

特集記事・3

安全性確保のための構造材料寿命評価・予測技術の最前線

高温部品の余寿命評価とリペア技術

Remaining Lifetime Assessment and Repair Technology of Hot Gas Path Parts

三菱重工業 高砂製作所

寺崎正雄

Masao Terazaki

同左

堀口雅樹

Masaki Horiguchi

同上

熊野信太郎

Shintaro Kumano

同上

兼澤佳行

Yoshiyuki Kanezawa

同上

久保田淳

Jun Kubota

1 はじめに

タービン入口温度の上昇によってプラント出力及び効率の向上を図るガスタービンにおいては、既に燃焼ガスの最高温度が1500℃に達しており、耐熱材の許容温度を大きく上回っている。燃焼ガスに直接さらされる高温部品には、種々の冷却方式が採用されているものの、寿命を持つ消耗品として定期的なメンテナンスが不可欠である。一方メンテナンス計画に際しては、寿命を持つ高温部品を有効的かつ効率的に運用し、次回運用に於ける機器の信頼性を十分保つ必要がある。

そこで重要となるのが、メンテナンス時に適用される点検/補修技術と、実運用を経験した高温部品の残存寿命評価であり、これらについては常々実績データの蓄積と改良検討が進められている。

2 高温部品の補修技術

2.1 高温部品の劣化/損傷要因

ガスタービンにおける高温部品の代表的な損傷要因は下記のように分類され、タービンの回転部品と静止部品とによってその特徴的な要因は異なる。

①高温条件下クリープ

高温条件下では、一定応力条件下において材料組織が時間と共に変化し、材料固有のクリープ破断時間に達すると破壊を生じる。特に、タービン動翼は高温燃焼ガス中で遠心力を受けているため、その材質組織は運転時間の蓄積と共に劣化する。

②低サイクル疲労

材料に急激な熱負荷の増加・減少が加わると、熱疲労により表面に微細なクラックが発生し、その後の熱負荷の繰返しに伴ってクラックが進展する。特にタービン静翼や分割環などの静止部品は、部品の受ける外力は主に

ガス流れによる曲げ応力のみだが、それよりも翼材に発生したメタル温度差に起因する熱応力が一般的には大きく、寿命評価において支配的要因となる。

③表面の酸化及び腐食による減肉

部品の平均メタル温度は許容値以下であっても、局所的に高温となった部位では、長時間の運転の過程で表面の劣化、酸化減肉を生じることがある。また、硫黄などの腐食性成分を含む燃料を使用する場合には、母材の材質劣化とは別に表層より腐食減肉が生じる。

2.2 検査手法

高温部品の点検/補修時における検査項目として、通常表1に示すような内容を実施している。これらの検査はその特性に応じて使い分けを行っている。

なお、近年では3次元寸法計測を実施し、より精密な寸法管理を適用している部品もある。これは、運転パラメータの変化と寸法変化とに相関が認められるためであり、検査実施前における運転状況評価に基づいた検査項目の策定が重要となることを示している。

2.3 損傷形態と補修基準

前述の通り燃焼ガスに直接さらされる高温部品については、長期間運用後の損傷/劣化は避けられず、点検/補修を

表1 定検時の一般的な非破壊検査内容の例

検査項目	タービン 静翼	タービン 動翼	燃焼器
目視検査(VT)	○	○	○
浸透探傷検査(PT)	○		○
蛍光探傷検査(FPT)	○	○	
渦電流探傷検査(ECT)		○	

繰り返ししながら計画寿命まで使用される。高温部品に認められる一般的な損傷形態を表2に示すが、高温部品の点検に際しては、これら認められた損傷と、各部品 / 部位毎 (図1参照) に定められた補修基準と照らし合わせ、その補修内容が決定される。

なお、この補修基準は弊社が過去の損傷記録を蓄積し、発生の予想される損傷に対し設計評価を加えたものであり、運転実績及び材料強度 / 補修技術の向上と共に改定されている。

2.4 補修技術

高温部品の補修内容はその損傷形態に合わせて選択される。

表2 高温部品損傷形態

損傷形態
コーティング剥離
酸化減肉
クラック
減耗
打痕
変形

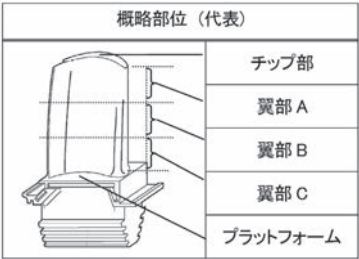
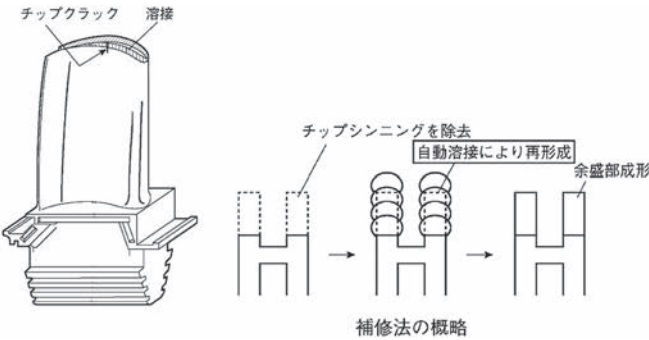


図1 補修基準：部位分類例 (タービン1段動翼)



従来、これら補修を行っても再使用不可 (次回運用中の信頼性不足) と判断された高温部品については、予想寿命に到達する以前であれ廃却処分となっていたが、補修技術の向上はこれら部品の再使用を可能とし、高温部品の有効運用を可能としている。また、補修に際しては損傷部を復旧するだけでなく、コーティング時に最新の技術を適用する (新型ガスタービンの高温部品と同様のスペックへ引き上げる) 等、信頼性の向上を図っている。

ここでは、三菱重工業が近年補修時に採用している技術の一部を紹介する。

2.4.1 自動プラズマ溶接補修 (図2)

本プロセスは、CCD カメラを用いた自動化が図られており、溶接もパルス溶接法により、時間当たりの熱入力を最小限に抑えて熱影響部を従来よりも小さいエリアとすることで、高強度を実現している。本手法は、主に動翼の先端シンニング部の整形に適用される。

2.4.2 低流動ロー付け補修 (図3)

従来のロー付け補修では、比較的狭いき裂部にロー材が浸透し、固化するプロセスの為、開口部が広いき裂には、適用できなかった。本低流動ロー材を用いた補修プロセスでは、ペー

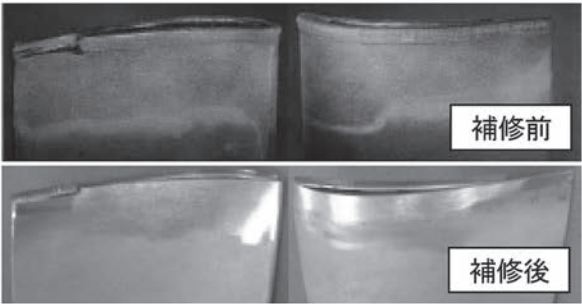


図2 自動プラズマ溶接補修

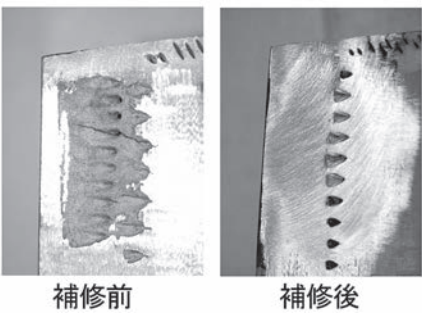
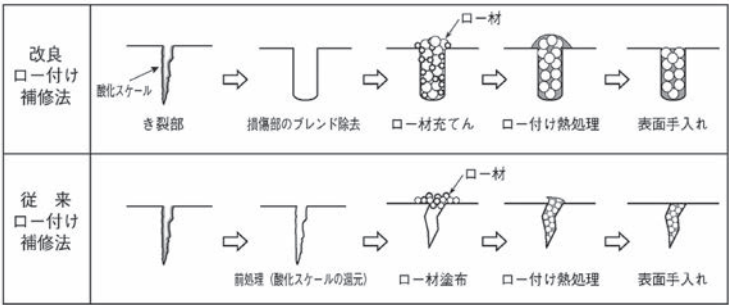


図3 低流動ロー付け補修

比較的広い開口部や欠損部の整形等の補修を可能とした。

2.4.3 冷却通路部分溶接補修 (図4)

三菱重工業では燃焼器壁面部材として、内部に冷却通路を備えた二重構造パネル (MT フィン) を採用している。MT フィンにおいて、冷却通路に架かるき裂が認められた場合、補修時にはき裂部の完全除去に伴い冷却通路を開口させ、冷却通路を閉塞させないように管理し、肉盛り溶接により冷却通路を復旧する。

2.4.4 クーボンリペア

上記 MT フィンの補修においては、図5に示すように必要に応じて損傷部位を入れ替えて補修する手法も採用している。

2.4.5 遮熱コーティング施工法改良 (図6)

従来型の遮熱コーティング施工においては、コーティング施工時の冷却穴詰まり防止のために、冷却穴まわりにマスキングを実施しており、一部コーティング未施工部分が存在していた。

樹脂を用いた施工方法の改善により、冷却穴まわりまでコーティング施工が可能となり、冷却穴まわりの耐熱性の向上及びき裂発生を抑制を図っている。

3 余寿命評価

3.1 計画寿命到達前 (部品運用中) の余寿命評価

ガスタービン高温部品の運用中の寿命消費については、その運転実績 (実運転時間、燃料形態、起動回数、負荷変化

等) を等価運転時間へと換算し、計画寿命と比較することで部品の余寿命を評価している。

以下に、代表的な等価運転時間換算式を示す。

$$Ho = Hi + A \times (Ni + Bi \times Lri + Ci \times Ti + Di \times Lci)$$

Ho: 等価運転時間 (hr)

Hi: 実運転時間 (hr)、A: 等価運転時間換算係数

Ni: 実起動回数 (回)

Bi: 負荷遮断回数 (回)、Lri: 負荷遮断換算係数

Ci: トリップ回数 (回)、Ti: トリップ換算係数

Di: 負荷急変回数 (回)、Lci: 負荷急変換算係数

3.2 計画寿命到達部品に対する余寿命評価

計画寿命に到達した高温部品については、長期間運用に伴うマイクロ組織の及び機械的性質の劣化が予想される。そのためこれら高温部品については、非破壊及び破壊検査を行い、材料特性データ (バックデータ) と比較することで実質残寿命の評価を行う。

3.2.1 タービン動翼の余寿命診断

タービン動翼の寿命は先に述べたように、主にクリーブ破

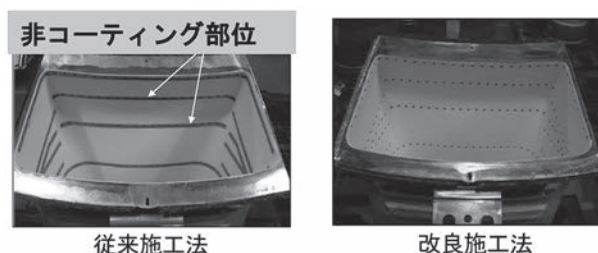


図6 燃焼器尾筒 遮熱コーティング施工法改良

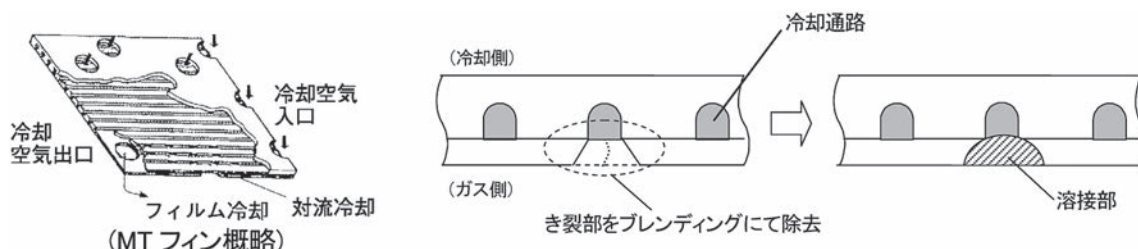


図4 MT フィン冷却通路補修



図5 燃焼器尾筒クーボンリペア

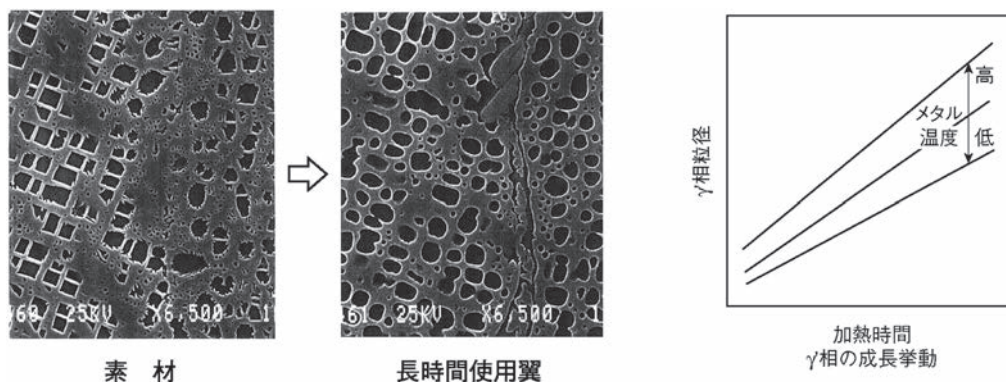


図7 Ni基超合金の加熱時間と γ' 相粗大化の関係

断寿命で評価する。動翼の材料は主としてクリープ破断寿命の優れたNi基超合金が採用されており、これらの材料には、図7に示すように高温に曝される時間に比例して析出硬化した γ' 相や粒状析出物が成長、凝集粗大化する特性がある。この特性を利用し、テストピースの γ' 相を測定し、その大きさと使用時間の関係から動翼のメタル温度が推定される。一方、同一サンプリング翼からテストピースを採取し、クリープ破断テストを実施すればクリープ強度の劣化状況が確認される。

これら2つの確認結果を基に設計応力を考慮して余寿命を判断することが出来る。

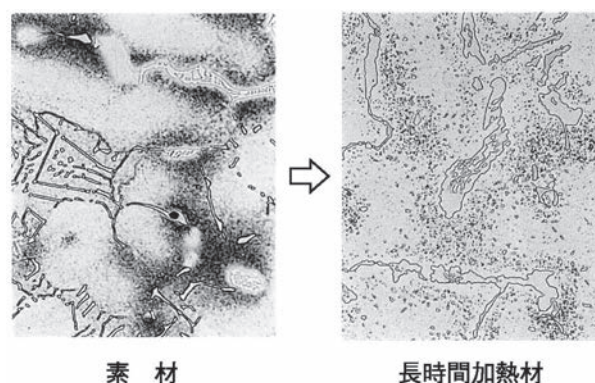


図8 Co基超合金の長時間加熱後での炭化物粗大化例

3.2.2 タービン静翼の余寿命診断

タービン静翼は起動停止及び運転中の負荷変化に伴い熱応力が生じ、これによりクラック等の損傷が発生する。クラック等については溶接及びロウ付け等で補修して継続使用することとなるが、補修履歴が度重なった場合や使用に伴う材料劣化が進行した場合は補修が困難となり、経済的ではなくなる。この時点が静翼の寿命と考えられる。

静翼の材料はNi基超合金並びに、耐食性・溶接性に優れたCo基超合金も採用される。Co基超合金の場合は γ' 相の析出はないものの、図8に示すように加熱時間の経過と共に炭化物が析出拡大する特性がある。従って動翼と同様に、これら炭化物の形状を観察すれば使用時間から静翼のメタル温度が推定される。

これに加えて静翼から採取したテストピースの材料試験結果から高温強度を調査することでその部品の材料劣化程度が把握でき、これと補修の経済性を総合的に評価して余寿命を診断する。

なお、燃焼器の内筒・尾筒はその劣化形態がタービン静翼と同様であるため、余寿命診断の手法も同様なものとなる。

4 おわりに

プラントメンテナンスに対する近年の動向は、効率化、省力化を目的としたメンテナンスインターバル及び高温部品の寿命延長化を指向しており、それら延長された運用期間中の機器の信頼性についても、これまでと同等であることが求められている。

ここでは、ガスタービン高温部品に対する三菱重工業における最近の補修技術、余寿命診断技術について述べてきた。高温部品の損傷が不可避である現状、点検結果を反映した改良設計検討/適用を進めると共に、補修/余寿命診断技術の更なる向上により、信頼性を保ちながらプラントメンテナンスの効率化、省力化を支えていくことが期待される。

参考文献

- 1) 堀口雅樹：ガスタービンセミナー・第35回「ガスタービンの最新技術動向と保守管理技術」資料集，(社)日本ガスタービン学会，(2007)，61.

(2008年9月22日受付)