



# 原子炉底部管台向け渦電流探傷システムの開発

## Development of Eddy Current Testing System for Bottom-Mounted Instrumentation Nozzle in Reactor Pressure Vessel

株式会社東芝

小林 徳康  
上野 聡一  
千田 格  
落合 誠  
藤田 友基  
市川 博也

Noriyasu KOBAYASHI

Souichi UENO

Member

Itaru CHIDA

Makoto OCHIAI

Tomoki FUJITA

Hiroya ICHIKAWA

We confirmed the defect detection performance of the eddy current testing (ECT) system in order to inspect the bottom-mounted instrumentation (BMI) nozzle in reactor pressure vessel. We developed the small size cross coil type ECT sensor that has the magnetic cores near the coils and the sensor scanning equipment based on the portable laser peening system. According to the experimental results that measured the sensitivity for the defects on the concave specimen and the relationship between the sensor inclined angle and the defect detecting sensitivity on the convex specimen, the sensor has the adequate sensitivity and the decrease of sensitivity depend on the sensor inclined angle reduced. From the artificial stress corrosion cracking detection test using the developed ECT system, we confirmed that the ECT system has the potential for detecting the defect on the little space. These experimental results indicated that there is the possibility that we can inspect the BMI nozzle.

**Keywords:** Eddy current testing, Stress corrosion cracking, Bottom-mounted instrumentation, PWR, BWR

### 1. 緒言

加圧水型原子炉(PWR: Pressurized Water Reactor)及び沸騰水型原子炉(BWR: Boiling Water Reactor)の原子炉圧力容器や原子炉内構造物を対象とした応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)の表面検査手法として渦電流探傷法(ECT: Eddy Current Testing)の開発が進められている[1][2]。ECTは水中での検査が可能であるため、炉水を抜く必要が無く検査工期の短縮に貢献できる。この特長を生かして、これまでに原子炉冷却材出入口管台溶接部の水中レーザ溶接工事向けにクロスコイルを用いたECTセンサの欠陥検出性能評価試験が行われており、人工的に付与した深さ0.02 mmから0.48 mmまでのSCCに対する検出性能が確認されている[1][3]。

冷却材出入口管台と同様に、原子炉底部の炉内計装筒(BMI: Bottom-Mounted Instrumentation)管台溶接部も検査対象のひとつであるが、本部位は曲率半径約5 mmの凹面狭隘部を有すると共に三次元的に曲面が変化する複雑な形状をしているためECTによる探傷が困難である。凹面形状をした狭隘部に対しては、センサと被検査面との距離(リフトオフ)を短くして欠陥検出感度を維持する

ためにセンサの小型化が必要である。また、複雑な形状の曲面に対しては、この表面にセンサを沿わせることのできる駆動装置が必要となる。本論文では、BMI管台溶接部を対象にクロスコイルを用いた小型ECTセンサのシミュレーション計算による設計と性能評価試験、人工的にSCCを付与したBMI模擬試験体に小型ECTセンサ駆動装置を取り付けた実証試験の結果について記述する。

### 2. ECTシステム

#### 2.1 小型ECTセンサのシミュレーション計算

複雑な曲面形状をしたBMI管台溶接部には凹面部分と凸面部分とが混在しており、その最小曲率半径は一般的に凹面で約5 mm、凸面で約20 mmである。凹面部分では、ECTセンサのセンシング面サイズが大きいとリフトオフが増え欠陥検出性能が低下する。また、凸面部分では、センサと被検査面との接触面積が小さくなるためセンサの姿勢維持が難しくなる。小曲率半径の凹面部分でのリフトオフを短くするためセンサの小型化が必要である。また、凸面部分でのセンサ傾斜による欠陥検出性能の低下を抑制するためにはセンサが発生する磁場の広が

りを小さくすることが有効である。小型 ECT センサの設計として、より曲率半径の小さい凹面部分に着目し、リフトオフが被検査体に誘起される渦電流密度分布に与える影響をシミュレーション計算により評価した。

まず、これまでに冷却材出入口管台を対象として欠陥検出性能を評価してきたクロスコイルを有する ECT センサ[1][3]の励磁コイル、磁性体 (コア)、及び凹面形状の被検査体をモデル化した。従来の磁性体付きクロスコイルの外形図を Fig. 1(a)に示す。ここでは、クロスコイルを相互誘導標準比較方式[4][5]で動作させることを想定する。従来センサではクロスコイルを取り囲む様に円筒状の磁性体を配置していた。そこで、Fig. 1(a)に示す励磁コイルと磁性体の断面部分を 2 次元モデル化して被検査体に誘起される渦電流密度分布を計算した。ここでの 2 次元モデルとは Fig. 1 の y 方向に対して形状変化が無い平面モデルを意味する。磁気ベクトルポテンシャルを変数とする支配方程式と辺要素を用いた有限要素法で計算し、磁性体は線形近似、境界条件は対称とした。計算条件を Table 1 に示す。

曲率半径 5 mm 凹面の被検査体上にセンサを置いた時の励磁コイルと磁性体の計算モデル、及び渦電流密度分布の計算結果を Fig. 2(a)に示す。本モデルでは励磁コイル

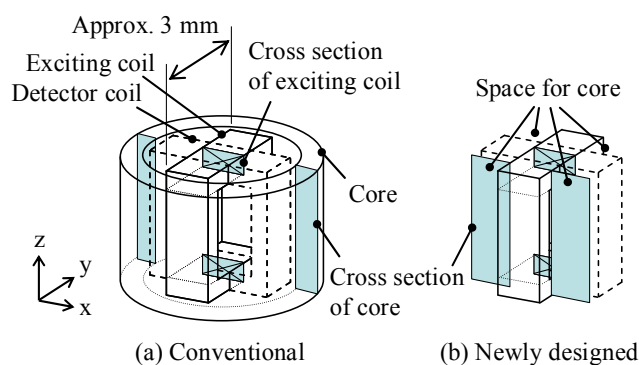


Fig.1 Schematics of cross coils

Table 1 Calculation conditions

Exciting current (AT)	2.25
Frequency (kHz)	500
Magnetic material (Core)	Iron-nickel alloy
Relative permeability	$8.0 \times 10^3$
Conductivity (S/m)	$6.3 \times 10^6$
Inspected material	SUS316L
Relative permeability	1.0
Conductivity (S/m)	$1.0 \times 10^6$

を凹面の谷に沿って配置した。相互誘導標準比較方式のクロスコイルで、例えば同図 x 軸方向に長さを持つ欠陥を検出する場合、励磁コイルは z 軸に対して 45 度回転して配置される。本計算では、渦電流密度分布変化の傾向把握とモデル簡単化のため本配置を適用した。センサのセンシング面直径は 6.4 mm であり、曲率半径 5 mm の凹面上を探傷する時は約 1 mm のリフトオフが生じる。リフトオフの増加による渦電流密度の低下は欠陥検出感度の低下を導き、渦電流分布の広がり増加は空間分解能を低下させる。本条件での渦電流密度の最大値は  $1.9 \times 10^5$  A/m<sup>2</sup>、渦電流密度分布の広がりには 4.6 mm であった。ここでは、渦電流密度分布の広がりを被検査体表面における渦電流密度 x 軸方向分布の半値全幅と定義した。

凹面上でのリフトオフはセンサのケーシングサイズにより決まり、ケーシングサイズは磁性体の配置により制限されている。そこで、クロスコイルの十字の間に磁性体を近接配置してケーシングの小型化を図った(Fig. 1(b))。また、コイルへの磁性体近接配置により磁路長が短縮されるので、センサ端部における磁場の広がりの抑制が期待できる。このセンサを同様の凹面上に設置した場合の計算モデルと渦電流密度分布の計算結果を Fig. 2(b)に示す。本モデルではセンサのセンシング面直径を 3.4 mm まで減少できるためリフトオフを約 0.3 mm に抑えることができる。その結果、渦電流密度の最大値は  $5.4 \times 10^5$  A/m<sup>2</sup> に増加し、渦電流密度分布の広がりには 2.7 mm に減少した。計算結果のまとめを Table 2 に示す。

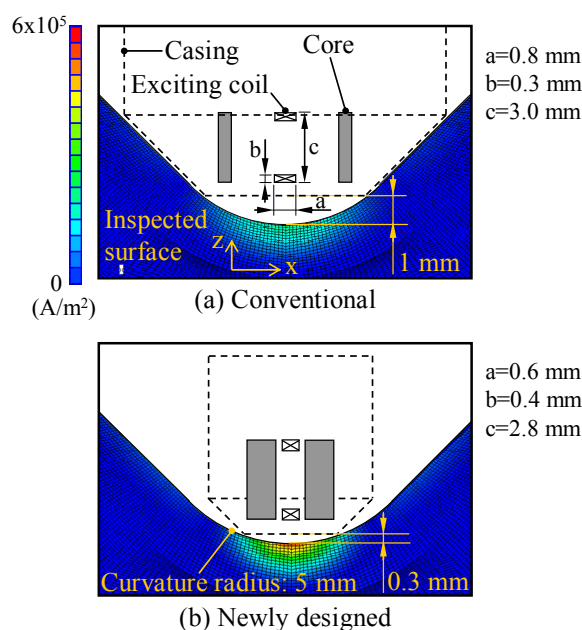


Fig.2 Calculated results of eddy current density distribution

## 2.2 センサ駆動装置

三次元的に形状が変化する複雑な曲面を有するBMI管台溶接部表面にECTセンサを沿わせて走査する駆動装置には、BMI管台向けSCC予防保全システムとして開発したポータブルレーザピーニング(PLP: Portable Laser Peening)システム[6]の駆動装置を用いた。この装置構成には検査と予防保全とを同一駆動装置で実施できる利点がある。Fig. 3にセンサ駆動装置の概略図を示す。PLPシステムのレーザ照射ヘッドを取り外し、そこにECTセンサが組み込まれたアタッチメントを取り付けることで検査システムに変更できる構成とした。センサ駆動装置はBMIのノズル上端に設置固定される。モータによる駆動軸は旋回、伸展、上下、及びセンサ回転軸であり、その他の軸としてばねによるセンサ傾斜軸を有する。これらの軸構成によりECTセンサをBMI管台表面の探傷位置に導き、センサの傾斜姿勢を制御する。

## 3. 試験方法

### 3.1 基本性能確認試験

シミュレーション計算により新たに設計・試作した磁

Table 2 Calculated results on concave surface

Sensor	Eddy current density	
	Maximum (A/m <sup>2</sup> )	Width (mm)
Conventional	1.9 x 10 <sup>5</sup>	4.6
Newly designed	5.4 x 10 <sup>5</sup>	2.7

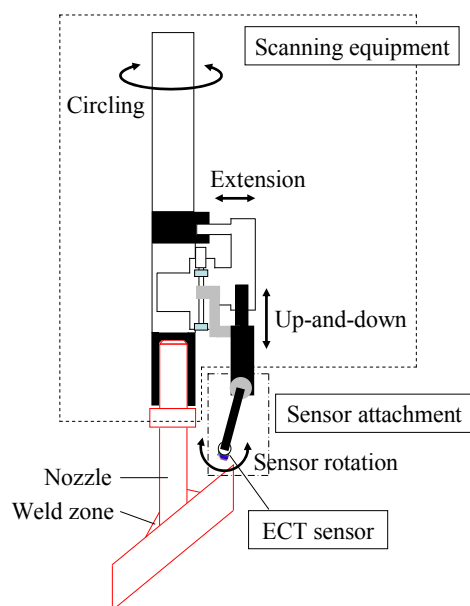


Fig.3 Schematic of sensor scanning equipment

性体近接配置ECTセンサの基本性能として、平面上での欠陥検出感度と検出波形幅、凹面上での欠陥検出感度、及び凸面上での欠陥検出感度のセンサ傾斜角依存性を試験により確認した。これらの基本性能確認試験ではECT探傷装置を用い、試験周波数500kHzの条件でクロスコイルを相互誘導標準比較方式で動作させて探傷を行い、得られた各性能を従来センサと比較した。また、基準感度と位相角の設定には深さ1mm、幅0.3mm、長さがセンサプローブ外形に対して十分に長い放電加工(EDM: Electro-Discharge Machining)スリットを付与した対比試験片[4]を用い、基準感度を0dB、位相角を90degに設定した。

#### 3.1.1 平面上での欠陥検出感度と検出波形幅の確認

シミュレーション計算では、新たに設計したECTセンサを曲率半径5mm凹面上に設置した場合、従来センサに比べて渦電流密度最大値が増加し、渦電流密度分布の広がりが減少した。この効果を確認するために、渦電流密度最大値が影響を与える欠陥検出感度と、渦電流密度分布の広がりが影響を与える欠陥検出波形の幅を確認した。本試験では、深さ0.5mm、長さ1.5mm、幅0.2mmのEDMスリットを付与したステンレス鋼(SUS316L)製の平面試験体を用い、リフトオフをパラメータとした。各パラメータ値は、従来センサと新たに設計したセンサを各々曲率半径5mm凹面上に設置した場合に生じるリフトオフの値とした。試験パラメータをtable 3に示す。本試験では、EDMスリット長さ方向に対して直交する方向にセンサを走査して探傷した。

#### 3.1.2 凹面上での欠陥検出感度の確認

BMI管台溶接部が有する狭隘部の代表として曲率半径5mm凹面上での欠陥検出感度を確認する試験を行った。試験体系をFig. 4に示す。試験体の材質はステンレス鋼(SUS316L)であり、外形を開き角90degのL字形状に、同図中の破線で示す部分を曲率半径5mmの凹面形状に機械加工した。本試験では、同図中に示す方向にセンサを走査しながら、長さ方向がセンサ走査方向と直交、及び平行となる様に凹面上に付与した深さ0.5mm、長さ1.5mm、幅0.2mmの2種類のEDMスリットを探傷した。

Table 3 Test parameters of flat surface specimen

Sensor	Lift-off(mm)
Conventional	0, 0.3, 1
Newly designed	0, 0.3, 1

### 3.1.3 凸面上での欠陥検出感度のセンサ傾斜角依存性

凸面上で、ECT センサと被検査面との傾斜角に対する欠陥検出感度の依存性を評価する試験を行った。凸面形状を模擬した試験体として Fig. 5 に示す直径 38 mm (曲率半径 19 mm) の Alloy 600 製円筒を用い、試験体外面に機械加工にて付与した深さ 0.5 mm、幅 0.4 mm の全周スリットを検出対象として ECT センサを同図中に示す方向に走査して探傷した。この時、センサを試験体の外表面に接触させ被検査面に対する傾斜角を  $0^\circ$  から  $3^\circ$  まで変化させてセンサ傾斜角と検出感度との関係を測定した。

### 3.2 BMI 模擬試験体探傷試験

BMI 管台狭隘部に対する ECT センサの探傷性能を評価するため、BMI 管台模擬試験体に駆動装置を含む ECT システムを設置して探傷試験を行った。BMI 管台模擬試験体の概略図を Fig. 6 に示す。試験体は炉底部の最外周部管台を模擬している。ノズルを炉底部に TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接した構造であり、ノズルと溶接金属の材質は Alloy 600 である。溶接部表面を機械加工で平滑にし、試験体山側の狭隘な溶接部には周方向に長さを持つ人工 SCC をノズル外面から 10mm の位置に付与した。この SCC を検出対象として、周方向長さ約 10 mm、径方向長さ約 6 mm の範囲でセンサを走査して探傷試験を行った。本探傷試験も基本性能確認試験と同様に ECT 探傷装置を用い、試験周波数 500 kHz の条件でクロスコイルを相互誘導標準比較方式で動作させた。基準感度と位相角の設定も基本性能確認試験と同様の手順で行った。

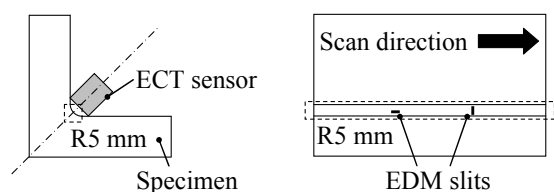


Fig.4 Experimental setup using concave specimen

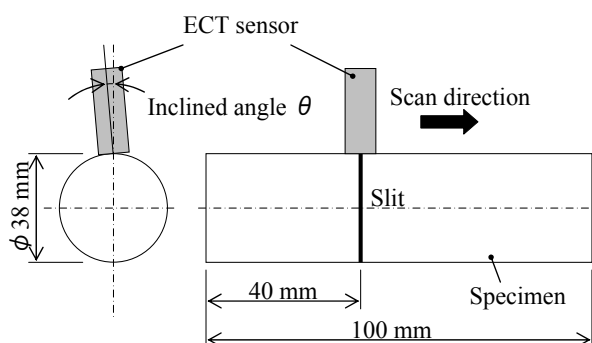


Fig.5 Experimental setup using convex specimen

## 4. 試験結果

### 4.1 基本性能確認試験

#### 4.1.1 平面上での欠陥検出感度と検出波形幅の確認

従来の ECT センサと新たに設計したセンサによる平面上での欠陥検出感度と検出波形幅の測定結果を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。ここでの欠陥検出感度は前述の対比試験片を用いて設定した感度を基準(0 dB)にした値である (以降同様)。また、本試験で得られた全振幅チャート上での EDM スリット指示波形の半値全幅(FWHM: Full Width at Half Maximum)を検出波形幅とした。

Table 2 に示す渦電流密度最大値のシミュレーション計算結果では、従来センサ (リフトオフ 1 mm)  $1.9 \times 10^5 \text{ A/m}^2$  に対して新設計センサ (リフトオフ 0.3 mm)  $5.4 \times 10^5 \text{ A/m}^2$  であり渦電流密度最大値が従来センサの 2.8 倍に増加した。この計算結果に対応する欠陥検出感度の測定結果(Fig. 7)は、従来センサ (リフトオフ 1 mm)  $-32.1 \text{ dB}$  に対して新設計センサ (リフトオフ 0.3 mm)  $-19.1 \text{ dB}$  であり欠陥検出感度が従来センサより 13.0 dB (4.5 倍) 増加し、渦電流密度最大値計算結果と同様に増加する傾向を示した。この結果から、曲率半径 5 mm 凹面上での探傷を想定した場合、新設計センサが従来センサより高感度な欠陥検出性能を有することが分かった。ここで、新設計センサ (リフトオフ 0.3 mm) での欠陥検出感度測定結果は渦電

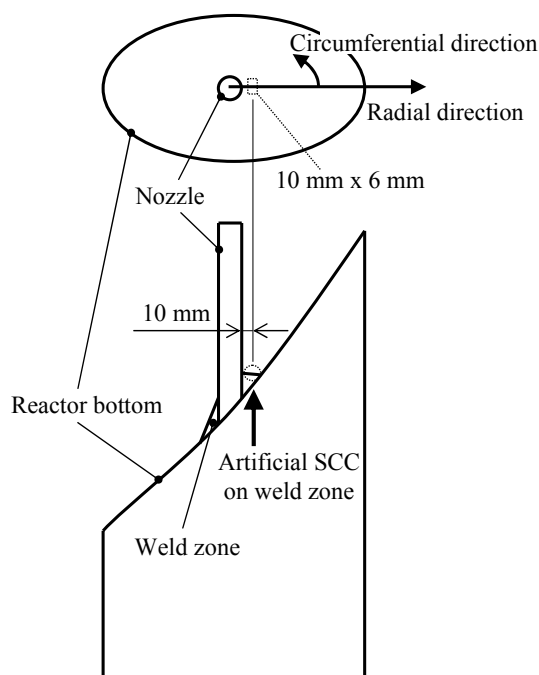


Fig.6 Schematic of BMI nozzle mock-up



流密度最大値計算結果より大きく増加した。ECT の欠陥検出感度は主に励磁コイルが誘起する渦電流の大きさと検出コイルでの鎖交磁束数とで決まる。本計算では、リフトオフの発生による検出コイルでの鎖交磁束数の減少を考慮していないため、これが計算結果と測定結果との差異要因のひとつになっていると考察する。

検出波形幅については、シミュレーション計算結果が示す従来センサ（リフトオフ 1 mm）4.6 mm、新設計センサ（リフトオフ 0.3 mm）2.7 mm に対して、測定結果(Fig. 8)は従来センサ（リフトオフ 1 mm）3.3 mm、新設計センサ（リフトオフ 0.3 mm）2.2 mm であり、渦電流密度分布半値全幅計算結果と同様に減少する傾向を示した。また、新設計センサは同一リフトオフ条件でも従来センサより狭い検出波形幅を示した。この結果から、新設計センサでは発生する磁場の広がりや抑制されていることを確認した。ここで、各センサ共に測定値は計算値よりも小さな値を示した。測定時、零点近傍におけるノイズ等の影響による検出波形の測定精度低下がこの要因のひとつと考察する。

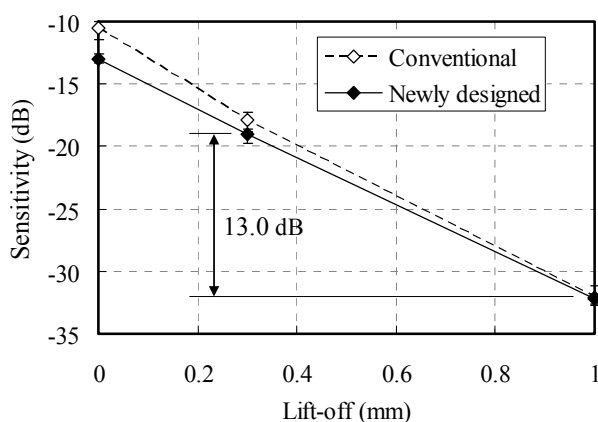


Fig.7 Measured sensitivity for EDM slit

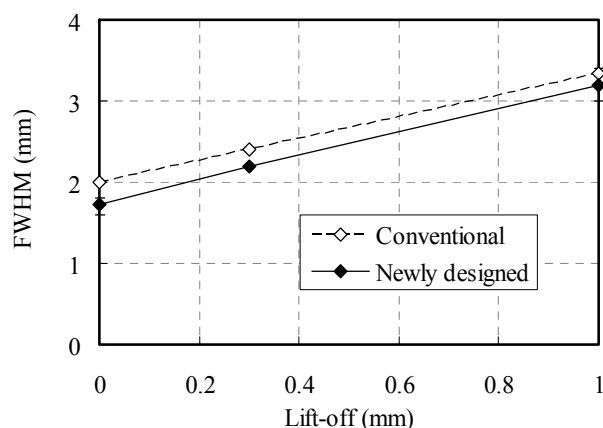


Fig.8 Measured waveform width for EDM slit

#### 4.1.2 凹面上での欠陥検出感度の確認

曲率半径 5 mm 凹面上に付与した EDM スリット検出感度の測定結果を Table 4 に示す。同表中の値は、Fig. 4 に示す 2 種類の欠陥を 5 回ずつ計 10 回探傷した時の平均値 A と標準偏差 S である。新設計センサでの感度平均値は従来センサより 15.0 dB (5.6 倍) 増加し、新設計センサが曲率半径 5 mm 凹面上での探傷に有効であることを確認した。この感度の増加分は、Fig. 7 に示す平面試験体での測定結果 (4.5 倍) とばらつき(2S)の範囲で一致した。この結果から、曲率半径の小さい凹面の探傷で生じる感度低下はリフトオフの影響が支配的であると評価する。

#### 4.1.3 凸面上での欠陥検出感度のセンサ傾斜角依存性

曲率半径 19 mm 凸面上に付与したスリットの探傷試験にて得られたセンサ傾斜角とスリット検出感度の関係を Fig. 9 に示す。新設計センサは 3 deg まで傾斜しても深さ 0.5 mm のスリットに対して -14 dB 以上の十分な感度を有し[4]、特に傾斜角の大きい領域で従来センサより感度が改善されていることが分かる。本結果から、磁場の広がりや抑える新設計センサがセンサ傾斜角に対する欠陥検出感度低下の抑制に効果的であることを確認した。

Table 4 Measured sensitivity on concave surface

Sensor	Sensitivity (dB)	
	Average A	Standard deviation S
Conventional	-31.2	0.4
Newly designed	-16.2	0.9

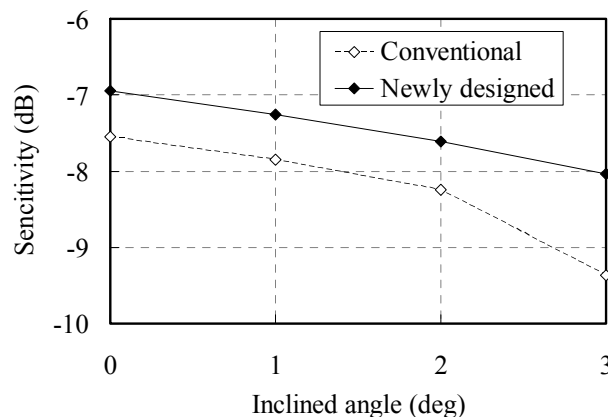


Fig.9 Experimental result of relationship between sensor inclined angle and sensitivity on convex surface

## 4.2 BMI 模擬試験体探傷試験

BMI 管台狭隘部に付与した SCC 周辺領域の探傷結果を Fig. 10 に示す。同図では SCC 付与部分に 2 箇所の高い指示信号が確認できる。事前に行った浸透探傷試験では本 SCC の指示長さが約 6 mm であったことから、SCC の深さは一定でなく、割れの中に 2 箇所深い部分が存在すると推察する。同図中の SCC による指示部分のリサージュ波形を Fig. 11 に示す。本波形は約 90 deg の位相角（横軸正方向が位相角 0 deg であり反時計回りに増加）を示していることから、Fig. 10 の高い指示信号が欠陥(SCC)によるものと評価できる。以上の結果から、開発した ECT システムによる BMI 管台狭隘部の SCC 探傷を実証した。

## 5. 結言

原子炉底部の BMI 管台向け ECT システムとして磁性体をコイルに密着させた小型（新設計）センサと PLP システムを利用したセンサ駆動装置を開発した。平面試験体

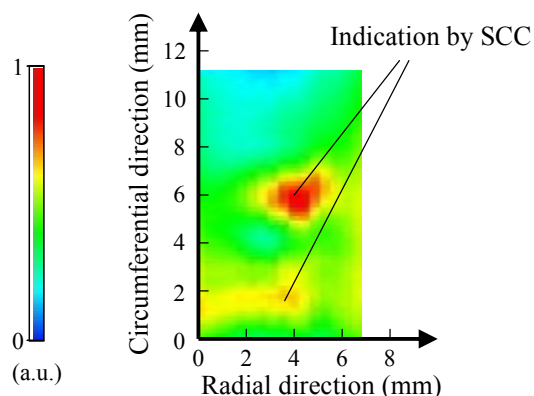


Fig.10 C scope image for SCC on BMI nozzle mock-up

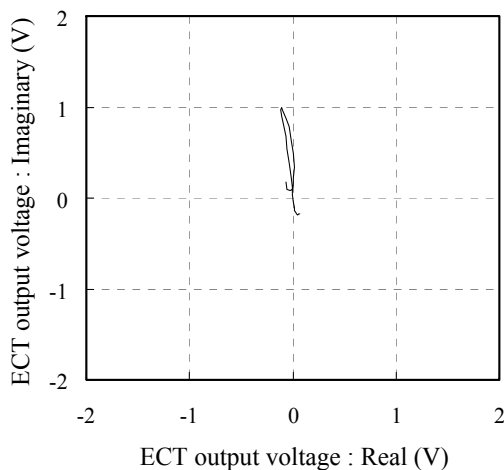


Fig.11 Lissajous curve for SCC on BMI nozzle mock-up

の探傷試験では、小型センサによるリフトオフの低減が高感度化に寄与することと、同センサでは発生する磁場の広がり抑制されていることを確認した。また、凹面試験体の探傷試験により高感度化を検証すると共に、凸面試験体の探傷試験により磁場の広がりを抑える新設計センサがセンサ傾斜角に対する欠陥検出感度低下の抑制に効果的であることを確認した。最後に、BMI 管台模擬試験体を用い、開発した ECT システムによる BMI 管台狭隘部の SCC 探傷を実証した。

## 参考文献

- [1] N. Kobayashi, T. Kasuya, S. Ueno, M. Ochiai, Y. Yuguchi, C. S. Wyffels, Z. Kuljis, D. Kurek, T. Nenno: "Utility Evaluation of Eddy Current Testing for Underwater Laser Beam Temperbead Welding", Proceedings of the 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Berlin, Germany, Sept. 29-Oct. 1, We.2.B.2. (2010)
- [2] 糟谷高志, 内一哲哉, 高木敏行, 黄皓宇: "ECT に基づくシュラウドの検査シミュレーション", 保全学, Vol. 3, No. 1, pp. 51-56 (2004)
- [3] S. Ueno, N. Kobayashi, T. Kasuya, M. Ochiai, Y. Yuguchi: "Defect Detectability of Eddy Current Testing for Underwater Laser Beam Welding", Proceedings of the 19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE19), Osaka, Japan, Oct. 24-25, ICONE19-43658 (2011)
- [4] "原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針 (原子力規格委員会編)", 日本電気協会, 東京, JEAG4217-2010 (2010)
- [5] "渦電流探傷試験Ⅲ", 日本非破壊検査協会, 東京 (2003)
- [6] I. Chida, T. Uehara, M. Yoda, H. Miyasaka, H. Kato: "Development of Portable Laser Peening Systems for Nuclear Power Reactors", Proceedings of the 2009 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'09), Tokyo, Japan, May 10-14, ICAPP09-9029 (2009)

(平成 25 年 11 月 2 日)