

最近における大容量タービン発電機の新技术

New Technique for Recent Large Turbine Generators

近年、タービン発電機の大容量化はやや鈍化の傾向にあるものの、発電所建設用地の入手難などの理由から、単機容量はやはり増大の方向にあると予想され、このための新技术開発が必要となってきた。一方、発電機の使い方をみると特に火力機で従来とは異なった計画がなされており、そのための新技术も要求されている。

この論文では、大容量化に伴う新技术や次代の技術に対する展望を行なうとともに、運転方式の変化に対応した新技术について、特に起動・停止回数の多い中間負荷火力機についての考察や、厳しい責務に耐え高い信頼度を維持するために確立されつつある予防保全技術などに重点をおいて述べる。

実松俊弘* *Toshihiro Sanematsu*

小松弘二* *Hiroji Komatsu*

鈴木敏孝** *Toshitaka Suzuki*

1 緒言

我が国のタービン発電機の単機容量は、過去の経済の高度成長とともに飛躍的に増大してきたが、近年の安定成長期に至り、大容量化も頭打ちの傾向がみられている。石油資源の偏在、入手経路の不安定さ及び価格の高騰は、重油原油依存形からLNG(液化天然ガス)、石炭などへのエネルギー資源の分散化を生ずるとともに、原子力指向が一段と進むことになり、このため、従来はベースロードとして使用されてきた大容量の火力機までが、中間負荷火力として負荷調整のための運転を行なう必要が生じてきている。したがって、高頻度起動・停止の運転に耐える新技术が要求されており、また系統の安定度向上のための高速再閉路の運用とか、新幹線や製鉄所負荷のような高調波不平衡負荷運転など、負荷側から要求される性能も多様化してきている。この論文では以上述べたような発電機本体に要求される新技术とともに、従来よりも厳しい使い方に耐えて十分な信頼性を発揮させるための各種の予防保全診断手法の新技术を紹介し、更には来るべき新時代の新しい形の発電機についても触れ、関係者の参考に供したい。

2 タービン発電機の大容量化とその技術的展望

タービン発電機の単機容量では、現在までに我が国では二極火力機で700MW、四極原子力機で1,100MW級が製作されており、また外国では二極機で1,000MW、四極機で1,300MW級が製作されているが、近年の世界的な傾向として原子力プラント、火力プラントの信頼性の見直しが叫ばれ、経済成長の鈍化による工期の再検討、延長などの理由から単機容量の増大は頭打ちの傾向となっており、技術的なウエートが大容量化指向から信頼性重視の方向に転換されつつあると言える。ただし、発電所の建設用地の入手難など立地条件や経済性からみて、やはり大容量化は必須であり、その速度は鈍化するものの、二極機では1,500~2,000MW、四極機では2,000~2,500MWがゆくゆくは実現すると考えられる。

このような大形機の実現にとって、技術的な制約となる要素は種々あるが、最も大きな条件となるのは冷却方式であろう。現在、我が国やアメリカなどで製作されている大形機は固定子導体が直接水冷却であるのに対し、回転子導体は直接水素冷却の形のもので、この形式では回転子の冷却性能で発電

機の出力が左右される。ただし、この方式は長年の研究と実績に裏打ちされた信頼性の極めて高いもので、冷却能力も優れており、回転子コイル端部の冷却効果にいま一つの改善を加えれば、二極機では1,500MW級、四極機では2,000MW級にまで適用が可能と考えられ、少なくとも今世紀に必要なとされる発電機のほとんどが、現在のこの種技術の延長で十分に対応できると予想される。

これに対し回転子を水で直接冷却する方式は、二極機で2,000MW級まで可能と考えられるが、ヨーロッパでは小容量機にもこの方式が採用されており、回転子寸法の縮小による機械損の低減が可能で、部分負荷時の効率が良いこと、輸送条件が有利になることなどが理由となって、特に容量の大きな機械に限らず、広い範囲にわたり適用が可能と考えられる。日立製作所では、既に1,000MW二極機相当の全水冷発電機を製作の上、各種の試験を完了して実用機への適用体制を確立しており、図1にこの全水冷発電機の全容を示す。なおこの発電機は、総合信頼性確認のための試験機として現在自社工場内に設置され、発電機の総合的な信頼性確認試験に威力を

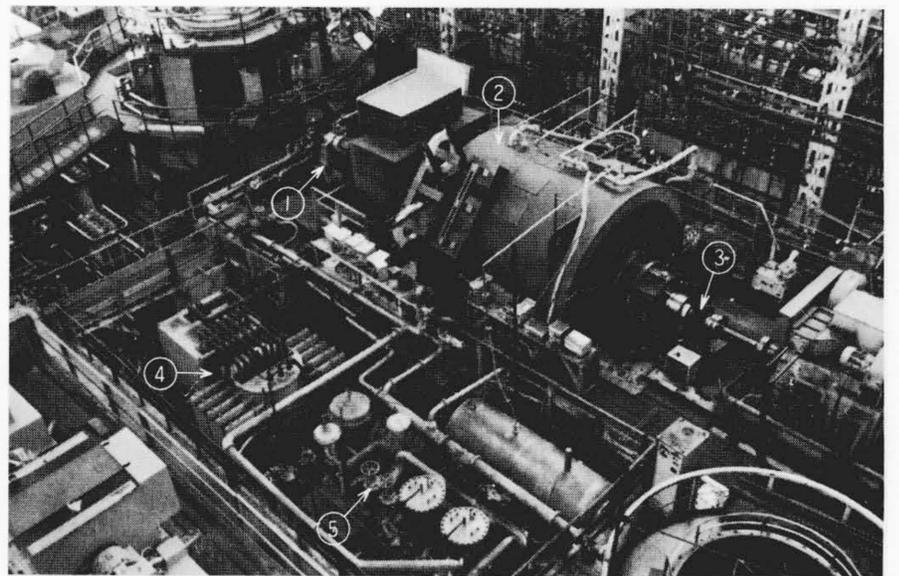


図1 全水冷タービン発電機 容量1,120MVA、回転速度3,600rpm機と同一断面をもち、回転子導体も直接水冷却される。写真中表示の①は冷却水装置を、②は水冷却発電機本体を、③は多段切換測定器を、④は200V、10kA直流電源を、⑤は純水装置をそれぞれ示す。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所

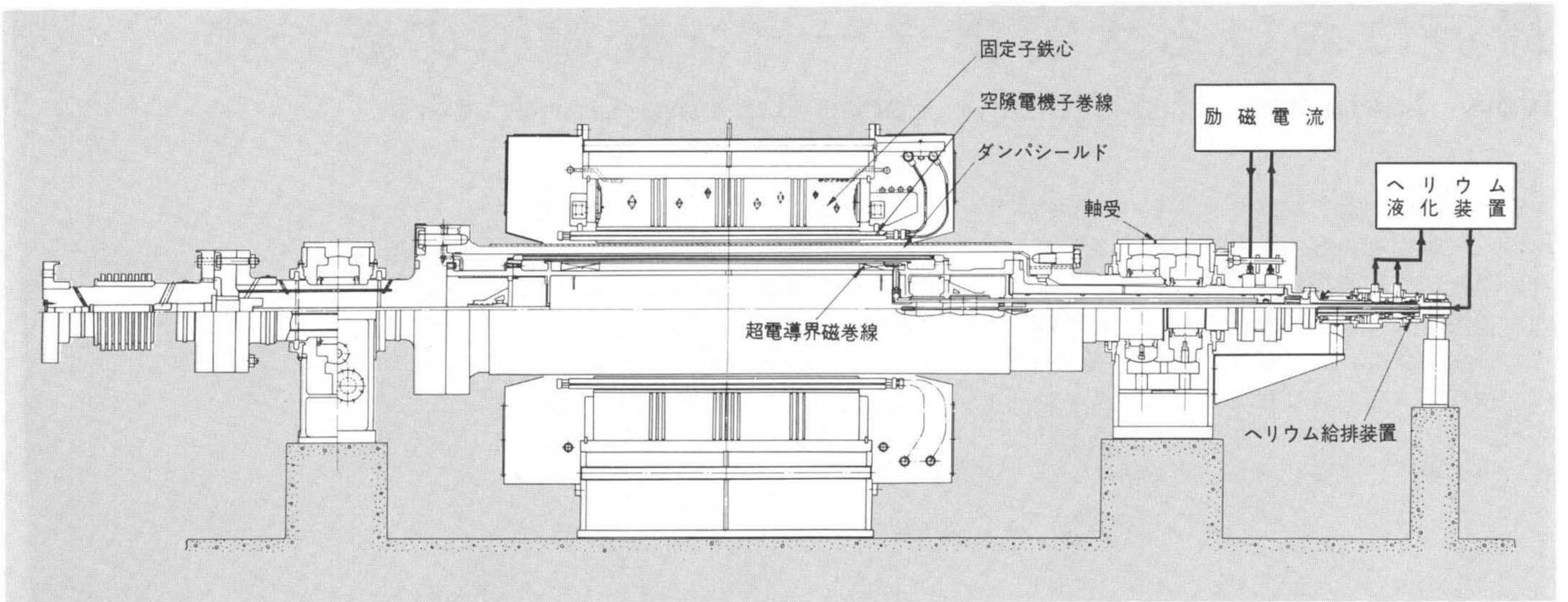


図2 超電導発電機の構造 体格50MVA級の回転子は、4~5Kの液体ヘリウムの自然対流により冷却される。固定子は実験用の空隙電機子巻線形である。

発揮している。

更に大容量となつて、1,500~2,000MW(二極機の場合)を超える発電機に適しているのが回転子に超電導線を使用した超電導発電機と言われている。超電導機はまだ比較的小形の試験機の開発段階であり、今後、変動磁界に強い化合物系線材の開発や、高速回転に耐える界磁巻線構造、電気的・熱的シールド構造など、機器の信頼性に直接影響を与える重要な開発項目が残されており、これらを一つ一つ確認していかなければならないが、機器の小形化と0.5%以上の効率の改善が期待されることから、省エネルギーの見地から大容量機に限らず適用される可能性があり、特に寸法的な制約のある船舶や航空機用への応用も期待されている。次に、この超電導回転機の固定子の新構造として注目されるのが、空隙巻線構造(Air Gap Winding)電機子である。現在のタービン発電機が空隙長さが大で固定子のスロットも深いのに対しこの空隙巻線構造電機子方式では、空隙に電機子巻線を置いてスロットをなくし固定子寸法を縮小しようとするもので、鉄心歯部が省略されることによって空隙の磁束密度を上げることができ、特に超電導発電機にとって有利となる構造である。日立製作所では、既に50MVA級超電導発電機の試作¹⁾や、空隙巻

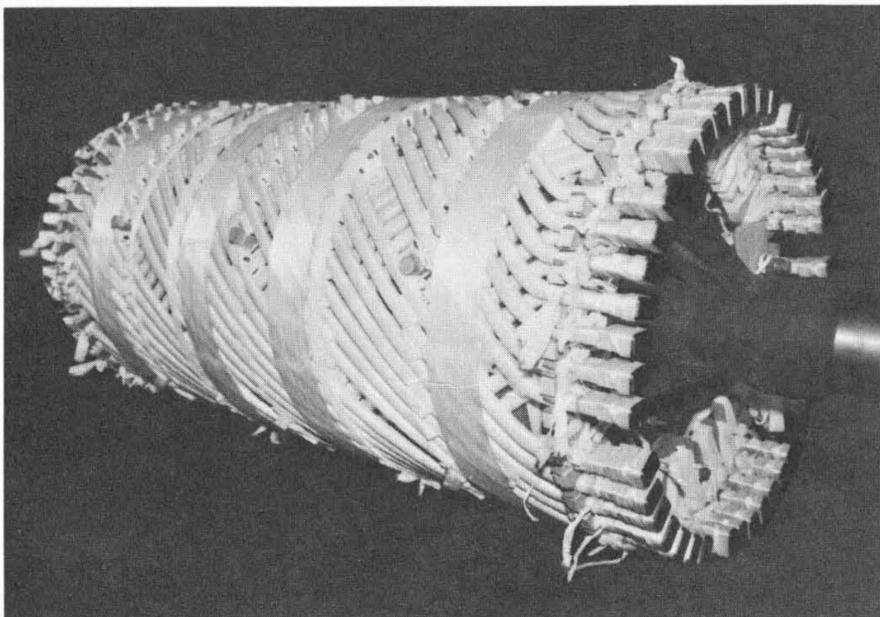


図3 空隙巻線構造電機子巻線 製作中のスクューされた電機子巻線を示す。この巻線は、支持わくとともに固定子鉄心にそう入される。

線構造電機子の開発²⁾を行っており、このような次代の新技術に対しても十分対応できるよう絶えず研究を続けている。図2に50MVA級超電導発電機の断面図を、図3に製作中の空隙巻線構造電機子巻線の外観を示す。

3 運転方式の変化と新技術

ここで述べるのは、主として中間負荷火力を対象としたものである。火力発電は火主水従の時代のベース負荷としての大容量化から転じて、今後はベース負荷を原子力に譲り、火力発電で中間負荷を、水力やガスタービンなどでピーク負荷を分担する形態に移行してゆく。このため、タービン発電機には、頻繁な起動・停止、急しゅんな負荷変化に耐える信頼度の高い構造が要求されるが、これに加えて高調波や不平衡負荷、高速再閉路などに対しても十分耐え得るような、広い範囲の要求にこたえられるものでなければならない。

3.1 ヒートサイクル耐久形コイル

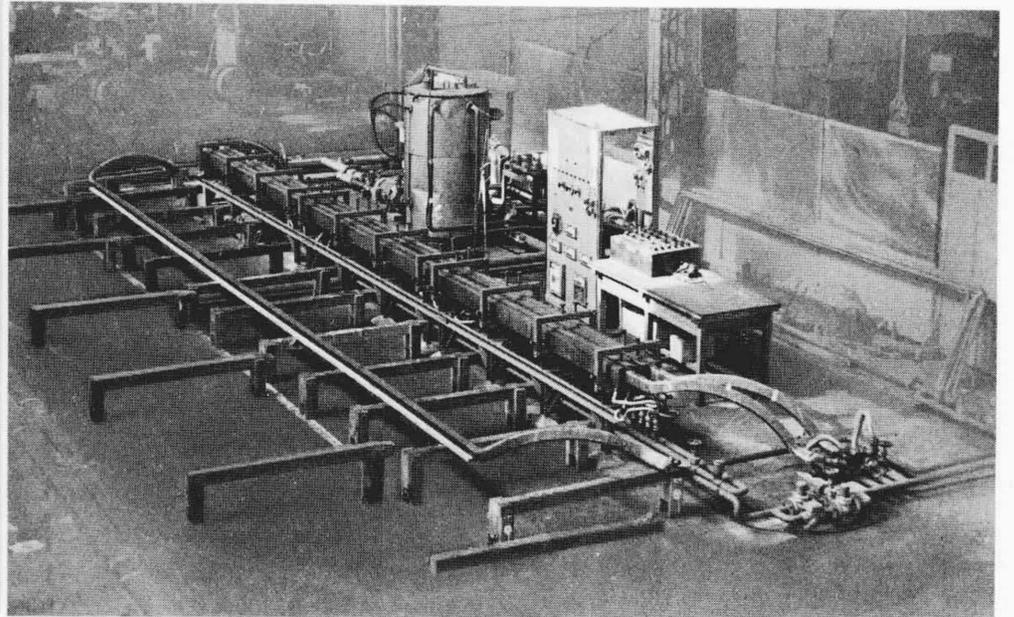
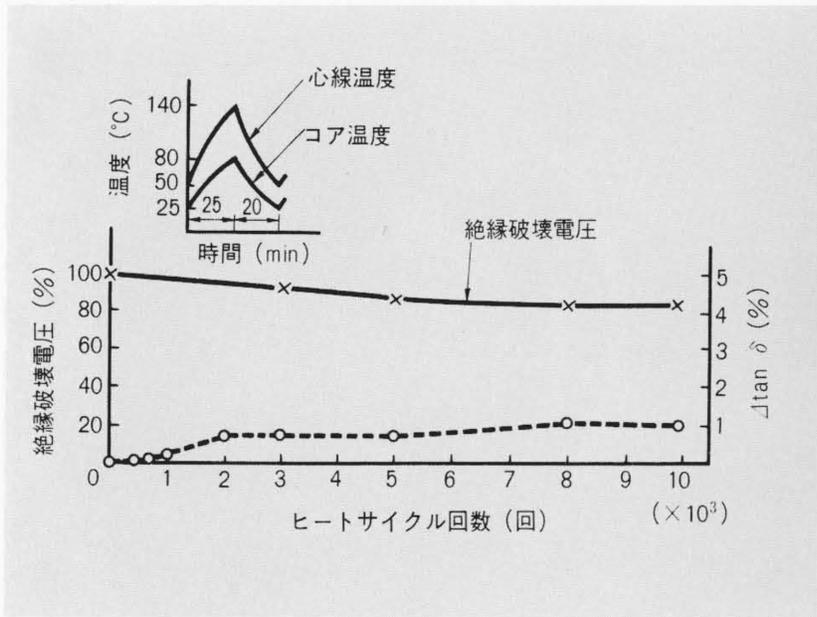
固定子コイルは、熱的機械的特性の優れたエポキシワニス真空含浸方式B種コイル、又はプリプレグ方式F種コイルを採用するが、その特性は例えば図4に示すように、50~140°Cの実際よりはるかに過酷なヒートサイクル1万回に対しても問題のないことを確認している。また、今後の負荷変化の厳しい機械に対しては、水冷却装置での固定子コイル入口温度の一定制御に加えて、出口水温も一定に制御する方式が考えられている。

次に回転子コイルに対しては、従来のマイカ、アスベストを主体としたソフト絶縁方式を熱的機械的特性の優れたFRP(ガラス繊維強化プラスチック)系のハード絶縁方式に変えており、45~130°Cの過酷なヒートサイクル1万回を実施して特性が良好であることを確認済みであり、実際の運転での温度変化45~100°C程度では全く問題がない。

また起動・停止ごとに伸縮を受けてクラックが生じやすい極間わたり線に対しては、図5のような各種の形状に対して、静止疲労試験、遠心力模擬疲労試験、回転試験などを実施して形状の比較検討を行ない、1万回の起動・停止に耐える構造を開発済みである。図6に極間わたり線の試験結果の一例を示す。

3.2 回転子の新構造

アルミ合金ウェッジについては、実形ウェッジによる疲労



(a) 劣化特性

(b) 試験状況

図4 大形コイルのヒートサイクル試験 起動・停止、負荷変化の頻繁な最近の大容量機の固定子コイルに対し、実機よりも過酷な状況でヒートサイクル試験を実施し、信頼性の確認を行なった。

試験やクリープ強度試験などを実施し、起動・停止回数1万回でも安全率が3以上あることを確認しているが、発電機ごとに信頼性を確認するという趣旨で運転開始後約4年目にはロータ外表面からの斜角超音波探傷や硬度調査、また8年目にはウェッジ全数抜出しによる精密点検を推奨しており、更

に最近の機械に対してはウェッジ肩部の面取り半径を従来の値の約3倍と大きくして、寿命を倍増する設計を適用しており、信頼度はいっそう向上していると言える。

また軸材については、近年、鋳込時の真空度上昇による脱ガス効果の向上などによる靱性の向上や、FATT（脆性破面

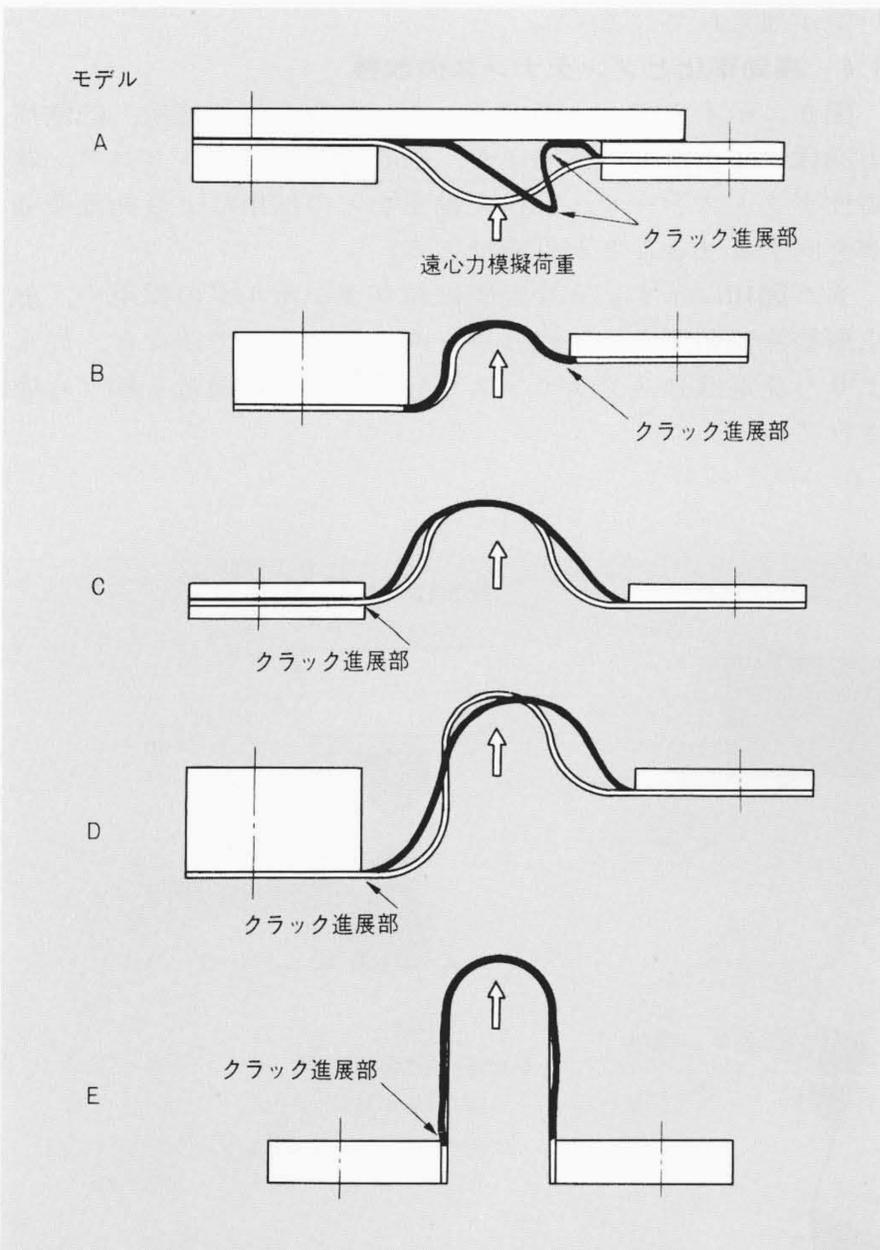


図5 極間接続線の疲労試験 各種形状の接続線モデルにつき疲労試験を実施し、最適形状の検討を行なった。

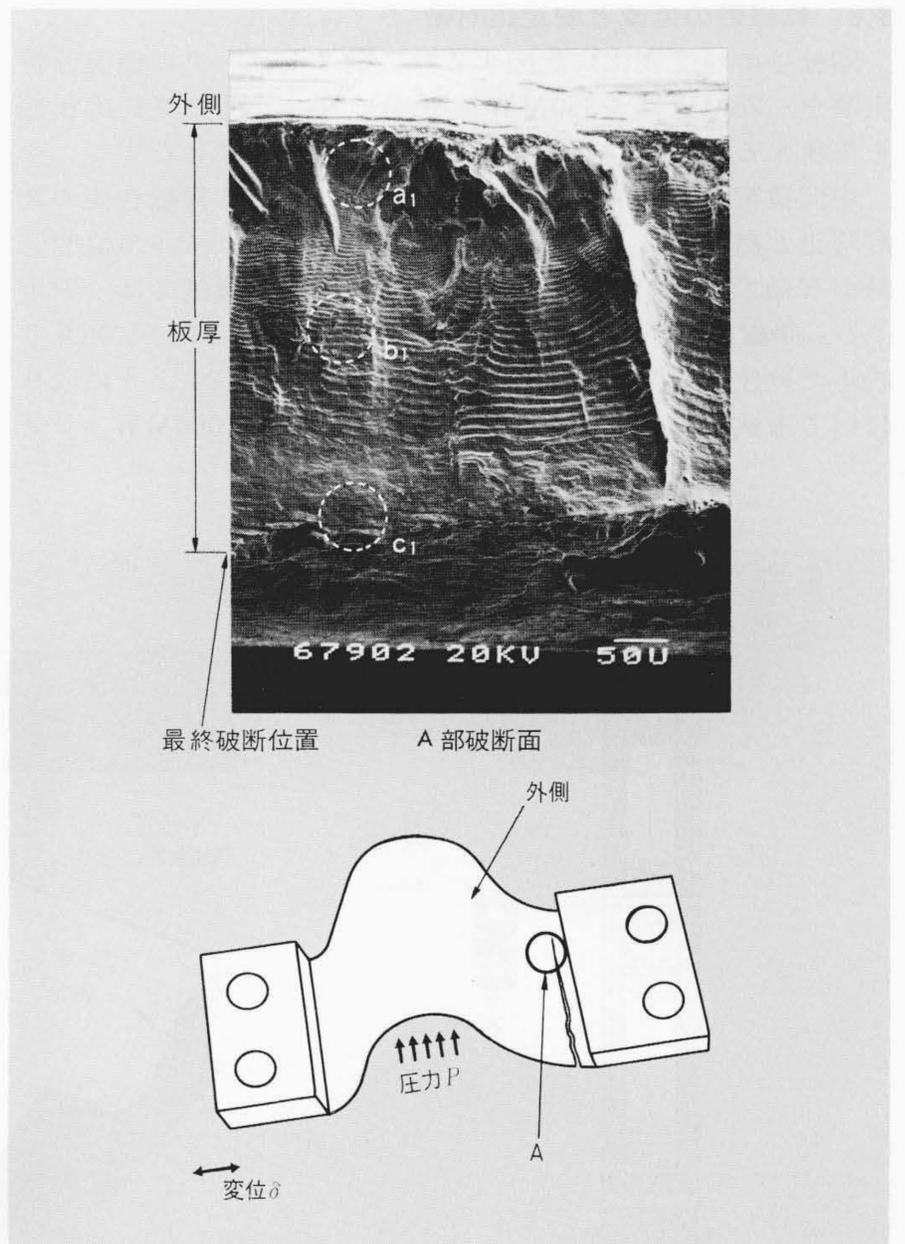


図6 極間接続線の疲労破断面 下一下接続線の遠心力模擬試験結果、得られた破断面には片振り応力が見られたが、形状によっては両振り応力となっているものもあった。

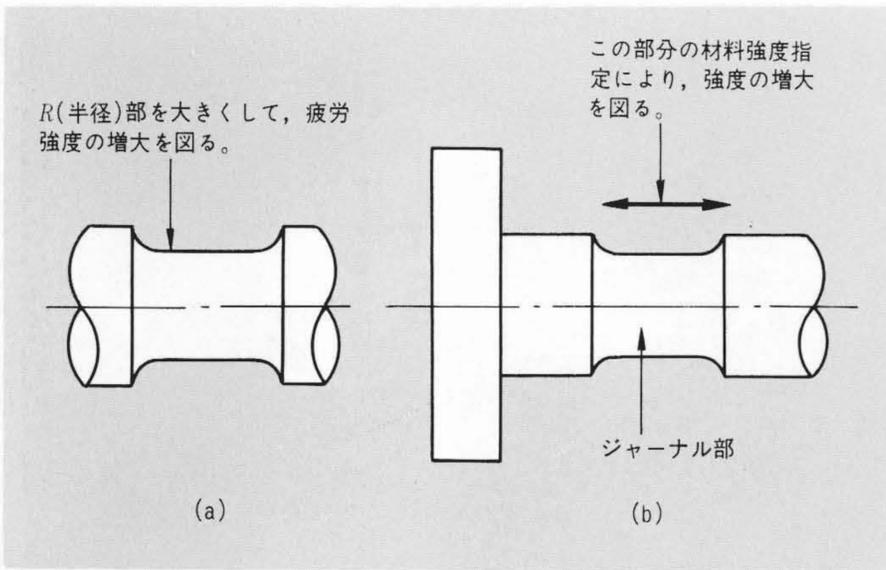


図7 再閉路耐力向上策 ジャーナルの強度を高めるため、調質焼もどし工程の際、ジャーナル部の焼もどし温度を、ロータ素材胴部よりも15°C低い温度とする2段階調質を実施し、軸系許容トルクで約10%、再閉路許容回数で約80%向上させた。

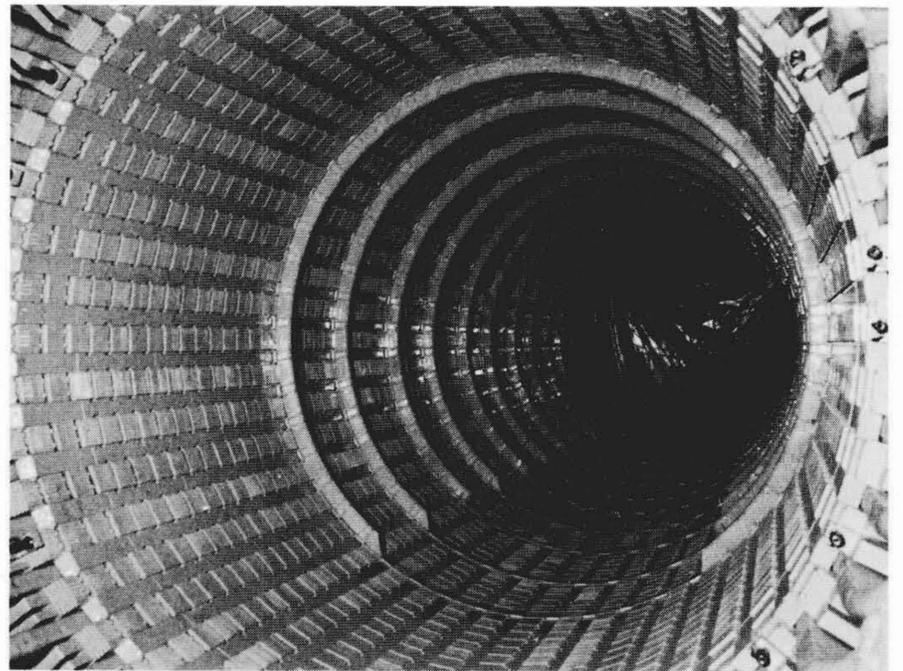


図8 空隙バツフルリング 空隙のきを仕切るバツフルを設け、界磁電流を110%とすることができる。

遷移温度)の低下を図って起動・停止に対する欠陥進展への安全率を増大させ、更に機会あるごとに中心孔からの超音波探傷やスロット部の磁粉探傷検査など、欠陥検出QC(Quality Control)の増強を行なっている。また、電力系統の運用上再閉路が必要となっているが、軸ねじり強度の改善、曲げ応力の低減を目的として図7に示すようなジャーナル表面の強度向上やカップリング部ボルト連結の強化策などを採っている。

3.3 軸振動の低減と安定化対策

回転子の温度変化に起因する熱振動ストロークの要因分析実験を、25MW機や350MW機で実施し、工場で実負荷状態を再現する設備と、これを用いた試験法を確立した³⁾。

中間負荷火力機の場合は、変動負荷に対する界磁巻線の変形防止と熱振動ストローク低減のため、界磁コイルの温度低減が有効であり、このため特に容量の大きい機械では、固定子から回転子への入気ゾーンと排気ゾーンの境界部を、空隙の約 $\frac{1}{2}$ だけ仕切る空隙バツフルリングを図8に示すように取り付け方式が有効である。日立製作所では、1,000MWクロス

コンパウンド二極機などにこの方式を採用済みで、界磁コイル温度上昇の約20%低減を確認している。

このほかに軸振動の低減法としては、タービンのHIT(加熱計測)特性と発電機の負荷ストロークが打ち消し合う方向に軸を直結するベクトル振れ差直結法の採用とか、軸受の安定性及び焼損に関する解析や実験に基づいた軸受組込法の確立、オイルリフト装置の設置による低速時の油膜確保などの対策が採られている。

3.4 高効率化とメンテナンスの改善

図9に示すように、固定子コイル混合素線の採用、低鉄損方向性ケイ素鋼板の採用ほか、鉄心端部のシールドコア、非磁性ダクトスペーサ、低損失軸受などの採用により発電機効率を向上させることが可能である。

また図10に示すような定圧ばねブラシホルダの採用や、静止形整流器装置を励磁機カバー内に内蔵する方法など、従来よりも発電機のメンテナンスを容易にできる構造も種々考慮されている。

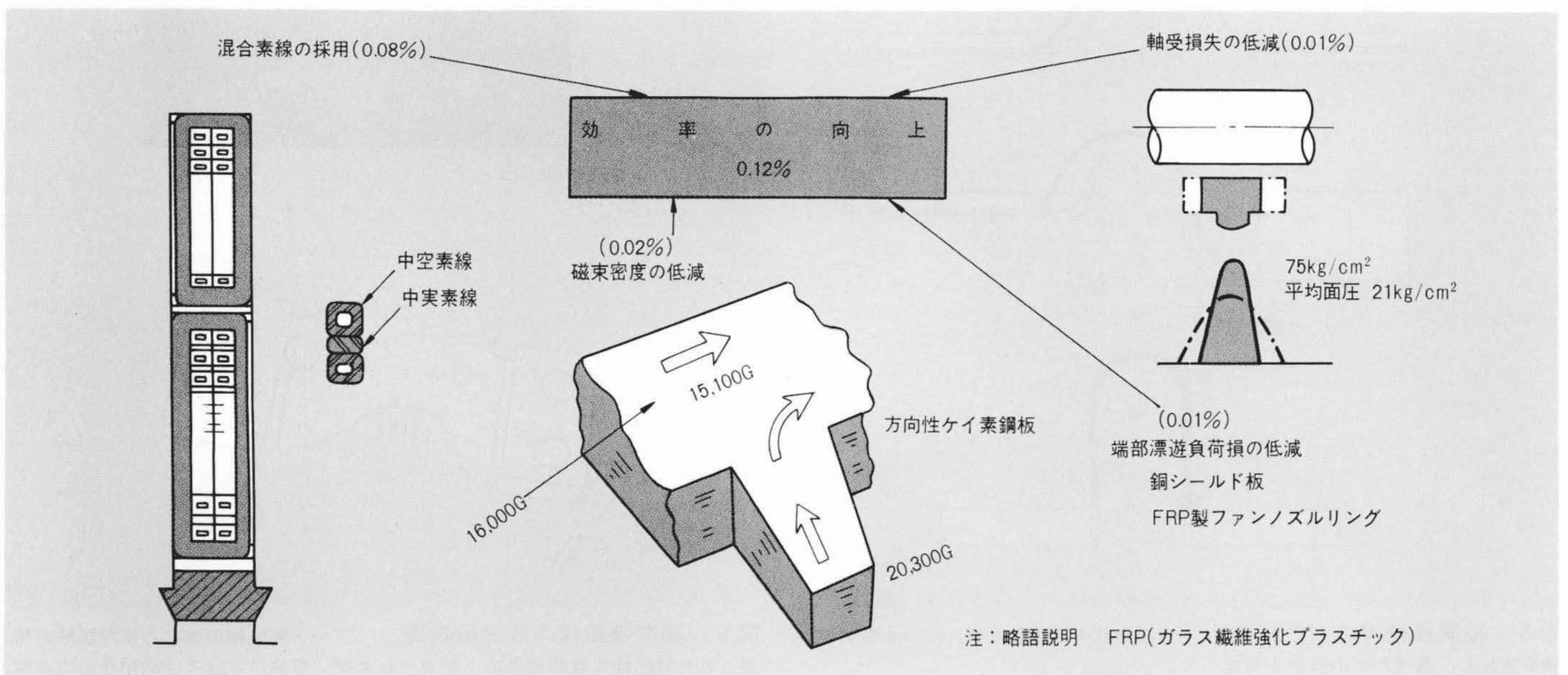


図9 発電機の効率向上策 従来の設計を変更することにより、発電機の効率を例えば本例のように向上することが可能である。

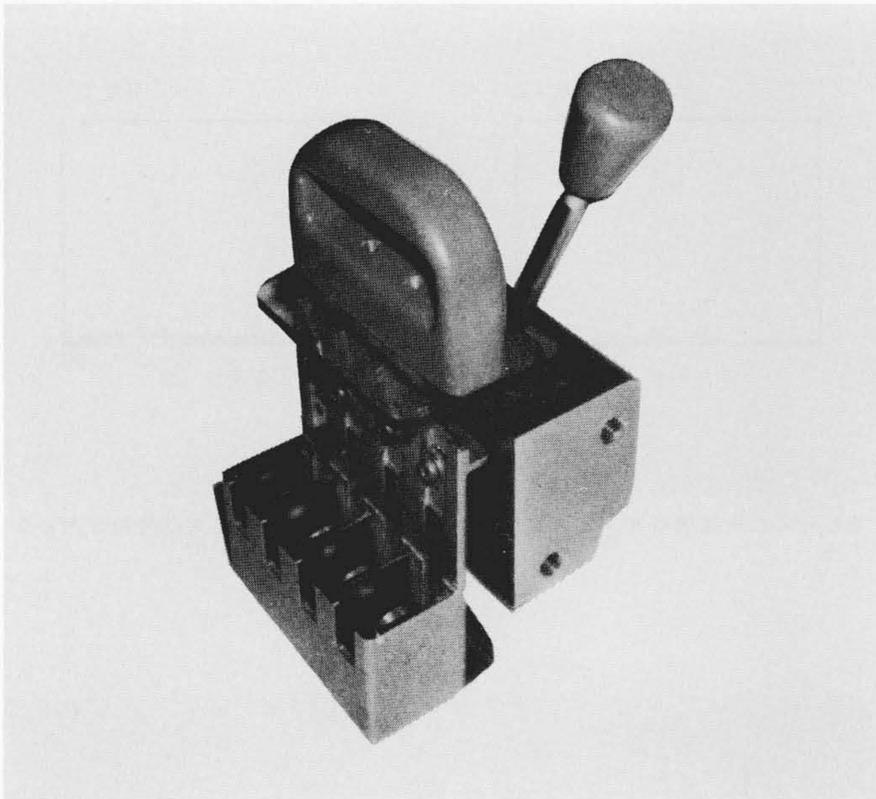


図10 日立レバック形ブラシホルダ つるまき形ばねにより一定のブラシ圧が保持され、レバーによって簡単に装着が可能な新形ブラシを示す。

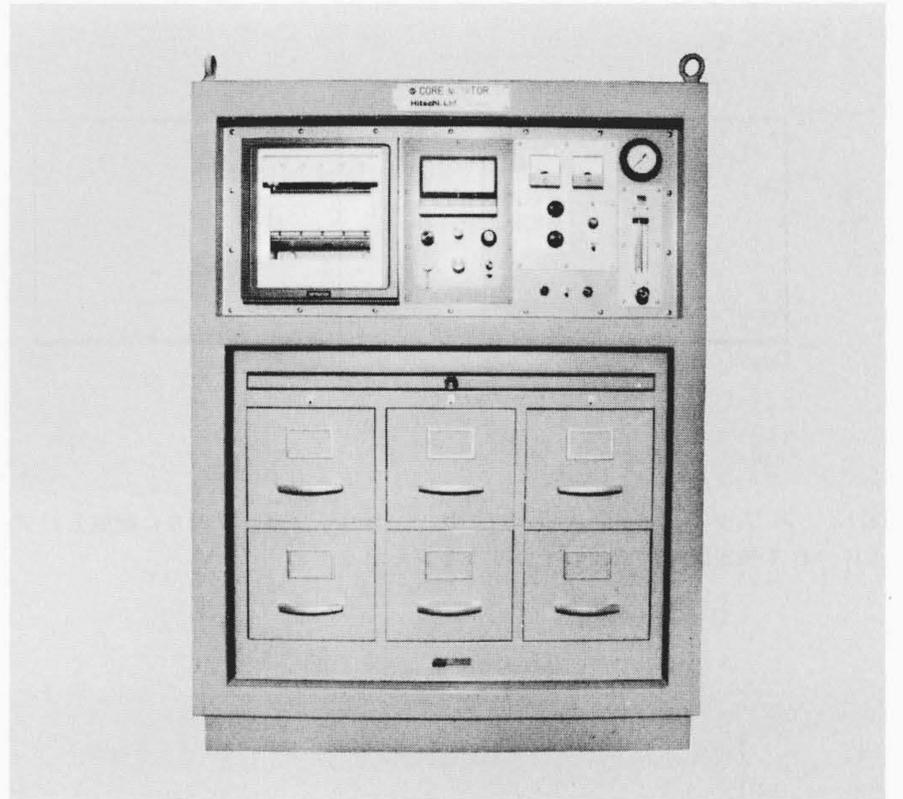


図11 微粒子モニタ 絶縁物の熱分解により発生した微粒子を帯電させて、異常を検出する。

4 予防保全の新技术

大容量化したタービン発電機の信頼性について見直したいという意向が製作者側にも使用者側にもあり、製作時や定期検査時に重点的に実施しておくべき予防保全項目については、これまでかなりの検討が加えられ、実施も軌道に乗った感があるが、運転中の発電機の故障診断を行なう手法は比較的新しい技術であり、今後の開発にまつところが多い。

4.1 固定子異常の早期診断

運転中の固定子の状況、特に鉄心や巻線の局所的な過熱を早期に検出する装置として開発されたのが微粒子モニタ⁴⁾であり、水素ガス中でのワニスなど、有機絶縁材の熱分解による $0.1\mu\text{m}$ 以下の浮遊微粒子に荷電して微小のイオン電流を検出する方式である。水素ガス中の微量の水滴による誤動作を防止し、装置の信頼度を上げるために電極部の温度を調節するなどの細かな配慮が必要である。図11に微粒子モニタの外観を示す。

また、固定子コイルのクラックなどの原因による水冷却系統の水素ガス漏えいモニタも完成しており、正常時の純水タンクの水素ガス濃度 $150\sim 200\text{ppm}$ が、異常時にはその10倍以上にもなる点を半導体センサを用いて検出する。また、水素ガス系統の各溶接部や水素封入配管の気密不良、油切り部の不具合などによる水素ガス漏れを診断し、水素ガス消費量を自動的に算出する方式も開発された。

4.2 回転子異常の早期診断

回転子巻線の層間短絡を検出する方法として、固定子側から空隙にサーチコイルを挿入し、空隙磁束の波形を測定してこれを正常時の波形と比較し、短絡の有無、位置などを検出する方法もある。

また軸振動監視モニタとして、軸振動波形のスペクトル分析を行ない、異常兆候を早期に検出するとともに、振動データの長期的集積による経年変化の早期検出なども考慮されており、定期検査前後の軸振動管理に対しても有力な手段となり得る。

AE (Acoustic Emission) 法を応用した手法としては、回

転子内部のクラックの発生の診断や、固定部と回転部の異常接触(ラビング)検出、軸受発生音のAE分析なども検討されている。

また、上記のような異常監視診断モニタ類に加えて、回転子では事故が発生した場合、特に重大な結果となることを考慮すると、機器の停止時、定期検査時のチェックも重要であることは言をまたない。一例として、前述のロータウェッジや軸材のほかに、界磁コイル保持環の予防保全も重要である。最近、ヨーロッパで非磁性保持環の保守不具合によるとみられる破断事故が報告されているが、日立製作所では保持環に使用される $18\text{Mn}-5\text{Cr}$ 材の応力腐食に対する特性について、保持環に応力がかかった状態で数箇月浸水した場合などについての実験を完了しており、開放空気冷却形の発電機に対しては保持環の内面をワニスコーティングするなどの技術を既に確立して実機に適用中であり、また水素冷却機に対しては、製作中、輸送中や停止中の機内への水分の浸入を避ける、正しい取扱い方さえしていれば心配のないことを確認しており、定期検査時の検査としては、回転子引抜き時の保持環外表面からの超音波探傷検査、保持環引抜き時の内面の染色探傷検査を推奨して、万全を期している。

4.3 スリップリング火花の診断

日立製作所では、スリップリングとブラシ間で発生する火花を早期に検出するための実機による検証も完了している。スリップリングの周りにアンテナを設置し、増幅器、検波器、フィルタを介して検出解析を行なう手法であり、この種異常時の診断に有力な装置となる。図12に、本装置による火花のヒストグラム解析結果を示す。

4.4 劣化予知診断技術

実機の使用中に生ずる材質変化の情報を、精度良く測定できる非破壊診断技術の研究も行なわれており、例えば、回転子コイル銀入り銅材の疲労寿命を回折X線の半価幅で予測する方法もある。また固定子コイルの絶縁劣化については、15年以上経過したコイルについて、電力会社の援助を得てサンプリング破壊試験を続けている。コイル絶縁の劣化要因としては、課電劣化やヒートサイクルによる機械的劣化、熱劣化

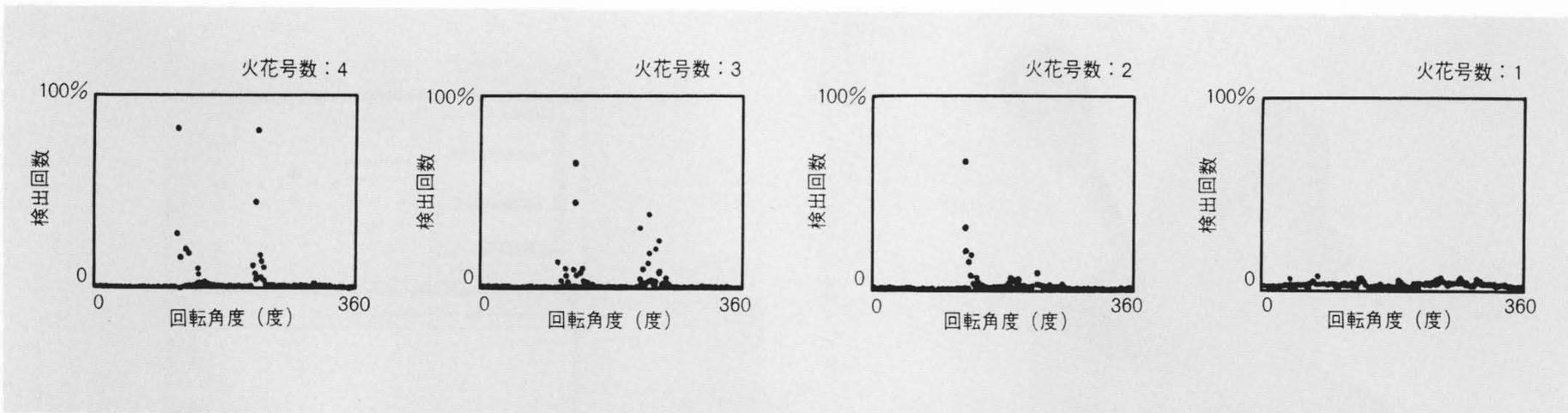


図12 スリップリング火花の検出 スリップリング周りに配置したアンテナでとらえた火花信号を、ヒストグラム解析したものであり、火花号数が大なるにつれて検出回数が増加していることが分かる。

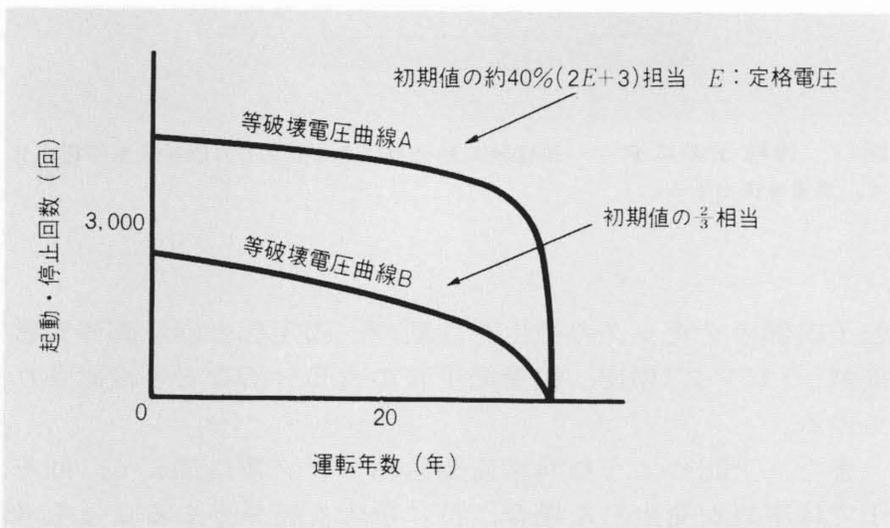


図13 ポリエステル絶縁コイルの寿命曲線 曲線A:実際に安全運転可能なためにはこれだけは必要であり、これが絶縁更新の目安となる。曲線B:新品の破壊電圧の $\frac{1}{3}$ に低下したら、更新を計画すべき領域に入ったと考える。

などがあり、これら要因ごとの運転年数、起動・停止回数に対応する劣化度の実験値から、当該コイルの残存破壊電圧を算定することができるが、これまでの実機でのサンプリング破壊試験値とよく一致することが分かっており、コイルの高信頼度の維持という観点から、運転歴15年以上起動・停止回数 1,000回以上の機械に対しては、サンプリング試験を実施して余寿命の診断をすることが有意義であると言える。図13に残存破壊電圧の算定例を示す。

また、非破壊試験データから残存破壊電圧を推定する方法も研究しており、運転歴10~16年のコイルに対して、 $\Delta \tan \delta$ (誘電体損失の変化値)、 ΔC (静電容量の変化値)、 Q_m (最大放電電荷量)などをパラメータとした残存絶縁破壊電圧算定値が実際の値とよく一致するというデータも得られている。

同様に回転子コイルについても、運転歴15年以上のコイルについての劣化データを集積中であり、一例としてソフト絶縁のもので起動・停止 4,700回で破壊電圧が初期値の30%程度にまで低下したというデータも得られている。図14にその例を示す。

5 結 言

以上、最近のタービン発電機の新技术について、中間負荷火力や予防保全などに重点をおき述べた。今後ともタービン発電機の大容量化に伴う新技术の開発、信頼性確保に全力を挙げる考えであり、ここに関係各位の御指導及び御助言を請う次第である。

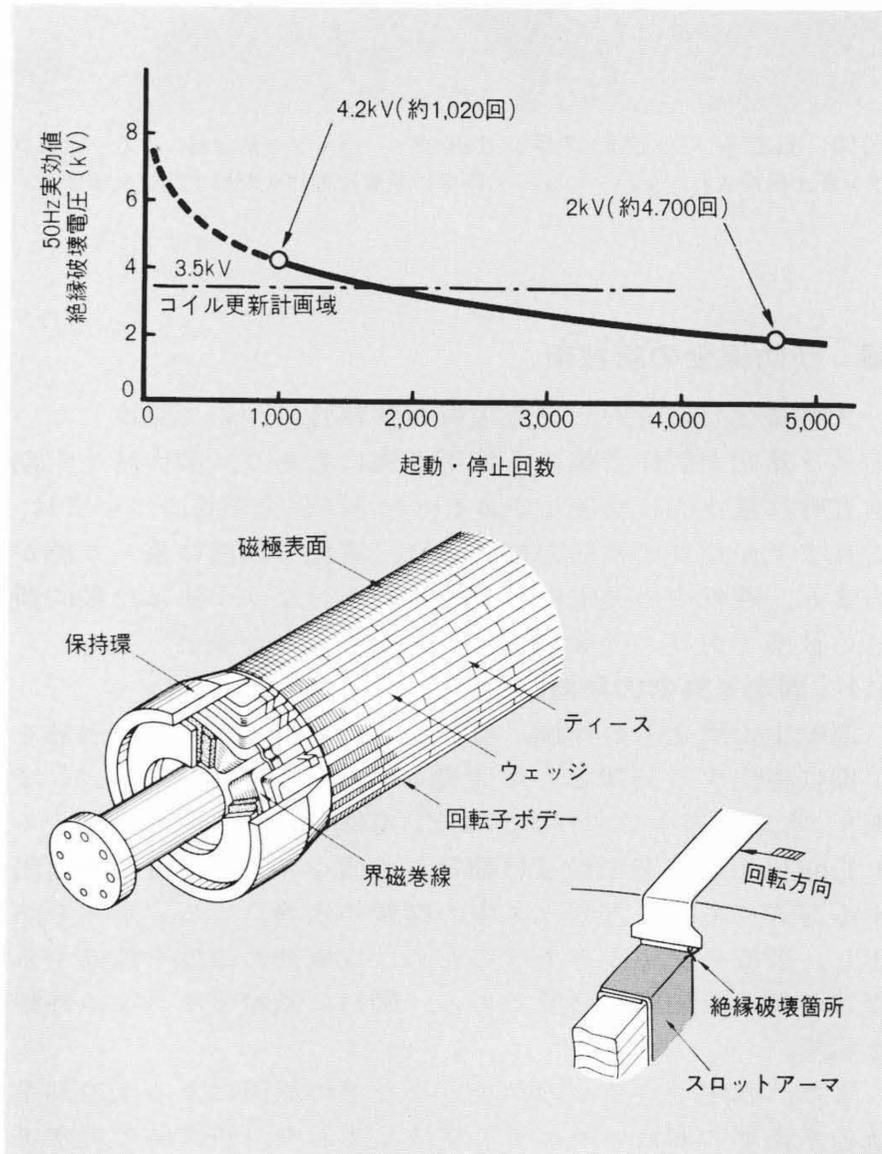


図14 回転子コイル絶縁破壊特性 ソフト絶縁の機種では、運転歴15年あるいは10万時間、起動・停止数 1,000回のいずれかに達した時点を目安にして、絶縁全面更新を行なうことが望ましい。

参考文献

- 1) N.Maki et al.: Design and Component Development of a 50 MVA Superconducting Generator, IEEE Winter Meeting Feb. 1979
- 2) M. Watanabe et al.: Experimental Study of a Practical Airgap Winding Stator Arrangement for Large Turbine Generators, IEEE Winter Meeting Feb. 1979
- 3) 渡辺, 外: 大容量タービン発電機の軸振動に関する最近の進歩, 日立評論, 59, 977~982 (昭52-12)
- 4) 大塚, 外: 微粒子モニタによる発電機内雰囲気監視, 火力原子力発電, Vol. 27, No. 12, 1163~1167 (昭51-12)