

250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステム向け マイクロガスタービンの開発

Development of the Micro Gas Turbine for 250kW Class SOFC-MGT Hybrid Systems

河野 雅人^{*1}
KAWANO Masato

新井 啓介^{*1}
ARAI Keisuke

安井 芳則^{*1}
YASUI Yoshinori

ABSTRACT

This report is about describes development and a proof evaluation of the micro gas turbine to use for the hybrid system which coupled micro gas turbine with SOFC(Solid Oxide Fuel Cells). Gas turbine supplies compressed air to SOFC. Gas turbine generates electricity with the fuel which finished a reaction in SOFC and with the air which finished a reaction in SOFC. We remodeled the main body of gas turbine to fit SOFC system, and developed the combustor which could burn with low-calorie fuel from SOFC. We developed the control to link SOFC, and to control the gas turbine for SOFC.

Key words : Micro Gas Turbine, Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs), Hybrid System, Compressor, Combustor, Control

1. はじめに

株式会社トヨタタービンアンドシステムは主にコージョネレーション用50kW級マイクロガスタービン（以下MGT）と300kW級MGTを製造、販売してきた。ガスタービンの用途利用開発として50kW級のMGTをベースとして2002年よりMCFC（熔融炭酸塩型燃料電池）-MGTハイブリッドシステムの開発に参画し、5000時間以上の運転実績を積んだ。

その後、以前よりSOFC（固体酸化物型燃料電池）ガスタービン複合発電システムに取り組んでいた三菱重工業株式会社（現三菱日立パワーシステムズ株式会社）とトヨタ自動車株式会社においてSOFCとMGTハイブリッドシステムの開発を2008年より開始した。トヨタ自動車株式会社（トヨタタービンアンドシステム）はMGT本体およびその制御、三菱重工業株式会社においてSOFCおよび補機ユニット（BOP）と全体制御を担当している。2009年より三菱重工業の長崎造船所においてシステム試験を開始、2012年より東京ガス株式会社千住テクノステーションにおいて連続運転試験を実施し4100時間以上のシステム運転時間を達成した。さらに2015年より国立大学法人九州大学において、より高出力密度の新型セルスタック（15式セルスタック）を利用した実証

試験機の運転を開始し、現在運転を継続中である。

本報告ではSOFC-MGTハイブリッドシステムに使用するガスタービンの開発内容と評価状況について報告する。

2. SOFC-MGTハイブリッドシステムフロー

SOFCとガスタービンを組合せたシステムをSOFCとガスタービンという異なるエネルギー変換プロセスを組合せたことからハイブリッドシステムと呼んでいる。ハイブリッドシステムのシステムフローを図1に示す。

SOFCはセル内で酸化剤（空気）と還元剤（燃料）を反応されることにより電力を取り出しており、酸化剤および還元剤を連続的に供給する必要がある。燃料電池への運転圧力を高めることにより、燃料電池の出力を向上させることができる。ガスタービンの圧縮機は、SOFCに高圧の空気を供給するブロア（カソードブロア）の役割を果たしている。またSOFCにおいて反応を終えた空気を排空気と呼んでいるが排空気は高い圧力と温度を維持しておりこの排空気をMGTのタービンに供給することで電力に変換でき、システム効率の向上に貢献できる。本システムではMGTのタービン出口に再生熱交換器を設置して、MGT排気を利用してSOFCへの圧縮空気の加熱をおこない、SOFCへの空気を加熱するエネルギーの低減を図っている。

本システムでは燃料極内の高温環境下で蒸気と燃料を供給することにより内部改質を実現している。燃料及び蒸気は燃料極側に供給され循環するが、SOFCの燃料極で反応を終えた可燃成分を含む一部がガスタービンに供

原稿受付 2016年9月5日

査読完了 2017年4月6日

*1 (株)トヨタタービンアンドシステム
〒471-8573 豊田市元町1番地
トヨタ自動車(株) 元町工場内

給される。SOFC反応後のMGTに供給される燃料を排燃料と呼び、ガスタービンの燃料として再利用される。

システムの定格運転中はSOFCとのシステムバランスを考慮してMGTは部分負荷（MGT発電出力20～30kW）で運転される。

システム運用において、起動時のSOFC昇圧とSOFC昇温についてMGTを高負荷で運転し、起動時間の短縮に貢献している。また停止時についてもMGTを低負荷運転することによりシステム全体の冷却をおこなっている。本システムのMGTはSOFCバイパス回路を使用することにより単独運転が可能である。

3. SOFC（固体酸化物型燃料電池）

燃料電池は燃料の持つ化学エネルギーを直接電力に変換することができるが、使用する電解質により方式が分類される。SOFCは電解質としてセラミックスで構成され、高い動作温度で作動する燃料電池である。高い運転温度が必要だが、発電効率50%以上の非常に高い効率を得ることができる。三菱日立パワーシステムズにおいて開発を進めているSOFCは、円筒形セルスタックを組合せカートリッジを構成し、複数カートリッジを組合せてモジュール化、モジュールを圧力容器に収めた構成となっている（図2）。高い空気圧力において運転が可能であり、モジュールの組合せにより出力を変更でき、ガスタービンの空気量に合わせた出力構成が可能である。

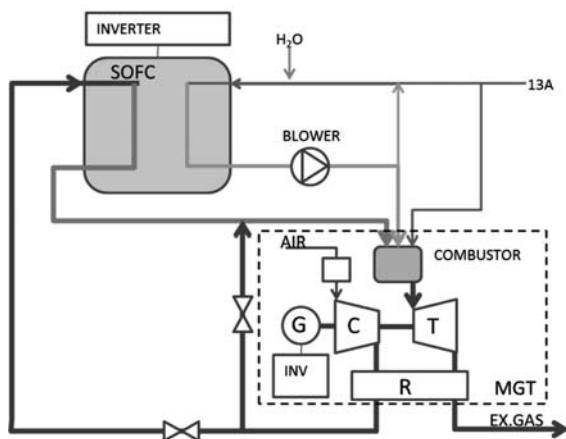


Fig. 1 Flow diagram of SOFC-MGT hybrid system.

4. 50kW級MGT

50kW級MGT（TG051R）は2001年よりコージェネレーションシステム用として販売を開始、150台以上の販売と累計300万時間以上の運転実績がある。

エンジン仕様を表1に示す。エンジン構成として遠心圧縮機1段とラジアルタービン1段で構成されており、軸受の潤滑はオイル潤滑をおこなっている。都市ガスやLPG、灯油に対応した各燃焼器を準備しており、都市ガスは予混合方式、LPG、灯油仕様は拡散燃焼方式を採用している。またプレートフィン式の再生熱交換器を使用することによりガスタービンの排熱から燃焼用圧縮空気を加熱することで熱効率を高めている。ガスタービンにおいて発生した動力は減速機を介さず、エンジン同軸上に配置された高速発電機を用いてエンジン回転数から直接電力変換を行い、インバータを利用して系統に接続している。

50kW級ガスタービンはコージェネレーションシステムとしてパッケージ化されておりガスタービン本体、再生熱交換器、制御盤、連系インバータ、燃料ガス圧縮機、さらに簡易温水ボイラを内蔵したオールインワンパッケージとなっている（図3）。今回250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステム向けのガスタービンのベースとしてTG051Rを使用している。

Table 1 Specifications of Micro Gas Turbine

エンジン型式	TG051R
形式	再生開放サイクル 1軸式
定格軸出力	57 kW (15℃)
定格回転速度	80000 min ⁻¹
圧力比	3.6
空気流量	0.493kg/s
圧縮機	遠心式 1段
タービン	ラジアル式 1段
燃焼方式	希薄予混合燃焼
排気温度	650℃
潤滑油	合成油
起動方式	電気式
発電機	インバータ式高速発電機

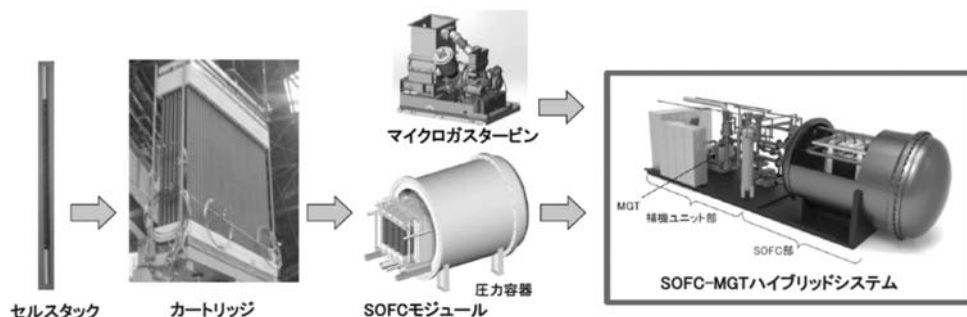


Fig. 2 Configuration of SOFC-MGT hybrid system using segmented-in-series tubular type cell-stack.
(It was provided by MHPS)

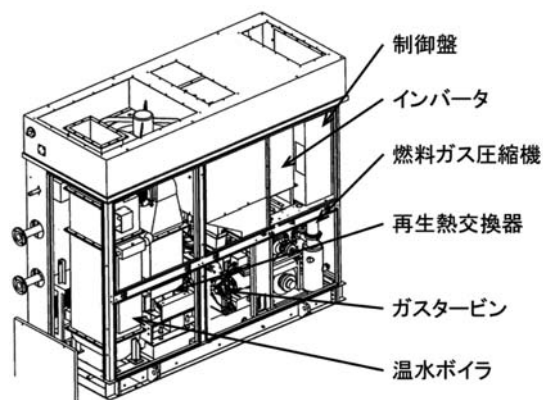


Fig. 3 50kW Class Micro Gas Turbine.

5. システム適応のためのMGT変更点

5.1 ガスタービン本体

SOFC-MGTハイブリッドシステム向けのMGTの断面図を図4, SOFCから供給される排空気および排燃料の条件を表2に示す。

MGTはSOFCから排空気と排燃料が供給されることになるが, SOFCの排燃料の熱量は都市ガスの1/18と非常に低く, 流量はMGTの定格空気流量に対して8.5%と非常に多い。SOFCの排燃料を供給した場合, タービン側の空気流量が増加し, さらにSOFCの圧損も加わるため, 圧縮機の圧力が上昇し圧縮機のサージに近づくことになる。MGT作動域におけるサージを防止する為, 圧縮機側の形状を変更し小容量化することで対応した。コジェネ向けのTG051Rと比較して8%の空気流量低減を図っている。空気流量低下に伴い, 通常MGT性能としては最大出力が10%程度低下する(図5)。

SOFCへ圧縮空気を供給する為, 再生熱交換器の構造を変更し圧縮空気を外部に取り出せるように形状の見直しをはかった。あわせてSOFCからの排空気をMGTに供給できるようにエンジンハウジングの変更をおこなっている。

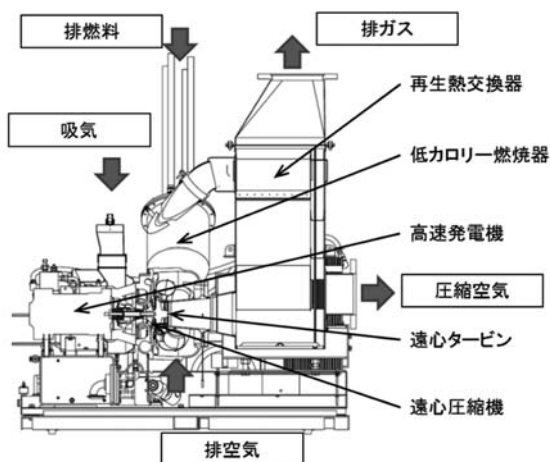
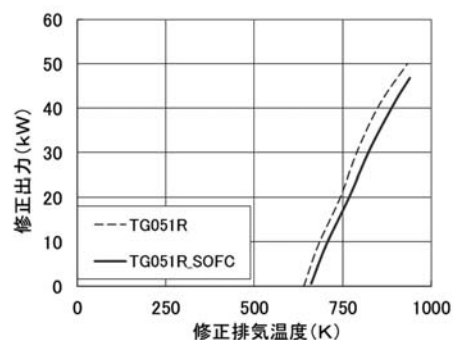


Fig. 4 Micro Gas Turbine cross section view

Table 2 Gas condition from SOFC.

	状態		条件
	温度	℃	
排空気	流量	Nm ³ /h	564
	熱量	MJ/Nm ³	1270
排燃料	温度	℃	300
	流量	Nm ³ /h	115.7
	熱量	MJ/Nm ³	2.2



(修正：大気15℃条件に修正した値)

Fig. 5 Power decreasing TG051R for SOFC

5.2 低カロリー燃焼器

SOFCから供給されるガスの条件を表2に示す。燃料として使用する排燃料中の可燃成分は水素, COなどにより構成されているが, SOFCにおいて反応が終了したガスであり, 可燃成分が減少し, 水分が多いためボリウムが大きくかつ熱量が非常に低くなっている。そのため通常の都市ガス燃焼器では燃焼が困難であった。さらにシステム効率を高めるためMGTの燃焼器内の火炎を維持するためのメイン燃料 (パイロット燃料) を最少にする必要があった。SOFCの排空気はSOFCにおいて酸素が消費されるため酸素濃度が15% VOL程度まで減少しており, このため低酸素化下において低カロリー燃料を安定的に燃焼するために専用燃焼器を開発した。燃焼器の構造を図6に示す。燃焼器は都市ガスを供給し, 火炎を維持するパイロット噴孔と, 低カロリーな排燃料を供給する排燃料噴孔を個別に配置しており噴孔形状, 配置, スワール等パラメータについては解析および実験により形状を決定した。また低カロリー燃料の燃焼時間を確保するために燃焼室容積をコジェネ用と比較して約2.5倍に大型化している。SOFCとの連係運転中は部分負荷運転が想定されており, 部分負荷時燃焼室内の温度を確保する為, 都市ガス仕様の予混合燃焼器で実績のある無冷却ライナーを採用している。燃焼器については社内に設置したSOFC模擬試験ベンチにおいて模擬排燃料の条件下による試験を実施し, SOFC連係条件下における燃焼器および制御の適合を図った。図7に模擬排燃料による試験結果を示す。SOFC連係条件下における模擬排燃料ガス (熱量条件あわせたガス) をMGTに供給しMGTのメイン燃料である都市ガス (13A流量) が減少しているが, MGTの発電は維持できていることが確認できる。

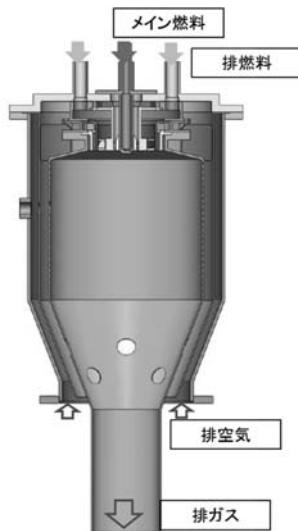


Fig. 6 Combustor cross section view

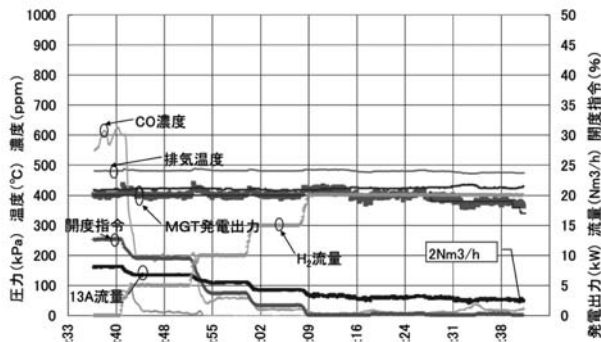


Fig. 7 Combustion test result

5.3 制御

SOFCとの連係運転をおこなうため、専用の制御を開発した。本制御ではMGTのメイン燃料（13A）制御でMGTの負荷を制御する通常運転モードとSOFCとの連係運転をおこなうCC（コンバインドサイクル）運転モードを切り替えて運転をおこなう。CC運転モードではMGTの燃料制御とMGTの発電出力制御を併用した運転制御となっておりSOFCからの排燃料熱量の変動にも追従できる制御となっている。図8にCC運転モードの切替前後の運転チャートを示す。切り換え前は燃料制御

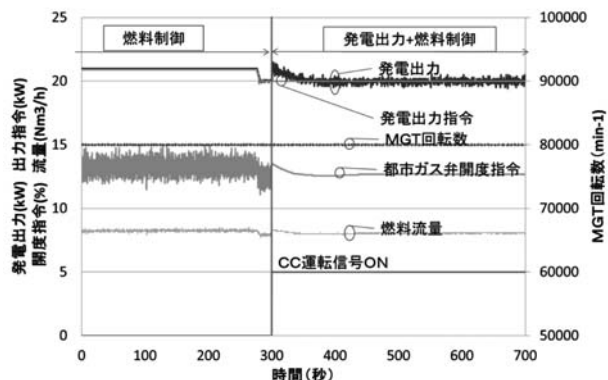


Fig. 8 Operation mode change

（都市ガス弁開度指令）においてエンジン回転数を維持する制御がされているが、切替後は連系インバータへの発電出力を制御し、回転数を維持するように制御している様子が確認できる。CC運転モードにおいてはMGTのメイン燃料を絞り燃料調量弁の最小開度で運転することにより、SOFCシステムとしての高効率運転が可能となる。

6. 実証評価

2009年より三菱重工業株式会社の長崎工場内に設置された、SOFC評価設備においてシステム構成確認試験と制御開発を行った。2012年以降、各フィールドにおいて実証評価を開始した。

6.1 10式実証試験

2012年より東京ガス株式会社千住テクノステーション内に設置された10式実証評価機（図9）において運転評価を開始、4100時間の連続運転、発電効率50.2%（LHV）を達成した（図10）。その間、SOFC側、MGT側に異常発生することなく運転することができた。連続運転試験終了後にMGTの燃焼確認試験を実施し、メイン燃料低減状態においても火炎が維持できることを確認した（図11）。

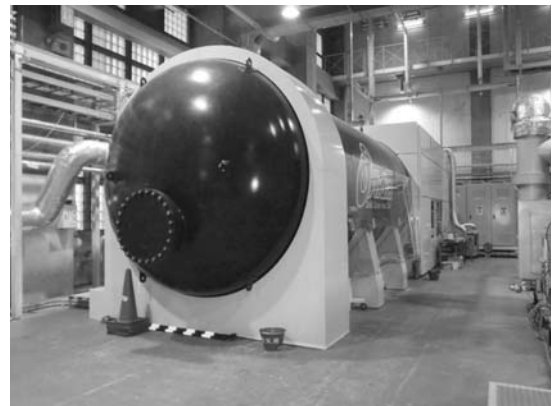
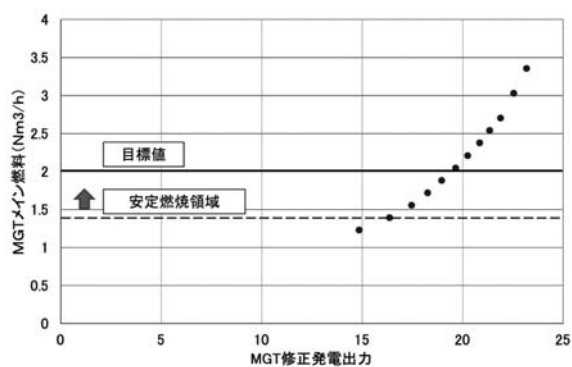


Fig. 9 Appearance of model 10 SOFC-MGT Installed at the Tokyo Gas Co.,Ltd. Senju Techno Station (It was provided by MHPS)



Fig. 10 Long term behavior of model 10 SOFC-MGT hybrid system installed at Tokyo Gas Co.,Ltd.'s Senju Techno Station (It was provided by MHPS)



(MGT修正発電出力：大気15℃条件に修正したMGT発電出力)

Fig. 11 Experiment to reduce main fuel

6.2 15式実証試験

2015年より国立大学法人九州大学伊都キャンパス内NEXT-FC内に15式実証評価機を設置し評価を開始した(図12)。15式実証評価機は細径、長尺化した15式セルスタックを採用し、密充填することによりSOFC圧力容器の小型化をはかると共に、補機ユニットのコンパクト化をはかったシステムである。10式システムまではMGTパッケージ全体をSOFCの補機ユニット内に設置していたが、15式においてはMGTのパッケージを廃止し、MGTエンジンユニット単体のみをSOFCの補機ユニット内に設置するように変更した(図13)。MGT制御盤についてはSOFCの盤内にMGT用の連系インバータとともに納められている。

2015年5月より運転を開始し、瞬低、周辺設備トラブル、熊本地震等によるシステムトリップに見舞われたが、システムは安全に停止し、ただちに再起動をおこない運転を継続している。現在9000時間以上の運転時間と発電効率54% (吸気温度15℃換算LHV基準) を達成している。

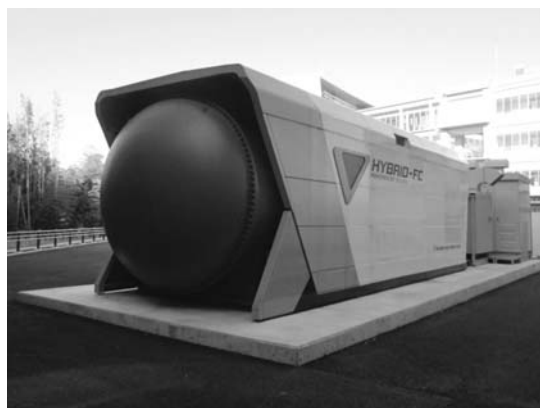


Fig. 12 Appearance of model 15 SOFC-MGT hybrid system installed at the Next-Generation Fuel Cell Research Center (NEXT-FC) in Kyushu University (It was provided by MHPS)



Fig. 13 MGT installed in SOFC

7. 今後の展開

2016年より実証評価としてさらに複数台のシステム評価をする予定となっており、各サイトにおいて運転評価を実施していく計画である。各実証評価機においてシステムの信頼性、機能の向上を図ると共に、実機運転による機器の耐久性の確認を実施していく。これらの実証評価からのフィードバックを活かし商品性を向上させ、2017年度より本システムの市場投入を目指している。

7.1 燃料多様化

ガスタービンは燃料多様性が高い熱機関といわれており、コジェネ用MGTにおいても様々な燃料に対応してきた。SOFCは内部改質において燃料の改質をおこない、さらに水素だけでなくCOも発電に利用できることからバイオガスや水素、LPGなどの燃料多様化に対応し易いシステムとなっている。これらのことからハイブリッドシステムにおいても燃料多様化に優れたシステムの構築が可能と考えられる。ただし燃料種別により排燃料組成の変化や、SOFCシステムバランスによる排空気側条件の変化が推測されるため、今後燃焼確認試験および適合開発を進めていく計画である。

7.2 1000kW級システム

これまでの開発は50kW級MGTとSOFCの組合せであったが、300kW級MGTとSOFCの組合せにより1000kW級(メガワット級)のSOFC-MGTハイブリッドシステムとなる。今後メガワット級開発を国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託開発として実施する予定である。2017年にかけてメガワット級SOFC専用のMGTの試作をおこない、組合せ評価を実施する計画である。

8. おわりに

これまで250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステム向けにガスタービンの開発をおこない実証評価を実施してきた。SOFCシステムにMGTを適応する為、ガスタービンの改造および専用燃焼器、専用制御の開発を実施した。実際のSOFCとの組み合わせ実証試験において所定の性能を発揮するとともに、安定した運転を実現

し、9000時間以上の運転を継続している。今後、SOFC-MGTハイブリッドシステムの市場普及を通じて高効率な発電システムによるCO₂の削減、水素社会実現に貢献していきたいと考えている。

謝辞

本報告は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の共同研究等の成果を含んでおり、関係各位のご指導とご協力に感謝を申し上げます。

またSOFCに関する技術情報のご教授および開発機会を与えて下さいました三菱日立パワーシステムズ株式会社、プロジェクトのご支援いただいたトヨタ自動車株式会社、評価にご協力いただきました東京ガス株式会社、国立大学法人九州大学、その他部品メーカー等関係会社、すべての関係各位にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 富田和男, 北川雄一郎 “MHPSにおけるSOFC-マイクロガスタービンハイブリッドシステムの開発状況” ガスタービン学会誌Vol.44 No.4 2016.7 pp.247-252.
- (2) 安藤喜昌, 大澤弘行, 水原昌弘, 入江弘毅, 浦下靖崇, 池上卓夫 “SOFC-マイクロガスタービン (MGT) ハイブリッドシステム 九州大学向け実証機の運転状況 三菱重工技報 Vol.52 No.4 2015.
- (3) 君島真仁, 加幡達夫 “マイクロガスタービン-SOFCハイブリッドサイクル” ガスタービン学会誌Vol.37 No.3 2009.5 pp.155-161.
- (4) 樋口新一郎, 杉山末吉, 中野吉信, 大久保陽一郎 “50kW級TG051ガスタービンの開発” ガスタービン学会誌Vol.29 No.3 2001. pp.146-151.
- (5) 塩田哲男 “マイクロガスタービンにおける軸受・潤滑システムについて” ガスタービン学会誌Vol.43 No.4 2015.7 pp.256-261.