

スマートアレイプローブの開発

Development of Smart Array Probe

(株) 原子力エンジニアリング 前田 功太郎 K. MAEDA、下根 純理 J. SHIMONE
布子 章 A. NUNOKO、赤川 純一 J. AKAGAWA、永田 泰章 Y. NAGATA、
泉田 博幸 H. IZUMIDA、原田 豊 Y. HARADA (Member)

In 1998, NEL developed X-probe in cooperation with foreign firms. Recently NEL has developed the transmit-receive type array probe characterized with a significantly improved resolution for circumferential cracks. The advanced probe, called Smart Array Probe, has been developed based on the result of detailed numerical simulation.

The doubled channels in the circumferential mode have greatly improved the circumferential resolution of Smart Array Probe. With all the circumferential mode channels on the same circle, there is no need for axial position correction. In addition, the detectability both in the axial and circumferential modes has been improved by putting receivers close to transmitters.

This report describes the result of numerical simulation for Smart Array Probe and the results of detectability comparison tests using various test specimens.

Keywords: Nondestructive Testing, Steam Generator, Eddy Current Testing, Transmit-Receive Type Probe, Array Probe, Numerical Solution, Stress Corrosion Crack

1. 緒言

加圧水型原子力発電所 (PWR プラント) 内の蒸気発生器 (SG) 伝熱管の供用期間中検査は渦流探傷 (ECT) で行われており、通常ポビン型プローブが使用されている。当社では次世代定期検査用プローブとして、きざ検出能及び分解能を向上させたアレイ型プローブ「Xプローブ」を海外メーカーと共同で1998年に開発した[1]-[6]。これはパンケーキコイルを円周方向に16個、軸方向に3段の計48個配置したもので、プローブヘッド内部のASICにより励磁/検出コイルを順次選択して管の全周を網羅する。Fig. 1にXプローブの検出原理を示す。本プローブは一度の走査で軸方向きざ検出モード (軸モード)、周方向きざ検出モード (周モード) の両データを採取できる。またEPRI (米国電力研究所) の認証を取得しており、他の伝熱管サイズにも展開されていることから、米国・カナダを中心に詳細検査用プローブとして広く使われている[7],[8]。国内においても2003年に(財)発電設備技術検査協会による確性試験において技術的な妥当性について確認されており、(社)日本電気協会 電気技術指針 JEAG4208

—2005に新型プローブとして追加記載されている。

しかしながら、Xプローブは軸モード・周モード各々伝熱管一周あたり32チャンネルと高分解能であるものの、周モードはC列のデータとB列のデータ間にギャップがあり、データ解析時の煩雑さから実質16チャンネルとして使われることが多い。それ故にチャンネル間の感度低下が若干あるのが実状である。

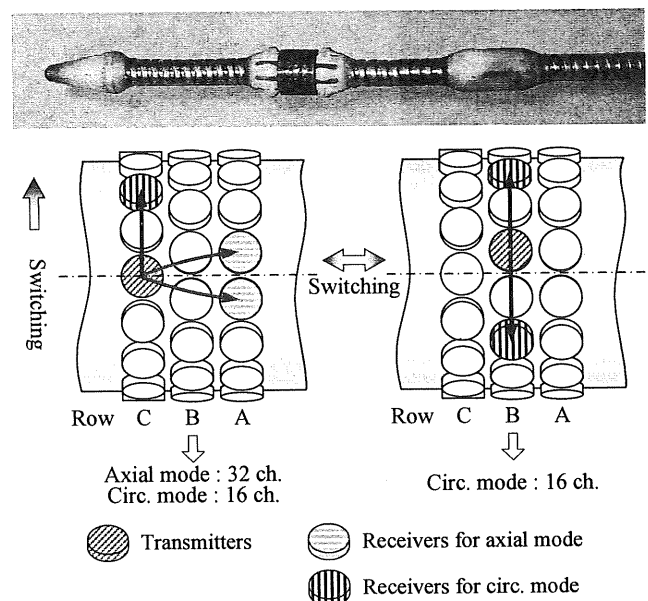


Fig. 1 Detection Principle of X-probe

連絡先:前田功太郎、〒550-0001 大阪市西区土佐堀
1-3-7、(株)原子力エンジニアリング、
電話: 06-6446-9363、e-mail:kmaeda@neltd.co.jp

本研究では、数値解析結果を基に周方向きず検出能及び分解能を大幅に改善したスマートアレイプローブを開発・製作し、様々な性能評価を行った。

2. スマートアレイプローブの開発と特長

2.1 概要

スマートアレイプローブはXプローブとコイル配置はほぼ同等ながら励磁・検出コイルの組み合わせを見直すことにより、周モード32チャンネルを同一円周上に配置し、周方向きず検出能及び分解能を大幅に向上させたプローブである。Fig. 2 にスマートアレイプローブの検出原理を示す。一般に励磁・検出コイルペアときず方向が一致しないときず検出感度は低下するが[9]、Fig. 2 に示すコイルペアを選択することによりコイル同士が従来よりも若干近付くため、結果として感度は僅かながら向上する。なお、軸モードはXプローブと同様だが、こちらもコイル同士を若干近付けることにより感度向上を図っている。

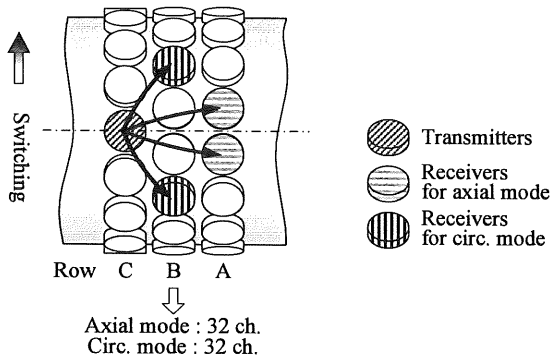


Fig. 2 Detection Principle of Smart Array Probe

2.2 特長

スマートアレイプローブの特長を以下に示す。

第一に、周モードのチャンネル数が倍増したことにより分解能が上がり、チャンネル間の感度低下量が緩和された点である。Fig. 3 に両プローブの外面周方向EDMノッチ信号の数値解析結果を示す。数値解析は変形磁気ベクトルポテンシャル (Ar) 法に辺要素有限要素法を適用したコードを使用した[10]。この結果からXプローブではピーク感度に対する最小感度が66%だっ

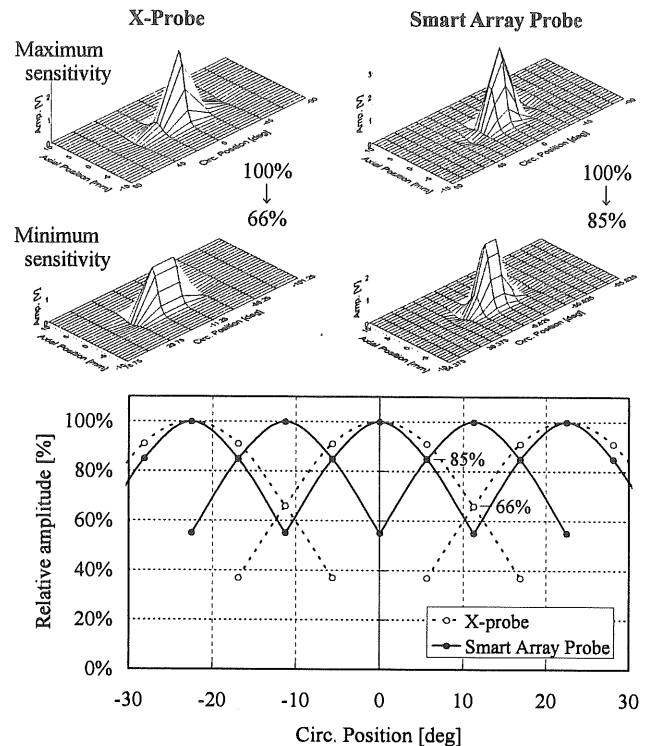
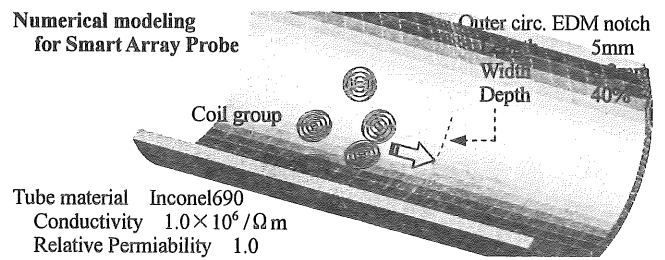


Fig. 3 Sensitivity variation (Circ. mode @300kHz)

たものが、スマートアレイプローブでは85%と大幅に改善されている。信号の感度変動量が小さい故、感度による評価精度も向上していると言える。

第二に、周モードの32チャンネル全てが同一円周上に存在するため、軸方向位置の補正が不要となった点である。Xプローブは周モードのデータ間にギャップが存在するため、32チャンネルとして使用するには軸方向位置の補正が必要となる。それに対してスマートアレイプローブは軸モード同様、軸方向位置の補正が全く不要である。Fig. 4 に両プローブによる校正試験片の探傷結果を示す。Xプローブの波形に対しては線形補正を実施しているが、僅かなプローブの速度変化等によってデータにずれが生じているのがわかる。これはデータ解析に影響を与える恐れがある。

第三に、励磁・検出コイルを若干近付けることにより、軸モード・周モードともにきずに対する感度が向

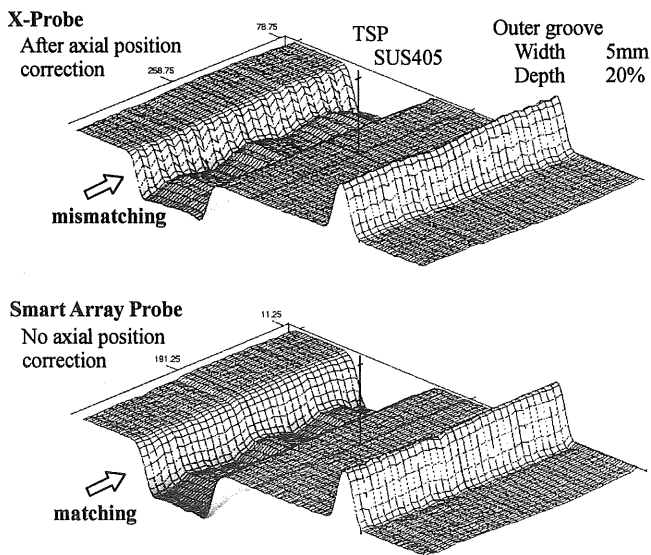


Fig. 4 Calibration tube signals (Circ. mode @300kHz)

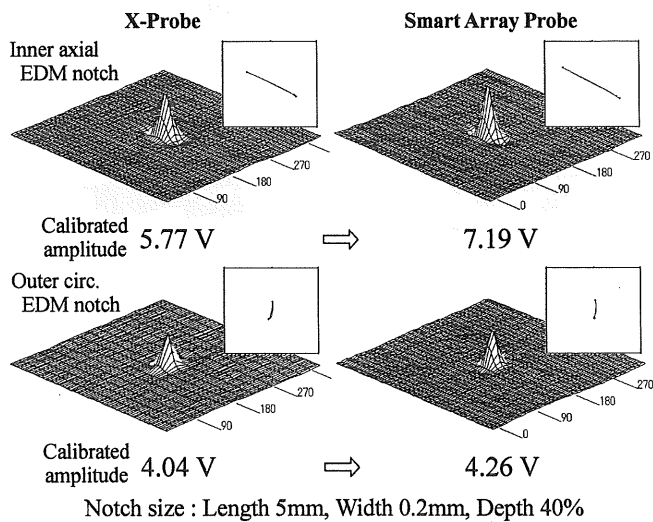


Fig. 5 EDM notch signals (@ 300kHz)

上した点である。Fig. 5 に両プローブの内面軸及び外面周方向 EDM ノッチの探傷結果を示す。軸モードで約 1.25 倍、周モードで約 1.05 倍感度が向上している。ノイズレベルはほぼ同等であることから SN 比も向上しており、これは微小なきずを検出できる可能性が高くなっていることを示唆している。

第四に、軸方向ピッチを細かく探傷できる点である。伝熱管一周のデータを採取するのに X プローブではチャンネル間の干渉を避けるために多くの時間を要するが、スマートアレイプローブでは干渉の懸念がないため、その 2/3 の時間で済む。従って同一時間の間に単純計算で 1.5 倍細かくデータを採取することが可能で

ある。もしくは軸方向ピッチを変更せずに 1.5 倍の速度でプローブを走査することが可能である。

第五に、回路構成が比較的単純である点である。X プローブは励磁/検出共用のコイルがあるために回路構成が複雑であり、かつ多チャンネルの特殊なマルチプレクサが必要である。一方スマートアレイプローブは励磁/検出コイルが明確に分かれているので回路構成が比較的単純である。また市販の小型マルチプレクサが利用でき、そのままプローブヘッド内に格納することが可能である。

第六に、きず信号波形が X プローブと同等である点である。これはデータ解析時に各種信号に対する従来の知見がそのまま踏襲できるということで重要である。Fig. 6 に両プローブによる校正試験片の探傷結果を示す。X プローブでは拡張管境界信号（リフトオフ信号）を位相校正に、外面全周溝信号を感度校正に使用すが、スマートアレイプローブも波形はほぼ同じであることから同様の校正方法が適用可能である。また、他のきず信号についても、Fig. 5 に示す様に感度には差があるものの波形は同等であり、従来の解析手法がそのまま適用可能である。

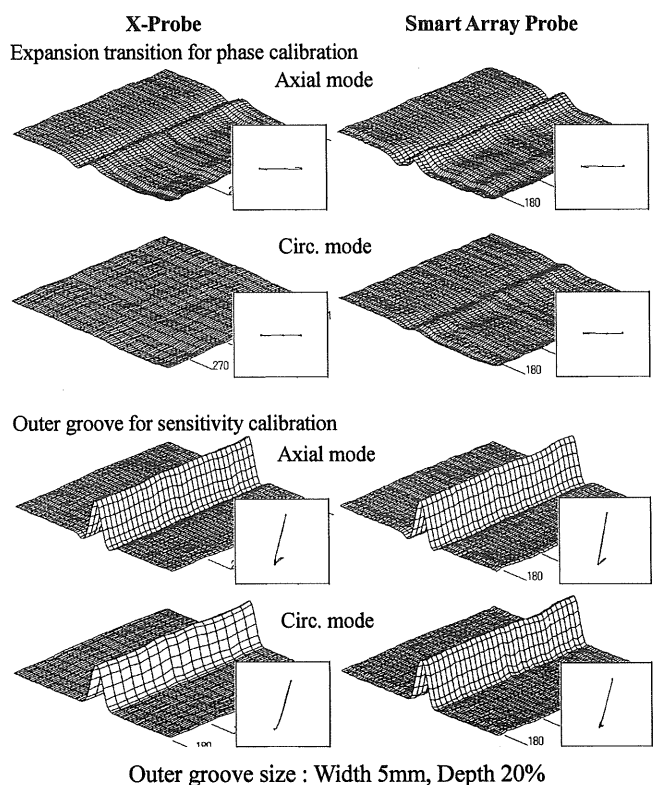


Fig. 6 Calibration tube signals (@ 300kHz)

3. 実機模擬 SCC 試験片の探傷結果

実際に製作したスマートアレイプローブを使用して、人工の応力腐食割れを付与した試験片（SCC 試験片）のきず検出性確認試験を行った。SCC 試験片はインコネル 600 製の伝熱管に、きず方向に応じた応力を付加した状態で腐食液に浸漬することにより製作した。また拡管部及び拡管境界部 SCC を模擬した試験片は応力を付加する前に拡管加工を施し、探傷時には炭素鋼製の模擬管板を装着して探傷を行った。Fig. 7 に試験体系を示す。探傷には米国 Westinghouse 社製のプッシャー一体型探傷器である OMNI-200 を使用した。この探傷器は時分割探傷及び多周波同時探傷が可能であり、今回スマートアレイプローブでの探傷を行うにあたり、Westinghouse 社と共同でプローブアダプタを開発した。またデータ解析には自社開発の解析ソフトウェアを使用した。

探傷後、SCC 試験片を破壊してきず形状を確認した。Fig. 8 に試験結果を示す。最も浅いきずである、最大深さ 29%（約 0.37mm）の拡管境界部内面軸方向 SCC を含め、通常ポピン型プローブでは検出が困難である拡管部及び拡管境界部の SCC についても有効であることを確認できた。

4. 結言

- 1) 軸方向きずのみならず周方向きずに対しても高い検出能及び分解能を持ったスマートアレイプローブを、数値解析結果を基に開発・製作した。
- 2) スマートアレイプローブは既存の X プローブを上回る特長を多数有していることを、性能評価試験を通して実証した。
- 3) SCC 試験片を製作し、その検出性について調べたところ、十分な検出能を有していることを確認した。

参考文献

[1] G. Lafontaine, F. Hardy, R. Samson, "New Generation ECT Array Probe and System as High Speed Alternative to Rotating Probes", 18th Annual EPRI Steam Generator NDE Workshop, 1999
 [2] Y. Harada, K. Maeda, J. Shimone, Y. Kishi, "The Results of Comparative Tests for a New High Performance Multi Array Probe", 18th Annual EPRI Steam Generator

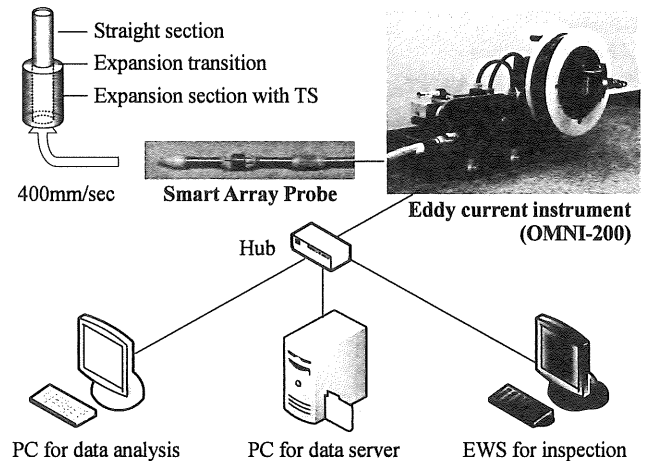


Fig. 7 Equipments for SCC detection exam.

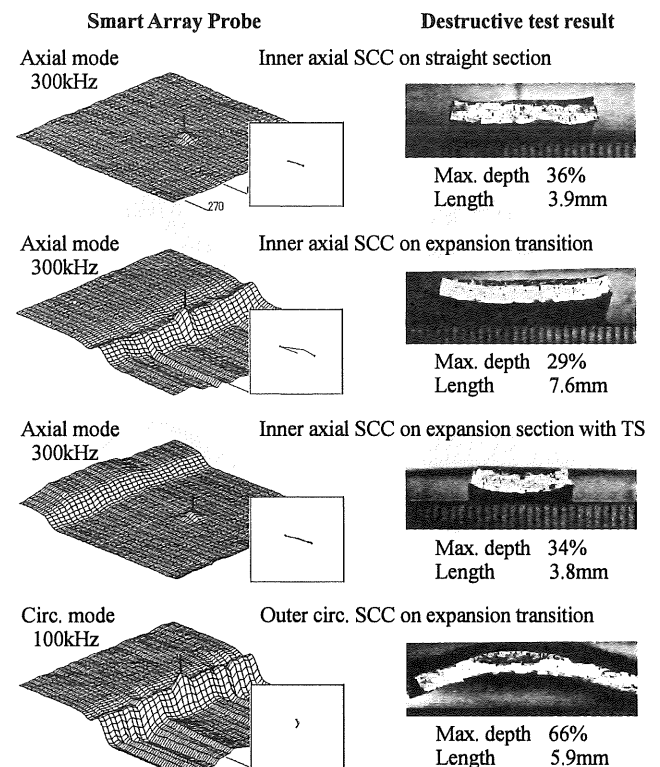


Fig. 8 Artificial SCC signals and destructive test results

NDE Workshop, 1999
 [3] Y. Harada, K. Maeda, J. Shimone, Y. Kishi, "Field Experience and Detectability Test of High Performance ECT Array X-probe in Japan", 19th Annual EPRI Steam Generator NDE Workshop, 2000
 [4] K. Maeda, Y. Harada, J. Shimone, Y. Kishi, "New High Performance ECT Array Probe for Steam Generator

- Tubes”, 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 2000
- [5] Y. Nagata, H. Sumikura, Y. Harada, R. Murakami, “Automated Inspection and Analysis System for High Performance ECT Array (X) Probe”, 21st Annual EPRI Steam Generator NDE Workshop, 2002
- [6] T. Matsunaga, T. Sera, K. Maeda, J. Shimone, Y. Nagata, S. Ninomiya, R. Katsumata, H. Izumida, Y. Harada, R. Murakami, “Demonstration of X-probe including Row 1 U-bend probe in Japan”, 22nd Annual EPRI Steam Generator NDE Workshop, 2003
- [7] J. Renaud, C. Fogal, M. Klatt, F. Hardy, G. Lafontaine, “The Year in Review – Qualification and Field Trial Experiences form the Fall 2000/Spring 2001 Inspection Seasons”, 20th Annual EPRI Steam Generator NDE Workshop, 2001
- [8] G. Lafontaine, M. Klatt, J. Renaud, F. Hardy, C. Fogal, “X-probe Steam Generator Inspection Device”, 3rd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 2001
- [9] L.S. Obrutsky, B. Lepine, J. Lu, R. Cassidy and J. Carter, “Eddy Current Technology for Heat Exchanger and Steam Generator Tube Inspection”, Proceedings of the 16th World Conference in Nondestructive Testing, 2004
- [10] 福富 広幸、高木 敏行、谷 順二、下根 純理、原田 豊、 “辺要素有限要素法による電磁界数値解析法の開発と渦流探傷試験への応用”、東北大学流体科学研究所報告 第8巻、1997、pp.91-105.