

近藤 卓久  
KONDO Takuhisa

小林 政徳  
KOBAYASHI Masanori

大八木 清人  
OOYAGI Kiyoto

ガスタービンは、高温燃焼ガスを作動流体とするため高温酸化や熱応力によるき裂損傷が著しく、短時間の運転でもその兆候を示すことがある。そのため、ガスタービンの予防保全は高温部品の損傷形態の把握がその出発点といえる。

当社は、実機での損傷形態把握から高温部品の寿命診断技術を開発し、さらに長寿命化技術の開発に努め、燃焼器および動静翼の長寿命化技術を含む補修技術、さらに、出力と性能向上に関する合理化技術を確立し、実用化の見通しを得た。

The hot gas parts of a gas turbine are susceptible to damage such as thermal stress cracks and hot oxidation within a short operating time due to the high temperature of the combustion gas. From the standpoint of gas turbine preventive maintenance, it is therefore most important to know the cause of such damage.

Toshiba has been developing life assessment and long life technologies for hot gas parts based on the evaluation of damage. In this paper, the latest repair technologies and performance improvement methods for gas turbines are described.

## 1 まえがき

火力発電設備の主要機器の一つであり、高温燃焼ガスを作動流体とするガスタービンの保全技術は、燃焼器、ガスタービン動静翼などの高温通路部部品の損傷に対する予防保全がもっとも重要である。それは、これらの高温部品は金属が溶融する温度域を取り扱い、通常汽力に比べ劣化損傷が激しいためである。

当社は、高温部品の損傷形態把握から寿命診断技術を開発し、さらに長寿命化技術の開発を含む補修技術の整備を進めてきた。ここでは、最近の補修技術と出力・性能向上に関する合理化技術について述べる。

## 2 ガスタービン高温部品の高度補修技術

ガスタービンは、性能向上を目指した新技術の開発によって、タービン入口温度が上昇し、補修の難しい高価な材料が多く使用されるようになってきた。これまでの高温部品の一般的な補修は溶接補修であるが、部品の長寿命化には限界があった。以下に、当社が開発を進めている高温部品に対する高度補修技術を述べる。

### 2.1 拡散ろう付け補修

劣化した静翼の表面には微細なき裂が多くあり、これらを溶接補修すると変形や割れを起こしやすい。拡散ろう付け補修は、このような溶接によるき裂補修が困難な箇所へ適用する技術で、基材成分に合わせた第一粉末と融点降下

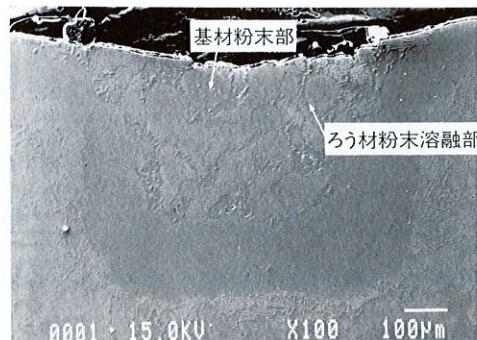


図1. 拡散ろう付け補修技術 拡散熱処理後の補修部組織を示す。  
熱ひずみや変形を与えることなく比較的簡単に修理できる。  
Diffusion braze repair

元素を含有するろう材粉末を混合してき裂部に詰め、熱処理により拡散溶融接合させて補修部の強度を基材と同等にするものである。図1に拡散熱処理後の補修部組織を示す。従来補修が難しいとされたものに対し、熱ひずみや変形を与えることなく比較的簡単に修理できることから、静翼の微細き裂の補修や動翼先端部補修などへの適用が期待される。

### 2.2 動翼の HIP 再生化処理

動翼は高温クリープ温度域においてつねに大きな遠心力を受けるため、クリープ疲労損傷が進行し動翼寿命は時間経過とともに確実に消費する。通常の熱処理では、劣化して生じた析出物の消失はできてもクリープラップチャ强度を

回復させるまでの組織回復はできないと言われており、動翼の再生補修は困難と考えられてきた。この課題に対し、当社は図2(a)に示すような小型のHIP(Hot Isostatic Pressing: 高温等方圧プレス)装置を導入してクリープ疲労した動翼の再生処理技術の開発を進めてきた。圧力約1,000気圧、処理温度1,000°C以上の圧力容器中での処理作業となるが、これまでの研究から機械加工面へ影響を与えることなくクリープ疲労を回復させる条件を確立した。組織は新材料と同等の状態へ戻すことができる。再生する技術としてHIP再生化処理技術を動翼2段と3段に適用した場合、寿命を従来の1.5倍から2倍まで延長できる。図2(b)はHIP再生化処理をした2段動翼で、材料強度の回復、健全性を確認した。

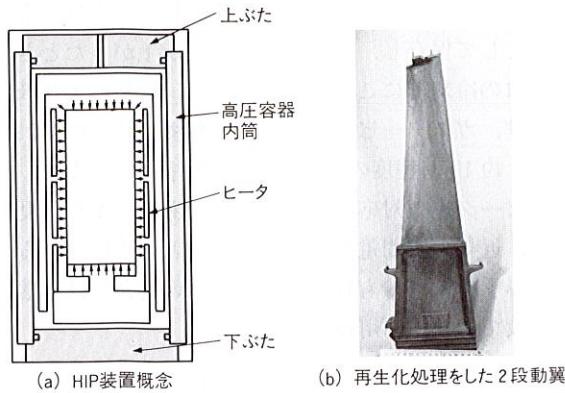


図2. HIP再生化処理技術 HIP装置の概念と再生化処理を2段動翼に適用した例を示すが、寿命は従来の1.5倍から2倍にまで延長できることを確認している。

Refurbishment of blades by hot isostatic pressing

### 2.3 動翼の再コーティング技術

動翼のようなNi基材はきわめて強い高温クリープ強度をもつ反面、高温酸化に対し弱い欠点もある。そのため、高温域で使用される動翼は、高温酸化を防止する目的で翼表面および冷却孔内面に耐酸化コーティングを施している。しかし、このコーティング層は使用時間とともに劣化し、高温酸化から羽根有効部が減肉し強度が弱くなる。そして、翼の寿命も設計寿命より短くなる。当社は、このような損傷を防ぐ技術を整備している。それは、劣化したコーティング層を機械的手法と化学的手法の併用で効果的に除去し、再コーティングを施すことによって動翼基材が本来もっている寿命まで延命化を図る技術である。図3は低圧溶射コーティングを実機翼に施行中の写真である。

### 2.4 動翼の溶接補修技術

動翼材料はNi材をベースとした超合金が使用されている。この材料は溶接が難しく、一般的な溶接では熱影響部に大

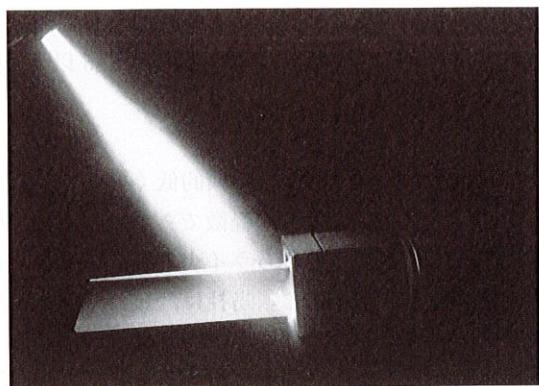


図3. 低圧溶射コーティング 翼表面に耐食コーティングを施行することによって、動翼基材が本来もっている寿命まで延命化できる。  
Low-pressure plasma spray coating

きな残留応力が生じ無数の微細き裂が発生する。そのため、これまでの動翼の補修は欠陥部のグラインディングまでで、許容を越える損傷翼は新翼へ交換されていた。近年、動翼の再利用率を改善するため、動翼先端などの応力の低い部位へ適用できる特別な溶接技術が開発された。当社は至近年に実機へ適用できるよう準備をすすめている。

### 2.5 燃焼器の耐摩耗処理

ガスタービンの定期点検(以下、定検と略記)間隔は規制緩和により2年へ延長されたが、燃焼器は補修を必要とするき裂や摩耗の発生が早く、毎年の点検ごとに見つかる確率が高い。特に、摩耗については管理基準の基材板厚50%以上に達するものが多くあり、燃焼器点検を2年へ延長できない最大の原因となっている。具体的には熱応力を緩和するためにルーズ構造としている燃焼器取合部の摩耗が激しい。燃焼器の耐摩耗技術は、摩耗の激しい燃焼器の各部分にセラミックス系の耐摩耗コーティングの施行または耐摩耗材の取付けをすることによって摩耗を減少させ、燃焼

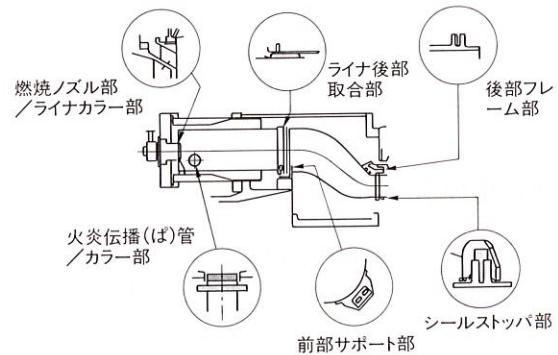


図4. 燃焼器の耐摩耗性改善部 対象部に耐摩耗コーティング、または耐摩耗材を取り付けることによって摩耗率を従来の1/5以下に抑えられる。

Improvement of wear on combustor

器点検間隔を2年へ引き延ばすことを目的として開発した(図4)。この技術は、各部の摩耗率を従来の1/5以下に抑えることができる。

### 2.6 燃焼器ライナの組織回復

燃焼器ライナはメタル温度を比較的低く抑えていることもあって、材料劣化は全般的に軽微である。しかし、局部的に高温となるスポット部からライナの寿命を支配する材料劣化へ進展することがある。当社は、材料劣化した組織の回復を図る目的でライナ熱処理法を開発した(図5)。この熱処理と劣化した部品交換を併用することにより燃焼器ライナの延命化と信頼性改善が期待できる。



図5. 燃焼器ライナの組織回復例 開発した熱処理法によって処理した例で、延命化と信頼性改善が図れた。

Refurbishment of combustor liner material

### 2.7 ガスタービン補修専門工場

当社は、1996年5月にガスタービン部品の補修専門工場として米国General Electric社(略称:GE社)と合弁で“東芝ジーイー・タービンサービス㈱(略称:TGTS)”を京浜事業所内に設立した。主な業務内容は、ガスタービン高温部品の修理(燃焼器、動翼、静翼など)、ガスタービン・蒸気タービン部品のコーティング、蒸気タービンノズルの補修溶接、ガスタービンロータ修理などである。GE社の最新情報と技術だけでなく、当社が開発した補修技術と合わせてガスタービン部品の信頼度の高い補修に貢献していく。

## 3 合理化技術

ガスタービンの保守管理課題として、出力・性能向上と劣化防止によるプラントの経済性改善と維持があげられる。以下に、合理化技術について述べる。

### 3.1 ガスタービン入口温度の高温化技術

ガスタービン高温部品の改良技術は目覚ましく発展している。既設機のガスタービン入口温度の高温化についても改善が図られ、1段動翼の材料強化、翼型変更、冷却改善、

1段静翼の冷却改善、2・3段静翼の材料強化、シュラウドセグメントの冷却構造改善などの最新技術が、運転中の既設ガスタービンに取り入れられている。この高温部品のアップグレード化の時期と合わせて、ガスタービン入口温度を変更すれば出力および熱効率向上につながることができる。例えば、9E型ガスタービンの場合、入口温度を従来の1,104°Cから1,124°Cに変更すれば出力で約5.6%、効率で約2%相対的に向上する。

### 3.2 吸気冷却システム技術

空調設備が全国的に普及し、真夏の午後には電力需要のピークを迎える。しかし、ガスタービンは大気温度が高いと吸気する空気の質量流量が減るために、出力が低下する特性をもつ。この改善策として、ガスタービン吸気系の入口に吸気冷却システムを設置して吸気温度を下げる方法がある(図6)。冷却媒体は電力需要の低い夜間電力をを利用して作ったシャーベット状の氷である。作った氷は冷水槽に氷蓄熱として保存し、日中の外気温度が上がったときに吸気系入口の冷却器にこの冷水を通して、冷熱により吸気温度を下げ、ガスタービンの出力改善を図るシステムである。例えば、約10%程度の出力アップが期待できるため、特に夏場のピーク電力対応に有効な技術である。また、夏場に限らず、近年の夜間電力活用のニーズと合致していることから、春季や秋季でも日中の気温の高い場合には非常に有効な手段であり、利用範囲は広い。

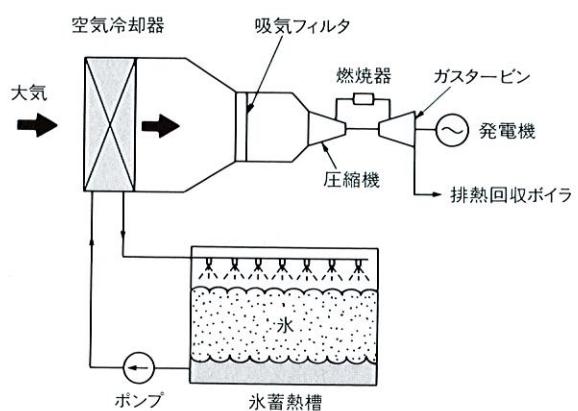


図6. 吸気冷却システム ガスタービンの出力低下を防ぐための氷蓄熱を利用したガスタービン吸気冷却システムを示す。

Gas turbine inlet air cooling system

### 3.3 ガスタービンの水洗システム

ガスタービンの圧縮機の動翼および静翼が汚れると圧縮機内部の効率が低下し、プラントの性能低下を招く。そのため、定期的に水または温水による洗浄を推奨している。その洗浄方法には、運転中に実施できるオンライン洗浄と低速回転で大量の洗浄水を使用するオフライン洗浄の二種

類がある。一回当たりの洗浄効果はオフライン洗浄が大きく、オンライン洗浄は多数回できることから、吸気フィルタ強化との組合せで優れた汚れ防止効果が期待できる。この洗浄システムは、自動化により二種類の洗浄システムを使い分けることができ、作業の省力化も図れる。

### 3.4 吸気フィルタの高性能化

羽根の侵食と腐食防止のために、大気中に含まれる浮遊粉塵(じん)はガスタービン吸気系入口にあるフィルタ設備で除去している。しかし、現状の高効率のフィルタでは除去できない微細な油分やすすなどの炭化物が、運転経過とともに下流側の圧縮機動静翼に付着して、図7の破線のように熱消費率が悪化する。

これに対し、当社は従来の設備に高性能フィルタを追設する強化案で、図7の実線のような性能劣化を抑える検討を進めている。圧縮機の汚れ防止は、燃料消費量の節約と発電出力の維持だけでなく、圧縮機動静翼に付着する成分の減少によって、それに含まれる塩分や硫化物のような大気中の腐食成分の除去率が高められ、ガスタービン圧縮機翼の腐食損傷防止のうえでも大きな効果が期待できる。

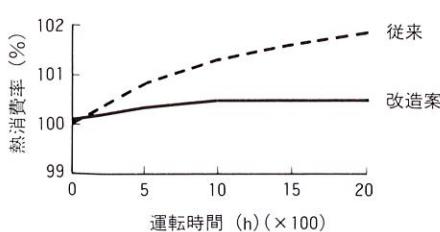


図7. 热消費率の改善例 热消費率(実線)はフィルタ強化による性能劣化防止の一例で、圧縮機翼の腐食損傷防止にも効果が期待できる。

Typical example of heat rate improvement

### 3.5 蒸気噴射併用の低 NOx 燃焼器の活用

当社が開発した1,100°C級低NOx燃焼器は、ガスタービン燃焼器で生ずるNOx量を蒸気噴射と併用して最小限に抑えることができる。当社の低NOx燃焼器は、燃料予混合ダクトを燃焼器ライナ外周にもつ構造である(図8)。そして、従来燃焼器と同じように拡散燃焼方式のパイロット燃料ノズルをライナ中央に配置している。そのため、これまでのようにパイロット燃料ノズルの周囲から蒸気を燃焼器内へ供給できる。加えて、NOx発生量の多い拡散燃焼域へ効果的に供給することから燃焼安定性が高く、わずかな蒸気量でNOx低減率を大きく取ることができる。表1にNOx排出特性比較を示す。従来燃焼器の定格負荷におけるNOx排出量を100とすると、低NOx燃焼器に蒸気噴射を併用すればNOx排出量は10となり、大きな効果が期待できる。また、蒸気量も従来の約1/3で十分である。

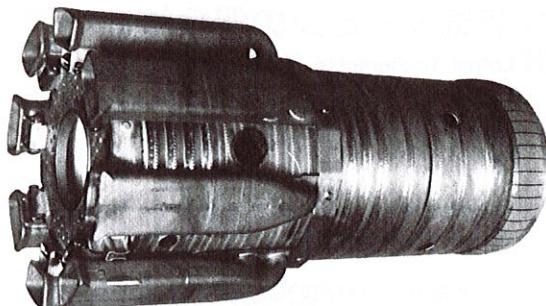


図8. 低 NOx 燃焼器 従来燃焼器との互換性があり、最小限の部品交換で済む。

Low-NOx combustor

表1. NOx 排出量の比較(相対値)

Comparison of NOx emissions

項目	蒸気噴射なし	蒸気噴射あり
従来燃焼器	100	36
低 NOx 燃焼器	20	10

## 4 あとがき

ガスタービンの保全技術にもっとも強く求められているのがコスト低減であり、信頼性向上である。その要求を満たすべく当社はここに紹介した技術開発に取り組んできた。今後も市場ニーズに合う新技術の開発に努め、環境に優しい製品を一つでも多く供給していきたい。

## 文 献

- (1) 本多啓三、他、高温部品の拡散ろう付け補修法、溶接学会シンポジウム、1997。
- (2) 近藤卓久、ガスタービン保守技術、平成9年度火力原子力発電大会要旨集、1997、p.52-53。



近藤 卓久 KONDO Takuhisa

火力事業部 火力改良保全技術部部長。  
コンバインドサイクル機器の改良保全業務に従事。日本ガスタービン学会、火力原子力発電協会会員。  
Thermal Power Systems Div.



小林 政徳 KOBAYASHI Masanori

環境事業推進本部 環境機器・装置部参事。  
コンバインドサイクル機器の改良保全業務に従事。日本ガスタービン学会会員。  
Environmental Management Business Group



大八木 清人 OOYAGI Kiyoto

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。  
Thermal Power Systems Div.