

# 工程短縮に寄与する超音波技術を活用した プラント設備の高効率検査サービス

High-efficiency Inspection Service of Plant Facilities Utilizing Ultrasonic Technology  
that Contributes to Process Shortening



浦田 幹康\*<sup>1</sup>  
Mikiyasu Urata

久保田 雄貴\*<sup>2</sup>  
Yuki Kubota

石本 雄介\*<sup>3</sup>  
Yusuke Ishimoto

和田 貴行\*<sup>4</sup>  
Takayuki Wada

大山 博之\*<sup>5</sup>  
Hiroyuki Ohyama

火力・原子力などの発電プラントでは、定期検査の工程短縮が求められており、高効率な検査サービスの確立が望まれている。しかしながら、プラント配管や、ボイラ伝熱管の腐食減肉検査には、足場架設や、管外面スケール除去などの付帯工事が発生するため、それらに係る時間とコストの低減が課題であった。その対策の一例として、最小限の付帯工事でプラント配管の減肉部を効率的にスクリーニング可能な検査サービスと、外面スケールを除去することなく、ボイラ伝熱管の肉厚と内面スケール厚さを計測可能な検査サービスを開発した。これらにより、プラント設備の腐食減肉検査に必要な付帯工事を低減し、定期検査の工程短縮に貢献する。

## 1. はじめに

火力・原子力などの発電プラントは、高温・高圧・腐食環境で長時間運用するため、経年的な劣化に伴う各設備の損傷が懸念される。中でも、主要水管や主要二相流配管などのプラント配管や火力ボイラ設備の伝熱管では、腐食や摩耗などによる管の減肉損傷が発生しており<sup>(1)</sup>、特に経年化が進むプラントでは損傷発生リスクが増加し、定期的な保守管理の重要性が高まると予想される。しかしながら近年は、プラントの定期検査期間(工程)の短縮や、検査コスト低減が強く求められていることから<sup>(2), (3)</sup>、損傷発生リスクが増加した設備に対して、信頼性向上と期間・費用の低減を両立可能な保守技術の確立が課題である。

これに対し三菱重工業株式会社(以下、当社)では、損傷が懸念される設備を正確、かつ効率的に検査可能な技術を開発し、検査サービスとしてお客様に提供している。本報では、当社が提供する検査サービスの例として、ガイド波を活用したプラント配管の腐食減肉スクリーニングサービスと、EMAT(Electro Magnetic Acoustic Transducer)を活用したボイラ伝熱管の前処理レス検査サービスを紹介する。

## 2. プラント配管およびボイラ伝熱管の従来検査技術の課題

まず、プラント配管の損傷事例と従来の検査技術の課題について述べる。図1に示すように、プラント配管では、FAC(Flow Accelerated Corrosion:流れ加速腐食)や、CUI(Corrosion Under Insulation:保温材下腐食)などの腐食減肉が配管の内表面や外表面に発生する場合があるため、定期的な検査により損傷の発生状態を把握する必要がある。損傷状態を把握する手法として、例えば火力発電設備のプラント配管については、日本機械学会から減肉管理技術規格<sup>(4)</sup>が

\*1 総合研究所 電子・物理研究部 工博

\*2 総合研究所 サービス技術部

\*3 エナジードメイン SPMI 事業部 営業部

\*4 エナジードメイン SPMI 事業部 営業部 主席チーム統括

\*5 エナジードメイン SPMI 事業部 技術部 主席技師

発行されており、主要水管や主要二相流配管は、定期的な検査と腐食減肉の傾向監視が求められている。ここで、現状のプラント配管の検査は、主に超音波による肉厚計測や外観目視検査が採用されているが、検査部位によっては、足場架設や保温材の撤去が必要になり、検査のための付帯工事に多大な時間とコストを要している。また、昨今は定期検査の工程短縮が進められており、過去の検査記録や実績などから、検査対象部位を限定するケースがあるが、プラントの運転状態によっては、検査対象とした部位が必ずしも最大損傷懸念部であるとは限らない。これらのことから、配管の腐食減肉検査では、付帯工事の最小化が可能で、かつ損傷発生懸念部を漏れなく迅速に検査するための高効率な検査手法の確立が課題である。

次に、火力発電プラントのボイラ設備における伝熱管の損傷事例と、従来の検査技術の課題について述べる。ボイラ伝熱管では、[図2](#)に示す火炉蒸発管の硫化腐食や管内面の孔食が発生する場合があります。プラント配管と同様に、超音波による肉厚計測や外観目視検査が実施されている。また、ボイラ伝熱管で生じるクリープ損傷に対する寿命評価のパラメータとして、ボイラ運転中に曝されていたメタル温度が必要であり、管内面に生成した内面スケール(水蒸気酸化スケール)の厚さを超音波で計測し、その厚さからメタル温度を推定する手法が知られている<sup>(5)</sup>。この肉厚計測と内面スケール厚さ計測は、いずれも管の外面に超音波探触子(センサ)を当て、センサからの超音波信号を解析することでそれぞれの厚さを計測するものである。しかしながら、ボイラ伝熱管の外面は外面スケール(大気酸化スケール)が生成しており、検査の前にスケールを除去する必要があるが、外面スケールの除去にはサンドブラスト処理やグラインダーによる研磨作業などが必要であり、多大な時間やコストを要している。これらのことから、ボイラ伝熱管の腐食減肉検査では、検査に係る時間やコストの低減を実現するうえでネックとなる外面スケールの除去作業を撤廃可能な検査手法の確立が課題である。

これらの課題に対して開発した技術とサービスを次章以降に示す。



図1 プラント配管の損傷事例  
(FAC:Flow Accelerated Corrosion:  
流れ加速腐食)



図2 ボイラ伝熱管の損傷事例  
(硫化腐食:表面スケール除去後)

### 3. ガイド波によるプラント配管損傷スクリーニング技術

#### 3.1 ガイド波による検査システム構成

2章で述べたプラント配管検査の課題を達成するためには、一つの検査ポイントに対して、一度に広範囲を検査可能な技術が有効と考えた。そこで、非破壊検査によく用いられる超音波に比べ、配管の金属内の長い距離(数m~数十m)を伝搬するガイド波に着目し、ガイド波によるプラント配管損傷スクリーニング技術を開発した。[図3](#)にガイド波による配管損傷スクリーニング技術の

システム構成を示す。ガイド波は、配管長手方向に長距離伝搬可能なモードの超音波であり(6)、配管に発生した腐食減肉のスクリーニングに有効と考えた。減肉検出原理は一般的な超音波探傷技術(UT:Ultrasonic Testing)と同様であり、センサから配管長手方向に送信されたガイド波が、減肉などの配管断面形状変化部で反射し、その反射波をセンサが受信して減肉有無を評価する。

図4に開発したガイド波センサを示す。本センサはリング状であり、リング周方向に複数の送受信チャンネルを有するマルチチャンネルタイプである。また、複数の受信チャンネルで得られた信号を FMC/TFM (Full Matrix Capture and Total Focusing Method) 処理<sup>(7)</sup>することで、SNR (Signal-Noise Ratio) の改善を図り、従来ガイド波技術では適用が難しいとされていた<sup>(8)</sup>エルボ部の欠陥検出を可能とした。また、本検査結果は、FMC/TFM にて処理されたカラーマップにて表示されるため、減肉や断面形状変化といった反射源の位置情報を視覚的に理解することができる。なお、検査結果の出力例は、3.2 の検証試験結果に示す。

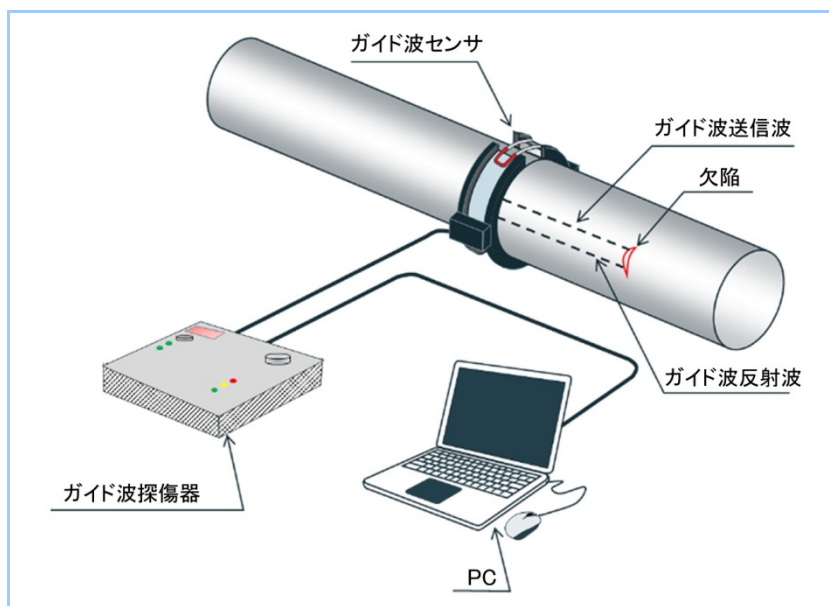


図3 システム構成



図4 ガイド波センサ

### 3.2 モックアップ配管による検証試験

図5にモックアップ配管による検証試験結果を示す。モックアップは、 $\Phi 216.3\text{mm}$  (200A・炭素鋼配管)の直管であり、溶接部を含む長さ11mの長尺配管である。なお、モックアップの端部から5m位置の配管外表面には、ピット状の腐食を模擬した人工欠陥(断面欠陥率1%)を、端部から10mの位置の配管外表面には、広範囲な減肉を模擬した人工欠陥(断面欠陥率1.7%)を付与した。ここで、断面欠陥率とは、配管健全部横断面の面積に対して欠陥の投影面積が占める割合のことである。直管モックアップ配管の検証試験の結果、いずれの欠陥付与位置にも反射信号を



検出した。

図6にエルボ部を有したモックアップ配管による検証試験結果を示す。本モックアップのエルボ部の背側の配管外表面には、断面欠陥率 1.5%の人工欠陥を付与した。検証試験の結果、エルボ部の人工欠陥からは十分な SNR の信号が得られたため、エルボ部にも適用可能であると判断した。なお、本技術は配管長手方向位置および周方向位置における減肉有無を評価することは可能であるが、肉厚の計測はできない。

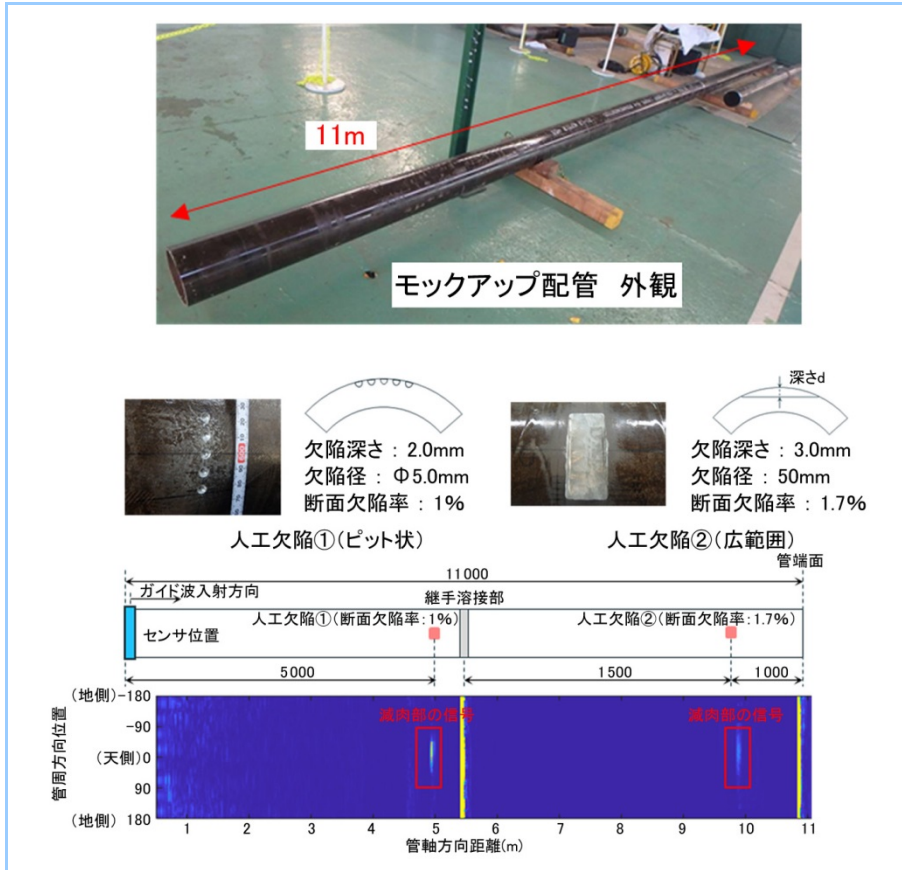


図5 モックアップ配管検証試験結果(直管)

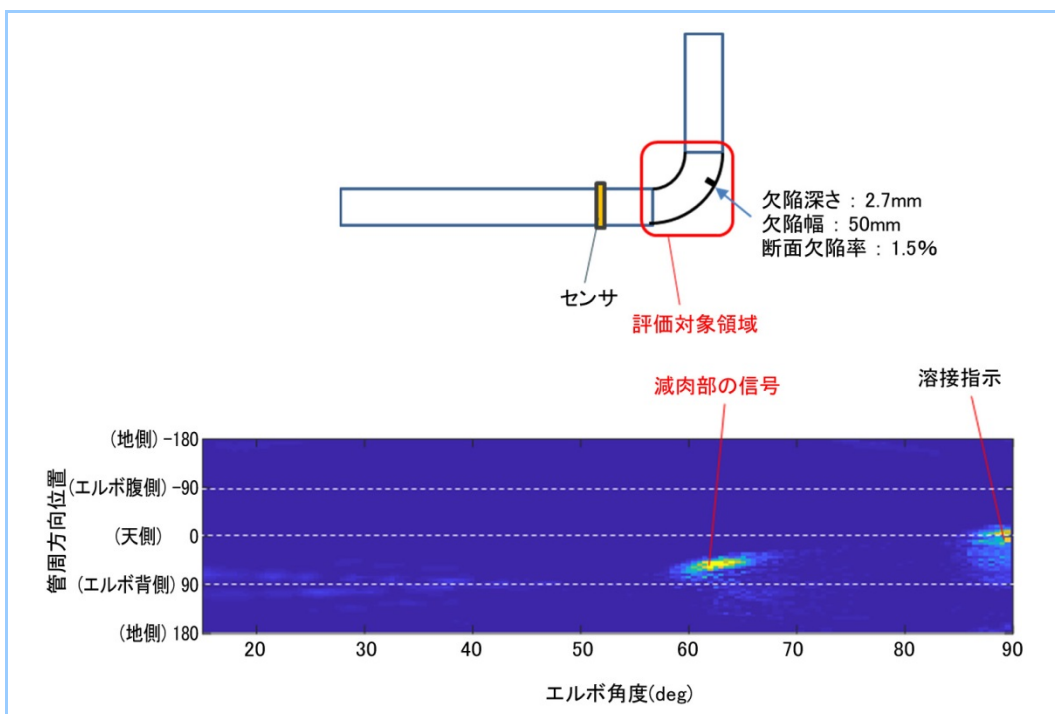


図6 モックアップ配管検証試験結果(エルボ)

### 3.3 実機プラントにおける検査事試験結果

開発したガイド波による検査システムの実機プラント配管への適用性を評価するため、保温材が設置された実機主要水管による検証試験を実施した。図7に検証結果の一例を示す。実機プラントにおける検証の結果、ガイド波では顕著な減肉は見られなかったものの、配管付帯物の影響を確認することができた。具体的には、本配管の周溶接部・保温ラグ等であり、図面情報と比較することで欠陥と区別可能であった。また、10m 先の付帯物からの反射信号を検出できており、センサから片側10m(センサから両側送信可能であるため最大20m)の範囲を検査可能であることを確認した。

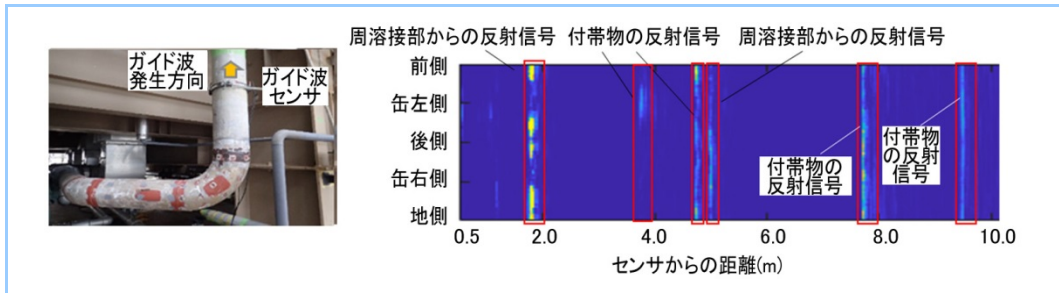


図7 実機プラント配管検証試験結果

### 3.4 本技術を用いたサービスと提供価値

表1にプラント配管における従来検査と、ガイド波によるプラント配管損傷スクリーニング技術の比較結果を示す。前述したように、従来のプラント配管検査は、都度足場架設・保温材撤去が必要であるが、ガイド波による検査の場合は、センサ設置部の保温材撤去が必要であるものの、検査範囲全域の保温材を撤去する必要はなく、付帯工事を最小化可能である。また、従来検査は定点計測であるのに対し、本技術では最大20mの範囲の損傷有無を一括評価でき、広範囲の損傷を効率的にスクリーニング可能である。

以上の結果から、本技術によるスクリーニングサービスにより、付帯工事を最小化することで、検査コストの低減と、検査がクリティカルパスとなっている定期検査の工期短縮に貢献できると考える。また、広範囲の検査結果を従来検査よりも早くお客様に提供することで、検査に伴う取替工事による定期検査延長リスクを低減するとともに、限られた期間で最大損傷部位を見逃すリスクを低減し、プラント設備の信頼性確保と電力の安定供給に貢献する。

表1 従来手法とMHI 開発ガイド波の比較

項目	従来手法(一般 UT)	MHI 開発ガイド波
足場架設	検査部位全て架設	一部架設
保温撤去	検査部位全て撤去	一部撤去
配管の表面処理	配管表面磨きが必要	配管表面磨きが不要
センサ設置	-	フタタッチで設置可能(接触媒質必要) 設置時間:約 10 分/箇所
欠陥検出性	減肉位置の肉厚評価が可能	検出のみ
検査範囲	定点	広範囲(最大 20m)
直管検査	可能	可能
エルボ検査	可能	可能 (ただしヶ所のみ)
探傷結果の評価	波形による判定 (肉厚値)	合成波形を画像化し、視覚的に検出有無を判定 (管軸方向に加えて管周方向の減肉位置情報も得られる)

## 4. EMAT を活用した前処理レス検査技術

### 4.1 EMAT 原理および外観

2章に示したボイラ伝熱管検査の課題達成のためには、管外面スケール上から管の肉厚を計測可能な技術が有効と考えた。そこで、外面スケールが生成した状態でも伝熱管の外表面に渦

電流を発生させることで、非接触で肉厚計測が可能な電磁超音波に着目し、電磁超音波を発生させることができる EMAT による計測技術を開発した。図8に EMAT の外観を、図9に構成図を示す。EMAT は主に永久磁石とコイルから構成され、コイルに高周波電流を加えることにより電磁超音波を発生させる<sup>9)</sup>。肉厚計測方法は、従来の超音波による肉厚計測と同様であり、計測対象の管外面に EMAT を設置し、電磁超音波を管内面側に入射して、管内面側からの反射信号を検出し、その到達時間から肉厚を算出する。なお、開発した EMAT は、励起して発生した超音波の信号強度を高めるために、永久磁石のサイズとコイルの線径・巻き数を最適化したものである。



図8 EMAT の外観

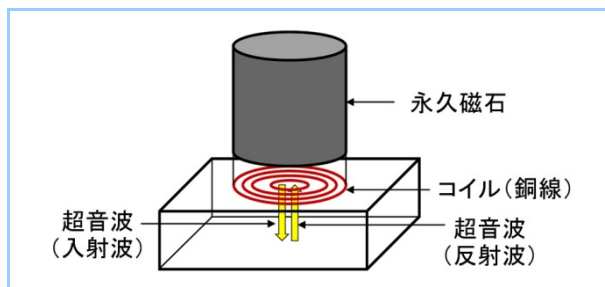


図9 EMAT の構成図

#### 4.2 実機ボイラ伝熱管を用いた検証試験

開発した EMAT による肉厚計測誤差や、管内面の酸化スケール厚さの計測誤差を評価するため、図 10 に示す管外表面に酸化スケールが生成した実機ボイラ伝熱管を供試材として用いて、検証試験を実施した。具体的には、供試材に対して、EMAT を使って肉厚と内面スケール厚さを計測し、その後切断調査を行い、断面情報から得た真の肉厚と内面スケール厚さと比較した。なお、供試材に生成した外面スケール厚さは最大約 1.2mm である。

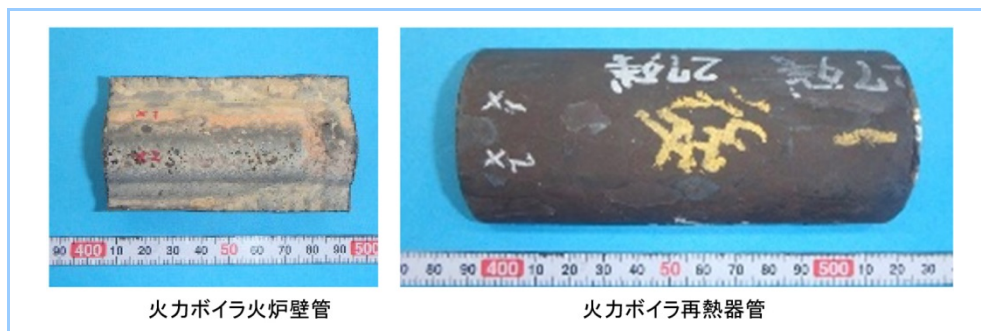


図 10 実機サンプルの外観

図 11 に EMAT による肉厚計測値と実測値の比較結果を、図 12 に EMAT による内面スケール厚さ計測値と実測値の比較結果を示す。EMAT による肉厚計測値と実測値の誤差は、 $\pm 0.2\text{mm}$  以下であった。また、内面スケール厚さの計測誤差は $\pm 50\ \mu\text{m}$  以下であり、いずれも精度よく計測できることを確認した。

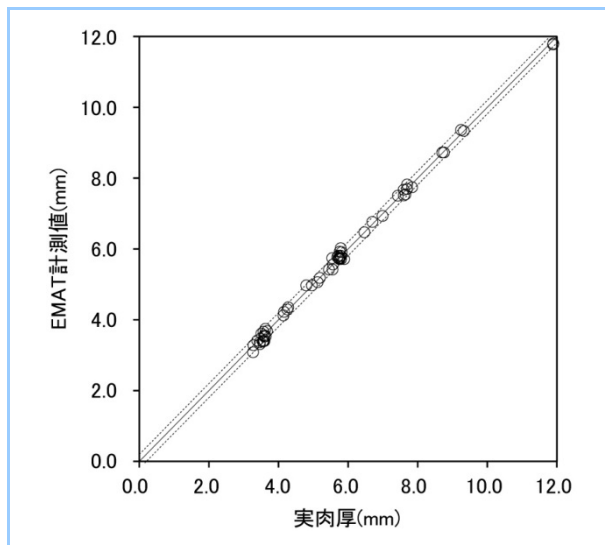


図 11 検証試験結果(肉厚値)

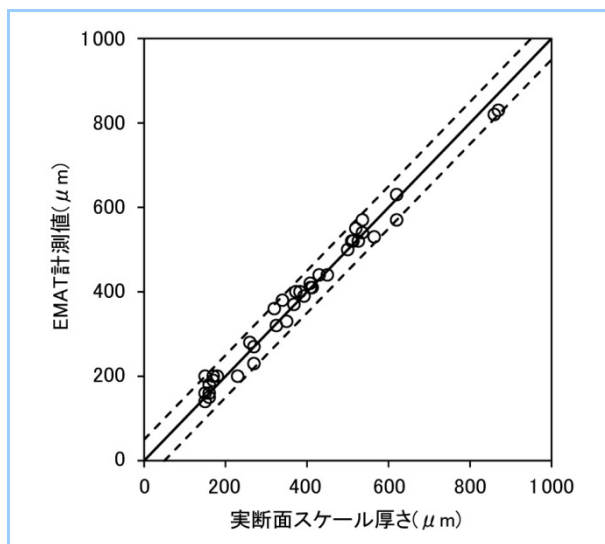


図 12 検証試験結果(管内面スケール厚さ)

#### 4.3 本技術を用いたサービスと提供価値

図 13 に UT を用いた従来手法と、EMAT を用いた開発手法に関する作業工数の比較結果を示す。EMAT の適用により従来必要であった外面スケールの除去作業が不要になることで、条件にもよるが作業工数を 50%程度削減可能と考えられる。また、サンドブラストによるスケール除去作業は粉塵が発生するため、溶接などの他作業は同時にできない場合が多いが、本技術により他作業も同時並行で進めることができる。なお、サンドブラストによる伝熱管の減肉も防ぐことができる。

以上の結果から、本技術による伝熱管腐食減肉の検査サービスをお客様に提供することで、外面スケール除去作業に係る時間とコスト低減、ならびに伝熱管の検査や工事がクリティカルパスとなる場合の定期検査の工程短縮に貢献できると考える。

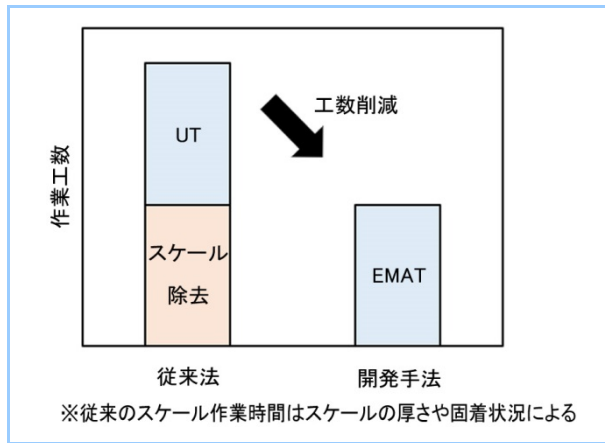


図 13 EMAT による作業工数削減イメージ

## 5. まとめ

本報では、プラント配管に発生する腐食減肉に係る検査の付帯工事を最小化し、効率的に検査可能なガイド波による損傷スクリーニング技術と、ボイラ伝熱管の肉厚と酸化スケール厚さを前処理不要で検査する技術について述べた。ガイド波による損傷スクリーニングサービスは2プラントに、EMAT による前処理レス検査サービスは6プラントに適用済みであり、1章で述べた損傷発生リスク増加設備の信頼性向上と検査期間・費用の低減の両立に寄与できると考える。今後もお客様に満足いただける高効率検査サービスの提供を通じて、プラント設備の信頼性向上や定期検査の工程短縮に貢献する。

## 参考文献

- (1) 赤嶺博史ほか, 火力発電プラント水処理の現状と新技術, 三菱重工技報 新製品・新技術特集, Vol.58 No.1 (2021), p1~7
- (2) 椎塚晋ほか, 保全技術の更なる向上に向けた取組み, 三菱重工技報 原子力特集, Vol.57 No.4 (2020), p 1~9
- (3) 原子力発電の更なる利用率向上および長期運転に向けた取組み, 電気事業連合会, 2021
- (4) 火力設備配管減肉管理技術規格(2016年版), 日本機械学会, 2016
- (5) 薄田寛ほか, オーステナイト系ステンレス鋼の高温水蒸気酸化の研究, 三菱重工技報 Vol.8 No.4 (1971), p93~100
- (6) Vinogradov S.et al., Magnetostrictive Transducer for Torsional Guided Waves in Pipes and Plates, Materials evaluation, 3(2009), p 333-341.
- (7) Hongwei Hu.et al., Ultrasonic Phased Array Sparse-TFM Imaging Based on Sparse Array Optimization and New Edge-Directed Interpolation, Sensors, 18, 2018
- (8) 山本敏弘ほか, ガイド波による配管エルボ探傷での欠陥位置と欠陥検出感度の関係, 平成 28 年度火力原子力発電大会論文集, 2016, p6-10
- (9) 小島史男, 電磁超音波を用いた探傷の基礎と最新動向, 計測と制御, 第 56 巻第 11 号 (2017 年 11 月号), p839-844