UDC 621.315.616.96.004.62: 621.3.015.52
537.529論 文
47-A 7

各種プラスチックの内部放電劣化

明 治 大 学 宇 治 輝 幸
電子技術総合研究所 金 指 元 憲

1. ま え が き

現在、電力機器の高圧化に伴い内部部分放電による絶縁材料の劣化が問題となっており、最も実際に近い絶縁材料の耐内部放電性評価法の開発が進められている。筆者らはこれまでに、ポリエチレンを用いてプラスチックフィルムの人工作ボイドによる耐内部放電性試験法の試験条件について検討した結果、高真空シリコングリースでボイドを適当に密閉してやれば、試料がボイド内放電によって破壊に至るまでの時間（＝寿命）の分布は、ワイブル分布に比較的良好に当てはまり、摩耗破壊が起きると考えられる電界領域では、電界と平均寿命の関係が log-log プロットで直線になることを見出し、この領域を試験法に採用できうことを報告してきた。⁽¹⁾⁽²⁾

今回は、この方法に従って各種のプラスチックフィルムの耐内部放電性試験を行ない、ポリエチレンで得られた直線領域が存在するか、劣化の機構は材料によって異なるか、またどの材料が耐内部放電性にすぐれているかなどについて検討を行なった。その結果、他のフィルムの場合にもポリエチレンで得られた結果がよく当てはまり、この方法が試験法として適当であるとの結論を得た。そして前回同様、ワイブル分布への当てはめと顕微鏡写真による観察などから、劣化機構を検討することができた。

2. 実験方法および試料

試験片の作成は、前回のポリエチレン（以下 PE）の場合と全く同様に行なった。⁽¹⁾ つまりエチルアルコールで洗滌後じゅうぶん乾燥させたフィルムを3枚重

ね、中間の1枚に 3mmφ の穴をあけて人工ボイドとし、これらを高真空用シリコングリースではり合わせる。このグリースが実験中にボイド内へ流入することを防ぐためと、再現性の良い結果を得るために、ボイド端から 2～3mm 離して塗布したものを密閉式として、これを標準の試験片とした。また劣化の機構その他を観察するために、フィルム間には、グリースも何も塗らないで、ただ重ね合わせたものを半密閉式とした。

試験片を高圧側エポキシモールドのステンレス電極 25mmφ と、低圧側スズはく電極との間にはさみ、50mmφ のステンレス電極の上に置いて平均 60g/cm² の圧力が加わるように重りをのせた。これを五酸化リン入りの乾燥デシケータ中に 10～20 個並列に設置して 300Hz の電圧を連続印加した。第 1 図にその試験回路を示すが、ボイド放電による劣化で試験片が破壊するまでの時間を寿命とし、それを 6 倍して 50Hz 換算寿命とした。

実験は標準の密閉式を中心として行なったので、以下特に断りのない限り、実験および検討での論述はこれについて行なうものとする。また比較のために図、表、本文に PE のデータを用いたが、大部分は前報に報告したものである。実験に用いた試料とその略称（以下文中に使用）および平均厚さを第 1 表に示す。これらはできるだけ厚さが 0.1mm に近いものを選んだ。

第 1 図 寿命測定回路

Fig. 1. The life-test circuit.

Deterioration of Various Plastics by Internal Discharge. By T. UJI, Member (College of Engineering, Meiji University) & M. KANAZASHI, Member (Electrotechnical Laboratory, Ministry of International Trade and Industry).

宇治輝幸：正員，明治大学大学院工学研究科（現在，広島電機大学工学部）

金指元憲：正員，電子技術総合研究所材料部

第 1 表 試料および厚さ

Table 1. Samples and their thickness.

試 料 (略称)	商品名(会社名)	平均厚さ (μ)
電圧安定剤入りポリエチレン (VSPE)	(昭和電線電機提供)	93
ポリカーボネート (PC)	バンライト (帝人)	114
ポリイミド (PI)	カプトン(デュボン)	131
ポリエチレンテレフタレート (PET)	ルミラー (東レ)	107
ポリ塩化ビニル (PVC)	硬 質	106
テフロン FEP (FEP)	テフロン FEP (デュボン)	131

3. 実験結果

〈3・1〉 電界-寿命特性 第2図に各種フィルムの電界-寿命特性を示す。印加電圧を電極間隔(フィルム3枚の厚さ)で割った平均電界を縦軸に、50Hz 換算寿命の算術平均を横軸に、それぞれ対数でプロットしたものである。黒丸で示した高圧法 PE の場合と同様に比較的低電界ではすべての試料が直線に乗り、寿命 L と平均電界 F との間に

$$L = KF^{-n} \dots\dots\dots (1)$$

なる関係を満足させる領域があることがわかった。高電界では寿命は直線からより短い方向にずれる傾向を示す。以下 PE の場合と同様に、それぞれの領域を直線領域、高電界領域と称する。

PI はトラッキングと同様の劣化痕を生ずる傾向があり、破壊してもカーボン状トラックを通じて小電流が流れ、ヒューズが切れず破壊時間の記録ができない場合が多く、1点しかデータが取れなかった。PC は直線からずれる高電界領域が現われていないが、これは電源容量の制限や、エポキシモールドした上部電極端での放電発生などの理由で 9kV までしか実験を行なわなかったためである。

第2表は密閉式で、いずれの試料についても直線領域に属すると思われる 18 kV/mm での平均寿命の推定値、および(1)式での直線の傾き n 、つまり寿命の電界依存性を示したものである。 $n=2.5$ の PVC、3.3 の FEP の二つを例外として、あとはすべて $n=3.9\sim 4.1$ となり、第2図でもわかるように平行関係が成立している。

半密閉式の場合、寿命が密閉式とほとんど一致した PVC と、ほぼ平行関係のまま短くなった FEP の二つを例外として、その他の試料では半密閉式の寿命が密閉式の場合よりも大幅に長くなった。これら半密閉の寿命が長くなる試料は、

第 2 表 直線領域での寿命と傾き

Table 2. The life and the slope in the linear region.

試 料	18kV/mm での 50Hz 換算寿命(推定値)(h)	傾き n の値
VSPE	155	4.1
高圧法 PE	72	4.0
PC	65	'
PVC	62	2.5
PI	42	(4.0)*
PET	27	3.9
FEP	18	3.3

* 推定値、この値を用いて換算寿命を推定した。

実験時間のつごうで試験片の 30~40% が破壊した時点で実験を打ち切り、寿命の分布幅が密閉式より広がる傾向のあることも考慮して、少なくとも平均寿命がこれよりは長いという点とした。第2図には半密閉式の代表例として FEP と VSPE を点線で示したが、寿命が長くなった VSPE のプロットはこの意味のものである。他の試料でも、このように実験打ち切り点と密閉式の平均寿命とがほぼ平行関係になっていることと、PVC、FEP の場合も考え合わせて、半密閉式の場合も、低電界領域で平均寿命と電界の log-log プロットが直線に乗り、かつ密閉式の場合と平行関係が成立するものとみなすことができる。

第3表に、高電界領域と直線領域の両方における半密閉式/密閉式の寿命比を示した。また同表には各試料の高電界領域と直線領域に相当するところでの、密閉式の寿命の変動率も示したが、直線領域ではほとんどの試料が 30~50%、高電界領域では 70~100% と明白な違いを示し、ばらつきが急増した。

〈3・2〉 放電の観察 同調式コロナ検出器を用いて放電電荷の時間変化を観測した結果、放電が減少して落ち着くグループと逆に増加して落ち着くグループ

第 2 図 各種フィルムの電界-寿命特性

Fig. 2. Lives of various plastics versus field strength.

第 3 表 寿命の変動率と密閉-半密閉の比

Table 3. Coefficient of variation of lives and the life ratio of no grease type to standard type.

試料	電界強度 (kV/mm)	変動率(%)	半密閉式 の寿命	密閉式 の寿命
VSPE	31.0 19.7	70.6 58.3	>3.0 "	
高压法PE	28.6 16.1	90.5 41.0	1.1 >3.0	
PC	26.3 16.0	52.5 48.5	>3.0 "	
PET	26.4 14.0	75.0 36.0	— >2.0	
PVC	25.0 14.0	45.8 38.8	1.0 "	
FEP	21.6 15.0	92.8 46.8	0.5 0.6	
PI	19.1	25.7	—	—

第 3 図 PE の放電の時間変化

Fig. 3. The variation of the discharge of PE.

第 4 図 VSPE の放電の変化

Fig. 4. The variation of the discharge of VSPE.

があることがわかった。前者に属するものとしては、VSPE, PE, PC, PET などがあり、後者には FEP, PI がある。減少するものの代表として PE と VSPE の場合を第 3 図、第 4 図に示す。これらの測定は妨害雑音を避けるため、劣化寿命試験とは別に下部電極にガ

第 5 図 FEP の放電の変化

Fig. 5. The variation of the discharge of FEP.

ード付のものを用いて 50Hz 印加で行なったもので、縦軸に対数で 1 秒当たりの累積発生ひん度をとったものである。最大放電電荷を含め、ここでは 1 秒間に 1 発以上発生したものを数えた。PE を例にとると、初期の激しい変化は、ボイド内のガス組成と内圧の変化、つまり放電で酸素が消費されているためと思われる、初期の 1,000 pC 程度の最大放電電荷は、この変化の激しいところで消滅してしまう。後は 200~300 pC 程度の放電電荷が最大で、全体に徐々に発生個数が減少してほぼ一定に落ち着き、最後は大放電が数秒から数十秒続いて起こり破壊に至る。この最後の大放電は、試験片の上下いずれかの層が破壊した段階に相当すると思われる。⁽³⁾ これに対して、増加する代表例として、FEP の場合を第 5 図に示す。初期の変動は同様にあるが、時間とともに放電電荷の大きいものが現われ、全体として徐々に増加して落ち着いている。

これらのことを、放電光の観測によっても確かめた。つまり、表面導電性ガラスを下部電極として、⁽⁴⁾ 放電電流と放電光を光電子増倍管で増幅した光電流を同時に観測すると、両方のパルス数は 1:1 の対応を示し、パルス高さもだいたい比例関係が認められた。このことから、放電電流測定でボイド放電以外の放電やノイズを数えていないこと、写真の明るさで露光時間当たりの放電の大きさの比較ができることがわかる。

第 6 図に放電が弱くなる PC の例を、第 7 図に逆に強くなる FEP の例を示す。これら放電光の観測は、放電の発生場所、集中度なども併せて観察できて有益である。第 8 図に PVC の観察例を示すが、放電は全体として弱くなるが、3 時間ぐらいからボイド端、それも特定の位置へ集中が激しくなり、ついにその中の 1 点で、一方のフィルムが破壊したと思われる大放電を生じ、低電界のためかすぐ破壊せず、大放電はやや

第 6 図 PC の放電の変化

Fig. 6. The variation of discharge light of PC.

第 7 図 FEP の放電の変化

Fig. 7. The variation of discharge light of PE.

第 8 図 PVC の放電の変化

Fig. 8. The variation of discharge light of PVC.

弱まって破壊に至ることがわかる。

4. 検 討

〈4・1〉 ワイブル分布への当てはめ 各種のフィ

第 9 図 PET 寿命のワイブル確率紙への当てはめ

Fig. 9. Application of Weibull distribution to life of PET.

第 10 図 形のパラメータ m の電界依存性Fig. 10. Variation of shape parameter m .

ルムの寿命をワイブル確率紙にプロットしてみると、PE と同様にすべて比較的よく直線に乗った。第 9 図に、一例として PET の場合を示す。このように寿命をワイブル分布に当てはめてそれぞれの形のパラメータ m の値を求め、その電界依存性を示したのが第 10 図である。電界-寿命特性の直線領域での寿命の m は VSPE が 1.7、その他はすべて 2.0~2.5 となり、明らかに $m > 1$ であることから、この領域では摩耗破壊が起こっていることがわかった。PI は第 2 図で 1 点のみしか実測できなかったが、ワイブルプロットにより $m=2.0$ が得られたので、直線領域にあるものとして取り扱うことができた。第 10 図で、電界が大きくなって m が下がってくる領域は、第 2 図の電界-寿命特性が直線からずれる範囲と一致しており、多くの試料で $m \approx 1$ と $m \approx 2$ の混合タイプと思われる分布が認められた。第 9 図の PET 8.5 kV はその一例である。しかし、試験片数がじゅうぶんでないため、大半はこのようなきれいに分離できず、それぞれ全体として 1 本の直線として取り扱った。

第 11 図 直線領域の劣化写真

Fig. 11. Microscopic photographs of deteriorated surface in the linear region.

高電界領域ではすべて $m \approx 1.0$ となり、偶発破壊が支配的と取り扱うことができた。PC のみは、測定した範囲では偶発破壊領域が現われなかったが、これもさらに電界を高めてゆくと $m \approx 1$ の領域に至るものと思われる。

このように、多くの試料の幅広い試験条件での寿命がワイブル分布に当てはまり、その形のパラメータ m の値によって、試験条件が劣化試験として適当な摩耗破壊領域にあるかどうかの判定ができることを確かめることができた。より低電界になると、異常に長い寿

命を示す試験片も出てくるので、この分布やワイブル確率紙へのプロットを利用して、全試験片の破壊を待たず寿命分布の最ひん値（モード）や特性寿命を求め、算術平均の代わりに用いて、試料の寿命の評価を行なうことは有効であり、実験時間も大幅に短縮することが可能である。

〈4.2〉顕微鏡写真による観察 ほとんどすべての試験片について、破壊点の位置、ボイド内面の劣化状況などについて、顕微鏡を用いて観察した。試料の違い、密閉、半密閉の別、印加電圧などによって、そ

それぞれ特徴のある傾向をみせ、PE の場合のような統一した劣化機構を提案することは困難であった。しかし、ワイブル分布の形のパラメータ m の値や、放電電荷、放電光の経時変化とあわせて、それぞれの試料について劣化の傾向の差を説明し、問題点を指摘することができた。

(a) 直線領域 各試料について、直線領域での劣化の代表的な顕微鏡写真を、第 11 図(a)～(g)に示す。破壊点は矢印で、倍率は基準長さで写真に示し印加電圧と 300 Hz で破壊までの時間を説明として添えた。PC[(a)図]、PET[(c)図]、PI[(d)図] は PE と同様、ボイド端にみぞ状の侵食を生じ、そこに破壊点が存在する摩耗破壊の代表例と考えられるものである。PC はボイド端から外ヘトリー状の放電痕が伸びており、ボイド内面にも放電侵食が認められるのが、PE と違った特長で、中間領域の写真第 13 図(a)でもよく見られている。このことは、第 6 図に示した放電光写真ともよく対応している。PI のトリー状放電痕の黒く見える部分にはカーボンが析出しており、これは、はしご形に芳香環が連続した化学構造のためカーボン生成が起こりやすいと考えられる。破壊点の両側に円形の羽を拡げたような模様は、PI の破壊点に特徴的なもので、この原因は不明であるが、〈3・1〉節で述べたように、破壊時にリレーが動作するまでにカーボントラックを通じてかなり電流が流れ、その熱作用によるものではないかと思われる。

VSPE[(e)図]、PVC[(f)図]、FEP[(g)図] では、ボイド端が明りょうなみぞを形成せず、ボイド内面が侵食されてボイド端はその境いの段差となり、破壊はほとんどボイド端で起こっている。FEP、PVC は放電光写真ともよく対応して、外側にトリー状放電痕を生じ、特にボイド内面全面がほぼ一様に分解揮発しているのが特徴的である。このように、試料によって放電がボイド端に集中するか、内面の放電の寄与が大きくなるかによって、劣化の傾向の差はあっても、劣化痕は放電光の観察と明りょうな対応を示し、破壊に至るまでの放電による侵食の累積が、劣化痕として試料面に残されていることは確実である。直線領域においては破壊はすべてボイド端で、特に放電光のよく集中した点で起こっており、PE の場合と同様、放電侵食によってついに破壊に至る摩耗破壊に変わりないものと考えられる。

(b) 高電界領域 高電界領域では、破壊までの時間の長短によって、劣化痕やボイド端から外へ向かう放電痕が明りょうに見られる場合と、このような放電痕がほとんど見られない場合とがあった。破壊はこ

第 12 図 高電界領域の劣化写真

Fig. 12. Microscopic photographs of deteriorated surface in the high field region.

(a) PC (偏光フィルタ使用), 21.9 kV/mm, 4.5 h

(b) PET 23.3 kV/mm, 1.8 h

第 13 図 中間領域の劣化写真

Fig. 13. Microscopic photographs of deteriorated surface in the region between high and linear region.

これらの劣化痕とは関係なく、第 12 図(a)のようなトリー状放電痕の先端や、ボイド端から 0.2～0.5 mm 外側に離れたところで、ぽつんと起っている例 [(b) 図] が非常に多かった。

放電光の観察によると、高電界になるとすべての試料において、ボイド端部に集中した放電は外部へ大き

(a) PC 16kV/mm, 37.0h

(d) FEP 18.4kV/mm, 5.2h

(b) (a)図を偏光フィルタにかけたもの

(e) PVC 25.2kV/mm, 2.2h

(c) VSPE(偏光フィルタ使用)19.6kV/mm, 28.5h

第 14 図 半密閉式の場合の劣化生成物写真
Fig. 14. Microscopic photographs of deterioration products in the case of no grease type.

く伸び出してトリー状の放電となる。第 13 図(b)に見られるような、長大なトリー状放電痕を残す場合も破壊点はこれと関係がない。一方、寿命のワイブル分布の m の値は 1 に近く、故障率一定の偶発破壊と考えられる。結局この領域では、前報の PE の場合⁽²⁾と同じく、破壊は劣化とは無関係に、偶発的に起きる大きな放電パルスが、弱点に命中した結果起きるものと考えられる。

(c) 中間領域 直線領域と高電界領域の中間では両者のパターンが混在し、例として示した第 13 図(a)の写真に見られるように、ボイド端のみぞと内面の侵食痕がはっきり見られるが、破壊はトリー状の先端部で起こっている。また PET 7.5kV では、同図(b)のように、ボイド端のみぞよりはずっと深く、枝分れの少ない長大なトリー状侵食を生じているが、破壊はこれらと無関係に、ボイド端の外側でぽつんと起こっている例が現われ始める。このほか、直線領域の例と同様に、ボイド端のみぞで破壊している例も数多

く見られるので、この領域では、偶発的な破壊と摩耗的な破壊が混在していることが考えられ、〈4・1〉節で述べた混合ワイブル分布の考え方の妥当性を示している。

(d) 半密閉 半密閉の場合は、FEP、PVC を除いて、液滴や結晶のような放電生成物を多く生ずる。密閉式の場合は、このようなものはほとんどないので、フィルムの重ね合わせ面を通して空気が流通し試料の酸化や放電化学反応などによって生じた水、シュウ酸、硝酸、亜硝酸などが主体であろうと考えられる。第 14 図(a)は代表的な PC の場合で、ボイド端付近の写真であるが、端部は明りようでない。針状結晶と多数の液滴、劣化痕が見られるが、これを偏光フィルタを通して見ると、同図(b)のようになり、白く光って見える部分が結晶で、液滴内にも結晶があることがわかる。結晶が潮解しているのか、液滴内で結晶が析出しているのかはわからない。同図(c)は VSPE の偏光写真で、左端にボイド端の劣化痕がみぞ状に浅く見え、ボイド内部に結晶が生成していて、破壊も内部で起っている。半密閉の場合は、電界にもよるが、ボイド内部に放電が偏在する傾向が強く、そのため破壊点も密閉式とは対称的に、ボイド内部に見られる例

(a) PC 16kV/mm, 13.5h

(b) (a)図を偏光フィルタにかけたもの

第 15 図 放電痕に残る機械ひずみ

Fig. 15. Mechanical stress at deteriorated place.

が多かった。

FEP[(d)図]はこれらと正反対に、液滴や結晶のような生成物は見られず、PVC では生成してもごくわずかで、ボイド内面がかなり侵食され、ボイド端から外へ向うような放電痕も大きくなっている。FEP は EP ゴムの分子の水素が、すべてフッ素で置換された構造をしており、酸化分解によって水を生ぜず、CO、CO₂、CF₂O などのガス状生成物を生ずる。⁽⁵⁾ このため表面に導電性を生じて放電を弱めるということではなく、かえって適当な濃度で酸素が外から供給されるため、半密閉の場合のほうが酸化分解が促進され、寿命が短くなると考えられる。PVC では水の生成も考えられるが、その量は少なく、HClの生成が特異な変化の原因ではないかと思われる。

(e) 放電による残留ひずみ 第 11 図(b)、第 13 図(a)、第 14 図(c)に見られるように、偏光写真で見ると、破壊跡にはすべて残留ひずみが認められた。これは主として破壊時の熱ストレスによるものと思われる。

一方、PC や FEP において、ボイド端から外部に向った放電劣化痕の先端や幹の部分に、かすかな残留ひずみが認められた。第 15 図(b)は同図(a)と同じ箇所を偏光フィルタを通して撮影したもので、劣化痕の先端で白く見えるところが、ひずみのあるところで

ある。また、第 11 図(b)にも見られるように、放電によって侵食を受けたと思われる穴の周囲にも、かすかな残留ひずみが見い出された。これら残留ひずみはすべての劣化痕に明白に認められるというものではなく、微妙な光の差を見つけることが困難なせいもあってか、むしろはっきりと認められる例は少なかったが、少なくともこの程度の小さな放電のくり返しによって、機械的ひずみが生じることは明らかであり、高電界における電気力学的破壊との関連についても、今後検討を重ねてゆく必要がある。

〈4.3〉 試料厚さの効果 厚さの異なる試料の寿命の評価を、平均電界で行なうには、厚さによる補正方法を検討しなければならないが、PE については、直線領域での寿命の厚さによる補正が可能であることを、すでに報告した。⁽¹⁾今回は比較的寿命が短い PET を選び、その直線領域の 14kV/mm で、厚さの異なる試料の寿命を測定した結果を第 16 図に示す。やはり PE 同様、厚さの大きいものほど寿命は短く、寿命 L と厚さ d との間に

$$L = C d^{-K} \dots \dots \dots (2)$$

なる関係を得た。 C と K は定数であるが、寿命の厚さ依存性を示す K の値は 0.7 となり、PE で得られた値とかなり近い値を得た。すべての試料についてこの試算式が適用できるとは限らないが、一応この 0.5 と 0.7 を用いて実験した試料のうち、ほぼ中間の厚さを持つ PVC に合わせて寿命を換算すると、第 4 表のようになる。これによると、この程度の厚さの違いでは、寿命に及ぼす影響は試料間の評価を左右するものではないといえる。

第 16 図 寿命の厚さによる効果

Fig. 16. Effect of sheet thickness on life time.

第4表 寿命の厚さ換算値

Table 4. Calculated life of equivalent sheet thickness.

試料	平均寿命 (h)	換算寿命 (h)	
		$K=0.7$	$K=0.5$
VSPE	470	430	450
高圧法PE	215	208	210
PC	180	190	187
PI	128	152	146
PVC	110	110	110
PET	65	62	62
FEP	40	46	44

〈4・4〉 試験法としての可能性 この方法によって得られる寿命-電界特性の直線領域では劣化機構は同一で、寿命のばらつきも比較的小さく、再現性も良いことから、試験法として採用できることが確かめられた。特に、第2図で示されたような平行関係にある試料の比較は簡単に行なえるし、傾きの異なるものでも、低電界での傾向を知る手がかりとなり、スクリーニングテストとしてじゅうぶん使用できる。ところが高電界領域ではばらつきも急に大きくなり、寿命の電界依存性は大きくなる。この高電界領域の下限は、それぞれの試料や厚さによって異なるので、試料間の比較には直線領域にあるという確認が必要である。つまり、電界による加速試験には限界があるといえる。厚さ0.1mm程度の試料では、平均100時間前後の寿命を目安にして、14~18kV/mm程度の電界を用いるのが適当である。

この直線領域を確かめるために、ワイブル分布に当てはめてみることは有効であり、その形のパラメータ m の値が2.0以上となる領域を用いるとよい。

周波数による加速試験の可能性については特に検討しなかったが、高電界領域で50Hzの電圧を印加した場合の寿命と、300Hzによる換算寿命とを比較した結果、ほとんどの試料では50Hzでの寿命のほうが長くなった。このことから、単純に周波数による比例を行なうには問題があるようであり、今後の検討課題であらう。

また、他の試験法で得られた試料の評価と併せて考えることも興味深い。すなわち、集中法 IEC 電極による寿命試験⁶⁾では PE, PC が比較的良く、PET が悪くなっており、この方法で得られた傾向と一致する。ところが、平行平板法による重量減少の速度は、PE と比べて PET, FEP は大差なく、PVC, PC がやや大きくなっており、⁶⁾この試験法の結果と異なるが、これはガラス隔壁で守られた電極構成と、弱点への放電の集中が強調される寿命試験との差によるものであ

らう。

〈4・5〉 耐内部放電性の評価 第2表は、一定平均電界(18kV/mm)での推定平均寿命を、大きさの順に並べたもので、試験結果の表示方法としては最も簡便、単純なものである。30~50%の変動率を考慮すると、平均値での細かな差は意味がなく、VSPEがすぐれ、PE, PC, PVC, PI は大差なく、PET, FEP は劣るといえる。しかし、寿命の電界依存性 n を考慮すると、この序列は n の値が異なる FEP と PVC を除いて、第2図で平行関係にある試料の間でだけしか成立しない。電界依存性 n の大きな試料の寿命は、低電界になると飛躍的に延びるのに対して、 n の小さな試料ではあまり延びず、実用電界に近いところでは、 n の小さな試料は相対的に耐内部放電性に劣ることとなる。たとえば、第4表の平均電界が14kV/mmでの推定寿命では、PVC はかなり悪いほうへ近づくことがわかる。同表により試料の厚さによる補正を行なってみても、その評価は変わらないことは前述のとおりである。

一方、劣化の主因である放電電荷または放電エネルギーを一定にして、耐内部放電性を比較するという考えもある。しかし、ボイド内の放電電荷の分布やその経時変化を厳密に測定することはかなり困難であるうえ、同一試料、同一電界でも試験片によって異なることがある。筆者らがくり返し放電測定を行なった結果によると、直線領域では第3図~第5図に示すように、各試料ともボイド内での放電電荷の大きさの分布が、いずれもほぼ一様に落ち着いてきて、かつその一様な期間が寿命の大部分を占めている。そこで、この一様な分布を用いて耐内部放電性の評価を試みた。

つまり、50Hzの電圧印加後6時間での1秒間に発生する放電電荷の大きさと、それぞれの個数を測定しこれを合計して1秒当たりの累積電荷とし、この値に50Hz換算寿命(s)をかけて総累積電荷とした。その結果を第5表に示すが、総累積電荷はPC, PVC, PET

第5表 最大放電電荷および累積電荷

Table 5. The maximum charge of discharge and the sum of the charges.

試料	最大放電電荷 (pC)	1秒当たりの累積電荷 (pC)	平均寿命 (s)	総累積電荷 (pC)
PC	875	4.88×10^5	2.34×10^5	1.73×10^{11}
PVC	1,250	6.19×10^5	2.23×10^5	1.38×10^{11}
PET	3,300	1.09×10^6	9.72×10^4	1.06×10^{11}
PI	1,160	5.50×10^5	1.62×10^5	8.88×10^{10}
FEP	2,660	4.88×10^5	6.49×10^4	3.10×10^{10}
高圧法PE	350	9.18×10^4	2.59×10^5	2.38×10^{10}
VSPE	*	2.74×10^4	5.59×10^5	1.53×10^{10}

が大きく、VSPEは最も小さくなった。このVSPEとPEとを比較してみると、総累積電荷では両者の差は小さいが、1秒当たりの累積電荷では明白な差が認められた。この場合、最大放電電荷や電荷の大きさの分布範囲は、ほぼ同じであることから、VSPEにおいては1秒当たりの放電回数が減っていることがわかり、このことが寿命を長くすると考えられる。したがって電圧安定剤の効果が、ボイド壁面の抵抗を下げ、放電回数を減少させることによるという説が、この結果により支持されたことになる。

一方、総累積電荷の大きなPET、PC、PVCは、実験した材料中では機械的強度の大きな材料である。このことは、たとえ摩耗破壊領域にあっても、化学的な酸化分解による劣化だけでなく、放電による本質的な破壊現象に対しては、機械的な強度を考慮しなければならないことを示しており、前述の劣化痕に見られる機械的ストレスとも関連して興味深い。

しかしながら、実用的な寿命という見方からは、化学的な劣化現象のほうが大きな要因となっており、その意味で第3表に示した半密閉と密閉式の寿命比が大きなものほど、耐内部放電性が大きいという見方もできる。これは、半密閉式で寿命が延びるのは、ボイド表面の抵抗の低下のためで、密閉式でも弱いながらこの傾向が保持されるためと考えれば説明がつく。

この比の小さなFEPとPVCは、電界-寿命特性の n の値が、ほかのものと異なって小さく、半密閉の場合も液滴、結晶のような生成物をほとんど生ぜず、放電も時間とともに強くなって、ボイド内面が均一に分解揮発しているなど、ほかの試料と明らかに異なった特徴を示す。FEPについては、分子中に水素原子がないことも考慮しなければならないが、含ハロゲンプラスチックの特徴とも考えられる。トリ-の発生に、針先のボイド内の O_2 とともに、 CCl_2F_2 が効果あるという報告は、⁽⁷⁾ この意味で興味深い。

5. む す び

人工ボイドを用いた耐内部放電寿命試験の結果、各種プラスチックの電界-寿命特性は、ある領域で両対数表示ですべて直線となり、より高電界では寿命の短

いほうへずれるという結果を得た。寿命にはワイブル分布が適用され、その形のパラメータ m の値と顕微鏡で観察した放電劣化による破壊痕の様子は、いずれもこの直線部分からはずれない高電界領域で、明白な変化を示した。直線領域では放電侵食による摩耗的な破壊が起こっており、この領域では、ばらつきも小さく再現性も良いので、材料のスクリーニング試験にじゅうぶん使用できることを確認した。0.1mm程度の厚さの試料では、その厚さの違いや実験時間などを考慮して、14~18kV/mmの電界領域を用いるのが適当と思われる。

以上の結論は、前報においてPEを用いて得た結論の再確認であり、各種の異なった試料についても、PEの場合と同様の劣化機構が適用されることが明らかとなった。

試験したプラスチック中では、VSPEが最も寿命が長くなり、耐内部放電性にすぐれているといえる。これは、電圧安定剤の効果が単位時間当たりの放電回数が減ったためである。PET、FEPは逆に耐内部放電性に劣るといえる。このうちFEPはPVCとともに他と異なった特徴を示し、この種の含ハロゲンプラスチックは、耐内部放電性の点で問題がある。

最後にこの研究を行なうにあたり、適切な助言と暖かい励ましをいただいた明治大学工学部山口宗五郎教授、電子技術総合研究所堀井憲爾氏(現名古屋大学)、および実験上の協力をいただいた明治大学村田幸雄氏、武藤浩氏、ならびに試料を提供して下さった昭和電線電纜株式会社(VSPE)、帝人(PC)に対し深く感謝の意を表します。(昭和46年3月31日受付)

文 献

- (1) 金指・宇治・亀山: 電氣四学会連大 270 (昭 45)
- (2) 宇治・金指: 電学論 92-A, 1 (昭 47)
- (3) 絶縁材料コロナ劣化専門委員会資料(大日本電線) No. 26-8
- (4) 宇治・武藤・金指: 電氣学会全国大会 259 (昭 46-3)
- (5) M. Kanazashi: 7th Electrical Insulation Conference, (1967) IEEE Paper No. 32 C 79-88
- (6) 電氣学会技術報告(1部) 第 90 号
- (7) 曾根・光井・鳥山: 電氣学会第3回絶縁シンポジウム III-I (昭 45)