.4) 高浜2#28(26.3) 高浜4#26(28.4) 川内1#29(30.9)

- 残留応力解析及び亀裂進展評価を踏まえ、全ての口径においてUT指示が認められていないことから、大飯3号当該亀裂以外の箇所では亀裂が発生する可能性は低いと考える。

【添付-24】 亀裂進展の感度解析に用いた硬さ分布

＜亀裂進展評価に用いる硬さ分布＞

- 大飯3 当該部の溶接を想定した初層入熱大（TIG）+2層目以降入熱小（SMAW）による溶接にて6B,12B,14Bのモックアップを製作し、亀裂の進展性に影響する配管口径ごとの硬さの分布を確認。（2024年度）
- モックアップで確認した硬さ分布から、亀裂進展の感度解析に用いる硬さ分布を設定。
- 亀裂進展の感度解析に用いる配管口径ごとの硬さ分布は以下の通り。

| 大飯3当該部硬さ分布（4B配管） | |
|------------------|---------|
| 内表面からの距離 | 硬さ（HV1） |
| 0mm以上 0.5mm未満 | 240 |
| 0.5mm以上 1.5mm未満 | 224 |
| 1.5mm以上 2.5mm未満 | 222 |
| 2.5mm以上 3.5mm未満 | 216 |
| 3.5mm以上 4.5mm未満 | 213 |
| 4.5mm以上 5.5mm未満 | 203 |
| 5.5mm以上 6.5mm未満 | 199 |
| 6.5mm以上 | 192 |

| 6B配管-硬さ分布 | |
|------------------|---------|
| 内表面からの距離 | 硬さ（HV1） |
| 0mm以上 6.0mm未満 | 272 |
| 6.0mm以上 7.0mm未満 | 261 |
| 7.0mm以上 8.0mm未満 | 258 |
| 8.0mm以上 9.0mm未満 | 249 |
| 9.0mm以上 10.0mm未満 | 245 |
| 10.0mm以上 | 239 |

| 12B配管-硬さ分布 | |
|-------------------|---------|
| 内表面からの距離 | 硬さ（HV1） |
| 0mm以上 21.0mm未満 | 247 |
| 21.0mm以上 23.0mm未満 | 246 |
| 23.0mm以上 24.0mm未満 | 242 |
| 24.0mm以上 25.0mm未満 | 241 |
| 25.0mm以上 27.0mm未満 | 238 |
| 27.0mm以上 28.0mm未満 | 231 |
| 28.0mm以上 29.0mm未満 | 229 |
| 29.0mm以上 30.0mm未満 | 220 |
| 30.0mm以上 31.0mm未満 | 211 |
| 31.0mm以上 32.0mm未満 | 210 |
| 32.0mm以上 | 201 |

| 14B配管-硬さ分布 | |
|-------------------|---------|
| 内表面からの距離 | 硬さ（HV1） |
| 0mm以上 8.0mm未満 | 285 |
| 8.0mm以上 21.0mm未満 | 272 |
| 21.0mm以上 27.0mm未満 | 264 |
| 27.0mm以上 28.0mm未満 | 261 |
| 28.0mm以上 29.0mm未満 | 257 |
| 29.0mm以上 30.0mm未満 | 248 |
| 30.0mm以上 | 240 |

- いずれの口径も複数断面において1mmピッチ、1kgf条件で硬さを測定し、最大値を用いた。
- 同一の硬さとなる範囲については表中の記載を省略している。

