

# 解説 記事

## 渦電流を用いた伝熱管検査技術

三菱重工業株式会社

山口 岳彦 Takehiko YAMAGUCHI

浦田 幹康 Mikiyasu URATA

神納 健太郎 Kentaro JINNO

難波 一成 Kazushige NAMBA

三菱日立パワーシステムズ株式会社

浦田 直矢 Naoya URATA

### 1. 緒言

発電プラントにおける各種機器の健全性を評価する非破壊検査のうち、伝熱管に対する体積検査、及び溶接部等の表面に対する表面検査として渦電流探傷試験 (ECT: Eddy Current Testing) が適用される。発電プラントは、運転時間の経過に伴い、様々な損傷を経験することになる。このため、当社では種々の損傷モードに対応した ECT プローブを開発・適用し、プラントの信頼性向上に努めてきた。

本稿では火力発電プラントにおけるボイラ伝熱管内面腐食減肉部の高効率検査技術開発、および原子力発電プラント、火力発電プラント等の熱交換器伝熱管を対象としたパンケーキコイルによる高性能アレイ ECT 技術の開発について述べる。

## 2. ボイラ伝熱管内面腐食減肉部 ECT 技術

### 2.1 背景

火力発電プラントにおけるボイラ伝熱管では、アルカリ腐食等 (図 1) による管内面側の腐食減肉の発生が懸念される。しかし、ボイラ伝熱管は密集して管群を形成しているため、検査部位へのアクセスが難しい場合が多い。ボイラ伝熱管の連続肉厚測定技術としては、水浸超音波探傷を用いた管内挿式超音波肉厚計測技術 [1] の適用が一般的であるが、管内面には腐食反応により生成したスケールが付着するため、超音波による内面減肉の検出は難しい。また、フィン付管は管外面から検査することも不可能である。

このようなことから、当社では内面スケールの影響を受けずに、ボイラ伝熱管内面の腐食減肉を管全長・全周にわたって検査する ECT 検査技術を開発した [2]。

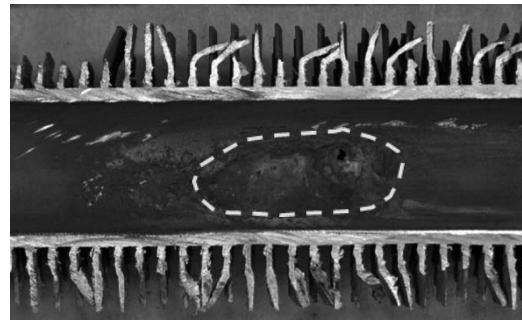


図 1 アルカリ腐食減肉の例

### 2.2 ボイラ伝熱管内面検査用 ECT プローブ

開発した ECT プローブの外観を図 2 に示す。センサコイルには様々な方式があるが、欠陥検出性や欠陥方向識別性、耐リフトオフノイズ性に優れた差動方式のクロスコイルを採用した。図 3 は電磁場シミュレーションにより減肉部に発生する渦電流の状態を確認した結果である。シミュレーション上で、局部減肉や比較的広範囲な減肉等を模擬し、コイル 1 個当たりの渦電流分布を評価した。この結果を基に、管内面全周を見逃しなく検査可能な小型コイルの最適アレイ配置を検討し、プローブを設計した。なお、本プローブのコイル部はフレキシブルな構造となっており、伝熱管溶接部裏波部や管曲げ部等の内径が小さくなる部位もスムーズに通過可能である。

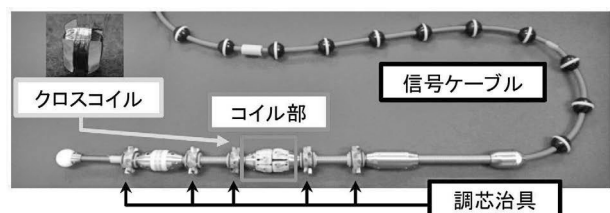


図 2 ボイラ伝熱管内面検査用 ECT プローブ

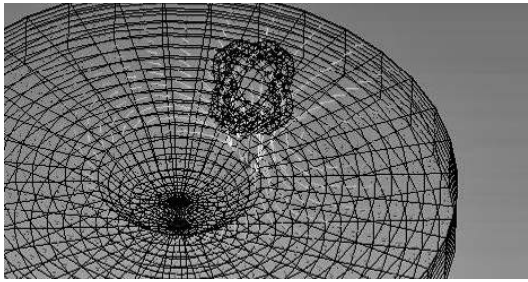


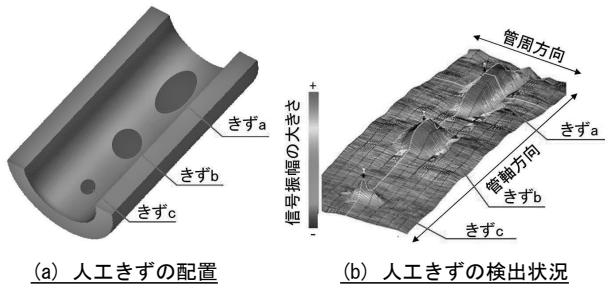
図3 電磁場シミュレーション

### 2.3 検出性、及び深さ評価

開発した ECT プローブの減肉検出性を評価するため、管内面に人工きずを加工したモックアップを用い、検証試験を実施した。図4にきず検出状況を示す。きずは深さを一定(0.5mm)とし、きず幅やきず長さを変化させている。開発した ECT プローブは全ての人工きずを検出可能であった。

図5に ECT による減肉深さ評価値と断面調査による減肉深さ計測値の比較結果を示す。ECT による減肉深さ評価誤差は±0.3mm であり、比較的高精度に減肉深さを評価可能であった。

### 2.4 ECT プローブ搬送検査システム



(a) 人工きずの配置 (b) 人工きずの検出状況

(c) 人工きずの寸法

きず名称	欠陥寸法 [mm]		
	軸方向長さ:L	周方向長さ:W	深さ:D
a	65	18	0.5
b	35	18	0.5
c	10	9	0.5

図4 人工きずの検出状況

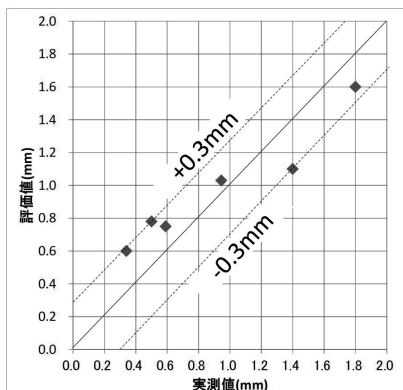


図5 減肉深さ評価結果

図6に水圧搬送 ECT 検査システムを示す。本システムは、図2で示した ECT プローブを伝熱管内部に挿入し、ケーブル搬送装置による駆動力と水圧によってプローブを移動させながら、管の全周及び全長にわたって減肉を検査するものである。

この水圧送型システムは規模が大きく、大型ポンプ・

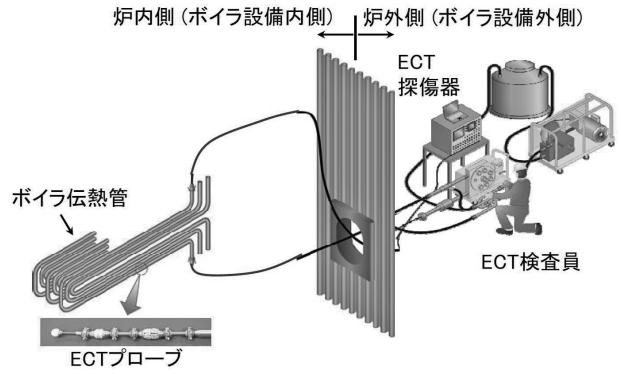


図6 水圧搬送 ECT 検査システム

ケーブル送り装置・貯水タンクの運搬・設置等、検査前の準備・片付け等に時間を要する。そこで、水圧搬送方式に代わるシステムとして、空気圧による搬送方式も開発した。

図7に開発した空気圧搬送 ECT 検査システムを示す。空気圧搬送 ECT 検査システムは、開発した ECT プローブを空気圧によって伝熱管内に挿入し、手動走査によって引き抜きながら検査を行うものである。搬送装置は、空気挿入口とケーブル挿入口を有したものであり、検査対象管との接続はホースバンドを利用する簡便な構造である。

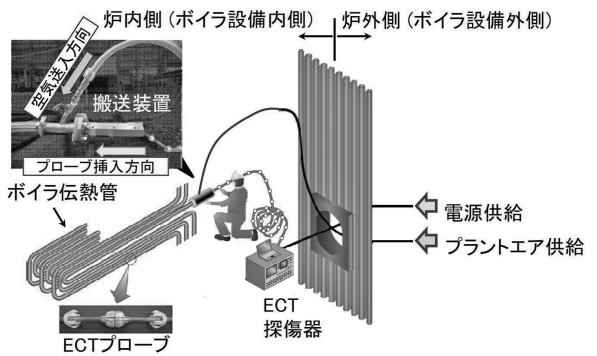


図7 空気圧搬送 ECT システム

図8に空気圧搬送システム用の ECT プローブ外観を示す。ECT コイル部は、図2で示した ECT プローブと同様であるが、信号ケーブルには樹脂性の玉が取り付けられており、空気流れを受けてプローブ挿入力を生じさせるとともに、搬送中の接触摩擦低減とケーブルの座屈

防止を図っている。モックアップパネルによる検証試験の結果、本システムでは、1000L/min 程度の空気流を用いることにより、図9に示す半径 65mm のベンド部を有する HRSG 伝熱管 (全長 40m) を通過可能であることを確認した。1000L/min の空気流量は、発電プラントで使用される一般的なエアコンプレッサの流量で十分対応可能である。本システムは既の実機プラントで検証済みであり [3]、きず検出性は水圧搬送検査システムと同等であること確認している。

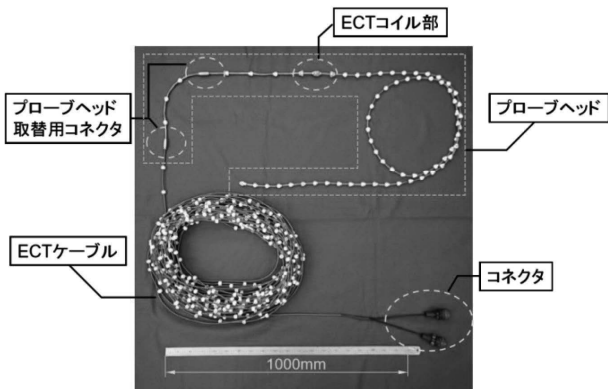


図8 空気圧搬送システム用の ECT プローブ

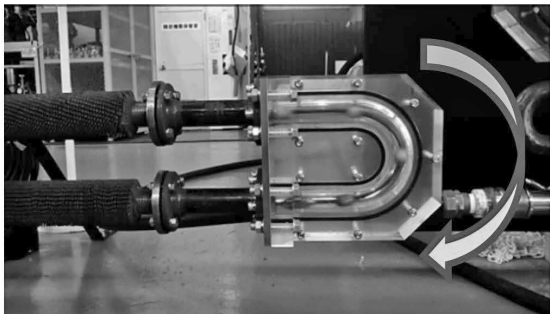


図9 ベンド部 (R65) 通過の状況

空気圧搬送システムは、水圧搬送システムと比べてコンパクトなシステム構成であり、機器をボイラ設備内部に設置可能である。このため、装置設置時間の短縮が可能である。図10にボイラ伝熱管 10本 (40m/本) 検査する場合における両方式の検査時間を比較した結果を示す。現場環境にもよるが、システム簡素化により、検査準備時間が約 1/3 まで短縮でき、検査に要する時間も約 2/3 に短縮できることを確認している。これらの効果により、全体検査工程が 45% 低減する見込みを得た。なお、実際には、検査対象プラントの構造や、環境によって適用可能なプローブ搬送システムが異なるため、都度、水圧搬送・空気圧搬送から適切なシステムを選択して適用することとしている。

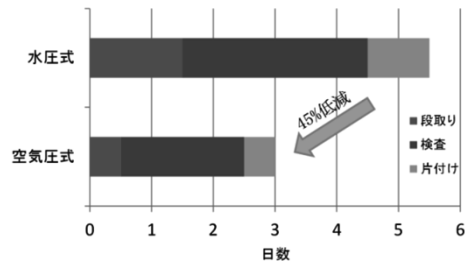


図10 検査時間の比較結果

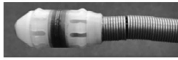

### 3. パンケーキコイルによる高性能アレイ

#### ECT 技術

##### 3.1 背景

各種プラントの熱交換器では、伝熱管に対し定期検査やリーク発生時の損傷部位特定を目的として ECT が適用されている。伝熱管に対する ECT はボビンプローブや回転プローブを適用することが一般的である。双方の特徴を表1に示す。

表1 ボビンプローブと回転プローブの特徴

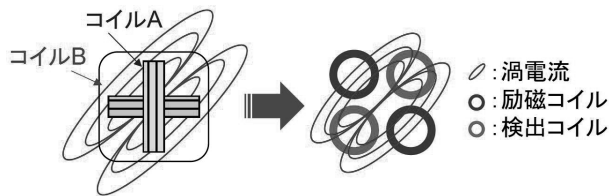
ECTプローブ	長所	短所
ボビンプローブ 	<ul style="list-style-type: none"> <li>検査が高速</li> <li>軸方向欠陥の検出性が高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>周方向欠陥の検出性が低い</li> <li>欠陥の周方向分布把握が難しい</li> </ul>
回転プローブ 	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸・周方向欠陥両方の検出性が高い</li> <li>欠陥分布や性状が高精度に把握できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>螺旋走査を行うため、検査に時間を要する</li> </ul>

一方、昨今の脱炭素社会の流れでプラントの稼働率向上に向けたニーズは高く、これを実現するための検査工期短縮や、迅速な健全性評価、および検査の低コスト化が要求されている。これらの実現のために、当社ではボビンプローブと回転プローブ双方の長所 (高い検出性、高い欠陥分布・性状の識別性・高速探傷) を併せ持ち、比較的 low コストで適用可能な、パンケーキコイルを用いたアレイ ECT 技術を開発した [4]。

##### 3.2 パンケーキコイルによるアレイ ECT の特徴

図11にパンケーキコイルによるアレイ ECT のチャンネル構成と、励起される渦電流について示す。本技術では4つの一般的な薄型パンケーキコイルを励磁コイル2つ、検出コイル2つとして組み合わせる。斜めに配置された2つの励磁コイルにより、クロスコイルと同様に斜め方向の渦電流が励起される。図12に得られるリサー

ジュ波形と欠陥性状の関係を示す。このように、周方向及び軸方向双方の欠陥検出及び識別が可能となる。また、欠陥検出時には2つの検出用コイルで検出される信号の差分をとることにより、周軸方向に一樣なノイズ信号(例:リフトオフ信号)の影響を低減する。このため、割れ等の微小欠陥に対しても高い検出性を持つ。



クロスコイルによる渦電流 パンケーキコイルアレイによる渦電流  
図11 パンケーキコイルによるアレイ ECT のチャンネル構成

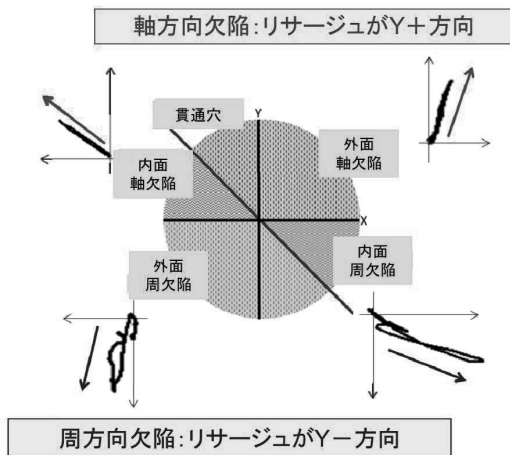


図12 リサージュ波形と欠陥性状の関係

また、図13に示すように、このチャンネル構成をプローブ周方向に並べ、順次励磁コイルと検出コイルを切り替えることで、プローブを回転させることなく、欠陥の周方向分布を把握することが可能となる。

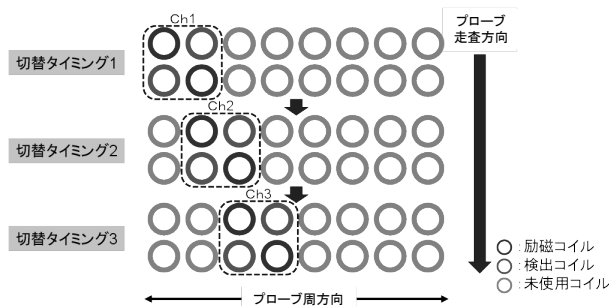


図13 コイル切り替えによる周方向探傷

### 3.3 パンケーキコイルによるアレイ ECT プローブ

上述したパンケーキコイルによるアレイ ECT を適用し、熱交換器伝熱管用のアレイ ECT プローブを開発した。図13にプローブ外観を示す。

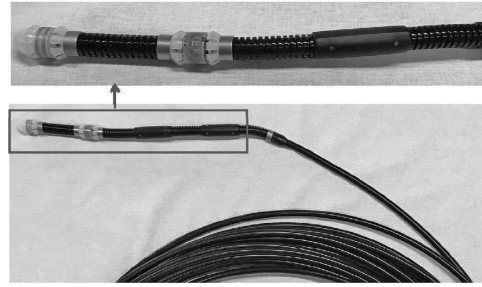


図13 熱交換器伝熱管用アレイ ECT プローブ

本方式は、プローブ周方向に並べるパンケーキコイルの径、およびその個数を調整することにより、様々な伝熱管内径に合わせてカスタマイズ可能であるという特徴を持つ。また、各種プラントの熱交換器伝熱管に使用される SUS304、純チタン/耐食チタン合金 (TTH340、TTH340Pd 等)、銅 (C7060、C6871 等) に対し適用可能である。加えて、一般的なデジタル探傷器で使用可能な仕様となっており、高い汎用性を持つ。また、過去のポビンプローブデータとの連続性確保のために、プローブ上にポビンコイルを加えることも可能である。

### 3.4 検出性

開発した熱交換器伝熱管用アレイ ECT プローブ、およびモックアップを用い、検出性確認試験を実施した。対象欠陥は深さ 20%t ~ 100%t の周軸内外面のスリット、外面減肉や内面ピッチングとした。代表例として、周軸内外面のスリットに対し、励磁周波数 400kHz で探傷した試験結果を図14に示す。全てのスリットが検出可能であることが確認された。

図15には得られたリサージュ波形を示す。リサージュ波形の方向を評価することにより欠陥の向きが判別できることが確認された。また、図16および図17に示すように、外面減肉及び内面ピッチングについても検出が可能である。

### 3.5 パンケーキコイルによるアレイ ECT の応用

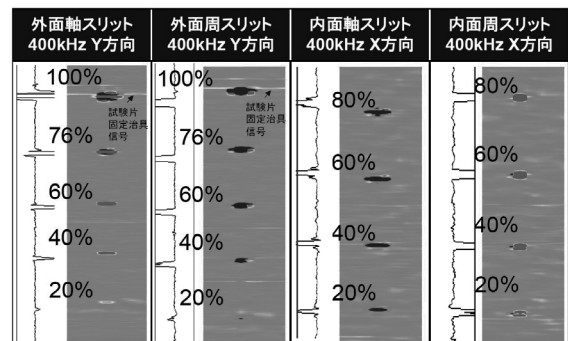


図14 スリット検出性確認試験結果 (400kHz)

軸	C1 (1)	400DIF	軸	C1 (1)	300DIF	軸	C1 (1)	200DIF	軸	C1 (1)	100DIF				
<b>外面軸スリット (20%)</b>															
PP	PV	FX	AN	PP	PV	FX	AN	PP	PV	FX	AN				
0.22	0.14	0.16	41	0.21	0.19	0.10	63	0.21	0.21	0.06	99	0.25	0.19	0.21	151
<b>外面周スリット (20%)</b>															
PP	PV	FX	AN	PP	PV	FX	AN	PP	PV	FX	AN				
0.22	0.18	0.17	45	0.26	0.23	0.13	59	0.32	0.32	0.07	99	0.32	0.23	0.24	135
<b>内面軸スリット (20%)</b>															
PP	PV	FX	AN	PP	PV	FX	AN	PP	PV	FX	AN				
0.61	0.25	0.56	156	0.51	0.24	0.46	153	0.46	0.23	0.41	152	0.48	0.24	0.45	157
<b>内面周スリット (20%)</b>															
PP	PV	FX	AN	PP	PV	FX	AN	PP	PV	FX	AN				
1.45	0.29	1.42	169	1.16	0.32	1.12	165	0.93	0.23	0.91	166	0.78	0.20	0.77	175

図 15 深さ 20%スリットのリサージ波形状

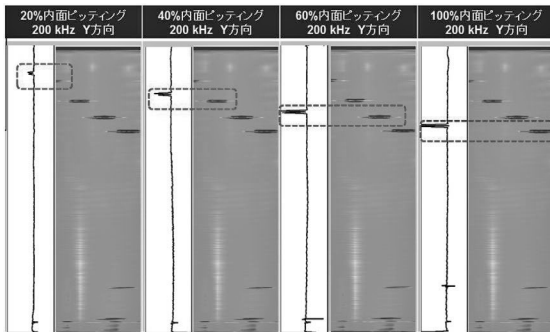


図 16 20 ~ 100%t 深さ内面ピitting検出性確認試験結果 (200kHz)

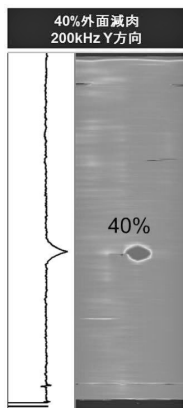


図 17 40%t 深さ外面検出性確認試験結果 (200kHz)

開発したパンケーキコイルによるアレイ ECT 技術は、一般的な薄型パンケーキコイルをアレイ配置した簡便な構造であるため、様々なアプリケーションに応用できる

可能性を持つ。図 18 は、狭隘部検査用に、本技術を用いた例である [5]。このプローブは非常に狭い隙間の検査に用いることを想定している。図 19 は、ペンシル型のプローブ先端に本技術を用いた例である。フレキシブルな素材の上にパンケーキコイルをアレイ配置しており、曲面に追従して検査できるという特徴を持つ。このように本技術を活用することで、従来は検査していなかった、または出来なかった箇所に対する ECT 検査手法の開発が期待できる。

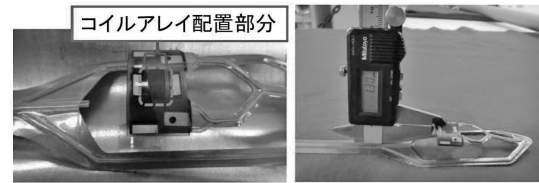


図 18 狭隘部検査用プローブへの応用例



図 19 フレキシブルタイププローブへの応用例

#### 4. まとめ

火力・原子力発電プラントにおいて、各種機器の損傷は重大事故に繋がりがねず、電力を安定的に供給する上で、それらの検査技術は非常に重要である。このため、当社では種々の損傷モードに対応した ECT プローブを開発・適用し、プラントの信頼性向上に努めてきた。本稿では、これらの取り組みのうち、伝熱管検査をテーマとして、2つの技術について述べた。

1つ目はボイラ伝熱管内面腐食減肉を管全長・全周にわたって検査し、且つ減肉深さを定量的に評価可能な管内挿入式 ECT 検査システムである。本システムは、磁性材管内面に発生した腐食減肉を、スケールを除去せずに定量評価でき、実機プラントへ適用可能な当社独自の検査技術である。既に5つの事業用火力発電プラントに適用しており、有効性を検証済みである。

2つ目は、高い検出性、高い欠陥分布・性状の識別性・高速探傷といった特徴を併せ持ち、比較的低コストで適用可能な、パンケーキコイルを用いたアレイ ECT 技術である。様々な管径や材料に合わせてカスタマイズ可能であるとともに、従来検査が難しかった箇所に対応した

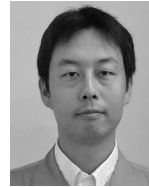
ECTプローブへの応用が期待される。

今後、これらの技術と当社の持つ自動分析技術を組み合わせることにより、より効果的なアプリケーションとすることを目指し、取り組んでいく。

## 参考文献

- [1] 浦田幹康、青木清隆、浦田直矢、和田貴行、椿崎仙市、松本真太郎：“ボイラ伝熱管の高効率肉厚計測技術 ケーブルレスインナー UT”、三菱重工技報、Vol.53 No.4, pp. 72-76、(2016)
- [2] 浦田幹康、山口岳彦、神納健太郎、浦田直矢：“ECTによるボイラ管内面腐食減肉部の高効率検査技術の開発”、非破壊検査、Vol.68 No.11、pp.554-557、(2019)
- [3] 浦田幹康、山口岳彦、浦田直矢、中原強、黒澤裕也、高橋春女：“コンバインドサイクル HRSG のアルカリ腐食減肉技術の開発 (空気圧搬送 ECT)”、三菱重工技報、Vol.55 No.4, pp.95-99、(2018)
- [4] 難波一成、鶴田孝義、長谷部貴士、神納健太郎、黒川政秋：“パンケーキコイルを用いた高性能アレイ ECT 技術の開発”、日本非破壊検査協会 平成 29 年度秋季講演大会概要集、pp.121-122、(2017)
- [5] 難波一成、神納健太郎、黒川政秋、関伊佐夫、鶴田孝義：“原子力発電所に適用される高精度 ECT プローブ開発の歴史”、日本保全学会 第 15 回学術講演会要旨集、pp.391-393、(2018)

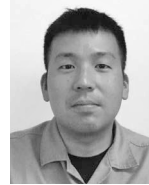
## 著者紹介



著者：山口 岳彦  
 所属：三菱重工業(株) 総合研究所  
 電気・応用物理研究部  
 専門分野：非破壊検査



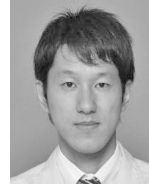
著者：浦田 幹康  
 所属：三菱重工業(株) 総合研究所  
 サービス技術部  
 専門分野：非破壊検査



著者：神納 健太郎  
 所属：三菱重工業(株) 総合研究所  
 電気・応用物理研究部  
 専門分野：非破壊検査



著者：難波 一成  
 所属：三菱重工業(株)  
 原子力事業部 品質保証部  
 専門分野：原子力発電設備の  
 アフターサービス技術



著者：浦田 直矢  
 所属：三菱日立パワーシステムズ(株)  
 サービス本部 呉サービス部  
 専門分野：火力発電設備の  
 メンテナンス技術全般

(2020 年 1 月 30 日)