



原子炉容器上蓋管台 ECT 検査用の新しい薄型プローブの検証

Verification of new thin ECT probe for reactor vessel head nozzle

三菱重工業株式会社	難波	一成	Kazushige NAMBA	Non-Member
三菱重工業株式会社	中井	正義	Masayoshi NAKAI	Non-Member
三菱重工業株式会社	神納	健太郎	Kentaro JINNO	Non-Member
三菱重工業株式会社	山口	岳彦	Takehiko YAMAGUCHI	Non-Member
三菱重工業株式会社	熊谷	肇	Hajime KUMATANI	Non-Member
三菱重工業株式会社	井原	亮一	Ryoichi IHARA	Member
三菱重工業株式会社	川浪	精一	Seiichi KAWANAMI	Non-Member

The probe to be applied for the inner surface of the CRDM tubing having a narrow portion of the reactor vessel, however existing probe is not applicable to the minimum gap 1.5 mm of the CRDM tubing. It is necessary to study further thinning of the probe while maintaining sufficient detectability and flaw direction discrimination. Therefore, a new coil system using pancake coils was developed. As a result of a verification test, it was confirmed that an EDM flaw of 0.2 mm in length, 0.2 mm in width and 0.2 mm in depth could be detected and the flaw direction could be identified.

Keywords: vessel head nozzle, thinning of the probe, ECT, pancake coil

1. 緒言

原子炉容器上蓋管台については、1991年に仏国のブジェー3号機にてPWSCCによる一次冷却水の漏洩を経験して以来、米国でも同様の事象が報告されている。国内においても本事象を踏まえた水平展開として、Fig. 1(a)に示すような管台母材中のJ溶接部熱影響部に対して管台内面からのECT等の点検を実施するとともに、PWSCC耐性の高い690合金製の管台への取替を実施してきた^[1]。

上蓋管台の点検に使用するECTプローブは、遠隔検査装置によりFig. 1(b)に示すような管台内面とサーマルスリーブの隙間部に挿入される。しかしながら、この隙間部寸法は1.5~3.0mmと非常に狭隘であり、既存のプローブでは厚みが約2.0mmあるため、1.5mmの隙間を通過することができない。故に、隙間を広げながら検査する場合がある。今後同様の点検を実施する場合、隙間を広げることなく円滑にプローブ挿入を行うためには、プローブ本体の薄型化が求められる。これを踏まえ、ECTガイドライン^[2]に従ったセンサと同等の検出性及び方向識別性を持ちながら、1.5mmの隙間に対応できる薄型化を実現する新たなプローブの設計を進めてきた。

連絡先: 熊谷 肇, 〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町1-1-1 原子力セグメント 品質保証部 原子力サービス品質管理課, E-mail: hajime.kumatani.ue@nu.mhi.com

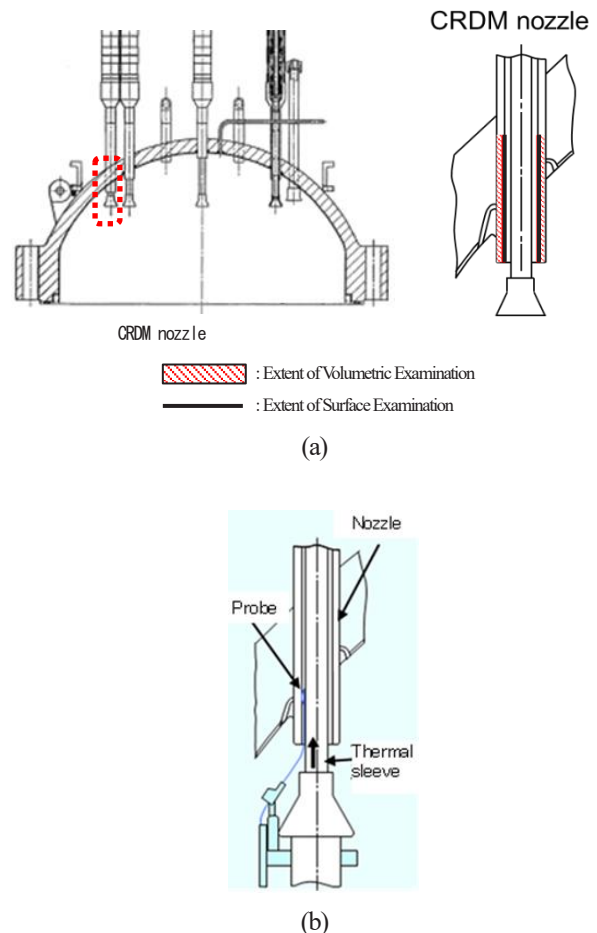


Fig. 1 Variation of vessel head nozzle and examination extent

本報では、1.5 mm の隙間に対応できる薄型化を実現するための設計に基づいた新型プローブを製作し、その検出性及び方向識別性について検証した結果を報告する。

2. 新型プローブ設計

1.5 mm の隙間に対応できる新しい薄型プローブのセンサ部(センサ+センサホルダ)設計について本項にまとめる。以降では、プローブの ECT 探傷子をセンサ、ECT 探傷子の励磁/検出部の構成単位をコイルと称す。

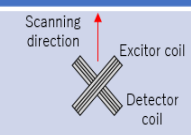
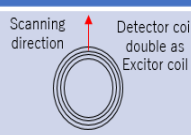
2.1 制約条件に関する検討

プローブの設計にあたり、センサ部に対する制約条件を検討した。Fig.1 (b)に示す通りプローブは管台内面に挿入して使用する。CRDM 管台内面に適用するプローブは内径部にサーマルスリーブが挿入されているため、サーマルスリーブ外面と管台内面間の約 1.5~3.0 mm の狭隘な隙間部にプローブを挿入する必要があることから、センサ部の厚みは 1.5 mm 以下とする必要がある。よって、センサ部の厚み目標値は、1.5 mm に挿入余裕を持たせた 1.2 mm と定めた。

2.2 センサの目標性能検討

本検査における対象きずとしては、Ni 基合金における一次系応力腐食割れ PWSCC を想定している。一方で、センサ部の厚み目標値を達成できる見込みのある薄型センサとしては一般的にはパンケーキコイルがあり、従来プローブでは、クロスコイルが使用されている。各センサを比較評価した結果を Table 1 に示す。

Table 1 Comparison of cross coil and pancake coil

Features of coil	Cross coil	Pancake coil
Appearance		
Detectability of SCC	○ Absolute mode (cross type)	× Absolute mode
Defect direction discrimination ability	○	-
Lift-off noise resistance	○	×
Coil thickness	× (≒1 mm)	○ (<1 mm)

Note) In this paper, we compared the two and evaluated the one with the better ability as "○", the opposite as "×" and the one without the ability as "-".

Table 1 に示す通り、パンケーキコイルはコイル厚みが 1 mm 未満と小さいが、単一使用では割れ検出性 (低 SN 比)、きず方向識別性及びリフトオフノイズ耐性が十分ではない。その反面、クロスコイルはコイルの厚みが 1 mm で薄型化に不向きであり、センサホルダを加味した著者らの検討では、センサ部の厚みを 1.2 mm とすることはできなかった。よって、パンケーキコイルの薄さとクロスコイルの検出性、きず方位識別性、リフトオフ耐性 (自己比較方式) といった利点を併せ持つことを目標性能として、新しいセンサ方式を検討した。

2.3 新しいセンサの検討

前述の目標性能を実現するため、以下の案を採用した。パンケーキコイルは単一使用で標準比較方式となるが、コイルを複数配置し自己比較方式とすることで、割れ検出に関する SN 比及びリフトオフノイズ耐性が向上することが知られている^[3]。そのため、パンケーキ型の検出コイル 2 個を平面上で斜めに配置し、その対角線と直交する方向へ励磁コイル 2 個を配置した、合計 4 個のパンケーキコイルで自己比較方式を実現するセンサとした。本センサであれば、向きが逆方向となる様に励磁電流を各励磁コイルに流すことで、斜め方向に渦電流を励起させることができ、周/軸きずをほぼ同等の感度で検出できる。また、きずの周軸方向に応じて出力されるリサージュ波形の向きが、波形の原点を中心に逆転するように調整することで、きず方向を識別できる。ここで、センサが管軸方向に走査されることから、軸きずはセンサの走査方向に平行となるきずを指し、周きずは走査方向に直交するきずを指す。励磁コイルと検出コイルの配置及び励起される渦電流のイメージを Fig. 2 に示す。

2.4 シミュレーションによる機能確認

本センサ設計での機能実現を確認するため、Fig. 3 の様に厚さ 1.0 mm のインコネル 690 平板に対し 6.7 mm (長さ) × 0.2 mm (幅) × 1.0 mm (深さ) の軸貫通きず及び周貫通き

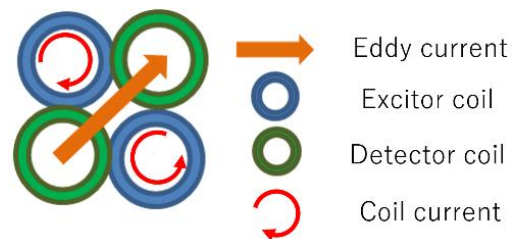


Fig. 2 Image of coil arrangement and eddy current

ずを付与したモデルを用いて有限要素法によるシミュレーションを行った。このシミュレーションでは簡易モデルにて、“周/軸きずそれぞれを同程度の感度で確認できるか”、“きず方向に応じてリサージュ波形の向きが逆転するか”の確認をクロスコイルモデルと比較する形で行った。なお、条件として導体部を、寸法：20.0mm(軸)×18.0mm(周)×1.0mm(厚さ)、分割数：12(軸)×9(周)×1(厚さ)、コイルモデルを、形状：矩形、励磁/検出コイル寸法：2.0mm×2.0mm×0.3mmとし、クロスコイルモデルは自己誘導方式の外径3.0mmとした。その結果、Fig.4の通り周/軸きずそれぞれを同程度の感度で検出でき、リサージュ波形で正負が180°逆転した位相を得ることが確認できた。

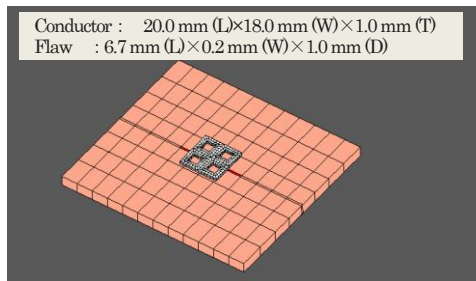


Fig. 3 Simulation model of new type pancake coils

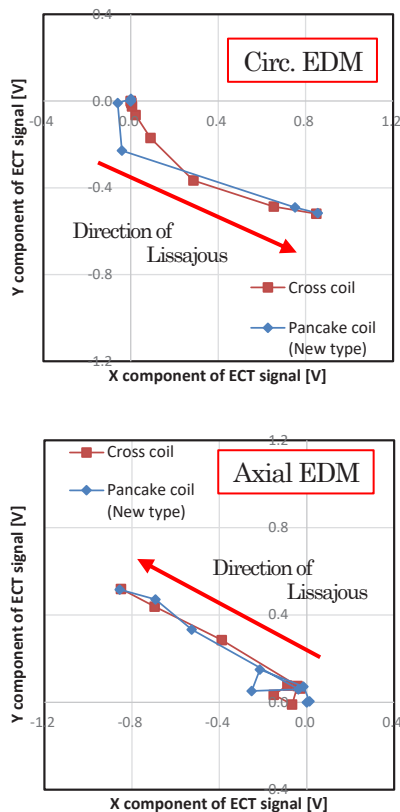


Fig. 4 Simulation results

2.5 プローブ構成部品の薄型化

センサ部の厚みを1.2mmにすることを目標にプローブを製作するにあたり、センサ部を含めた構成部品も薄型化し、信号ケーブルも小径化した。今回対象となるCRDM管台内面に適用するプローブについては、2.3項及び2.4項で検討したパンケーキコイルからなる新型センサを搭載する必要がある。これらのセンサを含むセンサホルダの薄型化が次の課題となり、単純にセンサを配置するのみでは目標厚みを達成することが出来ない。そこで、センサホルダについては厚み低減のため、センサホルダへセンサを埋め込む方式とした。また、ECTコイルは、励磁・検出共に製作性の観点から形状を円形としてφ2.0mmにし、高感度を得るため検討構造上で最大となるよう厚さを0.5mmとした。この結果、センサを含めたセンサホルダ全体の厚みについて、目標値である1.2mmを達成することが出来た。Fig.5にセンサ配置前後のセンサホルダ外観を示し、Fig.6に薄型化、小径化を行った結果を示す。

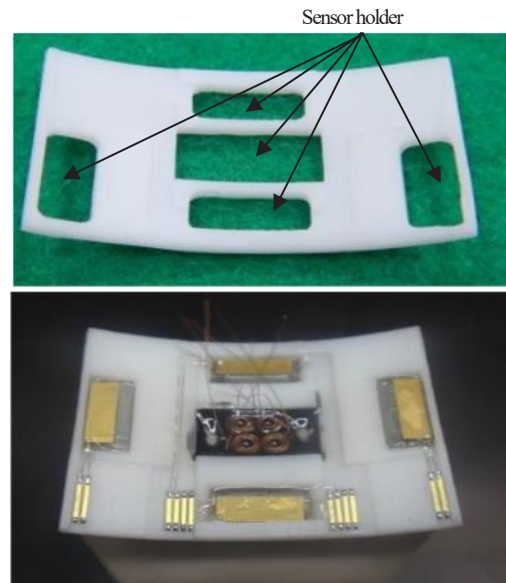


Fig. 5 Appearance of sensor holder before and after embedding sensors

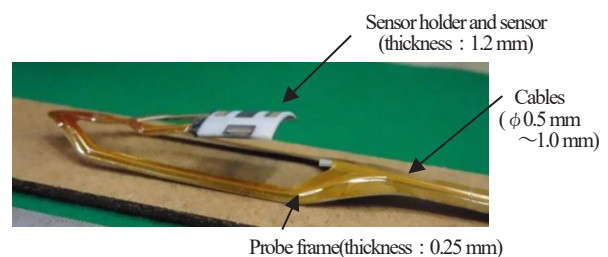


Fig. 6 Appearance of the probe for CRDM nozzle

2.6 扱い性向上設計

次に、良好なデータを採取するためには、プローブを管台内面に安定して做わせる必要がある。そこで、プローブ走査時におけるセンサホルダの姿勢を安定させるため、センサホルダの両端を支持する形状としつつ、センサ部押し付けは板バネ構造を採用することとした。これにより、薄型化を実現しながら十分な押しつけ力と安定性を得ることができ、安定してセンサ部を做わせることを実現した。Fig.7にセンサ部拡大図を示す。

3. 性能検証試験

前章で述べた設計に基づく新型プローブを製作したうえで、その性能検証のための試験体製作及びデータ採取を実施した。

3.1 試験体製作

クロスコイルを用いて従来プローブで行われた試験⁴⁾では、EDM スリットを使用した検出性の確認がなされ、深さ 0.2 mm 以上の EDM スリットが検出可能であると確認されている。また、同時に SCC(付与実績：深さ 1.3～5.5 mm)が検出可能であることも確認された。今回の試験では、従来プローブで行われた試験⁴⁾と同等の試験を行うことで検出性の確認をすることとし、従来プローブで行われた試験⁴⁾で使用されたきずと同じサイズの EDM スリットを試験体に付与することとした。プローブ挿入性及

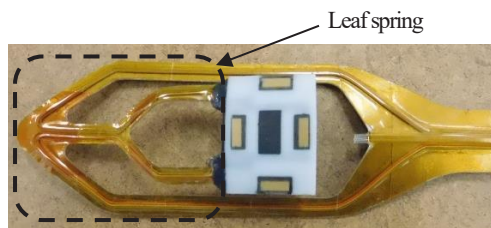


Fig. 7 Applying leaf spring for pressing probe

Table 2 Specification of EDM specimen

Nozzle type	OD thickness (mm)	Length (mm)	Flaw position	Flaw direction	Flaw size (Length×Width×Depth) (mm)
CRDM/TC nozzle	φ 102 t16	320	Inner surface	Circ.	0.2×0.2×0.2, 2.0×0.2×0.5, 3.0×0.2×1.0, 6.0×0.2×2.0, 9.0×0.2×3.0, 15.0×0.3×5.0,
				Axial	21.0×0.3×7.0, 30.0×0.3×10.0

び扱い性確認を行うため、試験体の寸法、曲率及び形状については実機管台と同一とし、EDM スリット寸法については、深さを 0.2～10.0 mm、長さを 2.0～30.0 mm とした。ただし、深さ 1.0 mm 以上の EDM スリットについてはアスペクト比(深さ：長さ)を 1：3 として製作した。EDM 試験体の仕様を Table 2 に示す。

3.2 データ採取

データ採取にあたっては、Fig. 8 に示すように EDM 試験体にサーマルスリーブ模擬管を挿入して狭隘部(1.5 mm)を再現した。試験周波数は ECT ガイドライン²⁾を参考に、50 kHz、100 kHz、200 kHz、400 kHz とし、従来プローブで行われた試験⁴⁾のクロスコイルに合わせるため、400 kHz をメイン周波数とした。また、校正条件は、内面周方向の幅 0.15 mm、長さ 6.4 mm、深さ 1.0 mm の EDM スリットから得られる信号を感度：3 V、位相：165° で設定した。

EDM 試験体にてデータを採取した結果の波形例を Fig. 9 及び Fig. 10 に示す。Fig. 9 は 0.2 mm 深さの波形例であり、(a)が周方向きず、(b)が軸方向きずである。この結果を見ると、周/軸のきずでリサージュ波形の方向が正負で逆になっていることが確認できる。これは、シミュレーションで想定した通りの結果である。また、Fig. 10 は EDM 試験体を探傷した結果のうち、深さ 0.2～3.0 mm を代表に示したものであり、(a)が周方向きず、(b)が軸方向きずの結果である。この結果から、プローブ走査による、ガタ信号やリフトオフノイズ信号が生じることなく、EDM スリットからの信号を検出できていることがわかる。また、0.2 mm 深さの EDM スリットは、長さ幅を踏まえても最小の欠損体積であるから、最も検出困難なスリットであるが、このスリットからも問題なく検出できていることが確認できる。

以上の結果より、製作したプローブは目標のプローブ挿入性と扱い性及び周/軸きず検出性を有していると評価できる。

4. 結言

原子炉容器上蓋の CRDM 管台内面狭隘部に適用する新しい薄型プローブを製作し、その検出性及び方向識別性について検証した。

新型プローブでは、センサ部に 4 個のパンケーキコイルを使用した斜め励磁の自己比較方式のセンサを採用す

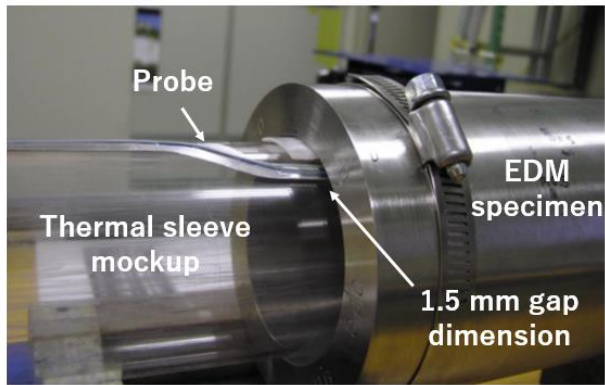


Fig. 8 Data acquisition situation

るとともに、センサホルダにセンサを埋め込む方式を採用して、1.5 mm の隙間に対応できる薄型化を実現した。また、センサ倣いの観点では、センサ押しつけ機構の形状やセンサホルダ保持の工夫により、プローブ走査による、ガタ信号やリフトオフノイズの生じない良好な倣い性を実現した。

これらの設計による新型プローブについて性能検証を実施した結果、CRDM 管台の狭隘部に対する検査用プローブとして、十分な挿入性、きず検出性及びきず方向識別性を持ったプローブを完成させることができた。

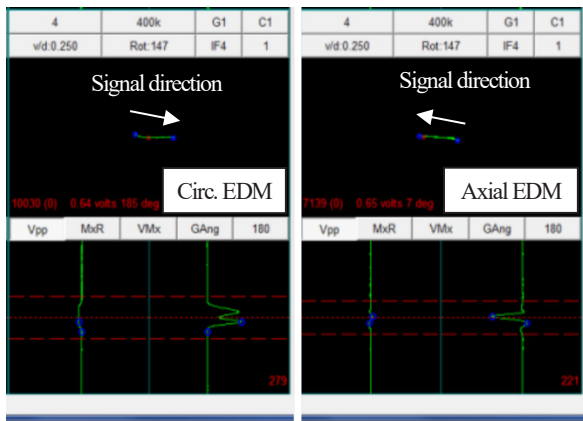
謝辞

本報における新型プローブの製作検証は、電力共同研究として実施した。関西電力(株)、北海道電力(株)、日本原子力発電(株)、四国電力(株)、九州電力(株)の関係各位に対し感謝の意を表す。

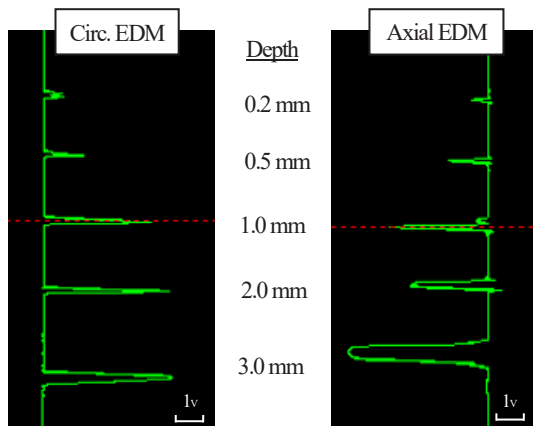
参考文献

- [1] 伊藤肇, 亀山雅司「原子炉容器上蓋貫通部の PWSCC に関する動向について」日本保全学会誌, 保全学 Vol.4-No. 1, pp.13-17, 2005 年度
- [2] 原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針 JEAG4217-2018, 付属書 A-4~A-5, 日本電気協会・原子力規制委員会
- [3] 渦電流探傷試験 II 2016, pp. 69~72, 日本非破壊検査協会
- [4] 容器貫通部狭隘部の非破壊検査技術実証に関する事業報告書: 総括版, 原子力安全基盤機構, 平成 21 年度

(2022 年 5 月 23 日受理, 2022 年 11 月 2 日採択)



(a) (b)
Fig. 9 Example of ECT data result
(0.2 mm depth, 400 kHz)



(a) (b)
Fig. 10 Example of ECT data result
(0.2~3.0 mm depth, 400 kHz)