

12月4日 公開会合資料1-1を一部修正

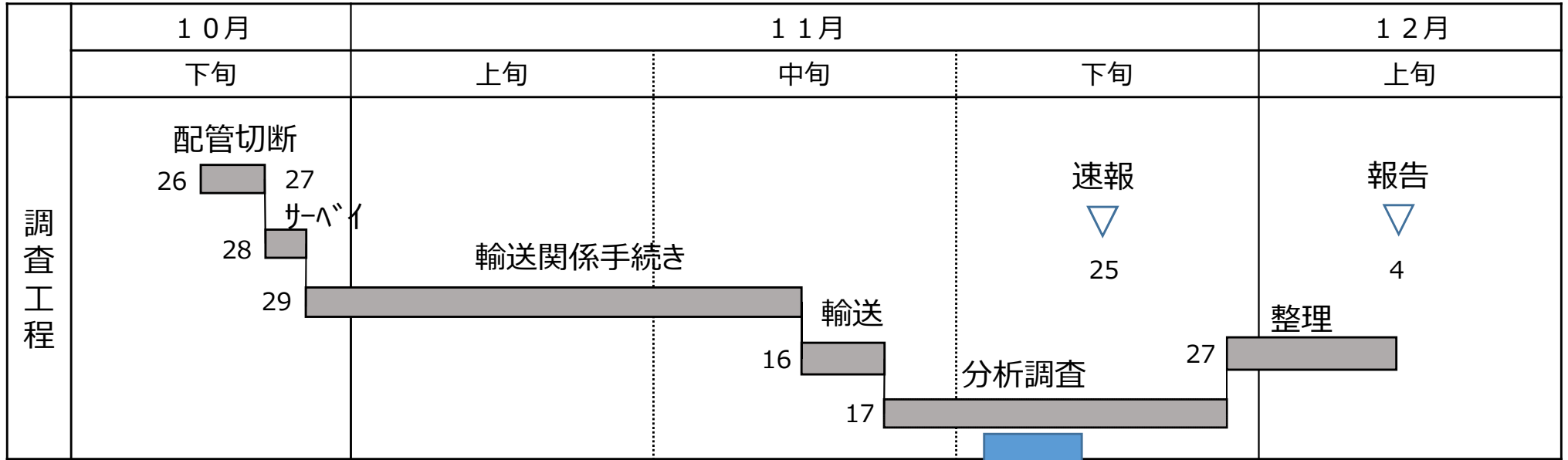
大飯発電所 3号機 加圧器スプレイライン配管溶接部の調査結果について

関西電力株式会社

2020年12月 日

調査結果データ

加圧器スプレイライン配管の破面調査スケジュール



分析調査スケジュール

月日	11/17	11/18	11/19	11/20	11/21	11/22	11/23	11/24	11/25	11/26	11/27
外観観察	計画	実績									
寸法計測		計画	実績								
UT,PT検査		計画	実績	計画	実績	計画	実績				
破面開放、破面外観観察					配管切断 (2分割)		細断・破面開放	計画			
破面SEM観察							計画	実績			
付着物EDS分析							計画	実績			
断面マクロ・ミクロ・組織観察							計画	実績			
フェライト量計測								計画	実績		
硬さ計測								計画	実績		
化学成分分析										計画	実績
残留応力測定				計画	実績	計画	実績				

詳細工程

■ 計画
■ 実績

1. 調査内容

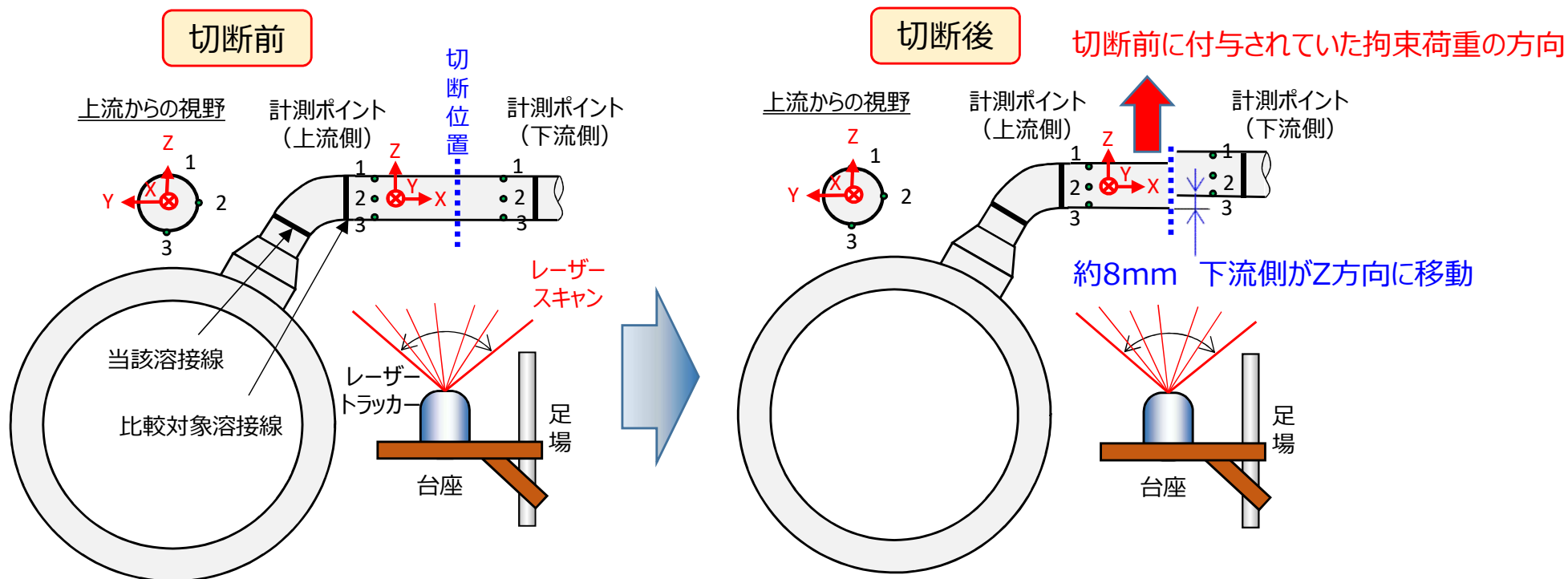
加圧器スプレライン配管切り出し時に、配管前後の配管の変位量を測定し、切断前に作用していた拘束力を確認する。

《変位量の測定方法》

- ✓ 切断位置の前後に各々3箇所マーキングし、その位置情報をレーザートラッカーにより測定する。
- ✓ 位置測定は切断の前と後で2回行い、その位置情報の差異から変位量を評価する。

2. 調査結果

切断の前後で、M C Pに接続されている上流側の変位量はほぼ無かったが、下流側については、Z方向(上方向)に、約8mm変位した。



- 切断前は上流側配管を上方向へ拘束する荷重（変位量：約8mm）が若干作用していたと推測される。
- 出力運転時の発生応力 約100MPaに対して、約8mmの変位量を与える応力は、出力運転時において3MPa程度の上昇であり、亀裂の発生/進展に主たる影響を及ぼすものではないことを確認した。

1. 調査内容

外観目視確認および1次冷却材管（MCP）管台切断面の浸透探傷試験を実施した。

2. 調査結果

切り出した配管の外観目視確認において、特に異常等は認められなかった。

また、MCP管台切断面の浸透探傷試験を実施した結果、指示模様は認められなかった。

当該部

切断面①

切断面②

切断面③

1次冷却材管 (MCP)

切断面① 当該部

切断面② サンプル (比較対象)

切断面③ MCP管台

管内面溶接部

エルボ背側

欠陥位置

エルボ背側

エルボ腹側

➤ 外観目視確認において特に異常は認められなかった

浸透処理 (20分)

現像処理 (30分)

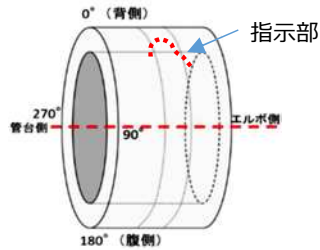
指示部に相当する箇所

➤ 浸透探傷試験においてMCP管台切断面に指示模様は認められなかった

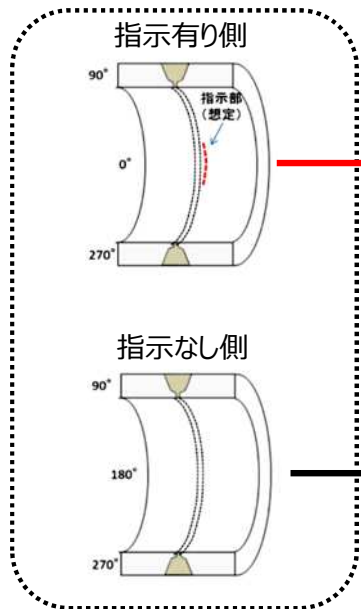
大飯発電所3号機 加圧器スプレライン配管の分析調査の流れ (1/2)

① 外観観察
内外面PT (2分割前)
寸法計測

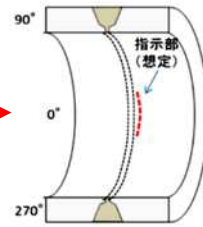
② UT



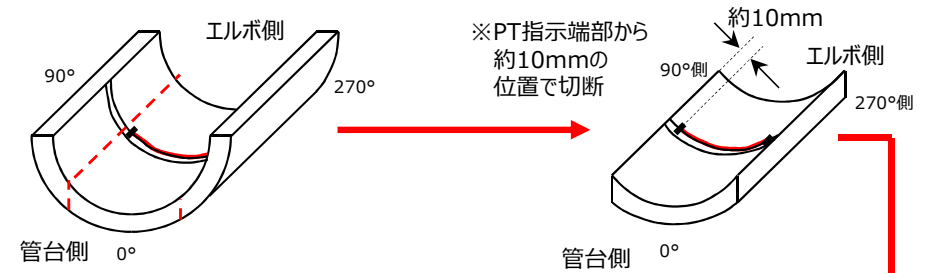
③ 2分割切断
[工具: 切断機 (切り代 約 1mm)]



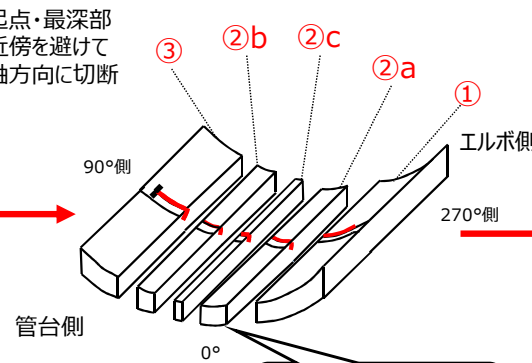
④ 内面PT (2分割後)



⑤ 軸方向細断
[工具: マイカカッタ (切り代 約0.8mm)]

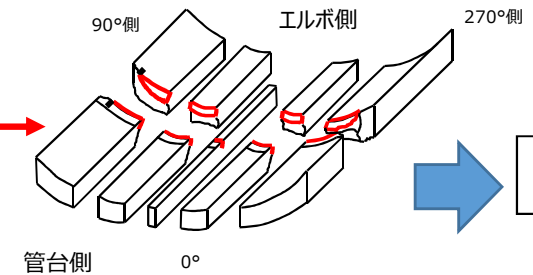


※起点・最深部
近傍を避けて
軸方向に切断



断面PTを実施

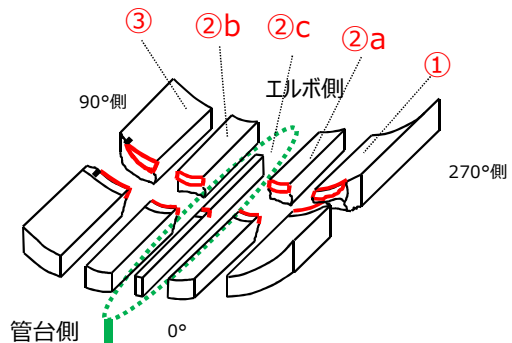
⑥ 破面開放、破面外観観察



⑬ 残留応力測定 (X線測定、ひずみゲージ測定)
※外面X線測定は2分割切断前に実施

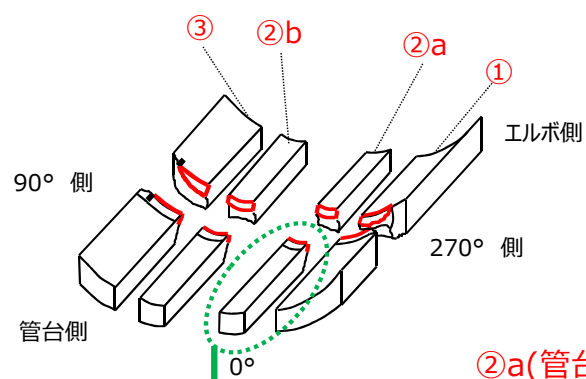
大飯発電所3号機 加圧器スプレイライン配管の分析調査の流れ (2/2)

⑥ 破面開放、破面外観観察



⑦ 破面SEM観察

開放した破面を観察



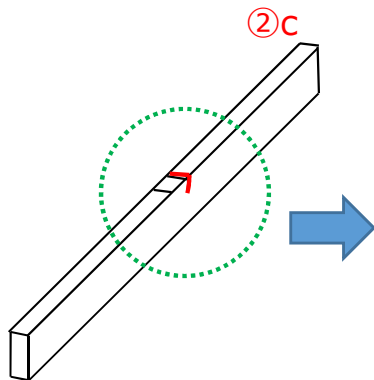
⑧ 付着物EDS分析

②a(管台側)

破面開放した②a (管台側) について、溶接部への進展の有無を確認するため亀裂最深部に近い箇所にて軸方向に2分割

破面開放はせず断面を観察

⑨ 断面マクロ・ミクロ・組織観察



樹脂埋め込み

⑩ フェライト量測定

⑪ 硬さ計測

⑫ 化学成分分析

①-1 外観観察結果

1. 調査内容

PT実施前に配管内面の状態および酸化皮膜の状態を、目視により外観観察を実施した。

2. 調査結果

配管内面の拡大観察により溶接裏波近傍に亀裂を確認した。

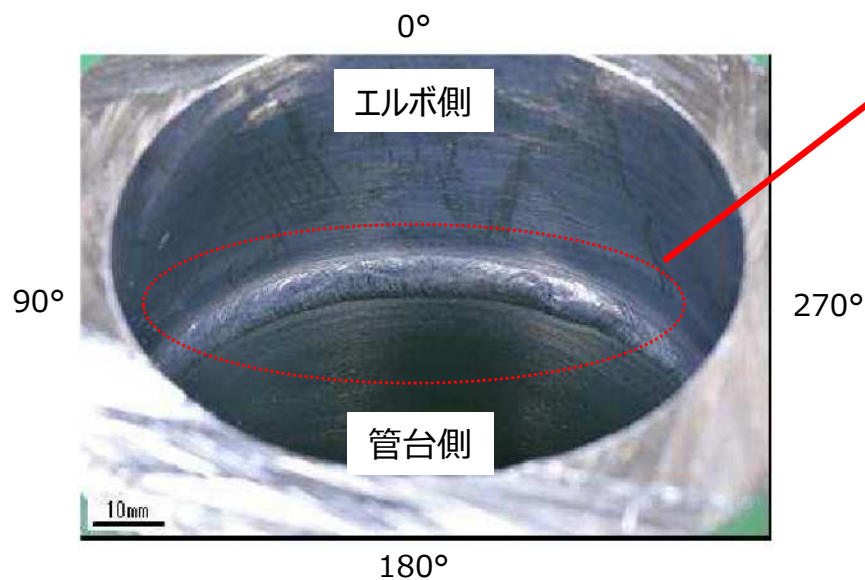
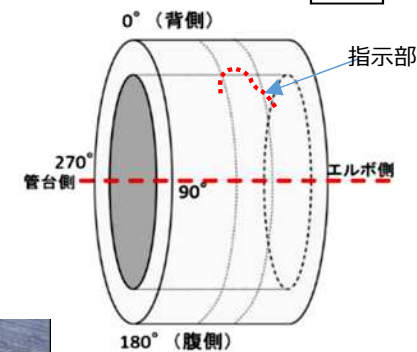


図1：エルボ側からの内面

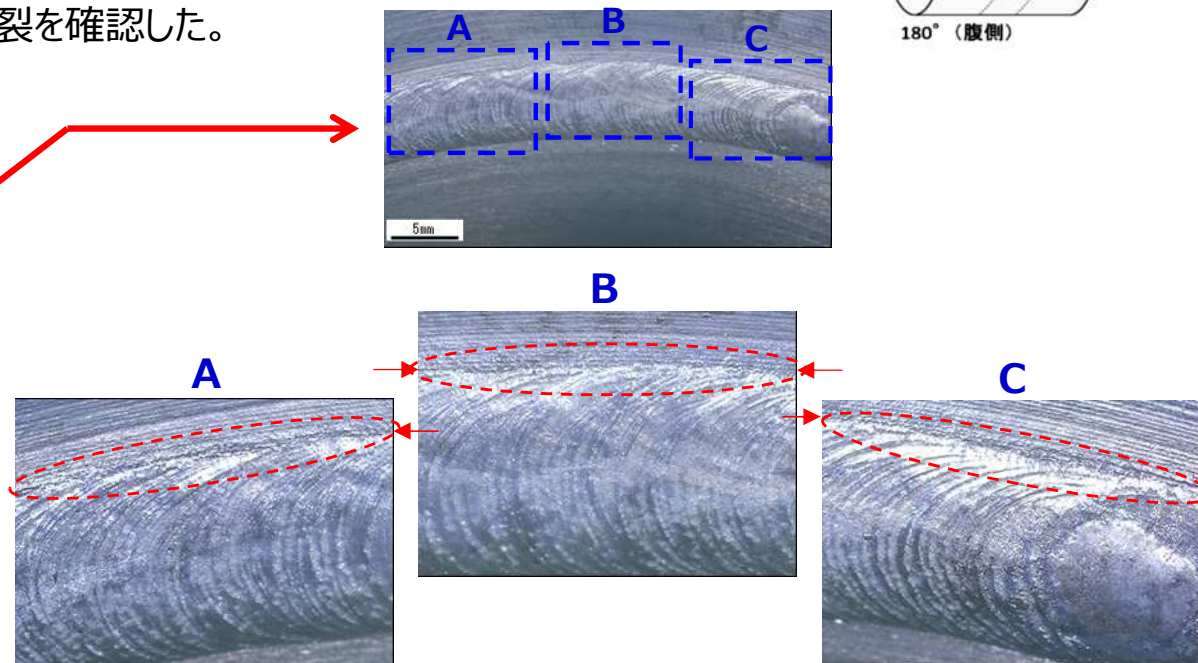


図2：指示拡大図

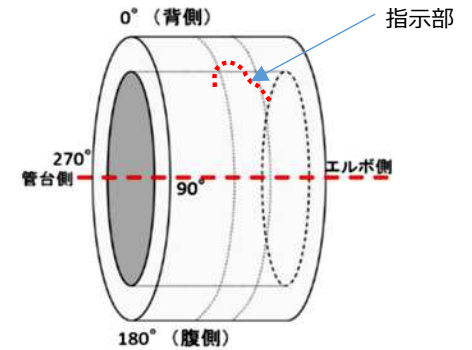
〰〰〰：亀裂箇所

- 拡大観察により、溶接裏波近傍のエルボ側に亀裂を確認した。
- 管内面全体が黒色に変色しており酸化皮膜の存在は確認できたが、通常とは異なる顕著な酸化物、付着物は認められなかった。
- なお、亀裂以外の箇所については、サンプル（比較対象）との外観上の有意な差はなかった。

①-2 内外面PT（2分割前）結果

1. 調査内容

2分割の切断位置特定のため、溶接部近傍を全周にわたり内外面PTを実施した。
また、PT指示範囲をもとに、UTの実施範囲を設定。



2. 調査結果

外表面及び内面の溶接部近傍を全周にわたりPTを実施した結果、1箇所指示が認められた。

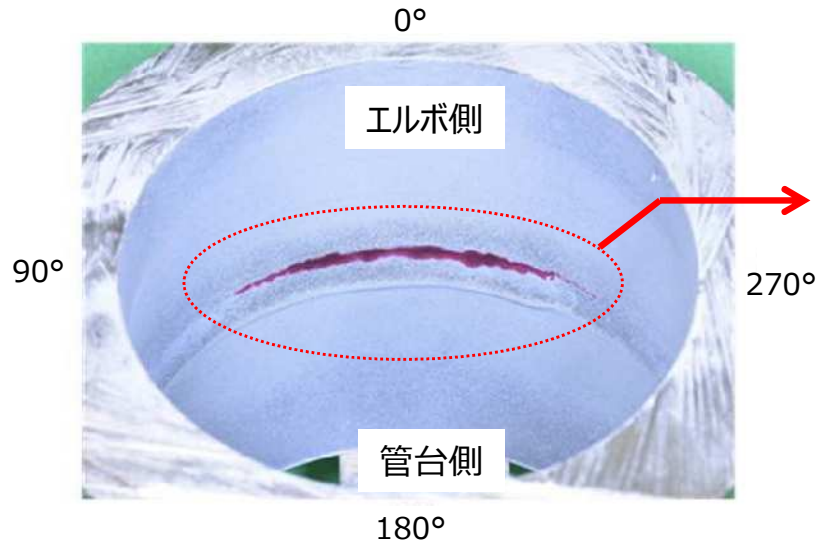


図1：エルボ側からの内面PT指示箇所

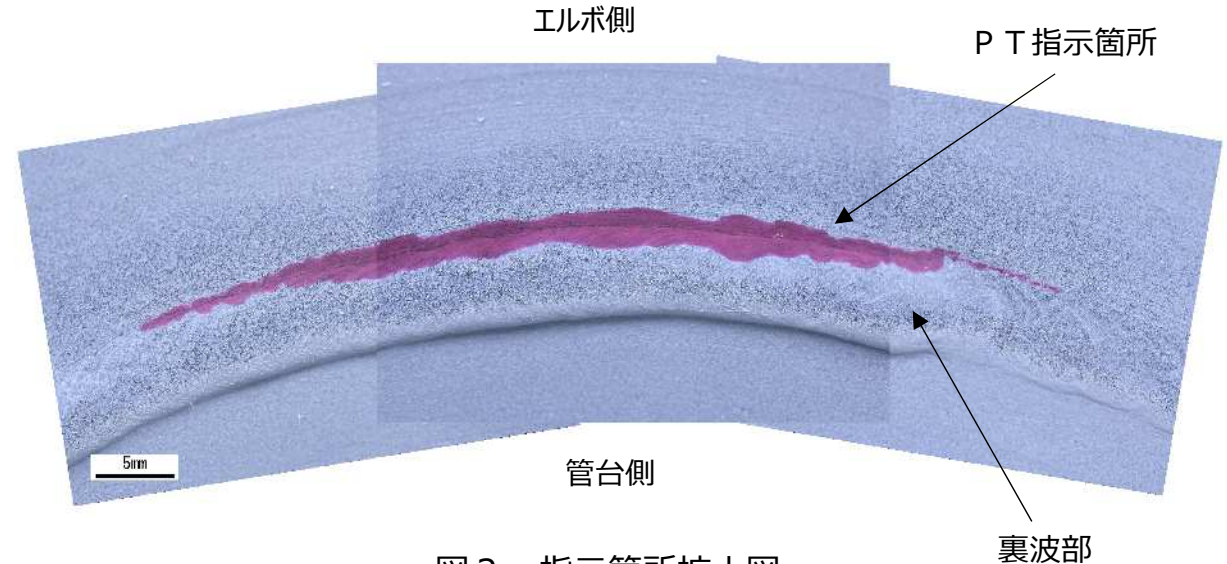


図2：指示箇所拡大図

- 現地でのUTで検知した位置とほぼ同じ位置（エルボ側溶接裏波近傍）に指示を確認した。
- 外表面、内面ともに溶接部近傍において上図以外のPT指示は認められなかった。

①-3 寸法計測結果

1. 調査内容

当該部およびサンプル（比較対象）の形状に変形や歪がないことを確認するために、ノギス等を用いて外径および内径の寸法計測を行った。

2. 調査結果

図1の測定箇所にて計測した結果、表1，2のとおりであった。

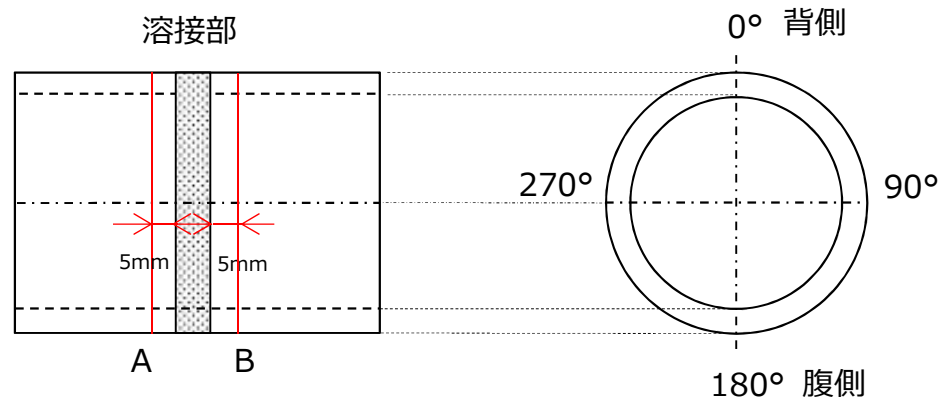
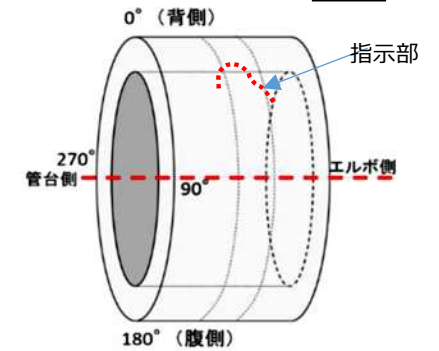


図1：寸法測定箇所

表1：寸法測定結果<当該部> (mm)

	A (管台側)		B (エルボ側)	
	0°-180°	90°-270°	0°-180°	90°-270°
外径	114.1	114.0	114.2	114.1
内径	87.0	86.9	87.3	87.6

表2：寸法測定結果<サンプル> (mm)

	A (エルボ側)		B (直管側)	
	0°-180°	90°-270°	0°-180°	90°-270°
外径	115.3	114.5	113.5	113.1
内径	87.9	87.6	87.9	87.9

➤ 溶接による有意な変形や歪は認められず、また、当該部とサンプル（比較対象）で有意な差異は認められなかった。

② UT結果

1. 調査内容

内面PT指示を踏まえ探傷範囲を設定し、切断において亀裂の起点・最深部に影響を与えない切断位置を確認するために、外面よりUT（FMC/TFMを使用）を行った。

2. 調査結果

外面UTの結果、配管内面のコーナーエコー及び亀裂性状を検出した。

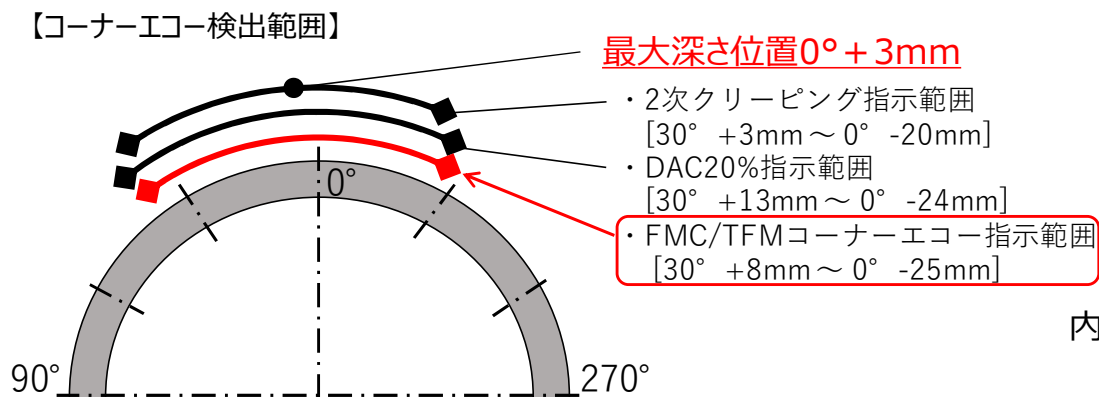
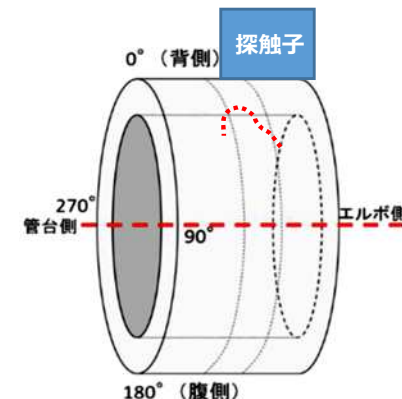


図1：FMC/TFMコーナーエコー検出結果
(探傷範囲： $300^{\circ} \sim 60^{\circ}$)

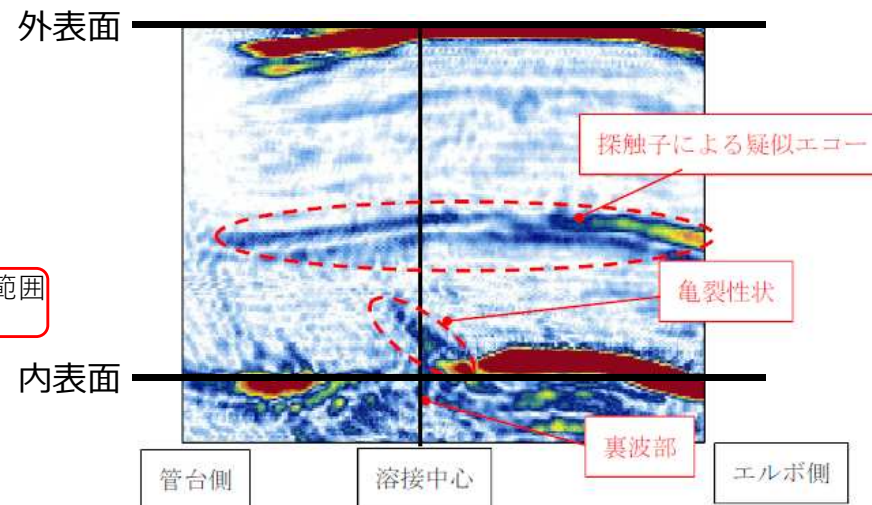


図2：FMC/TFM亀裂性状検出結果
(X位置： $0^{\circ} - 1\text{mm}$)

- FMC/TFMの結果、コーナーエコーの長さ及び亀裂性状は、現場UTの結果と同様であることから、現場UTにおける最大深さ位置 ($0^{\circ} + 3\text{mm}$) を亀裂の最深部と想定し、切断することとした。

④ 内面PT（2分割後）結果

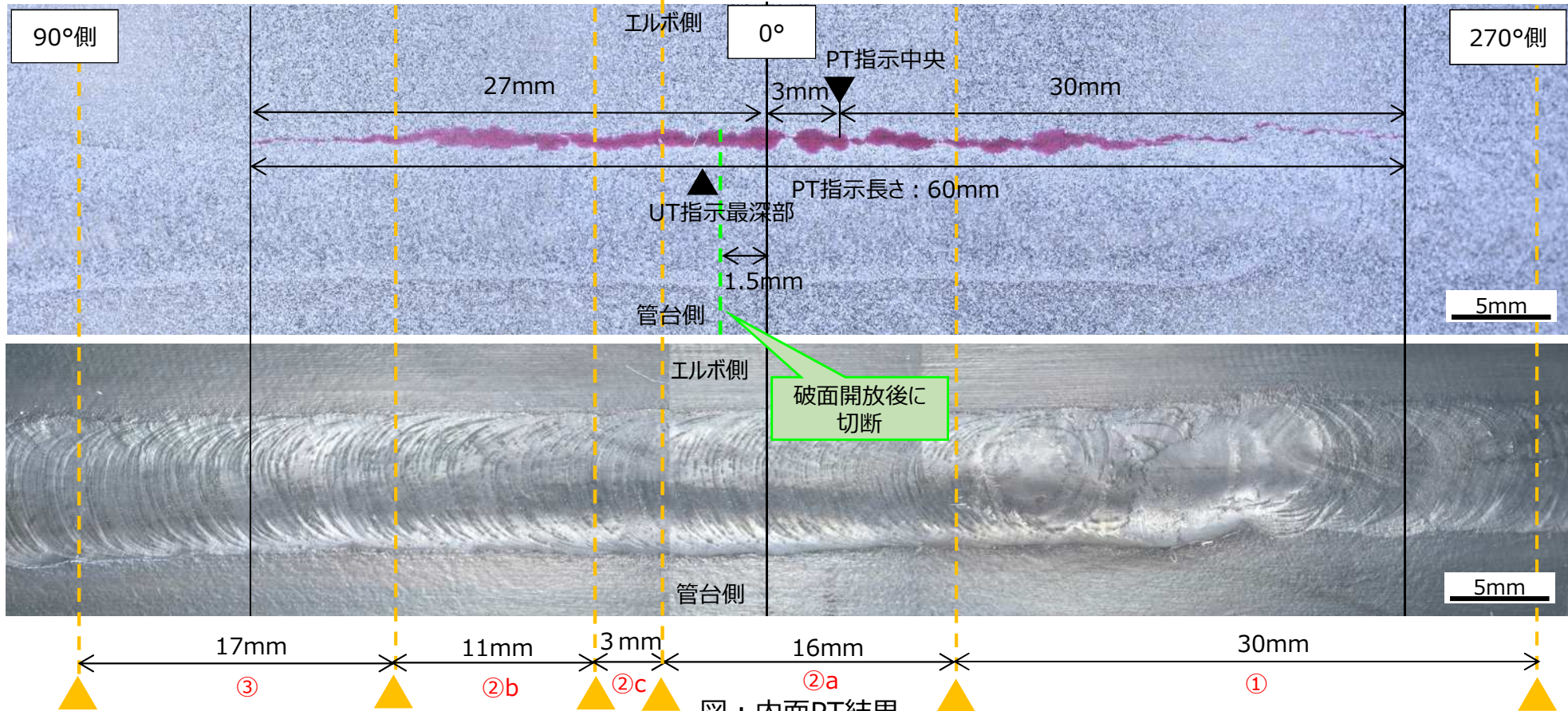
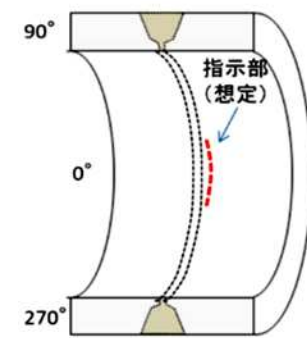
1. 調査内容

2分割後に、内表面の亀裂開口部の詳細確認のため、内面PTを行った。

2. 調査結果

内面PTの指示長さは、下図のとおりであった。

▲：細断位置



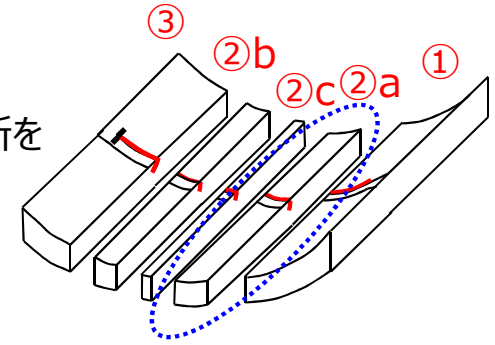
図：内面PT結果

- 2分割後の内面PTを実施し、亀裂長さは60mmであることを確認。
(現場UT指示は内面で51mmであり、UT検出限界以下の浅い亀裂によるものと推定)
- 亀裂の起点は、推定される亀裂形状からPT指示中央が亀裂の起点の可能性が比較的高いと推測し、切断することとした。

⑤ 断面PTの結果

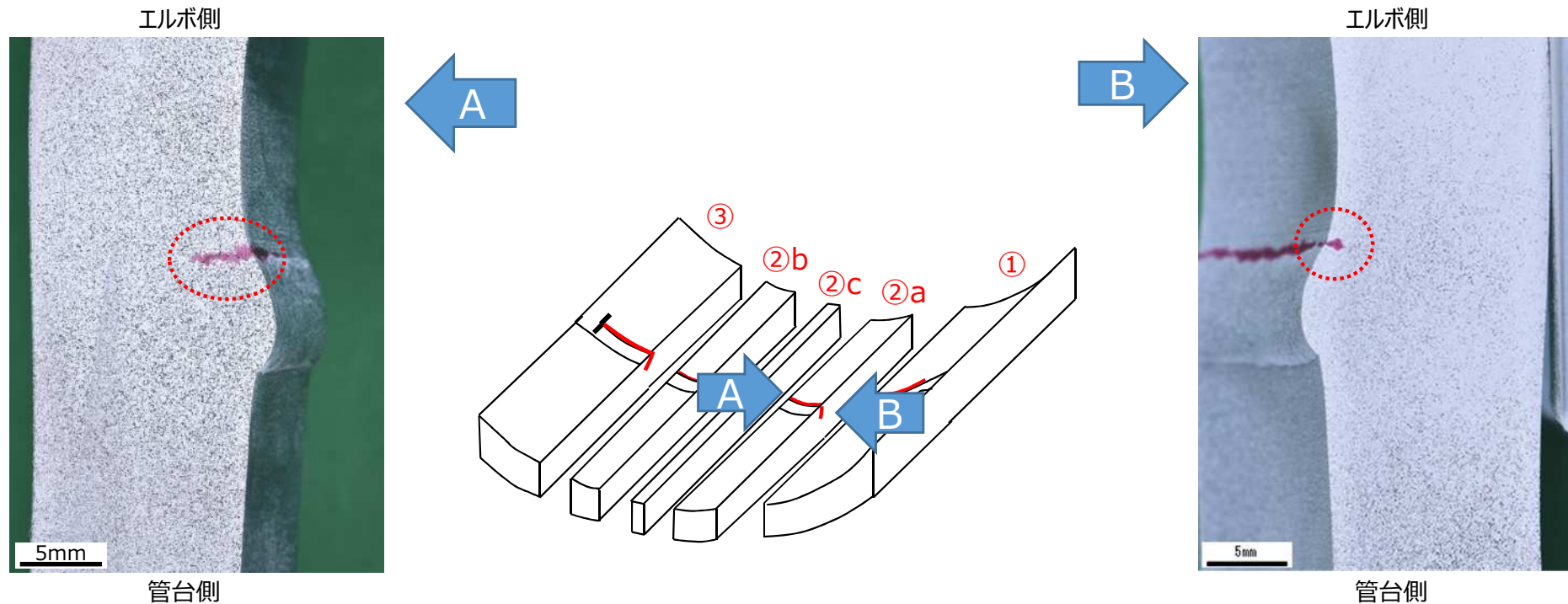
1. 調査内容

破面開放に向けて、内面PTおよびUT結果を踏まえ、亀裂の起点・最深部を避けて軸方向に細断を行った。細断後、破面開放の方法を判断するため、初めに開放する② aの断面のPTを実施した。



2. 調査結果

断面PTの結果、下図のように、板厚方向に進展した亀裂が認められた。



図：断面PT結果

- 亀裂は板厚方向に進展していた。なお、指示長さを計測した結果、2～4 mm程度であった。

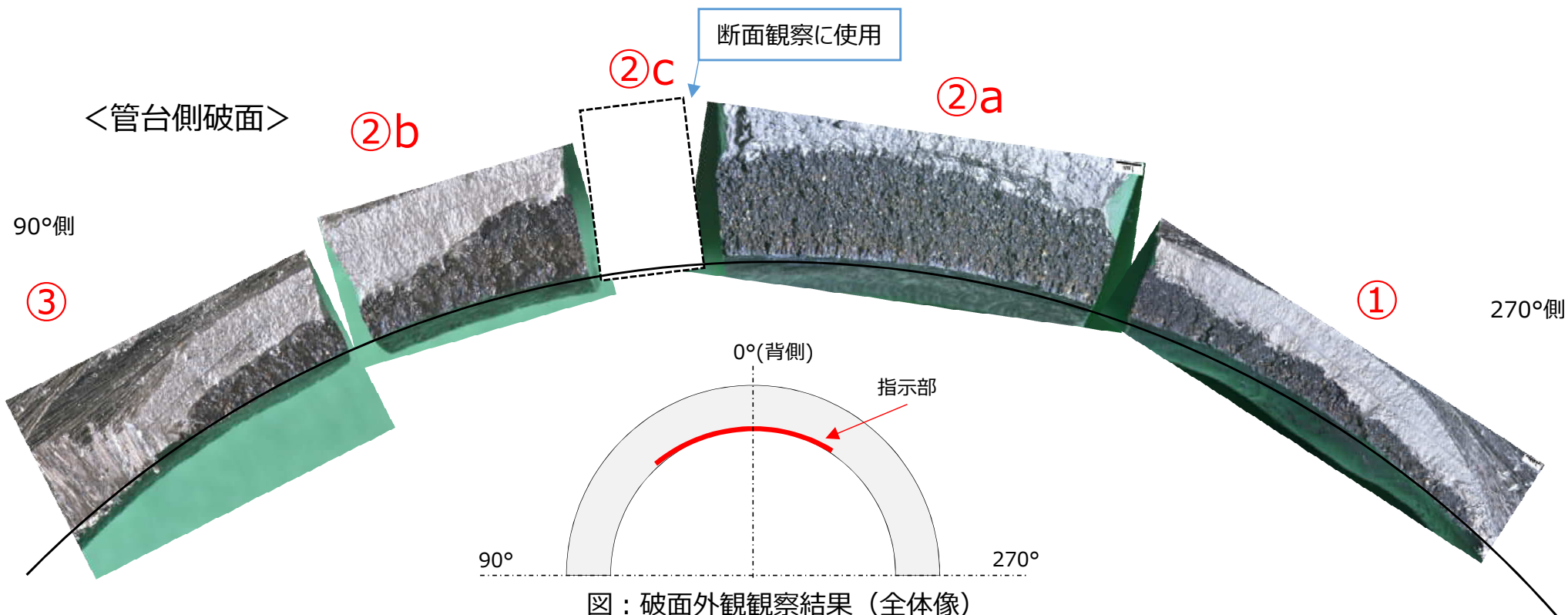
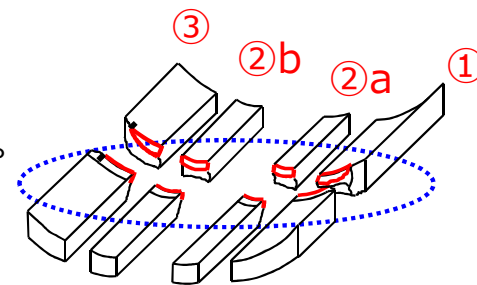
⑥ 破面外観観察の結果（1/2）

1. 調査内容

①、②a、②b、③の破面に影響を与えないよう外面からノッチを入れて、破面開放を行った。

2. 調査結果

各破面の外観を並べた全体像を下図に示す。



図：破面外観観察結果（全体像）

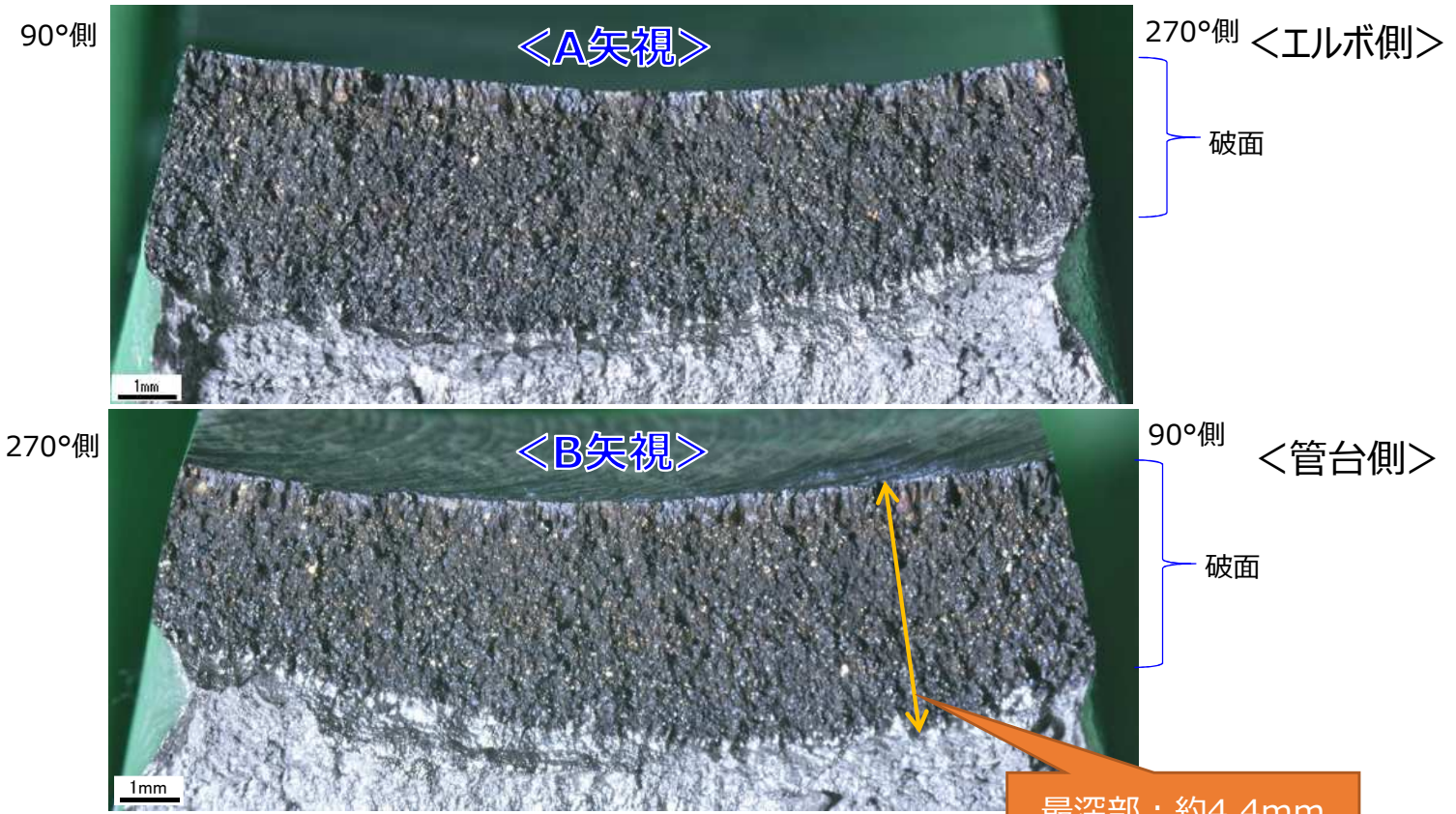
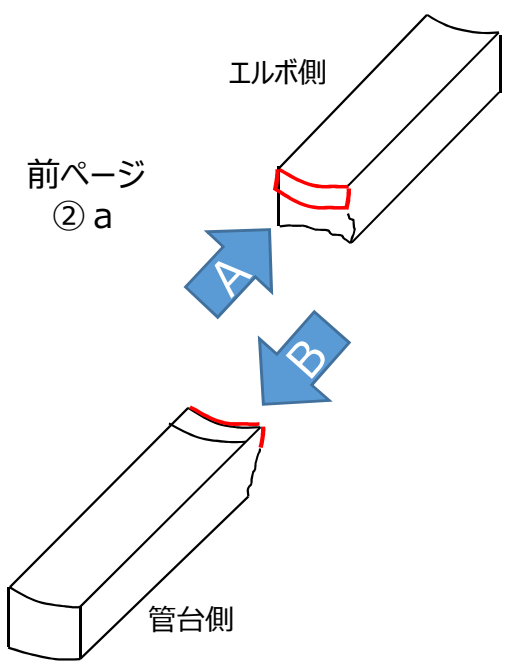
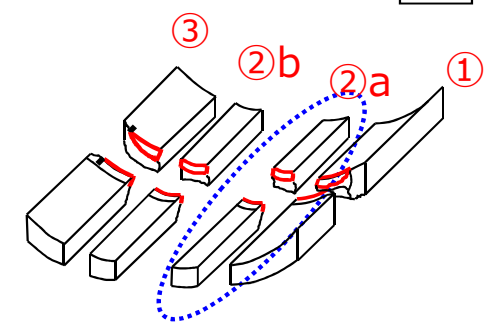
- 破面外観観察の結果、粒界割れのような性状が認められた。
- 破面は黒色を呈しており、酸化被膜が形成されていると推測される。小さな凹凸はあるものの、平坦な様相であった。
- 亀裂先端は概ね円弧上に揃っており、最深部は0°付近に位置していることが認められた。

12/4公開会合にてご説明
他破面外観観察結果については補足資料⑤参照

⑥ 破面外観観察の結果 (2/2)

2. 調査結果

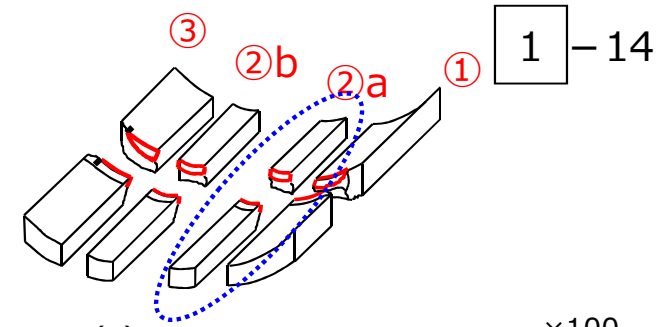
②aの破面について、下図のような破面が確認された。



図：亀裂破面外観

➤ 現地UT指示における最深部 (0° + 3mm) を含む②aの断面において、最深部の亀裂深さは約4.4mmであり、必要最小厚さを満足していることを確認した。

⑦ 破面SEM観察の結果

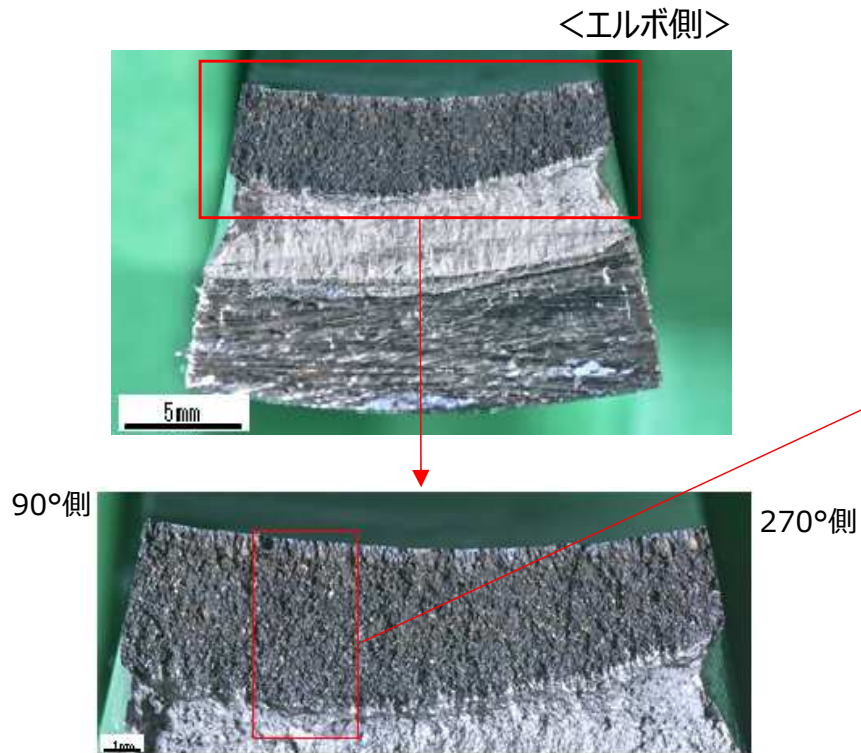


1. 調査内容

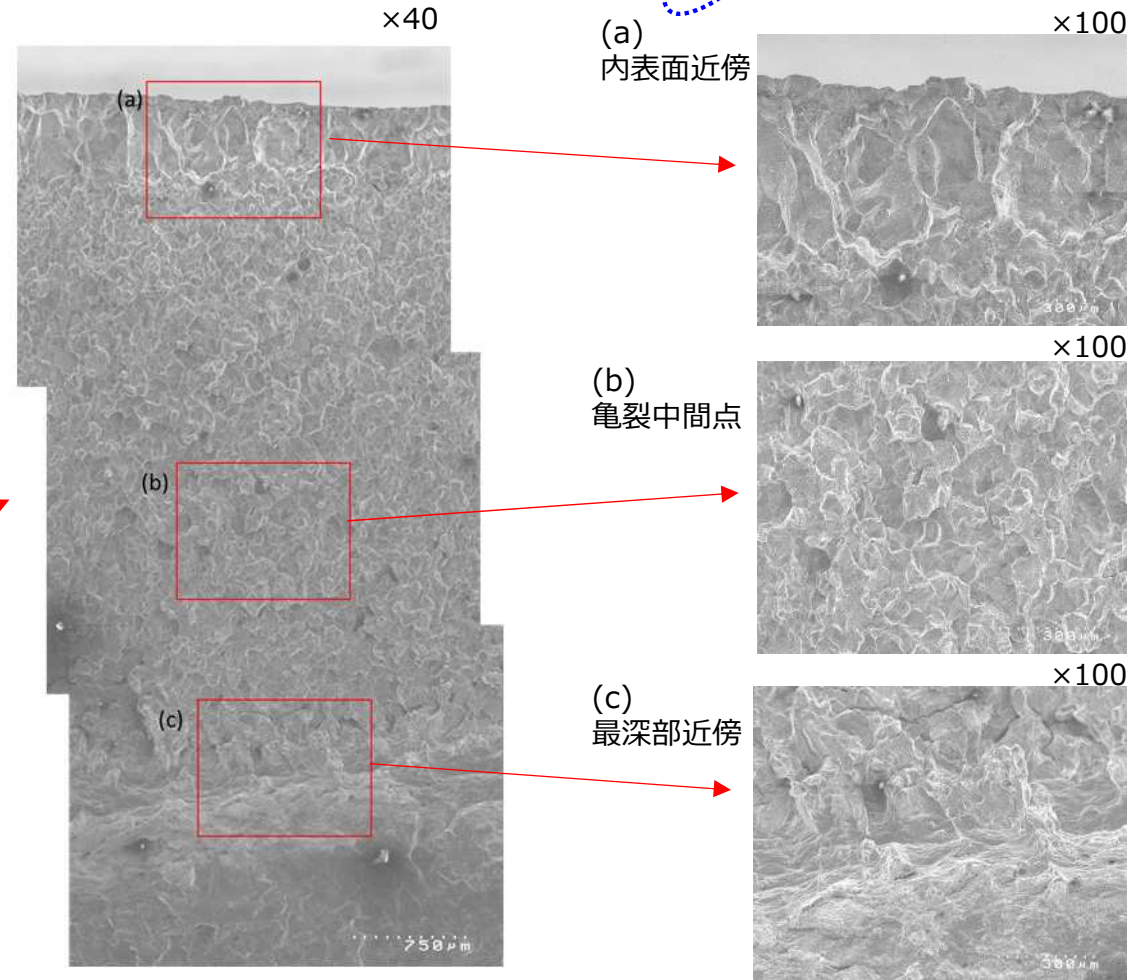
②aの破面について、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた詳細な観察を行った。

2. 調査結果

破面SEM観察の結果、以下の情報が得られた。



図：破面SEM観察



➤ 亀裂最深部の破面SEMの結果、破面全体にわたって、主に粒界割れが認められた。

⑨ 断面マクロ・ミクロ・組織観察の結果

1. 調査内容

②cの断面を光学顕微鏡によるマクロ観察、SEMによるミクロ観察を実施した。

2. 調査結果

断面マクロ・ミクロ・組織観察の結果、以下の情報が得られた。

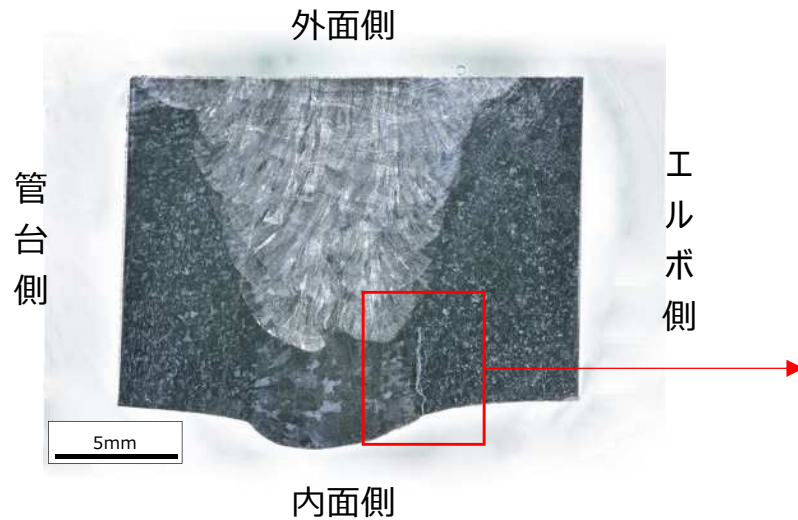


図1：断面マクロ観察

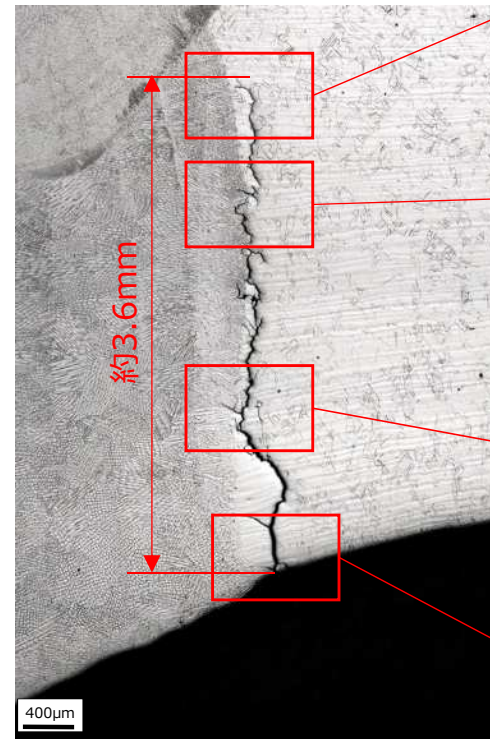
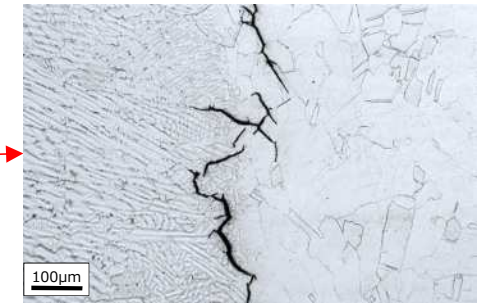


図2：断面ミクロ観察



- 断面マクロ観察およびミクロ観察の結果、亀裂は粒界型であり、溶接金属部近くの母材部を進展していることが確認された。(②aの断面観察でも同様の結果)
- また、補修溶接の痕跡は認められなかった。

⑨ 断面観察（酸化皮膜分析）の結果

1. 調査内容

②cの断面をSEM観察し、破面の酸化皮膜形成厚さを測定した。

2. 調査結果

断面観察から得られた、酸化皮膜厚さの結果を下図に示す。

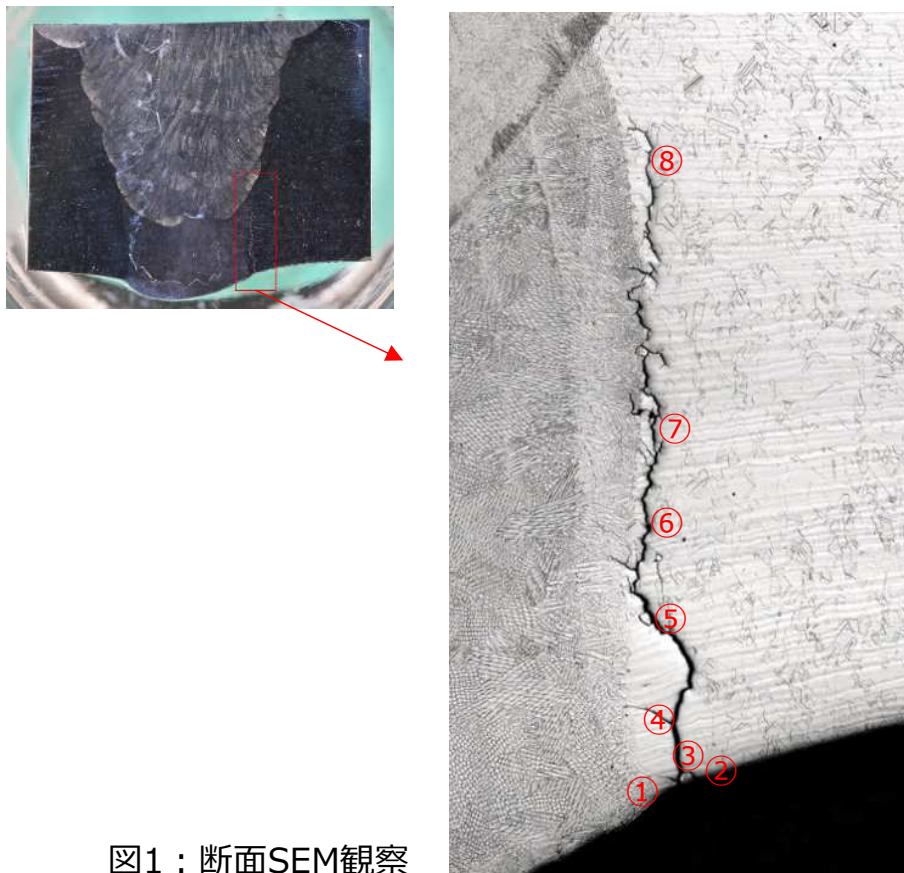


図1：断面SEM観察

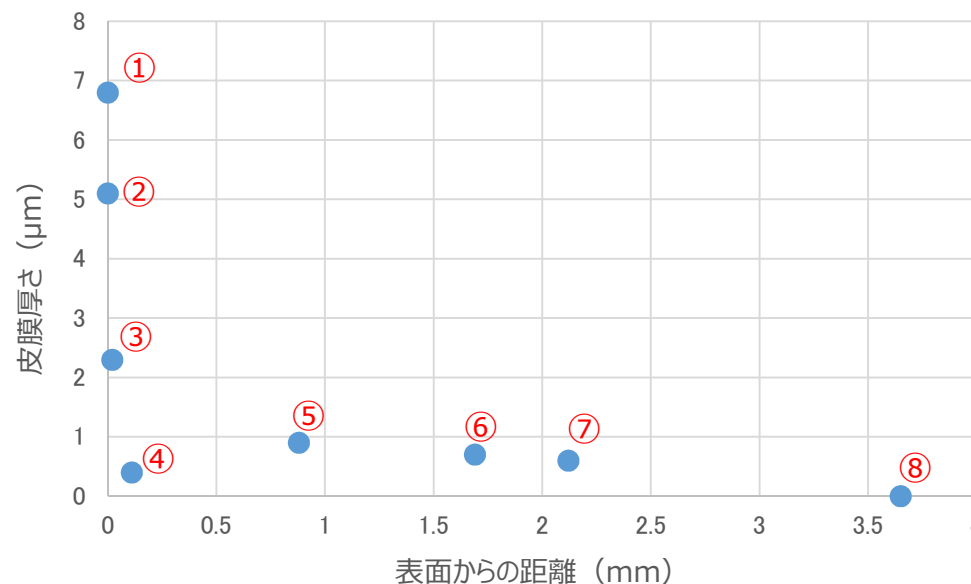
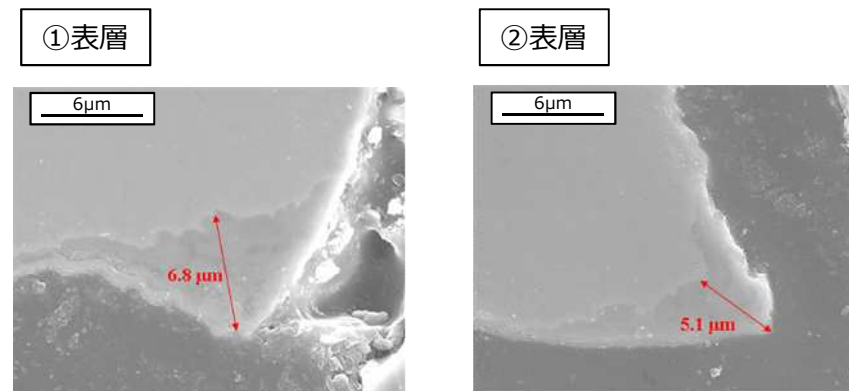


図2：酸化被膜厚さ結果

- 表層部では、亀裂内部に比べ酸化皮膜が厚く、場所によっては5～7μmの厚い皮膜が形成されていた。
- 亀裂内部は極端に酸化皮膜厚さは小さくなり、1μm以下で亀裂先端に進むにしたがって皮膜厚さが小さくなる傾向が認められた。酸化皮膜は、割れ発生後の接液により形成することから、表層部に比べ亀裂内部は接液時間が短いことが推察される。

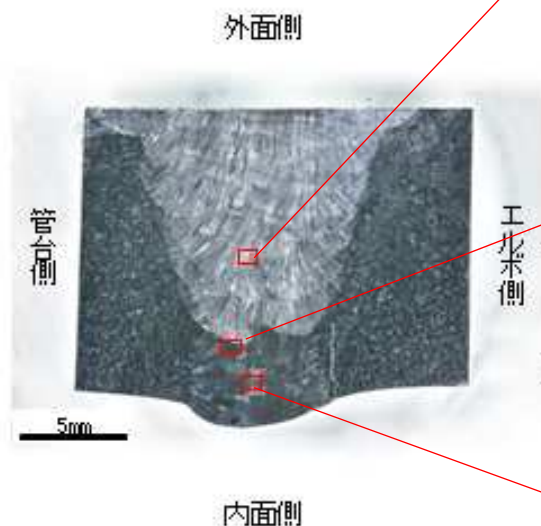
⑩ フェライト量測定の結果

1. 調査内容

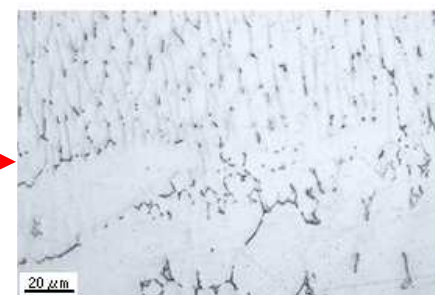
②c断面のSEM観察結果から、画像解析により
フェライト量を測定した。

2. 調査結果

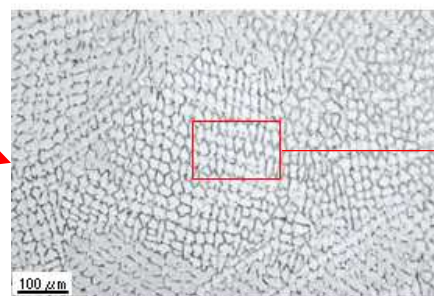
フェライト量測定結果を以下に示す。



SMAW 溶接部：
 δ -フェライト量
7.9%



TIG 溶接部：
 δ -フェライト量
2.9%



- 溶金部での亀裂進展は認められなかったが、SCC進展へ影響する溶接金属部の δ フェライト量を測定した。
- SMAW溶接部は7.9%であったが、初層のTIG溶接部では2.9%であった。

⑪ 硬さ計測の結果 (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。

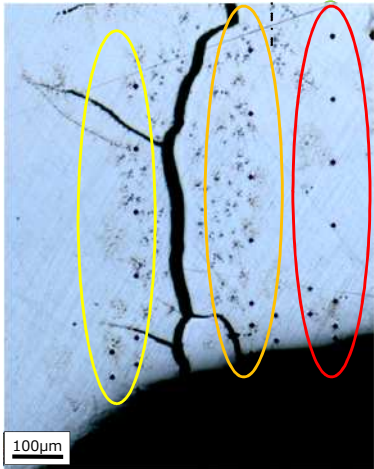
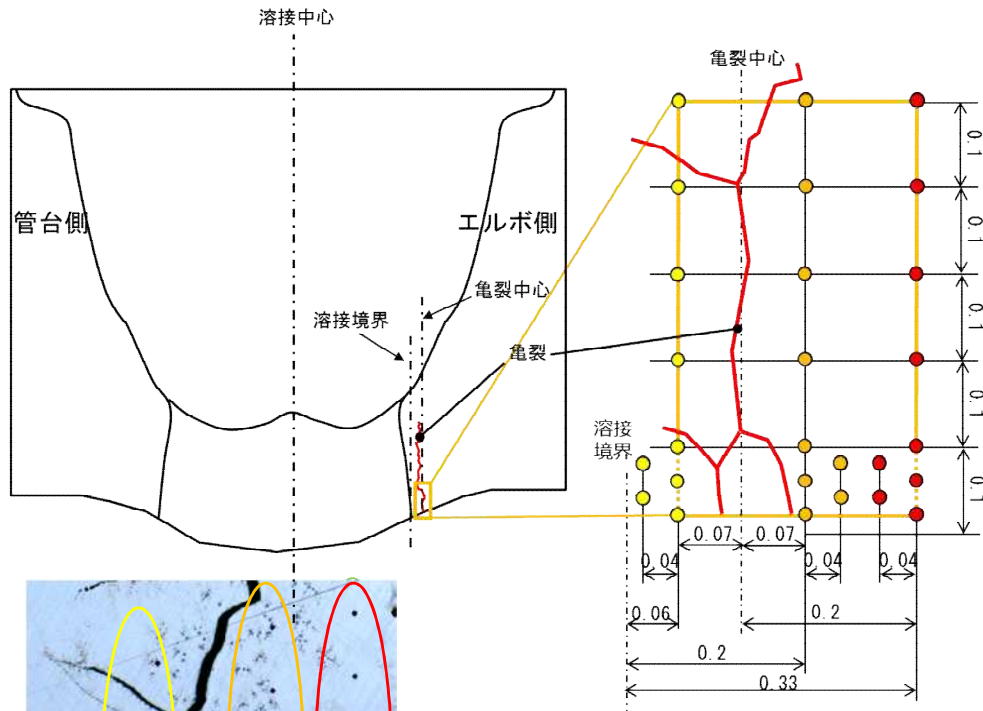


図1：硬さ計測位置

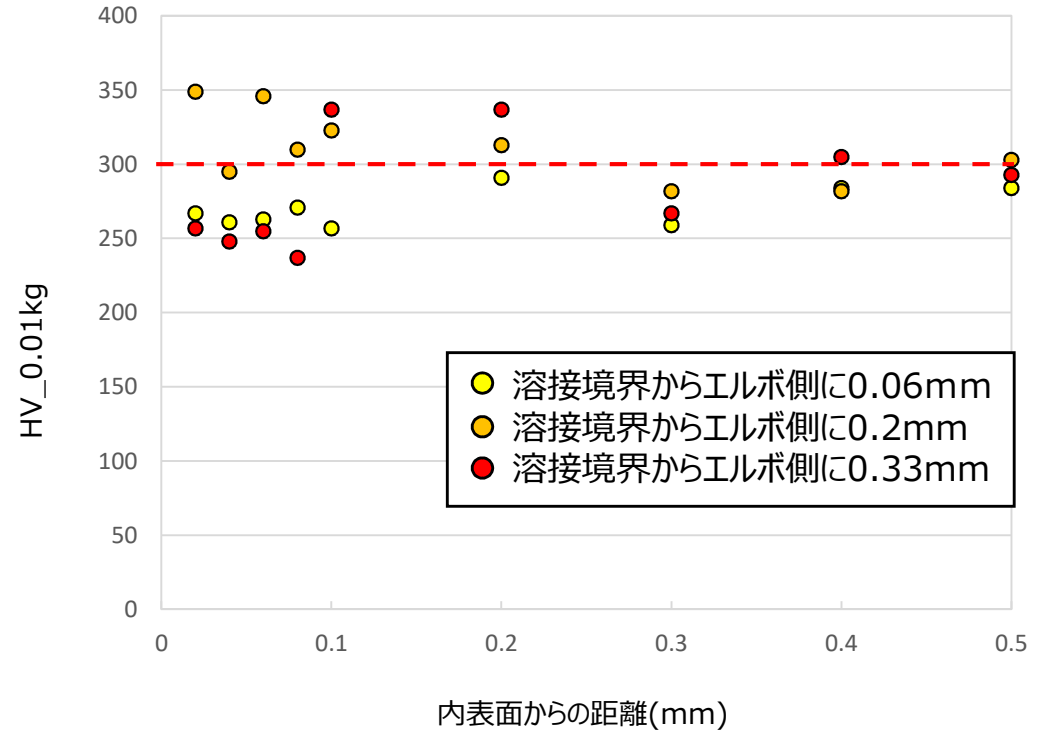


図2：硬さ計測結果

- 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

⑫ 化学成分分析の結果

1. 調査内容

当該部の材料の化学成分が規格値を外れていないことの確認として、②c断面のEDSにより化学成分を分析した。

2. 調査結果

下図の分析位置を化学成分分析した結果を、下表に示す。

表：化学成分分析結果

①分析位置：母材（エルボ側） (Wt%)

	Si		Mo		Cr		Mn		Fe		Ni		Co		Cu	
当該管	0.7	±0.2	2.0	±0.2	16.3	±0.3	1.6	±0.2	67.1	±0.4	12.3	±0.4	ND	-	ND	-
規格値	1.00以下		2.00 ~3.00		16.00 ~18.00		2.00以下		Bal.		10.00 ~14.00		-		-	

<参考>

②分析位置：母材（管台側）

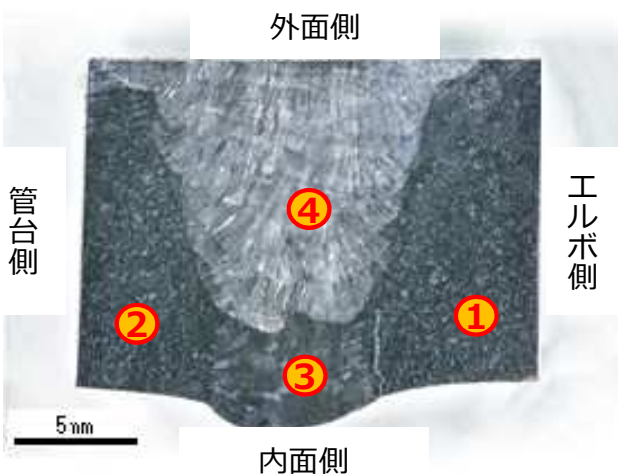
	Si		Mo		Cr		Mn		Fe		Ni		Co		Cu	
当該管	0.9	±0.2	2.2	±0.2	16.6	±0.3	2.0	±0.2	65.9	±0.4	12.4	±0.4	ND	-	ND	-

③分析位置：TIG溶接金属

	Si		Mo		Cr		Mn		Fe		Ni		Co		Cu	
当該管	0.7	±0.2	2.1	±0.2	17.5	±0.3	1.8	±0.2	66.0	±0.4	12.0	±0.4	ND	-	ND	-

④分析位置：SMAW溶接金属

	Si		Mo		Cr		Mn		Fe		Ni		Co		Cu	
当該管	0.6	±0.2	2.1	±0.2	18.8	±0.3	1.7	±0.2	64.8	±0.4	12.0	±0.4	ND	-	ND	-



● : 分析位置

図：分析位置

➤ 当該部（当該管エルボ側）の化学成分は規格値の範囲内であり、異常は認められなかった。

⑫ 化学成分分析（鋭敏化確認）の結果

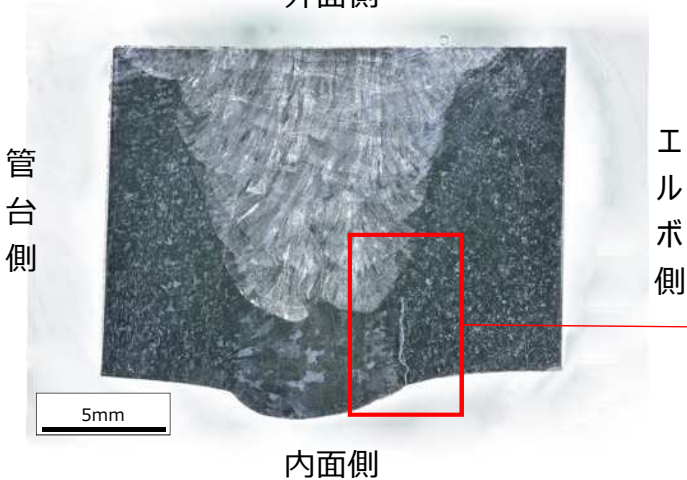
1. 調査内容（鋭敏化測定）

②c断面をシウ酸エッチングし、鋭敏化を確認した。

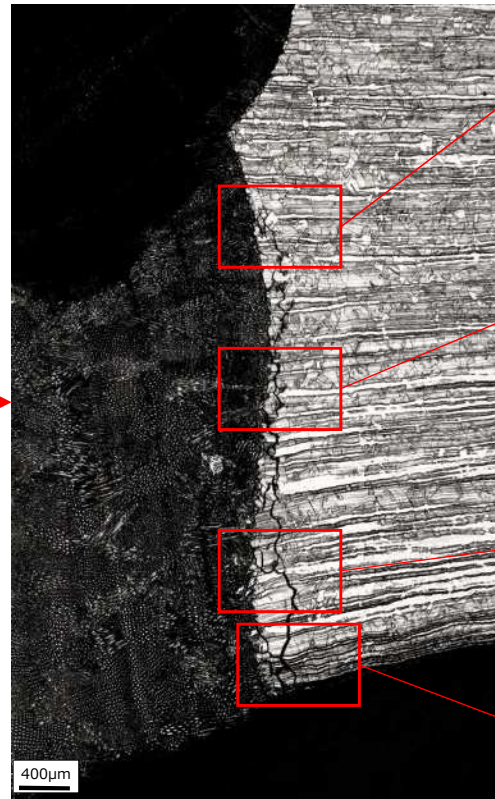
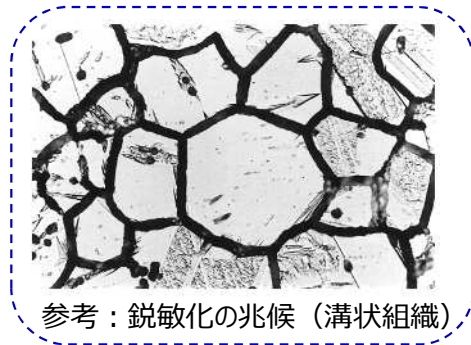
2. 調査結果

鋭敏化確認の結果を下図に示す。

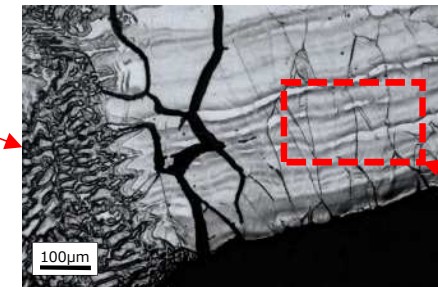
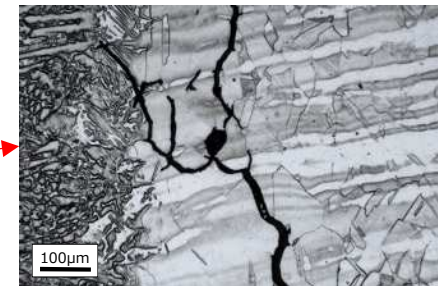
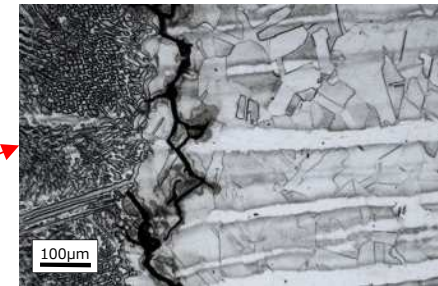
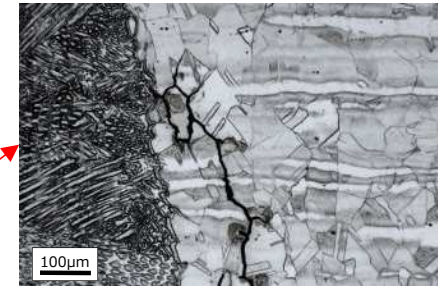
外面側



内面側



図：②cのシウ酸エッチング写真



段状組織を呈している

➤ 金属組織は段状組織を呈しており、 O_2 SCC時によく見られる鋭敏化の兆候（溝状組織）は認められなかった。

⑬ 残留応力測定の結果

1. 調査内容

溶接部の残留応力の評価のため、切断時の応力開放をひずみゲージで測定するとともに、表面の残留応力をX線で測定した。

2. 調査結果

図1の通り測定した残留応力測定結果を、図2に示す。

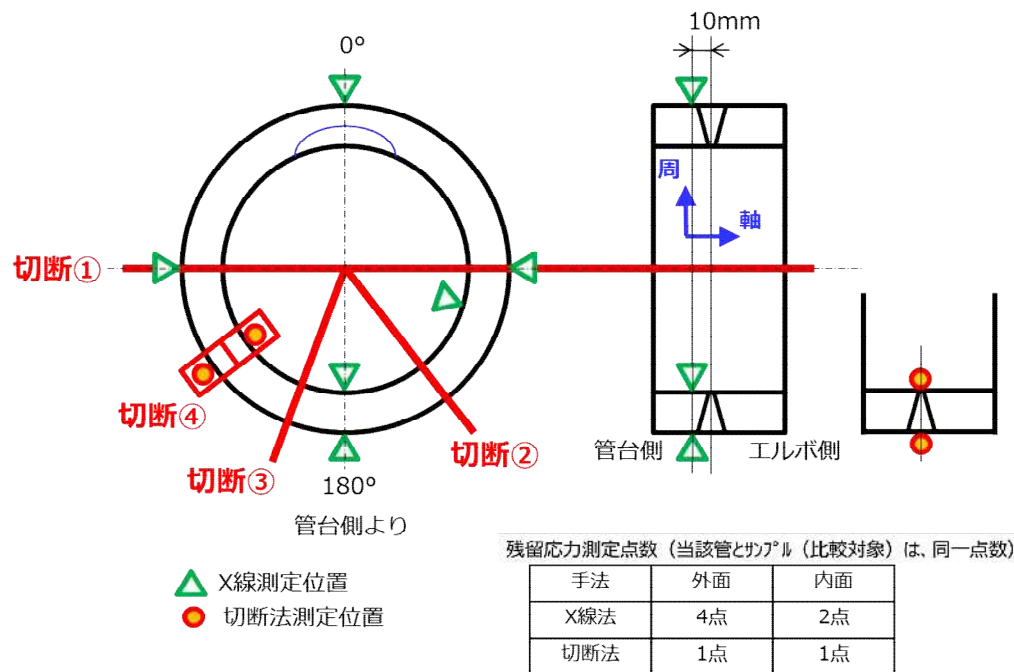
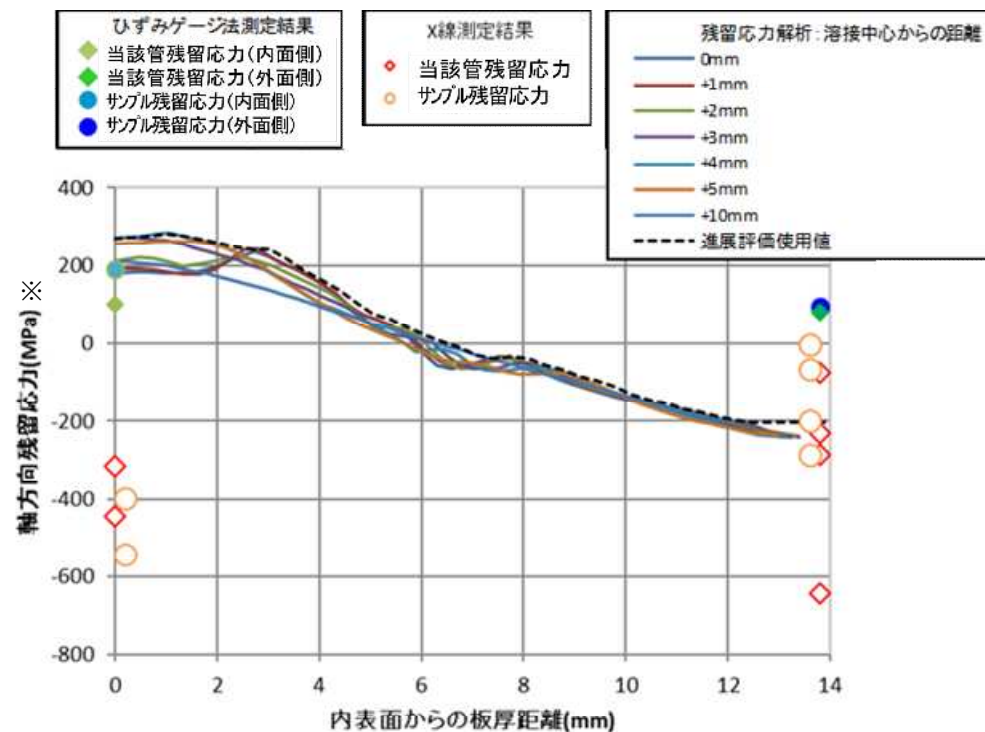


図1：残留応力測定位置



※ +は引張応力、-は圧縮応力を表す

図2：残留応力測定結果

- ひずみゲージ法による内面側残留応力は、当該管で+101MPa、サンプル（比較対象）で+190 MPaの引張応力であった。一方、外面応力は、FEM解析と比較できるようなデータが得られなかった。
- X線による残留応力は、測定を試みたが有効なデータが得られなかった。一般的にX線による測定は結晶粒度の影響を受け、結晶粗大化や集合組織ができる溶接部、熱影響部の計測は困難と言われており、その影響と考えられる。