

低炭素・循環型社会に貢献する潤滑油の延命/再生技術の開発

Development for Lubricating Oil Life Extension/Regeneration Technology Contributing to Low Carbon and Recycling-oriented Society



大久保 花菜*1
Kana Okubo

矢野 昭彦*2
Akihiko Yano

洞口 典久*3
Norihsa Horaguchi

渡辺 郁美*4
Ikumi Watanabe

河原 克行*5
Katsuyuki Kawahara

岩田 英生*6
Hideo Iwata

潤滑油のマテリアルリサイクルによる CO₂ 削減の実現に向けて、潤滑油の延命/再生技術の開発を行っている。従来の潤滑油の再生方法は、廃油回収時や、再生時にエネルギーを使用する課題がある。そこで、廃油回収が不要かつ再生時に熱を用いないオンサイト型の方法を検討し、添加剤補給と酸成分除去を組み合わせることで潤滑油を延命/再生する新しいプロセスを見出した。本報では、潤滑油の劣化特性と、三菱重工業株式会社(以下、当社)が提案する添加剤補給及び酸成分除去による潤滑油の延命/再生効果について紹介する。

1. はじめに

低炭素・循環型社会の実現に向けて、製品のライフサイクル及びサプライチェーンにおける CO₂ 削減が求められている。機械で使用される潤滑油における汎用的な鉱物油は、化石燃料から作られ炭素を含んでおり、産廃処分において焼却されると CO₂ が発生する。日本では、地球温暖化対策推進法により、廃油のサーマルリサイクルは新たな石油燃料の使用を減らし CO₂ を削減しているという認識であるが、実際のところ CO₂ を排出している。これに対して、潤滑油の長寿命化や潤滑油の再生を行うことは、産廃処分量を抑えて低炭素・循環型社会に貢献すると考えられる。

潤滑油の再生には、従来、多数のユーザから使用済み潤滑油(廃油)を回収し、再蒸留することで基油を取り出し、添加剤を加えて再生油を得るというアプローチがあり、欧米ではすでに商業化されている。EU においては、約 200 万 kL/年の廃油が回収され、約 100 万 kL/年の基油にリサイクルされている⁽¹⁾。再生油は、廃油から基油へとマテリアルリサイクルしていることから、産廃焼却時の CO₂ 排出を削減している。

大規模回収による潤滑油の再生は、不特定多数の廃油の回収、基油への再生、再生基油を用いた潤滑油の製造、販売という流れで実施される。この方法は、産廃焼却をなくすことができる一方で、廃油回収時及び蒸留時等においてエネルギーが必要であり、化石燃料を使用した場合は低炭素とは言い難い。また、様々な油種・銘柄が回収されるため、再生基油の性能維持・再現性等に課題を有する。

また、当社製品のタービン設備を使用しているお客様からは、潤滑油の購入コスト削減のご要望を受けている。タービンは使用する油量が多く、1回の潤滑油購入に数千万円のコストが発生

*1 総合研究所 機械研究部

*2 総合研究所 機械研究部 主席研究員 工博

*3 総合研究所 機械研究部 主席研究員

*4 総合研究所 化学研究部

*5 エナジードメイン GTCC 事業部ガスタービン技術部 主席技師

*6 エナジードメイン SPMI 事業部営業部 主席技師 技術士(機械部門)

する。大規模回収により再生された潤滑油を使用しても、再生にエネルギーが必要であり、そのコストは新油と同等になることが予想される。

これに対し当社では、廃油回収が不要、かつ、潤滑油再生時に熱を用いないオンサイト型の潤滑油再生方法を提案する。本方法は、油の部分交換とは異なり、潤滑油の劣化を抑制する添加剤成分を補給し、劣化を促進させる老廃物を取り除く、従来にない新しいアプローチである。当社は、使用油量が多いタービン設備の潤滑油を一例に、潤滑油の劣化特性を明らかにし、本コンセプトの実現可能性を見出した。本報では、要素試験で得た試験結果に基づいて、当社が提案するオンサイトでの潤滑油の延命/再生方法を紹介する。

2. 発電プラントの潤滑油交換・管理

潤滑油は使用に伴い徐々に劣化していく。潤滑油が劣化すると、粘度増加や酸価の上昇(酸成分の増加)、スラッジ(油や添加剤由来の固形物)等が発生し、機械部品に対して焼付きや摩耗あるいは腐食、軸受の温度上昇、フィルタの目詰まり等の悪影響を及ぼす恐れがある。そのため、発電プラントでは、潤滑油の管理指標が基準値に到達する前に、使用油を新油と全量交換または部分交換している。また、数カ月に一度の頻度で潤滑油の定期分析を行い、その状態を確認している。

潤滑油の定期分析項目の一つであるRPVOT(Rotating Pressure Vessel Oxidation Test)値⁽²⁾は、油を加速劣化させて余寿命を評価する油の酸化安定性の指標であり、酸化防止剤の残存率と概ね相関がある。一方、酸価は油中に含まれる酸成分の量を表す。当社におけるRPVOT値と酸価の管理基準は、RPVOT残存率(劣化油のRPVOT値を新油のRPVOT値で除した比率)として25%以上、酸価は新油値+0.4mgKOH/g以下と定めている。潤滑油が酸化劣化する環境に置かれた場合、油中に添加された酸化防止剤は、自らが酸化されることで基油の劣化を抑制するが、酸化防止剤が消耗すると基油が酸化劣化され有機酸等が生成する。

タービン油を加速劣化させた試験結果の一例を図1に示す。図1(a)に示すように、酸価はRPVOT残存率が約25%以下から急激に増加し始め、また、図1(b)に示すように、スラッジもRPVOT残存率が約25%以下から急激に生成する。従って、RPVOT残存率を25%以上で管理することは妥当である⁽³⁾。

RPVOT残存率は、プラントの運転時間とともに概ね線形で低下するため、潤滑油の酸化劣化度合いを最も管理しやすい項目となっており、潤滑油の酸化劣化に起因する機器の故障を防止する良い指標となっている。

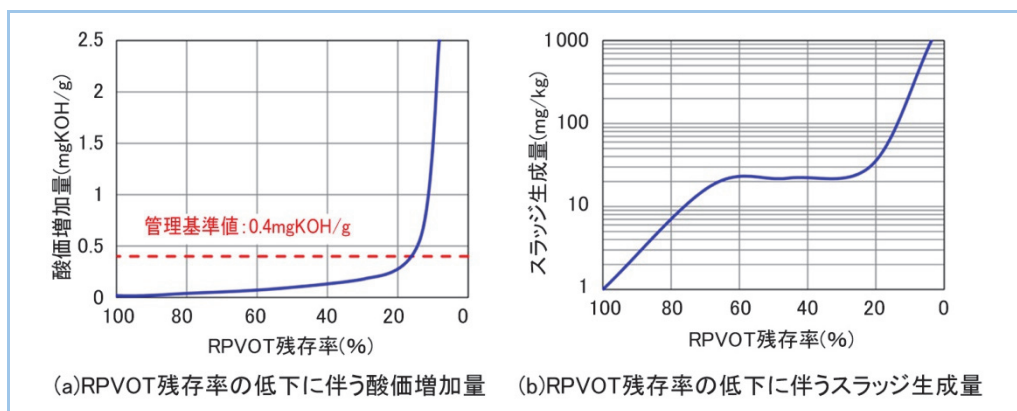


図1 加速劣化試験による、RPVOT残存率の低下に伴う酸価増加及びスラッジ生成

3. 当社が考えるオンサイト型の潤滑油再生方法

上述のように、潤滑油の管理値を基準値内に維持し続ければ、潤滑油交換は不要であると考えた。RPVOT残存率の低下及び酸価の増加を抑える方法としては、酸化防止剤を補給して

RPVOT 残存率を高め維持し続ける方法(添加剤補給)と、油中に蓄積する老廃物を除去して酸価を低減する方法(酸成分除去)が考えられる。

そこで当社は、コスト低減効果を大きくするために、添加剤補給と酸成分除去を組み合わせた潤滑油の延命/再生プロセス案を見出した。図2に添加剤補給と酸成分除去による潤滑油の延命/再生プロセス案を示す。定期的に添加剤補給を実施することで RPVOT 残存率を高め維持する。そして、添加剤補給の何回かに一度、老廃物が蓄積した段階でシリカを用いて酸成分除去し、酸価を新油相当に戻す。酸成分除去については、イオン交換樹脂を用いる方法もあるが、試験の結果から、シリカを用いる方法が高効率かつ安価であることを確認した。

このプロセスにより、オンサイトで潤滑油を延命/再生可能な目途を得た。これにより潤滑油交換は実質不要となるため、潤滑油の購入・廃棄費用を削減し、低炭素・循環型社会実現への貢献に繋げることができる。また、お客様の使用油をそのまま延命・再生して使用していくため、従来の大規模回収による潤滑油の再生方法と比較して、安定した品質の再生油を作ることができる。

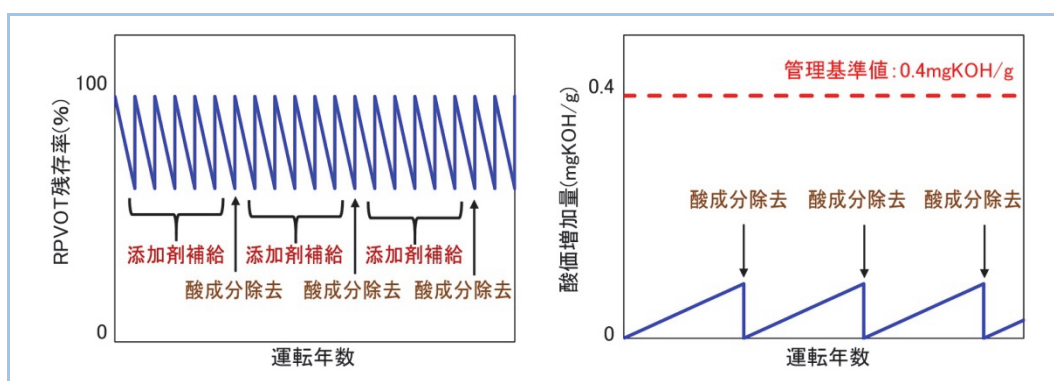


図2 添加剤補給と酸成分除去を組み合わせた潤滑油の延命/再生プロセス案

4. 潤滑油の延命/再生の効果検証

4.1 劣化油の作製

添加剤補給及び酸成分除去による潤滑油の延命/再生効果を要素試験によって検証した。試験で用いた劣化油は、TOST (Turbine oil Oxidation Stability Test) の試験装置を用い、ASTM D943⁽⁴⁾や ASTM D7873⁽⁵⁾に準じて油を加速劣化させることで作製した。

4.2 添加剤補給による潤滑油の延命試験結果

作製した劣化油に酸化防止剤を補給し、RPVOT 値が新油相当まで回復するか検証した。異なる RPVOT 残存率の劣化油に対して、新油相当量の酸化防止剤を補給した結果を図3に示す。劣化油の RPVOT 残存率が異なっても、同量の酸化防止剤を補給すれば、同程度に RPVOT 値が回復した。また、酸化防止剤の種類(酸化防止剤 A or B)によって RPVOT 値の回復量が異なることを確認した。ところが、RPVOT 残存率が管理基準値を下回った潤滑油に対しては、酸化防止剤を補給しても RPVOT 値は全く回復しなかった。従って、適切な酸化防止剤を選択することに加えて、RPVOT 残存率が管理基準値に至る前に酸化防止剤を補給すれば、新油相当まで RPVOT 値を回復させることができると考えられる。ただし、図4に示すように、劣化油に対して酸化防止剤の補給量を増加させていくと、RPVOT 値の回復量が飽和に達する傾向が認められるため、酸化防止剤の補給量を増やす方法は適切でないと考えられる。図2に示した添加剤補給を行うためには、潤滑油の RPVOT 残存率が高い時から酸化防止剤を補給し、少ない補給量で新油相当に回復させる必要がある。

RPVOT 残存率が管理基準値を下回った潤滑油に対して、酸化防止剤を補給しても RPVOT 値が変化しない理由を図5に示す。基油に酸化防止剤が添加された新油は、酸化防止剤による油劣化抑制能力が 100%発揮されるが、管理基準値を下回った潤滑油では、酸化防止剤の能力

を阻害する酸成分等の物質が蓄積しているため、酸化防止剤の能力が発揮できないと考えられる。また、使用可能な劣化油においては、酸化防止剤の能力は残存しているが、能力を阻害する物質も共存しているため、図3に示したように、新油相当量の酸化防止剤を補給してもRPVOT値が新油値まで回復しにくいと考えられる。従って、酸化防止剤の能力を発揮しやすくするために、能力を阻害する物質の除去、すなわち、酸成分除去の操作が必要である。

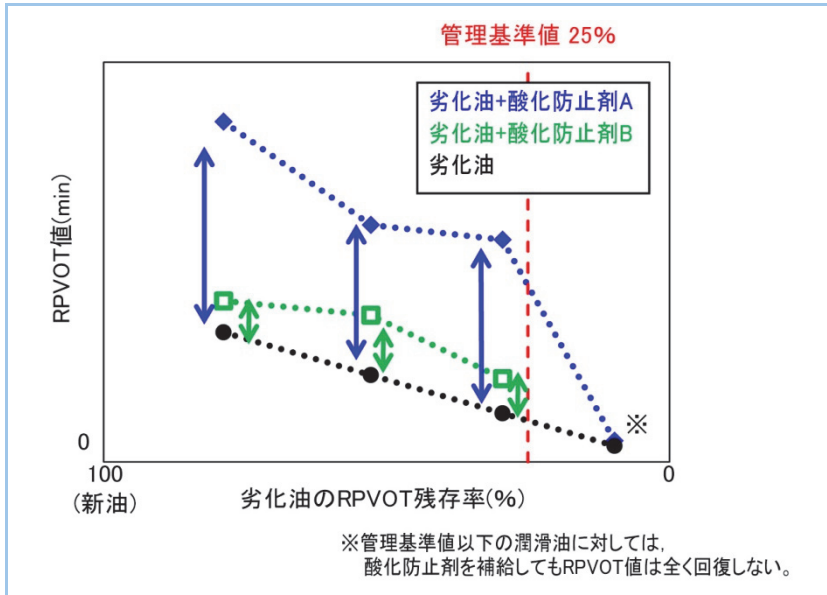


図3 新油相当量の酸化防止剤補給時のRPVOT値変化

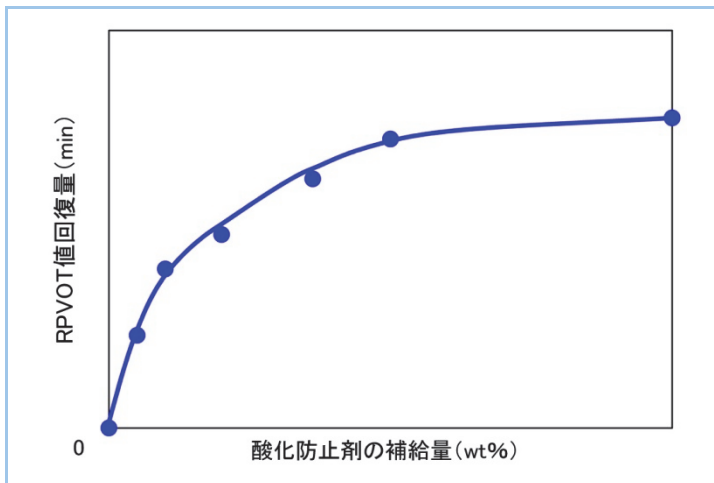


図4 酸化防止剤の補給量とRPVOT値回復量の関係

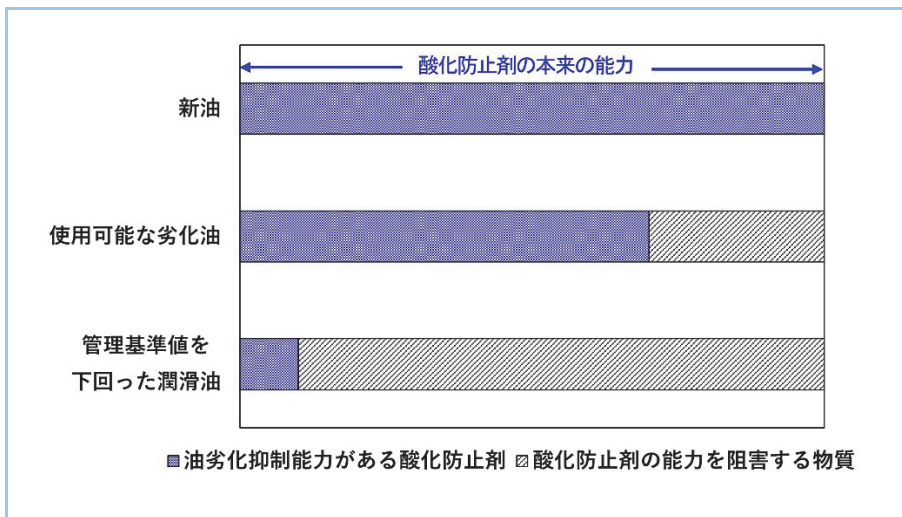


図5 油状態による酸化防止剤の油劣化抑制能力

4.3 シリカを用いた酸成分除去による潤滑油の再生試験結果

作製した劣化油の酸成分を除去したのち酸化防止剤を補給した場合、RPVOT 値及び酸価が新油相当に回復するか検証した。RPVOT 残存率が 25%の劣化油に対して、酸成分を除去した結果を図6に示す。図6(a)は酸成分除去を行わずに新油相当量の酸化防止剤を補給し、引き続き劣化させた場合である。酸成分除去を行わなかった場合、酸化防止剤の補給によるRPVOT 値の回復は小さかった。なお、酸化防止剤補給後の劣化速度は新油時の劣化速度と同等であった。

一方、酸成分除去を行った場合が図6(b)と図6(c)であり、酸成分除去剤として(b)はシリカ、(c)はイオン交換樹脂を用いて酸成分除去した場合である。酸化防止剤を補給した後の RPVOT 値の回復について分析した結果、シリカで酸成分除去した後は RPVOT 値が新油値相当に回復した一方、イオン交換樹脂で酸成分除去した後は新油値まで回復しなかった。シリカとイオン交換樹脂での RPVOT 値の回復率の差については、残存する酸成分等の濃度差が影響していると考えられる。表1に、各酸成分除去剤による条件と試験結果を示す。シリカで処理した場合は、1回のろ過操作で油の色が無色透明になり、酸価が新油値程度まで低下した。イオン交換樹脂で処理した場合は、5回のろ過操作で油の色が薄くなり、酸価が新油値程度まで低下した。

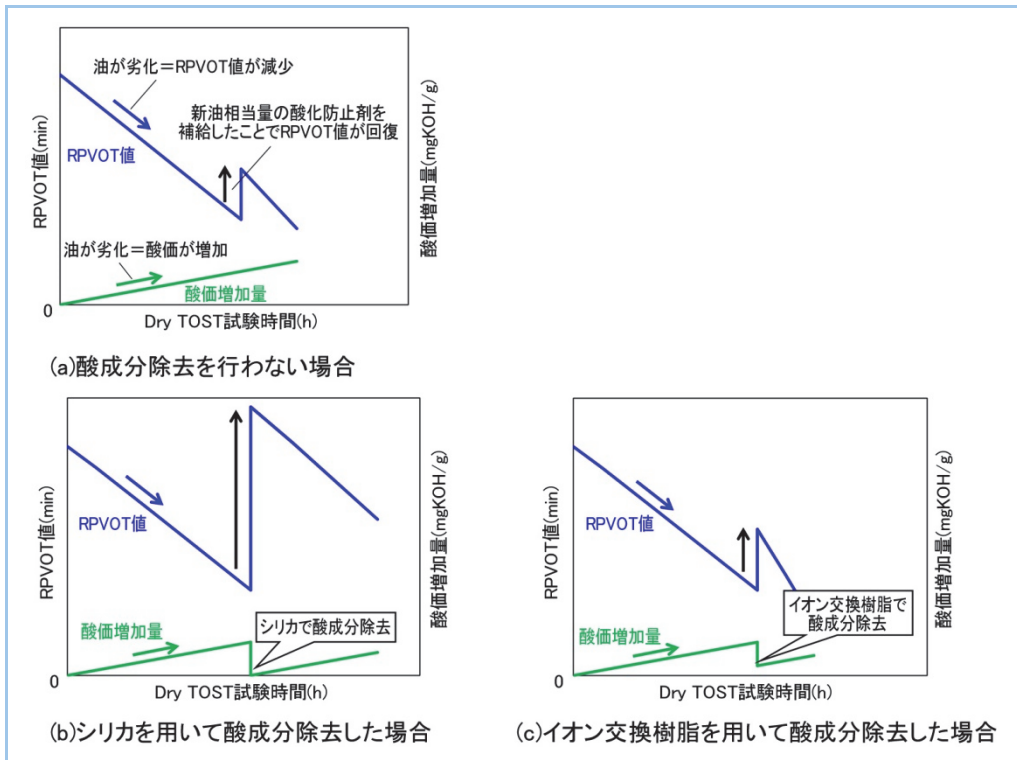






図6 劣化油に対する酸成分除去の効果

表1 各酸成分除去剤による条件と試験結果

酸成分除去剤	ろ過回数	酸成分除去効果	油の色変化
シリカ	1	○	 → 
イオン交換樹脂	5	△	 → 

ここで、本当に酸成分が除去されたか否かを確認するため、油の赤外分光分析 (FT-IR 分析) を行い、酸成分に紐づくカルボニル基 (1700cm^{-1} 前後の2本)の吸収ピークを調べた。その結果を

図7に示す。シリカで処理した油ではカルボニル基の吸収ピークが消失しているのに対し、イオン交換樹脂で処理した油ではカルボニル基の吸収ピークが残存していた。従って、シリカで処理した場合は酸成分が完全に除去される一方、イオン交換樹脂で処理した場合は酸価が低下するものの、酸価に現れない劣化物質が残存している可能性が考えられる。ただし、イオン交換樹脂については、温度や接触時間の処理条件を見直すことにより、酸成分の除去効率向上の可能性は残っている。

潤滑油中の酸成分を除去し、酸価を新油値まで低下させるために必要な酸成分除去剤の量と材料コストを試算した結果を表2に示す。シリカは、イオン交換樹脂と比べて3倍の量が必要であるが、重量単位あたりの費用が 30 分の1であるため、必要量に対するコストは 10 分の1になる。試験及びコスト試算の結果から、潤滑油の酸成分除去を行う際は、シリカを用いることとした。

潤滑油の劣化とシリカを用いた酸成分除去による再生を繰り返し実施した結果を図8に示す。再生処理の判断指標は、色相が透明になること、酸価が0.1mgKOH/g未満になることとした。3回の再生において、色相を透明にすると酸価が 0.1mgKOH/g 未満になり、酸化防止剤の補給でRPVOT 値が回復した。従って、潤滑油の繰り返し再生は可能であり、従来と比べて約4倍寿命が延びる見込みを得た。

シリカにより劣化油中の酸成分及び着色成分が取り除かれる理由は、分子間に働く微弱な引力(ファンデルワールス力)による物理的な吸着と、酸成分・着色成分とシリカの親和性による化学的な吸着と考えられる。将来的には、シリカの比表面積を広げて物理的な吸着能力を、シリカ表面の官能基を最適化して化学的な吸着能力を各々向上することで、潤滑油中の酸成分が除去されるために必要なシリカ量を減少できる可能性がある。なお、シリカは防錆剤等の必要な添加剤も取り除いてしまうため、これらの添加剤も補給する必要がある。

4.2 及び 4.3 の結果に基づいて、当社は、添加剤補給で油の寿命を延命し、油中に老廃物が蓄積してきた段階で酸成分を除去し添加剤を補給して再生する、新しい方法を見出した。潤滑油の延命/再生プロセス(図2)によるコスト試算結果を図9に示す。従来の新油購入及び全交換するプロセス3回分と比較して、約 40%のコスト低減を予想している。

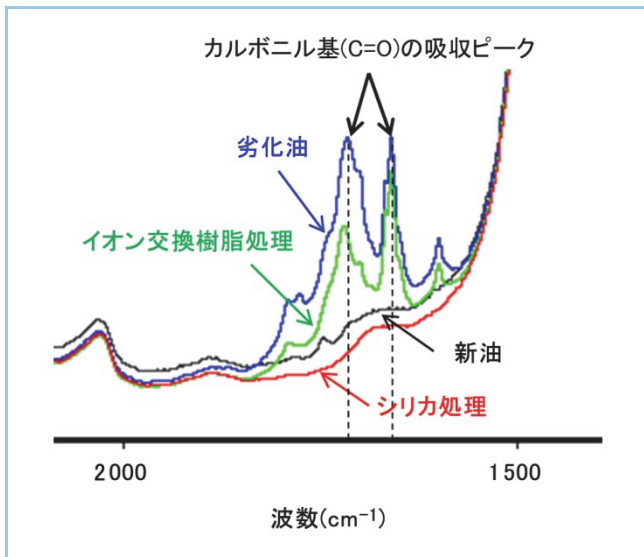


図7 酸成分除去前後の潤滑油の赤外分光分析結果

表2 潤滑油中の酸成分を除去するために必要なコスト比率

酸成分除去剤	重量単位あたりのコスト	酸成分除去に必要な量	必要量のコスト
シリカ	1	3	1
イオン交換樹脂	30	1	10

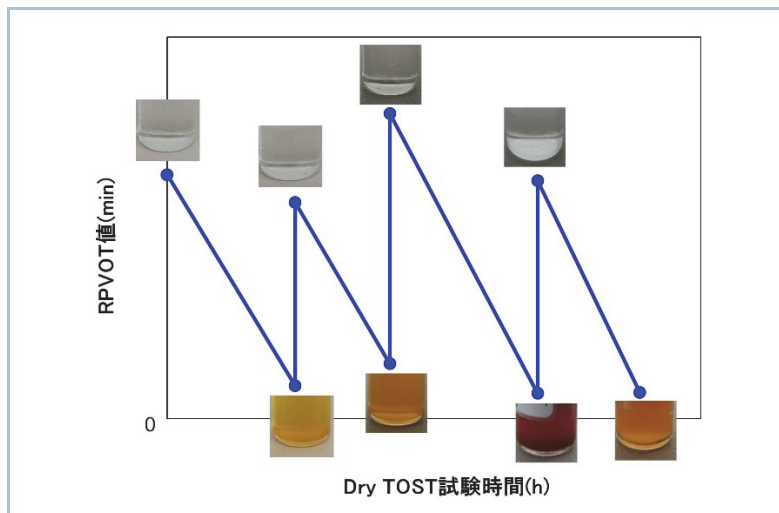


図8 潤滑油の劣化とシリカを用いた酸成分除去による繰り返し再生

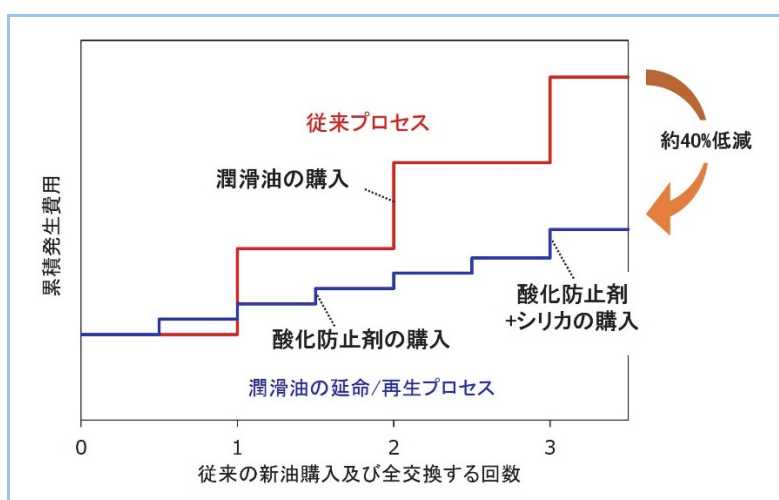


図9 潤滑油の延命/再生プロセスによるコスト低減効果

5. まとめ

本報では、当社が提案するオンサイトでの潤滑油の延命/再生について、添加剤補給と酸成分除去を組み合わせる方法を紹介した。

要素試験の結果から、潤滑油の RPVOT 残存率が低くならないように、定期的に、添加剤補給を実施することで RPVOT 残存率を高め維持すること、及び添加剤補給の何回かに一度、老廃物が蓄積した段階でシリカを用いて酸成分を除去することで酸価を新油相当に戻し、添加剤補給による効果を高めるというプロセス案を策定した。

今後、小型試験装置を用いて、添加剤補給と酸成分除去の繰り返しによる効果の確認、及び油循環システムの運用方法の検討を行う。また、補給する添加剤が満足すべき特性について、MHI 規格の策定を検討中である。

参考文献

- (1) 潤滑油協会, 令和4年度燃料安定供給対策に関する調査等事業調査報告書, (2023)
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2022FY/000455.pdf
- (2) ASTM D2272, Standard Test Method for Oxidation Stability of Steam Turbine Oils by Rotating Pressure Vessel.
- (3) A.Yano, et al., “Study on Sludge Formation during the Oxidation Process of Turbine Oils”, STLE Tribology Transaction, 47, 1(2004)111.
- (4) ASTM D943, Standard Test Method for Oxidation Characteristics of Inhibited Mineral Oils.
- (5) ASTM D7873, Standard Test Method for Determination of Oxidation Stability and Insolubles Formation of Inhibited Turbine Oils at 120 °C Without the Inclusion of Water (Dry TOST Method).