



Title	光による中型変圧器の劣化診断法の検討
Author(s)	澤田, 賢良; 元治, 崇; 佐藤, 重勝 他
Citation	電気材料技術雑誌. 1999, 8, p. 32-37
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/81577
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

光による中型変圧器の劣化診断法の検討

澤田 賢良、元治 崇

関西電力株式会社 総合技術研究所
〒661-0974 尼崎市若王寺3丁目11番20号

佐藤 重勝

株式会社日立製作所 国分工場
〒316-8501 日立市国分町1丁目1-1

竹澤 由高、片桐 純一、伊藤 雄三、森川 雅也

株式会社日立製作所 日立研究所
〒319-1292 日立市大みか町7丁目1-1

Development of Aging Deterioration Diagnosis Method for Middle-sized Power Transformers by Optical Analysis

Kenryo Sawada, Takamu Gengi

Technical Research Center, The Kansai Electric Power Company, Inc.
11-20 Nakoji, 3-chome, Amagasaki, Hyogo 661-0974, Japan

Yoshitaka Takezawa, Jun'ichi Katagiri, Yuuzo Itoh

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.
1-1, Omika-cho 7-chome, Hitachi-shi Ibaraki 319-1292, Japan

Shigekatsu Satoh

Kokubu Works, Hitachi Ltd.
1-1, Kokubu-cho 1-chome, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8502, Japan

Masaya Morikawa

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.
1-1, Omika-cho 7-chome, Hitachi-shi Ibaraki 319-1292, Japan

We have presented a new method of deterioration diagnosis for middle-sized power transformers by optical analysis. The new method is applied a phenomenon that both deteriorated insulating oil and light absorption of paper over specific wave length range according to their deterioration level. The method has features that oil extraction is not required and that deterioration diagnosis is possible in real time. The deterioration degree of insulating oil and insulating paper can be estimated using the diagnostic master curve which is obtained with an accelerated heating experiment. The optical absorption loss and reflection loss was correlated with the average value of polymerization degree of insulating paper. Consequently this optical diagnosis technique is theoretically applicable to diagnosis for power transformers.

キーワード：光素子、変圧器、劣化診断、絶縁油、絶縁紙、光吸収損失、反射吸光度

1. はじめに

現在の借室および配電塔に使用されている中型変圧器の劣化診断方法は、現地で絶縁油を採油した後持ち帰り、油中ガス分析および油性能試験により行っている。この方法では、診断の都度、採油のための作業が必要であり、判定結果を得るのにも時間を要していた。

そこで、試験作業の省力化と判定の迅速化をねらいとして、絶縁油を採油することなくリアルタイムでかつ簡易に実施する方法について、光素子を利用した診断手法の可能性を検討した。

この方法は、絶縁油等の劣化度合に応じて光の吸収スペクトルに差があることを利用したものである。

本報告では、実際に現場で使用されている中型変圧器および加速した絶縁油・絶縁紙の光吸収特性を測定し、光診断技術への適用性を検討した結果について述べる。

2. 現状の診断方法

絶縁油を現地の変圧器から採油した後、油中ガス分析により油中の溶存ガスを抽出・分析し、そのガスの種類・量・組成から内部異常の有無および異常の種類（原因・箇所等）・程度を診断している。また、油性能試験では絶縁油の各種特性試験（物理特性、電気特性、化学特性）を実施し、その特性値から油の性能を評価している。第1表に当社における現状の判定基準を示す。

第1表 現状の判定基準概要

Table.1. Standard for deterioration diagnosis of insulating oil.

(1) 油中ガス分析

判定項目	判定区分	異常なし	要注意	異常	危険
可能性 ガス量 合計I	10MVA以下	要注意 以下の もの	1200ppm以上	3600ppm以上	・絶縁 油の引 火点 130℃を 下廻っ たもの
	10MVA超過		900 "	2700 "	
	500kv		600 "	1800 "	
個々の ガス	水素	同 上	400ppm以上	800ppm以上	・増加 率月率 300ppm 以上の もの
	一酸化炭素		300 "	800 "	
	アセチレン		20 "	100 "	
	メタン、エタン、 エチレン、プロ パン、プロピレン		250 "	750 "	
	二酸化炭素		別途、使用基準値以上	同 左	
増加率	10MVA以下	同 上	年率300ppm以上	年率100ppm 以上	
	10MVA以上		年率250 "		
	500kv		年率200 "		

(2) 油性能試験

判定項目	判定区分	異常なし	要注意	異 常
引火点(PMCC) °C		130以上	129~126	126未満
全酸価 mgKOH/g		0.2未満	0.2~0.299	0.3以上
腐食性硫黄(銅板の色)		非腐食性(3以下)	—	腐食性(4)
界面張力(25℃)mN/cm		20以上	19.5~15	15未満
絶縁破壊電圧(2.5mm)kV		30以上	—	30未満
体積抵抗率(80℃)Ωcm		5×10 ¹¹ 以上	4.9×10 ¹¹ ~1.0×10 ¹¹	1.0×10 ¹¹ 未満
水分 (mg/kg)	密封、N2封入	30未満	30~50未満	50以上
	開放	50未満	50~70未満	70以上

3. 光吸光度を利用した診断方法

光が絶縁油中を透過する際に受ける減衰には波長の依存性がある。これらの減衰特性が変圧器の劣化度合に伴い変化することを診断に利用しようとするものである。

変圧器用絶縁油は一般的に精製鉱油が使用されている。この絶縁油は絶縁紙の空隙部をうめて絶縁性を向上させる絶縁機能のみならず、対流による放熱の機能もある。運転中の変圧器は油温が少なからず上昇し熱劣化を起こす。

絶縁油が熱酸化劣化すると有機酸や水分が生成され、その色相も無色透明状態から経年劣化により黄色化することが知られている。また、絶縁紙も経年劣化により黄色化することが予想される。そこで今回、経年絶縁油（現場採取品、加速品）

および劣化絶縁紙（加速品）の色相の変化を定量化するため、色相を分光光度計で測定し、経年劣化との関係を検討した。具体的には、吸光度スペクトルを測定し、絶縁油では光吸収損失を、また、絶縁紙では反射吸光度を測定した。

4. 測定結果

現場使用の絶縁油は関西電力管内で5～20年間使用された中型変圧器容量200～1000kVA および参考に大型変圧器から採油したものを測定した。また、加速品は中型変圧器を模擬した容器に各種構成材料を封入し熱加速試験を行った加速絶縁油および絶縁紙を用いた。

現場使用の絶縁油の種類および油中ガス分析結果を第2表に、また、加速試験容器と封入した材料を第1図に示す。第2図に現場絶縁油の吸光度スペクトルと経年との関係を、第3図に加速絶縁油の吸光度スペクトルと加速日数との関係を、第4図に加速した油浸耐熱絶縁紙の吸光度スペクトルと加速日数との関係を示す。

なお、吸光度Aは（1）式で定義されるものである。

$$A = -\log(I/I_0) \dots\dots (1)$$

I_0 : レファレンス透過光強度

I : 被測定材料の透過光強度

第2表 絶縁油を採取した中型変圧器
Table.2. Medium-sized power transformers for sample.

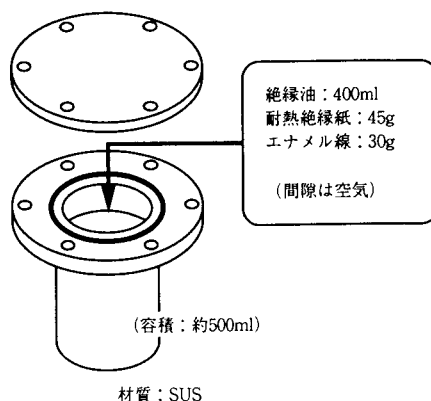
場所	台数	製造後年数	定格容量	分析結果
WM	3	4.9～5.0年	500～100kVA	要注意1台
BC	3	10.1年	550～100kVA	要注意2台
Y5	3	10.2年	200～750kVA	要注意3台
Y1	3	13.8～14.5年	200～750kVA	要注意3台
N3	3	19.2年	300～750kVA	要注意3台
N5	3	19.2年	300～750kVA	要注意3台

現場採取絶縁油および加速絶縁油は、製造後年数や加速日数（劣化進行度）とともに吸光度が大きくなっている。

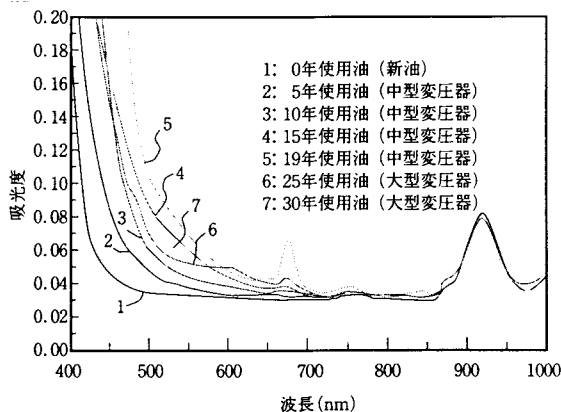
これは絶縁油の熱酸化劣化に基づく電子遷移吸収（分子中の電子が励起状態になるときに起こる吸収で、波長が短いほど指数関数的に大きくなる）

の増大によるものと推測される。加速絶縁紙でも、絶縁油と同様な傾向を示した。

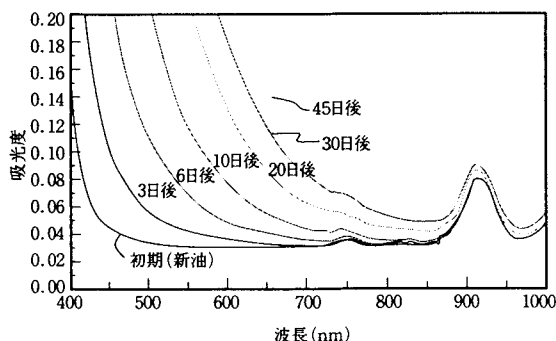
次に、スペクトルの形状変化だけでは劣化診断を定量的に評価できないので、絶縁油では特定の波長における光吸収損失を、絶縁紙では反射吸光



第1図 加速試験容器
Fig.1. Receptacle for acceleration test.

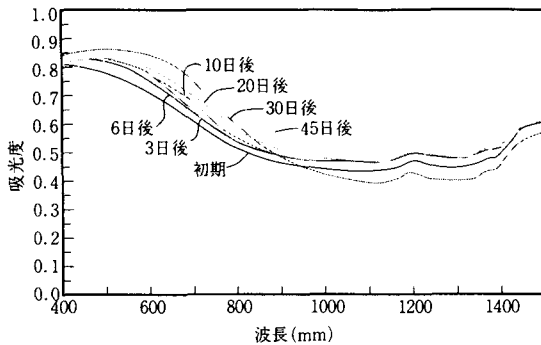


第2図 現場絶縁油の吸光度スペクトルの経年変化
Fig.2. Time dependence on optical absorptin spectra of insulating oil.



第3図 加速絶縁油の吸光度スペクトルの変化
Fig.3. Time dependence on optical absorptin spectra of insulating oil with heat acceleration.

度を算出した。算出には劣化してもほとんど変化しない800 nm以上の領域と、劣化により顕著に増大する650 nm以下の短波長域での損失により行った。なお、算出に使用する波長領域は単色光源が存在する500～850 nmの波長間で50nm毎に



第4図 加速絶縁紙の吸光度スペクトルの変化

Fig. 4. Time dependence on optical absorptin spectra of insulating paper with heat acceleration.

単位長さ当たりの損失を測定した。

光吸収損失 α は(2)式で、また、反射吸光度 AR は(3)式で定義されるものである。

$$\begin{aligned}\alpha \text{ (dB/m)} &= 10 \cdot A_{\lambda} / t \\ &= -10/t \cdot \log (I / I_0) \\ &\dots\dots (2)\end{aligned}$$

A_{λ} : 波長 λ における吸光度

I_0 : レファレンス透過光強度

I : 被測定材料の透過光強度

$$AR = -\log (I / I_0) \quad \dots\dots (3)$$

I_0 : レファレンス反射光強度

I : 被測定材料の反射光強度

[現状の劣化判定項目と光吸収特性との関係]

中型変圧器の劣化診断で判定している項目(第1表)の内の数種類について、発生ガス量や油性能と光吸収損失差との相関関係を調べた。第3表に絶縁油の各項目に関する相関係数を示す。また、第4表に絶縁紙の特性との相関係数を示す。

実使用絶縁油の全酸価と光吸収損失差との相関

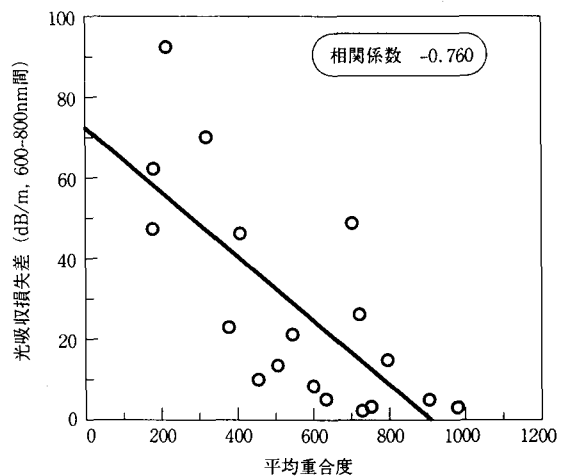
係数が、0.706と高いことから、光吸収損失の変化により、絶縁油の熱酸化劣化を検知することは可能であると考えられる。油中ガス分析での項目では全体的に相関係数が低い。これは各々のガスの特定吸収波長が今回使用した単色光源(500～800 nm)よりも長波長側にしかないためであると考えられる。

しかし、加速した絶縁紙の平均重合度の値と光

第3表 絶縁油の診断項目と光吸収損失差との相関係数

Table 3. Correlation coefficient between diagnostic item of insulating oil and optical absorption loss.

項 目	相 関 係 数	
	実使用絶縁油	加速絶縁油
油性能試験	全酸価	0.706
	絶縁破壊電圧	-(一定値のため)
	体積抵抗率	-0.319
	水分	-0.544
油中ガス分析	メタン	-0.155
	エタン	-0.521
	エチレン	0.590
	プロパン	-0.504
	プロピレン	0.071
	イソブタン	検出されず
	アセチレン	検出されず
	水素	-0.622
	一酸化炭素	0.487
	二酸化炭素	0.681
	酸素	0.682
	窒素	0.044



第5図 光吸収損失差と平均重合度との関係

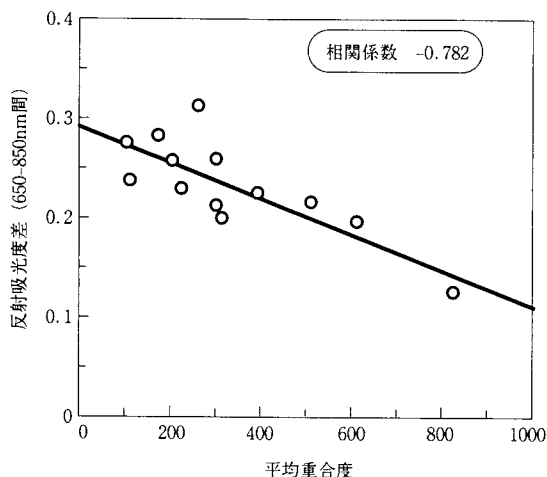
Fig. 5. Relation between optical absorption loss of insulating oil and average degree of polymerization of insulating paper.

第4表 絶縁紙の特性と光吸収損失差および反射吸光度差の相関係数

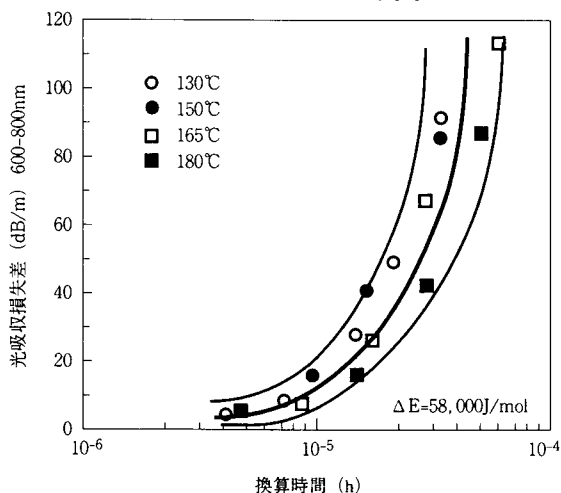
Table.4. Correlation coefficient between characteristics of insulating paper and optical characteristics.

項 目	相関係数	
	光吸収損失差	反射吸光度差
平均重合度 (耐熱絶縁紙)	-0.760	-0.407
〃 (プレスボード)	-0.241	-0.782
フルフラール	0.089	—

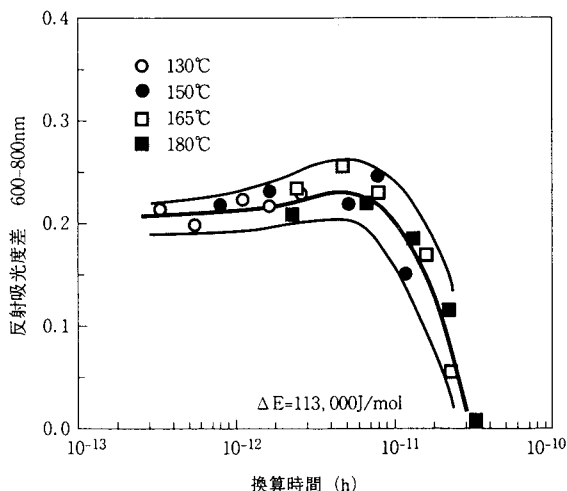
吸収損失差ならびに反射吸光度差との相関係数は高く、損失差等を測定することで絶縁紙の直接診断の可能性があることがわかった。第5図および第6図に平均重合度との相関を示す。



第6図 反射吸光度差と平均重合度との関係
Fig. 6. Relation between reflective absorption difference of insulating paper and average degree of polymerization of insulating paper.



第7図 絶縁油の診断マスターカーブ
Fig. 7. Diagnostic master curve of insulating oil.



第8図 絶縁紙の診断マスターカーブ
Fig. 8. Diagnostic master curve of insulating paper.

5. 診断マスターカーブの作成および劣化診断手順

劣化診断や余寿命推定を行うためには、劣化の進行を示すマスターカーブを作成することが必要となる。そこで、加速試験結果をもとに診断マスターカーブを作成した。

このマスターカーブはアレニウス法を用いて、絶縁油および絶縁紙の活性化エネルギーを算出し、加速時間 t を換算時間 θ に変換、再プロットすることにより作成した。第7図および第8図に絶縁油ならびに絶縁紙の診断マスターカーブを示す。
〔診断手順について〕

作成した診断マスターカーブを用いて、絶縁紙の劣化診断・寿命評価を行う手順を第9図に示す。

手順としては、まず、診断対象の変圧器の製造後年数（実使用時間）を確認し、絶縁油の光吸収損失差を測定する。次にあらかじめ作成している絶縁油の診断マスターカーブを使い、その光吸収損失差から換算時間 θ_1 を求める。 θ は各材料の劣化度に相当する反応速度論的時間である。そして、図中の式から絶縁油の活性化エネルギーと実使用時間と換算時間を使って、実時間で使用された絶縁油の平均使用温度 T_{oil} を算出する。さらに、絶縁紙は概略 T_{oil} の温度にさらされていたと考え、図中の式から絶縁紙に関する θ predict

を求める。次に絶縁紙の反射吸光度差を測定しあらかじめ作成している絶縁紙の診断マスターカーブから換算時間 θ 、 θ' を読み取る。この値は絶縁紙の平均重合度の低下に直結した指標であると考えられる。この時点では同じ劣化度を表す値として θ 、 θ' の2つの値が得られることから、そ

れらの内のどちらの値を採用すべきかを定める必要がある。図では、予測した換算時間 θ_{predict} に近い値 θ' を真の換算時間と判定する。最後にこの θ' (θ_{predict})に基づき、絶縁紙がさらされていたと考えられる平均熱履歴温度 T_{paper} を図中の式から求める。

以上の手順によって求めた T_{paper} を使用して、変圧器の余寿命を図中の式から求める。あらかじめ作成している絶縁紙の診断マスターカーブの寿命点の換算時間と算出した換算時間との差が寿命点までの余寿命に相当する。その求めた余寿命の換算時間を変換することにより寿命までの実時間がわかる。

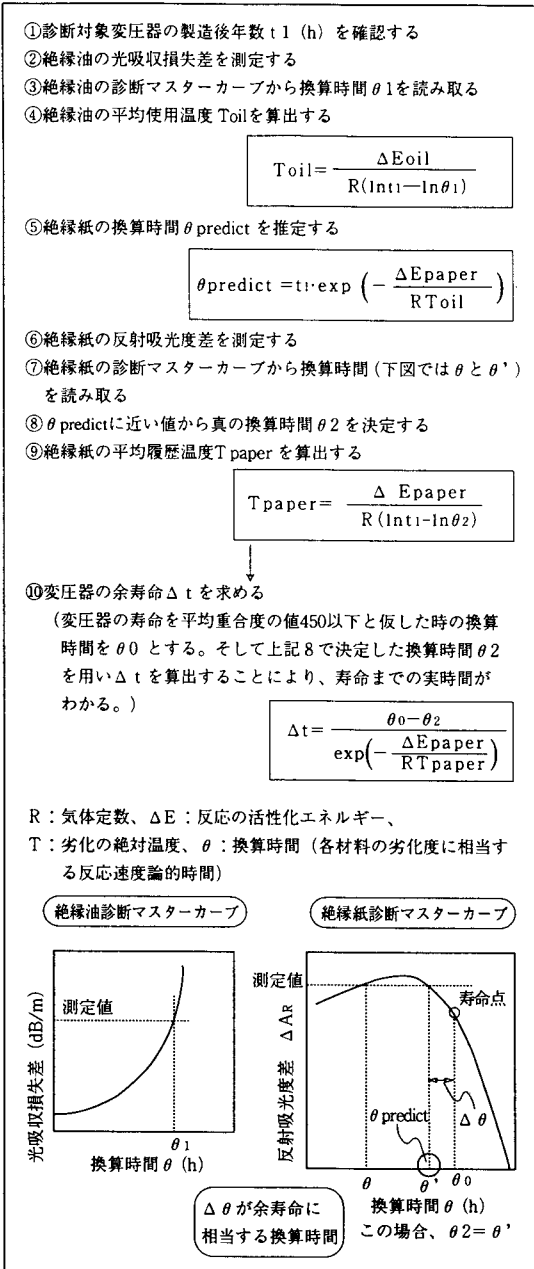
6. おわりに

絶縁油の劣化と光吸収損失差とは相関があることがわかった。また、加速劣化試験による絶縁紙の平均重合度とも相関があることがわかり、原理的には絶縁油における光吸収特性および絶縁紙における光反射特性を、変圧器の余寿命診断に使用することの可能性を見出すことができた。

このことから、変圧器の劣化診断方法として、実使用および加速劣化試験により診断用マスターカーブを作成することができた。

今後は上述の絶縁物物性の劣化指標と電気的絶縁性能との関係を明確にし、光を使用した方式による劣化判定基準の作成を行い、装置としての劣化診断法を確立していく。

(1999年10月31日受理)



第9図 診断マスターカーブを用いた診断手順

Fig. 9. Diagnostic procedure using master curve.