大きい電極ギャップ長における合成樹脂のアーク劣化の研究[†]

池 尻 忠 夫* 川 本 昂**

Studies on Arc Deterioration of Synthetic Resin with Electrodes Having Long Gap Length

by

Tadao IKEJIRI* and Akira KAWAMOTO**

Many studies on arc deterioration of electrical insulating materials by high voltage-low current arc have hitherto been done by using small size samples with electrodes having short gap length. In this paper, the arc resistance tests different from the previous ones were carried out by applying higher voltage and longer electrode gap length than before. Arc resistance was measured by a new arc resistance test method and the process of arc deterioration was investigated.

As the experimental method, ASTM D495 standard test method was modified a little. Electrodes were the stainless steel plate type of 5~100 mm in length and the applied voltage was max. 100 kV. Furthermore, arc resistance in the case of electrodes detouched from the sample surface was also investigated.

The experimental results are summarized as follows:

(1) The arc resistance of insulating materials measured with contact electrodes having long gap length showed two different tendencies depending upon the species of insulating materials, one showing a slow increase with increasing gap length from about 40 mm to 100 mm, and the other a tendency of saturation at the gap length of 50 mm or more. Thus, the effect of electrode gap length on arc resistance was observed clearly.

(2) The arc resistance of insulating materials measured with detouched electrodes having long gap length also showed two different tendencies depending upon the species of insulating materials, one showing a slow increase with increasing gap length from about 30~40 mm to 100 mm and the other nearly constant. Thus, the separation of electrodes from the sample surface affected arc resistance remarkably and the effect of electrode gap length on arc resistance was observed in this case also.

(3) The effect of spatial configuration of sample on the arc resistance of insulating materials exists not only in comparatively small electrode gap length but also in long one.

キー・ワード：大きい電極ギャップ長，耐アーク性，空間配置

1 緒 言

最近，電気機器の大容量化に伴い，それらに用いられる絶縁物の寸法はますます大形化するとともに，特にアークを発生する機器を対象とした場合，十分な耐アーク性をもつことが要求される。これら構造絶縁物の寸法は，一般に通常の耐アーク性試験に用いられる標準の試料に比べて大きいのが普通である。

ところで，従来電気絶縁材料のアーク劣化については高電圧小電流アークの場合，小さい電極ギャップ長のときはかなり研究が行われているが，大きい電極ギャップ長のときはほとんど行われていない。したがって試験法だけでなく，具体的に絶縁材料の耐アーク性の序列が，大きい電極ギャップ長のときも不変なのか，あるいは変化を生ずるのかというような基礎資料として利用しうるものは見られない現状で，今日大きい電

極ギャップ長のときの絶縁設計を行う場合資料が不足し，耐アーク性の評価には小さい電極ギャップ長の場合のいままでの耐アーク性試験の結果を利用するばかりではない。ゆえに，さらに高電圧の，また大きな電極ギャップの長さのもとでの耐アーク性試験に期待されるところが大きいと思われる。

したがって，本稿においては従来の耐アーク性試験¹⁾と異なり，さらに高い電圧を印加し，またより大きな電極ギャップの長さのもとで耐アーク性試験を行い，耐アーク性を測定し，またアーク劣化過程を調べた。

2 実験方法ならびに試料

実験方法としてはほぼ ASTM D495 標準試験法（断続的にアークを発生させる方法）に準じたが，アークが充分試料面を¹⁾はうようにスぺーサを設け同一材料で上面をおおっている。〔Fig. 1 (a)〕また電極は厚

[†] 原稿受理 昭和60年5月8日 Received May 8, 1985

* 正会員 福井大学工学部 福井市文京, Faculty of Engineering, Fukui University, Bunkyo, Fukui

** 福井工業高等専門学校 鯖江市下司町, Fukui Technical College, Geshi-cho, Sabae

Fig. 1. Electrode assembly.

さ 0.4 mm, 幅 4 mm, 長さ 12 mm 以上のステンレス鋼製平板電極で, 50 ± 5 g の荷重を加えて供試面に密着させ, かつ, その先端は鋭角にし放電の安定を期している. 電極ギャップの長さは 5~100 mm とし, 試料面 (電極上面) と上部絶縁材料とのギャップは 3~5 mm とした. また電極ギャップの長さが大きく, アークが充分試料面にはうような場合には上面をおおう絶縁材料は取去って実験を行った. 印加電圧は最大 100 kV (商用周波数 60 Hz) で, 高電圧変圧器としては一次電圧 100 V, 二次負荷電圧 100 kV, 二次短絡電流 0.04 A のものを用いた. なお, 電極形状, 電極ギャップの長さ, 印加電圧などの変化に基づくアーク電流の変動に対しては, 試験回路で一次側回路の電流制御抵抗を調整し, ASTM 法の場合と同一電流値に保つようにした. またアーク断続時間も ASTM 法の場合と全く同じである. このような電極配置のもとで各種の試料について耐アーク性時間 (アーク抵抗) を求めた.

さらに電極が供試面より離れて配置された場合の耐アーク性についても調べるため Fig. 1 (b) の電極配置のもとで実験を行った²⁾. なお, このような場合の劣化では劣化の終結点はえられず, 両電極よりの試料面劣化部への微小アークが最後まで消滅することなく継続発生するので普通の意味での耐アーク性時間の判定は不可能である. したがって, ここでは劣化路が進展し両電極先端下部近傍まで到達し, 以後進行が停止するまでの時間をもって耐アーク性時間とした.

また, いずれの実験の場合とも室温, 無風状態のも

*1 一般に, 最初アークは試料面上の大気中に発生するが, 試料面の絶縁が破壊されて抵抗値が小さくなるとアークは消滅し, 電流は試料面の導電層によって運ばれるようになる. このようにアークが消滅することはアーク劣化が完了したことを示し, この状態を指す. なお, 電圧印加後アークが消滅するまでの時間を測定して耐アーク性時間とする.

とで行った. 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, 塩化ビニール樹脂などの各種の合成樹脂を使用した (Table I). 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.

Table I. Tested materials.

Thermosetting resin	Phenolic-paper
	Epoxy-glass laminate
	Polyester-glass laminate
	Melamine-glass laminate
Thermoplastic resin	Polyvinyl chloride

3 実験結果とその考察

3・1 電極が試料面上に配置された場合の大きい電極ギャップ長における絶縁材料の耐アーク性

各種の絶縁材料について電極ギャップの長さを大きくした場合の耐アーク性時間 (アーク抵抗) 特性の測定の結果を示すと Fig. 2 のようになる (耐アーク性時間はいずれも 5~10 回の測定値の最大値, 最小値およびメジアンをもって示した). 図からわかるように, 電極ギャップの長さの比較的小さい場合には曲線の形状は落ち込みを有する N 字状曲線を示すが, さらに電極ギャップの長さが大きくなるにつれ耐アーク性は再び大きくなるようになる. フェノール樹脂, 塩化ビニール樹脂の場合では電極ギャップの長さが大きくなると, それに伴い電極ギャップ長 100 mm のときまでも耐アーク性時間は増大する傾向を示すが, エポキシガラス積層板, ポリエステルガラス積層板, メラミンガラス積層板の場合では, 電極ギャップの長さが 50 mm 程度をこえた付近から飽和に達する傾向がみられる. いずれの絶縁材料の場合とも電極ギャップ長 80 mm 程度以上になるとアーク放電は極めて不安定とな

Fig. 2. Arc resistance time vs. electrode gap length in the case of electrodes touched to testing insulator.

There also exists the moving of arc discharge column at other electrode.

Fig. 3. Unstable moving of arc discharge column at the electrode.

りやすく, Fig. 3 のようにアークの放電柱が移動しやすく, このような不安定なアーク放電の生じている間は, アーク放電路が試料面に接触しにくくアーク劣化の進展はほとんど認められなかった (Fig. 2 の電極ギャップ長 80 mm 程度以上の各絶縁材料の耐アーク性時間は不安定なアーク放電が生じていない場合の測定結果を示したものである). このようなアークの放電柱の移動の原因については現在のところ不明である.

なお, 電極ギャップの長さの大きい場合の, 代表的なアーク劣化路の一例を示すと Fig. 4 のようである.

つぎにアーク劣化過程を外観的に追究するためにアーク劣化路に着目し, 形態学的に検討した. 各種の合成樹脂について劣化路の電極軸よりのへだたりの最大値, 劣化路の電極軸よりの偏向角の最大値などを電極ギャップ長に対して示したものが Fig. 5 である. これよりアーク劣化路は樹脂の種類にもよるが電極ギャップ長が大きくなると一般に電極軸より離れて生成されるようになることがわかる.

なお, Fig. 2 の結果から耐アーク性時間の変化は電極ギャップの長さが大きくなるにつれ比例的に増大してはいない. しかも各種の絶縁材料によって耐アーク

Fig. 4. Appearance of typical arc deterioration path in synthetic resin.

Fig. 5. Max. distance $l_{\max}$ or max. deflection angle $\alpha_{\max}$ vs. electrode gap length.

性時間の変化の傾向がいくらか異なり, 一般に小さい電極ギャップ長の場合と大きい電極ギャップ長の場合では絶縁材料の耐アーク性の序列が変化し, その小さい電極ギャップ長の場合と大きい電極ギャップ長の場合の対応性の点に問題があり, 電極ギャップ長の効果が認められる.

3・2 電極が試料面より離れて配置された場合の, 大きい電極ギャップ長における絶縁材料の耐アーク性

一般に ASTM D495 標準試験法のように電極が試料面上に配置される場合には, アーク劣化時末期電極先端近傍に火点 (白熱炭炭素と考えられる) を生じ,

これの対向極への進行により炭化路が形成され, 劣化が完了する. したがって, 劣化時間, すなわち耐アーク性時間の判定は容易である. しかしながら, 電極が試料面より離れて配置された場合では, 両電極より試料面上の劣化部に連なる微小アークが試料劣化後も依然として存在し, アーク劣化時間の判定は困難である. なお, この場合においても電極ギャップの長さが比較的大きいときは, アーク劣化時末期, 試料面上で微小アーク放電路先端に火点が生成され, 対向極方向に進行し, 炭化路を形成し, 試料は劣化するが, 火点の進行の状態はやや複雑である. すなわち対向極に向い火点が進行したのち, さらに新しい火点が発生し, これらは火点発生電極方向に引返すような動きを示す. そしてほぼ電極下部 (1~2 mm 電極後方にまで進行することが多い) まで到達して静止する. この状態では

Fig. 6. Arc resistance time vs. electrode gap length in the case of electrodes detached from testing insulator.

両電極下間劣化部は一本の細長い劣化路を示し、アーク劣化の進行の特徴を表している。電極ギャップの長さの大きい場合劣化路が大きく屈曲するのは、電極が試料面上に配置されたときと同様である。ここではこのような劣化路の形成時間をアーク劣化時間、すなわち耐アーク性時間とした。

いま各種の樹脂の試料について両電極と試料面のエアギャップが1.5 mmの場合、電極ギャップの長さを大きくしたときのアーク劣化時間特性の測定結果を示すと Fig. 6 のようになる。図からわかるように、曲線の形状は谷を有するV字状曲線を示し、耐アーク性時間は極めて電極ギャップ長が小さい場合よりそれが大きくなるにつれ減少するが、さらに電極ギャップ長が大きくなるとともに増大するようになる。しかも電極ギャップ長が100 mmに至るまでもゆるやかに上昇しつづけている。ただし、電極ギャップ長100 mmに至るまでほとんど変化のみられない場合も存在する。なお、このような耐アーク性時間の変化の傾向は各種の樹脂によってやや異なることが知られ、谷における電極ギャップの長さも文献2)の場合と同じく、フェノール樹脂、塩化ビニール樹脂、エポキシガラス積層板、ポリエステルガラス積層板などの場合ともいっくらか相違している。ここでアーク放電路の外観を示すと Fig. 7 のように電極ギャップの長さ20~23 mm程度までの場合、一般には(a)図のように放電路は上方に湾曲しやすいが、電極ギャップの長さ23~30 mm程度以上では(b)図に示されるようになり、しかも上下左右に移動しやすい。また、この後者の場合の炭化焼損路は、両電極と試料面とのエアギャップにもよるが、前述のように一般には両電極より試料面上の劣化

Fig. 7. Variation of the appearance of arc discharge with the change of electrode gap length.

部（アークの陽光性の接触により生ずる）を連ねる微小アークの先端に発生する火点の対向極への進行により生ずるため、細い焼損路となり、前者の場合の焼損部が表面に沿って広く広がる劣化の形態（この場合には放電路は試料面にはい難く、火点の生成はみられない。そして耐アーク性時間も比較的大きくなる。）とは明らかに相違している (Fig. 8)。

以上よりアーク劣化時間特性に谷を生じた理由としては、文献2)の電極ギャップ長50 mm以下の場合と同じく、アーク放電路の試料面への接触の様相が大きく変化していることが考えられる。すなわち、比較的電極ギャップ長が小さい場合、アーク放電路は試料面より離れやすく、さらに電極ギャップの長さが大きくなるとアーク放電路は充分試料面に触れるようになり、また一層電極ギャップの長さが大きくなってもアーク放電路は比較的良好に試料面に接触することによるためと思われる。

さて Fig. 6 からわかるようにアーク劣化時間の 変

Fig. 8. Appearance of typical arc deterioration path in the case of electrodes detached from testing insulator.

化は電極ギャップの長さが大きくなるにつれ比例的に増大してしない。しかも各種の絶縁材料によってアーク劣化時間の変化傾向がいくらか異なり、一般に小さい電極ギャップ長の場合と大きい電極ギャップ長の場合では絶縁材料の耐アーク性の序列が変化し、その小さい電極ギャップ長の場合と大きい電極ギャップ長の場合の対応性の点に問題があり、3・1節のときと同様電極ギャップ長の効果が認められる。

3・3 大きい電極ギャップ長における絶縁材料の耐アーク性に及ぼす試料の空間配置の効果

従来電気絶縁材料の耐アーク性に及ぼす試料の空間配置の効果の研究は、電極ギャップ長が40~50 mm程度までの場合は既に報告されているが、さらに電極ギャップ長が大きくなり、100 mm程度となるような場合についてはほとんど発表されてはおらず、したがって具体的に基礎資料として利用しうるものはみられない現状である。ゆえに種々の空間配置での、大きい電極ギャップ長のときの絶縁設計を行う場合資料が不足し、耐アーク性の評価には電極ギャップ長40 mm程度までのいままでの耐アーク性試験の結果を利用するほかはなく、さらに高電圧の、また大きい電極ギャップ長のもとの、空間配置を種々変えた場合の耐アーク性試験に期待されるところが大きいと考えられる。

さて実験方法としては3・1ならびに3・2節の場合と同様ほぼ ASTM D495 標準試験法に準じたが、電極面供試面に密着させ、また電極ギャップの長さは最大100 mmとした。なお、印加電圧は90 kV(商用周波数60 Hz)で、アーク電流はASTM法の場合と同じく10 mAとなるようにした。またアーク断続時間もASTM法の場合と全く同じである。

各種の絶縁材料について電極ギャップの長さが80 mmの場合の試料の空間配置の耐アーク性時間特性に及ぼす効果を示すとFig.9のようになる。ここで試料の空間配置としては、水平なる位置より、電極軸と垂直なる方向(試料面上)を軸として一回転する場合と電極軸の回りに一回転する場合の二つについて考え、試料面の水平面よりの各傾斜角度の場合について耐アーク性を求めた。図からわかるように曲線の形状はいずれの空間配置の場合とも最小値を有するV字状曲線を示し、しかもこの最小値は電極ギャップ長が比較的小さいときと同様傾斜角度が180°のときに認められる。すなわち裏返しの配置において生ずるのが知られる。

ところで、絶縁材料の種類によってこれらの曲線が互いに交差する場合がみられ、試料の傾斜角度によって耐アーク性の序列が変化するのが認められる。すなわち電極ギャップの長さが80 mm程度と大きいときも、電極ギャップの長さが6~50 mm程度と比較的小

Fig. 9. Arc resistance time vs. angle of inclination of specimen.

さいときと同様、耐アーク性に及ぼす試料の空間配置の効果が存在することがわかる。

4 結 言

以上、大きい電極ギャップ長のもとのアーク劣化について実験的に調べたが、要約すると次のようである。

(1) 電極が試料面上に配置された場合の、大きい電極ギャップ長における絶縁材料の耐アーク性は、絶縁材料の種類により電極ギャップ長40 mm程度より100 mmに至るまでゆるやかに増大する傾向を示すときと電極ギャップ長50 mmをこえる付近から飽和する傾向を示すときなどがある。また、ここで小さい電極ギャップ長の場合と大きい電極ギャップ長の場合では絶縁材料の耐アーク性の序列において、その対応性の点に問題があり、耐アーク性に及ぼす電極ギャップ長の効果が認められる。

なおアーク劣化路は電極ギャップ長が大きくなると一般に電極軸より離れて生成されるようになる。

(2) 電極が試料面より離れて配置された場合の、大

きい電極ギャップ長における絶縁材料の耐アーカ性は、絶縁材料の種類により電極ギャップ長 30~40 mm 程度により 100 mm に至るまでゆるやかに増大する傾向を示すときとほとんど変化を示さないときなどがある。すなわち、電極が試料面より離れて配置された場合は、大きい電極ギャップ長においても耐アーカ性の増大がみられにくいときがあり、電極の試料面よりの離隔は大きい電極ギャップ長のもとの耐アーカ性に重大な影響を与える。なお、この場合も耐アーカ性に及ぼす電極ギャップ長の効果が存在する。

(3) 大きい電極ギャップ長における絶縁材料の耐アーカ性に及ぼす試料の空間配置の効果は電極ギャップ長が比較的小さいときと同様存在する。

参 考 文 献

- 1) 池尻忠夫, 電気学会論文集, A-92, 351 (1972).
- 2) 池尻忠夫, 材料, 27, 384 (1978).
- 3) H. Warren, J.I.E.E., 87, 528 (1940).
- 4) 池尻忠夫, 材料, 25, 193 (1976).