

# マイクロガスタービン

伊藤高根\*<sup>1</sup>

## Microturbines

by

Takane ITOH

(received on March 28, 2003, accepted on May 28, 2003)

### Abstract

Recently, much attentions has been paid on a "microturbine". Distributed resources offer a non-grid connected remote power and have been integrated into a grid system with large generating stations. There are many reasons for this change, such as peak shaving, power quality and reliability, grid stability, combined heat and power (cogeneration), and energy management. A microturbine is one of the most attractive candidates for these distributed energy systems. This paper describes the history, current status and future of microturbines and their related technologies. The efficiency of a microturbine is highly desired to be increased to more than 40% in near future.

**Keywords:** Microturbine, Gas turbine, Distributed energy system, Cogeneration, Ceramic gas turbine, Thermal efficiency

## 1. はじめに

最近、分散電源という言葉とともに、マイクロガスタービン、燃料電池などという言葉が耳にすることが多い。ところで、わが国における一次エネルギーの発電に占める割合は40%を超え今後も増える傾向にある。従来この電力需要は主として火力発電所、原子力発電所、水力発電所などの大型発電所によって賄われてきた。新鋭の火力発電所ではガスタービンと蒸気タービンとの組み合わせによる高効率コンバインドサイクルの導入により発電効率は50%を越えるレベルに到達しているが、発電に伴い排出される排熱のエネルギー量は膨大である。多くの分野で技術開発努力がなされ、使用しているほとんどの機器のエネルギー効率は年々改善されてきているにもかかわらず、わが国全体で見ると一次エネルギーの有効利用率は逆に悪化の一途をたどっている。この主原因は、これら効率向上努力の効果に比べ電力需要の増大の方が大きいことによる発電所における排熱エネルギー量が結果的に増加してしまっていることにある。したがって、国全体のエネルギー効率を改善するためには従来方式の延長線を追いかけるのではなく、個々の機器の改善だけではなく国を一つのエネルギーシステムとして考えて「システムの改善」を図ることが重要である。電力供給に対して欧米を中心に規制緩和が進展し、また小型分散型電源、小型コージェネレーションなどの導入により、電力のピークカットや一次エネルギーの節約に対する可能性もあることから、小型分散電源、小型コージェネレーションシステムが注目されている。そこで、代表的な分散電源として注目されているマイクロガスタービンに関し、開発の経緯、特徴、将来に向けての課題等を解説する。

## 2. マイクロガスタービンの開発経緯と特徴

分散電源システムに関連した原動機としては従来ディーゼルエンジン、ガスエンジンが使用されているが、最近マイクロガスタービン（以下MG Tと略す）が開発され、性能的にもコスト的にも優れた特性を有するため最近特に注目されている。MG Tは当然ガスタービンの一種であるから、航空機用や産業用のガスタービンとは原理的には当然同じものであるが、開発の経緯をはじめ、いろいろな面でかなり様相が異なっている。先ず、これらについて簡単に述べる。

### 2.1 MG Tの開発経緯

通常の大型ガスタービンが性能向上のために採用してきた手段は、タービン入口ガス温度の高温化とそれに伴う圧縮機の高圧力比化である。小型ガスタービンの場合には、タービン翼等の大きさが極めて小さいから複雑な翼の内部冷却構造、高価な製造技術などをそのまま適用することはできない。そのため小型ガスタービンは熱交換器を装着し排熱を回収するという独自の手段（再生サイクル）を採用することにより効率および性能向上が図られてきた。

これら小型再生式ガスタービンの開発は、1950年初期より開始された自動車用ガスタービンの研究を通じて醸成され、エンジン構造と主要要素の形式が概ねかたまり、圧縮機は遠心式一段、タービンは軸流式1ないし2段、あるいは遠心式一段と言う構造が定着した。また熱交換器は車載するために小型高性能性を重視して回転蓄熱式と言う形式が主流となった。その後自動車を取り巻く環境がますます厳しくなる中で、自動車用ガスタービンの研究対象はハイブリッドエンジン化という方向に向けさらに小型化にシフトし、バス・トラック用でも100kW程度、乗用車用は50kW程度の容量でよく、きわめて小さなガスタービンを開発する基礎技術がその中で培われた。また、

\*1 東海大学工学部機械工学科・教授

Table 1 Specifications of Developing Microturbines

| メーカー      | Capstone  | Honeywell   | Ebara /Elliott | Turbec                     | Toyota TS               |
|-----------|-----------|-------------|----------------|----------------------------|-------------------------|
| 機種名       | Model 330 | Parallon 75 | TA60           | T100                       | TG-051                  |
| 出力(kW)    | 28        | 75          | 60             | 100                        | 50                      |
| 回転数(rpm)  | 96,000    | 65,000      | 115,000        | 70,000                     | 80,000                  |
| 圧力比       | 3.5       | 3.7         | 4              | 4.5                        | 3.6                     |
| TIT(°C)   | 851       | 930         | 930            | 950                        |                         |
| 排気温度(°C)  | 288       | 250         | 260            | 55                         | 256                     |
| 発電効率(%)   | 26        | 28.5        | 27             | 30                         | 26*                     |
| NOx (ppm) | 天然ガス      | 9           | 9              | 15-25 (16%O <sub>2</sub> ) | 9 (16%O <sub>2</sub> )  |
|           | 灯油        | 25          | 25             | 30-50 (16%O <sub>2</sub> ) | 35 (16%O <sub>2</sub> ) |
| 軸形式       | 1軸式       | 1軸式         | 1軸式            | 1軸式                        | 1軸式                     |
| 軸受け       | 空気軸受      | 空気軸受        | オイル軸受          | オイル軸受                      | オイル軸受                   |

MGTの主要部品である圧縮機、タービンなどの空力部品は形式、大きさとも航空機の補機駆動（APU）用小型ガスタービンや自動車用ターボチャージャの範疇とちょうど同じであり、そこで開発されてきた設計技術や大量生産技術、低コスト化技術などの多くの部分が流用できるという事情もある。また、ハイブリッドエンジン用あるいは補機電源用に開発された永久磁石を用いた直結式超高速小型発電機の技術も実用化可能なレベルになってきた等々の条件により、また分散型電源へのニーズの高まりもあって、100kW以下のきわめて小さなガスタービンが実用化される条件が最近急速に整うようになってきた。



Fig.2 Assembly of Rotating Parts

2. 2 MGTの特徴

従来の発電用ガスタービンと比べた場合、全体的な特徴としては、先ずきわめて小型、小容量な領域のものであることである。Fig.1に現在市販されている発電用ガスタービンの発電容量と発電効率の関係をプロットして示す。図中にはMGTの範囲も示してある。通常ガスタービンは小容量になるほど発電効率は下がるが、MGTは100kW以下でも30%程度であって、これらのグループの延長線上には存在せず異質なものであることが判る。これは無冷却構造、再生式サイクルの採用によるものであるが、商品化の考え方もまったく異なり、一品生産ではなく大量生産、低コスト化を前提に考えられている。Fig.2に回転体アセンブリの例を示す<sup>1)</sup>。構造は発電機も含めて1軸式で減速機など無くきわめて単純で部品点数も少ない。また、発電用パッケージの運転はタッチパネルの操作のみでまったくの素人でも運転可能である。現在多くの機種が開発されつつあるがこれらMGTの構造上の共通の特徴を以下にまとめておく。

- 圧縮機、タービンはラジアル式1段のものが多く、自動車用ターボチャージャとまったく同じ形式のものである。
- 熱交換器は空気もれ、耐久性、信頼性などを重視しレキュペレータと呼ばれる伝熱式のものが使われている。
- 発電機は永久磁石を用い、圧縮機/タービンシャフトに直結し減速機を持たず、タービン軸とまったく同じ超高速で回転し、電気出力はインバータで必要な周波数に変換する。
- 軸受けは、エアベアリング方式を採用する機種と従来技術のオイル潤滑方式を採用する機種があるが、メンテナンス性、低機械損失等からエアベアリング方式が目される。
- 燃焼器は低NOxを重視し、いずれも希薄燃焼方式がとられている。

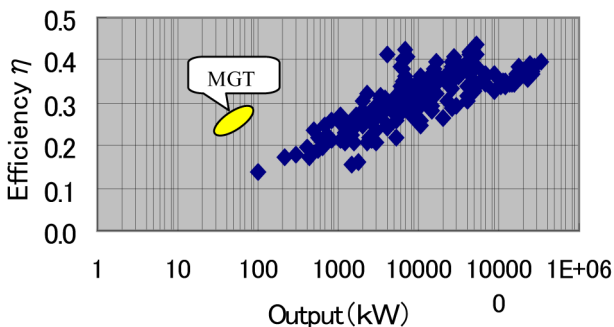


Fig. 1 Efficiency of Gas Turbine Generators

3. MGT開発の現状

MGTのほとんどの要素は既にも実績、経験のある既存技術の組み合わせから成り立っており、燃料電池などと比べると、実用化の程度がかなり進んでいると言える。しかし現実的にはまだユーザテストを実施している段階であり、本格的な量産段階には至っておらず、わが国での運用事例、また海外の運転経験もまだそれ程多くない。ここ数年、日本でも電力会社、ガス会社、製造会社等が海外メーカーが開発中の幾つかの機種を購入し、性能評価のための運転を実施しており、その実態がしだいに明らかになりつつある。

3. 1 開発中のMGTの概要

現在開発中のMGTの概要をTable 1に示す。Honeywell Power Systems社は参入は最も早かったが、社内事情により既に撤退しているが、歴史的に代表的な機種でもあるので表には載せた。この他わが国においても数社が独自の機種の開発を進めているが性能等の公表はなされていない。それぞれのエンジン

は、概ね共通した構造となっており、タービン入口温度 (TIT) は 900℃前後、圧縮機圧力比は4前後、排気ガス温度は約250℃となっている。また、性能面では、発電効率は発電容量により異なり、およそ25~30%弱、排気ガスの NOx 値は天然ガスの場合およそ9 ppm、騒音は機側10mで大体65 db程度となっている。Honeywell Power Systems 社と Capstone Turbines 社のものは空気軸受を採用しているが、他社のものは従来方式のオイル潤滑方式を採用している。代表的な機種として現在最も量産化がすすんでいるといわれている Capstone 社の Model-330 を例に性能について概要をのべる。

エンジン概観を Fig.3 に示す<sup>3)</sup>。このエンジンはハイブリッド乗用車

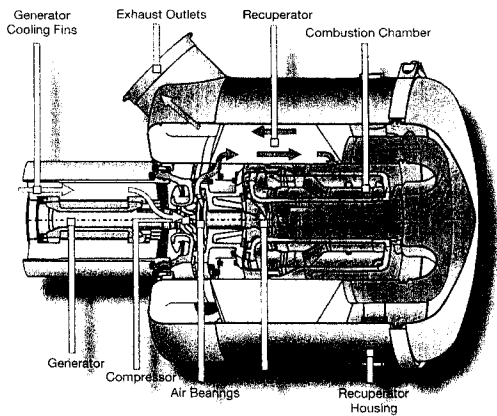


Fig.3 Capstone Model 330 Microturbine

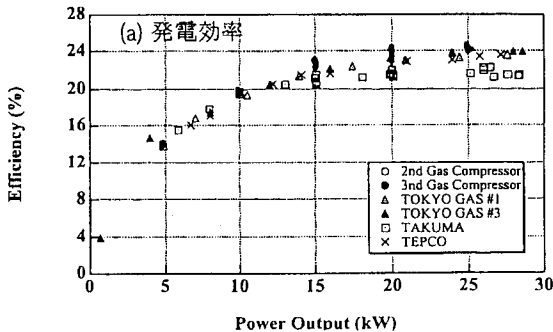


Fig. 4 Efficiency of Capstone Model 330

用エンジンとして開発されてきた物をベースとして、28kWの分散電源用に Model330 パッケージとして販売されている。軸受はラジアル荷重、スラスト荷重ともにエアベアリングを採用している。熱交換器に特徴があり、プライマリーサーフェス方式の伝熱面を採用し、円筒形状でエンジンコア部分を囲むような配置となっている。この構造により、外部への放熱を防ぐとともに、万一タービン等の回転体が運転中にバーストした時の破片の飛散を防止する構造ともなっている。コージェネレーション設備としてもユーザテスト中で、現在最も量産化に近いと言われている。Fig.4 に東京大学でパッケージを運転して得られた性能実験結果の例を示す<sup>2)</sup>。発電効率は発電出力により当然変化するが、定格点では26%とほぼカタログ値と同じ値が出ており、NOx排出特性も酸素濃度15%換算で数ppmという優れた値が報告されている。

### 3. 2 市場性

MGT は以下のような点が期待されており、現在実際のフィールドで使用され評価が進められている。

- 優れた環境性能
- 低コスト化への期待 (構造簡単, 部品点数少)
- 低メンテナンスコスト化への期待 (冷却水, オイル不要)
- 排熱利用
- 多種燃料性
- 小型, 軽量性

環境性能はクリーンな排ガス特性が市場でも実証され、騒音対策も問題の無いことが示されているが、負荷率がおおよそ60%以下の領域では希薄燃焼方式が不安定となるため拡散燃焼方式に切り替えることが行われている。したがって60%以下の部分負荷で使用する場合は排気特性は悪化することが判っている<sup>4)</sup>。

コストについては、現状でも700~1,000ドル/kWであり、量産化がすすめば100ドル程度は下がると予想され、排熱回収温水ボイラーを含め、工事費込みで1,200~1,500ドル/kW程度と言われている。同規模のレシプロエンジンをを用いたシステムが2,500~3,000ドル/kWであることと比較すると1/2以下であってその経済効果はきわめて大きい<sup>5)</sup>。

MGT の売り物の1つにメンテナンスの容易性がある。あるメーカーの説明によれば、現状では8,000時間ごとに行う燃料ガスフィルタの点検、燃焼器の点火器ケーブルのチェック、エンジン吸気用フィルタ類の交換、次に16,000時間ごとに行う排気ガスセンサ、点火器、燃料ガスインジェクターの交換等が必要と説明されているが、現在この時間はさらに延長されつつあるようである。空気軸受や、燃焼器本体等の耐久性が実際にどの程度であるか不明であるが、全負荷で連続25,000時間程度の実績報告もある<sup>6)</sup>。メンテナンスコストはメーカー説明では0.01~0.02ドル/kWhでありこれは従来機に比べ1/4程度である。わが国ではガス圧が低いため燃料ガスの昇圧ポンプが必要となるが実際にはエンジン本体よりもこの昇圧ポンプに故障が多いとの報告がある。いずれにしても、1年間、8000時間程度は無点検で運転は可能なレベルに到達しているようである。

排熱利用については、排気ガス温度レベルからも従来のガスエンジンとほとんど同じような利用の仕方が可能である。

多種燃料性はガスタービンエンジンの特徴であり、レシプロエンジンのようにセタン価、オクタン価と言った制約は無く、都市ガス、LPG、灯油、軽油、バイオマスなど液体、気体を問わず多様な燃料が使用可能である。

小型、軽量性もガスタービンの特徴で設置スペースや重量は従来システムと比較しておおよそ2/3~1/2である。

### 3. 3 期待される用途

現在開発中のMGTは、上記のように優れた市場性を備えており、これを生かした多くの用途が考えられている。特にわが国では既に電力供給網が完備され質の良い電力の供給が可能であるから独立した分散電源としてよりも、排熱を回収できるコージェネレーションとしての用途が期待されている。しかし小型コージェネレーションの場合は、発電効率と排熱利用効率を加えた総合効率で単純に評価することはできない。総合効率が高くても実際に運用した場合、負荷変動が大きい場合が多く排熱が十分に使い切れないと言うケースが多い。発電効率が送電端効率に比較して悪い場合はエネルギー的にも、環境的にもかえって悪化する可能性もある。

(財) エネルギー総合工学研究所が行った発電出力50kW、発電効率30%程度のMGTを例としたフィジビリティスタディの結果によれば、現行の電力・ガス料金を前提に、5年以内で投資回収できる市場として、熱需要の多い4業種(クリーニング店、レストラン、ヘルスセンタ、スポーツ施設)、稼働率の高い3業種(福祉施設、病院、ホテル)および熱需要の多い小規模工場が上げられている。また、集合住宅は電気料金、ガス料金等の契約料金体系が現状では存在しないが、MGT導入後一括契約で、仮に業務用と同じ料金体系になるとすれば、最も回収年限が短く、安価な蓄熱装置が開発されればきわめて有望であるとしている。また、発電効率が40%に上がり、さらに小型な10kW程度のMGTが開発されれば、熱電比の低い利用形態でも普及し、小規模の事務所、小売店、コンビニ、ビジネスホテル等でも使われる結果、10kWWMGTの潜在需要は100万台、総発電設備は10GW程度になると予測されている<sup>7)</sup>。排熱を有効利用するコージェネレーションシステムであっても、発電効率の影響はきわめて大きいことがあらためて認識され、また、この程度の需要が創出されるならば、従来ガスタービンの世界では考えられなかったような大量生産によるコストダウンも現実的なものになる。

このように、MGTはいろいろな用途が考えられ、それなりの特徴を有しており、用途によっては現状の性能でもほとんど問題ない場合もあるが、さらに発電効率が向上すれば、MGTの潜在マーケットはきわめて大きいと考えられる。

#### 4. MGTの性能向上策

現在開発中のMGTの性能は既にかかなりのレベルに達しているが、発電効率が30%以下という現状レベルは、買電の平均送電端効率が既に38%のレベルに達している現状を考えると、定常的に使用する場合にはエネルギー的、環境的にも必ずしも十分とはいえず、また排熱を利用するコージェネレーションシステムに適用する場合であっても、不十分である。ここへ来てMGTの一時のフィーバ的関心は沈静化しつつあるが、その主な理由は発電効率の低さにも原因があると思われる。従って、発電効率の一層の向上が強く望まれるわけで、今後のMGTの開発にあたり、主として効率向上のための技術的課題がどこにあるかを述べる。

##### 4.1 MGTの性能を決めるパラメタ

一般に、ガスタービンの性能を決めているパラメタとしては、

- サイクルパラメタ:  
タービン入口ガス温度(TIT)と圧力比
- 要素パラメタ:  
圧縮機、タービンの断熱効率、熱交換器温度効率  
空気流れ率、圧力損失率、放熱損失率  
機械効率(軸受損失、発電機効率、補機動力などを含む)

などがあげられる。これらのうち、最も重要な熱効率向上に関して影響する主要要素の技術的な展望と所見を述べる。

##### 4.2 主要要素の技術展望<sup>2)</sup>

###### (1) 圧縮機

マイクロガスタービン用の圧縮機は、いわゆる遠心式とよば

れるものが利用されているが、実際に開発されているもの圧縮比は、Table 1にも示されているように、3.5~4.5程度であり、発電出力が大きくなるほど高くなっている。圧縮機の効率は、一般に次式で示される比速度 $N_s$ と寸法に依存し、同じ比速度でも小型で寸法が小さくなるほど効率は悪くなる。

$$N_s = N \cdot m^{1/2} / \text{Had}^{3/4}$$

ここに、 $N$ :回転数 (rpm),

$m$ :空気流量 (kg/s),

$\text{Had}$ :断熱ヘッド (m)

通常は、効率は比速度が50~55程度のところで最も良くなるといわれており、現状のマイクロガスタービンの圧縮機もおよその範囲で設計がなされている。実際に使用されている圧縮機の断熱効率、およそ75~77%と推定され、現状の空力設計技術では上限に近いところであろう。最新のCFDなどを駆使した流路形状の最適化、羽根車とディフューザとのマッチング改善など更なる最適化により多少は改善されると思われるが、最終的には妥当なコストで製造できなければならないからあまり複雑な翼形状は採用が難しく、大幅な性能改善は期待できない、むしろシュラウドと羽根車翼先端との隙間からの洩れ損失を減らすためのシール技術の改善や、発電機冷却のために上昇する吸入空気の低温化、タービン側からの伝熱を遮断するなど泥臭いところでの改善が必要にも思える。また、圧縮機回転数の最適化に関しては、発電機と同軸で直結している構造であるから、発電機の強度設計、軸系全体の振動低減技術とも密接に関連しており、これらを十分考慮して決定する必要がある。

###### (2) タービン

タービンもラジアル式のものを用いられている。タービンの場合の内部流れは自然法則のとおり高圧から低圧に流れるから無理が無く、断熱効率は圧縮機と比べるとより高い値が期待できるが、実際には高温、高速で回転しており、流路の曲がりも強く、また翼端隙間を通じて流れる洩れ流れの影響等も受け、二次流れを含むきわめて複雑な3次元流れとなっている。また、小型であるから流れのレイノルズ数が通常のガスタービンに比べて小さく、剥離や渦が発生しやすくなる。これらを考慮したCFD技術の開発が進められ、新しい乱流モデルの提案などもなされているようだが、流れが複雑なだけに容易ではなく、実用されるまでには至っていない。現状のマイクロガスタービンのタービン断熱効率は81~85%程度と推定されるが、この値は小型タービンロータとしてはかなり良い値といえる。さらに効率向上を図るためには、翼端隙間小さくすることが重要で、特に小型になるほどこの影響は大きい。翼端隙間は軸受構造とも密接に関連しており、フォイル式空気軸受の場合は軸受隙間が大きくなると思われる。圧縮機と同様にアブレーダブルシールなどの採用が現実的と思われるが、高温となるため、耐熱性のある材料の選定が重要である。ポーラスセラミックス材料などが期待される。また、動翼出口の二次流れ損失を減少させるために、エクスデューサ部の翼を負圧面側にわずかに傾けると(リーンバック動翼)効率が数ポイント上がるとの報告もある<sup>7)</sup>。

###### (3) 燃焼器

マイクロガスタービンの一つの大きな利点として、排気ガスがクリーンであるということが上げられている。天然ガスを使用する場合、 $\text{NO}_x$ 排出量は $\text{O}_2$ 濃度15%換算値で25ppm以下、実際には数ppmが実現されている機種もある。どのエ

ンジンも基本的には予混合・希薄燃焼方式を取り入れてこれらの性能を確保しているが、負荷が低くなると火炎の安定性が得られなくなるため、希薄燃焼方式がそのまま維持できなくなり、従来の拡散燃焼方式に途中から切り替えて運転させることになる。当然排気性能はこの領域では悪化する。分散電源が大々的に普及し、その中でマイクロガスタービンが実際にどのような運転パターンで利用されていくか明確ではないが、低負荷領域でも運転し、負荷に追従して加減速運転も行うとなれば、現在の特性のままでは不十分であり、低排気濃度となる運転領域をもっと低負荷側に広げる必要がある。また、全て天然ガス焚きというわけにもいかず、灯油などの液体燃料の使用も可能とする前提で考えていく必要もあろう。技術的には液体燃料に対する低NO<sub>x</sub>化対応も当然考えておく必要がある。排気特性のほか、小型燃焼器としてその他に重要な性能は「高効率・高負荷燃焼」、[火炎の安定性]および「出口温度分布の均一性」である。マイクロガスタービンでは燃焼器も小型になるから、滞留時間はきわめて短くなり、従来の燃焼器で得られた技術をそのまま延長することができない部分も多いと思われる。具体的には、逆火を防止しながらいかに高速に均一な混合気を形成し安定に希薄燃焼を行わせるかにかかっている。これらを実現させるためのコンセプトとしては、スワローを用いて空気に予旋回を与えて火炎安定化を図るとともに、燃料と空気を供給する合流部で互いに交差するように流して高速に混合させ、拡散混合型の希薄予混合気を形成させ、逆火の防止と低NO<sub>x</sub>化を図ろうと言うものや、希薄予混合気の既燃ガスの中に希薄な予混合気を噴射してサーマルNO<sub>x</sub>の生成を凍結することを狙ったコンセプト等が研究されている。一般にガスタービン用の燃焼器ライナーは最も高温にさらされる部品であり、耐久性確保のためには冷却が必要で、従来複雑な構造がとられてきた。これらの冷却のための空気の導入は温度不均一率を悪化させ、また一次燃焼領域の希薄化にとってもよくない。その点セラミックライナーは冷却の必要が無く、300kWCGTプロジェクトの経験からも温度不均一率はきわめて低くなり、下流のタービンノズルにとっても良い結果をもたらすことが明らかになっている。高温化のためだけではなく、耐久性、性能改善面から見ても、セラミックライナーの導入は検討に値する。また、将来に向けてさらなる低公害化を目指すためには、触媒燃焼器の検討もしておく必要がある。マイクロガスタービンはTITは高くても1200℃程度であろうから、追い炊き無しでも触媒燃焼のみで燃焼させることは可能で、100kWCGTプロジェクトの実験結果では、液体燃料の灯油の場合でも触媒燃焼部出口のNO<sub>x</sub>濃度はほとんど0であった。また一般に触媒燃焼器のネックとなっている触媒と担持用ハニカムの耐熱性確保の点では1200℃程度であれば十分可能性はある。

(4) 熱交換器

マイクロガスタービンの発電効率に対して、熱交換器の影響は極めて大きい。具体的には、温度効率と圧力損失率が効いてくるが、例えば熱効率35%程度のマイクロガスタービンを考えた場合、熱交換器の温度効率が0.8のもの0.9のものとは、タービン入口温度に換算して180℃以上の差が生じる<sup>7)</sup>。この差は熱効率が高くなればなるほど大きくなり、高効率エンジンの実現には熱交換器の高効率化がますます重要となる事が判る。しかしながら、熱交換器の温度効率は基本的には伝熱面積に直接関係するから、高効率な熱交換器は当然大型化するこ

とになる。一般に、熱交換器に要求される項目としては、高効率性、コンパクトネス、低コストが重要である。エンジン発電効率を高くしようとすればTITの高温化は必須であり、それに伴い熱交換器入口ガス温度(RIT)も上昇する。材料は

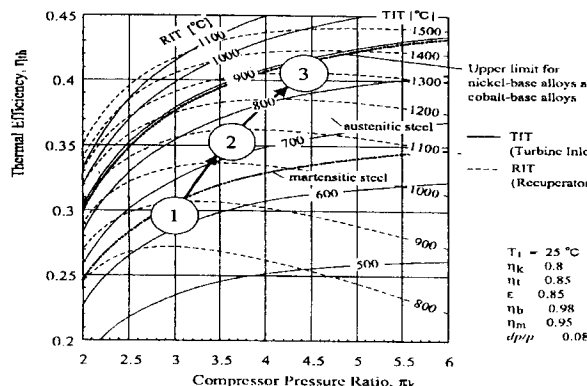


Fig. 5 Effects of Design Point on Thermal Efficiency

RITに依存し、コストは材料に依存する。Fig.5にエンジン熱効率と熱交換器のRITの関係、さらに使用可能な材料との関係が示す<sup>7)</sup>。エンジン高性能化、高温化に対して、熱交換器が一つの大きな鍵を握っていることが判る。伝熱特性を改善するための基礎的研究も行われているが、大きな技術的ブレークスルーがないかぎり、高効率性、コンパクトネス、低コストの3拍子そろったものの開発はかなり困難が予想される。現在用いられている熱交換器の方式としては、プレート・アンド・フィン型とプレート型(プライマリーサーフェス型など)があるが、プレート型は伝熱面積が小さいため多少大型になりやすいが圧力損失が小さく、低コスト化の面では有利といわれている。熱交換器については詳細はあらためて別途解説されることになっているのでここでは省略する。

(5) 軸受

マイクロガスタービンに用いられている軸受としては、転がり軸受とすべり軸受があり、潤滑方式としては気体潤滑と従来から実績のある油潤滑とがある。Honeywell社とCapstone社の製品は気体潤滑の空気軸受を採用しており、軸受損失の低減、メンテナンスの容易さからも注目される。具体的には、いわゆるフォイル軸受を用いており、本来空気軸受の欠点である低い減衰係数を高める効果を利用しているが、軸受隙間は逆に小さくとも思われ、空力部品の運転時翼先端隙間はできるだけ小さくしたいところであるが、逆に広く取らざるを得ないのではないかと推測される。また、空気軸受の採用は潤滑オイルが不要となり、メンテナンス上きわめて有利といわれている。しかしながら、あるメーカーによれば、軸一体で直結して回している発電機の冷却は、発電容量が大きくなると空気冷却では無理で、いずれは油で冷却する必要があり、すべての大きさの機種を空気軸受で対応するのは無理であるとしている。空気軸受は新しい技術であり、特にわが国では研究開発が遅れている。通常の油潤滑式の軸受についても回転数はきわめて高いから転がり軸受の寿命等は十分検討する必要がある。

4. 3. 性能向上に向けて

マイクロガスタービンが出現し、一時期のフィーバ的な状況は漸く収まり、火付け役であったHoneywell社も撤退するという

状況となっている。じっくりと腰を落ち着いた検討が必要な時期と思われる。確かにマイクロガスタービンは多くの利点を持っており、現状の性能でも十分実用化に耐えられる市場もあると思われるが、今後大々的に市場に普及していくためには、発電効率が30%以下という点はやはりネックとなるであろう。特にわが国のように電力網がすでに高度に発達していて、送電端効率もやがて40%に到達するであろうから、排熱を回収するコージェネレーションシステムとしての運用を前提としても、小型分散電源がエネルギー効率、環境の面からも有利となるためには、発電効率の向上は必須であろう。しかしながら、いままで述べてきたように、各要素の効率は既にかかなりのレベルになっているから、これをさらに数%も向上させることはほとんど不可能であろう。効果的な方法は、やはりTITの上昇と、熱交換器の温度効率向上となる。Fig.6は熱交換器の温度効率が0.85の場合(上図)と0.91の場合(下図)のエンジン比出力と熱効率をTITをパラメータとして計算した例である<sup>(4)</sup>。TITは華氏で表示されているので注意を要するが、一番温度の高い1900度は1038℃に当たる。図を見て判るように、熱交換器の温度効率向上はきわめて効果大きい。同じ1900度で比較しても最高効率は3%程度高くなる。しかもそのときの最適圧力比は4.2程度から3.3程度に下がっており、これは圧縮機の効率向上の面からも有利に働く。これに関連して、NRECの開発しているマイクロガスタービンは70kW機であるが、発電効率33%を達成しており、最も高い性能を出している。ちなみに圧縮機圧力比は3.3と最も低い。また、TITの効果はあらためて言うまでもない。高効率を狙うのであればやはりセラミックス化は避けてとおれない道であろう。幸いわが国はこの方面の技術では一歩リードしており、この技術を最大限に利用する必要がある。TIT200℃以下ならば現在の窒化珪素材は十分使用可能なレベルにある。

### 5. おわりに

今後、発展途上国における電力需要、エネルギー需要の増大は目に見えているが、先進国が歩んだ道をそのままたどるのは、あまりにもばかっている。はじめから必要なところに性能の良い分散電源を投入出来れば、エネルギーの面のみならず、建設費、建設工期、運転コスト等でも有利となるはずである。現在開発されているマイクロガスタービンに関しては、残念ながらわが国は米・欧の後塵を拝してきた。さらに、米国では40%実現を目標に国が援助して検討が既に進められている。わが国も多少時間はかかるであろうが、思い切って40%程度の発電効率の実現を目指し、産官学の国を挙げて開発にとりかかり、一気に追い抜くぐらいの気概で当たるべき時期であろう。

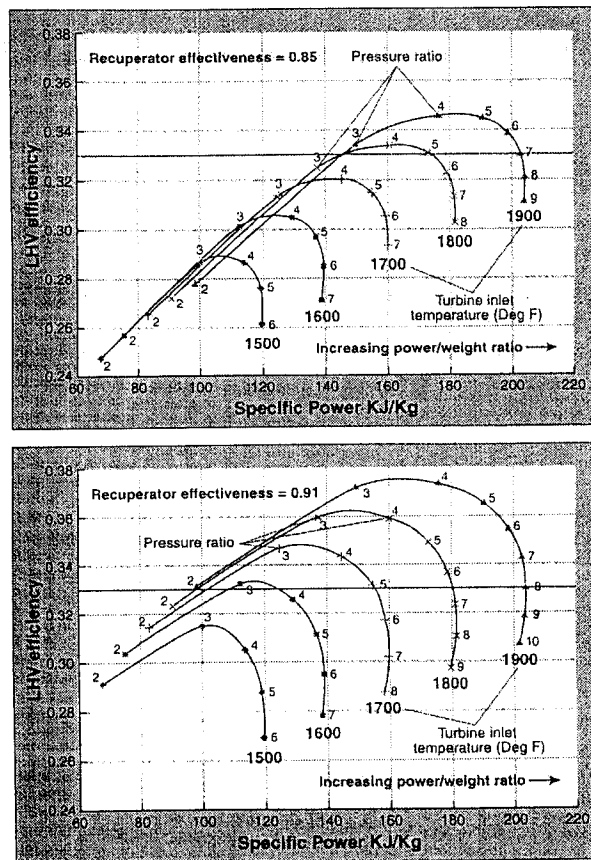


Fig.6 Efficiency vs. Specific Power for a Recuperated Engine

#### 参考文献

- 1) Richard Sanders, Power Magazine, Dec. 1998, pp27
- 2) 伊藤高根：マイクロガスタービンの要素技術、ガスタービンセミナー第31回資料集、(2003) 71~79
- 3) Victor de Biasi, 'Low cost and high efficiency make 30 to 80kW microturbines attractive' GAS TURBINE WORLD, January-February 1998,31
- 4) 笠木伸英,浜島芳晴,黒田英信,三輪潤一,君島真二：28kW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、(2001)、83~88
- 5) 三浦千太郎：エネルギー利用効果向上へマイクロタービン開発、ENERGY,2000-8, 9
- 6) RC165超小型ガスタービン利用分散型エネルギーシステム研究報告書、日本機械学会,May 2001
- 7) James H. Watts, Global Gas Turbine World, Jan.-Feb., 1998, pp7.