

報 文 2

受配電盤絶縁物の余寿命診断技術開発

— 製油所等の安全・安定操業の基盤 —

製造本部 工務部 設備管理グループ おかもと さとる
岡本 悟



1. はじめに

製油所等の安全・安定操業の基盤は電力の安定供給であり、電気設備の信頼性確保が必須条件である。また、製油所等には受電、発電、配電、負荷設備など非常に数多く、かつ多種多様の電気設備が設置されており24時間常に稼動している。電力の安定供給を行うためには、これら設備の適切なメンテナンス、診断、更新等の設備維持管理が必要である。

一方、電気設備は高度成長時代から製油所等の稼動と共に設置され一部重要設備の更新は実施しているものの、多くの老朽化設備が存在している。これら老朽化設備を経過年数で更新を行うことは非効率であり、補修原資の効率的運用の観点から、設備の状態把握と影響度評価が肝要であり「トラブル発生確率が高いもの」、「トラブル影響が多大なもの」に的を絞った、効率的かつ効果的な維持管理と共に、老朽化が進行しつつある設備に対して適切な状態診断が重要となる。

この背景から、受配電盤の余寿命診断技術は必要不可欠なものとなっているが、これまで精度高く余寿命を診断できる手法はなかった。特に絶縁物は受配電盤の構成部品中、電力の安定供給面で最重要部品であり、その余寿命診断技術の精度向上が急務とされていた。

今回、三菱電機殿が2000年頃から展開していた絶縁物の余寿命を化学分析と品質工学を組合せた手法(MT法: Mahalanobis-Taguchi)で推定する技術に着目し、その診断精度向上に係る共同開発を三菱電機殿と実施したので報告する。

2. 受配電盤の重要性

受配電盤は、受電・発電した電力を所内全域に供給するとともに、電力系統(個別機器およびケーブル等)に地絡・短絡・過負荷などの事故が発生した場合、事故点を瞬時に判別遮断し、健全系統への波及防止を図り停電範囲を最小限に食い止める重要な役割を担っている。よって、多くの電気設備の中で電力系統信頼性確保の観点から受配電盤は最重要設備となる。

3. 絶縁物の余寿命診断技術の重要性

受配電盤は数多くの部品の集合体であり、全ての部品が健全に機能しなければその役割を果たすことはできない。

また、受配電盤は代表的な静止機器であり、多くの部品は万一の事故に備え監視待機している状態であるが、絶縁物は荷電された高電圧/大電力を常に大地から遮断する役割を担っている。

従って、絶縁物以外の部品はその機能を失っていてもその影響が即時に顕在化することは少ないが、絶縁物は多数で構成している中の一つでも機能を失うと、即時にその影響が顕在化し、地絡、短絡の重大事故に直結する。また、電源構成上その影響が広範囲に及ぶとともに、長期の補修期間を要する事となり、操業損失影響が甚大なものとなる。よって、電力の安定供給のためには、絶縁物の適正な保守と精度の高い余寿命診断技術が必要となる。

4. MT法による余寿命診断技術の有効性

従来、絶縁状態の把握は、絶縁抵抗測定、部分放電測定などの電気的手法により実施していた。また、余寿命診断の見地からは、測定値のトレンド管理を行っていた。しかし、絶縁抵抗測定では湿湿度の影響を、部分放電測定では周辺機器からの外来ノイズの影響を受けることから、余寿命評価の観点からは信頼性が十分とは言えない状況であった。特に湿度の影響は大きく、日本の気象を考慮した場合、最大5桁の測定誤差があること、絶縁劣化が進行した場合、湿度変化により抵抗値が大きく変化することが判明している。(5.4節)

MT法は、パターン認識として多次元量を扱う分野で主に用いられている手法であり、絶縁状態を判定する場合、化学的手法により絶縁材料を直接的に分析するもので、絶縁性能評価に有効な成分をイオンクロマトグラフにより化学分析して余寿命を推定するものである。

このため電気的手法に比較し、湿度の影響を受け難く、余寿命診断を行う上では精度が高い手法と言える。

5. MT法（従来法）による余寿命診断概論

5.1 絶縁劣化に有効な要素

絶縁物の劣化状態を化学分析により、新品との相違度をマハラノビスの距離（MD：Maharanobis-Distance）で評価する。

図1に判定概念を示すが、正常品の母集団の重心と、判定要素A,Bを比較した場合、重心との距離はA,B共に同じであるが、正常度を判定する場合、Aは有効要素であり、Bは無効要素であることが分かる。

例として人間の健康度を評価した場合、Aは体温差、Bは身長差として評価できる。

絶縁物の劣化度を評価する場合の有効な要素を直交表とSN比により選定した結果、硝酸イオン（NO₃⁻）、硫酸イオン（SO₄²⁻）、色差b（黄ばみ）となる。

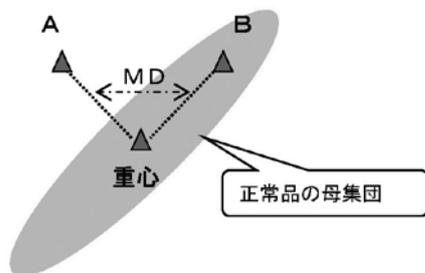


図1 MT法による判定概念

5.2 絶縁物の劣化メカニズム

1990年台まで主流として用いられたBMC（ポリエステル絶縁）の劣化メカニズムは次の通りと考えられる。大気中に含まれるNOx（窒素酸化物）、SOx（硫黄酸化物）が大気中の水分と反応して硝酸（HNO₃）を生成し、この硝酸が絶縁物の充填剤である炭酸カルシウム（CaCO₃）と反応し、潮解性を持つ硝酸カルシウム（Ca（NO₃）₂）となり、表面抵抗を低下させるとともに、充填剤を侵食しポーラス化する。表面抵抗が低下した事に伴い漏れ電流が増加し、ジュール熱によるドライバンド（電位集中部位）が形成され部分放電が発生する。

図2にBMC絶縁物の劣化形態を、図3に劣化プロセスを示す。

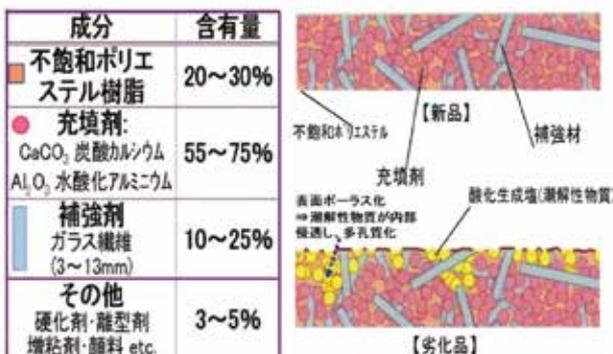


図2 BMC絶縁物劣化形態

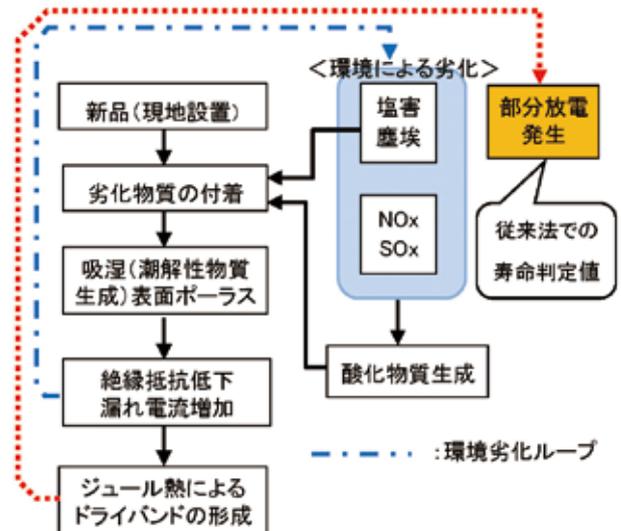


図3 絶縁物劣化プロセス

5.3 MDと絶縁抵抗との相関

温度20℃、湿度50%での硝酸イオン（NO₃⁻）、硫酸イオン（SO₄²⁻）、色差b（黄ばみ）から求めたMDと、新品および実機使用劣化品の絶縁抵抗の相関グラフを図4に示すが、相関係数-0.96と良好な相関がある。

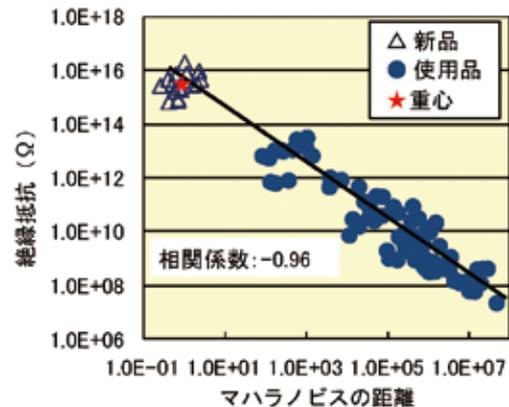


図4 MDと絶縁抵抗相関

5.4 絶縁抵抗の湿度変化との相関

絶縁物の湿度変化による抵抗変化は、新品では湿度依存性は少ないが、劣化の進行に伴い湿度依存性が急激に高くなること、その変化率はガウス分布関数に近似していることが判明している。図5にガウス分布関数による表面抵抗の湿度特性を示す。

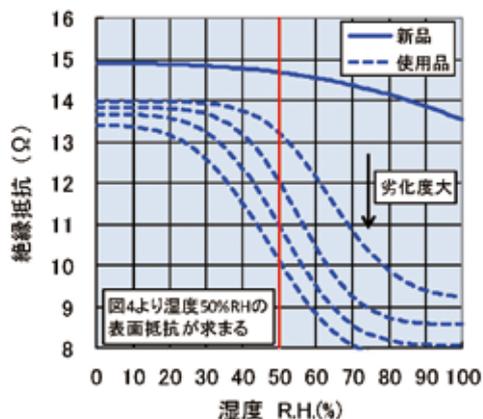


図5 絶縁抵抗の湿度特性

5.5 判定閾値

絶縁物の材質、形状、荷電電圧から計算により図3に示す部分放電が発生する絶縁抵抗を寿命判定基準値としていた。(従来法)

5.6 余寿命診断手順

余寿命診断手順を纏めると次の通りとなる。

- ① MT法により、絶縁物表面の硝酸イオン、硫酸イオン、色差bからMDを求める。
- ② MDと絶縁抵抗相関グラフ(図4)より、湿度50%時の絶縁抵抗を求める。
- ③ 前項で求めた絶縁抵抗(湿度50%)と、ガウスの分布関数(図5)から湿度100%時の絶縁抵抗を算出。
- ④ 新品時の絶縁抵抗初期値を調査すると共に、絶縁物の材質・形状から、部分放電が発生する絶縁抵抗を計算により算出。
- ⑤ 上記より直線回帰にて絶縁物の余寿命を推定する。(図6参照)

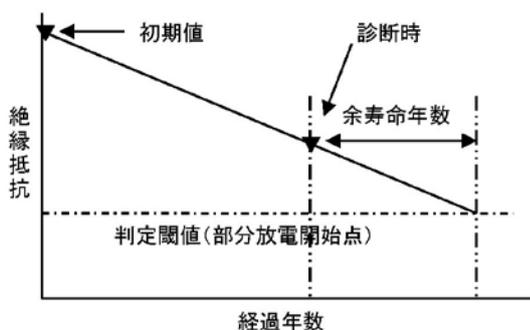


図6 直線回帰による余寿命推定

6. 診断結果

三菱電機のMT法(従来法)を、当社水島製油所受配電盤に導入して余寿命診断を実施した結果を次に紹介する。

6.1 診断対象設備

水島製油所 No.203 電気室(RDS Complex) 高圧始動器盤、1973年三菱電機製FV盤1面3ユニット(30年使用品)、診断時期:2003年3月

6.2 余寿命診断結果

当該診断に際しては、絶縁抵抗を算出する際、ガウス分布関数により湿度補正を行った。

- ① 岡山県(製油所所在地)での年間湿度調査(2002年1月~2003年3月)
 - ・年間平均湿度:73%
 - ・月間平均湿度 最高:80%、最低:65%
- ② この結果、ガウス分布関数による湿度特性式に採用する湿度は、65%、75%、100%(参考値)として余寿命を推定した結果を表1に示す。

表1 余寿命推定結果一覧

湿度	データ	母線支持板	ブッシング	絶縁ロッド
		余寿命(年)	余寿命(年)	余寿命(年)
65%	最大	100.0	96.0	49.3
	中央	51.0	12.1	11.3
	最少	14.6	5.5	7.1
75%	最大	53.8	63.2	25.2
	中央	26.2	7.2	6.5
	最少	8.4	3.2	3.8
100% (参考)	最大	19.4	25.0	12.1
	中央	12.6	5.7	4.9
	最少	6.4	2.3	2.6

余寿命診断結果、次の事項が判明した。

- ③ 実使用環境に近い湿度条件(75%)では余寿命3.2年(推定余寿命到達年数:設置後33年)
- ④ 湿度条件により、余寿命推定年数に大きな相違がある。
- ⑤ 絶縁物全体の劣化傾向を把握するため、部位別に3分類(母線支持板、ブッシング、絶縁ロッド)し、余寿命年数をデータとしてヒストグラムで解析した結果、ユニット側に設置しているブッシング、絶縁ロッドの劣化が相対的に早く、母線支持板の劣化がやや遅い傾向であった。

7. MT法(従来法)による余寿命診断評価

4章で述べた通り、湿度変化の影響を受け難いため余寿命診断には有効と判断し、当社の他製油所においてもMT法を採用し余寿命診断を実施した。その結果、正常に稼動しているものでも余寿命が0年またはマイナス年との診断結果が出た。

その原因を究明すべく、MT法(従来法)の診断内容を調査した結果、次の問題点があることが判明した。

- ① 絶縁抵抗算出時の湿度の問題
 - ガウス分布関数を用いて絶縁抵抗算出時の湿度条件を

100%としていた。診断精度を向上するためには実使用環境での湿度調査が必要。

②寿命判定閾値の問題

余寿命判定基準値を、部分放電が発生し始める時点としていた。

実用上問題となるのは部分放電発生点ではなく、地絡・短絡(架橋短絡)点である。図7に実使用盤での部分放電痕跡写真を示すが、部分放電が発生しても実用上の支障が無いことを確認している。また、放電発生開始から架橋短絡に至る間には時間的余裕があると思われる。

これら状況を踏まえ、三菱電機殿と診断精度向上に関する共同開発に取り組んだ。



図7 実使用盤の部分放電痕跡

8. 共同開発方針

従来のMT法における寿命判定基準値である部分放電発生以降、実用上支障となる架橋短絡点に至るまでの劣化予測方法の確立を主眼とした。デシケータとして恒温槽を使用した加速劣化試験を行い、部分放電開始点および架橋短絡時点の硝酸イオン付着量と絶縁抵抗値を実測し、劣化予測方法を確立するための一般式化を行う方針とした。

その概念を図8および図9に示す。今回の開発部分は黄色の点線で囲った部分が該当する。

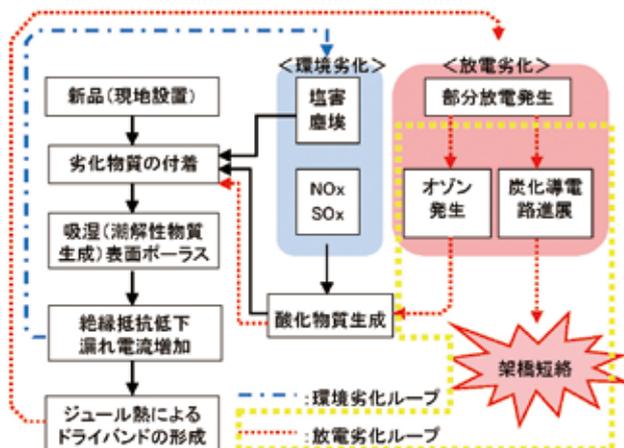


図8 絶縁劣化プロセス

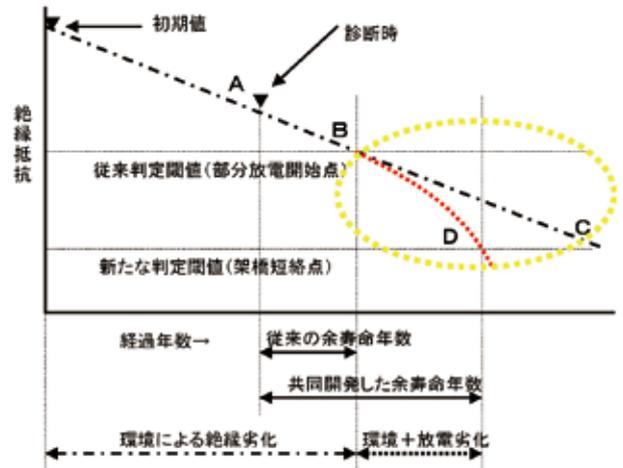


図9 短絡余寿命推定概念

9. 開発内容と結果

9.1 環境による加速劣化試験

環境劣化による絶縁抵抗低下動向および絶縁物表面への硝酸イオン付着量と時間の関係を数式化するため、デシケータ内で硝酸暴露試験を実施した。(図10)

試験条件は、温度60℃に保ったデシケータ内に3種類の硝酸水溶液(0.5N, 1.5N, 2.0N)を置き、絶縁物表面への硝酸付着量を調査した。なお、硫酸は物性由来の制約より、硫酸を用いた環境劣化試験は不可能であったが、硝酸のみの試験においても良い相関(0.92)が得られたため、実用上の支障がないと判断した。

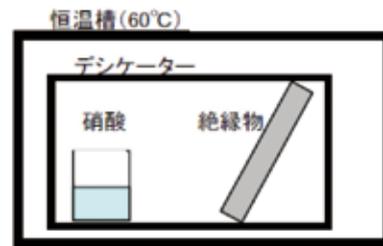


図10 硝酸暴露試験

9.2 環境劣化試験からの変換式確立

BMC絶縁における劣化に伴う化学反応は、絶縁物中の充填剤に含まれる炭酸カルシウム(CaCO₃)が硝酸(HNO₃)と反応し、潮解性物質である硝酸カルシウム(Ca(NO₃)₂)が生成することにより絶縁抵抗が低下する。その反応式を次に示す。



初期濃度	a	b	0
t時間後	a-x	b	x

- a: BMC絶縁物の炭酸カルシウム量
- b: 環境による硝酸濃度
- x: 生成した硝酸カルシウム量

この時の硝酸カルシウム生成速度は次式で表される。但し k は温度に依存する反応速度定数である。

$$\frac{dx}{dt} = k(a-x)b^2 \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

式(1)を2通りに変形する。

$$\frac{1}{b^2} \ln\left(\frac{a}{a-x}\right) = kt \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

$$x = a \{1 - \exp(-kb^2t)\} \dots\dots \text{式(3)}$$

硝酸暴露試験より式(2)を使用し、炭酸カルシウム初期量 a : 2.5mg/cm^2 ($2.5\text{E-}5\text{mol/cm}^2$) とし反応速度定数 k を求めた結果、 $k = 7.80884\text{E+}08$ であった。(温度 60°C)

さらに、図 10 に電圧 3.45kV を印加し、放電が発生するまで硝酸暴露試験を継続した結果、次の条件で放電が発生した。

- ・硝酸イオン付着量 : 0.09mg/cm^2
 - ・絶縁抵抗 :
 - ⇒ $3.0\text{E+}09 \Omega$ (MD 相関用 : 湿度 50%)
 - ⇒ $3.0\text{E+}07 \Omega$ (放電発生 : 湿度 80% 換算値)
- 放電発生時の写真を図 11 に示す。

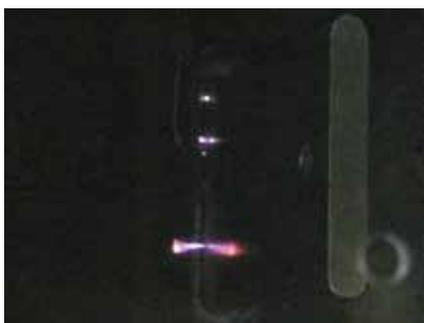


図 11 放電発生写真

9.3 放電による加速劣化試験

放電に伴う硝酸イオン付着量を調査するため、環境劣化加速試験にて放電が発生する直前の劣化サンプルを作成し、電圧 3.45kV 、温度 60°C 、湿度 $60 \sim 90\%$ の環境下で一定時間毎の硝酸イオン増加量を測定した。

短絡試験装置を図 12 に、放電による硝酸イオン増加量を図 13 に示す。



図 12 短絡試験装置

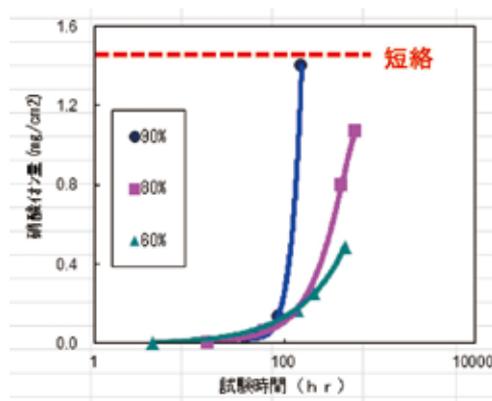


図 13 放電による硝酸イオン増加量

この結果、湿度 h ($50 \leq$) % での放電時間 x (hr) での硝酸イオン付着量 y (mg/cm^2) は次式となることが判明した。

$$y = aF(h) x^{0.24 \exp(0.022h)} + 0.0015 - F(h) \dots\dots \text{式(4)}$$

ただし、 $F(h) = 125.59h^{-2.77}$

$50 < h \leq 60$ のとき、 $a=5$ 、 $60 < h \leq 70$ のとき、 $a=10$
 $70 < h$ のとき、 $a=15$

9.4 短絡閾値の調査

9.3 節の放電による加速劣化試験を短絡発生まで継続した結果、短絡直前の硝酸イオン付着量は約 1.5mg/cm^2 、その時の絶縁抵抗は $2.5\text{E+}06 \Omega$ (MD 相関用 : 湿度 50%) であった。

9.5 実使用環境の温度・湿度調査結果

水島製油所の 5 電気室と屋外の年間湿度分布調査結果を図 14 に、各電気室の平均年間湿度分布を図 15 に示す。

この結果、電気室内の年間最高湿度は 80% であり、その時間は 2Hr であることが判明した。

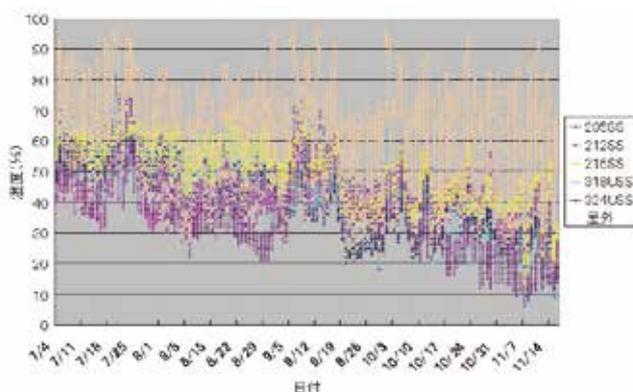


図 14 電気室湿度分布

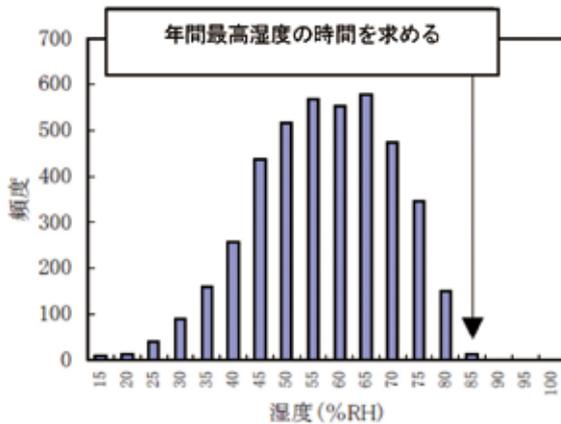


図15 各電気室の平均年間湿度分布

9.6 環境劣化と放電劣化の合成

短絡時期の推定アルゴリズムを整理すると次の通りとなる。

- ①設置～放電発生までの環境要因による劣化状態を把握するため、「総イオン量」および「硝酸イオン・硫酸イオン量、色差bおよび総イオン量との比」を求めるとともに、9.2節の式(3)より環境要因による絶縁物に付着する硝酸イオン量を算出する。

これらの結果より、設置から放電発生までの任意の時間において、環境要因による硝酸イオン量、硫酸イオン量、色差bを求めることができ、この3要素からMT法を用いて実使用環境(温度、湿度)における絶縁抵抗値を推定することが可能となる。

- ②9.5節から、年間最高湿度とその時間を調査し9.3節の式(4)より放電に伴う硝酸イオン付着量を算出。
- ③環境劣化+放電劣化による硝酸イオン付着量を合計し $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ に到達する年数が、架橋短絡に至る年数となる。

9.7 実機への適用

水島製油所診断盤をサンプルに、32年間の使用で放電発生時期に至ったとの仮定で短絡時期推定結果を次に示す。

- ・32年時点で絶縁抵抗 $3.0\text{E}+09\Omega$ (湿度50%)とすると、湿度80%では絶縁抵抗が $3.0\text{E}+07\Omega$ となり放電が発生し始める。
- ・環境調査結果、湿度が80%以上となる時間は年間2Hr
- ・湿度80%、2Hrの放電で発生・付着する硝酸イオン量は $8.272\text{E}-03\text{mg}/\text{cm}^2$
- ・33年目の環境劣化による硝酸イオン付着量に、放電による硝酸イオン付着量 $8.272\text{E}-03\text{mg}/\text{cm}^2$ を加算してMT法により絶縁抵抗を求めると、 $1.49\text{E}+09\Omega$ (湿度50%)となる。
- ・ $1.49\text{E}+09\Omega$ (湿度50%)では湿度が75%以上で放電閾値の絶縁抵抗 $3.0\text{E}+07\Omega$ 以下となり放電が発生する。
- ・年間で湿度が75%以上となる時間は図15より4Hr。この4Hrの放電で発生・付着する硝酸イオン量は $0.04\text{mg}/\text{cm}^2$

・34年目以降も同様に各年数での絶縁抵抗値を算出した結果は次の通り。

34年： $7.57\text{E}+08\Omega$ 、35年： $7.74\text{E}+07\Omega$

36年： $7.46\text{E}+06\Omega$ 、37年： $3.89\text{E}+04\Omega$

そして部分放電開始から5年目で短絡閾値 $2.5\text{E}+06\Omega$ 以下になり、短絡に至ると推定される。この短絡時期推定イメージを図16に示す。

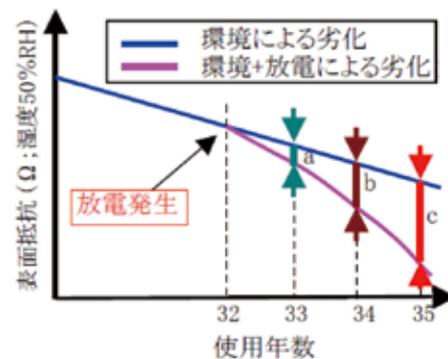


図16 放電発生以降の絶縁抵抗の変化

10. 社内運用指針の策定

今回の共同開発過程で得たノウハウおよび成果を取り纏め、「絶縁物の短絡余寿命推定技術を用いた受配電盤の維持管理方針書」として社内運用指針を発行するとともに、開発成果を国内と海外(PCT出願)へ三菱電機殿と共同出願した。

社内運用指針の規定概要を次に紹介する。

- ①絶縁物の短絡余寿命診断技術概要紹介
- ②診断手順と運用ロジック策定
 - ・診断精度向上を目的に、診断に必要な要素を明確化した事前調査チェックリスト策定。
 - ・診断および結果に基づく運用ロジック策定。
- ③全社共通管理表の策定
 - ・受配電盤を更新単位毎に分類し、影響度評価と、余寿命診断結果を網羅した共通管理表を策定。
- ④定期点検時のメンテナンス方法確立
 - 劣化速度の緩和と延命化措置として、次の事項を重点的に実施することを規定。
 - ・1000V絶縁抵抗計を用いた10mmギャップでの絶縁物表面抵抗測定。

硝酸カルシウム等の潮解性物質が付着している場合、表面抵抗が低下し絶縁抵抗計の指針が触れる。この場合、アルコールと水1:1の水溶液で絶縁物表面を清掃することにより、部分放電の発生を防止することができる。特に海岸線近くや長期使用している配電盤絶縁物は劣化傾向にあるため、事前準備を行うこと。
 - ・空調機の設置と整備

温度上昇は劣化速度に、湿度上昇は放電閾値と時間に大きく影響するため、空調機の設置と整備を行い、電気室内の温度・湿度を低く保つ。合わせて、外気が進入しない様、扉、壁のシール性を強化する。

- ・配電盤ケーブル導入口のシール強化
特にケーブルピット内の濃縮した NO_x、SO_x 蒸気を盤内に侵入させない措置。

11. おわりに

今回の共同開発により、長寿命部品であり、従来寿命推定が困難とされていた受配電盤絶縁物の余寿命を精度高く診断することが可能となった。また、絶縁劣化要因とプロセスを明確化することにより、適切なメンテナンス方法を確立することができた。

既に当社検査基準（JX スタンダード）に規定済の有寿命部品の取扱指針と合わせて、当該技術を実フィールドへ展開、実践運用することにより、製油所等の電力供給信頼性確保と、補修費の効果的な活用に寄与できるものと考ええる。