

最近のパッケージ形ガスタービン発電機

Package-type Gas Turbine Generator — Recent Development

現在、世界の多くの国々に広く輸出されているパッケージ形ガスタービン発電機は、昭和41年に1号機を完成して以来既に200台に近い納入実績を持ち、その高い信頼性とともにより必要に応じて選択できる多種にわたる機能を備えているために顧客の好評を博している。この間、現地での運転条件に合わせて、その構造にも改良が加えられ現在の姿に至っている。

ここに、その特長の概要について述べる。

大井 珪雄* Ooi Masao
高根 文彦* Takane Fumihiko
二宮 岩夫* Ninomiya Iwao

1 緒 言

- パッケージ形ガスタービン発電機的基本的な特長¹⁾は、次のようなものが挙げられる。
- (1) コンパクトな構造で屋外設置が可能である。
 - (2) 据付工事費が安く、据付期間が短い。
 - (3) ガスタービン出力対周囲温度特性に近似した発電機出力対周囲温度特性を持ち、出力の協調が容易である。
 - (4) 起動に必要な時間が極めて短いため、ピーク負荷、又は保安電源用として有効である。
- これらに加えて、日立製作所のガスタービン発電機は、次のような特長を備えている。
- (5) 水の無い場所でも運転できるよう開放空気冷却形となっている。
 - (6) 運転中も容易に交換できるエアフィルタ
 - (7) 寒冷地対策用ルーバコントロール装置

- (8) 砂漠地対策用イナーシャセパレータ
- (9) 市街地向け防音対策用サイレンサ
- (10) 火災による被害を最小限に抑えるためのCO₂消火装置
- (11) 耐熱特性及び作業性の優れたF種絶縁ハイモールドコイルの採用

2 発電機パッケージの構造

発電機パッケージの構造例(開放空気冷却形)を図1に示す。日立製作所標準の発電機パッケージは、減速機、発電機及び付属機器より構成されている。これらはすべて溶接鋼板製の共通ベース上に置かれ、エンクロージャ内に収められ、屋外形となっていて、工場で完全に組立完了した後、発電所まで一体輸送されるので現地据付作業はガスタービンパッケージとの直結、センタリング及びケーブル配線ほかの付帯作業だ

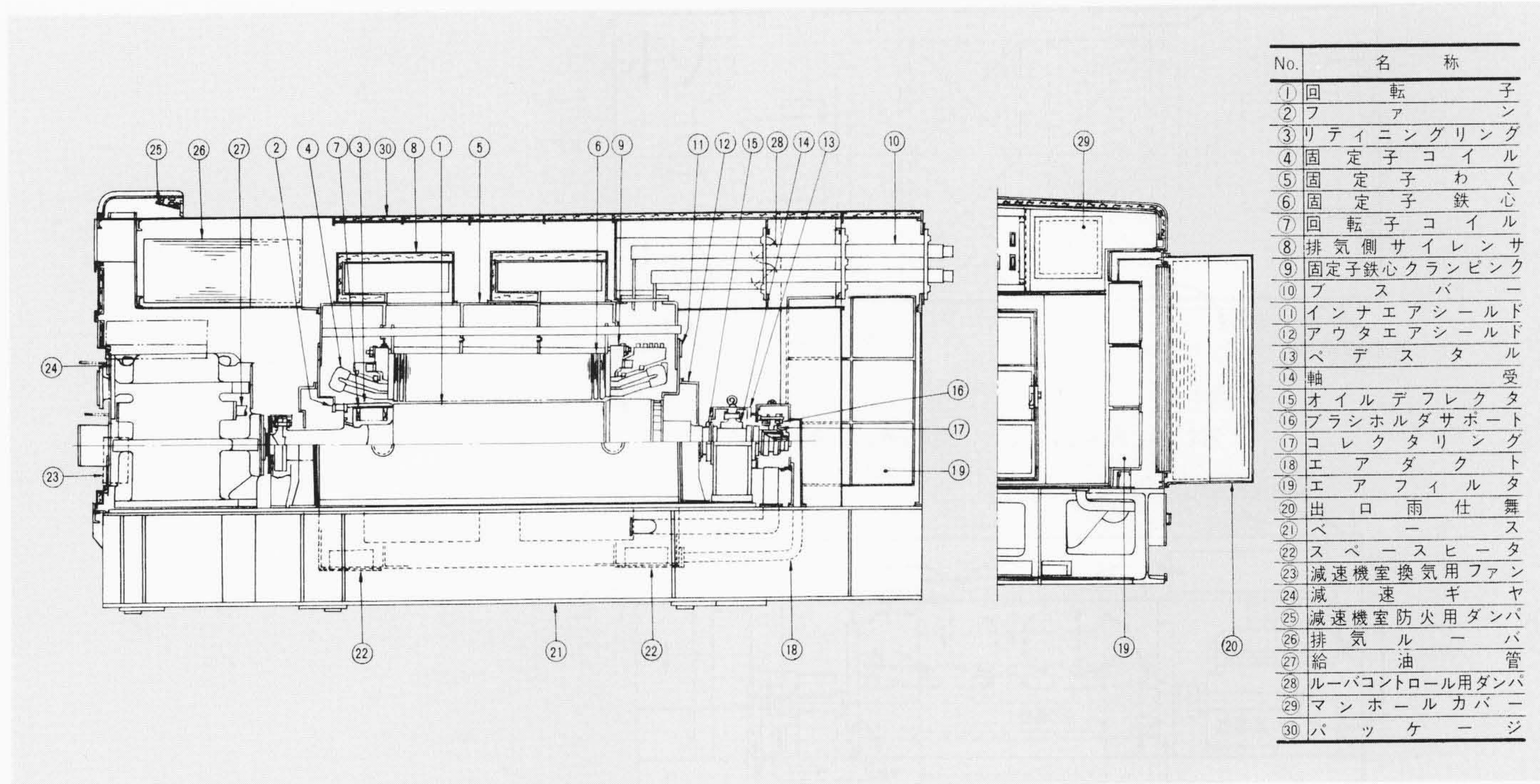


図1 パッケージ形ガスタービン発電機全体構造図例(開放管通風方式) 共通ベース上に減速機、発電機及び付属機器が載っている。

* 日立製作所日立工場

けとなり、基礎も簡単で済むために据付工事費は安価であり、据付期間も短くて済む。

2.1 冷却空気通風系統

図2は、発電機パッケージ内を冷却空気が流れる様子を示したものである。発電機回転子のボディ部両端に取り付けられているラジアルファンにより、吸引された冷却空気(外気)は発電機パッケージのコレクタリング側両側面に取り付けられた雨水の浸入を防ぐための入口雨仕舞を通り機内に入る。まずエアフィルタを通り、砂塵などのダストを除去された清浄な空気はベースの中を介して発電機ファンへと導かれる。冷却風の一部は回転子内の界磁コイルスロットの底に設けられたサブスロット内を通り抜け、コイルを冷やしながら空隙に出てくる。他の一部はファン出口より、そのまま空隙部に押し込まれる。その他は、固定子わくに設けられた通気用ダクトを介して固定子コアバックの中央部に集められ、そのままコアバックより空隙に向けてエアダクト中を通り抜ける。これらは、空隙部で合流し空隙両端部からエアダクト中をコアバックに向けて逆向きに流れ、この間、鉄損やコイル銅損を吸収して温ガスとなり、排気サイレンサ、排気ダクトを通り抜けて、出口雨仕舞から機外に排出される。コレクタリング室内及び減速機室内は、上述した主冷却系統とはそれぞれ別の冷却系統とし、信頼性の向上に努めている。

2.2 運転中も交換可能なエアフィルタ

エアフィルタは、プレフィルタとメインフィルタから成る。プレフィルタでは、比較的粒度の大きい塵埃を除去し、プレフィルタを通り抜けた粒度の小さい塵埃をメインフィルタで

除去するように工夫されている。プレフィルタは洗浄して2～3回までは繰り返して使用することができる。エアフィルタに塵埃がたまってくると、フィルタの出入口間の差圧が上昇してくる。差圧があまり高くなり過ぎると、フィルタ内の炉材の変形やフィルタわくからはみ出しという不具合が生じ、また冷却風量の減少という好ましくない現象も起きてくるので、差圧計により警報を発し、それを合図にプレフィルタの洗浄を行なって乾燥後再使用するようにしている。図3は、標準よりかなり悪い塵埃濃度(0.15 mg/m^3)を持つ冷却空気中で運転中の発電機のエアフィルタのフィルタ出入口間差圧の運転時間に対する変化を表わす特性曲線を示すものである。本曲線によれば、運転2,600時間後第1回目のプレフィルタ洗浄、4,400時間後第2回目の洗浄、そして5,400時間後にはプレフィルタ、メインフィルタとも新品と交換することを示している。したがって、本図のような塵埃濃度の場合で連続運転の場合、エアフィルタの予備品との交換は、半年に1回というのが目安となる。ただし、据付当初は建設工事の影響で空気中の塵埃量が非常に多いのが普通であり、この場合フィルタの目詰まりが激しく、予備品との交換周期も本図の場合より相当短くなるのが常であるので、予備のフィルタはなるべく多く持つことが得策である。なおプレフィルタ及びメインフィルタの交換は、発電機の運転中でも実施可能なように設計されている。

2.3 減速機

減速機は、ガスタービンの高速回転速度を発電機の50Hz又は60Hzに見合う回転速度まで減速するために使用される。ギ

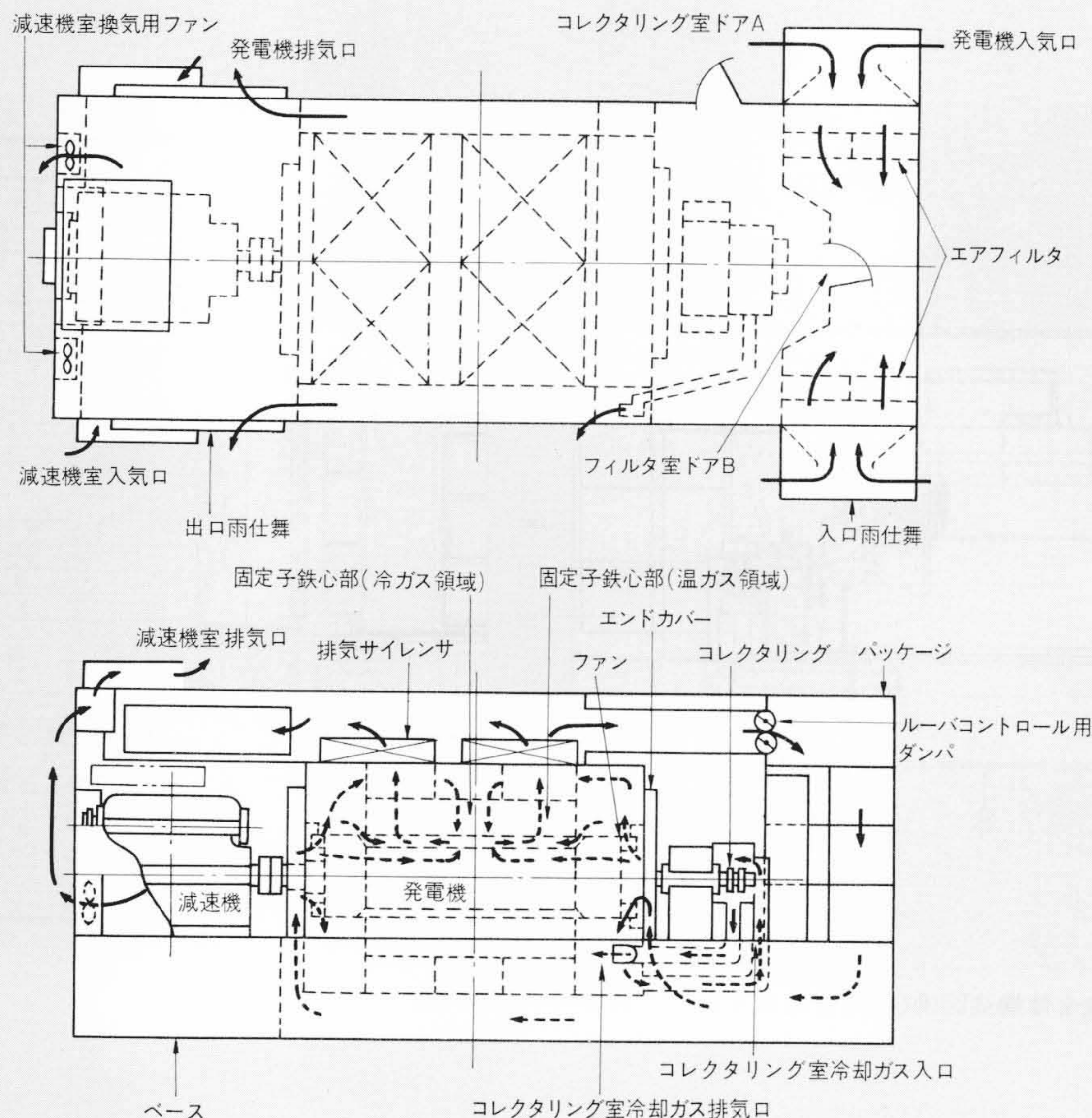


図2 通風系統図 発電機パッケージの冷却通風系統は発電機本体、コレクタリング及び減速機の三つの独立した系統に分かれている。

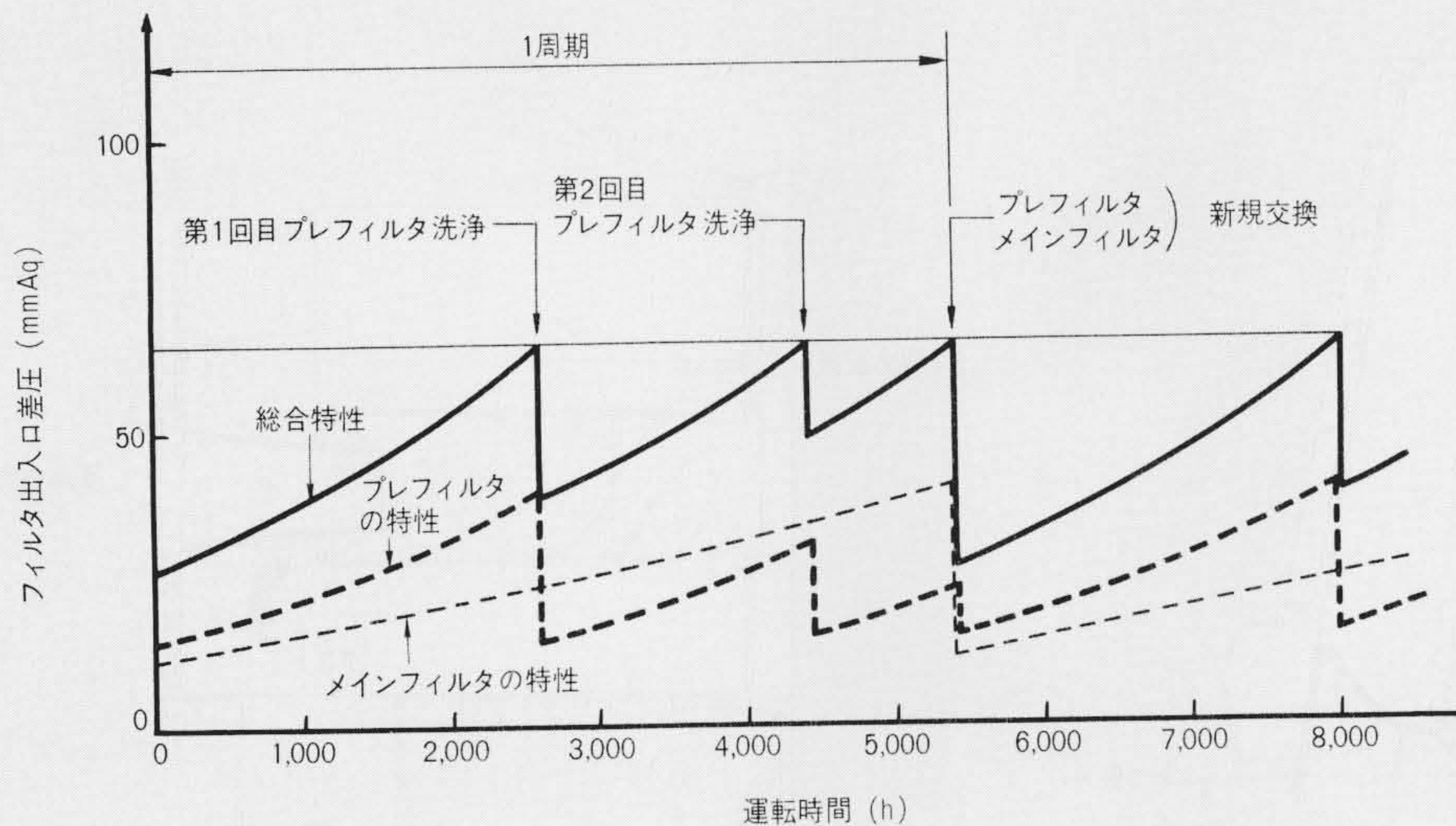


図3 エアフィルタ風損対時間特性 プレフィルタの目詰まりが早く、全体の風損が65mmAqになると、プレフィルタを洗浄する。2回まで洗浄して、3度目にはメインフィルタ共々新品スペアと交換する。(国内での標準的塵埃よりつらい条件…0.15mg/m³……でのカーブである)

や製作に関する過去の豊富な経験が生かされ、高効率で騒音、振動の低い構造となっている。ピニオン及びギヤはバーチカルオフセットとなっているため、占有面積が少なくて済み、またタービンとの間はフレキシブルカップリングで接続されている。一方、ホイールギヤ軸端に焼ばめられたたわみ性のあるクイルシャフトは、ホイールギヤ軸中心穴を貫通して発電機軸と直結されている。

ピニオンギヤ、ホイールギヤの歯は、ダブルヘリカルで歯車自身に軸方向推力が発生しないようになっている。このように、減速機はコンパクトで据付が容易、かつ性能の良い設計となっている。

2.4 ベース及びエンクロージャ

図4の発電機パッケージの外観に示すように、溶接鋼板製の共通ベース及びエンクロージャは、単純かつ丈夫で保守の容易さ及び運転中の振動、騒音の低減化を図り、更に規格に基づくシャワー試験に合格した構造である。

3 オプションとしての機能

多種の地域で利用されるため、ガスタービン発電機はそれぞれの地域の気候、風土、環境上の特異性に合わせた機能が必要とする場合が多い。この点で、次に述べる機能をも保持できるように考慮されている。

3.1 寒冷地向けルーバコントロール装置

寒冷地で運転する場合、極低温の冷気が機内に浸入することは、発電機部品中の強度メンバーの低温脆性破壊につながる心配もあり好ましくない。そこで、機内に入る冷却空気の温度が一定温度以下にならないよう、図2中に示したように排気側温ガスの一部を入気側へもどしてモータによるダンパ開度制御によりその量を調整し、外部からの冷ガスと混合して一定温度を維持するよう工夫されている。標準機ではこのダンパ部は、マンホールカバーで盲にされる。

3.2 砂漠地対策用イナーシャセパレータ

水のない砂漠地帯に据付けられる場合、開放空気冷却形では外部よりの冷却空気中に含まれる比較的粒度の粗い砂塵などを主体とする塵埃を除去するために、図5に示すようなイナーシャセパレータが発電機の両側端の入口雨仕舞とエアフィルタの間に装荷される。砂塵を含んだ外気は、同図(a)に示すように配列されている一面360本のストラタチューブの入口

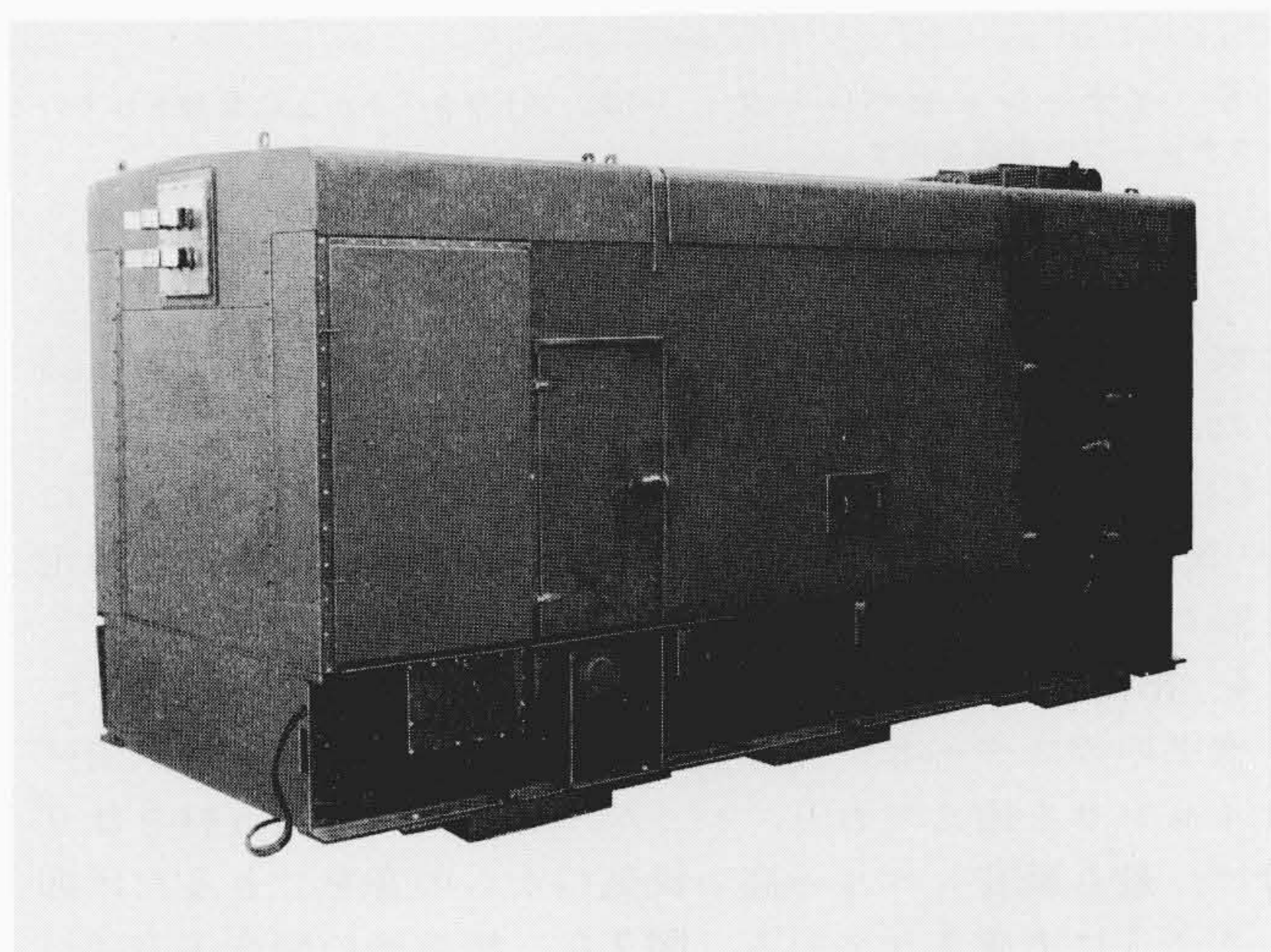


図4 発電機のパッケージ外観 共通ベース上に減速機、発電機及び付属機器が載り、全体をエンクロージャで覆っている。

チューブより吸入される。ストラタチューブは、同図(b)に示すような構造をしている。吸入された空気中のダストはらせん状に取り付けられているペインを通り抜けることにより、遠心力が働くため、チューブ内の壁面近くをらせん状に旋回しながら出口側へ進み、出口チューブと入口チューブの間隙よりイナーシャセパレータ内に取り付けられているブロワによって吸引され、ダスト排出ダクトに導かれて排出される。出口チューブは、入口チューブ中を進んでくる空気のうち中心部だけを通すように設計されているため、ダストの含まない清浄な空気だけが出口チューブ、エアフィルタを通して発電機内に吸引される。

3.3 CO₂ 消火装置

CO₂ガスは、無臭・無害、空気より重い、電気的・化学的に安定である、また消火性能が極めて優れている、入手が容易であるなど、消火用ガスとしての優れた特長を備えている。

日立製作所のCO₂消火装置は、火災検知から保守員の待避のための警報、CO₂ガス一次噴射、二次噴射及び出入口ダンパ閉じなどの動作をすべて自動的に行ない、火災の初期消火

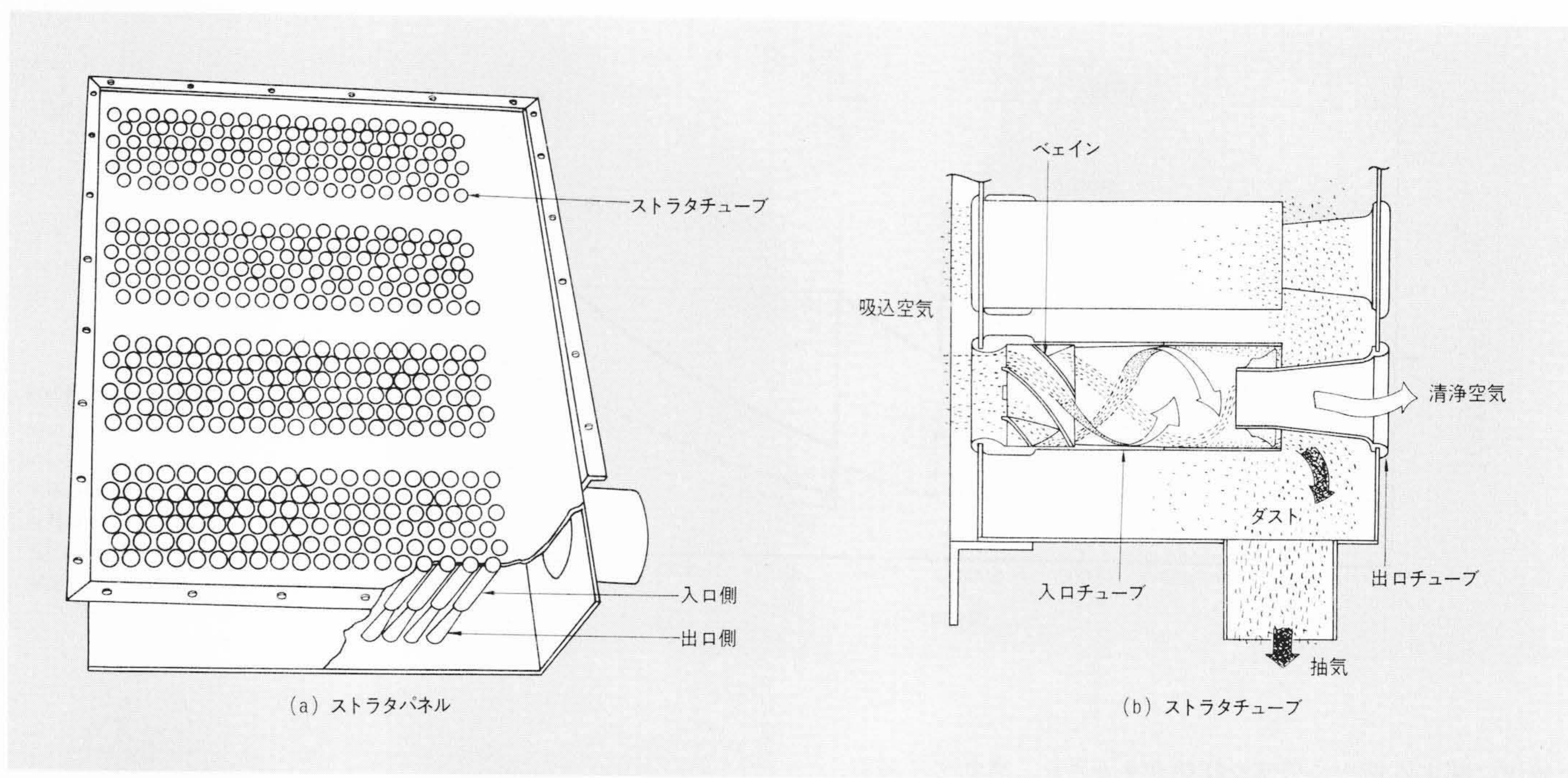


図5 イナーシャセパレータ (a)は、ストラタパネル上に配列されているストラタチューブを、(b)はストラタチューブの構造を示す。

に努め被害をできるだけ少なくするように考慮されている。また、手動でも本操作は可能となっている。

CO₂ガス噴射後の機内ガス濃度曲線は、図6に示すようになりNFPA(National Fire Protection Association)の規定を満たすように考慮されている。

3.4 市街地向け防音対策用サイレンサ

標準のガスタービン発電機は、図1に示すとおり排気側にサイレンサを備えており、パッケージ内側にも吸音材をはり付け、最も騒音レベルの高い排気口からの音をできるだけ抑えるように考慮されている。図7は、標準機の騒音等音圧分布曲線を示すものである。

近年、都市近郊の発電所では、騒音に対する規制値がしだいに厳しくなっており、このような場合には、冷却空気の吸

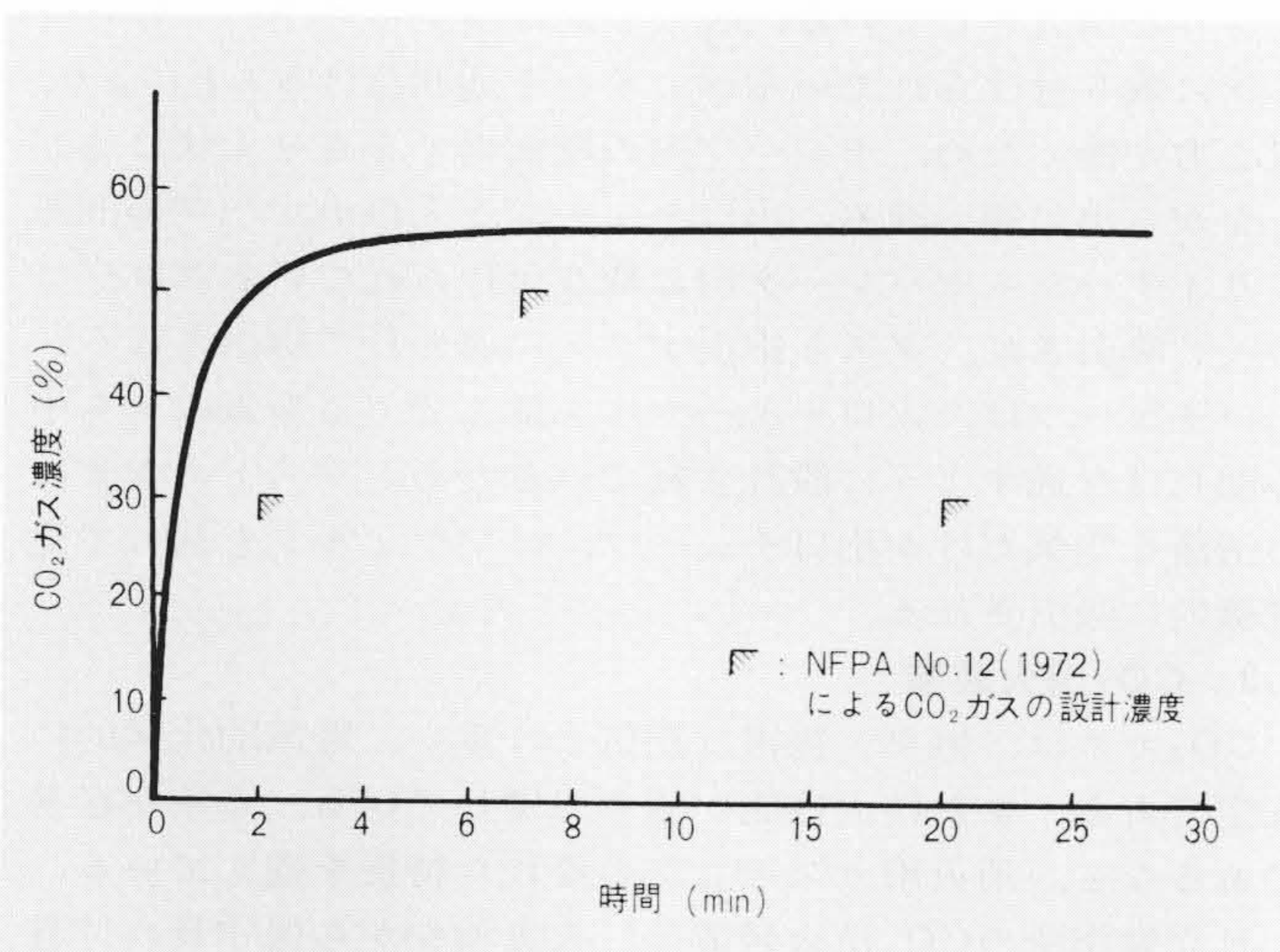


図6 CO₂ガス濃度曲線 火災発生検出時、保守員の待避の時間経過後、ポンペよりCO₂ガスが噴射される。このときの機内のCO₂ガス濃度曲線を示す。

排気側に更にサイレンサを追加し、低騒音とするような工夫がなされる。図8は、標準機と低騒音機の騒音レベルの周波数特性を示したものである。

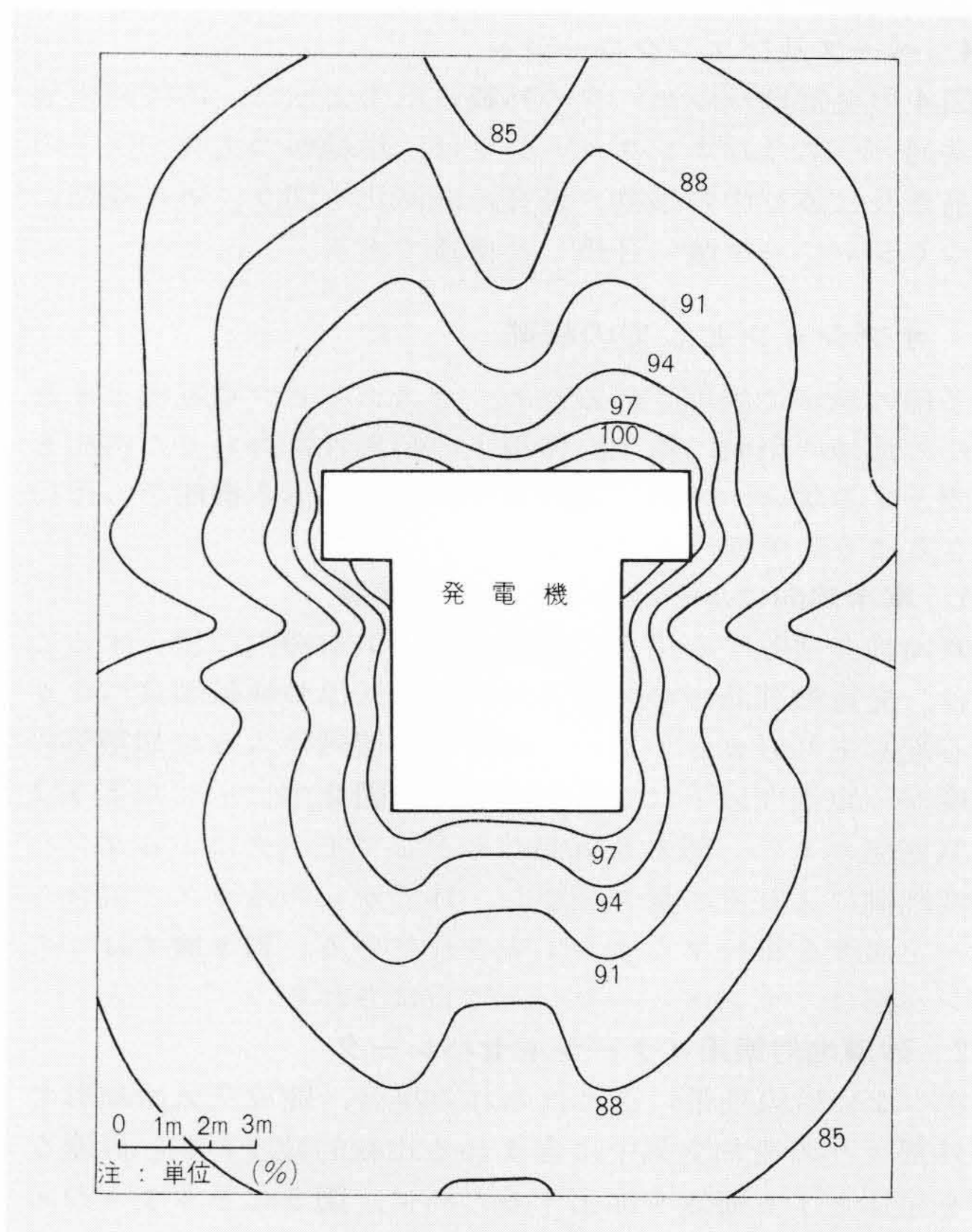


図7 騒音の等音圧分布曲線(相対レベル表示) 発電機パッケージより発する騒音を等音圧レベル(相対レベル-%表示)曲線で表わしたもので、距離とともに騒音が下がっていく様子が分かる。

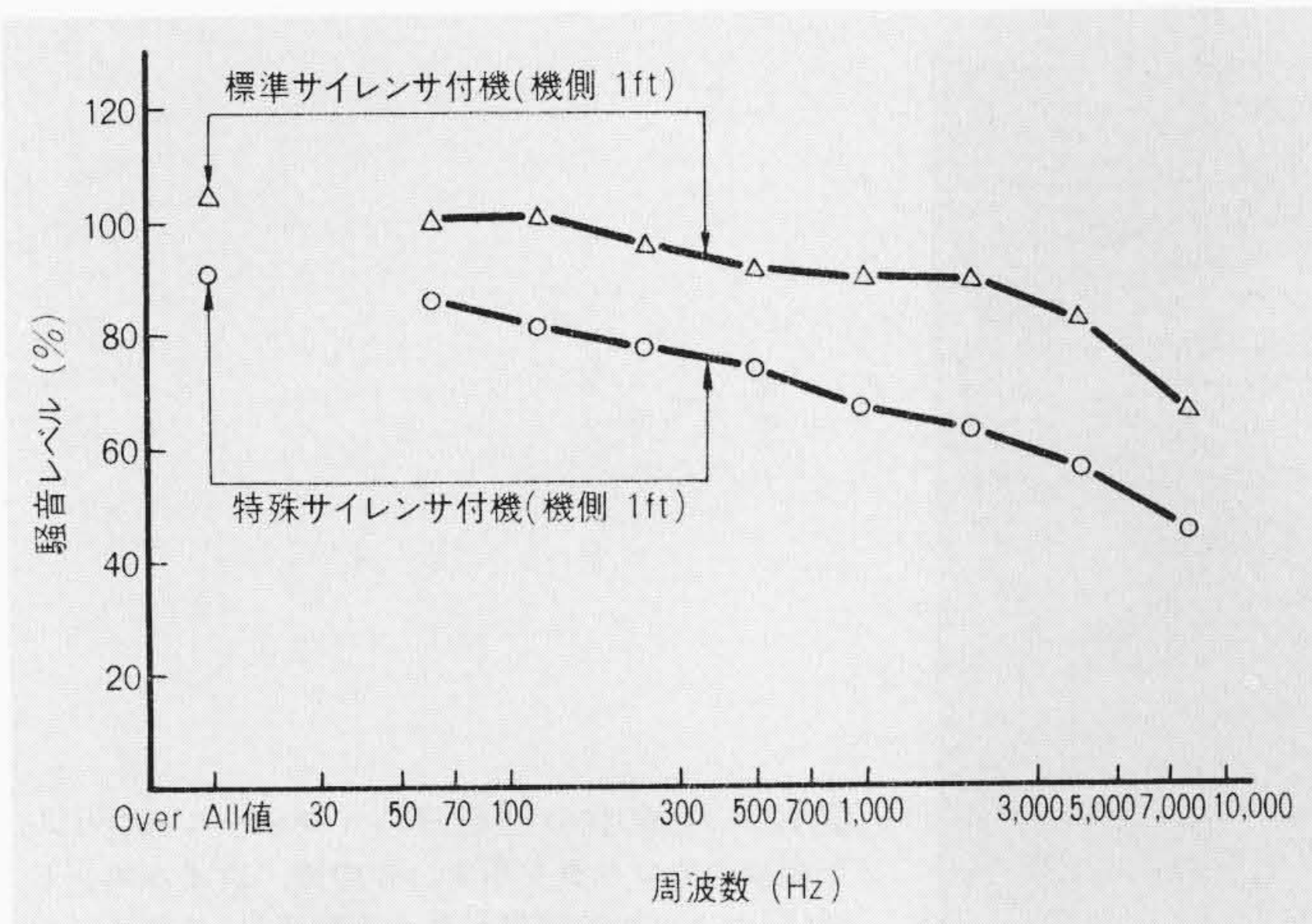


図8 騒音の周波数特性(相対レベル) 標準サイレンサ付機と、特殊サイレンサ付機のオクターブバンド相対騒音レベルを表示したものである。

4 発電機の構造と性能

4.1 構造

4.1.1 巻線絶縁

発電機固定子巻線は、耐コロナ性、耐熱性及び電気的特性の優れたエポキシプリプレグガラスクロス裏打ちマイカテープを用いたF種絶縁日立ハイモールドコイル²⁾を使用している。

図9に、組線後の固定子コイルを示す。

発電機の界磁巻線は、あらかじめ成形された銅帯を溝に挿入しながら組み立てたもので、絶縁はFRP(ガラス繊維強化プラスチック)を主体とするF種絶縁で高速回転による強大な遠心力及び熱膨張に耐えるように考慮されている。

更に、日立製作所ではF種絶縁用プリプレグマイカと同一基材を用い、耐熱特性のいっそう優れたエポキシ系レジンを含浸させたH種プリプレグマイカテープ使用の固定子巻線の開発に成功し、また同時に開発に成功した耐熱特性の優れた特殊FRPを使用したH種絶縁界磁コイルとともに、H種絶縁

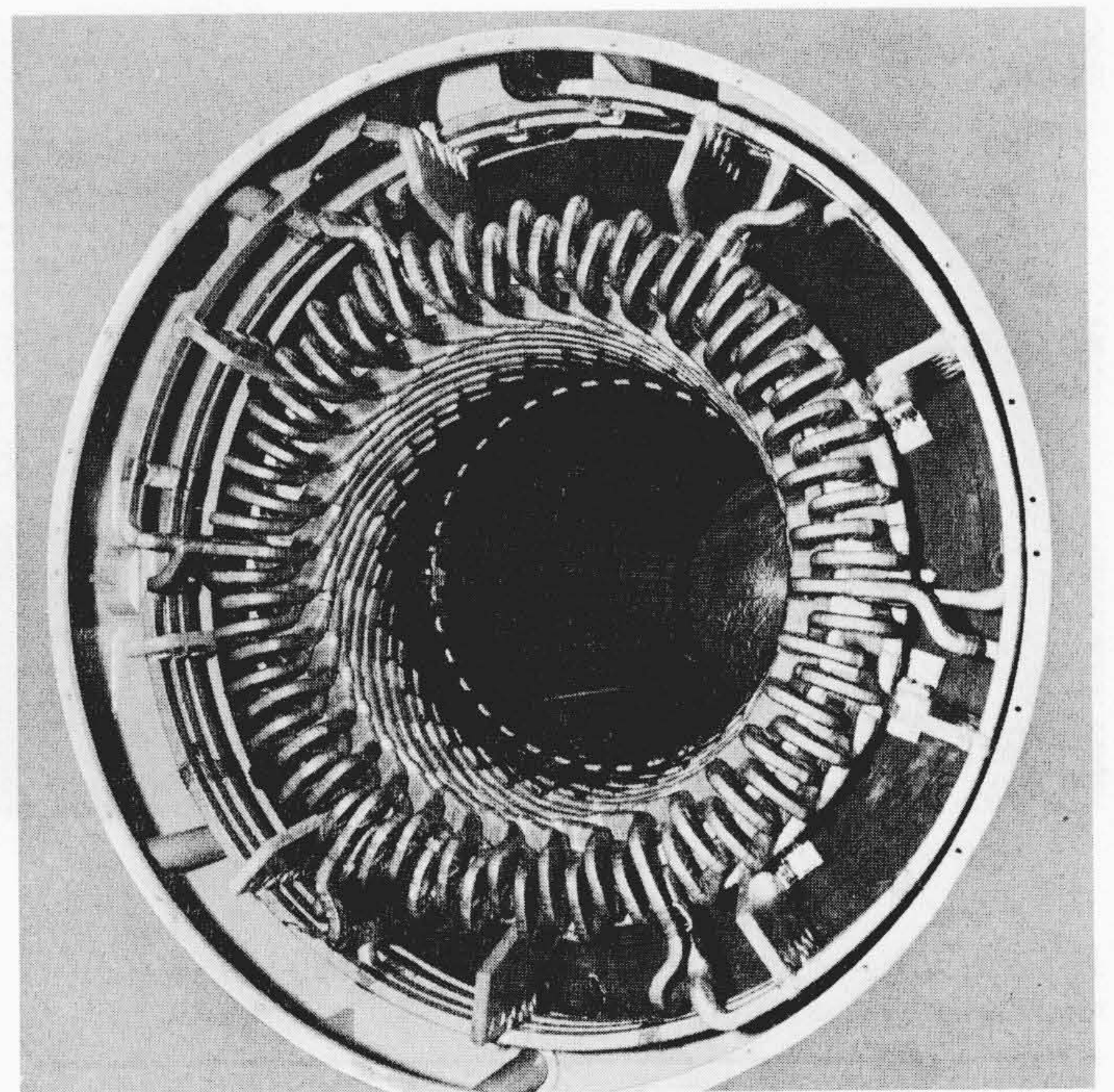


図9 パッケージ形ガスタービン発電機組線後の固定子コイルステータフレーム中に積層された鉄心のスロット中へと組線を完了された固定子コイルを示す。

ガスタービン発電機の試作試験を完了した。この結果、F種絶縁発電機に比べ特にピーク負荷運転時にも負荷力率を大きくとれるので、更に余裕を持った運転が可能となった。表1にF種絶縁発電機及びH種絶縁発電機の仕様を示す。図10はH種固定子コイルの $\tan \delta$ 特性³⁾を、また図11はH種回転子コイルの曲げ強さの熱劣化特性³⁾を示している。

4.1.2 回転子の構造

発電機のあらゆる部品中、最も高い応力が発生する回転子軸には高抗張力、高透磁率の単一鋼塊を使用し、全面にわたる超音波探傷試験及び各部から採取した多数の試験片による厳格な試験に合格したものである。界磁巻線端部に加わる遠

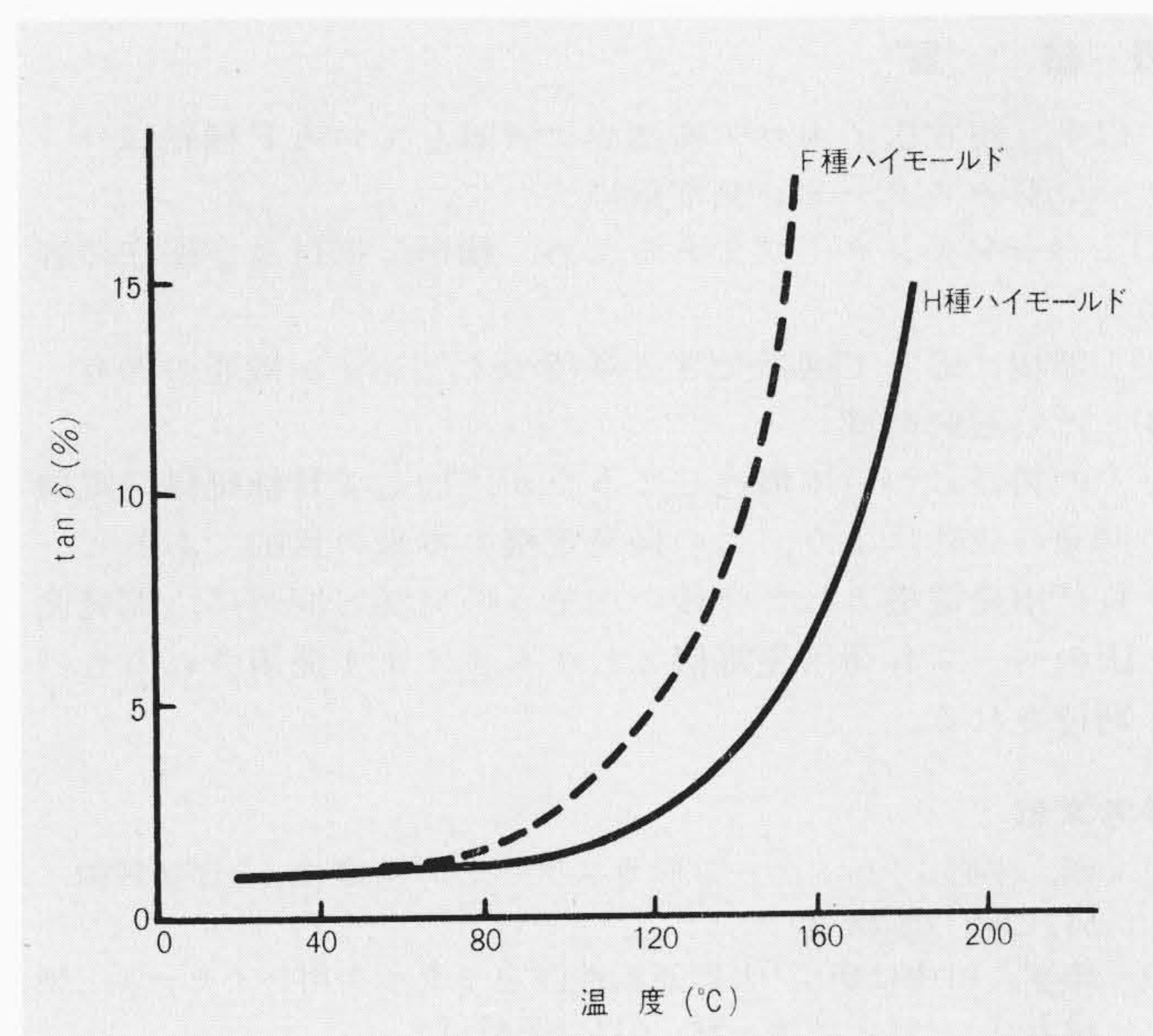


図10 H種コイル $\tan \delta$ —温度特性 160°C以上の高温領域でのH種ハイモールド絶縁材料の信頼性の高さを示すものである。

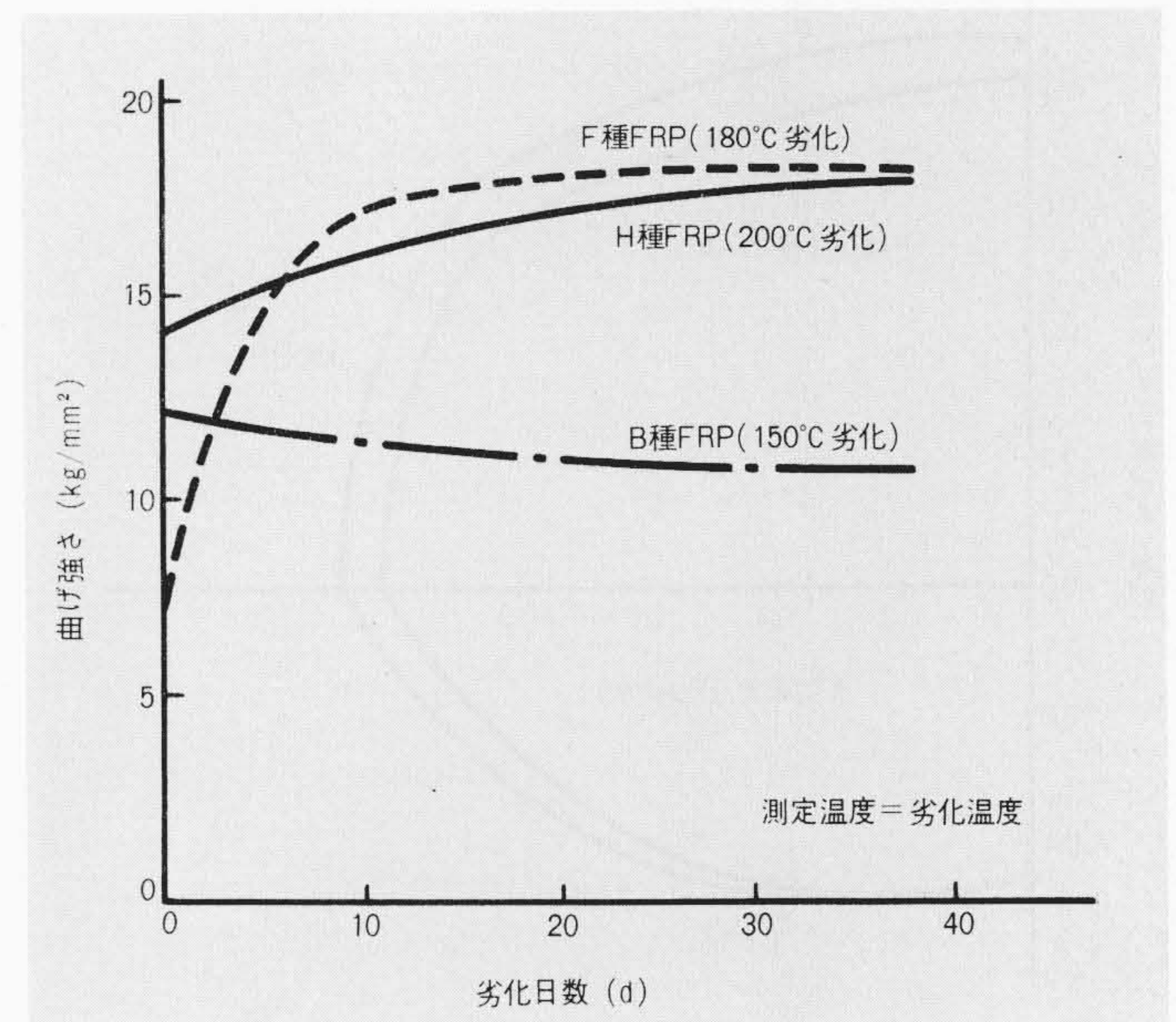


図11 スロットアーマ材料の熱劣化特性 H種回転子コイル用絶縁のH種の高温領域における熱劣化特性は、F種並みに信頼性が高いことを示している。

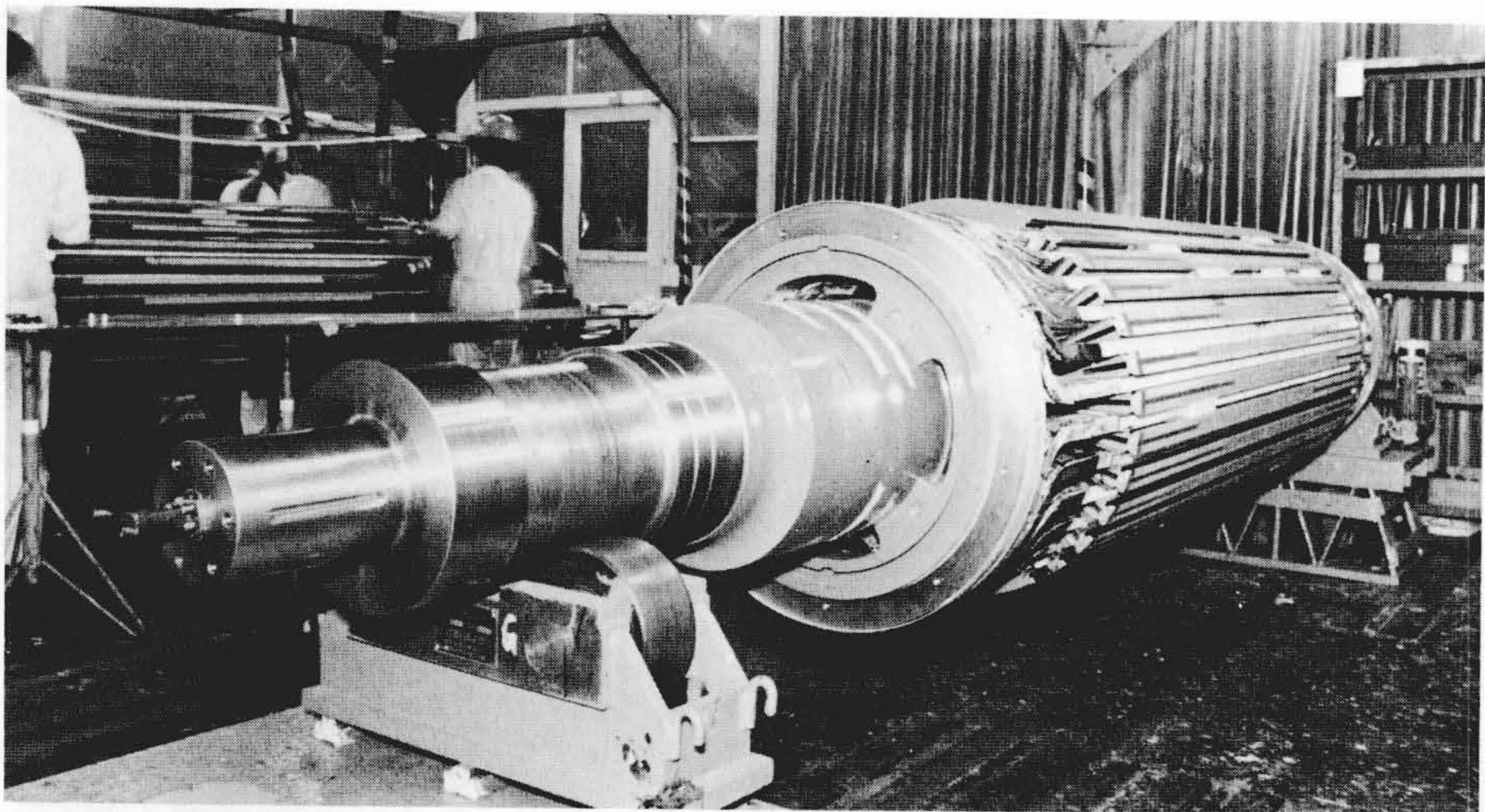


図12 組線中の回転子 フィールドコイルを組線中のロータを示す。この後、コイルエンド部(図中コイルの銅部が見える箇所)にリティニングリングが焼ばめられる。

表1 ガスタービン発電機仕様 F種絶縁及びH種絶縁ガスタービン発電機の50Hz/60Hzにおける標準的仕様を示す。

絶縁クラス		F 種		H 種	
—		出力 (kVA) at 15°C	力 率	出力 (kVA) at 15°C	力 率
運 転 モ ー ド	ベ ー ス	30,313	0.8	30,313	0.8
	ピ ー ク	30,706	0.85	32,625	0.8
	ピークリザーブ	30,556	0.9	32,353	0.85
極 数		2			
周 波 数 (Hz)		50/60			
回 転 数 (rpm)		3,000/3,600			
電 圧 (V)		11,500/13,800			
電 流 (A)		1,522/1,268			

心力は、つりあい環に焼ばめされた極めて抗張力の高い特殊鋼よりできている保持環により支えられている。軸ボディ両端部には発電機内に冷却風を吸入するためのラジアルファンが取り付けられており、更に反直結側軸端には、静止形励磁電源より界磁電流の供給を受けるためのコレクタリングが取り付けられている。図12に巻線挿入後の回転子を示す。

4.1.3 固定子の構造

固定子鉄心は高透磁率けい素鋼板を扇状に打ち抜き、両面にワニス焼付け絶縁処理した後、キーバーに積層して作られている。固定子外わくは鋼板溶接構造で、スプリングロッド支持方式を採用し、運転中の振動や不平衡磁気吸引力に対しても十分耐えられるような構造となっている。

4.2 性 能

表1に示すように、F種絶縁機とH種絶縁機とではピーク負荷時の力率余裕が異なるため、図13に示すような容量曲線となる。また、発電機は急速起動の場合停止状態から定格速度まで約7分間で定格回転数に達して、同期投入後30秒以内で全負荷に至るという過酷な条件にも十分耐えられる設計となっているので、ピーク負荷運転用、あるいは保安電源用として最も適している。

5 結 言

以上、現在広く海外の産業界に貢献しているF種絶縁パッケージ形ガスタービン発電機について、

- (1) パッケージタイプであるため、輸送、据付及び保守の容易さ
- (2) 環境に応じて選択できる多種のオプション機能の保有
- (3) 短い起動時間

などの特長について概述してきたが、加えてH種絶縁発電機の開発の成功により、この種発電機の本来の目的であるピーク負荷用発電機として今後いっそうの発展と同時に、開発途上国のベース負荷用発電機としてもますます愛用されるものと期待される。

参考文献

1) 西, 岸野:「パッケージ形ガスタービン発電機」, 日立評論, 51, 266 (昭44-3)
2) 藤本, 田中ほか:「大形回転機固定子コイル用ハイモールド絶縁方式」, 日立評論, 54, 611 (昭47-7)
3) 安芸, 松延ほか:「大形回転機絶縁の動向」, 日立評論, 58, 865 (昭51-11)

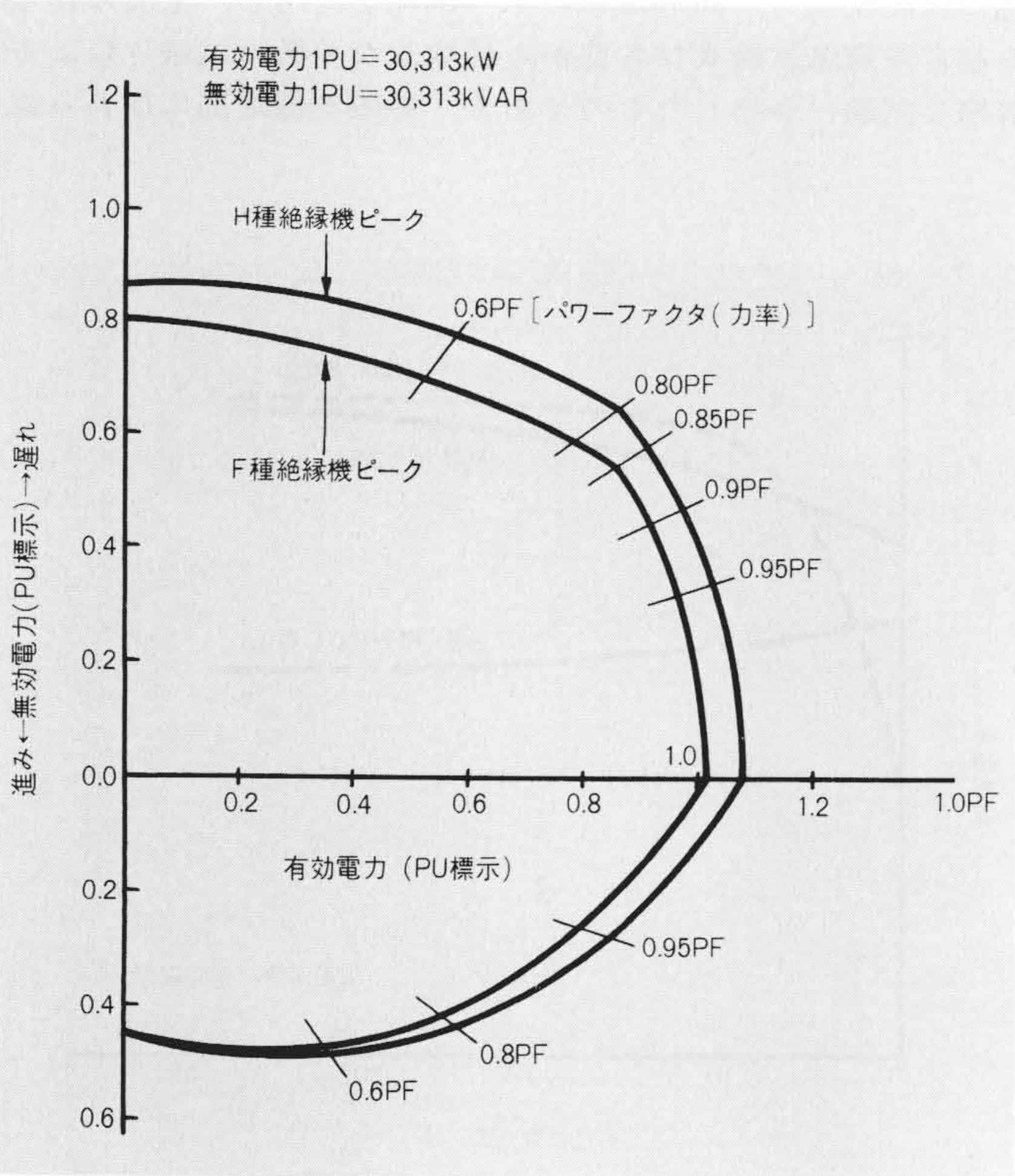


図13 容量曲線例 H種絶縁機は、F種絶縁機に対してピーク負荷時に容量に余裕があることを示している。