

スマートアレイプローブの開発と実機への適用性

Development and Field Practical Performance of Smart Array Probe

㈱原子力エンジニアリング	前田 功太郎	Kotaro MAEDA	
	下根 純理	Junri SHIMONE	
	赤川 純一	Junichi AKAGAWA	
	永田 泰章	Yasuyuki NAGATA	
	原田 豊	Yutaka HARADA	Member
関西電力株式会社	瀬良 健彦	Takehiko SERA	Member
	平野 伸朗	Shinro HIRANO	Member

In 1999, NEL developed the transmit-receive type ECT array probe for steam generator (SG) tubing, called "X-probe", in cooperation with foreign firms. Recently NEL has developed the advanced ECT array probe, "Smart Array Probe", characterized with a significantly improved resolution for circumferential cracks. 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 of inspection data.

This report describes both the field practical performance and the compliance assessment to a Japanese SG-ECT guideline "JEAG4208" of Smart Array ECT System, composed of Smart Array Probe, pusher-in-tester "OMNI-200", and NEL's ECT Analysis System.

Keywords: Nondestructive Testing, Steam Generator, Eddy Current Testing, Transmit-Receive Type Probe, Array Probe, JEAG4208, Stress Corrosion Cracking

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、ボビン型プローブの一種である DF プローブが使用されている。著者らは次世代定期検査 用プローブとして、きず検出能及び分解能を向上させ たアレイ型プローブ「全長用 X プローブ」を海外メー カーと共同で1999年に開発した[1]-[5]。これは伝熱管番 地 Y4 列以上の伝熱管全長及び Y1~3 列の伝熱管半長 (直管・管板) 部探傷用のプローブであり、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、プローブヘッド内蔵の ASIC (特定用途 向け IC)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 に全長用 X プローブの励磁/ 検出コイルの切換パターンを示す。本プローブは一度 の走査で軸方向きず検出モード(軸モード)、周方向き ず検出モード(周モード)の両データを採取できる。

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

また、2002 年には Y1~3 列の伝熱管小曲げ U ベン ド部探傷のために形状を特化した「U ベンド用 X プロ ーブ」を開発した^[6]。これはパンケーキコイルを円周 方向に 16 個、軸方向に 2 段の計 32 個配置したもので ある。Fig. 2 に U ベンド用 X プローブの切換パターン を示す。両プローブとも 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]。

国内においても 2003 年に(財)発電設備技術検査協 会内に設置された「蒸気発生器伝熱管体積検査用新型 ECT システム(X プローブ ECT システム)確性試験委 員会(以下、確性試験委員会)」において米国 Zetec 社 製探傷器「TC7700」、解析ソフト「ECT 解析システム」 とともに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(以 下、JEAG4208)に追加記載されている。

しかしながら、全長用 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列から得られるデータと B 列のデータ間にあるギャップを事前に調整する等の



処理(軸方向位置の補正)が必要である。この結果、 走査速度の僅かな変動の影響を受けてしまうことから 実質16チャンネルとして使われることが多い。また、 Uベンド用XプローブではそもそもB列が存在しない ため周モードは16チャンネルで使わざるを得ない。そ れ故に両プローブとも周モードについてはチャンネル 間の感度低下が若干あるのが実状である。

そこで著者らはコイル切換パターンを Fig. 3 の様に 見直して周モードのきず分解能をさらに向上させた全 長用/Uベンド用スマートアレイプローブを2007年に 開発・製作した^{[8],[9]}。また、米国 Westinghouse 社が開発



(a) Appearance (for Full-length)



(b) Appearance (for Small Radius U-bend)



Fig. 3 Smart Array Probes

した探傷器「OMNI-200」、及び確性試験委員会におい て既に技術的な妥当性の確認が為されている解析ソフ ト「ECT 解析システム」と本プローブを組み合わせた 「スマートアレイ ECT システム^{[10], [11]}」について、そ の実用性確認及び JEAG4208 一般要求事項への適合性 確認を行った。

2. スマートアレイECTシステム

2.1 スマートアレイプローブ

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/検出コイルの切換パターンを 見直すことにより、周モード全32チャンネルを同一円 周上に配置し、周方向きずの分解能を向上させたプロ ーブである。Fig.3に示す周モードの励磁/検出コイル のペアは周方向きずと方向が一致しないため、きず検 出感度の低下が懸念されるが^[12]、コイル同士が若干近 付くため感度の低下分を補うことができ、Fig.4の放電 加工(EDM)による模擬きずの探傷結果に示す様に総 じてほぼ同等の感度となる。また、全32チャンネルが 同一円周上に存在することから、データの軸方向位置 の補正を必要としない。なお、軸モードの励磁/検出



Target Defect : Outer Circumferential EDM NotchDefect Size : Length 5mm, Width 0.2mm, Depth 40%

Fig. 4 EDM Notch Signals (X-probe vs. Smart Array Probe)

コイルのペアは X プローブと同じであり、きず検出感 度も同等である。プローブの仕様比較表を Table 1 に示 す。

2.2 探傷器OMN I-200

OMNI-200 は米国 Westinghouse 社が開発したプッシ ャーー体型のデジタル探傷器である。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る。探傷器は プッシャーリールの内部に格納されており、リールと ともに回転する。そのためプローブからのアナログ信 号は回転部分を経由することなくデジタル信号に変換



Fig. 5 OMNI-200 (Tester-in-pusher)

されるため耐ノイズ性に優れ、かつケーブルの敷設や 設置にかかる作業量の軽減を図ることができる。また OMNI-200 は DF プローブをはじめ、上記 X プローブ やスマートアレイプローブでの探傷も可能であり、国 内実機においては 2009 年より DF プローブによる定期 事業者検査に使用されている。OMNI-200 の外観を Fig. 5 に、仕様比較表を Table 2 に示す。

2.3 ECT解析システム

X プローブやスマートアレイプローブ等のアレイ型 プローブによる検査は、高速かつ高精度故に膨大な量

~								
項	 目		プローブ	Xプローブ	スマートアレイ プローブ			
	プロー	ブ方コ	ŧ.	相互誘導	相互誘導絶対型			
	励磁デ	バイン	ス	小型巻線コイル				
	検出デ	バイン	ス	小型巻線コイル				
接触/非接触			虫	非接触	タイプ			
校正 位相 振幅			位相	拡管境界信号を水平(0°)に設定				
			振 幅	全周スリット信号を6Vp-pに設定				
	+7	口作公	Ŧ	伝熱管番地 ¥4 列以上の伝熱管全長				
\Diamond	17	ト「あ車」	囲	及び Y1~3 列の伝熱管半長部				
長田	コ	イル酉	2置	3×16	3×16			
用	エンクル	.*	軸モード	32	32			
	ファンイル	/ 安义	周モード	16**	32			
U	招	影傷範	囲	Y1~3列の伝熱管小曲げUベンド部				
ベンド用	1	イル酉	2置	2×16	3×16			
	エンシュル		軸モード	32	32			
	用	フィンイル多	女人	周モード	16	32		

Table 1 Specification Comparison between X-probe and Smart Array Probe

※ 32 チャンネルも可能だが軸方向位置の補正が必要

探傷器	TC7700	OMNI-200
項目	(ボックス型)	(プッシャーー体型)
探傷周波数	$20\text{Hz}\sim6\text{MHz}$	$100~{\rm Hz}~\sim~10~{\rm MHz}$
最大多重周波数	8	4
最大接続コイル数	256	128
最大チャンネル数	1024	512
信号出力方式(分解能)	16 bit	16 bit
最大サンプリングレート	40000 pts/s	10000 pts/s
搭載 CPU	32 bit	32 bit
最大プローブ接続数	2	1

Table 2 Specification Comparison between TC7700 and OMNI-200

のデータを瞬時に生成する。データ解析ではこれを効 率良く適確に評価することが求められる。この要求に 応えるべく、ECT 解析システムは従来の手動による解 析機能だけではなく、自動で校正を行う「自動位相・ 感度校正機能」、自動で各種信号の抽出・判別を行う「自 動スクリーニング機能」、各種減肉に対して自動で深さ 評価を行う「自動定量評価機能」等の機能を有してお り、これらの機能は確性試験委員会にて既に技術的妥 当性が確認されている。もちろん従来のプローブのデ ータ解析も可能である。

3. 実用性確認

スマートアレイ ECT システムの実機 SG 伝熱管(外 径 22.23 mm、肉厚 1.27 mm)に対する実用性を確認す るため、以下の各項目について確性試験委員会での確 認方法と同じ方法にて確認を行った。Table 3 に実用性 確認項目及び結果を示す。

3.1 プローブ挿入性確認

実機模擬のモックアップ管及び小曲げ Uベンド部模 擬短管を用いて、全長用及び Uベンド用プローブの挿

確認項目			忍項目	判定基準				
(1)	1) プローブ 全長用		全長用	Y4列伝熱管全長、Y1~3列伝熱管半長部へ挿入できること。				
	挿入性		U ベンド用	Y1~3列伝熱管小曲げUベンド部へ挿入できること。				
(2) 走査速度 全長用		全長用	走査速度 400 mm/s と高速での探傷データを比較し有意な差がない こと(確認には校正用試験片の全周スリット信号を使用する)。					
(\mathbf{a})	(3) 検出性 各種模擬試驗片 模擬 SCC 試験片		各種模擬試験片	Table 4 に示す試験片が全て検出可能であること。	良			
(3)			模擬 SCC 試験片	模擬 SCC が検出可能であること。 自				
(4)		ł.	一般的性能	JEAG4208 第2章2.1 (4) a~e を満たすこと。	良			
(4)	4) 探傷器性能 実用性		実用性	(3)と同時に確認。 良				
(5)) 解析機能				•			
	① 位相・愿	或度	校正機能	全てのチャンネルの位相・感度が規定の位相角及び感度に設定可能で あること。	済			
② 自動構造物検出機能		物検出機能	自動で支持構造物信号が検出・表示されること。	済				
ľ		《1	》自動スクリーニンク、機能	きず信号がきずの可能性のある信号であると自動で評価されること。	済			
	 3 解析 機能 	(2	》フィルタ機能	きず信号とノイズ信号の複合信号に対して、各フィルタを適用し、 ノイズ信号の影響が低減されること。	済			
		(3	》定量評価機能	各種減肉に対し、定量評価誤差が十分低いこと。	済			
			※「≱	済」は確性試験委員会にて既に技術的妥当性が確認されていること	:を示			



(a) Probe for Full-length with Y4 U-bend Tube



(b) Probe for Small Radius U-bend with Y1 U-bend Tube

Fig. 6 Insertion Ability of Probes to U-bend Tube

入性確認試験を行った。対象とする部位は Y4 列以上 の伝熱管全長及び Y1~3 列の伝熱管半長部(全長用)、 Y1~3 列の伝熱管小曲げ Uベンド部(Uベンド用)で ある。試験の結果、両プローブとも対象とする部位を ほぼ等速で通過しており、問題なく探傷可能であるこ とを確認した。この結果より実機 SG 伝熱管の探傷が 可能であると判断できる。Fig.6 に模擬短管での試験の 様子を示す。

3.2 走査速度確認

実機模擬のモックアップ管及び校正用試験片を用い て、全長用プローブにて実機と同様の探傷条件(400 mm/sec)と高速での探傷条件(1000 mm/sec)で全周ス リット信号の探傷を行い、信号の振幅値を測定した。 試験の結果、振幅値は 6.0 V で同じであり、両条件の 間に有意な差が無いことを確認した。この結果より実 機 SG 伝熱管ではこの範囲での高速探傷実施が可能と 判断できる。Fig. 7 に試験結果を示す。



Fig. 7 Lissajous and Amplitude of Outer Groove Signal Obtained from Calibration Tube Inspection

3.3 検出性確認

Table 4 に示す各種模擬試験片を対象として、全長用 及び U ベンド用プローブにより探傷を行い、対象きず が検出可能であることを確認した。

また、模擬 SCC 試験片の検出性についても確認し、 直管部内面軸方向 SCC (深さ 19%t)、拡管部内面軸方 向 SCC (深さ 29%t)、拡管境界部内面軸方向 SCC (深 さ 32%t)、拡管境界部外面周方向 SCC (深さ 51%t) 及び Y1 列 U ベンド肩部内面軸方向 SCC (深さ 33%t) を含む全ての SCC が問題なく検出可能であることを確 認した。本試験中で最も浅い、直管部内面軸方向 SCC の試験結果を Fig. 8 に示す。

これらの結果より実機 SG 伝熱管においても十分な きず検出性を有すると判断できる。

3.4 解析機能確認

実機模擬のモックアップ管及び Table 4 に示す各種 短管試験片を用いた、全長用及び U ベンド用 X プロー

	きず種類			構造物の影響							
部位	八粘	性状		721	管支持板		AVP	体击	判定基準	結果	
	刀類			ふし	丸穴	BEC	AVD	官似			
	EDM	外	面軸方向	0	0	0		—	20%t 以上を		
	スリット	スリット 外			0	0		—	検出		
直管部	減肉		丸型	0	0	0	_	(直上)	10%t 以上を	良	
		矩	角度なし	0	—	—	0		検出		
		形	角度5°	0	_	—	0	_	10%t 以上を検出 (AVB 複合 20%t 以上)		
			4.1 mm	\bigcirc	_	_	_	0	20%t 以上を		
		φīmm		0	0			(直上)	検出		
拉答如	EDM	EDM リット		_		_	_	0			
1)ム 팀 다	スリット								20%t 以上を		
拡管	EDM	内面軸方向		_	_	—	_	0	検出		
境界部	スリット	内面周方向			—	—		0			
※ EDM:放電加工、BEC:四つ葉型支持孔、AVB:振れ止め金具 ○:試験対象 -:試験対象外											

Table 4(1) Detectability Test Results of Various Test Samples with Smart Array Probe for Full-length

Table 4(2) Detectability Test Result of Test Sample with Smart Array Probe for Small Radius U-bend

<u> </u>		业学甘滩	(注田)		
	分類	位置	性状	刊化本毕	和木
Y1 列 U ベンド部	EDM スリット	肩部・側面	内面軸方向	30%t 以上を検出	良





(b) Destructive Test Result Fig. 8 Example of SCC Detectability Test Result (Inner Axial SCC on Straight Section, 19%t)

ブの既探傷データにより Table 3 に示す解析機能が実 用上問題ないことは確性試験委員会にて確認済みであ る。なお、Table 3 の③《3》の定量評価機能について は減肉個数を 12 から 48 へ増やして再評価を行い、深 さ評価精度は RMSE (σ) =1.6%t、最大誤差 4%t であ ることを確認した。

4. JEAG4208 一般要求事項適合性確認

スマートアレイ ECT システムの JEAG4208 一般要求 事項への適合性を確認するために行った検討結果を Table 5 に示す。全ての項目において JEAG4208 の要求 を満たしていることを確認した。

5. 結言

- 周方向きずの分解能をさらに向上させた、SG 伝熱 管検査用の「スマートアレイプローブ」を開発・製 作し、探傷器「OMNI-200」、及び解析ソフト「ECT 解析システム」と組み合わせて「スマートアレイ ECT システム」を開発した。
- 2) 確性試験委員会での確認方法と同じ方法にて上記 ECT システムの実用性確認を行い、問題がないこと を確認した。
- 3) 上記 ECT システムの JEAG4208 一般要求事項への 適合性確認を行い、全ての項目において要求を満た していることを確認した。

JEAG4208 項目		評価	参照先·備考等
第1章	1.1 目的	適合	・スマートアレイ ECT は渦流探傷試験(内挿
総則	1.2 適用	適合	コイル法)である
第2章	2.1 探傷器		・走査速度確認(3.2項)
探傷装置等			 ・検出性確認(3.3項)
		適合	・分解能 16 ビット(Table 2 参照)
			・探傷器 一般的性能確認(Table 3 (4)参照)
			・探傷画面から確認可能
	2.2 探傷子	海스	 ・プローブ挿入性確認(3.1項)
		10.0	 ・検出性確認(3.3項)
	2.3 校正用試験片	海合	・校正用試験片データ(Fig.7参照)
		山山	・校正用試験片成績書から確認可能
	2.4 解析装置	適合	・確性試験委員会にて確認済み(3.4項)
	2.5 精度の確認	海스	・探傷装置及び解析装置の各精度は12ヶ月
		山山	以内に確認することとしている
第3章	3.1 試験要領の一般事項	海合	・走査速度確認(3.2項)
試験要領		山山	 ・検出性確認(3.3項)
	3.2 主な探傷子の試験要領		・スマートアレイプローブの探傷試験内容は
			X プローブと同一である
	3.3 試験員及び評価員	_	・スマートアレイ ECT を規定するものではない
		_	ので省略
第4章	第4章4.1 信号の解析解析及び記録4.2 試験結果の記録		・ 確計 計 齢 禾 昌 今 に て 確 辺 次 7, (2 4 百)
解析及び記録			・唯江四歌安貝云にく唯祕伊の(3.4 頃)

 Table 5
 Compliance Assessment of Smart Array ECT System to JEAG4208

謝辞

本稿は関西電力株式会社殿委託「蒸気発生器伝熱管 改良型探傷システム確性に向けたデータ整備委託」の 成果の一部である。関係者各位に深謝致します。

参考文献

- G. Lafontaine et al., "New Generation ECT Array Probe and System as High Speed Alternative to Rotating Probes", 18th Annual EPRI SG NDE Workshop, 1999
- [2] Y. Harada et al., "The Results of Comparative Tests for a New High Performance Multi Array Probe", 18th Annual EPRI SG NDE Workshop, 1999
- [3] Y. Harada et al., "Field Experience and Detectability Test of High Performance ECT Array X-probe in Japan", 19th Annual EPRI SG NDE Workshop, 2000
- [4] K. Maeda et al., "New High Performance ECT Array Probe for Steam Generator Tubes", 2nd Int'l. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 2000
- [5] Y. Nagata et al., "Automated Inspection and Analysis

System for High Performance ECT Array (X) Probe", 21st Annual EPRI SG NDE Workshop, 2002

- [6] T. Matsunaga et al., "Demonstration of X-probe including Row 1 U-bend probe in Japan", 22nd Annual EPRI SG NDE Workshop, 2003
- [7] 例えば、S. Sullivan et al., "Update on X-probe Sizing Capability for Flaws in Canadian Steam Generator Tubes", 26th Annual EPRI SG NDE Workshop, 2007
- [8] 前田ら、"スマートアレイプローブの開発"、 日本 保全学会第5回学術講演会、2008
- [9] K. Maeda et al., "Development of Smart Array Probe", 27th Annual EPRI SG NDE Workshop, 2008
- [10] K. Maeda et al., "Development of Smart Array Probe and Introduction of New Inspection System", 7th Int'l Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 2009
- [11] J. Akagawa et al., "Field Demonstration of Smart Array Probe and Suitcase Eddy Current System in Japan", 28th Annual EPRI SG NDE Workshop, 2009
- [12] L. Obrutsky et al., "Eddy Current Technology for Heat Exchanger and Steam Generator Tube Inspection", Proc. of the 16th World Conf. in NDT, 2004

(平成 22 年 11 月 4 日)