

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
事象への対応を踏まえた設工認の
技術基準への適合性について（案）

関西電力株式会社

2021年2月16日



ご説明内容

- 大飯3号機の供用期間中検査において、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、当該箇所を取替えを行うことから、大飯3号機 加圧器スプレイライン配管取替工事の設計及び工事計画認可申請書（以下、「設工認」という）を10月20日申請し、11月12日審査会合にて、設工認の概要に関してご説明済み
- また、加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示に係る対応については、12月4日～2月12日に実施した第6回～第11回加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示に係る公開会合で、観察結果、亀裂発生及び亀裂進展要因等をご説明済み

＜観察結果等に基づく事実の整理＞

- ・溶接熱影響部にて深さ4.4mm、長さ60mmの亀裂が認められた。
- ・当該部の亀裂は、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が認められた。
- ・破面内表面全域で粒界割れが認められた。
- ・硬さ計測の結果、割れ近傍の表層で350HV、内部で200HV～240HVの硬さが認められた。

＜亀裂発生及び亀裂進展要因＞

- ・粒界割れの発生には、表層近傍の特異な硬化及び応力が影響したものと推定した。
- ・硬化及び応力には、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）に加え、形状による影響が重畳したと推定した。また、これまでの超音波探傷検査の結果、今回の事象のような「溶接部近傍の特異な硬化に起因する粒界割れ」は確認されていないこと等から特異な事象であると推定した。
- ・亀裂進展は、硬化したオーステナイト系ステンレス鋼はSCCで進展する知見があることから、粒界型SCCで進展したと推定した。

- 上記の内容に関して設工認へ反映し2月16日に補正を実施しており、本日は、当該溶接部の有意な指示に係る対応を踏まえた設工認の技術基準への適合性を以下のとおりご説明する。

NO	説明項目	ページ番号
1	加圧器スプレイ配管溶接部における有意な指示に係る対応を踏まえた対応	1
2	加圧器スプレイ配管溶接部における有意な指示に係る対応を踏まえた設計及び工事計画認可申請書への反映内容	2
3	原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管に対する破断前漏えい（LBB）成立性評価	3

設工認申請時は、機械加工により形成された表層（シンニング部）の硬さを本事象の要因と推定していたが、以下のとおり、今回の工事計画において対応する。

①変更の理由の見直し

シンニング加工以外の要因であることが判明したこと、また、認可を要する理由の明確化のため、以下のとおり記載を見直す。

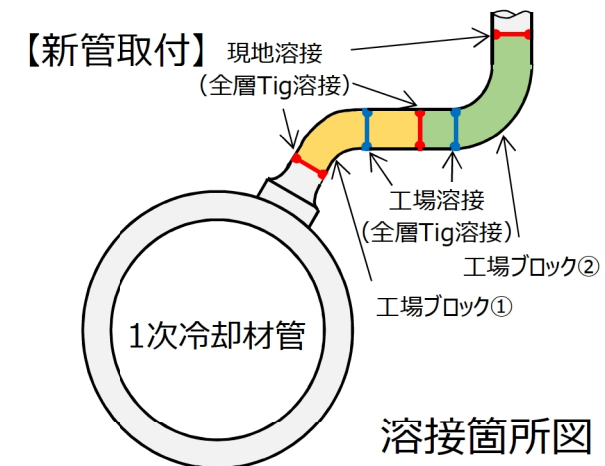
大飯発電所第3号機の第18回定期事業者検査として実施した超音波探傷検査において、加圧器スプレイラインの1次冷却材管台と加圧器スプレイ配管の溶接部付近に有意な指示が認められたことから、当該箇所を取替えを行う。

なお、本工事計画においては、日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格（JSME S NB1-2012/2013）」、「発電用原子力設備規格 材料規格（JSME S NJ1-2012）」及び「発電用原子力設備規格 維持規格（JSME S NA1-2012/2013/2014）」の適用に伴う変更を行う。

②クラス1機器の応力腐食割れ対策に関する説明書への反映

今回の工事における溶接部の全て（全5か所）について、初層入熱量が過大とならない**全層Tig溶接を用いる**。

なお、開先加工時のシンニング加工においては、表層の硬化によるSCCが懸念されることから、硬化層が形成されにくい加工法または応力低減のバフ加工を用いることとする。



③原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管に対するLBB成立性評価結果に関する説明書への反映

溶接時の大入熱の影響又は形状による影響が大きい溶接部について、**定検時に継続的にUTを実施し、欠陥のないことを確認**する。（**運用管理での対策**）

加圧器スプレイ配管溶接部における事象の原因・対策を踏まえた設計及び工事計画認可申請書への反映内容

変更前	変更後
<p>本文「変更の理由」 V. 変更の理由 大阪発電所第3号機の第18回定期事業者検査として実施した超音波探傷検査において、加圧器スプレイラインの1次冷却材管台と加圧器スプレイ配管の溶接部付近に有意な指示が認められ、<u>加工硬化に起因する応力腐食割れと推定されることから、長期信頼性確保の観点から予防保全として当該箇所を取替えを行う。</u> なお、PWRの1次系高温環境下において、機械加工により形成された表層（シンニング部）の硬化層により応力腐食割れが発生する可能性があることから、加工硬化の低減を図る加工方法またはバフ研磨による表層の引張残留応力の改善を図る手法を用いる。</p>	<p>V. 変更の理由 大阪発電所第3号機の第18回定期事業者検査として実施した超音波探傷検査において、加圧器スプレイラインの1次冷却材管台と加圧器スプレイ配管の溶接部付近に有意な指示が認められたことから、当該箇所の取替えを行う。 なお、本工事計画においては、日本機械学会「<u>発電用原子力設備規格 溶接規格（JSME S NB1-2012/2013）</u>」、「<u>発電用原子力設備規格 材料規格（JSME S NJ1-2012）</u>」及び「<u>発電用原子力設備規格 維持規格（JSME S NA1-2012/2013/2014）</u>」の適用に伴う変更を行う。</p>
<p>添付資料「資料3 クラス1機器の応力腐食割れ対策に関する説明書」 (2) 申請範囲における応力腐食割れ発生の抑制策について 申請範囲におけるクラス1機器及びクラス1支持構造物は、以下を考慮することにより応力腐食割れの発生を抑制している。 a. 配管及び弁 (a) 材料選定 当該部に使用する材料は、炭素含有量を制限（$C \leq 0.05\%$）したSUS316系材料であり、応力腐食割れの感受性が低く、これまでPWRの1次系高温環境下における応力腐食割れ対策材料として多く使用されている。 (b) 発生応力 当該部は、<u>JSME事例規格に基づき</u>、運転中の引張応力が增大する設計及び製作時の引張残留応力が高くなる工法を避けて設計し、溶接施工に関しては、日本機械学会「<u>発電用原子力設備規格 溶接規格（JSME S NB1-2012/2013）</u>」に基づき十分な品質管理を行う。</p>	<p>(2) 申請範囲における応力腐食割れ発生の抑制策について 申請範囲におけるクラス1機器及びクラス1支持構造物は、以下を考慮することにより応力腐食割れの発生を抑制している。 a. 配管及び弁 (a) 材料選定 当該部に使用する材料は、炭素含有量を制限（$C \leq 0.05\%$）したSUS316系材料であり、応力腐食割れの感受性が低く、これまでPWRの1次系高温環境下における応力腐食割れ対策材料として多く使用されている。 今回、<u>有意な指示が認められた箇所については、Tig+SMAW溶接※1による過大な溶接入熱（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とから、工事範囲において、過大な初層溶接入熱とならない全層Tig溶接※2を用いる。</u> なお、配管内表面の機械加工として加工硬化の低減を図る加工方法を用いる。 (b) 発生応力 当該部は、運転中の引張応力が增大する設計及び製作時の引張残留応力が高くなる工法を避けて設計し、溶接施工に関しては、日本機械学会「<u>発電用原子力設備規格 溶接規格（JSME S NB1-2012/2013）</u>」に基づき十分な品質管理を行う。 今回、<u>有意な指示が認められた箇所については、Tig+SMAW溶接※1による過大な溶接入熱（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）により熱影響部に通常よりも大きな引張応力が生じていた可能性が考えられることから、工事範囲において、過大な初層溶接入熱とならない全層Tig溶接※2を用いる。</u> なお、配管内表面の機械加工として加工硬化の低減を図る加工方法を適用できない部分については、<u>引張残留応力の改善を図るバフ研磨を行う。</u> ※1：初層のみTig溶接を行い、以降は被覆アーク溶接を実施する溶接施工方法 ※2：全層にわたりTig溶接を実施する溶接施工方法</p>
<p>添付資料「資料6 強度に関する説明書」 別添1「原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管に対するL B B成立性評価結果に関する説明書」 5.2.2 損傷防止対策 (1) SCCの発生防止対策 SCCは、材料（材料の鋭敏化）、応力（溶接引張残留応力）、環境（高溶存酸素）の3要因が重畳することにより発生するものであり、SCCの発生防止対策を実施しておりL B B概念適用の前提条件に適合している。 クラス1機器のSCCの発生防止対策については、資料3「<u>クラス1機器及びクラス1支持構造物の応力腐食割れ対策に関する説明書</u>」において説明する。 (2) 高サイクル熱成層化現象の発生防止対策</p>	<p>5.2.2 損傷防止対策 (1) SCCの発生防止対策 SCCは、材料（材料の鋭敏化）、応力（溶接引張残留応力）、環境（高溶存酸素）の3要因が重畳することにより発生するものであり、SCCの発生防止対策を実施しておりL B B概念適用の前提条件に適合している。 クラス1機器のSCCの発生防止対策については、資料3「<u>クラス1機器及びクラス1支持構造物の応力腐食割れ対策に関する説明書</u>」において説明する。 (2) SCCの損傷防止対策 今回、<u>有意な指示が認められた箇所については、Tig+SMAW溶接※1による過大な溶接入熱（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と考えられることから、今後、溶接時の大入熱の影響又は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溶接部に対して、継続的な超音波探傷検査により有意な指示がないことを確認する。</u> (3) 高サイクル熱成層化現象の発生防止対策 ※1：初層のみTig溶接を行い、以降は被覆アーク溶接を実施する溶接施工方法</p>

記載の適正化のため削除

適用規格の記載を追記

前段の基本方針と記載重複のため削除

全層Tig溶接、加工硬化の低減を図る加工方法の記載を追記

全層Tig溶接、バフ研磨の記載を追記

継続的なUT実施の記載を追記

原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管に対するLBB成立性評価結果に関する説明書において、原子力発電所配管破損防護設計技術指針（以下「JEAG4613」という）に基づき、以下のとおり、LBB成立性評価を実施している。

工事範囲である加圧器スプレイライン配管は、亀裂安定性解析において、作用応力が判定応力内であることから、配管破損形式は取替え前と同じ漏えいとなった。

<配管に考え得る潜在的損傷要因と対策>

LBB概念を適用に当たっては、JEAG4613により損傷防止対策（一般配管で考え得る潜在的損傷要因と対策は同規格表2-1に例示）が施されていることが前提条件であり、考え方は次ページ参照

第3-1表 配管の破損形式及び開口面積

呼び径 (B)	4	
外径 D _o (mm)	114.3	
板厚 t (mm)	13.5	
想定き裂角度 2θ (°) (注5)	96.9	
判定応力 (× S _m) (注2)	1.54	
作用応力	σ _t = 0.5 S _m σ _b = 0	破損形式 (B) (L) 及び 開口面積 (mm ²)
	σ _t = 0.5 S _m σ _b = 0.5 S _m	
	σ _t = 0.5 S _m σ _b = 1.0 S _m	
	σ _t = 0.5 S _m σ _b = 1.5 S _m	
	σ _t = 0.5 S _m σ _b = 2.0 S _m	
	判定応力 (注2)	

- (注1) B：破断を想定する。
L：漏えいを想定する。
()内数値は開口面積 (mm²)。
- (注2) 判定応力 (σ_t + σ_b) 及び作用応力のうち、σ_t (膜応力) は内圧で0.5 S_mとみなし、残りはσ_b (曲げ応力) とする。ただし、S_mは114.7MPaとする。
- (注3) 開口面積は作用応力に応じて内挿するものとする。
- (注5) 想定き裂角度 2θ は、想定き裂長さに対する中心角を表わす。

第4-1表 LBB成立性評価結果 (1/2)

分類	破損想定位置	呼び径 (B)	作用応力 (× S _m)			判定応力 (× S _m)	配管破損形式	開口面積 (mm ²)	配管破損反力 (kN)
			膜応力 ^(注1)	曲げ応力 ^(注2)	合計応力				
分岐管台 ^(注4)	加圧器スプレイ管台 ^(注6)	4	0.5	1.03	1.53	1.54	L	183	5

- (注1) 膜応力は第3-1表の(注2)に従い、0.5 S_mとする。
- (注2) 曲げ応力は自重、熱膨張、機械的荷重及び地震による応力値を合算し、小数第3位を切り上げたものとする。
- (注4) 同一種類の管台で複数存在する場合、厳しい側の結果を代表として記載する。
- (注6) 今回の申請にて、新規に評価を実施した。

：枠囲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

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」については、以下の理由にて満足している。

- **当該箇所（Dループ 加圧器スプレイライン）については以下の方法により取替ることで類似事象は発生しない。**
 - ✓ 今回の取替え工事と同条件のモックアップ試験結果を受けて、**溶接時に過大な初層入熱とならない全層Tig溶接**を行い、初層の入熱量（と応力）の抑制を図る。
 - ✓ 溶接にあたっては、事前に溶接技能トレーニングを行い、溶接施工技能を有する溶接士にて施工する。また、溶接作業前のTBM等にて、溶接施工における注意点等を再度確認した後に溶接を行う。

- 他部位について追加検査を37箇所実施し、**現時点で優位な指示がないことを確認している**。また、今後も37箇所のうち、**溶接時の大入熱の影響又は形状による影響が大きい溶接部**について、定検時に**継続的にUTを実施し、優位な指示がないことを確認する。（運用管理での対策）**

- JEAG4613で言及されている既知のSCC（O2SCC,CISCC）に対しては従前同様の対策※を行っている。

※従前同様の対策

・O2SCC・・・SUS316材の使用（C≤0.05%）

・CISCC・・・製作施工段階での塩化物イオン混入防止

参考

調査結果

<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。

<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。
- 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。**）

亀裂発生及び亀裂進展要因

<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、**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）に加え、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ていることが明らかとなったことから、亀裂は特異な硬化と応力が影響したことにより発生したものと判断している。**

※ 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。

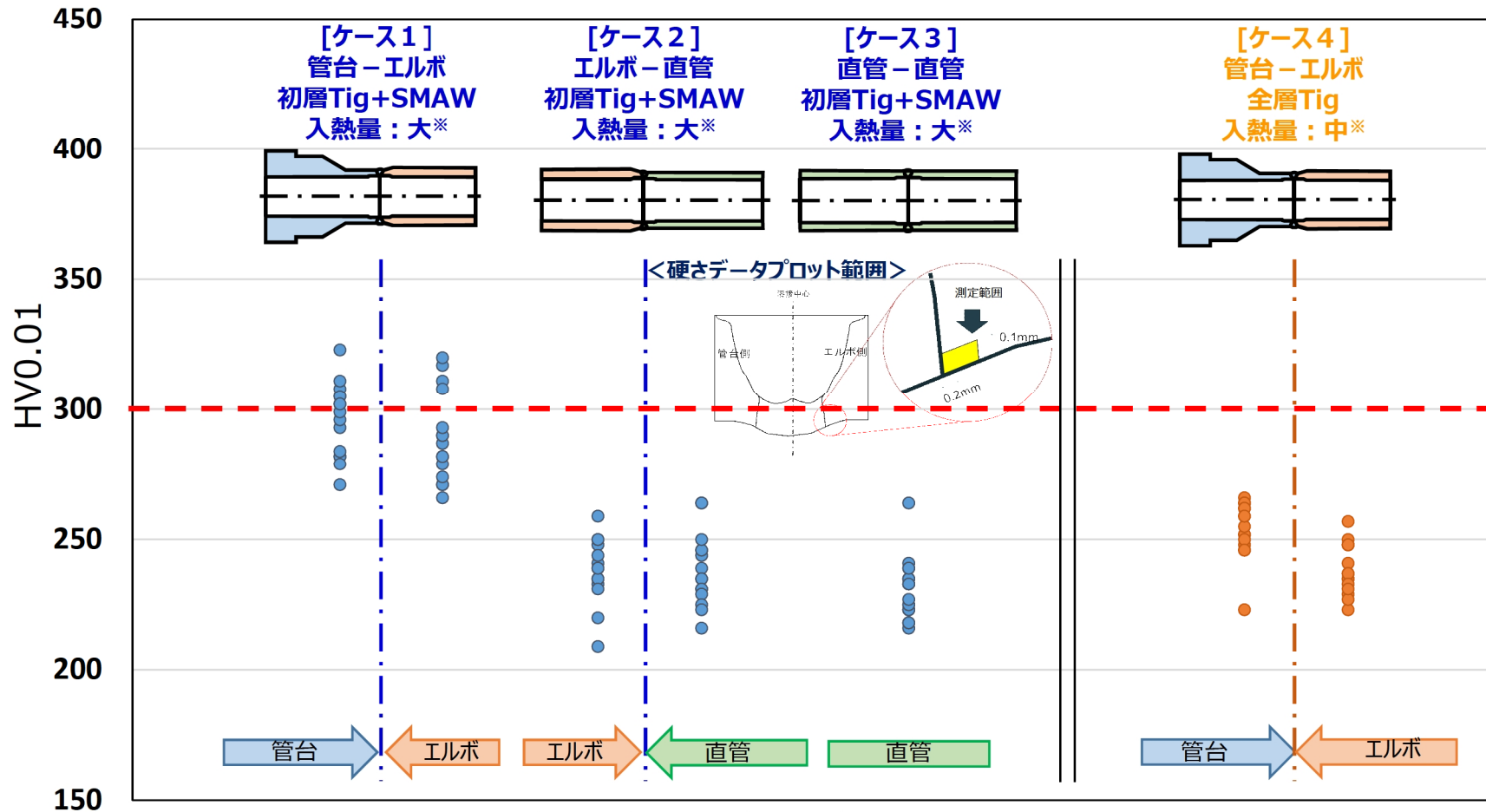
<形状による剛性の硬さへの影響>

- **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。

形状による剛性の硬さへの影響確認結果①

参考2

➤ 形状による剛性の影響について確認するためモックアップを製作し硬さ測定を実施



※：通常の溶接施工における入熱量 大：[]kJ/cm、中：[]kJ/cm
 なお、全層Tig溶接では初層Tig+SMAW溶接に比べて、初層を薄く溶接するため、入熱量が「大」になることはないことから、入熱量は「中」としている。

- 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。

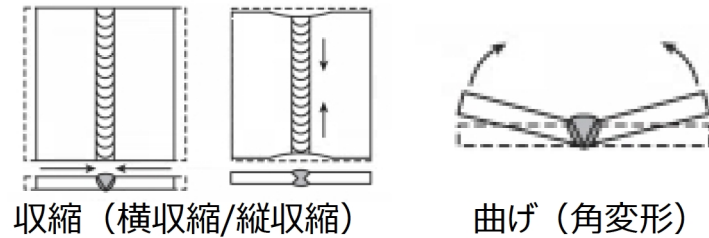
[] : 枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません (1月29日公開会合説明資料 抜粋)

形状による剛性の硬さへの影響確認結果②

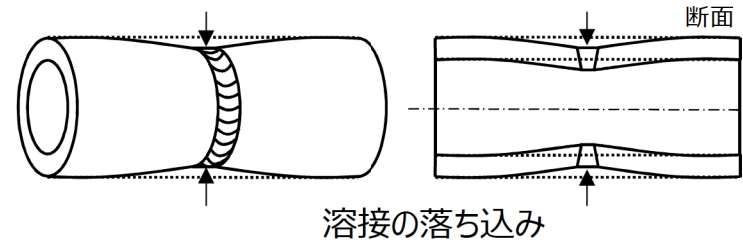
参考3

- ▶ 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。

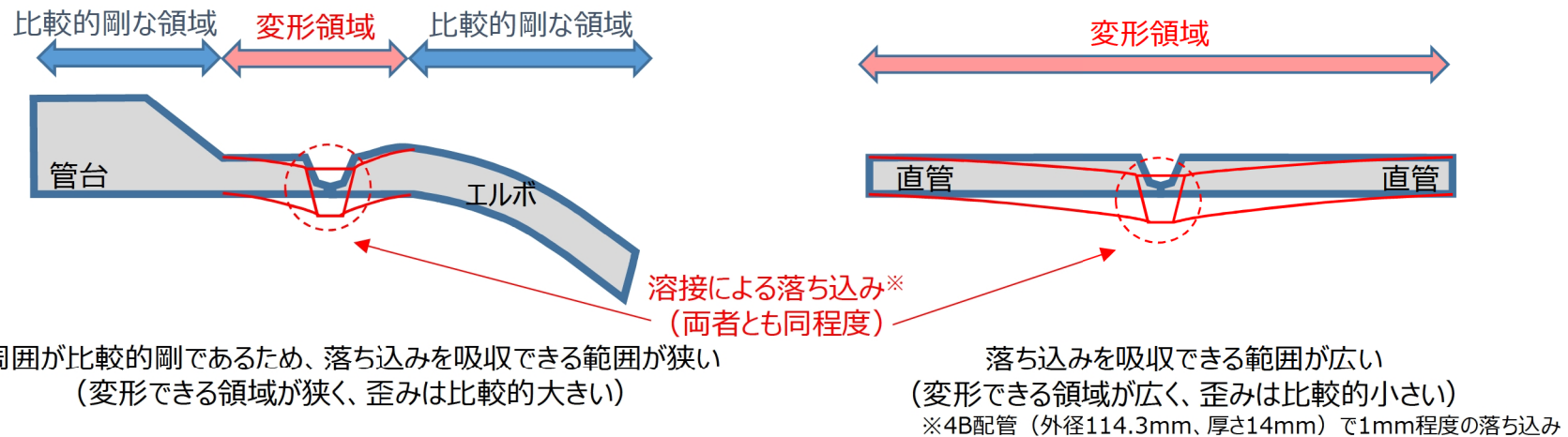
【平板溶接の場合（イメージ）】



【配管溶接の場合（イメージ）】

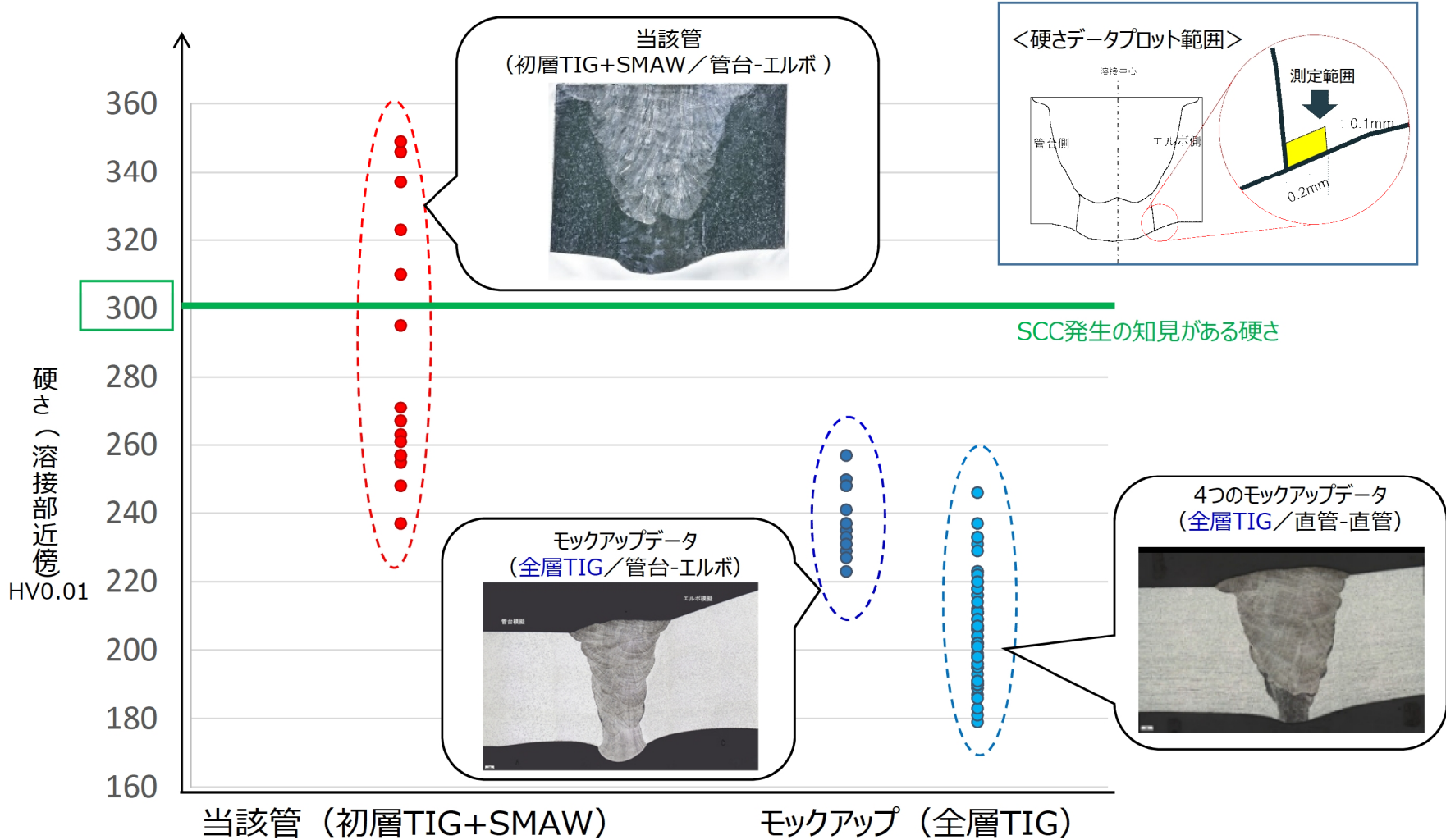


- ▶ これまでのモックアップは直管同士で製作していたが、溶接部周囲の形状剛性の相違が変形程度へ影響した可能性について検証する。



- ▶ 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。

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、管台-エルボの形状模擬でも300HVに至らないことを確認した。