

小型分散エネルギーシステムの新展開

東京大学大学院工学系研究科 笠木 伸英

1．個性化共生社会へ向けて

著名な経済学者であるJ. ガルブレイスによれば，“よい社会”とは，誰もがよりよい生き方を希求することのできる社会であり，我々は地球の有限性の下で持続性を確保しつつ，そのような社会の実現に最大限の努力をせねばならない．ところで，対立と戦争，飢餓と欠乏，エネルギーや資源の不均衡，そして環境汚染などの困難な現実と直面するとき，未来によい社会が達成される道筋はいたって不透明である．将来の社会，国家，地球環境の実現可能なシナリオを構想し，それを指針とし，意志を持って着実な歩みを続けること，それが地球環境時代に要請される英知であろう．

さて，ミレニアムを迎えた世界動向のキーワードは，技術革新，グローバル化，そして規制緩和である．情報化，ネットワーク化，高速輸送網整備が進んで，人，もの，情報の移動に対する国家，国境の障壁は一層低下する．従って，フェアな自由競争を前提にし，地域，文化，宗教，家族，世代や性の差異を認め，個人の尊厳を担保する“個性化共生社会”の実現が望まれる．つまり，多種多様な個人の価値観，目的意識，生活様式を許容し，各々の文化や伝統を認めつつ，地球環境と共生することを目指すべきである．そこには，我々人類の空間的な共生のみならず，祖先から我々へ，そして子孫への世代を越えた時間的な共生が包含される．

技術者としての使命と倫理の模索も，このような“よい社会”を実現するための努力に他ならず，エネルギーの有効かつ環境に調和した利用はその成立に不可欠である．そして，個性化共生社会におけるエネルギー需給を構想するとき，技術の提唱する一元的な価値のみならず，自ら学習し，多元的な価値を読みとり選択する，成熟した市民に伝える必要があることを肝に銘じねばならない．そのような観点からは，多様なエネルギー観，エネルギー利用形態，需要の個体・地域偏差や日・季節変化を受容できる分散エネルギーシステムが適している．そして，百年後に究極的な持続可能システムに禍根なく繋げるために，限りある化石燃料の高度利用のための要素・システム技術を開発することが喫緊の課題であろう．

本稿では，近未来に普及の可能性の高い新技術としてのマイクロガスタービンを中心に分散エネルギーシステム技術の現状を概観し，今後の諸課題を明らかにしたい．

2．分散システムへの潮流

1882年に発明王トーマス・エジソンは，ニューヨーク・パール街で6基の石炭炊きボイラと往復蒸気機関を使って33kWの直流電力を発電し，初めて電力供給事業を開始した．その後彼は，シカゴをはじめとする12の都市で分散発電を計画するのである．続いて，欧米の主要都市に数千kWの分散電源が導入され，また，100kW程度の小型電源が，小工場，デパート，ホテル，農園などに設置される．20世紀初めに，全米の発電量の半分以上（1907

年で59%)は分散発電に依っていたが、これらの多くは地域暖房や余剰電力の配送も行っていた。しかし、同じ頃から、蒸気タービンの普及と交流の高圧送電技術が開発され、発電所は大規模化してゆく。そして、1920年以降 Economy of Scale を追求する技術開発と各国政府の地域独占発電事業の促進によって、1980年代まで発電プラントの大型集中化が続けられた。

発電所の最大規模は、1920年の8万kWから、1960年に60万kW、1980年に140万kWと飛躍的に増加したが、一方で環境問題や原発事故などの負の問題が顕在化した。E.F.シューマッハーの著「Small is Beautiful」が出版されたのは第一次オイルショックの1973年、またA.B.ロビンスの「ソフト・エネルギー・パス」が出版されたのは1977年である。1980年代以降、より小さく、経済的な発電装置の登場によって、電力事業自由化は加速した。加えて旧東側諸国の崩壊、米国主導の産業構造改革は、電信電話、航空、金融、そして電力事業の世界的な自由化への道を拓いてきた。IPPや電力会社は、コージェネレーション(CGS)、風力発電などによって、エンドユーザーの近接地でより小規模の分散発電を行う傾向がある。ちなみに、米国の発電所の平均規模は、80年代の20万kWから1998年に2.1万kWと急減したが、これは今世紀初頭の数字とほぼ同じである。エジソンが120年前に夢見たものが、今改めて現実となってきた。

分散システムは、エネルギーの系統的な利用を可能にし、高い総合エネルギー利用率を実現することができる。我が国のCGSの導入は欧米に比較して少ないが、ガスタービン(GT)、ディーゼルエンジン(DE)、ガスエンジン(GE)などを使って、工場、オフィスビル、ホテル、スーパーマーケット、病院などに実績がある。北欧のデンマーク、オランダなどでは、全設備容量の数十%に及ぶCGS設備が導入され、実効ある炭酸ガス排出削減対策となっている。

表1 小型分散エネルギーシステムの特徴

建設立地・導入条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建設立地の困難回避 ・ 短期間の建設導入 ・ 多種燃料対応による地域インフラへの依存度小 ・ 比較的簡易な保守管理
電力供給	<ul style="list-style-type: none"> ・ ピークカットを含む時空間的電力需給変動への対応（小型台数制御） ・ 大型発電の設備稼働率の改善への寄与 ・ 系統孤立地域、災害緊急時の電力供給
省エネルギー・環境	<ul style="list-style-type: none"> ・ 優れた総合エネルギー利用効率 ・ CGSなどの排熱利用のシステム化 ・ 送電ロス（>5%）の回避 ・ 天然ガス転換によるCO₂排出削減 ・ 市民の省エネルギー意識の啓蒙
経済効果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 不確定なエネルギー需要見通し下での資本投資戦略 ・ 大型設備投資（プラント、送電網）の困難回避 ・ 量産化によるコスト削減 ・ 事業者・企業家が選択できるエネルギーシステム ・ 燃料多様性による価値創出 ・ 電力市場、エネルギー市場自由化への対応 ・ ネットワーク技術との融合による新ビジネス創出

暖房需要の大きい高緯度地域に位置するという事情もあってCGSの歴史は古いが、エネルギーの合理的利用法を積極的に取り入れる考え方が根付いているといえる。表1は、小型分散システムがいかに大規模集中発電を補完するのか、その優位性がどこにあるのかをまとめたものである。小型分散システムには、建設導入が容易で、電力供給に柔軟性を付与し、省エネルギー・環境負荷低減に寄与し、新たな経済効果も期待できるなど、優れた側面が多々あることは明らかである。

3. 小型分散エネルギーシステム技術の進展

我が国のCGS発電設備容量は現在約500万kWで、全容量の約2%である。この内、民生用の割合は1/6程度で、産業用に比べて少ない。また、単機平均発電容量は、民生用のGEで330kW、DEで530kW、GTで3500kW、産業用のGEで710kW、DEで2450kW、GTで7540kWである。電力自由化と共に、小規模の事業者や家庭までも対象とするには、ミニ（電気出力5～200kW）あるいはマイクロ（同0.3～5kW）CGSを成立させる技術を育てる必要がある。小型のCGSの普及は、省エネルギー意識の涵養に有効であり、増加の著しい民生用エネルギー消費の抑制にも貢献する。既に、GEを組み込んだものとして、例えば、1.8kW（本田技研工業）あるいは9.8kW（ヤンマーディーゼル）のGEパッケージが商品化され、いずれも発電効率20%以上、80%のエネルギー利用効率を達成している。

最近、新技術として、マイクロガスタービン(μ GT)^{1,2)}とよばれる30-300kWの超小型GTが商品化されている。これらの多くは、図1に示す再生ガスタービンサイクルを基本とし、再生熱交換器(レキュペレータ)の導入によって高い効率を達成する経済性のあるガスタービンである¹⁾。欧米で相次いで発表されているマイクロガスタービンは、航空機補助電源(APU)用あるいは車載用の数百kWのガスタービンを起源とし、分散電源用あるいはハイブリッド車用として開発されている。ガスタービンは、表2に示すように、元来構造が単純で補機が少なく、起動・負荷変動特性に優れ、運転・保守が容易で、多種燃料使用が可能で

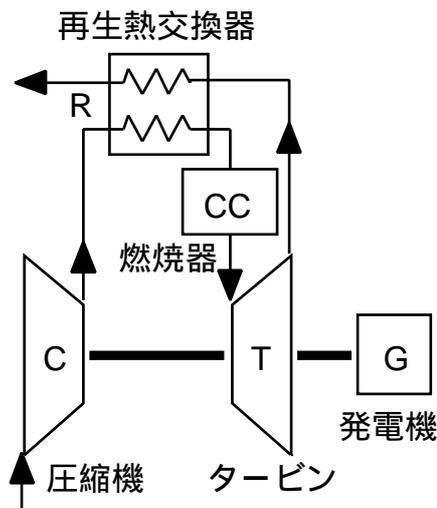


図1 再生ガスタービンサイクルの構成図

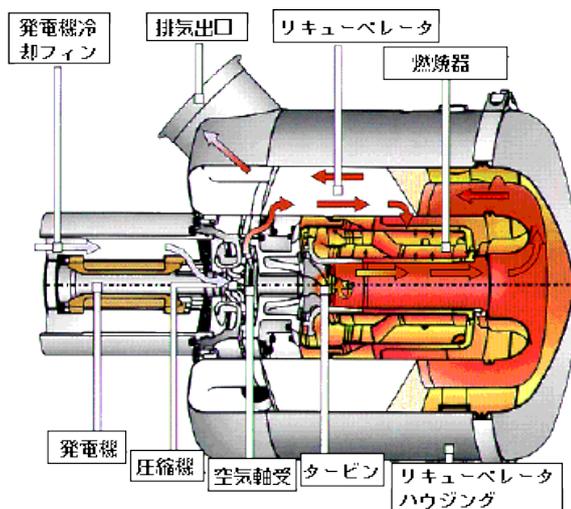


図2 Capstone社マイクロタービン（同社カタログより）

表2 マイクロガスタービンの長所

経済性・市場性	単純構造，超小型化可能，耐久性・長い要素寿命，多種燃料適応性，容易な保守管理，新規導入容易
エネルギー利用効率	高効率化への可能性，燃料電池や多種類のボトミングサイクルとの併用
運転特性	優れた被制御性，負荷変動応答性，容易な運転管理
クリーンエネルギー変換	清浄な排出ガス，低騒音振動，天然ガス利用，水素への連続移行性

あり，連続燃焼で排ガス対策が講じ易く，従って往復動のピストン機関に比べて優れた点が多い。適切な生産台数が見込めれば，その経済性も現存の機器に比べて有利になることが十分期待できる。燃料としてパイプライン網³⁾の整備が進む天然ガスを用いれば，環境負荷の点で優れており，さらに将来の水素燃焼への移行にも有利である。

典型的な例として，Capstone社は，設計製作はすべてAPUやターボチャージャーの技術を転用し，実績のある空気軸受を導入して，低価格のマイクロガスタービン発電機をまとめ上げた。図2に示すように，ラジアルのコンプレッサ，タービンを備えた圧縮比3.2の一軸再生ガスタービンで，出力は28kW，タービン入口温度（TIT）が840 程度，熟効率26%，NO_x，COとも9ppm以下（15%O₂），パッケージ重量約300kgで販売価格500万円程度（1999年秋）である。簡単な保守で寿命40,000時間という。排気温度が260～270 あるので排熱利用も経済性があり，集合住宅規模の用途に向いている。2000年末で，すでに1000台の出荷を記録した。

AlliedSignal社（現在，Honeywell社）は，ハイブリッド電気自動車用の50kWマイクロタービン発電機の開発を発表したが（図3）⁴⁾，1999年にパッケージ化した75kWの分散電源装置に仕上げた。軍用APU技術を基本とした一軸再生ガスタービンでやはり空気軸受を採用している。TIT 930 ，圧力比 3.7，永久磁石発電機採用で効率 28.5%，回転数 65,000rpm，燃

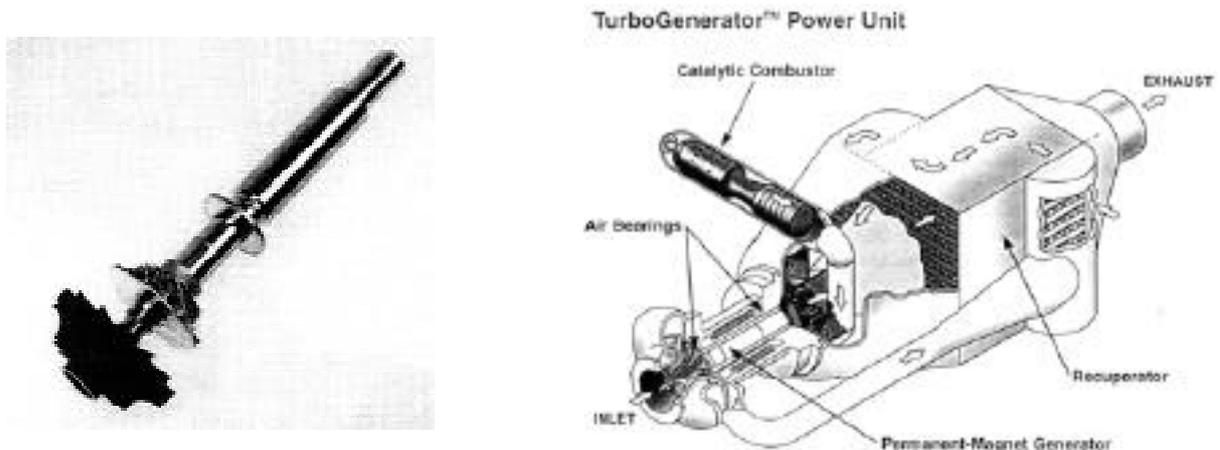
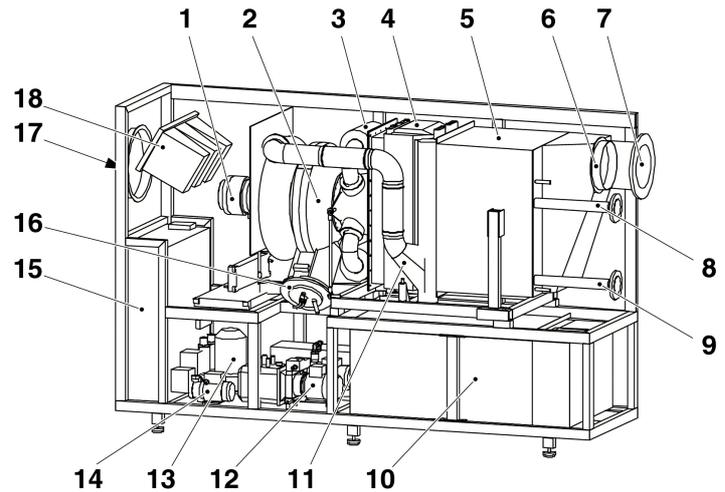


図3 AlliedSignal社MTローター⁴⁾，内部構造（カタログより）



1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9.
 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18.
 Compressor inlet
 Compressor
 Compressor outlet
 Inlet
 Turbine inlet
 Turbine
 Turbine outlet
 Generator
 Exhaust
 Power electronics
 Control system
 Cooling system
 Fuel system
 Lubrication system
 Air filter
 Air inlet

図4 Turbec 社 T100 マイクロガスタービン CGS システム

焼器は触媒燃焼方式で NO_x 9ppm(15% O_2)以下という。同社もさらに効率を改善し、価格として \$300/kW を目標にしている。

その他欧米では、米国のElliott社、英国のBowman社、スウェーデンのTurbec社、オランダのMega Limburg 社等が、類似のマイクロガスタービン発電システムを開発しつつある。中でも、Turbec 社 T100 マイクロガスタービン・コージェネレーション・システム(図4)は、自動車用ガスタービンの転用で、100kW、発電端効率が30%、総合熱エネルギー利用率で80%と優れた性能を有し、2001年初頭から市場導入を計画している。一方、国内では、日産自動車以前からターボチャージャー転用の一軸再生ガスタービン、出力2.6kWの小型移動電源ユニットを開発商品化している⁵⁾。最近では、トヨタタービンシステムズ、さらに複数のメーカーが開発中である。

以上を概観すると、現状のマイクロガスタービンは、航空機補助電源あるいはターボチャージャーの技術を源とする、一軸ないし二軸の再生サイクルガスタービンが多い。回転数は10万 rpm 程度の高速回転で、図5に示すような空気軸受を採用した場合に機械損失は小さく、潤滑補機も不要である。出力は30~300kWで、寿命を考慮してTITは抑制気味に850~900 程度とし、効率は30%程度に達する。タービン直結の永久磁石発電機を採用して、ギアボックスでの機械損失を避け、インバータによって50/60Hzに調整する。天然ガスを用いて排ガスを清浄に保つが、同規模のレシプロエンジンと比較して優れており、また振動も少なく、防音対策も講じやすい。なお、軽油やメタンなど多種燃料が使用可能で、予備ないし非常用電源としての用途もある。数千時間ごとの簡単な保守で済み、寿命も4万時間以上である。現在のところ、レシプロエンジンと比較して初期コスト、保守コスト、設置スペースで有利であり、普及の可能性がある。

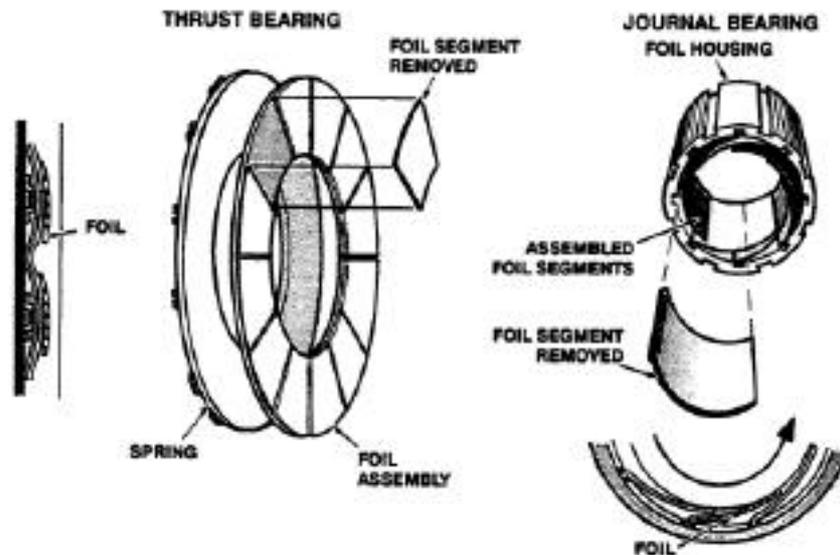


図5 エアフォイル軸受の構造⁴⁾

海外では、小型の外燃エンジンとして、スターリング・エンジンも、0.5-3kWの孤立分散発電装置として開発されている。小型、低騒音で、保守も少なく、熱源、燃料を選ばず、太陽熱発電への応用も想定されている。また、以上の熱機関に加えて、電気化学反応を経て電気および熱エネルギーを直接取り出す各種の燃料電池がある。電解質の種類によって各種の種類があり、各々作動温度は異なり、使用燃料として水素、CO、メタン、メタノール、ガソリンなどが選ばれる。最近、固体高分子形(PEFC)のイオン交換膜が比較的安価で製作可能になって、日米欧で燃料電池自動車の開発競争が続いているのは周知の事実である。PEFC開発はカナダBallard社が有名で、自動車用で5千時間、定置用で4万時間の寿命を達成し、その価格は、改質器を含めてkW当たりそれぞれ50, 1200カナダドルと伝えられるが、その経済性には慎重な見極めが必要であろう。数kW以下の温水供給の家庭用CGSには、効率とコンパクトネスにおいてマイクロタービンより適性があると言える。作動温度が900-1000の固体電解質形(SOFC)は、現在のところ加工プロセスが高コストで市場性はないが、効率は最も高く、排熱利用も有利であり、小型CGSへの応用には最適であろう。

分散発電装置としては、再生可能エネルギーも見逃せない。太陽電池は、単結晶型、多結晶型、そしてアモルファスシリコンを用いた数kWの装置が開発されている。我が国では1994年の政府の新エネルギー導入大綱以来、通産省の補助金制度による逆潮流あり系統連系太陽電池の導入促進が図られ、1997年には米国の10.8万kWに次いで9.1万kW(世界の28%)の全設備容量となった。しかし、設備コストが約150万円/kWと高く、今後、効率改善と一層のコスト削減が必要である。京セラなど日本メーカーやBP Solarex, Astropowerが数kW級の住宅用パネルを供給している。より経済性のある風力発電は、欧米で開発導入が急速に進んでいる。最近では、数百kWから千kW以上の大型機まで製作されるようになって、1998年末で日本の設備容量は約3.2万kWである。自然エネルギーは理想的なシステムではあるが、コスト、立地条件、電力供給安定性に難があり、他の電源との併用を前提にすることになる。

4. マイクロガスタービンの技術課題

マイクロガスタービンの今後の課題を表2にまとめた。まず第一に高効率化が必須のターゲットである。すでに効率30%を越えるガスエンジン、ディーゼルエンジンがあり、マイクロガスタービンが普及するにはこれらと同等かそれ以上の効率を達成する必要がある。コージェネレーションを想定しても、熱電需要比が比較的小さい我が国の条件では、高い効率が望まれる。新鋭の大型火力プラントとの比較でも、コージェネレーション分散システムの優位性を達成するには40%以上の効率が長期目標である。図6(a)は、30kWの再生サイクルの効率を、TITを900 とし、現実的な圧縮機効率やタービン効率を仮定して計算したものである¹⁾。レキューペレータ温度効率 r_r を0.85と考えると、圧縮比3.7で効率31%となり、Capstone社のマイクロガスタービンの性能とほぼ合致する。ここで、多くの設計パラメータの中で効率改善に最も効くのは、TITと r_r である。両者が高い値となるほど効率は上昇し、TIT=1000 において40%に近づく効率を示し、仮にTIT=1300 , $r_r=0.95$ とすれば、効率は

表2 マイクロガスタービンの技術課題

目 標	課 題
高効率化	要素効率改善（圧縮機、タービン、燃焼器、再生熱交換器）、高温化（冷却技術、耐熱材料、セラミックス）、チップクリアランス制御、シール技術、空気軸受・超高速回転体制御
小型化	要素小型化、最適設計技術、パッケージング技術、燃料電池との役割分担
環境適合化	低NOx燃焼（予混合希薄燃焼、触媒燃焼）、LCA
システム化	総合エネルギー利用効率向上、ハイブリッドシステム（二次電池、燃料電池、燃料改質など）、排熱利用技術、家庭用超小型エネルギーシステム、系統連系制御技術、リモート運転保守技術
低コスト化	経済性評価、マイクロタービンの普及、マイクロタービンの多目的利用

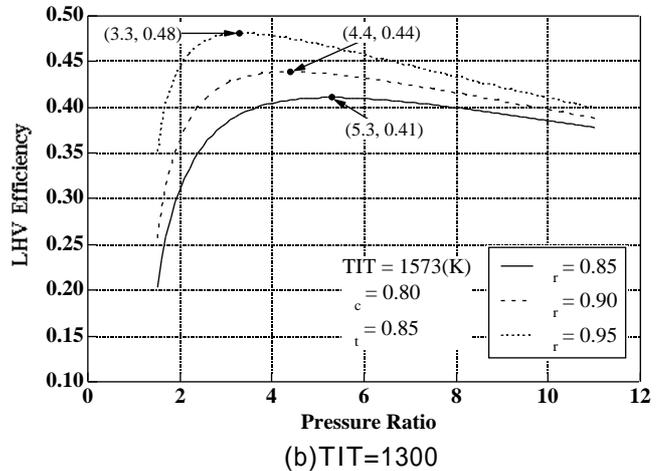
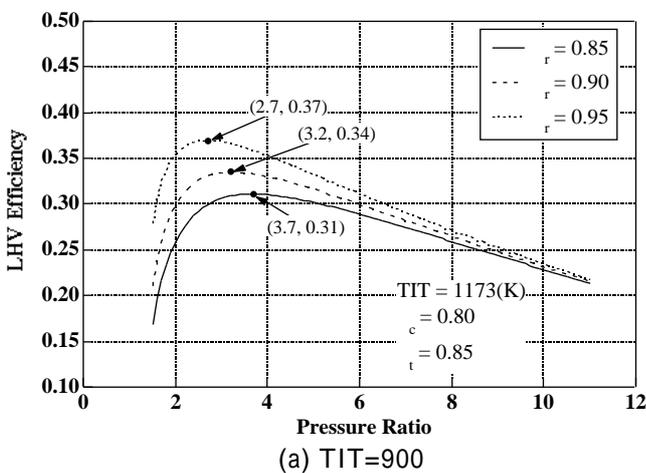


図6 再生ガスタービンの効率¹⁾

40%を遙かに上回る(図6(b))。

小型化と共に効率の劣化する圧縮機やタービンの空力設計に 効率向上を狙って本格的なCFD(数値流体力学的)最適設計を試みることも望まれる。また、高温化に伴って、燃焼器やタービンの耐熱材料開発や冷却設計が改めて重要になる。ただし、マイクロガスタービンの小型ラジアルタービンに冷却翼を使用した例はなく、無冷却のセラミック翼の採用が重要課題である。通産省の開発プロジェクトの成果として、川崎重工業は、京セラの窒化ケイ素製タービン翼を使用した2軸の300kWセラミックスガスタービンT 302を製作し、目標の熱効率42%を達成した⁶⁾。パワータービンのシュラウド面にアブレダブル材料を適用し、タービンのチップクリアランスを0.1mmまで小さくし、タービン入り口温度1334 Kの条件で軸出力は321.6kWを記録し、優れた熱効率を初めて達成した。セラミックスの成形・焼結技術が大幅に進歩し、機械的・物理的性質を実現することが可能となり、薄肉の羽根と肉厚のディスク部の一体品(図7)も可能になったことが有利に働いた⁷⁾。

図6で注目したいもう一つの点として、レキュペレータの温度効率が上昇するほど最適な圧縮比が減少することである。エンジンの圧力が低下すれば、各機器の寿命信頼性、製作コストにとって有利であり、また燃料ガス昇圧のためのガスコンプレッサ動力も軽減できる。従って、効率の高いレキュペレータの開発はキーテクノロジーのひとつである⁸⁾。既存のレキュペレータは、圧力損失数%で効率80~90%弱と言われている。高効率が実現できるプライマリサーフェス型のレキュペレータが有力であるが、今後は、セラミックスも含めた材料開発や伝熱最適設計によって、さらに高温化、高効率化を計る必要がある。以上述べた技術開発の展望は、最近報告された、図8に示す各世代のマイクロガスタービン性能予測⁹⁾に端的に示されている。

マイクロガスタービンの主たる機械損失である軸受についても技術開発が望まれる。欧米のマイクロガスタービンでは、航空機エンジン転用の空気軸受を採用している例が多く、これによって損失を極めて小さくし、さらに潤滑に必要な補機とメンテナンスを不要にして



図7 セラミックタービンローター⁶⁾

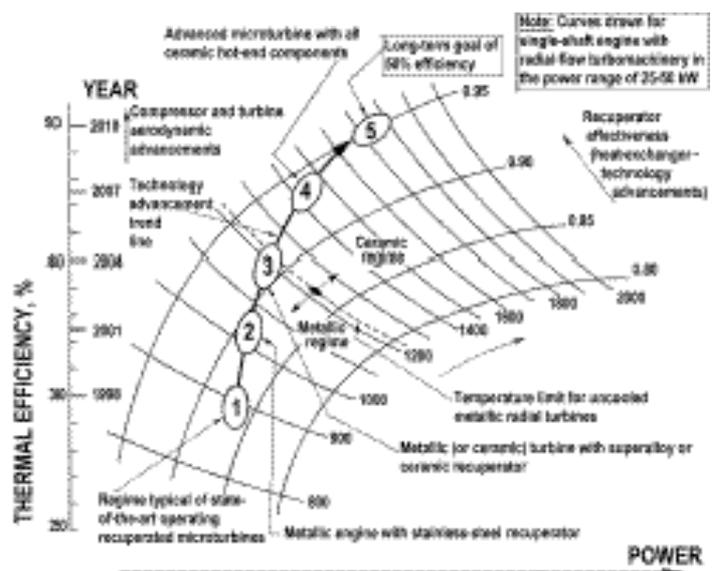


図8 マイクロガスタービンの開発性能予測¹⁰⁾

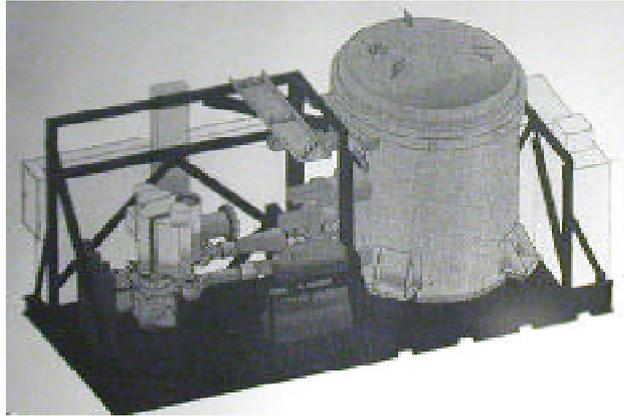


図10 マイクロタービン・固体電解質燃料電池ハイブリッドシステム試験プラント¹²⁾

システムが構想されている¹⁰⁾。燃料電池としては、運転温度の比較的高い、固体電解質型(SOFC, 約1,000℃)、熔融炭酸塩型(MCFC, 約650℃)が検討の対象になっているが、用途と社会環境に最適なシステムの設計開発が重要である。一例として、図9に小型化を狙った30kWのマイクロタービン・SOFCハイブリッドシステムの構成と得られる発電効率を示す¹¹⁾。30kWという小規模のシステムを想定したことは、ハイブリッドシステムでは小型化に伴うガスタービンの要素効率劣化がシステム全体性能にあまり影響しない一方、SOFCの製造が容易になることを背景にしている。SOFCセル温度が950℃、TITが1200℃で、効率は60%を超えることがわかる。Siemens Westinghouse社による、電気出力197kW(燃料電池AC162kW、マイクロガスタービンAC40kW)、熱効率56%(LHV)の試験プラント¹²⁾を図10に示す。燃料電池の高圧化がコスト、効率の面で有利であることが報告されている。

4. 小型分散エネルギーシステムの課題

新世紀初頭は、世界的な電力市場の自由化と、小規模設備も含めた分散発電新技術の研究開発が相互に加速を促すことになろう。近未来の小型のCGSにおいて市場性、環境適合性に優れているのは、既存のGEに加えて、マイクロタービンとPEFCである。特に、マイクロタービンは10～数百kW小型分散型エネルギーシステムの基幹要素として着実にその地位を築きつつある。熱効率、排ガス、排熱利用、運転制御性などで優れたガスタービンの原理的長所を活かしたシステム設計が可能となるはずである。今後2005-2015年に向けて一層の高効率化、小型化¹³⁾、低コスト化が必要である。我が国には、そのような開発の基盤となるシーズ技術、例えば、セラミックスを始めとする材料設計・製造技術、計算機シミュレーションを含めた熱流体設計・制御技術、高性能伝熱技術、触媒燃焼を含む燃焼制御技術、トライボロジ技術、振動騒音防御技術、最適化設計技術、そして発展の著しいマイクロマシン技術等に関する誇り得る知的資産がある。これらによって、優れた要素技術の開発が可能となろう。

PEFCは自動車用の大量生産によるコスト低減が予想されるが、排熱温度が80℃と低いので、家庭用以外の分散システムとしては難点がある。定置用としては、SOFCに期待が大きい。加えて、発電効率60%を超えるSOFC・マイクロタービン・ハイブリッドシステムの開発も国家的開発目標として設定すべきである。

分散電源の発電効率の改善に加えて、排熱の有効利用がなくしては大型集中発電に対する真の優位性はないことも銘記すべきである。暖房、給湯、乾燥、殺菌、プロセスなどの温熱、そして冷房、冷凍など、多種の温度レベルの熱需要に適合する排熱利用機器の開発、それらのモジュールを適切にシステム化するソフトウェアの構築も重要である。時空間的な需要変動に対応するための、蓄電、蓄熱、運転制御、系統連系の技術も必要になる。小型高密度の2次電池、優れた蓄熱材などが開発されねばならない。家庭用システムには、世代を越えた共感が得られるフレンドリィで協調支援型のシステムの開発が目標となる。

分散発電の燃料供給インフラも基本的な課題である。灯油やプロパンが適する孤立地域は別としても、多数の分散電源には天然ガスが向いている。開発の進むロシア、中国の天然ガスを東アジアパイプライン網の建設によって導入すれば、我が国のエネルギーセキュリティ、炭酸ガス排出削減にとって好ましい。天然ガスを利用した社会インフラは、将来の水素社会への移行にも整合性が高いと言える。

電力市場の自由化にとって不可欠なのは、様々な分散電源の系統連系、運転管理、保守の技術の確立と、系統全体の電力安定性の確保である。多数の分散電源が系統電力も含めてどのように相互連携するのかが十分に検討されねばならない。小型分散電源に関しては、新技術に対する技術基準、電気主任技術者やボイラ・タービン主任技術者の選任制度、技術員常駐・監視義務、系統連系ガイドラインなど関連規則は多数に昇るが、技術の安全性を十分見極めた上でこれらの見直しが必要である。すでに述べたように、電力供給の基本的な考え方にも今後変化が生まれてこよう。電力網は公共財とし、発電、送配電を切り離してIPPなどに開放することが欧米の趨勢である。しかし、日本の国土と社会は、系統電力網が隅々にまで整備された特殊な条件下にあり、他の社会制度との関係も含めて税制、電力・燃料料金体系の時代に即した見直しが望まれる。さらに、総合エネルギー利用効率90%を越える高度な小型分散エネルギーシステムの管理、保守、保全システムとして、ネットワークを駆使した情報技術の開発も急務である。

従来にない小型の分散エネルギーシステムの普及が見えてきた今、分散と集中とのベストミックスによって、いかに個性化共生社会への道筋を構想すべきか、我が国が東アジアの中で負うべき役割の観点からも、そして地球環境の観点からも一層の努力を集結すべき時代を迎えている。

参考文献

- (1) 笠木伸英，マイクロタービンの現状と課題，環境資源対策，35-10 (1999)，976-983。
- (2) 笠木伸英，マイクロガスタービン・分散エネルギーシステム，エネルギー研究総合推進会議第7回講演会，工業技術院筑波研究センター (2000)，2-13。
- (3) 平田賢，地球温暖化対策技術と天然ガスパイプラインの展望，エネルギー・資源，19-4 (1998)，303-309。
- (4) P. O'Brien, Development of a 50-kW, Low-Emission Turbogenerator for Hybrid Electric Vehicles, ASME Paper 98-GT-400 (1998).
- (5) 飯尾雅俊，高村東作，携帯用ガスタービン発電機の熱交換器開発，日本ガスタービン学会誌，24-96 (1997)，48-53。

- (6) T. Tastumi, I. Takehara and Y. Ichikawa, Development Summary of the 300 kW Ceramic Gas Turbine CGT302, ASME Paper 99-GT-105 (1999).
- (7) 吉田真, 田中広一, 寺園博文, 久保敏文, 平隆晶, 鶴園佐蔵, CGT302 セラミック部品開発, 日本ガスタービン学会誌, 27-5 (1999), 322-328 .
- (8) C. F. McDonald, Heat Recovery Exchanger Technology for Very Small Gas Turbines, Int. J. Turbo & Jet Engines, 13 (1996), 239-261.
- (9) A. F. Massardo, C. F. McDonald and T. Korakianitis, Microturbine/Fuel-Cell Coupling for High-Efficiency Electrical-Power Generation, ASME Paper 2000-GT-175 (2000) .
- (10) A. Layne, S. Samuelsen, M. Williams and P. Hoffman, Developmental Status of HYBRIDS, ASME Paper 99-GT-400 (1999).
- (11) 上地英之, 笠木伸英, 君島真二, マイクロガスタービン・燃料電池複合システムのサイクル解析, 第7回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, 00-11 (2000), 188-193 .
- (12) S. Veyo and W. L. Lundberg, Solid Oxide Fuel Cell Power System Cycles, ASME Paper, 99-GT-356 (1999).
- (13) 福永茂和, 上地英之, 笠木伸英, サイクル解析 GUI ソフトウェア開発とマイクロガスタービン概念設計, 第28回ガスタービン定期講演会 (2000), 141-146 .