

OF ケーブル用絶縁油の選択と不純物処理効果

Selection and Degassing Effect of Insulating Oil for Oil-Filled Cable

下山田富保* 橋本博治* 庄司民良*

内 容 梗 概

OF ケーブル用絶縁油はその物理的性質が使用条件に合致し、電氣的にもすぐれた性質をもつものでなければならない。本報告では数種の市販絶縁油について加熱劣化と光透過率の関係を求め、誘電正接と光透過率との間にもある一定の関係の存在することを確めた。

さらに絶縁油中に含まれる不純物と電氣的特性との関連性について検討し、それぞれつぎのような点をあきらかにした。すなわち

油中水分量の増加によつて油の破壊電圧は直線的に減少し、含有量が 10 p.p.m. から 60 p.p.m. になると 60% に減少する。

油中空気量についても同様の関係があるが、この場合には微量空気の影響がとくに大きい。一方、油浸紙の誘電正接は油中空気量の増加に伴つて急激に増大する。

[I] 緒 言

OF ケーブルの絶縁層は良質のクラフト紙とこれに含浸する絶縁油からなり、この絶縁油はケーブルの急激な温度変化時においても絶縁層内の圧力が、ある範囲内に止まるように即応できる低粘度油を使用する。さらに OF ケーブルが 60 kV 以上の重要な送電あるいは配電幹線に使用されるために、絶縁紙および絶縁油の性能は物理・化学的および電氣的に優秀であるばかりでなく、寿命の永いことが重要である。特に絶縁油は実際のケーブルに含浸する場合に、油中の水分、空気およびその他の不純物の除去について詳細な検討が必要である。これら不純物が絶縁油の性能におよぼす影響について参考となる報告もみられるが、ケーブル製造上の実際に応用する場合なお多くの問題点があると考えられる。

本報告においては、主として上述の問題点を考慮に入れて絶縁油の特性と不純物による電氣的性質の変化およびその除去効果などについて報告し、御批判を仰ぐ次第である。

[II] 絶 縁 油

(1) 絶縁油の選択

OF ケーブル油の選択についてはすでに本誌^{(1)~(2)}およびその他の文献に示されているが、物理的・化学的および電氣的特性のすべての点において優秀でなければならない。特に酸化安定性およびガス発生傾向(耐コロナ性)などについて十分検討する必要がある。

第1表は代表的市販絶縁油4種について測定した物理・化学および電氣特性を示した。CおよびD油はAおよびB油に比較して常温における粘度がかなり高いが、OF 油としてなら支障ないことを確めた。硫酸吸収量とオレフィン不飽和炭化水素量は酸化安定性と、また比

* 日立製作所日立電線工場

第1表 絶縁油の特性
Table 1. Properties of Insulating Oils

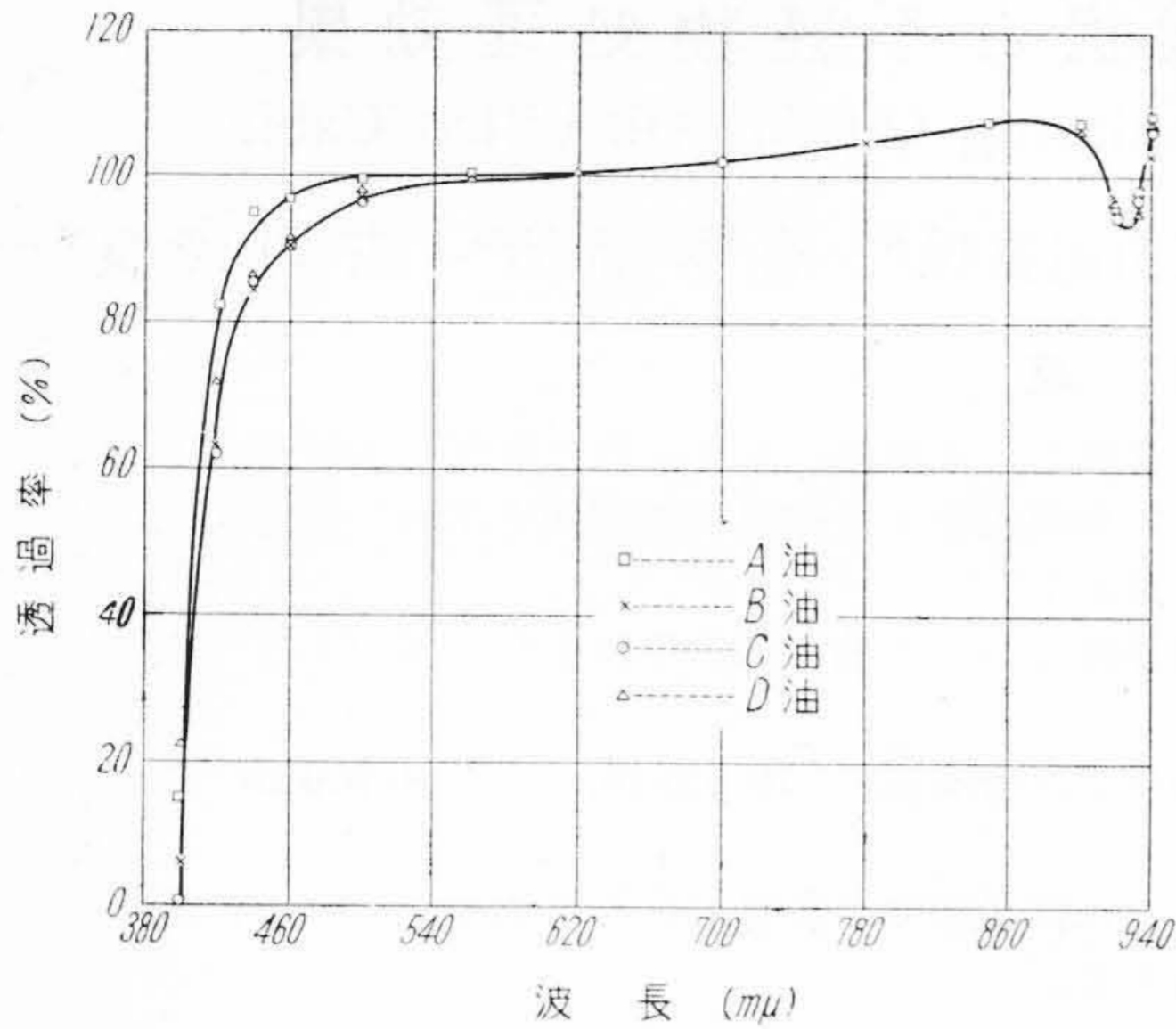
項 目	試 料				
	A	B	C	D	
比 重 (20/4°C)	0.896	0.881	0.899	0.896	
凝 固 点 (°C)	-30.0	-30.8	-40.0	-41.5	
引 火 点 (°C)	138	142	159	155	
アニリン点 (°C)	59.9	72.4	69.4	69.7	
粘 度 ※	20°C	89	87	148	199
	50°C	44	45	5.4	57
	75°C	35	35	3.9	41
比 分 散 (δ^{20})	129.2	117.5	118.0	112.6	
フルフラーン 吸 収 量 (%)	12	8	7	3	
硫酸吸収量 (%)	29.0	20.7	19.5	11.0	
オレフィン不 飽和炭化水素 (%)	4.3	5.5	4.2	2.6	
誘電正接 (%) 60c/s	50°C	0.01	0.01	0.01	0.01 以下
	80°C	0.05	0.19	0.04	0.02
固有抵抗 (Ωcm)	50°C	7.5×10^{13}	4.35×10^{13}	11×10^{13}	6.38×10^{13}
	80°C	1.99×10^{13}	1.27×10^{13}	1.78×10^{13}	1.42×10^{13}

※ セイボルト粘度計

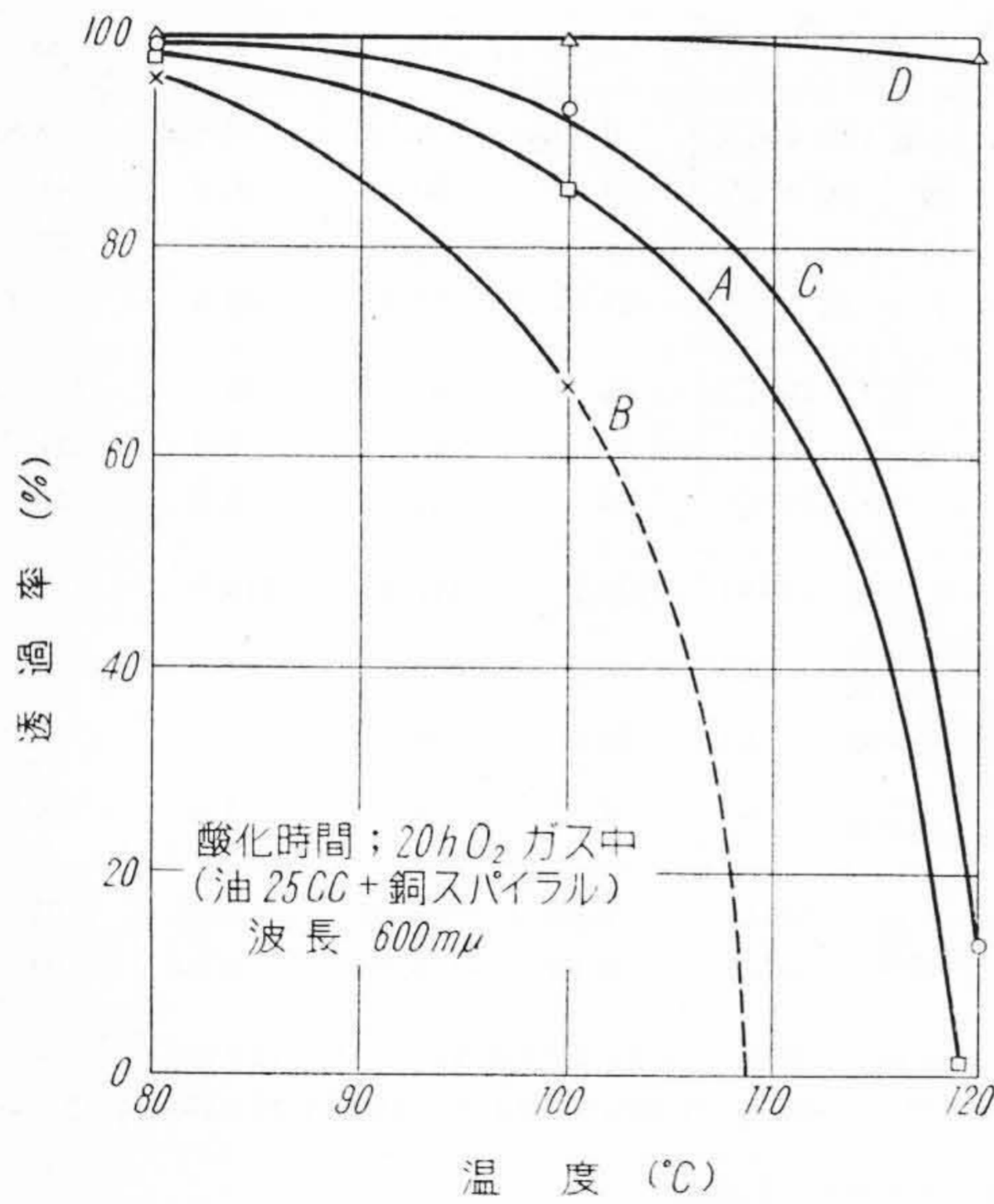
分散とフルフラーン吸収量は耐コロナ性とそれぞれ深い関係のあることが知られている。筆者らの実験においても後に述べるように同様な関係が認められた。電氣特性では C および D 油がすぐれているが酸化安定性およびガス安定性の試験結果による総合判断が必要である。

(2) 酸化安定性

酸化安定度試験は少量 (5 cc) の試料で短時間 (約 1 分) に測定できる酸化劣化による着色の変化を日立分光光度計 (EPB-L 型) で測定する方法をとった。油の酸化方法および装置は日立安定度試験法⁽⁷⁾に準じ、窒素ガス気流中で加熱劣化させる場合、市販の窒素ガスをさらに酸素吸収剤を通して精製した。



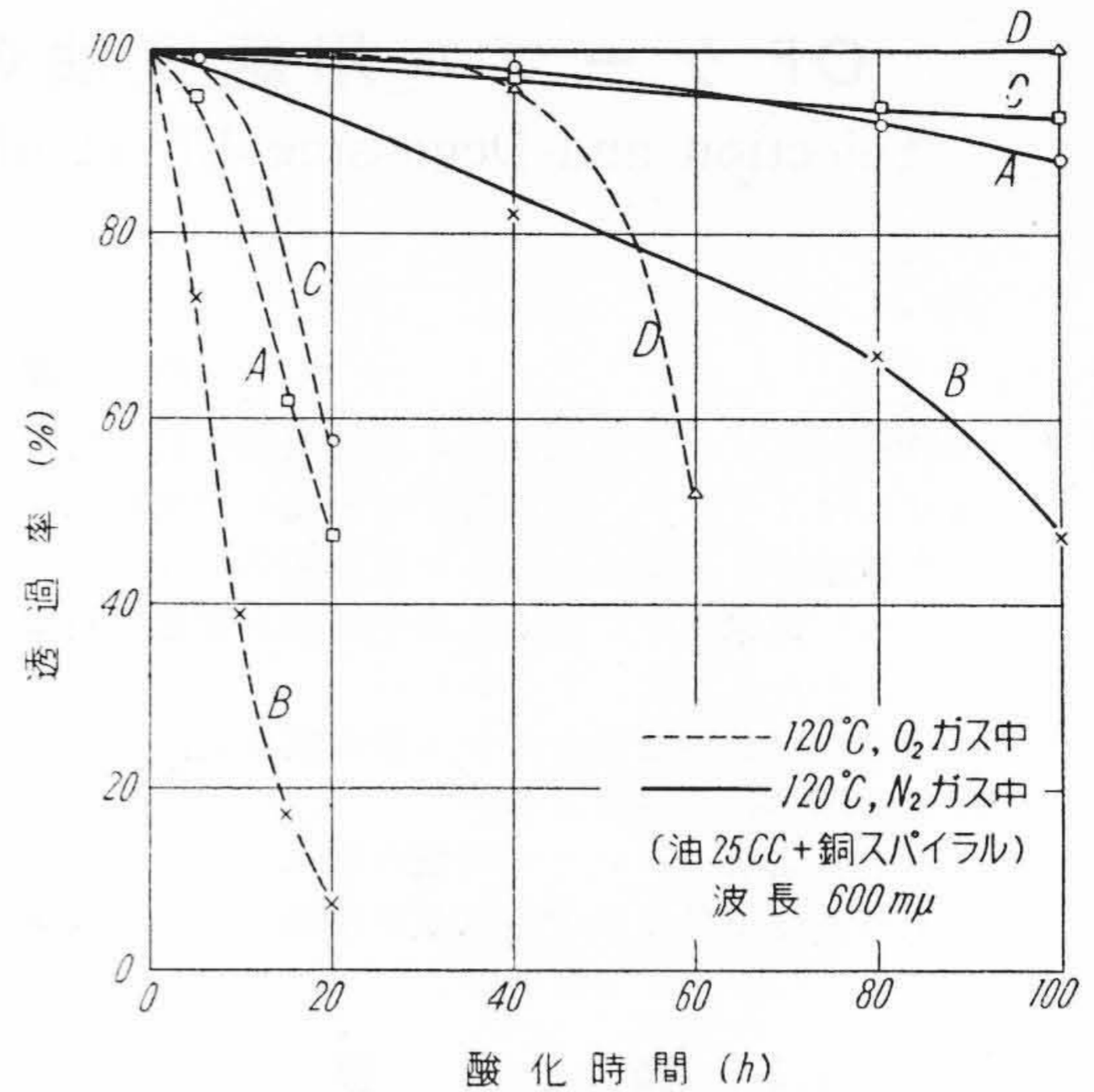
第1図 原試料(酸化前)の透過率
 Fig.1. Transmission-Wave Length Curves for Non-Oxidized Oil Samples



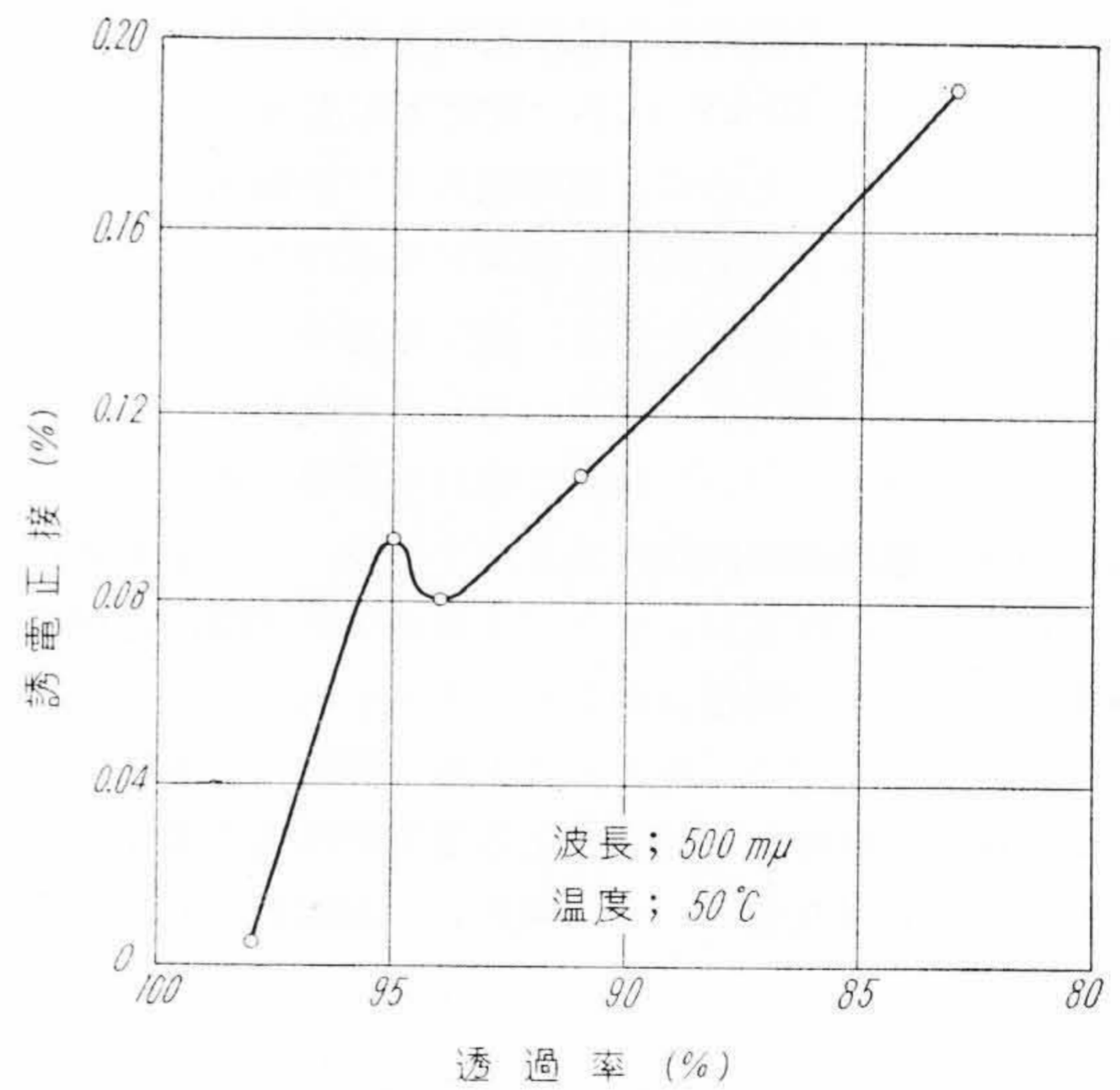
第2図 絶縁油の酸化温度と透過率の関係
 Fig.2. Relation Between Transmission of Oils and Oxidation Temperature in Oxygen

油の劣化と色の変化との関係については J. C. Balsbaugh 氏および J. C. Oncley 氏⁽⁶⁾も実験して、特にセタンは電気的特性との間に化学的劣化よりも透過率との間に、より密接な関係のあることを認めている。

第1図は原試料の 400~930 mμ にわたる透過率曲線で、400 mμ における透過率の高いほど電気特性もすぐれているが、J. C. Balsbaugh 氏⁽⁵⁾なども同一原油から精製した油について実験した場合同様な傾向を認めている。920~930 mμ における吸収帯は R. G. Larson 氏⁽⁸⁾などによれば多環の芳香族化合物で非常に安定である



第3図 絶縁油の酸化時間と劣化度(透過率)の関係
 Fig.3. Relation Between Transmission of Oils and Oxidation Times in Oxygen and Nitrogen

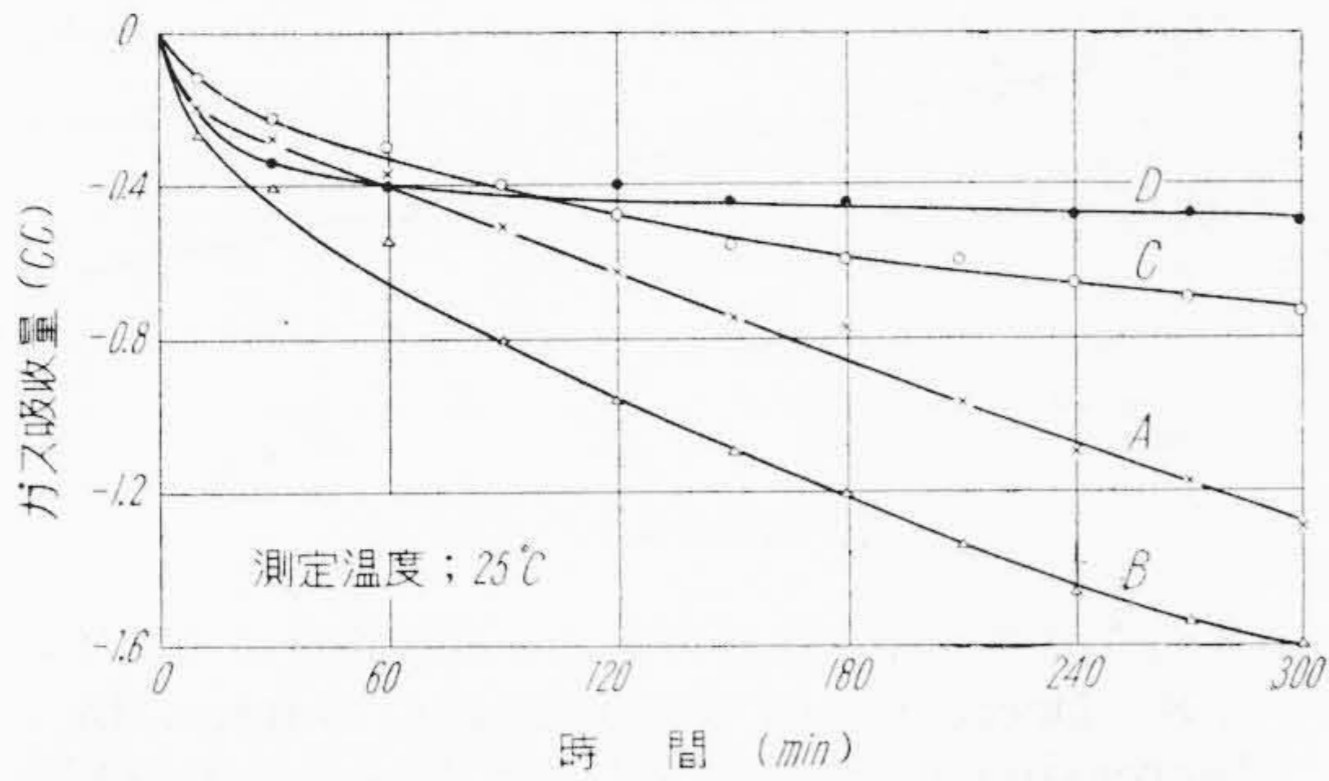


第4図 D油の透過率と誘電正接の関係
 Fig.4. Light Transmission vs. Electrical Deterioration of D-Oil

ため酸化防止剤的の効果が認められている。

第2図は 80~120°C の酸素雰囲気中において 20 時間酸化した後の各油の透過率で A, B, C 各油は 100°C 以上で急激に着色を増して、その透過率は減少する。特に B 油ははなはだしい。D 油は 120°C 20 時間酸化されてもきわめてわずかな変化にとどまり、酸化安定性に富む油であることを示している。

さらに第3図の酸素および窒素ガス中における酸化時間と透過率との関係からも D 油が他に比して断然すぐれていることがあきらかで、C, A 油がこれにつき、B 油



第5図 絶縁油の耐コロナ試験結果
Fig. 5. Test Results of Gassing Tendencies of Insulating Oils by the Pirelli-Thornton Apparatus

はオレフィン不飽和炭化水素含量が不適當であるためもつとも酸化されやすいものと考えられる。D油が酸化安定性にすぐれているのは第1表の硫酸吸収量およびオレフィン不飽和炭化水素量よりあきらかなように F. M. Clark 氏⁽⁴⁾などの最適芳香族含率 (4~8%) の油に近いことになるものと思われる。

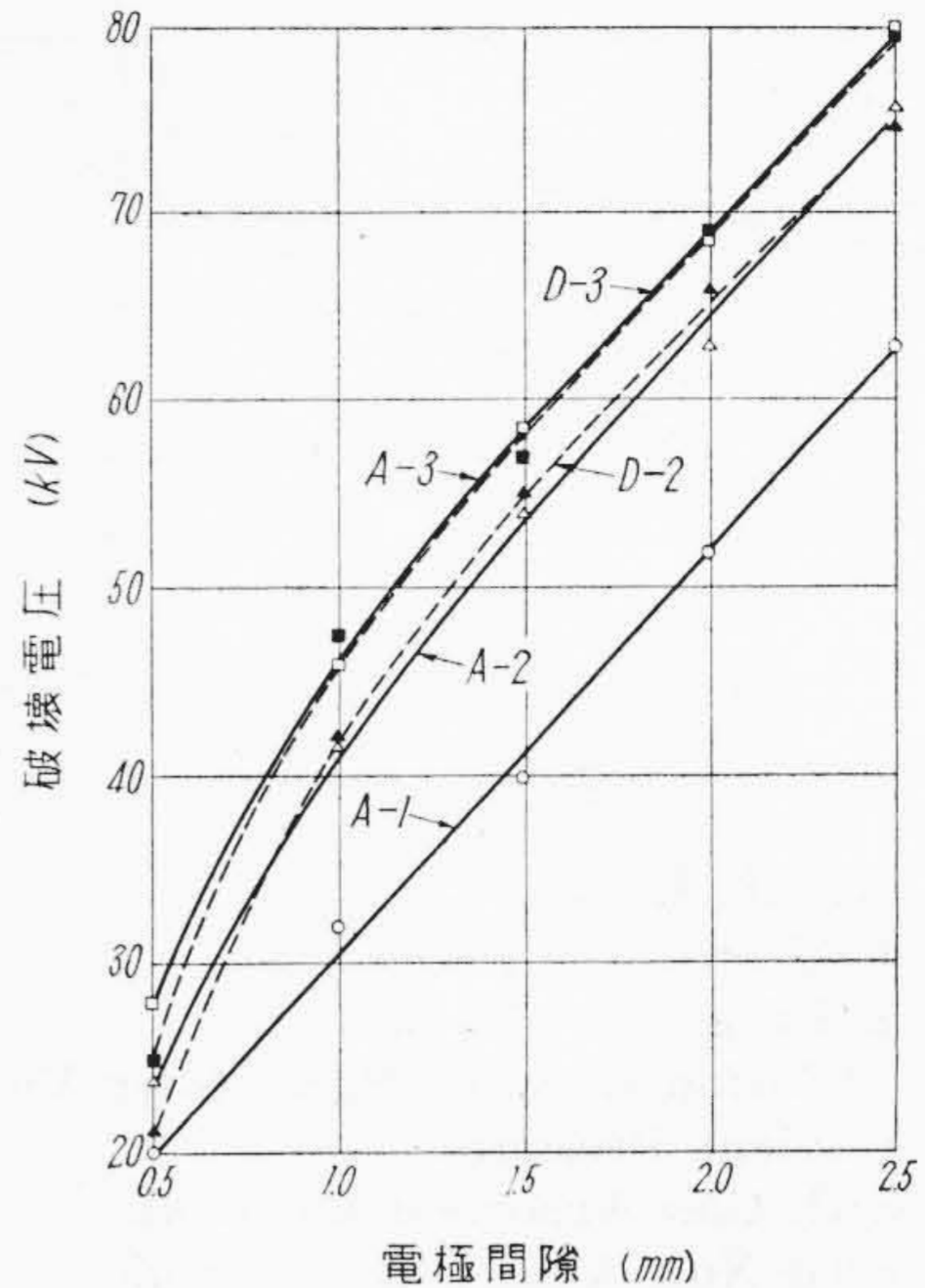
D油の透過率と誘電正接の関係は第4図に示したが、透過率の低下に伴い誘電正接は急昇して一たん減少するが、ふたたび漸増する傾向をたどる。A油の場合もD油のように幾分緩やかではあるが同様の傾向がみとめられた。これは原油、その精製法および微量成分の相違などによって酸化生成物の種類およびその量が異なるためであり、透過率と誘電正接の関係を一般化することはできないが、各油について同様の関係を求めておけばケーブル製造中の油の管理手法に応用することが可能である。

(3) 耐コロナ性

各油について Pirelli-Thornton 型耐コロナ試験器⁽¹⁾を用いて試験した結果は、第5図のようにいずれもガス吸収性で安定であった。フルフラール吸収量(第1表)が3%であるD油は80°Cにおいてもガス吸収性であることが認められた。油の比分数からガス安定性を求めている報告⁽⁹⁾もあるが、測定温度にあまり影響されないフルフラール吸収量⁽¹⁰⁾は耐コロナ性を知る上に安全な指標となる。

[III] 絶縁油の破壊電圧

絶縁油の破壊電圧は非常に多くの因子たとえば、塵芥、水分、空気あるいは試験条件によって左右されることは一般に認められた事実であり、これらの箇々の因子の影響をしらべた報告も数多くみられる。しかしながら OF ケーブル油のように非常に絶縁性能のよい油については詳細な報告は未だみられないようである。特にこの種の低粘度油は水分、空気などの不純物を吸収しやすく、これらの不純物の吸収によって絶縁性能が急速に低下する



第6図 破壊電圧と電極間隙の関係
Fig. 6. Breakdown Voltage of Insulating Oil vs. Gap Length

ので、ケーブル製造においてはこれらの不純物をできるだけ除去する必要がある。さらに破壊電圧の値を知ることによって含有する不純物の量を知り現場作業における品質管理の一手法として非常に重要な意義をもつものである。筆者らは以上の観点から実際の作業を進めており、油の破壊電圧に対する種々の因子の影響をしらべた。

(1) 間隙距離による変化

使用した電極は直径 12.5mmφ の真中製球電極で、これをガラス容器中に収めたものである。一回の試験に要する油量は約 500 cc であり、試験データは7回のうちから最大、最小値を除いた5回の平均値をもつて示す。その他の試験条件はすべて規格に準拠して行った。

第6図はAおよびD油の破壊電圧と間隙距離の関係である。間隙距離が 1.0~2.5 mm の範囲では大体において直線関係が成立し、その傾斜は油によってほとんど変化しない。一般に油の破壊電圧は 2.5 mm 間隙の場合の値をもつて比較することになっているので、以上の結果を使用して任意の間隙距離による試験データから 2.5 mm への換算式を求めると次式の通りである。

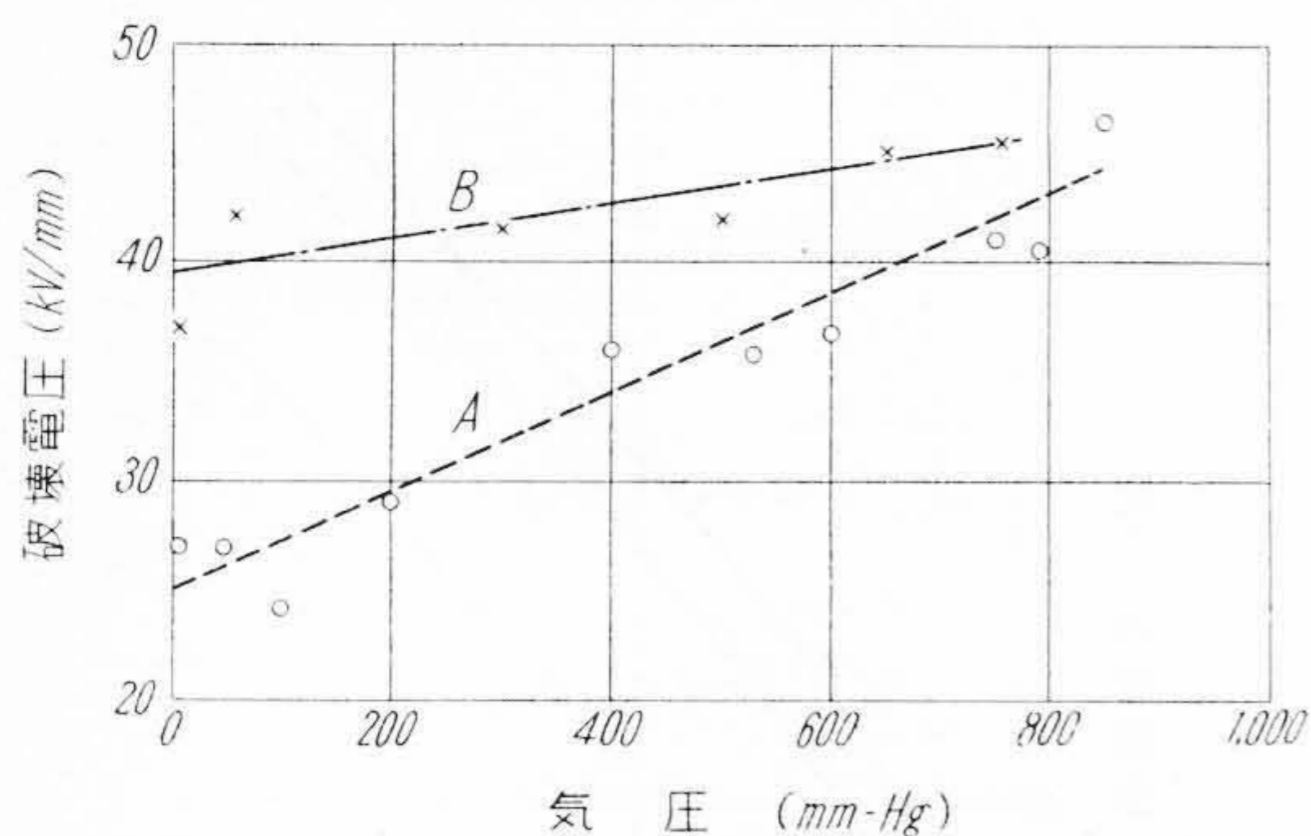
$$E_{2.5} = E_l + k(2.5 - l) \dots\dots\dots (1)$$

ただし $E_{2.5}$, E_l : 電極間隙が 2.5 mm および l mm のときの破壊電圧 (kV)

k : 油によって定る定数 (20~24 kV/mm)

l : 間隙距離 (mm)

以上のように 1.0mm 程度の小さい間隙で行った試験結果から標準間隙に対する換算は容易に行うことができ



第7図 破壊電圧の圧力による変化

- A: 電極吸着ガスのある場合
- B: 電極吸着ガスのない場合

Fig.7. Relation Between Breakdown Voltage and Ambient Pressure

- A: with Gas Absorbed Electrode
- B: with Non Absorbed Electrode

るわけであり、しかも A および D 油のように粘度の相当異なる油に対しても同一の換算係数が適用できる。実際的な応用としては試験変圧器の小型化および移動用試験機の製作が容易となる。

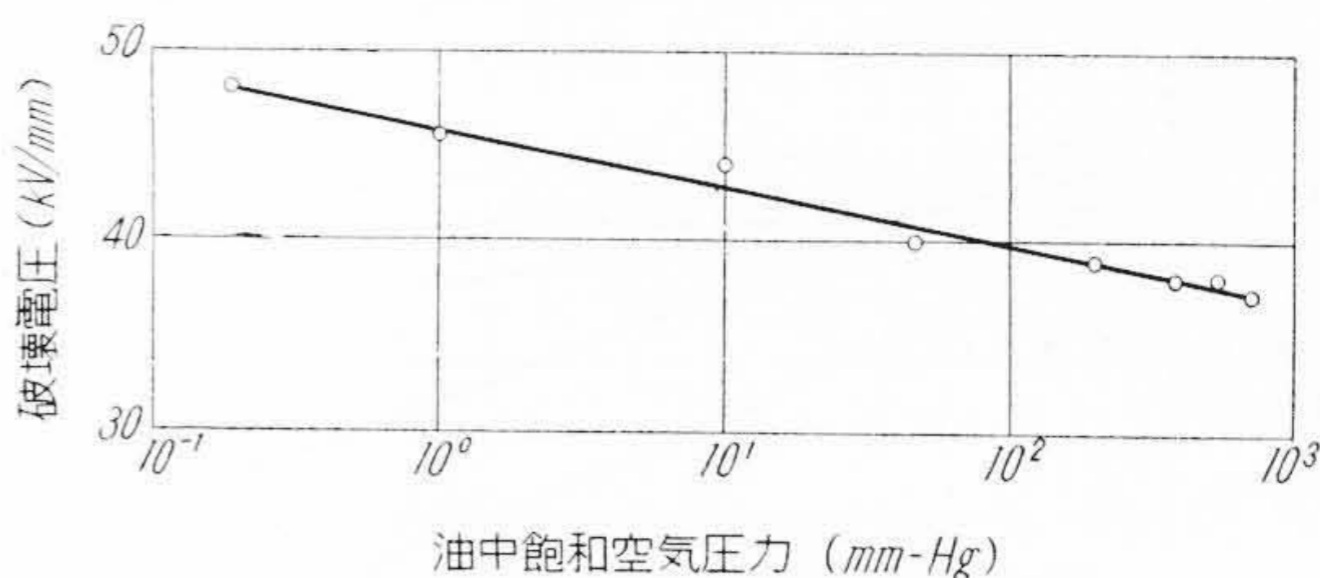
(2) 電極吸着ガスの影響

液体の絶縁破壊機構は衝突イオン化の進行による固有の純電氣的破壊と、含有ガスあるいは電極吸着ガス中のイオン化、あるいは不純物が原因となつている破壊機構とに分けられる。一般に現用されている油の不純物を完全に除去することは実際的に不可能であるために、ほとんどが後者による破壊と考えられる。特に電極吸着ガスの影響は供試物には無関係な因子であるから、これがほとんど影響しないような状態で破壊試験を行う必要がある。

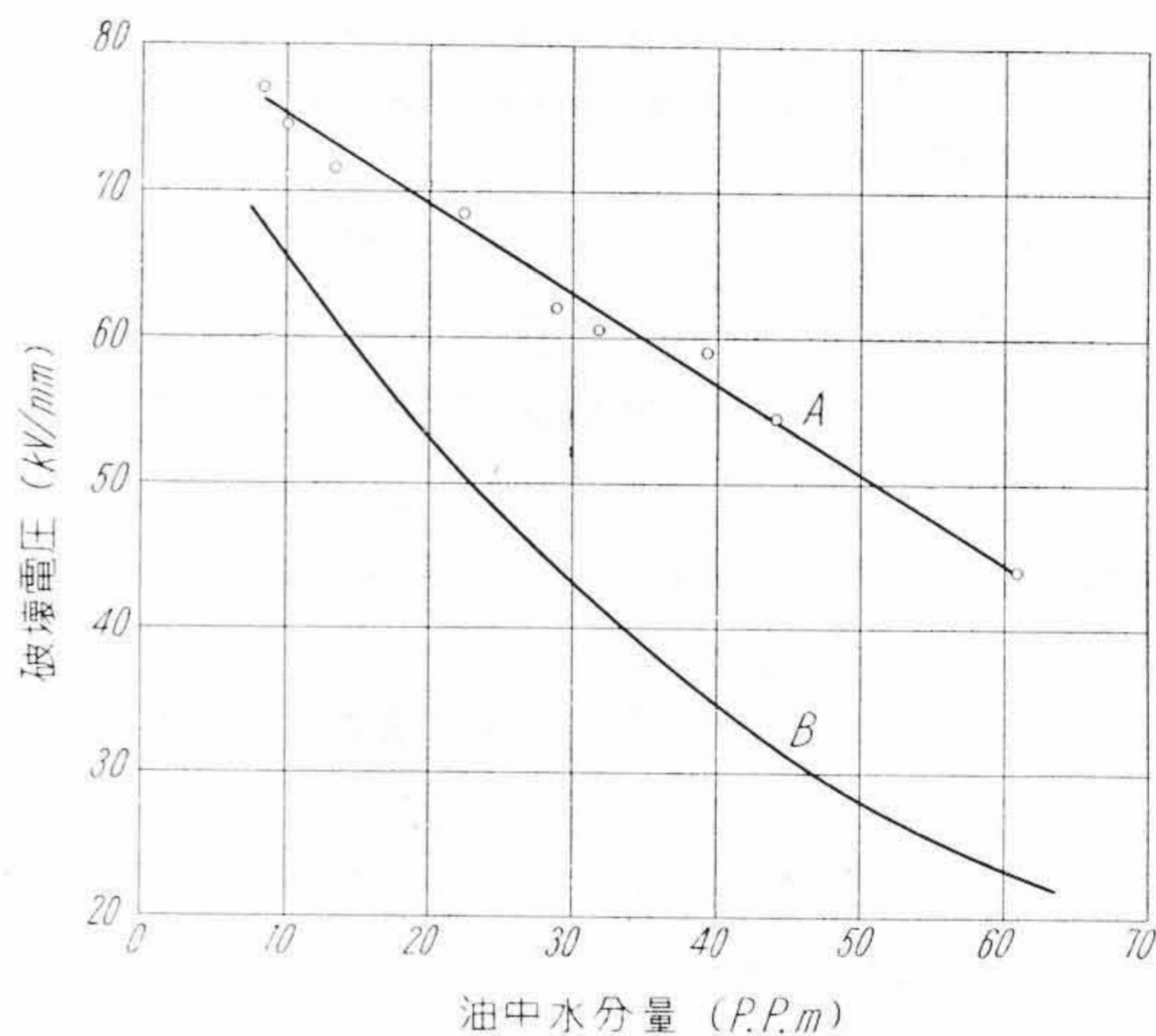
第7図はこの関係を示すものであり、電極吸着ガスの多い場合には低圧力における破壊電圧の低下が非常に大きい(曲線 A)、一方電極を 0.05 mm-Hg 30 分真空に保つて表面吸着ガスを除去した場合には圧力による変化が非常に少ない。以上のように一応電極吸着ガスの影響およびその真空処理の必要性があきらかである。しかしながら常圧(1気圧)における両者の差は実際的にほとんど問題ないと考えられる。なお電極材料の影響については吸着ガスがなければほとんどないという報告もあり、学問的にはなお多くの問題がある。

(3) 含有ガスおよび水分の影響

一般に油は容積比で 10~20% の空気を含んでいるといわれており、これが油の破壊電圧に影響をもっていることは前述のようにイオン化現象が油の破壊の原因と考えれば十分に推測できることである。筆者らはこの関係を求めるために一度完全に脱気処理した油に乾燥空気を含有させ破壊試験を行った。含有空気量の調整は一定圧



第8図 油中飽和空気圧力による破壊電圧の低下
Fig.8. Decrease of Breakdown Voltage by Increasing of Saturated Air Pressure in Oil



第9図 油中水分量増加による破壊電圧の低下
A: 筆者 B: 山口⁽¹³⁾

Fig.9. Decrease of Breakdown Voltage by Increasing of Water Content in Oil
A: Author's B: Yamaguchi's⁽¹³⁾

力の乾燥空气中で 24 時間攪拌してその圧力における空気を飽和させた。

第8図は飽和空気圧力と破壊電圧の関係であるが、飽和空気圧力と含有空気との間には直線関係⁽¹²⁾があるのでこの関係は直ちに含有量との関係を示すものである。含有空気の増加による破壊電圧の低下は前述のようなガス中の衝突イオン化に起因するものと考えられるが、ガスが油に溶解している状態が明瞭になればいつそうあきらかな説明が可能と考えられる。

水分も空気と同様に常態では 20~30 p.p.m. 含有されている。水分の含有量と破壊電圧の関係については多くの報告があるが、空気と水分とがともに含有された場合の報告が大多数で水分のみの影響に関するデータはほとんどみられない。これに対し筆者らは一度完全に脱気脱水された油に水蒸気のみを触れさせ適当に水分を吸収させた。

以上のようにしてえられた試料の破壊試験と水分の測定を行った。その結果を示すと第9図に示す通りである。(曲線-A) これに最近発表された山口氏⁽¹³⁾のデータ

を比較して示すと同図 曲線-B の通りとなる。両者の絶対値の間にはかなりの差があるけれども、後者は種々の油についての平均値であり、かつ、水分と同時に空気(どの程度の含有量か不明)も含まれている場合であるので妥当な差であると考えられる。

以上の結果の示すように油の破壊電圧は含有水分および空気の増加によつて急速に低下することがあきらかである。従来無視されていた微量空気ですえも油の破壊電圧を相当低下させることは OF ケーブルの性能向上にとつて非常に重要な特性である。OF ケーブルは SL ケーブルあるいはガス圧ケーブルなどのように絶縁体内にボイドの存在をゆるさないから、その絶縁破壊の機構も比較的簡単であり、まず油浸紙の間の油膜の破壊から生ずるといわれている。事実、この考え方から出発して薄紙の使用が提案されている例⁽¹⁴⁾もあるので油の破壊電圧向上は直ちにケーブル破壊電圧の上昇となるものと期待される。

〔IV〕 油浸紙の電気的特性

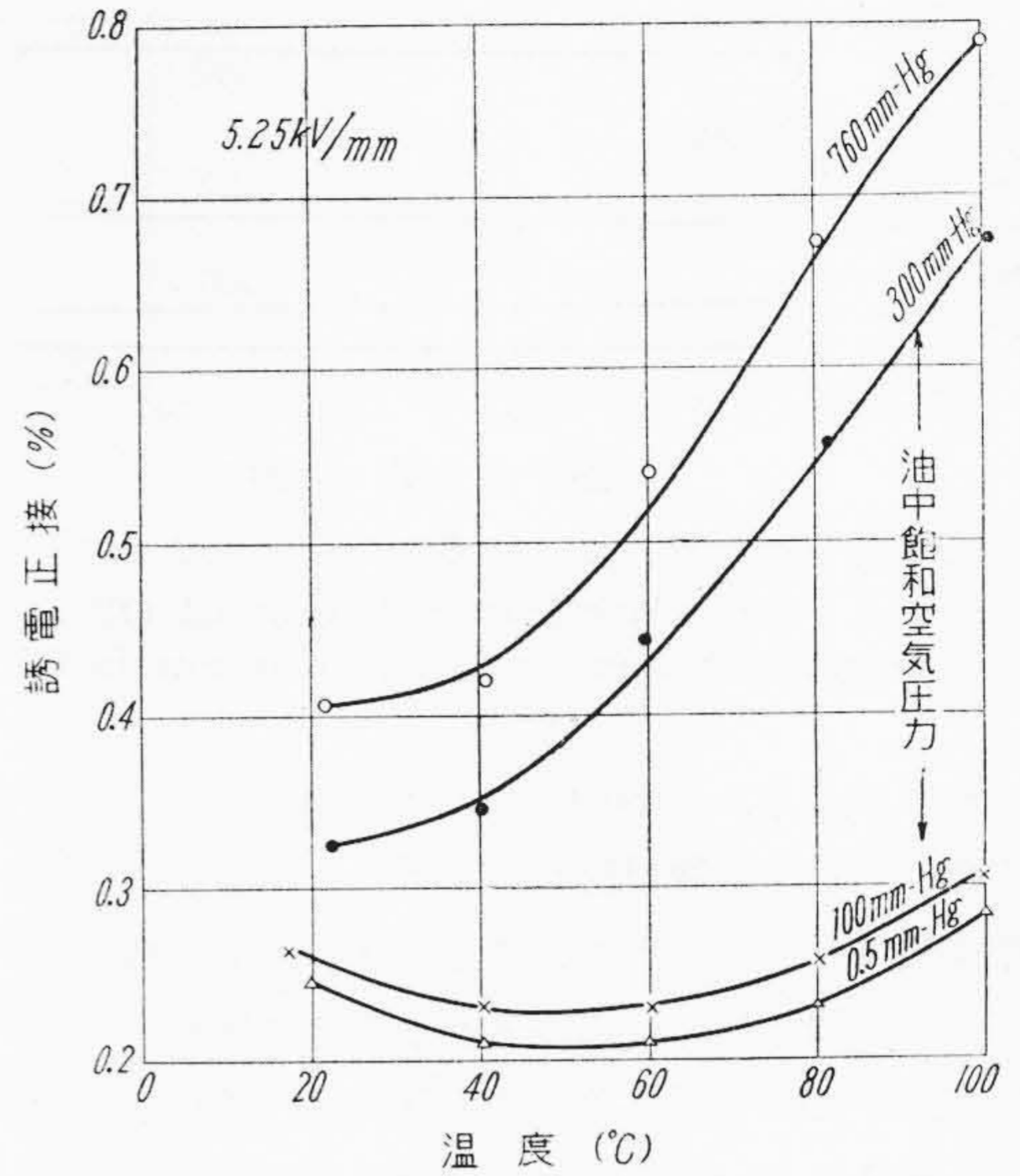
(1) 試料および処理法

油浸紙の電気的特性、特に誘電正接は含有不純物によつて大幅に影響されるが、OF ケーブル用油浸紙においては油の粘度が低いために油中の不純物による誘電正接の増加がはなはだしい。この点をあきらかにするためにつぎのような実験を行つた。

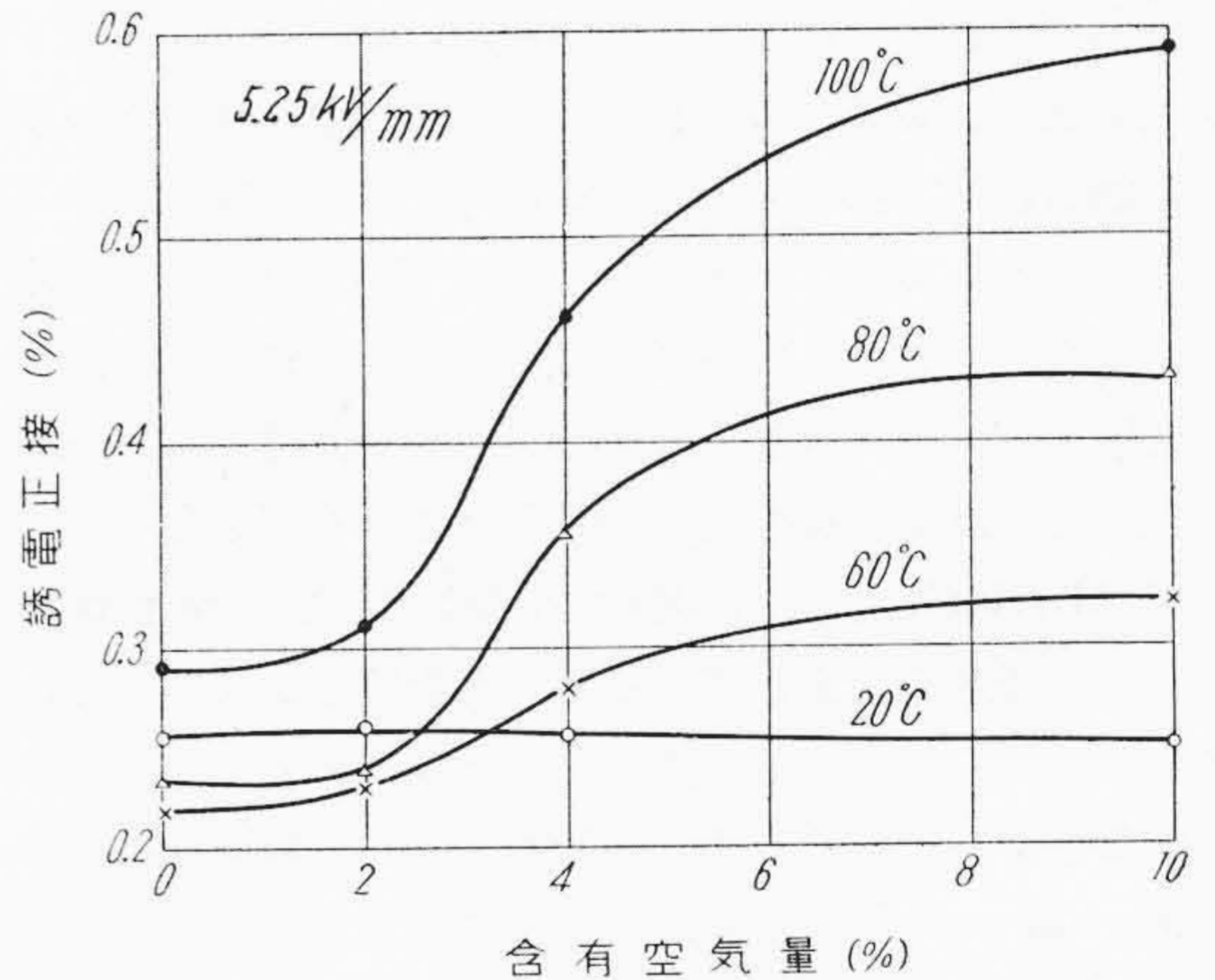
実験に使用される試料の構造には、平板電極間に試料を 2~3 枚重ねる方法、円筒状に巻く方法などがあるが、筆者らは試料作製の難易、試料温度の正確な測定、試料以外の不純物の影響を避けるなどの点を考えてコンデンサーエレメント型の試料を採用した。本試料の乾燥状態の静電容量は約 0.02 μ F、有効絶縁紙枚数は 3 枚である。試料を同一条件で予備乾燥、真空乾燥を行い乾燥が十分に終了してから、適当の空気あるいは水分を含有する油を含浸させる。絶縁紙の乾燥条件によつて乾紙中の水分量が変化するためにその誘電正接が変化するが、以下の実験においては乾燥真空度 0.01 mm-Hg 以下とし、乾燥条件による影響をできるだけ少なくするように努めた。さらに油を含浸させる前に特性を測定し同一のものとした。含浸に使用した油は完全に脱気、脱水処理を行つた後適当の水分あるいは空気を含有させたものである。

(2) 油中空気の影響

油中の空気量を適当に変えた場合の油浸紙の誘電正接—温度特性を示すと第10図の通りである。油中空気の多い試料は高温における誘電正接の増加が大きく、電圧特性においては低電圧における増大がみられる。この特性



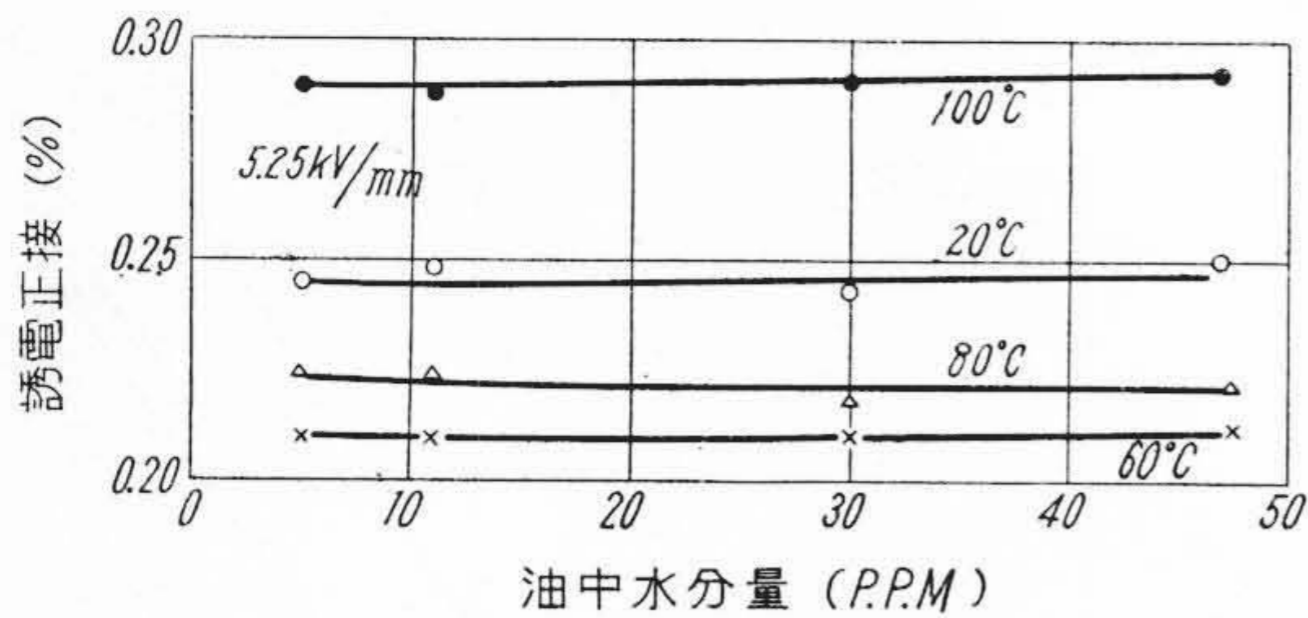
第10図 油浸紙の誘電正接—温度特性
Fig.10. Temperature Characteristics of Dielectric Power Factor of Oil Impregnated Paper



第11図 油中空気量による油浸紙の誘電正接の増加
Fig.11. Increase of Dielectric Power Factor of Oil Impregnated Paper by Increasing of Air Content in Oil

は C. G. Garton 氏⁽¹⁵⁾が指摘しているようなイオンの限定微小区間における電圧振動にもとづくものと考えられるので、油中にとけ込む空気の状態を示すものである。

これらの試料の油圧を変化すると、圧力の減少に伴つて誘電正接の増大が認められるが、これは油中溶解空気がガス状となつてイオン化を生ずるためと考えられる。しかしながら圧力の高い場合においても(空気が完全に溶解していると考えられる場合)誘電正接は大きいので前述の特性がガス状に分離した空気のイオン化のみにもとづくとは考えられず、なんらかの他の因子の変化によるものと考えられる。



第12図 油中水分量と油浸紙の誘電正接の関係
Fig.12. Dielectric Power Factor of Oil Impregnated Paper vs. Water Content in Oil

これらの結果から 80°C における誘電正接と含有空気量の関係を示すと第11図に示す通りである。すなわち、油中空気量が2%以上では誘電正接の増加が激しい。したがって実際作業時における油中残留空気量の制限には特に留意する必要がある。油の熱劣化、破壊電圧のためにも、0.01%以下に制限する必要がある。

(3) 油中水分の影響

前述と同様に処理し、油中水分のみを含有させた油浸紙の誘電正接を示すと第12図の通りである。各温度における誘電正接は油中水分量 47 p.p.m まではほとんど変化しない。常態では油中に含有される水分量が30 p.p.m を超えることはほとんどないと考えられ、筆者らの実験においても 60°C 以下においては 47 p.p.m 以上の水分を含有させることは不可能であった。高粘度油に関する佐藤⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾らの実験によると、油浸紙の水分量が0.2%以上では誘電正接の増加が大きいことを報告しており、F. M. Clark 氏⁽¹⁸⁾の実験では油中水分量が50 p.p.m までは油浸紙の誘電正接にほとんど影響をおよぼさないことがあきらかである。筆者らの実験においても使用した紙と油の容積はそれぞれ 150 cc および 2,000 cc であるので 50 p.p.m の水分が全部紙に吸着されたとしても紙中の水分量の増加は 0.073% にすぎない。したがって油浸紙の誘電正接は大体において乾燥工程中における絶縁紙中の残留水分によって決定され、含浸油中の水分の占める影響は非常に小さく、無視されうる程度である。現在の段階では絶縁油の処理技術が高度に向上しているので油浸紙の誘電正接は絶縁紙の特性向上に負うところが大きく、ケーブルの高電圧化に伴い、絶縁紙の電気的特性の改良を行う必要が痛感される。

[V] 結 言

(1) OF ケーブル用絶縁油の選択は重要な問題で、電気特性、劣化特性およびガス安定性を比較検討した結

果、市販 OF ケーブル用絶縁油 D 油が良好な成績を示した。

(2) OF ケーブル油の劣化測定方法として述べた透過率による方法は試験試料が少なく、短時間で測定できる利点があり実用しうる便利な方法である。しかしながら、透過率と電気特性との関係は非常に複雑であるので、試油ごとにこの関係を求めておく必要がある。

(3) OF ケーブル油の破壊電圧は含有水分および空気の増加によって急速に低下するが、従来無視されていたような非常に微量の含有量においてもこの傾向がみられる。したがって実際作業における絶縁油の脱気および脱水には特に留意する必要がある。

(4) 油中の含有空気は油自身の破壊電圧を低下させ特に微量部分においてその変化が大きい。また空気を含む油を浸させた油浸紙の誘電正接は非常に大となり、その特性には興味ある関係がえられた。これらの結果からケーブルの誘電正接および破壊電圧の向上のためには油中空気の除去が特に重要であることがあきらかとなった。

擧筆に当り、本研究に対し種々御指導を受けた東北大学鳥山四男教授、日立製作所日立電線工場内藤部長、久本課長を始めとし、実際面の御指導、御協力をうけた関係各位に厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 高橋：日立評論別冊第9号 33 (昭30)
- (2) 高橋：日立評論 36 95 (昭29)
- (3) C. E. Trautman, W. N. Arnquist: Ind. Eng. Chem. 32 1535 (1940)
- (4) F. M. Clark: Ind. Eng. Chem. 31 327 (1939)
- (5) J. C. Balsbaugh, A. H. Howell, A. G. Assaf: Ind. Eng. Chem. 32 1497 (1940)
- (6) J. C. Balsbaugh, J. C. Oncley: Ind. Eng. Chem. 31 318 (1939)
- (7) 高橋：日立評論 34 807 (1952)
- (8) R. G. Larson, R. E. Thorpe, F. A. Armfield: Ind. Eng. Chem. 34 183 (1942)
- (9) 柴田, 川井：電学誌 73 827 (昭28)
- (10) Theo Wörner: ETZ 72 655 (1951)
- (11) 平野：電学誌 63 463 (昭18)
- (12) F. M. Clark: Frank. Inst. 25 39 (1933)
- (13) 山口, 山岡：電気3学会東京支大 108 (昭28.10)
- (14) L. Domenach: C.I.G.R.E. II 217 (1954)
- (15) C. G. Garton: J.I.E.E. 84(II) 103 (1941)
- (16) 内藤, 島, 佐藤：日立評論測定特集号 (別冊2号) 7 (昭8)
- (17) 内藤, 島, 佐藤：電学誌 74 26 (昭29)
- (18) F. M. Clark: Ind. Eng. Chem. 44 887 (1952)