

関西電力株式会社大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管における亀裂の調査を踏まえた対策について（追加報告）

令和 3 年 4 月 2 1 日
原子力規制庁

1. 経緯・趣旨

令和 3 年 2 月 2 4 日の原子力規制委員会において、関西電力株式会社（以下「関西電力」という。）大飯発電所 3 号機（以下「大飯 3 号機」という。）における加圧器スプレイライン配管溶接部の亀裂に関する調査結果及び結果に基づく対策に関する報告を行い、当面の原子力規制庁の方針について了承された。

その際の報告では説明が十分ではなかった、当該亀裂に係る①初期欠陥の寄与の可能性、②超音波探傷試験（以下「UT」という。）の精度及び実施頻度並びに③破断前漏えい（以下「LBB」という。）の成立性について改めて追加報告するよう指示があったところ。

2. 追加報告

①初期欠陥の寄与の可能性について

（1）関西電力の見解

関西電力は、過去の研究知見から、亀裂が生じた配管の配管径及び肉厚の部位における UT の検出下限欠陥深さは、粒界割れの特徴を有する亀裂に対して約 2. 8 mm、疲労割れの特徴を有する亀裂に対して約 1. 6 mm としており、プラント建設時から UT 検出下限以下の深さの欠陥が存在していた可能性は否定できないとしている。

このことを踏まえ、関西電力は、切り出した配管溶接部の亀裂面の端部を電子顕微鏡によってつぶさに観察するとともに、溶接作業において生じる典型的な欠陥の可能性を検討することを含め、初期欠陥の有無について調査を行った。その結果、電子顕微鏡により観察した範囲では初期欠陥の痕跡を示す部分は確認されなかったことから、溶接欠陥等の明確な初期欠陥が存在した可能性は低いものの、微細な初期欠陥が存在した可能性を完全に否定することはできないとしている（添付資料参照）。

（2）原子力規制庁の評価

原子力規制庁は、公開会合において関西電力が実施した亀裂端部の観察結果及び既知の溶接欠陥が存在した可能性に対する関西電力の見解を確認した結果、UT で検出が困難な寸法の範囲において比較的大きな初期欠陥が存在し今般検

出された亀裂に至った可能性は小さいものの、微細な欠陥が存在したことは否定できないと考える。また、PWRの一次冷却材環境下における亀裂の発生に関する知見は現時点で十分ではなく、今後の供用期間中検査によって亀裂の監視を適切に実施する上では事業者の取り組みによる知見の拡充が必要と考える。

その上で、亀裂が異常に硬化した溶接熱影響部に生じていることを踏まえた原因の推定及びそれに対する対策として、関西電力が、溶接時の入熱量が過大になる可能性がある溶接部及び配管形状による変形量の抑制が大きい特徴をもつ溶接部に対する健全性確認を行うとした考え方について、原子力規制庁は妥当なものとして評価した。

②UTの精度及び実施頻度について

(1) 関西電力の見解

UTには、①(1)に示したとおり検出可能な下限寸法があり、それ以下の欠陥は検出できない場合がある。また、PWRの一次冷却材環境下におけるSCCの進展速度に関する知見が十分ではないため、関西電力は、供用期間中検査の実施頻度等を策定するためには、SCCの発生及び進展に係る基礎的な知見を拡充する必要があり、今後、これに取り組むこととしている。

この状況を踏まえ、関西電力は、現在得られている亀裂進展に係るデータを用いて過度に保守的な評価条件を仮定し、配管にUT検出下限深さの亀裂が存在した場合でも2サイクルの運転期間中は最低必要肉厚を下回ることはない、ということを確認した上で、亀裂が判明した配管溶接部と同様の特徴をもつ溶接部に対し、当面の間、1サイクルごとに実施する定期検査において健全性確認を実施することとしている。

(2) 原子力規制庁の評価

原子力規制庁は、関西電力が今後取り組むとしているSCCの発生及び進展に係る基礎的な知見の拡充は当然必要であると考えているものの、現時点で活用可能な知見に基づき、亀裂の特徴を踏まえた健全性確認の範囲を設定し、保守的な亀裂進展評価を踏まえ、1サイクルごとに健全性確認を実施することとした関西電力の考え方並びに健全性確認の対象範囲及び実施頻度は、妥当なものとして評価した。

③LBBの成立性について

(1) 関西電力の見解

関西電力は、亀裂が発生した配管を切り出す前の段階において、当該亀裂の進展評価及び破壊評価を行い、その結果、当初計画していた運転期間(1サイクル)

において貫通破壊に至らず、仮に、その時点における周方向亀裂長さを持つ貫通亀裂を仮定した場合においても、周方向亀裂長さに対応する角度（90.6度）が、当該配管においてLBBの成立性を判断する周方向角度（96.9度）以内にあることをもってLBBが成立する、としていた。

（2）原子力規制庁の評価

令和2年10月21日の第33回原子力規制委員会において報告したとおり、原子力規制庁は、配管を切り出す前の段階における関西電力の亀裂進展評価及び破壊評価について、前提条件の妥当性や一貫性及び結果に対する保守性の確保が確認できなかったため、想定される運転期間中の技術基準規則への適合性が維持されるとは判断できなかった。したがって、同一の評価に基づくLBBの成立性に係る関西電力の説明についても妥当性を判断できなかった。

関西電力が、亀裂が発生した大飯3号機の配管を交換することとしたことから、原子力規制庁は、当該亀裂に係るLBBの成立性について個別に議論を行う必要はないものとするが、PWRの一次冷却材環境下においてSCCとみられる亀裂が発生したことを踏まえ、PWRにおけるLBBの成立性に係る事業者の評価の考え方に対し、今後、新たに得られるSCC進展速度等に関する知見を反映することが必要であるものとする。

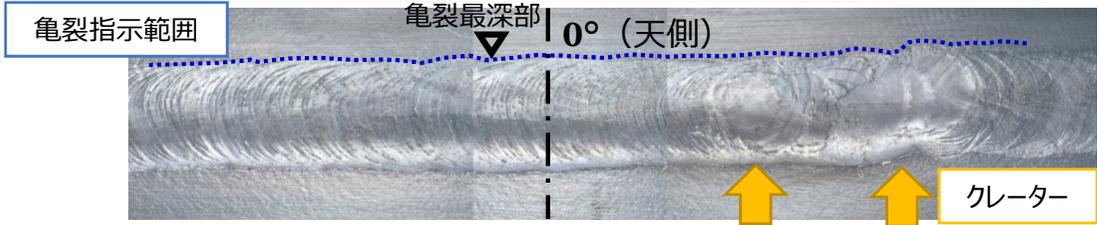
3. 事業者の知見拡充に係る取り組みについて

関西電力は、今後、原子力エネルギー協議会（ATENA）と共に、大飯3号機において発生した亀裂の更なる調査を含め、PWRの一次冷却材環境下におけるSCCの発生及び進展のメカニズムについて研究を行い、亀裂進展評価に用いる基礎データの拡充を行うとしている。また、フェーズドアレイUTにより亀裂進展方向を誤って評価したことについても原因調査を行うとしている。

これらの調査及び研究による知見の拡充については、原子力安全に対する一義的責任のもと、関西電力はもとより、事業者自らが率先して取り組むことが必要だが、原子力規制庁は、供用期間中検査におけるUTの妥当性及びLBB成立性の観点を踏まえ、今後、公開会合等において、これら調査及び研究の計画、進捗状況及び結果について説明を受けることとする。

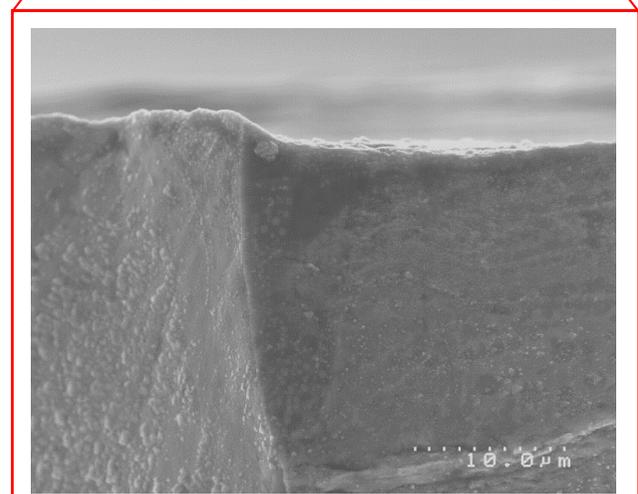
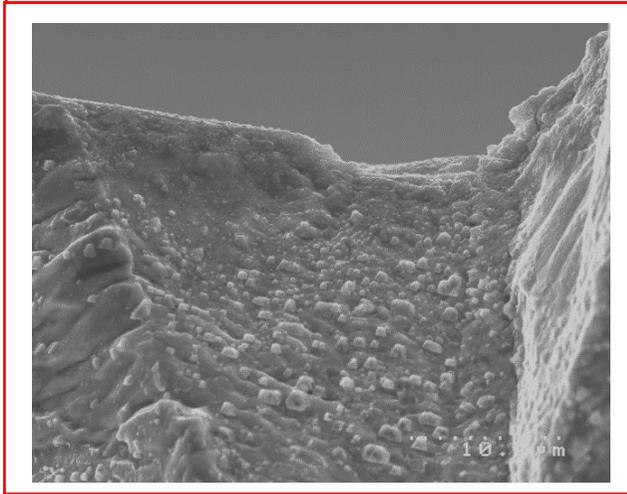
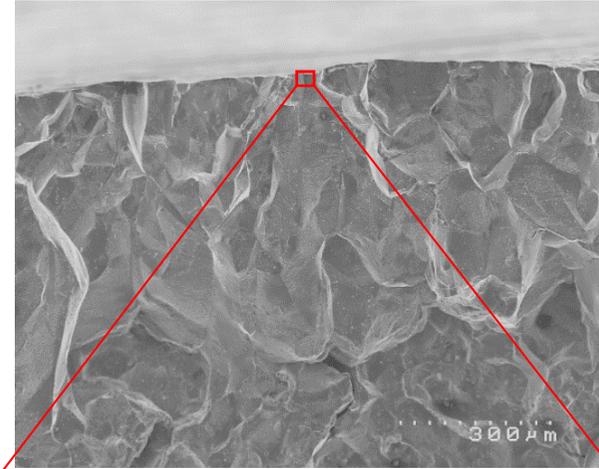
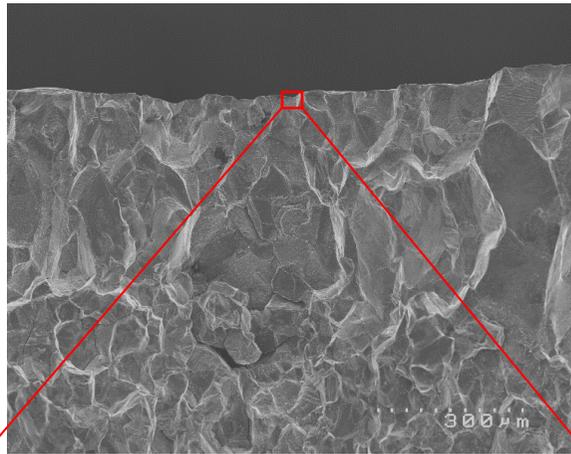
以上

溶接欠陥の有無の再確認 (1/2)



亀裂最深部近傍の表面側破面

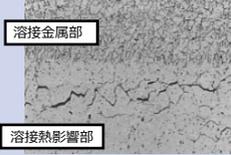
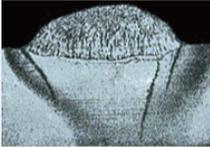
クレーター近傍の表面側破面



- 起点となる内表面側の破面全域を詳細に観察した結果、いずれの領域も一般的な粒界割れであり、明瞭な溶接欠陥の痕跡は認められなかった。
- 拡大像からは、微細な粒状の腐食生成物が認められた。

溶接欠陥の有無の再確認 (2/2)

熱影響部で生じる溶接欠陥に起因する割れの整理

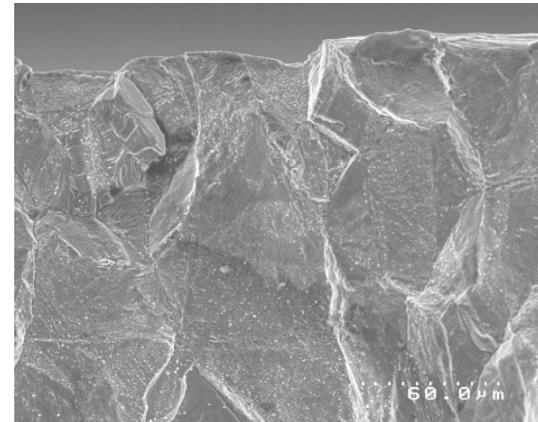
溶接欠陥		定義 (JIS Z 3001-4)	発生事象	溶接欠陥の例	調査結果
割れ	高温割れ	溶接部の凝固温度範囲またはその直下のような高温で発生する割れ	液化割れ、延性低下割れ	 *1	熱影響部に発生する高温割れとしては液化割れがあるが、破面観察の結果、液化割れの特徴である粒界が丸みを帯びた破面は認められなかった。延性低下割れは、炭素量の少ないSUS316では生じ難く、国内PWRプラントでの報告例はない。また、付着物EDS分析の結果、高温割れの原因となるP（リン）は認められなかった。
	低温割れ	溶接後、溶接部の温度が常温付近に低下してから発生する割れ	ルート割れ、止端割れ	 *2	オーステナイト系ステンレス鋼であれば、一般に低温割れは生じない。また、低温割れの要因となる水素の混入が少ないTIG溶接と低水素系棒を使用した被覆アーク溶接で行っている。
	再熱割れ	溶接後の再加熱（約600℃程度）において発生する割れ	再熱割れ	 *3	本溶接は、溶接後熱処理は実施しておらず、運転温度は約290℃と低いため、再熱割れではない。多層溶接の溶接熱サイクルによって炭化物が析出し、発生することはあるが、炭素量の少ないSUS316では、一般に再熱割れは生じない。



液化割れの例*3

粒界が丸みを帯びた破面

実機当該部では粒界が丸みを帯びていない破面



破面内表面の観察結果
(亀裂最深部の表層近傍)

破面では明確な溶接欠陥の痕跡は認められなかった。しかし、特異な硬化が生じているため、溶接により微小な割れが発生していた可能性は否定できない。

出典 *1 : (社)日本溶接協会編, 溶接技術Q&A (2004)
 *2 : 星研究所合同会社HP
 *3 : (社)溶接学会溶接冶金研究委員会編, 溶接部組織写真集 (1982)

資料1

関西電力株式会社大飯発電所3号機加圧器スプレイライン配管における亀裂の調査を踏まえた対策について

令和3年2月24日
原子力規制庁

1. 経緯・趣旨

令和2年10月21日及び令和3年1月13日の原子力規制委員会において報告した、関西電力株式会社（以下「関西電力」という。）大飯発電所3号機（以下「大飯3号機」という。）における加圧器スプレイライン配管溶接部の亀裂に関する調査結果及び結果に基づく対策について報告するとともに、今後の原子力規制庁による本件の対応方針を諮る。

2. 関西電力からの報告内容（添付資料参照）

（1）直接観察等による亀裂の発生及び進展の推定原因

関西電力が、亀裂が発生した溶接部を含む配管の直接観察等を実施した結果、当該亀裂は、溶接熱影響部に沿って進展した、最大深さ約4.4mm、周方向長さ約60mm、破面が粒界割れの特徴を持つものであること等が確認された。

また、亀裂が進展した溶接熱影響部が異常な硬さとなっていたことから、関西電力は、溶接熱影響部の硬化が亀裂の発生に寄与し、その後、応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking、以下「SCC」という。）により進展したものと判断した。

さらに、関西電力は、溶接熱影響部が硬化したことに対する要因を調査し、亀裂周辺の調査及び管台とエルボ管を模擬した試験体において熱影響部の硬化を再現したモックアップ試験の結果から、①溶接作業による入熱量の増加及び②溶接部周辺の形状等による溶接後の変形への制約、の二つの要因が重畳したことによって熱影響部が異常に硬化した可能性がある、と推定している。

（2）原因の調査結果を踏まえた対応

関西電力は（1）①及び②の相関関係が判明していない現時点において、いずれかの要因が単独でも熱影響部の硬化を起こす可能性を踏まえ、SCCが発生する可能性のある溶接部¹のうち、以下に示す、(a)又は(b)のいずれかの特徴に合致する溶接部については、SCCを引き起こす可能性のある溶接熱影響部

¹ 運転温度200度超、応力改善策が未実施及び全層TIG溶接以外の溶接法、のいずれにも該当する部位

の硬化が否定できないと判断し、健全性を確認する必要がある対象と判断した。

- (a) 溶接作業の経験年数が3年未満の作業員が担当した現地溶接の溶接部又は溶接記録により補修溶接を行ったことが確認された溶接部
- ・ 亀裂が生じた溶接部は経験年数が短い作業員が作業を担当しており、比較的作業が困難な現地での溶接作業だったため、作業に時間をかけた結果、入熱量が大きくなった可能性がある
 - ・ 補修のため追加的に溶接を実施した部位は、入熱量が大きくなった可能性がある
- (b) 溶接に伴う変形量を吸収しにくい管台と配管（管台とエルボ管又は管台と直管）の溶接部
- ・ 亀裂が生じた溶接部は、管台とエルボ管を接合している部位であり、溶接に伴う配管の変形量を吸収する領域が限定されているため、溶接部近傍にひずみが集中し硬化量が大きくなった可能性がある

関西電力は、大飯3号機及び関西電力のその他のプラント²において、今後、原子炉を起動する前及びその後3回の定期検査の際、健全性を確認する対象と判断したこれらの溶接部位に対し超音波探傷試験（以下「UT」という。）を実施するとともに、UTによる確認結果等の知見を踏まえ、それ以降の供用期間中検査の計画に反映するとしている。

また、SCCが発生する可能性のある溶接部のうち健全性を確認する対象以外の溶接部についても、念のため、各プラントの原子炉を起動する前にUTを実施し健全性を確認するとしている。

3. 関西電力の原因調査等に対する原子力規制庁の評価

原子力規制庁は、関西電力が亀裂の直接観察による原因調査を開始して以降、合計6回の公開会合³により調査結果等について確認を行った結果、2.に示した亀裂の調査及びモックアップ試験の結果に基づく亀裂の発生及び進展に係る要因を推定した考え方については概ね妥当なものであると評価する。加えて、この考え方に基づき関西電力が実施する健全性確認の対応についても、妥当な対象範囲及び内容であるものと評価する。

² 美浜3号機、大飯4号機並びに高浜1、2、3及び4号機

³ 令和2年12月4日、12月24日、令和3年1月8日、1月29日、2月4日及び2月12日の合計6回

また、大飯3号機加圧器スプレイライン配管溶接部において判明したUT指示に係る関西電力の対応については、当初、亀裂の形状及びその進展に係る評価等が十分ではない点があったものの、最終的には亀裂が生じた配管の直接観察による原因調査及びその結果を踏まえた対策が立案されたため、現時点で原子力規制検査の検査指摘事項に該当するものではないと判断する。他方、今後、関西電力の各プラントに対する健全性確認が適切に実施されることについては、引き続き、原子力規制検査による監視を継続する。

4. 原子力規制庁の今後の対応方針

(1) 大飯3号機加圧器スプレイ配管の交換に係る工事について

関西電力から、令和2年10月20日に申請された加圧器スプレイ配管の交換工事に係る設計及び工事の計画については、これまでの調査等を踏まえ、補正申請が令和3年2月16日になされている。原子力規制庁は、本設計及び工事の計画に対する技術基準規則への適合性等について審査を実施する。

(2) 溶接部の健全性確認に対する監視について

3. の関西電力による今後の取り組みの監視に加え、他のPWR事業者のプラントにおける溶接部の健全性については、各事業者において本事象を踏まえた対応が検討され、必要な確認等が実施されているかどうかについて、原子力規制検査により監視を行っていく。

(3) 亀裂の発生及び進展メカニズム、UTによる亀裂の評価等に係る調査及び分析について

関西電力は、今後、原子力エネルギー協議会（ATENA）と共に、PWRにおけるSCCの発生及び進展のメカニズムについて研究を進め、維持規格⁴に反映するとしている。また、大飯3号機の配管を切り出す前に実施したフェーズドアレイUTによる亀裂の評価において、進展方向が誤っていたことについても、原因の調査及び分析を行うとしている。

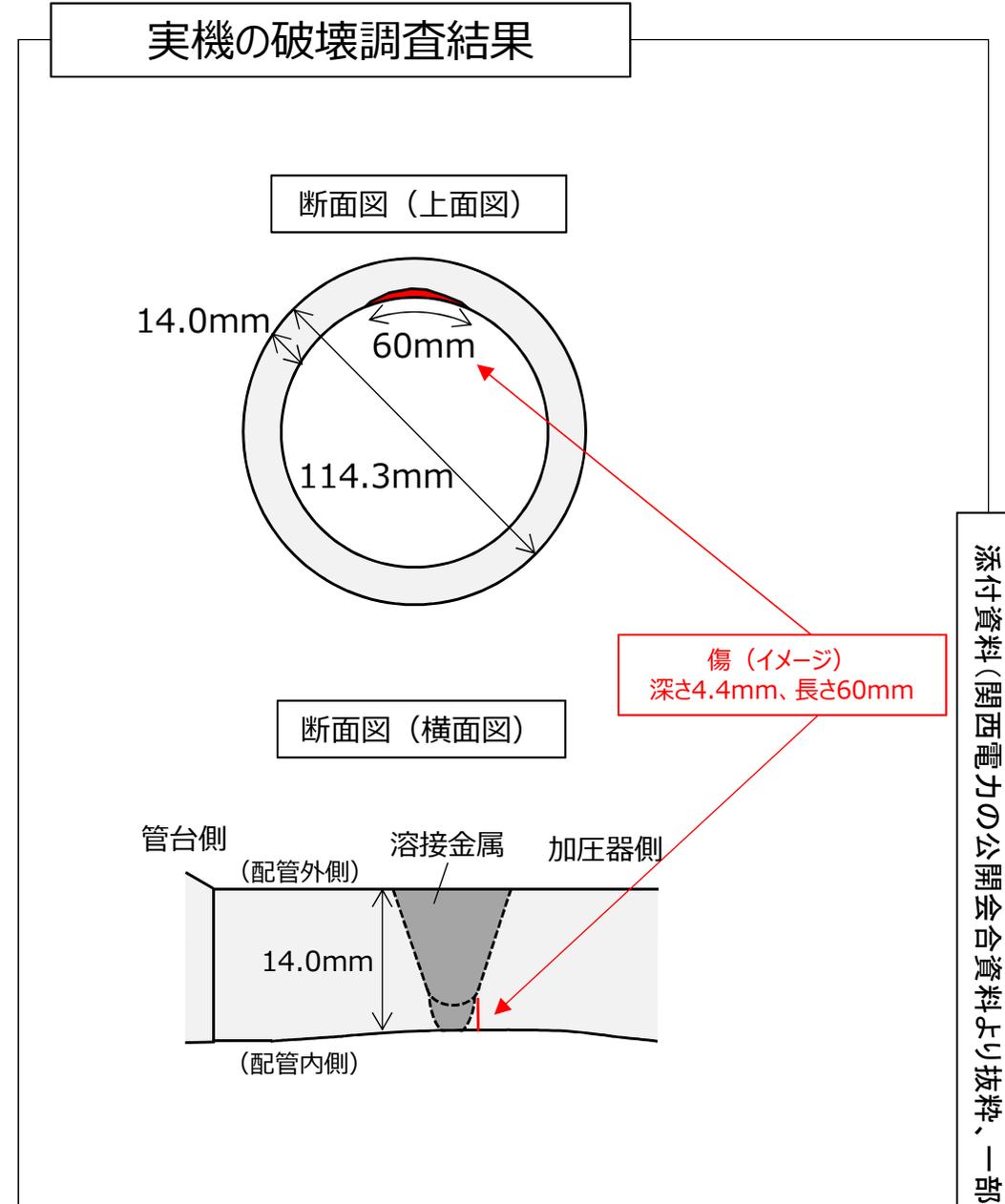
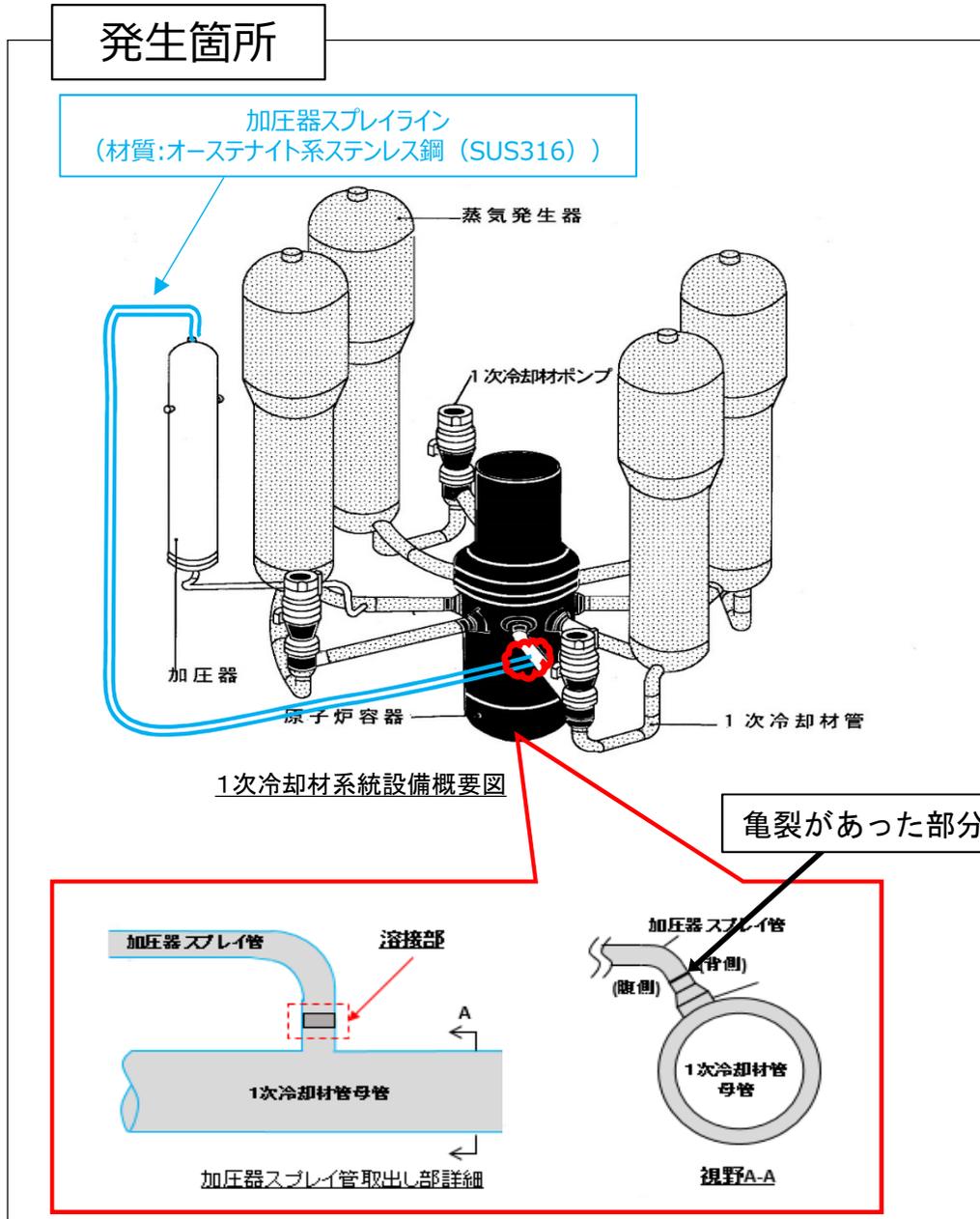
原子力規制庁は、これらの課題に係る取り組み状況について、公開会合等を通じて確認を行っていくこととする。

以上

⁴ 日本機械学会 発電用原子力設備規格維持規格

事象概要

➤ 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、**溶接熱影響部にて深さ4.4mm、長さ60mmの亀裂**があることが明らかとなった。

断面マクロ・ミクロ観察に基づく考察

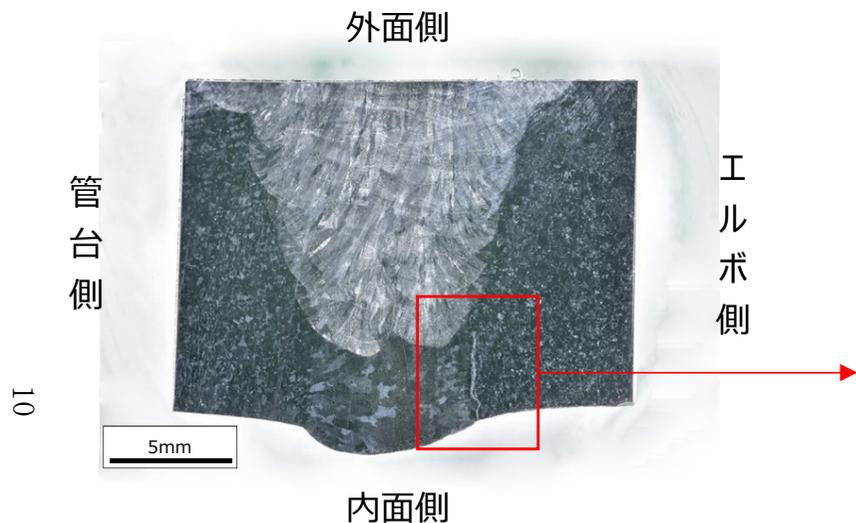


図1：断面マクロ観察

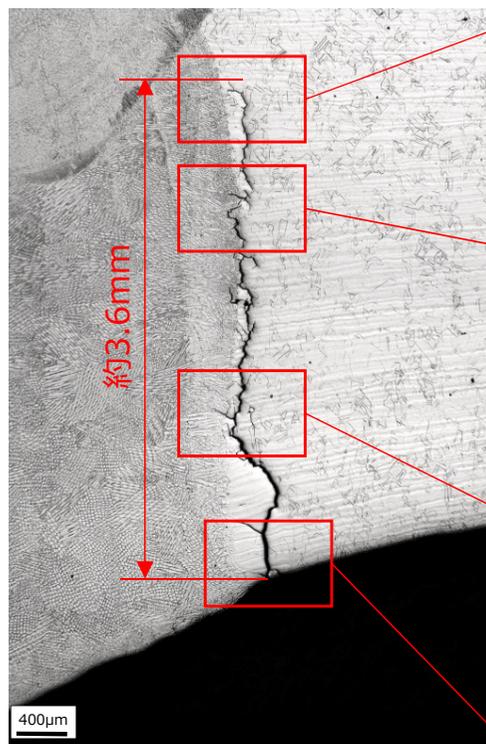
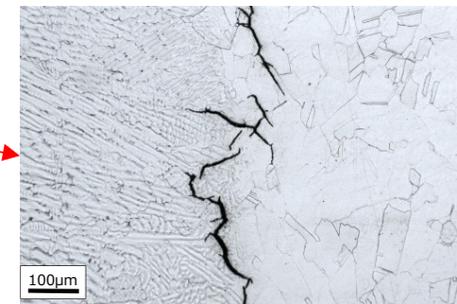
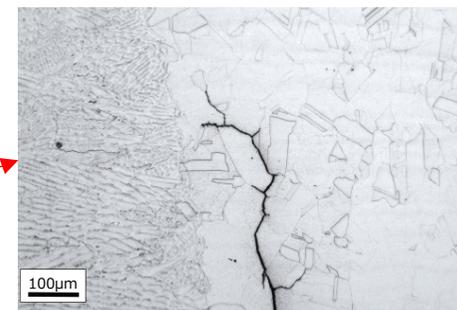


図2：断面ミクロ観察

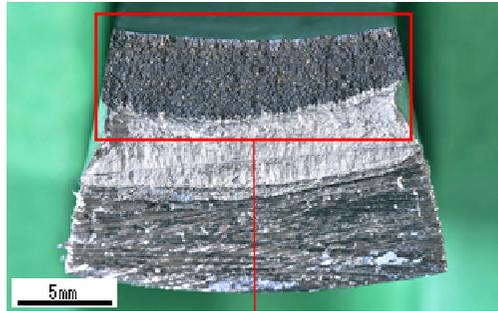


- 断面マクロ・ミクロ観察の結果、当該部の割れは溶接境界極近傍の母材部を起点としており、主亀裂の進展経路は母材部の溶接境界付近を粒界に沿って進展している。
(分岐した亀裂が溶接金属に接したのも一部あり)

破面マクロ・ミクロ観察および付着物EDS分析に基づく考察

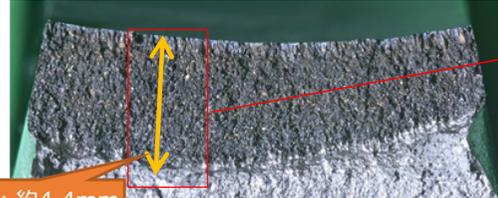
破面マクロ・ミクロ観察結果

<エルボ側>



90°側

270°側



最深部: 約4.4mm

図1: 破面マクロ観察

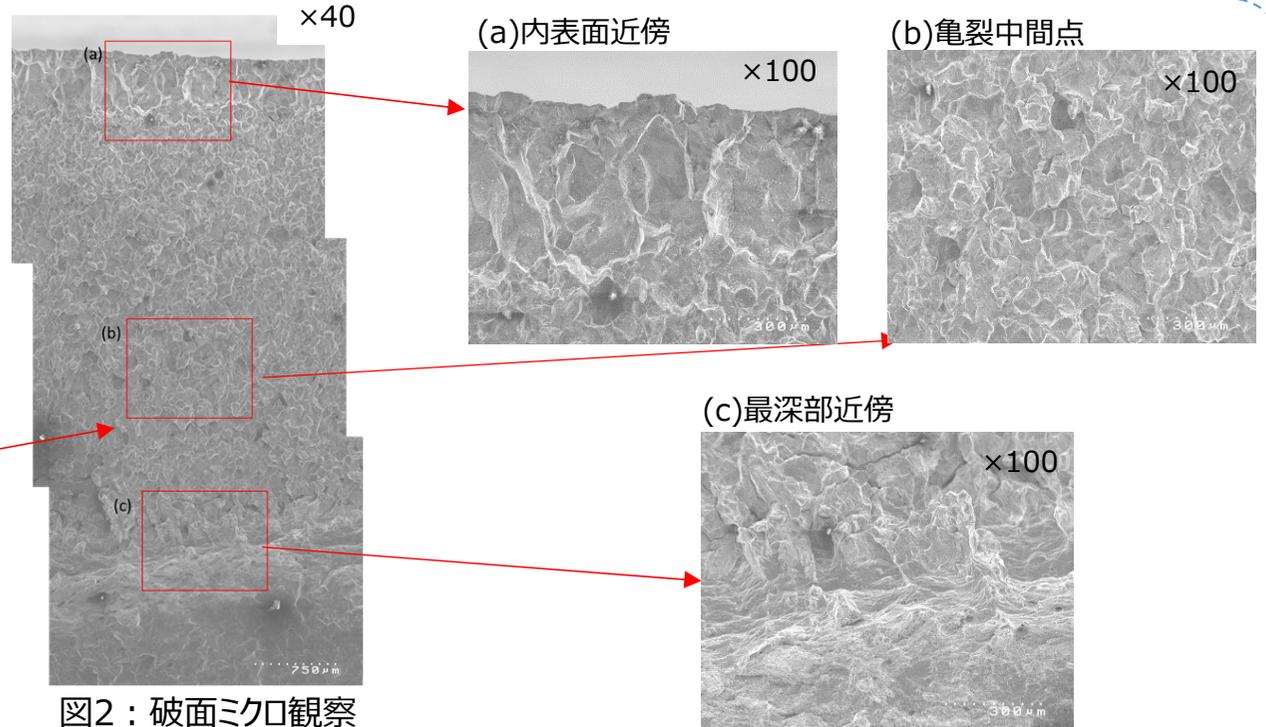


図2: 破面ミクロ観察

付着物EDS分析結果

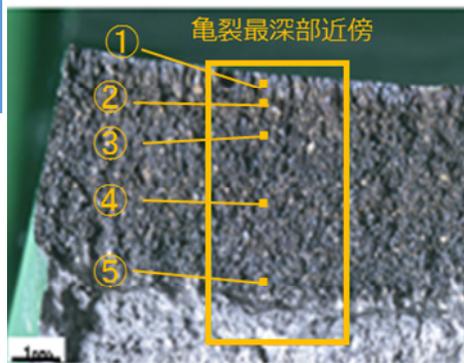


図3: 付着物EDS分析位置

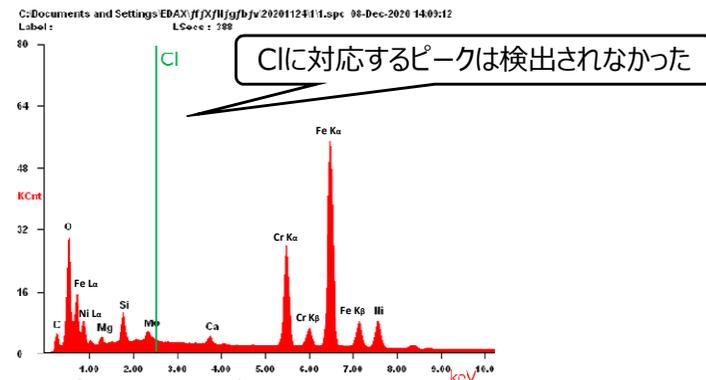


図4: 付着物EDS分析結果 (例: 分析位置①)

- 亀裂最深部の破面ミクロ観察の結果、**破面全体にわたって応力腐食割れ**でよく見られる、**粒界割れが認められた**。
- **疲労による割れの特徴であるビーチマークやストライエーションは認められなかった**。
- 破面観察から**Cl-SCCの特徴である粒内割れ**は殆ど認められず、付着物EDS分析から**Cl等の有害な元素**は認められなかった。

硬さ計測に基づく考察

<表層>

- ・内表面からの距離
0.02mm~0.5mm
- ・マイクロビッカース計 (10g)

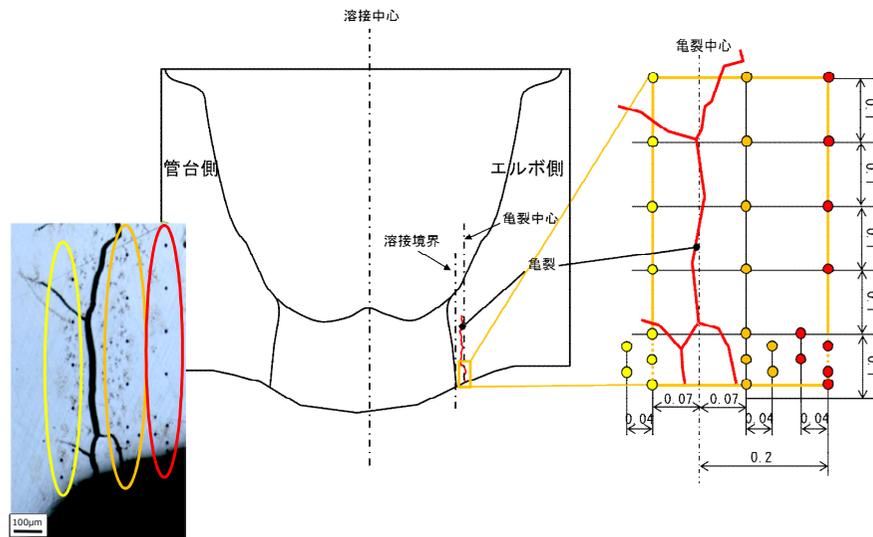
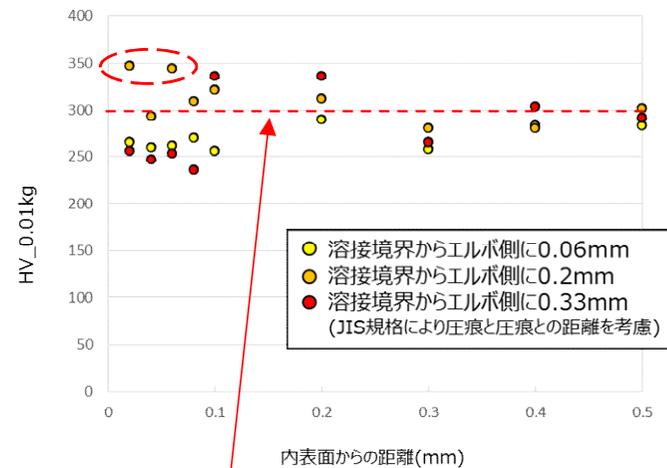


図1：硬さ計測結果 (荷重：10g)



硬さによるSCC発生の知見のある値 (300HV5)

<内部>

- ・内表面からの距離
0.5mm~7.5mm
- ・ビッカース計 (1kg)

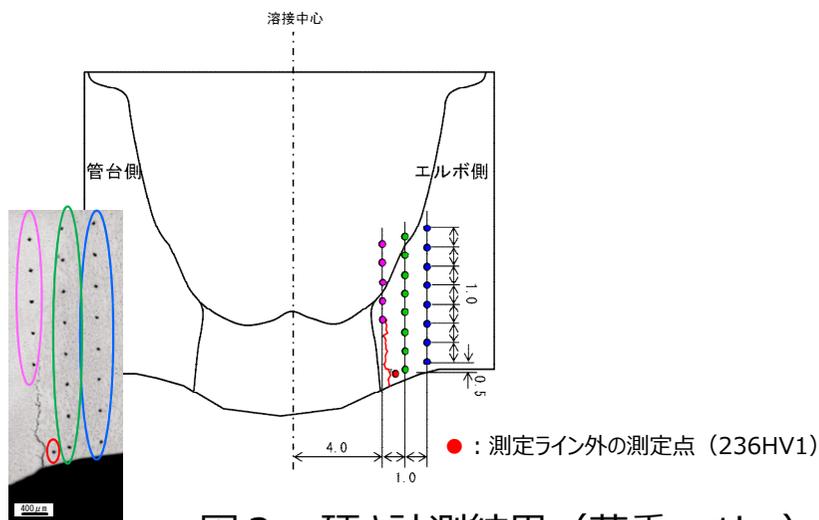
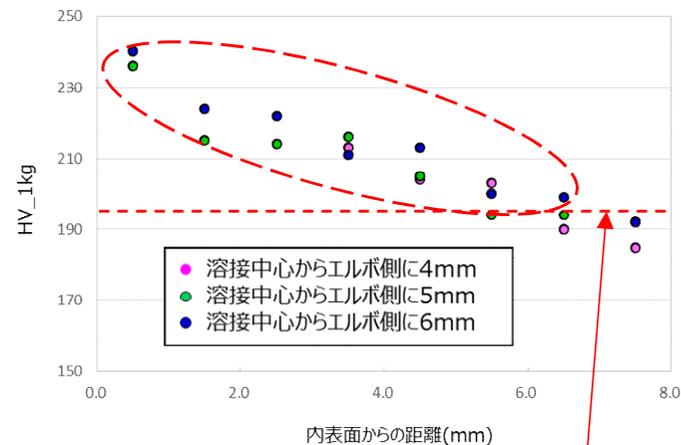


図2：硬さ計測結果 (荷重：1kg)



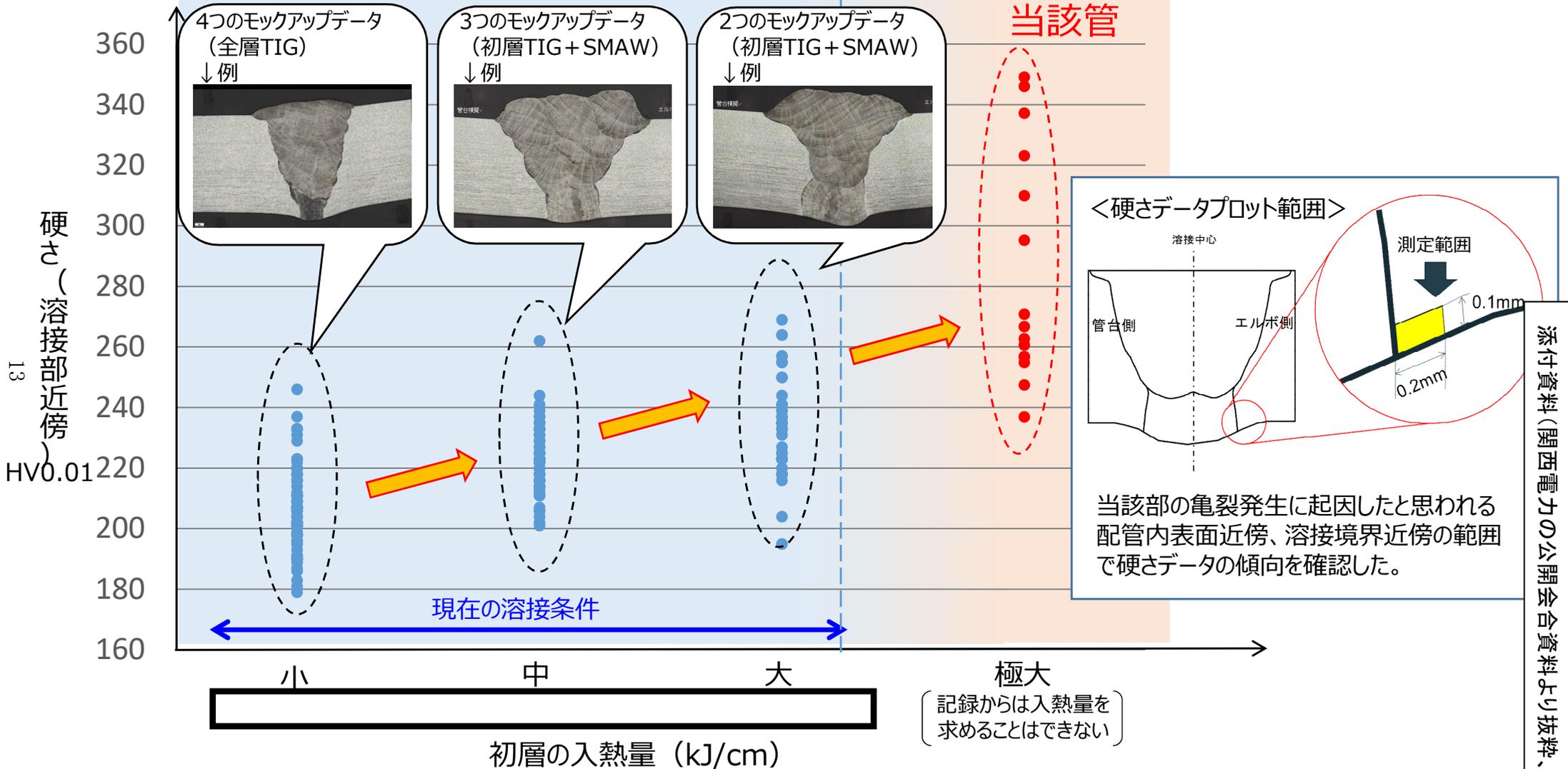
硬さによるSCC進展の知見のある値 (195HV1)

➤ 硬さ計測の結果、割れ近傍の表層で350HV、内部で200HV~240HVが認められ、SCC発生・進展の知見のある値を超えて著しく硬くなっている※ことを確認した。

※機械加工や溶接の影響がない、通常の母材部の硬さは約150HV1であった。

溶接時の入熱による硬化について

- 一般的に溶接の入熱により溶接部近傍に塑性ひずみが蓄積し、硬化されることが知られている。
- 当該管が大きな入熱で溶接された様相であることから入熱量等の種々の溶接条件を変えてモックアップを作成し、入熱量と硬さの関係进行调查した。



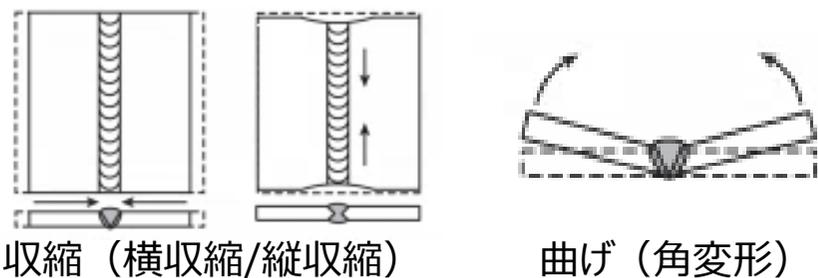
- モックアップ調査の結果、**入熱量が増加するに伴い硬くなる傾向**が認められた。
- このことから**当該部においては、大きな入熱が付与されたものと推察**される。
- なお、**現在の溶接条件では、当該管と同程度の硬さまで硬くならないことは確認**された。

□: 枠組み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。

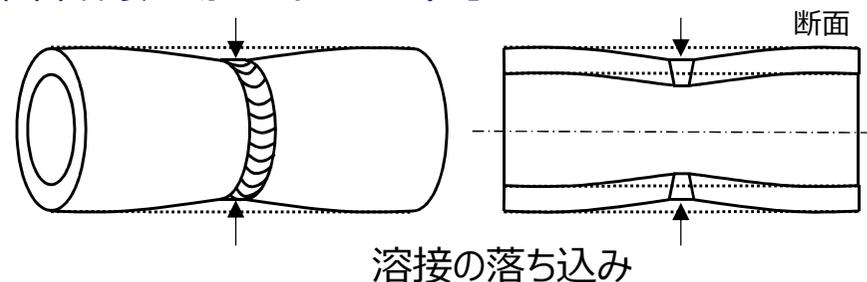
形状による剛性の硬さへの影響確認

- ▶ 平板の溶接部では、溶金が凝固する際の収縮により、溶接部の収縮及び曲げ変形（角変形）が生じる。配管溶接の場合は円の形状により角変形が拘束されるため、溶接部の収縮と曲げは溶接部の落ち込みとして顕在化する。

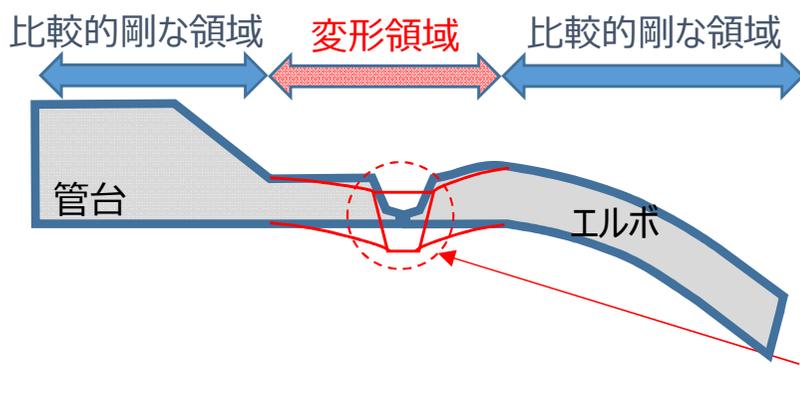
【平板溶接の場合（イメージ）】



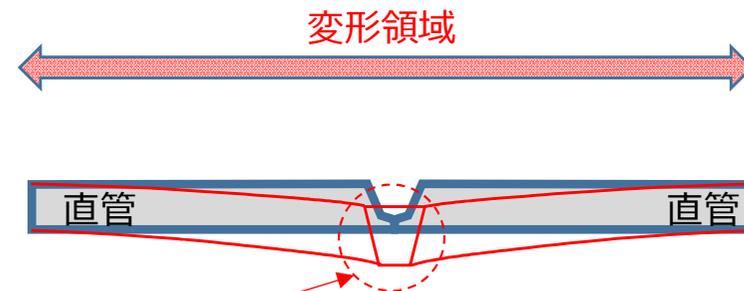
【配管溶接の場合（イメージ）】



- ▶ これまでのモックアップは直管同士で製作していたが、溶接部周囲の形状剛性の相違が変形程度へ影響した可能性について検証する。



周囲が比較的剛であるため、落ち込みを吸収できる範囲が狭い
（変形できる領域が狭く、歪みは比較的大きい）



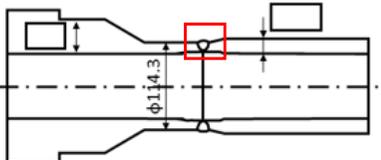
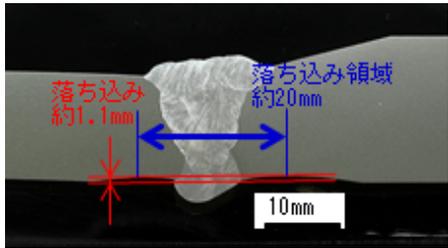
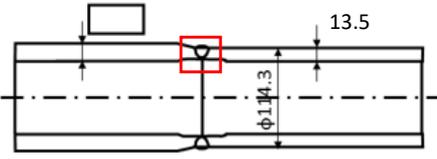
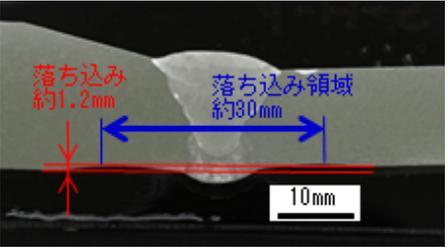
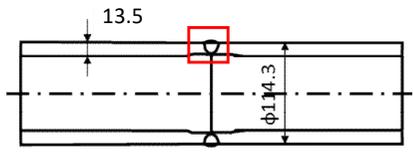
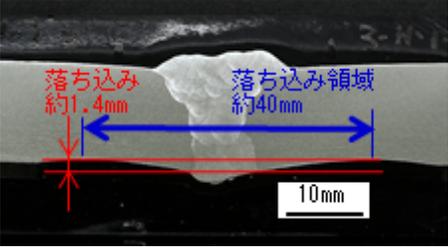
落ち込みを吸収できる範囲が広い
（変形できる領域が広く、歪みは比較的小さい）

※4B配管（外径114.3mm、厚さ14mm）で1mm程度の落ち込み

- ▶ 形状による剛性により、管台－エルボの方が溶接時における変形領域が狭く、硬化が進む可能性が考えられる。
- ▶ モックアップにより、溶接時の形状による硬さへの影響を確認する。

形状による分類 (モックアップでの落ち込み)

➤ 溶接後のモックアップ変形状況を確認した。

	ケース	形状	モックアップ形状	モックアップ写真	落ち込みの深さと領域
管台	ケース1	管台-エルボ			深さ 約1.1mm 領域 約20mm
管台以外	ケース2	エルボ-直管			深さ 約1.2mm 領域 約30mm
	ケース3	直管-直管			深さ 約1.4mm 領域 約40mm

※溶接時の条件は何れも、初層Tig+SMAW (入熱量：大)。
 ※落ち込み領域は明瞭な塑性変形が確認された領域で、弾性変形の領域はより大きい範囲で生じている。

➤ 管台-エルボでは落ち込み領域 (変形領域) が相対的に狭くなる傾向が認められた。

 : 枠組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

溶接入熱が大きくなる要因の整理

これまでの原因調査より、溶接入熱が大きくなる要因として以下が考えられる。

①全層TIG溶接以外の溶接手法

2層目以降の溶接において、TIG溶接では比較的安定した溶融池が形成されるのに対し、TIG溶接以外の溶接では、溶融池が不安定となるため、厚めの初層溶接を行うことから、入熱量が大きくなる傾向がある。

②現地溶接

工場溶接では、溶接対象物を回転させつつ、安定した溶接姿勢で溶接が可能であるが、現地溶接では、上向き姿勢や狭隘部での溶接となる場合もあり慎重な作業となることから、入熱が大きくなる可能性がある。

③若手溶接士による施工

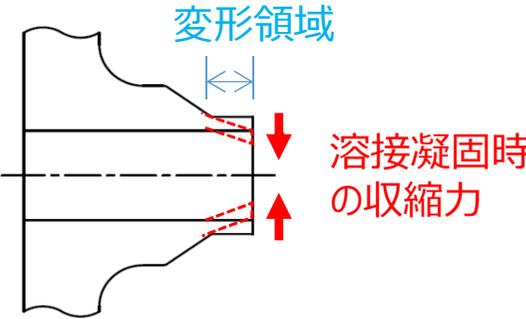
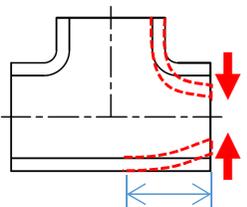
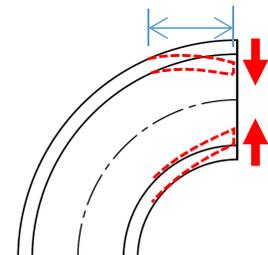
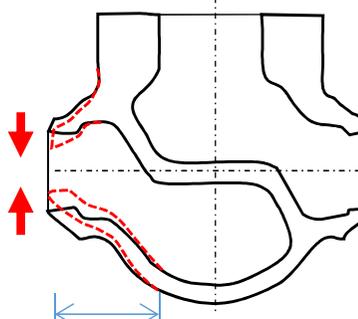
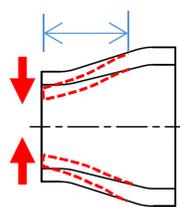
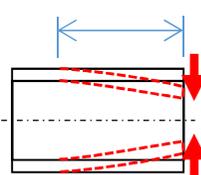
当該溶接部は、若手の溶接士が丁寧かつ慎重に溶接したことで溶接速度が遅くなり入熱が大きくなったと推定しており、同様に若手溶接士が施工した場合、入熱が大きくなる可能性がある。

④補修溶接

補修溶接は施工時の検査で判定基準を満たさない場合における通常の施工方法であるが、追加で溶接をするため、入熱が大きくなる可能性がある。

形状による分類（変形イメージ）

➤ 形状毎に溶接時の変形を模式的に示した。

形状	溶接時の変形イメージ図	変形領域	形状	溶接時の変形イメージ図	変形領域
管台	 <p>変形領域</p> <p>溶接凝固時の収縮力</p>	短	ティー		中
エルボ		中	弁		中
レギュレータ		中	直管		長

➤ 溶接時の変形状態を模式的に示した結果、管台は変形領域が短く、局所的に硬化することが想定された。（4 B以外の口径でも類似の傾向である。）