

ケーブル油の放電による劣化

Degradation of Cable Impregnated Oil with Electric Discharge

加子泰彦* 下山田富保**

内容梗概

低ガス圧ケーブルではほかのケーブルと異り、イオン化開始電圧が使用電圧に比較的接近している。したがってこのケーブルに使用する含浸用絶縁油に対しては、放電による性質の変化、特に電気的性質の変化について検討する必要がある。本研究は低ガス圧ケーブルの含浸油として使用される〔XXヘビーオイル+PO-3000〕と従来ソリッド型ケーブルに使用されてきた〔XXヘビーオイル+FFロジン〕の2種の絶縁混和物を対照として、放電により電気的性質の変化する様子を比較検討した。

放電によつては両者は劣化速度にかなりの差異はあるが、電気特性の変化はほぼ類似でまた、放電雰囲気における窒素の活性化による悪影響もほとんど認められなかつた。放電による劣化反応には一定の特性に漸近するような傾向が認められ、この最終状態の電気的性能は酸化劣化にくらべてその低下はいちじるしくないことが予想される。

〔I〕 緒言

電力ケーブル、静電蓄電器のように絶縁物として絶縁油含浸紙を用いる機器においては、使用する絶縁油の放電に対する安定性が寿命を左右する重要な問題である。たとえばOFケーブルなどでは、使用中になんらかの原因で油中にボイド(Void)が発生した場合ここから放電が起る。このとき油が放電によつてガス(主として水素ガス)を発生すれば、ボイドは増大し、放電はさかとなりついには破壊に至る。反対に油がガス吸収性であればボイドは消失し、放電は止み安全である。一方ソリッド型ケーブルでは使用中に熱による膨脹収縮の繰返しにより絶縁物中にボイドが発生する可能性があるが、この場合にはOFケーブルのような油の移動がないので、油のガス吸収性のみに性能維持を期待することはできない。

近年ソリッド型ケーブルよりも安定ある性能と保守上の利点のために、わが国でも20kVのケーブル系統に低ガス圧ケーブルが使用されはじめ、絶縁油の放電に対する性質というものも従来とはちがった観点より検討する必要ができてきた。低ガス圧ケーブルは、ソリッド型ケーブルと同様な方法で、絶縁油の含浸を行うが、傾斜地などに布設した場合、使用中に絶縁油の流下によるガス通路の閉塞が起るのをさけるために、余剰の油を除去するいわゆる油抜き工程を経るので、絶縁物中には窒素ガスの充填されたボイドが存在する。このため充填ガス圧1kg/cm²程度の低ガス圧ケーブルのイオン化開始電圧はほかのケーブルとことなり、使用電圧と比較的接近している。したがって使用中には微小ながらも局部的に放電が起ることが考えられ、これが長年月累積された場合にはケーブルの寿命を左右する要素となることが考え

られる。

一般に低ガス圧ケーブルでは自己回復作用といわれている現象があり⁽¹⁾、使用中にイオン化開始電圧が上昇する傾向がある。これは主として放電による油の移動が原因であるとされている。したがって従来問題とされた放電による油のガス発生、吸収は、自己回復作用には密接な関係があることは考えられるが、ガスを発生することがOFケーブルの場合のようにただちに致命的な欠点となることはない。これに対して放電の頻度はほかのケーブルにくらべて多いから、放電による絶縁油の電気的性質の変化が問題となる。

従来ソリッド型ケーブルの含浸油としては、鉱油に増粘剤としてロジンが多く添加使用されてきたが、近年合成化学の進歩がいちじるしく、わが国にも数年前より米国製合成油(PO製品正ブテンおよびイソブテンの重合物)が登場し、これが増粘剤として、または単独で含浸油として使用されるようになった。これら合成油の電気的性質は初期においては鉱油にくらべてはるかに良好なものであるが、放電による劣化はいちじるしいという報告もあり、ガス圧ケーブルの含浸油として使用することに対しては種々の批判がでている。本研究は放電による絶縁油の電気的性質の変化、特に長時間放電の影響をうけた場合について、PO-3000あるいはロジンを増粘剤とした2種の絶縁混和物と、各成分単独の場合の比較検討を行つたものである。

〔II〕 供試絶縁油

供試絶縁油は鉱油XXヘビーオイル(Sun Oil Co.)をベースとし、増粘剤にPO-3000(33.7%)を加えたものと、FFロジン(30%)を加えた2種の絶縁混和物およびXXヘビーオイル、PO-3000の単独のものについて実験を行つた。

* 日立製作所日立研究所

** 日立電線株式会社電線工場

〔III〕 実験方法

(1) 実験装置

放電による炭化水素の化学変化は放電条件により左右されるところが大きい⁽³⁾。したがって実験方法としては、実際のケーブルで起ると同様な化学変化が起るような装置を用いなければならない。このためにはまず第一に電極の電流密度は小さくとる必要がある⁽⁴⁾。また反応を加速するため、安定な放電を容易に持続させるためには気圧を減少させることがのぞましく⁽⁵⁾、一方また低ガス圧ケーブルでは充填ガスとして窒素を用いるが、この窒素ガスは放電が起つた場合には活性化されて絶縁油との化学変化を起すことが考えられるので⁽¹⁾、この点も同時に検討する必要がある。以上の諸点を考慮して、放電容器としては第1図に示すガラス製のものを用い、窒素ガスを 100 mmHg に充填して放電実験を行つた。温度は油槽中で 80°C に保ち、電圧約 20 kV、電流約 3 mA の条件で放電をさせた。

(2) 放電量の表示法

温度、圧力、放電容器などの物理的条件を一定にした場合には、化学変化に関する放電量は放電電気量（電流×時間）か放電電力量であらわすのが普通であるが⁽⁶⁾、放電電流中には多くの装置では化学反応に関係のない充電電流、高周波振動電流などが含まれ、回路条件の差異、また多くの放電容器を並列にして実験した場合には、容器の個々の微小な寸法差などによつて電流値がことなり、相互比較が困難となる。したがって本実験では放電電力量で表示することとし、測定にはシェリングブリッジ (Schering-Bridge) を用い、電源の基本波に対する放電エネルギーの測定を行つた。放電は主として容器内の気体部分で起るが、このエネルギーが全部絶縁油の化学変化に関するものとして、絶縁油の単位容積当りのエネルギーで示した。なお前記実験条件で 1 kWh/l の放電エネルギーをあたえるには約 3 時間を要する。

(3) 電源周波数

一般にこの種の実験では数百～数千 c/s の周波数の電源が用いられるが、本実験では 60 c/s と 160 c/s の場合を比較し、同一の放電エネルギーに対しては同等な変化をすることを確かめ、反応を加速する意味と設備の関係で 160 c/s を使用した。

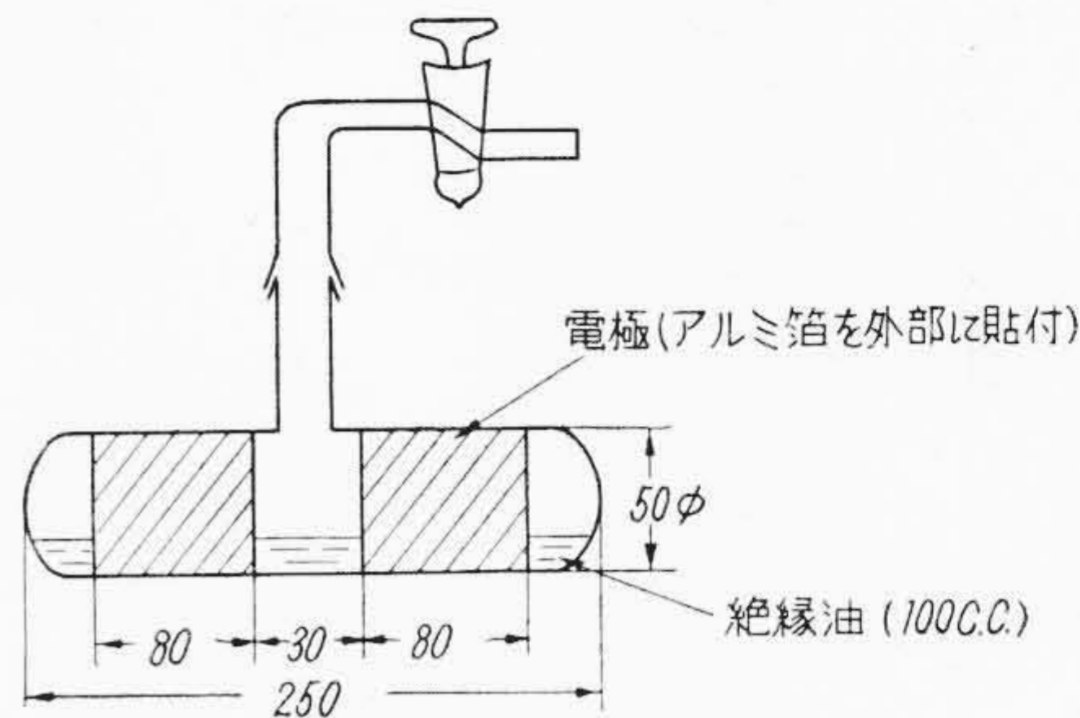
(4) ガス圧力の調整

放電によりガスを発生し圧力が增大するので、1時間ごとにガス圧力を調整し、また 8～9 kWh/l ごとにあたらしい窒素ガスを入れかえた。なお放電は 1 日に 8～9 時間（約 3 kWh/l）行い、累積したものである。

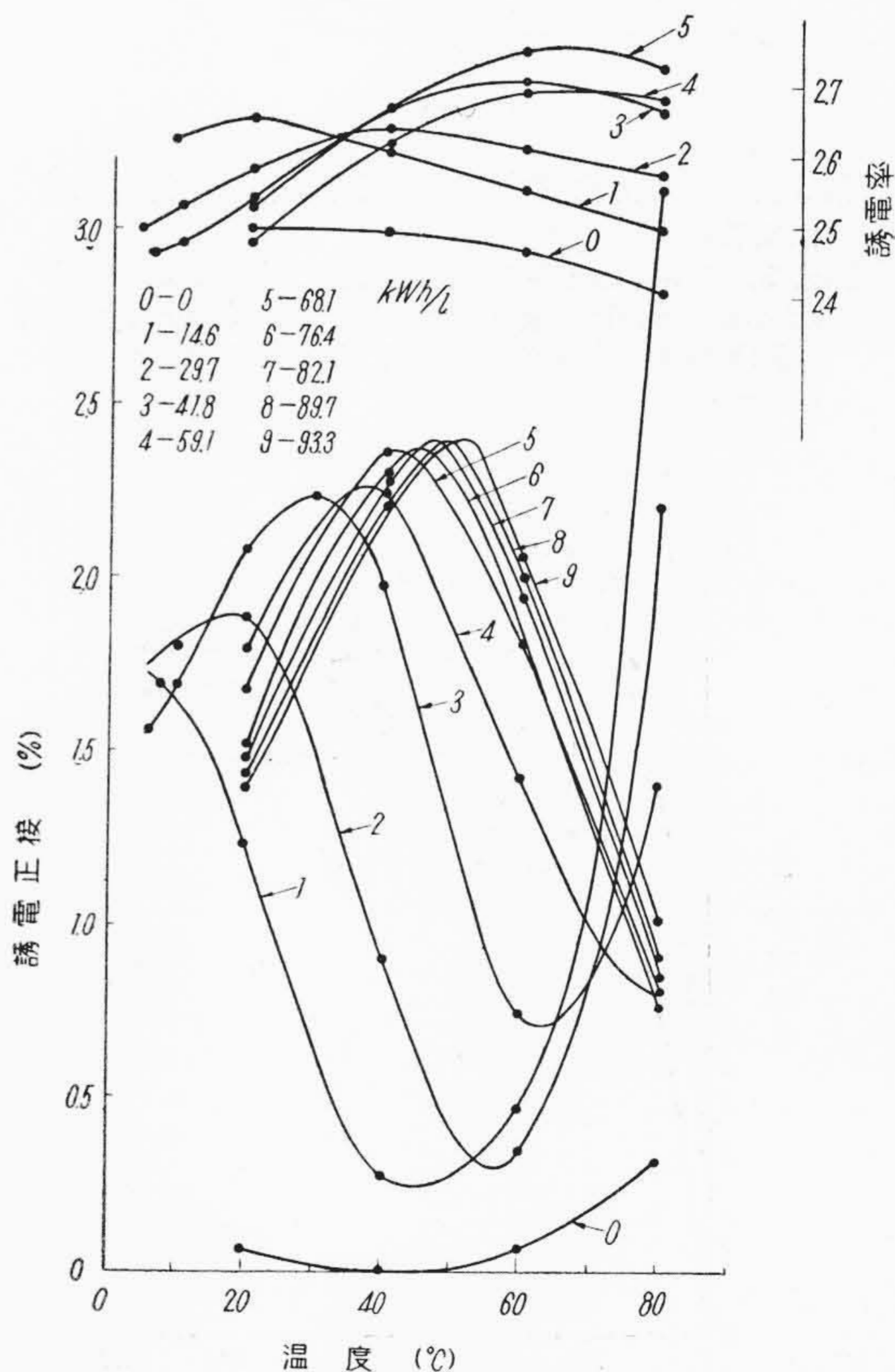
〔IV〕 実験結果

(1) 放電による電氣的性質ならびに粘度の変化

第2図、第3図に放電劣化油の誘電正接、誘電率の温度特性を示した。XX ヘビーオイル、PO-3000 単独の場合

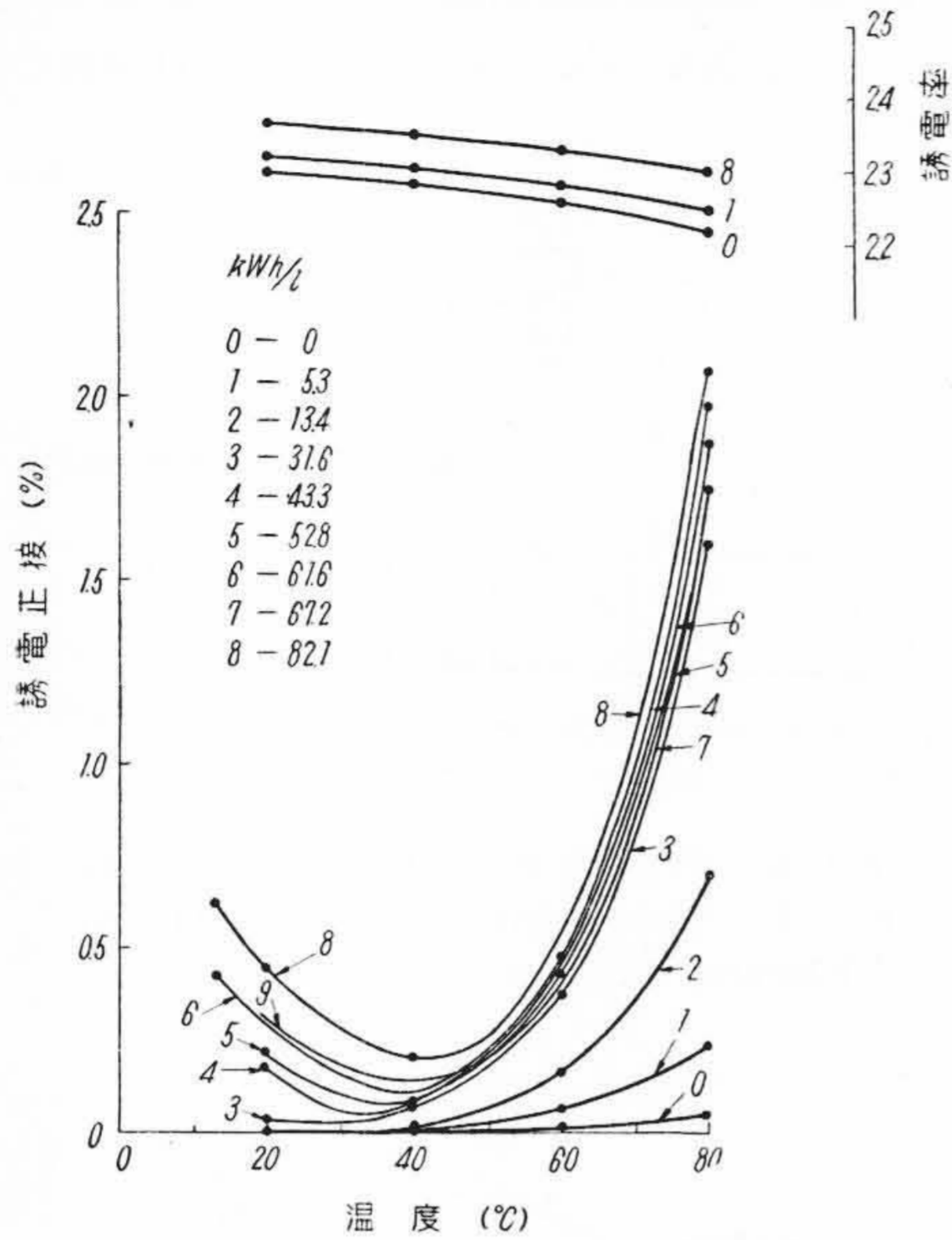


第1図 絶縁油放電劣化の試験容器
Fig. 1. Vessel for Subjecting Oil to Electric Discharge

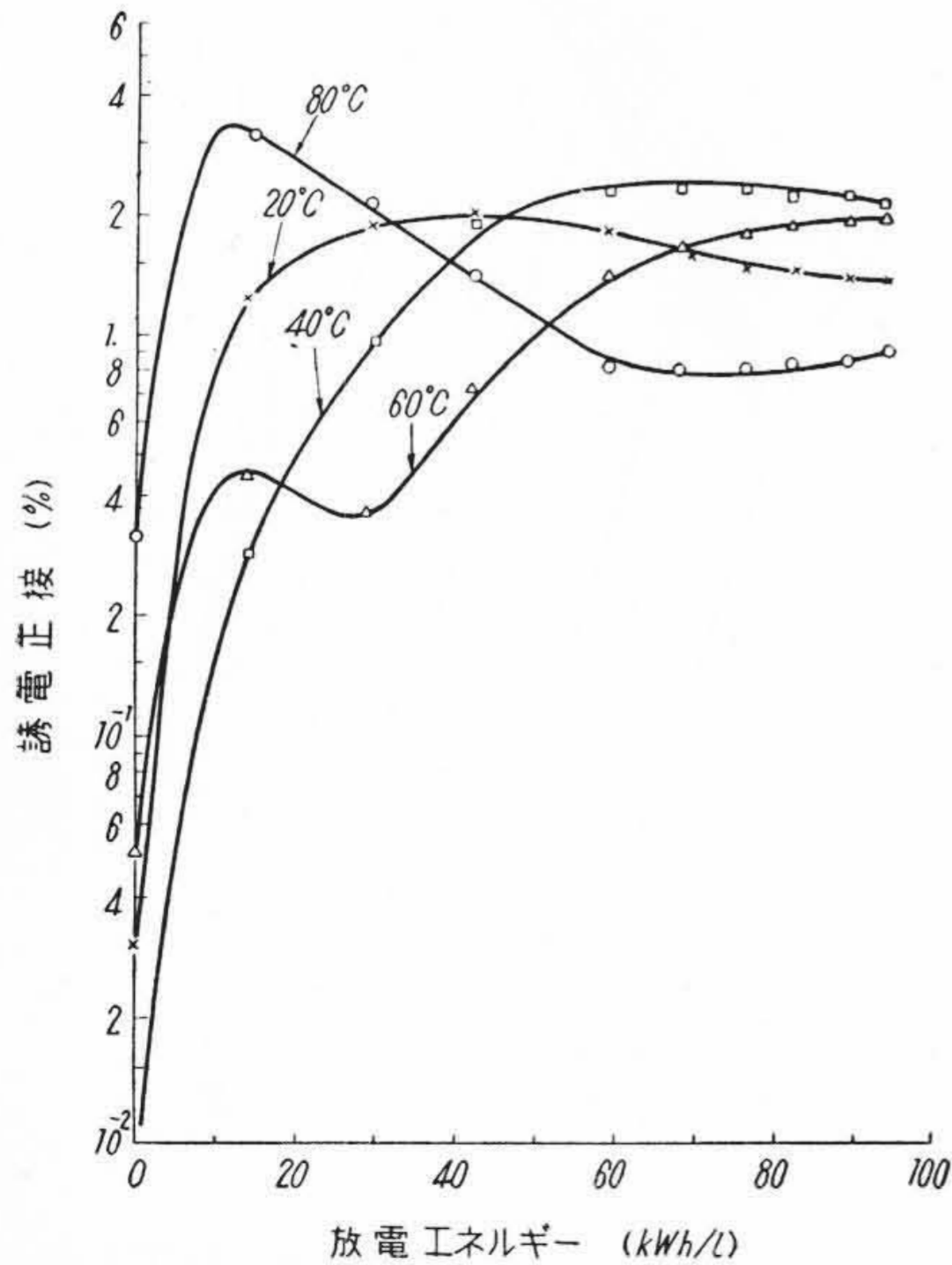


第2図 放電劣化ロジン配合混和物の誘電正接温度特性
Fig. 2. The $\tan\delta$ -Temperature Characteristic of the Insulating Compound [XX Heavy Oil +FF Rosin] Degenerated by Electric Discharge

は、おのこの第3図とほぼ類似の特性である。この特性はつぎのように考えられる。ロジン配合の混和物は、ロジンのために劣化前より有極性であり、さらに放電によつ



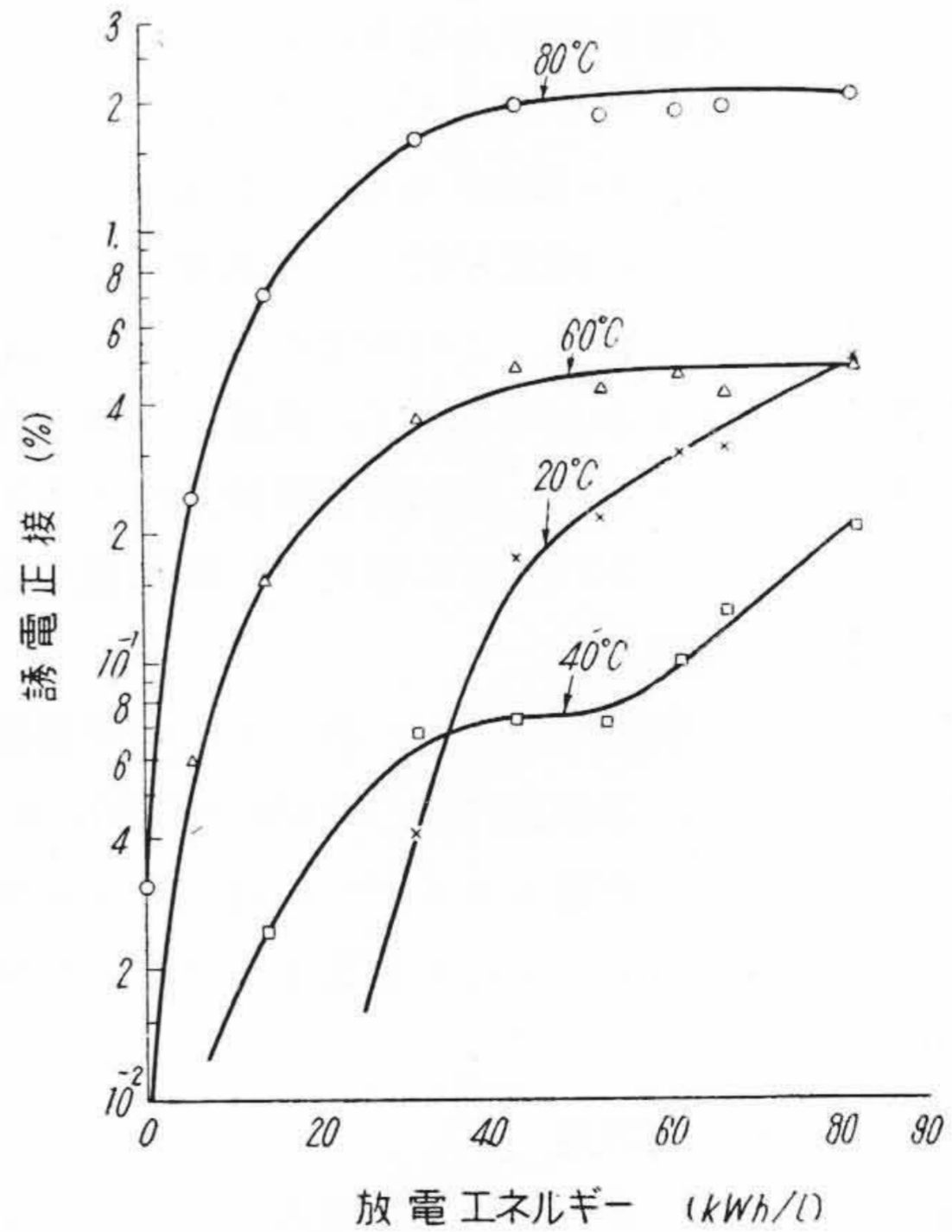
第3図 放電劣化 PO-3000 配合混和物の誘電正接温度特性
Fig. 3. The $\tan \delta$ -Temperature Characteristic of the Insulating Compound [XX Heavy Oil + PO-3000] Degenerated by Electric Discharge



第4図 ロジン配合混和物の放電による誘電正接の変化
Fig. 4. The Change of $\tan \delta$ of the Insulating Compound [XX Heavy Oil + FF Rosin] due to Electric Discharge

て急激にラジカルが増加し、粘度増大にともなつて誘電正接の極大値を示す温度が高温部に移動しているものと考えられる。これに対し PO-3000 配合の混和物は、最初は無極性に近いが、放電によつて極性があらわれ、低温部の誘電正接が上昇している。しかしその進行速度は前者にくらべておそい、XXヘビーオイル、PO-3000 単独の場合も同様な変化の傾向を示す。

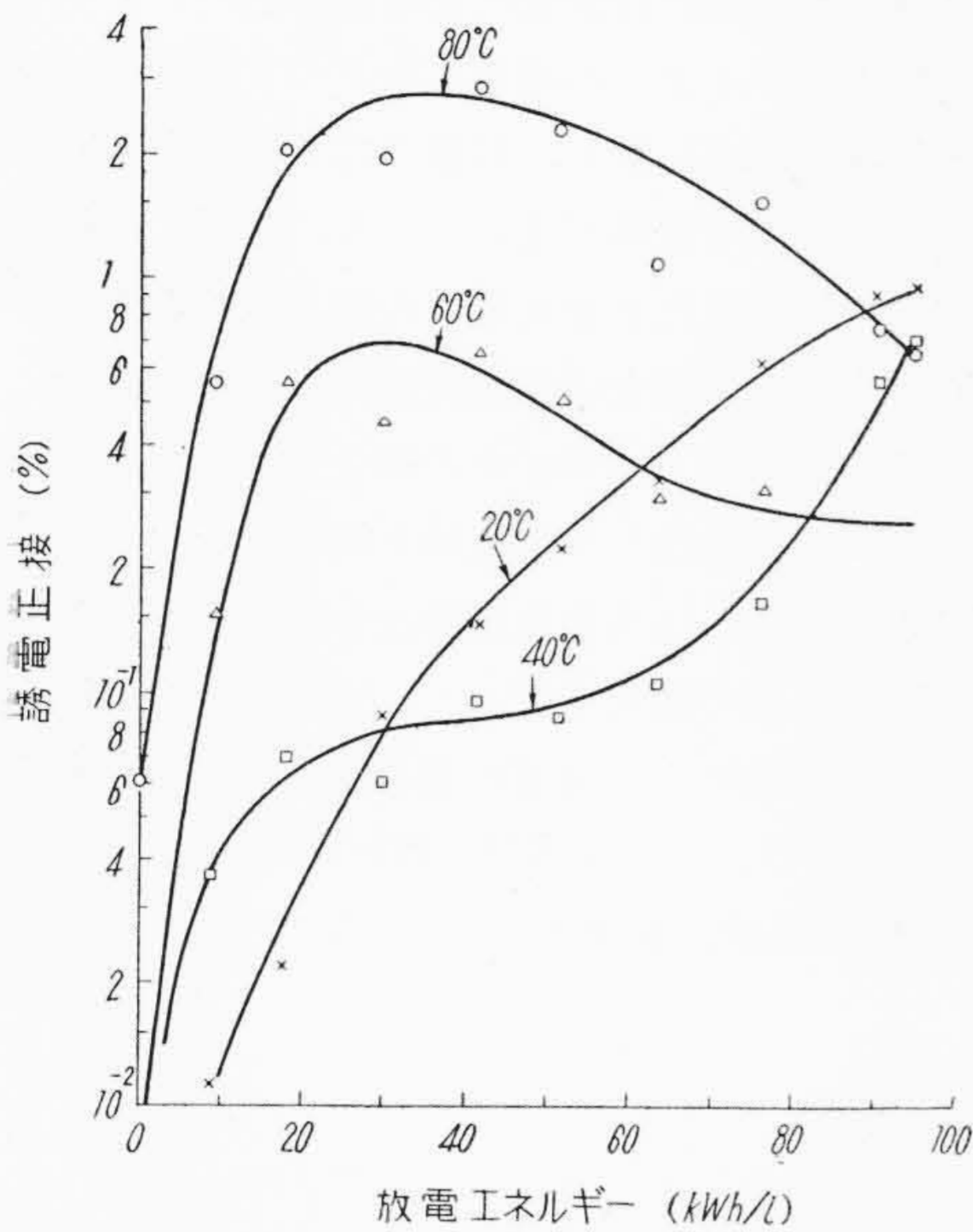
第4図～第7図に放電劣化油の各温度における誘電正接と放電エネルギーとの関係を示した。これらの特性についてはまず変化の速いロジン配合の混和物を例にとつて考えると、80°Cの誘電正接が極大値を経てふたたび減少しているが、この温度における誘電損失の要因が主としてイオンの伝導にもとづくものであり、放電により励起された分子あるいはイオン化された分子は増加するが、ラジカル同志の結合反応および重合反応による粘度の増大が急なためイオンの易動度が減少し、かえつて導電率の減少が起るためである⁽⁷⁾。60°Cの値が同様な理由で低下して再び上昇しているのは、この程度の放電をうけるとイオンの増加とともに、極性分子の増加が顕著となり、双極子にもとづく誘電損失が起るためである。第2図の温度特性からみれば、この温度が誘電正接の最小点の低温側になつたことを示している。20°C、40°Cの誘電損失の要因は大部分が極性分子によるものであつて、20°Cの値が極大値を経て減少していることは粘度の増大がいちじるしく固体の状態に近づいていることを示して



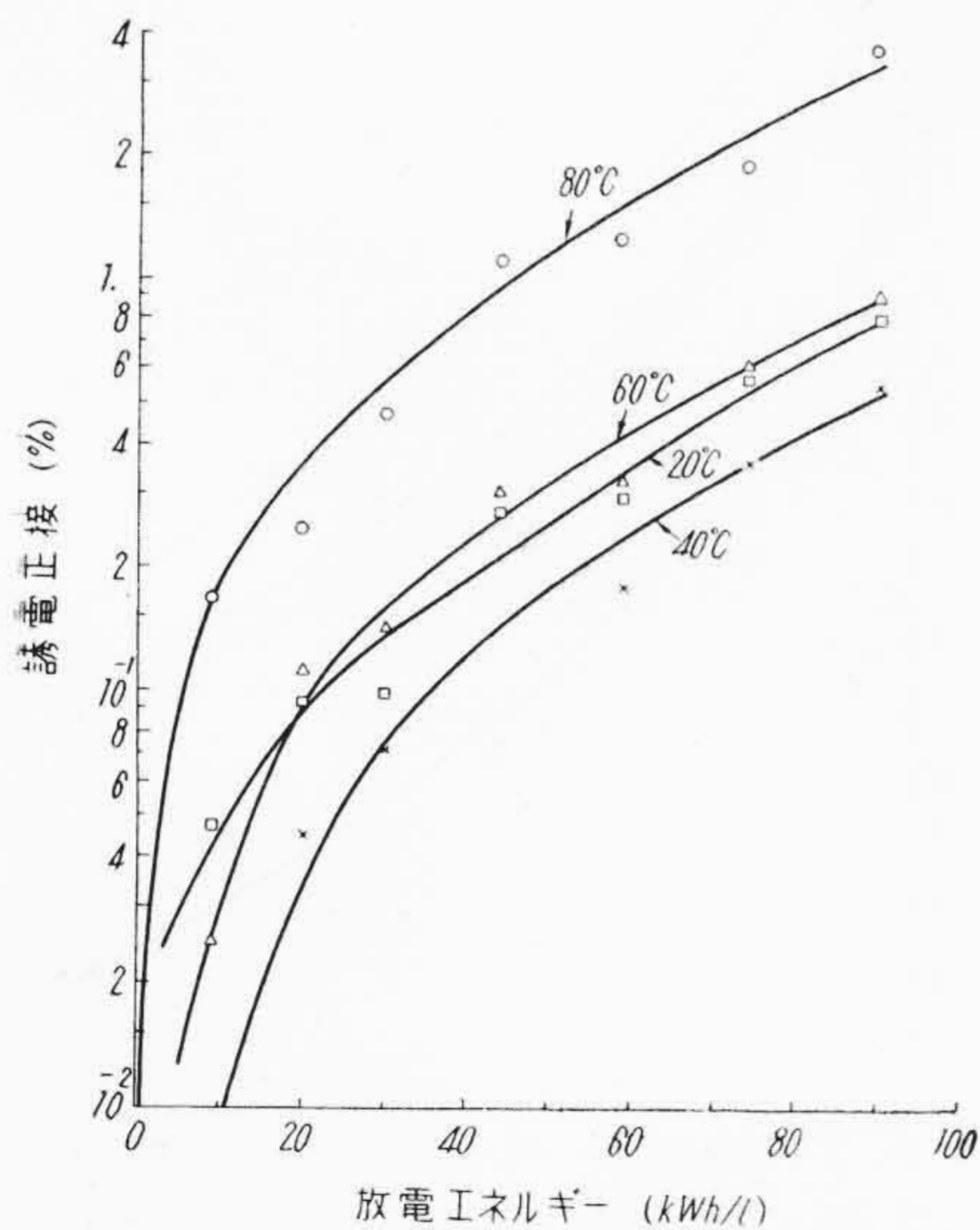
第5図 PO-3000 配合混和物の放電による誘電正接の変化
Fig. 5. The Change of $\tan \delta$ of the Insulating Compound [XX Heavy Oil + PO-3000] due to Electric Discharge

いる。ほかの3試料についても同様な変化傾向と考えられるが、化学変化の速度に大きな差異があるものである。ただし PO-3000 単独の場合には、後述するように粘度の上昇がほとんど起らないので、異つた傾向の特性のように見られる。PO-3000 配合の混和物ではそれぞれ成分の単独の場合の変化を加算したような特性を示し、両者の組み合わせによる特殊の変化のようなものはあらわれていない。ロジン配合の混和物の急激な変化はロ

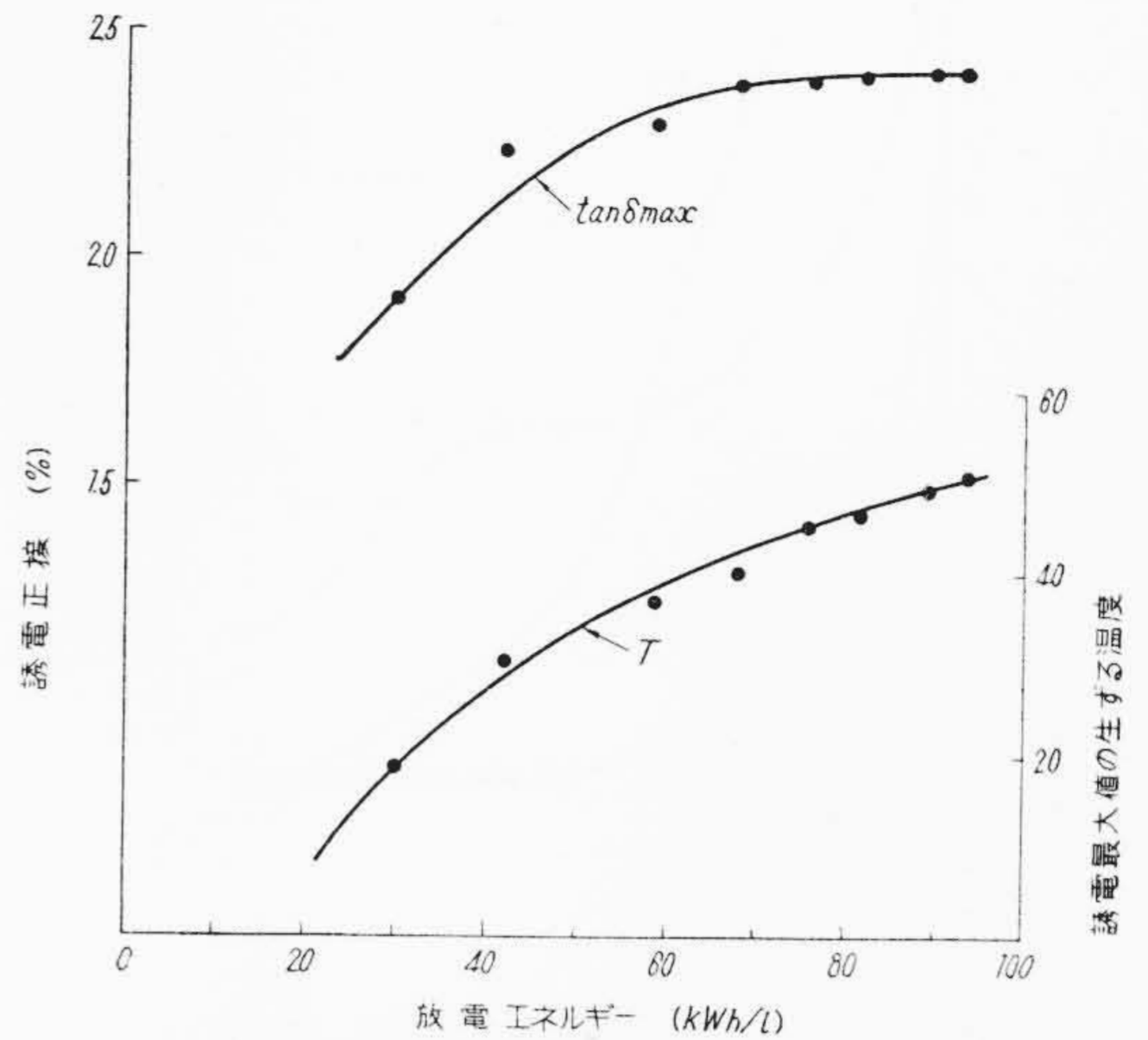
ジン自体の重合反応によるところが大きいと考えられる。



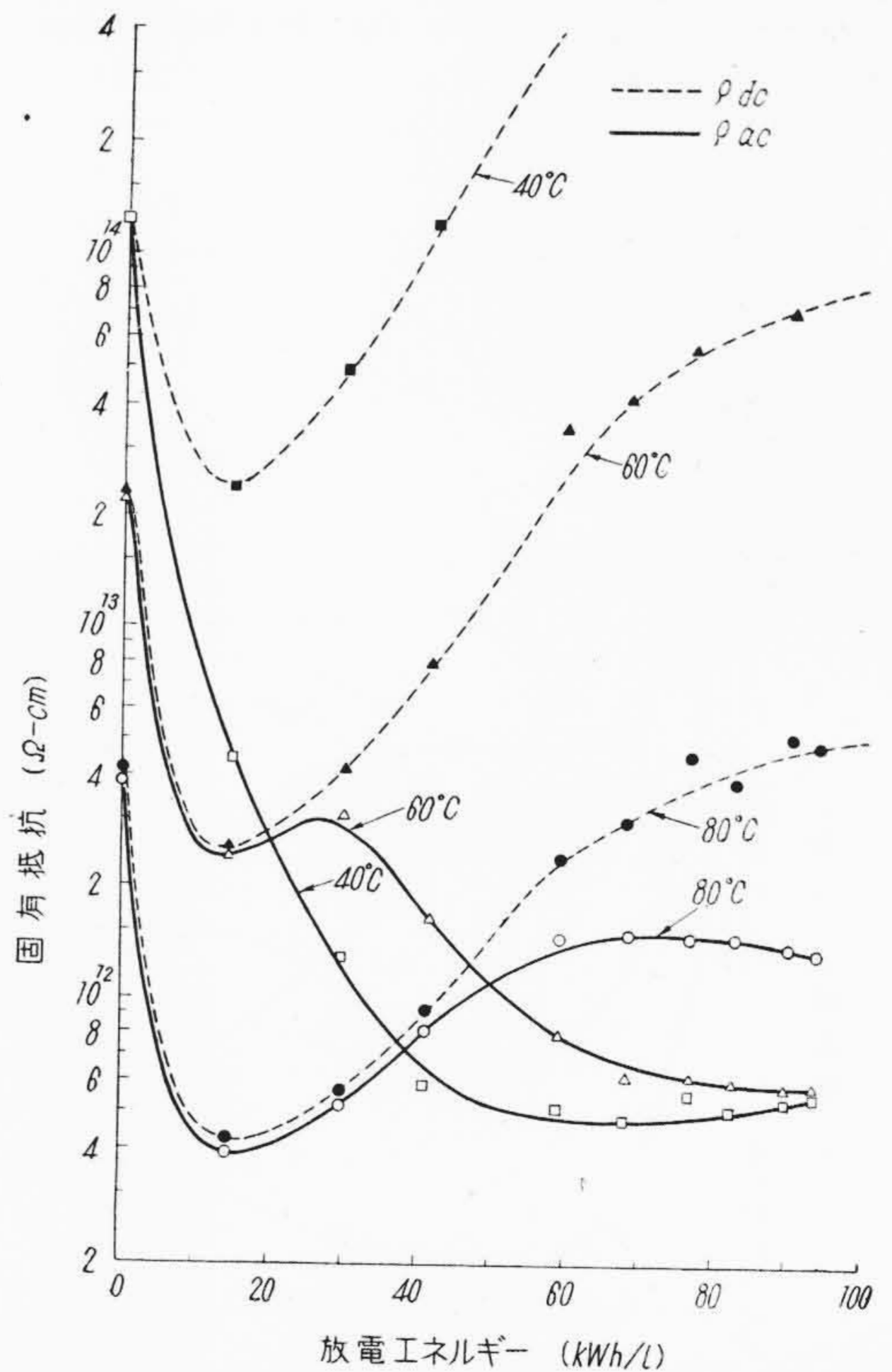
第6図 XXヘビーオイルの放電による誘電正接の変化
Fig. 6. The Change of $\tan \delta$ of the Insulating Oil [XX Heavy Oil] due to Electric Discharge



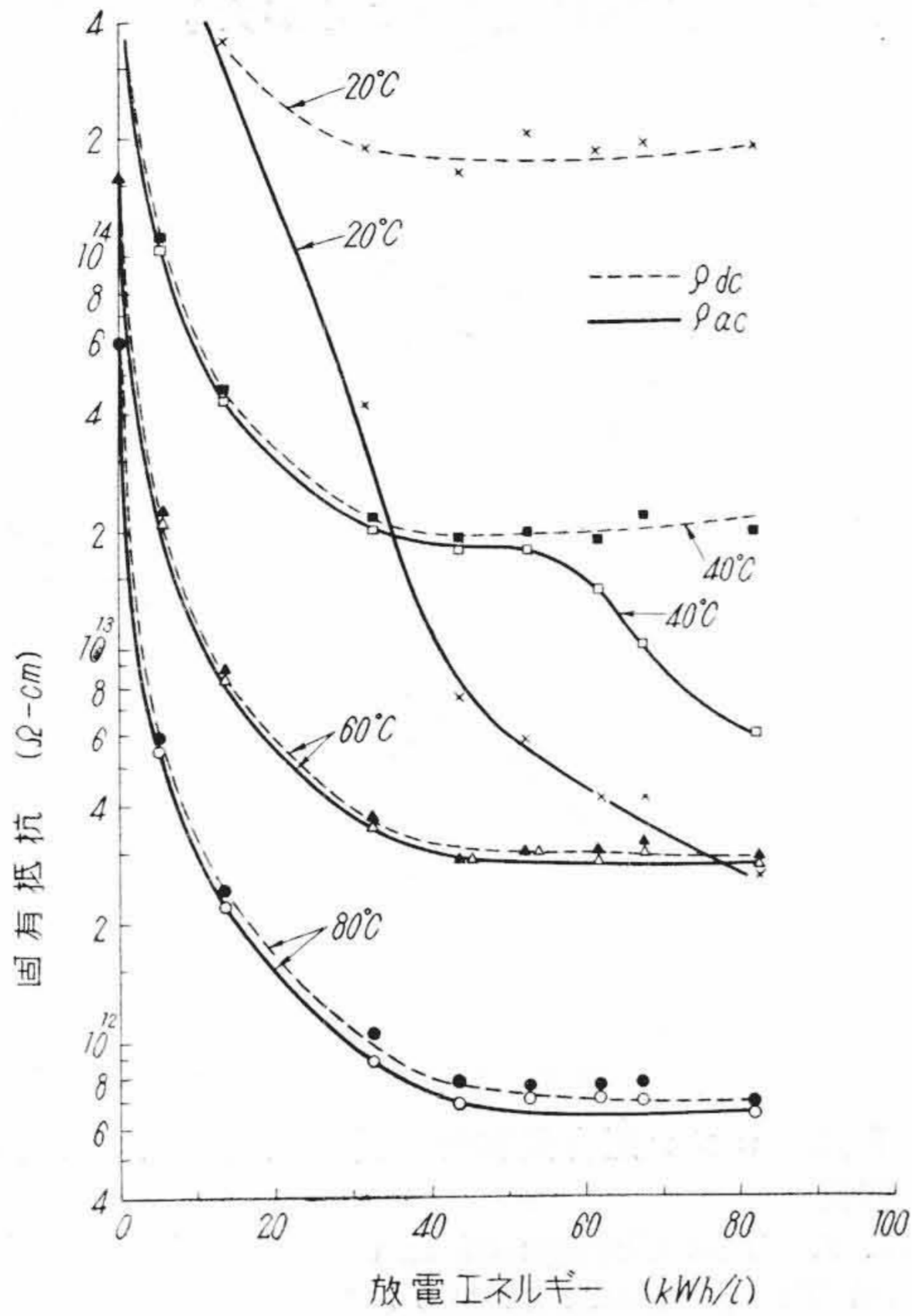
第7図 PO-3000の放電による誘電正接の変化
Fig. 7. The Change of $\tan \delta$ of the Insulating Oil [PO-3000] due to Electric Discharge



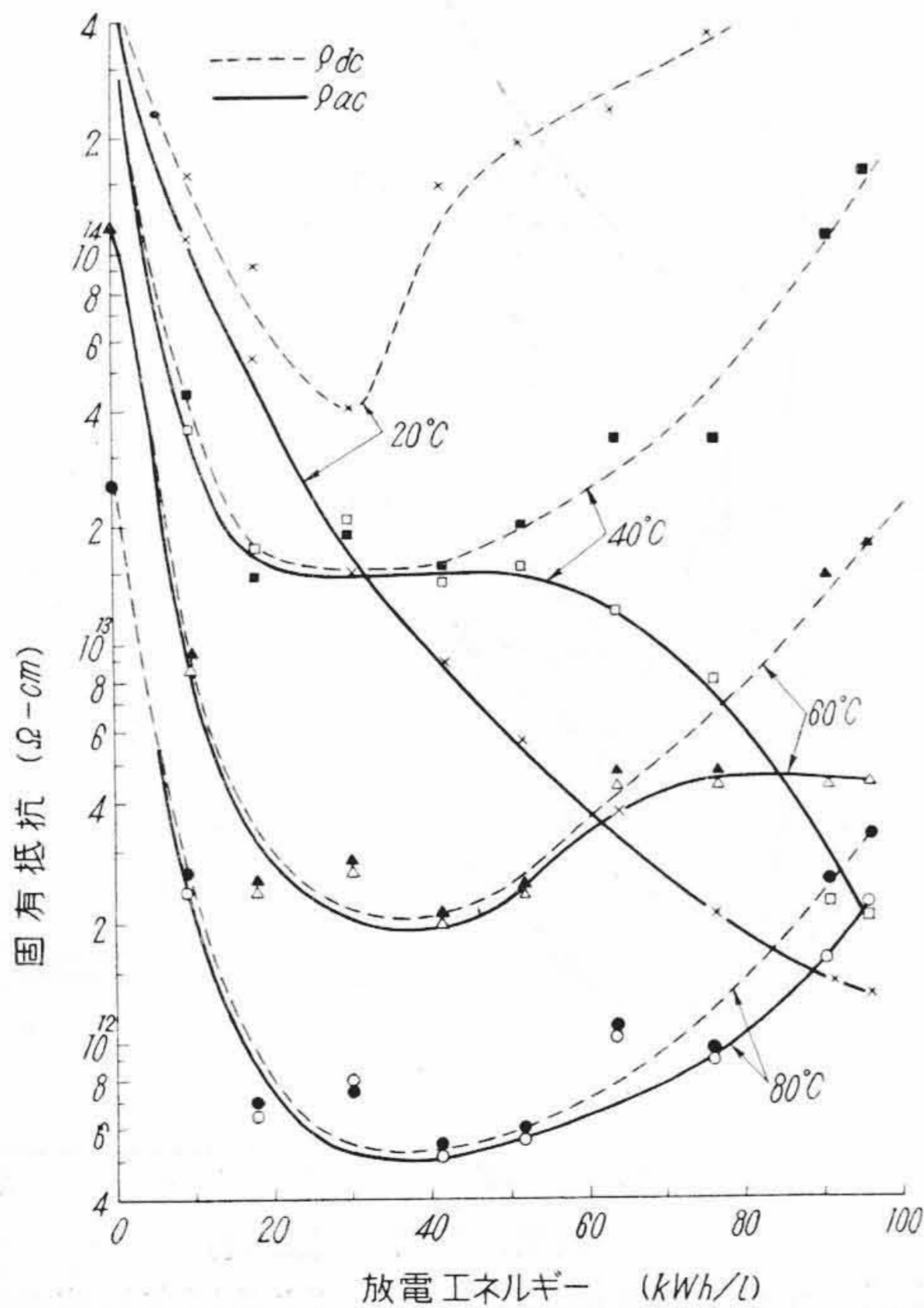
第8図 ロジン配合混和物の誘電正接極大値とその移動
Fig. 8. The Change of $\tan \delta_{max}$ and its Shift on Temperature of the Insulating Compound [XX Heavy Oil+FF Rosin] due to Electric Discharge



第9図 ロジン配合混和物の放電による固有抵抗の変化
Fig. 9. The Change of Resistivity of the Insulating Compound [XX Heavy Oil+FF Rosin] due to Electric Discharge



第10図 PO-3000 配合混和物の放電による固有抵抗の変化
 Fig. 10. The Change of Resistivity of the Insulating Compound [XX Heavy Oil+PO-3000] due to Electric Discharge

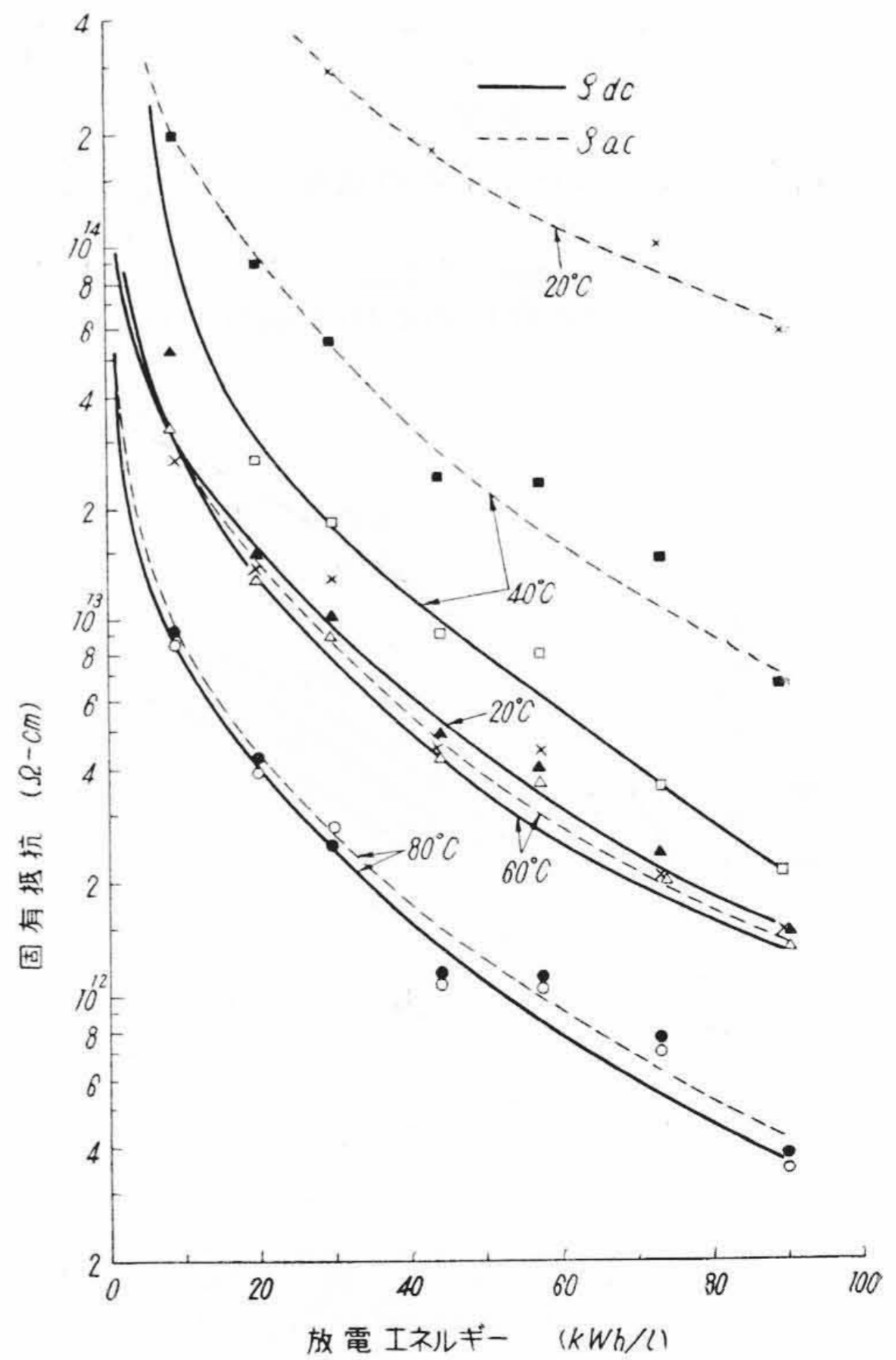


第11図 XXヘビーオイルの放電による固有抵抗の変化
 Fig. 11. The Change of Resistivity of the Insulating Oil [XX Heavy Oil] due to Electric Discharge

放電による誘電正接の極大値ならびに極大値の温度の変化については、変化の急なロジン配合の混和物の特性を示すと第8図のようになり、飽和の傾向が認められ、粘度そのほかの変化などを総合して、放電による劣化反応には一つの終点とも見られる状態が存在するものと思われる。PO-3000 配合の混和物については変化がおそいため誘電正接の極大値が測定温度範囲までできていないが、変化の傾向より同様な特性が期待される。

第9図～第12図には放電による固有抵抗の変化を示した。誘電損失がイオンの導電にもとづく場合は、交直流両固有抵抗はほぼ一致し、双極子による損失が顕著になると両者に大きな差異が生じてくる。第13図、第14図には真空中で放電劣化させた場合の固有抵抗の変化を示した。真空中劣化の場合は反応速度がはるかに大きい、変化の傾向は 100 mm Hg 中の場合と同様である。したがって窒素が活性化して絶縁油と反応を起したとしても電気特性に関しては大きな影響はないと考えられる。

第15図に粘度の変化を示した。ロジン配合の混和物ではロジンが放電により急速に重合するので⁽⁸⁾、粘度の増大が急である。これに対し PO-3000 配合のものでは PO-3000 の粘度は結果的には上昇しないので粘度変化



第12図 PO-3000の放電による固有抵抗の変化
 Fig. 12. The Change of Resistivity of the Insulating Oil [PO-3000] due to Electric Discharge

第 1 表 N₂ 100 mmHg 中あるいは真空中の放電による絶縁混和物の劣化の比較
Table 1. Comparison of Degradation of the Insulating Compounds by 100 mmHg (N₂) and Vacuum Electric Discharge

劣化条件	N ₂ , 100 mmHg		真空 (約 1 mmHg)	
	ロジン配合混和物	PO-3000配合混和物	ロジン配合混和物	PO-3000配合混和物
性質比較条件				
粘度 10 ポアズに変化するに要する放電エネルギー (kWh/l)	31.	88.	4.5	6.4
10 ポアズのときのイオン濃度 (mol/l)	4.2×10^{-8}	2.6×10^{-8}	1.4×10^{-8}	2.8×10^{-8}
反 応 速 度 比 (真空/100 mmHg)	6.7	13.8	—	—

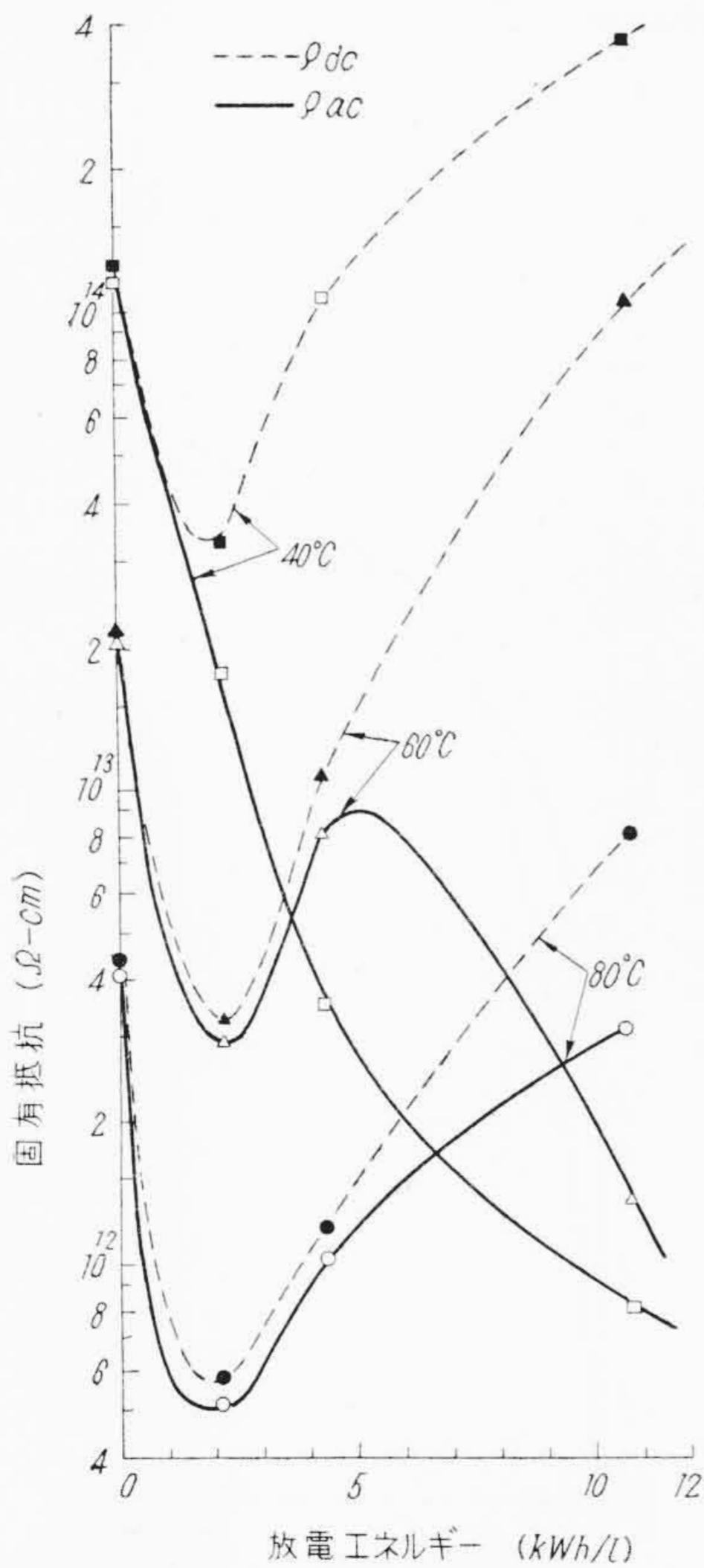
は緩慢となる。すなわち PO-3000 はその分子構造上から放電による分解生成物は大きな分子に重合しえないことが考えられるからである。第16図には真空中放電劣化の場合の粘度の変化を示した。各々に化学反応が加速される程度の差異はあるが、変化そのものは 100 mmHg の場合と同様である。

第17図, 第18図に窒素 100 mmHg 中と, 真空中の放電劣化によるイオン濃度の変化を示した。これはイオン

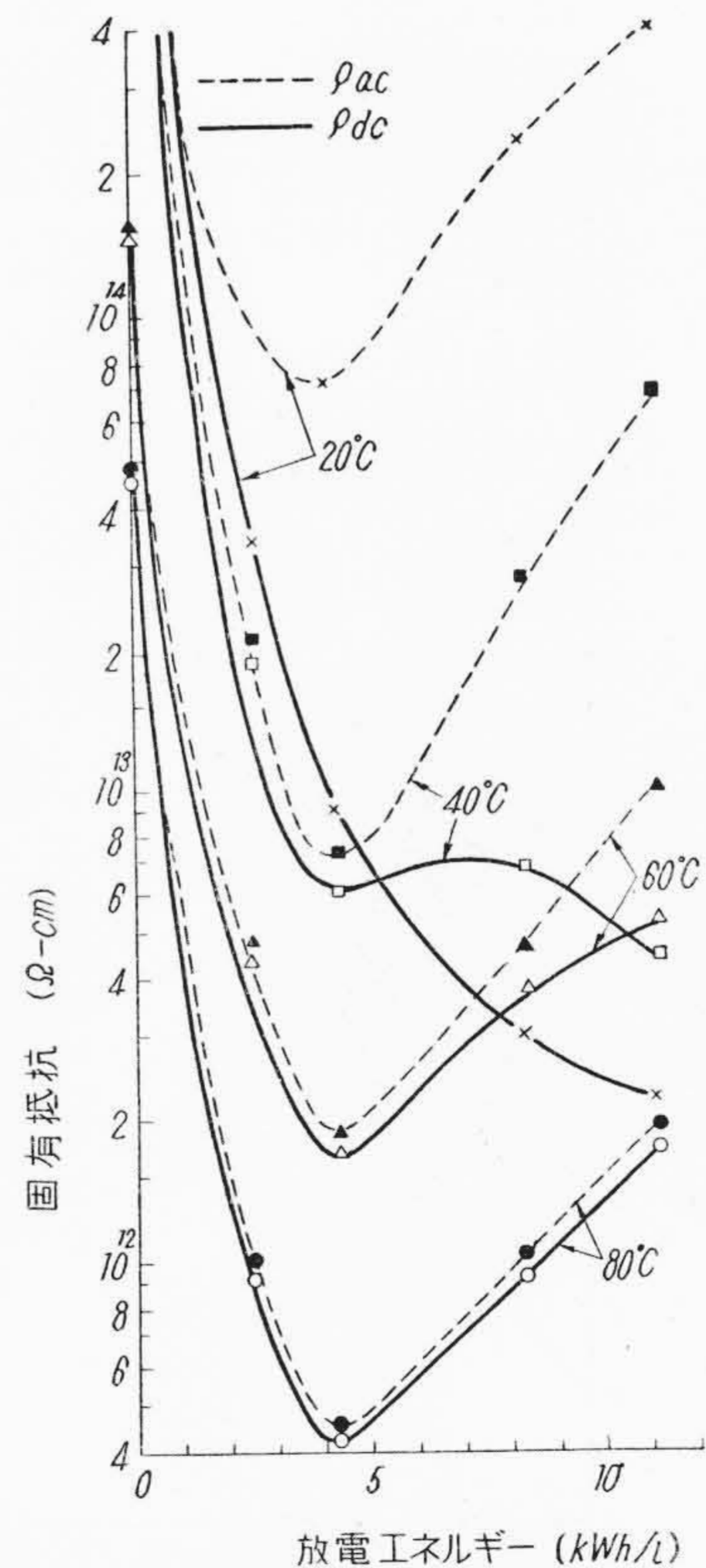
の大きさを一定と仮定し, 粘度と導電率より求めたものである。第1表には窒素 100 mmHg 中と真空中の放電劣化の速度を比較してみた。これによると絶縁油の放電劣化反応は低気圧ほど加速されるが, その加速の程度は絶縁油の種類によつて異なることがわかる。また窒素の影響はほとんどあらわれていない。

(2) 不飽和度の変化

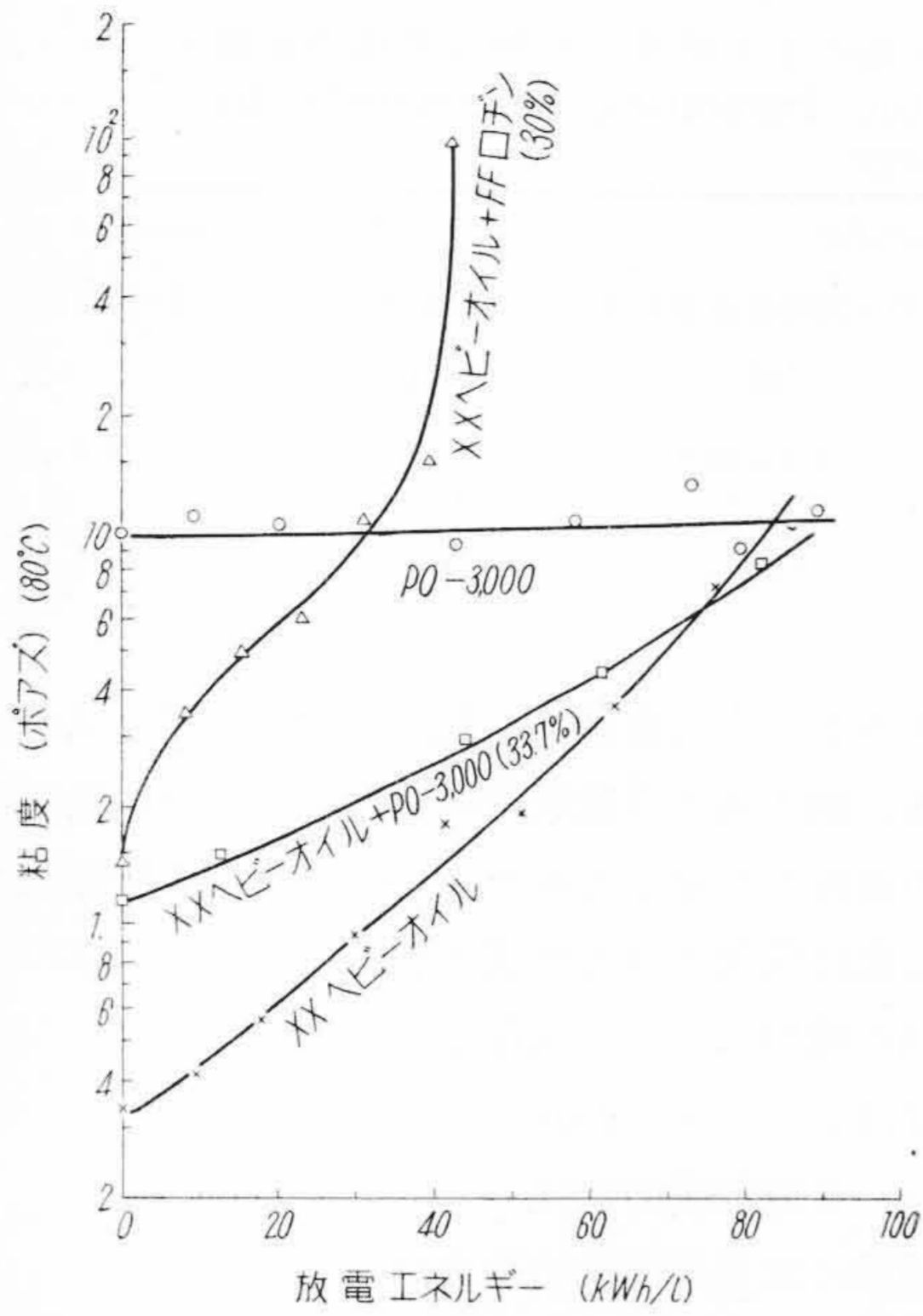
第19図に放電劣化油の臭素価の変化を示した。石油系炭化水素の放電による生成物は不飽和炭化水素の重合体であることが知られている。PO-3000 配合の混和物の



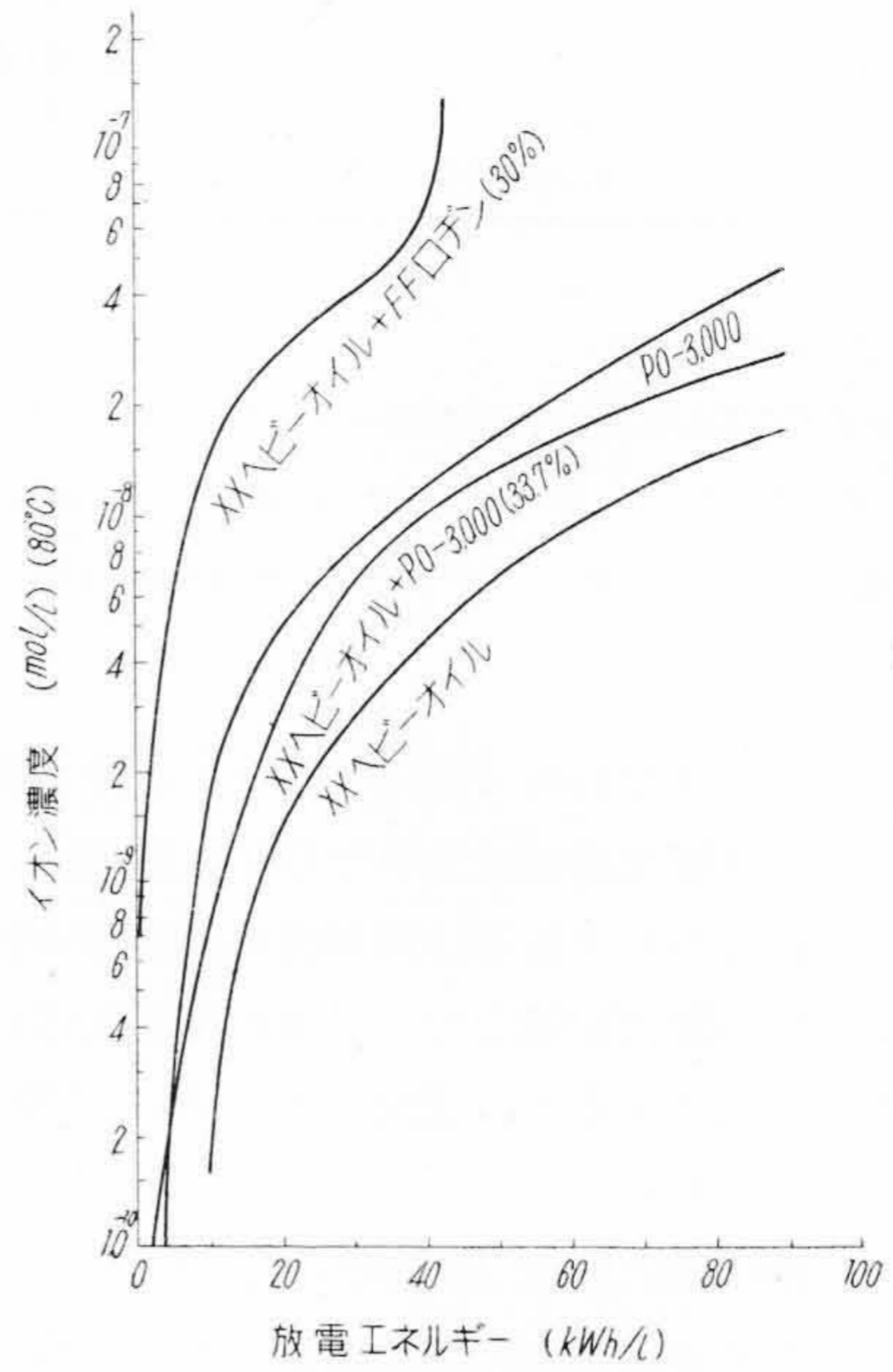
第 13 図 ロジン配合混和物の真空中放電による固有抵抗の変化
Fig. 13. The Change of Resistivity of the Insulating Compound [XX Heavy Oil+FF Rosin] due to Vacuum Electric Discharge



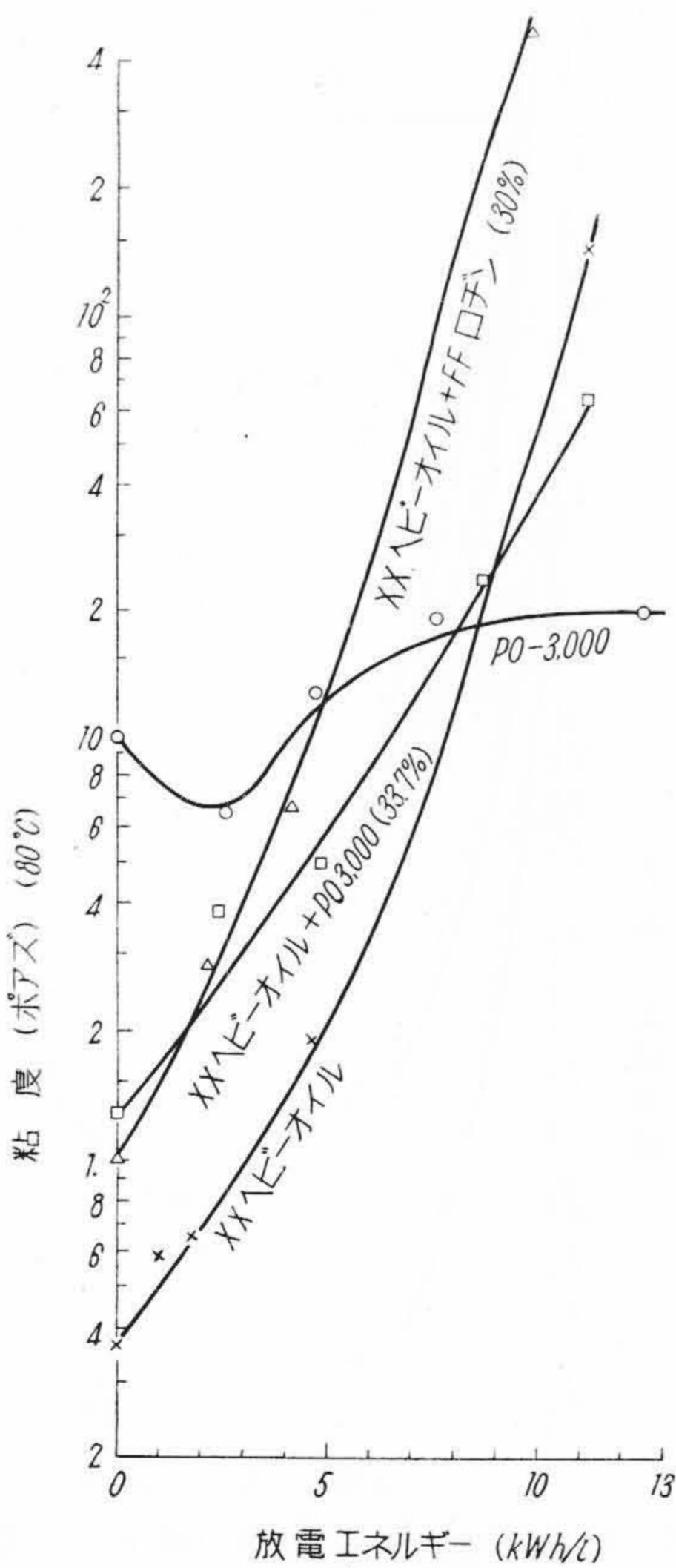
第 14 図 PO-3000 配合混和物の真空中放電による固有抵抗の変化
Fig. 14. The Change of Resistivity of the Insulating Compound [XX Heavy Oil+PO-3000] due to Vacuum Electric Discharge



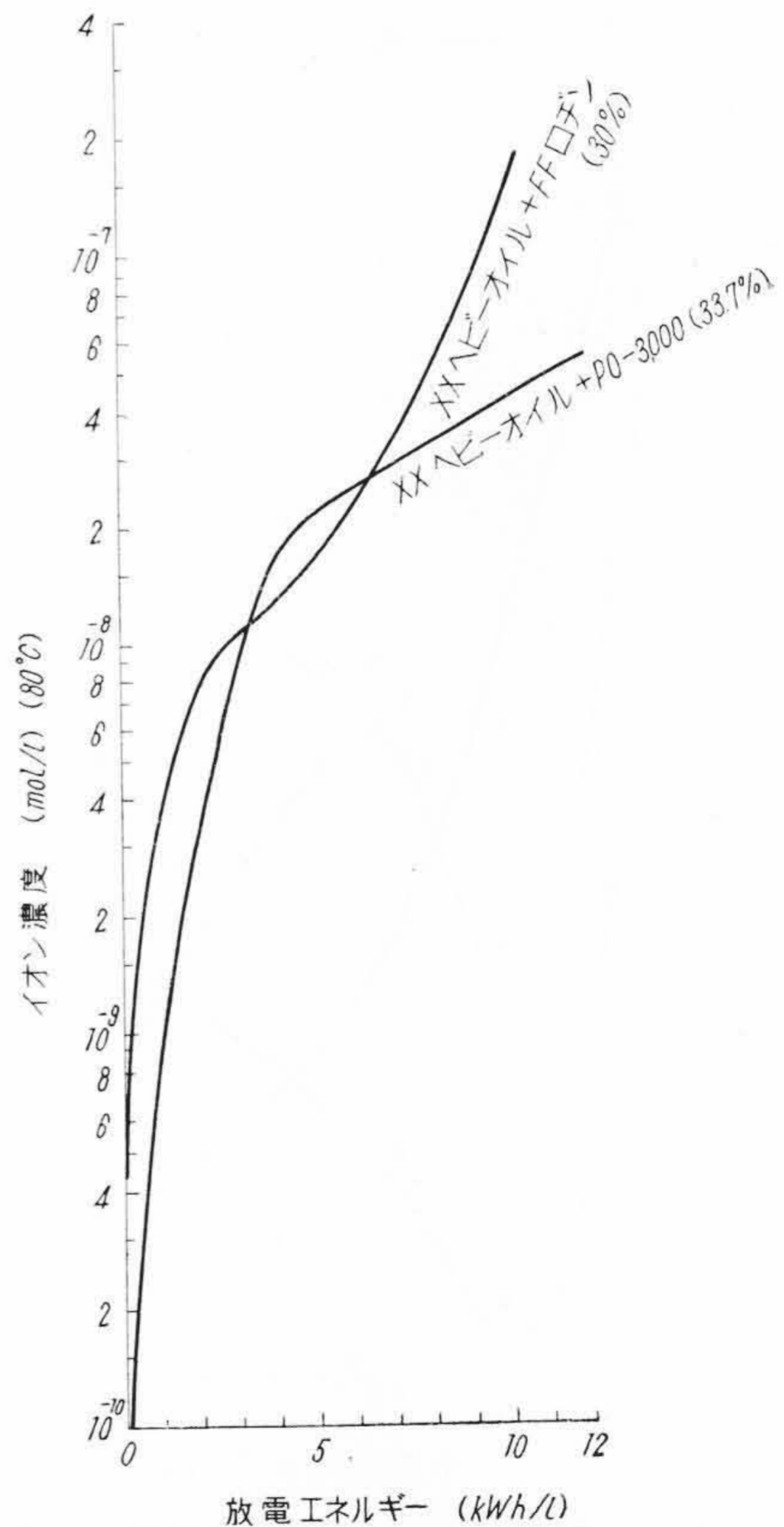
第15図 各種絶縁油の放電による粘度変化
 Fig. 15. The Change of Viscosity of the Insulating Compounds due to Electric Discharge



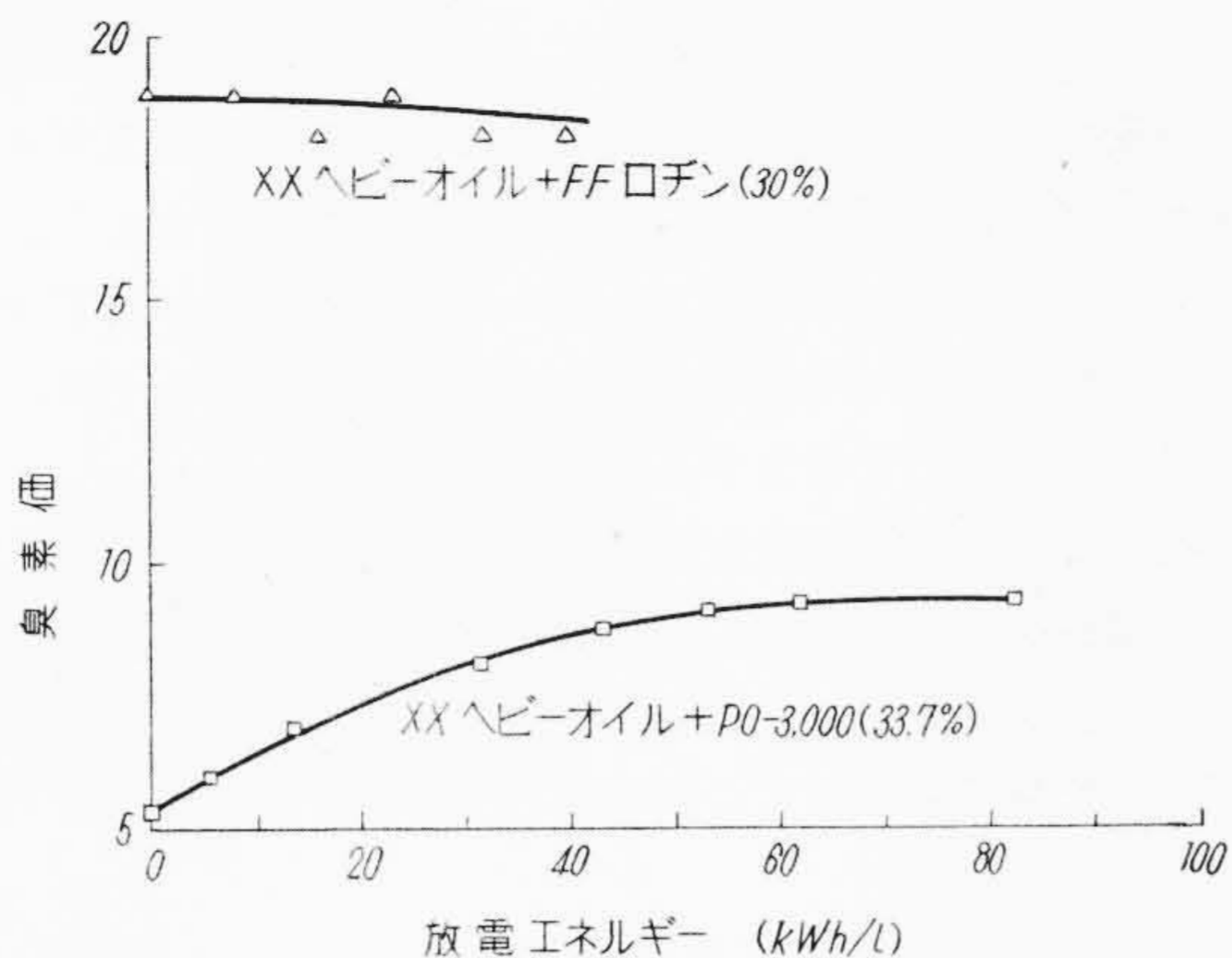
第17図 各種絶縁油の放電によるイオン濃度の変化
 Fig. 17. The Change of Ion Concentration of the Insulating Compounds due to Electric Discharge



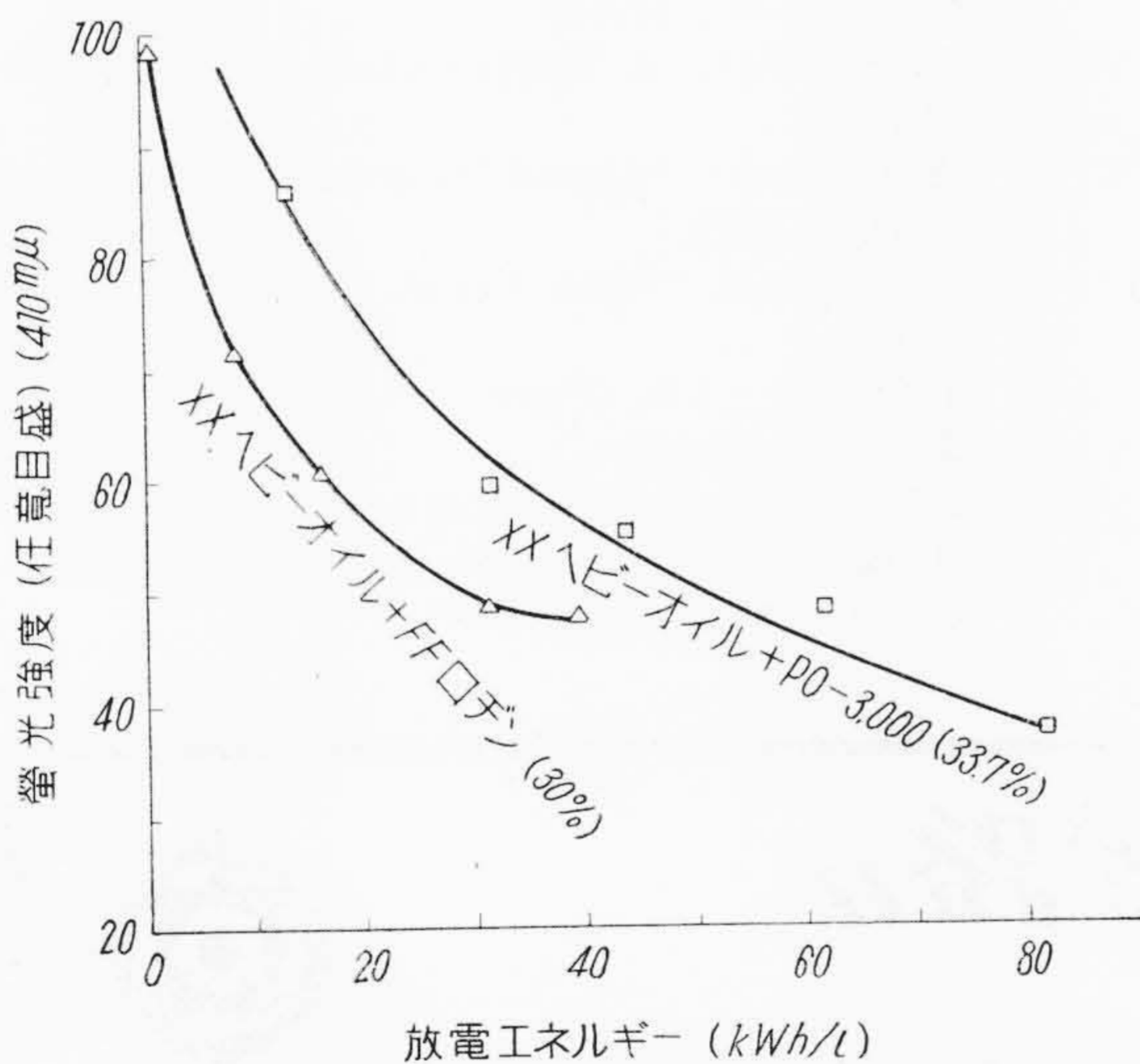
第16図 各種絶縁油の真空中放電による粘度変化
 Fig. 16. The Change of Viscosity of the Insulating Compounds due to Vacuum Electric Discharge



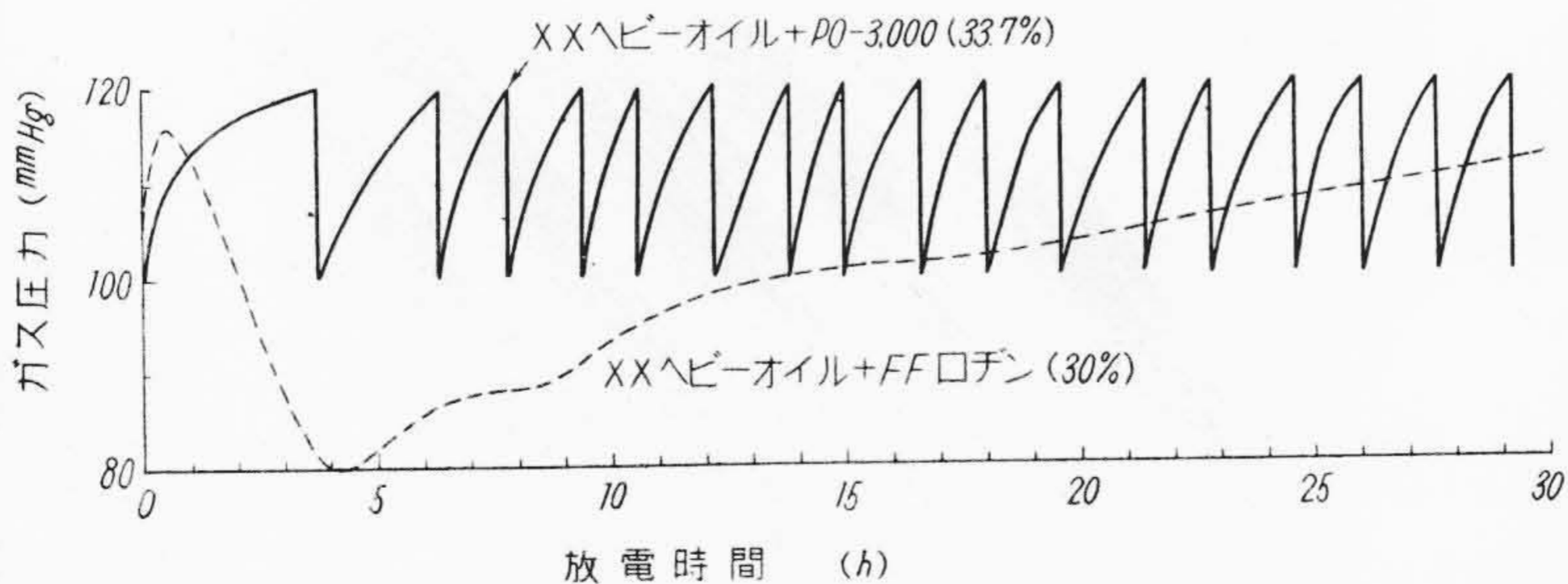
第18図 各種絶縁油の真空中放電によるイオン濃度の変化
 Fig. 18. The Change of Ion Concentration of the Insulating Compounds due to Vacuum Electric Discharge



第19図 絶縁混和物の放電による臭素価の変化
Fig. 19. The Change of Br Value of the Insulating Compound due to Electric Discharge



第20図 絶縁混和物の放電による蛍光強度の変化
Fig. 20. The Change of Intensity of Fluorescence of the Insulating Compounds due to Electric Discharge



第21図 絶縁混和物の放電によるガス発生状態
Fig. 21. The Gas Generation of the Insulating Compounds by Electric discharge

臭素価が増加し、飽和の傾向を示しているのは、不飽和重合物が水素添加反応に転じたためと思われる⁽⁹⁾。ロジン配合の混和物ではロジンの不飽和のために臭素価はかなり大きい、放電により増大せずむしろ減少する傾向を示すのはロジンの二重結合が飽和されるためと考えられる。

(3) 放電劣化による色相の変化

絶縁油は放電劣化により、黄色、赤色、赤褐色、黒色と色が変化する。この変化の様子を絶縁油の発する蛍光強度を日立分光光度計 (EPU-2 型) 付属蛍光装置で測定して比較してみた。各油について蛍光強度のスペクトルはそれぞれ異なるが、取扱った2種の混和物では 410 mμ のところに蛍光強度の最大値があるので、この値の変化を示すと第20図のようになる。すなわちロジン配合の混和物は PO-3000 混和物にくらべて蛍光強度の減少状態から前者の色相の変化は激しいことを示している。

(4) ガスの発生状況

ガス発生吸収の問題は前述のように特に研究対象としていないので長時間の変化は求めなかつたが、短時間の場合については第21図にその発生状況を示した。120 mm Hg に達すると発生ガスを取り出し 100 mm Hg にもどし放電を続行したものである。前述のように、ガス圧ケーブルでは、ガス発生吸収の問題は自己回復作用と関連して実際的意味をもつものと考えられるので、結論は自己回復作用の研究のときに求める予定である。

〔IV〕 考 察

以上絶縁油の放電による変化の概要をのべたが、ここでえられた結果を実際のケーブルに応用するには種々検討しなければならないことが残っている。しかし以上の結果より定性的にいえることは、絶縁油の長期間の放電劣化による誘電正接の増大は急速なものではなく、その変化には終点とも見られる状態が存在し、ケーブルの使用

中、長年月の間に絶縁物の一部にそのような放電劣化の進んだ劣化生成物ができても、それがただちにケーブルを熱的に不安定に導くほど大きな誘電損失をとまなうものではない。実際のケーブルではガス圧があり、化学変化の速度はかなり小さなものであることが推定される。つぎに窒素ガスについては放電による活性化は真空にちかい場合に起りやすいということを考えれば、活性窒素による絶縁油の劣化は、電氣的性質に関

する限り無視できるように考えられる。また PO-3000 など合成油も単独で含浸油として使用する場合は別として、増粘度剤として使用する場合は悪い結果を示していない。低ガス圧ケーブルの自己回復作用については検討中であるが、一般に、ここに示した絶縁油の劣化特性のごく初期の段階に相当する放電量でケーブルのイオン化開始電圧のかなりの上昇が認められるので、ケーブル使用中にうける放電の量は、製造時の特性から推定される放電量よりいちじるしく小さいことが予想される。この意味では PO-3000 配合の混和物はロジン配合の混和物に比してすぐれたものといえることができる。低ガス圧ケーブルに用いる含浸油の具備しなければならない条件を考えてみれば、ケーブルの使用中心イオン化開始電圧の上昇を起しやすい粘度であり、放電によつて油が移動する間は電気的性質の低下ができるだけ小さく、イオン化開始電圧が上昇されたような油の分布になつたときには、それまでにうけた放電によつて粘度が増大し、その後は温度上昇やそのほかの原因で、この好ましい油の分布状態に変化がないといったようなものが考えられる。目下、この種の研究については実験を進めている。

〔V〕 結 言

ガス圧ケーブルにおいて、ポイド放電が存在した場合これがケーブルの特性、寿命にどのように影響するかを推定する一手段として、絶縁油の放電劣化の経過を吟味

した。これによつて放電劣化によるケーブルの電気的性質の変化の概要を知ることができた。この研究は低ガス圧ケーブルの含浸油としてもつとも適当なものをえらぶための一連の研究の一部であるので、最終結論は目下研究中の自己回復作用に関する研究の結果とあわせて検討の後に稿を改めて報告することにした。

終りに御指導御鞭撻を賜つた東北大学教授鳥山博士、日立電線株式会社電線工場関係各位、日立製作所日立研究所々長三浦博士、橋本主任研究員および実験に御協力下さつた関係者の方々に深謝申し上げる。

参 考 文 献

- (1) G.B. Shanklin: Trans. A.I.E.E. 63 549 (1944)
- (2) C.T. Hatcher: C.I.G.R.E. No. 219 (1952)
- (3) C.L. Thomas, G. Egloff, J.C. Morrell: Chem. Rev. 28 1 (1941)
- (4) T. Rummel: Z. Electro Chem. 47 (II) 120 (1941)
- (5) A. Gemant: "Liquid Dielectrics" Wiley. New York (1933)
- (6) T. Rummel: Wiss. Veröff. Siemens. 19 278 (1940)
- (7) J. Sticher, J.D. Piper: Ind. Eng. Chem. 33 1567 (1941)
- (8) L.P. Lankin: U.S. Patent. 2,086,434 (1937)
- (9) H. Basseches, D.A. McLean: Ind. Eng. Chem., 47 1782 (1955)

テレビジョン伝送線路

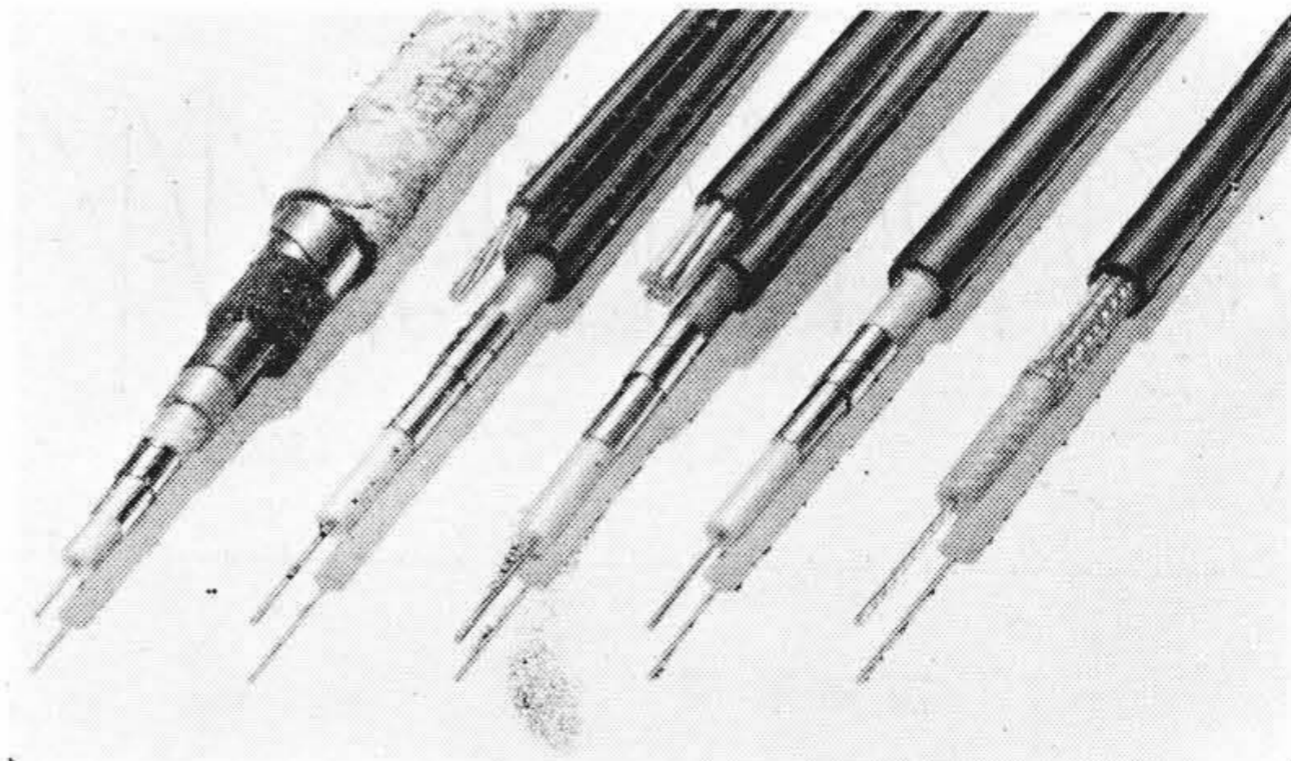
工業用テレビジョン用

日立同軸ケーブル

発泡ポリエチレン絶縁

特 長

- (1) 伝送特性が均一である。
- (2) 外被の障害があつても回線
を確保し得る。
- (3) 軽量である。
- (4) 架設が容易である。



東京・大阪・福岡・名古屋

日立電線株式会社