液体窒素中の部分放電および部分放電劣化

中央大学 高橋雄造

1. ま え が き

最近、電力技術において極低温絶縁が注目されている。極低温領域において、絶縁物の短時間破壊特性はすでに多くの研究が発表されている⁽¹⁾⁽²⁾が、部分放電および部分放電劣化の研究はまだ多くはない。⁽³⁾ 極低温絶縁で固体絶縁物の部分放電劣化が問題となるのはおもに

(1) 極低温液化ガス中

(2) 熱絶縁と電気絶縁を兼ねた極低温高真空中であろう。そこで本論文では、極低温絶縁用液化ガスとして、最も一般的な液体窒素を取り上げ、この中における部分放電および部分放電劣化を実験的に研究した。

2. 実験条件

電極構成は第1図のように IEC(b)電極を用いた。この電極は気中部分放電劣化試験の標準電極として広く用いられているものである。⁽⁴⁾ これをテフロン製フレームに組み、容積 5l のガラスデュフ内にセットした。放電光観察のために窓付デュフも併用した。試料は〈3・4〉節と第5章とを除いては、0.2mm 厚中圧法ポリエチレンフィルムを用いた。これは絶縁材料コロナ劣化専門委員会の標準試料⁽⁴⁾である。試料フィルムと円板電極とのはり付けはシリコングリースによったが、この方法は密着にやや難点があり改善の余地がある。棒電極の自重と高電圧リード線クリップのスプリング作用とにより、試料フィルムには数 10g の荷重が加わっている。液体窒素の液面の圧力は大気圧である。

実験回路を第2図に示す。印加電圧は〈3・4〉節のり

Partial Discharge in Liquid Nitrogen and Deterioration of Plastics by the Partial Discharge. By Y. TAKAHASHI, Member (Faculty of Science and Engineering, Chuo University).

高橋雄造：正員，中央大学理工学部電気工学科

(a) IEC (b) 電極 (b) 電極フレーム

第1図 電極構成

Fig. 1. Experimental electrode system.

第2図 実験回路

Fig. 2. Experimental circuit.

ヒテンベルグ像の実験を除いては、50 Hz 交流である。検出インピーダンスの時定数は $10\mu\text{s}$ とし、放電パルスの大小に応じて $0.01\mu\text{F} \times 1\text{k}\Omega$ と $0.001\mu\text{F} \times 10\text{k}\Omega$ を使い分けた。

3. 放電特性

部分放電劣化を解明するには、まず部分放電のふるまいをはくする必要がある。本論文では、主として電気的方法・光学的方法により放電特性を測定した。

〈3・1〉 部分放電開始電圧・部分放電消滅電圧

部分放電開始電圧 V_i と部分放電消滅電圧 V_e は、各サンプルにつき劣化初期状態で連続して 6~11 回測

第3図 部分放電開始電圧 V_i と部分放電消滅電圧 V_e (ポリエチレン試料)

Fig. 3. Inception voltage V_i and extinction voltage V_e of the partial discharge. (PE sample)

定した。電圧上昇速度はおおよそ数 kV rms/s である。サンプル数は24である。第3図に V_i , V_e の全測定値のばらつきの範囲と、サンプルごとの相加平均値のばらつきの範囲と、この相加平均値をサンプル間で相加平均した値を示す。ただし、処女放電の V_i は一般に2回目以後の V_i より数 kV rms 小さいので第3図からは除いた。同一サンプルでは V_i のばらつきが大きく、 V_e は比較的安定していることが注目される。 V_i は印加電圧上昇速度や電圧印加休止時間によってかなり影響され、印加電圧上昇速度大、電圧印加休止時間小のとき V_i は小さくなる傾向にある。サンプルごとの V_i , V_e の平均値のサンプル間のばらつきも、 V_i では大きい V_e では小さい。これをサンプル間で相加平均した値は、 V_i で 15.6 kV rms, V_e で 11.0 kV rms である。このように V_i のばらつきが大きいので、印加電圧・放電条件の目安としては V_e を用いるのがよいと筆者は考える。

〈3・2〉 放電モードと放電光 放電モードには二つある。電流波形上でこれを見ると第4図のようになる。一方の放電パルスは小さく、1発の見かけの放電電荷量 q_a は最大 3×10^{-9} C 以下で、半サイクルあたりの放電パルス数は多い。他方は q_a が 10^{-8} C 以上で、個数は少なく生起は著しく間欠的である。前者の放電をモード④、後者をモード⑤と名づける。

デュワ外部で聞くと、モード④はジーという音がし、モード⑤はバリバリという音がする。

放電光を観察すると第5図のようになる。モード④

第4図 放電モードによる放電パルスの違い
Fig. 4. Electrical pulse of two discharge types.

第5図 放電モードによる放電光の違い
Fig. 5. Light of two discharge type.

では放電光は棒電極のへりだけにあり、肉眼にはグロー光のように見える。この光はかなり弱く、暗室内で肉眼で検知できる程度である。一方、モード⑤の放電光は試料フィルム上を激しく動きまわる樹枝状の沿面放電で、光はかなり強く普通の室内でも肉眼で見える。この光の最大伸びの径は、印加電圧 15 kV rms で約 10 mm, 17 kV rms で約 20 mm, 19 kV rms で約 40 mm である。モード⑤では沿面放電の樹枝から盛んに気ほうが発生しているが、モード④では肉眼でわかる気ほうは発生していない。第5図でモード⑤の放電光の樹枝がぼやけているのは、この気ほうによる光の散乱のせいである。樹枝状放電路が試料フィルム表面に密着しているかどうかは興味あるところだが、気ほうによる光の散乱のせいでは判定できない。放電光の色は両モードとも白色であるが、モード⑤で

印加電圧大で放電が激しくなるとわずかに赤味がかかるようである。したがって、モード⑥では気ほう中の放電も加わっている可能性があるように思われる。

印加電圧 V と放電モードとの関係は次のようである。 V を零から上昇していくと、放電開始電圧 V_i での放電はモード④と⑥の共存ではじまる。まれにモード④だけではじまることもあるが、これは先行する放電の直後のヒステリシス現象と思われる。さらに V を上昇するとモード⑥がきわめて盛んになるが、モード④も共存している。 V を下降してくるとモード④と⑥共存のままで放電消滅電圧 V_e で放電が停止することが多いが、 $V=12\text{ kV rms}$ 付近でモード⑥が消滅しモード④だけになる場合もある。後者の場合、 V_e 付近から再び V を上昇すると 13 kV rms 付近でモード⑥が現われる。以上をまとめれば、一般にモード④と⑥とは共存し、印加電圧 V が大きくなるとモード⑥が優勢になる。モード④だけの放電を実現することは困難である。たとえ、これを実現しても印加電圧が小さいので 10 分程度の経過時間中に放電が停止してしまうことが多い。

印加電圧 V を零から大きくしていくとき、電流波形上の放電パルス・放電音・放電光はいずれも V_e ではじまる。同様に、電流波形上の大パルスバリバリという放電音・樹枝状の放電光・気ほうはいずれも同じ印加電圧ではじまる。すなわち、これらは放電あるいはモード⑥の放電の開始の検出信号として一致する。また、放電がモード④だけの場合は電流波形上の小パルス・ジーという放電音・弱い放電光から一致して検出できる。

なお、劣化破壊直後や電圧印加停止直後の試料フィルム面（棒電極付近および沿面放電路先端）に緑色のかなり強いりん光が現われ、数 10 秒で消滅することが観察された。

〈3・3〉 放電パルス 電流波形上の放電パルスは第 4 図に示したように放電モードにより著しく異なる。第 4 図は 50 Hz の半サイクル中の放電区間を横軸いっぱいに伸ばしたものである。モード④では放電パルスは多数個連続して重なり、パルスの持続時間は数 $10\text{ }\mu\text{s}$ と長く、立上りもあまり速くない。これに対しモード⑥では放電パルスの数は少なく、その生起は間欠的であり、2 個以上重なることがなく、持続時間は短く立上りもかなり速い。ただし、モード⑥でも負放電では 2 個以上のパルスが重なる場合がある。モード⑥では一般に負パルスは正パルスより小さく、その比は $1/2\sim 2/3$ である。モード④では放電パルスの大きさに極性による差はみられない。

第 6 図 最大放電パルスの電荷量（ポリエチレン試料）

Fig. 6. Maximum of electrical pulses of the partial discharge. (PE sample)

劣化初期状態での印加電圧対最大放電パルス図を第 6 図に示す。このようにモードにより放電パルスの大きさは著しく異なる。モード⑥の放電パルスは印加電圧増大につれて著しく大きくなるが、モード④の放電パルスの大きさは印加電圧によってはあまり変化しない。

以上みた放電のふるまいは、だいたいにおいて油中部分放電の場合⁽⁵⁾に似ているといえることができる。

モード④、⑥の放電光は高気圧ガス中の部分放電における「グロー状放電」と「樹枝状沿面放電」⁽⁶⁾におおのよく似ている。しかし、印加電圧特性や放電パルスの様子が異なるので、これらが対応する放電とは思われない。

放電パルスの立上りの速さ、気ほうの発生状況、放電光の色の变化からみると、モード④は液中放電でモード⑥は気中放電であるようにも思われる。モード⑥が気中放電とした場合、まず気ほうができてその中で放電するのか、それとも液中放電が先行してから気ほうができ、二次的に気中放電が伴うのかという問題がある。これら気中放電の存在のいかんは本論文の段階では断定し難い。液体窒素を加压して実験すると、気ほうの発生が抑止・制御されると考えられ、今後の研究方向として興味深いと筆者は考える。

〈3・4〉 リヒテンベルグ像による観察 写真感光材料は極低温では感度が低下するが使用できるとされている。⁽⁷⁾ ここでは、液体窒素中でリヒテンベルグ写真像が得られることを実験的に確認した。

第 7 図 液体窒素中のリヒテンベルグ像
Fig. 7. Lichtenberg figure in LN₂.

IEC(b) 電極において、試料フィルムの代わりに SS カットフィルム (0.25 mm 厚) を置き、インパルス電圧を印加した。インパルス波頭長は 50 Hz 交流を模擬すべく約 15 ms とし、波尾長は逆放電防止のため約 15 分と長くした。カットフィルムは電圧印加・取り出しの後、20°C パンドール中で 10 分現像した。得られた像を第 7 図に示す。カットフィルムのベースはセルローストリアセテート (CTA) である。第 5 章に述べるように CTA は液体窒素中では部分放電に対し弱いので、放電が起きるとカットフィルムがしばしば貫通破壊する。したがって、リヒテンベルグ像の観測はインパルス部分放電開始電圧付近の低電圧で行なわなければならない、像を得る確率は小さい。本論文の場合、印加電圧は正負とも約 25 kV が適当であった。

このように、気中⁽⁸⁾とほぼ同じ方法でリヒテンベルグ写真像が得られることがわかった。得られた図形は高気圧ガス中⁽⁸⁾とは異なり、正負とも樹枝状で、極性による違いはあまりない。大きな樹枝は交流印加における放電モード⑥に対応していると考えられる。正図形の枝分かれの角度は直角に近いが、負図形ではこれが鋭角になるようである。

この方法による実験の続きは別に報告する予定である。⁽⁹⁾

4. 劣化破壊試験

劣化破壊試験結果の寿命を第 8 図に示す。第 8 図の印加電圧 V では放電が必ずしも開始しないので、放電が開始するまで V を上昇し、その後に所定の V にする。 V が 15 kV rms 以上では放電はモード④と⑥の共存であるが、14 kV rms ではほとんどモード④のみである。17 kV rms 以上ではモード⑥が優勢である。14 kV rms では経過時間中に放電が停止しやすく、劣化試験条件としては不適当である。結局、モード④だけの放電による劣化試験は実現できず、両モードの

第 8 図 部分放電劣化破壊寿命 (ポリエチレン試料)

Fig. 8. Deterioration lifetime. (PE sample)

第 9 図 劣化破壊ポリエチレン試料の状態の一例 ($V=17$ kV rms, $T=650$ s)

Fig. 9. Surface condition of breakdown PE sample.

共存あるいはモード⑥が優勢な状態でのみ劣化試験ができる。

劣化破壊寿命の大きさは油中部分放電による劣化破壊の場合⁽⁵⁾とほぼ同じである。劣化破壊寿命 T と印加電圧 V との間に、

$$T \propto V^{-n}$$

を仮定すると $n \approx 7$ となり、これはかなり大きい。したがって、印加電圧増大により寿命は急速に小さくなる。この n の値は気中部分放電劣化と油中部分放電劣化の値⁽¹⁰⁾ の中間であることが注目される。液体窒素中の気ほうの発生が劣化に関与しているとも考えられ、液体窒素を加圧して実験すると気ほう発生がおさえられる可能性があり、今後の研究方向として興味深いと筆者は考える。

劣化破壊試料の一例を第 9 図に示す。放電が樹枝状に伸びるにもかかわらず、劣化試料の貫通孔は棒電極のへりか下にある。高気圧ガス中の樹枝状沿面放電による劣化⁽⁶⁾においては、貫通孔は棒電極のへりより外側にあるので比較して興味深い。これは棒電極による圧力が影響しているのかもしれない。貫通孔の回りは黒化している。その周辺がやや透明度の増加している

第 1 表 材料試験の結果
Table 1. Lifetest of various plastics.

材 料	ポリエチレン	ポリプロピレン	ポリカーボネート	ポリエチレンテレフタレート	セルローストリアセテート	ポリテトラフルオルエチレン
公 称 厚 (mm)	0.2	0.2	0.2	0.19	0.19	0.2
サンプル数	16	2	2	2	2	2
V_i (kV rms)	15.6	12.7	9.2	9.8	破壊が先行するので測定できない	
V_o (kV rms)	11.0	11.0	8.7	9.0		
破壊電圧 (kV rms) 〔寿命 (s)〕	第 8 図に示す	13.5 15 (15)	18.0 15 (30)	11.5 12.0	10.5 13.0	12.0 12.0
貫通孔の位置	棒電極の下かへり	棒電極のへり	棒電極のへりから 2.5 mm	棒電極のへり	棒電極の下かへり	棒電極のへり
劣化試料の状態	穴の回りやや黒化。その回りやや透明化。その回り白色化。放射状・円周状の割れ目。	穴は小さい。穴の回りやや透明化。放射状の割れ目。	棒電極のへりから穴までトラッキング。	穴は大きい。穴の回り黒化。その回りやや透明化。	穴は大きい。円周状の割れ目。	穴は小さい。穴の回り黒化。その回りに熱劣化のような跡あり。
赤外吸収帯	変 化 な し					

場合がある。さらに、その周辺がやや白色不透明劣化しており、第 9 図ではこれが黒い影として見える。この白色不透明部分のおおよその径は $V=14\text{kV rms}$ で 10mm, 15kV rms で 15mm, 17kV rms で 20mm, 19kV rms で 30mm である。貫通孔から放射状・円周状に数 mm 長の割れ目がはいる。この割れ目は破壊時にできるものであるが、破壊後試料を常温にもどす過程で大きくなると思われる。貫通孔以外の棒電極へりからも放射状の小さな割れ目が多数できている。

劣化試料の赤外吸収スペクトルを見ると、赤外吸収帯の変化はない。液体窒素中では酸化劣化などの化学変化が起きにくいので、この結果は当然と思われる。一方、劣化試料の赤外吸収チャート上では干渉じまによる振動が小さくなっており、これは放電により試料表面が侵されて微小な凹凸ができているからと思われる。

以上から、現在の研究段階で劣化破壊機構を推測すると、

- (1) 荷電粒子衝撃
- (2) マクスウェル応力
- (3) 棒電極の圧力による応力
- (4) 気ほう発生による圧力

が考えられる。前述の割れ目ができる理由もこれらであろう。そのほかに、

- (5) 熱変化
- (6) 化学反応の介在

も一応考えられるが、液体窒素中では大きな役割を果たすとは思われない。

5. 材料試験の試み

ポリエチレン (PE) 以外のフィルムで材料試験を行なってみた。材料はポリプロピレン (PP), ポリカーボネート (PC), ポリエチレンテレフタレート (PET), セルローストリアセテート (CTA), ポリテトラフルオルエチレン (PTFE) で、PTFE 以外は絶縁材料コロナ劣化専門委員会の標準試料⁽⁴⁾である。実験結果を PE と比較して第 1 表に示す。

PE 以外の材料は放電開始電圧測定中に破壊することがあり、この実験は劣化実験とはいえない。第 1 表で破壊電圧に寿命時間を併記してあるもの以外は印加電圧上昇中に破壊したものである。劣化試料を観察すると、貫通孔は一般に棒電極のへりにあるが、PC だけは棒電極のへりから約 2.5mm 外側にある。しかも PC では、この貫通孔から棒電極のへりまでトラッキングが残っている。どの材料も赤外吸収帯の変化はなかった。

このように、液体窒素中では部分放電に対しては PE が格段にすぐれている。液体窒素中の短時間破壊特性は極性基をもつ高分子がすぐれているというデータもある⁽¹⁾⁽³⁾が、本論文の実験では試料に棒電極による圧力が加わっているため、これが影響しているのかもしれない。

6. む す び

以上のように、液体窒素中の部分放電および部分放電劣化の概要がはあくされた。これを油中あるいは高気圧ガス中の部分放電・部分放電劣化と比較すると興味深い。本論文の成果を列挙すると次のようである。

(1) 液体窒素中では放電に二つのモードがあることがわかった。一方は弱い放電で、他方は樹枝状の激しい沿面放電であり気ほう発生を伴なう。両モードは一般に共存するが、印加電圧が大きいと後者が優勢になる。後者には気ほう中の放電が加わっている可能性がある。

(2) 液体窒素中でリヒテンベルグ像による沿面放電の研究が実現できることがわかった。

(3) 液体窒素中のポリエチレンの劣化破壊寿命特性がわかった。

(4) 液体窒素中ではポリエチレン以外のプラスチックは部分放電に対し弱いことがわかった。

(5) 今後の方向としては、液体窒素を加圧して実験すると、気ほう発生がおさえられて放電モードや劣化破壊特性に変化が現われるかもしれない、興味深い。

本論文の実験で興味ある現象がいくつか見いだされた。本論文を出発点として、この分野の研究が大いに進展することを期待したい。

本論文の研究にあたり、東京大学 鳳 誠三郎教授、河野照哉助教授のご指導とご援助をいただいた。古河電気工業(株) 岩田善輔氏からは有益な助言をいただいた。また、中央大学理工学部電気工学科から多大のご協力をいただいた。ここに各位に深く感謝する次第である。

(昭和 47 年 2 月 7 日受付, 同 47 年 5 月 1 日再受付)

文 献

- (1) 三浦・岩田: 絶縁材料研究会資料 IM-71-3 (昭 46)
- (2) 野口・河野・鳳: 電学誌 92A, 129 (昭 47)
- (3) 森田・八木・和田: 絶縁材料研究会資料 IM-71-18 (昭 46)
- (4) 絶縁材料コロナ劣化専門委員会: 電気学会技術報告 (I 部) 90 号 (昭 44)
- (5) 井関・倉橋: 電学誌 81, 1060 (昭 36-7)
- (6) 高橋: 電学誌 91, 760 (昭 46-4)
- (7) C. E. K. Mees & T. H. James: The Theory of the Photographic Process 3rd edition (1966) Macmillan Co.
- (8) 鳳・河野・鈴木・高橋: 昭46電気学会東京文大 111
- (9) 鳳・河野・千葉・高橋: 放電研究会資料 ED-72-8 (昭 47)
- (10) 井関・夏目・佐々木・松下: 第4回電気絶縁材料シンポジウム III-4 (昭 46)