

大形回転機固定子コイル用ハイモールド絶縁方式

Hi-Mold Insulation System for Stator Coils of Large Rotating Machines

藤 本 茂* 田 中 紘 一* 松 延 謙 次*
Shigeru Fujimoto Kōichi Tanaka Kenji Matsunobu
磯 部 昭 二* 兼 子 慶 市** 堺 昌 彦**
Shōji Isobe Keiichi Kaneko Masahiko Sakai

The insulating characteristics of stator coils have witnessed remarkable improvement since, following the recent marked progress of high-polymer chemistry, heat hardening solution-less varnishes such as epoxy resin and unsaturated polyester resin were taken into use for impregnating coils.

On the other hand, by the use of a pre-preg mica-tape, which is made by treating glass-cloth lined collective mica in the B-stage after impregnating it with heat-resisting epoxy-resin, the manufacture of highly heat-resisting coils has been made feasible. Also, as this tape dispenses with vacuum impregnating the period of manufacture has been much curtailed.

At Hitachi, Ltd. a Hi-mold insulation system which employs pre-preg mica tapes has been developed. In the testing concerning electric and mechanical characteristics, heat cycle characteristics, thermal deterioration characteristics, etc. this system has proved its practicality.

1. 緒 言

発電機、電動機などの大形回転電機における固定子および回転子の電気絶縁性能は機器の寿命を左右する重要な要素の一つである。最近の高分子化学の著しい進歩に伴いエポキシレジンや不飽和ポリエステルレジンなどの熱硬化性無溶剤ワニスが電機巻線の含浸剤として用いられるようになって以来、これらの絶縁性能には著しい改善がなされ、絶縁の耐熱性向上や絶縁耐力、誘電特性の改良などにより、機器の性能向上、小形軽量化に大きな役割を果たしてきた。

日立製作所における不飽和ポリエステルレジンの研究は昭和24年に始まり、従来からのアスファルトコンパウンドに次いでSLS絶縁方式（以下SLS方式という）と呼ばれる不飽和ポリエステルレジンによる真空注入方式を完成させた⁽¹⁾。SLS方式は昭和32年より大形機に採用されて以来、今日まですぐれた運転実績を残している⁽²⁾。SLS方式に次いで昭和40年以来エポキシレジンによる絶縁方式（日立製作所登録商標ハイレジン方式）を実用化した⁽³⁾。同方式の特長はエポキシレジンのすぐれた接着力、機械的強度および耐熱性を生かして絶縁耐力および熱劣化的寿命特性を改良したものである。

エポキシレジン絶縁方式は採用以来、好調な運転実績を続け各方面より高く評価されている。

一方において日立では時代の要求にそうため、大形回転機固定子コイル用F種絶縁を対象とした新絶縁方式の開発研究を行ない、このたびハイモールド絶縁方式を開発した。本方式はガラスクロス裏打集成マイカに含浸させたエポキシレジンを用いたプリプレグマイカテープを使ういわゆるプリプレグ絶縁方式であり、高い絶縁強度と耐熱性を備えている。本方式によれば真空注入が不要となり、短期間にコイルの製作ができる。本報ではハイモールド絶縁方式の概要について報告する。

2. 製 法

ハイモールド絶縁方式は近年特に進歩の著しい耐熱性有機絶縁材料の有効活用を図ったもので、作業性にすぐれ、良質のプリプレグマイカテープを使用した絶縁方式である。このマイカテープはガラスクロス、集成マイカおよび電氣的、熱的特性のすぐれた高性能エポキシレジンから成っており、エポキシレジンの硬化反応をBステージにとどめたものである。

本絶縁方式は前記マイカテープを導体の周囲に巻き回した後、加熱・加圧せねばならないが、この工程はきわめて重要であり、加熱と加圧の適切なる条件の選定が絶縁性能を大きく左右する。日立では長年にわたる研究の結果、硬化反応を科学的に管理し、温度、圧力をコントロールすることによって電氣的、機械的特性にすぐれかつ特性の安定したハイモールド絶縁方式コイル（以下ハイモールドコイルという）の製作に成功した。

3. 特 長

ハイモールドコイルは次の特長を持っている。

3.1 工作上の特長

- (1) 注入工程が不要であり、コイルを短期間に製作できる。
- (2) ガラスクロス裏打プリプレグマイカテープは引張りに強く、しなやかなためテーピング作業性が良いので、均質なテーピング作業ができる。

3.2 特性上の特長

- (1) 絶縁層が緻密(ちみつ)である。したがって耐水性、耐湿性および耐薬品性にすぐれている。
- (2) 絶縁破壊強度が高い。
- (3) 耐熱性が高く、F種まで使用できる。
- (4) 機械的強度が大きい。

4. 特 性

4.1 エポキシレジンの特性

本絶縁方式に使用しているマイカ含浸用エポキシレジンの特性

* 日立製作所日立工場
** 日立製作所日立研究所

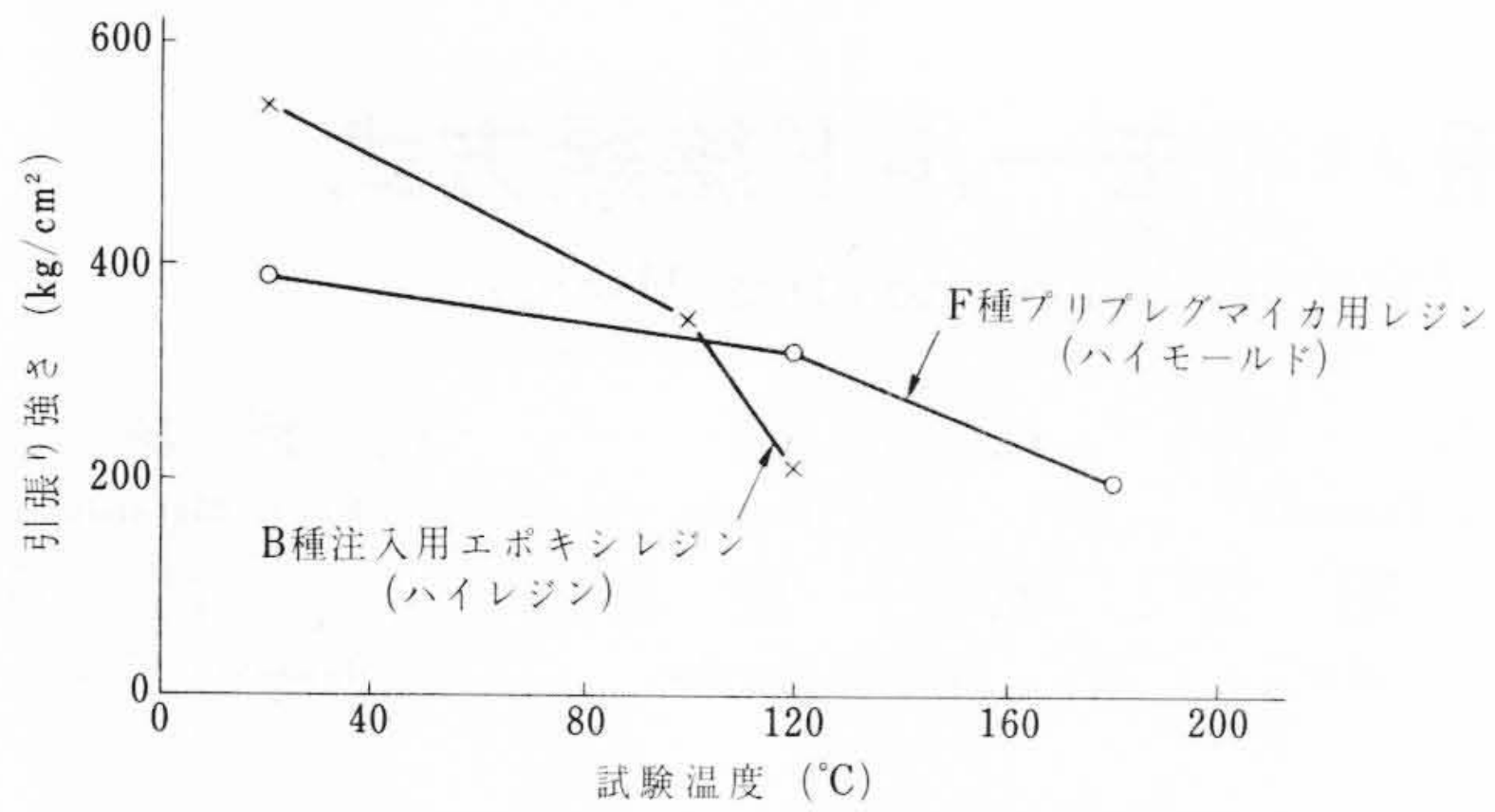


図1 F種プリプレグマイカ用レジンの引張り強さ

表1 レジンの特性

No.	項目	レジン		
		ハイモールド	ハイレジン	SLS
1	レジン種別	エポキシ	エポキシ	ポリエステル
2	熱変形温度(HDT)(°C)	241	115	101
3	比重	1.25	1.2	1.1
4	収縮率(%)	1.8	3.9	7.2
5	抗張力(kg/cm², 120°C)	321	215	63
6	加熱減量(%)			
	165°C-40日	—	0.5	4.2
	180°C-30日	1.1	—	—
	200°C-30日	2.8	—	—
7	熱膨張係数 (1/°C)	5.6×10^{-5}	7.5×10^{-5}	10×10^{-5}
8	熱伝導率(kcal/m.h.°C)	0.15	0.13	—

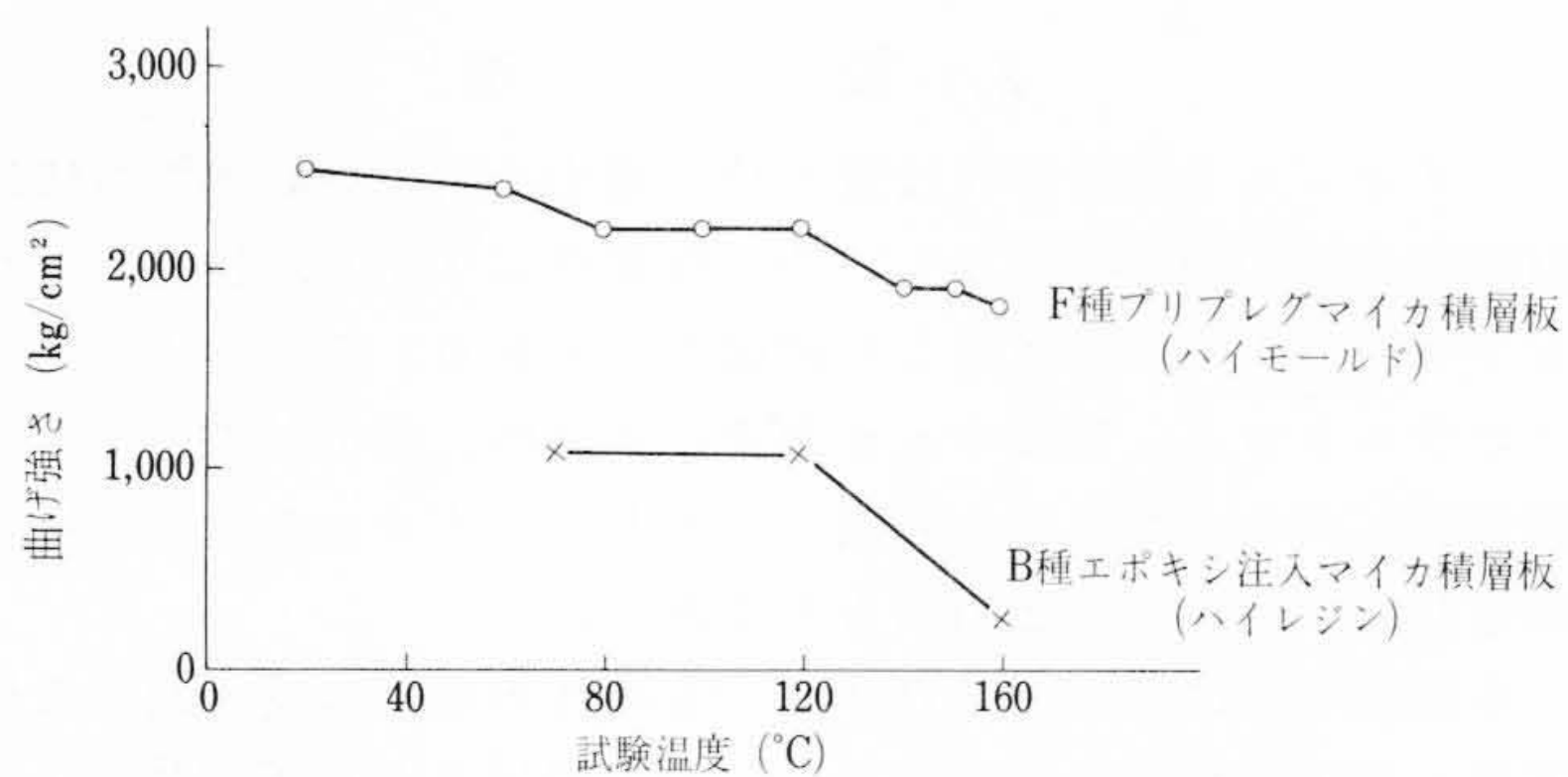


図2 F種プリプレグマイカ積層板の曲げ強さ

は表1および図1に示すとおりである。エポキシレジンには数十種類に及ぶレジンの中から特にF種用レジンとして選んだもので耐熱性エポキシを主成分としたレジンで、高温安定性と熱変形温度(HDT)が高い。

4.2 絶縁板の特性

前述のテープ用マイカをハイモールドコイルと同一の成形条件で作った絶縁板の特性は図2に示すとおりである。この特性は本絶縁方式の最も基本的な特性の一つで、高温に対する熱安定性にすぐれている。

これらの基本的な絶縁層の特性とコイル特性との間には長年の研究成果により密接な関連性のあることが判明しているが、本報では紙数の関係上ハイモールドコイルの特性についてのみ述べる。

4.3 コイルの電気的特性

ハイモールドコイルの $\tan \delta$ ～電圧特性、 $\tan \delta$ ～温度特性の一例は図3～4に示すとおりである。これらの試験法はコイル絶縁層の性状を示す代表的な試験法であり、 $\tan \delta$ ～電圧特性が良好なことは絶縁層が緻密であり、ボイドの少ないことを示している。 $\tan \delta$ ～温度特性図からはF種の運転温度領域において安定した絶縁であることを示している。

4.4 コイルの機械的特性

ハイモールドコイルの静的曲げ強さ、衝撃ねじり強さは図5に曲

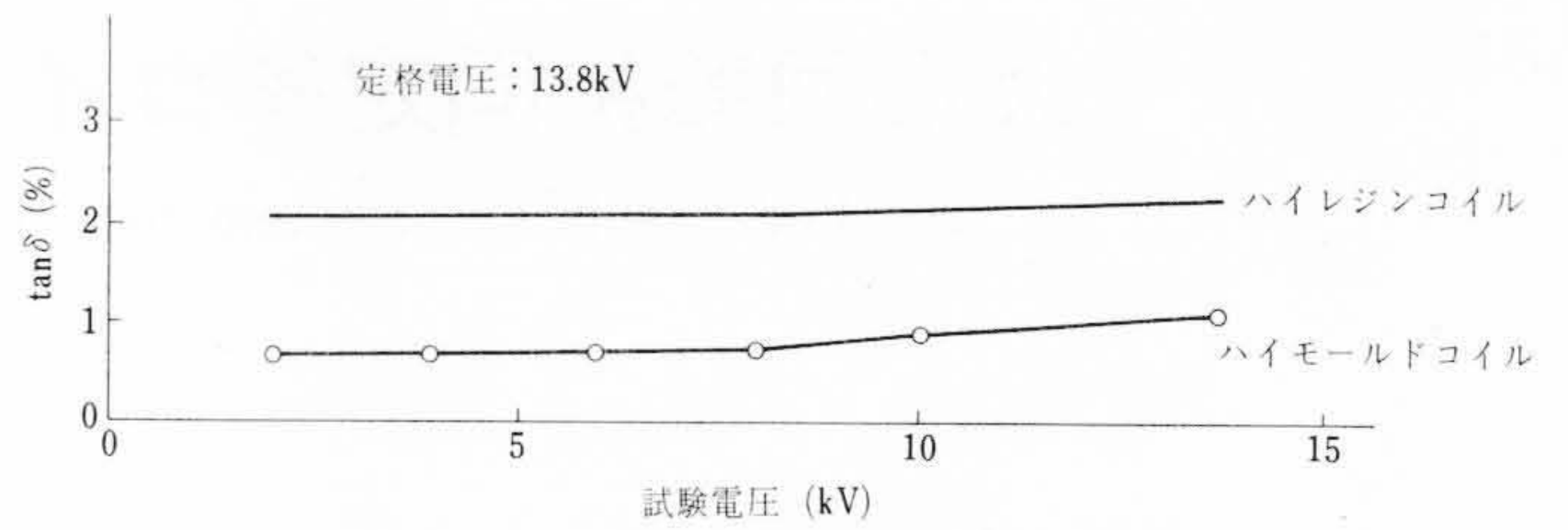
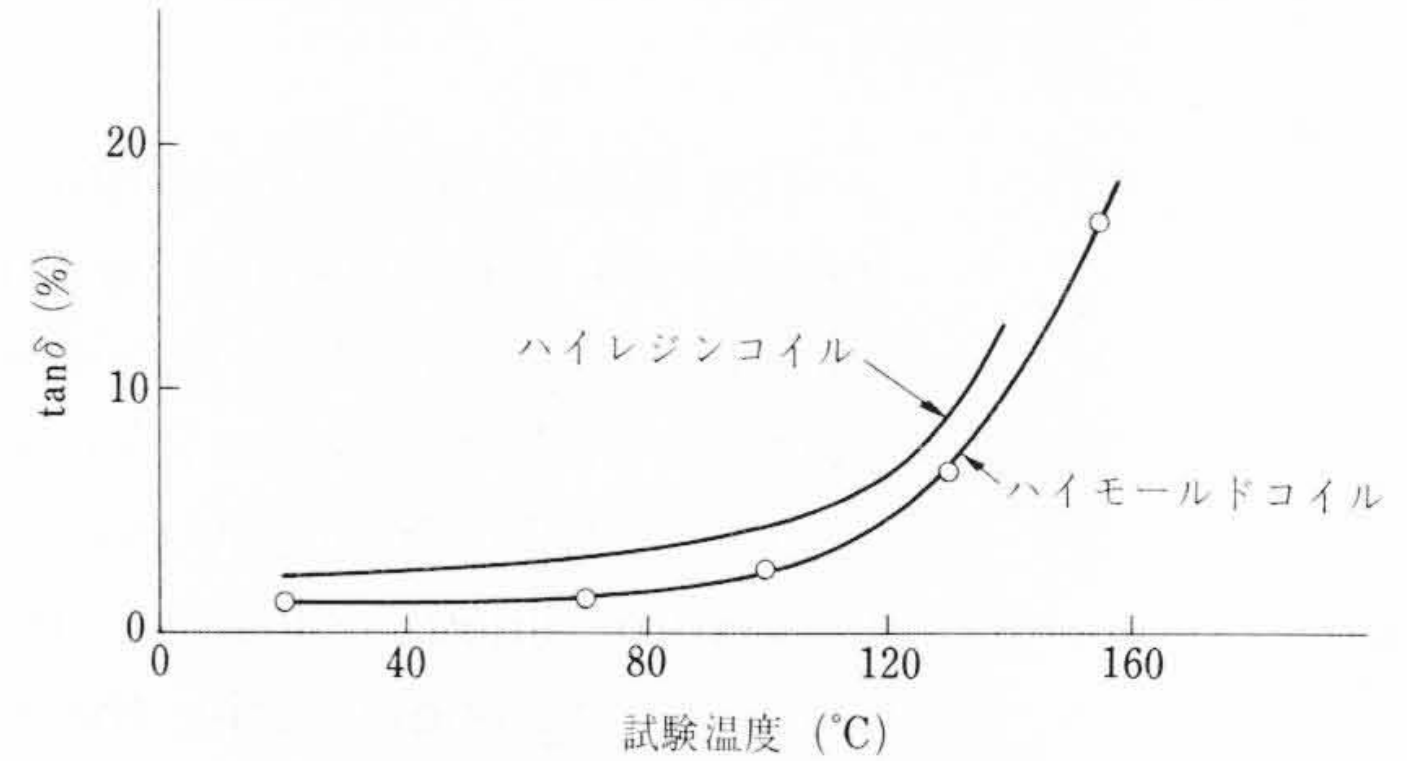
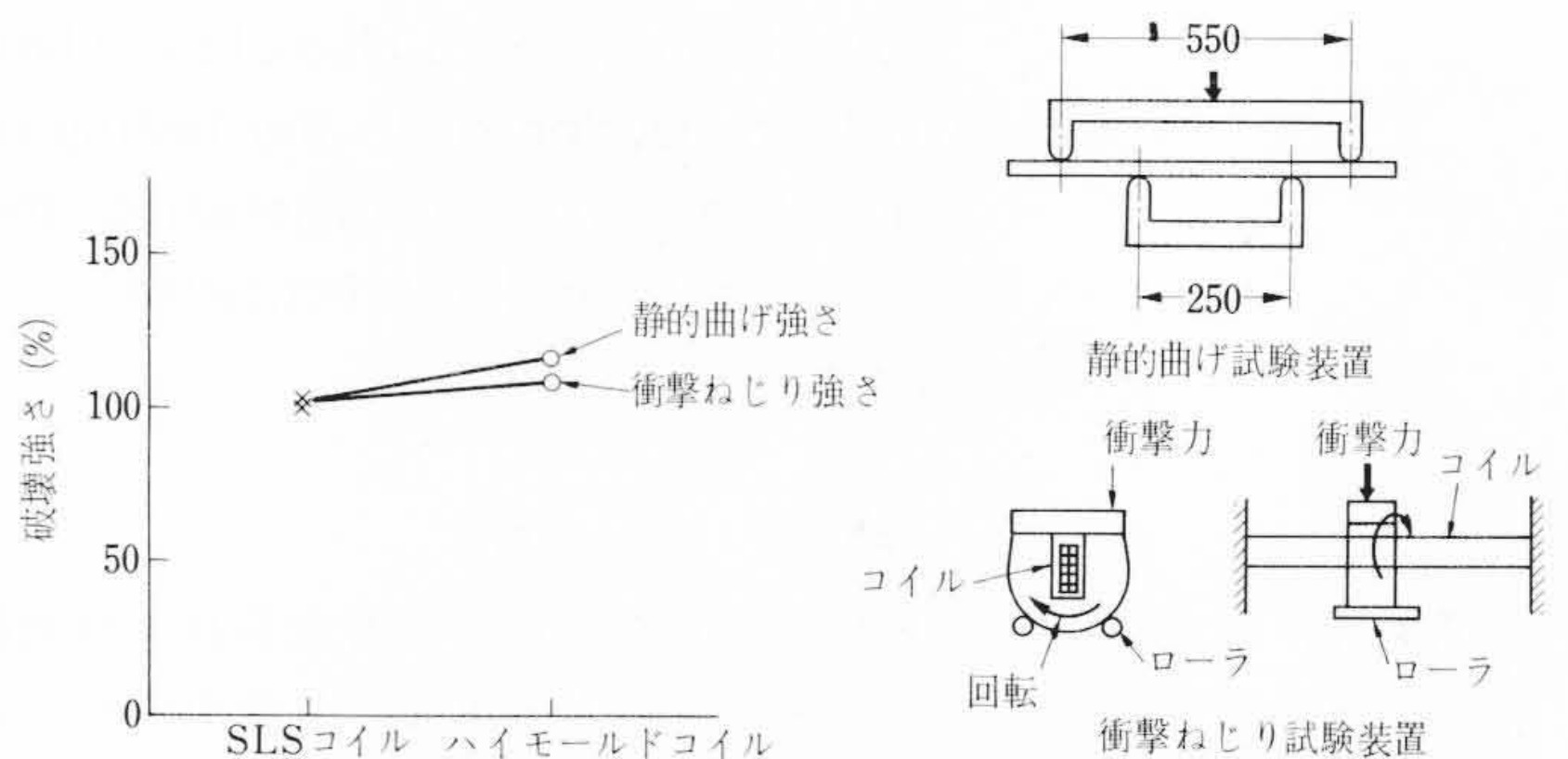

図3 ハイモールドコイルの $\tan \delta$ ～電圧特性

図4 ハイモールドコイルの $\tan \delta$ ～温度特性


図5 ハイモールドコイルの機械的特性

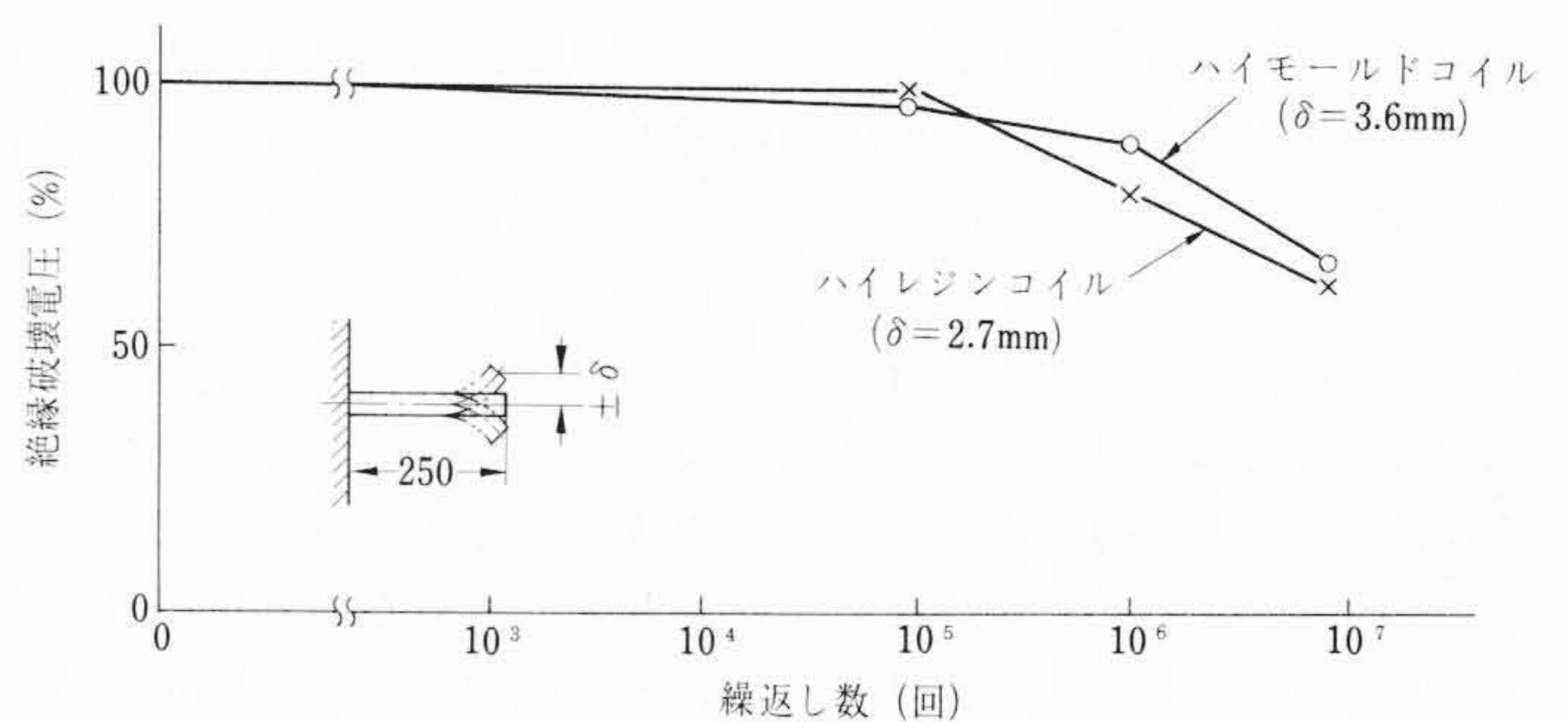


図6 ハイモールドコイルの曲げ疲労特性

げ疲労特性は図6に示すとおりであるが、大容量タービン発電機や水車発電機などですでに実績のある従来のレジンコイルと同等以上の強さを持ち機械的にもすぐれたコイルであることを示している。

4.5 寿命劣化特性

固定子コイルは運転中に電氣的、熱的、機械的ストレスを受ける。これらに対する抵抗力が大きいコイルほど、耐久性のあるコイルといえる。

図7は熱劣化特性を示したもので180°Cの長期熱劣化による絶縁破壊電圧の推移をSLSコイルの初期絶縁破壊強度を基準に示したものであるが、当初は若干の低下はあるがその後は変化なく、すでに十数年の運転実績を持つSLSコイルの初期絶縁破壊強度以上の強さを持っている。またF種温度(155°C)の劣化では、破壊電圧の低下は認められていない。

図8は最高導体温度を160°Cとしたヒートサイクル試験によって $\Delta \tan \delta$ がどのように変化するかを調べたものである。ヒートサイ

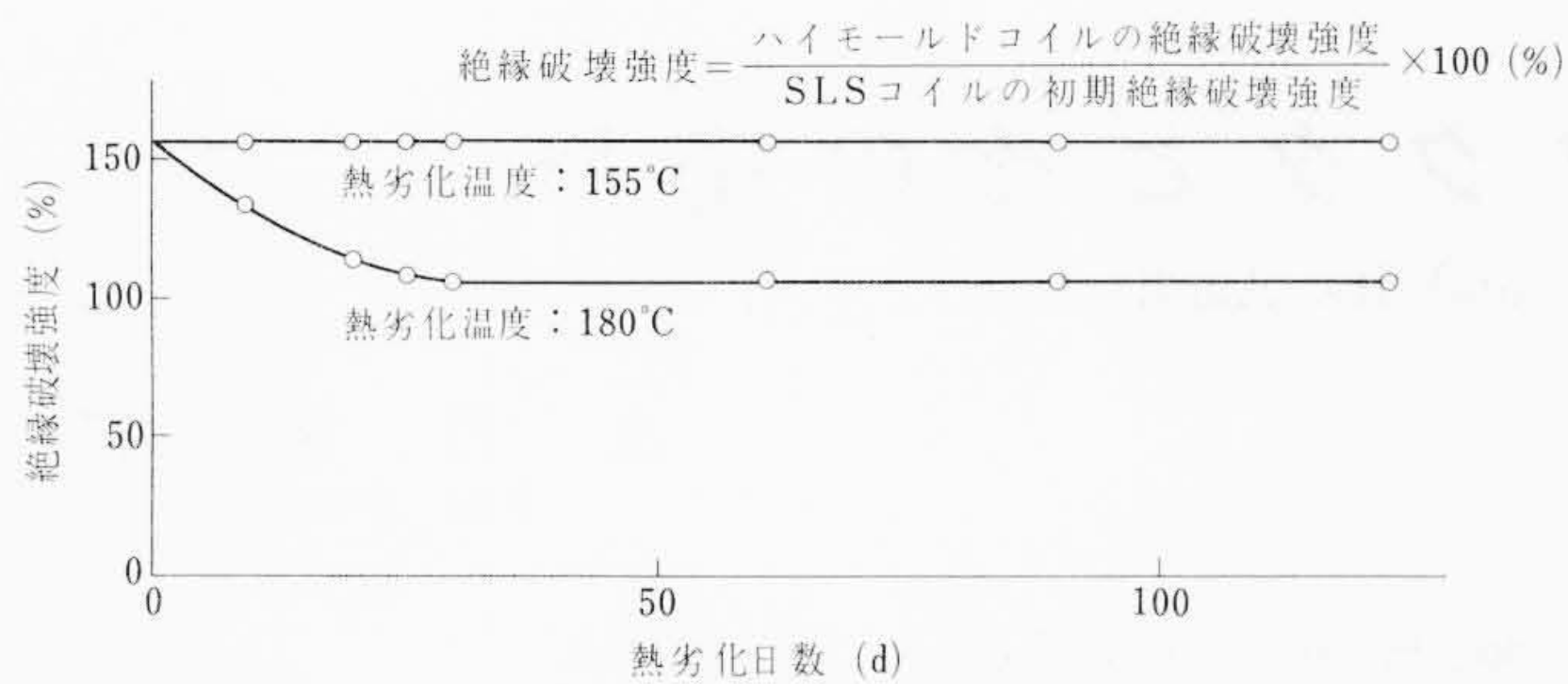


図7 ハイモールドコイルの熱劣化特性

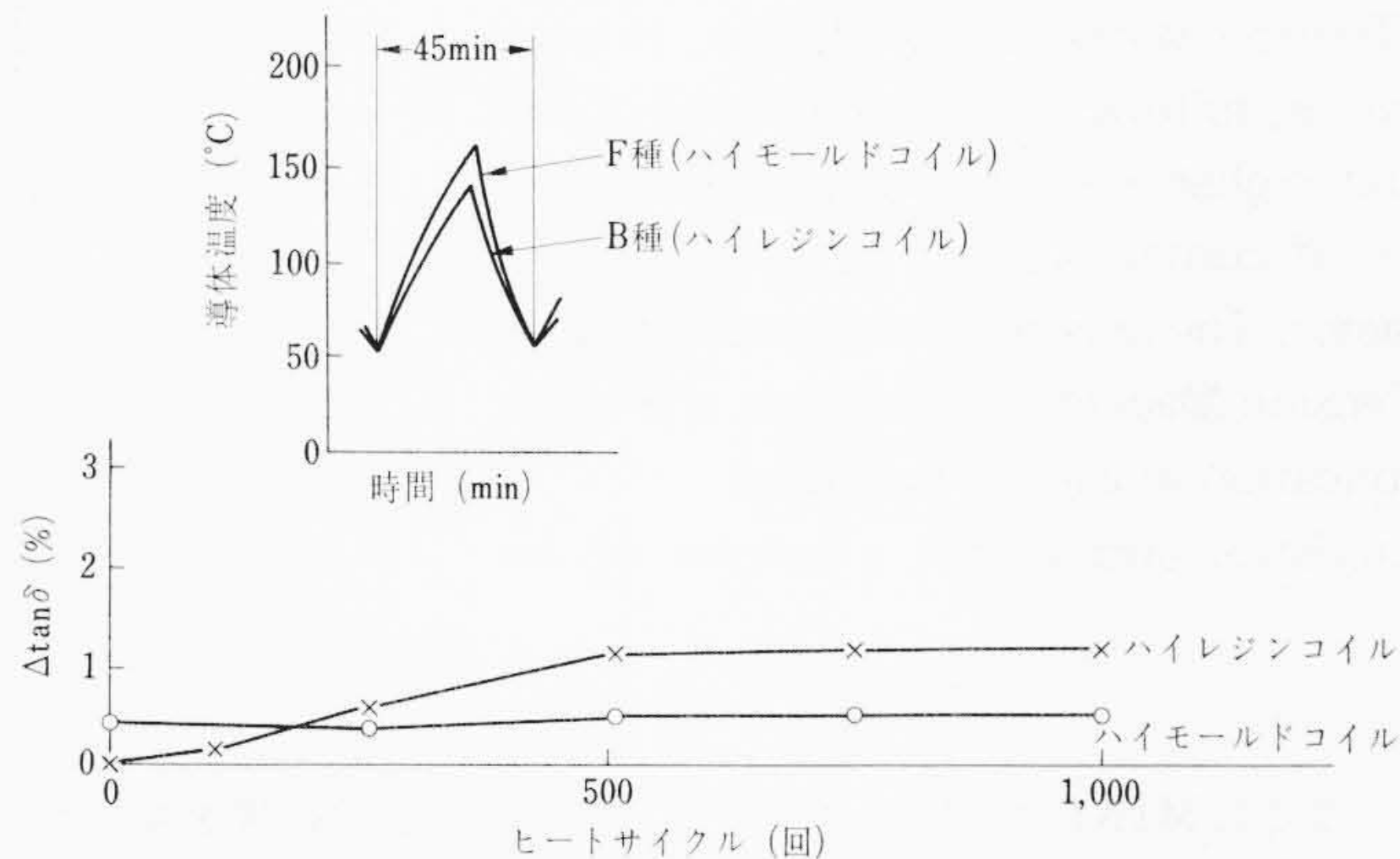


図8 ハイモールドコイルのヒートサイクル特性

クル特性においてもハイモールドコイルがハイレジンコイルに比較しすぐれた特性を持っており、起動、停止の激しい発電機に適している。

4.6 その他の特性

ハイモールドコイルは絶縁層が緻密で耐水性、耐湿性、耐薬品性にすぐれていることは前に触れたとおりであるが、この中で最もきびしい試験と思われる耐薬品性試験の結果を示したのが表2である。この試験は従来のエポキシレジンコイルとハイモールドコイルを製作し、長さ25mmに切断して表2に示す薬品中に常温で40日間浸せきし、その変化を調べたものである。本絶縁方式コイルの耐薬品性は従来のエポキシレジンコイルに比べ改善されており環境の悪いところでも使用される各種産業用同期電動機および誘導電動機の絶縁に適している。

表2 耐薬品性試験結果

No.	薬品	従来のエポキシレジンコイル	ハイモールドコイル
1	工業用メチルアルコール	ややハク離	異常なし
2	ガソリン	異常なし	"
3	試薬1級トルエン	やや膨潤	"
4	工業用トリクロルエチレン	"	"
5	5%アンモニア溶液	ややハク離	"
6	30%アンモニア溶液	"	"
7	5%カセイソーダ溶液	やや膨潤	"
8	30%カセイソーダ溶液	ややハク離	"
9	5%硫酸溶液	"	"
10	5%食塩水	"	"
11	5%塩酸	ややハク離	異常なし

4.7 特性の安定性

図9は本絶縁方式コイルの $\Delta \tan \delta$ 分布を示したものである。ばらつきが少なく安定した特性を持つことが明らかである。

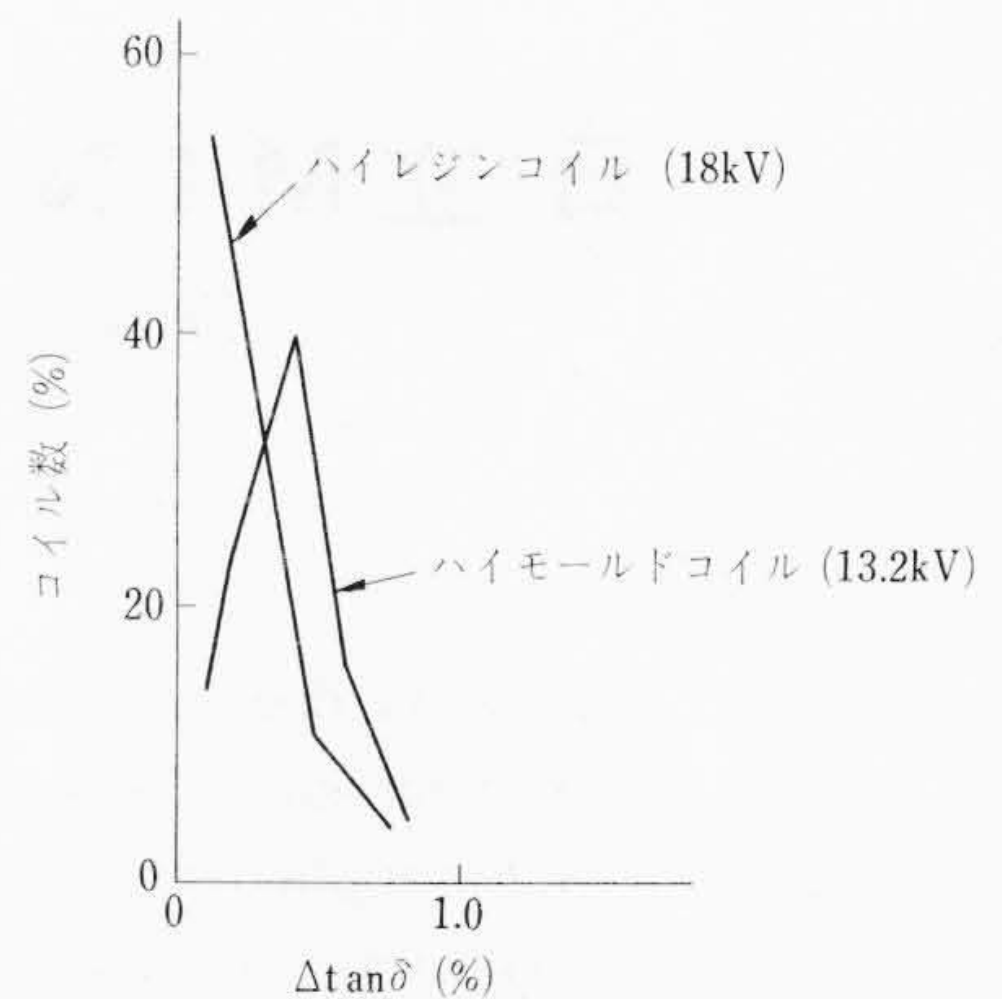
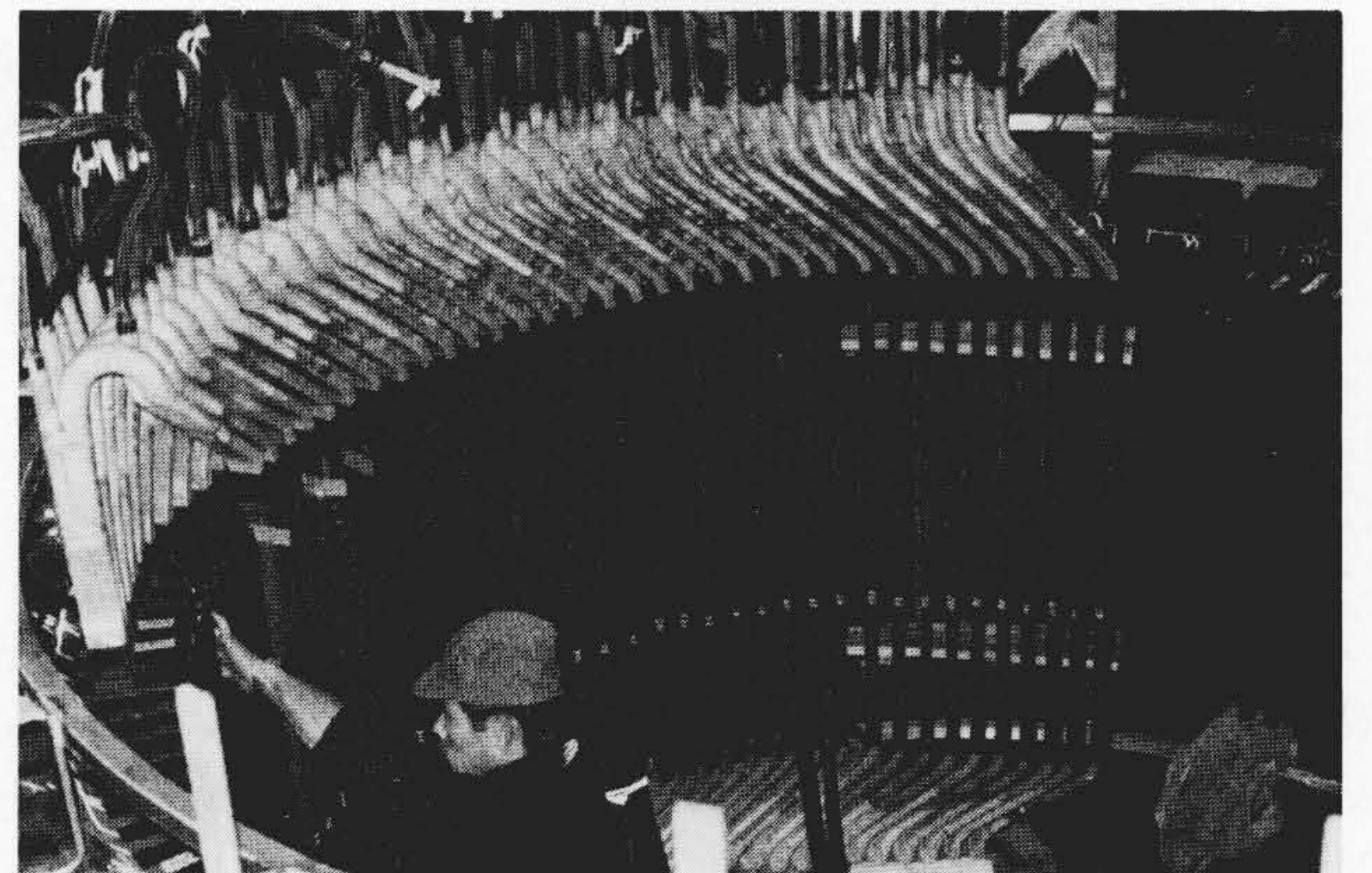


図9 ハイモールドコイルの $\Delta \tan \delta$ 分布の一例



(15,000kVA13.2kV交流発電機)

図10 ハイモールドコイルの組線状況

このようにハイモールドコイルはすぐれた電氣的、機械的、熱的特性を持っており、あらゆる用途面において満足して使用できるものである。特に起動、停止の激しい機械、F種用および耐薬品性が要求される用途においてはその特性を十分に発揮するものである。

5. 結 言

以上、本報では新しく開発したハイモールド絶縁方式の概要を述べ、その特徴を明らかにした。要約すると次のとおりである。

- (1) ハイモールド絶縁方式はガラスクロス裏打集成マイカテープにエポキシレジンを含浸処理したプリプレグマイカテープを使用している。
- (2) したがってコイルの真空注入作業を必要とせず短期間にコイル製作が可能である。
- (3) ハイモールドコイルの特性は電氣的、機械的特性が高温領域まで安定であり、耐熱区分はF種である。
- (4) $\tan \delta$ ～電圧特性、部分放電特性、機械的強度が安定しており絶縁破壊強度が高い。

終わりに臨み、本方式の開発にあたって長期にわたりご協力いただいた関係者各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 石坂：日本電気協会講演論文集（昭32）
- (2) 津久井，磯部ほか1名：日立評論 53, 324（昭46-4）
- (3) 安芸，松延ほか3名：日立評論 49, 682（昭42-6）