

ガスタービンメンテナンス技術

Gas Turbine Maintenance Technologies

酒井 義明 澤 徹 岡本 浩明

■ SAKAI Yoshiaki ■ SAWA Tetsu ■ OKAMOTO Hiroaki

電力供給の主役となっている火力発電においては、環境保全や、エネルギー利用の高効率化と経済性向上という市場要求に対応し、ガスタービンを用いた高効率コンバインドサイクル発電設備が増加しつつある。ガスタービンは、高温燃焼ガスを作動流体としていることから、燃焼器や動静翼などの高温ガス通路部部品は、高温酸化や熱応力による損傷を受けやすい。そのため、定期的な補修と交換が不可欠であり、これら保守・管理の効率を向上する技術が求められている。

東芝はこの要望に応えるために、寿命診断技術、寿命延伸技術や補修・検査技術などの開発に取り組み、実機に適用している。

The number of gas turbine combined-cycle plants is increasing in line with the market demand for environmental preservation and improvement of energy efficiency. Since the hot gas parts of a gas turbine are susceptible to damage such as thermal stress cracks and hot oxidation, such parts must be constantly repaired or replaced. As a result, efforts have been made around the world to develop gas turbine maintenance technologies, including diagnostics and advanced repair technologies.

Toshiba has been developing life assessment technologies, long life technologies, diagnostic technologies, and various other technologies for gas turbine maintenance.

1 まえがき

ガスタービンの高温ガス通路部部品（以下、高温部品と略記）は、高い熱応力や遠心力が作用する過酷な環境で使用されるため、比較的短い時間で補修や交換が必要となる。これらにかかる保守費用を低減するために、交換インターバルの延長につながる補修技術や寿命延伸技術などが求められる。

東芝はこのような課題に応えるために、寿命診断技術、寿命延伸技術、補修・検査技術などの開発に取り組み、実用化につなげている。

ここでは、これらの最新技術について述べる。

2 寿命診断技術

ガスタービンの高温部品は厳しい環境で使用されるため、図1に示すような劣化・損傷を受ける。これらの劣化・損傷を運転中や定期点検（以下、定検と略記）時に正確に把握し、継続使用、補修、再生、廃棄などを決定する迅速な判断が求められる。その手段として、高い精度の寿命診断技術が必要となるが、高温部品の寿命は様々な要因に影響されるため、普遍的な診断技術の開発は難しい。そのため、実際の運用状況を解析・評価し、更に、実際の劣化・損傷状況に基づいた寿命診断技術の開発が重要となる。

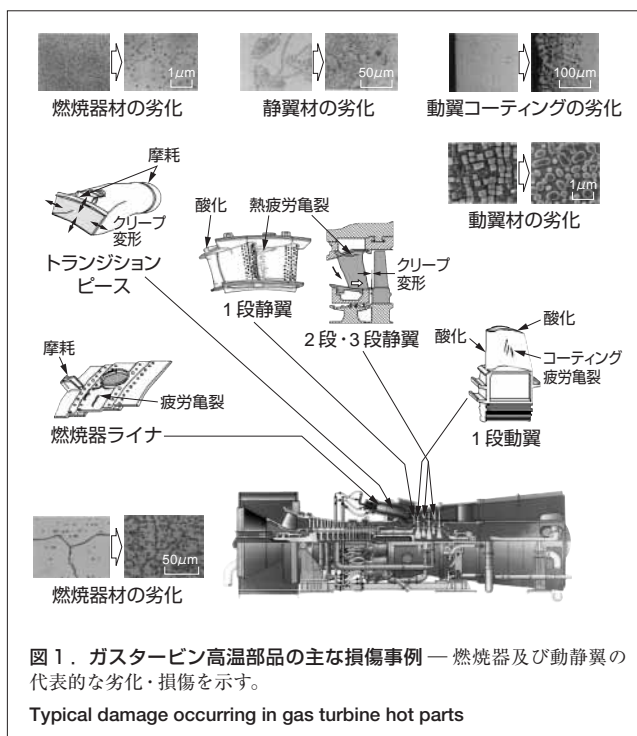


図1. ガスタービン高温部品の主な損傷事例 — 燃焼器及び動静翼の代表的な劣化・損傷を示す。

Typical damage occurring in gas turbine hot parts

当社の余寿命診断手法では、独自開発した材料劣化診断技術、部品損傷診断技術、シミュレーション解析技術を、有限要素法 (FEM) 解析や破壊調査 (クリープ強度、引張強さ、

耐力、疲労強度など)の従来手法と補完併用することにより精度良い診断を可能としている。

当社は、独自開発した寿命診断技術と他の手法を組み合わせることにより、余寿命診断のほかに、修理判定基準の見直しや修理時期の推奨に活用し実績を上げている。また、高温部品の寿命延伸技術開発にも、寿命診断技術を応用して成果を上げている。

以下に、これらの寿命診断技術について述べる。

2.1 材料劣化診断技術

材料劣化診断技術は、材料の組織変化から劣化状況を評価する技術である。高温部品に使用されているニッケル(Ni)基超耐熱合金材料(以下、Ni基材料と略記)の組織は、使用温度、作用応力、時効時間により変化する。したがって、組織調査を行うことにより高温部品のメタル温度の推定や、クリープ強度、引張強さ、耐力、硬さなどの機械的強度の推定を行うことができる。具体的な適用例としては、動翼や燃焼器の組織観察により、クリープ余寿命評価や変形予測などに活用している^{(1),(2)}。

2.2 部品損傷診断技術

部品に生じた亀裂や、変形、摩耗といった外的損傷が今後どのように進展するか予測できれば、計画的な保守へつなげることができる。部品損傷診断技術は、このような外的損傷変化傾向を解析して予測する技術である。実機の膨大な定検データを計算機に入力し解析することにより、その進展の法則性を見だしてマスタカーブなどを導く。これにより、外的損傷の進展予測が可能になる。具体的には、静翼の亀裂や燃焼器摩耗の進展傾向解析などに適用し、次回定検時の予測及び保守計画に活用している^{(1),(2)}。

2.3 シミュレーション解析技術

破壊調査を回避してその損傷状況を知りたい場合や、運転モード変更によりどのように損傷挙動が変わるか知りたい場合に、劣化・損傷を予測する技術として、シミュレーション解析技術があり、静翼の亀裂進展を推定するシミュレーションモデルなどが確立されている^{(1),(2)}。

3 最新の補修・寿命延伸技術

高温部品は非常に厳しい環境下で使用されるため、劣化・損傷を避けることはできない。動翼では経年的な材料劣化、高温酸化や外来飛来物による損傷に対して、従来は単にブレンドによる手入れが施されていた。このため、高温部品の延命化及び長寿命化を目指し、新しい補修技術や寿命延伸技術を開発して実用化している。

3.1 補修技術

3.1.1 動翼の溶接補修 動翼は高温の遠心力場で使用されるため、高温強度の高いNi基材料を使用しているが、

1,300℃級ガスタービンでは第1段動翼の先端部が高温酸化減肉する事象が認められている。このNi基材料は難溶接材であるが、近年の技術開発により翼先端部の補修に限り再生溶接が可能になっている。General Electric (GE) 社により開発された溶接割れを防止する新しい溶接法(WRAP^(注1)溶接)は、高温でのNi基材料の材料特性を利用したもので、動翼先端部の補修に適用し、再利用率改善に効果を上げている。更に、ロボットによる自動溶接補修も開発され、実機に適用している(図2)。

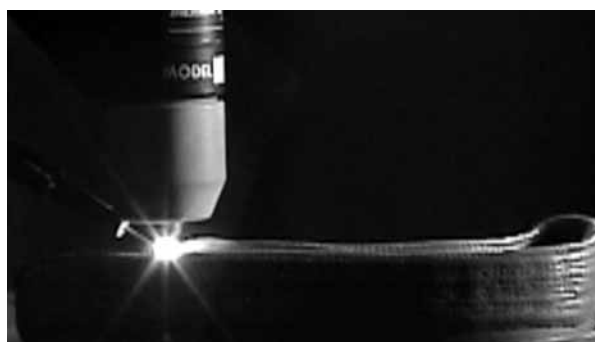


図2. ロボットによる動翼溶接補修 — ガスタービン動翼先端部の溶接補修状況を示す。

Bucket weld repair system automated by robot

3.1.2 動翼リコーティング タービン動翼基材を高温酸化から保護するために、翼外面及び冷却空気通路内面には耐酸化コーティングを施工している。長時間使用に伴いコーティングも劣化し、基材の保護機能が損なわれるが、コーティング及び基材表面の劣化状況を踏まえた最適時期に新しいコーティングを再施工(以下、リコーティングと表記)することにより、基材の劣化を抑えて延命化を図ることが可能となる。

リコーティングは、翼内外面の劣化した古いコーティング層を化学的・物理的手法により除去し、新しいコーティングを施工する修理技術である。第1段動翼(7FA型)にリコーティングを施した例を図3に示す。

3.1.3 静翼の拡散ろう付け補修 第1段静翼では、熱疲労により多くの亀裂が発生し、また、局所的に高温酸化減肉が生じることもある。従来技術では、修理前に亀裂・酸化減肉部分の除去が必要であり、また、補修量の増加とともに溶接による入熱が大きくなるため翼の変形も増大する。この問題に対して、広範囲な補修でも変形なく、高品質な補修を実現する修理方法として拡散ろう付け補修を開発し、実機適用が可能な状況である^{(3),(4)}。

(注1) WRAPは、General Electric社の商標。



図3. ガスタービン第1動翼のリコーティング — 翼表面と冷却空気孔にコーティングを施工した。

Recoated gas turbine bucket



図5. HIP 再生処理翼の実機組込状況 — HIP 再生処理した第2段動翼を実機へ挿入した。

Gas turbine rotor furnished with hot isostatic pressing (HIP) refurbishment bucket

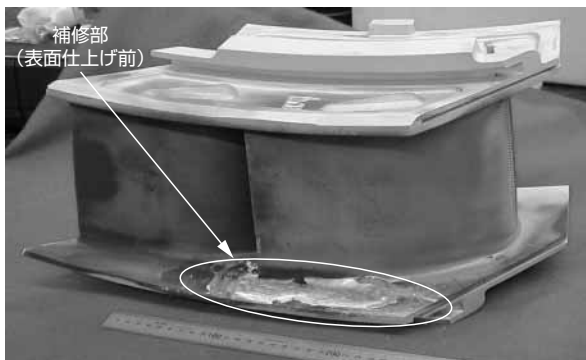


図4. 第1段静翼の拡散ろう付け補修 — 静翼側壁部へ拡散ろう付け補修を施工した。

Turbine nozzle repaired with diffusion heating system

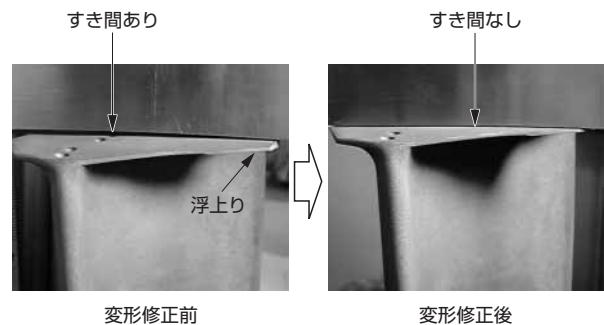


図6. 動翼先端部の変形修正 — ガスタービン第2段動翼先端部へ変形修正を施工した。

Reformed tip shroud of turbine bucket

拡散ろう付け補修は、基材と同等の合金粉末とろう材粉末の混合補修材料を補修部に充填(じゅうてん)し、真空中で拡散熱処理を施すことにより補修部を強固に補修する修理方法である。静翼の側壁部へ拡散ろう付け補修を適用した例を図4に示す。また、翼板部亀裂への適用による翼再生化技術も開発されつつある。

3.2 寿命延伸技術

3.2.1 劣化動翼のHIP再生化処理 動翼は運転経過とともにクリープ損傷が進行し、寿命を消費する。この劣化動翼に対して1,000気圧・1,000℃以上の高温高压下にて特殊熱処理を行うことにより、初期製造欠陥に加え、高温下の運転で経年的に材料劣化し、その結果、発生するクリープボイドを消滅させるとともに内部金属組織を再生させるHIP (Hot Isostatic Pressing) 再生化処理技術(特許登録済み)を当社独自にて開発しており、実機適用している^{(3), (4), (5)}。

これまでの技術検証では、材料強度が新翼以上の状態まで

回復することが確認されている。1,100℃級ガスタービンにて既の実機適用されているが、中部電力(株)新名古屋火力発電所7号系列にて、1,300℃級ガスタービン(7FA型)の実機劣化翼に世界で初めてHIP再生化処理が適用され、2004年4月から良好に運転中である(図5)。また、動翼先端部には経時的なクリープ変形が発生することがあるが、この変形を修正する技術も開発されており、HIP再生化処理と併用することにより、その寿命延伸効果を最大限生かすことができる(図6)。

3.2.2 燃焼器の耐摩耗処理と再生熱処理 燃焼器部品の支持部や他部品との取合い部では燃焼振動や機械振動により激しい摩耗が発生し、この摩耗が点検時期を決定する要因となっている。従来の処理方法から替えて、耐摩耗処理(クロムカーバイド(CrC)コーティング)(図7)を適用することにより大幅な改善が実現され、摩耗率が従来の1/5以下に低減している。また、燃焼器部品は長時間の運用により劣化するが、再生熱処理による寿命延伸が可能であり、実機に適用し効果を上げている。



図7. 燃焼器ライナへの耐摩耗処理 — 燃焼器ライナ取合い部へ耐摩耗処理を適用した。

Combustion liner coated with anti-wear material

4 最新検査技術

ガスタービンの高温化に伴って、高温部品には耐酸化あるいは遮熱のためのコーティングは必須である。当社は、これらのコーティングに対する新たな検査技術を開発し、実機に適用可能な段階にある。

4.1 微小亀裂深さ計測

高温部品の耐酸化・耐食のためのコーティングに発生した亀裂の深さを高精度に計測することで、リコーティング修理の可否を判断することができる。表面の微小亀裂深さを評価する方法の一つとして渦電流法があり、深さ0.2 mm以上の亀裂では従来技術以上の検出能力がある(図8)。

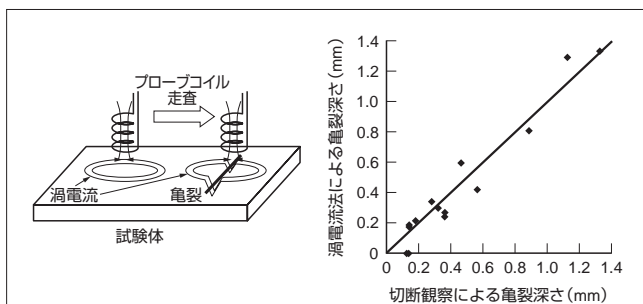


図8. コーティング微小亀裂深さ計測例 — 渦電流法をコーティング微小亀裂の深さ計測に適用した。計測は試験体の上をプローブコイルを走査して行う。

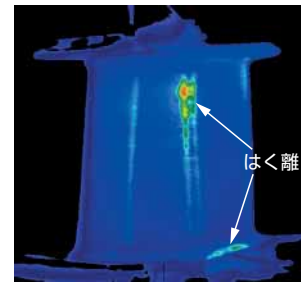
Measurement of crack depth by eddy current inspection

4.2 遮熱コーティング(TBC)の損傷検出

高温部品の表面には、遮熱のためのTBC(Thermal Barrier Coating)を施工することが一般的である。TBCは経時的に劣化・はく離するが、このTBCの損傷は基材の局所加熱を招き、亀裂発生や酸化減肉の原因となる。当社は、赤外線法による検査技術を開発しており、複雑な曲面を持つ動静翼でも効率良く検査することが可能となっている(図9)。最近では、タービンロータに組み込まれた状態で、TBCを検査する手法も開発されている。



外観



検査結果

図9. TBC損傷部位の検出例 — 赤外線法を用いてTBC損傷部位の検出を行った。

Measurement of thermal barrier coating (TBC) spalling by infrared method

5 あとがき

国内のガスタービン運用実績は日々蓄積されており、その保守管理技術も確実に進歩しつつある。今後は、これまで述べてきた技術を核とした保守技術の開発を推進し整備していくとともに、更に市場要求に応える新たな技術開発の推進が必要である。

文献

- 1) 近藤卓久, ほか. ガスタービン改良保全技術. 東芝レビュー. **56**, 6, 2001, p.37 - 40.
- 2) Yoshioka, Y., et al. Gas Turbine Hot-Gas-Path Components Maintenance and Life Assessment Technology. Proceedings of the 23rd CIMAC International Congress on Combustion Engines. 2001, p.249 - 256.
- 3) 石井潤治. ガスタービンの最新補修・寿命延伸技術. 火力原子力発電. **53**, 7, 2002, p.62 - 71.
- 4) 石井潤治. ガスタービン高温部品の補修技術. 日本ガスタービン学会誌. **29**, 5, 2001, p.18 - 23.
- 5) 伊藤洋明, ほか. HIP処理によるガスタービン動翼材の特性回復. 火力原子力発電. **53**, 3, 2002, p.71 - 76.



酒井 義明 SAKAI Yoshiaki

電力・社会システム社 火力・水力事業部 火力改良保全技術部グループ長。コンバインドサイクル機器の改良保全業務に従事。火力原子力発電技術協会会員。

Thermal Power & Hydroelectric Power Systems & Services Div.



澤 徹 SAWA Tetsu

電力・社会システム社 火力・水力事業部 火力プラント技術部主務。火力発電設備のプラント・機械システムエンジニアリング業務に従事。日本ガスタービン学会会員。

Thermal Power & Hydroelectric Power Systems & Services Div.



岡本 浩明 OKAMOTO Hiroaki

電力・社会システム社 京浜事業所 原動機部グループ長。ガスタービンの設計業務に従事。日本機械学会, 日本ガスタービン学会会員。

Keihin Product Operations