

# 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)

Latest Welding Ultrasonic Testing Technology Contributing to Shorten On-site Construction Period (UT in lieu of RT)



林 恭平\*<sup>1</sup>  
Kyohei Hayashi

西村 一仁\*<sup>1</sup>  
Kazuhito Nishimura

上林 正和\*<sup>2</sup>  
Masakazu Kamibayashi

浦田 幹康\*<sup>3</sup>  
Mikiyasu Urata

和田 貴行\*<sup>4</sup>  
Takayuki Wada

石本 雄介\*<sup>5</sup>  
Yusuke Ishimoto

発電プラントの現地改造・定期検査工事において、安定電源確保等の観点から、工期の短縮が強く求められている。これら工事では管の溶接が施工され、溶接後の品質検査として放射線透過試験(Radiographic Testing: 以下, RT)が一般的に採用されている。しかし、RTは放射線安全管理が必要であり、工期を短縮する上での制約になっているケースがあった。三菱重工業株式会社(以下, 当社)は、これまで品質検査として採用されてきた RT を、超音波探傷試験(Ultrasonic Testing: 以下, UT)に置き換えるプロセス、並びに技術を開発・適用し、関連工事と検査の同時並行作業を可能とすることで、大幅な工期短縮を実現可能とした。

## 1. はじめに

近年、エナジートランジション・カーボンニュートラルの観点から、発電設備の効率化・脱炭素化の取組みが加速している。経済産業省/資源エネルギー庁“今後の火力政策について(2023年3月)”<sup>(1)</sup>には、石炭火力設備における今後の対応方針として、電力の安定供給を大前提としつつ、2030年までに現設備の高効率化・低炭素化等の取組みが拡大する見込みが示されている<sup>(1)</sup>。これに対し当社では、既存インフラの脱炭素化ロードマップ等を掲げ、お客様の既存設備の低炭素化・高効率化といった、現在の市場ニーズに合わせた設備の高付加価値化等の取組みを推進している<sup>(2)</sup>。既存設備を活用しながら安定した運用を進める上では、設備の損傷形態を十分に考慮した検査と、適切なタイミングでの設備更新といった、各種定期検査工事の重要度も高まっている。さらに、近年では火力発電設備において、負荷追従運転、DSS(Daily Start and Stop)、WSS(Weekend Start and Stop)運転に伴い運用条件が厳しくなっており、蒸気漏洩等のトラブルが発生した際も、電力需要に対応するために早期復旧が必要といったニーズも増加しつつある<sup>(3)</sup>。<sup>(4)</sup>

現地改造工事・定期検査工事を行う場合、プラント設備を一定期間停止して施工することになる。プラント設備の長期停止は、設備運用収益に影響を及ぼすだけでなく、電力供給の観点でも社会への影響が大きい。工期が長期化するほど影響が拡大し得ることから、可能な限り工期を短縮し、設備の稼働率を向上させることが必要である。

ただし、プラント設備は多種多様な配管・部品で構成され、改造・検査が必要とされる部位、並びにプロセスは多岐にわたる。改造工事・定期検査工事の期間中には、これらの設備を、一部は改造し、一部は取り換え、一部は健全性評価を行って必要に応じて処置を行う、といった様々な工事が必要とされる。これらの工期短縮を達成するためには、全体工期が決定づけられるクリティ

\*1 総合研究所 サービス技術部

\*3 総合研究所 電子・物理研究部 工博

\*5 エナジードメイン SPMI 事業部 営業部

\*2 総合研究所 サービス技術部 主席研究員 工博

\*4 エナジードメイン SPMI 事業部 営業部 主席技師

カルパスを見極めるとともに、一連の作業工程の同時並行性を確保すること、また工程ごとの待機時間を削減すること等、の施策が重要である。例えば、火力発電プラントの主要機器の一つであるボイラの火炉壁やバーナ、各種伝熱管などの設備の更新・改造工事を実施する際、プロジェクトによっては数千箇所を超える大規模な現地溶接施工が行われ、その際施工された溶接部の品質検査として、一般的に放射線透過試験 (RT) が施工される。ただし、RT を現地で施工する場合、放射線管理区画の設定や人払いなど、安全管理上の作業制約が発生することから、溶接・検査・補修といった各作業を同時並行に進めることが難しい。特に複数の混在作業が発生する大型工事等では、RT の現地施工が工期短縮を実現する上での制約になっているケースがあった。

以上を踏まえ当社では、工期短縮が求められるプロジェクトにおいて、これまで慣用的に採用されてきた RT が抱える工程短縮の課題を解決するために、人体に無害な超音波を用いた検査 (UT) の開発と適用を進めてきた。次章以降は、本報で述べる RT 代替 UT (溶接自主検査対象外の管に対して、RT の代わりに用いる UT 技術及び UT 施工プロセスのこと) の定義を詳しく解説するとともに、当社で開発を進めた UT 技術の内容、並びに適用事例を紹介する。

## 2. 本報における RT 代替 UT の定義 (規格解釈, 適用範囲) について

### 2.1 RT と UT の概要

RT は、放射線を製品に照射し、透過した放射線の強さの変化から、製品内部のきずや状態を調べる非破壊試験である。所定のきずがフィルム上に投影されて認識でき、検査結果の客観性・保存性に優れる。一方、人体に有害な放射線を取り扱うことから、現地施工する際には管理区画の設定や人払い等の一定の制約が発生する。これに対し UT は、超音波を製品に伝搬させ、音響的性質を利用して製品内部のきず等を調べる非破壊試験である。超音波は物質内部を伝搬する弾性波であり、人体へ無害であることから、RT と異なり特別な管理区画の設定等を必要としない。ただし、UT は人の手でセンサを保持しながら超音波を製品へ直接入射し、波形を見ながらきずの評価を実施することから、検査員に求められる技量は RT よりも高く、検査結果の客観性・保存性の観点でも RT より劣る。

### 2.2 溶接後検査に関する国内規格について

RT と UT はどちらも、基本的には製品内部の検査手法 (体積検査) として位置づけられる。しかし、現地溶接施工後の溶接内部の品質検査としては、RT が一般的に用いられている。この一因として、日本国内の規格制約がある。電気事業法施行規則/79 条及び 80 条<sup>(5)</sup>に溶接自主検査の対象範囲に関する規定<sup>(6)</sup>があり、溶接自主検査に関する非破壊試験方法は、発電用火力設備の技術基準の解釈/別表第 24<sup>(7),(8)</sup>によって放射線透過試験 (RT) と規定され、他の手段は明示されていない。

### 2.3 本報における RT 代替 UT の定義

一方、2.2 節で述べた電気事業法施行規則に基づく溶接自主検査の対象外 (管にあつては外径が 150mm 未満) の管における溶接部の非破壊試験手法は、RT と規定されている訳ではない。

本報で述べる RT 代替 UT は、以上述べた規格で RT と規定されていない管を対象として、従来適用されてきた RT を、UT に置き換えて施工するプロセス・技術を指す。

## 3. RT 代替 UT の判定基準, 検証プロセス, 適用技術について

### 3.1 国内外の関連規格を参考にした RT 代替 UT 技術の判定基準の策定

RT 代替 UT 判定基準の一例として、海外の規格である ASME (American Society of Mechanical Engineers: 米国機械学会) が定める規格 (ASME コード)<sup>(9)</sup>があり、Ultrasonic Examination Used in lieu of Radiographic Examination 等として規格化され普及している。その一方で、前章で述べた日本国内規格では、RT の代替手段としての UT に関する規定は現時点では存在しない。日本国内ボイラでは、国内 RT 規格に基づいた検査を適用し運用されてきた経緯を考慮すると、UT を適用する場合であっても、国内 RT 規格の基準をベースとして検査を行うことが妥当であると考えら

れる。

ここで、国内におけるボイラ管溶接部に関する RT は、発電用火力設備の技術基準の解釈/別表第 25、並びに対応する JIS に規定があるため、その規定で示された欠陥許容サイズを参考として UT の判定基準を定めた。ただし、面状の割れ等の高さ(深さ)については、規定がないことから、これについては ASME コードを参考として定めた。

### 3.2 RT 代替 UT の実用性検証

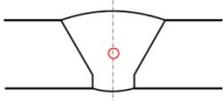
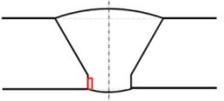
#### 3.2.1 検証する UT 技術の特徴

欠陥の検出性・識別性、並びに検査結果の客観性・保存性を考慮し、フェーズドアレイ (PA: Phased Array) UT 法を適用することとした。PAUT 法は、多数の振動子を直列にアレイ状に配列したプローブを用い、超音波の送受信タイミングを電子制御することで、合成波を任意の角度にスキャンしたり、フォーカシングしたりすることによって探傷結果を画像として表示し、製品内部の欠陥を検出・評価できる手法である。当社では、発電プラントの保守・健全性評価として PAUT を先駆けて導入し、配管溶接部のクリープ損傷検知技術等に活用してきた<sup>(10)</sup>。ここで、長年に亘って当社で蓄積してきた PAUT に関する知見及びプローブ設計ノウハウ等を、RT 代替 UT 技術の構築に活かすこととした。

さらに、斜角探傷である PAUT と合わせて、溶接余盛上からの垂直探傷であるアダプティブ UT を必要に応じて適用することとした。アダプティブ UT 技術は、アレイプローブと軟質ゲルの組合せによって、溶接余盛等の凹凸面から超音波を直接入射し、FMC/TFM (FMC: Full Matrix Capture, TFM: Total Focusing Method) を応用することによって、製品内部を精度よく画像化可能とする技術であり、当社が先駆けて開発を進めた先進 UT 手法の一つである<sup>(11)</sup>。本手法は上述の PAUT による斜角探傷と異なり、RT と同じように垂直方向から超音波を入射して探傷を行うことから、通常の斜角 UT で評価が難しいとされる溶接形状・裏波(凹み、垂れ)等の検出・評価や、欠陥と溶接形状との識別が期待できる。

#### 3.2.2 検証手順

図1に、3.1 節で述べた判定基準をベースとする、人工欠陥を導入した検証試験片の一例を示す。さらに、人工欠陥だけでなく、ブローホールや融合不良等の多様な自然きずが発生した試験片を複数個用意した。これらの試験片のきず部を、UT 並びに RT、さらには X 線 CT と断面調査を用いて複合的に評価し、それらの検出性と寸法の関連性を整理するとともに、判定基準の妥当性を検証することとした。

	第1種欠陥 (丸いブローホール及びこれに類するきず)	第2種欠陥 (細長いスラグ巻き込み、パイプ、溶込み不良、融合不良及びこれに類するきず)
第1類きず点数 (寸法)許容限度※1	1mm	長さ3mm以下
人工模擬欠陥	ドリル横穴: φ 1mm 	放電加工スリット 長さ3mm × 高さ11%t※2 

※1 JIS Z 3104 附属書4 透過写真によるきずの像の分類方法参照  
 ※2 ここでは一例として Section V article4 における校正試験片の規定を参照

図1 RT 代替 UT 検証試験片(人工欠陥)

### 3.2.3 検証結果

図2に、当該溶接部の UT 探傷イメージと、人工欠陥並びに自然欠陥の探傷画像の実例を示す。PAUT 法を用いて溶接内部の欠陥を直射法、並びに一回反射法により斜角探傷し、所定の欠陥を高感度で検出・評価することができた。さらに、アダプティブ UT 技術を用いた溶接余盛上からの垂直探傷により、溶接内部のきず、並びに溶接形状を探傷画像から客観的に定量評価できた。このような検証を多数の人工欠陥並びに自然欠陥に対して実施し、RT 代替 UT 用の合否判定要領を策定した。また、試験片による検証に加えて、数多くの現地検証を行い、現地検査施工性の観点でも問題がないことを確認した。なお、最終的にはお客様（発電事業者）とこれらの検証結果に基づいた技術協議を実施した上で、実機適用を進めた。

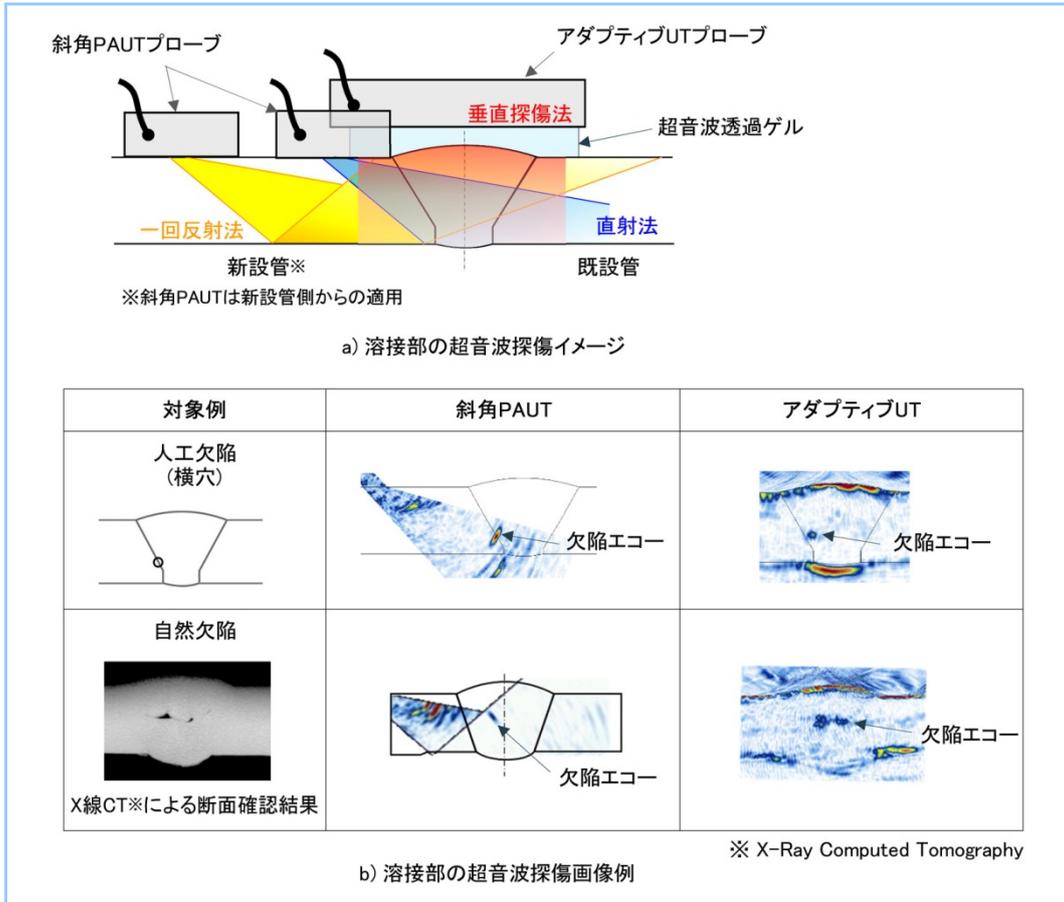


図2 RT 代替 UT 結果

### 3.2.4 考察及び今後の展望

以上の通り、国内におけるボイラ管溶接部に関する RT 規定で示された欠陥許容サイズをベースとした検証試験片を作成した上で、PAUT やアダプティブ UT 等の先進 UT 技術を検証し、所定の欠陥の検出性・識別性、並びに検査結果の客観性・保存性が RT と同等レベルに優れていることが実証され、UT が RT の代替となり得ることを示した。

その一方で、UT 施工にあたっては、管仕様(管径・肉厚・材質)ごとに当社で開発した特殊プローブが必要となることや、対応できる技量を有した検査員が限られている等の課題もある。そこで当社では、最新の信号処理技術に加えて自動化技術を活用し、RT 代替 UT 技術の効率化・高度化を進めている。具体的には、PAUT で実証してきた欠陥検出性や、判定基準と対比しながら、PCI(Phase Coherence Imaging)等の最新 UT 技術、ロボティクス機構を活用した自動走査の有効性を評価し、実装を進めている。最近では、これまで取得した膨大な探傷画像や、評価ロジックの蓄積を活かした自動評価・判定システムも開発している。さらに、当社グループ全体で、RT 代替 UT に活用すべき先進技術の取込みを図り、事業所・グループ会社・研究所が連携しながら

有効性の実証、検査プロセスの構築・改良及び検査員の技量向上を進めており、解決しつつある。

#### 4. RT 代替 UT の適用実績並びに効果について

UT 手法並びにプロセスを最適化しながら、これまで 20 例以上のプロジェクトで、数万箇所を超える溶接部を対象に施工を進めた。例えば、直近 2022 年度の大型改造工事事例として、火炉蒸発器管1万本弱の管溶接部へ適用することで、定期検査工期を 104 日から 94 日に(10 日間)短縮した(他の工期短縮取組み効果も含む)。さらに、UT の同時施工と探傷画像共有等の効果を活かして、合否判定結果を現場で即座にフィードバックし、待機工程の削減にも貢献した。また、[図3](#)に示すように各断面における欠陥発生位置や溶接初層の溶込み量等をアダプティブ UT によって画像化することによって、各溶接士の癖(欠陥が発生しやすい領域有無や初層の溶込み量等)を見える化し、品質改善等にも貢献した。

今後も、工期短縮が求められるプラント・プロジェクト向けに、当社グループ全体で RT 代替 UT の適用拡大を目指した取組みを推進する。さらには、蒸気漏洩等のトラブルが発生した際の、プラント設備の早期復旧を支援するツールとしても活用を進める。

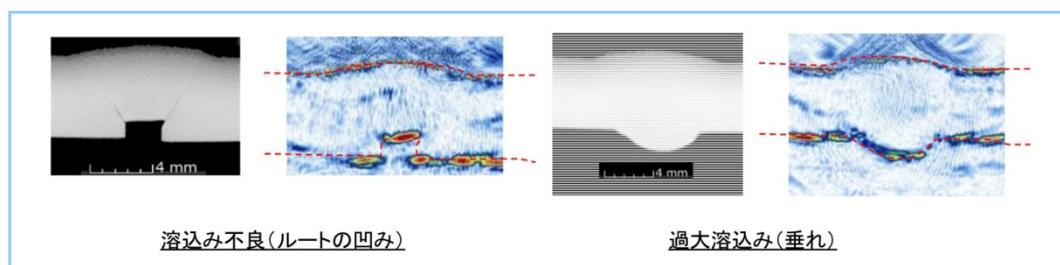


図3 アダプティブ UT を用いた溶接初層溶込み量の画像化

#### 5. まとめ

本報では、定期検査工事の工期短縮が求められている発電プラントのうちボイラを例題に、現地改造・検査工事の工期短縮施策の一つとして、実機展開を進めている RT 代替 UT 技術を紹介した。当該技術の実用化によって、従来用いられている RT 施工における放射線安全管理上の作業制約を一部解消し、結果として工期短縮を実現した。

この RT 代替 UT は、現行の国内規格で適用余地がある範囲内での取組みではあるものの、お客様の強いニーズに応えるべく、これまで慣用的に採用されてきたプロセスを改革することで、工期の大幅な短縮といった価値を創出できた一例である。今後も、当該技術の高度化と適用範囲の拡大を図り、これら技術の更なる価値を社会へ提供していく。

#### 参考文献

- (1) 経済産業省/資源エネルギー庁、今後の火力政策について、(2023)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/pdf/060\\_08\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/060_08_00.pdf)
- (2) 正田淳一郎他、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,
- (3) 経済産業省、冬季の電力需要期等における電気設備の保安全管理の徹底について、(2022)  
[https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/oshirase/2022/09/20220916-1.html](https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2022/09/20220916-1.html)
- (4) 経済産業省/資源エネルギー庁、予備電源について、(2023)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/seido\\_kento/pdf/081\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/081_03_00.pdf)
- (5) 内閣府、電気事業法施行規則(平成七年通商産業省令第七十七号)、(1995)  
[https://www8.cao.go.jp/pfi/concession/link/link\\_concession\\_juuten\\_403.html](https://www8.cao.go.jp/pfi/concession/link/link_concession_juuten_403.html)
- (6) 経済産業省、電気事業法施行規則に基づく溶接自主検査(火力設備)の解釈、(2023)  
[https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/law/files/yousetu\\_kaisyaku.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/yousetu_kaisyaku.pdf)

- 
- (7) 経済産業省, 発電用火力設備の技術基準の解釈, (2013)  
[https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/law/files/221214kagikaisyaku.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/221214kagikaisyaku.pdf)
  - (8) 一般社団法人 火力原子力発電技術協会, 発電用火力設備の技術基準省令及び解釈[第 10 章 溶接部](解説), 一般社団法人 火力原子力発電技術協会, (2017) p.222
  - (9) ASME (American Society for Mechanical Engineers), ASME Boiler and Pressure Vessel Code, (2023)
  - (10) 浦田幹康他, 火力発電プラントの非破壊検査技術, 三菱重工技報 Vol.52 No.4 (2015)
  - (11) 林恭平他, 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)