

## 電動機の延命化補修技術について

### The Technology for Life Extension Repairing of Electric Motor



増田 匡一  
整備事業部  
電動機企画グループ  
Masakazu Masuda

当社は日本製鉄株式会社殿を主要顧客とし、自社開発の診断装置を用いた高圧交流電動機の絶縁診断業務を行ってきた。しかしながら業務を継続する上で、以下が課題となった。

- ①診断装置が稼働後 20 年を経過し、機能拡張や維持に影響が出る
- ②電動機に使用される絶縁物が B から F 種に変更になり、交流試験法において得られる各種診断パラメータを用いて計算結果についての検討が必要
- ③高圧交流電動機の絶縁診断装置を統一する為には、過去の診断データとの互換検証が必要  
上記課題を解決する為、新診断装置の開発と新旧絶縁診断データの移行技術を確立した。  
又、電動機の診断結果を分析することで最適な補修を実施し、延命を行うことが我々の使命であり、今回高圧交流電動機の絶縁診断装置の活用と延命補修技術確立についても紹介する。

With Nippon Steel Corporation as a main client, we've worked on insulation diagnosing of high-voltage AC motors by using diagnostic device developed by ourselves.

However, there are problems as follows now;

- ① Having run about 20 years, existing diagnostic device has problems on expanding and maintenance of function.
- ② As the insulator of high voltage AC motors has changed from type B to type F, it is necessary to review the results of diagnosis calculated with parameters gained from AC insulation test.
- ③ Since tendency management is important for insulation diagnosing of high-voltage AC motors, to unify insulation diagnostic devices, we need to test compatibility with huge amount of previous data of insulation diagnosis.

To resolve these problems, we've developed new diagnostic device and established technology for migration of previous data to new one.

Our mission is diagnosing electric motors, analyzing the results, repairing them properly and expanding their life. This time we're going to introduce the utilization of insulation diagnostic device for high-voltage AC motors and the establishment of life extension repairing technology for electric motors.

# 1. はじめに

当社は顧客（日本製鉄株式会社殿）へ高圧交流電動機の絶縁診断装置を提供して、その絶縁データの傾向管理により電動機補修の提案を行ってきた。しかし旧装置の更新を計画して、新たに絶縁破壊電圧計算（余寿命推定）の機能を付加した新絶縁診断装置の開発を行った。さらに蓄積した旧データを有効に活用するために新・旧絶縁診断データの比較を行い補正式を導き出した。これによって両データの良い連続性を確認して傾向管理の継続が可能になった。

電動機の延命化は、巻線の巻替と真空加圧含浸による補修が基本となるが、特に巻替は固定子（鉄心を形成している電磁鋼板）の蒸焼処理を伴うため、熱による絶縁性能への影響を考慮した巻替回数の限界を明らかにする必要があった。

そこで長時間の実機使用履歴のある固定子（鉄心）を使用してオフラインで評価試験を行い、鉄心の絶縁性能評価に必要な判定基準と巻替が可能な回数の限界を整理した。

## 2. 新絶縁診断装置の開発

### ▶2.1 開発概要

本装置は電動機の絶縁状態を診断するもので、供試体に高電圧を加えた時の接地電流およびコロナの発生状態を内部プロセッサのメモリに記憶し各特性演算を行い、無線又は有線経由でノートPCへデータを転送する。表1にあるように現行の自動絶縁診断装置の機能と性能についてその特色を継承し、F

種絶縁への対応と信号処理部にデジタル手法の工夫で通信回路規模の縮小、信号処理の機差低減などを実現する一方、新機能の追加、計測精度改善などを達成した。

図1にシステム構成図を示す。

また、表2に新旧診断装置の比較を示したが、F種絶縁に対応した推定破壊電圧の計算に加えて、校正監視機能及び診断データをサーバに集約して一括管理を可能とした。

表1：開発内容

旧診断装置	新診断装置
<p>&lt;B種絶縁対応（現状）&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 絶縁抵抗：100MΩレベル</li> <li>② tanδ0：2~10%</li> <li>③ Qmax測定不安定</li> <li>④ アナログ処理 (XYレコーダー使用)</li> <li>⑤ カード構成要素製造中止</li> </ul> <p>⑥ 総合評価（B種対応） 絶縁劣化Z10および 損失汚損Z20の傾向管理</p>	<p>&lt;F種絶縁対応（新装置）&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 絶縁抵抗：10000MΩレベル (1GΩ以上と表現)</li> <li>② tanδ0：0.3~3% (高精度化※今回基準化実施)</li> <li>③ Qmax対策（個数、平均値追加） ・測定周波数帯域変更 ・測定ピッチ増加による安定化</li> <li>④ デジタル処理（パソコン使用）</li> <li>⑤ カード類老朽更新</li> </ul> <p>&lt;新機能&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 診断パラメータを使った 新総合判定基準の作成 (F種対応)</li> <li>② Qmaxデータ検証 ・Qmax発生部位推定 ・コロナ測定方法決定</li> <li>③ 絶縁物の枯れ診断 推定破壊電圧式の確立</li> </ul>

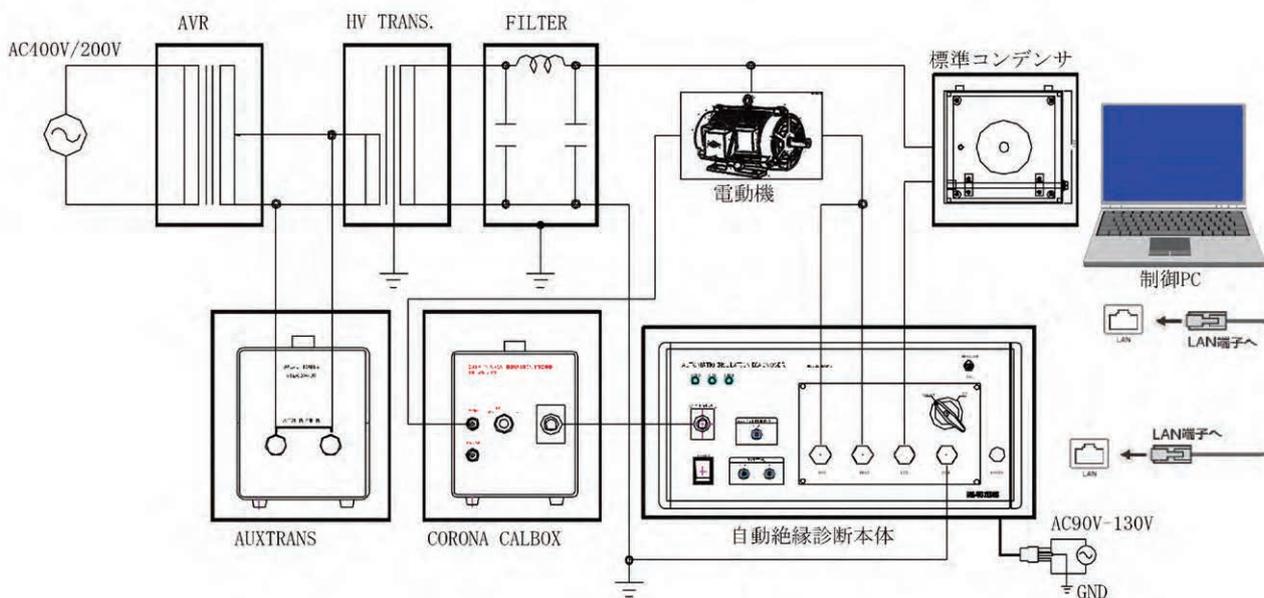


図1：システム構成図

表2：新旧絶縁診断装置について

旧診断装置 (MTEシリーズ)

	機能
診断項目	Pi1, Qmax, コロナ量, tanδ
操作機能	各装置の調整含め手動
寿命予測	B種絶縁主体 (Z関数)
データ管理	個別



新診断装置 (SID-070)

	機能
	Pi1, Qmax, コロナ量, tanδ, 正負コロナ, コロナパワー
	パソコン操作, データ自動読込&分析, 校正監視機能
	F種絶縁対応
	一括集中管理 (トレンド管理) ※サーバに集約

## ▶2.2 旧診断装置の保有状況と課題

### (1) 保有状況と移行状況

表3にあるように各エリアで様々な診断装置を使用してい

たが、今回の検証で全エリアでの新絶縁診断装置の使用を可能にした。

以降に今回の検証での課題と結果について記す。

表3：旧診断装置保有状況と移行状況

箇所	旧診断装置(メーカー, 型式, 製造年)		新診断装置 (SID-070) 配布状況		対応顧客	
					構外	構内
a	NS-TEXE (MTE-060)	2007年製造	○	移行完了	○	○
	//	2009年製造				
b	NS-TEXE (MTE-033)	1998年製造	○	移行完了	○	○
c	総研電気 (DAC-6017)	2005年製造	○	移行完了	○	○
d	NS-TEXE (MTE-060)	2007年製造	○	移行完了	○	○
e	NS-TEXE (MTE-033)	1994年製造	○	移行完了	○	○
f	NS-TEXE (MTE-060)	2012年製造	○	移行完了	○	○
g	NS-TEXE (MTE-033)	1991年製造	○	移行完了	○	○

注1) 日鉄テクノス、日鉄エレックス時代に製造された診断装置は全てNS-TEXEで表記

### (2) 課題

新診断装置を導入する上で下記課題が発生した。

- ①各所で保有している診断装置がバラバラでデータの互換検証が必要
- ②校正の頻度が不定期で、データの信頼性が無い。
- ③診断で使用する診断ケーブルの使用 방법에ばらつき  
(ドラムに巻いたままorドラムからほどいて)  
→ドラムに巻いたままだと、データが異常になる事が判明

※新機能で簡易校正機能も追加

- ③診断方法の統一化を実施(〈診断ケーブルは必ずほどいて使用〉も統一化)

### (3) 対策

今回のデータ互換検証に合わせて、校正の徹底と診断方法の統一化も実施した。

- ①今回、各所で新・旧データの比較検証→全箇所新診断装置に移行完了
- ②全社診断装置の統一と定期的な校正の実施→2年/回以内で校正

## ▶2.3 新・旧絶縁診断データの移行に必要な補正式の提供

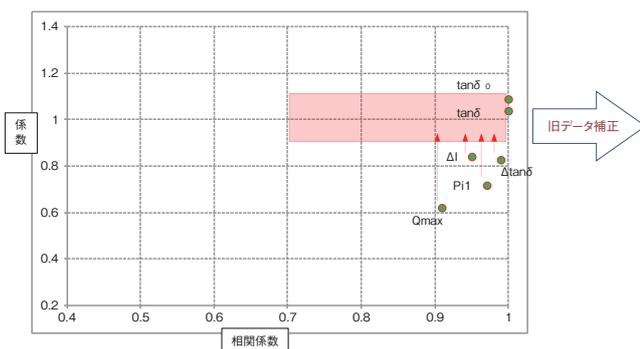
新旧絶縁診断データの乖離は顧客毎に異なる。顧客から供給された電動機(7台)を使用し、新診断装置にて診断をしたデータと、過去の膨大な顧客データの比較、解析を行って、顧客毎に補正式を提供する事で診断の継続を可能とした。

表4の交流電流( $Pi1, \Delta I$ )、誘電正接( $\tan \delta, \tan \delta 0, \Delta \tan \delta$ )、コロナ放電( $Qmax$ )について検証した。a.b.c.d.e.f.g.の7箇所について、新旧データ比較と補正式を導きだした。

表4：絶縁診断項目と評価

		診断内容	評価	
			枯れ	汚損
直流吸収		絶縁物に直流電圧を印加し、PI値(絶縁抵抗の10分値/1分値)からコイル絶縁の健全性を診断	○	△
電気性状	交流電流	対地間に交流電圧を印加し、洩れ電流が急増し始めた電圧から主絶縁のボイド状態を推定( $Pi1, \Delta I$ )	△	×
	誘電正接	絶縁物に流れる全電流と充電電流の位相差から吸湿・汚損・ボイド状態を推定( $\tan \delta, \tan \delta 0, \Delta \tan \delta$ )	○	○
	コロナ放電	対地間に交流電圧を印加し、そのとき発生するコロナ量と大きさから絶縁層の枯れを推定( $Qmax$ )	○	△
レイヤー試験		コイルにインパルス電圧を印加して、その $L \cdot di/dt$ から素線絶縁の状態を確認	△	×

[データの互換性と傾き (横軸：相関係数 縦軸：傾き)]



[新旧の補正式]

	新データ	旧データ	補正式	相関係数
Qmax	13,200	9,500	$y' = 1.60x - 2,000$	0.91
Pi1	3.52	3.35	$y' = 1.38x - 1.10$	0.97
ΔI	2.18	2.25	$y' = 1.19x - 0.50$	0.95
$\tan \delta$	7	7.63	$y' = 0.96x - 0.30$	1.00
$\tan \delta 0$	5.41	6.11	$y' = 0.92x - 0.20$	1.00
Δtanδ	1.58	1.52	$y' = 1.21x - 0.25$	0.99

※  $y'$  : 旧装置で測定したデータの補正值  
 $x$  : 旧装置での測定データ (過去データ)

図2：a 検証結果 (相関係数と補正式)

aの新旧データの相関係数も0.9以上と非常に高い。補正式の傾きも1に近く、旧データを引き続き傾向管理に使用可能となった。

aの相関係数が高いのは校正試験を定期的実施してきたこと、今回開発の際に前号機との相関性を重視した開発に起因する。

他の6箇所についても0.7以上の相関があり、補正式も導き出したので、旧データの継続使用が可能となった。

### ▶2.4 絶縁破壊電圧推定式(絶縁物の枯れ診断)

過去の膨大な絶縁診断データの検証と絶縁層の劣化形態から推定破壊電圧式を決定した。破壊電圧を以下で表す。

$$\begin{aligned} \text{破壊電圧} &= 100 - F1(x) - F2(Y) - F3(Y) \Rightarrow 100 - F2(Y) - F3(Y) \\ &= 100 - k2(\Delta \tan \delta + \Delta I - \Delta \text{ini}) - k3 \text{Log}(Q_{\text{max}}/Q_{\text{ini}}) \end{aligned}$$

(F1:吸湿、炭化、変質 F2:はぐり、ボイド F3:局所劣化  
F1=0 Δini、Qiniは初期値)

今後も精度検証が必要な事から巻替機について破壊試験を実施して、推定破壊電圧値との相関を確認し、更なる精度UPを目指す。

## 3. 電動機の巻替補修による延命化提案

### ▶3.1 概要

電動機の延命化策は、真空加圧含浸を基軸にした補修と巻替の技術有無が差別化のポイントとなる。特に巻替はコイル抜き取り時に構造体本体である鉄心を数百度前後で蒸焼き炉(図3)で蒸焼きして、絶縁物を灰化(図4)させる。鉄心形成している電磁鋼板一枚一枚に施されている絶縁物への熱影響を見極めた対応が求められる。

巻替はコストや品質だけでなく構造面のメリットもあり、何回まで巻替が可能かの検証について強制的に鉄心を蒸焼きし、複数回の蒸焼きは鉄心の健全性について問題ないことの結果を得た。

表5:巻替作業の流れ

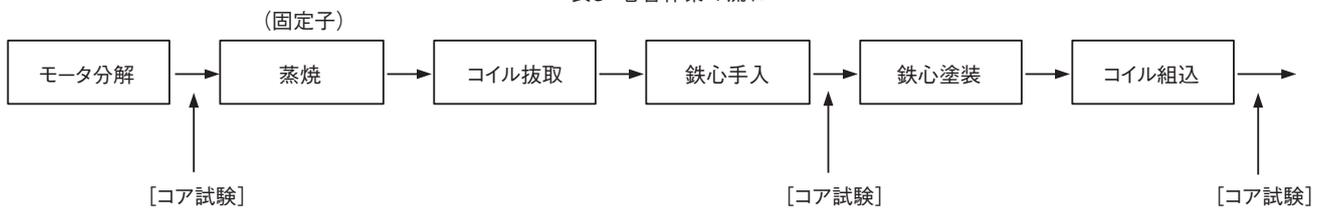


図3:蒸焼炉



図4:蒸焼後固定子(灰化)

### ▶3.2 鉄心評価試験

#### (1) 電動機における鉄心の役割

電動機の鉄心はケイ素鋼板を積層してプレスしたもので、1枚1枚が絶縁処理されている。図からわかるように回転子と固定子の隙間は狭く、ベアリング損傷や異物噛込みによる鉄心損傷、拘束や巻替え時の異常過熱によるケイ素鋼板の絶縁損傷等のために重要な特性を失う場合もある。

鉄心は再利用に限らず損傷させないことが原則であるが、万が一損傷があっても損傷度合を掌握できる技術を持つことが効果的延命の鍵を握ることに繋がってくる。

鉄心は納められたコイルからの磁力により磁化される。鉄心に使用されるケイ素鋼板(電磁鋼板)は磁性材料で大きな磁力を発生して、図5のような磁気回路を形成して回転子を回転させる。図6は鉄心によるトルク発生とトルク伝達である。

#### (2) 試験回路

固定子鉄心の診断は図7のように積層鉄心に対して直角にコイルを巻付け、発生した交番磁界によって鉄心の積層間に流れる磁束が作る渦電流に損傷部があると、図8の様に渦電流が発生して加熱する。損傷のあった判定基準は温度差と温度上昇の大きさである。

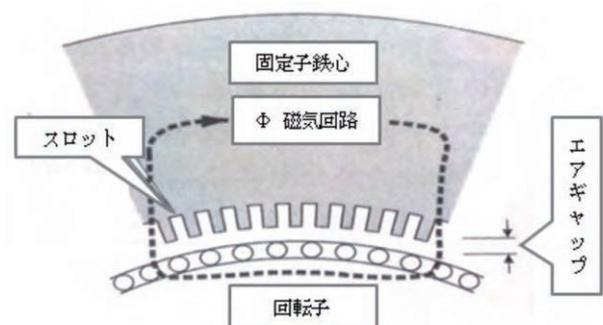


図5:交流機の磁気回路

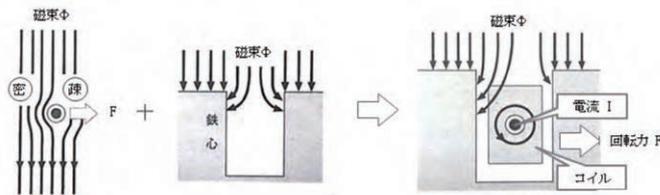


図6：トルク発生と伝達

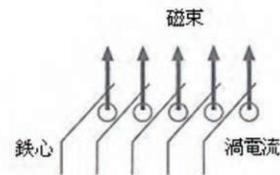


図8：渦電流発生メカニズム

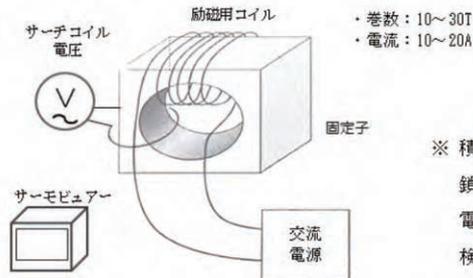


図7：固定子鉄心の診断

※ 積層鉄心に交番磁界を鎖交させ、発生する渦電流による局部加熱を検出。

### (3) 試験結果

表6：試験機と検証データ

	鉄心長	鉄心径		厚	検証データ(上昇温度値:単位°C)				
		内径	外径		状態	蒸焼き前	1回目	2回目	3回目
A号機 2,000kW	715	Φ447	Φ950	251.5	正常部	14.2	-	13	14
					異常部	15.4	-	22.5	24.7
B号機 220kW	405	Φ400	Φ620	110	正常	7.4	13.4	14.9	12.4
C号機 45kW	185	Φ265	Φ375	55	正常	6.7	10.9	7.6	9.8
D号機 45kW	185	Φ265	Φ375	55	正常	7.1	8.9	12.3	10.8

A号機は異常機であり、疵がある異常部は蒸焼の回数が増える毎に温度上昇が高くなる傾向を確認できた。またA号機を含め残り3台も正常状態であれば、1回以上蒸焼を実施しても問題ない事が確認できた。(表6)

#### (4) 電磁鋼板について

電動機の電磁鋼板は主に無方向性電磁鋼板が使用される。電磁鋼板の絶縁被膜は主に無機質組成で高温度域の耐熱を有し、数百度での蒸焼に充分耐えられる事が今回検証できた。

絶縁被膜が破壊されると渦電流増加で温度上昇するが、今回の検証で蒸焼後も正常部は温度上昇せず問題なし。

#### (5) まとめ

1回以上の巻替が問題無い事を提案し、1回巻替機が焼損等のトラブルで巻替となっても鉄心製作無しで最短工期での複数回目巻替補修に繋げる。

(鉄心製作となると納期3カ月&多大な費用がかかる)

## 4. おわりに

日本全国あらゆる場所で使用されている回転機は、多くの場合悪環境の下、熱・機械的ストレスを受けながら稼働し続けています。更には設備能力のフル発揮や高稼働率の要求で、恒常的な高負荷運転により劣化速度が加速度的に早まる傾向にあります。

まずは日々の点検・診断が重要であり、劣化状況をより正確に把握して設備管理を行い、最適な補修方法を提案してライフサイクルコストミニマムを提供いたします。

お問い合わせ先

電計事業本部 営業部

TEL 03-6860-6625