

PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れの 知見拡充に関する2024年度の検討結果について (モックアップ検証・大飯4号実機材調査, 溶接残留応力評価)

原子力エネルギー協議会
(ATENA)

2026年1月22日

背景・目的

- 大飯3号加圧器スプレライン配管溶接部に認められた粒界割れは、管台-エルボの溶接部であり、溶接熱影響部（HAZ）の特異な硬化、幅広な裏波幅が特徴的である。これらの特徴に関する知見を拡充するため、①当該管と同形状・同材料のモックアップを用いて、硬化要因と推定している初層入熱大（TIG）、2層目以降入熱小（SMAW）による溶接で、HAZ部が当該部と同等に硬化することを確認する。また、②大飯3号と同設計の大飯4号を調査し、特徴的な硬さや裏波幅が一般的なものか、大飯3号で確認された結晶粒の粗大化傾向は大飯4号でも観察されるか確認を行い、大飯3号の特異性について検討を行う。
- 大飯3号当該部の溶接は、初層入熱大（TIG）、2層目以降入熱小（SMAW）によるものと推定しているが、この溶接により応力面でも当該部が高応力の状況となっているか、FEM解析による検討を行う。また、大飯3号事象発生以降実施している水平展開検査においては、当該部と同じ4B配管以外の配管口径についても、入熱が大きくなると想定される箇所の検査を行っている。これまでの検査において、大飯3号当該部以外に指示は認められていないが、亀裂が顕在化するリスクは配管口径ごとに異なるものと考えられる。このことは亀裂の進展性が関係しており、溶接残留応力に関する検討（FEM解析）を行い、残留応力分布における進展性の違いを確認する。

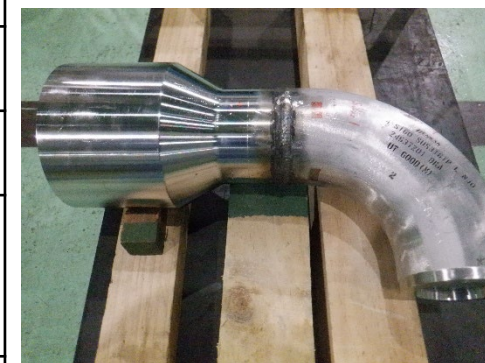
大飯3号当該部の特異性検討 (モックアップ検証・大飯4号実機材調査)

モックアップ溶接部の表層硬さ

- 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し、内表面の硬さ測定を実施。

<溶接条件>

項目	大飯3号当該部 (管台-エルボ)	モックアップ (管台-エルボ)																
溶接方法	初層TIG+被覆アーク	初層TIG+被覆アーク																
溶接姿勢	【現地溶接】 斜め60°水平	【工場溶接】 立向+下向 → 上下反転して立向+下向																
溶接材料	TG-S316LK:Φ1.6mm NC-36L:Φ2.6mm,Φ3.2mm	TG-S316LK:Φ1.2mm NC-36L:Φ2.6mm,Φ3.2mm																
溶接条件	<table border="1"> <tr> <td>初層</td> <td>2層目以降</td> </tr> <tr> <td>電流: 80~120A、</td> <td>70~120A</td> </tr> <tr> <td>電圧: 不明、</td> <td>不明</td> </tr> <tr> <td>速度: 不明、</td> <td>不明</td> </tr> </table>	初層	2層目以降	電流: 80~120A、	70~120A	電圧: 不明、	不明	速度: 不明、	不明	<table border="1"> <tr> <td>初層</td> <td>2層目以降</td> </tr> <tr> <td>電流: <input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>電圧: <input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>速度: <input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> </table>	初層	2層目以降	電流: <input type="text"/>	<input type="text"/>	電圧: <input type="text"/>	<input type="text"/>	速度: <input type="text"/>	<input type="text"/>
初層	2層目以降																	
電流: 80~120A、	70~120A																	
電圧: 不明、	不明																	
速度: 不明、	不明																	
初層	2層目以降																	
電流: <input type="text"/>	<input type="text"/>																	
電圧: <input type="text"/>	<input type="text"/>																	
速度: <input type="text"/>	<input type="text"/>																	
層パス	5層11パス	5層11パス																
拘束	<ul style="list-style-type: none"> • エルボや管台の形状拘束はあり • 形状以外の拘束は当該部から離れており、拘束はほとんどないとみなせる 	<ul style="list-style-type: none"> • エルボや管台の形状拘束はあり • それ以外の拘束はなし 																



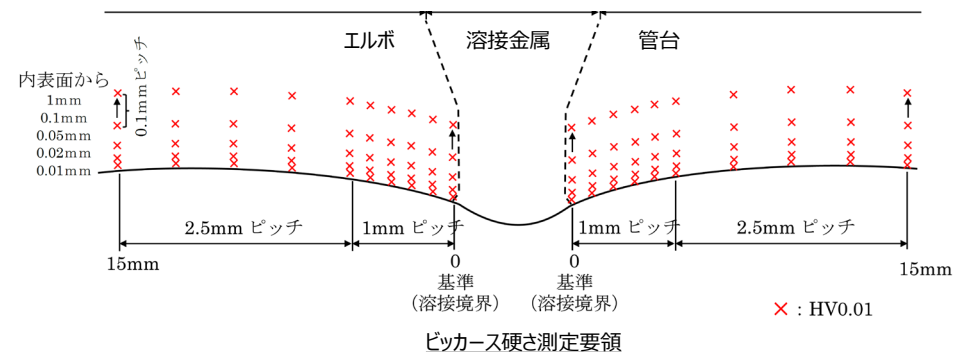
モックアップ製作 (管台-エルボ)

□: 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

※初層入熱量を極力大き化したモックアップを製作するために実施

<硬さ測定要領>

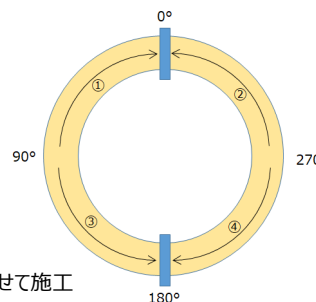
- 板厚方向測定位置: 内表面0.01mmから1mm
(0.01mm、0.02mm、0.05mm及び0.1mm~1.0mmは0.1mmピッチ)
- 軸方向測定位置: 基準点から15mm
(0~5mmは1mmピッチ、5~15mmは2.5mmピッチ)
- ビッカース硬さ測定: HV0.01 (10gf)



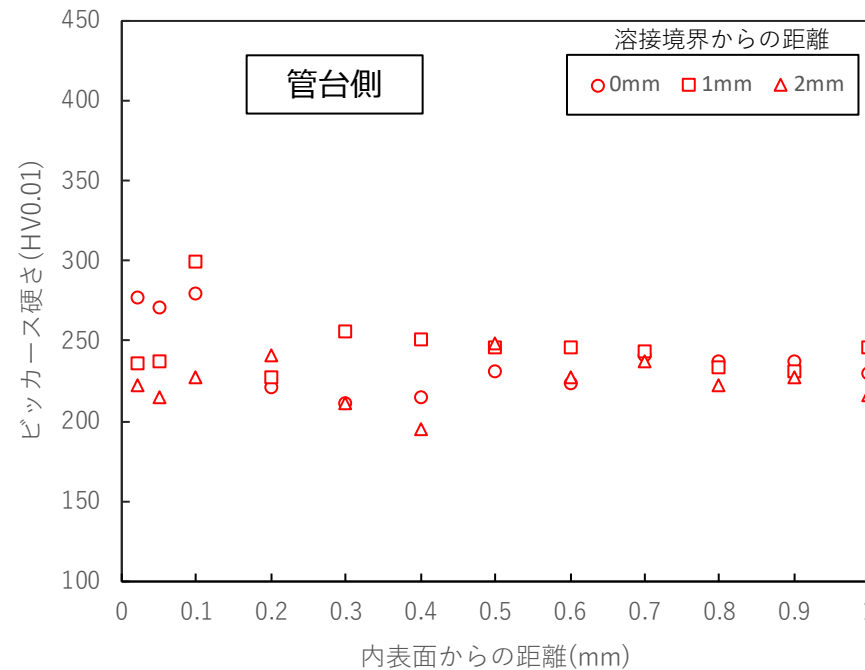
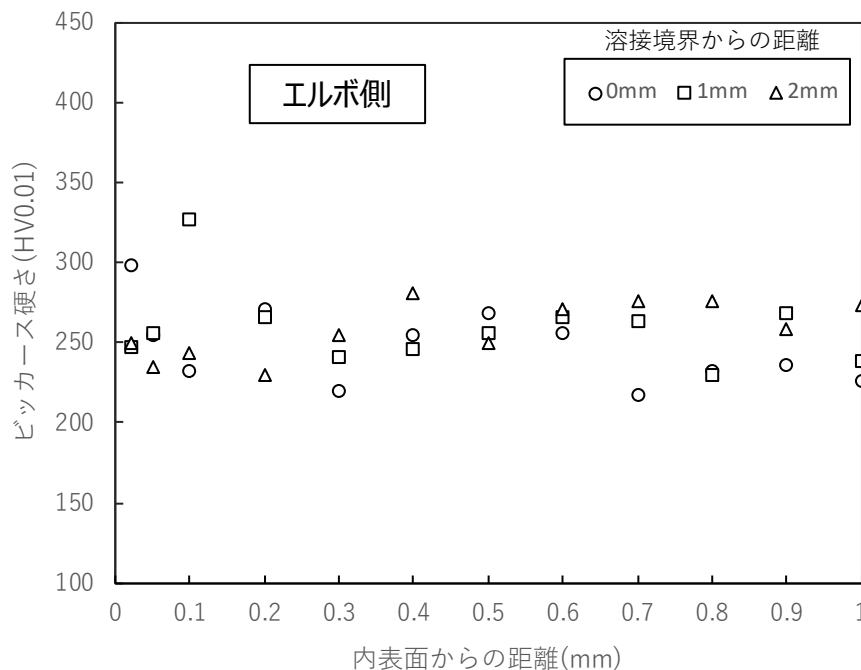
モックアップ溶接部の表層硬さ

- 初層入熱大（TIG）、2層目以降入熱小（SMAW）にてモックアップを製作し、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



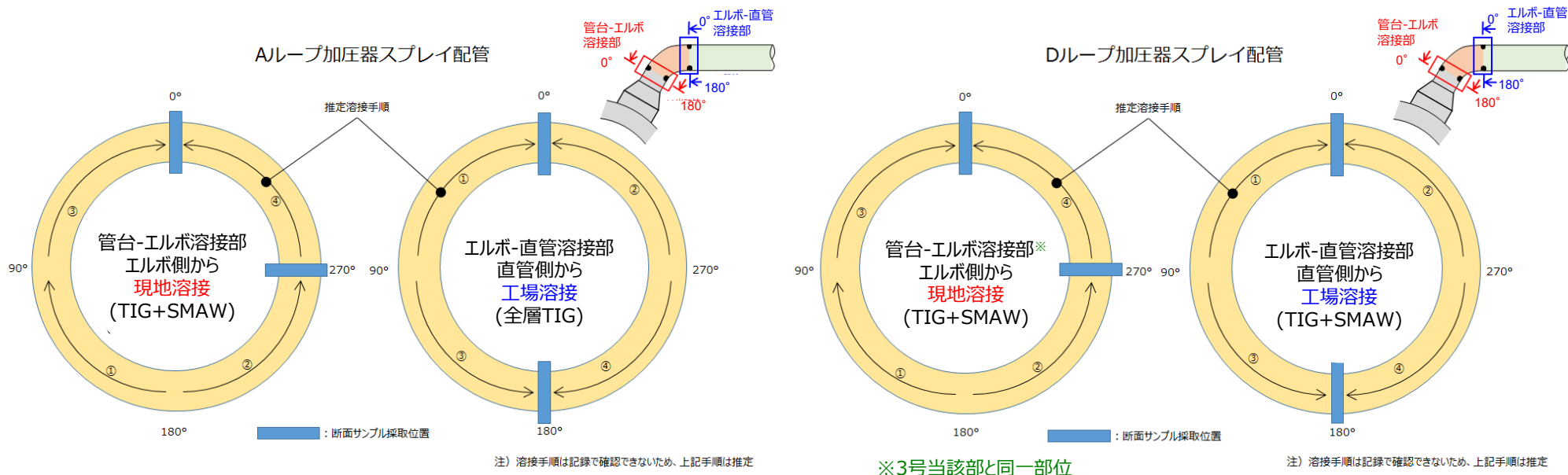
※右図の○数字は溶接手順
③④の溶接を行う際には天地を反転させて施工



※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

大飯4号加圧器スプレライン配管 調査対象

- 大飯3号加圧器スプレラインでの粒界割れ事象を受け、大飯3号当該管の複数断面の追加調査を知見拡充の取組みとして実施した。
- 当該主亀裂発生部位では、初層大入熱によるものと想定された**特異な硬さ（表層350HV0.01）**及び**幅広な裏波幅**が認められている。
- また、断面マクロ・ミクロ観察にて、主亀裂（約4.4mm深さ）以外にもHAZ部の溶接境界近傍に複数の**微小な割れ**が確認されている。
- これらの特徴が一般的なものであるか確認するため、大飯3号とほぼ同時期に建設され、同一材料を使用し、運転中に作用する応力もほぼ同等である同一部位の大飯4号加圧器スプレライン配管（A、Dループ）の廃材を調査した（溶接士は3号と4号で異なる）。



調査対象サンプル

大飯4号加圧器スプレイライン配管 調査マトリクス

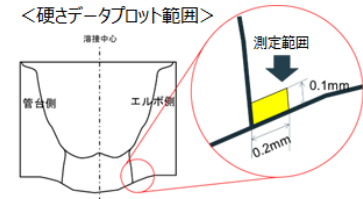
調査マトリクス

供試体		採取角度	表層マイクロビッカース硬さ (HV0.01)	断面マクロ・ミクロ* (微小割れ確認)
系統	組合せ			
Aループ 加圧器スプレイライン配管 (A-FW4) (A-SW5)	A-FW4 管台-エルボ 現地溶接 (TIG+SMAW)	0° 終端部	○	○
		270° 始末端部	○	○
	A-SW5 エルボ-直管 工場溶接 (全層TIG)	0° 終端部	○	○
		180°	○	○
Dループ 加圧器スプレイライン配管 (D-FW4) (D-SW5)	D-FW4 管台-エルボ 現地溶接 (TIG+SMAW)	0° 終端部	○	○
		270° 始末端部	○	○
	D-SW5 エルボ-直管 工場溶接 (TIG+SMAW)	0° 終端部	○	○
		180° 終端部	○	○

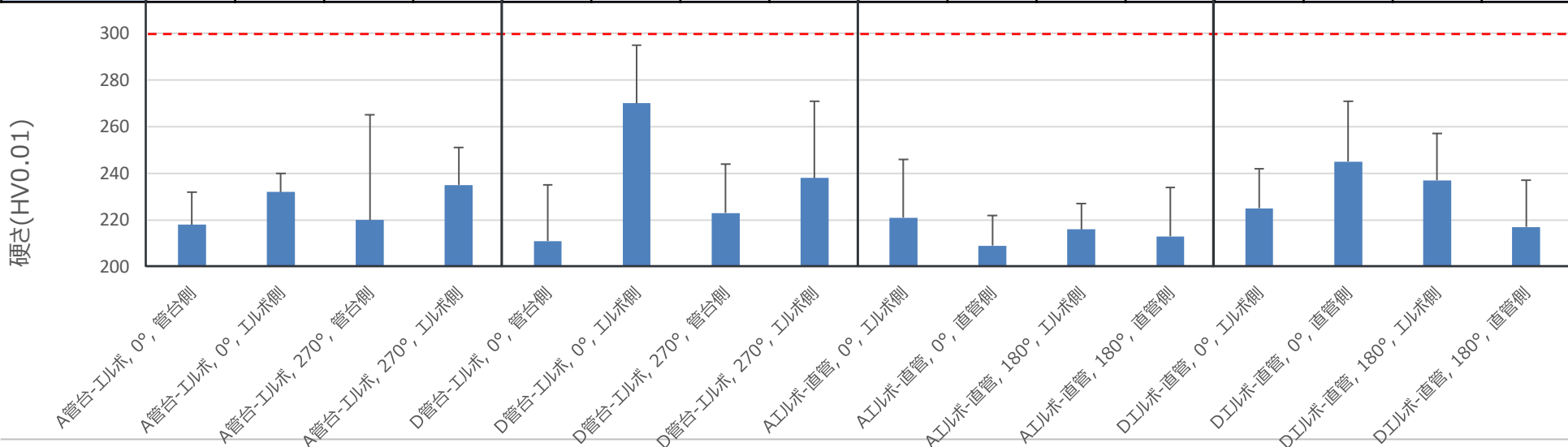
* 断面マクロでの観察結果に基づき、HAZ近傍の内表面部に着目して粒界酸化や微小な割れが認められる場合は、その領域に着目したSEM（走査型電子顕微鏡）を用いた拡大観察を行う

大飯4号加圧器スプレイライン配管 表層硬さ計測結果

- 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号当該部と同一ループ

大飯4号加圧器スプレイライン配管 断面マクロ・ミクロ

- 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、**微小な割れは認められない。**

管台側

エルボ側

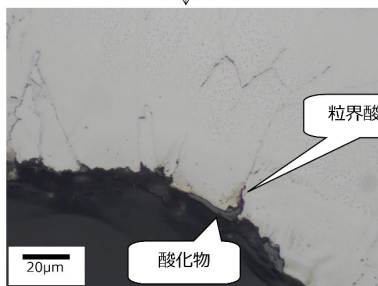


Dループ FW-4 0°断面
(管台-エルボ溶接部)

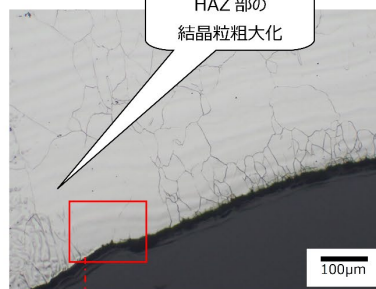
視野①



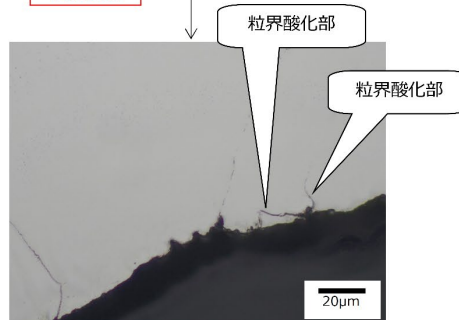
溶接境界



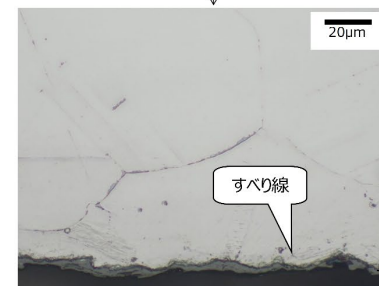
視野②



溶接境界

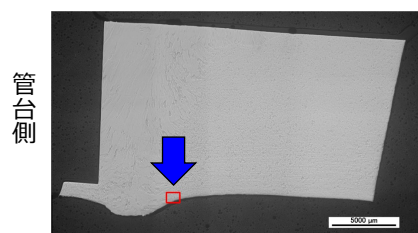


視野③



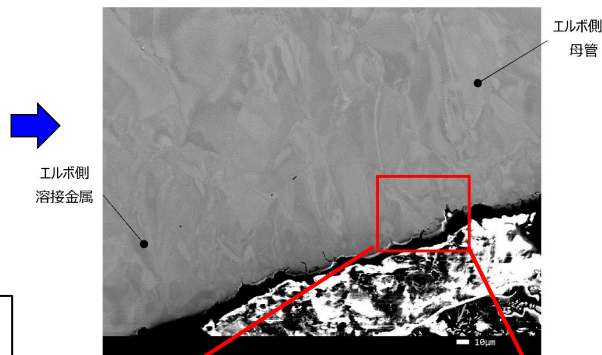
大飯4号加圧器スプレイライン配管 SEM/EDS観察結果

- エルボ側の溶接境界近傍には、内表面側に酸化物の形成とともに、凹凸部に粒界酸化部（約5 μm ）が認められた。
- 大飯3号で認められている微小な割れとは異なる様相を呈している。

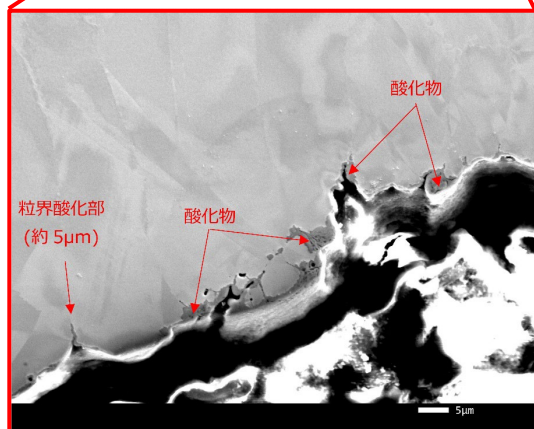


FW4-0°断面

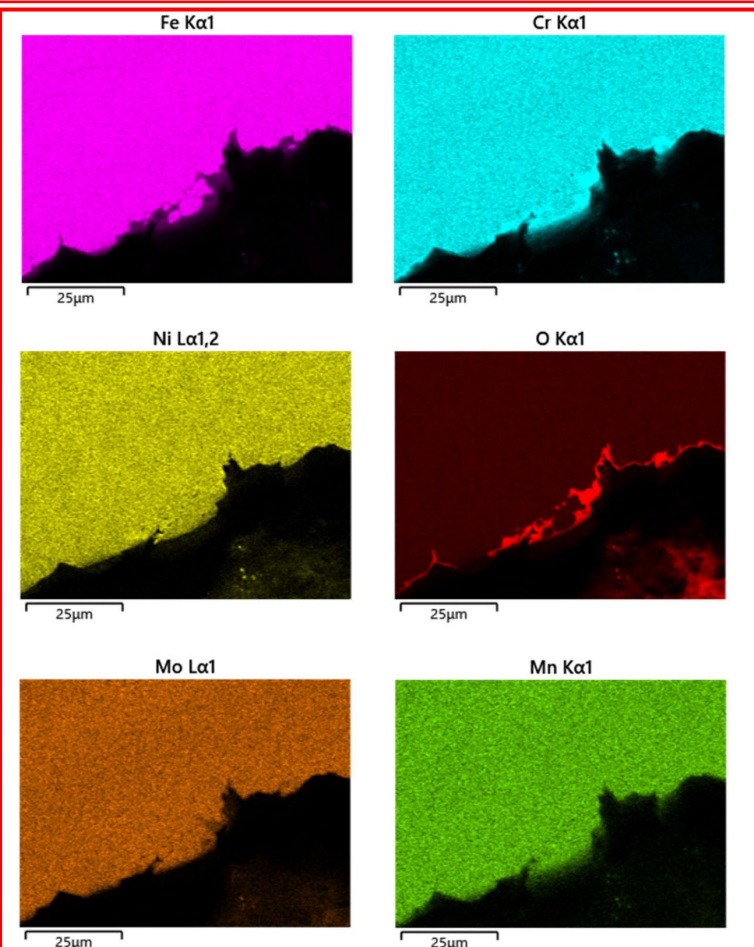
Dループ° FW-4 0°断面
(管台-エルボ溶接部)



FW4-0°断面エルボ側 二次電子像



FW4-0°断面エルボ側 二次電子像 (拡大SEM像)

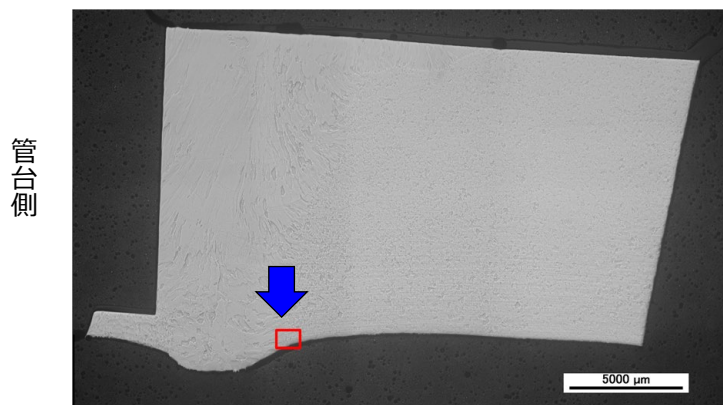


FW4-0°断面エルボ側 断面EDS面分析結果

大飯4号加圧器スプレイライン配管 SEM/EBSD観察結果

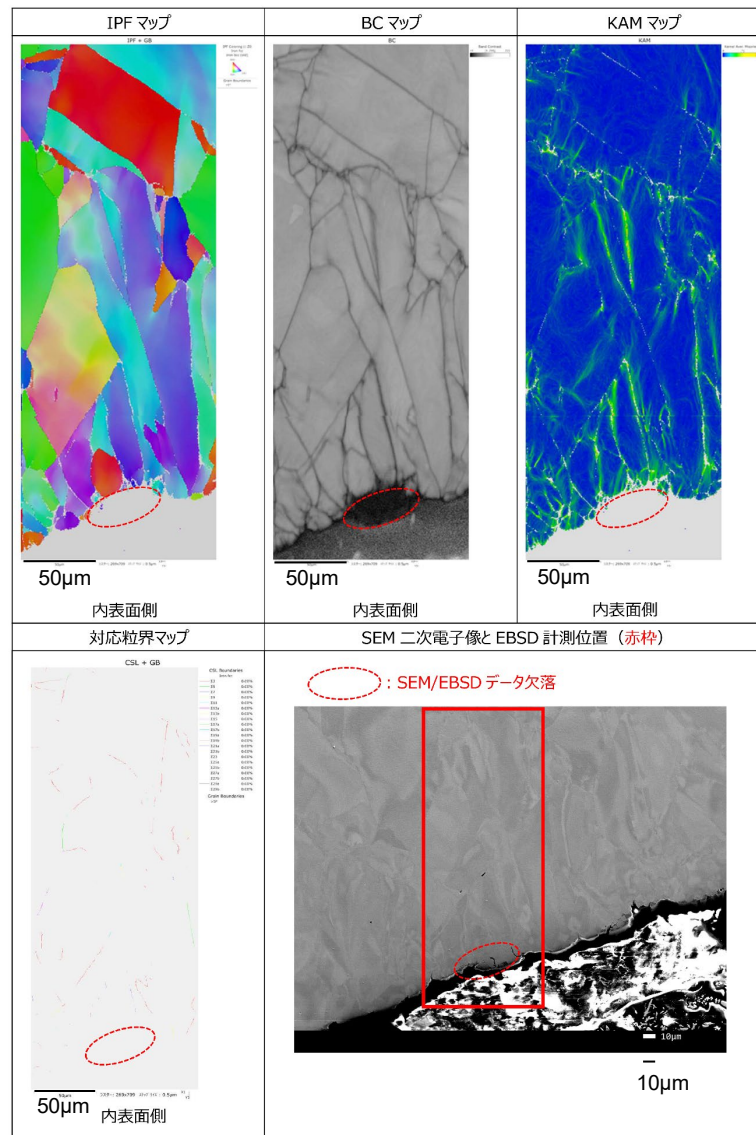
- エルボ側の溶接境界近傍のHAZ部には、溶接入熱により通常見られる結晶粒径の粗大化が確認された。
- 但し、大飯3号で確認された程大きく成長した粒は確認されなかった。

Dループ FW-4 0°断面 (管台-エルボ溶接部)



管台側

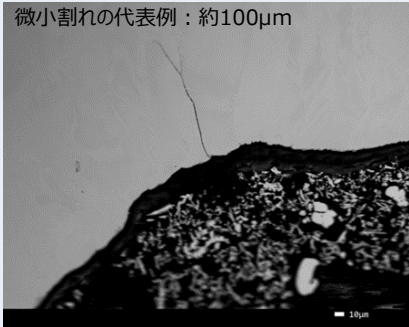
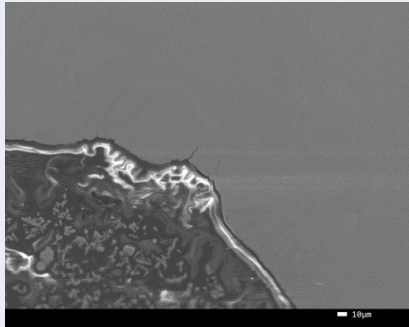
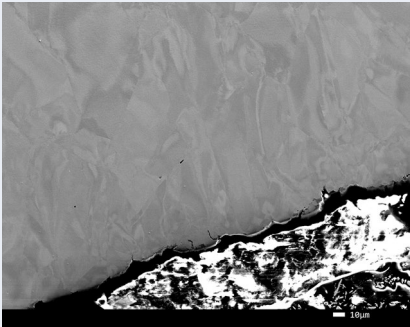
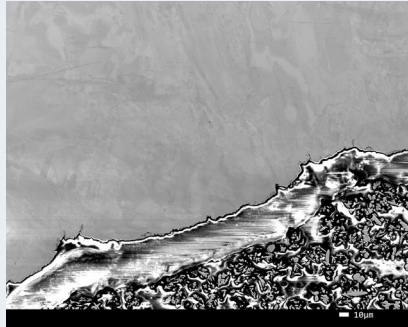
エルボ側



FW4-0°断面エルボ側 断面EBSD計測結果

大飯3号と大飯4号との調査結果比較

■ 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

大飯3号当該部の特異性検討まとめ

<モックアップ表層硬さ>

- ・ 初層入熱大（TIG）、2層目以降入熱小（SMAW）の溶接において、**エルボ側HAZ部の内表面が硬化する傾向**を確認。

<大飯4号表層硬さ>

- ・ 大飯3号当該部で認められた**300HV0.01を超える硬さは認められない**。
- ・ 全層TIG溶接部は、他溶接部（初層TIG+SMAW）に比べ、硬さは低い傾向にある。

<大飯4号断面マクロ・ミクロ観察>

- ・ 8断面の**裏波幅は5～6mm程度**であり、大飯3号の8mmより狭い。
- ・ 溶接HAZ部では、溶接入熱により通常見られる結晶粒径の粗大化が認められたが、大飯3号のような**約500 μ mまで大きく粒成長した箇所はない**。
- ・ 配管内表面側で長時間使用に伴う酸化挙動が認められ、一部粒界に対して局所的な腐食挙動が認められたが、割れらしきものは認められない。

モックアップ及び大飯4号実機材の調査結果を受け、以下の点が補強されたと考えられる。

- 初層大入熱の影響を考慮したモックアップで、大飯3号当該部と同等の**広い裏波幅、表層硬さ**が確認されたため、**大飯3号当該部の入熱は高かったもの**と考えられる。
- 大飯4号の裏波幅は3号より狭く、表層硬さも低い。また、結晶粒径の粗大化傾向も小さいことから、通常の施工部位と考えられる。大飯3号と4号では溶接部の様相が異なっており、また、モックアップによる知見も踏まえると、**大飯3号当該部は特異であったと考えられる**。

溶接残留応力評価

残留応力解析条件（1/2）

- 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の進展性に影響する配管口径ごとの残留応力分布を求めるため、FEM解析を実施。
- 下表に示す4ケースに対して、大飯3号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）による溶接で製作したモックアップの条件を参考に、溶接残留応力解析に用いる入力条件を設定し、解析を実施。
- 国プロIAF※で構築した手法を適用し、HAZ部の板厚方向における軸方向残留応力分布を算出。

※JNES国プロIAF（Integrity Assessment of Flawed Components with Structural Discontinuity；複雑形状部機器配管健全性実証に関する事業）

解析ケース

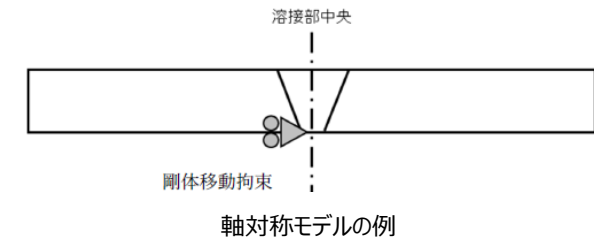
解析ケース	口径	層数・パス数	継手形状	解析モデル	溶接入熱量 (J/mm)
1	4B	5層・11パス	直管-直管	軸対称	初層： 2.4×10^3 2層目以降： $5.3 \times 10^2 \sim 1.5 \times 10^3$
2	6B	6層・14パス	直管-直管	軸対称	初層： 2.5×10^3 2層目以降： $6.1 \times 10^2 \sim 1.5 \times 10^3$
3	12B	11層・34パス	直管-直管	軸対称	初層： 2.7×10^3 2層目以降： $7.0 \times 10^2 \sim 1.9 \times 10^3$
4	14B	12層・39パス	直管-直管	軸対称	初層： 2.8×10^3 2層目以降： $7.0 \times 10^2 \sim 1.8 \times 10^3$
標準入熱※	4B	5層・11パス	直管-直管	軸対称	初層： 9.4×10^2 2層目以降： 1.3×10^3

※大飯3号事象発生当初検討していた残留応力解析ケース

(解析条件)

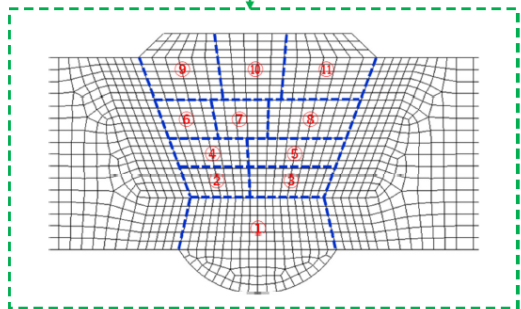
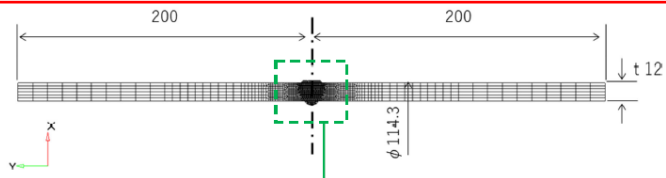
- 解析コード：Abaqus2019
- 拘束条件
 - ・ 製作したモックアップは溶接時に配管が周囲の構造物から受ける拘束力を考慮していないことから、移動を拘束する条件のみ適用
- 材料物性
 - ・ 常温の降伏応力：ミルシート値※
 - ・ 物性値全般：IAFで取得した高温の材料物性
 - ・ 移動硬化則を適用

※ケース1～4は2024年度製作モックアップの値を使用、標準入熱ケースは過去に製作の別モックアップの値を使用



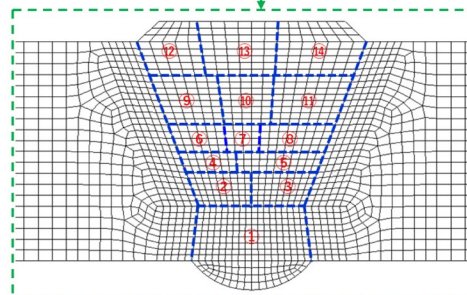
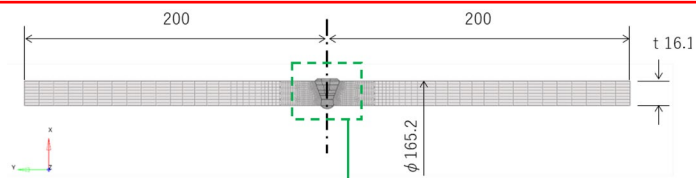
残留応力解析条件 (2/2)

■ 各解析モデルの積層の順番は、モックアップにおける溶接の積層順を模擬。



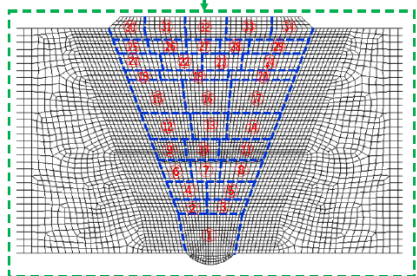
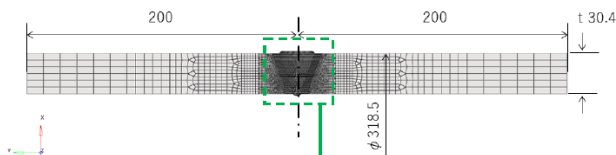
※図中の番号は積層順を示す。

ケース1：4Bの解析モデル



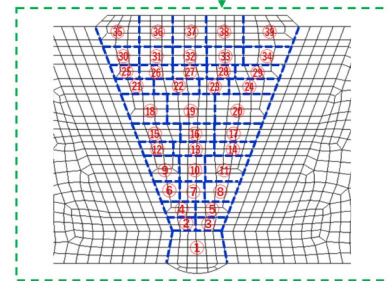
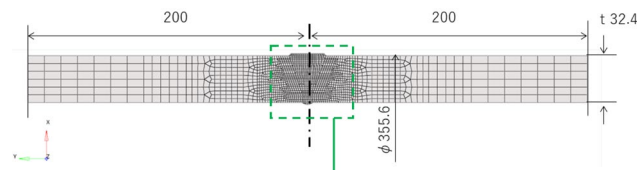
※図中の番号は積層順を示す。

ケース2：6Bの解析モデル



※図中の番号は積層順を示す。

ケース3：12Bの解析モデル

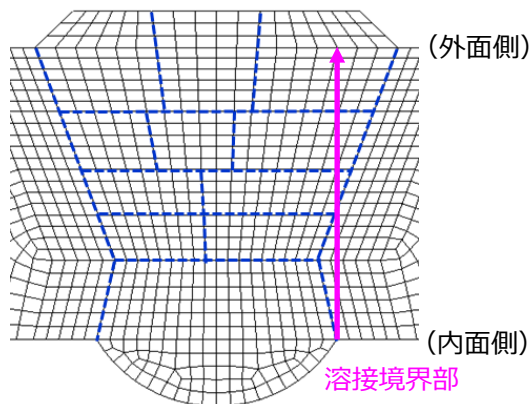


※図中の番号は積層順を示す。

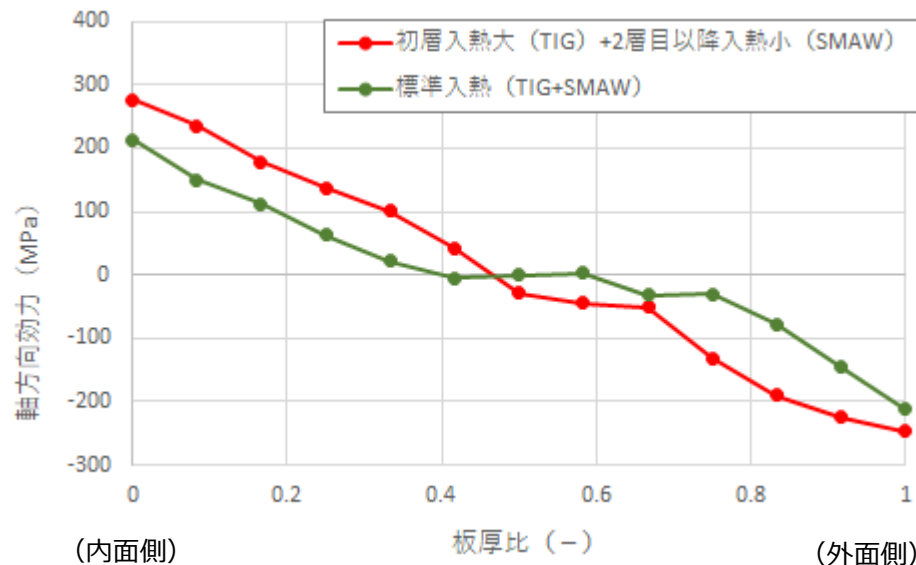
ケース4：14Bの解析モデル

残留応力解析結果 (1/4)

- 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

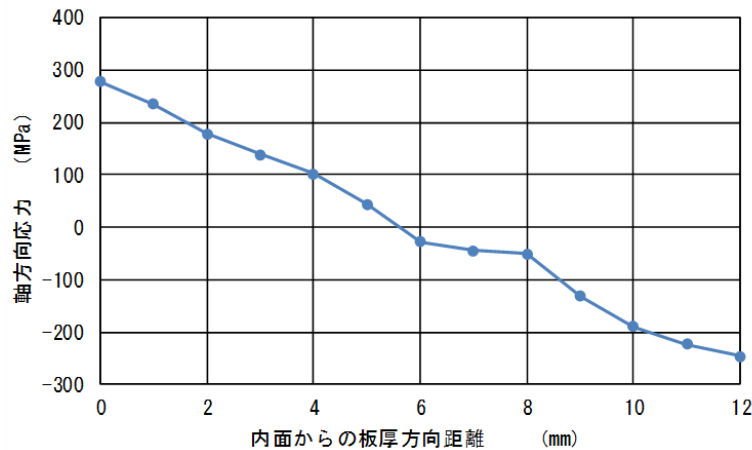
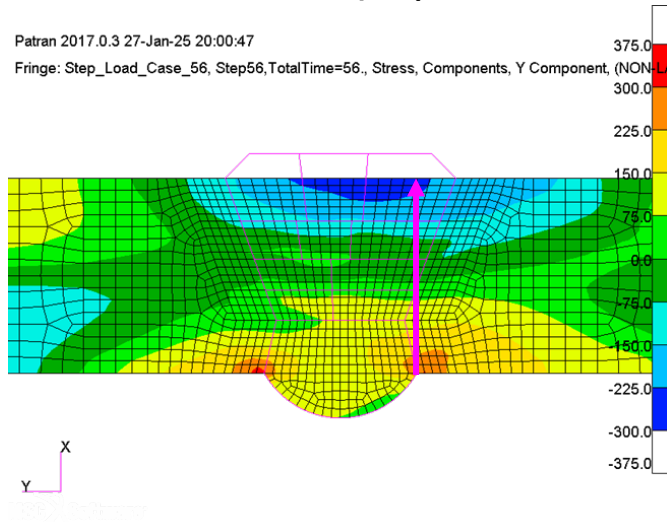
*大飯3号当該部に合わせて初層溶接部の幅（裏波幅）と高さを大きくモデル化
標準入熱は裏波の幅と高さが小さい解析モデルで実施

残留応力解析結果 (2/4)

■ 4Bおよび6Bの軸方向応力は、内面側で引張、外面側で圧縮の応力分布。

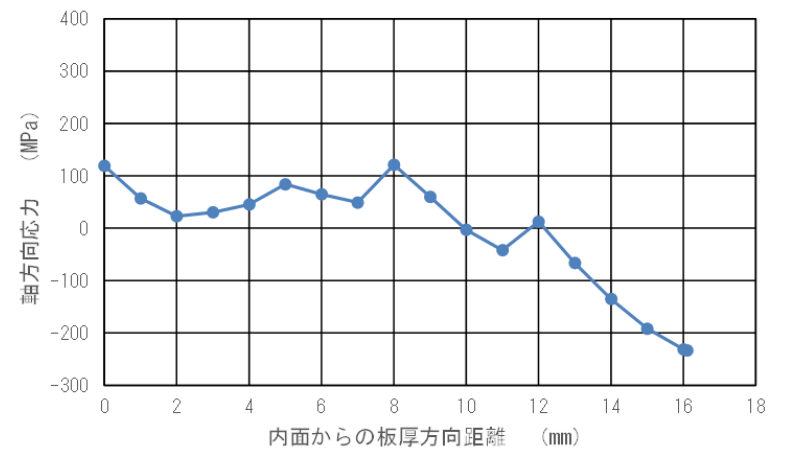
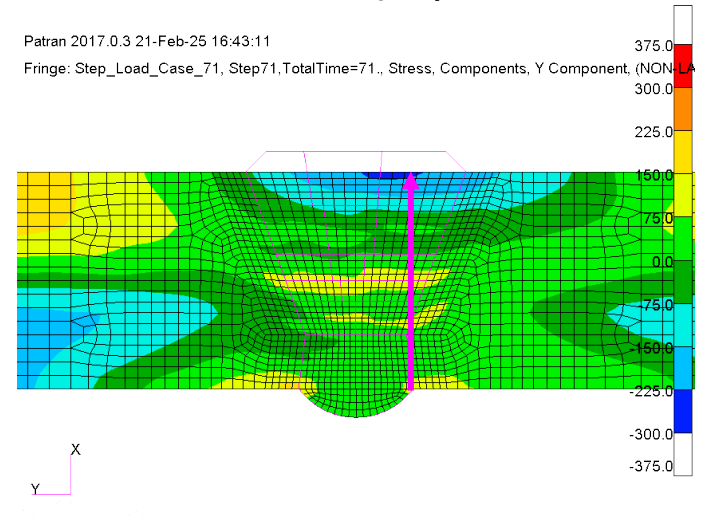
応力コタ

ケース1 (4B)



応力分布

ケース2 (6B)

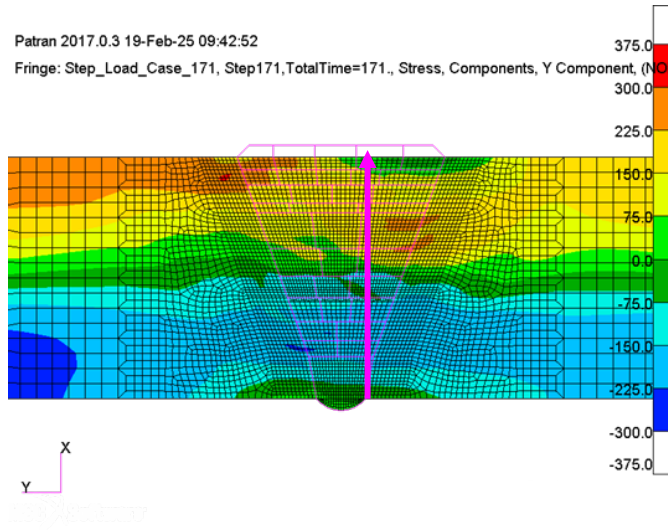


残留応力解析結果 (3/4)

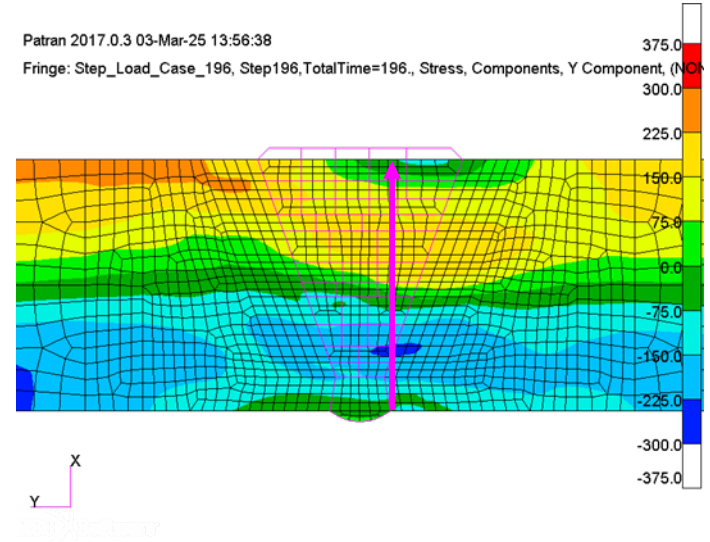
■ 12Bおよび14Bの軸方向応力は、内面側で圧縮、外面側で引張の応力分布。

応力コンタ

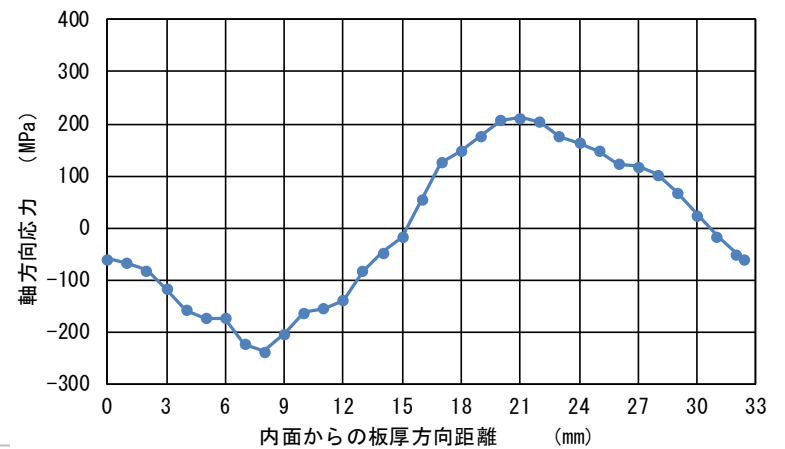
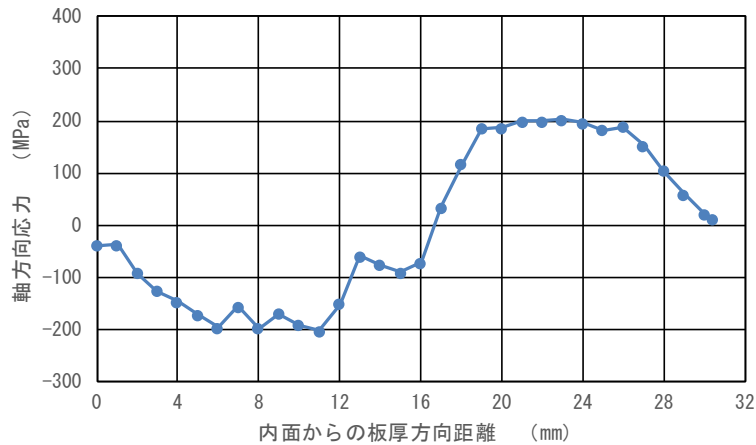
ケース3 (12B)



ケース4 (14B)

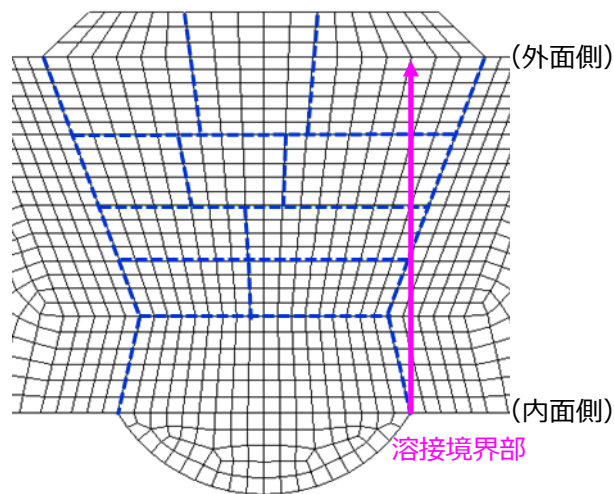


応力分布

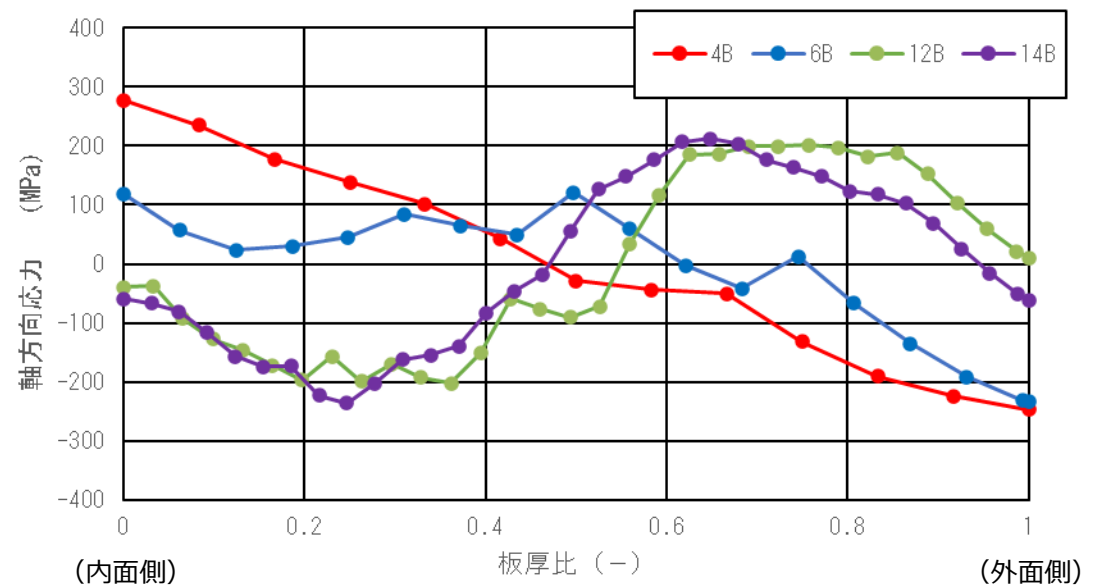


残留応力解析結果 (4/4)

- 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。



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

溶接残留応力まとめ

＜溶接残留応力＞

- 初層入熱大（TIG）、2層目以降入熱小（SMAW）の溶接条件における残留応力について、高応力状況の確認及び配管口径ごとの応力分布を検討。
- 溶接境界部における軸方向応力について、以下の傾向を確認。
 - 4Bでは内表面の応力が高くなる傾向
 - 4B,6Bでは、内面側引張、外面側圧縮
 - 12B,14Bでは、内面側圧縮、外面側引張



溶接残留応力について、以下の知見が補強されたと考えられる。

- 亀裂発生当該部は入熱量が高かったことで、応力面についても内表面側は高くなっていた可能性が考えられる。
- 溶接境界部の軸方向残留応力については、4B配管の内表面残留応力が最も高い傾向にある。
- 溶接境界部における板厚内部の軸方向応力分布より、4B,6Bは内表面側が引張の残留応力であることから亀裂は進展し易く、一方、12B,14Bは圧縮側の残留応力であることから、亀裂の進展性は低いと考えられる。

参考資料

参考1：モックアップ溶接部近傍の断面マクロ

参考2：大飯4号断面マクロ・ミクロ観察

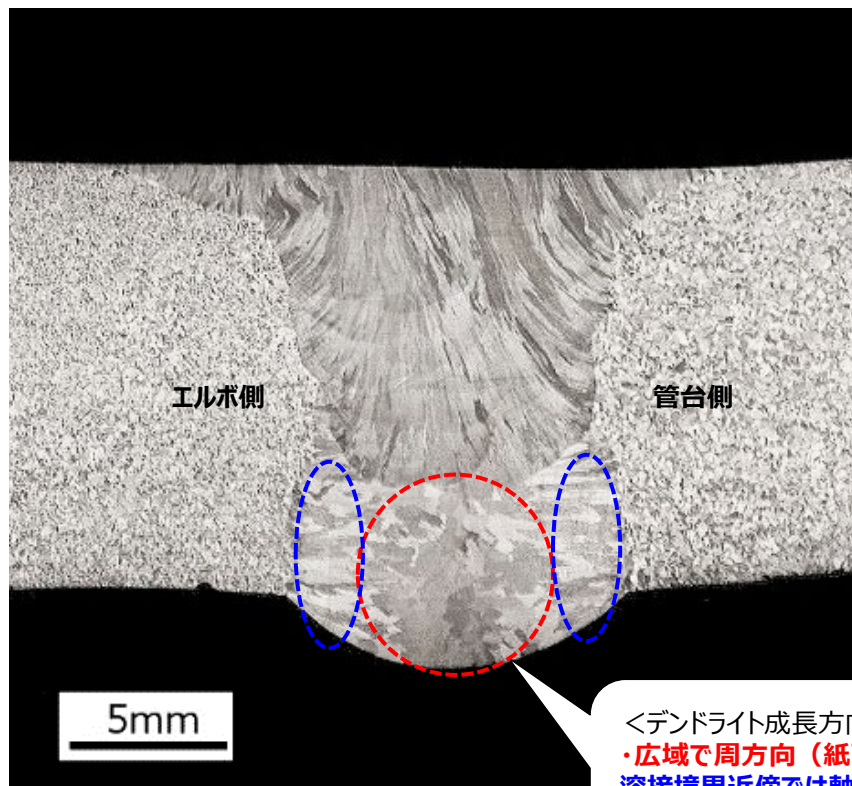
参考3：大飯3号断面マクロ・ミクロ観察

参考4：大飯3号と4号のEDS分析結果比較

参考5：大飯3号表層硬さ計測結果

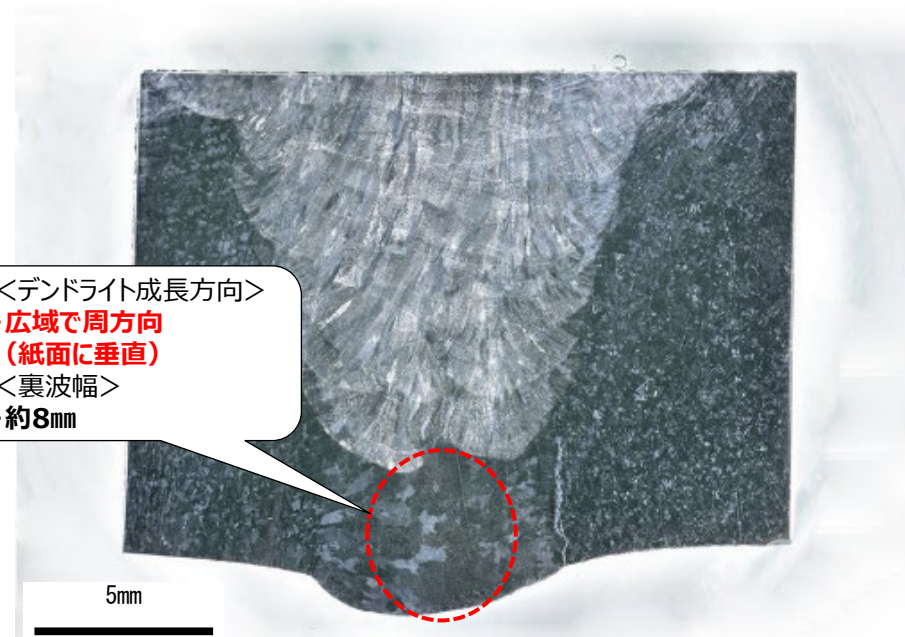
参考1：モックアップ溶接部近傍の断面マクロ

- 初層大入熱のモックアップのデンドライト成長方向は、周方向が支配的であることが確認され、大飯3号当該部も同様に大入熱であったと推測されることの実証データが得られた。



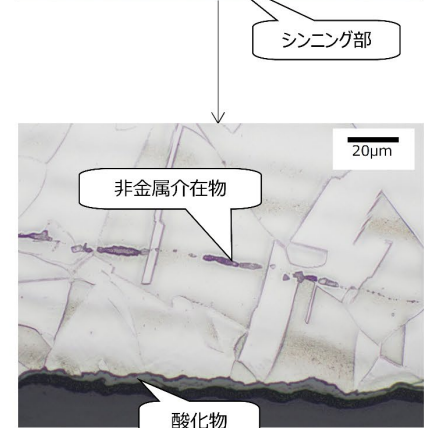
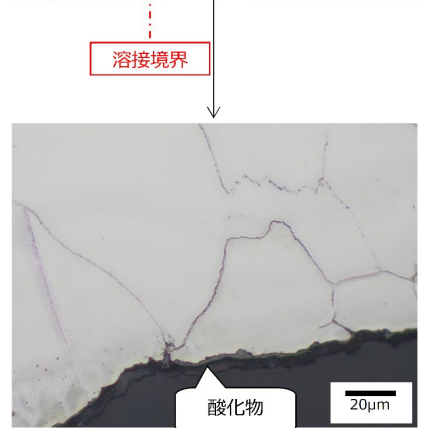
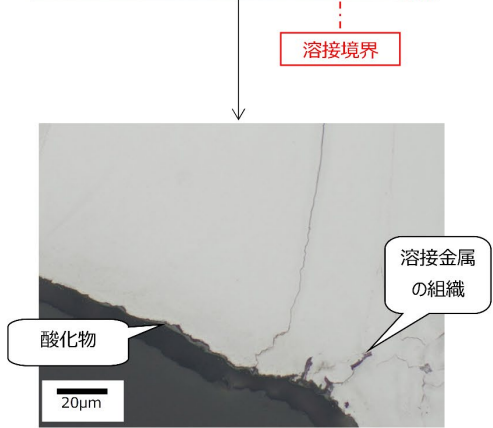
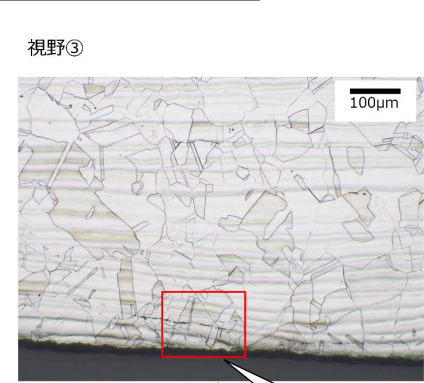
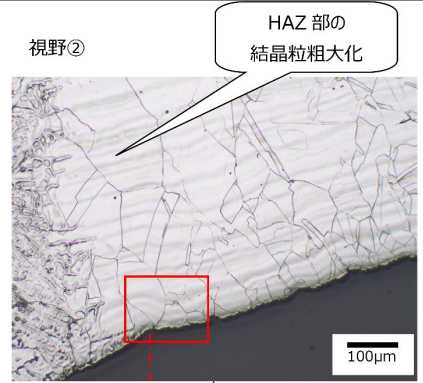
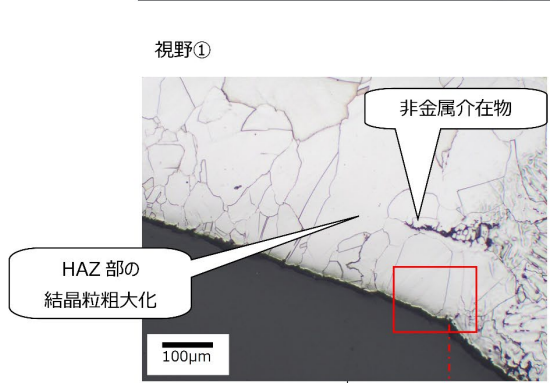
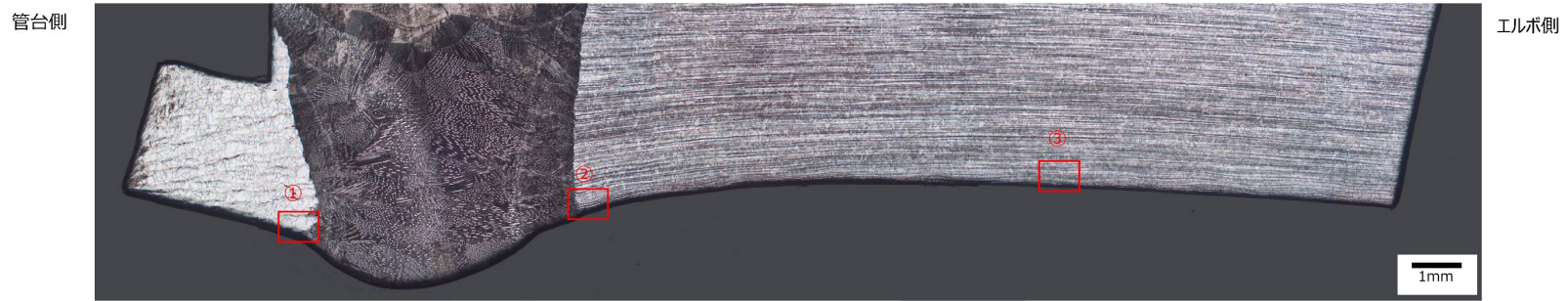
<デンドライト成長方向>
 ・広域で周方向（紙面に垂直）、
 溶接境界近傍では軸方向
 <裏波幅>
 ・約11mm

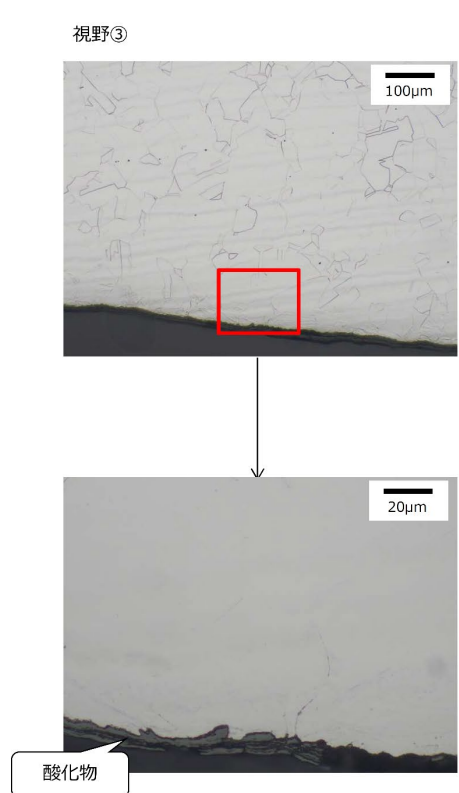
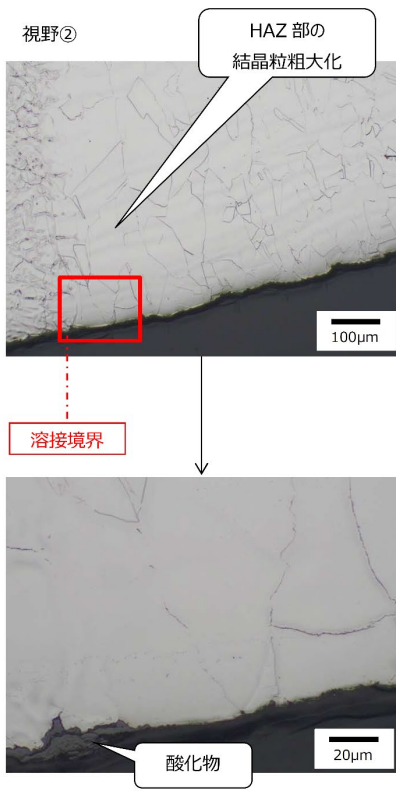
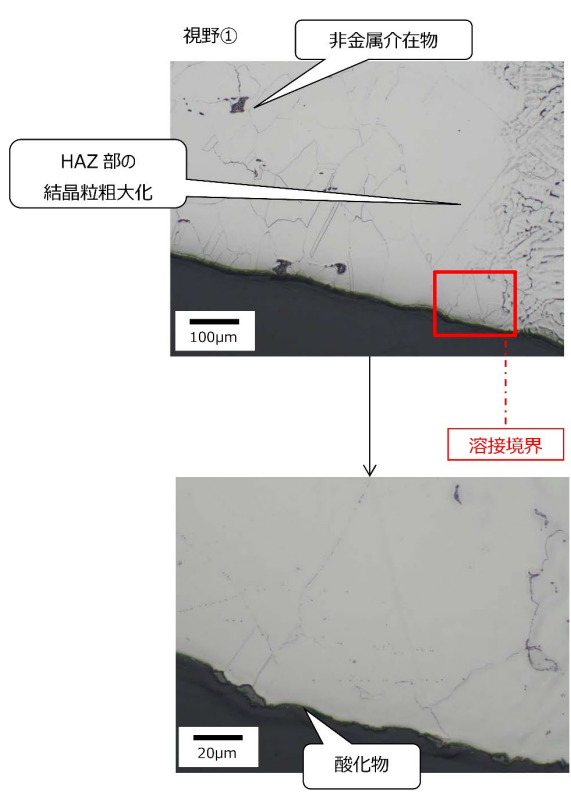
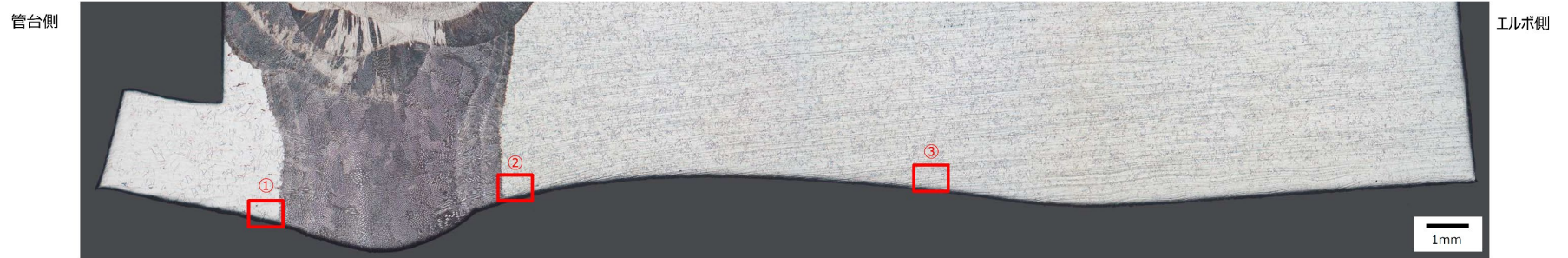
モックアップ（180°断面）



<デンドライト成長方向>
 ・広域で周方向
 （紙面に垂直）
 <裏波幅>
 ・約8mm

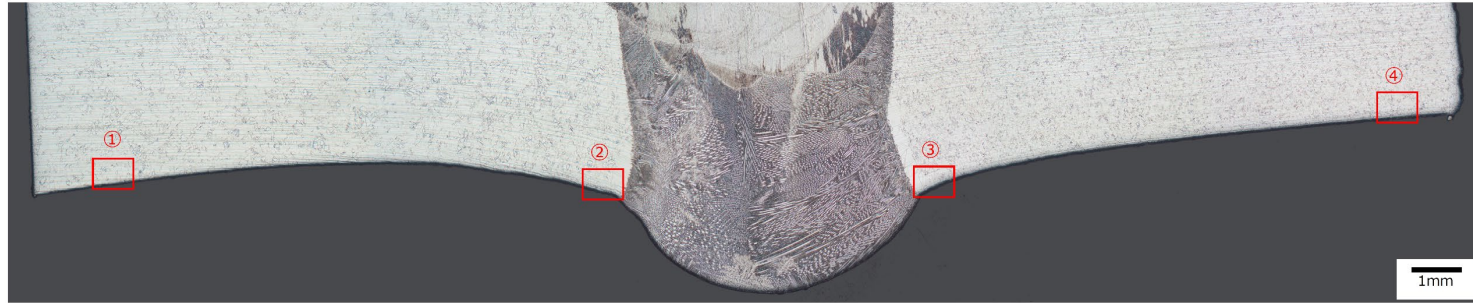
大飯3号当該部（0°断面）





エルボ側

直管側

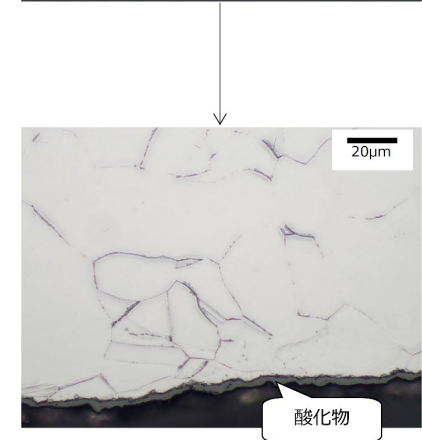
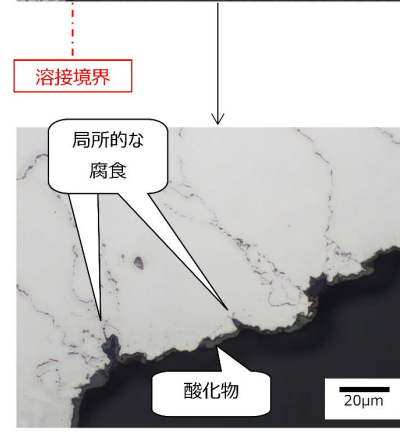
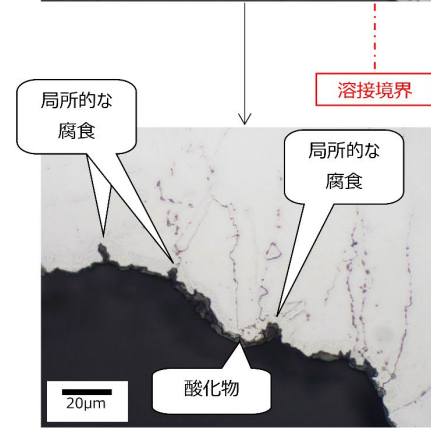
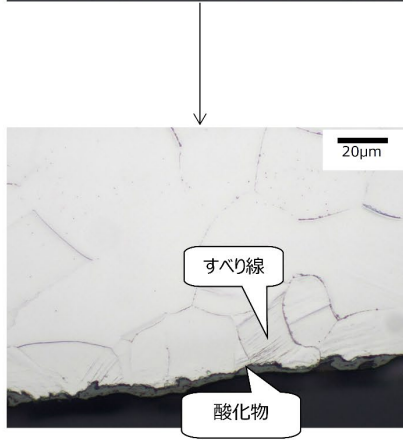
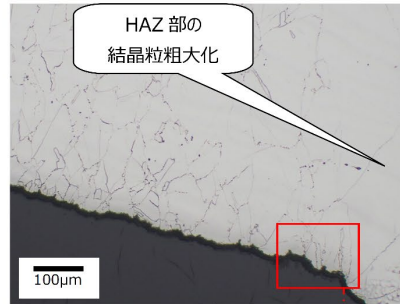
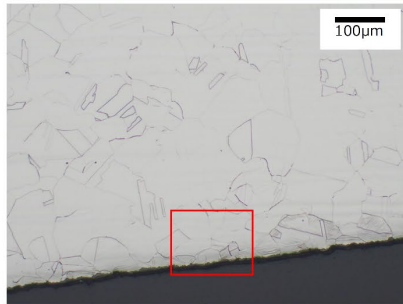


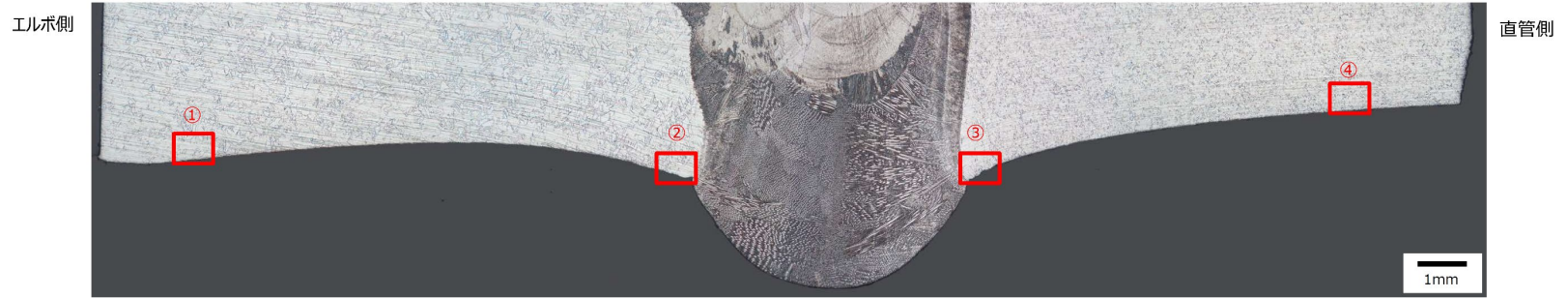
視野①

視野②

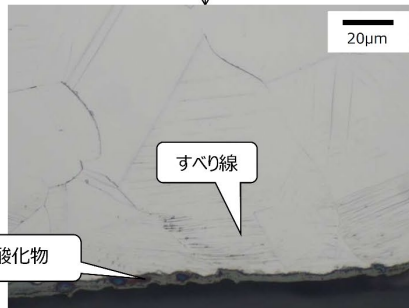
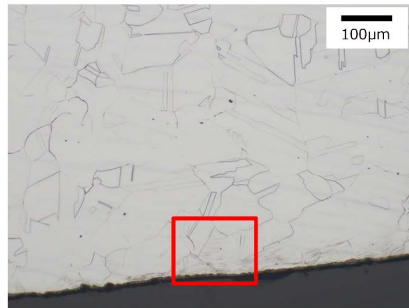
視野③

視野④

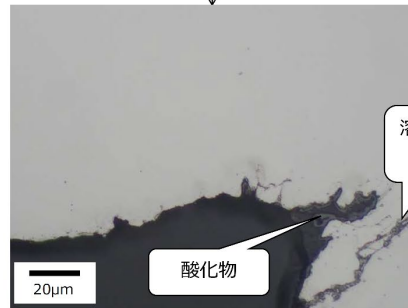
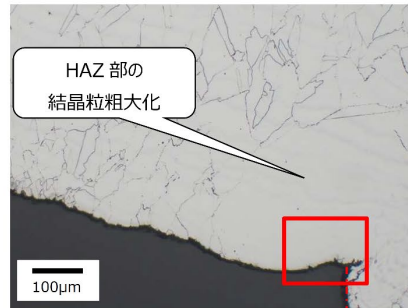




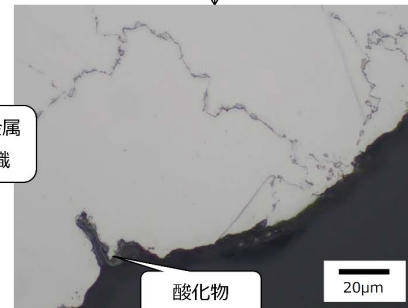
視野①



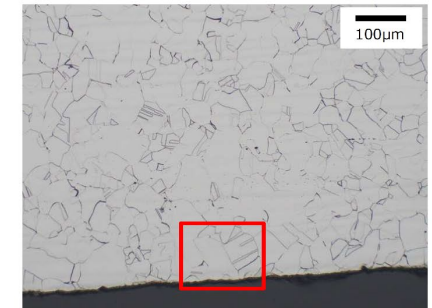
視野②

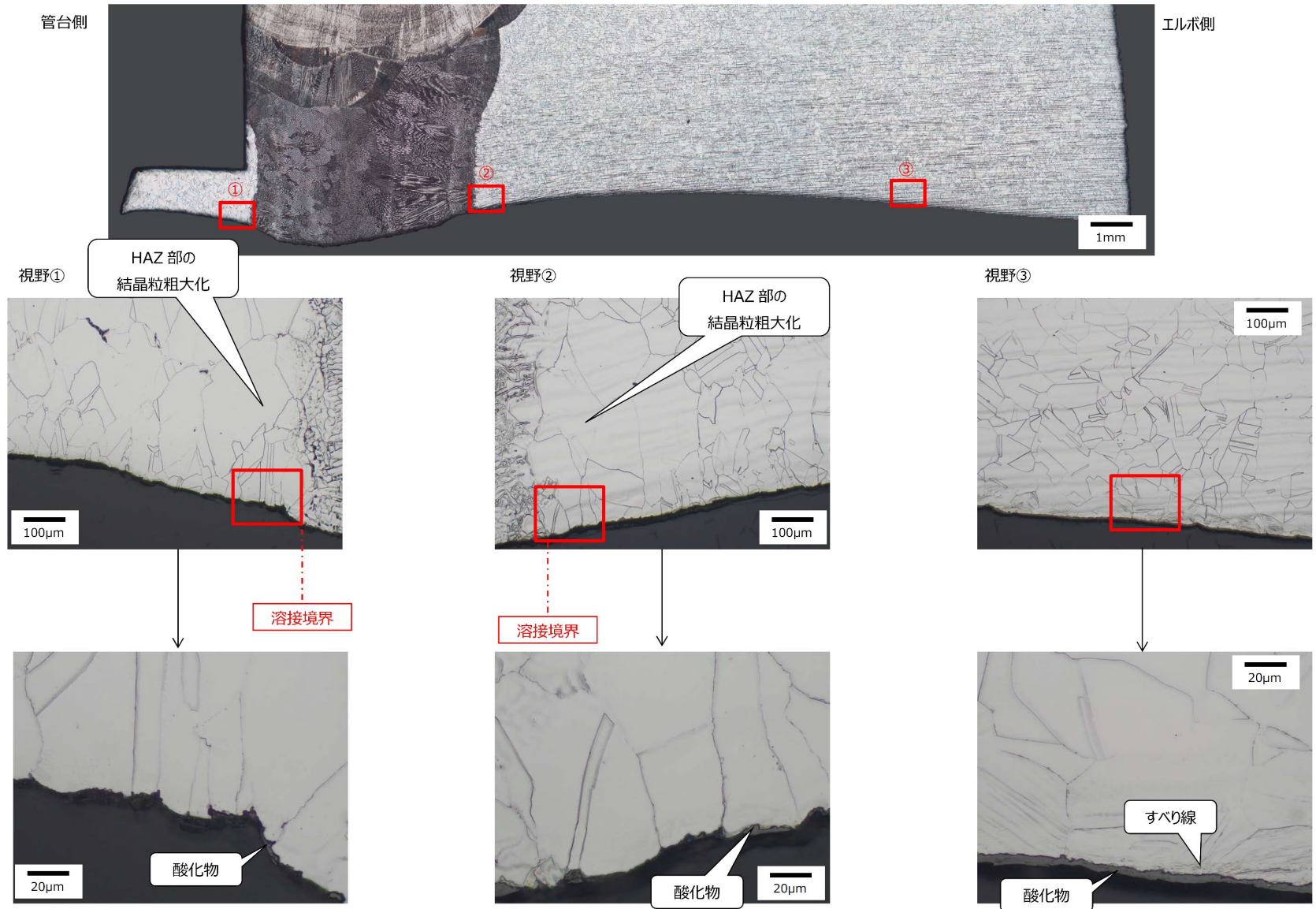


視野③



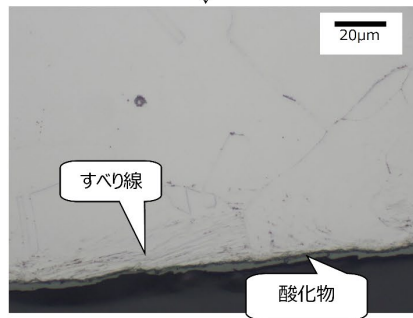
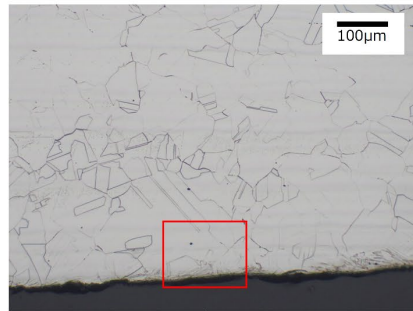
視野④



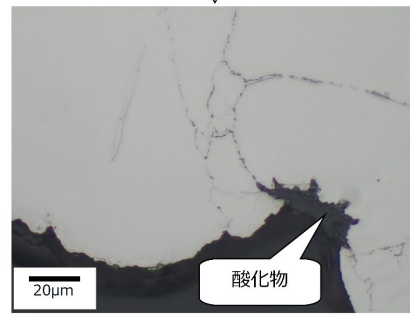
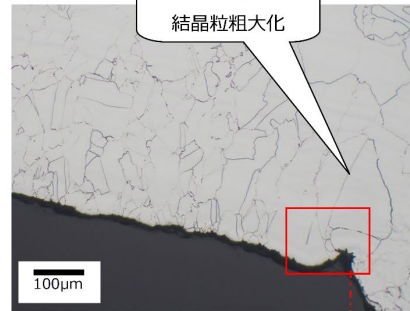




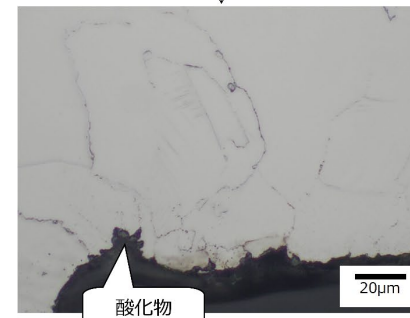
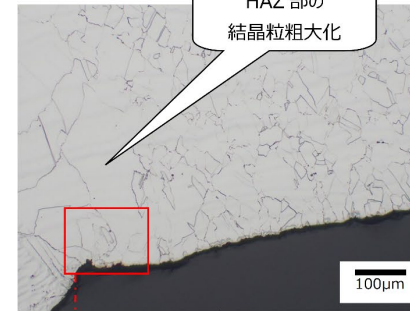
視野①



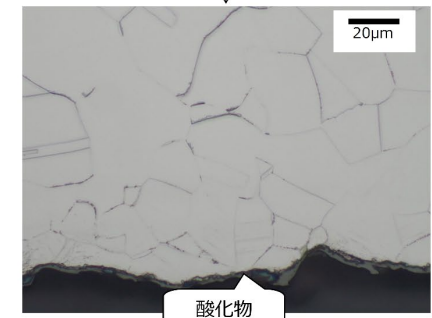
視野②

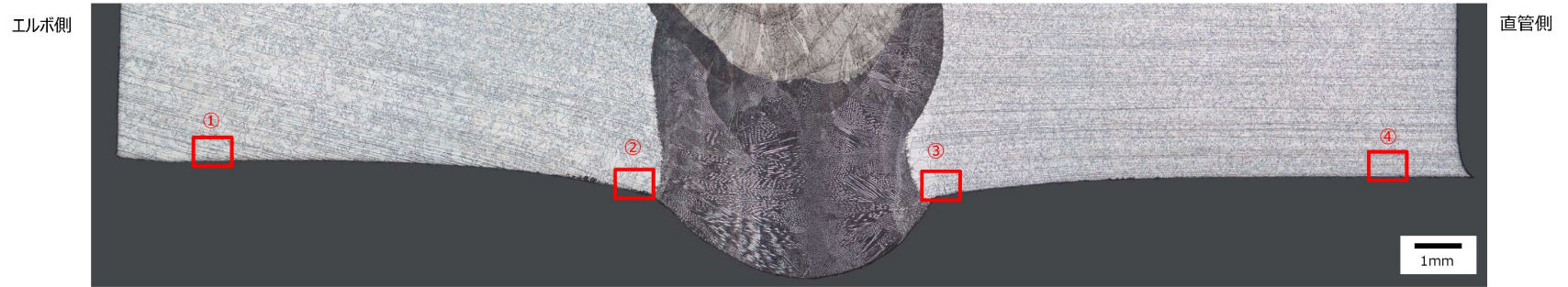


視野③

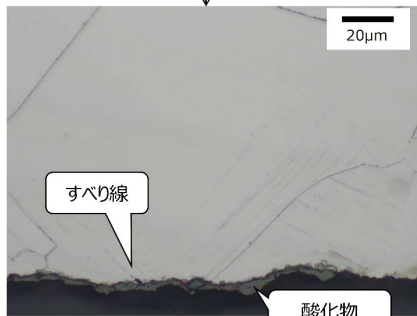
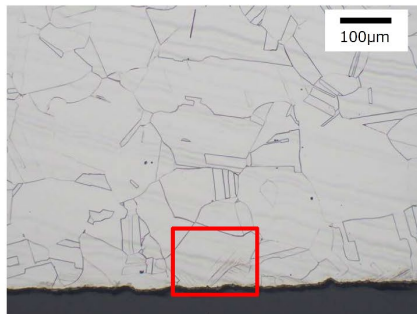


視野④

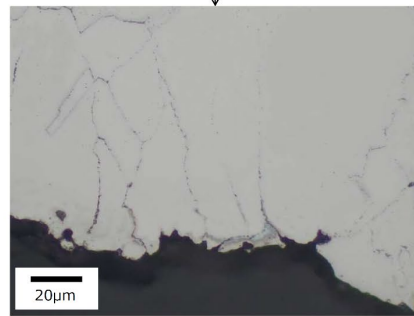
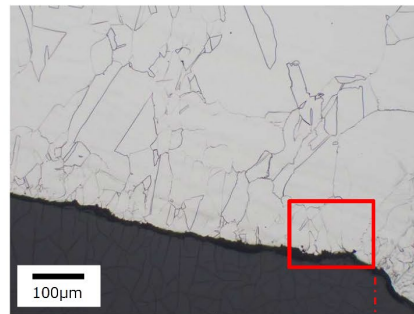




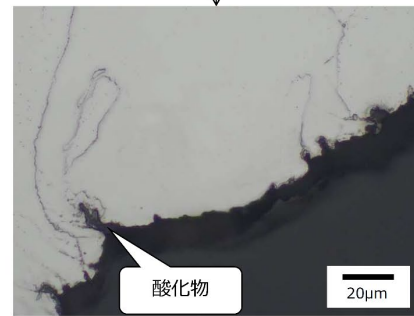
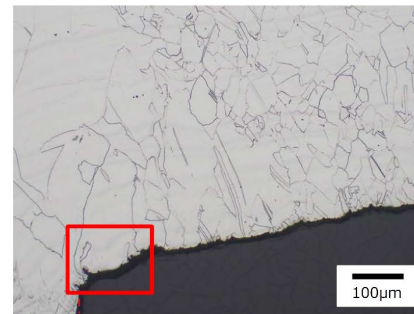
視野①



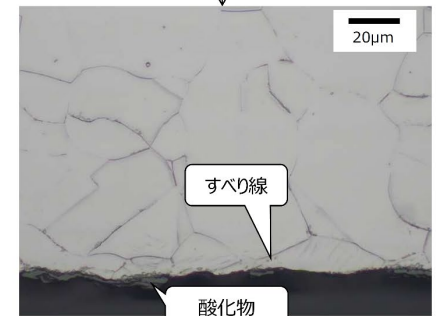
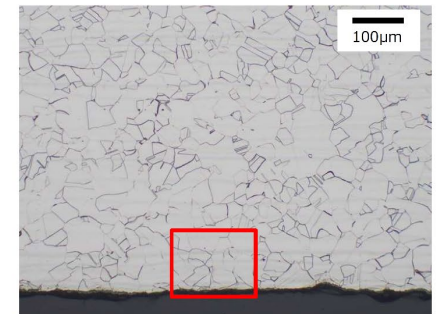
視野②



視野③

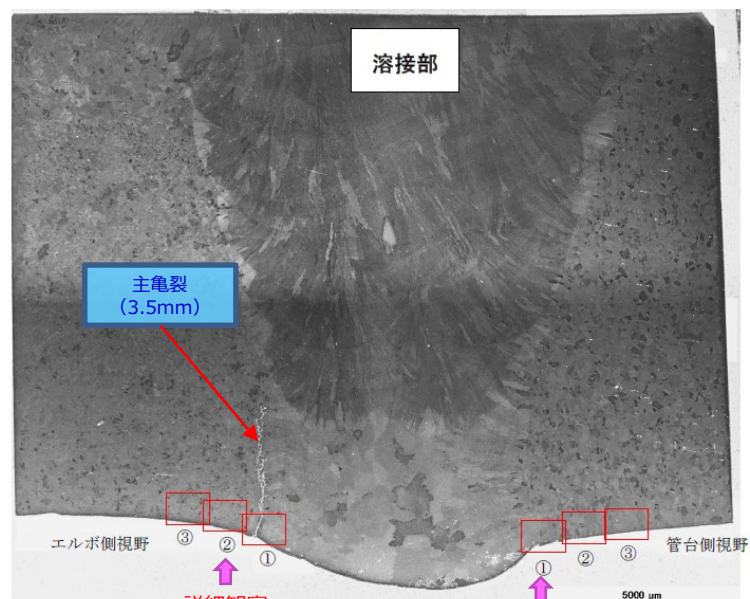


視野④

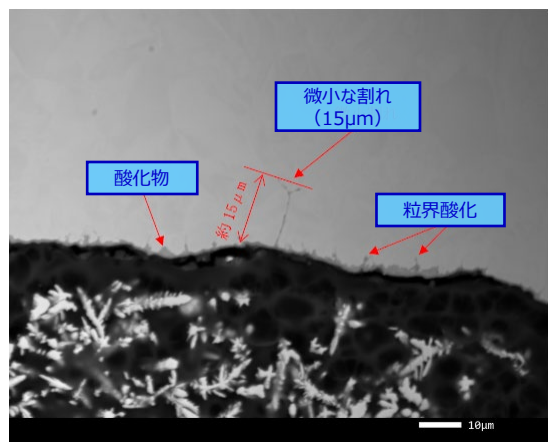


参考3：大飯3号当該部の断面マクロ・ミクロ

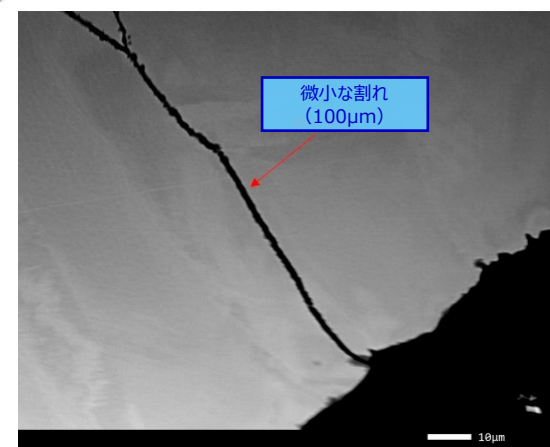
管台-エルボ溶接部0°断面HAZ領域のSEM観察位置



0°断面



エルボ側



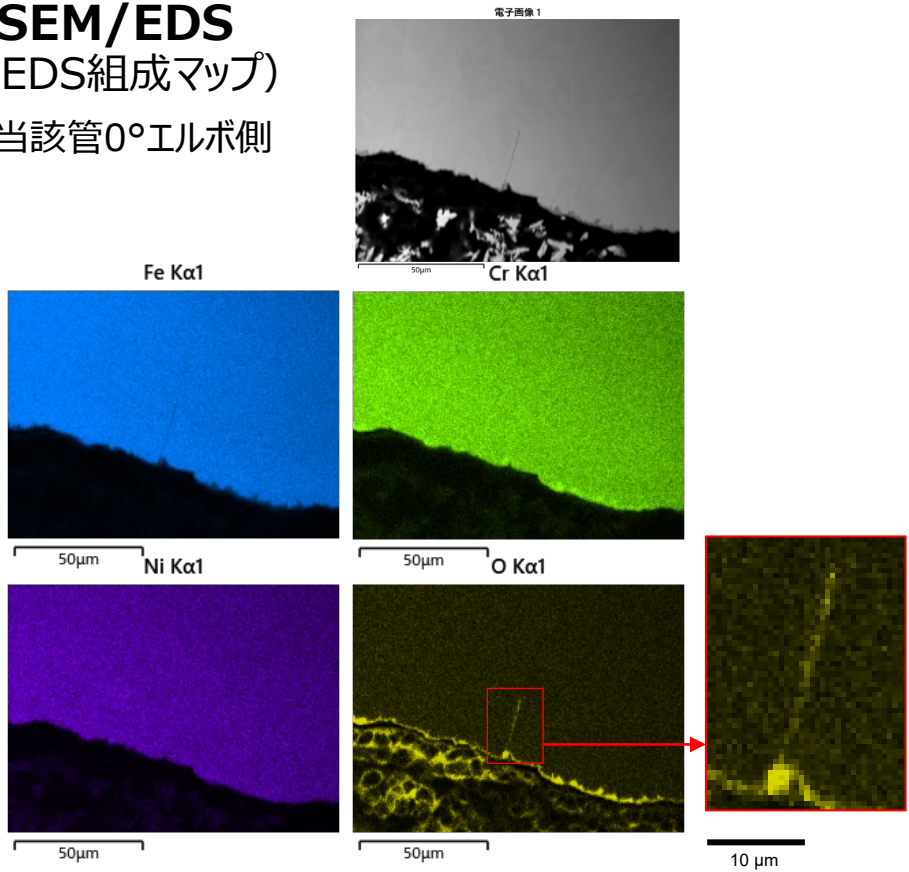
管台側

- ▶ 本断面観察位置では、HAZの内表層において、微小な割れが認められた。
- ▶ 微小な割れの表層周辺では、表層部及び選択的な粒界での酸化挙動が認められた。

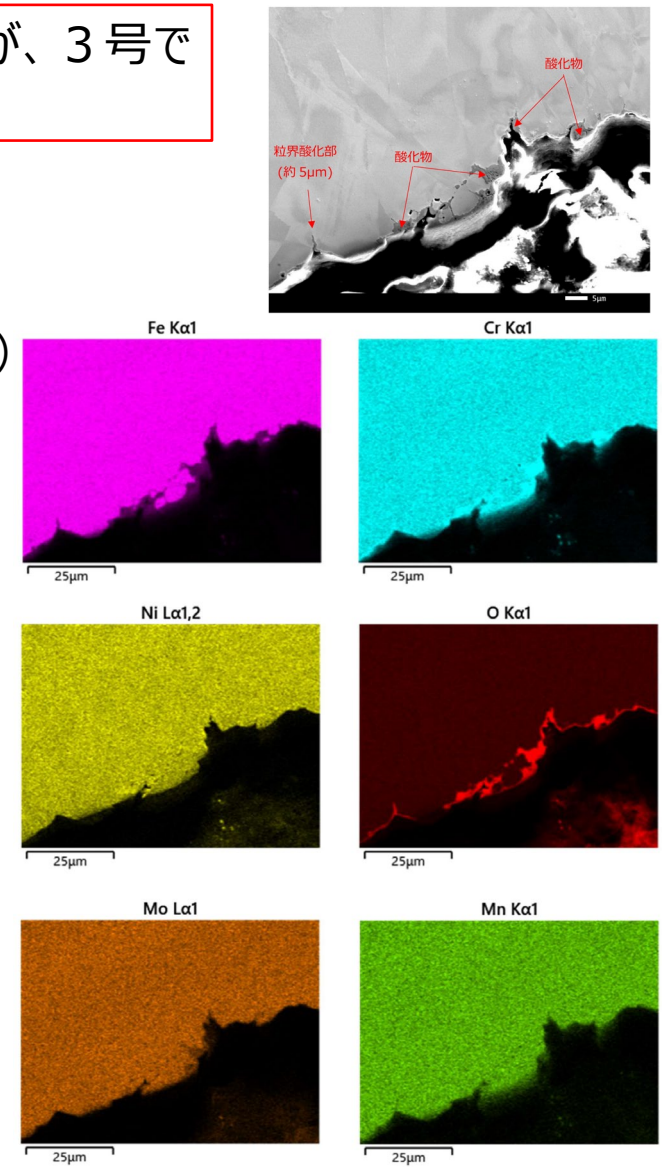
参考4：大飯3号と4号のEDS分析結果比較

■ 大飯4号では凹凸部に粒界酸化部（約5 μ m）が認められるが、3号で認められた微小な割れとは異なる様相を呈している。

大飯3号
 微小な割れ断面
 SEM/EDS
 (EDS組成マップ)
 当該管0°エルボ側

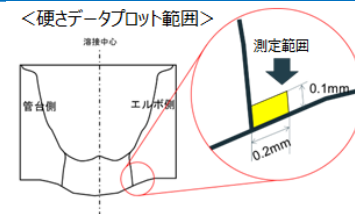


大飯4号
 粒界酸化部
 SEM/EDS
 (EDS組成マップ)
 Dループ FW-4
 0°エルボ側



参考5：大飯3号表層硬さ計測結果

- ミクロ硬さ（HV0.01）からは、エルボ-直管溶接部の0°エルボ側、また、他の断面と比べても当該部の管台-エルボ溶接部0°エルボ側の主亀裂周辺での硬化の傾向が大きい。



配管部位	管台-エルボ溶接部（当該部）								エルボ-直管溶接部							
	Dループ								Dループ							
断面角度	0° 管台	0° エルボ	90° 管台	90° エルボ	160° 管台	160° エルボ	270° 管台	270° エルボ	0° エルボ	0° 直管	90° エルボ	90° 直管	180° エルボ	180° 直管	225° エルボ	225° 直管
溶接方法	TIG+SMAW								TIG+SMAW							
裏波幅 (mm)	8.0		7.0		9.2		7.1		5.8		5.1		8.4		5.9	
最大硬さ (HV0.01)	313	350	239	267	239	237	263	253	266	279	244	239	259	265	234	239
平均硬さ (HV0.01)	288	294	219	236	214	223	230	229	243	239	216	226	235	228	215	220

