The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	エステル系絶縁油の特性と変圧器へ適用した場合の材料特性について
Author(s)	栗原, 二三夫
Citation	電気材料技術雑誌. 2015, 24(1), p. 24-33
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/76096
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

電気材料技術雑誌　第24巻第１号
J. Soc. Elect. Mat. Eng.　Vol.24,　No.1　２０１５

エステル系絶縁油の特性と変圧器へ適用した場合の材料特性について

栗原　二三夫

株式会社東光高岳　技術開発本部技術研究所　〒323-0806　栃木県小山市中久喜 1440

近年、重電機器では環境対応が必要とされ、変圧器においては鉱油に替わる液体絶縁媒体として生分解性に優れたエステル系絶縁油を適用した変圧器の開発が進んでいる。筆者らは各種エステル系絶縁油の吸湿性、電気特性、油浸紙の絶縁破壊特性、劣化後の各種特性について比較検証した。その結果、エステル系絶縁油は吸湿性が高いなど鉱油と異なる特性を持っており、吸湿に対する電気特性の変化や油浸紙の絶縁破壊電圧、劣化後の各種特性などに関し概ね鉱油同等の性能を示すことを確認した。またゴムや樹脂、接着剤など変圧器内使用材料との適合性検証の結果、油種により一部材料で留意が必要であるものの、概ね良好な適合性を示すことを確認した。更にパームヤシ脂肪酸エステルの絶縁紙劣化抑制効果に関する検証を実施し、高温・高紙中水分、窒素雰囲気において劣化抑制効果が大きいことを確認した。そのメカニズムは高吸湿性による紙から油への水分移行が関与している可能性が考えられる。当該油適用により鉱油入り変圧器と同等以上の絶縁紙寿命が期待できる可能性が示唆される。
キーワード：変圧器、エステル系絶縁油、電気特性、材料適合性、絶縁紙劣化

Study on the characteristics of the ester insulating oil, and material properties in the case of applying to the transformer

Fumio Kurihara

Technology Development Division, Research & Development Center, TAKAOKA TOKO Co., LTD.
1440 Nakakuki, Oyama-Shi, Tochigi 323-0806, Japan

Recently, it is necessary to consider the environment friendly in the power utility equipment. In the transformer, it has been developed to which the ester-based insulating oil to replace the mineral oil. In a various ester oils, the authors conducted a comparison and verification for hygroscopic, electrical characteristics, breakdown voltage of the oil-impregnated paper, the various properties after degradation with the mineral oil. As a result, in comparison to mineral oil, ester oil is highly hygroscopic. And it was confirmed to have the same performance that electrical properties , change in the electrical characteristics relative to moisture absorption, breakdown voltage of the oil-impregnated paper and various characteristics after deterioration. Also we have verified compatibility with the transformer materials such as rubber, resin and some adhesives. As a result, although it is necessary to pay attention for some materials, they were confirmed good compatibility. And we conducted experiments to investigate the aging of paper in Palm Fatty Acid Ester（PFAE）and mineral oil. As a result, paper was found to degrade slower in PFAE than in mineral oil in a high temperature, high moisture content, nitrogen atmosphere. Applying PFAE, it suggests that it is possible to expect the equivalent or more insulating paper life compared to mineral oil filled transformers.

Keywords：transformer, ester, electrical properties, material compatibility, paper degradation

1．はじめに

近年、電力用機器には経済性向上や小型化、防災性向上などの要求に加え、地球環境への配慮が求められている。ガス絶縁機器では環境負荷の高いSF_6ガス代替に関する技術開発が進み、また配電盤等においてもエコデザインを考慮した循環型社会へ適合性の高い製品が開発されている。変圧器などの油入絶縁機器においては、従来から主要な絶縁材料として使用されている鉱油系の電気絶縁油に代わる環境配慮型の絶縁油への関心が高まり、近年、国内においても生分解性や植物由来といった点で環境性に優れたエステル系絶縁油(以下エステル油と略す)およびエステル油を適用した変圧器の開発・適用が進んでいる。

エステル油を機器へ適用するに当たっては、その材料特性や鉱油との相違、機器へ適用した際の内部材料との適合性や適用した場合の材料特性等を把握し、適用可否や適用による性能への影響等の評価を行っておく必要がある。筆者らは、各油種の評価や特性評価をはじめ、変圧器へ適用した際の材料適合性をはじめとする材料特性評価など、エステル油入り変圧器の製品化や適用拡大に向けた取り組みを行っている。本稿では、それらの取り組みによって得られた検証結果を紹介する。

2．エステル油の種類と特徴、適用状況

エステル油は、基油の分子構造にエステル結合(-COO-)を有した化合物を絶縁油として適用したものであり、その種類として石油を原料とし合成したポリオールエステルなどの合成エステル、菜種、大豆などの種子から得られる植物油をベースとした天然エステル、植物油をベースに合成した脂肪酸エステルなどの植物油系エステルといった種類がある。特に海外ではその適用の歴史が長く、合成系（ポリオールエステル）では30年以上、天然エステル（大豆油、ひまわり油等）においても15年以上の使用実績がある[1)]。国内においてもポリオールエステル、菜種油、パームヤシ脂肪酸エステルなどが製品化されている。特徴として共通しているのは生分解性が高いという点であり、どの油種も(財)日本環境協会が定めた「生分解性潤滑油」としてのエコマーク認定基準をクリアしている。油種によって生分解性や植物由来といった環境性のみならず、防災性（高引火点）や冷却性（低粘度）といった特徴を有している。表1に各油種の特徴を、表2に国内で販売されている油種の特徴の一例を示す。

表1　エステル油の特徴[1)]
Table1　Features of ester oils

特性	合成エステル	天然エステル	植物系エステル
生分解性	◎	◎	◎
植物由来	○	◎	◎
危険物区分(引火点)	◎	◎	○
機器冷却性(動粘度)	△	△	○(鉱油以上との報告もあり)
酸化安定性	◎	○(酸化により増粘)	◎

◎：鉱油以上　○：鉱油同等　△：鉱油以下

表2　エステル油の特性の一例[1)]
Table.2　An example of the properties of the ester oils

		合成エステル	植物油(菜種油)	植物油系エステル パームヤシ脂肪酸エステル	鉱油(比較)
密度(15℃)	kg/L	0.97	0.92	0.86	0.87
動粘度(40℃)	mm^2/s	30.6	35.0	5.06	8.36
動粘度(100℃)	mm^2/s	5.63	8.02	1.8	2.26
引火点(COC)	℃	274	330	186	154
流動点	℃	<-50	-27.5	-32.5	-32.5
比誘電率(80℃)	−	3.0	2.9	3.0	2.2
誘電正接(80℃)	%	0.12	0.05	0.31	0.005
体積抵抗率(80℃)	Ωcm	2.3×10^{12}	8×10^{13}	7.1×10^{12}	5×10^{13}
絶縁破壊電圧(2.5mm)	kV	81	78	81	72
特長		生分解性 非危険物 酸化安定性	生分解性 非危険物 植物油	生分解性 植物由来 冷却性能	−

変圧器への適用実績では、海外では天然エステル適用機器としては、220社以上、45万台を超える使用実績があり[1)]、近年国内においても電鉄用や産業用を中心に適用事例が報告されている。

また最近ではIECにおける未使用天然エステル品質規格 IEC62770 の発行、使用中の天然エステルに関するメンテナンス規格の検討も提案されている。国内においては石油学会絶縁油分科会内の専門委員会における規格化検討が行われており石油学会規格としての制定を目指している等、エステル油をより使用しやすい環境の整備が進んでおり、今後の適用拡大が期待される。

３．各種エステル油の特性検証

3.1.　対象油種

エステル油の特性検証に当たって、以下の油種を対象とした。

・菜種油
・大豆油
・ひまわり/紅花混合油（以下ひまわり油と略す）
・パームヤシ脂肪酸エステル
・鉱油（JIS C2101 1種2号）

3.2.　検証結果

3.2.1.　吸湿性

エステル油は、その化学構造に鉱油にはないエステル結合を有するため、吸湿性が非常に高いという特徴がある。図1にエステル結合の化学構造と水分子の吸着の様子を示す[2)]。

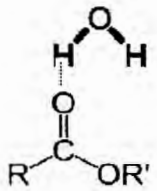


図1　エステル結合への水分子の吸着[2)]
Fig.1　How esters attract water molecules

図2に試験結果を示す。なお吸湿処理は湿度 38～54%RH、25～28℃の気中にて実施し、油中水分量はJIS C2101 「電気絶縁油試験法」[3)]規定のカールフィッシャー電量滴定方法により測定した。

鉱油が50mg/kg程度の水分量で飽和するのに対し各エステル油とも10倍以上の吸湿性を示していることがわかる。

3.2.2.　油中水分量に対する電気特性

(1)　AC絶縁破壊電圧

図3に油中水分量に対するAC絶縁破壊電圧の相関を示す。AC絶縁破壊電圧は、JIS C 2101に準拠し測定した。

鉱油に対し各エステル油とも水分に対する絶縁破壊電圧の低下が緩やかであり、吸湿性が高い反面、高い水分量でも絶縁破壊電圧を維持していることがわかる。

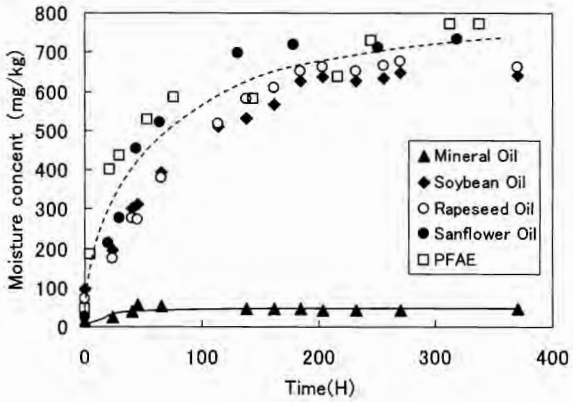


図2　吸湿特性の比較
Fig2.　Comparison of moisture content

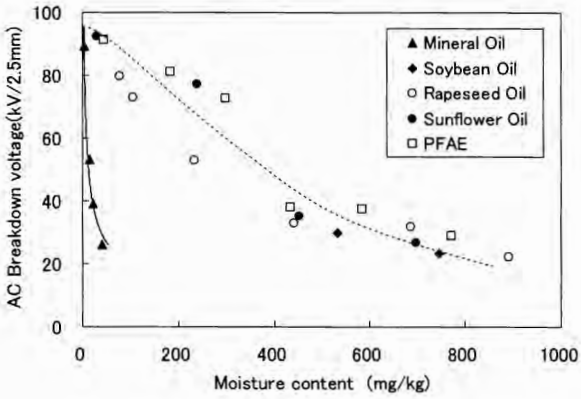


図3　AC絶縁破壊電圧への油中水分量の影響
Fig.3　Effect of moisture content on AC Breakdown Voltage

図4に水分飽和率（飽和水分量に対する油中水分量）に対するAC絶縁破壊電圧を示す。

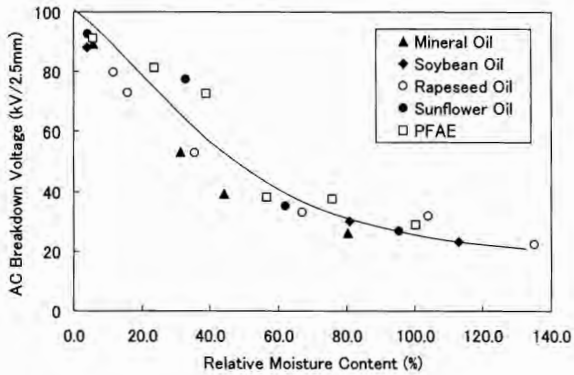


図4　AC絶縁破壊電圧への水分飽和率の影響
Fig.4　Effect of relative moisture content on AC Breakdown Voltage

各エステル油は鉱油と同等の絶縁破壊電圧低下傾向を示すことがわかる。すなわち油中水分に対する絶縁破壊電圧低下メカニズムは、鉱油と同様と考えることができる。

(2) 体積抵抗率

図5に水分飽和率に対する体積抵抗率を示す。体積抵抗率はJIS C 2101に準拠し測定した。

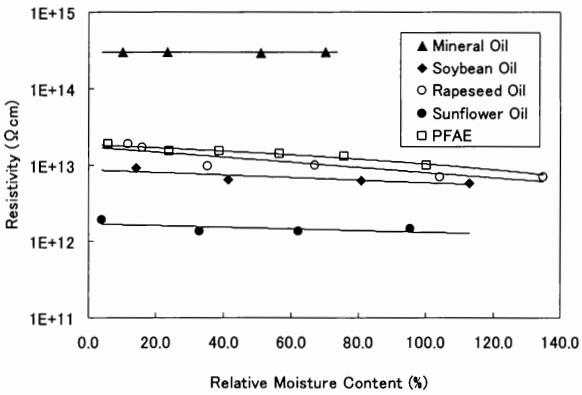


図5　体積抵抗率への水分飽和率への影響
Fig5.　Effect of relative moisture content on resistivity

各エステル油は、その組成のため鉱油に比べ体積抵抗率が1桁～2桁低い傾向があるが、水分飽和率による影響は鉱油と大きな差が見られず同等と考えられる。なお誘電正接についても検証を行ったが、飽和水分率による影響は体積抵抗率と同様な傾向が見られている。

3.2.3.　AC絶縁破壊電圧特性

(1) 油単体でのAC破壊電圧特性

油単体でのAC絶縁破壊電圧を測定し、ワイブル解析した場合のワイブル係数(m)および50%破壊電圧（V_{50}）を表3に示す。なお各試料は真空脱気により脱水処理を行い、測定はJIS C 2101に準拠しφ12.5mm球電極、2.5mmギャップで実施した。

各エステル油のV_{50}の値は鉱油と同等であり鉱油同等のAC絶縁破壊性能を持っていると考えられるが、鉱油に比べm値が小さいエステル油種もあった。ワイブル係数は小さいほど絶縁破壊電圧のばらつきが大きい。この点については、今後の検討が必要である。

表3　油単体でのmおよびV_{50}
Table3　m, V_{50} of oil

	Mineral Oil	Soybean Oil	Rapeseed Oil	Sanflower Oil	PFAE
m	20.6	10.1	12.3	25.2	25.3
V_{50}(KV/mm)	33.4	35.1	31.0	37.9	37.7

(2) 油浸紙のAC破壊電圧特性

油浸紙のAC絶縁破壊電圧を測定し、ワイブル解析した場合のワイブル係数(m)および50%破壊電圧（V_{50}）を表4に示す。なお絶縁紙は0.075mmの電気絶縁紙を2枚使用し、事前に105℃にて真空乾燥し脱水した。試験はJIS C　2111[4]に準拠しφ12.5球電極にはさんで油浸し、貫通破壊した。

表4　油浸紙のmおよびV_{50}
Table4　m, V_{50} of Oil impregnated paper

	Mineral Oil	Soybean Oil	Rapeseed Oil	Sanflower Oil	PFAE
m	8.7	29.3	16.6	22.7	43.5
V_{50}(kV/mm)	112	95	95	94	96

各エステル油ともV_{50}は鉱油に近い値を示している。またm値はエステル油種によりばらつきはあるもののいずれも鉱油以上の値を示しており、今回の測定系においてエステル油の破壊電圧のばらつきが少ないことがわかる。これらの結果から、基本的な油浸紙AC絶縁破壊特性は鉱油に遜色ないものと考えられる。

3.2.4.　劣化時の特性変化

鉱油と、国内で製品化されている菜種油、PFAEを変圧器内部部材(紙巻導体,珪素鋼板他)とともにステンレスタンクへ入れ空気密封し、140℃ 100Hの加熱によって加速劣化させ、劣化時の特性変化を確認した。その結果を表5に示す。

劣化後の各油種の特性値に大きな差は無く、いずれも判定値(電気絶縁油保守管理指針 異常レベル）[5]を上回っており、各油種とも劣化に対する安定性に問題がないことがわかる。ただしIEC62770では、天然エステルは酸化劣化が早い傾

表5　劣化前後の絶縁油特性変化
Table5　Characteristic change after degradation

	Mineral Oil		Rapeseed Oil		PFAE		Reference value
	Before	After	Before	After	Before	After	
Moisture in Oil (mg/kg)	1.1	27	75	181.4	47.5	302.5	–
Acidity (mgKOH/g)	0.002	0.056	0.016	0.09	0.01	0.07	<0.5
Resistiviy (Ωcm)	8.0 $\times 10^{14}$	4.0 $\times 10^{12}$	6.0 $\times 10^{13}$	1.5 $\times 10^{12}$	2.2 $\times 10^{13}$	1.3 $\times 10^{11}$	>1.0 $\times 10^{11}$
Breakdown Voltage (kV/2.5mm)	86.4	42.5	73.3	85.9	87.2	47.5	>30

向があるので、開放型でない（空気流通のない）機器への使用を推奨している[6]。また鉱油やPFAEでは酸化劣化による増粘はないが、天然エステルは劣化により増粘するため、菜種油のような天然エステルを機器へ適用する場合はこれらを配慮することが望ましい。

４．変圧器内部部材との適合性

エステル油を変圧器へ適用する場合、変圧器内部部材との適合性(相溶性)を検討し、材料の変質や劣化が生じないことを確認しておく必要がある。材料間の相溶性は、目安として溶解度パラメータ(SP値)により対比されることがあり、値が近いほど相溶性が高いと予測される。表6に各油種と変圧器内部部材の一般的なSP値を示す[7)8)9)]。

表6　各油種と変圧器内部部材のSP[7)8)9)]
Table6　Solubility Parameter

Insulateing Oil		Material in Transformer	
OilType	Solubility Parameter ($(cal/cm^3)^{1/2}$)	Material	Solubility Parameter ($(cal/cm^3)^{1/2}$)
Mineral Oil	8.5	NBR	9.4～9.9
Rapeseed Oil	8.4	Epoxy Resin	10.9
PFAE	8.2	Polyester	10.7

鉱油とエステル油のSP値は非常に近く、鉱油中で使用している材料はエステル油にも適合する可能性が伺える。しかしながら一般的なSP値はあくまで目安であり、実際の判定には検証試験が必要である。よって国内で製品化されている菜種油、PFAEを対象に、代表的な変圧器内部材料との適合性試験を実施した。

4.1.　油密ガスケットとの適合性

油密ガスケットとして使用されるNBR（中高AN(アクリロニトリル)グレード）を用いて各油種を油密した状態での加熱加速劣化検証を実施した。120℃における各油種でのNBRの圧縮永久歪の経時変化を図6に示す。

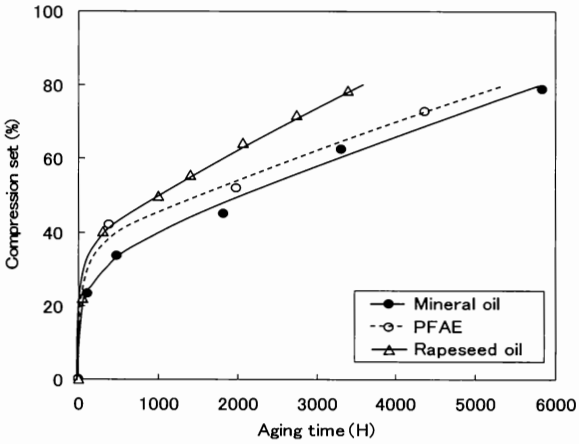


図6　NBRガスケットの圧縮永久歪の変化
Fig.6　Compression set of NBR with time at 120℃

PFAEでは加熱初期の圧縮永久歪変化は鉱油より早く菜種油に近い傾向を示したが、長時間域では鉱油と近い傾向になった。菜種油ではこれらに比べ上昇が早かった。同時に油中浸漬における重量変化の検証を行なった結果では、菜種油に浸漬加熱したNBRは他の油種に比べ重量減少が大きかった。通常、ゴム材料は各種の添加剤添加により一定の特性を発現しているが、今回使用した材料ではこれらの一部が菜種油との相溶性が高く、油中へ溶出したことにより劣化特性に影響が現れた可能性が示唆される。

4.2.　接着剤や樹脂材料との適合性

変圧器内で使用される接着剤や樹脂を油浸加熱処理（140℃ 100H）し、接着強度や機械強度の変化を検証した結果を図7に示す。

各油種において各種接着剤、樹脂とも処理前後で大きな特性変化は無かった。今回選定した各材料のエステル油に対する適合性は高いと考えられる。ただし他の系統の接着剤などでは油種による

適合性差異も確認されているため、実器使用に当たっては、使用油種に対する各材料の適合性を評価する必要があるといえる。

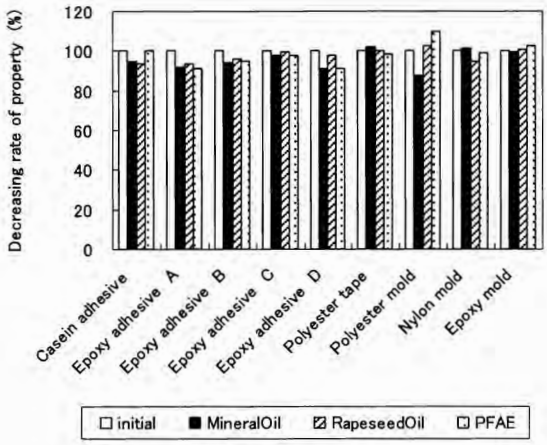


図7　各種材料の強度低下
Fig.7　Decrease in the strength of the various materials

5．エステル油の絶縁紙劣化抑制効果検証

前述の様にエステル油は、油種によって生分解性や植物由来といった環境性のみならず、防災性（高引火点）や冷却性（低粘度）といった特徴がある。中でもPFAEは環境性はもとより比誘電率が鉱油より高く、紙-油間の誘電率整合効果による油浸絶縁油隙等の電界緩和や、動粘度が低いことによる機器冷却性向上等の可能性があり、これらに対する検証結果が各所で報告されている[10)11)]。変圧器へのエステル油適用のメリットは上記以外でも天然エステル油使用下における絶縁紙劣化抑制効果について報告されている[12)13)14)]。絶縁紙に対する劣化抑制は巻線寿命延伸などの点で利点になるが、変圧器には数種の密封形式があり劣化環境が異なることや、絶縁油中における絶縁紙劣化は「熱劣化」、「酸化劣化」、「加水分解」の相互作用により進行するため[15)]、劣化抑制効果についてはこれらの劣化要因（温度、酸素、紙中水分）をパラメータとした検討が必要である。そこでPFAEを対象とし絶縁紙劣化抑制効果とそのメカニズムを明確にすることを目的に、油浸絶縁紙に対する劣化要因(温度、酸素、紙中水分)と劣化抑制効果の関係についての比較検証を行った。

5.1.　試験条件・方法

5.1.1.　試料と試験条件

対象油種はPFAEとし、絶縁紙は電気絶縁紙（クラフト紙（0.08t、0.25t））を使用した。試験条件を表7に示す。

表7　試験条件
Table.7 Setting　conditions

Aging Temp.	120℃、130℃、140℃
Moisture in Paper	0.5% (Low Level) 2% (Standerd Level) 4% (High Level)
Seal Type	Air Sealed , N_2 Sealed

5.1.2.　試験方法

クラフト紙をロール状・短冊状に成形し、20mlバイアルびんに入れ真空乾燥および硫酸調湿法にて所定の紙中水分量に調整後、脱水および空気飽和・窒素飽和した試料油を注油し高温用セプタムを介してアルミキャップで密封した。紙/油比は実器レベルとした。なお窒素密封試料の注油・密封作業は窒素置換したドラフタ内で実施した。作製した試料入りバイアルびんをステンレスタンクに封入し、空気密封試料は空気封入、窒素密封試料はタンク内を窒素置換し、フッ素ゴムガスケットを介して密封した（図8参照）。その後各温度に設定した恒温槽内で加熱処理を実施し、所定の時間でタンクからバイアルびんを取り出し25℃の恒温槽内で静置後、絶縁紙を取り出し引張強度測定、絶縁油中水分量、酸価測定を実施した。

5.2.　試験結果

5.2.1.　引張強度の変化

図9,図10に各条件での引張強度残率の経時変化を示す。

窒素密封下、紙中水分0.5%、2%では、特に140℃において鉱油中に対するPFAE中での絶縁紙劣化（引張強度残率低下）が緩やかになる傾向が確認でき、紙中水分4%では各温度でPFAE中の絶縁紙劣化が緩やかになる傾向が顕著に確認された。窒素密封下での高温・高紙中水分におけるPFAE中での絶縁紙劣化抑制効果が伺える。また空気密封下

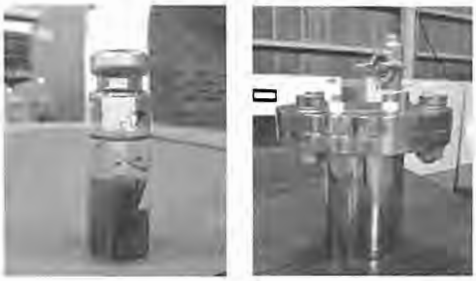


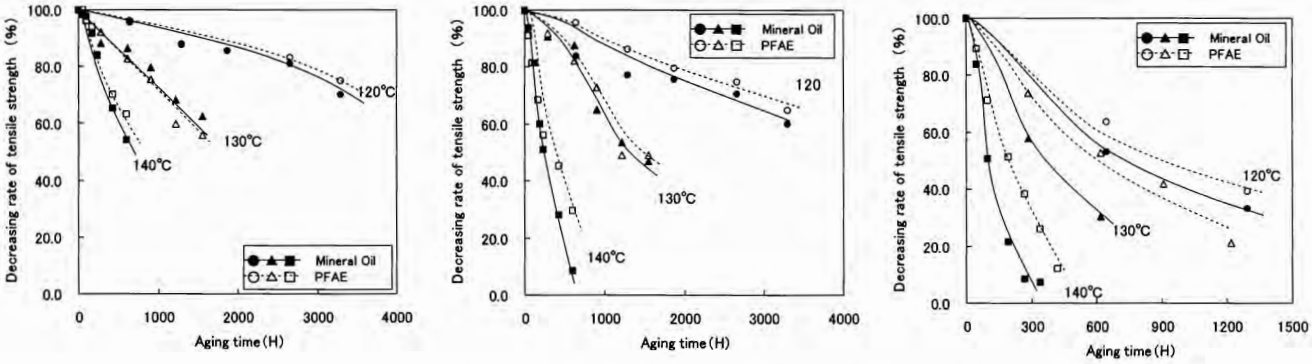
図８　バイアルびん封入試料とステンレスタンク
Fig.8　Appearance of and sealed vial and SUS tank

では鉱油中および PFAE 中における顕著な劣化傾向差異は確認できなかった。空気密封下では酸化劣化要因が相乗的に作用し、窒素密封下より過酷な絶縁紙劣化が生じていると考えられ、そのため劣化傾向差異が見えにくくなっていると思われる。酸化劣化要因の少ない窒素密封では、温度や水分（加水分解）要因の程度が絶縁紙劣化傾向差異として現われていると考えられる。

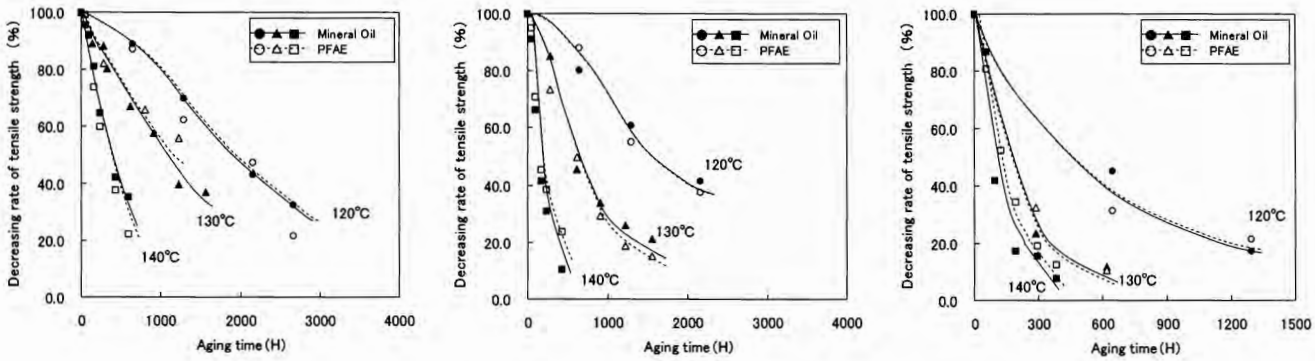
5.2.2.　油中水分、酸価の変化

各条件における PFAE 中の油中水分量は、試験開始後、空気密封・窒素密封とも初期水分量 20mg/kg から大幅に増加し 200～300mg/kg 超となった（鉱油中水分量は 30mg/kg 以下）。この傾向は特に高温、高紙中水分量において顕著であった。これは PFAE の吸湿性の高さによって水分平衡が油側へシフトし、絶縁紙から絶縁油へ水分が移行しているためと考えられる。

また酸価は空気密封下の鉱油では各条件で同様な上昇傾向を示し、最大 0.1mgKOH/g 程度へ増加したが、窒素密封下では大きな上昇傾向を示さず、



a) Moisture in paper 0.5%　　b) Moisture in paper 2%　　c) Moisture in paper 4%
図９　窒素密封　引張強度残率の経時変化
Fig.10　Decreasing rate of tensile strength with time at nitrogen sealed



a) Moisture in paper 0.5%　　b) Moisture in paper 2%　　c) Moisture in paper 4%
図 10　空気密封　引張強度残率の経時変化
Fig.10　Decreasing rate of tensile strength with time at air sealed

0.05mgKOH/g 未満で飽和傾向となった。これは空気介在が少なく酸化劣化が抑制されるためである。これに対し空気密封下での PFAE の酸価は紙中水分量が多いほど顕著な上昇を示し、紙中水分 4%で 6mgKOH/g 程度、2%で 1～3mgKOH/g 程度と鉱油に比べ非常に大きい値となった。また鉱油と異なり窒素密封下でも上昇傾向を示し、特に長時間加熱を行った 120℃、130℃の紙中水分 4%では 6mgKOH/g 弱、短時間加熱の 140℃では 2mgKOH/g 強まで増加した。高紙中水分では酸素の影響の少ない窒素密封でも酸価が上昇することや、紙中水分量により上昇傾向が顕著となることなどから、PFAE はエステルの加水分解により酸価が上昇している可能性が伺える。C.Patrick らは、植物油は高温下でエステルの加水分解を生じ、紙の水分を消費すると推定している [2]。本結果はこの推定に合致し、PFAE 自体が紙中水分によって加水分解することによりカルボン酸等の酸性成分を生じ酸価を上昇させている可能性が伺える。また低分子量の酸は加水分解の触媒となり紙の劣化を促進することが報告されている [15] が、今回の結果では特に窒素密封で酸価が上昇しているにもかかわらず PFAE の劣化抑制効果が現われており、PFAE の加水分解によって紙の劣化に大きな影響を及ぼすような低分子量酸が生成しているわけではないと想定される。

また実器経年使用による PFAE の酸価上昇の懸念があるが、今回の実験結果では、PFAE 窒素封入 130℃紙中水分 2%の条件下で紙の引張強度残率が 50%程度になる時点での酸価は 0.06mgKOH/g 程度であった。鉱油（0.01mgKOH/g）に比べ若干大きいものの保守管理基準（0.5mgKOH/g）[5]より大幅に低く、実器運用上の問題とはならないと考えられる。

5.3. 劣化抑制効果に関する考察

5.3.1. 各劣化要因からの考察

PFAE 中、鉱油中の絶縁紙引張強度残率が 50%に低下するまでの時間を比較し鉱油に対する PFAE の倍率を算出することにより、各条件における PFAE の絶縁紙劣化抑制効果を調べた結果を表 8 に示す。なおカッコ内は想定値である。

表 8　PFAE の絶縁紙劣化抑制効果
Table 8 Effect of degradation suppression

Seal Type	Air Sealed			Nitorogen Sealed		
Paper Moisture	0.5%	2%	4%	0.5%	2%	4%
120℃	—	—	—	(Up to 1)	(Up to 1)	2
130℃	—	—	1.3	—	—	2
140℃	—	1.2	1.6	(1.2)	1.3	2.1

空気・窒素密封とも高温・高紙中水分であるほど、PFAE 中での絶縁紙劣化抑制効果が高い傾向があることがわかる。紙中水分が多いほど油側へ水分が移行する結果も得られており、PFAE 中での絶縁紙劣化抑制には高吸湿性による紙から油への水分移行の関与が大きいと考えられ、水分移行により絶縁紙の加水分解が抑制されている可能性が伺える。また空気密封では窒素密封とくらべ、特に低温、低紙中水分条件で劣化抑制効果が現われにくい。これは紙中水分が少ない場合は移行する水分が少ないことに加え、空気密封下での絶縁紙劣化は酸化の影響により窒素密封にくらべ劣化環境が過酷であると考えられ、水分移行による加水分解抑制等の劣化抑制効果が現われにくくなっていると思われる。高紙中水分では PFAE の水分移行効果が現われやすいと考えられる。

5.3.2. エステル油の吸湿性からの考察

エステル油の吸湿性はエステル結合の数により異なることが報告されており [2]、天然エステルは PFAE に対しエステル結合が多く吸湿性も高いため水分移行効果も大きいと考えられる。また絶縁紙劣化抑制効果に水分移行の要因が強く関与していれば油種によって劣化抑制効果が異なると想定できる。図 11 に鉱油、PFAE、天然エステル(ここでは菜種油を使用)の油中/紙中水分平衡の検証結果を、図 12 に油種による紙劣化抑制効果の検証結果（紙中水分 0.5% 130℃ 空気密封）を示す。

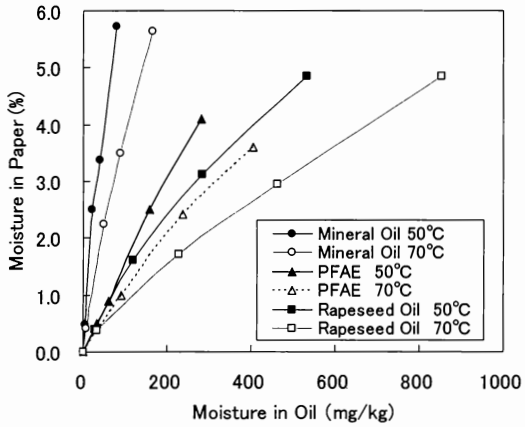


図 11　油種による油中/紙中水分平衡
Fig11.　Moisture equilibrium for paper-Oil by each oil

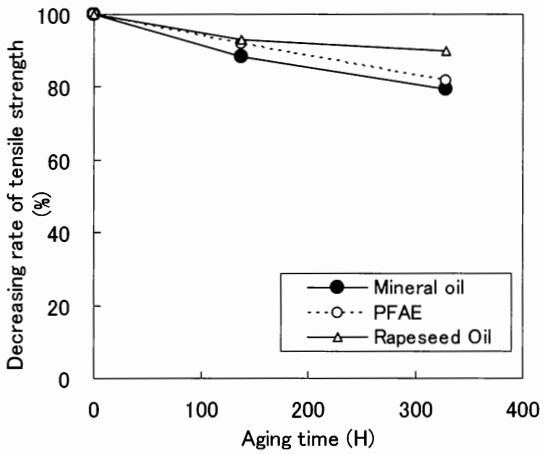


図 12　油種による紙劣化抑制効果
Fig12.　Effect of degradation suppression by each oil

図 11 では天然エステル(菜種油)の水分平衡は PFAE より油側へシフトしており、水分移行効果は PFAE より大きいと思われる。また図 12 では天然エステル(菜種油)の絶縁紙引張強度残率低下傾向は PFAE に対し緩やかとなり、上記想定に合致する結果となった。これらの結果からも絶縁紙劣化抑制に水分移行（絶縁紙加水分解抑制）が関与しているものと考えられる。

5.3.3.　アレニウスプロットから想定した寿命延伸効果

図 13 に、窒素密封 紙中水分 4%における実験結果から得られる絶縁紙のアレニウスプロット（引張強度残率 50%を寿命とする）を示す。

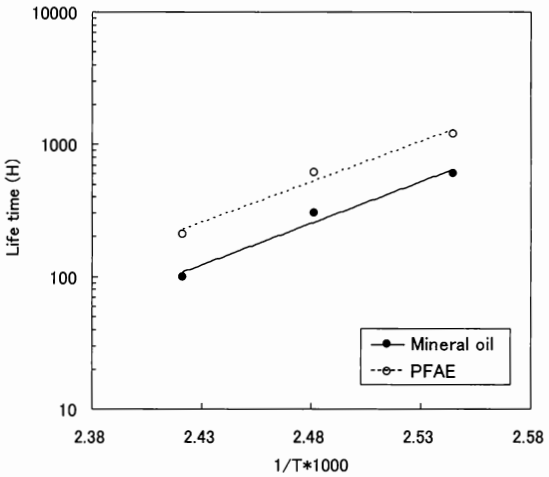


図 13　絶縁紙のアレニウスプロット
Fig.13　Arreniuse plot of insulating paper

この結果から巻線最高温度95℃における絶縁紙寿命時間を想定・比較したところ、1.7 倍程度の寿命延伸が想定された。変圧器実運用上の巻線温度は需要家における運転条件によって変化することや、巻線絶縁紙中水分量も運用状態によって異なるため上記寿命延伸倍率は絶対的なものではないが、この結果から窒素密封変圧器への PFAE 適用によって、少なくとも鉱油入り変圧器と同等以上の絶縁紙寿命が得られる可能性が示唆される。

６．まとめ

各種エステル油の吸湿性や電気特性、絶縁油および油浸紙の絶縁破壊特性、劣化後の各種特性を比較検証した。その結果、吸湿性が高い、体積抵抗率が低いなど鉱油と異なる特性を持っているが、吸湿に対する電気特性の変化や油単体・油浸紙の絶縁破壊電圧、劣化後の各種特性などに関し概ね鉱油同等の性能を示すことを確認した。また国内で製品化されている PFAE、菜種油を対象に、変圧器内で使用する主な材料との適合性を鉱油と比較で検証を実施した。その結果、油種によってゴム材料（NBR）の劣化傾向が異なる傾向を示し、材料選定時に留意が必要なことが確認されたが、接着剤、樹脂については概ね良好な適合性を示した。更に変圧器に PFAE を適用した場合の絶縁紙劣化抑制効果とそのメカニズムを明確にすること

を目的に、劣化要因(温度、酸素、紙中水分)と劣化抑制効果に関する比較検証を行った。その結果、高温・高紙中水分量であるほど PFAE 中の絶縁紙劣化が緩やかになる傾向が確認され、また空気密封に対し窒素密封条件でその傾向が顕著となることがわかった。エステル結合が多い天然エステルでは PFAE に対し油中/紙中水分平衡関係の油側へのシフトが大きく、空気密封下の低紙中水分量においても劣化抑制効果が見られることから、絶縁紙劣化抑制効果のメカニズムとして高吸湿性による紙から油への水分移行と、それに伴う絶縁紙加水分解の抑制が関与している可能性が想定された。本検証結果から窒素密封変圧器への PFAE 適用によって、少なくとも鉱油入り変圧器と同等以上の絶縁紙寿命が得られる可能性が示唆された。

今後も筆者らは、従来の鉱油と互換性が高く変圧器に対するメリットも高い油種として PFAE に注目し、同油種を適用した変圧器の製品化および適用拡大に関する技術開発に注力していく予定である。

参考文献

1) 石油学会絶縁油分科会技術資料 No.12037 エステル系絶縁油専門委員会報告,2012
2) Cigre Technical Brochure436 Experiences in Service with New Insulating Liquids,2010
3) JIS C2101 電気絶縁油試験法,2010
4) JIS C2110 固体絶縁材料の電気試験法,2010
5) 電気絶縁油保守管理指針,電気学会/石油学会,1983
6) IEC62770, Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment,2013
7) 絶縁油ハンドブック,石油学会
8) プラスチック素材辞典
9) 高本,環境対応型電気絶縁油の変圧器への適応性評価,平成 17 年石油学会絶縁油分科会研究発表会要旨集,2005
10) 八田他,パームヤシ脂肪酸エステルの絶縁基礎特性(2)巻線モデル,平成 18 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集,2006
11) 鄭他,パームヤシ脂肪酸エステル油の変圧器モデルによる冷却特性検証,平成 20 年電気学会電力.エネルギー部門大会論文集,2008
12) C.patrick, et al -Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid , IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition,Oct.28-Nov.02,2001
13) Ruijin Liao,et.al, A comparative study of thermal aging of transformer insulation paper impregnated in natural ester and mineral oil, Euro. Trans. Power, 2010
14) 西川他,開放条件下における絶縁紙劣化に及ぼす植物油系絶縁油の影響, 電気学会静止器研究会資料 SA-13-94,2013
15) Cigre Brochure 323 – Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformer,2007

(2015年6月10日受理)

栗原　二三夫

1965 年生。1988 年 山形大学工学部高分子材料工学科卒業。同年、株式会社高岳製作所（現株式会社東光高岳）入社。現在、絶縁材料の評価・応用技術開発に従事。電気学会、石油学会会員。