



# 渦電流アレイを用いた ボイラ火炉壁管の減肉検査技術

Hikichi Tatsuya

引地 達矢<sup>\*1</sup>

Muramatsu Yusuke

村松 佑亮<sup>\*4</sup>

Hara Kazuki

原 和輝<sup>\*2</sup>

Tsuda Akinori

津田 明憲<sup>\*5</sup>

Kobiki Tatsuya

小日置 達哉<sup>\*3</sup>

石炭焚き火力発電所のボイラ火炉壁管は、高温および腐食環境下での使用により腐食減肉やファイヤークラックなどの損傷が発生する。IHI グループでは火炉壁管の損傷評価技術の一つとして新たに渦電流アレイを用いたブラストが不要な減肉検査技術を開発した。本稿では渦電流アレイ検査技術の有効性について紹介する。

**キーワード：** 火力発電所、ボイラ、火炉壁管、渦電流アレイ、腐食減肉

## 1. はじめに

石炭焚き火力発電所のボイラ火炉壁管は燃焼エリアを囲う壁構造となっており、ボイラ耐圧部の大きな割合を占める設備である。この火炉壁管は高温および腐食環境下での使用により、熱疲労や高温硫化腐食が原因とされるファイヤークラックや腐食減肉などの損傷が生じる<sup>(1)(2)</sup>。定期検査においてはこれらの損傷状況を把握し定期的に監視・修繕していくことが重要となるが、火炉壁管は燃焼灰、クリンカやスケールが検査面に付着しており、ブラストによる灰・スケールの除去に

時間を要する。この課題に対して、IHI グループではブラストによる灰・スケールの除去が不要な検査方法として渦電流探傷試験を適用し、ファイヤークラックの検査を実施している。

現在適用している渦電流によるファイヤークラック検査ではリフトオフ（検査面とセンサーの距離）の変化によるノイズが小さいプローブ構造を用いることで、安定したデータ取得が可能としている。その一方で、単一プローブからなる検出信号からは減肉の状況を把握することが難しく、減肉評価には不向きな特徴がある。

\*1：検査事業部 技術部 NDEグループ グループ長

\*2：検査事業部 技術部 NDEグループ

\*3：検査事業部 プラント検査部 品質管理グループ

\*4：株式会社IHI 資源・エネルギー・環境事業領域 カーボンソリューションSBU  
ライフサイクルマネジメント部 技術品質マネジメントグループ

\*5：株式会社IHI 資源・エネルギー・環境事業領域 カーボンソリューションSBU  
ライフサイクルマネジメント部 技術品質マネジメントグループ 主査

本稿では火炉壁管に生じる腐食減肉のブラスト施工なしでの検査方法を検討するとともに、その有効性について検証した内容を紹介する。

## 2. 電磁気を用いた検査技術の市場とボイラ火炉壁管の減肉検査への適用性について

鋼板や鋼管の減肉を測定する方法として、超音波による厚さ測定が広く用いられているが、表面に塗装が施工されている場合や、灰やスケールが付着している場合は、超音波の伝搬過程で損失が生じ測定が困難となってしまう。このため、超音波による厚さ測定を実施する場合は前処理としてスケールや灰・塗膜の除去を行う必要がある。また、広い範囲を検査する場合などは、前処理に多くの時間を費やすため、前処理を必要としない効率的な検査方法が求められる。

前処理が不要な検査手法としては表 1 に示す

電磁気を用いた手法が適しており、スケールや灰・塗膜の上から減肉の検出や板厚測定が可能である。いずれも塗膜上からの検査が可能であり、検査面が平滑な状態であればセンサー走査による連続的な検査も可能である。検査分解能は使用するセンサーにもよるものの、比較的広い範囲や長距離での検査に適しており、スクリーニング検査としては有効な方法である。

ボイラの火炉壁管への適用を想定した場合は、配管形状に合わせるとともに、灰やスケールによるリフトオフの影響を考慮する必要がある。また、減肉の性状は一様ではなく、腐食の進行状況によって減肉模様が変化するため、初期の減肉であるか、または損傷が進んでいるかを判断するには、解像度の高い情報を得る必要がある。火炉壁管への適用においては、配管形状に最適化しやすく、また表面のきずや凹みを精度よく検出できる渦電流アレイが適すると考えた。

表 1 電磁気を用いた減肉の検出に適用可能な検査方法

	検査技術	減肉検出		厚さ測定	特徴
		外面	内面		
1	パルス渦流探傷 <sup>(3)</sup>	—	○	○	パルス電流をコイルに流すことで試験体表面に渦電流が発生し、減衰する渦電流の時間変化から板厚を測定する技術。
2	電磁超音波 <sup>(4)</sup>	—	○	○	磁石による磁場とコイルによる渦電流との相互作用により試験体表面に超音波を発生させ板厚を測定する技術。
3	低周波電磁誘導法 <sup>(5)</sup>	○	○	—	通常の渦流探傷よりも試験周波数を低くすることで試験体内面まで渦電流を浸透させ、試験体内外面のきずを検出する技術。
4	渦電流アレイ <sup>(5)(6)</sup>	○	—	—	規則的に配置した複数の渦電流コイルを電子的に制御することにより一度に広い範囲を探傷することができる技術。
5	漏洩磁束法 <sup>(6)</sup>	○	○	—	試験体を磁化することで試験体内部に磁束を発生させ、欠陥などの不連続部から漏洩する磁束を検知する技術。

○：有効、—：不向き（課題あり）

### 3. 渦電流アレイの特徴について

渦電流探傷は図1に示す通り金属などの導電体の表面に発生させた渦電流の変化を電気信号として検出する技術である。渦電流アレイは渦電流探傷のコイルを規則的に配置し、電子的に送受信を制御することで一度に広い範囲を検査するとともに、得られた信号を諧調表示することで、きず指示を画像化することができる。また、コイルの送受信レイアウトを変えることで検出するきず方向を制御することができ、図2に示すような配置とした場合には、軸方向配置（以下、Axial）では縦きずを、横方向配置（以下、Transverse）では横きずを検出することができる。

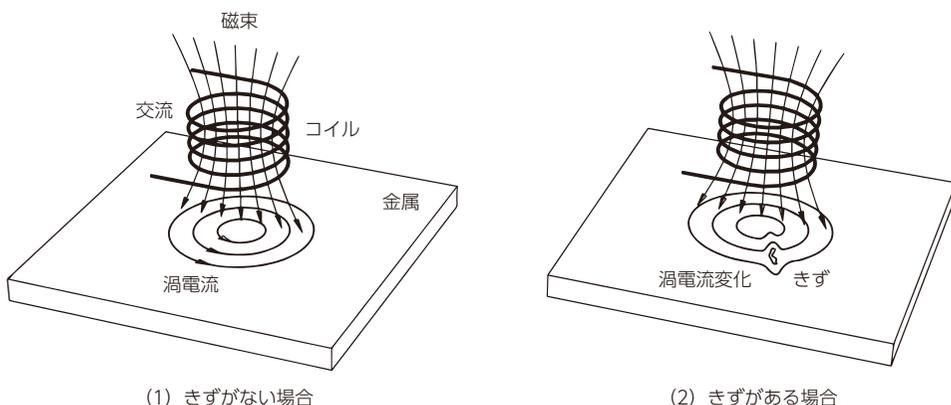


図1 渦電流探傷の原理

### 4. 平板試験体による減肉部の検出確認

渦電流アレイの火炉壁管への適用に当たっては、灰やスケールの上から検査を行うことを前提に、ガタ信号となるリフトオフの影響を最小限に抑えつつ、検出対象の腐食減肉を検出する必要がある。図3に平板試験体における模擬きずの試験結果を示す。試験体の左側には樹脂製の段差を配置している。樹脂製段差、スリット、溝穴はそれぞれリフトオフ、ファイヤークラック、腐食減肉を模擬しており、3種の典型的な信号を試験的に得ることを目的としている。また送受信レイアウトを Axial および Transverse の2条件とし試験を行った。

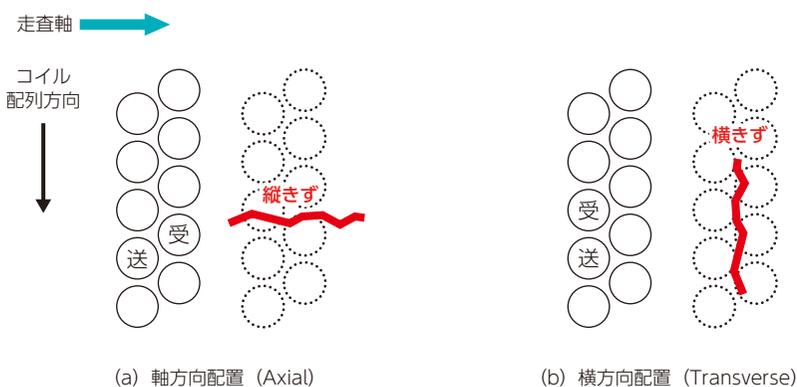


図2 渦電流アレイセンサーの送受信レイアウト例

試験の結果では、Axialは溝穴形状が明瞭に確認でき加工深さに応じて信号差が認められるものの、樹脂段差も同等の信号レベルで検出している。また、スリット部についてはいずれの深さも検出しているが、加工深さが0.5～2.0mmの範囲では信号レベルに明らかな差はなかった。一方、Transverseでは樹脂段差の信号が画像上には現

れておらず、スリット部については加工深さに応じた信号レベルの差が認められた。なお、溝穴部については明瞭に形状を確認できなかった。

上記結果は、Axialについては溝穴部が明瞭に確認できるように、Transverseについてはスリット部が明瞭に確認できるように位相角度を回転させた表示画像である。図4に試験体の中央を通るコ

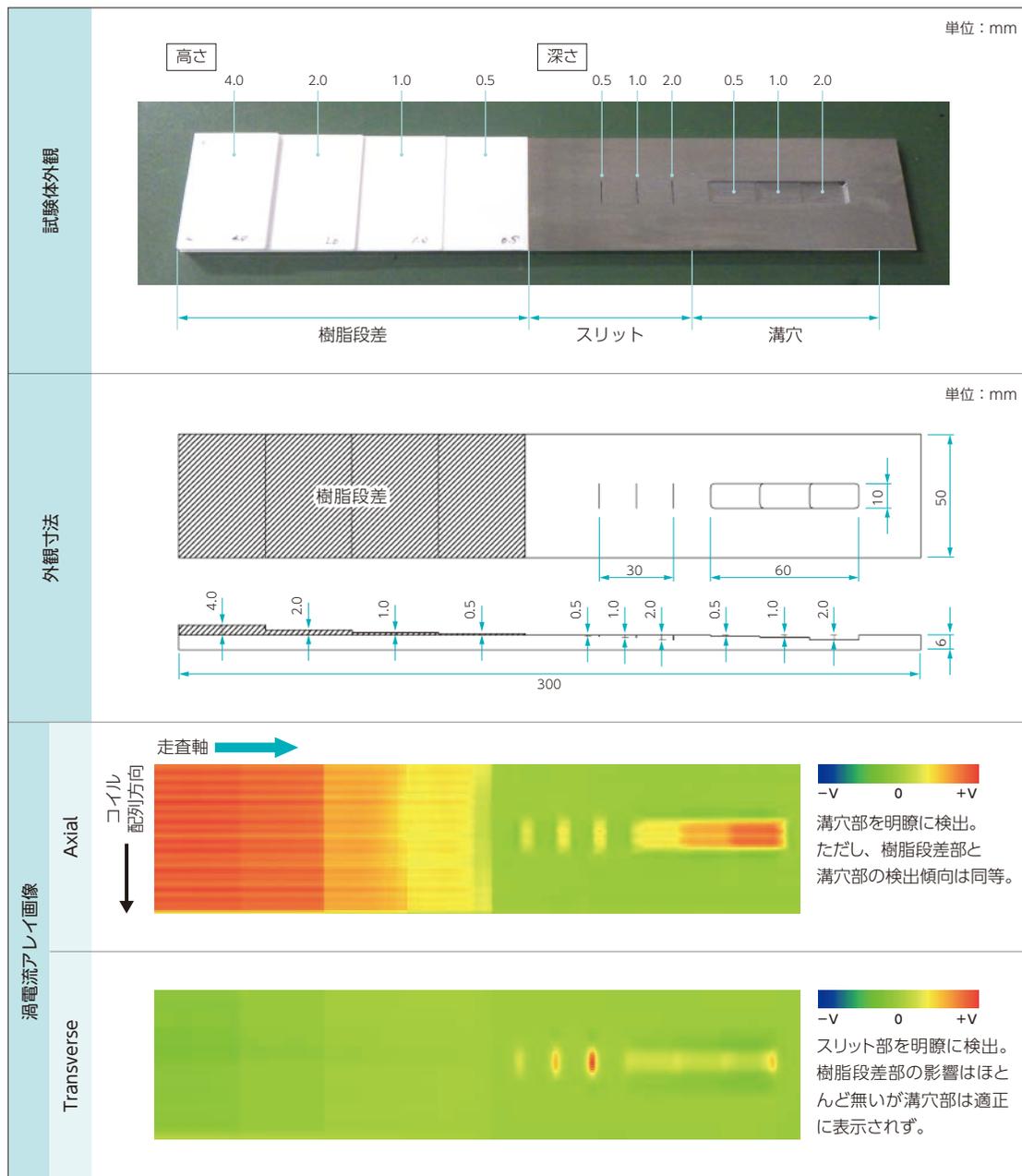


図3 平板試験体の渦電流アレイ画像

イル信号の代表波形を示す。図に示す通りリサーチ波形では位相角度の調整に関わらず樹脂段差部と溝穴部の位相角度の差が小さいことが分かる。これは、樹脂段差部と溝穴部の信号が類似しており、金属面からのリフトオフの変化量に大き

く依存しているためと考えられる。特に Axial においては樹脂段差部と溝穴部の位相角度が近接しており信号を分離して評価することは難しい。火炉壁管への適用にあたっては、走査時のガタ信号となるリフトオフ変動の低減が課題となる。

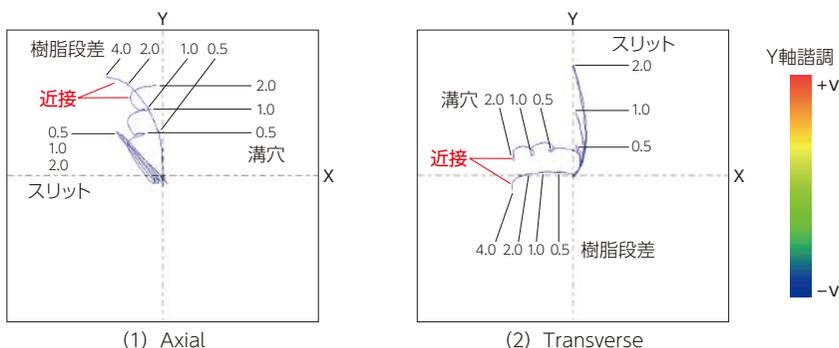


図 4 平板試験体中央部を通るコイルのリサーチ波形

## 5. 火炉壁管への適用

火炉壁管に付与した模擬きずの探傷結果を図 5 に示す。なお、加工部の検出信号がマイナス値となるように図 4 の位相を 180 度回転させて表示している。また、試験体の加工部表面には形状が視認しやすいよう塗装で着色した。

試験の結果、すべての模擬きずの位置できず指示が検出された。なお、きずの種類ごとに検出さ

れる位相角度が異なるため、図 5 では減肉および周方向のスリットがそれぞれ明瞭に確認できる位相角度にて画像を表示した。模擬きずを対象とした試験結果ではあるものの、火炉壁管の形状であっても減肉が検出可能であることや、周方向のスリットが加工深さに応じ諧調表示されていることから、渦電流アレイの適用は減肉検査に有効であるといえる。

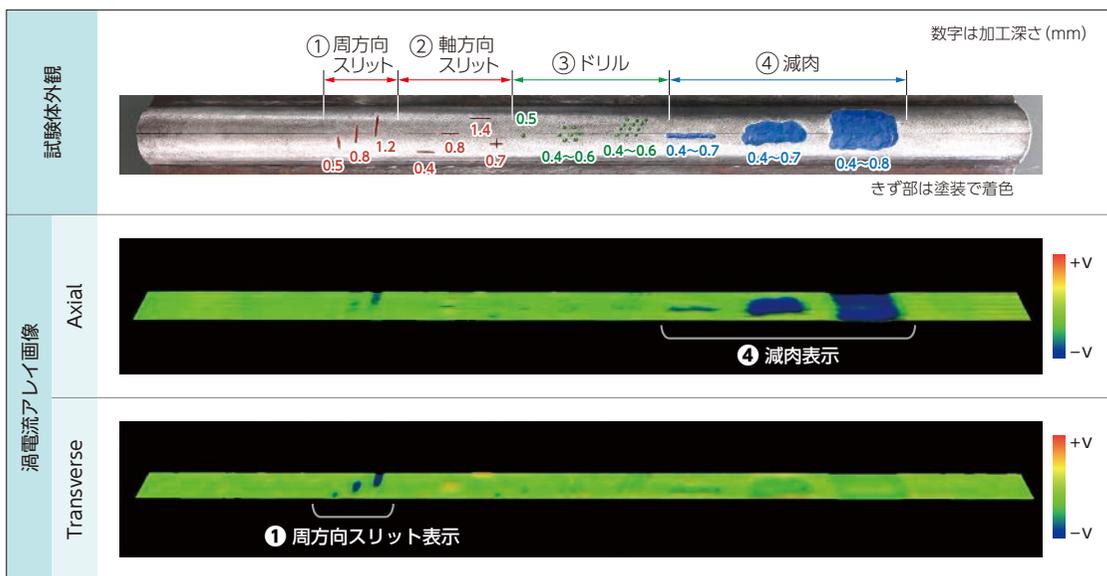


図 5 火炉壁管試験体（模擬きず）を用いた渦電流アレイ探傷結果

またさらに実機への適用にあたり、腐食状態を模擬した試験体を製作し検証を行った。図6に火炉壁管の腐食減肉写真および製作した試験体写真を示す。部分的に減肉が認められる「A. 腐食減肉 小」と全体に減肉が認められる「B. 腐食減肉 大」のほか、腐食減肉とファイヤークラックが混在している「C. 混在」の3パターンを模擬し製作した。

腐食減肉を模擬した火炉壁管試験体の探傷結果を図7に示す。試験体の加工部表面には形状

が視認しやすいよう塗装で着色している。また、Axial では研削部を、Transverse ではスリット部が確認できる条件にて画像を表示した。

試験の結果では研削範囲が明瞭に確認でき、また、加工形状も試験体写真と一致していることが分かる。さらに、Axial では識別ができていないスリット部分については Transverse にて検出をしており、それぞれの送受信レイアウトでのきず検出性の特徴が表れている。この探傷方法を用いることができず種別の判断やきずごとの評価が可能

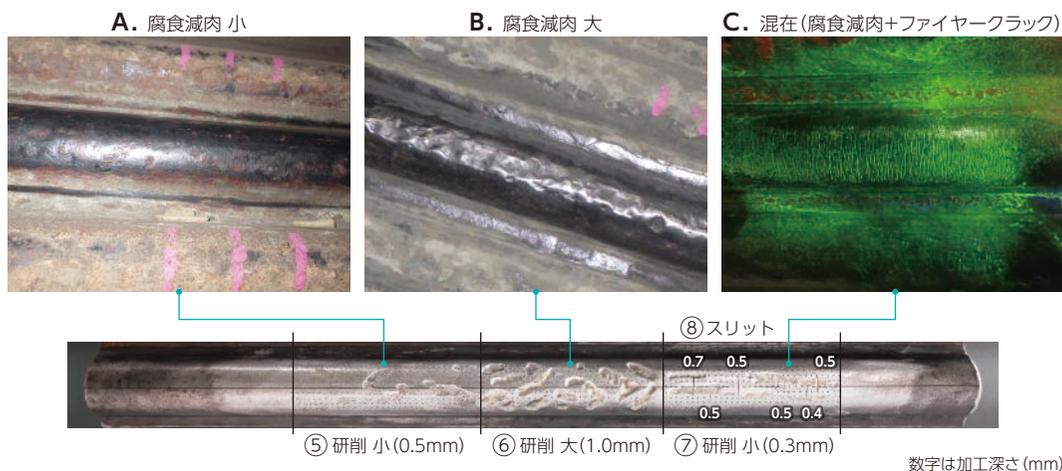


図6 火炉壁管試験体（腐食減肉模擬）

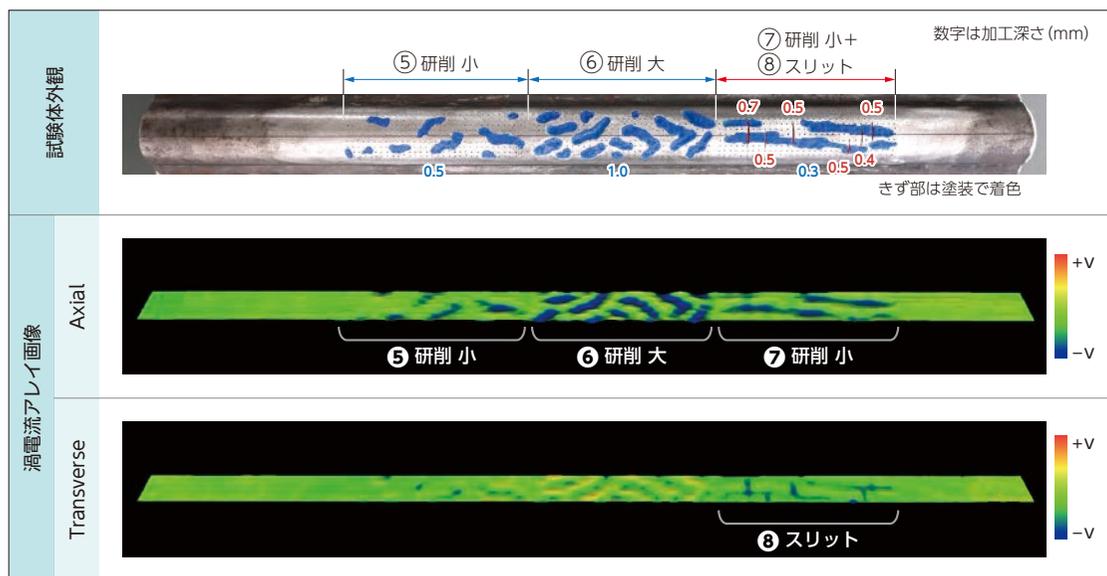


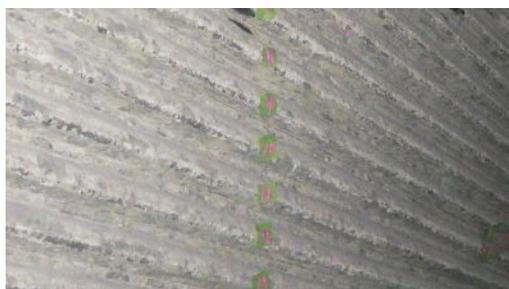
図7 火炉壁管試験体（腐食減肉模擬）を用いた渦電流アレイ探傷結果

となり、損傷評価においてより詳しく表面状態を把握することができる。

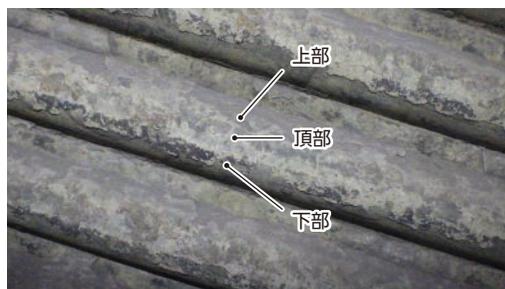
以上の結果より渦電流アレイの有効性が確認できたことから実機にて検証試験を実施した。なお、対象はヘリカル管として、灰・スケールが付着している状態で試験を行った。付着灰の厚さは火炉内のエリアによっても異なり、また、管の上部/頂部/下部によっても異なる。今回の検証エリアではおよそ 400 ~ 1000 $\mu\text{m}$  の灰の付着が認

められた。なお、計測には電磁膜厚計を用いており、膜厚計の値はワイヤーブラシで落とせる灰のほか、ブラシでは落とせない硬質灰および酸化スケールも含む値となっている。図 8 に検証エリアの火炉壁管写真を示す。写真の箇所は付着灰の厚さが平均で 700 $\mu\text{m}$  程度であった。

図 9 に実機火炉壁管における渦電流アレイの探傷結果を示す。付着灰が 700 $\mu\text{m}$  程度ある場合でもガタ信号の影響もなく安定したデータ取得が



(1) 検証エリア



(2) 火炉壁管の拡大写真

図 8 火炉壁管の灰の堆積状況

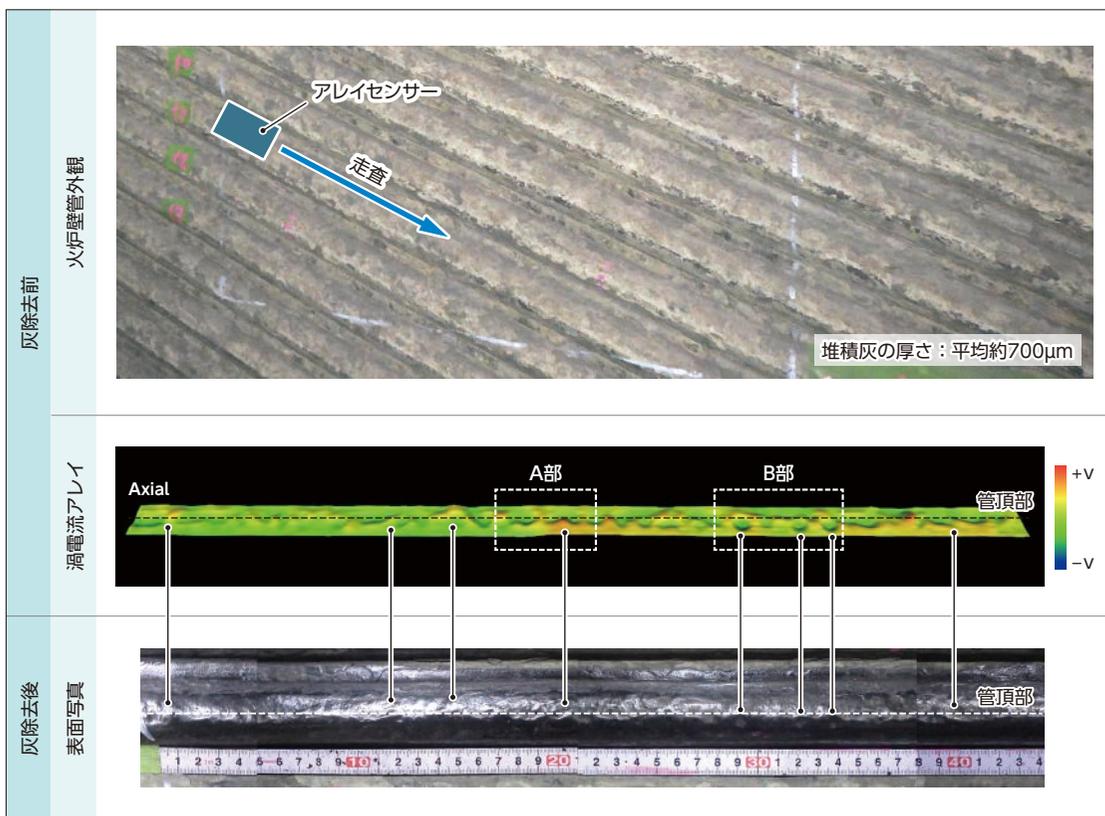


図 9 実機火炉壁管における渦電流アレイ探傷結果

可能であった。図 10 に代表箇所の拡大画像を示したが、灰除去前後の比較においても減肉形状が一致しており、渦電流アレイの適用が有効であることが分かる。渦電流アレイは、灰・スケール上からの探傷であっても火炉壁管の表面状態を画像化し、損傷の状態を把握することができる検査方法であるといえる。

## 6. ボイラ火炉壁管への検査展開について

渦電流アレイは前処理を必要としないことが

らスクリーニング検査に適しており、検査範囲が広いほど相対的に画像比較ができ、損傷の程度や分布を把握しやすくなる。また、従来の超音波厚さ測定や磁粉探傷試験を実施する場合でも、スクリーニング結果をもとに調査範囲が絞れることから、ブラスト作業や研削作業の省力化とともに、計画的な検査を行うことが可能となる。図 11 に検査イメージを示す。そのほか、ブラスト作業後の目視検査の代替としての活用も期待でき、客観性および記録性に優れた検査が可能となる。

なお、付着した灰の上から検査するにあたって

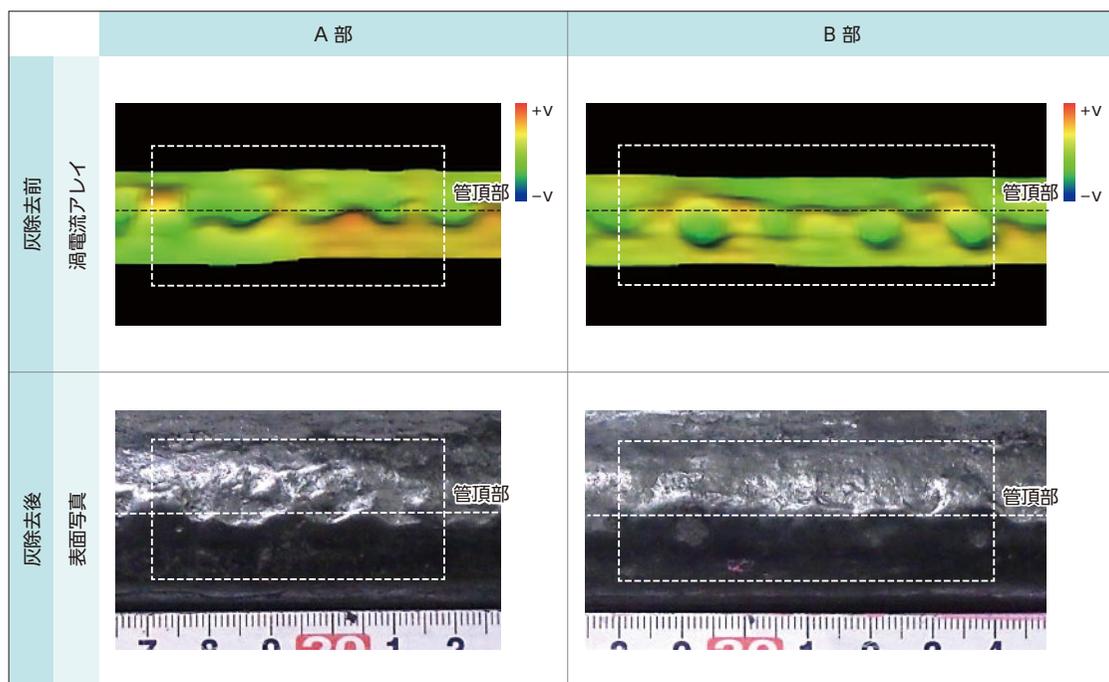


図 10 実機火炉壁管における渦電流アレイ探傷結果（拡大画像）

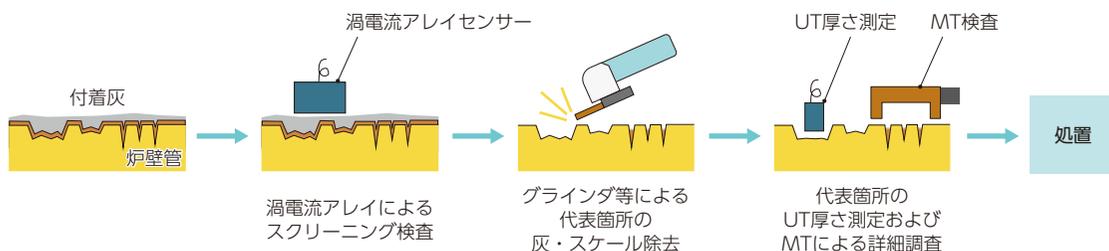


図 11 ボイラ火炉壁管の減肉検査イメージ

は、灰の影響によるリフトオフを考慮した感度補正と、配管材質の電気的特性に合わせた位相角度の調整が必要となる。そのほか、エリアごとに灰の付着量の違いが想定されることから、検査する火炉壁の状態を事前に調査する必要がある。

## 7. まとめ

火炉壁管に生じる腐食減肉の検査方法の検討とともに、渦電流アレイの適用の有効性について紹介した。渦電流アレイは火炉壁管に付着した灰の上からでも管表面の損傷状況を確認できる技術であり、センサーを検査対象物に合わせ最適化することで適用の幅を広げることができる技術である。なお、本稿では渦電流アレイを用いた検討結果を紹介したが、そのほかの電磁気を用いた検査技術についても簡便に検査ができる手段として活用が期待される技術である。よりニーズに合った検査方法を提供できるよう、引き続き検査技術の向上とともに、発電プラントの安定運用に寄与したい。

## 参考文献

- (1) 茂田潤一：  
火力発電ボイラにおける高温硫化腐食  
IIC REVIEW、No.44、2010/10、pp29-33
- (2) 津田明憲、本間一茂：  
火炉壁管ファイアクラック検査技術  
IIC REVIEW、No.65、2021/04、pp49-52
- (3) 前角貴弘、北園夏未、大森真実、  
水上孝一、佐々木孝明：  
パルス渦流探傷試験（PEC法）を用いた  
減肉検査の基礎検討  
IIC REVIEW、No.64、2020/10、pp8-12
- (4) ダコタ・ジャパン株式会社ホームページ  
（電磁超音波厚さ計（EMA）の測定原理・特徴）  
[https://www.dakotajapan.com/product/e\\_t\\_gauge/principle/](https://www.dakotajapan.com/product/e_t_gauge/principle/)
- (5) ディービー株式会社ホームページ  
<https://www.db-kk.com/>
- (6) Eddyfi Technologies ホームページ  
<https://info.eddyfi.com/ja-jp/>



検査事業部 技術部  
NDE グループ グループ長

引地 達矢

TEL 045-759-2120

FAX 045-759-2146



検査事業部 技術部  
NDE グループ

原 和輝

TEL 045-759-2120

FAX 045-759-2146



検査事業部 プラント検査部  
品質管理グループ

小日置 達哉

TEL 045-759-2527

FAX 045-759-2146



株式会社 IHI  
資源・エネルギー・環境事業領域  
カーボンソリューション SBU  
ライフサイクルマネジメント部  
技術品質マネジメントグループ

村松 佑亮

TEL 03-6204-7520



株式会社 IHI  
資源・エネルギー・環境事業領域  
カーボンソリューション SBU  
ライフサイクルマネジメント部  
技術品質マネジメントグループ 主査

津田 明憲

TEL 03-6204-7520