高電圧小電流アークによる絶縁材料の劣化について*

池 尻 忠 夫**

On the Deterioration of Insulator by High Voltage Low Current Arc

by

Tadao IKEJIRI

(Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui)

高電圧小電流アークによる劣化の性質を放電形式、電極配置、絶縁材料の種類を種々変えた場合について調べた。そしてアーク劣化ではいくつかの劣化の形式が存在することを明らかにした。またその劣化機構についても考察した。

その結果、次のような結論を得た。

- (1) アーク劣化は放電形式により影響されるところが大で、弧光状火花では劣化は大きく、せん光状火花の場合では劣化の程度はきわめて小さく炭化は起こらない。
- (2) アーク劣化は電極配置により異なり、特異焼損図形を伴いトラッキングにより劣化する場合、電極軸にはほぼ直角方向に生成される炭化侵食部を生じ、最終的にはトラッキングに進展する場合、アークの腹により燃焼蒸発を起こし内部に向かい劣化する場合などのいくつかの形式がある。
- (3) 絶縁材料の種類により、劣化は炭化する場合、熔融炭化する場合、熔融するが炭素を遊離しない場合の三つの形式が存在する。そして、絶縁材料の分子構造中のフェニール基の有無や C/H , C/F (個数比) などとこれらの劣化形式がかなり関係あることが推察される。
- (4) 高電圧小電流アークによる劣化では高電界の影響が存在する。

1 緒 言

アークが絶縁材料面に沿って発生すると材料は炭化、溶融、変形、蒸発または燃焼などにより劣化する。このようなアーク劣化は火花を発生する電気機器においては重要な問題で、従来よりもかなり研究が進められてきた。しかしながら劣化の現象が複雑なため、いまだ充分満足すべき結果は得られず、たとえば、高電圧小電流アーク劣化時の機構についても解明すべき問題はあまた残されている^{1) 2) 3)}。こうして従来アーク劣化に関する多くの研究は主として絶縁材料自体に関するもので、アーク抵抗の測定、耐アーク材料の開発などのみ集中された観がある。ところで、アーク劣化についてその機構を総合的に要約考察する場合、これはさらに放電形式、電極配置などによりやや異なった劣化の過程および形態を示すもののものであり、また絶縁材料の種類によってもかなり相違があるようである。

このような観点から本稿においては、高電圧小電流アーク劣化の基礎的資料を提供するために、やや詳細に放電形式などとアーク劣化現象との関係を調べた。さらにこれらを基に、高電圧小電流アーク劣化の機構

を考察したが、このような研究は絶縁材料の耐アーク性の向上、ないしは耐アーク材料の開発に対しても重要な役割を果たすものと考えられる。

2 実験装置ならびに実験方法

放電発生回路としては、図1に示されるものを使用

図1 放電発生回路

し、繰返し放電を発生しうるようにした。したがって、絶縁材料面の劣化はこの繰返し放電によってしだいに拡大、進展するようになる。また、放電形式は回路にそう入された蓄電器の容量 C か、抵抗 R などを変えらるかで変化でき、 C 一定では R が大きいと弧光状火

* 原稿受理 昭和41年8月31日

** 正 公 員 福井大学工学部 福井市牧島町

花の様相を呈し、 R が小さいときはせん光状火花の様相を示す。すなわち、前者の放電形式では弱い赤桃色の光が間隙長全体にわたって認められ、放電破壊の完成時間も長く放電構成の模様はやや間隙の横方向に広がりを現わしている。後者の放電形式では放電は白色で、しかも間隙全体にわたり強烈な明るさを持った線条放電でガス分子ならびに荷電粒子の拡散度が弱く、かつ放電破壊の完成時間が短いため、放電構成の模様はギャップの横方向への広がりの限定された線条形をなしている。

さて、本実験ではこのように放電の形式を種々変えること、または電極配置などにより劣化がいかなる形式で、どのように進行するかを、外観ならびにアーク抵抗（耐アーク性時間）、劣化表面の絶縁抵抗、重量減量などの変化より調べた。なお、表面の絶縁抵抗は超絶縁抵抗計（東亜電波製 SM-10 型および SM-5 型を用いた）により電極として、アルミニウムはく $20 \times 20 \text{ mm}$ を 4 mm 離して貼付し、 50 g/cm^2 の荷重をかけて測定し、10回の測定値の平均をもって示した。また重量減量は質量の変化より化学てんびん（ $\pm 0.0005 \text{ g}$ ）により求めた。ここで、本実験に用いた試料は主として有機質絶縁材料で、フェノール、エポキシ、ポリエステル、メラミン、尿素、塩化ビニルなどの諸樹脂を使用した。

3 実験結果とその考察

3・1 アークによる表面劣化の形式と機構

3・1・1 弧光状火花の場合 印加電圧 $9 \sim 25 \text{ kV}$ 、放電電流 $10 \sim 50 \text{ mA}$ の範囲において調べたが、放電線返し回数は毎分30回である。なお、この場合の放電柱の温度上昇は、光高温計での測定によると、約 $1000 \sim 1100^\circ \text{C}$ 程度と推定される。^{*1}

さて、絶縁材料がフェノール樹脂、エポキシ樹脂、ポリエステル樹脂などでは弧光状火花による表面劣化の形式は一般に二つの場合に分類されるもののように考えられる。すなわち、一つは両電極が図2に示されるように、絶縁材料の表面に密着している場合で、アークにより両極間の焼損および特異焼損図形（電極軸にほぼ直角方向に生成される焼損図形で後述するよう

図2 電極が絶縁材表面に密着して配置された場合の劣化

に比較的絶縁抵抗が低い場合に生成されやすく、放電路を電極としたコロナ放電の熱エネルギーにより生ずるものと考えられる）が生成され、両者により劣化は促進されるようになる。劣化の末期には非常に明るい黄橙色の火点が電極先端（直流電圧印加時は陰極の先端）に現われ、相手極に向かい $2 \sim 6 \text{ mm/sec}$ の速度で移動しはじめ、相手極に到達すれば完全劣化に至る。その火点の痕跡は炭化されており狭いみぞ、いわゆるトラッキングを形成している（ここで特異焼損図形の生成は表面の電位の傾きに影響し、電界強化効果をもたらし、また火点の進展にも影響あるものと思われる）。なおこのような場合には放電電圧はしだいに低下し、あたかも一方の電極が相手極に進出したような観を呈する。火点が相手極に到達すると放電電圧は急激に低下し、放電電流は導電性の炭化路を通して流れ火花はもはやみられない。以上のように、放電電圧が低下するという事実から考察し、この焼損の形式は材料の絶縁という点については致命的な結果を招くものであり、必ず炭化路の生成が認められる。いまこれらの樹脂について印加電圧とアーク抵抗（耐アーク性時間）、重量減量などとの関係を示すと図3のよう

図3 印加電圧とアーク抵抗および重量減との関係

になる。すなわち、印加電圧の低下につれアーク抵抗は上昇する傾向を示すが、重量減量はこれと相反する傾向を現わすのが見られる。両電極が絶縁材材面上にある場合の他の一つの劣化形式はメラミン樹脂、尿素樹脂などにみられるように、電極軸にほぼ直角方向に生成される溝状の炭化侵食部を伴う劣化である（図4）。このような溝状の侵食部の生長は、劣化末期に材料面上に生じた直列に連なる微小火花の放電点の電極軸とほぼ直角方向の移動により促進されるものと考えられ、その熱エネルギーによるものと思われる。しかし、

*1 連続放電時の温度上昇で黒鉛探針の場合の測定結果である

図4 尿素樹脂の焼損図形

最終的にはトラッキングの生成を招き劣化に至る。次に、電極と絶縁材料の組合せ配置の場合も電極が材料面に密着すれば、両極間の焼損および特異焼損図形により劣化し、トラッキングを形成し完全劣化に至ることは相違はない(図3)。しかし、この場合は角部Cに大なる火点の生成がみられ、ここに停滞し電極先端に発生した火点がこれを連ねて進行する。普通、この電極先端の火点は下部電極より発生しやすい特徴がある。なお、このような電極配置の場合のアーク劣化特性は同図に併示されるとおりで、アーク抵抗の低下はかなり大きい。これは角部の存在による電界強化効果とともに角部の火点での炭化焼損の大なることにもよるものと考えられる。また、他の一つの焼損劣化の形式は両電極が図5に示されるように、絶縁材料面に接

図5 電極が絶縁材料面より離れて配置された場合の劣化

近して配置された場合に起こるものであり、絶縁材料はアークの腹により劣化損傷を受ける。この場合は、トラッキングのような細い炭化路の生成は起こらず、広い範囲にわたり燃焼蒸発を伴い、材料内部に劣化は深く進展する。しかし、火花の消滅はみられず放電電圧も最後まで低下しない。この場合熱が放散するように働くので、そこに残される炭化分は少ない。なお、印加電圧と重量減量、絶縁抵抗などとの関係を求めると図6に示されるようになる。

要するに、この形式の劣化は内部にまで深く進展するが、前掲トラッキングによる劣化の場合は、材料面に沿って広がる特性をもつことに特色があると言える。

図6 電極を供試絶縁材料より離して配置した場合の印加電圧とアーク劣化後の重量減および絶縁抵抗との関係

図7 電極が供試絶縁材料面より離れて配置された場合のアーク劣化後の表面抵抗の低減率 R/R_0 とアーク抵抗との関係

したがって、電極配置により耐アーク性の意義はやや異なったものとなり、評価も違うものと考えられる。たとえば、アーク抵抗と図5の配置での一定時間劣化時の劣化部の絶縁抵抗の低減率との関係は図7のようであり(図5の配置では一定時間劣化時の劣化部の絶縁抵抗の低減率で耐アーク性を評価するものとする)、これらの諸点と原点とを結ぶ直線の傾きが、印加電圧、絶縁材料の種類などにより異なる場合がみられ、アーク抵抗の大小と絶縁抵抗の低減率の大小とが必ずしも対応関係にあるとは考えられず、電極配置により耐アーク性評価がやや相違する場合があることが推察される。

3・1・2 せん光状火花の場合 この放電形式の場合には炭化焼損、蒸発、燃焼などはほとんど認められない。すなわち、材料の表面に放電路に沿わずかのくぼみか変色部が生成されるが、炭化分の遊離は認め

られず、また火点も生成しがたく、放電電圧の低下も起こらない。

いま放電柱の温度上昇を計算してみる。一般に、放電柱のどの部分においても空気 1 g あたりのエネルギー入力 W は次式により表わされる。

$$W = I E t n / N \quad (1)$$

ここで I は電流密度 A/cm²、 E は電界の強度 V/cm、 t は放電発生時間 sec、 n は空気 1 g あたりのガス分子数、 N は 1 cc あたりのそれである。

このエネルギーの一部は熱伝導や放射で消費されるが、これを無視し、全エネルギーが温度上昇に関係するものとすれば、温度上昇 $\Delta T = 0.24 W / C_p$ (C_p は空気¹⁾の定圧比熱) で与えられ、 $n = 2.08 \times 10^{23}$ 、 $N = 2.7 \times 10^{19}$ 、 $C_p = 0.24 \text{ cal/g} \cdot \text{deg}$ で $E = 20 \text{ kV/cm}$ 、 $I = 0.1 \text{ A/cm}^2$ 、 $t = 10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ sec}$ として $\Delta T \approx 1.5^\circ \text{C}$ となりきわめて低い。一般に、炭化は約 500°C で起こることが知れているが、これよりしても本放電形式の劣化では炭化損傷の認められないことが推察される。また、せん光状火花と弧光状火花の両者の温度の差を同一放電エネルギーで検討するために図 1 で C を一定としたが、せん光状火花では試料の温度上昇は図 8 に示されるように小である。

図 8 供試絶縁材料の温度上昇

したがって、せん光状火花の場合には熱エネルギーの発生は直列抵抗 R での熱エネルギー損失が少ないにかかわらず弧光状火花のそれよりもかなり小さいことがわかる。一方、このことはせん光状火花のスペクトル解析の結果よりもうかがい知ることができる。すなわち、せん光状火花のスペクトルには電極金属元素のイオン化した原子の線スペクトルが強く現われ、放電エネルギーの大半が電極金属の蒸発に消費され、発生熱エネルギーの小さいことを示している。なお、せん光状火花は放電時間がきわめて短いが、弧光状火花では $2.5 \sim 5 \times 10^{-7} \text{ sec}$ 程度である。したがって、炭化燃焼などの劣化が起こりうるが、前者においては起こりがたく、特異焼損図形も明りょうでないことが推察される。以上

からせん光状火花では放電エネルギーが小さいが、また放電時間も短く、これが焼損劣化効果のいかに小さいかを示す一つの理由であろうと思われる。なお、このような放電形式でアーク劣化の程度がきわめて小さいことはアーク劣化の軽減対策を施す上において、それを放電形式の変化に求める場合有力な手段となるものと考えられる。

3・2 絶縁材料の種類とアーク劣化

表 I に示されるような各種の絶縁材料においてのアーク劣化は、材料によってやや異なった傾向を示し、劣化部の外観もかなり異なった様相を表わしている。大半の絶縁材料では、前記フェノール樹脂などと同様な劣化過程をたどりトラッキングを生じ劣化に至る。そして、このような場合の損傷の相違はただその損傷過程の進行速度のみに依存するものと考えられる。ポリカーボネート樹脂などの場合ではこれといくらか異なり溶融変形を伴う。すなわち、前者はただちに炭化するが後者は溶融炭化する。したがって、どのような焼損形式をたどるかは材料が溶融変形するか、いなかの特性のみに関係あることがわかる。また、ポリエチレン、ポリ四フッ化エチレンなどでは炭化は起こらず溶融変形するのみで放電電圧も低下しない。いま、アーク抵抗と劣化前の絶縁抵抗との関係を示すと図 9 の

図 9 アーク劣化前の絶縁抵抗とアーク抵抗との関係

ようになり、絶縁材料の分子構造中のフェニール基の有無または C/H 、 C/F の値 (個数比) などによりアーク劣化特性がいくつかの傾向に整理されることが推察される。表 I はこれらの関係を表示したものである。すなわち、(1)フェニール基 c1ccccc1 を含む樹脂では C/H は大きくほぼ 1 以上の値を示し、炭化しやすく一般に耐アーク性も劣る。(2)三次元網状構造を有する樹脂でフェニール基を含まないものは $C/H \approx 0.75 \sim 1.0$ 程度の場合でも耐アーク性は比較的良好である。(3)塩化ビニ

表 I 絶縁材料の C/H (個数比) などとアーク抵抗との関係

材 料	C/H (個数比)	表面抵抗 (Ω)	アーク抵抗 (sec)	劣化破壊の形式
フェノール樹脂(ベークライト) $\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ -\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_2-\text{CH}_2- \\ \\ \text{CH}_2 \end{array}$	≈ 1.0	$10^9 \sim 10^{12}$	8~20	トラッキング
エポキシ樹脂 $\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}_2$	(≈ 1.0) ビスフェノール	$10^{11} \sim 10^{15}$	40~120	"
ポリエステル樹脂	≈ 1.0	$10^{12} \sim 10^{13}$	30~110	"
メラミン樹脂 (α -セルローズ)	≈ 1.0	5×10^{10}	90~120	"
尿素樹脂 (充てん剤-紙)	0.75	$5 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{12}$	80~100	"
塩化ビニル樹脂 $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{Cl} \end{array} \right]_n$	0.66	$10^{12} \sim 10^{14}$	6~25	"
酢酸ビニル樹脂 $\left[\begin{array}{c} \text{CH}-\text{CH}_2 \\ \\ \text{OCOCH}_3 \end{array} \right]_n$	0.66	$> 10^{12}$	5~20	"
ポリカーボネート $\left(\begin{array}{c} \text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}(=\text{O}) \end{array} \right)_n$	2.6	$10^{15} \sim 10^{16}$	10~30	"
ポリエチレン $\left[\text{CH}_2-\text{CH}_2 \right]_n$	0.5	10^{15}	—	エロージョン
ポリ四フッ化エチレン(テフロン) $\left[\text{CF}_2-\text{CF}_2 \right]_n$	$[C/F=0.5]$	10^{14}	—	"
6 ナイロン $\left[\text{NH}(\text{CH}_2)_5\text{CO} \right]_n$	0.54	4.76×10^{12}	60~80	トラッキング
アクリル樹脂 $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2-\text{C} \\ \\ \text{COOR} \end{array} \right]_n$	0.8	$4 \sim 5 \times 10^{12}$	—	エロージョン (燃焼発火)

ル樹脂 ($C/H \approx 0.66$) のように Cl を含むものは、高温にさらされ分解し炭素を遊離する。したがって耐アーク性は劣る。(4)フェニル基が含まれていない樹脂で C/H または C/F が0.5程度のものは熔融変形することはあっても炭化しない。

3・3 高電圧小電流アーク劣化の機構

図2より知られるように、アーク劣化時において特異焼損図形の生成が認められる。これは後掲図13よりわかるように、低電圧大電流アークの領域ではみられないもので、高電圧小電流アーク劣化に伴う特有なものと考えられる。そのために高電圧小電流アークでは

特徴ある劣化形態を呈することになる。すなわち、劣化は両電極を結ぶ軸上部分の焼損と特異焼損図形による損傷とにより促進されるものと考えられ、低電圧アーク劣化時の単純なる軸上部分のみの焼損との相違が明らかに認められることになる。さて、このような特異焼損図形の諸性質を明らかにすることは劣化の機構解明上きわめて重要であるが、これは図形の電位の傾き分布や供試面の表面抵抗率との関係などの考察よりなされうものと考えられる。なお、これらの諸因子との関係についてはさきにその一部を報告したが、いまその実験結果の概要を示すと次のようである。

(1) 特異焼損図形は電位の傾きが非常に関係する。すなわち、両電極間に各種形状の穴および切欠きを作ったり、導電体もしくは液滴をおいた場合などについて特異図形の変化を調べると、図10のように伸びはほぼ等電位面の方向に生成されている。

(2) 図形の生成は表面抵抗率が $10^5 \sim 10^9 \Omega$ の範囲は再現性ができわめて良好である。また、伸びは供試

図10 特異焼損図形に及ぼす電位の傾きの影響

図11 表面抵抗率と特異焼損図形の伸びとの関係

図12 電流と特異焼損図形の伸びとの関係

図13 特異焼損図形の生成範囲

面の表面抵抗率の大小により相違する(図11)。これより伸びは表面抵抗率が小さく、印加電圧の大きいほど大となることがわかる。また、放電電流に対する線条の伸びの変化を求めると図12のようであり、ほとんどこれによる相違は認められず、すなわち印加電圧のみに関係することがわかる。なお、電圧-電流平面で図形の生成範囲を図示すると図13のようになり、電圧および電流に関し極限値の存在することが知られる。

以上の諸実験結果よりわかるように、特異図形の生成は印加電圧に関係しほぼ等電位面の方向に向かい、したがって、放電発生瞬時の電界の方向ときわめて関係あることが明らかとなった。このような理由により、図形の生成は放電路を電極とした沿面コロナ放電による劣化と考えられる。なお、このような沿面コロナ放電においては放電電荷、放電電流も大きく持続時間も長く、したがって、その高エネルギー密度により熱的不安定を引き起こし、トラッキングを生じ劣化を促進するものと推察される。こうして比較的供試面の絶縁抵抗が低い場合には放電形式がかなり変化し、すなわちコロナの持続時間の増加、放電繰返しひん度の増大などのため放電点のエネルギー密度の増大を生じて、特異焼損図形の形式による劣化が発生しやすいようになるものと思われる。

さて、ここでアーク劣化の機構を考察するに両極を結ぶ軸上部分の焼損劣化は放電の熱エネルギーに基づくものと考えられ、また前述の特異焼損図形は沿面コロナの高エネルギー密度によるものと推定された。したがって、本アーク劣化は電氣的破壊の様相を帯びること

*2 電極先端に劣化の末期生成される火点も白熱炭素と考えられ、したがって、この進展による損傷もその熱エネルギーによるものとみられる

になり、高電界の影響が存在することが考察される。要するに、特異焼損図形は両極間において電気的には電位の傾きの変化、熱的には分布点熱源または線条熱源の生成されたことを示すことになる。

ところで、従来よりコロナ放電のように非常に低い電力密度の場合には、紫外線放射や放電での活性化物の存在が劣化に対し主要な役割を果たし、低電圧大電流アーク放電での劣化では、本質的に熱源としてふるまうものと考えられている¹⁾。しかしながら、これら両者の中間領域、すなわち本研究の対象領域にてはどのような機構により劣化するものか明らかでなかった。したがって、以上の諸結果より高電圧小電流アーク劣化の放電劣化において占める位置がその劣化機構に関して明確にされたことになる。

4 結 言

放電形式、電極配置、絶縁材料の種類などを変えた場合のアーク劣化を調べ、それぞれいくつかの形式に分けられることが明らかにされた。また、高電圧小電流アーク劣化の機構は高電界の影響が存在することが知られた。

参 考 文 献

- 1) Mandelcorn, L., T.A.I.E.E., Pt, III, **80**, 481 (1961).
- 2) Race, H., and F. Warner, Gen. Elec. Rev., **38**, 97 (1935).
- 3) Sterling, R., T.A.I.E.E., **75**, 776 (1956).
- 4) Warren, H., J.I.E.E., **87**, 528 (1940).
- 5) 池尻忠夫, 電気三学会北陸支部講演論文集, 1 (1963).
- 6) 池尻忠夫, 電気三学会北陸支部講演論文集, 1 (1959).