

大飯発電所 3 号機
加圧器スプレイライン配管溶接部での事象への対応について

関西電力株式会社

2021年 1月26日

目次

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対応として、これまでの調査結果及び追加確認結果を踏まえた、本事象の発生要因及び水平展開について以下のとおり報告する。

本事象の亀裂要因の特定について
(これまでの事象要因の整理)

… 2

追加確認

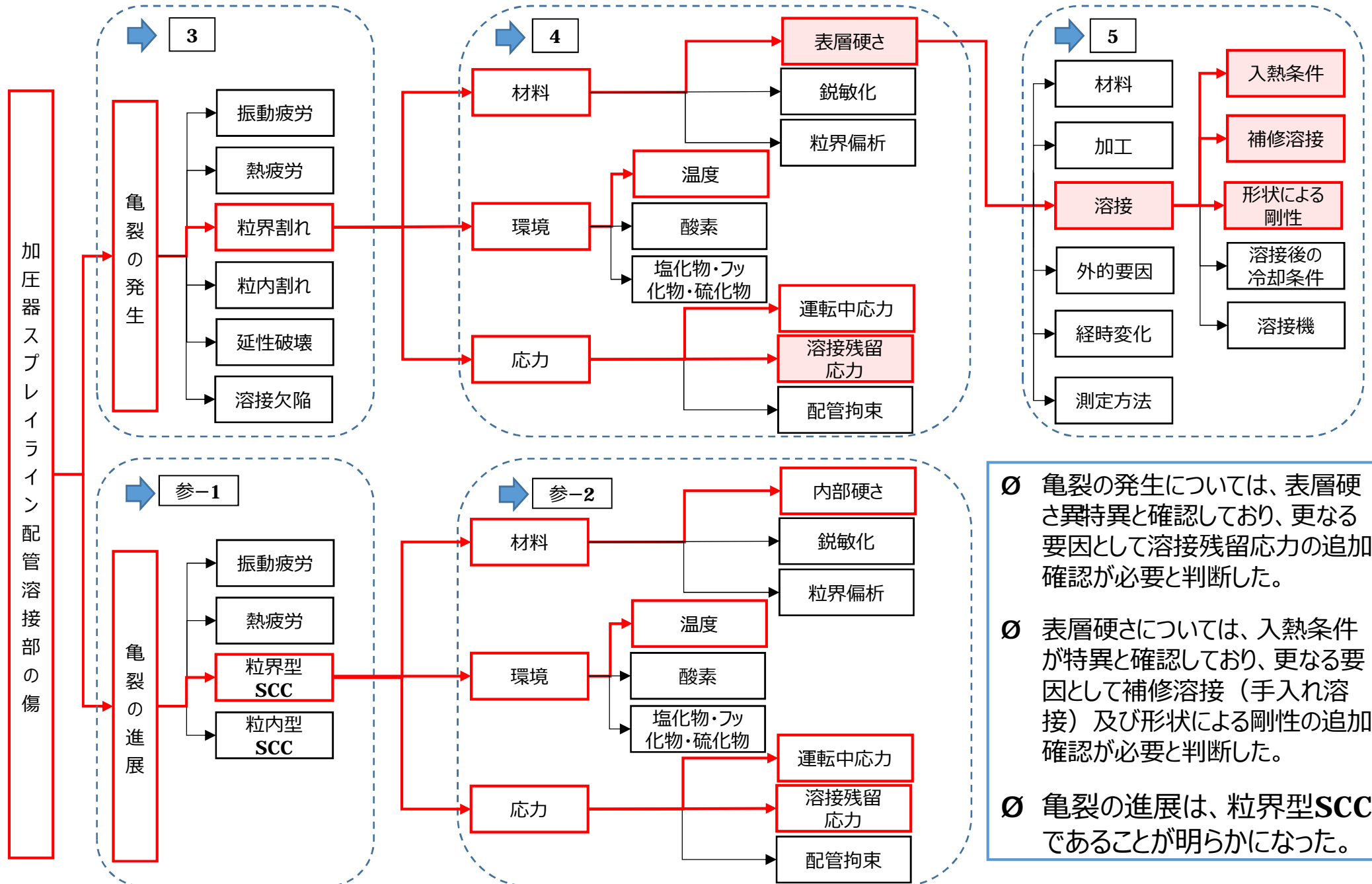
… 8

水平展開方法の策定

… 19

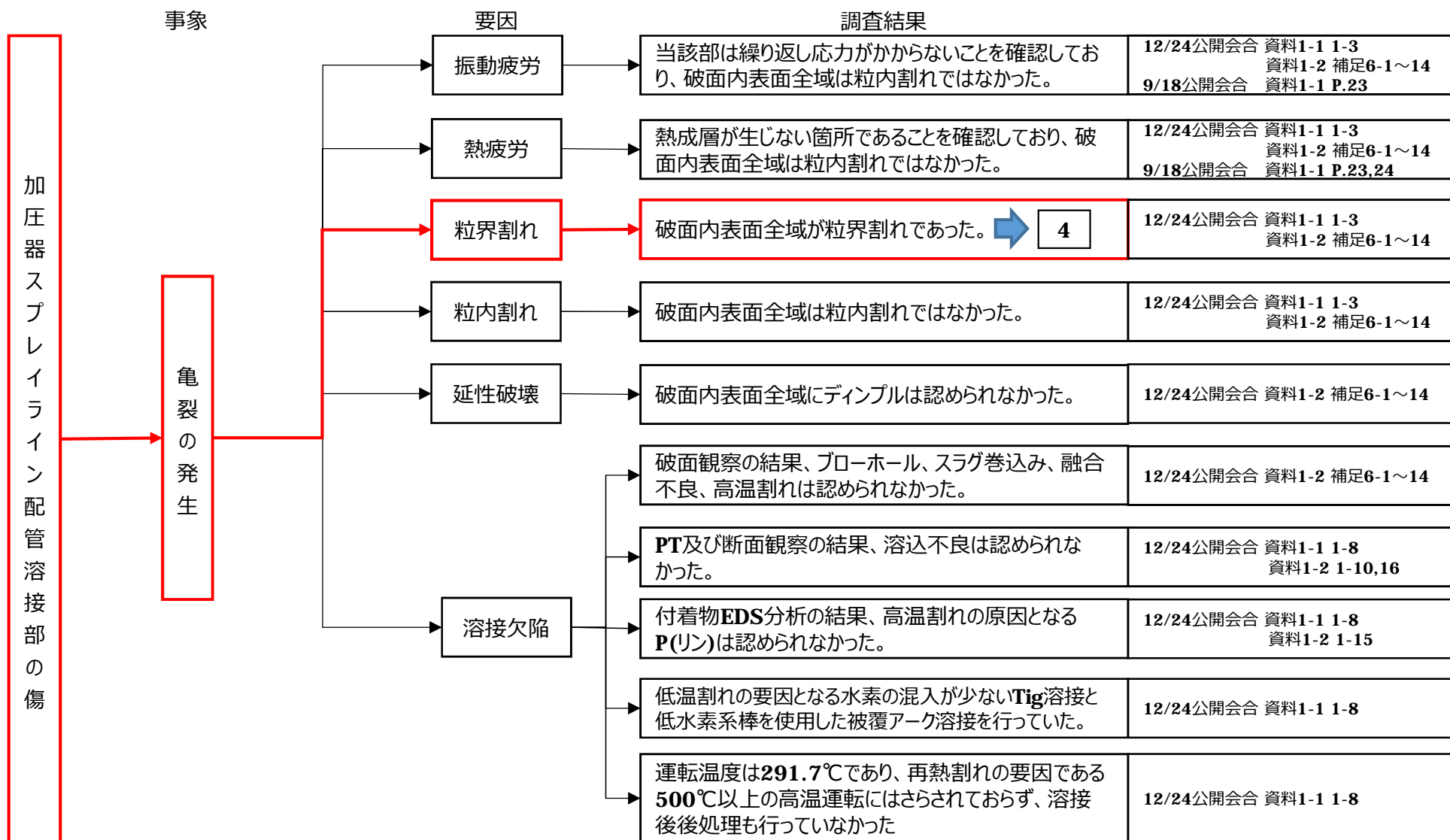
本事象の亀裂要因の特定について（概要）

〇 本事象の亀裂要因の特定を目的に種々のFT図を作成した。本図は、後述するFT図の概略である。



- 〇 亀裂の発生については、表層硬さ異特異と確認しており、更なる要因として溶接残留応力の追加確認が必要と判断した。
- 〇 表層硬さについては、入熱条件が特異と確認しており、更なる要因として補修溶接（手入れ溶接）及び形状による剛性の追加確認が必要と判断した。
- 〇 亀裂の進展は、粒界型SCCであることが明らかになった。

亀裂発生要因のF T図 (1/3)



○ 亀裂発生要因については粒界割れで発生した可能性が最も高いと判断した。

亀裂発生要因のF T図 (2/3)

事象	要因	因子	調査結果	知見・理論	追加確認	更なる知見拡充	
粒界割れの発生	材料	表層硬さ	硬さ計測の結果、表層で 350HV の硬さが確認された。	12/24公開会合資料1-1 1-5 資料1-2 1-19	BWR環境では、 300HV 以上で割れる実験室データがあり、PWR環境では、海外において加圧器ヒータシースが 310HV 以上で割れている事例あり。(参-3 文献1,2)	表層硬さが大きくなった要因検討 → 5	SCC発生と硬さの関係
		鋭敏化	ミルシートでは炭素濃度が 0.04% であり、鋭敏化検査でも粒界腐食が生じなかった。	9/3面談資料P.16 12/24公開会合資料1-1 2-2 資料1-2 1-16	酸素添加条件では、鋭敏化によりSCC発生が促進される知見がある。(参-3 文献3)	-	-
		粒界偏析	炉外であり照射量が低い領域であることから、中性子照射による粒界偏析はない。	(参-3 文献4)	照射量によりSCC発生が促進される知見がある。(参-3 文献4)	-	-
	環境	温度	温度は 200℃ 以上の箇所である。	12/24公開会合資料1-1 1-9	発生温度に対する知見は無いが、 200℃ 以上で進展の知見がある。(参-3 文献5)	-	SCC発生と温度の関係
		酸素	加圧器スプレイラインであり、常時通水環境であることから、閉塞滞留部ではない。	9/8公開会合資料P.46	閉塞滞留部では、SCCが発生しやすくなる。(参-3 文献6)	-	-
		塩化物・フッ化物・硫化物	適切に水質管理が行われている。	9/8公開会合資料P.46	不純物はSCC発生の加速因子となることが知られている。(参-3 文献7)	-	-
	応力	運転中応力	実機応力は計測できていないが、引張応力が生じていたと解析により推定。	12/24公開会合資料1-1 1-9	亀裂の発生応力を明確に示す知見は無いが、発生への影響は否定できない。(参-3 文献8)	-	SCC発生と応力の関係
		溶接残留応力	実機応力は計測できていないが、熱影響部に溶接による引張応力が生じていたと解析により推定。			当該部の溶接状態を踏まえた実機応力の評価	
		配管拘束による応力	応力解放時に 8mm 程度移動し、 3MPa 程度の応力が生じていたと推定。	12/24公開会合資料1-2 1-2		-	

- 亀裂発生については、硬さが特異に大きいことが影響したと判断した。
- 応力については、当該部の溶接状態を踏まえた実機応力について追加確認が必要と判断した。

亀裂発生要因の F T 図 (3/3)

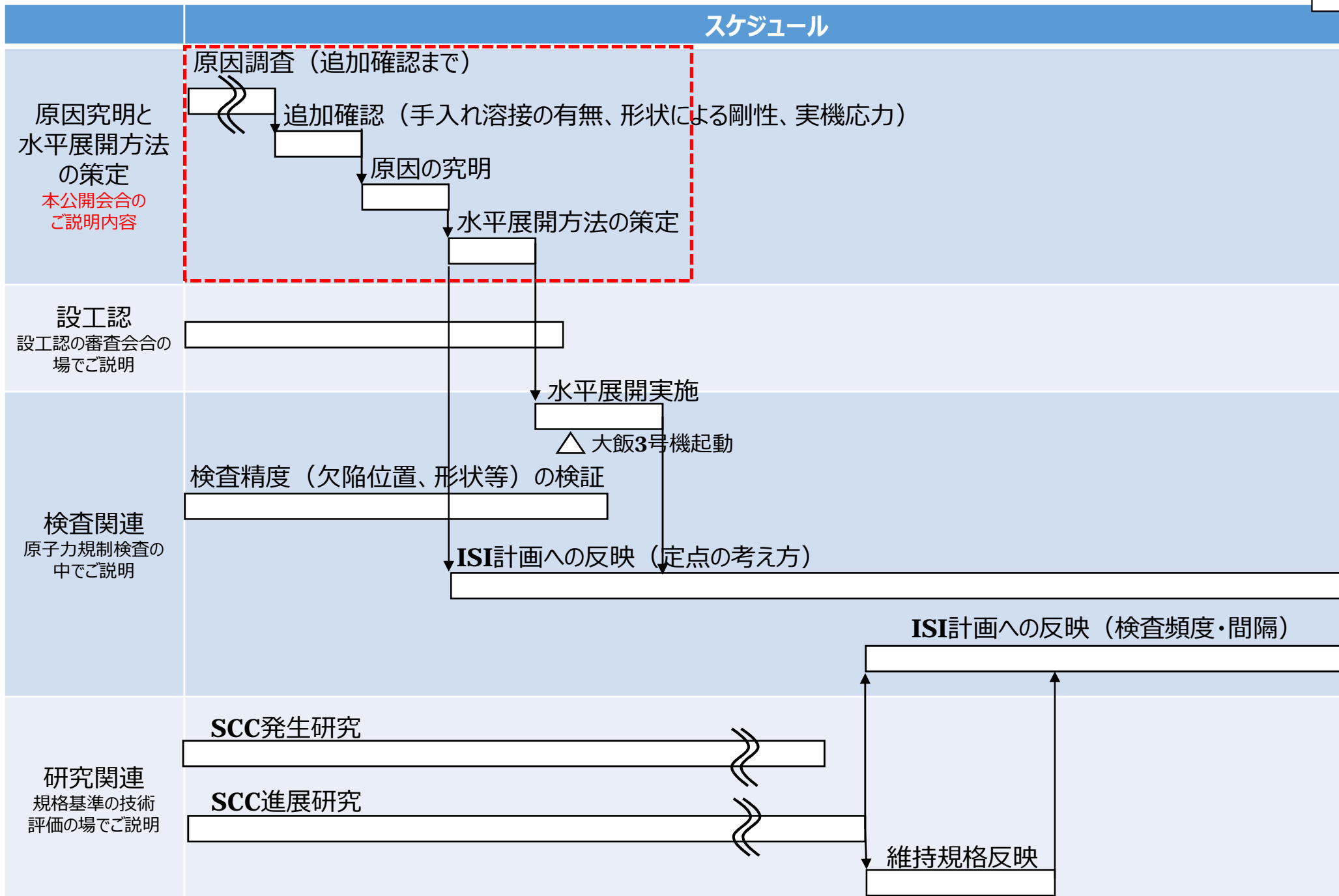
○ : 影響が否定できない
 × : 影響がない



表層硬さ (溶接部近傍の硬化)

○ 硬化要因としては、溶接入熱に加え補修溶接 (手入れ溶接)、形状による剛性について追加確認が必要と判断した。

本事象を踏まえた今後の対応スケジュール (1/2)



本事象を踏まえた今後の対応スケジュール (2/2)

本公開会合のご説明内容 原因究明と水平展開方法の策定	原因調査（追加確認まで）	〇 実機の破面調査等 〇 溶接記録や当該溶接部積層図等による手入れ溶接の有無の確認及び硬さへの影響評価 〇 形状による剛性の硬さへの影響確認 ・当該溶接部近傍の硬さ比較・整理 ・形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定 〇 当該部の溶接状態を踏まえた実機応力の評価
	追加確認	〇 入熱条件、補修溶接（手入れ溶接）、形状による剛性の影響整理
	原因の究明	〇 これまでの調査結果及び追加確認結果を踏まえた検査対象箇所の抽出方法策定
	水平展開方法の策定	〇 配管取替に伴う強度評価等
設工認	配管取替	〇 配管取替に伴う強度評価等
検査関連	水平展開実施	〇 大飯4号機以外のプラントに対する追加検査
	検査精度の検証	〇 進展方向を誤認した原因調査 ・モックアップ（横穴、スリット）検証及びシミュレーションによる、探触子や外面形状、材料（溶接）の影響確認
	ISI計画への反映（定点の考え方）	〇 本事象の原因と水平展開の結果を踏まえたISI定点の考え方の整理
	ISI計画への反映（検査頻度・間隔）	〇 SCC進展式を踏まえたISI点検頻度・間隔の整理
研究関連	SCC発生研究	〇 SCC発生と硬さの関係 〇 SCC発生と温度の関係 〇 SCC発生と応力の関係 （ ・表面加工や試験温度等をパラメータとしたSCC発生の基礎研究 ・廃炉材を活用したSCC発生の検討 他 ）
	SCC進展研究	〇 SCC進展と硬さの関係 〇 SCC進展と温度の関係 〇 SCC進展と応力の関係 （ ・過去研究データ（国内外）の整理 ・進展式の策定 他 ）
	維持規格反映	〇 事例規格案の審議、発刊

追加確認

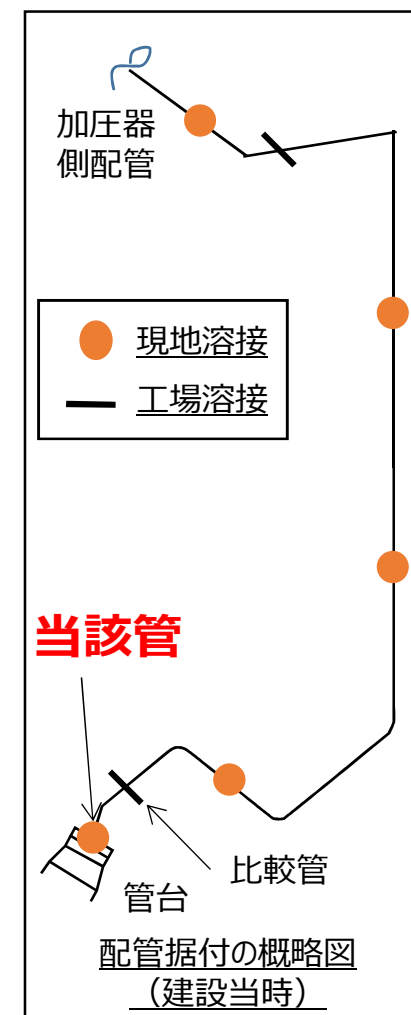
- 溶接記録や当該溶接部積層図等による手入れ溶接の有無の確認及び硬さへの影響評価
- 形状による剛性の硬さへの影響確認
 - ① 当該溶接部近傍の硬さ比較・整理
 - ② 形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定
- 当該部の溶接状態を踏まえた応力の評価

溶接記録や当該溶接部積層図等による 手入れ溶接の有無の確認及び硬さへの影響評価 (1/2)

○ 施工当時の記録から、溶接施工手順に問題がなかったことを確認する。

【**当該管**の溶接施工手順】（材料確認を除いてサイトで実施）

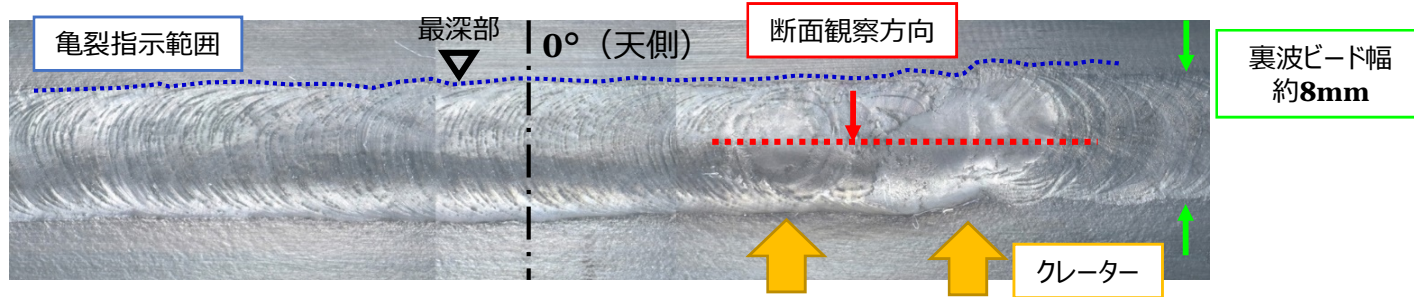
手順		実施日	確認した記録	確認結果および特記事項
材料確認	管台	'89.2.21	素材チェックシート ミルシート	規格通りの材料であった。 (工場で実施)
	エルボ	'89.6.12		
開先合せ検査		'90.3.29	開先検査記録	図面指示通りの開先合せ精度であった。 同日に一連の配管、計5箇所の開先合せ検査を実施していた。
溶接		'90.4.21 '90.4.23	溶接施工記録	溶接指示通りの施工であった。 同日に一連の配管、計5箇所の溶接を開始していた。 作業者は若手とベテランの2名で施工していた。(初層Tig溶接は2名、SMAW溶接は若手1名で施工)
非破壊検査 (PT)		'90.4.25	浸透探傷試験記録	有意な指示がないことを確認した。
非破壊検査 (RT)		'90.4.27	放射線透過試験記録	有意な指示がないことを確認した。
耐圧試験・目視検査		'90.9.18	耐圧・漏えい試験記録	漏えいがないことを確認した。



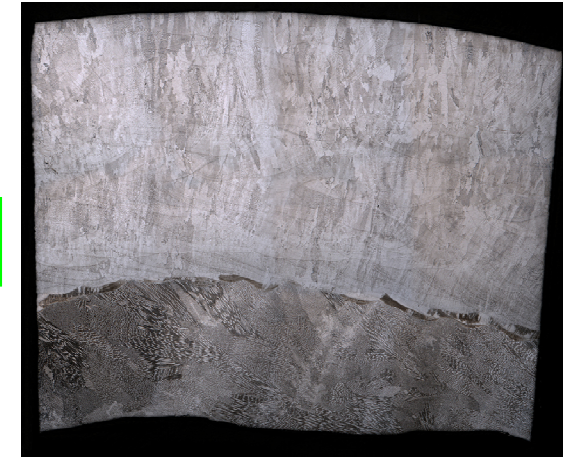
- 一般的な施工手順通りに開先合せ及び溶接施工を実施し、溶接検査に合格している。特に不適合、異常は確認されていない。
- 溶接施工について、溶接電流は指示された範囲内である。ただし、当該溶接部の観察を踏まえると、溶接入熱については、若手が丁寧かつ慎重に溶接を行ったことから、溶接速度が遅くなり入熱が大きくなって初層溶接熱影響部の硬化を促進した可能性はある。

溶接記録や当該溶接部積層図等による 手入れ溶接の有無の確認及び硬さへの影響評価 (2/2)

- 当該溶接の裏波ビード幅は約8mmと幅広であり、溶接終端部と思われるクレータが2箇所認められた。溶接断面写真により欠陥が無い事を確認しているが、継ぎ足し溶接により溶接入熱が高くなった可能性がある。



当該管 溶接部裏波外観



当該管 溶接クレータ部断面組織

- 当該管のSMAW溶接は施工記録より4層で施工されている。(当該管サイズでは通常3～6層)
- 記録上、補修溶接は実施していないが、ビード形状を整えるためのグラインダ成形や部分的な追加溶接を行う場合があり、断面組織では部分的に5層以上に見える領域がある。

積層図 4層

赤線部境界があった場合
5層以上と認められる部分

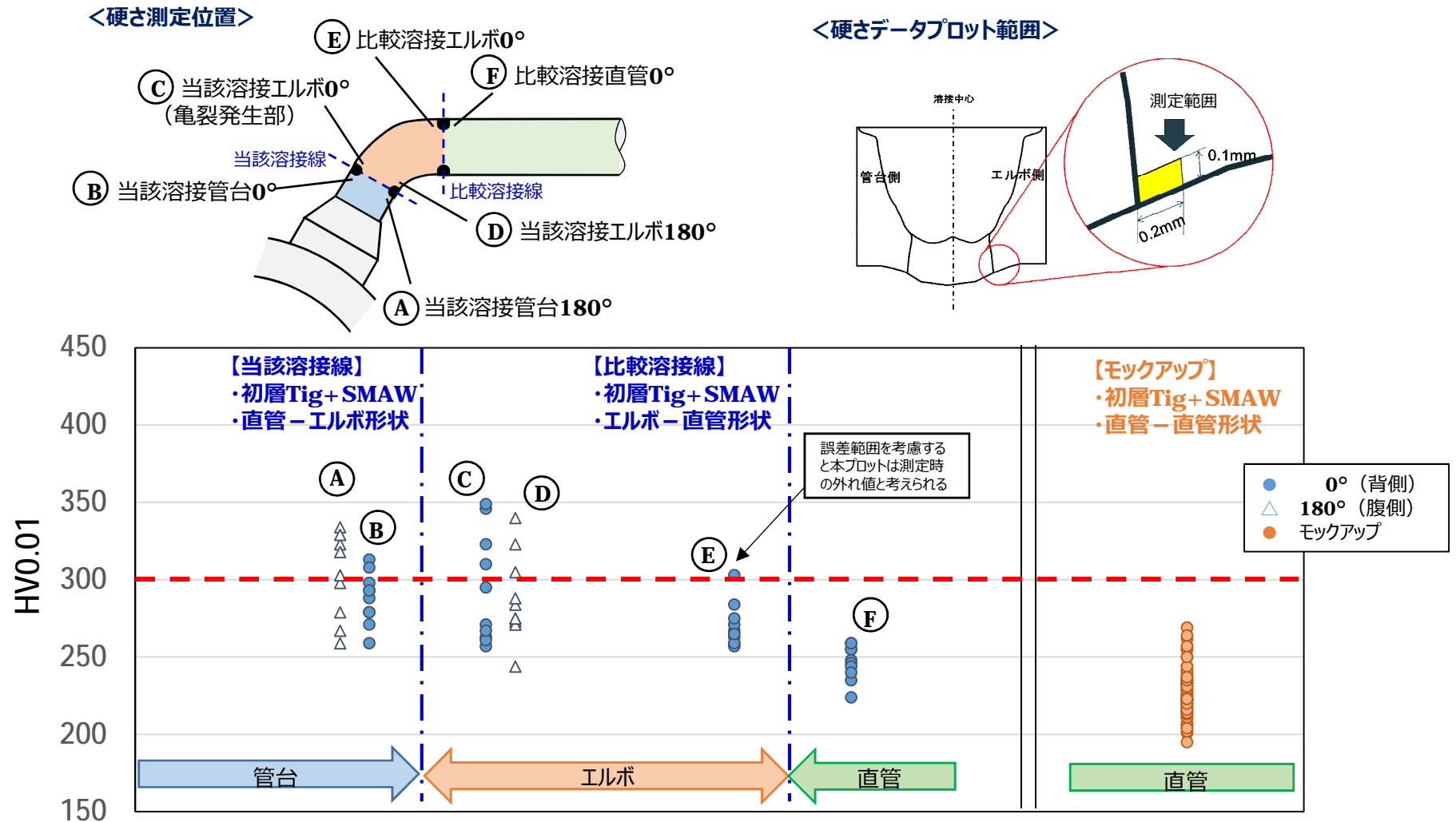
当該溶接部積層図 (観察位置 0°)

- 当該溶接部では補修溶接の記録は無く、また観察結果より欠陥も認められなかった。しかしながら、裏波ビード幅が約8mmと広く、また、記録に残らない手入れ溶接を実施した可能性はあり、当該部の大入熱の一因となった可能性は否定できない。

□: 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

形状による剛性の硬さへの影響確認

① 当該溶接部近傍の硬さ比較・整理



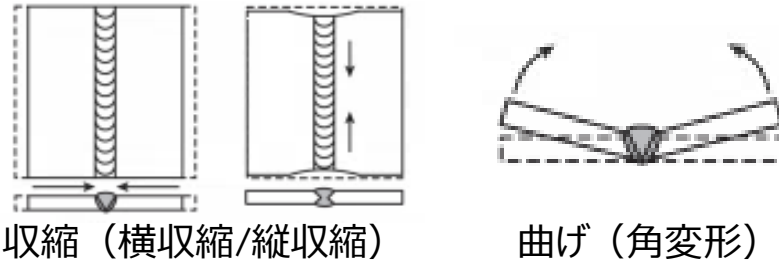
- 管台とエルボの溶接部における表層の硬さが、他の部位より高い傾向が見られる。
- 上記の結果を踏まえ、入熱の影響以外にも管台・エルボ・直管といった形状による剛性が硬さに及ぼす影響についても確認する。
- なお、シンニング部においては、亀裂近傍部に比べて応力が低いことから顕在化していないものと推定される。

形状による剛性の硬さへの影響確認

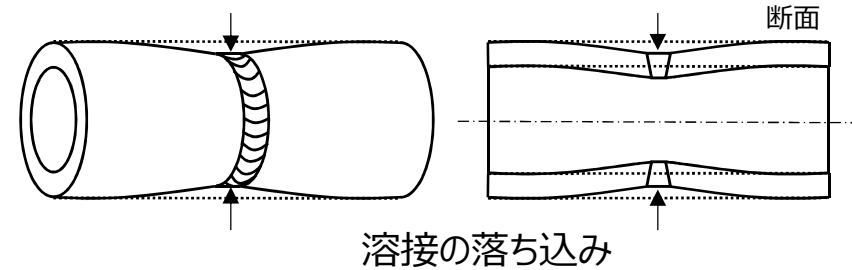
②形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定 (1/4)

- 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）】

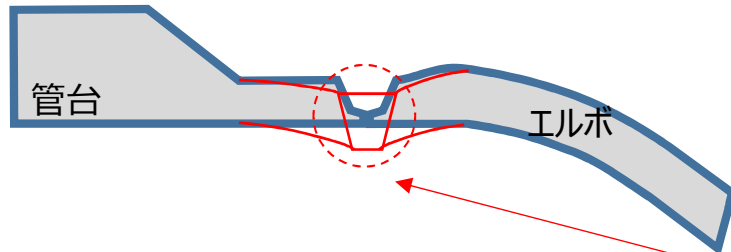


【配管溶接の場合（イメージ）】



- 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。

比較的剛な領域 変形領域 比較的剛な領域



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）

変形領域



溶接による落ち込み
（両者とも同程度）

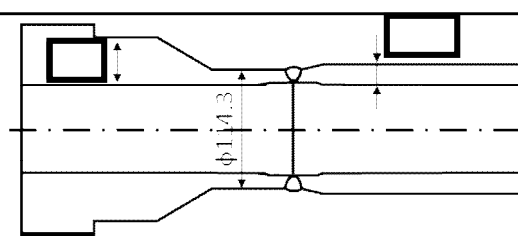
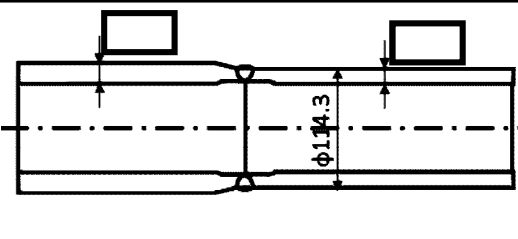
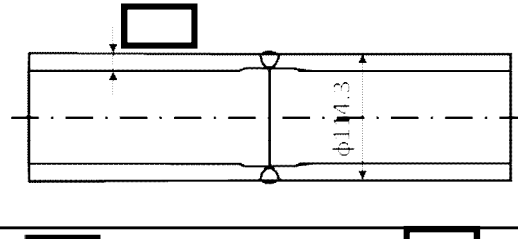
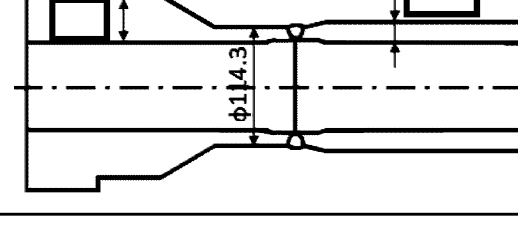
落ち込みを吸収できる範囲が広い
（変形できる領域が広く、歪みは比較的小さい）

- 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。

形状による剛性の硬さへの影響確認

②形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定 (2/4)

○ 形状による剛性の影響について確認するため、以下のモックアップを製作し、硬さ測定を行う。

ケース	溶接方法	拘束条件	モックアップ形状
ケース1	初層Tig+SMAW (入熱量：大※1)	管台－エルボ※2	
ケース2	初層Tig+SMAW (入熱量：大※1)	エルボ※2－直管	
ケース3	初層Tig+SMAW (入熱量：大※1)	直管－直管	
ケース4	全層Tig※3 (入熱量：中※1)	管台－エルボ※2	

※1：通常の溶接施工における入熱量 大： kJ/cm、中： kJ/cm

※2：エルボは製作に長期間（約3か月）を要するため、モックアップにおいては、溶接に伴う内面側への落ち込みが周方向の剛性により拘束されることを考慮し、エルボを厚肉な管（ミルシートの最大板厚： mm）に置き換えて剛性の影響効果を確認する。

※3：今回、大飯3号機の当該配管取替にて採用する溶接方法

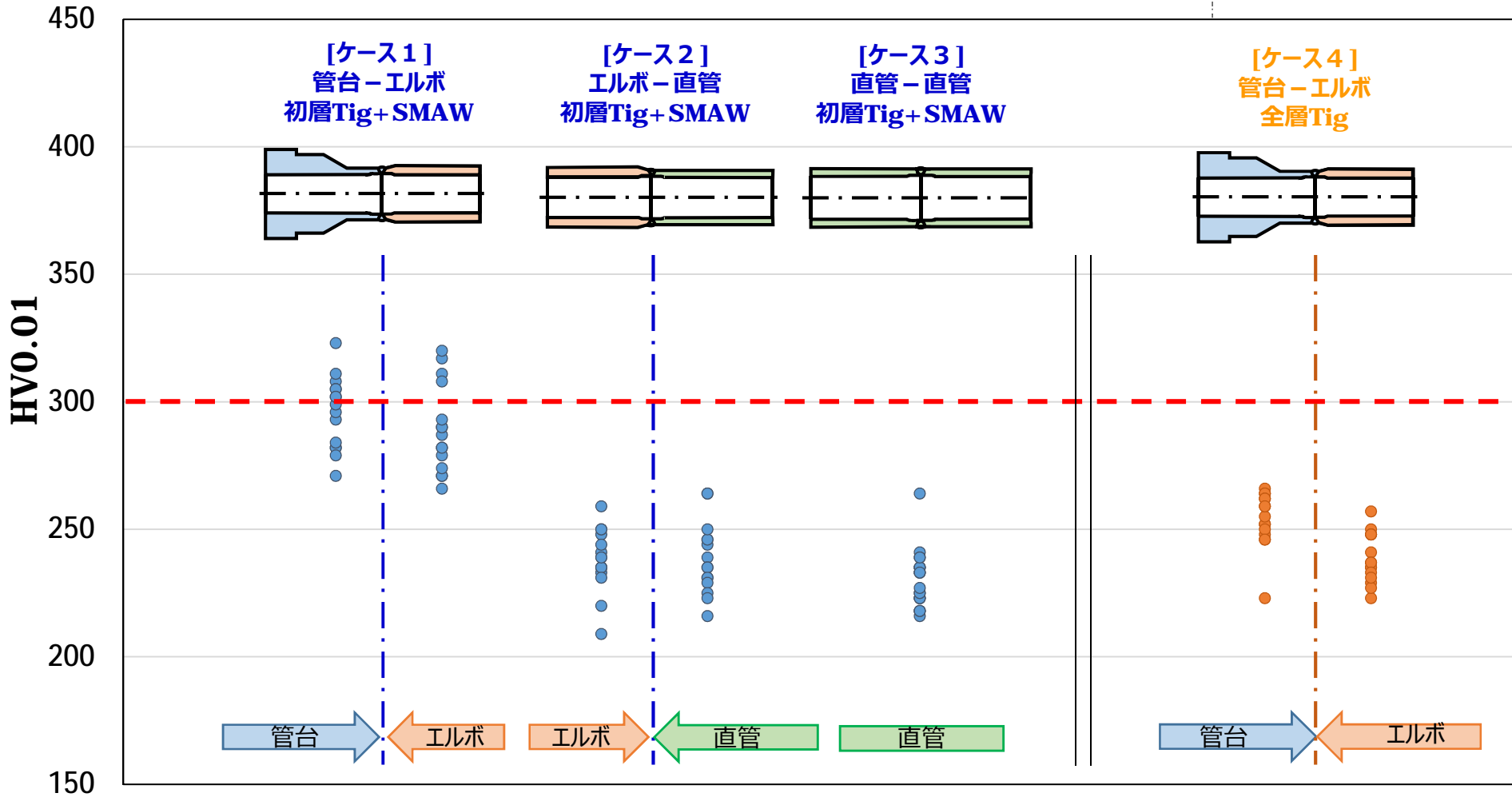
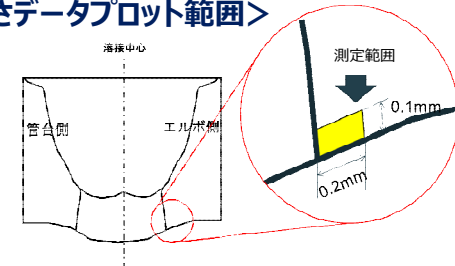
：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

形状による剛性の硬さへの影響確認

②形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定 (3/4)

∅ 溶接時における形状による剛性の影響について確認するために製作したモックアップの硬さ測定結果は以下のとおり。

<硬さデータプロット範囲>



形状による剛性の硬さへの影響確認

②形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定 (4/4)

- 溶接時における形状による剛性の影響について確認するために製作したモックアップの硬さ測定結果は以下のとおり。

拘束条件 溶接方法	管台－エルボ	エルボ－直管	直管－直管
初層 Tig+SMAW (入熱量：大)	[ケース1] 300HV を超えている。	[ケース2] 300HV を超えていない。	[ケース3] 300HV を超えていない。
全層 Tig ※ (入熱量：中)	[ケース4] 300HV を超えていない。	—	—

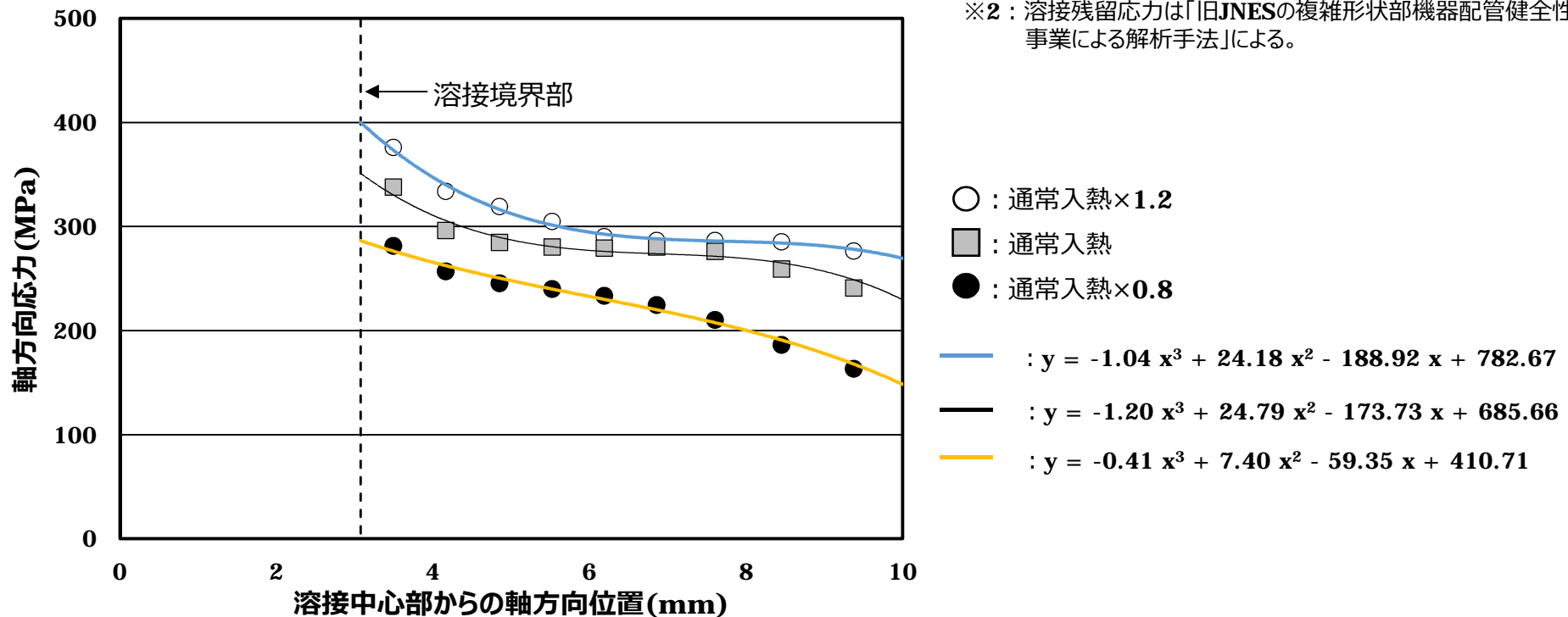
- 本事象の当該管溶接部と同様の方法である初層**Tig+SMAW**で溶接され、かつ形状による剛性の影響から溶接時の変形領域の狭い「管台－エルボ」の形状では、**300HV**を超える硬さを確認した。
- 全層**Tig**で溶接した場合は、「管台－エルボ」の形状でも**300HV**を超える硬さに至らないことを確認した。

※：今回、大飯3号機の当該配管取替にて採用する溶接方法

- 当該部については、運転による発生応力:約**100MPa**、溶接残留応力:約**200MPa**が生じていたものと解析※1,2により確認している。
- 一方、実機の応力は計測できていないものの、当該部においては溶接入熱が大きかったと推定しており、その影響について検討した。

【配管内表面の軸方向応力の F E M解析（発生応力※1 + 溶接残留応力※2）結果】

※1：運転による発生応力は解析コード「MSAP」による。
 ※2：溶接残留応力は「旧JNESの複雑形状部機器配管健全性実証（IAF）事業による解析手法」による。



○ 当該箇所は、過大な入熱により、応力についても特異に大きくなっていたと推定される。

追加確認結果のまとめ

<追加確認結果>

○ 溶接記録や当該溶接部積層図等による手入れ溶接の有無の確認及び硬さへの影響評価

- 施工手順等に問題がなかったことを確認し、溶接裏波形状や断面組織観察から欠陥も認められなかったが、溶接入熱については、若手が丁寧かつ慎重に溶接を行ったことで、溶接速度が遅くなり入熱が大きくなって初層溶接熱影響部の硬化を促進した可能性はある。
- また、溶接施工記録では補修溶接はされていないが、施工記録に残らない手入れ溶接（ビード形状を整えるためのグラインダ成形や部分的な追加溶接）を実施した可能性はあり、これによって更に入熱が大きくなった可能性は否定できない。

○ 形状による剛性の硬さへの影響確認

① 当該溶接部近傍の硬さ比較・整理

- 管台とエルボの溶接部における表層の硬さが、他の部位より高い傾向が見られる。
- 上記の結果を踏まえ、入熱の影響以外にも管台・エルボ・直管といった形状による剛性が硬さに及ぼす影響についても確認した。
- なお、シンニング部においては、当該部位に比べて応力が低いことから顕在化していないものと推定される。

② 形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定

- 本事象の当該管溶接部と同様の方法である初層**Tig+ SMAW**で溶接され、且つ拘束状況から溶接時の変形領域の狭い「管台－エルボ」の形状では、**300HV**を超える硬さを確認した。
- 全層**Tig**で溶接した場合は、「管台－エルボ」の形状でも**300HV**を超える硬さに至らないことを確認した。

○ 当該部の溶接状態を踏まえた応力の評価

- 当該箇所は、過大な入熱により、応力についても特異に大きくなっていたと推定される。

- 今回の事象は、当該部が全層**Tig**よりも入熱量の大きくなりやすい初層**Tig+ SMAW**において更に大入熱で溶接されたこと、及び剛性が大きい管台-エルボ形状であったことが重畳したことで硬化が生じ、また、入熱が大きくなったことに伴い応力も大きくなったことで割れが発生したものと判断した。
- なお、若手が丁寧かつ慎重に溶接を行ったこと、及び施工記録に残らない手入れ溶接を実施したことで溶接入熱が大きくなった可能性はある。

本事象のまとめ

<事象の概要>

供用期間中検査にて、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。

<亀裂発生及び亀裂進展要因>

調査の結果、粒界割れの発生には表層近傍の硬化及び応力が影響したと考えられた。また、その硬化及び応力には、過大な溶接入熱（手入れ溶接の可能性を含む）に加え管台-エルボ部の剛性が影響した特異な事象と判断された。PWR1次系の配管溶接部では、これまで同様の事象が生じておらず、今後知見の拡充が必要である。

亀裂進展に対しては、硬化したオーステナイトステンレス鋼が割れる要因が明確であり、粒界型SCCで進展したものと判断された。

水平展開方法の策定（1/2）

水平展開の基本的な考え方について

今回、加圧器スプレイ配管で見つかった亀裂は、以下の理由から当該事象は特異であったものと判断している。

- これまでの供用期間中検査で、当社においては11プラントの安全上重要な配管に対し、10年（高経年プラントは7年）の周期で約3,000箇所・回の超音波探傷検査を実施してきており、今回の事象を除いて、これまで国内外のPWRにおいて溶接部近傍の硬化に起因する粒界割れは確認されていない。
- 破面調査、モックアップ試験結果等から今回発生した亀裂は溶接時の大入熱（手入れ溶接の可能性を含む）と形状による剛性の重畳によるものである。
- 今回事象を受け、これまで既に大飯4号機他プラントを含め類似箇所約90箇所を追加検査を実施しているが、同様の指示は確認されていない。



今回事象は他部位でも発生の可能性が高いものではなく、特異な事象であると判断した。

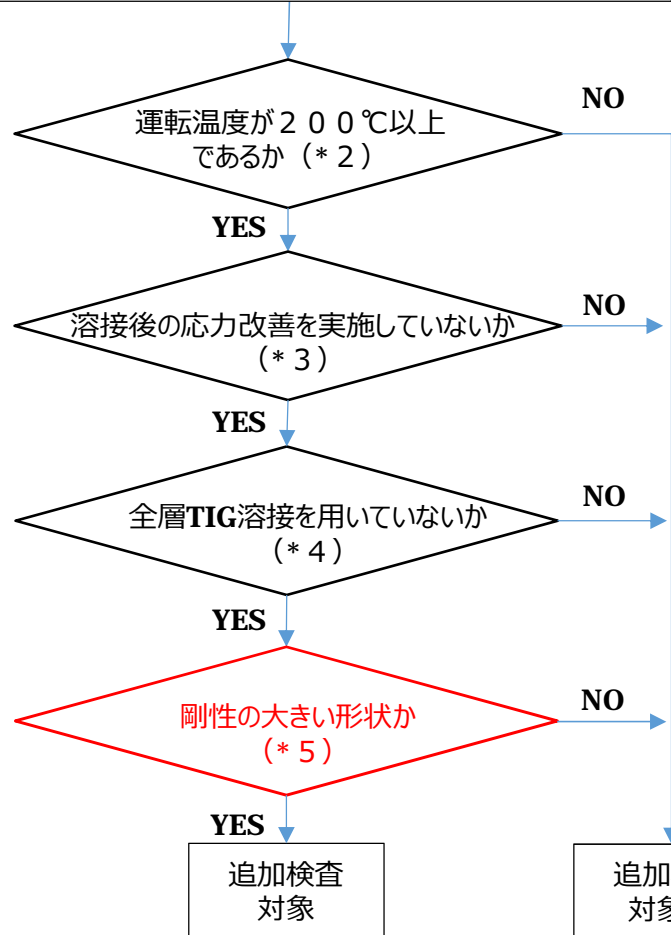
特異事象であることを踏まえ、水平展開としての追加検査は以下の考え方で実施する。

- 大飯3号機については、事象発生プラントであることから、念のため大飯4号機と同様の考え方に基づき前広に超音波探傷検査を行い有意な欠陥がないことを確認することで、事象の特異性を再確認する。
- 他プラント（美浜3号機、高浜1,2,3,4号機）については、追加確認結果を踏まえた選定フローに基づき、追加検査を実施する。

水平展開方法の策定 (2/2)

- 当該部は入熱条件及び形状による剛性が特異であったことを踏まえ、以下の選定フローで追加検査を実施する。
- なお、大飯3号機については、大飯4号機の考え方にに基づき追加検査を実施することとする。

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又は除去されている部位は対象外とする。

参-19 ~ 参-21

(* 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。

参-22

(* 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。

参-23

(* 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。

16
参-16 ~ 参-18

(* 5) 管台-エルボの形状では当該管と同程度の硬さが再現されたことから、
形状による剛性が大きい管台を含む溶接部を抽出対象とする。

11 ~ 15

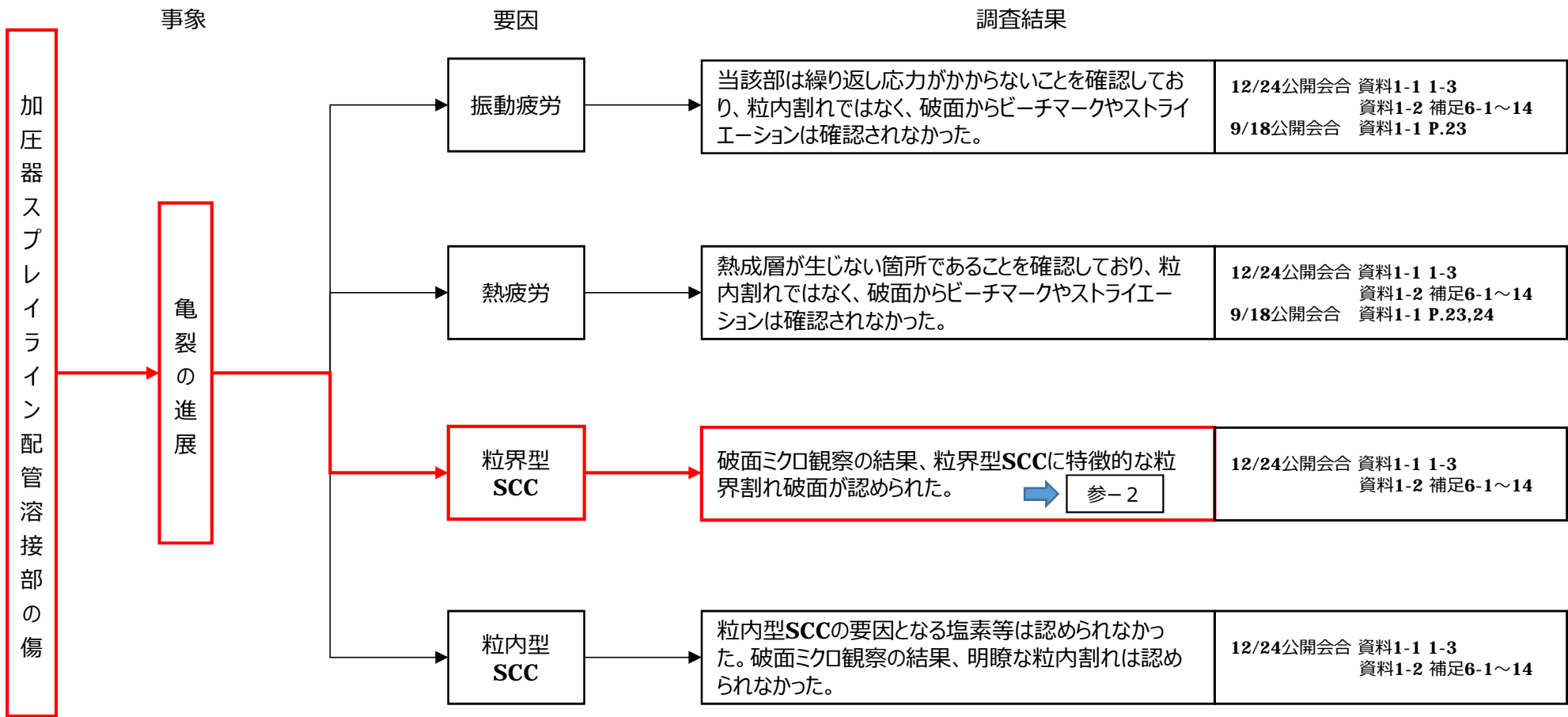
追加検査の対象箇所数

	美浜 3	高浜 1	高浜 2	高浜 3	高浜 4	大飯 3	大飯 4
本フローの考え方に 基づく箇所数	15	12	13	10	9	9	9(済)
大飯4号機の考え 方に基づく箇所数	-	-	-	-	-	37	43(済)

- 追加検査を実施し、本事象に対する健全性を確認する。
- 更なる経年変化の知見拡充を図るため、**事象の発生した大飯3号機については、入熱条件及び形状による剛性を踏まえた本フローで抽出される9箇所に対し、I S Iの中で今後3定検にわたり毎定検検査を実施し健全性を確認**する。
- それらの確認結果等を踏まえて、以降のI S I計画を検討する。

以降、参考資料

亀裂進展要因のF T図 (1/2)



∅ 亀裂進展要因については、粒界型SCCと判断した。

亀裂進展要因のFT図 (2/2)



○ 進展については、SCCの3要素が揃っていることを確認した。

FT図の参考文献 リスト

1. Tsubota, Motoji, Yukio Kanazawa, and Hitoshi Inoue. "The effect of cold work on the SCC susceptibility of austenitic stainless steels." Seventh international symposium on environmental degradation of materials in nuclear power systems--Water reactors: Proceedings and symposium discussions. Volume 1. 1995.
2. Couvant, T., et al. "Investigations on the mechanisms of PWSCC of strain hardened austenitic stainless steels." 13th International Conference on environmental degradation of materials in nuclear systems-water reactors, Whistler (Canada). 2007.
3. Cheng, C. F. "Effect of Residual Stress and Microstructure on Stress-Corrosion Cracking in BWR Piping." Corrosion 76 (1976).
4. Asano, K., et al. "Changes in grain boundary composition induced by neutron irradiation of austenitic stainless steels." Proceedings of the fifth international symposium on environmental degradation of materials in nuclear power systems-water reactors. 1992.
5. Matsubara, N., et al. "Research programs on SCC of cold-worked stainless steel in Japanese PWR NPP." International Symposium Fontevraud. Vol. 7. 2011.
6. Busby, J. T., et al. Expanded materials degradation assessment (EMDA)-Vol. 2: aging of core internals and piping systems. Vol. 2. NUREG/CR-7153, 2014. p.16
7. 小若正倫. "金属の腐食損傷と防食技術." アグネ, 東京 (1983): 202.
8. P. Huguenin et al., "SCC initiation of Pre-Strained Stainless Steels in Nominal Primary Water," Eurocorr, (2011).
9. ステンレス鋼便覧(第3版)、ステンレス協会編、日刊工業新聞 (1995).

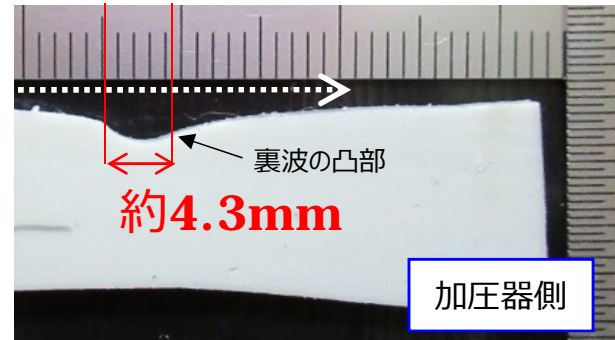
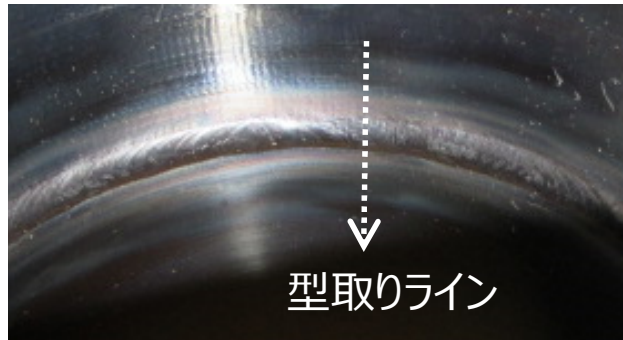
他の溶接箇所における実機材の調査

○ 亀裂が認められた当該溶接部に加え、配管工事の取替範囲に含まれる他の溶接部について溶接裏波の形状を調査した。

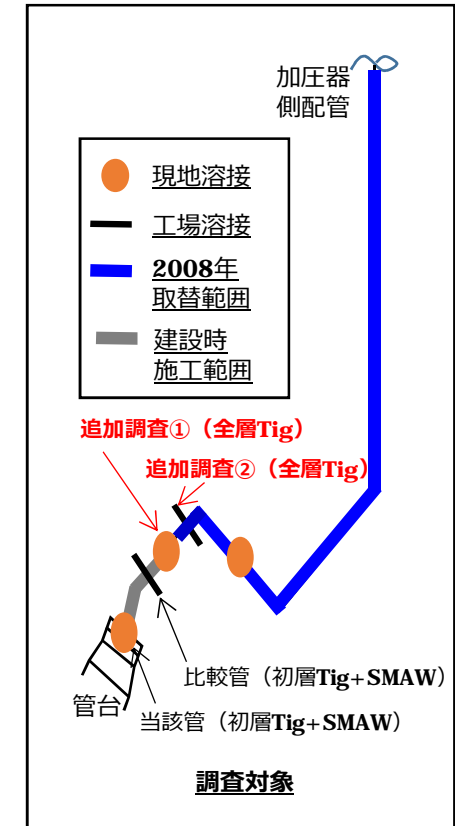
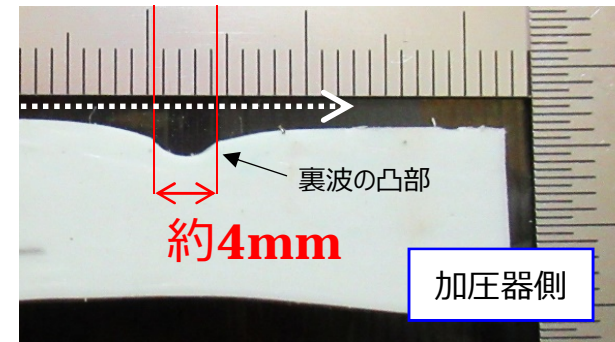
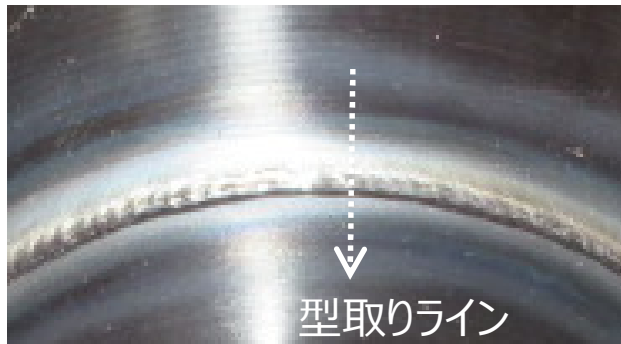
＜裏波形状の外観調査＞

＜裏波幅の型取り調査※＞

追加調査①
0° (天側)



追加調査②
0° (天側)



※：型取り材(テクビット™)により形状を転写した型の断面を観察

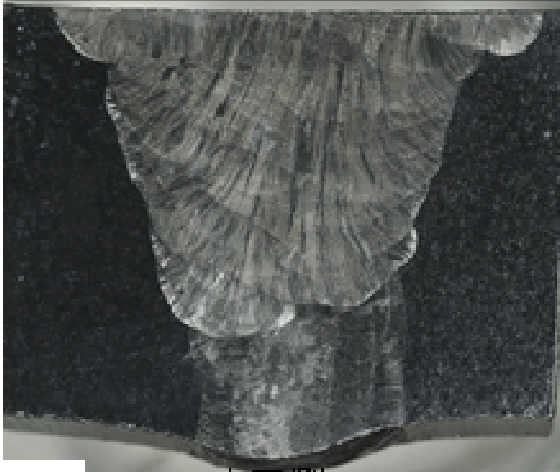
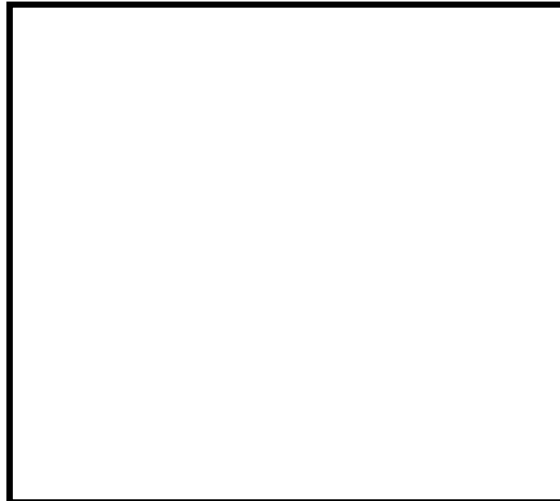
○ 他の溶接箇所における実機材の溶接裏波調査の結果、幅は4mm程度であったことから、全層Tigで施工された本追加調査部位については、初層が大きな入熱条件とならず、当該配管で見られたような裏波形状 (約8mm) にならないことを確認した。

当該溶接部の積層想定図

- Ø P10の当該溶接線0°断面に加え、90°、180°、270°の3つの断面について溶接性状を確認し、溶接積層の境界位置を想定した。
- Ø 黄色は溶接施工記録に基づく4層での想定積層図であるが、それ以外にも積層の境界とも判断できる線が認められる（赤線）ことから、手入れ溶接を実施した可能性がある。

— 4層積層境界（推定）
- - - 手入れ溶接境界（推定）

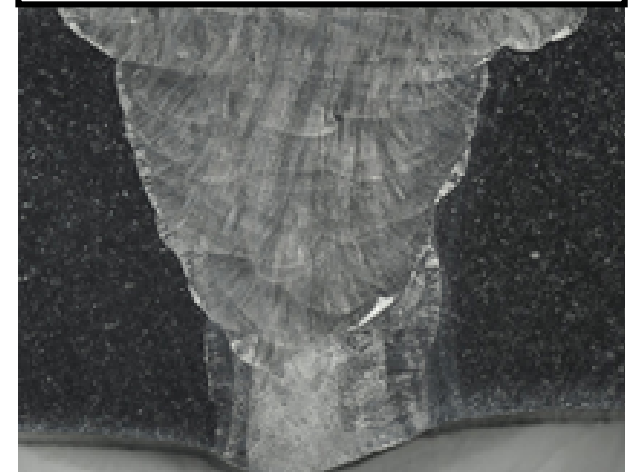
90°



180°



270°



□：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

当該部の補修溶接の有無について

- 補修溶接が行われた場合の運用は、当該管施工時点で施工メーカーの社内標準で規定されており、検査記録に補修を示す「R」の表示をする運用となっている。
- 当該管の放射線透過試験記録を確認したところ、Rの表示はなく、補修溶接はされていないことを確認した。
- なお、溶接施工記録に「R」の表示をする運用管理については、平成3年には施工メーカーの社内標準へ反映されている。

No. 135

フィルム判定結果 TEST RESULT			
溶接線番号 WELD JOINT No.	KON-3-	撮影日付 SHOT DATE	563. 4. 15 563. 3. 25
検査官 INSPECTOR	科学技術庁	検査日付 DATE OF REVIEW	63. 4. 19
	財団法人 発電設備技術検査協会		
フィルム番号 RADIOGRAPH No.	欠陥の位置と種類 LOCATION & TYPE OF DEFECT	判定 EVALUATION	備考 REMARK
KON-3-	有効長 320 mm	<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
		<input type="checkbox"/>	
2		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
3		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
4		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
5		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
6		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
7		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
8		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
9		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	

昭和63年の時点で「R」の表記がされている

(大飯3号機建設時の記録例)

No. 15

フィルム判定結果 TEST RESULT			
溶接線番号 WELD JOINT No.	KON3-RCS016 FW4 FW6 (各1~7)	撮影日付 SHOT DATE	4.26.90
検査官 INSPECTOR	財団法人 発電設備技術検査協会	検査日付 DATE OF REVIEW	5.31.90
	客先		
フィルム番号 RADIOGRAPH No.	欠陥の位置と種類 LOCATION & TYPE OF DEFECT	判定 EVALUATION	備考 REMARK
KON3-RCS016 FW4-1	有効長 55 mm	<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
2		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
3		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
4		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
5		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
6		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	
7		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 PASS	

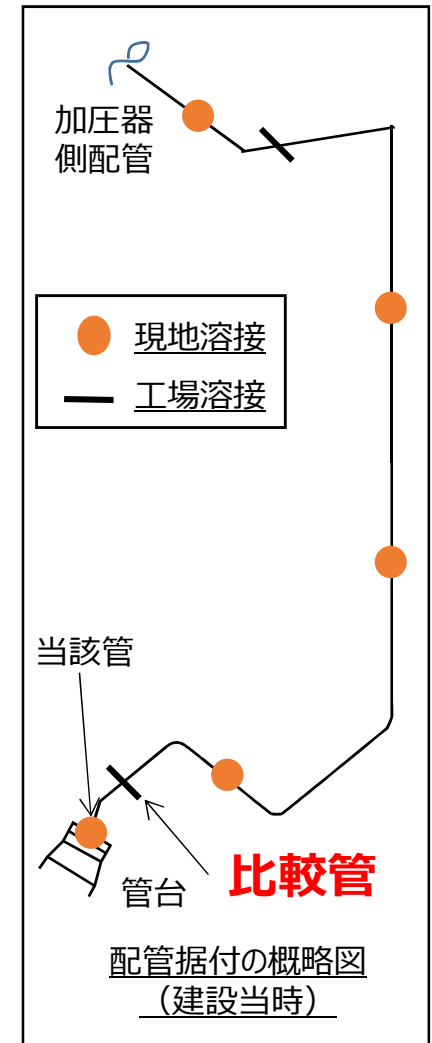
(当該管の放射線透過試験記録)

溶接記録や当該溶接部積層図等による 手入れ溶接の有無の確認及び硬さへの影響評価（比較管）（1/2）

○ 施工当時の記録から、溶接施工手順に問題がなかったことを確認する。

【**比較管**の溶接施工手順】（耐压試験・目視検査を除いて工場で実施）

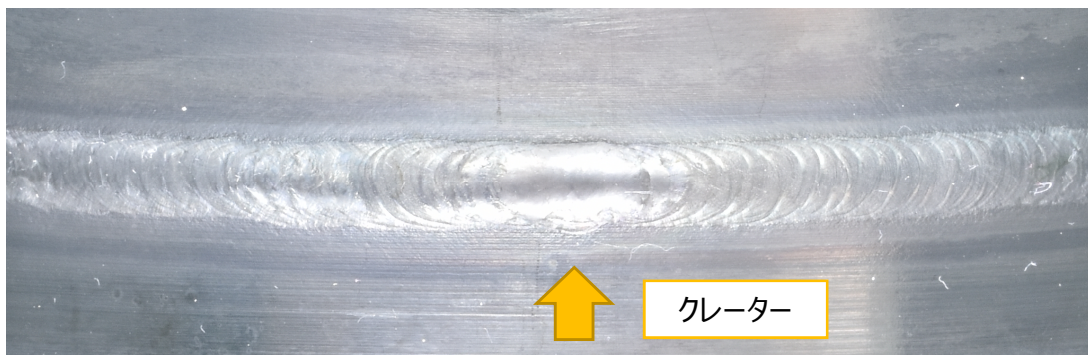
手順		実施日	確認した記録	確認結果および特記事項
材料確認	配管	'89.7.12	素材チェックシート ミルシート	規格通りの材料であった。
	エルボ	'89.6.12		
開先合せ検査		'89.11.17	開先検査記録	図面指示通りの開先合せ精度であった。
溶接		'89.11.29	溶接施工記録	溶接指示通りの施工であった。
非破壊検査（RT）		'89.12.2	放射線透過試験記録	有意な指示がないことを確認した。
非破壊検査（PT）		'89.12.12	浸透探傷試験記録	有意な指示がないことを確認した。
耐压試験・目視検査		'90.9.18	耐压・漏えい試験記録	漏えいがないことを確認した。 （サイトで実施）



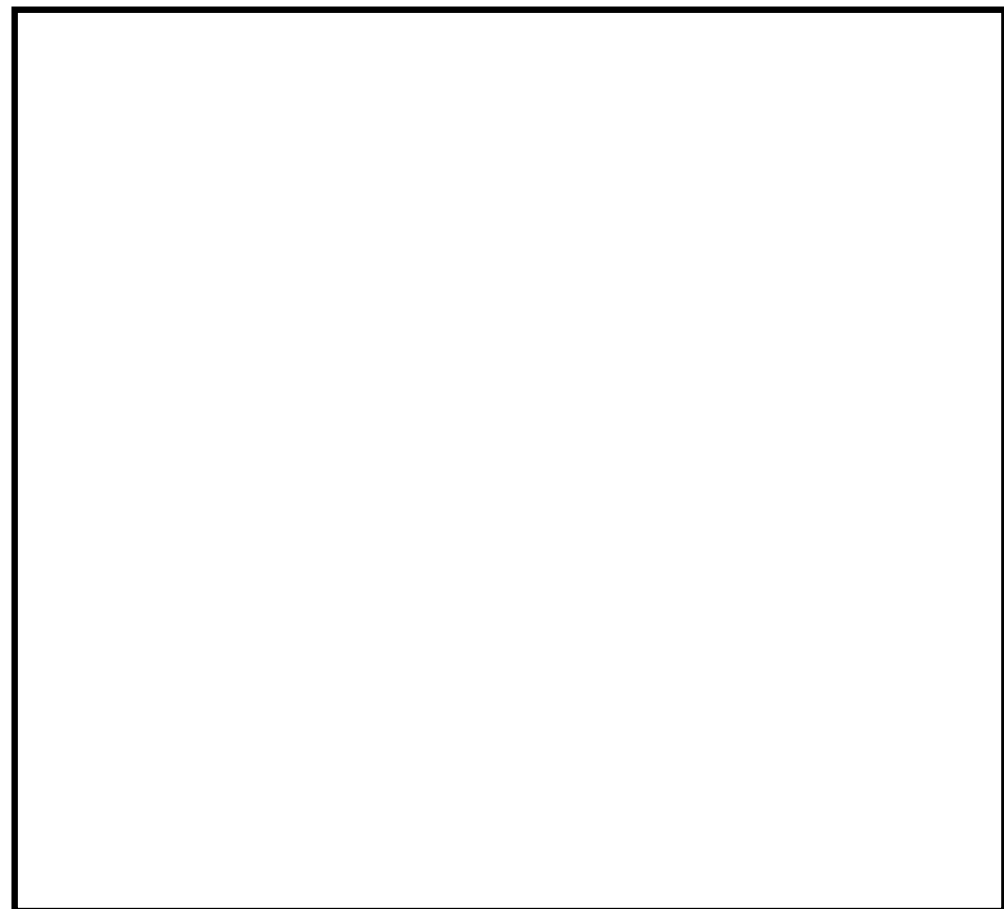
○ 一般的な施工手順通りに開先合せおよび溶接施工を実施し、溶接検査に合格している。特に不適合、異常は確認されていない。

溶接記録や当該溶接管積層図等による 手入れ溶接の有無の確認及び硬さへの影響の評価（比較管）（2/2）

- Ø 比較管の溶接部はTIG+SMAWの4層4パス溶接であり、断面写真から4層の積層が認められる。
- Ø 溶接裏波の0°付近には1箇所のクレーターが認められ、標準的な溶接が施工されたと考えられる。



比較管 溶接部裏波写真（0°付近）

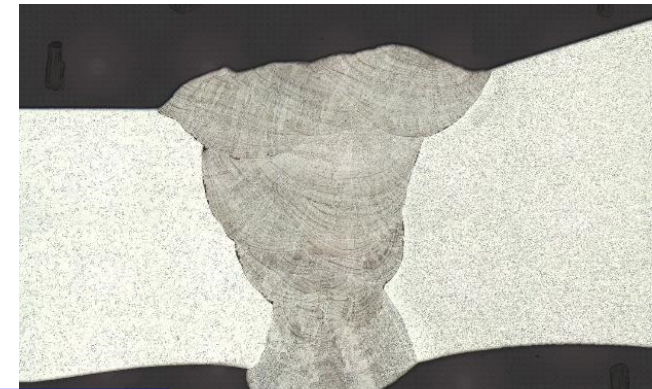


比較管 溶接部積層図

形状による剛性の硬さへの影響確認

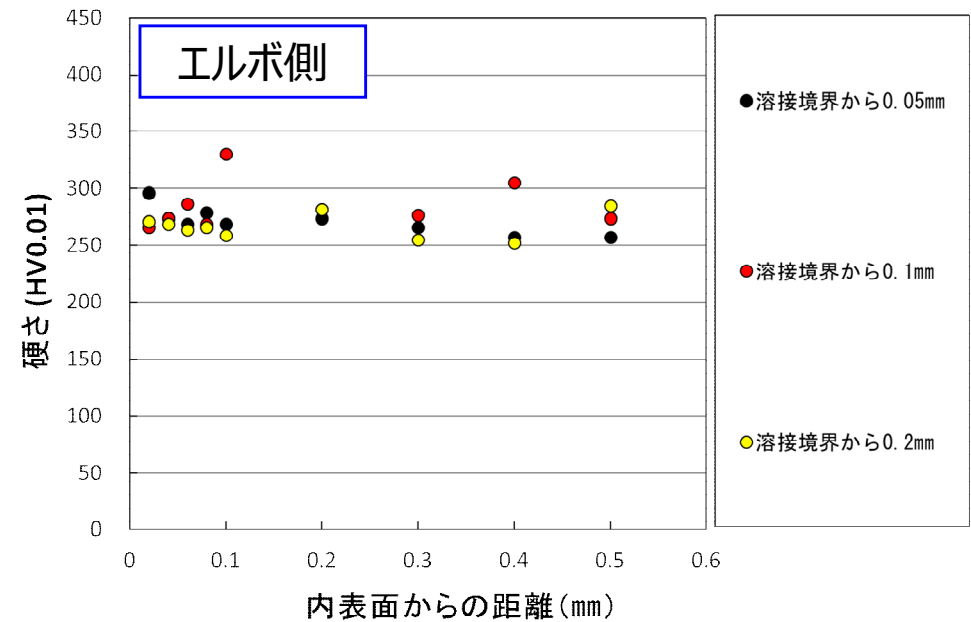
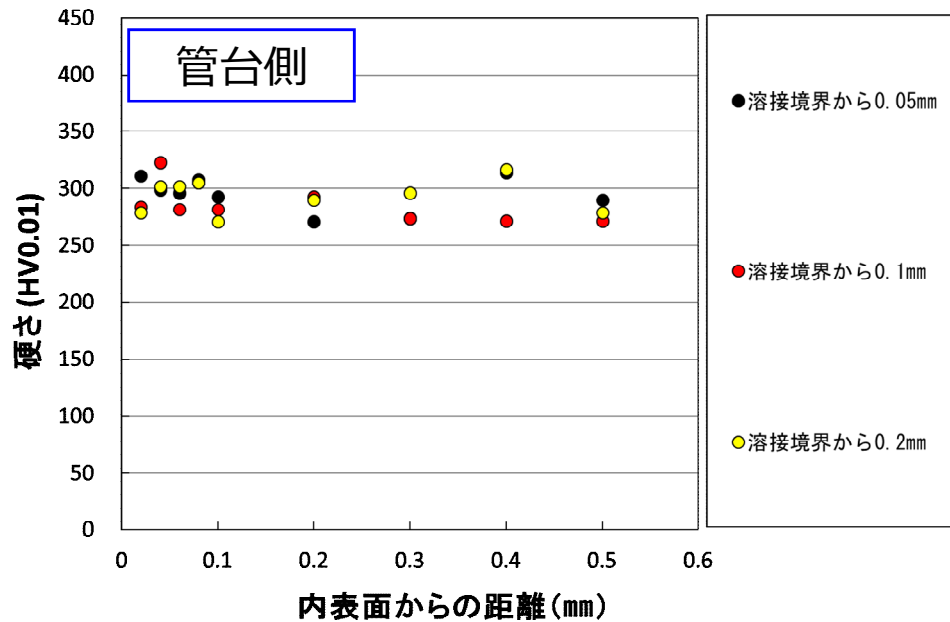
②形状による剛性を考慮したモックアップ^o製作と硬さ測定（測定データ）（1/4）

ケース	溶接方法	拘束条件
ケース1	初層Tig+SMAW	管台-エルボ



管台側

エルボ側

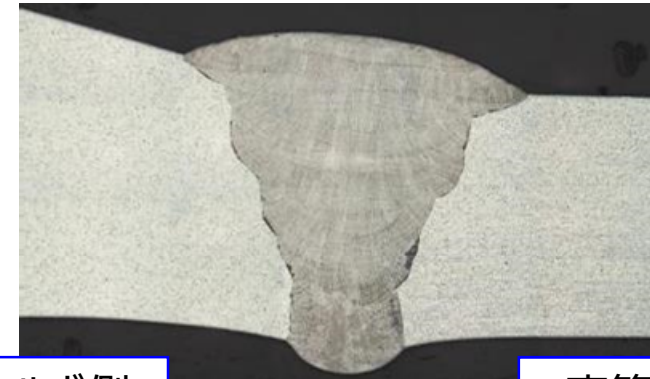


○ 管台-エルボ、初層Tig+SMAWで溶接したモックアップにより、300HVを超える硬さを再現した。

形状による剛性の硬さへの影響確認

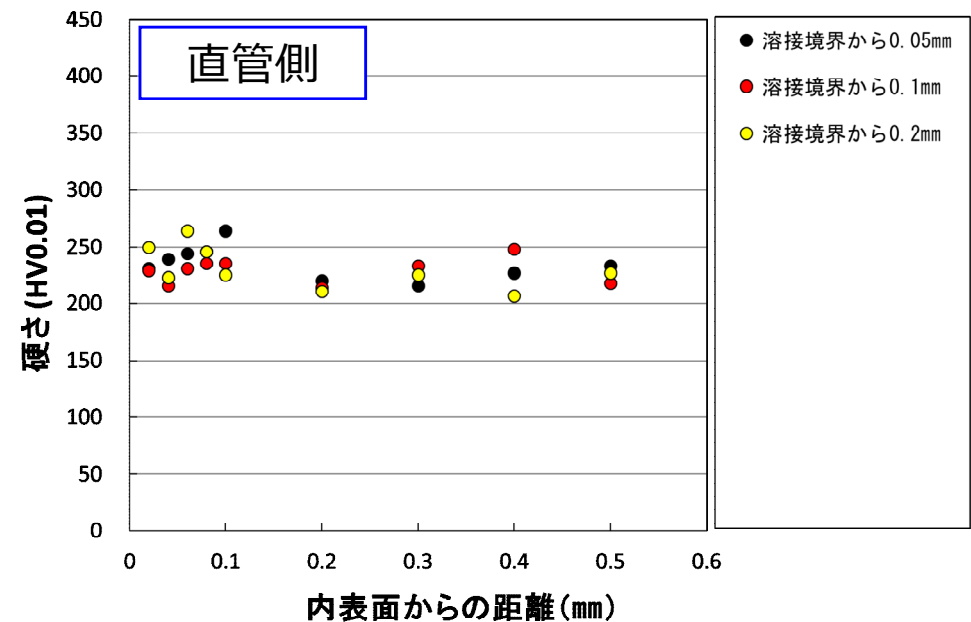
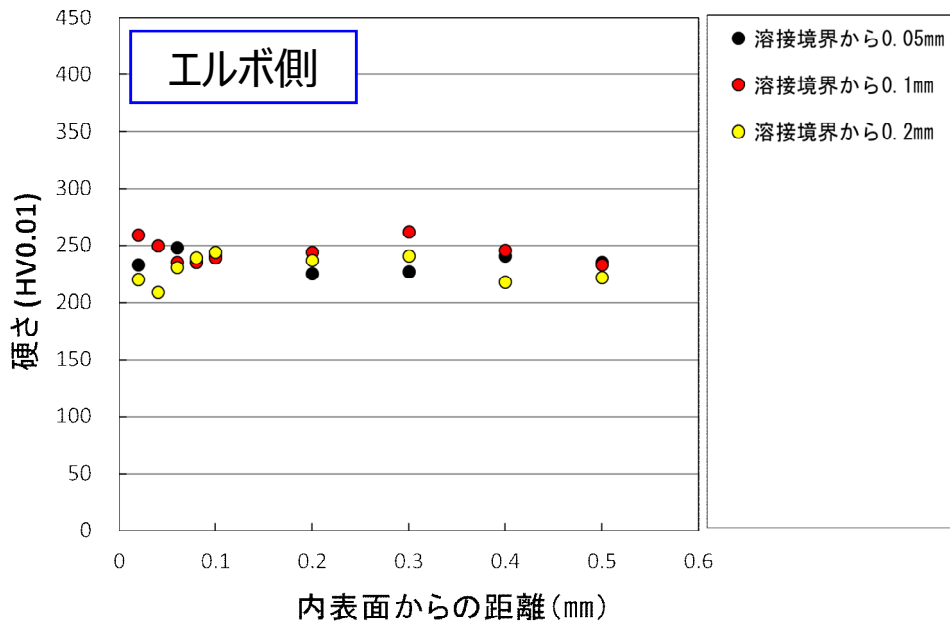
②形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定（測定データ）（2/4）

ケース	溶接方法	拘束条件
ケース2	初層Tig+SMAW	エルボ-直管



エルボ側

直管側



○ エルボ-直管、初層Tig+SMAWで溶接したモックアップでは、300HVを超える硬さを再現できなかった。

形状による剛性の硬さへの影響確認

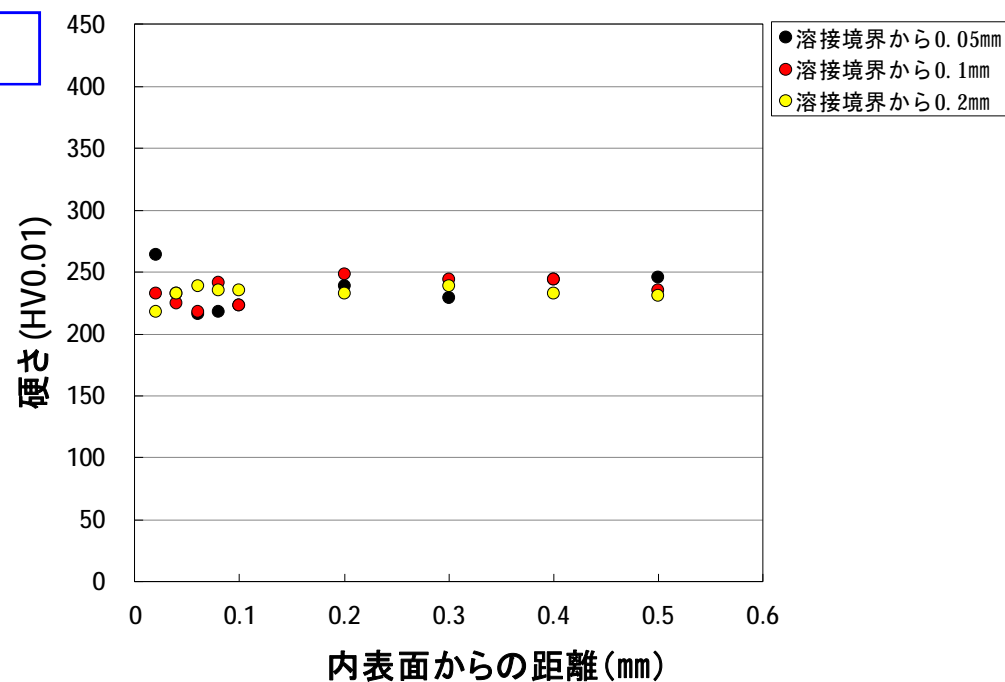
②形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定（測定データ）（3/4）

ケース	溶接方法	拘束条件
ケース3	初層Tig+SMAW	直管-直管



直管

直管

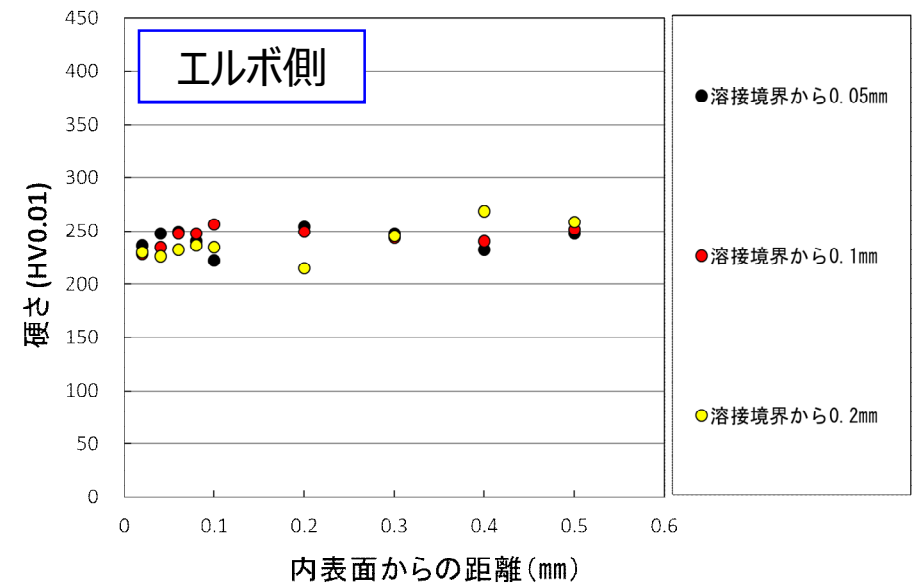
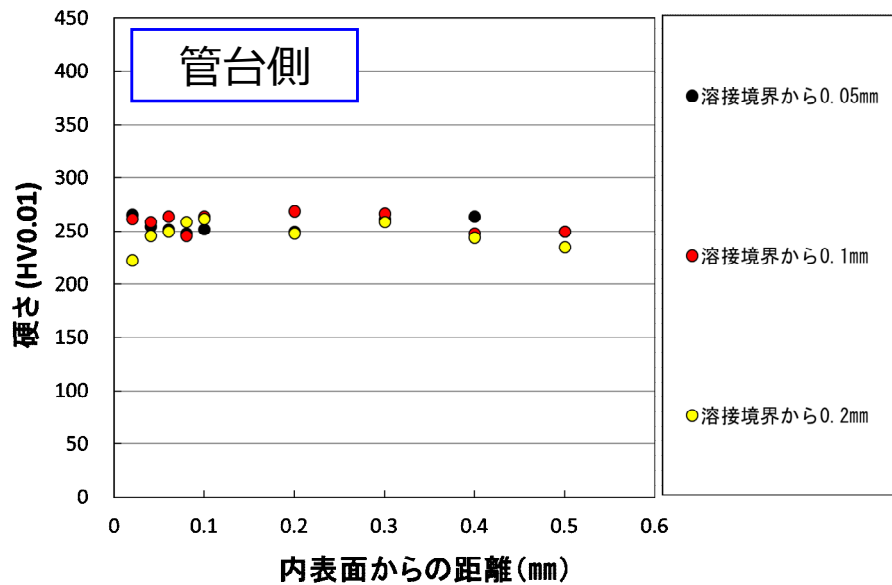
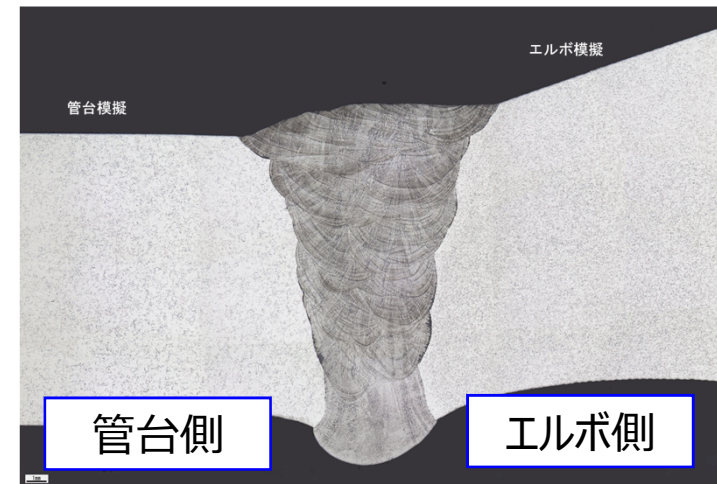


○ 直管-直管、初層Tig+SMAWで溶接したモックアップでは、300HVを超える硬さを再現できなかった。

形状による剛性の硬さへの影響確認

②形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定（測定データ）（4/4）

ケース	溶接方法	拘束条件
ケース4	全層Tig	管台-エルボ



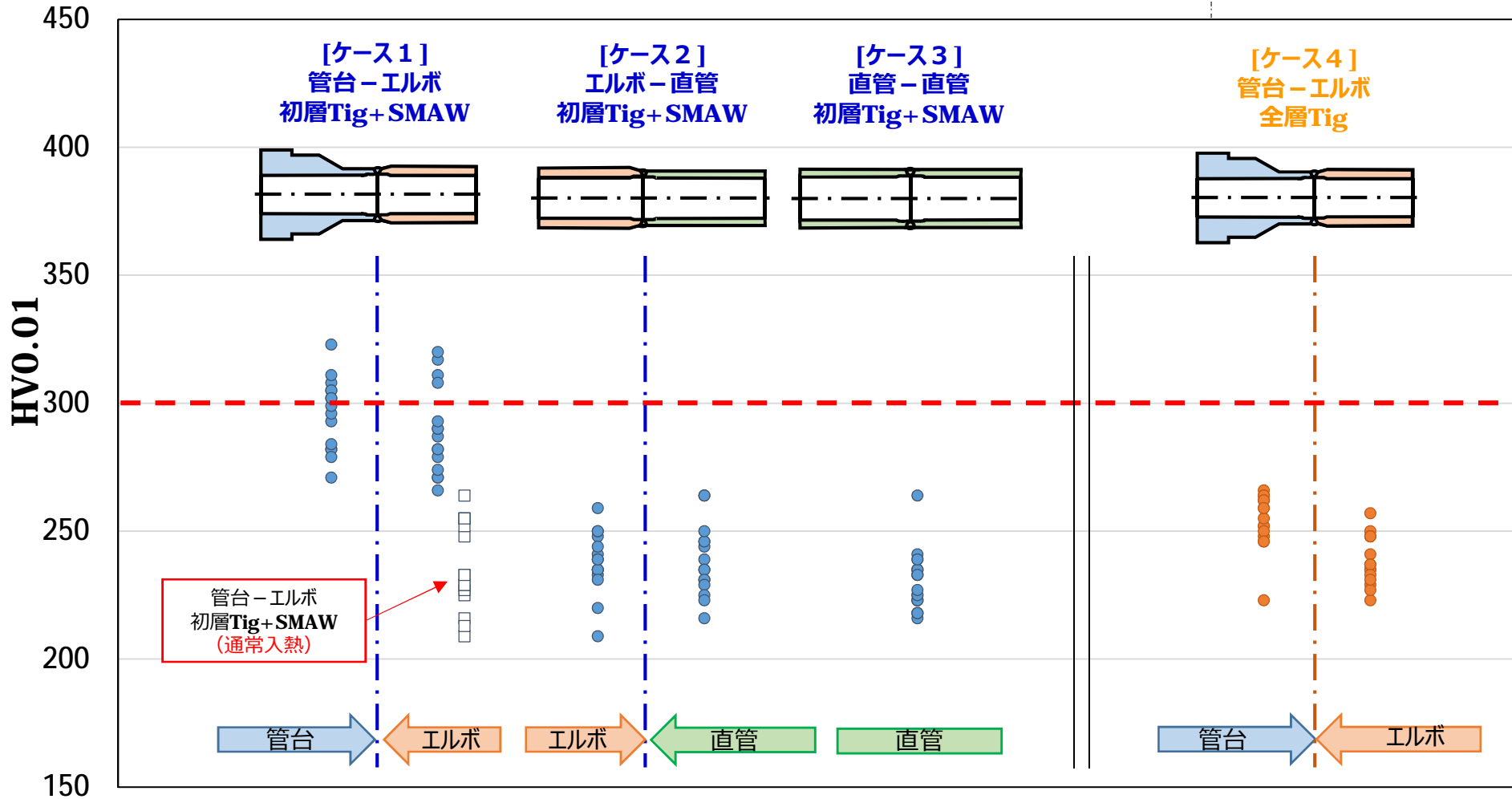
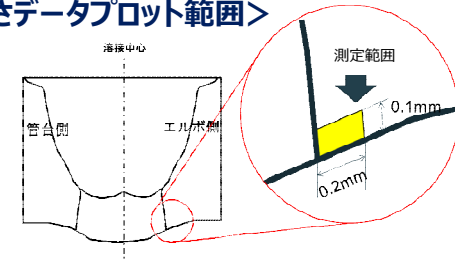
Ø 管台-エルボ、全層Tigで溶接したモックアップには、300HVを超える硬さを再現できなかった。

形状による剛性の硬さへの影響確認

②形状による剛性を考慮したモックアップ製作と硬さ測定（ケース1（通常入熱））

○ 溶接時における形状による剛性の影響について確認するために製作したモックアップの硬さ測定結果は以下のとおり。

<硬さデータプロット範囲>



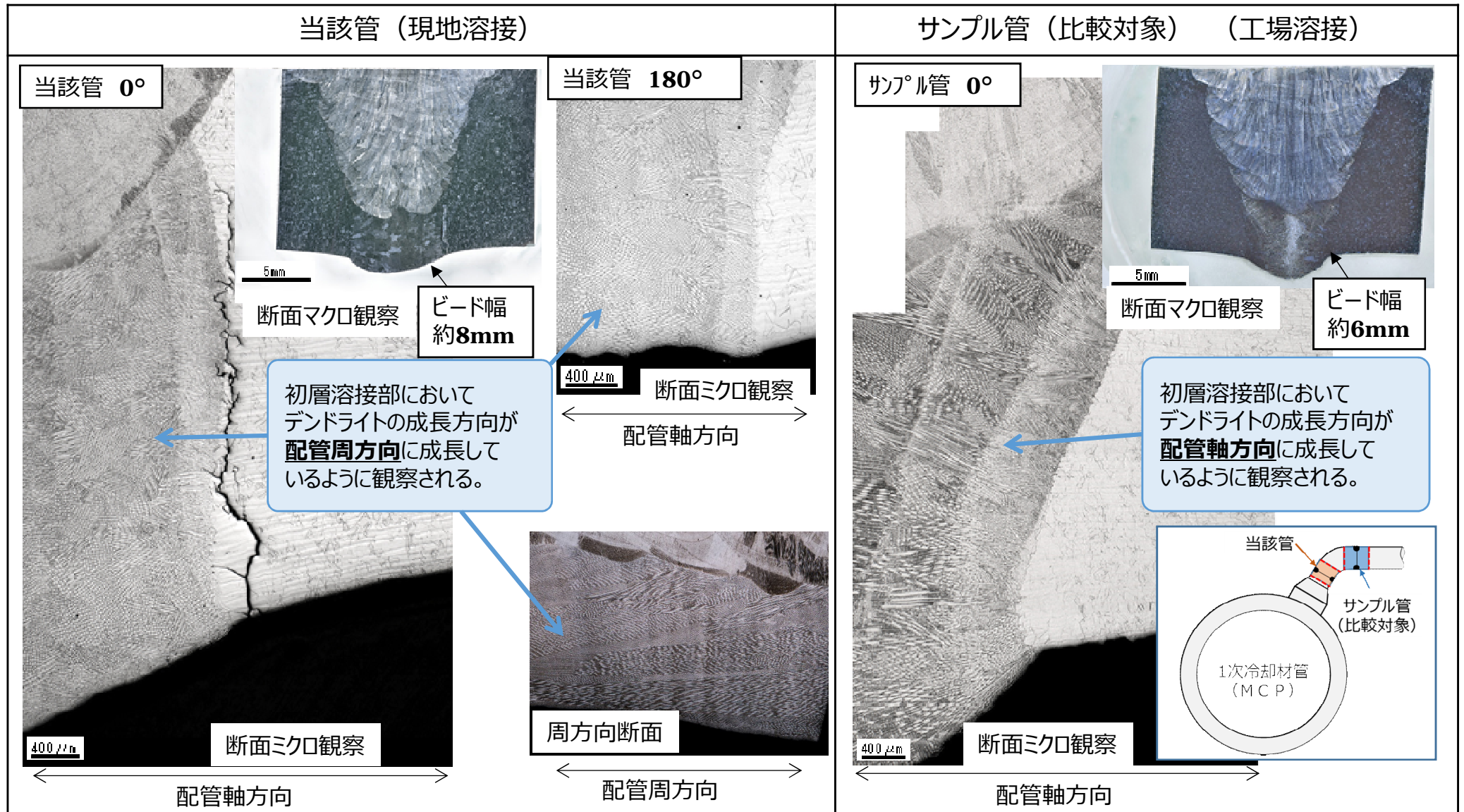
管台 - エルボ
初層Tig+SMAW
(通常入熱)

当該溶接部を実施した溶接士の他の溶接箇所について

- 当該部の溶接を実施した溶接士が、大飯3, 4号機において建設時に施工した他の溶接箇所は以下のとおり。
- 大飯3号機の検査未実施箇所4箇所については、念のため検査を実施した。

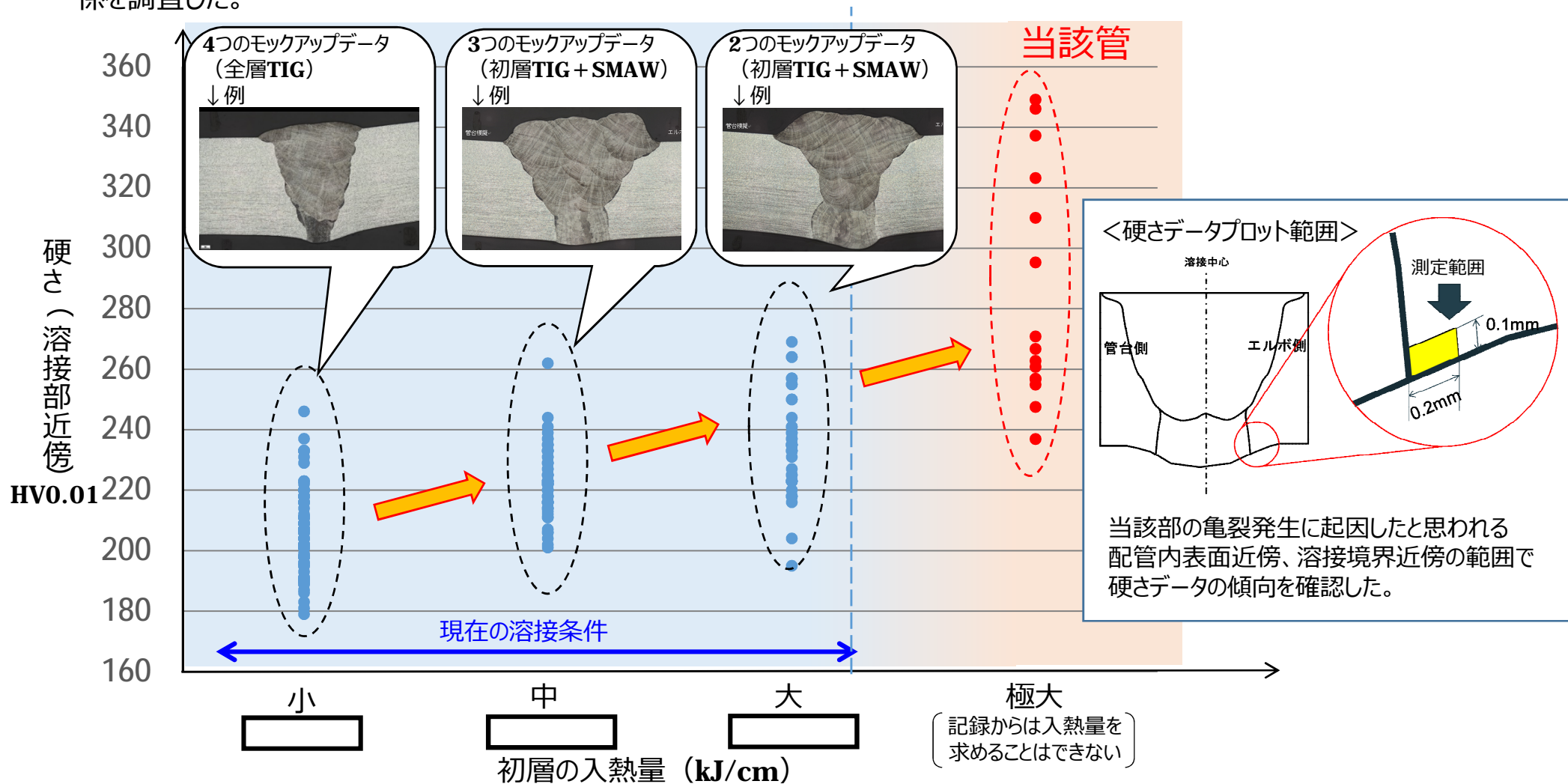
	全層Tig溶接	初層Tig+SMAW
大飯3号機	0	5 (済)
大飯4号機	1	2 (済)

- 溶接時の入熱による硬化について、当該管とサンプル管の断面を比較しビード幅および溶接金属組織について考察した。



○ 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。）

- 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を調査した。

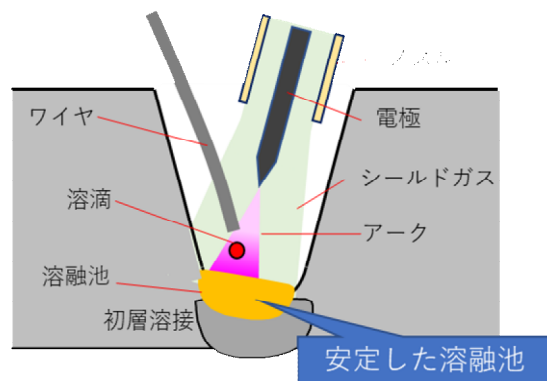


- モックアップ調査の結果、**入熱量が増加するに伴い硬くなる傾向**が認められた。
- このことから**当該部においては、大きな入熱が付与されたものと推察**される。
- なお、**現在の溶接条件では、当該管と同程度の硬さまで硬くならないことは確認**された。

溶接手法による初層溶接の入熱について

- 当該箇所及び比較管の溶接部について、硬化の原因を検討したところ、両溶接部は「初層TIG+SMAW」で溶接されていることから、溶接手法による初層の入熱について以下の通り検討した。

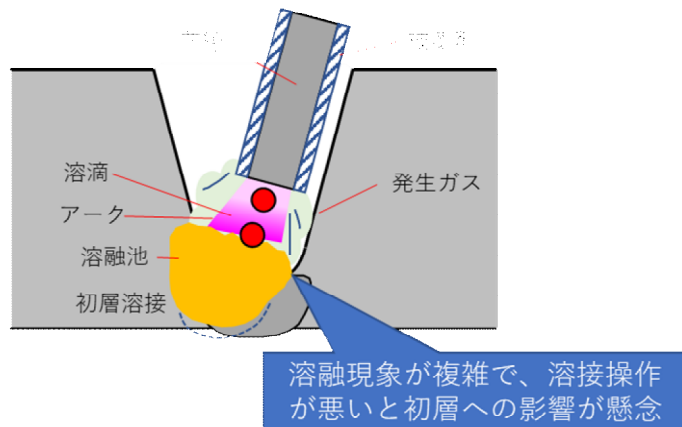
【2層目：TIG】



<全層TIG>

- TIG溶接では、被覆剤なしのワイヤ、シールドガスを用いた非消耗電極式溶接法のため、2層目以降の溶接においても比較的安定した溶融池が形成される。

【2層目：被覆アーク】



<初層TIG+SMAW>

- 被覆アーク溶接は被覆剤を塗布した溶接棒による消耗電極式溶接法であり電流値により溶接棒の溶融量が影響されるとともにスラグやスパッタ発生で溶融現象が複雑となる。
- このため溶接棒の操作次第では2層目の溶接時に初層への影響が生じ、初層の再溶融による裏波のへこみや溶け落ちを発生させる可能性がある。



溶接士は被覆アーク溶接に置ける上記の現象を避けるため、**初層TIG+SMAWでは全層TIGの初層よりも厚めの初層溶接を行うことで、入熱が大きくなる傾向**がある

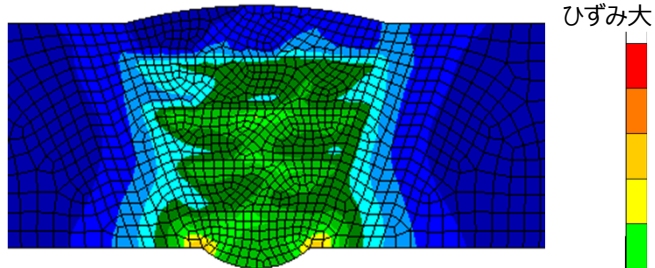
硬化が認められた当該箇所及び比較管に用いられている溶接手法であること及び、初層の入熱が過大となる懸念があることから、「**初層TIG+SMAW**」溶接は**追加検査の対象**とする。

- 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。

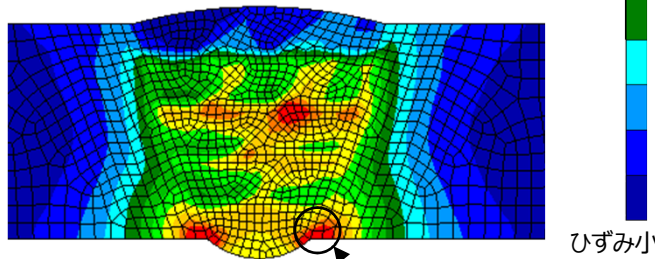
解析

FEM解析による塑性ひずみへの入熱量の影響

初層の入熱量 : 7 kJ/cm



初層の入熱量 : 11 kJ/cm



亀裂発生部

材質 : SUS316

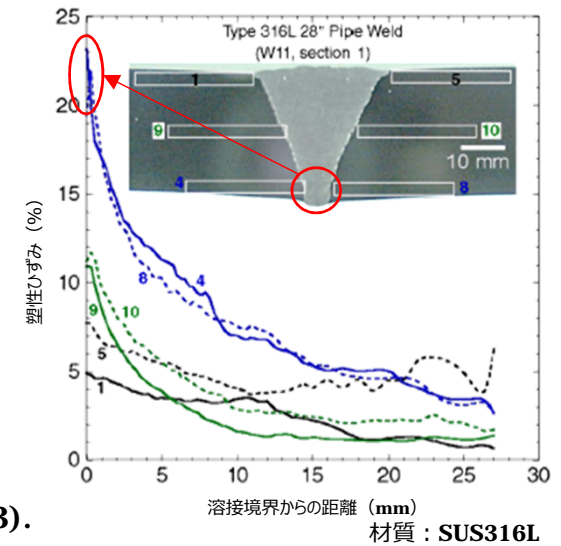
図 : 4B管(TIG+SMAW) 溶接模擬 FEM解析による塑性ひずみコンター図

- 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

溶接部近傍の塑性ひずみ分布

- 内面近傍の塑性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

- 塑性ひずみが増すに従い、硬さが上昇する。

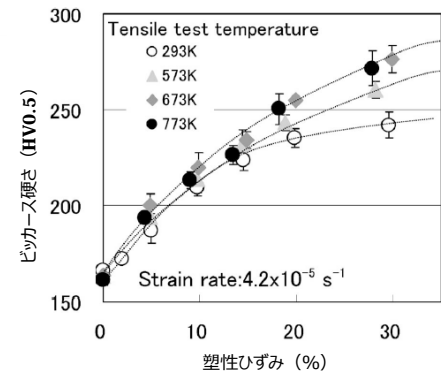


Fig. 4 Relationship between micro-Vickers hardness and tensile strain at temperatures of 293, 573, 673 and 773 K.

材質 : SUS316L

- 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、**入熱量が増加するに伴い硬くなる傾向**が示されていることを確認した。

1次冷却材管について

<ステンレス鋳鋼>

- 〇 ステンレス鋳鋼のPWR一次系水質環境下でのSCCの亀裂進展性については、電共研にて試験を実施しており、亀裂が進展しないことを確認している。(図1)
- 〇 今回亀裂が確認された実機当該部の板厚内部硬さは**240HV**程度であったが、電共研ではそれよりも硬い状態を冷間加工で模擬した試験片 (**280HV**) にて試験を実施しており、それでも亀裂は進展していない。
- 〇 また、INSSにおいても同様な亀裂進展試験が実施されており(図2)、亀裂の進展は認められていない。
- 〇 以上の結果から、ステンレス鋳鋼は、PWR一次系水質環境下において、SCCによる亀裂が進展しないことが知られている。
- 〇 なお、ステンレス鋳鋼はデルタフェライトを含んでおりSCC感受性を抑制している可能性がある。[1]

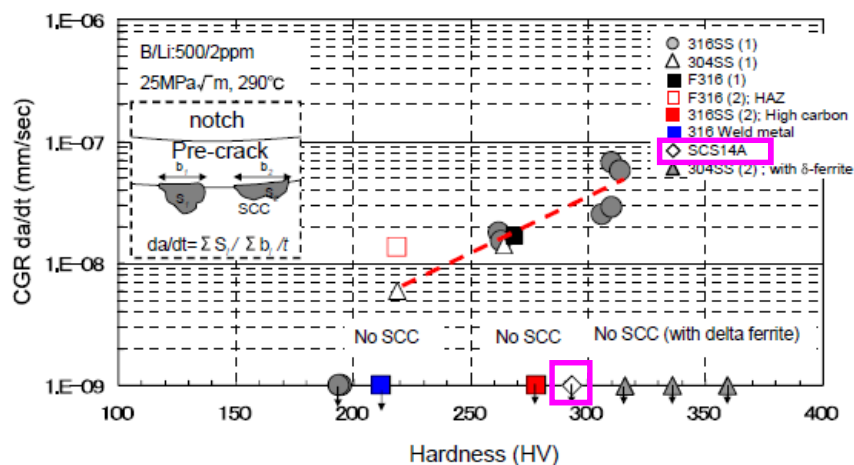


図1 PWR一次系水質環境下の硬さと亀裂進展速度の関係

出典 ; Matsubara.et.al 2010 Fontevraud7 002-A099-T03 -Research Programs on SCC of Cold-worked Stainless Steel in Japanese PWR N.P.P.

9/11 公開会合資料1-2 (添付資料-7) より抜粋

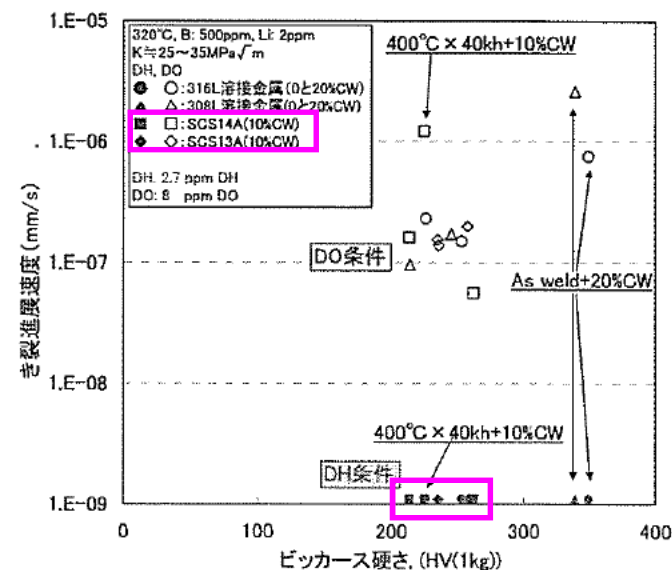


図2 各種ステンレス鋼の亀裂進展速度の硬さ依存性

出典 : ステンレス溶接金属と鋳鋼の高温水中SCC進展に及ぼす電位の影響 (日本原子力学会「2009年春の年会」)

[1]Y.Chen 他, Cracking of irradiated cast stainless steels in low corrosion potential environments, Environmental Degradation Conference 2019.

<セーフエンド溶接部>

- 〇 1次冷却材管と機器セーフエンドの溶接部は内表面の裏波部を除去している。
- 〇 なお、記録は残っていないものの、当該部は溶接内面の浸透探傷検査を実施しており、標準的な施工としてバフ施工を実施していると考えている。

1次冷却材管管台（セットイン）について

- 追加検査を実施する溶接部は、初層溶接の大入熱により特異に硬化する箇所を対象としている。
JSME維持規格における試験カテゴリ**B-J**の**B9.31**「母管と管台の溶接継手（100A以上）」のうち、**1次冷却材管管台（セットイン）**の溶接継手は両U開先であり、今回割れが発生した部位の開先と異なり、初層溶接部は接液しない構造であることから、対象外としている。
- これまでの公開会合でも示した通り、特異な硬化が認められた初層溶接部近傍に対して、最終溶接部の近傍は硬さが低下する傾向が確認されており、図2に示す実機内部硬さ計測結果においても、同様に硬さが低下する傾向を確認している。
- なお、記録は残っていないものの、当該部は溶接内面の浸透探傷検査を実施しており、標準的な施工としてバフ施工を実施していると考えている。

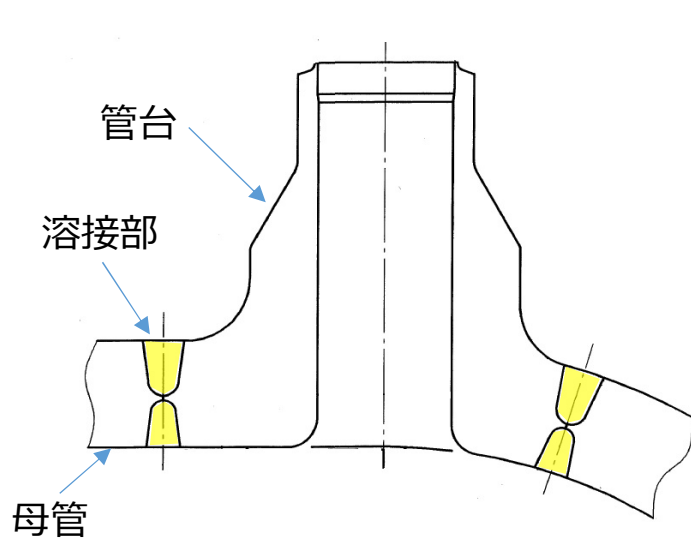


図1 MCP管台（セットイン）溶接形状

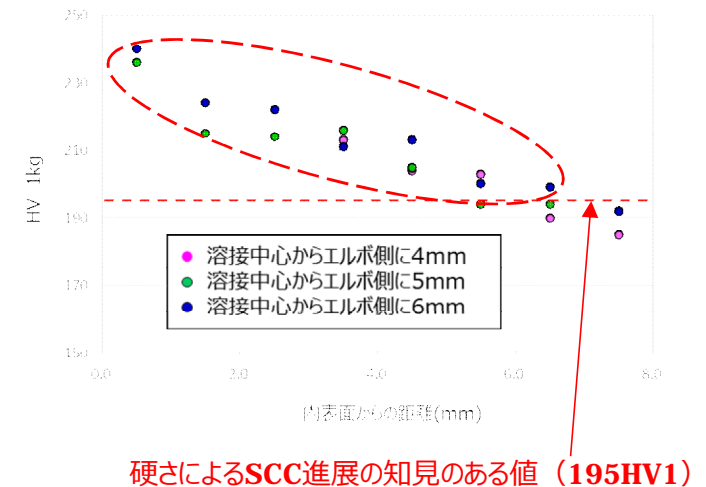
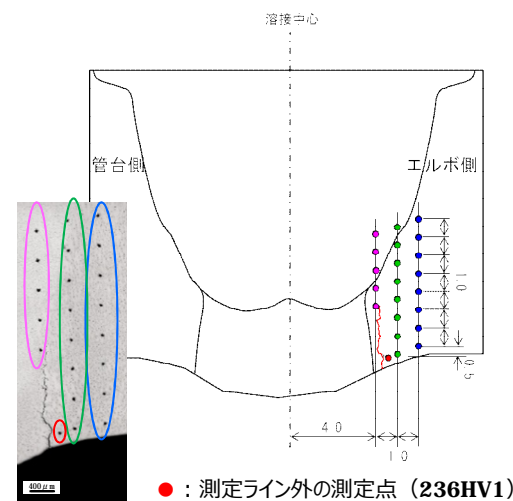
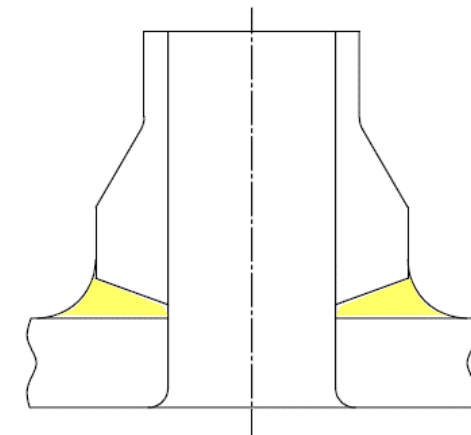


図2 実機内部硬さ計測結果※

※ 2020年12月24日第7回公開会合資料より

1次冷却材管管台（セットオン）について

- 追加検査を実施する溶接部は、初層溶接の大入熱により特異に硬化する箇所を対象としている。
JSME維持規格における試験カテゴリB-JのB9.31「母管と管台の溶接継手（100A以上）」のうち、1次冷却材管管台（セットオン）の溶接継手は、図1に示す通り裏当金付きの開先であり、今回割れが発生した部位の開先と異なり、初層溶接部（約4.5～24mm）が施工の中で除去される構造となっていることから、対象外としている。
- なお、記録は残っていないものの、当該部は溶接内面の浸透探傷検査を実施しており、標準的な施工としてバフ施工を実施していると考えている。



管台内面加工後

図1 MCP管台（セットオン）の施工フロー（例）

PWRの温度環境 (200°C) とSCC進展との関係

- これまでの研究において、PWR環境中のSCC亀裂進展速度の温度依存性を検証しており、図1のとおり200°Cでの進展速度は、硬度300HVの場合10年で2mm程度、250HVの場合100年で1mm程度の進展速度である。
- 配管の硬さについては、今回事象の発生箇所のように極表層では300HVを超える硬さが生じる可能性は有るが、一方、配管内面においては当該箇所においても図2の通り、250HVを下回る硬さであることを確認している。

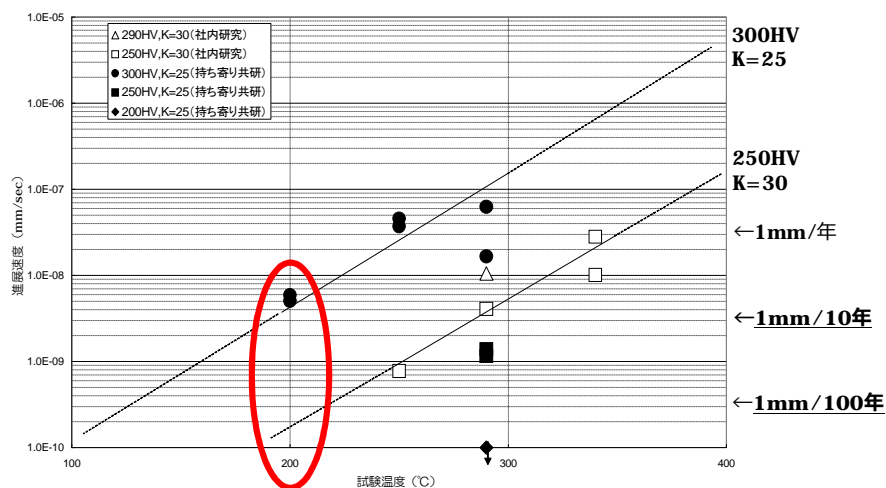


図1 SCC進展速度の温度依存性

出典；持ち寄り共研「維持規格導入に向けたステンレス配管のSCC評価に関する研究」

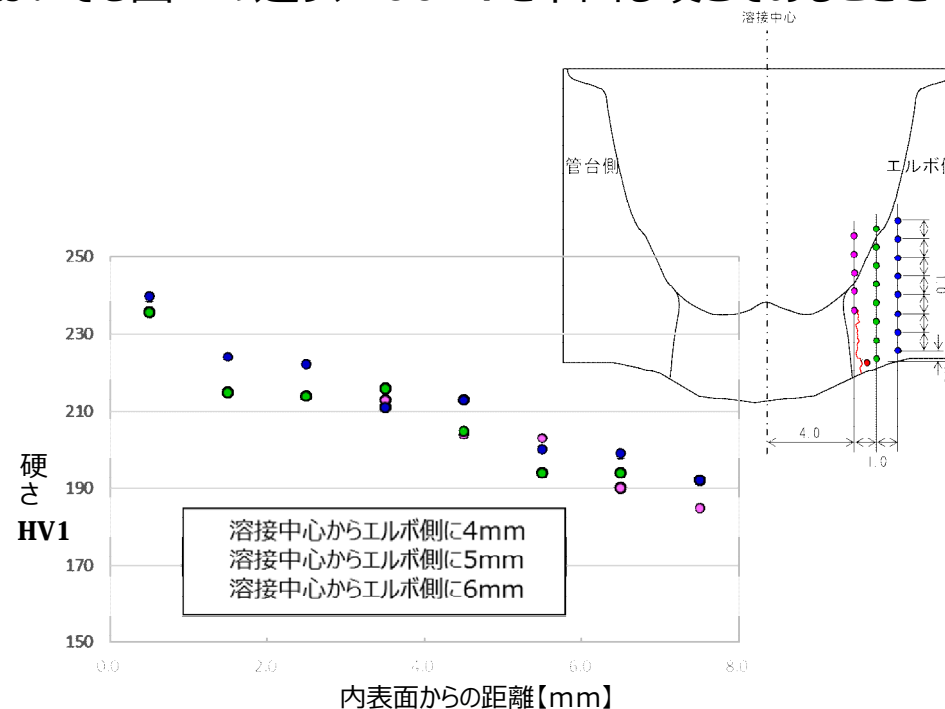


図2 実機硬さ計測結果 (溶接部近傍)

- 配管の内面の硬さを踏まえ、仮に粒界割れが生じた場合でも想定される傷は小さいことから、200°C未満の箇所は対象外とする。

残留応力の改善

○ 応力改善（バフ研磨、ピーニング）を行うことで、表面の残留応力は引張りから圧縮方向へ改善できる。

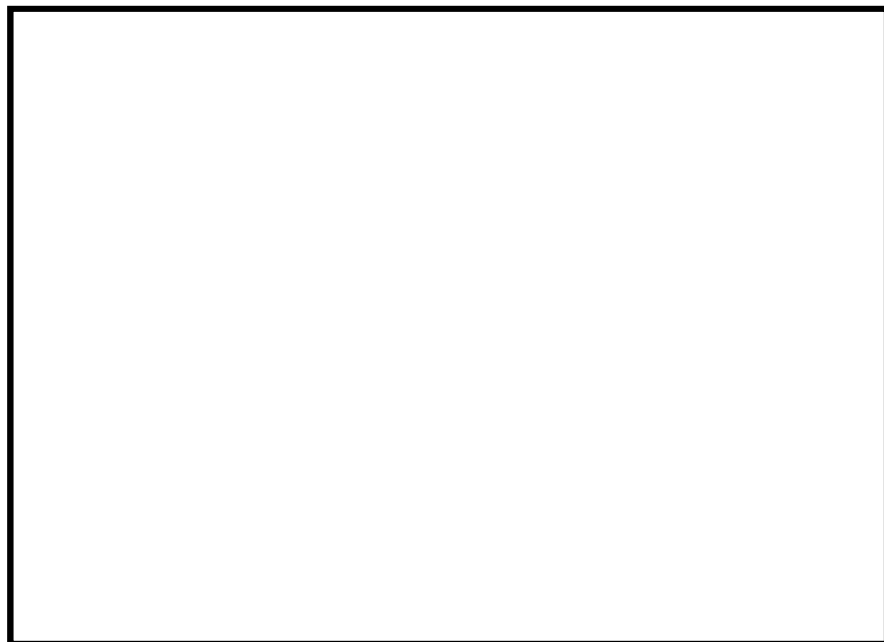


図1 応力改善バフ研磨の効果（三菱重工資料）

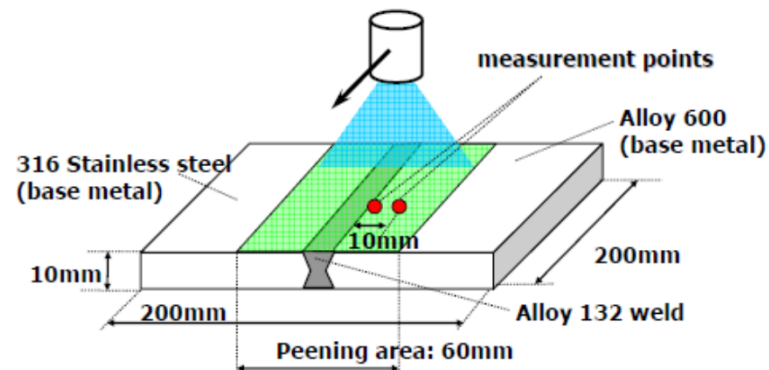


Fig.5 The mockup of butt weld for RV Nozzle safe-end

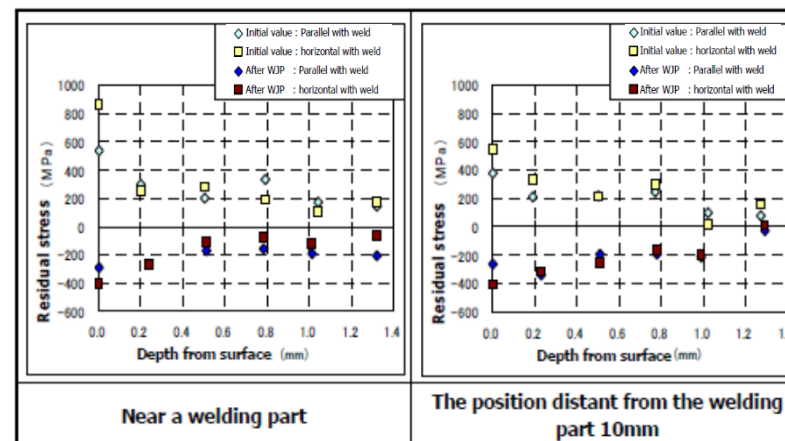
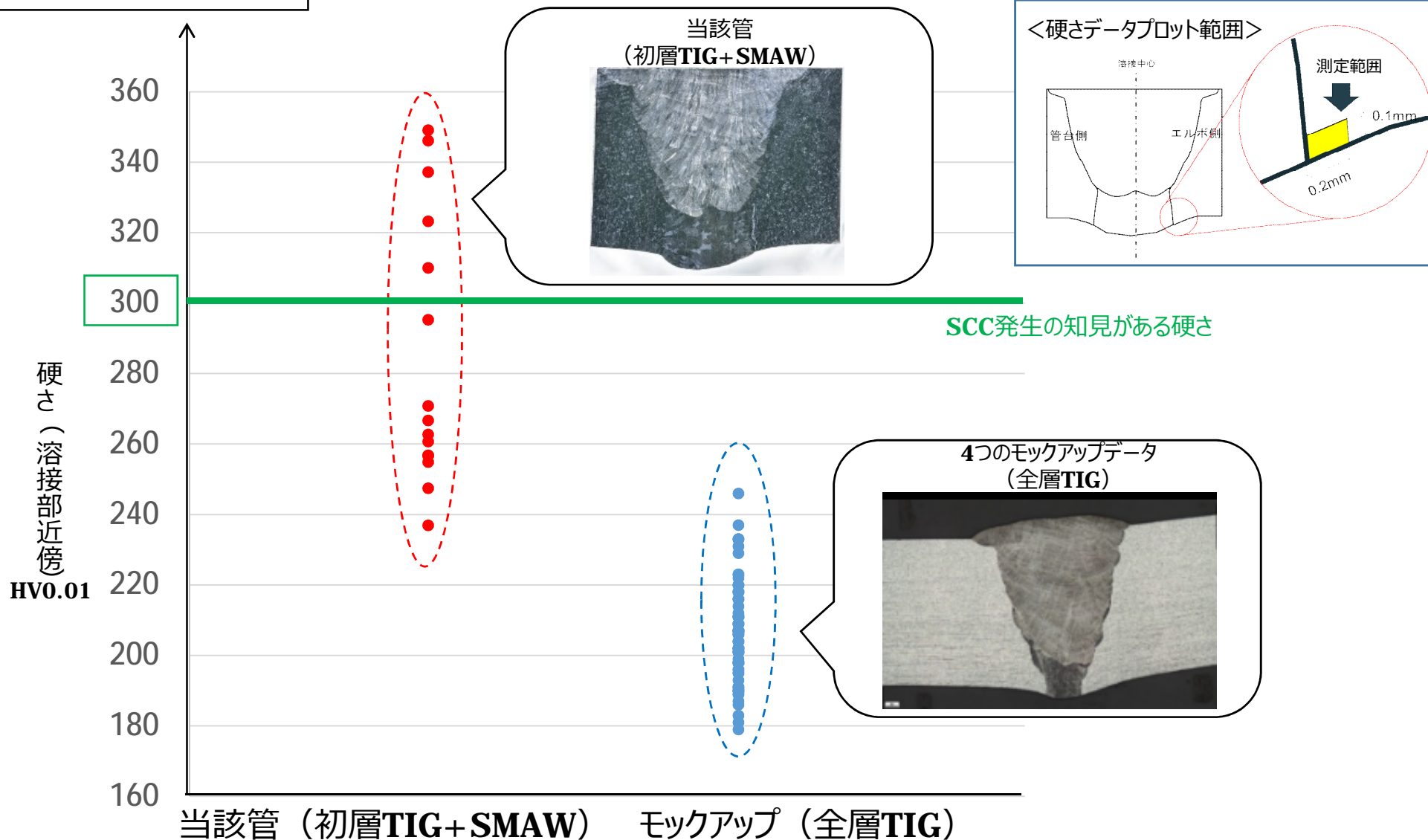


Fig.6 Results of residual stress improvement effect of butt weld mockup

図2 応力改善WJPの効果

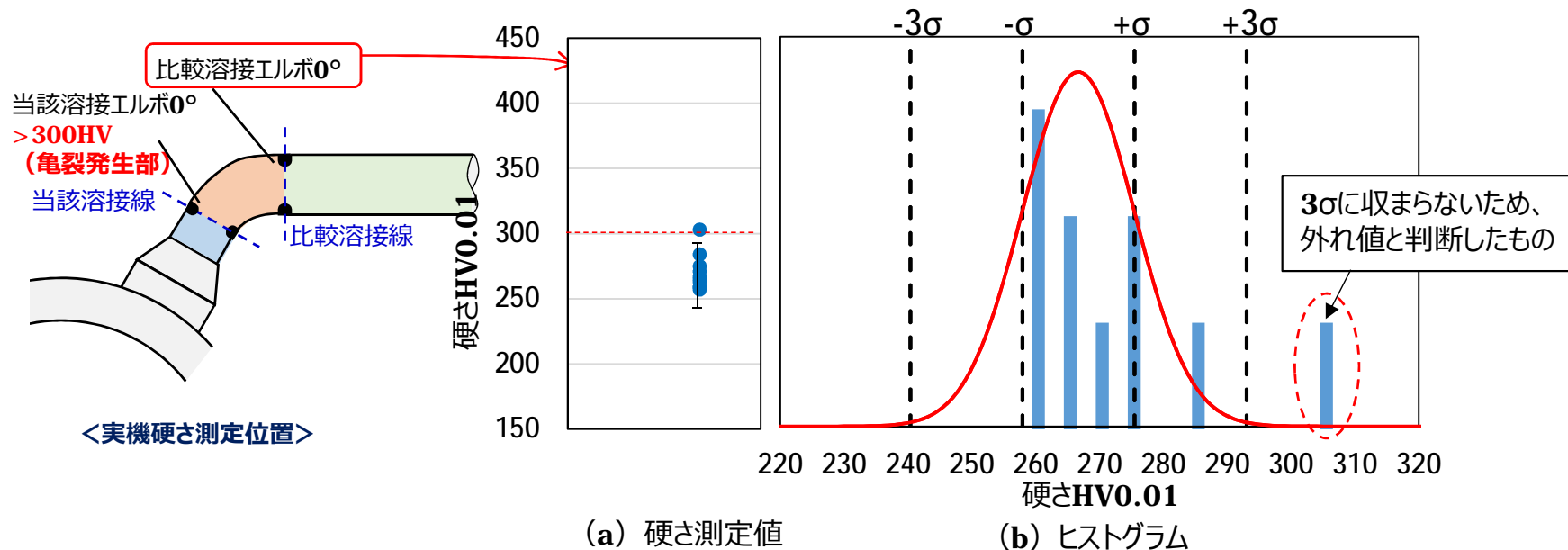
出典 ; Koji Okimura, :RELIABILITY OF WATER JET PEENING AS RESIDUAL STRESS IMPROVEMENT METHOD FOR ALLOY 600 PWSCC MITIGATION, 16th International Conference on Nuclear Engineering

○ 粒界割れは引張りの応力環境下で生じることから、**溶接後に表面の残留応力改善を実施している箇所は対象外**とする。

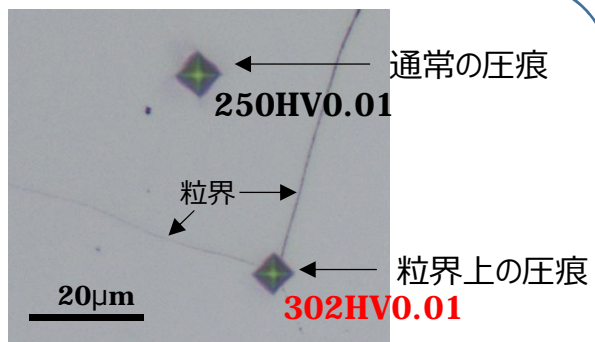


- 今回亀裂が発生した当該管溶接部は初層TIG+SMAWにて溶接され、その近傍の硬さはSCC発生の知見がある300HVを大きく超えている箇所があることを確認した。
- 全層TIGにて溶接したモックアップにおいては、300HVに至らないことを確認した。

比較溶接エルボで認められた > 300HV の測定点に関する考察



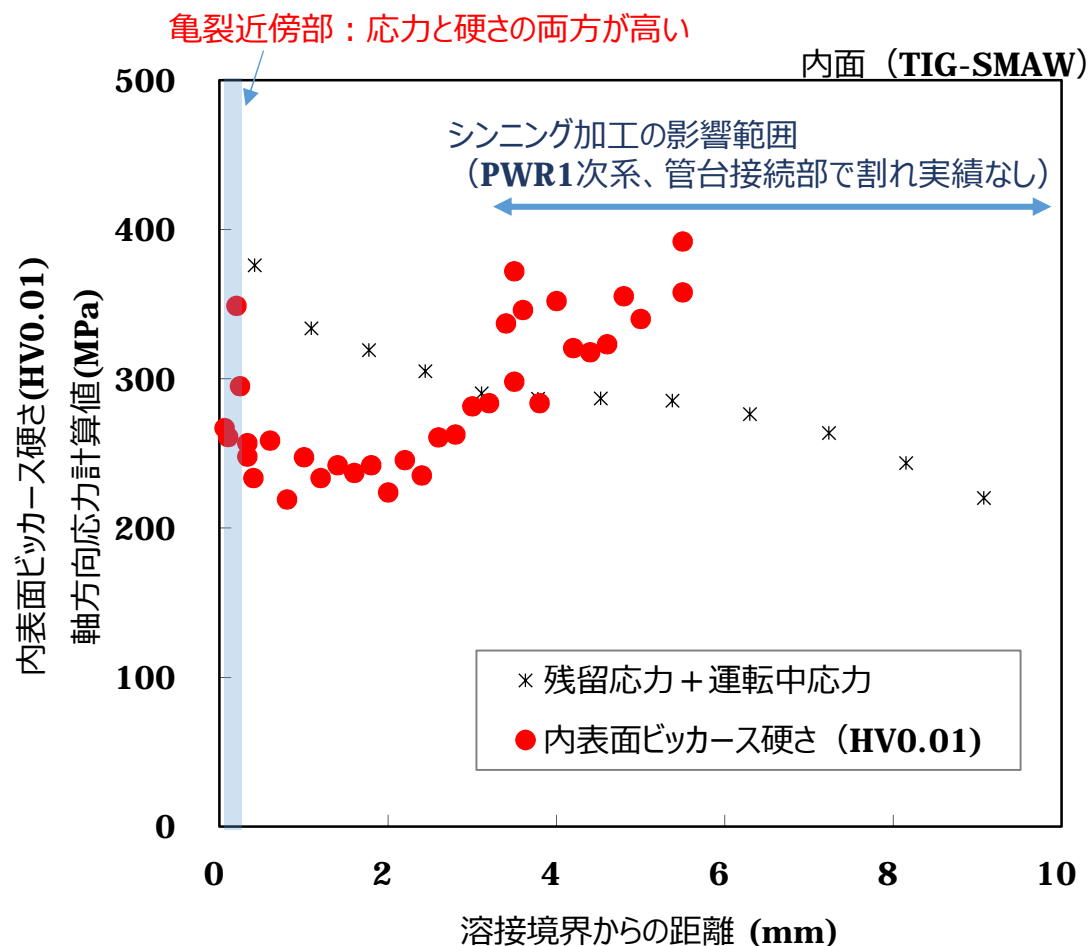
比較溶接エルボの硬さ



モックアップ (SUS316 製配管の周方向溶接部近傍) での検証結果

- 当該部の硬さは、標準偏差の3倍 (3σ) に収まらないため、外れ値であると判断した。
- ビッカース硬さ計の圧痕が粒界上に触れた場合、外れ値を示すことが想定されたため、これをモックアップで検証した。

亀裂近傍部とシンニング部の応力についての説明



- 亀裂近傍部は高い応力が想定される場所であり、硬さと応力の両方の条件が揃っていた。
- 一方、シンニング部は硬いが、応力は比較的低いため、亀裂が発生していない。

破断前漏えい（LBB）の成立性について

今回、加圧器スプレイ配管で見つかった亀裂は粒界割れの発生とSCCの進展であると判断しているが、以下の理由からJEAG4613においてLBB適用の前提条件としている「SCCに対する損傷防止対策が施されていること」は満足している。

- ü 破面調査、モックアップ試験結果等から今回発生した粒界割れは溶接時の大入熱（手入れ溶接の可能性を含む）と形状による剛性の重畳によって生じた粒界割れである。
- ü 今回の事象を除いて、これまで国内外のPWRにおいて、溶接部近傍の硬化および応力に起因する粒界割れは確認されていない。
- ü JEAG4613で言及している既知のSCCはO₂SCC, CISCCであり、これらのSCC対策は機能している。
- ü 今回事象を受けて既に大飯4号機他プラント含め類似箇所約90箇所について追加検査を実施しているが、同様の指示は確認されていない。



他部位でも発生の可能性が高い事象（ジェネリックな問題）ではなく、特異な事象と判断

なお、大飯3号機は事象発生プラントでもあることから、念のため大飯4号機と同様の考え方にに基づき、前広に超音波探傷検査を行い、有意な欠陥がないことを確認する。