

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 8日

<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）は認められなかった。
- 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。

<SCC発生・進展の3要素>

- SCC進展の知見のある200℃以上の温度環境である。
- 引張残留応力が生じる部位であることに加え、発生応力が比較的高いターミナルエンド部である。
- 硬さ300HV以上においてSCC発生の知見のある材料である。

- 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

<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>

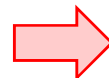
- 当該管の亀裂発生部近傍の溶接金属は、サンプル管と比較して、デンドライトの成長方向から溶接速度が遅く、ビード幅も広いことから、大きな入熱で溶接されたものと推察する。
- 当該部は現地溶接であり施工性が悪く、丁寧・慎重に溶接し入熱量が大きくなったものと考察する。

<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結果、入熱量が増加するに伴い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。
- 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が確認された。

○ 亀裂発生・進展の推定メカニズム

- SCCが発生しうる環境・応力条件に加え、当該部は大きな入熱で溶接され材料が著しく硬化したことにより、SCCが発生・進展したものと判断する。

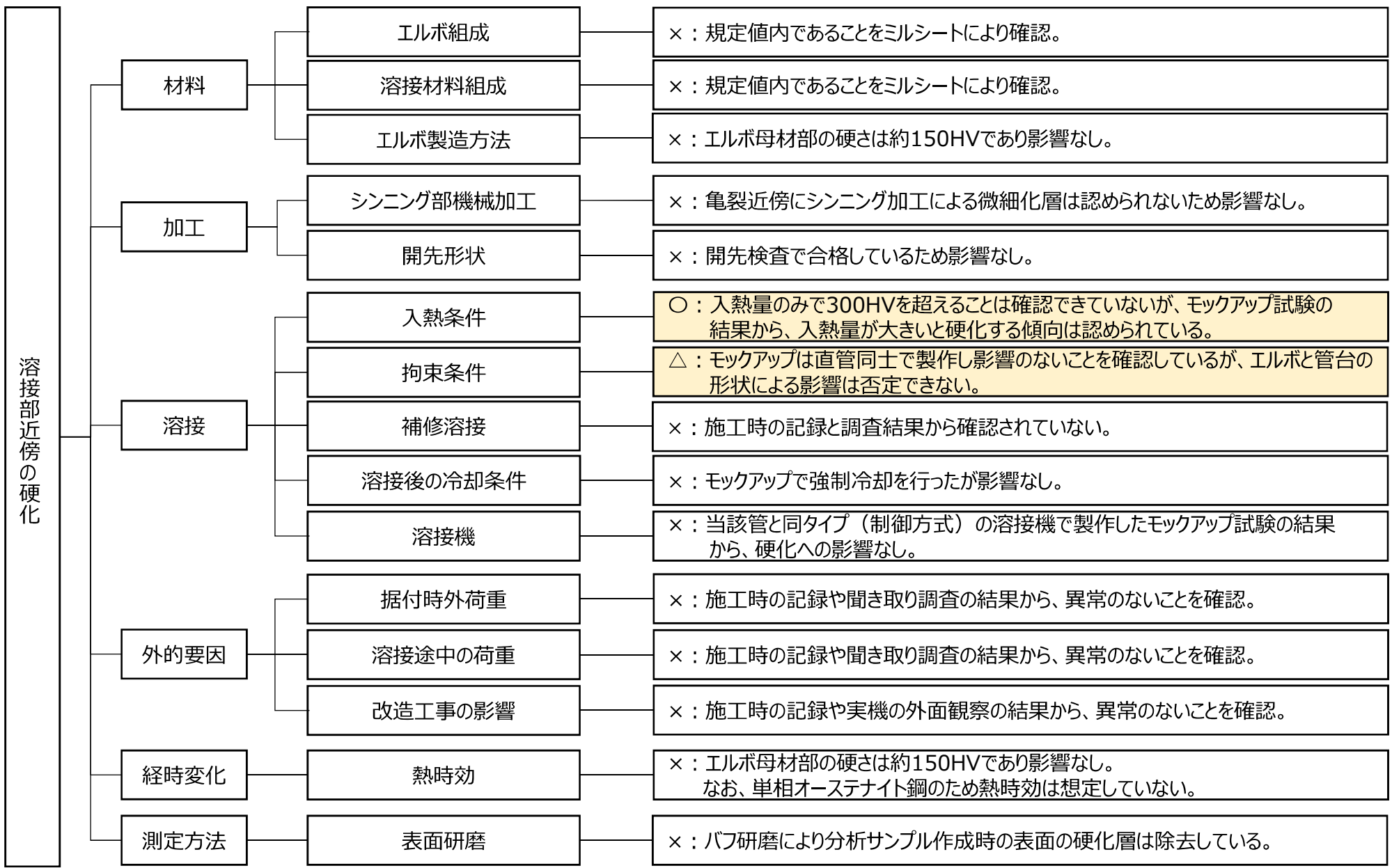


入熱量のみで硬化することについては、再整理が必要

溶接部近傍の硬化要因について

×：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図に基づき、溶接部近傍の硬化要因を再整理。



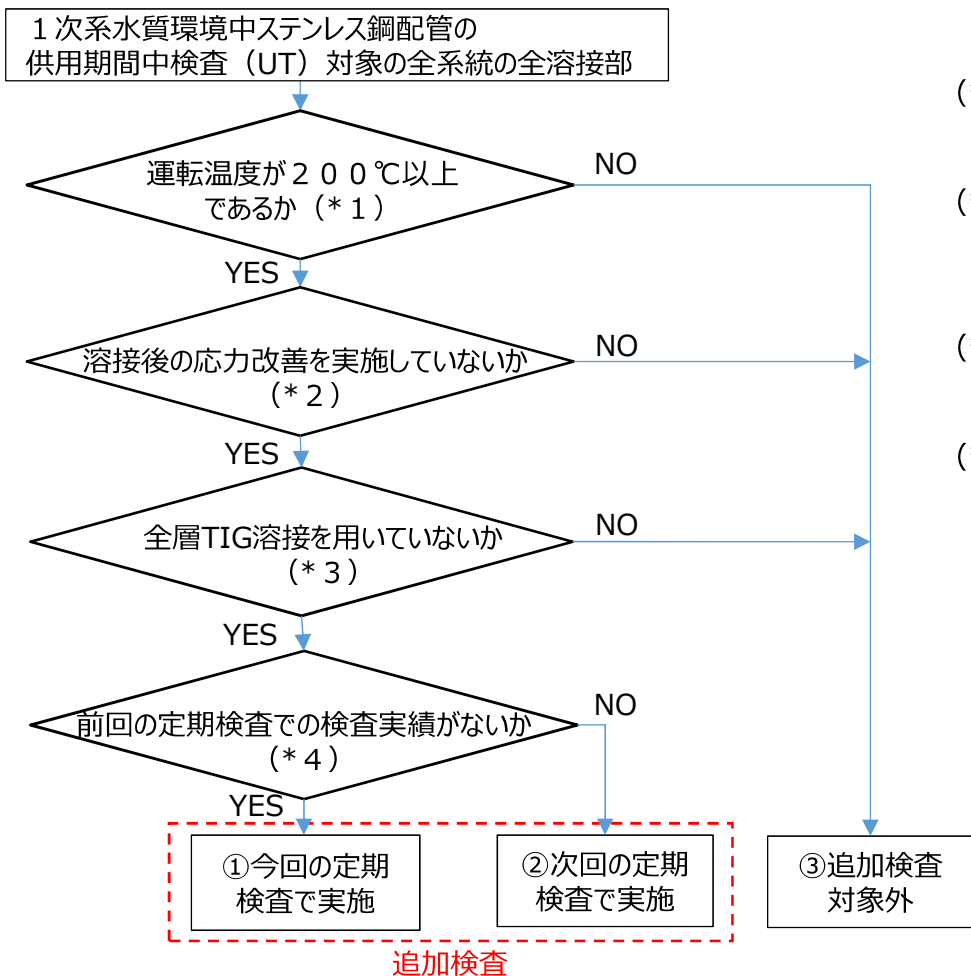
溶接時の入熱量に加え、拘束条件による硬化への影響を確認する。

- 水平展開（追加検査）については、今後実施する硬化要因の確認結果及び供用期間中検査との関係性を踏まえ、精査した対象箇所抽出方法を策定し、別途報告することとしたい。
- ただし、大飯4号機については現在判明している事実（「当該事象はS C C」、「溶接部近傍の硬化部で発生」）を基に、ステンレス鋼配管の供用期間中検査（UT）対象の全系統の全ての溶接部に対してスクリーニングを行い、前広に検査を行うことで健全性を確認し、至近の稼働に備える。

なお、硬化要因の確認結果等を踏まえ、至急の対応が必要な場合は、プラントの安全を第一に対応する。

大飯4号機に対する追加検査対象箇所を選定フロー

➤ 大飯4号機は、以下のフローで追加検査を行う。



(* 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。 ➡ 6

(* 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。 ➡ 7

(* 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。 ➡ 8

(* 4) 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。

追加検査対象箇所数

①今回の定期検査	41
②次回の定期検査	2 [*]
合計	43

※ 1箇所については今回の定期検査で実施済み

PWRの温度環境 (200℃) 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℃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。

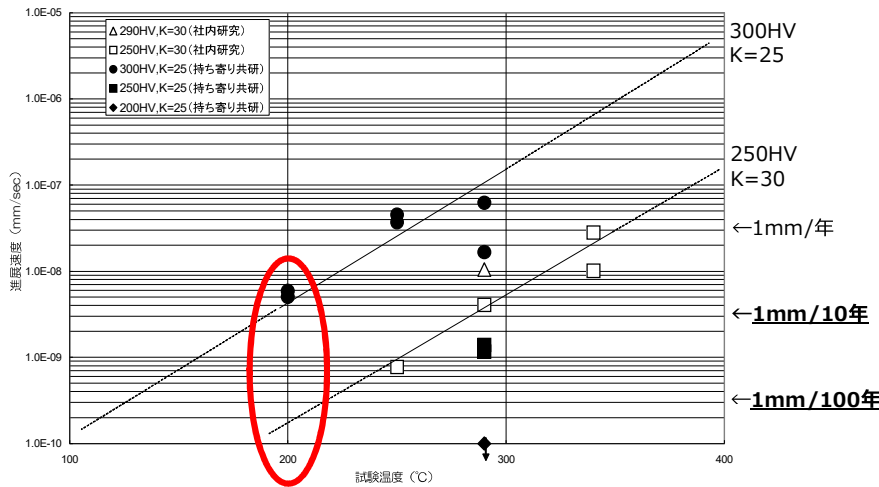


図1 SCC進展速度の温度依存性

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」

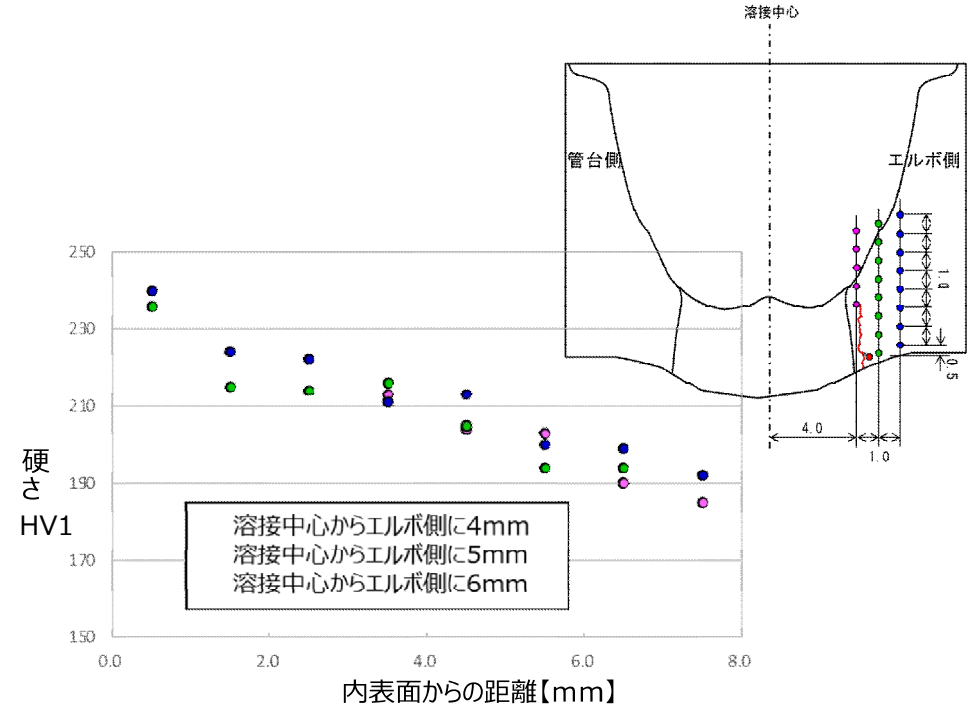


図2 実機硬さ計測結果 (溶接部近傍)

➤ 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℃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）

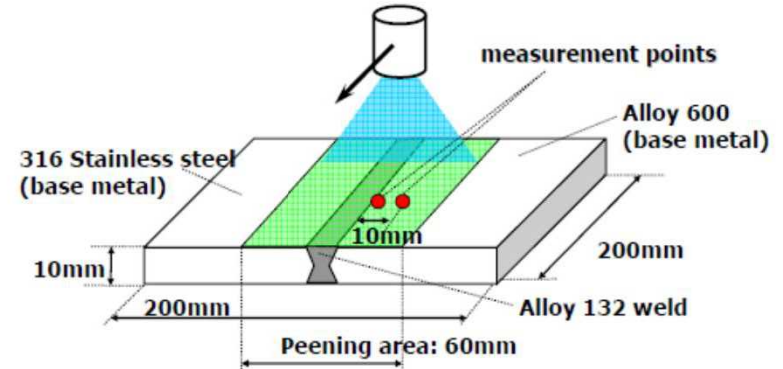


Fig.5 The mockup of butt weld for RV Nozzle safe-end

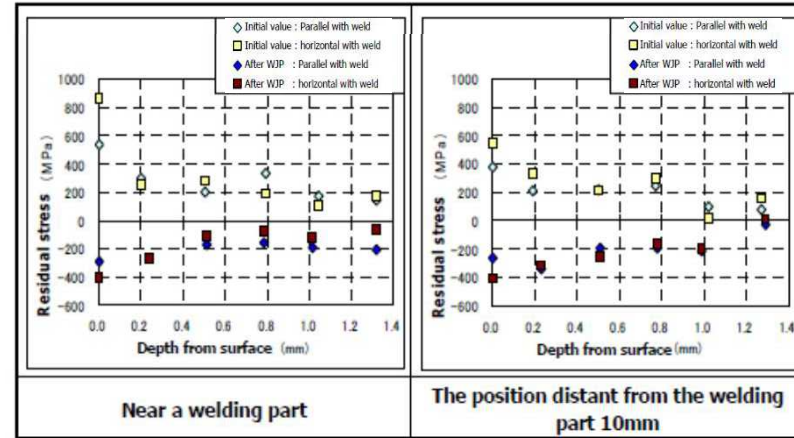


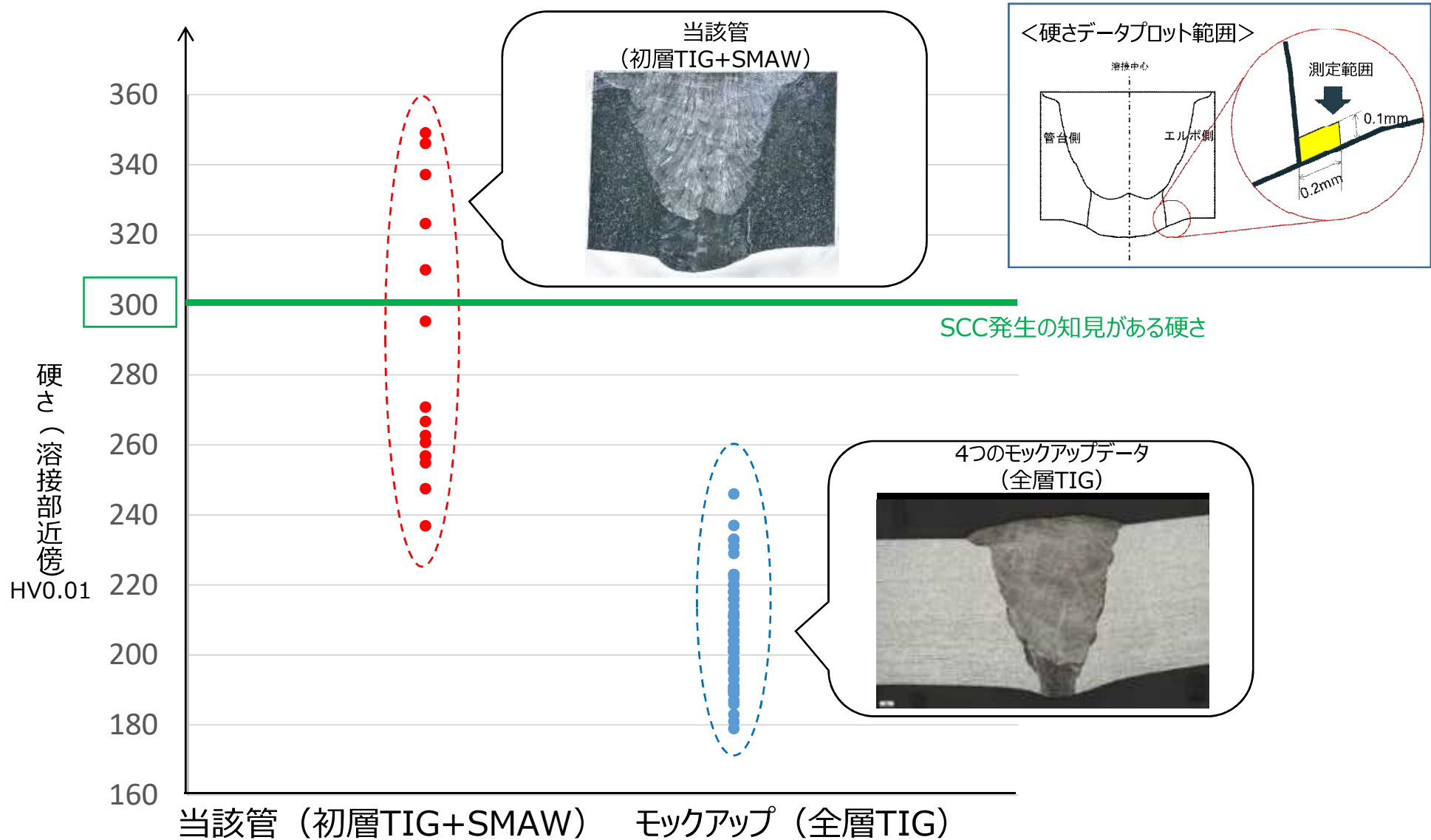
Fig.6 Results of residual stress improvement effect of butt weld mockup

図2 応力改善W J P 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

➤ S C C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。

溶接法による硬さの影響について



- 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。