

分析論文

# 炉心シュラウド等の非破壊検査技術実証

独立行政法人原子力安全基盤機構 規格基準部 材料評価グループ・河野 克己・谷岡 修二

Katsumi KONO Shuji TANIOKA

・井坂 克己・三原田八水

Katsumi ISAKA Hassui MIHARADA

## 1. 背景および概要

沸騰水型原子炉発電プラントの炉心シュラウド（以下、シュラウドという）や原子炉再循環系（以下、PLRという）配管は、耐食性を考慮し低炭素ステンレス鋼が使用されている。しかしながら、最近、これらの機器の溶接部において相次いで損傷が発生したことが報告されている。特に、最近の損傷では従来の知見とは異なり、母材より溶接金属内まで進展した応力腐食割れ（以下、SCCという）や放射状のSCCの事例が報告されている。（図-1および図-2参照）これら新たなモードの損傷に対する検査技術を確認し、検査の信頼性を実証しておくことは原子力発電所の健全性を確保していく上で極めて重要なことである。また、実証した検査技術の成果を迅速かつ円滑に運用するための非破壊検査指針案の策定も欠かせない項目である。

これらに対応するため、原子力安全・保安院はシュラウド、PLR配管に発生するSCCを検出・サイジングする検査技術を実証し、当該部位検査に係る検査指針案の策定を目的に平成15年4月に「シュラウド等の非破壊検査技術実証事業（NSA）」を（財）発電設備技術検査協会に委託した。平成15年10月からは（独）原子力安全基盤機構（JNES）がこの事業を引継ぎ、平成18年度までの計画で実施している。

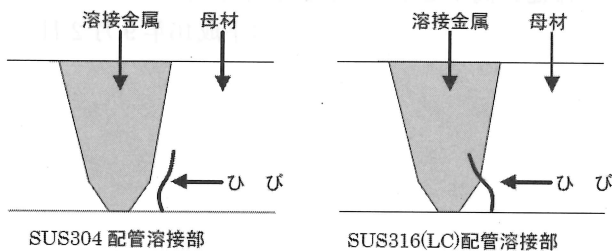


図-1 配管溶接部のSCCについて<sup>[1]</sup>

本稿ではNSAプロジェクトの平成15年度成果を含め、プロジェクトの取り組みについて紹介する。

## 2. 関係する他の検査関連プロジェクトの状況

供用期間中検査に用いられている超音波探傷試験（以下、UTという）は、原子力発電施設検査技術実証事業（SGF-UTS）において、評価不要欠陥寸法相当の欠陥に対する検出性及びサイジング精度に関する確認を行ってきた。この内、SCCに対しては、SUS304配管における過去の発生状況より、熱影響部を溶融線に沿って進展する板厚の約10%前後（UTの欠陥検出限界等を考慮して）の寸法のものを対象として確認を行ってきており、低炭素ステンレス鋼で発生した深いSCCや放射状のSCCに対しては未確認であった。

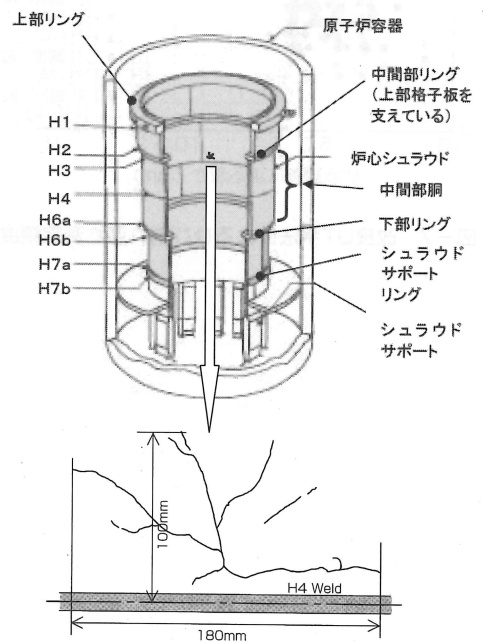


図-2 シュラウドH4継手に発生したSCCの例<sup>[1]</sup>

### 3. NSAプロジェクトについて

NSAプロジェクトは前述の背景を踏まえ、低炭素ステンレス鋼を対象として、新たな損傷モードである溶接金属にまで進展するSCCや溶接線に対して斜めに発生するSCCも含めて、非破壊検査技術による欠陥検出性及びサイジング精度の確認を行い、低炭素ステンレス鋼に対する検査指針案の策定を目的としている。プロジェクトの実施手順を図-3、全体工程を表-1に示す。

表-1 NSAプロジェクトの全体工程

	H15	H16	H17	H18
1. 調査・試験計画				
(1) 損傷事例及びプラントデータ調査	■	■	■	■
(2) 非破壊検査技術の最新動向調査	■	■	■	■
(3) 試験計画	■	■	■	■
2. 試験体の設計・製作				
(1) シュラウド模擬試験体		■	■	■
(2) PLR配管模擬試験体		■	■	■
(3) 薄平板試験体		■	■	■
3. 基礎試験				
(1) 非破壊検査技術に関する基礎データ取得	■	■	■	■
(2) 予備試験	■	■	■	■
4. 実証試験				
(1) 探傷試験		■	■	■
(2) 1次評価		■	■	■
(3) 切断調査		■	■	■
(4) 2次評価		■	■	■
5. 総合評価				■
6. シミュレーションシステムによる解析評価等				■

#### 3-1) 調査・試験計画

損傷事例およびプラントデータ調査、非破壊検査技術の最新動向調査を行い、試験の全体計画の策定を行う。

#### 3-2) 試験体の設計製作

損傷事例およびプラントデータ調査等を基に、シュラウドおよびPLR配管の代表部位を模擬した試験体の設計・製作を行う。

#### 3-3) 基礎試験

(1) 非破壊検査技術に関する基礎データ取得  
ステンレス鋼および溶接金属部における超音波伝播速度、減衰特性等の超音波特性および透磁率、導電率等の電磁気特性に関する基礎データを取得する。

(2) 非破壊手法の予備試験  
フェーズドアレイUT等の新技術も含めた各種探傷手法の適用性確認と、模擬試験体を用いて行う実証試験における試験手法の選定および試験要領の策定を行うため、人工欠陥を用いた試験を予備的に実施する。

#### 3-4) 実証試験

予備試験結果等からシュラウド、PLR配管に適用できる手法を選定し、欠陥検出およびサイジングに関する実証試験を平成16年度より開始する。

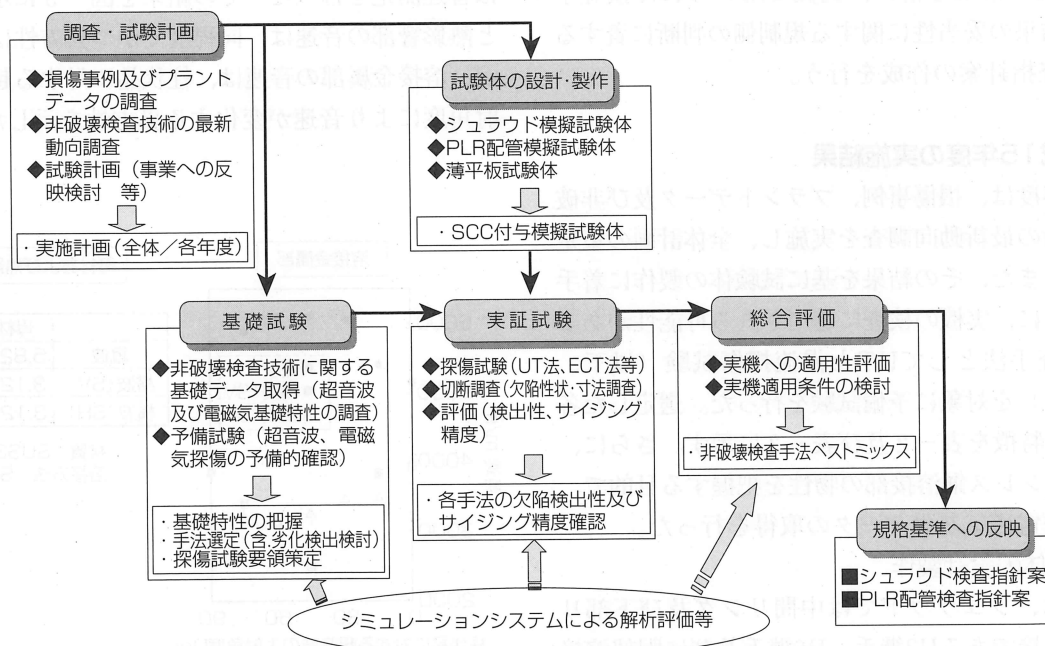


図-3 NSAプロジェクトの実施手順

測定結果については、探傷試験データを試験体毎に集約し、欠陥検出および欠陥サイジングのばらつき等について考察を加え、データ取得・データ評価上の問題等のなかったことを確認する。

全ての手法による探傷試験が終了した後、付与したSCCの切断試験を行い、欠陥の寸法、性状等を調査し、その後、探傷試験および切断試験で得られたデータに基づき、試験体毎に各種試験手法の欠陥検出性およびサイジング精度に関する評価を行う。

### 3-5) 総合評価

実証試験結果を基に、各種非破壊検査手法の実機への適用性および実機適用条件等について総合的な評価を加え、シュラウドおよびPLR配管におけるSCCの検出性、サイジング精度についてまとめるとともに、実機適用時における検査手法の最適組合せ（ベストミックス）を提言する計画である。

### 3-6) シミュレーションシステムによる解析評価等

予備試験、実証試験結果の妥当性確認、総合評価における実機適用条件の評価等においてはUTシミュレーション解析、ECTシミュレーション解析を併用し、客観性のある評価を進めていく計画である。

### 3-7) 規格基準等への反映

総合評価の結果を基に、実機で用いられた検査手法、検査結果の妥当性に関する規制側の判断に資する目的で検査指針案の作成を行う。

### 3-8) 平成15年度の実施結果

平成15年度は、損傷事例、プラントデータ及び非破壊検査技術の最新動向調査を実施し、全体計画の策定を行った。また、その結果を基に試験体の製作に着手するとともに、実機の検査に適用される可能性がある非破壊検査手法としてUTと渦流探傷試験（以下、ECTという）を対象に予備試験を行った。選定した各手法とその特徴を表-2及び表-3に示す。さらに、低炭素ステンレス鋼溶接部の物性を把握する目的で、超音波及び電磁気基礎データの取得を行った。

#### (1) 試験体の設計製作

試験体は、シュラウドでは中間リング及び下部リング部の溶接であるH3継手、H6継手並びに胴部溶接部ではH4継手の模擬試験体および板厚25mmの平板試

験体の製作を行うこととした。また、PLR配管の模擬試験体としては母管、ヘッダ管、ライザ管を模擬した溶接試験体の製作を行うこととした。試験体の種類、形状、目標欠陥深さを図-4に示す。

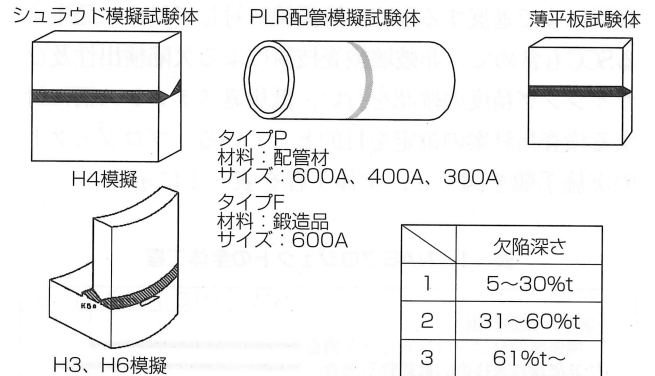


図-4 準備する試験体

#### (2) 非破壊検査技術に関する基礎データ取得

低炭素ステンレス鋼の非破壊検査結果の妥当性を評価するシミュレーション解析等で必要となる材料物性値の取得を行った。電磁気特性のうち導電率は母材、溶接金属及び熱影響部において大きな違いはなかったが、比透磁率は、母材、熱影響部が1.0~1.1に対して、溶接金属は1.4~3.9の値であった。超音波特性については音速測定を行った。その結果を図-5に示す。母材と熱影響部の音速は、同程度でかつ異方性はなかったが、溶接金属部の音速は、柱状晶に対する超音波の入射角度により音速が変化する異方性を示した。

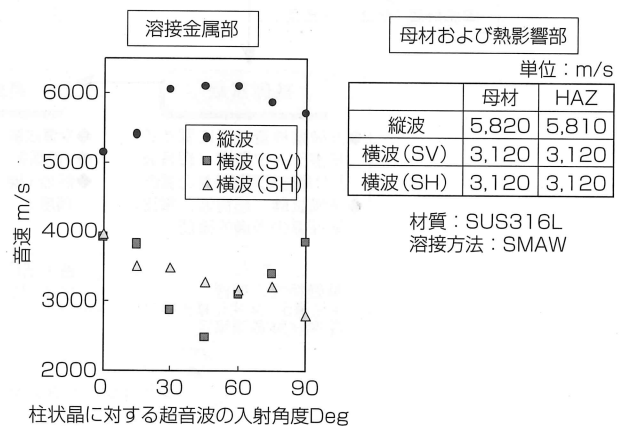


図-5 低炭素ステンレス鋼溶接部のUT基礎データ（音速）

表-2 各種UT手法

No	手法	説明
1	<p>水浸フェーズドアレイUT法</p> <p>リニアスキャン</p> <p><math>\theta</math>: 屈折角</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・複数振動子の発振・受信タイミングを電子的に制御することにより任意の探傷角度を設定可能。また、リアルタイムに断面表示可能。</li> <li>・超音波ビームの集束が可能。</li> <li>・探触子と探傷面との間に水ギャップを設けた状態で探傷する手法であり、複雑構造物の探傷に適用可能。</li> </ul>
2	<p>直接接触フェーズドアレイUT法</p> <p>送信超音波</p> <p>送信アレイ</p> <p>受信アレイ</p> <p>回折波</p> <p>き裂先端</p> <p>き裂深さ</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・複数振動子の発振・受信タイミングを電子的に制御することにより任意の探傷角度を設定可能。またリアルタイムに断面表示可能。</li> <li>・超音波ビームの集束が可能。</li> <li>・探触子と探傷面を直接接触させて超音波の伝達効率を高めた手法である。</li> </ul>
3	<p>点収束フェーズドアレイUT法</p> <p>TOFD方式点集束法の適用例</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・複数振動子の発振・受信タイミングを制御することにより任意の探傷角度を設定可能。また断面表示可能。</li> <li>・探触子自体に曲率を持たせるか、或いはマトリクス化によりビーム集束径を小さくすることにより欠陥の検出、サイジング性を向上させる。</li> </ul>
4	<p>レーザー超音波探傷技術</p> <p>パルスレーザー</p> <p>レーザー手探針</p> <p>レーザー手探針</p> <p>超音波</p> <p>反射波</p> <p>き裂</p> <p>透過波</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・レーザーにより発生させた超音波を用いて、き裂の反射をレーザーで検出する手法であり、非接触探傷が可能な手法である。</li> </ul>
5	<p>ワンスキップUT法</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・垂直継ぎ手や探触子の走査面側表面近傍の探傷を実施する場合に探傷面の裏面で超音波を1回反射させて欠陥を探傷する手法である。</li> </ul>
6	<p>縦波70° UT法</p> <p>受信(50°)</p> <p>送信(70°)</p> <p>欠陥</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・前後2分割の縦波斜角法は、欠陥端部からの回折波を効率的に受信することが可能である。</li> <li>・対象とする欠陥端部位置により、超音波ビームの送受信角度を変えるが、通常、送信屈折角70°、受信角50°が使用される。</li> <li>・また、溶接金属部内の散乱の影響を受け難い縦波で探傷する。</li> </ul>

表-3 各種ECT手法

No	手法	説明
1	<p>マルチ周波数き裂幅補正ECT法</p> <p>出力プロファイル</p> <p>周波数A</p> <p>周波数B</p> <p>検算処理</p> <p>き裂幅a</p> <p>き裂幅b</p> <p>プローブ走査</p> <p>被検体で発生する渦電流</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・複数の周波数を励磁して欠陥探傷を行い、結果を信号処理して特徴量の変化から欠陥検出・サイジングを行い、さらに欠陥出力信号をき裂幅で補正して深さサイジングの高精度化を図る手法。</li> </ul>
2	<p>マルチコイルアレイECT法</p> <p>検算方向</p> <p>電子スキャン方向</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直線上に配列した複数コイルから構成されたプローブを用いて表面欠陥を検出する手法。</li> </ul>
3	<p>インテリジェントECT法</p> <p>0.5mm深さスリット</p> <p>幅60mm</p> <p>移動方向</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検出性に優れたコイルを多数配置したプローブで探傷し、この信号のノイズ処理を行いSN比を向上させる手法である。</li> </ul>
4	<p>溶接部検査用ECT法</p> <p>2.5</p> <p>12.5</p> <p>12.5</p> <p>bottom (top) view</p> <p>side view</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・溶接部ノイズの影響を受け難いコイル配置を持つ特殊形状探触子を用いてステンレス鋼配管や容器溶接部での性能向上を狙ったECT手法である。コイル方式として十字型を採用し、低周波数化とコイルサイズの大型化を図っている。</li> </ul>
5	<p>深部検査用ECT法</p> <p>30</p> <p>30</p> <p>13.0</p> <p>8.0</p> <p>2.0</p> <p>0.5</p> <p>pickup</p> <p>side view</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・通常のECT法では数mm程度の欠陥深さのサイジングが限界であるが、より深い欠陥のサイジングのために探触子の低周波数化、コイルサイズの大型化を図り、深部での渦電流密度を増加させ深部の欠陥検出及びサイジング性の向上を狙った方式である。</li> </ul>

(3) 非破壊手法の予備試験結果

非破壊検査手法の低炭素ステンレス鋼への適用性を確認するために放電加工ノッチを付与した試験体を用いて予備試験を行った。予備試験結果のまとめを表-4に示す。

表-4 低炭素ステンレス鋼の放電加工ノッチに対するUT/ECT適用性確認試験結果

○：適用可、△：条件付で可、×：不可

		UTの適用性		ECTの適用性
		母材側探傷	溶接部側探傷	
欠陥 開口面探傷	検出性	○	○	○
	サイジング性	○	○	△(10mm程度が限界か?)
欠陥 反開口面探傷	検出性	○	○	△(残肉厚10mm程度が限界か?)
	サイジング性	○	○	△~×

UTでは、国内外で急速に実用化が進められている手法であるフェーズドアレイUT法（アレイTOFD法を含む）、レーザUT法及び実機にも適用されているワンスキップUT法、縦波70°UT法などの試験を行った。その結果、UTは欠陥の検出・サイジングに適用性を有していることが確認できた。試験結果の一例としてフェーズドアレイUT探傷結果を図-6に示す。

また、ECTでは、アレイプローブを用いたECT法や溶接部や深部検査を対象としたECT法などについて試験を行った。その結果、欠陥開口面からの探傷では、欠陥検出性を有していることが確認できた。また、浅い欠陥（10mm程度以下）のサイジングの可能性が確認できた。試験結果の一例としてアレイプローブを用いたECT探傷結果を図-7に示す。

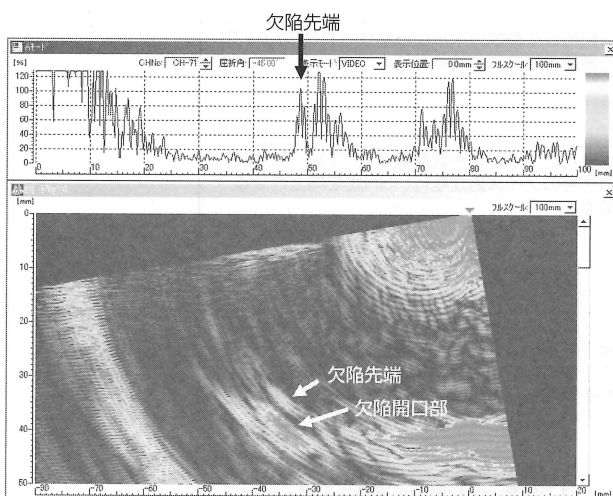


図-6 フェーズドアレイUT法の探傷結果（例）

4. あとがき

平成15年度においては、プロジェクトの全体計画を策定するとともに試験に供する試験体製作及び非破壊検査手法の試験を行った。今後は、検査指針案への反映を考慮し、科学的合理性を求め、透明性のあるデータの取得を進めていく。

また、取得した技術データは、実機の検査を規定している電気技術指針（社団法人日本電気協会発行）の改正などにおいても貴重なデータとなるものであり、有効に活用されることを期待する。

参考文献

- [1] 総合資源エネルギー庁調査会原子力安全・保安部  
会原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会  
（第7回）、“原子力発電設備の健全性評価について  
- 中間とりまとめ -”

（平成16年 8月20日）

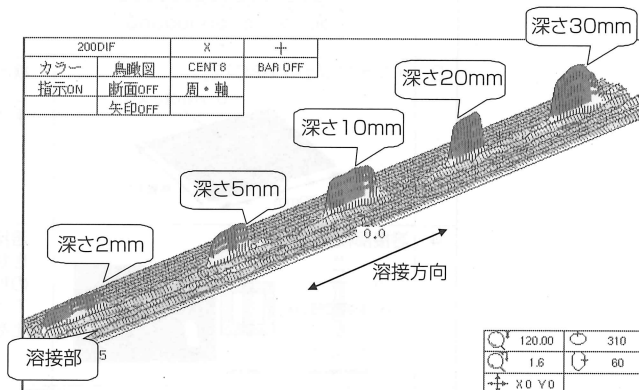


図-7 ECT法の探傷結果（例）