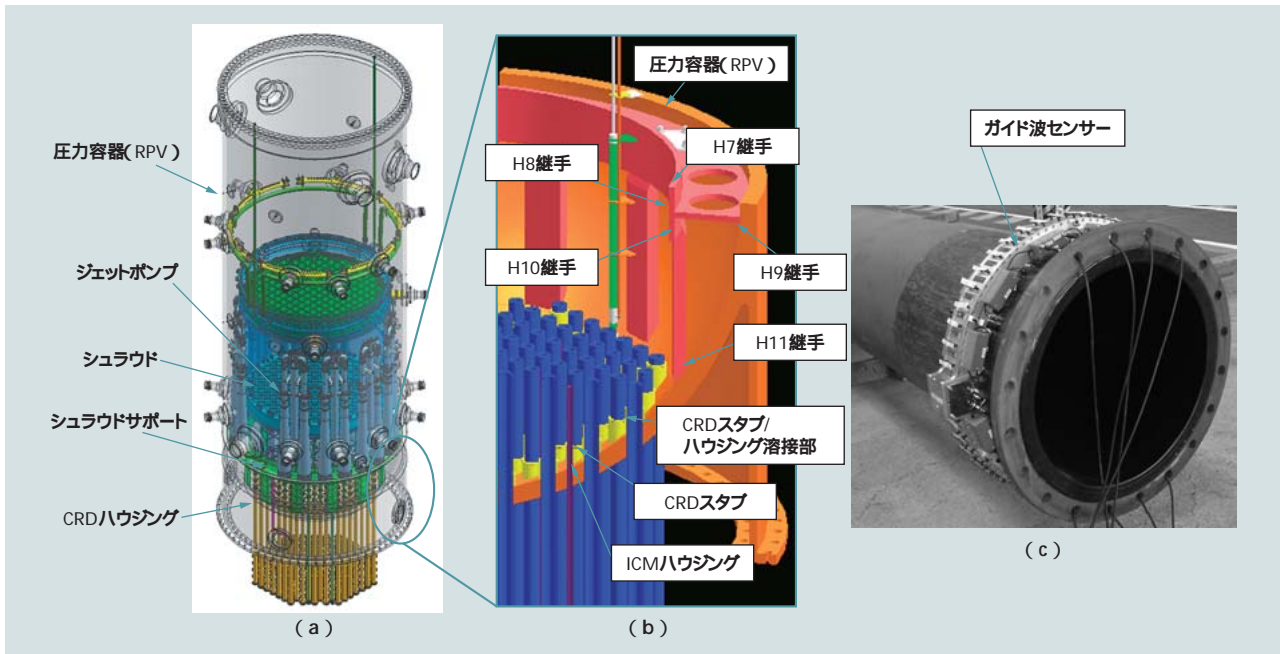


# 原子力発電所の安定運転を支える高度検査技術

Advanced Inspection Technologies for Safe Operation of Nuclear Power Plants

小平 小治郎 Kojiro Kodaira  
松井 哲也 Tetsuya Matsui

野中 善夫 Yoshio Nonaka  
藤間 正博 Masahiro Toma



注:略語説明 RPV(Reactor Pressure Vessel),CRD( Control Rod Drive:制御棒駆動機構),ICM( Incore Monitor),H7~11( 水平方向(Horizontal)の溶接部の番号名称)  
 図1 原子炉の概要と炉底部検査対象部位,および配管減肉検査用ガイド波センサー  
 沸騰水型原子炉の概要(a),その炉底部の拡大図における検査対象部位(b),および配管減肉検査用ガイド波センサー(c)を示す。

原子力発電プラントの高経年化に伴い,保全の重要性はより高まっており,原子力発電所を安全に安定運転するために,炉内機器などの応力腐食割れ(SCC)や,配管の減肉を高精度に検査できる検査技術が求められている。日立グループは,このような要求に応えられる技術の開発を進めてきた。

炉内シュラウドや再循環系(PLR)配管については,より迅速に検査できる炉内ピークルや自動超音波探傷 UT 装置を,そして炉底部の複雑形状部(CRDスタブ溶接部)については,高精度な表面検査を可能とするフレキシブルな渦流探傷(ECT)センサーを,压力容器(RPV)溶接部については,炉外からSCCのサイジングを可能とした超音波センサーを開発した。さらに,配管減肉を迅速にスクリーニング検査可能なガイド波検査法を開発している。

## 1.はじめに

国内の原子力発電所においては,運転年数が30年を越える高経年化プラントが増加し,溶接部にはSCC(Stress

Corrosion Crack:応力腐食割れ)によるき裂の発生が顕在化しており,予防保全工事も行われている。BWR(Boiling Water Reactor:沸騰水型軽水炉)のRPV(Reactor Pressure Vessel:压力容器),炉内構造物,配管などについて,健全性評価や補修を考慮した精度の高い検査技術が求められている。日立グループは,このようなニーズに対応し,各検査部位に適した信頼性の高い,高度検査技術の開発を進めている。

ここでは,原子力発電所の安定運転を支えるため,日立グループが開発した高度検査技術について述べる(図1参照)。

## 2.RPVと炉内構造物溶接部の検査技術<sup>1)2)</sup>

### 2.1 検査概要

RPVと炉内構造物の溶接部(H9,H11溶接部)に想定したき裂の深さは,これまで,RPV内からのUT(Ultrasonic Testing:自動超音波探傷)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,定期検査工程を左右する作業となる。そこで,

RPV外面からアクセスして探傷することで、クリティカル作業と  
ならないUT技術(以下、炉外UTと言う)を開発した。

## 2.2 RPV外面UT点検技術

H9およびH11溶接部の炉外UTは、RPVのISK( 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2 (a)  
参照)。また、ISI用軌道がない場合にはRPV外面に着脱可能な  
仮設軌道上を走行する装置などを用いて炉外UTを行うこと  
ができる。

炉外UTには、遠方( RPV板厚150 mm以上)で超音波を集  
束可能なフェーズドアレイ探触子を用いる。電子スキャン(セク  
タースキャン)で探傷範囲を画像化することにより、き裂の方向  
にかかわらずき裂の深さを容易に測定できる。また、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RPV側への  
進展度合いを測定できる( 図2 (b)参照)。

## 3 .RPV炉底部の検査技術<sup>1)2)</sup>

### 3.1 検査概要

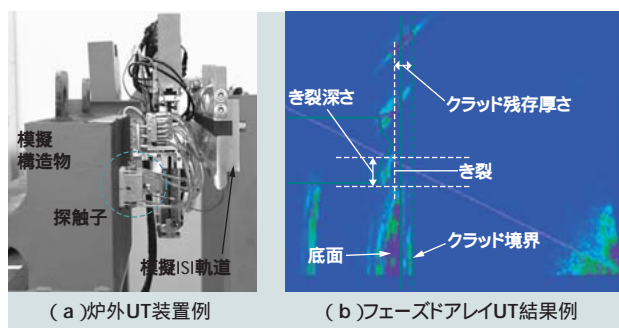
炉内機器にき裂が確認された場合は、健全性評価を行い、  
必要に応じて補修を実施するため、補修範囲を正確に確認  
する技術が求められる。そこで、内表面から高精度でき裂の  
長さを測定できるECT( Eddy Current Testing: 渦流探傷)技術  
を開発した。

### 3.2 CRDスタブ溶接部ECT点検装置

原子炉内補修装置にECT用スキャナおよびセンサーを搭載  
した例を 図3 に示す。このように補修と同一の装置を用いるこ  
とで、測定されたき裂範囲を正確に補修できる。

### 3.3 フレキシブルマルチECT技術

炉底部には曲面形状の溶接部が多数存在するため、可  
撓(とう)性を有する基板にコイルを多数配列したフレキシブル  
ECTセンサーを用いる。このセンサーにより、CRD( Control



注:略語説明 ISK( In-service Inspection ), UT( Ultrasonic Testing )

図2 ISI軌道を利用した炉外UT装置と測定結果

炉外UT装置外観(a)と、炉内側溶接部UT結果例(b)を示す。

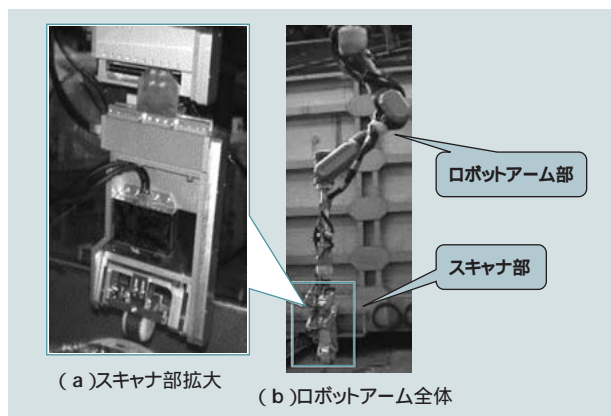
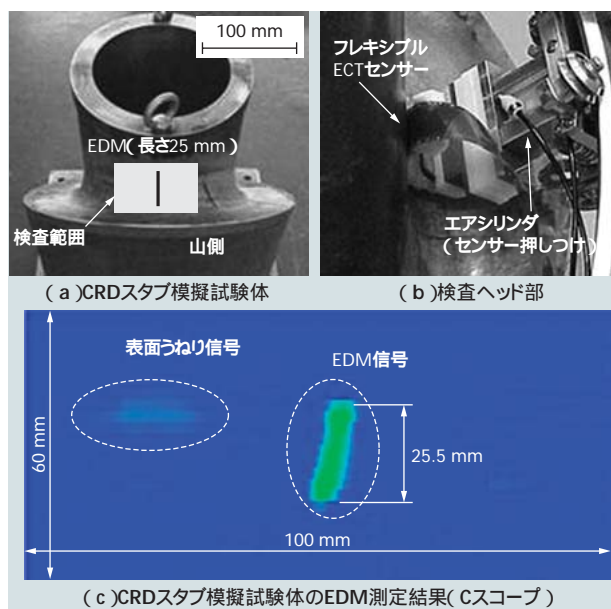


図3 ECT検査装置例(炉底部用)

スキャナ部拡大外観(a)と、原子炉内補修装置(6軸ロボットアーム)の全体  
外観(b)を示す。



注:略語説明 EDM( Electric Discharge Machining: 放電加工 )  
ECT( Eddy Current Testing: 渦流探傷 )

図4 CRDスタブ溶接部の探傷結果

CRDスタブ模擬試験体の外観(a)、検査ヘッド部の外観(b)、および模擬試  
験体のEDM欠陥の測定結果(c)をそれぞれ示す。

Rod Drive: 制御棒駆動機構)スタブ溶接部のような曲面形状  
部を一度の走査で広範囲に検査することが可能となる。ECT  
による表面検査ではリフトオフ信号などのノイズが発生するが  
独自の欠陥識別技術を開発し、正確なき裂範囲の測定を可  
能としている。

CRDスタブ実機模擬試験体を用いた三次元曲面形状の  
溶接部の探傷結果を 図4 に示す。

## 4 .炉内点検用ROV

### 4.1 炉内水中点検概要

原子炉の炉内機器の健全性を確認するため、炉内機器は、  
(1)カメラによる目視検査、(2)渦流検査、(3)超音波検査を  
実施することが重要となっている。開発したECTセンサーや  
UTセンサーを検査対象部位へ押しつけるために、これらのセ

ンサーを搭載し、検査対象部位まで水中を遊泳、または検査壁面を走行するROV(Remotely Operated Vehicle:水中遠隔操縦ロボット)を開発して検査時間の短縮と信頼性確保に貢献している。

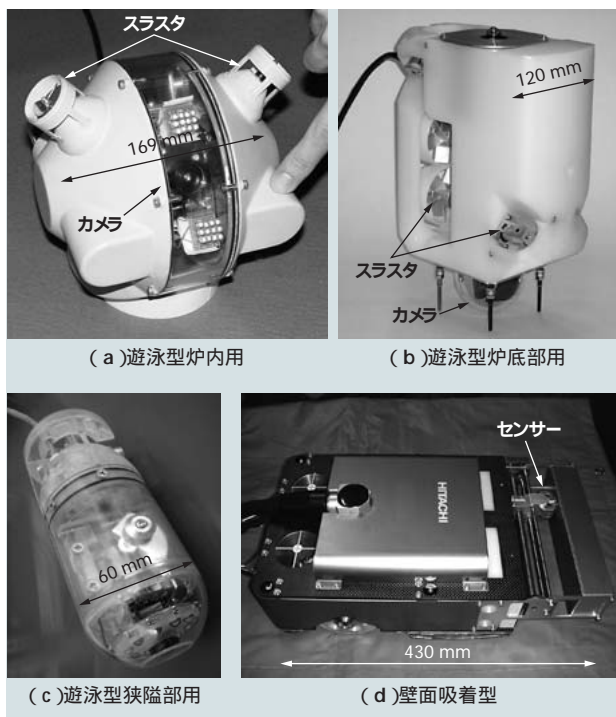
#### 4.2 ROVによる点検技術

ROVには水中を遊泳する遊泳型と検査壁面に吸着しながら走行する壁面吸着型がある。開発したROVの代表例を図5に示す。(a),(b),(c)の遊泳型ROVは搭載したスラストにより、水中を三次元的に遊泳するとともに、カメラによって検査対象部位を鮮明に撮影することができる。(c)は、狭隘部検査用超小型ROVである。(d)の壁面吸着型ROVは先端にECTセンサーやUTセンサーを搭載しており、検査対象面を高精度に走行して検査することができる。これらのROVは実機炉内機器の目視検査や超音波検査で用いられており、炉内の隅々まで迅速に、かつ精度よく検査することができる。

### 5 .PLR配管点検用高度自動UT装置

#### 5.1 PLR配管点検概要

原子炉一次系配管のPLR(Primary Loop Recirculation System:再循環系)などの低炭素オーステナイト系ステンレス鋼(SUS316L)の溶接部にSCCが顕在化しており、その配管溶接継手部の健全性確認を目的としてUTによる点検を行っている。従来このUTは主に手動操作であったが、作業の均一性や被ばく低減およびデータの記録保存や評価結果の客観



注:略語説明 ROV(Remotely Operated Vehicle:水中遠隔操縦ロボット)

図5 炉内点検用水中ROV

原子炉の炉内点検を行う各種の水中ROVの外観を示す。

性向上が望まれていた。日立グループでは、従来からISIで配管用自動UT装置を適用しているが、さらに比較的短い期間で多くの継手を探傷し、信頼性の高い結果の評価を行うことが求められるため、新たに高度自動UT装置を開発し、実点検に適用している。

#### 5.2 高度自動UT装置

開発した自動UT装置の特徴は、配管への装置取り付けを容易な構造とし、新機構で探触子からの超音波伝達を向上させたほか、デュアル探触子による迅速探傷を可能とした。また、探傷データの処理機能では、評価に必要な解析や作図、複数の記録作成を自動化し、画像表示機能を充実させたことで、現場探傷とデータ処理作業などの作業効率を大幅に向上させるとともにデータの記録保存や評価結果の客観性確保を可能としている(図6参照)。なお、実使用結果からも総合的に探傷・評価作業の信頼性向上と検査員の負荷軽減を確認した。

### 6 .ガイド波による配管減肉検査技術<sup>3)</sup>

#### 6.1 配管肉厚点検の概要

現状の配管肉厚点検では、主に超音波厚み計を用いて測定している。測定ポイントをマーキングし、1ポイントごとに測定

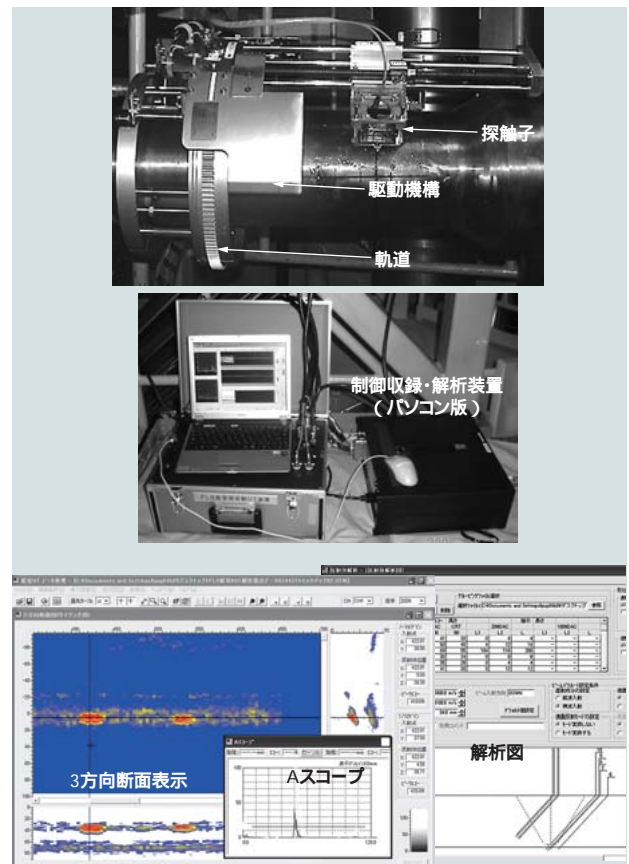


図6 高度自動UT装置の実探傷状況とデータ処理・解析画像

高度自動UT装置を適用することにより、総合的に探傷・評価作業の信頼性向上と検査員の負荷軽減が可能となる。

し、1定期点検/プラントで数万ポイントに達する。1プラント当たりの測定個所は数千部位に上り、計画的に配管肉厚測定、減肉管理を推進している。また、減肉個所については、継続的な監視が必要となる。しかし、すべての配管について測定することは困難であり、また、壁貫通部など測定困難な部位や減肉していない部位もかなりあることから、スクリーニングによる点検が求められている。

## 6.2 ガイド波減肉検査技術

超音波の一種のガイド波を用いて、保温材を脱着せずに、配管の十数メートルの長距離区間の減肉を一括してスクリーニングする技術を開発し、実機適用に向けたポータブルガイド波検査システムを完成した(図7参照)。

このシステムの特徴は、圧電素子を用いたセンサーを直接配管に設置することができ、特殊な送信方法と受信信号の処理によって、検出性を大幅に向上させた点にある。直管や小口径の曲げ管では、配管断面積に対して1%の減肉を検出することができる(図8参照)。

現在、発電プラントなどでフィールドデータの蓄積を進めており、評価方法が確立しつつある。今後、実機へ適用していく予定である。

## 7. 検査技術の拠点「NDEセンター」

日立GEニュークリア・エナジー株式会社は、高度な検査技術の開発とともに検査員の技術力向上と専門技能者を養成



図7 ポータブルガイド波検査システム  
ポータブルガイド波検査装置外観と配管の測定状況を示す。

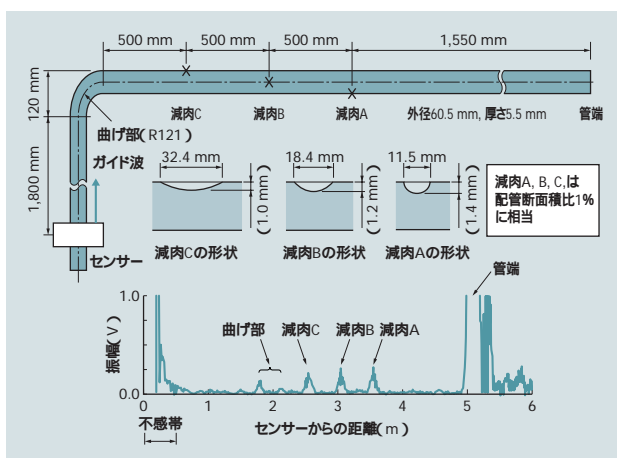


図8 ガイド波による減肉スクリーニングの例  
模擬減肉を付与した実配管の検査結果を示す。

し、顧客の満足度を重視した信頼性の高い検査の実現を目的に、検査員と設備を集中配置した「NDE(Non-Destructive Examination)センター」を設置している。NDEセンターを拠点にして、設計、研究、検査部署で構成されるチームにより、たゆみなく検査技術の向上をめざし、高度技術を取り入れた検査装置の開発と検査員の技術力向上に努めていく所存である。

## 8. おわりに

ここでは、日立グループが開発した原子力発電所のための高度検査技術について述べた。

原子力発電所では高経年化プラントに対し適切な保全を行いながら安全に長期間運転することがますます重要となり、今まで以上に信頼性の高い検査技術が求められる。

日立グループは、今後も、合理的かつ適切な検査を可能とする非破壊検査技術の開発と検査員の技術力向上に努め、原子力産業の発展に貢献していく。

### 参考文献

- 1) M. Nakamura et al.: Non-Destructive Examination Systems for BWR CRD Stub Tubes, Proceedings of the 5th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components(2006)
- 2) 野中, 外: BWR炉底部検査技術, (1) 検査技術の概要, 日本原子力学会 2006年秋の大会(2006)
- 3) 永島, 外: ガイド波による発電プラント配管の減肉検査技術の開発, 火力原子力発電(2006.12)

### 執筆者紹介



小平 小治郎  
1971年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 原子力品質保証部 所属  
現在, 予防保全の非破壊検査技術開発に従事  
日本原子力学会会員, 日本非破壊検査協会会員



松井 哲也  
1984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, 非破壊検査技術の研究・開発に従事  
工学博士  
日本原子力学会会員, 日本非破壊検査協会会員, 日本保全学会会員



野中 善夫  
1995年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 原子力設計部 所属  
現在, 炉内機器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



藤間 正博  
1982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, 非破壊検査技術とロボットの研究・開発に従事  
工学博士  
日本物理学会会員, 日本原子力学会会員