

新標準 F 種ハイパクトエポキシ絶縁高圧誘導電動機

New Standard F-class Hipact Epoxy Insulation, High-voltage Three-phase Induction Motor

立川 昭三* 今井 利秀* 袴田 武司*
Shôzô Tatekawa Toshihide Imai Takeshi Hakamada

要 旨

宇宙開発の技術成果である耐熱フィルムと東海道新幹線の電車用電動機で、すでに多大の実績がある無溶剤エポキシレジンを使用したF種ハイパクトエポキシ絶縁は、きわめて熱的・電氣的にすぐれており、電動機の信頼度を向上するとともに小形化、軽量化に貢献している。日立製作所では45年下期より中容量以上につきこの新絶縁への切り替えを開始するので、その内容を紹介し、関係各位の参考に供するものである。

1. 緒 言

出力 90 kW～500 kW 級の中容量電動機は火力発電設備のファン用をはじめ、青函トンネル掘削現場の悪条件下における海水排水ポンプ用、ダム建設現場においてコンクリートを運ぶ巻上機用などに使用されており、それぞれ高度の信頼性、耐湿性や耐薬品性、耐熱性が要求されている。

日立製作所ではこうした用途・性能に対して SLS 絶縁などを適用しじゅうぶんな成果をあげてきた。しかしさらに信頼性を向上し完全なメンテナンスフリーを目標とし、かつ小形、軽量化を図るために、たゆまざる研究を重ねた結果、耐熱フィルムを応用し、これを無溶剤エポキシレジンで処理することにより、耐熱性F種のハイパクトエポキシ絶縁を開発し、これを採用したハイパクトシリーズ電動機の第1段階として開放防滴形のシリーズを完了した。

ここに、その性能、特長などを紹介しご参考に供したいと考える。

2. 耐熱フィルムとエポキシレジン

ハイパクト絶縁に使用されている素材として耐熱フィルムとエポキシレジンについて説明する。

アポロ計画が多大の周辺技術の先導的役割をはたしたことは衆知のとおりであるが、素材の超耐熱化もその重要な成果の一つである。耐熱フィルムとしては Du Pont 社の KAPTON, NOMEX から日立化成工業株式会社の PAIFLON, 東洋レーヨン株式会社の TH フィルムなどが紹介されている。

フィルムの耐熱性を説明するデータの代表例として KAPTON, NOMEX の引張り強さの熱劣化特性、誘電率の温度特性⁽¹⁾⁽²⁾を示したのが、図 1, 2 である。有機高分子材料の熱劣化では機械的損傷が電氣的損傷に先行して起こるのが普通であり、300℃ という劣化温度が通常の有機材料なら劣化し、くずれ去る温度であることを考えると、これらの材料がいかに耐熱性のすぐれたものであるかがわかる。

含浸用レジンには真空注入のために必要な粘度・硬化時の収縮率、硬化後の電氣的・機械的・熱的特性などを総合的に評価して決定される。表 1 は数多くの配合から選択されたエポキシレジンと無水酸硬化剤による配合レジンの主要特性である。特長は低粘度で真空含浸が完全にできること、硬化時の収縮率が小さいこと、抗張力が大きいこと、加熱減量が小さいことなどである。これらの特性がすぐれていることは、コイルの誘電正接特性、耐ヒートサイクル特性、耐熱性も向上させた大きな要因であると考えられる。

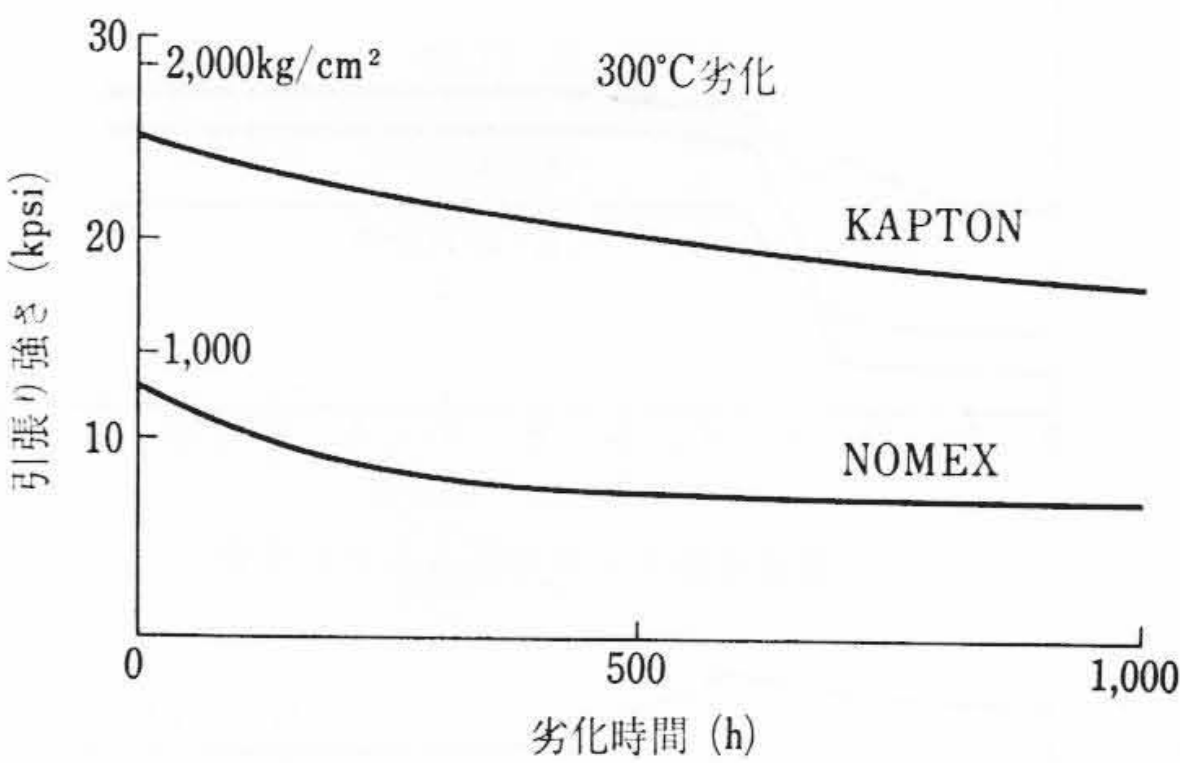


図 1 耐熱フィルムの引張り強さ-熱劣化特性

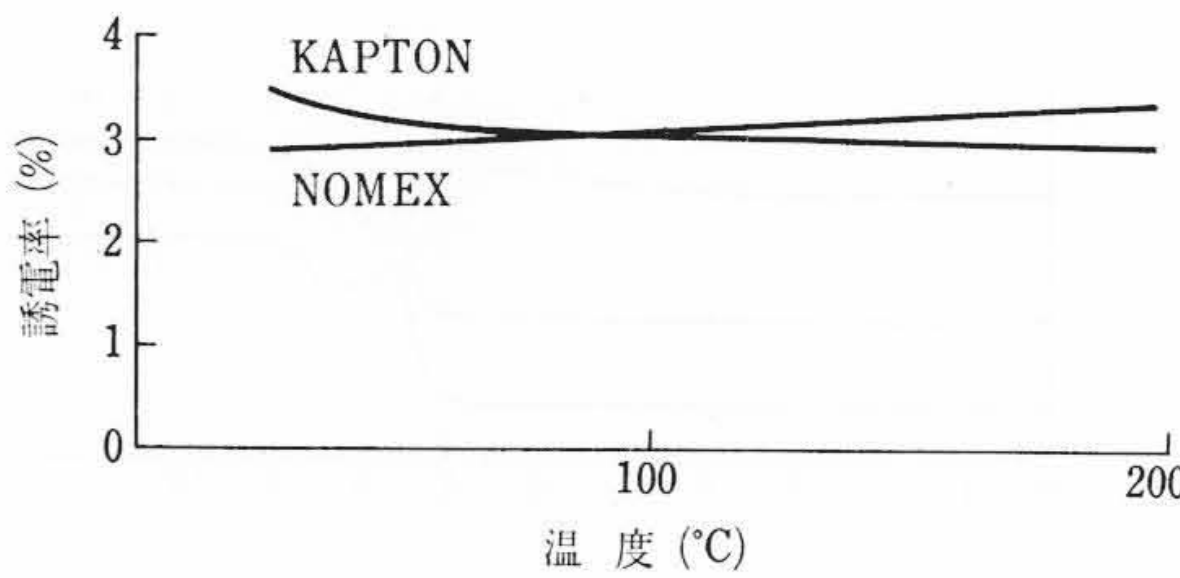


図 2 耐熱フィルムの誘電率-温度特性

表 1 無溶剤エポキシレジンの特性

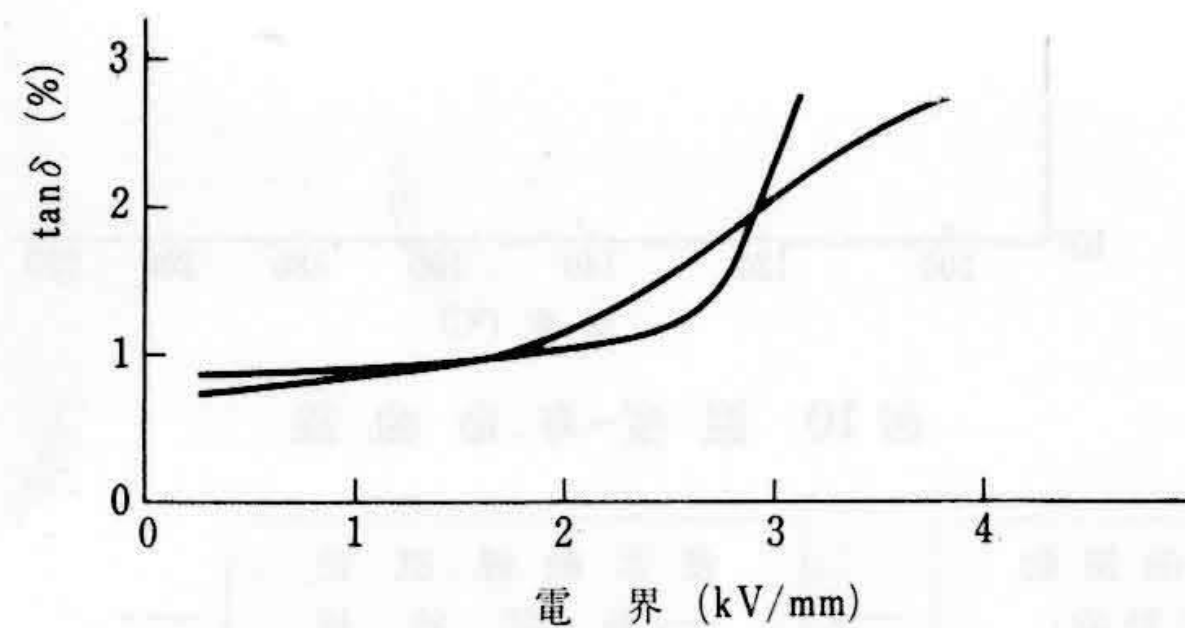
		特 性	エポキシレジン		SLS レジン	
レジン		粘 度	1.5	25℃	1.3	25℃
		比 重	1.2	25℃	1.1	25℃
硬 化 レジン	機 械 的 特 性	収 縮 率 %	3.5		3.9	
		抗 張 力 kg/km ²	22.3	180℃	232	100℃
		伸 び %	8	180℃	15	100℃
		加熱減量 %	2.6	200℃ 40日	4.2	165℃ 40日
	電 氣 的 特 性	tan δ %	1.2	140℃	0.8	100℃
		ρ Ω・cm	10 ¹⁴	140℃	10 ¹⁶	100℃

3. コ イ ル

すでに筆者らはB種のマイカを主体としたハイパクトエポキシ絶縁について発表⁽³⁾し、その最大の特長が「コイル・コア一体注入方式」の採用にあることを述べたが、F種ハイパクトエポキシ絶縁もその方式である。

コイル素線には日立電線株式会社のイメージワイヤまたは二重ガラス被覆線を使用する。これを必要回数巻線し素線間を一体に固めてその上にアース絶縁を施す。アース絶縁には耐熱フィルムや必要に応じてマイカを併用して半重ね巻きし、最外層には保護のためのガラステープを巻く。テーピングの終わったコイルはワニス未処理のまま鉄心に組み込まれコイルの接続が行なわれる。このコイルと

* 日立製作所日立工場

図4 初期コイル $\tan \delta$ -電界曲線

コアの一体品を高温・真空乾燥してコイル絶縁層中に含まれる水分や揮発性物質を完全に除去する。次に低粘度のエポキシレジン真空下で注入し、さらに加圧して絶縁層内部の微小間隔にまで完全にレジンを含浸させる。これを含浸タンクより取り出して加熱硬化し巻線として完成する。

このコイル・コア一体注入法の最大の特長は従来弱点とされていたコイル間の接続部までレジンの真空含浸が行なわれることで、それにより飛躍的に信頼性を向上することができることである。図3はこの完成品であり、これを外被にそう入してから回転子を組み込み誘導電動機として完成する。(なおこのコイル製造法に関しては現在特許出願中である。)

4. コイルの特性

コイル絶縁の性能評価は最終的にはその寿命によって決められるが、実際にその寿命の絶対値を求めることは困難であり、一般に初期および劣化時の誘電正接-電圧特性、絶縁抵抗特性・コロナ特性・絶縁破壊電圧などを測定することによってほかの絶縁構成と相対的に比較して評価を行なっている。劣化の方法としては長期の寿命を短時間に評価することの必要性から高周波電圧によるコロナ劣化、モータレット法による熱的・機械的劣化などの加速法を採用している。

4.1 コロナ劣化特性

コロナ劣化試験としてはモデルコイルを製作し、これをまず200℃で40日間熱劣化してから導体に通電してコイルの温度を120～140℃に保ち、かつ絶縁層には1,500 Hzの高周波を印加した。印加電圧としては定格電圧からその2倍程度までの4点とした。熱劣化後にコロナ劣化試験を行なったのは実際の劣化状態にできるだけ近似させるためである。

まずこの熱劣化を行なったときのコイルの特性を紹介する。図4は初期コイルの $\tan \delta$ -電圧特性である。a曲線はほぼ3 kV/mmまでカーブに立上りがなく、ボイド放電の存在しないことを示してい

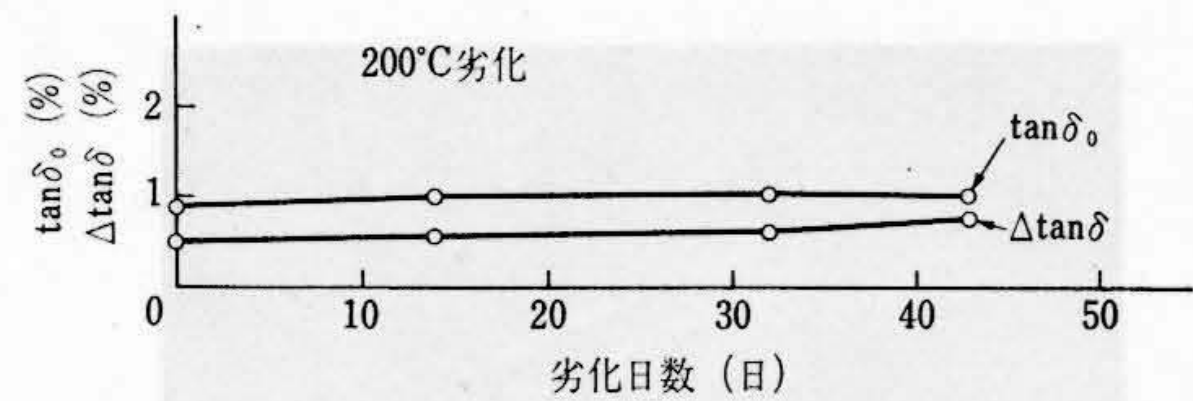
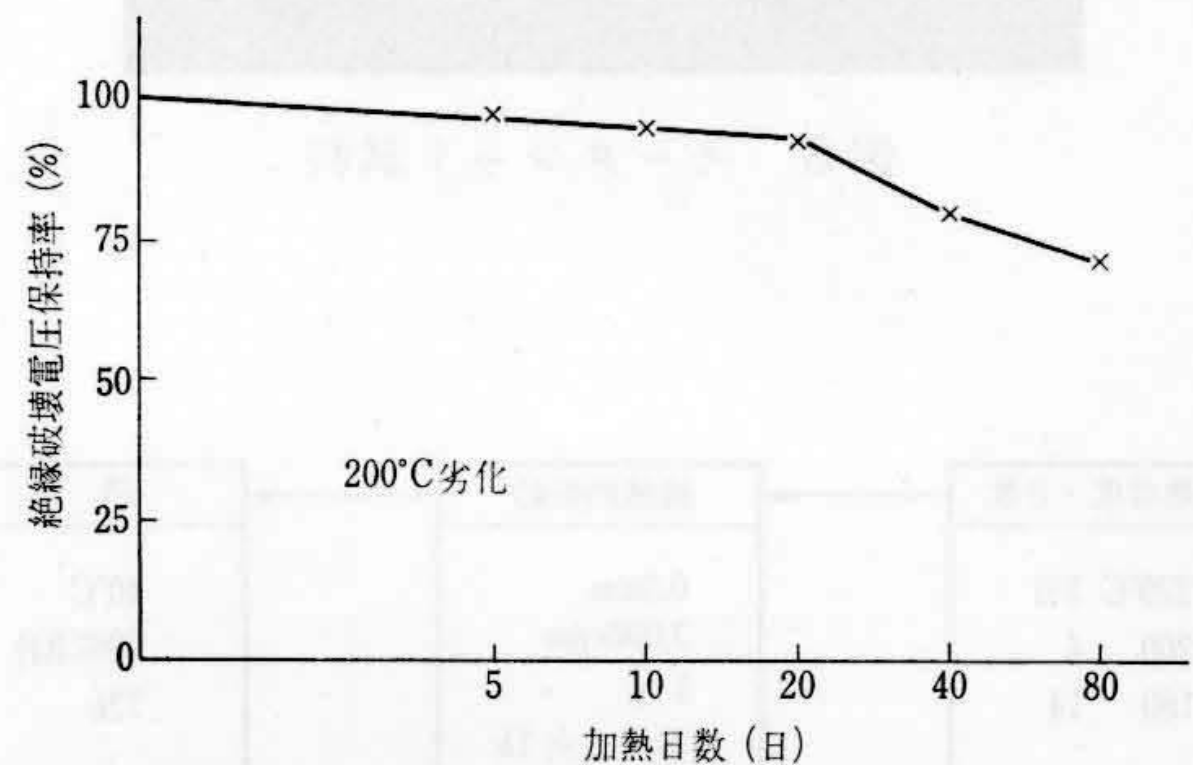
図5 $\tan \delta_0$, $\Delta \tan \delta$ -熱劣化特性

図6 絶縁破壊電圧-熱劣化特性

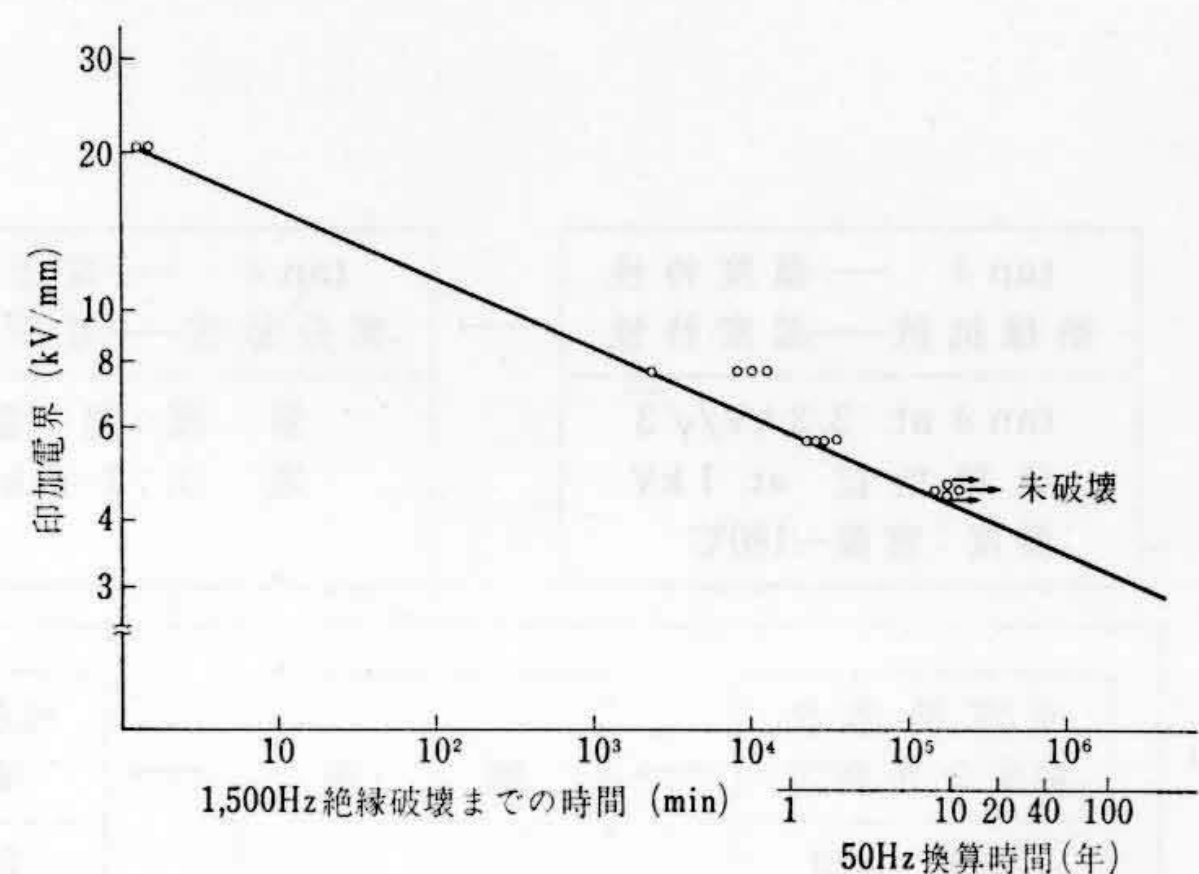


図7 印加電界-寿命曲線

るが、3 kV/mm以上の急な立上りは電極端の放電であった。b曲線はa曲線に対してコロナシールドを施した場合のもので端部放電が相当抑制された結果、3 kV/mm以上の $\tan \delta$ 値が非常に小さくなっている。図5は $\tan \delta_0$ と $\Delta \tan \delta$ の200℃における熱劣化特性である。 $\tan \delta_0$ は電圧1 kVの $\tan \delta$ 値であり、 $\Delta \tan \delta$ は常規電圧の $\tan \delta$ から $\tan \delta_0$ を差引いた値である。これらの特性が熱劣化に対して不変であることは、材質的に熱に安定であり、かつハク離などによるボイドの発生もないことを示唆している。また図6は絶縁破壊電圧の熱劣化特性である。200℃、80日間の熱劣化においても劣化率は30%未満にとどまり、素材の特性とともにこれらの特性からH種の耐熱性さえあるものと思われる。

さて、コイルの寿命評価の一翼をになうものがV-t試験であり、図7はもっとも重要なデータのの一つである。試験条件も前述のようにじゅうぶん実際に近似し、かつ過酷なものが与えられた。この実験段階では結果の中に未破壊の一群が含まれており、かつ直線は破壊時間の最短点を結んで引かれているので、実際のV-t曲線はさらに長寿命の方向へ移行するが、すでに50 Hz換算時間にしてじゅうぶん電動機の実用寿命に到達していることがわかる。

4.2 モータレット試験

コロナ劣化による寿命評価とともにコイル寿命評価で重要なものがモータレット試験である。モータレット試験についてはすでにいろいろと紹介されているが、要は熱劣化をなるべく実機の使用状態に近い条件のもとで行ない、化学反応速度論に従って寿命を推定しようというものである。図8はこの主旨によりコイルをモデルコアに入れて作った実際の固定子の一部に相当するモデルである。劣化

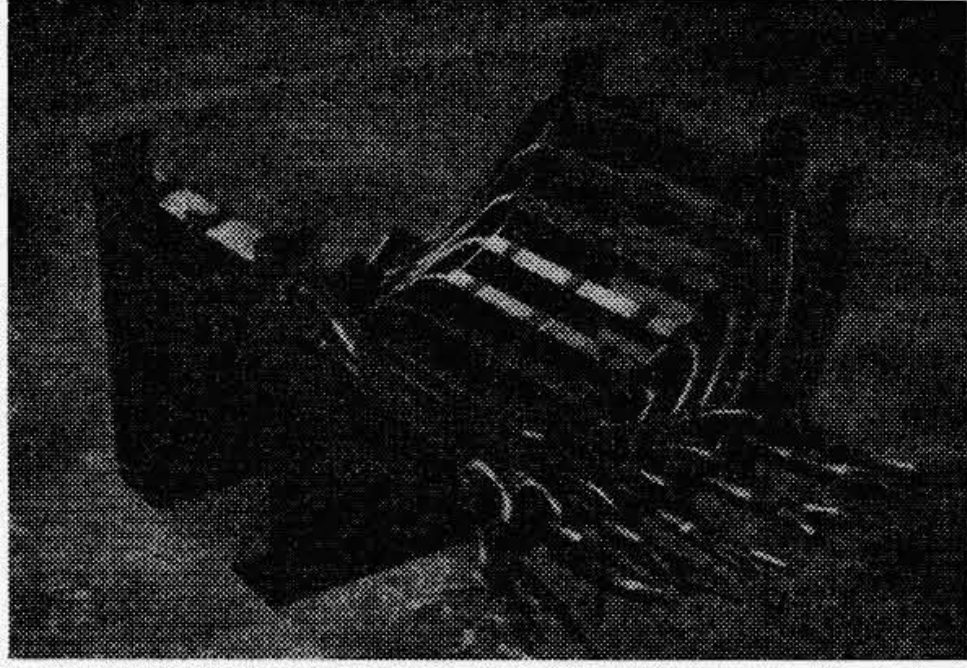


図8 モータレット試料

加熱温度・日数	機械的振動	吸湿
220°C 1日	0.3mm	40°C
200 4	3,000cpm	90% RH
180 14	1.5g	72h
	垂直方向 1h	

図9 モータレット試験手順

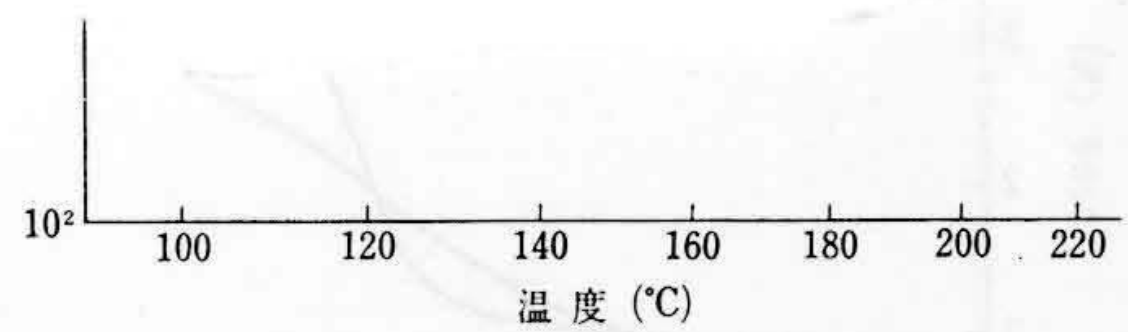


図10 温度-寿命曲線

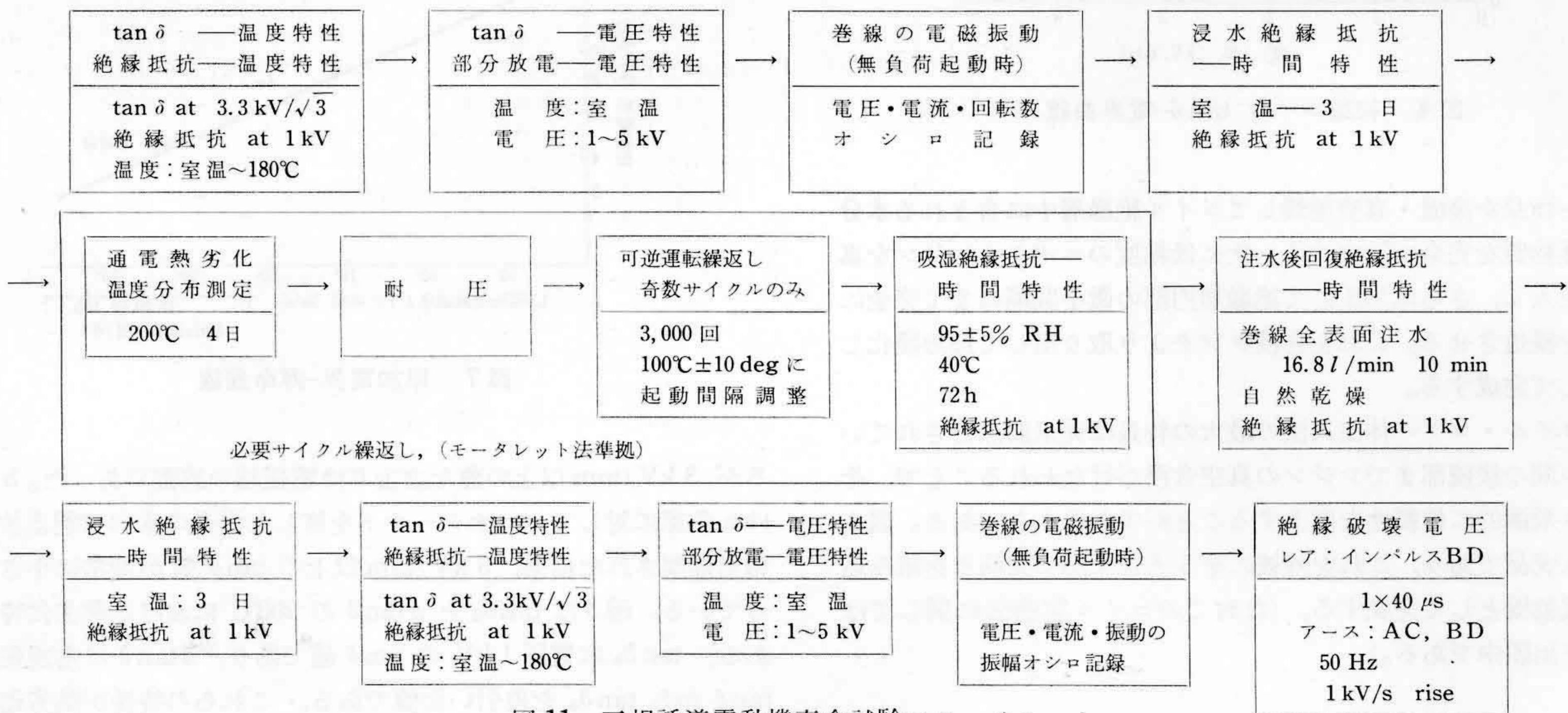


図11 三相誘導電動機寿命試験フローチャート

条件は図9に示すように加熱→振動→吸湿の繰返しであり、これはモデルの形状とともに実機の使用状態に近いものである。加熱劣化は180°C, 200°C, 220°Cの3点の温度に対して各一組のモデルを使用し1サイクルごとに行なう各コイルの耐圧チェックでコイルが破壊するまでの時間を測定したものである。

図10はハイパクトエポキシ絶縁を従来のもっとも一般的なアルキルフェノール系溶剤ワニスで処理したB種絶縁と比較して示した温度-寿命曲線である。B種絶縁の130°Cに対してハイパクトエポキシ絶縁は165°Cの耐熱性となり、F種とH種のちょうど中間に位置している。われわれはこれらをF種に使用するこ

表2 電動機寿命試験特性測定項目

測定項目	測定箇所	測定条件	測定方法、測定回路
1. $\tan \delta$ —温度特性	(三相一括)〜(アース)間	室温〜160°C, 3,300V/ $\sqrt{3}$	1.〜7. ガード電極 固定子単独 測定器： $\tan \delta$ ：簡易シェーリングブリッジ 絶縁抵抗：1,000Vメガ 部分放電：簡易コロナ測定器
2. $\tan \delta$ —電圧特性	同上	1〜5kV, 室温	
3. 絶縁抵抗—温度特性	同上	室温〜160°C, 1,000V	
4. 部分放電電荷量—電圧特性	同上	1〜4kV, 室温	
5. 耐圧	同上	室温	
6. 浸水絶縁抵抗	同上	室温, 1,000V	
7. 注水回復絶縁抵抗	同上	同上	
8. 通電熱劣化 巻線温度分布	3相交流通電 温度分布測定箇所 図30参照	—	8. 3相220V IM 324V, 15.5Aで巻線温度を200°Cに調整, 固定子単独
9. 起動繰返し, 振動	起動時振動測定箇所 図30参照	巻線温度100°C±10deg	9. 3,300V 起動繰返し IM 起動振動時巻線温度測定 IM 3,000V直入 非接触形多素子振動計 (日本測器KK.500-P形)
10. 絶縁破壊電圧	シリーズ結線解体後の単独コイル	室温, 気中 インパルス1×40μ AC 50Hz	10. レアインパルスBD. アースAC, BD.

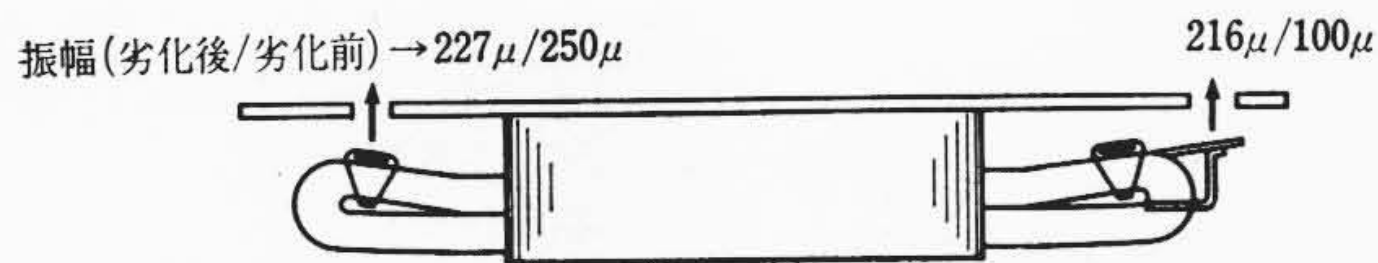


図 12 直入起動時におけるコイルエンドの振動

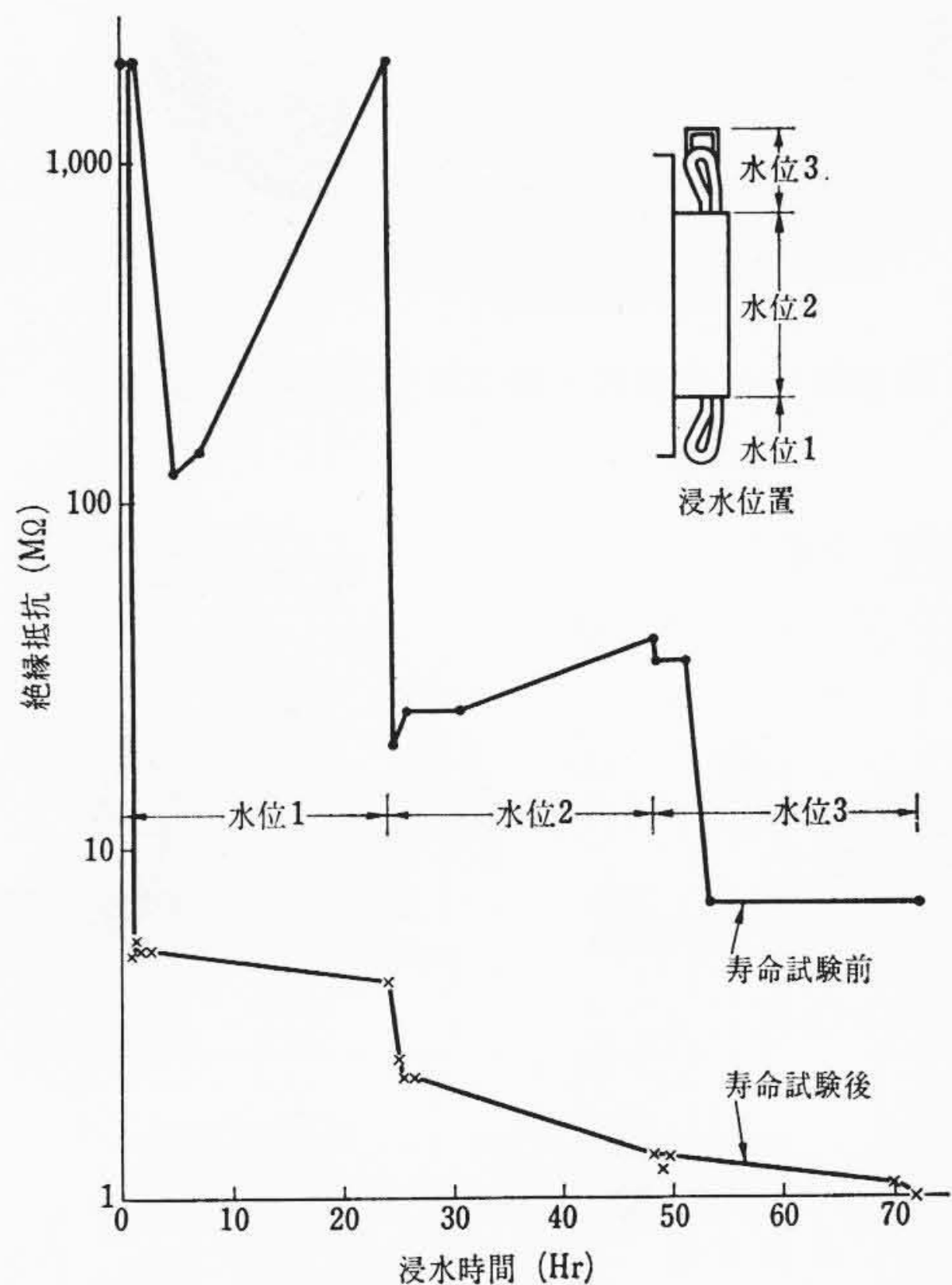


図 13 絶縁抵抗-浸水時間特性

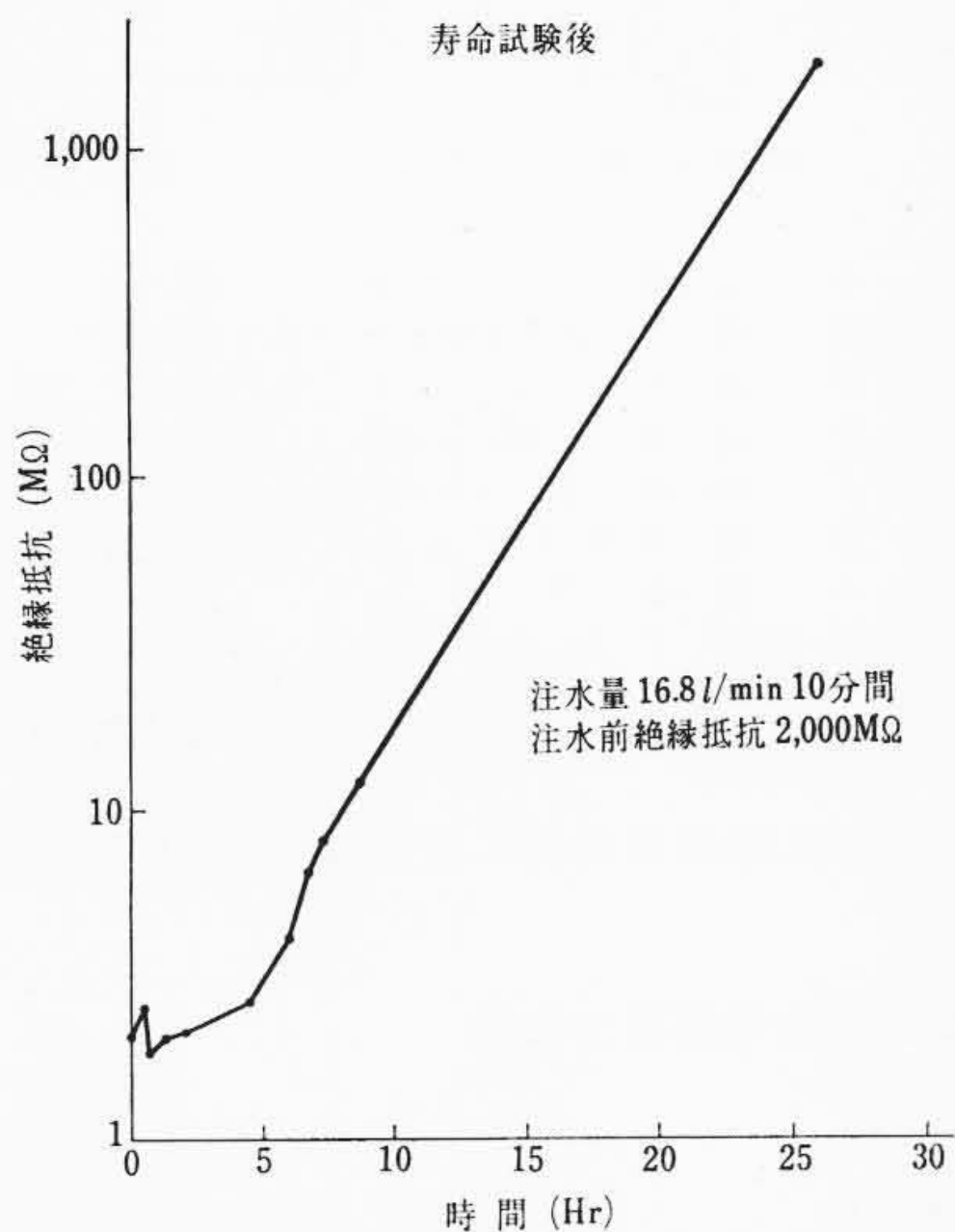
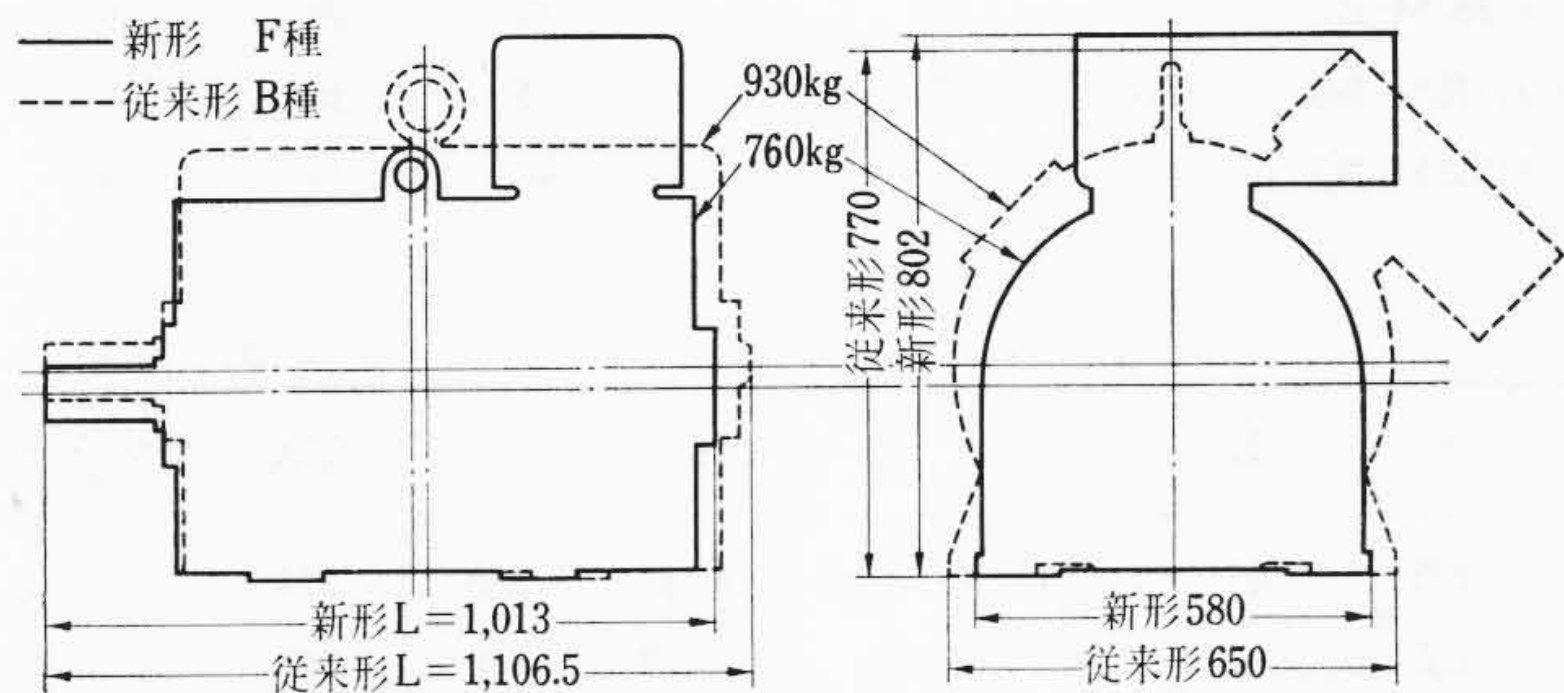


図 14 注水後の絶縁抵抗回復特性



(寸法は 132 kW 3 kV 4 極開放防滴かご形を示す)

図 15 高圧電動機新旧電動機外形比較

表 3 新旧適用わく番比較表

極数 区分 わく番	4			6		
	低E 圧種	3 kV 級種	3 kV 級種	低E 圧種	3 kV 級種	3 kV 級種
250 S	75	45		45		
250 M	90	55		55	45	
280 S	110	90	132	75	55	90
280 M	132	110	160	90	75	110
315 S	160	132	200	110	90	132
315 M	200	160	250	132	110	160

表 4 開放防滴かご形誘導電動機わく番適用表
形式 EFOU(P)-KK 3 kV 50 Hz F 種

極数 出力 (kW)	4	6	8	10	12
90		PB280S-B5	PB315S-B5	UB355S-B3	UB355S-B3
110	PB280S-B5	PB280M-B5	PB315M-B5	UB355S-B3	UB355L-B3
132	PB280S-B5	PB315S-B5	UB355S-B3	UB355S-B3	UB400S-B3
160	PB280M-B5	PB315M-B5	UB355L-B3	UB355L-B3	UB400S-B3
200	PB315S-B5	UB355S-B3	UB355L-B3	UB400S-B3	UB400L-B3
220	PB315M-B5	UB355L-B3	UB400S-B3	UB400S-B3	UB400L-B3
250	PB315M-B5	UB355L-B3	UB400S-B3	UB400L-B3	UB450A-B3
280	UB355S-B2	UB400S-B3	UB400L-B3	UB400L-B3	UB450A-B3
315	UB355S-B2	UB400S-B3	UB400L-B3	UB450A-B3	UB450A-B3
355	UB355L-B2	UB400L-B3	UB450A-B3	UB450A-B3	UB500A-B3
400	UB355L-B2	UB400L-B3	UB450A-B3	UB500A-B3	UB500A-B3
450	UB400S-B2	UB450A-B3	UB500A-B3	UB500A-B3	UB500A-B3
500	UB400L-B2	UB450A-B3	UB500A-B3	UB500A-B3	

とにしたので、熱的に余裕の大きい設計となっている。

5. 実機コイルの寿命評価

実機コイルの寿命を短期間において誤りなく推定することは相当困難であるが、一つの方法として既述のモータレット試験法がある。これも機能的寿命評価試験法として実機の運転状態と比較すると劣化要素にかなりの差があるように思われる。これに対して通電ヒートサイクルとか、電圧印加を劣化要素に追加するなどの方法がとられているが、筆者らはモータレット法はそのまま IEC 推奨案によるものとし、その不備を補うものとして実機寿命試験を併用した。

供試電動機は開放かご形 110 kW・3,000 V・4 極その他であり、試験としては通常の商用試験に引き続いて図 11 に示す多項目の寿命試験を行なった。表 2 は電動機寿命試験における特性測定項目と測定法である。図 11 のヒートサイクルはモータレット法に準拠した 10 サイクルで、この劣化の前後で巻線各部の起動時の振動を測定した。図 12 は直入起動時におけるコイルエンド部の振動測定結果である。この部分はもっとも振動の大きいところであるが、それでも 0.2 mm 程度であり、ヒートサイクルの前後においてもほぼ不変である。これは図 11 に示す 15,000 回の可逆運転でもコイルの糸じばりがゆるむなど振幅増大の原因となる劣化が起こっていないことを意味する。これは製法で説明したコイル・コア一体注入法のすぐれた効果の一つである。

電動機は図 11 のヒートサイクルを 10 サイクル終了してもまったく問題なかったので、コイルを強制的に絶縁破壊しその電圧を測定しようとしたが、印加端から沿面破壊し実測することができなかった。

そこで電動機を水槽に浸水し絶縁抵抗の経時変化を測定した。図 13 はこれをヒートサイクルの前後で比較して示したものであるが、従来の電動機では浸水すれば、特に水位 3 では直ちに 0 MΩ になっ

たがコイル間の接続部分までエポキシレジンで一体注入してある本電動機では初期値で $8\text{ M}\Omega$ 、絶縁の枯れにより水が絶縁層中に浸水しやすくなっていると思われる劣化後でも $1\text{ M}\Omega$ あった。

また図14はヒートサイクル寿命試験後に電動機の洗浄などを想定して注水を10分間実施したのち、室温に放置したときの回復絶縁抵抗を測定したものである。前述のような過酷なまでのヒートサイクル試験後の注入においてさえ $2\text{ M}\Omega$ あり、それをそのまま常態に放置しても24時間で $1,000\text{ M}\Omega$ に回復していることから、このF種ハイパクトエポキシ絶縁が驚異的にメンテナンスフリーであることがわかる。

6. F種ハイパクトシリーズ開放防滴形電動機

ハイパクト絶縁は前述のようにきわめてすぐれた絶縁特性であるがまた一方、絶縁破壊強さの向上により絶縁厚さを縮小し、さらにF種の採用にもより、大幅な電動機の小型・軽量化を達成することができた。表3は現行高圧B種、低圧E種との比較で示すべく番適用表であり、大幅に小型化されていることがわかる。図15はこの様子を示す一例であり、外径・軸長ともに短縮され、重量にして75%の軽減が達成されている。

6.1 わく番適用

現在B種絶縁電動機の国内統一寸法規格(JEM-1203 高圧(3kV)三相かご形誘導電動機(一般用B種)寸法)があるので、この範囲を小型化することは既納品互換性の面から顧客に多大の迷惑をかけることになる。したがってこの範囲(4極160kW相当315フレームまで)は国内統一寸法が決定するまで除外する方針で検討した。しかし大幅に小型化される利点も考慮して、最終的には280フレーム(4極110kW相当)以上を新絶縁方式に移行し、280, 315フレーム

表5 F種ハイパクトシリーズ電動機性能一例
(仕様 132 kW 3 kV 50 Hz 4極 開放防滴かご形)

項	目	試 験 機	JEM 1204 (1967)
出 力 (%)		100.2	
効 率 (%)		93.7	88.5 以上
力 率 (%)		84.0	82.0 以上
す べ り (%)		1.2	4.0
起 動 電 流 (A)		177	215 以下
起 動 トルク (%)		135	100
最大トルク (%)		189	175
温度上昇	固定子コイル (deg)	81	—
	固定子コア (deg)	71	—
	外 被 (deg)	29	—

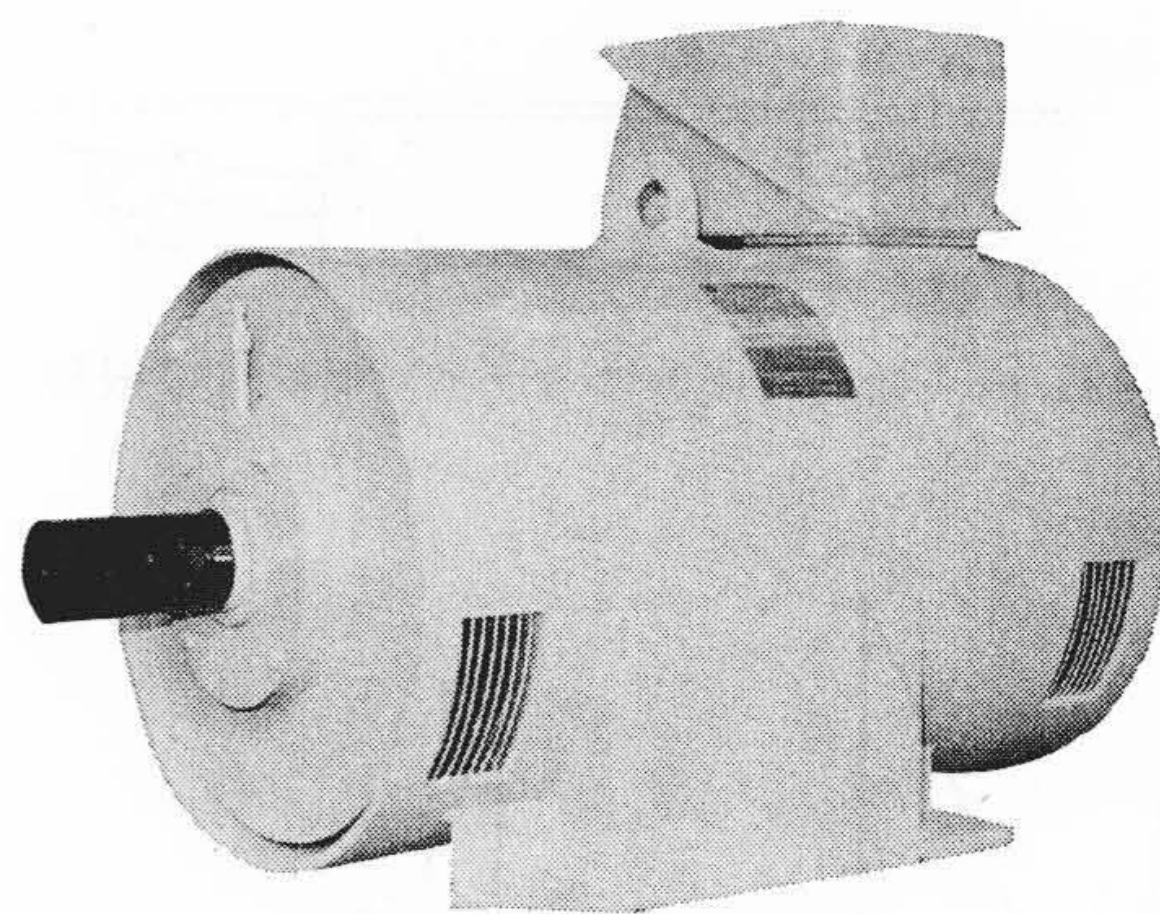


図16 開放防滴かご形わく番315以下誘導電動機

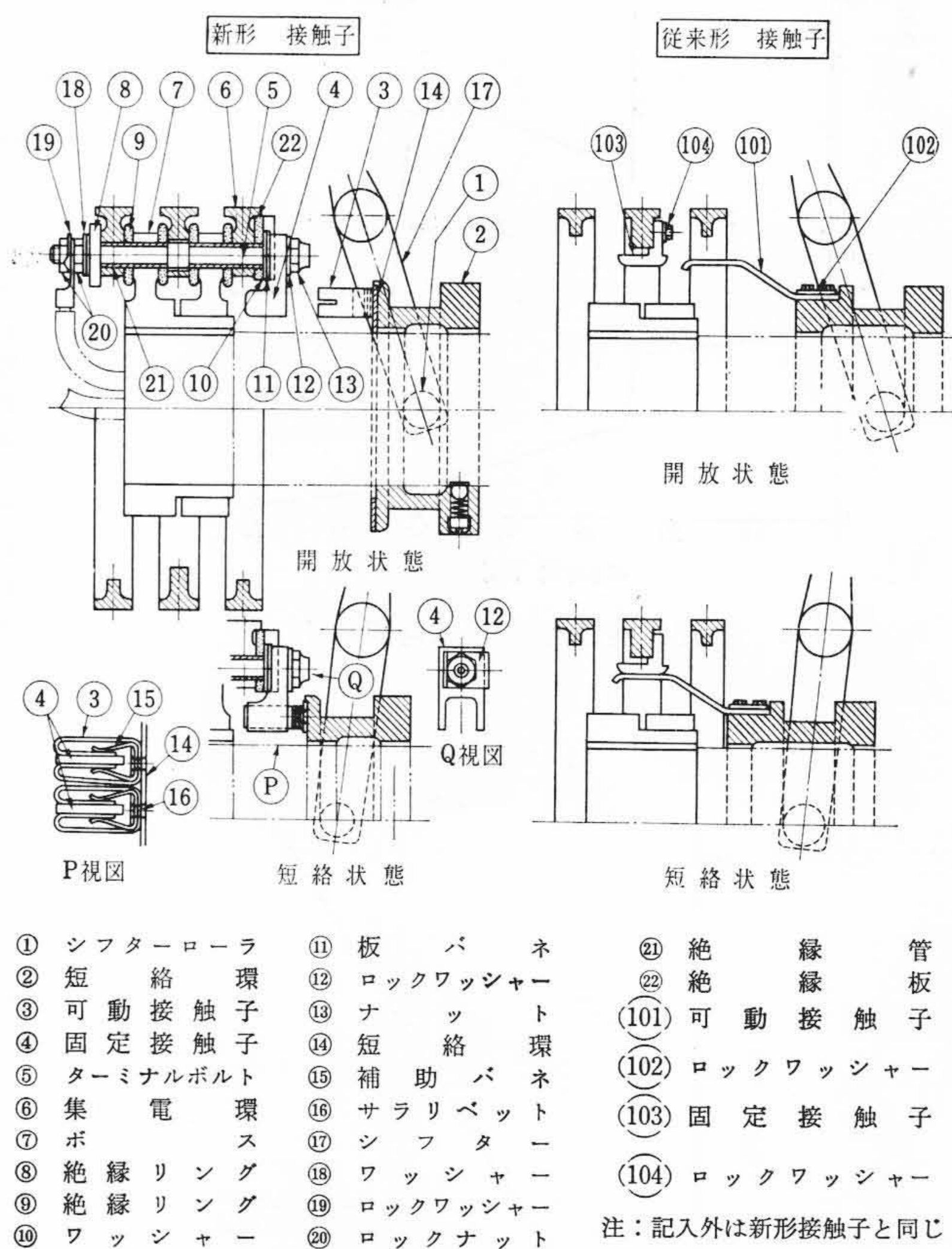
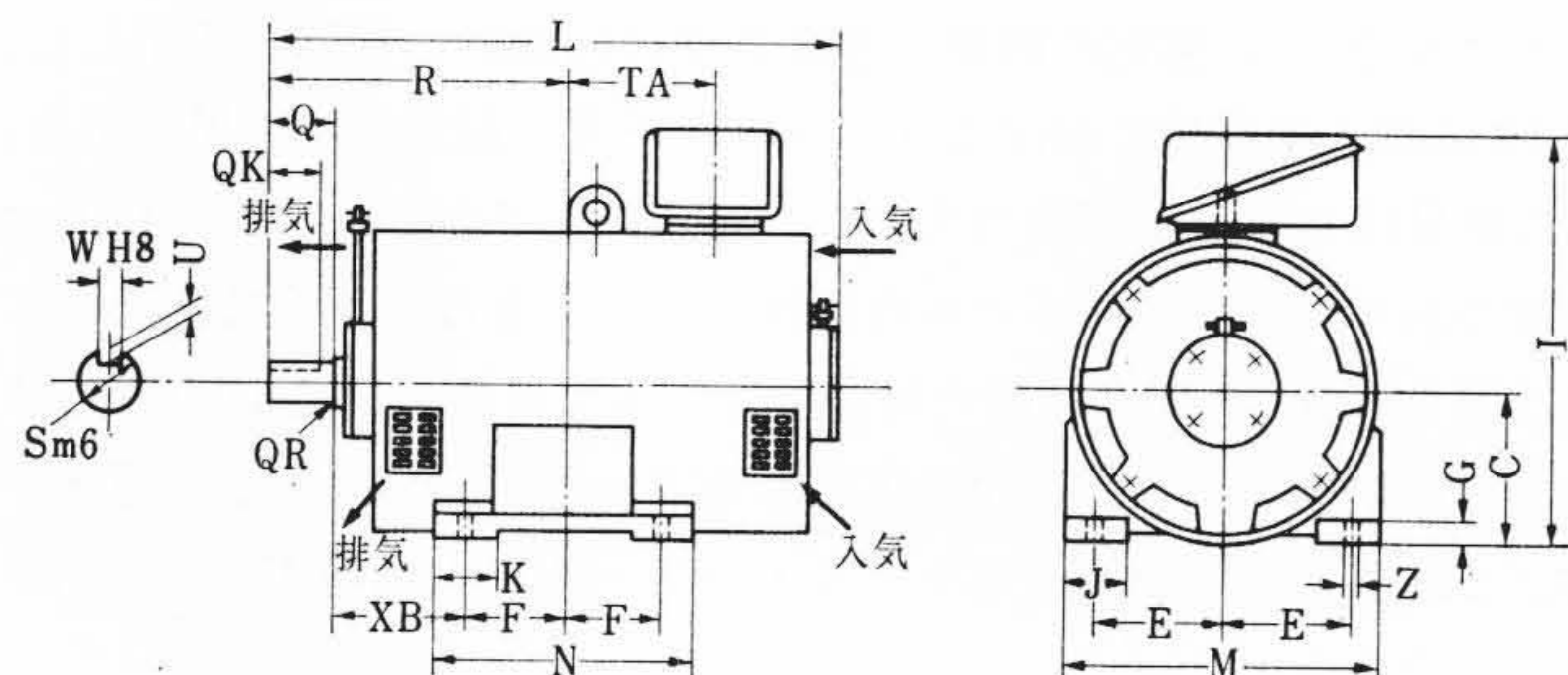


図17 中容量巻線形誘導電動機二次側集電環短絡装置新旧比較図

表6 F種ハイパクトエポキシ絶縁高圧開放防滴かご形直結電動機寸法表



本体寸法表

わ く 番	R	C	2 E	2 F	XB	M	N	J	K	G	Z	L	I	TA	最大重量 (kg)
PB280S-B5	544	280	457	368	190	580	480	125	96	24	28	1,013	802	276	760
PB280M-B5	569.5	280	457	419	190	580	531	125	96	24	28	1,103	802	341	860
PB315S-B5	589	315	508	406	216	660	560	150	117	24	28	1,108	865	311	1,020
PB315M-B5	614.5	315	508	457	216	660	610	150	116.5	24	28	1,208	865	386	1,120

に関しては、顧客のご要望あれば中間ベースでB種寸法規格に合わせ納入することにした。わく番適用表の一例は表4に示すとおりである。

6.2 性能

現行B種絶縁の性能規格(JEM-1204 高圧(3kV)三相かご形誘導電動機(一般用B種)特性)に準拠した効率、力率、起動電流としている。規格値とF種ハイパクトエポキシ電動機性能の比較一例を示したのが表5である。

6.3 構造

わく番315までは従来鋳物製外被を採用していたが、図16に示す鋼板溶接構造に変更するとともに端子箱を上部設置として配線の自由化を図った。わく番355以上には従来と同じ簡易分解形NUシリーズ⁽⁴⁾を採用する。

6.4 メンテナンスフリー

電動機の保守を必要とする個所は、開放防滴形においてはコイル、軸受、巻線形回転子ではさらに集電環部分がそのおもなものである。コイルについては、前述のように高信頼度となるが、メンテナンスフリーのためにはそのほかの部分も同様に配慮されなければならない。

6.4.1 長寿命グリースの採用

丸善石油株式会社と協力して長寿命グリースの開発研究を行ない、従来のグリースに比較して2倍以上の寿命をもち、使用温度範囲も-30℃~130℃と広い、WRグリース(商品名)を完成し、市販体制もととのったので、電動機に全面採用を開始した。本グリースの採用により、補給期間を従来の2倍に延ばすことが可能となり大幅な省力化となった。(WRグリースの詳細は本号91頁を参照)

6.4.2 長寿命二次側集電環短絡用接触子の開発

従来採用していた中容量電動機用接触子は約2,000回の起動が

可能であり、1日3回の起動として約2年目で交換する必要があったが、今回9,000回の起動に耐える新製品を開発した。新旧構造比較は図17に示すとおりである。新製品は従来形に比べ、接触子間の面圧調整、当たり調整の必要がなく、交換作業も容易に行なわれる特長を備えたもので、1部の部品を交換することにより従来形を新形に改造可能なように配慮されている。

6.5 寸法

IEC規格に準じた国際寸法を採用、輸出増大に備えたものとなっている。表6はその一例を示したものである。IEC規格はすでに日本電機工業会規格(JEM)に全面的に採用されている。

7. 結 言

高信頼度F種ハイパクトエポキシ絶縁を紹介するとともに、新絶縁を採用したF種ハイパクトシリーズのうち開放防滴形電動機の構造、性能、寸法につき説明した。現在全閉外扇形のモデルチェンジを計画中であり、近日中にその内容を紹介する予定である。

新絶縁採用により寸法が大幅に小形化し、既納品との互換性において需要家に迷惑をかけることがあるが、この点を考慮して既納B種絶縁寸法に中間ベースを取付けることにより取付寸法を合わせるようにした。F種ハイパクトシリーズ電動機は、長寿命グリース、長寿命集電環短絡片の開発を加えて名実ともにメンテナンスフリーを実現することができた。

参 考 文 献

- (1) Technical Information "NOMEX" Bulletin NM1-2 (N-195) 丸正産業
- (2) Technical Information "KAPTON" Bulletin H-2 丸正産業
- (3) 袴田・桜沢：日立評論 52, 119 (昭45-2)
- (4) 今井：日立評論 49, 1000 (昭42-10)

Vol. 52 日 立 評 論 No. 12

目 次

■論 文

- ・フランスシスポンプ水車の水車運転時の二重性能
- ・回転機械の不つり合い振動の解析
- ・関西電力海南発電所納シーケンスモニタシステム
- ・高速エレベータ横振動の解析
- ・リニアモータ方式L4形貨車加減速装置
- ・ファクシミリ信号帯域圧縮装置
- ・B23形自動交換装置(構造と特長)
- ・団体予約システム MARS-201
- ・ロータリエンジン用排気ガス浄化装置

- ・超高压OFケーブル用ガラスフレック混抄絶縁紙の諸特性
- ・アルミニウムろう付用フラックスの研究
- 小形制御用計算機応用特集
- ・小形制御用計算機システムの展望
- ・電力系統制御用データ交換システム
- ・熱間可逆圧延機のデジタル計算機による全自動化
- ・小形制御用計算機の化学プラントへの適用
- ・生産管理および倉庫のオンライン計算制御
- ・小形制御用計算機の省力化への適用

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内一丁目5番1号 郵便番号 100
取次所 株式会社 オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 郵便番号 101
振替口座 東京 20018 番