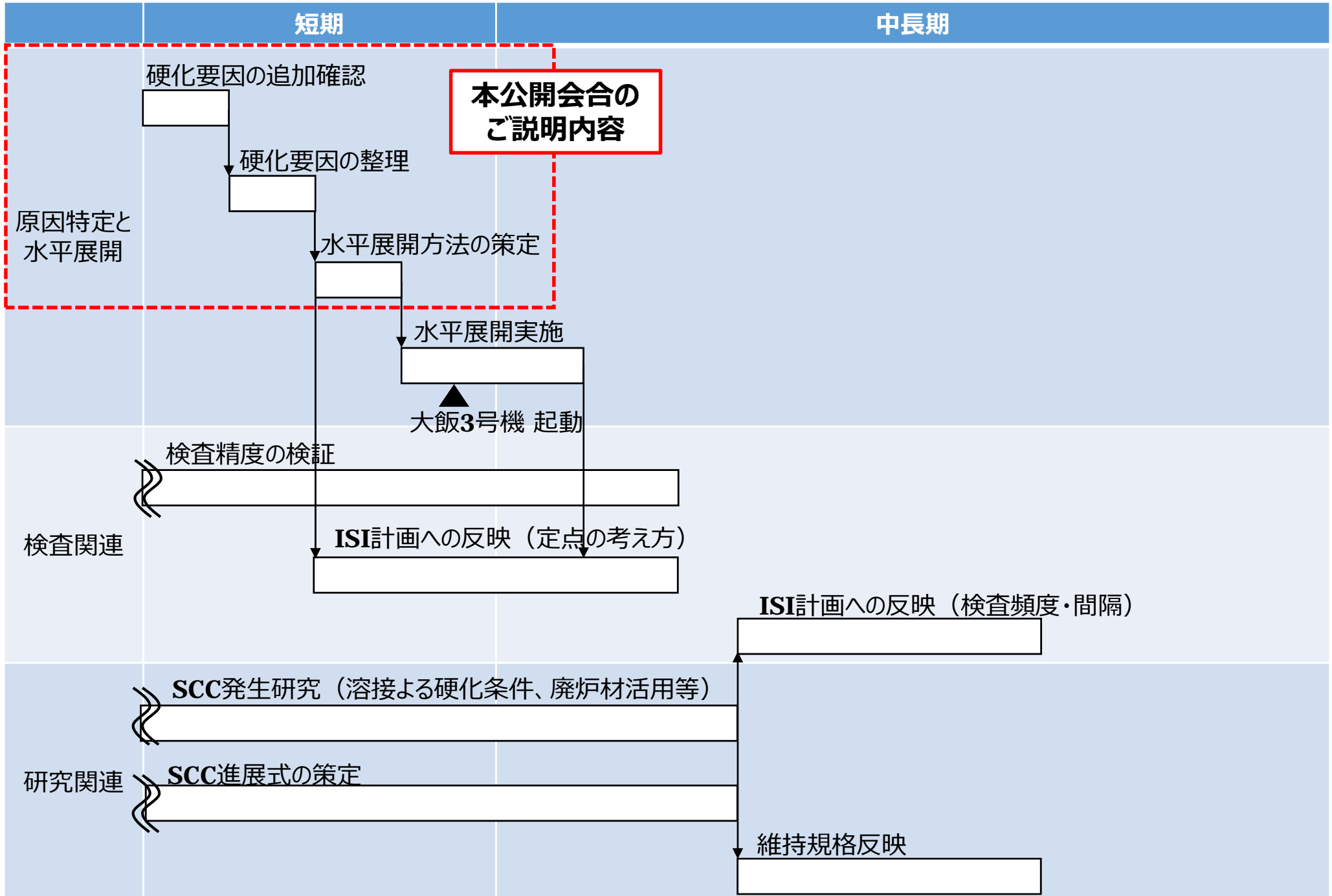


大飯発電所 3 号機
加圧器スプレイライン配管溶接部での事象への対応について

関西電力株式会社

2021年 1月14日

本事象を踏まえた短期・中長期の検討事項 (1/2)



本事象を踏まえた短期・中長期の検討事項 (2/2)

| | | |
|--------------------|-----------------------------------|--|
| 本公開会合のご説明内容 | 硬化要因の追加確認 | <ul style="list-style-type: none"> ○他の溶接箇所における実機材の調査 ○記録による溶接施工手順の確認 ○拘束条件毎の硬さ比較・整理 ○拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定 ○有限要素解析 (F E M) による残留歪み解析 |
| | 硬化要因の整理 | <ul style="list-style-type: none"> ○拘束条件の影響有無の整理 ○その他要因の影響有無の整理 |
| | 水平展開方法の策定 | <ul style="list-style-type: none"> ○追加確認結果を踏まえた検査対象箇所の抽出方法策定 |
| | 水平展開実施 | <ul style="list-style-type: none"> ○大飯4号機以外のプラントに対する追加検査 |
| 検査関連 | 検査精度の検証 | <ul style="list-style-type: none"> ○進展方向を誤認した原因調査 |
| | ISI計画への反映 (定点の考え方) | <ul style="list-style-type: none"> ○本事象の原因を踏まえたISI定点の考え方の整理 |
| | ISI計画への反映 (検査頻度・間隔) | <ul style="list-style-type: none"> ○亀裂進展速度を考慮したISI点検頻度の整理 |
| 研究関連 | SCC発生研究 (溶接による硬化条件、 廃炉材活用等) | <ul style="list-style-type: none"> ○表面加工や試験温度等をパラメータとした基礎研究によるSCC発生の知見拡充 ○複雑形状における溶接部の硬化に関する定量評価の検討 ○廃炉材を活用したSCC発生の検討 |
| | SCC進展式の策定 | <ul style="list-style-type: none"> ○過去研究データ (国内、海外) の整理 ○追加データ要否の検討 ○研究知見の公知化 他 |
| | 維持規格反映 | <ul style="list-style-type: none"> ○事例規格案の審議、発刊 |

硬化要因の追加確認

- ①他の溶接箇所における実機材の調査
- ②記録による溶接施工手順の確認
- ③拘束条件毎の硬さ比較・整理
- ④拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定
- ⑤ F E Mによる残留歪み解析

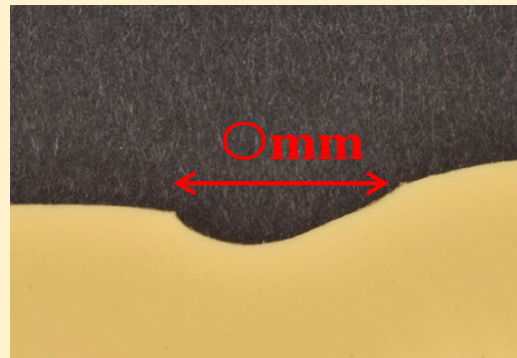
① ① 他の溶接箇所における実機材の調査

- 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形状を調査する。

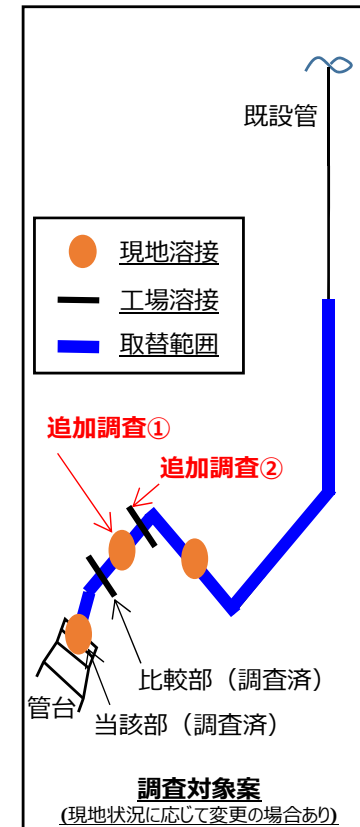
調査結果イメージ



裏波形状の外観調査



裏波幅の型取り調査



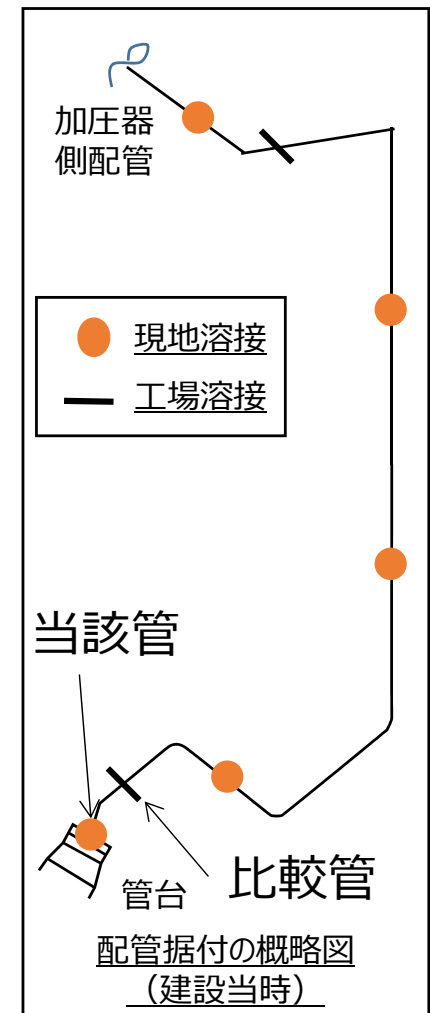
- 他 の 溶 接 箇 所 に お け る 実 機 材 の 裏 波 調 査 の 結 果 、 特 異 な 形 状 は 認 め ら れ ず 、 通 常 の 溶 接 施 工 が さ れ て い る こ と を 確 認 す る 。

②記録による溶接施工手順の確認（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。 |
| 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。 |



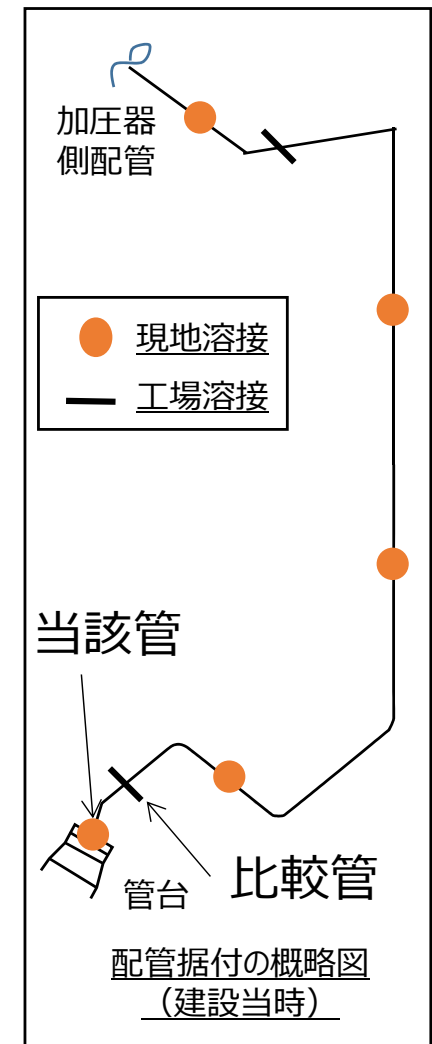
- 一般的な施工手順通りに開先合せおよび溶接施工を実施し、溶接検査に合格している。特に不適合、異常は確認されていない。
- 溶接施工について、溶接電流は指示された範囲内である。ただし、溶接入熱については、丁寧かつ慎重に溶接を行ったことから、溶接速度が遅くなり入熱が大きくなった可能性がある。

②記録による溶接施工手順の確認 (2/2)

○ 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】（耐圧試験・目視検査を除いて工場で実施）

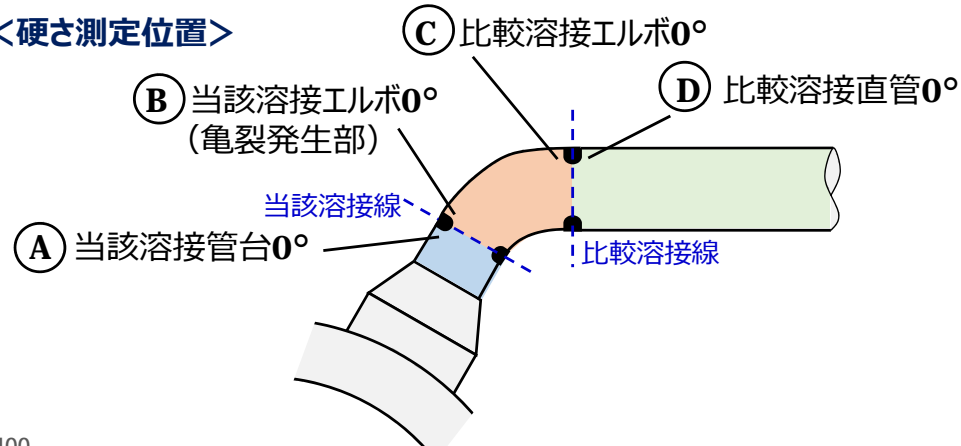
| 手順 | 実施日 | 確認した記録 | 確認結果および特記事項 | |
|------------|-----------|------------|----------------------------|--------------|
| 材料確認 | 配管 | '89.7.12 | 素材チェックシート ミルシート | 規格通りの材料であった。 |
| | エルボ | '89.6.12 | | |
| 開先合せ検査 | '89.11.17 | 開先検査記録 | 図面指示通りの開先合せ精度であった。 | |
| 溶接 | '89.11.29 | 溶接施工記録 | 溶接指示通りの施工であった。 | |
| 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。 (サイトで実施) | |



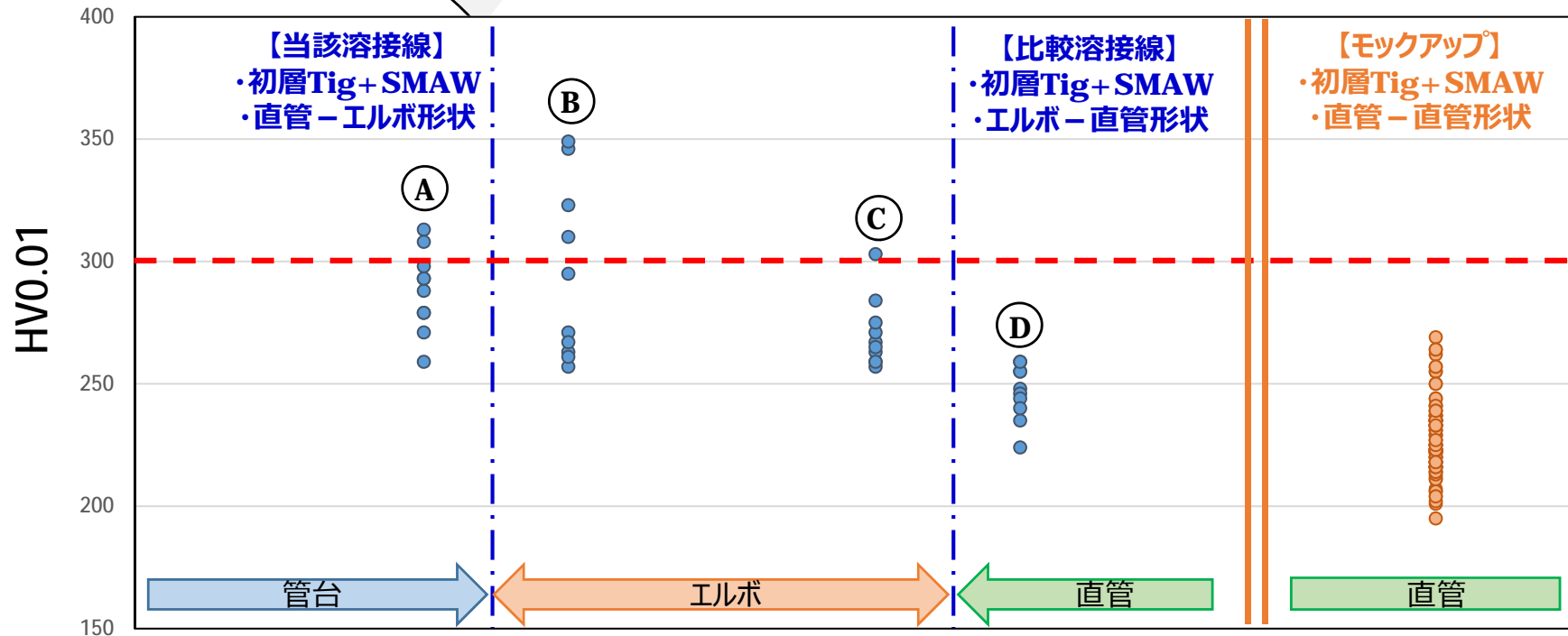
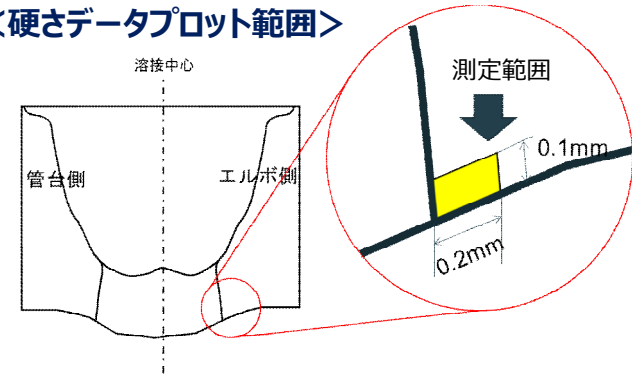
○ 一般的な施工手順通りに開先合せおよび溶接施工を実施し、溶接検査に合格している。特に不適合、異常は確認されていない。

③拘束条件毎の硬さ比較・整理

<硬さ測定位置>



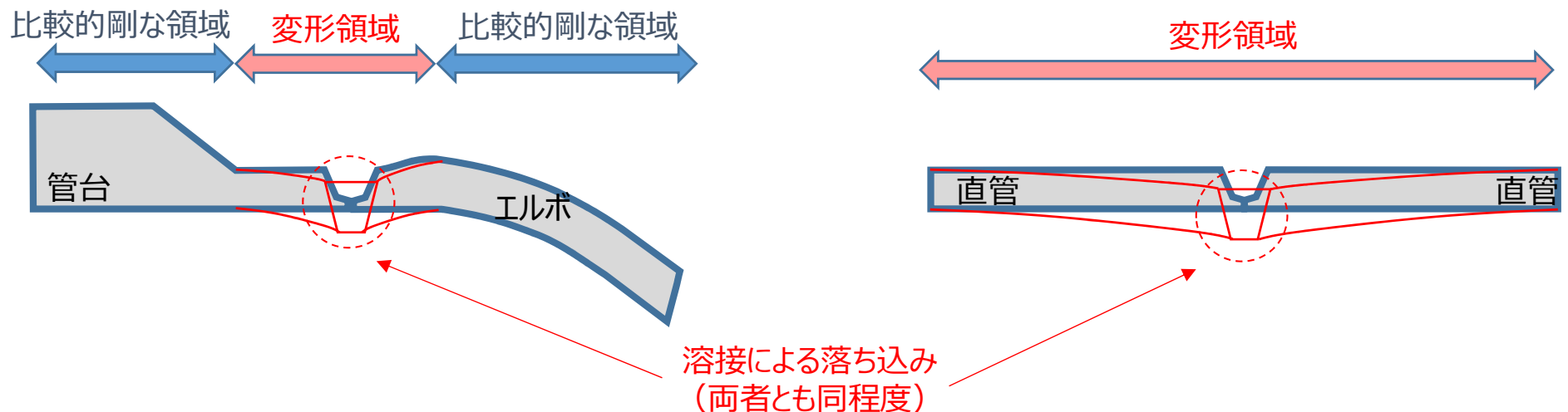
<硬さデータプロット範囲>



- 管台とエルボの溶接部における極表層の硬さが、他の部位より高い。
- 入熱の影響（現地溶接の影響を含む）が硬化の主要因と考えたが、モックアップでは当該管の硬さは再現できなかったため、溶接時の拘束条件の影響についても確認する。

④拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定（1/7）

- これまでのモックアップは直管同士で製作していたが、溶接時の硬化要因を網羅的に確認すべく、拘束条件が重畳した可能性について検証する。



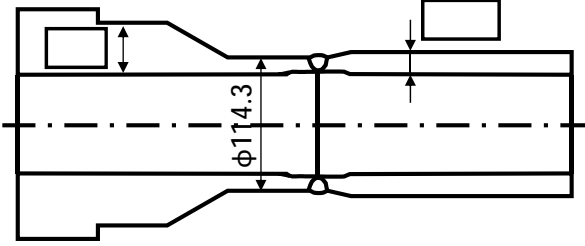
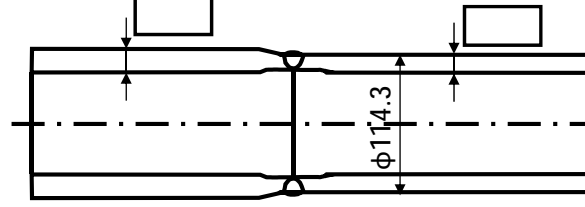
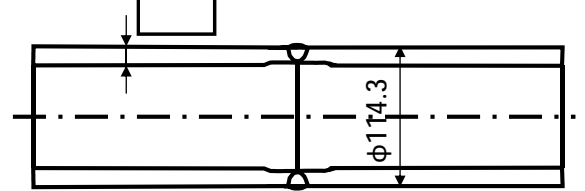
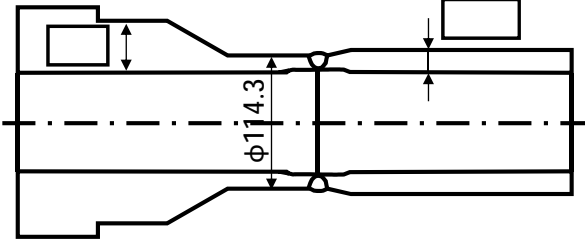
管台－エルボであれば、周囲が比較的剛であるため、落ち込みを吸収できる範囲が狭い
(変形できる領域が狭く、歪みは比較的大きい)


直管同士であれば、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)


- 拘束状況から、管台－エルボの方が変形領域が狭く、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。

④拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定 (2/7)

○ 溶接時の拘束条件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 | 管台 - エルボ※ |  |
| ケース2 | 初層Tig+SMAW | エルボ※ - 直管 |  |
| ケース3 | 初層Tig+SMAW | 直管 - 直管 |  |
| ケース4 | 全層Tig | 管台 - エルボ※ |  |

※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、エルボのミルシートの最大板厚  を採用した直管により拘束条件を模擬する。なお、今後の研究において、複雑形状における溶接部の硬化に関する定量評価を検討していく。

 : 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

④拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定 (3/7)

| ケース | 溶接方法 | 拘束条件 |
|------|--------------------|--------|
| ケース1 | 初層 Tig+SMAW | 管台-エルボ |

溶接部の断面写真
(別途)

管台側の硬さデータ
(別途)

エルボ側の硬さデータ
(別途)

○ 管台-エルボ、初層**Tig+SMAW**で溶接したモックアップにより、硬さを確認する。

④拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定（4/7）

| ケース | 溶接方法 | 拘束条件 |
|------|--------------------|--------|
| ケース2 | 初層 Tig+SMAW | エルボ－直管 |

溶接部の断面写真
(別途)

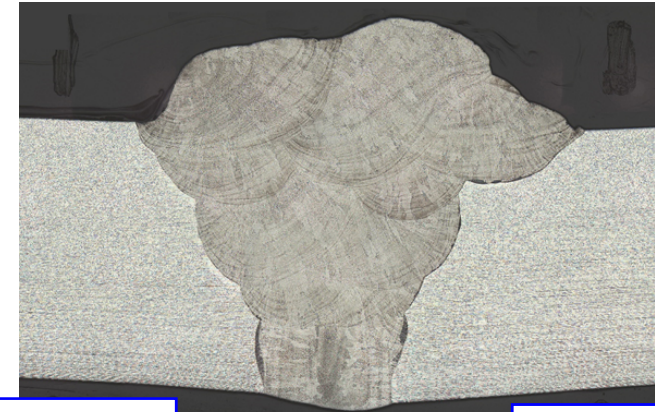
エルボ側の硬さデータ
(別途)

直管側の硬さデータ
(別途)

○ エルボ－直管、初層**Tig+SMAW**で溶接したモックアップにより、硬さを確認する。

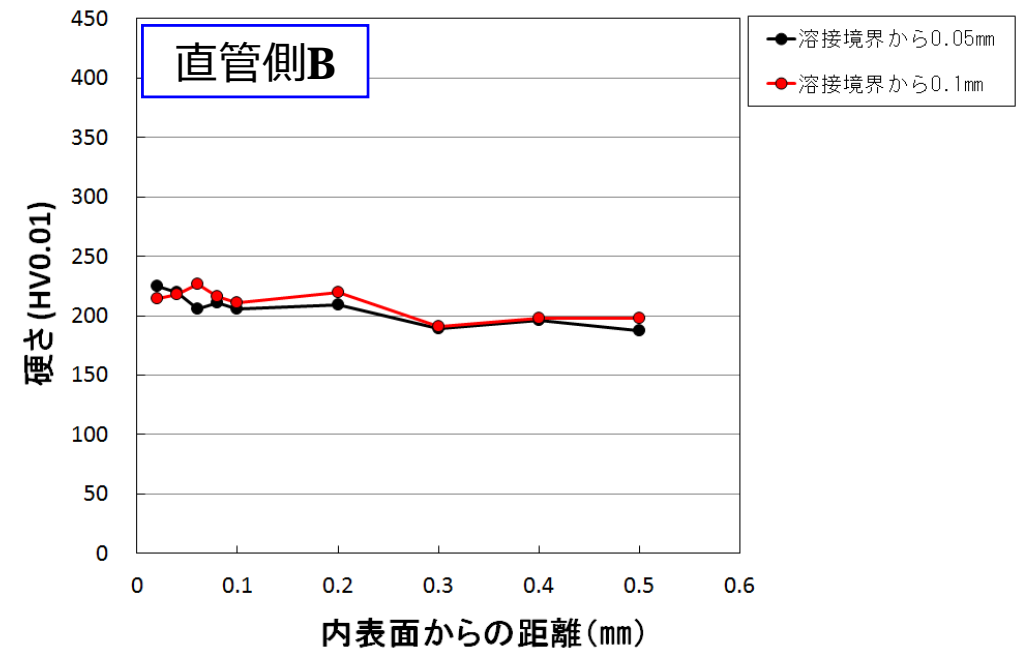
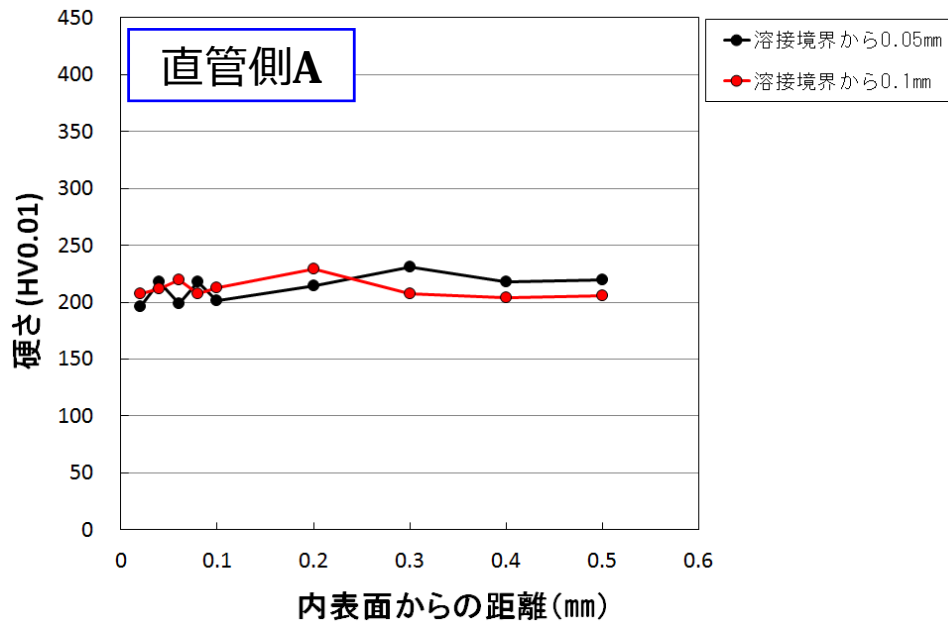
④拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定 (5/7)

| ケース | 溶接方法 | 拘束条件 |
|------|------------|-------|
| ケース3 | 初層Tig+SMAW | 直管-直管 |



直管側A

直管側B



○ 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。

④拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定（6/7）

| ケース | 溶接方法 | 拘束条件 |
|------|-------|--------|
| ケース4 | 全層Tig | 管台－エルボ |

溶接部の断面写真
(別途)

管台側の硬さデータ
(別途)

エルボ側の硬さデータ
(別途)

○ 管台－エルボ、全層Tigで溶接したモックアップにより、硬さを確認する。

④拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定（7/7）

○ 溶接時の拘束条件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。

| ケース | 溶接方法 | 拘束条件 | 硬さ測定結果 |
|------|--------------------|--------|-------------------------------|
| ケース1 | 初層 Tig+SMAW | 管台－エルボ | 確認中 |
| ケース2 | 初層 Tig+SMAW | エルボ－直管 | 確認中 |
| ケース3 | 初層 Tig+SMAW | 直管－直管 | 300HV を超える硬さを再現できなかった。 |
| ケース4 | 全層 Tig | 管台－エルボ | 確認中 |

〇 モックアップにより確認した管台－エルボ形状の硬化影響について、F E Mにより検証する。

【解析条件】

- 〇 溶接条件（開先形状、入熱、積層）は下記①、②で同じとし、溶接部両端形状の影響を調べる
- 〇 解析は軸対称モデルとする

【解析モデルと結果のイメージ】

| | ①管台-エルボ模擬のモックアップ | ②直管-直管のモックアップ |
|-----------|--------------------|------------------------|
| 解析モデル (案) | <p>※エルボ側は板厚を模擬</p> | <p>外表面 内表面</p> |
| 結果のイメージ | <p>解析結果 (別途)</p> | <p>亀裂発生部 溶接部拡大</p> |

き裂発生部近傍のひずみ、変形を比較する

〇 まとめ (別途)

至近の検討に関するまとめ

①他の溶接箇所における実機材の調査

〇 まとめ（別途）

②記録による溶接施工手順等の確認

〇 施工手順等に問題がなかったことを確認した。

③拘束条件毎の硬さ比較・整理

〇 管台とエルボの溶接部における表層近傍の硬さが、他の部位より高い。

〇 入熱の影響（現地溶接の影響を含む）が硬化の主要因と考えたが、拘束条件の影響は整理できていない。

④拘束条件を考慮したモックアップ製作と硬さ測定

〇 管台－エルボで溶接したモックアップにより、直管同士では再現できなかった**300HV**を超える硬さとなるか確認中。

〇 これらの検証により、溶接時の入熱量に加え、拘束条件が硬化要因として影響を与えていることを確認中。

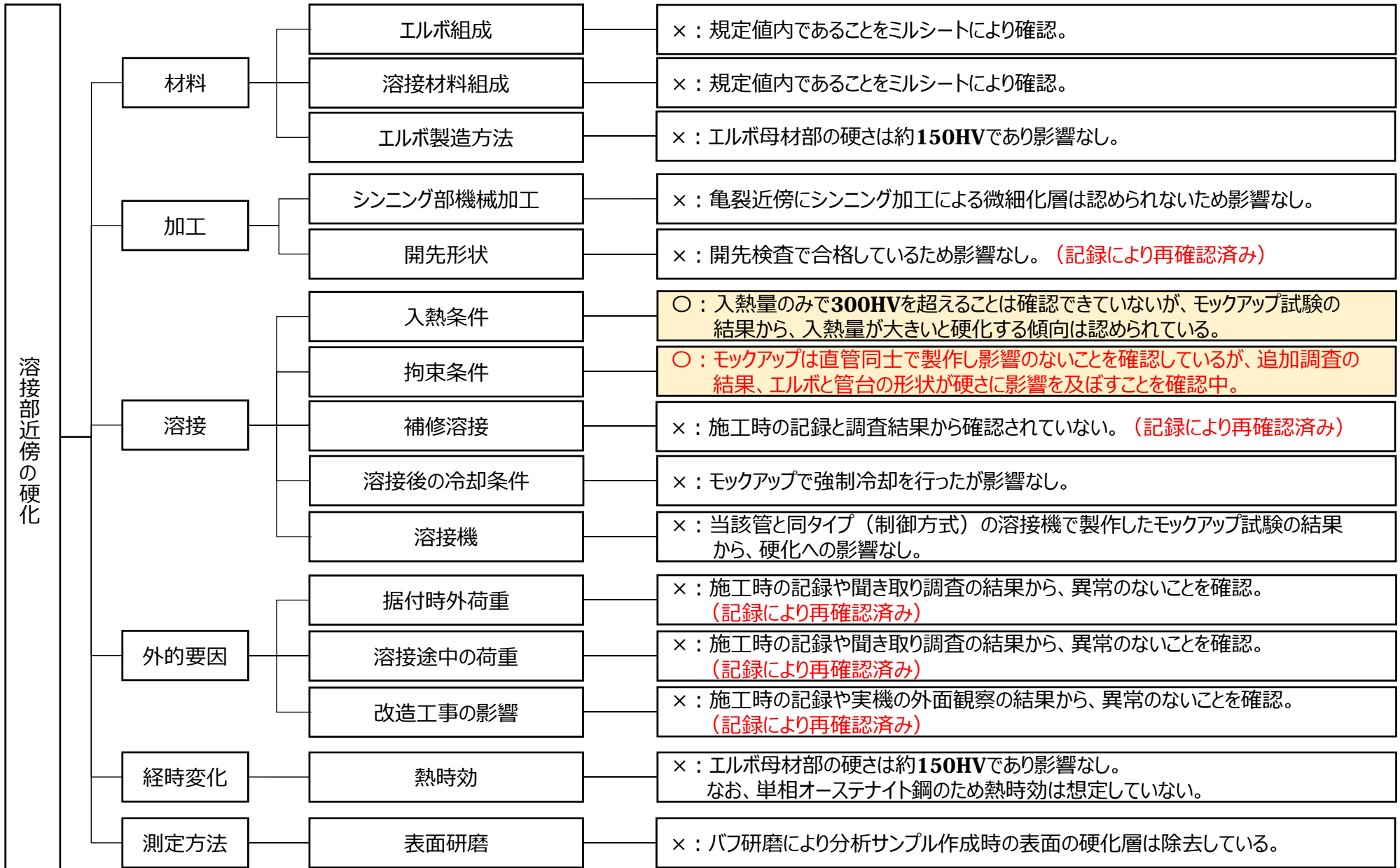
⑤ F E Mによる残留歪み解析

〇 まとめ（別途）

硬化要因の整理

×：影響がないことを確認
 △：影響が否定できない
 ○：影響のあることを確認

○ FT図に基様き、溶接部近傍の硬化要因を再整理した。



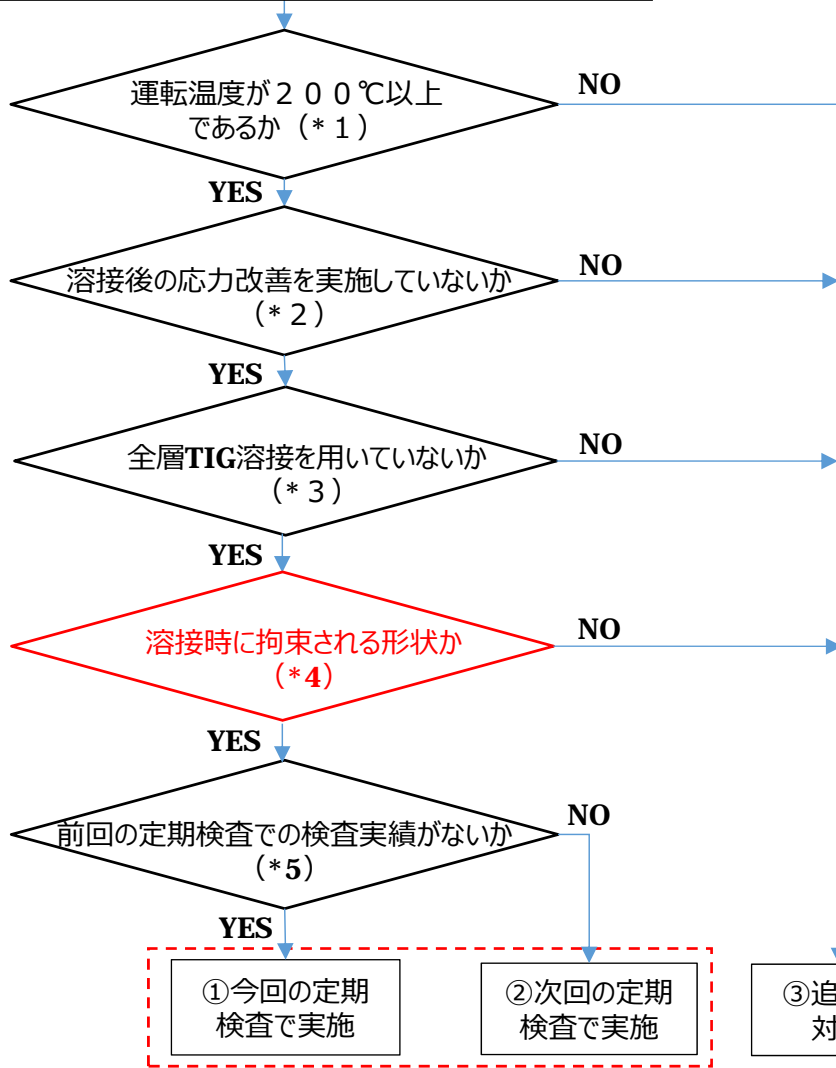
○ 当該部と同様の入熱条件（溶接方法）及び拘束条件の溶接部に対して、水平展開を実施する。

水平展開方法の策定

拘束条件による硬化の影響が
確認された場合に追加

○ 大飯4号機に対する選定フローを基に、拘束条件による硬化の影響が確認された場合、以下の選定フローで追加検査を行う。

1次系水質環境中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) PWR環境中のSCCの発生及び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。 → 19

(*2) 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、
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。 → 20

(*3) 全層TIG溶接は硬化が小さいことを確認していることから、
全層TIG溶接を用いていない溶接部は抽出対象とする。 → 21

(*4) 管台-エルボでは当該管と同程度の硬さが再現されたことから、
溶接時に拘束される形状である管台を含む溶接部を抽出対象とする。 → 8 ~ 15

(*5) 前回の定期検査で検査を実施し問題のないことを確認している
箇所については、次回の定期検査での実施とする。

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 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ①今回の定期検査 | 8 | 10 | 9 | 6 | 9 | 8 | 8 |
| ②次回の定期検査 | 7 | 2 | 4 | 4 | 0 | 1 | 1 |
| 合計 | 15 | 12 | 13 | 10 | 9 | 9 | 9 |

○ 本事象の要因確認及び追加検査の結果を踏まえ、ISIにおける検査対象箇所（定点）の選定方法を見直しを図る。

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。

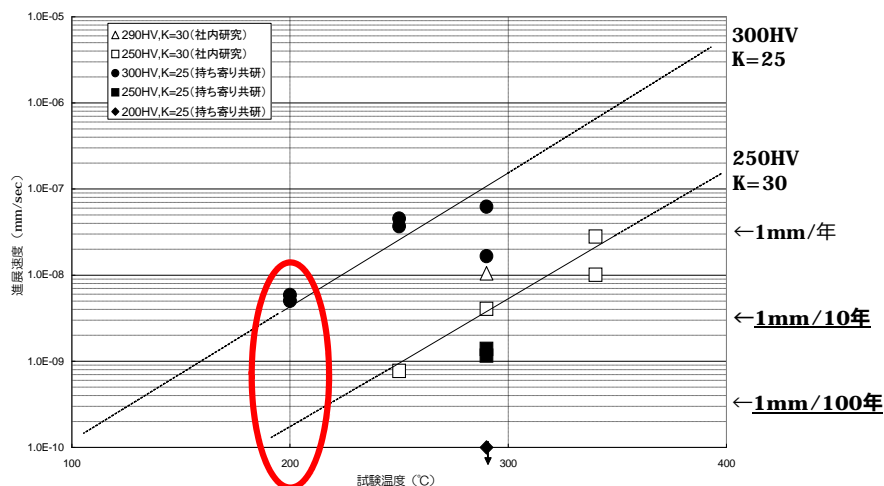


図1 SCC進展速度の温度依存性

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」

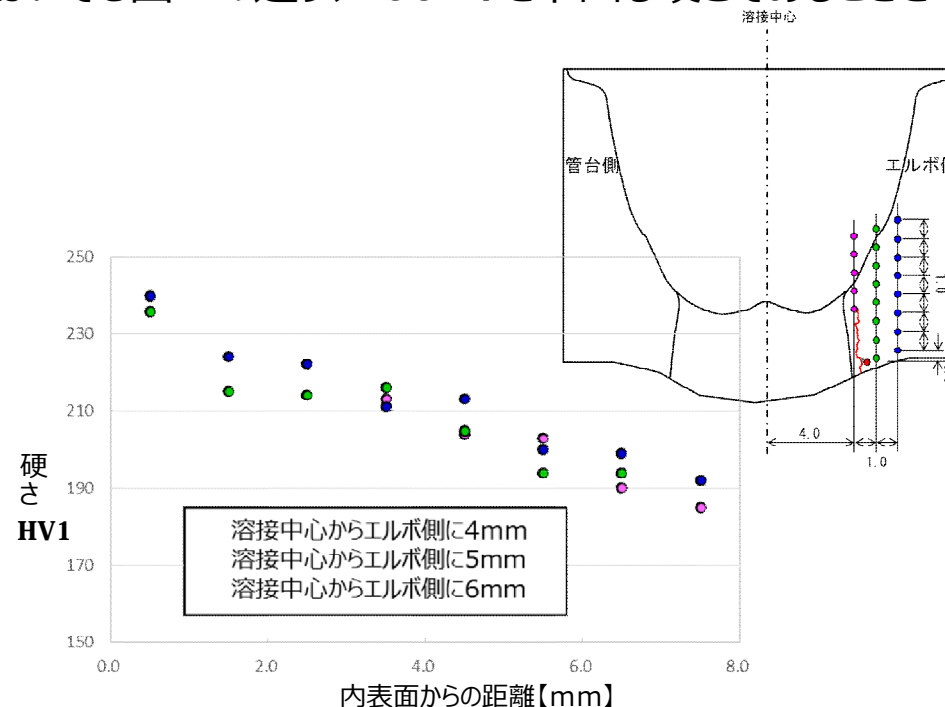


図2 実機硬さ計測結果 (溶接部近傍)

- 配管の内面の硬さを踏まえ、仮にSCC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）

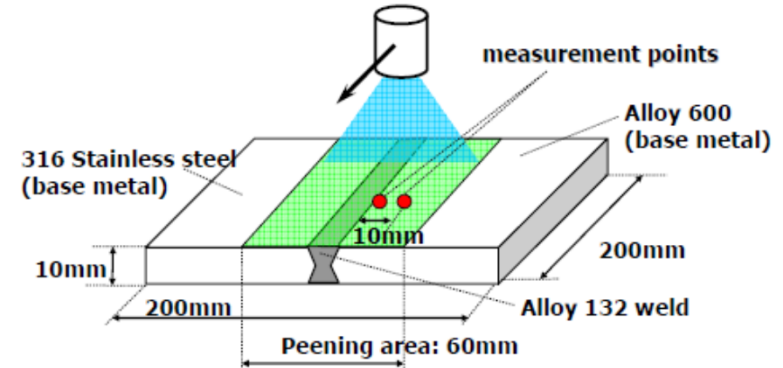


Fig.5 The mockup of butt weld for RV Nozzle safe-end

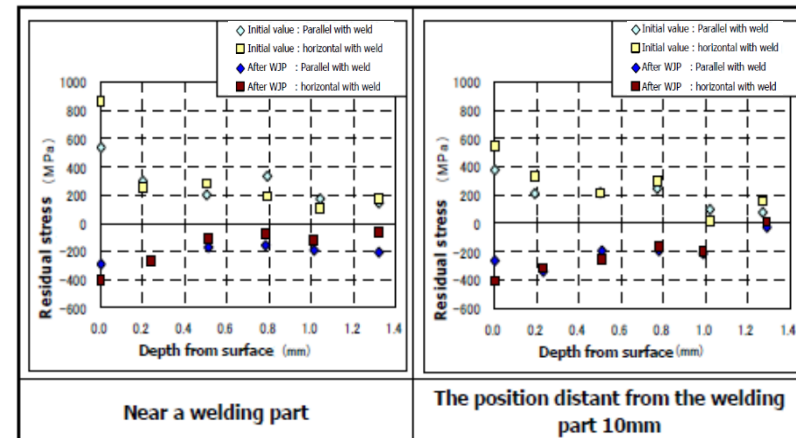
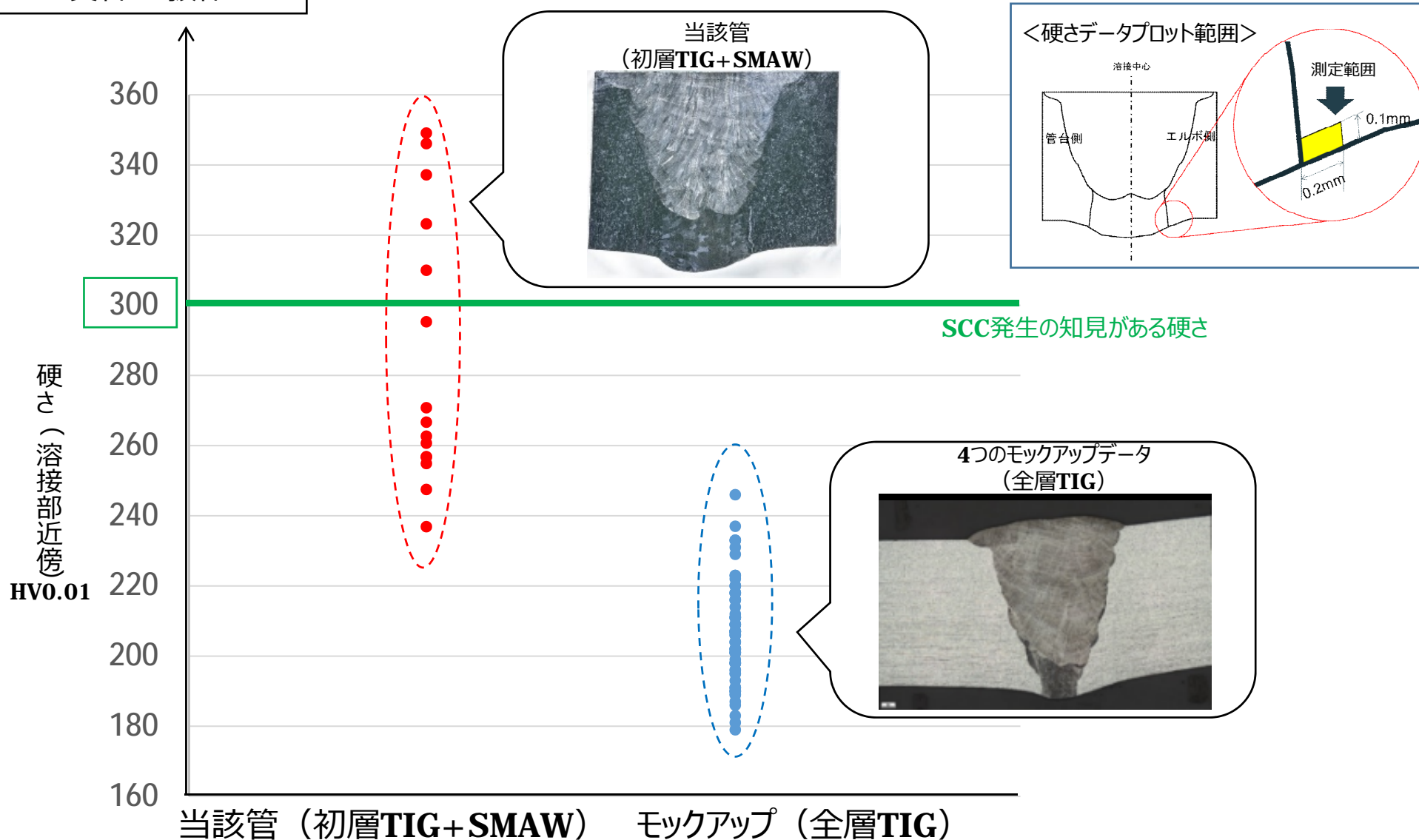


Fig.6 Results of residual stress improvement effect of butt weld mockup

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

○ SCC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。

①検査関連

【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）による検証及びシミュレーションにて、探触子や外面形状、材料（溶接）の影響を確認する

【ISI計画への反映】

（定点の考え方）

- 要因の特定および水平展開の結果を踏まえ、適宜、ISI定点の見直しを行う

（検査頻度・間隔）

- SCC進展式が策定され次第、適宜、ISIの検査頻度・間隔の見直しを行う

②研究関連

国内外の有識者と議論し、以下の事項について検討を進める。

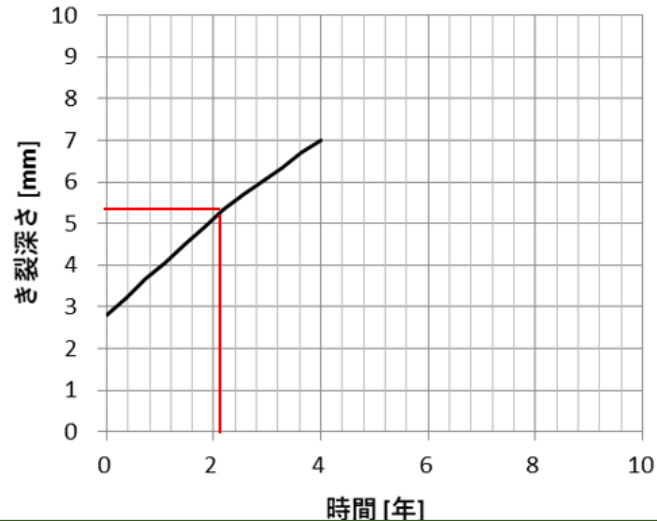
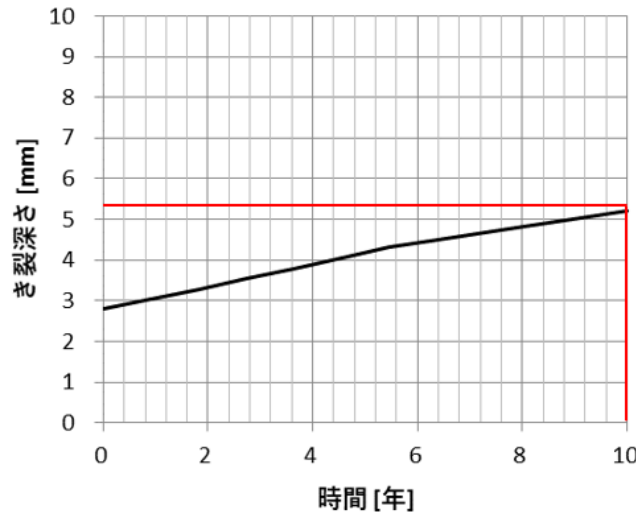
- 表面加工や試験温度等をパラメータとした基礎研究によるSCC発生の知見拡充を行う
- SCC亀裂進展速度線図について、進展論文投稿等により公知化・妥当性検証を進め、維持規格への反映を行う
- 複雑形状における溶接部の硬化に関する定量評価の検討を行う
- 廃炉材を活用したSCC発生の検討を行う

亀裂進展裕度についての評価

○ 最も裕度の少ない**4B**配管について、検査時に検出下限値相当の亀裂が存在していたと想定し、その亀裂が必要最小板厚 (**Tsr**)に至るまでの時間を評価した。

BFC式：約**10年(9サイクル)**

包絡曲線式*1：約**2年(2サイクル)**



| | 適用内部硬さHV1 | |
|---------------|----------------------------------|----------------------------|
| 内面からの距離 | BFC式： 電共研モック アップ材の内部 硬さ | 包絡曲線式： 亀裂発生当該 管の内部硬さ |
| 7.0mm～ 外表面 | 191 | 192 |
| 6.0～ 7.0mm | 191 | 199 |
| 5.0～ 6.0mm | 191 | 203 |
| 4.0～ 5.0mm | 192 | 213 |
| 3.0～ 4.0mm | 207 | 216 |
| 2.0～ 3.0mm | 209 | 222 |
| 1.0～ 2.0mm | 209 | 224 |
| 0～1.0mm | 209 | 240 |

＜亀裂進展評価の共通条件＞

- ・口径：4B (外径:114.3mm, 板厚:13.5mm) ・必要最小板厚 (Tsr) : 8.2mm
- ・許容亀裂深さ：5.3mm (板厚13.5mmベース) ・初期亀裂深さ：2.8mm (4B UT検出限界)
- ・応力条件：残留応力解析値※2 (初層TIG+被覆アーク溶接) + 発生応力 (実機当該部と同等)
- ・長さ方向進展への適用内部硬さ：0～1.0mmの硬さを採用
- ・亀裂形状：亀裂深さと長さの比は実機亀裂形状を使用。

※1 包絡曲線式は過度に進展速度を早く評価しているという認識であり、今後精査が必要な値
 ※2 残留応力解析はIAF事業と同手法にて実施

○ 当社が妥当と考えた条件 (ベストフィットカーブ式 (BFC式)) で検出下限値相当(2.8mm)の亀裂がTsrに至るまで約**9サイクル**、更に最大限の進展速度条件を適用した場合でも **約2サイクル**の期間が確認できた。

水平展開(追加検査)の結果を踏まえた供用期間中検査計画について(案)

参考2

- 供用期間中検査（I S I）ではJ S M E 維持規格に基づき、非破壊試験・漏えい試験を実施することで設備の健全性に問題のないことを確認している。
- 検査に当たっては、経年変化の有無を確認することが重要であるため、**システムを代表する箇所を定点として選定し、繰り返し検査**を行う。

＜定点選定の考え方＞

損傷が発生する可能性が比較的高いと想定される部位を優先的に選定

- ・相対的に応力の高くなるターミナルエンド等の構造不連続部
- ・使用環境条件（温度、水質等）の厳しい部位
- ・過去の損傷発生部位 等



当該箇所は、構造不連続部（ターミナルエンド）であって運転時の発生応力が高くなる箇所として**定点選定された箇所**であり、今回事象を発見できたことから**I S Iは有効に機能**していたものとする。



今回事象の要因を踏まえ策定した選定フローに基づき追加検査を実施し、**全検査箇所について健全性を確認できた場合、今回事象が特異であると評価できる**ことから、今後、**追加検査箇所についても定点として加えることで、I S Iとして健全性を確認できる**ものと考えている。