

発電プラント配管の合理的安定運用に貢献する 損傷定量化技術: TOFD-TFM 超音波画像探傷システム

Crack Quantification Technology Contributing to Rational and Stable Operation of Power Plant Piping: TOFD-TFM Ultrasonic Image Evaluation System



林 恭平*¹
Kyohei Hayashi

天野 裕維*¹
Yui Amano

馬場 義貴*²
Yoshitaka Baba

石本 雄介*³
Yusuke Ishimoto

中馬 文広*⁴
Fumihiko Chuman

和田 貴行*⁵
Takayuki Wada

発電プラントを安定的かつ経済的に運用するためには、設備の状態を正確に把握し、適切な保全を行うことが求められる。近年、脱炭素化に向けた燃料転換や再生可能エネルギー調整に伴う負荷変動運転により、発電プラントの運用条件が厳しくなり、新たな損傷の進行が懸念される。構造物の強度評価や余寿命評価の観点では、非破壊で不連続部(以下、きず)の高さを定量化する技術が重要であるが、従来は非常に高い技量が必要で精度確保が難しく、保全計画策定の妨げになっていた。三菱重工業株式会社は、ロバストなきず高さ評価が期待できる TOFD 法と、多 CH 信号・画像処理技術である TFM を組み合わせた TOFD-TFM 超音波画像探傷システムを開発し、きず高さの定量化を可能とした。現在は本手法を実機に適用し、発生したきず高さの定量評価を行うとともに、得られたデータから経年評価を実施し、きず進展とボイラ運用環境の相関分析等に基づいた合理的な保全計画の策定に貢献している。

1. はじめに

発電プラントを始めとした三菱重工業株式会社(以下、当社)製品は、過酷な環境で長期間運用されることから、経年劣化に伴う設備の損傷が懸念される。発電プラント設備は多種多様な配管群で構成され、一か所でも漏洩に至る損傷が発生すると、設備全体が数週間にわたって計画外停止し、発電事業者並びに社会へ多大な影響が及ぶ場合がある。

保全の考え方として、設備の損傷状態に依らず一定の時間間隔で配管を交換し計画外停止を未然防止するような時間保全(以下、TBM: Time Based Maintenance)と、設備の状態を検査・監視し、その結果に応じて必要なメンテナンスを行う状態保全(以下、CBM: Condition Based Maintenance)が挙げられる。TBM は、損傷調査に関する検査コストを抑制できるが、損傷が懸念される配管の取替間隔を安全側に短くするしかなく、場合によっては過剰な保全に繋がるため、安全とコスト低減を長期的に両立させることが難しい。一方 CBM は、設備の余寿命検査結果に応じて適切なタイミングで必要なメンテナンスを実施することから、安全と経済性を両立した合理的な保全が可能となる^{(1)~(3)}。

近年の火力発電プラントは、再生可能エネルギーの出力変動を補う調整力の役割も担っており、負荷変動運転が適宜行われている⁽⁴⁾。また、脱炭素化に向けバイオマスや水素・アンモニアなどの新たな燃料への転換が加速している^{(4),(5)}。それらに起因した新たな損傷の発生や、損傷の進展速度の変動といったリスクが想定されており、CBM の考えを取り入れた保全のニーズが高まっている。

設備の損傷には様々な形態が考えられるが、特に注意すべきものとして配管の表面や内部に

*1 総合研究所 電子・物理研究部

*2 総合研究所 製造研究部

*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 技術部

*5 エナジードメイン SPMI 事業部 営業部 主席チーム統括

発生するきずがある。図 1(a)にきずの例を示しており、製品の使用環境に応じて様々な性状のきずが発生する。構造物強度評価や余寿命評価の観点では、図 1(b)に示す“きず高さ(深さ)”の定量化が特に重要である⁽⁶⁾。しかしながら、きず高さを現地で非破壊的に定量化するには非常に高い技量が必要で精度確保が難しく、CBM の考えを取り入れた保全計画策定の妨げになっていた。当社では、保全・アフターサービスメニューの一部として、超音波探傷技術を応用したきず高さ定量化システムである TOFD(Time of Flight Diffraction)-TFM(Total Focusing Method)技術を展開している。本報では従来検査の特徴と課題を説明した上で、TOFD-TFM 技術を活用したきず高さの定量化手法のロジック、メリット及び実用事例を紹介する。

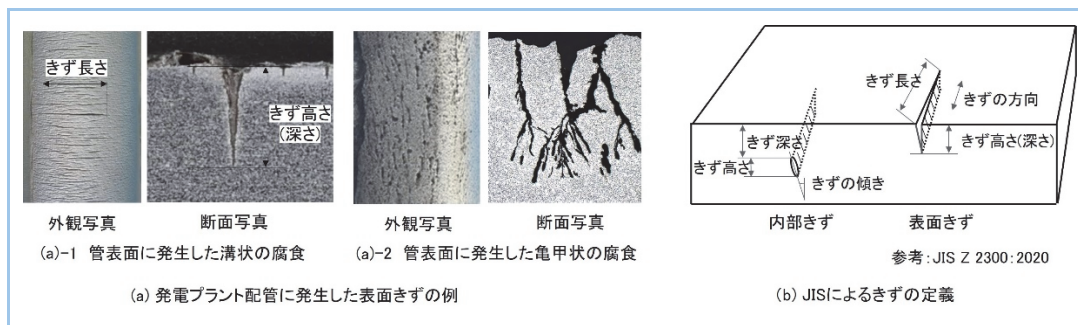


図1 発電プラントに発生したきずの例及びきずの定義

2. 一般的なきず高さ評価手法

配管に生じたきずの非破壊検査及びきず高さ評価を行う場合は、一般的に電位差法(電気抵抗法)、放射線透過試験(以下、RT:Radiographic Testing)または超音波探傷試験(以下、UT:Ultrasonic Testing)が用いられる。

電位差法は、表面開口きずを対象とする場合にのみ適用され、配管表面に端子を接触させて交流電流を流し、きずによる電流の回り込み距離を電圧降下量に対応させることによって、きず高さを推定できる。ただし、電気的特性により電流はきず形状に依らず最短経路を流れるため、端子の設置位置や内部のきず性状・きず長さ等のバラつきによって測定値が大きく変動することからきず高さ定量化の精度確保が難しい。

RT や UT は、配管内部に放射線もしくは超音波を入射し、きずの有無・大きさに応じた変化量进行评估するため、原理上はきず高さの定量化が期待できる。RT は、人体に有害な放射線を取り扱うことから、現地施工時には管理区画の設定が必要である。一方、UT は人体に無害な超音波を取り扱うため管理区画を必要としない。ただし、人の手で探触子を保持して超音波を配管へ直接入射し、波形の変化を見てきずを評価することから、検査員に高い技量が求められる。

図 2(a)に、JIS Z 3060 で規定された一般的な UT を示す。UT は、きずからの反射エコーの高さ情報、探触子設置位置及びエコー検出位置・範囲に基づいて評価を行うことから、探傷結果の信頼性は検査員の技量に依存する傾向がある。今般では、多チャンネル(以下、CH)の超音波送受信情報に基づいて 2 次元・3 次元の探傷画像をリアルタイムで構築し、画像上できずを客観的に特定できる技術がある。図 2(b)に示すフェーズドアレイ UT が市中に普及した代表例である。独立に励振できる微小な振動素子をアレイ状に複数個配置した多 CH アレイ素子を用い、各素子に適切な時間遅延を与えて励振させることで超音波合成波面の集束点を設定し、伝搬角度を電子的に走査することで 2 次元・3 次元の探傷画像を構築できる。これらの UT 手法では、表面きずのきず開口部(付根部)は、コーナー反射によって高い感度で検出できるが、きずの面や端部(きず先端)は、きず方向や傾きによっては反射エコーを検出・識別できず、実際のきず高さや探触子設置位置およびエコー検出位置・範囲に差異が生じる⁽⁷⁾。そのため、きず高さを高い信頼性で定量化するには検査員の技量が必要である。

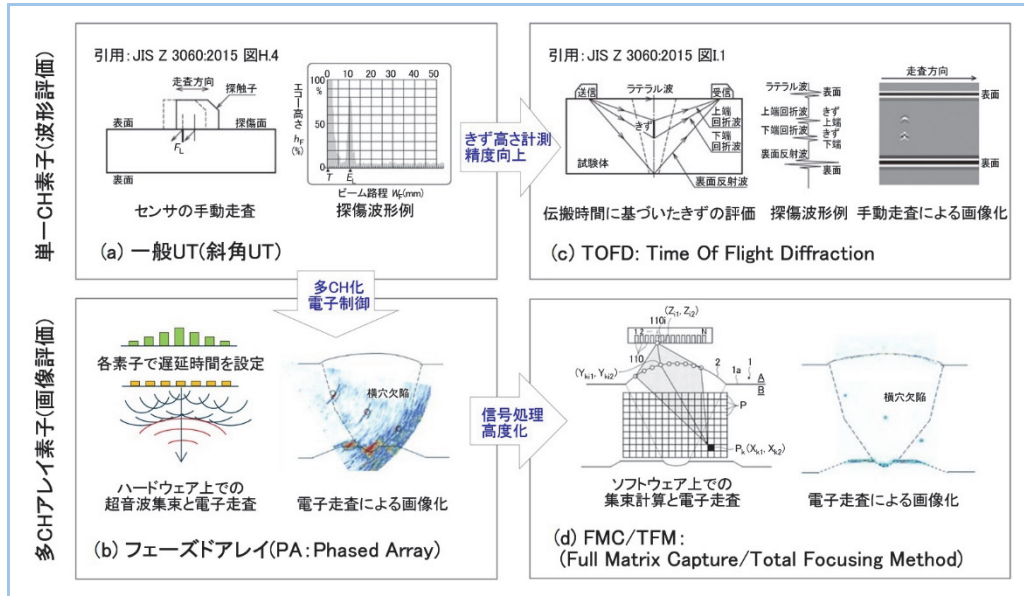


図2 超音波探傷技術の分類

3. TOFD-TFM 超音波画像探傷システムの構築

きず高さの定量化の対策として、図 2(c)に示す送信及び受信の 2 探触子を使用した TOFD 法が開発され、実機適用されている。きずからの反射エコーではなく、きず端部で生じた回折波を検出し、その伝搬時間に基づいてきず高さを測定する。回折波は無指向性の球面波であり、きず方向や傾きによる影響を比較的小さく抑えることができるため、ロバストなきず高さ定量評価が可能である⁽⁷⁾。ただし、単一 CH の送受信情報で評価するため、探触子間におけるきず位置を特定できないという課題がある。

多 CH アレイによる送受信情報を評価し、きず位置等を高精度に特定する手法の一つとして、図 2(d)に示す FMC/TFM(Full Matrix Capture/Total Focusing Method)技術の開発が近年進んでいる。前述のフェーズドアレイ技術はハードウェア上の遅延制御で超音波ビームを集束させるが、FMC/TFM 技術は予め取得した送受信データに対してソフトウェア上のポスト処理によって集束計算を行う信号処理手法の一つであり、新たに考案した信号処理・超音波ビーム補正ロジックをプログラムの改良によって実装できることが特徴である⁽⁸⁾。その計算は膨大なデータの処理が必要であるため、従来は主に処理時間の観点から実機検査への適用が困難だった。しかし、GPGPU(General-Purpose computing on Graphics Processing Units;GPU による汎用計算)の処理性能進化によって実機検査への適用も可能となっている。

以上を踏まえ当社では、ロバストなきず高さ評価が期待できる TOFD 法と、多 CH 信号・画像処理技術である FMC/TFM 技術を組み合わせたものを TOFD-TFM 超音波画像探傷システムと呼び、結果の信頼性、客観性、および保存性を向上させることを目指して技術の開発を行った。

図 3(a)に TOFD-TFM 超音波画像探傷システムのフローを示す。ここでは、2 つ以上のアレイ素子を配置して、きず端部からの回折波を評価する。しかし、図 3(b)に示すような、特に厚肉材の表層から深層までの全域を探傷する場合、交束点(送信・受信ビームの中心軸が交差する点)から離れた位置にあるきずは、検出できないリスクがあるため、各アレイ素子の相対的な距離・角度に応じた評価可能領域を特定し、その領域を検査が必要な領域に対応させることが重要である。その上で、図 3(c)に示すように、縦波、横波、及び反射モードを考慮した複数の波形伝搬計算による複合評価を行い、様々な性状のきずを適切に評価を行う。

本システムは、まず被検体に 2 つ以上のアレイ素子を配置し、アレイ素子による全波形(FMC)データを取得する。次に、アレイ素子の配置高さ・角度・相対距離を FMC データ等から測定し、製品内部の交束点、評価対象領域設定並びに波形伝搬計算に反映する。次に、配管内部を

TFMによって画像化する。ここでは、図3(d)に示すように、すべての波形情報が含まれるFMCデータの中から、TOFD原理に基づき、きず端部からの回折波(i)と、ウェッジ内部伝搬波(ii)・試験体表面伝搬波(ラテラル波)(iii)・裏面反射波(iv)・きず面からの反射波(v)を識別して複合的に評価する。なお、本システムではリアルタイムで配管内部の画像化ができるため、探触子配置方向の走査(画像上での左右方向への走査)による追従性確認を行うことで、S/N(Signal-Noise ratio)が低い微弱な指示のノイズに対する識別性を向上させ、検出性を高められる。これらのステップによってきず端部の指示を特定し、画像上からきず高さを測定する。

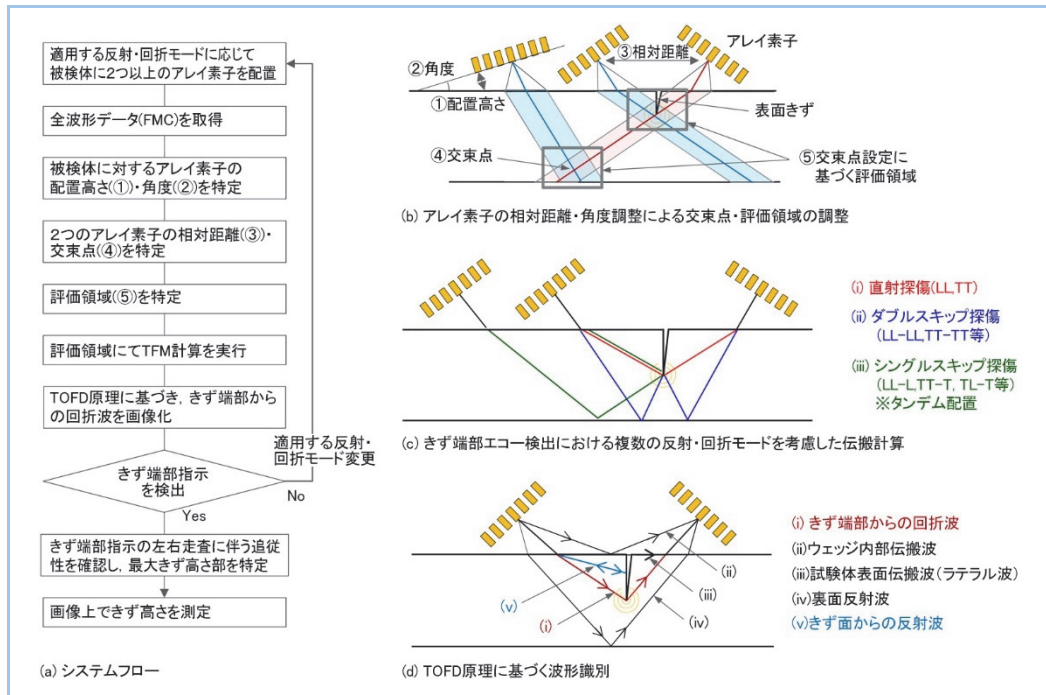


図3 TOFD-TFM 超音波画像探傷システムによるきず高さ計測方法

4. 技術検証結果

4.1 技術検証手順

今回、火力発電ボイラ設備で特に経年状態評価のニーズが大きい、母材面の腐食を伴った表面きず(図1(a))を検査対象とし、人工きずと自然きず高さ、それぞれの定量化を検証した。人工きずは、高さ0.5mmから2.5mmの表面開口スリットとし、自然きずは実機プラントにて実際に生じた表面開口きずとした。更に溶接部検査への展開を想定し、溶接部に挿入した人工きず高さの定量化の検証も行った。ここでは、前述したTOFD-TFM超音波画像探傷システムの検査フローに基づいてきず高さを測定した結果と、その後の断面調査により取得した実際のきず高さを比較した。

4.2 検証結果

図4(a)に、母材表面に挿入した人工きず探傷画像を示す。図4(b)には自然きず(溝状の腐食、及び亀甲状の腐食)探傷画像例を示す。図3(c)に示したように、2つのアレイ素子を対向配置した直射探傷またはダブルスキップ探傷によって、きず端部の指示を有意に検出でき、画像上からきず高さを測定できた。図4(c)に、自然きず(溝状の腐食)の実際のきず高さとの対比を示しており、±0.3mm以内の誤差範囲で定量化できることを確認した。また、検出対象のきずが密集・連結・分岐している場合において、きずの最大高さに相当するきず端部を検出できた。

図5(a)には、溶接内部の人工きず探傷画像例を示す。この条件では、溶接ビードを挟む形で2つのアレイ素子を対向配置し、直射探傷またはダブルスキップ探傷によって、きず端部の指示を検出できた。図5(b)に示す溶接止端部の表面きずは、溶接ビード形状によるアレイ素子の配置制約があるため、図3(c)に示したように、2つのアレイ素子を溶接線の片側にタンデム型として同方向直列配置したことで、きず面・端部からの反射・回折波を検出できた。同図中に当社でこれま

で開発したフェーズドアレイ UT と、溶接部上からのアダプティブ UT 探傷の結果^{(8),(9)}を対比して示す。いずれの手法においても同じきずを有意に検出できるが、TOFD-TFM 探傷はきず端部の画像化ができており、きず高さの定量化に有効であることが示された。

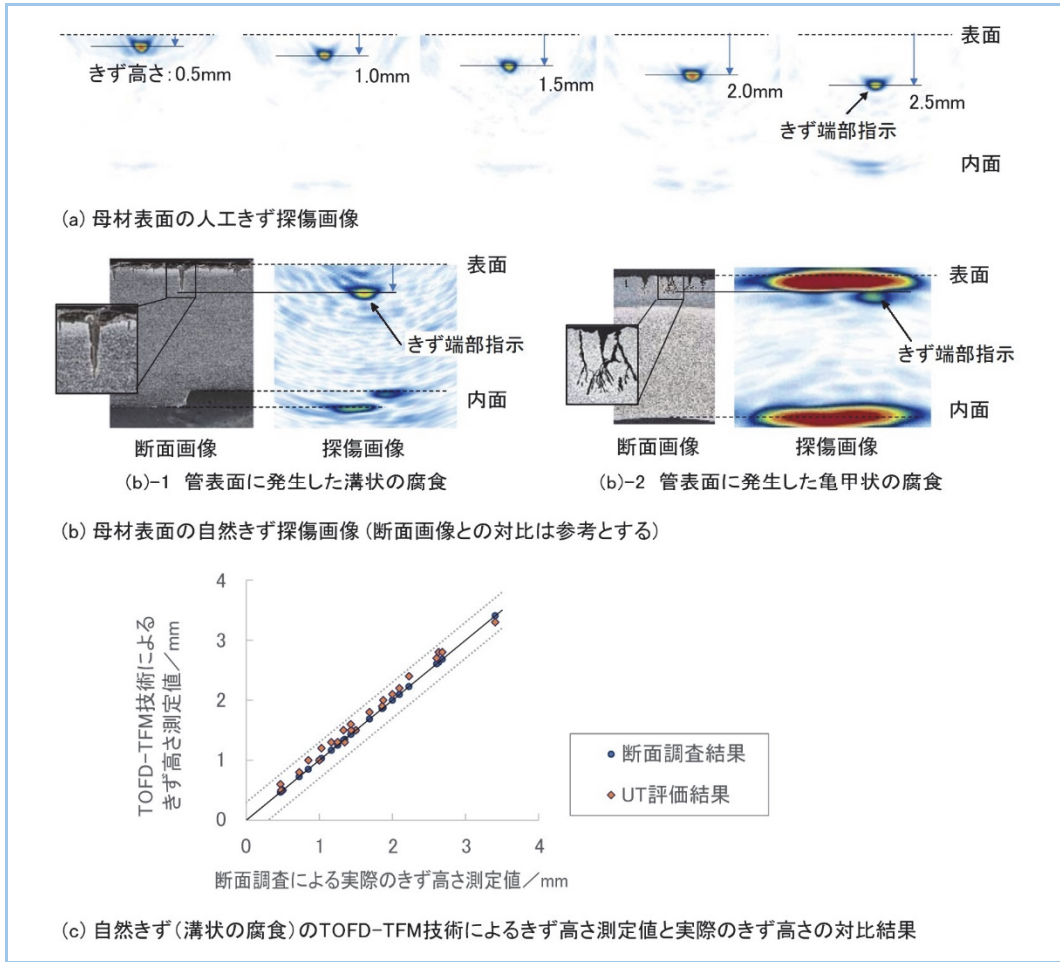


図4 母材表面きず検証結果

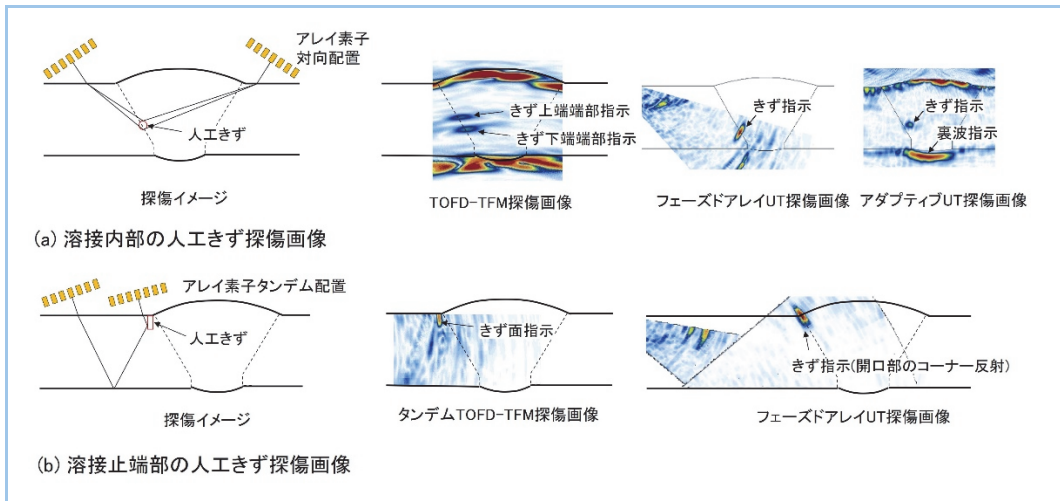


図5 溶接きず検証結果

4.3 考察及び今後の展望

以上のとおり、TOFD-TFM 超音波画像探傷システムを構築し、きず端部からの回折波を画像化できることを示した。また、複数のきず(密集・連結・分岐したきず)を対象として、実際のきず高さと、TOFD-TFM 技術で定量化したきず高さの対比を行い、精度 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内で、きず高さをロバストに定量化できることを確認した。加えて、母材表面きずだけではなく溶接きずの定量評価にも活用できると考えられた。その一方で、TOFD-TFMの適用にあたっては、例えば開口幅が非常

に小さい閉じた亀裂といった微小なきずを検査対象とする場合は、技術改良と検証が必要である。様々ななきず性状・被検体形状・材質・板厚における適用性評価を行い、複数製品のなきず高さ定量化ニーズに対応できるよう準備を進めている。

5. 実機への適用

当社が納入した火力発電プラントを中心に、実機環境下での試適用と、現地抜管サンプルによるなきず高さ定量化可否を事前に確認した上で、実機適用を進めている。現地検査時は、アレイ素子の配管上走査による連続データを取得・保存することで、広範囲のスクリーニングとなきず最大高さの探索が同時に完了できる。そのことから、検査の効率化と結果の信頼性・客観性・保存性の確保が両立できた。また、アレイ素子の配管上走査を補助する治具を開発・適用することで、検査に関する一連のプロセスの高速化・技量レス化に繋がることを確認した。なお、検査結果は、リアルタイムの画像で最大なきず高さと残肉厚が客観的に確認できるため、現場で即座にお客様と検査結果を共有し、次の処置に関する判断を仰ぐことができた。

現在では、実機に発生した特定のなきず高さの経年調査も行っている。経年調査結果を評価することによって、なきずの進展速度を推定するとともに、ボイラ運用環境との相関を分析可能とした。その結果、必要な箇所に適切な対策の導入と、その効果の評価といった、CBM の考えを取り入れた合理的な保全計画の策定に貢献した。

6. まとめ

本報では、ロバストなきず高さ評価が期待できる TOFD 法と、多 CH 信号・画像処理技術である TFM を組み合わせた TOFD-TFM 超音波画像探傷システムを紹介した。様々ななきず性状・被検体形状・板厚に応じた適切な検査が可能となるロジックを構築し、アレイ素子配置と探傷モードの最適化によってなきず端部からの回折波を有意に検出・画像化できることを示した。また、断面調査による実際のなきず高さ、TOFD-TFM 技術で定量化したなきず高さの対比を行い、なきず高さを精度±0.3mm 以内でロバストに定量化できることを確認した。現在では火力発電プラント実機に発生したなきず高さの定量化ならびに経年調査を行っており、それらの結果に応じた保全計画の策定によって、安全性と経済性を両立した合理的な設備運用に貢献している。本技術は様々な製品の損傷定量化ニーズに対応できる共通的な技術であることから、火力・原子力発電プラントに加えて、溶接を含む構造物全般に対する高度非破壊検査技術としての適用が期待される。今後も実機での適用実績を重ねながら更なる技術の高度化と適用事例の拡大を図る。

参考文献

- (1) 後藤大輔ほか、生成 AI を活用した TOMONI® のスマート保全と遠隔監視：現状と将来展望、三菱重工技報、Vol.60, No.4 (2023)
- (2) 本田雅幹ほか、AI による画像解析を活用した高強度フェライト鋼配管溶接部の余寿命診断サービス、三菱重工技報、Vol.60, No.4 (2023)
- (3) 林恭平ほか、ロボットを活用した安全で効率的な配管検査サービス、三菱重工技報、Vol.60, No.4 (2023)
- (4) 経済産業省/資源エネルギー庁、今後の火力政策について、(2024)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/074_10_00.pdf
- (5) 正田淳一郎ほか、脱炭素社会の達成を目指す“高砂水素パーク”“長崎カーボンニュートラルパーク”の取組み、三菱重工技報 Vol.60 No.3 (2023) p.1-11,
- (6) 時吉巧ほか、ボイラ高温配管溶接部の寿命診断システム、Vol.38, No.2 (2001)
- (7) 若林嘉幸ほか、高温配管溶接部の余寿命診断システムの開発、三菱重工技報、Vol.38, No.3 (2001)
- (8) 林恭平ほか、複雑な形状から製品内部をイメージングするアダプティブ超音波探傷技術、三菱重工技報 Vol.56, No.1 (2019)
- (9) 林恭平ほか、現地工期の短縮に貢献する最新の溶接部超音波探傷技術(RT 代替 UT)、三菱重工技報、Vol.61, No.1 (2024)