

アレイ型プローブを用いた SG 二次側管支持板監視手法の開発

Development of Monitoring Method for SG Secondary Side Tube Support Plate Using Array Probe

三菱重工業(株)	小橋 優司	Yuji Kohashi	
三菱重工業(株)	七田 知紀	Tomonori Shichida	
三菱重工業(株)	川瀬 直人	Naoto Kawase	
三菱重工業(株)	松浦 貴之	Takayuki Matsuura	
三菱重工業(株)	川田 かよ子	Kayoko Kawata	Member

Array ECT probe called Intelligent ECT probe (I-Probe) has a capability to inspect tubes of Steam Generator (SG) more productively and more accurately than conventional probes. It has been applied as full length inspection in Japan since 2003 and there is much field experience to date.

On the other hand, a phenomenon in SG secondary side is known that scale deposits on the clog holes of quatrefoil type tube support plate(TSP). Water level oscillation of secondary side caused by excessive blockage of scale deposits may decrease operation efficiency and it will cause one of the unintended troubles. Therefore, periodical monitoring of blockage condition and applying cleaning are important. The new method has been developed to evaluate blockage condition of every tube support plate of all tubes automatically using I-Probe data. The software was also developed to visualize the evaluation results. This new method will contribute increase of reliability of SG maintenance, because the new method makes it possible to monitor the whole SG more precisely.

Keywords: ECT, Steam Generator, Array probe, Intelligent ECT, Scale blockage, Monitoring method

1. 緒言

加圧水型原子力発電所（以下、PWR）には、蒸気発生器（以下、SG）が2基から4基設置されている。SGは、全長が約20m、外径が約20mmのニッケル基合金製の伝熱管を約3000本収納している。これらは伝熱管の直管部では管板及び管支持板、上部の曲がり部であるUバンドでは振れ止め支持金具によって固定されている。管支持板部はFig.1に示すように四葉型をした Broached Egg Crate（以下、BEC）型となっている。冷却材の流路である管穴をBEC形状にすることによって、2次系冷却材に含まれる不純物の濃縮が発生するドライ&ウェット領域が少なくなり、伝熱管と管穴クレビス内での不純物の濃縮を抑えることが可能となる。

一方、プラントの運転に伴い、このBEC型支持板の管穴と伝熱管の間にスケールが付着し、流路を閉塞することがある。閉塞が進展すると支持板部圧力損失が増加し、2次側水位が変動して運転に支障をきたす恐れがあるため、閉塞解消を目的として水流による機械式洗浄、または化学洗浄液による化学式洗浄を実施する必要がある。以上から、2次側水位変動を防止し、効率的かつ安全な運転を実施することを目的として、閉塞状況の把握及び適

切な洗浄時期の計画が必要となっており、2次側監視に関するニーズが高まっている。

国内のPWR型プラントにおける閉塞率の監視は、定期検査の伝熱管健全性評価と並行して行われている。約10年前から、高い欠陥検出性を持つインテリジェント ECTプローブ（以下、インテリジェント ECT）と呼ばれるアレイ型プローブによる定期検査が実施されているが、アレイ型プローブによる閉塞率の評価手法が確立されておらず、これまでポピン型プローブによる追加ECTを必要としてきた。本論文では、開発したインテリジェント ECTによる閉塞率の監視手法について説明するとともに、本手法を適用した結果及び効果について報告する。

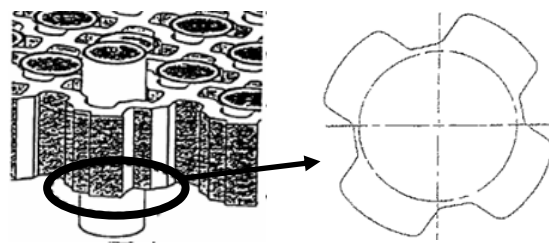


Fig.1 Broached Egg Crate (BEC) Tube Support Plate

2. 現行のBEC閉塞監視技術

現行の閉塞監視技術について、その特徴を紹介する。

2.1 目視検査 (VT)

SGの2次側よりアクセスし、カメラで管穴を直接撮影する。得られた画像から初期開口面積と閉塞時開口面積の比率を計算することで閉塞率を算出する。Fig.2は、洗浄前後の目視検査によるカメラ画像である。このように閉塞状態を直接観察することができるので、スケールの付着や周辺の状態を詳細に把握することができる。しかし、アクセスが可能な範囲に限られていることが短所である。

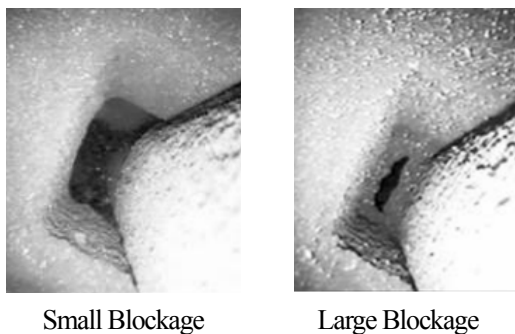


Fig.2 BEC tube hole image with VT

2.2 ボビン型プローブ (ECT)

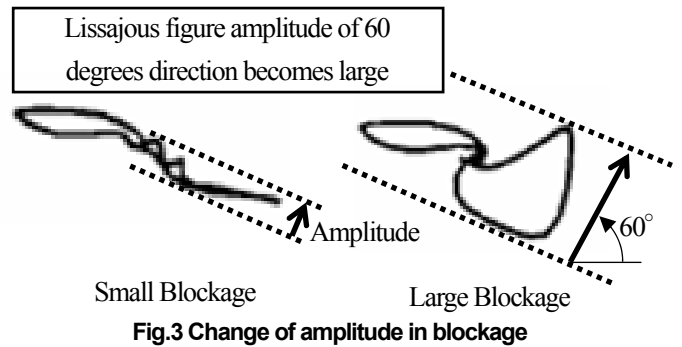
閉塞状態にある伝熱管の支持板部に対してボビン型プローブで波形を採取すると、支持板の波形にスケール信号が複合し、Fig.3に示すように特定方向に対して特徴的なリサージュ波形を描く。スケールの付着量に応じて特定方向の電圧が増加することから、この電圧を計測することで閉塞状態を評価する手法である。スケール付着分の電圧計測方法は、特定方向の成分を計測する他に、スケール付着前の支持板波形を減算した電圧を計測する方法などが知られている^[1]。

閉塞率の評価では、あらかじめスケール付着分の電圧と目視検査から得た閉塞率から、評価カーブを作成する。次に、評価対象である伝熱管のECTデータの支持板信号からスケール付着分の電圧を求め、評価カーブより閉塞率を評価する。

但し、定期検査の伝熱管健全性評価にインテリジェントECTを適用している場合は、ボビン型プローブによる計測を追加で実施する必要があり、追加工程が発生する。

3. アレイ型プローブによる閉塞率評価 (ECT)

インテリジェントECTの概要、探傷/分析システム、閉塞率評価手法について述べる。



3.1 インテリジェント ECT 概要

Fig.4にプローブ外観と構成を、Table 1に主なプローブ仕様を示す。Fig.4に示すように、センサは検出コイルと励磁コイルから構成されている。プローブヘッド部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である。更に、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、信号線数を削減している。

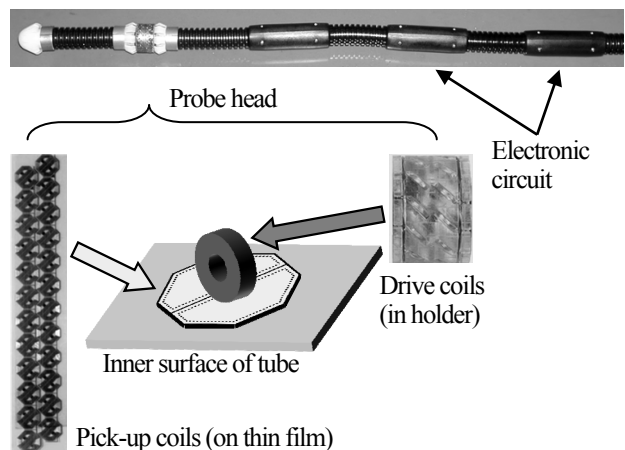


Fig.4 Intelligent ECT Probe

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	周方向に24センサ (軸方向2段に配置)
接触/非接触	非接触

3.2 インテリジェント ECT システム

3.2.1 探傷システム

インテリジェントECTは、4種類の探傷周波数を用い、

走査速度 400mm/s 以上で探傷を行う。データのサンプリングピッチは軸方向に 0.8mm であり、周方向は管径に係らず 24 分割となる。Table 2 に代表的な探傷条件を示す。

インテリジェント ECT を用いた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行う自動探傷システムを採用している。さらに、探傷ロボット 1 台でプローブ 4 本の同時探傷が可能であり、効率的な検査を実現している^[2]。探傷システムの構成を Fig.5 に示す。

閉塞率評価でも、同じ探傷条件及び構成で得られた ECT データを利用することができる。

Table 2 Acquisition condition of Intelligent ECT

項目	探傷条件
探傷周波数	100, 200, 300, 400 kHz
コイル数	24
チャンネル数	96
軸方向サンプリングピッチ	0.8 mm
走査速度	400 mm/s

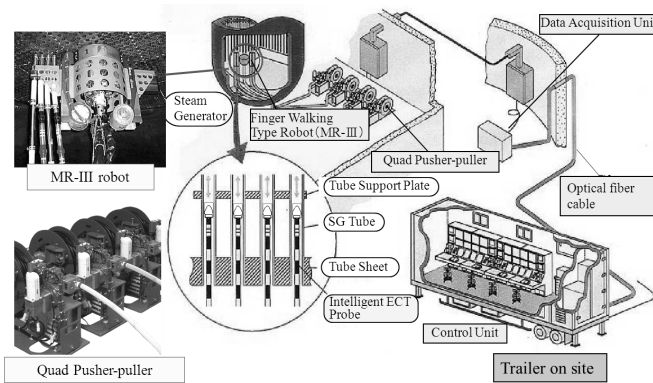


Fig.5 Fully Automated ECT system

3.2.2 データ分析システム

データ分析システム（MIDAS: Mitsubishi Intelligent Data Analysis System）は、ECT で採取した信号の位相感度調整や有意な信号の抽出を行う自動分析機能を実装しており、高速かつ高信頼性の分析が可能である。本システムでは、複数の探傷周波数におけるリサージュ波形の特徴から減肉深さを推定する評価手法を採用している^[3]。Fig.6 に本システムの分析フローチャートを示す。

3.3 閉塞率評価手法

データ分析システムに閉塞率評価機能を組み込むことで、システムのインターフェースを少なくし、効率的な

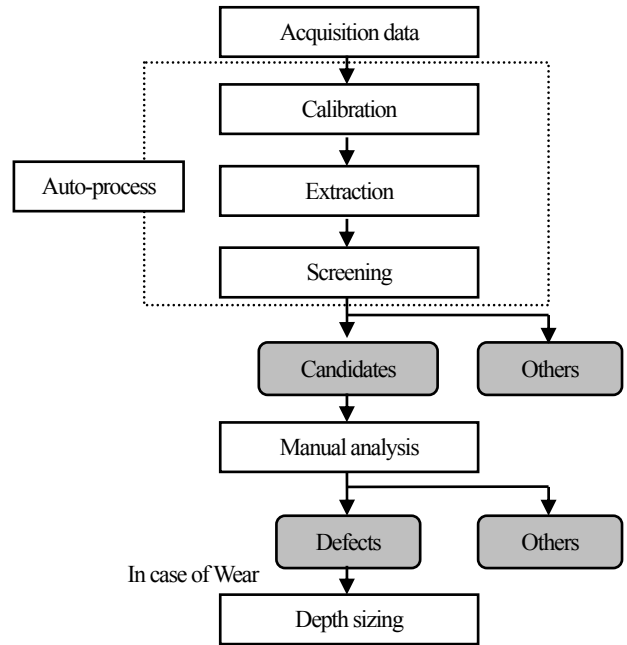


Fig.6 Flow diagram of Intelligent ECT data analysis

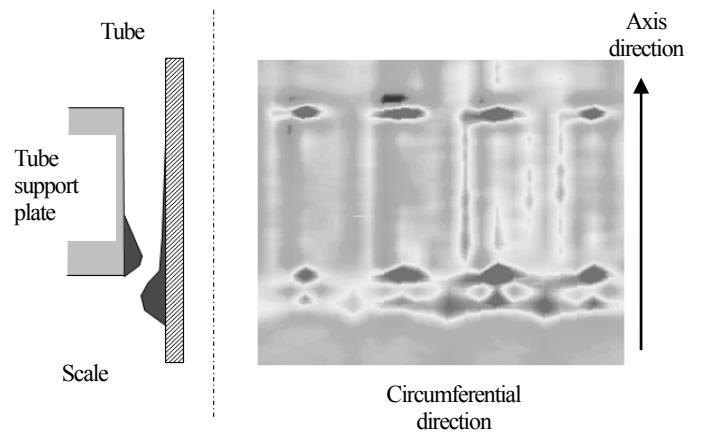


Fig.7 Figure of voltage change of tube support plate and scale with Intelligent ECT

評価が実現できた。

インテリジェント ECT によるデータ分析システムでは Fig.6 に示す自動処理プロセスにより全長分のデータから支持板に相当する信号範囲を特定することができる。特定された支持板信号の色調図を Fig.7 に示す。縦方向は伝熱管の軸方向、横方向は伝熱管の周方向、色調は信号の電圧値を示している。

Fig.7 は、スケール付着による閉塞が進んだ支持板の色調図であり、色調図でも支持板の下端部にスケール付着の影響による電圧の変化が確認できる。このスケール付着信号の電圧から、閉塞率を求める評価カーブを用いて閉塞率を評価する。評価カーブは、目視検査により求めた閉塞率と、当該部インテリジェント ECT 波形からあら

かじめ作成しておく。

現行のポピン型プローブを用いた閉塞率評価は追加工程が発生し、閉塞率評価の対象とする伝熱管も一部に限られる上、閉塞率評価は手動処理で行う必要がある。一方、インテリジェント ECT による閉塞率評価は、伝熱管の定期検査の健全性評価のデータを利用し、全ての管穴に対して上記の閉塞率評価を自動処理で適用可能であり、効率的な評価が可能となる。

3.4 閉塞率評価出力機能

閉塞状況を視覚的に把握するために、算出した閉塞率から支持板の配置に合わせてカラーマップ表示する機能及び平均値算出機能を開発した。

カラーマップは、Fig.8 に示すように、SG の各支持板データを支持板毎 (図では第 1 から第 7 支持板) に並べ、閉塞率によって色調を変えて表示したものであり、左側が HOT、右側が COLD を示している。カラーマップの色調範囲は自在に更新可能であり、目的に応じた閉塞状況の確認に有用である。また、管穴毎に閉塞率を評価しているため、同一支持板或いは異なる支持板での閉塞の分布・偏りを容易に確認することができる。

平均値算出機能は、各支持板における全体の管穴から平均値を算出し、定期検査毎に比較することで各支持板及び全体の閉塞率の変化を数値で確認でき、経年比較が可能となる。

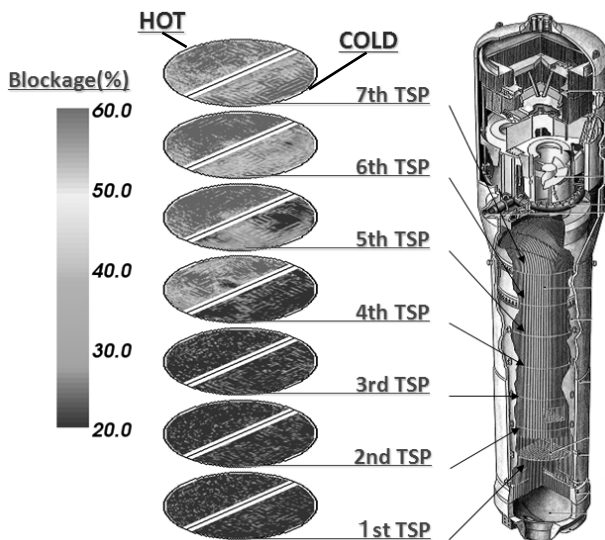


Fig.8 Figure of color map using blockage

3.5 閉塞率評価の流れ

定期検査において、インテリジェント ECT を用いて SG

伝熱管に対して全数全長探傷を実施する。まずはこのデータを Fig.6 に示す手順で分析し、SG 伝熱管の健全性を評価する。一方で、同じデータを用いて前項までの手法により、伝熱管全数の閉塞率を評価し監視する。作業フローを Fig.9 に示す。この手法により、インテリジェント ECT を用いることで、SG 伝熱管の健全性の評価及び 2 次側の閉塞率の監視が可能となる。

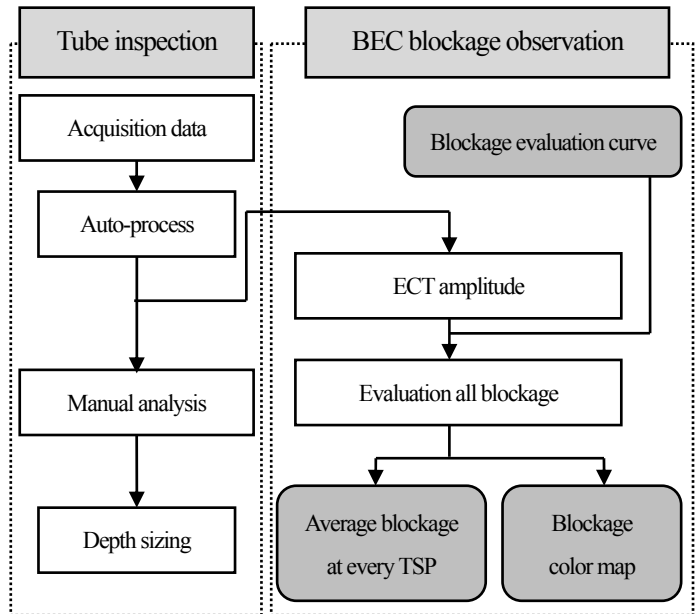


Fig.9 Flow diagram of whole inspection

4. 評価結果

開発したシステムを用いて、実機プラントの閉塞率を評価した結果について報告する。

4.1 機械洗浄後の閉塞率評価

Fig.10(a)は上部から 3 段までの支持板管穴の約半数に機械洗浄を施工した後、Fig.10(b)は更に残りの管穴に追加で機械洗浄を施した後のインテリジェント ECT で評価した閉塞率のカラーマップである。Fig.10(a)では、上部 3 段の支持板のうち、洗浄を適用した範囲と評価閉塞率から、洗浄部と非洗浄部が明確に確認できる。Fig.10(b)では、洗浄した上部から 3 段の中に、高閉塞率を示す線状の領域が各 3 本確認できるが、これは洗浄装置の構造により生じる未洗浄部に一致する。

また、通常プラント運転では、スケールの付着は上段の支持板ほど多く、下段になるほど少なく、また低温側と比較すると高温側の方が付着しやすい傾向があり、図からこれらの特徴も確認できる。このようにカラーマップ表示により、洗浄効果やスケール付着の分布特徴を

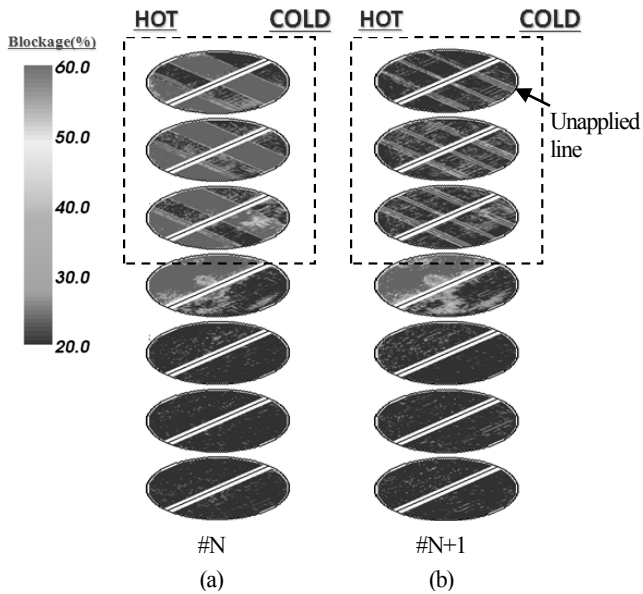


Fig.10 Blockage color maps after mechanical cleaning

視覚的に把握することができる。

4.2 化学洗浄後の閉塞率評価

化学洗浄を実施している SG の閉塞率を評価した結果を Fig.11 に示す。また、平均値算出機能によって各支持板の平均閉塞率を定期検査回数毎にグラフ上にプロットしたものを Fig.12 に示す。図中の#N などは、定期検査の回次を示し、化学洗浄の適用は#N+1 以降である。Fig.11, Fig.12 から分かるように、機械洗浄ほど明確ではないが、実施後から回次を経るごとに徐々に全体として閉塞率が緩和されていることが分かる。この傾向は、化学洗浄の特徴と合致する。このようにインテリジェント ECT によ

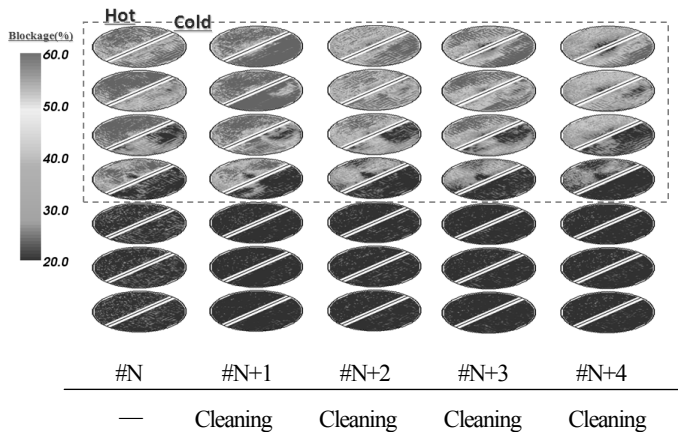


Fig.11 Blockage color maps after chemical cleaning

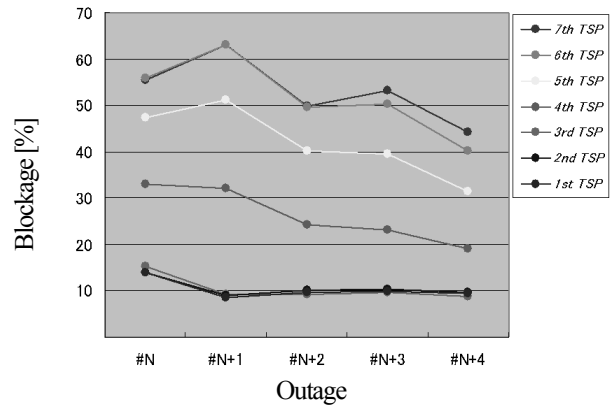


Fig.12 Graph of blockage transition at every TSP in chemical cleaning

る探傷を定期検査毎に実施することによって、伝熱管の健全性だけでなく化学洗浄の効果を経年的に把握することができ、より適切な洗浄時期の計画が可能となる。

5. 結言

インテリジェント ECT のデータを用いて支持板部管穴の閉塞率を評価できる手法を開発した。これによりボビン型プローブの追加適用が不要になり、工程の短縮が可能となる。また、カラーマップの出力及び支持板毎の平均閉塞率の算出から閉塞率を可視化し、SG 全体の閉塞状況を容易に把握可能となり、実機プラントにおいて運転に伴う閉塞率の変化傾向や機械洗浄及び化学洗浄の効果を確認することができた。

以上のように、高速な検査と高い欠陥検出性を兼ね備えたインテリジェント ECT を定期検査に適用することで、伝熱管の健全性評価だけでなく経年的な閉塞率の監視や適切な洗浄計画が可能となる。

参考文献

- [1] 川瀬直人、“信号処理装置”、特許第 3771825 号、2006.4.26
- [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] 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、pp.66-72.

(平成 25 年 6 月 21 日)