

電動機補修部門におけるサステナブルの現状と期待 Current Status and Expectations of Sustainability in the Electric Motor Repair Sector



相馬 祐介
Yusuke Soma
整備事業部
名古屋電計整備部
電動機整備グループ



松坂 一志
Kazushi Matsuzaka
整備事業部
札幌北都電計整備部



能登 宏
Hiroshi Noto
整備事業部
札幌北都電計整備部



渡邊 雄二
Yuji Watanabe
整備事業部
札幌北都電計整備部
電動機整備グループ



岡林 清志
Kiyoshi Okabayashi
整備事業部
札幌北都電計整備部
電動機整備グループ



工藤 也寸志
Yasushi Kudo
整備事業部
電動機企画グループ



増田 匡一
Masakazu Masuda
整備事業部
電動機企画グループ

回転機は時々のニーズで更新するものもあれば、寿命目途 30 年を越えて巻替や絶縁対策で延命を図りながら稼働し続けているものも数多くある。

我々補修メーカは現場技術力に留まらず、操業影響まで配慮した保全技術的視野での改良改善や技術担保が望まれている。

本稿では診断技術から真空加圧含浸を適用したりリニューアルへの展開を主眼として、回転機の延命に関する理論と現場経験から判断・実践した補修技術を紹介する。

Some rotating machines are renewed according to the needs of the customers, while many others continue to operate in spite of a life expectancy of about 30 years while being rewound or insulated to extend the life.

We, repairers, are expected to make improvements and ensure technology from the perspective of maintenance technology, taking into account the effects of post-operation, as well as on-site technology.

In this paper, we will introduce the theory of life extension of rotating machines and the repair technology that we judged based on our field experience and put into practice, mainly focusing on the development from diagnosis technology to renewal applying vacuum pressure impregnation.

1. はじめに

製造業の駆動源である回転機は重要な役割を担い機種、電圧、容量に係わらず膨大な数が稼働し続けている。保全形態は様々で、時々のニーズで更新するのあれば、寿命目途30年を巻替や絶縁対策で延命を図りながら稼働しているのも数多くある。その背景として高度成長期頃の回転機は極限を目指した限界設計機に比べて構造面で強固かつ頑丈なため、絶縁面で適切な処置を講じることにより高い機能と品質とともに裕度を維持できる事がある。一方、限界設計では回転機の劣化メカニズムを解析し、系全体を真空加圧含浸（以降 含浸）にて一体化する絶縁技術の適用が小型化と劣化防止を実現するに不可欠な技術である事も判っている。

本稿では「含浸技術を始めとした技術変遷」の效果に着目し、現場と操業の事象解析まで踏み込んだ保全技術から、改良や延命化の提案を具現化する技術&技能までを紹介する。

2. 真空加圧含浸技術の補修への展開

含浸は絶縁材料の変遷と同じく電動機の信頼性向上や限界設計からの小型化に欠かせない技術で、劣化要因である熱、電氣的、機械的、環境、等の特性を飛躍的に改善して来たと言われている。本章では実践に近い環境で樹脂含浸とワニスディップ処理の2パターンで比較し、技術的裏付けした検証内容を記す。

▶2.1 真空加圧含浸の概要

真空加圧含浸は1970年代頃から主流となり、導体、絶縁物それと樹脂中にある空気を除去しながら樹脂浸透させる技術である。浸透度の検証は含浸作業の各工程で減少するボイド（空隙）部に浸透していく樹脂の量で変化する静電容量で行っている。

図1に横軸が作業工程で縦軸を静電容量にした樹脂浸透度管理曲線を示す。真空引きで供試物に含まれる空気を抜き、加圧で残っているボイドを押し出す、もしくは潰して樹脂浸透度を高めている。

管理は樹脂注入開始直前（図中①）、加圧終了間際（図中②）、加圧解放直後（図中③）の静電容量値から比率を求めた樹脂浸透度やボイドレスを指標とするが、基準は各施工先で異

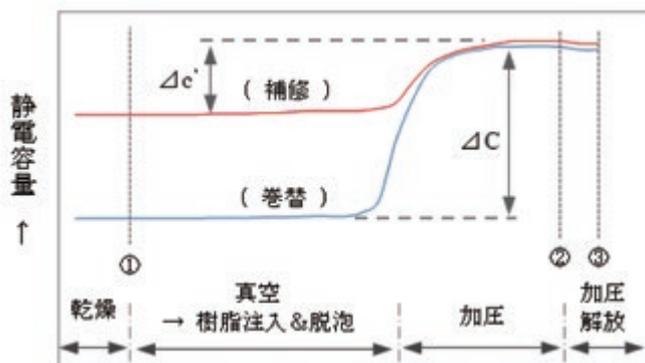


図1：樹脂浸透度管理曲線

なるので都度確認する必要がある。又、この管理曲線は図1に示している様に静電容量の変化が巻替の ΔC に比して補修では $\Delta c'$ しかなく、大きく異なる事も理解しておく必要がある。

▶2.2 熱特性の改善

検証は熱蓄積し易い界磁コイルを模試した多層巻コイルに樹脂含浸とワニスディップ（以降ワニス処理）の2処理を施し温度の分布および上昇で比較している。図2は模試コイル仕様を示している。

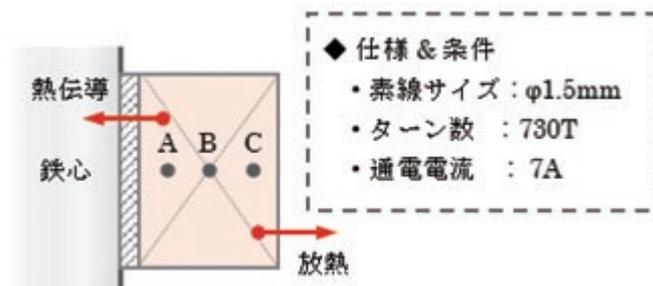


図2：模試コイル仕様

模試コイルは素線 $\Phi 1.5$ を730T巻いて厚み方向で4分割した3カ所（図中 A, B, C）に熱電対を埋め込んでいる。温度比較は冷却風なしで一定時間通電して行い、その結果の温度上昇&分布を図3に示す。3カ所とも含浸コイルの温度の方が低く、その差は40~50°Cにもなる。測定箇所Bを中心に考えると、A点が熱伝導、C点が放熱の影響で温度が降下すると考えられ、ワニス処理コイルは熱伝導と放熱で224°Cまでしか下がらなかったが、含浸コイルはB点とC点が同温度の180°Cで、A点が162°Cと著しく低い事から熱伝導の大きな作用で180°Cまで下がったと推測出来る。

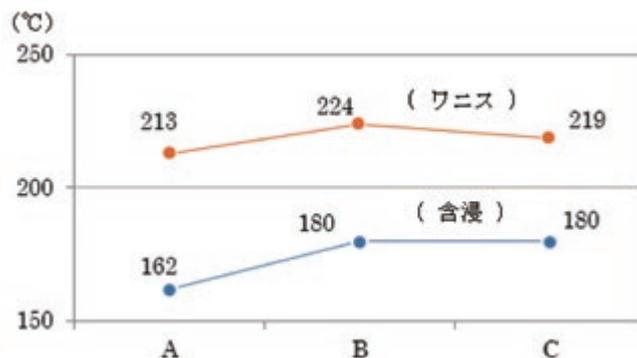


図3：温度上昇&分布

通電終了後60分経過してから風速一定で更に連続冷却した時の温度をB点で比較してみたところ、含浸は156°Cで下限飽和したがワニスは降下途中の191°Cまでしか低下しなかった。この例から、冷却の効果は一段と大きな差として現れることが判る。

これらの事象から含浸は樹脂浸透率が高く断熱効果を持つ空気層を排除する絶縁技術であり、効果は巻替に留まらず補修でも充分発揮できる事を検証しており延命化の期待度が高い技術である。

▶2.3 機械的特性の改善

電動機のコイルは稼働中常に電磁力振動による繰り返し応力を受け続けていて、従来のワニス処理は含浸に比べ溶剤浸透度、耐熱強度、結束力等が弱く、熱ストレスから電磁力振動が増す確率が非常に高い。その影響は楔やコイル間に緩みを誘発広域化させ、叩かれ現象から素線絶縁の損傷にまで至るケースがある。含浸は巻替に限らず補修でも枯れや緩みからの隙間を埋め、耐振強化策として有効な手段である事を加振テストの振動波形から確認出来た。

図4は一体含浸機でない高圧交流機を補修で含浸した時に、固定子コイル単品をハンマリングした際の振動波形である。含浸後は減衰時間が含浸前に比し1/2の0.05 secまで短くなっており、この振動を音として或いは触手により隙間への樹脂浸透が伺える結果が得られた。又、含浸前の振幅が低く現れているのは打撃力を隙間が吸収していると考えられる。

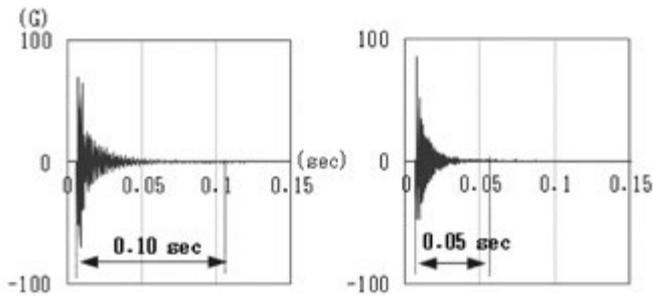


図4：コイル単体振動波形

図5に電磁力振動抑制策として交流機の固定子コイルエンドと直流機の補償巻線（コンペンバー）に緊縛を加えた補強写真を示す。何れも古い絶縁物を除去し新しく樹脂浸透し易いガラス基材で支持&緊縛の再処置しなければ含浸効果としての機械的特性の改善は望めないという知見も得た。



(a) 交流機コイルエンド (b) 直流機コンペンバー

図5：電磁力振動抑制対策

▶2.4 電気的特性の改善

含浸処理で電気的特性は大きく改善されるが、ここでは絶縁抵抗と絶縁耐力が空気やワニス処理に対してどれ程の優位性があるかを単純に比較した。検証は導体に絶縁テープを1mmと2mm巻いて含浸とワニス処理した2パターンと空気絶縁層で実施した。

表1に絶縁抵抗と充電特性を示す。含浸あるいはワニス処理の充電特性は、1mm厚の絶縁抵抗1分値が含浸590GΩ、ワニス処理 173GΩ、この1分値と10分値との比を求めたPI値で示すと含浸 1.69、ワニス 1.18と含浸の方が優れ、2mm厚でも同様

の結果が得られた。空気はギャップに関係なく7秒で1,000GΩと見掛け上高い絶縁抵抗値を示すもPI値は1.00と低い。

表1：絶縁抵抗と充電特性

	絶縁抵抗 (GΩ)	絶縁厚(1mm)			絶縁厚(2mm)		
		1分値	10分値	PI	1分値	10分値	PI
テープ	含浸	590	1,000	1.69	>1,000(40秒後)	—	—
	ワニス	173	204	1.18	386	476	1.23
空気		>1,000(7秒後)		1.00	>1,000(7秒後)		1.00

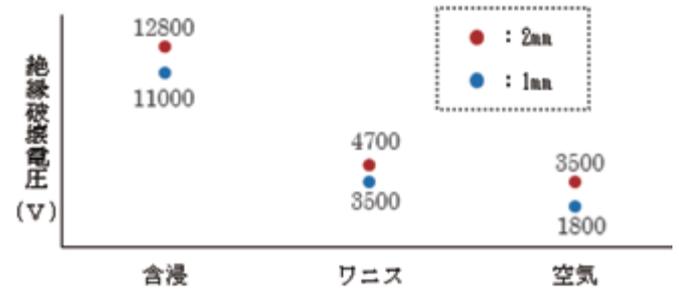


図6：絶縁破壊電圧

この充電特性の影響が汲み取れるのが図6に示す絶縁破壊電圧のグラフである。含浸は絶縁部1mm、2mm厚共に10,000V超あるがワニスと空気は2mmでも5,000V以下の耐力で、空気に至っては3,500Vで含浸の25%程しかない。

電動機の劣化は多くの要因が複合的に作用して決まるが、空気層つまりボイドを無くす真空加压含浸は、絶縁耐力改善でも高評価が得られる技術として定量化した論文¹⁾を発表しており、補修分野でも積極的提案から市場拡大が期待出来る技術である。

3. 現場力が繋ぐ検証&探求力

電動機補修は経験から学ぶ事象が多いが、疑問と探求力の意識を持ち続けなければ伸長は見込めない。3項では現場がどんな状況でも疑問を持って対自し、現状分析から処置を考察して正しい補修の出来る技術を展開することを期待して紹介する。

▶3.1 緑錆

ここでは長期間停止（設備休止含）や諸事情で被水した回転機に発生する緑錆が絶縁に与える影響について紹介する。緑錆は設置環境の影響を受けて塩素性硫黄銅（＝緑錆）が銅の表面に発生して内部への腐食を防ぐ特性を持った不動態の被膜である。

大形交流機や直流機は裸銅帯や銅を主とした部材等が数多くあり雰囲気によっては緑錆が生成し易い構造体である。今までは緑錆がある電気設備で絶縁抵抗が大きく変化しても汚損による吸湿が大きな要因であると認識していた。

しかし、劣悪な環境下に長期間放置した影響で整流子や銅帯に酷い緑錆が発生した直流機を絶縁回復した際、通常の洗浄&乾燥の後の樹脂処理前の冷却時間内に絶縁抵抗が大きく低下変動している事を確認した。洗浄（煮沸含）作業で汚れは取り除いており、変動要因は乾燥後の温度を樹脂処理の適温まで下げる過程で緑錆が吸湿した為と考えられる。

これまで緑錆が絶縁にどのような影響を与えるかの視点から言及した資料はなく、今回、緑錆と粉塵で絶縁抵抗の湿度依存性を検証した。その結果を図7に示す。

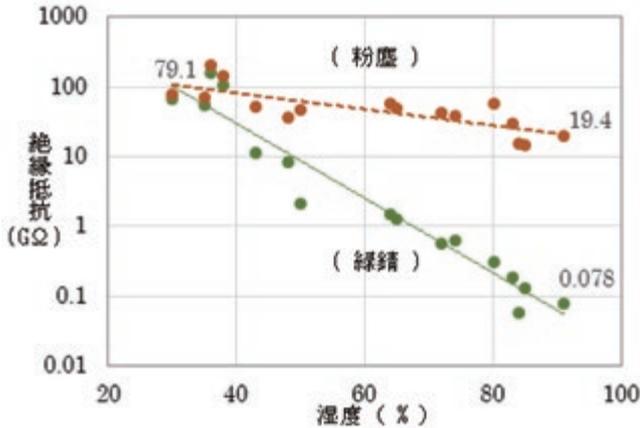


図7：緑錆と粉塵の湿度依存性

グラフから緑錆は湿度依存性が極めて高いことがわかる。湿度30%前後では互いに80GΩ近くある絶縁抵抗が、湿度90%では塵埃が20GΩ程度、緑錆に至っては0.1GΩまで吸湿低下し、湿度影響度は200倍も違う。

つまり緑錆は見掛け上の絶縁劣化だけではなく、高湿度環境下では汚損よりも接地に至りやすい性質で管理の難しい事象であることを掴んだ。

湿度影響を回避するためには緑錆を取り除くしかないが構造上完全に除去出来ない事が殆どなので、緑錆が孤立する格好に加工して沿面を遮断する。また養生してある接続部の合わせ面は一旦切り離して処置する等の簡易補修技術の確立を目指している。

▶3.2 アルコール診断

電動機のコイル素線は丸線と角線に大別されるが、大形の回転機と高圧交流機は角線、低圧機は丸線が主流である。コイルは熱の蓄積と電磁力の影響を受け劣化進行するが、丸線は角線と違い主絶縁層の固形保護がなく、しかも鉄心外のコイルエンドはフリーで素線丸出しに近いので、異物混入や補修の不具合等によるエナメル被覆の傷やクラックにも注視すべきである。

絶縁管理として角線は診断技術が定着しつつあるが、丸線は依然として絶縁抵抗の変化に頼った単発的判断しかなく、素線絶縁のエナメル被覆の劣化を早い段階で見つけてレイヤーショートや接地を未然防止するための検出技術が必要であった。

既にエナメル被覆の傷やクラックから劣化度を推定する技術として、図8 (a) に示す等価回路の様に揮発性に優れたアルコールを直接スプレーする非破壊試験がある。図8 (b) は異

常カ所を更に絞り込むピンポイント検出技術で、広範囲で異常を検出したコイルの素線表面をアルコールで浸した脱脂綿で丁寧に滑らせ、エナメル被覆の傷やクラックの部位特定だけでなく異常部位の数や距離から補修要領の判断根拠に繋がる高い精度を有している。

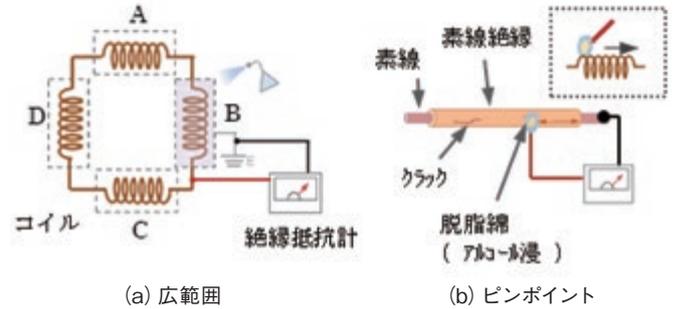


図8：アルコール診断回路

計測方法が簡便なので、先ず広範囲診断をベアリング交換等のタイミングで先ず広範囲診断をユーザ自ら実施して頂き、異常があれば我々がピンポイント診断を受け持つという2段階の対応が可能なのが本技術の魅力である。更には補修要領、巻替タイミングおよび管理を含めた意見交換からユーザーとの意思疎通を密にできるような機会創出は補修メーカーとして大切にすべきと考える。

図9にアルコール検出試験の計測イメージを示す。

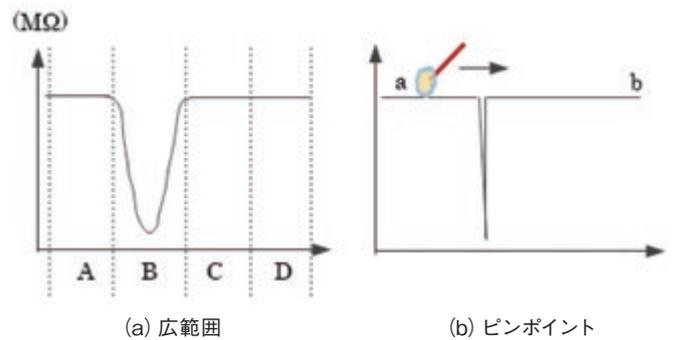


図9：計測イメージ

▶3.3 電位転換

高圧交流機の異常は固定子コイルが50~60%と非常に高く、原因の殆どは電源側コイルのレイヤーショートである。

コイル主絶縁の健全性は非破壊試験の電気性状特性でトレンド管理出来るが、素線絶縁に関しては40μs程度の電圧を印加するインパルス試験による良否判定しかなく劣化進行の判断が難しい。レイヤーショート部位が電源側に集中する要因は起動の高電圧サージや稼働中に継続して掛かる高電位が素線に与えるストレスと推測する。

実際に事故トリップした高圧機 (A号機) と同じ運転パターンの高圧機 (B号機) の電気性状と破壊電圧の結果を表2に示す。

主絶縁の劣化指標となる電気性状では2台とも異常となる数値は現れてないが、A号機は運転中にレイヤーショートした事故コイルのU相を除いた破壊試験でW相コイルが8,000V、B号機は14,000Vと両機とも電源側コイルで破壊した。

表2: 電気性状と破壊電圧

		A号機	B号機
絶縁抵抗(MΩ)		90900	6310
PI		4.50	5.32
コロナ放電(pC)		2600	640
耐圧(V)	対地	破壊せず	破壊せず
	素線	8000	14060
起動回数		Σ1700	Σ1100

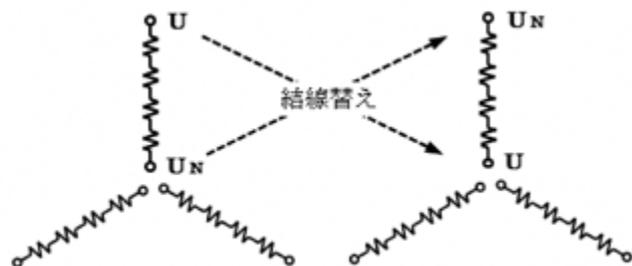


図10: 電位転換

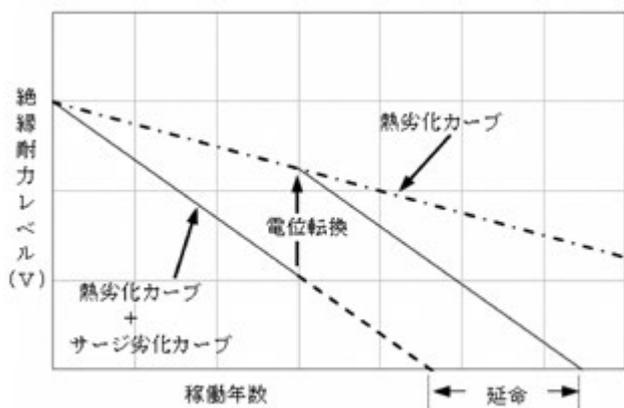


図11: 劣化パターン

電源側以外のコイルは15,000Vでも破壊しなかったのだが、このことから電源側の素線絶縁が起動頻度の影響を受けた事象と考えられる。

この電源側と中性点側で受けるストレスの大きな違いに着目した補修技術が電位転換である。

図10に示す様に電源側と中性点側を結線替えて互いのストレスの入替を狙っている。電位転換はリード線や渡り線に手を加えるケースもあり高度な補修技術&技能が求められるが通常補修に2~3日の工期延長で低コスト、高品質の延命が得られる技術である。

図11に熱とサージに限定した劣化パターンを示す。途中で電位転換すると熱劣化カーブは不変でも熱+サージによる複合劣化は大きく改善され延命が図れる。効果は延命だけでなく操業に合わせた巻替工程の調整立案が可能となり工期短縮だけでなく操業影響の最小化も期待できる。

一方、大きな特徴として補修の時期や優先順位の判断を操業熟知したお客様に委ねる場合がある。このような状況下でも某製鉄所では正確な情報整理と優先順位付けで、既に60台の対策を終え、レイヤーショート原因のトラブル皆無を継続している。

又、新たな試みとして新製時に電位転換を視野に、リード線を計6本端子箱に出す処置も講じられている。各ユーザに背景、効果含めて推奨したい事案である。

最近では非常に短い運転歴の高圧交流機の電源側コイルが異常コロナ放電の副産物(オゾン、硝酸、窒素酸化物)で侵食され絶縁耐力低下(破壊ケースもあり)する事例が頻発しており、電位転換の予防保全的位置付けは高くなると考える。

4. おわりに

電動機補修は重電メーカ主導でなく補修メーカが独自に技術者育成し、原因追求型の補修技術確立を指向する時期にある。補修技術は「単なる汚れを落としてワニス処理や部品調達しての原形復旧」ではなく、環境、条件、形態等から劣化メカニズムを追及して原因解明できる洞察&検証力、及び膨大な補修データを統計処理できる解析力を融合させて延命を図る事であり、「解は現場にある!」の意識を持ち続けてソフト・ハード両面から将来を見据えた保全技術として変換させていくべきである。

当社電計事業本部は、「更新しての使い捨て」に頼ることなく改善・改良を加えた補修での継続使用提案からSDGs (Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標) 達成へ向けた社会貢献へと努めてまいります。

参考文献

- 1) 相馬祐介、松坂一志、能登宏、渡辺雄二、岡林清志、工藤也寸志、増田匠一(日鉄テックスエンジ株):「電動機補修部門におけるサステナブルの現状と期待」;電気学会 産業応用部門 回転機研究会
- 2) 「経年使用直流機の長寿命化技術について」, 電気学会技報,第965号, (2004年)
- 3) 「直流機の整流と保守技術」, 電気学会技術報告, 第815号, (2000年)
- 4) 榎藤幹雄,「回転機の保守・点検・補修」, オーム社, (2010年)
- 5) 大場善次郎, 榎藤幹雄, 田辺信夫, 森田登,「大形直流機絶縁劣化簡易診断」, 電気学会, (1994年)

お問い合わせ先 _____
電計事業本部 営業部
TEL 03-6860-6625