

大飯発電所 3号機
加圧器スプレイライン配管溶接部における
事象の発生原因および対策について

関西電力株式会社

2020年12月 日

目次

大飯発電所 3 号機 加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示の対応として、当該配管の破面観察等の分析調査を実施し、事象の発生原因および対策について以下のとおり、報告する。

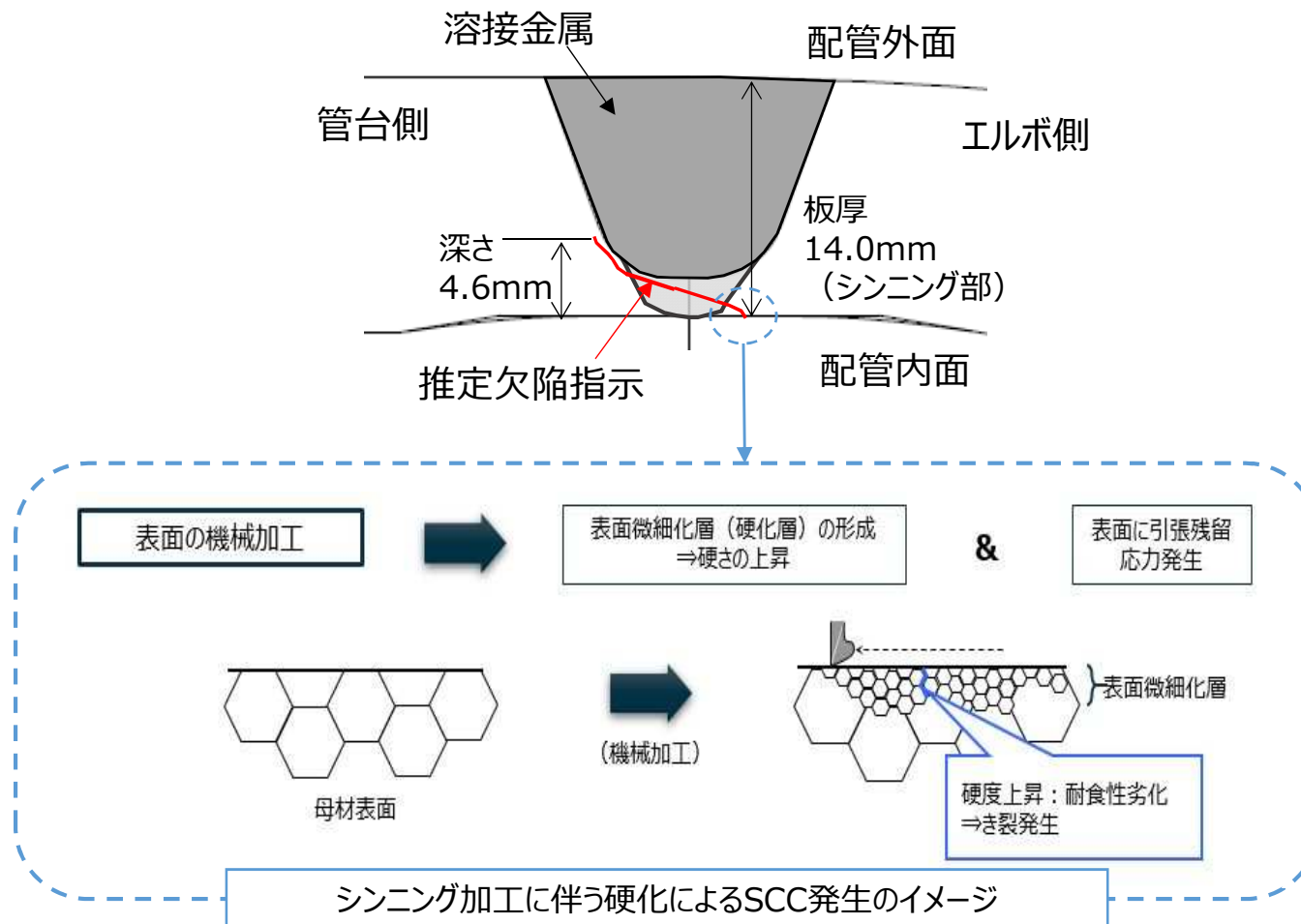
【説明内容】

事象の特定	...	1
硬化の要因および亀裂発生・進展の推定メカニズム	...	2
対策	...	3

分析調査前に推定していたメカニズム

分析調査前においては、以下のメカニズムにて、亀裂が発生・進展に至ったと推定していた。

- シンニング加工による硬化を要因としたSCCと推定。
- 超音波探傷検査における検出限界以下のごく微小な欠陥が存在し、何らかの関与をした可能性も否定できない。



事象の特定

要因の特定について

F T 図に基づき、調査結果を基に当該事象の要因を特定する。

事象	要因	因子	調査項目	調査結果	判定
加圧器 スプレイン 配管 溶接部の傷	機械的疲労	振動による疲労	破面マクロ・ミクロ観察	・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。	×
			断面マクロ・ミクロ観察		
	熱疲労	高サイクル熱疲労	破面マクロ・ミクロ観察	・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。	×
			断面マクロ・ミクロ観察		
		熱過渡による疲労	破面マクロ・ミクロ観察		
			断面マクロ・ミクロ観察		
	SCC	粒界型 SCC	破面マクロ・ミクロ観察	・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350HV、内部で200HV～240HVが認められた。	○
			断面マクロ・ミクロ観察		
			硬さ計測		
			鋭敏化評価		
粒内型 SCC		破面マクロ・ミクロ観察			
		断面マクロ・ミクロ観察			
付着物EDS分析	鋭敏化の兆候（溝状組織）は認められなかった。	×			
溶接不良	溶接不良	PT	・破面観察の結果、ブローホール、スラグ巻き込み、融合不良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。 ・断面観察の結果、溶込不良、高温割れ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。 ・当該部はオーステナイト系ステンレス鋼であり、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のため、低温割れではない。 ・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。 ・断面観察の結果、補修溶接の痕跡は認められなかった。 ・溶接部の観察の結果、ビード幅が広くデンドライトの方向から大入熱で溶接された影響の可能性はある。	△	
		破面マクロ・ミクロ観察			
		断面マクロ・ミクロ観察			
		付着物EDS分析			
		外観観察			

断面マクロ・ミクロ観察に基づく考察

1 - 2

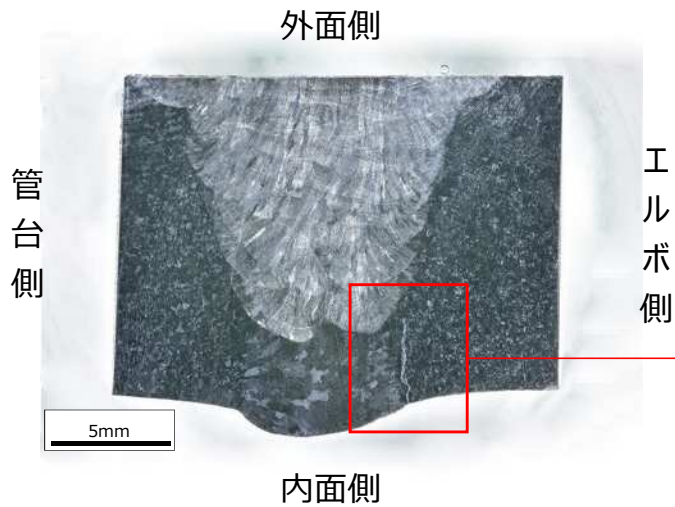


図1：断面マクロ観察

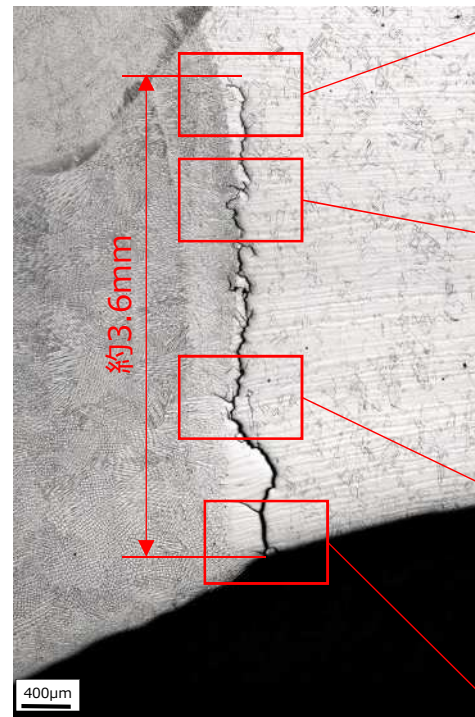
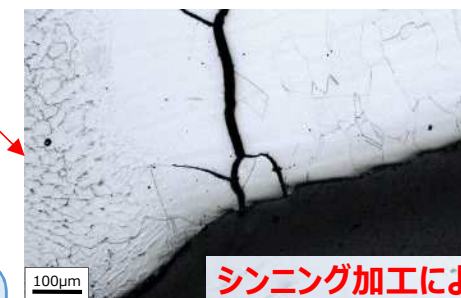
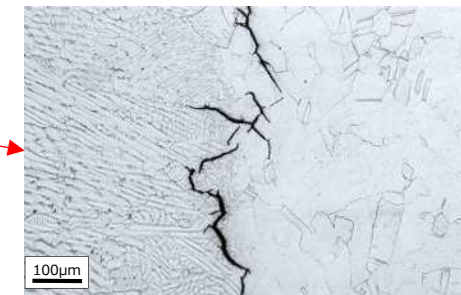
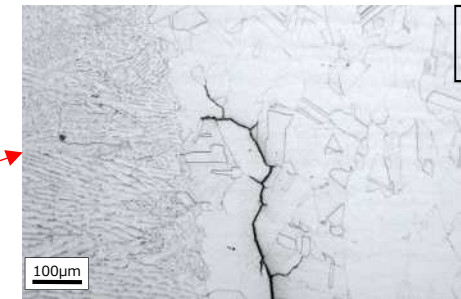


図2：断面ミクロ観察



- 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粒界に沿って進展しており、主亀裂の進展経路は母材部の境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)
- 割れの発生表面にはシンニング加工による微細化層は確認できなかった。

破面マクロ・ミクロ観察結果

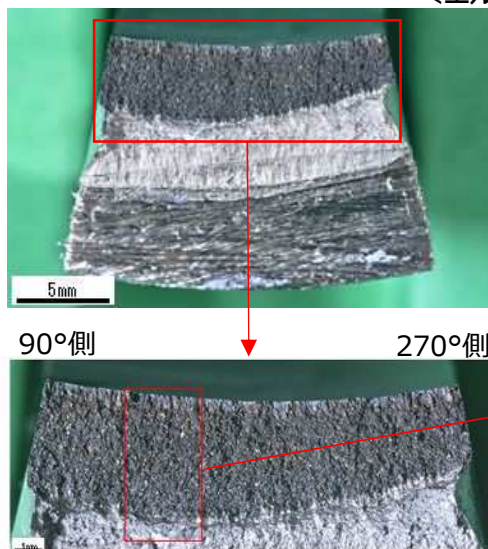


図1：破面マクロ観察

<エルボ側>

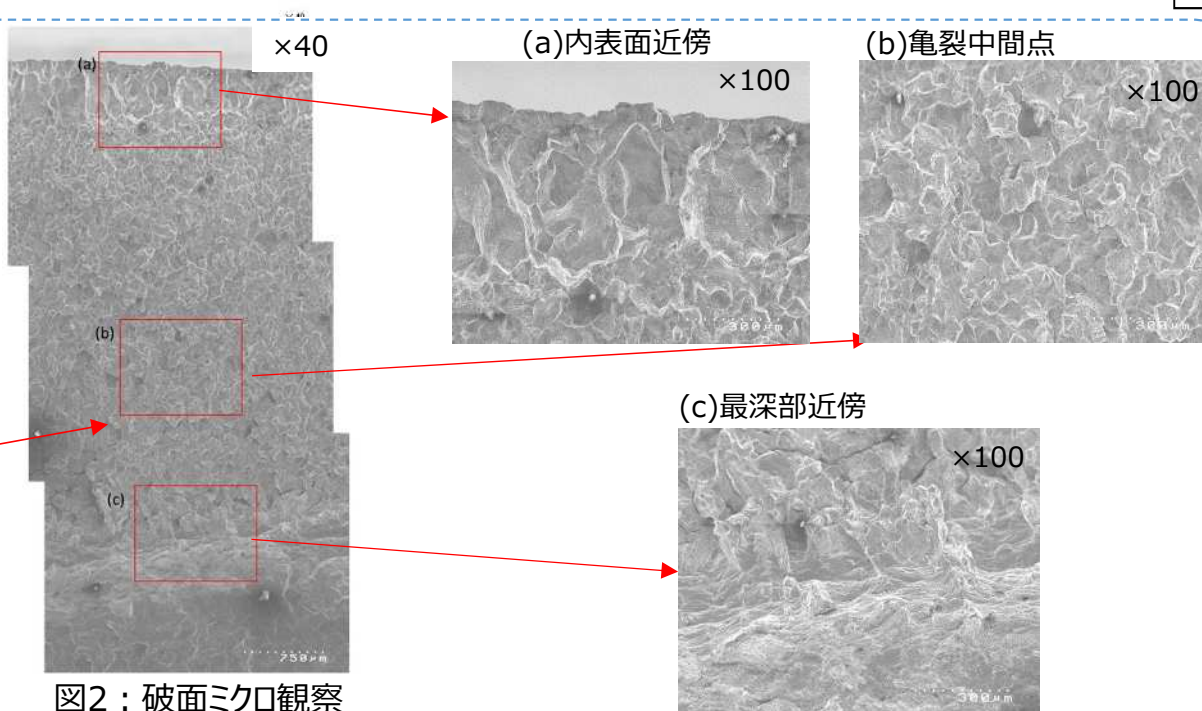


図2：破面ミクロ観察

付着物EDS分析結果

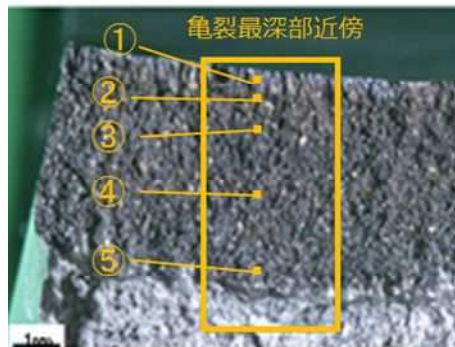


図3：付着物EDS分析位置

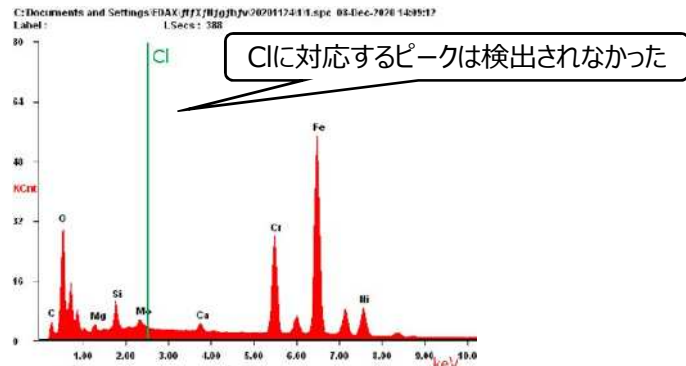


図4：付着物EDS分析結果（例：分析位置①）

- 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**がよく見られる、**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。

鋭敏化に対する考察

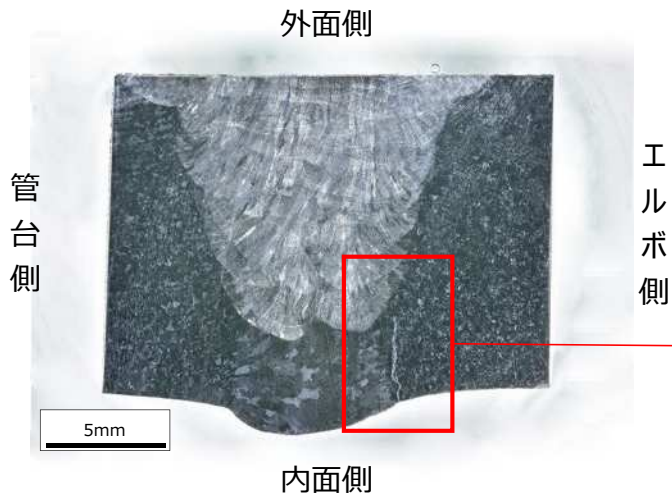


図1：断面マクロ観察

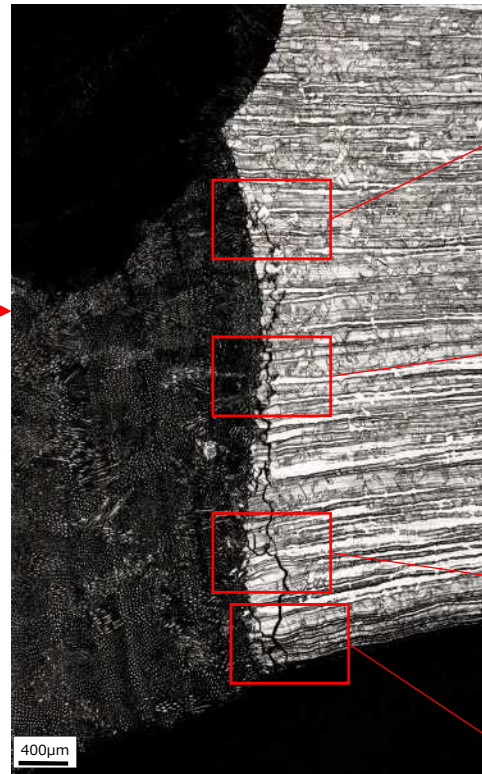
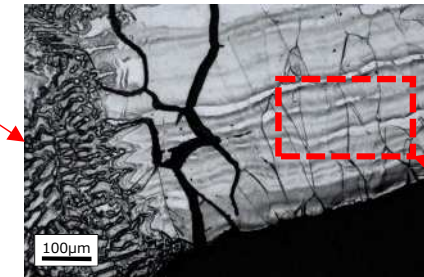
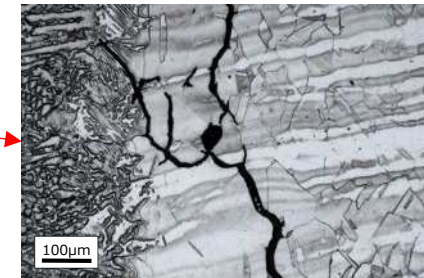
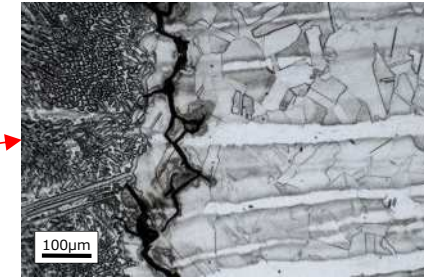
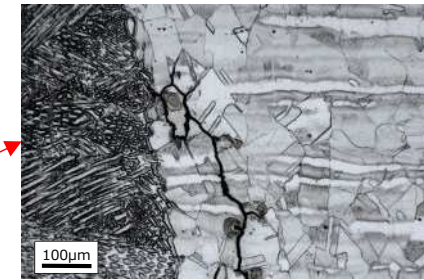
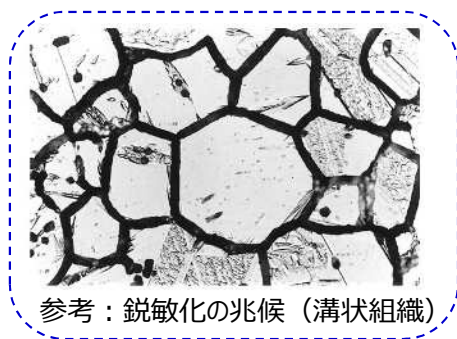


図2：断面ミクロ観察
(シュウ酸エッチング写真)



段状組織を呈している



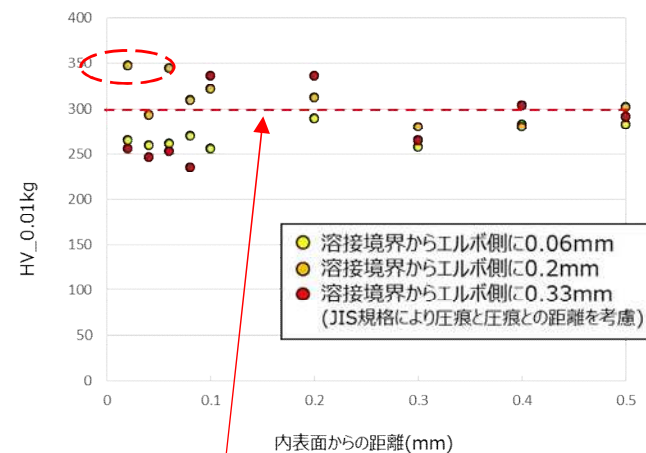
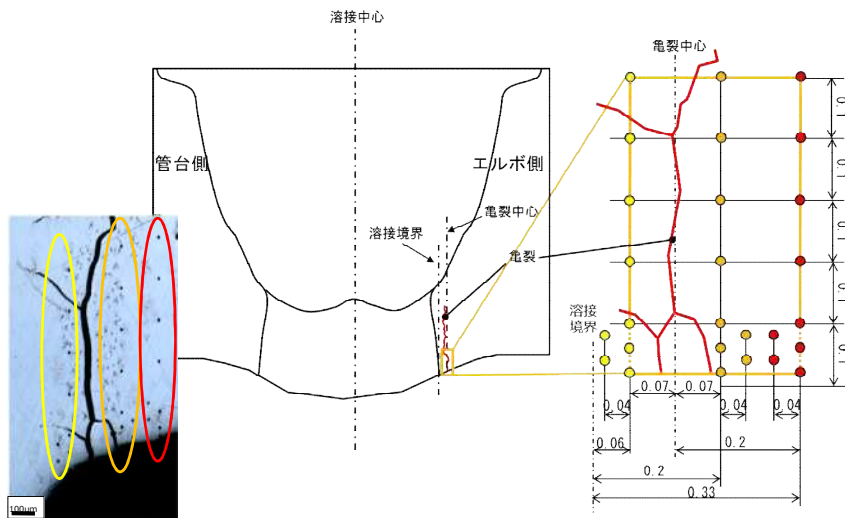
参考：鋭敏化の兆候（溝状組織）

➤ O₂SCCの特徴である鋭敏化の兆候（溝状組織）は認められず、金属組織は段状組織を呈していた。

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)

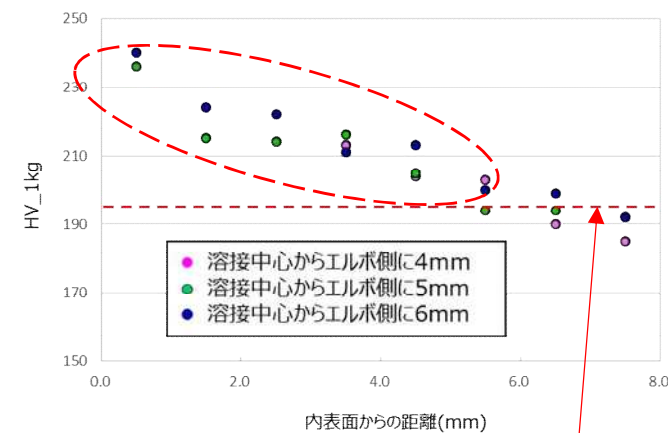
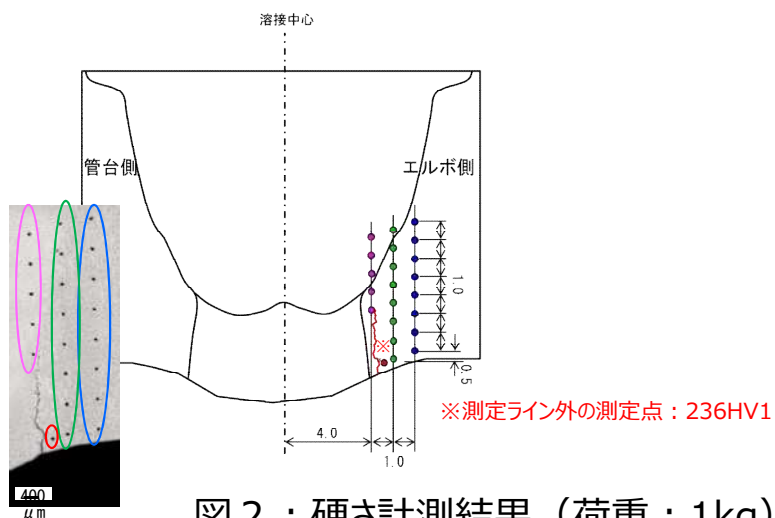


硬さによるSCC発生の知見のある値 (300HV5)

図1：硬さ計測結果 (荷重：10g)

<内部>

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



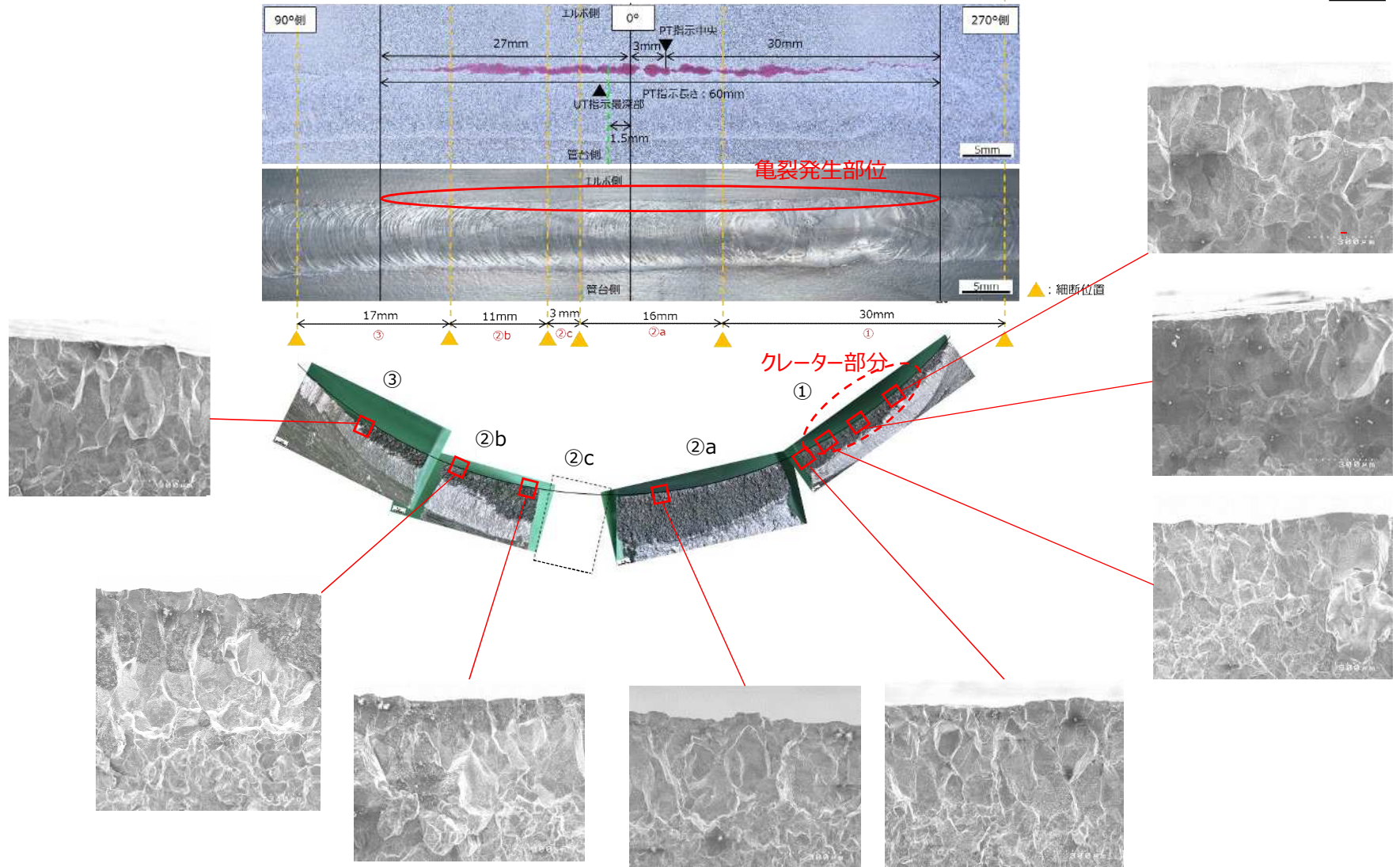
硬さによるSCC進展の知見のある値 (195HV1)

※測定ライン外の測定点：236HV1

図2：硬さ計測結果 (荷重：1kg)

- 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。

亀裂の起点に関する考察



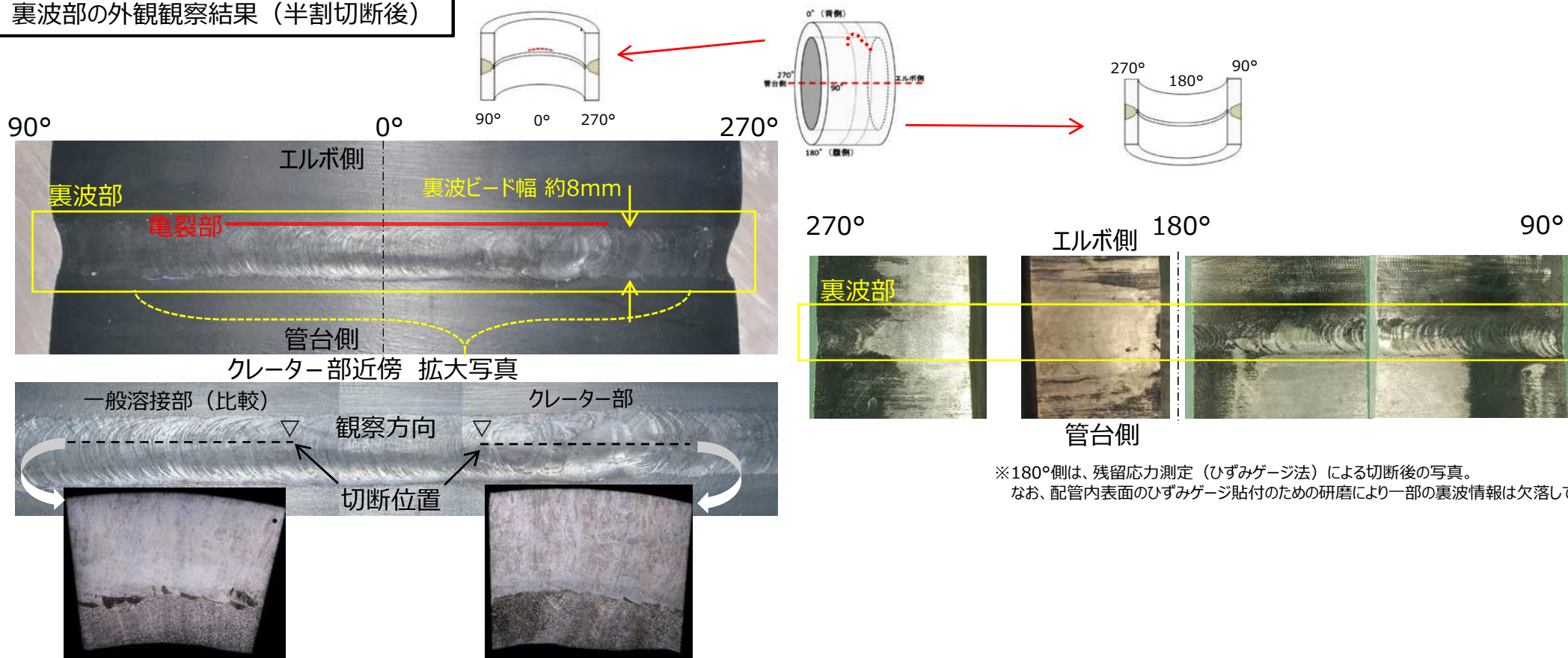
図：内面PTおよび破面マクロ・ミクロ観察

- 破面マクロ・ミクロ観察の結果、亀裂の起点に関連するような情報は破面からは確認できなかった。
- 亀裂の形状および最深部の位置を考慮すると亀裂の中心付近が起点と考えられる。

溶接部に関する考察 (1/3)

- 亀裂が溶接境界極近傍の母材から発生・進展していることから、溶接部について「裏波部の外観、周方向断面観察」、「亀裂破面・断面観察」、「当該管とサンプル管との断面比較」を行い、詳しく考察を行った。
- 「裏波部の外観、周方向断面観察」の結果、裏波部から認められる溶接異常の有無に関する考察を以下に示す。

裏波部の外観観察結果 (半割切断後)

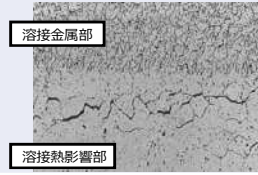



※180°側は、残留応力測定 (ひずみゲージ法) による切断後の写真。
 なお、配管内表面のひずみゲージ貼付のための研磨により一部の裏波情報は欠落している。

裏波部の周方向断面観察

- **裏波ビード幅が約8mmと幅広であった。**ビード幅は360°全周にわたり同様であり、補修溶接をした場合に見られるようなビードの乱れは認められなかった。
- 溶接終端部と思われる**クレーターが2つ近接して存在**しており、周方向断面を確認した結果、**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。**2つのクレーターはビード長さが不足していた分を追加で溶接したものと推定している。
- クレーター部は割れ中央部 (0°+3mm) から離れたところ (0°+10~20mm) に位置しており、また溶接欠陥も確認されておらず、**クレーターによる亀裂発生への影響は確認できなかった。**

- 亀裂破面・断面観察の結果、溶接欠陥の有無に関する考察を以下に示す。

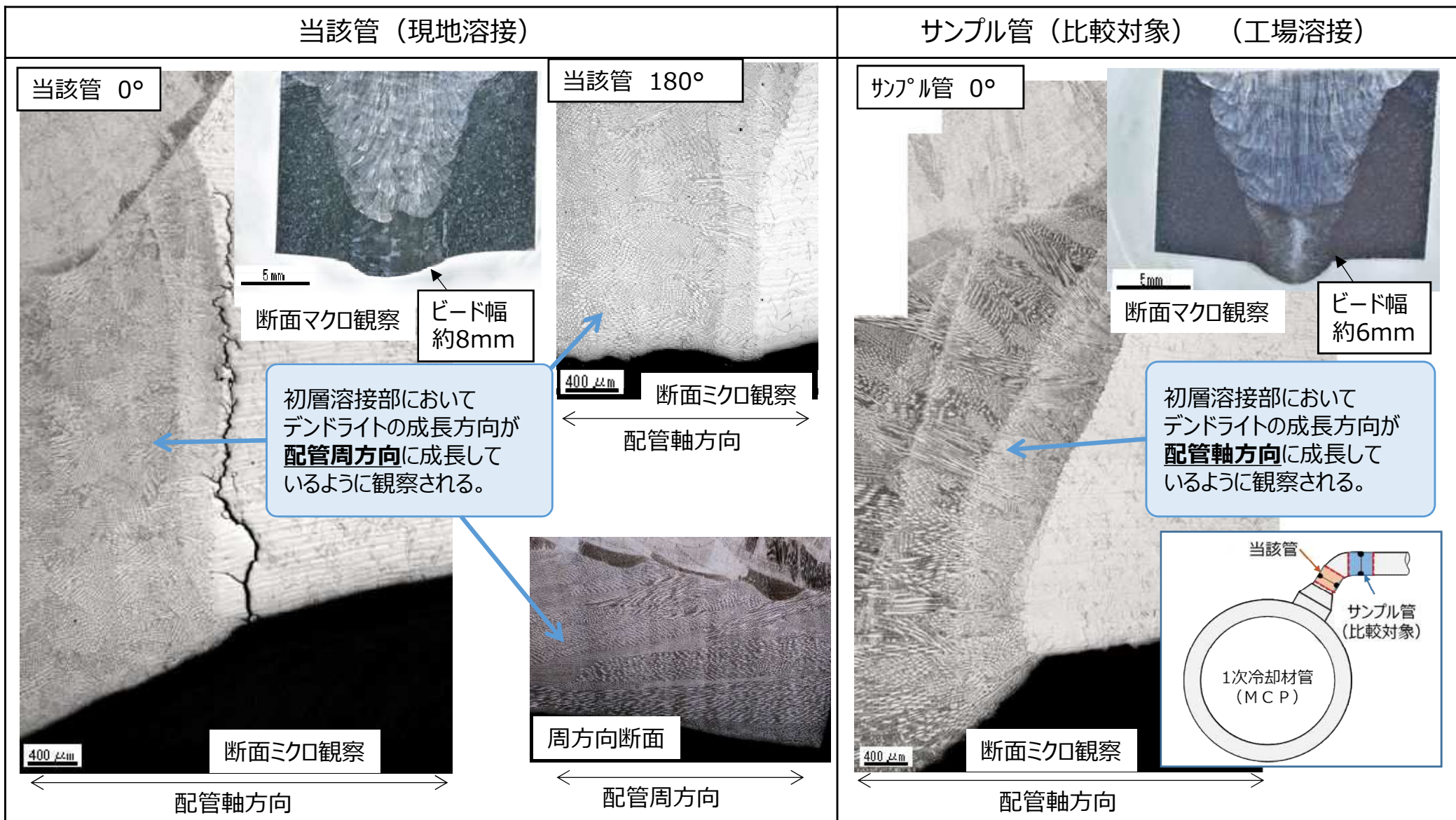
溶接欠陥	定義 (JIS Z 3001-4)	発生部位			発生事象	溶接欠陥の例	調査結果	
		溶金	HAZ	母材				
割れ	高温割れ	溶接部の凝固温度範囲またはその直下のような高温で発生する割れ	○	○	—	ビード割れ、凝固割れ、液化割れ	 *1	HAZに発生する高温割れとして、液化割れはあるが、粒界が丸みを帯びた破面となるため、断面観察の結果、高温割れは認められなかった。また、付着物EDS分析の結果、高温割れの原因となるP (リン) は認められなかった。
	低温割れ	溶接後、溶接部の温度が常温付近に低下してから発生する割れ	○	○	—	ルート割れ、ビード下割れ、止端割れ	 *2	オ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	○	○	—	HAZに発生する割れ	 *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。
空洞	ガスを巻き込むことによって生ずる空洞	○	—	—	ブローホール、ワームホール、ピット	 *4	断面観察の結果、ブローホール等の空洞は認められなかった。	
介在物	溶接金属に巻き込まれた異物	○	—	—	スラグ巻き込み、フラックス巻き込み	 *4	断面観察の結果、スラグ巻き込み等の介在物は認められなかった。	
融合不良	溶接境界面が互いに十分に溶け合っていない状態	○	—	—	溶接境界面が互いに溶け合っていない	 *5	断面観察の結果、融合不良は認められなかった。	
溶込不良	設計溶込みに比べ実溶込みが不足している状態	—	—	○	ルート面などが溶融されずに残っている	 *2	断面観察の結果、溶込不良は認められなかった。	

➤ 溶接欠陥について詳細な調査を実施した結果、溶接欠陥の痕跡は認められなかった。

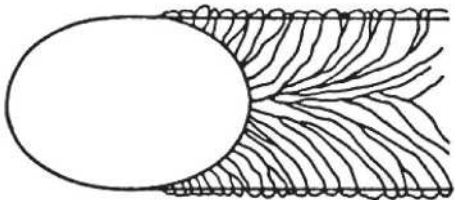
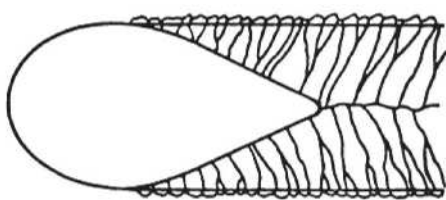
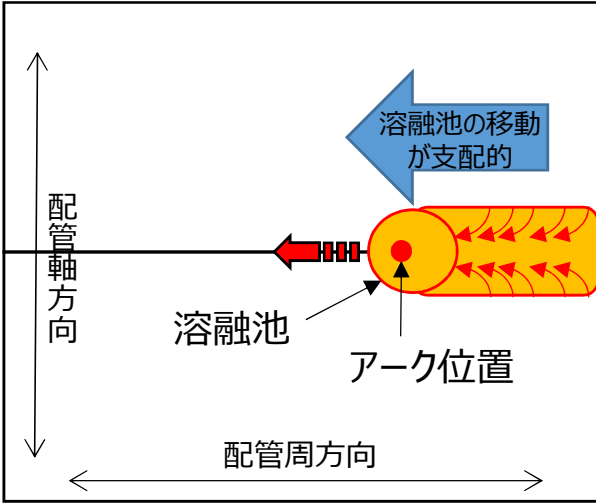
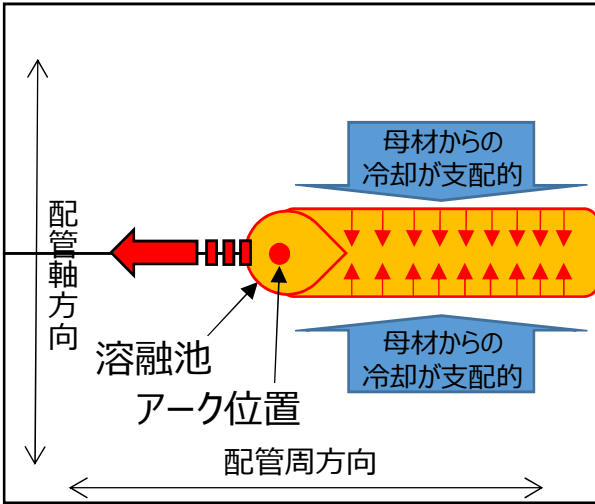
出典 *1: (社)日本溶接協会編, 溶接技術Q&A (2004)
 *2: 星研究所合同会社HP
 *3: (社)溶接学会溶接冶金研究委員会編, 溶接部組織写真集 (1982)
 *4: 神鋼溶接サービス株式会社HP
 *5: 佐藤邦彦編, 溶接強度ハンドブック, 第1版

溶接部に関する考察 (3/3)

- 当該管とサンプル管との断面比較の結果、ビード幅およびデンドライト成長方向に関する考察を以下に示す。



- 当該管はサンプル管と比べ、約8mmとビード幅が広がった。
- 当該管とサンプル管との溶接金属部の組織の様相に違いが認められる。(当該管ではデンドライトが周方向に、サンプル管ではデンドライトが軸方向に成長しているように観察される。)

	当該管	サンプル管 (比較対象)
文献		
イメージ図	 <p style="text-align: center;">← デンドライト成長 (凝固) 方向</p>	 <p style="text-align: center;">← デンドライト成長 (凝固) 方向</p>
解説	<p>溶接速度が遅い場合、溶融池は母材を溶融しながらゆっくりと通りすぎるため、溶融池の移動に追従して溶融金属が流れる方向の冷却 (凝固) が支配的となることから、<u>母材側から溶融池中心のアーク位置に向かう方向 (配管周方向) にデンドライトが成長する。</u></p>	<p>溶接速度が速い場合、溶融池は母材を溶融しながらすくに通るため、溶融池通過後は母材からの冷却 (凝固) が支配的となることから、<u>母材側から溶接金属中心に向かう方向 (配管軸方向) にデンドライトが成長する。</u></p>

※ 出典 : J.H. Devletion, W.E Wood: Metal Handbook, 9th ed.Vol.6 ASM, P.29, (1983).

➤ 当該管は、裏波溶接幅やデンドライト成長方向から、溶接速度が遅く、**大入熱で溶接**されたものと推察。

観察結果に基づく事実の整理・まとめ

＜亀裂の位置、形状＞

- 亀裂は、溶接境界極近傍の母材部を起点として粒界に沿って進展していた。
- 亀裂の起点に関連するような情報は破面からは確認できなかった。

＜破面、断面等の性状＞

- 破面ミクロ観察から、破面全体にわたってSCC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。
- Cl-SCCの特徴である粒内割れは破面観察から殆ど認められず、Cl等の有害な元素についても付着物EDS分析から認められなかった。
- O₂SCCの特徴である鋭敏化の兆候（溝状組織）は認められず、金属組織は段状組織を呈していた。
- 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。
- 亀裂発生表面にシンニング加工による硬化層は認められなかった。
- 亀裂の断面からは、溶接欠陥や補修溶接の痕跡は認められなかった。
- 溶接部の観察結果から、クレーター部含め直接的な溶接欠陥・補修溶接の痕跡は認められなかったが大入熱で溶接された可能性を示唆していた。

- 当該部の亀裂は、SCCにより発生、進展したものと判断する。
- SCCの発生、進展に材料の硬化が寄与したものと推察する。

硬化の要因および 亀裂発生・進展の推定メカニズム

表層の硬化について

<原因の推定>

一般的に、表層が固くなる原因としては以下のことが知られている。

➤ シンニング加工による硬化

シンニング加工により表面を機械加工した場合、下図の通り、表面組織が微細化した層を形成し、表面が硬化する。

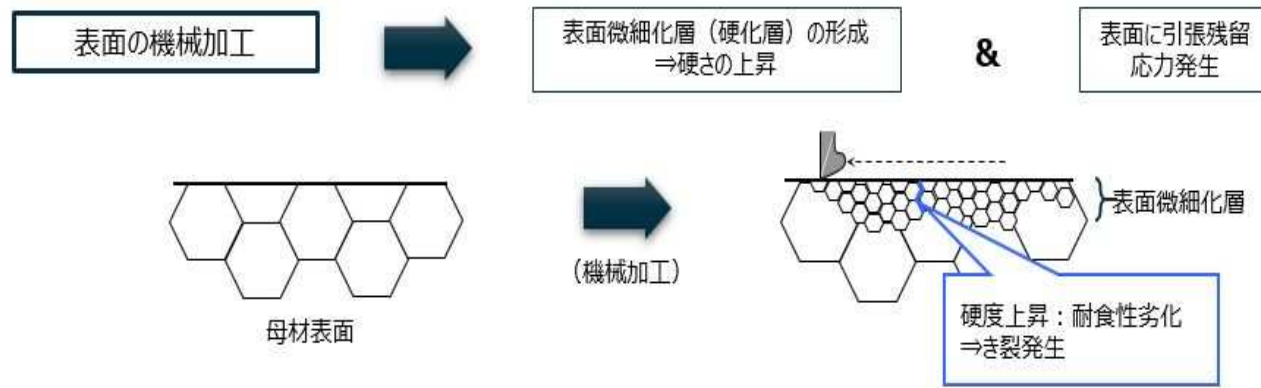


図 1：シンニング加工による硬化メカニズムのイメージ

➤ 溶接時の入熱による硬化

溶接により入熱が加えられた場合、溶接の凝固収縮に伴い、溶接境界近傍に塑性ひずみが生じ、硬化する。

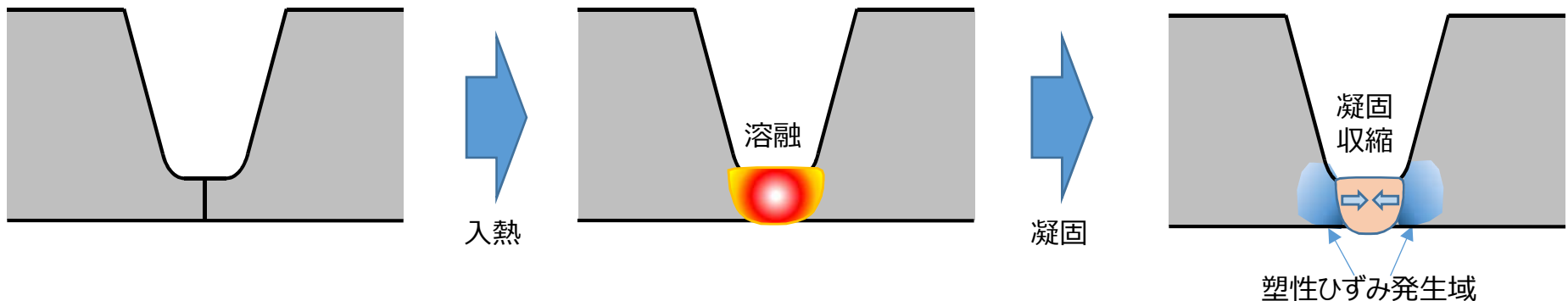
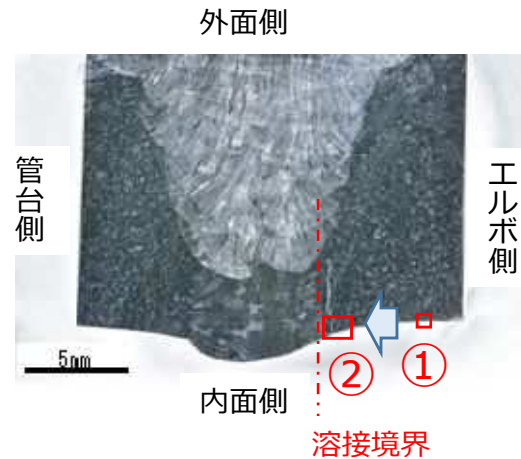


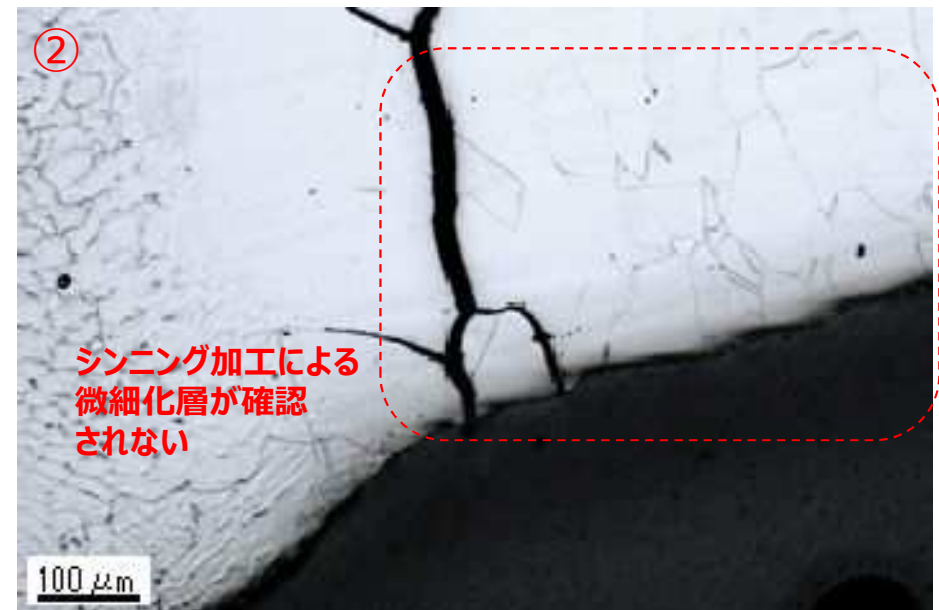
図 2：溶接時の入熱による硬化メカニズムのイメージ

シンニング加工による硬化について

割れが認められた溶接部近傍の表層②では、シンニング部①と同様の350HVを超える硬さが認められるものの、シンニング加工による微細化層は確認されないため、②における硬化はシンニング加工以外の要因によるものと考えられる。



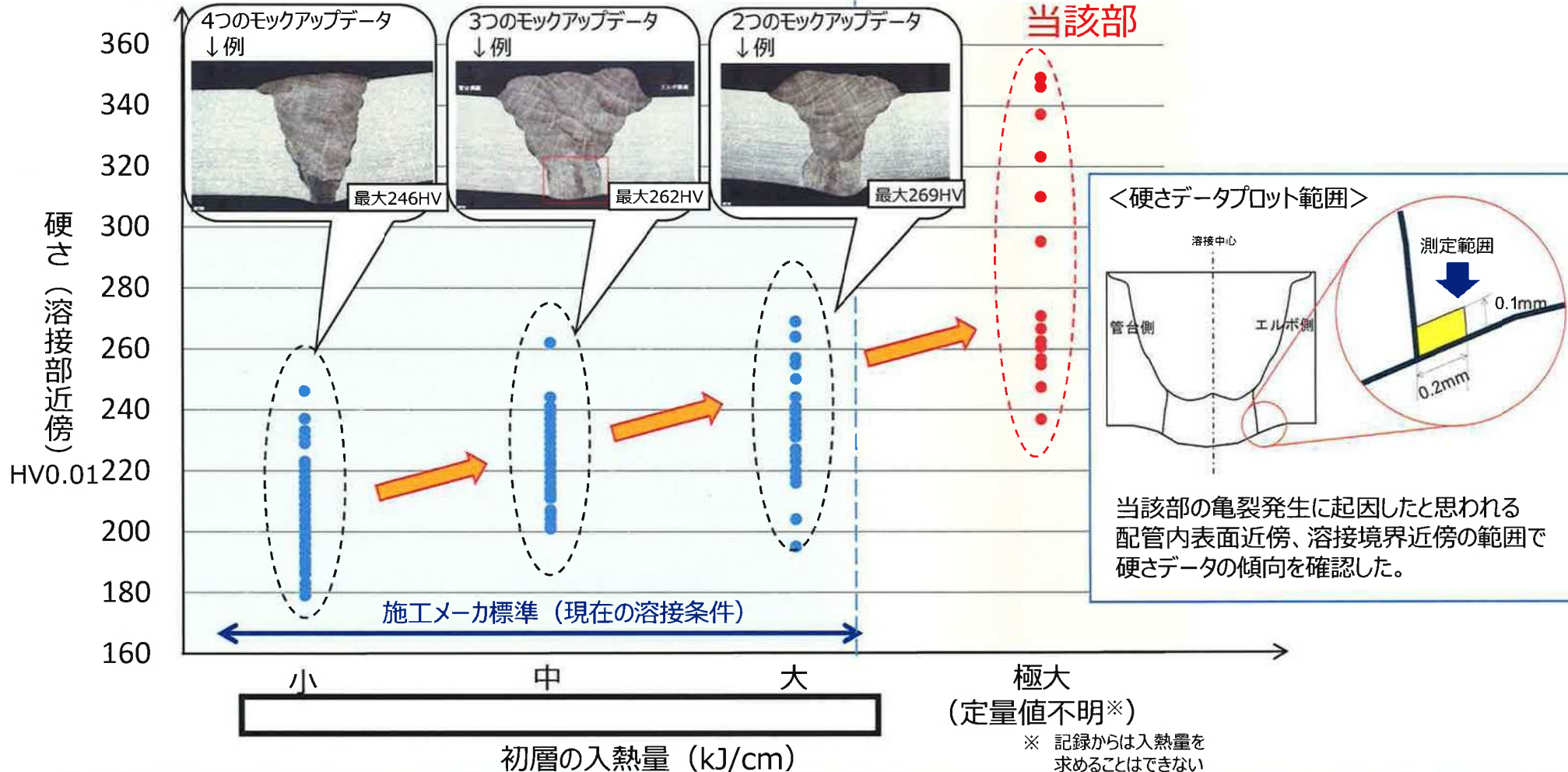
溶接
入熱の
影響



図：当該部の溶接境界近傍とシンニング部の断面ミクロ比較

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を調査した。



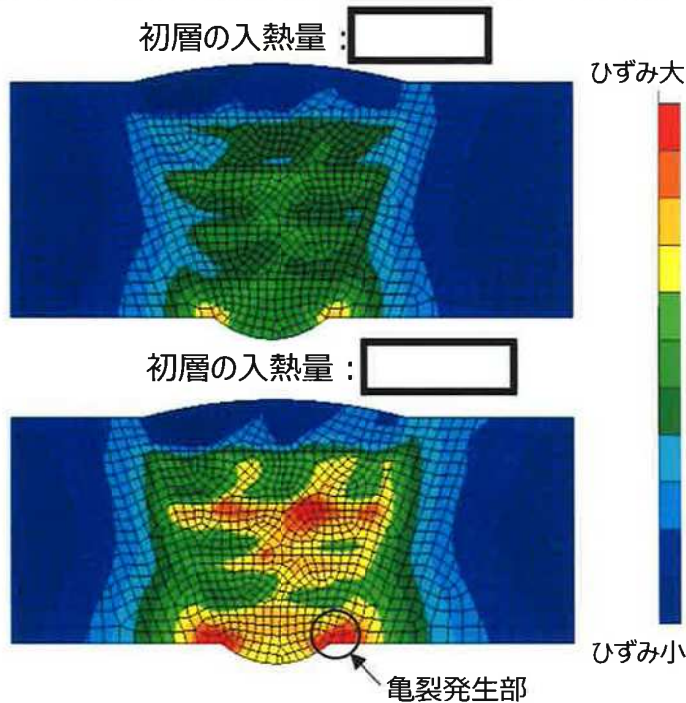
- モックアップ調査の結果、**入熱量が大きくなるにつれ、硬くなる傾向が認められた。**
- このことから**当該部においては、極めて大きな入熱量が付与されたものと推察される。**

□ : 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。

- モックアップ調査で確認された入熱量と硬さの関係について、解析および文献調査により確認を行った。

解析

FEM解析による塑性ひずみへの入熱量の影響

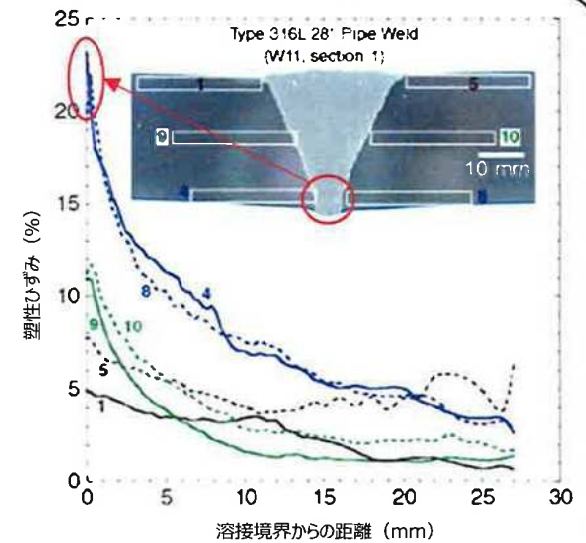


図：4B管(TIG+SMAW) 溶接模擬 FEM解析による塑性ひずみカウンター図

- 入熱が大きくなれば、塑性ひずみが増加する。
- 亀裂発生部近傍で最大塑性ひずみが存在する。

文献調査

溶接近傍のひずみ分布



- 内面近傍のひずみは計算値同様に増加している。

出典： P. Andresen, *Corrosion* 69.10 (2013).

硬さと塑性ひずみの関係

- 硬さと塑性ひずみには相関がある。

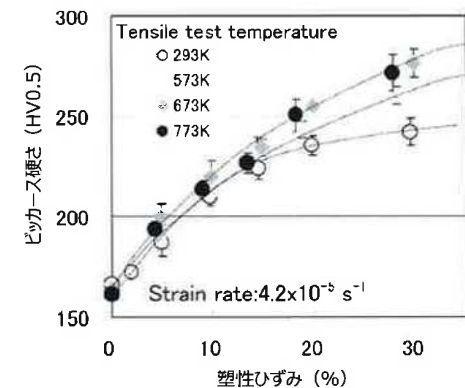


Fig. 4 Relationship between micro-Vickers hardness and tensile strain at temperatures of 293, 573, 673 and 773 K.

出典：加古ら, 日本金属学会誌 72[3], (2008).

- 解析および文献調査においても、モックアップ調査と同様に、入熱量が大きいほど硬さが上昇する傾向が示されていることを確認した。

： 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。

当該管の施工当時との比較による入熱量に係る考察

モックアップ調査の結果、当該管の溶接施工時に極めて大きな入熱が加わった可能性が確認されたことから、当該管の施工当時と現在の溶接条件等を比較し考察を行った。

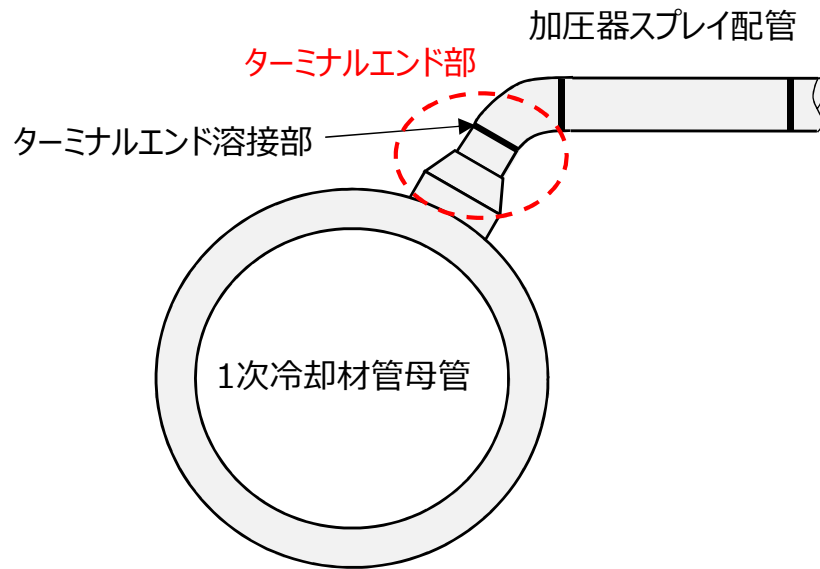
項目	施工当時の記録 (平成2年4月時点)	現在の溶接条件 (令和2年11月時点)		当時と現在との差異に関する考察
		現地	工場	
施工場所	現地	現地	工場	工場の場合は特に溶接姿勢の制限がないが、 現地の場合は狭隘や機器配置により溶接姿勢の制限があり比較的施工性が悪くなる。
溶接方法	初層TIG溶接 + 被覆アーク溶接	全層TIG溶接が主流		作業安全・労働安全のため、2006年頃から、施工メーカーでは火の粉やヒュームが少ない全層TIG溶接が主流となっている。
体制	2名	1名または2名		技術伝承の観点で、 熟練度の高い溶接士（経験年数約20年）と低い溶接士（経験年数3年）の2名でのペアリングでの体制 としていた。
電流値	<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">TIG溶接</div> <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">被覆アーク溶接</div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; text-align: center;">TIG溶接</div>		当該管の電流値の記録（実績）は計画値の範囲内であり、特異性は認められない。
溶接速度	記録項目なし	記録項目なし		溶接速度は記録がないものの、 熟練度が低い溶接士が実施した場合、丁寧に慎重に溶接することにより、溶接速度が遅くなる可能性 がある。
力量	適切な有資格者による施工	適切な有資格者による施工		当時も現在も溶接技能の認証試験に変更はない。

- 当該部は30年以上前の溶接であり、上記の記録、実機の観察結果からの推察とはなるが、現地溶接であり、溶接姿勢に制限があったことに加え、2名で実施していたことから技術指導を受けた溶接で、**丁寧かつ慎重に溶接を行ったことから、溶接速度が遅くなり入熱が大きくなった可能性**があると考察する。

□：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。

当該部における亀裂発生・進展への応力の影響について

- 今回の事象が発生した部位はターミナルエンド部であった。
- ターミナルエンドは一般的に比較的高い応力が生じる可能性があることから、ISIにおける定点としても優先的に選定している。



【JEAG4613-1998 原子力発電所配管破損防護設計技術指針より抜粋】

・ターミナルエンドとは、機器との配管接続部、配管のアンカー点、またはアンカー点相当の配管分岐部、及びそれ等に準じる点で配管系の可撓性を拘束または制限するような箇所であり、一般に配管系の中で不連続部性により、より比較的高い応力が生じる可能性があることから、原則として破損を想定する。

【発電用原子力設備規格 維持規格2012年版（JSME S NA1-2012）より抜粋】

- ・管の同種金属溶接継手は、溶接継手数の25%とする。試験は、以下のよう
に配分しなければならない。
 - a. 容器と各管の溶接継手またはその他の機器と各管の溶接継手を優先して選定しなければならない。
 - b. a.項で選定した溶接継手数が25%に満たない場合は、構造不連続部を優先して選定し・・・
- ・構造不連続部は、容器の管台、弁、ポンプケーシング、枝管等と管との溶接継手および管溶接継手(エルボ、ティ、レジューサ、フランジ等)とする

- 当該部は、ターミナルエンドであったことで比較的高い応力が生じていたものと考察する。

硬化の要因と亀裂発生・進展の推定メカニズム まとめ

○ 硬化の要因

<シンニング加工の影響>

- 当該の亀裂発生部の表層では、シンニング加工による微細化層は認められず、亀裂近傍での硬化はシンニング加工以外の要因によるものと考えられる。

<溶接の影響>

- 当該管の亀裂発生部近傍の溶接金属は、サンプル管と比較して、裏波のビード幅が広く、デンドライトの様相から異なっていることから、溶接速度が遅く、極めて大きな入熱で溶接されたものと推察する。
- 当該部は現地溶接であり施工性が悪く、熟練度が低い溶接士により丁寧・慎重に溶接し入熱量が大きくなったものと考察する。

<入熱量と硬さの関係>

- 入熱量と硬さの関係をモックアップ調査で確認した所、入熱量が大きくなるにつれ、硬くなる傾向が確認された。
- FEM解析および文献調査においても、同様の傾向が確認された。

○ 亀裂発生・進展の推定メカニズム

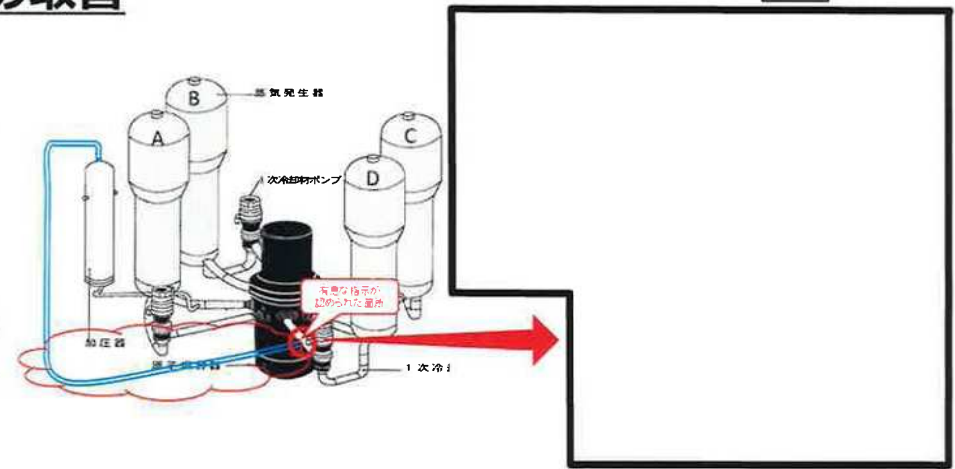
- 大入熱で溶接されたことにより材料が著しく硬化したことから、ターミナルエンド部であることから※比較的大きな応力が発生したことが重畳し、SCCが発生・進展したものと判断する。

※ターミナルエンド部は、一般に配管系の中で不連続性により、より高い応力が生じる可能性がある箇所とされている。

対策

対策1. 配管の取替

- 今回事象は溶接における大入熱に伴う硬化によるSCCと判断し、対策として当該指示範囲を含んだ範囲（Dループ 加圧器スプレイン配管）について、**同材料、同仕様（外径、厚さ）の配管に取替える。**
- 今回取り替え工事と同条件のモックアップ試験の結果、**現在の溶接条件の中で考える入熱で、表面近傍の硬さをSCC発生の知見のある値である300HV以下に抑えられるが、入熱量を以下のとおり管理強化する。**

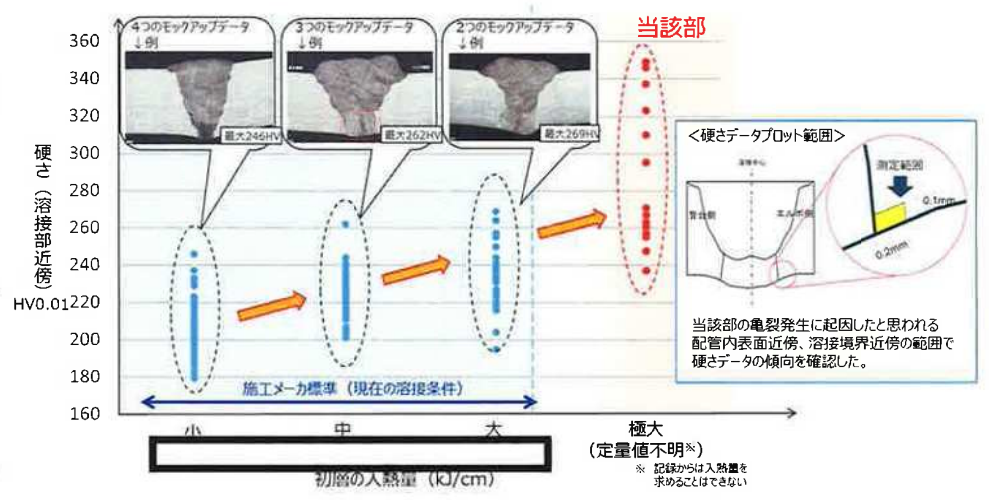


➤ 入熱量の管理

入熱量は、熱影響範囲、溶接による塑性ひずみ量に影響を与え、過大であると耐SCC性への懸念があることから**上限値**（例：当該管サイズ（4B）であれば 程度）を設定する。

また、入熱量上限値を超えない溶接施工実現のため、溶接技能トレーニングを行い、**入熱量上限値を超えない溶接施工技能を有することを確認**する。

現地においては、溶接作業前のTBM等にて、入熱上限値を超えて溶接してはいけない溶接部であること、及び、溶接施工における注意点等を再度確認した後に溶接を行う。



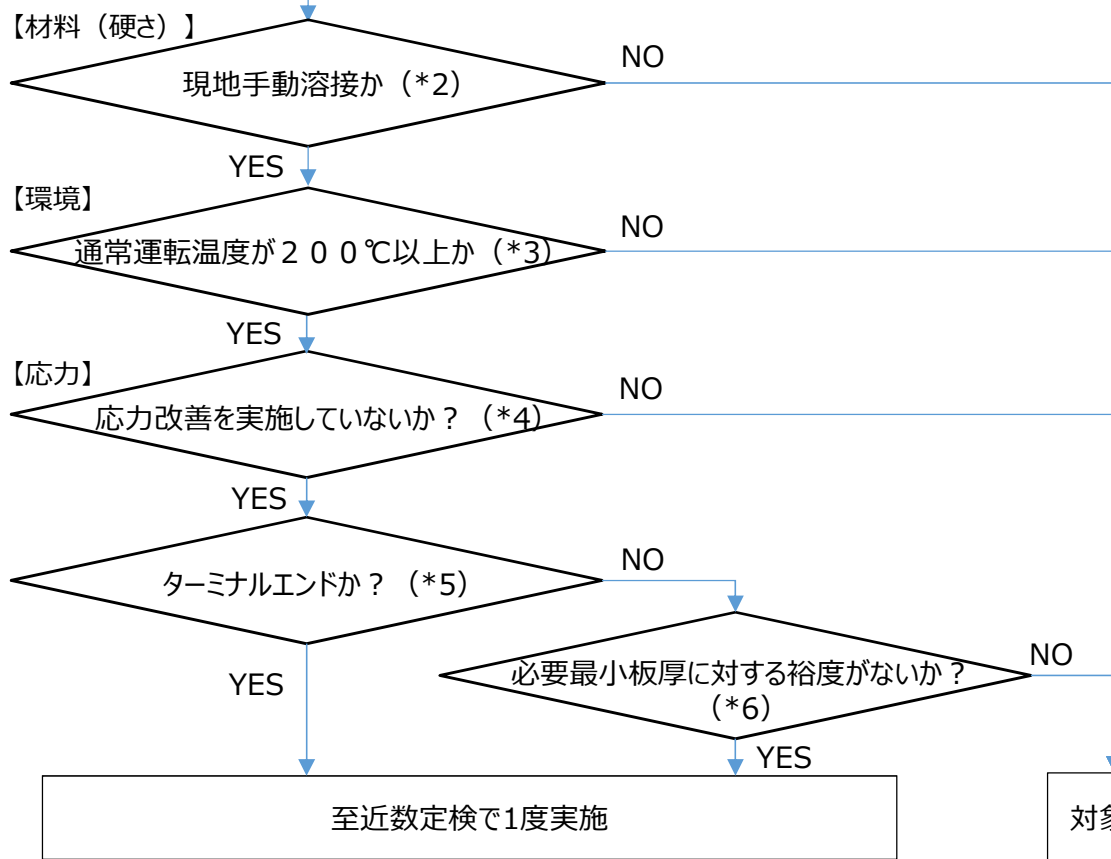
なお、開先加工のためのシンニング加工においては、シンニング加工に伴う表層の硬化によるSCCが懸念されることから、硬化層が形成されにくい加工法または応力低減のバフ加工を用いることとする。

: 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。

対策2. 検査の強化

- 当該配管の類似箇所として7プラントで約70箇所について検査で問題のないことを確認しており、特異な箇所であったと考える。
- 今後実施する施工では溶接条件の厳格な順守を要求する。一方、これまで施工されてきた範囲については、当該事象が十分に説明できていない部分もあることから、**ISIのUT検査対象を増やすことでSCCに対する検査の強化を図る。**
- **維持規格においてUTが要求**されている4 B以上の配管のうち、**3要素（材料・環境・応力）の観点でSCCの発生・進展が生じる可能性のある箇所に加え、板厚までの裕度が小さい箇所についても広く抽出し至近数定検で1度検査を行う。**

対象：1次系水質環境にある主要系統（*1）の配管・機器のうち、ISIにおいてUT対象となっているオーステナイト系ステンレス鋼の溶接部



（*1） RCS, CVCS, SIS, RHRS, CSS

（*2） 現地手動溶接部は入熱が大きくなる可能性のあることから抽出対象とする。

（*3） PWR環境中のSCCの発生及び進展への温度に影響を考慮し、**運転温度200℃以上の溶接部は抽出対象とする。**

（*4） PWR環境中のSCCの発生及び進展への残留応力の影響を考慮し、**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。**

（*5） **運転時の発生応力が高くなるターミナルエンドの溶接部は抽出対象とする。**

（*6） **検出限界から必要最小板厚までの板厚の裕度の小さい4, 6 B配管の溶接部であってこれまで取替え実績のない溶接部については抽出対象とする。**

フローによる想定箇所数

	M3	T1	T2	T3	T4	O3	O4	合計
箇所数	約30	約40	約40	約50	約40	約20	約40	約260

〔 水平展開については、電事連を通じて他社に情報を共有しており、今後、検査の結果についても共有していく。 〕

- フローに基づき抽出された箇所に対し、至近数定検で定期事業者検査の中でUTを1度実施し健全性を確認する。
- 1度実施した検査結果及び知見拡充結果をもとに、検査対象箇所、検査間隔等を設定し、ISI計画へ反映することで、SCCに対する検査の強化を図る。