

マイクロガスタービン発電機の研究

Research of Micro-gasturbine Generator

新 村 光 一*
Koichi SHINMURA
木 村 英 海*
Hidemi KIMURA

山 口 浩 司*
Koji YAMAGUCHI
加 藤 武 士*
Takeshi KATO

都 築 貞 親*
Sadachika TSUZUKI

要 旨

エネルギー利用効率の向上に寄与する小型分散型電源への適用を目的としたマイクロガスタービン発電機の研究を行った。この発電機は、出力電力をインバータにより商用電力に変換し系統に供給する系統連系仕様である。エンジンには、排気ガスのエネルギーを回収する熱交換器を採用し、構造をコンパクトにすることにより放熱損失ならびに機械損失を低減した結果、エンジン端熱効率 30.8%、システム端熱効率 26.7%を達成できた。また、希薄予混合燃焼方式を採用することにより、排気ガスの低エミッション化をはかっている。エンジン、インバータその他の補機類を、メンテナンス性を損なうことなくコンパクトにパッケージングし、40kW クラスで世界最高の性能と環境性を有するシステムを実現した。さらにエンジン単体で改良を進めた結果、エンジン端熱効率 32.9%を達成することができた。

ABSTRACT

Research on a micro gasturbine generator targeted for a compact distributed energy resource, which would contribute to the improvement of energy usage efficiency, has been conducted. While aiming at a low emission level by introducing a premixed lean burning method, the engine has achieved a generation efficiency of 30.8 and 26.7 percent at the engine and system end respectively by adopting a recuperator and by reducing the heat and mechanical loss specific to its compact structure. Electricity output from the high-speed generator is converted into commercial power and supplied in coordination to the power grid. The engine, inverter and other auxiliary devices have been arranged into one compact package, achieving the highest performance and ambience level in the class (of 40 kilowatts). Further modifications of the engine have improved the efficiency to 32.9 percent at the engine end.

1. まえがき

電力需要は従来そのほとんどが大型の火力・水力・そして原子力発電によって賄われてきた。これらは設備の大型化により高効率化を進められる反面、建設期間の長期化・設備費の増大や、需要地までの遠距離送電ロスという課題を抱えている。電力の世界的な規制緩和と原子力発電所などの環境負荷の増大などにより分散型発電への関心が高まり、そのなかでもマイクロガスタービン発電機は、大量生産によるコストダウン、熱交換器による発電効率や低エミッション燃焼器性能の向上が進んできた結果、経済性・環境負荷低減の期待により注目されている。(1), (2)

2. 研究のねらいと課題

Honda は、より高度な環境技術の実用化に取り組ん

*和光基礎技術研究センター

でおり、その一環としてエネルギー利用効率の向上に寄与し、電力需要の一部を担う分散型電源の研究を進めてきた。

本研究では、1)高効率発電・長寿命による経済性、2)環境にやさしい低エミッション、3)コンパクトパッケージ&静粛性、をコンセプトとしたマイクロガスタービンによる分散型発電(系統連系)システムを実現することを目的とした。以下に課題を示す。

○課題

エンジン

- ・高効率コンパクト熱交換器
- ・シンプルな軸構成のための小型高速発電機
- ・排気ガス低エミッション化のための希薄予混合燃焼器電力変換システム
- ・小型かつ長寿命なインバータ
- ・電気品質向上のための最適制御方法

パッケージ

- ・設置面積の小さいコンパクトパッケージ
- ・メンテナンス性の良さ
- ・静粛性

3. 主要諸元および概要

本発電機システムの主要諸元を Table 1 に、内外観およびシステム構成を Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 に示す。本システムのガスタービンエンジンは、排気ガスのエネルギーを回収する熱交換器を採用し、遠心式の圧縮機とタービンに高速発電機を直結したシンプルな一軸構造とした。

燃料には一般的な都市ガス 13A を使用し、ガス圧縮機により約 560kPa に昇圧し、計量バルブを通しガスタービンエンジンへ供給する。高速発電機で発電された 1.3kHz の高周波交流は、電力変換システムのコンバータ部で直流にされたあと、インバータ部で商用三相交流に変換され、系統に接続される。

Table 1 Major specifications of micro-gasturbine generator

Items	Specifications
Type of output	3 phase 200VAC, 50/60Hz
Rated output (kW)	42 (ISO conditions)
Thermal efficiency (engine end) (%)	30.8 (ISO conditions)
Thermal efficiency (system end) (%)	26.7 (ISO conditions)
Emissions (CO, HC, NOx) (ppm)	< 3
Fuel type	Town gas 13A
Dimensions (W × D × H) (mm)	1506 × 942 × 1501
Weight (kg)	950
Life (hr)	60 000
Noise level (dB(A))	65 (at 1m)

補機のオイル系はエンジン軸のベアリング潤滑と発電機ステータの冷却を行っており、オイルクーラファンはパッケージ内の換気も兼ねている。また、ベアリングのオイルシールでの差圧確保のためにエアポンプを使用している。

パッケージは、Fig. 2に示すように上段と下段に分かれ、エンジンなどの発熱源は上段に、エンジン吸気ダクト・電力

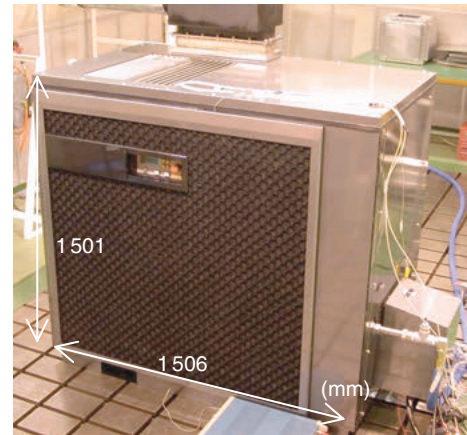


Fig. 1 External view of micro-gasturbine generator

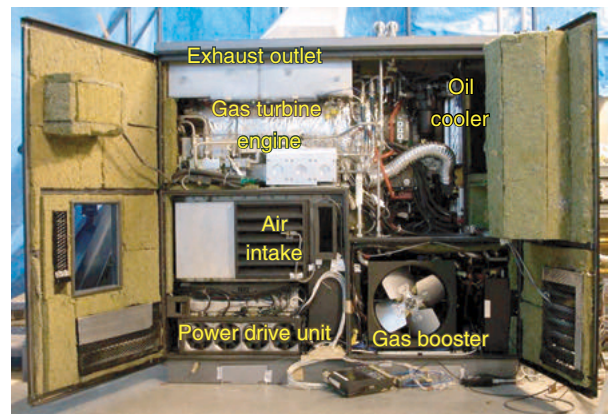


Fig. 2 Internal view of micro-gasturbine generator

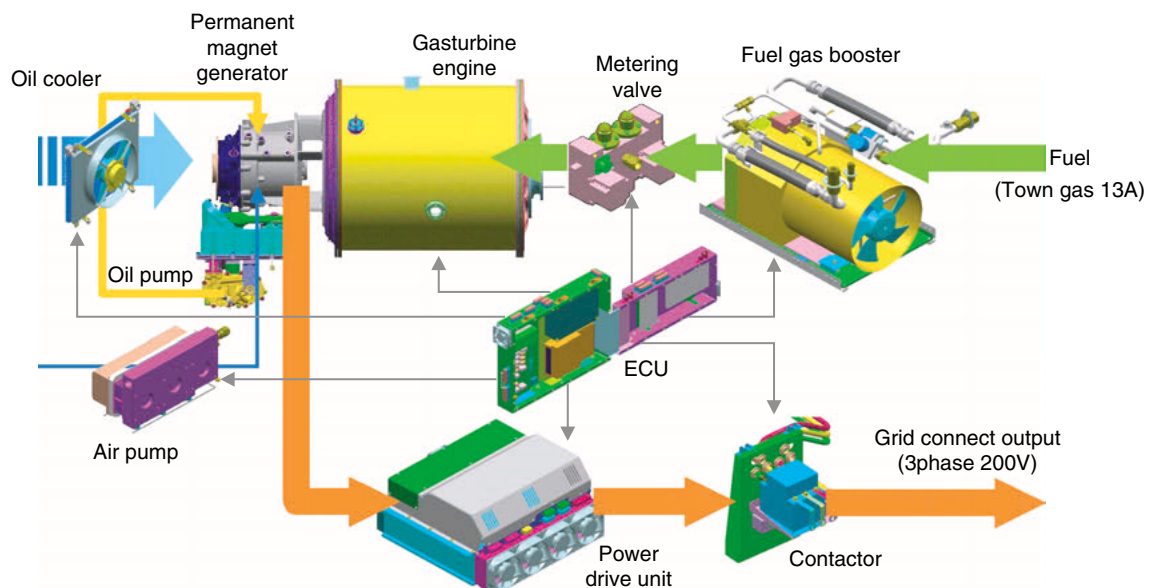


Fig. 3 System diagram of micro-gasturbine generator

変換システム・電装部品などの耐熱性の低いコンポーネントは下段に配置し、効率よく庫内換気を行なえるように設計した。定期メンテナンス時にも前面から全ての部品交換、点検ができるようにコンポーネントを配置し、必要なメンテナンススペースを抑えた。サイズは、40kWクラス発電機では最小である。

騒音は、ダクト部からの音漏れが支配的である。この低減のために各ダクトを吸音材付きの3ベント構造とすることで、65dB(A)/1m(昼間の商業地域で運転可能なレベル)に低減できた。

Fig. 4 にエンジン、システム特性を示す。熱効率率は、標準大気状態において、エンジン端 30.8%、システム端 26.7% を達成した。この性能は、40kWクラスでは最高のレベルである(Fig. 5)。一般にガスタービンの性能は大気温度の上昇により低下するが、エンジン回転数を変化させることによりその影響を抑えた。

エンジンの燃焼器には、燃料と空気の均質な混合気を生産するマルチベンチュリーミキサを用いた希薄予混合燃焼方式⁽³⁾を採用した。この方式により火炎温度を低く抑えな

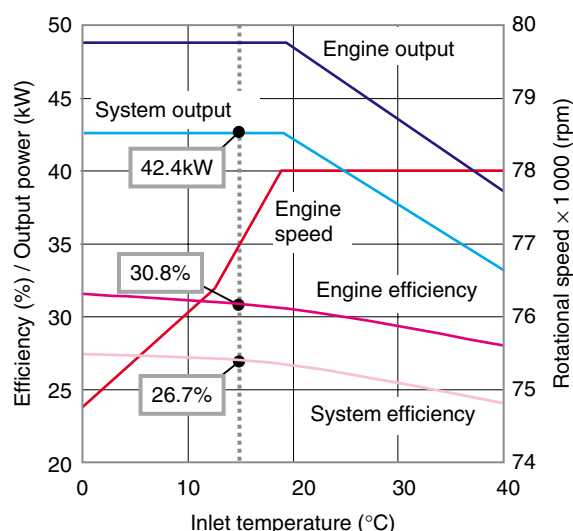


Fig. 4 System and engine performance characteristics

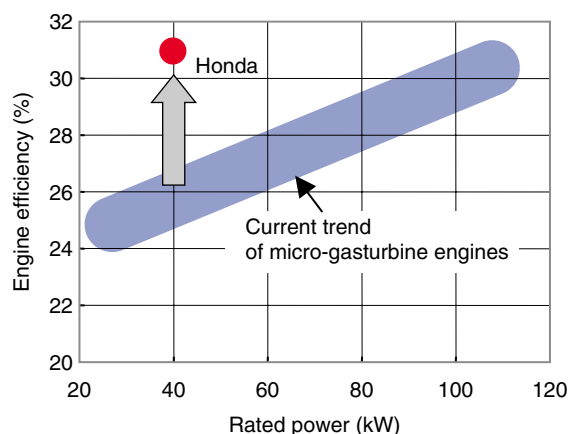


Fig. 5 Honda engine compared with current trend

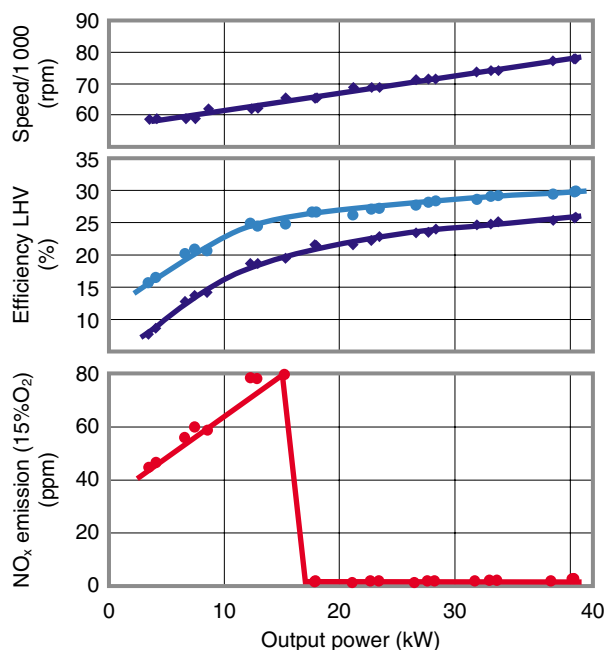


Fig. 6 System emission with efficiency (at inlet temp. 24°C)

が安定燃焼させることが可能となり、エンジン負荷 50% から 100%の広い運転範囲においてエミッション 3 ppm 以下(NO_x , CO, HC at 15% O_2)を達成できた(Fig. 6)。これは、原子力発電を含む全発電所平均⁽⁴⁾を下回る値である。

4. エンジン

一般にガスタービンエンジンは小型化により効率が低下する傾向がある。これは、サイズ、出力が小さくなることによる、1)ロータの先端クリアランスの相対的増加による損失の増加、2)タービン入口温度高温化に対する制約(複雑な冷却構造が取りにくい)、3)ベアリングなどの機械損失の相対的増加、などに起因する。

本エンジンでは、排気ガスの熱を回収する熱交換器を用いた再生サイクル(Fig. 7)を採用することにより、効率の向上をはかった。また、熱交換器を円環形状にした多重管構造を採用した。これにより、高温部を内側に配置し、圧縮機を出た温度の低いエアでエンジン外周部を覆うことができ、タービン出口通路や熱交換器などから外部への放熱損失を

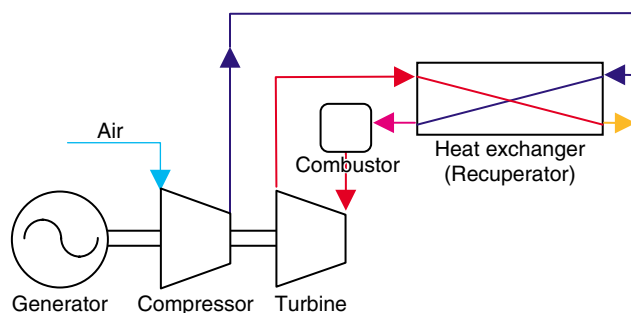


Fig. 7 Flow chart of recuperated gasturbine cycle

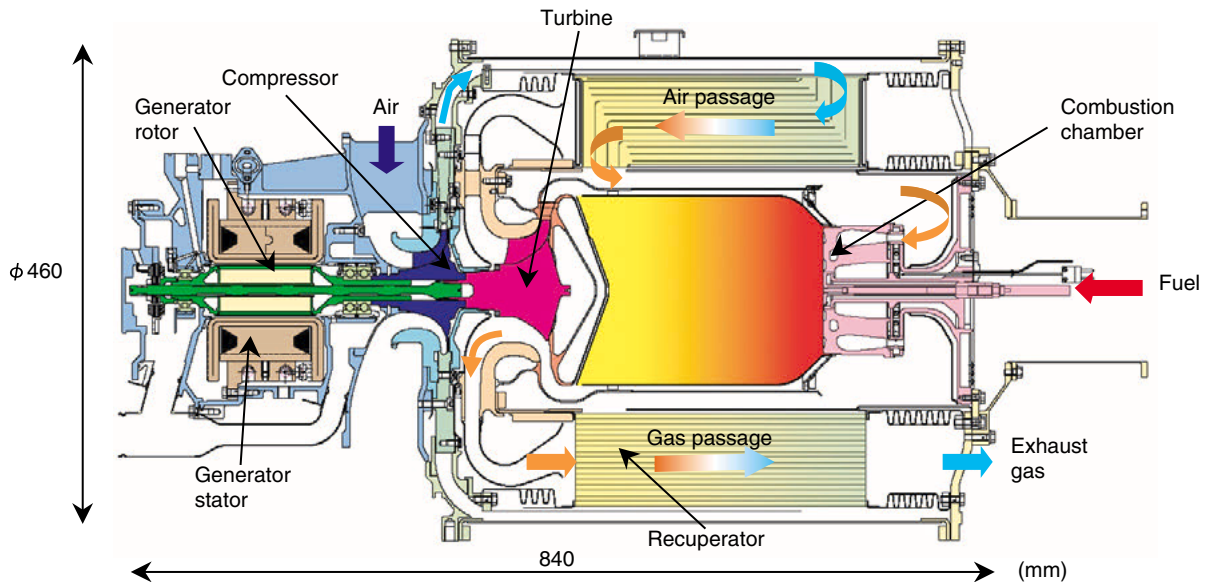


Fig. 8 Cross-sectional view of micro-gasturbine engine

極力抑えた。軸には、遠心式の圧縮機とタービンに高速発電機を直結した一軸構造を採用し、減速機を不要とすることで機械損失を抑えた。エンジン構造図を Fig. 8 に示す。この構造は軸対称であり、温度勾配の大きい高温部品の応力低減にも寄与している。

諸元を Table 2 に、熱交換器の排熱回収によるエンジン効率向上の推定結果に実験結果を対比して Fig. 9 に示す。

Table 2 Engine specifications at ISO conditions

Items	Specifications	
	Version 1	Version 2
Engine speed (rpm)	77 000	
Turbine inlet temperature (°C)	900	
Max. electrical output (kW)	47.8	51.7
Engine efficiency (%LHV)	30.8	32.9
Recuperator temperature efficiency (%)	87.6	90.6
Dimensions (mm)	$\phi 460 \times L840$	
Weight (kg)	145	

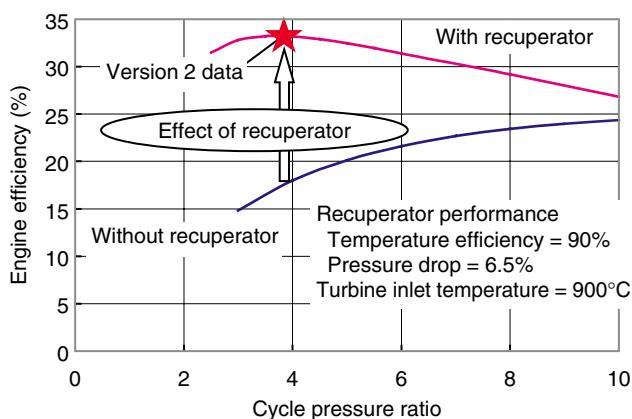


Fig. 9 Relation between cycle pressure ratio and engine efficiency

Version 1エンジンは、システムに搭載し、熱交換器効率87.6%、エンジン端熱効率30.8%である。これに対しVersion 2は、エンジン単体でさらに改良を進め、フリクションの低減や熱交換器効率を90.6%に向上させた結果、エンジン端熱効率32.9%⁽⁵⁾を達成することができた。

ガスタービンエンジンはタービン入口温度(TIT)を高くすることにより効率が上昇するが、高温部品の寿命に与える影響が大きい。本エンジンでは、寿命を考慮しTIT900°Cとし、単体高温回転テストで精度を確認した FEM 解析結果と、運転中のタービン部材温度の実測より 60 000 時間のタービン寿命の見通しを得た。

また、万が一回転体がバーストしても破片がエンジン外に飛び出さないことを実証するため、エンジン過回転バーストテストを行ない安全性を確認した。

以下に主要コンポーネントである熱交換器、高速発電機について説明する。

4.1. 熱交換器

主要諸元及び外観をそれぞれ Table 3, Fig. 10 に示す。円環形状熱交換器には、コンパクトで効率の高い対向流方式の伝熱型を採用した。

Table 3 Recuperator specifications

Items	Specifications
Core size (mm)	$\phi 430 \times L289$
Core weight (kg)	45
Material	SUS304
Plate thickness (mm)	0.1
Flow rate (kg/s)	0.4
Temperature efficiency (%)	90.6
Pressure drop (%)	6.4

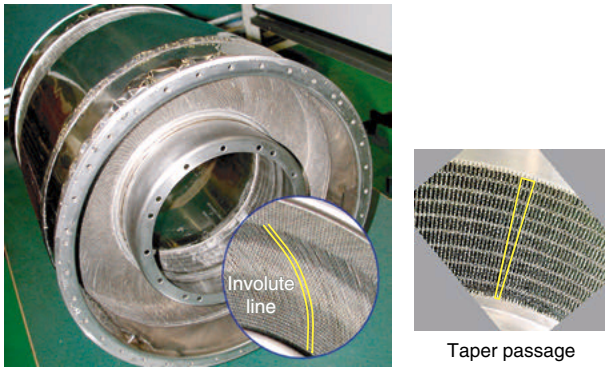


Fig. 10 Front view of recuperator with two different passage types

一般的に熱交換器の効率低下の主な要因は、エアと排気ガスの流量分布の不均一である。流量分布による効率低下の推定結果を Fig. 11 に示す。排気ガスとエアの流量分布が一致する場合をライン A、一致しない場合をライン B に示す。この推定結果をもとに、目標効率 90% を達成するための流量分布の目標値を、標準偏差 0.07 以下とした (Fig. 11: 領域 Q)。

熱交換器を円環にする場合、伝熱板を放射状に配置すると通路幅は内径側が狭く、外径側が広いテーパ通路 (Fig. 10) となり、流量の偏りによって効率が低下する (Fig. 11: P 点)。この偏流を防止するため、どの断面でも通路幅が一定となるインボリュート形状を採用した。また、エア側流路は、流れを転向させることから内径側に流量が偏りやすいため、転向部に流れを制御するリップを配置することにより

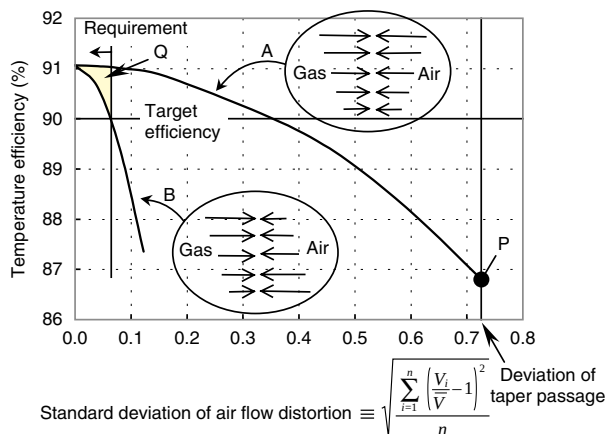


Fig. 11 Calculated effect of flow distortion

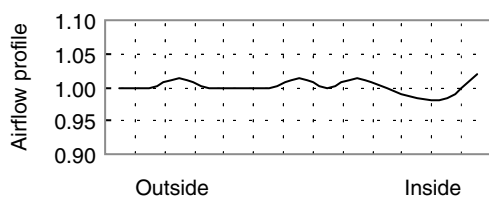


Fig. 12 Air flow profile at 100%N

流量分布を均一化した (Fig. 12)。この確認のため、熱交換器内の部材温度を計測した結果が、Fig. 15 である。温度が入り口から出口にかけて一定勾配で下がり、全体に均一な熱交換が行なわれていることがわかる。

伝熱板はフィンなどの別体パーツを使わないプライマリ構造とした。排気ガス側通路を形成するステンレス板は、フィン状に成形した密着波板とし、エア側通路を形成するリップをプレスしたステンレス板を組み合わせ側面をレーザー溶接して 1 ペアとし (Fig. 13, Fig. 14), 510 枚を円環形状に一体ろうづけして、エア/排気ガスのシールを行って

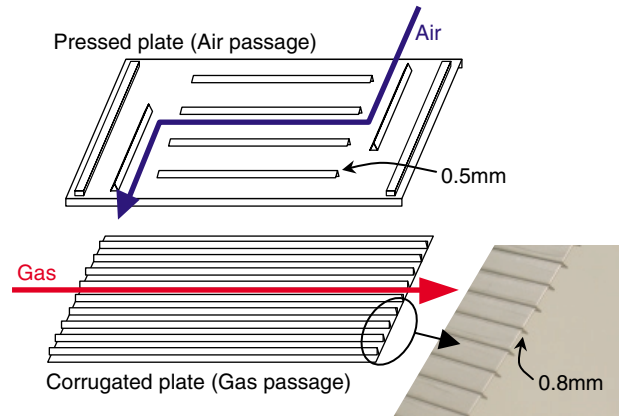


Fig. 13 Plate model of passage

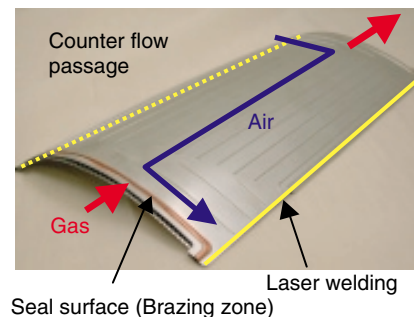


Fig. 14 Laser welded cell (Involute shaped)

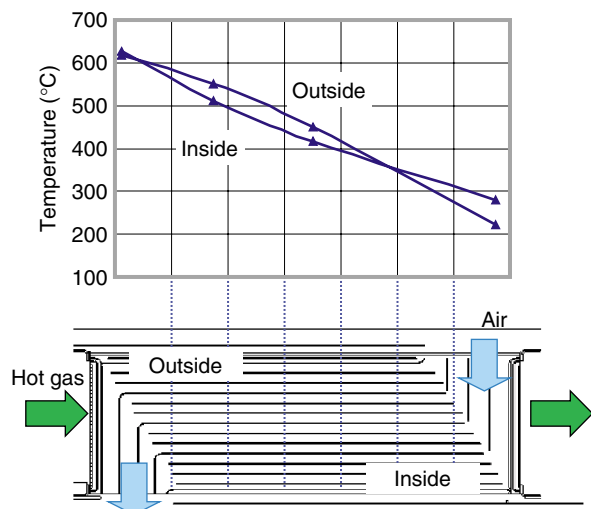


Fig. 15 Measured temperature of recuperator

いる。エア／排気ガス通路高さを 0.5/0.8mm と小さくし、熱伝達率を上げるにより小型軽量化をはかった。シール総延長は伝熱板 510 段でレーザ溶接部 306m、ろうづけ部 122m となるが、リーク量を 1%以下(非シール面積φ2.7mm 以下相当)に抑えた。

偏流防止とリークを抑えたロウ付け製法により、熱交換器の効率は定格で 90%以上を達成することができた。

4.2. 高速発電機

高速発電機は、永久磁石方式でエンジン直結型とした。主要諸元、ロータの構造図をそれぞれ Table 4, Fig. 16 に示す。軸を一体化した場合、軸受け数を減らし機械損失を低減できる反面、軸の曲げ共振を回避するために軸長を短くするとともに、強度の低い磁石を高回転で保持できる構造が必要となる。そして、この制約されたサイズで磁束量を確保し、ロータ渦電流損やステータ損失などを低く抑えることが要求される。

要求される出力に必要な磁束量を確保するため、発電機ロータには、磁束密度の高い永久磁石(Nd Fe B)を採用し、高強度なニッケル・クロム系合金管に焼ばめすることにより高回転においても圧縮荷重がかかる構造とした。

ロータ渦電流損は、効率の低下だけでなくリングを発熱させ、磁石の温度上昇による減磁や、リングの熱膨張による磁石の圧縮荷重低下を招くため、基本機能を損なう恐れがある。ティースを持ったスロットタイプのステータでは、ティース部の磁気抵抗が低く磁束が通りやすいため磁束変動が起き、ロータ表面に渦電流が発生しやすい。この渦電流損への対応として、ティースの無いコア(鉄心)内側に円筒形状にコイルを配置するスロットレスタイプのステータを採用した(Fig. 17)。コイルは、自己融着線を加熱プレス成形している(Fig. 18)。

Table 4 Generator specifications

Items	Specifications
Generator type	Permanent magnet
Rotor size (mm)	φ 48.8 × L90
Magnet material	Nd Fe B
Stator type	Slotless
Electromagnetic conversion efficiency (%)	97

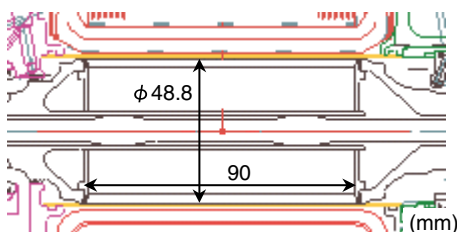


Fig. 16 Cross-sectional view of generator rotor

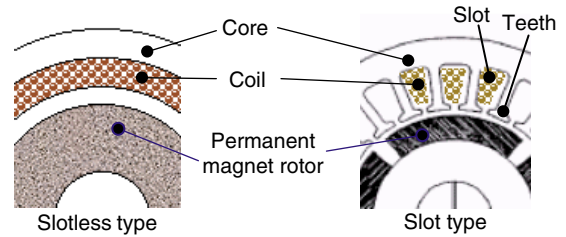


Fig. 17 Structures for slotless and slot stator

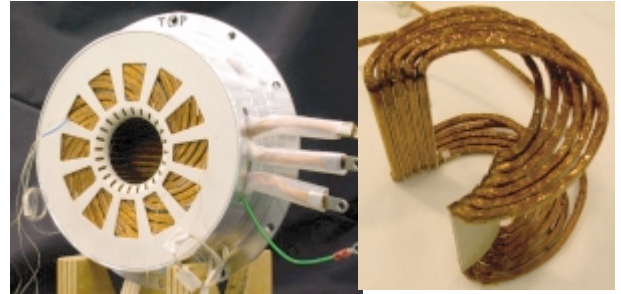


Fig. 18 External view of stator coil

ステータ損失には、コイルの内部抵抗により生じる銅損以外に、交番磁束がコイルを通過する時に起きる磁束の変動によって素線内部に発生する渦電流損と、同相の束線内の各素線間の位相差で発生する循環電流損の二つがある。細い素線(φ0.3)の採用と、素線束を撚り合わせた複合リッツ線を採用することにより両方の損失を小さく抑えている。

このように磁束量の確保と、ロータ渦電流損とステータ損失の低減をした結果、発電機効率 97%が得られた。

5. 電力変換システム

電力変換システムには、系統連系ガイドラインなど^{(6)~(8)}に適合する出力電力の電気品質と、高効率およびコンパクト化が求められる。

達成値および主要諸元を Table 5 に示す。実系統にて計測した電気品質は、力率0.99、総合電流ひずみ率(THD)3.5%であり、系統連系ガイドラインなどのそれぞれの基準値0.95 以上、5%以下を十分にクリアした。高力率であることと、直流平滑部の損失低減等により、効率は定格出力で95.1%を達成した。

Table 5 Electric power control unit specifications

Items	Specifications
Type of control	3 phase PWM control
Output power (kW)	42
Efficiency (%)	95.1
Total harmonic distortion (%)	3.5
Power factor	0.99
Volume (litter)	87
Weight (kg)	98

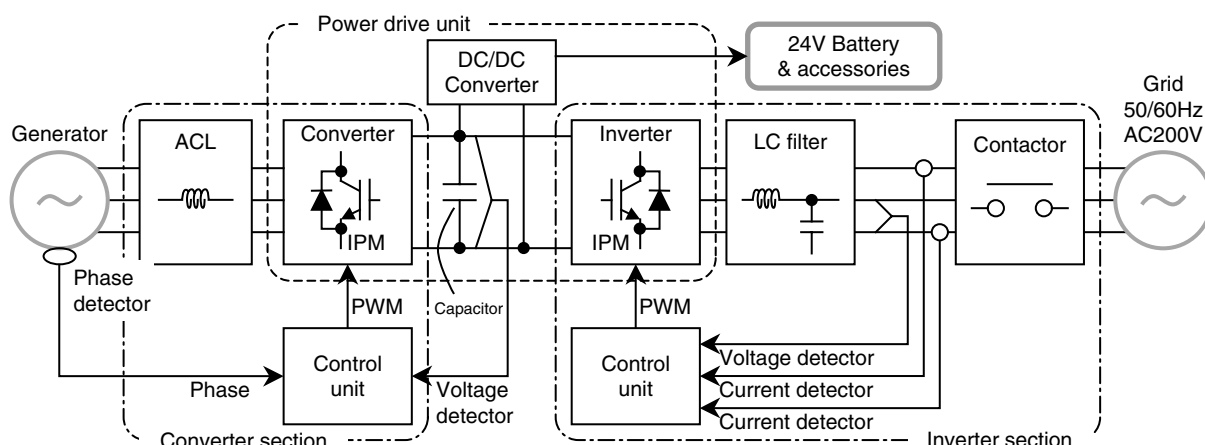


Fig. 19 Block diagram of electric power control system

ブロック図を Fig. 19 に示す。この電力変換システムは、高速発電機からの高周波交流を直流に整流するコンバータ部、直流平滑をするコンデンサ群、直流を商用三相交流に変換し系統連系するインバータ部、および、補機電源用の DC/DC コンバータで構成されている。

電力変換システムの主要部である PDU (Power Drive Unit) を Fig. 20 に示す。発熱の大きいスイッチング素子 (コンバータとインバータ) と DC/DC コンバータを一カ所に集約し、ヒートシンク上に配置することで冷却効率を高め、小型化した。また、コンバータとインバータを一体構成にしたことと、出力制御応答性の向上により、直流平滑コンデンサの充放電損失を低減することが可能となり、極めて小さな容量ながら 60 000 時間もの長い要求寿命を確保しつつ、高い効率を得ることができた。

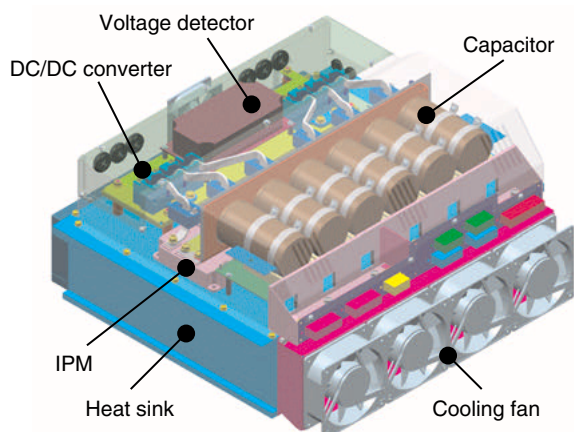


Fig. 20 Detail of power drive unit

5.1. コンバータ部

高速発電機の交流電圧を直流変換する上で、一般的なダイオード整流を用いたシステムでは、低回転では直流電圧が低く系統への電力供給ができない。また、エンジンの始動時に発電機に通電してモータとして作動させるためのインバータを、別途設ける必要があるなどの欠点がある。

一方、PWM (Pulse Width Modulation) コンバータ方式を用いると、回転数によらず任意の直流電圧を生成して低回転域から高回転域で、系統への電力供給が可能である。さらに、インバータ動作を行うことでスタータ機能も有することができ小型化がはかれる。以上の理由から、本コンバータ部ではこの方式を採用し、さらに各相電流をベクトル制御することにより、幅広い運転領域において高効率かつ安定な動作が可能となった。

5.2. インバータ部

インバータには、前述の系統連系ガイドラインなどに適合した電気品質 (力率・ひずみ率など) や単独運転検出等の異常時の系統保護機能が求められる。その電気品質を満たすために、系統電圧の高精度な位相検出と高速な電流波形整形制御を用いた。その結果、低次の高調波を小さくでき、出力段の LC フィルタはスイッチングの高周波を除去する程度で充分であり、小型化がはかれた。また、系統連系保護機能に必要な各種処理をソフトウェアで行い、専用回路部品などを新たに追加することなく求められる機能を満たすことができた。

6. エンジン制御

発電機には、定格出力だけではなく、部分出力 (定格以下) での連続発電も要求される。本機のような軸式ガスタービンエンジンで出力を制御する場合は、Fig. 21 に示すように回転数固定でタービン入口温度 (TIT) およびタービン出口温度 (TET) を下げる方法と、回転数を下げて温度上限付近で運転する方法の二つがあるが、エンジンの特性上、効率の低下が少ない後者を採用した。

一方、ガスタービンエンジンは、大気温度 (T1)、大気圧 (P1) により、TIT または TET が上限になるときの回転数が増えるため、大気状態によらず効率のよいラインをトレースして運転できる制御が求められる。そのために、TET

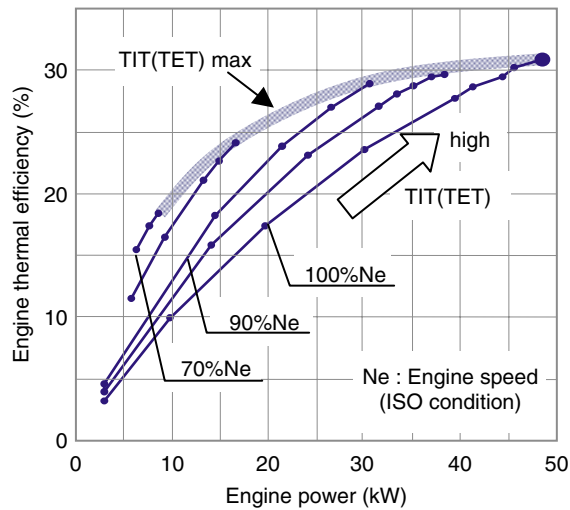


Fig. 21 Engine performance

などの温度を直接フィードバックする方法を用いると、その過渡特性のため制御周期を短くすることができず、制御の安定性や速い過渡応答性が得られない。以上の理由から、エンジンの性能マップデータを用いて回転数を制御する手法を採用し安定性を向上させた。

Fig. 22にこのエンジン制御の構成を示す。回転数と出力に対する TIT および TET の特性をマップデータ化し、そのマップとセンシングされた T1 と P1 から、そのときの適正な作動ラインを導出している(上側のブロック部)。そしてこの作動ラインと要求出力値から、目標とする回転数を求めて制御を行っている(下側のブロック部)。T1, P1は急激に変化しないため、この適正作動ラインの更新間隔は、

回転数制御の制御周期より十分長くすることができ、演算負荷を軽減できる。この制御方法により、定格出力時の回転数変動を $\pm 100\text{rpm}$ 以下にすることができた。

また、長期間の運転などによりエンジン特性が徐々に変化する場合があるが、TET をセンシングして、マップから想定される TET との差から、初期に設定したマップ自体の補正を定期的に行ない、このような経時変化に対応している。

7. まとめ

エネルギー利用効率の向上に寄与する小型分散型電源への適用を目的としたマイクロガスタービン発電機の研究を行ない、以下の結果を得た。

- (1) 要求寿命と安全性を満たし、かつ高効率な再生式サイクルエンジンを搭載した発電機システムを開発し、エンジン端熱効率 30.8%、システム端熱効率 26.7%を達成することができた。これは、40kW クラスとして現在報告されている世界最高の値である。さらにエンジン単体で改良を進めた結果、エンジン端熱効率 32.9%を達成することができた。
- (2) マルチベンチュリミキサを採用した希薄予混合燃焼器により、出力 50～100%の広い範囲において、エミッションを 3ppm 以下にできた。これは、原子力発電を含む全発電所平均を下回る値である。
- (3) エンジンやインバータなどのコンポーネントを、熱、メンテナンス性を考慮しコンパクトなパッケージにまとめ、65dB(A)/1m の低騒音を達成した。

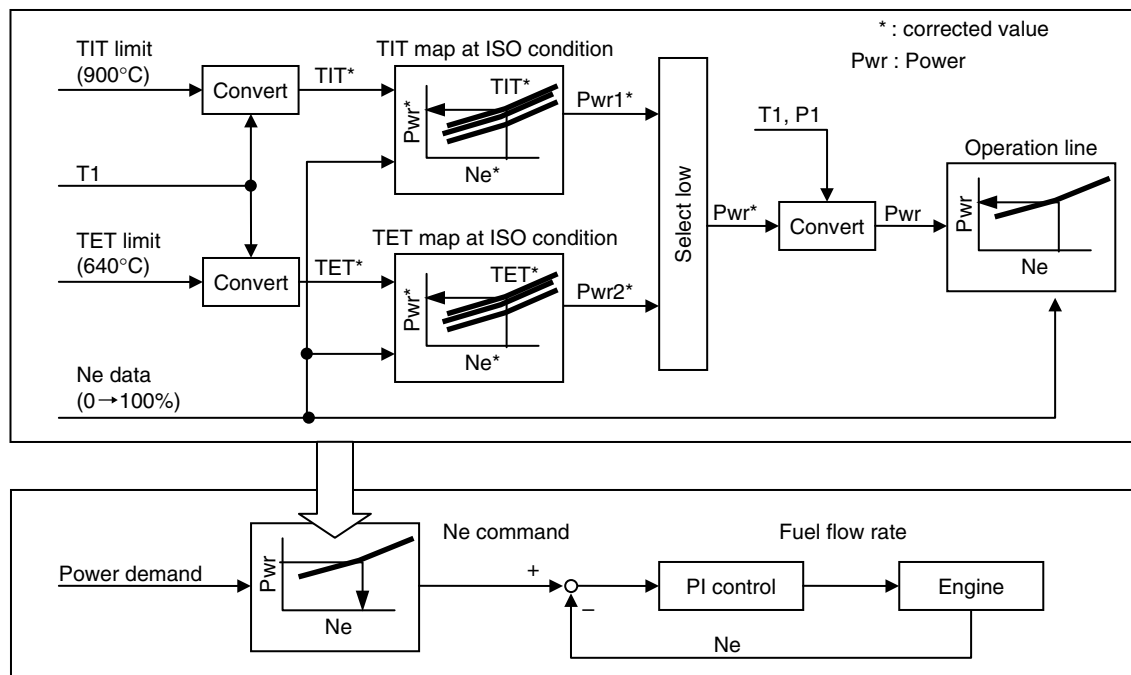
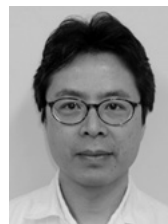


Fig. 22 Engine control block diagram

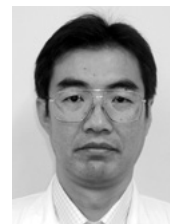
8. 参考文献

- (1) 吉識晴夫: マイクロガスタービンの開発の状況と課題,
日本ガスタービン学会誌 Vol.29 No.3, p.123-128 (2001)
- (2) 三浦千太郎: 小型分散型電源市場でのマイクロガスタービンの最近の動向, 日本ガスタービン学会誌
Vol.29 No.3, p.134-140 (2001)
- (3) 山崎敦, 黒川正敏, 井上勉, 村上尚: 天然ガス希薄予混合超低エミッション燃焼器の研究, Honda R&D
Technical Review Vol.15 No.2, p.85-92 (2003)
- (4) 東京電力(株): 環境行動レポート 2002, p.113 (2002)
- (5) Koichi Shinmura: Microturbine Research at Honda,
Presented in 2003 ASME TURBO EXPO Panel session
(2003)
- (6) 資源エネルギー庁: 解説 電力系統連系技術要件ガイド
ライン 98 (1998)
- (7) 社団法人日本電気協会: 分散型電源系統連系技術指針,
JEAG9701 (2001)
- (8) 財団法人電気安全環境研究所: 小型太陽電池発電システム系統連系保護装置等の試験方法(1993)

■ 著 者 ■



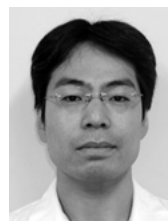
新村 光一



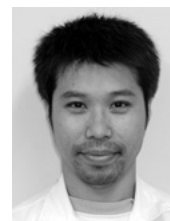
山口 浩司



都築 貞親



木村 英海



加藤 武士