

# 高圧誘導電動機用新H種ハイパクト絶縁

## New Class H HIPACT Insulation System for High Voltage Induction Motor

高圧誘導電動機に対しては設備合理化のために小形軽量化、保守の簡易化及び信頼度向上の要求が高くなってから久しい。昭和45年にシリーズ化したF種ハイパクトは、この要請に応じて大方の好評を博してきた。これを一歩進めたものが新H種ハイパクト絶縁である。

新H種ハイパクト絶縁は、耐熱フィルムにマイカを組み合わせ、新しく開発した耐熱性C種のIOレジンを一体注入して得られる絶縁システムである。

IOレジンは樹脂としての性能が製作上好適であり、更にC種の熱安定性をもっている。これを用いた新H種ハイパクト絶縁システムは、モータレット試験及び実機による長期信頼度試験で十分にH種の耐力をもつことが確認できた。

袴田 武司\* Hakamada Takeshi  
相馬 節\* Sōma Misao  
小松喜八郎\* Komatsu Kihachirō  
奈良原俊和\*\* Narahara Toshikazu

### 1 緒 言

誘導電動機はポンプ、ファン、コンプレッサなどの流体負荷、クレーン、コンベヤなどの荷役機械及びミル、ロール、プレスなどの固体加工用とさまざまな方面に奨用されている。したがって、使用環境も多様で極めて過酷なものがあり、耐湿性、耐薬品性、耐熱性などの点で高い信頼性が要求される。

我々はこのニーズにこたえて、昭和45年にコイルとコアを一体注入するエポキシワニス使用のF種ハイパクトシリーズを開発し<sup>1)</sup>、大方の好評を博してきた。このB種からF種への移行が優れた無溶剤形エポキシレジンの開発によったと同様に、F種からH種への向上も電動機の製作とその使われ方に適した新レジンの開発を必要とした。昭和48年に発表<sup>2)~4)</sup>したC種の耐熱性をもつIOレジンを3年間にわたって電動機への適用の観点から多角的に検討を加え、ここに長期の信頼度試験を含む各種試験を終了したので、その要点について報告することにした。

### 2 耐熱性H種レジン

従来、H種の耐熱性をもつレジンとしてはシリコーン、ポリイミド、ポリジフェニールエーテルなどが知られている。数十キロワットから数千キロワット級の誘導電動機は定格電圧が3,000Vないし6,000V級の高圧であり、したがって、無溶剤形ワニス常識となっている。しかし、無溶剤形としての前述の各レジンはコイル製法上、あるいは性能上いろいろな問題をもっている。表1にこれらレジンの特徴を比較して示す。同表中でのIOレジンは緒言で述べた日立製作所開発の新しいC種のレジンである。このレジンはイソシアネートとエポキシ樹脂を反応して得られる高耐熱性の網目状ポリマー、ポリオキサゾリドンの系内へ、同時に架橋密度の高いイソシアヌレ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形成することを可能にした極めて耐熱性に優れたユニークな樹脂である。

#### (1) レジンの注入性

高圧コイルはボイドのない絶縁とするために、無溶剤レジンを真空下で加圧注入している。この注入に適した粘度は、注入時のレジンの完全な浸透と硬化時の流出抑制の面からみ

て数ポアズが望ましい。したがって、数十ポアズのレジンは加温して粘度を下げ注入しなければならない。表1から明らかのように、シリコーン、ポリイミドはこれが必要である。

#### (2) レジンのポットライフ

レジンは注入後加熱硬化されるが、一般に保管中にもこの硬化は進行し、前述の適性な注入粘度を越すことになる。更に加温注入を繰り返す場合には、この進行度合は加速される。このレジンの可使時間、すなわちポットライフは経済性、資源の有効活用、産業廃棄物などの観点で極めて重要である。

#### (3) 硬化レジンの耐熱性

コイルは使用状態で熱応力や機械的振動を受ける。したがって、注入レジンは高い機械的強度が要求される。

表1の引張り強さを見ると、IOレジンが初期はもとより240°C、40日の劣化後でも常温から220°Cの高温まで極めて高い強度を保持していることが分かる。コイルは高温、長時間の熱劣化を受けて使用される。加熱減量が大きいレジンを使うとボイド形成の原因となる。この点に関しては、エポキシに対してはいずれのレジンも相当改善されている。

レジンの耐熱性を評価する手段として、 $\tan \delta$ や体積固有抵抗の温度特性を測定し、特性の急変する温度を調べる。表1ではシリコーンの場合160°Cで $\tan \delta$ の急増が認められた。

### 3 モータレット試験による耐熱性寿命評価

#### 3.1 試料及び試験法

コイルは電線を巻線し対地絶縁を行ない、コアに組込み後、レジンを真空注入して製造される。図1のモータレット試験モデルは実機同様にこの方法で製作したものであり、コイルの大きさは開放形110kW 4極機品に相当する。

絶縁材料の耐熱性評価は、最終的には素材ではなく絶縁組織に対し、その試験法も単なる熱劣化でなく振動、吸湿を劣化条件に含む機能試験が望ましい。この考え方に基づいて十数年来モータレット試験は行なわれている。この試験規準としては35~1,500kW、6,600V以下の交流機の固定子コイルを対象としたIEEE(The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) No.275(1966)<sup>5)</sup>が最も具体的である。

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所日立研究所

表1 H種レジンの特性比較 IOレジンは常温注入でき、ポットライフは実質無限、また機械的強度と熱安定性に優れている。

No.	項目	劣化条件	測定温度	IOレジ	エポキシ	シリコーン	ポリイミド
1	粘度 (P)	25°C		1.4	2.9	21	半固体
2	注入温度 (°C)	——		常温	常温	70	70
3	ポットライフ	——		実質無限	実質無限	注入1回のみ	注入1回のみ
4	価格比	——		0.7	1	4.8	14.4
5	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	初期	25°C	7.6	5.2	——	——
			220°C	4.8	0.7	0.2	1.0
		240°C-40日劣化後	25°C	——	——	——	——
			220°C	3.4	0	0.18	0
6	加熱減量 (%)	240°C-20日		4.8	14.0	5.0	4.2(250°C-10日)
		240°C-40日		6.3	28.0	6.1	——
7	tan δ (%)	初期	25°C	0.6	0.7	0.2	0.2
			180°C	1.3	2.5	4.5	0.4
			220°C	2.9	——	——	0.7
8	体積固有抵抗 (Ω·cm)	初期	25°C	6×10 <sup>16</sup>	9×10 <sup>16</sup>	1.3×10 <sup>16</sup>	——
			180°C	5×10 <sup>12</sup>	4×10 <sup>12</sup>	1.6×10 <sup>11</sup>	1.6×10 <sup>14</sup>
			220°C	8×10 <sup>11</sup>	8×10 <sup>10</sup>	9×10 <sup>10</sup>	2×10 <sup>13</sup>

図2はこれに準拠した今回の試験法である。図1に示したモデルを4台製作し、初期値及び図2の熱劣化温度3点に配分し試験を行なった。なお熱劣化温度と日数の関係だけを最新のIEC(International Electrotechnical Commission) Pub. No.505<sup>6)</sup>の最高許容温度180~204°Cを想定した条件とした。

3.2 試験結果

図3は、このモータレット試験の結果から求めたいわゆる温度寿命曲線である。比較のために、かつて実施したB種の溶剤系ワニスを使った絶縁とB種のハイパクト<sup>7)</sup>及び現標準のF種ハイパクトの結果<sup>1)</sup>を併記した。同図より平均寿命が20,000時間である温度をTemperature Index(TI)と称し、その値を

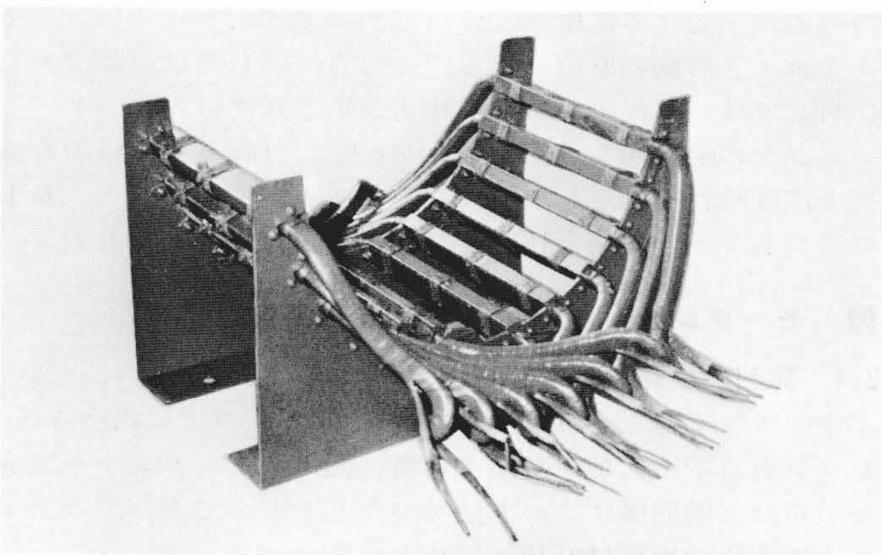


図1 モータレット試験モデル 110kW 4極開放形固定子相当モデルを示す。

これら絶縁の定格温度と比較する。いずれの絶縁仕様も絶縁種別が定める定格温度を満たすのはもとより、現標準のF種ハイパクトで10°C、今回開発のH種ハイパクトでは35°Cものサービスファクタがあり、万一の過負荷運転にも十分余裕があり、安心できるものであることが分かる。

4 実機寿命試験による信頼度の確認

モータレット試験は、実施されるようになって十余年になり、データも蓄積されて相当高い信頼度をもって評価できるようになってきた。これには常に実績のある絶縁システムと比較試験し、それとの関係でTIが何度向上するか、あるいは同じ温度で使用すれば寿命時間は何倍となるかの比較で論じられるべきである。

日立製作所では更にこの信頼度を裏付けるために、実機を使用した長期寿命試験を実施してきた。図4はこの実機寿命試験法を示すものである。この試験法は過酷試験法であると同時に、モータレット試験との関連で寿命評価ができるように配慮している。モータレット試験との比較で眺めると、加熱劣化220°C、4日はモータレット試験の3点の劣化温度の一つであり、ヒートサイクルは炉加熱劣化では得られない熱応力を生じさせるものであり、10サイクルで1,000回となる。また可逆運転は、固定子コイルの端部をコアに対し十分に振動させ、機械的強さを評価するものである。この可逆運転は、フライホイールを付けた逆相制動で実施しており、したがって、通常の起動に比較し起動電流による電磁振動は約2倍の継続時間をもっている。この逆相制動は、図4に示す試験法で10サイクル行なうことにより15,000回となり、1日2回起動、365日運転として20年分に相当する。



注：1サイクルの構成

図2 モータレット試験法 試験は、IEEE No.275(1966)フォームD固定子コイル絶縁組織の評価試験法に準じ、熱劣化温度だけはIEC No.505(1975)によった。

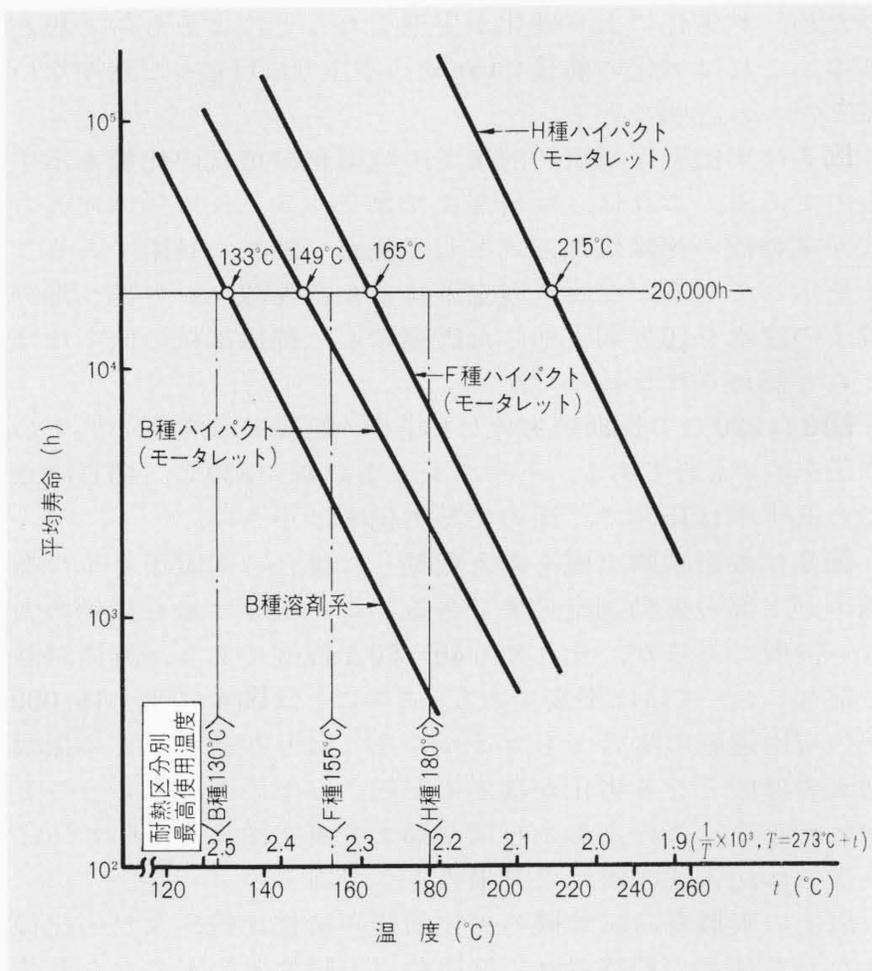


図3 モータレット寿命曲線 B種、F種、H種3kV級固定子コイルのモータレット寿命曲線の比較を示す。

実機寿命試験の供試電動機は、開放かご形110kW 4極機を使用した。

4.1 実機寿命試験結果

試験結果については、劣化の前後で絶縁の諸特性を測定し、劣化の程度を判断すると同時に、図3のB種ハイパクト及びF種ハイパクトの寿命試験で得られているデータとも比較しながら、H種ハイパクトの耐熱性を論ずることとする。

図5はB種、F種、及びH種ハイパクト電動機の常規電圧1.9kVでのtanδ-温度特性である。一般に耐熱性の低い絶縁組織のtanδは、低い温度で高い値になる。絶縁種別の定める最高許容温度でのtanδ値はB種が4.5%、F種が4.6%であるのに対し、H種は3.8%であり、図3で説明したサービスファクタの大きさとともにH種ハイパクトの余裕を示すものといえる。

図6はtanδ-電圧特性であり、B種、F種、及びH種のハイパクトについて初期値と寿命の終点に相当する10サイクル終了後の特性とを比較して示したものである。初期の特性は三者間でほとんど差がなく、かつ定格電圧までtanδ値に急な立上りがなく、有害な放電は存在しないことが分かる。また、この傾向は10サイクル終了後の特性でもF種、H種品では変わりはない。B種品が劣化後で低いtanδ値になっているのは、製作時の硬化温度がH種よりF種、F種よりB種において低

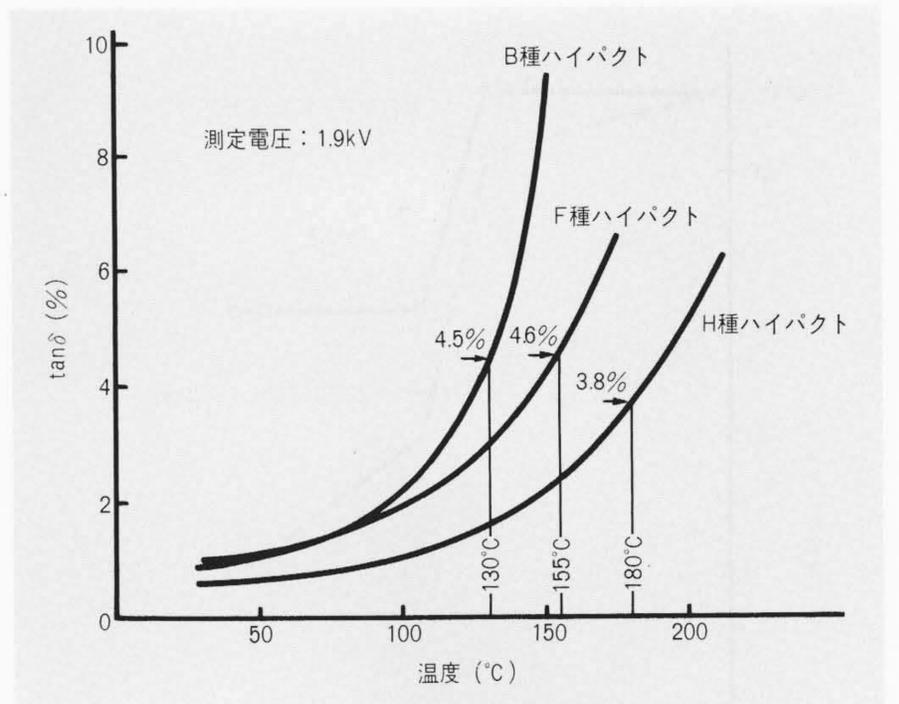


図5 tanδ-温度特性 3kV級B種、F種、H種ハイパクト絶縁の常規電圧1.9kVでのtanδ-温度特性を示す。定格温度のtanδはいずれも小さい。

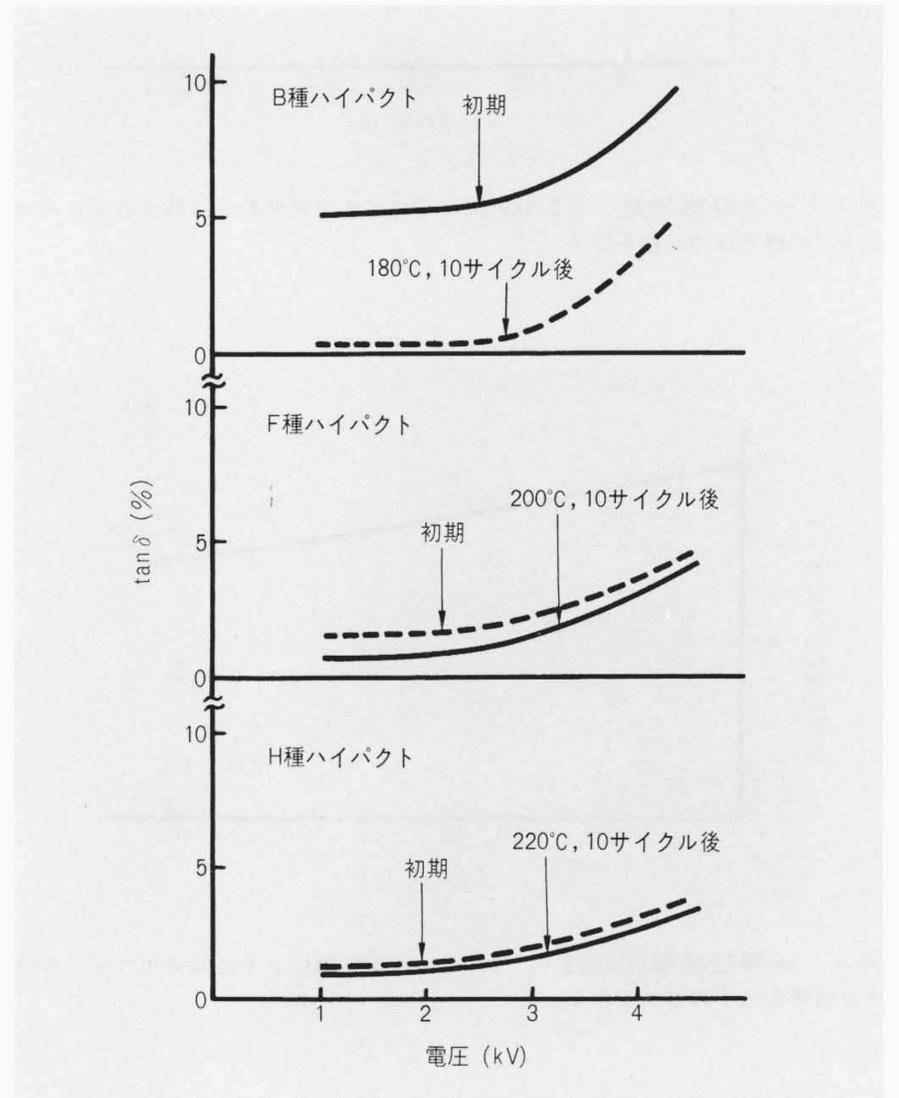
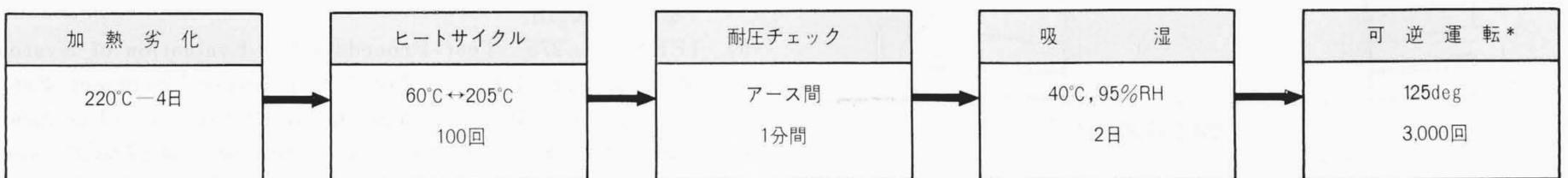


図6 tanδ-電圧特性 3kV級B種、F種、H種ハイパクト絶縁の劣化前後におけるtanδ-電圧特性の比較を示したもので、いずれも熱劣化を認めない。



注：1サイクルの構成 \*可逆運転は、奇数サイクルだけ実施する。

図4 実機寿命試験法 モータレット法に準じ、かつ熱応力や電磁力の影響が加味されている。

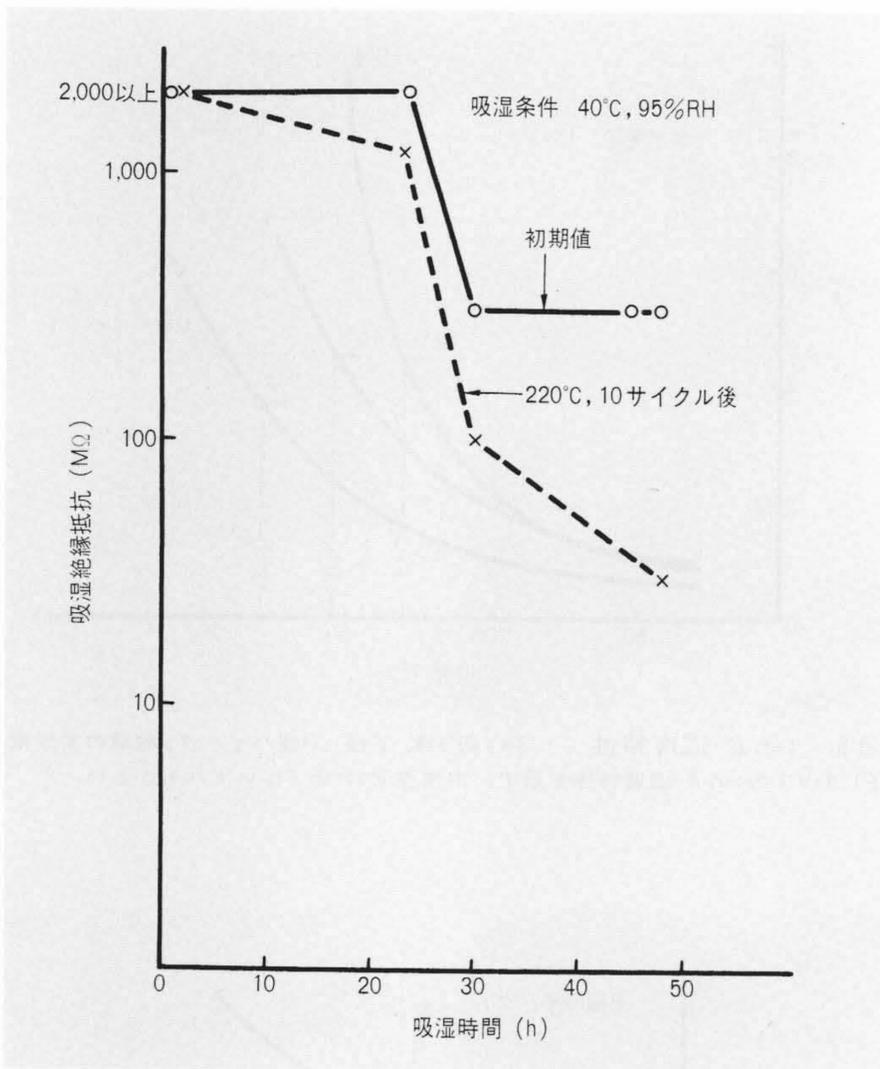


図7 吸湿絶縁抵抗 3.3kV 固定子コイルの実機寿命試験の前後における吸湿絶縁抵抗の比較を示す。

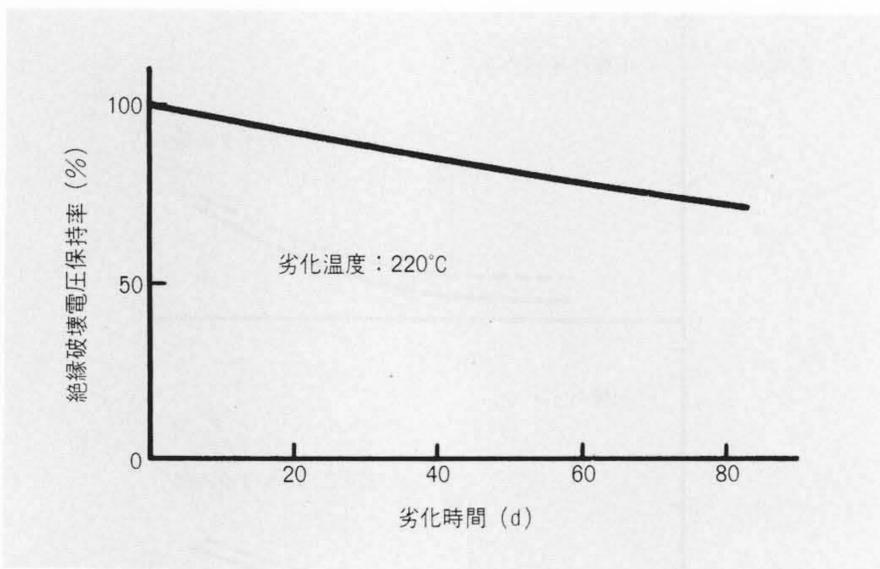


図8 絶縁破壊電圧特性 モータレット試験による長期劣化における絶縁破壊電圧低下の様子を示す。

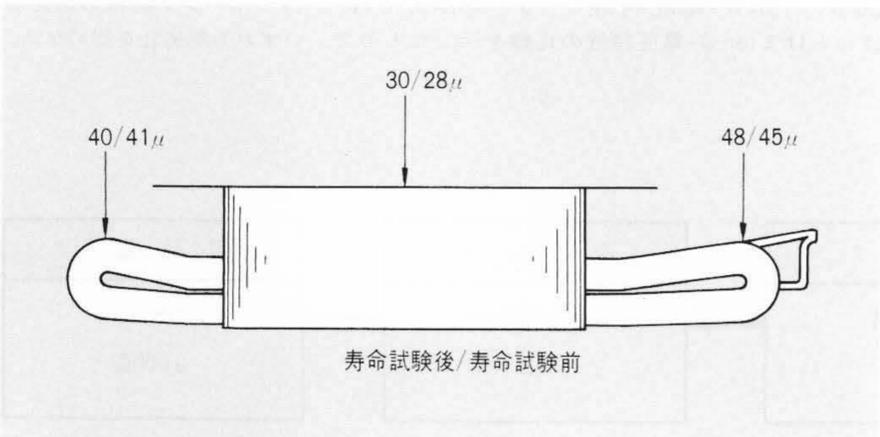


図9 固定子巻線端の振幅 実機寿命試験の前後における固定子巻線端部の直入起動時の振幅を示す。

いため、熱劣化により硬化が促進したことによるものと思われる。これは劣化の前後で $\tan \delta$ の立上りに目立った差がないことから説明できる。

図7は実機寿命試験の前後での吸湿絶縁抵抗の比較を示すものである。これは、接続部まで真空注入される一体注入方式が電動機の絶縁処理方式として極めて優れた技術であることを示している。なお、固定子コイルの巻線エンド部へ毎分17 lの注水を10分間実施した実験でも、絶縁抵抗の低下はほとんど認められなかった。

図8は220°Cで長期熱劣化した場合の絶縁破壊電圧の低下の様子を示すものである。モータレット試験の220°C、40日時点での低下率は15%で、極めて熱劣化率は小さい。

図9は寿命試験実機を直入起動した場合の固定子コイル巻線エンド部の振動測定結果である。この部分は最も振動の大きい箇所であるが、それでも40~50 $\mu$ 程度であり、寿命試験の前後においてほぼ不変である。このことは図4に示す15,000回の可逆運転の場合でもコイルの糸しばりが緩むなどの振幅増大の原因となる劣化がほとんど起こっていないということがいえよう。この点も糸しばり部まで真空注入されるコイル、コア一体注入法の優れた効果の一つである。

以上の実機寿命試験機の劣化前後の特性比較、及び劣化後すなわち通常の期待寿命の終局時点の特性そのものからしてもH種のハイパクト絶縁が電氣的、機械的両面で優れた熱安定性をもっており、高い信頼度のものであるということがいえよう。

## 5 結 言

H種ハイパクト絶縁は耐熱フィルムを裏打材としたパルプマイカを使い、自社開発の耐熱性C種のレジンをコイル、コア一体注入方式で製造するものである。このC種のIOレジンは常温注入が可能で、かつポットライフは実質無限である。また、この硬化物は高温、長期の熱劣化でも他のレジンは例を見ない高い強度をもっている。これを使用した絶縁組織の耐熱性評価では、モータレット試験、実機過酷試験を通じて、従来の実績ある絶縁組織との比較で、十分H種の耐熱性をもつことを確認した。これらの試験から得られた多くのデータから、新ハイパクトH種絶縁は長期にわたり電氣的、機械的に十分安定した絶縁システムであるといえる。

なお本稿は、実用的な観点に立った機能評価試験の結果を中心に述べたが、現象解析については次の機会に発表したい。

## 参考文献

- 1) 立川, 今井, 袴田: 新標準F種ハイパクトエポキシ絶縁高压誘導電動機 日立評論, 52, 980 (昭和45-11)
- 2) 日本経済新聞: 摂氏225度でもOK 新しい無溶剤ワニス開発 日立製作所 (昭和48.10.18)
- 3) 日本工業新聞: 200°Cの壁破る 日立, 高耐熱の無溶剤ワニス開発 (昭和48.10.18)
- 4) 日刊工業新聞: 高耐熱性無溶剤ワニス 日立製作所が開発 (昭和48.10.18)
- 5) IEEE No.275 Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for A-C Electric Machinery Employing Form-Wound Preinsulated Stator Coil (Dec.1966)
- 6) IEC Pub.505 Guide for the evaluation and identification of insulation systems of electrical equipment (1975)
- 7) 袴田, 桜沢: ハイパクトエポキシ絶縁—最新の高圧電動機用無溶剤ワニス注入マイカ絶縁, 日立評論, 52, 2 (昭和45-2)