

大形発電機用固定子コイルのエポキシレジン絶縁方式

Epoxy Insulating System for Stator Coils of Large Alternating Current Generator

安 芸 文 武* 松 延 謙 次* 兼 子 慶 市**
Fumitake Aki Kenji Matsunobe Keiichi Kaneko
芝 田 信 雄** 向 井 淳 二**
Nobuo Shibata Junji Mukai

要 旨

最近新しく開発されたエポキシレジンを用いた高電圧固定子コイルの特性を種々検討し、従来の不飽和ポリエステルコイルと比較してすぐれていることを確認したので実機に適用した。本論文ではおもにこれらの特性についての試験結果を述べている。

1. 緒 言

大形発電機用高電圧固定子コイルは、起動停止の繰返しに対するヒートサイクル特性、温度上昇による熱劣化特性、振動、短絡などに対する機械的特性などに対して長い期間にわたって安定した特性を維持しなければならない。信頼性の高い固定子コイルを製作するために国内外のメーカーは合成樹脂を用いた絶縁方式を採用してきた。

日立製作所においても昭和24年来の研究の結果、不飽和ポリエステルによる絶縁方式のSLSコイルを完成し昭和32年以来大形発電機に適用してすぐれた実績を得てきた⁽¹⁾。一方早くからエポキシレジン⁽²⁾の電気的、機械的特性のすぐれていることに着目し試作検討を続けた結果、従来のSLSコイルとほぼ同一の工程で品質の一段とすぐれたエポキシコイルを量産化することに成功した。ここにその性能を紹介しご参考に供したいと考える。

なお、本論文では新たに開発実用化している「日立製作所のエポキシレジン」を単に「エポキシレジン」と称することにする。

2. コイル含浸用レジン

含浸用レジン⁽³⁾の性能は真空含浸を行なうときに問題となる粘度やポットライフ（使用可能時間）などに伴う作業上の問題点と、硬化時の収縮率および硬化後の電気的、機械的、熱的特性などを総合的に評価して判断しなければならない。芳香族系、脂環系、脂肪族系などの多種のエポキシレジンと各種硬化剤を組み合わせる広範囲な組成検討を行ない要求特性を満足するジグリシジルエーテル形エポキシレジンと無水酸硬化剤の組成を見出した。表1はエポキシレジン⁽⁴⁾の基本特性を示したものである。特長は低粘度で、真空含浸作業

が容易に行なわれること、収縮率が小さいこと、抗張力が大きいこと、加熱減量が少ないことなどである。また図1に示したように接着強さが非常に大きいことも特長である。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、耐熱性を向上させた大きな要因であると考えられる。図2、3に硬化レジン⁽⁵⁾の誘電特性を示した。誘電特性についていえば、エポキシレジン⁽⁶⁾はSLSレジンより若干すぐれている。最近重視されるようになって

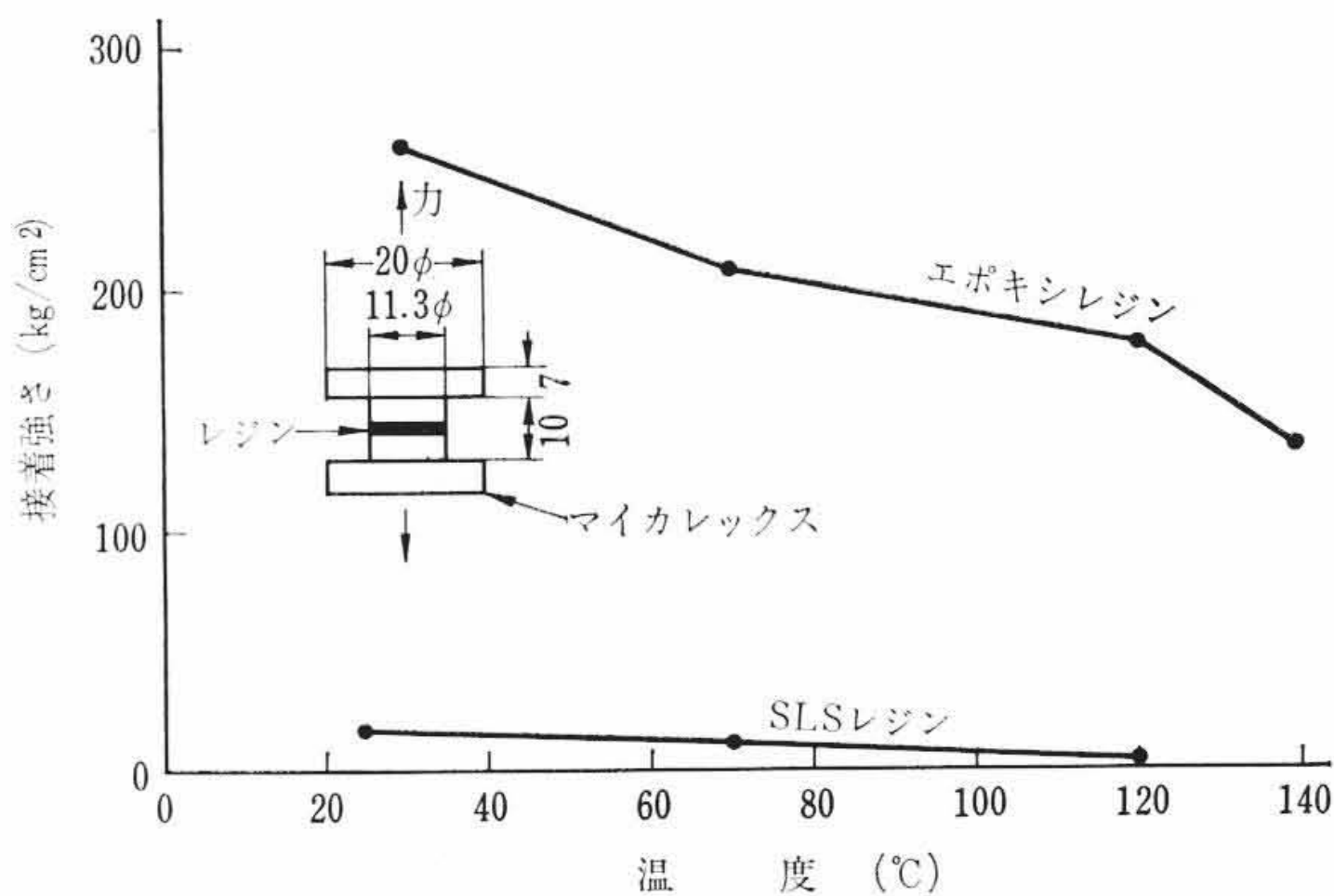


図1 レジンの接着強さ

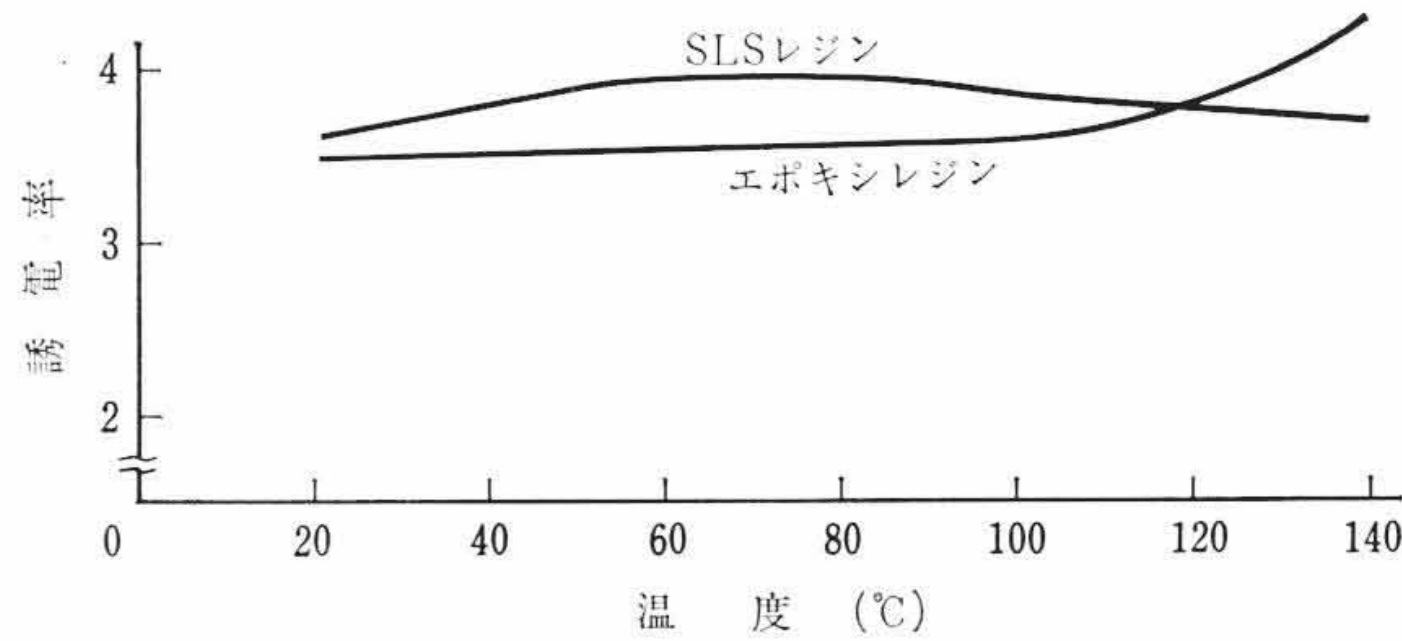


図2 硬化レジン⁽⁵⁾の誘電率特性

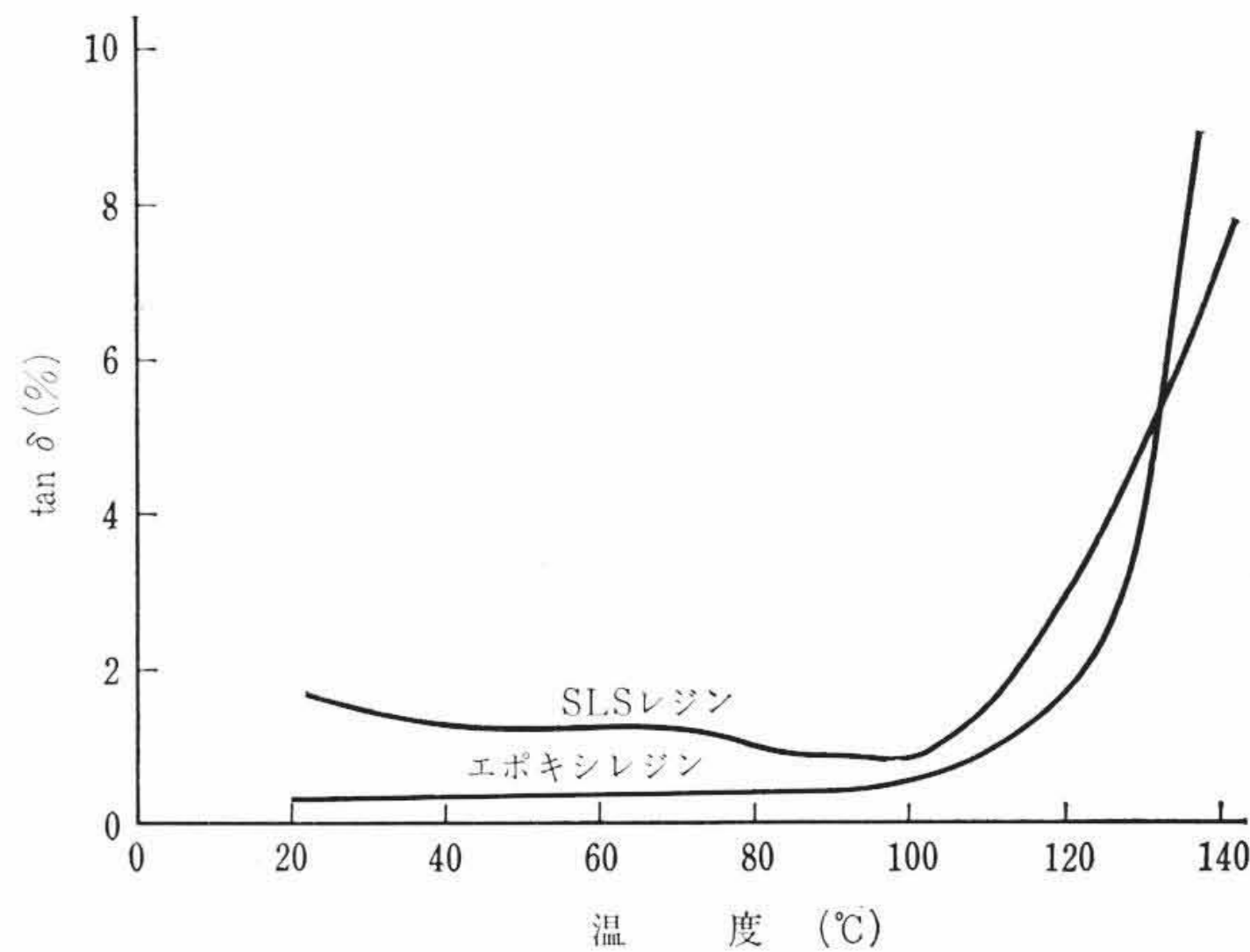


図3 硬化レジン⁽⁵⁾のtan δ特性

表1 レジンの特性

				単 位	エポキシレジン	SLSレジン
レジン		粘 度 25℃		ポ イ ズ	2.0	1.3
		比 重 25℃			1.2	1.1
硬 化 レジン	機 械 的 特 性	収 縮 率		%	3.9	7.2
		抗 張 力	100℃	kg/cm ²	350	232
			120℃		215	63
		伸 び	100℃	%	10	15
		加熱減量	165℃ 40日	%	0.5	4.2
		電 氣 的 特 性	tan δ	100℃	%	0.6
	ρ		100℃	Ω cm	10 ¹⁵	10 ¹⁶

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所

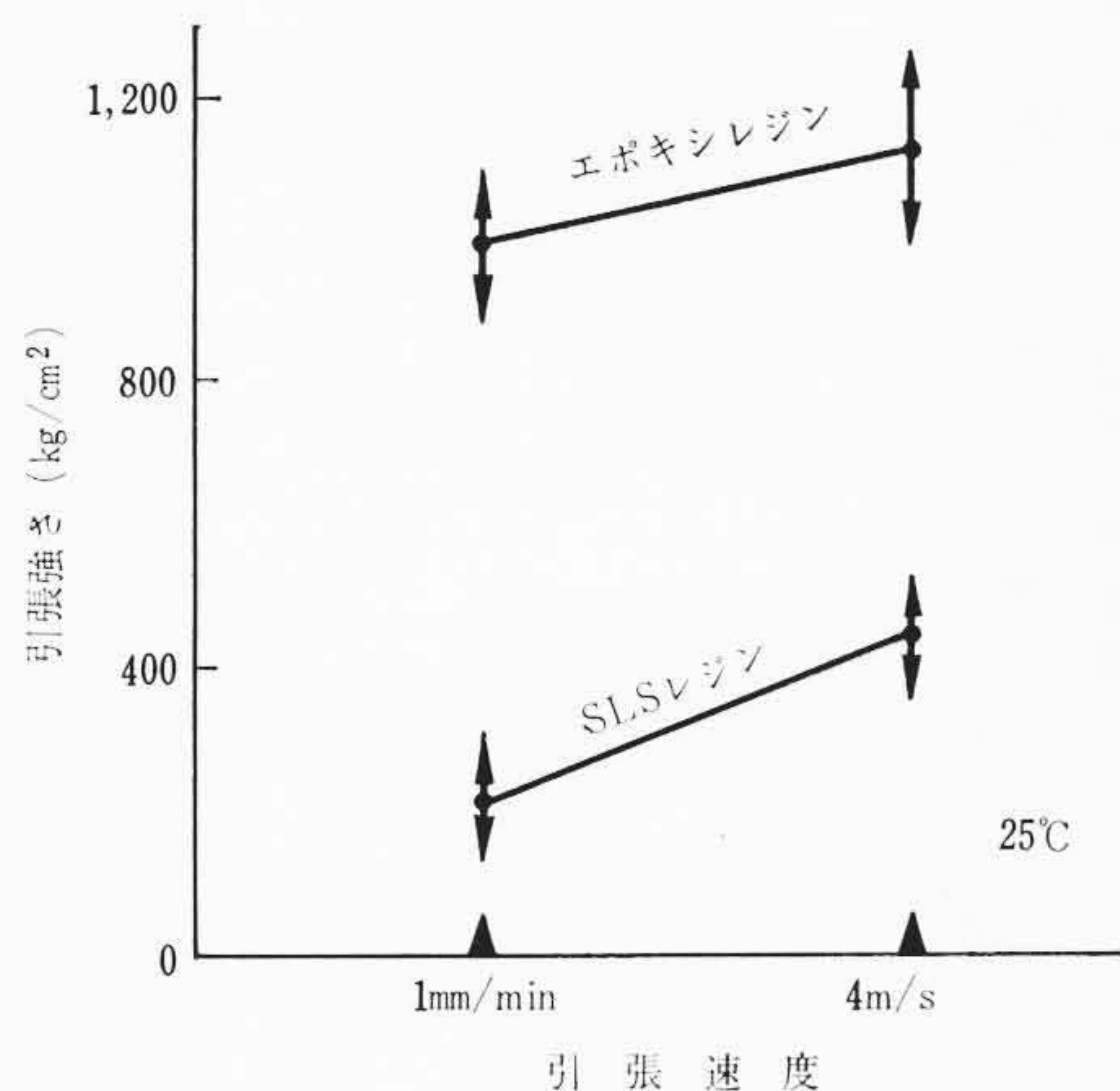


図4 硬化レジンの高速引張特性

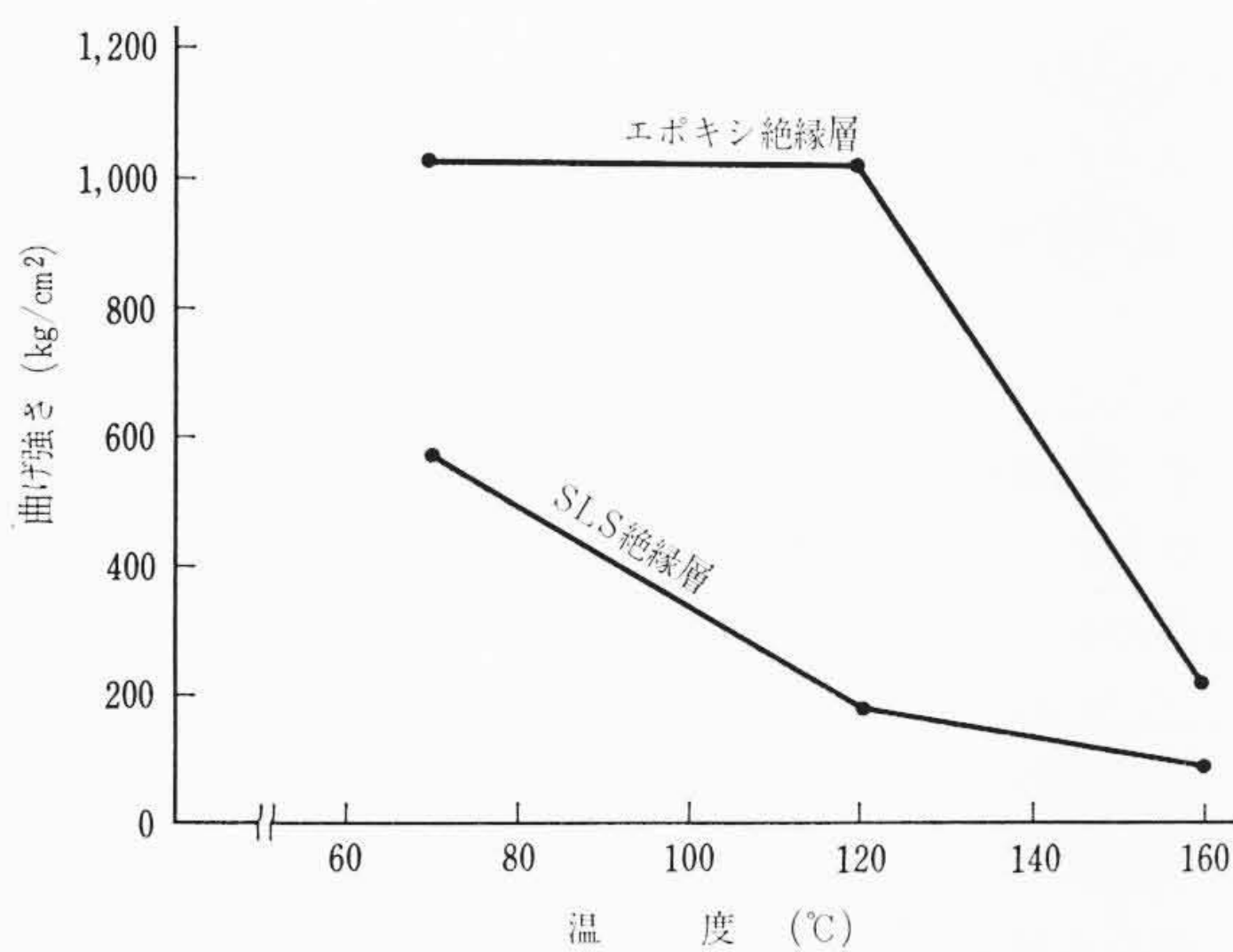


図5 絶縁層の曲げ強さ特性

きた高速引張試験については図4に示すとおりである。一般に硬質のレジンには衝撃に対して弱いと考えられるが、発電機の短絡事故などで発生する衝撃力に対してはエポキシレジンには十分な強度を有していることがわかる。

3. 絶縁層の特性

前述のようにすぐれたレジンを使用しているのので、これを真空含浸して成形された絶縁層は強じんで、高温時にもその特性がすぐれている。

マイカ片を含む絶縁層単独の機械的特性は試料のサイズや試料片の加工方法および測定の方法によって異なった値を示すのが普通であるが、同一条件で試験を行えば、各種の構成材料の適正さを判定する目安とすることができる。

図5は曲げ強さの温度特性を示したものであるが、接着強さの大きいことと、耐熱性の良いことからエポキシ絶縁層は通常の運転状態における温度で大きな強度を保つことがわかる。また図6に示すへき開力の温度特性からも、接着強さの大きいことがわかる。

4. コイルの製作法

コイル素線には日立電線株式会社のローロスアスベスト被覆線またはマイカテープを半重ね巻きした銅線を使用する。必要数の素線を一体に固めてその上にアース絶縁を施す。これにはマイカテープを半重ね巻きで所要回数巻きつけ、最外層に保護のためのガラステープを巻いてある。テーピングが終わったコイルは高温で減圧してコイル絶縁層の中に含まれてい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

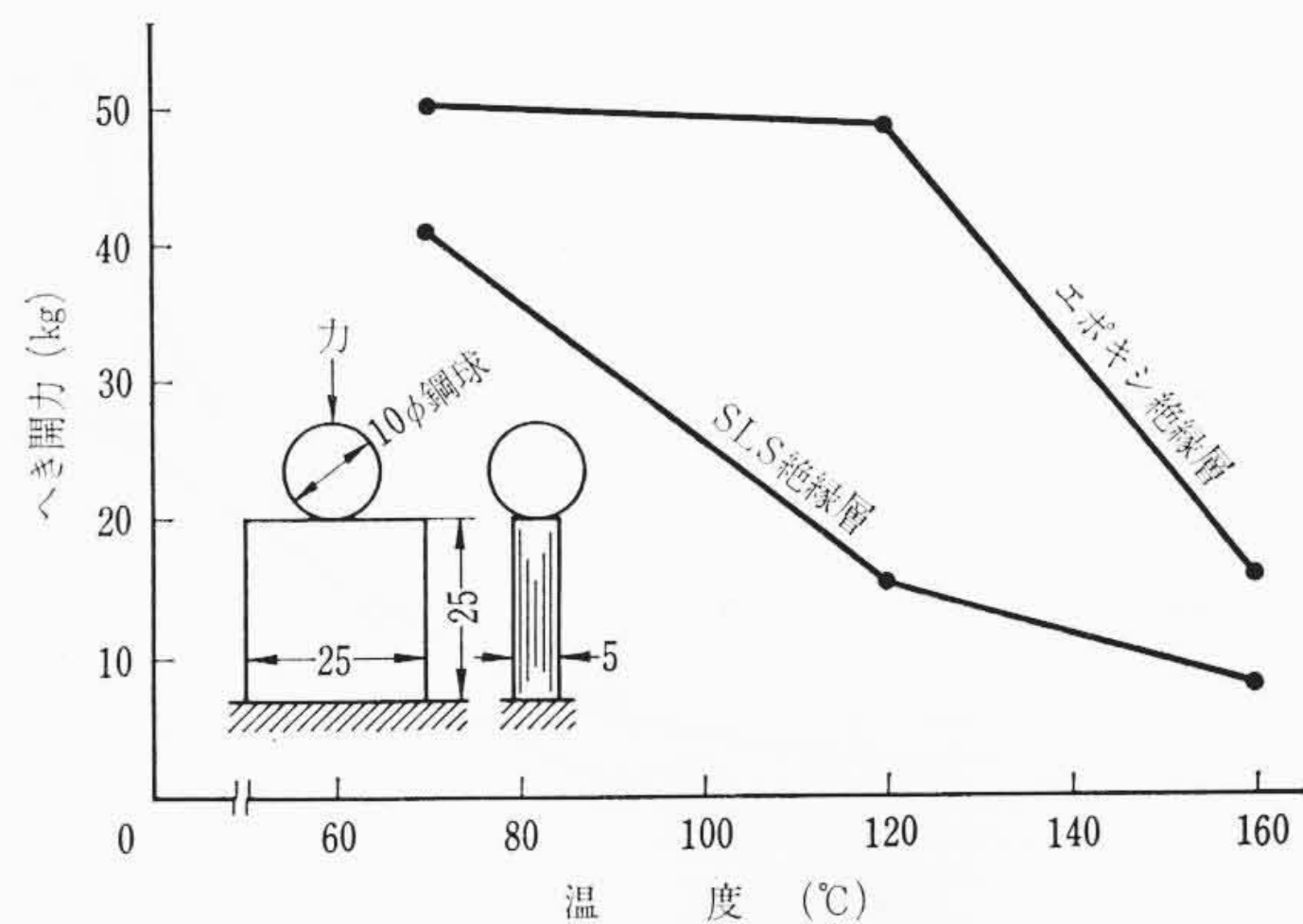
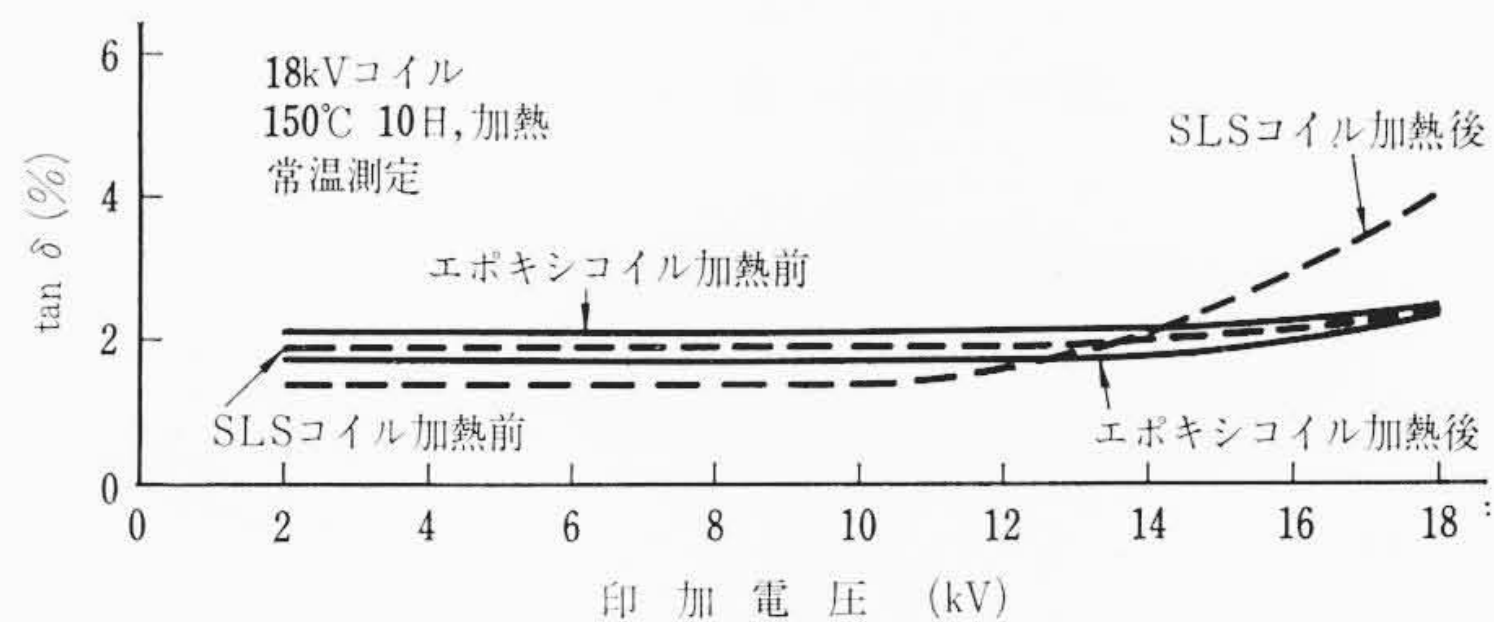


図6 絶縁層のへき開力特性

図7 $\tan \delta$ -電圧特性

圧して絶縁層内部の微小な間隔のすみずみまで完全にレジンを含浸させる。このとき使用するレジンのポットライフを長くするためにこの操作はすべて室温付近の低温度で行なわれる。十分レジンが含浸されたコイルは含浸タンクより取り出して加熱硬化させて、レジンの重合反応を行なわせる。かくて完全に一体となった強固なコイル絶縁層が完成する。これらの真空乾燥工程、含浸圧入工程、加熱硬化工程については従来のSLSコイル製作の条件を参考として決定されたもので、温度、真空度、圧力、時間などすべて最適条件が採用されている。硬化の終了したコイルにはコロナ防止用の特殊処理を施し、かつコイルエンド部分には仕上ワニスを塗布して完成する。その後に品質管理のために寸法測定、誘電正接-電圧特性などがチェックされ、全数耐電圧試験を実施する。このように日立製作所ではエポキシレジンの欠点であるポットライフを長くするようにSLSコイルとまったく同一の設備、製法を採用している。

5. コイルの特性

コイル絶縁の性能評価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、一般的には初期におけるコイルの誘電正接-電圧特性、交流電流特性、絶縁抵抗特性、コロナ特性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。しかしコイルの性能および劣化の特性をさらに実際の劣化状態に近づけ、かつ短時間で長期間の劣化を模擬するために種々の試験が行なわれる。日立製作所においても強制加熱劣化試験および実際の運転状態を模擬した過酷なヒートサイクル試験などを実施している。

コイルについて各項目ごとに試験結果を述べる。

5.1 誘電正接特性

図7は18kV定格コイルの誘電正接-電圧特性の一例である。従来のコンパウンド絶縁コイルに比べるとSLSコイルは格段の特性向上を示してきているが、エポキシコイルはさらにすぐれている。どちらにしても常規電圧（運転状態の最高電圧）までは電圧上昇に基づく誘電正接値の増加がみられず絶縁層内部のボイドがほとんどないことを意味している。

図8には誘電正接-温度特性の測定結果を示した。どちらも温度

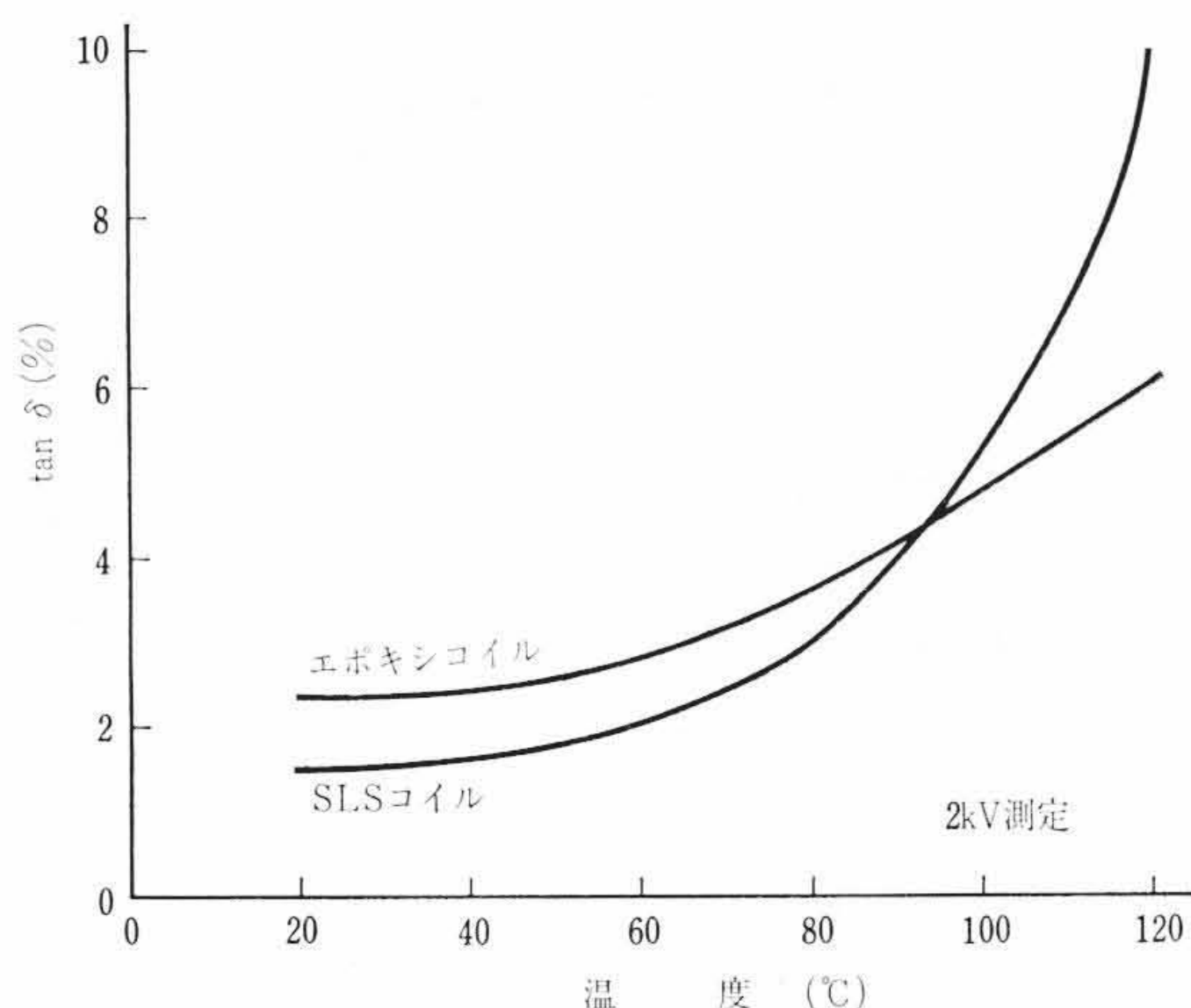


図8 $\tan \delta$ -温度特性

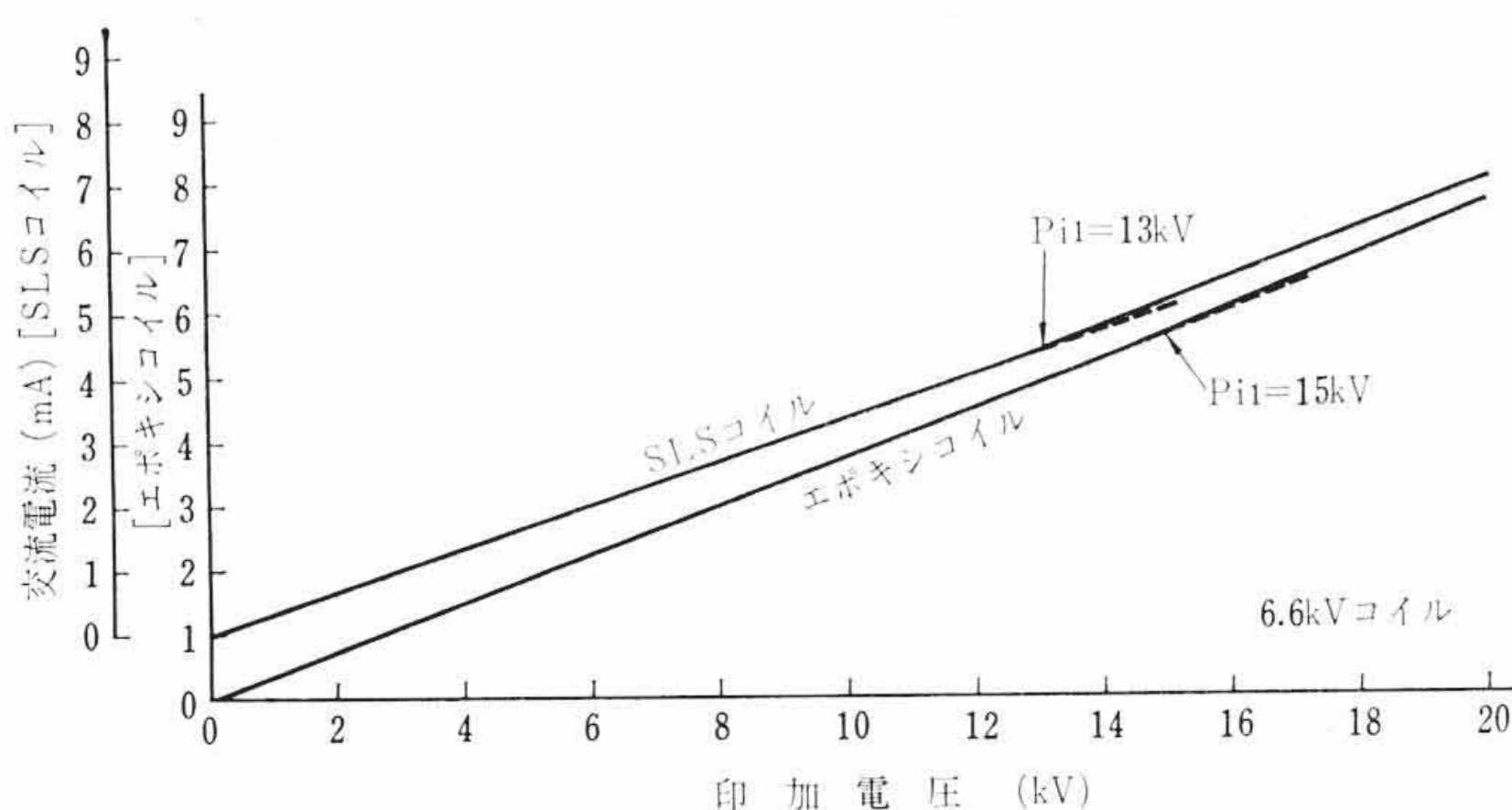


図9 交流電流特性

に対する変化が少なく良好である。実際の運転温度に相当する100℃前後ではほぼ同じ特性を示しているが、120℃付近ではエポキシコイルのほうが良好となる。これは耐熱性が良いことに起因していると考えられる。

5.2 交流電流特性

非破壊試験において絶縁破壊電圧を推定できる試験法として交流電流試験が最近広く用いられるようになったが、新製コイルの場合には絶縁層がち密であり孤立したボイド群が存在しても橋絡することが少なく、また絶縁破壊電圧が非常に高いため推定破壊電圧の $1/\alpha=1/2.4$ (α =破壊電圧/第2次電流急増点)⁽²⁾の印加電圧も非常に高くなり単独コイルにおいてはエンド部分が裸のため所定の電圧印加がむずかしく第2次電流急増点(Pi_2)が得られないのが普通である。3×(定格電圧)まで印加した場合の交流電流試験の一例を図9に示したが、 Pi_2 は出現せず、充電特性ではエポキシコイルはSLSコイルと同様に特性良好と考えられる。

5.3 熱劣化特性

長期間の連続運転によりコイル絶縁層が劣化してくることは当然であるが、実際の場合には劣化の原因となる因子は非常に多く簡単には再現試験ができない。通常はその最も大きな要因を占めると考えられる熱劣化試験、繰返し熱膨張による機械的劣化試験としてのヒートサイクル試験、機械の振動に基づく振動疲労試験などが実施され、試験条件を過酷にし従来の実績ある安定した材料を用いたコイルとその優劣を比較検討するのが普通である。

そこで固定子コイルについて150℃、10日間の強制加熱試験を行った結果を図7に併記した。誘電正接特性の変化はエポキシコイルのほうがSLSコイルよりも小さいことがわかる。これはレジンの加熱減量が小さいことからわかるように耐熱性ではエポキシレジンのほうが良好であることからもうなずけることである。

130℃から180℃の範囲で1年以上に及ぶ長期的な熱劣化も実施

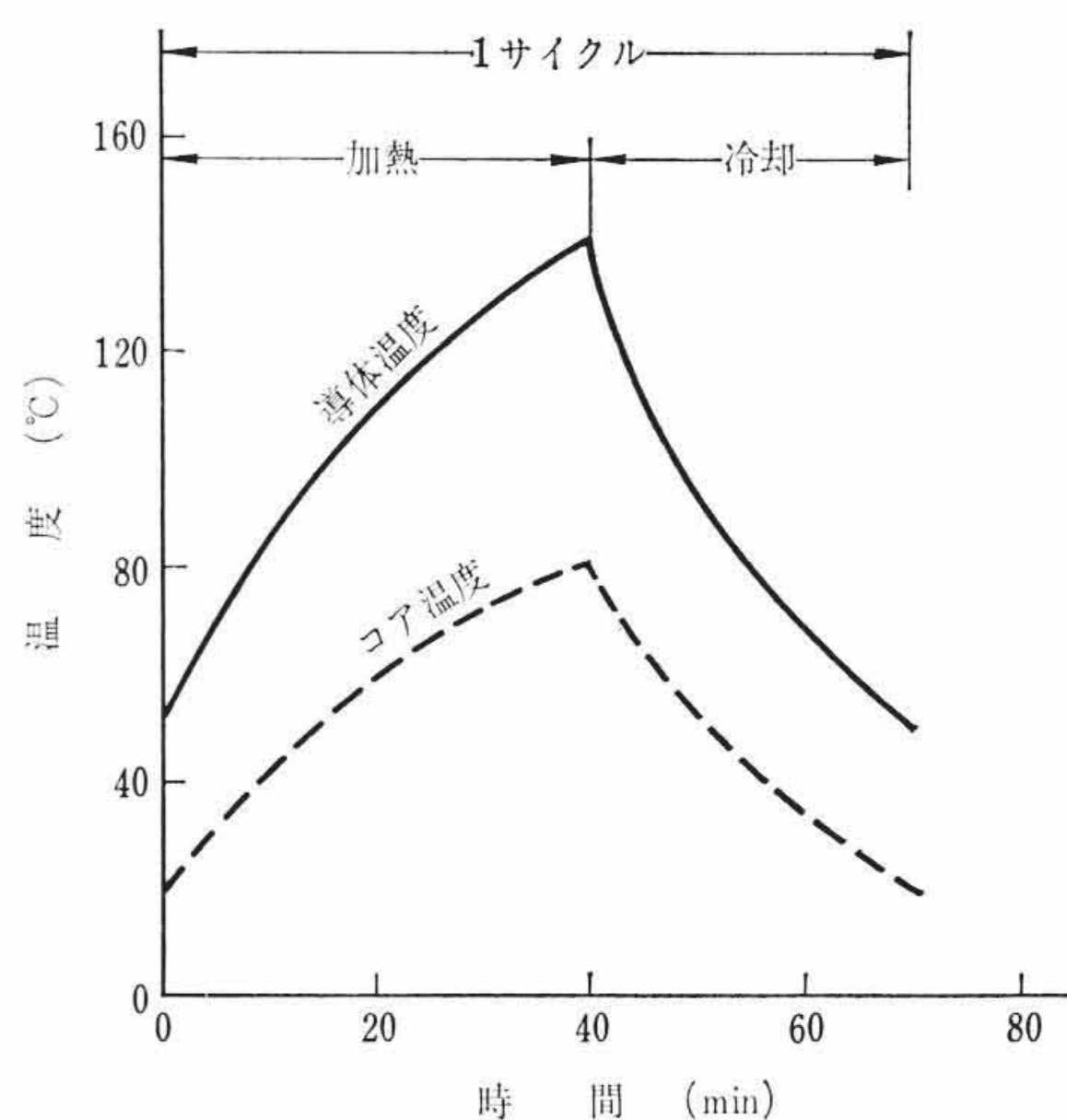


図10 ヒートサイクルスケジュールの一例

しておりいずれも特性変化は合成レジンコイルでは割合少なく特にエポキシコイルでは良好であることが確認されている。

5.4 ヒートサイクル特性

コンパウンドコイルにおいては高温時の接着力があまり強くないために長大なコイルの場合には発電機の起動、停止の繰返しによって少しずつ絶縁層の移動が生じ girth crack (絶縁層のくびれ現象)を生じたりテープのハク離を生じたりする事故があった。しかし合成樹脂系のレジンが使用されるに及んでこの種の事故はほとんどなくなった。しかしこのような経験や、近年のように起動停止が非常にひんぱんに行なわれる揚水式発電電動機やせん頭負荷用発電機の増大に伴い耐ヒートサイクル特性の検討が必要となった。

発電機の大形化に伴い固定子コイルも長くなり、負荷変動によりコイルの絶縁層に過酷な影響を与えることになった。すなわち負荷の変動により冷熱サイクルを受け、その都度コイル導体と絶縁層の熱膨張係数の差、それぞれの冷却、加熱速度の相違などが原因となって伸縮に差を生じ、導体と絶縁層の間でずれが生じてくることが考えられる。実際の運転時の条件に似た条件で加速したヒートサイクル試験を行ない絶縁層を評価することが望ましいわけであり、各社とも試験条件は異なるが寿命を推察する一手段として広く採用されている。

日立製作所においてもすでに十数年前からヒートサイクル試験を実施しレジン改良時の判定基準の一つと考えてきた。今回もエポキシレジンコイルを評価するに当たりモデルコアにコイルをセットした状態で行なった。全長約4メートルのモデルコア内にコイルをそう入し導体に電流を通じて加熱するとともにモデルコアに蒸気を通じて加熱し鉄損に応じた温度上昇を与える。コイル温度が140℃になったときに電流および蒸気を遮断し、モデルコア内に冷却水を通して冷却し、図10に示したようなスケジュールになるように自動制御している。このスケジュールでは時間に対する温度の変化は実際の機械が遭遇する条件にくらべて非常にきびしい条件であり、このため絶縁層に発生する応力変化は非常に早く、強度、接着性などすぐれたレジンでなければとうてい追従しきれないと考えられる。またこれは試験時間短縮化のためにも非常に有利な試験方法である。図11はその試験結果である。エポキシレジンコイルはその強度と接着力がすぐれているためにコイル内で発生する熱膨張差に基づく応力変化に対しても、導体と絶縁層間、絶縁層内でハク離を生ずることもなく特性の変化も少ないことがわかる。図12にヒートサイクル500サイクルと1,000サイクル後の絶縁層の状況を示した。コンパウンドコイルでは導体とコイル絶縁層の間に永久ずれを生ずるが、エポキシ絶縁では1,000サイクル後においても永久ずれは生

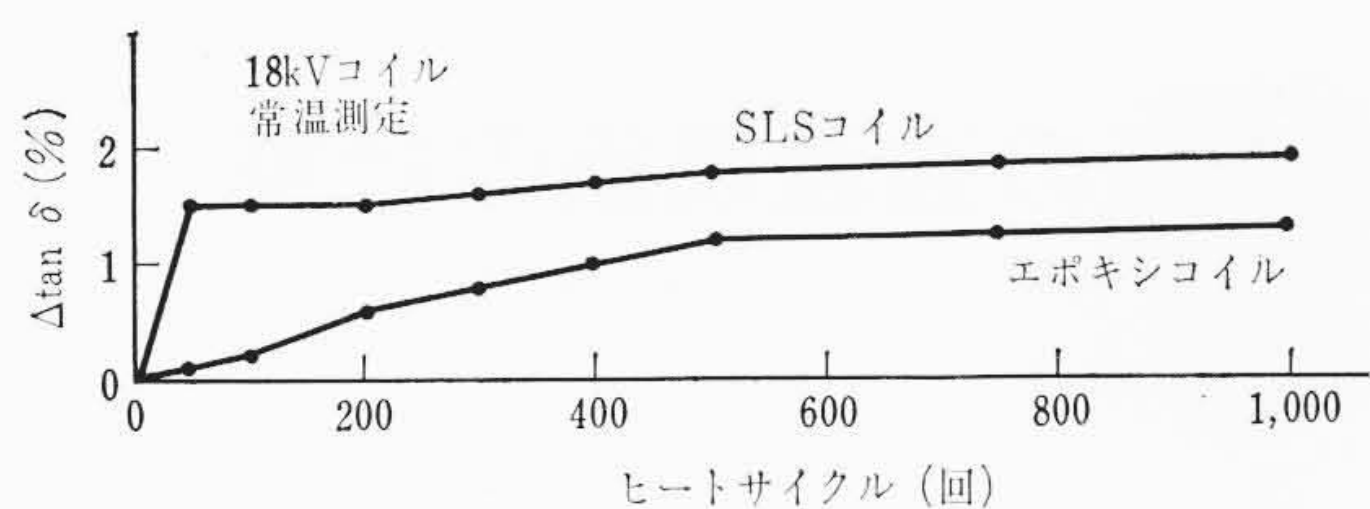


図11 ヒートサイクル試験結果

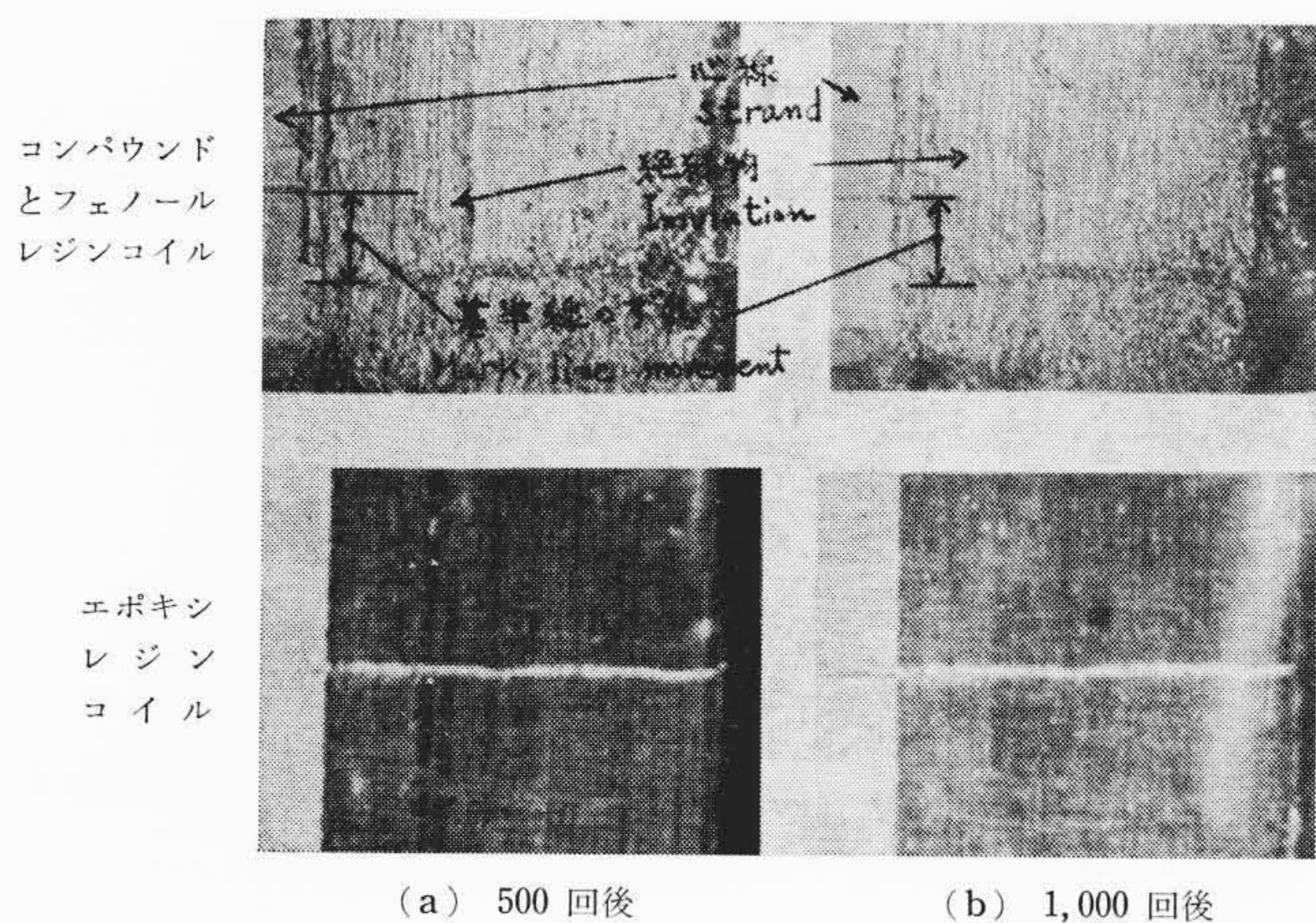


図12 ヒートサイクル試験後の絶縁層の移動

じていない。すなわちエポキシレジン熱膨張収縮のはげしい繰返しに耐えるに必要な性質を十分にそなえているといえる。外観上もテープのハク離は認められず全然異常はなかった。なお将来単機容量の増大したタービン発電機固定子コイルでは全長10 mに及ぶことも考えられ、モデルコイルを使用してヒートサイクルを行なった結果特性的にはなんら心配のないことが確認されている。

5.5 機械的特性

一般にエポキシコイルはかたくてもろいのではないかという懸念があった。エポキシレジンはそのレジンと硬化剤の配合のいかんによってたわみ性あるものから非常にかたいものまで広範囲な機械的特性を有するものを得られる利点がある。しかし一般に柔軟性のあるものは電気的特性がやや落ちるという欠点があり、高電圧機器の絶縁用に使用するのに難点がある。高圧コイル用のエポキシレジンには電気的特性に主体を置いているためややかためのものである。したがって機械の振動による長期間の繰返し疲労に対する特性を検討する必要があった。このためコイルを片持ばりとして先端に両振りの繰返し力を印加してコイル表面の最大発生応力がコイル絶縁層の機械的破壊強度の約1/3約500 kg/cm²になるようにして10⁵、10⁶、10⁷回の繰返し疲労を加えてその後の絶縁破壊電圧を測定した。その結果を示したのが図13である。外観上はなんの異常も認められなかったが、絶縁破壊電圧は繰返し数が多くなると低下が大きくなる。しかしエポキシコイルにおいては10⁵回後では初期値の絶縁破壊電圧をほぼ保持している。発電電動機の始動時におけるコイル絶縁層の応力は機械的破壊強度の約1/10程度以下に設計されているし、また1日1回起動としても40年間では約1.5×10⁴回であることから発電電動機のコイルとして、十分な耐力を有しているといえる。なお、コイル絶縁層に加わる応力は、工場試験で確認されている。

6. コイル品質の均一化

コイルは同じ仕様で多数製作されるために特性のバラツキが問題になる。コイルの性能を決めるための重要な因子の一つは製品の品質の均一化であり、いかに性能のよいコイルができたとしてもその特性にバラツキが大きい場合には全体として良好な製品とはいえない。

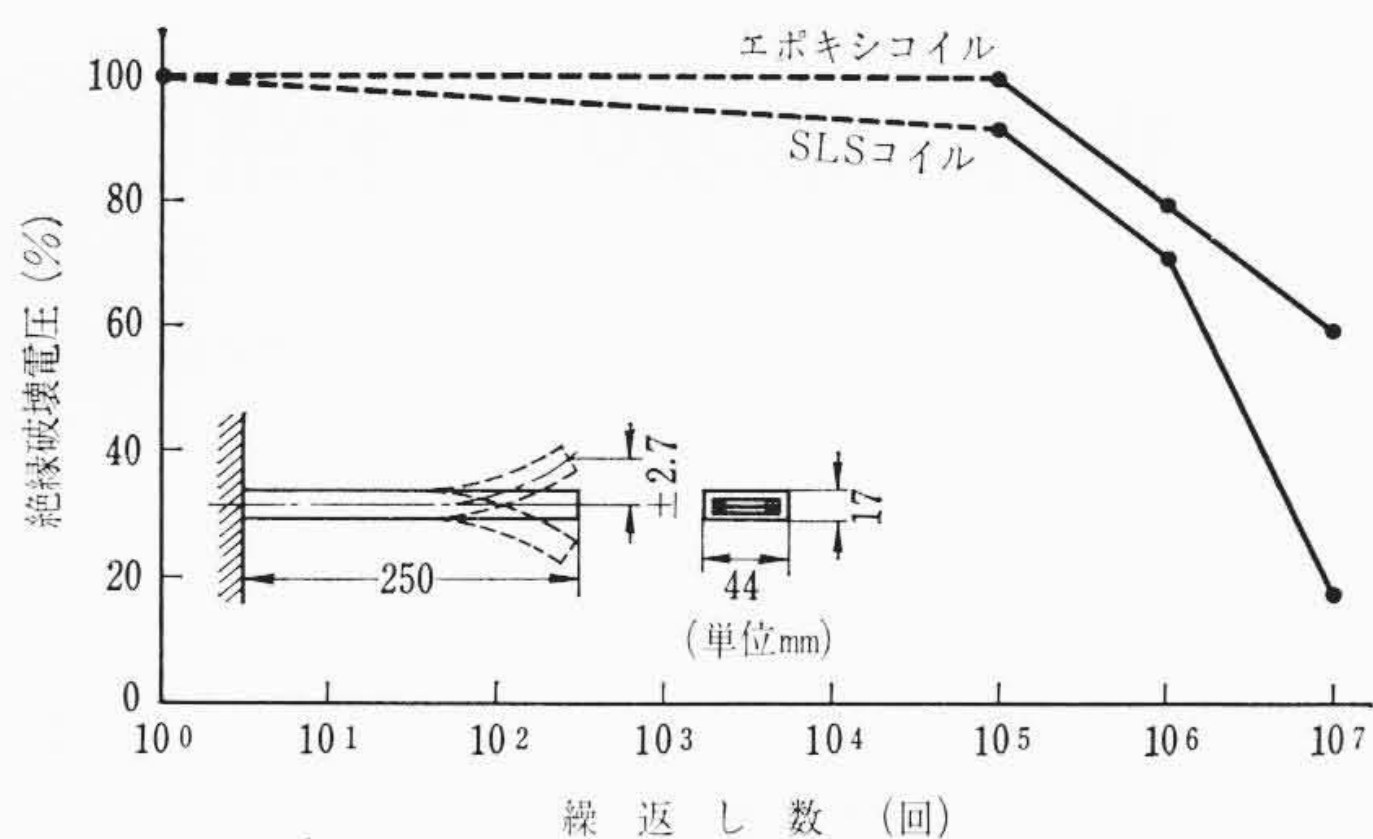


図13 繰返し疲労特性

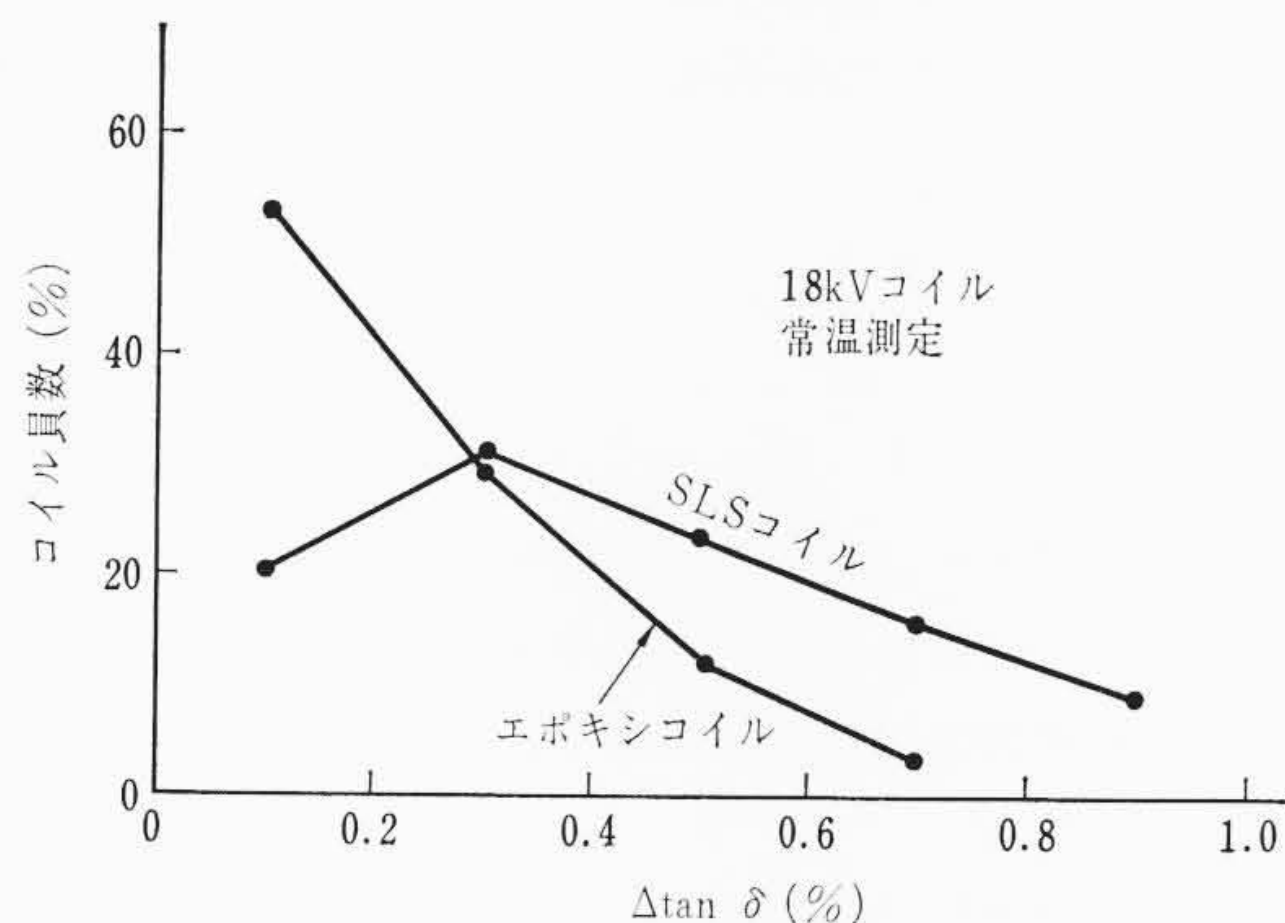


図14 Δtan δ 特性

い。特性優秀なエポキシレジンの開発とコイル製作方法の開発とゆき届いた品質管理によって均一なコイルの製作が可能となっている。図14はその一例として実機におけるΔtan δ (定格電圧を印加したときと2 kV電圧を印加したときの誘電正接の値の差)の分布特性を示したものである。SLSコイルでも良好な特性を示しているが、エポキシコイルではさらにいっそうバラツキの小さい優秀な特性を示している。なお絶縁破壊電圧が向上するので絶縁厚さを薄くし、機械全体を小形化することができる。

7. 結 言

以上新しく開発実用化された日立製作所のエポキシレジンコイルについてレジンの特性、コイルの特性などの試験結果について述べたが、要約すると次のようになる。

- (1) 誘電正接-電圧特性がすぐれている。
- (2) 耐熱安定性がすぐれている。
- (3) ヒートサイクル特性がすぐれている。
- (4) 機械的特性にすぐれている。
- (5) コイルの品質が安定している。

これらは大容量のタービン発電機、水車発電機用の固定子コイルに対して必要である。これらのコイルを用いて製作納入した発電機は昭和42年2月現在28台総容量160万kVAに達しており、製作中のものが29台ある。われわれはさらに特性のすぐれたコイルを製作するよう日夜努力を続けている。

終わりに臨み本方式の実施に当たり、各電力会社の関係各位からいただいた多大なご協力とご助言に対し本紙を借りて謝意を表する次第である。なお指導を仰いだ日立製作所日立研究所の中牟田、井上、津久井、加子、日立製作所日立工場の田附、磯部、岡各氏に対し感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 石坂：日本電気協会講演論文集(昭32)
- (2) 寺瀬：電気学会誌 83, 894 (1963.3)