

関西電力（株）大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管における亀裂に係る原因調査の状況について

令和 3 年 1 月 1 3 日
原子力規制庁

1. 経緯・趣旨

令和 2 年 1 0 月 2 1 日第 3 3 回原子力規制委員会において報告した、関西電力株式会社（以下「関西電力」という。）大飯発電所 3 号機（以下「大飯 3 号機」という。）における加圧器スプレイライン配管溶接部の亀裂に関し、関西電力が行った亀裂の調査結果、亀裂が発生及び進展した原因等について、公開会合¹を開催し確認を行った。今回は、この状況を報告するとともに、当面の原子力規制庁による検査対応の方針を諮る。

2. 関西電力からの報告内容（添付資料 1 及び 2 参照）

（1）直接観察等による亀裂の性状

関西電力は、亀裂が発生した大飯 3 号機加圧器スプレイライン配管の溶接部を含む配管エルボ一部を切り出し、亀裂の直接観察等の調査を実施した。調査により判明した主な事実は以下のとおり。

- ・ 亀裂の深さは最大約 4.4mm、周方向長さは約 60mm であった
- ・ 亀裂の位置及び方向は、配管を切り出す前に推定していた溶接金属を斜めに進展するものではなく、配管母材の溶接境界近傍の熱影響部に沿って径方向に進展するものであった
- ・ 開放した破面表面等観察から、亀裂は金属結晶の粒界に沿って進展する粒界割れの特徴を示しており、疲労亀裂等の痕跡は見受けられなかった
- ・ 亀裂近傍の硬さを測定したところ、通常の配管母材の硬さ（ビッカース硬さ 150HV 程度）とは異なり、配管内面の表層近くで 350HV、内部で 200～240HV の硬さになっている領域があった

（2）亀裂が発生及び進展した原因

関西電力は、調査により判明した事実に基づき、亀裂は応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking、以下「SCC」という。）により発生及び進展したものと判断している。また、加圧水型軽水炉（PWR）の一次冷却材環

¹ 原子力規制委員会への報告以降、令和 2 年 1 2 月 4 日、2 4 日及び令和 3 年 1 月 8 日の合計 3 回、亀裂の調査に係る公開会合を開催

境下において発生することが稀なステンレス鋼配管のSCCが発生した原因として、溶接熱影響部の硬化が影響したものと推定している。

さらに、熱影響部が硬化した要因については、関西電力は、1月8日の第8回公開会合において、溶接によって過大な入熱量が加わった可能性を挙げつつ、その他の要因が寄与した可能性も含めて今後再整理を行うとしており、亀裂の再発防止対策並びに同じ要因を有する部位の特定及びこれに対する予防処置等については、引き続き、公開会合において原子力規制庁に報告するとしている。

(3) 大飯3号機のその他の部位及び他のプラントにおける対応

関西電力は、同社が所有する7プラントにおいて、(2)の再整理等により得られた知見を踏まえ、亀裂の発生をもたらした要因と同様の要因が考えられる部位について、亀裂の有無等について調査を行う方針を示している。

さらに、当面、現在定期検査中の大飯4号機については、大飯3号機で亀裂の発生をもたらした要因が十分に判明していない状況であることを踏まえ、今回の亀裂が発生した条件と同様の状況下にある全ての溶接部²(43か所)について、原子炉の起動までに超音波探傷試験を実施し、配管の健全性を確認するとしている。

3. 原子力規制庁の対応方針

大飯3号機において発生した亀裂の発生及び進展の原因等については、引き続き公開会合において関西電力の報告を受け、その内容を確認するとともに、定期事業者検査の点検対象及び頻度の適切性に対する評価など、得られた知見を原子力規制庁の対応に反映する。

大飯4号機の配管健全性に係る確認、大飯3号機のその他の部位及び関西電力の他のプラントの調査並びにこれら関西電力の調査結果を踏まえて他のPWR事業者が実施する点検等の取り組みについては、原子力規制検査により監視を行う。

以上

² 大飯3号機において亀裂が発生した溶接部と同様に、供用期間中検査の対象となる1次系ステンレス鋼配管にある溶接部のうち、①運転温度が200℃以上、②応力改善策が未実施及び③全層TIG溶接以外の溶接方法、のいずれにも該当するもの

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24日

断面マクロ・マイクロ観察に基づく考察

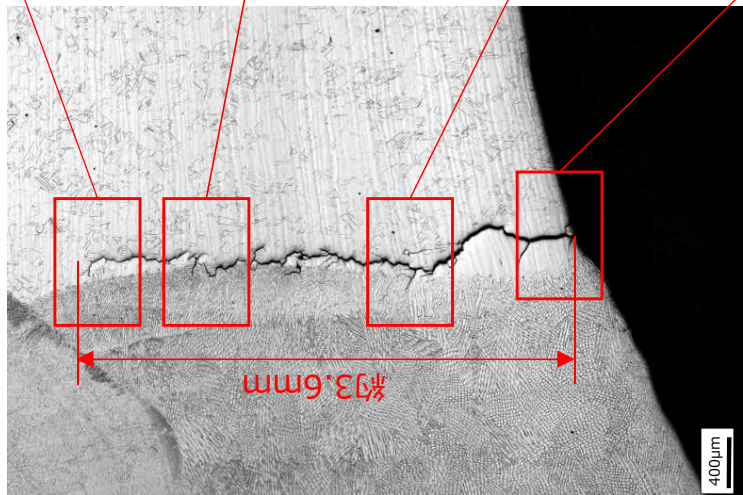
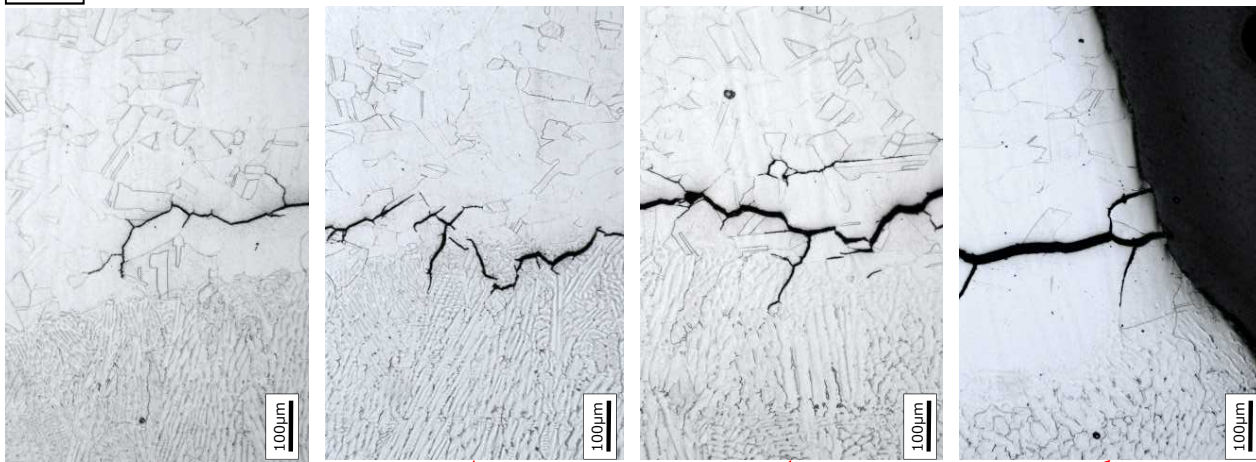


図2：断面マイクロ観察

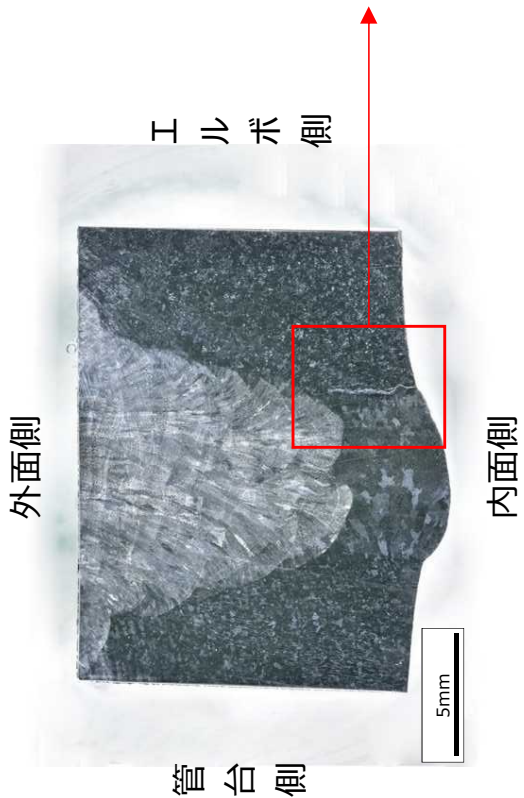


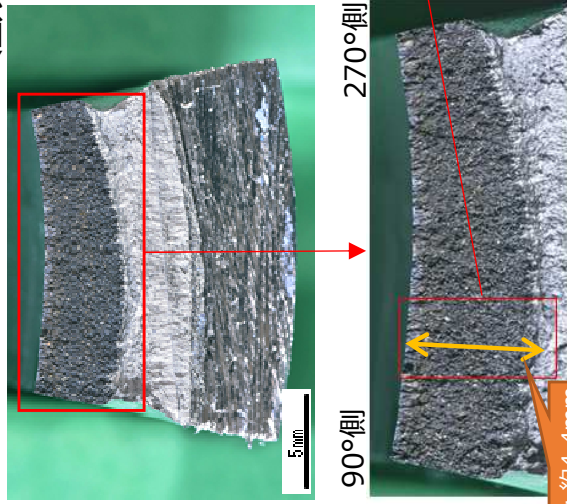
図1：断面マクロ観察

➤ **断面マクロ・マイクロ観察の結果、当該部の割れは溶接境界極近傍の母材部を起点としており、主亀裂の進展経路は母材部の溶接境界付近を粒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)

破面マクロ・ミクロ観察および付着物EDS分析に基づく考察

破面マクロ・ミクロ観察結果

<エルボ側>



最深处：約4.4mm

図1：破面マクロ観察

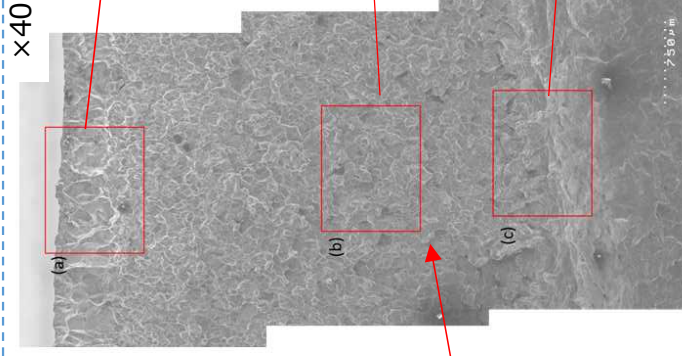
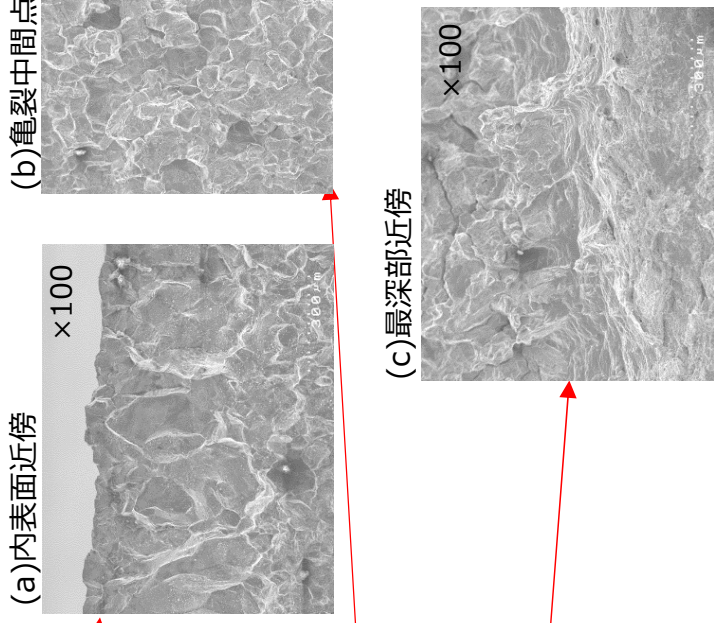


図2：破面ミクロ観察



付着物EDS分析結果

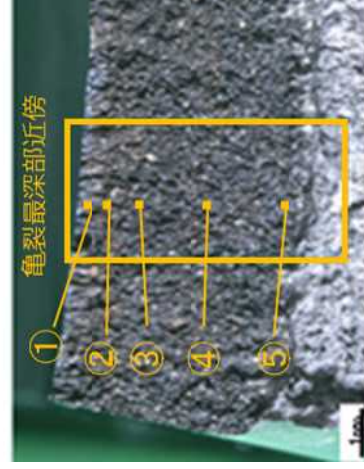


図3：付着物EDS分析位置

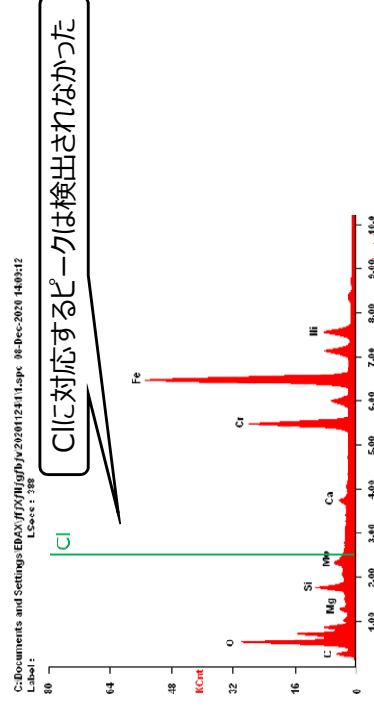


図4：付着物EDS分析結果（例：分析位置①）

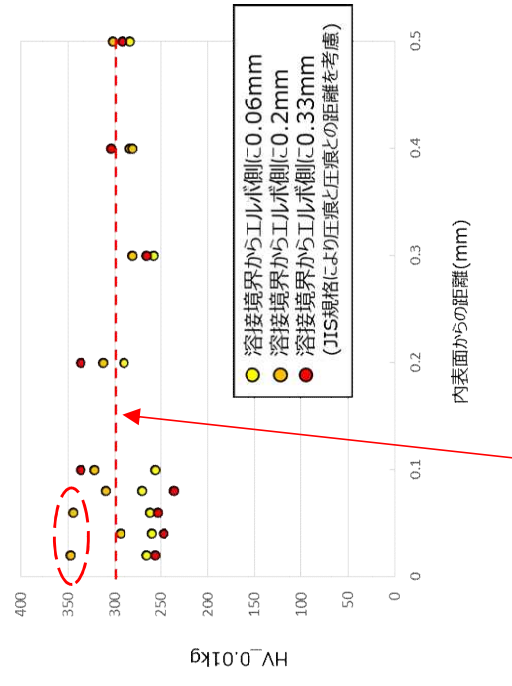
- 亀裂最深处の破面ミクロ観察の結果、破面全体にわたって応力腐食割れでよく見られる、粒界割れが認められた。
- 疲労による割れの特徴であるビーチマークやストライエーションは認められなかった。
- 破面観察からCl-SCCの特徴である粒内割れは殆ど認められず、付着物EDS分析からCl等の有害な元素は認められなかった。

硬さ計測に基づく考察

1-5

<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)

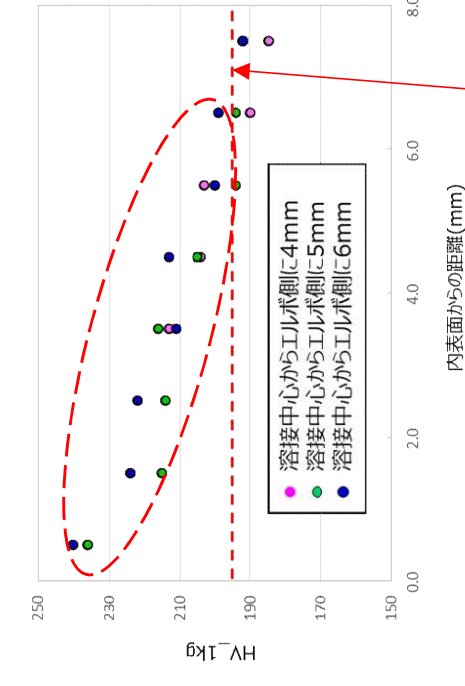


硬さによるSCC発生の知見のある値 (300HV5)

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)

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。

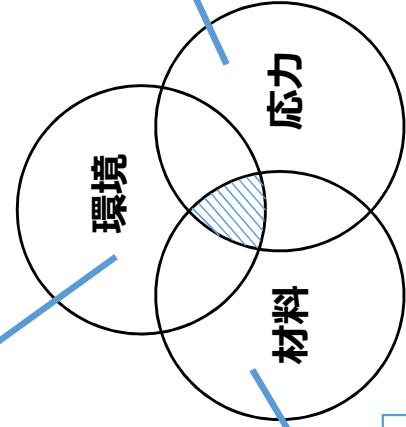
※機械加工や溶接の影響がない、通常の母材部の硬さは約150HV1であった。

SCC発生・進展の3要素（環境、応力、材料）に関する考察

- 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でよく見られる粒界割れが認められていることから、SCC発生・進展の3要素である環境、応力、材料について、以下のとおり整理した。

当該部の環境

- 運転温度： PWR環境中、200℃以上でSCCが進展する知見があり、当該部は200℃以上の環境に該当する。

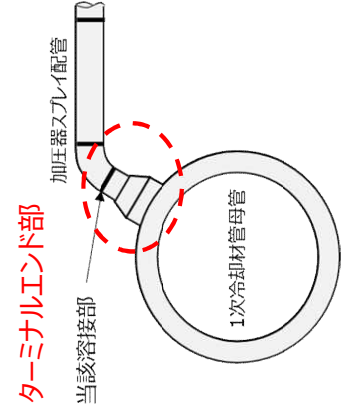


当該部の応力

- 通常運転時の発生応力：100MPa
当該部はターミナルエンド部※1であり、同ラインの他の溶接部と比べると、比較的大きな応力が発生する箇所となっている。
- 残留応力：約200MPaの引張応力
当該部は溶接残留応力が生じる部位であり、解析※2により、内面に引張の溶接残留応力が発生することを確認している。
なお、当該部はバブ研磨やピーニング等の応力改善による応力腐食割れ対策は実施していない部位である。

当該部の材料

- 材質：SUS316
BWR環境で硬さ300HV以上の場合にSCC発生を知見がある。
なお、当該部の表層部において300HV以上の硬さが認められた。
(機械加工や溶接の影響がない、通常の母材部の硬さは約150HV)



- ※1 ターミナルエンドとは、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、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優先的に選定している。
- ※2 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り確認した値

- 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。

：枠組み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。

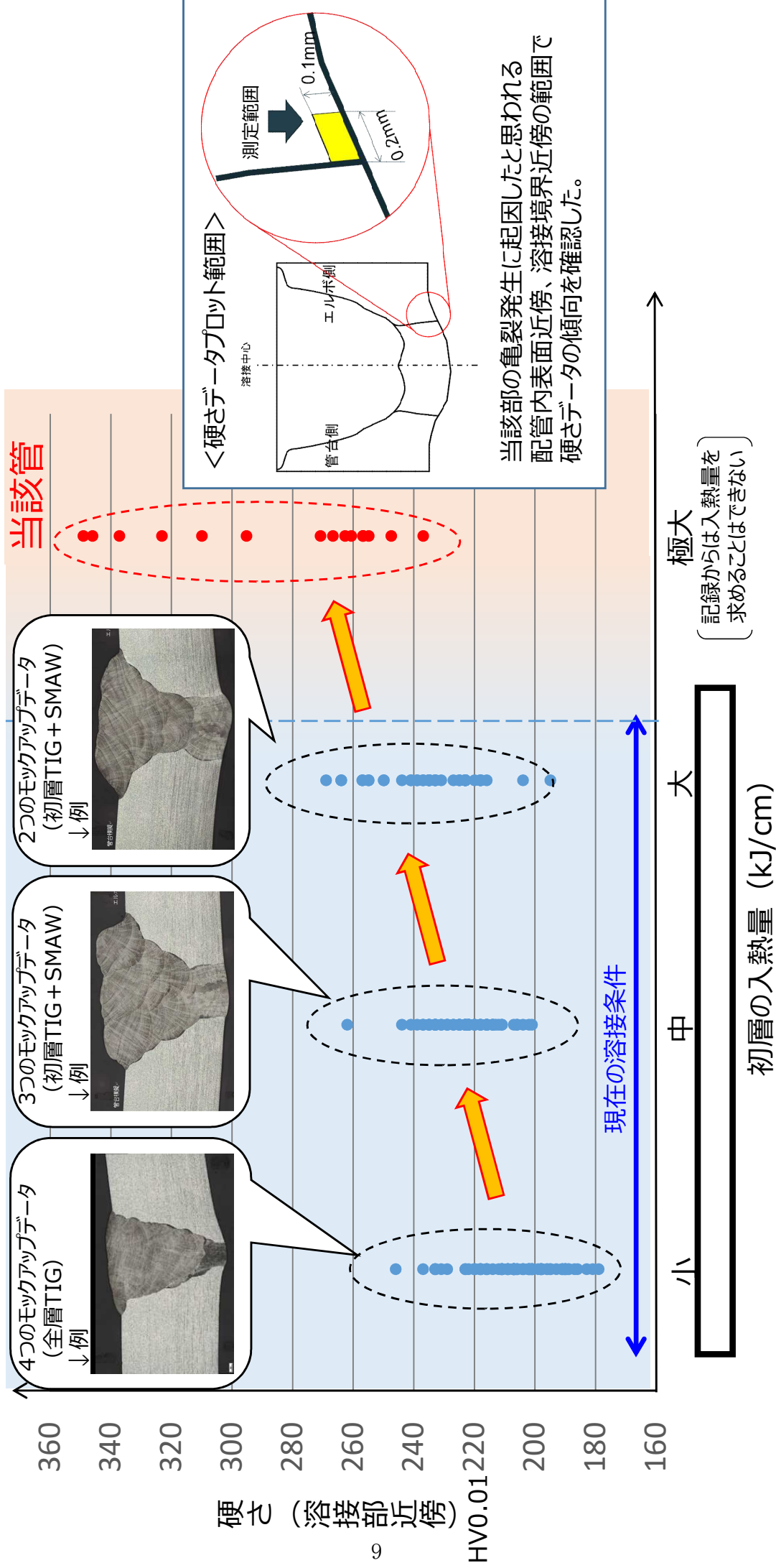
観察結果等に基づく事実の整理・まとめ

- <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。
 - CI-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、CI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発生の見解のある材料である。

- 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。**

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。



当該部の亀裂発生に起因したと思われる配管内表面近傍、溶接境界近傍の範囲で硬さデータの傾向を確認した。

- 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。
- ：枠組み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。

資料 1

大飯発電所 3 号機

加圧器スプレイン配管溶接部での事象への対応について

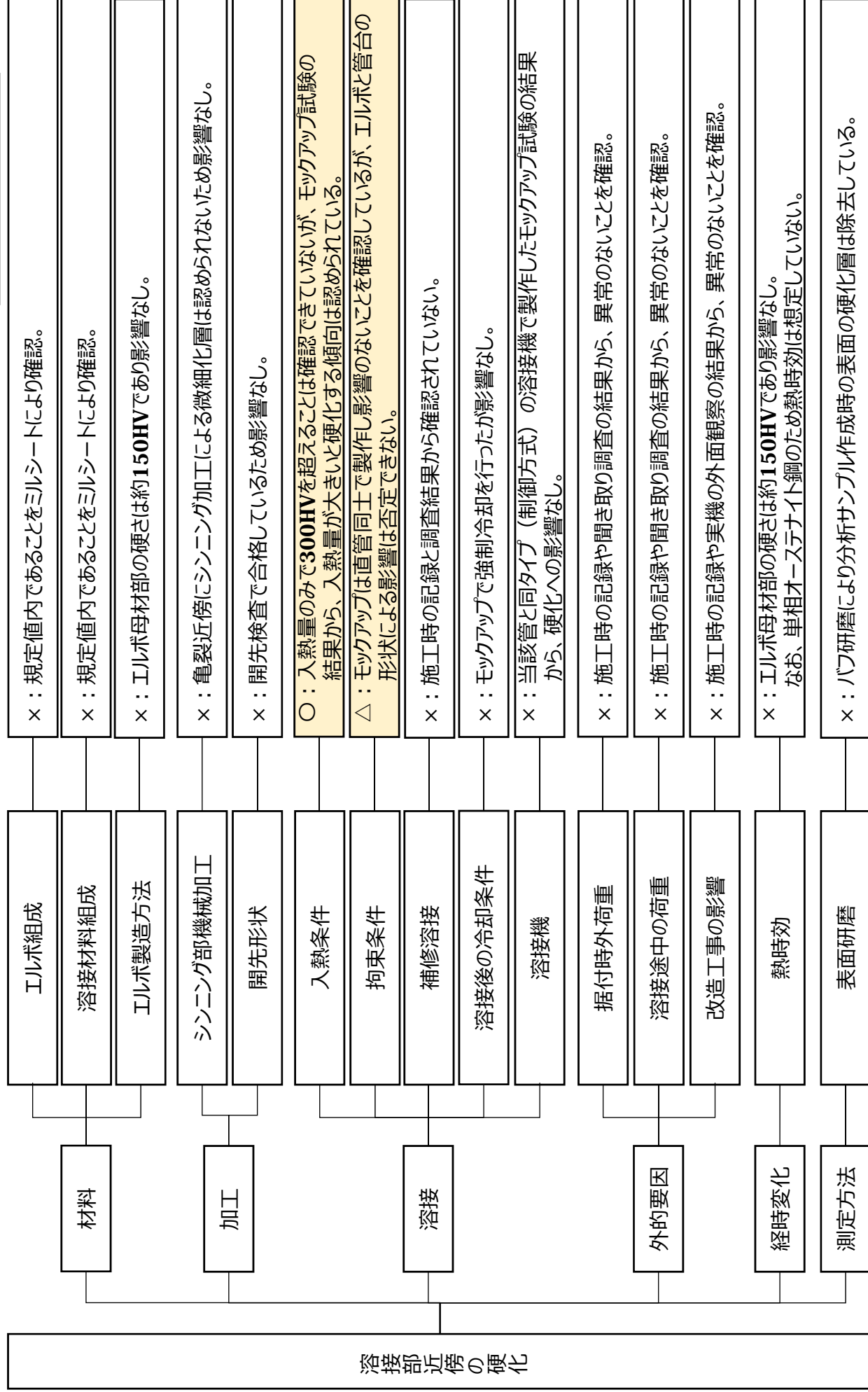
関西電力株式会社

2021 年 1 月 8 日

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SCC」、「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。