

1. はじめに

21世紀は、人類が持続的な発展を可能とするような様々なインフラを構築すべき時代であるが、なかでも、エネルギーの安定確保、環境と調和した利用は重大な課題のひとつである。究極的な持続可能なシステムが、太陽エネルギーあるいは核エネルギー利用のどちらであれ、そこに至る50年、100年に相応しいエネルギー利用を構想する必要がある。問題は多様で、困難であるが、まずは化石燃料の使用をいかに高効率かつクリーンにするかが喫緊の課題であろう。炭酸ガス排出量の削減には、コージェネレーションをはじめとするエネルギー利用のハイブリッド化、そしてエネルギー当たりの炭酸ガス発生量の少ない燃料への転換、すなわち石炭、石油から天然ガスへの転換策に即効性が期待できる。これらの方策への転換はIPCC第二次レポートでも有力なオプションとして位置づけられている[1]。期待が大きい熱機関はガスタービンである。我が国におけるガスタービンの普及は、発電プラント、特に高い熱効率を実現する蒸気タービンとのコンバインドサイクルプラントの導入によって過去30年にわたって着実に進展してきた。最新の次世代ガスタービン・蒸気タービン複合発電プラントでは、タービン入り口温度(TIT)は1500℃、熱効率は約58%(LHV)に到達しつつあり、さらに次々世代型火力発電プラントではタービン翼の蒸気冷却を採用して熱効率60%(LHV)をねらう。

このようなコンバインドサイクルプラントは、熱エネルギーを高温から低温まで順次機械エネルギーに変換するというエネルギー利用の基本則に合致したものである。さらに、プラントから排出される低温の熱を熱源として利用できれば、一層のエネルギーの有効利用が達成できる。すなわち、コージェネレーションの導入である[2,3]。ところで、排熱利用はその利用者に近接した立地で容易であることは明らかであるから、利用者の規模に応じた分散型コージェネレーションシステムが構築され、大規模発電プラントからの送電網とうまく系統化されることが望ましい。そういった観点からは、ミニ(電気出力5～200kW)あるいはマイクロ(同0.3～5kW)コージェネレーションこそ理想であり、その究極的な姿は少数の家屋集合、あるいは一戸建ち家屋ごとのコージェネレーションシステムの構築ということになる。新世紀には、個性化した個人や家庭毎の多様な生活様式が共存できる社会システムを構築すべきであり、そのためには、世帯・小規模地域社会が管理単位となる小型で制御性に富む分散型エネルギーシステムの開発・導入が必要となる。このような家庭に入り込んだエネルギーシステムは、家電製品や自動車と同じように我々の生活に溶け込んだものになり、従って社会の隅々までエネルギーや環境に対する意識の浸透が促進されるものと予想される。

最近国外では、新しい関連技術の開発が顕在化している。米国では、カリフォルニア州を始めとして電力・ガス事業の規制緩和は急速に浸透しつつあり、独立発電事業者(IPP)の増加も顕著である。このような中で、分散電源あるいは分散コージェネレーションにおけるガスタービンの役割は注目され、後述のようにマイクロタービンをパッケージ化した超小型分散電源も市場に現れ始めている。本稿では、このようなミニ、マイクロコージェネレーションを支える熱機関として開発、製品化が進んできたマイクロタービン(以下、MT)の現状と今後の課題について述べたい。

2. マイクロタービンの特徴と開発状況

ガスタービンは熱エネルギーを機械的なエネルギーに変換する回転式の熱機関のひとつである。図

*Present Status and Future Directions of Microturbines

**Nobuhide KASAGI 東京大学大学院工学系研究科 教授

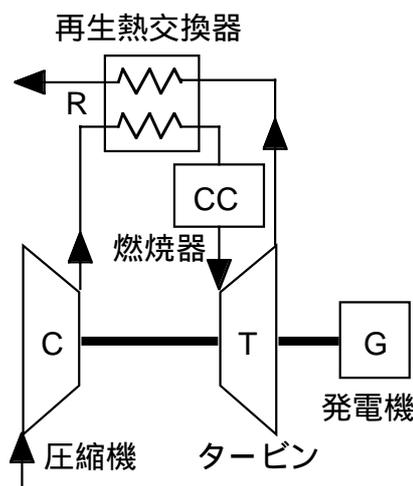


図1 再生サイクルガスタービンの構成図

1に示すように、大気を圧縮機で圧縮し、燃料を吹き込んで燃焼させ高温高压のガスを作り、これをタービンで膨張させて仕事を取り出す。タービンの仕事の一部は圧縮仕事に費やされるので、残りの仕事が熱機関としての正味の仕事になる。図1のシステムでは、さらに再生熱交換器(レキュペレータ)を組み込み、そこでタービン排気ガスから圧縮空気へ熱回収を行い、燃料の投入量を削減する。このような再生ガスタービンは、比較的容積の大きなレキュペレータの設置が可能な事業用や車載用の中小型のガスタービンで高い効率を達成する経済性のある方法である。最近欧米で相次いで発表されているMTは、100kW以下の再生ガスタービンで、分散電源用あるいはハイブリッド車用として注目されている。

ガスタービンは、構造が単純で補機が少なく、運動機構に無理がなく、起動あるいは負荷変動特性に優れ、制御性が高く、運転・保守が容易で、多種燃料使用が可能であり、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。また、他のエネルギー変換機械との整合性も高く、コンバインドサイクルやハイブリッドシステムを組み易い。従って、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。

1998年ストックホルムで開催された米国機械学会TurboExpo'98では、100kW以下のMTがハイブリッド自動車用、あるいはパッケージ化した分散電源装置として展示され、関連研究論文の発表も目に付いた。本年の同会議はインディアナポリスで開催されたが、MTの新たな概念設計、製品化、市場予測などが規制緩和の波に乗って話題となった。以下にその幾つかの例を示す。

Capstone Turbine Corporation (Tarzana, CA)は、1996年のASME TurboExpo'96で"Unit-Size"ガスタービン発電機を発表して話題となった。航空機補助電源ユニット(APU)やターボチャージャーなどを手がけてきた初代社長のPaul Craig氏は、低コスト、大量生産の小型ガスタービン発電機を構想して1988年にこの会社を設立したという。特徴として、航空業界で実績のある空気軸受を導入している。今年になってパッケージ化された製品が出荷されているが、表1、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、TITが840

程度、熟効率26%、NO_x、COとも9ppm以下(0.15%)、パッケージ重量約300kgで販売価格500万円程度と聞いている。生産台数の増加と共にkW当たり10万円を十分下回ることを想定している。メンテナンスフリーで寿命40,000時間という。本機を搭載したハイブリッド電気バスが、今年のTurboExpo'99で展示されたが、排気温度が260~270℃あるので吸収冷温水器とつなげれば集合住宅規模の用途には検討に値しよう。

表1 マイクロタービン性能・仕様の比較

メーカー名	Capstone	Allied Signal	NREC	Bowman	Volvo/ABB (Vattenfall)	トヨタタービン アンドシステム	日産自動車
システム呼称	Model 330	Turboqenerator	PowerWorks	TG45	試作機	TG051	DynaJet 2.6X
タービン形式	一軸再生式GT	一軸再生式GT	二軸再生式GT	一軸再生式GT	一軸再生式GT	一軸単純解放式GT	一軸再生式GT
定格発電出力	28 kW	75 kW	70 kW	45 kW	38 kW	50 kW	2.6 kW
発電効率(再生器on)	26% (LHV)	28.5% (LHV)	33% (LHV)	22.5% (LHV)	28%		8-10%
発電効率(再生器off)				13%		13.1% (LHV)	
総合効率		60-80%	88% (HHV)	75-85%	80%		
排ガス温度	270	250	200	275	245	650	250
タービン回転数	96,000 rpm	65,000 rpm	60,000 rpm	99,750 rpm	90,000 rpm	80,000 rpm	100,000 rpm
タービン入口温度	840	930	870		910		850
タービン出口温度		650		680	625		690
圧縮機圧力比	3.2	3.7	3.3	4.3	4.1	4.6	2.8
軸受	空気軸受	空気軸受	油潤滑	油潤滑	油潤滑		転がり軸受け
燃料種別	天然ガス	天然ガス, 灯油, 軽油	天然ガス, プロパン, ディーゼル燃焼	天然ガス	天然ガス	A重油, 灯油, 都市ガス1.3A	灯油, 軽油
燃料消費率	9.3 Nm ³ /h (1.3A天然ガス換算)	22.2 Nm ³ /h, 26.8 /h, 25.7 /h	18.4 Nm ³ /h (1.3A天然ガス換算)	17.3 Nm ³ /h (1.3A天然ガス換算)	11.7 Nm ³ /h (1.3A天然ガス換算)	38 /h, 41 /h, 3.3 Nm ³ /h	4.5 /h
重量	489 kg (含ガスコン)	1,540 kg (含ガスコン4台)	1,360 kg	1,000 kg		120 kg	62 kg
パッケージ寸法 (mm ³)	714 x 1345 x 1899	2334 x 1219 x 2163	890 x 1420 x 2260	800 x 2000 x 2380		~ 500 x 400 x 800	782 x 424 x 440
騒音	65 dB@10m	65 dB@10m		75 dB@1m	70 dB@3m	85 dB@1m	55 dB@7m
NOx	9 ppmv	25 ppmv (保証値) 9 ppmv (目標)	9 ppmv		14 mg/MJ fuel		
CO	9 ppmv		25 ppmv		8 mg/MJ fuel		
寿命	40,000 hrs.	40,000 hrs.	80,000 hrs				
電気出力	400-480V, 50/60Hz (二相交流)	120/208V, etc. 50/60Hz (二相交流)		400V, 50/60Hz (二相交流)	400V, 50Hz (三相交流)		100V, 50/60Hz
発電器形式	永久磁石式	永久磁石式	誘導発電機	永久磁石式	永久磁石式同期型		永久磁石式同期型

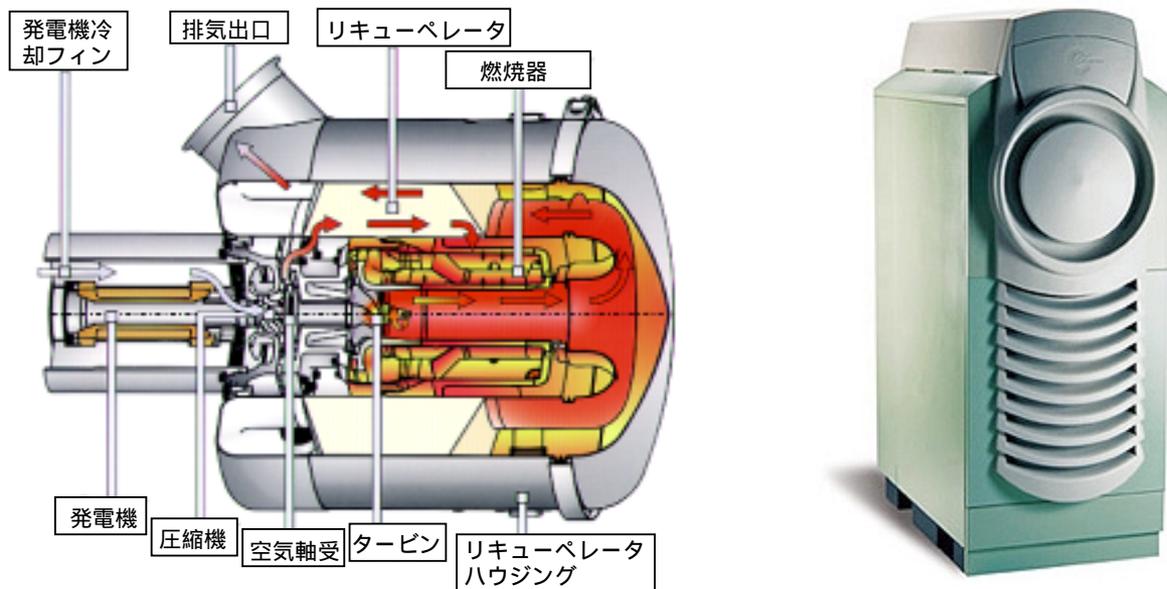


図2 Capstone社マイクロタービン（同社カタログより）

AlliedSignal Turbogenerator Systems (Torrance, CA)は、昨年ハイブリッド電気自動車用の50kW ガスタービン発電機の開発を発表したが[4]、今年に入りパッケージ化した分散電源装置に仕上げてきた。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，効率28.5%，回転数65,000rpm，永久磁石発電機で出力75kW，燃焼器は触媒燃焼方式でNOx 9ppm(15%O₂)以下である。図3にローターとパッケージ外観を示す。同社も効率改善と、価格\$300/kWを目標にしている。

NREC (Northern Research & Engineering Corp., Woburn, MA)はIngersoll-Rand社の子会社で、PowerWorksの商品名で30kW～250kWのMTを開発中である。図4にシステム構成図とその外観を示す。二軸再生ガスタービンで、効率90%のレキュペレータの採用によって熱効率は33%、コージェネレーションでの総合熱利用率が88%に達する。パッケージ寸法は奥行889×幅1420×高2260mm，重量は1360kgである。パワータービン軸出力をギアボックスで減速し、誘導発電機を駆動している。NOxは9ppm(O₂15%)以下，COは25ppm(O₂15%)以下である。寿命は80,000時間という。

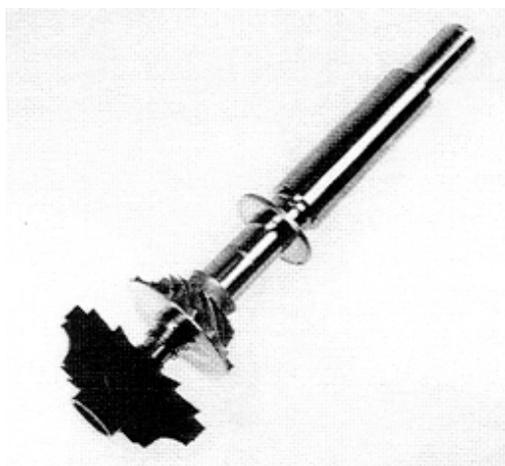


図3 AlliedSignal社マイクロタービンローター[4]と外観図（カタログより）

表 1 に示すように、その他、英国の Bowman Power Systems 社、米国の Elliott Energy Systems 社、オランダの Mega Limburg 社、スウェーデンの Vattenfall 社 (Volvo Aero Turbines/ABB 共同出資) 等が、類似の MT 発電システムを開発しつつある。一方、国内では日産自動車がいち早くターボチャージャー転用の小型移動電源ユニットを開発商品化している[5]。一軸再生ガスタービンで、出力 2.6kW、寸法もコンパクトに仕上がっており、大人二人で持ち運びできる重量である。機械損失が大きく熱効率は 10% 以下に留まっているが、価格を下げて商品化に成功している。最近では、トヨタ自動車タービン部門を独立させて新会社を設立し、冷凍機駆動用の MT を開発している。

以上を概観すると、現状の MT 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、空気軸受を採用した場合に機械損失は小さく、保守も不要である。出力は 100kW 以下であるが、TIT は 850 ~ 1000 程度で、効率は 30% 程度に達する。現在のところ、初期コストはレシプロエンジンより高いが、寿命・保守の面で有利となる展望がある。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 に変換する。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 (NOx は 9ppmv 以下)、また静穏で振動も少ない。なお、軽油やメタンも使用可能で、予備ないし非常用電源としての用途もある。なお、都市ガスを燃料とする場合には、加圧のためのガスコンプレッサが必要で、現在のところこのコストが高い。パッケージ化されたシステムの価格は出力規模によって差があるが、およそ \$1000/kW 前後で、今後の市場規模によっては大幅に値下がりする可能性がある。

3. マイクロタービンの今後の課題

前節で述べたように、MT はいわば第一世代が出揃い、今後さらに市場参加するメーカーも増えて本格的な技術開発競争が始まると予想される。その際、MT の熱効率とコストが主たるターゲットであろう。現在数 ~ 数十 kW の分散電源として、効率 30% を越えるガスエンジンがあり、MT が普及するにはまず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、電力需要が熱需要を上回ることが多い我が国の条件では、高い熱効率がまず望まれる。なお、排ガスや騒音・振動の面でも条件が課せられるが、連続燃焼のターボ機械という面から

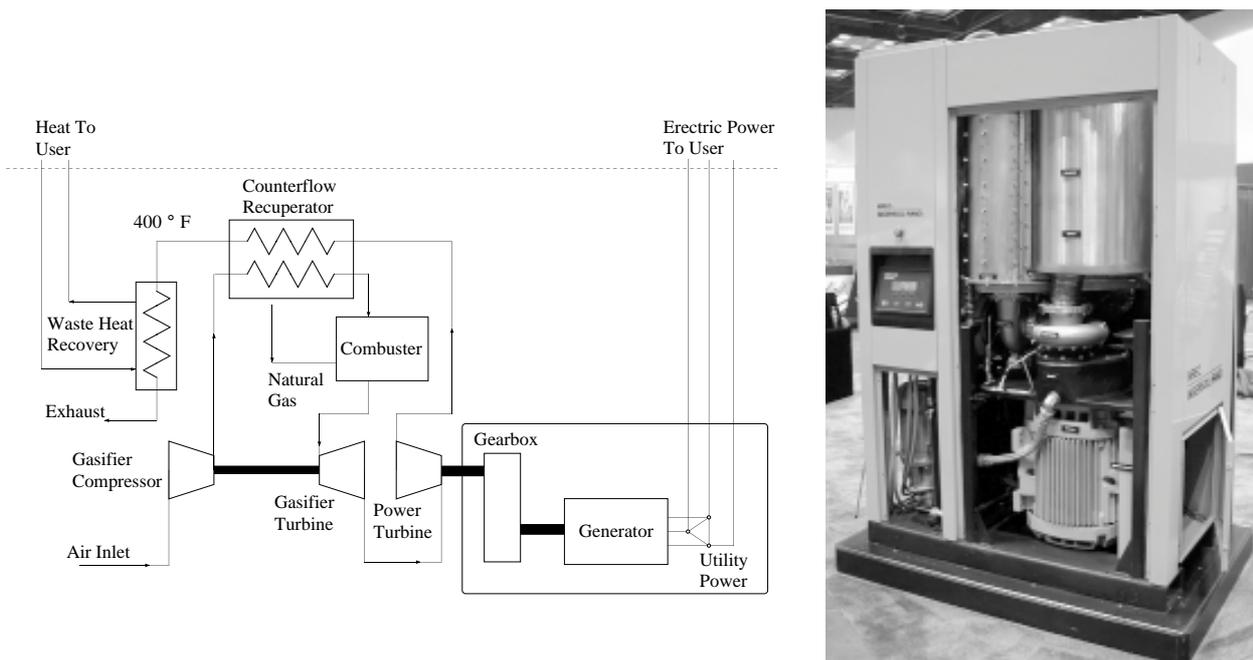


図 4 NREC マイクロコージェネレーション・システム

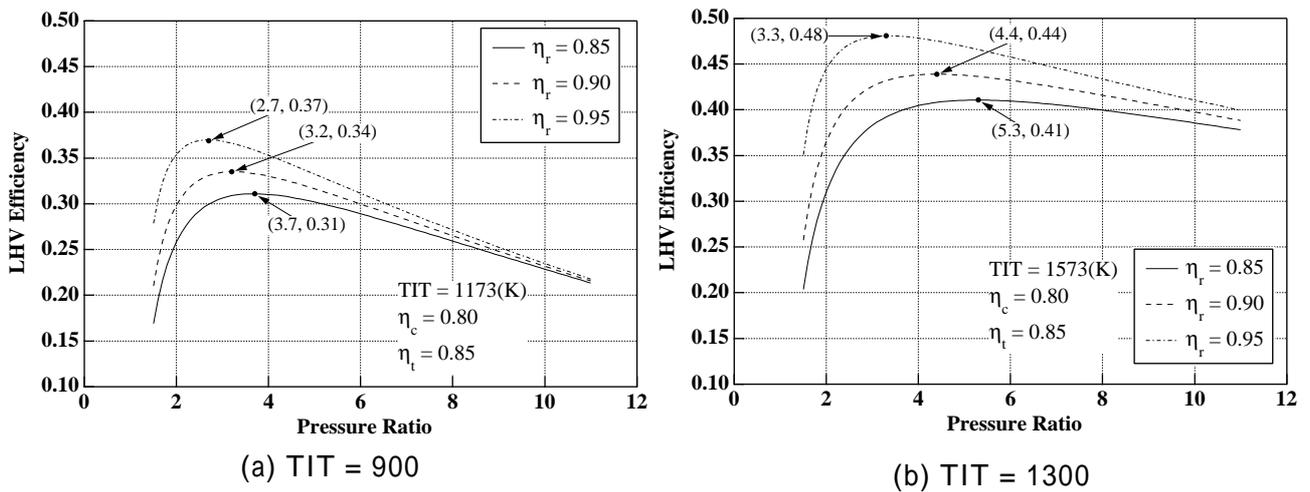


図5 再生ガスタービンの効率

はその対策は原理的に有利である。

図5 (a)は、30kWの再生サイクルの効率を、サイクル最高温度(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。レキューペレータ温度効率 η_r を0.85と考えると、圧縮比3.7で効率31%となり、Capstone社のMT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 η_r である。両者が高い値を取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、 $\eta_r=0.95$ とすれば、効率は40%を遙かに上回る(図5 (b))。そして、これは実際到達可能な技術といえる。

ガスタービンの高温部、即ち燃焼器やタービンは高温の燃焼ガスにさらされるので、従来から耐熱材料開発や冷却翼設計が行われてきたが、無冷却のセラミック翼に期待がかかる。我が国では1988年度から通産省主導による自動車用100kW[10]、発電用300kWのセラミックスガスタービンの開発プロジェクトが進行し、本年春一連の活動を終了した。この成果として、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T302を製作して、TurboExpo'99で注目を浴びた[7](図6)。TIT=1334の条件で軸出力は321.6kWを記録し、目標の熱効率42%を達成した。類似のセラミックタービンが石川島播磨重工業、日本ガイシ、そして海外ではAlliedSignals社、Volvo Aero社でも開発中であるが、セラミックス技術では我が国は一步も二歩もリードしていると言える。

図5で注目したいもう一つの点として、レキュー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

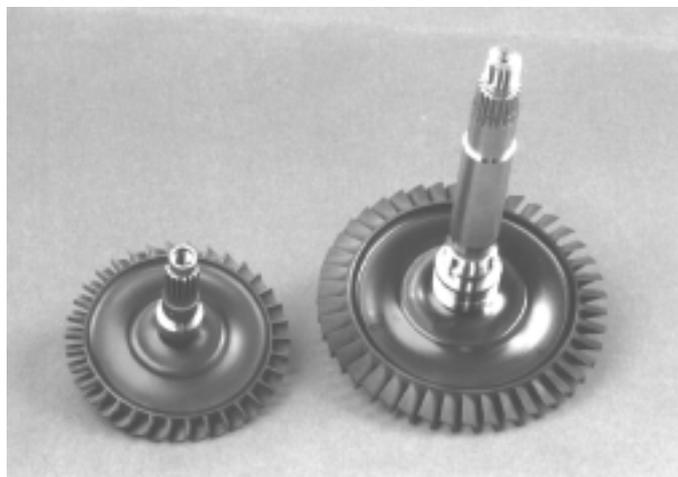


図6 セラミックタービンローター[7]

て有利であり、また後述の燃料ガスの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]。AlliedSignal社のMTではSolar Turbines社の高性能レキュペレータを採用して成功している。現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。今後は、セラミックス[9]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。

ガスタービンの小型化で効率低下の起こる一因は、コンプレッサ、タービンとケーシングとのクリアランスからの漏洩損失が大きくなることである。従って、熱膨張を考慮した設計と精密加工技術によって、あるいはアブレードブルなケーシング材料を採用し、高度なチップクリアランスコントロールを達成する必要がある。また、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MTでは、空気軸受を採用している例が多く、これによって軸受損失を小さくし、さらに潤滑に必要な補機とメンテナンスを不要にしている。表1に示したように、MTの排出ガス清浄性は優れており、天然ガスを使用した場合、NOxは9ppmv以下で、将来の環境基準に対しても有利である。今後さらに、起動停止時や負荷変動にも排ガスの清浄性を保証できる高度な燃焼制御技術も必要になる。

米国DOEは、電力コスト、汚染物質排出、燃料消費の大幅削減を伴ったビジョン21構想を具体化しつつあるが、その一環として、ガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムの開発基礎研究を促進している[10]。燃料電池自身は、クリーンで、高効率の発電を可能とするものであるが、ガスの高圧化による効率向上、排出される炭酸ガス、水蒸気の改質器への供給という利点を利用できるガスタービンとのハイブリッドシステムが構想されている[11]。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。このようなハイブリッドサイクルの提案はすでに70年代に報告があるが、両者の技術の高度化と、規制緩和、環境問題の影響で、究極的な化石燃料エネルギー変換システムの開発に火がついたと言えよう。我が国でも遅れることなく技術開発に向けた組織的研究開発体制を構築する必要がある。

4. マイクロコージェネレーションへ向けて

MTは車載、分散電源、コージェネレーション、非常・移動電源など、用途は様々である。AlliedSignal社によれば、75kW TurboGeneratorは、その低排出ガス濃度、低コストが買われてMcDonaldsレストラン、Walgreenドラッグストアはじめ40の会社で試験運転中である。我が国での用途を考えると、分散電源、コージェネレーションシステムの利用が主となる。30～100kWの出力は、スーパーマーケット、コンビニエンスストア、大型商店、オフィスビル、ホテル、学校、マンションなどがターゲットとなる。我が国では夏期の冷房負荷が高いので、冷凍機や蓄熱装置を組み込んでシステム化することが望ましい。従って、MTのボトムングに相応しい、小型の排熱吸収式冷凍機の開発も望まれる。最近国内企業において、海外の機種を購入して性能試験、信頼性・耐久試験が相次いで開始されている。東京ガスはCapstone、AlliedSignal、BowmanのMTを購入して試験を開始しつつある。さらに、電力各社も分散型電源事業に参入する気配で、例えば、東京電力、関西電力も海外機種を購入して年内に技術評価試験に乗り出すとの報道がある。燃料と電力の供給を独立に考える時代から、必要な形態のエネルギーを適切な割合で自給・供給する時代への移行の気配が感じられる。

さらに小規模の家庭用マイクロコージェネレーションとしては、現在の30kWでは出力が過大なので、効率をあまり落とさずに数kWのエンジン開発の可能性を検討する必要がある。この出力レベルではどこかで固体高分子型燃料電池との住み分けが必要と予想され、今後の研究課題であろう。

最後に、マイクロコージェネレーションの普及には、社会の受容性が不可欠であることを記しておきたい。コストパフォーマンスが劣れば製品が売れないことは事実ではあるが、地球環境時代

を迎えたこれからの社会では、温暖化ガスの排出権設定、あるいは炭素税などの税制のグリーン化が国内外で進行すると予想される。そのような状況では、環境負荷の小さいシステムが有利であり、効率パフォーマンスの考え方を導入する必要がある。つまり、kW当たりの価格に加えて、効率当たりの価格を意識すべきであろう。初期投資は少々高くとも、効率が優れ、排ガスのクリーンなシステムが、最終的には経済性が優れたものであるという意識の浸透が必要である。また当面の課題としては、このような小型分散型システムにとっては、系統電力との適切な連携の可否が成功の鍵である。太陽電池発電導入において認可された逆潮流、売電を可能とする法規制の緩和、そしてMT運転にタービン・ボイラ技術者常駐を必要としない規制緩和が是非必要である。

5. むすび

21世紀の個性化共生社会を可能ならしめる技術としてのマイクロコージェネレーションシステムの有力なオプションの一つとして、マイクロタービンは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本来の長所を活かしたシステム設計が可能となるはずである。個人が自動車を購入する感覚で我が家のエネルギーシステムを検討する時代を構想する技術的な基盤が整いつつある。また、我が国が、地球温暖化に対して、真に国際的に責任を果たす手段の一つとしても魅力的なオプションである。

マイクロタービン開発においては欧米に遅れをとった感は否めないが、本来日本が得意とするターボチャージャー技術を起点として発展できる分野であり、今後産官学が協調して研究開発にあたれば、将来の国内外市場に参入できるものと予想される。特に、現在開発されている30kWクラス、およびそれ以下の数kWまでのマイクロタービンの開発を燃料電池との住み分けをどのように構想するかも含めて検討すべきである。我が国には、セラミックスを始めとする材料設計・製造技術、計算法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し、マイクロタービンの社会・経済的フィージビリティも検討の課題であるが、むしろ原理的に優れたものを受け入れる社会インフラを誘導する努力が必要である。さらに2010年以降の夢の技術としての燃料電池・マイクロタービン・ハイブリッドシステムに発展させられる展望もある。そして、総合熱効率90%を越える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が大きな助けとなることは間違いないであろう。

文献

- [1] IPCC[気候変動に関する政府間パネル]編；IPCC 地球温暖化第二次レポート，中央法規，1996．
- [2] 平田賢；コージェネレーション，エネルギーレビュー，1999-5，pp. 4-7．
- [3] 平田賢；二酸化炭素排出削減を目指すエネルギー転換技術の動向，環境研究，1998-11，pp. 56-65．
- [4] O'Brien, P.; Development of a 50-kW, Low-Emission Turbogenerator for Hybrid Electric Vehicles, 1998, ASME Paper, 98-GT-400.
- [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，24，1997，pp. 48-53.
- [6] 吉田祐作；自動車用セラミックガスタービンの開発動向，自動車技術，52，1998，pp. 22-28.
- [7] Tastumi, T., Takehara, I., and Ichikawa, Y; Development Summary of the 300 kW Ceramic Gas Turbine CGT302, 1999, ASME Paper, 99-GT-105.
- [8] McDonald, C. F.; Heat Recovery Exchanger Technology for Very Small Gas Turbines, Int. J. Turbo & Jet

Engines, 13, 1996, pp. 239-261.

[9] Lundberg, R., and Ferrato, M.; Ceramic Component Development for AGATA, 1999, ASME Paper 99-GT-392.

[10] Layne, A., Samuelsen, S., Williams, M., and Hoffman, P.; Developmental Status of HYBRIDS, 1999, ASME Paper 99-GT-400.

[11] Veyo, S., and Lundberg, W. L.; Solid Oxide Fuel Cell Power System Cycles, ASME Paper, 99-GT-356, 1999.

キーワード

マイクロタービン , コージェネレーション , 分散発電 , セラミックタービン , レキユーペレータ