

シアノエチル化紙の変圧器への応用

(65°C 柱上変圧器)

Application of Cyanoethylated Paper to the 65°C Pole Transformer

松村 和男* 上田 太一*
 Kazuo Matsumura Taichi Ueda
 佐藤 博* 三好 昭*
 Hiroshi Satō Akira Miyoshi

内 容 梗 概

変圧器の小形軽量化には耐熱絶縁紙を用いて許容温度上昇限度を高めることが有効である。近年アメリカでは絶縁紙を化学処理した耐熱絶縁物を用い、従来 55°C であった許容温度上昇を 10°C 高めるとしていわゆる 65°C 変圧器が実用化されている。

本研究では変圧器の耐熱性を高めるためシアノエチル化紙を開発し、この絶縁紙の耐熱性の検討および実物変圧器による強制劣化試験を行なった。その結果シアノエチル化紙を使用する変圧器は従来より 10°C 以上許容温度上昇を高め得ることがわかった。またこの変圧器に用いる引火点および安定度の高い耐熱絶縁油も開発し良好な結果を得たので紹介する。

1. 緒 言

一般に変圧器の容量はその温度上昇により制限されるため、機器の小形化には絶縁物の耐熱性をよくして許容温度上昇度を高めることが有効である。近年絶縁紙を化学処理することにより耐熱性を高めた種々の耐熱絶縁紙が開発され、アメリカにおいてはすでに従来の許容温度上昇 55°C より 10°C 高い 65°C 変圧器が実用されている。わが国ではシアノエチル化紙、アミン添加紙などの耐熱紙が開発されている。

日立製作所でもすでにシアノエチル化紙および耐熱絶縁油を開発し、これらの耐熱性を検討し、さらに実物変圧器の強制劣化試験によるシアノエチル化紙とクラフト紙の寿命比較を行ってきた。最近関西電力株式会社で大形の柱上変圧器にこの耐熱変圧器を採用することになり、わが国でも実用化の段階にはいつてきた。この機にあたりシアノエチル化紙、および変圧器の寿命試験結果を紹介し参考にするものである。

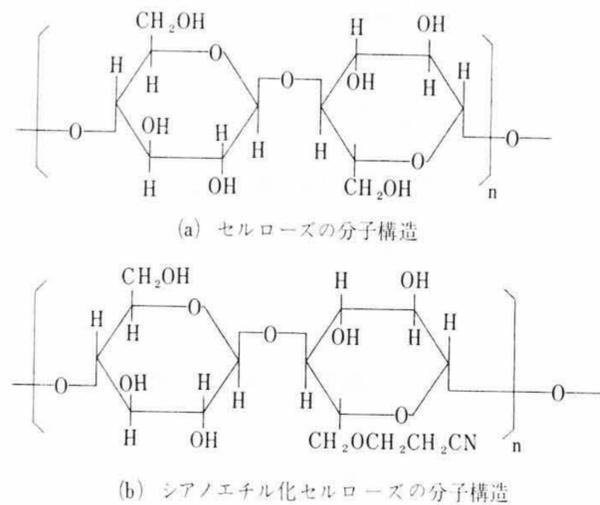
日立製作所ではこのシアノエチル化紙のほか、現在なお種々の耐熱絶縁紙についても研究中である。

2. 耐熱紙の概要

近年高分子化学の発達により各種の合成樹脂からなる絶縁材料が開発されているが、油入変圧器では絶縁耐力、柔軟性、熱軟化性および価格などの点で現在もまだクラフト紙、プレスボードなどの天然繊維性絶縁物が主絶縁材料となっている。したがって上記の特性が現在の絶縁紙と同等であり、さらに耐熱性を向上させる方法があれば非常に有効で容易に変圧器に適用できる。以上の考えに基づいて耐熱性を向上させたものがシアノエチル化紙である。

一般にセルロースの分子構造は第 1 図(a)に示す構造をしているが、熱劣化に最も影響があるのは第一水酸基であるといわれており、シアノエチル化紙はこの熱的に最も弱い第一水酸基をシアノエチル基で置換したものである。その分子構造を同図(b)に示す。

クラフト紙のシアノエチル化は一般的にクラフトパルプをアルカリ触媒の存在下でセルロースとアクリロニトリルとを反応させる方法で得られるが、製造には種々の方法があり、メーカーによりそれぞれ異なっている。またシアノエチル基の置換程度は成分中に含まれる窒素含有量によって示されるものである。



第 1 図 分 子 構 造

第 1 表 絶縁紙油中劣化の方法

試験順序	密 閉 試 験	開 放 試 験
1	各試料約 10 g をガラス管にそ入	同 左
2	100°C × 16 時間真空乾燥	同 左
3	脱気変圧器油を浸	同 左
4	常温で 3 時間真空吸引	
5	真空に吸引しながらガラス管を密封	
6	130°C と 150°C の油槽中で加熱劣化	同 左
7	所定日数加熱後真空を破って取り出す	所定日数加熱後試料を取り出す
8	四塩化炭素で油抜き	同 左
9	20°C 相対湿度 65% の雰囲気中で 24 時間放置後特性測定を行なう。	同 左

3. 絶縁紙およびモデルコイルの油中劣化特性

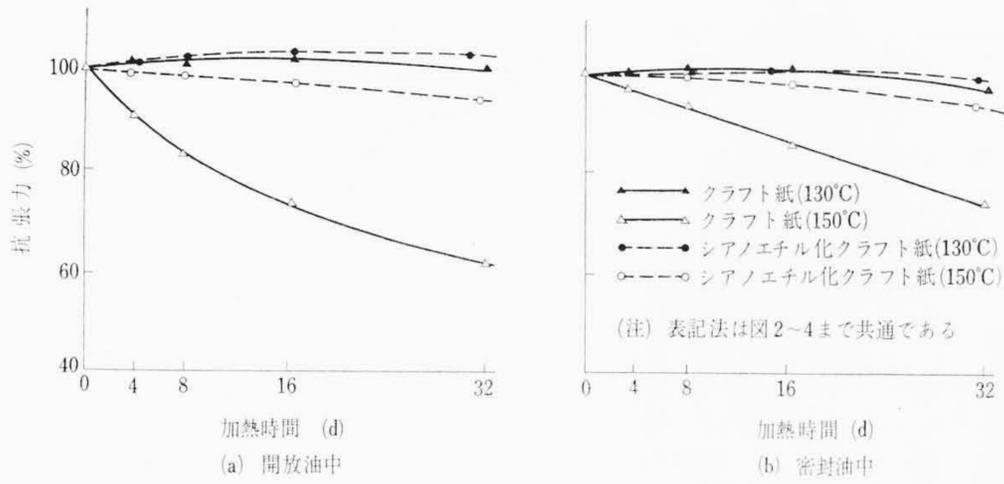
3.1 絶縁紙の油中劣化特性

油入変圧器の構造は大形機器では密封構造と考えてよいが、柱上変圧器のような小形機器では長期間を対象とすると往々開放状態と考えられる場合が多い。そこで密封状態と開放状態について高温油中におけるシアノエチル化クラフト紙(窒素含有量 3%)と普通クラフト紙の熱劣化比較試験を実施した。

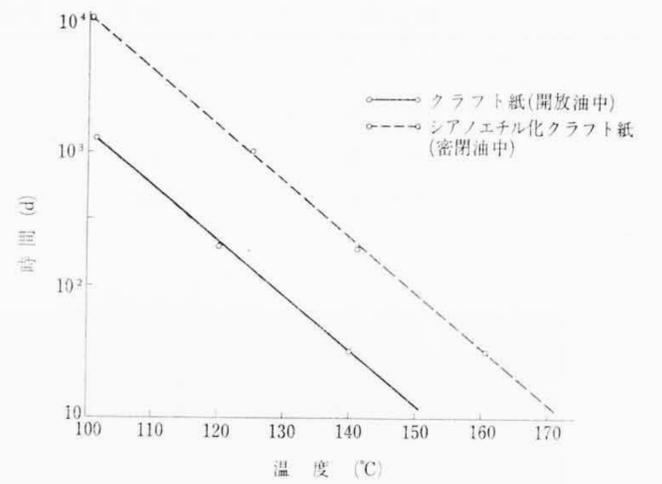
3.1.1 試験方法と試験結果

シアノエチル化クラフト紙(以下シアノエチル化紙という)と普通のクラフト紙(以下クラフト紙という)を第 1 表による方法で油中加熱し、4 日、8 日、16 日および 32 日を経た後の各種特性を試験した。劣化比較の一例として第 2~4 図に両紙の抗張力、比破裂強さ

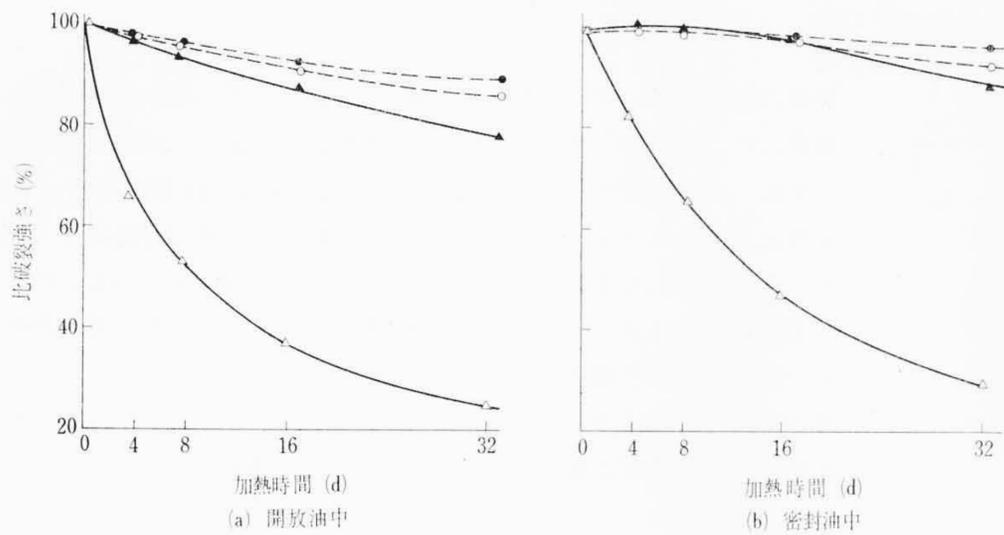
* 日立製作所亀戸工場



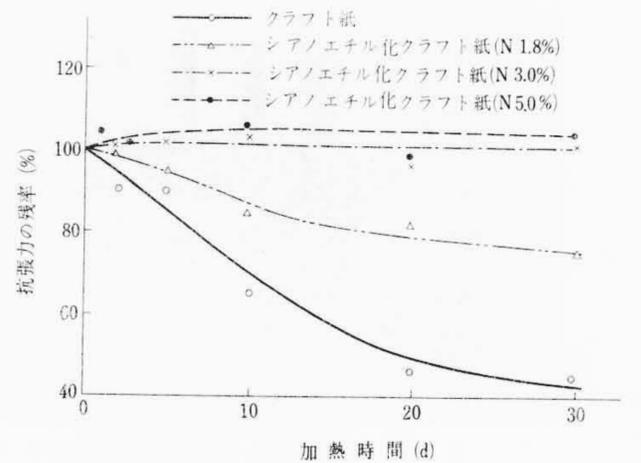
第2図 加熱油中における抗張力の変化特性



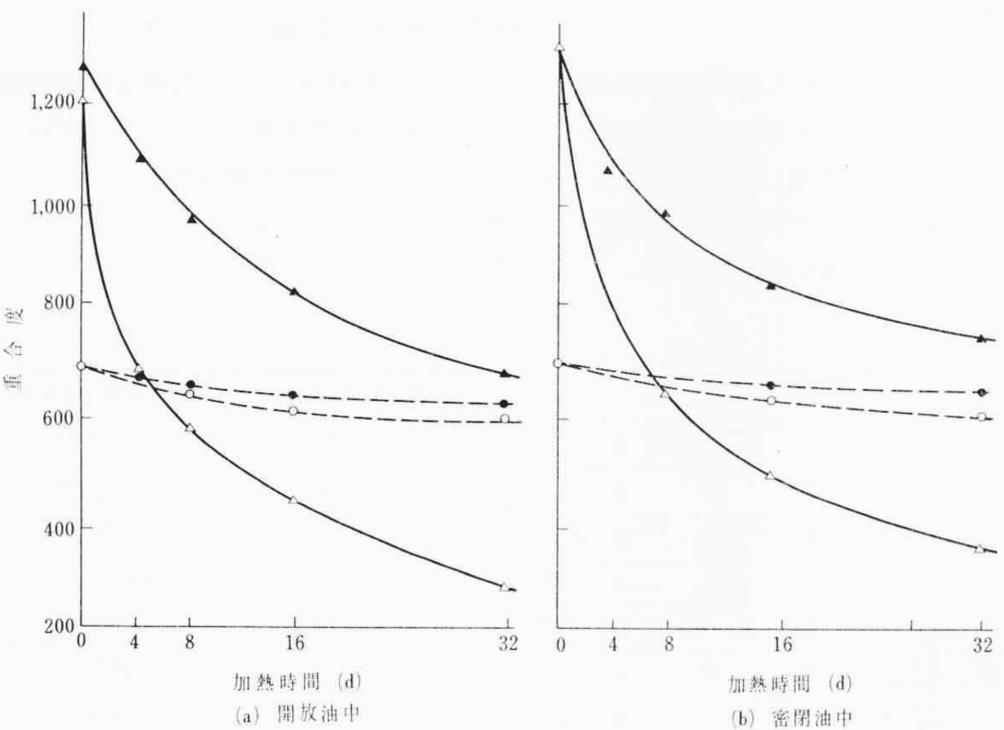
第5図 重合度が500に低下するまでの日数と温度の関係



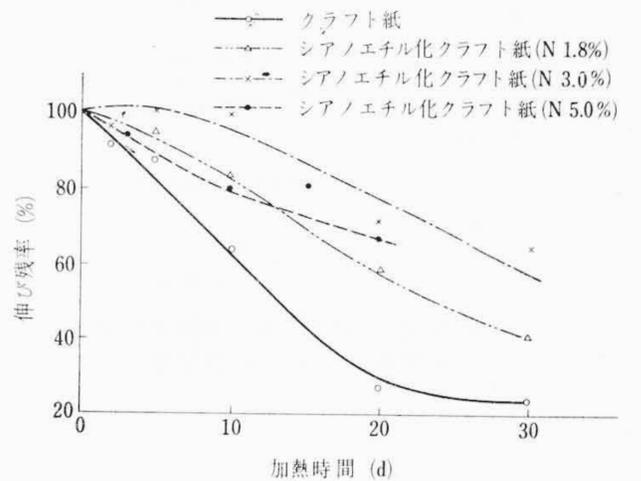
第3図 加熱油中における比破裂強さの劣化特性



第6図 密閉油中加熱(150°C)による抗張力の変化(縦方向)



第4図 加熱油中における重合度の劣化特性



第7図 密閉油中加熱(150°C)による伸びの変化(縦方向)

および紙の重合度の劣化特性を示した。図示のようにクラフト紙の熱劣化が大きいのに比べシアノエチル化紙の劣化は少なく、高温になるほど熱劣化に対する効果の大きいことがわかる。また開放油中と密閉油中では大差はないが、密閉油中のほうがシアノエチル化紙の効果は大きいようである。次に油中加熱による紙の重合度変化⁽¹⁾から耐熱寿命を計算すると第5図のようになるが、シアノエチル化紙はクラフト紙に比べ約20°C高い温度で使用可能であることを示している。なお第5図の算定基準は、シアノエチル化紙の熱劣化が少ないため重合度が500になったときを寿命として計算したものである。しかしもっと重合度の低いところでも使用可能といわれてい

るので、このことを勘案すればシアノエチル化紙はもっと高温で使用可能であるといえる。

3.2 シアノエチル化紙の窒素含有量の検討

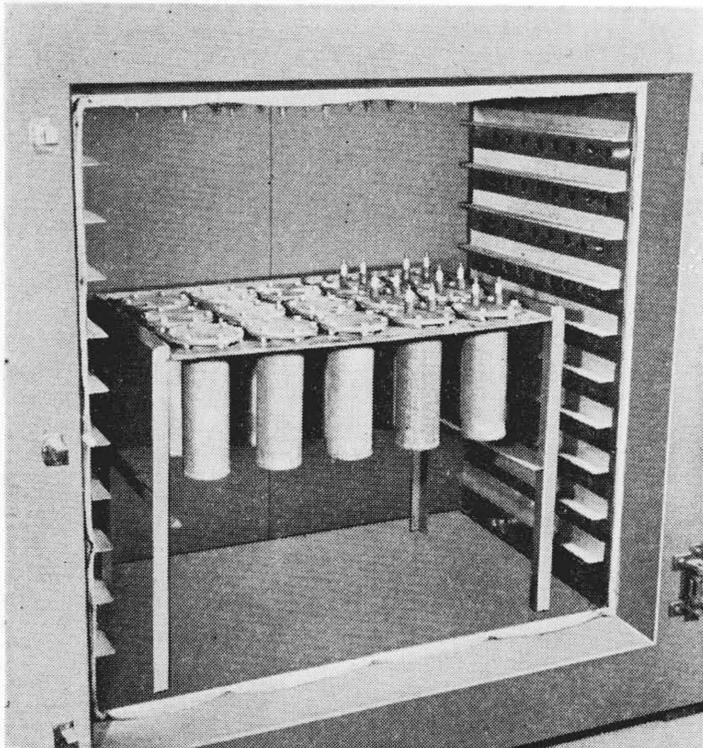
クラフト紙のシアノエチル化の程度は普通窒素含有量で表わし、一般に窒素含有量が多いほど耐熱性が良好であるが、含有量が多くなると製紙法がむずかしくなり、機械的強度の初期値が低くなる欠点がある。したがってどの程度の窒素含有量が適当であるかを決定することは重要である。これを決定するためクラフト紙と窒素含有量1.8%、3.0%、および5.0%のシアノエチル化紙について比較検討した。

3.2.1 試験方法

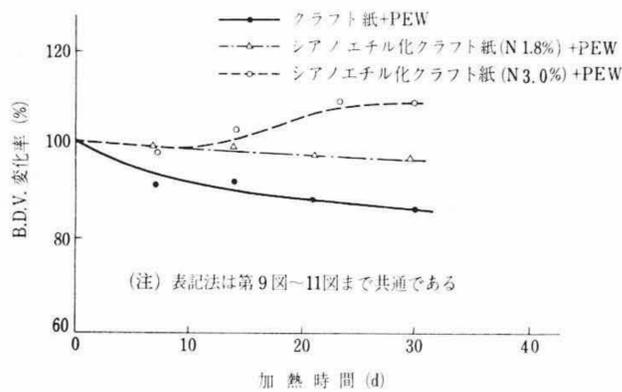
各試料を第1表の密封試験の方法に準じて処理した後150°Cで30日間加熱し熱劣化特性を比較した。この一例として抗張力および伸びの特性を第6図と第7図に示す。以上の試験結果を検討すると、窒素含有量が3%をこえると抗張力の劣化および伸びの変化も少なく、それ以上窒素含有量を多くしてもあまり効果がない。

第 2 表 モデルコイル絶縁物の仕様

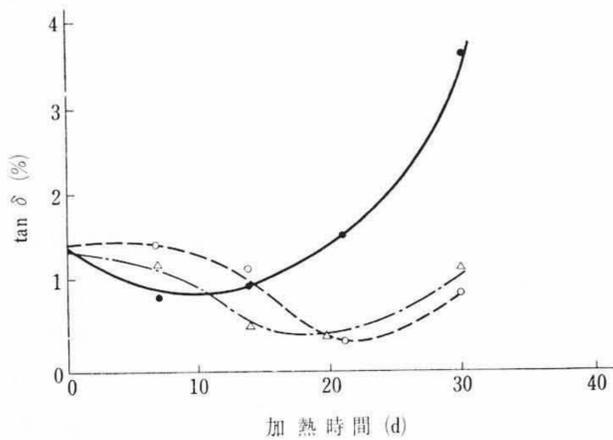
絶 縁 紙	マグネットワイヤ
0.13t クラフト紙	PEW 1.0φ
0.13t シアノエチル化クラフト紙 (N 1.8%)	PEW 1.0φ
0.13t シアノエチル化クラフト紙 (N 3.0%)	PEW 1.0φ



第 8 図 モデルコイル強制劣化試験方法



第 9 図 175°C 油中加熱劣化試験におけるモデルコイルの B D V 変化

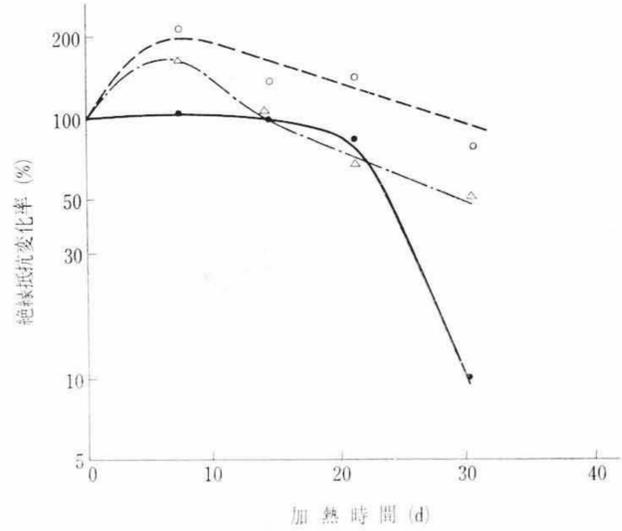


第 10 図 175°C 油中加熱劣化試験におけるモデルコイルの tan δ 変化

これから考えて現在の製法によるシアノエチル化紙の窒素含有量は大体 3% 程度で十分なる耐熱性が得られるといえる。

3.3 モデルコイルによる強制劣化試験

以上絶縁紙の熱安定性を機械強度により測定したが、次に電気的特性を検討するため第 2 表の仕様でモデルコイルを作り、ワニス処理した後容器に入れ、真空注油して第 8 図のように恒温槽に入れ、



第 11 図 175°C 油中加熱劣化におけるモデルコイルの絶縁抵抗変化

各種の温度で 30 日間加熱劣化させ、モデルコイルの熱劣化特性を測定した。結果の一例として 175°C 加熱試験における絶縁破壊電圧の変化、tan δ 変化および絶縁抵抗の変化を第 9~11 図に示す。図示のようにシアノエチル化紙はクラフト紙に比べ熱安定性にすぐれていることがわかる。また窒素含有量 3% ものは 1.8% のものに比べて熱安定性はよく、試験片での結果と一致しているが、電気的特性の変化と前項の機械的特性の変化を比べてみてわかるように、電気的特性の劣化は少ない。また同時にそれぞれの供試品に用いた絶縁油の劣化特性を比較した。これによると絶縁破壊電圧、tan δ ではあまり差はないが、酸価はシアノエチル化紙のほうがよい結果となっており、この点から絶縁油に及ぼす影響は従来の絶縁紙に比べ劣ることはないといえる。

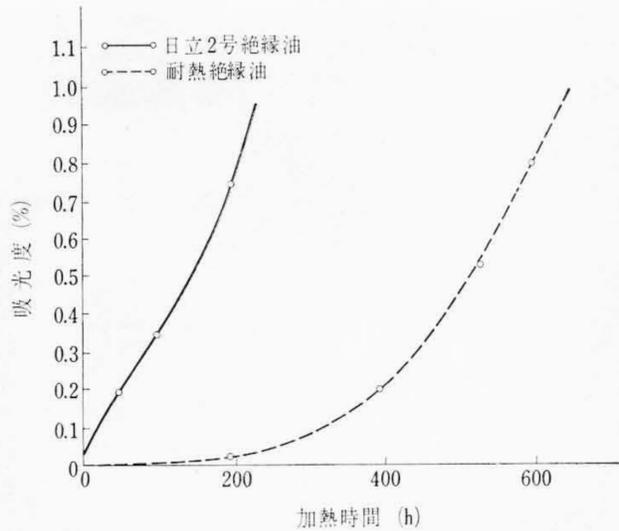
4. 絶縁油の劣化試験

65°C 変圧器用絶縁油として、現用絶縁油より引火点を高め精製に考慮を加えて酸化防止剤を添加した新絶縁油について劣化試験を実施した。新絶縁油と現用絶縁油の一般特性を第 3 表に示す。

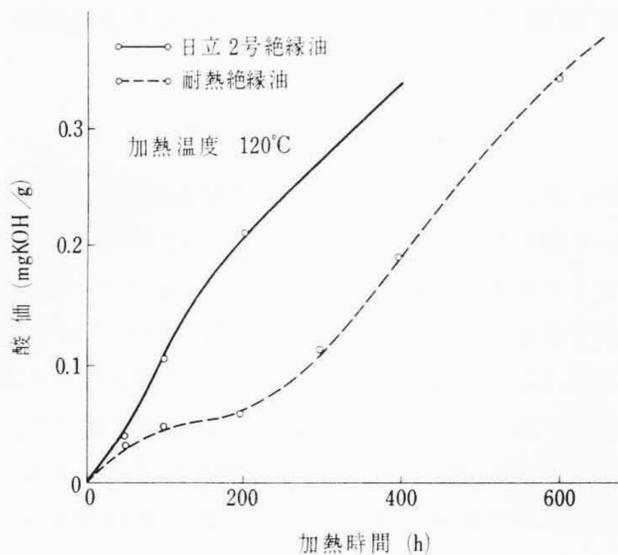
供試油の劣化試験、すなわち酸化安定度試験を行なうにあたり、JIS-C2101 あるいはこれに類似した日立法は無添加油の評価方法と

第 3 表 供試絶縁油の一般特性

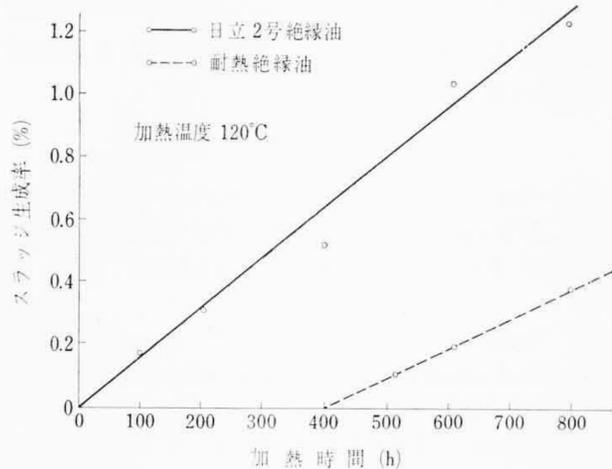
項 目	現用絶縁油	65°C 変圧器用絶縁油	
比 重 D_{4}^{20}	0.8744	0.8659	
屈 折 率 n_D^{20}	1.4843	1.4776	
動 粘 度 $\nu^{20}(\text{cst})$	21.39	20.09	
引 火 点 $\text{PM}(^{\circ}\text{C})$	150	155	
蒸 発 減 量 (Wt%)	0.14	0.10	
流 動 点 ($^{\circ}\text{C}$)	-27.5	-27.5	
フルフロル数 (%)	4.0	2.0	
比 分 散 δ_{20}	117	112	
分 子 量	285	295	
v-n-α 分 析 値	C _P (%)	55.9	57.3
	C _A (%)	11.7	7.4
	C _N (%)	32.4	35.4
	R _A	0.40	0.24
	R _N	1.48	1.60
ASTM 銅 腐 食 性	2c	2e	
tan δ (%) at 70°C	0.004	0.010	
誘 電 率 at 70°C	2.09	2.13	
体積固有抵抗 (Ω-cm) at 70°C	7.20×10^{14}	7.26×10^{14}	
酸 化 防 止 剤	無	有	



第12図 吸光度上昇曲線 (610 mμ)

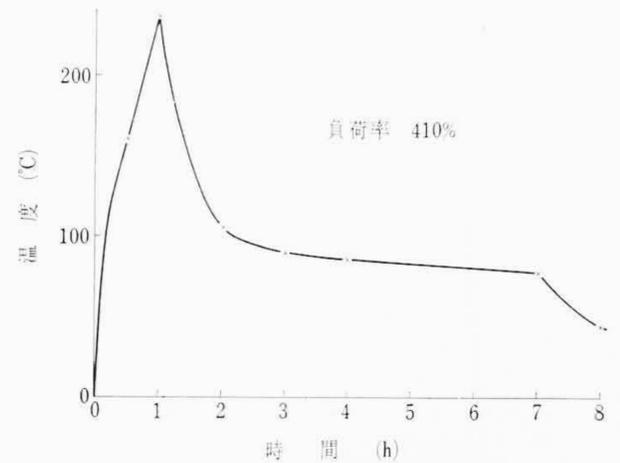


第13図 酸価上昇曲線



第14図 スラッジ生成率上昇曲線

して採用されたもので、これを添加剤入絶縁油の評価に用いることには多少疑問がある。そこでわれわれは日立法の試験時間を延長して劣化を行なった。すなわち絶縁油に銅を入れ酸素を補給しつつ120°Cで400時間以上加熱して吸光度変化、酸価およびスラッジ生成率を測定した。この試験結果を第12, 13, 14図に示す。この結果65°C変圧器用絶縁油は吸光度変化、酸価およびスラッジ生成率のいずれも現用絶縁油より劣化が少ないことがわかった。また現用絶縁油は酸価が約0.1 mg KOH/gに達するとスラッジが析出しはじめ、以後酸価の増加が早くなるが、第14図に示すように65°C変圧器用絶縁油はその析出時間がおくれており増加率も低いことがわかる。これは精製度を考慮し酸化防止剤を加えた効果が現われたものと思われる。これらのことから酸価0.1 mgKOH/gを基準値として比較計算すると、新絶縁油は現用絶縁油より少なくとも10°C以上の高温で使用可能となる。



第15図 負荷時間—温度特性

5. 実変圧器による強制劣化試験

前項までに絶縁紙、モデルコイルなどの試験片によりクラフト紙とシアノエチル化紙の比較試験について述べたが、その結果シアノエチル化紙の熱安定性は従来のクラフト紙に比べ約20°C以上の高温で使用可能であることがわかった。

以上の試験の結果よりほとんど確実に65°C変圧器としてシアノエチル化紙が使用できると考えられるが、作業性の問題や変圧器の複雑な絶縁構成あるいは変圧器が実際に使用される状態において受ける機械的応力、異常電圧などを考えた場合まだ問題が残っている。そこで本研究の信頼性を高めるため、現用の変圧器とシアノエチル化紙を用いた変圧器との寿命の比較試験を行なった。以下これについて述べる。

5.1 試験方法

クラフト紙を使用した現用の変圧器とシアノエチル化紙(窒素含有量3.0%)を使用した6kV級変圧器各4台を一般製品と同一作業工程、同一作業ラインで製作し供試品とした。この供試品に第15図に示す温度曲線になるような負荷をかける。すなわち負荷率を変えて7時間通電後無負荷で17時間放置する。このような負荷を5日間くり返して1周期とし、各周期の最後に下記の試験を行ない破壊までくり返す。

- (1) 130%の誘導電圧試験
- (2) 規格の80%の衝撃電圧試験
- (3) 定格電流の15倍2秒間の短絡試験

なお上記試験中における絶縁油の劣化特性も測定した。

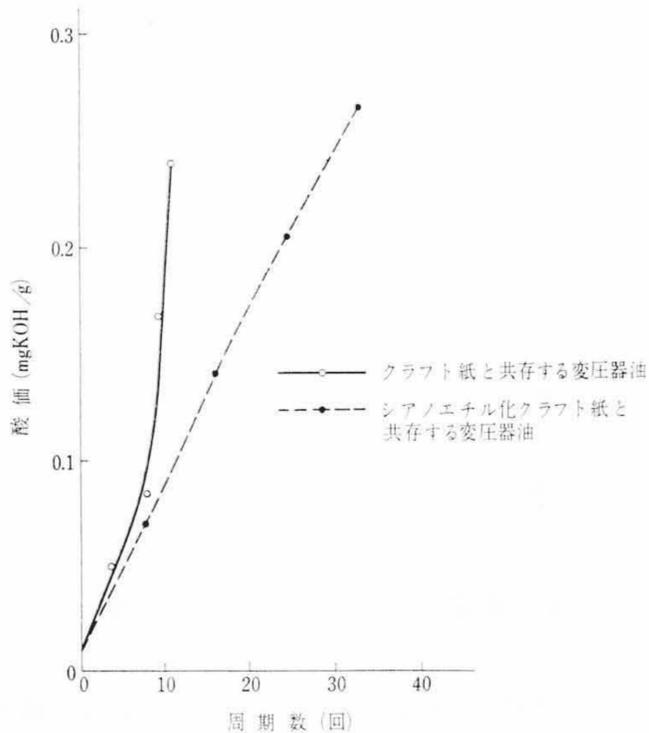
5.2 試験結果と検討

第4表に各供試変圧器焼損時までの経過周期を示した。また絶縁油劣化特性の一例として酸価の変化を第16図に示した。

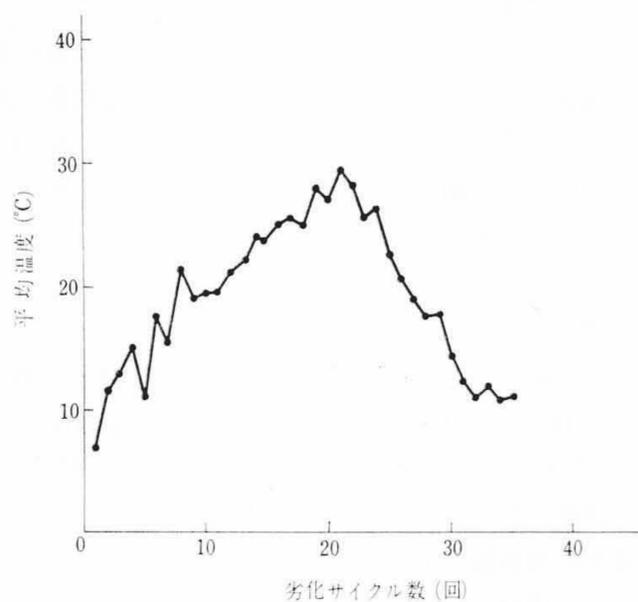
変圧器の寿命計算方法については種々の提案^{(2)~(6)}がなされており、決定的な方法はないが、一応よく知られている8°C半減説を用いて第4表と第15図から寿命計算をすると、連続95°C(最高温度点)使用に換算で現用変圧器は全台数平均で30年、第4表中特に低い1台を除いた平均では約40年となる。しかしわれわれの一般常識か

第4表 負荷率410%強制劣化試験結果

使用絶縁紙	供試変圧器 No.	破壊までの劣化試験周期数			
		10	20	30	40
クラフト紙	1	—	—	—	—
	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	4	—	—	—	—
シアノエチル化クラフト紙	1	—	—	—	—
	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	4	—	—	—	—

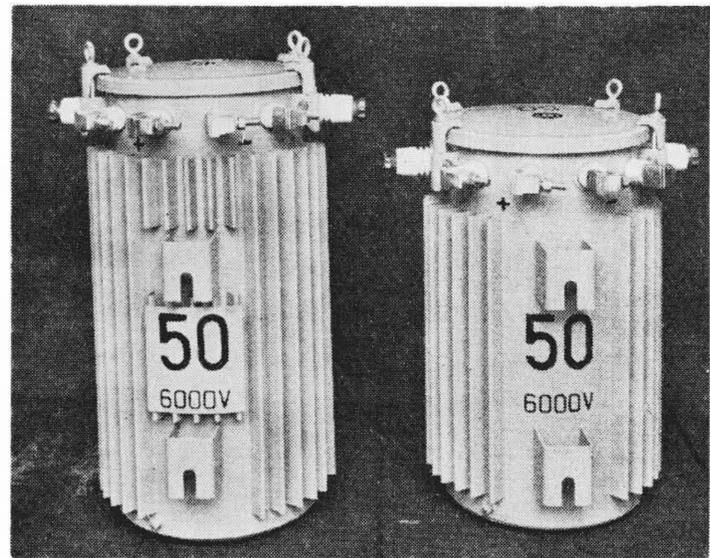


第16図 強制劣化試験変圧器油の酸価の変化



第17図 強制劣化試験時の周囲温度曲線

ら考えると、この値はやや長過ぎ8°C半減説は疑問に思える。この点については現在別途実験検討中である。また第4表よりシアノエチル化紙を使用した変圧器は従来品に比べ約4.5倍の寿命があることになり、また両者の寿命を同一として計算すると許容温度上昇値を20°C程度高められるという結果を得た。さらに第15図は午前9時ごろの周囲温度が15°C程度における温度曲線であり、試験はそのときの電流で試験期間中保持したため最高温度は周囲温度により若干変動している。第17図に各週期における周囲温度を記載しているがこれと第4表と比べればわかるように現用変圧器は比較的低い周囲温度の時期に破壊されているのに比べシアノエチル化紙は夏の暑い時期を経過している。また第16図よりシアノエチル化紙使用変圧器の油の劣化は少なくモデルコイルの時に検討した結果に一致している。以上の実験結果に基づき実際に1φ50kVAの65°C変圧器を製作し従来の変圧器と比較したものが第18図である。図示のように大幅に小形化されている。



(右) シアノエチル化クラフト紙使用 65°C 変圧器
(左) 現標準変圧器 (55°C 変圧器)

第18図 1φ6kV級50kVA60c/s柱上変圧器

6. 結 言

以上シアノエチル化紙、高温用絶縁油および実変圧器による寿命特性について紹介したが結論として次のことがいえる。すなわち

- (1) シアノエチル化紙は従来のクラフト紙に比べ高温で使用することができる。その窒素含有量は現在の製法では3.0%程度がよく約20°C以上の高温で使用することが可能と考えられる。
- (2) 実変圧器による試験の結果から窒素含有量3.0%のシアノエチル化紙は65°C変圧器として十分使用が可能である。
- (3) 高引火点の新絶縁油は65°C変圧器の絶縁油として可能である。

なお現在シアノエチル化紙以外にも数種類の耐熱絶縁紙が知られているので、日立製作所ではさらに新しいすぐれた耐熱絶縁紙の研究を進めていることを付記する。最後に本研究にあたり種々ご指導願った日立製作所日立研究所、国分工場および日立電線株式会社の関係各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) M. J. Fabre: Les Lois de Degradation du Papier Impregne D'huile dans les Transformateurs: Bulletin de la Société Francaise des Electriciens. Vol. 9 No. 103 (1959)
- (2) A. M. Lockie: Functional-life Expectancy Test for Liquid-filled Distribution Transformers: Tr. A. I. E. E. 74 Part 3 977~985 (1955)
- (3) W. A. Sumner: Life Expectancy of Oil-immersed Insulation Structures
A. M. Lokie: A. I. E. E. Paper Vol. 72, Oct., 1953
- (4) R. E. Rood: A Method for Estimating the Thermal Life Expectancy of Distribution Transformers: I. E. E. E. Paper Vol. 63 No. 241, 1963.
- (5) A. S. Lindway: Evaluation of Transformer Life Criteria, I. E. E. E Paper Vol. 63 No. 239, 1963.
- (6) Proposed Alee Test Procedure for Thermal Evaluation of Oil-immersed Distribution Transformers, I. E. E. E Paper Vol. 63 No. 238, 1963