

UDC 537.528: 546.17
621.315.615.015.533

論 文

51-A 41

液体窒素中の部分放電特性

名古屋大学 小 崎 正 光
名古屋大学 羽 根 良 成
名古屋大学 井 坂 進
名古屋大学 堀 井 憲 爾

1. ま え が き

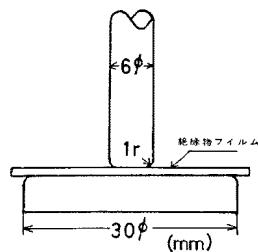
電力ケーブルや回転機、変圧器などの電力機器は強制冷却により大容量化が進められているが、将来は液体窒素冷却の極低温電力機器や、更には液体ヘリウム冷却の超電導機器の開発により GVA 級の大容量化も可能になるであろう。これに伴って、極低温領域における電気絶縁に関する研究がますます重要となってくる。実用的な極低温電気絶縁構成として実験的にも取り上げられ検討の行なわれている固体（合成紙あるいは高分子フィルム）と冷媒との複合絶縁系においては、固体絶縁物の劣化および最終的な破壊にかかわり合う液中あるいは気中の部分放電に関する研究が、長期にわたる信頼性のうえから非常に重要な課題と考えられる。しかしながら、この分野の研究は始められたばかりである⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。また学問的にも極低温領域での研究は、室温以上での研究とは異なった立場から現象を眺めることができる点で極めて興味あるものと考えられる。

本論文は、このような観点から液体窒素中に生ずる部分放電現象を種々検討した結果をまとめたものである。すなわち、液体窒素自身の絶縁破壊特性、複合絶縁系の部分放電特性、高分子フィルムの部分放電によ

る寿命特性、リヒテンベルグ写真図形による沿面部分放電の観測、液中部分放電を介した高分子フィルムのインパルス破壊など、液体窒素中の部分放電に関する諸特性と、それに及ぼす液体加圧の効果を系統立てて実験的に検討した。これらの諸結果から、液体窒素を冷媒および電気絶縁媒体として用いた複合絶縁構成は、極低温電気絶縁として十分機能しうるものと判断された。

2. 実験方法、装置および試料

〈2・1〉電極系 液体窒素自身の絶縁破壊強度を調べるにあたっては球（19mm 直径）対平板のステンレス鋼製電極を用いた。部分放電特性の測定は第1図に示したステンレス鋼製 IEC (b) 電極に 100 μ m 厚程度の高分子フィルムをそう入し、これを液体窒素中に浸漬した状態で行なった。以上の実験には交流電圧（60Hz）を印加した。使用した液体窒素については後述するように、窒素ガスポンベからのガスを液化して使用しており、特に精製はしていないが比較的純粋なものである。



第1図 IEC (b) 電極

Fig. 1. IEC (b) electrodes.

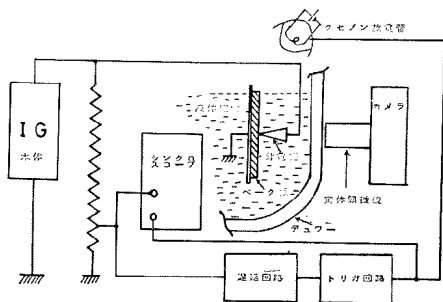
Partial Discharge in Liquid Nitrogen. By Masamitsu Kosaki, Member, Yoshinari Hane, Member, Susumu Isaka, Member & Kenji Horii, Member (Department of Electrical Engineering, Nagoya University).

小崎正光：正員，名古屋大学工学部電気学科講師

羽根良成：正員，名古屋大学大学院工学研究科修士課程〔現在，古河電気工業（株）勤務〕

井坂 進：正員，名古屋大学大学院工学研究科修士課程〔現在，東京芝浦電気（株）勤務〕

堀井憲爾：正員，名古屋大学工学部電気学科教授



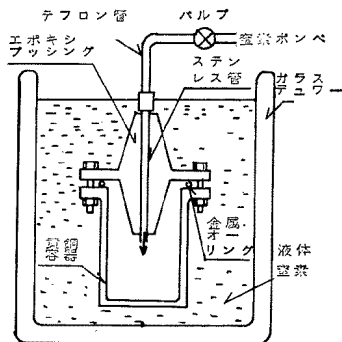
第 2 図 放電により形成された気泡の
写真撮影装置

Fig. 2. Schematic diagram to take a photograph of bubbles formed by discharge.

沿面放電によるリヒテンベルグ図形を得る場合には、部分放電特性の場合と同様 IEC(b) 電極にカラーシートフィルム (エクタカラー) をそう入し、液体窒素中でインパルス電圧 ($1 \times 40 \mu\text{s}$) を印加した。また液体窒素中の部分放電を介して高分子フィルムを破壊させる実験においては、半球棒 (5mm 直径) と平板電極を用い平板上に数 $10 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ 厚の高分子フィルムをはり付けて、半球棒電極をフィルム上約 $250 \mu\text{m}$ に固定しインパルス電圧を印加した。この場合、液体窒素層の部分破壊は必ず発生する条件を満たすような電圧を印加した。

沿面放電を固体絶縁物表面に発生させた際に形成される気泡の成長の過程を調べる場合には、第 2 図に示すようにペークライト板 (2mm 厚) をそう入した針対平板電極系を液体窒素用の窓つきガラスデューワーに入れ、実体顕微鏡を通して写真撮影した。針電極は木綿 3 号針を適当な長さに切断して使用した。印加電圧 (インパルス電圧) の信号を遅延回路で設定した時間遅らせてキセノン放電管 (発光時間 $10 \mu\text{s}$) をトリガして写真撮影を行なっている。

〈2.2〉 圧力容器 液体窒素の部分放電特性や絶縁破壊強度に及ぼす静水圧の効果を測定するにあたっては、第 3 図に示した圧力容器を用いて実験を行なった。まず圧力容器内の気体を十分窒素ガスで置換したのち、窒素ガスをボンベから数気圧ケージで導入した状態に保持する。外部のデューワーに液体窒素を満たすと容器内の窒素ガスが液化され、外部の液体窒素は盛んに沸騰する。液化の様子を直接見ることはできないが、容器の外部側壁に見られる発泡部分の境界線が底から上部フランジに向かって移動していくことから見当はつけられる。内容積約 150 ml の容器において約 20 分で完全に液化は完了し、外部の液体窒素は定



第 3 図 液体窒素用加圧容器

Fig. 3. Pressure vessel for liquid nitrogen.

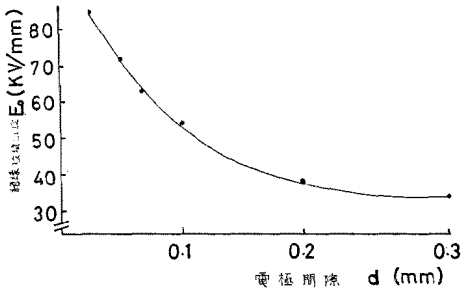
常的な沸騰に収まる。このようにして比較的純物の少ない液体窒素が得られ、かつ容器内の圧力は接続しているボンベにより、任意に変えることができる。この圧力容器内に上記の各種電極系を装着して加圧実験を行なった。しかし、極低温での圧力の密閉は容易ではなく、ゴム、シリコンゴム、テフロンは低温で硬化、収縮のため使用できず、鉛、はんだなどの O リングを使用したが、メタル O リング (大日本電線社製) が比較的良好な特性を示し、反復して使用できる利点があるので、最近では専らこれを用いている。

〈2.3〉 測定および試料 部分放電はオシロスコープにて観測し、放電開始電圧、最大放電電荷を調べた。またインパルス破壊の実験では、オシロスコープの電圧波形で破壊を確認した。

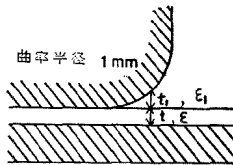
試料としては、低密度ポリエチレン (ユカロン LK 50), ポリエチレン合成紙 (タイベック, カレンダー処理), ポリエチレンテレフタレート (ルミラー), ポリカーボネートを用いた。厚さはいずれも $100 \mu\text{m}$ あるいはそれ以下である。

3. 実験結果と検討

〈3.1〉 液体窒素の絶縁破壊強度と部分放電開始電圧 液体窒素中の IEC(b) 電極に $100 \mu\text{m}$ 程度のポリエチレンフィルムをそう入して印加交流電圧を上昇させていくと、まず 10^3pC オーダの微弱な部分放電が間欠的に発生する。更に電圧を上昇させていくと、この部分放電のひん度が増大するとともに時折 10^6pC に達する大きな放電が特徴ある音を伴って発生するようになる。また、電圧を降下させると間欠放電の開始電圧より低い電圧で消滅する。大気圧沸騰状態の液体窒素中での部分放電については、すでに詳細に報告されているが⁽²⁾、筆者らの実験結果にも類似した傾向が見られた⁽³⁾。



第 4 図 液体窒素破壊強度のギャップ長依存性
Fig. 4. Gap length dependence of electric strength of liquid nitrogen.



第 5 図 IEC(b) 電極の端部
Fig. 5. Edge of IEC(b) electrodes.

部分放電は絶縁破壊強度の小さい液中で発生していることは明らかであるので、これら部分放電の開始電圧と液体窒素の絶縁破壊強度を関連づけて検討するために、大気圧下の液体窒素の絶縁破壊強度 (E_0) を短い電極間げき (d) について調べた結果を第 4 図に示した。各点の標準偏差は平均値の 10~15% 程度であり、 $E_0 = Ad^n$ (A と n は定数) の実験式から求まる n は -0.3 となっている。

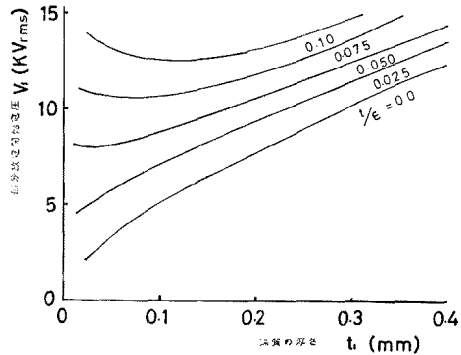
一般に IEC(b) 電極系に絶縁物フィルムをそう入して測定される気中での部分放電開始電圧 (V_1) は、絶縁物の厚さ (t) と誘電率 (ϵ) が決定されれば一義的に求められることは良く知られている⁽⁶⁾。すなわち、電極周辺部は第 5 図に示すように、外部に向かって開く厚さ (t_1) の媒質層 (誘電率 ϵ_1) と厚さ (t) の絶縁物層 (誘電率 ϵ) との直列構造となっている。従って、電気力線の乱れが大きくなければ印加電圧 (V) は (1) 式のように記述される。

$$V = E_1 \epsilon_1 (t_1 / \epsilon_1 + t / \epsilon) \dots\dots\dots (1)$$

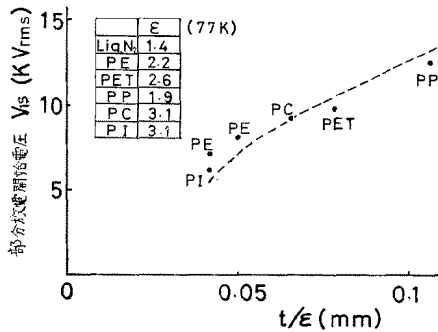
部分放電は媒質層の電界 (E_1) が媒質自身の破壊電界 (E_0) に達したときに発生すると考えられる。 $E_0 = A_1 t_1^n$ なる関係が実験的に求まっておれば、 t/ϵ を一定として t_1 での部分放電開始電圧 (V_1) は (1) 式を用いて

$$V_1 = A_1 t_1^n \epsilon_1 (t_1 / \epsilon_1 + t / \epsilon) \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで $-1 < n < 0$ の条件があれば、 t_1 が 0 から無限大まで変化する間に、 V_1 の最小値 V_{1s} が求まり、部分放電開始電圧が一義的に定まる。すなわ



第 6 図 媒質の厚さと部分放電開始電圧の関係
Fig. 6. Partial discharge starting voltage as a function of medium thickness.



第 7 図 t_1/ϵ_1 と部分放電開始電圧特性
Fig. 7. Partial discharge starting voltage vs. t_1/ϵ_1 .

ち、第 5 図のような電極構成での部分放電開始電圧 V_1 は場所的に異なり、ある条件のもとでは ($-1 < n < 0$) 最小値 V_{1s} が求まることになる。気中放電に適用されているこれらの関係を液体窒素中での部分放電に適用した結果を以下に述べる。

第 4 図に示した短電極ギャップでの液体窒素の絶縁破壊強度 ($E_0 = Ad^{-0.3} \equiv E_1 = A_1 t_1^{-0.3}$) を (2) 式に代入し、 t/ϵ が与えられたときの t_1 と V_1 との関係の求めてみると第 6 図のようになり、 t/ϵ が 0.05mm 以上では V_1 の最小値が認められる。すなわち、最小値に対応する t_1 のギャップでまず部分放電が生じ、これがこの電極系における部分放電開始電圧 (V_{1s}) を決定することになる。第 7 図に t/ϵ の異なる各試料に対して V_{1s} の測定値を整理した結果を示す。一方、第 6 図の曲線群の最小値から求めた V_{1s} を点線で第 7 図中に描いたが、実測値とよく一致していることがわかる。

以上の結果から、液体窒素中での部分放電に関して (1) 式の考え方が適用されることがわかり、従って

ϵ/t が決定されればかなりの確度で V_{1s} を予想することが可能となると考えられる。

〈3・2〉 液体窒素中の部分放電の圧力特性 部分放電開始、消滅電圧に及ぼす加圧の効果を調べた結果を第8図に示したが、いずれの値も圧力とともに上昇している。また大気圧下で部分放電を発生させておき、電圧を一定に保ったまま圧力を上昇させると部分放電は消滅する場合のあることが明らかとなった。液体窒素自体の絶縁破壊強度は、第4図に示したように0.1mm程度の電極間げきで50kV/mm以上に達しており、短間げきでの強度はかなり高い。一方、77Kの窒素ガスの絶縁破壊電圧を調べたが、大気圧下でのそれは、室温の3気圧Gの破壊電圧にほぼ一致していることが判明した。この結果は、野口氏らが常温から-180°Cまでの窒素ガスの絶縁破壊電圧は密度を一定

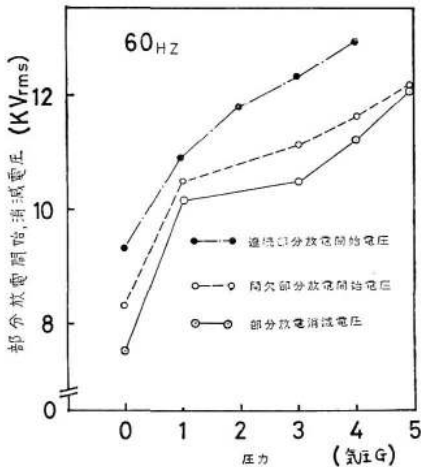
に保てば変化しないと報じた⁽⁷⁾ことと一致している。従って、大気圧下の液体窒素中に発生した気ほうの絶縁破壊強度は約12kV/mmと推定される。この値は液体窒素自体のそれに比してかなり低いので、気ほうが存在すればその中で放電が生じやすいと考えられる。

一方、最大放電電荷 (Q_{max}) を圧力をパラメータとして第9図に示した。各圧力において Q_{max} は電圧とともに増加しているが、同一電圧で比較すると Q_{max} は圧力の高いほうの方がむしろ小さくなる傾向が見られる。すなわち、発生する部分放電の面積が圧力とともに減小し、 Q_{max} が減少したと推定される。またパルスひん度も加圧により減少する。これらの結果を総合すると、加圧による部分放電開始電圧の上昇と Q_{max} の減小は、おそらく圧力とともに気ほうの形成が妨げられていく効果に起因していると思われる。

〈3・3〉 放電のリヒテンベルグ図形と気ほう形成の写真 液体窒素中の部分放電により形成された気ほうのふるまいを調べるために、インパルス電圧による放電写真図形(リヒテンベルグ図形)を求め、更に気ほうの発生と散逸過程のストロブ写真撮影を行なった。

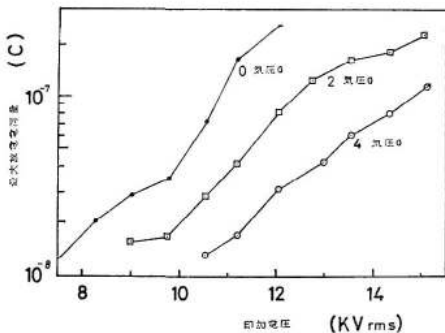
液体窒素温度でもリヒテンベルグ図形の得られることはすでに報告されているが⁽⁸⁾、筆者らはカラーフィルムを用いて図形を調べた結果、ストリーマが写真乳剤中に侵入するような現象のために正確な沿面放電図形が得難いことを指摘してきた⁽⁹⁾。そして、乳剤面を透明なセロファンテープで覆って、その上で液中沿面放電を発生させれば上述の効果を抑えてリヒテンベルグ図形が得られることが判明している。

第10図(a)および(b)にセロファンテープで覆っ



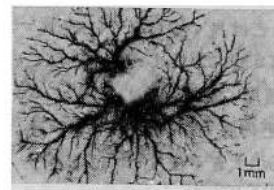
第8図 部分放電開始電圧の圧力特性

Fig. 8. Pressure dependence of partial discharge starting voltage.

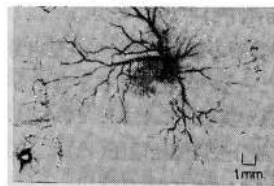


第9図 最大放電電荷の電圧特性

Fig. 9. Maximum charge of partial discharge vs. voltage.



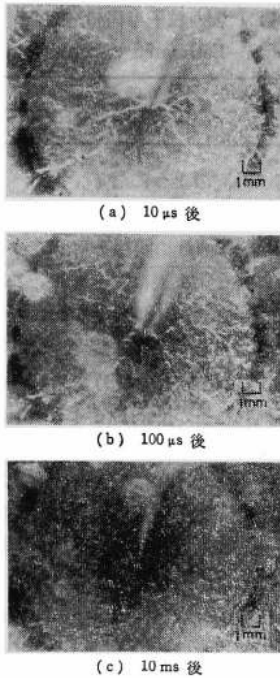
(a) 大気圧 +26 kV



(b) 4気圧G +26 kV

第10図 液体窒素中のリヒテンベルグ図形

Fig. 10. Lichtenberg figure of surface discharge in liquid nitrogen.



第 11 図 インパルス電圧 ($1/40\mu\text{s}+36\text{kV}$)
により大気圧下の液体窒素中に
生じた気ほうの写真

Fig. 11. Bubbles formed after discharge
by an impulse voltage ($1/40\mu\text{s}+36\text{kV}$ and
 0.1atm G).

たカラーシートフィルム上での液体窒素中の浴面放電図形とその圧力による影響を示した。ストリーマの色は青白い。セロファンテープのない場合はストリーマが乳剤層に侵入し黄色を呈する部分が現われる。図形の広がりや圧力によって大きく変化しないようであるが、枝分れの程度は加圧とともに減少している。

一方、浴面放電によって生じる気ほうのふるまいについて観測した結果を述べる。実験装置は第 3 図に示したものをを用い、インパルス電圧を印加して浴面放電を形成させたのち、設定した時間を経過させてキセノンフラッシュを点弧して得られた写真を第 11 図(a)から(c)までに示す。

放電開始直後から $10\mu\text{s}$ 経過した段階で放電路と思われる箇所はすでに気ほうの管ようになっており、その直径は太いところで $100\mu\text{m}$ 程度で、これはリヒテンベルク図形のストリーマの太さより若干太いようである。特記すべき事実は、この気ほうと見なされる図形が第 10 図のリヒテンベルク図形によく似ていることである。なお、放電光のみの明るさでは写真フィルムが感光しないことを確認している。その後、気

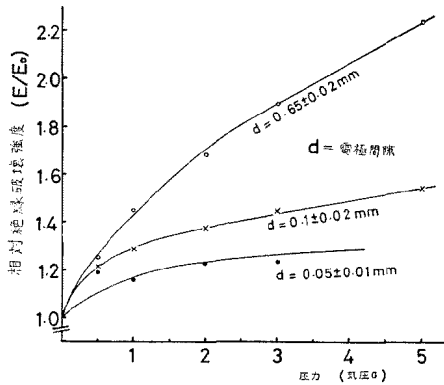
ほうの管は界面張力により分裂し、だ円体から球形の気ほうに成長する。第 11 図(b)には球形の気ほうとなったものも認められるが、その直径は最大のもので $250\mu\text{m}$ 程度である。10 ms 後には気ほうは針電極の周りに放射状に飛散しており、最も近いもので電極から 1 mm ほどのところにある。気ほうは $300\mu\text{m}$ 程度の径にまで成長して肉眼で観測できるようになり、最終的には数 mm 程度になって浮上する。Halpern 氏は液体(水素, アルゴン, ヘリウム)中でタングステン突起からの注入電流に起因する局部的温度上昇と気ほう化に要する時間を評価して数 10~数 100 ns を求めている⁽¹⁰⁾。また Krasucki 氏は n -ヘキサンにおける電圧印加に伴う気ほう形成に要する時間として 140 ns を求めている⁽¹¹⁾。従って、液体窒素中で $10\mu\text{s}$ で気ほうが観測されることは十分可能と考えられる。

商用交流電圧を印加した場合、部分放電は低電圧では間欠的な 10^3pC 程度の電荷で開始するが、電圧を高めていくと連続的になって 10^5pC に及ぶ大きな電荷の放電が観測されるのは、前半周期の放電により形成された気ほう中に引き続き半周期で放電が再点弧するためであることを推測させる。

〈3.4〉電界による発ほう機構 部分放電発生あるいは液体窒素自体の絶縁破壊のきっかけとなる気ほうが液中に偶存するものか、電界の印加による何らかの作用によって形成されるものであるかは興味ある問題である。前節に述べたように、いったん部分放電が発生すれば後続する部分放電には前半周期で発生した気ほうが影響を与えることは推測される。しかし、最初の部分放電の発生に関しては、本実験に用いた条件下で液体窒素は沸点あるいは沸点以下の温度にあって、特に電極近傍では電氣的以外にエネルギーの注入は考え難いので、気ほうの発生は電界に起因するものと思われる。そこで電界による気ほうの発生に関して検討を行ってみた。

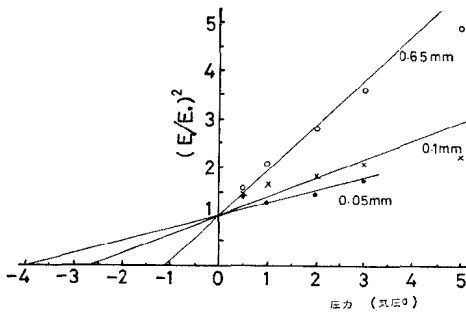
電極間げきをパラメータとした液体窒素自身の絶縁破壊強度(E)の圧力依存性を大気圧での絶縁破壊強度(E_0)との比で表わしたものを第 12 図に示した。いずれの電極間げきにおいても圧力とともに絶縁破壊強度は増大しているが、電極間げきの大きさによって増大の割合が違っている。実験結果からは電極間げきの大きいほうが上昇の割合が大きいうようである。

液体の破壊機構に明確な形で加圧の効果を導入したものとして Krasucki 氏の考え方が⁽¹⁰⁾、それによれば電極表面上に存在する導電性の微粒子あるいは電極の突起などにより電界の集中が生じ、電極と同極性の電荷が液体中に注入され、電極との間に反発力が



第 12 図 ギャップ長をパラメータとした破壊強度の圧力依存性

Fig. 12. Pressure dependence of electric strength with parameter of gap length.



第 13 図 圧力と $(E/E_0)^2$ の関係

Fig. 13. Relation between pressure and $(E/E_0)^2$.

生ずる。その静電力が液の静水圧 (P) と界面張力 (σ) による力 $2\sigma/R$ (ただし, R は電極表面上に存在する導電性微粒子もしくは突起などの曲率半径) の和に打ち勝つとき粒子の表面の圧力は零となり, 気ほうが発生する。その条件式は

$$E = 358 \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{2\sigma}{R} + P \right) \right\}^{1/2} \text{ (V/cm)} \dots \dots \dots (3)$$

ここで, P (dyn/cm²), σ (dyn/cm), R (cm), ϵ (誘電率) である。従って, R および σ が一定ならば発ぼうの起こる電界, すなわち絶縁破壊強度 (E) の平方と静水圧 P との間には直線関係が得られることになる。なお, 本実験では圧力容器が 77K で一定に保たれているから, σ はほぼ一定と考えられる。また導電性の不純物粒子もしくは電極面上の突起に関しては, 最も破壊に寄与する最大の半径 R を想定することは不合理ではないと思われる。そこで第 12 図の結果を大気圧での絶縁破壊強度 E_0 を基準として $(E/E_0)^2$ を求めて

第 1 表 粒子半径の推定値

Table 1. Estimated particle radius.

ギャップの長さ (mm)	0.05	0.1	0.65
粒子半径 R (μm)	0.046	0.07	0.16

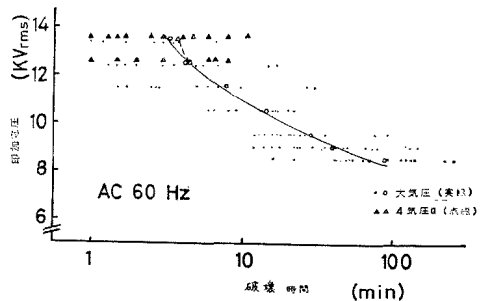
図示すると第 13 図のようになる。

次に, 第 13 図より $E=0$ に外そうしたときの圧力 P の値から $R=2\sigma/P$ の関係を用いて粒子の半径 R を求めてみた結果を第 1 表にまとめた。ここで, σ の値としては 77K での値 (8.86 dyn/cm) を代入した。この程度の大きさの粒子は液体窒素中に存在しうると考えられる。すなわち, 電極間げきの大きい場合にはより大きな不純物粒子が介入してくる確率が大きくなることを示唆しているかもしれない。これらの結果から直ちに結論を下すわけにはいかないが, 不純物粒子または電極面上の突起を介した電界による発ぼうが液体窒素の破壊あるいは複合絶縁系の部分放電の開始を支配していることは十分考えられる。

なお, 第 8 図の部分放電開始電圧の圧力による上昇率を第 12 図の液自身の破壊強度の圧力による上昇率と比較してみると, ギャップの長さが 0.05 mm の場合の結果と似ており, <3.1> 節で述べた最初の放電開始ギャップ長の考えたと照らして妥当な結果である。

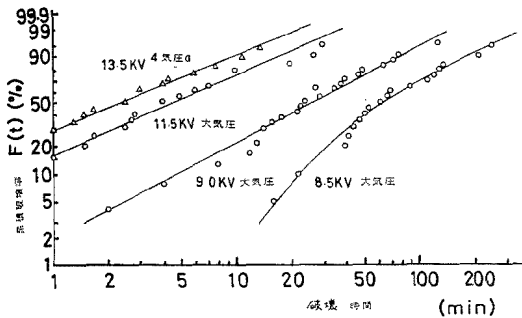
<3.5> 液体窒素中のポリエチレンフィルムの寿命

前節までに述べてきた特性をもつ部分放電に曝されたいくつかの高分子フィルムの寿命を測定したが, ポリエチレンではかなり長い期間に及ぶ特性が得られた反面, ポリエチレンテレフタレートやタイベックなどの 1 枚試料では電圧印加後わずかな時間内に破壊するようである。第 14 図に約 100 μm 厚の 1 枚のポリエチレンフィルムの寿命特性を描いたが, 大気圧下では部分放電開始電圧が低いので比較的広い電圧範囲にわたって寿命が測定される。一方, 加圧した場合その範



第 14 図 ポリエチレンフィルム (100 μm 厚) の寿命特性

Fig. 14. Life of polyethylene film of 100 μm thick.



第 15 図 ポリエチレンフィルム (100µm 厚) の破壊時間のワイブルプロット

Fig. 15. Weibull plotting of life of polyethylene film of 100µm thick.

第 2 表 ワイブルプロットの結果

Table 2. Results of Weibull plotting.

印加電圧 (kV _{rms})	0 気圧 G			4 気圧 G		
	n	m	μ	n	m	μ
8.5	19	1.0				
9.0	24	1.1	37.6			
9.5	25	1.0	23.3			
10.5	17	1.3	14.4			
11.5	19	0.9	7.5			
12.5	18	1.0	3.1	12	1.0	4.3
13.5	20	0.9	2.6	17	0.9	3.6

n: 試料数, m: 形状パラメータ, μ, 平均寿命 (min)

囲が狭くなる。一例として、4気圧で加圧したときの寿命特性を示したが、大気圧と比較して寿命はあまり変化がない。前節で述べたように、加圧により同じ電圧での Q_{max} と放電ひん度は減少しているが、寿命に与える効果はそれほど大きくないことがわかる。ただし、これらの結果は加圧効果を否定するものではなく、加圧した場合、部分放電開始電圧が高くなるので、加圧により部分放電を抑制しうる電圧範囲の寿命は飛躍的に改善される。

上述の破壊の原因を考察するために、第 14 図のデータをワイブル分布で整理した結果を第 15 図に示し、各種パラメータを第 2 表にまとめた。この結果からは、大気圧の放電開始電圧付近の特性を除いては形状パラメータは 1 に近く、破壊が偶発的な機構に支配されていることが示唆された。すなわち、部分放電のストリーマ先端が、ポリエチレンフィルム上に確率的に散在する弱点に到達して破壊に至ると思われる。

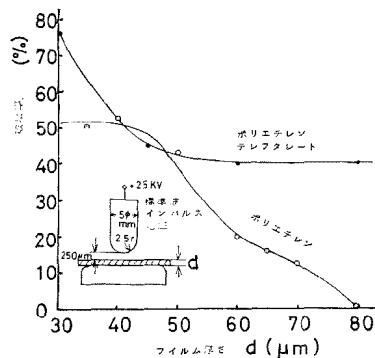
劣化の様子を調べた結果、比較的短時間に破壊した試料に破壊孔以外の劣化こん跡はない。電圧印加時間

の経過とともに白濁した電極の輪郭を示すリング状のものが見られるようになる。更に 8.5kV 印加の大気圧下で 1 時間以上で破壊した試料では、顕微鏡にて確認されるようなさん孔が見られる。液体窒素中での部分放電開始電界は高分子フィルムの絶縁破壊電界に近いので、100µm 厚程度の試料では液体窒素中に生じた部分放電ストリーマの直撃を受けて偶発的破壊が生じたと考えられる。

〈3.6〉 液体窒素中の部分放電を介した高分子フィルムの破壊 前節で述べたように 1 枚の高分子フィルム (100µm 厚程度) を比較した場合、ポリエチレンの耐部分放電性がポリエチレンテレフタレート (PET) などに比べて優れていることが指摘された。そこで単一インパルス電圧を印加して液体窒素層に生じた部分放電を介したポリエチレンと PET フィルムの破壊強度を調べた。実験に用いた電極構成は〈2.1〉節で述べたように、高分子フィルム上に 250µm の液体窒素の間げきを設け、25kV のインパルス電圧を印加する。この電圧では液体窒素層で確実に部分放電が生じている。

第 16 図に厚さを変化させた場合の各材料の破壊率を示したが、40~50µm 厚さでは両フィルムの破壊率には差がない。しかし、厚さが増大するとともにポリエチレンの破壊率は著しく低下していく。すなわち、液体窒素中の放電ストリーマは PET に侵入しやすいことが示唆され、特に 100µm 厚で比較した寿命特性で両者に顕著な差が生じたのは、この効果に起因していると考えられる。

ここで興味ある事実は、同一試料で繰り返し破壊を行なわせると、複数個の直径 50µm 程度の貫通孔が最小 0.2mm ほどに接近して生じることである。ギャッ



第 16 図 液体窒素中の部分放電を介した高分子フィルムの破壊率

Fig. 16. Breakdown percentage of polymer film by partial discharge in liquid nitrogen.

プの長さ $250\mu\text{m}$ を $5\text{mm}\phi$ の電極の曲率と比較すれば、ほぼ平等電界と考えられるので、液中ストリーマはランダムにフィルム表面に衝突すると考えられる。リヒテンベルグ図形の放電路先端の太さは数 $10\mu\text{m}$ であるので、ストリーマの先端がフィルムの弱点部に当たった瞬間に破壊が生ずる。その箇所破壊が生じない場合には、ストリーマは放射状に浴面に広がり始めるが、そのときはすでに電界緩和作用のためフィルムの破壊が起こりにくくなり、既存の貫通孔を通して放電するものと考えられる。PET の場合はポリエチレンに比べて $100\mu\text{m}$ 厚でもなおストリーマが貫通できる弱点部が多いものと考えられる。このような弱点破壊機構を考えると、積層構造により特性が改善される可能性が大きい、事実 Bulinski 氏らの報告によれば優れた寿命特性が得られている⁽⁶⁾。

5. ま と め

液体窒素中に生ずる部分放電を特に加圧効果を中心に種々の観点から検討を行なったが、以下に述べるような結果が得られた。

(1) 高分子フィルムをそう入した IEC(b) 電極系を液体窒素に浸漬したときの部分放電開始電圧は、高分子フィルムの厚さと誘電率が与えられれば予測することができるが、この結果は極低温液化ガスに特徴的に見られるものと考えられる。

(2) 部分放電開始電圧は液体窒素を 77K (大気圧の沸点) に保持した場合、加圧により上昇する。また同一電圧での最大放電電荷およびパルスひん度数は加圧により減少する。

(3) 液体窒素中の絶縁物表面にインパルス電圧を印加して得られた沿面放電のリヒテンベルグ図形と気ほう形成のストロボ写真から、放電路は $10\mu\text{s}$ では気ほう化しており、その後粒状になって 10ms 後には電極からやや離れて存在している。これらの気ほうが交流電圧印加時の繰り返し放電に寄与する効果が考えられる。

(4) 液体窒素自身の絶縁破壊強度の電極間げき長

依存性および圧力依存性から不純物粒子を介した電界発ほうによる破壊機構が支配的と推測した。

(5) 各種高分子 1 枚フィルムの耐部分放電性を調べた結果、ポリエチレンは比較的優れた特性を示し寿命を測定することができた。液体窒素の加圧が寿命に与える効果は大きくないが、部分放電の開始電圧を高める事実は重要である。ワイブル分布の結果からは偶発的な破壊が支配的である。

(6) 部分放電のストリーマを介した PE と PET フィルムの破壊を調べた結果、PE に比して PET は部分放電に弱いことが判明し、前項に述べた耐部分放電性と一致した結果を与えた。

これらの結果を総合して、液体窒素中の部分放電の状況は数気圧 G に加圧することにより部分放電開始電圧は大気圧に比してかなり上昇し、複合絶縁を構成するうえに好ましい特性を与えることがわかった。

終わりに、本研究の実験に協力いただいた卒業研究生 稲見正己(現在、大日本電線(株))、安藤延寿(現在、電信電話公社)、石川一吉(現在、関西電力(株))、近藤松悟(現在、名古屋大学大学院)の諸君に感謝いたします。

本研究の一部は文部省科学研究費の援助を受けて行なわれた。

(昭和 50 年 6 月 16 日受付, 同 50 年 11 月 19 日再受付)

文 献

- (1) 森田・八木・和田: 絶縁材料研究会資料 IM-71-18 (昭₄₆)
- (2) 高橋: 電気学会論文誌 92-A, 497 (昭 47-11)
- (3) 堀井・小崎・羽根: 放電研究会資料 ED-72-23 (昭 47)
- (4) 田中・岡本: 絶縁材料研究会資料 IM-73-33 (昭 48)
- (5) A. T. Bulinski & R. J. Juchniewicz: International Conference on High Voltage Electric System, Paris 15-02 (1974)
- (6) T. W. Dakin, M. H. Philofsky & W. C. Divens: AIEE Comm. and Elec 73, 155 (1954)
- (7) 野口・河野・鳳: 電気学会論文誌 92-A, 129 (昭 47-3)
- (8) 千葉・河野・鳳: 同上 93-A, 215 (昭 48-5)
- (9) 羽根・小崎・堀井: 放電研究会資料 ED-74-8 (昭₄₉)
- (10) B. Halpern & R. Gomer: J. Chem. Phys. 51, 1031 (1969)
- (11) Z. Krasucki: Proc. Roy. Soc. A, 294, 393 (1966)