

大形回転機絶縁の動向

Tendency of Electrical Insulation for Large Rotating Machines

日立製作所は、既に大形回転機用固定子コイル絶縁として真空加圧注入方式のスーパーハイレジンコイルとプリプレグ方式のハイモールドコイルを開発実用化しているが、今回ガスタービン発電機や同期電動機に対して、H種ハイモールドコイルを開発した。

界磁コイル絶縁としてはエポキシガラス、ポリエステルガラスなどのFRPや、Nomex(Du Pont社の耐熱ポリアミド紙)のような薄葉材が多く使用されている。H種用としてはジフェニルエーテルレジンガラス成形品が使用される。

本稿は、プリプレグ化し、H種化へと進む大形回転機絶縁の動向について述べる。

安芸文武* Aki Fumitake
松延謙次** Matsunobe Kenji
向井淳二*** Mukai Junji
津久井勤**** Tsukui Tsutomu

1 緒言

大形回転機絶縁は、機器の性能や寿命を左右するものであり常にたゆみのない技術向上が行なわれ、高信頼性を持つ合理的な絶縁システムが完成され使用されている。

コイル絶縁は次の六つの区分で考えられる。

- (1) 単独固定子コイル
- (2) 固定子コイル組線絶縁(コアへの組込み、接続部絶縁など)
- (3) 突極機の界磁コイル絶縁(層間絶縁、コア絶縁など)
- (4) 突極機の界磁コイル組線絶縁(口出線、接続部絶縁など)
- (5) 円筒極機の界磁コイル絶縁(層間絶縁、対地絶縁など)
- (6) 円筒極機の界磁コイル組線絶縁(口出線、接続部絶縁)

紙面の都合でこれらすべてについては述べられないが、主として(1)、(2)、(3)、(5)についてどのような考え方で絶縁システムが開発実用され、将来はどう進むかといったことについて述べる。

2 固定子コイル

大形機用コイル絶縁の特長の一つは、乾式絶縁で、かつ大容量化に伴い定格電圧が、水車発電機では18~20kVへ、タービン発電機では20~24kVへ高電圧化したことである。このため、主材料はマイカを用い、かつコロナ放電防止技術が重要となっている。

現在は、耐コロナ性能の面でマイカに匹敵する材料がなく、世界の高電圧コイルは、すべてマイカ主体となっている。合成マイカの検討も一部行なわれているが、経済性が悪くほとんどが天然産マイカを使用している。主産地はインドがほとんど独占しているため、良質のフレークマイカは入手しにくくなる傾向にあるが、集成マイカ用原料はフレークマイカに比べて有利であり、良質のものも入手しやすく、後述するプリプレグ方式絶縁の拡大化と相まって集成マイカの使用が拡大されている。集成マイカは、マイカ原石を粉碎し抄造紙のように抄造して作るもので、フレークマイカに比べて機械的特性は弱い、厚みや特性の均一性に優れ最近広く用いられている。機械的強度の弱さは裏打材料でカバーし、実用上は全然問題のない強さになっている。プリプレグテープは、樹

脂の塗布、保持などの問題でフレークマイカではほとんど製造不可能で、もっぱら集成マイカが使用される。

固定子コイル絶縁は処理方式から次の二つに分けられる。

(1) 真空加圧注入方式

日立製作所では昭和32年以降SLSコイル¹⁾(不飽和ポリエステルコイル)が、その後ハイレジンコイル²⁾(エポキシコイル)が開発実用化され、信頼度を一段と向上させた。その後も改良を重ね、スーパーハイレジンコイル³⁾(エポキシコイル)が開発され現在に至っている。従来はフレークマイカ主体であったが、スーパーハイレジンコイルでは、省資源化、高信頼性向上のため、集成マイカの併用を行なっている。集成マイカの絶縁層がち密なため、樹脂含浸性が難しくなるので注入樹脂は粘度をより低くした特殊なスーパーハイレジンを開発使用し、含浸の完全さを確保している。併用するフレークマイカテープは、できるだけ少量のバインダで接着し(これは含浸樹脂をより多く含ませるため)、機械で巻くときにマイカはがれや脱落、テープの切れなどが出ないように特殊なマイカバインダを開発使用し、作業性の著しい向上と品質の安定化を図っている。

(2) プリプレグ方式(レジンリッチ方式ともいわれる)

この方式も古くから⁴⁾存在し、大形機にも使用されてきた^{5),6)}。コイル絶縁の特性としては、真空注入方式に比べ色がなく、集成マイカ使用のためむしろばらつきの少ない均一な品質が得られる。真空注入方式では、プリプレグ方式に比べてコイルの製造工程が複雑であり、省力化、省資源化の点で現代の要求に合わなくなってきた。

日立製作所は、プリプレグ方式の大形機への適用に積極的に取り組んでいる。F種絶縁⁷⁾、H種絶縁(後述)をプリプレグ方式により開発実用化を図っている。

コイルの製作工程は、加熱真空乾燥と加圧レジン注入の有無が異なるだけで、他は両方式ともほとんど同一である。コイルの製作は従来は手作業が主であったが、近年機械化が進み作業の能率化と高品質化を得ている。ガラス被覆素線を用い、素線の伸線、切断、被覆はく離及びびトランスポジション部段

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立工場 工学博士 *** 日立製作所日立研究所 理学博士 **** 日立製作所日立研究所

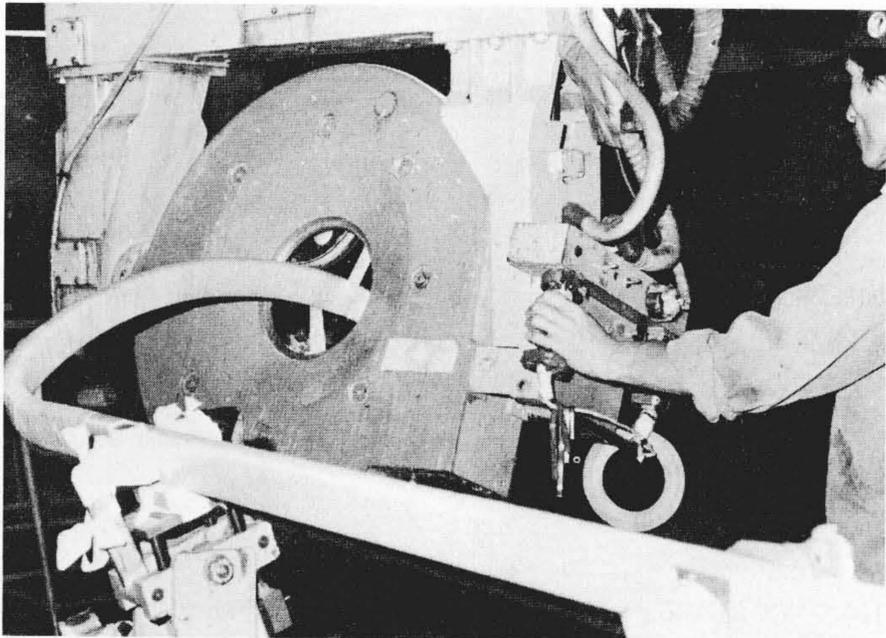


図1 アース絶縁作業 マイカテープをテーピングマシンで、直線部及びエンド部に一連に巻く。

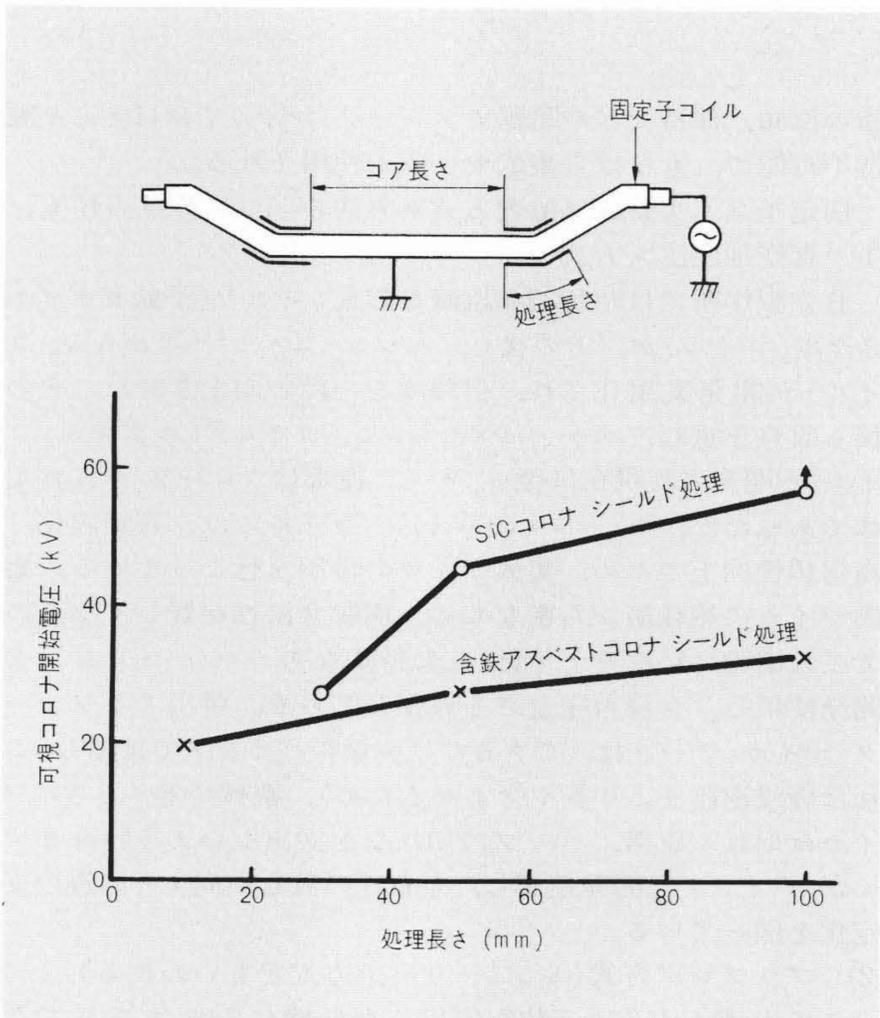


図2 可視コロナ開始電圧特性の一例 コイルのコア長さ部分の低抵抗コロナシールド処理部分をアースして、コイル導体に電圧をかけ高抵抗(SiCあるいは含鉄アスベストコロナシールド)処理部分から発生する可視コロナを測定する。

落して作業を自動化し、特に大容量発電電動機のようにコイル数や、素線数の多い機械のコイルに対して、非常に均一な製品の製作を可能にした。対地絶縁用マイカ及びガラステープは、一定張力で均一に、しかも能率良く巻けるテーピングマシンを用い、コイルの直線部分、エンド部分共に連続一貫した均一なテーピングを実施している。図1にその状況を示す。真空注入方式では、注入作業を永年の実績と改良により、多量のコイルを合理的に処理する方式を確立し適用している。樹脂硬化は、両方式とも成形金型を用いてスロット部分を規定の寸法に仕上げる。特にプリプレグ方式では、この加熱と加圧の適切な条件の選定が絶縁性能を大きく左右するので、硬

化反応を定量的に管理して、温度圧力を制御し電氣的、機械的特性の優れた安定したコイルの製作を行なっている。

コロナ放電防止技術が重要なことについて述べたが、絶縁層内部のボイドによる内部コロナと、コイル表面に発生する外部コロナがあり、特に後者の防止が難しい技術である。内部コロナは絶縁構造と製作技術により規制されるが、日立製作所のいずれの標準絶縁システムでも特に問題はなく、常規電圧で $5 \times 10^{-9} \text{C}$ (クーロン)のコロナ⁸⁾が1個/1サイクル以上発生しないよう考慮されている。外部コロナはスロット内コロナとスロット外コロナに分けられる。スロット内コロナ防止は、コアとコイル表面の間の電位差を少なくするため、コイル表面に低抵抗コロナシールド処理を行なっている。スロット間空隙の充てんにライナ(スロットライナ、サイドライナなど)を用いるが、これらは半導電性材料で低抵抗値を持っている。大形機ではコイルの充電電流が大きくなり、低抵抗処理がしてあっても振動その他で接触したり離れたりする部分があると、火花放電を生じ絶縁物が焼損することが経験される。この防止には、スロット内でコイルがパーフォースなどで動かぬようライナを使用して、スロット幅方向の動き止めをすると同時にスロット深さ方向の動き防止のため、硬く挿木を打ち込むようにしている。

スロット外コロナは、コイル表面に沿ったものが特に問題で、従来高抵抗コロナシールドワニスを使用していたが、含鉄石綿テープを用い安定した品質のものを開発実用化している。更に、最近の高電圧化に伴いSiC(炭化けい素)コロナシールドワニスを用いて、電流-電圧の非直線性を利用し図2のように可視コロナ発生電圧を著しく向上している。

コイル絶縁の性能評価は、その寿命により決められるが、実際には短期間はその寿命の絶対値を求めることは困難であり、一般的に初期でのコイルの諸特性を測定し、かつ劣化の特性を実機での劣化条件に近く、また短期間で長期の劣化を模擬するため、種々の強制加熱劣化試験や実際の運転を過酷に模擬した加速ヒートサイクル試験などを行ない、従来の実績と経験の豊富な絶縁システムと同等以上の諸特性を持っていることを相対的に比較して評価を行なっている。コンパウンドコイルでは、高温時の接着力が強くないために長大なコイルの場合には、機械の起動停止の繰返しによって少しずつ絶縁層の移動が生じ、Girth-Crack(絶縁層のくびれ現象)を生じたり、テープのはく離を生じたりすることもある。しかし、合成樹脂が使用されるに及んでこの種の事故はなくなった。このような経験及び近年のように起動停止がひんぱんに行なわれる揚水発電電動機用コイルや負荷変動の多い機械に対しては、耐ヒートサイクル特性が重要である。冷熱サイクルを受けたときに、その都度コイル導体と絶縁層の熱膨張係数の差や、それぞれの冷却加熱速度の相違などが原因となって伸縮に差を生じ、導体と絶縁層の間でずれが生じてくるのが考えられるので、実際の運転条件に近似した条件で加速ヒートサイクル試験を行ない、絶縁層の評価を行なうことが望ましく、既に十数年前から、ヒートサイクル試験を開発時の標準試験の一つに取り入れて、モデルコア内にコイルを取めて図3に示したスケジュールで自動制御を行ない測定している。このスケジュールでは、時間に対する温度の変化は実際の機械が遭遇する条件に比べて非常に厳しく、このため絶縁層に発生する応力変化は非常に速く、強度、接着性などが優れたレジンでなければ到底追従しきれないと考えられる。特にこの試験では、接着のはがれなどによる内部ボイドの形成を検出するため、 $\Delta \tan \delta_2$ の変化を測定している。試験結

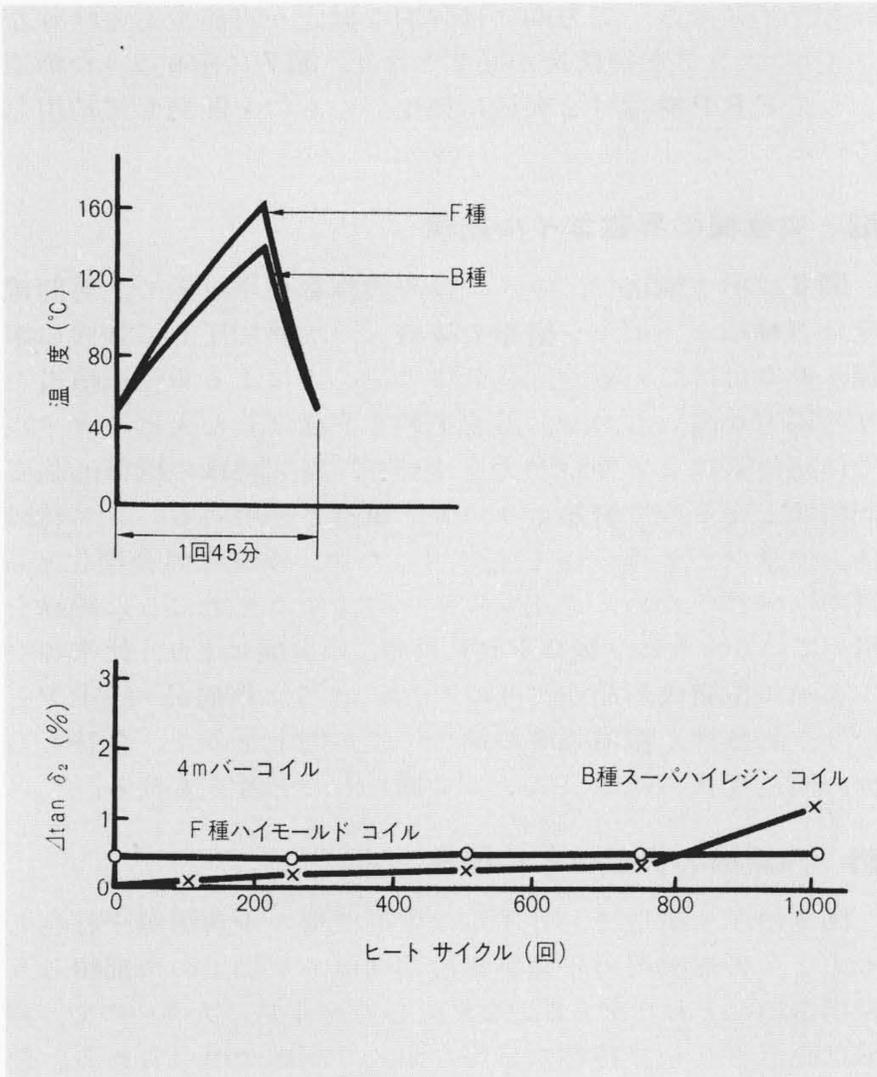


図3 ヒート サイクル試験の一例 図に示すスケジュールで、4 mのバー コイルを用いてヒート サイクル試験を行なった。

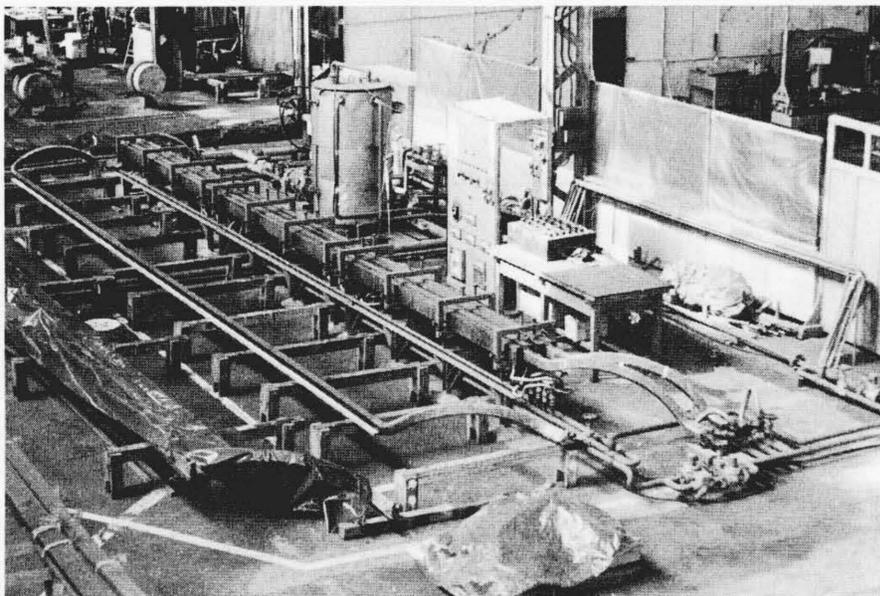


図4 超大形コイルのヒート サイクル試験 直線部長さ10mに及ぶ1,000MWクラス タービン発電機用固定子コイルのヒート サイクル試験の状況を示す。

果の一例を図3に示したが、変化も小さくまたコイル外観上もテープのはく離などの異常は全然認められなかった。また図4に直線部長さ10mに及ぶ1,000MWクラスのタービン発電機用コイルのヒート サイクル試験の様子を示した。特性変化も小さく良好な結果を得た。

中形機では耐熱性を上げて機械の小形化、又は容量増大化を図る考えがあり、このため絶縁種別B種からF種化が進められ、ハイモールド コイル⁷⁾として数多くの実績を持っている。最近、更にH種化を行なうため開発研究が行なわれ、これを完成した。紙面の都合で詳細は後報するが、ここでその一部について述べる。今回開発したH種絶縁は、ガラスク

ロス裏打集成マイカに含浸させた特殊レジンを用いたBステージにしたプリプレグ マイカ テープを使用したプリプレグ絶縁で、コイル製作技術はF種ハイモールド コイルと類似しており、現在まで培われたプリプレグ絶縁製造技術を随所に採り入れ、耐熱特性の優れたH種ハイモールド絶縁を製作した。図5にコイルの $\tan \delta$ -温度特性の一例を示すが、高温特性が優れていることが分かる。

3 固定子コイル組線絶縁

大容量機になるとコイルに流れる電流も大きくなり、電磁振動も大きくなるので、スロット内のコイル固定には半導電性のライナを用いて強固に固定するとともに、挿木には熱履歴による寸法収縮の小さい合成樹脂積層板を用いる。特にスロット内バーフォースの大きいタービン発電機では、図6に示すようにコンプレッシブル ストリップと称するエポキシセミキュア集成マイカを用いて、スロット内にコイルを入れてから挿木側より加熱加圧して、固いコイル表面の凹凸にセミキュア集成マイカをなじませて硬化させスロット深さ方向の動きを減らすとともに、側面には波状に成形した半導電性プラスチックのスプリングを入れて強固に押し付け、更に挿木を二重構造にしたテーパ挿木を用いて運転中のコイルの動きをほぼ完全に押し付ける構造を採っている。

コイル エンドは、一般にはコイル支えリングにコイル エンドをガラスひもでしばり付けている。支えリングは、従来非磁性鋼に絶縁を施していたが、最近はガラス繊維強化プラスチック(以下、FRPと略す)リングを用い、リング自体を絶縁体として軽量化を図っている。水車発電機のコイル間シリーズ接続部は、特殊ゴム絶縁キャップを用い従来のマイカシートはり合せの絶縁キャップに比べて寸法、物性の面で均一な絶縁としている。大容量タービン発電機では、ステータコイルが長くなるため、熱伸びによる変位が大きくなり、無理に固定すると絶縁層に機械的劣化を与えるので、軸方向に

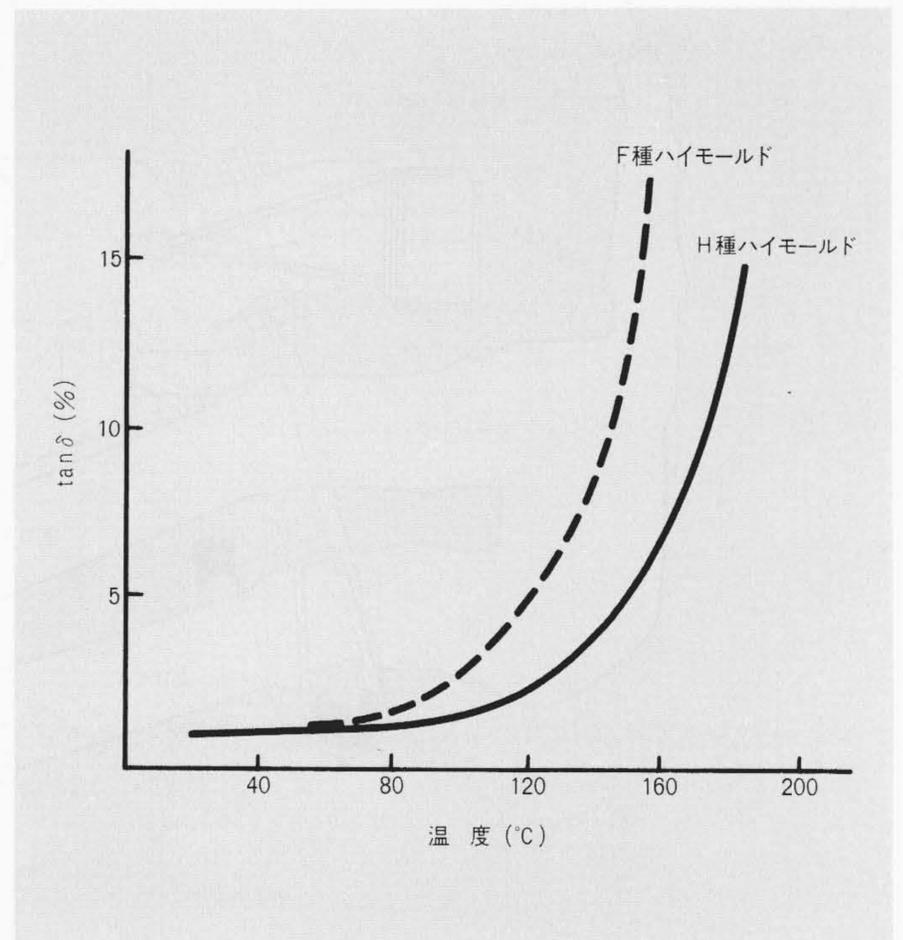


図5 H種コイルの $\tan \delta$ -温度特性 最高許容温度180°Cの $\tan \delta$ 値は、15%程度で温度特性が良好である。

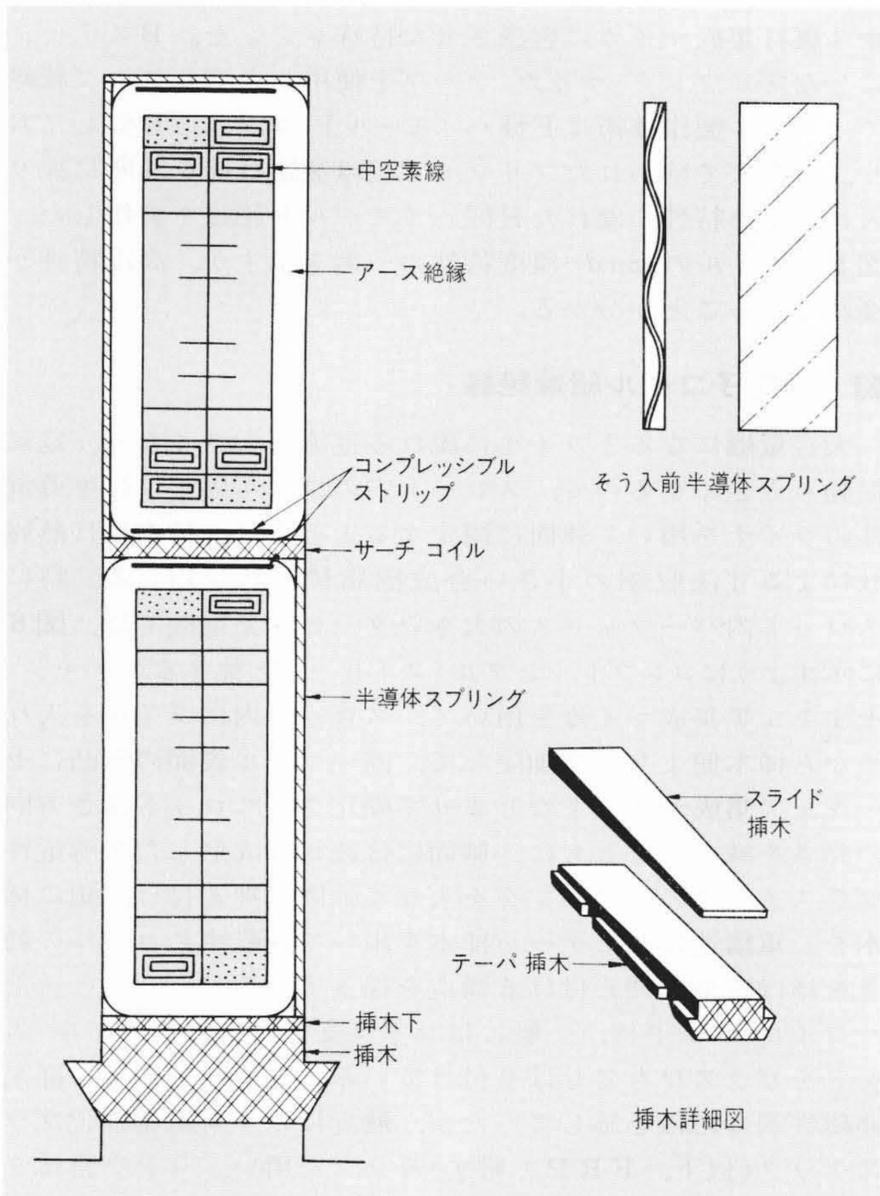


図6 タービン発電機用直接冷却形固定子コイル断面 コンプレッシブルストリップとテーパ挿木でスロット深さ方向の半導体スプリングで幅方向のしっかりした固定を行ない、振動を止める。

はスライドでき、周方向には強固な固定が可能である特殊なコイルエンド支持構造が必要となり、図7に示すような構造としてFRP構造材を縦横に使用したものを開発して使用している。

4 突極機の界磁コイル絶縁

図8に示す構造で、コイルは平角銅線の平打巻で、層間絶縁は石綿紙をエポキシ樹脂で接着し、加熱加圧して強固に銅線へ焼き付けているが、運転中の遠心力による単位面積当たりの圧力が高いものや、温度上昇をF種にした大形のコイルでは熱膨張による伸びが大きくなり、層間絶縁の機械的強度が問題となるので耐熱ポリアミド紙などを用いる。コア絶縁は、従来マイカシートを主に用いたが、作業性の合理化と品質の均一性のため、ポリエステルフィルムを主にした絶縁を用いている。ボビン板はFRPの著しい発展により、従来のフェノール樹脂成形品がポリエステルガラス積層品のFRPとなり、耐熱性、機械強度の面で一段と向上をみた。今後も当分の間、現状の絶縁システムで進むものと考えられる。

5 円筒機の界磁コイル絶縁

図9に示す構造で、コイルは中形機用の平角銅線平打巻のものと、大形機用の平角銅線冷却通風みぞ加工の角部銀ろう付構造の二とおりがある。なお遠心力が非常に大きいので、銅線は高温クリープ特性の良好な銀入り銅線が用いられる。使用定格電圧は低電圧のため、使用する絶縁材料は電気的特性よりむしろ機械的特性を重視しており、FRPを多く使用する。構造的には突極機用コイルと異なり、層間絶縁を導体間にあらかじめ挿入し、これを加熱加圧硬化してコイルを一体に製作しスロット内へ入れることは幾何学的に不可能なので、ス

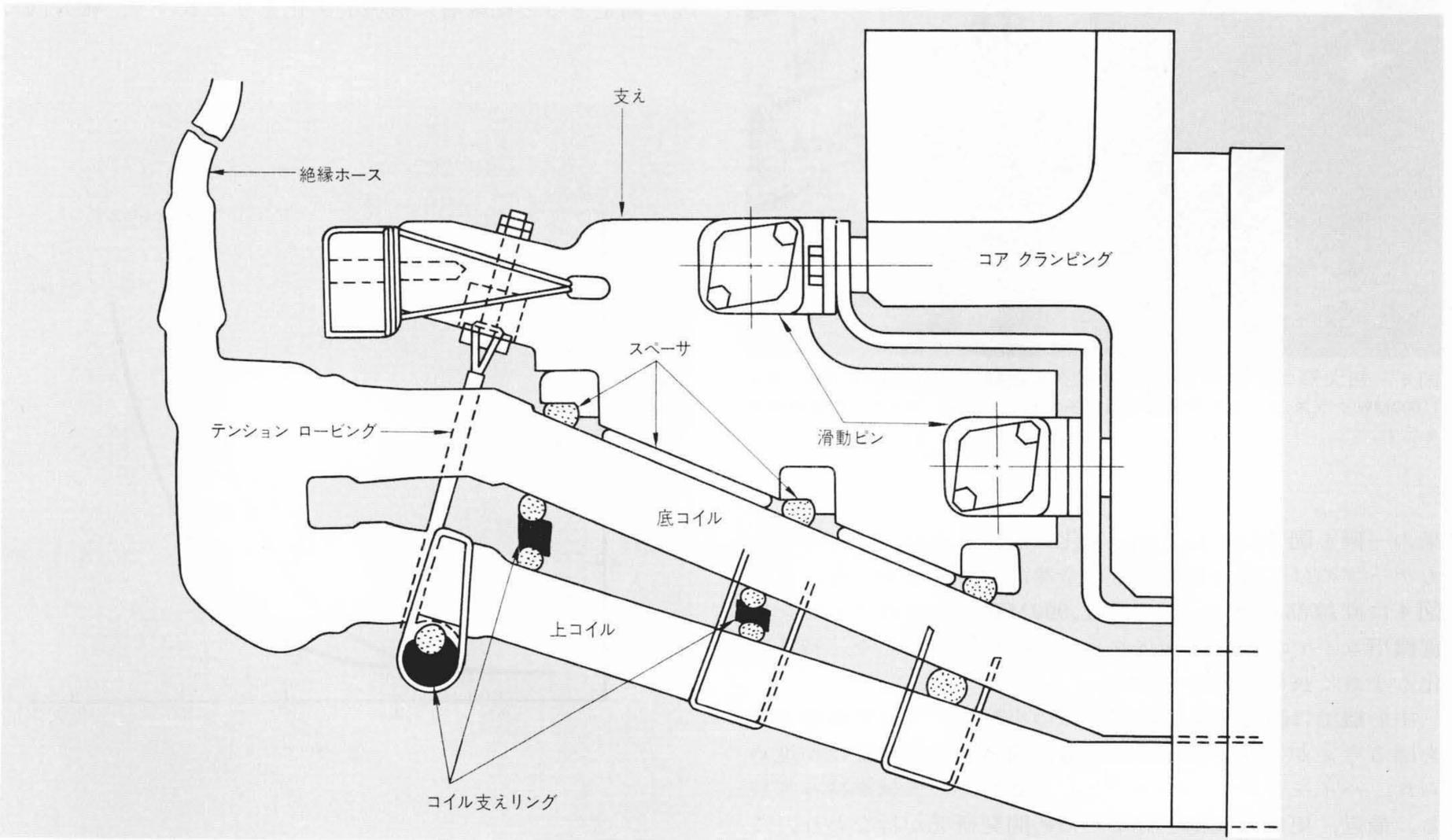


図7 コイルエンド支持方式 FRPを縦横に使用して、滑動ピンで軸方向のコイル熱伸びを自由にし、支え、スペーサなどで円周方向をがっちりと固定する支持方式である。

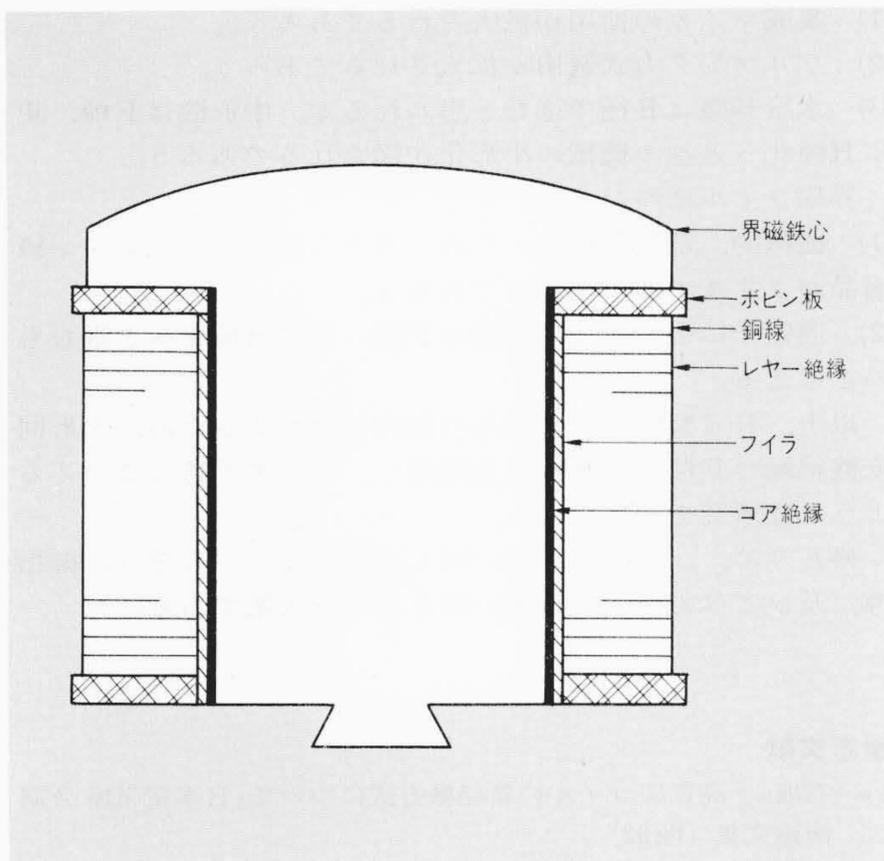


図8 突極形界磁コイルの断面図 対地絶縁はコア絶縁とポビン板で行ない、フィラはコイルとコアとの固定用に入れる。

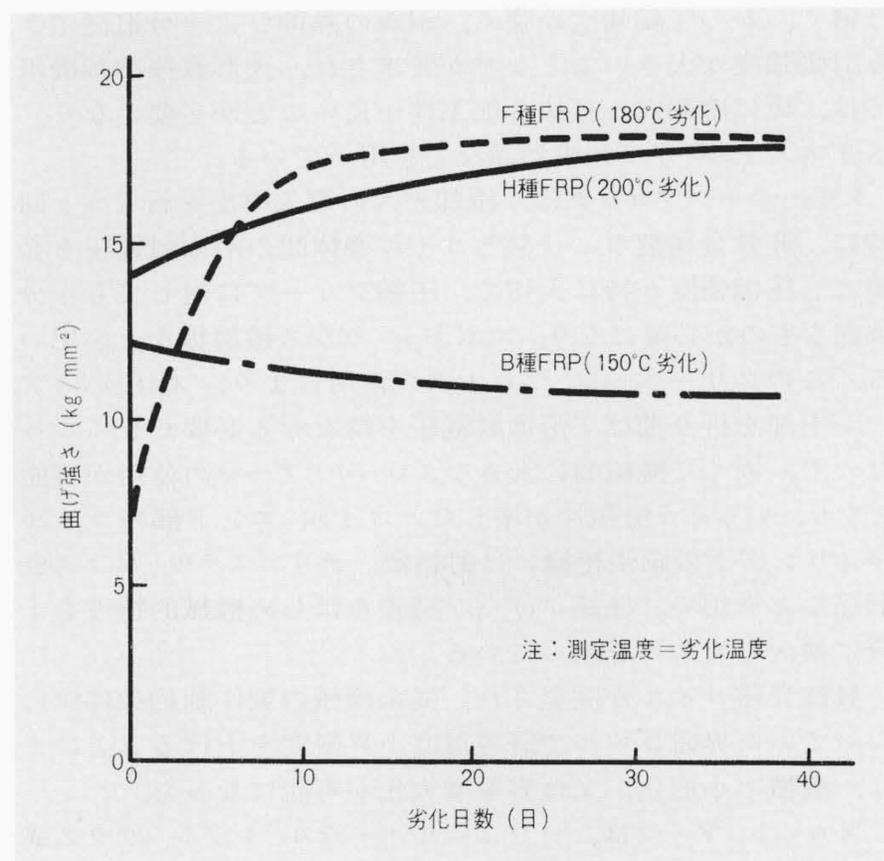


図10 スロット アーマ材料の熱劣化特性 熱劣化温度は、許容最高温度+約20°Cで実施したが、H種用は強度低下がなく良好であった。

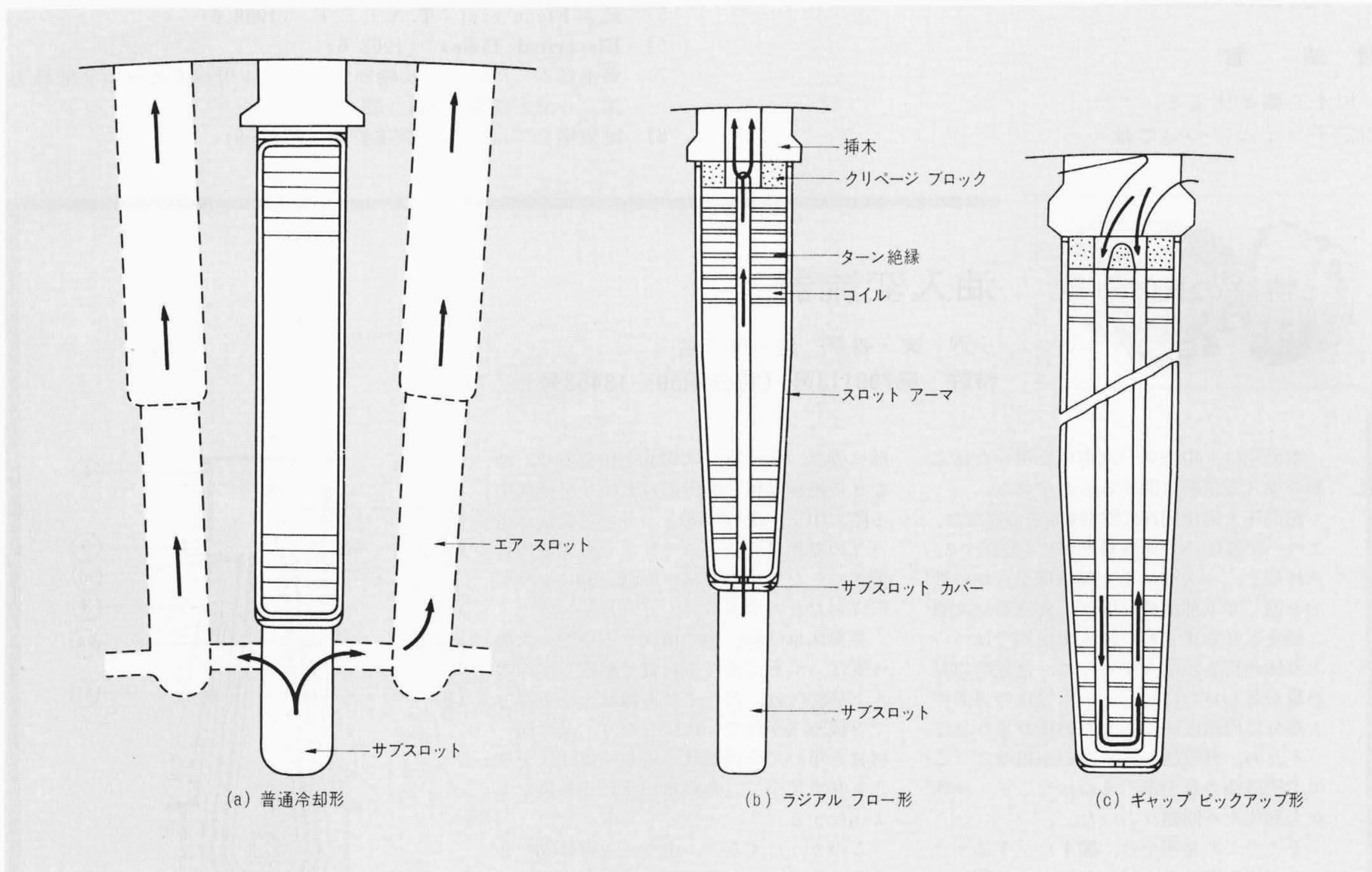


図9 円筒形界磁コイルの断面図 直接冷却タイプには大形四極機用ラジアルフロー形と大形二極機用ギャップピックアップ形とがある。

ロットへまずスロットアーマを入れて、コイル導体を組み込みながら層間絶縁をはさみ込み、すべてをスロット内に収めてから通电加熱しながら高圧力で締め付け接着させている。スロット部断面は、図9(a)に示す普通冷却形と水素ガス直

接冷却形の大形二極機用の(c)に示すギャップピックアップ形、(b)に示す大形四極機用のラジアルフロー形がある。対地絶縁はスロットアーマと呼ばれ、主として耐電圧、耐摩耗性が必要でエポキシガラス成形品が用いられ、層間絶縁はできるだ

け薄く、かつ圧縮強度が強く、銅線の熱伸びに十分追従できる引張強度が大きいことなどが要求され、大形直接冷却機用では、更に冷却穴の打抜き加工性が良いことが必要となり、ポリエステル ガラス成形品などを用いている。

クリーページブロックは、冷却ガスの導入導出を行なうと同時に、非鉄金属製ウェッジとコイル導体間の沿面耐電圧を必要とし圧縮強度が特に大切で、圧縮クリープに対しても十分強固なものが必要になり、エポキシ ガラス積層板などを用いる。このクリーページ ブロックの使用により、スロット アーマ上部を折り曲げて沿面耐電圧を持たせる必要がなくなったので、固くて機械的に大きなスロット アーマの使用が可能となり、いっそう信頼性が増した。コイル エンド部のコイル押えリング下の胴張絶縁には耐熱紙、ポリエステル ガラス成形品などを用い、圧縮クリープ特性をはじめ機械的特性を十分に検討したものを用いている。

H種界磁コイルが開発され、従来機械の製作制約条件側になっていた界磁コイルで許容温度上昇限度を上げることにより、機械の小形化、又は容量増大化が可能になった。

スロット アーマは、ジフェニルエーテル レジン ガラス成形品を用い、層間絶縁は耐熱ポリアミド紙をジフェニルエーテル ワニスで接着し、クリーページ ブロックにはエポキシ変性ポリエステル ガラス積層板をまた胴張絶縁はジフェニルエーテル レジン ガラス成形品を用いている。これらの特性の一例を図10に示す。

6 結 言

以上を要約すると、固定子コイルについては

- (1) 集成マイカの使用が拡大されるであろう。
- (2) プリプレグ方式適用が拡大されるであろう。
- (3) 水冷却機はB種で進むと思われるが、中形機はF種、更にH種化へと進む機械の小形化が図られるであろう。

界磁コイルについては、

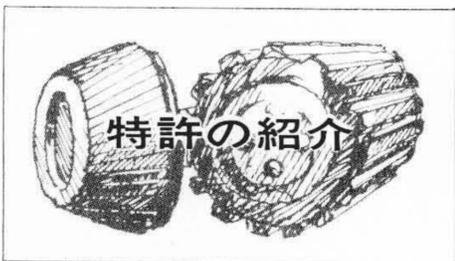
- (1) 機械的、電気的特性のため、ガラス基材の合成レジン積層品がますます使用されるであろう。
- (2) 固定子に合わせて中形機はF種、更にH種化へと進むものとする。

以上、日立製作所はこれらの動向に対処するため、大形回転機絶縁のF種化、H種化を完成し、顧客の期待にこたえるよう日夜研究を続けている。

終わりに、ユーザー各位に対し今後もよりいっそうの御指導、及びごべんたつをお願い申しあげる次第である。

参考文献

- 1) 石坂：「高電圧コイルの新絶縁方式について」日本電気協会講演論文集（昭32）
- 2) 安芸ほか：「大形発電機用固定子コイルのエポキシレジン絶縁方式」日立評論49, 682（昭42-6）
- 3) 安芸ほか：「大形回転機固定子コイル用スーパーハイレジン絶縁方式」日立評論55, 679（昭48-7）
- 4) K. Abegg : Bulletin Oerlikon No. 324 (1957)
- 5) E. J. Flynn et al : T. A. I. E. E. (1958.6)
- 6) Electrical Times : (1968.6)
- 7) 藤本ほか：「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）
- 8) 電気学会：同期機試験法要綱（昭47-9）



油入変流器

小沢 実・森戸 廷・他1名
特許 第799113号（特公昭50—13453号）

本発明は、中空の一次導体を用いた正立形の油入変流器に関するものである。

超高压大電流回路に使用する変流器では、この一次導体での発熱量が著しく増加する。それゆえ、一次導体を上部油槽からがい管を通して下部油槽に導き、変流器二次側と鎖交させる正立形の油入変流器では、一次導体の長さが増大するので、通電時の発熱量が著しいのに対し、一次導体の表面の大部分は回路電圧に応じた絶縁が施されているため、熱放散が悪く冷却が困難となるので絶縁油の量を多くせねばならず、全体が大形化する問題があった。

そこでこの発明では、図1に示すように油入変流器①を鉄心⑥及び二次巻線⑦から成る変流器二次側⑤が収納される下部油槽②に、上端へ上部油槽④を取り付けるがい管③を樹立し、一次端子⑨と直接、あるいは補助導体⑩を介して接続するとともに絶縁物⑪を施す中空一次導体⑧を上部より下

部に導き、変流器二次側⑤と鎖交させ、油などの絶縁媒体⑫を内部に充填して構成する際、中空一次導体⑧を一方の単位長さ当たりの発熱量を他方のそれよりも実質的に大きくした二つの導体単位⑧A、⑧Bによって形成したものである。

各導体単位⑧A、⑧Bで構成する中空一次導体⑧は、例えば異なる材質で形成して両者を下部⑧C付近、若しくは直線状となる部分で溶接やろう付で一体にしたり、又は同一材質を用いて断面形状、若しくは寸法を変化させて製作し、発熱量がそれぞれ異なるようにする。

このようにすると、中空一次導体⑧の各導体単位⑧A、⑧Bの発熱量の差を利用して内部に絶縁媒体を自然循環させることができ、一次導体の効果的な冷却が行なえる。

したがって、超高压大電流の油入変流器を正立形で容易に、かつ経済的に製作でき、しかも油量減少により大幅に小形化できる。

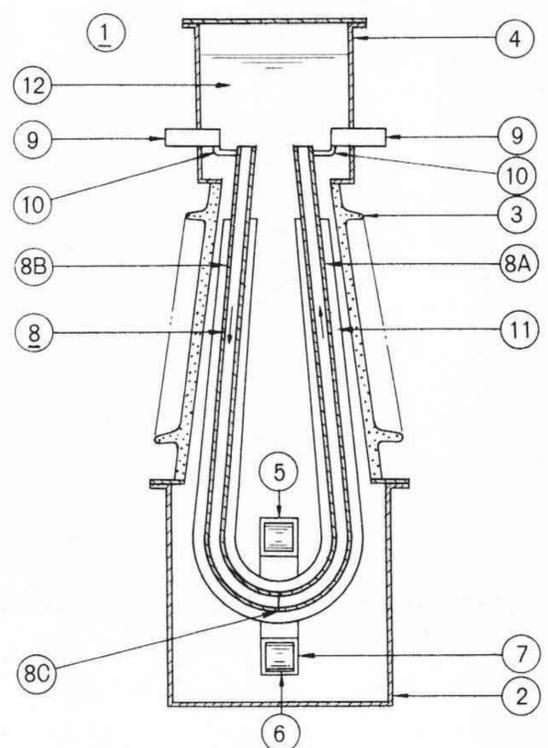


図1 油入変流器概略縦断面図