

ガスタービンのランニングコストと環境負荷を低減する 寿命延伸技術

Life Extension Technologies for Gas Turbine Hot Parts Contributing to Reduction of Running Costs and Environmental Burden

吉田 耕平 酒井 義明 齊藤 大蔵

■ YOSHIDA Kohei ■ SAKAI Yoshiaki ■ SAITO Daizo

ガスタービンを用いたコンバインドサイクル発電設備は、電源多様化の流れのなかで、低炭素社会の実現に向けた二酸化炭素(CO₂)排出量の削減、エネルギー利用の高効率化、及び経済性の向上という特長が市場要求に合致し、年々増加している。しかしガスタービンの燃焼器や動静翼など高温ガス通路部の部品は損傷を受けやすく、定期的な補修と交換を行いながらの運用が不可欠である。したがって、各部品の劣化・損傷状態を的確に把握し適正な修理と再生を繰り返しながらできるだけ長く部品を使用していくことが、ランニングコストの低減とともに環境負荷の低減に寄与することから、効果的な寿命延伸技術が求められている。

東芝は、このようなニーズに応えるために、ガスタービン高温部品の寿命延伸技術を開発し、実用化に取り組み続けている。

With the diversification of power supplies in recent years, the number of combined-cycle power generation systems equipped with a gas turbine has been increasing due to the market demand for improvement of both energy efficiency and economic efficiency and the need for reduction of carbon dioxide emissions. As hot parts including combustion liners, buckets, and nozzles located in the hot gas flow path of a gas turbine are susceptible to various types of damage, it is necessary to constantly repair or replace them. Therefore, appropriate life extension technologies to allow gas turbine hot parts to remain in service for as long as possible are essential for the reduction of running costs and the environmental burden.

In response to these requirements, Toshiba has been developing life extension technologies for gas turbine hot parts and applying these technologies to actual products.

1 まえがき

ガスタービンの高温ガス通路部の部品（以下、高温部品と略記）は、大きな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になる。これらにかかる保守費用を含めたランニングコストを低減するとともに、資源を有効活用し環境負荷を低減する観点で、高温部品の交換周期を延長することができる補修技術や寿命延伸技術が求められている。

東芝は、このようなニーズに応えるために、寿命延伸技術の開発に取り組み、実用化を図っている。ここでは、これらの技術開発の状況について述べる。

2 余寿命診断技術

ガスタービンの高温部品は使用環境が厳しいことから、図1に示すような劣化や損傷を受ける。これらの劣化や損傷を運転中や定期点検時に正確に把握し、継続使用や、補修、再生、廃棄などの処置を決定する的確な判断が求められる。その手段として、信頼性が高い寿命診断技術が不可欠となるが、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困難である。そのため、実際の運用状況

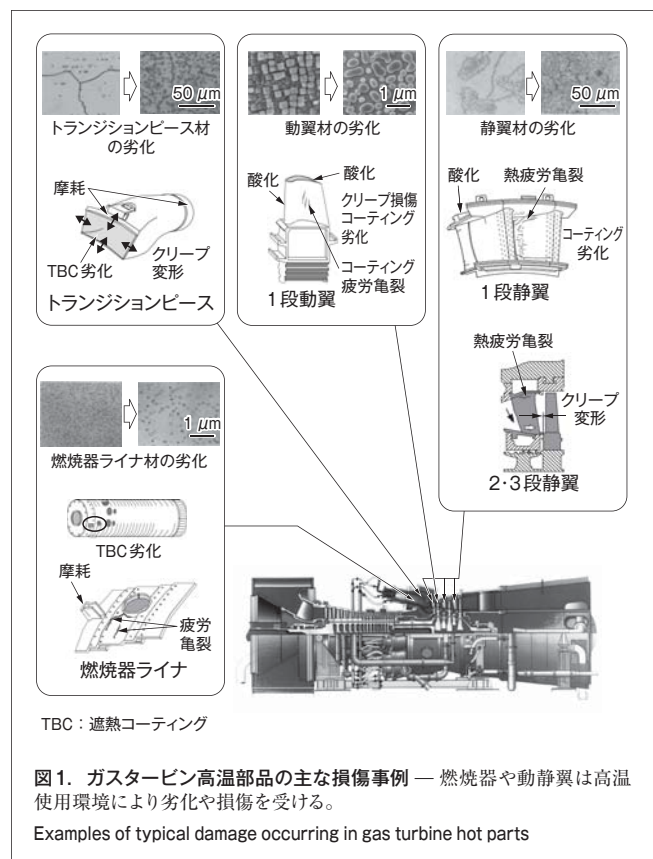
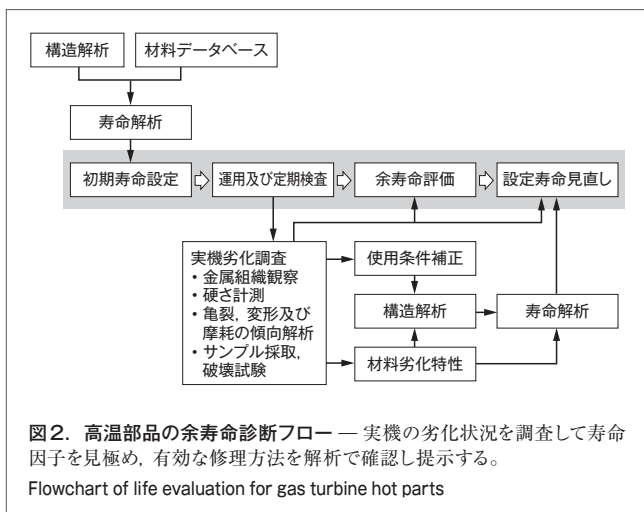


図1. ガスタービン高温部品の主な損傷事例 — 燃焼器や動静翼は高温使用環境により劣化や損傷を受ける。
Examples of typical damage occurring in gas turbine hot parts



を解析して評価し、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。

当社の余寿命診断手法は、独自に開発した材料劣化診断技術、部品損傷診断技術、及びシミュレーション解析技術と、従来からある有限要素法 (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) の手法をそれぞれ補完するように併用することで、精度の高い診断を可能にしている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

具体的には、**図2**に示すように、運用開始後の定期検査において、運用時に使用した高温部品を用いて、金属組織観察や、硬さ計測、亀裂及び、変形、摩耗の傾向解析、サンプル採取及び破壊試験といった実機劣化調査により余寿命評価を行い、部品寿命を支配している寿命因子を見極める。その結果により、寿命を延伸するために有効な修理を選定し、効果を構造解析及び寿命解析により確認して、最適な修理内容を提案するとともに設定寿命を見直す。

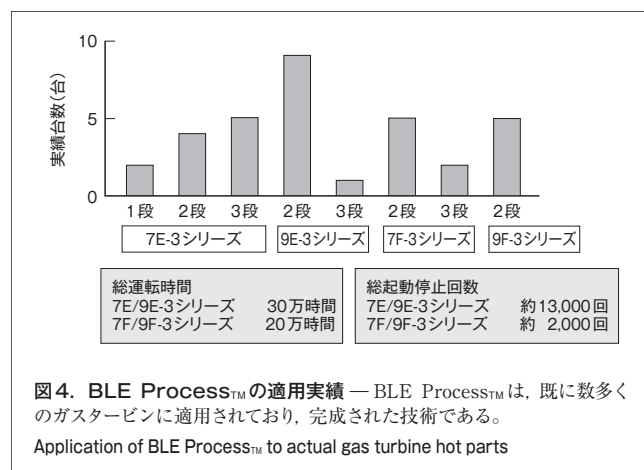
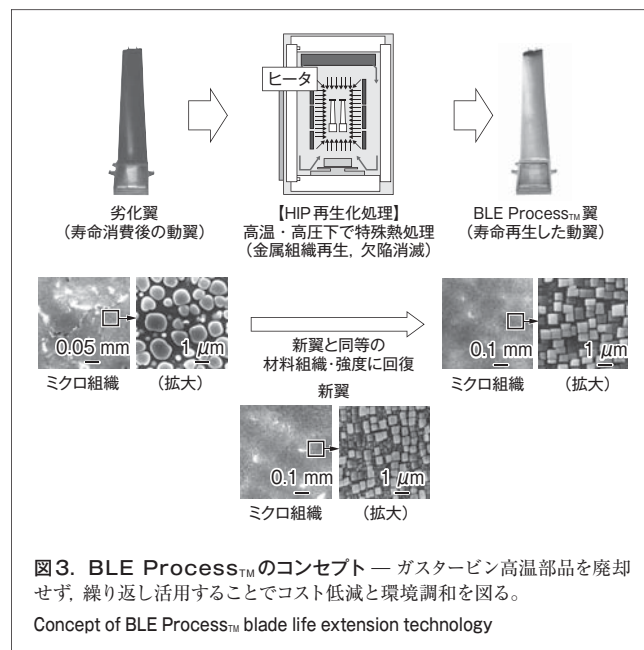
3 寿命延伸・補修技術

過酷な環境下で使用されたガスタービンの高温部品は、比較的短期間での劣化や損傷による寿命消費を避けることはできない。このため、当社は高温部品の再生と長寿命化を目指し、新しい寿命延伸・補修技術を開発し実用化を進めている。

3.1 ガスタービン動翼の寿命延伸・補修技術

3.1.1 動翼寿命延伸技術 BLE Process™ 当社独自の動翼寿命延伸技術である BLE (Blade Life Extension) Process™ の概要を**図3**に示す。修理基準を満たしていれば、廃棄することなく繰り返し再生することができるという技術である。

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。この劣化した動翼に対して、約100 MPa、1,000℃以上の高圧・高温下において特殊熱処理を行うことで、初期製造欠陥及び、高温下の運転で経年的な材料劣化により発生す



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) 再生化処理技術を当社独自に開発し、実用化を進めている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。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おり、General Electric Company (GE社) の1,100℃級ガスタービン (7E/9E-3シリーズ) 動翼や1,300℃級ガスタービン (7F/9F-3シリーズ) 動翼で実用化され、**図4**に示すとおり、既に数多くの実績を積んでいる。

3.1.2 高性能遮熱コーティング ガスタービン動翼では、基材の温度低減による長寿命化を図る目的で、遮熱コーティングを採用している。更に、コーティング層の気孔率を制御し、従来の遮熱コーティングよりも格段に遮熱性能が優れ、基材の劣化を抑えて延命化を図る高性能遮熱コーティングを開発した。ガスタービン動翼の外周側に位置するシュラウドセグメントに適用した結果を**図5**に、また第1段動翼に適用した

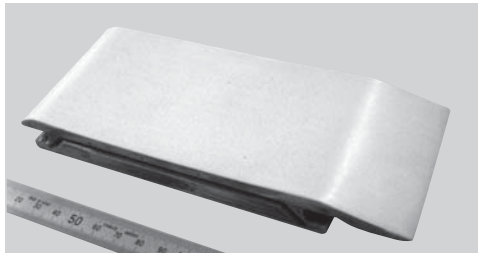


図5. シュラウドセグメントへの高性能遮熱コーティング適用 — 第1段シュラウドセグメント内輪へ適用した。
Shroud segment coated with dense vertically cracked thermal barrier coating (DVC-TBC)



図6. ガスタービン動翼への高性能遮熱コーティング適用 — 第1段動翼へ適用した。
Turbine buckets coated with DVC-TBC

結果を図6に示す。いずれも良好に稼働中である。

3.1.3 レーザ肉盛補修 ガスタービン動翼は高温の遠心力場で使用されるため、高温強度の高いニッケル (Ni) 基超合金を使用しているが、翼先端部に高温酸化減肉、プラットフォーム部に亀裂などの損傷が生じる。チタン (Ti) やアルミニウム (Al) 量の多いNi基超合金は、溶接入熱が大きいと高温割れが発生する可能性のある難溶接材である。GE社によって開発されたWRAPTM(注1)溶接は、翼先端部の補修に適用され動翼の再利用率改善に効果を上げてきた。当社は更なる動翼の再利用率向上を目指し、低入熱でかつ予熱なしの補修方法として、レーザ肉盛補修技術を開発した⁽⁷⁾。このレーザ肉盛補修を、プラットフォーム部に発生した亀裂に対して採用し、動翼の再利用率向上に貢献している。レーザ肉盛補修を適用した第1段動翼プラットフォーム部を図7に示す。現在、翼先端減肉部の補修への適用も検討中である。

3.2 ガスタービン静翼の寿命延伸・補修技術

ガスタービンの第1段静翼には、熱疲労により多くの亀裂が広範囲に生じるほか、局所的に高温酸化による減肉が生じる

(注1) WRAPは、GE社の商標。

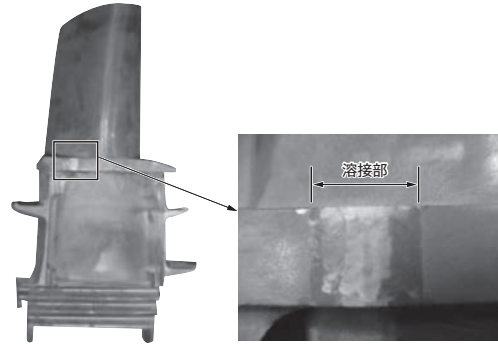


図7. ガスタービン動翼へのレーザ肉盛補修適用 — 第1段動翼プラットフォーム部に発生した亀裂補修に適用した。
Turbine bucket repaired by laser build-up welding

こともある。従来の技術では、修理前に亀裂や酸化減肉部分の除去が必要であった。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、翼の変形も増加し、最終的に組込みが困難になることもある。

このような問題に対し、広範囲の補修であっても翼の変形がなく、高品質の補修を実現する方法として、当社は拡散ろう付け補修技術を開発して広く実機に適用し、静翼の寿命延伸に貢献している。

拡散ろう付け補修は、液相拡散接合技術の応用例として位置づけられ、基材と類似した合金粉末とろう材粉末を混合させた補修材料を補修部に充填し、真空中で拡散熱処理を施すことにより補修部を基材と同等レベルにする技術である⁽⁸⁾。拡散ろう付けにより補修した静翼を図8に示す。また必要に応じて、HIP処理を併せて適用することにより、信頼性の向上が可能である。

3.3 燃焼器の寿命延伸・補修技術

3.3.1 燃焼器の耐摩耗処理 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因子となっている。従来はステライトコーティングが用いられていたが、現

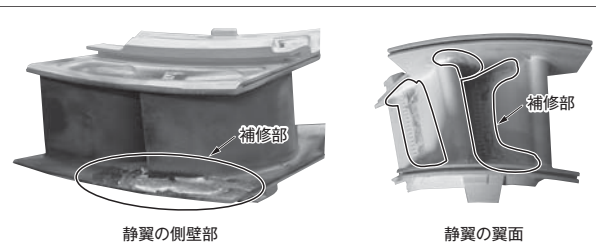


図8. 静翼への拡散ろう付け補修 — 第1段静翼の側壁部と翼面へ拡散ろう付け補修を施工した。
Turbine nozzle repaired by diffusion heating system



図9. 燃焼器のクーポンリペア— 燃焼器ライナへ適用し、後部スリーブを耐力強化型に交換した。
Application of coupon repair to combustion liner

在はクロムカーバイド (CrC) コーティングによる耐摩耗処理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以下に低減されている。

3.3.2 燃焼器のクーポンリペア 高温部品の補修方法はそれぞれの部品の損傷形態により選定されるが、燃焼器ライナやトランジションピースでは一部分だけ損傷が進行し、その部位の損傷のために、大半の部位の損傷が軽微であるにもかかわらず、部品全体の交換を余儀なくされる場合がある。この問題に対して、損傷部分だけを切り取り、取替え部品と交換し部品全体の寿命延伸を図る補修方法としてクーポンリペアがあり、燃焼器部品へ適用している。クーポンリペアによる燃焼器ライナの補修例を図9に示す。これは、大きく変形した後部スリーブを、冷却を強化した厚肉タイプの耐力強化型スリーブに交換し、部品全体の寿命延伸を図ったものである。

現在、同じく局部的に変形が生じたトランジションピースへのクーポンリペア適用の検討を進めている。

4 あとがき

昨今の電源多様化の流れのなかで大きな役割を担うコンバインドサイクル発電設備やシンプルサイクル発電設備に用いられているガスタービンは、いっそうの効率向上を図るため高温化が進んでいる。1,100℃級、1,300℃級のプラントは豊富な運用実績が既に蓄積され、ガスタービンの保守管理技術は着実に進歩しつつある。ガスタービンを保守管理していくうえで、高温部品の寿命延伸技術は、非常に高額なガスタービン補修費を含めランニングコストを低減できるとともに、資源の有効活用による環境負荷の低減にも大きく貢献する有用なものである。

今後も、いっそうの寿命延伸技術の開発を推進し、それを適用した保守管理を整備し、市場ニーズに応えていく。

文 献

- (1) 近藤卓久. 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, Hamburg, Germany, 2001-05, CIMAC, 2001, p.249-256.
- (3) 酒井義明 他. ガスタービンメンテナンスの最新技術の紹介. 東芝レビュー. 60, 12, 2005, p.24-27.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 伊藤明洋 他. 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.
- (7) 日野武久 他. ガスタービン翼の補修技術開発. 日本ガスタービン学会誌. 40, 4, 2012, p.130-134.
- (8) Saito, D. et al. "Development and Application of Repair Technology for Land-Base Gas Turbine Nozzles". Proceedings of International Gas Turbine Congress 2011, Osaka, Japan, 2011-11, IGTC 2011-74.



吉田 耕平 YOSHIDA Kohei

電力システム社 火力・水力事業部 火力改良保全技術部主務。
火力発電プラントの改良保全業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



酒井 義明 SAKAI Yoshiaki

電力システム社 火力・水力事業部 火力改良保全技術部参事。
火力発電プラントの改良保全業務に従事。火力原子力発電
技術協会、日本ガスタービン学会会員。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



齊藤 大蔵 SAITO Daizo, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部主務、博士(工学)。高温材料の研究・開発に従事。
日本ガスタービン学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center