

経年変圧器の劣化評価技術と更新技術

大野孝雄*
土江博美*
網本 剛*

Deterioration Assessment and Replacement Technology for Aging Transformers

Takao Ohno, Hiroyoshi Tsuchie, Tsuyoshi Amimoto

要 旨

変圧器の長期運転による材料の劣化やストレスなど、経年に対する評価技術や更新技術は、事故未然防止の点から重要である。

変圧器の診断技術は、絶縁紙の熱劣化に対する劣化診断と油中ガス分析や部分放電試験に代表される変圧器内部の異常現象を検出する異常診断に大別され、診断技術の高度化や新たな知見による診断技術の見直しなどが提案されている。

従来の油中ガス分析は、主に絶縁油の熱分解で生じる可燃性ガスによる異常診断であったが、高精度油中ガス分析では過熱や放電で生じる絶縁材料の微量分解生成物を検出し、異常部位を更に精度よく診断するものである。

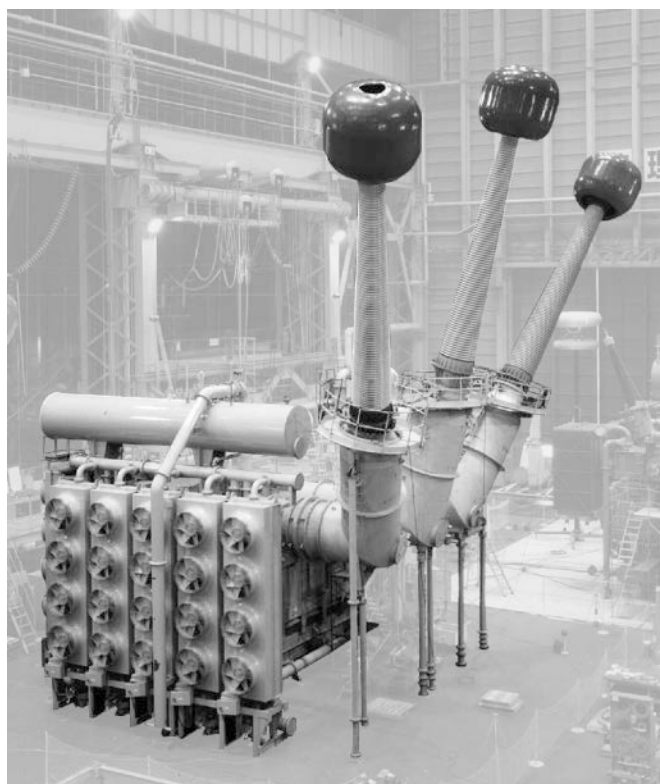
流動帯電に関する研究では、絶縁油の高帯電度化に加え、

絶縁物の高帯電度化が影響していることがわかってきた。そのため、絶縁物と絶縁油の両者の劣化要因を考慮した管理基準や指標について、電気協同研究報告の内容見直しが図られた。

一方、経年変圧器の更新が今後増加していくことが予想されるが、建設当時からの輸送環境の変化に対応した輸送方法に適した設計や現地工事期間の短縮が重要である。

九州電力(株)川内原子力発電所1号機の主変圧器の更新工事では、主変圧器・所内変圧器の一体化によるコンパクト化と損失改善による高効率化を図り、さらにIPB(Isolated Phase Busduct)の一部を取り付けて輸送するなどの工程短縮によって、約60日間という短期間で無事更新工事を完了した。

特集
II



川内原子力発電所1号機の主変圧器・所内変圧器更新器

1,000MVA、520kV主変圧器と56MVA所内変圧器とを一体形した更新器の、工場試験時の状態を示す。3本の気中ブッシングは工場試験のためのものである。右上図は、IPBの一部を取り付けた変圧器本体が専用キャリアで発電所構内を搬送される状態を示す。右下図は、旧変圧器を変圧器エリアからスライド工法で搬出する作業を示す。

1. ま え が き

変圧器は、送電用・配電用その他様々な用途に使用されている重要な電気機器であるが、国内の電力用変圧器の半数が設計寿命の30年を経過する状況にあり、変圧器故障による電力供給支障のリスクが高まる可能性があるため、劣化診断技術や異常診断技術の高度化が求められている。

一方、今後増加していく経年変圧器の更新に当たっては、省エネルギー等の社会的・環境的ニーズや輸送環境の変化への対応が必要とされる。

2. 変圧器の診断技術

変圧器本体に関する主な診断技術は、研究途上で今後期待される技術を含め、表1に示すようなものがある。

2.1 絶縁紙の劣化診断技術

絶縁紙は変圧器の運転に伴って熱劣化し、機械的強度が低下する。これは絶縁紙の平均重合度の低下によるもので、その値が450に達すると変圧器寿命と考えられている。

絶縁紙の劣化特性は、110℃前後を境に劣化速度が異なるという特徴があるため、変圧器の運転温度の110℃以下での劣化特性が必要であり、約12年間の長期低温劣化試験を行った。その結果を図1に示す。

絶縁紙の劣化診断技術は、この結果を統計処理した重回帰式を用いて、コイルの最も温度の高い部分(ホットスポット：HSP)の絶縁紙がいつ寿命レベルの平均重合度450に達するかを推定するものである。

表1. 変圧器の診断手法

	目 的	方 法
絶縁紙の劣化診断	平均重合度の推定	重合度法
		フルフラール法
		CO ₂ +CO法
本体の異常診断	過熱・放電現象	油中ガス分析
	過熱・放電部位	高精度油中ガス分析
	部分放電	電気パルス, UHF
		AEセンサ
	流動帯電	巻線漏れ電流測定
		絶縁油の帯電度測定
		蓄積電荷密度測定
	巻線の異常	FRA
	絶縁紙の水分	RVM

AE : Acoustic Emission

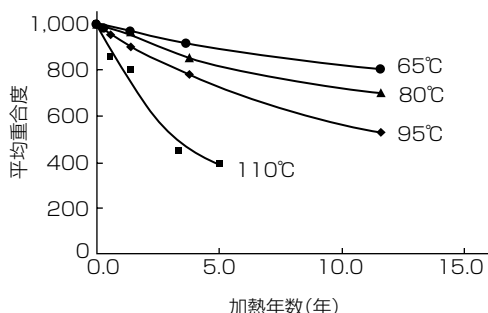


図1. 絶縁紙の低温劣化特性

油温度で劣化した絶縁物(プレスボード：PB)を採取し、その平均重合度と運転年数・運転負荷率・工場試験での温度データから重回帰式を用いて求められたHSP部の絶縁紙の平均重合度が寿命レベルに達する期間を算出し、寿命推定を行っている。

図2は絶縁紙の電子顕微鏡写真であり、劣化絶縁紙では、繊維長手方向の亀裂(きれつ)が割れに進展している。

先に述べたPBを採取して寿命推定する方法のほかに、絶縁紙の劣化生成物である油中のフルフラール量やCO₂+CO量から推定する方法などがある。平均重合度を測定する方法として、光(吸光度、色相)を用いた方法も研究されている。

2.2 本体の異常診断技術

2.2.1 油中ガス分析

油中ガス分析は、変圧器内部での過熱や放電などのエネルギーによって、絶縁油が分解し可燃性ガスを生じることから、油中溶存ガスを分析することによって異常を検出する手法であり、最も広く使用されている。電気協同研究報告では、可燃性ガスの量と種類によって3段階の異常レベルに区分されている。また、様相診断や過熱温度推定方法などについても詳しく述べられている。

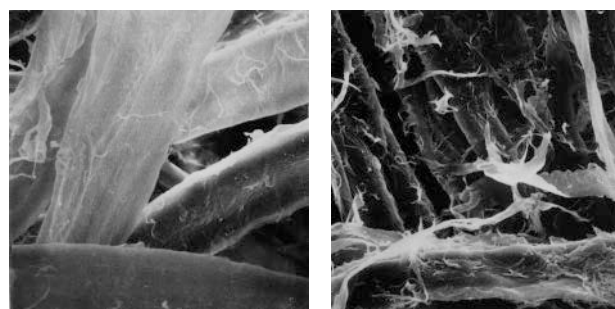
高精度油中ガス分析は、過熱や放電で絶縁材料が分解して出てくる多種類の高沸点微量成分を高感度で分析し、特徴的な成分を検出して損傷材料の識別・部位の特定などを行い、運転可否を判断するものである⁽¹⁾。

絶縁材料の分解成分は沸点が高く蒸気圧が低いいため、微量成分の抽出と高感度の分析手段が必要であり、図3に示す装置で濃縮捕獲し、その成分を急速に加熱・気化させガスクロマトグラフ質量分析器(GCMS)で分析する。

分析された微量成分と表2のような分解成分のデータベースとを比較して、異常が生じている材料を判別し異常部位を特定するものである。

2.2.2 部分放電

変圧器の絶縁検証のため部分放電試験が行われ、電気パルスや音響マイクによって放電音を検出しているが、UHF(Ultra High Frequency)帯(0.3～3GHz)の電磁波を



(a) 新品絶縁紙(平均重合度1,051) (b) 劣化絶縁紙(平均重合度279)

図2. 絶縁紙の電子顕微鏡写真(1,000倍)

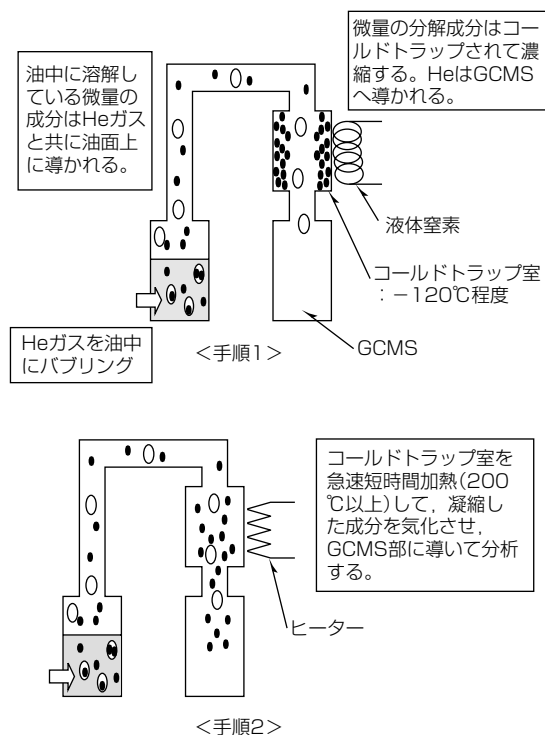


図3. 油中溶解微量成分の抽出方法

表2. 診断に必要な分解物

		過熱異常	放電異常
異常検出	正常変圧器及び新油からは検出されない成分を利用	酢酸 3ペンタノン ブタノール アンモニア 2.5ジメチルフラン 1.3ジアジン	2メチル1.3ブタジエン メチルビニルアセチレン
損傷材料識別	材料固有分解物	耐熱処理紙 ワニス処理紙 ガラスエポキシ	アンモニア 1.3ジアジン ブタノール 2メトキシエタノール
	検出成分の濃度比率を利用(1例)	セルロース系材料から上記材料を除く材料	ギ酸メチル フラン ジアセチル ジメチルサルファイド
			エタノール 酢酸メチル 2メチルフラン

測定すれば、外部ノイズの影響を受けにくく、減衰も少なく高感度に測定できることから、UHF帯での研究が進められている。

部分放電発生位置の位置評定は、図4に示すように、部分放電によって放射された電磁波は変圧器内部を伝播(でんぱ)し、変圧器タンクに設けられたアンテナA1~A3によって検出されるが、電磁波の到達時間($t_1 \sim t_3$)に差が生じるので検出時刻は各アンテナで異なる。アンテナの位置を基準(図ではA1)に、この時間差が一定となる点の軌跡を描くと部分放電発生位置である交点が得られる。

500kV級外鉄形変圧器を用いて、巻線上部空間の模擬放電源を高周波帯域(0.7~2GHz)の検出特性を持つホーンアンテナを使用した測定例では、アンテナの配置を調整することによって、±10cm以内の結果を得た⁽²⁾。

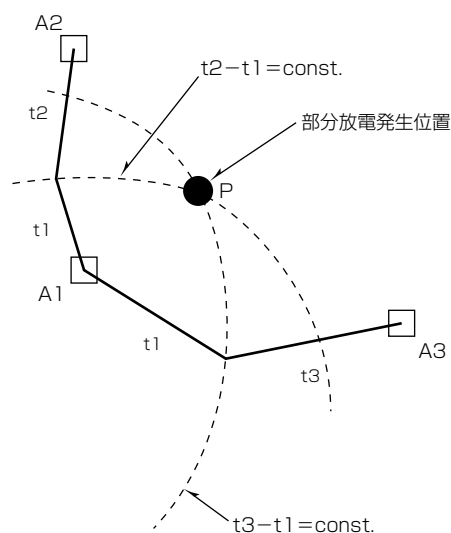


図4. 部分放電の位置評定(概念図)

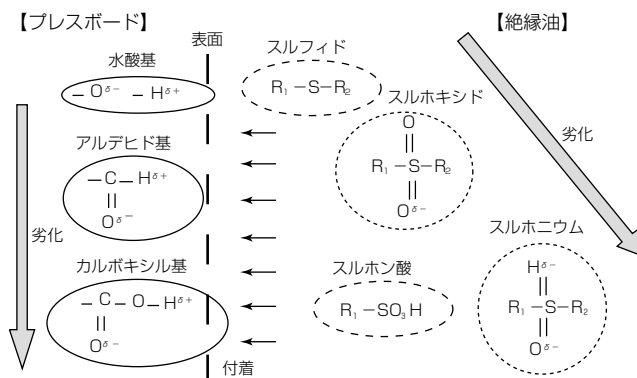


図5. プレスボードの高帯電度化

2.2.3 流動帯電

流動帯電は、変圧器内部で絶縁物との界面で油が流動することによって分離した電荷が移動して電荷が蓄積され、その部位の直流電位が上昇する現象で、静電気放電が発生する場合がある。高帯電度化は、図5に示すように、油中の劣化生成物がPB表面の水酸基、アルデヒド基、カルボキシル基に付着して生じると考えられる。

経年変圧器の絶縁物の流動帯電評価については、PBで構成された油ダクトに絶縁油を流したときの帯電電位(蓄積電荷密度)を測定する方法が、新たな評価指標として加えられた。従来の帯電度や誘電正接及び蓄積電荷密度が管理値を超えた場合、直接的な方法として巻線漏れ電流を測定して異常の判断を行う。

2.2.4 FRA(Frequency Response Analysis)

変圧器巻線の変形や短絡などに至る不具合がある場合、巻線のインダクタンスや静電容量が変化し、共振周波数がずれることを応用した診断法である。測定精度や評価方法の課題があるが、今後の研究に期待されている。

2.2.5 RVM(Return Voltage Measurement)

変圧器内部の絶縁紙中の水分量を把握するための診断法

であり、変圧器にステップ電圧を加えたあとの回復電圧の卓越時定数によって評価する。

3. 変圧器の更新技術

変圧器を更新する際には、接続機器や建屋・基礎などの既設設備とのインタフェースが重要である。また、建設当時から輸送環境の変化や運搬車両の除却などによる制約条件を把握し、更新計画を立案する必要がある。

3.1 変圧器の更新計画

変圧器の更新計画の立案には次のような確認作業が必要となる。

- ①仕様の確認：増容量，低騒音化などの追加仕様確認
- ②既設設備の確認：建屋，基礎，接続設備の流用範囲
- ③現地調査：寸法測定，輸送調査等現地確認
- ④工程計画：停電可能期間など制約条件の確認

特に輸送の制限条件によっては、変圧器の形式変更が伴い、変圧器の特性や工期・費用に大きな影響を及ぼす場合があるので注意を要する。輸送制約が厳しい場所には、特別三相方式やコイルと鉄心に分解して輸送し、現地で組立てハウスを設けて組み立てる分解輸送方式(CGPA)などを採用する必要がある。図6に分解輸送方式を、図7に500kV級変圧器の現地組立てハウスの外観を示す。

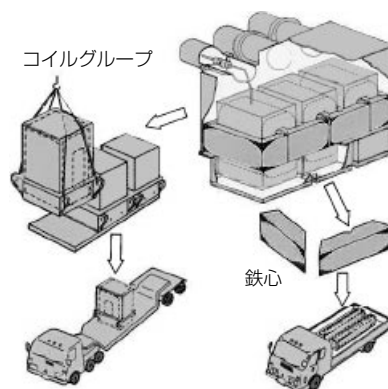


図6. 分解輸送方式(CGPA)



図7. 500kV級変圧器の現地組立てハウスの外観を示す。

3.2 変圧器の更新事例

ベース負荷を担う原子力発電所の主変圧器は、高負荷連続運転のため絶縁紙の劣化にとって最も厳しい環境にある。このたび、九州電力株川内原子力発電所1号機主変圧器の更新工事を行ったのでその特徴について述べる。

3.2.1 最新技術の適用

1,000MVA、520kV主変圧器と56MVA所内変圧器とを一体化し、主変圧器エリアに据付け可能となるようコンパクト化を図り、旧変圧器に対し約30%の損失改善を達成した。

また、プラントライフ60年を想定した変圧器寿命とするため、絶縁紙の劣化診断で培った技術によって得られた適正な巻線温度上昇限度を満足する冷却設計を行った。

3.2.2 工程計画

主変圧器・所内変圧器の更新工事を約60日間という短期間で行うため、次のような施策によって無事更新工事を完了した。

- ①基礎、IPB、OF(Oil Filled)ケーブル等主要設備を流用するための十分な現地調査
- ②構内輸送に対する干渉物や地耐力の調査
- ③埋設金物の設置など可能なものは前定検で施工
- ④新旧変圧器の搬出入に引き込みフックを必要としないスライド工法を採用

- ⑤IPBの一部を変圧器に取り付けた荷姿で輸送
- ⑥ドライエアの封入輸送によって、現地での絶縁油の取扱いの最小限化

4. む す び

変圧器の高経年化に対する事故未然防止を図るため、新たな診断技術や変圧器更新に対する工法などについて述べた。今後ますます重要となる診断技術や増加する更新需要に対応するための技術開発を更に進めていく。

川内1号機主変圧器更新の機会を与えていただいた九州電力の関係者各位及び更新工事に協力いただいた関係者に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 岡部成光，ほか：油入変圧器の油中ガス分析による早期異常診断法の検討，電気学会論文誌B，**116**，No.9，1151～1157（1996）
- (2) 石倉隆彦，ほか：変圧器における部分放電位置評定精度へのアンテナ配置の影響，平成20年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集，XIV-6（2008）