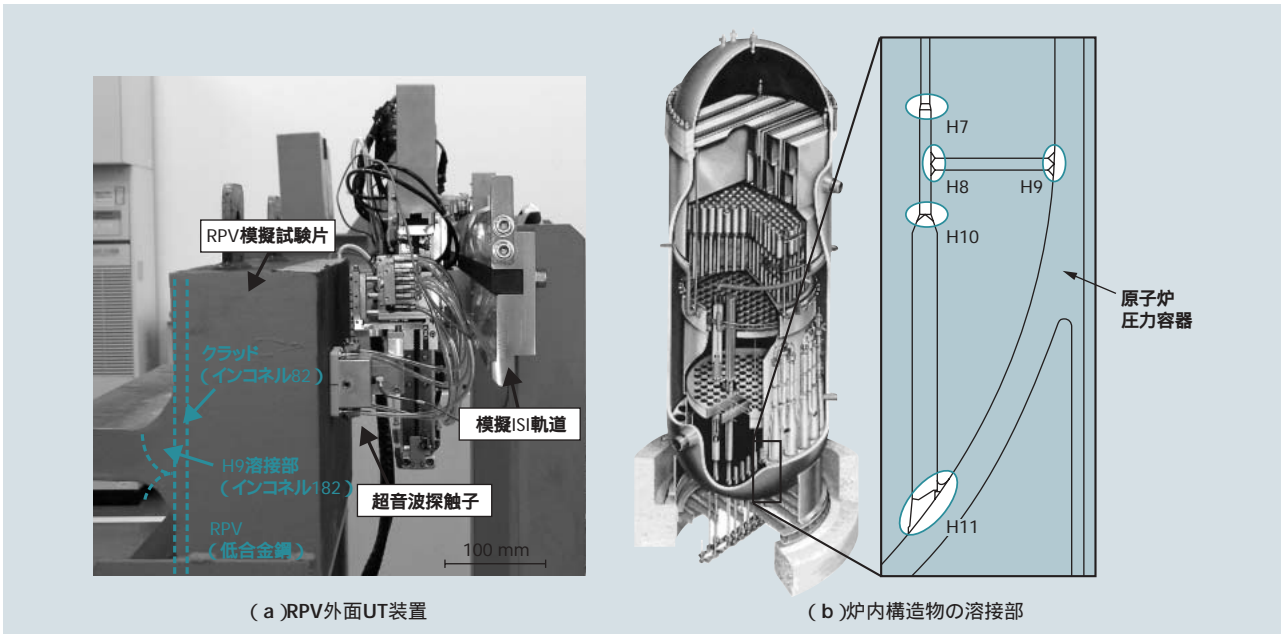


# BWRシュラウドサポート点検技術の開発

Development of Inspection Technology for Shroud Support of BWR

野中 善夫 Yoshio Nonaka  
河野 尚幸 Naoyuki Kono

西水 亮 Akira Nishimizu  
江原 和也 Kazuya Ehara



注:略語説明 RPV(Reactor Pressure Vessel), ISI(In-Service Inspection), UT(Ultrasonic Test)

図1 RPV外面UT装置による応力腐食割れのき裂深さ測定例

UT技術は、供用期間中検査( ISI )装置用の軌道を利用し、RPV外面から超音波で炉内構造物との溶接部( H9溶接部 )内の応力腐食割れのき裂深さを測定する技術である。RPV外面UT装置( a )に、炉内構造物の溶接部( b )に示す。H9およびH11は、健全性評価の検査対象箇所となっている。

## 1.はじめに

原子力発電所の原子炉機器などの健全性評価制度が整備され、その中核となる維持規格が導入された。この維持規格においては、維持規格導入以前の検査要求に加え、高経年化プラントについての検査内容が順次、整備・拡充されてきており、より詳細な検査が行われている。

また、原子力発電所の安定的な運転のために、原子炉機器については機器の交換や残留応力低減などによる予防保全措置がとられており、予防保全施工の際にも施工対象部の詳細な検査が行われている。

BWR( Boiling Water Reactor:沸騰水型軽水炉 )のRPV( Reactor Pressure Vessel:原子炉压力容器 )と炉内構造物の溶接部( H9およびH11 )は上記の検査対象箇所である。日立製作所は、これらの部位に発生したき裂の有無を内表面から高精度で確認し、長さを測定できるECT( Eddy Current Test:渦

流探傷検査 )技術と、その深さ寸法をRPV外面から測定するUT( Ultrasonic Test:超音波探傷検査 )技術を開発した( 図1参照 )。

ここでは、原子炉保全のために日立製作所が開発したECT技術、およびUT技術について述べる。

## 2. RPVと炉内構造物の溶接部の検査

RPV内の構造物や溶接部の検査は通常、水中TVカメラを用いた目視検査( Visual Test )で行う。目視検査でき裂が確認された場合は、き裂の寸法を測定し、その結果を基に健全性を評価して、必要な場合は補修を行うことになる。

RPVと炉内構造物の溶接部は図2に示すような構造となっており、健全性評価においては、き裂の寸法に加え、RPV母材への進展有無を確認することが重要となる。

また、き裂発生部を補修する場合には、必要な範囲を確定

原子力発電所の原子炉機器などの健全性評価制度の整備が行われ、その中核となる維持規格が導入された。この維持規格においては高経年化プラントについての検査要求が拡充され、高経年化プラントでは維持規格の規定に基づき、詳細な検査が行われている。

日立製作所は、このような背景の下、定期検査工程に影響を与えずに、原子炉压力容器と炉内構造物の溶接部内の検査を原子炉压力容器外表面から高精度で行う超音波探傷技術と、原子炉压力容器内の溶接部表面を高精度で検査することができる渦流探傷技術を開発した。

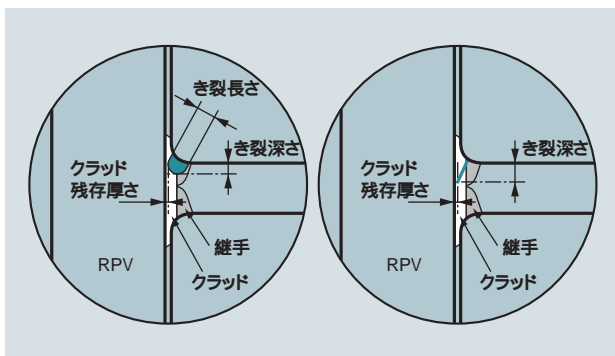


図2 検査対象個所のイメージ

RPVと炉内構造物のH9溶接部の構造概要を示す。

に補修するために、き裂が生じている範囲を正確に把握する必要がある。

### 3. 開発技術

#### 3.1 検査技術の特徴

##### (1) き裂長さ測定

き裂長さ測定には、高感度の渦流探傷を採用し、ECTセンサを多数配列することにより、一度の走査で広範囲の曲面を検査可能なフレキシブルECTセンサを開発した。開発したECTセンサでは、可撓(とう)性を有するプリント基板に、複数のコイルを配列した構造とすることにより、曲面形状部への密着を可能としている(図3参照)。

このECTセンサを用いて、実機と同様に表面仕上げを行った三次元曲面形状溶接部を探傷した結果を図4に示す。ECTによる表面検査では表面の凹凸や曲面形状の変化の影響を受け、また、実際の炉内構造物の検査では表面に付着したハードクラッドと呼ばれる酸化皮膜の影響を受けることが想定される。このような影響はリフトオフ信号として発生し、き裂長さ測定に悪影響を及ぼすが、欠陥信号との識別技術を適用することによって安定した測定を可能としている。

##### (2) き裂深さ測定

これまではH9, H11溶接部のき裂深さはRPV内からUTで測定することが検討されてきた。しかし、RPV内の検査作業は狭隘(あい)部での遠隔作業となり、かつ、定期検査工程

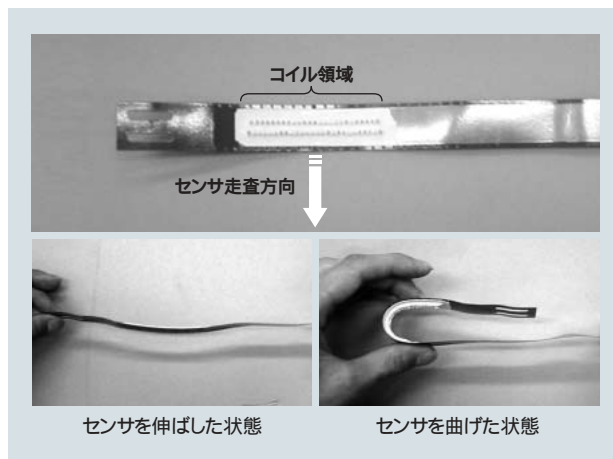
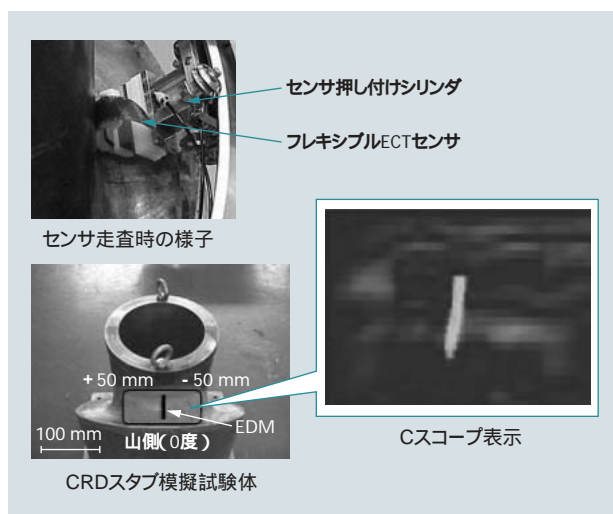


図3 フレキシブルECTセンサ

可撓性を持つプリント基板に複数のコイルを配列しているため、曲面形状部に密着して検査することができる。



注:略語説明 CRD( Control Rod Drive:制御棒駆動機構)  
EDM( Electric Discharge Machining:放電加工)  
ECT( Eddy Current Testing:渦流探傷試験)

図4 CRDスタブ溶接部の探傷結果例

実機と同様に表面仕上げを行った試験体の三次元曲面形状溶接部を、ECTセンサを用いて探傷した。

のクリティカル作業となる。そこで、定期検査工程のクリティカル作業とならないようにRPV外面からUTを行ってき裂深さを測定する技術を開発した。この技術はフェーズドアレイ法を活用したものである。そのための探触子の一例を図5に示す。探

触子の設計において、音場解析シミュレーション技術を活用し(図6参照)、超音波を送受信する圧電素子の配置と送受信制御パターンを最適化して、遠方からの探傷に適した超音波の集束を可能としている。この探触子に、日立製作所が独自開発した電子スキャン(ティルトスキャンとセクタースキャンを組み合わせて検査を行うことにより、き裂の方向にかかわらずにき裂深さの測定を可能とした。また、き裂深さ測定に加え、クラッドと母材の境界部を検出することにより、き裂先端の母材への進展有無を評価することが可能である。

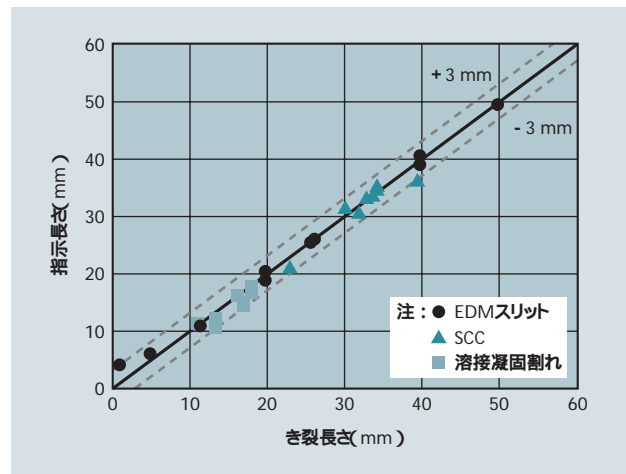
### 3.2 検査技術の性能

#### (1) き裂長さ測定

フレキシブルECTセンサのき裂長さ測定精度を、平板および曲率半径20~100 mmの曲面形状試験片に付与したEDM(Electric Discharge Machining:放電加工)スリット、溶接凝固割れおよびSCC(Stress Corrosion Cracking:応力腐食割れ)によって検証した。フレキシブルECTセンサでは、き裂の両端部に特徴的な波形信号が得られるため、表面形状、き裂種およびき裂の向きによらず、±3 mm以内の精度で長さ測定が可能である(図7参照)。

#### (2) き裂深さ測定

RPV外面UTの性能を、H9およびH11継手を模擬した試験片に付与した深さ6~75 mm(板厚の10~75%)のEDMスリットと、深さ約7~20 mm(板厚の12~33%)のSCCを用いて検証した。H9継手模擬試験体のSCC深さおよびクラッド境界部を検出し、画像表示した例を図8に示す。このように、き裂深さおよびクラッド境界部の測定に必要なエコーを高い感度で検出できることを確認した。



注:略語説明 SCC(Stress Corrosion Cracking;応力腐食割れ)

図7 き裂長さ測定精度の評価結果例

表面形状や、き裂種、き裂の向きによらず、±3 mm以内の精度で長さ測定することができる。

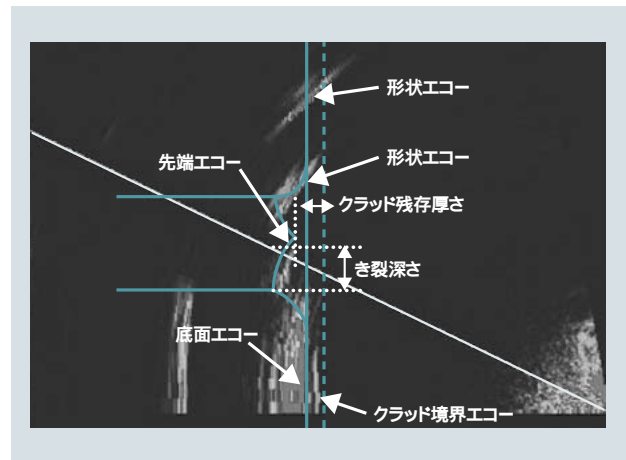


図8 H9継手内SCC深さ、クラッド境界部の測定例

き裂の深さやクラッド境界部の測定に必要なエコーを高い感度で検出することができる。

### 3.3 検査装置

#### (1) ECT検査装置

原子炉内補修装置にECT用スキャナおよびセンサを搭載した例を図9に示す。このように補修と同一の装置で、き裂範囲を測定することにより、データの補正などを行うことなく確実に補修工事にき裂範囲のデータを渡すことができる。また、ECT専用の簡便な検査装置の開発も進めている。

#### (2) RPV外面UT装置

H9およびH11溶接部のRPV外面UTは、RPVのISI(In-Service Inspection:供用期間中検査)で用いるRPV外表面に設置されたISI用軌道を走行する装置で行うことができる(図10参照)。また、ISI用軌道がない場合にはRPV外面にマグネットなどによって脱着可能な仮設軌道上を走行する装置(図11参照)を用いることにより、容易にRPV外面からのUTを行うことができる。

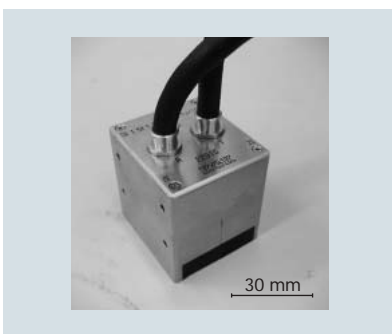


図5 探触子の例  
き裂深さを測定する探触子を示す。

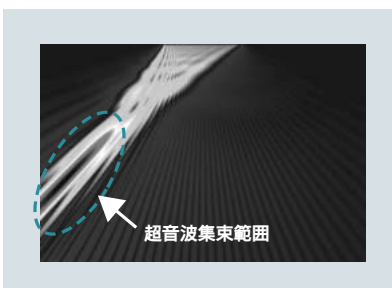


図6 音場解析の例  
音場解析シミュレーション技術を活用している。

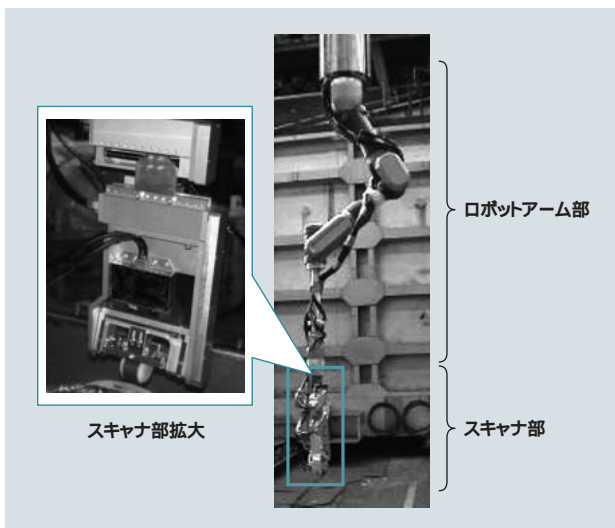


図9 ECT検査装置の例(炉底部用)  
原子炉内補修装置にECT用スキャナおよびセンサを搭載した例を示す。

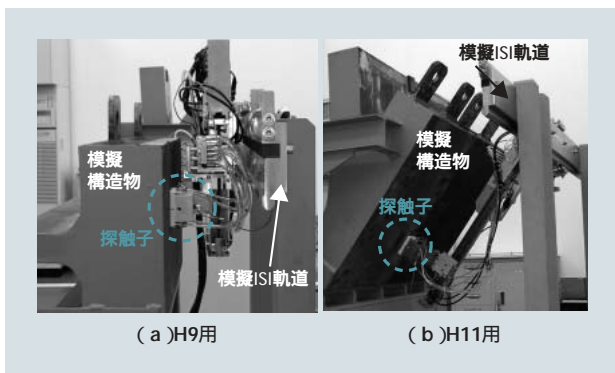


図10 ISI軌道を利用したRPV外面UT装置の例  
溶接部のRPV外面UTは、RPV外表面に設置されたISI用軌道を走行する装置で行う。H9用を(a)に、H11用を(b)にそれぞれ示す。

#### 執筆者紹介



野中 善夫  
1995年日立製作所入社，電力グループ 日立事業所  
原子力設計部 所属  
現在，炉内機器の検査技術開発および設計業務に従事  
日本原子力学会会員



河野 尚幸  
1995年日立製作所入社，電力グループ 電力・電機開発  
研究所 非破壊検査プロジェクト 所属  
現在，超音波検査技術の研究・開発業務に従事  
日本原子力学会会員

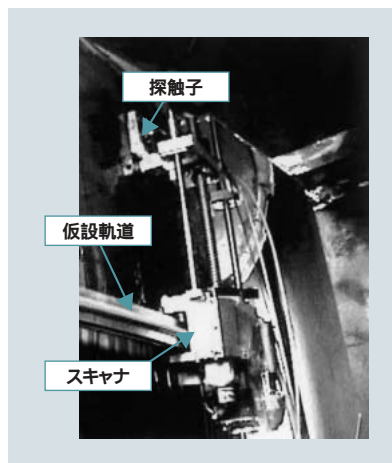


図11 仮設軌道を利用したRPV外面UT装置の例

ISI用軌道がない場合は脱着可能な仮設軌道上を走行する装置を用いる。

#### 4. おわりに

ここでは、BWRのRPVと炉内構造物の溶接部を点検するECT技術、およびUT技術について述べた。

原子力発電所では維持規格に基づいて各機器の検査が行われており、また、予防保全を施工する場合にはその前後にも検査が行われている。

日立製作所は、これらの検査の対象箇所、評価の要求に適した合理的な検査技術の開発を進め、原子力発電所の安全かつ効率的な運転に寄与していく所存である。



西水 亮  
1995年日立製作所入社，電力グループ 電力・電機開発  
研究所 非破壊検査プロジェクト 所属  
現在，渦電流探傷技術の研究・開発業務に従事  
日本原子力学会会員



江原 和也  
2000年日立エンジニアリング株式会社入社，日立製作所  
電力グループ 日立事業所 原子力品質保証部 所属  
現在，超音波検査技術の開発および検査業務に従事  
日本原子力学会会員