

## シリコン油浸絶縁システム

## Silicone Oil Impregnated Insulation System

倉橋 晟\* 山口 博之\* 増田 雄彦\*  
Akira Kurahashi Hiroyuki Yamaguchi Takehiko Masuda  
後藤 勝彦\* 松崎 孝二\*  
Katsuhiko Gotō Kōji Matsuzaki

## I. ま え が き

油入変圧器のほとんどは鉱油系絶縁油と絶縁紙あるいは耐熱紙の組合せによる油浸絶縁で、特殊用途には従来不燃油が使用されてきた。このたび変圧器の大幅な小形化、容量増大を図る目的で、これらの油浸絶縁の耐熱性を大幅に向上させた新しい絶縁システムを開発した。これは、絶縁油に耐熱性、難燃性および無公害性を考慮してシリコン油を採用し、絶縁材料には耐熱性のすぐれた芳香族ポリアミド紙（商品名：ノーマックス）を用いた絶縁システムである。この絶縁は耐熱温度が160~180℃と非常に高く、かつコロナ特性をはじめとする絶縁特性は従来の鉱油含浸紙の場合と同等のすぐれた特性を有している。この絶縁システムを車両用変圧器に適用し好成績を得た。変圧器の内容は本誌の別論文で紹介されているので、ここではこの新しい絶縁システムの内容を紹介し、各位の参考に供したいと考える。

## II. シリコン油の特性

## 1. 一般特性

電気絶縁用として使用されるシリコン油の一般特性を他の絶縁油と比較して第1表に示した。油を循環して冷却をする関係上、変圧器に使用される絶縁油の粘度は低い方が望ましい。しかし、粘度の低いシリコン油では、難燃性に対する要求が満足されないでシリコン油には、25℃で50c.stのポリジメチルシロキサンを選んだ。このシリコン油の変圧器への適用を考えた場合の特性上の長、短所を第2表にまとめた。これらの特性について具体的に述べる。

- (1) シリコン油は温度に対する粘度変化が小さく75℃における粘度は、鉱油や不燃油より約1桁高い。しかし逆に、低温側では粘度上昇が小さく流動点が-50℃以下と非常に低い利点がある。
- (2) 引火点が約300℃と鉱油に比較して非常に高く、また、自己消火性である。また、蒸発量は鉱油や不燃油にくらべて非常に小さい。

第1表 各種絶縁油の一般特性

Table 1. General properties of three types of insulating oils

特 性	絶縁油		
	シリコン油 KF 96*,50c.st	鉱 油 JIS 2号油	不 燃 油 KC1000
比 重 15℃	0.96	0.87~0.92	1.52
粘 度 (c.st)	30℃	46	12~14
	75℃	22	3
引 火 点 (℃)	300	135~145	—
流 動 点 (℃)	-50>	-27.5>	-30>
酸 価 (KOHmg/g)	0.01>	0.02>	0.01>
蒸 発 量 (95℃, 5H) (%)	(150℃, 24H) 0.5>	0.4>	2>
ガ ス 溶 解 量 (N <sub>2</sub> , 20℃) (%)	14	7.5	4.5
熱膨張係数 (cc/cc/℃)	10.6×10 <sup>-4</sup>	7.2×10 <sup>-4</sup>	7×10 <sup>-4</sup>
熱伝導率 (cal/cm·sec·℃)	3.6×10 <sup>-4</sup>	2.9~3.3 ×10 <sup>-4</sup>	2.4×10 <sup>-4</sup>
比 熱 (cal/g·℃)	0.35	0.43	0.27
tan δ 50℃ (%)	0.01>	0.2>	3>
体積抵抗率 50℃ (Ω-cm)	1×10 <sup>14</sup> <	5×10 <sup>12</sup> <	1×10 <sup>12</sup> <

\* 信越化学製

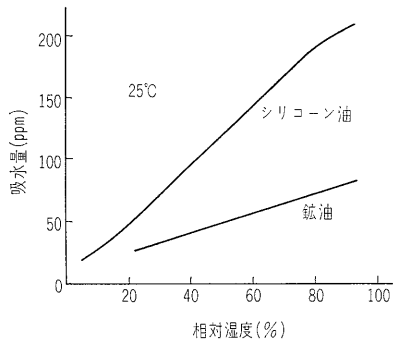
第2表 電気絶縁用シリコン油の長所短所

Table 2. Merits and demerits of silicone oil

	特 性	得 失
長所	引火点が高い 自己消火性である 耐熱性が高い 流動点が低い 蒸発量が少ない 非腐食性である 溶解力が小さい	着火しにくい 燃焼が広がらない 高温で使用できる 低温の起動が容易 高温での蒸発損失が少ない Cu, Fe の腐食の心配がない 多くの有機材料に対する影響が少ない
短所	粘度が高い 熱膨張係数が大きい ガス溶解量が大きい 吸湿量が多い 潤滑が悪い コストが高い	オイルポンプのロスが大きい 体積変化に対する対策が必要 ガス封入タイプのトランスは困難 充分な脱水を行わねばならない 水分の保守管理が重要 オイルポンプのベアリングにくふうを要する

\* 中央研究所

- (3) 鉱油と異なり硫黄分をほとんど含まないので、金属類の硫黄による腐食の心配がない。
- (4) 熱膨張係数が鉱油や不燃油の約 1.5 倍であるので、適用には十分な配慮が必要である。
- (5) ガス溶解量が大きく、N<sub>2</sub> ガスについては、鉱油の約 2 倍であり、N<sub>2</sub> 封入変圧器では、発泡が起りやすいので注意を要する。
- (6) 水分の溶解量も鉱油に比べて、かなり大きい。第 1 図に相対湿度と飽和吸水量の関係を示す。

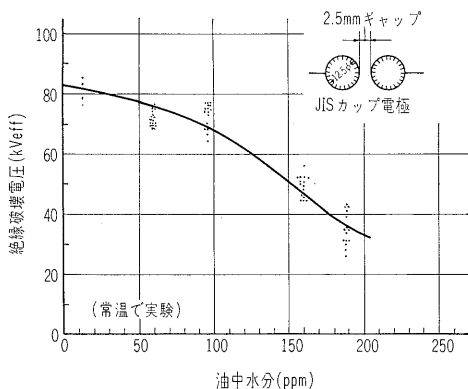


第 1 図 シリコン油と鉱油の飽和吸水量

Fig. 1. Water vapor absorption isotherm of silicone oil and mineral oil

### 2. 電気的特性

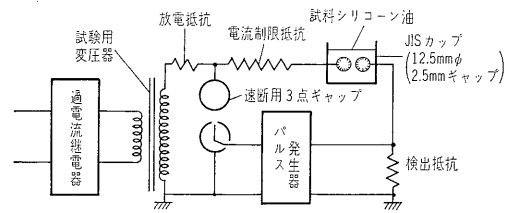
シリコン油の誘電特性は、第 1 表にその一例を示すように鉱油系変圧器油や不燃性絶縁油に比べて一段とすぐれている。また温度、周波数などによる特性の変化が小さい。このようにシリコン油は絶縁油としてすぐれた特性をもっているが、その反面、前述のように、吸湿性に富み、吸湿により、破壊電圧や絶縁抵抗が低下するので溶解水分量の管理には注意する必要がある。第 2 図は、シリコン油の溶解水分量と交流破壊電圧との関係を JIS C-2320 に準じて求めた結果で、後述する速断装置を用いて測定した結果を示した。破壊電圧は水分量の増加に伴って低下し、100ppm をこえると急速に低下する傾向がみられる。



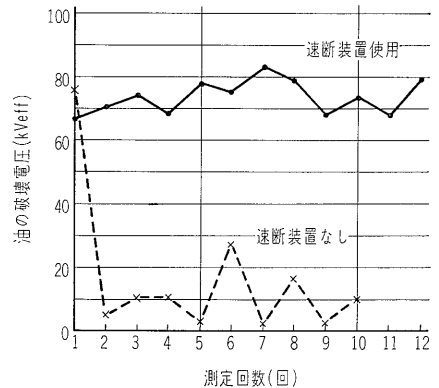
第 2 図 シリコン油 (KF 96-50 Cst) の水分-破壊電圧特性

Fig. 2. Effects of moisture on AC breakdown voltage of silicone oil

シリコン油は一度絶縁破壊すると多量の分解ガスおよび固体状分解生成物が生じその影響で、その後の破壊電圧が大幅に低下する傾向がある。この現象から類推して、シリコン油中の放電によっても絶縁耐力が低下するのではないかと懸念があるが、つぎに述べる実験によって放電エネルギーが著しく大きくない限りその心配のないことが明らかになった。第 3 図は破壊電流を極力小さくするように速断装置を用いて破壊試験を行なった例で、破壊電流 5mA、シャ断時間 5ms で繰り返し破壊試験を行なった結果、破壊電圧の低下は、ほとんど、認められなかった。第 4 図は図中に示す絶縁モデルに交流電



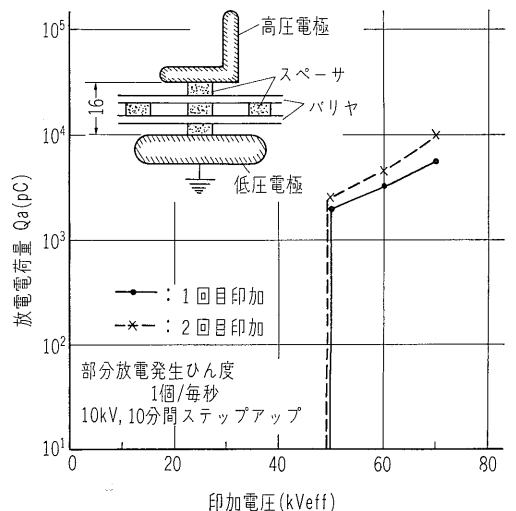
(a) 速断回路



(b) 測定例

第 3 図 シリコン油の破壊電圧

Fig. 3. Breakdown voltage of silicone oil



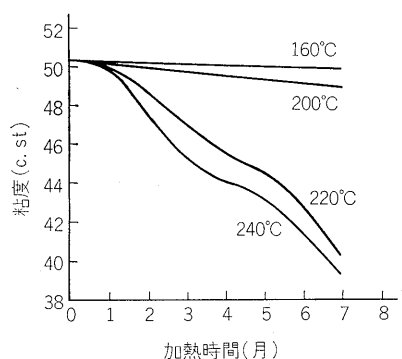
第 4 図 シリコン油絶縁のコロナ特性

Fig. 4. Q-V characteristics of silicone oil impregnated insulation

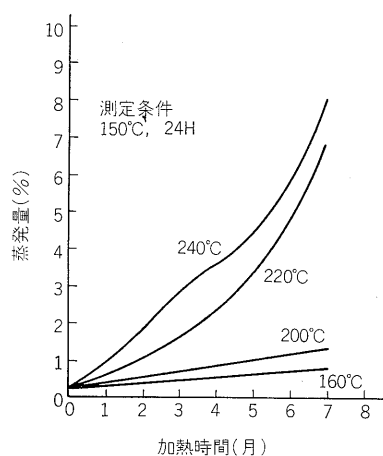
圧を印加し(10kVステップ, 10分間保持)高圧電極のエッジ部でコロナを発生させて得た  $Q-V$  特性である。実験は、繰り返して2回行なったが、いずれもある電圧から  $10^3 \sim 10^4$  PCの油中コロナが毎秒0.2~1発の割合で、間欠的に発生したが、2回目の印加においても、コロナ開始電圧の低下やコロナ量の経時変化は認められなかった。このように比較的発生ひん度の小さい、弱い放電に対して、シリコン油は十分な安定性を持っていることがわかる。

### 3. 耐熱性

シリコン油の耐熱性を求めるために窒素ガス封入のガラスアンブル中で長期の加熱劣化試験を行ない、粘度、蒸発量、電気特性などの変化を追跡した。それらの結果



第5図 シリコン油の加熱劣化による粘度変化  
Fig. 5. Variation of viscosity in heat aging test

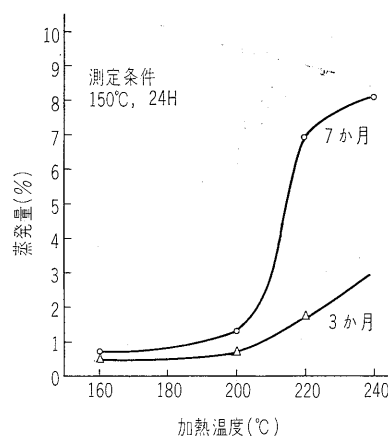


第6図 シリコン油の加熱劣化による蒸発量変化  
Fig. 6. Evaporation loss in heat aging test

第3表 240°C加熱シリコン油の電気特性変化  
Table 3. Variation of electrical properties in heat aging test at 240°C

加熱時間 (月)	0	1	2	3	5
特性					
$\tan \delta$ (80°C・%)	0.01	0.03	0.06	0.01	0.09
体積抵抗率 (80°C-Ω-cm)	$7.8 \times 10^{14}$	$5.0 \times 10^{14}$	$1.5 \times 10^{14}$	$2.6 \times 10^{14}$	$3.8 \times 10^{14}$

の例として、粘度(25°C)と蒸発量(150°C, 24時間にて測定)の変化を第5図と第6図に示した。粘度、蒸発量のいずれも、200°Cまでは、比較的变化が小さい。第3表に電気特性( $\tan \delta$ , 体積抵抗率)の変化の一例を示したが、物理的特性に比較して電気特性は変化が非常にわずかである。これはシリコン油の熱分解生成物の電気特性がもとのシリコン油の電気特性とあまり変わらないためであろう。このように特性により変化の傾向がかなり異なるので、これらの結果から、一般の有機材料の場合のように、シリコン油の耐熱限界を求めることは難しい。ここで、第5図の蒸発量の変化を加熱時間をパラメータとして表わすと第7図のようになる。この図でみると200°C以上から変化が大きくなり、この温度を境にして、劣化の機構が異なると考えられる。この傾向は、粘度変化の場合でも同じである。このように200°Cまでの特性の変化はわずかであり、電気特性の変化も考えあわせると、このシリコン油の耐熱温度は、180°C前後と考えられる。以上は、初期水分が約30ppmであるが、100ppmの場合は耐熱温度は15°C程度低下する。水分のほかに金属が共存した場合にも多少耐熱温度は低くなる。



第7図 シリコン油の加熱温度と蒸発量の関係  
Fig. 7. Temperature characteristic of evaporation loss

## III. シリコン油浸ノーメックス絶縁

### 1. ノーメックスの種類および特性

芳香族ポリアミド紙(商品名, ノーメックス: デュボン社製)は、耐熱性、物理特性などがすぐれているので、回転機など、主に乾式機器の絶縁材料に広く用いられている。ノーメックスには抄紙後ホットカレンダー加工したタイプ(#410)と加工しないタイプ(#411)、ほかにカレンダー加工されているがポリマの結合分子(ファイブリット)を短繊維(フロック)に比べ減らした含浸性の良いタイプ(E54A)、マイカをポリマに混抄したタイプ(E58)などがある。これらの各種特性を第4表に示

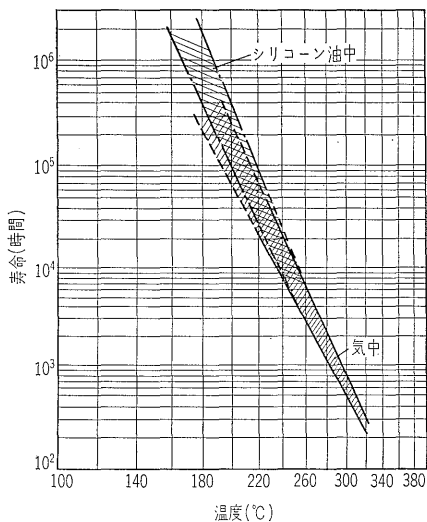
第4表 ノーメックスの種類と特性  
Table 4. Types and properties of Nomex papers

ノーメックス種類		411	410	E54A	M(E58)
特性					
厚さの種類		6~30 mil まで 5種類	2~30 mil まで 10種類	3, 5 mil のみ	3~10 mil まで 4種類
密度		0.3	0.8~1.2 (厚さにより異なる)	—	—
引張強さ(kg/mm <sup>2</sup> )		1.2	7.7	0.82	5.2
破壊電圧 (kV/mm)	空气中	11	24	12	34
	油浸	52	50	48	50
油浸性		◎	○~× (厚さにより異なる)	○~◎	○~△
作業性	テーピング	△	◎ (薄もの)	△	○ (薄もの)
	成形品	◎	△	○	△

した。#410は密度が大きいので機械特性にすぐれているが、厚いものは、油浸性が悪く、また、成形性にも問題がある。#411は密度が小さいので機械特性や気中での破壊電圧は低い油浸後の破壊電圧は#410と大差ない。E54AやE58は入手に制約があるので以下に述べるように#410と#411を使用箇所により使い分けている。

2. ノーメックスのシリコン油中寿命

ノーメックスをシリコン油中で使用した場合の耐熱寿命を求めるため、ガラスアンプル法で油中加熱試験を行なった。この際、シリコン油は脱気、脱水処理し、ノーメックスは充分乾燥させたものを試料とした。各温度で加熱し、特性変化を追跡したが、一例として引張強さが初期値の50%に達した時間を寿命とした場合の温度-寿命特性を第8図に示した。図中に空气中における耐熱寿命特性を併記したが、このようにシリコン油中におけるノーメックスの耐熱寿命は、空气中の場合と大差ないことがわかった。なおシリコン油の吸湿量は鉱油に比べて大きく、またノーメックスも飽和吸湿率は7~8%と大きいので、吸湿した試料についても同様の



第8図 ノーメックスの温度寿命特性

Fig. 8. Life-temperature characteristics of Nomex paper in silicone oil and in air

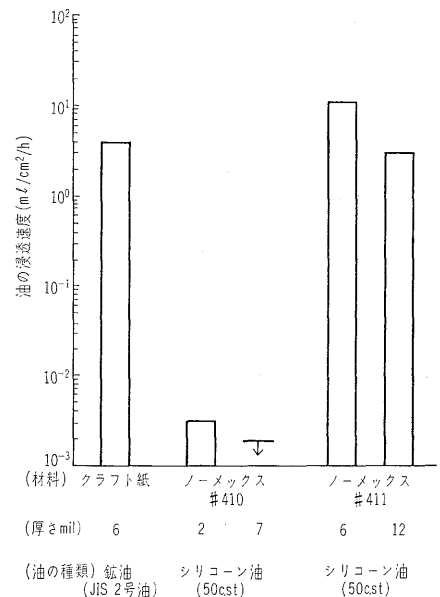
試験を行なったところ、やはり水分の影響で耐熱温度が低下することを確認した。

3. ノーメックスのシリコン油含浸性

ノーメックス#410は、気密度が非常に高く、透気度の測定からは油含浸性を評価できない。

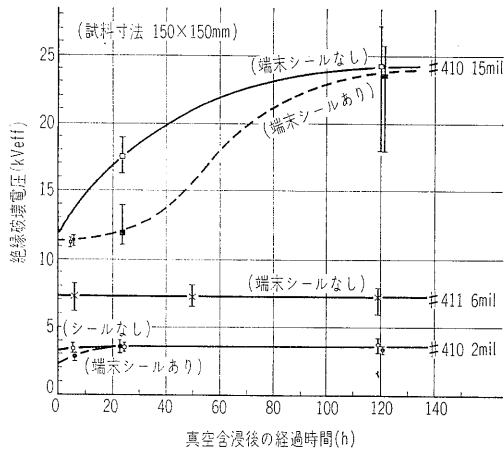
そのため放射化分析法により油浸透性を求める方法を考案した。これは供試ノーメックスの上にOリングを介してシリコン油を常温大気圧の状態のみたし、下部容器を0.1 mmHgの減圧状態に保持する。所定時間後に下部に漏れた微量の油を溶剤で洗浄回収し、溶剤を蒸発させた後、放射化を行なう。その強度からあらかじめ求めておいた検量線を用いて油の浸透速度を求める。

この方法で、ノーメックスおよび絶縁紙のシリコン油あるいは鉱油の浸透速度を求め、比較したのが第9図である。図によれば、#410の厚さ2ミルの場合、垂直方向の油漏れ量は、 $3.2 \times 10^{-3}$  ml/cm<sup>2</sup>/h と非常に小さい。このようにとくに#410ノーメックスは油の浸透性が悪く、とくにシリコン油のような粘度の高い油と組合



第9図 各種ノーメックスおよびクラフト紙の油浸透速度

Fig. 9. Oil impregnation rate of Nomex papers and kraft paper



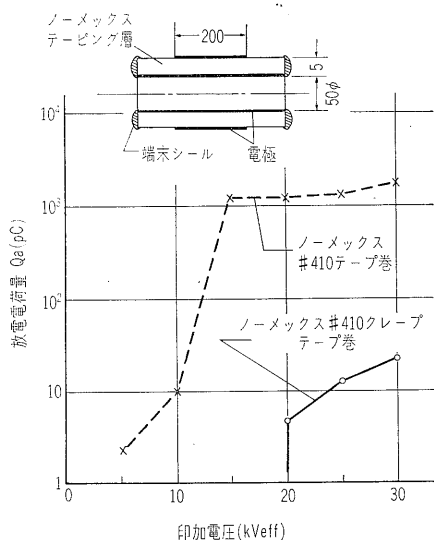
第10図 絶縁破壊電圧—時間特性

Fig. 10. Time effects of oil impregnation on AC breakdown voltage of Nomex paper

わせる場合には実用上の十分な配慮が必要となる。

第10図は 110°C, 0.1 mmHg で真空乾燥したノーマックスシートにシリコン油 (70°C) を注油し、油面を大気圧にもどしたのちの経過時間とノーマックスの破壊電圧との関係を示したものである。図中の点線は、シートの端面を樹脂でシールして表面だけから含浸が行なわれるようにし、広い面積のシートを模擬したものである。#411は、前記の結果と同じくきわめて含浸性が良く、真空注油終了と同時に破壊電圧は飽和値に達する。これに対し#410は飽和値に達するのに時間がかかり、端面をシールした場合には含浸時間がいちじるしく長くなっており、厚物のノーマックスは、シート表面からの含浸抵抗が端面からのそれにくらべかなり高いことがわかる。

また第11図は、モデルによるノーマックス#410のテープ巻絶縁のコロナ特性を求めた結果である。モデルは外

第11図 ノーマックステープ巻円筒形モデルの  $Q-V$  特性Fig. 11.  $Q-V$  characteristics of silicone impregnated Nomex insulation

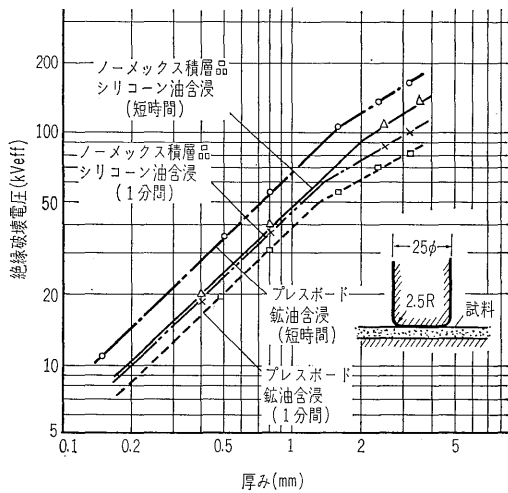
径50mmの鉄パイプに厚さ2ミルの#410テープとしわづけ加工した#410のクレープテープをそれぞれ5mm厚に緊密にテーピングしたもので、真空加熱乾燥後シリコン油を真空含浸した。図から、#410テープでもしわづけ加工することによって油含浸性がいちじるしく改善されることがわかる。一方、ノーマックス#410は、このように2ミル程度の厚さでもノーマックスの厚さ方向の油の浸透速度が非常に小さいことがわかる。

#### 4. ノーマックスの成成品とその特性

ノーマックスを変圧器に使用する場合、大別すると(a)巻線、リード線などの被覆用テープ、(b)バリヤ用ボードおよび成形加工品、(c)くさび、スペーサ用構造材料がある。

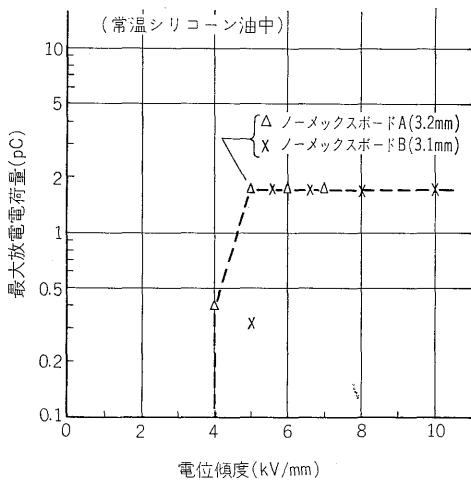
(b)と(c)では、かなり厚いボード状のものや複雑な形状の成成品となるが、前項で述べたようにノーマックスは油浸性が悪いため、従来の積層成形法では満足な製品がえられず、高圧機では、ボイドによるコロナ放電が大きな問題になる。従来のノーマックスの成形法には、接着剤を用いる積層成形法や非常に高い温度、圧力で熱融着させる積層成形法があるが、いずれの場合もえられた成成品の油含浸性は悪く、また、後者の方法では厚物の成形が難しい。したがって、われわれは前記の(a)には#410の薄物で幅の狭いテープを、とくに絶縁厚の大きいところは特殊加工によりしわづけしたクレープテープを用いた。(b)には#411を接着樹脂を使用せず、かつ高温高圧処理しないで成形加工した油含浸性のよいボード(以下ボードAと称する。特許申請中)を、また(c)には#411をベースに特殊配合エポキシ樹脂を併用しボイドレスな成成品(以下ボードBと称する。特許申請中)特殊処理により局部接着した成成品(以下ボードCと称する。特許申請中)を開発しかつこれを適所に使いわけてコロナ特性のすぐれた絶縁システムを完成した。第12図はこれらのボードのシリコン油含浸後の交流破壊電圧を JIS C-2111 に準じて鉱油含浸紙のそれと比較したものである。各ボードの破壊電圧にはほとんど差がなく、種々の厚さについて鉱油含浸プレスボードとほぼ同等の絶縁耐力を示した。第13図は部分放電特性の一例で、縁端に5mm Rの丸みをもった直径80mmの平円板電極間に試料を狭み、コロナを測定した結果である。

いずれの試料も、電界が4kV/mmまでコロナはまったく検出されず、この電界をこえると2pC以下の微細コロナが検出されたが、電圧を上げてても電荷量が増す傾向は認められなかった。微細コロナの発生原因は明らかでないが、ノーマックスせんい中のマイクロボイドによるものと推定される。この数pC~数十pC程度の微細コロナがシリコン油浸ノーマックス絶縁の耐電圧寿命特性に影響をおよぼすか否かを解明するために  $V-t$  特性



第12図 ノーメックス積層品の絶縁破壊電圧

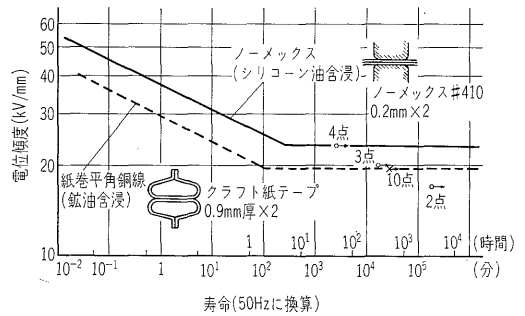
Fig. 12. Relation between insulation thickness and AC breakdown voltage of silicone oil impregnated Nomex-board and mineral oil impregnated pressboard



第13図 ノーメックスボードの部分放電特性

Fig. 13. Q-E characteristics of silicone oil impregnated Nomex-board

試験を行なった. 第14図はシリコン油を真空含浸したノーメックスシート (0.2mm厚さの #410 を 2枚重ね)



第14図 油浸絶縁紙の V-t 特性

Fig. 14. V-t characteristics of silicone oil impregnated Nomex-paper and mineral oil impregnated insulation paper

の V-t 特性を油浸紙巻線のそれと比較したものである. 電極端部から油中沿面コロナが発生する電界を境に, 曲線に屈折がみられ, 沿面コロナが発生しない領域では, 曲線の傾斜はきわめて小さい. また曲線が屈折する時点での電位傾度は23kV/mm以上であり前述の微細コロナを開始する電界 (4 kV/mm) に比べていちじるしく高い. この結果から第13図の微細コロナは絶縁に有害な影響をおよぼさないことが明らかになった.

このように, 従来の変圧器における鉱油系絶縁油-絶縁紙系と同等のすぐれたコロナ特性をはじめとする絶縁特性を有する新しい絶縁システムを開発することができた.

#### IV. あとがき

新しい油浸絶縁システムであるシリコン油浸ノーメックス絶縁に関しその概要を報告したが, この絶縁は耐熱性が非常に高かつコロナ特性をはじめとする絶縁特性は従来の鉱油含浸紙の場合と同等であるなどすぐれた特性を有し, 機器の耐熱グレードの向上に大きな寄与をするものと期待される.



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。