



# 蒸気発生器 3/4 インチ伝熱管用 インテリジェント ECT システムの開発

Development of Intelligent ECT System for 3/4 inch SG Tubes

三菱重工業(株)	川田 かよ子	Kayoko KAWATA	Member
三菱重工業(株)	山本 裕子	Yuko YAMAMOTO	
三菱重工業(株)	黒川 政秋	Masaaki KUROKAWA	Member
三菱重工業(株)	高次 正弥	Masaya TAKATSUGU	
三菱重工業(株)	宇奈手 一之	Kazuyuki UNATE	

Intelligent ECT system for 7/8 inch tubes has been qualified as official method for inspection of Steam Generator tubes in Japan since 2003. We have developed Intelligent ECT system for 3/4 inch outer diameter tubes, which is applicable for full length inspection of all tubes in Steam Generator. We have carried out the verification test on passage, scanning speed, detectability of various defects, performance of auto screening, effectiveness of filtering, and accuracy of depth sizing of wears. Totally we have confirmed the performance of Intelligent ECT system for 3/4 inch tubes is equivalent to that of Intelligent ECT system for 7/8 inch tubes.

**Keywords:** ECT, Steam Generator, Eddy Current, Intelligent ECT

## 1. 緒言

加圧水型原子力発電所 (PWR) には全長が 20m、外径が 20mm 程度のニッケル基合金製の伝熱管を 3000 本以上収納した蒸気発生器が 2 基から 4 基設置されている。これら伝熱管の全長全数検査用に使用されてきたボビンコイル型 ECT に比べ、欠陥検出性に優れ、かつボビンコイル型 ECT と同等の高速探傷が可能な「インテリジェント ECT システム」を開発した。本システムは、(財) 発電設備技術検査協会の確性試験を経て外径 7/8 インチ伝熱管の公式検査として実用化している。

また、基本性能は「実用原子力発電施設検査技術信頼性実証試験」において確認されており、「軽水型原子力発電所用蒸気発生器伝熱管の供用期間中検査における渦流探傷試験指針 (JEAG4208-2005)」の要求事項も満足している。

現在、国内 PWR プラントの伝熱管は全て外径 7/8 インチであるが、次世代プラントの APWR (改良型 PWR) では、外径 3/4 インチの伝熱管が採用される。この 3/4 インチ伝熱管にインテリジェント ECT システムを適用するには、プローブ小型化による信号レベル低下を補償して、7/8 インチ用と同等の欠陥検出性と深さサイジング性能を実現することが必須となる。

本論文では、3/4 インチ用に小型化した ECT プローブを含む ECT システムが、従来の 7/8 インチ用と同等の性能及び実用性を有していることを確認した結果を報告する。

## 2. インテリジェント ECT システムの概要

インテリジェント ECT システムは、インテリジェント ECT プローブ、探傷システム、及び分析システムからなる。

### 2.1 インテリジェント ECT プローブ

インテリジェント ECT プローブのセンサは、欠陥以外の信号発生要因により生じるノイズの影響が小さくかつ欠陥検出性の高い相互誘導方式であり、プローブはマルチセンサで構成されている。

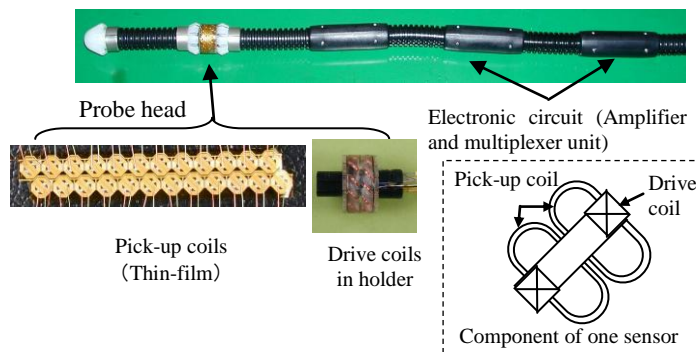


Fig.1 Intelligent ECT Probe

Fig.1 にプローブ外観と構成を、Table 1 にプローブ仕様を示す。Fig.1 の模式図に示すように、1 センサは、2 個の検出コイルとそれらに直交する 1 個の励磁コイルから構成される。励磁コイルにより区切られた各検出コイルの 2 領域では、渦電流による磁束が逆向きになるため、検出コイル全体に一樣に分布する信号発生要因 (たとえばリフトオフ変化などのノイズ要因) による信号を低減する効果がある<sup>[1]</sup>。検出コイルには薄膜アレイコイルを採用してコイル

間のばらつきを低減し、プローブヘッド部には電子式切替器及び信号増幅アンプからなる小型アナログ電子回路を内蔵することで、信号線数を削減した。プローブヘッドは、周方向分解能を考慮して合計 24 個のセンサを配置する構造とした。

なお、インテリジェント ECT プローブには、全長用プローブと小曲げ管 U ベンド用プローブの 2 種類がある。伝熱管のうち、U 字型曲がり部の曲げ径が  $\phi 280\text{mm}$  程度以下の小曲げ径管は、曲げ部伝熱管内径が扁平により直管部に比べ小さいため、小曲げ管 U ベンド用プローブで探傷する。その他は全長用プローブで探傷する。

Table 1 Specification of Intelligent ECT Probe

項目	内容
プローブ方式	相互誘導／自己比較方式
検出コイル	薄膜コイル
励磁方式	局所斜め励磁方式
センサ配置	24 センサ／周 (軸方向 2 段に配置)
接触／非接触	非接触

## 2.2 探傷システム

インテリジェント ECT では、4 種類の励磁周波数で、走査速度 400mm/s、軸方向サンプリングピッチ 0.8mm で探傷を行うため、96 チャンネルの信号を 1 チャンネル当たり 500Hz 以上で AD 変換する必要がある。探傷器では、4 周波の励磁信号を重ね合わせて励磁し、位相検波する際に各周波数を分離する同時励磁方式を採用することにより、処理時間の短縮を図って、多チャンネルの高速探傷を可能にした。

Table 2 に代表的な探傷条件を示す。

探傷は、プローブ挿入位置決め (検査対象伝熱管の選択)、プローブ走査・停止、計測データの記録などを自動化した探傷システムを採用し、ロスタイムを排除した効率的な探傷を実現した。探傷ロボット 1 台でプローブ 4 本同時探傷が可能である。探傷システムの構成を Fig.2 に示す。

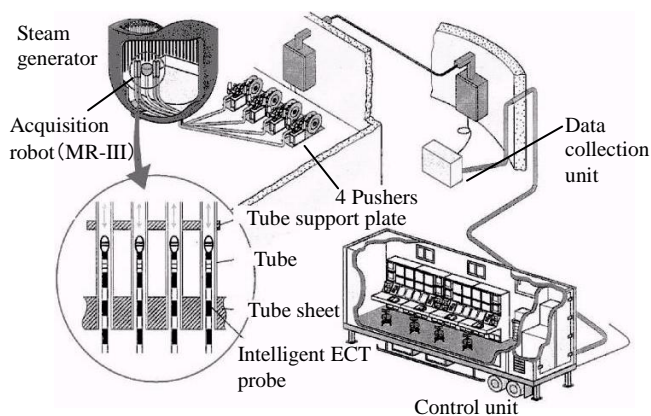


Fig. 2 Intelligent ECT Acquisition System

Table 2 Acquisition Condition of Intelligent ECT

項目	探傷条件
励磁周波数	100,200,300,400 kHz
コイル数	4
チャンネル数	96
サンプリング周波数 (1 チャンネル当り)	500Hz (以上)
走査速度	小曲げ管 U ベンド部 : 200mm/s それ以外 : 400mm/s
データ記録	16 bit

## 2.3 分析システム

データ分析システム (Mitsubishi Intelligent Data Analysis System) は、マルチセンサで採取した膨大なデータ量の信号の位相感度調整、有意信号の抽出、欠陥候補をピックアップする自動分析機能を実装し、高速かつ信頼性の高い分析が可能である<sup>[2]</sup>。また、検出された欠陥が減肉の場合、深さにより処置の要否が決まるため、深さ評価を行う。インテリジェント ECT システムでは、複数の探傷周波数の信号の波形特徴から重回帰分析を用いて減肉深さを推定する評価手法を採用している<sup>[1]</sup>。Fig. 3 にデータ分析の流れを示す。

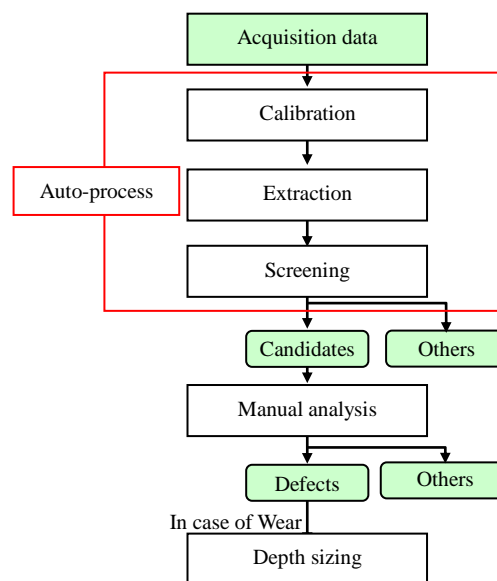


Fig. 3 Flow diagram of Intelligent ECT data analysis

## 3. 3/4 インチ伝熱管用インテリジェント ECT システムの開発

7/8 インチ伝熱管用インテリジェント ECT システムの技術を基に 3/4 インチ伝熱管用のインテリジェント ECT システムの開発を行った。開発では、プローブの小型化、探傷条件の選定及び分析機能の最適化を実施した。

### 3.1 プローブ

3/4 インチ用 ECT プローブでは、適用可能な検出コイル及び励磁コイルの物理的なサイズが小さくなる。そのため、信号レベルの低下が発生し、SN 比の低下も懸念される。そこで、その対策として以下を実施した。

- ① 検出コイルの検出有効面積増加のための接続パッド小型化
- ② 検出コイル線幅・線間隔減少による巻数増
- ③ リフトオフ（伝熱管内面とセンサの距離）低減による渦電流レベル増加
- ④ 内蔵する増幅器ゲインの最適化による信号レベル増加

以上により、7/8 インチ用とほぼ同等の信号レベルを達成することが可能となった。

開発したプローブの写真を Fig.4 に示す。



Fig.4 Intelligent ECT Probes for 3/4" Tubes

### 3.2 探傷システム

探傷器及び探傷装置は、7/8 インチ用と共通である。探傷条件については、伝熱管の全厚の検査が可能であり、かつ、信号発生要因の識別に有効な条件を選定する必要がある。

渦電流表皮深さは探傷周波数の 1/2 乗に反比例し、Alloy690 材伝熱管の表皮深さは励磁周波数 100kHz ~ 400kHz のとき約 1.7~0.85mm である。Table 2 に示す複数の励磁周波数の信号を用いることで、伝熱管肉厚（3/4 インチ伝熱管は約 1.1mm、7/8 インチ伝熱管は約 1.3mm）の全厚の欠陥検出、伝熱管外面構造物の確認、欠陥以外の要因の識別が可能であることを確認し、7/8 インチと同じ探傷条件を選定した。

### 3.3 分析システム

分析手順は、7/8 インチと同様である。フィルタリング機能、自動分析機能、減肉深さサイジング機能については 3/4 インチ伝熱管モックアップ探傷信号を用いてパラメータを最適化した。

## 4. 検証試験

開発した 3/4 インチ用インテリジェント ECT システムの検証試験を行い、実機適用に係る妥当性を確認した。7/8 インチ用の確性試験の検証項目のうち、3/4 インチ用独自の検証要否を Table 3 に示す。

Table3 Confirmation Item for Applying 3/4" Intelligent ECT Probe

項目	要否	不要の理由	
プローブ挿入性	要	—	
走査速度	要	—	
検出性	要	—	
探傷器性能	不要	探傷器仕様は同じ	
分析機能	自動校正機能	不要	校正基準は同じ
	自動抽出機能	不要	校正基準は同じ
	分析基本機能	不要	径に依存しない
	自動分析機能	要	—
	フィルタ機能	要	—
減肉深さサイジング機能	要	—	
データ転送機能	不要	径に依存しない	

### 4.1 プローブ挿入性

実機模擬（実物大伝熱管全長）モックアップを用いて探傷したデータにより、全長用プローブ、及び小曲げ管 U ベンド部用プローブが、それぞれ対象とする部位を問題なく通過することを確認した。

通過性を確認した項目の一覧を Table 4 に、小曲げ管 U ベンド部用プローブが、最小曲げ径の短管試験片を通過した例を Fig.5 に、模擬全長モックアップの Y3 列伝熱管を全長用プローブが通過した波形例を Fig.6 に示す。

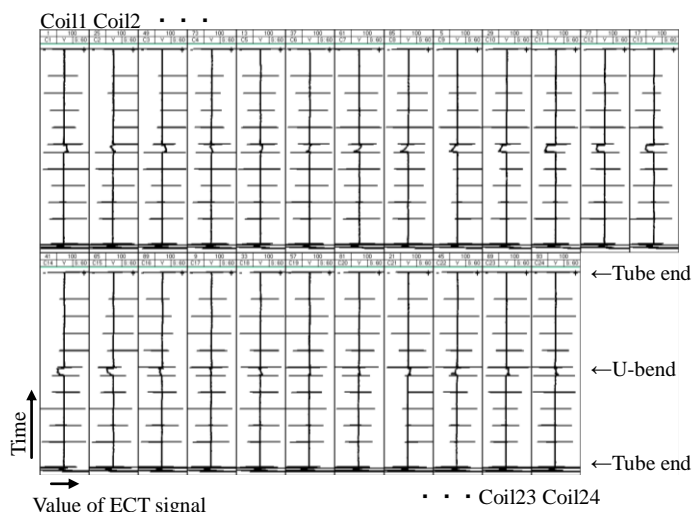
Table4 Confirmation Item of Passing Test

プローブ	対象管*1	探傷範囲	走査速度	結果
全長用	Y3 列以上	管端~管端	400mm/s	良
			1000mm/s	良
	Y1~2 列	管端~最上段支持板	400mm/s	良
小曲げ管 U ベンド用	Y1~2 列	最上段支持板~最上段支持板	200mm/s	良

\*1 Y 列は、蒸気発生器内での伝熱管配置の列番号を示し、列番号が小さいほど U ベンド部曲げ径が小さい。



Fig. 5 Passing Probe through Small U-bend (Y1)

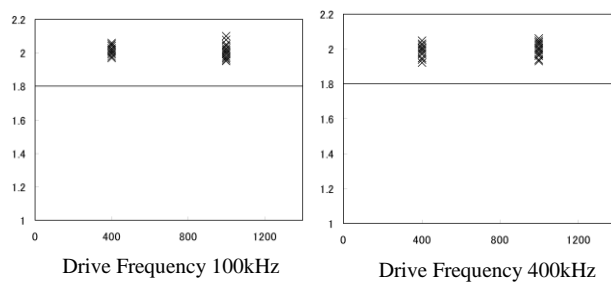


Tube:Y3 (mock up)  
 Probe: Intelligent ECT probe for full length  
 Signal in draw: 100 kHz vertical

Fig.6 Example of Result of Acquisition Test

### 4.2 プローブ走査速度

模擬欠陥試験体を用いて、全長用プローブを走査速度 400mm/s 及び 1000mm/s で探傷したとき、欠陥波形のばらつきが許容範囲内であることを確認した。模擬欠陥として、感度校正基準である深さ 50%の外周全周スリットを用い、24 コイルすべての信号振幅が規定感度内 (2.0±0.2V) であることを確認した。確認結果例を Fig.7 に示す。



Horizontal axis: Scanning speed (mm/s)  
 Vertical axis: Amplitude of slit (V)

Fig.7 Result of Probe Speed Test

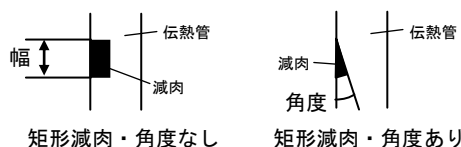
### 4.3 検出性

各種短管試験片を対象として、インテリジェント ECT プロブにより探傷を行い、所定深さの EDM スリット及び減肉が検出可能であることを確認した。Table 5 に検出性確認を実施した項目と結果を、Fig. 8 に代表波形例を示す。検証に使用した欠陥性状は、7/8 インチ用インテリジェント ECT の確性試験での検証項目を全て含んでおり、3/4 インチ伝熱管用インテリジェント ECT システムは、7/8 インチ伝熱管用と同等な検出性を有することが確認できた。

Table 5 Items and Results of Detectability Test

部位	欠陥種類			構造物複合 <sup>*1</sup>					結果	
	分類	性状	深さ	なし	管支持板		AVB <sup>*3</sup>	管板		
					丸穴	BEC <sup>*2</sup>				
直管部	EDM スリット <sup>*4</sup>	外面 軸方向	20%t	○	○	○	—	—	良	
		外面 周方向	20%t	○	—	—	—	—		
	減肉	丸型 (R50mm)	10%t	○	○	○	—	○		
		矩形 <sup>*5</sup>	角度なし	10%t	○	—	—	○		—
			角度 3 度	10%t	○	—	—	○		—
		角度 5 度	10%t	○	—	—	○	—		
	ピッチング	φ1mm	20%t	○	—	—	—	○		
拡管部	EDM スリット <sup>*4</sup>	内面軸	20%t	—	—	—	—	○		
拡管境界部	EDM スリット <sup>*4</sup>	内面軸	20%t	—	—	—	—	○		
		内面周	20%t	—	—	—	—	○		
Y1 列 U ベント <sup>3</sup> 部	EDM スリット <sup>*4</sup>	外面 軸方向 外面 周方向 内面 軸方向 内面 周方向	30%t	○	—	—	—	—		

<sup>\*1</sup> 構造物複合 ○：試験実施 —：試験対象外  
<sup>\*2</sup> BEC：Broached Egg Crate 管穴形状の種類  
<sup>\*3</sup> AVB：Anti Vibration Bar 振れ止め金具  
<sup>\*4</sup> EDM スリットは、全て長さ 5mm 幅 0.2mm  
<sup>\*5</sup> 矩形減肉は、幅 15mm、角度は軸方向に対する傾き



自然きずについては、応力腐食割れ(SCC)の検出性に関して米国・電力中央研究所 (EPRI) の認証試験に合格している<sup>[3]</sup>。EPRI 認証試験で使用した模擬 SCC 検出波形例を Fig.9 に示す。

#### 4.4 分析機能

自動分析機能、フィルタリング機能、減肉深さサイジング機能の性能確認を実施した。

自動分析機能は、欠陥可能性のある信号位置をピックアップする機能である。Table 5 に示す短管試験体を探傷したデータを対象として、自動分析により全ての対象欠陥を見逃しなくピックアップすることを確認した。

フィルタリング機能は、欠陥以外のノイズ要因により生じる信号を低減して SN 比を向上する機能である。フィルタリング機能により、対象ノイズ成分が低減され、SN 比向上効果があることを確認した。フィルタ種類及び機能確認結果を Table 6 に、フィルタ適用時の波形例を Fig. 10 に示す。

減肉試験片データを対象として、深さサイジング試験を行った。結果を Fig. 11 に示す。検証対象の矩形減肉の評価誤差は 5%t 以下であり、7/8 インチ用と同等の性能であることを確認した。

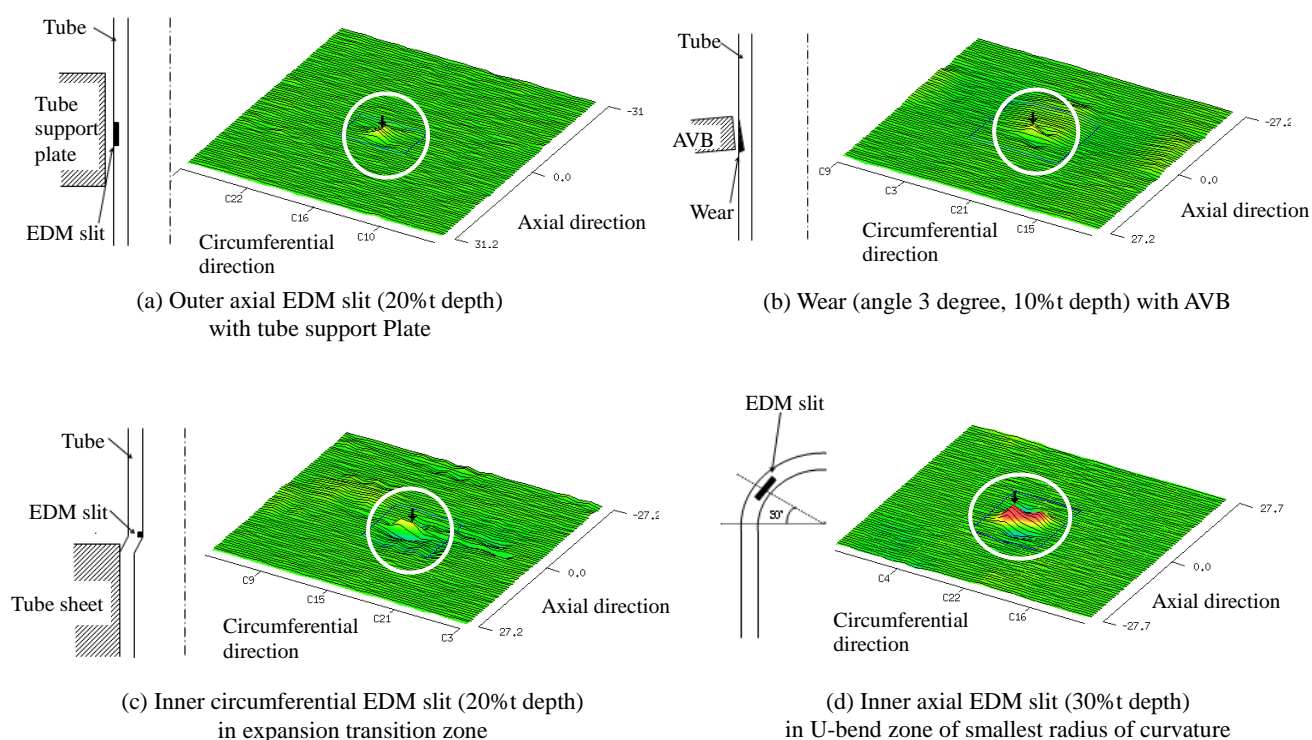


Fig. 8 Examples of Detectability Test Signal

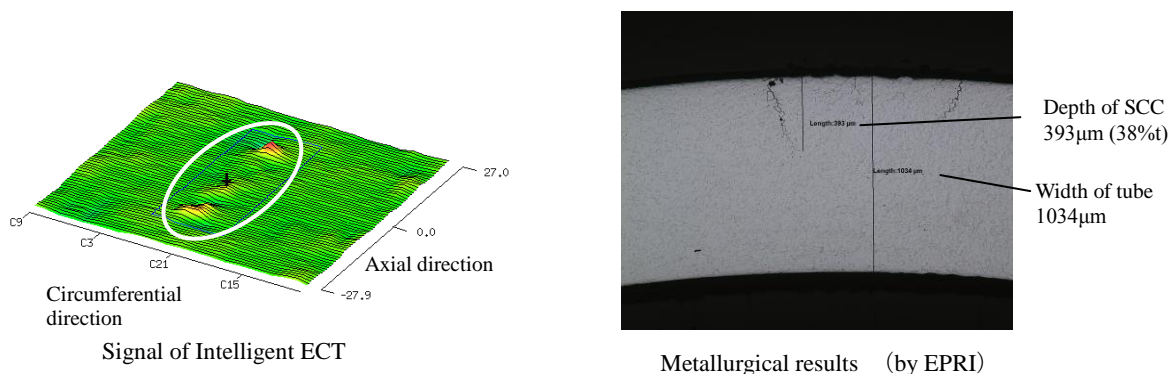


Fig. 9 Example of Artificial SCC Signal

Table 6 Result of Filtering Test

フィルタ名	用途	適用プローブ	判定基準	結果
MIX	支持板、AVB、 付着物信号低減	全長用	400kHz-100kHz の多重周波数演算により支持構造物の影響が低減され、SN 比が向上すること	良
YURE	プローブ揺動 信号低減	全長用	拡管部通過時のノイズが低減され、SN 比が向上すること	良
EXP	拡管境界部 形状信号低減	全長用	拡管境界部の形状変化に起因する信号の影響が低減され、SN 比が向上すること	良
DRac	U ベンド部 形状信号低減	小曲げ伝熱管 U ベンド用	U ベンド部の形状変化に起因する信号の影響が低減され、SN 比が向上すること	良

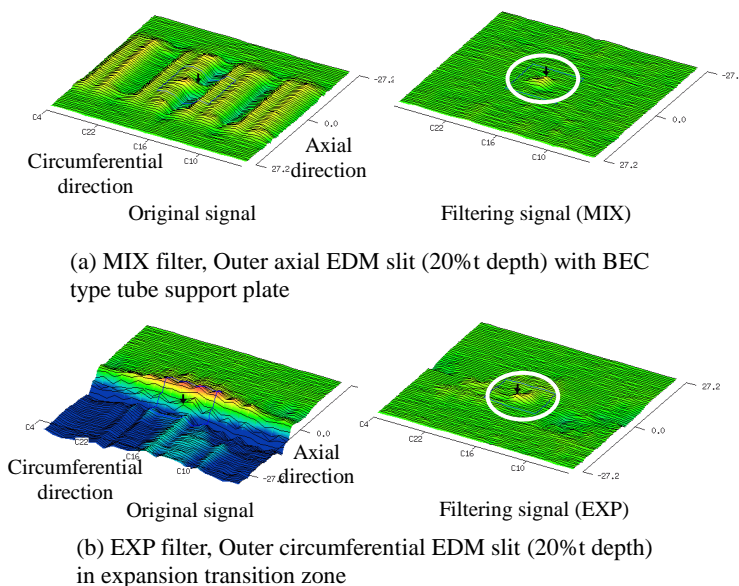


Fig.10 Example of Filtering Test

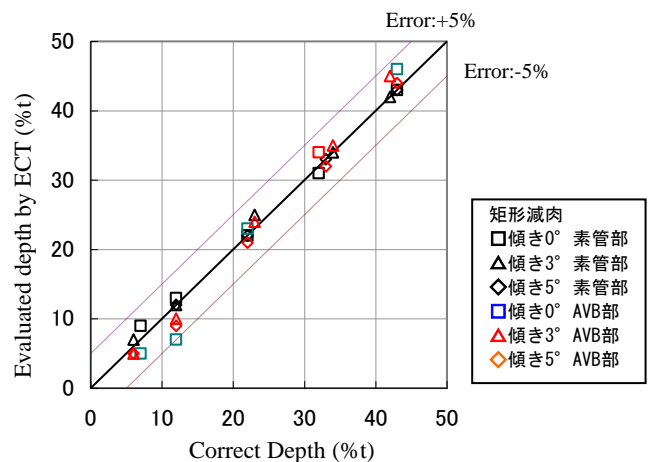


Fig.11 Results of Depth Sizing Test of Wears

## 5. 結言

3/4インチ伝熱管用インテリジェントECTシステムを開発し、実機適用性の確認を行った。結果を下記にまとめる。

- ① 7/8インチ用インテリジェントECTプローブと同様の方式を維持しつつ、検出コイルや電子回路の最適化等により、7/8インチ用とほぼ同等の信号レベルとSN比を確保することができた。
- ② 7/8インチ用の確性試験項目と同等の検証試験を実施し、プローブ挿入性、プローブ走査速度、欠陥検出性、自動分析性能、フィルタリング性能、減肉深さサイジング性能を検証し、いずれの機能についても7/8インチ用と同等の性能であることを確認した。
- ③ 3/4インチ用インテリジェントECTシステムの性能及び実用性が7/8インチ伝熱管用インテリジェントECTシステムと同等であることを確認した。

## 参考文献

- [1] 川田かよ子、川瀬直人、黒川政秋、浅田義浩、“インテリジェントECTシステム”、日本工業出版「検査技術」Vol.10、No.3、2005、pp66-72。
- [2] 川田かよ子、川瀬直人、黒川政秋、浅田義浩、“蒸気発生器伝熱管用インテリジェント渦流探傷システムの開発”、火力原子力発電大会論文集、2004、pp189-194
- [3] EPRI、“Eddy Current Examination Technique Specification Sheet”、ETSS#10414.1、2010

(平成 23 年 6 月 28 日)