

ガスタービン高温部品の寿命延伸技術

Life Extension Technologies for Gas Turbine Hot Parts

酒井 義明 佐藤 岩太郎 斎藤 大蔵

■ SAKAI Yoshiaki ■ SATO Iwataro ■ SAITO Daizo

ガスタービン (GT) を用いたコンバインドサイクル発電設備は、低炭素社会へ向けた二酸化炭素 (CO₂) 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て、年々増加している。

しかし、GTは作動流体として高温燃焼ガスを用いることから、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く、定期的な補修と交換を行いながら運用していくことが不可欠である。これらの部品は高価であることから、修理と再生を繰り返しながらできるだけ長く使用していくことがランニングコストの低減につながるるとともに、環境負荷低減の観点からも有効であり、効果的な寿命延伸技術が求められている。

東芝は、この課題を解決するために、高温部品の余寿命診断・寿命延伸技術を開発し、実機に適用している。

The number of combined-cycle power plants utilizing a gas turbine has been increasing due to the market demand for the reduction of carbon dioxide emissions toward the achievement of a low-carbon society, and for the improvement of energy efficiency. Since the hot parts of a gas turbine are susceptible to damage such as thermal stress cracks and high-temperature oxidation, it is necessary to constantly repair or replace them. Appropriate gas turbine maintenance technologies, including diagnostic and repair technologies, are therefore required so that expensive hot parts can remain in service for as long as possible.

In response to these requirements, Toshiba has been making efforts to develop remaining life assessment and life extension technologies for the hot parts of gas turbines.

1 まえがき

コンバインドサイクル発電設備は、高温燃焼ガスを用いるGT、蒸気を発生させる排熱回収ボイラ (HRSG)、蒸気タービン (ST)、及び発電機から構成される。特に、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GTの高温ガス通路部部品 (以下、高温部品と略記) は、STの部品とは異なり比較的短期間で補修及び交換が必要となる。これらにかかる保守費用を低減するとともに、資源を有効活用するために、高温部品の交換インターバル延長につながる補修技術や、再生及び長寿命化という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、余寿命診断・寿命延伸技術の開発に取り組み、実用化につなげている。ここでは、これらの技術開発の状況について述べる。

2 余寿命診断技術

GT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、運転中や定期点検において正確に把握し、継続使用、補修、再生、廃棄などの決定を的確に判断することが求められる。その手段として、信頼性の高い余寿命診断技術が必要不可欠となる

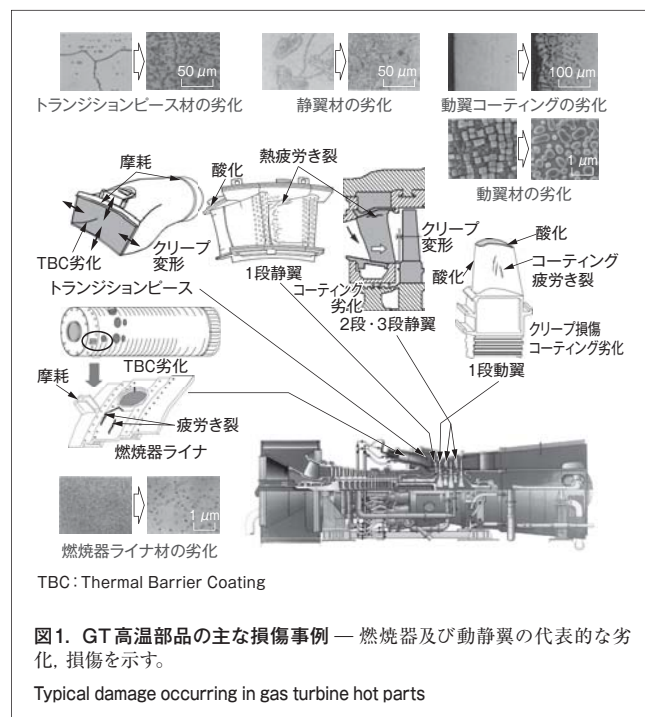
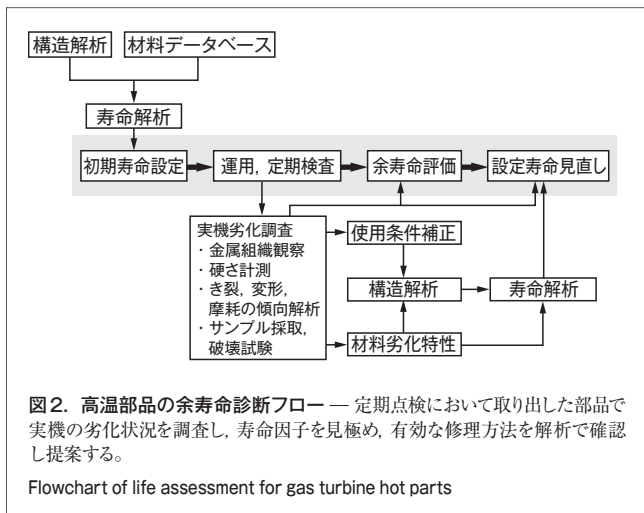


図1. GT高温部品の主な損傷事例 — 燃焼器及び動静翼の代表的な劣化、損傷を示す。
Typical damage occurring in gas turbine hot parts

が、高温部品の寿命は様々な要因に影響されるため、普遍的な診断技術を開発することは困難である。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



づいた余寿命診断技術の開発が重要となる。

当社の技術は、独自に開発した材料劣化・部品損傷診断技術とシミュレーション解析技術を、従来からある有限要素法 (FEM) 解析やクリープ強度、引張強さ、耐力、疲労強度などの破壊調査の方法と補完併用することで、精度の良い診断を可能としている^{(1), (2), (3)}。

具体的な高温部品の余寿命診断フローを図2に示す。定期点検において、実機で運転した高温部品を用いて、金属組織観察、硬さ計測、き裂や変形、及び摩耗の傾向解析、サンプル採取や破壊試験による実機の劣化調査で余寿命評価を行い、部品寿命を支配している寿命因子を見極める。その結果を基に、寿命を延伸するために有効な修理方法を選定し、効果を構造解析及び寿命解析で確認して、最適な修理内容の提案を行うとともに設定寿命の見直しを行う。

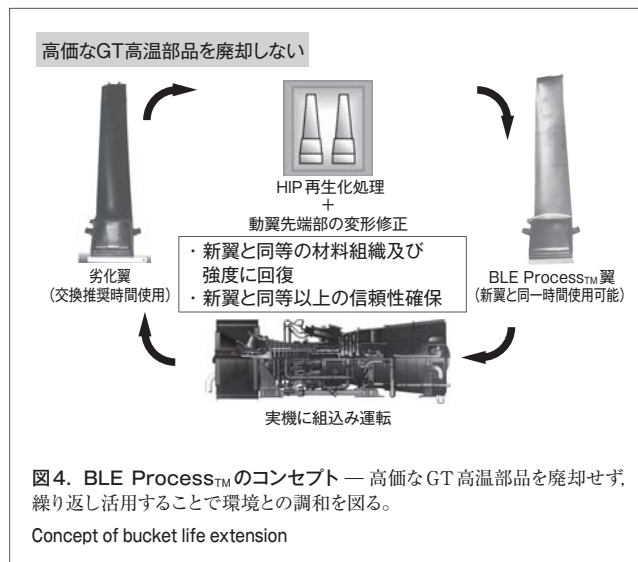
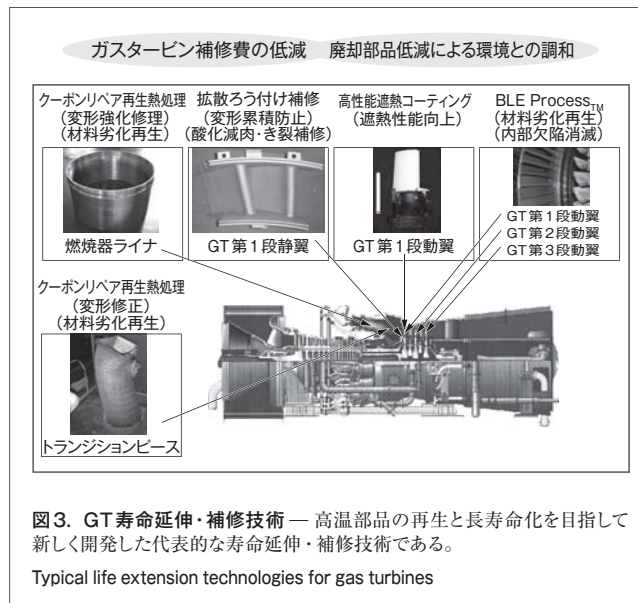
3 寿命延伸・補修技術

GTの高温部品は過酷な環境下で使用されるため、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て、新しい寿命延伸・補修技術を開発し、実用化を進めている(図3)。

3.1 GT 動翼の寿命延伸・補修技術

3.1.1 動翼寿命延伸技術 BLE Process™ 当社独自の動翼の寿命延伸技術であるBLE (Blade Life Extension) Process™のコンセプトを図4に示す。修理基準を満たしていれば、動翼を廃棄することなく繰り返し再生することができる。

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1,000気圧、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 casting 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ポ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) 再生化処理技術を開発し、実機に適用している^{(4), (5), (6)}。これまでの技術検証により、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。この技術は、1,100℃級GT (9E/7E型)の動翼及び1,300℃級GT (7FA型)の動翼において実機に適用され、良好に運転中である(図5)。

また、動翼の先端部では経時的なクリープ変形が発生することがあるが、これらの変形を修正する技術も開発しており(図6)、HIP再生化処理と併用して適用することで、動翼としての寿命延伸効果を最大限に生かすことができる。

3.1.2 高性能遮熱コーティング 高温酸化からGTの動翼基材を保護するために、翼外表面及び冷却空気通路内面を耐酸化コーティングする。また、動翼基材の温度を低減し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

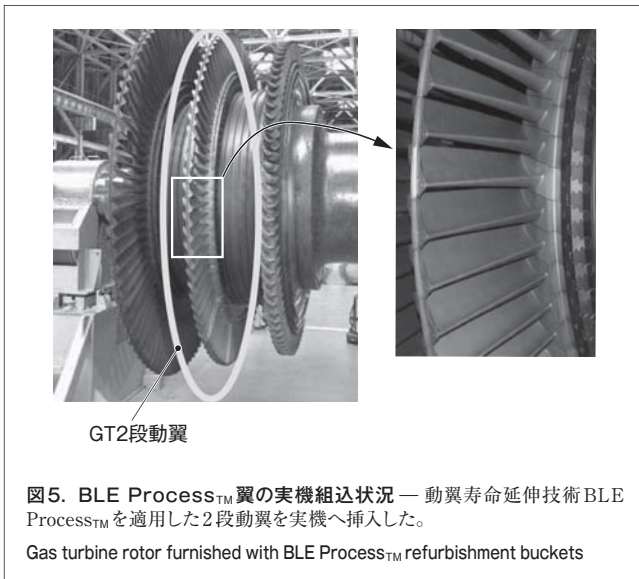


図5. BLE Process™翼の実機組込状況 — 動翼寿命延伸技術BLE Process™を適用した2段動翼を実機へ挿入した。
Gas turbine rotor furnished with BLE Process™ refurbishment buckets

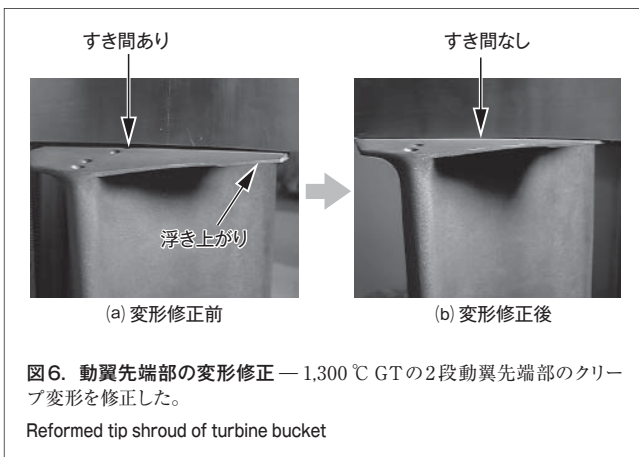


図6. 動翼先端部の変形修正 — 1,300℃GTの2段動翼先端部のクリープ変形を修正した。
Reformed tip shroud of turbine bucket

に、基材の劣化を抑えて延命化を図るため、気孔率を制御することで従来の遮熱コーティングより格段に優れた遮熱性能を持つ、高性能遮熱コーティングの開発を進めている(図3)。

3.1.3 溶接補修 GTに用いられる動翼は高温の遠心力場で使用されるため、高温強度が高いニッケル(Ni)基合金を採用している。しかし1,300℃級GTでは、第1段動翼の先端部が高温酸化で減肉する事象が認められている。このNi基合金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溶接で再生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であるWRAP^(注1)溶接は、高温でのNi基合金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て動翼の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、実機の補修に適用されている(図7)。また、修理範囲を必要最低限とするために、カスタマイズした修

(注1) WRAPは、GE社の商標。

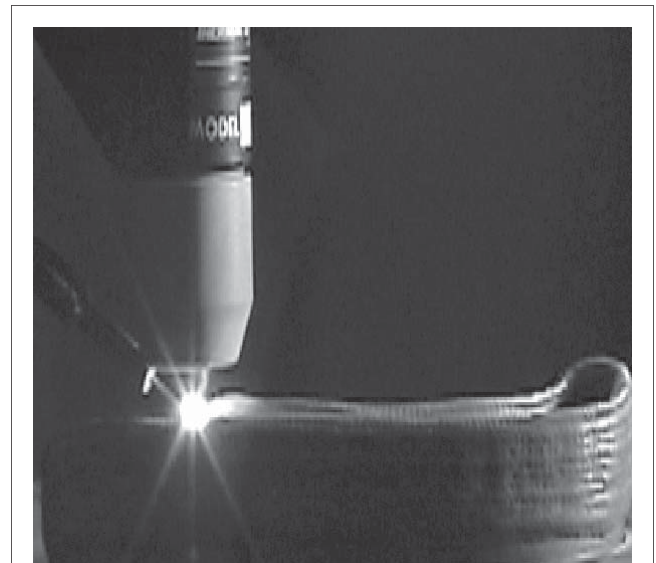


図7. ロボットによる動翼溶接補修 — GT動翼先端部の溶接補修を自動化することで、効率的な補修を実現した。
Bucket weld repair system automated by robot

理メニューも準備しており、コスト低減と納期短縮に寄与している。

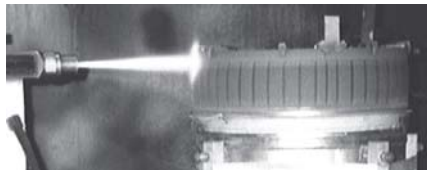
3.2 GT静翼の寿命延伸・補修技術

GTの第1段静翼には、熱疲労により多くのき裂が生じるほか、局所的に高温酸化による減肉が生じることもある。従来の技術では、修理前にき裂・酸化減肉部分の除去が必要であり労力を要していた。更に、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、翼の変形が増大し、組込みが困難となるケースもある。

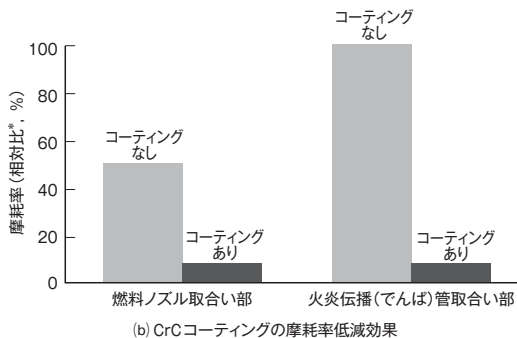
このような問題に対して、き裂や減肉などの損傷形態によらず同時に全面補修が可能であり、広範囲な補修でも変形がなく、高品質な補修を実現する修理方法として、拡散ろう付け補修を開発して実機に適用している^{(4),(5)}。拡散ろう付け補修は、基材と同等の合金粉末とろう材粉末の混合補修材料を補修部に充てん後、真空中で拡散熱処理を施すことで補修部を基材と一体化する修理方法である(図3)。また、オプションとして、HIP処理を必要に応じて適用することにより、信頼性を向上できる。

3.3 燃焼器の寿命延伸・補修技術

3.3.1 燃焼器ライナ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、燃焼や機械の振動で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。従来の処理方法に替わり、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で、摩耗率を従来の1/5以下に低減できた(図8)。また、長時間の運用で燃焼器の部品に材料劣化が生じるが、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。



(a) 耐摩耗処理(高速ガス炎による溶射)



(b) CrCコーティングの摩耗率軽減効果

*: ベアメタルとの摩耗率比較

図8. 燃焼器ライナへの耐摩耗処理 — 燃焼部品の支持部や他部品との取合い部に耐摩耗処理を適用し、摩耗率を従来の1/5以下に低減した。

Results of turbine nozzle repair using diffusion heating system

3.3.2 燃焼器ライナのクーポンリペア 燃焼器ライナは薄肉構造であることから、プラントの特性により燃焼振動が大きい場合には、変形や破損に至るケースもある。変形が大きく出るケースでは、冷却を強化した厚肉タイプのスリーブに交換する耐力強化型クーポンリペアメニューを開発し、実機に適用している(図3)。

3.3.3 トランジションピースのクーポンリペアと再生熱処理 1,300℃級のFA型GTにおいて、燃焼器からの燃焼ガスを静翼へ導くトランジションピースの軸方向変形は、燃焼器ライナや静翼との組立不良、及びシール不良を引き起こし、寿命の支配因子となっている。このような変形に対しては、静翼との取合い部であるピクチャーフレームをクーポンリペアにより修正し、寿命延伸が可能である。また、材料劣化に対して、燃焼器ライナと同様に再生熱処理による寿命延伸が可能であり、実機に適用している。

4 あとがき

1,100℃級、1,300℃級GTの運用実績の蓄積とともに、高温部品の寿命を支配する因子が明らかになりつつあり、余寿命診断・寿命延伸技術も確実に進展している。

GT高温部品の寿命延伸技術は、高額なGT補修費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大きく貢献することから、今後も、これらの開発を推進、整備し、市場要求に対応していく。

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, p.249-256.
- (3) 酒井義明, ほか. 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, 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会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



佐藤 岩太郎 SATO Iwataro

電力システム社 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。日本ガスタービン学会会員。Keihin Product Operations



斎藤 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, 工博。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 & Industrial Systems Research and Development Center