

DEN-CHU-KEN

# TOPICS

2013 5 MAY

VOL.15

Central Research Institute of Electric Power Industry

## 電力の安定供給を担う 火力発電設備の 保守管理技術

1. 火力発電設備の現状と保守管理の課題
2. プラント熱効率管理とボイラの伝熱面管理技術
3. ガスタービン高温部品の保守管理技術
4. 火力発電設備高温配管への非破壊検査の適用

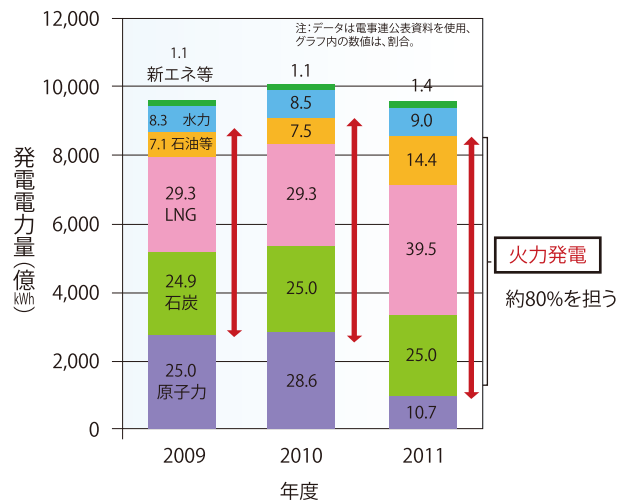
## 電力の安定供給を担う火力発電設備の保守管理技術

# 1.火力発電設備の現状と保守管理の課題

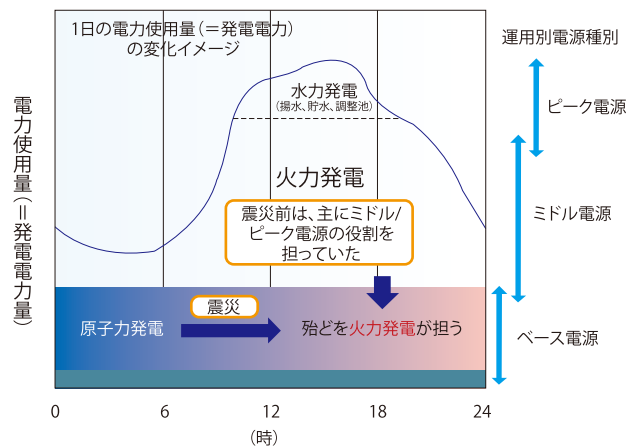
東日本大震災以前の10年間における我が国の電源別発電電力量は、原子力25～30%、火力60～65%、水力10%程度の割合となっており、火力発電は主にミドル・ピーク電源としての役割を果たしてきました。それが震災以降は、原子力発電が担っていたベース電源としての役割についても火力発電が果たすこととなり、全発電電力量に占める火力発電の割合は、2011年度実績で約80%を占めました(右図上、下)。最近では約90%に及んでおり、火力発電への依存度は非常に高くなっています。このため、電力安定供給を維持するためには、その中核を担う火力発電設備において、性能を維持しながら機器信頼性と安全を確保する保守管理を行うことが、非常に重要となります。同時に、コストの増大とならない合理的な保守が求められています。

第1章では、石炭(微粉炭)、LNG(液化天然ガス)、ならびに石油を燃料とする各火力発電方式の違いによる保守技術の課題を整理し、紹介します。

エネルギー技術研究所  
上席研究員 渡辺 和徳



電源別発電電力量構成比の変化



1日の電力使用量と対応電源構成の変化

図(上)に示したように、東日本大震災以降、LNGや石油を燃料とする火力発電の発電電力量が増えている。これは、電力の供給量を確保するため、これまで主にミドル・ピーク電源とされていたLNG複合発電プラントの稼働率が上がり、さらには、老朽石油火力も随時稼働しているためである(図下)。このため、今日の電力安定供給を支える火力発電設備は、従来よりも厳しい運用が求められており、また、ミドル・ピークからベースへと運用形態が変化することにより、現場では新たな視点での保守管理も必要になっている。

一般に、設備維持の観点としては、日常的な保守と定期的な実施するオーバーホールがある。前者については、日常的な機器の巡回やプラントの運転データ管理を通じて、予防保全の観点から運転中のわずかな変化を見逃さないように努めることが主眼となる。一方、後者は安全に運転が継続できるように機器の信頼性を維持するとともに、性能を回復させるためのメンテナンスを実施することが目的となる。以下に、火力発電方式の違いによる保守の課題を整理する。

まず、微粉炭火力発電の内、超々臨界圧の蒸気(圧力:25MPa、温度:600℃級)を用いたUSC(Ultra Super Critical)発電プラントでは、配管溶接部の損傷劣化の検出が重要な課題となっている。特に、タイプIV損傷\*と呼ばれる事象は、配管の噴破など重大な事故につながる危険性を伴い、それを未然に防ぐための高精度な非破壊検査技術を用いることが有効である。また、窒素酸化物(NOx)の排出を抑制するために燃焼場を還元雰囲気にするることによる弊害として、ボイラ内における硫化腐食の問題が顕在化してきている。更に、効率維持のために配管外面への灰付着抑制や、保守コスト削減のために配管内面の付着物(スケール等)の化学洗浄時期

を適正化することも重要となっている。

LNG複合発電については、高効率の鍵となるガスタービンの高温化技術が著しい進化を遂げている一方で、高稼働率の実現に向けた機器信頼性の確保と、ガスタービン高温部品の保守コスト削減が重要な課題となっている。燃焼器や動静翼などの高温部品は、材料技術や耐熱・冷却技術の進歩による性能向上に伴い、その価格も高額になっている。ユーザとしては、それらの真の寿命を知り、信頼性を確保しつつ寿命を余すことなく使用することにより、保守コストを抑制したいニーズが強い。そのため、ユーザ技術として、部品の状態の評価、使用計画の策定、寿命管理などに対し、納得できる合理的な保守の実現が望まれている。

また、急激に稼働率が上がった老朽石油火力の経年劣化に対する保守管理も大きな問題となっている。ボイラやタービンなどの主要機器だけでなく、構造物、制御系、補機も含めてプラント全体に対してどう保守していけばいいのか、今後の設備利用計画も念頭に置いた信頼性確保のための取り組みが急務となっている。

更に、夏季と冬季の高需要期の出力確保のため、春と秋に集中して定期点検が実施されることから、点検期間の短縮や定期点検周期の延伸など、効率的な保守の実施に向けた取り組みも重要な課題として位置付けられる。

2章以降では、これら火力発電設備の保守に関わる課題の内、これまで当所が取り組んできた、プラント熱効率管理、ボイラにおける伝熱面管理、ガスタービン高温部品の保守管理、高温配管の非破壊検査技術について、研究の状況を紹介する。

\*:溶接熱影響部の金属母材近傍の細粒域で発生するクリープ損傷(高温下では、時間の経過に伴い、温度・応力が一定でも徐々に変形して壊れる現象)

# 電力の安定供給を担う火力発電設備の保守管理技術

## 2.プラント熱効率管理とボイラの伝熱面

既存火力発電プラントの熱効率を維持・向上することは、貴重な化石燃料の消費量や二酸化炭素排出量、さらには運転コストの増加抑制・削減のため、大変重要な課題です。熱効率が低下した場合、どの機器の性能低下が原因なのかを適切に究明できれば、速やかに対策を講じることができ、熱効率の維持・向上に繋がれると考えます。そこで、当所では、熱物質収支解析（プラント内部における熱および物質（ガス、蒸気、水等）の収支解析）を基本とした、火力発電プラントの熱効率解析手法ならびにツールを開発し、火力発電所での熱効率管理の支援に活用しています。

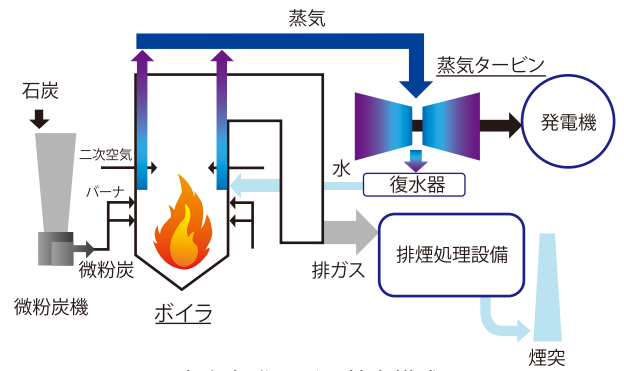
また、火力発電所の主要機器であるボイラにおいては、信頼性を確保した上で、運転コストおよび保守管理コストの削減が命題となっています。昨今、安価な燃料の使用、NOx生成抑制運転の採用など運転コスト削減が図られる中、想定されるトラブルの把握と監視、合理的な保守管理基準の作成が必要となっています。

本章では、当所が開発した火力発電プラントの熱効率解析手法ならびにボイラ運転状態評価手法について紹介します。

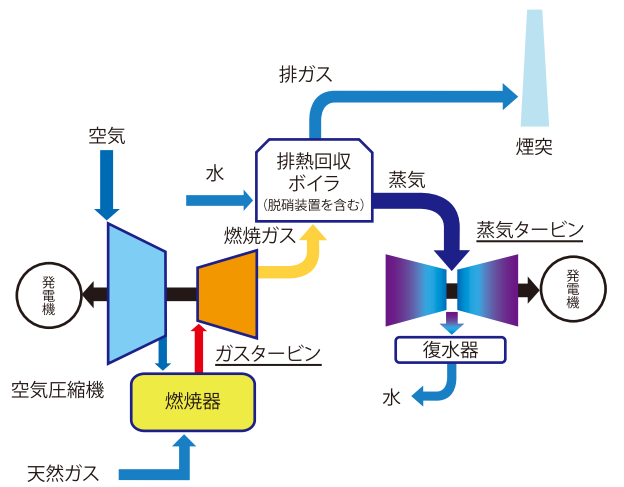
エネルギー技術研究所  
主任研究員 高橋 徹



エネルギー技術研究所  
上席研究員 森永 雅彦



石炭火力発電所の基本構成



LNG コンバインド火力発電所の基本構成

# 管理技術

## 2.1 既設火力発電プラントの熱効率解析

火力発電プラントの性能管理のためには、熱効率推移の監視が有用である。熱効率が低下した場合、熱物質収支解析を行ってその原因を推定することにより、対策を講じやすくなり、適切な保守管理に繋げることができる。

現状の熱効率管理では、プラント全体の熱効率の他、汽力発電プラントにおいては、ボイラの熱効率とそれ以外の蒸気タービン設備の熱効率を、ガスタービン複合発電プラントにおいては、ガスタービン設備、蒸気タービン設備、排熱回収ボイラ設備それぞれの熱効率を管理している。しかしながら、プラント熱効率が低下した場合、プラントを構成する機器数が多いため、これらの指標だけではどの機器の性能低下が主な原因なのか特定することが困難であった。そこで、当所では、熱効率低下要因解明のために、熱物質収支解析を用いた新たな解析手法とそれを支援するツールを開発した<sup>(1)</sup>。

### ① 熱効率低下要因解明手法の開発

プラントの熱効率低下要因を推定するためには、多数計測されている運転データ等をもとに、個々の機器性能値(圧縮機、タービンなど回転機器では断熱効率、熱交換器については熱貫流率など)の変化を把握するとともに、各機器性能の変化量がプラント熱効率に与える影響量を評価する必要がある。

本手法の概略フローを図2-1に示す。第1ステップとして、運転データを用いた熱物質収支解析から、計測できない状態量を求め、それらを用いて個々の機器性能値を算出する。ただし、機器性能値が機器の出入口の条件によって変化する場合があるため、長期間の運転データから多数の機器性能値を算出し、機器出入口条件に対する機器性能

関数を作成する。この機器性能関数を用い、基準の機器出入口条件での機器性能値に換算することで、同一の条件下での機器性能値の比較(運転時間等による変化)が行える。

以上の解析で同一条件下での機器性能値の比較評価は可能となるが、それぞれの機器性能値の変化が発電プラント全体の熱効率に与える影響は明らかとはならない。そのため、第2ステップとして、上で得られた個々の機器性能値および機器性能関数を用いて発電プラントの熱物質収支解析を再度行い、それら個々の機器性能の変化がプラント熱効率に与える影響を算出する。この感度解析により、どの機器の性能変化がプラント熱効率の低下に最も関与しているかを把握できる。

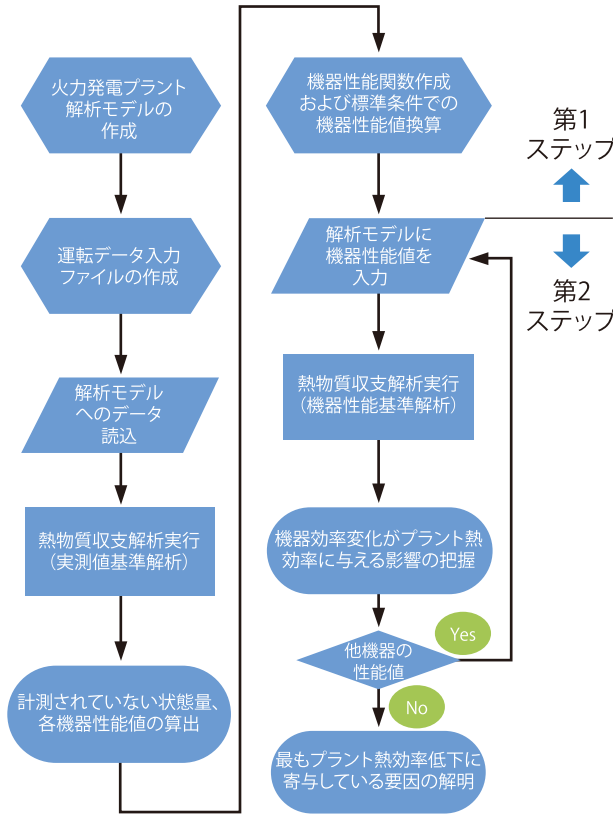


図 2-1 熱効率低下要因解明手法のフロー

## ② EnergyWinをベースとした熱効率低下要因解明支援ツールの開発

前項で示した解析方法を実現するためには、大量の運転データをもとに、複雑な火力発電プラントの熱物質収支を効率良く解析でき、柔軟な解析条件の設定・変更が可能なツールが必要である。

そこで、図2-2に示すように、当所オリジナルの汎用熱物質収支解析ソフトの「EnergyWin」<sup>(2)</sup>をベースとし、連続計算機能や計算条件自動設定マクロ機能などを付加することにより、運転データをもとにした、個々の機器性能の比較ならびにプラント熱効率の低下要因の推定を支援するツールを開発した。

本ツールを用い、すでに多くの火力発電プラントにおいて熱効率低下要因の解明支援ならびに点検・改善の提案や効果の検証を支援している。今後も火力発電プラントの熱効率の維持・向上に貢献したいと考える。

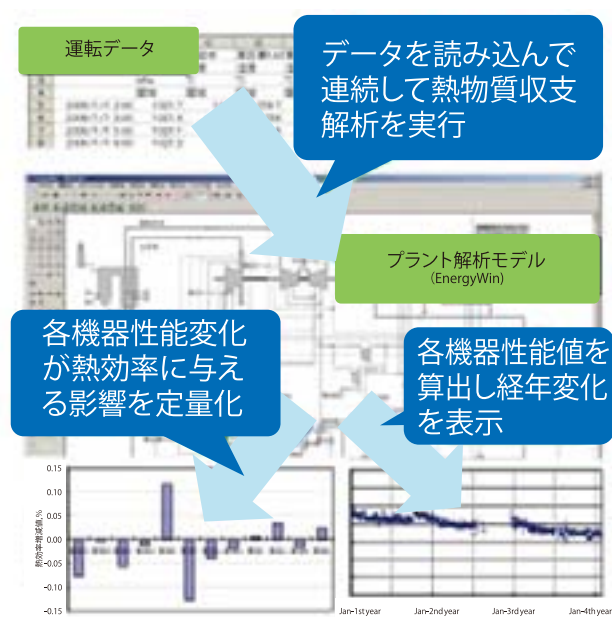


図 2-2 熱効率低下要因解明支援ツール

## 2.2 火力発電プラントのボイラ伝熱面管理

火力発電所では、トータルコスト引き下げへの効果が大きい運転コスト低減のため、運転開始時に想定した条件とは異なる運転(様々な産地・性状の安価な燃料の使用、脱硝コスト低減を狙った窒素酸化物(NOx)抑制運転等)が行われている。そのため、伝熱管の損傷(管内面スケール付着による伝熱面過熱、管外面の腐食による減肉、大塊クリンカ(大きな灰の塊)落下による噴破ほか)等のトラブルに至る現象の把握とその発生メカニズムを踏まえた状態監視が、プラントの信頼性確保の観点から、一層重要となっている。

### ① ボイラ運転状態評価

状態監視としては、定量的なボイラ炉内情報が少ないため、常設監視計器であるプラント計算機データの十分な活用を図るとともに、ボイラの覗き窓や計測ポート等を利用した追加測定による情報入手が重要である。更に、定検時の炉内調査結果を運転中の測定結果と比較・検討することも、各現象の把握において有益である。

追加測定項目としては、燃焼ガス温度、燃焼ガス組成、炉内燃焼画像等が挙げられる。当所では、炉内の燃焼状態を把握するため、放射温度計による燃焼ガス温度分布の測定を実施している。本測定は、ボイラの覗き窓40箇所前後を利用した1時間前後の測定であるが、温度測定結果をボイラ高さ方向で整理することで炉内の燃焼状態、各部のアンバランスを把握できることから、ボイラ全体での燃焼状態の確認に有効である(図2-3)<sup>(3)</sup>。本結果とプラント計算機データの解析結果、更には定検時の炉内調査状況を関連付けることで、より確度の高いボイラ運転状態の全容把握が可能となる。

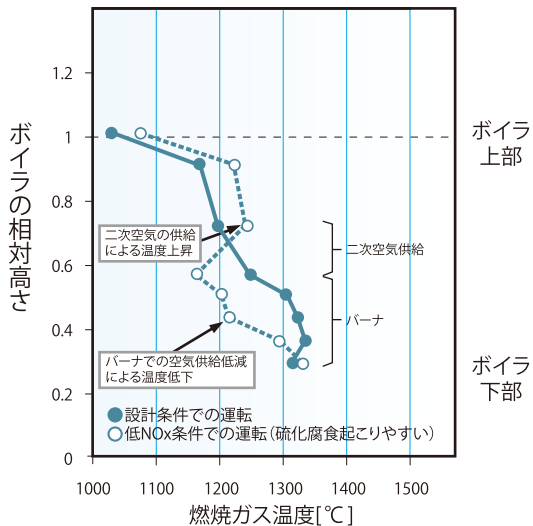


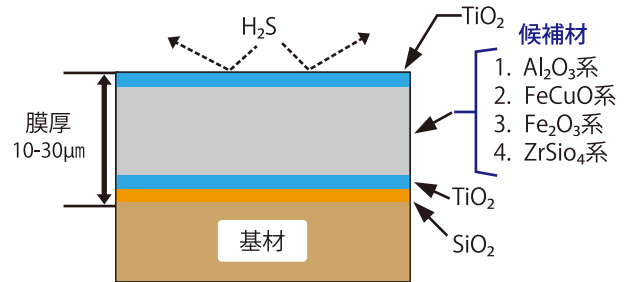
図 2-3 ボイラ高さ方向の燃焼ガス温度分布測定例  
(運転条件の違いによる変化)

## ②ボイラ伝熱面材料の損傷・劣化予測

ボイラで発生した熱量の4～5割を吸収する水冷壁管は、高温で過酷な環境にある。そのため、腐食や摩耗による減肉、損傷形態もクリープによる噴破や膨出、疲労による割れなど複雑であるため、特に重要な監視部位となっている。当所では、この中で、硫化腐食減肉対策としての環境評価と新たなコーティング技術、クリープ損傷対策としての化学洗浄基準の合理化に関する検討と評価ツールの開発を進めている。

### 1)硫化腐食減肉に関する対策

当所では、運転時において、前述の炉内燃焼ガス温度分布計測による燃焼状態把握と合わせて、炉内燃焼ガスの採取と組成分析を行い、多くの実機ボイラで炉内硫化腐食環境評価を実施してきている。また、腐食環境が厳しい部位の推定に役立つため、定検時には、水冷壁管の腐食状態に関する調査を実施している。更に、低コストで施工が容易なスプレ方式による耐硫化腐食コーティング技術の開発を進めており、実機検証も行っている(図2-4)<sup>(4)</sup>。



特徴 ・施工方法(スプレ法)⇒早い、安い、簡単  
 ・4層の複合膜による環境遮断  
 ・H<sub>2</sub>Sと反応性の低いTiO<sub>2</sub>をトップコート

図 2-4 当所開発コーティング層(複合膜)の模式図

### 2)化学洗浄基準の合理化

化学洗浄実施の時期については、設備寿命が近づいている経年ボイラの増加や酸素処理法の採用など給水処理方法の変化に伴う化学洗浄間隔の延伸等に応じた化学洗浄基準(管理基準)の合理化(緩和)が求められている。

そのため、当所では、従来の管理基準で運用されていたボイラの抜管試料(実機から採取した試料)を用いたクリープ試験による残存寿命の実態把握、運転時のボイラ炉内水冷壁管表面の温度に基づいた管のクリープ損傷解析や損傷予測等を行うことにより、管理基準であるボイラ内伝熱面材料における推奨許容温度の緩和について検討を進めている。

#### <参考文献>

- (1)高橋徹ほか:「発電システム熱効率解析汎用プログラムを用いた火力発電プラントの熱効率低下要因解明方法の開発」、電力中央研究所報告M09013、2010
- (2)幸田栄一ほか:「発電システム熱効率解析汎用プログラムの開発」、電力中央研究所報告W99034、2000
- (3)若林信行ほか:「微粉炭焼きボイラにおける灰付着性評価手法の開発—実機灰付着環境温度の実態解明—」電力中央研究所報告M11013、2012
- (4)河瀬誠ほか:「石炭火力ボイラ管における耐硫化腐食コーティングの開発Ⅳ—管表面の下地処理の影響—」電力中央研究所報告M11013、2013

## 電力の安定供給を担う火力発電設備の保守管理技術

# 3.ガスタービン高温部品の保守管理技術

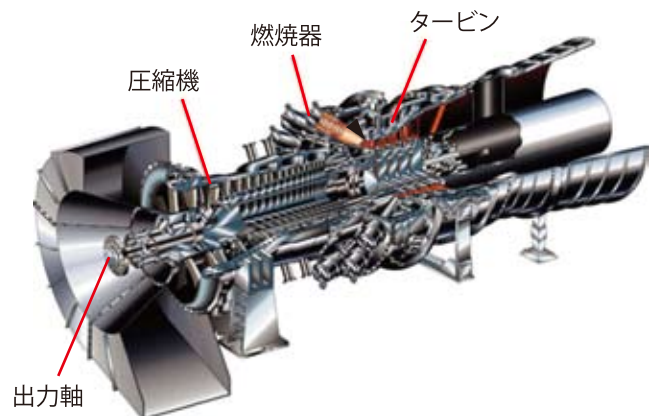
LNGを燃料としたガスタービン複合発電は、従来の火力発電方式と比較して高効率であり、1 kWh当たりのCO<sub>2</sub>排出量も少ないため、電気事業においても導入が進められています。しかし、ガスタービンは1000℃を超える高温燃焼ガスにより運転されるため、燃焼器やタービン動静翼などの高温部品には、最新の材料技術、冷却技術、コーティング技術が適用されており、それらは非常に高価なものです。また、高温部品には、き裂、減肉、変形などの様々な損傷劣化事象が高頻度で発生するため、他の火力発電機器の部品と比較して管理寿命が短く設定されており、定期的に部品の補修や交換が行われています。このため、合理的な寿命判断基準に基づく、高温部品の保守管理の実現が望まれています。

当所では、上記のような高温部品に関わる保守管理費用を低減することを目的に、ユーザサイドに立った合理的な保守管理技術の開発に取り組んでいます。本章では、ガスタービン高温部品の保守管理を支援するソフトウェア、高温部品に適用されている遮熱コーティングに対する非破壊検査技術、数値解析を活用したガスタービン翼の耐久性評価技術について紹介します。

エネルギー技術研究所  
上席研究員 藤井 智晴

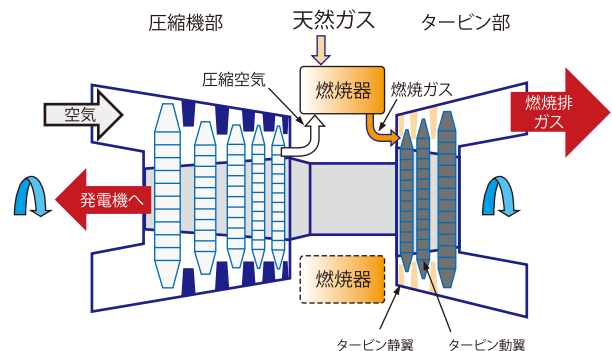


エネルギー技術研究所  
上席研究員 高橋 俊彦



ガスタービン

出典:三菱重工業株式会社 ホームページ



ガスタービンの概略構造



### 3.1 ガスタービンの保守管理支援ソフト

ガスタービン高温部品は高温環境での使用に耐えるために、最新の高度な製造・加工技術が適用されることから、非常に高価である。また、ボイラや蒸気タービンなどの従来の火力設備の部品と比較して、管理寿命が短く設定されており、保守管理費用の低減のためには、効率的な部品運用が必要となる。さらに、1台のガスタービンで使用される高温部品の数は500個程度で、個別部品毎に損傷劣化の発生状況が異なり、その補修には数ヶ月の期間を要する場合もある。このため、部品毎に使用履歴や補修履歴の管理を行う必要がある。

このような高温部品の保守管理を効率的に行うため、通常は、予備部品を用いた部品ローテーション計画に基づく部品運用が行われている。これにより、点検時に、計画的に予備部品と交換することで、補修のための期間を確保することが可能となる。しかし、特に予備部品を共有するガスタービンの台数が多い場合には、ローテーション計画の作成や履歴管理に多大な労力が必要となる。

当所は、高温部品に関わる保守管理業務の効率化を目的として、保守管理支援ソフト「ガスタービン高温部品保守最適化支援システム」<sup>(1),(2)</sup>の開発を行っている。本システムは、図3-1に示すように、ローテーション計画の自動作成機能、および部品の履歴管理機能とともに、コスト試算機能を備えており、この試算結果が、作成したローテーション計画の良否を判断する指標となる。また、将来の運転計画、予備部品の納期、部品補修に必要な期間などの制約条件の下、円滑な部品ローテーションのために最低限必要な予備部品の数を計算することで、予備部品の削減に貢献できる。さらに、将来の運転計画が変更された場合や、部品の管理寿命な

どの仕様に変更された場合について、ローテーション計画や各種費用への影響を事前に評価できる。

本システムは、実際の発電所において使用されており、ユーザから得られた意見等に基づいて、利便性や操作性の更なる向上に向けた改良を進めている。

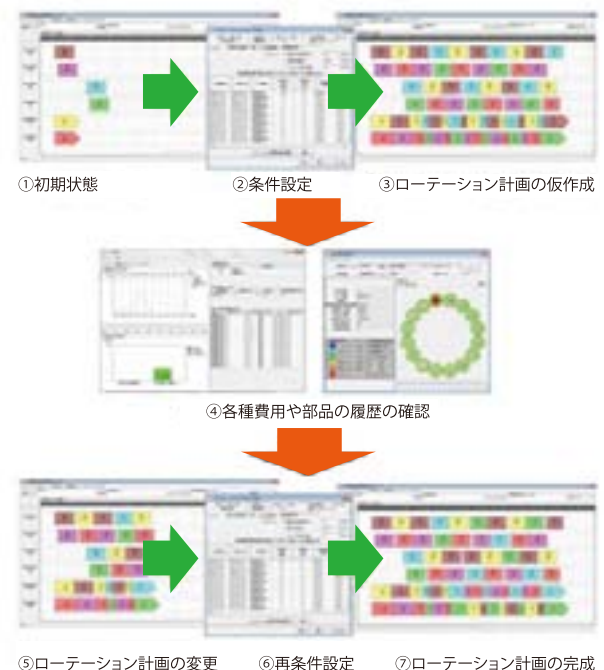


図3-1 部品ローテーション計画策定の流れ

### 3.2 遮熱コーティングの非破壊検査技術

ガスタービン複合発電設備の中核となるガスタービンについては、更なる高効率化を目指して燃焼ガスの高温化が進められている。このため、高温部品の基材を高温環境から保護することを目的に、遮熱コーティング(TBC)の適用が進められている。図3-2に示すように、TBCは合金製のボンドコート(BC)とセラミックス製のトップコート(TC)

の2層から構成されており、TC内部には無数の小さな気孔が存在する。TCが金属よりも熱伝導率が低いセラミックスであること、内部の気孔が断熱層の役割を果たすことから、TBCの適用により、基材の表面温度を100℃以上下げることができると言われている。しかし、TBCは高温環境に長時間曝されるため、経年的に様々な損傷劣化事象が発生する。代表的な事象として、TCの減肉、焼結、はく離がある。減肉は、TCの厚さを減少させ、焼結はTCの見かけの熱伝導率を増加させるため、結果としてTCの熱抵抗が低下し、基材の温度上昇を引き起こす。また、はく離はBCとTCの界面付近に間隙を発生させ、この状態を放置した場合には、間隙の拡大により、TCの一部がはく落し、やはり基材の温度上昇を引き起こす。このようなTBCの損傷劣化が発生した場合には、TBCの再施工（リコーティング）が行われるが、リコーティングは他の損傷劣化に対する補修と比較して工程が多く高額である。このため、高温部品の信頼性の確保と補修費用の低減を両立する合理的なリコーティング周期を確立することが必要となる。

このため、当所では、TBCに発生する様々な損傷劣化を非破壊で検査するための技術開発に取り組んでいる。焼結<sup>(3)</sup>およびはく離<sup>(4)</sup>の検査については、図3-3に示すように、TBC表面を一定速度で移動するレーザで加熱した際の表面温度の違いを、赤外線サーモグラフィを用いて検出する方法を開発した。また、はく離の検査においては、レーザ加熱後のはく離部に生じる残熱像も利用する。これらの手法を実際のTBC施工動翼に適用して検証した結果、高い精度で検査可能であることが判明し、今後の実用化に向け、検査条件の適正化を進めている。

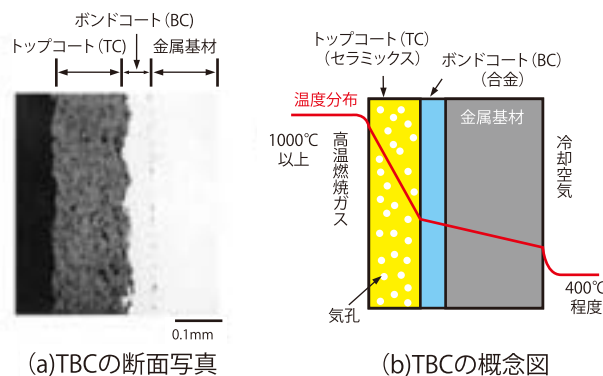


図3-2 遮熱コーティング(TBC)の概要

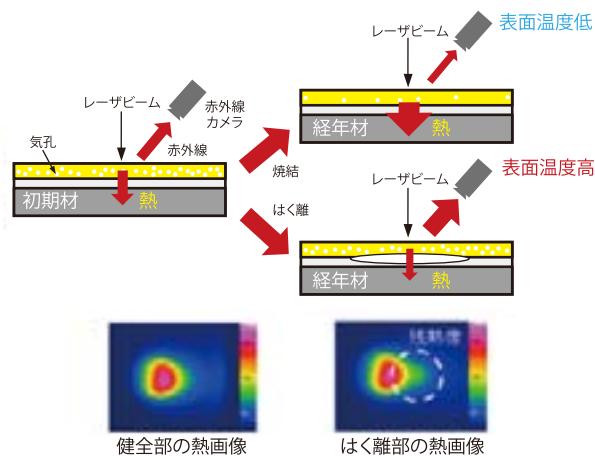


図 3-3 焼結とはく離の検査原理

### 3.3 数値解析を活用したガスタービン翼耐久性評価技術

高温の燃焼ガス流中で使用されるガスタービン翼の耐久性は、構造材料(基材)のクリープ、酸化、熱疲労に支配され、いずれも温度に起因する。ガスタービン翼の温度分布は、形状、冷却構造およびTBCの性能に大きく支配され、また、TBC自体の損傷、性能劣化も温度に大きく依存するため、ガスタービン翼の耐久性評価には翼の形状・構造に基づく温度分布の把握が不可欠となる。ガスタービ

ン内部に挿入する放射温度計等で翼表面温度を測る装置も開発されているが、未だ定量的な計測は難しく、まして商用機に対する適用は、現実には容易ではない。

そこで当所では、ガスタービン翼の耐久性評価に必要な、翼の形状・内部冷却構造の計測および翼温度分布の数値解析による推定手法を構築して、推定温度に基づく基材のクリープ損傷による耐久性評価を行ってきた。



図 3-4 X線CTによるGT翼の非破壊計測

図3-4は、当所における産業用X線CT装置(X線管電圧450kV)による、翼の断面像、およびこの断面像に基づく翼形状モデルの例<sup>(5)</sup>である。ガスタービン翼は頻繁な設計変更があるが、CT技術を用いることにより、非破壊による迅速な計測を可能とした。また、翼形状・構造に基づく翼表面温度の数値解析においては、実現象と同じく、翼まわりのガス流による加熱と翼内部冷却の熱バランスに基づき、温度分布を計算する手法を構築した。数値解析で推定されたガスタービン定格運転時の翼温度分布<sup>(6)</sup>を図3-5に示す。推定された温度分布は、使用済み翼の損傷部によく対応するとともに、コーティング組織の観察から推定された温度にも良好に一致した。さらに、計測・推定した翼の形状、温度分布は、翼の構造解析による応力・ひずみの評価、および基材の強度評価条件に適用して、耐久性を

評価することができる。図3-6は、構造解析結果の一例であり、推定された高応力部は実翼の損傷発生位置とほぼ一致することを確認している。

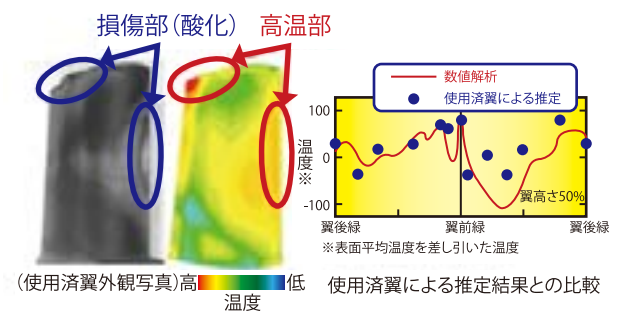


図 3-5 数値解析による翼表面温度分布

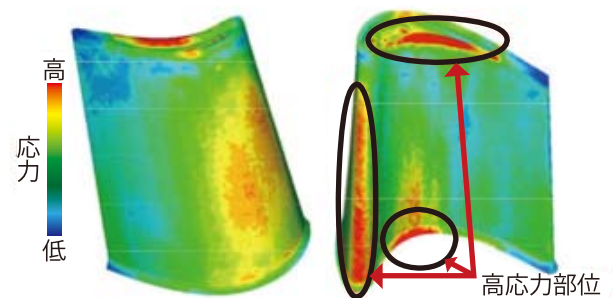


図 3-6 数値解析による応力分布

<参考文献>

- (1) 藤井智晴ほか:「ガスタービン高温部品保守最適化支援システムの開発—システムの自由度向上に向けた改良—」、電力中央研究所報告 M06003、2007
- (2) 藤井智晴ほか:「ガスタービン高温部品保守最適化支援システムの開発—コスト評価における有効性の実証—」、電力中央研究所報告 M07008、2008
- (3) 藤井智晴ほか:「ガスタービン翼を対象としたTBC遮熱性能非破壊評価法の開発—TBC施工動翼を対象とした熱抵抗の推定値の精度検証—」、電力中央研究所報告 M11009、2012
- (4) 藤井智晴ほか:「ガスタービン用遮熱コーティングを対象としたはく離の非破壊検出手法の開発—手法の提案と適用性の評価—」、電力中央研究所報告 M12002、2013
- (5) 高橋俊彦ほか:「火力機器部品の非破壊形状計測におけるX線CTの適用性評価—ガスタービン動翼の耐久性評価への適用—」、電力中央研究所報告 M08005、2009
- (6) 渡辺和徳ほか:「発電用大型ガスタービン初段動翼を対象とした温度解析技術の開発」、電力中央研究所報告 M01、2005

## 電力の安定供給を担う火力発電設備の保守管理技術

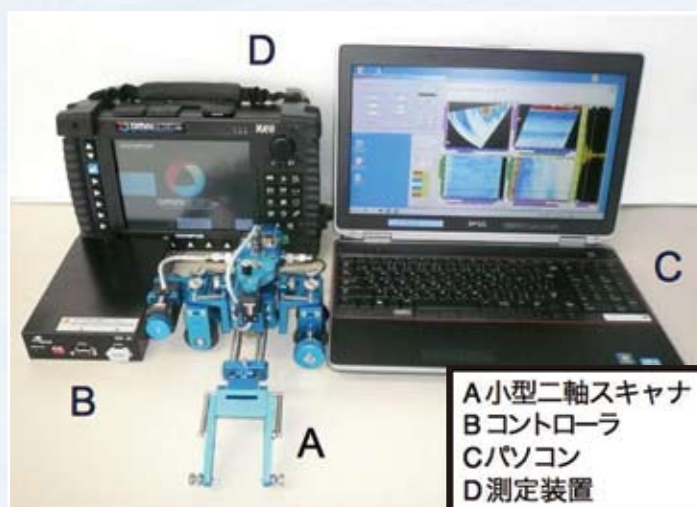
## 4.火力発電設備高温配管への非破壊検

600℃級の微粉炭火力発電設備の蒸気配管には、高温強度に優れた高クロム鋼が使用されています。この高クロム鋼製配管は、長時間高温に曝されることで、その溶接部の内部においてタイプIV損傷と呼ばれるクリープ損傷が進行し、配管の噴破が従来の想定よりも早いことが懸念されています。そのため、損傷のより初期段階での検出が必要とされており、そのための技術開発が強く望まれています。超音波探傷試験は、厚肉な配管に対しても内部検査が可能のため、表面検査では検出が困難な溶接部内部に発生するタイプIV損傷の検出に用いられています。特に、超音波の伝搬方向や集束位置を電子的に制御することが可能な超音波フェーズアレイ法\*の実機適用が進められています。

本章では、高クロム鋼製配管溶接部に発生するタイプIV損傷の早期検出を目指し、非破壊検査の高度化に向けた技術開発や、実機への適用に向けた取り組みについての現状を紹介します。

※：探触子の各素子から異なったタイミングで超音波を送受信することにより、超音波の伝搬方向や集束位置を制御することができ、測定が従来よりも容易となる。

材料科学研究所  
主任研究員 永井 政貴



小型二軸スキャナを用いた自動探傷システム



火力発電所高温再熱蒸気管エルボ長手溶接部への適用事例

# 査の適用

## 4.1 非破壊検査の高度化に向けた取り組み

### ①高速シミュレーションツールの開発

探傷技術の研究開発では、実機を模擬した試験体を製作し、これを用いて検査条件の実験的検討を行う必要がある。しかし、さまざまな形状や寸法の試験体を製作するには費用がかかり、また、内在欠陥の形状や寸法を模擬することも容易ではない。

そのため、実験の代わりに数値シミュレーションを行うことで、試験体を製作することなく、検査条件を検討することが考えられている。代表的な数値シミュレーション手法である有限要素法は、複雑な欠陥形状のモデル化が容易で、正確な波動伝搬の予測が可能であるが、実機サイズの試験体の波動伝搬を複数の条件についてシミュレーションするためには、膨大な時間を要する。そこで当所では、近似解を用いることで、有限要素法と比較すると精度は劣るものの、検査結果を高速に予測できるシミュレーションツールを開発している(図4-1)<sup>(1)</sup>。

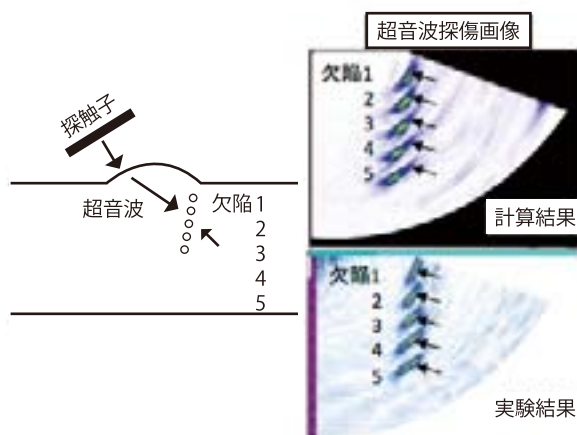


図 4-1 高速シミュレーションによる計算例

本ツールにより、短時間での検査条件の最適化が可能であり、また、検査により得られた探傷画像から、欠陥による信号と試験体形状による信号との識別も容易となる。当所では、開発したシミュレーションツールを用い、合理的な探傷技術の開発に取り組んでいる。

### ②複雑形状部の検査方法の開発

溶接継手の余盛や小口径管台溶接部は、その表面が複雑な形状であるため、超音波フェーズドアレイ法を適用するには、肉盛を削って表面を平坦にする必要がある。複雑な表面形状のまま検査するためには、超音波フェーズドアレイ法において、表面形状を考慮して、探触子(超音波を送信または受信する素子を組み込んだセンサ)の各素子にパルス電圧を印加するタイミング(遅延時間)を決定する必要がある。表面の形状測定において、フレキシブルな探触子を表面に押し当て、その際の探触子の変形を測定する装置が商品化されている。これは画期的な技術であるが、高価な専用の探触子、測定装置およびソフトウェアが必要となる。また、表面形状に関するCADデータを事前に入力する探傷システムが市販されているが、実際の検査において、事前に検査部位のCADデータを入手することは困難である。

そのため、当所では、特殊な探触子や、事前に表面形状に関するCADデータを必要としない検査方法の開発を行っている。この方法では、一般的な探触子に、後述する適合型ウェッジを併用することで、複雑な表面形状部においても安定した超音波の送受信を可能としている。また、超音波の受信波形により表面形状を測定し、その結果に基づき遅延時間を計算することができる(図4-2)<sup>(2)</sup>。現在、実機損傷材などを用いた検討を進めつつ、

この方法を用いて配管溶接部の余盛の上からの探傷や、小口径管台溶接部の探傷技術の確立にチャレンジしている。また、前述したシミュレーション技術の援用による高精度化、高速化も検討しつつ、実機探傷の効率改善に向けて取り組んでいる。

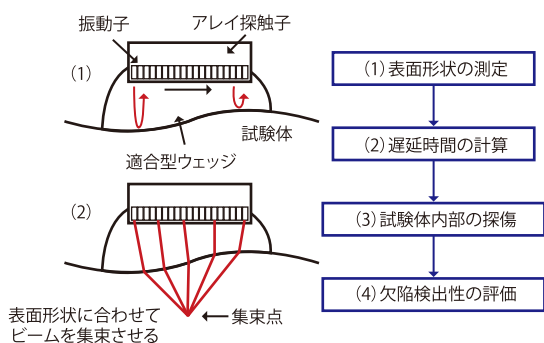


図 4-2 複雑形状部の探傷技術

## 4.2 非破壊検査のための技術開発

### ① 小型自動探傷システム

超音波探傷試験において、多くは手動や半自動による探傷が実施されている。探触子をスキャナにより機械的に二次元走査し、探傷波形データを画像化することで、欠陥の視認性が向上し、これにより欠陥寸法の測定精度も向上する。また、欠陥とそれ以外の信号、例えば、形状、溶接欠陥、金属組織に起因する信号との識別性も向上する。しかしながら、自動探傷は、手動や半自動探傷に比べ、準備やデータ取得に時間を要する。また、周溶接部、長手溶接部、分岐管台溶接部など異なる部位を探傷する場合、それぞれの形状に応じたスキャナを用いなければならないのが現状である。これに対して、当所では、様々な部位に適用可能で、且つ準備に時間を要しない小型二軸スキャナを開発した。同スキャナはゴム製レールを軌道とし、磁石内蔵車輪により様々な曲率に追従できるように、従来のス

キャナよりも多くの回転機構を設けている。さらに、スキャナの制御プログラムを開発し、上述の小型二軸スキャナ、そのコントローラ、パソコンおよび測定装置から構成される自動探傷システムを構築した(中扉図)<sup>(3)</sup>。現在、本システムは、実機配管の超音波探傷試験だけでなく、渦電流探傷試験や硬さ測定にも活用されている。

### ② 適合型ウェッジ

ウェッジとは、試験体表面に対し斜めに超音波を送受信させる目的で、探触子前面に取り付けるくさび形状のプラスチックや金属のことである。鋼材の検査に用いられるプラスチック製ウェッジでは、安定した超音波の送受信を行うために、試験体表面とウェッジの接触面の上に大きな空隙が生じないように、試験体形状に合わせてその接触面を機械加工していた。当所では、様々な形状に適合する油性ゲルを充填した適合型ウェッジを開発し(図4-3)<sup>(3)</sup>、様々な表面の試験体において、ウェッジを機械加工しなくても安定した超音波の送受信を可能としている。また、これにより、前述した複雑な表面形状を有する検査部においても、検査が容易となった。

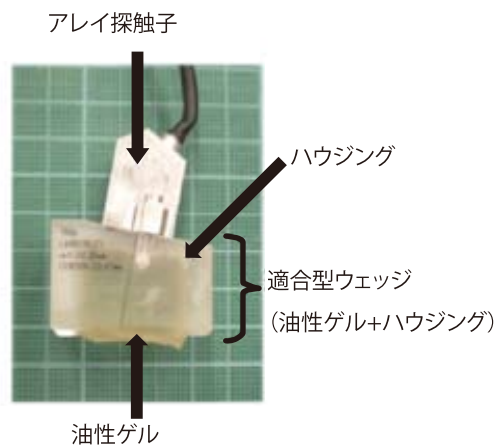


図 4-3 開発した適合型ウェッジ

### 4.3 非破壊検査技術の実機への適用

高クロム鋼製配管溶接部に発生するタイプIV損傷は、その進行過程で、クリープボイドと呼ばれる微小な欠陥が発生、成長し、それに引き続いてき裂が発生、進展する。当所では、人工的にタイプIV損傷を付与した溶接継手試験体を製作し、これに超音波フェーズドアレイ法を適用した。その結果、適切な条件下で探傷を行うと、き裂が発生する前のクリープボイドが連結した状況を検出できることを明らかにした(図4-4)<sup>(4)</sup>。現在、上述した小型自動探傷システムと共に、探傷条件などの得られた知見を実機配管の検査に活用している。また、得られた探傷画像から、タイプIV損傷の信号と溶接欠陥の信号を識別する上で、溶接継手の形状は極めて重要な判断材料である。通常は図面を参考にすが、再溶接がなされ、溶接継手の形状が不明である場合がある。これに対して、超音波フェーズドアレイ法を用いることで、非破壊的に溶接継手の形状を推定する手法を開発した(図4-5)。

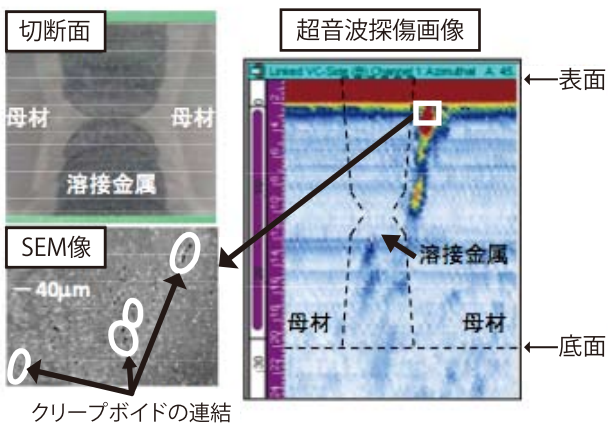


図4-4 タイプIV損傷の探傷結果例

本手法は、タイプIV損傷の検出だけでなく、再溶接の有無の判定や、その形状推定に利用することも期待される。今後は、溶接継手の形状推定を利用して、タイプIV損傷の検出性の向上に取り組んで行く予定である。

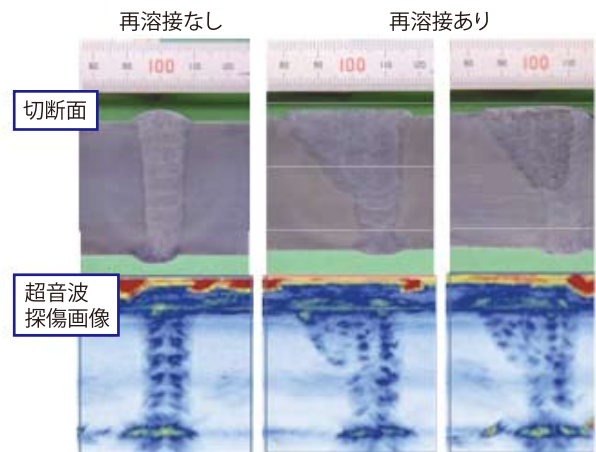


図4-5 溶接継手の形状推定

<参考文献>

- (1)永井政貴ほか:「超音波探傷試験の高精度化・高効率化に活用するシミュレーションツールの開発-第4報」、電力中央研究所報告Q10020、2011
- (2)永井政貴ほか:「ボイラ配管溶接部の形状変化部に適用可能な超音波フェーズドアレイ技術の開発-第2報」、電力中央研究所報告Q10021、2011
- (3)福富広幸ほか:「ボイラ配管溶接部に対する超音波探傷試験のための小型自動探傷システムの開発」、電力中央研究所報告Q09002、2010
- (4)福富広幸ほか:「高クロム合金鋼溶接継手におけるタイプIV損傷への超音波フェーズドアレイ法の適用性評価」、電力中央研究所報告Q07003、2008

DEN-CHU-KEN  
**TOPICS**

発行：一般財団法人 電力中央研究所 広報グループ

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 (大手町ビル7階)

TEL:03-3201-6601 FAX:03-3287-2863

<http://criepi.denken.or.jp/>