

気 体 機 特 集

気体機製品の動向.....	83
石油化学工業用圧縮機の要素.....	88
往復動圧縮機における弁抵抗の解析.....	92
異径管を有する圧縮機吐出し管の圧力脈動.....	97
ターボ圧縮機の高速度大容量化.....	103
軸流圧縮機段特性とそのマッチング.....	110
日立 75 mm HMC 冷凍機.....	116
工業用ガス脱湿装置について.....	124

気体機製品の動向

Recent Development of Compressors, Blowers and Refrigerators

伊 藤 茂*
Shigeru Itō

内 容 梗 概

産業規模の拡大に伴い圧縮機、送風機、冷凍機も技術的に大きい発展をとげ、特に高速化と効率向上に成果をあげている。往復圧縮機では大形化に伴い遠心圧縮機との併用、石油化学への進出、無給油圧縮機の用途拡大が目立ち、送風機では大形ファンの効率向上、遠心圧縮機の高速度と世界的水準をゆく効率、軸流圧縮機の一般産業への応用が増加したことがあげられる。冷凍機では空調用の需要が激増し密閉形の範囲も拡大している。また化学工業用の低温装置に新しい方式のものが用いられている。

1. 緒 言

圧縮機、送風機、冷凍機は気体の圧縮、圧送、冷凍、冷房など気体を取り扱うプラントの重要機械としてあらゆる産業に広く用いられているが、最近各種産業の発展と設備増強によりこれらに使用される機械も大形になり、その用途もさらに拡大し、技術も飛躍的に進歩した。特に鉄鋼、電力などの基礎産業の膨大な設備投資、石油化学への進展、建築ブームによる冷房設備などが大きい需要となっている。第1～3図にそれぞれ圧縮機、送風機および冷凍機の過去5年間における全国生産高の推移を示す。

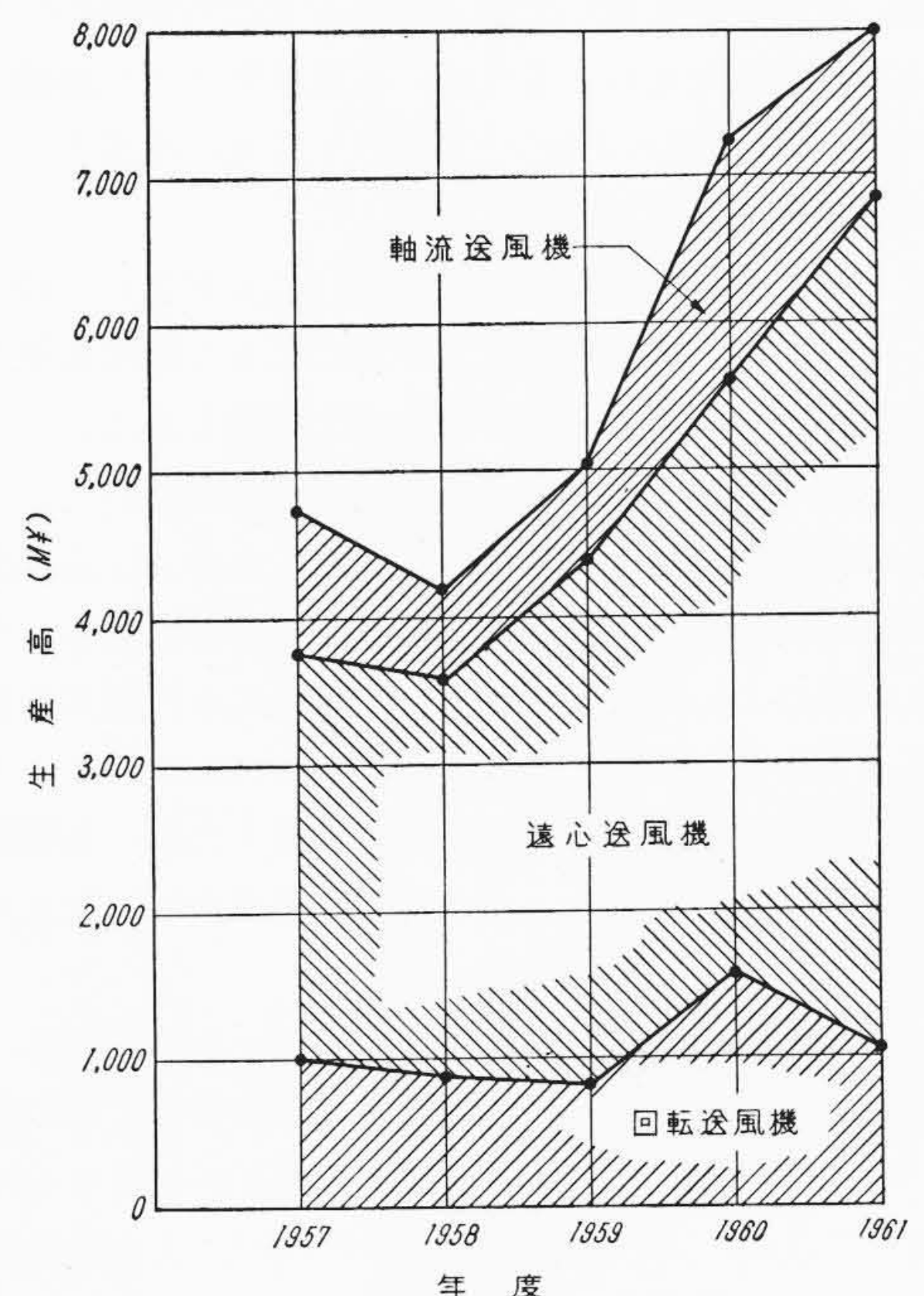
技術的にはバランス形圧縮機の高速度化、オイルフリー圧縮機の使用範囲の拡大、遠心送風機圧縮機の効率向上、軸流圧縮機の一般産業への進出、密閉形ターボおよびHMC冷凍機の使用など画期的な発展をとげたが以下各機種につきその概況を述べる。

2. 往 復 圧 縮 機

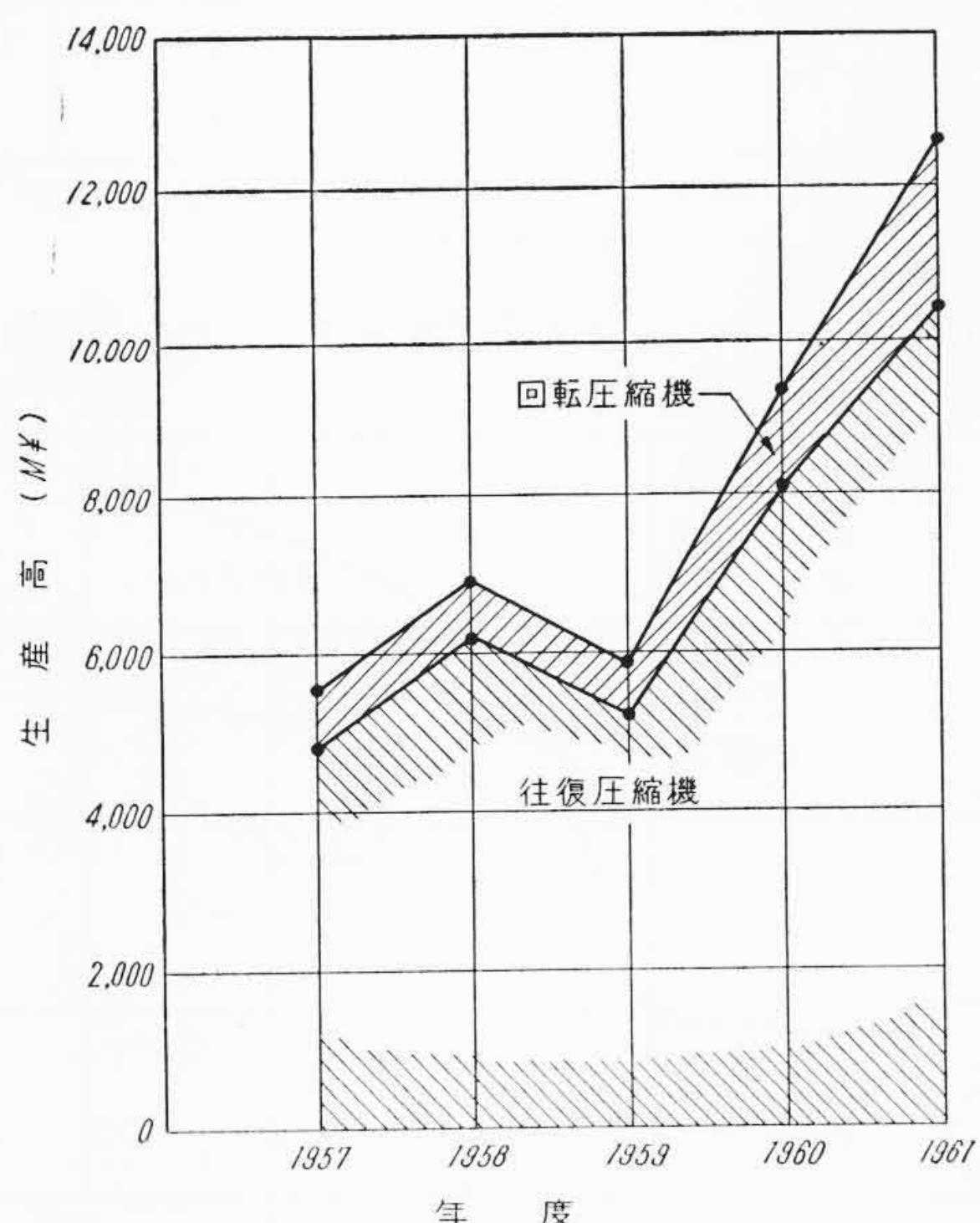
2.1 汎 用 圧 縮 機

汎用圧縮機が高速小形化されてきたことは衆知のとおりであり、特に1基当りの容量が増大し、これらを集中設置して運転の総合効率をあげることが図られている。たとえば総出力 1,350 kW の汎用圧縮機が設置される場合 225 kW×6 台、450 kW×3 台、675 kW×2 台の案があり、据付面積は 25.2 m² : 18 m² : 14 m² すなわち、

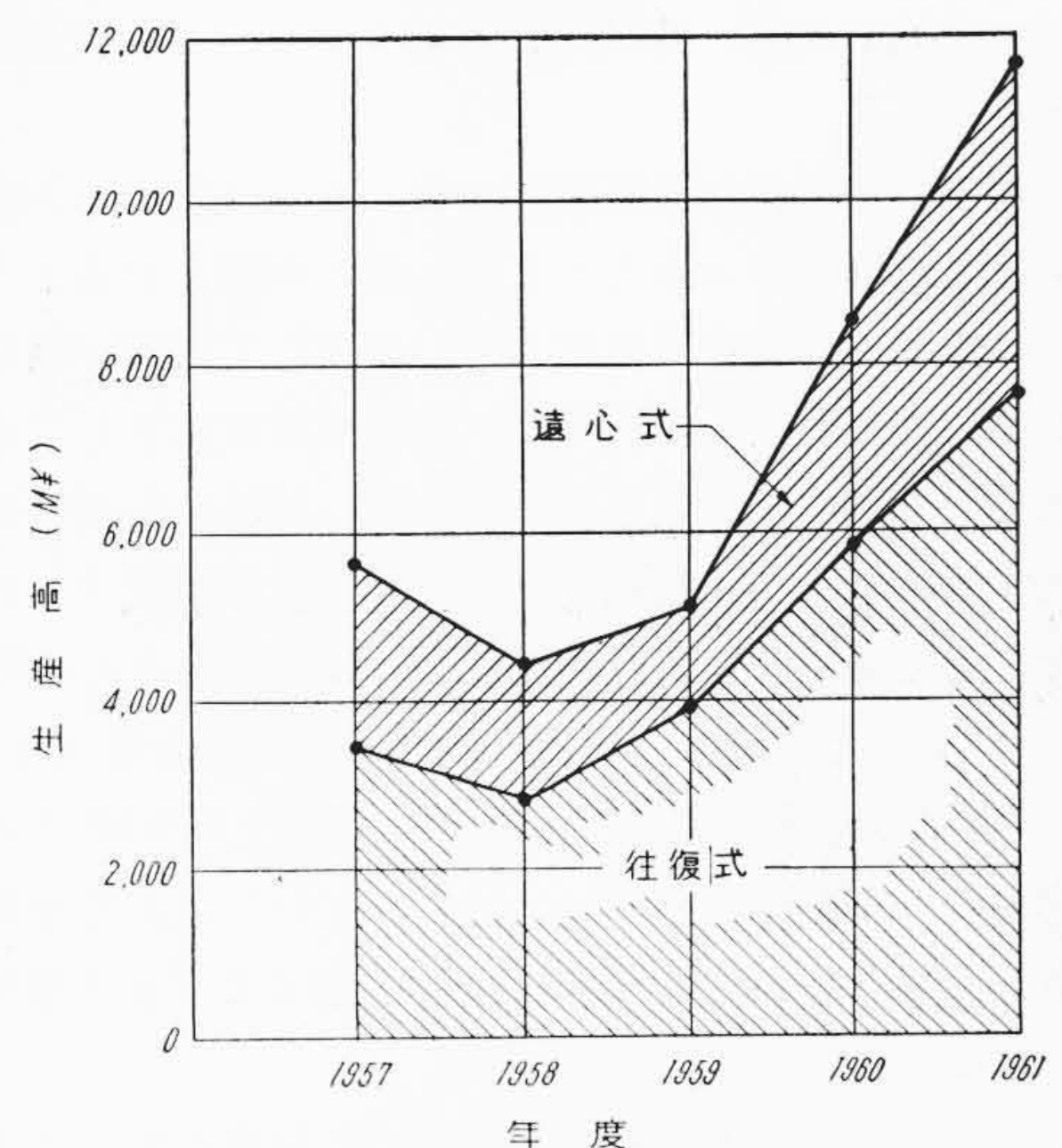
100:71.5:55.5 になる。また集中管理による労務費の節約、負荷の平均化による総合効率の向上など経営上プラスになる面が多い⁽¹⁾。汎用 150 kW 圧縮機は 200~300 rpm の横形並列形式より 600 rpm のバランス形となって、高速小形化への基礎をつくり、さらに 750 rpm へと進歩の跡を示している⁽²⁾。この機種は 75 kW 以下の



第2図 送風機年度別全国生産高



第1図 圧縮機年度別全国生産高



第3図 冷凍機年度別生産高

* 日立製作所川崎工場

高速立形圧縮機 (VHC) の例からみて、いっそう高速化への道をたどることが予想される。

2.2 特殊圧縮機

特殊圧縮機分野も各種プラントの合理化および近年発達が目ざましい石油化学工業に新しい用途の圧縮機が数多く国産化されて多種多様の形式のものが生産されてきている。高圧ガス化学工業の代表的なアンモニア、メタノール合成工業は、原料ガス源の改革と、総動力消費量の低減をねらった各種の合理化がここ数年来続行されて、ほぼ完成に近づいた観がある。現在行なわれているのは、原料ガス源として天然ガス (NG)、コークス炉ガス (COG) を主にした一貫した製造行程で、圧縮機は原料ガスの圧送および精製ガスの高圧圧送に使われる。したがって高圧圧縮機も大気圧より圧縮するものは少なくなり、中圧 ($10\sim 30\text{ kg/cm}^2\text{g}$) にて吸入するものがほとんどで、大容量のガスを少ない動力にて圧送できるようになってきた。石油化学の代表的なものはエチレン分離装置を中心としたコンビナートであろう。プラント自身輸入品が大部分を占めた第 1 期計画には圧縮機はほとんど輸入されたが、第 2 期以降は国産品も数多く使用されるようになった。これは輸入圧縮機をみて、特別なところもなく、十分国産化できることがユーザに認識されたものと考えられるが、構造、使用方法において教えられるところが多かったことも事実である。代表的なものとしては、石油分解ガス圧縮機⁽³⁾、エチレン-プロピレンまたはエチレン-プロパン二元冷凍機⁽⁴⁾、低圧、高圧エチレン圧縮機などがある。

これらプラントも採算の問題からしだいに大形化してゆくことが考えられ、それにつれて圧縮機も大容量になることは必至であり、プラント圧力のいかによっては遠心式圧縮機も進出している。

需要の急増に対処する都市ガスの合理化は高圧精製により行なわれた。これは精製度の高いガスが得られることおよび高圧圧送はガスの製造、圧送諸設備が小形低廉であることから採用されたものである。また効率のよい設備とするために遠心式と往復式の組み合わせ方式が採用された。粗製都市ガス中に含まれるタール、ダスト、ガム質などの異物たい積による運転障害を除くための基礎的研究、実際面の対策も成果があがり、ガム発生の機構や対策などが明らかにされた⁽⁵⁾。

オイルフリー圧縮機の進出は近代目ざましいものがある。古くからダイヤフラム式などで知られているが、大容量化するに従い、カーボン式、ラビリンス式、テフロンリング式などがプラントの要求に応じて発達してきた。これに拍車をかけたのが、大容量の酸素圧送設備で $4,000\sim 6,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ の酸素ガス圧送には $300\sim 500\text{ kW}$ 級のラビリンス式オイルフリー圧縮機が数台使用され、また $10,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ の大容量には効率の良い 550 kW 注水テフロンリング式圧縮機 5 台が使用されている。

最近、石炭や石油に代わって天然ガス、石油分解ガスが合成化学原料として、または都市ガスとして大々的に利用されるようになった。これらの輸送、貯蔵はガス状より、液化して低温で行なうほうが得策である。液化石油ガス (LPG) の低温貯蔵用としても圧縮機が使用されている⁽⁶⁾。この種用途は、輸送、貯蔵の経済性によりますます発展するであろう。超低温二元冷凍装置が国産化されたことも画期的なことである。丸善石油株式会社に納入された 570 kW エチレン-プロパン二元冷凍機 $\times 7$ 台は -60°C のガスを吸入するので、低温、高圧に対する考慮が払われている⁽⁴⁾。また S & W 方式エチレン分離装置用の $2,150\text{ kW}$ エチレン、プロピレン二元冷凍機 3 台も目下製作中であり、この種大形冷凍機の用途はますます増加するものと考えられる。

高速小形化は一般的のすう勢であるが、圧縮機においては高速化するに従い、吸入吐出弁の作動が不安定になることがある。このた

め絶えざる研究がなされ、その成果⁽⁷⁾が実用機に応用されている。また近年のように配管が長くなったり、自動制御が利用されるようになると、吸入、吐出ガスの圧力脈動は、それらに悪影響を及ぼすので、脈動を減少させるために、緩衝タンク、絞りなどが研究され圧縮機を含む配管系のシュミレーションにより、電子計算機で解くこともできるようになった。

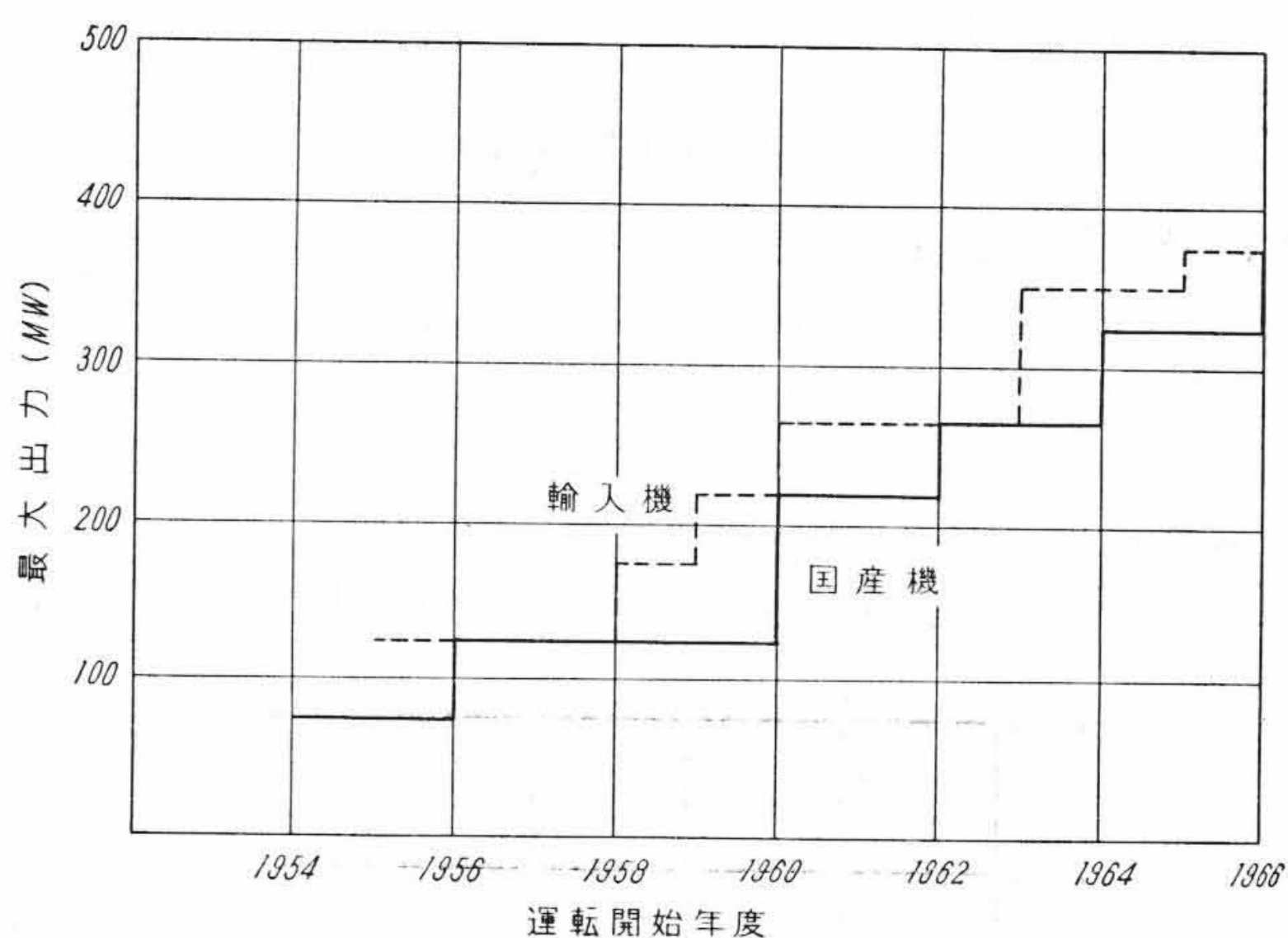
往復圧縮機は容易に高圧が得られること、効率が良いこと、ガスの比重温度による影響が少なく、容量調整が広範囲に効率よく行なえるなどの特長を有しているので、大容量の範囲においては遠心圧縮機の使用または併用が行なわれているが、中容量および高圧の部分では独自の強味を持っている。

3. 送風機

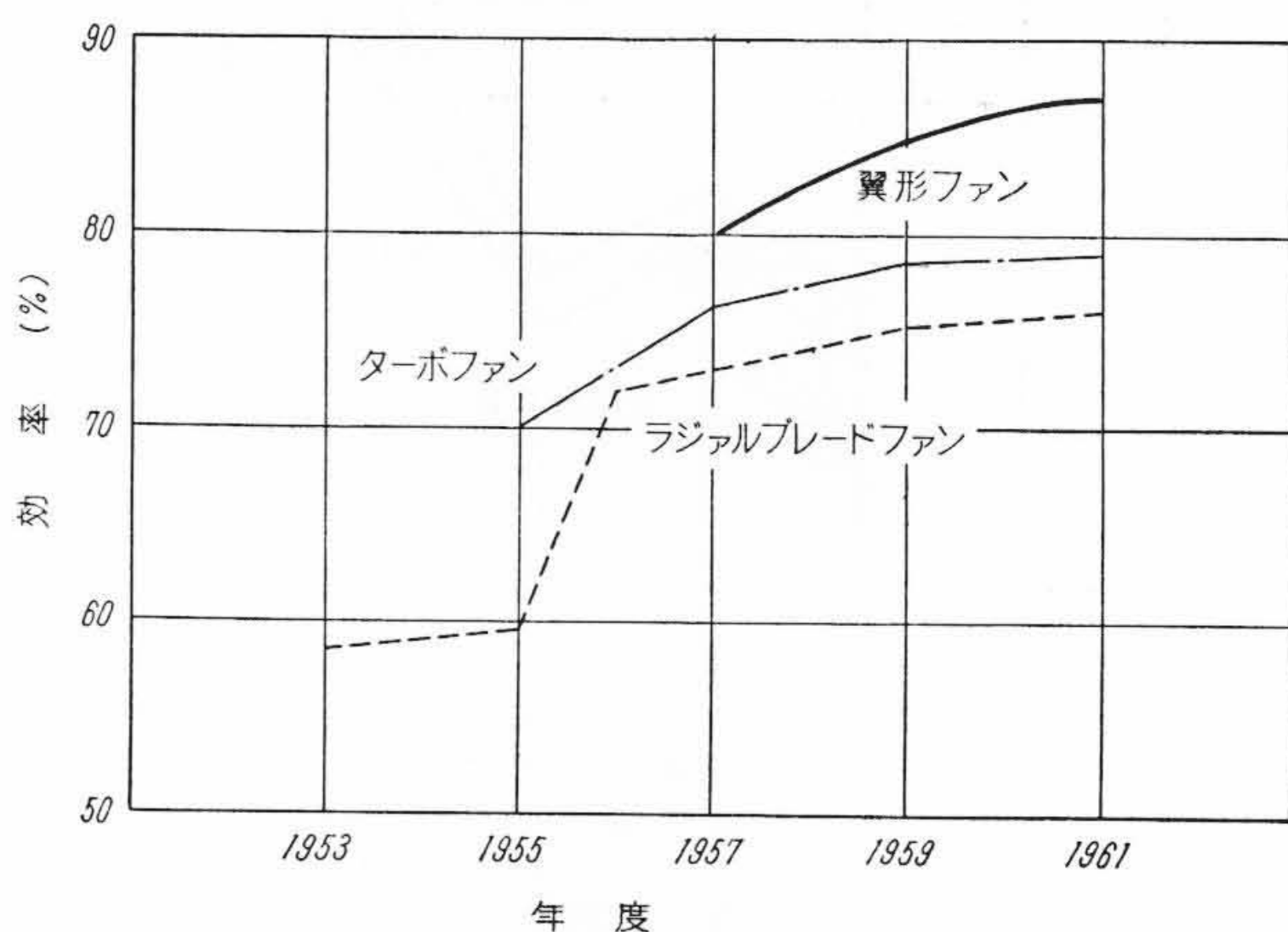
3.1 遠心送風機、圧縮機

遠心送風機の技術的進歩をもたらした最も大きな要因は火力発電所の急激な伸長であろう。すなわちタービン発電機の単基出力が第 4 図⁽⁸⁾にみるように逐年大きくなり、ボイラ通風機の容量もしだいに大きくなり、送風機 1 台の出力が $2,000\text{ kW}$ に達するものも出現している。また従来は平衡通風方式がもっぱら採用されていたが、最近ではほとんど例外なく強圧通風方式となり、押込ファン (FDF) のみによる通風方式がとられている。

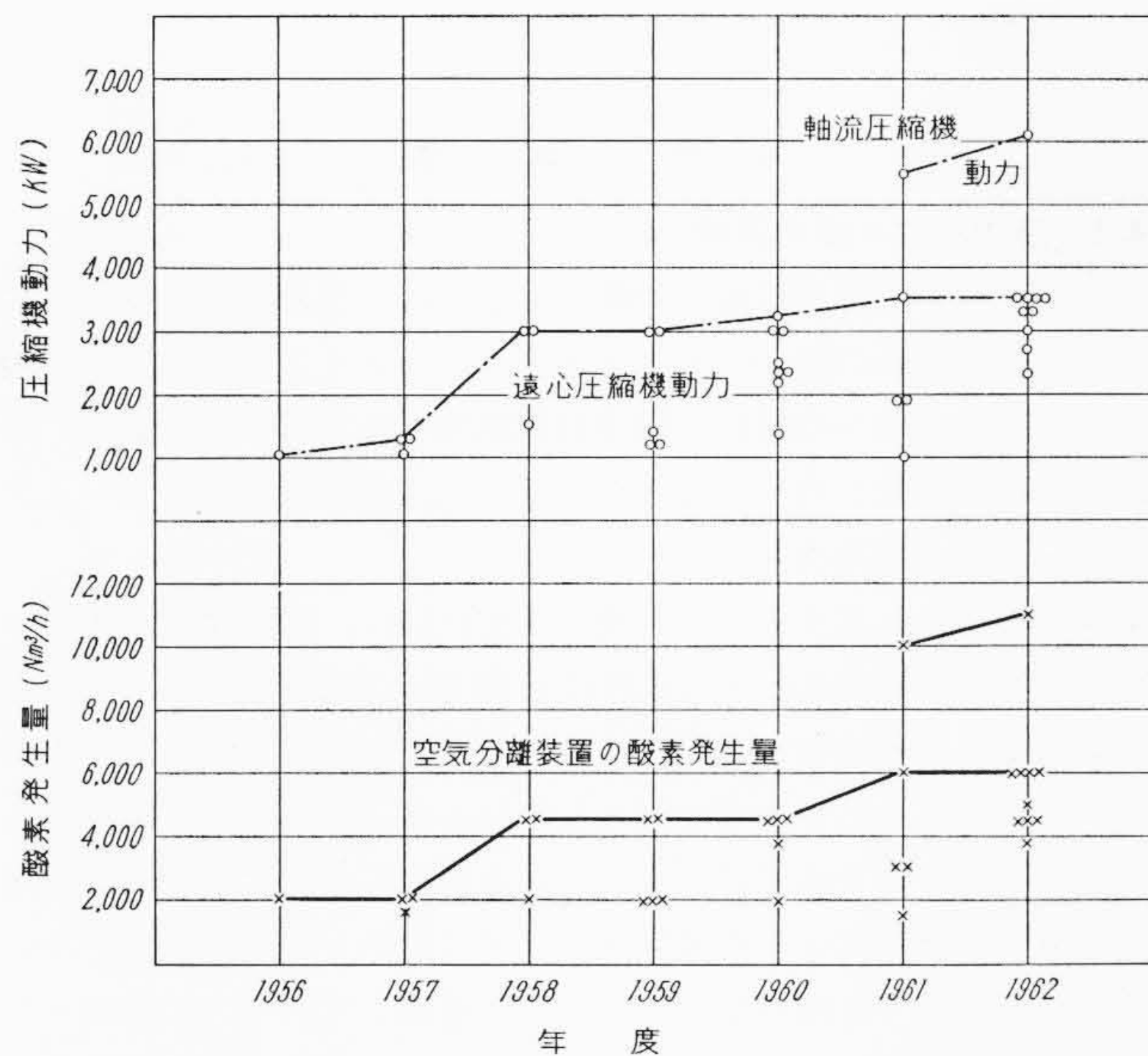
このため FDF の圧力は従来の $300\sim 400\text{ mmAq}$ より $1,000\sim 1,500\text{ mmAq}$ としだいに高くなりファンからブロワの領域にはいつつつある。これらボイラ通風機の技術的進歩を表わすものとして第 5 図⁽⁹⁾に効率向上の推移を示す。翼形ファン、ターボファンはもっぱら FDF として使用され、ラジアルブレードファンは誘引ファン (IDF)、ガス再循環ファン (GRF) に使用される。強圧通風方式の



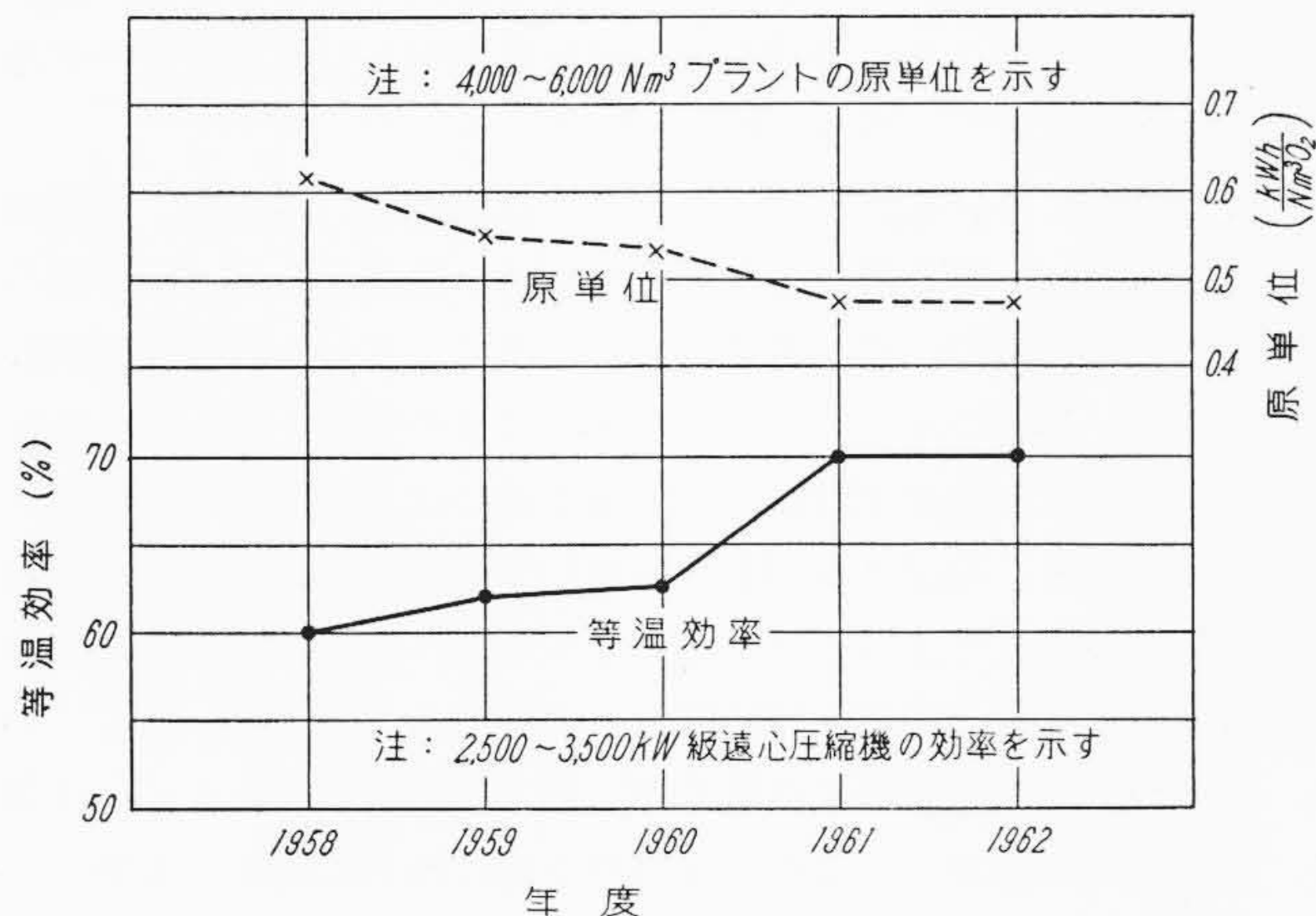
第 4 図 タービン発電機単基最大出力の推移状況



第 5 図 遠心ファン効率の推移



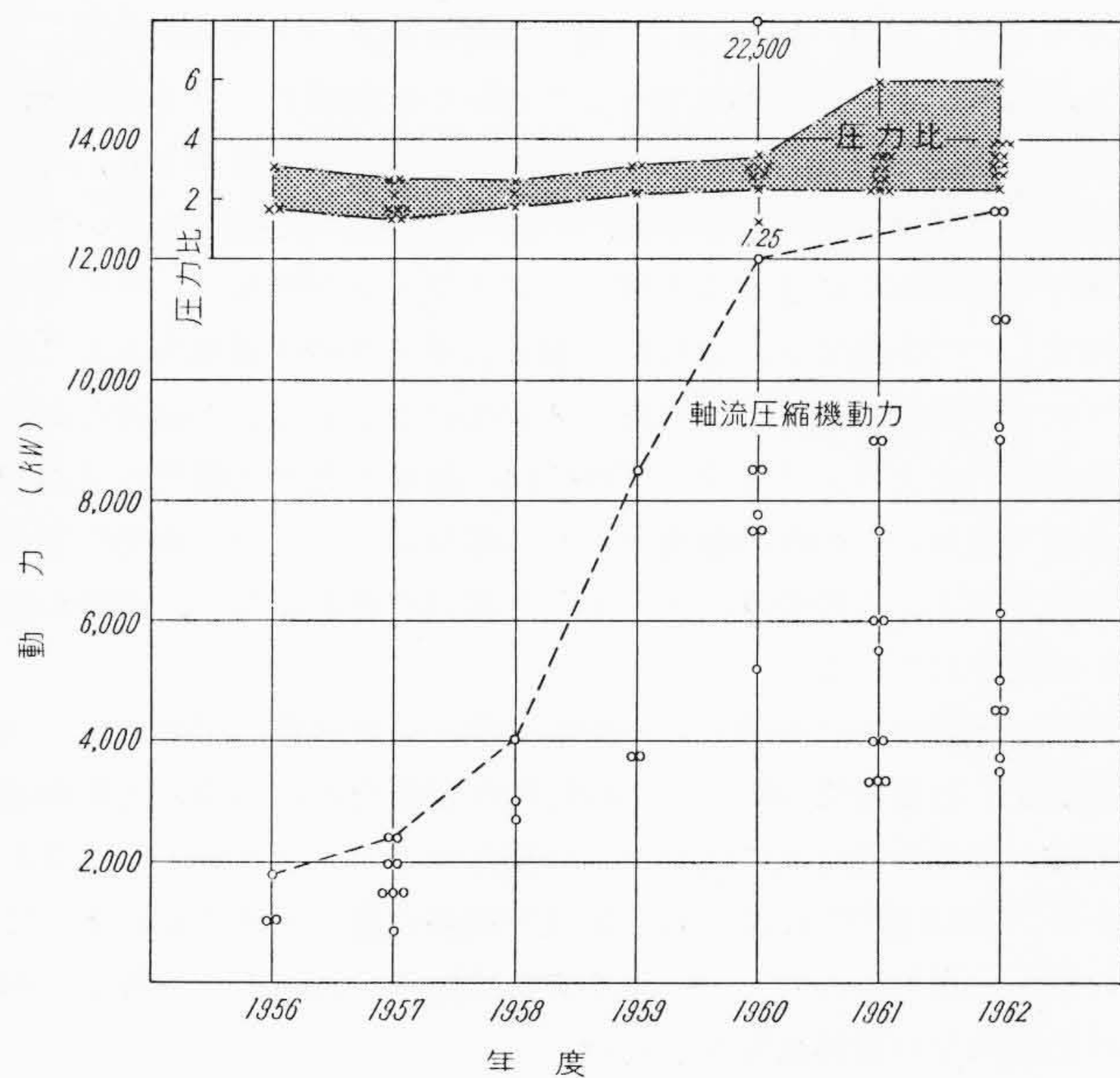
第6図 空気分離装置容量と原料空気圧縮機動力の推移



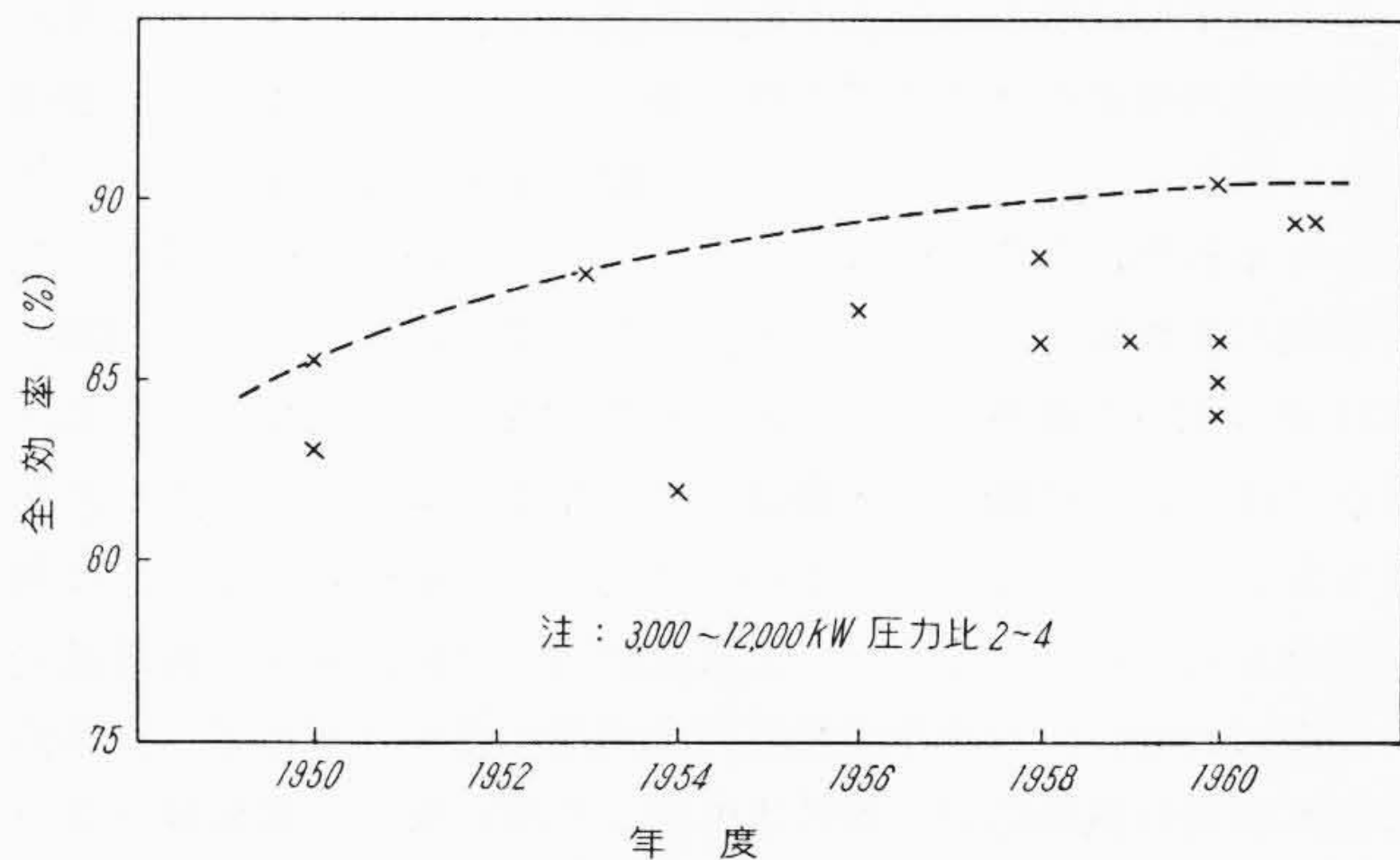
第7図 遠心圧縮機の効率と原単位の推移

FDFの羽根車周速は120~130 m/sで従来の平衡通風方式における80~90 m/sに比し50%も大きくなるため、羽根車出口における動圧が大きく、これを有効に静圧に変えることが性能上の最大の焦点である。ターボファンについても羽根車流路の形状、ケーシング構造などに改善が加えられ効率も向上したが、特にラジアルブレードファンの効率向上は著しい。このファンはターボファンに比し羽根車外径を20%程度小さくでき、また羽根との相対速度を40%以上小さくできるので、ダストなどに対する耐摩耗性が大きい利点があるが、ターボファンに比し効率がかなり劣る欠点があった。このため羽根車流路形状の改善が図られ効率が著しく向上し、第5図のようにターボファンにかなり接近した。しかしこの構造の羽根車では比較回転数に対する効率の変化がかなり顕著であり、今後の研究が必要である。火力発電用のほか、ラジアルブレードファンの特長が生かされているものに製鉄用焼結機の主排風機、セメント用のキルン誘引ファンがある。特に焼結機の容量が近年著しく大きくなり、数年前の2~3倍の4,000 t/dayに達するものが出現しつつあるため、数千kWの記録的製品が多数製作されている。このほか800°Cに達する高温送風機の出現、一般に広く使われる換気用ファンで従来のものに比し10~15ホンも低騒音のファンが製作されるようになったことなどが特筆すべきものであろう。

遠心圧縮機の近年における技術的進歩を促した大きな要因は、鉄鋼、重化学工業などにおける空気分離装置の急激な発達である。第



第8図 国内軸流圧縮機動力と圧力比の推移



第9図 軸流圧縮機効率の推移概況

6図は全低圧式空気分離装置の容量が逐年大形化した推移を示すが、これに伴って原料空気圧縮機として使われる遠心圧縮機の高速度とともに大容量、高压化が進められ著しい発展を遂げた。すなわち羽根車流路を主体とする流体力学的研究と、材料、工作技術の進歩によって羽根車の周速が数年前に240~260 m/s程度であったものが、300~330 m/sに達する高速となり段当り圧力比も上昇し、吐出圧力5~8 kg/cm²gを4段で実現する高性能の遠心圧縮機が出現し、遠心圧縮機の水準をきわめて高いものにした。高速化されたこの種遠心圧縮機の性能向上の推移を示すものとして第7図に一例を掲げた。本図には圧縮機の効率とともに空気分離装置における性能を表わす原単位(酸素1 m³当りの電力消費量)の推移状況も付記した。遠心圧縮機の高速度小形化は世界的すう勢であり、流体力学的究明と機械構造上の進歩改良によってさらに羽根車周速をあげ、段数の低減、効率の向上が計られてゆくと考えられる。

さらに最近の動向として、石油化学の急速な発達に伴い、炭化水素を主とする特殊ガス圧縮機として往復圧縮機に代わって遠心圧縮機が使用されるようになってきたことがあげられよう。この種圧縮機は吐出圧力が十数気圧に達するものが多く、また数十気圧のレベルでガス循環用として使用されるため、特に軸封装置が問題で、これに関する開発研究が進められ、純国産による実機が製作されるようになり、今後の発展が期待されている。

3.2 軸流送風機、軸流圧縮機

軸流送風機については鉱山用主扇として口径が3,000 mmをこえる大形機が炭坑合理化に伴って設置され、鉄鋼用としては焼結鉄の

冷却用として耐熱，耐摩耗性を備えた特殊構造の大形機が出現したこと，自動車トンネル換気用として運転中に動翼のピッチを自動的に変える構造の口径 3,000 mm の大形ファンが多数製作され，今後の需要がますますふえつつあること，冷却塔の大形化に伴い口径 4,000～6,000 mm に達する大形ディスクファンが出現し，その需要も増大しつつあること，さらに大形火力ボイラ押込通風用として軸流ブロワが採用されるようになってきていることなどが最近のおもな動向といえよう。ボイラ用 FDF は一般にかなり大幅な容量制御が必要であり，このため軸流ブロワの採用についての技術的問題点は制御方法と，この要求にマッチした翼列の選択にあり，今後の動向が注目されている。

軸流圧縮機における著しい技術的進歩は高炉送風を筆頭に，空気分離装置，石油精製，風どう空気源，加圧製塩などの用途に大形軸流圧縮機が従来の遠心式に代わって登場したことにより如実に示されている。第 8 図⁽⁴⁰⁾にはこれら軸流圧縮機の動力と圧力比によってその生産状況の推移を，また第 9 図には国内，国外の大形軸流圧縮機の効率向上の推移概況を示した。

軸流圧縮機は第二次大戦末期以来ガスタービン，ジェットエンジンを主とする航空用需要の急増によって積極的な研究開発が行なわれ，その結果が定置用の軸流圧縮機の設計にとり入れられるに及んで一般産業用軸流圧縮機の実用機が製作されるようになった。第 8 図にみられるようにわが国における一般産業用軸流圧縮機は 1956 年ころから本格的に実用に供されるようになり，特に高炉送風用として大形機が多数製作され，最近では空気分離装置用として 5,000～6,000 kW，2 段圧縮形式の圧力比 6 をこえるものも出現している。

現在ではこれらの軸流圧縮機はその信頼性，効率などの点できわめて安定したものとなっているが，今後さらに解明されるべき技術的問題点も残されている。たとえば性能面では旋回失速，衝撃波失速，off design における回転翼列の内部流動の究明など，機械的には動翼静翼の振動応力，疲労限度のより深い解明，運転保守面ではダストによる翼のよごれからくる性能低下に対処する方法などの問題であろう。またもっぱら航空用として発達したガスタービンが定置用としてぼつぼつ実用に供されるようになっており，このガスタービン用の軸流圧縮機も近い将来には種々の分野に出現してくるものと思われる。遠心圧縮機と同様に軸流圧縮機においても，その技術的進歩の方向は世界的すう勢として高速化に向っており，現在の一般産業用圧縮機でとられている動翼の周速度 200～230 m/s 程度が 250～300 m/s 程度まで増速され，大幅な段数の低減が計られることは必至と考えられる。それには各国においてきわめて活潑に行なわれている航空用を対象とした高速（高亜音速，遷音速，超音速）軸流圧縮機の研究成果がどの程度一般産業用のものに適用され

うるかがかぎとなろう。

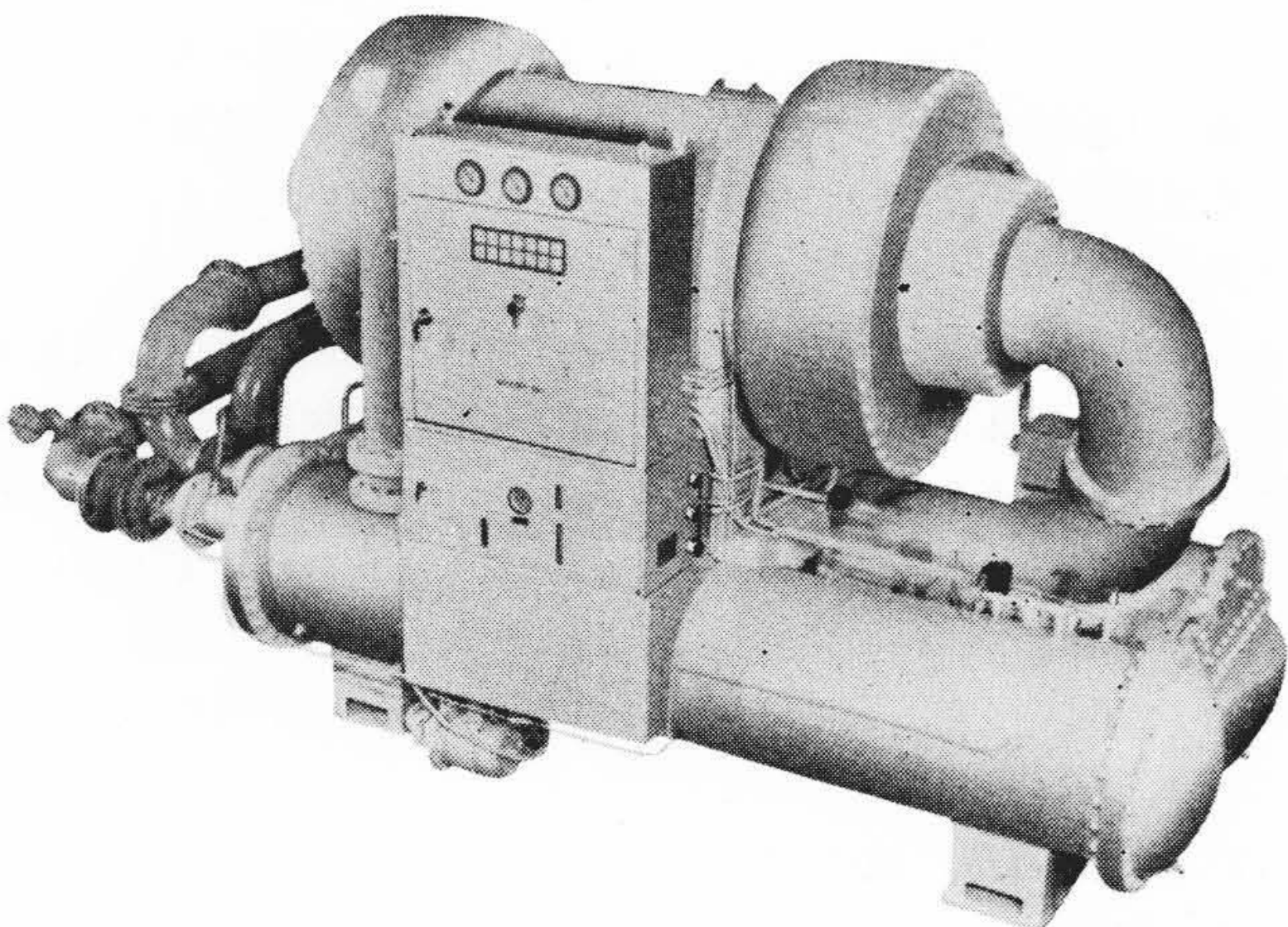
4. 冷 凍 機

4.1 空調用ターボ冷凍機

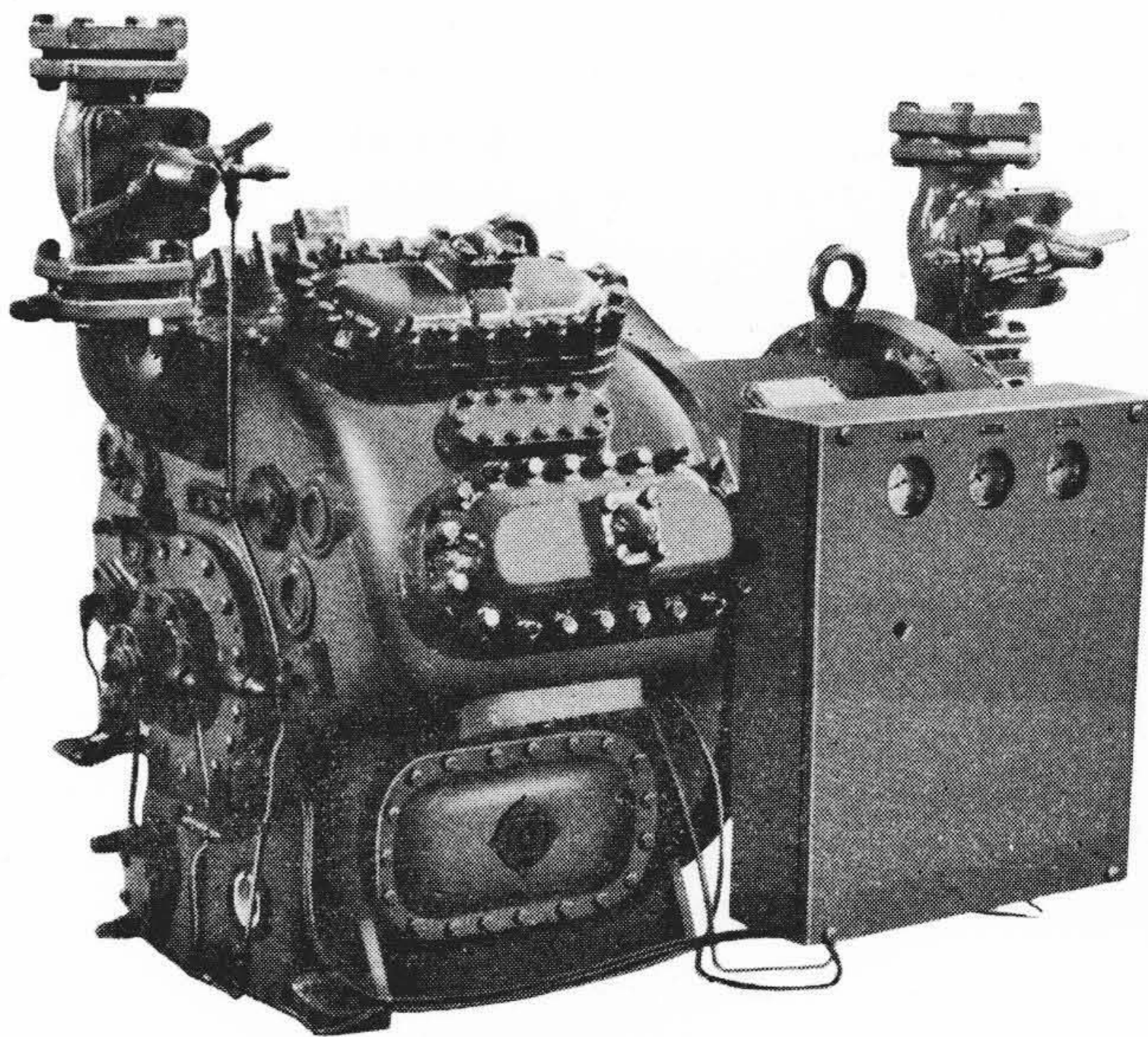
空調用ターボ冷凍機の最近の傾向としては，生産規模の拡大に伴う形式および寸法の統一，ハーメティック・タイプの登場，小形軽量化，小容量領域への進出，容量制御範囲の拡大，騒音の低下，運転，操作の簡易化と自動化などがあげられ，特に小容量のハーメティック・ターボ冷凍機の登場が目だつ。

空調に使用されるターボ冷凍機の温度仕様は，冷却塔の使用が一般化されたため冷却水の入口温度は最高 30～33℃，また冷水出口温度は 4～7℃と比較的狭い範囲にはいるようになった。冷凍機の 1 台当りの容量は年々わずかず増大しているが，個々の容量は大ビルの建設により大形大容量に，また空調の普及により取り扱いが簡単で高圧ガス取扱法規上の冷凍機械主任者の資格を要しないことなどから従来の高速多気筒の領域へしだいに進出しており，40 冷凍トンから 1,000 冷凍トンと非常に広い範囲にわたって利用されるようになった。特に小形ターボ冷凍機については，小ビルのみでなく大ビルでも，端境期の空調の一般化と大形事務機械の温調のため，秋から春にかけてのオフシーズン中でも部分負荷用として大形ターボ冷凍機と併用されることが多くなっている。

需要の増大に伴い各メーカーはそれぞれ圧縮機，蒸発器，凝縮器の形式を統一し，容量別に各機器のサイズを標準化して，その組み合わせにより各種の仕様を満足させるようにしており，納期の短縮，価格の低減，品質の向上，アフターサービスの充実を計っている。新しく開発された増速 2 段形ターボ冷凍機では，徹底した標準化が行なわれており，冷媒に R-11 を使用し 100 冷凍トンを超える容量の空調を対象として計画されたものであるが，機器の組み合わせを変化させて工業用の特殊冷凍装置にも応用できるようになっている。最近のターボ冷凍機は空気力学，熱力学の進歩とともに，圧縮機，蒸発器，凝縮器そのほかの機器の性能の向上に絶えざる努力が傾注されており，大幅な小形軽量化が行なわれ，ビルの狭い機械室をできるだけ有効に利用するよう配慮されている。圧縮機の構造の面では合理的なインペラ，ディフューザおよびインレット・ガイドペーンの設計が行なわれ，高い効率でしかも広い範囲にわたって容量制御ができるようになっている。またターボ冷凍機の生命ともいうべきシャフトシールには構造の簡単なメカニカルシールが多く使



第 10 図 (a) ハーメティック形ターボ冷凍機



第 10 図 (b) 密閉形 HMC 冷凍機

第1表 低温用ターボ冷凍機

用 途	容 量 (RT)	冷 媒	圧縮機形式	ブライン種類	ブライン出口 温度 (°C)
合成繊維	400	R-11	2段	CaCl ₂	-1
合成繊維	250	R-11	2段	CaCl ₂	-8
合成繊維	200	R-11	2段	硝酸カルシウム	-10
合成繊維	120	R-11	3段	CaCl ₂	-18
	62.5	R-11	2段	CaCl ₂	-5
合成樹脂	200	R-11	3段	CaCl ₂	-12
合成樹脂	165	R-11	3段	CaCl ₂	-15
合成樹脂	116	R-11	3段	CaCl ₂	-30
肥 料	300	R-11	2段	メタノール	0
肥 料	120	R-11	3段	プロピレングリコール	-10
表 酒	220	R-11	2段	CaCl ₂	-7
麦 酒	200	R-11	2段	CaCl ₂	-7
麦 酒	175	R-11	2段	CaCl ₂	-7
麦 酒	150	R-11	2段	CaCl ₂	-5
石油化学	115	R-11	2段	CaCl ₂	-10
そ の 他	100	R-12	5段	メチレンクロライド	-46
	300	高低温側R-12	2元サイクル	ペンタン	-65
	40	{低温側 R-12 高温側 R-11}	2元サイクル	デクロロメタン	-75

用され、構造、材質、加工の改善により信頼性がいっそう向上するようになった。ターボ冷凍機は往復式に比較して振動の少ない機械であるが、劇場、ホテル、事務所など特に振動をきらう場所に据え付けられる関係上、防振については特に考慮が払われており、従来のコルク防振基礎に代わり、ゴムあるいはスプリングで直接機械のベースを弾性的に支持する方法が採用されたので、基礎、据え付けの工事は非常に簡単になった。また音についても騒音源である増速歯車、圧縮機および凝縮器についてその解明が行なわれ、歯車精度の向上、ガス音の発生防止と吸収に細心の注意が払われるようになった。

ハーメティック・ターボ冷凍機については内外メーカーのほとんどが生産を行なうようになっており、アメリカでは1,000冷凍トンの大容量のものまで製作されている。密閉形電動機はかご形で起動電流が大きいので、ビルの受電能力の制約を受ける関係で、わが国では全面的な採用までには至っていない。しかし100冷凍トン以下の小容量ターボ冷凍機はほとんどハーメティック・タイプになってきた。第10図(a)は40~100冷凍トン用の直結形4段のハーメティック・ターボ冷凍機で、圧縮機、蒸発器、凝縮器などプラントとしての必要な機器はすべて一体としてまとめられており、寸法は非常に小さくなっている。特長としては、冷媒の消耗が少なく、騒音が小さく、小形であるにもかかわらず効率がよく、広い範囲にわたって容量制御が可能で、一体のまま搬入、据え付けが可能であること、また安全装置が完備しておりスイッチ一つで運転できることで、今後ますます用途は増加するものと考えられる。第10図(b)は同

じく密閉形HMC冷凍機である。

4.2 低温用ターボ冷凍機

低温用ターボ冷凍機もプラントの単位容量が大きくなるとともに取り扱いが容易で交換部品数が少なく、保守点検が簡単容易であるように設計が改善されたので、その用途はしだいに増加している。第1表はこの種のターボ冷凍機の用途と仕様の例を示したもので、かなり小容量の範囲まで利用されていることがわかる。最も多く用いられる冷媒はR-11で、ブラインの出口温度の下限は-30~-35°Cである。冷媒にR-12を使用すれば温度をさらに低くすることができ-40~-45°Cまで可能である。ブラインの出口温度がこれ以下になると、ターボ圧縮機の入口の風量に比較して出口の風量が非常に小さくなるので、比較回転数を適当な範囲に収めるため、回転数の異なる圧縮機を2台直列に運転したり、あるいは低温側にR-12、高温側にR-11を使用する2元サイクルも採用できる。

低温用ターボ冷凍機では蒸発温度が低くなるため、各機器は低温による材料のぜい(脆)化と収縮には特に慎重な考慮を払って設計されている。また機内の真空度は空調用に比較して低く空気や水分の侵入しやすい条件になるが、もし水分がいれば低温のため氷結して思わぬ事故を発生するので、気密については細心の注意と、厳重な試験が行なわれている。低温用ターボ冷凍機は用途により仕様が非常に異なるため、個々に応じた設計が行なわれているが、低温に関する技術は最近目ざましく発達してきているので、容量、温度ともかなり広範囲のものまで利用できる段階に達しており、将来LPG関係、そのほかの新分野に相当進出するものと期待される。

5. 結 言

圧縮機、送風機、冷凍機の最近の動向を述べたが、産業規模の拡大に伴い、取り扱う容量はますます増大し、遠心圧縮機、軸流圧縮機分野が広がっている。これらの性能向上は流体力学の著しい進歩に負うところきわめて大であるが、現在たどりつつあるすう勢としては、機械はますます小形化、高速化するとともに、段数が少なくて効率のよい機械に進んでいる。

参 考 文 献

- (1) 山本：日立評論 43, 539 (昭 36-4)
- (2) 山本：日立評論 43, 894 (昭 36-7)
- (3) 重松：産業機械 No. 137 (昭 37-2)
- (4) 松本：日立評論 43, 1251 (昭 36-10)
- (5) 山本、西松：日立評論 42, 1001 (昭 35-9)
- (6) 清水、岩本：日立評論 44, 326 (昭 37-2)
- (7) 大谷：機械学会誌 Vol. 63, No. 503, 1
- (8) 渡辺：日本機械学会誌 Vol. 65, No. 516, (1962) 69
- (9) 日立評論 44, 115 (昭 37-1)
- (10) 井口：日本機械学会誌 Vol. 64, No. 509, (1961) 878