電極を試料面より隔離した高電圧小電流耐アーク性試験*

池 尻 忠 夫**

High Voltage-Low Current Arc Resistance Test Using the Electrodes Detached From Testing Insulator

by

Tadao IKEJIRI

(Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui)

The ASTM D 495-61 method has been regarded as a representative test for the high voltage-low current arc resistance of insulating materials. In this method, however, the electrodes are placed directly on the sample, so that the heat delivered to the fire spot at the tip of advancing track is of the orders of magnitude greater than that on the surface. Accordingly, the failure by the heat delivered to the fire spot appears to be emphasized in comparison with the failure by the heat delivered to the surface from the body side of arc.

From these view points, it is considered that, when the electrodes are detached from the surface, the formation of fire spot can be avoided and consequently the failure caused by only the body of arc can be taken out and examined under various conditions excluding the influence of electrode position and its state in order to evaluate the arc resistance. In fact, under such conditions, the formation of tracking is not observed and the burning part spreads out widely on the surface.

The experimental method used in this study was similar to the ASTM D 495-61 method, but the electrodes were placed horizontally about 1~2mm apart from the surface of the sample as shown in Fig.1. The elapsed time of failure were selected to be 10, 20, 30 sec and so on. After allowing 30 minutes of cooling, the surface resistance was measured in order to detect the failure. Various types of thermosetting resins were used as the test samples.

The following results were obtained from these experiments :

(1) At more than 10~40 seconds of failure time, the relation between the failure time and the ratio of the insulating resistance after failure to that before failure begins to deteriorate. From this relationship the characteristics of failure can be derived.

(2) For the evaluation of arc resistance, the measurement of insulating resistance after the failure is superior than that of breakdown voltage.

(3) The time dependency of insulating resistance during failure, which can be followed by the measuring circuit arranged between the electrodes (Fig. 1), shows that the process of failure is extremely complicated.

(4) The present method is found to be useful as a practical testing method from the comparison between the present results and the results obtained by various arc resistance tests.

(Received July 12, 1971)

1 緒 言

一般に電気絶縁材料は火花放電に暴されると炭化、燃焼、熔融などのため劣化しその高絶縁抵抗を保持できなくなるのが普通である。したがって火花放電に暴された後でも高絶縁抵抗を保持できるかどうかの性質すなわち電気絶縁材料の耐アーク性はその有用性を判定する重要な因子と考えられる。

ところで、電気絶縁材料が火花放電に暴される機会

は非常に多く、しゃ断器、制御器あるいはヒューズの保護筒などのように火花を発生する電気装置または火花に近接した部分に置かれる絶縁材料などの場合は等しくこれに相当する。

このような意味で電気絶縁材料の火花放電に対する抵抗力、すなわち耐アーク性の研究は重要で、これまでかなり詳細に調べられ、また耐アーク性試験法に関しても種々提案がなされ、高電圧小電流アークによる試験法として現状においては ASTM D495-61 標準試験法が代表的なものとして知られている（こ

* 原稿受理 昭和46年 7 月 12 日

** 正 会 員 福井大学工学部 福井市文京

用いている「アーク」とは厳密に言えば高電圧グロー放電をさしたものであり、いわゆる低電圧大電流アーク放電とは異なっている）。しかしながら ASTM D495-61 標準試験法では電極が供試面上に配置されるため、劣化時の進行トラックの先端の火点（白熱炭素と考えられ最初電極先端近傍に生じその対向極への進行により炭化路を生じ劣化する．そしてその発生は電極の配置状態により大きく影響をうける）に分配される熱が全体として材料表面に分配される熱より大なる割合を占めることが考えられ、したがって全体として材料表面に分配される熱，すなわちアークの腹による加熱での劣化に比べ、火点に分配される熱での劣化が強調されて現われることになる。要するに耐アーク性の評価においてやや考慮の余地があることが推察される。

このような見地から本稿においては両電極を供試面より 1～2mm 離し、火点の生成を妨げることによってアークの腹による劣化のみの状態として、すなわち電極の状態の影響を除いた状況のもとでアーク劣化を調べ、耐アーク性の評価を行なった。また従来の耐アーク性試験の結果などと比較対照し、その有用性についても検討した。なおこのような状態での劣化ではトラッキングの生成はみられず、焼損部は表面に沿い広く広がる劣化の形態を示した。したがって劣化の程度の判定には劣化部の絶縁抵抗の測定などによった。

2 実験方法ならびに試料

実験方法としてはほぼ ASTM D495-61 標準試験法に準じたが、電極は板状（厚み 0.4 mm，幅 4 mm，長さ 12 mm 以上のステンレス鋼製でその先端は 30°の鋭角に尖らした。）で供試面より 1～2 mm 程度離し水平に保持した。（Fig. 1）このような電極配置のもとで電圧を印加しアークを発生させ、試料を劣化させた。試験段階としては第 4 段階すなわち連続アーク発生の状態のみにして行なった。また劣化時間は 10, 20, 30 sec……とし、劣化後30分間冷却した後で表面の絶縁抵抗を東亜電波製超絶縁計 SM-5, SM-10 を用いて測定し、劣化の程度を調べた。電極としてはアルミニウムはく 20×20 mm を 4 mm 離して試料面に貼付

し、50 g/cm² の荷重をかけ、また印加電圧 1 000 V で測定し、5 回の測定値の平均をもって絶縁抵抗を示した。また比較のため劣化部の沿面破壊電圧ならびに劣化後の重量減をも測定した。

沿面破壊電圧の測定は交流で電極ギャップ長 4 mm のもとで行なった。なお劣化後の重量減はすすなどの炭化劣化物などをふきとらない状態で測定した。

一方 Fig. 1 に示すように別に測定回路（電池：100 V 電流制限抵抗：500 k Ω ，ペンオシロ，針状電極などよりなる）を設け、アーク劣化時の試料面の絶縁抵抗の変化を同回路を流れる電流より推定した。

試料としてはフェノール樹脂，エポキシ樹脂，ポリエステル樹脂，シリコン樹脂などの各種の熱硬化性樹脂などを使用した。また特にエポキシ樹脂の場合には各種の鉱物質充てん剤を 50～100 phr 配合したものの板状試料を注型操作により作製し用いた。樹脂，硬化剤ならびに充てん剤の種類，配合量などを Table I に示す。充てん剤は200～325メッシュでいずれも80℃で 6 hr 乾燥し、さらに 5 mmHg で約 1 hr の真空乾燥を施したのち樹脂と混練した。

Table I. Resin, curing agent and fillers

Classification of mineral	Name of mineral	Chemical formula	Fineness (mesh)
Halogen mineral	Fluorite	CaF ₂	200
	Diaspore	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	"
Oxide mineral	Hydrated alumina	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	"
	Silica	SiO ₂	"
Sulphate mineral	Alumite	K ₂ O·3Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂ ·6H ₂ O	"
Firo silicate mineral	Pyrophyllite	Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂ ·H ₂ O	"
	Chlorite	11MgO·Al ₂ O ₃ ·7SiO ₂ ·8H ₂ O	"
	Serpentine	3MgO·2SiO ₂ ·2H ₂ O	"
Tecto silicate mineral	Albite	Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	"
	Eucryptite	Li ₂ O·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	"
Resin		Epikote 100	
Curing agent		Triethylene tetramine (TTA)	15 4
Diluent		Allyl glycidyl ether (AGE)	10
Filler		50～100	

なお試料は測定前に表面をベンゼンでふき、中性洗剤で洗浄し、さらに水道水と蒸留水で洗浄したのち乾布で水分をふきとったものを実験に供した。

3 実験結果とその考察

3・1 アーク劣化後の絶縁抵抗特性

電極を試料から浮かせたアーク劣化試験においてはトラッキングの生成はみられず焼損部は表面に沿い広く広がる劣化の形態を示す。（Fig. 2）

いま各種の熱硬化性樹脂の試料について両電極と供試面のエアギャップが 2 mm の場合のアーク劣化後の

Fig. 1 Electrode assembly.

Table II. Surface resistance R_t after discharge and its reduction factor m of various resins. $T=25^{\circ}\text{C}$ Air gap : 2 mm $R_t(\Omega)$: Surface resistance after dischargeR. H. : 65~68%, $m=R_t/R_0$ $R_0(\Omega)$: Surface resistance before discharge

Insulator Sec	Phenol resin	Epoxy resin	Polyester glass	Epoxy glass	Silicone glass*
10	$R_t=9.2\times10^{10}$ $m=9\times10^{-2}$	4.8×10^{11} 1.2	5.8×10^{11} 1.4	1.7×10^{12} 1.8	2.2×10^{12} 1.3
20	2.9×10^8 6×10^{-4}	4.5×10^{11} 9×10^{-3}	1.1×10^{10} 1.3	1.5×10^{12} 1.8	1.8×10^{12} 1.2
30	—	—	2.5×10^{10} 6.5×10^{-2}	1.7×10^{12} 1.8	2.3×10^{12} 1.3
40	—	—	8.2×10^8 2.4×10^{-3}	1.3×10^{11} 1.4×10^{-1}	1.6×10^{11} 1.1
50	—	—	—	2.0×10^{10} 5.0×10^{-3}	1.2×10^{11} 5.5×10^{-1}
60	—	—	—	—	2.2×10^{11} 2.6×10^{-1}
70	—	—	—	—	8.1×10^{11} 1.3×10^{-1}
80	—	—	—	—	3.5×10^{11} 1.0×10^{-1}
90	—	—	—	—	6.0×10^{10} 7.0×10^{-2}
100	—	—	—	—	3.5×10^{10} 4.5×10^{-2}

* Air gap : 1 mm

Fig. 2. Deterioration when the both electrodes are arranged apart from the test insulating material.

Fig. 3. Relation between reduction factor of insulating resistance R/R_0 and elapsed time of discharge.

表面抵抗と劣化前の表面抵抗よりの低下の割合を表示すると Table II のようである。また劣化前の表面抵抗よりの低下の割合を劣化時間に対し図示すると Fig.

3 のようになる。^{*1}これより加熱時間が小なる場合は曲線の傾きは比較的平坦で、その増大とともに大きく低下するようになるのが知られる。このような低下の理由については熱分解による炭素の遊離や有機半導体の生成によるものと思われる。また図よりわかるようにシリコンガラスの特性が最も良く劣化時間の増大に対してもほとんど低下していない(両電極の供試面よりの距離が 2 mm の場合ではほとんど劣化していないと考えられるのでこの場合のみは 1 mm の距離で劣化させた)。シリコンガラスに次いでエポキシガラス、ポリエステルガラス、エポキシ樹脂(鉱物質充てん剤入り)、フェノール樹脂(アスベスト充てん剤入り)の順で特性は低下している。そして劣化の状況もシリコンガラスを除いては皆等しく黒化している。なお本実験の場合では前記のように、化学焰⁴⁾あるは電気炉⁵⁾による耐アーク性の測定の場合にみられた加熱時間の小なるときの絶縁抵抗の増大効果がそれほど著しくない。これはいまの場合放電のエネルギーが比較的小で樹脂の酸化による架橋などの程度が比較的小さく絶縁抵抗があまり増大しないためと考えられる。ただフェノール樹脂(アスベスト充てん剤入り)の場合では劣化時間 10 sec 程度でかなり顕著な絶縁抵抗の増大効果が認められる。これはフェノール樹脂自体の吸湿性のため放電のエネルギーにより乾燥効果を生じこのような特性を示すものと考えられる。

次にエポキシ樹脂に各種の鉱物質充てん剤を配合したものについての結果を示すと Table III および Fig. 4 のようで、いずれの充てん剤のときにも無配合時に

*1 劣化後の表面抵抗のばらつきおよび劣化前の表面抵抗よりの低下の割合のばらつきは各試料についてはほぼ同じで一けた程度である。

Table III. Surface resistance R_t after discharge and its reduction factor m of epoxy resin with filler.
 Epikote 828 $T=25^\circ\text{C}$
 TTA : 15 4 phr R. H. = 65~68%, $m=R_t/R_0$, $R_t(\Omega)$. Surface resistance after discharge
 AGE : 10.0 phr Air gap : 2 mm $R_0(\Omega)$. Surface resistance before discharge

Filler		Albite (150 phr)	Serpentine (150 phr)	Diaspore (150 phr)	Chlorite (150 phr)	Silica (100 phr)	Eucryptite (100 phr)	Fluorite (100 phr)	Pyrophyllite (100 phr)	Hydrated alumina (50 phr)	Hydrated alumina* (50 phr)
Sec											
3	$R_t =$ 2.3×10^{14} $m = 1.4$	3.2×10^{14} 1.3	2.4×10^{14} 1.2	4.3×10^{14} 1.6	3.4×10^{14} 1.8	7.0×10^{14} 2.0	3.7×10^{14} 2.1	1.9×10^{14} 1.0	8.2×10^{14} 2.1	1.1×10^{15} 2.2	
6	1.7×10^{14} 1.0	3.7×10^{14} 1.5	4.0×10^{14} 2.0	4.6×10^{14} 1.7	4.1×10^{14} 2.2	7.3×10^{14} 2.1	4.6×10^{14} 2.8	2.6×10^{14} 1.4	1.8×10^{13} 4.5×10^{-2}	9.5×10^{14} 1.9	
10	1.2×10^{14} 7.5×10^{-1}	3.7×10^{14} 1.5	5.0×10^{14} 2.5	4.8×10^{14} 1.8	3.8×10^{14} 2.0	7.7×10^{14} 2.2	5.0×10^{14} 2.8	3.2×10^{14} 1.7	—	1.0×10^{15} 2.0	
15	1.7×10^{11} 1.0×10^{-3}	3.5×10^{14} 1.4	3.6×10^{14} 1.8	5.9×10^{14} 2.2	3.6×10^{12} 1.9×10^{-2}	7.3×10^{14} 2.1	5.4×10^{14} 3.0	3.6×10^{14} 1.9	—	1.6×10^{14} 3.2×10^{-1}	
20	—	2.5×10^{14} 1.0	6.0×10^{14} 3.0	7.2×10^{14} 2.7	9.9×10^{11} 5.0×10^{-3}	7.0×10^{14} 2.0	5.5×10^{14} 3.1	4.1×10^{14} 2.2	—	3.0×10^{13} 6.0×10^{-2}	
25	—	4.5×10^{12} 1.8×10^{-2}	6.2×10^{14} 3.1	6.7×10^{14} 2.5	—	2.4×10^{13} 7.0×10^{-2}	4.3×10^{14} 2.4	3.9×10^{14} 2.1	—	5.0×10^{11} 1.0×10^{-3}	
30	—	—	7.2×10^{14} 3.6	5.9×10^{14} 2.5	—	7.0×10^{11} 2.0×10^{-3}	3.2×10^{14} 1.8	3.8×10^{14} 2.0	—	—	
35	—	—	1.0×10^{13} 5×10^{-2}	6.7×10^{14} 2.5	—	—	2.7×10^{12} 1.5×10^{-2}	1.5×10^{14} 8.0×10^{-1}	—	—	
40	—	—	2.0×10^{11} 1.0×10^{-3}	7.2×10^{14} 2.7	—	—	—	6.0×10^{13} 3.2×10^{-1}	—	—	
45	—	—	—	1.6×10^{12} 6×10^{-3}	—	—	—	—	—	—	

* Epikote 190, HHPA 100 phr, Epikote 110 5 phr

Fig. 4. Relation between reduction factor of insulating resistance R/R_0 and elapsed time of discharge.

比しかなり耐アーク性が向上していることが知られる。クローライト（緑泥石）では 150 phr 配合で、劣化時間 20 sec の場合 2.8 倍程度の値を示している。なお同じく充てん剤 150 phr 配合の場合で比較すると耐アーク性はアルバイト（曹長石）、サーペンタイン（蛇紋石）、ダイアスポア（ジャスボル）、クローライト（緑泥石）の順に向上し、充てん剤 100 phr 配合の場合の比較では耐アーク性はシリカ（無水珪酸）、ユークリプタイト、フルオライト（螢石）、パイロフェライト（葉ロウ石）の順に向上している。これらの配合による耐アーク性の増大の理由については、たとえばダイアスポアの場合劣化時に生じた炭素に一種の酸化

剤として働き CO あるいは CO_2 として気化させるので遊離炭素が生成され難いためと考えられる⁶⁾。またフルオライトの場合では熱分解によりふっ素ガスを放出し、これが炭化や有機半導体の生成を妨げるためと思われる（このようなガスの放出についてはガスクロマトグラフィによって調べた²⁾）。クローライトならびにパイロフェライトなどの場合優れた特性を示すことに関しては明らかでないが、ダイアスポアの場合と同様 CO あるいは CO_2 の発生により遊離炭素を残さないことと構成成分の SiO_2 自体炭化や有機半導体の生成を妨げることなどの性質が複雑に影響するものと推定される。なお水和アルミナの場合はダイアスポスの場合と同様の機構によるものと考えられるが、実際にはあまり良好な特性はえられなかった。これは配合量の小さなことにもよるが、ガスクロマトグラフによる分析の結果よりすると、CO および CO_2 の発生量が少ないことにも関係していると思われる。一般に水和アルミナの場合は耐アーク性改善効果は大で、それも酸化剤として働き CO あるいは CO_2 の発生により遊離炭素を残さないことが知られているが、いまの場合 CO および CO_2 の発生量が少なく特性の改善が不充分である理由については明らかでない。なおビスフェノール型エポキシ樹脂の耐アーク性は環状脂肪族エポキシ樹脂の耐アーク性より小さいことが知られる。これは ASTM 法などでの結果ともよく一致している⁷⁾。

*2 中空円柱状試料を製作し、両端よりコム栓を通して電極を挿入し、この間で放電を発生させ、周壁より生じたガスを円柱面上の小孔より注射器により取出しガスクロマトグラフィに導いた。なおガスクロマトグラフィの実験条件としてはキャリアガスに H_2 を使用しカラムの充てん剤は活性炭 TR で一部の実験には PEG 1000, 4 5 m を使用した。

要するに、各樹脂では劣化時間の増大につれ、熱分解などによる遊離炭素や有機半導体の生成が顕著となり、絶縁抵抗は低下するが、それぞれの場合で劣化時間 10~40 sec 程度以上では、絶縁抵抗の劣化前のそれよりの低下の割合と劣化時間との関係は、かなり長い劣化時間の範囲にわたって、劣化時間の増大につれほぼ直線的に下降するようになる。したがって、この領域での劣化後の絶縁抵抗の劣化前のそれよりの低下の割合の模様より試料の劣化特性が求められる。

さて、高橋⁸⁾はフェニール基は樹脂の主体（構成分子の主鎖）の中にあつて充分強固に結合されている場合は基全体が炭化に関係し、したがつて遊離炭素の生成量も比較的多いと予想し、また実験的に確かめている^{*3}。これよりすると、たとえばフェノール樹脂の場合特性の低下が大きいことが推察される。またエポキシ樹脂の場合ではその熱分解機構はフリーラジカル機構であるといわれ、また熱分解における遊離炭素の生成量もかなりあることが推察されるが、特性の低下もシリコン樹脂に比べるとかなり大となっている。

一方 Fig. 1 の測定回路によって劣化時の絶縁抵抗の低下をその電流変化から調べたがその一例を示すと Fig. 5 のようであり，劣化時間の増大とともに絶縁抵抗の変化する模様が察知される．そしてこの傾向は Fig. 3 の絶縁性の低下の傾向と概念的にはよく一致するようである．（たとえば Fig. 5 のポリエステルガラスの場合では，22 sec 程度までは電流値はきわめて小

Fig. 5. Current-time behavior of discharges in insulation measuring circuit.

*3 高橋は有機半導体の生成については直接には触れていないが、文献(3)の結果よりみて明らかにこの場合も含められると考えられる。

*4 エポキシ樹脂の末端基はきわめて容易に分裂してつぎのようなラジカルをつくると考えられる。

このラジカルは異性化して次のラジカル

に転化することがきる。また初めのラジカルは分解して CH_2O と $\text{CH}_2\text{—CH}$ となることもてきこれらは最終的には CO とメタン

に変わる。これらの反応と同時に CO_2 の生成、さらには $\text{C}-\text{O}$ 、 $\text{C}-\text{H}$ 結合の分解による炭素の共軛結合（2重または3重）の生成がおり、後者は遊離炭素として析出される。

であるが、24 sec 程度以上では波高値はほぼある一定の傾斜で増大し、すなわち絶縁抵抗はある一定の傾斜で低下することになり、Fig. 3 のポリエステルガラスの R/R_0 の変化の傾向のほぼ類似した特性を示すのが観察される) しかしながら電流波形の詳細な観察によると、波形には多数の切れ目がみられ、一概に簡単な機構で絶縁性の低下が起こっているのではないことが推察される。

3・2 アーク劣化後の絶縁破壊電圧

アーク劣化試料について沿面破壊電圧を測定した場合の結果を示すと Fig. 6 のようになる。この場合もシリコンガラスの特性はほとんど低下せず、わずかに 60 sec 過ぎで低下するかのような傾向がみられるがばらつきが大なるため明確ではない。なお各種の試料についての絶縁破壊電圧の低下の順序は前節絶縁抵抗低下の順序と大体対応性があるようである。しかし測定値のばらつきは絶縁抵抗測定の場合よりもやや大きいようである。なお竹村、吉村らがプラズマ・ジェットによる試験では絶縁破壊電圧の方が絶縁抵抗よりもばらつきが小さいと言っているが、この点に関しては一概に断定はできない。

Fig. 6. Relation between breakdown voltage of resins and elapsed time of discharges.

3・3 アーク劣化後の重量減

アーク劣化後の試料の重量減を測定した。測定は化学天秤（感度 $\pm 0.0005 \text{ g}$ ）を用いて行なったが、劣化焼損後に生ずる煤は取り払わずそのままの状態とした。測定の結果を示すと Table IV のようになる。すなわち重量減は劣化時間の増大とともにシリコンガラスの場合を除き増大するが、エポキシ樹脂（鉍物質充てん剤入り）の場合顕著でフェノール樹脂（アスベスト充てん剤入り）では劣化時間の小なる場合比較的大であるが、劣化時間が大となるにつれあまり増大せずポリエステルガラスよりも小となっている。要するに劣化時間 80 sec における増大の順序はエポキシ樹脂（鉍物質充てん剤入り）、ポリエステルガラス、フェノール樹脂（アスベスト充てん剤入り）、エポキシガラス、シリコンガラスとなる。これから考察すると重量減

Table V. Comparison of testing results obtained between the present method and ASTM arc resistance test, arc resistance test at the power density 30 w/cm², low voltage high current arc test and test by electric furnace.

Insulator	Present methode ($m=\frac{R_t}{R_0}$ at 20 sec)	ASTM D 495-61 (sec)	Test at the power density 30 w/cm ² **	Low voltage high current arc test**		Test by electric** furnace ($m=\frac{R_t}{R_0}$ at 20 sec)
				A C 400 Hz 300 V, 800 A	D C 500 V, 500 A	
Phenolic-paper	6×10 ⁻⁴	5~50	③	Very poor	Very poor, tracked	1.2×10 ⁻³
Epoxy (unfilled)	9×10 ⁻³	30~100 tracked	③	—	—	5.5×10 ⁻²
Polyester glass	1.3	5~190	②	—	1~33	1.7
Epoxy glass	1.8	125 tracked	—	Poor tracked	2, tracked	1.2
Silicone glass	2.0	150~250	①	—	—	2.0

* On the results of tests at 30 w/cm² power density, the number shows the classification of insulators according to the effects of discharges on their electrical resistance
** In the appraisal of arc resistance of this test, the result of ASTM D495-61 is used together.
*** As the heat source, the electric furnace was used. The temperature is 1000°C The appraisal of this test was done by the surface resistance after the heating and its reduction factor as the present method.

Table IV. Weight loss of resins during discharge.
Air gap : 2 mm

Insulator Sec	Phenolic asbestos- filled	Epoxy mineral- filled	Polyester glass	Epoxy glass	Silicone glass
	(mg)				
10	7	3	3	2	—
20	10	4	4	3	—
30	16	17	8	5	1*
40	23	32	12	9	—
50	27	50	23	12	—
60	32	86	30	15	1.5*
70	—	—	37	18	0.8
80	33	103	42	20	2.0*
90	38	—	49	22	1
100	40	121	56	25	3*

* Air gap 1 mm

は前述の絶縁抵抗、絶縁破壊電圧などとは相関関係は認められず耐アーク性評価の対象としてはあまり適当でないことが推察される。

4 各種耐アーク性試験における試験結果との比較

本劣化試験が耐アーク性試験として適用しうるか、否かを調べるために各種の絶縁材料のアーク劣化特性を ASTM D495-61 耐アーク性試験, L. Mandelcorn らの行なった電流密度一定のもとにおける耐アーク性試験¹¹⁾, また同氏らの低電圧大電流アークによる耐アーク性試験¹²⁾, さらに電気炉による試験の結果などと比較した。Table V はこれら各種の耐アーク性試験の結果を示したものである。ASTM D495-61 試験法での結果との比較では、樹脂の種類による特性の増大の順序はかなりよく対応するが、たとえばエポキシガラス、ポリエステルガラスなど一、二の樹脂の場合においてその増大の順序が逆になっている。このような理由については ASTM D495-61 の方法での劣化では本法でのそれが電極近傍に火点を生ぜず、炭化焼損部

が表面に沿って広く広がって生成されるのに対し、火点を生じ、トラッキングの生成により劣化が進行することによるためと考えられる。

また L. Mandelcorn らによる電力密度 15 w/cm² 一定のもとでの耐アーク性試験の結果との比較では、この場合の特性がフェノール樹脂（紙充てん剤入り）、エポキシ樹脂（鉱物質充てん剤入り）ポリエステルガラス、シリコンガラスの順に階級が順次③より①と変化し、本試験の結果ともその特性の順序はよく一致している。

ところで本試験での結果では各試料の差がはっきりと現われるが、この L. Mandelcorn らの試験の場合にはフェノール樹脂（紙充てん剤入り）とエポキシ樹脂（鉱物質充てん剤入り）間などでは耐アーク性の差はやや不明りょうである。なお、このように試料面の差があまりはっきり現われない理由としては本試験と遊離炭素の析出機構、析出炭素の付着状態や有機半導体の生成の機構ならびに状態などに差異がでるためと考えられる。

次に同氏らによる低電圧大電流アークによる耐アーク性試験と本劣化試験の結果でも樹脂の種類による特性の増大の順序はかなりよく対応するが、たとえばエポキシガラス、ポリエステルガラスなど一、二の樹脂の場合においてその増大の順序が異なっている。これは本法での劣化が放電の熱エネルギーのみでなく高電界の影響が存在するのに対し、放電の熱エネルギーのみに

*5 放電発生時、試料面上において電極軸直下部分に対しその両外側にはほぼ直角方向に延びる焼損線条が生成され。これと電極軸下の部分の試料面に沿い広く広がる劣化形式の焼損部（放電の熱エネルギーによるものと思われる）により、劣化は進行するか。前者の焼損線条は高電圧トラッキングの形式による劣化に基づくもので、すなわち火花放電路を一方の電極とした高電圧印加時の局部劣化で、これは沿面コロナによるものと考えられる。要するに焼損線条の生成には高電界の存在の影響が大きいことが知られる。（低電圧アークの場合は焼損線条はみられない）なお Fig 2 では放電線返し回数を大としたため試料の炭化焼損の程度は大となり、焼損線条は不明りょうとなっている。

よることならびに放電のエネルギーが大なることによるためと推察される。

さらに電気炉による加熱劣化試験の結果と比較するとフェノール樹脂（アスベスト充てん剤入り）、エポキシ樹脂（鉱物質充てん剤入り）などで特性は悪くシリコンガラスで良好となっており両試験の結果間にはかなりよく対応関係があるように考えられる。しかしながら前記低電圧大電流アークによる耐アーク性試験の場合と同様たとえばエポキシガラス、ポリエステルガラスなど、二の樹脂の場合においてその順序が逆になっている。この場合についても本法での劣化が放電の熱エネルギーのみでなく高電界の影響が存在する¹³⁾のに対し電気炉での熱エネルギーのみによることならびにそのエネルギーの大なることによるためと思われる。

以上本試験と各種試験法との結果を比較し、試験法としての適用性について考察した。本試験は高電圧小電流アークによる耐アーク性試験であるが測定値が電極の状態に左右されないことが大きな特長であると思われる。しかしながらまた耐アーク性の判定において、すなわち劣化後の表面抵抗の測定や、劣化前の表面抵抗よりの低下の割合の測定に ASTM 法に比し長時間を要し、またばらつきも大なることがあり、これらの点についてはさらに検討を要するものと考えられる。さらに電極間に設けた絶縁性測定回路による劣化過程の追跡の結果でもやや再現性がよくなく、特に電極系に問題が存在する。なお供試材料の大きさは ASTM 法の場合と同じですむ。

5 結 言

高電圧小電流耐アーク性試験で電極の状態の影響を受けない試験法として電極を供試面より離し水平に保持した試験法を考察し、その特性を調べた。また耐アーク性の判定にはアーク劣化後の絶縁抵抗の測定によるのが優れていることを示した。さらに本法の耐アーク性試験法としての有用性についても検討した。一方アーク劣化での絶縁抵抗の時間的変化を追跡する方法を検討し、劣化の過程は複雑であることを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) Warren, H., J.I. E.E., **87**, 528 (1940).
- 2) 池尻忠夫, 電学誌, **87**, 1761 (1967).
- 3) Billings, M. J., *et al.*, Trans. IEEE, Electrical Insulation, **EI-2**, 131 (1967).
- 4) 池尻忠夫, 材料, **18**, 330 (1969).
- 5) 池尻忠夫, 電気四学会連合大会講演論文集 S.1・3(1968).
- 6) Norman, R. S., *et al.*, Trans. AIEE, **75**, 257 (1956).
- 7) エビコート 190, シェル化学エンジニアリングニュース No.84.
- 8) 高橋治男, 日本化学誌, **63**, 199 (1942).
- 9) Neuman, M. B., (稲葉弥之助, 飯山比呂美訳) “高分子の劣化”, p.247 (1967) 産業図書社
- 10) 竹村 直, 吉村辰彦, 電学誌, **88**, 711 (1968).
- 11) Mandelcorn, L., *et al.*, Trans. AIEE, Pt. III, **80**, 486 (1961).
- 12) Mandelcorn, L., *et al.*, T153-34 Electrical Insulation Conference (1963).
- 13) 池尻忠夫, 電学誌, **87**, 1355 (1967).