

最近におけるタービン発電機の新技术

Recent Technique for Large Capacity Turbine Generators

タービン発電機は大容量化がやや鈍化してゆくなかで、信頼性の確保が、従来にまして重視されてきている。このために各種の新技术が開発されているし、また、省エネルギー、高効率運用のため、起動・停止頻度の高い中間負荷に、タービン発電機が使用されるようになってきた。

丹羽貞彦* Sadahiko Niwa

小松弘二* Hiroji Komatsu

このような状況のもとでは、発電機を設計、製作するに当たり、従来の技術をもう一度見直して新しい技術へと育ててゆくことが必要である。

この論文では、原子力機を中心とした大容量化に伴う新技术、ミドル火力運用に対する考慮、励磁方式の動向、運転中に、機器の正常性を確認するための予防保全モニタなどについて最新の技術を説明する。

1 緒言

近年、タービン発電機の大容量化傾向は、従来に比較して鈍化はしているが、原子力用発電機では100万kW級が標準機種になりつつあるなど、着実な歩みが見られる。また火力用発電機では、従来のベース負荷の運用から、起動・停止の頻繁な中間負荷火力運用に移行しつつある。このような状況のも

とで、タービン発電機の大容量化、新運用方式に対する信頼性確保及び性能向上のための技術開発が進められている。

この論文では、タービン発電機の大容量化対策、ミドル火力対策、サイリスタ分巻自励超速応励磁方式などについて、最近の新技术を説明する。

2 大容量化に伴う新技术

図1に、タービン発電機単機容量の推移(日立製作所実績)を示す。火力用二極機がやや頭打ちの傾向であるのに対して、原子力用四極機は、着実に大容量化が進んでいることが分かる。表1に大容量原子力発電機の構造比較と仕様例を示す。原子力発電機の場合は、1,000MWを超える場合でも、その構造は基本的には従来機のその延長線上にはあるが、(1)効率

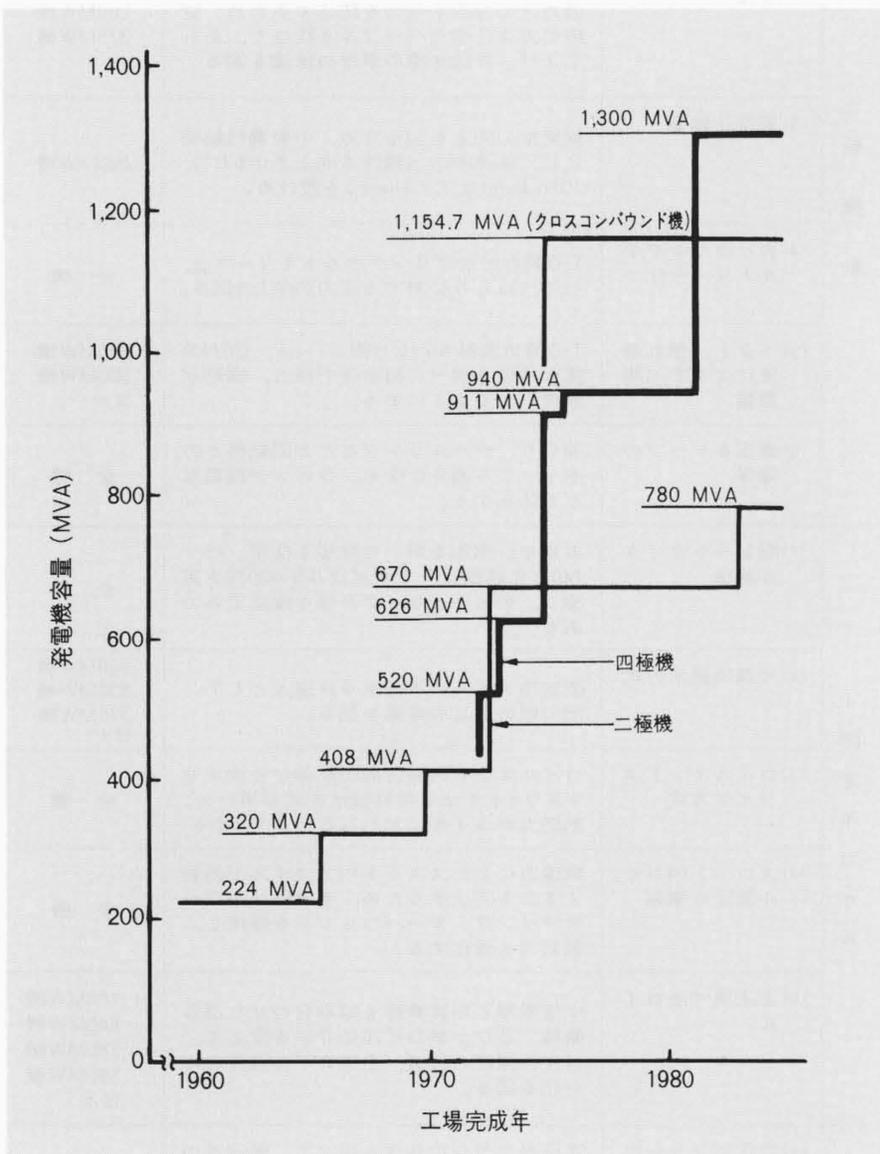


図1 タービン発電機単機容量の推移 タービン発電機の単機容量は、二極機は大容量化がやや頭打ちの傾向にあるのに対し、四極機は着実に大容量化が進んでいる。

表1 大容量原子力発電機構造比較と仕様例 1,000MWを超える発電機でも、従来機と基本的構造は同一であるが、冷却方法の改善、水素ガス圧力の高圧化、電磁力対策などに新技术が適用されている。

項目	構造及び仕様例			
容量 (MVA)	~750	~1,100	~1,500	1,500~
水素ガス圧力 (atg)	3.2	4.2	5.3	5.3
回転子コイル	ラジアルフロー方式直接水素ガス冷却	ラジアルフロー方式直接水素ガス冷却(改良形, 通風孔ピッチは左記のま)	ギャップピックアップ方式あるいは直接水冷却方式	
固定子コイル	直接水冷却 往復流	直接水冷却 片道流 上下異寸法コイル		
固定子フレーム	四隅縦置冷却器方式	二重冷却器・上置方式(ツインドーム), 又は四隅縦置冷却器方式		
タービン出力 (MW)	540	784	840	1,100
容量 (MVA)	626	911	940	1,300
回転数 (rpm)	1,800	1,500	1,800	1,500
力率	0.9	0.9	0.9	0.9
電圧 (kV)	22	17	18	19
短絡比	0.58	0.6	0.58	0.60
水素ガス圧力 (atg)	3.2	4.2	4.2	5.3

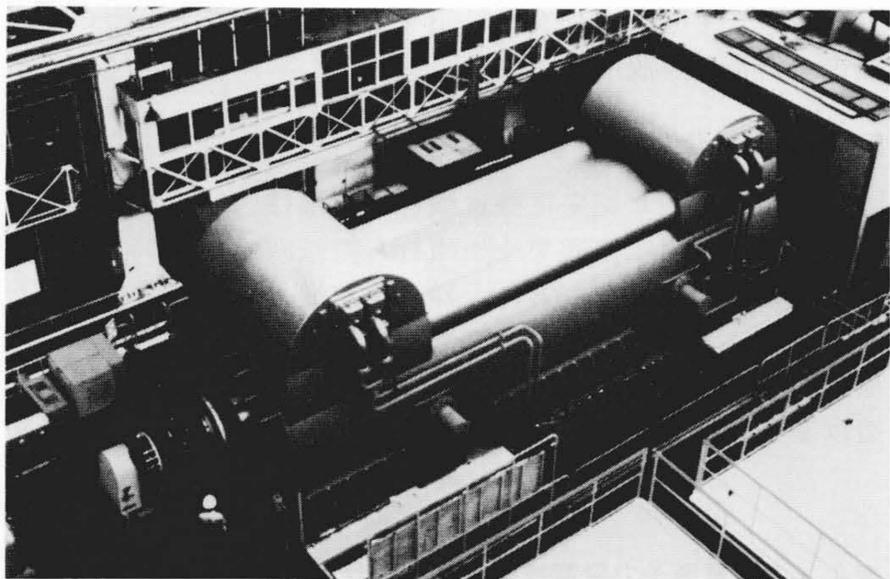
* 日立製作所日立工場

の向上、(2)温度上昇の低減、(3)電磁力対策、(4)固定子フレームの耐圧性向上、(5)運転性能の向上などの点に技術的な課題がある。日立製作所では、東京電力株式会社福島第二原子力発電所向けに、国内最大級の1,300MVA発電機を完成し、現在現地据付け中であるが、同機に採用した新技術、及び工場試験時に確認した新技術の効果を図2の付表に示す。1,300MVA機の主要な新技術としては、上底混合素線異断面電機子コイル、シールドコア付鉄心端部、改良形ラジアルフロー水素ガス直接冷却界磁コイル、全長ダンパ、キーパー短絡リングなどがあり、これらにより、効率の向上、温度上昇の低減、運転性能の向上が図られている。図2に工場試験時の写真を示す。

原子力機の場合、次のステップは、1,450MVA級と考えられるが、基本的に、現状の技術ベースで製作が可能である。

3 ミドル火力運用と新技術

最近の電力需要パターンの尖頭化及び原子力プラントのベース負荷分担量の増加により、従来、ベース負荷用として運用されてきた大中容量の火力発電機が、ミドル火力として運



新技術とその効果

技術的課題	新技術	新技術の効果
1. 損失低減、 効率向上	(1)混合素線異断面固定子コイルの採用 (2)ラジアルファンの採用 (3)シールドコア、銅シールド板付鉄心端部の採用	実測効率 99.2%
2. 温度上昇の 低減	(1)片道流水直接冷却固定子コイルの採用 (2)改良形ラジアルフロー水素ガス直接冷却界磁コイルの採用 (3)スリット付端部鉄心の採用 (4)シールドコア、銅シールド板付鉄心端部の採用 (5)5.3atg機内水素ガス圧の採用	実測温度上昇 固定子コイル 24.3℃ 界磁コイル 30.3℃ 固定子鉄心 24.0℃
3. 電磁力対策	(1)4 Y両側口出し固定子コイルの採用 (2)固定子コイルエンド特殊支持方式の採用 (3)リップルスプリング、テーパウェッジによる固定子コイルスロット内固定の採用	39,503 Aの通電試験、突発短絡試験実施、問題なし
4. 固定子フレーム耐圧向上	(1)完全球形ターミナルボックスの採用 (2)ツインドーム方式の採用	水圧試験8atg実施、問題なし
5. 運転性能向上	(1)全長ダンパの採用 (2)キーパー短絡リングの採用 (3)シールドコア、銅シールド板付鉄心端部の採用 (4)デュプレックスクーラの採用	逆相耐力の向上 過励磁耐力の向上 進相運転耐力の向上 1クーラ停止時の容量向上

図2 工場試験中の1,300MVA機と1,300MVA機における新技術
1,300MVA機は工場で試験を行ない、性能を確認した。1,300MVA機では、損失の低減、温度上昇の低減、電磁力対策、運転性能向上のため、種々の新技術が採用されている。

表2 ミドル火力用タービン発電機考慮点 ミドル火力機の場合は、高頻度の起動・停止を行なうため、発電機の各コンポーネントに対して耐ヒートサイクル性、疲労強度などを十分に考慮しなければならない。

項目	内容	説明	実績
1. 界磁コイル	(1)耐ヒートサイクル絶縁	FRP系のハード絶縁方式を採用。45~130℃の過酷ヒートサイクル1万回を実施済み。	全機
	(2)コイルエンドスライド方式	リテンションリング下絶縁にテフロンコーティング実施。コイルエンドをスライドさせる。	全機
	(3)DSS(Daily Start and Stop)機用極間接続線	原則として下側接続とし、耐伸縮サイクル性の高いひずみ集中排除形を採用。	500MW機 375MW機 ほか
2. 回転子軸	(1)品質管理(欠陥検出)の強化	中心孔からのUT、スロット部のMTを行ない、軸材の欠陥検出の強化を図る。	—
	(2)高靱性清浄軸材	Ni-Cr-Mo-V鋼を採用し、FATTを下げて、欠陥進展の防止を図る。	450MW機 375MW機
	(3)応力集中低減形軸設計	軸各部の応力集中、ひずみ集中を避けるため、段付部の面取りRの改善のほか、曲げ応力、ねじり応力の低減を図る。	300MW機 ほか
	(4)フルダンパ方式	逆相電流による回転子表面の電食を防止し、回転子の信頼性を上げる。	1,100MW機 220MW機
	(5)ジャーナル部の強度管理の強化	軸材のジャーナル部の強度管理を強化して、ねじり耐力を向上させる。	500MW機 300MW機
	(6)応力集中低減形ウェッジ	ウェッジ角部の面取りRを改善し、疲労強度の向上を図る。	全機
3. 軸振動	(1)工場内振動管理の強化	発電機界磁コイル温度を現地定格状態まで上げてバランスを行ない、熱振動についても管理を行なう。	500MW機 375MW機 350MW機
	(2)ガス仕切りバツフル	固定子と回転子間の空隙部で、冷ガスと温ガスの混合するのを防止するため、空隙にガス仕切りバツフルを設けて、それにより、界磁巻線の温度の低減を図る。	550MW機 500MW機 375MW機
	(3)安定化軸受	安定度の向上を図るため、中央溝付軸受とし、低速時の信頼性を向上させるため、JOP(Jacking Oil Pump)を設ける。	600MW機
	(4)カップリングボルトリーマ化	T-G間のカップリングボルトをリーマ化して、ねじりに対する耐力の向上を図る。	全機
	(5)ベクトル振れ差法によるT-G間直結	T-G間の直結を行なう際に、LP、GENの振れ特性を調べ、結合後の振れ、振動が最良となるようにする。	600MW機 500MW機 ほか
	(6)適正ギャップの確保	油切り、シールリングなどと回転部とのギャップを適正に保ち、ラビング振動などを防止する。	全機
4. 固定子コイル	(1)耐ヒートサイクル絶縁	エポキシ樹脂を用いた絶縁を採用。45~140℃の過酷ヒートサイクル5,000回を実施し、耐ヒートサイクル性を確認済みである。	全機
	(2)片道流通水方式	固定子コイルの冷却水を片道流として、出口部の温度の低減を図る。	600MW機 500MW機 375MW機 ほか
	(3)コイルエンドスライド方式	コイルエンドの軸方向の熱伸びを拘束せずスライドさせる特殊指示方式を用いて、熱応力がコイルに加わらないようにする。	全機
	(4)スロット内コイル固定の増強	電磁力によりスロット内でコイルが振動するのを防止するため、半導体リップルスプリング、テーパウェッジを採用し、固定力を強化する。	全機
	(5)上底異寸法コイル	中空素線と中実素線を組み合わせた混合素線、及び上底コイルの寸法を変えて、コイル温度の低減、上底コイル温度の均一化を図る。	1,100MW機 840MW機 780MW機 550MW機 ほか
5. 保守	(1)定圧形ブラシホルダ	定圧形ブラシホルダを用いて、保守性の向上を図る。	全機
	(2)監視項目、内容の増強	鉄心温度、固定子コイル温度監視の増強、あるいは予防保全モニタによる各部の状態監視。	1,100MW機

注：略語説明 FRP(ガラス繊維強化プラスチック)、UT(超音波探傷)、MT(磁粉探傷)、FATT(遷移温度)、T-G(タービン発電機)、LP(低圧タービン)、GEN(発電機)

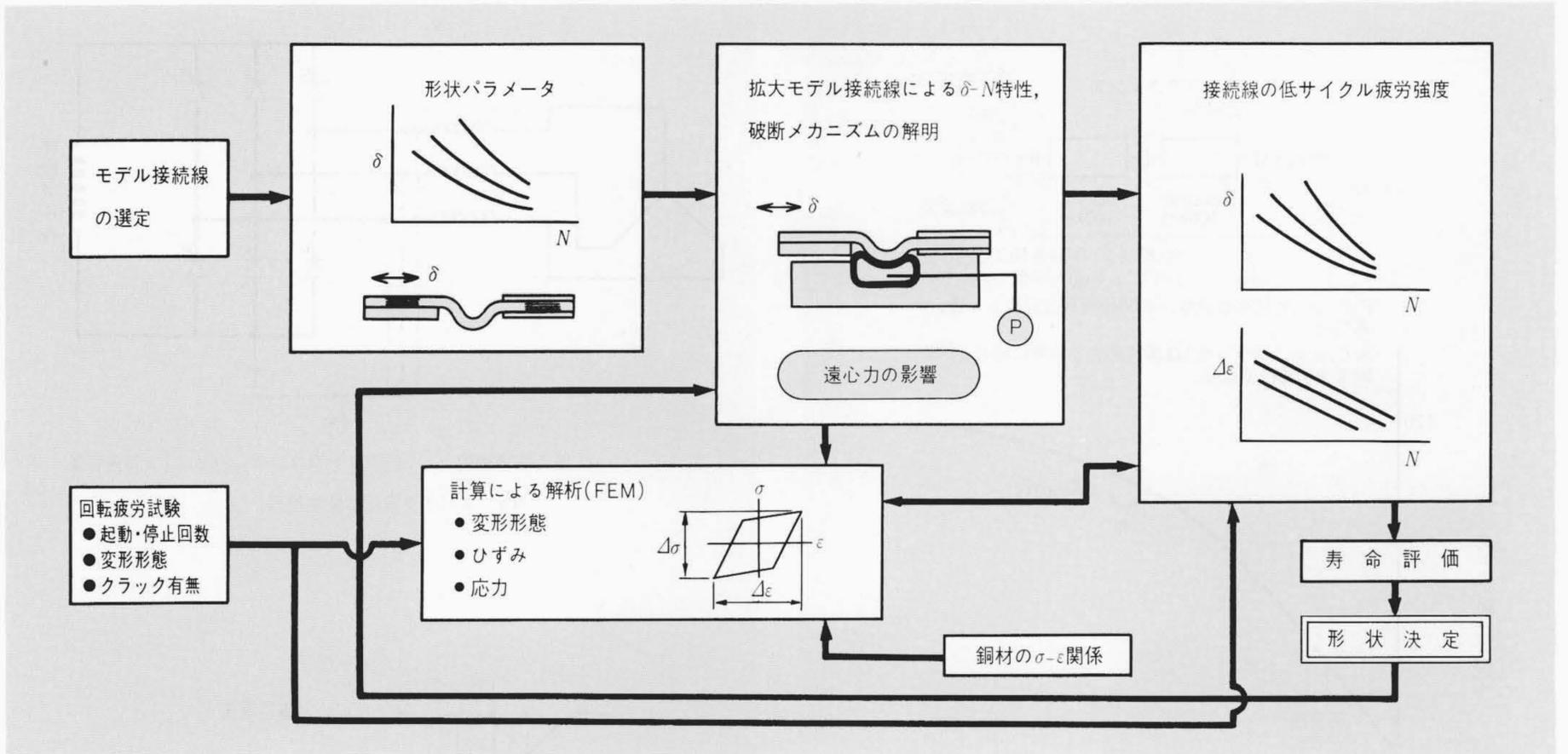


図3 極間接続線の最適形状選定フロー 高頻度の起動・停止を行なうミドル火力機では、ごく細かい点まで注意を払って設計、製作を行なう必要がある。本図は極間接続線の形状選定の例を示す。

用されるようになってきた。ミドル火力機の場合は、高頻度の起動・停止を行なうため、負荷の増減に伴う熱伸縮サイクル、起動・停止による遠心力の印加-解放サイクルを受ける頻度が従来機と比較にならないほど高くなるので、発電機の各コンポーネントに対し、この点を特に考慮した設計が必要である。表2に、ミドル火力機の場合に考慮しなければならない主要な諸点についてまとめた。

回転子について言えば、耐ヒートサイクル性の高い界磁コイル絶縁、高靱性清浄軸材、低振動などは必須である。また固定子に関しては、耐ヒートサイクル性の高い固定子コイル絶縁、スロット内電磁振動の低減、上底固定子コイル温度の均一化、温度上昇の低減などが重要な課題である。

このたび日立製作所では、関西電力株式会社相生発電所向けに375MW機を製作したが、これは、初の本格的ミドル火力機であり、1万回の起動・停止を行なうことを想定して設計、製作を行なった。そのため、極めて細かい点までにも細心の注意を払い設計を行なった。例えば界磁コイル極間接続線の形状を決めるに当たっても、図3に示すフローに従い、従来の技術をもう一度見直しながら設計・製作を行なった。また起動・停止が頻繁なミドル火力機では、振動変化の小さいことが大切なので、工場内で交流励磁機を直結した状態で、熱振動バランスを実施した。

これからの火力機は、600MW級の大容量機といえどもミドル火力運用の対象外ではないと考えられ、ミドル火力対策は、今後更に技術開発を行なう必要があると思われる。

4 励磁方式と発電機の新技术

サイリスタの大容量化、信頼性向上に伴い、信頼性を特に重視する事業用タービン発電機の励磁装置にも、サイリスタを用いた分巻自励励磁方式が用いられるようになってきている。表3に、サイリスタ分巻自励方式と従来から用いられてきた交流励磁機方式との比較を示す。サイリスタ分巻自励方式は、実績の点で、交流励磁機方式に及ばないものの、応答

表3 発電機励磁方式の比較 サイリスタを用いた分巻自励方式と従来から用いられてきた交流励磁機方式の比較を示す。サイリスタ分巻自励方式は、実績の点では及ばないものの、応答性能、保守性、経済性などの点で特長がある。

項目	内 容	(A)サイリスタ分巻	(B)交流励磁機	備 考	
特性・機能	1. ステップ応答	特に応答性良	応答性良	—	
	2. 負荷しゃ断	最大電圧上昇は、発電機固有の変動率で略決まる。			
	3. 安定度 (事故時)	短絡事故除去後の界磁電圧の立上りが早いため、(B)と同じ。	良 好		特に頂上電圧を高くし、安定度を向上させる場合はサイリスタ式が有利。
	4. 付属機能追加	電子化されているため容易	やや困難		
信頼性	1. 故障検出	自動→手動 自動切替可能	現状では不可能	—	
	2. システム構成	(1)回転機がないため信頼性が高い。 (2)冗長範囲が広い。	(1)回転機があるため(A)に比べやや劣る。 (2)(A)に比べやや狭い。	—	
保守性	1. 運 転 時	静止器のため特別な保守不要	コレクタリング回り軸受の点検要	—	
	2. 定期検査時	特別な試験設備不要	試験用副励磁機セット必要	副励磁機はタービン軸直結	
経済性	1. 機器の経済性	(B)に比較して有利	(A)に比較してやや不利	—	
	2. 機器寸法, 据付スペース	キュービクル寸法が小さく、T-Gの軸長が短くなり建屋、架台スペースの点で有利。	T-Gの軸長が長くなるため、架台寸法が大きくなる。	—	
動 向	1. 実 績	556MVA 火力発電所	940MVA 原子力発電所	—	
	2. 今後の動向	特性、経済性から今後主流と推定	—	—	

性能、保守性及び経済性の点で特長があり、今後大容量の発電機に対しては、この方式が主流になってゆくであろうと推定される。また、クロスコンパウンド機に対しても積極的に適用される気運にあり、日立製作所では、電源開発株式会社竹原火力発電所向けの、700MW機クロスコンパウンド機に、

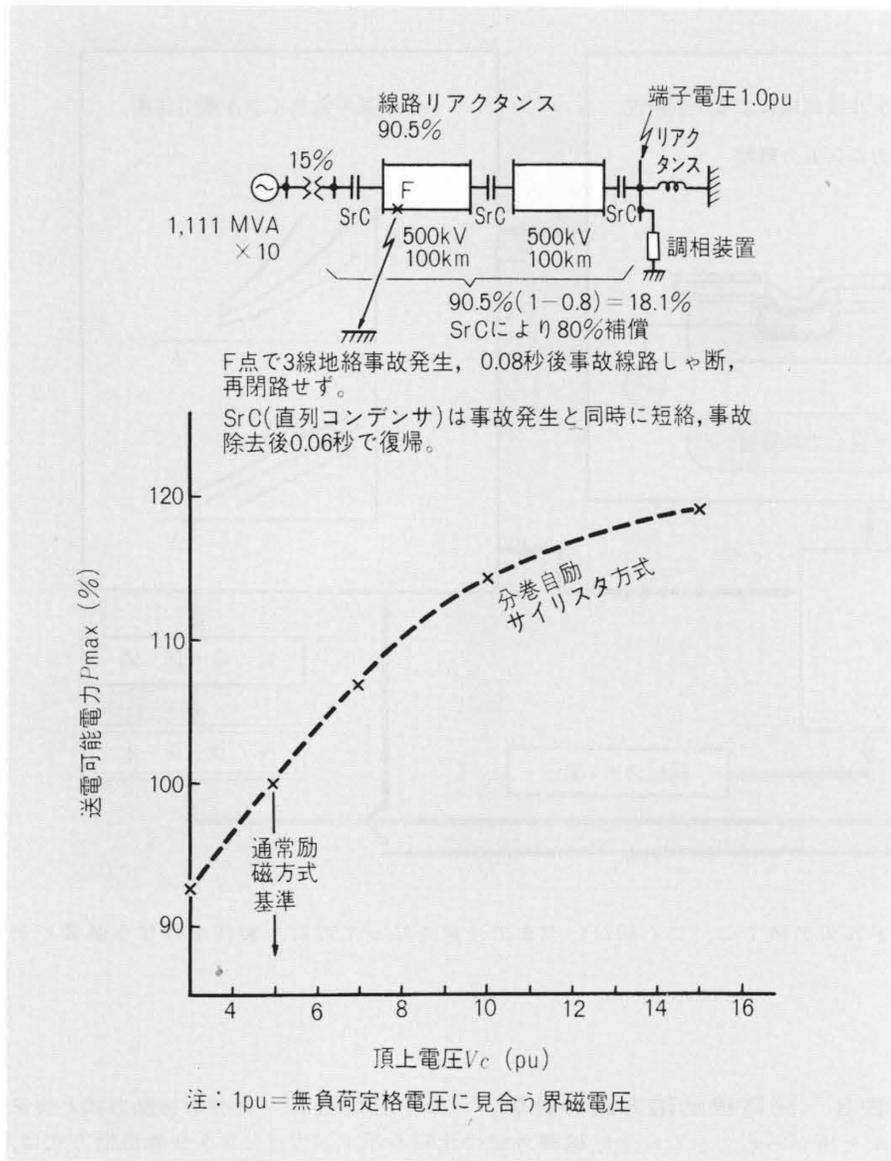


図4 頂上電圧と送電可能電力の一例 一般に頂上電圧を上げると、送電可能電力は増大する。この例では、頂上電圧を5 puから7.5puに上げると、送電可能電力は7%程度増大する。

サイリスタ分巻自動方式を適用している。同機は現在据付け中である。

最近では、電力需要の膨脹と都市化の進展に伴い、大容量火力発電所、原子力発電所が大負荷地と遠く離れる傾向にあり、系統安定度の確保が以前にもまして重要になってきている。系統安定度の向上策としては、直列コンデンサの挿入、中間調相設備、タービン高速バルブ制御など種々の方法が考えられているが、発電機励磁装置の速応性能を高める方法、超速応励磁方式は最も実現性のある方法の一つと考えられ、各方面で検討が進められている。超速応励磁方式として、分巻自動サイリスタ方式、交流励磁機付サイリスタ方式が考えられるが、経済性、保守性の点から分巻自動サイリスタ方式が採用される気運にある。図4に頂上電圧と送電可能電力との関係を示す。

超速応励磁方式の採用に当たり、注意しなければならない点の一つに、発電機界磁コイル絶縁耐力の問題がある。すなわち、超速応励磁方式を採用した場合は従来実績の範囲を大幅に超える頂上電圧となるため、サイリスタスパイク電圧に対する界磁コイル絶縁耐力、新しい状態だけでなく長期運転後でもその耐力が十分であることを確認する必要がある。図5にスパイク電圧の発生原理を示す。

このために、実機と同一断面、同一構造の界磁コイルモデルなどを用いて、総合的な絶縁破壊試験を行なった。またこの試験から、最も安全率が低い部分はクリページブロックの沿層絶縁破壊であることが確認されたので、長期の運転を経験した実機のクリページブロックのサンプリングを行ない、絶

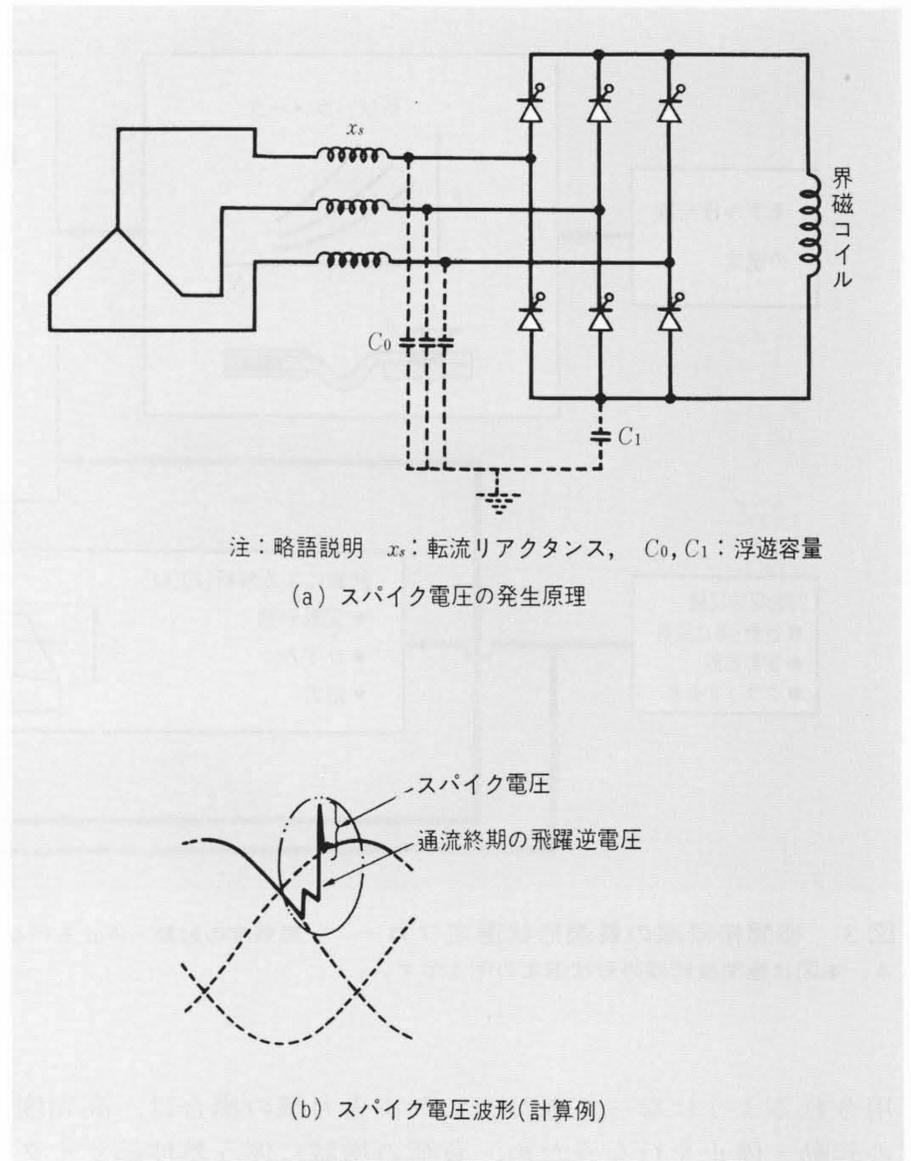


図5 スパイク電圧の発生原理とスパイク電圧波形 サイリスタ分巻自動励磁方式の場合、通流終期の飛躍逆電圧が、転流リアクタンス、浮遊容量のLC回路で共振して、大きなスパイク電圧が発生する。

縁破壊試験を実施して劣化後の耐力についての確認をも行なった。図6に試験の状況及び測定結果の一例を示す。試験の結果、現在のタービン発電機の絶縁システムで、1,250V(直流平均電圧)程度までの頂上電圧は、採用可能であることが確認された。

5 予防保全新技術

前にも述べたように、火力発電プラントの最近の運用は中間負荷運用の傾向にあり、頻繁な起動・停止によって従来にない過酷な運転が要求されている。このような状況のもとで、発電機に高い信頼性が要求されるのはもちろんであるが、発電機の運転状態を連続的に監視して、異常発生時にその兆候を早期に検出することも極めて重要である。発電機の異常を早期に検出するものとしては、図7に示す予防保全モニタ類が有効である。このうち、機内の過熱を早期に検出する微粒子モニタについて紹介する。微粒子モニタの構成を図8(a)に示す。発電機機内の過熱は絶縁材の損傷に発展する例が多い。この場合、過熱発生とともに絶縁物が熱分解し、微粒子状となり機内に放出される。この機内中の微粒子濃度を監視することによって、機内の異常過熱を早期に検出するのが微粒子モニタである。

微粒子モニタによる発電機機内監視結果の一例を図8(c)、(d)に示す。この例では、図8(c)に示す運転初期の機内の微粒子の濃度は、約6,000時間の運転を行なったあとでも一定で増加しておらず安定しており、機内各部の正常性が確認された。

このほかにも、コレクタリングモニタ、水素ガス消費量モ

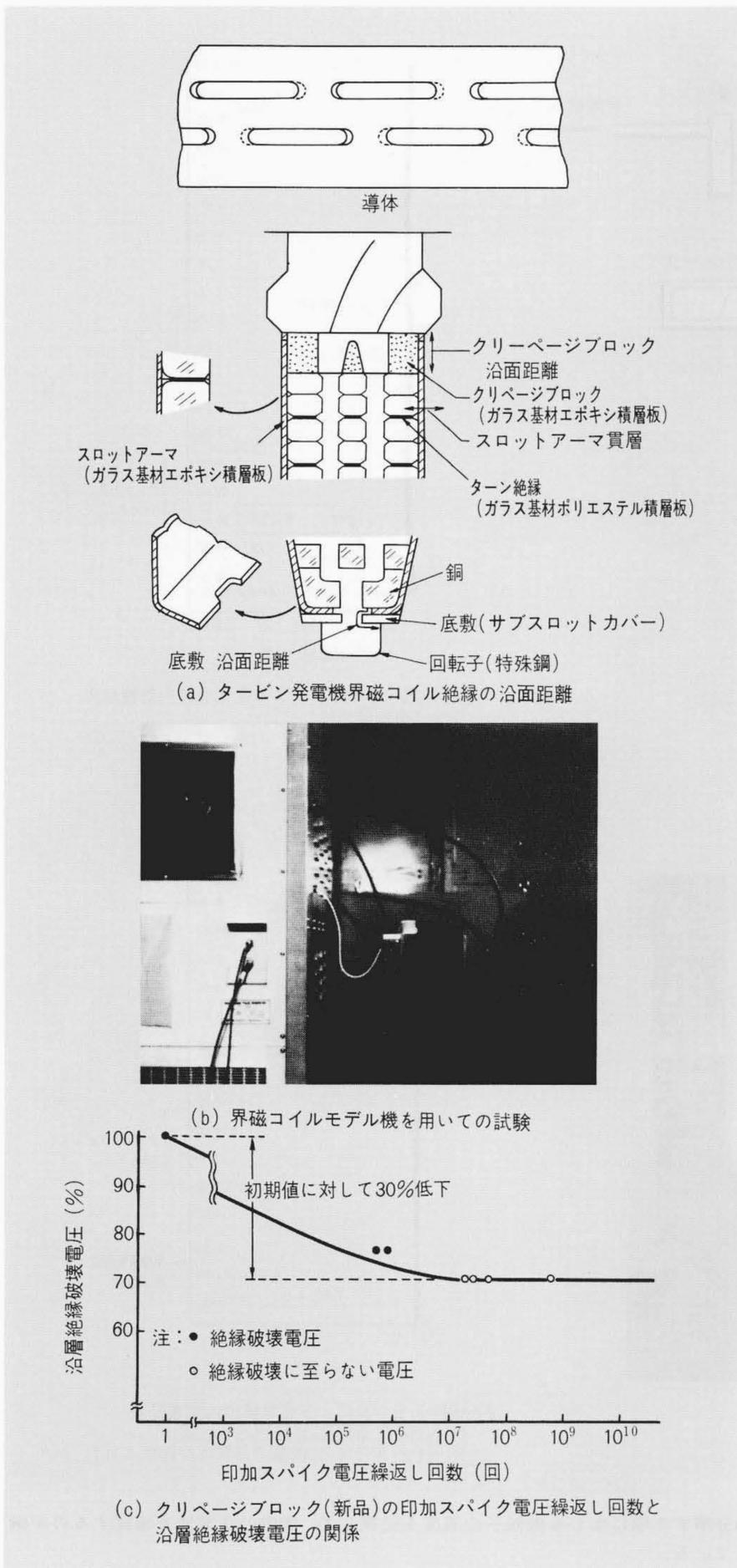


図6 タービン発電機界磁コイルの絶縁耐力 サイリスタスパイク電圧に対する界磁コイルの絶縁耐力を、界磁コイルモデル機などを用いて調査した。

ニタ、純水系統漏洩モニタなどによって、発電機運転中の正常性の監視が行なわれる気運にある。

今後、過酷な運転状況のもとで、発電機の信頼性を確保するために、この種の予防保全モニタ類によって、機内の正常性確認、異常の早期検出を行なうことが増加してゆくであろうと予想される。

6 その他

6.1 コンバインドプラント用発電機

ガスタービンと排熱回収熱交換器、蒸気タービンを組み合わせて発電機を駆動するコンバインドプラントは、プラント

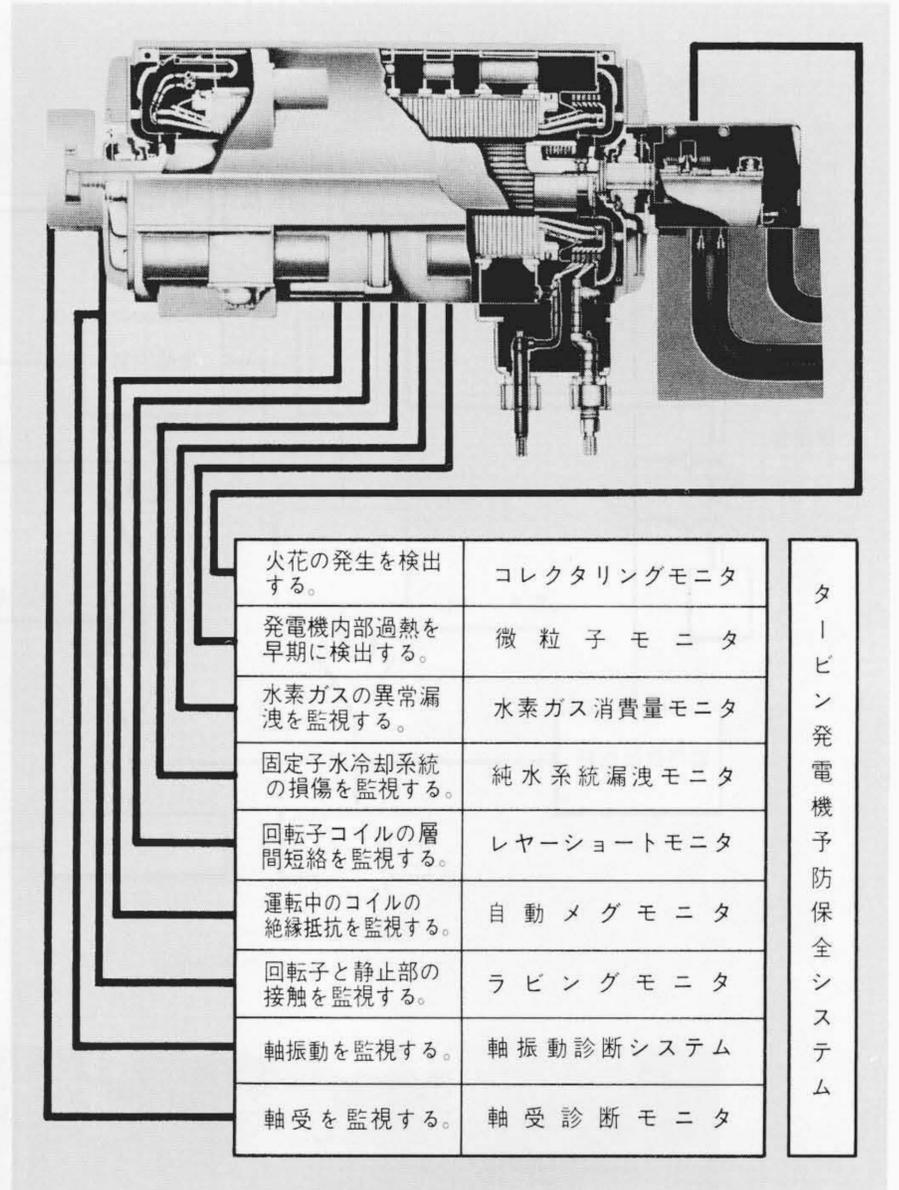


図7 発電機用予防保全モニタ 頻繁な起動・停止を受けるといったような過酷な運転を受ける発電機については、運転中にその異常の兆候を早期に検出する予防保全モニタ類は有効である。

熱効率が優れていること、起動特性が優れていることなどの特長があり、今後、適用が拡大されることが予想される。コンバインドプラント用の発電機には、ガスタービン、蒸気タービンが各々の発電機を駆動する多軸形と、両方が共通の1台の発電機を駆動する一軸形とがある。後者の場合には、発電機の両端にガスタービン及び蒸気タービンが結合されるため、(1)大径コレクタリング、(2)荷重変化、油温変化に対応できる軸受、(3)蒸気タービンとの結合装置などに配慮することや新技術が必要である。

6.2 完全水冷却発電機、超電導発電機

先の図1に見たように、タービン発電機の単機容量増大の傾向は、鈍化はしつつあるものの、立地難や経済性の点からみて、長期的には大容量化は必至であり、将来は二極機で1,500~2,000MW、四極機では2,000~2,500MW級が実現すると考えられている。我が国や米国では、回転子導体は直接水素ガスで冷却されているが、欧州では、回転子導体を直接水冷却する全水冷却タービン発電機も用いられている。

日立製作所では、既に1,120MVA、3,600rpm相当の発電機の試作、各種試験を完了しており、実用機への適用体制を固めている。

回転子に超電導線を使用した超電導発電機は、二極機で、1,500MWを超える容量の発電機に対して適していると考えられている。線材の開発、界磁巻線の構造、熱シールド構造など多数の本質的な開発課題が残されているが、日立製作所では、50MVA級超電導発電機の試作を行なっており、現在回転

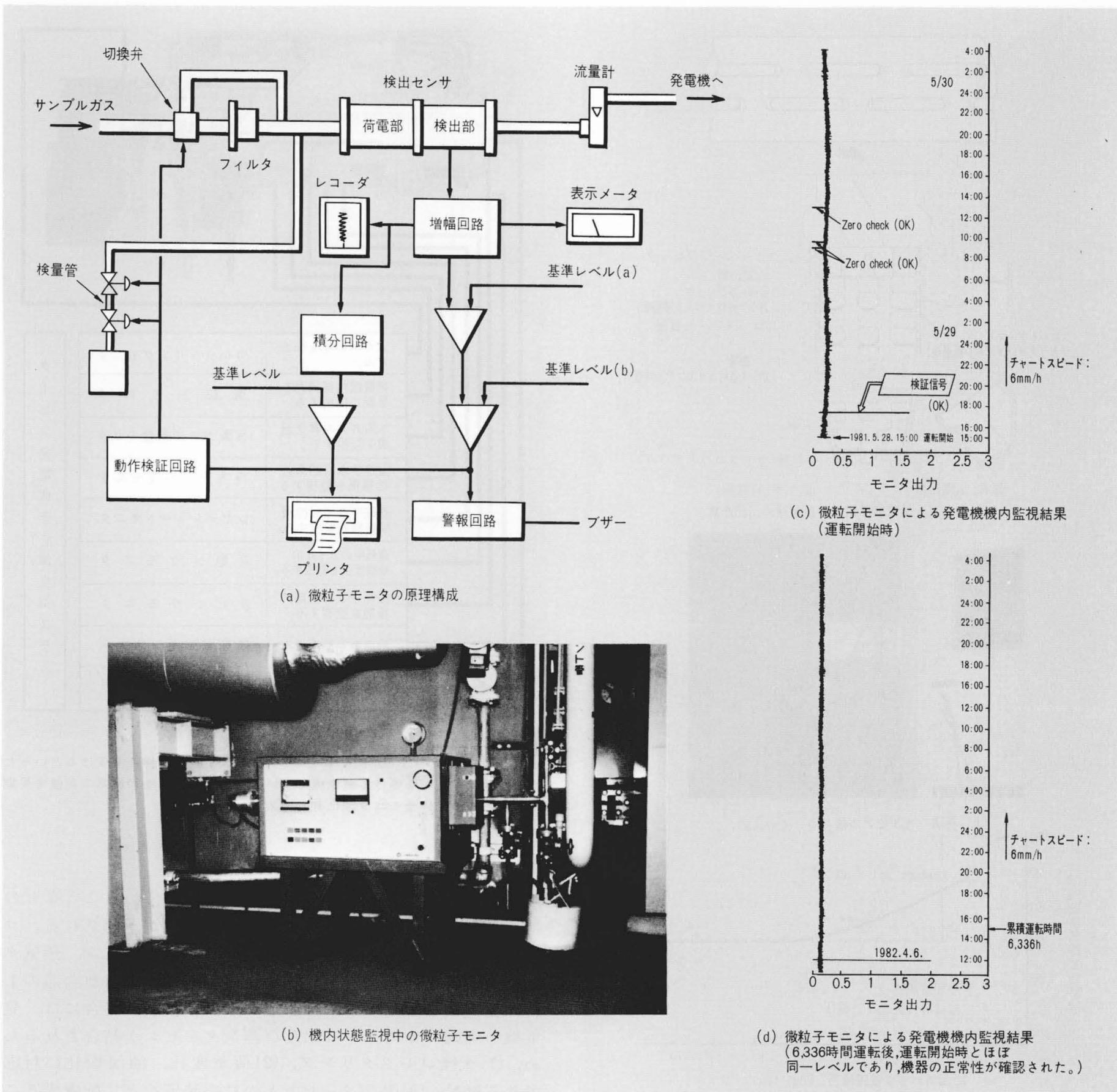


図8 微粒子モニタによる発電機機内の監視 機内絶縁物が過熱により熱分解する際に生じる微粒子の濃度を監視して、機内の正常性を確認するのが微粒子モニタである。この例では濃度も安定しており、発電機が正常であることを示している。

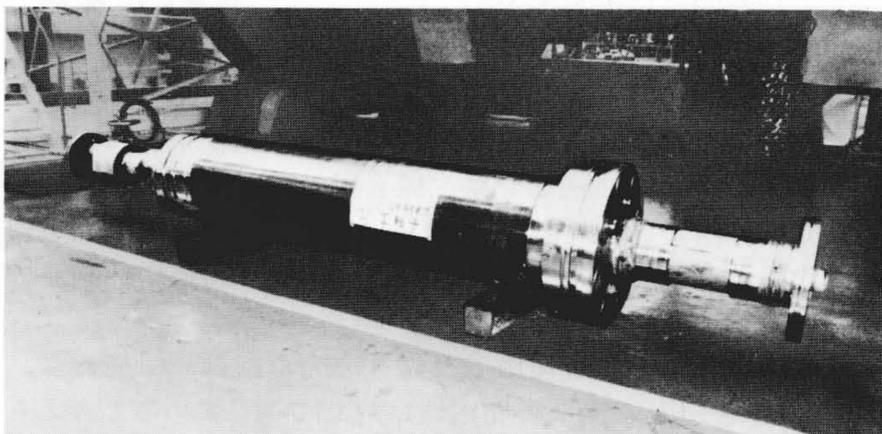


図9 超電導発電機の外観 超電導発電機は、線材の開発、界磁巻線の構造、熱シールド構造など多数の本質的な開発課題があるが、将来二極機で1,500MWを超える容量のものには適していると言われている。

試験を実施中である。図9に超電導発電機回転子の外観を示す。

全水冷発電機あるいは超電導発電機は、大々的に利用されるまでには、まだ時間を要するとは考えられるが、一步一步着実な技術開発が行なわれている現状である。

7 結 言

以上、最近のタービン発電機の新技术について、大容量化対策、ミドル火力運用対策、励磁方式の動向と超速応励磁方式に伴う問題点、予防保全モニタなどに関し、信頼性向上のための新技术について述べた。これからもタービン発電機の信頼性向上、性能の向上に全力を尽す考えである。今後とも関係各位の御指導をお願いする次第である。