UDC 621.315.618.9:546.226.166-1

621.315.616.96.044.62-42:678.643'5'43

論 文

49-A 32

SF₆ ガス中におけるエポキシ樹脂板の部分放電劣化

東京芝浦電気株式会社

東京芝浦電気株式会社

中 北 倫 男

小 柳 瑛 二

1. ま え が き

SF₆ ガスは、その優れた絶縁性能と高い消弧能力から、広く高電圧機器および設備に応用されつつある。たとえば、高電圧変圧器、しゃ断器、縮小形密閉変電所などがそれである。

電気機器の高電圧化、小形化の進展と高分子材料の広範な使用により、電気絶縁が部分放電劣化を生ずる機会が増し、その劣化特性のはあく、劣化機構の解明から、さらに抑止・防止法などの研究と開発が促されてきた。SF₆ ガス絶縁については、部分放電を発生させないように設計ならびに製作がなされることもあって、部分放電劣化の研究はあまりなされていない。

SF₆ ガス中におけるプラスチックフィルムのオゾナイザ形電極を用いた実験によれば⁽¹⁾、放電エネルギーあたりの重量減少が少なく、SF₆ 分解ガスの化学的作用はわずかである。しかし、放電部分における局部的変化がはなはだしいので、実用的な耐部分放電劣化性の評価には集中法電極による寿命比較試験を行なう必要があるとの指摘がなされた。この種の寿命試験例も一、二あり、プラスチックフィルムの部分放電劣化の場合、高気圧では沿面ストリーマを形成しやすく、寿命が短くなると報告されている⁽²⁾。また、乾燥空気中や窒素中の場合に比べて、SF₆ ガス中では破壊に至る総放電電荷量が 1/2~1/5 で、20~60°C の範囲で温度

依存性もほとんどないことが確かめられた⁽³⁾。

これらは、いずれも薄いプラスチックフィルムについての実験であり、SF₆ ガスとともに用いることの多い熱硬化性樹脂については報告例はきわめて少ない。わずかに、エポキシ樹脂の種類および充てん剤を変えた場合の寿命の比較を簡単に述べた例⁽⁴⁾があるにすぎない。これに対して筆者らは、この種の代表的熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂について、特に厚い板状試料を用いて集中法電極による表面部分放電劣化を数千時間にわたって試み、寿命を左右する因子として、印加電界、ガス圧、ガス温度、電源周波数および機械的ストレスなどの影響と、エポキシ樹脂に加える充てん剤の効果を調べ、検討を加えた。

2. 試料および実験方法

試料は第 1 表に示す 6 種類である。ビスフェノール系 1 と 3 は、銘柄は異なるが基本的には同種の樹脂である。充てん剤はアルミナとシリカの 2 種、補強材としてポリエステル不織布を検討した。試料の比誘電率および誘電正接の温度特性を第 1 図に示す。また、こ

第 1 表 試料の種類

Table 1. Composition of tested materials.

符 号	エポキシ樹脂	充てん剤または補強材
N	ビスフェノール系-1 (酸無水物硬化)	な し
A	同 上	アルミナ
P	ビスフェノール系-2 (酸無水物硬化)	ポリエステル不織布
N'	ビスフェノール系-3 (酸無水物硬化)	な し
A'	同 上	アルミナ
S	同 上	シ リ カ

Dielectric Breakdown of Epoxy Resin Plates due to Surface Partial Discharges in Sulfurhexafluoride Gas. By T. NAKAKITA, Member & E. KOYANAGI, Member (Power and Control Laboratory, Toshiba Research and Development Center, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.).

中北倫男：正員，東京芝浦電気株式会社総合研究所，エネルギー機器研究所

小柳瑛二：正員，東京芝浦電気株式会社総合研究所，エネルギー機器研究所

第 1 図 試料の誘電特性

Fig. 1. Dielectric properties of tested materials.

第 2 表 試料の機械的特性

Table 2. Mechanical properties of tested specimens.

特 性	試料の種類	N'	A'	S
比 重		1.2	2.1	1.8
引 張 り 強 さ (kg/mm ²)		9.6	8.5	8.5
伸 び (%)		1.6	1.0	1.2
引 張 り 弾 性 率 (kg/mm ²)		243	953	1,100
圧 縮 強 さ (kg/mm ²)		12.9	21.6	18.0
曲 げ 強 さ (kg/mm ²)		16.5	12.5	11.0
シャルピ衝撃強さ (kg·cm/cm)		8.6	6.6	5.0
熱 変 形 温 度 (°C)		108	123	120
熱伝導率 (10 ⁻⁴ cal/s·cm ² °C/cm)		1.2	5.0	4.6

第 2 図 電極構成

Fig. 2. Electrode configuration.

これらの樹脂の機械的諸特性は第2表のとおりである。試料板の製作は、いずれも真空注形により厚さを1mmにそろえた。試料の処理は、アセトンで表面の汚れを拭拭後、100°Cで15時間熱風乾燥のうえ、デシケータ中に1週間以上保持したものをを用いた。平板電極との接触不良を避けるため、試料板の片面には導電塗料を塗布した。

電極系は、第2図に示すようなステンレス鋼製5mmφ半球棒状電極対50mmφ平板電極を用い、試料と半球棒状電極との間のギャップはマイクロメータヘッドで0.5mmにセットした。試料容器は内径500mm、深さ1,000mmの軟鋼製タンクで、1容器に5〜6組の電極系を収容することができる。原則として容器下部に500gの粒状活性アルミナを300mm×200mmの平皿上にいっぱいに広げて配置し、器内の乾燥と分解ガス成分の吸着を行なわせた。

ガスの置換は、0.2Torrまで排気後、5TorrまでSF₆ガスを導入し、再び0.2Torrまで排気した後、手早くSF₆ガスを所定の圧まで導入する。SF₆ガスの純度は99.90〜99.98%であり、酸素濃度は0.02%以下であった。圧力は室温25°Cで調整し設定する。したがって、高温での実験の場合は温度上昇分だけ高い圧力を示すことになるが、ガス密度は変わらない。電圧の印加は一次側を安定化電源により励磁した50Hz、20kV、20kVAの変圧器か、500Hzまたは1kHzの場合は、サイリスタインバータによる20kV、2kVAの高電圧電源を用いた。寿命の表示はすべて50Hzに換算した時間による。

曲げストレスはカマボコ形の電極を平板電極に代えて使用し、試料板をその曲面に沿って密着させることにより加え、曲面円弧の半径を選んで調整した⁽⁵⁾。

初期放電特性の測定は内容積約2lの小形容器を用い、個別に行なった。測定器は日本計測製の同調式コロナ測定器を使用した。

印加電圧は13, 14および15kVの3段階、ガスは主としてSF₆ガスで、0.2, 0.7および1.2kg/cm²・gの3圧力段階、一部窒素ガス2kg/cm²・g、温度は25, 50, 75および90°Cの4段階で、これらの条件と6種の試料を組合せて部分放電劣化寿命を調べた。

3. 実験結果

〈3・1〉初期放電特性 劣化寿命を放電の強さと関係づける目安として、初期放電特性を代表的試料について測定した。第3図は、部分放電開始電圧と消滅電圧を各種の試料について、圧力特性の形で求めたものである。エポキシ樹脂単独の試料N'の場合が最も高い電圧を与える。以下、シリカ充てん試料S、アルミナ充てん試料A'の順である。

第4図は見かけの最大放電電荷の印加電圧特性で、ガス圧をパラメータにしてある。極性、試料の種類を問わず、印加電圧を上げるに従い増大する。

第5図は、放電電荷の分布を調べると電荷が100pC以下の小さいところで発生数が多いことがわかった。

第 3 図 放電電圧の圧力依存性

Fig. 3. Pressure dependence of discharge voltages.

第 4 図 見かけの最大放電電荷と印加電圧の関係

Fig. 4. Relation between maximum apparent charge and applied voltage.

ら、100 pC 以上のパルス数を総パルス数にほぼ等しいとして、そのガス圧特性を描いたものである。一定の電圧の下では、ガス圧を上げるに従い放電パルスの発生ひん度は減少する傾向を示す。

同様に 100 pC 以上のパルスの発生ひん度と印加電圧の関係を描いたのが第 6 図である。電圧が高くなる

第 5 図 放電パルス発生ひん度とガス圧の関係

Fig. 5. Relation between partial discharge repetition rate and gas pressure.

第 6 図 放電パルス発生ひん度と印加電圧の関係

Fig. 6. Relation between partial discharge repetition rate and applied voltage.

ほど放電パルスが多く発生する様子がわかる。

〈3・2〉 部分放電劣化寿命特性 得られた個々の寿命時間を条件ごとに Weibull 確率紙⁽⁶⁾にプロットして、平均寿命 μ と形のパラメータ m を求め、また変動率を算定してばらつきの程度を表示したのが第 3 表である。試料数は各条件とも 5~6 個で、表中、試料条件欄の記号は、最初の文字が試料の種類、ハイフ

第 3 表 Weibull 分布による寿命 (平均寿命 μ , 形のパラメータ m , 変動率)Table 3. Shape parameter m and average life in reduced hours to 50 Hz.

試料条件	N-15	A-15	P-15	N-14	A-14	N-13	A-13	N-13 -0.7 kg/cm ² ·g	N-13 -1.2 kg/cm ² ·g	A-13 -0.7 kg/cm ² ·g	A-13 -1.2 kg/cm ² ·g	N-13 -50°C	A-13 -50°C
寿命 μ (h)	226	53	1,030	837	147	2,640	296	200	268	198	73	2,040	302
m	4.0	2.3	11.1	1.4	1.1	7.5	8.1	3.0	2.3	2.2	0.9	15.0	13.6
変動率 (%)	28	47	12	73	91	15	13	37	47	49	111	11	6.5

試料条件	N-13 -N ₂	A-13 -N ₂	N-13**	N-13*	N'-13*	A'-13*	S-13*	N-13* -90°C	A-13* -57°C	S-13* -0.7 kg/cm ² ·g	S-13* -1.2 kg/cm ² ·g	S-13* -50°C	S-13* -82°C
寿命 μ (h)	182	102	1,260	1,480	1,580	850	1,810	530	415	310	231	550	320
m	2.5	4.0	2.1	0.5	1.5	1.4	4.0	0.6	1.2	1.2	0.7	37.5	4.6
変動率 (%)	43	28	50	224	68	73	28	144	84	84	146	7.9	23

(注) *: 500 Hz., **: 1 kHz

第 7 図 平均寿命の電界依存性

Fig. 7. Electric field dependence of average life.

ンの後の数字は印加電圧 (kV) を表わす。ほとんどの場合 m は 1 より大きく、寿命は摩耗的に尽きることが多い。変動率を見ると、たいていの場合、数十パーセント以下で、空気中で各種プラスチックフィルムについて得た表面放電劣化寿命の場合のよりやや大きいばらつきを与える。

第 7 図にギャップに加わる電界 E_g と平均寿命 μ の関係を示す。試料 A と N の $\log E_g - \log \mu$ 特性は E_g が 20 kV/mm 付近で近接する。平均寿命の電界依存性は N のほうが大きい。S の寿命は N の寿命特性上にほぼおのるが、P の寿命はやや長い。A および N とともに純度が 99.8% の窒素ガス中では寿命はむしろ短い。

第 8 図は横軸に絶対温度の逆数を取り、これと 50 Hz 換算平均寿命の関係を描いたものである。寿命の温度依存性は S が最も大きく、次いで A', N の順である。A の寿命は温度によりほとんど変わらない。

第 9 図は平均寿命とガス圧の関係を示すもので、試料の種類によって様相がやや異なるが、大まかに言って、印加電圧一定の下でガス圧を上げると、平均寿命ががえって短くなるのが注目される。

平均寿命と曲げストレスの関係を第 10 図に示す。N' の場合は 1 kg/mm² のストレスで寿命は 2 けた以

第 8 図 平均寿命の温度依存性

Fig. 8. Temperature dependence of average life.

第 9 図 平均寿命のガス圧依存性

Fig. 9. Gas pressure dependence of average life.

第 10 図 平均寿命の曲げストレス依存性

Fig. 10. Flexural stress dependence of average life.

第 11 図 50 Hz 換算平均寿命の周波数依存性

Fig. 11. Frequency dependence of average life in reduced hours to 50 Hz.

上も低下するが、A' の場合は 5 kg/mm² のストレスでも半減するに止まる。S の場合は両者の中間で、4 kg/mm² のストレス下で寿命は 1/20 程度に低下する。

第 11 図は平均寿命 μ と周波数 f の関係を示したもので、試料は N の場合である。 $\log \mu - \log f$ 特性はほぼ直線で、周波数を上げるほど換算寿命は短くなる。

〈3・3〉部分放電劣化試料面の状況 SF_6 ガス中における部分放電劣化は、空気中の場合とかなり相違する。以下、試料の種類別に劣化状況の特徴を述べる。

第 12 図 劣化試料面の写真 I

Fig. 12. Photographs of deteriorated surface of specimen. I.

- (a) N' , SF₆-0.2 kg/cm²·g, 13 kV (500 Hz), 曲げ 1 kg/mm²
 (b) A, SF₆-0.2 kg/cm²·g, 14 kV
 (c) A' , SF₆-0.2 kg/cm²·g, 13 kV (500 Hz), 曲げ 5 kg/mm²
 (d) A' , SF₆-0.2 kg/cm²·g, 13 kV (500 Hz), 50°C
 (e) S, SF₆-0.2 kg/cm²·g, 13 kV (500 Hz), 82°C
 (f) P, SF₆-0.2 kg/cm²·g, 15 kV
 (g) N' 空気 0 kg/cm²·g, 10 kV (500 Hz)

第 13 図 劣化試料面の写真 II

Fig. 13. Photographs of deteriorated surface of specimen. II.

(1) 無充てんエポキシ樹脂の場合 (N および N'): SF₆ ガス中 25°C の場合は、電圧およびガスのいかなを問わず、第 12 図(a)に示すように電極直下を中心に皿形のくぼみを作り、その最薄部で貫通破壊を起こす。温度を上げると電極の直下で直径 10 mm ほどの範囲にわたり、表面が円形にやや劣化する傾向がある。

高気圧 (2 kg/cm²·g) 窒素中では皿形のくぼみを作ることとはほとんどない。寿命の長い試料の場合に、電極直下にわずかながら放電条痕が見られる。貫通破壊孔は電極直下から 2 mm ほど離れた点にあり、これを起点にして部分的割れ目を生じる [第 12 図(b)]。

曲げストレスを加えた場合は、皿形のくぼみの縁端に破壊孔とクラックを形成する [第 13 図(a)]。

(2) アルミナ充てんの場合 (A および A'): 25°C では電極直下にくぼみを作ることなく、円形にきわめて軽い減耗部分を生じ、樹脂分が揮散してアルミナが残る。貫通破壊孔は小さく電極直下に近いが、電圧が高くなるとややずれることもある。周辺部に白色不透明の劣化生成物の付着も見られる [第 13 図(b)]。

温度を上げると、濃茶色と白色の同心状のしま模様が形成され、化学的腐食反応の進行がうかがわれる。500 Hz では電極直下は高温かつ化学反応が激しくなるのか、特に 50°C の場合は炭化と劣化生成物の堆積がかなり著しい [第 13 図(d)]。圧力を上げると破壊孔は電極直下から 2~5 mm 離れる。窒素中では電極直下でのみ炭化が見られる。SF₆ ガス中で曲げストレスを加えても試料 N' の場合と異なり破壊の状況は変わらない [第 13 図(c)]。

(3) シリカ充てんの場合 (S): 25°C では電極の下に直径 10 mm 程度の浅いくぼみが形成され、直下よりやや離れた点で破壊する。温度を上げると、試料表面における化学反応が活発な様子で、濃茶色の反応生成物が多量に付着し、82°C では電極直下に深くくぼみを作り、その部分がほぼ黒色を呈する [第 13 図(e)]。圧力を上げるとくぼみ浅い時点で破壊に至り、その貫通孔はより離れた地点に生ずるようになる。

(4) ポリエステル不織布補強の場合 (P): 電極直下に皿形のくぼみを作り、ほとんどその中央で破壊する。くぼみの周辺に円形に茶色の付着物が見られる [第 13 図(f)]。

空気中の場合は、電極直下から放射状のストリーマに沿った深い放電条痕が残る、その最深部で破壊している [第 13 図(g)は無充てんエポキシ樹脂の典型例]。

4. 考 察

〈4.1〉 部分放電劣化寿命の電圧依存性 平均寿命のギャップ電界特性は、試料 N および A について逆 n 乗則⁽⁶⁾に従うとして直線を引けば指数 n はそれぞれ約 16 および 12 となり、空気中の場合の n が 3 前後である⁽⁵⁾のに比べて数倍大きい。これらはボイドのない場合のポリエチレン中のトリーヤ、エポキシモールド品、発電機コイルのマイカ絶縁などの破壊電圧に対する電圧依存性⁽⁹⁾と同程度の大きさで、SF₆ ガス中における放電が非常に集中性の高いものであることを示唆する。実際、永田氏らも SF₆ ガス中の部分放電はストリーマ形になりやすく、放電面積も限られた集

中放電になることを報告している⁽¹⁰⁾。SF₆ ガスの場合は破壊電界が高いので、電離係数および電子附着係数のいずれも大きく⁽¹¹⁾、発生電子数が多くまた負イオンも大量に形成されるので、負極性ストリーマ先端の電界が強まり、沿面ストリーマ自体伸びやすくなる⁽¹²⁾。第4図のように、最大放電電荷が印加電圧の上昇に従い増大するのは、ギャップ間の放電よりは沿面ストリーマ支配の特性と見るべきであろう。

この最大放電電荷 ($q_{\max}$)-電圧 (V) 特性を、両対数表示で直線にのりとして勾配を求めると7ないし10であり、それらの間に次の関係が成りたつ。

$$q_{\max} \propto V^a \quad (a=7\sim 10)$$

横井氏らも空気中でアクリル樹脂板上のインパルスによる沿面放電の様相を調べ、放電電荷 q が印加電圧 V (kV) と試料板の固有容量 C_0 (pF) との間に

$$q = kV^\xi C_0^\varphi$$

の関係があり、 ξ と φ はそれぞれ7および3前後であることを確かめている⁽¹³⁾。

さらに放電パルス発生ひん度の電圧依存性は、第6図のように両対数表示で直線関係にあるとみなせば、その勾配は3程度である。

したがって、最大放電電荷と放電パルス発生ひん度の両面から、放電の強さは印加電圧の約10乗のべきに比例することになり、放電の強さと劣化速度がほぼ比例的関係にあるとすれば、逆 n 乗則の n の値は放電の強さの電圧依存性から、ある程度説明できる。

単針直接接地形の試料によるトリッキング破壊の実験によれば、トリッキングの進展に対するアルミナやシリカなどの充てん剤の阻止作用が大きいことが推定されている⁽¹⁴⁾。本報の場合は厚肉試料を用いており、トリッキング破壊の過程も当然入ってくるはずであるが、第3表からわかるように、同一印加電圧で比較して充てん剤入りの試料の寿命はむしろ短くなっている。これはSF₆ ガスのギャップを介した放電によるトリッキングであること、有効ギャップ電界 E_g が単針直接接地試料におけるトリッキング破壊電界と大きく相違することおよび、SF₆ ガスを含めた放電化学反応が影響することなど、条件に多くの違いがあるので矛盾する結果ではない。主に高電界トリッキングが寿命を支配する形にはなっていないと言える。同一印加電圧で比較して、無充てん試料よりアルミナ充てん試料のほうが短寿命なのは、後者の比誘電率が大きいのでギャップ電界が強くなり、放電の遅れに伴う過電圧⁽¹⁰⁾も高く、放電の強さが増すからである。実際、最大放電電荷はアルミナ充てん試料の場合に数倍大きいので、パルス発生ひん

度も2~3倍多い。これと寿命が1けた相違するのがよく対応する。

指数 n の試料による違いを含めて寿命の電圧依存性を解明するには、放電の強さの電圧依存性のほか、放電の強さと劣化量の関係、集中穿孔過程への移行と進展の電圧依存性などを明らかにしなければならない。

〈4・2〉 寿命の温度依存性 平均寿命と温度の関係は、対数寿命 $\log \mu$ と絶対温度の逆数 $1/T$ の間に直線関係が成りたつとして、劣化過程の見かけの活性化エネルギー E_a を、次式から定めれば第4表のようになる。

$$\mu = \gamma \exp(E_a/kT) \quad (\gamma \text{ は定数})$$

S の場合は7.1kcal/molで、3種の試料の中で最も大きい。一般の化学反応の場合と比べるとはるかに小さい。これらの値はMckeown氏が空気中の表面放電劣化の場合に求めた⁽¹⁵⁾ ポリイミドおよびポリエステルフィルムのそれぞれ2.4~2.9および3.3~4.5kcal/molと大差はない。SF₆ ガス中の場合も放電空間で活性粒子が生ずるに違いないが、これと試料との反応は空気の場合と相違する。しかし、活性粒子の作用が直接的に効いて、劣化を進める点で差がないのであろう。試料が S の場合に活性化エネルギーが多少大きいのは、シリカ中のSiがSF₆分解ガス中のFと反応しやすいので、これが集中穿孔過程への移行に関連して律速過程に影響を及ぼすためと思われる。

〈4・3〉 寿命のガス圧依存性 前述のように、一定の印加電圧下でガス圧を上げると、見かけの放電の強さは低減する。放電電流の形で整理すると、第14図のように圧力の上昇に従い直線的に減少する。ところが、寿命はかえって短くなる。これはガス圧のような条件を変える場合は、見かけの放電の強さと寿命を単純に結びつけて考えるべきではないことを意味する。

放電の状況を見ると、ガス圧が低いほどストリーマの枝分れが多く、試料面から離れがちになるうえ、放電による発光部分は細くかつ光も弱い。ガス圧が高くなると放電の枝分れは少なく、幹も太くなり、試料面への密着傾向が増す。このようになると、見かけの放

第4表 SF₆ 中部分放電劣化の活性化エネルギー

Table 4. Activation energies in deterioration process due to partial discharges in SF₆ gas.

試料の種類	活性化エネルギー (kcal/mole)
N	2.5
A'	3.1
S	7.1

第 14 図 部分放電パルス電流のガス圧依存性
Fig. 14. Relation between partial discharge current and gas pressure.

電荷は小さくても劣化作用は大きくなる。そこで、発生ひん度を含む見かけの放電の強さの低減による劣化の抑制と、放電の集中、密着に伴う劣化の促進の両者のバランスにより寿命特性が決定される。

充てん剤の入った *A* および *S* の試料の場合は、圧力の上昇に伴う放電の密着と集中の効果が優勢で、他方、*N* の場合は圧力 1.2 kg/cm²・g 側で、それよりも放電の強さの減少の影響が強く出て、寿命の圧力依存性が浅い *V* 特性を描くことになる。この場合、特に、高ガス側では印加電圧が放電開始電圧に近づき、過電圧率が低下することが指摘される。

〈4.4〉 寿命に及ぼす機械的ストレスの効果 機械的ストレスの影響は空気の場合と異なり著しい⁽⁵⁾。これは侵食が進展するにつれて表面不整が増し、これに基づく機械的ストレスの集中が進むとき、SF₆ ガス中の放電は試料面上でエネルギー密度が大きいため、局部加熱の形で機械的ストレス集中部の温度を上げ、機械的に微小クラックを生じて、これに電氣的貫通破壊が続くものと推定される。このように考えると、充てん剤が入って見かけの機械的強度が増し、熱伝導率が高い試料の寿命が機械的ストレスに比較的影響され難いことが定性的に説明できる。

試料 *N*, *S* および *A* の諸性質は第 2 表に示したとおりで、室温における機械的強さに大差はないが、試料 *A* は熱伝導率が最も大きく、表面温度を相対的に上げ難いので機械的強さの低下が少ないうえ、〈3.3〉節で述べたように侵食に伴う試料面の減耗形態がアルミナ粉末を残して比較的一様に減るため、ストレスを集中させ難いので、曲げストレスを増したときに示す寿命低下の程度が最も小さい。他方、*S* の場合は熱伝導率が *A* に次いで大きい、劣化試料面がやや皿形の侵食形式をとる（これはシリカ中の Si が SF₆ 分解ガス中の F と化合し揮散しやすいから）ため、*A* より

第 15 図 放電の強さの周波数依存性

Fig. 15. Frequency dependence of discharge intensity.

ストレスの集中を起しやすしい。したがって、*A* と *N* の中間程度の寿命低下を示すことになる。*N* の場合は試料面の減耗形態が最も典型的な皿形を示し、その縁端部の曲率が大きくなる。したがって、ストレスの集中を最も起しやすいうえ、熱伝導率も低いので、表面の局部温度が高くなりやすく、曲げストレスの増大に伴い極端な寿命低下をもたらすことになる。

〈4.5〉 寿命の周波数依存性 試料 *N'* について限られた条件でのみ調べたので、電界、温度あるいは充てん剤の混入などにより、周波数依存性の傾向は多少異なるかもしれない。しかし、SF₆ ガス中における厚肉のエポキシ樹脂板の一例として検討する。薄いプラスチックフィルムの部分放電劣化寿命は、空気中で集中法の場合、1 kHz 程度の周波数まで寿命の総サイクル数はほとんど変わらない。すなわち、周波数加速の比例性が通常成立する。ところが、筆者らの場合は、50 Hz 換算平均寿命 μ は周波数 f との間に $\mu \approx 6.9 \times 10^3 f^{-0.29}$ の関係が成り立つ。

これは周波数の増大に伴い、50 Hz 換算平均寿命が短くなることを意味する。このような周波数依存性は 1 サイクルあたりの発生する放電の強さが変わらず、かつ、劣化がこれに比例するとの前提の下では見られないはずである。実際、第 15 図のように 1 サイクルあたりの放電の強さは、周波数によりあまり変わらない。したがって、放電による試料表面の温度上昇が強く影響していることが推定される。

いま、周波数効果が温度上昇にのみ起因するとして第 8 図の平均寿命-温度特性を考慮して実効温度を推定すると、500 Hz および 1 kHz の場合それぞれ約 90°C および 110°C となる。これは、あまりかけ離れた温度とは思えないので、このような見方がかなり有力であると考えられる。

5. む す び

厚さ 1 mm の厚肉試料によるエポキシ樹脂の SF₆ が

ス中における集中法を用いた表面放電劣化寿命について、電界、温度、ガス圧、機械的ストレスおよび電源周波数などの影響を調べた。また、エポキシ樹脂に混入する充てん剤の影響も合せ検討した。電界を高くすると、沿面ストリーマが伸びて電極間を直接橋絡するので、部分放電開始電圧以上の電圧で安定に部分放電を発生させて劣化寿命を調べるには、電界範囲が自ら限定され、ギャップ電界で 17~23kV/mm の範囲で検討したに止まったが、結論として次のことが言える。

(1) 逆 n 乗則を仮定して得た寿命-電界特性の勾配 n は、エポキシ樹脂単独の場合とアルミナ充てんの場合について、それぞれ約 16 および 12 と非常に大きく、空気中の場合の数倍に達する。これは、 SF_6 ガス中における集中性の高い放電形態を示唆するもので、放電の強さの電圧依存性から、定性的にある程度説明できるが、試料間の差については放電による集中穿孔への移行過程などに原因を求める必要がある。

(2) 寿命の温度変化は、25~100°C の範囲で比較的小さい。これは劣化の律速過程が、通常の化学反応と異なることを意味する。シリカ充てん試料の場合、やや温度変化が大きい。これは SF_6 分解ガス中のフッ素とシリカ中のケイ素が反応しやすいことに起因するのであろう。

(3) 印加電圧一定でガス圧を上げると、見かけの放電の強さは低下するが、寿命はむしろ短くなる。これは圧力の上昇に伴い放電が試料面に密着し、かつ集中しやすくなるからである。

(4) 曲げストレスを加えて劣化寿命を調べると、充てん剤を含まない試料はストレスの増大に伴い寿命の低下が著しいが、シリカ充てん、アルミナ充てんの順にストレス効果は小さくなる。これは主として、放

電による実効温度の上昇に伴う電氣的、機械的強度の低下と、劣化形態の差により説明される。

(5) 充てん剤を含まない試料で電源周波数の影響を調べると、周波数が上がるほど換算寿命は短くなる。これは、放電による試料表面の局部温度上昇が周波数を上げるほど大きくなり、これが間接的に寿命を短くしているものと推論される。

劣化寿命についてさらに一般性ある結論を得るには諸因子間の相乗または相殺効果が考えられるので、それらの多くの組合せについて実験する必要がある。

本研究を進めるにあたり、試料の作製、実験の遂行にご協力いただいた東京芝浦電気(株)化材事業部 田村主任、鶴見工場 萩原氏および総合研究所 南氏らに謝意を表する。

(昭和 47 年 11 月 7 日受付, 同 48 年 7 月 23 日再受付)

文 献

- (1) 宅間: 電学誌 88, 1803 (昭 43-10)
- (2) 高橋: 同上 91, 760 (昭 46-4)
- (3) 堺, 他: 同上 86, 93 (昭 41-1)
- (4) 平林, 他: 昭44電気関係学会関西支部連大 S2-10
- (5) 中北: 電気学会論文誌 94-A, 91 (昭 49-3)
- (6) W. B. Nelson: GER & D Center. TIS Rept. 71-C-011 (1971)
W. Weibull: J. Appl. Mech. No. 9, 293 (1961)
- (7) 絶縁材料コロナ劣化専門委: 電気学会技術報告 I 部 90号 13, 21~22 (昭 44)
- (8) Y. Toriyama: Dust Figure of Surface Discharge and its Application p. 11 (1961) Kinokuniya
- (9) 井関, 他: 昭 48 電気学会全大 275
- (10) 永田, 他: 同上 295
- (11) 鳥山, 他: 電学誌 87, 1625 (昭 42-9)
- (12) 鳳, 他: 放電専門(委)資料 85-10 (昭 45)
- (13) 横井, 他: 電学誌 91, 1455 (昭 46-8)
- (14) 中北, 他: 昭44電気学会東京支大 95
中北, 他: 昭46電気学会全大 201
中北, 他: 昭47電気学会全大 199
中北, 他: 昭48電気学会全大 363
- (15) McKeown, et al.: Proc. 5th EIC, 125 (1965)