

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 2月12日

本事象のまとめ

<事象の概要>

- 供用期間中検査（ISI）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）（材質：オーステナイト系ステンレス鋼（SUS316））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原因>

- 調査の結果、過大な溶接入熱（若手による丁寧かつ慎重な溶接や手入れ溶接の可能性を含む）と、形状による影響※が重畳したことで、表層近傍において特異な硬化が生じたものと考えられる。
- この硬化部に高い応力が影響したことにより、亀裂が発生したものと考えられるが、メカニズムがすべて明らかにはなっておらず、PWR1次系の配管溶接部では、これまで同様の事象が生じていないことから、今後知見の拡充に努める。
- 亀裂は溶接熱影響部で粒界に沿って進展しており、硬化したオーステナイト系ステンレス鋼はSCCで進展することが知見としてあることから、粒界型SCCで進展したものと判断した。

※管台－エルボ形状では、変形領域が狭いため、溶接部近傍でひずみが大きくなる。

本公開会合でのご説明内容

2/4公開会合を踏まえ、過大な溶接入熱（溶接入熱が大きくなる要因の整理）及び形状による影響（形状による分類）について整理を行い、水平展開における検査対象を明確にする。

- 溶接入熱が大きくなる要因の整理
- 形状による分類



- 水平展開方法の策定

溶接入熱が大きくなる要因の整理

これまでの原因調査より、溶接入熱が大きくなる要因として以下が考えられる。

①全層TIG溶接以外の溶接手法

2層目以降の溶接において、TIG溶接では比較的安定した溶融池が形成されるのに対し、TIG溶接以外の溶接では、溶融池が不安定となるため、厚めの初層溶接を行うことから、入熱量が大きくなる傾向がある。

②現地溶接

工場溶接では、溶接対象物を回転させつつ、安定した溶接姿勢で溶接が可能であるが、現地溶接では、上向き姿勢や狭隘部での溶接となる場合もあり慎重な作業となることから、入熱が大きくなる可能性がある。

③若手溶接士による施工

当該溶接部は、若手の溶接士が丁寧かつ慎重に溶接したことで溶接速度が遅くなり入熱が大きくなったと推定しており、同様に若手溶接士が施工した場合、入熱が大きくなる可能性がある。

④補修溶接

補修溶接は施工時の検査で判定基準を満たさない場合における通常の施工方法であるが、追加で溶接をするため、入熱が大きくなる可能性がある。

①全層TIG溶接以外の溶接手法

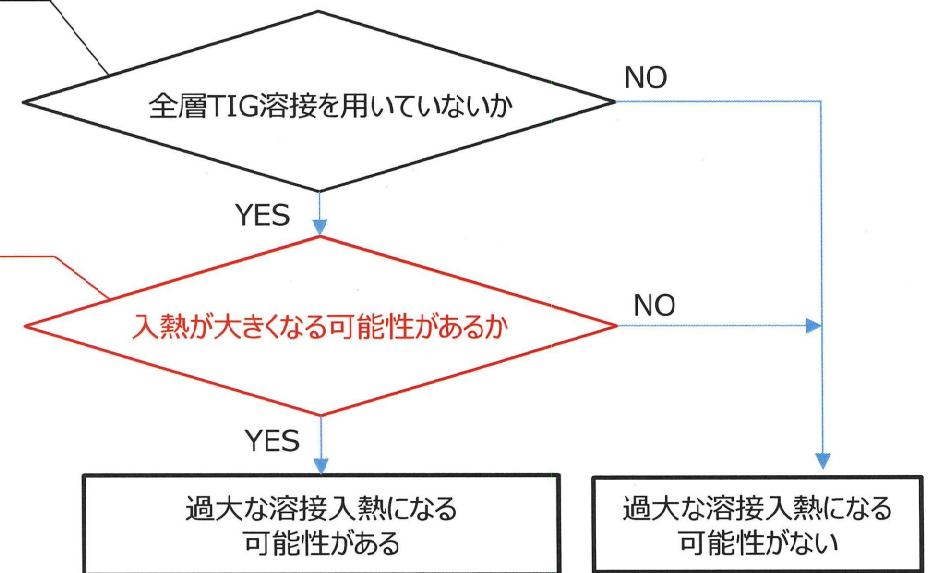
- 従来より考慮している。

②現地溶接 + ③若手溶接士による施工

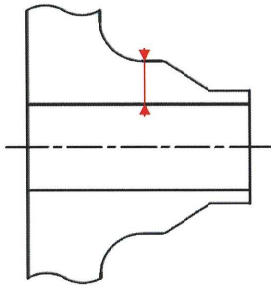

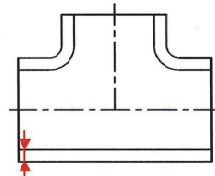
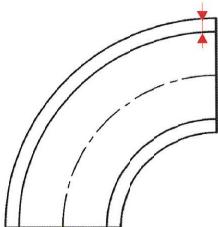
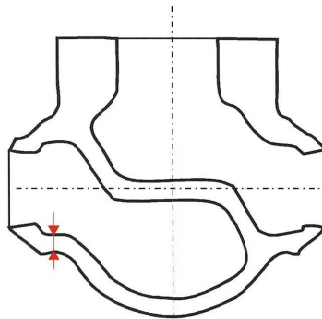
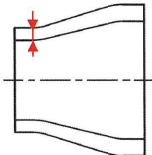
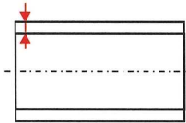
または

④補修溶接

- 工場溶接の場合は、若手溶接士であっても安定した溶接が可能であることから、「②現地溶接」と「③若手溶接士による施工」を組み合わせることを考慮する。
- 「②現地溶接 + ③若手溶接士による施工」と「④補修溶接」は、それぞれがどの程度寄与するか明らかではないため、両要因を考慮する。



形状による分類（板厚）

形状	断面図	板厚 (mm)	形状	断面図	板厚 (mm)
管台			ティー		約20
エルボ		約20	弁		約20
レギュレーサ		約20	直管		13.5

※4B配管の代表的な分類を示したもの。

➤ 管台は他の形状と比べて明らかに板厚が厚い。

 : 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

形状による分類（変形イメージ）

➤ 形状毎に溶接時の変形を模式的に示した。

形状	溶接時の変形イメージ図	変形領域	形状	溶接時の変形イメージ図	変形領域
管台	<p>変形領域</p> <p>溶接凝固時の収縮力</p>	短	ティー		中
エルボ		中	弁		中
レギュレーサ		中	直管		長

➤ 溶接時の変形状態を模式的に示した結果、管台は変形領域が短く、局所的に硬化することが想定された。（4 B以外の口径でも類似の傾向である。）

形状による分類（モックアップでの落ち込み）

▶ 溶接後のモックアップ変形状況を確認した。

	ケース	形状	モックアップ形状	モックアップ写真	落ち込みの深さと領域
管台	ケース1	管台-エルボ			深さ 約1.1mm 領域 約20mm
管台以外	ケース2	エルボ-直管			深さ 約1.2mm 領域 約30mm
	ケース3	直管-直管			深さ 約1.4mm 領域 約40mm

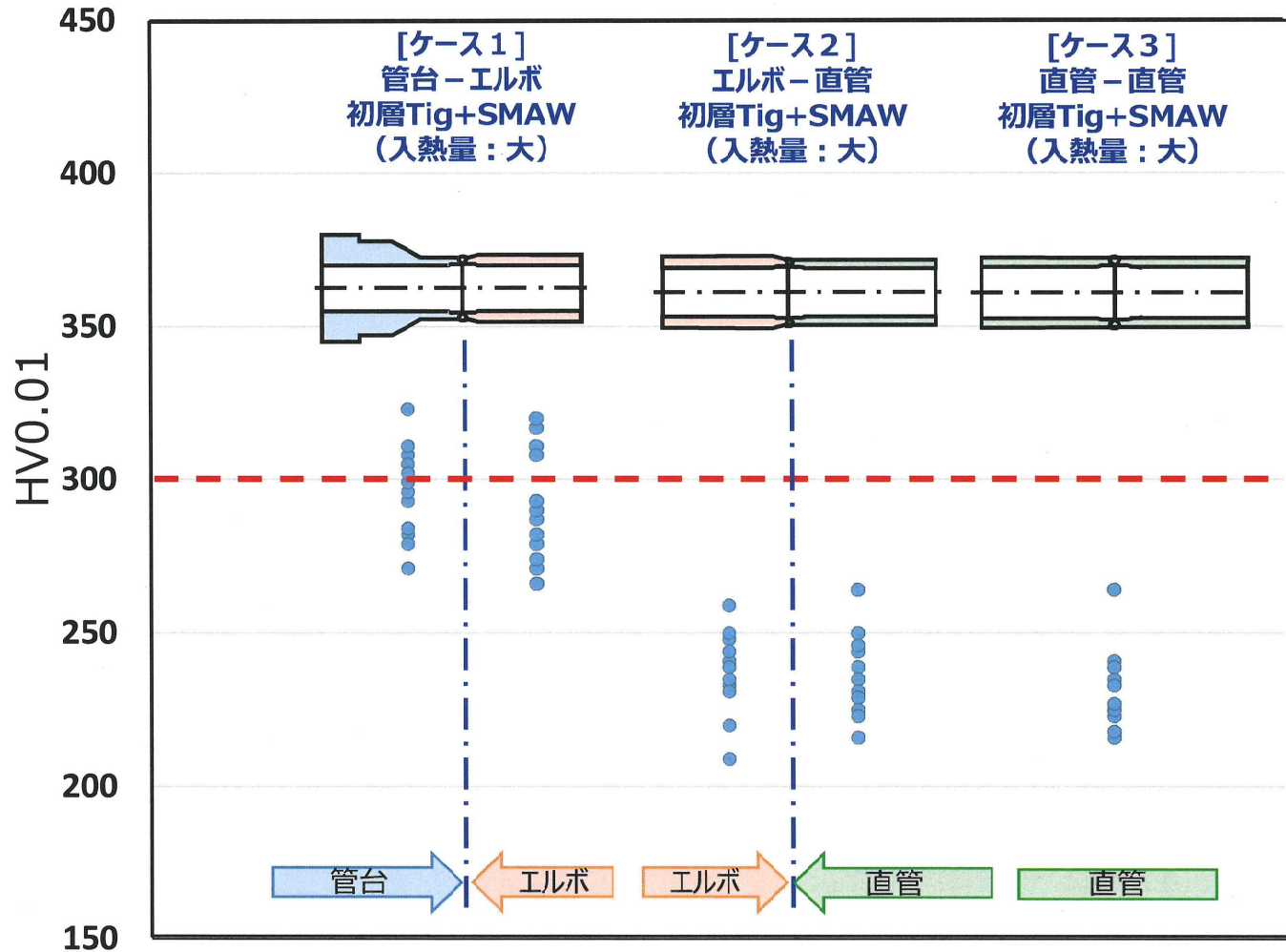
※溶接時の条件は何れも、初層Tig+SMAW（入熱量：大）。

※落ち込み領域は明瞭な塑性変形が確認された領域で、弾性変形の領域はより大きい範囲で生じている。

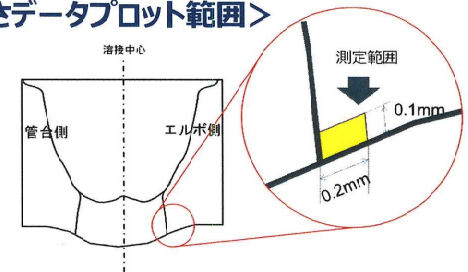
▶ 管台-エルボでは落ち込み領域（変形領域）が相対的に狭くなる傾向が認められた。

：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

形状による分類（モックアップの表層硬さ）

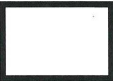


＜硬さデータプロット範囲＞



➤ モックアップで検証した結果、管台を含む形状のみで300HVを超える硬化が確認された。

形状による分類（まとめ）

分類	形状	板厚	変形領域	表層硬さ (モックアップ)	水平展開 対象	解説
管台	管台		短	>300HV 管台－エルボ	○	板厚が極端に厚く、急激に変化する。変形領域が短いことで溶接時の自由収縮が阻害され、硬化が生じたものと推定。 実機・モックアップ共に硬化が認められた。また、運転中応力が高くなるターミナルエンド部である。
管台以外	エルボ	20	中	<300HV エルボ－直管	×	管台と比べて板厚が薄く、急激に変化しない。そのため、溶接時の自由収縮が阻害されず硬化が生じにくいと推定。 モックアップでも硬さが増加しにくいことが確認された。
	レジューサ	20	中	—		
	ティー	20	中	—		
	弁	20	中	—		
	直管	13.5	長	<300HV 直管－直管		

➤ 管台は硬化が生じやすい形状であるため、管台以外の形状と分類することとした。

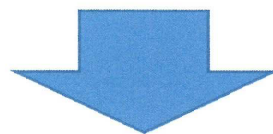
: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

水平展開方法の策定（1/2）

今回、加圧器スプレイ配管で見つかった亀裂は、以下の理由から特異な事象であると判断している。

- これまでのISI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、延べ約3,000箇所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、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。
- また国内外のPWRプラントにおいても、これまで同様の発生事例の報告はない。
- 今回事象を受け、既に大飯3,4号機においては、同様の事象の可能性のある部位全て（80箇所）に対し追加検査を実施し、欠陥がないことを確認している。
- 当社プラントの内、最も運転時間の短い大飯3号機（約17万時間）で生じたものであり、それよりも運転時間の長い美浜3号機、高浜1～4号機でも、至近3定検分のISI※（109箇所）及び今定検中における本事象と同じ箇所の検査（10箇所）において、欠陥がないことを確認している。

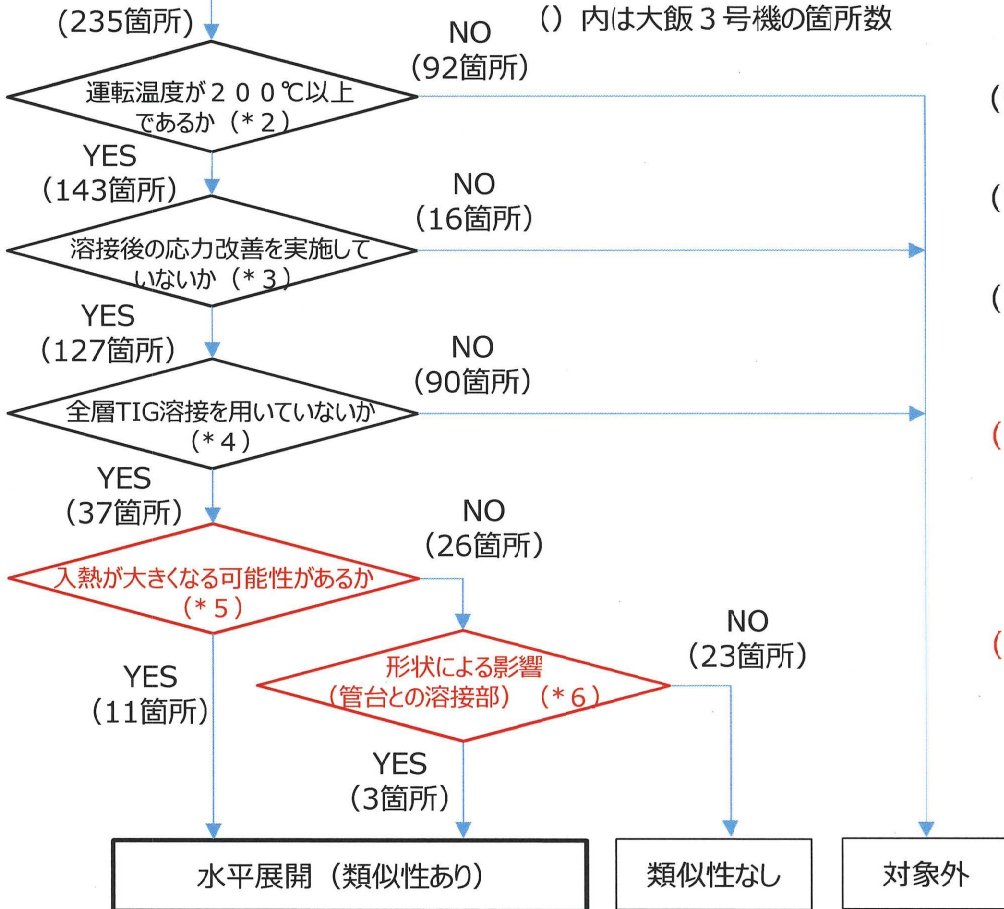
※運転時間で約20万時間が経過した以降の検査



- 上記のとおり、本事象は特異であると判断しているが、メカニズムがすべて明らかにはなっていないため、本事象の原因である「過大な溶接入熱」、「形状による影響」を踏まえ、それぞれについて類似性の高い箇所へ水平展開を行う。

水平展開方法の策定 (2/2)

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鋳鋼、初層溶接部が接液しないセットイン管台、及び初層溶接部が除去されているセットオン管台は含まれていない。
- (* 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。
- (* 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。
- (* 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。
- (* 5) 経験年数が少ない溶接士が施工した場合、丁寧かつ慎重に作業することにより入熱が大きくなる可能性があることから、実務経験が3年未満の溶接士が施工した溶接部 (入熱の安定する工場溶接を除く) は抽出対象とする。または、補修溶接を実施した場合は、追加で溶接をするため、入熱が大きくなる可能性があることから、補修溶接を実施した溶接部を抽出対象とする。
- (* 6) 管台は他の形状と比較して溶接による硬化が生じやすく、モックアップにおいても管台を含む形状で300HVを超える硬さを確認したことから、形状の影響の大きい「管台-エルボ」及び「管台-直管」の溶接部を抽出対象とする。

水平展開の対象箇所数

美浜 3	高浜 1	高浜 2	高浜 3	高浜 4	大飯 3	大飯 4
21	24	17	14	18	14	9

【水平展開】

- 入熱が大きくなる可能性のある溶接部については検査を実施する。また、入熱が大きくなる可能性が低い溶接部であっても、形状による影響を踏まえ検査を実施する。
- これらの類似性の高い箇所に対しては3定検の間、毎定検で検査を実施する。
- なお、知見拡充や研究結果を踏まえて、対象・頻度を検討し、ISI計画に反映する。

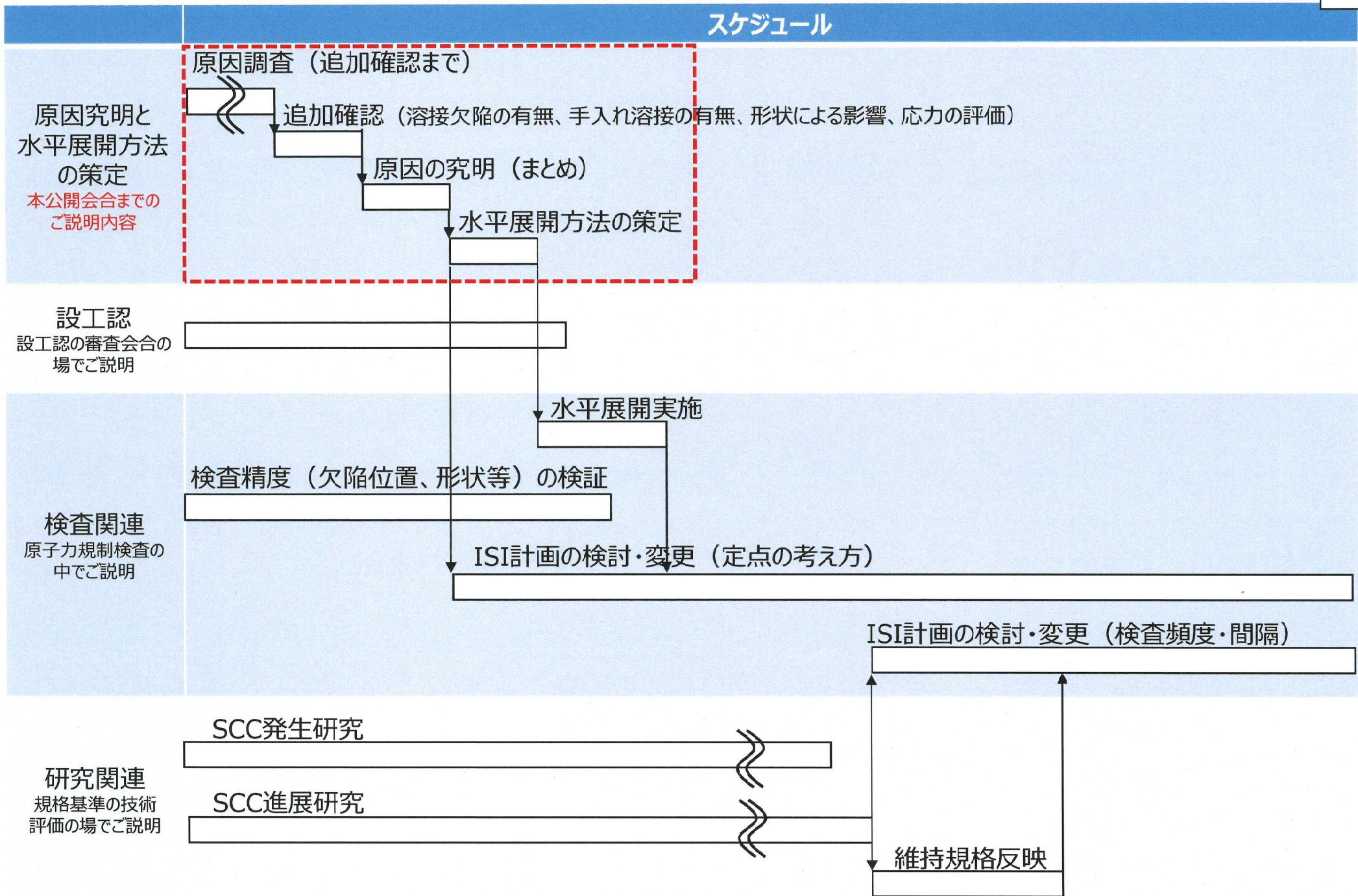
本定検で実施する検査

水平展開箇所に加え、「類似性なし」とした箇所も含め、現時点において同様の事象が他プラントにおいて生じていないことを念のため確認し、欠陥がないことを確認した上でプラントを稼働する。

本定検で実施する検査の対象箇所数

美浜 3	高浜 1	高浜 2	高浜 3	高浜 4	大飯 3	大飯 4
98	94	132	54	44	37(済)	43(済)

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)

本公開会合までのご説明内容 原因究明と水平展開方法の策定	原因調査 (追加確認まで)	➤ 実機の破面調査等 ➤ 溶接欠陥の有無の再確認 ➤ 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 ・形状による影響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
	追加確認	
	原因の究明 (まとめ)	➤ 追加確認結果を踏まえた本事象のまとめ
	水平展開方法の策定	➤ 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抽出方法策定
設工認	配管取替	➤ 配管取替に伴う強度評価等
検査関連	水平展開実施	➤ 類似性の高い箇所に対する検査
	検査精度 (欠陥位置、形状等) の検証	➤ 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計画の検討・変更 (定点の考え方)	➤ 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計画の検討・変更 (検査頻度・間隔)	➤ 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	➤ SCC発生と硬さの関係 ➤ SCC発生と温度の関係 ➤ 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	➤ SCC進展と硬さの関係 ➤ SCC進展と温度の関係 ➤ 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	➤ 事例規格案の審議、発刊

以降、参考資料

工場溶接において過大な溶接入熱とならない理由

参-1

- 工場溶接と現地溶接を比較すると、現地溶接の方が作業上の制約が大きいことから、現地溶接では、慎重に行う傾向がある。なお、工場溶接においては作業性がよく、標準的な条件で施工できることから、過大な溶接入熱にはならないと考えられる。

項目	工場溶接	現地溶接
溶接対象物の状態	対象物を溶接に適した向きや高さに自由に動かすことができる。	対象物が固定されており、対象物を自由に動かすことができない。
溶接部位へのアクセス性	床面での作業が可能であり、溶接に適した作業体勢を確保できる。	足場上等での高所作業や狭隘な場所での作業となり、作業体勢が制限される場合がある。
周囲の干渉物	なし	サポートや周辺配管等の干渉物がある。

溶接による落ち込み変形に対する口径の影響について

- 口径が大きな場合でも、4B配管と同等の変形のし難さが見込まれることを確認するために、落ち込みによる変形に及ぼす口径の影響を検討した。

溶接による落ち込み変形を外力による変形と見なし、口径の影響を評価した結果を図1に示す。外力が作用する配管に生じる周方向応力 σ は、次式で与えられる。

$$\sigma = PD / 2t \quad \text{ここで、} P : \text{外力、} D : \text{外径、} t : \text{板厚}$$

外力が一定の場合、応力は外径 D と板厚 t で決まり、 D が大きくなると増加し、 t が大きくなると減少する。すなわち、配管の変形し難さは t/D により表すことができる。

口径毎の t/D を示した表1からは、 t/D が口径によらずほぼ同等であり、変形し難さに顕著な差が無いことがわかる。

なお、溶接部の形状計測の実績では、大口径の変形量も4B配管と同レベル(1~2mm程度)であることが分かっているため、口径が大きくなっても溶接による落ち込み変形は増加しない。

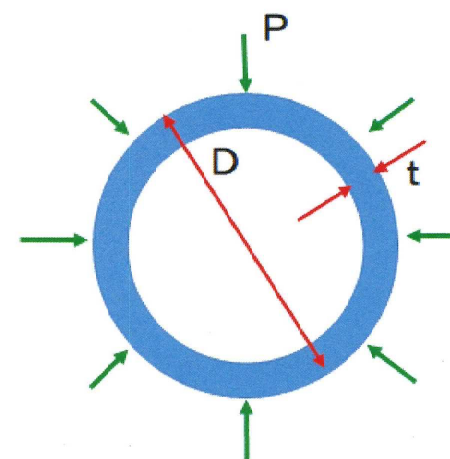


図1 外力が作用する配管

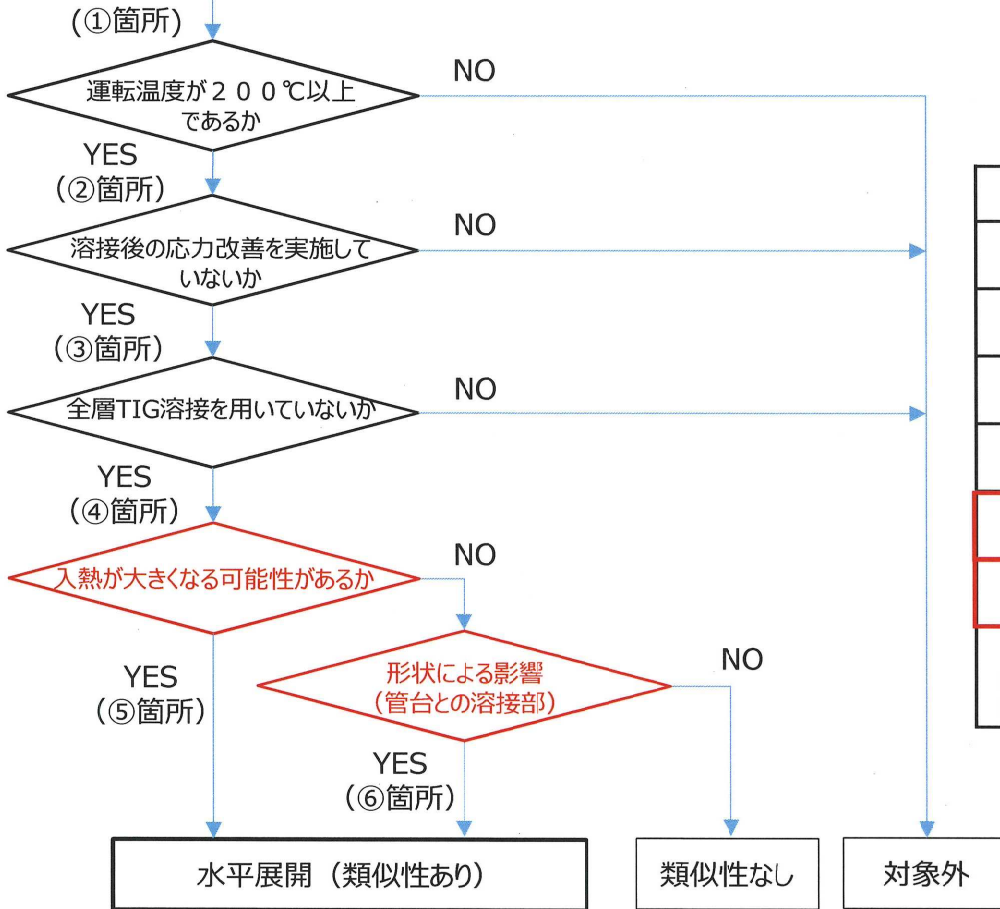
表1 口径による t/D の比較

	外径 D (mm)	板厚 t (mm)	t/D
4BxSch160	114.3	13.5	0.12
6BxSch160	165.2	18.2	0.11
12BxSch160	318.5	33.3	0.10
14BxSch160	355.6	35.7	0.10

- 変形し難さは口径によらずほぼ同等であり、顕著な差が無いことが確認された。

対象箇所数の詳細について

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



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	310	305	322	268	280	235	222
②	236※	201	261	180	207	143	128
③	224※	189	246	165	192	127	112
④	98	94	132	54	44	37	43
⑤	7	12	4	5	9	11	0
⑥	14	12	13	9	9	3	9
⑤+⑥ (水平展開対象)	21	24	17	14	18	14	9

※：2/4公開会合の資料1では「②：254」、「③：242」と記載していたが、過去温度計測結果より一部配管が200℃未満であることが判明したため適正化した。