

カーボンニュートラルと循環型社会の実現に 貢献する電気絶縁油の再生技術の構築

■ 北村 英里子 ■ 栗原 二三夫
Eriko Kitamura Fumio Kurihara

近年、環境への対応に向けられる関心が大きくなっており、脱炭素社会やカーボンニュートラル、循環型社会の構築に向けた取り組みは必要不可欠である。この潮流は油入絶縁機器に使用する電気絶縁油の分野においても同様で、海外では電気絶縁油品質の国際規格が改正され、未使用絶縁油と再生絶縁油で品質上の区別はなく同等に扱われるようになった。一方、国内では再生絶縁油の適用はまだ盛んではないが、環境配慮への潮流、さらに国際規格への整合促進なども考慮すると、国内においても電気絶縁油再生と再生絶縁油の利用は広がっていく可能性がある。

そこで、使用済み絶縁油の再生処理と再生絶縁油の利用に関する研究に取り組み、知見を得たので紹介する。

1 はじめに

近年、環境への対応に向けられる関心が大きくなっており、カーボンニュートラルに向けた取り組みは必要不可欠である。このような流れは、油入電気機器の絶縁媒体として使用される電気絶縁油の分野においても同様である。電気絶縁油におけるカーボンニュートラルへの取り組みとして、生分解性電気絶縁油^{注1)}の適用、そして、電気絶縁油の再利用が挙げられる。これらは、電気絶縁油ライフサイクルの中での電気絶縁油に由来する二酸化炭素排出量の削減に大きく貢献できると考えられる。

生分解性電気絶縁油に関しては、海外では未使用の天然エステルに関する品質規格 (IEC 62770 : 2013)、改質・混合エステルに関する品質規格 (IEC 63012 : 2013) に加え、天然エステルが使用されている電気機器のメンテナンスと使用に関するガイドライン (IEC 62975 : 2021) が発行されている⁽¹⁾。また国内では、生分解性電気絶縁油が JIS 品質規格として制定 (JIS C2390 : 2019) され、電気絶縁油使用機器への適用が進んでいる。

電気絶縁油の再利用に関しては、海外では 2020 年に未使用の電気絶縁油品質の国際規格である IEC 60296 が改正され、未使用絶縁油と再生絶縁油で品質上の区別はなくなり、同等に扱われるようになった。また、再生絶縁油の適用状況としては、例えばアメリカ合衆国オハイオ州に再精製工場を持つ Hydrodec Group plc では、日本の電気絶縁油需要の半分以上に相当する年間 4 万トンもの再精製絶縁油を供給している。また、ヨーロッパでは使用済み絶縁油の輸入、そして、輸入した使用済み絶縁油を再精製した電気絶縁油を輸出する動きもある。さらに、変電所の変圧器に移動式の電気絶縁油再生システムを設置し、絶縁油をリフレッシュさせるサービスも普及しているため、ヨーロッパでの使用済み絶縁油の廃棄量は減少傾向にある⁽²⁾。

一方、国内では再生油から PCB^{注2)} が検出されたこ

とをきっかけに、1990 年以降は使用済み絶縁油を再利用しなくなったが、近年では電気絶縁油の再生と再生絶縁油の変圧器への適用に関する事例が出てきている⁽³⁾。カーボンニュートラルへの潮流、さらに国際規格への整合促進や、2027 年 3 月末をもって PCB 汚染機器の処理が完了することなどを考慮すると、国内においても電気絶縁油の再生と再生絶縁油の利用は広がっていく可能性がある。このため東光高岳では、電気絶縁油の再生に関する技術や、再生された電気絶縁油の長期安定性に関する研究に取り組んでいる。

使用済み絶縁油を再生する方法は、機械的方法 (ろ過や遠心分離ほか) や、吸着法 (酸化劣化による生成物を吸着剤へ吸着し除去する方法)、化学的方法 (硫酸処理や水素化処理ほか) などが挙げられる⁽⁴⁾。その中でも、電気絶縁油特性への品質要求を満たすレベルで回復・改善でき、かつ、石油精製レベルのプラントを必要としない吸着法に着目して検証を行っている。今回、電気絶縁油の再生方法と、再生処理により得られる再生油の特性やその挙動について知見を得たので報告する。

2 再生処理条件の検討

2.1 試料とした電気絶縁油

再生処理の条件検討にあたり、模擬劣化油を使用した。模擬劣化油は、ステンレスタンク内に市販の電気絶縁油 (JIS C2320 : 2010 1 種 2 号油) を銅線や絶縁紙などの変圧器材料とともに、実変圧器内での使用比率で密封し、空気の加圧供給を実施しながら、120°C で加熱して加速劣化させたものである。

2.2 吸着剤の選定

電気絶縁油の再生処理に適した吸着剤を選定するため、模擬劣化油中の劣化成分の除去性能に関する検証を行った。吸着剤として活性炭^{注3)}、活性アルミナ、モレキュラーシーブ 4A、陰イオン交換樹脂の 4 種を使用

した。活性白土や活性アルミナはすでに石油の精製工程や変圧器油の劣化防止剤として使用実績がある。また、その他の吸着剤として活性白土や活性アルミナとは成分の異なる多孔質のゼオライトや高分子化合物を選定した。検証は、ピーカーの中へ模擬劣化油とともに一定量の吸着剤を入れて攪拌、ろ過して各特性を評価した。各吸着剤の検証結果を表1に示す。

表1 各吸着剤で処理した再生油の特性

吸着剤	色相	酸価	電気特性	総合評価
活性白土	○	○	○	○
活性アルミナ	△	△	—	△
モレキュラーシーブ4A	×	×	—	×
陰イオン交換樹脂	×	×	—	×

酸価はその値が低下するほど良好な特性として評価する項目であるが、モレキュラーシーブ4Aと陰イオン交換樹脂では酸価の低下がみられなかったことから、劣化生成物を除去できなかつたと考えられる。一方で、活性白土と活性アルミナでは酸価が低下し、電気絶縁油の再生処理に効果があったが、活性白土の方が再生処理の効果が高かつたことから、吸着剤として活性白土を選定した。

2.3 再生処理の条件検討

次に、活性白土を使用した再生処理条件を検討した。模擬劣化油に対し、再生処理において一般的に使用される吸着剤量である⁽⁴⁾5wt%の活性白土を温調条件下で接触させると、電気絶縁油の特性が向上したことを確認した。さらに、再生処理前の電気絶縁油の色相は茶色であったのに対し、再生処理をすることで脱色され、新油と同様な色相となった。なお、1段階の再生処理では電気絶縁油特性を十分に改善させるために再生処理時間を長くする必要があつたが、2段階以上の処理（吸着剤を途中で交換）を行うことで、短時間で十分な電気絶縁油特性が得られた。本検討をもとに、再生処理検証装置での処理条件は表2とした。

表2 再生処理条件

項目	内容
吸着剤の使用量	劣化油に対して約5wt% (各段階で吸着剤は新しいものに取りかえる)
油温	60℃以上
処理の段数	2段階以上

3 検証装置による模擬劣化油の再生処理効果の検証

3.1 再生処理に使用した検証装置

再生処理装置での再生処理工程における特性変化と再生油の電気絶縁油特性を検証するため、検証装置を用いた再生処理検証を実施した。

図1に検証装置の外観を示す。

本装置は真空脱気槽に貯留した電気絶縁油を昇温・保温しながら循環し、吸着剤槽へ通液し吸着剤と接触させるパーコレーション法^{注4)}としている。検証にあたっては、真空脱気槽へ導入した劣化絶縁油を真空脱気しながら60℃に昇温し、保温しながら吸着剤槽へ循環した。吸着剤槽の出口には、市販の導電率センサを設置し、再生処理中の電気絶縁油の導電率の変化を測定し、この挙動から再生処理の終点を判断した。



図1 検証装置

3.2 検証装置による模擬劣化油の再生処理

表2で示した再生処理条件で検証装置を使用して再生処理を行い、その効果を確認した。各段階で再生処理を行った試料油を採取し、酸価・誘電正接・体積抵抗率を測定した。測定はJIS C2101:2010電気絶縁油試験方法に準拠した。その結果を図2に示す。なお、各特性の測定結果は再生処理前の模擬劣化油の値を1としたときの変化率を記載した。

再生処理により各種特性は向上し、新油レベルに近い特性が得られた。さらに、再生油に対してJIS C2320

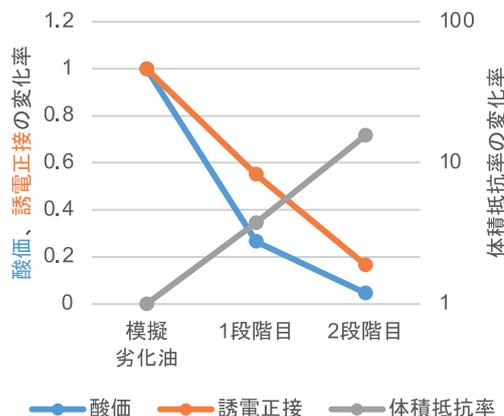


図2 再生油の特性の変化傾向（吸着剤量：約5wt%）

の品質項目のすべてを試験し、規格値を満足することを確認した。しかしながら、今回の再生処理条件では十分な再生効果は得られたものの、処理時間は合計で24時間以上もの時間を要することがわかった。これは、再生処理温度や吸着剤量などの再生処理条件のほか、模擬劣化油と吸着剤の接触方法などの影響があると考えられる。本装置のようなパーコレーション法の場合は、装置や吸着剤による再生処理、装置運用が簡素化できるメリットがある一方で、コンタクト法^{注5)}に比べ、処理時間が長くなる傾向を示している。

3.3 吸着剤量を増やした場合の処理時間への影響検証

吸着剤量を増やした場合、油と吸着剤の接触面積の増加により油中の劣化成分の吸着が促進され、同装置での吸着再生処理をより短時間化できる可能性がある。そこで吸着剤量を模擬劣化油に対して約10 wt%とし、3.2と同様に検証を行った。その結果を図3に示す。なお、各特性の測定結果は再生処理前の模擬劣化油の値を1としたときの変化率を記載した。

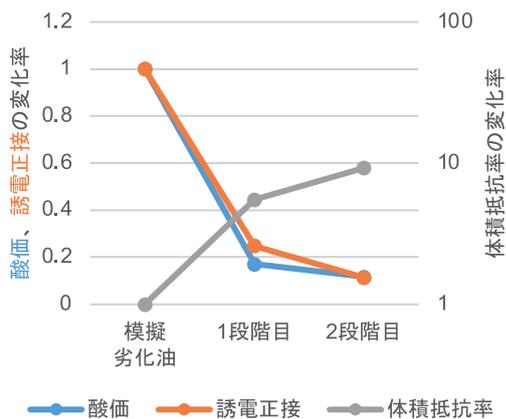


図3 再生油の特性の変化傾向 (吸着剤量：約10 wt%)

吸着剤を模擬劣化油量に対して約5 wt%使用した場合と比べて酸価・誘電正接・体積抵抗率が向上するまでにかかる時間は大幅に短くなり、1/3以下までに短縮できることを確認している。また再生処理終了時の再生油特性は吸着剤量約5 wt%時と同等で、新油に近い特性が得られた。さらに、再生処理による各特性向上の変化傾向が急峻となり、吸着剤を増やした効果が表れたと考えられる。このことから本装置のような構造では、吸着剤量の使用量によって処理時間の調整(最適化)が可能であることがわかった。

3.4 再生処理における導電率センサの挙動

3.3で実施した再生処理における導電率センサの出力(導電率)を図4に示す。なお、再生処理開始時点での導電率の値を1としたときの値を示した。

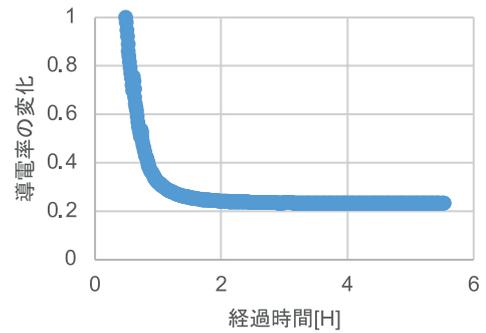


図4 導電率の経時変化

導電率センサの出力は、経時的に低下し、ある一定の値で安定化する挙動を示した。これは、電気特性を低下させる劣化油中の劣化成分が吸着剤によって除去される様子が、リアルタイムにモニタされていると推察できる。このことから、再生処理の終点判断は導電率センサで実施可能であり、また処理時間などの再生処理条件を固定することなく、確実な再生処理が可能になると考えられる。

3.5 繰り返し再生処理可否の検証

一度再生処理した模擬劣化油の再生油は新油とそんない特性を示したことから、複数回の繰り返し再生利用の可能性も期待される。そこで電気絶縁油の加速劣化と再生処理を繰り返し、酸価・誘電正接・体積抵抗率の変化傾向を確認した。再生処理は表2に示した条件で検証装置により行った。その再生油の特性測定結果を図5に示す。なお、各測定値は新油の値を1としたときの変化率を記載した。

その結果、複数回の再生処理を行った再生油でも、酸価や誘電正接、体積抵抗率は再生処理により改善してJIS規格を満足する特性が得られた。この結果から、電気絶縁油の複数回の繰り返し再生利用、ひいてはよりいっそうのカーボンニュートラルへの貢献の可能性がうかがえた。

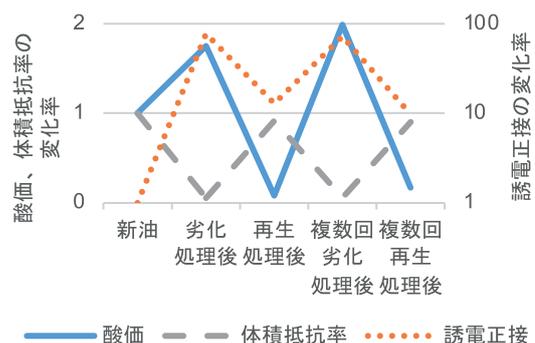


図5 繰り返し再生処理による各特性の変化傾向

4 実器使用油の再生可否

実器で使用された電気絶縁油でも同様に再生処理可能かを確認する目的で、実運用された変圧器から採取した実器使用油に対して、模擬劣化油と同様に表2の条件で再生処理を行った。その結果を図6に示す。なお、各測定結果は再生処理前（実器使用油）の値を1としたときの変化率を記載した。

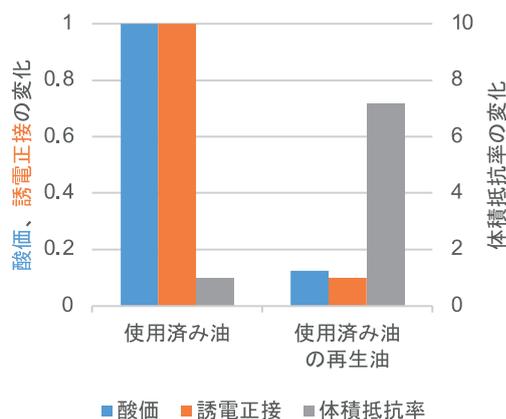


図6 実器使用油の再生処理結果

実器使用油に対しても再生処理は進行し、酸価・体積抵抗率・誘電正接などの項目で、新油とそん色ない特性を得ることができた。よって、今回検証した吸着剤による再生処理方法は実器使用油への適用が可能と判断される。

なお、実器使用油の再生油に対して JIS C2101 品質試験をすべて実施したが、JIS が要求する電気絶縁油品質をもつことを確認した。

5 おわりに

電気絶縁油に対して劣化と再生処理を繰り返し、得られた再生油の電気絶縁油特性について検証を行った。その結果、活性白土を使用したパーコレーション法で再生処理を行うことにより、電気絶縁油を繰り返し使用しても JIS 規格を満足し新油に近いレベルの電気絶縁油特性が得られることを確認した。また、導電率センサを使用することで再生処理の様子をモニタすることができ、センサの挙動から再生処理終了の判断が可能であることを確認した。

さらに、実器使用油を使用した場合でもその再生油は JIS 品質規格を満たすことを確認した。

しかしながら、実器使用油の劣化が大きい場合の再生油品質や、新油の状態では最適化されている微量成分の変化、長期安定性への影響などの課題があると考えている。今後、これらの課題解決をはじめ、設備化や運用方法などに関する検討を進め、本技術および本技術を適用した東光高岳の製品・サービスが、環境負荷低減の視点で社会に貢献できることを目指していく。

参考文献

- 大野高志, 西川精一:「電気絶縁油概論」, 第6回絶縁油分科会後継者育成講習会要旨集, p.57 (2022)
- 長谷川正明:「欧米における潤滑油(絶縁油含む)のサーキュラーエコノミーの現状について」, 第42回絶縁油分科会研究発表会要旨集, pp.51-59 (2022)
- 尾迫修二, 井上暁史:「絶縁油リサイクル技術の開発と実用化」, 電気現場, pp.38-43 (2021.07)
- 松島正蔵:「電気絶縁油および含浸材料」, 電気書院, pp.46-48 (1954)

■ 語句説明

- 注1) 生分解性電気絶縁油: 現在一般的に使用されている石油由来の絶縁油に比べて高い生分解性をもつ電気絶縁油。生分解性電気絶縁油はその分子内にエステル結合をもつことから、「エステル系絶縁油」や「エステル油」とも呼ばれる。JIS C2390:2019では生分解性電気絶縁油を合成エステル・天然エステル(植物油)・植物由来エステルの3部に分類している。
- 注2) PCB: ポリ塩化ビフェニルの略。以前はPCBの化学的安定性や電気特性の高さから、電気機器の絶縁油をはじめ幅広い用途に使用されていた。しかし、後に人体への毒性が判明したため、現在ではPCBを含む機器の製造・輸入ともに禁止されている。
- 注3) 活性白土: モンモリロナイトやハロサイトを主成分とする粘土を酸性処理し、吸着性能を向上させたもの。
- 注4) パーコレーション法: percolation(ろ過, 浸透)を由来とする名称で、吸着剤が格納されている吸着剤槽を電気絶縁油が浸透する様子を示す。電気絶縁油と吸着剤の接触・分離を同時に行うことができる方法。
- 注5) コンタクト法: 接触法とも呼ばれる、吸着剤と試料油を混合攪拌して直接接触させ、その後ろ過により吸着剤と試料油を分離する方法。

北村 英里子

戦略技術研究所技術開発センター
材料技術グループ 所属

栗原 二三夫

戦略技術研究所技術開発センター 所属