

# ハイパクト絶縁

——最新の高压電動機用無溶剤ワニス注入マイカ絶縁——

## High-pact Insulation

——Recent Mica Insulation Using Solventless Varnish for High Voltage Motors——

今井 利秀\* 袴田 武司\*

Toshihide Imai

Takeshi Hakamada

### 要 旨

最近の研究から生れた特殊なマイカテープとポリエステルワニスより構成されるハイパクト絶縁はきわめてすぐれた電気的特性と十分な機械的強度により機器の小形化に寄与するところ大であり、これにより日立製作所の6kV級誘導電動機は3kV級のものとほぼ同一寸法まで縮小されることになった。

### 1. 緒 言

SLSの名で知られる絶縁は日立製作所において1954年に開発された回転電機用の高压絶縁であり、誘導電動機には1957年に応用されて、一号機として550HP、6,000V、4極が製造され、現在も無事故で運転を続けている。SLS絶縁はマイカテープを連続的にテープ巻きしたコイルにSLSの名で知られる無溶剤形合成レジンを真空注入して作られる高品質の絶縁で、マイカテープに紙を裏打材としたフレックマイカを使用している。

またSLSワニスは不飽和ポリエステルであり、不飽和ポリエステルは一般に無水マレイン酸やフマル酸で代表される不飽和二塩基酸に2重結合の割合を調節し種々の変性を目的としてアジピン酸や無水フタル酸のような飽和二塩基酸を添加、これにプロピレングリコールやエチレングリコールを反応させて製造される。これに架橋用単量体としてスチレンやジアリルフタレートなどを加えれば熱硬化樹脂としてのポリエステルが得られる。こうして作られるSLSワニスは、低粘度でポットライフも長く硬化時の体積収縮も小さくて、そのうえに硬化後は適度の柔軟性と電気的性能をそなえる。コイル注入用としてきわめてすぐれた特性の不飽和ポリエステルである。

一方、回転電機の定格電圧の高压への移行は著しいものがあり、発電機では1957年当時11~13kVがふつうであったが今日では20~28kVをみるに至り、電動機では最近の6kV配電の普及につれて急速に6kV級の生産台数が増加している。

日立製作所ではこうしたすう勢に対処するため発電機用、電動機用の高性能絶縁を開発してきた。ここに報告する研究はこうした中より生れた高压用誘導電動機の固定子コイルの絶縁性能に関するものであり、そのち密にして堅固にまとめられた性能にちなんで“ハイパクト絶縁”と称することにした。ハイパクト絶縁は新しく開発された特殊なパルプマイカテープ(実用新案出願中)で連続的にテープ巻きされ、これに最新の不飽和ポリエステルワニス(特許出願中)を真空注入している。以下にこの開発過程から電動機における寿命試験までをハイパクト絶縁の性能を中心に説明する。

### 2. ハイパクト絶縁の開発過程

一つの絶縁組織を完成するために検討すべき項目としてアース絶縁の主体となるマイカの種類はもとより注入レジンの系統、絶縁層の適正厚さ、さらにはレジンの注入圧力から硬化条件までと無数の因子が考えられる。いま、これらの因子の一例としてマイカテープについて考察する。マイカ素材にもフレックマイカとパルプマイカがあり、その裏打材にも紙、ポリエステルフィルム、ガラスクロスなどいろいろあり、さらにこのバインダまで考えるとマイカテ

表1 実験された因子と水準

因子	水準	1	2	3
A: マグネットワイヤ		イ	ロ	ハ
B: 絶縁厚さ		小	中	大
C: マイカ素材		フレックマイカ	パルプマイカ	—
D: 裏打材		紙	ポリエステルフィルム	ガラスクロス
E: バインダ		a	b	c
F: 注入レジ		ポリエステル A	ポリエステル B	—
G: 硬化剤		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
H: 注入時間		5	10	15
I: 硬化時間		1	2	5
J: 劣化雰囲気		空気, 180°C	空気, 120°C	フロン 11, 120°C

プという一因子にしても実験水準は無限である。

幸いにして、数多くのすぐれた研究により今日われわれが研究すべき範囲はかなりしぼられてきた。また一方推計学の進歩により直交配列表を利用する実験計画法<sup>(1)</sup>が実用化され、このような実験に対して非常に有力な手法になっている。しかもこれらのデータ処理は電子計算機で能率的かつ正確に実施することができる。

#### 2.1 供試料の作成

前述のような数多くの因子と水準の中から十分な討議によって選択された実験因子は表1に示す10因子とその水準である。この10因子の中でA~Iの9因子は制御因子であるがJ因子は標示因子であり、いっそう安定したものを選択するために有効なものである。これらの因子は直交配列表に割り付けられ、それに基づいて50余種のモデルコイルが製作された。

#### 2.2 試験法

50余種のモデルコイルはそれぞれ3等分され、まずその1/3を使用して初期特性が測定された。残りの2/3は以下に示す劣化に供され1/3は中間データを、最後の1/3は最終劣化後の特性を提供するように計画された。

モデルコイルの劣化は図1の実験装置を使用して行なわれた。中心のオートクレーブは温度と内圧が自由に制御できるものであり、かつ電圧端子を供えていて供試コイルのモデルスロットに電圧を印加できるように設計されている。劣化の過程は図2のフローチャートに示すとおりである。

頭初の計画では、チャート第一工程である180°C、40日の加熱劣化を終了したときに予定した一連の中間測定を行なうはずであった。コイルの加速劣化に関するAIEEの推奨案<sup>(2)</sup>を引用すれば、熱効果のみを考えると、B種絶縁の熱劣化は180°C、40日でよいので、一応この時点を選定点としたわけである。ところが後述のいろいろな被破壊測定を行なった結果絶縁はほとんど劣化を示さなかったため、ここに振動と吸湿を行なった後さらに180°C、20日の熱劣化を追加して中間測定を実施した。

最後の1/3の試料は再び吸湿され第6工程の加熱劣化を受けて最

\* 日立製作所日立工場

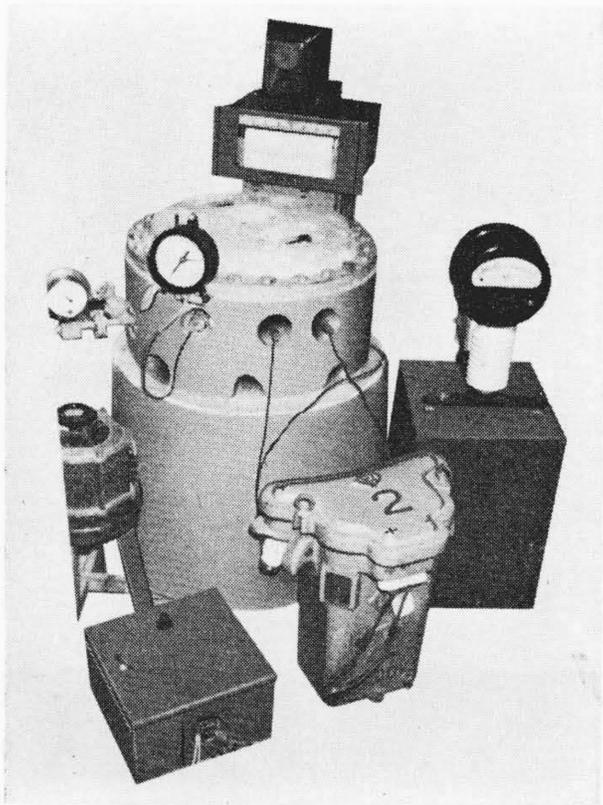


図1 コイル劣化実験装置

終的測定が行なわれた。なお熱劣化法の一応のよりどころとして AIEE の考え方を引用したが、図2の工程は決して寿命確認のための劣化ではなく、目的はあくまで初期値だけによる水準決定の誤りをさけて安定した製品を得るための手段である。

劣化の初期と中間および最終時点における測定は次の各項について実施した。

(1) コロナ開始電圧と消滅電圧

図3の測定回路を使用して50 c/sの交流電圧を試料に印加し電圧を徐々に上昇する。そのとき検出抵抗の両端に発生するパルス電圧をフィルタ、増幅器を通して単位時間に発生するパルス個数で計器に指示させた。コロナの発生は放電開始電圧付近では交流サイクルに対して間欠的に起こるので、このときの印加電圧をコロナ開始電圧とした。またコロナ消滅電圧は開始電圧からさらに1 kV電圧を上昇させた後これを徐々に下降し計数率計の振れが零にもどり指針が静止したときの電圧で示した。

現在のところ、コロナ特性とコイルの絶縁性状との相関性についての資料は少なく、またコロナ放電とコイルの寿命の関係も明確ではないが、一応コイル内部の空げきの存在程度、コロナ防止塗料の効果がある程度推定しうるようになっている。

(2)  $\tan\delta$ -電圧特性

シェーリングブリッジを使用して50 c/sで6 kVまでの $\tan\delta$ を測定し、図4の定義に従って $\tan\delta_0$ および $\Delta\tan\delta_2$ の値を解析した。 $\tan\delta$ が絶縁物の形状や寸法に無関係であり供試料の平均化された性状を示すものであることは周知であるが、われわれが $\tan\delta_0$ と $\Delta\tan\delta_2$ を論ずるのは、前者が複合絶縁としての誘電率や吸湿の度合を示し、後者が内部ボイドの存在をよく示すものであるからである。もちろんこれらは複雑な関係にあるが、熟練者には、絶縁の性状判定にたいへん有効な手法である。

(3) 吸湿絶縁抵抗

主電極に金属ハクを使用すると十分吸湿しないので真ちゅうの網目電極を用いた。試料は40°C、相対湿度90%の恒温恒湿槽で72時間吸湿させ、その間の絶縁抵抗の経時変化を測定するものである。測定は直偏法で直流500Vを印加し、30秒値を読みとった。

(4) 絶縁破壊電圧

絶縁破壊電圧の測定は電極の大きさを幅10mmにして、かつ油中で実施した。その電圧上昇速度は1.0 kV/sである。

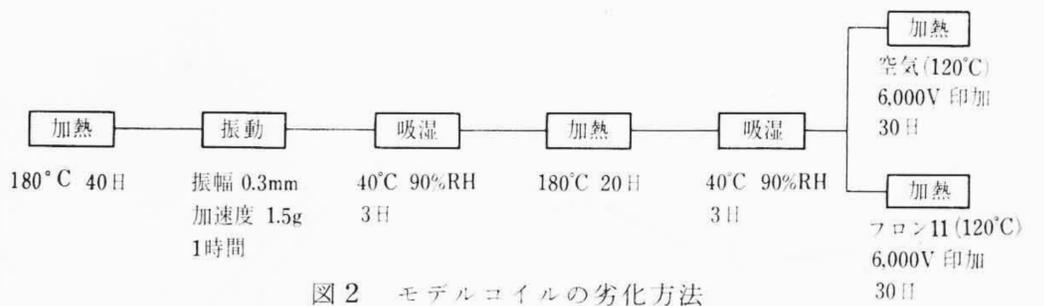


図2 モデルコイルの劣化方法

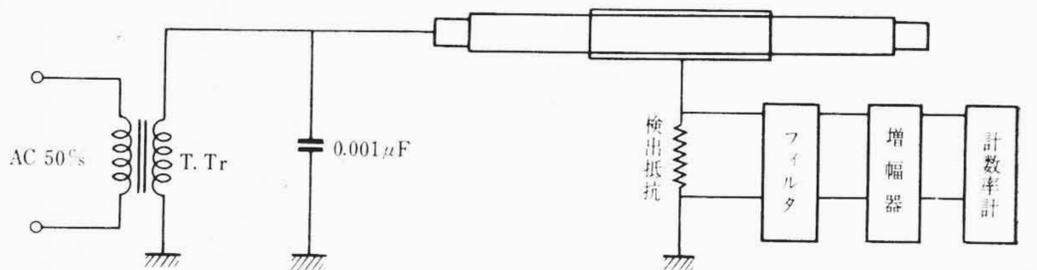


図3 コロナ測定法

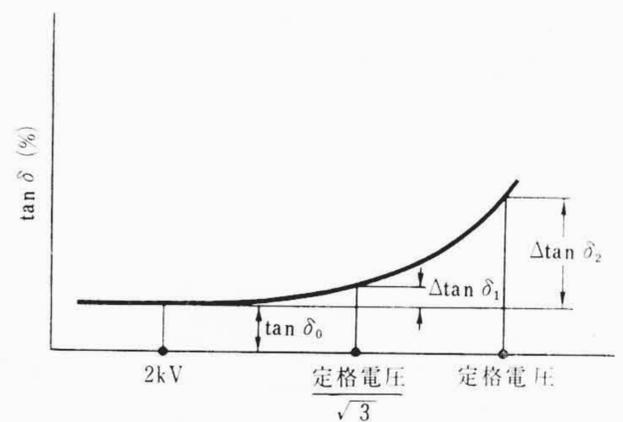


図4  $\tan\delta$ の説明

2.3 試験結果

前節に述べた試験法に基づいて測定したデータはA~Jの要因効果が互いに交絡したものであるので、分散分析を行なって各因子の主効果あるいは交互作用を明確にしなければならない。われわれはA~Jのすべてについて解析を行なったが、ここでは代表例としてマイカテープ(B, C, Dの複合)のグラフ(図5)を示しておく。図において\*\*印は水準間の有意差検定で1%以下の危険率で有意であり、\*印は5%以下の危険率で有意であることを示し、印のないものは水準間に有意差がないことを示している。

ここで各因子に関してどの水準を採用するか、いいかえればどの材料を使用するのが最善であるかを決定しなければならないが、それにはどの特性を重視するかが問題になる。マイカテープを例にとればコロナ開始電圧が高く、 $\Delta\tan\delta_2$ が小さくて、絶縁破壊電圧の良好な $\rho_3$ ということになる。そのほかの因子についても同様の手法により、かつ製造原価に対する考慮も加えて現時点における代表的仕様を決定することができた。それを表2に示す。表2の3種の仕様に関しては絶縁の厚さと破壊電圧の関係を初期と180°C、60日劣化後について推定値を求めこれを図6に示した。

これらI~IIIの絶縁仕様は表2に示す以外の材料や製法も違ってはいるが、図6の明らかな差から表2の要素が非常に重要なことがわかる。

かくして試番IIIが用途に対して性能が十分であり、かつ製造原価を安くもっともすぐれているものと判断され、ここにハイパクト絶縁と命名された。

3. ハイパクト絶縁の特性

ハイパクト絶縁として採用されることになった仕様に対して本節ではさらに詳しく電氣的、機械的特性を検討する。

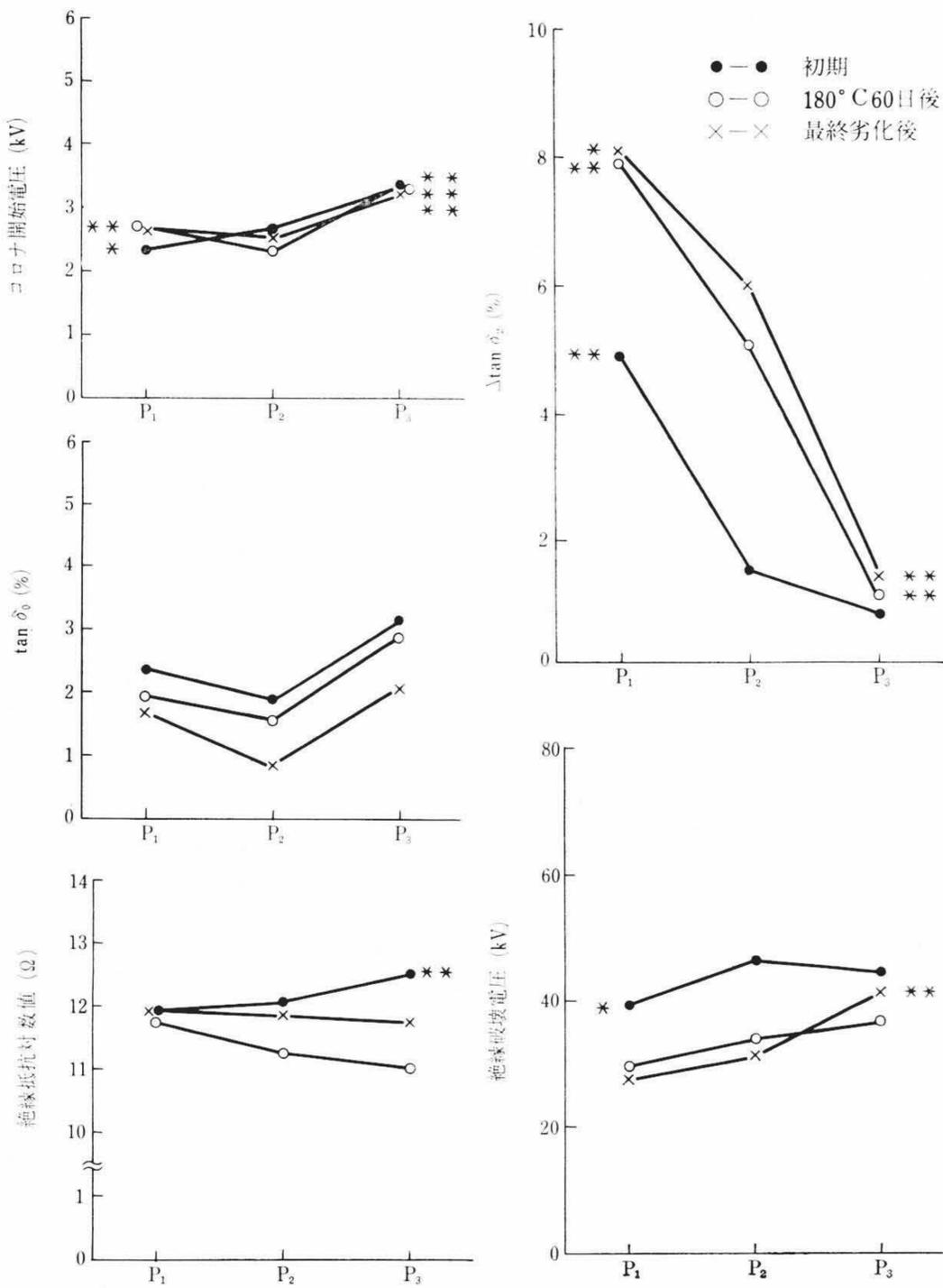


図5 マイカの主効果

3.1 電気的特性

供試料は200 kW級誘導電動機の6 kV絶縁のコイルであり、測定電極は低抵抗コロナシールドを施した上に金属ハクを巻いたものであり、電極面積は270 cm<sup>2</sup>であった。測定はすべて常温の大气中で実施された。測定法は2.4節にて説明したとおりであるが、実用上のことを配慮して可視コロナの開始電圧を測定した。これらの結果を表3に示す。表3は冒頭にも述べたように過去10年余の間にきわめてすぐれた実績をあげているSLS絶縁とハイパクト絶縁の比較であるが、これからハイパクト絶縁がいかにすぐれた電気的特性をもっているかがわかる。

ここでハイパクト絶縁がこのようにすぐれた特性を示す理由について考察する。図7はハイパクト絶縁の顕微鏡写真であるが、これにより注入レジンが絶縁層内に十分に含浸されマイカ層と一体となり、まったくボイドのないコイルになっていることがわかる。この事実は通常よくみかける図8のtan δ-電圧特性が定格の6 kVまでほとんど直線であることでもわかる。

次にワニスとマイカテープの特性について説明する。表4はハイパクト絶縁に使用されるポリエステルレジンの性能表である。

これらの特性は硬化条件や測定法が異なるといくぶん違った結果を与えるが、ここには一応硬化レジンとして安定した特性を示すときの値とし、測定法はJISに準拠するものとした。この特性は同様の用途に対するエポキシとして最近に発表されている二、三の例と

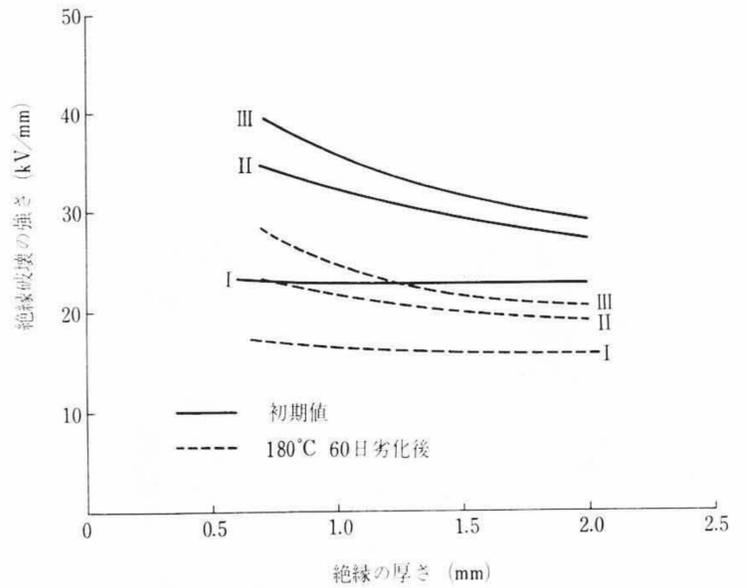


図6 代表的絶縁の絶縁破壊の強さ

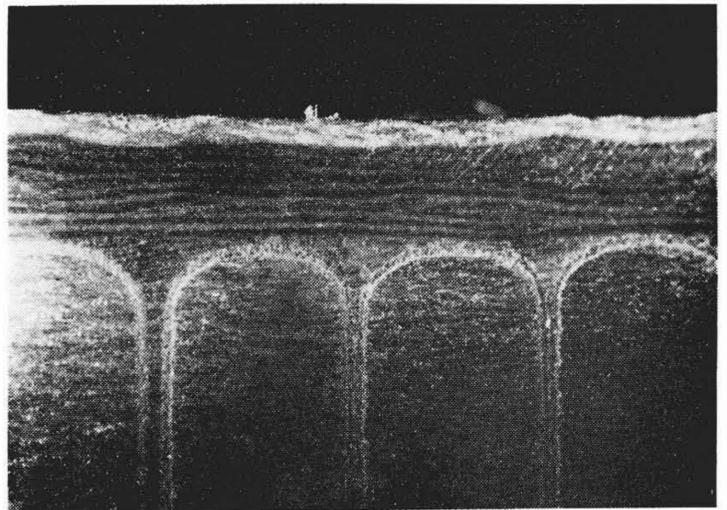


図7 ハイパクト絶縁層の顕微鏡写真(×20)

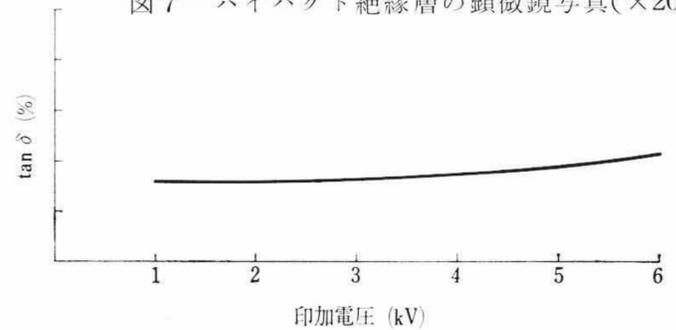


図8 ハイパクト絶縁のtan δ-電圧特性

表2 代表的な絶縁仕様

試番	マイカ	裏打材	ワニス
I	フレックマイカ	紙 (両面)	ポリエステル A
II	バルブマイカ	紙 (両面)	ポリエステル B
III	バルブマイカ	紙, ポリエステルフィルム	ポリエステル B

表3 ハイパクト絶縁の電気的特性 (SLS絶縁の特性値を100%とした比較において表す)

項	目	ハイパクト絶縁	SLS絶縁
絶縁破壊の強さ	(kV/mm)	138%	100%
コロナ開始電圧	(kV/mm)	113%	100%
可視コロナ開始電圧	(kV/mm)	135%	100%
$\tan \delta_0$	(%)	73%	100%
$\Delta \tan \delta_2$	(%)	58%	100%
72h 吸湿絶縁抵抗	(MΩ)	250%	100%

表4 ハイパクト絶縁用ポリエステルレジンの特性

項	目	初期	160°C, 7日劣化後
抗張力	(25°C) (kg/cm <sup>2</sup> )	191	519
伸び	(25°C) (%)	15	0.3
硬度	(ショア)	100 以上	—
$\tan \delta$	(80°C) (%)	1.3	—
体積固有抵抗	(Ω-cm)	$5 \times 10^{15}$	$2 \times 10^{14}$
絶縁破壊電圧	(kV/mm)	149	139

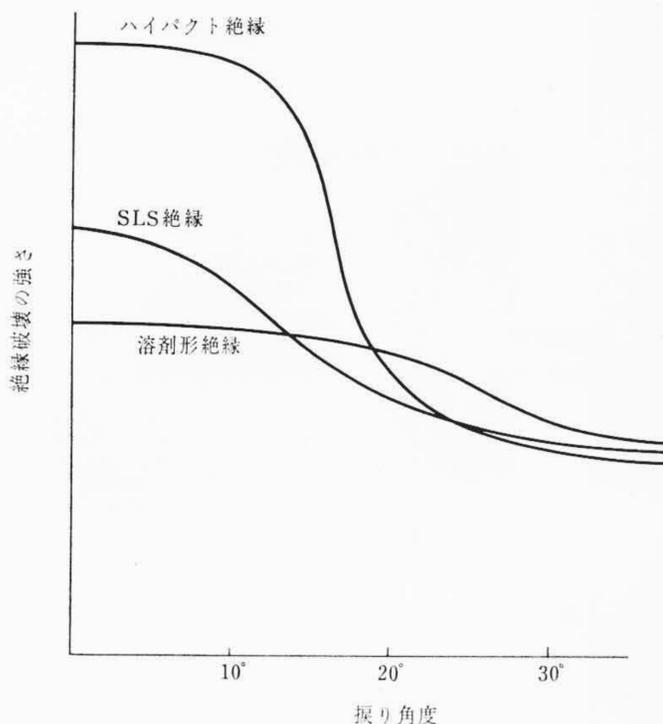


図9 ねじり角度と絶縁破壊電圧

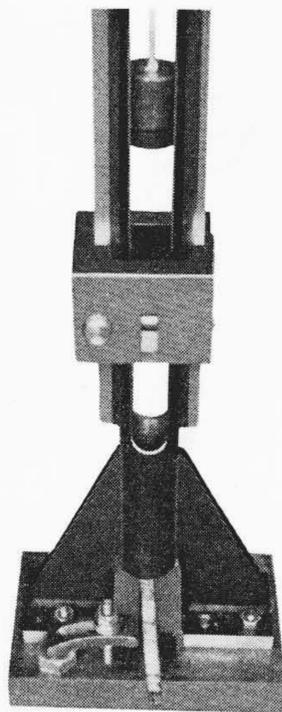


図10 衝撃試験装置

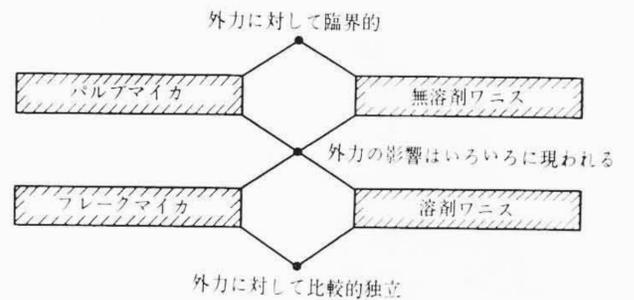


図11 マイカとワニスの組合せと外力による絶縁破壊電圧の低下の関係

している。実験は荷重端におけるねじり角度がいろいろと変わった場合について、いろいろな絶縁仕様のコイルの電気的特性の変化を調べた。電気的特性で判定したのは、それが実用上のデータに直結するからである。

図9は絶縁破壊電圧に関する結果であり、ハイパクト絶縁とSLS絶縁、さらに溶剤形ワニスで処理された両面紙フレックマイカ絶縁の3者を比較するものである。溶剤形のものは無溶剤レジンが出現する以前から現在まで

A種のコイルや低圧機器用のコイルに使われているものである。

この結果から無溶剤レジンを注入した絶縁層はレジンの種類でいくらかは違うがねじりに対して臨界特性があり、ある一定の応力を越すと破壊電圧は急激に低下することがわかる。これに対して溶剤形のは臨界応力が不明確で無溶剤形のものに対して大きい傾向にある。したがって作業時のストレスをこの臨界値以下におさえなければならない。こうした確実なデータに基づいて製造されたハイパクト絶縁は、確かに、溶剤形のはもとよりSLSに対してさえ45%もすぐれている。

次に衝撃荷重の効果について検討する。供試コイルはねじり試験に使用されたモデルコイルと同一であり、荷重は50Rのチップをもつ重錘を自然落下させる方法である。実験は図10の衝撃試験装置(自家製)により行なわれた。この場合もねじり荷重のときと同様に衝撃エネルギーに対して臨界特性の存在することがわかった。この臨界特性はパルプにおいて顕著であり、フレックにおいて不明確である。このことからパルプマイカを使用する絶縁ではこの臨界値以上の衝撃が加わらないように留意しなくてはならない。

こうした一連の実験からある種の絶縁層は外力に対して臨界的特性を示すことがはっきりしたが、この傾向はパルプマイカとフレックマイカ、無溶剤ワニスと溶剤ワニスの関係において次の傾向がある。

V. A. Volkov, Yu. V. Koriskit 氏らもこれによく似た結果を発表している。表5<sup>(3)</sup>は曲げとねじり後の絶縁破壊電圧の低下をいろいろなテープの絶縁について比較したもので、試片は460φのマンドレルに曲げられ、45~50mmのアームで35度ねじられたという。

これからもマイカコンパウンド注入は劣化率の小さいことがわかる。また裏打材の選定はやはり重要でガラスより紙がはるかによい結果を与えている。

マイカはフレックかパルプか、裏打材は何かよいかはつねに議論のあるところであるが、筆者はそれらをいかに上手に組み合わせて使用するか、その組合せと製法にかぎがあると考えている。それ以上のことは用途を考えるとのおのずから決定される。表6<sup>(4)</sup>はヨーロッパの代表メーカーの絶縁仕様を示したものであるが、これからも何が決定的かはいえない。

#### 4. ハイパクト絶縁電動機

3節で詳しく述べてきたようにハイパクト絶縁は従来の絶縁に比較して絶縁破壊の強さが飛躍的に増大し、機械的強度も必要十分で

表5 機械的変形後の絶縁破壊電圧比較

マイカテープの種類	初期	曲げ後	ねじり後
ガラス—パルプ	100%	37%	34%
ガラス—パルプ—ガラス	100%	46%	40%
紙—パルプ—紙	100%	63%	66%
マイカコンパウンド注入	100%	84%	67%

表6 ヨーロッパ代表メーカーの絶縁

メーカー	商品名	マイカ	裏打材	ワニス
A E G	Epotherm	フレック	ガラス布	エポキシ
A E G	Epotherm foil	フレック+パルプ	紙	エポキシ
Siemens	Micalastic	フレック	紙orガラス布	ポリエステル
B B C	Micadur	パルプ	ガラス布	ポリエステル
Derlikon	Orlitherm	パルプ	ガラス布	エポキシ
Derlikon	Orlitsa	パルプ	紙	エポキシ
A S E A	Micapact	パルプ	ガラス布	エポキシ
Alsthom	Isotenax	パルプ	ガラス布	エポキシ
Swiss Ins	Thermodel	パルプ	ガラス布	ポリエステル
Swiss Ins	Samicatherm	パルプ	ガラス布	エポキシ

比較しても決して遜色のないものである。

表4のワニスと図7のマイカとを使ってコイルを製造する方法は特許として出願中であり、これがハイパクト絶縁のkey pointである。世はあげてエポキシ時代の観があるが、エポキシは硬化剤の広い範囲からの選定にも関係して実にいろいろのものがあ、あるものは特性だけを論じてもポリエステルより劣り、用途、価格まで考慮するとまだポリエステルの活躍分野は大きいと考えている。

#### 3.2 機械的特性

パルプマイカは絶縁破壊電圧は高いがもろいといわれる。これはマイカそのものに対しては正しい。しかしこれに裏打材がはられワニスで処理されたものに対しては正しくない。

実験はモデルコイルに対するねじり荷重効果を調べることから始まった。モデルコイルは200kW級誘導電動機の6kV級コイルに相当し、断面は長方形にして面積は174mm<sup>2</sup>で、長さは有効長300mmである。荷重は軸の一端を固定し他端に偶力を加えてこれをねじるものとする。軸はねじり作用を受けると横断面は曲面に変わり、せん断応力は断面の外周上にして図心からもっとも近い点に生ずる。せん断応力は軸方向に対して独立である。そのせん断応力によって絶縁層はなんらかの損傷を起し、その結果として絶縁破壊電圧が低下する。このプロセスはちょうどダイヤモンド形に成形されたコイルをスロットに組み込む過程でコイルが受ける劣化に近似

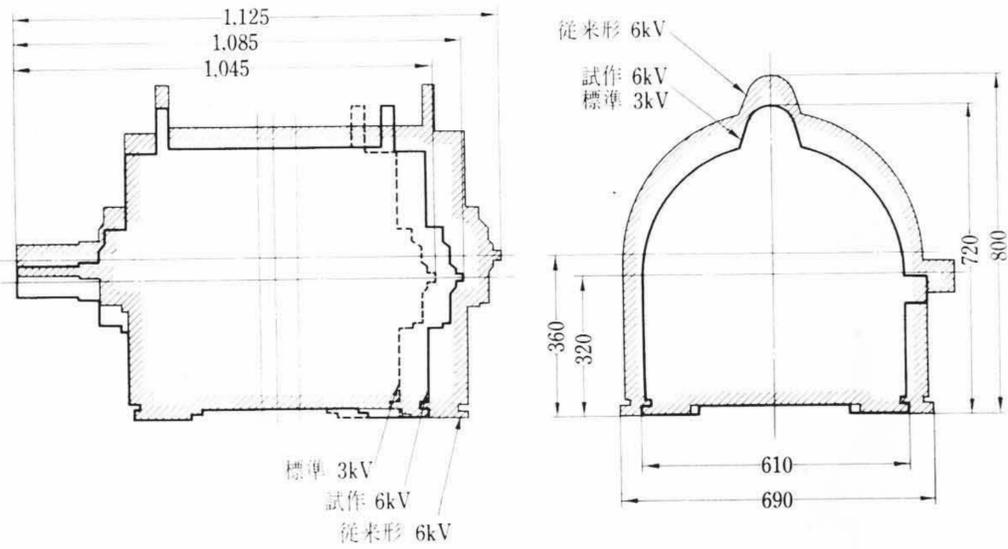


図12 誘導電動機寸法図

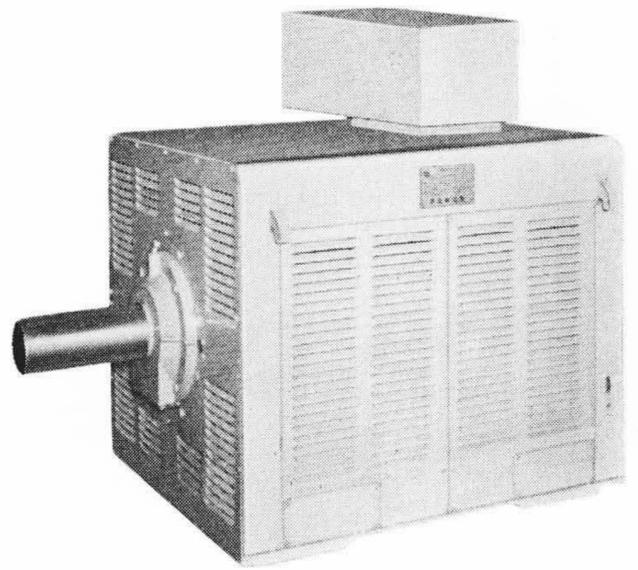


図13 新簡易分解開放防滴形NUシリーズ

表7 NUシリーズわく番適用表

出力 (kW)					わく番号 (IEC)	
4極	6極	8極	10極	12極	3kV級*	6kV級
200	132				355 S	355 M
250	160	132			355 M	355 L
315	200	160	132		400 S	400 M
400	250	200	160	132	400 M	400 L
500	315	250	200	160	450 S	450 M
	400	315	250	200	450 M	450 L
	500	400	315	250	500 S	500 S
		500	400	315	500 M	500 M
			500	400	560 S	560 S
				500	560 M	560 M

\* 3kV級のNUシリーズへの移行は41年下期より行なう予定

あるので、コイルの絶縁厚さを縮小して機器の寸法を大幅に縮小することが可能になった。図12はこの様子を示す一例であるが、従来不経済と考えられていた60kW級電動機においても径においては従来の3kV級電動機とまったく同一であり、軸長はわずかに大きい。これは重量において32%の軽減になっている。

また日立製作所の電動機のすべてがそうであるように、こうした十分な試作に裏づけられて完成した電動機はさらに実機としての過酷試験をうける。すなわちそのライフ内に受ける起動停止によるストレスを保証し、また運転中の振動も含めての機械的強度を確認するために、15,000回の起動停止と10<sup>6</sup>回の機械的振動を加えた。起動停止試験は電動機を直入起動し加速後1.3秒無負荷運転して電源を遮断、供試機に直結した誘導電動機にダイナミックブレーキをかけることより1サイクルを構成した。また振動は5t振動試験機により全振幅2mm、加速度5gで実施した。

こうして全工程を終了した後もハイパクト絶縁電動機は絶縁抵抗は1,000MΩ以上であり、tanδ特性も初期と変わることなく、18kV、1分間の耐圧試験(商用試験は13kV、1分間)にも十分耐える。この電動機はさらにAIEEのモータレット試験法に準じた方法で現在も過熱、振動、吸湿、運転を続けている。

### 5. 6kV級電動機標準シリーズ

ハイパクト絶縁を採用した6kV級標準シリーズとしては、すでに開放防滴形および全閉外扇形が完成しており、40年下期より生産が開始されている。現在、開放防沫形および開放屋外形につき標準化を急いでいる。

#### 5.1 新簡易分解形開放防滴NUシリーズ

NUシリーズとは開放防滴形の日立形記号EFOUの末尾のU文字を取って名付けたUシリーズ<sup>(5)</sup>に改良を加えた新標準で、NEWの頭文字をつけてNUシリーズと呼んでいる。外観は図13に示すとおりである。3kV級に関しては41年下期よりNUシリーズに移行の予定である。表7はモデルチェンジ予定の3kV級との比較で、6kV級電動機のわく番適用表を示す。450フレームまでは3kV級より1段長くなっているが、500フレーム以上は同一適用である。

#### 5.2 中容量全閉外扇形電動機

詳細は日立評論<sup>(6)</sup>に発表済みであるので参照されたい。全閉外扇形では3, 6kVとも同一わく番が適用されている。

## 6. 結 言

以上小形標準化の一環として強力に推進してきた6kV級絶縁のコンパクト化および標準電動機シリーズにつき述べた。将来6kV電動機がますますふえる傾向にあるので、さらに研究を進めていく所存である。関係各位のいっそうのご支援とご協力をお願いしたい。

### 参 考 文 献

- (1) 田口玄一：実験計画法(上)(昭37丸善)
- (2) A. I. E. E Standard, No. 1C (Jan. 1954)
- (3) V. A. Volkov, Yu. V. Koriskit: Elektrichestvo, No. 10 1964 (昭39)
- (4) Hars Mosimann: Insulation. Sept. 1963 (昭38-9)
- (5) 今井：日立評論 45, 1423 (昭38-9)
- (6) 今井, 中村：日立評論 47, 1531 (昭40-9)