

植物油入り変圧器の実用化研究

Practical use study of the transformer with vegetable insulating oil

宮本 伸治^{※1}
Shinji Miyamoto
宮島 極^{※1}
Kiwamu Miyajima

1. はじめに

近年、二酸化炭素の排出量抑制など環境負荷低減への意識の高まりから、絶縁油を鉱油系から植物油系に置き換えた植物油系絶縁油⁽¹⁾入り変圧器が注目されている。その多くは、絶縁油用として水分量等の品質管理が行われた植物油を使用しており、鉱油に比べて高価である。この絶縁油用は、絶縁性能を低下させる可能性がある水分や不純物を除去するため、白土処理による高度な精製を行っている。この精製過程において、元々含まれる天然の酸化防止成分も除去されるため、人工の酸化防止成分を添加している。また、精製過程で使われる白土は産業廃棄物となる。

そこで、絶縁油用に比べて精製度が低く、水分量も厳密に管理されていないが、安価で天然の酸化防止成分を含み、産業廃棄物が少ない一般用植物油に着目し、絶縁油としての適用可能性および植物油特有の性質について調査した結果を報告する。

2. 研究の目的と内容

一般用植物油は、絶縁油用と比べて不純物が多く、水分量が厳密に管理されていないため電気特性に劣り、植物油系絶縁油の規格⁽²⁾を満足しない可能性が考えられる。また、多くの植物油は鉱油に比べて凝固点が高いため、冬季の高緯度地方や山間部など寒冷な環境では油が凝固し、電気特性に影響を及ぼす可能性が懸念される。

このため本研究では、一般用植物油が植物油系絶縁油の規格値を満足し、変圧器用絶縁油として実用可能であるか、油単体および実機での検証により確認することを目的とした。その内容として、絶縁油の特性、低温時の特性、実機性能を調査した。

絶縁油の特性では、一般用植物油は電気特性等の絶縁油に必要なデータがないため測定を行い、絶縁油として適用できるか調査した。

低温時の特性では、寒冷地において油が凝固した場合を想定し、凝固状態で電気特性がどのように変化するか調査した。

実機性能では、絶縁油の特性および低温時の特性で得られた結果が実機にも適用できるか、試作機による検証を行った。また、変圧器の長期信頼性評価の一つである経年劣化診断に必要なデータを得るため、変圧器の耐用年数とされる30年相当の加速劣化試験を行い、経年劣化度を調査した。

3. 特性調査

3.1 植物油の特性調査

(1) 絶縁油の特性

調査対象の植物油は、国内での供給量が多く入手しやすい菜種油、大豆油、米油、ごま油、コーン油とした。

調査項目は、変圧器用絶縁油の特性として必須である①

表1 一般用植物油における絶縁油の特性測定結果

項目	植物油										
	絶縁油用規格値 ⁽²⁾	一般用					絶縁油用(参考)			鉱油(参考)	
		菜種油	大豆油	米油	ごま油	コーン油	菜種油	大豆油	パームヤシ油		
動粘度 (mm ² /s)	40℃	50以下	35	32	38	35	33	35	32	5.07	7.2
	100℃	15以下	8.1	7.5	8.3	8.0	7.7	8.1	7.7	1.8	2.0
流動点 (℃)		-10以下	-30.0	-20.0	-15.0	-12.5	-15.0	-30.0	-22.5	-37.5	-45
油中水分量 (ppm)		200以下	134	104	104	182	78	29	29	68	19
体積抵抗率 (TΩm) [80℃]		0.01以上	0.019	0.023	0.012	0.065	0.007	0.50	0.13	0.12	42
誘電正接 (%) [80℃]		3以下	0.19	0.87	1.64	0.32	1.78	0.07	0.14	2.96	0.001
絶縁破壊電圧 (kV)		45以上	94	96	90	91	92	72	73	95	69
引火点 (℃)		275以上	330	332	342	336	326	334	326	188	130
酸化安定性		0.6以下	0.43	1.14	0.21	0.28	0.66	0.13	0.11	0.02	0.21
	酸価 (mgKOH/g) スラッジ量 (%)	-	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.01	0.01	0.03

※1 開発部 材料研究G

動粘度(40℃、100℃)、②流動点、③油中水分量、④体積抵抗率、⑤誘電正接、⑥絶縁破壊電圧、⑦引火点、⑧酸化安定性の8項目とした。これらの測定方法は、電気絶縁油試験方法(JIS C2101)に拠った。表1に一般用植物油における絶縁油の特性測定結果を示す。参考として、絶縁油用植物油および鉱油の測定結果も併記した。

動粘度は、全試料とも規格値の50 mm²/s以下(40℃)および15 mm²/s以下(100℃)を満足し、油種による差はみられなかった。

流動点は、全試料とも規格値の-10℃以下を満足した。菜種油のみ、鉱油のJIS規格値(JIS C2320)である-27.5℃以下を満足した。

油中水分量は、絶縁油用と比べて高い傾向であったが、全試料とも規格値の200 ppm以下を満足した。

体積抵抗率は、コーン油のみ規格値の0.01T Ω m以上を満足しなかった。一般用は絶縁油用と比べて低い傾向であったが、これは油中に含まれる導電性の不純物および水分による影響と考えられる。

誘電正接は、全試料とも規格値の3%以下を満足した。体積抵抗率と同じく、一般用は絶縁油用(パームヤシ油は除く)よりも低い結果となった。これも、体積抵抗率と同様に不純物および水分による影響と考えられる。

絶縁破壊電圧は、全試料とも規格値の45 kVを満足した。この項目のみ、絶縁油用(パームヤシ油は除く)よりも一般用の方が高い結果となった。

引火点は、全試料で規格値の275℃以上を満足した。

酸化安定性の酸価は、大豆油およびコーン油が規格値の0.6 mgKOH/g以上であった。米油は他の油より低く、鉱油と同等の結果となったが、これは元々含まれる天然の酸化防止成分の効果と考えられる。

酸化安定性のスラッジ量の規格値はないが、全試料とも鉱油の実測値である0.03%以下であった。

以上の結果から、植物油系絶縁油の規格値を全て満足したのは、菜種油、米油、ごま油の3種類であった。この中で、菜種油は流動点(低温特性)が特に優れ、米油は酸化安定性(酸価)が特に優れることから、この2種類を候補に選定した。

(2) 低温時の特性⁽³⁾

① 流動点と凝固点

一般に、油の低温特性の評価には流動点を用いられ、JISに試験方法が規定されている(JIS K2269)。この試験は、試験管に入れた油を一定の速度で冷やし、2.5℃低下するごとに油が凝固したかを目視にて確認し、凝固した温度の一つ手前を流動点とする。菜種油の場合は、鉱油のJIS規格値である-27.5℃以下を満足するため、植物油の中でも低温特性が良いとされている。

しかし、国内の寒冷地では-15℃～-5℃といった低温状態が長時間続く環境が予想される。このため、試験管に入れた油を7日間ごとに2.5℃低下させて段階的に冷やして

表2 植物油の流動点と凝固点

油の種類		流動点(℃)	凝固点(℃)
植物油系	菜種油	-30	-15
	米油	-15	-5
	パームヤシ油	-37.5	-35
鉱油(1種2号)		-45	-45

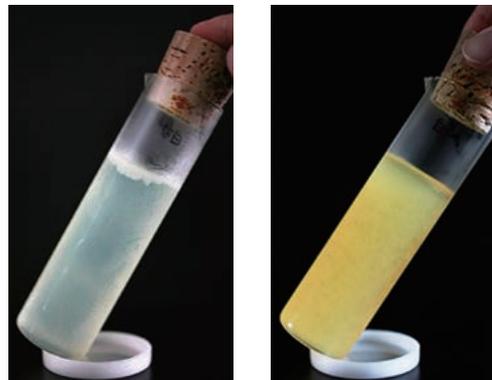


図1 菜種油(左)、米油(右)の凝固状態

いき、凝固した温度を確認する試験を行った。この温度を凝固点とした。その結果、一般用および絶縁油用に関係なく菜種油は-15℃、米油は-5℃で凝固することが確認された⁽⁴⁾。流動点よりも高い温度で凝固した理由は、菜種油および米油中に含まれる主成分のグリセリンエステルより凝固点の高いパラフィンなどが結晶化し、低温が長時間続くことで結晶が成長していくためと考えられる。

一方、急速に温度を低下させる流動点試験法では、結晶が成長する時間がないため、主成分が凝固する温度と考えられる。いずれにしても、菜種油および米油は寒冷地において凝固する可能性がある。この影響については次の電気特性の項目にて述べる。

なお、パームヤシ油は菜種油と同じ市販の植物油系絶縁油であるが、鉱油と同じく流動点と凝固点が近い値を示している。これらの油は、主成分よりも凝固点の高いパラフィンなどを含まないため、流動点と凝固点に差異が生じなかったと考えられる。表2に植物油の流動点と凝固点、図1に菜種油および米油の凝固状態を示す。

② 電気特性

電気規格調査会(JEC)では、変圧器の最低使用温度を-20℃と規定している(JEC 2200)。凝固点測定の結果、菜種油および米油は長時間低温環境に置かれた場合、-20℃より高い温度で凝固することが確認された。このため、-20℃の凝固状態を想定した電気特性を調査した。

-20℃の凝固状態とJISの試験温度(絶縁破壊電圧は常温、その他は80℃)による油単体との比較を行った。調査項目は、絶縁油の電気絶縁特性で必要とされる①絶縁破壊電圧、②誘電正接、③体積抵抗率、④比誘電率の4項目と

表3 凝固状態における植物油の電気特性変化

調査項目	測定温度	油の状態	菜種油	米油
絶縁破壊電圧 (kV)	-20 °C	凝固	>100	>100
	常温	液体	94	90
誘電正接 (%)	-20 °C	凝固	0.061	0.065
	80 °C	液体	0.19	1.64
体積抵抗率 (TΩm)	-20 °C	凝固	2.3	7.5
	80 °C	液体	0.019	0.012
比誘電率 (-)	-20 °C	凝固	3.3	3.3
	80 °C	液体	2.9	2.9

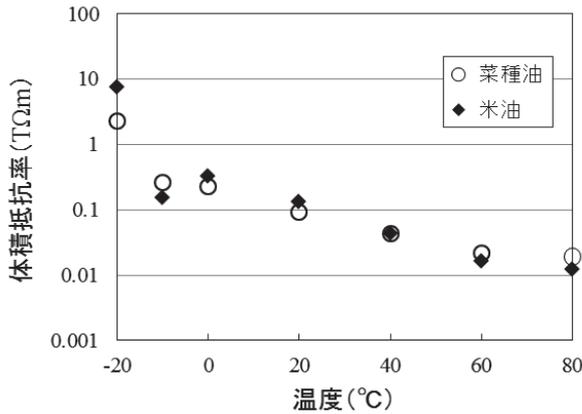


図2 植物油の体積抵抗率と温度の関係

した。表3に凝固状態における植物油の電気特性変化を示す。菜種油および米油とも、全調査項目において-20 °Cの凝固状態の方が絶縁油としての特性が向上し、良好な結果が得られた。

凝固状態での絶縁破壊電圧は100 kV以上となり、常温よりも大きな値を示した。誘電正接は小さな値を示した。図2に植物油の体積抵抗率と温度の関係を示す。体積抵抗率は、-10 °Cから-20 °Cにかけて特性が急激に変化した。この温度の間で植物油の凝固が起こることを示している。これらの電気特性が凝固によって向上する理由は、植物油中に含まれる電荷のキャリアとなる微量の残留成分が凝固することで、移動できなくなったためと考えられる。

比誘電率は、-20 °Cの凝固状態では3.3、液状時(80 °C)では2.9であった。鉱油は2.5、絶縁紙は3.5程度である。植物油凝固時の比誘電率は、液状時および鉱油よりも絶縁紙に近くなることから、両者の電位分担が小さくなり、電界集中の緩和効果が期待される。

3.2 試作機による性能調査

(1) 基本性能

試作機は、10 kVAおよび20 kVAの柱上変圧器(以下、現行機)をベースに製作し、絶縁油に植物油(菜種油または米油)を使用した。

表4 10kVA 試作機の基本性能

調査項目	試作機		現行機 (鉱油)
	菜種油	米油	
効率 (%)	97.99	97.98	97.99
電圧変動率 (%)	1.72	1.72	1.73
無負荷電流 (%)	0.51	0.57	0.44
温度上昇 (°C)	巻線	49.7	51.8
	油	43.5	41.0
短絡インピーダンス (%)	2.28	2.29	2.32

表5 20kVA 試作機の基本性能

調査項目	試作機		現行機 (鉱油)
	菜種油	米油	
効率 (%)	98.33	98.33	98.34
電圧変動率 (%)	1.43	1.43	1.41
無負荷電流 (%)	0.33	0.35	0.35
温度上昇 (°C)	巻線	58.6	53.8
	油	51.0	47.0
短絡インピーダンス (%)	2.32	2.33	2.29

コイル乾燥後、ケース内を真空状態にし、脱気(液体中に溶存している空気や水分を除去する)処理した植物油を真空注油した。

試作機の調査項目は、変圧器の特性として必須である①効率、②電圧変動率、③無負荷電流、④温度上昇、⑤短絡インピーダンスの5項目とした。表4に10 kVA 試作機の基本性能、表5に20 kVA 試作機の基本性能を示す。

10 kVA 試作機は、全調査項目において現行機(鉱油)と同等の性能であることが確認された。

20 kVA 試作機については、巻線および油の温度上昇が現行機より高い数値となった。これは、20 kVA 変圧器は10 kVAよりも発熱量が高く、また鉱油よりも粘度が高い植物油を使用したことで、その差が顕著に表れたと考えられる。この影響により、コイルに使用される絶縁紙の加熱劣化促進が懸念されるが、それについては加速劣化試験の項目で述べる。

(2) 低温特性

10 kVA 試作機をドライアイスで-20 °Cに冷却し油を凝固させ、凝固状態における絶縁性能を調査した。また、凝固状態から液体状態に戻るまで無負荷による通電試験を行い、低温環境下で始動した場合の動作安定性能を確認した。

菜種油および米油の試作機を角型の保冷ボックス(W 650 mm × D 455 mm × H 460 mm)に入れ、ケースとの間に断熱材を挟んで蓋をし、ドライアイスの気化をなるべく抑える構造とした。ドライアイスは油面と同じ高さまで入れ、ケース外側面の全周を覆うように配置した。内部の油が-20 °C程度で保冷され、完全な凝固状態となるまで3日間ほど静置した。

凝固状態で目視観察したところ、油の体積変化は認められなかった。また、凝固状態の植物油はシャーベット状で、棒で突き刺させる程度の硬さである。凝固しても強固な固体とならないことから、内部の構造物に掛かる応力などの影響は少ないと考えられる。図3に試作機の保冷イメージ、図4に試作機保冷時の外観、図5に油凝固前および油凝固状態の変圧器内部を示す。

油凝固状態の耐電圧試験(22 kV、1min)では、絶縁特性に異常は認められなかった。また誘電正接を測定したところ、凝固状態と液体状態で差がない結果が得られた。表6に油凝固状態における10 kVA 試作機の絶縁性能を示す。

無負荷による通電試験(210V、0.3A)では、凝固状態から液体状態に戻るまでの油温、周囲温度、電圧値、電流値の経時変化を測定した。その結果、凝固状態から液体状態へ変化する過程において、菜種油は-7℃前後、米油は5℃前後で油温が階段状に変化する傾向がみられた。この現象は、この温度付近で油の融解が起こっていることを示す。電流値は、油の融解過程において一定値を保持し、通電時の動作に異常はみられなかった。図6に無負荷通電試験の回路、図7に無負荷通電時における油の融解過程での経時変化(油温、周温、電圧、電流)を示す。

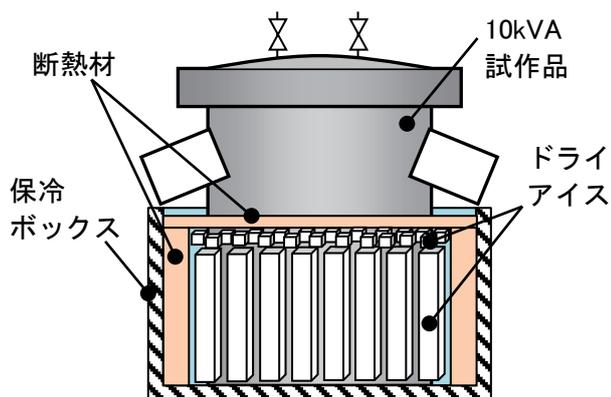


図3 試作機の保冷イメージ



図4 試作機保冷時の外観



図5 油凝固前(上)、油凝固状態(下)の変圧器内部

表6 油凝固状態における10kVA 試作機の絶縁性能

調査項目	菜種油	米油
耐電圧 (22 kV、1 min)	異常なし	異常なし
誘電正接 (%)	-20℃	0.6
	常温	0.8

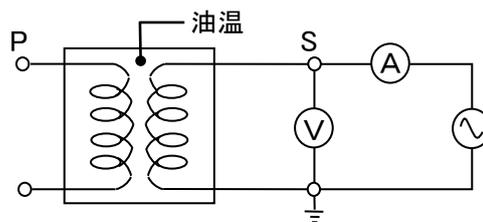


図6 無負荷通電試験の回路

(3) 加速劣化試験

20 kVA 試作機を返還負荷法にて経年30年相当まで加速劣化させ、変圧器性能を調査した。

返還負荷法とは、2台以上の同一定格の変圧器を用いた試験法で、並列に結線した変圧器の低圧側に電源を接続し、定格電圧・定格周波数で励磁し、無負荷損失を供給する。電源側から変圧器の損失分だけを供給すれば済むため、低コストで実施できるという特徴がある。

上記の方法を数か月実施し、その間に測定した油温、巻線最高点温度、周囲温度、電圧値、電流値から負荷率および経年数を算出する。

加速劣化試験後の変圧器性能として、①効率、②電圧変動率、③無負荷電流、④無負荷損、⑤負荷損、⑥短絡インピーダンスの6項目を調査した。表7に20 kVA 試作機加速劣化試験後の性能を示す。

30年相当経年後の変圧器性能は、概ね新品時の基本性能と同等であったが、現行機と比べて無負荷損のみ若干の性能低下が認められた。しかし、効率は低下していないことから、無負荷損の性能低下による影響は軽微とみられる。加速劣化試験後の油は、褐色状に変色していた。しかし、

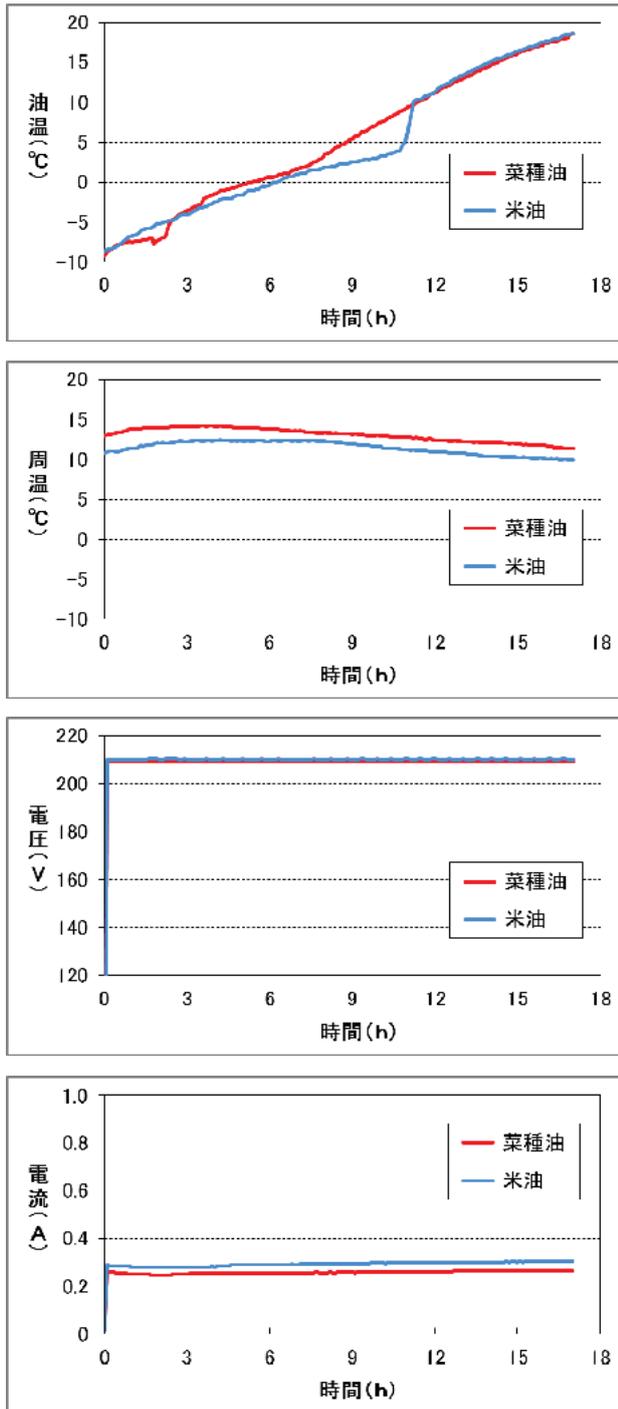


図7 無負荷通電時における油の融解過程での経時変化 (油温、周温、電圧、電流)

鉱油と異なり油劣化によるスラッジ発生はほとんどなく、濁りはみられなかった。

油面より上の気相部では、全面に茶色状の付着物が認められた。この茶色物は、加熱により気化した植物油が酸化し固着したものと考えられる。この他に、金属材の変色や塗膜剥離等の異常はみられず、高温加熱による材料への影響は認められなかった。

また、油面より下の部位においても材料の変色等はみられず、正常な状態であった。

加速劣化試験後のコイルを分解し、採取した絶縁紙の平均重合度を測定した。平均重合度測定の方法は、日本電機工業会規格(JEM 1463)に拠った。どの箇所においても、植物油の方が鉱油よりも平均重合度は高く、絶縁紙の劣化度合いが小さかった。基本性能調査において、巻線および油の温度上昇が現行機よりも試作機の方が高い数値を示したが、加速劣化試験では試作機の方が平均重合度が高くなる傾向がみられた。植物油は飽和水分量が高いため、絶縁紙から植物油へ水分が移行することが知られている。絶縁紙から水分が減少することによって絶縁紙の加水分解が抑制されるため、現行機よりも平均重合度の低下が少なくなったと考えられる。

実測値では、鉱油の平均重合度残率の平均が47%に対し、菜種油では54%、米油では65%であった。この結果をもとに植物油の寿命延伸効果を想定すると、1.5～1.9倍程度となる。フィールドにおける実機では、一定条件で行う加速劣化試験と異なり、ユーザーによって運転条件は様々である。このことから延伸倍率は確実なものではないが、植物油入り変圧器は鉱油入り変圧器よりも長寿命であることが期待される。図8に加速劣化試験後の絶縁紙の平均重合度残率を示す。

表7 20kVA 試作機の加速劣化試験後の性能

調査項目	試作機		現行機 (鉱油)
	菜種油	米油	
効率	○	○	○
電圧変動率	○	○	○
無負荷電流	○	○	○
無負荷損	△	△	○
負荷損	○	○	○
短絡インピーダンス	○	○	○

○：基本性能と変わらず △：基本性能より若干低下

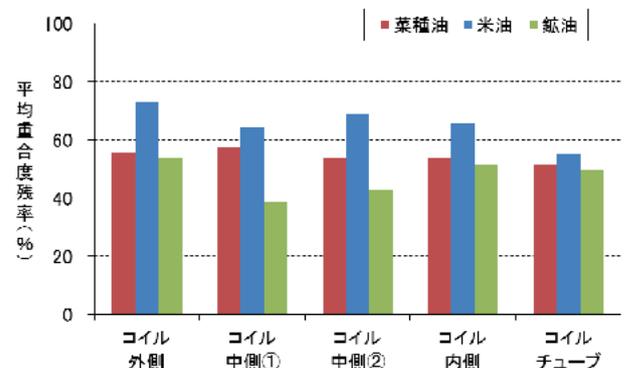


図8 加速劣化試験後の絶縁紙の平均重合度残率

4. まとめ

植物油系絶縁油よりも不純物が多く、厳密な水分管理等もなされていないが、安価で産業廃棄物が少ない一般用植物油に着目し、絶縁油としての適用可能性および植物油特有の性質について調査した。

絶縁油特性では、5種類の油の中から菜種油および米油を選定した。体積抵抗率および誘電正接において、不純物や水分の影響と考えられる電気特性の低下が認められたが、植物油系絶縁油の規格値は満足することが確認された。ただし、変圧器用として使用する場合、水分量の増加により電気特性が低下する可能性があるため、水分量は規格値を超過しないよう管理する必要がある。また、変圧器の最低使用温度である -20°C の環境下では油が凝固するが、凝固状態における電気特性も良好な結果が得られた。

試作機による調査では、基本性能は現行機(鉱油)と概ね同等であり、低温凝固状態での無負荷通電においても電流値の変動は認められなかった。加速劣化試験後の変圧器性能は、概ね基本性能を維持した。また、コイル絶縁紙は現行機よりも劣化の度合いが小さく、植物油の劣化抑制効果を実機で確認することができた。

絶縁紙はクラフト紙を使用しているため、平均重合度による経年劣化度評価は鉱油と同じ方法が適用できる。しかし、油については鉱油と植物油では発生ガス量が異なり、その差は現段階では明確になっていない。このため、採油による経年劣化度評価を行うには、油中ガス分析での基準値の確立が必要となる。

今後は、発生ガス量等の分析データを蓄積していき、採油による異常・寿命診断技術の確立を目指す。

参考文献

- (1) 「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)
- (2) 石油学会規格「エステル系絶縁油の品質指針」JPI-5R-76-2015(平成27年)
- (3) 石油学会編：「絶縁油ハンドブック」講談社(1987)
- (4) 宮島、宮本：「植物エステル系絶縁油の低温特性」電気学会B部門大会(2015)