

火災安全性の要求や絶縁油のレトロフィル需要に対応可能な天然エステル油入変圧器

Natural Ester Oil-Immersed Transformers Responding to Demands for Fire Safety and Retrofilling

山下 駿也 YAMASHITA Syunya 野澤 強久 NOZAWA Tsuyoku

カーボンニュートラルの実現に向けて、電気絶縁油に、従来の鉱油系電気絶縁油（以下、鉱油と略記）に替えて天然エステル^(注1)を使用した油入変圧器（以下、天然エステル油入変圧器と呼ぶ）の導入が進んでいる。特に、燃焼点が300℃を超える天然エステルの長を生かし、火災安全性が要求される屋内変電所などに設置する電力流通設備への導入拡大や、経年設備のレトロフィル（鉱油を天然エステルに入れ替える）需要への対応が求められる。

北芝電機（株）は、このような市場の要求に応え、屋内変電所向けに、油入変圧器のタンク構造を改良して移動経路や据付場所の寸法・質量制限を満足するコンパクト化・軽量化を実現した。また、天然エステルに菜種油を用い、レトロフィル需要に応えるため、入れ替え後の菜種油中の残存鉱油量及び燃焼点などの特性を把握し、消火設備の簡素化が可能な要件を満たすことを確認した。

The introduction of natural ester oil-immersed transformers as an alternative to mineral oil, which has traditionally been used for electrical insulation, is picking up speed in recent years in line with efforts to achieve carbon neutrality. Demand is particularly strong for such transformers in power distribution equipment installed at indoor substations with fire safety requirements due to the fire point temperature of natural ester exceeding 300°C.

To meet market needs, Kitashiba Electric Co., Ltd. has developed a compact, lightweight rapeseed oil-immersed transformer for indoor substations by improving the tank structure of conventional oil-immersed transformers in consideration of various installation location constraints. To meet user requirements for retrofilling aged oil-immersed transformers by replacing mineral oil with rapeseed oil, we have confirmed that required fire suppression systems can be simplified by identifying rapeseed oil characteristics, such as the amount of residual mineral oil, fire point temperature, etc.

1. まえがき

油入変圧器の絶縁及び冷却媒体には、従来から原油を精製した鉱油が使用されている。政府による2050年カーボンニュートラル宣言及び2030年温室効果ガス削減目標の実現に向けた取り組みとして、従来の鉱油に替えて、天然エステルを使用した変圧器の導入が進んでいる。天然エステルは、鉱油に比べ、生産から油の廃棄処分までのライフサイクルを通して発生する二酸化炭素（CO₂）を抑制できるカーボンニュートラルな材料である。

一方、電力流通において重要な役割を担う変圧器は、電力需要の増加に伴い、その多くが人口の集中する地域や場所に設置されてきており、変圧器に求められる安全性・防災性の要求が高まっている。特に、高層ビルや、地下施設、駅などの受変電設備では、火災予防対策が重要視されている。

天然エステルは、鉱油と比較して、引火点、燃焼点（引

火後に燃焼が5秒間継続する最低温度）が高く燃えにくい特長があるため、火災安全性向上を目的とした天然エステル油入変圧器の導入拡大が求められる。特に、屋内設備の防火対策としては、絶縁油の種類によらず、特殊消火設備（不活性ガス消火設備、ハロゲン化物消火設備又は粉末消火設備）の設置が義務付けられていたが、2023年3月、消防庁からの通知（消防予第205号）⁽¹⁾により、燃焼点が300℃を超える天然エステル（植物油）を絶縁油として使用する変圧器については、一定の要件を満たす場合、大型消火器を設置することで、特殊消火設備の設置を省略でき、消火設備の簡素化が可能となった。

更に、1960年代から1970年代の高度経済成長期に大量の電力流通設備が建設され、そのうちの一つである変圧器は、運転年数30年を超過したのも多く、高経年化に伴う維持や更新が課題となっている。変圧器を安全に長期間使用するには、適切な保守管理と劣化部分の修繕が必要となるが、変圧器の寿命を決定する巻線絶縁紙の交換は現実的ではなく、また、経年設備の更新時期の集中により、更新が困難なケースも生じている。そのため、巻線絶縁紙

(注1) JIS C 2390-2 : 2019 (日本産業規格C 2390-2 : 2019)* 生分解性電気絶縁油—第2部：天然エステル(植物油)に規定された、植物油。

の劣化の進行を遅らせる手段として、あるいは、天然エステルの難燃性の特長を生かした火災安全性向上を目的として、既設変圧器の絶縁油を鉱油から天然エステルに入れ替えるレトロフィルも、その実施による効果が期待されている。

北芝電機(株)は、天然エステルとして菜種油を用いた天然エステル油入変圧器(以下、菜種油入変圧器と略記)の適用を拡大してきた。当初は電力会社向け配電用変圧器や、再生可能エネルギー発電事業者向け連系用変圧器、中間変圧器を主に納入してきたが、最近は炉用変圧器、リアクトル、移動用変圧器など、幅広い機器に適用を拡大している。菜種油入機器の適用目的が多様化する中、今回、経年配電用変圧器で鉱油を菜種油に入れ替えるレトロフィル後の実運転状態における絶縁油の特性を評価し、レトロフィルにより火災安全性を向上させられることを確認した。また、屋内変電所向け変圧器のコンパクト化・軽量化を実現した構造を開発し、TAKANAWA GATEWAY CITY 特高電気室変電所に適用した。

ここでは、それらの概要について述べる。

2. 変圧器絶縁油の鉱油から菜種油へのレトロフィル

火災安全性向上を目的にレトロフィルを実施する場合、レトロフィル時には、残存した鉱油が置換した菜種油にある程度混入するため、その影響の確認が必要である。そこで、残存する鉱油量の油特性への影響について、基礎評価を実施した。また、経年配電用変圧器の実器にレトロフィルを実施し、菜種油中の残存鉱油量(比率)を実際に確認した。

2.1 菜種油への鉱油混入による影響の評価

鉱油と菜種油の混合比率を変化させて、油特性の変化を測定した(図1)。消防法上、引火点250℃以上の液体は危険物から除外され、指定可燃物として扱われる。鉱油含有率が5%以下では、引火点が250℃以上、燃焼点が300℃以上を確保されることが確認できた。また、動粘度は混合比率に応じて変化した。一方で、引火点や燃焼点は鉱油含有率10%以下の領域において、含有率の微小な変化で特性が大きく変化することを確認した。

2.2 レトロフィル後の残存鉱油含有率の確認

1975年製造の15 MVA 配電用変圧器(運転年数41年)にて、菜種油へのレトロフィルを実施した。油入れ替えの際、元々封入されていた鉱油を変圧器タンク内から完全に抜き取ることは困難であり、一部はタンクに残存する。

この残存する鉱油の含有率を、タンク上部と下部のそれぞれで測定し、油入れ替え後の運転日数とともに図2に示した²⁾。現行のレトロフィル工法は、タンク下部から菜種油を注油するため、注油初期は鉱油の含有率が高い。注油

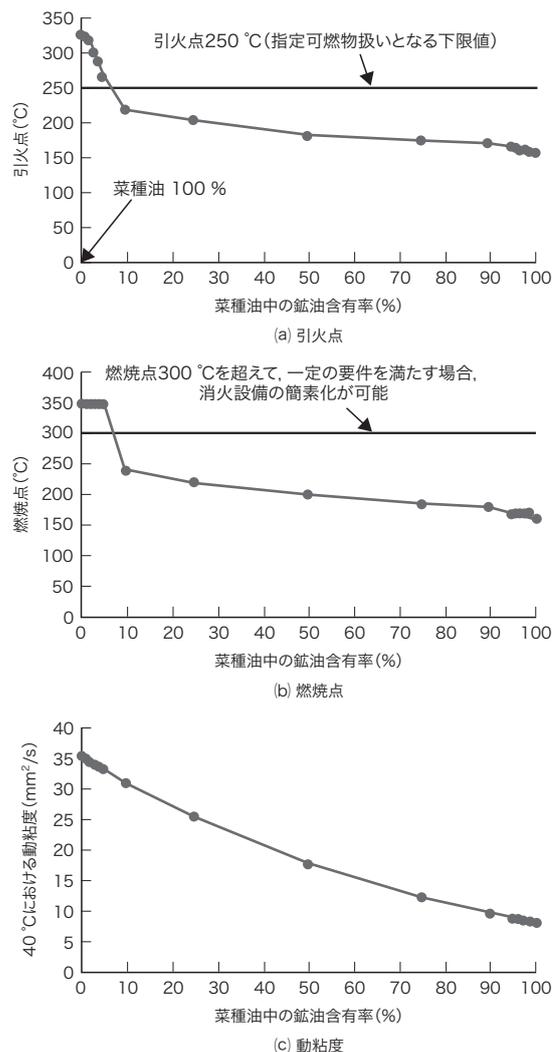


図1. 鉱油と菜種油の混合特性

菜種油中の鉱油含有率5%以下では、引火点は250℃以上で、燃焼点は300℃を超えることが確認できた。

Mixing characteristics of mineral oil and rapeseed oil

を進めると、鉱油含有率の高い混合油が、後から注油される菜種油よりも密度が低い(菜種油:0.91 g/mL, 鉱油:0.87 g/mL)ことから、鉱油含有率の高い混合油は油面とともに上昇する。このため、注油完了後のタンク上部の鉱油含有率は、タンク下部に比べて高くなっている。注油後は絶縁油に含まれる油中ガスや水分を除去するために脱気循環を行うため、変圧器内部の絶縁油が全体的に混ざり合い、鉱油含有率は均一化される。運転開始後は、変圧器内部の温度上昇とともに上部に留まっていた油が対流し、上下同一の比率になったと推定される。運転開始から30日経過以降の鉱油含有率は増加傾向を示し、200日経過後は一定となった。これは、絶縁物に含浸した鉱油の菜種油への染み出しによるものと推察される。

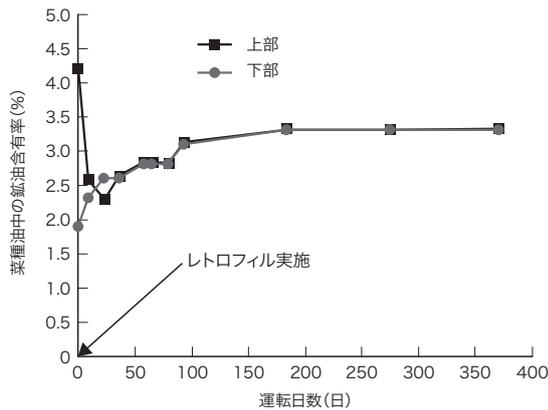


図2. レトロフィル後の菜種油中における鉱油含有率の推移

15 MVAクラスの配電用変圧器において、油入れ替え後の菜種油中に残存する鉱油の比率は約3%となることを把握した。

Changes in content rate of mineral oil in rapeseed oil after retrofilling

現行のレトロフィル工法において、15 MVAクラス配電用変圧器の菜種油中の鉱油含有率が約3%となることを把握した。鉱油含有率が5%以下では燃焼点が300℃を超えることから、レトロフィルにより、消火設備の簡素化が可能となる要件を満たしていることが確認できた。

3. 屋内変圧器の新構造

3.1 屋内変圧器に求められる構造

建屋内に設置する屋内変圧器は、搬入から据付場所までの移動経路や、据付場所の寸法及び質量に制限があるため、変圧器のコンパクト化・軽量化が求められる。また、納入後にメンテナンス(用品交換など)作業を行う際、作業スペースが制限されることから、メンテナンスの容易性が求められる。一方、菜種油は鉱油よりも動粘度が高く、鉱油入変圧器に対して菜種油入変圧器は質量が大きく、体格が大きくなるため、質量及び輸送時の寸法が屋内の制限を満足できない場合がある。今回、メンテナンス上のメリットを保ったままコンパクト化・軽量化を実現する新たな構造を開発した。

3.2 新構造に対する課題

当社では、油入自冷式変圧器の油劣化防止方式として、無圧密封式、窒素密封式を標準的に採用しているが、油劣化防止方式の指定がない場合は、窒素密封式を採用している。この窒素密封式は、オーバーホール時に交換対象となる部品点数が少ないというメンテナンス上のメリットはあるが、特に菜種油入変圧器は鉱油入変圧器と比較して外形が大きくなるという構造上のデメリットもあり、輸送時に変圧器を分解する範囲に制限が生じる場合もある。

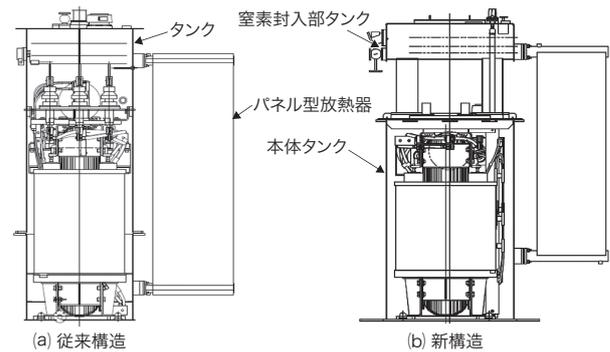


図3. 新構造と従来構造の比較

窒素封入部と本体とにタンクを分割することにより、内部のデッドスペースをなくし、質量を低減できた。

Comparison of tank structure in conventional oil-immersed and new rapeseed oil-immersed transformers

自冷式変圧器の場合、パネル型放熱器を取り付ける構造を標準とし、変圧器の巻線や鉄心から絶縁油に伝達した熱を、内部の絶縁油の自然対流により循環させ、パネル型放熱器の各パネルから熱を外部へ放射することで放熱する。

絶縁油の動粘度が高い場合、絶縁油の循環力が低下することから、鉱油入変圧器と比較した場合、構造が同じ条件で評価すると、菜種油入変圧器は、変圧器上部と下部の温度差が大きい傾向となる。

変圧器上部と下部の温度差を小さくする改善方法として、放熱器の取り付け高さを上げ、絶縁油の循環力を上げる方法があり、窒素密封式変圧器はこの方法を採用しているが、放熱器高さに応じてタンク高さが高くなっている。このため、変圧器全体の質量が大きく、体格が大きくなり、厳しい質量・寸法制限がある場合の対策が課題となっていた。

3.3 新構造の窒素密封式変圧器

窒素密封式のメンテナンス上のメリットを保った上で、輸送据付制限を満足する、新たな構造(図3)を開発した。変圧器本体とタンク上部の窒素封入部を別タンクとすることで、内部のデッドスペースをなくし、油量、タンク質量の低減を可能とした。また、窒素封入部タンクと本体タンクとを分割した輸送を可能とし、タンク高さを抑えることも可能とした(図4)。

これらにより、現地組み立て作業に支障がない範囲で分解輸送を可能とする構造とし、従来よりも厳しい質量・寸法制限となる場合でも窒素密封式変圧器の採用を可能とした。

TAKANAWA GATEWAY CITY特高電気室納入菜種油入変圧器についても、据付場所構内への移動経路に寸法及び質量上の制限はあったが、新構造を採用したことで、従来構造に対し変圧器全体として約6%質量を低減でき、

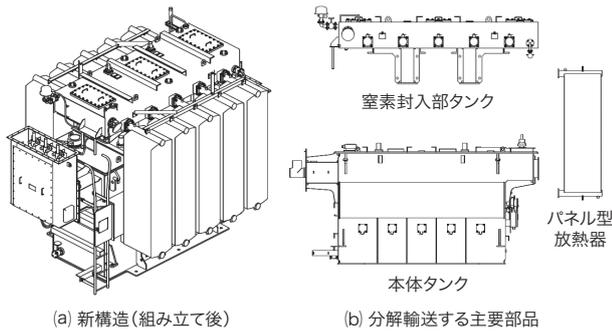


図4. 新構造における分解輸送時の形態

タンクを分割したことで、輸送品の寸法と質量を低減し、移動経路や据付場所での寸法・質量制限を満足した。

New tank structure capable of being disassembled for transportation



図5. TAKANAWA GATEWAY CITY特高電気室納入菜種油入変圧器

新構造の採用により、変圧器全体として従来構造に比べて約6%質量を低減した18 MVAクラスの変圧器を納入した。

Rapeseed oil-immersed transformer installed in TAKANAWA GATEWAY CITY High Voltage Electrical Room

2025年に据え付けを完了している(図5)。

4. あとがき

15 MVA 配電用変圧器の実機を用いて鉱油から菜種油への絶縁油のレトロフィルを行い、残存する鉱油の比率が約3%となることを把握した。併せて実施した基礎評価により、菜種油中の鉱油含有率が5%以下であれば、燃焼点が300℃を超えるという火災安全性向上を確認していることから、菜種油へのレトロフィルで消火設備の簡素化が可能になることを確認できた。

また、屋内変圧器の新構造を開発し、メンテナンスの容易性を保ちながら、建屋への搬入時の据付場所までの移動

経路や据付場所の厳しい寸法・質量制限に対応した。

カーボンニュートラルの実現に向けて、火災安全性向上などの多様化するニーズに応えることで、今後も天然エステル油入機器の普及を推進していく。

文献

- (1) 総務省消防庁. 消防予第205号 消防用設備等に係る執務資料の送付について(通知). <<https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/items/5e53b0035ddf8a822b1b6bf8491a9cf221f91719.pdf>>, (参照 2025-01-30).
- (2) 坂本 進, ほか. “天然エステルでの経年鉱油変圧器のレトロフィル検討”. 令和5年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集. 愛知, 2023-09, 2023, 論文No.48.



山下 駿也 YAMASHITA Syunya
北芝電機(株)
変圧器部
Kitashiba Electric Co., Ltd.



野澤 強久 NOZAWA Tsuyoku
北芝電機(株)
変圧器部
Kitashiba Electric Co., Ltd.