



法令適用事前確認手続

照会書

発 室 発 第 565 号

平成22年3月8日

原子力発電検査課長 殿

東京都千代田区神田美土代町1番地1

日本原子力発電株式会社

取締役社長 森本 浩志



下記について、照会をします。

なお、照会及び回答内容が公表されることに同意します。また、照会対象法令(条項)の性質上照会者名を公にすることが回答に当たって必要とされる場合には、照会者名が公表されることに同意します。

記

1. 法令名及び条項

電気事業法第55条第1項に基づく電気事業法施行規則第94条の3第1項第1号

2. 実現しようとする自己の事業活動に係る具体的な行為

「原子力発電工作物の保安のための点検、検査等に関する電気事業法施行規則の規定の解釈(内規)(平成20・12・22 原院第4号、最終改正 平成21・12・01 原院第1号)」及び「発電用原子力設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について(内規)(平成21・11・18 原院第1号)」に基づき「一次冷却材に接触する箇所材質が600系Ni基合金部」の非破壊試験を計画するにあたり、別紙1の適用範囲に限定して加圧器の600系Ni基合金部に対して実施されるレーザ外面照射応力改善工法(以下、「L-SIP」という)の施工範囲に係る非破壊試験の範囲、程度及び試験方法を、同文書に記載された「検出限界のき裂を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策を施した部位」として適用し計画する。

3. 当該行為と照会対象法令(条項)の規定との関係についての自己の見解

電気事業法第55条第1項に基づき実施する定期事業者検査における発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令第9条の2への適合性確認については、「原子力発電工作物の保安のための点検、検査等に関する電気事業法施行規則の規定の解釈(内規)(平成20・12・22 原院第4号、最終改正 平成21・12・01 原院第1号)」において「発電用原子力設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について(内規)(平成21・11・18 原院第1号)」に規定する方法であることと解釈され、省令に定める技術的要件を満足する技術的内容が記載されており、非破壊試験は、同文書に基づき計画・実施している。

一方、加圧器の600系Ni基合金部に対するL-SIPの施工範囲については、添付資料1に示す結果から、L-SIP施工により超音波探傷試験(以下、「UT」という)による検出限界深さ未満のき裂(以下、「潜在欠陥」という)の先端から延性き裂が発生・進展せず、潜在欠陥に悪影響を及ぼさないこと、潜在欠陥周辺であっても、L-SIP施工後はUTによる検出限界深さ以上の範囲に圧縮応力が得られること、潜在欠陥が存在していても、L-SIP施工後は応力腐食割れによる潜在欠陥の進展がないことが確認されている。これらのこ

とから、当該手法は、検出限界のき裂(UT の検出限界)を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策であると考えられる。

従って、同部位については、「発電用原子力設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について(内規)(平成 21・11・18 原院第 1 号)」の別紙 1 の 5. で規定されている「検出限界のき裂を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策を施した部位」に該当し、当該規定に基づき非破壊試験を計画・実施することで、技術基準適合性を確認する試験方法として妥当であるとする。

なお、L-SIP 工法及び加圧器管台異種金属溶接部における UT 検査手法について添付資料 2, 3 に示す。

4. 公表の遅延の希望

なし

5. 連絡先 < 非公開 >

以上

非破壊試験における「検出限界のき裂を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策を施した部位」の適用範囲について

標記の範囲は、確性試験により有効性が確認された以下の範囲に限定する。

1. 適用箇所

加圧器の 600 系 Ni 基合金部における、以下の適用条件を満足する応力腐食割れ防止対策の実施範囲への適用に限定する。

具体的な適用箇所は以下の通り。

(1) レーザ外面照射応力改善工法 (L-SIP)

・加圧器

サージ用管台セーフエンド溶接部、スプレイ用管台セーフエンド溶接部、安全弁用管台セーフエンド溶接部

(何れも、低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の周継手の溶接部であり溶接金属はニッケルクロム鉄合金-600 合金))

2. 適用条件

(1) 施工前確認

応力腐食割れ防止対策として(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「レーザ外面照射応力改善工法の適用に関する確性試験」(確性試験証明書番号:18 確 S3 号-1 及び 18 確 S3 号-2 完)(別紙 2 参照)で規定された UT 手法(圧縮応力付与深さと同じ深さ以上の欠陥が検出できる UT)を用い、割れ等の有害な欠陥が検出されなかった部位とする。UT 手法は別紙 3 の通り。

(2) 施工条件

(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「レーザ外面照射応力改善工法の適用に関する確性試験」(確性試験証明書番号:18 確 S3 号-1 及び 18 確 S3 号-2 完)で確認された項目に則り、予め確認された施工条件の範囲で施工された部位とする。施工条件は別紙 4 のとおり。

以 上

(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会

「レーザー外面照射応力改善工法の適用に関する確性試験」

確性試験証明書

1. 「レーザー外面照射応力改善工法の適用に関する確性試験」(18 確 S3 号-1)

確性試験対象:低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の周継手の溶接部

(溶接金属:ニッケルクロム鉄合金-600 合金)

オーステナイト系ステンレス鋼の周継手の溶接部

(溶接金属:オーステナイト系ステンレス鋼)

ニッケルクロム鉄合金とオーステナイト系ステンレス鋼の周継手の溶接部

(溶接金属:ニッケルクロム鉄合金-600 合金)

2. 「レーザー外面照射応力改善工法の適用に関する確性試験」(18 確 S3 号-2 完)

確性試験対象:低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の周継手の溶接部

(溶接金属:ニッケルクロム鉄合金-600 合金及び 690 合金)

表 施工前確認として用いるUT手法

プ ロ ー プ	モ ー ド :縦波 振動指数 :2 振動子型 屈 折 角 :45 度、50 度、60 度、フェーズドアレイ手法(軸方向探傷)、 35 度(周方向探傷) 周 波 数 :1.0～2.0MHz
探 傷 面	外表面
探 傷 方 法	自動探傷ツールを用いた UT 手法
校 正	JEAC4207-2008 に準拠して、横穴およびスリットを用いて感度校正を実施

確性試験の施工条件における☒部については、メーカー施工ノウハウに関わるため、公開される場合はマスキング対象とさせていただきます。

別紙4

表「レーザ外面照射応力改善工法の適用に関する確性試験」に関する確性試験の施工条件
(別紙2 確性試験証明書番号:18確S3号-1及び18確S3号-2完参照)

表 1.低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の周継手の溶接部

(溶接金属:ニッケルクロム鉄合金-600合金及び690合金)

材 料		低合金鋼 (P-3) (注1) とオーステナイト系ステンレス鋼 (P-8) との突合せ継手で、ニッケルクロム鉄合金-600 合金及び 690 合金による溶接部 (F-43、R-43) (注1) P-3 の内面にはオーステナイト系ステンレス鋼のクラッド溶接がされている。	
適用部位 外径と板厚 *1		管台及び配管の周継手 $\phi 133 \times t 22 \text{ mm} \sim \phi 390 \times t 49 \text{ mm}$	
必要応力改善範囲		工法の適用にあたっての施工目標範囲: ☒	
冷却モード		空冷モード	水冷モード
内面の適用条件		内面が気相 あるいは 施工前に水が充満している場合	常に水が充満している場合
エ ッ セ ン シ ャ ル バ リ ア ブ ル	最高到達温度 T_{max}	オーステナイト系ステンレス鋼: $550^{\circ}\text{C} \leq T_{max} < 650^{\circ}\text{C}$ ニッケルクロム鉄合金: $550^{\circ}\text{C} \leq T_{max} < 650^{\circ}\text{C}$ 低合金鋼: $500^{\circ}\text{C} \leq T_{max} < 595^{\circ}\text{C}$	オーステナイト系ステンレス鋼: $550^{\circ}\text{C} \leq T_{max} < 650^{\circ}\text{C}$ ニッケルクロム鉄合金: $550^{\circ}\text{C} \leq T_{max} < 650^{\circ}\text{C}$ 低合金鋼: $500^{\circ}\text{C} \leq T_{max} < 595^{\circ}\text{C}$
	昇温時間パラメータ F_o *2	$0.04 \leq F_o \leq 0.08$	$0.04 \leq F_o \leq 0.50$
	移動速度 v	$v h \geq 111 \text{ mm}^2/\text{s}$	$v h \geq 15 \text{ mm}^2/\text{s}$
	周方向加熱幅 W *2	$1.7 \times \sqrt{rh} \leq W \leq 4.0 \times \sqrt{rh}$	$1.0 \times \sqrt{rh} \leq W \leq 4.0 \times \sqrt{rh}$
	軸方向加熱幅 L	$3 \times \sqrt{rh}$ 以上	$3 \times \sqrt{rh}$ 以上
施工回数 *3		3 回以下	3 回以下

(備 考) r : 平均半径、 h : 板厚、 k : 熱拡散率、 v : レーザ光源の移動速度

τ_o : 外面が 100°C から最高温度まで加熱されるのに要する昇温時間

昇温時間パラメータ: $F_o = \tau_o \times k / h^2$

W : 最高温度まで加熱するのに有効な周方向加熱幅 ($= \tau_o \times v$)

L : 外面が所定の温度に加熱されている領域の軸方向長さ

*1 外径と板厚は溶接金属での値とし、図面などの資料もしくは現物の調査により確認する。なお、外径と板厚の範囲は公称値である。

*2 F_o と W は、溶接部での温度計測結果を用いて評価する。

*3 施工の1回は2周が1セットである。

添付資料1:平成22年1月21日 検査評価技術WG資料

「600系Ni基合金部に適用するレーザ外面照射応力改善工法(L-SIP)
の応力腐食割れ防止に関する有効性確認結果」

添付資料2:金属 Vol.79 No.10 (2009)

「レーザ加熱による配管溶接部内面の残留応力改善—L-SIP工法—」

添付資料3:保全学 Vol.6 No.1 (2007)

「PWR 加圧器管台異種金属溶接部UT検査手法の実証試験」

600系Ni基合金部に適用する レーザ外面照射応力改善工法(L-SIP)の 応力腐食割れ防止に関する有効性確認結果

2010年1月21日

日本原子力発電株式会社
三菱重工業株式会社

1

1. はじめに

■加圧水型原子力発電プラントの1次系冷却水環境下の600系Ni基合金部の応力腐食割れ(以下、PWSCC)に対する予防保全対策(残留応力改善対策)として、平成18年にL-SIPの確性試験を実施し承認された。

注) L-SIP(outer surface irradiated Laser Stress Improvement Process)



■平成19年9月に、日本原子力発電(株) 敦賀2号機のサージ用管台の異材溶接部において、L-SIPを実機適用。

安全弁・逃がし弁用管台

スプレイ用管台

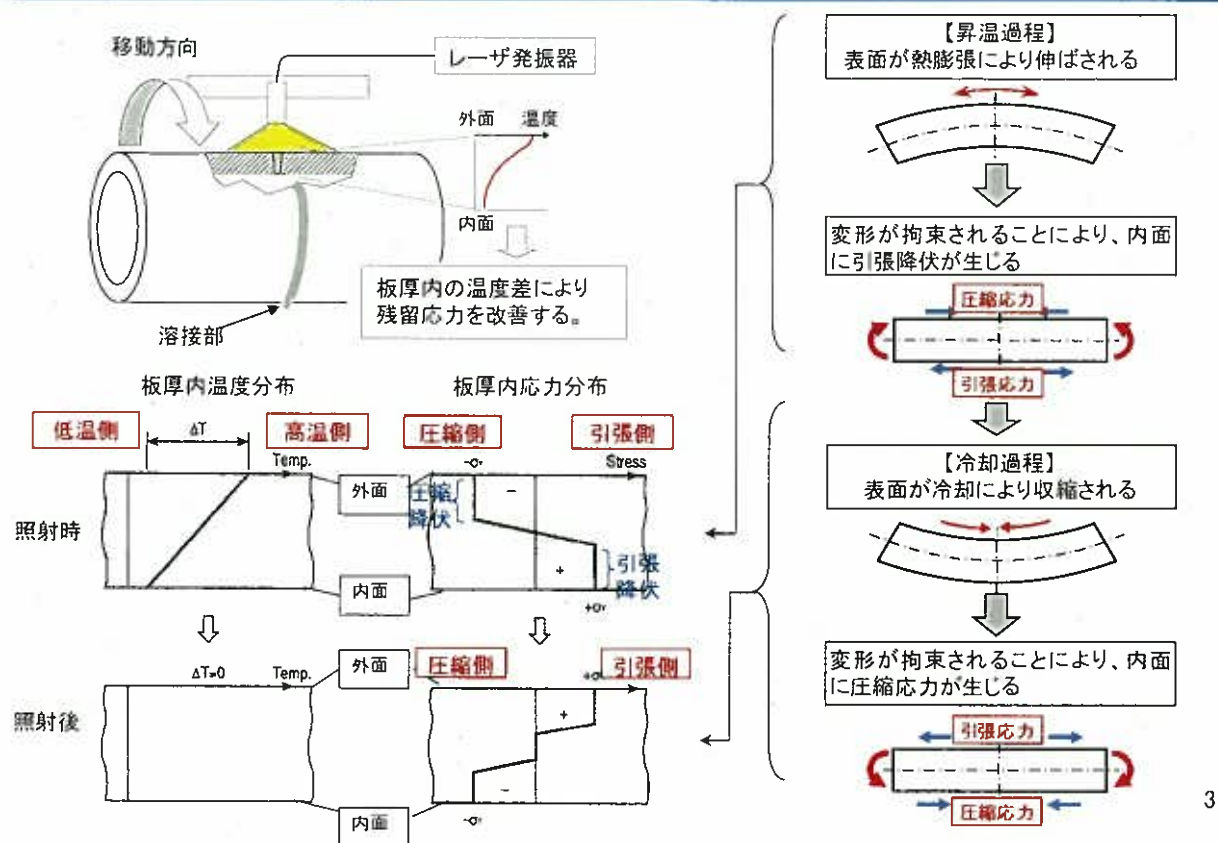
サージ用管台



L-SIP適用部位

2

2.L-SIPの原理



3

3.確性試験での潜在欠陥に対するL-SIPの影響確認項目

(1) 検討内容

確性試験では、確性済みのL-SIP施工条件を前提として、施工前検査（超音波探傷試験（UT））が実施されているものを対象に、施工前検査で確認できない可能性のある欠陥（以降潜在欠陥とする）へのL-SIPの影響/効果を確認した。

(2) 確認項目

確性試験では、UT検出限界である板厚の20%深さの潜在欠陥を想定して下表の内容を確認した。

	潜在欠陥に対するL-SIPの影響	潜在欠陥に対するL-SIPの効果確認	
	4.1 延性き裂進展確認試験	4.2 残留応力確認解析	4.3 SCC試験
目 的	L-SIP施工によって潜在欠陥から延性き裂が発生・進展しないことを確認する。	潜在欠陥周辺で、L-SIP後に残留応力が圧縮応力になっていることを確認する。	潜在欠陥が存在しても、L-SIP後は、SCCによる潜在欠陥の進展がないことを確認する。
試験項目	①延性き裂進展評価 ②破面・表面観察	③残留応力解析	④SCC試験

4

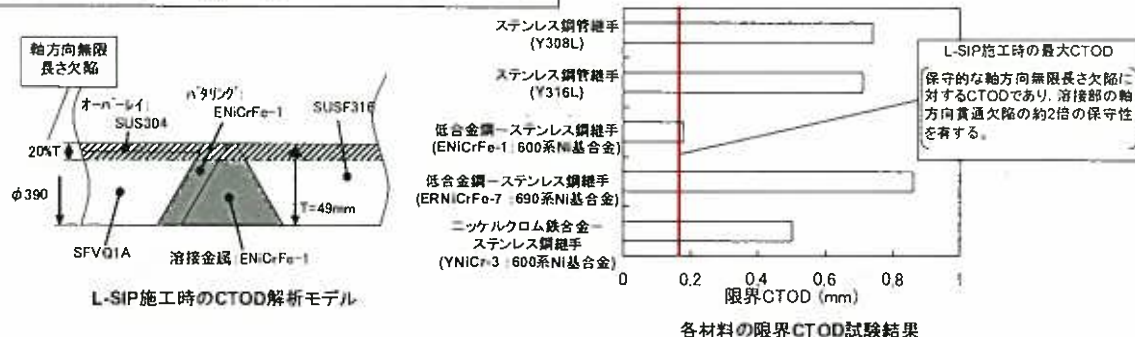
4.1 延性き裂進展確認試験

① 延性き裂進展評価 (限界CTODとL-SIP施工時CTODの比較)

- (1) 各材料の限界CTOD (Crack Tip Opening Displacement: き裂先端開口変位量) は、溶接金属部を対象に試験で求めた
- (2) L-SIP施工時のCTODは、L-SIP施工対象構造の中でCTODが最大となる形状をモデル化した3次元FEM (有限要素法) により算出

※ 限界CTOD: 延性き裂が発生する、材料の限界変位量

L-SIP施工時CTOD: L-SIP施工時に生じるき裂先端の開口変位量



各材料の限界CTOD > L-SIP施工時CTODとなることから、
L-SIP施工による延性き裂は生じないこととなる。

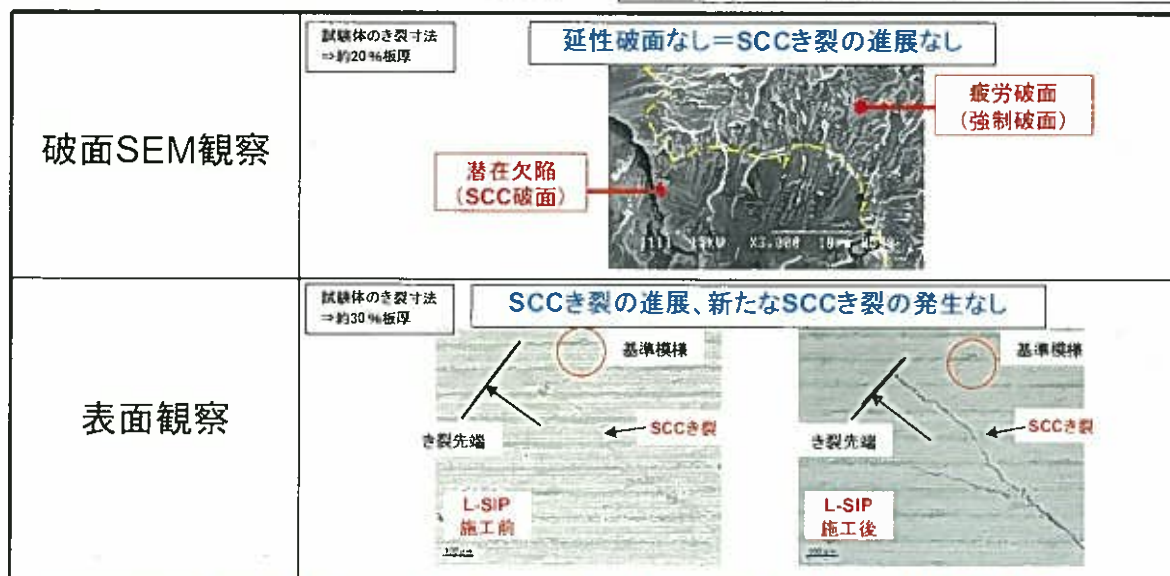
5

4.1 延性き裂進展確認試験

② 破面・表面観察 (潜在欠陥の進展有無の確認)

・L-SIP施工によるき裂進展有無を確認

試験体種類: ステンレス鋼管継手
試験体サイズ: 外径: 114.3mm 板厚: 13.5mm き裂寸法: 約20,30%板厚 (2種類)
処理: 潜在欠陥導入 (SCCき裂) → L-SIP施工 → 破面観察、表面観察



破面・表面観察の結果、潜在欠陥 (SCCき裂) がL-SIP施工により延性的に進展しないことを確認した。

6

4.2 残留応力確認解析

③ 残留応力解析

・L-SIPによる板厚内の残留応力改善効果を熱弾塑性解析で確認

潜在欠陥の有無による
板厚内圧縮残留応力改善範囲の比較

継手種類 (溶接金属)	解析モデル	板厚内圧縮残留応力改善範囲 (距離mm)				
		内面	20	40	60	外面

き裂先端のひずみ集中の効果により、き裂が無い場合に比べて、き裂先端に大きな圧縮ひずみ(圧縮応力)を受ける。そのため、板厚内の応力が再分配され、き裂がない部分よりも深い範囲が圧縮残留応力に改善される。従って、潜在欠陥がないモデルの方が残留応力改善範囲が浅くなることから、潜在欠陥がないモデルで各ケースを評価した。

各ケースでの板厚内圧縮残留応力改善範囲(潜在欠陥なし)

継手種類 (溶接金属) (外径/板厚(単位:mm))	モード	板厚内圧縮残留応力改善範囲 (距離mm)				
		内面	20	40	60	外面

潜在欠陥深さ

いずれのケースでも内面～潜在欠陥深さ以上の範囲で残留応力が圧縮となることを確認した。

7

4.3 SCC試験

④ SCC試験

・解析の結果、いずれのケースでも内面～潜在欠陥深さ以上の範囲で残留応力が圧縮となることから、SCCき裂が発生／進展しないことを確認するため、代表1ケースでSCC試験を実施

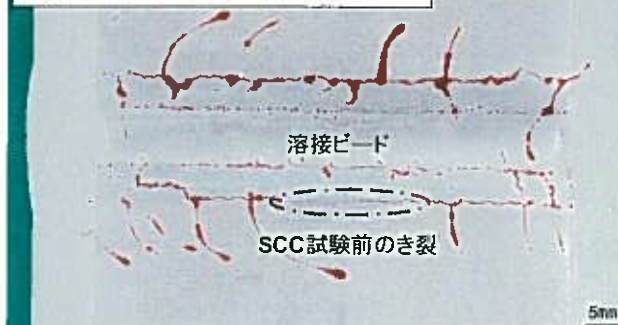
※ Ni基合金に数mm深さの模擬欠陥を制御して導入することは困難なため、ステンレス鋼管継手で代表した。

L-SIP施工無し

L-SIP施工後

試験体種類: ステンレス鋼管継手
試験体サイズ: 外径: 114.3mm 板厚: 13.5mm
処理: 潜在欠陥導入→PT検査→SCC試験→PT検査

試験体種類: ステンレス鋼管継手
試験体サイズ: 外径: 114.3mm 板厚: 13.5mm
処理: 潜在欠陥導入→L-SIP→PT検査→SCC試験→PT検査



潜在欠陥を有する溶接部でも、L-SIP施工により SCCき裂の進展、新たなSCCき裂の発生が防止できることを確認した。

8

5.まとめ

以下の通り、L-SIP施工による潜在欠陥への影響及び効果を確認した。

- ① L-SIP施工によって潜在欠陥から延性き裂が進展せず、また新たな欠陥の発生も認められないことから、潜在欠陥に悪影響を及ぼさないことを確認した。
- ② 潜在欠陥があっても、L-SIP施工後は潜在欠陥よりも深い範囲まで圧縮応力が得られることを確認した。
- ③ 潜在欠陥が存在していても、L-SIP施工後はSCCき裂の進展、新たなSCCき裂の発生が防止できる事を確認した。

従って、L-SIPの施工前確認のUTで検出されない微小な欠陥の存在を仮定しても、L-SIPの技術は有効であり、「検出限界のき裂を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策」に該当するものとする。



材料表面き裂の無害化と自己治癒の最前線

レーザ加熱による配管溶接部内面の残留応力改善 — L-SIP 工法 —

朝田 誠治, 太田 高裕, 金崎 宏, 蔵内 広伸

溶接部に発生する内面の引張残留応力は応力腐食割れの要因の一つである。内面からアクセスできない小口径配管等に対し、外面からのレーザ照射による板厚内温度差を利用して残留応力を改善する工法を開発した。その工法の原理及び L-SIP 施工時の潜在欠陥に対する評価について紹介する。

はじめに

原子力プラントのニッケル溶接異材継手及びオーステナイト系ステンレス鋼溶接継手では、応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking: SCC) の事例が報告されており、SCC は引張応力、材料及び環境の3つが重畳する場合に発生する可能性がある。実機プラントに対して現地で施工可能な SCC 発生防止対策の工法としては、当該部の残留応力改善が有効な手法の一つとなっている。

残留応力改善工法にはいくつかあるが、実機プラントでは環境の制約がある中で施工しなければならない。たとえば、水中で施工する場合、高圧水をノズルから噴射することにより発生させたキャビテーションを利用して金属表面をピーニングし、それにより施工面の残留応力を改善するウォータージェットピーニング工法¹⁾がある。しかし、小口径の配管のように内面からアクセスできない場合にはこのような工法は適用できない。

そこで、外面から施工できる残留応力改善工法として、溶接部の外面からレーザ光を照射し、その照射により生じる板厚内外面の温度差を利用して管内面の残留応力を改善するレーザ外面照射応力改善法 (outer surface irradiated Laser Stress Improvement Process: L-SIP) が開発された²⁾³⁾。ここでは、L-SIP 工法の原理及び潜在欠陥に対する影響・効果の検討結果について説明する。

L-SIP 工法による残留応力改善

原 理

L-SIP 工法は、図1に示すように溶接継手近傍の外周上をレーザ光が移動しながら外面を照射・加熱し、板厚内外面の温度差を与えることで全周の残留応力を改善する。その原理を、内外面が2本棒で構成された単純なモデルを用いて以下に示す (図2)。

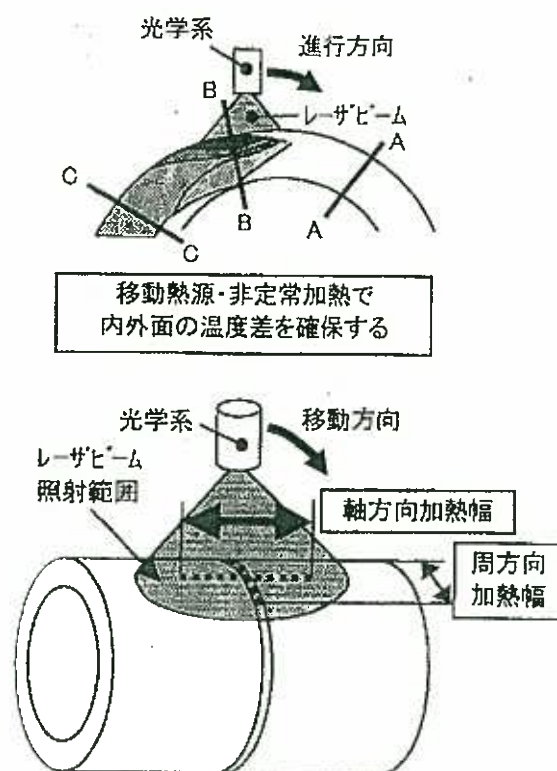


図1 L-SIP 工法の概念図

- ①レーザー照射前 (A-A断面) では板厚内の温度は一定である。
- ②レーザー照射時 (B-B断面) では、内外面で拘束がないとすると、内面の棒より外面の棒の方が熱膨張の量は多くなる。しかし、内外面が拘束されており、内面と外面の棒は同じ長さになるので、内面の棒は引張応力、外面の棒は圧縮応力が生じる。これらの発生応力が塑性域になる程度に温度差を与えることで、塑性ひずみが生じることになる。以上より、初期状態より内面の棒は伸びる方向、外面の棒は縮む方向になる。
- ③冷却後 (C-C断面) では、内外面で拘束がないとすると、レーザー照射時に生じた塑性ひずみにより初期状態に比べて内面の棒は伸び、外面の棒は縮むことになる。しかし、内外面が拘束されており、内面と外面の棒は同じ長さになるので、内面の棒は縮められるために圧縮応力、外面の棒は伸ばされるために引張応力を生じる。

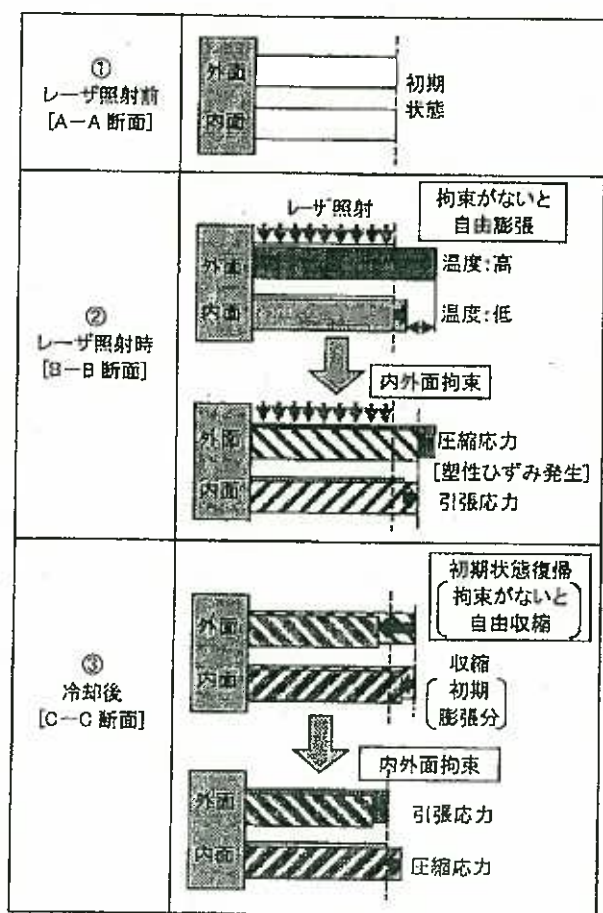


図2 L-SIP 応力改善原理図

以上のように、L-SIP工法は外面からのレーザー照射により与える板厚内温度差を利用して、内面側の応力を圧縮方向に改善する工法である。レーザーの出力、移動速度等を調整し、適切な板厚内温度分布を与えることが重要である。

ここで注目すべきは、L-SIP工法は通常の溶接時の熱処理と異なり、材料のクリープ現象により残留応力を改善するものではなく、板厚内の温度分布により新たに塑性ひずみを導入して残留応力を改善する工法だということである。このため、加熱時間は短時間でも残留応力改善効果が得られる特徴がある。ただし、L-SIP工法はSCCに対する予防保全のための工法であることから、加熱する温度は溶接後熱処理温度より低く、移動熱源であることから温度保持時間もなく、材料に対して熱影響を与えないようにしている。

また、管内部には冷却水がある状態の方が内外面の温度差を出しやすいが、冷却水がない状態でも照射条件を適切に選べばL-SIPによる残留応力改善は可能である。

オーステナイト系ステンレス鋼管の検証例

L-SIP工法による残留応力改善効果を確認するため、オーステナイト系ステンレス鋼管 (SUS316TP: 4B×Sch160) の溶接部を対象に熱弾塑性解析及び実験を実施した²⁾。

熱弾塑性解析においては、図3に示すように文献値⁴⁾を参考に溶接部内面に約300MPaの引張残留応力を模擬した解析を行った。次に、L-SIPによ

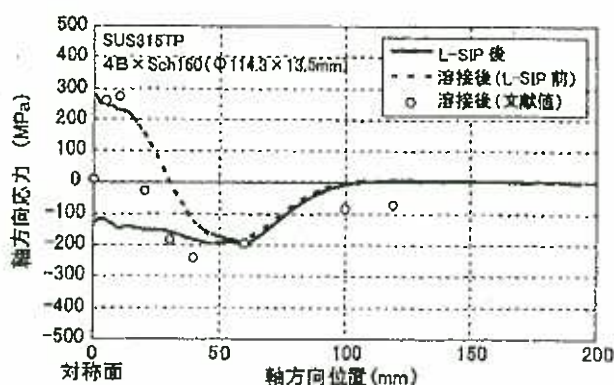


図3 L-SIP 前後の熱弾塑性解析結果 (軸方向分布)

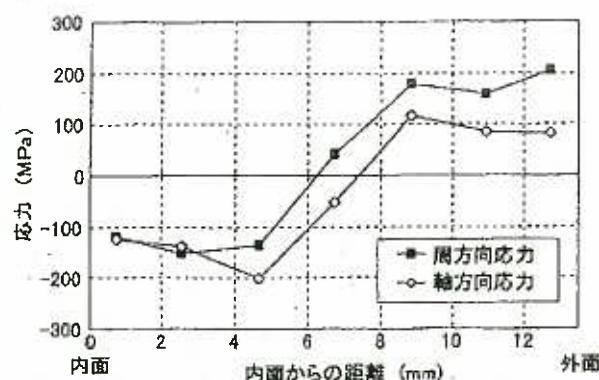


図4 L-SIP 前後の熱弾塑性解析結果 (板厚内分布)

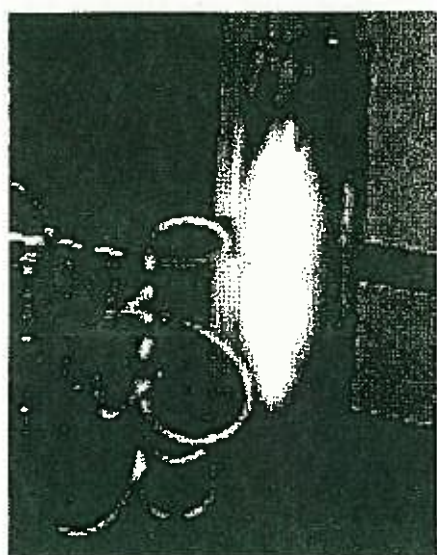


図5 ステンレス鋼管継手に対するL-SIP 施工状況

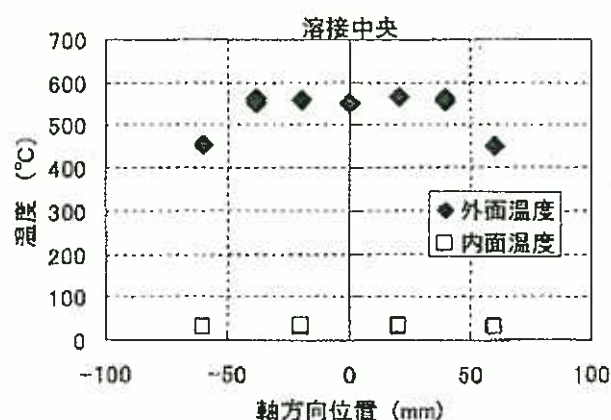


図6 ステンレス鋼管継手へのL-SIP 施工時の温度計測結果

るレーザ照射の温度分布解析を行い、最高到達温度が550℃以下で、かつ内外面に適切な温度差が生じるように条件をコントロールし、温度分布を設

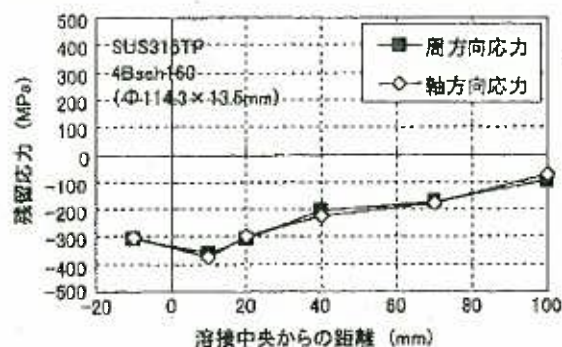


図7 ステンレス鋼管継手に対するのL-SIP 後の板厚内残留応力

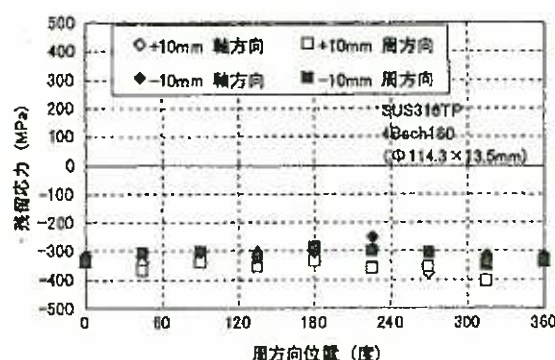


図8 ステンレス鋼管継手へのL-SIP 後の板厚内残留応力

定した。得られた温度分布を用いて熱弾塑性解析を行い、図3及び図4に示すように、溶接残留応力があつた場合でも溶接部内面で100MPa程度の圧縮応力まで改善されることを確認した。

対象とするステンレス鋼管の供試体を製作し、図5に示すようにL-SIPを施工し、実験を行った。その結果、図6に示すように、外面温度は約550℃で管理できた。L-SIP施工後、供試体の残留応力を計測した結果、図7に示すように、溶接部近傍の内面では周方向及び軸方向応力ともに200～400MPaの圧縮応力に改善できた。また、図8に示すように、L-SIP後の残留応力は周方向位置ではほとんど差がなく、全周を均一に応力改善できたことを確認した。粒界に異常はなく、鋭敏化などの悪影響がないこともシュウ酸電解エッチング試験により確認した。

確性試験

L-SIP 工法は(財)発電設備技術検査協会にて「レーザ外面照射応力改善工法の適用に関する確性

試験 J (18 確 S3 号) を行い、ステンレス鋼周溶接継手 (SUS304 系, SUS316 系)、低合金鋼-ステンレス鋼周溶接継手 (600/690 合金溶接金属) 及びニッケルクロム鉄合金-ステンレス鋼周溶接継手 (600 合金溶接金属) を対象に L-SIP 工法の適用性を確性した。

確性試験においては、確認項目の設定 (応力改善効果を得ることができる確認項目 (エッセンシャルパラメータ) の設定)、施工条件に関する検討 (確認項目の内、施工に関する因子の有効範囲 (下限値・上限値) を実験及び解析で検証)、継手性能試験 (L-SIP 施工した溶接部が機械的性能及び金属組織的に健全であることを確認)、潜在欠陥に対する影響・効果の評価及び実機模擬試験を実施した。ここで、管内部に冷却水がある場合とない場合の両方の条件を対象とした。

以降では、潜在欠陥に対する L-SIP 施工の影響・効果の評価について概要を紹介する。

なお、上記の成果に基づき、L-SIP 工法の JSME 発電用原子力設備規格・維持規格への取り込みが同規格委員会にて検討されている。

潜在欠陥に対する評価

L-SIP 工法では、施工前の検査として、溶接継手部外面からの超音波探傷 (UT) 検査を実施し、継手部の健全性を確認した上で施工することとしている。ただし、UT 検査には検出限界があり、内面側に微小な潜在欠陥が残存する可能性は否定できない。

そこで、このような微小な潜在欠陥が残存した

状態で L-SIP を施工した場合に、施工時に潜在欠陥が進展しないこと及び潜在欠陥の近傍でも残留応力改善効果があることを確性試験の中で確認した。なお、ここでの潜在欠陥は、内面からの SCC を想定し、板厚の 20% 深さを有するき裂とした。検討結果の概要は以下のとおり。

施工時の潜在欠陥の進展

内面側に潜在欠陥がある状態で L-SIP を施工しても、潜在欠陥が進展しないことを以下のとおり確認した。

(1) 延性き裂進展評価

ステンレス鋼溶接部、ニッケルクロム鉄合金溶接部に対し、材料の限界 CTOD (Crack Tip Opening Displacement: き裂先端開口変位) を基礎試験で取得した。

L-SIP 施工時の CTOD については、対象とする継手を最も熱応力が高くなる L-SIP 施工条件から選び、図 9 に示す低合金鋼-ステンレス鋼継手部を

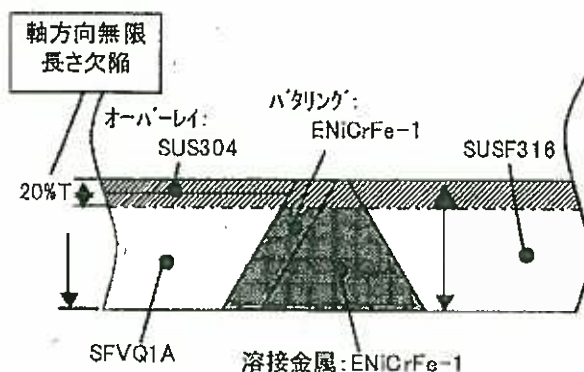


図9 L-SIP 施工時の CTOD 解析モデル

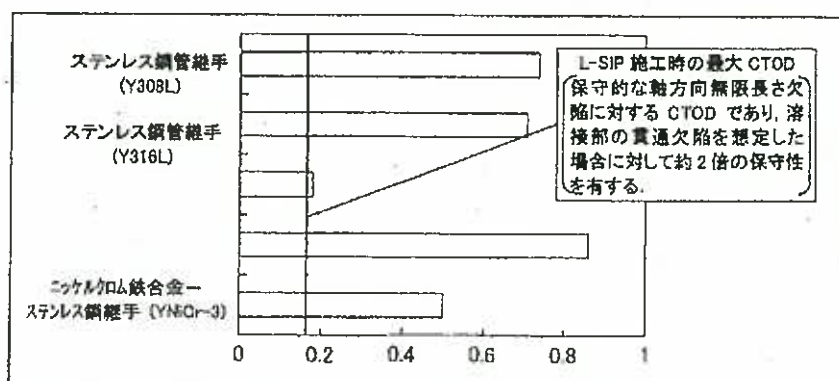


図10 延性き裂発生評価結果

対象とした。当該継手に対して図9に示すように保守的に軸方向無限長さの欠陥を想定し、3次元FEM(有限要素法)を用いた熱弾塑性解析を行い、L-SIP施工時の最大のCTODを求めた。

ここで、軸方向無限長さ欠陥のCTODは、CTODの簡易計算式⁵⁾に基づき検討した結果、溶接部を貫通欠陥に置き換えた場合のCTODに比べて約2倍となり、十分保守的な想定欠陥といえる。

両者を比較した結果、図10に示すように延性き裂は進展しないことを確認した。

(2) 延性き裂進展確認試験

ステンレス鋼溶接部及びニッケルクロム鉄合金溶接部に対し、潜在き裂を付与した供試体を製作し、L-SIP施工により潜在き裂進展が長さ方向に進展しないことを次のとおり確認した。

溶接部を持つ供試体を製作し、SCCき裂を付与し、L-SIPを施工した。L-SIP施工前後で長さを計測することにより長さ方向の延性き裂進展がないことを確認した(図11)。深さ方向はUT試験によりL-SIP施工前後でき裂深さの変化が認められないことを確認した。また、破壊調査によりL-SIP施工による延性き裂が発生・進展していないことを確認した(図12)。

潜在欠陥近傍での残留応力改善効果

内面側に存在する潜在欠陥の近傍で残留応力が圧縮側に改善されることを次のとおり確認した。

(1) 残留応力分布に対する評価

対象とする継手の施工範囲の上限・下限条件に対して熱弾塑性解析を行った。各々の解析結果に対して板厚内応力分布を調べ、20%板厚以上の領域が圧縮応力となっていることを確認した。

(2) SCC試験

ステンレス鋼継手の供試体を製作し、 $MgCl_2$ により20%板厚相当の潜在き裂を付与した。

その後、供試体にL-SIPを施工しないで $MgCl_2$ 試験を実施した場合、図13に示すようにSCCが

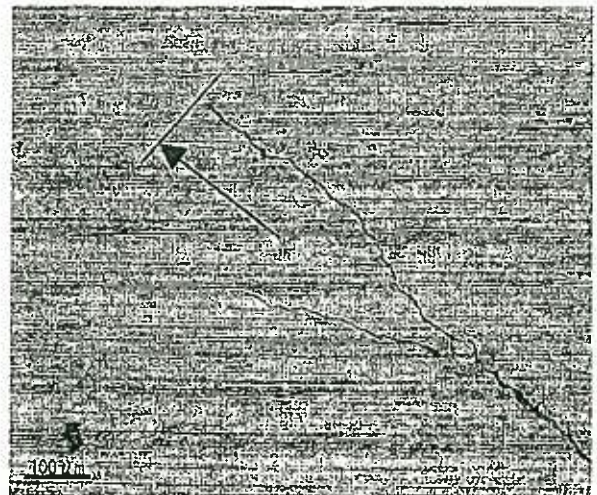


図11 L-SIP施工後のSCC試験結果(き裂形状観察結果)

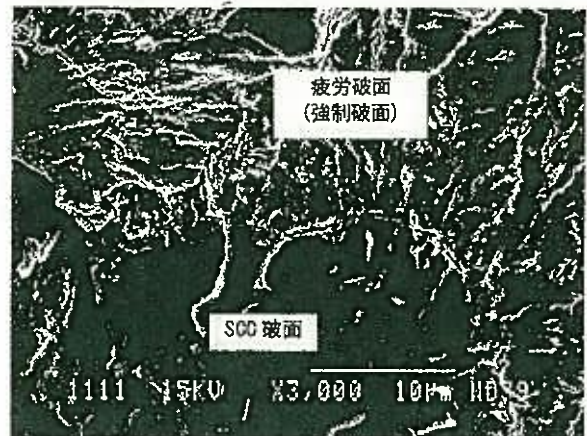


図12 SEM観察による延性き裂発生有無確認結果

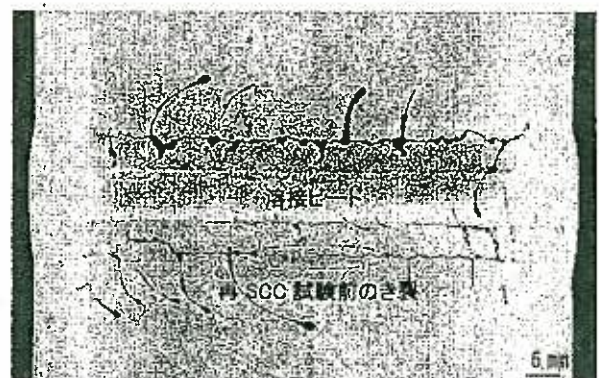


図13 L-SIP施工無しのSCC試験結果(ステンレス鋼管継手部PT試験結果)

発生した。

潜在き裂を付与した後、L-SIPを施工し、さらに $MgCl_2$ 試験を行った結果、図14に示すようにき裂



図14 L-SIP施工後のSCC試験結果(ステンレス鋼管継手部PT試験結果)

長さが伸びないこと及びき裂の個数が増加しないことを確認した。

これにより、潜在き裂が存在してもL-SIP施工により潜在き裂近傍の残留応力が改善し、潜在き裂の進展、新たなき裂の発生がないことを確認した。

おわりに

内面からアクセスできないような小口径配管等を対象に、外面からのレーザー照射による板厚内外面の温度差を利用して管内面の残留応力を改善するL-SIP工法を開発した。

L-SIP工法は、適切な照射条件を設定することにより溶接部内面側の残留応力を改善できることを解析及び実験にて検証した。

また、L-SIP工法は潜在欠陥を想定しても悪影響はなく、有効であることを確認した。

L-SIP工法は管内部に冷却水がある状態だけでなく、冷却水がない状態でも適用可能な工法であり、施工範囲が広く、優れた工法である。

なお、本工法は平成19年9月に敦賀発電所第2号機の加圧器サージ管台に適用された。

謝辞

確性試験の検討は日本原子力発電(株)、北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸

電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、電源開発(株)及び三菱重工業(株)の共同研究として行われた。

確性試験においては野本敏治東京大学名誉教授、牛尾誠夫大阪大学名誉教授、安藤柱横浜国立大学名誉教授、寺崎俊夫九州工業大学教授、小関敏彦東京大学教授並びに発電機検事事務局から多大なご指導を頂いた。

ここに関係者各位に深く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) M.Taniguchi and N.Hori: Maintenance Technology Development for Alloy 600 PWSCC Issue, 12th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE12-49156, 2004.
- 2) 太田高裕, 石出孝, 鴨和彦, 鬼塚博徳, 朝田誠治, 谷口優: レーザ外面照射応力改善法の開発, 溶接学会誌, 75 No.8, (2006), 38.
- 3) T.Ueda et al.: Application of Outer Surface Irradiate Laser Stress Improvement Process (L-SIP) to Pressurizer as Residual Stress Improvement method for Alloy 600 PWSCC Mitigation, 16th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE16-48379, 2008.
- 4) 名山理介, 秋友典夫, 坂元成夫, 高野元太, 村瀬一紀: 両側加熱法の効果とその支配パラメータ, 溶接学会論文集, 第14号(1996), 398.
- 5) 岡村弘之: 破壊力学と材料強度講座1, 線形破壊力学入門, 培風館,(1976).

あさだ・せいじ ASADA Seiji

1989 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了, 同年三菱重工業(株)入社, 原子力压力容器等の機器設計に従事し, 現在神戸造船所原子力機器設計部主席技師, 2009 博士(工学)。

おおた・たかひろ OHOTA Takahiro

1988 九州大学大学院工学研究科冶金工学専攻修士課程修了, 同年三菱重工業(株)入社, 製造技術関係の研究に従事し, 現在技術本部高砂研究所製造技術開発センターセンター長。

かなさき・ひろし KANASAKI Hiroshi

1983 京都大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了, 同年三菱重工業(株)入社, 主として原子力機器の材料強度研究に従事し, 現在高砂研究所材料・強度研究室の主席研究員。

くらうち・ひろのぶ KURAUCHI Hironobu

1983 大阪府立西野田工業高等学校機械課卒業, 同年日本原子力発電(株)入社, 敦賀発電所1, 2号機の運転等に従事し, 現在, 発電管理室設備管理グループ副長。

学術論文

PWR 加圧器管台異種金属溶接部 UT 検査手法の実証試験

Validation of Ultrasonic Testing for PWR Pressurizer Dissimilar Metal Weld

財団法人電力中央研究所 笹原 利彦 Toshihiko SASAHARA Member
 財団法人電力中央研究所 直本 保 Tamotsu JIKIMOTO Member

Validation of ultrasonic testing (UT) for detecting stress corrosion cracks (SCCs) in the Pressurizer's dissimilar metal weld of nuclear power plant, PWR, was carried out. Appropriate UT methods using probes consist of separate transmit and receive piezo-electric elements with longitudinal wave can detect both axial and circumferential SCCs ranged from 12% to 23% thickness of weld.

Keywords: Ultrasonic testing, Nickel-Alloy steel welding, Dissimilar metal weld, SCC, PWR, Pressurizer, Detection

1. 緒言

近年、加圧水型原子力発電プラント(以下、PWR)のニッケルクロム鉄合金(以下、600 系合金)溶接部からの応力腐食割れ(以下、SCC)損傷事例が国内外において発生しており^[1]、対象部位の取替えまたは補修や溶接残留応力緩和等の予防保全策が実施されてきている。予防保全策を実施する際には、その施工前検査で当該部位の健全性を確認することとしているが、加圧器管台異種金属溶接部においては、構造的に内面からの検査が困難であるため、外面からの超音波探傷試験(以下、UT)により健全性を確認する必要がある。しかし、600 系合金を使用した当該部は超音波難透過材であること、結晶成長方向の影響により超音波が屈曲し、内表面部からの超音波反射が擬似エコーとなることから高度な検査技術が必要となる。

そこで、必要性が高い PWR 加圧器管台異種金属溶接部に対する高度化された UT 検査手法の実機適用性を実証するために、当該部に対する UT 検査要領とその欠陥検出性能について実証試験を行った。

2. 異種金属溶接部 UT 検査の課題

PWR の加圧器管台とセーフエンドの溶接部では炭素鋼管台とステンレス鋼配管を溶接するために 600 系合金が使用されているが、これらステンレス鋼や 600 系合金の溶接金属部は、炭素鋼と比較して結晶粒が粗大であるため、結晶粒によって図 1 に示すような超音波の散乱・減衰が生じ、その結果欠陥の検出性が低下することが知られている^[2]。また、図 2 に示すように結晶の成長方向の影響により超音波が屈曲し、内面からの超音波反射波が擬似エコーとなり、欠陥信号との識別が困難となる場合がある。このため、これらの溶接部の検査では、溶接金属中の超音波の屈曲および減衰が小さい縦波モード(L モード)が適用されている^[1]。図 3 に PWR 加圧器管台溶接部の模式図を示すが、これらの管台溶接部 UT では更なる信頼性の向上を目指して縦波モード探傷と探傷結果の映像化を組み合わせたより高度な UT 手法の開発が行われている。

本実証試験は、この新たに開発された UT 検査手法

◆連絡先：笹原 利彦

〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1
 電力中央研究所 材料科学研究所 PD センター
 Tel: 046-856-2121
 E-mail: sasahara@criepi.denken.or.jp



図 1 超音波の散乱・減衰のイメージ

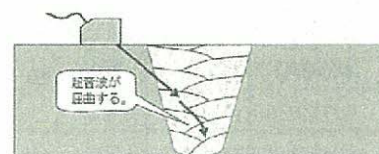


図 2 超音波の屈曲イメージ

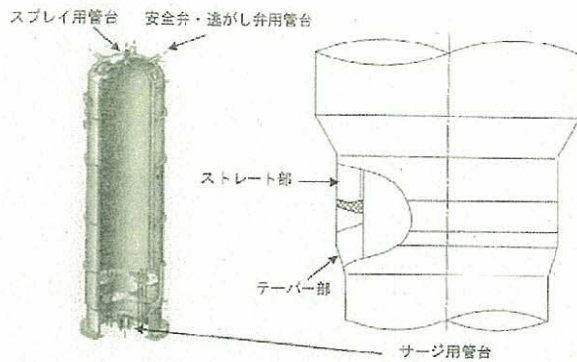


図3 加圧器および管台模式図

の妥当性を評価するために、実機を模擬した溶接部に SCC を付与した試験体を使用して探傷試験を実施し、欠陥検出性と実機適用性を確認したものである。

3. 実証試験

3. 1 試験体

実証試験に使用した試験体の一覧を表1に示す。試験体の口径は実機の既設管台サイズを代表する様に3種類の管台(サージ用管台、安全弁・逃がし弁用管台、スプレイ用管台)を選定した。管台内面の周方向・軸方向に SCC を付与した試験体を製作した。SCC の目標挿入深さは板厚の10%から20%とし、付与位置は周方向 SCC は図4にあるように溶接部とバタリング部の境界位置に、軸方向 SCC は溶接部とバタリング溶接部範囲内に納まるように付与した。この SCC は国プロ等で探

表1 実証試験に使用した試験体

管台	口径 板厚 (mm)	SCC 付与方向	目標 深さ (%)
サージ 用管台 (350A)	φ390 t46.0	周	10~20
		軸	10~20
安全弁・ 逃がし弁 用管台 (150A)	φ188 t29.6	周	10~20
			無欠陥
		軸	10~20
			無欠陥
スプレイ 用管台 (100A)	φ149 t22.1	周	10~20
		軸	10~20

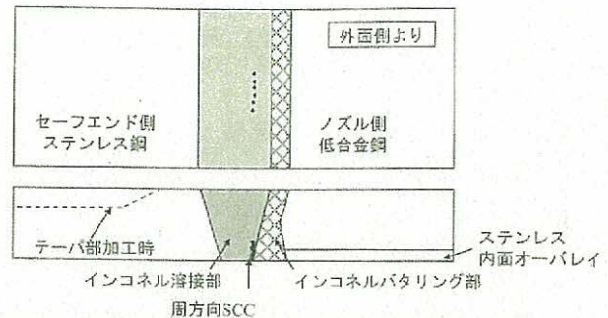


図4 実機模擬試験体模式図 (周方向 SCC 付与試験体)

用されている、試験体を短冊状にした状態で付与部位をポリチオン酸に浸漬し、3点曲げにより応力を与える方法で製作した^[1]。なお、周方向 SCC を付与した試験体は後述するストレート部からの探傷試験後、セーフエンド側にテーパ加工を施し、テーパ部からの探傷試験の試験体としても使用した(3.2 項参照)。代表的な試験体の外観を図4、図5に示す。また、試験体には、試験者が SCC 付与部を確認できないよう内面側へマスキングを実施した。また、一部管台においては無欠陥の試験体も用意し、SCC 試験体との結果の比較をするようにした。

3. 2 試験方法

実証試験のフローを図6に示す。まず、各管台に適した探触子の選定を行った。そして選定した探触子で図7に示す各種 UT 試験を行い、切断調査を行った。最後に、UT 試験結果と切断調査結果から SCC 検出性の評価を行った。

(1) 探触子の選定

各管台で板厚が異なること、周・軸方向探傷で溶接金属中を伝搬する超音波のビーム路程が異なることから、各管台に適した探触子を選定した。超音波モードは、2項をふまえて縦波を採用した。探触子のタイプは、溶接部からの散乱ノイズの影響を低減するため、送・受信振動子が左右に分割された二振動子型を採用した。周波数は溶接金属部の減衰を考慮し、周方向欠陥に対しては1.5または2.0MHz、軸方向欠陥に対しては、超音波を溶接金属上から送受信する必要があるため、溶接金属中を透過する距離(ビーム路程)が長いことから1.0MHzとした。

屈折角は、周方向 SCC 付与試験体に対しては、ストレート部入射の場合、コーナー部での反射効率が低い

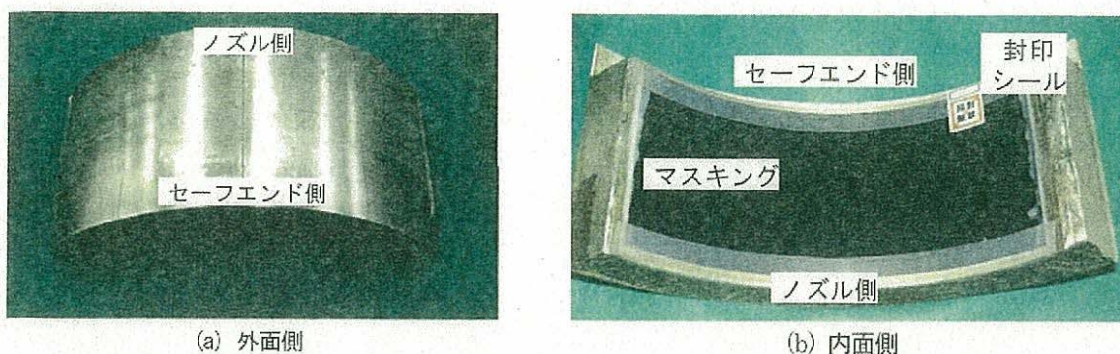


図5 実証試験に使用した試験体例 (サージ用管台軸方向 SCC 付与試験体)

45°^[4]を基本とし、その他の角度として60°を選定した。さらに、テーパ部入射の場合は、テーパ部中央に探触子を設置した時に欠陥が想定される部位へ超音波があたる角度(サージ用管台: 45°~50°、安全弁・逃がし弁用管台: 30°、スプレイ用管台: 60°)を基本とした。この際、安全弁・逃がし弁用管台ではテーパ部が短いので、角度を変化させて探傷可能なフェーズドアレイプローブを適用することとした。また、軸方向 SCC 付与試験体に対しては、周方向入射となるため曲率の影響を受ける。そこで、内面欠陥のコーナー部からの反射効率が低い45°近傍で入射させるため、屈折角を35°とした。実証試験に使用した探触子を表2に示す。

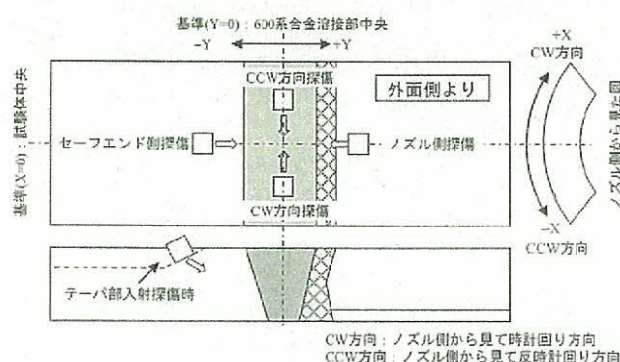


図7 各種 UT 試験状況

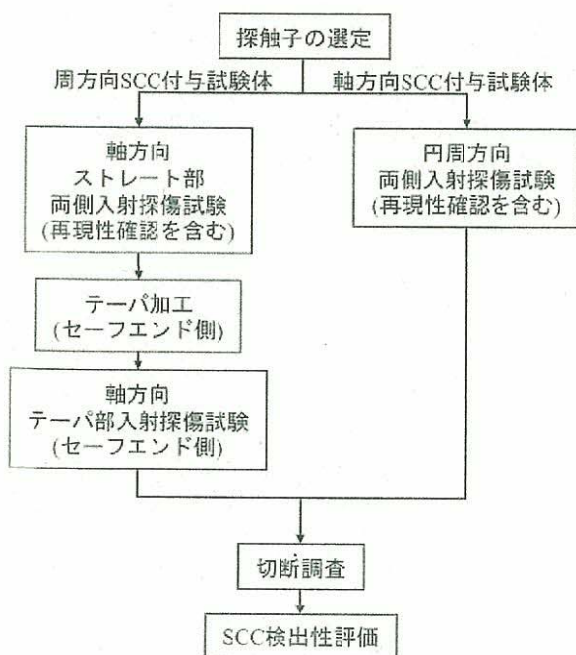


図6 実証試験のフロー

表2 実証試験に使用した探触子

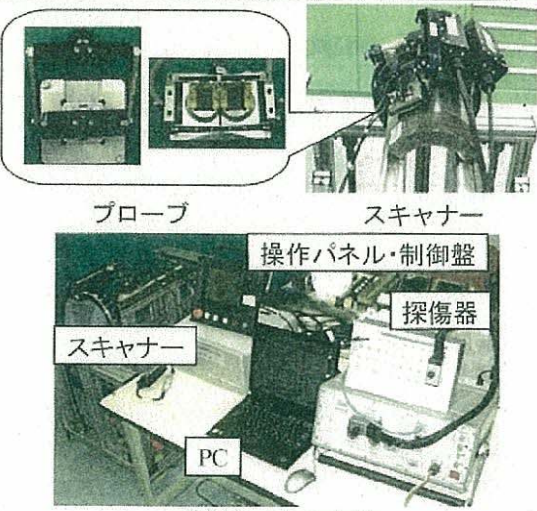
管台	SCC 付与 方向	周波数 (MHz)	屈折 角	備考 (JIS 表記等)
サージ 用管台	周	2.0	45°	2K29x20LAD45F22-70
		2.0	60°	2K35x20LAD60F10-92
		1.5	[45°]	1.5K26x19LAD45F6-84
		1.5	[50°]	1.5K26x19LAD50F6-84
安全弁・ 逃がし弁 用管台	軸	1.0	35°	1K30x20LAD35F46
		2.0	45°	2K20x9LAD45F12-47
		2.0	60°	2K29x15LAD60F6-56
		2.0	[30°]	2K16x16L-PA 左右2分割 Ch16
スプレイ 用管台	周	1.0	35°	1K30x20LAD35F30
		1.5	45°	1.5K17x9LAD45F8-32
		2.0	60°	2K29x15LAD60F6-42
		2.0	[60°]	2K29x15LAD60F6-42
スプレイ 用管台	軸	1.0	35°	1K30x20LAD35F30
		1.0	35°	1K30x20LAD35F30

(2) 探傷試験

選定した探触子を用いて外面からの直接接触法により、周方向 SCC 付与試験体に対しては、ストレート部の両側(セーフエンド側およびノズル側)からの軸方向ストレート部入射探傷試験および軸方向テーパ部入射探傷試験(ストレート部入射試験後、セーフエンド部をテーパ加工)の2種類を実施した。軸方向 SCC 付与試験体に対しては、円周方向の両側(CW 側および CCW 側)からの探傷試験を実施した。また、再現性を確認するために、一部の管台については同一試験体に対して軸方向ストレート部両側入射探傷試験または周方向両側入射探傷試験を3回実施し、データを比較した。

探傷試験は、位置情報を取り込むことのできる自動探傷ツールを使用して実施し、全波形データを収録した。探傷ツールの仕様および外観を表3に示す。

表3 実証試験の探傷ツールの仕様と外観

仕様	対応可能 配管径	PWR 加圧器管台径に対応 (100A、150A、250A、350A 管)
	走査方向	周方向・軸方向
	重量	約 4.5~6.0kg
外観	探傷器	TomoscanIII-PA および Tomoscan Focus
	 プローブ スキャナー 操作パネル・制御盤 探傷器 スキャナー PC 探傷ツールの全体	

(3) 切断調査

全探傷試験終了後に試験体を切断調査して、SCC の性状・深さを調査した。切断調査法は、断面観察および破面開放とした。

(4) SCC 検出性評価

切断調査結果と探傷試験結果を照合して、SCC に対する欠陥検出性を評価した。

3.3 探傷手順

実証試験での探傷要領を図8に示す。探傷要領は基本的に供用期間中検査で適用されている(社)日本電気協会 JEAG4207-2004(軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針)に準拠した。

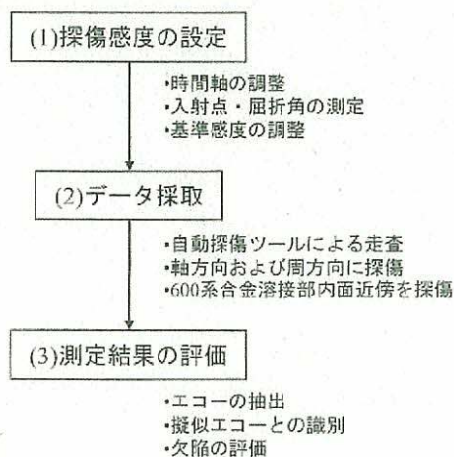


図8 探傷要領

(1) 探傷感度の設定

始めに探傷感度の設定を行った。この際、①時間軸の調整、②入射点・屈折角の測定、③基準感度の調整をステンレス鋼母材および溶接モックアップを用いて行った。なお、フェーズドアレイの探傷条件設定については、メーカー標準に従った。

(2) データ採取

次に、自動探傷ツールを用いて探触子を走査して探傷データを下記の通り採取した。

- X 方向(周方向)および Y 方向(軸方向)ともに探傷ツールを用いて探触子を自動走査
- データ採取ピッチはスキャン方向 0.5mm 以下、ステップ方向 3.0mm 以下(スキャン方向：探触子の音波送信方向、ステップ方向：スキャン方向と垂直な方向)
- 超音波ビームが 600 系合金溶接部内面近傍に入射する範囲を走査してデータを採取

(3) 測定結果の評価

最後に、探傷器メーカーの標準解析ソフトを使用し、

取得した探傷データの評価を行った。検出性の判定は以下の通りに行った。

①エコーの抽出

採取データの板厚近傍から SN 比が 2 以上または DAC20%以上のエコーを抽出する。この際、SN 比のノイズは同じビーム路程上で一様なレベルにあるエコーとした。

②擬似エコーとの識別

溶接金属部ノイズと欠陥エコーの識別は以下の方法で実施した。

- ・ 反射源位置の評価
- ・ エコーの連続性の評価
- ・ 健全領域との比較
- ・ 他屈折角および反対側探傷結果との比較

③検出性の判定

総合的に欠陥と判断されるエコーを有意な指示と評価し、最大エコー位置、エコー高さを記録した。

3. 4 探傷試験結果

周方向 SCC 付与試験体に対する探傷試験結果を表 4 に、軸方向 SCC 付与試験体に対する探傷試験結果を表 5 にそれぞれ示す。また、探傷データ例を図 9 に、切断調査結果例を図 10 に示す。切断調査の結果、全ての SCC が 600 系合金溶接部内にあることを確認した。図 9 において左側の図が C スコープ(平面)表示、右側の図が B スコープ(断面)表示の探傷データである。探傷結果および切断調査結果より以下の事が明らかとなった。

(1) 周方向 SCC

- ・ サージ用管台では 12%t および 18%t の SCC をストレート部入射(45°および 60°)でセーフエンド側、ノズル側共に SN 比 2 以上で検出可能であった。また、テーパ部入射でも同様に検出可能であった。
- ・ 安全弁・逃がし弁用管台では 23%t の SCC をストレート部入射(45°および 60°)でセーフエンド側、ノズル側共に SN 比 2 以上で検出可能であった。さらに、18%t の SCC をストレート部入射(45°)でノズル側から SN 比 2 以上で検出可能であった。セーフエンド側からは SN 比 2 未満であるが、欠陥エコーが識別可能であった。また、テーパ部入射では全ての SCC が SN 比 2 以上で検出可能であった。
- ・ スプレイ用管台では 13%t の SCC をストレート部

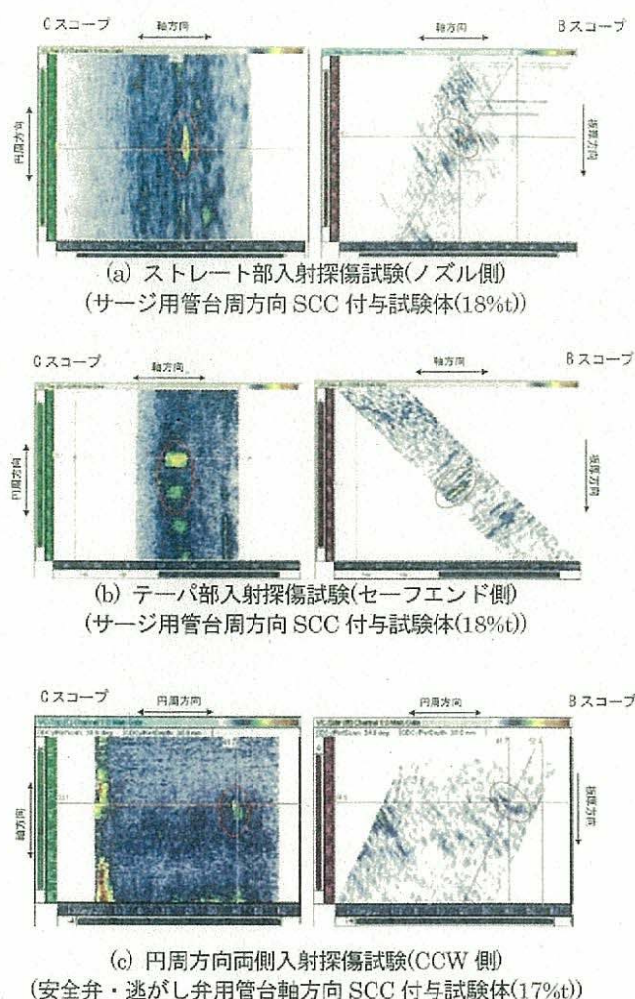


図 9 探傷データ例

入射(45°および 60°)でセーフエンド側、ノズル側共に SN 比 2 以上で検出可能であった。さらに、21%t の SCC をストレート部入射(45°)でノズル側から SN 比 2 以上で検出可能であった。セーフエンド側からは SN 比 2 未満であるが、欠陥エコーが識別可能であった。また、テーパ部入射では全ての SCC が SN 比 2 以上で検出可能であった。

- ・ 軸方向探傷について再現性を確認した結果、エコー高さのばらつきは 1 dB 以内、最大エコー検出位置のばらつきは 2mm 以内であり良好であった。

(2) 軸方向 SCC

- ・ サージ用管台では 17%t の SCC を CW 側、CCW 側共に SN 比 2 以上で検出可能であった。16%t の SCC は CW 側から SN 比 2 未満であるが欠陥エコーを検出できたが CCW 側からは欠陥エコーは検

出できなかった。これは、板厚が厚く SCC の長さが短かったためと考えられる。

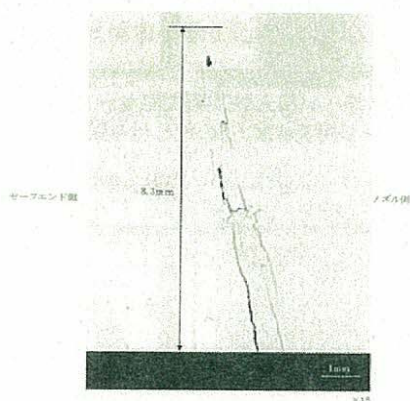
- 安全弁・逃がし弁用管台では 17%t の SCC を CW 側、CCW 側共に SN 比 2 以上で検出可能であった。さらに、9%t の SCC については両側共に欠陥エコーは検出されなかった。これは、SCC の長さが短く、深さも浅かったためと考えられる。
- スプレイ用管台では 15%t の SCC を CW 側、CCW 側共に SN 比 2 以上で検出可能であった。さらに、19%t の SCC を CCW 側から SN 比 2 以上で検出可能であった。また、CW 側からは SN 比 2 未満で

あるが、欠陥エコーが識別可能であった。

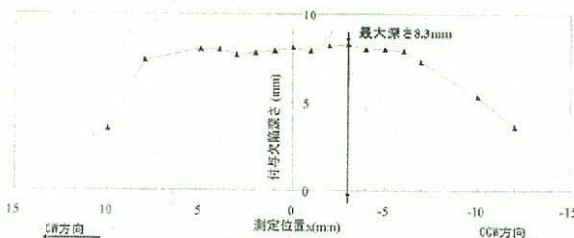
- 周方向探傷について再現性を確認した結果、エコー高さのばらつきは 1dB 以内、最大エコー検出位置のばらつきは 4mm 以内であり良好であった。

(3) 欠陥寸法と検出性

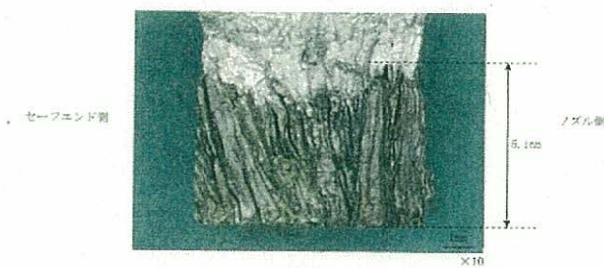
表 4 及び表 5 に示された SCC の検出性を欠陥の深さ及び長さとの関係で整理したものを図 11 に示す。本図では軸方向と周方向探傷の結果を一括して示している。また、検出性の評価は対向する 2 方向の探傷のうち良い方の結果を採用している。図中の破線は探傷結果より推定した欠陥検出ラインである。実証された探傷手



(a) 断面観察
(サージ用管台周方向 SCC 付与試験体)



(b) SCC の深さ分布
(サージ用管台周方向 SCC 付与試験体)



(c) 破面観察
(安全弁・逃がし弁用管台軸方向 SCC 付与試験体)

図 10 切断調査結果例

表 4 周方向 SCC 付与試験体に対する探傷試験結果

管台	最大欠陥深さ	軸方向探傷		
		ストレート部入射		テーパ部入射
		SE 側	NZ 側	SE 側
サージ用管台 (t46.0)	12%t	○	○	○
	5.5mm	○	○	
	18%t	○	○	○
	8.3mm	○	○	
安全弁・逃がし弁用管台 (t29.6)	18%t	△	○	○
	5.3mm	△	△	
	23%t	○	○	○
	6.8mm	○	○	
スプレイ用管台 (t22.1)	13%t	○	○	○
	2.9mm	○	○	
	21%t	△	○	○
	4.8mm	○	×	

○ : SN 比 2 以上 △ : SN 比 2 未満 × : 検出不可
上段 : 縦波 45° SE : セーフエンド
下段 : 縦波 60° NZ : ノズル

表 5 軸方向 SCC 付与試験体に対する探傷試験結果

管台	最大欠陥深さ	周方向探傷	
		CW 側	CCW 側
サージ用管台 (t46.0)	16%t	△	×
	7.3mm		
	17%t	○	○
安全弁・逃がし弁用管台 (t29.6)	9%t	×	×
	2.7mm		
	17%t	○	○
スプレイ用管台 (t22.1)	15%t	○	○
	3.3mm		
	19%t	△	○

○ : SN 比 2 以上 △ : SN 比 2 未満 × : 検出不可
CW : ノズル側から見て時計回り方向
CCW : ノズル側から見て反時計回り方向

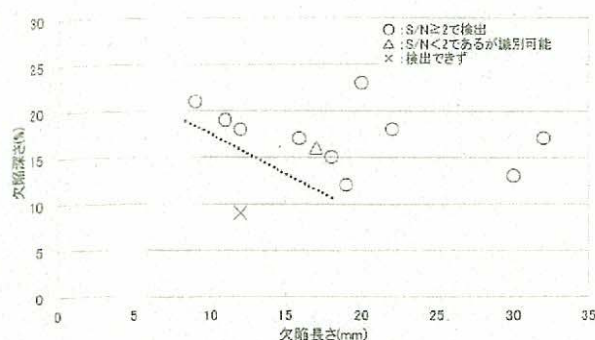


図 11 欠陥寸法と検出性

法を使用することにより SCC 長さが 20mm 程度以上あればその深さが板厚の 12% 程度まで検出可能であるが、SCC 長さが短くなるにつれ検出性が低下すると考えられる。

3. 5 評価

実証試験実施プロセス及び切断試験を含む試験結果より得られた知見を以下に示す。

(1) SCC の検出性

実機を代表した口径・板厚を有する試験体による検証の結果、テーパ部からの探傷を含み、板厚の 12%～23% 深さの周及び軸方向 SCC を検出できることを確認した。

欠陥長さが短く、かつ深さが板厚の 20% 程度に達しない浅い SCC の場合は欠陥検出性の低下傾向が認められた。

(2) 探傷及びデータ解析条件

実証試験ではデータ採取に自動探傷ツールを使用し、データ採取のピッチはスキャン方向 0.5mm、ステップ方向 1mm から 3mm の範囲で行った。欠陥評価には再生した A、B、C、D スコープ表示を用いた。

実証試験の結果、探傷結果の再現性及びデータ採取ピッチによる欠陥像の描写を含めて探傷手法が妥当であることを確認した。

(3) 解析手法

異種金属溶接部の探傷では、欠陥指示に加えて溶接金属組織に起因するノイズ(擬似エコー)が認められる。これら擬似エコーの判別には、異なる屈折角、対向方向からの探傷、無欠陥部を含む周囲の結果との比較が有効であることが確認できた。

4. 結言

PWR 加圧器管台異種金属溶接部(600 系合金溶接部)における内表面からの応力腐食割れに対する UT 検査手法の実機適用性を実証するために、当該溶接部に対する UT 検査要領とその欠陥検出性能について実証的な検討を行った。

本実証試験で確認した探触子、自動探傷ツール及び解析手法の組み合わせは実機の検査に適用可能と考える。なお、擬似エコー識別のため、異なる屈折角の探触子を補完的に導入する場合においても、A スコープデータだけではなく、B、C、D スコープデータも含めた上記解析手法が適用できるような探傷手法の適用を推奨する。

更に、今後 UT の高度化が実現し検出性が向上した場合、今回実証された手法を基準とし、EDM 試験体等による相互の性能比較により改良手法の採用可否を判断できると考える。

当該溶接部の UT 検査におけるデータの評価者については、事前に本実証試験のデータ等を用いたトレーニングが必要と考える。

謝辞

本実証試験を行うに当たり、PWR 電力 5 社のご協力をいただきました。また試験体の製作・試験要領の開発・試験の実施には三菱重工業株式会社の多大なるご協力をいただきました。関係者の御協力に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 原子力安全・保安院、“平成 17・06・10 原院第 7 号 加圧水型軽水炉の一次冷却材圧力バウンダリにおける Ni 基合金使用部位に係る検査等について”、NISA-163a-05-2、2005。
- [2] 古川敬、古村一朗、山下裕宣、徳間英昭、福田俊彦、“原子炉再循環系配管の SCC 深さサイジング技術”、保全学、Vol.3、No.3、2004、pp.51-55。
- [3] 原子力安全基盤機構、“平成 17 年度ニッケル基合金溶接部の報告書”、2006。
- [4] (社)日本非破壊検査協会編、“非破壊検査技術シリーズ超音波探傷試験Ⅲ”、2001。

(平成 18 年 11 月 28 日)