

絶縁材料の $\tan \delta$ と絶縁破壊との関係

The Influence of the Power Factor of Insulating Materials upon the Electrical Breakdown

材料研究所第一課 井 関 昇

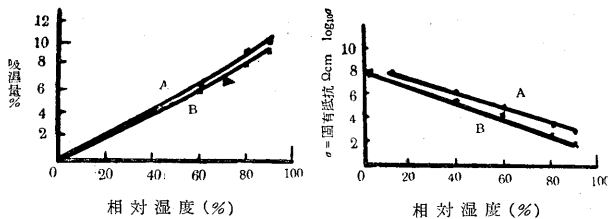
I. 緒 言

一般に電力用機器の絶縁の良否判定法として従来行はれて来た方法は、絶縁耐力試験及びメガーによる絶縁抵抗試験であつて何れも十分な判定基準にはならないものであつた。一方近時損失角 ($\tan \delta$) 測定に依る方法が提案せられて既に可成り多くの測定結果が発表されたが⁽¹⁾ 斯かる方法が絶縁劣化の判定に如何程の規準を与えるものかに就いての研究は 1, 2⁽²⁾⁽³⁾ を除き皆無であると思はれる。我々は以上の関係を明確にし併せて $\tan \delta$ 増大の機構を明らかにする爲に、当社技術部変圧器課の協力のもとに材料研究所において、変圧器主絶縁材料である油含浸絶縁紙、ワニス含浸絶縁紙及び絶縁油に就いて組織的な基礎研究を行ひ、略々その間の関係を明らかにすることができたので、ここに材料的に見た変圧器の $\tan \delta$ と絶縁性に就いての研究結果の概要を報告する。

II. 湿気に依る絶縁劣化

1. 概 論

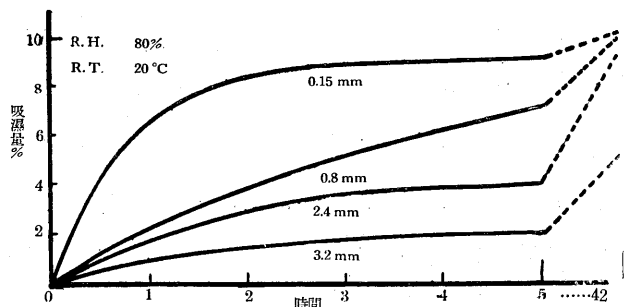
一般に電気機器の絶縁において、湿気が最も悪影響を及ぼすことは衆知のことからであり、殊に機器絶縁材料として最も多く用いられる繊維質材料の吸湿性は非常に大きく、使用に際してワニス含浸等の防湿対策を構ずるのも此のためである。



第 1 図—絶縁紙の相対湿度と吸湿量及び体積固有抵抗

Fig. 1—The relationship bet. moisture content, specific volume resistance and relative humidity of paper.

変圧器絶縁に用ひられる絶縁紙の吸湿量は大気の湿度に依つて非常に異なるものであり、例へば相対湿度80%中に放置した場合は 8~12重量%も吸湿するものである。その測定結果の一例を示せば第 1 図及び第 2 図の如くで湿気の影響が如何に大きいかわることができる。

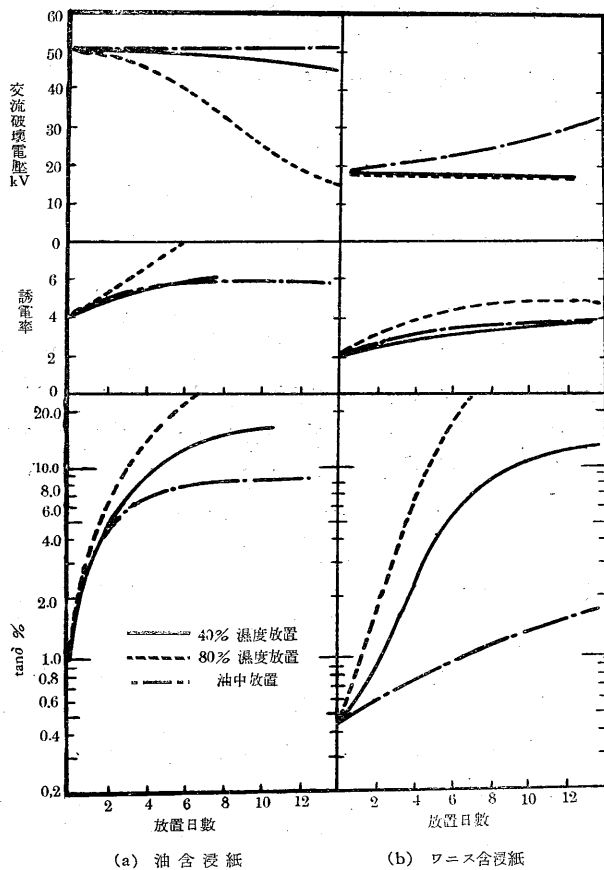


第 2 図—絶縁紙の吸湿速度

Fig. 2—The velocity of moisture absorption of paper.

2. 絶縁紙の吸湿に依る絶縁劣化

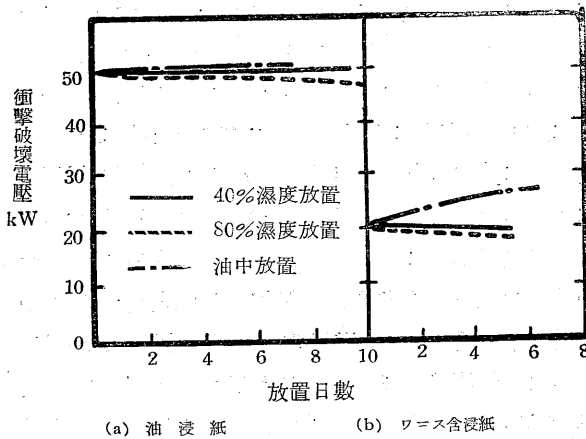
上述したように材料の吸湿は絶縁抵抗の値より検出することができるが、更に吸湿に依る絶縁劣化の状態を明らかにする爲に油含浸 (真空度 300 mmHg 110°C 絶縁油中に浸) 及びワニス含浸 (真空中ワニス 1 回塗) 処理の絶縁紙を 40%湿度気中、80%湿度気中及び80%湿度に曝された絶縁油中に長時間放置して、吸湿と共にその $\tan \delta$ 、交流破壊電圧、誘電率の変化する模様を測定した。第 3 図(a)(b)はその結果を示すもので図より分るやうに、80%湿度中に放置したものは吸湿と共にその $\tan \delta$ は急激に増加し交流破壊電圧は低下する。所が絶縁油中に放置したものは油浸紙ではその $\tan \delta$ が増加するにも拘らず破壊電圧に変化が無く、ワニス含浸紙では $\tan \delta$ が増加する一方破壊電圧の倍増しているのを見る。かような油中放置ワニス含浸紙の $\tan \delta$ の増加、破壊電圧の上昇は湿気の浸入によるものではなく油が繊維中の空気と置換して入り込むためにおこる現象である。即ち油含浸処理に依ると $\tan \delta$ は増加することはあるが反面破壊電圧は著しく上昇するものである。



第3図—プレスボードの湿気と電気絶縁性の関係 (22°C)
Fig. 3—The relationship bet. humidity and insulating characteristic of pressboard.

3. 吸湿と衝撃破壊電圧との関係

絶縁紙の衝撃破壊電圧については今迄に少数の結果が得られてゐるが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、我々は円周に6mmの丸味をもつた平円板電極を用ひて吸湿と破壊電圧との関係を測定し第4図のような結果を得た。図に示したように衝撃破



第4図—プレスボードの湿気と衝撃破壊電圧
Fig. 4—Humidity and impulse breakdown voltage of pressboard.

壊電圧は吸湿状態においても殆んど低下しないものであり $\tan \delta$ 、交流破壊電圧が湿気に著しく影響されることに比較して特異な現象である。

猶得た衝撃比の値は 1.5~2.5、厚さと破壊電圧との関係は次式の如くであつた:

$$\text{油 浸 紙 } V=Ad^{0.8-0.9} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{ワニス含浸紙 } V=Ad^{0.75} \dots\dots\dots(2)$$

III. $\tan \delta$ と絶縁破壊との関係

1. $\tan \delta$ と短時間破壊電圧との関係

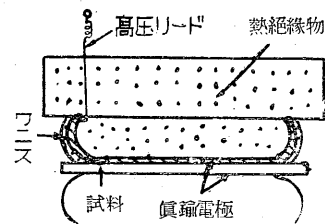
種々の $\tan \delta$ をもつた絶縁紙に就いて短時間交流破壊電圧を測定した結果を第1表に示す。之は $\tan \delta$ と短時間交流破壊電圧との間に關聯性のないことを表はしてゐる。

種別	厚さ mm	処理方法	破壊強度 kV/mm	$\tan \delta$ %	誘電率
A	0.50	空氣乾燥	13.9	0.49	—
〃	〃	ワニス含浸	18.9	0.48	2.6
〃	〃	油 含 浸	50.6	1.12	4.0
B	0.72	空氣乾燥	13.0	0.44	3.6
〃	〃	油 含 浸	49.3	1.60	4.7
C	2.4	空氣乾燥	13.6	0.43	3.5
〃	〃	ワニス含浸	16.5	0.48	3.3
〃	〃	油 含 浸	30.4	4.56	5.6

第1表—プレスボードの $\tan \delta$ と破壊電圧
Table. 1—The value of $\tan \delta$ and dielectric strength of pressboard.

2. $\tan \delta$ と長時間破壊電圧との関係

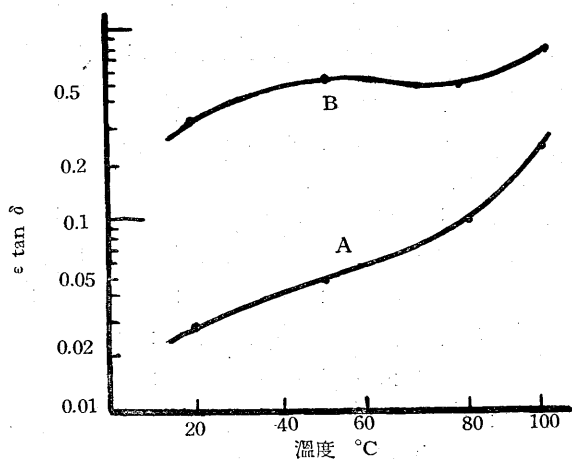
上述の短時間破壊の結果を更に明確にするために長時間の加圧に依る熱破壊現象の有無をも検討した。即ち大小2種の $\tan \delta$ を有する油浸紙を採り第5図の如き熱容量、熱放散の小さい特殊の電極を用ひ 20°C 及び変圧器使用の最悪状態と考へられる 100°C の絶縁油の中において多数の試料 (約 400 枚) に就き長時間交流絶縁破壊試



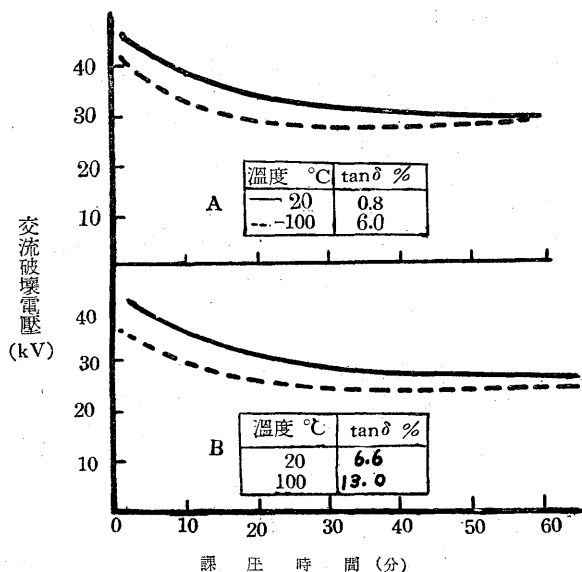
第5図—長時間破壊試験用電極
Fig. 5—Electrode for long time test of dielectric strength.

験を行つた。第6図には用ひた試料の損失率 $\epsilon \tan \delta$ の温度特性を、第7図にその実験結果を示してゐる。

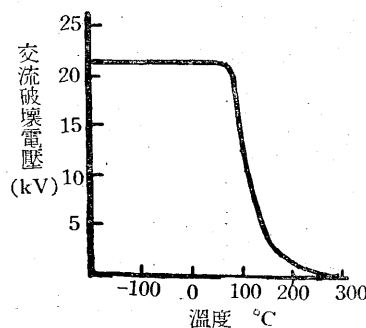
一般に熱破壊と言はれる現象は第8図に引用したように100°Cの温度上昇においてその破壊電圧は通常数分の1に迄低下するものであるが、我々の場合80°Cの温度差において $\epsilon \tan \delta$ は3~8倍に増加してゐるにも拘らず破壊電圧の低下は10~20%に過ぎず、又本実験において同時に行つた熱電対に依る試料の温度上昇測定においても何等温度の変化を検出しなかつたことを併せ考えると、此の場合所謂熱破壊現象は起つてゐないと考えられることができる。即ち油浸紙絶縁破壊の現象は電圧の印加と共に絶縁物中の不純物部分や一部の不均一電場部分においてイオン化が起りコロナが発生し之が原因となつて破



第6図—試料の損失率温度特性
Fig. 6—Loss-factor temperature characteristic.



第7図—油浸紙の長時間破壊電圧特性
Fig. 7—Long time dielectric strength test of oil-impregnated paper.



第8図—ガラスの熱破壊の例 (Inge, Walther による)
Fig. 8—Thermal breakdown of glass.

壊に至るものであつて低電圧で測定した $\tan \delta$ の値とは直接的な関係は存在しないものである。

IV. $\tan \delta$ 増大の機構

1. 概論

絶縁物誘電体損の機構としては今迄に色々の説明が与えられてゐるが、大要次の3種類に分類することができる。即ち

- (1) 材料が不均質である爲に生ずる残留電荷に依るもの。
- (2) 永久双極子 (dipole) の配向に依るもの。
- (3) イオンの移動に依るもの。

であると考えられる。例えば良好な絶縁油においては主としてイオン伝導に原因し、種々の樹脂類においては主として永久双極子の配向に原因し、絶縁紙においては以上3種の合成に原因するが如きである。特に吸湿した纖維質ではイオンによるものが最も大きくあらはれるものである。

2. 油浸及びワニス含浸紙の $\tan \delta$ の比較

一般に纖維質材料は多くの結合水を持ち之を取り除くには高温高真空中で長時間乾燥しなければならないが普通行はれてゐる高温乾燥のみに依る時は残存した結合水の爲に猶 0.3~0.4%の $\tan \delta$ を示すものである。

かような絶縁紙を油含浸又はワニス含浸した場合第1表にみられたように $\tan \delta$ に著しい差を生じることがある。即ちワニス含浸の場合はワニスと絶縁紙とが直列に結合せられるとみてよく、その合成の $\tan \delta$ は使用した絶縁紙、ワニスのそれにより決まり次式により表はされる(6)。

$$\tan \delta = \frac{I_p \epsilon_i \tan \delta_p + I_i \epsilon_p \tan \delta_i}{I_i \epsilon_p + I_p \epsilon_i} \dots\dots\dots (3)$$

但し $I_p, I_i; \epsilon_p, \epsilon_i; \tan \delta_p, \tan \delta_i$ は使用した絶縁紙

及び含浸剤の分量比、誘電率、 $\tan \delta$ を表はす。

然るに油含浸紙の場合は上式で予期される値より遙かに大きい $\tan \delta$ を持つことがあり必ずしも油浸前のそれによつてきまるものではない。即ち此の場合は絶縁紙中に浸透した絶縁油は単にその空間部をみたす役目をするだけでなく、繊維質中に混在してゐる不純物（例えばアルカリ、酸、樹脂、灰分等）に作用し、その永久双極子（dipole）の配向やイオンの移動を容易にするのではないかと考えられる。第2表及び第3表に示した結果は此の間の関係を明らかにするもので、不純物や混和物を除くことにより $\tan \delta$ を改善することができる。

厚さ mm	処理方法	$\tan \delta$ %	誘電率
0.5	空気乾燥	0.42	3.5
〃	油含浸	20.6	6.1
〃	水洗後油浸	5.34	3.6
2.4	空気乾燥	0.38	3.2
〃	油含浸	2.42	4.5
〃	水洗後油浸	1.46	4.1

第2表—水洗によるプレスボードの改良

Table 2—Improvement of pressboard by washing

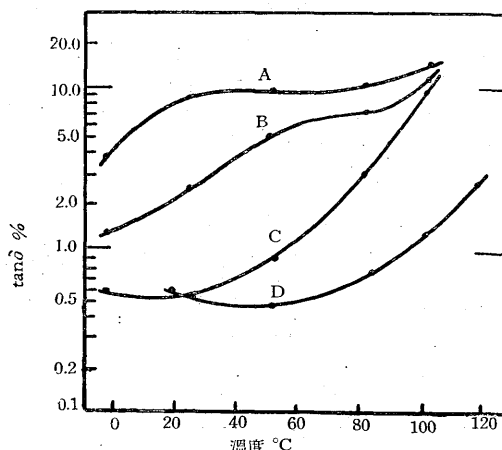
漉造方法	$\tan \delta$		誘電率	
	空気乾燥	油含浸	空気乾燥	油含浸
水洗後漉造	0.45	0.73	2.31	2.95
パルプその儘	0.44	1.1	2.30	3.15
松脂3%含有	0.44	5.6	2.17	4.55

第3表—漉造方法による $\tan \delta$ の変化

Table 3—The value of $\tan \delta$ of various pressboard.

3. 油浸絶縁紙の $\tan \delta$ 温度特性

第9図は各種油浸絶縁紙の $\tan \delta$ 温度特性を示したもので、図より分るように室温で大きい $\tan \delta$ を持つものでは温度による増加率小さく、室温で $\tan \delta$ の小さいものでは、温度による増加率が大きいといふ傾向がみられる。例えばB試料においては 60~80°C において一旦極大値を示し、その後 90°C で再び上昇してゐる。之は混入してゐる樹脂の融点が 80°C 附近にあることに依ると考へられるが、更に高温度では B, C 試料の差は極めて小さくなつてゐる。此の事からすると低温度における $\tan \delta$ の値を知つても、熱的破壊の起ると考へられるような高温度における $\tan \delta$ を予測できない以上、一般に行はれてゐるような比較的低温における $\tan \delta$ 測定によ



第9図—油浸紙の $\tan \delta$ 温度特性

Fig. 9— $\tan \delta$ -temp. characteristic of oil-impregnated paper

り、絶縁劣化の判定とすることは、早急に失するのではないかと考へられる。

V. 絶縁油の $\tan \delta$ と破壊電圧との関係

今迄各章においては主として絶縁紙の絶縁性に就いて述べたが、変圧器絶縁材料として重要なものに絶縁油がある。絶縁油の絶縁性については既に幾多の人々によつて研究が行はれてゐるのでここでは単に $\tan \delta$ と交流破壊電圧との間に関係があるかどうかについてのみ考へることとする。即ち第4表に示された如き絶縁油を用ひてその電気絶縁性及び酸價を測定した結果を示せば第5表及び第10図の如くである。此の結果を簡単にまとめると次のように結論することができる。

No.	処理方法
1	生油
2	80%恒湿槽中9日間放置
3	W 28 塗布銅板共存にて加熱 (大気圧下にて 115°C, 56 時間加熱)
4	銅板共存にて加熱 (加熱方法は同上)

第4表—絶縁油試料

Table 4—Oil specimen

No.	$\tan \delta$ % 50°C	誘電率 50°C	絶縁抵抗 Ω cm 50°C	破壊電圧 kV 13°C 40°C	酸價
1	0.16	2.22	2.5×10^{14}	12.7 19.9	0.0025
2	0.27	2.17	1.7×10^{14}	13.4 21.3	0.0025
3	0.36	2.19	1.1×10^{13}	17.7 18.3	0.0694
4	3.50	2.22	9.0×10^{11}	17.2 21.2	0.1880

[破壊電圧測定電極は 12.5mm ϕ 電極、間隙長 1.0mm]

第5表—絶縁油の特性

Table 5—Characteristic of insulating oil.

(1) 絶縁油の交流破壊電圧の機構としては種々考へられるが通常はその中に混在してゐる不純物(空気, 湿気, スラッジ, 塵埃等)の影響が非常に大きく, 不純物の部分の局部破壊が絶縁破壊の原因となるとされてゐる. 測定結果に依れば絶縁油中の水分によりその破壊電圧は著しく低下してゐる.

(2) ワニス, 銅等の共存にて加熱された絶縁油はその酸化が著しく増大し, $\tan \delta$, 絶縁抵抗もその傾向を示すが数値的には兩者の比例関係は見出されない. 即ち $\tan \delta$ の値は種々の影響の合成であつて酸化のみに依つて決まるものではないと考えられる.

(3) 一般に絶縁油の交流破壊電圧は 60~80°C で最大値があらわれるとされてゐるが, 一方 $\tan \delta$ は温度と共に急激に増加するものである. 又測定結果中 90°C における破壊電圧は各試料とも略等しい値をえてゐるがその $\tan \delta$ は1桁以上も異つてゐることから考えると, $\tan \delta$ と絶縁破壊電圧との間には何等関係が無いと考えてよい. 絶縁破壊と温度との関係は例えば油中に含まれる空気量, 水分量等で説明されるものである.

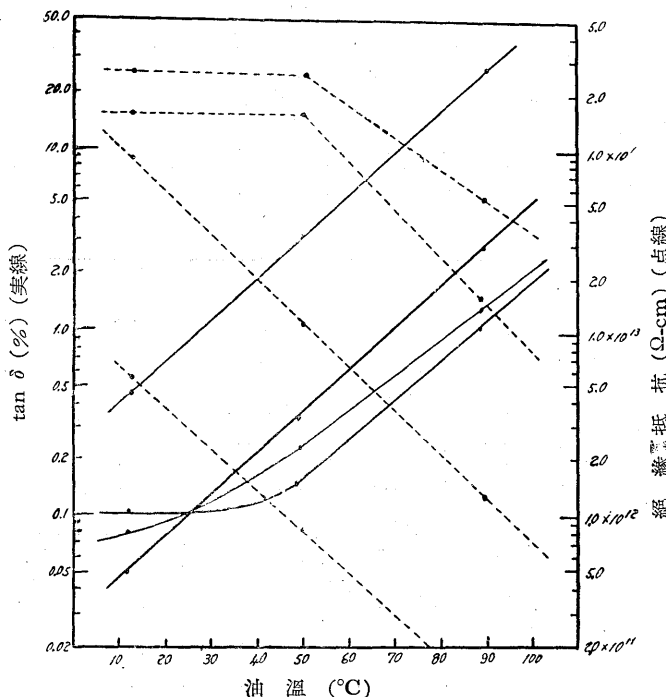
VI. 結 論

今迄主として材料的に見た変圧器絶縁の $\tan \delta$ に就いて論じたが, 以上述べたことより, $\tan \delta$ の測定は材料の吸湿状態や或種の混合物の状態を検出するには甚だ有効であるが, 一方 $\tan \delta$ の大きい半面破壊電圧の高いものがあり, 絶縁破壊の機構が $\tan \delta$ の値と全く無関係の場合が多いということが考えられ, $\tan \delta$ の値のみを以てその絶縁の良否を判定することは誤りに陥り易いものであることに注意をせねばならない.

最後に本研究に当り種々御指導を賜つた材料研究所佐藤金三課長, 技術部整流器課甲斐弘道課長, 絶大な御協力を賜つた材料研究所橋野幸雄氏, 齋藤清実登氏, 大胡, 倉橋両君, 技術部変圧器課穴原良司氏, 前川定雄氏, 川崎工場試験課西尾忠一郎氏に対し深甚な謝意を表する.

文 献

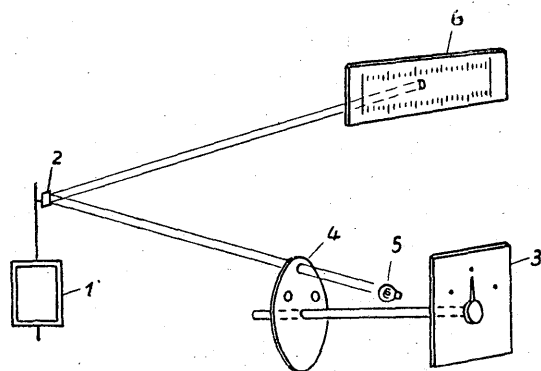
- (1) 富山他; 電学誌 70 p.210 (1950)
- (2) J. W. Gross: E. E. 57 p.589 (1938)
- (3) P. H. Mc. Auley: E. E. 61 p.707 (1942)
- (4) 稲 田: 18回聯合大会予稿 p.20 (昭16)
- (5) P. Bellashi: E. E. 56 p.164 (1937)
- (6) A. Buchner: Wissenschaftliche Veröff. aus der Siemens Werken 17 S.212 (1939)



第 10 図—各種絶縁油の $\tan \delta$ 絶縁抵抗温度特性
Fig. 10—Temperater characteristic of $\tan \delta$, volume resistivity of various oil

光 示 式 計 器

(特許第 184236 号)



光示式計器でも多重目盛を使つて測定範囲を切換える方式が使用されますが, 指針の場合と違つて目盛を読分けるのが不便であります. 色の使分けをして之を簡単に解決したのが此の発明であります. 即ち(1)は計器の可動線輪(2)はミラー(3)は測定範囲の切換開閉器(4)は(3)で回される色フィルター(5)は光源(6)は多重目盛であります. 目盛には違つた色の目盛が刻まれその色と合致した色硝子をフィルターに取付けます. 従て開閉器で測定範囲を変えますと同時に目盛を照す色が変わり, その色の目盛を読めば簡単に測定出来ます. 実際に使用して非常に便利であります. (技術部 池上)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。