

マイクロガスタービン・分散エネルギーシステムの現状と課題\*

Current Status and Perspective of Micro Gas Turbine and Distributed Energy System

君島 真仁\*\*

(Shinji KIMIJIMA)

笠木 伸英\*\*\*

(Nobuhide KASAGI)

1. はじめに

2002年1月31日に資源エネルギー庁総合政策課より2000年度のエネルギー需給実績が発表された<sup>1)</sup>。図1は、その中の「エネルギー起源の二酸化炭素排出量の推移」を図示したものである。過去5年間には大きな変動は見られないが、1990年レベルと比較すると、2000年は10.2%の増加となる。二酸化炭素が温暖化に対して如何なる影響を及ぼしているのか、未だ明確に認めうる科学的知見は十分ではないとはいえ、二酸化炭素排出量削減は、限りあるエネルギー資源の高度利用を示す一つの指標として重要な意味を持つものと言えよう。

一方、部門別の最終エネルギー消費に目を向けると、産業部門に比較して民生部門の増加の割合が高く、とりわけ家庭部門におけるエネルギー消費量の増加が著しい。市民生活におけるアメニティの追求とエネルギー消費の抑制を同時に満たす社会の実現のための、一つの有力オプションとして分散エネルギーシステムに大きな期待が寄せられている。

分散エネルギーシステムは、エネルギー需要に近接して設置することができ、電力供給と同時に熱エネルギーを供給することにより、一次エネルギーの総合利用率向上を可能とする。既存の大規模集中発電とその電力供給網との適切な共存を実現すること

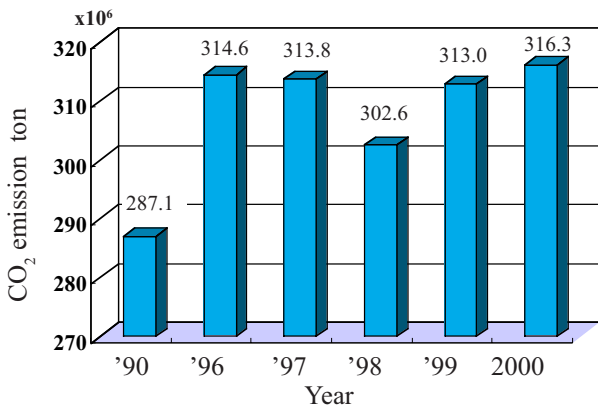


図1 エネルギー起源の二酸化炭素排出量の推移 (炭素換算排出量 百万トン)

\* 原稿受付 2002年2月28日  
 \*\* 芝浦工業大学システム工学部機械制御システム学科 (〒330-8570 さいたま市深作307)  
 \*\*\* 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 (〒113-8570 文京区本郷7-3-1)

が、エネルギー起源の二酸化炭素排出量削減の実効ある対策になりうると期待される。

このような背景から、現在、分散エネルギーシステムを支える要素機器の開発が加速している。本稿では、分散エネルギーシステムの意義を見直し、近い将来に普及する可能性が高いマイクロガスタービン(μGT)を対象としてその技術の現状を概観し、今後の課題について私見を述べる。

2. 分散エネルギーシステム

2.1 大規模集中型から小規模分散型へ

19世紀の米国において、エジソン、テスラ、ウェスティングハウスらが発電・送電技術の激しい開発競争を展開する中で様々な新技術が創出され、それを基に電力供給が事業化された<sup>2)</sup>。当初は分散発電であったが、損失の少ない交流送電技術の進歩が発電所の大規模化を加速した。我が国では、高度経済成長期に、スケールメリットを求めて発電所が大型化の一途を辿り、人口の稠密度が高い都市部から離れた地に巨大な発電所を建設し、電力消費地である都市部まで送電する形態が確立され、市民生活の水準も著しく向上した。しかし、発電所が大規模化する一方で、エネルギー資源の大量消費とそれに伴う環境破壊等の新たな問題が生じてきた。

沿岸地域に建設された大規模集中発電プラントでは、発電と同時に大量に発生する熱エネルギーを海水に廃棄している。熱エネルギーを需要地の都市部まで長距離輸送することが困難であることが大きな要因である。これに対して、小規模分散システムでは、発電と共に熱エネルギーを供給するコージェネレーションシステム(CGS)の形態をとることで、エネルギーの系統的な利用を可能とし、総合的なエネルギー利用率の向上が期待される。

我が国におけるCGSの導入は欧米に比較すると少ないが、ディーゼルエンジン、ガスエンジン、ガスタービン等を使用して、工場などの産業分野、ホテル、スーパーマーケット、病院などの民生分野で導入実績がある。CGSの発電設備容量は2001年3月の段階で548万kW程度であり、国内の全発電容量の約2.2%である<sup>3)</sup>。これらの多くが産業用であり、

表1 分散発電の特徴<sup>4)</sup>

建設立地・導入条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・建設立地の困難回避</li> <li>・短期間の建設導入</li> <li>・多種燃料対応による地域インフラへの依存度小</li> <li>・比較的簡易な保守管理</li> </ul>
電力供給	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ピークカットを含む時空間的電力需要変動への対応（小型台数制御）</li> <li>・大型発電の設備稼働率の改善への寄与</li> <li>・系統孤立地域、災害緊急時の電力供給</li> </ul>
省エネルギー・環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・優れた総合エネルギー利用効率</li> <li>・CGSなどの排熱利用のシステム化</li> <li>・送電ロス（&gt;5%）の回避</li> <li>・天然ガス転換によるCO<sub>2</sub>排出削減</li> <li>・市民の省エネルギー意識の啓蒙</li> </ul>
経済効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・不確定なエネルギー需要見通しの下での資本投資戦略</li> <li>・大型設備投資（プラント、送電網）の困難回避</li> <li>・量産化によるコスト削減</li> <li>・事業化・企業家が選択できるエネルギーシステム</li> <li>・燃料多様性による価値創出</li> <li>・電力市場、エネルギー市場自由化への対応</li> <li>・ネットワーク技術との融合による新ビジネスの創出</li> </ul>

著しく増加する民生用エネルギー消費を削減するためには、発電容量が数100W～200kWで優れた性能を有するミニ/マイクロCGSが広く普及しうるといった技術開発が求められる。デンマーク、スウェーデンなどの北欧諸国では、寒冷地帯に位置するという地理的・気候的条件から暖房需要が大きく、CGSの歴史も古い。これらの国々では発電容量が全発電容量の数十%を占めており<sup>3)</sup>、エネルギーの有効利用に大きく貢献している。

## 2.2 分散エネルギーシステムの意義

分散エネルギーシステム導入の意志決定の指標としては、次の三項目を挙げることができる。

- (1) 省エネルギー性：一次燃料の消費量削減。
- (2) 環境性：有害ガスの排出量の低減。
- (3) 経済性：導入から廃棄に至るまでの総コストが

従来までのエネルギー供給方式より小さいこと地球環境保護の観点からは、(1)および(2)は最低限満たされなければならない事項である。すなわち、経済性が満足されても、従来より多量の燃料を消費するようなシステムには、導入の意義を見出すことはできない。また、地域の自然環境、文化に応じたエネルギー・インフラの構築、大きな日および季節変動を許容したフレキシブルな運用を可能とするようなエネルギーシステムであることが望まれる。

表1は、分散エネルギーシステムのメリットを整理したものである<sup>4)</sup>。分散発電には大型の系統電力設備を補完しうるといった様々な利点がある。これらの利点を最大限に活用しうるといった基盤技術、さらにそれらを有機的に結合するためのシステム化技術の開発が求められる。

## 2.3 分散エネルギーシステムを支える発電技術

分散エネルギーシステムの基幹コンポーネントとしては、 $\mu$ GTと共に固体高分子形燃料電池（PEFC）が急速に台頭してきた<sup>5)</sup>。現在の $\mu$ GTは個別の家庭に設置するには規模が過大であるが、PEFCは数kW規模のコージェネレーションシステムを構成することが可能である。PEFCは、電解質として0.2mm程度のフッ素系高分子薄膜を使用し、膜の両面を白金系の多孔質触媒で被覆する。さらに電極を介してセパレータ（黒鉛板）で挟み、単セルを構成する。この単セル所要の出力に応じて積層してセルスタックを構成する。発電に伴って発生する熱は70～80℃程度の温水として回収することができる。このPEFCは、次世代自動車の主要動力源として大きな期待が寄せられており、自動車への搭載が進めば、大量生産による大幅な価格低下が可能となり、家庭用コージェネレーションユニットとして普及が加速する可能性を秘めている。現在は、自動車メーカー、家電メーカーがその実用化への技術開発を強力に推進している。しかし、家庭用に燃料電池を設置する場合には、停止時のパーシブ用窒素ガスポンプの設置が義務づけられている等の規制もあり、普及促進のための関連法規の整備も必要であろう。

現在の $\mu$ GTは出力規模から事務所ビル、ホテル、病院、コンビニエンスストア、集合住宅といった用途に適合する。排気ガスの温度が300℃程度と高いことからPEFCと比較して熱利用の自由度は高いといえる。 $\mu$ GTとPEFCはともに大量生産により価格低下が可能となれば、広く普及する可能性を秘めているが、エンドユーザーの規模とエネルギー需要パターンを十分に考慮して適切なシステムの選定が必要である。なお、太陽光・熱、風力等の自然エネル

ギーも分散エネルギーシステムの範疇に入るものと考えられるが、地域の地理的・気候的条件に依存して大きな変動を伴い、安定した電力供給は困難とならざるをえない。これらの技術は地域の特性を踏まえて他の分散電源との共存が前提となろう。

3. ガスタービンサイクル

ガスタービンは燃料のもつ化学エネルギーを熱エネルギーを介して機械エネルギーに変換する熱機関の一つである。その構成は図2(a)に示す単純開放サイクル(Simple Cycle)が基本となる。大気を圧縮機で加圧し、これに燃料を吹き込んで燃焼させ高温高压のガスとする。燃焼ガスをタービンで膨張させることにより仕事を取り出す。この仕事の一部は圧縮機の駆動に利用され、残りが有効な仕事となり発電機で電力に変換される。図3は単純開放サイクルの熱効率を圧力比との関係で整理したものである。この図から分かるように、単純開放サイクルでは、最も高温になるタービン入口温度(TIT)を高くしても熱効率は30%程度にとどまる。しかし、圧力比にも依るが、タービン出口温度が高くなることから、排気ガスの保有する熱エネルギーを回収して蒸気タービンを駆動することにより熱効率を向上させることが可能である。これは、コンバインドサイクルとして大型の発電設備において多数の実績があり、最新鋭のプラントでは50%を越える発電効率を実現している。また、コージェネレーション用のガスタービンでは、回収した蒸気をタービンに噴射し出力増大を図るチェンサイクルも実用化されている<sup>6)</sup>。

図2(b)の再生サイクル(Recuperative Cycle)では、タービン排気が有する熱エネルギーを再生熱交換器で回収し、これを圧縮機吐出空気、すなわち燃焼器への供給空気の予熱を行い、燃料消費量を削減することが可能となる。これにより単純開放サイクルと比較して熱効率が向上する(図3)。タービン排気の熱エネルギーの利用方法としては、上述のような熱再生の他に水蒸気を利用して燃料を改質し、水素リッチガスに変換する化学再生方式もあり、サイクル評価や実験例が報告されている<sup>7)</sup>。

一般にガスタービンサイクルでは、圧縮過程における温度上昇は作動ガスの比体積増加の要因となり、これに起因して圧縮仕事が増大する。圧縮過程を複数段に分割し、各々の圧縮過程の前段で空気を冷却して比体積を減少させることにより圧縮機動力を削減を図ったものが図2(c)に示す中間冷却サイクル(Intercooling Cycle)である。このサイクルでは、

圧縮機動力の削減はできるが、圧縮機の吐出温度が低くなり燃焼消費量は増加する。そのため、中間冷却の利点を生かすには、再生の併用が必要となる。

図2(d)はタービンでの膨張仕事の増加を狙った再熱サイクル(Reheating Cycle)であり、膨張過程を多段に分割して各膨張過程の前段で加熱を行うことで作動流体の比体積を増加させ、膨張仕事を増加させるものである。このサイクルでは、最終的なタービン出口温度が高くなることから、排気損失低減のために再生を併用することが必要となる。

小型分散電源としての用途を想定するならば、高い熱効率と共に、設備がコンパクトかつ安価であることが必要である。このような観点から、マイクロガスタービンでは再生サイクルが採用されている。これとは逆に、大型の発電設備では、規模と価格の面から再生熱交換器の付帯は得策ではなく、蒸気タービンとのコンバインドサイクルが有利である。

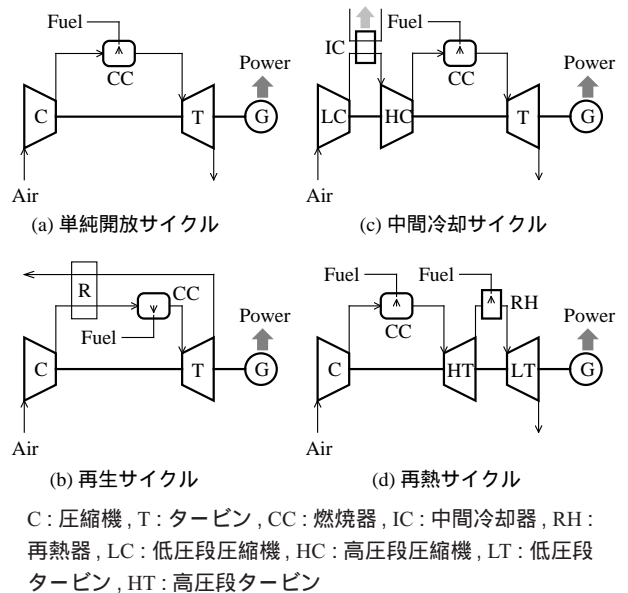


図2 ガスタービンサイクル

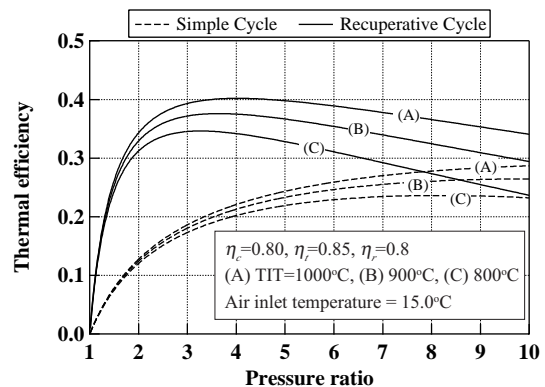


図3 ガスタービンサイクルの熱効率の例

## 4. マイクロガスタービンの特徴と開発状況<sup>8)</sup>

### 4.1 マイクロガスタービンの特徴

現在までに実用化されている $\mu$ GTの多くは、航空機の補助電源やターボチャージャーを技術基盤としており、図4に示すようなラジアルの圧縮機・タービンを使用し、一軸あるいは二軸の構成としている。回転数が10万rpm程度的高速回転であり、ギアによる変速の際の損失を回避するために直流発電機を直結し、インバーターを介して系統電力の周波数に変換している。TITは材料の耐熱性能、寿命等を考慮して800～900°C程度に設定されており、発電効率は出力規模にも依るがおおむね25～30%程度である。ガスタービンの再生熱交換器としては回転蓄熱型等もあるが、コンパクトかつ低コストであることを重視してプレートフィン型あるいはプライマリーサーフェス型<sup>9)</sup>の熱交換器が使用されている。また、燃料の種類に自由度も高く、連続燃焼のため排気ガス対策が講じやすい。燃焼方式として希薄予混合燃焼を採用し、燃料として天然ガスを利用した場合には、排気ガスの清浄性も高く、NO<sub>x</sub>濃度が10ppm(O<sub>2</sub>=15%)以下に抑制されている。振動は少なく、騒音は高周波音であることから防音対策は講じやすい。回転部分の支持に空気軸受(図5)を使用すると、潤滑系統が不要で、保守も容易である。

このように、ガスタービンは構造がシンプルでありレシプロ機関のように直線運動を回転運動へと変換するような複雑な機構が不要であることから、保守・管理が容易であるという利点を持ち、コストや設置の容易性において有利な面がある。

### 4.2 マイクロガスタービンの開発状況

現在 $\mu$ GTは、その実用化に取り組む各社から第一世代機が出揃い市場への投入が開始されている。

Capstone Turbine Corporationは、ターボチャージャーの開発等を手がけてきたPaul Craig氏により設立され、低コスト、大量生産の小型ガスタービン発電機を構想し、パッケージ化された製品を開発した<sup>11)</sup>。図6にその構造を示す。ターボチャージャーの技術の転用をはじめ、既存の技術をベースとした製品開発を行っている。出力28kW、TITが840°C程度、吸気条件15°C、1気圧で発電効率は26%程度である。定格運転におけるNO<sub>x</sub>濃度は9ppm(O<sub>2</sub>=15%換算)と低く抑えられてる。排ガス温度は280°C程度であり、給湯、暖房等の温熱供給、さらには吸収冷凍機を利用した冷熱供給にも十分に対応することができる。

その他、欧米では、イギリスのBowman Power Systems社やスウェーデンのTurbec社、アメリカのIngersoll-Rand Energy Systems社、Elliott社(荏原製作所が100%株式取得)等が、出力45～200kWの $\mu$ GTを開発しており、排熱回収用熱交換器を含むコージェネレーションパッケージとして商品化している例もある。国内では、IHIエアロスペースが自動車用ターボチャージャー技術を転用した出力2.6kWの携帯用電源ユニット<sup>12)</sup>を商品化しており、現在では、トヨタタービンアンドシステムズ<sup>13)</sup>他、重工各社が開発中である。これと並行して、ガスおよび電力各社で様々な技術評価が行われている<sup>14,15)</sup>。



図4 圧縮機・タービンローターの構造<sup>10)</sup>

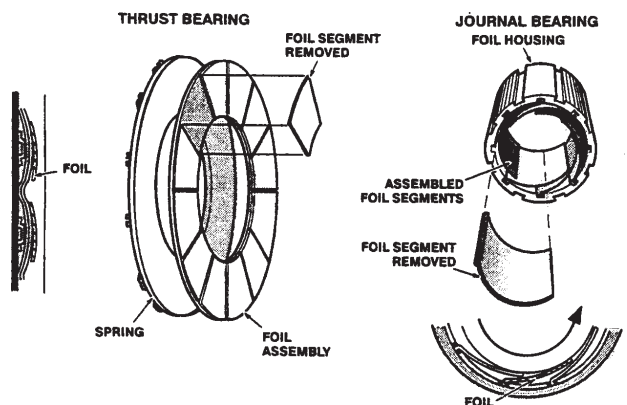


図5 空気軸受の例<sup>10)</sup>

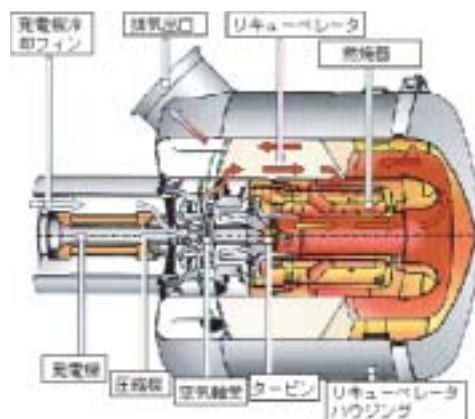


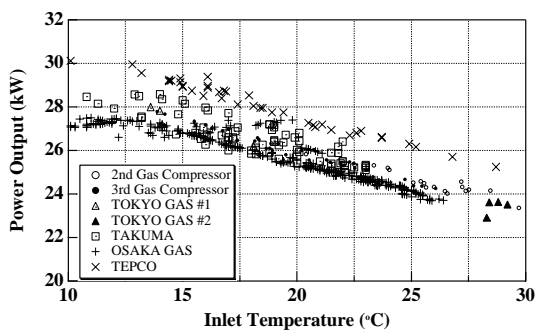
図6 Capstone社のマイクロガスタービン(同社カタログより)

5. マイクロガスタービンの性能評価<sup>16)</sup>

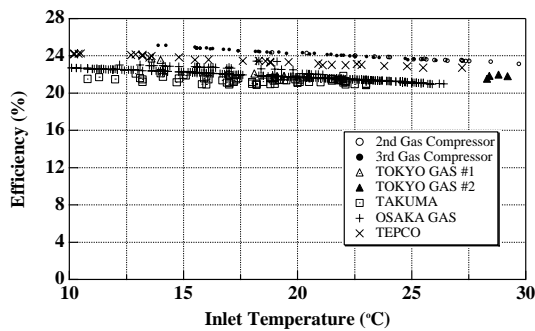
μGTの導入が適切に行われるためには、その省エネルギー効果、環境性(排気ガス清浄性)ならびに経済性に関する十分な検討が必要である。そのためには、想定される様々な運転モードにおけるμGTの性能を明確に把握しておくことが不可欠である。筆者らは、Capstone社のModel330を対象とした性能評価試験を実施し、これに基づいてμGT-CGSの導入評価への試みに着手している。ここでは、性能評価試験の結果を示し、μGTの性能の現状を紹介する。

試験では、燃料として通常の都市ガス13Aを使用している。電力はμGTを設置している建物の電力系統に連系し建物内で消費され、逆潮流は行っていない。燃料、吸入空気、排気ガスの各系統には温度、圧力、流量の計測機器が設置されており、試験中は1.0秒間隔でデータを取得している。排気ガスの組成はFTIRガス分析装置により測定している。本試験では、連続運転ではなくDSS(Daily Start and Stop)方式で起動と停止を繰り返している。2000年6月に試験を開始して以来、2002年1月末までの累積運転時間は740時間である。

試験結果の一例として図7に吸気温度の影響を、図8に部分負荷特性をそれぞれ示す。図7から分かるように定格条件(15°C)での発電効率は20~25%



(a) 発電出力

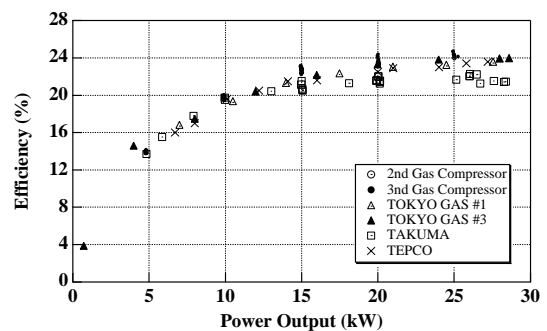


(b) 発電効率

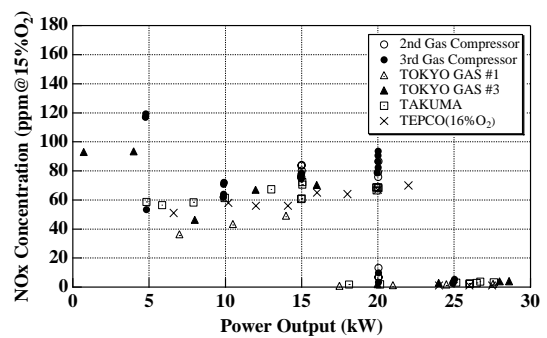
図7 μGTの性能に対する吸気温度の影響<sup>16)</sup>

程度である。ガスタービンは原理的に吸気温度の上昇により出力が減少し、熱効率が低下する特性を有する。μGTも例外ではなく、図7に示すように吸気温度の上昇に伴う性能低下の特性がある。したがって、外気温度が高くなる夏場に出力および発電効率が低下する。また、図8から部分負荷条件では、発電効率が低下することを確認することができるが、15kW以上の範囲では、効率の低下はそれ程大きくない。負荷により燃焼方式の切り替え(高負荷では希薄予混合燃焼、低負荷では拡散燃焼)が行われており、NOx濃度が著しく異なる。発電効率およびNOx濃度を考慮すると、出力の履歴に応じて15kW~20kW程度の範囲で運転することが望ましい。

図9は起動および停止時の動作状態の一例を示したものである。起動指令の投入後、約20秒間のセルフチェックの後に発電機をモーターとして利用して約30秒間パージ(25000rpm)を行う。その後、燃料を投入してアイドリング(45000rpm)を約130秒間行う。タービン出口温度が650°Cに達したことが検知されるとさらに回転数が増加し、定格負荷を設定した場合には96000rpmまで到達する。発電出力はおおむね5~6分程度で所定の出力となる。一方、停止時は、指令投入後直ちに燃焼を停止し、起動時のパージ運転と同様に発電機をモーターとして利用し



(a) 発電効率



(b) 排気ガス中のNOx濃度

図8 部分負荷特性<sup>16)</sup>

て冷却運転(45000rpm)を行う。タービン出口温度が193°Cに達した時点でタービンが停止する。定格負荷から完全な停止までは10分程度である。

供試 $\mu$ GTは、定格条件で25%程度の発電効率、NOx値は10ppm( $O_2=15\%$ )未満であり、良好な性能を示しており、PCによる操作性等を含めて完成度は高いといえる。しかし、燃料昇圧機や制御用電装機器等の補機類の信頼性向上に課題が残されていると言える。また、今後の普及促進のためには、導入・設置に必要な手続きや監視・保守等に対する規制等、新しい制度の整備が必要であろう。

## 6. マイクロガスタービンの技術課題<sup>8)</sup>

### 6.1 発電効率向上への課題

CGS市場では、現在の $\mu$ GTよりも高効率なディーゼルエンジン、ガスエンジン等のレシプロ機関に数多くの実績があり、 $\mu$ GTがこれらの既存の熱機関と省エネルギー性で競合するためには、発電効率の向上が極めて重要な課題となる。

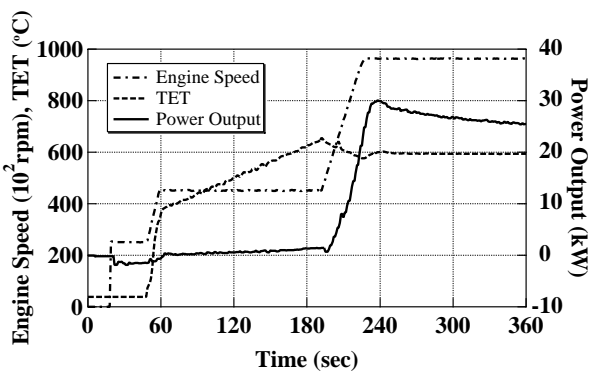
一般に、ガスタービンサイクルの熱効率向上のためには、高温化が有効であると言われており、大型のガスタービンでは、耐熱金属材料の開発、冷却技術、耐熱表面処理等の技術開発によりTITが上昇と共に熱効率が向上している。最新のコンバインドサ

イクル発電プラントでは、50%(LHV)を越える発電効率を実現している。しかし、 $\mu$ GTで使用される小型のラジアルタービンでは、大型の軸流タービンのような冷却構造<sup>17)</sup>を採ることが難しく、従来までの金属材料の使用ではTITの高温化が制約を受ける。我が国では、100kW級ならびに300kW級のセラミックガスタービンの開発が国家プロジェクトとして遂行され、特に後者においては窒化ケイ素製の無冷却翼を使用して1300°Cを越えるTITによる運転の実績を残している<sup>18)</sup>。TITの高温化は、タービン出口温度の上昇の要因となり、再生サイクルの場合には、再生熱交換器の材料選定も課題と言える。

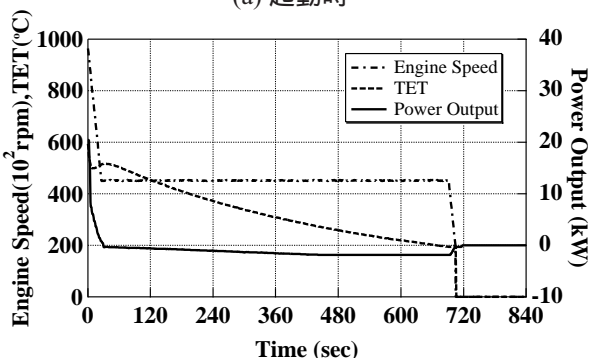
これらの材料開発に加えて、要素効率の向上の観点からは、圧縮機・タービンの断熱効率の向上ならびに漏れ損失の低減化、広い燃焼負荷範囲で安定した希薄予混合燃焼を実現する小容積燃焼技術、高い伝熱性能と低圧力損失を同時に満足しうるコンパクトな再生熱交換器の最適設計技術等の開発が課題となる。図10は $\mu$ GTの開発性能予測<sup>19)</sup>であり、ここに今後の技術課題が端的に示されている。将来的に40%を越える発電効率を実現するためには、高温化に耐える構成材料としてタービン、再生熱交換器にセラミック材料を適用するとともに、再生熱交換器の温度効率の向上が不可欠である。

メンテナンスが容易であるという $\mu$ GTの特徴を生かすには空気軸受の採用が有効であり、安定した運転を確保するための高速回転系制御を含めた技術開発が求められる。これと同時に小型で高効率な高速発電機～電力変換制御システムの開発も重要である。さらに普及促進のためには、装置が小型・軽量であることが望ましく、コンパクト化のための最適設計、パッケージング技術も必要である。

米国エネルギー省(DOE)では、6300万ドルに上る研究予算を投じ、2000年から2006年までの7年間で発電効率40%を越える $\mu$ GTの開発を目指す研究プロジェクトAdvanced Microturbine Systems Programがスタートしている<sup>20)</sup>。技術開発の目標としては、40%を越える発電効率、実用的な運転範囲内におけるNOx排出量(天然ガスを燃料とした場合は)7ppm以下、45000時間以上の寿命というように非常に意欲的なものとなっている。また、1kW当たり500ドル以下の低価格化、多種燃料への対応が可能であることも要請している。



(a) 起動時



(b) 停止時

図9 起動および停止時の運転状況<sup>16)</sup>

### 6.2 更なる高効率化に向けて

$\mu$ GT単体では、40%を大幅に越えるような発電効

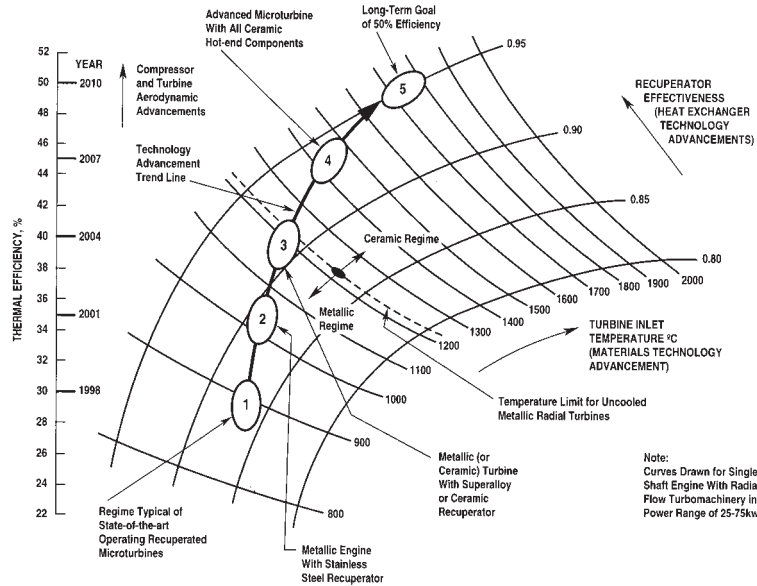


図 10 マイクロガスタービンの開発予測<sup>19)</sup>

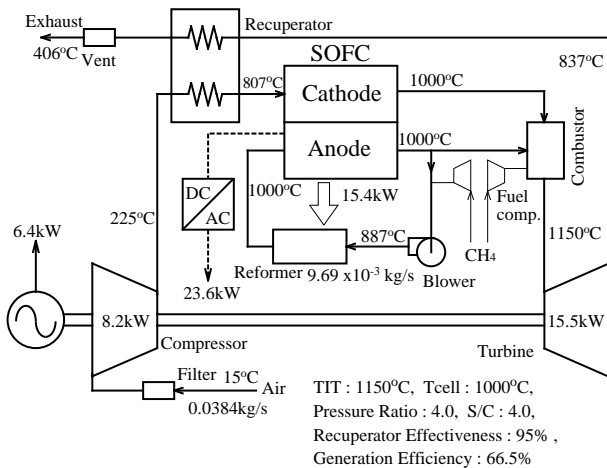


図 11 μGT・燃料電池複合発電システムの例<sup>22)</sup>

率を実現することは困難である。更に高効率な分散電源の実現に向けて現在、μGT と高温型燃料電池 (SOFC, MCFC) とを複合化したハイブリッドシステムが注目されている。複合化の形態は様々であり、より高効率なシステム構成の提案に向けたシステム解析<sup>21)</sup>が多数報告されている。図11はハイブリッドシステムの一例を示したものである。現行のμGTのように民生用エネルギー需要への対応を想定した出力30kWの規模でも、適切な設計を行うことで理想的には60%を超える発電効率を実現しうる可能性があることが示されている<sup>22)</sup>。ハイブリッドシステムでは、燃料電池に対してμGTの出力が小さく、総出力30kWを狙う場合には、10kW未満の出力規模のμGTの開発が課題となる。図12はカリフォルニア大学アーバイン校のNational Fuel Cell Research Centerにおいて世界に先駆けてフィールド試験が開始され



図 12 ハイブリッドシステム試験プラントの例<sup>23)</sup>

ているハイブリッドシステムの外観である<sup>23)</sup>。μGTが47kW、SOFCが173kWでトータル220kWの出力を有するシステムであり、SOFC排気温度が850°Cで57%(LHV)の発電効率が期待されている<sup>24)</sup>。試験結果を基に、システムの最適化を図ることができれば、更なる効率向上が期待できるであろう。この他にも、欧米でフィールドテストが計画されている。このような従来までにない高い発電効率を実現する夢の発電システムへの挑戦を支える技術として高効率なμGTの技術開発は極めて重要な課題である。

### 7. おわりに

今後も市民の生活水準の向上に伴う民生用エネルギー需要の増加は必至であり、多様なライフスタイル、業務形態に適合したエネルギーの高度利用が益々強く求められるであろう。個々の要請に応じた

柔軟なエネルギーシステムの構築に対して高性能なマイクロガスタービンは有意義な選択肢と成りうる。さらに近い将来には、天然ガスパイプラインを基盤とし、情報ネットワーク技術により高度にインテリジェント化された高効率マイクロガスタービン・分散エネルギーシステムの適切な導入がエネルギー消費量削減という困難な課題に対する一つの解を与えうる可能性を有していることは間違いない。

#### 参考文献

- 1) 資源エネルギー庁総合政策課, 2000(平成12)年度におけるエネルギー需給実績(速報)について(2002)。
- 2) 名和小太郎, 起業家エジソン 知的財産・システム・市場開発(朝日選書671), 朝日新聞社(2001)
- 3) 日本コージェネレーションセンター, コージェネレーションシステム年間動向レポート(2000年度)(2001), 1-30。
- 4) 笠木伸英, エネルギーネットワーク - 分散システムへの潮流 -, コージェネレーション, Vol. 16, No. 1(2001), 7-11.
- 5) 平田賢, 21世紀「水素の時代を担う分散型エネルギーシステムの展望」, コージェネレーションシンポジウム2001(第17回)発表抄録集(2001), 3-18。
- 6) 三浦千太郎, 小型ガスタービンによる熱電可変, エネルギー・資源, Vol. 18, No. 1(1997), 53-62。
- 7) C. Carcasci, B. Facchini, S. Harvey, Design issues and performance of a chemically recuperated aeroderivative gas turbine, Proc Instn Mech Engrs, Vol. 212 Part A(1998), 315-329.
- 8) 笠木伸英, マイクロガスタービン小型分散エネルギーシステム, 高圧ガス, Vol. 38, No. 6(2001), 544-552。
- 9) M. E. Ward, Primary Surface Recuperator Durability and Applications, Turbomachinery Technology Seminar, Solar Turbines(1995).
- 10) P. O'Brien, Development of a 50kW, Low-Emission Turbogenerator for Hybrid Electric Vehicles, ASME Paper, 98-GT-400(1998).
- 11) P. Craig, The Capstone Turbogenerator as an Alternative Power Source, SAE Paper, 970292(1997).
- 12) 熊倉弘隆, ガスタービン技術の応用 - 携帯用ガスタービン発電機の開発, エンジンテクノロジー, Vol. 4, No. 1(2002), 30-33。
- 13) 樋口新一郎・盛昭雄, マイクロガスタービンの開発, 火力原子力発電, Vol. 52, No. 8(2001), 947-952.
- 14) 徳本勉, マイクロタービンの評価およびコージェネレーション開発の現状, 空気調和・衛生工学, Vol. 75, No. 8(2001), 677-682。
- 15) 三浦千太郎, エネルギー有効利用としての分散電源の推進, 日本機械学会誌, Vol. 104, No. 989(2001), 214-218。
- 16) 笠木伸英・浜名芳晴・奥田英信・三輪潤一・君島真仁, 28kW マイクロガスタービンの性能評価試験, 第29回ガスタービン定期講演会講演論文集(2000), 83-88。
- 17) 吉田豊明, ガスタービン基礎講座 - ガスタービンと伝熱工学(1) -, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 27, No. 6(1999), 426-432。
- 18) 竹原勇志・巽哲男・市川善浩, セラミックガスタービン(CGT302)の研究開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 27, No. 5(1999), 308-316。
- 19) C. F. McDonald, Low-cost compact primary surface recuperator concept for microturbines, Applied Thermal Engineering, 20(2000), 471-497.
- 20) U.S. Department of Energy, Advanced Microturbine Systems Program Plan for Fiscal Years 2000 Through 2006(2000).
- 21) A. F. Massardo and F. Lubelli, Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycles (IRSOFC-GT):Part A - Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis, Trans. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 122(2000), 27-35.
- 22) H. Uechi, S. Kimijima, N. Kasagi, Cycle Analysis of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid Micro Generation System, ASME Paper, JPGC2001/PWR-19171(2001).
- 23) S. E. Veyo, L. A. Shockling, J. T. Dederer, J. E. Gillett and W. L. Lundberg, Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Power Systems - Status, ASME Paper, 2000-GT-550(2000).
- 24) R. A. George, Status of tubular SOFC field unit demonstrations, J. Power Sources, 86(2000), 134-139