

近藤 卓久  
KONDO Takuhisa

石井 潤治  
ISHII Junji

酒井 義明  
SAKAI Yoshiaki

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、効率の高さから増え続け、今や発電設備の主流になりつつある。ガスタービンにおいては、高温燃焼ガスを作動流体としていることから、燃焼器や動静翼に代表される高温ガス通路部部品(以下、高温部品と略記)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が必要不可欠である。このような背景から、ガスタービンの設備診断とその損傷を低減する技術が求められている。当社は、ガスタービン保守にかかわる要望にこたえるために、寿命診断技術、長寿命化技術、設備診断技術、保守性向上技術などの開発に取り組み、実機に適用してきた。

The number of gas turbine combined cycle systems installed in power plants is increasing. Since the hot gas parts of a gas turbine are susceptible to damage such as thermal stress cracks and hot oxidation, it is indispensable to constantly repair or replace hot gas parts. For this purpose, diagnostics and advanced repair technologies for gas turbines have been developed in the world.

Toshiba has been developing various technologies for gas turbines, including life assessment technologies, long-life technologies, diagnostic technologies, and maintenance technologies.

## 1 まえがき

ガスタービン高温部品は、高温ガスにさらされ過酷な環境下で使用されることから、定期的な補修と交換が必要不可欠である。それにかかる保守費用を低減するためには、交換インターバルの延長につながる部品の補修技術あるいは延命化技術などが求められる。

当社は、このようなガスタービン改良保全の課題にこたえるために、寿命診断技術、長寿命化技術、設備診断技術、保守性向上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、当社が開発したこれらの最新技術について

述べる。

## 2 寿命診断技術

燃焼器や動静翼などの高温部品は図1に示すような劣化損傷を受けやすい。例えば、燃焼器では、き裂、コーティングのはがれ、組織劣化などが劣化損傷の代表的な例である。また、1段静翼では、き裂、組織劣化などが、2・3段静翼では、クリープ変形などの劣化損傷を受ける。1段動翼では、組織劣化や翼表面に施したコーティング劣化などが代表的な劣化損傷として挙げられる。それらの劣化損傷部の余寿

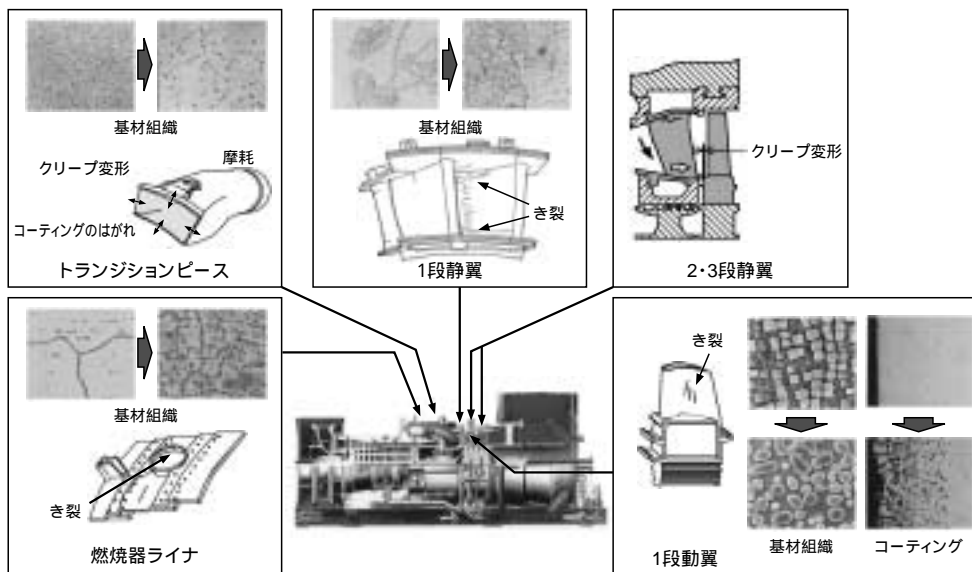


図1. ガスタービン高温部品の主な劣化損傷例 燃焼器、動静翼の代表的な劣化損傷を示す。

Typical damage occurring in gas turbine hot parts

命を精度よく診断できれば、ガスタービン保守の最適化に結びつけていくことができる。当社は、そのために、これらの損傷を評価すべく寿命診断技術の開発整備を進めてきた。

当社の寿命診断技術は、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)のほか、独自開発した非破壊調査技術(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)で構成されている。これらを用い高温部品の余寿命を総合的に評価する。

以下に、当社が独自開発した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Ni基耐熱超合金材料(以下、Ni基材料と呼ぶ)の組織は、使用温度、作用応力、時効時間により変化する。よって、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<sup>(1)</sup>。

### 2.2 部品損傷診断技術

部品に生じたき裂、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。実機の膨大な定期点検(以下、定検と略記)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いだして、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、静翼のき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<sup>(1)</sup>。

### 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がある。そのような場合に、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る。当社は、動翼の表面に施工するPt-Alコーティングの寿命解析に適用している。このシミュレーションは、AlとNiの相互拡散モデルに着目し、時間によるAl濃度の変化を求め劣化強度を解析的に求めるものである。そのほかにも、静翼のき裂進展を推定するシミュレーションモデルも確立している<sup>(1)</sup>。

上述の寿命診断技術と他の手法を組み合わせることにより、当社では、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、高温部品の長寿命化技術開発にも、寿命診断技術を応用して成果を上げている。

## 3 ガスタービン動翼の長寿命化技術

従来、動翼を補修する特別な技術はなかった。しかし、

延命化の強い要求から、長寿命化技術の開発、導入に努めてきた。ここでは、当社が動翼の長寿命化技術として整備した次の三つの技術、リコーティング、溶接補修、HIP(Hot Isostatic Pressing)再生化処理と、更に、最近開発を完了した最新TBC(Thermal Barrier Coating)による補修技術について述べる。

### 3.1 リコーティング

動翼のNi基材料は強い高温クリープ強度を持つ反面、高温環境下では酸化減肉を受けやすい。そこで、高温酸化から動翼基材を保護するために、動翼の表面及び冷却孔の内面には耐酸化コーティングが施されている。しかし、使用につれて耐酸化コーティングは劣化し、動翼基材は高温酸化による減肉が生ずる。当社は、翼表面と冷却空気孔内面の劣化したコーティング層を除去し、新しいコーティングを施す修理技術(リコーティングと呼ぶ)を持っており、実施を推奨している。図2は、ガスタービン1段動翼の翼表面にリコーティングを施した事例である。

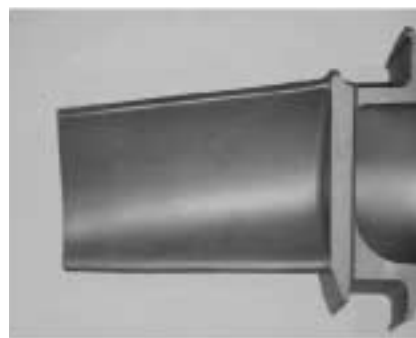


図2. ガスタービン1段動翼のリコーティング 翼表面と冷却空気孔内面にコーティングを再施工した。

Recoated gas turbine bucket

### 3.2 溶接補修

動翼がNi基材料であることから、溶接補修は難しいとされてきたが、GE社により新しい溶接法(WRAP<sup>(注1)</sup>)が開発され、応力の低い動翼先端部などの補修に応用されている。更に、ロボットによる自動溶接補修の開発を進めており、近く補修ラインに配備する計画である(図3)。

### 3.3 HIP再生化処理

従来寿命の1.5倍~2倍の延伸をねらいとして、動翼内部に劣化して生じたクリープポイドを1,000気圧・1,000以上の高温高压容器の中で消滅させるHIP再生化処理技術を開発し、確立した。これまでの技術検証では、材料強度は新翼に近い状態、あるいは、それ以上の状態まで回復することを確認している。

1999年には、中部電力(株)四日市火力発電所4-3号機  
(注1) WRAPは、General Electric(GE)社の商標。

ガスタービンへ、図4に示すように再生化した2・3段動翼を各3本組み込み、実証運用を開始し順調に続けている<sup>(2)</sup>。また、東京電力(株)富津火力発電所においても、HIP再生化した2段動翼をガスタービンに組み込み、2001年3月から運転に入っている。

### 3.4 最新TBC

動翼の劣化損傷を少しでも抑えるためには、基材のメタル温度低下を増進させる必要がある。メタル温度低下策と

しては、入熱を抑える方法と冷却空気量を増加する方法がある。当社は、入熱を抑える方法として動翼に適した最新TBCを独自に開発した。このTBCは高温においてはがれにくい特性を持っている。実機への施工技術は確立しており、図5は最新TBCを施工したガスタービン1段動翼の例である。これにより、1段動翼のメタル温度を従来温度から20～50℃下げることが可能になり、損傷低減が期待される。

## 4 設備診断技術

コンバインドサイクル発電設備は、高効率であることから、高稼働率へのニーズが高く、起動遅延、負荷制限、事故停止などの不適合を未然防止するための設備診断技術が求められている。それに対して、当社は、次の三つの技術、高温設備診断、リモート診断、軸トルク計測装置を開発し、診断サービスを開始するために準備を進めている。

### 4.1 高温設備診断

ガスタービン、排熱回収ボイラや排気ダクトなど高温機器は、コンバインドサイクル発電設備の大部分を占めている。これら設備の異常を安全かつ効率的につかむために、当社は、運転中に非接触で高温設備の外表面温度を採取してそれを解析することにより、設備内部の異常を診断する技術整備に努めている。これにより、異常部位を絞り込んだうえで詳細な調査を行うことができ、原因の早期究明と対策実施が可能になる。図6に示すように、高温設備の外表面温度分布を遠隔からとらえて画像処理し、予測した温度以上の部位を見だし、その劣化度を解析的に評価するようにしている。

### 4.2 リモート診断

お客さまからのご相談に対して、当社の専門家が即座に実機の運転状態を評価して、回答するサービスの提供準備を進めている。その前提として、図7に示すようにデータ収集装置を発電所側に設置し、当社に運転データを取り込むシステム構成を考えている。これによれば、当社にて専門家が発電設備の運転状況を時間遅れなく把握することができる。ユーザーは、特に診断が難しい燃焼器の燃焼異常、回



図3．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

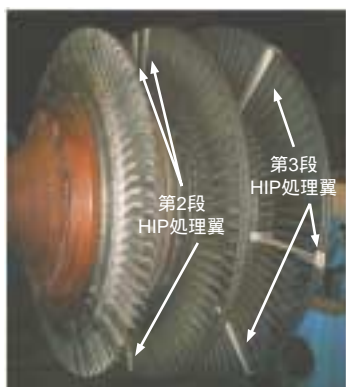


図4．HIP再生化処理翼の実機組み込み状況　HIP再生化処理した2・3段動翼各3本を実機へ挿入した<sup>(2)</sup>。

Gas turbine rotor furnished with HIP refurbishment buckets



図5．最新TBCを施工したガスタービン1段動翼　翼表面にTBCを施工した。

Turbine bucket coated with advanced thermal barrier coating

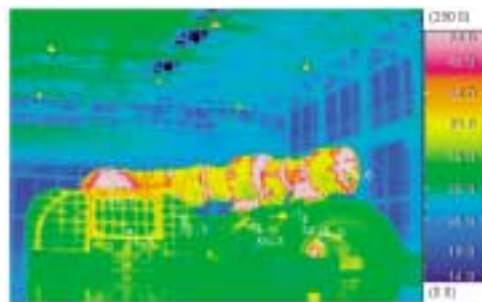


図6．設備診断例　発電設備の外表面温度分布を遠隔からとらえた画像例を示す。

Typical example of diagnostic technology

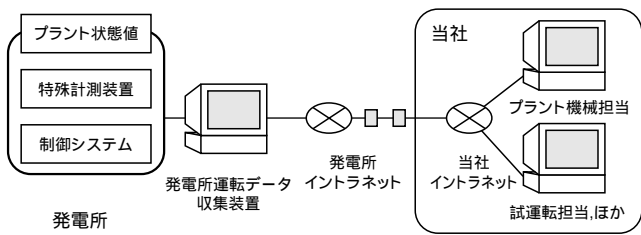


図7. リモート診断のシステム構成例 発電所と当社をイントラネットで結ぶ。

Remote monitoring and diagnostics

転体の振動大など、専門家の診断をいち早く取り入れ、迅速かつ確かな対応をとることが可能となる。

#### 4.3 軸トルク計測装置

従来、一軸型コンバインドサイクル発電設備の出力は、ガスタービンと蒸気タービンの合計出力であり、その出力配分はわからない。そのため、性能が低下した場合、どちらの要因が特定しづらかった。その問題点を解決するために、東京電力(株)と当社は共同で、それぞれの出力を精度よくとらえる装置を開発した。その装置の計測原理と実機適用例を図8に示す。この例では、二つのレーザーセンサで、蒸気タービンと発電機間のロータ2点間におけるねじれ角を計測し、そのねじれ角から出力を求める。精度は±0.5%の誤差範囲内にある。現在、実機での検証を進めている<sup>(3)</sup>。

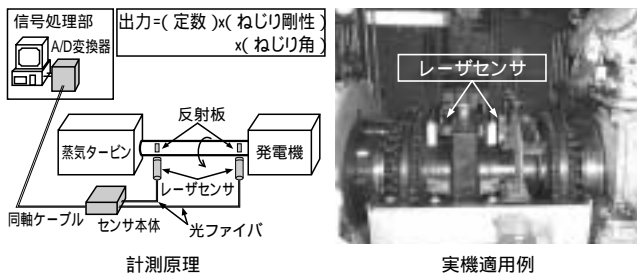


図8. 軸トルク計測装置の計測原理と実機適用例 レーザセンサで、ロータ2点間のねじれ角を計測する。

High-accuracy torque meter for combined cycle power train

### 5 保守性向上技術

当社は、ガスタービンの保守に関して、その頻度が高く、かつ高度な技術を必要とする燃焼器の分解・組立を支援するロボットを開発している。ロボットの導入で、作業者は狭いエリアにおける重量物の分解・組立作業を安全・容易に、かつ効率的に実施することが可能となり、作業工程の短縮も図られる。図9は、燃焼器分解組立ロボットによるトランジションピースの組込み状況を示す。4種類のつめと周方向・軸方向の移動機構を利用して、燃料ノズル、燃焼器ケーシング、燃焼器ライナ、トランジションピースなどの重量物を



図9. 燃焼器分解組立ロボット トランジションピースの燃焼器ケーシングへの組込み状況を示す。

Robot for combustor assembly and disassembly

上下半の取付け位置に関係なく容易に分解・組立できる<sup>(4)</sup>。

### 6 あとがき

当社は、ガスタービンの改良保全にかかわる課題にこたえるために、寿命診断技術、長寿命化技術、設備診断技術、保守性向上技術などの開発に取り組み、実機に適用してきた。今後も新技術の開発を推進していく所存である<sup>(5)(6)</sup>。

### 文献

- (1) 近藤卓久, ほか. ガスタービンの寿命診断技術. 東芝レビュー . 54, 5, 1999, p.22 - 25.
- (2) 伊藤明洋, ほか. "HIPによるガスタービン動翼材の特性向上に関する研究". 平成12年度火力原子力発電大会要旨集 . 2000, p.18 - 19.
- (3) 山下達雄, ほか. "一軸型コンバインドサイクルの高精度トルク計測器の開発". 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2000, No.440, 2000-09.
- (4) 近藤卓久. 既設火力のリフレッシュと保守技術. 東芝レビュー . 53, 2, 1998, p.46 - 48.
- (5) 近藤卓久, ほか. ガスタービンの保全技術. 東芝レビュー . 53, 6, 1998, p.6 - 9.
- (6) 近藤卓久, ほか. 火力発電設備の予防保全と余寿命診断技術 3.1 コンバインドサイクル発電設備 / ガスタービン本体. 火力原子力発電 . 51, 11, 2000, p.1583 - 1607.



近藤 卓久 KONDO Takuhisa

中部支社 中部・電力技術部長。  
電力・火力機器の総合エンジニアリング業務に従事。日本ガスタービン学会, 火力原子力発電技術協会会員。  
Chubu Branch Office



石井 潤治 ISHII Junji, D.Eng.

電力システム社 火力事業部 火力改良保全技術部グループ長, 工博。コンバインドサイクル機器の改良保全業務に従事。日本機械学会, 日本ガスタービン学会, ターボ機械協会会員。  
Thermal Power Systems & Services Div.



酒井 義明 SAKAI Yoshiaki

電力システム社 火力事業部 火力改良保全技術部主務。  
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 Systems & Services Div.