

# 中形回転機用新H種絶縁

## New Class H Insulation Systems for Medium Capacity Rotating Machines

中形回転機に対しては小形軽量化、保守の簡易化のニーズが高い。この要請に応じて絶縁テープとして耐熱フィルムを活用、絶縁処理に無溶剤ワニスの積極的採用がなされてきた。この結果数年前よりF種絶縁が標準となり、今や新たにH種化の動きが活発化している。

袴田武司\* *Hakamada Takeshi*  
森野信幸\* *Morino Nobuyuki*

本稿は絶縁の素材と絶縁システムの耐熱性の関係をデータと耐熱区分から考察したうえで、代表的な機種については具体的に絶縁方法とその耐熱性評価の結果を論じた。その結果は、新しい絶縁システムが十分な耐熱性を持っていること、これにより信頼度が高く、かつ経済性に優れた回転機を製作できることを示した。

### 1 緒言

ここにいう中形回転機は数十キロワットから数千キロワットの回転機を指し、交流機としては誘導電動機、同期電動機及びディーゼルエンジン駆動の交流発電機などがあり、直流機としては一般産業用直流電動機や車両用直流電動機などである。

これらの中形回転機は、その用途により程度の差こそあれ、小形軽量化、高信頼度無保守化を共通的に要求されている。この点で絶縁技術の果たしてきた役割は極めて大きく、絶縁の耐熱性の向上は機器の小形軽量化に、絶縁処理ワニスの無溶剤化は高信頼度、無保守化にそれぞれ大きく貢献してきた。すなわち、1950年代には無溶剤ポリエステルによりA種からB種へ、1960年代には無溶剤エポキシによりB種からF種へと耐熱性が向上し、それぞれの段階で画期的な効果を挙げ、今やエポキシ万能の時代となっている。

しかし、更に小形軽量化への強い要求があり、技術のライフサイクルもこの要請に応じられるようになりつつある。そこで無溶剤系のワニスを使用したH種の絶縁に関し、絶縁テープと処理ワニスについて素材としての特性を検討したうえで、絶縁システムについて具体的な数例の耐熱性評価結果をまとめてみた。

### 2 最近のH種絶縁材料

中形回転機の絶縁システムの指向するところは、緒言でも述べたように耐熱性向上と高信頼度無保守化である。これは絶縁システムを構成するシート絶縁材料とその処理ワニスの双方の発達により達成されるものであるが、とりわけ新規ワニスの開発とその処理技術の確立によるところが大きい。

#### 2.1 H種無溶剤ワニスとその処理法

H種ワニスには古くから溶剤系のシリコーンワニスがある。これは熱安定性を別として、電気的・機械的特性で無溶剤系ワニスにかなり見劣りするがために、中形回転機ではあまり使用されていない。そこでH種の無溶剤ワニスについてながめると、一般に市販されているものにシリコーン樹脂、ポリアイミド樹脂などがある。更に特殊なものとして日立製作所が開発した「IOレジン」がある。「IOレジン」はイソシアネートとエポキシ樹脂を反応させて得られる耐熱性の網目状のポ

リマー、ポリオキサゾリゾンの系内へ、同時に架橋密度の高いイソシアネート結合を導入したものである。特殊な触媒の選択が同一系内へこの二つの異種の結合を均一に成形することを可能にしたC種の耐熱性レジンである。

「IOレジン」の耐熱性を、現在入手できるH種といわれる無溶剤シリコーン、無溶剤ポリアイミドなどと比較してみた。図1に240°Cの高温で長期熱劣化したときの樹脂の加熱減量を示す。「IOレジン」は無溶剤シリコーンとともに最も減量が少ない。ポリアイミド樹脂はこれらの約2倍の減量である。図2は240°Cで高温長期劣化した樹脂を225°Cの高温で測定した

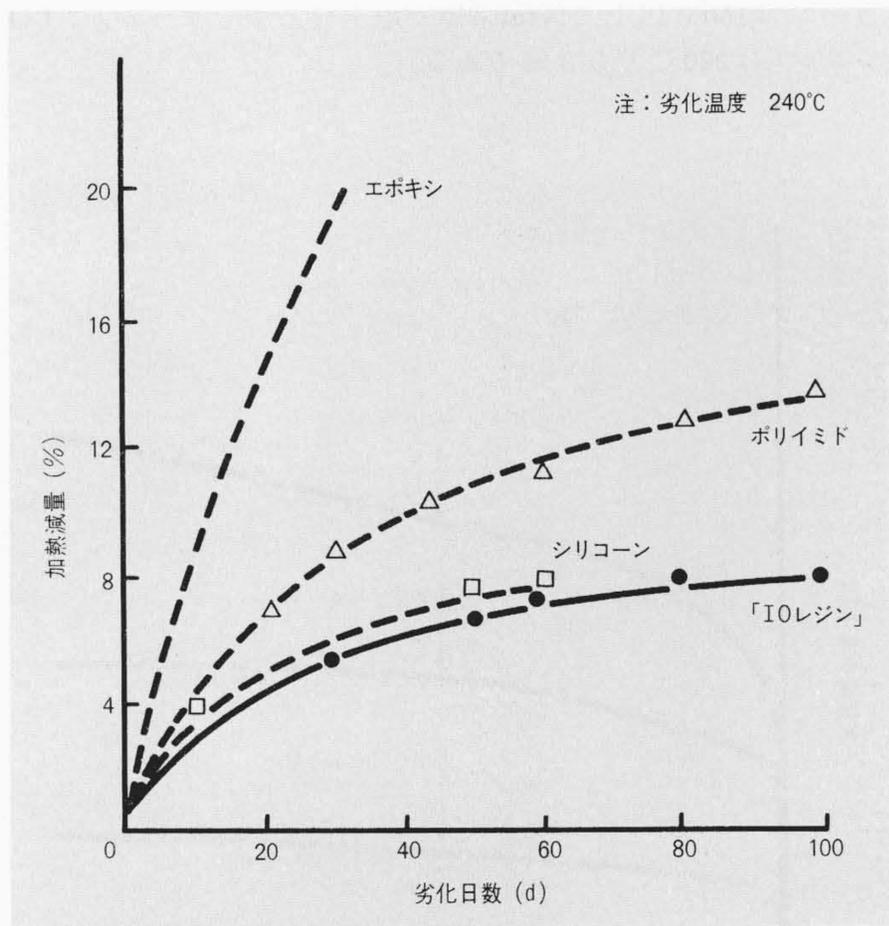


図1 「IOレジン」の加熱減量 樹脂板を240°Cで連続加熱したときの重量減少率を100日間追跡したもので、「IOレジン」の加熱減量が最も小さい。

\* 日立製作所日立工場

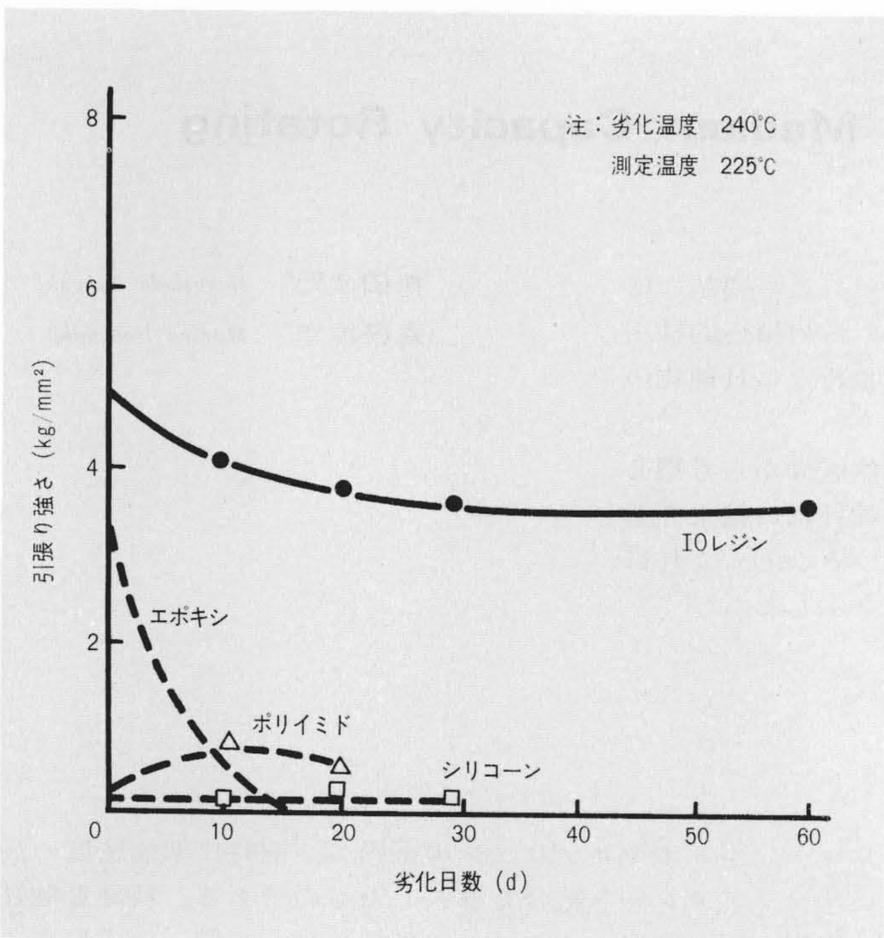


図2 「IOレジジン」の引張り強さの熱劣化特性 樹脂板を240°Cで60日間熱劣化し、その間、引張り強さを225°Cの高温で測定した。「IOレジジン」はほとんど強度の低下がない。

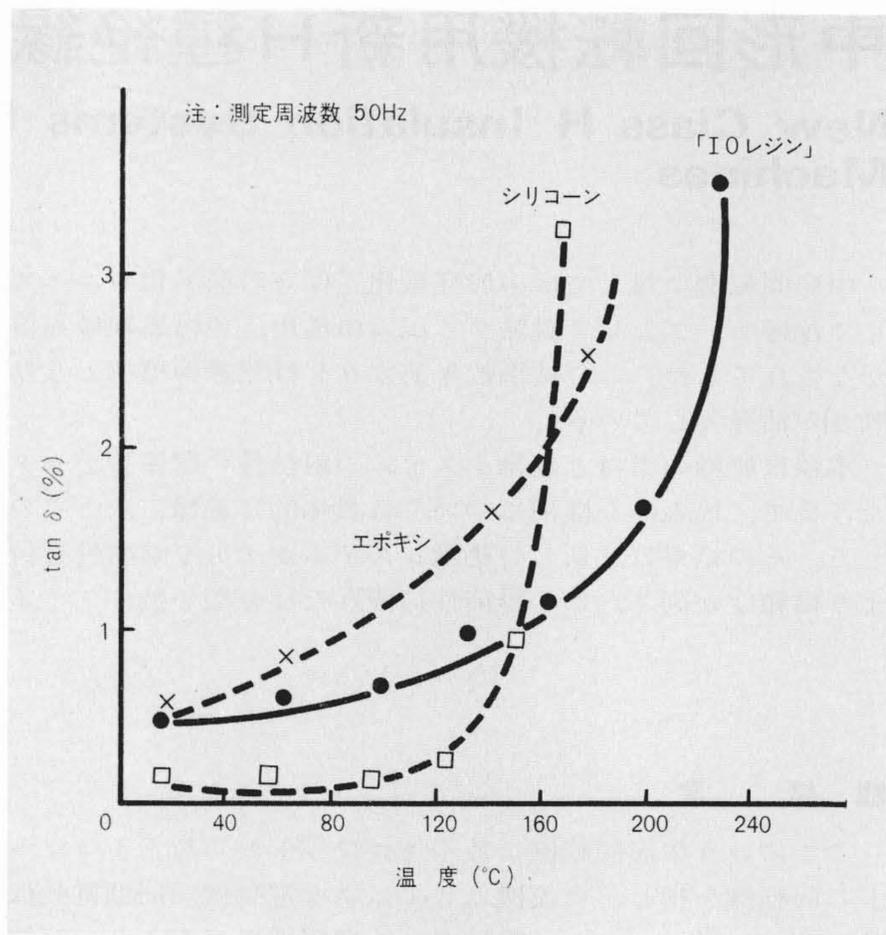


図3 「IOレジジン」のtanδ-温度特性 樹脂板のtanδを室温から240°Cまで測定した。「IOレジジン」は220°Cでも3%である。

引張り強さである。「IOレジジン」は従来強度が最も高いといわれるエポキシよりも更に強く、かつその値を保持し続けている。ポリイミドとシリコーンは初期、劣化後とも相対的に強度は低い。図3にtanδ(誘電体正接)の高温特性を示す。シリコーンは160°C以上ではtanδ値が急上昇してしまうが、「IOレジジン」は220°Cでも3%である。

このように「IOレジジン」は耐熱性C種にランクされる特性をもっているだけでなく、粘度は常温で1.4Pと真空加圧注入に最適であり、かつポットライフ(可使用時間)は実質的に無限に等しい。

2.2 H種絶縁材料

前節で説明した各種の無溶剤ワニスは、その用途、すなわ

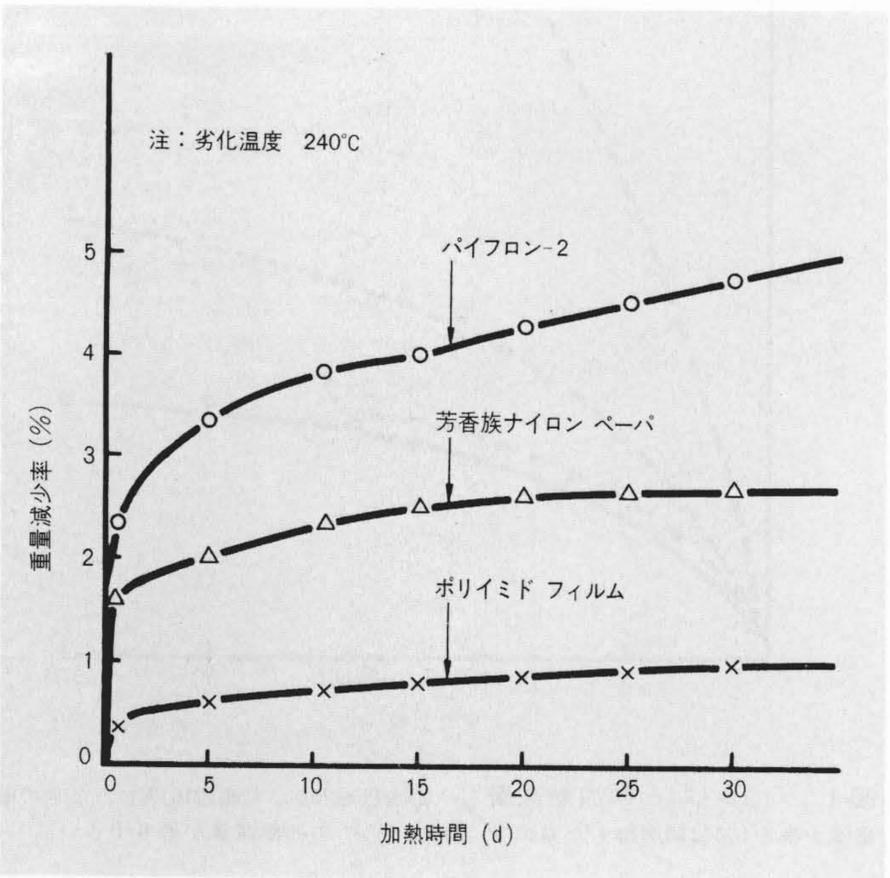


図4 耐熱フィルムの加熱減量 耐熱フィルムを240°Cで連続加熱したときの重量減少率の経日変化を示すもので、減少率は極めて小さい。

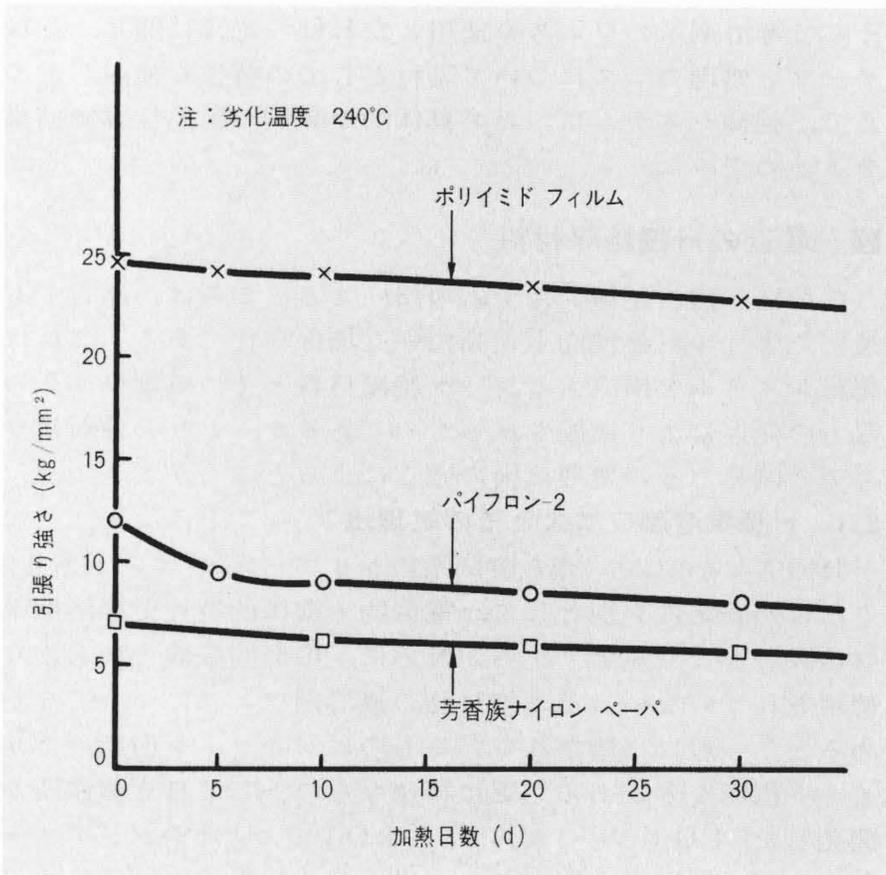


図5 耐熱フィルムの引張り強さの熱劣化特性 耐熱フィルムを240°Cで熱劣化し、経日変化として引張り強さを室温にて測定したもので、ほとんど低下を認めない。

ち機器の大きさ、電圧などにより、また製造設備により、プリプレグ コイル、単独注入コイル及び一体注入コイルなどの形態で使用される。いずれの形態をとるにしても、これらの無溶剤ワニスが発揮するには、これらと組み合わせて使われる絶縁テープ類が十分な耐熱性、すなわち高温での電氣的・機械的安定性が必要である。この要求に応ずるものとしてはポリイミド、ホリアミドイミド、ポリアミド、その他の耐熱フィルム及び従来から使われているマイカ、ガラステープなどがある。耐熱フィルムの優れた高温特性については既にいろいろと紹介されているが、ここに図4、5、6を図1、2、3と対比できる特性で示した。これらの耐熱フィルムも「IOレジジン」並みの240°Cクラスの耐熱性があることが理解できる。これら耐熱フィルムは数あるエポキシの中でも特に耐熱性の優れたものとの組合せにより既にH種としての耐熱性を確認されている。しかし、ともに240°Cレベルの耐熱性がある「IOレジジン」との組合せにより絶縁組織としてはC種が期待できる。

### 3 H種絶縁システム

新しい絶縁組織の確立には、材料単独の評価試験、材料相互の相性試験に始まり、コイルとして電磁力などに対する機械強度試験、熱応力に対するヒート サイクル試験、電氣的ストレスに対する長期課電寿命試験、長期熱劣化を主体とするモータレット試験、これらの最終的確認の意味をもつ実機過酷試験などが行なわれている。

次に絶縁システムの耐熱性評価の観点から、最も標準化の進んだモータレット試験のデータを中心に、中形回転機の絶縁システムについて検討した。

#### 3.1 高圧三相誘導電動機

出力数十キロワットから数千キロワット級の3kVないし6kVの電動機は、火力発電設備のファン用、青函トンネル掘削現場の海水排水ポンプ用、ダム建設における巻上機やコンベヤ用など、極めて広い用途をもっており、その使用条件は過酷なものである。そこで誘導電動機には熱的に裕度の高い、耐湿性に優れた絶縁システムが要求される。3kVかご形電動機の寸法規格も昭和42年にB種絶縁のJEM1203が、昭和50年にF種絶縁のJEM F 3005が制定されている。この間の経緯は無溶剤ポリエステル及び無溶剤エポキシの回転機への応用と関連している。無溶剤ワニスの真空加圧注入により絶縁性能が向上し、絶縁厚さを縮小できたので冷却性も向上し、耐熱性の向上と相まって機器の小形化に著しく貢献してきた。また、無溶剤ワニスは耐熱フィルムの併用などの効果もあり、ポイドのないち密な絶縁系を成すことから、耐湿性で代表される厳しい使用条件に対する性能も十分に兼ね備えている。

この一連の動向において、日立製作所は昭和45年に内外他社に先行してF種電動機シリーズを完成し、その高い熱安定性と特に高湿度下での高信頼性により、大方の好評を博してきた。この動きの延長線上に前述の「IOレジジン」を応用したH種の高圧交流機絶縁を開発したので、次にその概要について紹介する。

高圧の誘導電動機では、固定子コイルの絶縁に交番電界が印加されるので、部分放電による絶縁劣化を考慮した絶縁構成、絶縁厚さを必要とする。この観点からマイカが使用され、前述の耐熱フィルムとでテープを構成し導体にテープ巻きされる。日立製作所の中容量電動機はすべてコイル・コア一体注入方式で製作されるので、このテープ巻きが終わったコイルはワニス未処理の状態のコアに組線され、その後「IOレジ

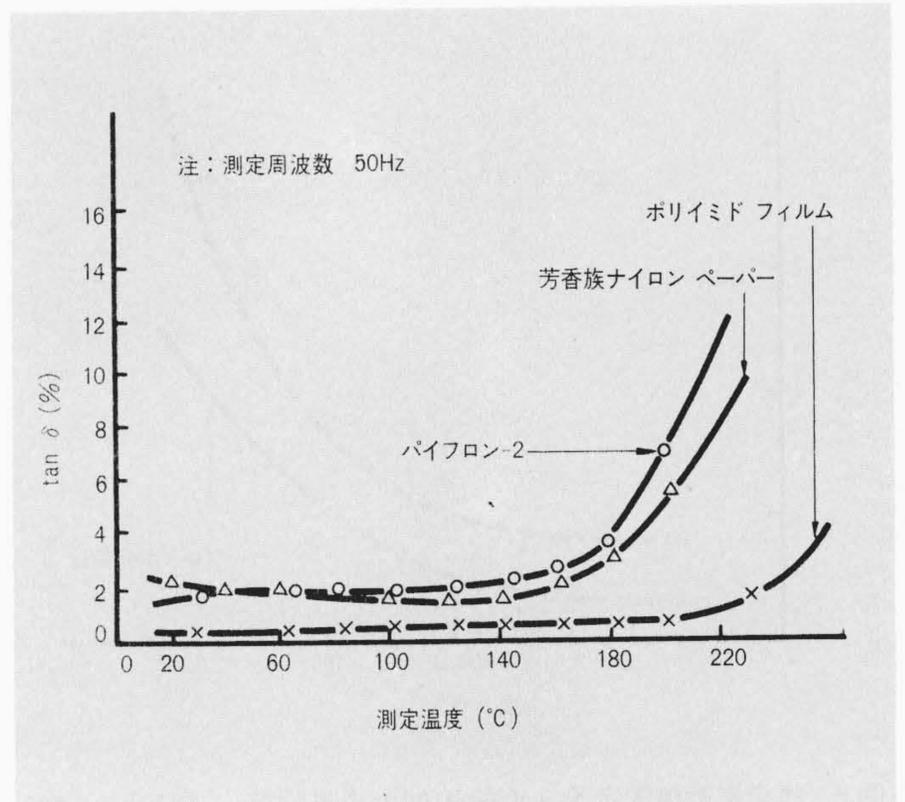


図6 耐熱フィルムのtanδ-温度特性 耐熱フィルムのtanδを室温から240°Cまで測定した。耐熱フィルムは220~240°C以上に急増点がある。

ン」を真空加圧注入している。

図7は、この固定子コイルのモータレット試験結果である。図中にエポキシ絶縁F種の寿命曲線を併記したが、平均寿命時間が2万時間となる温度は、F種絶縁165°C、H種絶縁215°Cとなり、50°Cの耐熱性向上が認められ、絶縁システムとしてはC種の実力をもっている。また、図8はこのコイルのtanδ-温度特性であるが、200°Cでも5%であり、ここでも優れた耐

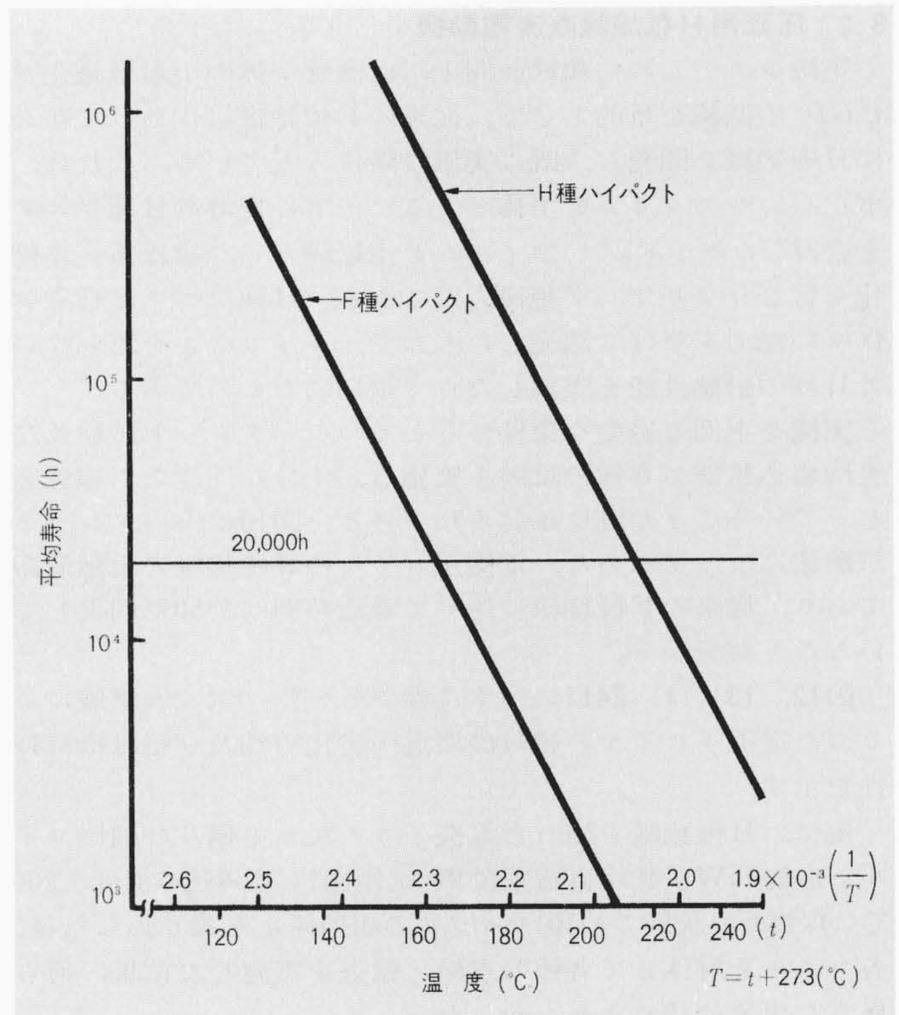


図7 固定子コイルの温度-寿命曲線誘導電動機 モータレット試験法による固定子コイルの耐熱寿命曲線を示すもので、従来のF種に対し50°Cの耐熱性向上が認められる。

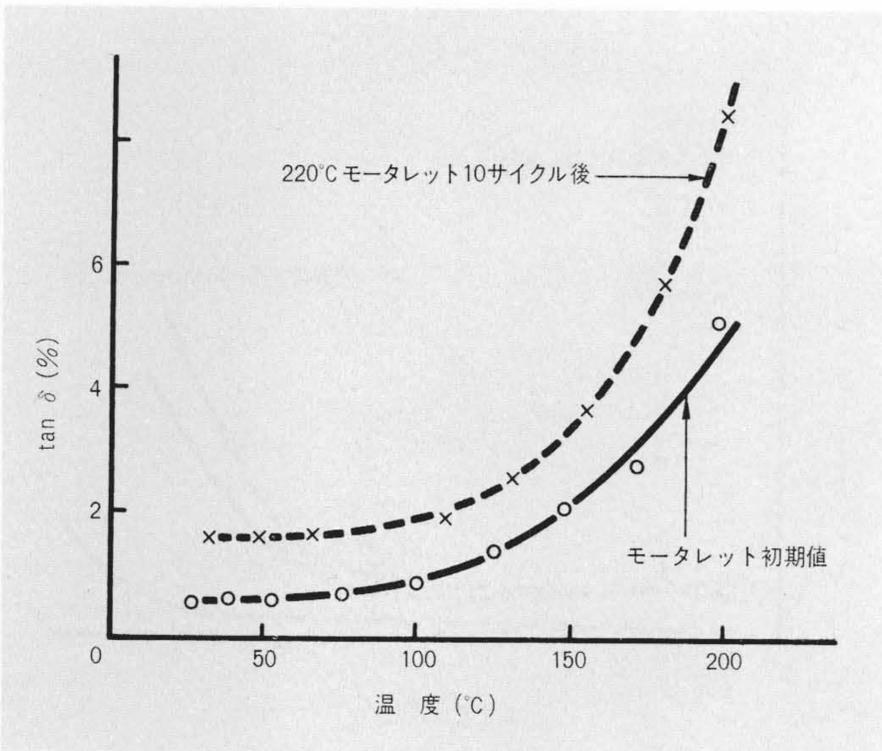


図8 誘導電動機固定子コイルのtanδ-温度特性 固定子コイルに1kVを印加し、tanδを室温から220°Cまで測定した。200°Cでも5%である。

熱性がうかがえる。更に、図9は部分放電電荷量の電圧特性であるが、 $5 \times 10^{-9}$  Cの部分放電開始電圧は4kVであり、3.3kVの定格電圧では寿命を損う放電は存在しないといえる。

一体注入方式で製作される誘導電動機では、コイル表面とコアが注入ワニスにより一体に固着していると、絶縁層には大きなせん断熱応力が発生する。これは大容量でコア長さが長いほど、また温度上昇が高いほど大きい。この点に関しては現標準のF種電動機で特殊処理を確立しており、新H種でも全く問題はない。このようにして、熱的に十分な余裕のある新しいH種電動機の製作が可能となった。

### 3.2 圧延用H種絶縁直流電動機

絶縁システムの信頼性の向上、直流機全体の小形軽量化及びGD<sup>2</sup>の低減を目的として、従来のF種絶縁に代わって新たにH種絶縁を開発し、既に実用段階に入っている。これは、ポリイミドフィルムを主体とするテープに無溶剤H種ワニスを含浸したセミキュアフィルムを主絶縁とし、組線後一体硬化を行なうプリプレグ絶縁方式である。H種ワニスは日立製作所の総力を挙げて開発したもので、シリコンを用いないでH種の耐熱性能を実現した点で画期的なものである。

実機を上回る過酷な条件のもとでのモータレット試験及び実機組込状態で各種の試験を実施し、十分な性能と信頼性をもっていることが既に確認されている。図10はモータレット試験法によって求めた、電機子コイルのH種絶縁の耐熱寿命であり、従来のF種絶縁に比べて寿命時間が約50%向上していることが分かる。

図12、13には、図11に示す条件のヒートサイクル試験により得た電機子コイルの絶縁破壊電圧劣化特性及び絶縁抵抗特性を示す。

更に、H種絶縁を施した電機子コイルと主極及び補極コイルを1,500kW圧延用直流電動機(試作機)に組み込み温度を200°Cに保持した状態で約10<sup>4</sup>サイクルの起動停止を繰り返した後、各コイルを解体して各種の点検・検査を実施した結果、何ら異常な現象は認められなかった。

以上各種特性の一例を示したが、圧延用直流電動機用として新H種絶縁が優れた性能をもっていることが確認された。

なお電機子コイルについては、電線の伸線、対地絶縁テ-

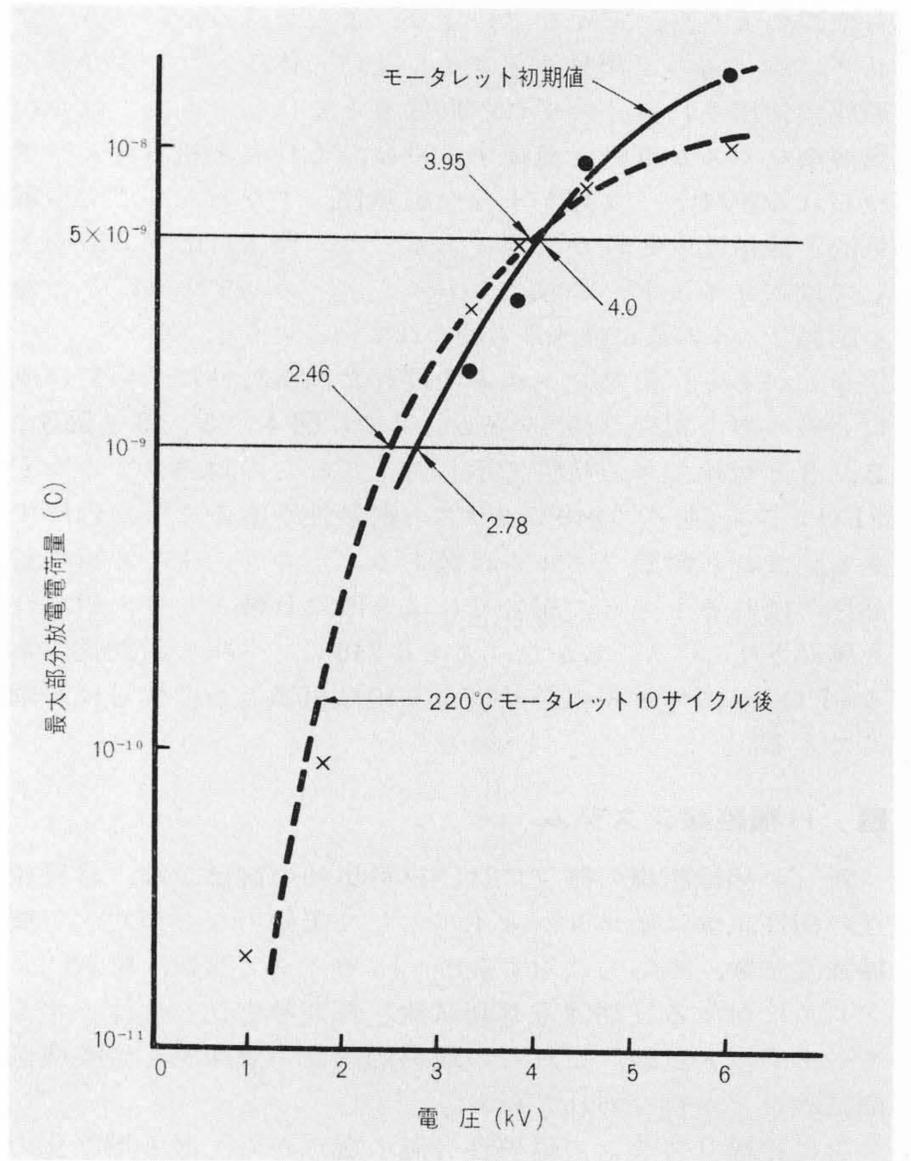


図9 誘導電動機固定子コイルの最大部分放電電荷量-電圧特性  $5 \times 10^{-9}$  Cの部分放電開始電圧は4kVであり、3kV級の定格電圧以上である。

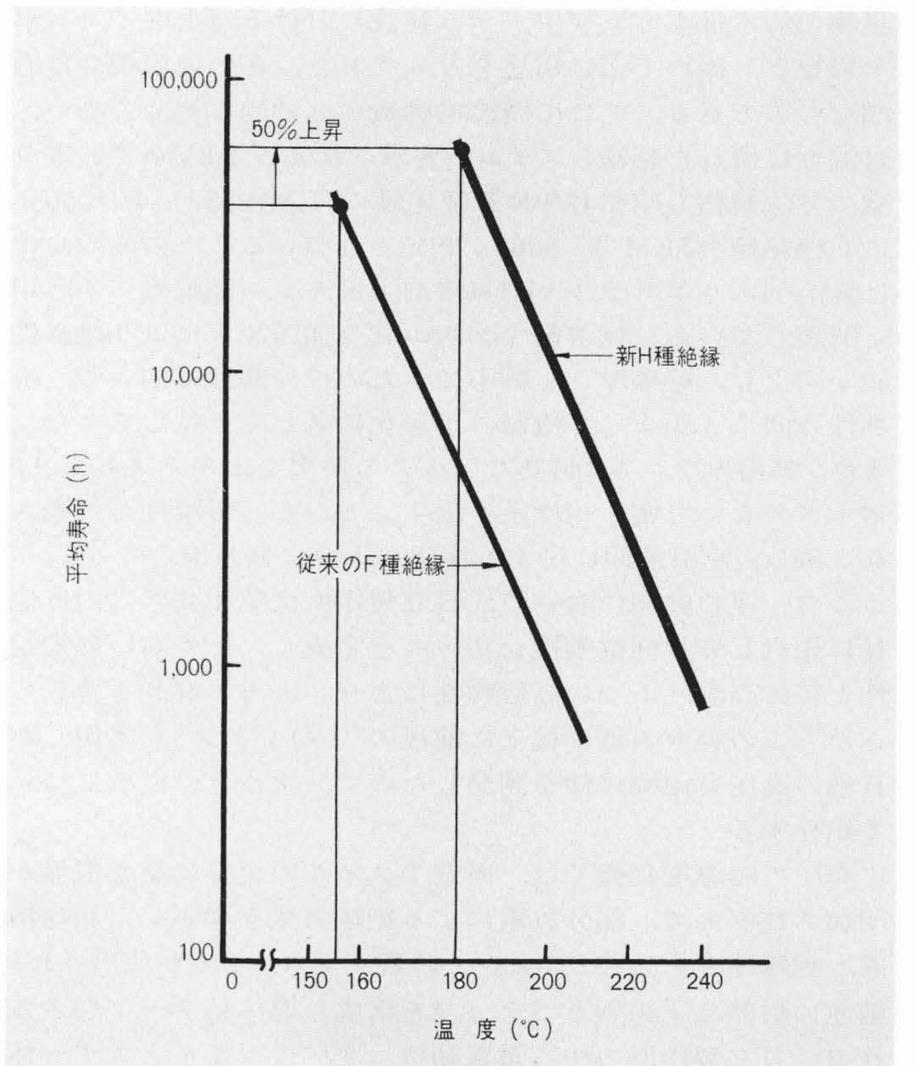


図10 圧延用直流電動機電機子コイルの温度-寿命曲線 モータレット試験法により電機子コイルの耐熱寿命曲線を示すもので、従来のF種に比べて耐熱寿命が50%向上している。

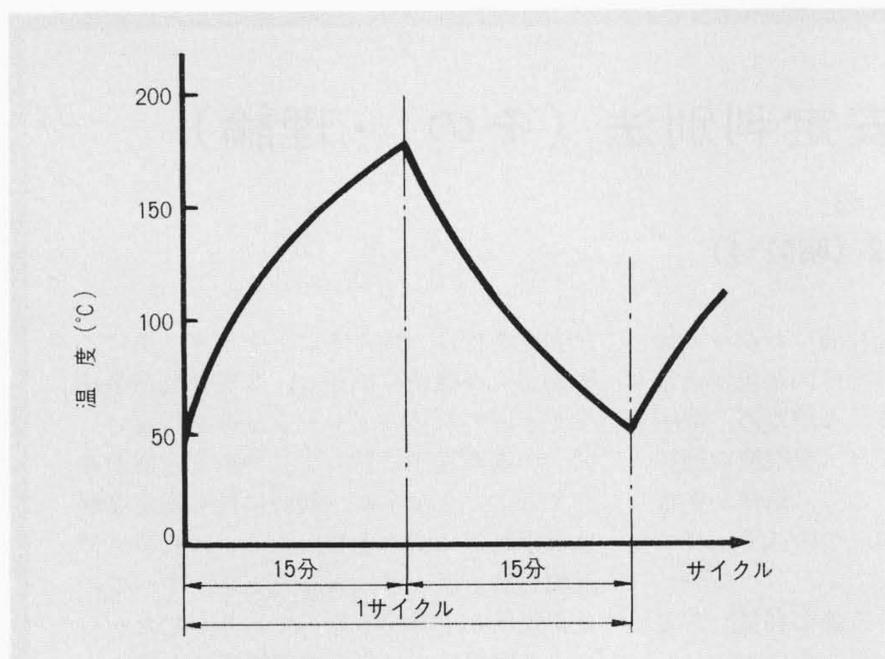


図11 圧延用直流電動機電機子コイルのヒート サイクル試験条件 15分×2を1サイクルとし、500サイクル実施した。

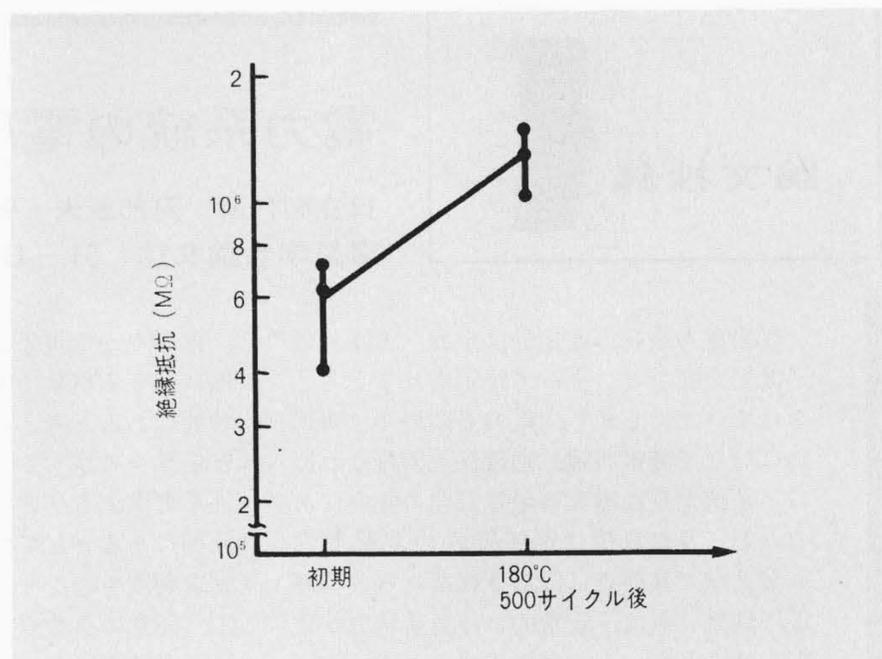


図13 圧延用直流電動機電機子コイルの絶縁抵抗特性 実用上許容し得る1MΩをはるかに上回っている。

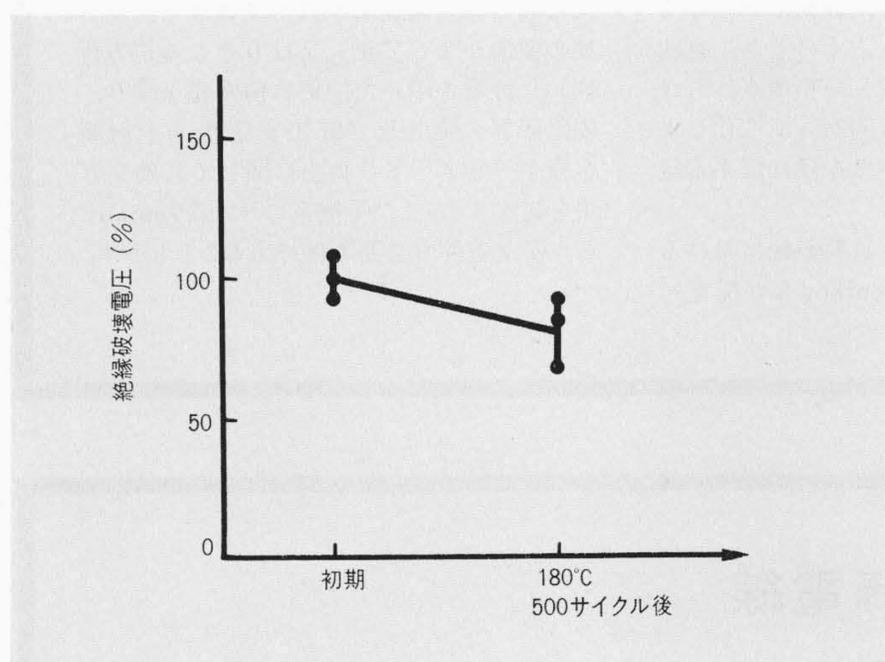


図12 圧延用直流電動機電機子コイルの絶縁破壊電圧劣化特性 180°C 500サイクル劣化後でも絶縁耐力の安全率は十分確保している。

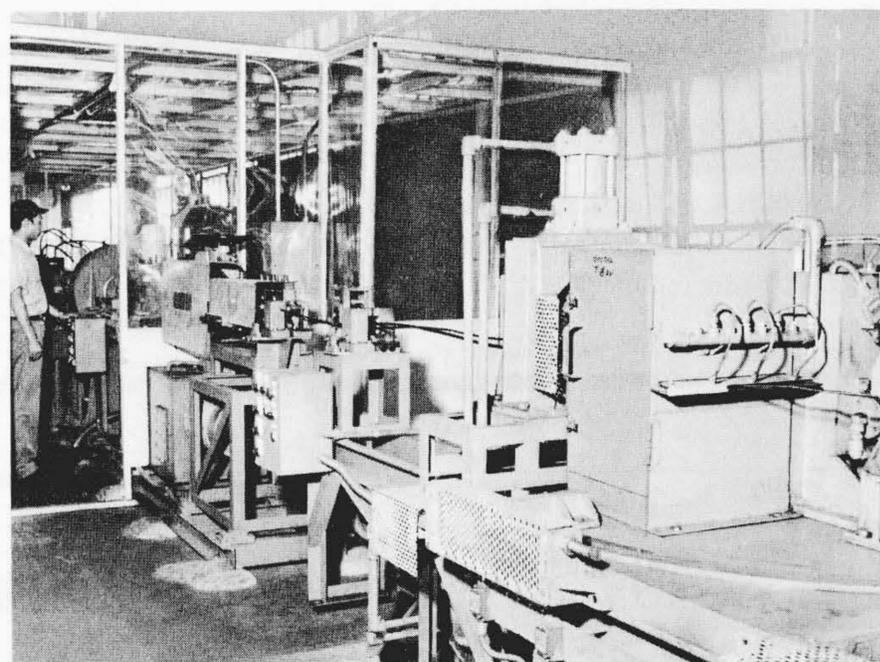


図14 コイル自動製作装置 電機子巻線用ハーフ コイルは口出成形作業を除き本装置により自動的に製作される。

ピング、コイル エンド形付作業を一貫して日立製作所独自のコイル自動製作装置で行なうことによって機械化を図り、従来の手作業に比較して、コイル単品の品質レベルの均一化を図ることによりその信頼性を一段と向上させた。コイル自動製作装置の全景を図14に示す。

圧延用直流電動機にH種絶縁を採用することにより、従来のF種機に比較してGD<sup>2</sup>を10~20%低減することができる。これにより、加減速特性の向上及び加減速エネルギーの低減が可能となり、省エネルギー化に寄与できる。

H種絶縁を適用した直流電動機は、昭和49年の適用開始以来既に13台が稼動を開始しており、現在引き続き15台を製作中である。

#### 4 結 言

絶縁材料と絶縁組織の耐熱区分について実測データを基に検討し、中形回転機用としての新しいH種絶縁がH種を超えた実力のものであることを確認した。

この新絶縁方式を採用したH種電動機は、絶縁の耐熱性向上により小形軽量化が図られ、また十分に熱的余裕のあるこ

とから高信頼度の製品となっている。

更に「I Oレジンは従来の高耐熱レジンの種々の欠点をことごとく克服した画期的なものでありシリコンを排したブリプレグH種絶縁システムとともに絶縁処理に新しい時代を到来させるものである。

#### 参考文献

- 1) "Recommendations for the Classification of Materials for the Insulation of Electrical Machinery and Apparatus in Relation to their Thermal Stability in Service", IEC Pub. 65
- 2) "Proposed IEEE test Procedure for Evaluation and Classification of Insulation Systems for Direct-Current Machines", IEEE Pub. 304
- 3) 立川, 今井, 袴田:「新標準F種ハイバクトエポキシ絶縁高圧誘導電動機」, 日立評論, 52, 980(昭45-11)
- 4) 袴田, 高橋ほか:「車両用回転機絶縁の進歩」, 昭和51年電気四学会連合大会