
ガスタービン特集

ガスタービンの動向	51
ガスタービンの応用	56
ガスタービンの運転と制御	62
パッケージ形ガスタービン発電機	70
ガスタービン用耐熱金属材料	74
ガスタービンとその環境	78

ガスタービンの動向

State of the Art of Gas Turbines

是 井 良 朗* 久 保 田 道 雄*
Yoshiro Korei Mitio Kubota

要 旨

最近、全世界におけるガスタービンの伸びは、設置台数で見ても数年前年比20~30%とめざましいものがある。これはガスタービンのたえまない技術的進歩にささえられ、より高性能で経済的なユニットが標準化され、かつ量産され、また一方では各種の適用面でガスタービンの利点が広く認識されてきたためと考えられる。本論文では主として日立-GEガスタービンにつき、その最近の実績と技術的進歩のうち最大の特長と考えられるタービン入口温度の上昇による高出力、高効率化、単機容量50 MW級パッケージガスタービンの開発状況、公害対策として騒音と煙の色の低減対策、電子式制御装置の開発による性能および信頼性の向上などにつき述べた。さらにわが国では設置例は少ないが、イギリスその他で広範に採用されているジェットエンジン利用ガスタービンの運転実績の調査結果を紹介した。

1. 緒 言

日立製作所では世界最大のガスタービンメーカーであるアメリカGE社との協同製作により陸用ヘビーデューティ形ガスタービンの製作を行っており、現在すでに28台受注し国内はもとより広く海外に設置されている。これらのガスタービンは標準化されかつ量産化されているため日立製作所とGE社の間では国際分業の形をとり、ロータなどはGE社で製作し、これを日立製作所に持ち込み、ユニットとして日立製作所がとりまとめている。また一方日立製作所でケーシングなどを量産しGE社に輸出し、GE社でロータとともにユニットとしての取まとめも行なわれている。このため日立製作所とGE社の製作するガスタービンは全く同等の性能、信頼性を有し、GE社がユニットとして受注したものをさらに日立製作所がその製作をうけもつなど国際分業の利点を十分に生かしている。日立-GEガスタービンはアメリカをはじめとする全世界の大きな需要にささえられ、絶えまない研究開発によって文字どおり日進月歩の発展をとげている。以下その一端を紹介する。

2. ガスタービンの最近の実績

ガスタービン自体は古い歴史を有する原動機であるが広く実用化されるに至った歴史は比較的新しい。第2次大戦後の航空用ジェットエンジン開発によって得られた高性能の圧縮機やタービンの設計技術や超耐熱鋼の製造技術と、長い伝統と実績を有する陸用蒸気タービンの製造技術が結実し、陸用の発電用および産業用のポンプ、ブローワなどの駆動に適した陸用ガスタービンの開発が着実に進められ、1950年ごろより実用化されてきた。航空用の軽量なジェットエンジン形ガスタービンと区別してこの種のものをヘビーデューティ形ガスタービンと呼んでいる。GE社はヘビーデューティ形ガスタービンの製造業者としては航空用ジェットエンジン部門を同一社内を持つ世界で唯一(ゆいいつ)の会社で戦後の陸用ガスタービンの開発実用化に指導的役割を果たしてきたといっても過言ではない。GE社のヘビーデューティ形ガスタービンは航空用ジェットエンジンの具備する諸特性に陸用蒸気タービンの耐久性を兼ね備えたもので、1968年2月末現在100,000時間以上の運転実績をもつユニット数が38台を越えており、その高い信頼性とすぐれた性能はきわめて高く評価されている。

図1は最近のGE社の受注実績である。これは世界のヘビーデューティ形ガスタービンの約50%を占めるものであり、1966年以降

* 日立製作所機電事業本部

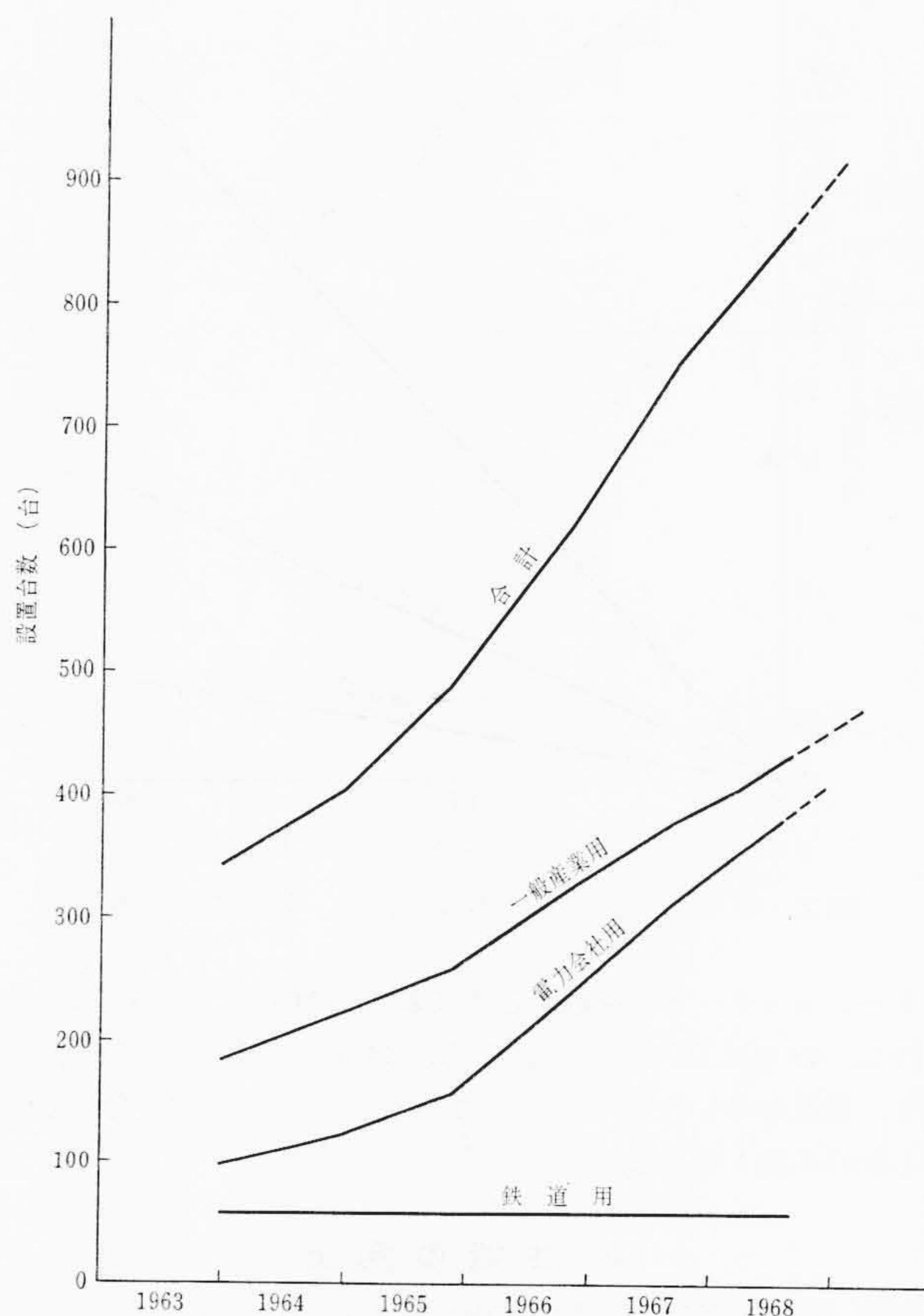


図1 GE形ガスタービンの実績

は年間110~130台受注している。電力会社用としては1965年末のニューヨーク地方の大停電、1966年夏の猛暑などで需要が急増したが、さらに最近のアメリカにおける原子力発電の大形発電設備の長納期化などの事情によりガスタービンの需要は著しく伸びており、実績の増加とともに世界各地における増設計画が具体化し、国際的に高水準の需要が維持されることが予想される。

現在GE社ではピーク出力17,000 kW (NEMA条件)のパッケージガスタービンが標準化され量産されている。電力会社では大きなピークロード用としてこの機種を数台並べておき、運転制御は1箇所から集中して行なえるようにしたパワーブロック式が広く採用され、1967年の受注実績では75%を占めている。

日立製作所では昭和41年日本石油化学株式会社に6,000 kWパ

表1 日立—GE ガスタービン発電設備納入先一覧表 (1969年1月)

納入先		納入年	ガスタービン					備考
			基数	モデル	出力(kW)	燃料	形式	
日本石油化学株式会社	川崎	1966	1	PG3802	6,000	プロセスガス	SC-2S	20T/H 排熱ボイラ付
GE/アメリカンインデペンデント	クエート	1967	1	G5191(P)	16,250	天然ガス	SC-1S	
GE/オイル会社								
GE/エッソ肥料会社	西バキスタン	1967	2	PG5191	13,750	天然ガス	SC-1S	
GE/コモンウェルスエヂソン	アメリカ	1968	4	PB4—5191(P)	65,000	天然ガス/軽油	SC-1S	二重燃料
昭和電工株式会社	鶴崎	1968	1	PG5211	17,000	A重油	SC-1S	50T/H 排熱ボイラ付
GE/サウジアラビア肥料会社	サウジアラビア	1968	2	PG5191	13,750	天然ガス	SC-1S	
ヤンヒー電力会社	タイ	1968	2	PG5211	16,050	軽油	SC-1S	
GE/コモンウェルスエヂソン	アメリカ	1969	3	PG5211(P)	17,000	天然ガス/軽油	SC-1S	二重燃料
GE/電力会社								
北海道電力株式会社	滝川	1969	1	PG5211(P)	20,000	灯油	SC-1S	
アラビア石油株式会社	クエート	1969	1	G5211	15,000	天然ガス	SC-1S	
GE/アメリカ電力会社仕込	アメリカ	1969	4	PG5211(P)	17,000	天然ガス/軽油	SC-1S	二重燃料
GE/アメリカ電力会社仕込	アメリカ	1969	4	PB(4)—5211(P)	69,300	天然ガス/軽油	SC-1S	二重燃料
ヤンヒー電力会社	タイ	1969	2	PG5211	16,050	軽油	SC-1S	

(注)

(1) モデル
PG: パッケージ形発電用
G: 屋内形発電用
PB: パワーブロック
PB4-5211 はPG-5211形
4台よりなるパワーブロッ
クを示します。
(P): ピーク定格

(2) 出力は銘板出力を示します。
(3) 形式
SC: 単純開放サイクル
1S: 一軸
2S: 二軸

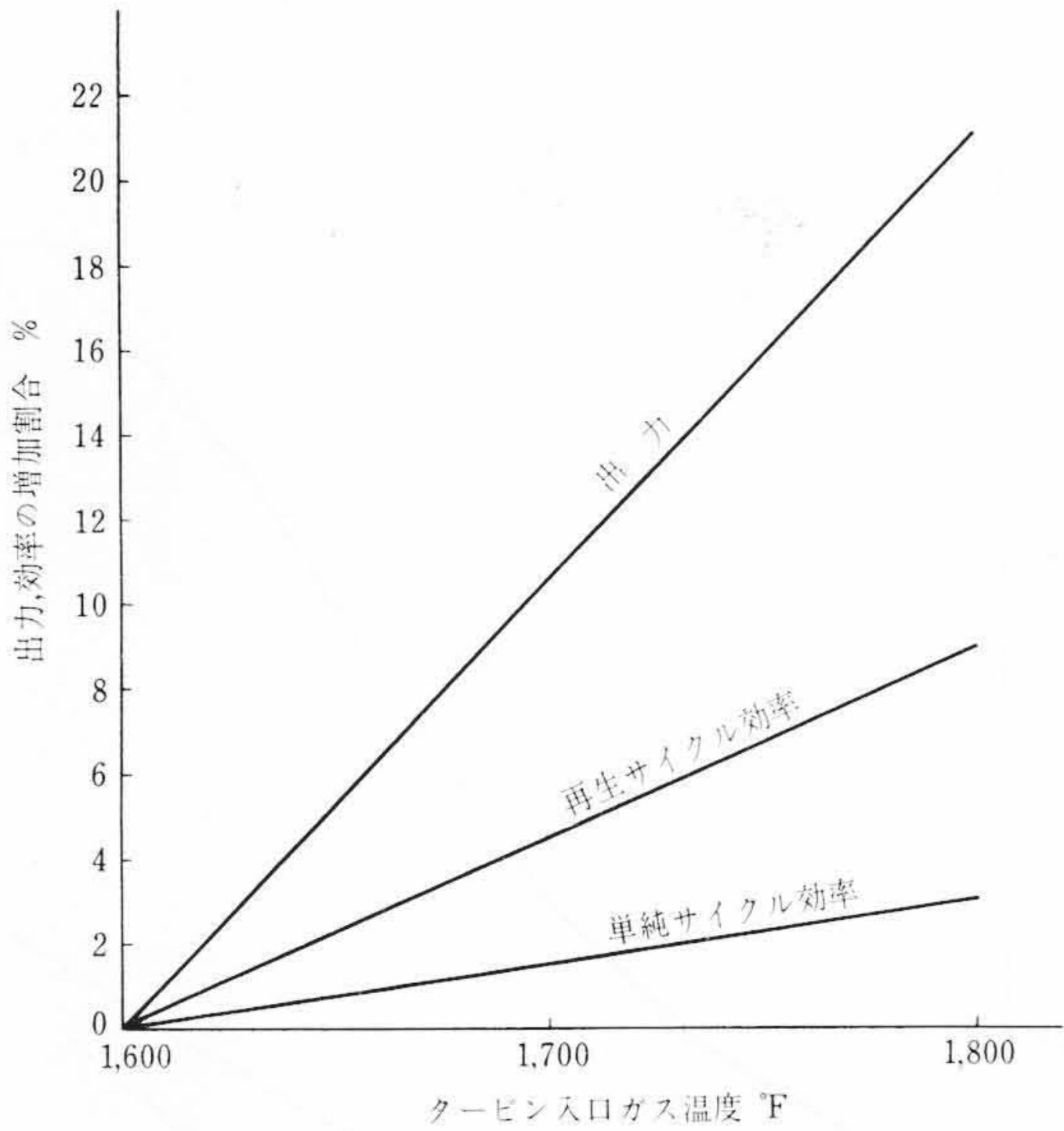


図2 タービン入口ガス温度と出力、効率の増加割合

パッケージガスタービンを納入して以来昭和44年1月現在で28台を受注し、43年に10台発送し、さらに44年には10台発送の予定であり、運転中のもの11台となっている。日立製作所の受注実績を示したのが表1である。

3. 性能の向上

ガスタービンの性能向上の歴史を顧みると圧縮機、タービンなど各構成機器の流体力学的効率を改良するとともに信頼性をそこなわずにガスタービン入口ガス温度を高めて熱効率の向上を図ることに最も多くの努力が注がれてきたといっても過言ではない。図2は17,000kWクラスの開放サイクルガスタービンでタービン入口温度を上昇された場合に出力および効率の増加割合を示した一例である。このようにタービン入口ガス温度を高くすることにより単位空気量当たりの出力、すなわち比出力が増加し機械がコンパクトに設計できるとともに外気温度の変化による性能の変化幅も少なくなる利点があり、ガスタービンとしては最も望ましいものとなる。

日立—GEガスタービンの主力製品であるモデル5000形ガスタービンのベースロードの定格出力が技術の進歩とともにどのように増加したかを、年代を追って示したのが図3である。この出力はNEMA条件(外気温度80°F、設置高度1,000 Feet)で燃料として、軽、灯油を使用した場合であり、ピークロード定格ではさらに約

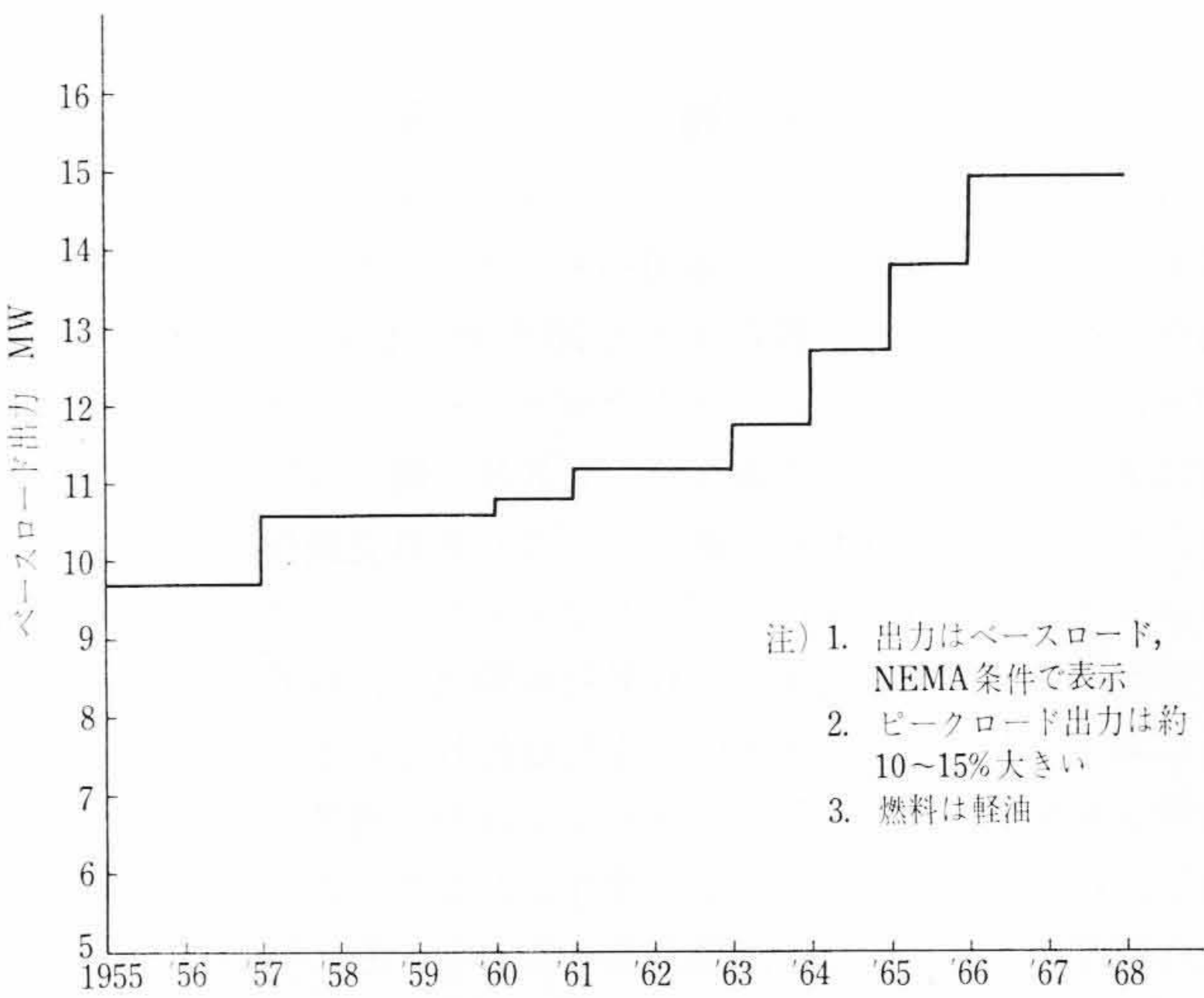


図3 5000形ガスタービンの出力増加の実績

注) 1. 出力はベースロード、NEMA条件で表示
2. ピークロード出力は約10~15%大きい
3. 燃料は軽油

10~15%出力が増加する。

このように年代を追っての出力増加はタービン入口ガス温度の上昇によるものである。さらに1963年度には回転数を約5%高くして、風量増加による出力増強が図られている。この間のガス温度の上昇幅は常に技術進歩により許容された範囲内で行なわれ部品の寿命の短縮や保守費の増加のないことを条件に出力増強が実現されてきた。このようなタービン入口ガス温度の上昇は高級耐熱鋼の開発、高温部の冷却方式の改良、合理的な燃焼系統の採用、確実な温度制御装置の採用などにより可能となったものである。

たとえば昭和41年度に完成した日本石油化学株式会社向け6,000kWガスタービンではタービン入口ガス温度はベースロード定格で、800°Cであり、当時としては最高の材料が使用されており第1段ノズルはGE社で開発された耐熱、耐食性にすぐれ、クリープ強度および熱疲労抵抗の高いX-45(CoベースでCr, Ni, Wの添加された耐熱合金)、第1段動翼はU-500(NiベースでMo, Ti, Alの添加された耐熱合金)であった。また最も高温である第1段ノズルの冷却方式は図4(a)のようなものであった⁽⁴⁾。しかしながら現在製作中の17,000kWクラスのガスタービンではタービン入口ガス温度はベースロード定格で900°C、ピークロード定格では965°Cと高くなり、その使用材料はいずれもさらに改良され高温における性能がすぐれたもので、第1段ノズルFSX-414、第1段動翼はU-700が用いられている(詳細は本特集の材料関係を参照されたい)。第1

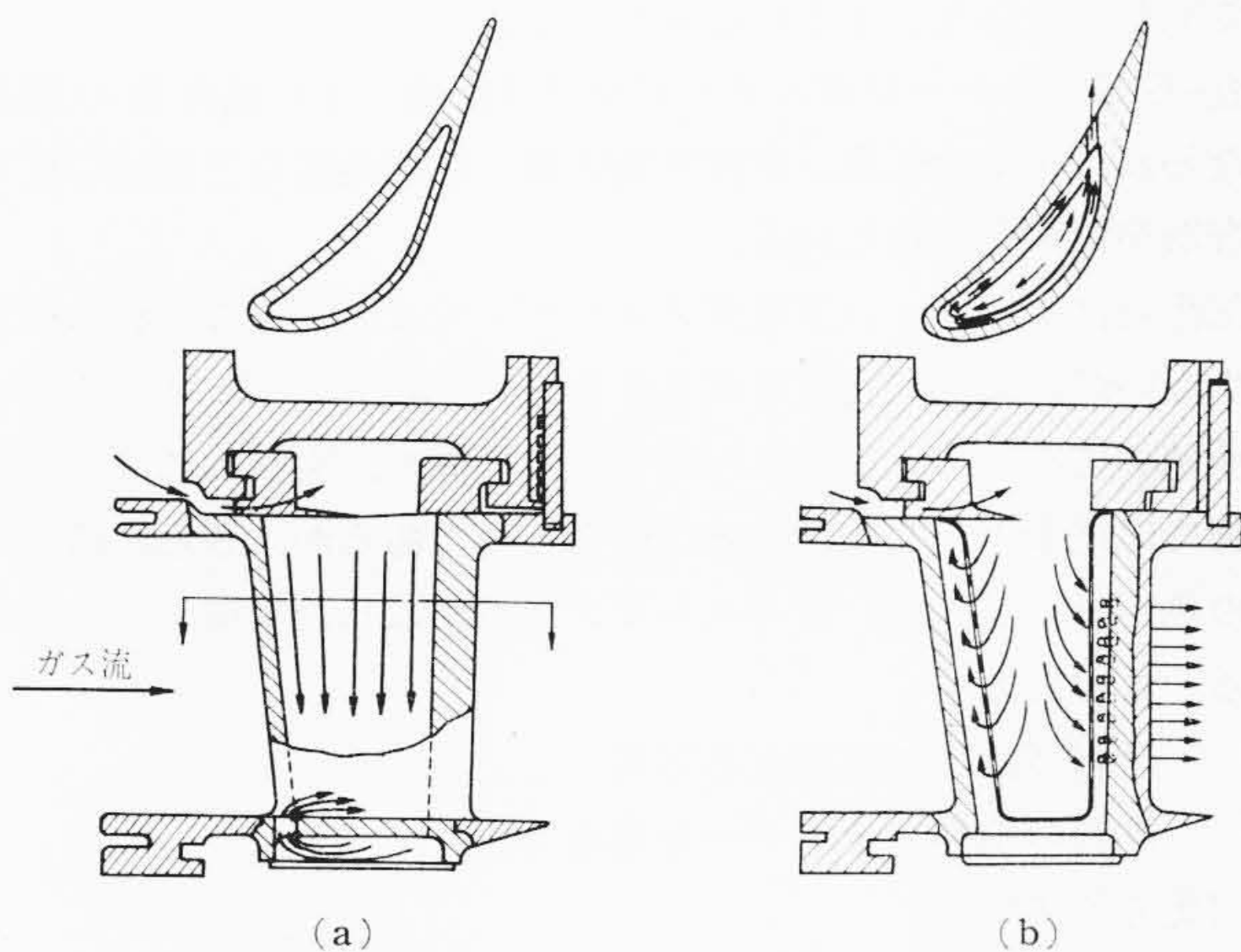


図4 ノズル冷却方式

段ノズルの冷却方式も図4(b)のようにノズル先端まで直接冷空気によるフィルムクーリングを行なって冷却効果を画期的に向上させており、急激な技術進歩の過程が如実に示されている。

燃焼系統の各機器もタービン入口ガス温度を高くできるよう次のような合理的な設計が採用され、日立-GEガスタービンの特長となっている。

(1) 燃料配分器により高い精度で各バーナに燃料を均一に配分している。また第1段ノズルは衝動式で圧力比が大きくしかも精密鑄造によって製作されるため、各燃焼器への空気流量も正確に配分されるため、燃焼器出力のガス温度は他形式ガスタービンに比べて均一となる。

(2) タービンの第一段動翼の部分の入口ガス温度の分布を遠心力の大きい動翼根部で低くなるように特別の考慮を払って設計してあるため動翼にはじゅうぶん余裕のある強度が得られる。

4. パッケージ化と大容量化

GE社で1961年パッケージガスタービンを完成して以来、ガスタービンのパッケージ化は世界的な傾向となり、そのすぐれた特長が高く評価され、現在の主流となっている。日立製作所で受注した28台のガスタービン中26台がパッケージ形であり、ほかの2台は屋内形でクェートに設置され、連続運転される産業用のものである。パッケージ形ガスタービンは標準化されており、しかも工場内で組立完成され、試験に合格したものが解体されることなく一体のまま現地に輸送されるので、現地作業がきわめて少なく信頼性も高く経済的である。図5は据付中のパッケージガスタービンを示したものである。

パッケージガスタービンの制御装置を電子式とし、ソリッドステート化したものが開発され現在実機で試運転中である。この装置はSPEEDTRONICと呼ばれており、今後広く実用に供される予定である。このSPEEDTRONICは応答性がきわめて早く、精度が高い、より高度の自動化を行なうに適している、遠方制御が容易で信頼性も高いなど多数の特長をもっている。電力会社用のピークロード用または非常用ガスタービンでは自動起動あるいは遠方操作による起動の信頼性が強く要求されるが、現在広く採用されている日立-GEガスタービンの実績では起動の信頼性は97.5%となっている。起動失敗の原因の多くはリレー類の接点の汚れや、設定値のずれ較正不良などである。将来このSPEEDTRONICの採用により、これらの誤動作の原因が格段に減少し、保守が非常に楽になるとともに自動起動の信頼性がさらに向上する。精度が高く、応答性の速いSPEEDTRONICの温度制御によって起動時や大幅な負荷変動時にも燃焼器、タービンなどの高温部分の熱応力を正確に規定値内に押えるこ

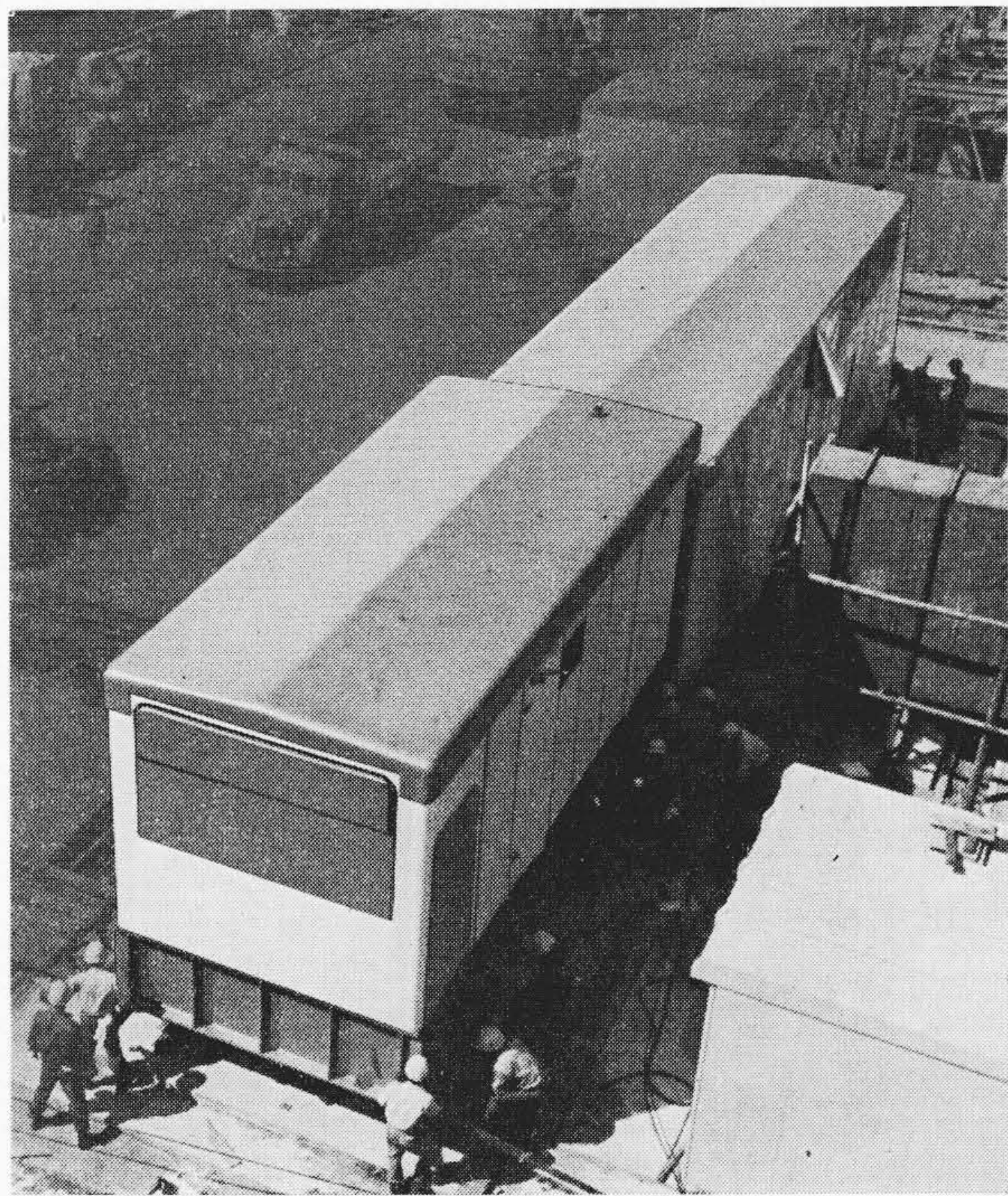


図5 据付中のパッケージガスタービン

とができるため、部品の寿命が延び保守費が低減する。また起動時間を約40%、自動同期の時間を15%それぞれ短縮することができ、ヘビーデューティ形ガスタービンとしては画期的な起動時間約3分程度のユニットも実現可能と期待されている。

このようにパッケージ化したプラントの構成機器の性能および信頼性の向上のための研究開発が着々と進められている。

さらにもう一つの大きな傾向はパッケージガスタービンの大容量化である。大きな電力系統のピークロード用としてガスタービンの経済性が広く認められるに従い、必然的に設備容量の大きいものが要求されてきた。これに対処して数台のパッケージガスタービンを並べ、これを1個所よりあたかも1ユニットのように運転制御する方式が広く採用されるとともに単一ユニットの大容量化のための努力がなされている。

前者はパワーブロックと呼ばれ2台ないし8台のモデル5000形のガスタービンによる構成が標準化されており、その容量は次のとおりである。(軽灯油使用 NEMA 条件時)

2台	P B-5211-2	33,700 kW
4台	P B-5211-4	67,900 kW
6台	P B-5211-6	101,900 kW
8台	P B-5211-8	135,800 kW

パワーブロックは実績の多いパッケージガスタービンで構成されているため、その特長がすべて生かされしかも部分負荷時は運転台数を任意に減らすことができるので、その時点で運転中のユニットは高負荷で使用され、効率が良いなど柔軟性に富む運転ができる利点がある。

単機容量の増大は機械の大形化を招き、急速起動、ブラックスタート、パッケージ化などの特長が生かされにくいため、パッケージガスタービンによるパワーブロックより総合的に見て経済的ではなかった。GE社では単機ユニット30,000 kWのガスタービンを製作しコンバインドサイクルなどに使用していた例もあるが、この機種がパッケージ形でなかったことも理由の一つで、現実の需要はもっぱらパッケージガスタービンに集中し、パワーブロックの設置台数のほうが格段に多い結果となっている。現在GE社ではモデル5000形パッケージガスタービンの有するすべての特長を損ずることな

く、単機出力の増加した機種を開発中で、画期的な 50 MW 級パッケージガスタービンを 1969 年完成予定で現在製作中である。この大容量パッケージガスタービンはモデル 7000 形とよばれ 1970 年アメリカ Long Island Lighting 電力会社に納入され 1 年間の運転実績を確立の上量産に移される予定で、現在 1972 年までに 21 台製作される予定である。本ガスタービンのおもな仕様および特長は次のとおりである。

仕 様	
形 式	単純開放サイクル軸、パッケージ形
出 力	
(ピーク定格)	50,600 kW
(ベース定格)	45,000 kW
(ただし 大気温度 15℃, 1 気圧, 軽灯油燃料)	
圧縮機段数	17 段
回 転 数	3,600 rpm
圧 縮 比	9
タービン段数	3 段
燃 焼 器	多筒形 10 個
パッケージ構成	
コントロールパッケージ	1 個
補機パッケージ	1 個
タービンパッケージ	1 個
発電機パッケージ	1 個
据付時パッケージ寸法	
幅	3.5 m
高さ	4.15 m
全長	33 m
特 長	
完全なパッケージ設計を採用	
急速起動可能(全負荷まで約 10 分)	
冷却水は密閉循環式で外部よりの供給不要	
ブラックスタート可能	
遠方無人運転可能	
電子式制御装置の採用	
各構成機器、材料はすべて実績のあるものをベースとした信頼性の高い設計	
大容量、高効率化	

このモデル 7000 形ガスタービンはモデル 5000 形ガスタービンに比べ風量は約 2.3 倍であるが、出力では 2.75 倍になっている。またタービン段数を 2 段から 3 段としタービン外径の増大を防ぎ、パッケージの輸送制限内に押えている。軸受も 2 個を 3 個としタービンと圧縮機の間にベアリングを追加し、ロータのたわみを少なくし翼先端部の間げきを小さくして、効率の向上を図るとともにロータの軽量化につとめ、起動時間の短縮を図っている。

タービン、圧縮機の構成部品はベース定格で 100,000 時間の寿命を基準として設計されており、高温ガス通路はピーク定格の場合でも 5,000 時間以上の寿命をもっている。これはピーク運転は年間延 500 時間程度と普通考えられているから、部品の取り換えまでに 10 年以上運転できることになる。

5. 公 害 対 策

ガスタービンによる公害としては一般に騒音と大気汚染がとりあげられている。騒音については早くから関心がもたれ主として消音器による対策が行なわれている。パッケージガスタービンでは外側のエンクロージャの内張りに吸音材を張りつけること、吸気口および排気口に設置条件に応じた消音器を設けることでほとんど公害

として問題にならないようになっている。

日立-GE パッケージガスタービンでは性能のよい消音器の開発が行なわれ、工業地区用、準住宅地区用、住宅地区など用途に応じた消音器が標準化されている。

大気汚染はピークロード用ガスタービンでは主として燃料に硫黄分の少ない灯、軽油が使用されること、過剰空気率が 3~4 と大きいので亜硫酸生成による害はきわめて軽微であり、実質的には大気汚染の面では従来から問題とならなかったのであるが、さらに最近では煙の色が全く見えないガスタービンを目標にした対策が行なわれている。このため

- (1) 燃料に添加物を加える方式
- (2) 燃料の噴霧エネルギーを高める方式

が実用化されている。

従来の標準方式の軽油焚ガスタービンの場合は無負荷から 30~40% 負荷程度までは煙の色が全く見えず、それ以上の負荷ではかすかに黒い色が出ているが、その色もうすぐ特に問題にされていなかったものである。

添加物としては ETHYL 社の CI2 などのマグネシウム系のものが有効であることが確認されている。しかしながら多量に添加物を加えることはそれ自体大気汚染の原因を作りガスタービン内の付着物生成によりガスタービンの性能の低下を招く傾向にあるので注意を要する。

燃料の噴霧エネルギーを高めるものとしては高圧空気にする噴霧方式が実用化されている。この方式では従来の標準方式に比べ約 6 倍の噴霧エネルギーをもつように設計されており、軽油では全く煙の色が見えない状態に改善されている。さらに日立製作所で本設備により A 重油を使用したところかすかに白い煙が見えた程度であり、本設備の使用により若干低質の燃料でも公害の面で問題なく運転されることがわかった。

6. ジェットエンジン形ガスタービン

ガスタービンの最近の動向として、ジェットエンジンを利用したガスタービンが非常用またはきわめて短時間のピークロード用に使用されている。この方式は 1960 年以来イギリスにおいて特に多く採用されており、イギリスにおけるジェット形ガスタービンの運転実績が 1968 年の CIMAC に論文で紹介されている⁽²⁾。

イギリスにおいては系統のサイクルが 1 サイクル/25 秒の割で降下した場合ガスタービンが自動起動する方式がとられ、その起動時間は 2 分と言われている。

ジェットエンジンは Bristol Siddeley 社の Olympus エンジンと Rolls Royce 社の Avon エンジンに用いられている。これらのエンジンは元来航空用であるため、発電用としてはいくつかの問題点があり、機器の改良および運用方法の変更が行なわれたことが報告されている。

ジェットエンジンを発電用として用いる場合は全負荷運転時間が長いこと、地上では空気密度が高く、また空気中のゴミが多いことなどにより航空用より点検、修理間隔が短くなっている。たとえば燃焼器は航空用では 4,000 時間で取り換えていたものが発電用では 1,500 時間で取り換えが必要となっている。

ジェットエンジンは航空用として精密部品により構成されているため、その補修は専門工場で行なう必要があるため、連続運転の確保のため予備のジェットエンジン完成品をもつことが必要であるがその保有率は

Olympus エンジン 50 台に対し 8 台の予備 (約 16%)

Avon エンジン 92 台に対し 12 台の予備 (約 13%)

と報告されており 10 ないし 20% の予備機の保有が必要と考えられ

ている。

これらのエンジンは定格出力で運転した場合、専門工場へ返送するまでの間隔は1,000～1,500時間であるが、この間隔を約2倍に延ばすため定格出力を約20%下げた点で常時は運転し、1回の保守間隔中に発生する電力量(kWh)を多くするような運転を行なうことにしている。したがってこのような使用方法ではkW当たりの建設費は実質的には20%高くなりヘビーデューティ形ガスタービンとの経済比較を行なうに当たって考慮されねばならぬ点と考える。

ジェットエンジン形ガスタービンの最近の伸び率もかなり大きい
が、ヘビーデューティ形ガスタービンが現地で行なう解体点検がピー
クロード定格の場合でも 6,000 時間で格段に長いことを考えると、
ジェットエンジン利用ガスタービンは非常用などできわめて短
時間の運転を行なうに適しているものと考えられる。

ジェットエンジン形ガスタービンは小形軽量であるためパッケージ化が行なわれているが、さらにトレーラなどによる可搬式の発電設備も実用化され、その特色を発揮している。

7. 結 言

ガスタービンの最近の動向を日立-GEガスタービンを主にして紹介した。ガスタービンの進歩にはめざましいものがあり、その入口ガス温度も数年のうちに1,000°Cを越えるものと考えられ、ガスタービンの性能と信頼性は絶えまない研究開発によって向上してい

る。パッケージガスタービンの標準化と量産態勢により製作技術も画期的に進み、いっそう経済的なガスタービン設備が広く各方面に採用されるものと期待される。

たとえば電力会社の電力需要は近年ますますピーク負荷が増大し、大容量火力発電設備でも夜間は極端な部分負荷または停止を行なう必要性が出てきているが、ピーク負荷をガスタービンで受持たせることによって既設火力発電設備の利用率の向上とさらに大容量火力発電設備の増設時点を調整して電力系統全体を効果的に活用することによる経済性の向上は無視できないものがあり、将来原子力発電設備がベース負荷の大部分を受け持つような時代になれば、全系統電力の5～10%はガスタービンによりピーク負荷を受け持たせることが経済的となることも考えられる。

一般産業用では排熱回収によるプラント効率の向上、燃焼系統の改善に伴う低質油の使用などによりベース負荷および非常用の兼用として使用される傾向にある。

このようにガスタービンの実用化され始めてから約 20 年に過ぎないが、特色ある原動機としての地位を着実に確立しており、今後の発展が期待される。

参 考 文 献

- (1) 加藤, 岸野, 目黒: 日立評論 48, 1394 (昭 41-12)
- (2) Rizk, Tasker: CIMAC (1968) "Operation and Maintenance of Large Gas Turbine in Great Britain"



登録実用新案 第806079号

新 案 の 紹 介



星野文雄・村田良雄

高 周 波 用 電 子 管

この考案は、格子接地回路に使用する高周波用電子管特にミニアチューア形受信管に関するもので、その要旨は図面に示すようにセラミックウニバーとその中央部を貫通する板状のリードと該板状リードに対し互いに反対位置にあって、前記セラミックウニバーを貫通する1個または複数個のリードとからなるステムを用い、中央部の板状リードを直接または遮へい板を介してグリッドに接続し、板状リードに対して一方のリードの少なくとも1個は陽極接続片を介して陽極に接続し、他方のリードの少なくとも1個は陰極接続片を介して陰極に接続することを特長とするものである。

この考案によれば、リードは板状であるため自己インダクタンスおよび表皮抵抗が著しく小さくなって接地が完全に行なわれ、かつ従来のミニアチュア管では遮へいすることが不可能であった陽極リードと陰極リードとのステム絶縁体内部での静電結合をも遮へいすることができるので、入出力間の静電的結合は十分に防止され周波数の高い場合においても電子管の動作を安定させることができる。

(福田)

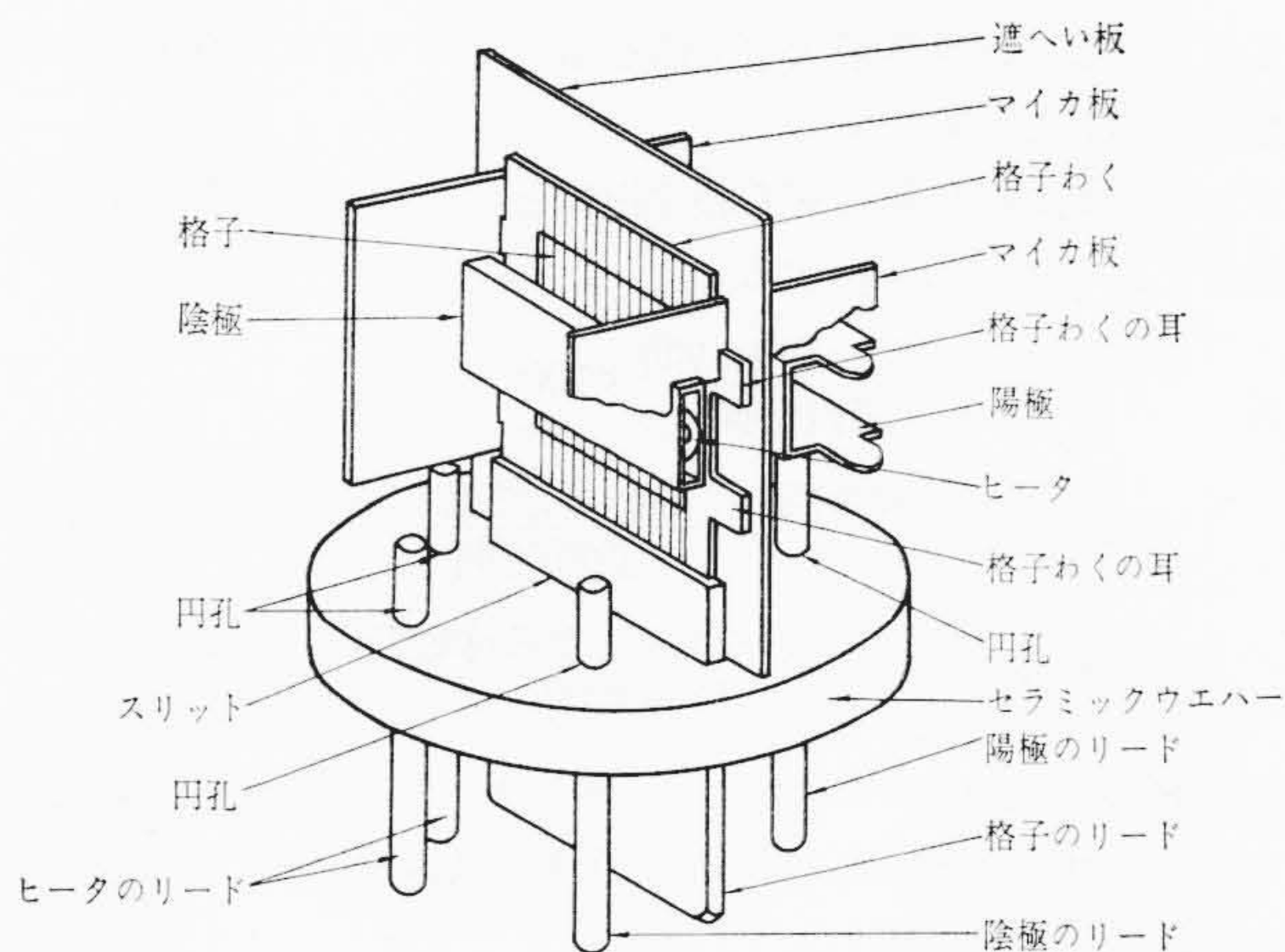


图 1