

汎用中小型ガスタービンの技術系統化調査

Systematic Technological Review of General-Purpose Small to Mid-sized Gas Turbines

星野 昭史 Akifumi Hoshino

■ 要旨

本調査は 1970 年代後半頃から国内において急速に需要を拡大した防災用途の発電装置用をルーツとし、その後各種の非常用発電装置やコージェネレーションシステム等の駆動源として市場を広げてきた国産の小容量陸船用ガスタービンを対象に実施したものである。

国内の陸船用ガスタービン生産の現状は、容量ベースで言えば全体需要の 85% は事業用を中心とする“大型常用発電用途”が占めており、一方台数ベースで見ると全需要の 70% が“中小型の非常発電用途”となっている。即ち、国内の陸船用ガスタービンの生産統計を見ると、それらの用途は上述した二つに大きく二極化されている事が判る。

昨年度調査報告された「産業用大型ガスタービン」はこの二極化した一方の“大型常用発電用途”を対象としたもので、本年はもう一方の“中小型非常発電用途”を中心とした「汎用中小型ガスタービン」について調査報告するものである。

ガスタービンは第二次世界大戦後、航空用として大きく発展しその成果が陸船用にも波及して地上用途の拡大をもたらした。わが国では敗戦後直ちに施行された「航空禁止令」により航空用エンジンについては 7 年間の完全空白期間が生じた結果、開発／設計等の先端分野では先進諸国に対して決定的な遅れをとる事となった。一方、陸船用の場合も戦後暫くは低迷時期が続いたが、1970 年代に入ると日本経済の成長と共に事業用のガスタービン発電所等の新規需要が活発化して大型部門の市場が徐々に拡大していった。また小型陸船用ガスタービンについて、1960 年代後半頃から世界的な流れを受けて車両用ガスタービンの研究開発が自動車メーカを中心に活発に行われたほか、航空用ガスタービンの地上用途転用等輸入エンジンによる小型ガスタービンの陸船用途開拓が国内の各方面で盛んに試みられていた。

このようななか、1974 年に実施された消防法の大改正によりビルや大型店舗等に対する防災用発電設備の設置義務が強化され、これを契機にして小型ガスタービンを駆動源とする非常用発電装置の評価が急速に高まりその需要が拡大していった。即ち、従来この市場はディーゼルエンジンがほぼ独占していたが、これに対してガスタービンは圧倒的に小型軽量で振動騒音が少なく、しかも冷却設備が不要等の特長を持っており、据付工事及び保守の容易さ等が高く評価されて非常用途に適した新しいタイプの原動機として急速に市場へ浸透していった。

此处で非常用発電市場に新しく登場した小容量のガスタービンは当初純国産品は少なく多くは輸入エンジンであったが、市場が拡大するに連れて品揃えや価格面等で輸入品の限界が目立つようになり、その対策として国産中小型ガスタービンの開発が各所で活発に行われた。

国産化の動きにはガスタービンメーカのみならず、従来この市場を独占していたディーゼルエンジンメーカも積極的に参加した。これらのディーゼルメーカは元々過給機とは馴染みが深く、構造上これと共通点が多い中小型の非常用ガスタービン開発に取り組み易い環境にあった事から多くのメーカが挙って国産化を推進した。この結果、1970 年代後半頃から国内での陸船用中小型ガスタービンの生産台数が一気に増加した。

更に 1980 年代の後半に入ると省エネルギー／環境問題等への対応から、小規模なガスタービンコージェネレーションシステムが注目されるようになり、これに伴って関連する中小型ガスタービンの更なる高効率化／低公害化／信頼性向上等が求められ、各社が競って高性能機の開発に取り組んだ。また、ガスタービン本体の高性能化と並行してコージェネレーションシステム全体についても、熱電比可変形をはじめ様々なシステムが新たに開発されて、小規模ガスタービンコージェネレーションシステムの熱効率の向上と低公害化の推進に大いに寄与した。

本編で採り上げた非常用をルーツとする中小型のガスタービンは当初、数百 kW 級の小型機が中心であったが、近年になって非常用／常用共に容量が徐々に大型化する傾向が見られ、その反動で小型機種は市場競争力を失いつつある。これは元来、ガスタービンは“大出力に適した原動機”であると言う本質に起因した部分も含まれているが、一方では特に非常用の場合は安易に大型化に流されて小型機種の競争力強化を怠った結果とも云え、今一度原点に戻って小型ガスタービンのあり方を見直す時期にあるように思える。

■ Abstract

This study examines small-capacity gas turbines for land and marine applications manufactured in Japan. Demand for the gas turbines as a power generation tool for disaster mitigation purposes grew rapidly in latter half of the 1970s. Afterwards, the market for gas turbines for emergency power generation and for co-generation systems continued to grow.

If we look at the current state of the domestic manufacture of gas turbines for land and marine use, we find that, by capacity base, 85 percent of overall demand is made up of large-scale turbines for continuous power generation. On the other hand, by number of units manufactured, 70 percent of overall demand is for small and mid-sized turbines for emergency power generation. In other words, the manufacturing numbers for domestic land and marine gas turbines show a major bipolarization based on the purpose of use.

Our study of "Industrial Large-scale Gas Turbines," published last year, examined one pole in the manufacture of gas turbines. This year, our study of "General-Purpose Small-Scale Gas Turbines" focuses on the other pole of the manufacture of gas turbines.

Gas turbines developed significantly for aircraft use after the Second World War, and as a result, their use expanded to land and marine applications. Immediately after the war, Japan was forbidden by the terms of its surrender from producing airplanes. As a result, there was complete inactivity for seven years in the field of aircraft engines, and Japan decisively fell behind advanced nations in the areas requiring sophistication, such as development and design. Turbines for land and marine applications were also sluggish after the war, but the market for large-scale turbines grew gradually in the 1970s as the growth of the Japanese economy spurred new demand for industrial gas turbine power generation facilities. As for small-scale land and marine gas turbines, R&D of gas turbines for automobiles had been vigorously pursued by auto manufacturers since the latter half of the 1960s due to the influence of worldwide trends. As well as, pioneering the use of small land and marine gas turbines had been actively pursued by Japan through the import and conversion of aircraft gas turbines.

In the midst of these developments, major revisions to the Fire Service Act in 1974 strengthened requirements for disaster mitigation power generation facilities in buildings and large shops. As a result, evaluation of small gas turbines as the drive source for emergency electrical generators grew rapidly and their demand increased as well. Previously, this market had been dominated by diesel engines. However, because gas turbines were overwhelmingly more compact and quieter, and furthermore, did not require cooling equipment and were easier to mount and maintain, they drew praises as a new type of prime-mover for emergency use and rapidly penetrated the market.

Initially, the small-capacity gas turbines introduced in the emergency power generation market were not 100 percent domestically manufactured products, and many were imported engines. However, as the market grew, imported products hit limitations in terms of selection and price, and in response, development of domestically produced small and mid-sized gas turbines were energized around the country.

The domestication of manufacturing drew participation from not only gas turbine manufacturers but also manufacturers of diesel engines, which had previously dominated this market. Diesel manufacturers had deep familiarity with force induction, and this area shared in the construction of gas turbines allowed them to easily participate in efforts to build small and mid-sized emergency gas turbines. The efforts of many manufacturers advanced the domestication of manufacturing, and as result, the number of units of small and mid-sized land and marine gas turbines produced in Japan grew in a single leap from the latter half of the 1970s.

Furthermore, in the latter half of the 1980s, attention was drawn to small-scale gas turbine co-generation systems in response to growing energy and environmental concerns. Demand grew for small and mid-sized gas turbines that were even more efficient, less harmful to the environment, and had greater reliability, drawing efforts from competing companies in the development of more advanced features. Besides advancements in the gas turbines themselves, new features were also introduced to co-generation systems, such as variable heat-to-power ratio configuration, contributing greatly to improvements in the thermal efficiency and environmental friendliness of small-scale gas turbine co-generation systems.

The small and mid-sized gas turbines used as emergency solutions discussed in this study were initially centered on small units that produced power in the several hundred kW range. In recent years, however, a gradually growing trend can be seen in increased capacity for both emergency and continuous power use. As a consequence, small-scale models have been steadily losing competitiveness in the market-place. A component of the trend may be that originally, gas turbines were considered to be "power drives suitable for high outputs". Also, as they are used only for emergencies, they can be made larger relatively easier, and as a result, manufacturers neglected to strengthen the competitiveness of smaller-scale models. The current situation calls for a review of the origin and competitiveness of small gas turbines.

■ Profile

星野 昭史 *Akitumi Hoshino*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

1961年	3月	九州大学工学部航空工学科卒業
1961年	4月	川崎重工業株式会社入社
		以降、同社明石工場にて主として汎用ガスタービンの開発、設計業務に従事
1996年	6月	同社汎用ガスタービン事業部長
2000年	6月	同社ガスタービン開発センター長
2001年	6月	同社退職
同年	同月	川重明石エンジニアリング入社
2002年	6月	同社退職
2009年	4月	国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員
その他		日本ガスタービン学会会員

■ Contents

1. はじめに	319
2. 国内ガスタービン産業の現状	320
3. 汎用中小型ガスタービンについて	324
4. 黎明期（1945年～1970年代半ば頃）	
：汎用中小型ガスタービンの夜明け前	327
5. 急成長期（1970年代半ば～1990年頃）	
：国産化の推進	337
6. 成熟期（1990年～現在）	
：高性能化への取り組み	348
7. 今後の展望	375
8. おわりに	377
謝辞	377
登録候補一覧	378
技術の系統図	379

1 はじめに

ガスタービンは軽量コンパクトで大出力を得易いことから航空用として目覚ましい発展を遂げ、航空用途では広い範囲でほぼ全面的に市場を独占している。一方、陸船用については事業用等の大型発電分野で順調に需要を拡大してきたが、出力の小さな分野では低い熱効率や高いコストが足枷となって中々普及が進まなかった。併しながら近年、経済性以外に環境適応性等も参入の重要な要件となるなど市場環境も変化した結果、小型ガスタービンの活躍する場も増えてきている。この調査研究は上記の流れに沿って、1970年代半ばの消防法改正をきっかけに非常用として誕生し、更にコージェネレーションシステム等の常用としても需要を上げた「汎用中小型ガスタービン」を対象に実施した。

本報告書の第2章では日本ガスタービン学会の生産統計資料を基に、国内におけるガスタービン産業の現状について紹介している。この中では特に陸船用ガスタービンについて、用途別／容量別の現状及び生産推移について述べると同時に、本研究の対象とする「汎用中小型ガスタービン」の位置付けについて解説している。

第3章では此处で取り上げた「汎用中小型ガスタービン」について、市場参入の背景／現況等についてその概要を解説すると同時に、国内における研究開発動向について紹介している。また、ガスタービンの一般的な特性について他の熱機関と比較しながら説明し、特に小型ガスタービンの抱える本質的な課題を採り上げ解説している。

第4～6章では汎用中小型ガスタービンの発達の歴史について、国内を中心にした第二次世界大戦後から現在迄の流れを生産推移を基に三分割し、それぞれ黎明期、急成長期、成熟期として各期毎の動きを紹介している。

この内、第4章では1945～1970年代半ば頃の黎明期について、戦後間もないこの時期に官主導で開発された始動用や消防用の小型ガスタービンを紹介した。また、当時世界の各地で活発化した自動車用等の一般産業用中小型ガスタービンの開発及びそれに呼応した国内の車両用ガスタービンに関する開発研究について紹介している。更にこの時期の陸船用を中心とする市場動向についてその動きの概略を記述している。1974年に行われた消防法の改正は非常用ガスタービンの普及を促す重要なきっかけとなったが、本章ではこの経緯についても解説している。

また、第5章では1970年代半ば～1990年頃の急成長期について紹介した。これは非常発電用途を中心に

して中小型ガスタービンの需要が飛躍的に拡大した時期で、これを契機に国産化の動きが急速に活発化した。本章では関連する各社の動きを紹介するとともに、各々の主力機種について開発の背景等を含み解説している。また、国産化が一気に進んで防災市場に確固とした地歩を築いた経緯や技術的な背景についても記述した。更にこの時期、移動用電源やポンプ駆動用等の新しい用途開発も活発に行われており、これらの動きについても紹介している。

第6章では1990年以降の成熟期の動きについて解説した。この時期には中小型ガスタービンの新たな用途として小規模コージェネレーションシステムが注目されるようになり、低公害で高効率な新機種の研究開発が関連各社を中心に活発に行われた。本章ではこれら各社の新機種及び関連する新技術を紹介すると同時に、様々なコージェネレーションシステム関連技術について概説している。更にこの時期活発化したマイクロガスタービンの動向及びセラミックガスタービン（CGT）／アドバンスドコージェネレーションテクノロジー（ACT90）／スーパーマリンガスタービン（SMGT）等の小型ガスタービンに関する国家プロジェクトについても紹介している。また近年、成熟化につれて非常用／常用の両用途共に大型化していく傾向が見られるが、この動きについても私見を交えながら解説した。

第7章では今後の展望について私見を述べている。コージェネレーションシステムに代表される常用については小型ガスタービンのアキレス腱とも云うべき軸端熱効率の改善が必須の課題で、セラミック材の利用等ガスタービンの簡潔さを損なわない画期的な方策の開発を進める必要があるとした。また、非常用については特に競争力を失いつつある小型分野を中心に、単純／小型／軽量等の特長をさらに追及して一層ブラッシュアップする努力が必要とした。

最後に第8章では「おわりに」として、本調査の対象範囲について説明している。即ち、本調査の対象は原則として国産ガスタービンに限定しており、輸入エンジンについては殆ど触れなかった。また、いわゆる「軽構造型」を中心としており、大型陸船用にルーツを持つ「重構造型」は、容量的に対象になる場合も殆ど説明を省略している。

また、巻末には本編で取り上げた技術の変遷を、社会情勢等時代の移り変わりとは対比して系統図として掲示した。

2 国内ガスタービン産業の現状

社団法人日本ガスタービン学会では例年、前年度の国内ガスタービン（ライセンス製造エンジンも含む）生産統計を集計し学会誌上で公表している。データは航空用ガスタービンと陸船用ガスタービンに大別して表示されている。資料提供は毎年、航空用については3社、陸船用については約15社程度から受けており、これらの各社が現在国内のガスタービン生産に携わる主要なメーカーとなっている。

周知のとおり、ガスタービンは第二次世界大戦後航空用として大きく発展し、それらの成果が陸船用ガスタービンの発達にも大きく貢献して地上用途や需要の拡大に繋がった。すなわち、航空用と陸船用ではその用途や使用環境・条件等の違いから、外観・構造等にはしばしば明確な差異が見受けられるが、主要な要素の設計技術や耐熱材料など基礎技術については共通する部分が多く、相互の技術交流も盛んである。

本報告書で取り上げている汎用中小型ガスタービンは陸船用ガスタービンに分類されるものであるが、ここではこのような観点からまず航空用を含む国内のガスタービン産業全体の現状について概説し、国内市場の規模や動向とともに、欧米のガスタービン先進諸国との関連や世界市場における我が国ガスタービン産業の位置付けを紹介する。

2.1 容量（出力の大きさ）別の分類について

本報告書で使用している日本ガスタービン学会の生産統計データは用途別に分類されていると同時に、其々の出力の大きさに応じて小型・中型・大型の3種類に分けて表示されている。その中で、出力による区分については出力735kW以下を小型、736kW～22,064kWを中型、22,065kW以上を大型と分類して表示している。

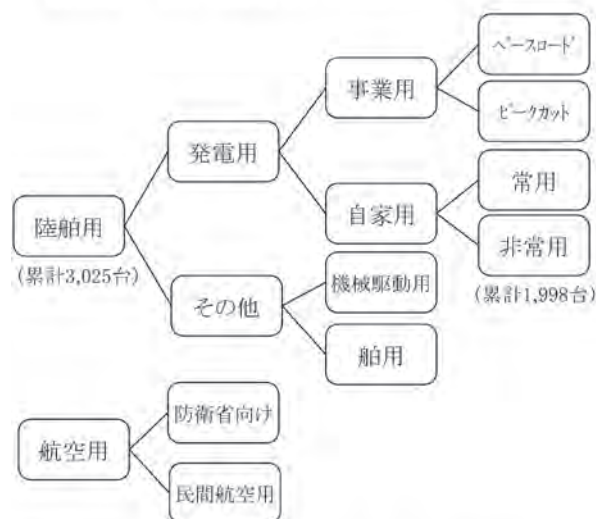
この区分に使用されている数値は中途半端なものでやや違和感があるが、これは本統計が始まった頃の年代に使用されていた出力単位がメートル法に準じたものでなかった事に由来している。すなわち、本統計は昭和40年代初頭から開始されているが、当時の出力単位はPSを主流としており、1,000PS未満を小型、1,000PS以上30,000PS未満を中型、30,000PS以上を大型として分類していたが、近年のメートル法施行と共に区分の表示もkWにそのまま直訳的に変更された事による。

現在、特に大型ガスタービンは高効率化が進むに比例して単機出力がますます大出力化する傾向にあり、事業用等では数百MW級のガスタービンが標準的サイズとなっている現状を見ると、現在日本ガスタービン学会の生産統計で使われている22,065kWと言う区分の数値は小さ過ぎる感もある。しかしながら、現状では本統計が国内ガスタービン生産のほぼ唯一のデータであり、データの継続性・利便性等を優先して本文ではそのまま使用する事とした。

2.2 主要製品及びメーカー

図2.1に示す図表は日本ガスタービン学会編纂の生産統計資料を基に、陸船用ガスタービン及び航空用ガスタービンの其々について大まかな用途別に分類されている状況を図示したものである。また、上の枠内には国内の主要なガスタービンメーカーを同じく陸船用及び航空用の其々について挙げているが、ここに掲示したメーカー名は基本的にはその年に（ここでは2008年）

国内ガスタービンの主力メーカー	
陸船用	IHI、川崎重工、神戸製鋼、神鋼造機、 ダイハツディーゼル、東芝、 トヨタタービンアンドシステム、新潟原動機、日立、 日立造船、三井造船、三菱重工、ヤンマー
航空用	IHI、川崎重工、三菱重工



注：台数は2002～2008年迄の7年間の累計台数ベースで非常用が陸船用ガスタービンの7割を占める。

図2.1 国内ガスタービンの主要製品⁽¹⁾

生産統計資料を日本ガスタービン学会に提供したメーカーで、従ってその内容は年毎に若干の入れ変わりがあ
る。但し大方の主要メーカーは毎年ほぼコンスタントに
生産を継続しており、その意味で主要メーカーについては
ほぼ漏れなく表示されていると考えて間違いないと言
える。

2.2.1 航空用ガスタービン

国内航空用ガスタービンは図 2.1 に示す通り、大別
して防衛省需要及び民間航空用の二つに分類すること
ができる。このうち防衛省需要用の方は 2008 年の生
産実績をみるとターボジェット / ファンのカテゴリー
に属するもので戦闘機用主エンジン 6 台、またターボ
シャフト / プロップのカテゴリーに属するもので 6 機
種のヘリコプター駆動用ガスタービン 45 台が生産さ
れている。これらの航空用ガスタービンはいずれも欧
米メーカーのライセンス製造エンジンで、当年は純国産
エンジンの生産実績はなかった。

近年、国内の航空用ガスタービン生産全体の動向
として、防衛省向けの新規製造需要が減少傾向にあ
るのに対して、V2500 / GE90 / CF34 / TRENT /
PW4000 と言った民間航空用大型ファンエンジンの国
際共同開発関連の生産が増加する傾向が顕著に見ら
れるようになってきた。この国際共同開発関連の製品は
何れもファン / 低圧タービン / アクセサリーギアボッ
クス等のモジュール及び圧縮機ブレードやファンケー
シング等の部品類で、その生産規模は年々確実に増加
傾向にあり、モジュール類の出荷台数を例にとると年
間の合計では 1,100 台を超える数量が生産されている
等、生産量は既に相当な額に達している。

世界の民間航空輸送は年間 5% の規模で年々拡大を
続けており、今後も引き続き将来の発展が見込まれる
有望な市場である。航空用ガスタービンの市場はその
創成期から半世紀以上の長きにわたり、GE (General
Electric), P&W (Pratt & Whitney), R/R (Rolls
Royce) の三大メーカーがほぼ独占している状況が続
いている。これは航空用エンジンに要求される厳しい技
術基準 / 開発に要する多額の投資と長期の回収期間
等、この事業固有の特殊な事情に起因している。現在、
民間航空用エンジンの開発はこの三大メーカーを
OEM (Original Engine Manufacturer) とする RSP
(Risk&Revenue Share Partner) 方式による国際共同
開発が主流であり、従ってパートナーとなる他メー
カの参画できる内容は限定的で、この体制は当分の間
続くことが予想される。

2.2.2 陸船用ガスタービン

図 2.1 には陸船用ガスタービンの用途別分類と国内
の主要メーカー一覧を表示している。陸船用のガスター
ビンはその大半 (容量ベースでは 95% 以上、台数基
準でも 85% 以上) が発電用で、他はポンプや圧縮機
等の機械駆動用及び護衛艦推進用に使用されている
船用ガスタービン等が比較的コンスタントな「その他の
用途」として挙げられ、大別すると図 2.1 のように分
類して図示することができる。

さらに発電用はその用途に応じて事業用と自家用に
分類できる。事業用は文字通り発電を事業とする電力
会社で火力発電用として使用されるガスタービンで、
通常はベースロードとして常時連続運転されている。
事業用のガスタービンは近年の著しい熱効率の向上に
比例する形で、その単機容量 (出力) は益々大型化す
る傾向にある。現在、その単機出力が 300MW 近い大
型機種が段々と主流になってきている。

自家用は基本的には工場とか地域冷暖房などで使用
されるコージェネレーションシステム等のエネルギー
供給設備の主機として使用される常用品以外に、停
電時や災害発生時の防災用として使用される非常用途
の二種類に大別できる。常用品のなかには多くの輸
出品が含まれているが、これらの内、特に大型機種は
国内ではしばしば事業用に近い用途のものが多く含
まれており、この点分類がやや曖昧になっている。

自家用の場合、大型機種が殆どの事業用とは異なり、
中小型機種が常用品に於いて比較的多く使用されて
いる。これらは近年省エネルギーや環境対策の一環と
してコージェネレーションシステムの普及が広まり、
数十 MW 級以下の中小規模のコージェネレーション
システムが工場や地域の省エネルギー設備として導入
される例が増えてきている事に起因している。

陸船用ガスタービンは用途別及び容量別に縦横に分
類すると、現在大きく二極化していることが判る。表
2.1 はその分類を表示したものであるが、その内容を
みると容量ベースで言えば陸船用の 85% 以上を事業
用等の大型常用発電用ガスタービンが占めており、一
方台数ベースで言えば全体の 70% 近くを防災用など
非常用発電用ガスタービンが占めていることが判る。

このうち、非常用は中小型機種を中心とした用途で
本文のメインテーマとして取り上げた汎用中小型ガス
タービンの中核となる用途である。昨年度、産業技術
の系統化調査研究の一環として取り上げられた「事業
用大型ガスタービン」は、国内においても戦後間もな
い時期より純粋に陸船用として開発が進められて、順
調に改良を進め今日の発展に至っている。

表 2.1 2002 ～ 2008 年の陸船用ガスタービン⁽¹⁾

		小形 (～735kW)		中形 (736～22,064kW)		大形 (22,065kW～)		合計	
		台数	出力 (kW)	台数	出力 (kW)	台数	出力 (kW)	台数	出力 (kW)
事業用	ベースロード	0	0	11	68,320	63	7,317,920	74	7,386,240
	その他	0	0	3	15,000	2	80,310	5	95,310
自家用	常用	191	38,135	215	1,074,549	144	17,290,360	550	18,403,044
	非常用	1,033	374,566	965	1,836,540	0	0	1,998	2,211,106
	その他	297	46,198	100	581,249	1	25,000	398	652,447
合計		1,521	458,899	1,294	3,575,658	210	24,713,590	3,025	28,748,147

注：年度別の生産高は年毎のバラツキが大きいため、2002 ～ 2008 年迄の 7 年間の累計で平準化して表示

これに対して、ここに取り上げた汎用中小型ガスタービンは 1970 年代の消防法改正を契機に需要を急増させたもので、その構造形式は戦後欧米のガスタービン先進諸国で急速に発達した航空用ガスタービンの内、ヘリコプターや APU (Auxiliary Power Unit：補助動力装置) に使用されている小型ガスタービンの流れを汲むもので、大型陸船用機種の新構造タイプに対して一般に軽構造タイプと呼ばれる型式が主体となる。

2.3 陸船用ガスタービンの生産推移

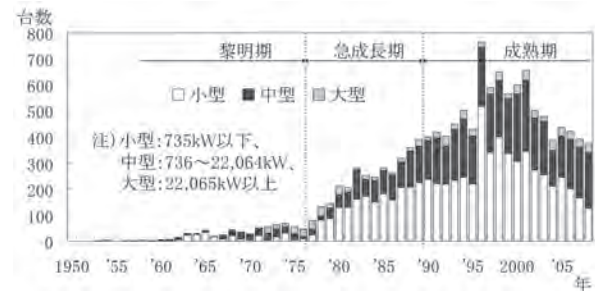
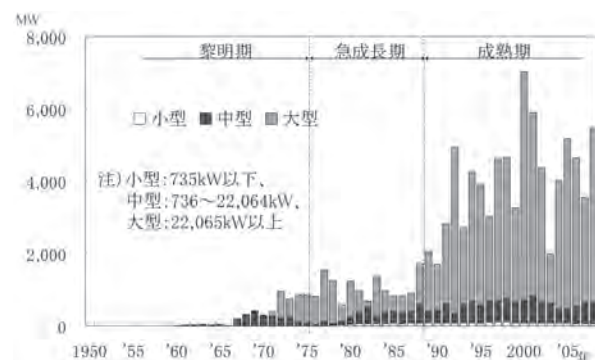
日本ガスタービン学会がまとめた国内ガスタービンの生産統計には、戦後間もない 1948 年に研究用として鉄道技術研究所に納入された出力 1,640kW の通称「1 号ガスタービン」で知られている東芝製の陸船用ガスタービンに遡りデータが集計されている。「1 号ガスタービン」については昨年度の産業用大型ガスタービンの「技術系統化調査」の中で詳細に説明されており、ここでの詳しい説明は省略するが、本機の完成が我が国における陸船用ガスタービンの幕明けとなった事は周知の事実である。

一方、航空用については戦後直ちに GHQ (General Headquarters: 連合軍総司令部) により発令された「航空禁止令」により、航空に関する一切の研究・生産が禁止されて、1952 年に再びこれが解除されるまでに 7 年間の完全な空白期間が生じた。この間における欧米の航空用ガスタービンの発達は目覚ましく、軍用機を中心にジェット化が著しく進展した。そしてこの空白期間がその後の航空産業発展に対する大きな足枷となり、今日我が国が欧米の先進諸国に大きく水をあけられる要因となった。

陸船用ガスタービンの国内生産は 1948 年の「1 号ガスタービン」以来、1960 年代初頭位までの 10 数年間は教育用や船用等の用途を中心に年間 1 ～ 2 台の

ペースで細々と続いていた。1960 年代に入ると小型機を中心に徐々に生産台数を増やして年間 2 ～ 30 台程度となるが、やがて 1970 年代後半に入るとさらに急激に台数が増えて年間数百台のペースまで生産規模が拡大してくる。

この間の生産台数及び生産容量（出力）の推移は日本ガスタービン学会の陸船用ガスタービン生産統計データとして図 2.2 及び図 2.3 のように纏められている。

図 2.2 陸船用ガスタービン生産実績（台数の推移）⁽¹⁾図 2.3 陸船用ガスタービン生産実績（出力の推移）⁽¹⁾

2.3.1 生産台数推移

図 2.2 は戦後 60 年間の陸船用ガスタービン生産台数推移を出力別に小型、中型、大型の三機種に分類して棒グラフ化したものである。このグラフを見ると、陸船用ガスタービンは 1977 年頃を一つの契機として生産台数が急激に増加しており、かつその伸びの原動力が中小型機種にある事が良く判る。さらにこの中身を用途別に見てみると、この時期にガスタービン駆動非常用発電装置の需要が急拡大しており、これがその後の陸船用ガスタービン市場拡大の大きな牽引力の一つとなっている事が判る。

さらにその後十数年経過して 1990 年代に入ると、この伸びはやや鈍化して国内陸船用ガスタービンの生産台数は、ほぼ現状のペースに落ち着く傾向が見られるようになる。この時期になるとそれまで小型機種が中心であった非常用のガスタービン発電装置が徐々に

大出力化していくようになり、需要の中心が中型機種に移っていく傾向が見られて、その分台数の伸びが鈍化するようになっている。

また、この時期になると汎用中小型ガスタービンの新たな用途として分散型の中小型コージェネレーションシステムが脚光を浴びようになり、この方面での新市場開拓が活発に行われるようになった。

一般にガスタービンは排気が清浄で、かつ燃焼温度の低減などによる低 NOx 化が比較的容易なことから、様々なタイプのエネルギー供給設備の中でも環境に優しい部類に属する熱機関と言える。また、ガスタービンは再利用可能な排熱量が多く、ボイラや吸収式冷凍機等の排熱回収装置との組み合わせにより様々な形で熱効率の向上を図ることが出来る。この為、非常用発電装置の普及により中小型ガスタービンに対する市場の認識度も徐々に深まったこの時期になると、地域冷暖房設備や比較的小規模な工場エネルギー供給設備に適した省エネルギー設備としても注目されるようになった。

このようにそれ迄非常用発電装置に限定的であった中小型ガスタービンの用途が、分散型の小規模なコージェネレーションシステムと言う新たな需要を見つけて市場を拡大していった。この結果、中小型の汎用ガスタービンは国内の各種エネルギー供給設備市場で一定の評価を獲得し、徐々にその地位は確固としたものとなっていく事になる。

2.3.2 生産容量（出力）推移

図 2.3 は国内陸船用ガスタービンの年間生産量を容量（出力）ベースで集計し、年毎の推移をグラフ化して図示したものである。図 2.3 を台数ベースの図 2.2 と比較すると、両者にはそのトレンドに若干の差異が見て取れる。

これは台数については図 2.2 より明らかなように、

中小型発電用ガスタービンの販売数量が陸船用全体の中で圧倒的な割合を示しているのに対して、年間の生産容量（出力）の場合は図 2.3 で明白のように、事業用等の大型発電用ガスタービンの販売量が市場を完全に支配しており、台数と容量で市場のリーダーが夫々異なっている事が要因となっている。

一方、本文の主題とする中小型ガスタービンに限定してこれらの図を注視すると、近年（2000 年以降）、生産容量はほぼ横這いで推移しているのに対して生産台数はやや減少気味な様子が見られる。これは需要の中心が従来の小型から徐々によりサイズの大きな中型機種へ移行しつつ有る事を示している。すなわち、1970 年代後半～1990 年代以前までの初期市場開拓の中心となった既設ビル等の小型防災用電源の需要がほぼ一巡し、代わって近年になると電話・インターネット等の情報産業や銀行・証券会社等の金融事業等で停電対策の重要度が増して、この方面で非常用発電設備の需要が増えてきた事が要因の一つとなっている。すなわち、これらの用途に必要な発電設備の容量は一般に十数 MW 級の非常用としては比較的大型なものが多く、従って使用されるガスタービンも中型機種が中心となる事による。

また、前述のように 1990 年代以降になると分散型のコージェネレーションシステムが徐々に普及してくるようになる。一般にコージェネレーションシステムの場合、小規模といえども需要の中心は数 MW 級以上であり、従って駆動源となるガスタービンは本文の分類で言えば殆どが中型機種に分類される大きさとなる事もこの要因の一つとして挙げられる。

参考文献

- (1) ガスタービン学会統計作成委員会：「2008 年ガスタービン及び過給機生産統計」，日本ガスタービン学会誌，Vol. 37，No. 4，PP. 250-260（2009）他

3 | 汎用中小型ガスタービンについて

第二次世界大戦以降の市場動向を見ると、国内陸船用ガスタービン市場は1977年頃から急激に生産台数を増やし拡大している。第2章ではその急拡大の原動力となったのが、この時期に非常用発電装置の駆動源として新たに市場へ参入してきた「汎用中小型ガスタービン」である事を示し、本年度はこれをメインテーマとして調査研究する事とした。

本章ではこの「汎用中小型ガスタービン」について、市場や用途開発動向の概要を紹介しながら、その特性とそれに付随する課題について概説し、「中小型ガスタービン」の理解を深める為の一助とする。

3.1 国内市場の動き

国内に於いては近年、防災用等の非常用発電装置の主要な駆動源の一つとして中小型の陸船用ガスタービンが確実に定着している。すなわち、国内においては非常用発電装置が陸船用中小型ガスタービンの重要な用途の一つとなっているが、このような状況は（現在のところ）国内特有なもので海外の他地域では余り見られない現象である。これは特に地震等の自然災害が多く非常用途に対する関心が深い事、地価が高くガスタービンの省スペース性が高評価を得られ易い事等我が国特有の事情による所が大きい。

いずれにしろ国内においては事業用等の大型機種と並んで陸船用の中小型ガスタービンがこの様に非常用途を突破口としてその需要を拡大し、コージェネレーションシステム等の新たな用途を開拓しながら各種のエネルギー供給市場において確かな地位を確保するに至っている

3.2 様々な地上用途開発の試み

周知の通りガスタービンは第二次大戦以降、軽量コンパクトで大出力を得られ易い等の特質をフルに生かして、航空用を中心に目覚ましい発達を遂げた。更にその成果は一部の地上用途にも波及拡大して、事業用発電用途等の大型機を中心とする陸船用市場へも徐々に浸透していった。また、航空用の場合はヘリコプターやAPU等の小出力分野においてもガスタービン化が急速に進み、これに伴って小型化に特有な関連技術も目覚ましく発達した。

これら航空用の成果に後押しされる事もあって、陸

船用について一時期ガスタービンに対する期待が一気に膨らみ、1950～1970年代に掛けて欧米のガスタービン先進諸国において、自動車用を始め鉄道用／船用／ポンプ駆動用／発電用等の様々な一般地上用途を目指して各種の陸船用中小型ガスタービンの開発研究が盛んに行われた。併しながら、これらは軍用や石油／ガス掘削用等の一部特殊な場合を除き、主に燃費や製造コスト等の経済的な理由から、本格的な実用化には中々結びつかなかった。

国内においても先進諸国同様、このような新タイプの陸船用内燃機関の誕生を期待する当時の世界的な風潮に後押しされる形で、1960～1970年代後半にかけて自動車／航空エンジン／運輸機械等の関連メーカを中心に、様々な種類の陸船用ガスタービンの開発が進められた。またこれらの動きと並行して、ユーザ側との共同で各種の用途開発研究や即効性のある航空転用型を利用した用途開発研究も活発に行われた。

これらは世界的な動向と同様、直接成果に結び付くものは少なく必ずしも満足いくものではなかったが、その後の消防法の改正を契機にした1970年代後半以降の国内に於ける非常用発電及びこれに続く新分野への汎用中小型ガスタービンの普及に、形を変えて大いに貢献している。

3.3 ガスタービンの特性

ガスタービンの様々な構造形式や分類種別等については、前年度行われた「産業用大型ガスタービン技術の系統化調査」の中で詳しく説明されており、本調査に於いては省略する。代わって此处では往復動機関との作動原理や構造の違いから生じるガスタービンの特性について、ディーゼル機関等の往復動内燃機関と比較しながら、特に中小型ガスタービンを中心にその特徴を説明する。

3.3.1 作動原理と構造

ディーゼルエンジン等の往復動機関では一個のシリンダー内で吸気／圧縮／加熱（燃焼）／膨張／排気等の各工程を間欠的／断続的に行うのに対して、ガスタービンは図3.1に示すように圧縮機／燃焼器／タービン等の各要素が流れに沿って並び、流れ作業的に連続して作動流体を処理していく。この為、短時間に大量の作動流体（空気）を処理する能力に優れ、単純で

軽量コンパクトな構造ながら大出力を得られる利点があり、この点が大きく評価されて航空用原動機として市場を独占している。

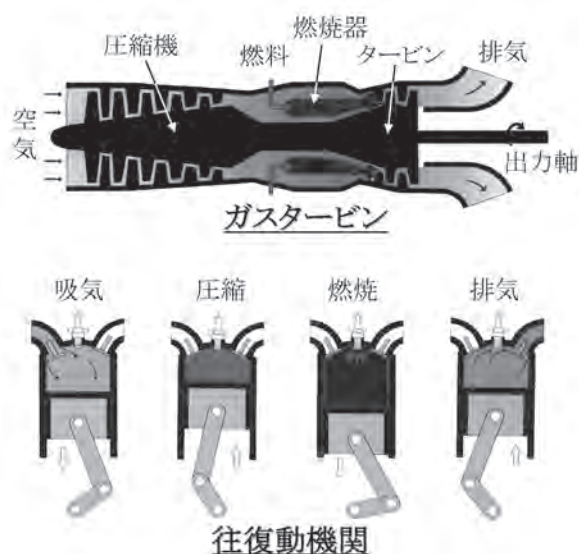


図 3.1 ガスタービンと往復動機関の作動原理の比較

また、ガスタービンは圧縮機／燃焼器／タービン等の各構成要素が各々個別の専門プラントとして作動する事から、これらをモジュール化して其々独立に取り扱い、個々の特性に応じた保守／交換作業が出来るなどの利点がある。航空用ではこの特性を活用して現地に於いてモジュール単位で保守点検作業を行い、作業効率の改善や寿命管理の精度向上に役立てている。

一方、往復動機関では作動流体の吸気／燃焼／排気が同一場所（シリンダー内）で間欠的に交互に行われる事から、燃焼ガスにさらされる高温部材の冷却が比較的容易で、特に高級な耐熱材料が必要となる事も少ない。これに対してガスタービンの場合は燃焼器／タービン等は常時高温の燃焼ガスに晒されており、必然的にニッケル／コバルト等高級な耐熱材料を多用すると同時に、複雑な冷却構造の採用など構成部材の複雑化を招きやすくなる欠点がある。

ガスタービンは圧縮機やタービン等の各翼列内に大量の作動流体（空気）を高速で流して大出力を発生させている。翼列内の回転翼（動翼）は高い効率を得やすくするため強度の許される限り高い周速で運転される。このためこれらの動翼に繋がる高速軸は非常に高い速度で回転し、結果として大きな慣性モーメントを持つことになる。発電用として通常多用される一軸式ガスタービンでは、この高速軸は負荷を駆動する出力軸に直結しており、急負荷投入などの大きな負荷変動があった場合、この大きな慣性モーメントがこの変動を吸収する為、慣性モーメントが遥かに小さな往復動

機関に比べて周波数変動が極めて少なく、良質な電気特性が得られる利点がある。

3.3.2 部分負荷性能について

前述のように、これまでガスタービンは自動車用を始め多種多様な一般産業用途について、新しい市場開拓を目指して種々開発研究が試みられた。併しながら、航空用としては他を圧倒したガスタービンも地上用途では中々普及が進まなかった。この大きな要因の一つはガスタービンの場合、部分負荷時の性能低下が他の熱機関に比べて大きいと言う欠点があり、自動車用など多くの一般産業用途では部分負荷運転が圧倒的に多い事から、これが致命傷となってガスタービンの地上用途への普及を大きく妨げた事は否定できない。

そこで自動車用ガスタービン等ではこの欠点を補うため、各要素部分に可変機構を取入れたり、熱交換器を付けた再生サイクルを採用するなど様々な対策が試みられたが、構造の複雑化や大型化によるデメリットは大きく現在のところ挽回は中々困難な状況にある。

3.3.3 小型ガスタービンの熱効率

ガスタービンは元来大容量の用途に適した熱機関で、単機出力が大きくしかも常時フルパワーで連続運転される場合が多い事業用発電用途はガスタービンに最も適した用途の一つであると言える。実際、大型の発電用機種については高温化等による熱効率の向上もあって急速に大型化が進んでおり、事業用の最新鋭機では単機出力 300MW 級が一般的な大きさで、熱効率もガスタービン単独で 40%に達するまでに進化している。

一方、一般ビルや病院・デパート等の防災用途の需要が多い非常用発電装置の場合、出力 300kW 級が主力機種の一つになっており、前述の大型機種に比べると 1,000 分の 1 の出力になる。また熱効率は概略 25% 程度で大型に比べるとかなり低くなる。

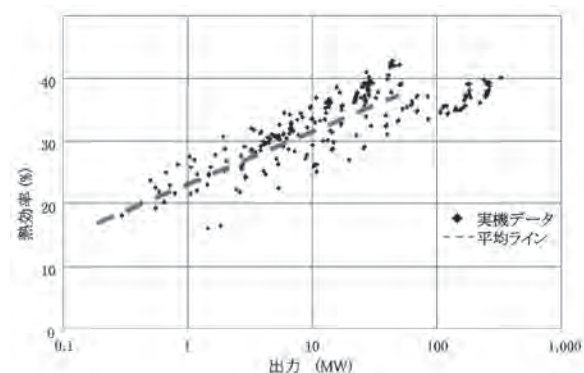
ガスタービンはその内部流路に作動流体（多くは空気及びその燃焼ガス）を高速で流し、動翼を持った回転体を駆動して動力を得ているが、この時発生する流体損失の多くは流路表面の境界層生成に起因する損失と、動翼先端とケーシング間隙間の洩れに起因する損失で、これらは何れも流路表面の濡れ面積の大きさに大きく左右される。

相似則によれば、出力（容量）と濡れ面積（流れの損失量）の間は面積とその周長との関係にあり、この種の損失の相対量は出力の平方根に逆比例して減少する。即ち、前述例のように比較する二機種間に 1,000

倍の出力差がある場合は流体の摩擦や漏れに起因する損失の部分は $1/33$ 迄減少する。逆に非常用の小型機の出力が事業用の大型機の $1/1,000$ 迄小さくなるとこの部分の相対的な損失は 33 倍に膨れ上がって熱効率を大きく悪化させる事になる。

ガスタービンの熱効率はサイクル最高温度、即ちタービン入口温度 (TIT) に大きく影響される。大型機では翼構造が大きくなる分複雑な冷却構造を採用する事が可能となり、また最新鋭機では蒸気冷却を取り入れるなど周辺装置の複雑化・高級化により高い TIT を設定する事が出来る。一方、中小型機の場合は冷却部のスペースに制限があり余り複雑な構造がとれない。この為、近年の最新鋭ガスタービンの TIT は事業用等の 300 MW 級大型機で $1,600^{\circ}\text{C}$ に達するのに対して、その $1/10$ 位の大きさの中型機ではせいぜい $1,300^{\circ}\text{C}$ が上限となる。また、最初の例で取り上げた非常用の 300kW 級小型ガスタービンの場合はスペースの関係で無冷却となる場合が多く、TIT はせいぜい $1,000^{\circ}\text{C}$ が上限となる。

このようにガスタービンは小型化するほど作動流体の摩擦や漏れに起因する損失が増えると同時に、高温部の冷却が難しくなって高い TIT が採り辛くなる事等の理由で、その軸端熱効率は急速に悪化するようになる。図 3.2 はこの出力と熱効率の関係を実際に稼働中の様々なサイズのガスタービンをサンプルにして作成したもので、図示のように両者の間には明確な相関がある事が確認できる。



注：稼働中の様々な陸船用ガスタービンをサンプルにして作成したもので、出力と熱効率には明確な相関がある。

図 3.2 陸船用ガスタービンの出力と熱効率の傾向⁽¹⁾

3.3.4 軽構造型の特徴

非常用発電装置をルーツとする陸船用の小型ガスタービンは通常軽構造型と呼ばれる形式の構造で、事

業用等の陸船用大型機に採用されている重構造型とは対極をなすものである。即ち、重構造型は一般の陸船用用途で要求される頑丈さと長寿命に対応した構造で、従来の蒸気タービンと同じく比較的肉厚なケーシングを採用して現地サイトの堅固な土台上でがっちり組み上げる方式である。一方、軽構造型は軽量コンパクト性が最優先される航空用の流れを引き継いだもので、ヘリコプターや補助動力装置 (APU) の動力源として使用されている小型航空用ガスタービンの構造に倣い、ガスタービンの軽量コンパクト性を優先した薄肉の構造形式である。

災害時等に使用される非常用途に於いては、緊急時に急速起動や急負荷投入遮断等の急激な熱変動に迅速かつ確実に対応できる事が必要不可欠な要件となる。軽構造型のガスタービンは薄肉で各部の熱容量が小さく、こう云った急激な熱変動に対して過大な熱応力が発生しにくいことから、非常用に好適な原動機である。また、同様な理由で熱疲労にも強いことから、ピークカット運転等の頻繁に起動停止を繰り返す用途についても採用される例が多い。

据付やオーバーホール等の保守点検作業において現地サイトでの組立作業が多い重構造型に対して、一般に小型で生産量の多い軽構造型は部品／装置類の製造／組み立てを工場で行い、現地据え付け後の保守点検等はモジュール単位で現地にて新品と交換し、交換品は工場に持ち帰って点検修理する量産方式が一般的である。この方式は航空用と同じで、現地での作業時間を極力短くして減らして設備の稼働率を高めると同時に、作業の信頼性向上にも大いに貢献している。

陸船用の中小型ガスタービンは前述のように様々な用途開発が試みられたが、燃費やイニシャルコスト等の経済的な要素が優先されるこれまでの市場では中々需要を伸ばす事が出来なかった。近年になって市場を困む環境も徐々に変化して、かつて絶対的な条件であった経済性以外に環境対応性等も市場参入の重要な要件となってきている。これらの市場環境の変化に伴い、陸船用用途においても中小型ガスタービンの需要が徐々に増えつつ有り、今後さらに新たな技術開発が加わって市場拡大が進む可能性がある。

参考文献

- (1) 杉本：「内燃機関の変遷と将来展望」汎用中小型ガスタービンの要素技術」, 第一回日内連主催講演会資料, P.5 (2009)

4 | 黎明期 (1945 年～1970 年代半ば頃)：汎用中小型ガスタービンの夜明け前

第 2 章では国内における陸船用ガスタービン生産量（台数／容量）の年毎の推移を示した図 2.2 及び図 2.3 において、戦後間もない時期に始まり現在に至る時代の流れを三分割し、各時代にそれぞれ黎明期、急成長期、成熟期と名付けて図示した。本章では、この内の黎明期について汎用中小型ガスタービンを取り巻く時代背景や市場動向について以下に紹介する。

4.1 海外の動向

ガスタービンは第二次世界大戦を契機に航空機用の原動機として急速に発達し、今日ではほぼ完全に市場を独占している。これは中小型の分野についても例外ではなく、一部の小型機を除き、APU（補助動力装置）や GPU（地上動力装置）等の補助動力源を含めて比較的早い時期からガスタービン化が進んでいる。

航空分野における中小型ガスタービンの目覚ましい進歩に刺激を受けて、これらの成果を陸船用途に広く応用して市場の拡大に繋げようと 1940 年代後半から 1970 年代に掛けて世界の各地で様々な試みが行われた。これらはいわゆる航転型と呼ばれているような航空用ガスタービンをそのまま陸船用として使うやり方と、他方それでは既存の競合エンジンに対抗できず、航空用で培った技術を生かして新たなガスタービンを作るやり方と大別して二つの異なる手法で研究開発が進められた。この内、前者は発電用／船用／鉄道車両用等の比較的航空用と使用条件が似通った用途で、一方後者については自動車用／機械駆動用等の使用条件が航空用とは異なり既存エンジンとの競争が厳しい用途を中心に開発が進められた。

これらの海外における用途開発研究の動きについて、以下に主要な用途別に説明する。

4.1.1 発電用／機械駆動用

発電用の中小型ガスタービンは石油基地関連等の一部の例外を除き、航転型が使用される場合が多かった。すなわち航転型ガスタービンは軽量小型で薄肉構造を生かして“急速起動”や“DSS (Daily Start Stop) 運転”に優れた対応能力を持っており、ピークカット用／非常用／移動用等の常用以外の用途で多く使われてきた。

APU や GPU 用のガスタービンを数十 kW ～ 数百 kW 級の小型地上用一般電源としてそのまま利用する

試みは米国等に於いて 1940 年代後半の早い時期から行われていた。併しながらその用途は軍用を中心とした特殊な範囲に限られることが多く、そのまま民需用として広く市場に普及する事は少なかった。また、航空用のターボプロップ機用エンジンを一部改造して地上用に転用する試みは 1950 年代の後半には英国においてブリストル・シドレーの“Proteus”エンジンを搭載した 3MW 級の発電装置を用いて実験的に行われており、その後ヘリコプター用等のターボシャフトエンジンを主体に数 MW 級の比較的小規模な発電装置用として多くの航転型ガスタービンが登場した。

さらに、1960 年代に入るとジェットエンジンの発達普及につれて、J79 / JT8D 等の大型ジェットエンジンをガス発生機にして数十 MW 級の発電機駆動用として転用する例が徐々に増えてきた。また中小型の範疇からは少し外れるが、特に 1960 年代に発生した“ニューヨーク大停電”等を一つの契機にして、事業用についても非常用やピークカット用予備電源のニーズが高まり、1970 年代に入るとこれらの対応策として CF6 等の大型ファンエンジンをベースとした更に大容量の発電装置が供給されるようになった。

石油基地や輸送用パイプライン設備用の発電装置やポンプ・圧縮機等の機械駆動用として中型ガスタービンが比較的早い時期から使用されていた。これらの用途では殆どが常用で使用条件もかなり厳しいことから、熱効率等の性能よりも耐久性・保守性等が優先され、この用途を主目的として設計された頑丈で長寿命な産業用ガスタービンが使用される事が多かった。

4.1.2 船用／鉄道車両用

船舶の推進用にガスタービンを使う試みは戦後間もない早い時期から英米や旧ソ連の海軍を中心に活発に行われていた。1947 年には英国海軍所属の魚雷艇用ブースターエンジンとして 2MW 級の航転型ガスタービンを試用した記録が残されており、更に 1950 年代に入ると商船用としても英米の各方面に於いて実際の運用を目指した実用試験が様々な形で行われていた。これらの多くは蒸気タービンやディーゼルエンジン等の従来型機関との組み合わせで使用される場合が多く、塩害対策等を考慮して重構造タイプの中型産業用ガスタービンが試用される例も多々あった。

併しながら、常用用途でも軽量小型なガスタービンの特性をより顕著に生かした航転型の評価が重構造型

を徐々に上回り、その後の海上 ACV (Air Cushion Vehicle) や水中翼船等の高速艇の出現がさらに後押しする形で現在実用されている船用ガスタービンの多くは航転型が主流となった。図 4.1 及び表 4.1 には 1982 年に一番艦が就航した我国海上自衛隊の“はつゆき”型護衛艦に搭載されている航転型の“オリンパス TM3B”ガスタービンの断面構造及び主要仕様を船用の一例として示しておく。

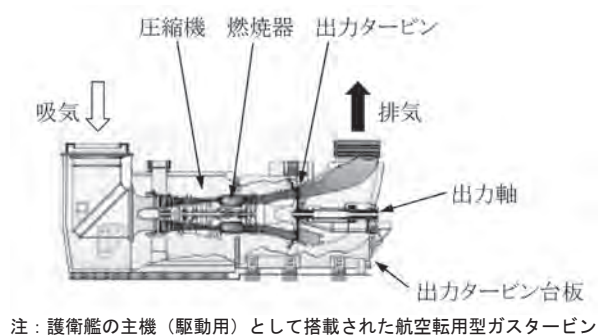


図 4.1 オリンパス TM3B 型ガスタービンの断面図⁽¹⁾

表 4.1 オリンパス TM3B 型ガスタービンの主要仕様⁽¹⁾

最大出力	20,880kW
燃料消費量	12,547kJ/kW・h
圧力比	10
空気流量	106.4kg/s
出力軸回転数	5,660rpm
圧縮機	5A + 7A
燃焼器	8Cannular
タービン	1A + 1A + 1A

ガスタービン列車の開発は非電化区間の高速化ニーズに対応する形で 1960 年代の半ば頃より仏／米／加／英／独等の各国で相次いで開始され、1970 年代には実用試験が各所で活発に行われた。ここで使用されたガスタービンの多くは数百～数千 kW 級の航転型で、各国の事情に応じて電気推進方式又は機械駆動方式の各々の方式で開発が進められた。一時期営業運転する例も現れるなど実用化も期待されたが、他の車両用と同様に部分負荷時の熱効率低下等の課題解決が出来ないまま、今日まで本格的な実用化には至っていない。

4.1.3 自動車用／戦車用

自動車用ガスタービンの開発研究は、1950 年代には既に GM／クライスラ／ローバ等の米英自動車メーカに於いて開始されていた。1960 年代の後半から 1970 年代の前半にはフォード／レーランド／ベンツ等の他の主力メーカも競ってガスタービンの研究開発を行うようになり、折からの排気浄化等の環境問題

も後押しする形でウィリアムス・リサーチ等のベンチャー企業も巻き込んで各地で活発に研究開発が進められた。特に米国に於いては環境庁等の政府機関主導のもとで、ソーラ／エアリサーチ等の小型ガスタービンメーカや専門メーカが多数参加して自動車用の低 NOx 燃焼器や熱交換器の開発が強力に進められた。

自動車用はイニシャル及び維持コスト等の解決困難な経済的重要課題が多くあり、せいぜい数百 kW 級の自動車用ガスタービンにとってこれらは非常に高いハードルであった。米国では上述の様に政府主導の豊富な資金投入による後押しや各大手自動車メーカも数十台規模の試作車による実用評価テストの実施等の強力な開発促進の動きがあったが、結論的にはそれでも既存の往復動機関を凌駕する事が遂に出来ないまま今日の EV 化の時代を迎えようとしている。

戦車は大型化／高速化するにつれて小型大出力な動力源に対するニーズが高まり、早い時期からガスタービン化が各国で検討されてきた。併しながら、部分負荷時の燃費の悪さ等の重要課題克服が中々困難な為に、今日までに実用化されて実戦配備された例はスウェーデン／ソ連／米国の三国に限られており極めて少ない。このうち米国の M1 戦車用として 1965 年に開発着手し 1981 年頃より実戦配備されている AGT1500 型ガスタービンの断面図及び主要仕様を各々図 4.2 及び表 4.2 に示しておく。本ガスタービンは出力発生部の一部に航空用のターボシャフトエンジンを転用し、それに固定式の簡易な熱交換器を取り付けて部分負荷時の燃費改善を図った再生式ガスタービンで、既に約 4,000 台が生産されており、量産化され実戦配備された唯一の本格的な戦車用ガスタービンエンジンである。

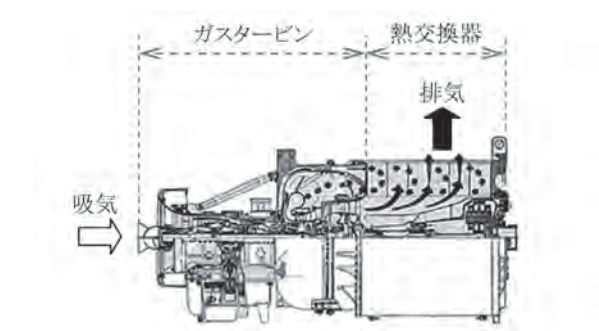


図 4.2 AGT1500 型ガスタービンの断面図⁽²⁾

表 4.2 AGT1500 型ガスタービンの主要仕様⁽³⁾

出力	1,120kW
出力軸回転数	3,000rpm
重量	1,000kg
長・巾・高	1.6m × 1.0m × 0.7m
燃料消費率	190gr/hp・hr
空気流量	5.0kg/sec
圧力比	14.5
タービン入口温度	1,190℃
熱交換器	固定式
その他	可変ノズル付

4.2 国内の動向

国内における陸船用ガスタービンの本格的な研究開発は、戦後間もない1950年頃から当時の鉄研（運輸省鉄道技術研究所）主導の下進められたいわゆる「一号ガスタービン」に始まる。その後これに引き続き国内重工業各社を中心に船用や発電用などの陸船用ガスタービンの開発研究が盛んに行なわれ、更に続いて1950年代の半ば頃から活発化した海外先進各社からの技術導入などを経て、国内の陸船用大型ガスタービン事業の基盤が徐々に培われていった。

黎明期の国内生産量（容量ベース）（図 2.3）の推移を見ると、1972年頃からの生産量増加が目立っているが、主にライセンス製造された陸船用中／大型機種の中近東／中南米方面への輸出増加によるもので、産油国の大規模な経済発展による電力需要の急激な増加に連動した動きであり、ここでテーマとして取り上げている「汎用中小型ガスタービン」に直接関連するものではない。

この時期における汎用中小型ガスタービンの国内動向は未だ本格的な国産化の動きは見られず、前述の“海外の動向”に倣って、各方面での地上用途開拓の可能性を模索している状況であった。即ち、1960年代半ばから1970年代後半に掛けて自動車用を中心とした車両用ガスタービンの研究開発が各方面で活発に行われ、また航空転用型等の輸入エンジンを用いた発電用等の陸船用途への進出が徐々に広がり始めていた。一方、やや特殊な例ではあるが、1950年代後半から1960年代前半に掛けて航空用の補助動力源や艦艇用の可搬式の消防ポンプ等の特殊用途を対象に当時の防衛庁が相次いで開発を計画し、国内のガスタービンメーカーがこれを受注して国産化した例がある。これらは戦後間もないという时期的な問題もあり、その成果が中小型ガスタービンの一般市場を対象とした本格的な普及に直ちに繋がる事は無かったが、そこで得られ

た経験／知識が様々な形で引き継がれ、後々の汎用中小型ガスタービンの普及に寄与した事は間違いない。

この時期（黎明期）の中小型機種に注目して前述の国内陸船用ガスタービンの生産統計資料を見ると、1960年頃から小型機種の生産台数が徐々に増えて年間数十台ペースになって来ているのが目につく。これは前述のジェットエンジン起動用GPU（Ground Power Unit）がこの時期から量産移行により生産台数を徐々に伸ばして1965年頃をピークに1970年代中頃までの間に、多い場合で年間約30台弱が生産されて主に防衛庁に納入されていた効果による所が大きい。また、更にはこれとほぼ同時期に重なった小型消防ポンプ用／教育用ガスタービンの市場投入もこれを後押ししている。これらの小型ガスタービンは1965年頃をピークにしてその後約10年間供給が続いているが、用途は限定的でこれらがそのままの形で広く一般市場に拡販する事はなかった。

これら汎用中小型ガスタービンを中心とした黎明期の国内の動きについて、以下のような主要テーマ毎にその概要を紹介する。

4.2.1 初期の国産小型ガスタービン

前項で紹介した防衛省需要を主な対象として開発された初期の国産小型ガスタービン二機種について以下に紹介する。

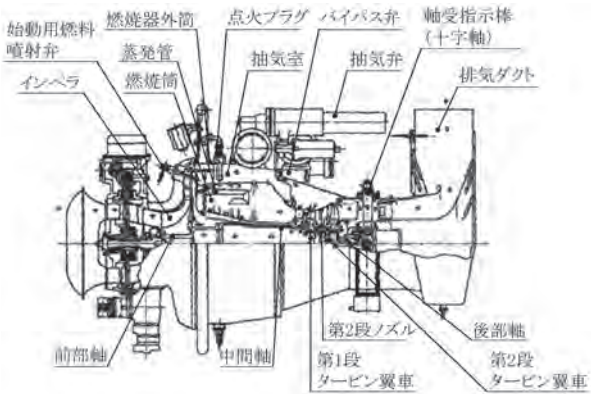
(1) GCM1B⁽⁴⁾

GCM1Bは1957年に当時の防衛庁がF104戦闘機のジェットエンジン始動用として国産化を計画し、戦後の早い時期に三菱重工業（当時の新三菱重工業）が受注して設計開発した軽量小型なガスタービンである。

本機はいわゆる抽気式と呼ばれる形式のガスタービン圧縮機でタービン流量より大きい流量を持った圧縮機から高压空気を抽気してジェットエンジン等の始動に使うもので、1958年12月に試運転を開始して以来各種の確認試験を経て1962年に防衛庁の正式機材として認可採用された。以来、1978年までに累計163台が生産され、その後もオーバーホールを続けながらF4戦闘機の始動用等としても使用されてきた。

本機の断面図を図4.3に、主要仕様を表4.3に示す。図示の様に構造形式はAPU（Auxiliary Power Unit）やヘリコプター用等の航空用小型ガスタービンのそれに沿ったもので、軸出力換算で300～400kW級の大きさながら重量は145kgという軽量に納まっている。三菱重工ではその後本機の主要コンポーネントを用いて各種小型ガスタービンの研究開発が続けられており、後の国産ヘリコプター用ガスタービンの開発等に

繋がっていった。更に又、これらの成果は1995年頃から同社によって非常用発電装置やポンプ駆動装置等の駆動源として市場に投入された各種陸船用ガスタービンにも転用されている。



注：圧縮機からの抽気をジェットエンジン等の始動に使用する抽気式ガスタービンで、その後の自社製小型ガスタービン開発の礎となった。

図 4.3 GCM1B 型ガスタービンの断面図⁽⁴⁾

表 4.3 GCM1B 型ガスタービンの主要仕様⁽⁴⁾

1. 型式		連続燃焼抽気式 ガスタービンコンプレッサ
2. 型番		GCM1B
3. 基本性能諸元	(1) 条件	JIS W 0201
	大気温度・圧力	15℃・101.3kPa
	(2) 出力(抽気)	134kW
	(3) タービン入口ガス温度	820℃
	(4) 圧縮機 圧縮比	1 : 3.7
	(5) 吸気量	2.9kg/s
	(6) 抽気量	0.92kg/s
	(7) 抽気圧力	0.37MPa abs
	(8) 抽気温度	195℃
4. 設計仕様	(1) 圧縮機	a. 形式
		単段遠心式
	(1) 圧縮機	b. 羽根数
		16 枚
	(2) 燃焼器	a. 形式
		蒸発管型分割式
		b. 燃焼筒個数
		4 個
		c. 蒸発管個数
		12 個
	(3) タービン	a. 形式
		軸流 2 段
		b. 羽根数
		(1 段) 29 枚
		(2 段) 24 枚

(2) IGT60⁽⁵⁾

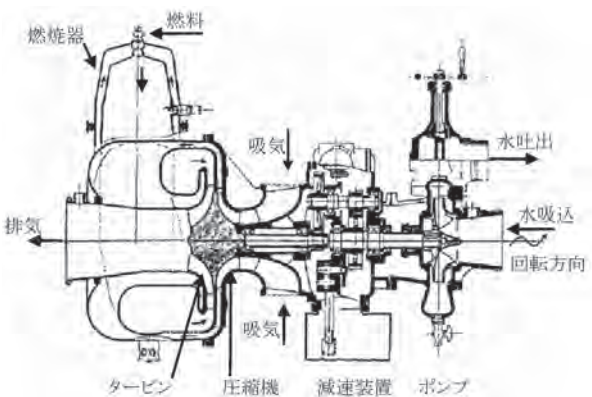
本機は IHI が護衛艦搭載の消防ポンプ駆動用として 1954 年に開発着手した出力 45kW の汎用小型ガスタービンである。1950 年代当時はガスタービンの軽量小型な特徴を生かして、可搬式や移動式の各種機械装置駆動用を目的としたこの種の小型ガスタービンが米 Solar や英 Rover などの欧米のガスタービンメカで相次いで開発されており、消防ポンプや発電機と組み合わせられて小型汎用ガスタービンの市場開拓が世界各

地で盛んに試みられていた。

当時、護衛艦の消防用ポンプ駆動にはガソリンエンジンが使用されていたが、起動信頼性や高い吸い込み水頭及び使用燃料の低い引火性等が評価されて 1962 年には量産初号機が給油艦「はまな」に搭載され、以後ガスタービンが各護衛艦に採用された。

本ガスタービンの断面図を図 4.4 に、主要仕様を表 4.4 にそれぞれ示す。本機は小型の過給機と同様な構造形式の遠心圧縮機と幅流タービンの組み合わせを採用しており、この高速ロータを二つのところが軸受でオーバーハング支持する簡潔な構造となっている。

当時は未だ電子計算機のない時代で、手計算や実験併用の trial and error により開発が進められた苦労話が記録されているが、当時の国内先端技術を結集する形で自主開発され直接の関係者はもとより関連業界にも様々な形で影響を与えた貴重なガスタービンの一つである。また本機は前述の消防用以外に教育用教材としても大学や高専に数多くが納入されており、人材育成等を通じても後々のガスタービン普及に大いに貢献があった。



注：護衛艦搭載の消防ポンプ駆動用として開発された小型ガスタービンで、単段遠心圧縮機・単段タービンの簡潔な構造が特徴

図 4.4 IGT60 型ガスタービンの断面図⁽⁵⁾

表 4.4 IGT60 型ガスタービンの主要仕様⁽⁵⁾

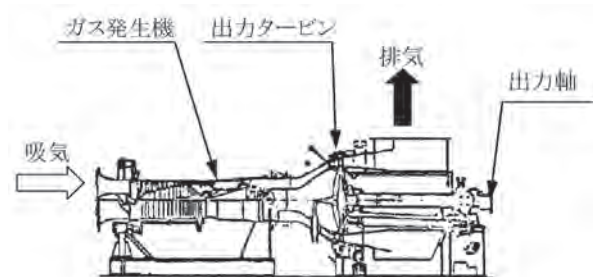
型 式	開放一軸式サイクル
最 大 出 力	60PS (標準大気状態にて)
圧 力 比	約 2.7
タービン入口温度	800℃ (最高)
タービン回転数	40,000rpm
出力軸回転数	4,560rpm (消防ポンプの場合)
燃 料	軽油または灯油
燃 料 消 費 量	約 55kg/h
起 動 方 式	人カクランク方式 (または起動電動機による)
潤 滑 方 式	タービン油強制潤滑方式
寸 法	約 L650 × W440 × H690
乾 燥 重 量	約 65kg (減速装置、補機を含む)

4.2.2 航転型等輸入ガスタービンの活用

1960年代の後半頃から航空転用型や輸入品の中型ガスタービンが船用や非常発電用の原動機として使用販売されるケースが増えてきた。この傾向は1970年代後半まで暫く続いたが、国産ガスタービンの台頭に伴って徐々にこれと入れ替わっていく事になる。

航転型ガスタービンの本格的な市場投入は1967年頃にIHIが米国GEより船用として導入したIM100型及びIM300型にはじまる。この内、1,000kW級のIM100型はヘリコプター用のT58エンジンの転用型で三井造船製のPP5型等のホバークラフト艇の主機として使用され、また2,200kW級のIM300型はターボプロップ用T64エンジンの転用型で防衛庁の魚雷艇用ブースターとして採用されている。ホバークラフト用としてはこの他1974年に川崎重工業が米国ライカミングより導入した1,800kW級のKTF25型も同じく三井造船製のより大型なPP15型艇の主機として採用され、折しも沖縄で開催されていた海洋博への海上輸送で活躍している。

また、これらの航転型は軽量小型や急速起動対応等の特性が評価されて、1960年代の終わり頃より1970年代の後半に掛けて旧電電公社や電力会社の移動用や非常用の発電装置としても多くの機種が市場投入されている。なかでもIHIでは米国GEのJ79ジェットエンジンをガス発生機として10MW級のIM1500型発電装置を開発し、電力会社や旧電電公社に非常用の発電装置として納入していたが、1977年頃にはこれをベースにして10MW級の超大型移動用発電装置を製作しメキシコ石油公社に納入したのに引き続き、リビアやイラクの電力庁に合計13台が輸出されているのが目につく。IM1500型ガスタービンの断面図と主要仕様をそれぞれ図4.5と表4.5に示す。



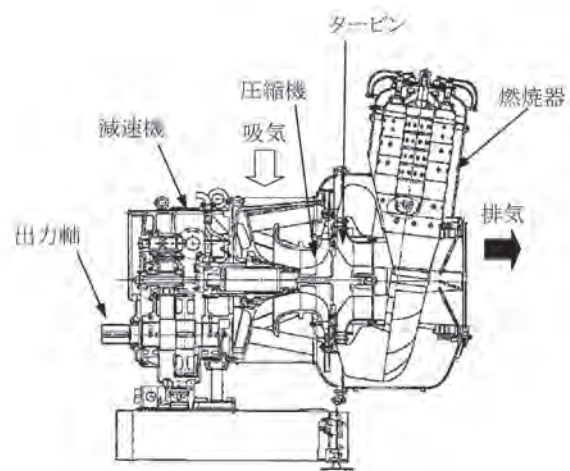
注：GE製のJ79ジェットエンジンをガス発生機として開発された航転型ガスタービン

図 4.5 IM1500 型ガスタービンの断面図⁽⁶⁾

表 4.5 IM1500 型ガスタービンの主要仕様⁽⁷⁾

形 式	開放サイクル 2 軸式
寸 法	L8.0 × W2.8 × H2.9m
重 量	約 16.5t
軸 端 出 力 (最 大)	16,500PS
燃 料 消 費 率	240gr/PS・h
空 気 流 量	約 73kg/s
圧 力 比	12
排 気 温 度	約 450℃
圧 縮 機	軸流 17 段 7,400rpm
燃 焼 器	キャニューラー形
圧 縮 機 ター ビ ン	軸流 3 段 7,400rpm
出 力 ター ビ ン	軸流 1 段 3,000/3,600rpm
運 転 条 件	
大 気 温 度	15℃
大 気 圧 力	101.35kPa
吸 / 排 気 圧 損	100/150mmH ₂ O
燃 料 発 熱 量	10,200kcal/kg (LHV)

このほか、神戸製鋼では1972年にノルウェーのコングスベルグとの技術提携により1,200kW級のKG2型ガスタービンの製造販売を開始している。KG2型ガスタービンの断面図と主要仕様を図4.6と表4.6に示すが、航転型ではないが頑丈で単純簡潔な構造で信頼性が高く取り扱いが容易なことから特に船用の発電装置として多くの実績を有していた。国内に於いても初号機は高速フェリー用の非常用発電装置として納入されたが、その後電力会社の離島用の発電装置として導入され、夏場のピークカット用の電源等として活用されている。



注：コングスベルグとの技術提携により製造販売されたガスタービンで、航転型ではない単純で頑丈な構造が特徴

図 4.6 KG2-3C 型ガスタービンの断面図⁽⁸⁾

表 4.6 KG2-3C 型ガスタービンの主要仕様⁽⁸⁾

形 式	一軸式
出 力 (kW)	1,480
熱 効 率 (%)	16.7
主 軸 回 転 数 (rpm)	18,000
圧 縮 機	遠心 1 段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	ラジアル 1 段

また、1976 年頃には新潟鉄工所（現在の新潟原動機）が英国セントラックスとの技術提携により 750kW 級の非常用発電装置の OEM 販売を開始して市場への参入を図っている。その後 1978 年には米国ソーラと技術提携し 10,000kW 級までの出力範囲に対応できる体制を作った。

その他、神鋼造機に於いても 1976 年頃に米国エアリサーチとの提携により IE831-800 型を導入して非常用の発電分野を中心に新たな体制で市場開拓を行っている。

4.2.3 国内の車両用ガスタービン研究

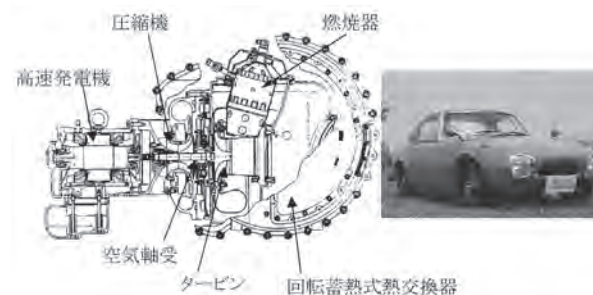
欧米の先進諸国ではかなり早い時期から航空分野での目覚ましい発達に誘発される形で中小型ガスタービンの陸舶分野における用途開拓の試みが活発に行われていた。なかでも車両用はディーゼルやガソリンなどの実績ある従来型エンジンと真っ向勝負する市場で、ここで対等以上の評価が得られれば他の用途でも十分対抗できる事から最も注目される分野であった。

海外のこの流れを受けて、我が国においても大手の自動車メーカを中心にして一時期車両用ガスタービンの開発研究が競って活発に行われた。これらの内主なものについて以下に各社別に記述する。

(1) トヨタ自動車⁽⁹⁾

トヨタ自動車では 1964 年からガスタービンの研究を行っている。乗用車の開発については 1970 年代後半から出力 22kW の GT24M 型 1 軸式ガスタービンを開発して、バッテリーと組み合わせたハイブリッドシステムとしてガソリン車の走行燃費を超える事を目指した。走行試験ではトヨタスポーツ 800 に本システムを搭載しテストコースで各種の走行テストを実施したが、当時の技術レベルでは遂にガソリン車の走行燃費を超える事が出来なかった。図 4.7 に GT24M 型ガスタービンの断面図とそれを搭載したトヨタスポーツ 800 の外観を、表 4.7 に GT24M 型ガスタービンの主要仕様を示す。その後更に大型のバス用を目指した GT21 型 (110kW 級)、GT31 型 (330kW 級) 等を次々と開発し、

日野自動車製のバスに搭載して一般公道での走行試験等も実施した。現在までのところトヨタにおいても自動車用ガスタービンは未だ実用化するには至っていないが、これまでに得られた成果を小型ガスタービンコージェネレーションシステムや非常用発電装置に転化して、別会社（トヨタタービンアンドシステム）の元で製造販売が続けられている。



注：トヨタ自動車が開発した 22kW 級の高速発電機駆動のガスタービン。バッテリーとのハイブリッドシステムをトヨタスポーツに搭載して試験を実施

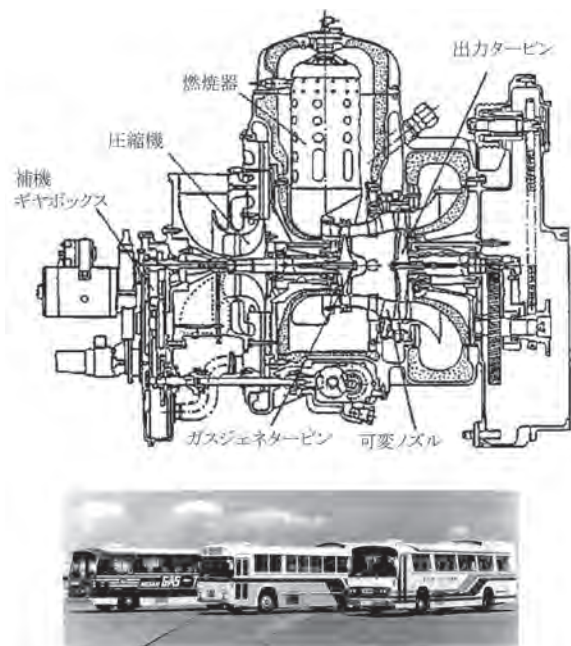
図 4.7 GT24M 型ガスタービンの断面図とトヨタスポーツ 800⁽⁹⁾表 4.7 GT24M 型ガスタービンの主要仕様⁽⁹⁾

形 式	一軸再生式
出 力 (kW)	22
熱 効 率 (%)	22.3
主 軸 回 転 数 (rpm)	86,000
圧 縮 機	遠心 1 段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	ラジアル 1 段

(2) 日産自動車⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

日産自動車では 1963 年から 200kW 級の自動車用 YTP 型ガスタービンの研究開発に着手している。最初の数年間は要素中心に基礎研究を行い、1968 年に試作 1 号機を完成させてエンジン実験を開始した。以来約 4 回の改造設計を行い 40 台以上のエンジンを試作して開発研究を進め、1974 年には既存のディーゼルバスを改造した実験車に搭載して本格的な走行試験を実施している。また、1976 年には白ナンバーを取得して実際の路上において走行試験を行い様々な実用データを採取した。

これらの試験結果、ガスタービンは振動／騒音／排気等の面では勝るが走行燃費ではディーゼルに劣ると言う結論が得られた。図 4.8 に YTP 型ガスタービンの断面図と走行試験を実施したバスの外観を、表 4.8 に YTP 型ガスタービンの主要仕様を示す。



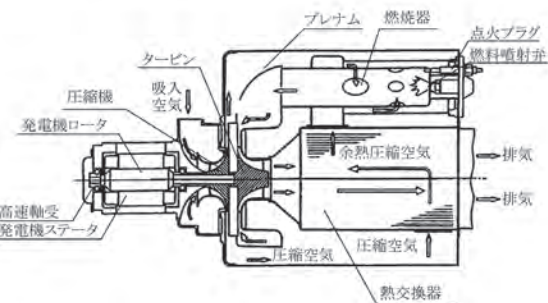
注：日産自動車が開発した 200kW 級の 2 軸式ガスタービン。バスに搭載して走行試験を実施

図 4.8 YTP12 型ガスタービンの断面図と搭載バス⁽¹⁰⁾

表 4.8 YTP12 型ガスタービンの主要仕様⁽¹⁰⁾

形 式	二軸再生式
出 力 (kW)	204
熱 効 率 (%)	18.9
主 軸 回 転 数 (rpm)	40,000
圧 縮 機	遠心 1 段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	軸流 (ガスジェネ: 1 + 出力: 1) 段

燃費改善には TIT の上昇が不可欠と言う事でセラミックガスタービンの研究が始められ、その研究過程で蓄積した技術を応用して 1985 年にはセラミックターボチャージャの実用車販売が開始されている。また、日産自動車に於いても他と同様、自動車用として実用に繋がる成果は未だ得られていないが、これらの技術を転用して開発した超小型の携帯用発電装置“ダイナジェット 2.6 (2.6kW)”を 1995 年から販売開始している (現在この事業は“IHI エアロスペース”に引き継がれている)。図 4.9 にダイナジェット 2.6 の外観とこれに搭載された 1 軸式ガスタービンの断面図を、表 4.9 にガスタービンの主要仕様を示す。



注：日産自動車が車用ガスタービンの技術を転用して開発した 高速発電機駆動の出力 2.6kW の超小型ガスタービン。携帯用発電装置として製品化された。

図 4.9 ダイナジェット 2.6 の外観と搭載ガスタービンの断面図⁽¹¹⁾

表 4.9 ダイナジェット 2.6 搭載ガスタービンの主要仕様⁽¹¹⁾

形 式	一軸再生式
出 力 (kW)	2.6
熱 効 率 (%)	-
主 軸 回 転 数 (rpm)	100,000
圧 縮 機	遠心 1 段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	ラジアル 1 段

(3) 三菱自動車

三菱自動車は 1969 年に三菱重工業と共同でトラック用ガスタービンの調査研究に着手し、走行試験を実施している。その後、この経験をもとに大型トレーラ用の二軸再生式ガスタービン E501X 型 (300kW 級) の開発に着手し、1979 年には実車に搭載して走行試験も行っている。しかしながら実用化には更なる熱効率の改善が必要との判断から、三菱自動車ではメタルガスタービンの開発を一旦中断してセラミック部品の研究開発に注力するよう方針を変更している。

(4) 小松製作所⁽¹²⁾

小松製作所では従来のディーゼルに代わる建設機械用の新しい動力源の開発を目指して 1969 年よりガスタービンの研究を開始した。当時はアメリカに於いてマスキー法による排ガス規制が強化され始めた時期で、GM / フォード / クライスラを始め欧米の自動車

メーカ各社が競ってガスタービンの研究開発を行っていた。また、建設機械分野ではオフロード用ダンプトラックのペイロード増加を狙って比出力の大きいガスタービンの採用を検討する動きも各所でみられていた。

このような状況の中、小松製作所ではそれまで全く未経験なガスタービンの開発に着手し、その開発目標は積載量 32 トンのオフロード用大型ダンプトラック搭載を念頭に、出力 440kW 級の自動車用としては比較的大型なガスタービンを選んで設定した。図 4.10 にコマツ ZW6410 型ガスタービンと 32 トンダンプトラックの外観を、表 4.10 にコマツ ZW6410 型ガスタービンの主要仕様を示す。各種の要素開発研究を経て 1972 年にはエンジン全体のベンチテストを行った。その後、実際の建設機械用ダンプトラックに搭載して様々な評価試験を実施し、排ガス／騒音等の環境評価では高い評価を得たが、燃費や発進加速性等の性能面で一段の改善を要する事も判った。この為、セラミック部材の採用等も検討されたが、折しも石油危機が勃発し燃費の重要性が一段と高まる中、中々解決に結びつく策も直ぐには見つからず遂には実用化に至らないまま開発研究は終了している。



注：小松製作所が建設機械の動力源として開発した 440kW 級ガスタービンで、ダンプトラックに搭載して試験を実施

図 4.10 コマツ ZW6410 型ガスタービンと 32 トンダンプトラック⁽¹²⁾

表 4.10 コマツ ZW6410 型ガスタービンの主要仕様⁽¹²⁾

形 式	二軸再生式
出 力 (kW)	441
熱 効 率 (%)	20.7
主 軸 回 転 数 (rpm)	31,500
圧 縮 機	遠心 1 段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	軸流 (ガスジェネ：1 + 出力：1) 段

(5) その他

自動車用とは若干異なるが、この時期（1960～1980 年頃）に我国において広い意味での車両用として“ガスタービン戦車”及び“ガスタービン列車”の試作研究が独自に行われており、これらについても簡

単に触れて置く事とする。

この内、戦車については前述の米国 M1 戦車に搭載された AGT1500 型ガスタービンに刺激される形で、1968 年頃から当時の防衛庁第 4 研究所に於いてガスタービン戦車の研究計画が持ち上がり、ヘリコプター用として川崎重工業が国産化していた T53-09B 型エンジンをそのまま転用して M4 戦車に搭載し 1969～1970 年の二年間懸けて走行試験等を行った。この結果、ディーゼルに比べて圧倒的に劣る燃費が矢張り問題とされて急遽供試ガスタービンを再生式に改造する試みもなされたが、当時の技術力では実用に耐える熱交換器を短期間で開発する事は至難の技であり計画は 1971 年に中止となった。

1960～1970 年頃には欧米の諸国に於いて在来線的高速化を目指してガスタービン列車の研究開発が盛んに行われていた。我国においても 1967 年頃から鉄道車両工業協会が当時の運輸省から補助金を得て、在来線の非電化区間的高速化を目標にガスタービン列車の研究に着手した。この研究開発にはガスタービンメーカとして IHI 及び川崎重工業の二社が各々 T58 型（GE 製）及び KTF14 型（ライカミング製）ガスタービンを駆動源として提案し参加した。図 4.11 に KTF14 型ガスタービンとガスタービン試験車の外観を、表 4.11 に KTF14 型ガスタービンの主要仕様を示す。これらのガスタービンは何れも航転型（ヘリコプター用）で出力も 800～900kW 級と従来のディーゼル動車に比べると大きくなっている。試験は 1970～1973 年に JR の磐越東線／伯備線／田沢湖線等で行われ、本格



注：ヘリコプター用として定評のあるライカミング製 T53 型ガスタービンの航転型で、改造したディーゼル気動車に搭載して走行試験を実施

図 4.11 KTF14 型ガスタービンとガスタービン試験車⁽¹³⁾

表 4.11 KTF14 型ガスタービンの主要仕様⁽¹³⁾

形 式	二軸式
出 力 (kW)	883
熱 効 率 (%)	21.8
主 軸 回 転 数 (rpm)	25,910
圧 縮 機	遠心 1 段
燃 焼 器	アニュラー形
タ ー ビ ン	軸流 (ガスジェネ：2 + 出力：2) 段

的な実用化を狙って試作されたガスタービン動車を使用して様々なデータが取得されたが、折しも勃発した石油危機や周辺状況の変化に影響されて1973年以降試験は行われずそのまま計画は中止された。

4.3 消防法の大改正と非常用ガスタービンの普及

前述のとおり、1960年代後半頃より航転型等の輸入品による中小型ガスタービンの陸船用途への進出が徐々に増えてきて、発電用としても移動用や非常用を中心に一般市場への普及が少しずつ広まりつつあった。さらに、このような時期の1974年に行われた消防法の大改正は防災用機器の市場規模を一気に拡大し、非常用発電設備についてもそれ迄はほぼディーゼルの独壇場であった一角にガスタービンが食い込んで行く機会が生まれてきた。

4.3.1 消防法の大改正

1972年5月の大阪千日デパートビル火災及び1973年11月の熊本大洋デパート火災は何れも死者100名以上を越す日本のビル火災史上最悪の大惨事となった。これらのビル火災が何れも当時の建築基準法に対して「既存不適格」であった事が大きな問題となり、このような物件を早急になくすために建築基準法及び消防法の大改正が行われた。

この内、消防法については1974年の大改正で公共性の高い旅館、ホテル、デパート、病院、地下街などの特定防火対象物について現在の基準に適合する事を義務付ける「遡及適用」の規定が史上初めて設けられた。当時行われた市場調査によると、これによって防災用機器全体の市場規模は二兆円以上に拡大し、そのうち非常用発電設備は約7,000億円程度とかなり大きな需要が期待された。

4.3.2 非常用ガスタービンの普及

1974年の消防法大改正によって不特定多数の人が出入りする建造物には防災用の自家発電設備の設置が義務付けられ、これを契機として中小型の非常用発電市場におけるガスタービンの普及が急速に広まっていった。この市場はそれまでディーゼルエンジンがほぼ独占していたが、特にスペースが限られ周辺環境への制限も多い既設ビルを中心に、軽量小型で環境に優しいガスタービンの評価が高まり、市場への浸透が一気に深まっていった。

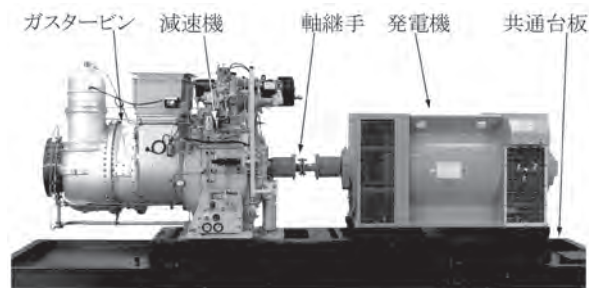
ガスタービンは、

- ① 同クラスのディーゼルエンジンと比べると重量で

約1/4、体積では約1/7と圧倒的に軽量小型で、従って発電パッケージもコンパクトになる事から狭いスペースでも設置可能である。

- ② 往復動のディーゼルエンジンと異なり回転運動である事から振動が殆どなく、据付に際して特別な基礎工事や防振工事を必要としない。
- ③ 冷却水が不要で、従って水槽や配管等も不要となる事から、冷却水が必要なディーゼルに比べて設備全体が大幅に簡素化されて、結果的に信頼性の向上に繋がる。

等の数々の特長がある。この為、従来のディーゼルでは難しかった屋上設置が可能となるなど、様々な制限があった従来の設置条件が大きく緩和されてスペースの有効活用が図れると同時に据付が容易になって工事費用の大幅削減に繋がった。図4.12に非常用ガスタービン発電装置の構造図例を示す。



注：共通台盤上にガスタービン、減速機及び発電機を搭載。この上にキュービクル構造の外箱が被せられる。

図 4.12 非常用ガスタービン発電装置の構造例 [写真提供：川崎重工業]

この当時、即ち1970年代半ば頃は未だこれらの用途に適した国産ガスタービンは少なく、多くの発電装置メーカーは輸入ガスタービンを導入して新たな需要に対応していた。航転型等の実績ある中小型ガスタービンを海外から輸入して、移動用や船用等の特定な発電分野で用途を開拓していく動きは、1960年代後半頃からIHIや神戸製鋼等の重機械メーカーを中心に徐々に広がっていた。

さらに消防法改正以後の1970年代後半になると、それまであまりガスタービンとは縁がなかった新潟鉄工（現在の新潟原動機）、神鋼造機等のディーゼルエンジンメーカーや日比谷総合等の発電装置パッケージが欧米のガスタービンメーカー（新潟鉄工＝英セントラックス及び米ソーラ、神鋼造機＝エアリサーチ、日比谷総合＝エアリサーチ等）と提携して陸船用の中小型ガスタービンを輸入し、自社製の発電装置に組み込んで防災用として売り出す動きが目立つようになって

きた。

1970年代半ば頃のこれらのディーゼルメーカやパッケージの一連の動きは、取りも直さず非常用発電分野における中小型ガスタービンの評価を高め、1970年代後半から1980年代に掛けて活発化する非常発電用の中小型ガスタービン国産化の動きを加速させた。

参考文献

- (1) 「産業技術歴史継承調査 我が国のガスタービン技術の独創性と創造性に関する調査編」, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, PP. 62-63 (2003)
- (2) 森下: 「2. 自動車(車両)用ガスタービンの動向 車両用ガスタービン開発の動向」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 16, No. 61, P. 60 (1988)
- (3) 川合他: 「特殊車両用ガスタービン -AGT1500 ガスタービンの開発まで-」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 4, No. 16, P. 48 (1977)
- (4) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 6-7 (2002)
- (5) 荒木: 「IGT60 型汎用小型ガスタービン」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 28, No. 4, P. 59 (2000)
- (6) 中杉他: 「10,000KW ガスタービン移動発電装置」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 6, No. 22, P. 62 (1978)
- (7) 「産業技術歴史継承調査 我が国のガスタービン技術の独創性と創造性に関する調査編」, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, PP. 18-19 (2003)
- (8) 永田: 「神鋼・コングスベルグガスタービン -その応用プラント『ターボイナートシステム』-」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 2, No. 8, P. 42 (1975)
- (9) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 92-93 (2002)
- (10) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 90-91 (2002)
- (11) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 74-75 (2002)
- (12) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 94-95 (2002)
- (13) 「産業技術歴史継承調査 我が国のガスタービン技術の独創性と創造性に関する調査編」, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, PP. 70-71 (2003)

5 | 急成長期（1970 年代半ば～1990 年頃）：国産化の推進

国内陸船用ガスタービンは 1978 年頃から急激に需要が拡大し生産台数を増やしているが、その大きな原動力となったのが 1974 年の消防法改正を機に市場が急拡大した非常用発電装置である。ガスタービンは軽量小型で冷却水が不要など従来型の原動機では得られない特長を持っており、これが消防法の改正を機に急拡大した非常用発電装置市場で高い評価を得て、急速に普及が進んだ。

当初、国内には未だこの用途に適した中小型の国産ガスタービンは見当たらず、国内の発電装置メーカーは欧米の先進メーカーから輸入したガスタービンを使って需要に対応していた。然しながら、市場が拡大し多様化するに連れて、品揃えや価格面で様々な制限の多い輸入エンジンの限界が目立つようになり、その解決策として国産中小型ガスタービンの開発が各所で活発に行われるようになった。

5.1 非常用ガスタービン国産化の動き

非常用ガスタービンの開発には陸船用途への市場拡大を目指していたガスタービンメーカーのみならず、従来この市場を独占していたディーゼルエンジンメーカーも積極的に参加した。ディーゼルエンジンは元来過給機との関わりが深く、これと構造が似通った中小型のガスタービン開発に比較的取り組みやすい環境にあり、多くのディーゼルエンジンメーカーが競って国産化を推進した。

またこの背景として、この時期に先行して防衛需要を主体にジェットエンジン等の航空用ガスタービンのライセンス生産が活発化しており、関連部品メーカーの裾野も広がって必要な素材や部品の国内調達が容易になって来た事も挙げられる。

これらの動きは、従来ややもすれば閉鎖的であった市場にガスタービンの参入を促す環境整備を更に進める事になり、この結果 70 年代後半頃から非常用途を中心とした陸船用中小型ガスタービンの生産台数が一気に増加することになる。

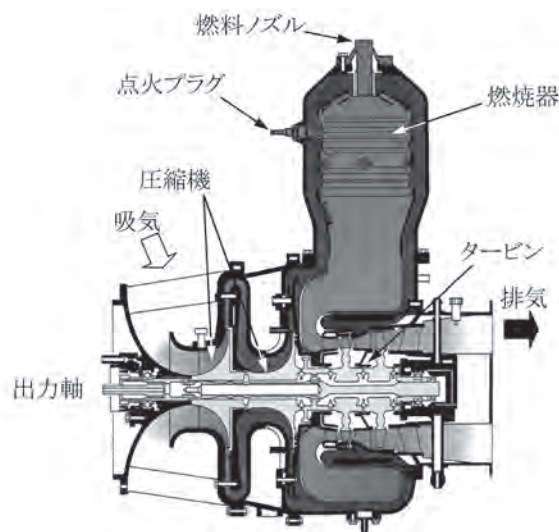
5.1.1 主要各社の動向

国産ガスタービンの開発は輸入品の限界を超えるべく様々なメーカーが競って取り組んだ。それぞれの状況は個々に異なっていたが、この内主要な数社の動きについて以下にその概要を記述する。

(1) 川崎重工業⁽¹⁾

川崎重工業は戦後間もない 1950 年代の半ば頃から米軍のジェットエンジンオーバーホール事業に取り組んでおり、その後も防衛省需要向け航空用エンジンのライセンス生産等を通して、1970 年頃にはガスタービン製造についての豊富な知識経験を得ていた。川崎重工業ではこれらを生かしてガスタービン事業を更に拡大しようと、ライセンス生産していたヘリコプター用の中型ガスタービンを使用して様々な陸船用途に対して用途開発を試みたが、種々な点で制限の多い輸入エンジンの限界もあって、何れも十分な成果は得られなかった。

これらの結果から自前の国産エンジンの必要性を痛感した川崎重工業は、1972 年に出力 300kW 級の小型ガスタービンを試作した。本機は試作年度に因んで KG72 型と名付けられ、プレジャーボートに搭載し走行テストを行うなど各種試験を実施した。本機はその



注：川崎重工業が 1972 年に開発した 150kW 級小型ガスタービンで、非常用ガスタービン発電装置として商品化され、その後の小型ガスタービンシリーズ化の礎となった。

図 5.1 S1A-01 型ガスタービンの断面図 [資料提供：川崎重工業]

表 5.1 S1A-01 型ガスタービンの主要仕様⁽¹⁾

形 式	一軸式
出 力 (kW)	150
熱 効 率 (%)	17.6
主 軸 回 転 数 (rpm)	53,000
圧 縮 機	遠心 2 段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	軸流 2 段

まま試作にとどまりその後ついに日の目を見ることはなかったが、この短期間の自社開発研究を通じて得した経験と自信がのちの自前技術による純国産ガスタービン開発に対する大いなる自信を与えた。

KG72 型の成果をベースにして最初に製品化されたエンジンは図 5.1 と表 5.1 に示す 150kW 級の S1A-01 型で、其れまでに実施した市場調査に基づき用途を発電用に絞って一軸式のシンプルな構造とした。このエンジンは初の純国産非常用ガスタービン発電装置 PU200 型として、1976 年にその初号機が市場に投入された。

発売当時は消防法改正後間もない頃で、時期的に恵まれた事もあって以後順調に販売台数を増やし、その結果従来ディーゼルエンジンの独壇場であった非常用発電分野にガスタービンの市場を新たに創造する役割を果たした。以降、このエンジンをベースに類似の形態をとりながら600kW級のS2A、1,000kW級のM1A等の大型機種を次々と開発して、これらのパワーアップタイプやツインタイプを含め2,400kW級まで短期間で一気にシリーズ化して品揃えを行った。

(2) ダイハツディーゼル⁽²⁾

ダイハツディーゼルでは1975年頃から独自の自社技術により中小型汎用ガスタービンの開発を進めてきた。これらのガスタービン開発の歴史は大略三代に分割できるが、この内、1975～1981年間の第一世代当時は未だ電子計算機も発展途上で数値流体力学(CFD)等の設計ツールも揃っておらず、手探り状態での出発であった。

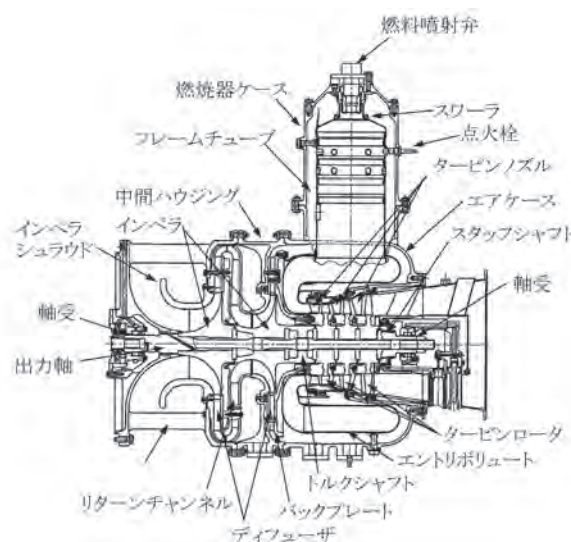
メカニカルな部分にはディーゼルエンジンで培った技術が役に立ったが、空力設計に関しては未知な分野が多く要素試験による基礎データの取得から始める必要があった。一方、実機を通じての知識／経験の体得も必要不可欠なことから、要素試験と併せて実機試験も並行して進められた。また、要素研究は手作りの風洞や燃焼装置を使用して翼列試験や燃焼実験を行い、必要な各種設計データの取得蓄積に努めた。

実機開発は当初より非常用発電装置をターゲットとし、シンプルで低コストなエンジンを早く開発する事に重点を置いて進めた。こうして開発された第一世代のエンジンが G-33 型ガスタービンで、1981 年にその初号機が 500kW 級の非常用発電装置に組み込まれて初めて市場に投入された。このエンジンは圧力比 4.2、タービン入口温度 (TIT) 900℃で燃料消費率は 400g / ps・h レベルであった。

この第一世代のガスタービンに基づいて1982

～ 1990 年の間に 550kW 級の TS-01 型（図 5.2 及び表 5.2 を参照）を始めとする第二世代のエンジン開発が進められた。これら新機種開発の主眼は TIT は現状維持のままとし、圧縮機段数を単段から二段に増やして圧力比を 4.2 → 8 ～ 9 と高くすると同時に各要素の効率を改善して燃費率を 25% 改善する事であった。更にはよりコンパクトな構造を目指して第一世代の G-33 型では 25,000rpm であった主軸回転数を同クラスの第二世代の TS-01 型では 35,000rpm に上げて高速化を図っている。

第二世代のエンジンは上記の TS-01 型の他に TS-02 型及び TS-01B 型の二機種が開発され、この 3 機種のエンジンを用いて 300kW から 1,200kW の間で 6 機種の発電装置を作り非常用発電装置 TX シリーズとして市場に投入した。



注：ダイハツディーゼルが第一世代ガスタービンベースに、TITは現状維持のまま圧縮機段数増加などで効率アップを図った第二世代ガスタービン

図 5.2 TS-01 型ガスタービンの断面図 [資料提供：ダイハツディーゼル]

表 5.2 TS-01 型ガスタービンの主要仕様⁽²⁾

形	式	一軸式
出	力 (kW)	550
熱 効 率 (%)		21.3
主 軸 回 転 数 (rpm)		35,000
圧 縮 機		遠心 2 段
燃 焼 器		単筒缶形
タ ー ビ ン		軸流 3 段

(3) 神戸製鋼⁽³⁾

神戸製鋼では軸流式や遠心式の圧縮機を始めとする各種回転機械の製造技術基盤をベースにして1972年にノルウェーのヨングスベルグと技術提携し、同社

の KG2-3 型産業用ガスタービンの製造販売ライセンスを取得してガスタービン事業を開始した。このガスタービンは発電端出力 1,200kW 級で全ラジアル型のロータを片持支持した単純簡潔な構造をしており、主に船用や離島用の電源として国内の各所で使用されていた。

一方、国内においては 1974 年の消防法改正を一つの大きな契機として、非常用発電分野での中小型ガスタービンの活躍が目立つようになってきた。神戸製鋼ではこの分野への本格的な参入を目指してより幅広い顧客ニーズに対応すべく、1980 年から新たに 800kW 級の GT1 型ガスタービンの自社開発に着手し、1983 年 3 月には初号機を市場に投入した。

この GT1 型の開発に際しては目標とする非常用発電市場において最大のライバルとなるディーゼルエンジンを意識して、これに十分対抗可能な低コストと高信頼性の達成を二大目標に設定した。この為、

- ① 吸気量を極力少なくして全体寸法を小さくする。
 - ② 部品点数の低減に努める。
 - ③ 鋳造品を多用する。
 - ④ 異物の吸込に強い構造とする。
 - ⑤ 高温側の軸受を排気通路側に配置しない。
- 等を念頭に開発を進めた。

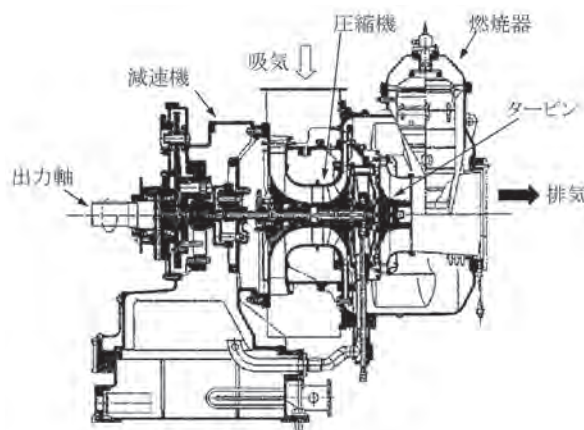
この結果開発された GT1 型ガスタービンは図 5.3 に示す断面構造、表 5.3 に示す主要仕様であり、

- ① 圧縮機／タービン共に単段ラジアル形式のシンプルな構造。
- ② エンジン本体の部品点数は約 150 点と従来に比べて大幅に低減。
- ③ ロータ類等を含み各所で精密鋳造部品を多用。
- ④ 軸受は高温側も遠心圧縮機とラジアルタービンの間に配置されており、高温の排気ガスに晒される事はない為、潤滑油は低温側と同じ鉱物油が使用できる。

等の多くの特長を持っている。

なかでも従来 200kW 級以下の小型機で 사용되는事が多かったラジアルインフロータービン（以下 RIT と呼称）を本エンジンのような 800kW 級のガスタービンに採用している例はごく稀であったが、この RIT の採用により比較的大型な機種にも関わらず部品点数の少ない簡潔な構造をとる事が出来た。

神戸製鋼が行ったこの GT1 型ガスタービンの自社開発は日本ガスタービン学会においても高い評価を得て、「発電用 800kW ガスタービンの開発」のタイトルで 1984 年度の技術賞を獲得している。



注：神戸製鋼が低コストと高信頼性を目標に開発したガスタービン。圧縮機・タービン共に単段ラジアル形式で部品点数が少ない簡潔な構造を採用

図 5.3 GT1 型ガスタービンの断面図⁽³⁾

表 5.3 GT1 型ガスタービンの主要仕様⁽³⁾

形 式	一軸式
出 力 (kW)	925
熱 効 率 (%)	18.5
主 軸 回 転 数 (rpm)	31,280 (50Hz) / 31,150 (60Hz)
圧 縮 機	遠心 1 段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	ラジアル 1 段

(4) 新潟原動機⁽⁴⁾

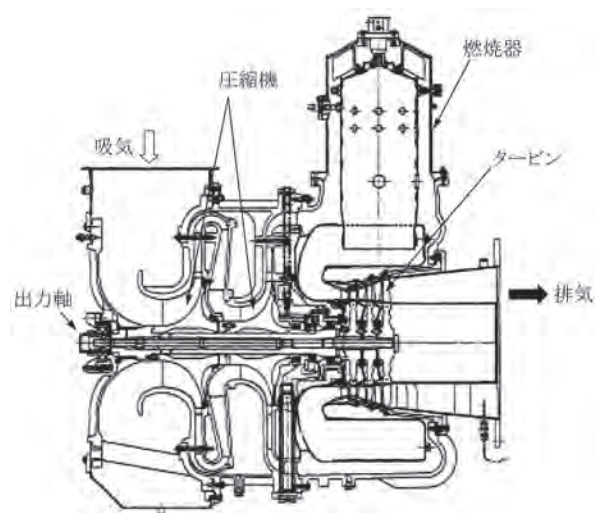
新潟原動機（旧新潟鐵工所）では終戦前（1944 年頃）から当時進められていた軍用のジェットエンジン開発プロジェクトに参加して、「ネ-20」等の試作を担当する等ガスタービンとの関わり合いは古くからあった。

戦後になって 1956 年に英国ナピアとディーゼルエンジン用過給機の技術提携を行っているが、ガスタービンについては 1976 年に英国セントラックスと技術提携し、出力 600kW 級の OEM ガスタービンを組み込んだ非常用発電装置を製造して初めて市場に参入した。

当時、非常用発電市場ではガスタービンの評価が急速に高まり、関連する多くの発電装置メーカーは海外の実績あるガスタービンメーカーから既成エンジンを輸入してこの新たな需要に競って対応していた。更に 1978 年には米国のソーラと提携し、同社の豊富な機種揃えをベースに 8,000kW 迄対応できる体制を構築して、拡大を続ける中小型ガスタービン発電市場に備えた。

新潟原動機では旧くからディーゼルエンジンの製造販売に携わってきたが、前述のように 1950 年代半ば頃からは過給機の開発製造も積極的に推進してき

た。以来長期にわたって蓄積されたこれらの高速回転機械に関する技術をベースにして、ガスタービンの自社開発が計画され、1988年には発電出力300kW級のNGT1型ガスタービンを完成させて市場に投入した。更に引き続き1989年には出力1,000kW迄をカバーする事が出来るNGT2型ガスタービンが完成し、これをベースに更なる大型化とツイン化によって2000年迄には3,600kW以下の出力範囲を隙間なくシリーズ化した。



注：旧新潟鐵工所が過給機等の高速回転機に関する技術をベースに自社開発した1,000kW級ガスタービン

図 5.4 NGT2 型ガスタービンの断面図⁽⁴⁾

表 5.4 NGT2 型ガスタービンの主要仕様⁽⁴⁾

形 式	一軸式
出 力 (kW)	1,320
熱 効 率 (%)	24.2
主 軸 回 転 数 (rpm)	22,000
圧 縮 機	遠心2段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	軸流3段

このNGTシリーズのガスタービンは図5.4のように2段の遠心圧縮機と3段タービンで構成されたロータを持ち、燃焼器は単筒缶型を採用している(表5.4にNGT2型ガスタービンの主要仕様を示す)。新潟原動機では更に多様化する市場ニーズに対応して、新たに出力800kW以下の範囲をカバーするRGTシリーズの開発に着手し、1990年代の後半にはこのシリーズ化を完成させる事が出来た。このRGTシリーズは単段遠心圧縮機と単段ラジアルタービンの組合せによる簡潔な構造を特徴としており、このRGTとNGTとの両シリーズの組合せによって非常用ガスタービン発電市場での揺るぎない地位を築くことが出来た。

(5) ヤンマー⁽⁵⁾

ヤンマーでは創業以来一貫してディーゼルエンジンを中心とする各種内燃機関の開発／製造／販売に取り組み、これまでに市場からの要求に応じて多種多様な商品を提供し続けてきた。ガスタービンについては1972年頃から500kW級の小型機種を対象に、設計技術の習得を目指して航空宇宙技術研究所(当時)の指導の下で細々と研修を進めていたが、その後の消防法改正(1974年)や宮城沖地震(1978年)を契機にガスタービン非常用発電装置の需要が急速に高まっていった。この市場の要求を受けてヤンマーでは自社ガスタービンの早期開発を推進する為の部門を新設した。

1979年当時、未だガスタービンの開発技術力に乏しかったヤンマーは英国の研究開発会社であるノエルペニイタービン(以下NPT)に最新技術を適用した450kW級のガスタービン開発を委託した。この間、ヤンマーではNPTに交代で技術者を派遣して駐在させ、ガスタービンの設計／製造／試験等に係る一切の技術習得に努めた。

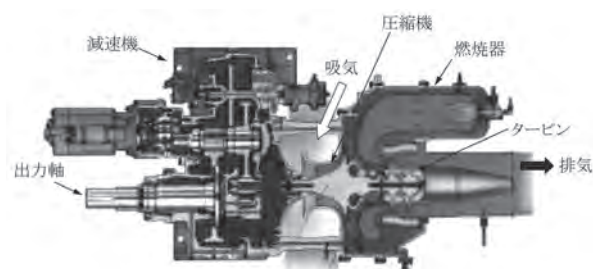
開発を請け負ったNPTに対するヤンマー側からの要求は、

- ① ヤンマーの製造能力で対応可能な構造。
 - ② ディーゼルエンジン並みの製造コスト。
- の二点であった。

NPTはこの要求に対して、当時の産業用小型ガスタービンとしては世界最高の効率79%、圧力比8の単段遠心圧縮機、単筒缶型燃焼器、軸流二段タービンの構造でTIT=1,027℃の仕様提案し、1980～1981年の二年間で完成させたプロトタイプP169型ガスタービンの試験性能はこれを満足するものであった。

ヤンマーではこの英国での開発と並行して、国産化の準備と前記のP169型を原型モデルとする非常用ガスタービン“ATシリーズ”の自社開発を推進し、1983年にはP169型とほぼ同じAT600S型(450kW、図5.5と表5.5を参照)とその2基1軸式のAT1200型(883kW)をシリーズ初号機として揃って初出荷した。納入当初は日本独特のA重油使用で黒煙や失火等のトラブルに見舞われたが、燃焼器／燃料弁等の改善で解決する事が出来た。

その後、1983年末にはAT900S(700kW)、1984年にその2基1軸式であるAT1800S(1,400kW)、1985年にAT360S(268kW)を完成させて相次いで市場に投入した。更に1988年には小型のAT270S型(202kW)を開発したが、このエンジンは当時最高レベルの周速680m/sのラジアルタービンを採用し部品点数



注：ヤンマーがNPTで開発した450kW級ガスタービンをベースに自社開発した450kW級ガスタービン

図 5.5 AT600S 型ガスタービンの断面図 [資料提供：ヤンマー (株)]

表 5.5 AT600S 型ガスタービンの主要仕様⁽⁵⁾

形 式	一軸式
出 力 (kW)	449
熱 効 率 (%)	18.9
主 軸 回 転 数 (rpm)	39,783 (50Hz) / 39,913 (60Hz)
圧 縮 機	遠心1段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	軸流2段

を大幅に削減している。また1986年には銀行のオンライン化等に伴う非常用発電装置の大型化に対応するため、AT900S型の3基1軸式であるAT2700型(1,986kW)を開発した。

更に当時の建設省やポンプ協会からの要望を受けて、1988年には2軸式のAT9T型(603kW)を開発し、加えて1991年にはAT3T型(221kW)とAT6T型(368kW)を追加した。この結果、1軸式の発電用ATシリーズに加えて2軸式ポンプ用ATTシリーズのラインアップ充実が図られて、その後の需要拡大に大きく寄与する事が出来た。

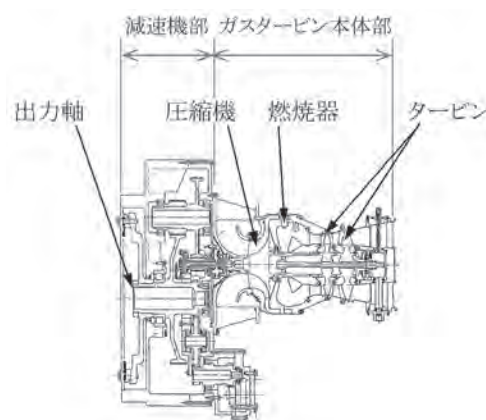
(6) 三菱重工業

三菱重工業は戦後間もない時期から陸船用のガスタービンの自社開発を行い、その後も事業用等の大型発電分野を主な対象として順調にその業容を拡大し、現在では大型陸船用ガスタービンについては世界でも有数の企業として各地で活躍している。

これらのガスタービンはいわゆる重構造型であるが、一方、汎用用途を対象とする中小型ガスタービンについても新製品を開発し、1989年頃より非常用発電等の市場に参入している。これらのガスタービンは500～1,000kW級程度の出力で、前述の数100MW級の大型機種を担当する原動機部門とは異なり、産業用の圧縮機／蒸気タービン等を担当する機械事業部門で開発し製品化されている。このガスタービンは単段遠

心圧縮機／単筒缶型燃焼器／2段軸流タービンの主要素で構成されており、1989年～2000年頃までの約12年間、主として非常用発電装置の駆動源として広く一般市場で販売されている。

また同社にはこの他、航空エンジン部門が自社開発したジェットエンジンを転用し、1995年頃より主に非常用発電装置に組み込んで販売されている400kW級の小型ガスタービンがある。このMTG400型ガスタービン(400kW, 図5.6及び表5.6を参照)は同社が開発したジェットエンジンの設計をベースに一軸式の発電用ガスタービンを開発したものである。即ち、航空用の実績を生かした薄肉／単純で信頼性の高い構造に加えて遠心噴霧方式のアニュラ型燃焼器を採用する等、部品点数を極力減らしており、軽量小型で低コストな汎用小型ガスタービンとなっている。



注：三菱重工業が航空用のジェットエンジンを発電用一軸ガスタービンに改造したもの。遠心噴霧式アニュラ型燃焼器を採用した小型軽量な400kW級ガスタービン

図 5.6 MTG400 型ガスタービンの断面図⁽⁶⁾

表 5.6 MTG400 型ガスタービンの主要仕様⁽⁶⁾

出 力	400kW
使 用 燃 料	灯油、軽油、A重油
燃 料 消 費 量	255L / Hr (40℃)
吸 気 / 排 気	吸気：310m ³ /min 排気：690m ³ /min, 420℃ (エジェクター型)
形 式	単純開放サイクル軸形
圧 縮 比	5
回 転 数	約 43,000rpm

この他、この系列にはMTG400型をツイン化したMTG800T型やポンプ駆動用に二軸化して縦型にしたMTM500型(316kW)が揃えられている。

現在これらの自社開発した軽構造型の汎用中小型ガスタービンは2005年以降は販売されていない。また、同社では海外の提携先から導入した航転型の中型ガス

タービンを使用してコージェネレーションシステムやポンプ駆動等の需要に対応している。

5.2 輸入ガスタービンについて

1970年代の半ば頃から1980年代後半に掛けて活発化した中小型ガスタービン国産化の動きは何れも防災用途の非常用発電装置を目標としていた。従来、この市場は小型の汎用ディーゼルエンジンがほぼ独占しており、船用や産業用のディーゼルエンジンを製造している多数のメーカーが豊富な品揃えで市場を席捲していた。

このような中で、輸入品を導入したガスタービン発電装置の非常用途における優位性が市場において注目されるようになり、ディーゼル主体であった既成の発電装置メーカーも挙ってガスタービンの導入に積極的になった。この時期、この用途に適した国産ガスタービンは見当たらず、欧米の先進メーカーからの輸入エンジンで対応していたが、市場が拡大するに連れて輸入品の不便さが徐々に目立つようになってきた。

これらの問題点は概ね下記のようなものであった。

- ① コスト：一般に中小型のガスタービンはディーゼルエンジンに比べると製造コストが高い。特に輸入品の場合、これらは通常汎用性の高い仕様となっており非常用としてはオーバースペックであったことからコスト高と成り易かった。
- ② 品揃え：客先の要求仕様は様々で、容量面でも数100kW～数MW級迄の幅広い需要に対応する必要があった。従来のディーゼルエンジンの場合にはこれらに対して各々が豊富に機種を揃えて小まめに対応していたが、特に小型領域で機種が少ない輸入ガスタービンではこのような自由で柔軟な対応が困難であった。
- ③ アフターサービス：自社製品でないことから特にトラブル時の技術的な対応や部品供給に問題が生じ易く、客先との信頼関係に傷が付く事も多くあった。また海外メーカーとのやり取りは国内同志と異なる商習慣や考え方の違いもあって、無用な手間暇がかかる不便さがあった。

5.3 国産化推進の背景

国産化の推進は上記のような輸入エンジンの問題点の解決策として関係各社がそれぞれ独自に発想し、別個に取り組んでいった。ベースとなるのは防災用途に適した中小型ガスタービン開発に必要な自社技術の醸

成／育成であるが、当時は適当なサンプルも少なく系統化立った参考資料も殆どなかった。国産化に取り組んだ関係各社の多くは中小型ガスタービン開発の経験が無かったが、そのような中で夫々が独自に自社開発に取り組み出来上がった製品が市場で活躍できたのは、下記に挙げるような当時の幾つかの特有な事情が後押しした結果と云える。

- ① 開発目標が防災用の発電装置に限定されていた事。
目標が明確で単純化されており、かつ性能／耐久性よりもコスト／機能／信頼性等がより重視される等から幅広い部分で各社が既に保有している技術を有効に活用する事が出来た。特に、多くのディーゼルエンジンメーカーにとって馴染み深い過給機の技術は小型ガスタービンと共通する部分が多く大いに役立った。
- ② 消防法改正を切掛けとする防災市場の活性化
市場に新規参入してきたガスタービンに対する既存メーカーの危機感と大きな拡大が見込まれる新たな需要に対する期待感から、ガスタービンの自社開発に必要な社内資源の投入を積極的に行う環境が整っていた。
- ③ 多種多量の生産量
品揃えが必要な事もあって、事業用等の大型機種に比べると圧倒的に数多い機種／生産量であったから、その分市場から得られる情報量も豊富になり、比較的短期間で経験の蓄積が出来た事も要因の一つと云える。

5.4 自社開発への取り組み方

上記のような事柄は関係各社に共通する部分であるが、各社の自社開発への取り組み方は基本的には夫々の事情によって異なっている。ここではこの時期に国内各所で活発に行われた非常用小型ガスタービン開発に特徴的な具体例の一つとして川崎重工業の場合を採り上げ、その開発手法や設計技術育成の一端を以下に紹介しておく。また併せて、国産に必要な製造技術の当時の状況について概説しておく。

5.4.1 開発手法

先に述べたように川崎重工業では防衛省需要向けのライセンス生産等を通じて1970年頃には航空用ガスタービン製造についてのかかなりな知識／経験を得ていた。更にこれを生かしてガスタービン事業を拡大しようと、航空用ガスタービンの様々な地上用途への転用を試みた（1969～1973年）が、前述のような輸入エ

エンジンの限界から、これを諦めて自社技術による国産化へと方針を転換した（1971 年末）。併しながら、其れまでに社内で培われた技術はライセンス製造に基づく生産／製造技術であって、ジェットエンジン部門に設計／開発経験者は殆ど皆無であった。この為、急きょ社内オートバイ部門からレシプロエンジンの設計／開発技術者 5～6 名が呼び集められ、これらが核となって採用したばかりの新入生を集中的にこれに投入する等の処置によって設計／開発チームの充実を図り国産化への取り組みを開始した（1971 年～）。

ガスタービン開発チームの幹部の多くはオートバイ出身者であったから、開発手法も通常とは異なるオートバイ流のユニークなやり方でスタートした。通常ガスタービンの開発は圧縮機／燃焼器／タービン等の各要素別の開発を重視し、本体開発に先行或いは並行してこれを進めるのが普通のやり方である。これに対して川崎重工業ではこれらの要素開発を省略し、代わりに様々な形状／様式が異なる供試部品をあらかじめ多数準備して頻繁に交換しながら、いきなり本体で試験／確認していくやり方で開発を進めた。この方法はその後品揃えが進み、製品が大型化していくに連れて要素開発重視へと徐々に移行していったが、あくまでも本体での確認試験を中心とする開発手法は現在も其のまま引き継がれている。

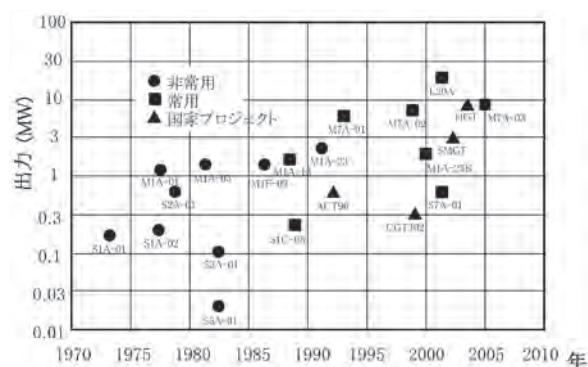
また、本体はもとより減速機／制御装置／各種電装品等の付属品一切についても、原則として出来るだけ自社開発するやり方で取り組んだ。この為、手間暇が掛かり苦労も多かったが、開発目標にピッタリの仕様／性能／コストの製品が得られるメリットと同時に、えてしてブラックボックス部分が多い買物では得られない知識経験が得られた事は大きな成果であったと云える。

300kW 級の KG72 型ガスタービンによる試作研究（1971～1973 年）を経て、製品化された最初のエンジンは 150kW 級の S1A-01 型で、初の本格的な純国産非常用ガスタービン発電装置 PU200 型として、1977 年にその初号機が市場に投入された。以降、このエンジンをベースにほぼ類似の形態をとりながらスケールアップした S2A 型（600kW 級）や M1A 型（1MW 級）等の大型機種を次々と開発し、これらのツインタイプも含めて短期間（1977～1985 年）で一気に 8 機種を揃え、150～2,400kW をカバーする PU シリーズとして非常用発電装置の市場へ順次投入していった（図 5.7 参照）。またこれと並行して移動用の MPU シリーズや防衛省需要等の特殊用途を目指した超小型機種等の新製品開発も積極的に推進し、新たな市場開拓による一層の需要拡大を狙った。

このような初期段階での開発手法は、オートバイや小型エンジン等の量産型製品に対して馴染み易いやり方で、その特徴は概ね下記のようなものであった。

- ① 全てに対して自社開発を優先し、差別化やノウハウ習得に力点を置いた。
- ② スピードを重視して敢えて拙速を厭わず、豊富な品揃えを迅速に行った。
- ③ 試験による確認を最も重要視して、設備及び供試品の充実に力を入れた。

これらの手法はこの時期急速に需要を拡大した国内の中小型非常用ガスタービンに特有なもので、仕様や市場の状況が大きく異なる航空用や事業用等の従来ガスタービンでは殆ど見られないやり方であった。需要が急拡大した成長期を経て市場が徐々に成熟期に移行して新製品が増えていくに連れて、こう云った取り組み姿勢も徐々に変化してきているが、基本的な部分についてはこのような量産型製品の開発手法を確実に引き継いでいく事も中小型ガスタービンの将来にとって重要な事柄であると思われる。



注：最初に開発したS1A型をベースに、ほぼ類似の形態をとりながら、短期間で多種の非常用ガスタービンの開発を行った。1980年代後半からは常用ガスタービンの開発も実施

図 5.7 川崎重工業の中小型ガスタービン開発の経過⁽⁷⁾

5.4.2 設計技術

防災用ガスタービンの自社開発にチャレンジしたダイハツ／新潟原動機／ヤンマー等の各社は元来ガスタービンとは無縁のディーゼルエンジンメーカで、ガスタービンそのものの開発・設計経験は全く無かった。一方、ほぼ同時期に国産化を目指した川崎重工業や神戸製鋼等は海外先進メーカとの技術提携により航空用や小型陸船用ガスタービンのライセンス生産／販売等を通じて、中小型ガスタービンの製造／サービス関連技術は限定的ながら持っていたが、開発／設計経験については同様に殆ど無かった。

この様にガスタービン開発の経験が無い各社が、

ベースとなる“設計技術の醸成／育成”について具体的にどの様に取り組んだのか、他社に先んじていち早く自社開発に着手し市場参入を果たした川崎重工業の場合を例に採り上げて具体的に紹介する。

川崎重工業が小型ガスタービンの自社開発に着手したのは1971年の事で、技術導入等は一切考えず全くの自力による開発を目指していた。開発チームのメンバーはガスタービン設計に関しては未経験者ばかりで、当時唯一の纏まった設計資料であったASME（米国機械学会）のガスタービンハンドブックを頼りに、当時は未だ管理が緩やかでガスタービン関連の新しい情報が比較的容易に入手出来たNACA（現在のNASA）のレポート等を読みながらの設計作業であった。その頃は丁度大型の電子計算機が普及し始めた時期で、入社して間もない新人達が文献片手に自らプログラムを作り、複雑な空力や強度計算を進めていく様子は殆どが勘と経験を頼りに育ってきた旧人達には非常に新鮮で、半信半疑ながら興味深く感じていた。ガスタービン開発に関してはこの様に全員が未経験であり、なかでも空力設計等のガスタービン固有の技術については新旧の区別なく皆がほぼ横並びで、頼る人も少なかった事が若い人たちの実力養成に反って好結果をもたらしたとも云える。

1971年に開発着手してからの最初の2年間は初めて自力で設計開発した出力220kWのKG72型ガスタービンによる試作研究期間で、試作／試験したエンジンをプレジャーボートに搭載して海上走行試験を実施するなど、実用性を含めて小型ガスタービンの実機経験取得に力を入れた。完全に自力によって短期間で試作エンジンを開発して自信をつけた後、1973年4月から本格的な製品開発に着手した。事前の市場調査により、開発目標を非常発電用に絞り、シンプルで頑丈な150kW級のS1A型ガスタービンを開発して1977年に初号機を市場に投入した。

試作エンジンのKG72型を開発した1970年代初めの頃は大型計算機が導入され始めた時期で、適当な設計ソフトは中々見当たらず、必要なものは自分達で作成していた。その後数年を経て量産型のS1A型エンジンを開発した1970年代半ば以降になると、欧米のソフト開発会社が圧縮機やタービン等のガスタービン要素を対象にした空力設計プログラムを開発して販売するようになり、質の良い設計ソフトを比較的容易に手に入れる事が出来るようになった。川崎重工業でも量産型のS1A型ガスタービンを開発する際に従来の設計法で試作した圧縮機では中々性能が上がらず対応に苦慮していたが、急遽米国のソフト開発会社から購

入した設計ソフトを使用して圧縮機を作り直すと、其れまでの苦労が嘘のように性能が改善されて、関係者一同大いに安堵すると同時に改めてその威力に驚いた経験がある。これらの設計ソフトはまた、加工用のNCテープ作成用としても使用出来た為、関連作業の大幅な生産性向上にも寄与した。

開発当初は大型計算機の導入が漸く始まったばかりで、適切な設計ソフトも少なく研究開発作業はどちらかと云えば実験偏重で進めていた。併し乍ら、その後量産段階に入って大型計算機が急速に発達し、これに呼応して空力や強度の設計ソフトが充実してくると、開発作業の内容も徐々に計算機内でのシミュレーションに重点が移っていった。その結果、試験内容の整理選択も進み開発期間の短縮と同時にコストの低減ができるなど開発作業の生産性が向上して、短期間での機種揃え等に大いに貢献した。

5.4.3 製造技術

この時期、各社が競って自社開発を目指した非常用ガスタービンは一般に「軽構造型」と呼ばれる形式で航空用の小型ガスタービンに類似した構造を採用している。これは非常用途の使用条件が航空用途の場合と同様に急速起動／急負荷投入／急負荷遮断等の熱サイクル変動が激しく起動停止回数が多い事から、これに対応できるように必然的に薄肉で熱容量の小さい構造となる事に由来している。

また、ディーゼルエンジンに多用されている過給機のロータ（回転体）はこの非常用小型ガスタービンのロータ部分と共通点も多く、その構造形式は相互によく類似している。これらの事から、部品の加工／製造については自社開発を目指した各社が以前から保有して馴染み深い加工機械／生産技術で対応可能な部分が多くあった。更に1960年代半ば頃から防衛庁（現防衛省）向けの航空用ガスタービンの国産化が活発化して、関連する各メーカーのガスタービン部品製造設備が急速に整備されるようになり、この結果材質や形状面から加工が中々難しいガスタービン部材の加工技術の向上／普及に大きく貢献した（図5.8参照）。

また、これらはガスタービン部品製造に不可欠なNi／Co等の超合金耐熱材やAl／Ti等の高比強度材を素材とした精密鑄造／鍛造／薄板材等の特殊金属材料メーカー、及び高温／高周速等の過酷な運転条件下で高い信頼性が求められる精密軸受メーカー等の部品関連企業の技術力／製造能力アップにも大きく寄与した。これは当時、主に航空機の機体やエンジン関連の特殊な分野で高度な部品製造の技術を確立した素材／

部品関連メーカーが、更なる需要拡大を狙って地上用の一般機械製品への応用を模索していた時期で、このような時代背景もあってこれらの航空用から陸船用への技術移転も比較的スムーズに行われた。



5軸マシニングセンターで加工中の1段インペラ



M1A-13 1段インペラ
材質:チタン合金
直径:430mm
翼枚数:20枚

注：小型ガスタービンの圧縮機用インペラの、加工中と完成品の写真

図 5.8 加工中及び完成品の鍛造インペラの例 [写真提供：川崎重工業]

5.5 新たな用途の開拓

国内では消防法の改正を契機に 1977 年頃から中小型ガスタービンの需要が急速に拡大し、国産化の動きも加速していったが、この中心は防災用の定置式発電装置であった。一方、この動きは移動用／船用／ポンプ駆動用／コージェネレーション用等の様々な方面にも波及して、次々と中小型汎用ガスタービンの新しい用途が開拓されて陸船用として広く普及していった。本章ではこれらの新しい用途について、主に国産の中小型汎用ガスタービンの状況を中心にその概要を紹介する。

5.5.1 移動用電源

軽量小型で大出力が得られるガスタービンを駆動源とする移動用電源車の歴史は比較的長く、1970 年代に入ると航空用ガスタービンメーカーの IHI 等が、輸入した航転型ガスタービンを駆動源として 1 ～ 10MW 級の移動電源車を製造し、当時の電電公社や各地の電力会社に納入すると同時に中南米や中近東等方面にも数多く輸出しながら、工事用や非常用の電源として各方面で活躍していた。

国産ガスタービンベースの移動電源車の本格的な生産は、小型非常用ガスタービンの国産化で先行していた川崎重工業が 1979 年に 200kW 級電源車を北海道電力に納入した事に始まる。この電源車は主として工事停電時の電源として使用され、街中でも運転可能な静粛性やガスタービン特有の低温起動性に優れた点が高く評価されて、以後引き続き 20 台以上が納入され

て道内の各地で活躍した。これらの反応を受けて、その後順次開発された新しい国産ガスタービンに対応してラインアップ化が進められ、定置式に倣って 160 ～ 1,600kW 間をきめ細かく機種揃えされている。これらは「カワサキ MPU シリーズ」として国内各地の電力会社や通信会社等を主な顧客としながら新たな需要を開拓していった。これらの移動電源車は輸出でも活躍して 1982 年には中近東向けに 10 台の 160kW 級移動電源車を納入し、更に同じく 1982 年にエンジンだけの供給であったが、独 KHD の大型トレーラ式移動電源車向けに 32 台の 2,650kW 級ガスタービンを納入している。

現在、国産ガスタービンを搭載した移動電源車（図 5.9 を参照）はこの他トヨタタービンアンドシステムの 300kW 級 TPM375 型（50 / 60Hz 切替え方式他）が市販されている。



注：トラックの荷台にガスタービン、発電機、制御盤及び燃料小出槽を搭載し、移動可能な電源車の例。工事用や非常用の電源として利用される。

図 5.9 移動電源車の例 [資料提供：トヨタタービンアンドシステム]

これらのガスタービン電源車は主として各地の電力会社や通信関連会社に納入され、多くは工事停電時の電源として使用されていた。これらの要求品質基準の厳しい顧客の下で、複雑な電力システムにスムーズな連系が出来るガスタービン発電装置の良質な電気特性とその制御技術は高く評価されたが、この技術は後にコージェネレーション等の常用発電設備で必須となった電力網との系統連系技術に繋がっていく事になり、その後の技術向上に大きく貢献した。

また移動用の分野ではこの他、防衛省需要で使用される例が多い携帯用の超小型ガスタービン発電機（IHI エアロスペース製ダイナジェット 2.6：2kW 級、図 4.9

及び表 4.9 を参照) や各地の山上に点在する無人の無線中継基地において遠隔操作で運用されている可搬式小型発電装置など、ガスタービンの軽量コンパクト性を生かした機動性ある電力支援システムの供給に広範囲で活躍している。

5.5.2 船用

ガスタービンの陸船用途の中で船用は発電用に次いで需要の多い分野であるが、推進用もしくは発電用の何れの場合においても航転型などの輸入ガスタービンを使用する例が多く、本文の主題とする国産の汎用中小型ガスタービンの使用例は少なく限定的である。

その中で 1979 年には防衛省の護衛艦搭載の主発電装置として川崎重工業製の「GP1250 型」(1,000kW 級)ガスタービン発電装置が初めて採用され、以後搭載される電子機器の増加に併せて徐々に大容量化する等の動きを交えながら、護衛艦の建造に合わせてほぼ毎年コンスタントな台数が出荷されていた。

護衛艦の主発電機に要求される仕様はこれまで扱ってきた非常用発電装置とは比較にならない厳しさで、多量の塩分を含む吸気条件や艦艇特有の耐衝撃性等について、過酷な試験／体験を重ねるうちに次々と不適格な部分が明らかになり、エンジン本体には数度にわたり大改造が加えられた。これらの改良結果は艦艇用のみならず常用等の一般用途に対しても有用で、その後用途が多様化していく中で極めて信頼性の高いエンジンに成長していく大きな要因の一つとなった。

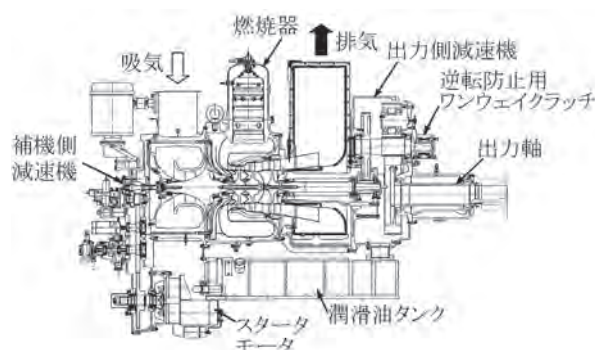
5.5.3 ポンプ駆動用（機械駆動用）

天然ガスや石油のパイプラインで多用されている圧送用圧縮機／ポンプ等はその駆動源としてガスタービンが使用される例が多い。国内においてもこの種の圧縮機／ポンプ関連の装置が毎年数基製造され、中近東始め世界各地に輸出されているが、ここで駆動源として採用されるガスタービンは何よりも先ず実績が優先されて、注文主より使い慣れた海外の機種を指名されることが多く、現時点では国産ガスタービンが割り込む余地は未だ少ない。

一方、国内においては 1980 年代の終わり頃から大型河川周辺の排水機場においてポンプ駆動用として国産のガスタービンを使用する例が増えてきた。従来これらのポンプ場においては主としてディーゼル機関が多く使用されてきたが、場内の各装置について長期放置による不具合が発生しやすい冷却水系の簡素化或いは無水化が進められて、その一環としてガスタービンが注目されて採用される機会が増えた。

ここで使用されるガスタービンは従来の発電機駆動用と同じ軸式を流体継ぎ手等を使って使用する事もあったが、建設コストの削減要求から排水機場のコンパクト化／省スペース化が更に進められて、これに呼応する形でポンプ駆動を主目的とする二軸式のガスタービンが開発された。ここではそれらのガスタービンの内、代表的な二機種を紹介しておく。

(1) ヤンマー製 AT9T 型二軸ガスタービン⁽⁸⁾



注：非常用発電装置用 AT 型ガスタービンをそのままガス発生機として使用し、出力タービンを排気出口横側に追加設置した二軸ガスタービン。排水ポンプ場の機械駆動用として活躍した。

図 5.10 AT9T 型二軸ガスタービンの断面図⁽⁸⁾

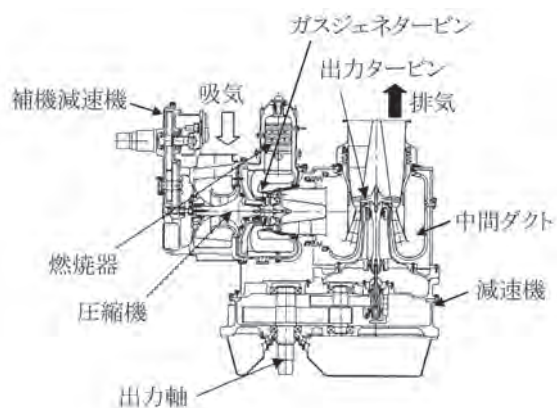
表 5.7 AT9T 型二軸ガスタービンの主要仕様⁽⁸⁾

形 式	二軸式
出 力 (kW)	603
熱 効 率 (%)	18.4
主 軸 回 転 数 (rpm)	31,200
圧 縮 機	遠心 1 段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	軸流 (ガスジェネ: 2 + 出力: 1) 段

排水ポンプ場向けとしてヤンマーが開発した出力 600kW 級の二軸式ガスタービンで 1993 年に初号機が市場に投入されている。断面構造を図 5.10 に、主要仕様を表 5.7 に示すが、簡潔な構造で、非常用発電装置用の AT シリーズガスタービンのパワーモジュール部分をガス発生部分としてそのまま使用し、出力発生部に単段の軸流タービンを設けて従来のディーゼル並みの価格を実現している。

(2) ダイハツディーゼル製 DFL-4 型立軸 L 型ガスタービン⁽⁹⁾

ダイハツディーゼルでは以前より非常発電用の一軸式ガスタービン (DT シリーズ) や機械駆動用として開発した二軸式ガスタービン (DF シリーズ) を使用しながらポンプ市場で活動していたが、これらの横軸



注：非常用発電装置用DT型ガスタービンをそのままガス発生機として使用し、出力タービンを縦軸に追加配置した二軸ガスタービン。ポンプ出力軸の直ぐ上にガスタービンを設置でき、設置スペースの削減が可能

図 5.11 DFL－4 型立軸 L 型二軸ガスタービンの断面図⁽⁹⁾

表 5.8 DFL－4 型立軸 L 型二軸ガスタービンの主要仕様⁽⁹⁾

形 式	二軸式
出 力 (kW)	367
熱 効 率 (%)	16.6
主 軸 回 転 数 (rpm)	41,000
圧 縮 機	遠心 1 段
燃 焼 器	単筒缶形
タ ー ビ ン	軸流 (ガスジェネ：2 + 出力：1) 段

式ガスタービンに比べて更に排水機場の建設コスト削減に有効な立軸式ガスタービンを開発すべく本機を開発した。

このユニークな構造の DFL－4 型立軸 L 型ガスタービンは出力 370kW 級で、既存の二軸式ガスタービンをベースに開発された。本機はこのクラスの排水機場で多く採用されている縦型ポンプに対応して出力軸を

縦型に配置したガスタービンで、図 5.11 に示すような L 型の構造をしており、主要仕様を表 5.8 に示す。

図のようにガスタービン本体の吸排気装置は上方に位置する事に成り、更にポンプ部は出力軸の延長に其の真直ぐ下方に配置する事から、必要な機場のスペースが少なくて目標とする建設コスト削減に有効な構造であった。本ガスタービンは 1998 年に開発完了し、同年に先端建設技術センターにおいて実機実証試験を終了した後市場に投入されている。

参考文献

- (1) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 44-45, P. 133 (2002)
- (2) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 50-51, P. 135 (2002)
- (3) 永田他：「発電用ガスタービン GT1 の開発」, 神戸製鋼技報, Vol. 34, No.1, PP. 43-47 (1984)
- (4) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 72-73, P. 137 (2002)
- (5) 「産業技術歴史継承調査 我が国のガスタービン技術の独創性と創造性に関する調査編」, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, PP. 48-49 (2003)
- (6) 大橋：「三菱 ガスタービン MGUN500 形非常用発電装置」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 23, No. 89, PP. 111-112 (1995)
- (7) 星野：「“内燃機関の技術変遷と将来展望” 汎用中小型ガスタービン」, 第一回日内連主催講演会資料, P. 10 (2009)
- (8) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 110-111, P. 143 (2002)
- (9) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 108-109, P. 135 (2002)

6 | 成熟期 (1990 年～現在)：高性能化への取り組み

国内における汎用中小型ガスタービンの需要は 1970 年代の後半以降急激な伸びを見せて、陸船用ガスタービン市場拡大の大きな要因となった。これは国内特有の事情もあって、防災用発電市場においてガスタービンの評価が急速に高まり、国産化の動きが活発化してコストダウンや機種揃えが促進され、非常用ガスタービン発電装置の需要が急速に増大した事が大きな要因である。

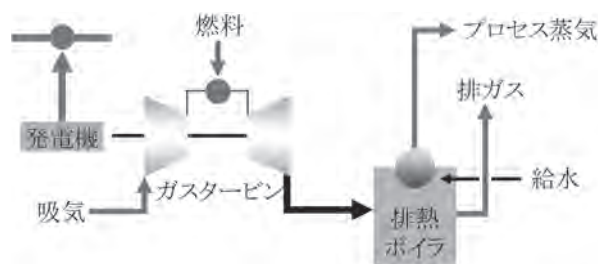
前章ではこの間の 10 数年間を急成長期として位置付け、主として国産の汎用中小型ガスタービンを中心にその誕生／発達過程等について紹介してきた。この中でも述べたとおり、成長期の 10 数年間は国産の汎用中小型ガスタービンが定置式の防災用発電装置を中心に移動電源車やポンプ駆動等のさまざまな用途で経験を積み重ねて、ディーゼル等の既成エンジンに対して十分対抗できる実力を養成した期間であった。

1990 年代に入ると成長期に示した伸びはやや鈍化して横ばい状況になってくるが、この時期以降から現在までの間を成熟期として引き続き国産ガスタービンを中心に汎用中小型ガスタービン関連技術の動向について紹介する。

6.1 小型コージェネレーションシステムの誕生

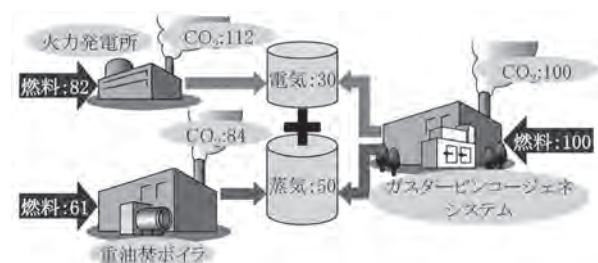
1979 年に第二次石油ショックが発生し、これを一つの契機として世の中に省エネルギー志向が広まっていった。国内では大型の事務所ビルや病院等の冷暖房設備用及び各種工場内のプロセス蒸気用の熱源としてボイラが多く使用されているが、これらの熱の需要が多い用途に対してガスタービンを駆動源とするコージェネレーションシステムを検討する動きが 1980 年代後半になると活発化してきた。

ガスタービンは元来、従来のディーゼル機関等に比べると排気ガスの量が格段に多く、且つ排気中の NOx も少なくても非常に清浄な事から、其のまま冷暖房設備やプロセス蒸気生成用の熱源として十分使用できる利点がある。この為、ガスタービンの軸力で発電し、その残りの排気を持っている熱量を上記のような方法で有効活用すればトータルの熱効率は 80% 以上となり、大幅な省エネルギー効果が期待できる事になる。図 6.1 にガスタービンコージェネレーションシステムの基本システムフロー図を、図 6.2 には同システムと既存システムとの省エネルギー性能／環境負荷の比較例を示す。



注：ガスタービンの軸力で発電し、排気の有する熱量を排熱ボイラで回収し、電気と熱（蒸気）を同時に発生するシステム

図 6.1 ガスタービンコージェネレーションシステムのシステムフロー例 [原図：川崎重工業カタログ]



注：コージェネレーションシステムと従来システム（電気は商用電源で、熱（蒸気）は重油焚きボイラで供給）との、燃料消費量と CO₂ 排出量の比較例。この例では、コージェネレーションシステムの従来システムに対する燃料消費量削減率は約 30%、CO₂ 排出量削減率は約 49%

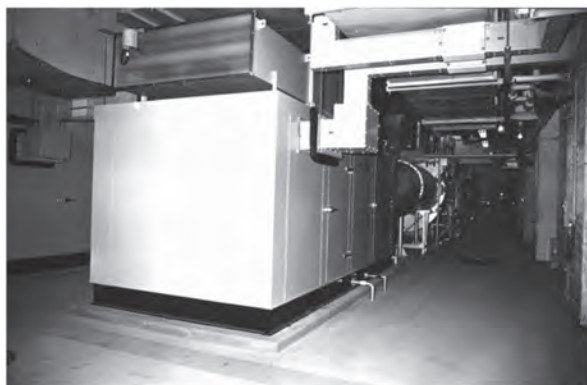
図 6.2 ガスタービンコージェネレーションシステムと既存システムの省エネルギー性能／環境負荷比較例 [原図：川崎重工業カタログ]

これらのガスタービンを駆動源とするコージェネレーションシステムの考え方は従来からあったが、需要側の熱量の規模から云えば数 MW ～数十 MW 程度 of ガスタービンとしては中型以下の比較的小規模なサイトが多く、適切なガスタービンが国内では見当たらなかった事から中々普及しなかった。併しながら、1970 年代後半より非常用発電市場で急速に力をつけた中小型ガスタービンが容量的にはこれらの用途に適したサイズが多く、且つ機種も豊富な事から 1980 年代後半頃になるとこれらを利用して国内各所で実験的な取り組みが始まり、1990 年代に入ると様々な用途で徐々に本格的な普及が進んでいった。

この頃のガスタービンを駆動源とする小規模コージェネレーションシステムは燃料供給の関係から東京ガス／大阪ガス／東邦ガス等の大手ガス会社が積極的に推進した。従来の都市ガスから天然ガスへの切り替えも進んで電力供給にも積極的に関わり始めていたガ

ス会社にとって、環境にやさしく省エネルギー効果も期待できるガスタービンコージェネレーションシステムは自社ガスの拡販に格好の商品であったことから、システムの製造メーカーとタッグを組む形で新規需要の開拓に取り組んだ。

客先は大都市内の地域冷暖房供給設備／大規模ショッピングセンタ／大学病院等の大型集客設備や化学／薬品／食品／ゴム等の各種工場で、コージェネレーションシステムはこれらの設備運用に必要な電気及び蒸気等の熱の供給に活用された。図 6.3 には 1984 年に東京ガス浜松町ビル殿に納めた 1,000kW × 2 基のガスタービンコージェネレーションの事例を、図 6.4 には 1989 年に納入した某ゴム工場納めの 1,500kW 級コージェネレーションシステムの事例を示す。



注：手前がガスタービン発電装置、奥側が煙管式排熱ボイラ

図 6.3 東京ガス浜松町ビル殿納め 1,000kW × 2 基屋内ガスタービンコージェネレーションシステム⁽¹⁾



注：右側がガスタービン発電装置、ダンパを挟んで左側が水管式排熱ボイラ

図 6.4 某ゴム工場納め 1,500kW 級屋外ガスタービンコージェネレーションシステム [写真提供：川崎重工業]

この様に中小型ガスタービンを駆動源とする比較的小規模なコージェネレーションシステムが急速に脚光を浴びるようになるに従って、市場からはガスタービンに対して更に高効率／低公害／高信頼性を求める声が高まり、国内の関連する各メーカーは各々がそれ迄に蓄積した新技術を積極的に取り入れた新鋭機の開発に

取り組み、非常用に次ぐ新たな用途として登場したコージェネレーションシステム市場での中小型国産ガスタービンの販売拡大を目指した。

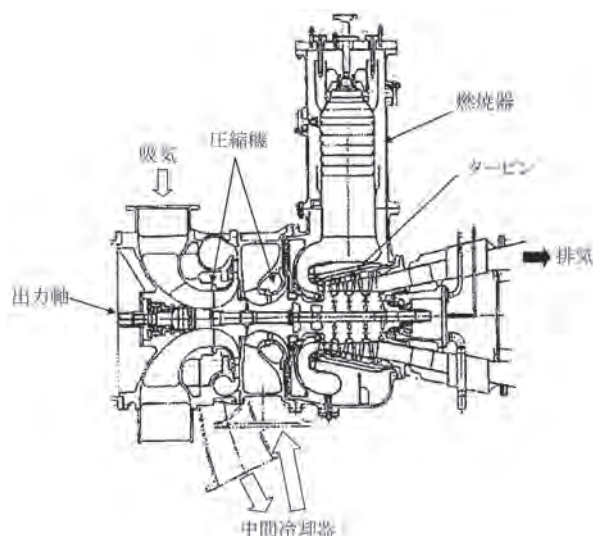
また、これらのコージェネレーションシステムの採否決定は殆どが経済性で決定されており、地域や使用条件によって複雑に変わる電力や燃料等の料金体系を考慮しながら、客先に最適なシステムを提案する作業はかなり高度な作業を要した為、多くの場合は従来からの営業部門に加えて専門的な推進チームを設けて拡販に当たった。この他、コージェネレーションの普及はアフターサービス部門の強化の他、エンジンのオーバーホールや補用品の供給等の分野で従来に増して累積的に事業が拡大していく大きな要因となった。

中小型ガスタービンコージェネレーションシステムの需要は国内同様、オイルショックを一つの契機にして海外においても活発化していた。非常用ガスタービンの国産化で他社に先行していた川崎重工業では、比較的早くから自社製ガスタービンの輸出にも積極的に取り組み、1980 年代半ば頃迄には世界の主要な各地に販売代理店を設けてガスタービン単体（エンジン OEM）やガスタービン発電装置の販売促進を図っていた。当初は国内同様、非常用／ピークカット用／移動用等のやや特殊な用途が中心で、海外の中小型自家発電装置の市場全般で言えばディーゼルエンジンが圧倒的に強く、国内と環境がよく似た韓国や香港等の一部を除いては、ニッチな需要に留まっていた。しかしながら、前述の通り 1980 年代後半になって小型コージェネレーションシステム市場が活性化してコージェネレーションシステムに適した新鋭機が次々と登場してくると海外ユーザからも注目されるようになり、1990 年代に入ると海外の各地から活発に引き合いが来るようになった。

6.2 高性能機開発の動き

1980 年代半ば頃より省エネルギー／環境問題等への対応から、小規模なガスタービンコージェネレーションシステムが注目を浴びるようになってきた。これに伴い市場からガスタービンエンジンの更なる高効率化／低公害化／信頼性向上等が求められるようになり、関係する各社が競って高性能機の開発に取り組んだ。本章ではこれらの動きの代表例について各社別に以下に紹介するものとする。

(1) 三井造船製 SB5 型ガスタービン (1MW 級、図 6.5 及び表 6.1 参照)⁽²⁾



注：三井造船が都市ガス 3 社と共同開発した高効率ガスタービン。この後、低 NOx 燃焼器の開発や蒸気注入仕様機の開発が行われた。

図 6.5 SB-5 型ガスタービンの断面図⁽²⁾

表 6.1 SB-5 型ガスタービンの主要仕様⁽²⁾

型 式	SB5
圧 縮 機	遠心型 2 段
タ ー ビ ン	軸流 4 段
燃 焼 器	単缶式
減 速 機	遊星 2 段式
定 格 出 力	1,184kW (1,610PS)
回 転 数	26,600rpm
燃 料	13A/LPG/ 灯油 /A 重油

第二次石油ショックを経て省エネルギーへの取り組みが活発化し、小型の都市型コージェネレーションの導入機運が高まった。併し乍ら、1980 年代半ば頃の当時は 2MW 位以下の小容量ガスタービンの軸端熱効率は 23% 以下程度であり、また総合熱効率の面からも排気ガス温度が低く満足のいく状況には無かった。この為、三井造船と都市ガス 3 社（東京ガス、大阪ガス、東邦ガス）は 1MW 級のガスタービンにおいて発電端熱効率 25%（軸端熱効率 27% 以上）、総合熱効率 75% を目標にして常用連続使用の小型ガスタービンの開発を行った。

1986 年に開発に着手し、1987 年に 1 号ガスタービンを完成させて工場試験で詳細なデータ収集を行い、1988 年に東京ガスの豊洲工場において廃熱ボイラ及びガス圧縮機と組み合わせたコージェネレーションシステムのフィールドテストを実施して、性能の確認及び実証試験を行った。また、同年半ばには商用 1 号機

の運転が開始され、その後各方面においてコージェネレーションシステム用のガスタービンとして採用されて数多くの運用実績を重ねている。なお、本ガスタービンはその優秀な性能が認められて 1990 年には日本ガスタービン学会賞を受賞した。

SB5 型ガスタービンはコージェネレーションシステム用として開発されたが、その特徴は概ね下記の通りである。

- ① 常用仕様において、1MW 機としては初めて発電端効率 25% を達成。
- ② この種の小型ガスタービンとしては初めて 1, 2 段タービン動静翼に空冷翼を採用。
- ③ 中間冷却器の採用により、圧縮機の性能向上、比出力の増加、ボイラ給水予熱によるボイラの小型化等に効果があった。
- ④ 鈹物油仕様のティルティングパッド軸受を採用して常用に対応した軸受の長寿命化を図った。
- ⑤ ロータとケーシングとの間隙管理にアブレダブルシールを採用して性能向上に役立てた。

このガスタービンを組み込んで初の都市ガス焚きコージェネレーションパッケージとして纏められたのが SB5 型ガスタービンコージェネレーションシステムパッケージであるが、燃料ガス圧縮機を発電機軸直結で駆動する方式を採用する等、大幅な省スペース化も図られた。

その後さらに以下の改良が施された。

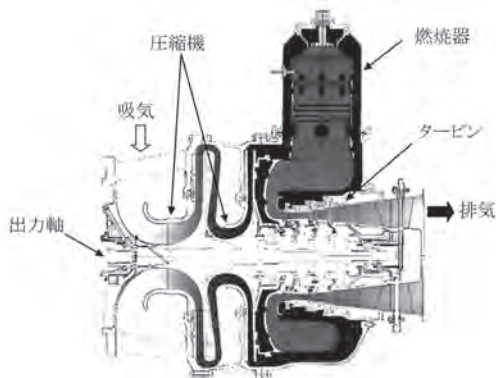
1) 低 NOx 燃焼器の開発

当初、燃焼器は拡散型燃焼方式で蒸気噴射／水噴射にて低 NOx 化を図っていたが、環境対応性の改善が求められる中で、より低 NOx で且つドライ方式による技術開発が実施された。その結果、1993 年に三井スーパープレミックス燃焼システムの開発が完了し、150ppm ($O_2 = 0\%$) 仕様のドライ低 NOx 燃焼器が完成し、その後のガス焚き機の標準仕様となった。この低 NOx 燃焼器をベースに、更にアドバンスド型燃焼器の開発が行われ、1997 年に 84ppm ($O_2 = 0\%$) 仕様機が完成した。

2) 蒸気注入仕様機開発

1999 年に SB5 エンジンの低圧段圧縮機ディフューザの改良を行うことにより、圧縮機出口に蒸気を噴射して熱電可変の出来る仕様 (SB5-COPRA) を追加した。この結果、夏季などに送気蒸気量を 2/3 にし、発電出力を春秋と同一出力が得られるように運用する事が可能となった。

(2) 川崎重工業製M1A-13型ガスタービン(1.5MW級、
図 6.6 及び表 6.2 参照)⁽³⁾



注：川崎重工業が 1,000kW 級非常用ガスタービンをベースに開発した高効率ガスタービン。この後、低 NOx 燃焼器の開発や蒸気注入仕様機の開発が行われた。

図 6.6 M1A-13 型ガスタービンの断面図⁽³⁾

表 6.2 M1A-13 型ガスタービンの主要仕様⁽³⁾

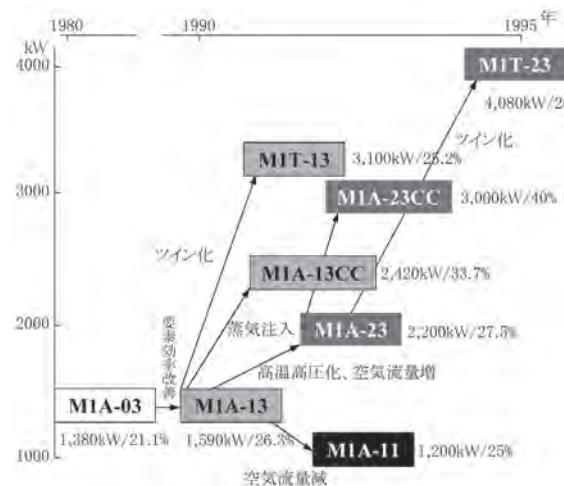
形 式	開放単純サイクル 1 軸式
圧 縮 機	2 段遠心式
タ ー ビ ン	3 段軸流式
燃 焼 器	単筒缶形
減 速 機	2 段遊星歯車式
燃 料	ガス、液体 多種対応可
減 速 機 端 出 力 kW	1,570
減 速 機 端 熱 効 率 %	26
空 気 流 量 kg / s	8
排 気 ガ ス 温 度 °C	520
圧 力 比	9
主 軸 回 転 数 rpm	22,000

M1A-13 型ガスタービンはコージェネレーションシステム市場の本格的な開拓を目指す為に、在来機である M1A-03 型をベースにして圧縮機／タービン等の主要要素に大幅な改良を加え、此れまでに比べて熱効率を 25%以上改善したエンジンである。

開発リスクを抑えるために圧力比やタービン入口温度は従来の延長程度の小幅な変更にとり、主として各部の要素効率改善によって熱効率の向上を図った。圧縮機インペラは従来のステンレス系に換えてチタン材を使用して周速を上げる事により高効率を達成した。タービンについては翼形状の改善の他、翼先端や翼間のシール機能を強化する事及び新しい冷却技術による空冷翼の冷却効率向上に注力した。この他、燃焼器については先端的な積層板構造や高級材料を積極的に採用して、低 NOx 達成に必要な燃焼温度の低減を実現した。

このエンジンは 1987 年から開発に着手し、1989 年に「PUC15 型」コージェネレーションシステムに組

み込み市場に投入した。更にこれに引き続き 1991 年にはこのエンジンのチェンサイクルバージョンである M1A-13CC 型（熱電可変型：1.5 ～ 2.4MW 級）を駆動源とする「PUC15CC 型」を初納入した。このシステムは客先の負荷変動に応じて熱電比を自由に変えられる特長を持っており、時間帯に応じて電気や熱の需要が大きく変動する用途に対して最適なシステムであった。また、同年にはこのエンジンをベースに出力向上を図った M1A-23 型（2MW 級）ガスタービンを開発し、これを組込んだ「PUC20 型」コージェネレーションシステムを市場へ送り出しており、更には 1993 年に M1A-23 型をツイン化した MIT-23 型（4,000kW 級）を使った「PUC40 型」の初号機を出荷する等、M1A-13 型ガスタービンを起源とするコージェネレーションシステム用高性能機の機種揃えが急ピッチで進んだ（図 6.7 参照）。



注：ベースエンジンの改良やツイン化（二機一軸化）により急ピッチで機種揃えを図った例。各機種に出力 / 熱効率を参考記載

図 6.7 高性能コージェネレーションシステム用ガスタービンの機種揃えの例⁽⁴⁾

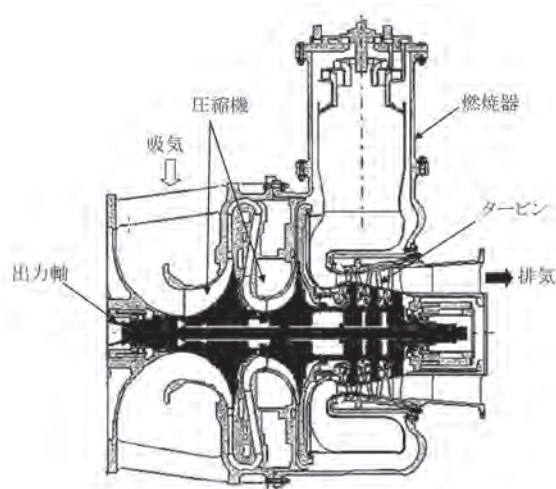
また、これら 1990 年代のコージェネレーションシステムに関連して従来の水や蒸気を使った「Wet 方式」に代わって希薄燃焼による「ドライ低エミッション（DLE）燃焼器」の開発が着々と進み、1995 年にはこれを組込んだ「GP1500D」型コージェネレーションシステムの初号機が納入された。その後、この方式は他機種にも次々と応用され従来方式（Wet 方式）の複雑な構造／制御システムが排除されて、コージェネレーションシステムの信頼性向上とコストダウンに著しく貢献した。

更に 1993 年には米国の某ベンチャー企業より移動式コージェネレーションシステム用として 1.5MW 級

のガスタービンを112台一括受注する等の大型商談もあった。この商談には引き続き当該ガスタービンの製造技術供与契約も結ばれて、ガスタービン先進国である米国企業に国産ガスタービンの製造ライセンスを供与したという画期的な意味合いから注目された。

この他、川崎重工業では米国 CESI (Catalytica Energy Systems Inc.) と共同で同社の触媒燃焼システム「Xonon」を組み込んだ「M1A-13X」型を世界に先駆けて商品化した。触媒燃焼は混合気中の燃料と酸素が触媒表面に吸着されて化学結合が分断され原子に分解される為、低い活性化エネルギー（低温）下での化学反応（燃焼）が可能になる。これによって、低濃度の混合気でも低温で完全燃焼する事が出来るようになり、高温燃焼で生成するサーマル NOx がほとんど発生しない利点がある。この触媒燃焼ガスタービンを組み込んだコージェネレーションシステムの初号機は2002年に米国カリフォルニアの病院に納入されている。

(3) IHI 製 IM270 型ガスタービン（2MW 級、図 6.8 及び表 6.3 を参照）⁽⁵⁾



注：IHI が自社の航空用ガスタービン技術を適用して開発した 2,000kW 級高効率ガスタービン。ガス焼き DLE 燃焼器はガス会社との共同開発。この後、液体燃料システムや、熱電可変型の開発が行われた。

図 6.8 IM270 型ガスタービンの断面図⁽⁵⁾

表 6.3 IM270 型ガスタービンの主要仕様⁽⁵⁾

型 式	単純一軸開放サイクル
圧 縮 機	遠心 2 段
タ ー ビ ン	軸流 3 段
燃 焼 器	単缶 DLE 燃焼器
減 速 機	2 段並行歯車
主 軸 回 転 数	20,300/20,295rpm
出 力 軸 回 転 数	1,800/1,500rpm
燃 料	都市ガス / 灯油 / LPG
NOx (O ₂ = 16%)	20ppm (都市ガス焼き)
ガスタービン寸法	全長 1.3 m × 全幅 1.0 m × 全高 1.5 m

IM270 型ガスタービンはガスタービンコージェネレーションシステムの普及拡大に対応する目的で、IHI が自社の航空用ガスタービン技術を適用して開発した中小型分散発電向けの低公害／高効率なガスタービンである。このエンジン及びこれを組込んだコージェネレーションシステムは東京ガスとの共同開発により、同社の有する都市ガス焼き燃焼技術や都市ガス利用機器のノウハウが適用されている。

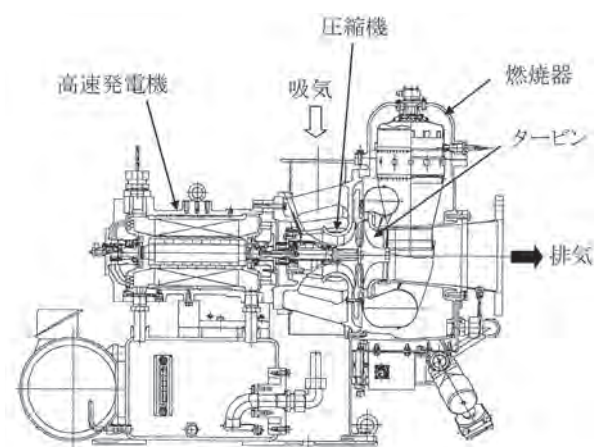
IM270 エンジンの設計点はエンジン単体の高性能化だけではなく、排熱ボイラの作動温度、エンジンコストに影響の大きいタービン段数及び冷却タービンの段数、さらには燃料の供給圧力等を考慮して決定されて、このクラスでは最高レベルの発電端効率 25.5%、コージェネレーションシステム総合効率 80%を両立させた。

このエンジンは発電機駆動に適した一軸式の単純開放サイクルガスタービンで、二段遠心圧縮機及び三段軸流タービンで構成されており、部品点数を削減して低コスト／高信頼性の実現に注力した。また、タービンは第一段の動静翼のみ空冷翼としている。軸系は圧縮機及びタービンの各ロータをカーブクップリングで結合し、軸芯を通るタイボルトで締め上げた。このロータ全体は前側のボールベアリングと後側のローラベアリングによりソフトマウント支持されて、構造の単純化／部品点数削減と熱膨張による偏芯／振動の防止等を両立させて信頼性の確保に努めた。

また、燃焼器は低公害化に対応する為に単缶式の DLE 燃焼器を開発した。IHI が開発した灯油／LPG 焼き用のマルチプル型と東京ガスと共同開発したダブルスワール型の二種類を開発した。都市ガス焼きダブルスワール燃焼器は超希薄予混合燃焼と冷却空気が不要な伝熱促進冷却ライナ、ステーキング燃焼制御等の組合せによりドライで 50%以上の広い作動範囲で国内の最も厳しい NOx 規制値をクリアする事が出来た。

IM270 コージェネレーションシステムの開発は 1994 年に先ず IHI 社内でエンジンの開発に着手し、灯油焼きシステムが 1996 年より IHI 呉第 2 工場において、都市ガスシステムが 1997 年より東京ガス根岸工場において各々実証テストを開始した。これらの実証試験を経て、1998 年より灯油／都市ガス焼きコージェネレーションシステムの販売を開始し、1999 年からは LPG 焼きも加えて市場で活躍中である。更に蒸気注入による熱電可変型も 2002 年より発売しており、低カロリーガス焼きなども交えて商品ライアップの強化にも注力している。

- (4) トヨタタービンアンドシステム製TG051型(50kW級, 図 6.9 及び表 6.4 を参照) 及びTG312型(300kW級, 図 6.10 及び表 6.5 を参照) ガスタービン⁽⁶⁾

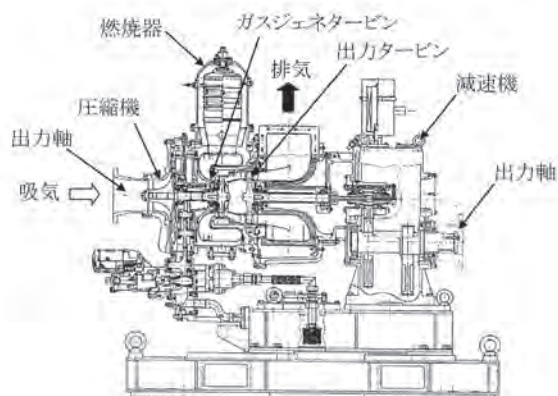


注：トヨタ自動車が高ブリッド自動車用に開発した一軸式の超小型ガスタービンをベースに、トヨタタービンアンドシステムがコージェネレーション用に開発した唯一の国産マイクロガスタービン。高速発電機直結の50kW級。

図 6.9 TG051 型ガスタービンの断面図⁽⁶⁾

表 6.4 TG051 型ガスタービンの主要仕様⁽⁶⁾

形	式	単純開放サイクル1軸式
構 造	圧 縮 機	遠心式1段
	燃 焼 器	単筒缶式
	タービン	ラジアル式1段
	起 動 方 式	電気式
	潤 滑 油	合成油
回 転 数	出 力 軸	80,000rpm
	減 速 機 端	無し（発電機）3,040rpm（冷凍機）
軸 出 力		58kW
圧 力 比		4.6
空 気 流 量		0.45kg/sec
燃 料 種 別		灯油／都市ガス／LPG



注：トヨタ自動車が大形バス用に開発した2軸式ガスタービンをベースにトヨタタービンアンドシステムがコージェネレーション用に開発した軽量コンパクトな300kW級ガスタービン

図 6.10 TG312 型ガスタービンの断面図⁽⁶⁾

表 6.5 TG312 型ガスタービンの主要仕様⁽⁶⁾

形	式	単純開放サイクル2軸式
構 造	圧 縮 機	遠心式1段
	燃 焼 器	単筒缶式
	タービン	軸流式1段／軸流式1段
	起 動 方 式	電気式
	潤 滑 油	合成油
回 転 数	出 力 軸	49,000rpm/35,000rpm
	減 速 機 端	1,500/1,800/3,600rpm
軸 出 力		315kW
圧 力 比		6.0
空 気 流 量		1.98kg/sec
燃 料 種 別		灯油／都市ガス／LSA／LPG

TG051 型及び TG312 型ガスタービンは何れもトヨタ自動車が1960年代半ば頃から試作研究を進めてきた自動車用ガスタービンをベースにして、コージェネレーションシステム等の一般産業用として転用する目的で新たに開発された小型ガスタービンである。

トヨタ自動車では長年の研究開発で得られた自動車用ガスタービン技術の一般産業用途への転用促進を図る為に、1998年に「トヨタタービンアンドシステム（以下TTS）」を設立した。TTSでは2000年に300kW級のコージェネレーションシステムを一般向けとして初出荷しており、以来発電機駆動を中心とする各種小型ガスタービン及びこれを組込んだ様々なコージェネレーションシステムや非常用発電設備を製造して広く販売を拡大している。

TG051 型は元来GT／Batteryハイブリッドシステム用を目指した1軸式の超小型ガスタービンをベースにしており、単段遠心圧縮機／単筒缶式燃焼器／単段幅流タービン等のコア部分については基本的に自動車用をそのまま流用している。この場合、燃費が決定的に重視される自動車用では回転蓄熱式の熱交換器を装備して再生サイクルとして軸端熱効率の向上を図っているが、コージェネレーション用の場合は単純サイクルとしてボイラで直接排熱を回収して総合熱効率を高くする方が採算性向上に繋がるケースが多く、基本形は熱交換器を取り除いた単純サイクル式としている。但し熱利用の少ない用途の場合も考慮して、（回転蓄熱式に比べると）より簡易なプレートフィン型熱交換器を装備し発電端効率を向上させた再生式のTG051R型も併せて製品化し用途の拡大を目指している。また、NOx低減対策として予混合燃焼器も準備されており、コージェネレーション用等の常用用途に対応している。

TG051 型については6.5.3項に於いても一部紹介しているが、当時新たな市場開拓を目指して国内に参入してきた多くの海外製マイクロガスタービン（以

下 MGT) に伍して殆ど唯一の国産 MGT として拡販を競っている。本機は他の MGT と同様、主軸回転数は 80,000rpm と非常に高く、駆動する発電機はこれに直結する同速の高速発電機を採用して減速機を排除する事により構造の簡素化と信頼性の向上を図っている。

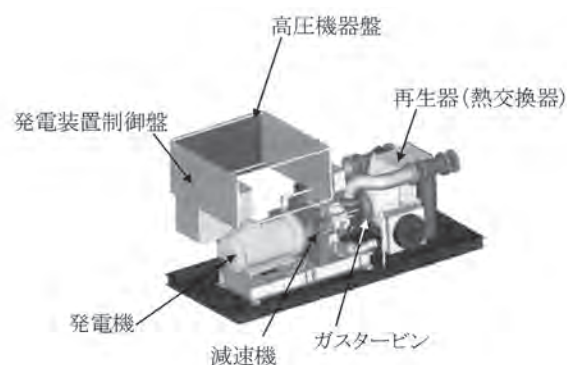
TG312 型はトヨタ自動車が大形バス用として開発を進めていた 300kW 級の二軸式ガスタービンをベースにしている。主要素は基本的には大形バス用をそのまま引き継いで単段遠心圧縮機／単筒缶型燃焼器／単段軸流タービン（圧縮機駆動用）／同（出力用）の構成となっており、TG051 型の場合と同様にバス用で装備されていた熱交換器は取り外して単純サイクルの二軸式ガスタービンとして 2000 年に発売された。更に 2004 年には此れを一軸式に改修して更に高効率化／コンパクト化を図った TG311 型を新たに開発し市場に投入している。TG311 型の主要素は単段遠心圧縮機／単筒缶型燃焼器／二段軸流式タービンで構成されており、二軸式から一軸式に改修する際にタービン部分に加えて遠心圧縮機の圧力比を増加（6 → 6.4）する等による性能改善が施されている。また、常用仕様に対しては NOx 対策として蒸気噴射式の拡散燃焼器とガス燃料を対象とした予混合燃焼器の二種類が準備されている。

此处で紹介した TG051 / 051R 型及び TG312 / 311 型ガスタービンは主として工場、店舗、病院等で使用される小規模な民生用コージェネレーションシステムの主機として多くは使用されているが、熔融炭酸塩型燃料電池（MCFC）とこれらの小型ガスタービンを組合せた加圧型 MCFC / MGT ハイブリッドシステムや近年大気汚染防止の観点から規制が厳しくなっている揮発性有機化合物（VOC）の処理システム等の新しい用途での需要も活発化してきている。この他、防災用や移動用等の非常用発電設備として活用される例も多く、その用途は常用／非常用を問わず多方面に拡大している。

(5) 新潟原動機製 RGT3R 型ガスタービン(300kW 級、 図 6.11 及び表 6.6 を参照) ⁽⁷⁾

本ガスタービンは新潟原動機（株）が防災用として開発し、1997 年から市場投入を開始した RGT3 型をベースにしたもので、軸端熱効率及び耐久性の向上を図ると同時に低公害化を推進して常用用途での拡販を目指して 2005 年に発売された新鋭機である。

国内では後述する 6.5.3 項に記載したように、1990 年代後半頃よりマイクロガスタービン（MGT）の開発及び市場開拓が活発化した。これを受けて国内でも電



注：新潟電動機が実績のある防災用ガスタービンをベースにコージェネレーション用として開発した 300kW 級高効率再生サイクルガスタービンを搭載した発電装置

図 6.11 RGT3R 発電装置の構造図 ⁽⁷⁾

表 6.6 RGT3R 発電装置の主要仕様 ⁽⁷⁾

形 式	再生サイクル 1 軸式
発 電 機 出 力	300kW
空 気 流 量	2.5kg/s
圧 力 比	4.02
回 転 数	37,000rpm
圧 縮 機	遠心 1 段
タービン	ラジアル 1 段
燃 焼 器	単筒缶型乾式低公害型（DLE）
熱 効 率（ 発 電 端 ）	32.5%
排 気 ガ ス NOx 濃 度	20ppm (O ₂ = 16%)

気事業法が改正され、300kW 未満のガスタービン設備については主任技術者の選任が不要となる等、MGT に対する規制緩和が進んだ。

この時期市場に投入された MGT の多くは 100kW 未満が殆どで、超小型に起因するコスト面や性能面での課題を克服するのが中々困難な事から、市場では中々普及が進まず苦戦していた。この為、新潟原動機では 300kW と云う規制上限の大きさを目標に設定し、低コストで高効率な小型ガスタービンの開発を目指した。

RGT3R 型は防災用として実績ある RGT3 型をベースにしており、遠心圧縮機等の主要構成要素の効率改善をはかると同時に廃熱回収用のプレートフィン型熱交換器を導入して再生サイクルに変更し、発電端の熱効率が 32.5%と云う 300kW 級としては最高レベルの熱効率を達成している。

さらに RGT3R 型では液体燃料（灯油）で都市部の厳しい排ガス規制値をクリアできる DLE（Dry Low Emission）燃焼器を新たに開発した。本燃焼器は宇宙航空研究開発機構から技術移転を受けて実用化したもので、予蒸発予混合二段ステージング希薄燃焼方式により 50 ～ 100% の負荷範囲で NOx 値が 20ppm (O₂

= 16%) 以下と云う液体燃料焚きとしては世界でも最高レベルの値を達成している。

本ガスタービンは従来の一般的なコージェネレーション用途に留まらず、揮発性有機化合物（VOC）処理等を目的とした新システムの開発研究も積極的に進められた。本システムは工場などから排出されるVOCガスをガスタービンの吸気に導き、そのままエンジン内部で燃焼させて無公害化すると同時にVOC廃液についても燃料の一部としてガスタービンに投入し無公害化するもので、元来公害源であったものを電力エネルギーに変換して有効活用する事により「見なし熱効率」は大幅に向上する事が出来るようになる。因みにRGT3R型ガスタービンの初号機は2005年に発電出力290kWのVOC処理システムとして初出荷されている。

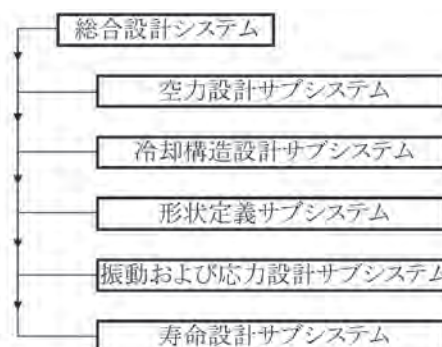
6.3 関連技術の動向

1980年代後半以降の中小型ガスタービンコージェネレーションシステムの開発では、市場参入を目指す各社が競って高性能ガスタービンの開発に取り組んだ。これらの高効率で且つ低公害なエンジンの開発には、中小型ガスタービン市場の活性化に伴って急速に進化した設計／材料／加工等に関する新技術が積極的に採り入れられている。本項ではこれらについて特に中小型ガスタービンに特徴的な代表的な例を幾つか採り上げて以下に紹介する。なお、高温化に関連する冷却技術や材料技術等については前年度の「産業用大型ガスタービンの技術系統化調査」と重なる部分が多く、此处では重複を避けて省略している。

6.3.1 統合設計システム

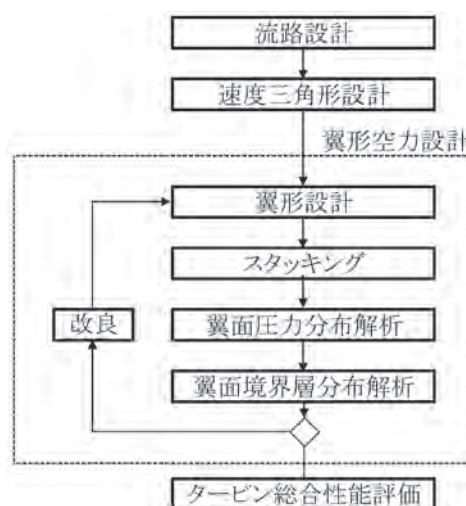
1970年代から急速に活発化した中小型国産ガスタービンの開発には、大型電子計算機の発達と関連ソフトの充実が大いに貢献した。ガスタービンの主要コンポーネントである圧縮機／タービン等の設計では、空力／伝熱（冷却）／強度／振動等の各検討要素が相互に複雑に関連し合って作業を難しく長時間掛かるものにしていった。

当初、これらの設計計算は各検討要素別に夫々の専門技術者が独立した個別の設計プログラムを各々並列的に使用して行っていた。この為、入出力データの作成／整理／検討等に多大な労力と時間を要していたが、1980年代に入ると電算機の大型化や多様化等の進展に合わせてこれらを改善し設計作業の効率化を図る動きが関連する各企業で活発化した。



注：タービンの所定の出力を得るように各段落の流路形状や動翼の外形形状を求める。次に使用材の耐熱温度を考慮して中空翼内部の冷却構造を定め、その性能を評価したのち、翼に作用する各種励振源との共振回避しながら、各種荷重に対する強度耐久性を満足するように翼植込部やシュラウドなどの周辺構造を定めていく。

図 6.12 統合設計システムの基本構成⁽⁸⁾



注：設計手順に従って流路形状および翼形の空力設計を行い、併せて空力性能の推定をおこなう。

図 6.13 空力設計サブシステムの例⁽⁸⁾

この結果生まれたのが統合設計システム（図 6.12、図 6.13 を参照）で、個別の具体的な内容はシステムを開発した夫々の企業毎に大きく異なるが、基本的な目的や方針は共通する部分が多い。即ち、前述のように各々の専門技術者が個別に行っていた空力／伝熱（冷却）／構造／強度／振動／寿命評価等の各検討作業を共通のデータファイルを使って一人でも行えるように改善すると同時に、設計基準や材料データ等の必要な最新情報を電子データとして簡単に参照できるようにして、設計作業の簡素化／迅速化／正確化を図っている。因みに、統合設計システムの誕生により従前に比べて設計工数が1／10に低減したという報告もある⁽⁹⁾。

これらの設計作業は一般に設計基準を満たす迄、設

計者の判断を入れて試行錯誤を繰り返しながら進められるのが通常のやり方で、最適設計を行う為の完全な自動化は中々困難であり且つ必ずしも効率的とは云えない。この為、大方のプログラムは対話方式となっており、設計者の判断／意志を採り入れつつ設計を進めていくのが一般的となっている。

6.3.2 CFD (Computational Fluid Dynamics) 技術

ガスタービンの製品競争力を維持していく為には、圧縮機やタービン等の主要コンポーネントに対する不断の効率改善努力が不可欠である。この為、関係各社は計算機能力の向上に合わせた設計解析法の高度化に力を入れており、冷却翼等の複雑な形状や多段圧縮機的全段を一括して対象とする大規模な CFD 解析等を積極的に進めている。

図 6.14 に示す「ガスタービン用 CFD の進歩」はこれらの動きを模式化したもので、図示のように計算速度の向上に伴って動静翼間の非定常流れや、冷却翼における流体からの熱伝達と翼内部の熱伝導との連成解析等が出来るようになり、実際により近い動きを計算機上で再現し確認する事が出来るようになって来ている。

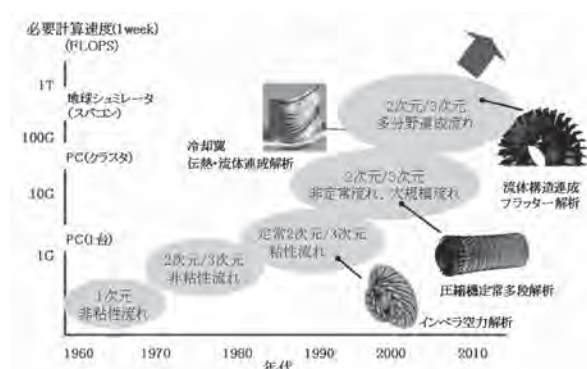


図 6.14 ガスタービン用 CFD の進歩⁽¹⁰⁾

例えば、遠心圧縮機は動翼であるインペラと後置静翼となるディフューザの各々の要素が一對となって段を構成しており、従来はこの流れの解析は要素毎に別々に設計し要素間のマッチング等の全体性能については試験で確認していた。併し乍ら、計算容量の増大に伴って事前に計算機上でこれらの現象を確認する事が出来るようになり、必要な時間／費用／人員等が削減されて開発の効率向上に大いに寄与出来るようになってきている。

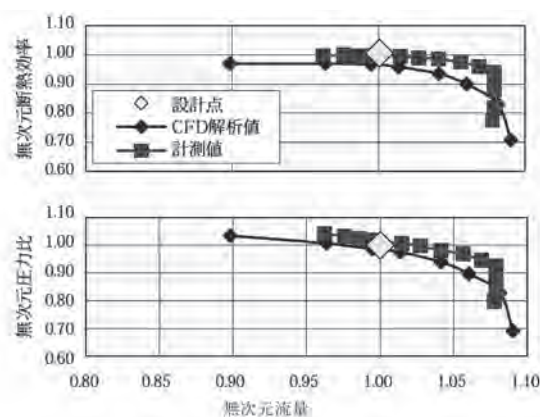
図 6.15 (相対マッハ数分布) は或る遠心圧縮機内を CFD で一体解析する事により得られた相対マッハ数の分布結果を例示したもので、各通路内における流れ

の減速状況が可視化されて判り易く確認出来るようになった。更に、図 6.16 (遠心圧縮機段性能特性) は計算で得られた遠心圧縮機の段性能特性を実験結果と比較したもので、両方のグラフ形状がよく一致している事が判る。



注：遠心圧縮機の CFD 一体解析によって得られた相対マッハ数分布であり、通路内での流れの減速過程が確認できる。

図 6.15 相対マッハ数分布の例 (遠心圧縮機内部)⁽¹¹⁾



注：圧力比・断熱効率の流量特性について各々設計値で無次元化して示している。解析結果と試験結果を比較すると流量変化に対する変化傾向がよく一致していることがわかる。

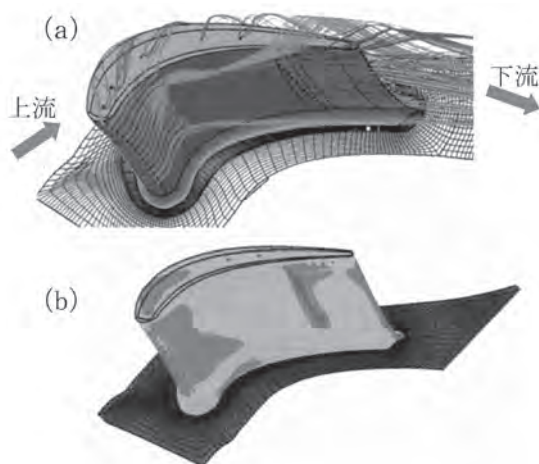
図 6.16 遠心圧縮機段性能無次元化流量特性例⁽¹¹⁾

また、図 6.17 (a) 冷却翼の翼外面冷却空気流れ、(b) 翼面温度分布) は前述の冷却翼についての CFD 解析の新しい適用例を示したもので、主流ガスや冷却空気の流れと翼表面熱伝達および翼内部の固体熱伝導を同時に連成解析して、翼表面の温度分布の確認を行った例である。この例では図 6.17 (a) に示す流れの軌跡から、上流側冷却孔からの冷却空気が下流側に流れるに従って徐々に偏り、全面を均一にカバーしていない事が判る。また、この結果として、図 6.17 (b) に示す翼表面温度分布から判るとおり、当該部分の温度が高くなっている事が判っている。また当然ながら、この様な計算で得られた解析結果とサーモペイント (示温塗料) やパイロメータ (放射温度計) 等の実機計測等で得られたデータは相互に照合／検証されて、

新しい解析技術のレベルアップを図っている。

CFD 解析技術はその他、吸気コレクタ／メインハウジング／燃焼器／排気ディフューザ等の形状が複雑な要素の設計についても採り入れられており、構造上の制限から実機での計測が中々難しい様なこれらの部位の流れを計算で確認して性能改善を図る等、高性能化に大きな役割を果たすようになってきている。

以上のように、電算機の発達と共に CFD 解析技術は近年目覚ましい発展を遂げており、大規模／複雑な解析対象に対して精度の高い予測結果が得られるようになってきた。この結果、ガスタービンの高性能化や信頼性向上に不可欠な技術となっており、様々な構成要素について設計段階で最適化を図る等に対する有力な武器として、今後益々活躍する場が広がっていく事が予想される。



注：(a) に示す流れ軌跡から、翼表面の上流側の冷却孔から出た冷却空気が、下流に進むに従って偏った流れとなり、翼全面をカバーできていないことがわかる。(b) の翼表面温度分布からは、その部分の翼表面温度が高いことがわかる。

図 6.17 冷却翼の温度分布例⁽¹¹⁾

6.3.3 低公害燃焼技術

(1) 排ガス規制の動向

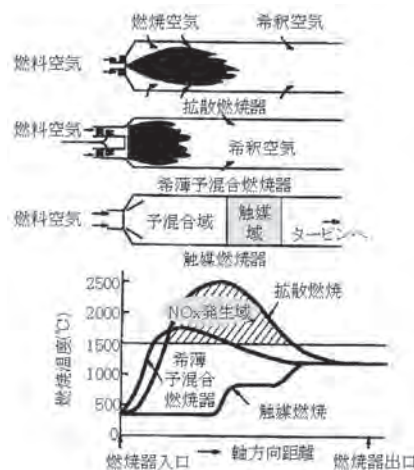
国内のガスタービン排ガス規制は 1987 年にガスタービン及びディーゼルエンジンがばい煙発生装置として大気汚染防止法に追加されたことに始まっている。

この大気汚染防止法では NOx とばいじんを対象としており、その規制値はこれまで年を追って段階的に強化されてきた。また、大都市を抱える自治体は独自に規制値を上乗せしており、更には総量規制を設けている処もある。

海外では米国や欧州を中心に NOx 以外に CO についても基準が設けられている事が多い。また、米国では州毎に独自の規制値を決めており、カリフォルニア州やマサチューセッツ等の東海岸沿岸州では飛び抜け

て厳しい規制値が設定されている。

このように国内外において益々厳しくなる排ガス規制に対して、従来は水・蒸気噴射や排ガス脱硝により対処してきたが、陸船用では天然ガス焼き仕様が多くなってきたのが幸いし、最近では水や蒸気を用いない DLE (Dry Low Emission) 燃焼器が増えてきた。図 6.18 に各種燃焼方式の比較を示す。



注：燃焼様式による燃焼温度や NOx 発生域の違い

図 6.18 各種燃焼方式の比較⁽¹²⁾

(2) 陸船用ガスタービンの低 NOx 化技術

ガスタービン燃焼器で生成する NOx を低減させる方法として最も効果があるのは火炎温度を下げる事で、その方式としては湿式法 (Wet 方式) と乾式法 (Dry 方式) がある。

水または蒸気を燃焼器内に噴射する Wet 方式は比較的簡単で、且つ確実に NOx 低減が出来るため従来から多く使用されているが、純水装置等の設備費用及びそのランニングコスト増加のほか熱効率の低下やタービンの劣化等の問題がある。ただし、灯油や A 重油等の液体燃料を専焼とするガスタービンでは後述する Dry 方式の DLE 燃焼技術が未だ十分に確立されておらず、現時点では Wet 方式が中心となっている。

一方、Dry 方式は燃焼そのものの改善によって NOx 低減を図る方法で、天然ガスを燃料とするガスタービンでは燃焼する前に予め燃料と空気を火炎温度が低くなるよう薄い比率で混合した希薄混合気を燃焼器内に導き燃焼させる希薄予混合燃焼法が主流となっている。この方法では燃料濃度が均一な為、局所的に火炎温度が高温となる領域が存在せず、従ってサーマル NOx の発生を抑制する事が出来る。

希薄予混合燃焼方式は NOx の発生を抑制しながら安定的に燃焼を継続できる混合比の範囲が狭く、不完

全燃焼や逆火／振動燃焼等の不安定燃焼を発生しやすいと言う本質的な課題もある。併しこの様な欠点があるにもかかわらず、この方式はNO_x低減効果が高く且つ経済性／信頼性／耐久性の向上等についてもメリットが多いことから、急速に普及が進んだコージェネレーションシステム等で積極的に開発が行われ実用化が進んでいる。

(3) DLE 燃焼器の開発動向⁽¹³⁾

現在国内の陸船用ガスタービン用として実用されているDLE 燃焼器は希薄予混合燃焼法が主流となっており、その具体的な方法は①マルチバーナ方式と②シリーズ燃焼方式の二つに大別される。

① マルチバーナ方式

マルチバーナ方式は多数の予混合メインバーナを負荷の増減に合わせて切り替え、広い空燃比範囲において希薄予混合燃焼を実現しNO_x排出を抑制するやり方である。図6.19、図6.20にその一例としてカワサキM1A-13D型ガスタービン（1, 500kW級）のDLE燃焼器構造を示す。

本ガスタービンは図6.20に示すような断面構造の缶型燃焼器を1個備えており、図6.19に示すような8本の予混合メインバーナを図6.21のように負荷に合わせて順次切り替える事によって、広い作動範囲でNO_xの排出を抑制している。図6.22はこの排ガス特性を図示したもので、この方式では一般に図のようなノコギリ状の特性を示し高負荷領域で特に低いNO_x排出が得られる特徴がある。

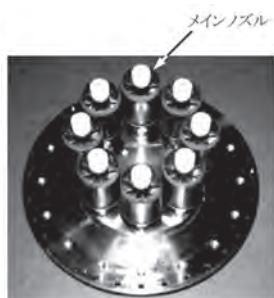


図 6.19 1,500kW 級マルチバーナ方式予混合バーナ外観例⁽¹³⁾

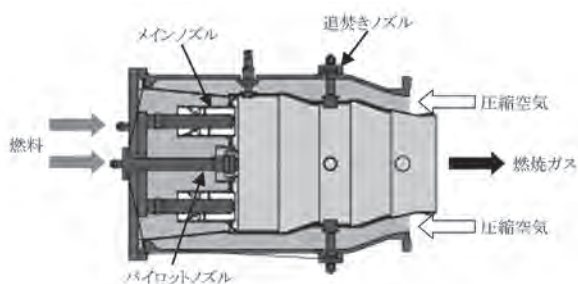
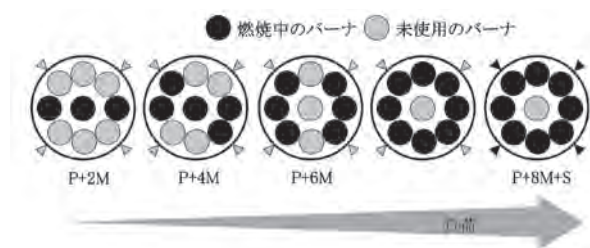
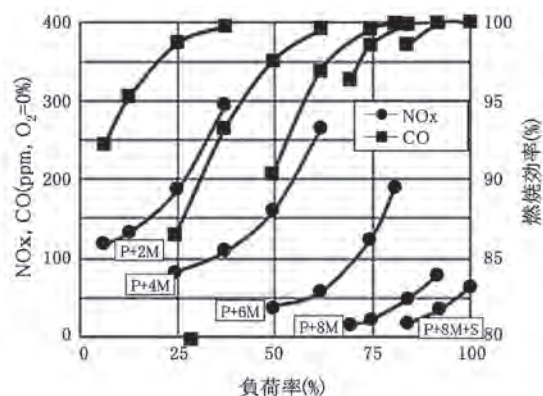


図 6.20 マルチバーナ方式燃焼器断面図例⁽¹³⁾



注：負荷率の増加にともない、使用するバーナを変化させる。

図 6.21 マルチバーナの燃焼制御例⁽¹³⁾



注：図 6.20 で示されたバーナ使用時のNO_x、CO値の例

図 6.22 マルチバーナの燃焼特性例⁽¹³⁾

② シリーズ燃焼方式

中小型で多缶式の燃焼器を採用しているガスタービンでは燃焼器単体が小さくなり、マルチバーナ方式では構造上の制約から適用が難しくなる場合が多い。この為、この様な例では構造が比較的簡単なシリーズ燃焼方式が採用されている。

この方式のDLE 燃焼器ではマルチバーナ方式のような本数制御による負荷変動対応が行えない為、燃焼器ライナの頂部に大型のラジアルスワラを備えて低NO_x運転範囲の拡大を行っているのが特徴である。この方式を採用した例として図6.23及び図6.24にカワサキL20A-DLE 燃焼器の予混合ノズルモジュール及び断面図を例示する。

L20A型ガスタービン（18MW級）は図6.24の様な缶型燃焼器を8個備えており、各々の燃焼器は図6.23、図6.24に示すように中央に位置する起動／低負荷時用の拡散パイロットバーナと予混合バーナ及び更にこれらの下流側に位置する追い焚きバーナを持っている。図6.25はこの方式の排ガス特性を示したもので50%以上の広い負荷範囲で低NO_xが達成できている。

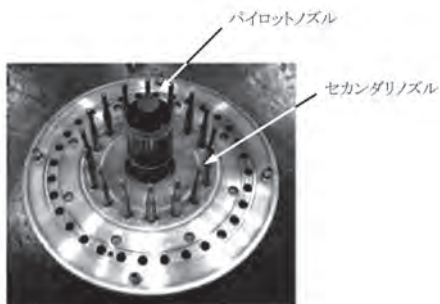


図 6.23 シリーズ方式予混合ノズルモジュール外観例⁽¹³⁾

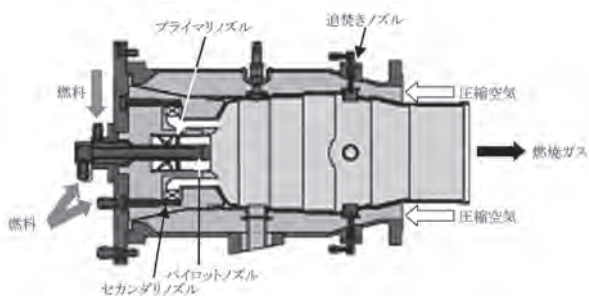


図 6.24 シリーズ方式燃焼器断面図例⁽¹³⁾

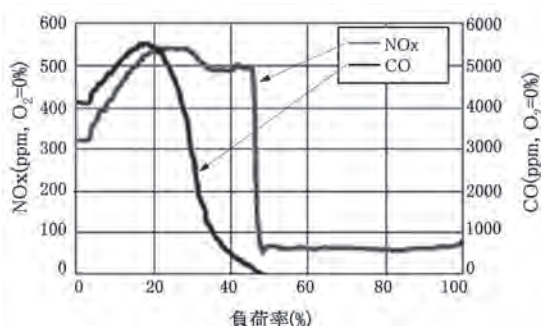


図 6.25 シリーズ燃焼方式の排ガス特性例⁽¹³⁾

(4) 触媒燃焼について⁽¹³⁾

世界的な環境規制強化の流れの中、米国では NOx の規制値が 3 ～ 5ppm 以下 ($O_2 = 15\%$) でないとガスタービン発電設備の設置許可が得られにくい地域が広がってきている。この様な厳しい規制値をクリアする為には現状では脱硝装置に頼らざるを得ないが、そのために必要なコスト増に加えてアンモニアのリーク問題がガスタービンの普及を阻害する大きな要因となっている。触媒燃焼方式はこの様な市場環境に対応して極低 NOx 排出 (3ppm 以下) を実現すべく開発されたもので、加熱によって活性化された触媒の表面反応で安定化された気相希薄燃焼により、通常の火炎燃焼では不可能な低い温度で燃焼させて極低 NOx を実現している。

川崎重工業では米国の Catalytica Energy Systems 開発の触媒燃焼器を搭載した M1A-13X 型ガスタービンを製品化して米国カリフォルニア州の病院

等へ輸出している。

この触媒燃焼器の断面図を図 6.26 に示す。燃焼器は予燃焼部、予混合部、触媒部、気相燃焼部及び空気流量制御部から構成されている。予燃焼部では少量の燃料を燃焼させ、燃料と空気の混合気温度を触媒の活性化に必要な温度まで上昇させる。主燃料は予燃焼部出口に設けたスワラの入口部に噴射され、予混合部内で予燃焼部から排出される燃焼排ガスと均一に混合される。部分負荷時は予燃焼部に供給される空気の一部を空気流量制御部にバイパスさせ、触媒入口での予混合気の温度を一定に保っている。この触媒燃焼方式では図 6.27 に示すように、世界でもトップレベルの極低 NOx 排出を達成している。

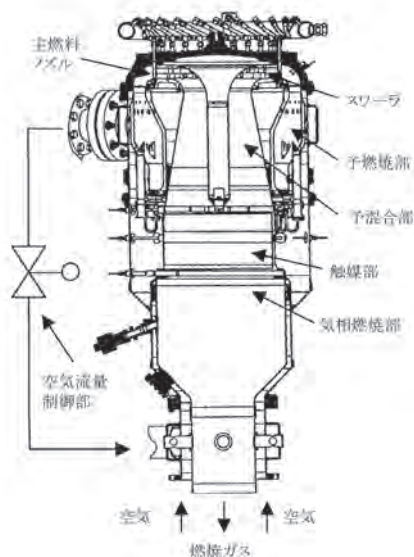


図 6.26 触媒燃焼器断面図例⁽¹³⁾

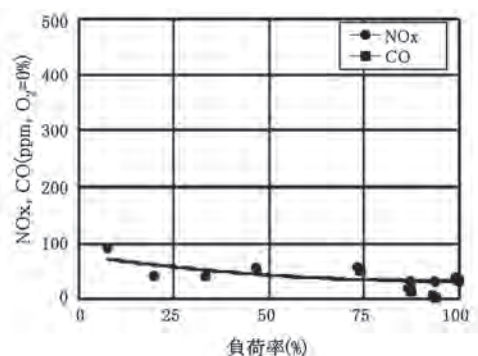


図 6.27 触媒燃焼器燃焼特性例⁽¹³⁾

6.4 様々な国家プロジェクト

1980 年代後半以降、中小型の陸船用ガスタービンを対象とする様々な国家プロジェクトが立ち上げられた。当時、我国を取り巻くエネルギー事情は 1970 年代

の二度にわたる石油ショックなど、石油需給の動向については不透明な部分が多く、省エネルギーの推進は石油代替エネルギーの開発及び石油の安定供給確保と並んでエネルギー政策の重要な柱として位置付けられていた。

ガスタービンは小型軽量で、低 NOx / 低騒音 / 低振動等の特性を持った低公害型熱機関であり、石油や天然ガス等の多種燃料への対応が可能であることから石油代替エネルギーに適応出来る熱機関として、更には省エネルギーの観点から積極的な普及推進が唱えられ始めたコージェネレーションシステムの駆動源として期待されていた。しかしながら、出力の小さい小型ガスタービンはタービン翼等の高温部分に十分な冷却構造が採れず、タービン入口温度（TIT）が上げられない為熱効率が低くなって小型ガスタービン普及の阻害要因の一つとなっていた。

この時期行われたセラミックガスタービン、ACT90、スーパーマリンガスタービン等の研究開発は上記のような背景の下で、何れも従来に比べて格段に高効率で低公害な中小型ガスタービン開発を目標としたもので、以下にそれら各プロジェクトの概要を紹介する。

6.4.1 300kW 級セラミックガスタービンの研究 (1988～1998 年)⁽¹⁴⁾

セラミックスは高温強度に優れた構造材料である為、ガスタービン内の高温にさらされる金属製部品をセラミック部品に置換し、無冷却で高いタービン入口温度を達成できれば大幅な熱効率の向上を図る事が出来る。このアイディア自体は以前より存在していたが、当時の国内のセラミック材料はエンジン側の要求を満足しておらず、高精度な部品の製造技術についても未だ十分に確立されてはいなかった。一方、米国においては 1970 年代からいち早く自動車用の小型セラミックガスタービン（CGT）の研究開発が開始されており、セラミックスを用いた高効率小型ガスタービンへの期待が高まりつつあった。

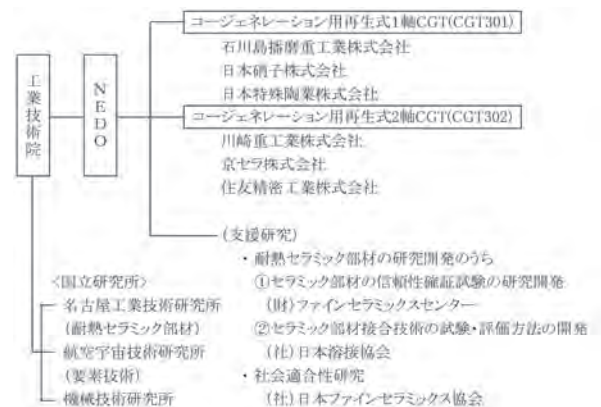
この様な中、国内においてもコージェネレーション用を目的にニューサンシャイン計画の一環として表記の小型セラミックガスタービンプロジェクトが計画され、1988 年から研究開発がスタートした。開発スケジュールの概要を表 6.7 に示す。本プロジェクトはタービン入口温度 1, 350℃ で軸出力 300kW、軸端熱効率は金属製ガスタービンの二倍以上の 42% を主要な達成目標としたもので、表 6.7 に示すような内容と開発スケジュールに沿って進められた。

表 6.7 セラミックガスタービン開発スケジュール⁽¹⁴⁾

	昭和 63	平成 1	平成 2	平成 3	平成 4	平成 5	平成 6	平成 7	平成 8	平成 9	平成 10
1. 耐熱セラミック部材の研究開発	セラミック部材の研究および部品化技術の研究										
2. 要素技術の研究開発	要素技術の試作研究および性能向上 (圧縮機、燃焼器、タービン、熱交換器等)										
3. 設計試作運転研究	基本設計、基本形金属製ガスタービン試作・運転及び基本形 CGT 試作・運転										
4. 社会適合性研究	環境安全性、負荷形態の解析、経済性、運転管理等の研究										

注：CGT はセラミックガスタービン

表 6.8 セラミックガスタービン研究開発体制⁽¹⁴⁾



プロジェクトの技術開発は NEDO からの委託によりガスタービンメーカとセラミックメーカ及び関係する公的な研究機関が表 6.8 に示すような体制で進められた。表示のようにプロジェクトの主目標である 300kW 級のセラミックガスタービン開発は、その特徴別に“CGT301”型及び“CGT302”型の二機種を設定し、各々の機種毎に分かれたメーカグループがこの二機種を同時並行で開発する方式で進められた。なお、当初このプロジェクトには移動式を特徴とする“CGT303 型”グループも参加していたが、計画した回転蓄熱式熱交換器の開発が困難との理由で中間評価の時点で中断されている。

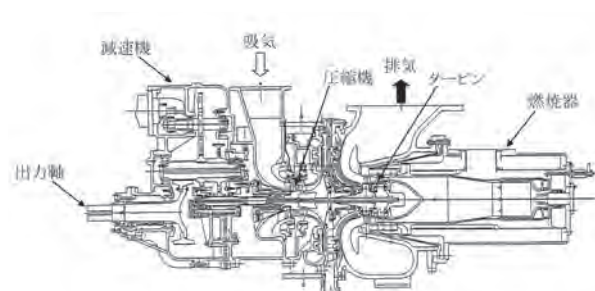
CGT301 型及び CGT302 型の各々の構造の特徴を表 6.9 に、またその断面構造を図 6.28 及び図 6.29 に各々示す。

CGT301 型は定格運転時の熱効率に重点を置いて一軸式を採用している。大型化も想定してタービンロータも翼部のみをセラミックスとする等、金属との組み合わせによるハイブリッド構造を全体的に採用している。また、熱交換器はシェル&チューブ形式のブロッ

クを三段に組重ねた三回流方式を採用しており、最高温側の一段の直線部にのみセラミック製の伝熱管を配置した構造となっている。

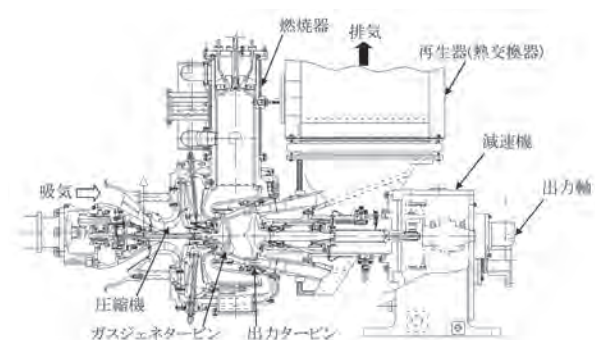
表 6.9 セラミックガスタービン各型式の特徴⁽¹⁴⁾

	CGT301	CGT302
エンジンタイプ	再生 1 軸式	再生 2 軸式
圧 縮 機	軸流＋遠心式	単段遠心式
タ ー ビ ン	2 段軸流式	GGT：軸流式 PT：軸流式
	セラミックブレード / 金属ディスク	GGT：セラミックブレード型 PT：セラミックブレード型
熱 交 換 器	シェル&チューブ型 (セラミック＋金属製)	プレートフィン型 (金属製)



注：定格時の性能を重視した 1 軸式で、大型化も想定して、タービンロータはセラミック翼と金属ディスクの組み合わせによるハイブリッド構造を採用

図 6.28 CGT301 の断面図⁽¹⁴⁾



注：部分負荷の性能を重視した 2 軸式で、タービンロータは（翼とディスクを一体形成した）セラミックス一体型を採用

図 6.29 CGT302 の断面図⁽¹⁴⁾

CGT302 型は電力及び熱の需要が変動する用途を想定して、定格点を外れた部分負荷でも出来るだけ高い効率が保持できるように比較的高圧力比の二軸式を採用している。構造自体は再生式ガスタービンとして実績ある形態を採用し、研究開発の主眼を部材のセラミックス化に置いている。すなわち、セラミックスの加工性の悪さを十分考慮して構造／形状の簡素化／単純化に注力すると同時に、セラミックス-FRC（Fiber Reinforced Carbon）の組合せによる複合締結部材やセラミックパネを使用した弾性支持構造他セラミック

スの特性を考慮した新技術を開発し積極的に適用した。また、放熱損失を低減する為、エンジン本体に断熱三重構造を採用しているのも本セラミックガスタービンの特徴の一つである。

本プロジェクトに関しては評価報告書が公開されており、この中で中核となる設計試作運転研究については代表的な一例として CGT302 型を採り上げ、その具体的な成果を図 6.30 として纏めて示してある。評価報告書では「CGT302 型は TIT = 1, 344℃（修正温度 = 1, 396℃）において、出力 322kW、熱効率 42.1% という従来の金属製ガスタービンでは達成不可能な世界最高水準の成果を得ている。

耐久性については目標外であり、今回の研究開発では十分検証されたとは云えないものの、実温度 1, 200℃で 783 時間を超える長時間運転を行い実際に使える技術である事を立証した。さらに関連技術を洗練させて実用化を進めれば、民生分野におけるエネルギーや環境関連分野で極めて大きなインパクトが期待される。」と述べられている。但し一方で、実用化については同じ報告書内に「実用化までには非常に多くの課題が有り、信頼性／耐久性の確保とコストパフォーマンスの立証が最も重要である」とも述べられており、どの位の大きさのガスタービンが最適かを含め実用化の道筋は必ずしも明確になっていない。結論的には実用化に必要な技術の確立には更に多くの人的資源と開発資金が必要であるとされている。

6.4.2 ACT90（1987～1992 年）⁽¹⁵⁾

都市ガス等のエネルギー源から電気及び熱の両エネルギーを同時に発生させ、高いエネルギー効率が得られるコージェネレーションシステムは我国においても産業用分野では比較的古くから採り入れられていた。一方、民生用としては 1980 年代に入って都市部の再開発等により、業務用施設の集中／インテリジェント化／空調等の高度化等の影響で電力と共に熱の需要が増大し、都市部における新しい民生用の分散型エネルギー供給システムとしてコージェネレーションシステムが急速にクローズアップされてきた。

この様な状況の中、1987 年に通産省（当時）の下で大手のガス三社及び電力三社を中心にアドバンス・コージェネレーションシステム技術研究組合（略称 ACT90）が設立され、関連する各企業の参加を求めて都市のエネルギー需要にマッチした高効率な新システムの開発を目指した 6 年間のプロジェクトとしてスタートした。

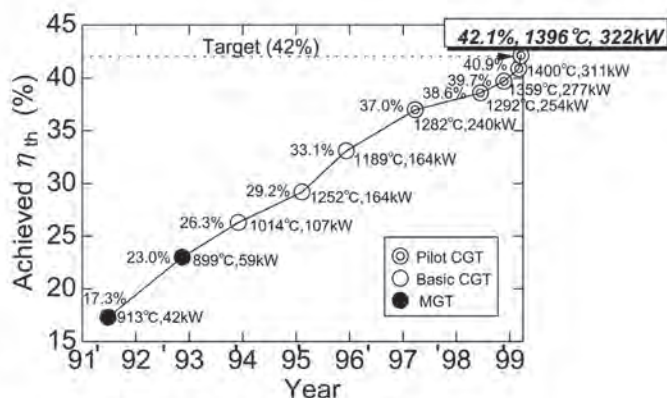
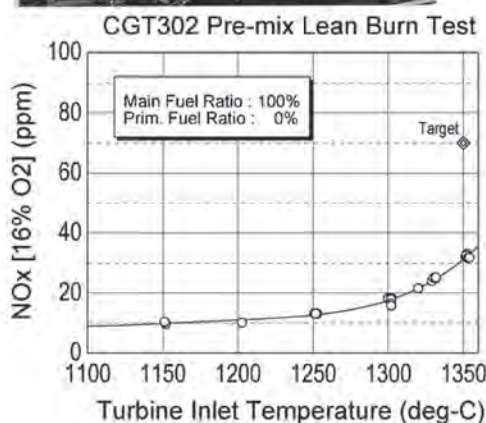
本プロジェクトはガスエンジン及びガスタービンを



TIT (°C)	現号機運転時間	総運転時間	運転条件等
1,200～	783 : 11	1901 : 08	連続運転 (WSS)
1,100～1,200	6 : 21	9 : 36	起動回数:
1,000～1,100	2 : 14	7 : 28	49回/118回
～1,000	1 : 54	9 : 01	(現号機/総回数)

注 現号機：最終テストエンジン

総運転時間：金属製ガスタービンを含む総運転時間



注：MGTは金属製ガスタービン

図 6.30 CGT302 の達成成果⁽¹⁴⁾

原動機とするコージェネレーションシステムを夫々二機種ずつ計 4 機種を同時並行して開発するやり方で、各機種毎にグループ分けし、各々に電力／ガスの事業者及び原動機／発電機／廃熱回収等の製造会社が参加して進められた。

各グループは表 6. 10 の様に民生用需要において大別される二つのパターン（①ホテル／病院など熱需要が多く日／季節間で熱電比が一定なパターン、②事務所など電力需要が多く日／季節間で熱電比が大きく変動するパターン）に分かれて目標を設定し開発を進めた。夫々の開発目標を表 6. 11 に一覧にして示す。また、特にガスタービンを原動機とする GT-1 及び GT-2 についてそのシステム系統図を図 6. 31 及び図 6. 32 に示しておく。

本研究開発は表 6. 12 に示すスケジュールで進められ、1992 年に 6 年間の補助事業を無事に終了した。それらの成果の概要は表 6. 13 に一覧して示す通りである。また、これらの研究は 1993 年以降 5 年間の企業化努力義務期間における追加研究を経て 4 商品（ガスエンジン／ガスタービンが各 1 機種ずつ及び吸収式冷凍機が 2 機種）が企業化されている。

表 6.10 ACT90 研究開発グループ⁽¹⁵⁾

システム	主なる対象 需要家先	研究開発 グループ	研 究 室
ガスエンジン コージェネ レーション システム	(1) ホテル、病院、 レストラン (2) 事務所ビル一般	GE-1	東京電力、小松製作所、 東芝、矢崎総業
		GE-2	関西電力、大阪ガス、 三菱重工業、三菱電機、 三洋電機
ガスタービン コージェネ レーション システム	(1) ホテル、病院、 レストラン (2) 事務所ビル一般	GT-1	中部電力、東邦ガス、 三井造船、明電舎、 日立製作所
		GT-2	東京ガス、川崎重工業、 富士電機

表 6.11 ACT90 基本設計の概要⁽¹⁵⁾

			GE-1	GE-2	GT-1	GT-2
出力	電 気		135 kW	160 kW	500 ～ 485 kW	630 ～ 860 kW
	熱	冷 房	98.4 Mcal/h	152 Mcal/h		
		暖 房	131.3 Mcal/h	152 Mcal/h		
		蒸 気	1,158 ～ 730 Mcal/h			1,299 ～ 546 Mcal/h
共通課題	総 合 熱 効 率		80%以上			
	原動機軸端効率		40%以上 (高圧縮比, 高稀薄燃焼)		30%以上 (タービン入り口温度の引上げ 1,200℃程度)	
	環境適合性 (NOx) (O ₂ = 0%)		300 ppm 以下		150 ppm 以下	
	設 置 方 式 運 転 方 式 設 置 面 積 系統連系保護リレー		ビルディング・ブロック方式 自動運転 (運転モード選択, 故障診断機能付き) 0.3 ～ 0.5m ³ / kW ディジタル化, 一体化			
特 徴	・ 部分負荷効率向上 (アトキンソンサイクル) ・ 排熱回収量の極大化 ・ ガスエンジンフライホイール組込み発電機 ・ 二重効用吸収冷凍機 (成績係数 0.7)		・ 熱電比制御 (ターボコンバウンド) ・ 排熱温度の高温化 (140℃高温冷却) ・ ヒートパイプによる発電機の排熱回収 ・ 二重効用吸収冷凍機 (成績係数 1.0)	・ 再生器バイパス制御方式による熱電比制御 (2.6 ～ 1.7) ・ ハイブリッド触媒燃焼方式による低 NOx 化 ・ 誘導型高速発電機 (30,000rpm)	・ 蒸気注入による熱電比制御 (2.4 ～ 0.7) ・ 可変予混合稀薄燃焼による低 NOx 化 ・ 同期型高速発電機 (15,000rpm)	

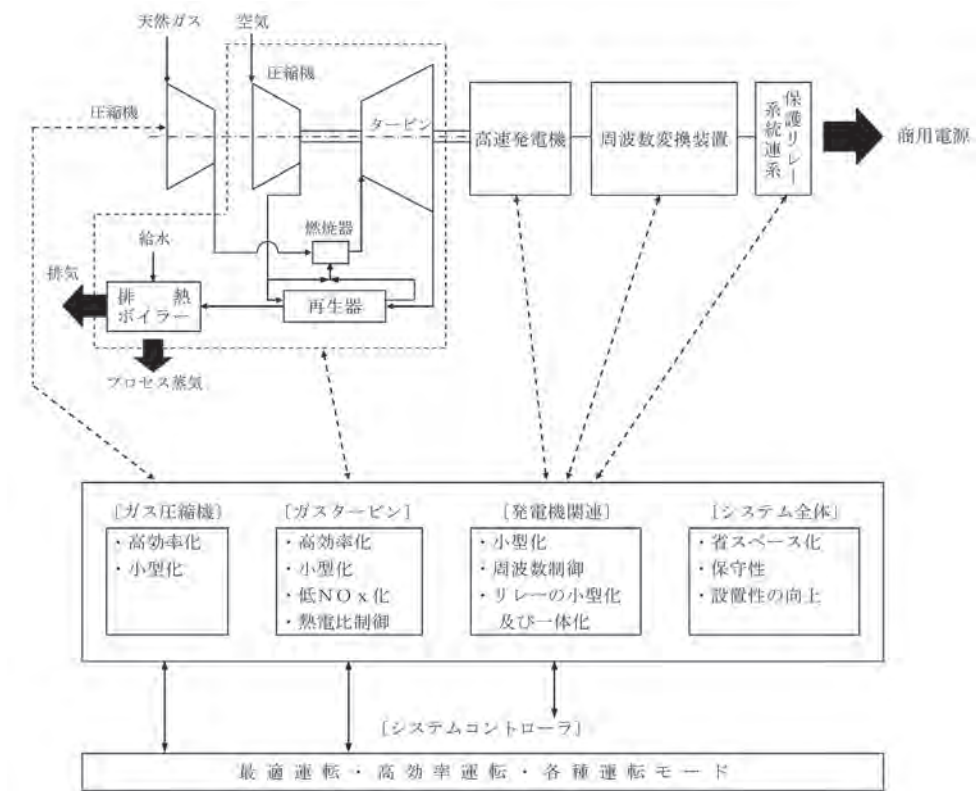


図 6.31 GT-1 ガスタービンコージェネレーションのシステムフロー（再生器付きの場合）⁽¹⁵⁾

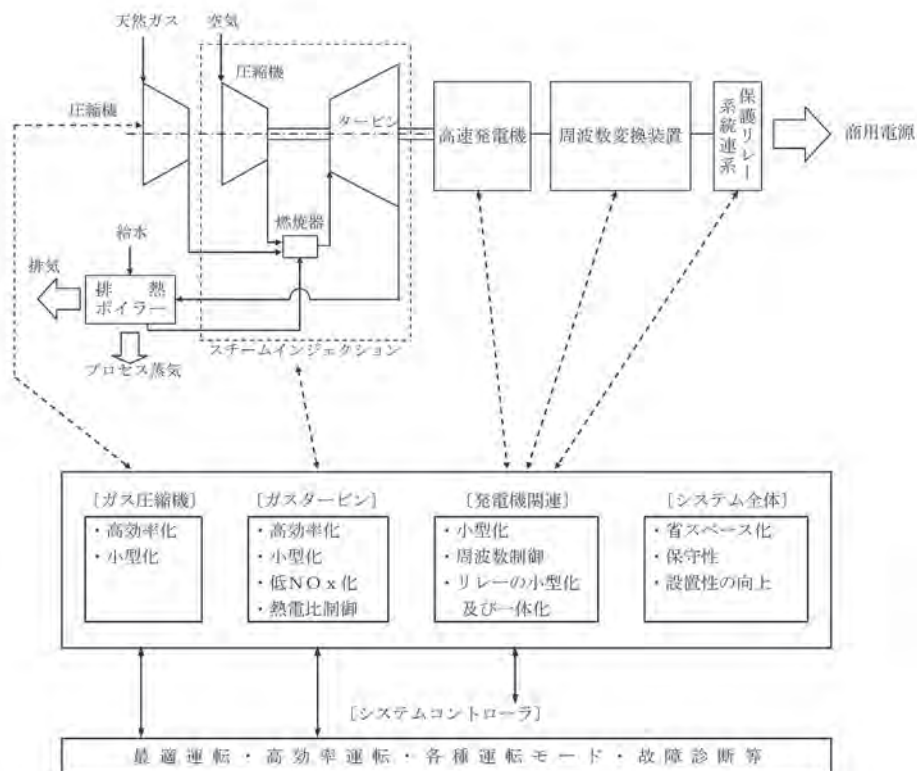


図 6.32 GT-2 ガスタービンコージェネレーションのシステムフロー（スチームインジェクションの場合）⁽¹⁵⁾

表 6.12 ACT90 の研究開発スケジュール⁽¹⁵⁾

研究開発大工程

項目\年度	昭和62年度	昭和63年度	平成元年度	平成2年度	平成3年度	平成4年度
研究開発	国内外の現状技術及び技術開発動向の調査 基本仕様基本設計	要素研究開発 詳細設計	製作	環境規制の強化に伴う目標値の変更 (NOx関係) 単体性能試験 パッケージ化 組合せ試験 現地設計・工事	フィールドテスト	解体研究 総合評価
自主研究	・先進諸外国の現状技術及び開発動向の調査 (第1回調査団派遣)	・先進諸外国の高速発電機等に関する調査 (第2回調査団派遣)	・先進諸外国のNOx規制動向及びガスエンジン等の低NOx化技術調査 (第3回調査団派遣) ・稀薄燃焼ガスエンジンについての委託研究 ・ガスエンジン輸入機の1・NOx・効率シベル実測	・先進諸外国のガスタービンCGSの低NOx化・高効率化技術調査 (第4回調査団派遣) ・国際会議での論文発表 (ASME COGEN-TURBOIV) ・第1回研究開発成果発表会 (12月6日)	・先進諸外国のCGS需要家の実態調査・EPR1・CR1等の研究機関との技術交流ワークショップ (第5回調査団派遣) ・第2回研究開発成果発表会 (1月30日)	・CGS技術調査・研究成果の広報活動・テストサイト見学会・講演会

表 6.13 ACT90 の開発結果⁽¹⁵⁾

システム		GE - 1	GE - 2	GT - 1	GT - 2
原動機・システム	総合熱効率 (フィールドテスト性能)	79. 5% [80%]	80. 0% [80%]	82. 5% [80%]	79. 1% [80%]
	軸端効率 (単体性能)	最高出力 (385PS) 39. 8% [40%]	40. 0% [40%]	26. 0% [30%]	28. 6% [30%]
	NOx 値 (フィールドテスト性能)	250ppm [300ppm 以下]	250ppm [300ppm 以下]	150ppm [150ppm 以下]	130ppm [150ppm 以下]
	省スペース性	0. 3m ² / kW 以下	0. 3m ² / kW 以下	0. 3m ² / kW 程度	0. 3m ² / kW 程度
発電機	発電機効率	93. 6% [94. 0%]	95. 2% [95. 0%]	87. 8% [86. 5%]	95. 7% [93. 5%]
変換	高周波電力 変換効率	—	—	94. 0% [90. 0%]	91. 7% [90. 0%]
冷凍機	成績係数	冷凍 0. 7 [0. 7] 加熱 0. 97 [0. 97]	冷凍 1. 1 [1. 0] 加熱 1. 0 [1. 0]	—	—

注) [] は目標値

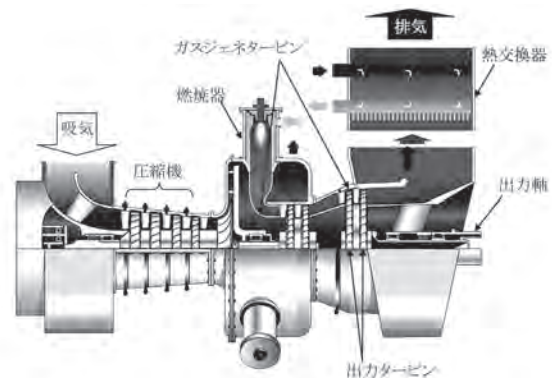
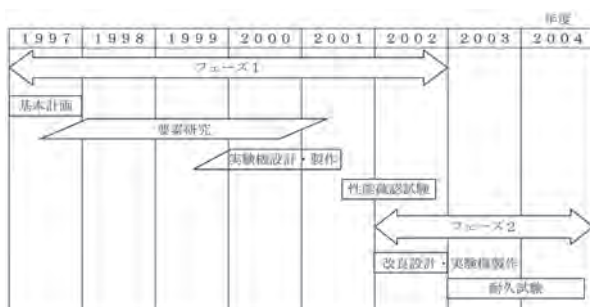
6.4.3 スーパーマリンガスタービンの開発

(1997 ~ 2004 年度)⁽¹⁶⁾

スーパーマリンガスタービンは国内のメーカ 5 社 (IHI, 川崎重工業、ダイハツディーゼル, 新潟原動機ヤンマー) によって設立されたスーパーマリンガスタービン技術研究組合が開発した次世代型の 2, 500kW 級船用ガスタービンである。

地球規模の環境問題がクローズアップされる中、海上における大気汚染防止等の環境対策や海上輸送システムの効率化が世界的な関心を集めている。ガスタービンは元来、軽量小型／低騒音／低振動及び良好な排ガス特性と云った優れた特徴を備えているが、船用としては熱効率の低さ等主として経済的な理由によって艦艇や高速艇など一部の特殊な用途に限られていた。スーパーマリンガスタービンはこの様な現状を打破して従来のディーゼル機関に代わる低環境負荷の高効率な次世代型の船用機関を目指して開発された。

スーパーマリンガスタービンの開発スケジュールを表 6.14 に示す。図 6.33 は本ガスタービンの断面を示したもので、船舶への搭載を考慮して下記のような特徴を備えている。

表 6.14 スーパーマリンガスタービンの開発スケジュール⁽¹⁶⁾

注：主要素の構成は、圧縮機＝4 段軸流＋単段遠心、燃焼器＝4 缶式、タービン＝2 段軸流（ガスジェネレーター側）＋2 段軸流（パワータービン側）、熱交換器＝プレートフィンタイプ

図 6.33 スーパーマリンガスタービンの断面図⁽¹⁶⁾

- ① 船用燃料として入手性の良いA重油が使用可能
- ② モジュール構造による良好な整備性
- ③ 海水雰囲気に対応した防食性に優れた材質／コーティングの採用
- ④ 傾斜／動揺に対する強度・排油特性の強化
- ⑤ 急激な負荷変動に対応可能な制御機構

フェーズ1では基本計画、各要素技術の研究、実験機の開発及びその性能試験を実施し、主な開発目標（出力2, 500kW、熱効率38%、NOx排出量1g/kW・h以下）の達成を確認している。フェーズ2では実船搭載に必要な信頼性を確保する為に、フェーズ1で得られた知見を基に改良を加えた実船搭載型スーパーマリンガスタービンを開発し、連続運転試験や繰返し負荷投入試験を行って耐久性を確認した。

実船搭載型スーパーマリンガスタービンの主要目を表 6.15 に示す。ガスタービン他機種との熱効率の比較を図 6.34 に示したが、再生熱交換器を使用する事で同クラスのガスタービンと比較して高い熱効率を得られている。また、図 6.35 は船用ディーゼルエンジンとの NOx 排出量の比較を示す。

表 6.15 実船搭載型スーパーマリンガスタービンの
主要仕様⁽¹⁶⁾

形 式	再生開放 2 軸式
出 力	2,400kW
熱 効 率	36%
N O x 排 出 量	1.7g / kW・h
回 転 数	21,000rpm (GG) / 12,500rpm (PT)
空 気 流 量	9.5kg / s
圧 力 比	8

※ ISO 条件, A 重油

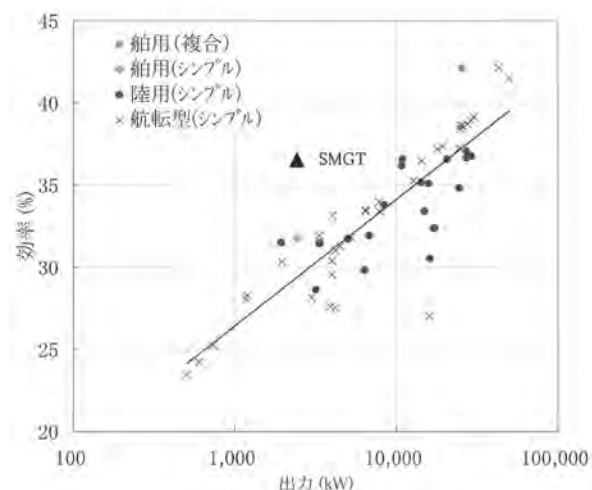


図 6.34 スーパーマリンガスタービンの熱効率比較⁽¹⁶⁾

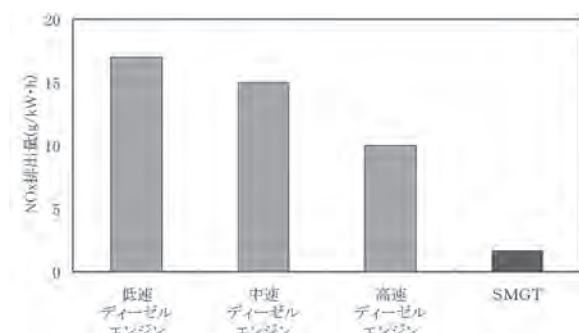


図 6.35 スーパーマリンガスタービンと船用ディーゼルエンジンとの NOx 排出量の比較⁽¹⁶⁾

実船搭載型スーパーマリンガスタービンは国土交通省が開発を推進している次世代内航船スーパーエコシップ（通称 SES）に搭載され、2007 年 2 月～6 月の期間に新潟沖で海上公試（船舶機能試験）及び実海域実証実験が実施された。SES は船舶による環境負荷低減及び船内の省力化を目指した次世代内航船の実験船で、スーパーマリンガスタービンを駆動源とする発電装置や電動式二重反転ポッドプロペラ等で構成される電気推進システムと、航海／荷役／離着桟／係船支援等の各システムを具備して省力化を図った制御システムを搭載している。

SES に搭載された発電装置の外観を図 6.36 に、またその構造を図 6.37 に示す。海上試験では速力／旋回／Z（ジグザグ航行）／離着桟／連続航行／全速前後進（クラッシュアスターン）等の各種試験を実施し、この間の運転時間及び起動回数は夫々 180 時間及び 32 回であった。この間スーパーマリンガスタービンに不具合等は無く動作は良好で、性能及び信頼性／安全性について検証が得られた。また、特にスーパーマリンガスタービンの低振動／低騒音による SES 船内の快適性は非常に好評であった。今後の展開としては更に長期間の運用実績の積み重ねや電気推進以外の推進方式（プロペラ駆動等）への適用検討等が考えられる。



図 6.36 スーパーマリンガスタービン発電装置の外観⁽¹⁶⁾

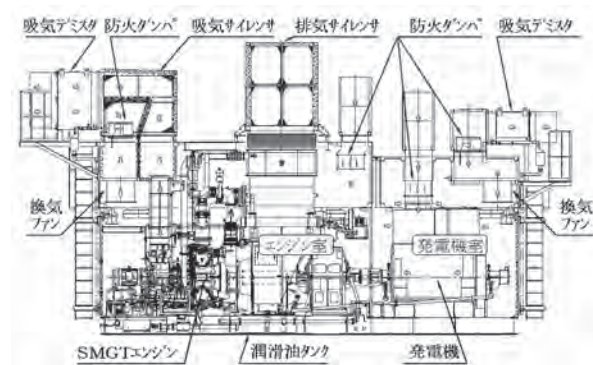


図 6.37 スーパーマリンガスタービン発電装置の構造⁽¹⁶⁾

6.5 多様なコージェネレーションシステムと運用方式

1980 年代半ば頃より比較的小規模なガスタービンコージェネレーションシステムが注目を浴びようになり、省エネルギーや環境負荷の低減を目指して様々な用途／方式が開発され実用化されている。また、これらのコージェネレーションシステムは小規模ながら常用設備として安定したエネルギー供給が求められ、遠隔監視システムのようなユーザに密着した保守管理サービスが普及する等、新しい形式の運用システムが

構築されてきた。本章ではこれらの概要を以下に紹介する。

6.5.1 様々な小型コージェネレーションシステム

中小型ガスタービンを駆動源とするコージェネレーションシステムは熱効率の向上を目指して、各々の用途に対して特に排気ガスの熱を出来る限り有効に活用する為の様々な方式が開発され実用化されている。ここでは其の内の幾つかの典型的な方式について参考例として紹介する。

(1) 標準システム

図 6.38 に示すシステムは最も標準的な小規模ガスタービンコージェネレーションシステムの模式図で、この場合ガスタービンは軸出力で発電機を駆動し、排気ガスを排熱ボイラに送ってプロセス蒸気を生成し供給している。

プロセス蒸気は工場内で製品の加熱／加湿等様々な工程に使用されるほか、地域冷暖房設備等においては吸収式冷凍機に供給する冷暖房装置の熱源としても利用されている。

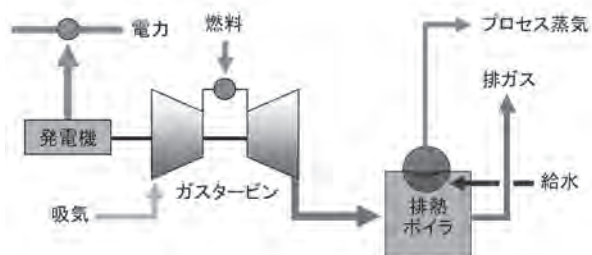


図 6.38 標準システム [資料提供：川崎重工業]

(2) 非常用兼用システム

本システムは、通常ガスタービンコージェネレーションシステムが運用されているサイトにおいて何らかの理由により停電が発生した場合にコージェネレーションシステムを非常用の電源として流用するシステムで、新たに別の非常用発電設備を設置する必要がなくなり、システムの簡素化及びコスト低減が可能となるなど多くの利点が期待できる。

図 6.39 は本システムの典型例を模式的に示したもので、通常ガス燃料を使用するコージェネレーションシステムの場合は停電時に燃料の供給遮断が想定されることから、非常時にはタンクに貯蔵した液体燃料を使うようになっているのが特徴である。また、停電時にはダンパを用いて排気を大気に直接放散し、発電のみの運転を行う。

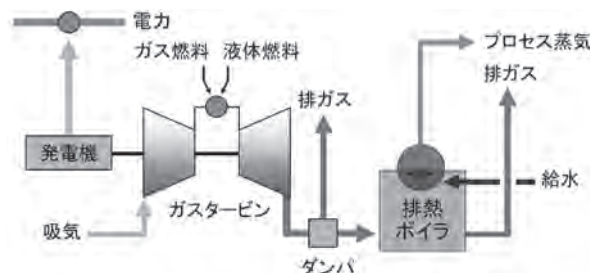


図 6.39 非常用兼用システム [資料提供：川崎重工業]

(3) 熱電比可変形システム

発生蒸気を過熱器に通して過熱蒸気を造り、それをガスタービンの燃焼器内に注入してタービンを駆動する流量を増加させて発電出力と発電効率の大幅な向上を図る事が出来る。本システムは主として夏冬等の季節や昼夜等の時間帯によって熱と電力の需要の比率が大幅に変動する用途で使われるもので、注入蒸気量を変える事により需要に応じた最適な熱電比で運転する事が出来る利点がある。

注入する蒸気は過熱器を用いずに単に飽和蒸気の状態でも可能であるが、何れにせよエンジン内に注入するには純水装置で精製された水が必要となる。また、蒸気注入によって発電端効率は向上するが総合効率は逆に低下する欠点もある。この為、熱電比可変によりコージェネレーションシステムの効率的な運用が期待できる半面コスト高や効率低下となる欠点もあり、本システムの採否は電気／ガスの料金や使用条件を考慮して十分な採算計算を行ってから決定される事になる。

図 6.40 はこの熱電比可変形システムの系統図を模式的に示したものである。

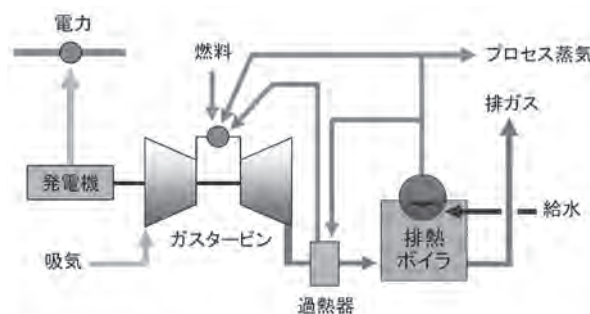


図 6.40 熱電比可変形システム [資料提供：川崎重工業]

(4) コンバインドシステム

発生蒸気で蒸気タービンを回して発電機を駆動し、ガスタービン主軸駆動の発電に加えて新たに別の電力を得る方式のコージェネレーションシステムである。本システムは復水器や脱気器等の機器を含む蒸気タービン運転システムが別途必要なことから、通常は数十 MW 級の中規模クラス以上のコージェネレーションシ

システムで利用される事が多い（図 6.41 参照）。

また、数 MW 級以下の小規模なコージェネレーションシステムでは蒸気タービンに代わって、より簡易なスチームエキスパンダを用いて補助動力を得る方式もしばしば採用されている（図 6.42 参照）。

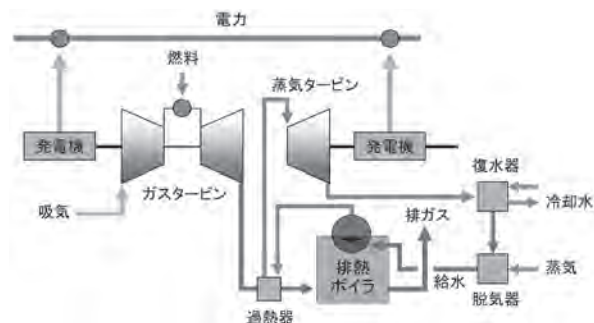


図 6.41 コンバインドシステム [資料提供：川崎重工業]

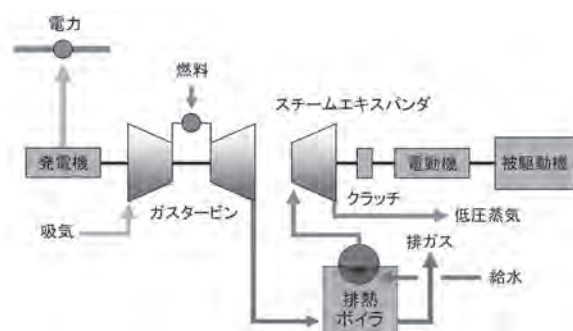


図 6.42 スチームエキスパンダを用いた補助動力利用システム [資料提供：川崎重工業]

(5) 排気ガス直接利用システム

ボイラの代わりに乾燥炉を置いて排気の熱で直接製品等の乾燥作業に使用するシステムで、飼料／ゴム／化学／ラウンドリ関連等の熱をそのまま使用する工場が多く使われている（図 6.43 参照）。

本システムはボイラ関連の設備が無くなり簡素な機器配置となる為、設備／保守関連の大幅なコスト低減が可能な事から、小規模なコージェネレーションシステムに適した方式と云える。

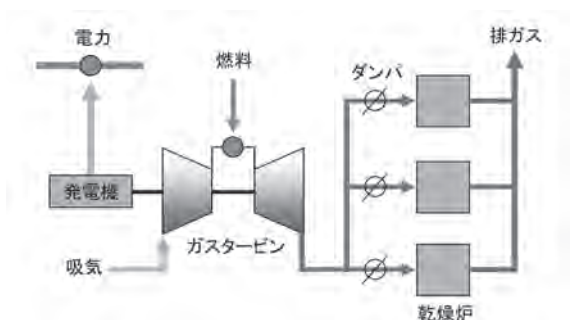


図 6.43 排気ガス直接利用システム [資料提供：川崎重工業]

(6) その他

発電機の代わりにガスタービンでコンプレッサを駆動し、工場用の空気源として利用している小規模コージェネレーションシステムもある（図 6.44 参照）。また、プロセス蒸気を一部利用して吸収冷凍機を駆動し、ガスタービンの吸気を冷却して夏場の出力低下を防止する方式（図 6.45 参照）もしばしば採用されている。また、ガスタービン排気中の豊富な残存酸素を利用して追焚きを行い蒸気量を増やす助燃方式を採用している例もある（図 6.46 参照）。

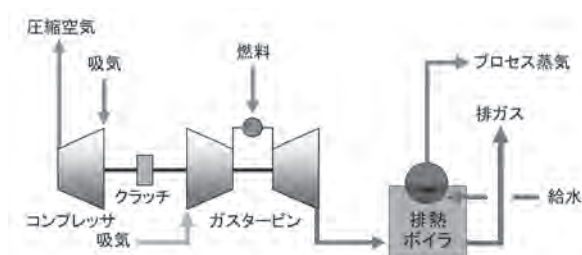


図 6.44 機械駆動システム [資料提供：川崎重工業]

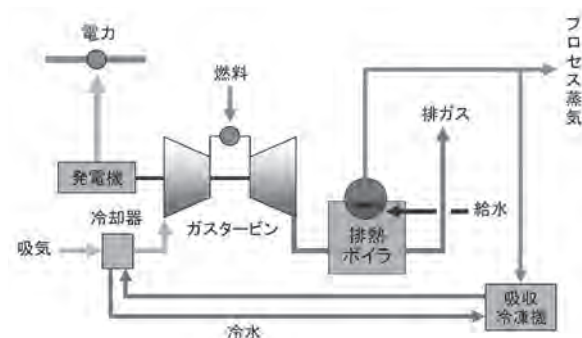


図 6.45 吸気冷却システム [資料提供：川崎重工業]

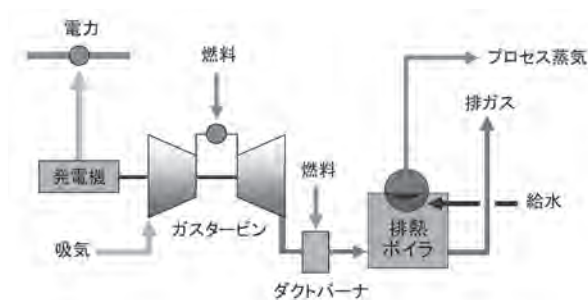


図 6.46 助燃システム [資料提供：川崎重工業]

この他、6.2 章の (4)、(5) 項で紹介した VOC 処理システムや燃料電池／ガスタービンハイブリッドシステム等の需要も増えてきており、新しい用途として今後の発展が期待できる分野である。

6.5.2 遠隔監視システム

中小型ガスタービンを駆動源とする比較的小規模なコージェネレーションシステムについては運用上高い

稼働率が求められるが、一方でこれらは一般に多数の台数が広い地域に分散して運用されており、ユーザ及びメーカ双方にとってシステム保全作業の省力化が重要な課題となる。この為、最近ではこれらのコージェネレーションシステムには遠隔監視システムが取り付けられて販売設置される例が増えてきており、各ユーザの個別なサイトにおける運転状況がメーカ側の監視装置上でも把握できるようになってきた。

これによって、故障等の不具合発生時に早急に原因を把握して適切な処置を施し早期に復旧する事が出来る。また最近では此れ迄の豊富な運転データの蓄積を解析する事により予知診断が可能になって、予防保全に主眼を置いたシステムに徐々に移行してきている。

現在、中小型ガスタービンコージェネレーションシステムメーカの多くは顧客と連携しながらこのような遠隔監視システムを配備運用しているが、それらは各社が各々独自の方式で作っており具体的な内容は当然ながら夫々に異なっている。併しながら、基本的な考え方等は共通する部分も多くあり、本項ではその代表例の一つとして川崎重工業が運用している中小型ガスタービンコージェネレーションシステム用の遠隔監視システム“Kawasaki Techno Net”を採り上げ、その概要を以下に紹介する。

< “Kawasaki Techno Net” の概要 > ⁽¹⁷⁾

川崎重工業では 1984 年頃から中小型ガスタービンコージェネレーションシステムの製造販売を開始したが、1988 年頃よりこれらの顧客サイトにおける安定した運用を目的として遠隔監視システムを開発し運用を開始している。

当初、このシステムは顧客側のコージェネレーションシステムに取り付けたコンピュータから採取した故障データ（故障警報発生時前後の運転データ）や毎正時の運転データ等を公衆電話回線を通じてメーカ側のサーバに送り、故障が発生した時にその内容を速やかに把握して迅速に復旧に当たる事を目的に使用されていた。その後、コンピュータ関連技術の目覚ましい発達により遠隔監視システムは年々大容量化してより緻密で多量なデータの送受信が可能となると同時に、運転実績データの蓄積や解析技術も進んでソフト面においても監視に加えて故障予知の役割が増えてくるなど徐々に進化を遂げてきた。

(1) システム構成

現在、運用されているシステムの構成を図 6.47 に示す。システムは顧客プラントに装備されたデータ収

集／送信装置及びメーカ側に設置された各種サーバ（データ蓄積装置）／クライアント（サーバよりデータを受け取るコンピュータ）より構築されている。

この遠隔監視システムの一つの特徴は社内 LAN システムを利用する事により、保守サービス担当のみならず設計技術部門においても権限ある場合は同時進行でデータを閲覧できる事で、これによってより幅広い見地から状況を判断してアフターサービスの充実を図る事が出来るようになった。

通信は当初、公衆電話回線を通じて行われていたが、現在はインターネット回線の利用も可能となっており、顧客の希望に応じて何れの選択にも対応できる。また、本システムは国内のみならず海外の顧客についても同じサービスが提供されており、現在 200 カ所以上のコージェネレーションシステムサイトを結んで運用されている。

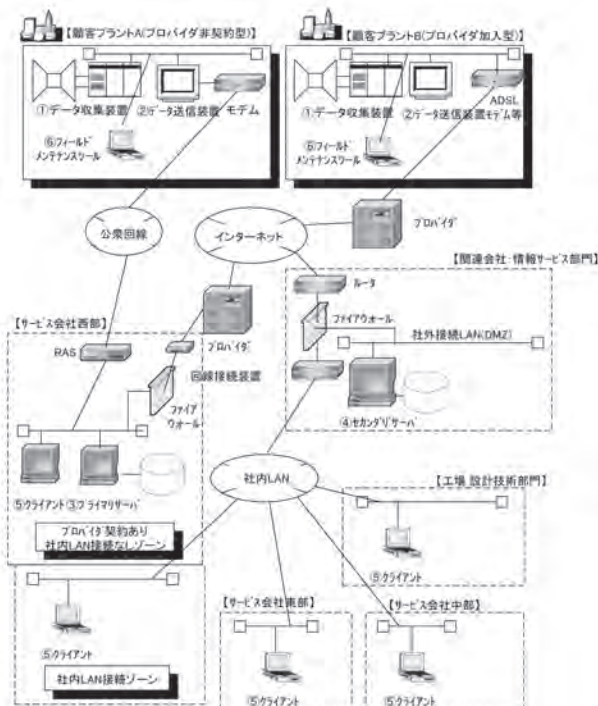


図 6.47 遠隔監視システムの構成例 ⁽¹⁷⁾

(2) 遠隔監視機能

本システムでは各サイト毎に下記のような種類のデータを採取して伝送する事が出来る。

- ① 故障データ：軽故障発生時は警報発令前26秒から発令後5秒間の運転データを1秒毎に、また重故障発生時は警報発令前50分から発生後5秒間、0.1秒間隔でデータを採取して記録している。
- ② 運転データ：毎正時毎に運転データ／ステータスデータ（機器類の動作信号）を1日単位で採取している。

- ③ 起動データ：起動時の運転データを回転数5% rpm間隔で採取している。
- ④ 停止データ：停止時の運転データを回転数5% rpm間隔で採取している。

(3) 予知診断機能

運転データを自動的に解析し、異常が把握できた場合は顧客と連携して事前の点検等により設備の不意な停止を予防すると同時に、設備熱効率や負荷率等の性能変化を周囲条件の変動等を加味して自動的に判定し、設備の劣化状況を把握して適切な対処が出来るようになってきている。

これらの予知診断作業はかなりの長い経験と専門知識を必要としていたが、自動診断機能の充実により大幅に改善されてきている。これらの診断に使用されている評価事項は主に下記のような内容のものである。

- ① 起動時間評価：起動指令から95%rpm到達までの時間を評価する事により、調速機等の不具合判定に供する。
- ② 起動時振動値評価：起動時の主軸や減速機振動の最大値の変化を評価し、車室との接触等の不具合の判定に使用する。
- ③ 起動時排気温度評価：起動時の排気温度最大値を評価して、燃料供給装置の不具合判定等を行う。
- ④ 停止時間評価：停止指令発令から5%rpm到達までの時間を評価し、回転軸系の不具合判定に供する。
- ⑤ 停止時振動評価：停止時の主軸及び減速機振動の最大値を評価して、回転体の不具合判定に供する。
- ⑥ 主軸振動評価：運転中の主軸振動変化を評価して、軸系の異常兆候予知に供する。
- ⑦ 吸気フィルタ汚れ評価：長期にわたる吸気フィルタの圧力損失のトレンドを評価して、その交換時期を予測し顧客に事前に提案する。
- ⑧ 性能劣化評価：実出力から操作量／外気条件等の影響を取り除いて標準出力を計算し、定格値と比較する事により設備の劣化状況を判定する。

近年のコンピュータ技術の目覚ましい発達により、従来の単なるデータの監視システムから、それらの解析によって不具合の発生を事前に予知する診断システムへと移行しつつある。本システムは今のところ未だ警報を発生する前に全ての不具合を完全に把握する迄には至っていないが、更に多くのデータを蓄積し同時に解析技術の向上を図る事により一層の診断技術の進化が期待できる。

6.5.3 マイクロガスタービンコージェネレーションシステム⁽¹⁸⁾

1990年代の終わり頃、国内においても分散型エネルギーシステムの一つとして、マイクロガスタービンコージェネレーションシステムが注目を浴びるようになった。

マイクロガスタービンとは、明確に定義が有る訳ではないが、一般には出力100kW以下程度の超小型ながら再生器を採用する等の方法により大幅に熱効率を改善した高性能ガスタービンで、主として店舗／ホテル／レストラン／病院等の小規模な一般民生用を対象にした超小型コージェネレーションシステムの駆動源等を主目的に開発されたものである。

(1) マイクロガスタービンの出現

マイクロガスタービンは最初に米国において開発され、順次欧州／日本等へと伝播していった。マイクロガスタービンの実現を促進する大きな切掛けとなったのは1990年に米国カリフォルニア州で制定された自動車の排ガスを厳しく規制する法律に有ると言われている。この法律は自動車の新車販売台数の10%以上（後に徐々に緩和されている）をゼロエミッション車とする事を自動車メーカーに義務付けしたものであった。米国ではこの対策としてハイブリッド車の開発が検討され、そのエンジンとしてNOx排出量の低いマイクロガスタービンの研究開発が活発に行われてその成果が今日のマイクロガスタービン出現に繋がったと言われている。

欧州においても米国にやや遅れる形でマイクロガスタービンの研究開発が行われたが、此处ではどちらかと云えば車載用よりもコージェネレーションシステム用を目標とした研究開発が先行しており、これには伝統的にコージェネレーションシステムの利用普及が盛んな欧州の風土環境が大きく影響していると思われる。

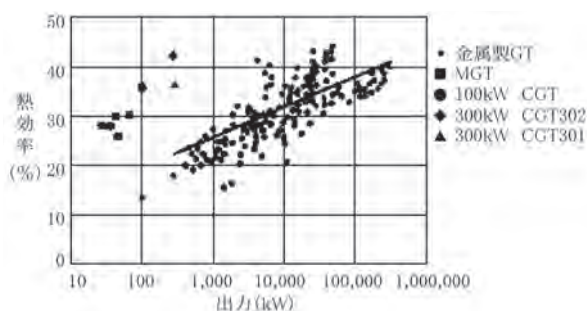
国内では1990年代の終わり頃に省エネルギー／環境対策の一環として新たな民生用コージェネレーションシステムの開発を模索していた大手の電力／ガス各社が欧米の先進メーカーからマイクロガスタービンを輸入し、数年間の運転試験等を行ってその実用性を評価している。また、同時期にこれと並行して国内のガスタービンメーカー数社が独自技術によるマイクロガスタービンの自社開発に着手している。

(2) マイクロガスタービンの特徴

マイクロガスタービンは一般に出力数十kW級の超小型再生式ガスタービンとこれに直結して10万rpm

程度で高速回転する永久磁石型的高速発電機及び商電との連携を担うインバータ装置で構成されている。本体となるガスタービン部分は基本的には航空用のAPU（補助電源）や過給機に通じる構造形式を採用している。即ち、ロータは遠心圧縮機と幅流タービンを背中合わせに組み合わせた簡潔な構造で空気軸受等の無潤滑でメンテナンスフリーな軸受方式で支持されている。また、燃焼器は予混合希薄燃焼方式によりNOx低減を図っており、ガス燃料の場合はNOx濃度が10ppm（O₂ = 15%）以下を達成している。ガスタービンのサイクル圧力比やTIT（タービン入口温度）は使用材料のコスト／耐久性等を考慮して比較的低い値を採用しているが、固定式の熱交換器と組み合わせて再生式ガスタービンとして軸端熱効率の大幅な向上を図っているのが特徴である。

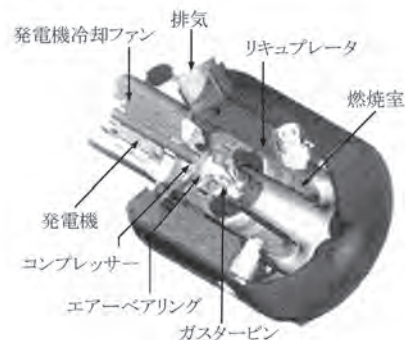
ガスタービンの軸端における熱効率は一般に小型化するに従って急激に低下する。図6.48はその傾向を示したもので、従来の延長のままで推移すればマイクロガスタービンクラスの小型機の軸端熱効率はせいぜい15%前後の低いレベルに留まる事を示唆している。



注：MGT：マイクロガスタービン、CGT：セラミックガスタービン。CGT301、CGT302については6.4.1項を参照のこと

図 6.48 ガスタービンの出力と熱効率⁽¹⁸⁾

これに対してマイクロガスタービンは上記のような様々な新しい工夫を積極的に採り入れて、30%近い軸端熱効率や非常に低いNOx排出レベルを達成すると同時にコンパクトで安価な小型の分散型電源を目標に多くのメーカーが競って開発を進めた。図6.49はそれらを代表する一例として米国のキャプストンが開発した30kW級のマイクロガスタービンの断面構造を示したもので、従来型ガスタービンとは全く異なる斬新な構造を採用している事が目につく。



注：キャプストンが開発した30kW級マイクロガスタービン。空気軸受採用で無潤滑、メンテナンスフリーとし、リキュレータ（熱交換器）がガスタービン本体を取り囲むように配置し、高速発電機を採用することで、高効率化と超小型化を図っている。

図 6.49 キャプストン製マイクロガスタービンの構造 [原図：タクマ カタログ]

(3) マイクロガスタービンの開発状況とその評価

1990年代から2000年代前半にかけて欧米及び国内の各メーカーでマイクロガスタービンの開発が活発に行われた。表6.16にこの時期に開発されたマイクロガスタービンの仕様を一覧して示しておく。この時期、多くのマイクロガスタービンが小規模な自家発電設備や予備或いは可搬式電源等の発電専用機または超小型ガスタービンコージェネレーションシステムの駆動源を目的として開発され、世界の各地で市場開拓が盛んに進められた。国内においても、マイクロガスタービンは省エネルギー／環境対策に有力な新しい手段の一つとして各方面から期待された。特に電力／ガス等のエネルギー供給関連の会社やコージェネレーションシステム関連のメーカーが中心となって、先行する欧米の有力メーカーからマイクロガスタービンを輸入して販売したり、長期にわたる試験を実施してその実用性を評価する等の活発な動きが見られた。また、国内のガスタービンメーカーにおいてはこれらの動きに合わせて独自のマイクロガスタービン開発を模索する等、一時期業界内ではブーム的な盛り上がりでマイクロガスタービンへの期待感が膨らんだ。

併しながら、2000年代の前半には新しいエネルギー供給システムの一つとして大いに期待されたマイクロガスタービンであったが、現状をみると必ずしもその期待通りに普及が進んでいるとは云えない。前述のようにマイクロガスタービンについては大手の電力／ガス会社や各地の大学／研究機関が夫々独自に試験を行い、その実用性を評価している。これらのレポートによれば、現時点におけるマイクロガスタービンの問題点は凡以下の通りである。

表 6.16 各社マイクロガスタービンの概要⁽¹⁸⁾

メーカー名	Capstone	Honeywell	NREC	Bowman	Turbec	トヨタタービン アンドシステム	日産自動車	Elliott (荏原)
システムの呼 称	Model 330	parallon 75	Power Works	TG50CG	T100	TG051	Dynajet 2.6x	TA45, TA60, TA80
タービン形式	1 軸再生式 GT	1 軸再生式 GT	2 軸再生式 GT	1 軸再生式 GT	1 軸再生式 GT	1 軸単純解放式 GT	1 軸再生式 GT	1 軸再生式 GT
定格発電出力	28kW	75kW	70kW	50kW	100kW	50kW	2.6kW	45, 60, 80kW
発電効率 (再生器 on)	26% (LHV)	28.5% (LHV)	33% (LHV)	22.5% (LHV)	30%		8 ~ 10%	25 ~ 30%
発電効率 (再生器 off)				13.5% (LHV)		13.1% (LHV)		
総合効率		60 ~ 80%	88% (HHV)	69 ~ 82%	80%			
排ガス温度	270℃	250℃	200℃	300℃、615℃	245℃	650℃	250℃	260 ~ 280℃
タービン回転数	96,000rpm	65,000rpm	60,000rpm	99,750rpm	90,000rpm	80,000rpm	100,000rpm	110,000 ~ 68,000rpm
タービン 入口温度	840℃	930℃	870℃		950℃		850℃	930℃
タービン 出口温度		650℃		680℃			690℃	640 ~ 690℃
圧縮機圧力比	3.2	3.7	3.3	4.3	4.5	4.6	2.8	4
軸 受	空気軸受	空気軸受	油潤滑	油潤滑	油潤滑		転がり軸受	油潤滑
燃料種別	天然ガス、灯油、 プロパン	天然ガス、灯油、 軽油	天然ガス、プロパン、 ディーゼル燃料	天然ガス、 灯油	天然ガス (メタノール)	A 重油、 灯油、 都市ガス 13A	灯油、軽油	天然ガス、 プロパン、灯油
燃料消費率	9.3Nm ³ /h (13A 天然ガス換算)	22.2Nm ³ /h, 26.8l/h, 25.7l/h	18.4Nm ³ /h, (13A 天然ガス換算)	17.3Nm ³ /h, (13A 天然ガス換算)	29Nm ³ /h,	38l/h, 41l/h, 33Nm ³ /h	4.5l/h	15.6 ~ 23.1 Nm ³ /h (13A 天然ガス換算)
重 量	489kg (含ガスコン)	1,540kg (含ガスコン他)	1,360kg	1,100kg	2,000kg	120kg	62kg	900 ~ 1,500kg
パッケージ寸法 (mm ³)	714 × 1, 345 × 1,899	2,334 × 1,219 × 2,163	890 × 1,420 × 2,260	804 × 2,129 × 2,342	650 (W) × 1,200 (H) × 950 (L)	~ 500 × 400 × 800	782 × 424 × 440	1,800 × 900 × 1,900
騒 音	65dB @ 10 m	65dB @ 10 m		75dB @ 1 m	70dB @ 1 m	85dB @ 1 m	55dB @ 7 m	65dB @ 1 m
NOx	9ppmv	25ppmv (保証値) 9ppmv (オプション)	9ppmv	25ppmv (O ₂ = 15%)	15ppmv			15 ~ 25ppm
CO	9ppmv		25ppmv	50ppmv (O ₂ = 15%)	15ppmv			
寿 命	40,000hrs.	40,000hrs.	80,000hrs.		60,000hrs.			54,000hrs (TBO)
電気出力	400-480V, 50/60Hz (三相交流)	120-208V, etc. 50/60Hz (三相交流)		400-480V, 50/60Hz (三相交流)	400V, 50Hz (三相交流)		100V, 50/60Hz	400/440/480V, 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	永久磁石式

- ① 熱効率が低い：現状では商電や他の内燃機関に比較して発電端効率が未だ低く、これが決定的に不利な材料となっている。この為、コージェネレーションシステムとして総合効率を高める努力が色々と為されているが、設備／保守コストの上昇と相殺して現段階では未だ決定的な解決策とはなっていない。また、近年の激しい燃料価格の変動も大きく影響していると思われる。
- ② 設備コストが高い：マイクロガスタービンの概念は元来大量生産を基にしているが、現状では未だ量産効果が得られる状況には至っていない。特にコージェネレーションシステムの場合、吸収式冷凍機等の周辺機器に適切なものが少なく、設備コスト高の大きな要因となっている。また、現状は高圧線との系統連系費用が高額となっており、コスト低減のためには規模に即した一段の規制緩和が必要と考えられる。

マイクロガスタービンの現状は、特に燃料費の高騰や世界的な大不況等の急激な環境変化による販売不振もあって、2000 年代前半の勢いはややトーンダウン

してきている。また、これらの外部要因に加えて上記に述べたようなマイクロガスタービンの本質的な課題も残されており、当初の期待値を実現する為にはこれらの課題解決、即ちマイクロガスタービンの効率改善／コスト低減に対する新たな努力が求められている。

6.6 大容量化への動き

1990 年代以降の成熟期に入って目立つようになった汎用中小型ガスタービンに関する特徴的な動きの一つとして“設備の大容量化”が挙げられる。即ち、1970 年代半ばに防災用として誕生して以来急速に発展した非常用及び 1990 年代に入って普及が進んだコージェネレーション用を主体とする常用の両用途において、従来の小容量設備から徐々に大型化していく傾向が見られるようになってきた。これは市場を取り巻く環境が時間の経過と共に少しずつ変化して、需要動向に影響していった結果で有るが、その根底には「ガスタービンは元来大容量に適したエンジンである」という事実が中小型ガスタービンの大きな課題として永続的に影響している事も否定できない。

本章ではこれらの動きについて非常用及び常用の夫々について以下に紹介する。

6.6.1 非常用発電設備の大型化

1970年代半ば頃に主として地震や火災発生時の防災用電源として誕生した小型ガスタービン発電装置は、時代の進展と共に停電対策やピークカット的な一般非常用途についても需要を拡大していった。更に1990年代に入ると3～4MWクラス的大型機種を複数台設置する案件が急速に増えていった。これは銀行や保険会社等の大手金融関連企業がIT化を急速に進め、グローバルレベルの24時間運用と大量データ処理のオンライン化計画に基づき、相次いで大型の電算センタを各地に新設した。その結果、大電力を要するこれら設備の非常用電源として、総容量が1万kWを超える大型の非常用発電設備が次々と導入された事が大きく影響している。

また、これに引き続き1990年代半ばから2000年代に掛けて、大型化は通信／電話関連の業界においても活発になり、総容量が6～13MW級の大容量非常用発電設備が相次いで納入されている。即ち、インターネットや携帯電話の急速な普及により、大手の情報通信関連企業が大型のデータセンタを相次いで各所に開設し、そのバックアップ電源として容量の大きな非常用ガスタービン発電設備が各々に複数台設置されている。

この様な大型の非常用発電設備の場合は大容量に適したガスタービンの特性が際立って高く評価されて、ディーゼル等の他の熱機関の追従を許さぬ場面が多くみられた。

6.6.2 コージェネレーション用中型ガスタービンの市場参入

1970年代の二度にわたる石油ショックを契機にして1980年代の後半になると省エネルギー／環境問題への対応から小規模なガスタービンコージェネレーションシステムへの関心が急速に高まった。その結果、其れまでに培った非常用ガスタービンの技術をベースにしたコージェネレーション用の高効率／低公害な小型ガスタービン及びこれに関連した周辺技術の開発が各方面で活発に行われ、これが国内の小型ガスタービン技術の飛躍的な進歩に大きく貢献した事は既に述べた通りである。

これら1980年代後半から1990年代初め頃に開発された初期の小型ガスタービンコージェネレーションシステムは何れも単機では3MW級以下程度の小規模なもので、省エネルギー／環境負荷の低減／脱石油等を

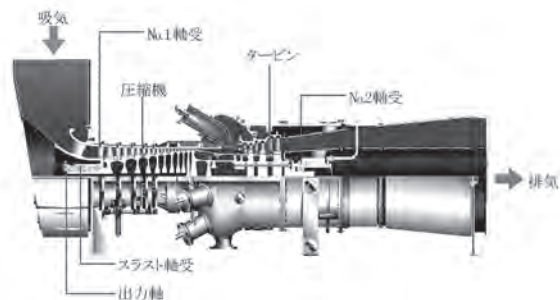
目標とするエネルギー政策の推進を目指す国の後押し等をも一部に受けながら、新たな市場開拓を積極的に進めていった。その結果、これらは主にガスタービンのクリーンなイメージや豊富な排熱量を売りにして、病院や大型の事務所ビル等の都市における分散型エネルギー供給システムとして、或いは化学やゴム関連等の比較的熱需要が多い中小規模工場用の省エネルギー型動力源等を中心として普及していった。

一方、非常用の場合と異なり、これらのコージェネレーション用のガスタービンは研究開発や機種揃えに伴う開発資源の負担増もあって全てを国産で対応するメーカーは限られており、多くは英米仏等の先進メーカーとの提携によってガスタービン本体を輸入し、それらを自社製のコージェネレーションシステムに組み込んで市場に供給した。これらの輸入エンジンは機種揃えも豊富で実績もある事から国産ガスタービンにとっては強力な競合相手として市場の活性化に大きな影響を与えた。

非常用をルーツとする初期の小型ガスタービンコージェネレーションシステムは上記のように都市型のコージェネレーションシステム等、比較的小規模な設備をターゲットにして市場開拓を行ってきたが、徐々に拡大傾向にあったコージェネレーション市場は工場等の産業用途を中心にした高効率な大型の機種を求める方向にシフトしていった。更に2000年以降になると、急激な原油価格の高騰が大型に比べて発電効率の低い小型のガスタービンコージェネレーションシステムの採算性を徐々に圧迫するようになり、より高効率な大容量機種へと需要が少しずつ移っていった。また、この時期になると新しいガスエンジンの台頭が目覚ましく、熱需要が比較的少ない小規模コージェネレーションシステムではこれに市場を奪われる例も増えてきた事も一因としてあげられる。

非常用をルーツとする初期の小規模なコージェネレーション用のガスタービンは先にも述べたように発電端出力は概ね3MW級以下で、遠心式の圧縮機と軸流式のタービンを組み合わせた簡潔な構造を特徴としていた。これに対して大容量化により更なる高効率化を目指す機種はメーカー毎で異なるが、概ね6～20MW級の中型機が中心となっている。これらは軸流式の圧縮機を使用しているのが大きな特徴で、先端的な翼型や可変静翼機構等を駆使して広い作動範囲で安定した高性能を達成している。また、タービン翼は大型化によってより高度な空冷構造を採用する事が可能となり、高いタービン入口温度を採用して熱効率の向上を図っている。

関連する国内の各メーカーは上記のような新しい中型機種の自社開発や欧米の先進メーカーとの提携による中型ガスタービンの輸入によって、より大型化したガスタービンコージェネレーションシステム市場の新たな開発を目指していった。図 6.50 に、この時期に国内で開発された高効率な中型機種の代表例として川崎重工業が 2004 年に市場に投入した発電出力が 20MW 級の「L20A 型」ガスタービンの断面構造図を参考に示しておく。



注：軸流圧縮機、多缶型燃焼器、軸流ガスタービンで構成される 20MW 級中型ガスタービンの構造例

図 6.50 中型ガスタービンの断面図例 [資料提供：川崎重工業]

参考文献

- (1) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 54-55, P. 133 (2002)
- (2) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 66-67, P. 141 (2002)
- (3) 細川：「カワサキガスタービン M1A-13 シリーズの開発・技術仕様、運転実績等の紹介」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 34, No. 1, PP. 31-36 (2006)
- (4) 星野：「“内燃機関の技術変遷と将来展望” 汎用中小型ガスタービン」, 第一回日連主催講演会資料, P. 21 (2009)
- (5) 「日本のガスタービンの歩み」, 日本ガスタービン学会, PP. 70-71, P. 131 (2002)
- (6) 樋口：「発電用小型ガスタービン」, エンジンテクノロジー, Vol. 4, No. 1, PP. 25-29 (2002)
- (7) 柴田他：「超低公害型再生サイクルマイクロガスタービン RGT3R の開発」, 石川島播磨技報, Vol. 43, No. 6, PP. 206-210 (2003)
- (8) 蔦他：「対話型ガスタービン翼設計システム “KAIT” の開発」, 川崎重工技報, No. 97, PP. 1-9 (1997)
- (9) 青木他：「ガスタービン統合設計システム TDSYS の高度化」, 三菱重工技報, Vol. 34, No. 4, PP. 234-237 (1997)
- (10) 杉本：「“内燃機関の技術変遷と将来展望” 汎用中小型ガスタービンの要素技術」, 第一回日連主催講演会資料, P. 24 (2009)
- (11) 須賀他：「高性能ガスタービン要素の開発 -CFD 技術を活用した高性能化-」, 川崎重工技報, No. 161, PP. 36-39 (2006)
- (12) 木村：「発電用ガスタービン燃焼技術」, 日本ガスタービン学会ガスタービンセミナー第 33 回資料集, PP. 49-58 (2005)
- (13) 緒方他：「ガスタービン用低 NOx 燃焼器の開発」, 川崎重工技報, No. 161, PP. 44-47 (2006)
- (14) 「ニューサンシャイン計画 『セラミックガスタービン技術開発』 最終評価報告書」, 産業技術審議会評価部会セラミックガスタービン技術開発評価委員会 (1999)
- (15) 「ACT90 のあゆみ」, アドバンス・コージェネレーションシステム技術研究組合 (1998)
- (16) 中山他：「スーパーマリンガスタービンの海上試験結果」, 日本ガスタービン学会第 36 回定期講演会 (2008)
- (17) 高橋他：「遠隔監視システムの変遷並びに予知診断機能について」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 35, No. 6, PP. 15-20 (2007)
- (18) 「新エネルギーの展望 マイクロガスタービン」, (財) エネルギー総合工学研究所 (2001)

7 今後の展望

7.1 現状認識

国内の汎用中小型ガスタービンは1970年代の後半頃より、消防法の改正を機に防災用電源設備の駆動源として需要を伸ばしてきた。更にその後10数年経過して1990年代に入ると都市型の小規模なコージェネレーションシステム等の新しい用途を見つけて市場を広げてきた。

図7.1は汎用中小型ガスタービンのこの十年間(1999～2008年)における国内における生産状況を示したもので、日本ガスタービン学会が定期的に作成している集計データを基にしたものである。図は出力22MW以下の汎用中小型ガスタービンについて、各年毎の生産台数と合計出力(容量)の推移を図示している。また、同図には汎用中小型ガスタービンの用途の多くを占める非常用発電設備の出荷台数/合計出力も併記しており、それらの推移を同時に見る事が出来る。

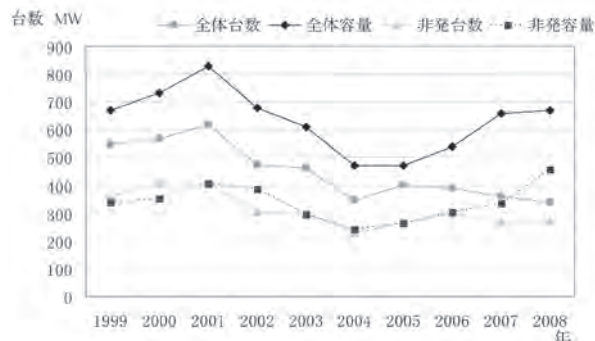


図7.1 1999～2008年における汎用中小型ガスタービンの国内における生産状況⁽¹⁾

汎用中小型ガスタービンの多くは非常用発電設備や小型コージェネレーションシステム用等の駆動源として使用されており、この十年間の需要は世の中の動きに影響を受け易い設備産業の例に洩れず、景気動向にほぼ連動した形で推移している。この間、国内で生産した中小型ガスタービンの出力(容量)合計は波打ちながらも横這い傾向に見受けられるが、台数はやや下降傾向を示しているのが目に付く。これは前節の6.6項で採り上げた「大型化の傾向」を示すもので、1999年当時約1,200kWであった平均単機出力(合計出力/合計台数)が2008年には約2,000kWと約1.6倍迄大型化している。

汎用中小型ガスタービンの用途の多くは現在も非常用発電装置が中心で、2008年の統計では生産台数の約8割がこの用途で使用されている。10年前に比べると非常用の台数も約25%減少しているが、出力で比較すると出荷量は約35%増となっており、ここでも「大型化の傾向」がはっきりと出てきている。

7.2 汎用中小型ガスタービンの将来動向

ガスタービンの将来展望については此れまでに日本ガスタービン学会誌上等で、様々な分野毎に色々な角度から論じられている。此处ではこれらを参考にしながら、本文のメインテーマである汎用中小型ガスタービンについて、出来るだけ事柄を単純化してその将来動向を考えてみる。

7.2.1 熱効率の改善

ディーゼルやガスエンジン等の競合する他の熱機関と比較する時、小型になるほど軸端熱効率が極端に低くなる事がガスタービンの大きな欠点として指摘される。自動車用やマイクロガスタービン等では熱交換器等と組み合わせて軸端熱効率の改善を図っているが、ガスタービンの大きな特徴である単純簡潔な構造が損なわれる等の欠点が大きく、広く実用化に至った例は未だ見当たらない。

コージェネレーションシステム等による廃熱の回収は総合熱効率の改善には有効な手段で、小型ガスタービンについても省エネルギー/低公害な都市型の分散型エネルギーシステムの動力源として需要を伸ばしてきた。併しながら、近年の急激な燃料コストの高騰の影響を受けて熱需要の大きな用途に適したガスタービンでは採算が合わないケースが増えてきた。その為、特に規模の小さなガスタービンコージェネレーションシステムの普及に少しずつブレーキが掛かり、コンバインドシステム等を採用して発電効率を高める事が出来る中規模クラスへと徐々に需要が大型化して来ている。

ガスタービンの熱効率を高める最も有効な方法はタービン入口温度の高温化であり、冷却が困難な小型ガスタービンにとってセラミックガスタービンは最も理想的な解決策と思える。セラミックスの利用についてはこれまで幾度も試みられたが、何れも実用化迄は到達しないまま終わっている。その中で、先般行わ

れた「300kW 級セラミックガスタービンの開発」プロジェクトでは軸端熱効率 42%と云う世界最高レベルの高効率を達成し耐久性についても一定の確認が得られている。勿論、実用化迄にはコストや信頼性等の解決すべき課題が未だ多く残されているが、道筋が見えてきた段階で其の低中断された事は如何にも勿体なく、近い将来の早い段階で実用化に向けた動きが出てくる事が期待される。

7.2.2 非常用発電設備について

7.1 項でも述べたように、現在でも台数で言えば汎用中小型ガスタービンの約 7～8 割が非常用途の発電設備用として使用されている。軽量小型で大出力が得られ、冷却水が不要で据付が簡単等のガスタービンの特徴が非常用途において特に高く評価された結果と云える。

近年、情報関連の事業が活発で大型の電算設備やデータセンターが各地に設置され、それらのバックアップ用電源として大容量のガスタービン発電設備が多く採用されている。IT 関連の設備等、電気を必要とする重要な設備は世の中の発展と共に今後益々増える事が予想され、これに伴ってガスタービン非常用発

電装置の果たす役割も大きくなっていくと思われる。

非常用のガスタービン発電装置も前述のように大型化する傾向にあり、その反動として小型部門では徐々に競争力を失ってきているように見える。非常用については常用用途における熱効率の改善の様な際立った課題が見当たらず、特に小型機種については改良や進化を促す開発研究が疎かに成り勝ちである。併しながら、非常用は汎用の中小型ガスタービンにとって最も重要な用途の一つであり、現状の市場を維持し更に拡大していく為にコスト／機能等の各方面でガスタービンの特長に一層の磨きをかける努力が必要と考える。例えば、特に小型機種ではマイクロガスタービン等で試みられた高速発電機を採用して減速機を無くし、ガスタービンの最大の特長である単純簡潔さを徹底的に追及する等の一段のブラッシュアップが求められている。

参考文献

- (1) ガスタービン学会統計作成委員会：「2008 年ガスタービン及び過給機生産統計」，日本ガスタービン学会誌，Vol. 37, No. 4, PP. 250-260 (2009) 他

8 | おわりに

本調査は 1970 年代の後半以降、急激に需要を拡大した非常用ガスタービンにルーツを持ち、更にコージェネレーション用等の一般用途に於いても一定の評価を獲得するようになった比較的小容量の「汎用中小型ガスタービン」を対象として実施した。

国内では 1970 年代以降、多数の汎用中小型ガスタービンが開発され市場に投入されており、本文ではこれらの国産ガスタービンを中心に、その主要な機種について関連技術や市場の動向を交えながら紹介している。なお、同じ市場には有力な海外先進メーカーから導入された実績あるガスタービンも数多く参入して活躍しているが、本調査研究の主旨からこれらについては殆ど触れておらず、あくまで主体は国産ガスタービンとして調査した。

此处で取り上げた小容量の汎用ガスタービンは一般に遠心圧縮機を装備した軽構造型と呼ばれる形式を採用している。併しながら、時代の流れと共に徐々に大容量化が進み、特にコージェネレーション用途等に於いては性能面から軸流圧縮機の採用が必然的になるにつれて大型陸船用ガスタービンの系統に属する重構造型と構造的／技術的に重なる部分が多くなってくる。一方、「産業用大型ガスタービン」については昨年度（2008 年度）に詳細な調査研究が行われており、従って此れと重なるものについては容量的に中小型の範疇に入る場合も一部の紹介に留め詳細な説明は省いている。

国内における「汎用中小型ガスタービン」の歴史は未だ浅いが、新機種開発や新用途開拓に関わる研究開発は多方面で活発に行われており、その内容は多種多様に亘っている。本調査を行うに際し、各種資料等を通じて情報の収集に努めると共に各関係先にお願

い直接ご指導やご意見を多数頂いたが、諸般の事情から全てを十分カバーしきれていない点はあしからずご了承頂きたい。

<謝辞>

本調査を行うに際し、多数の方々にご協力をいただき感謝に堪えません。お世話になった主な方々の氏名を下記に挙げておりますが、このほか多くの方々にお世話になり深くお礼申し上げます。資料提供、ご助言をいただいた下記の方に（敬称、肩書き略）厚く御礼を申し上げる。

(株)トヨタタービンアンドシステム

斎藤正俊氏

新井啓介氏

川崎重工業株式会社

井上俊彦氏

小島恒夫氏

神鋼テクノ株式会社

石田悦郎氏

石上久之氏

ダイハツディーゼル株式会社

早田陽一氏

徳永啓純氏

永田技術コンサルタント事務所

永田有世氏

新潟原動機株式会社

富田真澄氏

日本ガスタービン学会

伊藤高根氏

三井造船株式会社

岡 芳彦氏

楠 房雄氏

三菱重工業株式会社

八幡清正氏

ヤンマー株式会社

大橋義仁氏

大橋一生氏

元ヤンマー株式会社

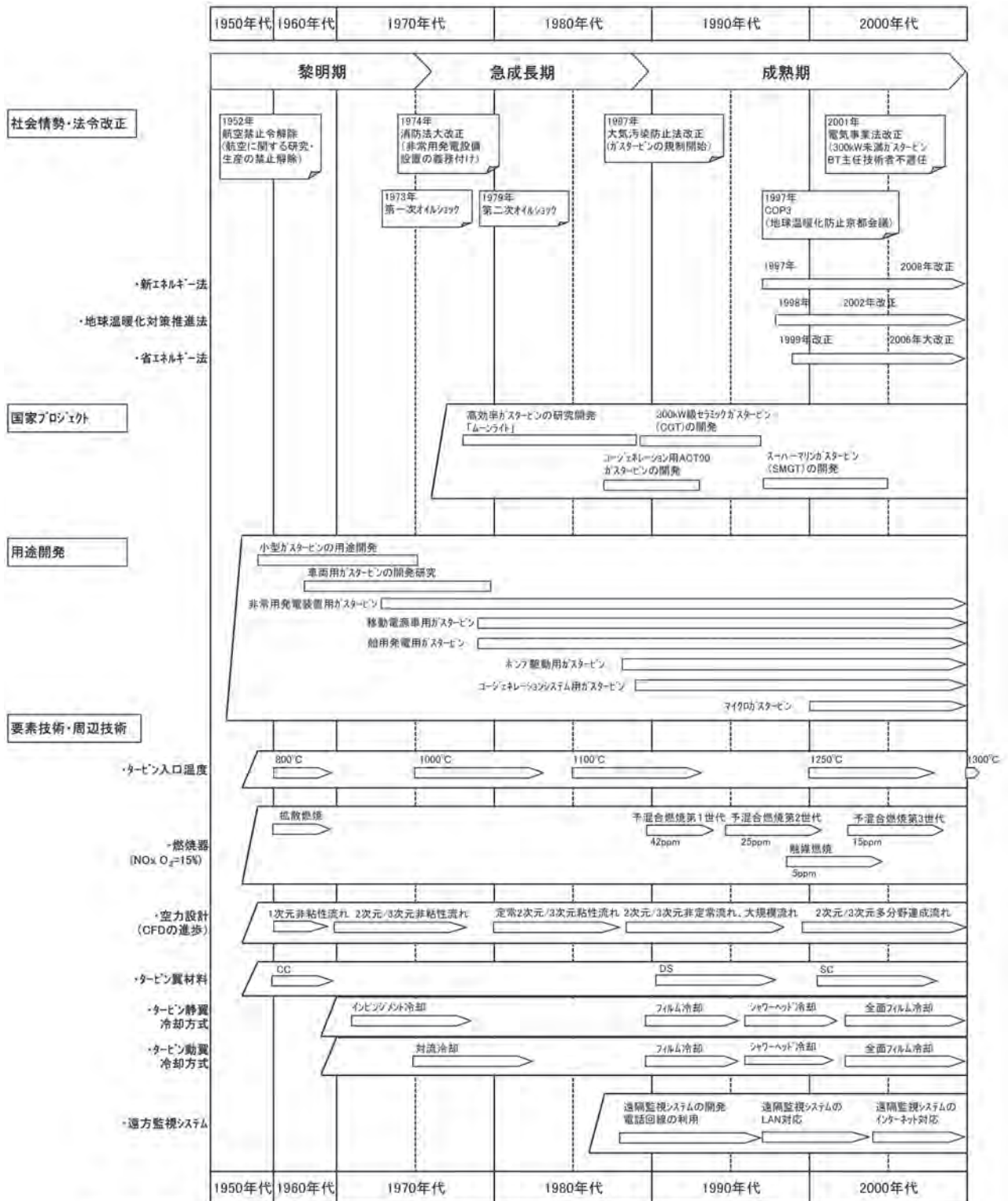
中島史雄氏

西原昭義氏

登録候補一覧

番号	名称	資料 形態	所在地	製作者	製作年	選定理由
1	S1A-01 型ガスタービン (初号機)	実機	川崎重工業 明石工場	川崎重工業	1975	1970 年代半ば以降、急速に普及が進んだ国産非常用ガスタービンの先駆的役割を果たした 150kW 級一軸式ガスタービン。
2	NGT1-S 型ガスタービン	実機	新潟原動機 新潟ガスタービン工場	新潟原動機	1983	新潟原動機が独自に設計開発した出力 360kW の単純開放一軸式ガスタービン。非常用を始め後の機械駆動用、コージェネレーション用等の各種自社開発エンジンシリーズのベースとなった。
3	AT900 型ガスタービン	複製	ヤンマー 尼崎工場	ヤンマー	1984	圧縮機に単段遠心式を採用した単純な構造の 700kW 級非常用ガスタービン。特に、本圧縮機は圧力比 8.2、断熱効率 78.2%と当時としては世界最高レベルの性能を達成している。
4	セラミックガスタービン CGT302 型	試作	川崎重工業 明石工場	川崎重工業 京セラ 住友精密工業	1999	ニューサンシャイン計画で三社共同により開発された 300kW 級コージェネレーション用セラミックガスタービン。軸端熱効率 42.1%の世界最高水準性能を達成し、実現の可能性を示唆した。
5	マイクロガスタービン TG051 型	実機	トヨタタービン アンドシステム 元町工場	トヨタタービン アンドシステム	1999	ハイブリッド自動車用として試作された超小型ガスタービンをベースにした 50kW 級の一軸再生式ガスタービン。高速発電機と組合せてシンプルな構造のマイクロガスタービンコージェネレーションシステムを実現した。
6	コージェネレーションシステム SB5-COPRA 型	実機	京葉ユーティリティ (千葉県船橋市)	三井造船	1999	蒸気注入式のガスタービンを搭載し、需要に合わせて熱電比を最適化し採算性を向上した 1MW 級コージェネレーションシステム。蒸気注入ガスタービンとしては世界で初めて希薄予混合燃焼器を装備。

汎用中小型ガスタービン技術の系統図



注) ニッケル基合金精密鍛造品の種類

①普通鍛造 (CC: Conventional Casting), ②一方向凝固 (DS: Directional Solidification), ③単結晶 (SC: Single Crystal)

主要汎用中小型ガスタービンの機種展開

黎明期

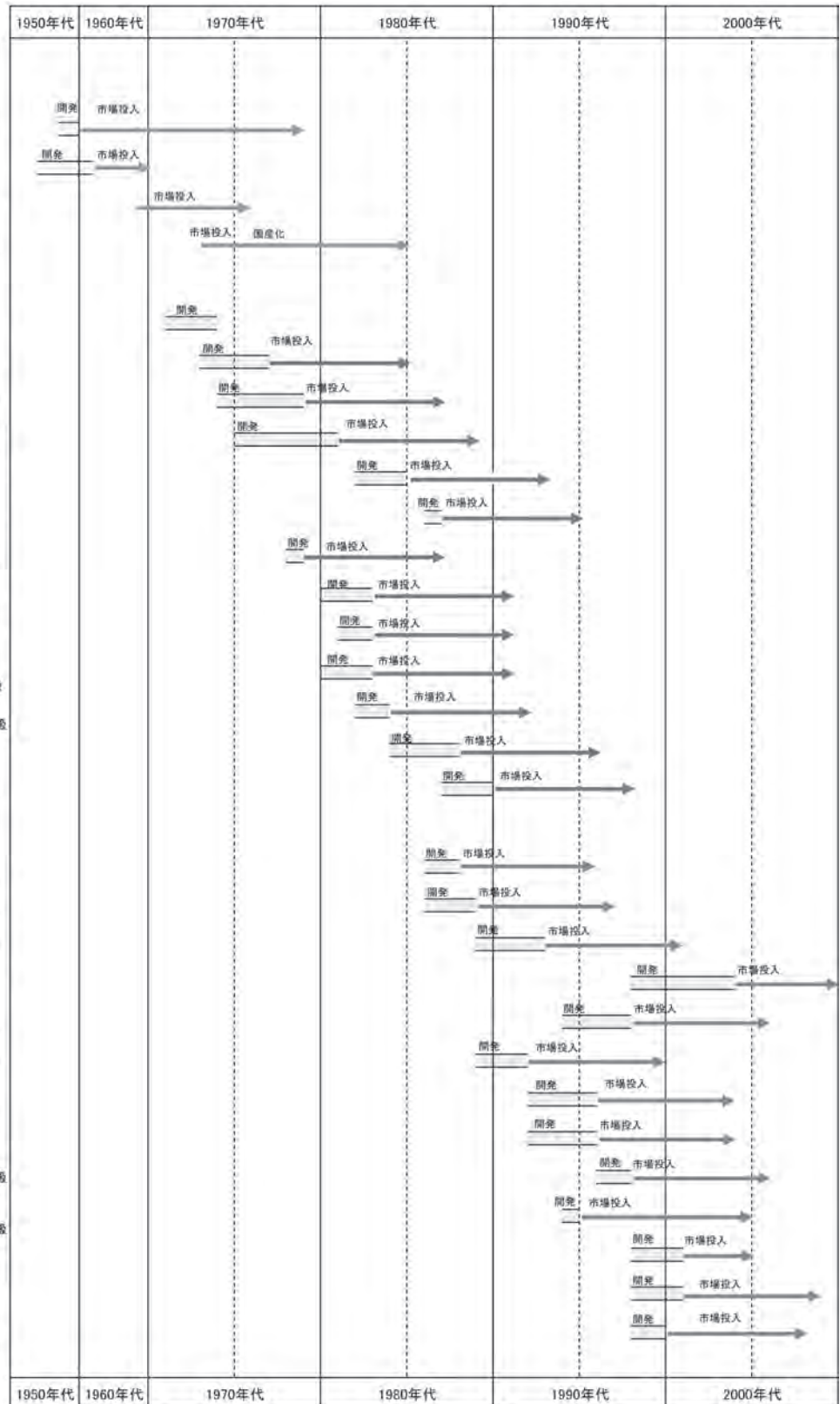
三菱重工業	GCM1B	134kW
IHI	IGT60	60PS
	IM1500 (GE社)	10MW級
神戸製鋼	KG2-3C (KONGSBERG社)	1200kW級

急成長期

川崎重工業	KG-72	300kW級
	S1A	150kW級
	M1A	1000kW級
ダイハツディーゼル	G-33	500kW級
	TS-01	500kW級
	TS-02	320kW級
神戸製鋼	KG2-Z	1600kW級
	GT1	800kW級
	GT2	600kW級
ヤンマー	AT600/1200	450/880kW級
	AT900/1800	700/1400kW級
新潟原動機	NGT1	300kW級
	NGT2	1000kW級

成熟期

三井造船	SB5 ※	1000kW級
川崎重工業	M1A-13 ※	1500kW級
	M7A ※	7000kW級
	L20A ※	20MW級
IHI	IM270 ※	2000kW級
新潟原動機	NGT3A	2000kW級
	NX21B ※	1600kW級
	NGT2BC ※	1500kW級
	RGT	300~800kW級
三菱重工業	MTG-400/800T	400/800kW級
	MTM500V (壁型)	315kW
トヨタ・エンジンシステム (マイクロガスタービン)	TG051 ※	50kW級
	TG312 ※	300kW級



(備考) ※:コージェネレーションシステム用ガスタービン

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第15集

平成22(2010)年3月30日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト・エディット 永田宇征、エディット 大倉敏彦・久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク