

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

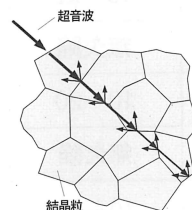


図1 超音波の散乱・減衰のイメージ

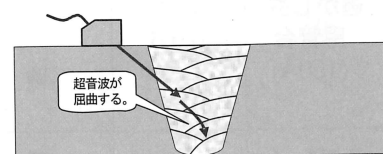


図2 超音波の屈曲イメージ

◆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

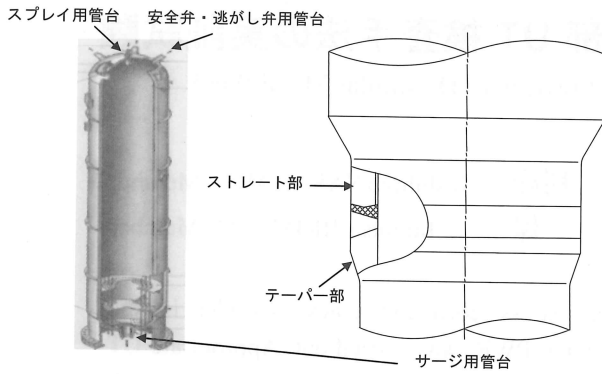


図3 加圧器および管台模式図

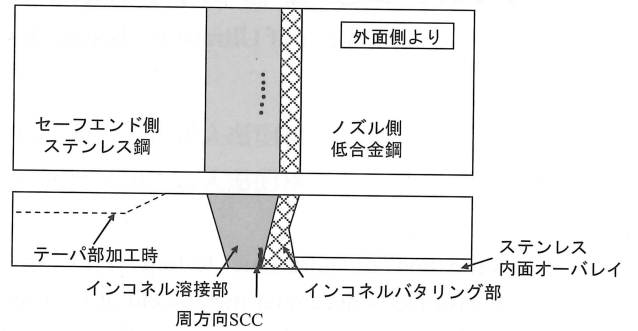


図4 実機模擬試験体模式図 (周方向 SCC 付与試験体)

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 は国プロ等で採

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^[3]。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り、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

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 (%t)
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

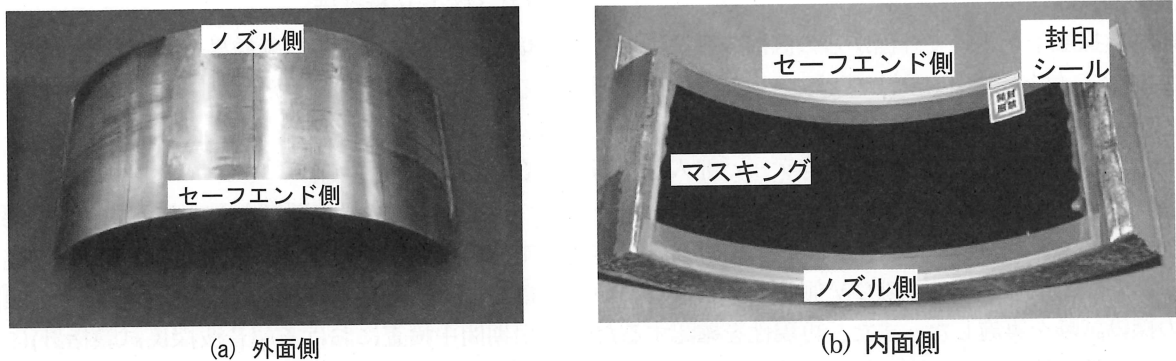


図5 実証試験に使用した試験体例 (サージ用管台軸方向 SCC 付与試験体)

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当たる角度(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。

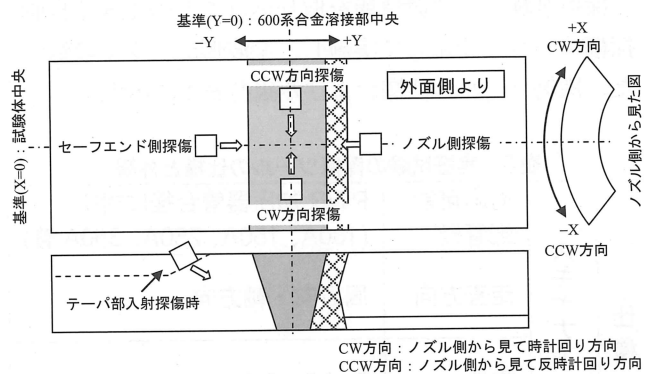


図7 各種 UT 試験状況

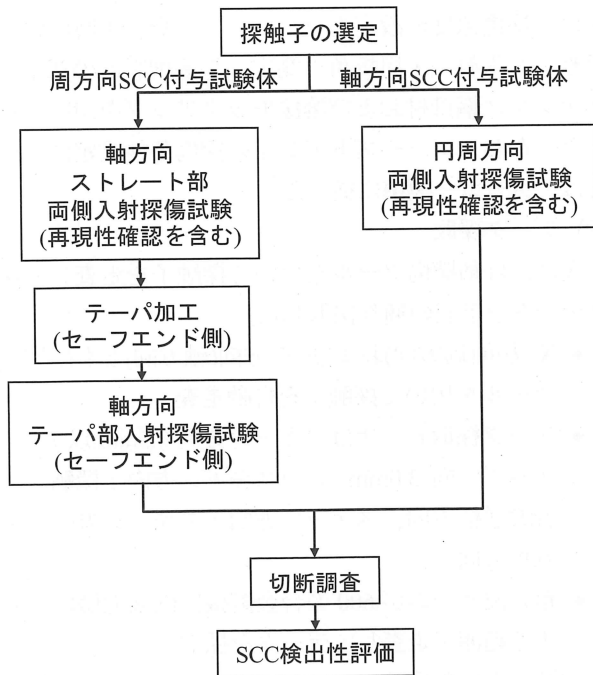


図6 実証試験のフロー

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	周	1.0	35°	1K30x20LAD35F46
		2.0	45°	2K20x9LAD45F12-47
		2.0	60°	2K29x15LAD60F6-56
安全弁・逃がし弁用管台	軸	2.0	[30°]	2K16x16L-PA 左右2分割 Ch16
		1.0	35°	1K30x20LAD35F30
		2.0	45°	1.5K17x9LAD45F8-32
スプレイ用管台	周	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	スキャナー	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
探傷器		TomoscanIII-PA および Tomoscan Focus	
外観			
			

(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。

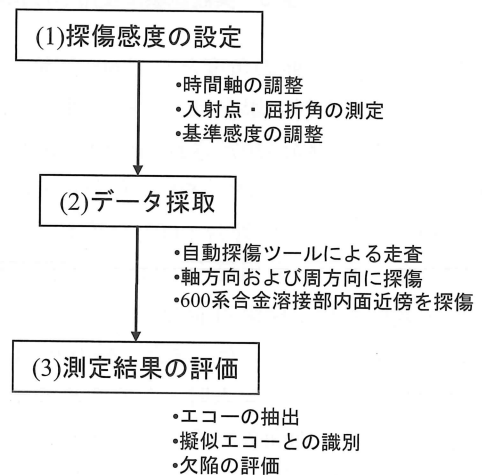


図 8 探傷要領

(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

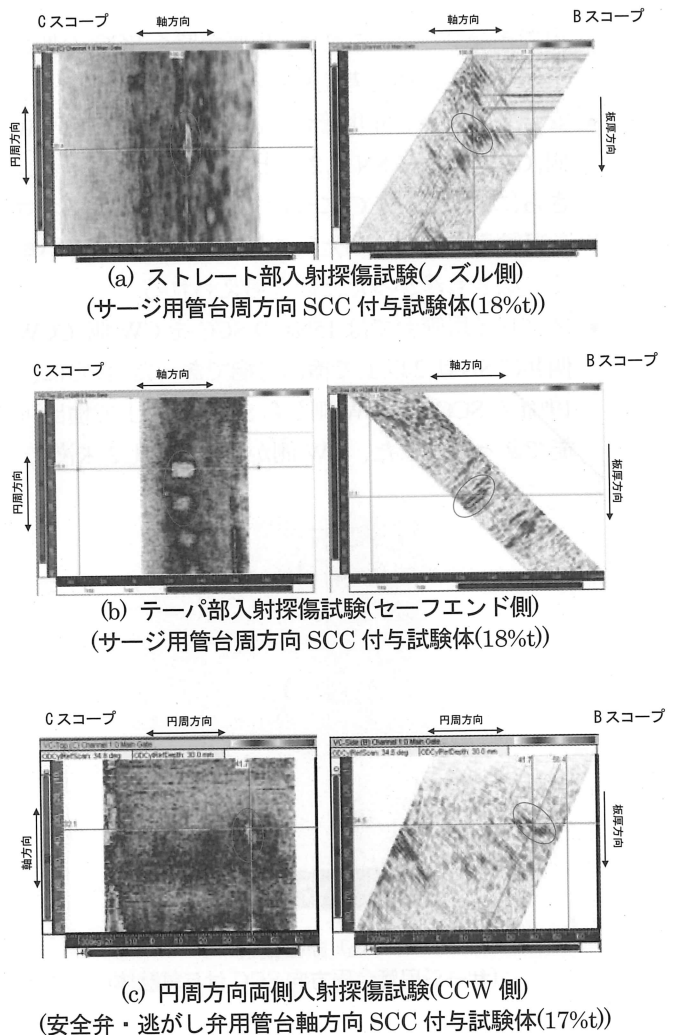


図 9 探傷データ例

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 1 dB 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

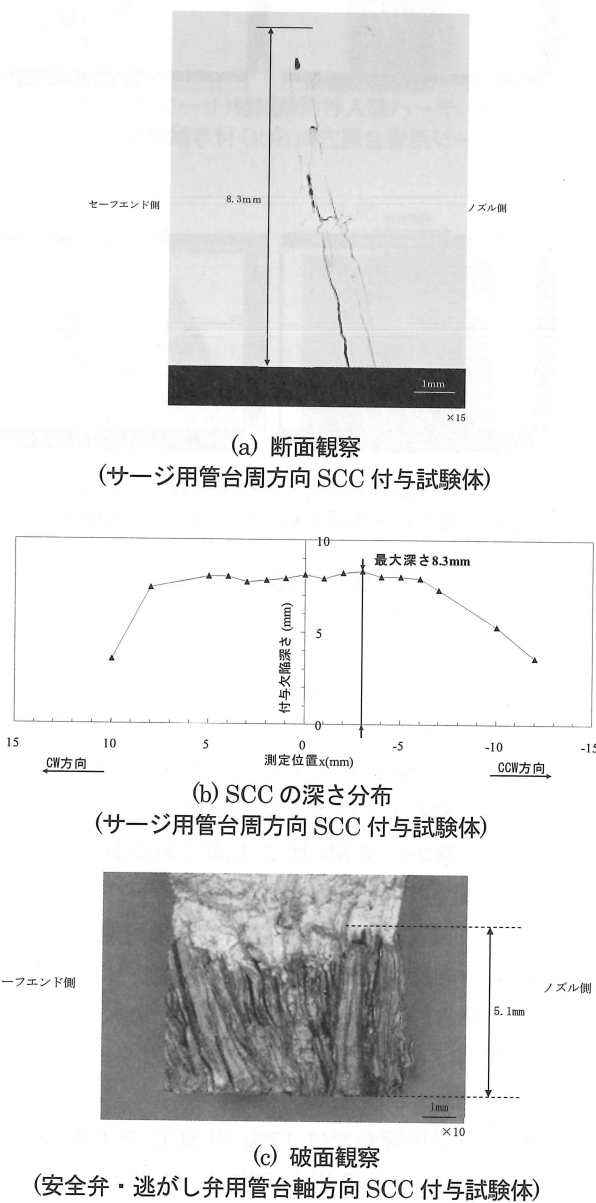


図 10 切断調査結果例

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 7.8mm	○	○
安全弁・逃がし弁用管台 (t29.6)	9%t 2.7mm	×	×
	17%t 5.1mm	○	○
スプレイ用管台 (t22.1)	15%t 3.3mm	○	○
	19%t 4.1mm	△	○

○ : 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

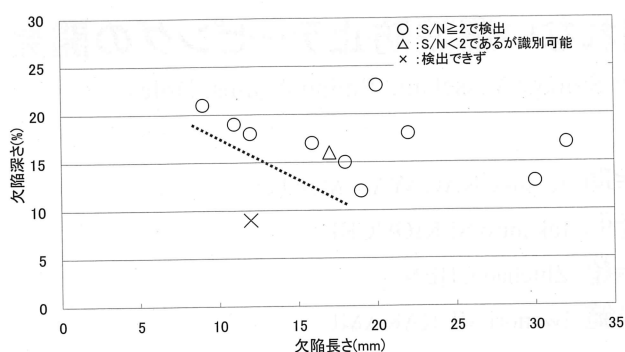


図 11 欠陥寸法と検出性

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)