

# 低ガス圧ケーブルの自己回復作用

## Consideration with Self-Healing Action of Low Pressure Gas-Filled Cable

加 子 泰 彦\*  
Yasuhiko Kako

### 内 容 梗 概

低ガス圧ケーブルは最初からボイド (Void) の存在をゆるし、絶縁体内には窒素ガスを封入して性能の安定化を図り、同時に常時ケーブルの性能を監視できるようにしたものである。したがって製造時のイオン化開始電圧は低いが、使用中に次第に上昇してゆく現象があり、これは自己回復作用と名づけられている。しかしこの現象の機構については明らかにされていなかった。筆者らはこの機構の解明とさらに広い意味でボイド放電によるケーブルの性能の変化を検討するために模型ケーブルについて実験し、これらを明確にすることができた。すなわちボイド中で放電が起ると、局所的な電界の集中が起り油はボイドに流入し、さらにここでワックス (Wax) 化し、ボイド放電が次第に消滅してゆくことが自己回復作用の原因である。

### 〔I〕 緒 言

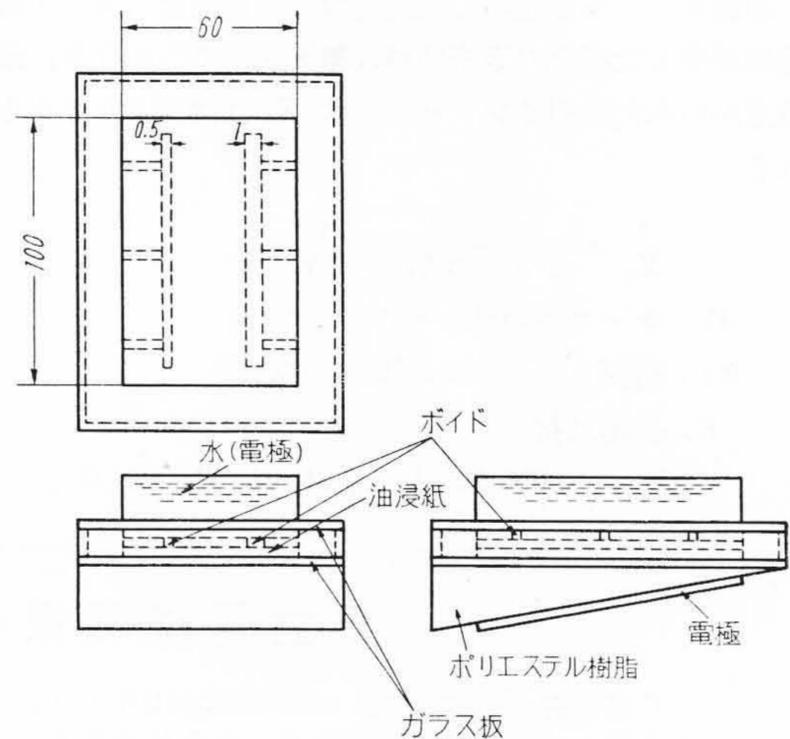
低ガス圧ケーブルは従来ソリッド型のケーブルが使用されている 20~30 kV の送電系統に使用されるケーブルで、系統の信頼度の向上を目的とするものである。このケーブルの性能を維持するためには、常時ケーブル全長にガス圧力が働いていることが必要であり、この目的のためケーブルの製造時に含浸後脱油工程を設け、布設後ガス通路を閉塞するおそれのある余剰の絶縁混和物をできるだけ少なくしている。したがってこのケーブルでは製造時に窒素ガスの充填されたボイドが存在し、ケーブルのイオン化開始電圧は使用電圧と比較的接近しているのが普通である。しかしこのケーブルでは使用中にイオン化開始電圧が次第に上昇してゆくということが発明者 G. B. Shanklin 氏によつて発見され、彼はこの現象を自己回復作用 (Self-Healing Action) と名づけた<sup>(1)</sup>。このことはその後使用経験などにより、一般の認めるところとなりつつあるが、この現象を正確に把握することの困難なためにその機構については考えかたが統一されておらず、使用者の立場としては、この好ましい性質を期待することに対して若干の不安はまぬがれない現状である。筆者らは製造者として、もつともすぐれた低ガス圧ケーブルの製法を確立するため、その第一段階としてこの自己回復作用の機構の解明、さらに広い意味でボイド放電が起るような状態で使用した場合のケーブルの性能の変化を知るために、模型ケーブルについて実験し、若干の結論を導くことができたので、ここにその概要を報告する。

### 〔II〕 実 験 法

#### (1) モデルボイドによる実験

実ケーブルあるいはモデルケーブルの実験により、放

\* 日立製作所日立研究所

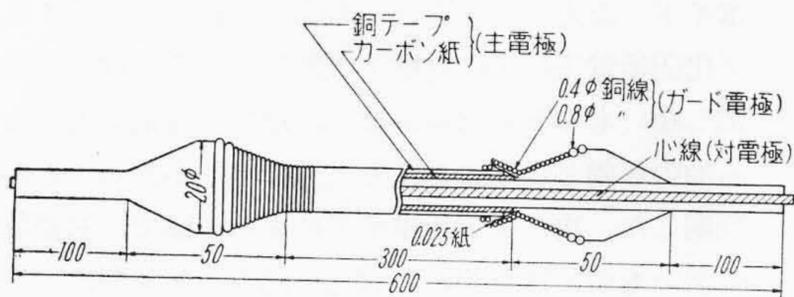


第1図 モデルボイド実験装置

電によるボイド状態の変化を推定することはできるが、正確にその機構を解明するためには、一つ一つのボイドの変化の経過を直接目でみるような実験を行うことがのぞましい。このために第1図に示すような装置でガラス板の間に3枚の絶縁紙をはさみ、中間の紙にケーブルの紙テープ間の間隙を想定してモデルボイドを作り、この状態で乾燥後一定量の油を含浸し、ガラス板の上下には電極をもうけ、上部電極には水を用いてボイド放電を外部から観察できるようにした。さらにケーブルの半径方向の電界強度の分布を再現するためには下部ガラス板の下に楔形のポリエステル樹脂板を重ね、この下に電極をもうけるという方法をとった。なお電圧印加は常温にて行い、封入窒素ガスは 100 mmHg と、常圧とについて実験を行った。

#### (2) モデルケーブルによる実験

実験に用いたモデルケーブルは導体断面積  $22\text{mm}^2$  絶縁厚 3 mm、長さ 600mm のものを用い、これを乾燥、含



第2図 試料ケーブルの電極構造

入、浸油抜き後にガラス容器に入れ、窒素ガスを常圧に封し、40°Cの油槽中で電圧を印加した。試料は約60度の傾斜で立てた状態とし、電圧印加は1日に約10時間づつ行いこれを累積した。この状態で50~100時間置きに誘電正接—電圧特性を測定し、電気的性能の変化を考察した。試料が小さく測定に誤差が入りやすいので、試料の製作特に補強絶縁、電極構成には細心の注意を払い、第2図に示すような構造とした。また油浸量は実際のケーブルよりもかなり少なくし、末端部より油が電極下に流入しないようにした。

試料の製作条件としては、紙厚を0.125mm, 0.100mmの2種とし、紙巻きをバットラップ (Butt-lap) とネガティブラップ (Negative-lap) の2種として含浸油は4種のものを用いた。また印加電圧は、絶縁の最外層にあ

るポイドまで放電する電圧として8kVを選び、周波数は160c/sと60c/sの2種とし、これに全然電圧を印加しないものを加えて計3種として試料総数48個について実験を行った。なお予備実験としては類似の構造で、導体断面積100mm<sup>2</sup>、絶縁厚1mm、長さ300mmのものについて同様な方法で実験を行った。

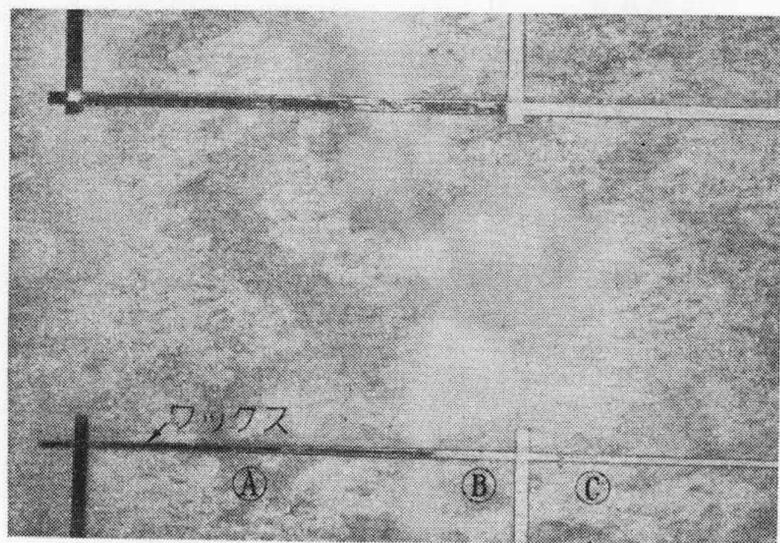
### 〔III〕 実験結果とその検討

#### (1) 一般的考察

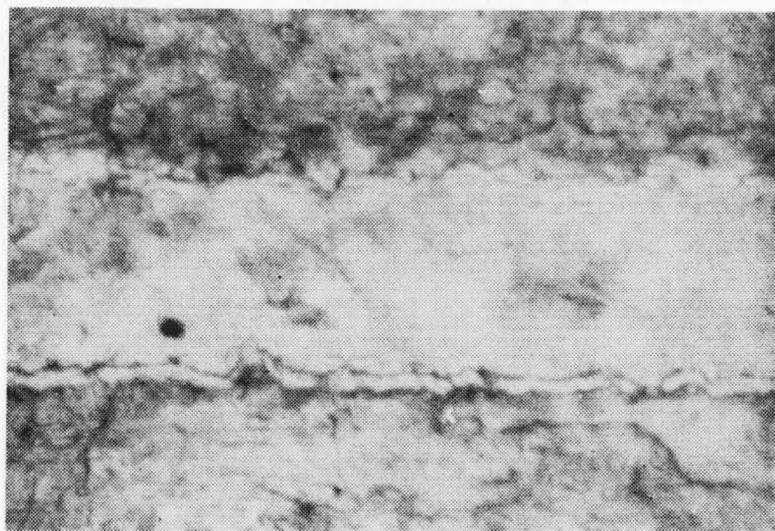
自己回復作用は普通イオン化開始電圧の上昇をさすものであるが、実験の結果では非常にばらつきの多い結果であった。したがって機構の解明にはほかの特性の変化をも総合的に検討する必要がある。ゆえに相互に関連のある実験結果を述べる前に、文献<sup>(1)(2)</sup>、予備実験、モデルポイドによる実験で得られた結果を参考として、ポイド放電によつてケーブル内で起ると考えられる変化を列挙して考察し、これとモデルケーブルによる実験結果を比較して実際にケーブルで起る変化と、その現象の機構を確かめるという方法をとることとする。

#### (a) 化学的变化

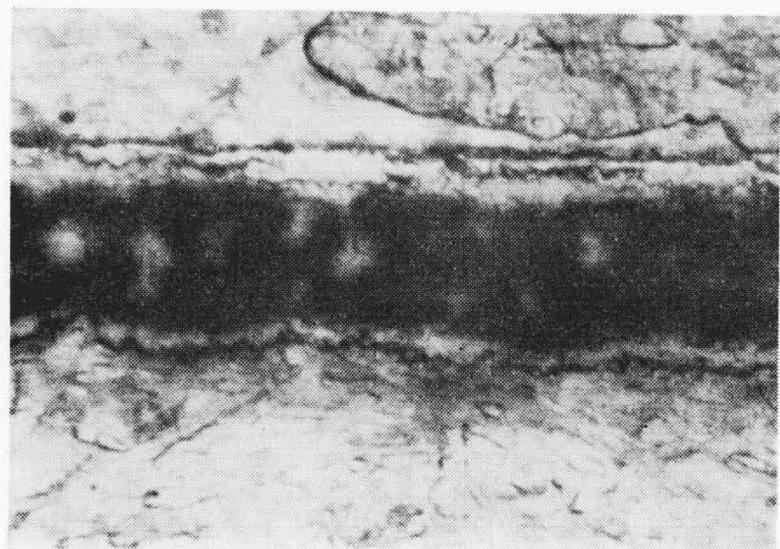
まず最初に油浸紙の化学的变化が考えられる。これは放電による電子の衝撃、ならびに局所的な温度



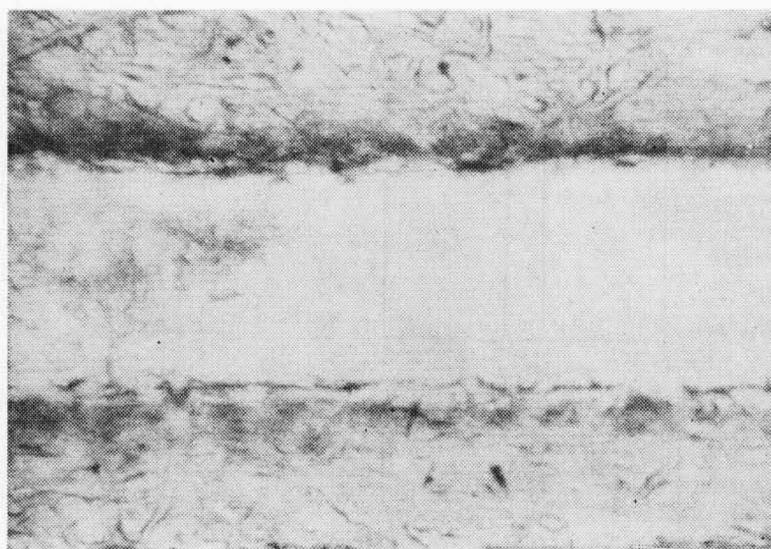
高電界部 ← ————— → 低電界部



(B)部



(A)部



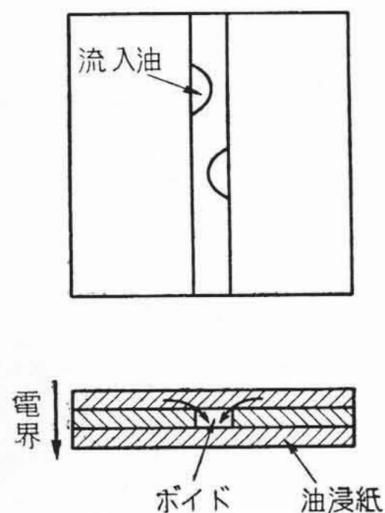
(C)部

第3図 放電によるワックスの生成状況

上昇により紙または油が変性することで、油はいわゆるワックス化を起す。このことが電気的特性に及ぼす影響としては、誘電正接、誘電率の増大などである<sup>(3)(4)</sup>。また油のワックス化がボイド中の油、またさらにボイドに流入してくる油をそこに固定してゆく作用として働けば、イオン化開始電圧の上昇することが考えられる<sup>(1)</sup>。次にボイド内面のごく薄い層の変化として、たとえば内面の導電化、小突起の消滅などが考えられ、これによつてイオン化開始電圧の上昇、静電容量の増加などが起る。モデルボイドによる実験では、ガラス板間の放電部分に比べボイド内の放電は電圧印加後2~3時間で放電がかなり減少するのが認められ、ワックス化した油でボイドが充填されてゆく状態は第3図に示すとおりである。これらの変化は放電の局部的集中による異状高温などが起らないかぎり、放電によつて与えられるエネルギーに關係する変化と考えることができる<sup>(5)</sup>。

(b) 物理的变化

物理的变化としてはボイド中に油が流入してくることであるが、これがどのようにして起るかということが各実験者の意見のわかれる点である。G. B. Shanklin 氏の自己回復作用についての考え方を要約すれば、ケーブルの心線に近い高電界部のボイドへは、毛細管現象と、誘電率の差異による静電気力によつて油が流入し、ここで油のワックス化が起りボイドが消失するということである。筆者は実験により現象としては上記のことが起ることを知つたが、油の移動の原因については別の考えをつもに至つた。まず絶縁の薄いモデルケーブルについての実験では、イオン化開始電圧以上の電圧を印加したものはいずれも放電量の顕著な減少があり、これらの解体結果では油は

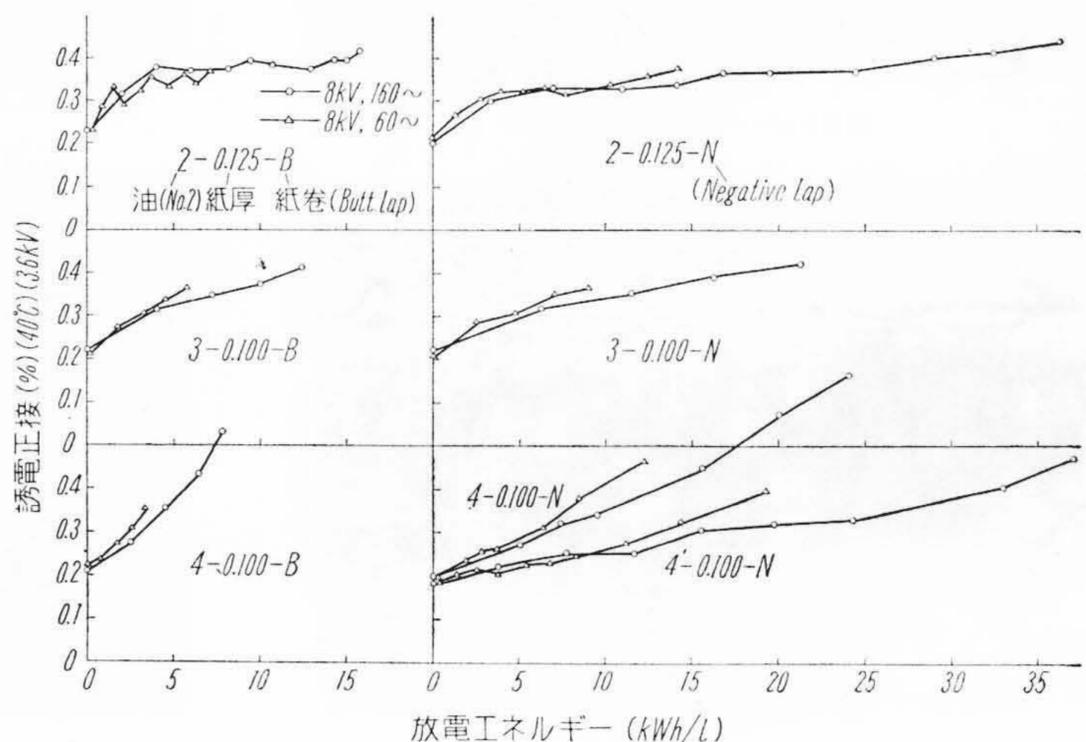


第4図 ボイド放電による油の流入状況

ボイドへ流入していることが認められた。またイオン化開始電圧以下の電圧を印加したものは電圧を印加しないものと有意差がなく、単なる静電気力による油の移動ということは考え方に無理があることが判明した。次にモデルボイドによる実験で、油浸量の多いものでは(約35%)放電が起ると第4図に示すように印加電界と直角の方向に油が流入してくることがみられた。この場合油は細かい泡状となつて流入し、ボイドはしだいに消滅してゆくのが認められた。この試料は油浸量が多いために短時間でこのようなことがみられたが、実際のケーブルでも同様な変化が徐々に起るものと考えられる。以上より、ケーブルの使用中に自己回復作用に關係のあるような油の移動が起るためにはボイド中で放電が起ることが必要条件であることが判明した。すなわちボイド中で放電が起ると局部的な電界の大きな歪のために油がボイドに流入するものと考えられる。さらに一歩進んで考えれば、高電界部の油がボイド部でワックス化してゆけば外側の油は毛細管現象などで中心部に入ってくることも考えられる。このような油の移動によつては当然イオン化開始電圧の上昇、静電容量の変化などが考えられる。これらの変化は放電のエネルギーよりもむしろ印加電圧の大きさと、電圧印加時間に關係する変化と思われる。

次に今回の実験とはたいして關係がないが、ケーブルに負荷の周期が加えられれば、熱による膨脹、収縮により油は移動し、油のワックス化と関連し、自己回復作用に關係のあることは当然考えられることである。

以上が大体ボイド放電による変化と考えられるもので



第5図 ボイド放電による絶縁の劣化

あるが、これらは単独で起ることではなく、複雑な組合せとなるが、大別して、放電エネルギーに関する変化と放電時間に関する変化があるので、これらについてモデルケーブルの実験結果を検討することにした。

(2) モデルケーブルによる実験結果

(a) 放電による絶縁劣化

放電劣化を表わすものとして、誘電正接の変化の一例を第5図に示した。ボイド状態が同じで、電圧の大きさが等しければ、放電によるエネルギーは低周波領域では電源周波数に比例する<sup>(5)</sup>。160c/sと60c/sの電圧を印加したものを比較すると、放電エネルギーについては両者はほぼ同様な変化をしてい

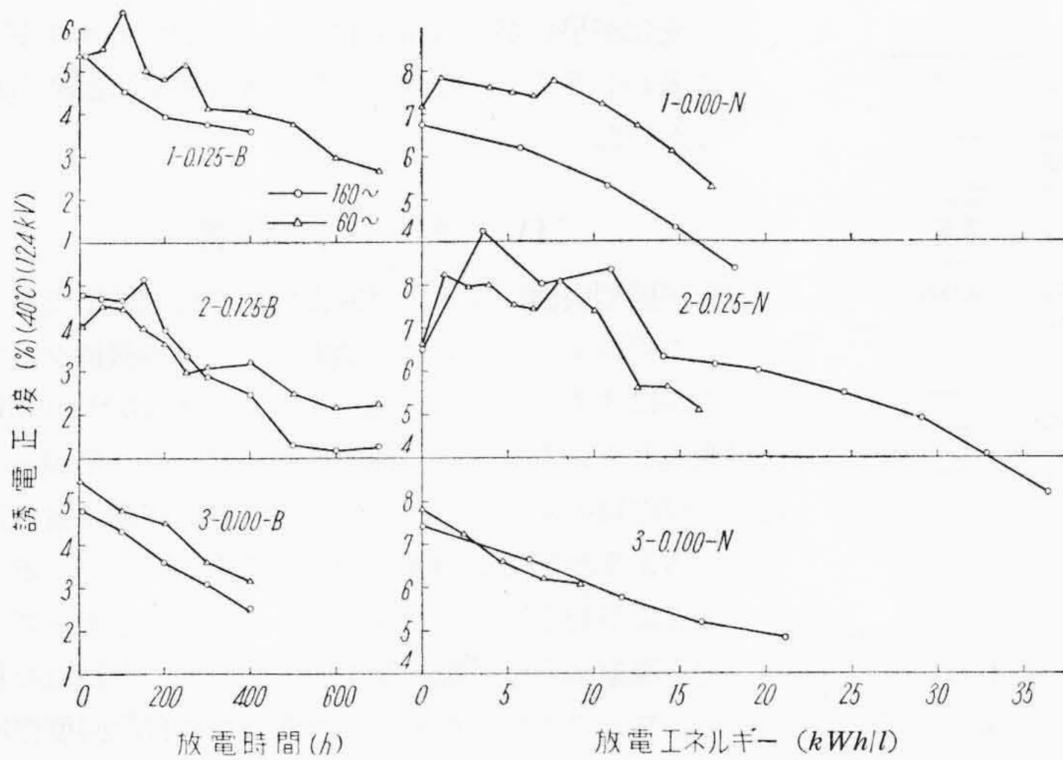
ることが認められ、前項で考察した結果が確認された。ここで油No.4で極度に油浸量の少ないものでは(図には4'として示す)劣化の進行がおそく、ボイド放電で劣化するものは油が主体であることが示れきた。油による差異は厳密な結果ではないが、油No.4が好ましくないことは推定できる。

(b) 放電量の変化

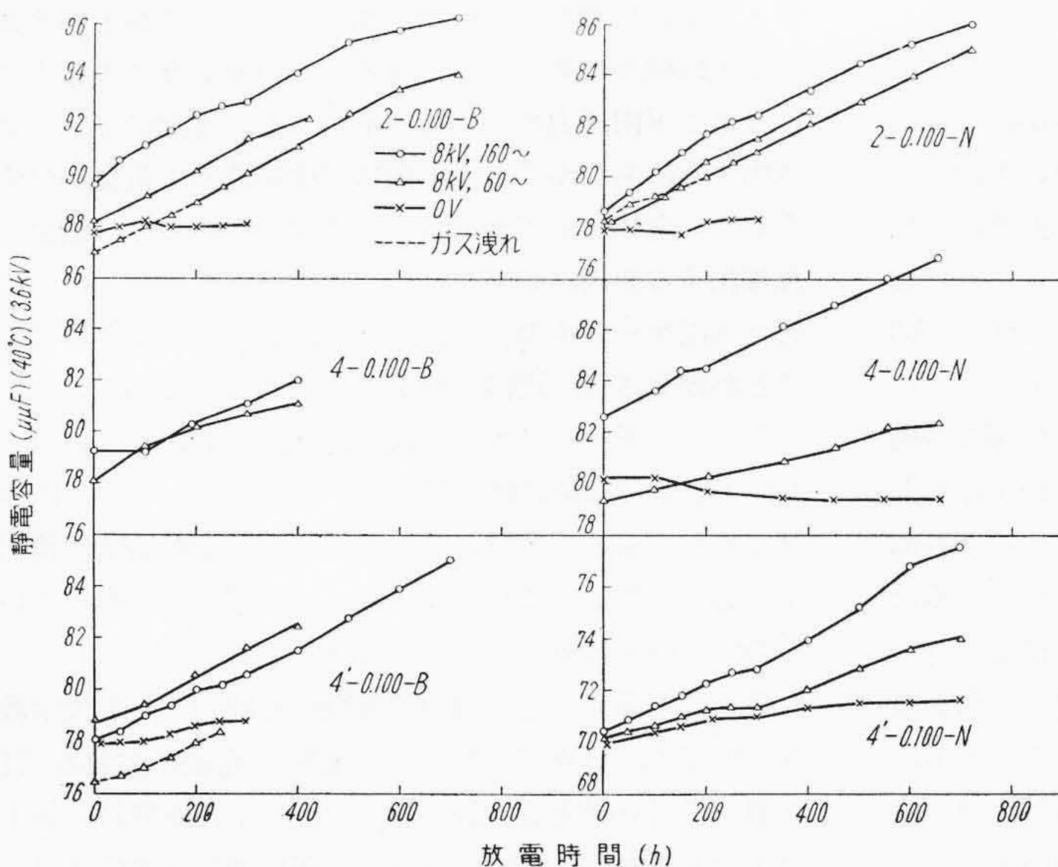
放電量の変化を示すものとしてイオン化開始電圧の約2倍の電圧12.4kVの誘電正接の変化の一例を第6図に示した。この放電量の変化は不規則であるが大体の傾向としてはバットラップではほぼ放電時間に関係して変化し、ネガティブラップでは放電エネルギーに関係して変化していることが、160c/sと60c/sを印加したものの比較より示される。すなわち、バットラップとネガティブラップについて放電量の変化を横軸にそれぞれ放電時間、放電エネルギーで示すと、160c/sと、60c/sのものは同様な変化傾向を示している。このことはさきに考察したように、ケーブル内では化学的変化と同時に物理的変化が起っていることを示すもので、バットラップとネガティブラップで両者の起る割合が異なるのは、バットラップの場合ボイドの生ずる可能性が少なく、移動する油は等しいと考えれば容易に理解できる変化傾向である。

(c) 静電容量の変化

変化の一例を第7図に示した。ネガティブラップでは多少放電エネルギーに関する変化もみられるが、大体の傾向は放電時間によつて変化している。このことは誘電率の増加ということよりも、油の移動、ボイドの変形<sup>(6)</sup>などの物理的原因が大きく作用するものである。この場合移動する油の供給源が端末部からでないことは油浸量のきわめて少ない試料(油4')でも同様な変化をしていることより知ることができる。また図中に実験の途中で容器内に空気が入ったものを点線で示したが、これらの誘電正接は不連続的に変化してい



第6図 放電量の変化



第7図 静電容量の変化

第1表 電圧印加後のイオン化開始電圧 (kV)

油	電圧		8kV, 160c/s		8kV, 60c/s		OV	
	紙厚	紙巻	B	N	B	N	B	N
			1	0.125	6.8	6.0	6.7	6.0
		0.100	7.1	5.6	6.9	6.1	5.9	5.0
	2	0.125	6.6	6.2	6.4	6.5	6.2	6.0
		0.100	6.4	6.2	6.1	6.2	5.5	5.0
	3	0.125	6.3	6.1	6.1	5.7	5.5	5.3
		0.100	6.4	6.0	6.1	6.0	5.5	5.5
	4	0.125	6.9	5.8	6.9	6.5	5.4	5.8
		0.100	6.8	7.1	6.5	6.8	5.8	5.4

第2表 要因分析結果

要因	変動	自由度	不偏分散	分散比
油 (O)	202.750	3	67.583	17.841**
紙厚 (P)	0.125	1	0.125	—
紙巻 (L)	84.500	1	84.500	22.308**
電圧 (E)	10.125	1	10.125	2.673
O×P	9.625	3	3.208	—
O×L	113.250	3	37.750	9.966**
O×E	11.125	3	3.708	—
P×L	1.125	1	1.125	—
P×E	0	1	0	—
L×E	6.125	1	6.125	—
<sup>3</sup> / <sub>4</sub> 重交互作用	49.250	13	3.788	—
O.P.L.E.	488.000	31	—	—

るのに反し静電容量には空気の影響がみられない。このことからポリエチレンケーブル<sup>(7)</sup>のようなボイド内面の導電化の現象はガス圧ケーブルの場合あまり起らず、性能変化の原因ではないと考えることができる。

(d) イオン化開始電圧の変化

最後にイオン化開始電圧の変化であるが、さきに述べたように種々の要因の組合せで起り、実験では試料の状態も厳密な意味では等しくないで、変化の過程をみるとばらつきが多い結果であった。ここでは途中の変化は一応除外して電圧印加後600~700時間で一応イオン化開始電圧の飽和的傾向がみられるので、これを第1表に示した。表より電圧印加の効果ははつきりと認められる。次にこの電圧を印加しなかつたものを除外し、イオン化開始電圧の上昇に対して各要因がいかに関与しているかを検討するために3重以上の交互作用を誤差としてF検定を行った結果を第2表に示した。第2表に有意と出たものは油と、紙巻条件と、これらの交互作用であるが、このうち油についてみるとイオン化開始電圧の順序は Shanklin 氏の述べたように粘度の低いものが自己回復作用が顕著であるという結果は得られなかつ

た。また油単独の放電劣化の実験ではワックス化しやすいものとワックス化しにくいものがあるが、この順序は必ずしも一致していない。したがってこの現象は油のほかの性質にも関係があることが考えられる。紙巻きについてはバットラップの方が好ましい結果であり、バットラップがボイドの少ないことより想像しうる常識的結論と一致している。両者の交互作用は、この実験では油 No. 4 が高粘度のために油抜きの際に残存油が多く、ネガティブラップでも比較的イオン化開始電圧の上昇が大きかつたことに原因しているものと思われる。紙厚は有意差はないが、変化の過程をみれば多少は薄い方が変化が早いようであり、また周波数は 160 c/s の方が明らかに変化が早い。放電劣化のように放電エネルギーで表わしうるような規則的な大きな差異は認められなかつた。

〔IV〕 結 言

以上が模型実験による自己回復作用の検討結果であるが、この実験よりイオン化開始電圧の上昇の機構をかなり明らかにすることができた。すなわち G.B. Shanklin 氏が発表しているように、油の移動とワックス化が一応自己回復作用の原因と考えられるが、油の移動は彼の述べているような単なる静電気力によるものでなく、ボイド中で放電が起ることに起因している。しかしケーブル内で起る現象は非常に複雑なものであつて、含浸油の粘度とか、ワックス化の難易とかでただちに自己回復作用を予測することは困難である。放電によつて起る現象は一般にばらつきの多いものであるし、ボイド中の放電を考えても、放電がどの程度局部的に集中するかということなどは種々の条件で変化する。このほかガスの発生によるボイド内圧力の変化なども起るし、また油がワックス化するにあつても局部的に固化が進んで亀裂が生ずるもの、全体としてゴム状に変化するものなど、結果を複雑化する要因は数限りなく存在する。しかしとにかく低ガス圧ケーブルの自己回復作用ということは存在することが確認され、機構の概略を解明することができた。さらにガス圧ケーブルの性能を明らかにし、よりいつそう向上させるためには実際のケーブルについてさらに検討すること、ボイド放電と絶縁耐力の関係を組織的に検討する必要がある。これらについては目下実験を進めているので、稿を改めて報告することにした。

終りに本研究に対し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者各位、日立製作所日立研究所々長三浦博士、牧主任研究員、井上主任および実験に御協力下さつた関係者各位に深謝申し上げます。

参考文献

- (1) G.B. Shanklin: Trans. A.I.E.E. 63 549 (1944)  
 (2) A. Gemant: "Liquid Dielectrics" Wiley, New York (1933)  
 (3) 加子, 下山田: 日立評論 別冊15号 32 (昭 31)  
 (4) J. Sticher, J. D.Piper: Ind. Eng. Chem. 33 1567 (1941)  
 (5) T. Rummel: Wiss, Veröff. Siemens. 19 278 (1940)  
 (6) A.P. Altshuller: J. Phys. Chem. 58 544 (1954)  
 (7) R. Davis, A.E.W. Austen: P.I.E.E. III 94 154 (1947)

日立電線関係の論文紹介 (その2)

(第25頁より続く)

- (8) 621. 315. 687. 22: 621. 315. 555  
 山本三郎, 福田重穂: ACSR (鋼心アルミ撚線) 接続用圧縮スリーブの把持力, 日立評論 38 (9) 1201 (昭 31-9)
- (9) 621. 315. 1. 001. 2: 531. 746  
 岡安一彦, 堀口二三男: 弛角測定用クリノメータ, オーム 43 (13) 1293 (昭 31-10)
- (10) 621. 315. 555: 699. 71: 620. 197. 6  
 山路賢吉, 下山田富保: ACSR (鋼心アルミ撚線) の防蝕処理, 日立評論 別冊15号 13 (昭 31-10)  
 ACSRは普通のふんい気では, 長年月の間でも腐蝕による事故を起すようなことはないが, 海岸線付近または火山, 工場地帯に架設された場合は, 主として塩水, 亜硫酸ガスなどによる腐蝕のため, その寿命が著しく減少するため, 当然その防蝕処理が問題となってくる。  
 ACSRの防蝕処理には種々の方法が考えられるが, 著者らの食塩水噴霧試験ならびに亜硫酸ガス曝露試験の結果より考えて鋼心上にラストループを塗布し, その上にマイラーポリエステルフィルムを巻きつける防蝕処理法を案出した。この日立防蝕処理 ACSR は下記に示すすぐれた種々の特長をもっている。  
 (1) 防蝕効果が大きい。  
 (2) 耐熱, 耐老化性が大きい。  
 (3) 防蝕層が強靱である。  
 (4) 直線接続部に雨水の侵入がなく, 腐蝕の懸念がない。  
 (5) 接続が容易である。  
 (6) 重量, 外径は一般の ACSR とほとんど変わらない。
- (11) 621. 315. 1. 002: 531. 746  
 山本義行(電発), 金子喜八郎(電発), 久本 方, 大和和夫: 架空送電線の弛角測定用クリノメータ, 日立評論 39 (3) 365 (昭 32-3)  
 架空送電線の弛角測定用クリノメータに関してつぎの諸点を述べている。  
 (1) クリノメータ応用の理論的根拠となる弛度計算法(既知の設計条件を入れ弛角を算出する方法)  
 (2) 本研究で検討した遠隔測定式静電容量型クリノメータの機構および構造  
 (3) このクリノメータを佐久間東幹線の架線工事に応用した一例  
 これらを総括し, 著者らの完成した弛角測定用クリノメータは, 今後の能率的架線工事に活用できると結んでいる。
- [II] 電力ケーブル関係
- (1) 621. 315. 2. 014. 6: 620. 193. 7: 621. 315. 2  
 工藤大二, 鈴木 博: 軽防蝕ケーブルの二, 三について, 日立評論 34 (9) 1063 (昭 27-9)
- (2) 621. 315. 212: 621. 879. 24  
 高橋長一郎, 橋本博治: ドレツジャーケーブルの特性向上に関する考察, 日立評論 35 (3) 541 (昭 28-3)
- (3) 621. 315. 336. 96  
 久本 方, 橋本博治: 塩化ビニル電線の短時間電流容量, 日立評論 35 (3) 585 (昭 28-3)
- (4) 621. 315. 212. 051. 2: 621. 311  
 橋本博治, 加子泰彦: 発電所主幹ケーブルの電流不平衡, 日立評論 別冊4号 123 (昭 28-12)
- (5) 621. 315. 2. 051. 2: 621. 311  
 田中照敏(九電), 石橋作五郎(九電), 橋本博治, 橋本清隆, 加子泰彦: 発電所主幹ケーブルの経済的計画, 日立評論 36 (7) 1161 (昭 29-7)
- (6) 621. 315. 211. 3. 027. 7  
 高橋長一郎, 今井利宣, 橋本博治: 特別高圧引込用としての 60 kV 単心油入ケーブル, 日立評論 別冊7号 129 (昭 29-7)
- (7) 621. 315. 2: 679. 58  
 橋本博治, 川和田七郎: ポリエチレン電力ケーブルの熱的特性, 日立評論 36 (8) 1281 (昭 29-8)
- (8) 621. 315. 2. 063: 66. 047. 2  
 河合麟次郎, 間瀬喜好, 工藤大二: 電力ケーブルの真空乾燥における理論的考察, 日立評論, 別冊9号 25 (昭 30-3)
- (9) 621. 315. 2. 027. 3: 621. 315. 1. 028. 2: 621. 317. 33  
 加子泰彦: 分割導体ケーブルの実効抵抗, 日立評論 別冊9号 39 (昭 30-3)
- (10) 621. 315. 2. 051. 2  
 橋本博治: 発電所主幹ケーブルの配列における諸問題, 日立評論 別冊9号 49 (昭 30-3)
- (11) 621. 315. 2. 051. 2  
 橋本博治: 主幹ケーブルの配列における諸問題, オーム 42 (6) 515 (昭 30-5)
- (12) 621. 315. 2. 051. 2: 621. 311  
 H. Hashimoto: On the Arrangement of Main Cables at Power Stations, Hitachi Rev. No. 8 31 (Jan. 1955)
- (13) 621. 315. 615. 2. 011. 5: 621. 315. 2. 027. 3  
 依田文吉: 高電圧ケーブル油の誘電現象, 日立評論 38 (9) 1325 (昭 30-9)
- (14) 621. 315. 336. 1. 027. 3: 621. 319. 74  
 橋本博治: 高圧配電線における感電とその対策, 日立評論 37 (11) 1559 (昭 30-11)
- (15) 621. 315. 211. 3  
 高橋長一郎, 今井敏雄: 王子製紙工業株式会社納 60 kV 3心 OF ケーブル, 日立評論 38 (5) 721 (昭 31-5)

(第41頁へ続く)