

# 誘導電動機絶縁の機能試験法

Function Tests for Induction Motor Insulation

角田昌隆\* 袴田武司\* 狩野育志\*  
Masataka Kakuta Takeshi Hakamada Ikushi Kano

## 要 旨

最近の急速な絶縁材料の進歩に対処するため、誘導電動機絶縁組織の機能試験法を確立した。これは絶縁組織の要求性を十分考慮し、実際の機器との等価性に重点をおいたもので、合理的かつ短期間に信頼度の高い絶縁組織の寿命推定を可能にした。F種ハイパクトエポキシ絶縁は本機能試験法により開発されたものである。

## 1. 緒 言

絶縁材料の進歩発展にはめざましいものがある。特に近年は耐熱高分子材料が急速に進歩しているため、それらのすぐれた特長を生かして、機器の絶縁組織を構成する必要がある。一般に誘導電動機の絶縁組織は、複合絶縁組織をとっているが、その場合に絶縁組織の特性は個々の絶縁の相乗効果が発揮できるとは限らず、その構成の組合せにより、大きな差の生ずることが一般に知られている。それゆえ、誘導電動機の要求特性を十分に考慮し、実際の機器が受ける劣化要因を試料に与え、絶縁組織の機能に即した試験、機能試験を行なって絶縁組織の特性を総合的に評価する必要がある。

機能試験は誘導電動機の寿命を推定するものであるから、必然的に大きな労力と時間を要する欠点がある。しかし、材料の進歩発達は急速であり、機能試験に長時間を要したのでは、材料の進歩におくれることになる。したがって短期間に信頼度の高い寿命評価を行なう試験法を確立することが必要となる。現在、型巻きコイル絶縁組織の機能試験法として広く採用されている方法は、IEEE, Pub275およびIEC, Pub216に示されているモータレット試験法である。これは過酷な模擬条件試験により、加速劣化試験を行ない、短期間に絶縁組織の寿命推定を行なうもので、試験の短縮化に大きな貢献をしている。しかし、劣化要因を個々に与えるため、実際の機器の運転状態と比較するとかなり差がある。

そこで、日立製作所では以上のような観点から、F種ハイパクトエポキシ絶縁の開発にあたり、従来の試験法を見直し、モータレット試験に標準実機寿命試験を併用することにより信頼度の高い誘導電動機絶縁組織の機能試験法を確立したので、この機能試験法と、この試験法により開発した、F種ハイパクトエポキシ絶縁の結果を一例として紹介するものである。

## 2. 絶縁組織機能試験パターン

誘導電動機の絶縁組織を開発するにあたり、絶縁組織への要求特性として考慮しなければならない項目は次のとおりである。

- (1) 容量または寸法区分
- (2) 使用電圧または試験電圧区分
- (3) 電源種類 (商用周波, 高周波など)
- (4) 稼働率 (h/d)
- (5) 周囲冷却媒体の種類と圧力区分
- (6) 周囲温度区分 (最低および最高周囲温度区分)
- (7) 耐熱区分
- (8) 耐ヒートサイクル数

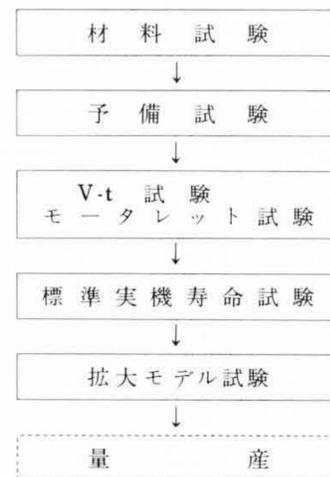


図1 機能試験パターン

- (9) 衝撃電流区分 (起動電流, 短絡電流)
- (10) 耐衝撃電流サイクル
- (11) 耐機械的強度
- (12) 耐振動性 (外部からの振動)
- (13) 耐サージ電圧
- (14) 電気的非破壊特性 (メグ,  $\tan \delta$ , 部分放電)
- (15) 耐湿性
- (16) 耐薬品性 (油, ダスト, 薬品ガス, 薬品液, 洗剤など)
- (17) 耐用時間

以上述べた要求特性を満足する誘導電動機用新絶縁組織を短期間で、しかも少ない費用で開発するための機能試験パターンは図1に示すとおりである。本パターンの各ステップに関してはそれぞれ試験法を制定し検討もれをなくし、相互比較の可能な有効なデータが集積できる方式としている。

## 3. 試験法および試験結果

### 3.1 材料試験

絶縁組織の構成を決定するにあたり、個々の絶縁材料の特性をは握し、絶縁組織の要求特性にあった適用をすることが必要となる。現在、日立製作所において行なっている絶縁材料に対する試験は、大別して、表1に示すとおりであり、絶縁材料種類、使用区分により、それぞれの試験内容を変えて、試験を行なっている。

従来、材料の開発試験を終わり、量産に移る際、開発試験に用いた材料と品質の異なる材料の供給しか得られない場合があったが、現在は材料購入の基本的な考え方は、開発試験に用いた材料と同一の品質のものを受け入れるという方針で、購入検査において、材料の品質のばらつきを最もよく表わす特性について、次に示す材料の合否の判定式(1), (2)を満足するような材料を購入することとしている。

\* 日立製作所日立工場

表1 絶縁材料の特性試験項目

項 目	備 考
1. 電気的非破壊特性(含劣化率)	抵抗率 $\tan \sigma$ 部分放電
2. 電気的破壊特性(含劣化率)	インパルス, AC破壊電圧, V-tトラッキング ピンホール
3. 機械的 特性(含劣化率)	引張, 圧縮, 曲げ, ねじり, せん断, 引さき, 摩耗, 接着力
4. 物 理 量(含劣化率)	
5. 熱 的 特 性	ひずみ, 膨張, 伝導, 容量, 軟化温度, 難燃性
6. 化学的 性質	
7. 保 管 性	保管温度, 時間による作業性と製品の特性変化
8. 作 業 性	
9. 他材料との相性	

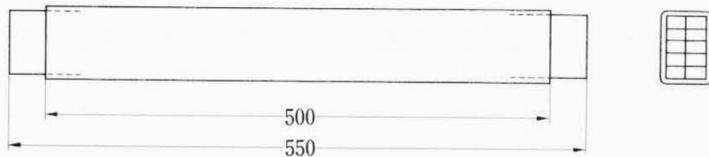


図2 試験用バーコイル

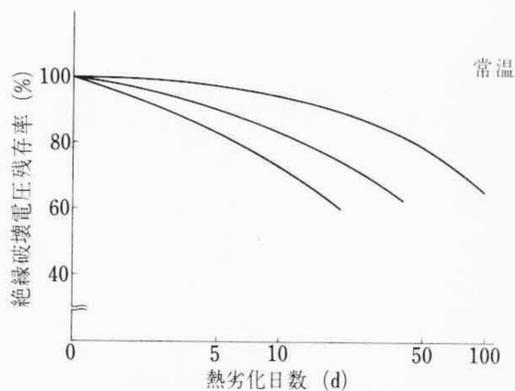


図3 絶縁破壊電圧熱劣化特性

$$\bar{X}_D - \alpha\sigma \leq \bar{X}_M \leq \bar{X}_D + \alpha\sigma \quad \dots(1)$$

$$\bar{X}_M - \alpha\sigma \leq \bar{X}_D \leq \bar{X}_M + \alpha\sigma \quad \dots(2)$$

ただし,

$\bar{X}_D$ : 開発試験時購入品の測定値の平均値

$\bar{X}_M$ : 量産時購入品の測定値の平均値

$\alpha$ : 測定値の数  $n$  によって定まる定数

$$\alpha(n=5)=1.44, \alpha(n=10)=0.99$$

$$\sigma: 1/2(\sigma_D + \sigma_M)$$

$\sigma_D$ : 開発試験時購入品の測定値の標準偏差

$\sigma_M$ : 量産時購入品の測定値の標準偏差

(1), (2)式の基本的な考え方は, 統計的手法における母集団が95%の確率で同一であるという判定に基づいたもので,  $t$  検定の理論を用いて誘導したものである。

以上のような検査により, 常に安定した品質の材料を購入し, 良好な特性を有するコイルの製造に努めている。

### 3.2 予備試験

この試験は前述した材料試験によって選ばれた材料を組み合わせさせて構成した絶縁組織について, 寿命評価のための予備試験を行なうものである。

試料としては図2に示すバーコイルを用い, モータレット試験相当の3点の温度で熱劣化を行ない, 絶縁破壊電圧を測定する。

図3はF種ハイパクトエポキシ絶縁の測定結果であり, 図3の絶縁破壊電圧の熱劣化特性は, 後述する寿命評価に使用される。

また, 予備試験においては熱劣化後のコイルの機械的特性として曲げ特性, 衝撃特性, ねじり特性も測定する。

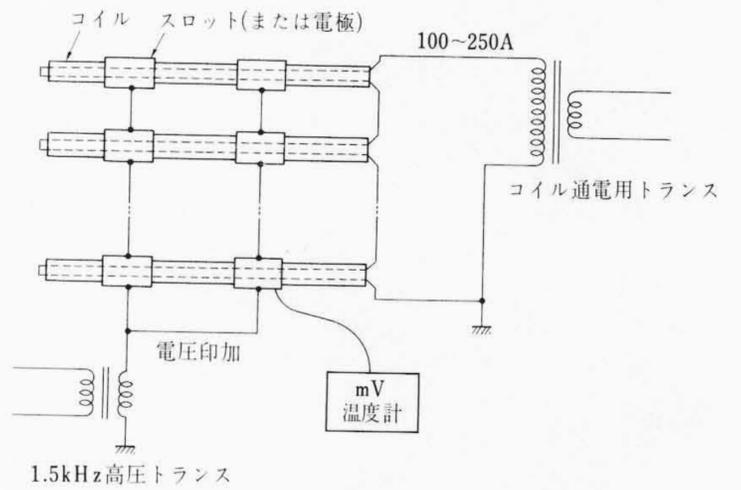


図4 V-t試験における結線図

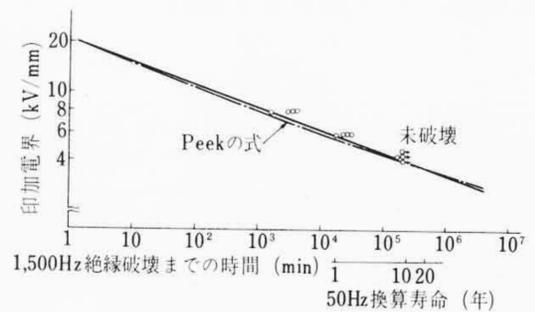


図5 印加電界-寿命曲線

### 3.3 V-t試験, モータレット試験

数種の絶縁組織について, V-t試験により部分放電劣化に対する寿命を評価し, モータレット試験で実際の機器の使用状態に近い条件で寿命の評価を行なった。

#### 3.3.1 V-t 試験

絶縁組織の部分放電劣化に対する寿命を評価するために行なうもので, 図2と同一寸法のバーコイルを40日熱劣化した後, 図4のように結線し, 通電によりコイルの温度を使用温度に保ち, 1,500 Hzの電源で30倍の周波数加速を行ない, 定格電圧からその2倍程度までの3点の電圧を印加し, 絶縁破壊までの時間を測定する。

図5はこの試験により測定したF種ハイパクトエポキシ絶縁の印加電界-寿命曲線で, コイルの寿命評価のもっとも重要なデータの一つである。図5は直線性が成立すると仮定し, 数個の試料が絶縁破壊を起こした最短時点を結んで, 寿命を求めたもので, (4)式で表わされる。またV-t曲線の実験式として有名なPeekの式<sup>(3)</sup>(5)式がある。

$$y = cx^a \quad \dots(4)$$

$$y = y_0(1 + P/4\sqrt{x}) \quad \dots(5)$$

ここに,  $y_0$ : 電圧印加無限大時の絶縁破壊の強さ

$y$ : 時間  $x$  における絶縁破壊の強さ

$t$ : 電圧印加時間

$c, a, p$ : 材料, 温度により決まる定数

(5)式のPeekの式によりプロットすると図5のPeekの曲線となり, 直線に対して, 下に凸の曲線となり, 使用点における寿命の推定値は(4)式の直線によるものが, Peekの式より短時間側のきびしい評価となることがわかる。また図5においては最低印加電圧の試料のものには, 残存絶縁破壊電圧が, 初期値とほぼ同じものが含まれており, 使用電圧では, Peekの式または(4)式の直線性を仮定して求めた寿命より, さらに長くなることが予想される。

#### 3.3.2 モータレット試験

部分放電劣化による寿命評価とともに絶縁組織の寿命評価で重要なものがモータレット試験である。これは絶縁組織の寿命評価

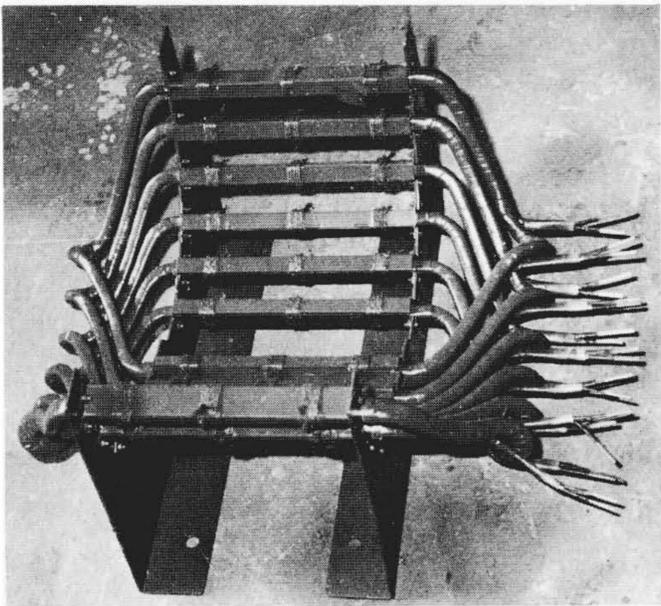


図6 モータレット試料

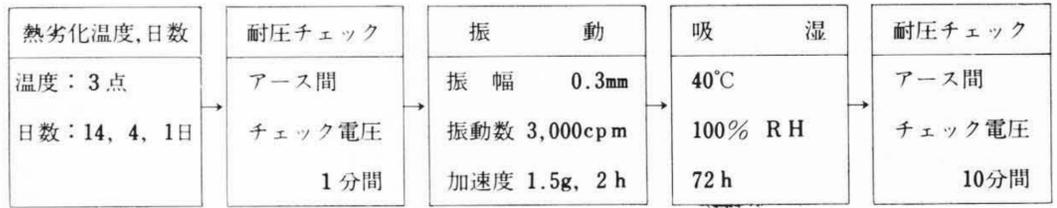


図7 モータレット1サイクル試験手順

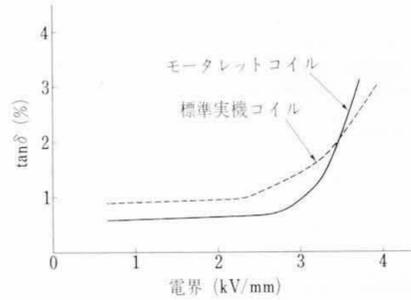


図8 モータレットコイル, 標準実機コイルtan δ電界曲線

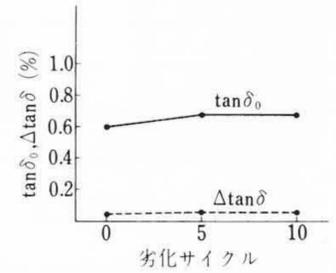


図9 モータレットコイルtan δ<sub>0</sub>, Δtan δ劣化特性

表2 モータレットコイル特性測定項目

測定項目	測定箇所	測定条件	測定方法
1. tan δ-温度特性	(導体一括)(アース)間	測定温度 3点	シェーリングブリッジによる。電源周波数 50Hz
2. tan δ-電圧特性	(導体一括)(アース)間	室温	シェーリングブリッジによる。電源周波数 50Hz
3. 部分放電特性	(導体一括)(アース)間	室温	簡易コロナ測定器による
4. 吸湿絶縁抵抗	(導体一括)(アース)間	40°C 100% RH 72 h	直偏法による。
5. 交流電流試験	(導体一括)(アース)間	40°C	
6. 絶縁破壊電圧	(導体一括)(アース)間	室温	AC 50Hz, 1kV/s

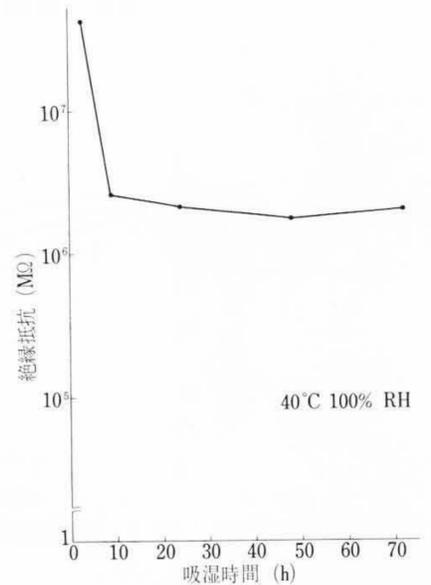


図10 吸湿絶縁抵抗特性

試験法としてはもっとも広く採用されている方法で、IEEE, Pub 275およびIEC, Pub216に示される試験法と同じ試験法である。試料は図6に示す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を採用している。図7はモータレット1サイクルの試験手順であり、これを耐圧チェック電圧で絶縁破壊するまで繰り返す。表2はモータレット試験コイルの特性測定項目を示したものである。試料には初期値測定用、熱劣化温度3点用および熱劣化10サイクル後の残存絶縁破壊電圧測定用をそれぞれ製作した。

次に、F種ハイパクトエポキシ絶縁の特性測定結果を示す。図8は初期コイルのtan δ電圧特性、図9はtan δ<sub>0</sub> (電圧1kVにおけるtan δ値)、Δtan δ(常規電圧のtan δからtan δ<sub>0</sub>を差引いた値)の劣化サイクル特性を、図10は吸湿絶縁抵抗特性を示したものである。tan δ<sub>0</sub>, Δtan δの特性が劣化サイクルに対して一定しており、材質的に熱に安定であり、かつハク離によるボイドの発生もないことを示している。吸湿絶縁抵抗は吸湿72時間後においても10<sup>6</sup>MΩ以上あり、耐湿性がきわめてすぐれていることがわかる。なお、寿命は耐圧チェック電圧において絶縁破壊するまでの時間とし、後述の寿命評価を行なった。

### 3.4 標準実機寿命試験

絶縁組織の寿命を評価する方法としては既述のモータレット試験があるが、この試験においては、劣化要因の熱-振動-吸湿-耐圧をそれぞれ単独に、しかも順次直列に与えるという劣化を行なっている。また、炉加熱のため、実際の機器と温度こう配が異なり実際の機器の運転状態と同等と考えることはできない。そこで、この欠点を補うため、日立製作所独自の方法として、標準実機寿命試験を併用している。図11は寿命試験に供用される標準実

機で110kW 4Pの三相誘導電動機であり、通常の商用試験に引き続いて、図12に示すフローチャートにしたがって寿命試験が実施された。この図のヒートサイクルはモータレット試験に準拠している。表3は標準実機寿命試験における特性測定項目と測定方法を示すものである。

この測定結果をF種ハイパクト絶縁の特性について述べる。まず、図8はtan δ電圧特性を示したもので、この図から標準実機とモータレットコイルはほぼ同等の特性を示している。直入起動時におけるコイルエンド部の振動振幅は絶対値も小さく、劣化前後においてもほぼ不変であり、劣化が起っていないことを表わし

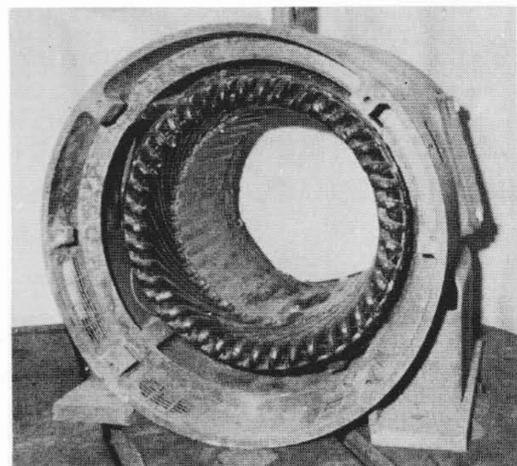


図11 標準実機の固定子

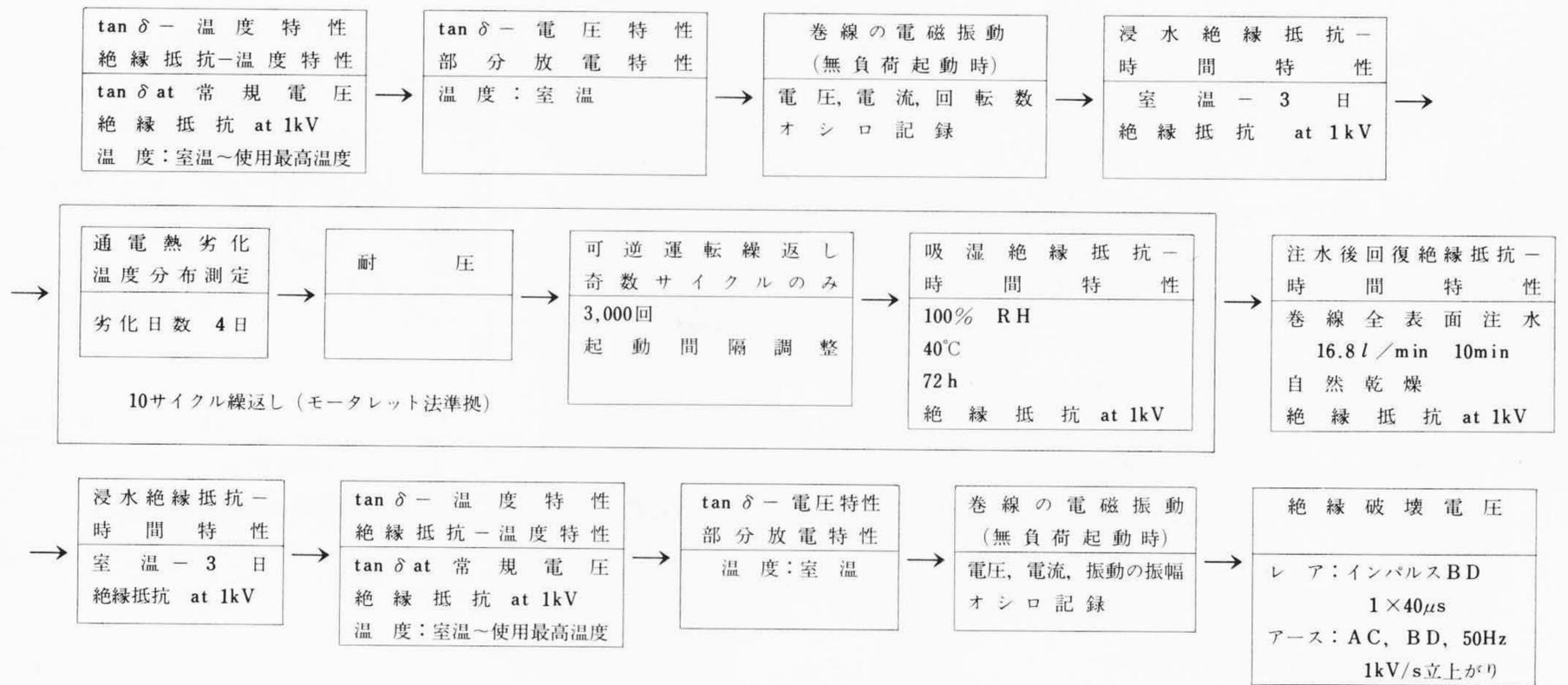


図12 標準実機寿命試験フローチャート

表3 標準実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 δ 温度特性	(三相一括)-(アース)間	室温~使用最高温度	1~7
2. tan δ 電圧特性	(三相一括)-(アース)間	室温	<p>浸水絶縁抵抗および注水回復絶縁抵抗はガード付測定測定器: tan δ : シェーリングブリッジ 絶縁抵抗: 1,000 V メガー 部分放電: 簡易コロナ測定器</p>
3. 絶縁抵抗温度特性	(三相一括)-(アース)間	室温~使用最高温度 1,000 V	
4. 部分放電特性	(三相一括)-(アース)間	室温	8
5. 耐圧	(三相一括)-(アース)間	室温	<p>3相220V 324V, 15.5Aで巻線温度を200°Cに調整, 固定子単独</p>
6. 浸水絶縁抵抗	(三相一括)-(アース)間	室温, 1,000 V	9
7. 注水回復絶縁抵抗	(三相一括)-(アース)間	室温, 1,000 V	<p>起電磁振動測定 起動繰返し IM 直入</p>
8. 通電熱劣化 巻線温度分布	三相交流通電	—	<p>非接触形多素子振動形 (日本測器 K K. 500-P 形)</p>
9. 起動繰返し振動		巻線温度	10
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 1×40 μs AC 50Hz	<p>レアインパルスBD 500V/s昇圧 アースAC, BD 1kV/s昇圧</p>

ている。図13は浸水絶縁抵抗特性であり、劣化後の水位3の位置においても1 MΩ以上の絶縁抵抗があり、従来絶縁の劣化前でも水位3ではただちに絶縁抵抗が0になるのに比較し、きわめてすぐれた特性であることがわかる。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結果であり、常態放置24時間で1,000 MΩ以上に回復している。なお、実機コイルは10サイクルのヒートサイクル完了後においても、耐圧チェック電圧において、絶縁破壊しなかったため、全試験完了後、残存絶縁破壊電圧を測定し、後述の寿命評価を行なった。

### 3.5 拡大モデル試験

小形モデルによる試験結果のみを信じて大形機に適用することは危険である。したがって、大形機への適用にあたっては、実物大のコアにコイルを組み込んで、ヒートサイクル試験を行なう必

要がある。また、電磁力が大きくなるため、電磁力とコイル支持法の関係を計算により求め、十分な安全率であることを実験により確認しているが、試験の詳細などについては省略する。

### 3.6 寿命評価法

絶縁組織の寿命評価には一般に Dakin の式<sup>(4)</sup>(6)が使われている。

$$1 nt = \frac{\alpha}{T} + \beta \dots \dots \dots (6)$$

ここに、

α : 物質定数

β : 初期値と劣化後の物理量の値により決まる定数

(6)を変形し、使用温度と試験温度の範囲内で、活性化エネルギーが変化せず、また劣化率が一定と仮定して(7)式を誘導した。この式と予備試験におけるバーコイルの熱劣化試験、モータレット試験、標準実機寿命試験の結果より寿命推定を行なうことにした。

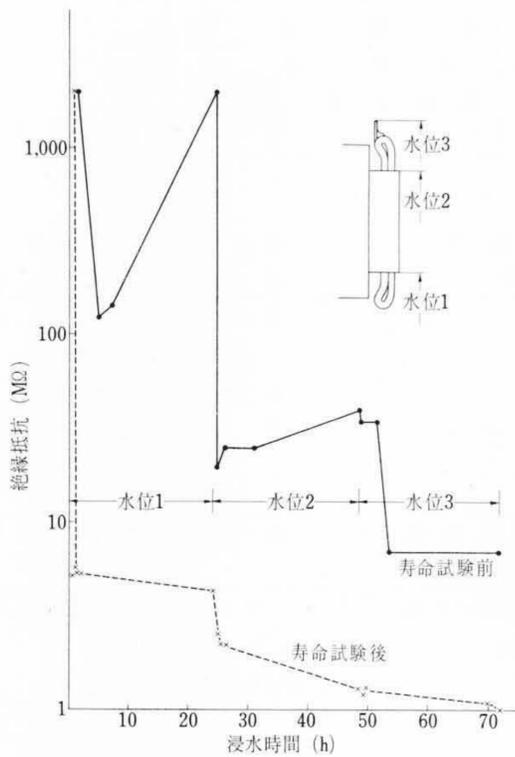


図13 絶縁抵抗-浸水時間特性

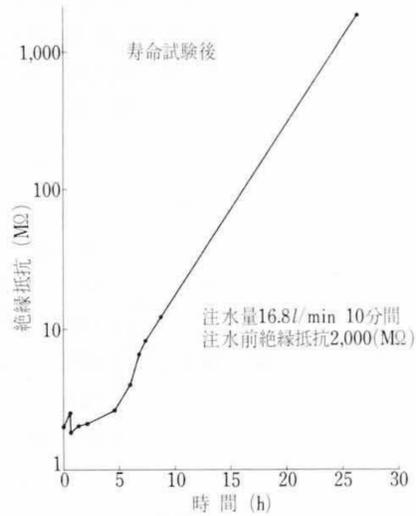


図14 注水後の絶縁抵抗回復特性

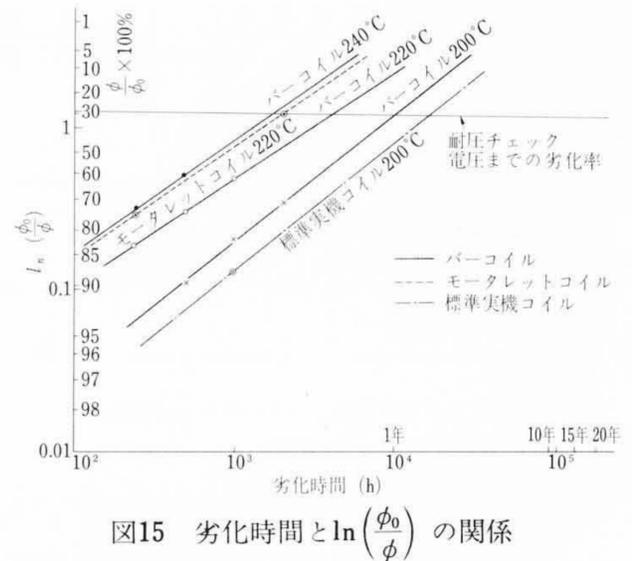


図15 劣化時間と  $\ln(\frac{\phi_0}{\phi})$  の関係

$$\ln(\ln \phi_0 / \phi) = \ln At - E/RT \dots\dots\dots(7)$$

ここに、

- $\phi_0$  : 被測定物の物理量 (絶縁破壊電圧など) の初期値
- $\phi$  : 被測定物の物理量の時間  $t$  後の値
- $A$  : 定数
- $E$  : 活性化エネルギー
- $R$  : 気体定数
- $T$  : 絶対温度
- $t$  : 劣化時間

次に(7)式を使ってF種ハイコンパクトエポキシ絶縁について、寿命推定を行なう。図3に示した予備実験において測定したパーコイルの熱劣化特性の結果を(7)式にしたがって両対数放眼紙にプロットしたものが、図15であり、直線に乗ることがわかる。図中のモータレットに対する直線は10サイクル(240h)後の残存絶縁破壊電圧の初期値に対する劣化率(74%)の点と耐圧チェック電圧(初期値に対する劣化率29%)における破壊までの時間( $2 \times 10^3$ h)の点を結んだものであり、パーコイルの同じ温度の直線に平行になることがわかる。したがって、この方法によればモータレットの10サイクル後の残存絶縁破壊電圧の初期値に対する劣化率を測定し、同一温度のパーコイルの熱劣化特性に平行に直線を引くことにより、耐圧チェック電圧における絶縁破壊までの時間を推定することができる。図15の標準実機コイルの直線はこれを利用し、10サイクル(960h)後の残存破壊電圧の初期値に対する劣化率(87%)の点を通して同じ温度のパーコイルの直線に平行に引いたもので、耐圧チェック電圧において破壊するまでの時間 $1.55 \times 10^4$ hが求められる。

図16の寿命直線はモータレットコイルについては熱劣化温度3点のチェック電圧において破壊した時間 $2.2 \times 10^4$ h(180°C)、 $6.6 \times 10^3$ h(200°C)、 $2 \times 10^3$ h(220°C)を結んだものであり、標準実機コイルについては、図15から求めた $1.55 \times 10^4$ h(200°C)の点を通して、モータレットコイルの寿命直線に平行に引いたものである。図16より従来B種絶縁と比較すると、B種絶縁の130°Cに対して、約165°Cの耐熱性となり、熱的に余裕のある絶縁組織であることが確認された。

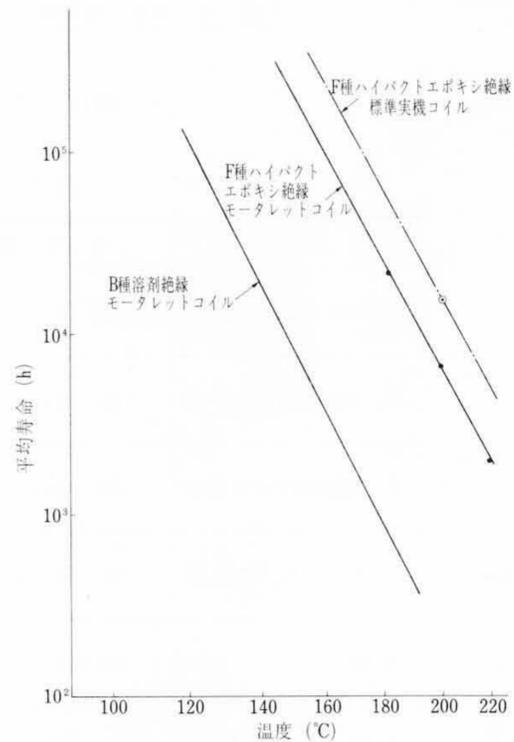


図16 温度寿命直線

#### 4. 結 言

耐熱フィルム材料を使用したF種ハイバクトエポキシ絶縁の開発にあたり、これを合理的かつ迅速ならしめるため、誘導電動機絶縁組織の機能試験法を確立した。これにより、従来よりも短期間で信頼度の高い寿命評価が可能となった。本試験法により、F種ハイバクトエポキシ絶縁の寿命評価を実施したが、従来の絶縁方式と比較し、耐熱的にも、部分放電劣化に対しても非常に余裕のある絶縁組織であることを確認した。

今後は、劣化要因の詳細な分析検討により、さらに信頼度の高い寿命評価を行なうよう努めていく所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) 袴田, 桜沢: 日立評論 52, 119 (昭45-2)
- (2) 立川, 今井, 袴田: 日立評論 52, 980 (昭45-11)
- (3) 電気学会放電専門委員会: 放電ハンドブック (昭33-8)
- (4) 電気学会有機材料劣化専門委員会: 高分子材料の劣化 (昭33-6)