

タービン発電機

🔊 タービン発電機, コンバインド, 永久磁石

* 横澤 修 Osamu Yokozawa * 松井隆秀 Takahide Matsui * 村井和也 Kazuya Murai

概要

当社は、タービン発電機に長年の経験と実績を持っており、国内外のお客様からご愛顧をいただいている。

タービン発電機は、一般に蒸気又はガスタービンで駆動され、産業用あるいは電力事業用に、常用、非常用又はピークカット用電源として広く使用されている。

当社タービン発電機の特長は、以下の通りである。

- (1) 永久磁石式発電機 (PMG) 付きブラシレス発電機であり、メンテナンスが容易
- (2) 小形・軽量化構造
- (3) 固定子巻線の一体含浸方式による高信頼性の確保
- (4) 様々な使用環境に応じた構造対応



タービン発電機

1. ま え が き

昨今の電力需要の増加に伴い、自家発電用のタービン発電機も単機容量が増大してきている。また、従来から使用されている蒸気タービンに加え、ガスタービンを使用した自家発電システムも増えている。これは最近のガスタービンの進歩により、排熱ボイラと組み合わせて熱効率の向上が図れるからである。

当社では、2極タービン発電機として75MVAまで、また4極タービン発電機として45MVAまでの範囲をラインアップしている。本稿では、最近の納入実績の中から、特に一軸形コンバインドサイクル用発電機、屋外特殊雰囲気に対応したガスタービン用発電機及び特定の原動機向けガスタービン用発電機について紹介する。

2. 一軸形コンバインドサイクル用発電機

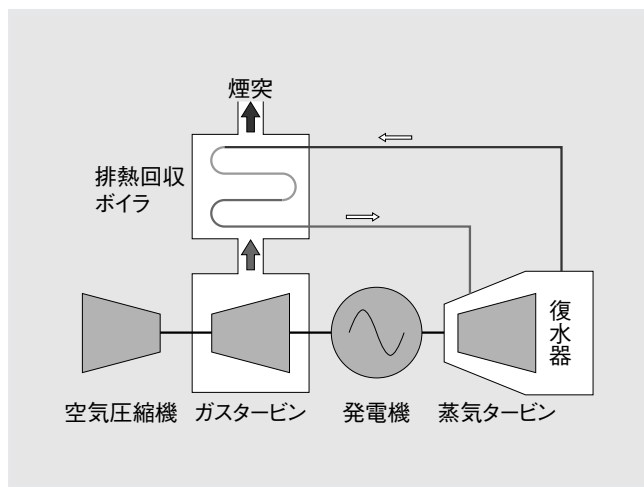
コンバインドサイクル発電は、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた発電システムで、ガスタービンの排ガスを利用して水を沸騰させ蒸気タービンを回して発電を行う。このため一般の火力発電に比べて発電量に対するCO₂の排出量が少なく、環境面からも注目されている発電システムである。

コンバインドサイクル発電の方式は二つある。一つは、ガスタービン用の発電機と蒸気タービン用の発電機を分けた多軸方式である。もう一つは、第1図に示すガスタービンと蒸気タービンが1台の発電機を駆動する一軸方式である。一軸方式の発電機は、発電機の両側からガスタービンと蒸気タービンで駆動する軸両出しタイプの構造を採用している。

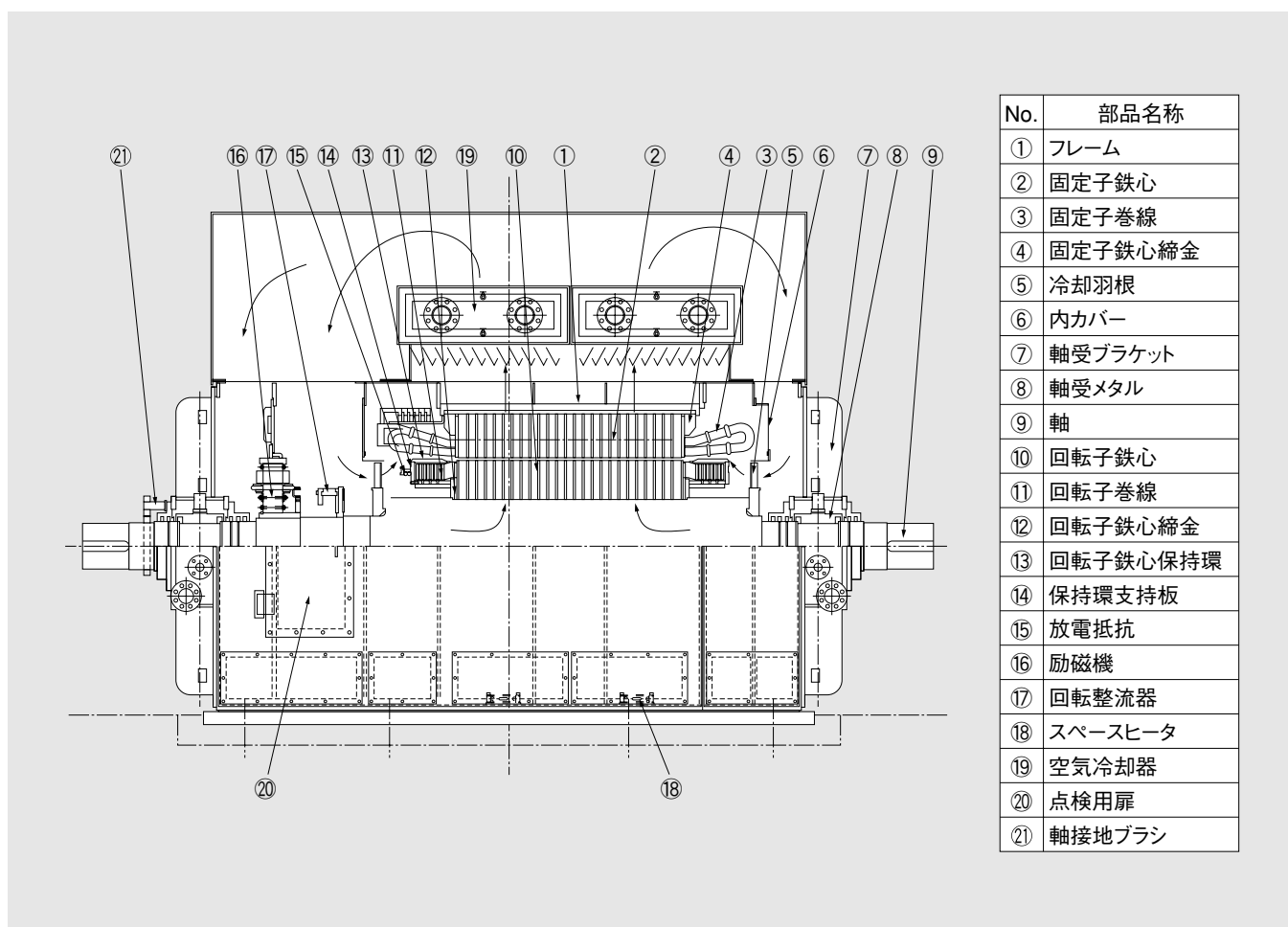
通常、1台のタービンで駆動される発電機の励磁機及び回転整流器は反直結側（反駆動機側）のフレーム外にオーバーハングの形で取り付けられている。しかし、本発電機のように両軸駆動の場合、このような構造では励磁機側のオーバーハングは

長くなってしまい、危険速度の低下や軸の振れ回りも大きくなり、タービンと直結した時の振動発生 の要因となりやすい。このため、本発電機では励磁機及び回転整流器をフレーム内に収納する形を採用している。第2図と第3図にコンバインドサイクル発電用両軸出し4極発電機と2極発電機をそれぞれ示す。この形を採用することにより、励磁機側も軸受部から出る軸の長さが駆動機側のように短くすることができ、軸端の振れ回りも小さくなる。

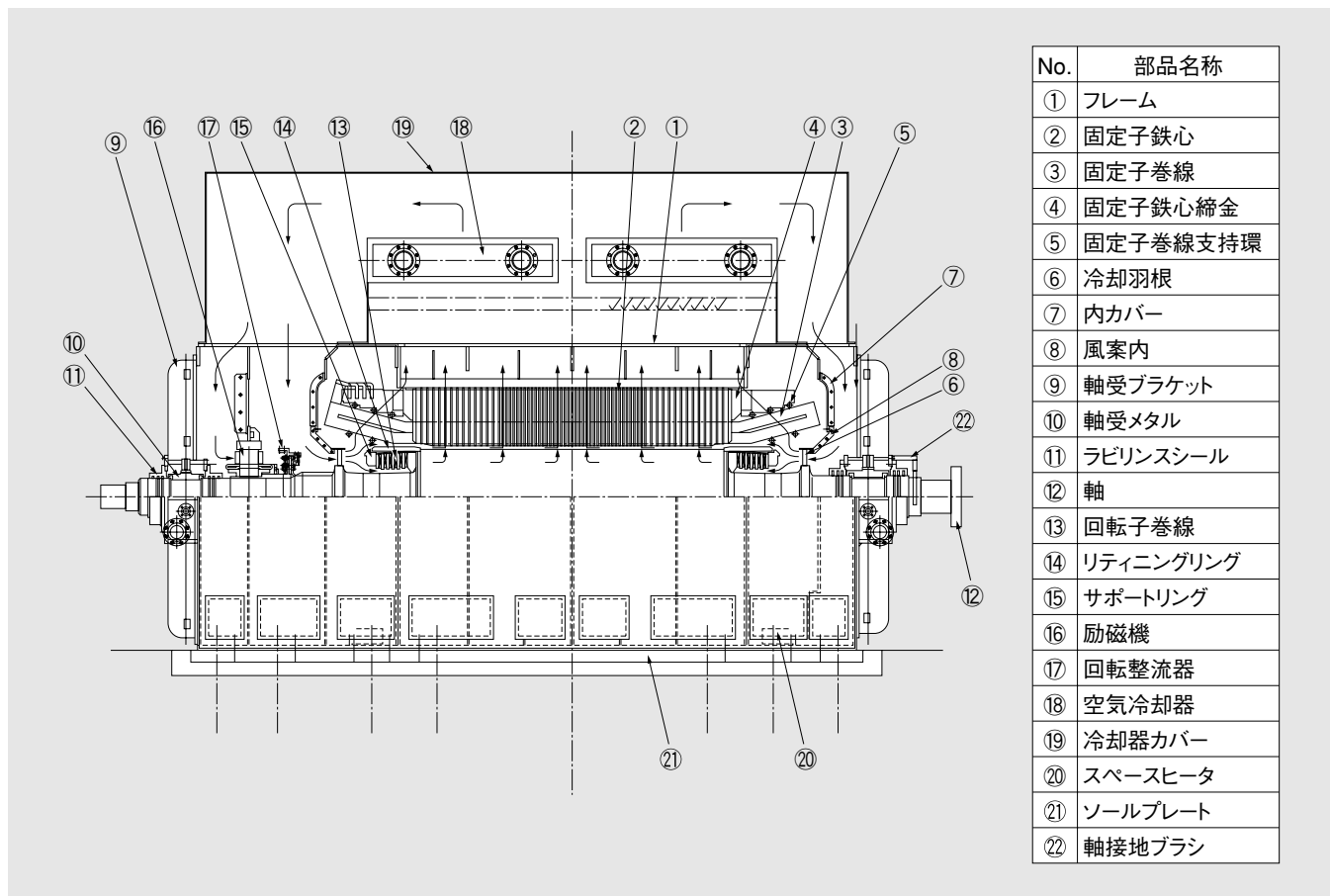
また、4極発電機は1次の危険速度の下に定格回転数がある剛性軸を採用し、2極発電機は1次と2次の危険速度の間に定格回転速度がある弾性軸を採用している。いずれの発電機も危険速度が定格回転速度に近づかないようにするため、軸受はブラケットタイプを採用し、軸受スパンをできる限り短くしている。励磁機、回転整流器の配置も危険速度を考慮しながらシミュレーションを繰り返し、安全性の高い最適な形を決定している。第4図に



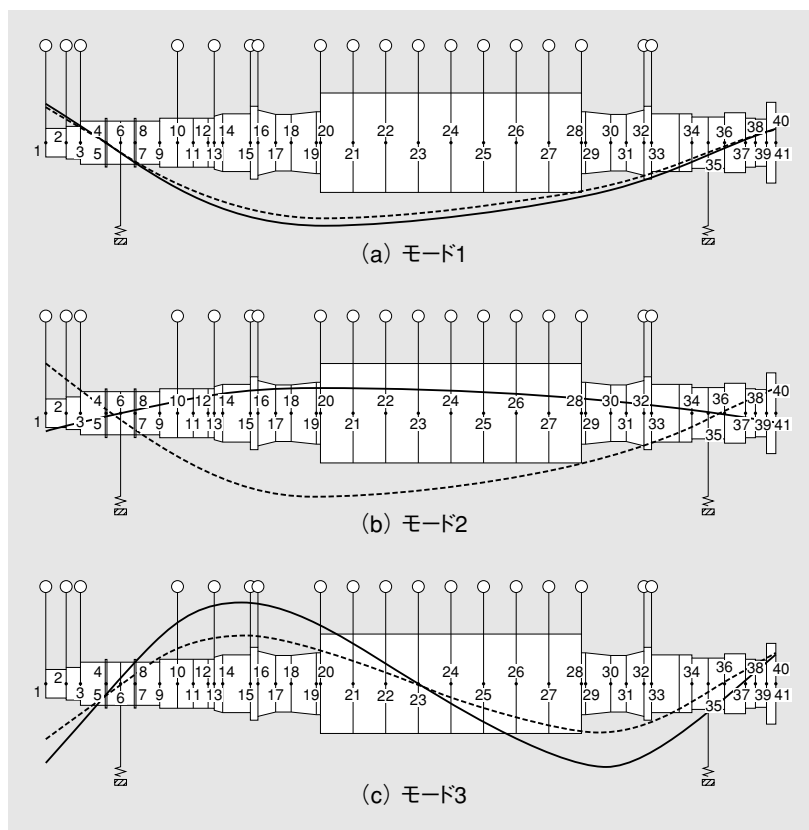
第1図 コンバインドサイクル発電システム
ガスタービンの排ガスの余熱を利用して蒸気タービンを回して発電を行う。



第2図 コンバインドサイクル発電用両軸出し4極発電機
4極発電機の構造を示す。



第3図 コンバインドサイクル発電用両軸出し2極発電機
2極発電機の構造を示す。

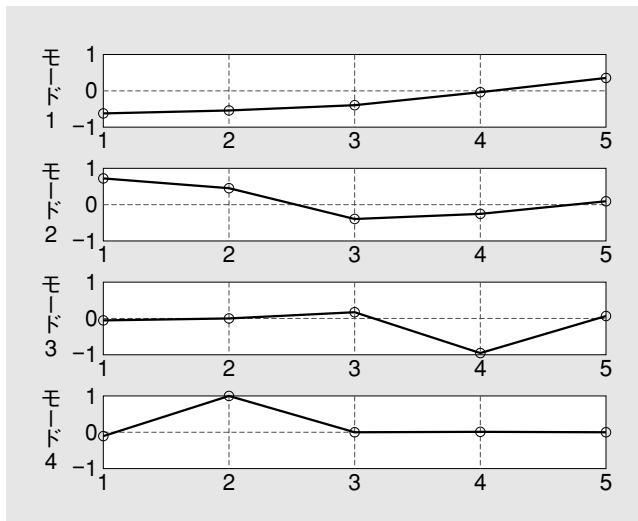


第4図 発電機単体軸たわみ振動モード解析結果
2極発電機の振動モードの例を示す。

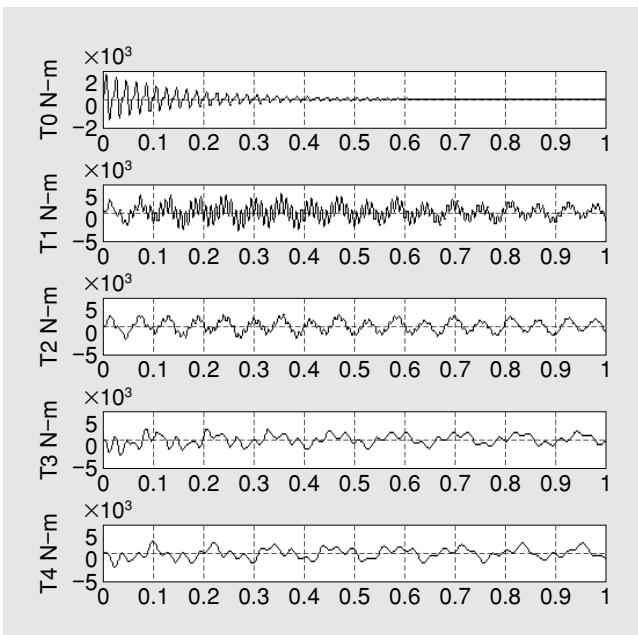
発電機単体での軸たわみ振動モード解析結果を示す。また、第5図と第6図に、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた全体システムでのねじり振動における振動モードと短絡事故時のねじり振動の応答計算結果をそれぞれ示す。

フレームは固定子の質量を支えるだけでなく、両端面のブラケットにより回転子を支え、運転中には固定子からの電磁力を受け、更には短絡時の荷重にも耐えなければならない。これらの条件に対し十分な剛性を考慮し、またフレーム内部に収納した励磁機、回転整流器の点検も容易に行える構造となっている。

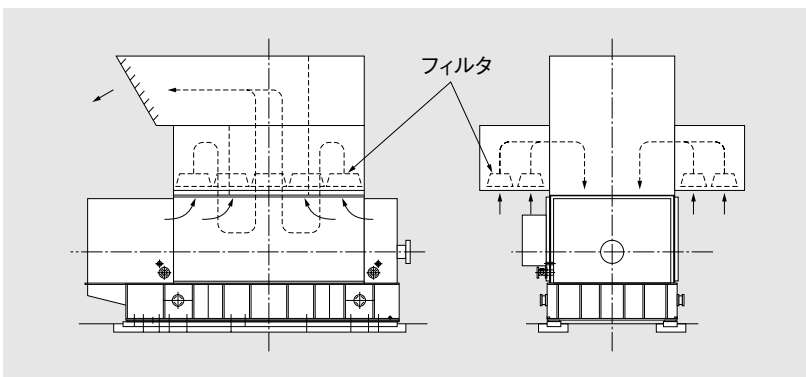
固定子巻線は鉄心コイルをはめ込み後、真空含浸を行う一体含浸方式を採用し、絶縁性及び機械強度的にも信頼性の高い絶縁としている。当社で製作



第5図 発電システム全体のねじり振動モード解析結果
 グラフのX軸方向で1~5の質点はそれぞれ、1はスチームタービン、2は減速機、3は発電機、4は減速機、5はガスタービンを示す。



第6図 発電システム全体のねじり振動応答計算結果
 T0は発電機の短絡時発生トルクを示す。T1~T4はそれぞれの質点間の伝達トルクを示す。例えば、T1は質点1（スチームタービン）と質点2（減速機）の間の伝達トルクである。



第7図 発電機構造図

矢印は冷却風流れを示す。冷却風はフィルタを経由して発電機内部に導入される。

するタービン発電機は、全範囲この一体含浸方式を採用しており、高い評価を得ている。

3. 屋外設置開放形ガスタービン用発電機

当社製作のタービン用発電機は、発電機上部に水冷熱交換器を搭載した全閉構造での冷却方式を採用する事例が多い。しかし、冷却水の供給が望めない地域においても運用を可能にするため、屋外設置対応の開放形ガスタービン用発電機もラインアップしている。また、多様な環境に対応できるように、発電機上部に搭載するサイレンサを交換することで、一般屋外地域、沿岸地域、更に砂漠地域での運用が可能である。その特長は、以下の通りである。

- (1) 屋外専用設計の採用により、エンクロージャをかぶせることなく発電機単体で屋外設置が可能
- (2) 発電機本体は同一仕様で、サイレンサを変更することで、水冷熱交換器式（全閉形）にも対応が可能
- (3) 特殊環境対策として、塩害防止フィルタやダストルーバーなどの吸気システムを追加することで、沿岸地域や砂漠地域での運転が可能
- (4) 寒冷地において、吸気で発電機が凍結する環境では、発電機の排気（暖気）で吸気（冷気）を暖めるエアリサーキュレーションシステムを適用することで凍結防止が可能

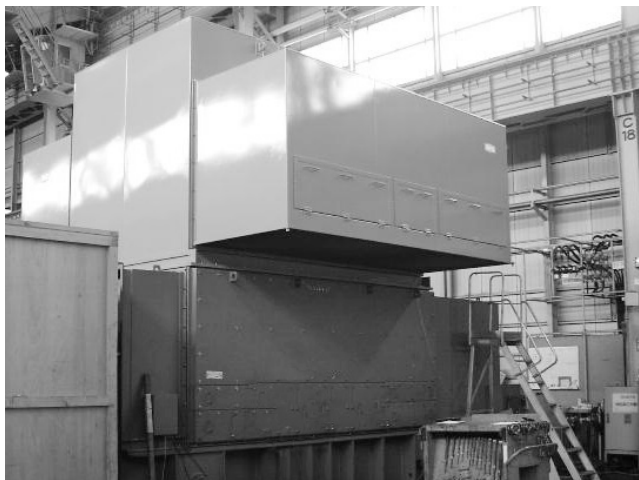
以下に屋外開放形発電機の具体例を示す。

3.1 一般地域における屋外開放形発電機

発電機の冷却風を外気から直接発電機内部に取り込むため、じんあいなどの影響による冷却効率の低下やコイルの汚損防止を目的として、発電機の吸気口にフィルタを設けている。第7図に発電機構造を示す。

このフィルタシステムの適用にあたっては、様々なサイトでの経験を基に、以下の社内基準を定め採用を行っている。

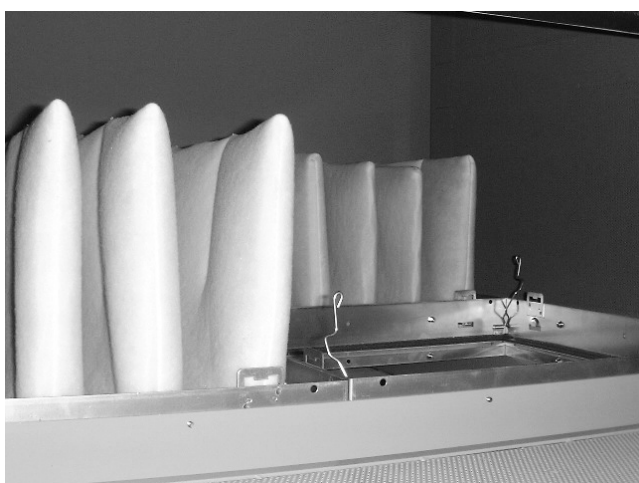
- (1) フィルタ性能として捕集粒径 $10\mu\text{m}$ 、捕集率90%以上を要求し、発電機の運転に影響が無いレベルまで粉じんの侵入を軽減。
- (2) 粉じん濃度として、環境基準の屋外での浮遊粒子物質1日の平均濃度



第8図 一般地域用屋外開放形発電機
2極発電機の外観を示す。



第10図 沿岸地域用屋外開放形発電機
塩害防止フィルタを適用した2極発電機の外観を示す。



第9図 フィルタの取り付け状況
フィルタ点検扉をあけた状態を示す。右手前のフィルタは取り外している。



第11図 フィルタの取り付け状況
フィルタ点検扉をあけた状態を示す。上段は塩害防止フィルタ、下段はプレフィルタである。

0.1mg/m³を適用し、フィルタ寿命は基本的に1年を確保。

(3) 吸気面積を広くし風速を低下させ、異物の進入防止及びフィルタ寿命確保。また、害虫などの異物吸い込みを防止するよう吸気口位置を高くしている。

第8図に一般地域用屋外開放形発電機の外観を、第9図にフィルタ取り付け状況を示す。

3.2 沿岸地域における屋外開放形発電機

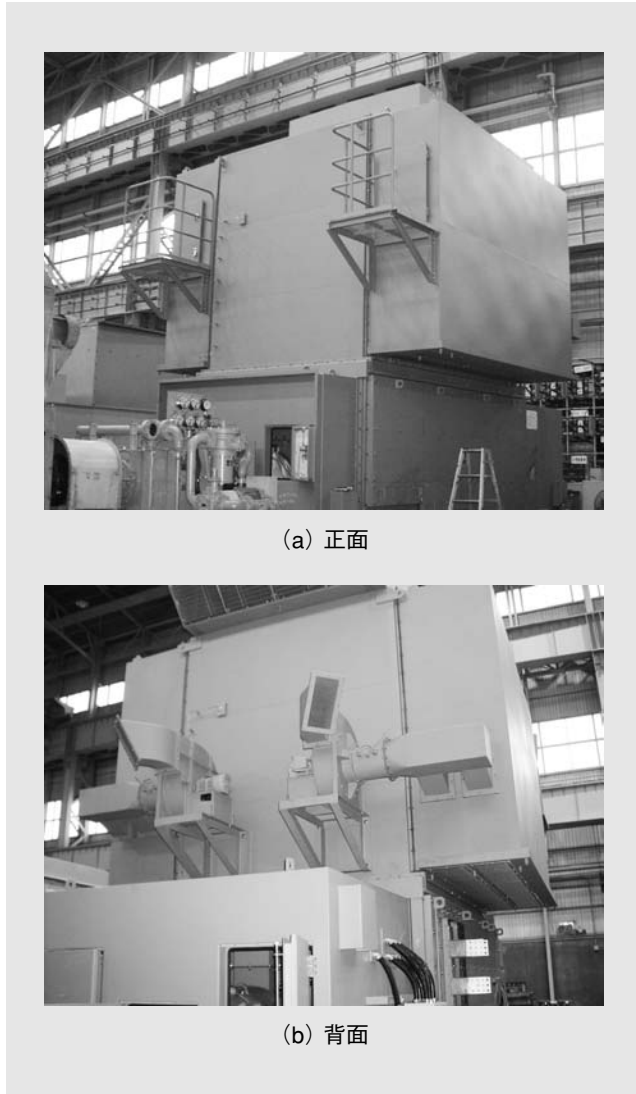
沿岸設置を考慮するためメインフィルタに塩害防止フィルタを設け、その粗じん捕集用としてプレフィルタを設ける構成としている。

一般的に、海岸付近における塩害粒子濃度は50μg/m³と言われている。塩害防止フィルタは、これを内陸部（海岸より20km以上）の塩害粒子濃度

4μg/m³程度まで除去する性能を有し、塩害の影響を受けにくいものとしている。なお、台風時には海水の飛沫（粒径20μm程度）が大量に発生するが、飛沫はプレフィルタにより大部分を捕集し滴下させている。第10図に沿岸地域用屋外開放形発電機の外観を、第11図にフィルタの取り付け状況を示す。

3.3 砂漠地域における屋外開放形発電機

当社は、ダストルーバー（進和テック株製）を採用し、砂漠での運転に対応している。ダストルーバーは、捕集ダスト排出用のダスト・シュートを備えたハウジング内に、必要個数のV字形ポケットを納めたものより成り立っている。このV字形ポケットに流入する冷却風が、側壁のルーバ・スリットを通り抜ける際、気流の方向を急激に変化させるが、その中に含まれている粉じんは、慣性



(a) 正面

(b) 背面

第12図 砂漠地域用屋外開放形発電機

(a) 砂漠用フィルタを搭載した発電機を正面から見た外観を示す。
 (b) 砂漠用フィルタを搭載した発電機を背面から見た外観を示す。
 2台見えるファンは粉じん排出用のダストルーバー用2次ファンである。

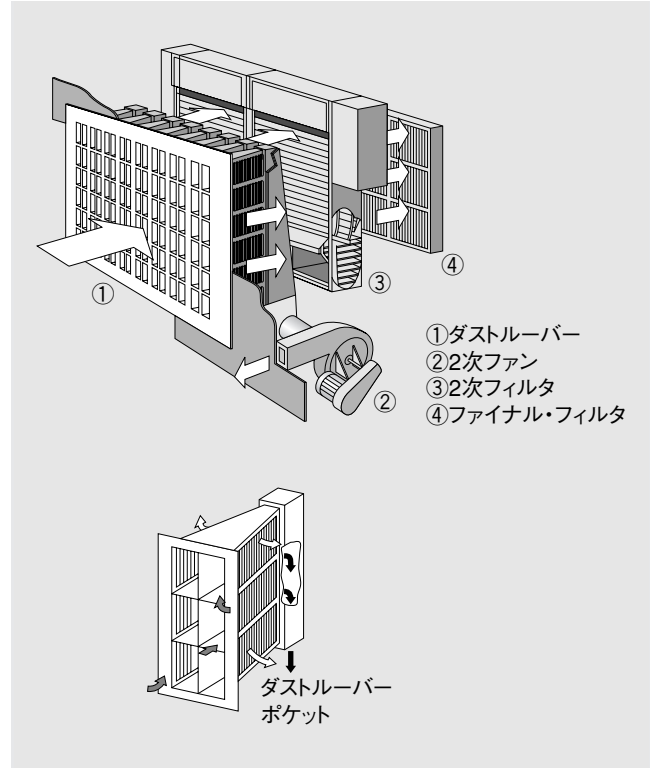
力が作用するため方向を転換することができず空気から分離する。この粉じんは少量の空気と共に、慣性力によりポケットの狭まった末端に向かって進み、2次ファンによって外部に排出される。

冷却風がダストルーバーを通過した後、更に2次フィルタ及びファイナルフィルタにより、発電機運転に影響の出ないよう更に粉じんを除去している。

第12図に砂漠地域用屋外開放形発電機の正面と背面から見た外観を、第13図にダストルーバーの構造を示す。

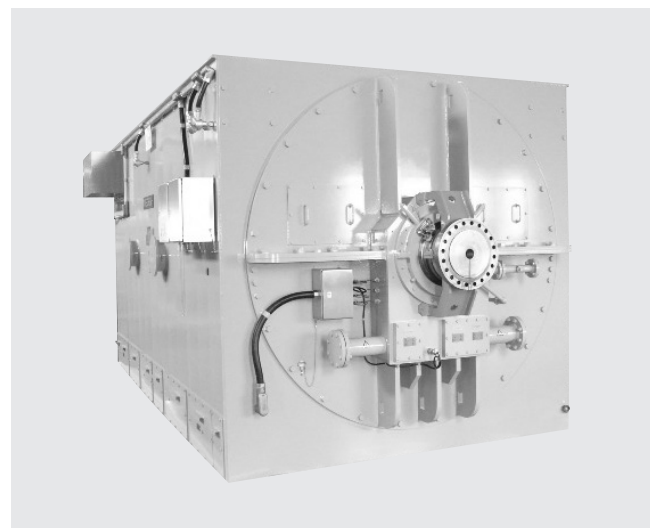
4. 特定原動機向けガスタービン用発電機

当社は、2000年以来GE傘下のパッケージャーであるGE Packaged Power, LP社に、GEガスタービ



第13図 ダストルーバーの構造

砂漠地帯などの高ダスト濃度地域での比較的目の荒い粉じん除去に使用する。



第14図 LM6000対応ガスタービン発電機
 タービン側から見た発電機の外観を示す。

ンLM6000PC対応2極タービン発電機を納入し、2010年2月には60号機を出荷するに至った。第14図にLM6000対応ガスタービン発電機の外観を示す。

4.1 定格

第1表に発電機定格を示す。本発電機は60Hz及び50Hz両用の2重定格で、ANSI/IECに準拠している。また、EU圏向けにCEマーキングにも対応している。

第1表 発電機定格

2重定格の主要諸元を示す。

適用規格	ANSI C 50.14	IEC 60034
出力 (kVA)	72,000	64,500
電圧 (V)	13,800	11,500
力率	0.85	0.8
周波数 (Hz)	60	50
回転速度 (min ⁻¹)	3600	3000
基準温度 (°C)	15	15

4.2 特長

発電機は、同一軸上に交流励磁機、回転整流器及び永久磁石式発電機を装備したブラシレスタイプである。

本発電機はGEのLM6000ガスタービンと共にパッケージ内に設置される。据え付け、主端子、タービン軸との取り合いなどの制約寸法以外は当社の独自設計を導入し、同一仕様で標準化を図り、ロット生産を可能にしている。

冷却は自力出口ダクト通風方式で、回転子軸上に設けたファンによりパッケージ内部の空気を吸入して発電機を冷却し、発電機上部に設置したダクトからパッケージ外部に排出する構造となっている。

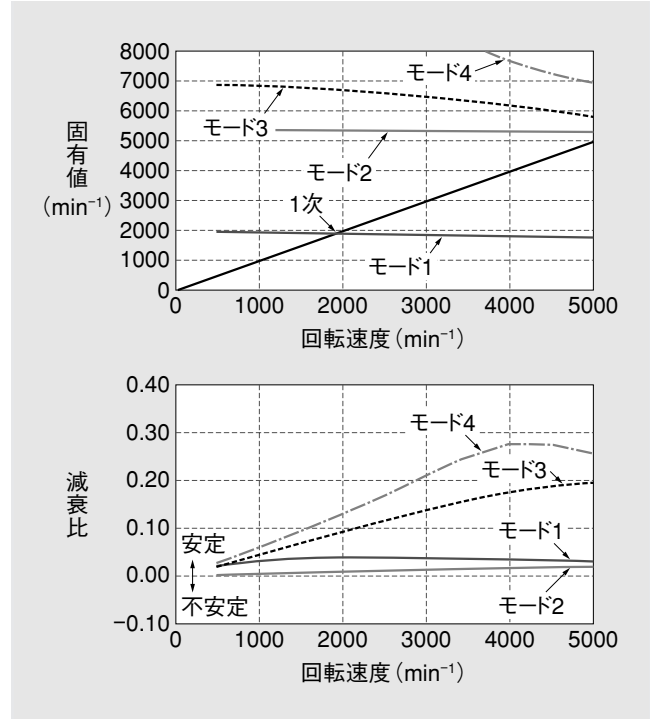
また、発電機は60Hz機あるいは50Hz機として使用されるが、回転速度の変化に応じて所要冷却風量とパッケージ側の圧力損失とがマッチングするように、ファン特性を持たせることで両用を可能にしている。

固定子鉄心は、2極機特有の2倍周波数による鉄心振動が基礎台への伝播を低減するように、鉄板溶接構造の固定子枠内に固定されている。また、鉄心の軸方向に適切な間隔の通風ダクトを配置した冷却構造の単式通風方式（冷却空気を固定子鉄心両端軸方向から通し、固定子鉄心背部へ排出する通風方式）を採用している。

回転子鉄心と軸は、磁気特性の優れた低合金鋼の一体鍛造品から削り出した単一鋼槐式で、各コイル溝の両側に通風溝を配した間接冷却方式を適用し、界磁巻線が吸気の汚れの影響を受けにくい構造としている。

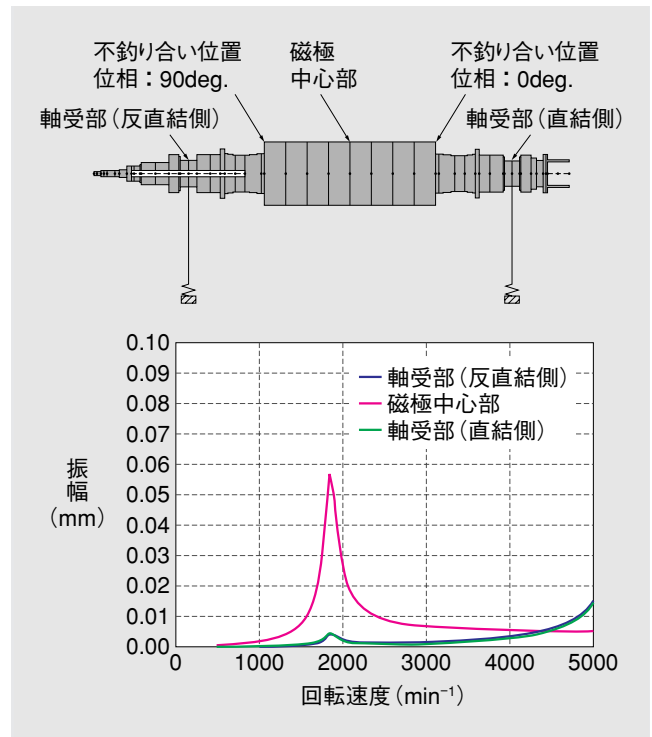
軸受は、強制給油方式のすべり軸受で、安定性の高いティルティングパッド軸受を採用している。

第15図に軸安定解析例を、第16図に不釣り合い応



第15図 軸安定解析例

危険速度は定格速度から十分離れており、不安定領域も存在しない。



第16図 不釣り合い応答解析例

1次危険速度における軸受部の振幅値は小さい。

答解析例を示す。直結側軸受は、起動時及び運転時のスラスト荷重を支えるためテーパランドスラスト軸受を装備し、軸受保護のため、反直結側軸受で軸電流防止絶縁を行っている。また、両軸受共に起動トルク低減のためジャッキアップ用の装

備を有している。

60Hz適用機には、軸受の給油用として軸端部にポンプを直結している。起動時及び停止時は、外部強制給油装置によって軸受に給油され、定格運転では軸端に装備したポンプで給油する構造である。

主端子は固定子枠側面に配置され、パッケージ内で外部引き出し端子に接続される。周波数によって回転方向と相順が変わるが、系統との連系はパッケージ外部の結線で処置される。

また、界磁巻線には地絡検出のため励磁機回転子に埋め込まれた専用の電源コイルから、界磁地絡モジュール（回転部）に電源供給する非接触式界磁地絡装置を装備している。

4.3 今後の展開

2010年秋、LM6000ガスタービンの開発と連動した新モデル機（通算61号機）のタイプテストを完了する予定である。現行モデル機に加え、2008年のリーマンショック以降の金融危機に発した世界規模の経済不況からの回復需要に合わせ、近々の市場投入が期待される。

5. む す び

以上、当社タービン発電機の技術的特長と構造について紹介した。今後もお客様のニーズを取り入れ、様々な使用環境に応じた製品を的確に提供

し、お客様のお役に立ちたいと考えている。

また、屋外形発電機用フィルタシステムの設計に当たっては、進和テック㈱の関係各位に厚く御礼を申し上げます次第である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



横澤 修 Osamu Yokozawa
タービン発電機の設計に従事



松井隆秀 Takahide Matsui
タービン発電機の設計に従事



村井和也 Kazuya Murai
タービン発電機の設計に従事