

# 吸湿油の絶縁破壊電圧に及ぼす界面活性剤の効果

日立製作所 堤 泰行

## 1. まえがき

鉱油中の絶縁破壊電圧は、鉱油中に含まれる微細な浮遊物、水分などによって著しく影響されることは良く知られている。<sup>(1)</sup> 鉱油を絶縁に用いる場合には、ろ過や脱気を行なっているが、このような処理によってもこれら不純物の影響を完全に除去することは困難であり、実験室的に極度に清浄化した油に比べて、工業的に処理された油の絶縁破壊電圧はかなり低いことが知られている。<sup>(1)</sup>

鉱油の絶縁破壊電圧に及ぼす水分の影響について、これまで多くの報告があり、定性的には含有水分がエマルジョンを作るほど多くなると絶縁破壊電圧が大幅に低下することが知られているが、絶縁破壊電圧が低下し始める水分量あるいは絶縁破壊電圧値は測定者によって大幅に異なり、<sup>(2)</sup> その破壊機構も明らかでない。

Zein, Tropper 氏ら<sup>(2)</sup>は、吸湿鉱油の絶縁破壊は油中に含まれる微細な浮遊物が原因で起こると考えている。沼倉氏らの実験<sup>(1)</sup>からも、油の破壊電圧に対して浮遊物と水分とが相乗効果を示すことが明らかである。

一方、石井氏ら<sup>(3)</sup>は油中水分そのものが油の破壊に影響を与えるのではなく、油中水分と油中飽和水分量（これ以上だとエマルジョンができる限界値）との比が破壊現象に密接な関係があると考えている。

本報では、鉱油に微量の界面活性剤を添加するという手法を取り入れ、油中水分が油の絶縁破壊電圧を低下させる機構について新しい角度から検討を加える。

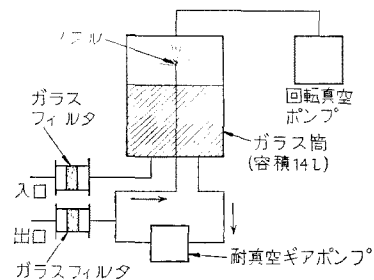
この問題とは別に本報のもう一つの目的は、吸湿鉱

油の破壊電圧が微量の界面活性剤添加によって飛躍的に向上することを示し、油絶縁に対する界面活性剤の応用の可能性を示唆することにある。

従来、油が酸化劣化すると界面活性剤の一種である金属せっけんを生じ、油の破壊電圧が低下するといわれていた。<sup>(4)</sup> 本報では、非イオン系の界面活性剤を積極的に添加して破壊電圧を向上させようとするもので、これまでこの種のデータは全く発表されていない。

## 2. 実験の方法

〈2・1〉 供試油およびその処理方法 変圧器油 (JIS C 2320 2号油) を供試油として用いた。この油を第1図に示すような油処理装置に導入し、3号ガラスフィルタ (細孔径 30~20 μm) でろ過し、0.1 Torr 以下の減圧空間でノズルから数回吹き出し、乾燥、脱気を行なった。このときの油中水分は 7~9 ppm であり、油の絶縁破壊の強さは第2図に示すように約 30 kV/mm (1.5 mm 間隔) で比較的ばらつきが少なく、別の電極 (形状は同じ) あるいは別の容器で試験しても結果の再現性は良好である。この絶縁破壊の強さは、工業的に処理された油についてこれまで知られ

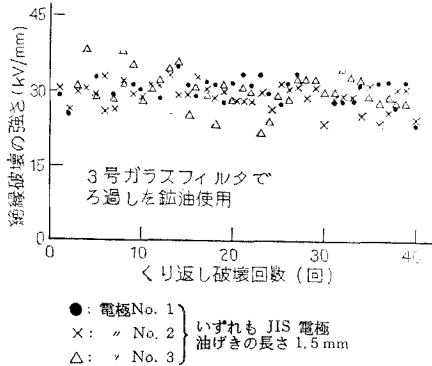


第1図 油脱気装置系統図

Fig. 1. System diagram of oil degassing equipment.

Effect of Surface Reagent on Dielectric Breakdown Voltage of Wet Oil. By Y. TSUTSUMI, Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

堤 泰行: 正員, 日立製作所日立研究所

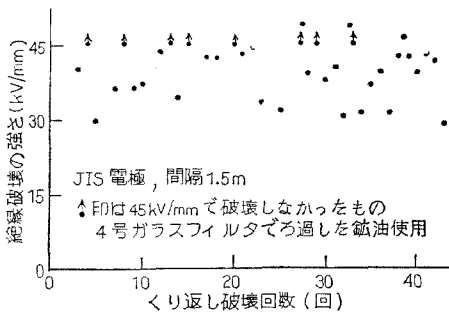


第2図 脱気油の絶縁破壊の強さ

Fig. 2. Dielectric breakdown strength of degassed oil filtered through glass filter of 20 to 30 μm pore size.

ている値に比べて決して低すぎることはない。しかしながら、第1章でも述べたように、この状態の油(真空脱気油と以下略称する)はミクロ的に見ると各種の浮遊物を含み、それが油の破壊に影響を及ぼすと考えられる。このことを確認するため、密閉ガラス容器内に4号ガラスフィルタ(細孔径10~5 μm)を設け、外部と完全にしゃ断した状態でろ過、脱気および絶縁破壊試験を続けて行なうと、第3図に示すように同一電極構造でも第2図に比べて絶縁破壊の強さはかなり高くなる。このように、より微細な気孔のフィルタでろ過すると油の破壊電圧が向上することは、以前から良く知られた現象である。<sup>(4)</sup>

本報では、浮遊物を全く含まない油の絶縁破壊に及ぼす水分の影響を対象とせず、第2図に示すような絶縁破壊値を示す、いわば工業的に処理された油に対する水分の影響を対象としているが、その理由は、後者の油の破壊機構が実用的に重要と考えたからである。



第3図 脱気油の絶縁破壊の強さ

Fig. 3. Dielectric breakdown strength of degassed oil filtered through glass filter of 10 to 5 μm pore size.

以下、第2図の特性を示す真空脱気油をもとに、調湿したり、界面活性剤を添加したりして実験を行なっている。

〈2.2〉 界面活性剤およびその処理方法 油に添加する界面活性剤としては、非イオン系の液状のもので、HLB 価約 10 のアルキルエーテル形界面活性剤〔分子構造  $R-O(CH_2CH_2O)_nH$ 、商品名ニッサンノニオン NS-204.5〕を使った。非イオン系界面活性剤を選んだ理由は、イオン系のものに比べイオン伝導現象が少なく、絶縁用により有効と考えたからである。また、分子構造の異なる同系列の界面活性剤あるいは HLB 価の異なる同系列の界面活性剤についても同様の実験を行ない、HLB 価が同じなら油中水分に対してほぼ同じような挙動を示すことがわかっているが、詳細について不明の点も多いので、これについては今後さらに検討したうえで報告したい。ここでは、上記界面活性剤についての結果だけを述べる。

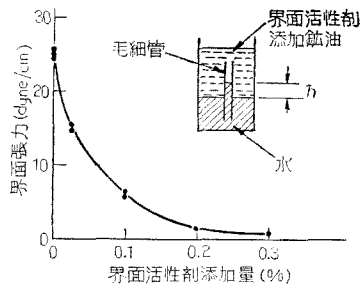
この界面活性剤は、鉱油に添加後かくはんすると簡単に溶解する。界面活性剤を添加した鉱油の水に対する界面張力を第4図に示す。界面張力の求め方は、図中に示すような方法で毛细管の上昇高さを測定し、次式によって算出した。

$$F = r\rho gh/2$$

ここに  $r$ 、 $\rho$ 、 $g$  はそれぞれ毛细管の半径、水と油の密度差、重力の加速度である。

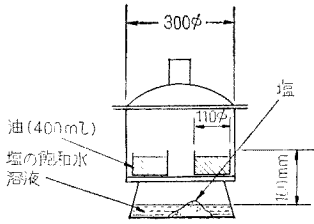
界面活性剤の脱水にはガラス製の真空乾燥器(アプデルハルデン)を使い、144°C、4時間、0.1 Torr の条件で乾燥したところ、含有水分は 2,020 ppm から 248 ppm に減少した。

〈2.3〉 供試油の調湿 供試油は第5図に示すような容器に入れ、これを同図に示すような塩で調湿したデシケータに入れ、そのデシケータを 20°C ± 1°C の



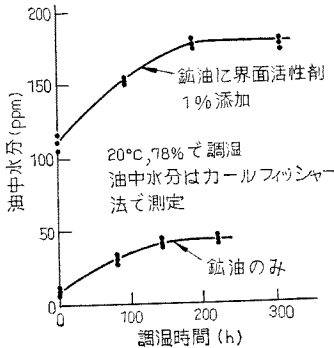
第4図 界面活性剤添加量と界面張力との関係

Fig. 4. Relation between added quantity of surface reagent and surface tension.



第5図 調湿の方法

Fig. 5. Method of humidity control.



第6図 調湿時間と油中水分との関係

Fig. 6. Relation between time for humidity control and water content in oil.

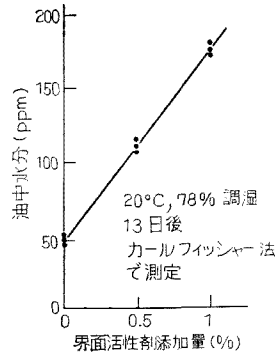
恒温室内に置いた。

使用した調湿用の塩は NaCl または NaNO<sub>2</sub> であり、これらの 20°C における相対湿度はそれぞれ 78% および 66% である。また、これと対比するため塩の飽和水溶液の代わりにシリカゲルを入れて、乾燥した油についても試験した。

調湿時間と油中水分との関係は第6図に示すような形となり、1週間程度ではほぼ飽和に達する。界面活性剤を添加した油の場合、調湿時間0でもかなりの油中水分が含まれているが、これは脱水しない界面活性剤を用いたためである。

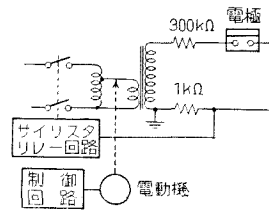
界面活性剤の添加量と相対湿度 78% における飽和油中水分量との関係は、第7図に示すように添加量0~1%の範囲で直線性があり、この相対湿度では1%の界面活性剤が 127 ppm の水分を吸着することがわかる。

〈2.4〉 高電圧回路 第8図に高電圧回路を示す。電圧は電圧調整器を電動機で駆動し、1.5 kV/s の割合で自動的に昇圧する。絶縁破壊が起こると1サイクル以内にサイリスタリレーが動作し、変圧器の一次側が切れる。その後、昇圧時と同じ時間かかって電圧調整器は0の位置にもどり、その後30秒休止した後、



第7図 界面活性剤添加量と油中水分との関係

Fig. 7. Relation between added quantity of surface reagent and water content in oil.



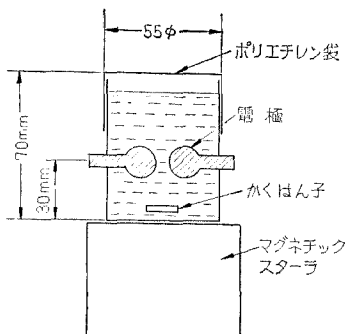
第8図 高電圧回路

Fig. 8. High voltage circuit.

再び一次回路を投入し、上記の昇圧速度で電圧を加える。この操作を自動的にくり返し破壊電圧を自動記録する。絶縁破壊の起こる時間間隔は、供試油の破壊電圧によって多少の差が生じるが、ほぼ50~70秒である。このように同一電極および同一供試油で破壊試験を50回くり返すと、電極間に多少カーボンの発生が見られるが、絶縁破壊電圧が低下してくることはなかった。前述の第2図はその例である。

〈2.5〉 電極および容器 電極としては JIS C 2320 に規定された 12.5φ 球対 12.5φ 球電極を使用し、電極間隔は 1.5 mm とした。電極材料は黄銅である。

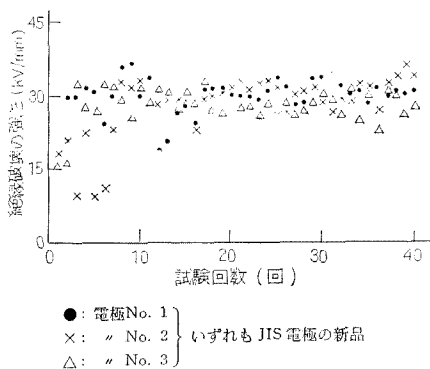
電極は第9図に示すようなガラス製容器に取り付け、この容器に脱気または調湿した供試油 120 ml を入れて絶縁破壊試験を行なった。また、容器内の油をかくはんしながら課電する必要のあるときは、第9図に示すように容器内にかくはん子を入れマグネチックスターラによりかくはんした。供試油をこのガラス製容器に入れてから絶縁破壊試験が終わるまでの時間は約40分であるが、この間の吸湿またはほこりを防止する意味で、容器はポリエチレン袋で簡易包装した。すべての絶縁破壊試験の前後で油中水分を測定してい



第9図 電極配置

Fig. 9. Electrode configuration.

るが、それによると 78% RH で調湿した鉱油をかくはんしながら絶縁破壊試験を行なうときのみ、油中水分は試験前の 56 ppm から 51 ppm と減少していたが、その他の試験（かくはんしない場合、あるいはかくはんしても脱気油や界面活性剤添加油などの場合）では、絶縁破壊試験前後で油中水分に有意差は認められなかった。上記の例で油中水分が減少した理由は、ガラス容器内の油面上の空間に水分が水蒸気として出たためと考えられる。すでに以前から、電極吸蔵ガスの影響として知られていたことではあるが、本報でも新しい電極を使い始める際、絶縁破壊電圧が数回異常に低く出る現象が認められた。第 10 図にその結果を示す。したがって、新しい電極は 40 回以上絶縁破壊したのち実験に用いるようにした。絶縁破壊試験を 40 回連続して行なうと油を捨て、電極とガラス容器をベンジン-せっけん水-蒸留水で洗浄し、じゅうぶん乾燥した後、次の実験に用いた。

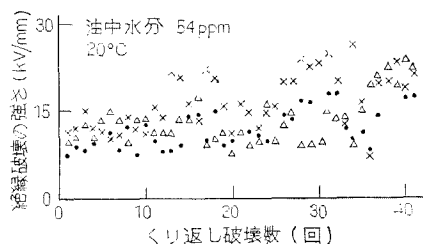


第10図 脱気油の絶縁破壊の強さに及ぼす新しい電極の影響

Fig. 10. Effect of new electrodes on dielectric breakdown strength of degassed oil.

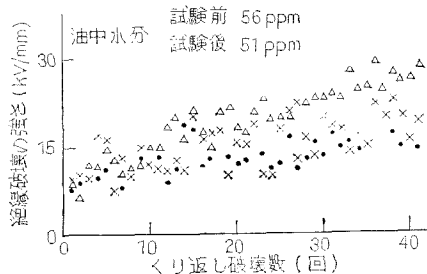
### 3. 実験結果と検討

〈3.1〉 界面活性剤を含まない吸湿油の絶縁破壊特性 吸湿油の絶縁破壊の強さはくり返し絶縁破壊させると次第に高くなる傾向がある。第 11 図は 20°C、78% RH で調湿した油の絶縁破壊の強さであるが、破壊数とともに高くなる傾向がみられる。このような現象は Zein, Tropper 氏らも報告<sup>(2)</sup>している。この原因は、破壊試験によって油中水分が少なくなるためではないかと考え、試験前後で油中水分を測定したが、有意差は認められなかった。また、電極近傍の油の中の水分が破壊の際に回りの油へ逃げ、全体としての水分量が同じでも局部的に乾燥しているかも知れないと考え、〈2.5〉節で述べた方法により油をかくはんしながら破壊試験を行なった。結果は第 12 図に示すように、破壊数とともに破壊の強さが増加する傾向がはっきり出てきた。第 12 図に示す三つの試験のうち、一つについてはそのまま実験を続けたところ、くり返し破壊数 100 回程度では乾燥油の値 30 kV/mm が得られるようになった。なお、このときの油中水分は 51 ppm であった。



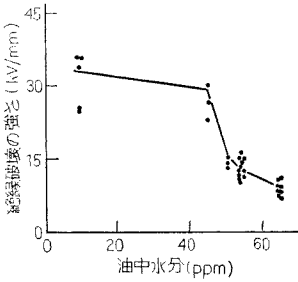
第11図 吸湿油の絶縁破壊の強さ

Fig. 11. Dielectric breakdown strength of wet oil.



第12図 吸湿油の絶縁破壊に及ぼすかくはんの影響

Fig. 12. Effect of stirring on dielectric breakdown strength of wet oil.



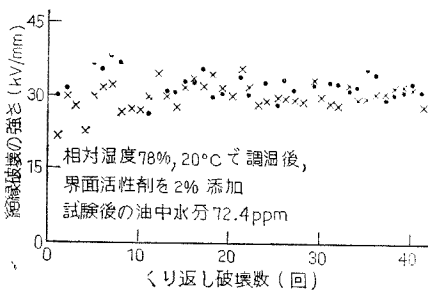
第 13 図 油中水分と絶縁破壊の強さとの関係  
Fig. 13. Relation between water content in oil and dielectric breakdown strength.

このように、くり返し破壊させると絶縁破壊の強さが向上する理由を水分だけに求めるのは無理であり、破壊によって浮遊物が乾燥するか、吸湿浮遊物が分解してしまうなどに原因を求めるべきだと思う。

吸湿鉱油の絶縁破壊の強さは破壊の回数とともに上昇するので、どの値をとるべきか問題であるが、一応 JIS C 2320 の方法に従って最初の 1 点を除外し、2 ~ 5 点目の値を取り、油中水分と絶縁破壊の強さとの関係をプロットしてみると第 13 図のようになる。この図は Russek 氏の結果<sup>(5)</sup>と良く一致している。

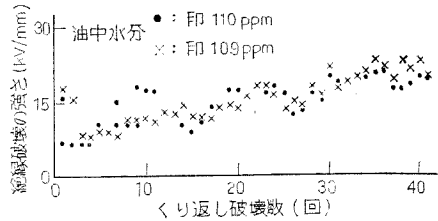
〈3・2〉 界面活性剤を添加した鉱油の絶縁破壊特性

吸湿した鉱油の絶縁破壊の強さは、第 11 図に示すように低い値を示すが、これに微量の界面活性剤を添加すると第 14 図に示すように、脱気した鉱油なみの絶縁破壊の強さが得られる。従来、油が劣化すると金属せっけんを生じ、絶縁耐力が低下することについては報告があるが、非イオン系界面活性剤でこのように大幅な絶縁破壊特性の向上があることについては詳しく検討された例はない。界面活性剤を添加した鉱油は第 7 図に示すように吸湿しやすいので、高湿度中に放



第 14 図 界面活性剤添加による絶縁破壊特性の向上

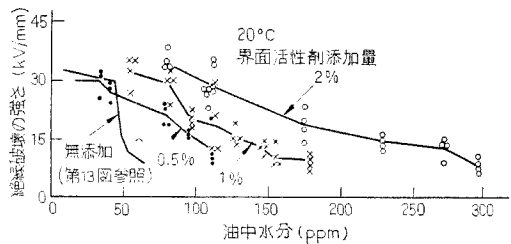
Fig. 14. Improvement in dielectric breakdown characteristics due to addition of surface reagent.



界面活性剤 0.5% 添加後 78% RH, 20°C で 4日間調湿した

第 15 図 吸湿した界面活性剤添加油の絶縁破壊特性

Fig. 15. Dielectric breakdown characteristics of wet oil contained surface reagent.

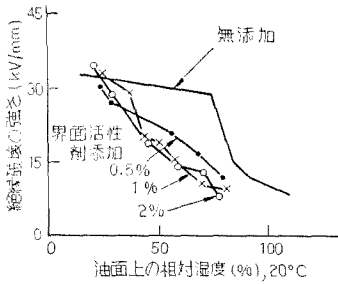


第 16 図 界面活性剤添加鉱油の油中水分と絶縁破壊の強さとの関係

Fig. 16. Relation between water content in oil contained surface reagent and their dielectric breakdown strength.

置すると油中水分が多くなり、破壊電圧は低下してくる。このときの特性は界面活剤を添加しない吸湿油の特性と同様、破壊の回数とともに破壊電圧は向上してくる。これを第 15 図に示す。

第 13 図と同様の方法で、界面活性剤添加油について油中水分と絶縁破壊の強さとの関係をプロットしてみると第 16 図のようになる。この図から界面活性剤を少量添加した油は、油中水分が非常に多くとも絶縁破壊の強さがかなり高いことが明らかである。このことは、油中水分そのものが油の絶縁破壊の強さを低下させる原因ではないという明らかな証拠である。この図に示された油中水分はカールフィッシャー法で測定した値であり、界面活性剤の親水基に弱い力で束縛されている水も、試薬で取って測定している。もし、油と平衡する水蒸気分圧によって油中水分を測定する機器（たとえば、Shaw Hygrometer）を用いれば、界面活性剤を入れると油中水分は見かけ上小さく検出されるはずである。界面活性剤を添加した油の 78% RH における飽和含水量の値（第 7 図）を使い、含水量は相対湿度に比例するとして、油と平衡する相対湿



第17図 油面上相対湿度と絶縁破壊の強さとの関係

Fig. 17. Relation between relative humidity above the oil and dielectric breakdown strength.

度と油の絶縁破壊の強さとの関係を求めると、第16図は第17図のように書き改めることができる。石井氏ら<sup>(3)</sup>は飽和含水量の異なる種々の塩素化油を吸湿させて絶縁破壊電圧を測定し、第17図のような整理の仕方をするとうの種類によらず一致すると報告している。しかし、第17図から界面活性剤添加油と無添加油とは一致しないことが明らかである。この結果をどう解釈すべきかについて、今後さらに検討しなければならないが、次の点はじゅうぶん考慮すべきことと思う。

(1) 第13図のように、低水分域で水分が変わっても破壊電圧が変わらないのは電極構造が良くないからであり、VDE電極では水分に対して敏感に破壊電圧が変わるとい報告<sup>(6)</sup>がある。したがって、電極構造が変わると第17図の特性も大幅に変わることも考えられ検討を要する。

(2) 吸湿油の破壊電圧は〈3・1〉節で述べたように、破壊の回数とともに上昇するので、何回目の値で比較するかによって第17図の形が違ってくる。

(3) 鉱油中の紙の水分吸着は大気中の場合より時間がかかるが、平衡状態ではほぼ同じになるといわれている。もし、油の種類や固体の種類によらずこのことがなりたつなら、油中浮遊物の吸湿状態は油と平衡する水蒸気圧によって決まり、第17図のような表示をすれば、油の種類によらず一致しても良いと考えられる。実際に一致していないのは、界面活性剤添加油の

中では浮遊物の吸着特性が大気中と異なるためとも考えられるので検討を要する。

界面活性剤を加えることによって吸湿鉱油の破壊電圧が向上する理由は、いまのところ明らかでないが、一応次のように考えられる。

(1) 界面活性剤は油中の吸着浮遊物から水分を取る一種の液状乾燥剤とみなすことができる。鉱油に界面活性剤を加えることにより、水分の飽和溶解量が増すため吸湿浮遊物の水分が油へ移る。

(2) あるいはまた、界面活性剤は油中の吸湿浮遊物の回りに付着し、浮遊物を安定化させ、電界によってこれら浮遊物同志が凝集して大きくなるのを防げるとも考えられる。

#### 4. むすび

吸湿した鉱油に微量の界面活性剤を添加すると、油中水分が多いにもかかわらず絶縁破壊の強さが飛躍的に向上することを明らかにした。

これらの現象についてははまだ不明の点も多いが、今後、吸湿油の絶縁破壊機構を解明する有力な手がかりになるとと思われる。

さらにまた、界面活性剤を添加した油を絶縁油に応用する可能性、たとえば変圧器などの絶縁処理用の油に応用する可能性については、今後じゅうぶん研究するに値する問題であると思う。

終わりに、本研究を行なうにあたり多大の援助を与えられた日立製作所日立研究所副所長 高砂常義氏、第2部主任研究員 宮下隆雄氏、第24研究室 沼田征司氏、佐藤 忠氏、国分工場変圧器設計部長 森山昌和氏に深く感謝の意を表す。

(昭和46年12月13日受付)

#### 文 献

- (1) 電気学会編：放電ハンドブック (昭38)
- (2) M. E. Zein & H. Tropper: Proc. Instn Elect. Engrs 103, Pt. C, 35 (1956)
- (3) 石井・難波・牧野：電学誌 91, 1119 (昭46-6)
- (4) 河村：電学誌 78, 389 (昭33-3)
- (5) R. M. Russek: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-86, 1, 34 (1967)
- (6) P. F. Ast: A More Sensitive Method for Dielectric Strength of Insulating Oil. A. S. T. M. Bulletin (250) p. 36 (Dec. 1960)