

# 5 MW級で世界最高効率の純国産ガスタービン 「M5A」

## World's Most Efficient 5MW-Class Gas Turbine, M5A



池口拓也①*	Takuya Ikeguchi
久保博史②	Hiroshi Kubo
石原信哉③	Shinya Ishihara
吉村親樹④	Motoki Yoshimura
竹田敬士郎⑤	Keishiro Takeda
谷口智紀⑥	Tomoki Taniguchi
櫻澤俊明⑦	Toshiaki Sakurazawa
石飛悠希⑧	Yuuki Ishitobi
堀内豪⑨	Takeshi Horiuchi

地球温暖化対策の枠組みとして定められたパリ協定の発効により、低炭素社会の実現に向けコージェネレーション（熱電併給）の促進が重要となっており、特に高温の蒸気を活用できるガスタービンコージェネには一層の効率向上が期待されている。

最新技術と経験豊富なカワサキガスタービンの知見を融合し、全要素の流れ解析による最適化や全動翼の非接触振動計測評価などを実施して、5 MW級で世界最高効率と低NOx化を達成したコージェネ用ガスタービン「M5A」を開発した。「M5A」は、これまで国内外含め合計15のサイトで採用され、累積運転は16万時間を超える。

Under the Paris Agreement, which is a framework aimed at mitigating global warming, promoting cogeneration (combined heat and power application) is increasingly important for realizing a low-carbon society. In particular, gas turbine cogeneration, which enables the utilization of high-temperature steam, is expected to further boost efficiency.

By combining state-of-the-art technologies with Kawasaki's expertise in gas turbines and extensive experience in this field, all the elements are optimized through flow analysis and measured and evaluated the vibration of all the rotor blades in a contactless fashion. M5A was also successfully developed, which is a cogeneration gas turbine with the world's highest efficiency in the 5MW class and reduced NOX emissions. M5A has been adopted in 15 domestic and overseas sites, and the total operation time has exceeded 160,000 hours.

### まえがき

地球温暖化対策の枠組みとして定められたパリ協定の発効により、低炭素社会の実現に向けて、コージェネレーション（以下、コージェネ）が、省エネルギーやCO<sub>2</sub>排出量削減効果だけではなく、電力の安定供給の観点から分散型エネルギーシステムとしての価値も評価され、導入量が増加している。また、新技術開発による採算性向上のほか、電力/ガス小売市場自由化などの制度改革により市場が活性化している。特に、高温蒸気を利用できるガスタービンコージェネは産業用分野を中心に広く導入され、ガスタービンにはより一層の効率向上が期待されている。

### 1 背景

当社は1983年に自社開発のガスタービンを用いた1 MW級のコージェネを市場投入して以来、30MW級に至るラインアップを揃え、さまざまな市場要望に応えてきた。当社が長年培ってきた産業用ガスタービンの開発技術を結集し、多くの経験や実績をベースに信頼性を継承しつつ、最

新技術を適用しクラス最高の効率と環境性能を実現した5 MW級の「M5A」ガスタービンと本機をコアとする「PUC50D」コージェネシステムを開発した<sup>1,2)</sup>。

### 2 開発コンセプト

多様化する需要へ優れたシステムの提供を可能とするため、当社ラインアップである小型機の「M1A」と中型機の「M7A」の間を埋める新機種として、「M5A」ガスタービンを開発した。鳥瞰図を図1に、主要諸元を表1に示す。以下、特長について述べる。

#### (1) 卓越したコージェネ性能

本ガスタービンの発電端効率は5 MW級のガスタービンの中で卓越して高く、最新の高効率機種トレンドからも一歩抜きでたレベルにある。また同時に、排熱回収に適した排ガス温度の設定により高い総合効率を可能とした。

高温部の耐久性確保のため、タービン入口温度は適度に設定しつつ冷却空気流量を削減して動力損失を低減している。また、あらゆる空力要素に対して最新の流れ解析を用

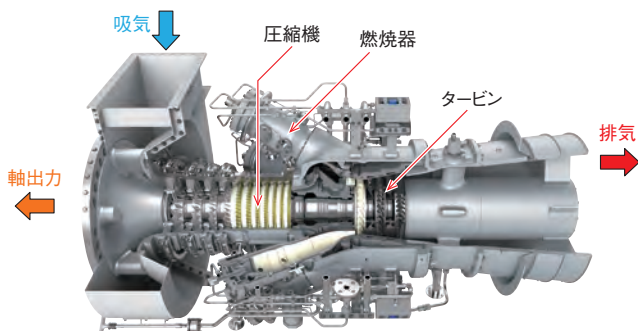


図1 「M5A」ガスタービンの鳥観図  
Fig.1 Bird's eye view of M5A gas turbine

表1 「M5A」ガスタービンの主要諸元  
Table 1 Main specifications of M5A gas turbine

型式	単純開放サイクル1軸式
圧縮機	11段軸流式
タービン	3段軸流式
燃焼器	6缶形
寸法 [m]	L2.6×H1.5×W1.4
発電端出力 [MW]	4.96
発電端効率 (LHV基準) [%]	33.0
排気流量 [kg/s]	17.6
排気温度 [°C]	523
エミッション	NOx : 52.5ppm以下 (O <sub>2</sub> =0%)

※ISO条件, 吸排気圧損なし, 100%CH<sub>4</sub>

いた最適化設計技術を適用し、圧縮機後段静翼に湾曲翼を採用するなどにより、小型ゆえに発生する問題を抑え、広い作動範囲と高効率を実現している。

## (2) クラス最高の環境性能 (低NOx)

当社独自のパイロット・メイン・追焚の3タイプの燃料ノズルを備える構造で、豊富な実績がある希薄予混合燃焼方式による6缶形のドライ低エミッション燃焼器（以下、DLE燃焼器）を搭載している。運転状態により各燃料ノズルへの燃料流量を制御することにより、最適な燃焼状態を維持し、幅広い運転範囲で5 MW級最高レベルの環境性能（低NOx）を実現している。

## (3) 「M1A」／「M7A」ガスタービンの信頼性継承

開発設計においては、豊富な実績がある「M1A」／「M7A」ガスタービンの信頼性継承を第一として、その上で性能などの特長を高いレベルで実現することとした。このため、構造や材料は機能・重量・サイズ・整備性・運用性などが全体最適となるよう、実績があり品質上確立したものを使用している。

## (4) 軽量・コンパクト

「M1A」ガスタービンを継承したシンプルなリングケーシング構造を採用して、かつ吸排気流路に最新の流れ解析による最適化設計を適用することにより、圧力損失を抑

制しつつ大幅な小型化を実現した。これにより、発電装置を小型化することができた。

## (5) 長い整備点検間隔

ガスタービン整備は年1回のボアスコープ点検と4年ごとのオーバーホールを設定して、1年間の連続運転を可能としている。オーバーホールは整備済みのガスタービンとトレードイン交換することで、整備停止時間を短縮する。

## (6) 優れた運用性

ガスタービン単体の始動はプレパージを除いて定格出力まで10分である。また、系統連係から解列した自立運転時でも低エミッションで運転が可能な自立運転DLEが可能のため、自立運転時の急負荷変動割合も負荷率50%まで許容しており、運用性に優れている。

## (7) 高温余力を活かした性能向上

複数の量産機で長期信頼性に関する確認試験により高温部品の温度に余裕があることが確認できた。そのため、大幅な設計変更なく、高温化による性能向上のポテンシャルを活用した改良を実施した。

## 3 開発プログラム

2014年4月に開発プロジェクトをスタートさせ、高い開発目標ながら短期での開発完了とスムーズな市場投入を目指し、製品企画・ガスタービン設計・生産準備を同時並行で推進した。2016年12月からガスタービンの運転試験を開始して、約1年弱の社内運転試験により性能・健全性評価・耐久試験など一連の必要な確認を完遂し、2017年10月に開発を一旦完了した。引き続き、さらなる高温化の予備試験や量産機の追加開放点検結果などを評価したうえで、2019年から性能向上プロジェクトを実行し、2年間で完遂した。

開発試験では、性能や健全性に関する確認を行った後、耐久試験で過酷な各種条件下での運転と試験後の検査確認を行い、改良設計が必要となった場合はプロセス上流へ戻り再試験評価を行った。それを想定した事前準備や2機の試作ガスタービンを用いて詳細計測と耐久・性能計測に類別して効率的な試験を実施することで、短期の試験完遂を実現した。

信頼性確認には、「L30A」ガスタービン開発で培ってきた圧縮機・タービン全段動翼の非接触翼振動計測や放射温度計によるタービン全段動翼表面温度計測技術などのノウハウを総動員して試験評価した。運転試験設備のデータ取得やモニタリングシステムでは1,000点を超える項目を計測しながら、リアルタイムに処理分析し評価・判断をタイムリーに行った。以下、代表的な計測実施例を紹介する。

(1) 圧縮機

翼は前置翼で発生する後流（ウェイク）などによる空力励振を受けるため、高サイクル疲労の評価が必須であり、全動翼に対して、光学式の非接触翼振動計測を実施した。翼がセンサを通過するタイミングの翼振動による変化を捉えて振動を評価した上で、耐久試験により健全性を確認した。このほか、3Dプリンタで製作した計測プローブの適用にも取り組んでいる。

(2) 燃焼器

希薄予混合燃焼時の燃焼振動を確認するため、半導体圧力トランスデューサを用いた圧力変動計測により振幅や周波数を評価した。また、熱電対と示温塗料を併用して部品の耐久性確保に必要な温度であることを確認した。

(3) タービン

タービン動翼の温度評価には、より温度分解能に優れた放射温度計（パイロメータ）も適用した（図2）<sup>3)</sup>。併せて、スリップリングを使用した熱電対による評価精度の検証を確認している。なお、この計測では歪ゲージによる動翼の翼振動計測も実施し、別途実施した翼先端隙間の非接触翼振動計測とあわせて高サイクル疲労の評価を行った。

(4) 構造

従来よりも小型に設計した吸排気流路では、各部の壁面静圧や全圧の計測と図3に示す流れ解析により評価を行い、期待通りの性能を発揮していることを確認した。

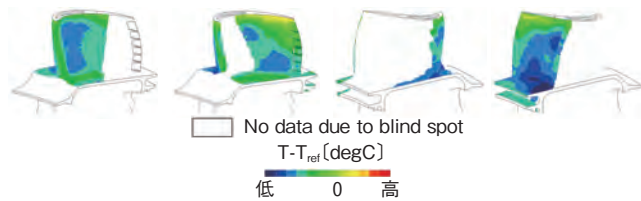


図2 放射温度計によるタービン動翼の温度計測結果  
Fig.2 Results of temperature measurement of turbine rotor blades with pyrometer

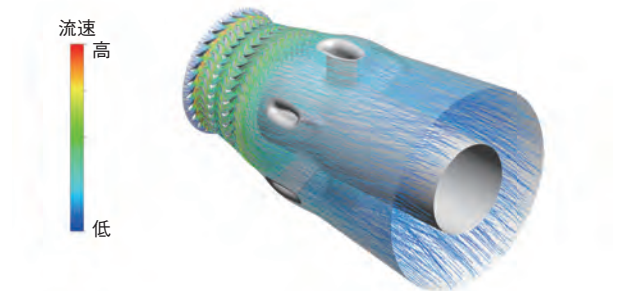


図3 排気流路部の流れ解析例  
Fig.3 Example of flow analysis of exhaust flow path

表2 「PUC50D」コージェネ性能  
Table 2 Cogeneration performance of PUC50D

機種	「PUC50D」
ガスタービンモデル	「M5 A-01D」
発電端出力 [kW]	4,685
燃料消費量 [Nm <sup>3</sup> /h]	1,287
送気蒸気量 [kg/h]	10,980
発電端効率 [%]	32.3
熱回収効率 [%]	53.0
総合効率 [%]	85.3
NOx値 (O <sub>2</sub> =0%換算) (DLE運転範囲) [ppm]	52.5 (50~100%負荷)

吸気温度：15℃，大気圧力：101.3kPa（高度 0m）  
吸気／排気圧損：0.98/2.94kPa  
燃料：都市ガス13A  
排熱ボイラ：蒸気圧力0.78MPaG，給水温度60℃

短期間の開発ながら、実機運転試験で上記例のとおり徹底した定量的評価を行うことにより、製品の信頼性を高めた。また同時に、製品の商品性向上へのポテンシャルや、さらなる性能向上の改良余地を定量的に把握した。

4 「PUC50D」コージェネレーションシステム

「M5 A」ガスタービンをコアとして排熱ボイラなどを組み合わせたカワサキガスタービンコージェネシステム「PUC50D」の性能を表2に示す。発電端効率は32.3%と同クラスのガスタービンに比べて約3ポイント、総合効率も85.3%と同クラスに比べ約3ポイント高く、高い経済性を有している。NOx値は同クラス最高の環境性能となっている<sup>4)</sup>。

代表例として国内向け「PUC50D」と従来型システム（商用電力とガス焚ボイラ）を比べると、エネルギー消費量では20.9%削減、CO<sub>2</sub>排出量では17.5%削減可能である。あわせて、エネルギーコスト（条件：購入電力20円/kWh，都市ガス100円/m<sup>3</sup>N，他）は従来型システムよりも年間あたり約3.5億円の削減効果が見込まれる。

5 運用実績

量産初号機は国内のユーザに納入し、2018年7月から商用運転を開始した。既設ガスタービンコージェネの更新で、基礎や補機・煙突・電気設備など、できる限り既設を流用しており、経済性や環境性能で劣る老朽化したコージェネ更新のモデルとなる導入ケースである。

運用開始から約3年経過時点でガスタービンの追加開放点検を実施した。サイトからガスタービンを持ち帰り、当社工場で全分解し、目視検査・寸法検査・非破壊検査を行った。長時間の耐久性を評価するため、破壊検査用の一部のサンプルを除き、部品交換は行わずにガスタービンを再組立してサイトに戻し運用を継続する方法を採用した。

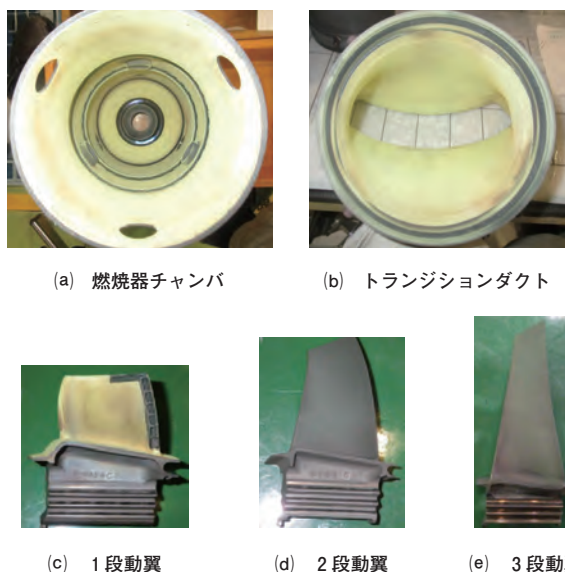


図4 工場持ち帰り追加開放点検時の高温部品写真の例  
Fig. 4 Example of hot gas path parts at additional overhaul inspection at factory

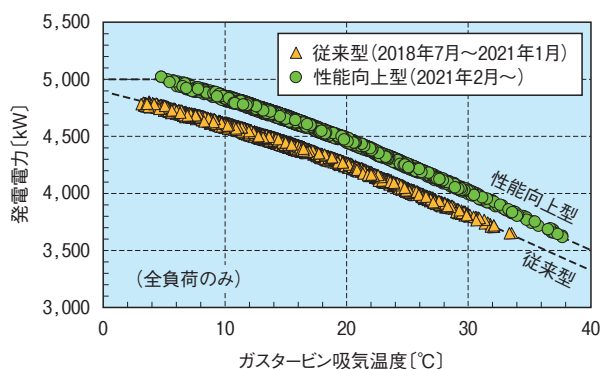


図5 性能向上したM5Aガスタービン導入後の性能推移  
Fig. 5 Trends in performance after application of M5A gas turbine with enhanced performance

工場検査時の燃焼器部品とタービン動翼の写真を図4に示す。全ての部品において様相は非常にきれいで有害な欠陥は認められなかった。翼端やラビリンスシール部の隙間部の過度のラッピングも無く、適正であることが確認でき、3年間の運転での耐久性や安定性に問題がないことが実証された。

この追加開放点検後に、性能向上した「M5A」ガスタービンを導入いただき、図5に示すように計画通りの性能を発揮していること、および、運用中の燃料消費量および蒸気量などに劣化の傾向は確認されていない。今後も運用実績を重ねるとともに、計画的な点検で経過観察を継続的に実施し、長期の耐久性や安定性を確認しながら、信頼性を実証していく。

## あとがき

CO<sub>2</sub>削減に向けた政策支援や非常時のエネルギー供給による事業継続への意識の高まりから、クラス世界最高の効率と環境性能などの優れた特性を実現したM5Aガスタービンがコージェネ導入推進への駆動力となることを期待している。今後も世界が立ち向かうエネルギー問題や環境問題の解決に貢献すべく、さらなる商品性の向上に引き続き努めてゆく。

## 参考文献

- 1) 寺内晃司 “5 MW級 M5Aガスタービンの開発と運用実績”, 第47回日本ガスタービン学会定期講演会 (函館) 講演論文集 (2019)
- 2) S. Ishihara, et al., “DEVELOPMENT OF HIGH EFFICIENCY 5 MW CLASS GAS TURBINE THE KAWASAKI M5A”, ASME Paper GT2019-90773.
- 3) T. Horiuchi, et al., “APPLICATION OF CONJUGATE HEAT TRANSFER ANALYSIS TO IMPROVEMENT OF COOLED TURBINE VANE AND BLADE FOR INDUSTRIAL GAS TURBINE”, ASME Paper GT2018-75669.
- 4) 天然ガスコージェネレーション機器データ2023, 日本工業出版, p.54



池口拓也



久保博史



石原信哉



吉村親樹



竹田敬士郎



谷口智紀



櫻澤俊明



石飛悠希



堀内 豪