

# パームヤシ脂肪酸エステルを用いた 変圧器絶縁油のレトロフィリングに 関する検討

■栗原 二三夫  
Fumio Kurihara

■大和田 裕樹  
Hiroki Owada

■塚田 智史  
Satoshi Tsukada

■本庄 智也  
Tomoya Honjo

■鈴木 貴志  
Takashi Suzuki

## 1 はじめに

近年、重電分野においても環境対応が必要とされている。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<sup>注1)</sup>(以下エステル油)を適用した変圧器の開発が進んでいる。エステル油には菜種油や大豆油などの天然植物油、植物由来の脂肪酸エステル、合成系のポリオールエステルといった種類がある。高吸湿性や生分解性、腐食性硫黄成分不含であるほか、油種によっては防災性(高引火点)や冷却性(低粘度)といった特長を持つ。また近年では高吸湿性に起因し、油浸絶縁物中水分がエステル油へ移行することによる絶縁物劣化抑制といった効果も報告されている<sup>(1)(2)(3)</sup>。変圧器への適用実績としては、近年国内においても電力用、電鉄用としての適用事例が増加している<sup>(4)</sup>。また最近ではIECにおける天然エステル品質規格(IEC62770)の発行やメンテナンスガイドの検討、国内では石油学会における品質指針(JPI-5R-76-15)の発行など、エステル油を使用しやすい環境の整備が進む傾向にある。

エステル油の変圧器への適用は新設変圧器に限らず、既設変圧器では保守・改修などの際に、従来使用されている鉱油からエステル油へのレトロフィリング<sup>注2)</sup>(入替)がある。CIGRE WG A2.35の技術報告書「Experiences in Service with New Insulating Liquids」<sup>(5)</sup>ではエステル油へのレトロフィリングの理由として、火災安全性、環境への配慮、水分耐久性付与、腐食性硫黄回避、固体絶縁物寿命延伸と記載している。海外においてはこのような要求に対しエステル油の特長を生かしたレトロフィリングが実施されている。エステル油へのレトロフィリングに関する研究は、近年国内でも鉱油からエステル油への入替時に生じる油種混合による特性変化の評価といった観点で種々報告されている<sup>(6)(7)</sup>。東光高岳においても低粘度で従来絶縁油との代替性が高いエステル油であるパームヤシ脂肪酸エステル(以下PFAE)を用いた環境対応特高変圧器の開発を行う中で、鉱油との混合性検証や経年機器への油入替による実器検証などを実施している。本稿ではその検証結果を紹介する。

## 2 PFAE/ 鉱油混合時の絶縁油特性

既設変圧器の絶縁油のPFAEへのレトロフィリングを

行う場合、従来の鉱油との混合が生じるため、PFAEに鉱油が混合した場合の特性変化に関する基礎検証を実施した。なお本検証は、PFAE製造・供給元であるライオン・スペシャリティ・ケミカルズ株式会社の協力を得て実施した。

### 2.1 試料と試験条件

鉱油(JIS C2320 1種2号)とPFAE(ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ(株)製 パステルNEO)を用い、PFAEに対し0~100%の混合率で混合を行い、JIS法による動粘度、引火点、電気特性(体積抵抗率、絶縁破壊電圧)の測定を実施した。

### 2.2 鉱油とPFAEの混合特性

図1に動粘度と引火点、図2に絶縁破壊電圧、体積抵抗率の変化傾向を示す。

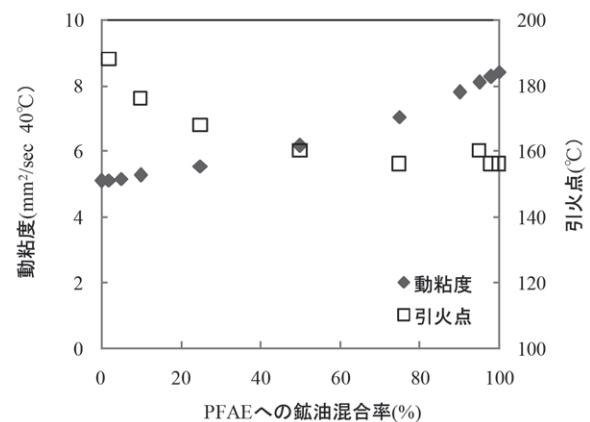


図1 PFAEへの鉱油混合による動粘度、引火点変化

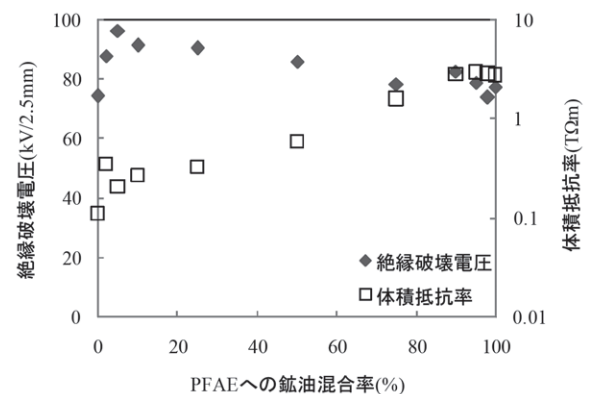


図2 PFAEへの鉱油混合による絶縁破壊電圧、体積抵抗率変化

各特性により若干の変動はあるが、鉱油混合率に応じ

各油種の特性値差の間で緩やかな変化を示した。変圧器絶縁油を抜出した際の残存油の割合は、変圧器内洗浄を行う場合は4%以下、行わない場合は7%以下であるとの報告例がある<sup>(8)</sup>。最大10%の鉱油残存が生じたとしても、PFAEは鉱油混合によって著しい特性悪化はない。なお鉱油混合によるPFAEの酸化安定性変化についても別途検証しているが、10%程度の鉱油混合では大きな影響はない。また生分解性では10%程度の鉱油混合では大きな変化は生じない(OECD301F試験<sup>注3)</sup>の易分解性基準である60%以上を保持)とのシミュレーション結果があり<sup>(9)</sup>、生分解性への影響も少ないと考えられる。

### 2.3 劣化鉱油混合時の電気特性

経年器絶縁油に著しい劣化が生じている場合は、電気特性の低下した劣化鉱油の混合により入替後PFAEの電気特性が低下する可能性がある。そこで加速劣化によって調製した劣化鉱油をPFAEへ混入することで、PFAE電気特性(絶縁破壊電圧、体積抵抗率、誘電正接(tanδ))の変化の傾向を検証した。図3、図4に結果を示す。なお調整した劣化鉱油の酸価は0.15 mgKOH/g、体積抵抗率は0.004 TΩm、誘電正接(tanδ)は9.9%であった。

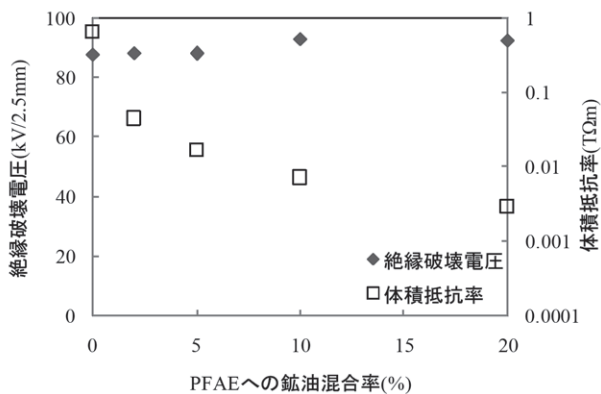


図3 PFAEへの劣化鉱油混合による絶縁破壊電圧、体積抵抗率変化

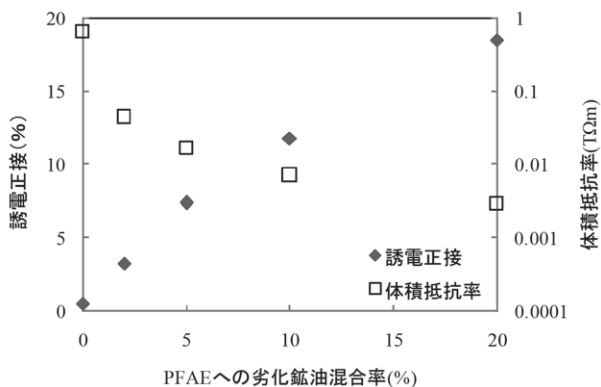


図4 PFAEへの劣化鉱油混合による誘電正接、体積抵抗率変化

PFAEへの劣化鉱油混合により、絶縁破壊電圧の低下はなかったが、体積抵抗率は20%混入までに劣化鉱油レベルまで徐々に低下、誘電正接も大きく増加した。一般にこれらの特性はイオン性劣化生成物の影響を受けて低下することが知られている。電子伝導のキャリアとなりうるイオン性鉱油劣化生成物の混入により、PFAEが比較的大きな影響を受けていることが想定されるが、加速劣化鉱油の使用による過剰な影響、誘電正接測定(80°C加熱)における加熱影響等の可能性もあり、今後のメカニズム検討が必要である。

## 3 PFAE/ 鉱油混合時の変圧器特性

鉱油入りの経年変圧器実器をPFAEへレトロフィリングした場合の変圧器特性の良否について検証した。

### 3.1 供試器

供試器は、経年21年の自社製特高変圧器とした。表1に供試変圧器の諸元を示す。

項目	定格
定格容量	5,000 kVA
相数	3相
定格周波数	50 Hz
定格電圧	66 kV / 3.3 kV
冷却方式	油入自冷
油量	5,750 L

### 3.2 試験内容

PFAEへの絶縁油入替は、真空注油により実施した。その際の鉱油混入量は、おおよそ10%程度と想定される。入替前後および変圧器試験後に、絶縁油特性の測定を実施し絶縁油入替による特性変化を確認した。変圧器試験は変圧器規格であるJEC2200に準拠し各種特性試験

受入試験	巻線抵抗
	変圧比
	短絡インピーダンス
	負荷損
	無負荷損
形式試験	短時間交流耐電圧
	温度上昇
特殊試験	雷インパルス耐電圧
	騒音
	巻線 - 対地間静電容量
	絶縁抵抗, 誘電正接 (tan δ)
その他試験	油中溶存ガス分析
	コロナ

を実施した。表2に試験項目を、図5に試験風景を示す。



図5 試験風景

3.3 試験結果と考察

表3にレトロフィリング前後の絶縁油特性変化を示す。

表3 レトロフィリング前後の絶縁油特性変化

	入替前 (鉱油)	入替後 (PFAE)	温度 試験後	PFAE 初期値
油中水分 (mg/kg)	7	41	58	17
酸価 (mgKOH/g)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
体積抵抗率 (TΩm)	0.45	0.05	0.04	0.11
絶縁破壊電圧 (kV/2.5 mm)	94	85	87	98

入替後の油中水分はPFAE初期値に対し上昇した。これはPFAEの吸湿性の高さによる固体絶縁物からの水分移行のためと思われる。その後さらに移行が進み水分は増加するが、絶縁破壊電圧への影響はほとんどなかった。体積抵抗率はPFAE初期値に対して若干低下した。これは前述の劣化鉱油の混入試験結果から経年劣化鉱油の影響である可能性が示唆されるが、詳細なメカニズムについては今後の検討が必要である。また酸価については大きな変化はなかった。

次に、レトロフィリング後の変圧器諸特性試験結果(入替前との差異)を表4に示す。

表4 レトロフィリング後の変圧器諸特性試験結果

項目	入替前との差異 (%)	比較条件
巻線抵抗	-2.0	等価抵抗
変圧比	0.0	U-V
短絡インピーダンス	-0.8	出荷時との比較
負荷損	0.7	出荷時との比較
無負荷損	0.0	出荷時との比較
短時間交流耐電圧	破壊なし (DGA: C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> N.D.)	既定の各条件
温度上昇	-1.3	最高油温
雷インパルス耐電圧	破壊なし (DGA: C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> N.D.)	既定の各条件
騒音	0.8	-
巻線 - 対地間静電容量	27.7	H-L, E 25°C
絶縁抵抗	-62.0	H-L, E 冷温
誘電正接 (tan δ)	23.8	H-L, E 冷温
コロナ	未検出 (DGA: C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> N.D.)	1.5 E

一部の試験項目を除き特性の変化はほとんどなかった。種類の異なる絶縁油入替による絶縁特性低下リスクという観点では、短時間交流耐電圧、雷インパルス耐電圧、コロナ試験において入替前と変わらない結果となり特性低下は生じていない。また試験後に実施した油中溶存ガス分析でも、放電起因で生成するアセチレン (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) や水素 (H<sub>2</sub>) 増加、過熱起因で生成するエチレン (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) 等は検出されず、その他ガスについても内部異常を示唆するような生成は見られなかった。油入替による絶縁的な特性低下や欠陥などは生じていないものと判断でき、PFAEへレトロフィリングした変圧器は、入替時点において十分な実用性能を有していると考えられる。

鉱油とPFAEの特性の違いが影響すると思われる試験項目については比較的大きな変化が見られた(当該特性の数値は表4中で斜体で表示)。以下、考察する。

(1) 温度上昇(最高油温)

温度上昇試験による最高油温は低下傾向を示した。これは、変圧器冷却性能にかかわる絶縁油物性(比熱、熱伝導率、粘度)の変化が現れているため、低粘度のPFAEへの入替によって冷却性が向上し最高油温が低くなったと考えられる。実器温度上昇試験により負荷率に対する二次巻線温度上昇値を実測した結果を図6に示す(本検証とは別途実施)。

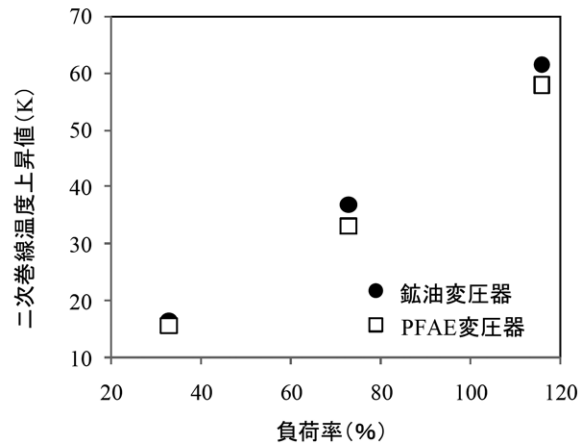


図6 鉱油変圧器、PFAE変圧器での温度上昇試験時の負荷率に対する二次巻線温度上昇実測値

鉱油変圧器に対しPFAE変圧器の二次巻線温度上昇値は負荷率が大きくなると低くなる傾向を示す。PFAEの巻線冷却効果が優れていることがわかる。

(2) 巻線 - 対地間静電容量

巻線 - 対地間静電容量は増加傾向を示した。これは鉱油の比誘電率2.2に対しPFAEが2.9と約30%程度高いため、対地間の絶縁油や油浸絶縁物の静電容量を増加させていると考えられる。

(3) 絶縁抵抗

絶縁抵抗は、変圧器として実用上十分な絶縁抵抗値が

得られたが、低下傾向が見られた。一般に、変圧器の絶縁抵抗は絶縁油体積抵抗率と相関することが知られている。表3に示すようにPFAEへの入替によって体積抵抗率は若干低下しており、この影響が絶縁抵抗低下の一因となっていると考えられる。

(4) 誘電正接 (tanδ)

巻線 - 対地間の誘電正接 (tanδ) は上昇傾向を示した。表3に示すように入替後の経年劣化鉱油混合のPFAEの体積抵抗率は若干低下していることから、絶縁油の誘電正接は増加していることが想定される。この傾向は図4においても確認されている。誘電正接は対地間の油浸絶縁物中の絶縁油の誘電正接も影響していると考えられ、経年劣化鉱油が混合したPFAEが存在することにより誘電正接が増加したことが想定される。

4 まとめ

低粘度で従来絶縁油との代替性が高いエステル油であるPFAEを用い、経年特高変圧器絶縁油のレトロフィリングに関する検証を実施した。その結果、PFAEへレトロフィリングした変圧器および絶縁油は、若干の特性変化があるものの十分な実用性能を有していることがわかった。今後、レトロフィリングした変圧器や絶縁油の安定性、保守管理方法、レトロフィリングによる付加価値の評価等、更なる検討を進める予定である。

最後に、本検証 (PFAE/ 鉱油混合時の絶縁油特性) の実施に当たり、ご協力いただいたライオン・スペシャリティ・ケミカルズ (株) に謝意を表します。

参考文献

(1) 栗原：「パーマヤシ脂肪酸エステルにおける絶縁紙劣化抑制の検討」, 東光高岳技報, No.1,2014  
 (2) 西川他：「植物油を用いた絶縁紙の劣化と酸素の影響」, H24 電気学会電力・エネルギー部門大会  
 (3) C. patrick, et al., Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid, IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, Oct. 28—Nov. 02, 2001  
 (4) 「エステル系絶縁油専門委員会報告」, 第32回絶縁油分科会研究発表会, 2012  
 (5) CIGRE Brochure 436, Experiences in Service with New Insulating Liquids, 2010  
 (6) 小柳他：「植物由来エステル系絶縁油と鉱油のブレンド検討」, 第35回絶縁油分科会研究発表会, 2015  
 (7) 小柳他：「植物由来エステル系絶縁油と劣化鉱油のブレンド調査」, 平成27年電気学会基礎・材料共通部門大会  
 (8) C. Patrick, et al., Retrofilling aging transformers with natural ester based dielectric coolant for safety and life extension, IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, 2003

(9) 畠田他「パーマヤシ脂肪酸エステル絶縁油の変圧器への適用検討」, 第34回絶縁油分科会研究発表会, 2014

■ 語句説明

注1) エステル系絶縁油：主成分として、脂肪酸とアルコールからなる分子内にエステル結合 (-COO- の化学結合) を有する化合物を使用した絶縁油。生分解性が高い。

注2) レトロフィリング：旧型のを改良することによって存続させることをレトロフィットという。絶縁油入替による電気機器の改良・存続をレトロフィリングという。

注3) OECD301F 試験：OECD GUIDELINE FOR TESTING OF CHEMICALS に記載された生分解性に関する試験法



栗原 二三夫

技術開発本部  
 技術研究所 材料技術グループ 所属  
 材料技術の開発に従事  
 電気学会, 石油学会会員



大和田 裕樹

技術開発本部  
 技術研究所 材料技術グループ 所属  
 絶縁油試験・分析に従事



塚田 智史

電力プラント事業本部  
 大型変圧器製造部 大型変圧器設計グループ 所属  
 大型変圧器の設計に従事  
 電気学会会員



本庄 智也

電力プラント事業本部  
 大型変圧器製造部 大型変圧器設計グループ 所属  
 大型変圧器の設計に従事  
 電気学会会員



鈴木 貴志

ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ株式会社  
 研究開発本部  
 平井研究所 平井第1研究室 所属