

回転機用絶縁材料及び組織の評価法

Evaluation Method of Insulation Materials and Systems for Rotating Machineries

同期機、誘導電動機などの回転機は大容量化と小形化の方向にあり、コイル絶縁には高電圧化と耐熱区分の上昇があり、使用されるふんい気も多種多様になっている。そのため、コイル絶縁には従来にも増して過酷な条件のもとで長年月にわたって信頼性が要求される。そこで、本稿はこの信頼性評価のための絶縁組織開発試験法の概要と代表的な試験結果について紹介を行なった。試験は、絶縁材料選定試験と絶縁組織選定試験とがあり、これらの試験により絶縁組織を決定する。更に、実機あるいは実機相当モデルで信頼性評価試験を行なうとともに、管理基準を決定して機器の信頼性確保に万全を期している。また、試験結果の定量的な把握や、早期寿命評価法の検討を行ない新しい絶縁組織の開発に対処している。

津久井 勤* Tsukui Tsutomu
門谷 建蔵* Kadotani Kenzô
安芸 文武** Aki Fumitake
袴田 武司** Hakamada Takeshi

1 緒 言

発電機(タービン、水車)、電動機(同期、誘導)、産業用直流機、車両用主電動機などの回転機には大容量化、小形化に対処した高電圧化、耐熱区分の上昇があり、使用されるふんい気も多種多様にわたっている。回転機でのコイル絶縁には、これらに対処した性能が要求される。これらのことから、回転機用コイル絶縁には従来にも増して過酷な条件のもとで、十数年から数十年にも及ぶ長寿命が要求される。そのため回転機絶縁組織の開発に当たっては、上記の性能を保障するための的確な信頼性評価法が必要である。

本稿は、信頼性評価のためのコイル絶縁組織開発試験法の概要並びに代表的な試験法及びその結果について紹介する。

2 信頼性評価のための試験法の概要

回転機コイル絶縁の絶縁組織が、前述のように運転状態で受けるストレス(電氣的、熱的、機械的、環境など)に耐え、長年月の寿命を満たすものでなければならない。そのため、試験法としては図1に示す各段階の試験を実施し、十分信頼性の評価を行なったうえで量産化に移行している。すなわち同表に示したように、まず第一段階として絶縁組織構成材料の選定を行なうが、そのためには個々の材料の選定と、絶縁組織が複合組織であるためこれら各材料の組合せによる適合判定(相性試験と呼んでいる)を行なっている。これは、個々の材料の特性が組合せによって、それぞれの特性より更良くなる場合と、かえって悪くなる場合とがあり、相性試験は複合化に当たって実施する重要な試験の一つである。第二段階は絶縁組織としての信頼性評価を行なうもので、機能評価試験に入る前の絶縁組織の選定を行なっている。機能評価試験は、コイル絶縁が受ける各ストレスのうち個々のストレスを取り出して行なう試験と、各ストレスを直列、あるいは並列にかけて実施する総合的な機能評価試験とがあり、これらの両試験を組み合わせることで劣化要因を的確に把握し、信頼性評価に万全を期している。また、試料形状もモデルによるものから、実機あるいは実機相当の形状を持っているもの、更には適用限界を決めるための拡大モデルについても実施し、形

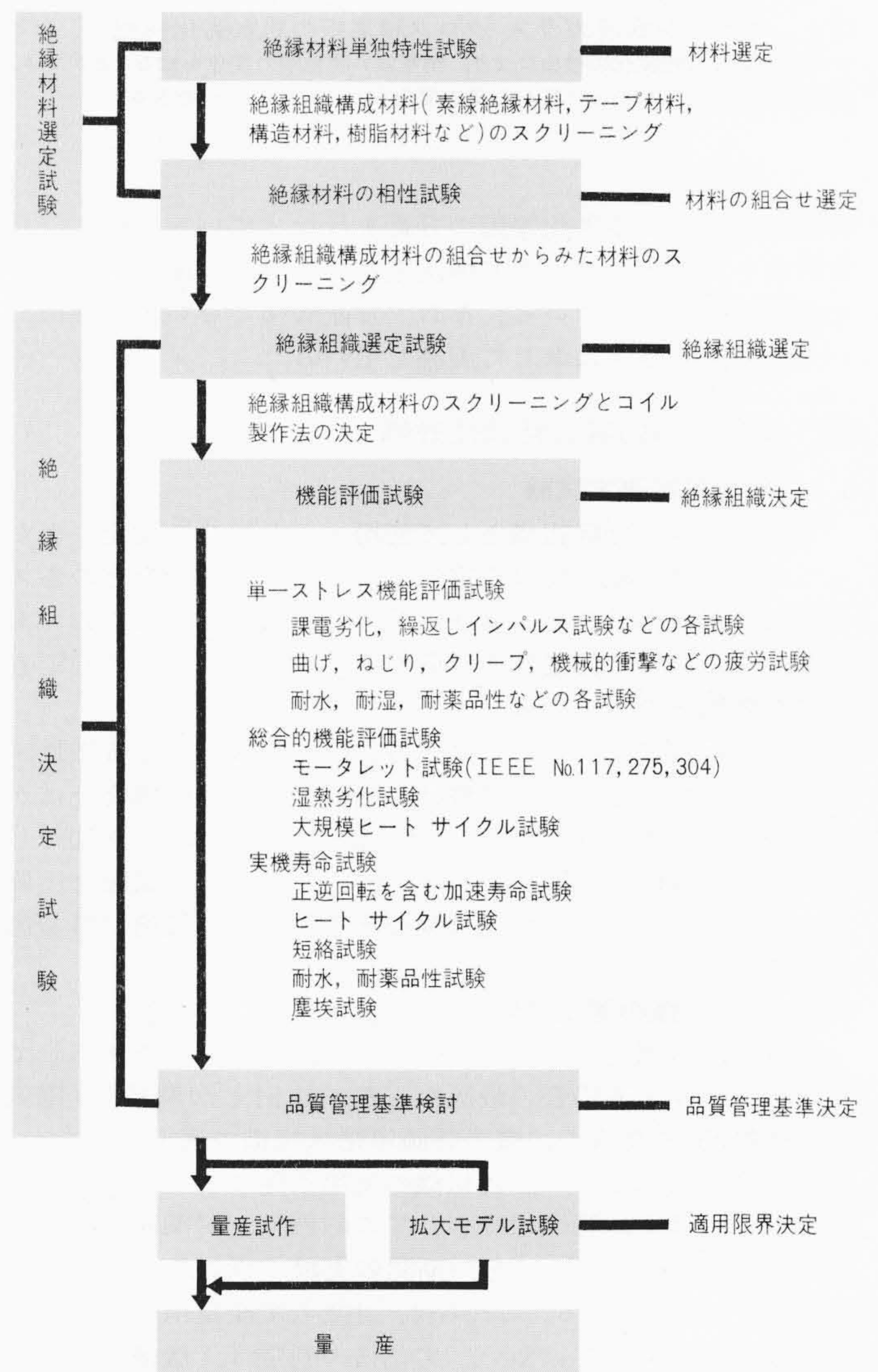


図1 絶縁組織開発試験法 絶縁組織開発のための試験順序を段階的に示す。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場

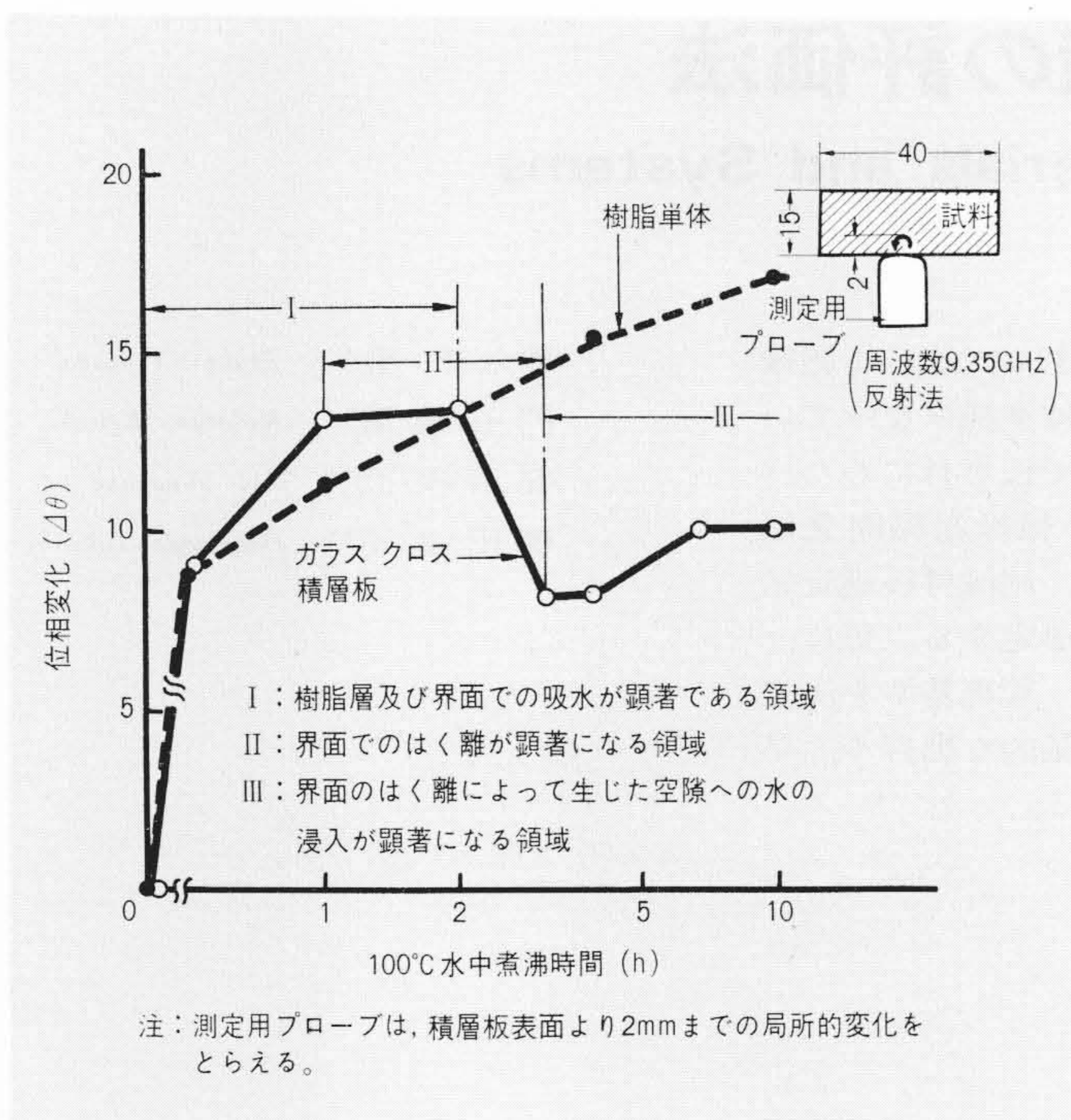


図2 エポキシ含浸ガラス クロス積層板の吸水劣化特性 マイクロ波による位相変化の検出により、誘電体の誘電率の変化を知ることができ、従来法では分からなかったIIからIIIの変化をとらえることができる。

状の違いからくる劣化要因の分析を行なっている。更に、品質管理を実施するための基準決定を行ない、量産試作のうで量産化へ移行している。なお、量産機種でない大形機についても上記試験法に準じて実施している。

3 試験法の内容と信頼性評価

3.1 絶縁材料選定試験

コイル絶縁の絶縁組織として使用する各材料の選定に当たっては、絶縁組織が受ける電氣的、熱的、機械的などの各ストレスに耐え得ることを基準としていることはもちろんであるが、そのほかに作業性や貯蔵安定性、価格面からの判定も重要な要因となっている。

更に、前章で述べたように、各材料の組合せによる相性試験を実施している。この試験は、構成材料相互の組合せばかりでなく、ふんい気の影響(ガス、湿気、薬品など)も加味したガラス封管による熱劣化試験、ヒート サイクル試験を実施している。更に、湿熱劣化試験などを実施して最適材料を選出することになっている。

3.2 絶縁組織の選定試験

構成材料の選定されたものについて、この材料を使用してコイルを製作する場合の最適な工程の検討と初期特性(電氣的、機械的)を把握し、機能評価用絶縁組織の選定を行なう。この選定に当たっては、回転機の使用条件によって、上述の初期特性のほか、絶縁組織としての耐熱性、耐薬品性や耐湿性、更には耐放射線性¹⁾を短期間の実験で検討し、この結果を加味する場合もある。これらは、主として産業用の誘導電動機や大形直流機などに多い。劣化後の判定は、機械強度、電氣的特性としての誘電正接、絶縁抵抗、破壊強度などにより、それぞれの機種の管理基準に沿って行なっている。また、新しい判定法として、構造材などではマイクロ波による方法も取り入れている²⁾。これにより、従来発見できなかった局所的な特性の変化をとらえることができる。その一例を図2に示す。

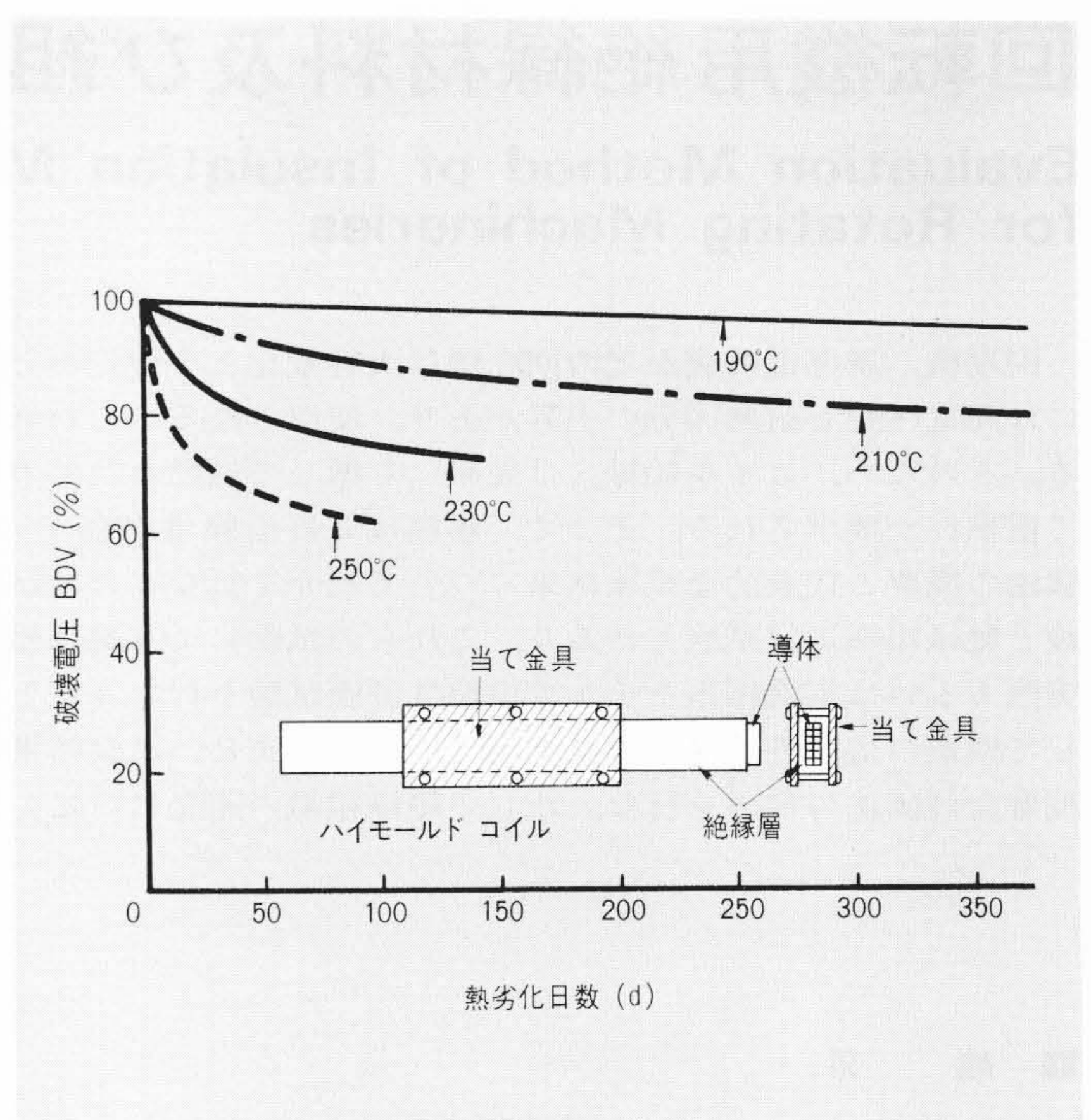


図3 モデル コイルの熱劣化特性 集成マイカ絶縁コイルの熱劣化特性の一例を示したもので、190°C以下の温度では破壊電圧の低下はほとんど見られなくなる。

同図は材料の吸水劣化に伴う位相(マイクロ波の入射波と反射波の位相差)の変化を示したもので、正の変化は誘電率の増加に対応している²⁾。図示のように積層板の劣化過程をマイクロ波の利用でよくとらえることができるが、従来法による誘電率の測定では平均的な測定であるため、同図の樹脂単体の結果とほとんど変わらない傾向を示し、IIからIIIのような変化はとらえにくい。

このマイクロ波の利用により汎用の樹脂固形物(フィラー入りなど含む)、ガラス積層物などの熱劣化時の特性変化や、絶縁層内の異物及びボイドの検出、更には樹脂充てん量の判定などにも有効である²⁾。

3.3 機能評価試験

2.で述べたように、機能評価試験としては、単一ストレス機能評価試験と総合的な機能評価試験とがある。次にこれらの代表的な試験法と試験結果について紹介する。

3.3.1 単一ストレスによる機能評価試験

(1) 熱劣化試験

回転機がE種やB種のほかにF種やH種で使用されるようになると、耐熱性の評価は従来にも増して重要なものとなる。図3、4にその一例を示す。実験はモデル スロットに入れ、恒温槽内で行なったもので、図3は破壊電圧の経日変化を示すものである。このような特性から、温度及び時間に対して破壊電圧の低下する特性をとらえ、理論式への当てはめを行なっている。その結果から、使用温度下で破壊電圧が50%に低下するまでの熱劣化日数を推定し、それを寿命としている⁷⁾。

(2) 課電劣化試験

コイル絶縁の課電による劣化は、常規の状態が高電圧が課電される機種はもちろんのこと、系統の保護に用いる真空しゃ断器などからのサージの侵入がみられる誘導電動機などでは、繰返しインパルスによる電圧劣化に対してもその信頼性を検討しておく必要がある。図4に交流課電による課電劣化特性を示す。

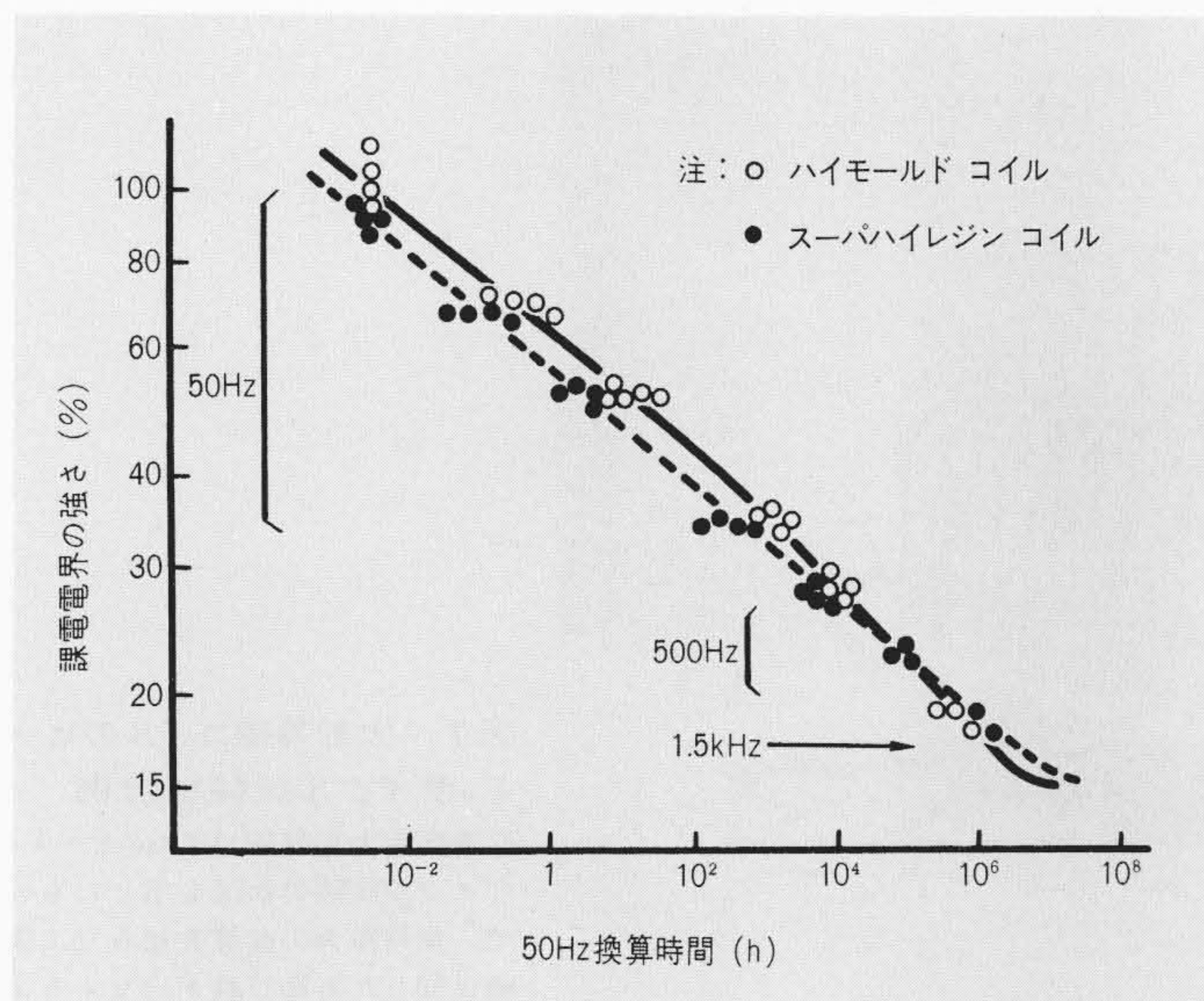


図4 モデル コイルの課電劣化特性 マイカ構成の違ったモデルコイルによる課電劣化特性を示したもので、これらの特性より使用電界の強さに対して寿命推定を行なう。

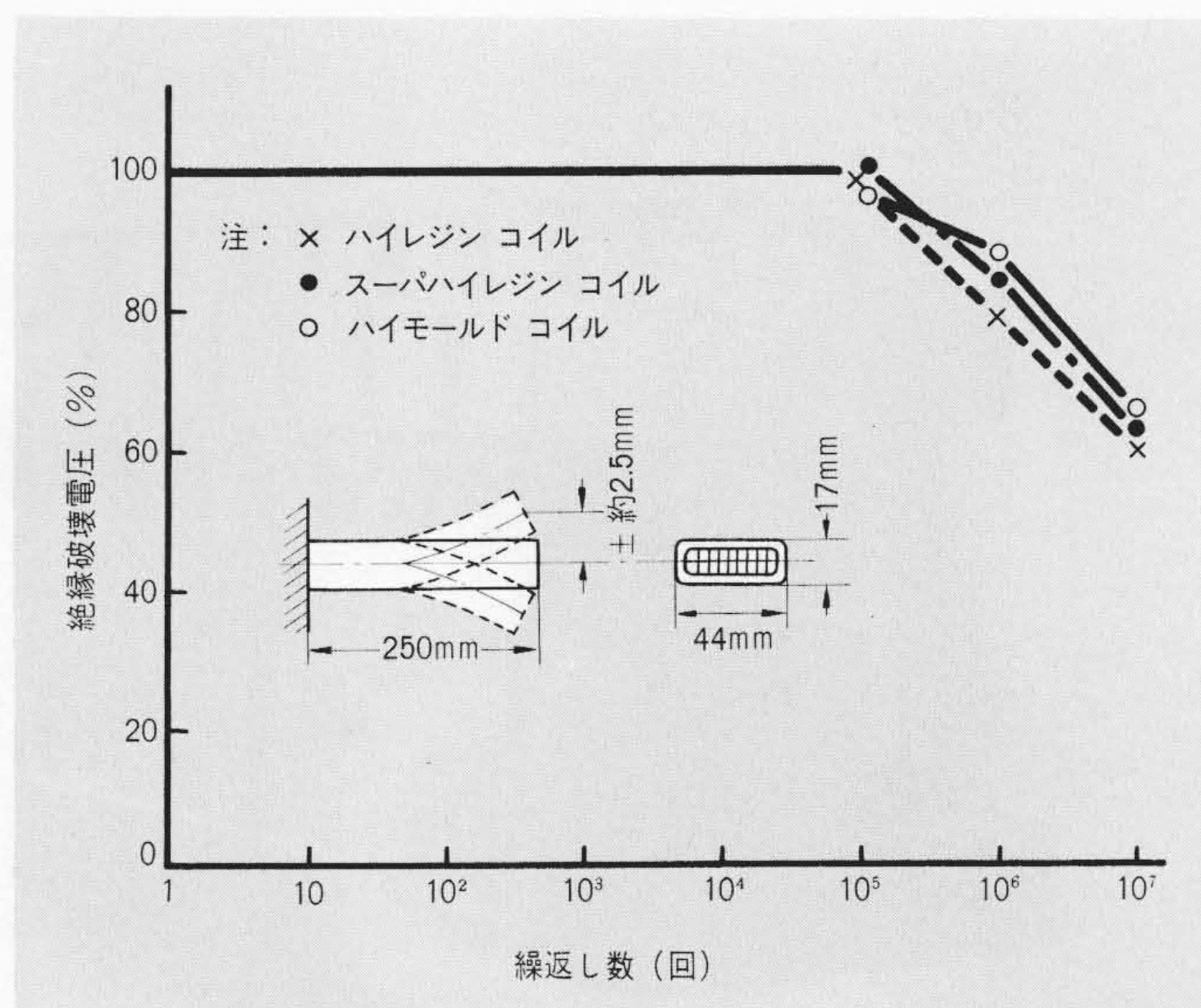


図5 バー コイルの曲げ疲労特性 一連の機械的疲労試験の一環として曲げ疲労試験を行っており、発電電動機などの起動時の応力に対して、従来の絶縁組織と比較して寿命を判断している。

課電劣化特性については常温、高温両方の特性を検討し、これらの特性より、使用電界の強さ、あるいは許容サージ電圧に対しての寿命推定を行なっている。

(3) 機械的疲労試験

系統事故時に発生する異常応力、起動時にみられる応力に対しては、初期及び熱劣化後の曲げ、ねじり、衝撃ねじりなどの試験を実施しており、更に長期寿命試験としては、コイルの曲げ疲労試験を実施している。その一例を図5に示す。同図から発電電動機などの1回起動/日の場合、必要な繰返し数に対して破壊電圧の低下がどの程度かを従来の絶縁組織と比較して寿命を判断している。

3.3.2 総合的機能評価試験

総合的な機能評価試験は、対象機種によってその方法が異なるが、それぞれの機種でIEEE(米国電気電子学会)などの試験法に準拠しながらも日立製作所独自の方法を検討している。例えば、直流機の電機子は回転子に組み込まれるため、

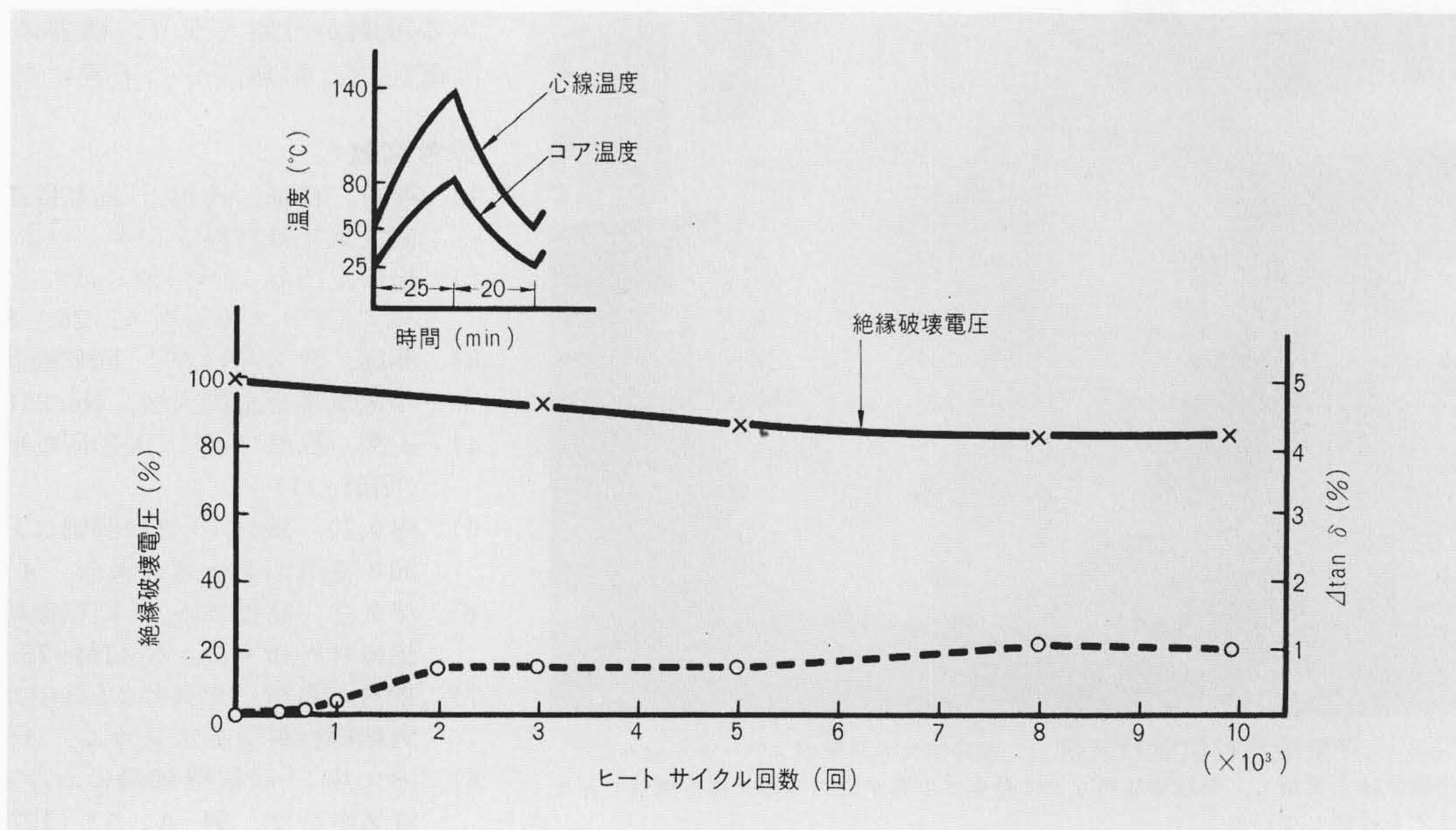
これを模擬した正逆回転を行なわせる方法の検討や、電動機のふんい気を考慮した湿気中のヒート サイクル試験³⁾の試みを実施するなど、実機により適合した機能評価試験法の開発研究も行なっている。更に、大容量機では、実物大モデルコイルで通電によるヒート サイクル試験を含む総合的な評価試験⁴⁾を実施している。一例として、他に例のない発電機用固定子コイルの約1万回に及ぶヒート サイクル試験を実施しており、結果の一例として電気的特性の変化を図6に示す。同図は13.3kV級、4.5mコイルの例であるが、10m級のコイルについても実施し、絶縁層に割れや、ずれがほとんどみられないことを確認している。また、界磁コイルのヒート サイクル試験状況を図7に示す。

3.4 実機寿命試験

汎用電動機や産業用電動機などでは、前節までに述べた機能評価試験から選んだ絶縁組織を組み込んで、実機あるいは実機大モデルを使用して加速寿命試験を実施している。

図6 ヒート サイクル試験による電気的特性の変化

13.3kV級、4.5mハーフ コイルでの約1万回に及ぶヒート サイクル試験の結果を示したもので電気的特性の低下も少なく絶縁層の割れやずれの少ないことを確認している。



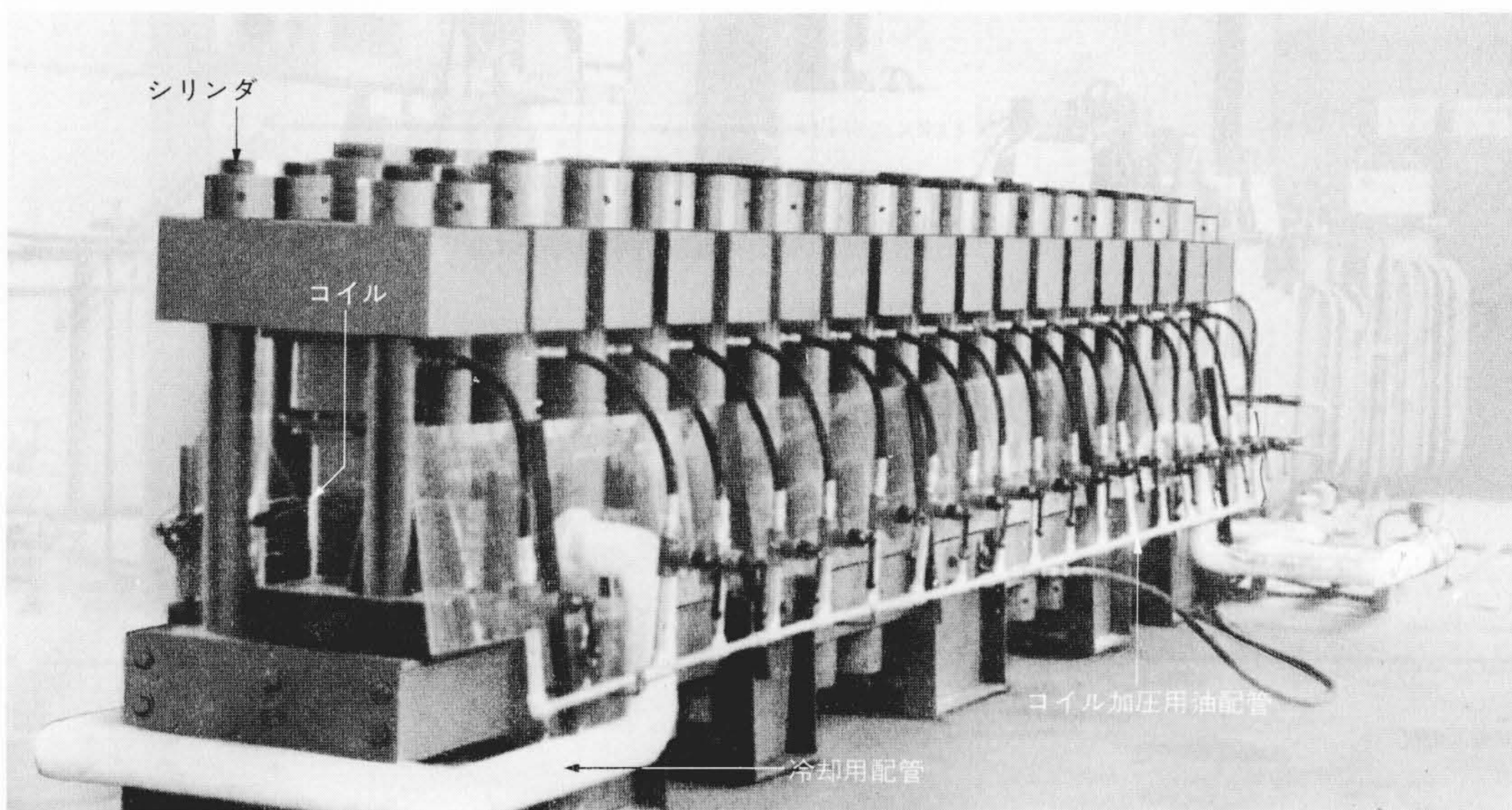


図7 大形界磁コイルのヒートサイクル試験状況例
発電機用大形界磁コイルのヒートサイクル試験の状況を示したもので、実規模大の装置を組み立て実機に即した寿命試験が行なえるようになっている。

この試験は、前節までに述べた機能評価試験結果と対応させることと、使用状態での環境を模擬した過酷な状態で正逆運転を含む過負荷試験を実施することを目的にしている。

大容量機では、実機大モデルを組み立てて、その特性把握を行なうとともに、前節で述べてきたモデルによる機能評価試験を併せ、実績のある絶縁との比較によって決めている。短絡試験に用いる実機大モデルを図8に示す。

4 信頼性評価の動向

高性能な絶縁組織の開発を早期に図っていくために、簡便で効果的な材料のスクリーニング試験法の検討、実機と等価性の良い機能評価試験法の開発、試験結果の定量的な把握などに主眼点を置いて検討を続けている。これには、試験法を開発する一方、破壊特性にはばらつきがあるので、このばらつきの処理法⁵⁾をも含めて検討することが必要である。

上述の目的を達成するため、まず長時間にわたる課電劣化、

熱劣化、あるいはヒートサイクルなどの劣化特性を求め、その劣化のパターンを把握すること、同時に同一条件での試料を増して特性値のばらつきがどのような確率分布に適合するか、またそれが時間経過によってどのように変化するかなどを的確に把握する^{6),7)}ことの両面から寿命推定の定量化が可能となる。

更に、課電劣化特性による寿命を $V-t$ 特性から求めるよりも、課電劣化後の残存短時間破壊電圧の低下度合を利用して求めるほうが短期間で求められる⁸⁾といった早期寿命評価法の検討も進めている。

最終的には実機による試験結果と比較し、等価性を確認したうえで決めることになるが、上述の寿命推定の定量化、実験期間の短縮化の方向で新しい機能評価試験法の提案を行なっている。

5 結 言

回転機の新しい絶縁組織を開発するための試験法及び試験結果の一例について紹介した。

最近では、長期寿命試験が行なわれるようになり、劣化のパターンが明確化してきたことから、従来にも増して信頼性のある評価が可能となり、機器の大容量化、小形化に対処した高電圧化、耐熱区分の上昇に対処できるようになってきた。

参考文献

- 1) 保月, 松延, 袴田:「回転機用絶縁線輪の放射線劣化」, 第7回電気絶縁材料シンポジウム, IV-16 (昭49-9)
- 2) 梅田, 門谷:「マイクロ波によるプラスチック複合材の新評価法」, プラスチックス, 26, 8 (1975)
- 3) 藤岡, 津久井ほか:「回転機巻線の新機能評価試験」, 昭和49年電気学会全国大会, No. 251 (昭49-4)
- 4) 安芸, 松延ほか:「大形回転機絶縁の動向」日立評論, 58, 865 (昭51-11)
- 5) 津久井, 磯貝:「絶縁評価における統計処理の問題点」, 昭和50年電気四学会連合大会, 4・2 回転機 (昭50-11)
- 6) 津久井, 高橋ほか:「回転機絶縁の課電劣化特性」, 電気学会絶縁材料研究会, No. IM-75-5 (1975-1)
- 7) 東村, 高村, 津久井:「高圧コイルの熱劣化特性」, 第9回電気絶縁材料シンポジウム, I-9 (昭51-9)
- 8) 津久井:「回転機絶縁における課電劣化寿命の早期推定法」, 電気学会誌, 94-A, 12 (1974-12)

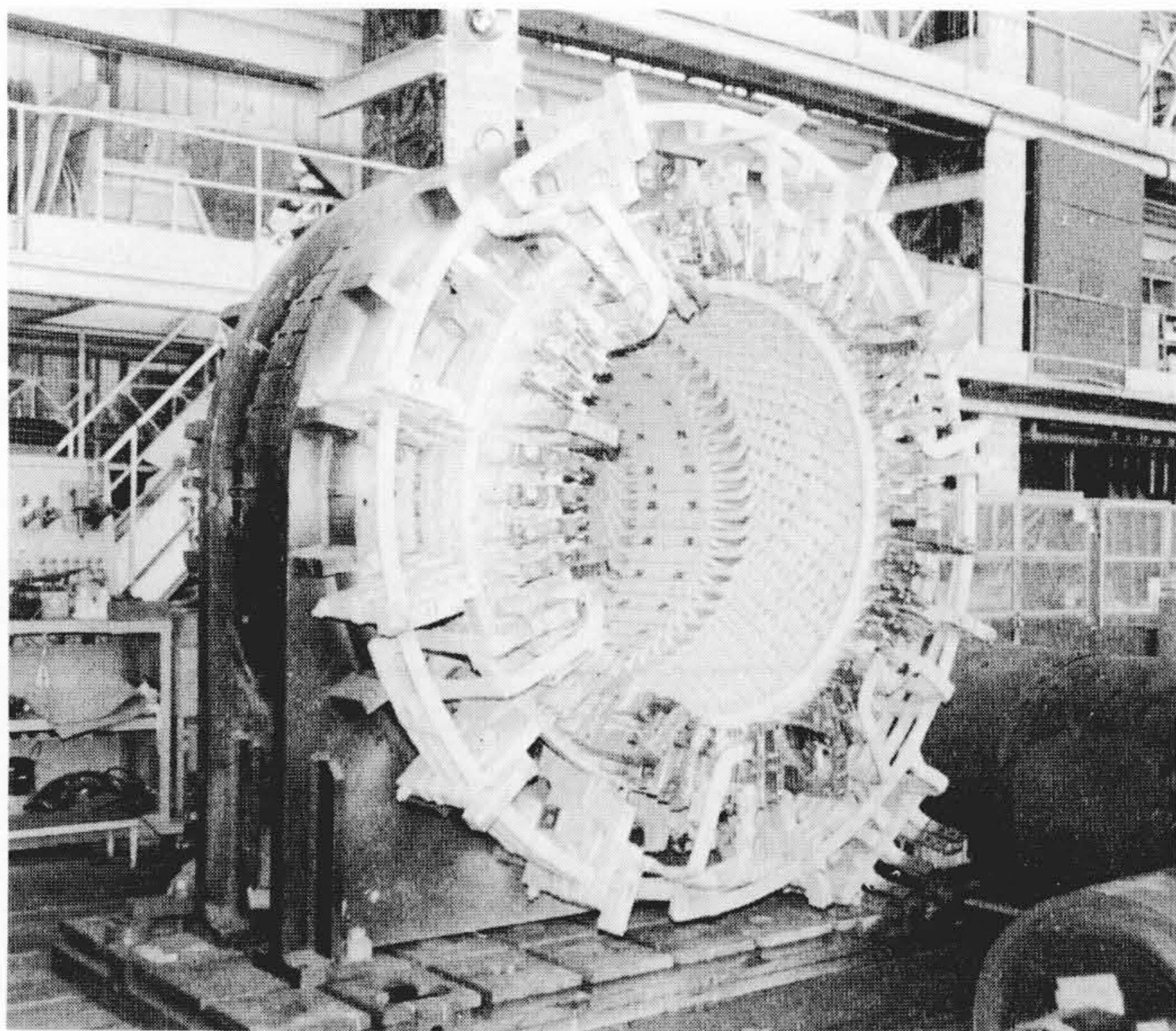


図8 発電機短絡試験状況例 実規模大の発電機ステータを組み立て、短絡試験を実施し、系統事故時などで発生する異常応力に耐え得る構造であることを確認している。