

8 MW級 高効率ガスタービン「M7A-03」の高性能化

Modification of 8MW Class Gas Turbine, M7A-03



瀧 博資① Hiroshi Taki
 志賀早希子② Sakiko Shiga
 浮田 哲男③ Tetsuo Ukita
 合田 真琴④ Makoto Gouda

2007年より販売を開始した8 MW級高効率ガスタービンM7A-03は、現在約30台の受注を得ており、累積等価運転時間は200,000時間を超えて順調に稼働を続けている。さらなる高性能化へのニーズを受けて、M7A-03においても継続的に性能向上を図っている。本稿では、M7A-03の性能向上への取り組みについて紹介する。

About 30 orders have been received for our 8 MW class high-efficiency gas turbine, the M7A-03, which first appeared on the market in 2007. Those units are running smoothly with an accumulated equivalent operating time of more than 200,000 hours. To respond to the need for further performance enhancement, continuous efforts have been directed at improving performance of the M7A-03. This paper presents our approach to performance improvement with the M7A-03.

まえがき

従来からの環境意識の高まりに加え、分散型電源としてガスタービンを用いたコージェネレーションシステムはますます重要なハードウェアとして捉えられている。このコージェネレーションシステムの核となるガスタービンには、環境面からの天然ガス利用によるクリーンな排ガス特性（CO₂排出削減、NO_x排出削減）と経済面からの高効率へのニーズがさらに高まっている。

M7A-03は、このようなニーズに合致した低環境負荷、高効率のガスタービンであり、100台以上の納入実績を持つ当社のM7Aシリーズの最新機種である。当社では、上記ニーズに応えるために、継続的にM7A-03の高性能化に取り組んでいる。

1 M7A-03の概要

当社は、本格的な軸流圧縮機を搭載したガスタービンM7A-01¹⁾（6 MW級）を自社開発し、1994年に市場に投入した。続いて、遷音速圧縮機技術を適用し、吸込空気流量と圧力比増大による出力向上を実現したM7A-02²⁾（7 MW級）を開発、1998年から販売を開始した。さらに、M7Aの基本構造を踏襲してスケールアップを図り、これに最新技術を投入した高効率ガスタービンL20A³⁾（18MW級）を開発、2000年より販売を開始した。

M7A-03⁴⁾は、L20Aに投入された最新技術を逆に既存のM7A-02に適用することで性能を改善し、2007年より販売を開始している。M7A-03の概観図を図1に、また主要諸元を表1に示す。

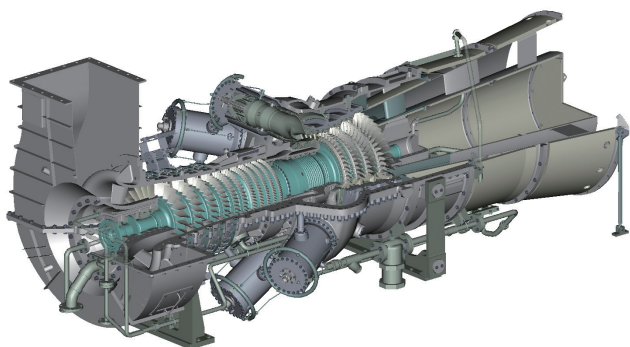


図1 M7A-03概観図
 Fig. 1 Overview of M7A-03 gas turbine

表1 M7A主要諸元
 Table 1 M7A main specifications

型 式	単純開放1軸型
圧 縮 機	軸流11段
燃 焼 器	缶型6缶
タービン	軸流4段
回 転 数 (min ⁻¹)	13,790
軸受仕様	すべり軸受



(a) 国内向け (b) ヨーロッパ向け

図2 M7A-03発電装置
Fig. 2 M7A-03 gas turbine generator package

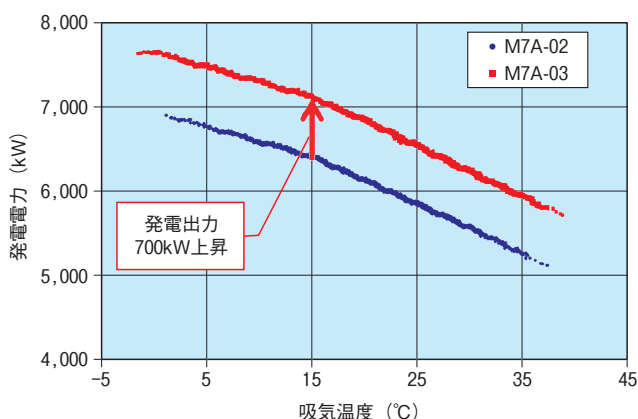


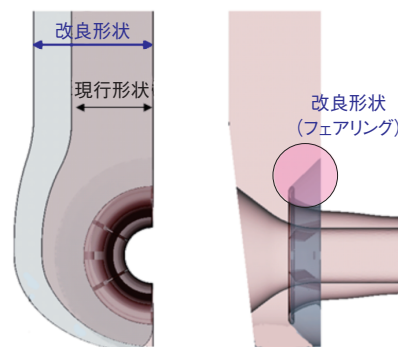
図3 M7A-02からM7A-03換装による発電電力の変化
Fig. 3 Benefits of output power by switching to M7A-03

2 M7A-03の稼働実績

M7A-03を搭載したコージェネレーション設備は、すでに国内外で約30台の受注を得ている。そして、総稼働時間は実運転時間で150,000hr以上、等価運転時間で200,000hr以上である。代表的な発電装置の例を図2に示す。

燃焼方式については環境面での要請から低NO_xのDLE (Dry Low Emission) 燃焼器を搭載した物件が多くを占める。排出NO_xが15ppm (O₂=15%換算)の超低NO_xのDLE燃焼器を搭載した仕様(3物件)も順調に稼働を続けている。一方で、東南アジアなど天然ガスのインフラが不安定な地域では、一時的に液体燃料も使用できるデュアルフェーゼル燃焼器を搭載した仕様もある。

また、M7A-03は、基本構造がM7A-02とほぼ同じであるため、M7A-02を搭載した発電装置へM7A-03を換装することも可能である。実際に換装を行った際の発電電力の変化を図3に示す。ガスタービンをM7A-02からM7A-03へと換装することにより、設備の大幅な改修を行うことなく発電電力を700kW向上させた。



(a) 軸方向矢視 (軸対称片側のみ表記) (b) 側面矢視

図4 インレットコレクターの形状改良
Fig. 4 Modified inlet collector profile

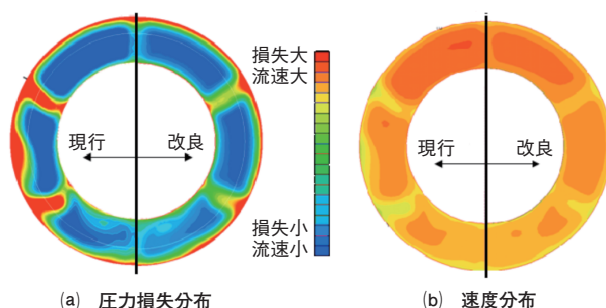


図5 インレットコレクター出口のCFD解析結果(ベルマウス下流断面)
Fig. 5 Results of CFD analysis at collector outlet

3 高性能化への取り組み

一方で、市場のさらなる高効率化への要求に応えるべく、継続的に高性能化に取り組んでおり、ここでその一部を紹介する。

(1) 要素効率向上と無効空気削減

M7A-03の開発⁴⁾では、圧縮機やタービンの要素効率向上と、動力発生に有効に利用されない空気を削減することにより、大幅な性能向上を実現した。引き続きこれらの改良を行うことで高性能化を図っている。

(i) インレットコレクターの圧力損失低減

発電装置外部よりガスタービン入口へ空気を取り込む通路が、インレットコレクターである。この形状が不適切であれば、圧縮機入口の流れに偏りが生じ、圧力損失が増加する。また、この偏流は圧縮機の要素効率や翼振動特性にも影響を及ぼす。

圧縮機入口の流れを均一化することを目標として改良を行った。改良前後の形状を図4に、CFD解析によるインレットコレクター出口(すなわち圧縮機入口)の解析結果を図5に示す。改良の結果、圧力損失を10%程度削減することができた。

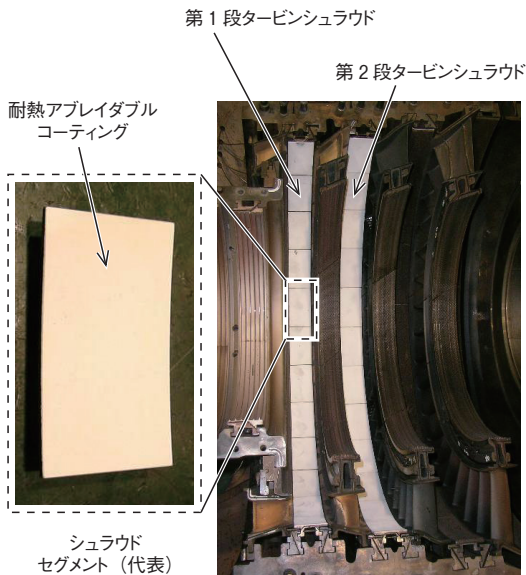


図6 耐熱アブレイダブルコーティング
Fig. 6 Heat-resistance and abrasion-resistant coating

(ii) タービン動翼先端 (チップ) クリアランスの削減

タービン動翼と、対向する静止部品であるタービンシュラウドとの間に形成される翼端隙間をチップクリアランスと呼んでいる。このチップクリアランスは、翼表裏への作動流体のバイパス量を左右するため、タービンの要素効率に大きな影響を及ぼす。

チップクリアランスは、起動時などの過渡的な状態で最小隙間となる。その際に回転する動翼と静止しているシュラウドが強い接触により損傷しないように定常運用時のクリアランスが設定される。

定常運用時の隙間をさらに小さくするため、過渡運転時に動翼がシュラウドと接触しても大きなダメージがないように、動翼に対向するシュラウドに金属との接触に対して



図7 コードシールによる隙間の削減
Fig. 7 Gap minimization by applying cord seal

削られやすく、耐熱性も備えたアブレイダブルコーティングを採用した。耐熱アブレイダブルコーティングを施したシュラウドを図6に示す。

(iii) 無効空気の削減

ガスタービンの圧縮機出口は非常に圧力が高い。このため、圧縮空気を格納している空間に隙間があれば空気が漏れ、圧縮空気を有効に利用できなくなる。しかし、加工公差や運用時の熱膨張差により隙間を完全になくすことは困難である。

運用時の隙間を可能な限り小さくし、漏れ空気を削減するために、隙間に耐熱性もあり、可塑性の高いコードシールを挿入することで運用時の隙間を小さくした。コードシールの挿入状況を図7に示す。

(2) 熱サイクルの見直し

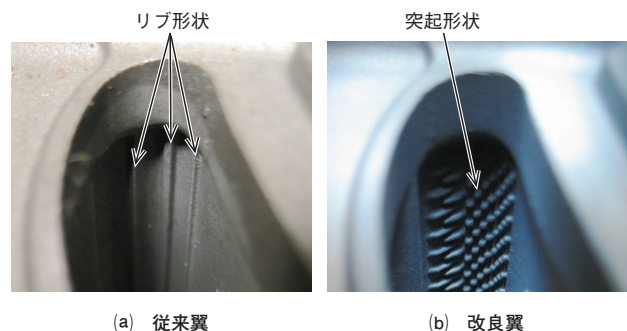
ガスタービンの熱サイクル特性の点から性能向上を実現する方策としては、圧力比の上昇とタービン入口ガス温度の上昇がある。前者では、圧縮機の再設計が必要となり、構造面での大幅な変更が必要となる。従って、後者のタービンの入口ガス温度を上昇させることで高性能化を図った。

タービン部材の温度の上昇は、翼寿命の点から、信頼性に影響を及ぼす。信頼性を確保するためには、タービン入り口ガス温度を上昇させた場合の、高温部品の冷却技術とその効果を確認するための温度計測技術が重要となる。

(i) 冷却技術

タービン翼の冷却空気は圧縮機出口の圧縮空気を使用するため、この冷却空気の節約で、圧縮仕事の増加を抑えることができ、ガスタービンの性能向上に寄与できる。タービン入口ガス温度を上昇させた場合も、冷却空気量を極力増やさずに、タービン翼温度を従来と同等にするため、翼の冷却性能を向上させることが重要である。

最も高いガス温度にさらされる第1段タービン静翼の、最も熱負荷の高い前縁部分に対して、翼の冷却性能を向上させるために、従来の前縁の冷却構造をリブ構造から突起状の構造に変更して冷却側の伝熱面積を増加し、冷却性能を向上させた。冷却構造の相違を図8に示す。



(a) 従来翼 (b) 改良翼

図8 第1段静翼前縁冷却構造
Fig. 8 Cooling structure on leading edge

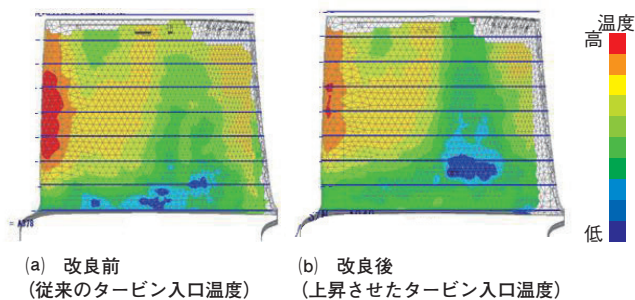


図9 パイロメータによる第1段動翼メタル温度計測結果(翼腹側)
Fig. 9 1st blade surface temperature measured by pyrometer (Brade pressure side)

(ii) 温度計測技術

M7A-03の回転翼のうち、第1,2段タービン動翼に冷却翼を用いている。タービン翼の翼寿命を評価する上で翼の部材温度は非常に重要な要素の一つであるが、冷却翼全域の温度を設計時に正確に予想することは難しく、実機運転での翼の温度計測が非常に重要である。

翼の信頼性を保持するため、冷却翼の基本構造は従来翼と変えず、強度的な信頼性を維持させた。その上で、タービン入口ガス温度が上昇しても、翼への冷却空気増加によって翼の部材温度を上昇させないことを目標とした。設計においては、エンジン性能に与える影響を考慮して、最小の冷却空気増分でタービン翼部材温度の維持が実現できるように検討を行った。

今回の設計による冷却空気量の増分が妥当であることを確認するために、実機による翼の部材温度計測を行った。回転翼の温度計測には、当社で十分な使用実績のある赤外線放射温度計測システム(パイロメータ)⁵⁾により計測した。第1段タービン動翼での計測結果を図9に示す。これにより、入口ガス温度が上昇してもタービン翼の部材温度が従来翼と同等以下に保持されていることが確認できた。

4 改良機の性能

現在各改良項目の信頼性を確認するため、当社明石工場7号発電所にて2012年6月より改良機のフィールド試験を実施中である。今回の改良を適用したガスタービンの性能を表2に示す。

表2 M7A-03改良機の性能
Table 2 Performance of improved M7A-03

	改良機	従来機
発電端出力 (kW)	7,780	7,420
発電端効率 (%)	33.5	33
排気ガス温度 (°C)	523	510
圧力比	15.6	15.6
空気流量 (kg/s)	27	27

吸排気ダクトロスなし、燃料：メタン (CH₄ 100%)

あ と が き

2007年より販売を開始したM7A-03は、受注状況も堅調であり、順調に稼働実績を伸ばし続けている。

さらなる高性能化を図ったM7A-03は、2012年6月より当社の明石工場エネルギーセンターで実証試験を行っている。

今後も、より高性能で信頼性の高いガスタービンを顧客へ提供するため、継続的に改良を行っていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 唐沢, 井上, 中安: “6 MW級中型高効率ガスタービン M7A-01およびコージェネレーションシステムPUC60”, 川崎重工技報, No.119, pp.90-91 (1993)
- 2) “ガスタービン「M7A-02」コンバインドサイクル発電設備”, 川崎重工技報, No.148, pp.48-49 (2001)
- 3) 笠, 永井, 杉本, 奥戸, 長友, 足利, 尾崎: “20MW級ガスタービン「L20A」の開発”, 川崎重工技報, No.148, pp.6-11 (2001)
- 4) 村上, 谷村, 石田, 松岡, 加藤: “M7A-03ガスタービンの開発”, 川崎重工技報, No.161, pp.24-27 (2006)
- 5) T. Taniguchi, K. Sanbonsugi, Y. Ozaki, A. Norimoto: “Temperature Measurement of High Speed Rotating Turbine Blades Using a Pyrometer,” ASME GT2006-90247 (2006)



瀧 博資 志賀早希子 浮田 哲男 合田 真琴