

Research Reports of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-90, 1990
UDC 537.527,621.365.2,537.521,621.315.61

加圧空気中における有機絶縁材料の高電圧小電流アークに対する耐性*

本山建雄**

Resistance against High-Voltage, Low-Current Dry Arc for Electrical Insulating Materials of Organic Solid in Pressurized Air

by Tatsuo MOTOYAMA**

Abstract: Some electrical insulating materials of organic solid have been required a characteristic which resists against high-voltage, low-current dry arc. This characteristic is ranked according to an arc-resistance time, which is the time maintained insulation of surface of those materials against arc when they are exposed to the arc. The arc-resistance is tested in atmospheric pressure in accordance with the method described in the ASTM-D-495 or the JIS-K-6911.

Recently, electric devices have come to be used in higher pressure atmospheres such as inside of caisson, marine vessels, etc. Moreover, the devices often include circuits of higher voltage than the maximum voltage, 12.5 kV, stipulated in those codes, for example, 30 kV such as the case of circuit in the TV-set. However, it is little known about the characteristics of dry arc resistance in high pressure atmospheres, and there is, therefore, a possibility of electrical hazards caused by arc discharge in such atmosphere.

This study aims at investigating experimentally high-voltage, low-current dry arc resistances of organic solid insulating materials in high pressure air.

The measurement of arc-resistance time was carried out in dry air compressed up to 1.9 MPa, in accordance with the methods described in the ASTM-D-495 or the JIS-K-6911 except for some test condition, such as open-circuit operating voltage at 50 kV. The materials tested were melamine-glass laminated sheet, phenolic-resin sheet and etc.

The test results showed that the arc-resistance time of all materials decreased sharply with the increase of atmospheric pressure of up to about 0.4 MPa. The reason can be explained mainly from the fact that the electric arcs approach more closely the surface of test specimen with the increase of atmospheric pressure and accelerate, thereby, the carbonization of specimen.

Thus, the author summarizes that the electric devices installed in high pressure atmosphere such as inside of caisson, in which pressure range is approximately 0.1MPa-0.3 MPa, have to considered about arc-resistance time of materials, which compose of electric apparatus, in high pressure atmospheres before those are installed.

Key Words: Arc-resistance, Dry arc, Insulating materials, High pressure gas, High voltage

1. 緒 言

固体有機絶縁材料は電気機器の絶縁材料として広

く使用されている。これら有機絶縁材料はアークにさらされると、その熱によって燃焼や炭化を生じ、火災、有害ガスによる中毒、また、炭化導電路の形成

*この研究の一部は第 20 回安全工学シンポジウムにおいて発表した。

**電気研究部, Electrical Safety Research Division

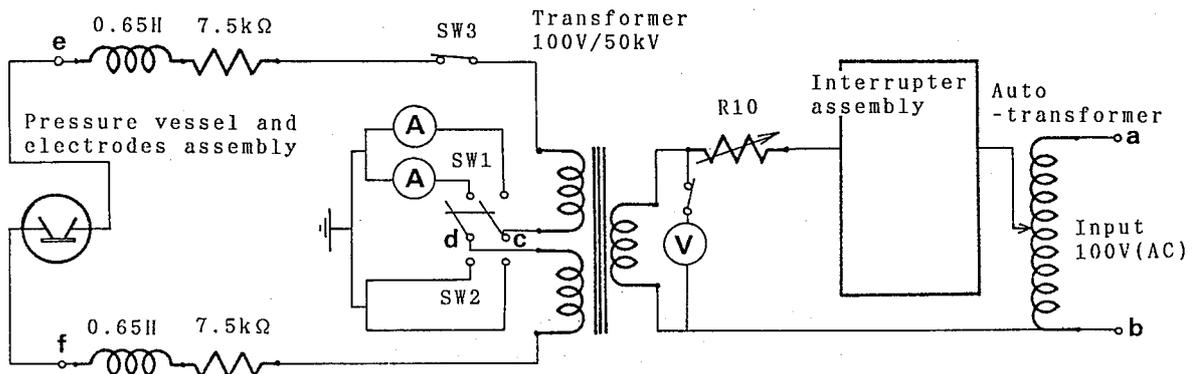


Fig. 1 Diagram of experiment to measure resistance against high-voltage, low-current dry arc of organic solid electrical insulating materials in pressurized atmosphere.
測定回路の概要

による制御機器の誤動作など、災害の原因になることがある。最近もテレビの高電圧回路からのアークを原因とする火災が報告されている¹⁾。

このようなアークに起因する災害を防ぐために、また、電気機器の安全性を一層向上させるために、ASTM-D-495 や JIS-K-6911²⁾では、有機絶縁材料の高電圧小電流アークに対する耐性を評価するための試験方法を規定している。その中で、アークにさらされたときに絶縁材料の沿面の絶縁性を保持できる時間として、すなわち、耐アーク性時間として、この耐性を評価している。これらの試験は、一般に、大気圧中において行われているため、その他の気圧でのアークに対する耐性は大気中の結果から類推されているのが現状であると思われる。しかし、技術の進歩とともに潜函作業室、高気圧治療室そして海中作業のための加圧室のように、加圧下での作業環境が増えており、加圧下における絶縁材料のアークに対する耐性についても明らかにしておく必要が生じてきた。

加圧空気中で発生するアークの特性は大気中と異なり、また、空気は加圧されるにしたがい酸素分圧が増加し、材料の炭化が促進されることなどから、アークに対する耐性も大気圧中での試験結果と大きく異なることが予想される。

これらのことから前報³⁾では、加圧によるアークに対する耐性への影響のうち、アークの特性の変化の影響を調べることを目的として、酸素分圧の増加の影響がない加圧窒素ガス中において実験を行った。実験は ASTM-D-495 に適合した市販の装置（試験用電極を解放した時の電極間電圧；12.5 kV）において、放電が発生し得る数気圧の加圧範囲内で行い、加圧

の初期においてアークに耐える時間が急速に短くなるという結果を報告した。

しかし、最近では、大画面のテレビやオシロスコープのように、30 kV を越える高電圧の回路を有する電気機器が使用されており、また、将来において、機能の向上のためにさらに高い電圧を有する機器の開発が予想される。一方、作業が行われる気圧の範囲にしても、現在、高気圧作業安全衛生規則において定められている上限 0.9 MPa を越える範囲のものも考えられる。

このようなことから、本報告書では 12.5 kV, 0.9 MPa を越える範囲において、加圧下での、高電圧小電流アークに対する有機絶縁材料の耐性を明らかにすることを目的として、電圧（試験用電極を解放した時の電極間電圧）が 50 kV の試験装置を組立て、1.9 MPa までの加圧した空気および窒素ガス雰囲気中において、加圧が有機絶縁材料のアークに対する耐性に与える影響を実験的に検討した。

2. 実験方法

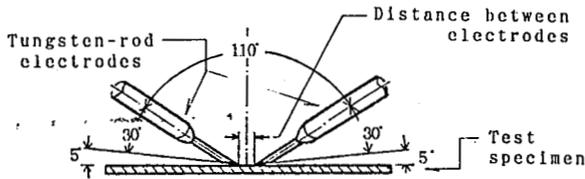
2.1 実験装置

装置は、Fig. 1 に示すように試験用電極を解放したときの電極間電圧（以下、二次電圧と記す）を設定するためのスライダック、アーク電流を設定するための抵抗 R10、通電時間を調整する制御回路、100V/50 kV のリーケージトランス、アークの状態を安定に保つための抵抗・インダクタンス、試験電極およびそれを設置する圧力容器からなる。

制御回路は、Table 1 に示すように JIS-K-6911 の

Table 1 Sequence of 1-min. current steps.
通電周期 (1分当たり)

Step	Secondary current(mA)	Time cycle	Total period(s)
1	10 or 15	1/4s on, 7/4s off	60
2	10 or 15	1/4s on, 3/4s off	120
3	10 or 15	1/4s on, 1/4s off	180
4	10 or 15	continuous	240 above

Fig. 2 Disposition and setup of tungsten-rod electrodes and test specimen.
試験電極の形状と配置

第4段階までの制御が可能であり、供試材料はこの範囲内の試験で十分である。なお、各段階毎に放電の持続時間が倍増するのでアークから発生するエネルギーも倍増することになる。

リーケージトランスの二次側は2個の巻線から構成されており、中央の接近した2点c,dは中性点(neutral)として実験中は直接(SW1:OFF, SW2:ON, SW3:ON)接地され、アーク電流を測定するときには電流計を介して(SW1:ON, SW2:OFF, SW3:ON)接地される。また、c, dを接続するとトランスの二次側に50 kVの電圧が出力される。(Fig. 1 参照)

トランスの二次側の回路の浮遊容量は放電に影響し、これが大きいとアークが乱れると言われているが⁴⁾、製作した試験装置の二次側の浮遊容量は数十pFであり、大気圧中での放電波形は安定している。

試験電極は直径2.4 mmのタングステンの丸棒を平面で切ったとき、その先端の角度が30°となるように整形したものであり、これを試料に加わる電極の荷重を 50 ± 5 gとして、Fig. 2に示すように試験片の上に置く。これらはJIS-K-6911の条件を満たすものである。

圧力容器は内径が約40 cm、奥行きが約50 cmの円筒状のもので、Fig. 3に示すように、その中央にタングステン棒電極、試験片を配置する。

Fig. 3 A setup of electrodes and test specimen in a pressure vessel.
試験電極と試験片を設置した圧力容器の内景

2.2 実験条件

主な実験条件をTable 2に示す。Table 2のカッコ内の数字はJIS-K-6911における値であり、参考までに示す。なお、JIS-K-6911では、10 mA連続通電の後に20 mA, 30mA, 40mA連続の通電段階がある。

加圧窒素ガス中の実験は、空気の加圧による酸素分圧の増加の影響を検討するための実験であり、電極間距離を一種類(7 mm)とした。また、ABS樹脂、ポリカーボネイト樹脂は加圧下において高電圧・小電流アーク(以下、単にアークと記す)に耐える時間が非常に短く、電極間距離が7 mmの場合についてのみ測定した。なお、実験回数は原則として5回とした。

2.3 試験片および前処理

試験片としてはメラミンガラス積層板、エポキシガラス積層板およびフェノール樹脂(以上、熱硬化性樹脂)、ABS樹脂およびポリカーボネイト樹脂(以上、熱可塑性樹脂)を選定した。これらはいずれも市販のもので、厚さは 3.17 ± 0.25 mmである。これを 100×100 (mm²)の正方形に切り出し、メタノール含浸ガーゼで表面を拭いた後、乾燥ガーゼで拭き、デシケータ中に24時間以上室温にて放置した。これは、JIS-K-6911による前処理とは若干異なる。

2.4 測定方法

2.4.1 タングステン棒電極の前処理

タングステン棒電極は実験条件(気圧、電極間距

Table 2 Main test conditions for experiments.
主な実験条件

Item	Condition	
	Experiment	(ASTM-D-495)
Gas	dry air and nitrogen gas	(air)
Pressure	0.1 to 1.9 MPa	
Open-circuit operating voltage(Vo)	50kV	(12.5kV)
Secondary current(Ia)	10, 15mA	(10-20 -30-40mA)
Distance between electrode(d)	3, 5, 7mm	(6.35mm)

離) が変わると共に治具を使用して 1000 番のエミリー紙により所定の形 (Fig. 2 参照) になるように研磨した。また、電極のクリーニングは各測定ごとにメタノール含浸ガーゼで清浄にし、10 mA の電流において 15 秒間空気中で放電させ、電極に付着しているメタノールを飛散させた。

2.4.2 二次電圧, アーク電流の設定

二次電圧, アーク電流の設定は JIS-K-6911 の方法に従って行った。まず、試験片の代わりにセラミックの板を用いて、タングステン棒電極を Fig. 2 のように、試験時と同じ電極間距離 d に配置する。そして、放電を発生させない状態 (SW3:OFF) のもとで二次電圧が 50 kV になるように一次側回路のスライダックを調整する。次に、放電を発生させた状態 (SW3:ON) のもとで電流が 10 mA になるように可変抵抗器 R10 を調整する。これを電圧, 電流が共に設定値になるまで繰り返し行う。設定は大気圧空気中で行っており、電流調整時のアークは安定している。トランスの二次側の電圧は一次側の電圧から換算により、放電電流は、Fig. 1 に示すようにトランスの二次側の中性点のところに電流計を挿入し (SW1:ON, SW2:OFF), 測定した。

2.4.3 ガスの充填

実験に与える使用ガス以外のガスの影響を避けるため、まず真空ポンプで压力容器内の空気を排気し、使用ガスを充填・排気した後、所定の圧力まで充填するという方法を採用した。

2.4.4 放電電流波形の観測

放電電流波形は Fig. 4 に示すようにリーケージトランスの中性点 d, c と接地極との間に抵抗 (10Ω×2)

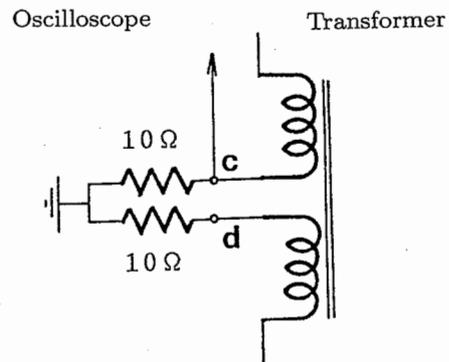


Fig. 4 Resistance set used for measuring discharge current waveforms.
放電電流波形測定用回路

を挿入し、その電位差から観測した。(Fig. 1 参照)

2.4.5 アークに耐える時間の測定

絶縁材料の表面が絶縁性を有する場合、アークは試料の上を通過する。しかし、絶縁性が悪くなるにしたいが、電流の一部は試料の表面に生じた炭化導電路を流れるようになり、ついには電極間に導電路 (track) が形成され (tracking; 以下, トラッキングと記す), 全電流が導電路を通るためアークは見えなくなる。この時点は目視で判定することも可能であるが、Fig. 1 の f 点において観測される放電波形の放電開始電圧はほぼ零となることから、これを主な確認の基準とした。アークに耐える時間は、試験開始からアークが見えなくなるまでの時間 (秒) とし、これをストップウォッチで測定した。なお、この時間は JIS-K-6911 の耐アーク性時間に相当するが、加圧下ということで、以下、「アークに耐える時間」と記すことにする。

3. 実験結果

実験結果を以下に示す。これらの条件は、例えば (Air 0.1 MPa, 7 mm, 10 mA, 50 kV) のように、ガスの種類については Air または N₂ と、気圧, 電極間距離 d, アーク電流 I_a, 二次電圧 V_o にはそれぞれに単位をつけて、また、図においては d = 7 mm, I_a = 10 mA, V_o = 50 kV のように略記することにした。

気圧は kgf/cm²・ゲージで測定したものであるが、ここでは大気圧 0 kgf/cm²・ゲージを 0.1 MPa とし、また、圧力差 1 kgf/cm²・ゲージを 0.1 MPa とし、測定された気圧をそれぞれ換算して表すこと

にした。

測定されたアークに耐える時間と気圧の関係は、試験片の材質が異なっても電極間距離、ガスの種類などのパラメータに関して、ほぼ同様の傾向を持つことから、これらの結果はフェノール樹脂およびメラミンガラス積層板を中心に表すことにした。また、実験結果は条件 (Air, 7 mm, 10 mA, 50 kV) を中心に表すことにした。

なお、アークに耐える時間の判定に利用している放電波形は抵抗分圧により観測しているため、放電開始電圧の上昇にともなう漏れ電流の増加の影響が考えられる。しかし、この影響はアークに耐える時間を長くする方向に作用することからアークに耐える時間が気圧の上昇にともなって大きく減少するという結果に対してはほとんど影響を与えていないと考えられ、詳細な検討はしていない。

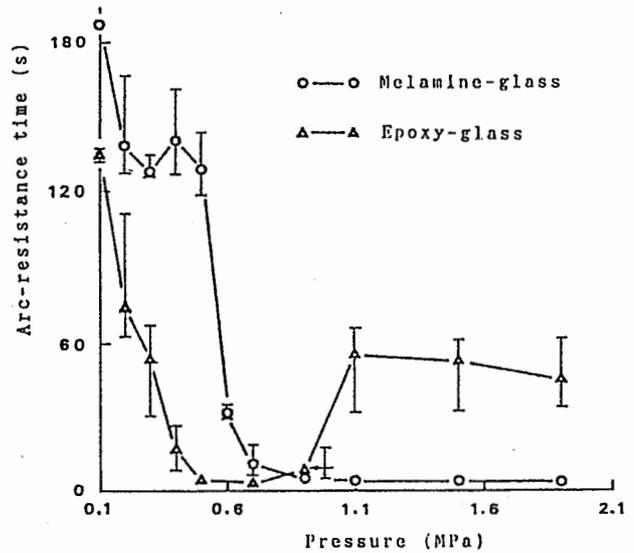
3.1 アークに耐える時間と気圧の関係

アークに耐える時間と気圧との関係は加圧とともに単調に減少する L 字形と極小値を持つ U 字形に分けることが出来る。以下、試験片の材質、電極間の距離、アーク電流、二次電圧、加圧ガスの種類をパラメータとして実験結果を示す。なお、アークに耐える時間は測定値の平均により表すが、同一条件においても測定値が大きく変動するものもあるので、一例として Fig. 5 にその範囲を併記した。

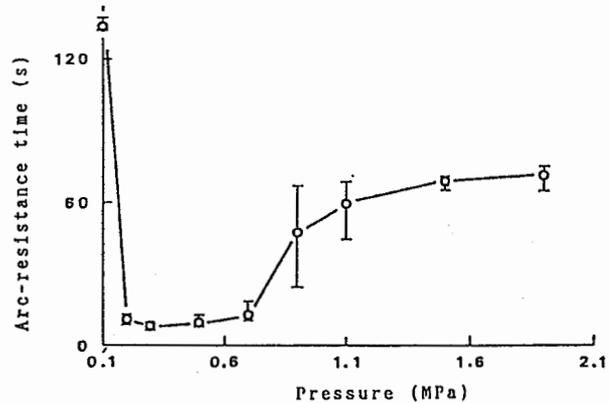
3.1.1 試験片の材質

供試材料は熱硬化性材料 (メラミンガラス積層板、エポキシガラス積層板およびフェノール樹脂) と熱可塑性材料 (ABS 樹脂およびポリカーボネイト樹脂) である。それらの材料のアーク耐える時間と気圧との関係は Fig. 5(a),(b) および (c) に示すように、メラミンガラス積層板、ABS 樹脂およびポリカーボネイト樹脂は L 字形の関係に、エポキシガラス積層板およびフェノール樹脂は U 字形の関係になる。Fig. 5 において、フェノール樹脂、ABS 樹脂およびポリカーボネイト樹脂は加圧と共に急速に減少することを示している。メラミンガラス積層板、エポキシガラス積層板は、耐アーク性の優れた材料であることから、フェノール樹脂などと比べて、加圧初期におけるアークに耐える時間の減少は小さく、特に、メラミンガラス積層板の場合には放電状態の小さな変化の影響が現れていると考えられる。

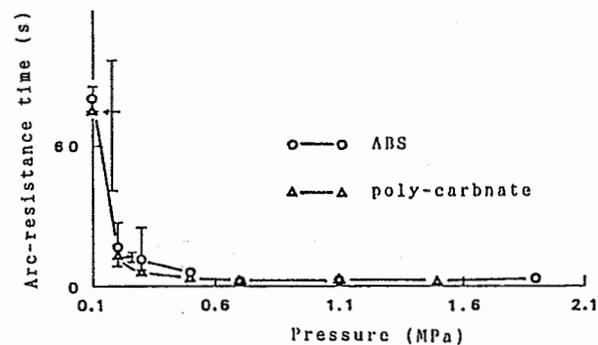
3.1.2 二次電圧



(a) melamine-glass and epoxy-glass laminated sheet.
メラミンガラス積層板, エポキシガラス積層板

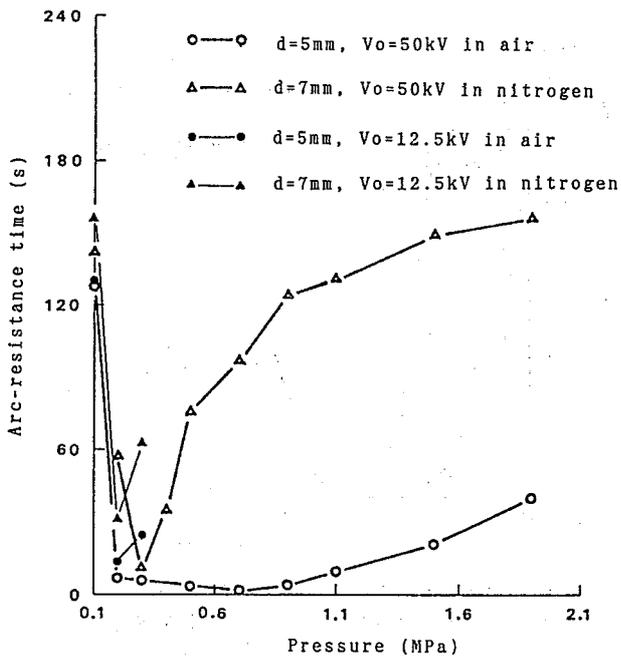


(b) Phenolic resin
フェノール樹脂

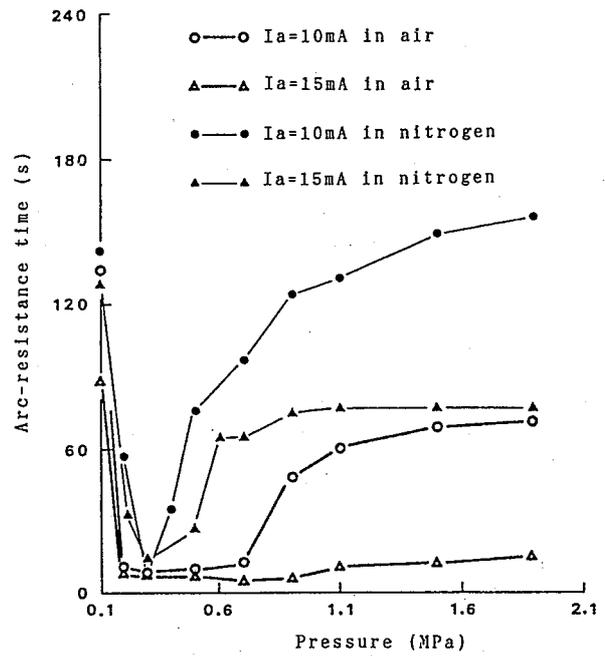


(c) ABS and poly-carbonate resin
ABS 樹脂, ポリカーボネイト樹脂

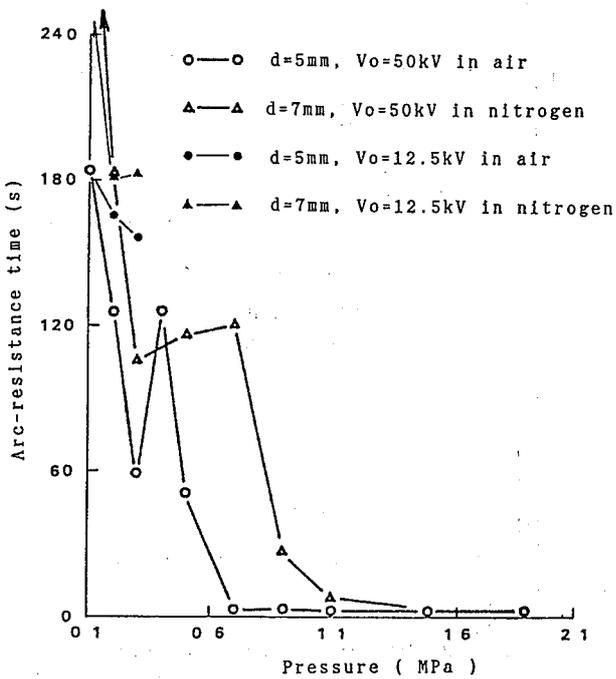
Fig. 5 Arc-resistance time of materials vs. dry air pressure and its scattered ranges. $d = 7 \text{ mm}$, $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$
試験材料の種類とアークに耐える時間 (平均, 範囲) $d = 7 \text{ mm}$, $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$



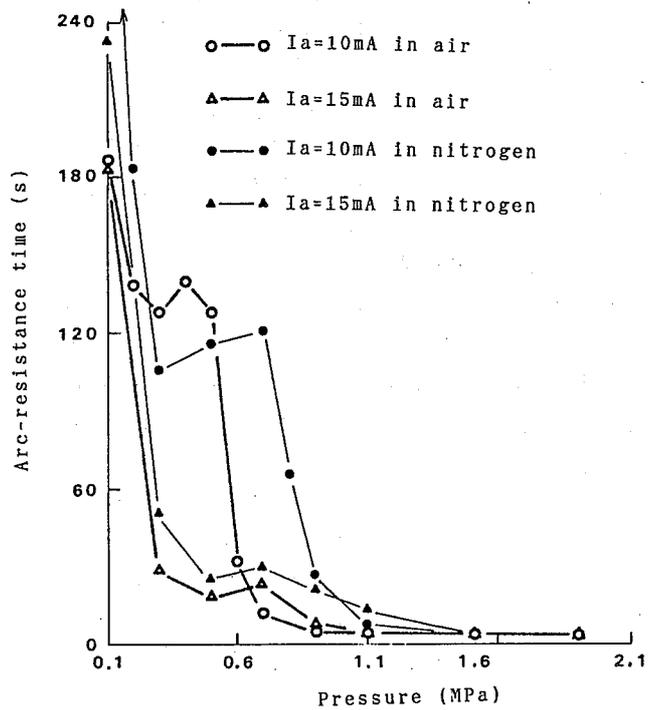
(a) Phenolic resin
フェノール樹脂



(a) Phenolic resin
フェノール樹脂



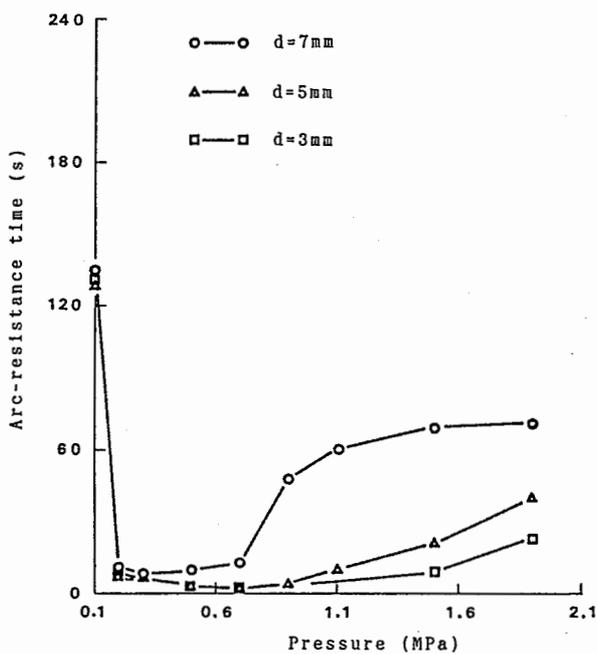
(b) Melamine-glass
メラミンガラス積層板



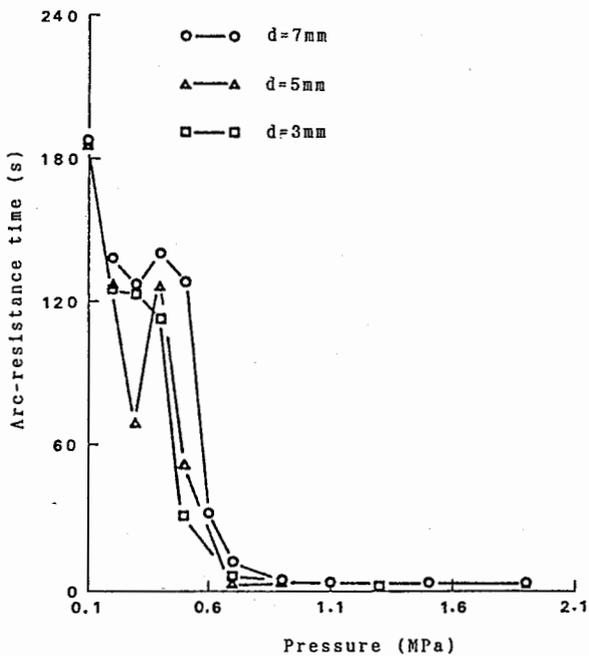
(b) Melamine-glass
メラミンガラス積層板

Fig. 6 Effect of open-circuit operating voltage on arc-resistance time in different gasses. $I = 10\text{ mA}$
アークに耐える時間に対する二次電圧 (V_o) の影響
 $I = 10\text{ mA}$

Fig. 7 Effect of secondary current and gasses on arc-resistance time. $d = 7\text{ mm}, V_o = 50\text{ kV}$
アークに耐える時間に対するアーク電流 (I_a) の影響
 $d = 7\text{ mm}, V_o = 50\text{ kV}$



(a) Phenolic-resin
フェノール樹脂



(b) Melamine-glass
メラミンガラス積層板

Fig. 8 Arc-resistance time in pressurized air of phenolic-resin sheet with different electrode distance. $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$
アークに耐える時間に対する試験用電極間の距離 (d) の影響 $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$

二次電圧を 12.5 kV^3 と 50 kV との比較の例として、(N_2 , 10 mA , 7 mm) および (Air , 10 mA , 5 mm) におけるアークに耐える時間を Fig. 6 に示す。上記の条件のもとで 12.5 kV のとき、放電の発生する気圧は 0.3 MPa までであったが、この範囲において 50 kV の場合と同様にアークに耐える時間の急激な減少が見られた。また、この傾向は他の材料においても同様であった³⁾。

3.1.3 アーク電流

アーク電流を 10 mA , 15 mA とし、電極間距離を 7 mm としたときのそれぞれの材料におけるアークに耐える時間は Fig. 7 のようになる。これによると、加圧空気中、加圧窒素ガス中のどちらにおいても電流の影響がかなり大きく、電流が大きいほどアークに耐える時間は小さくなっている。

3.1.4 電極間の距離

電極間の距離を $3, 5$ および 7 mm としたときのアークに耐える時間は Fig. 8 のようになる。加圧の初期においてアークに耐える時間と電極間の距離は対応していないものがあるが、全体的には電極間距離が大きいほどアークに耐える時間は大きくなる傾向にある。なお、Fig. 8(b) のメラミンガラス積層板の場合の結果から放電の状態は、距離と気圧とに関連しているように推測されるが、ここでは詳しい検討はしない。

3.1.5 加圧ガスの種類

Fig. 7 に示すように、加圧空気中でのアークに耐える時間は加圧窒素中よりかなり小さい。これは、空気が加圧されると酸素分圧が増加し、試験片の燃焼および周辺の炭化物の形成が促進され、トラッキングの芽の発生・進展が速まることに起因すると考えられる。

3.2 試験片の破壊痕跡

供試材料の破壊痕跡の代表的な例を Fig. 9 に示す。これらの痕跡は材質によらず気圧に対して同様の傾向を持つことから、ここでは、フェノール樹脂の場合を中心に示すことにした。また、各パラメータにおける比較は条件 (Air , 7 mm , 10 mA , 50 kV) の破壊痕跡に対して行うことにした。

Fig. 9 によると、破壊痕跡の形状は加圧されるにしたがい楕円状から帯状へと変化し、その面積は小さくなる傾向にある。

実験で得られた各材質の破壊痕跡の特徴は、要約

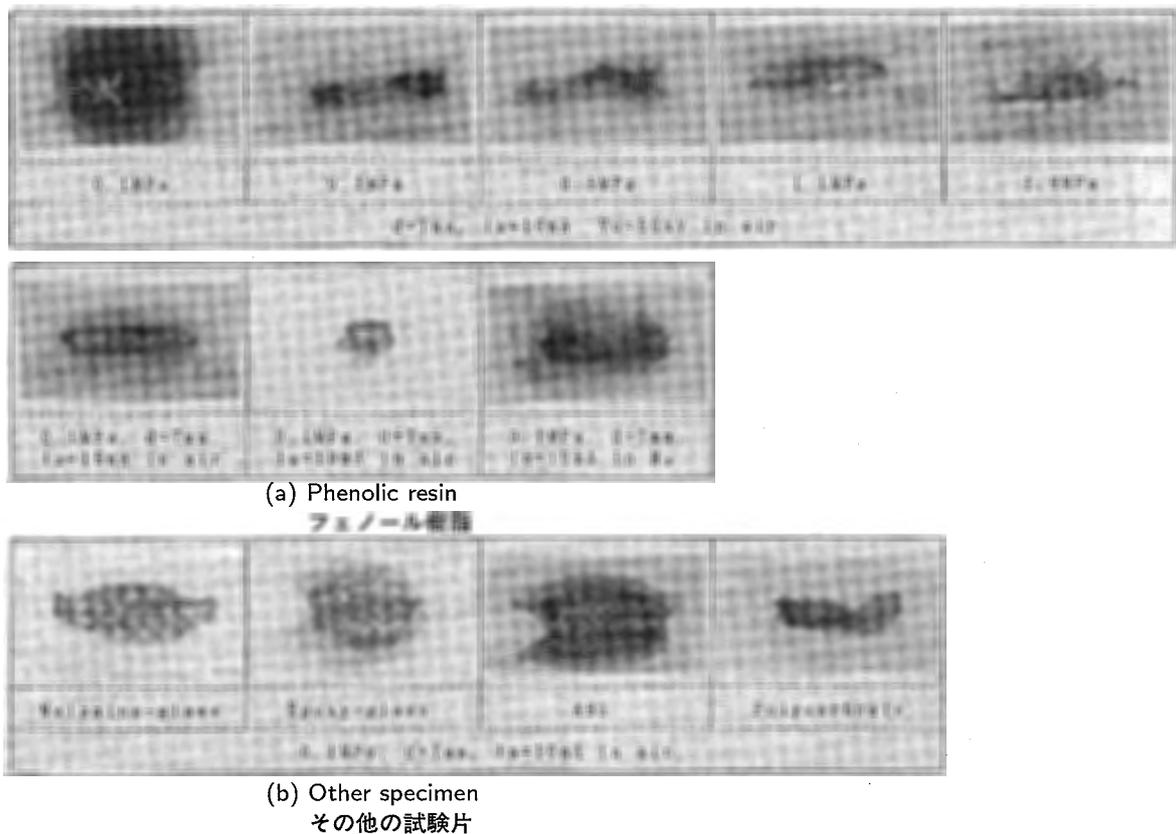


Fig. 9 Typical tracking traces of specimen tested. $d = 7\text{mm}$, $I_a = 10\text{mA}$, $V_o = 50\text{kV}$
 試験片の破壊痕跡 $d = 7\text{mm}$, $I_a = 10\text{mA}$, $V_o = 50\text{kV}$

すると次のようになる。

まず、メラミンガラス積層板、エポキシガラス積層板の場合、電極間距離およびアーク電流にかかわらず気圧に対してもほぼ同様の破壊痕跡を示している。これは、これらの試験片はガラス繊維を基材とした材料であることから、基材の特性が現れたためと考えられる。

紙基材フェノール樹脂の場合、気圧の高い条件のもとで表面に削られたような破壊痕跡が生じるとともに、その周辺にアークの筋状の痕跡がみられる。削られたような破壊痕跡はアークの接近による大きな熱の供給と試験片が脆い材質であるという材料の特性が重なり、その結果、表面が機械的に破壊したと考えられる。なお、筋状の痕跡はアークが試験片に接近したことを示している。

ABS樹脂およびポリカーボネート樹脂の場合、ススを多く発生する材料であることから破壊痕跡の周辺にススの付着が、特に、ポリカーボネート樹脂の場合、溶けた材料に付着したススが観察される。

一方、加圧空気中での破壊痕跡は、加圧窒素ガス中

よりも細くなる傾向にあり、また、 10mA のアーク電流における破壊痕跡の幅は 15mA の場合よりも広がる。しかし、電極間距離が異なっても破壊痕跡の形状は同様の形状であった。

4. 検討および考察

4.1 主な要因

アークに耐える時間と気圧との関係は大きく二つの現象に分けられる。一つは、加圧の初期において耐アーク性時間が大きく減少することである。これは供試材料の全てにおいて観測された。もう一つは、さらに加圧したときにいくつかの材料において耐アーク性時間が増加したことである。前者は、主に、加圧空気中または加圧窒素中でのアーク特性の変化が、後者はそれに加えて、材料の特性が主な原因であると考えられる。ここではこれらを中心に検討した。

4.1.1 アーク特性

材料の絶縁破壊という観点からアークの特性を考えると、アークに含まれるエネルギーおよびそれが

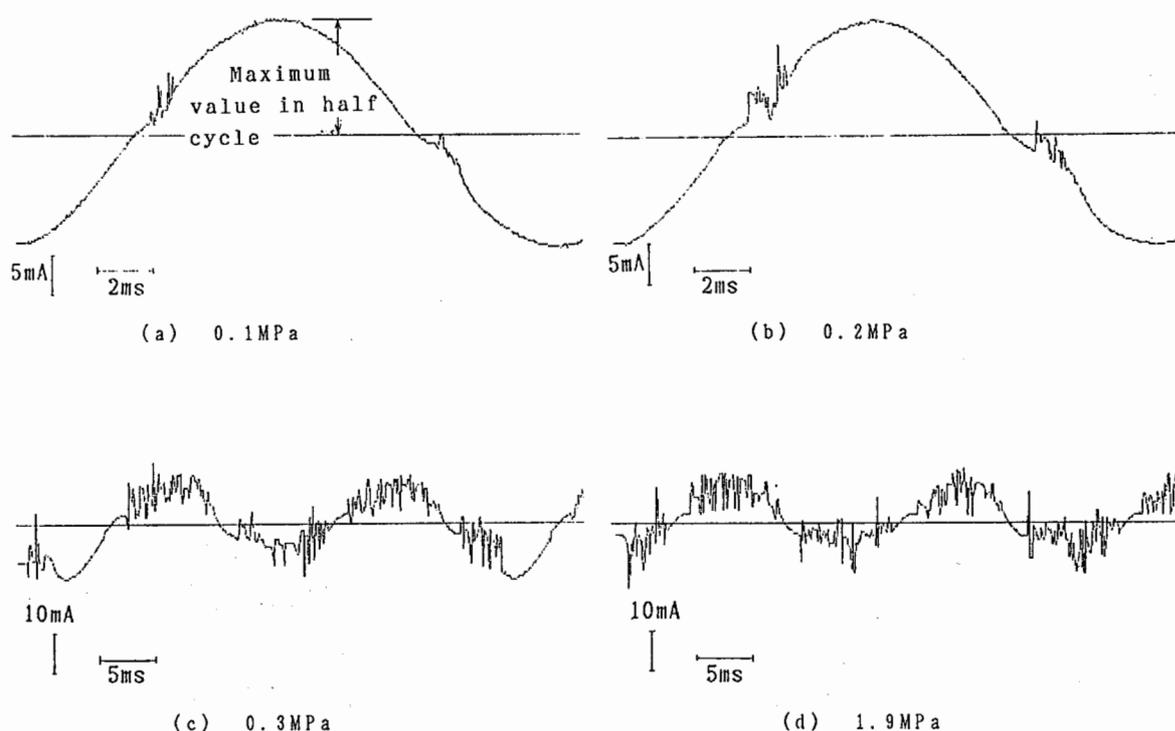


Fig. 10 Typical waveform of discharge current in pressurized air. $d = 6.35$ mm, $I_a = 10$ mA, $V_o = 50$ kV on porcelain
加圧空気における放電電流波形 $d = 6.35$ mm, $I_a = 10$ mA, $V_o = 50$ kV, セラミック板

熱となって試験片に伝わる割合、言い換えれば、アークと試験片との位置関係が大きな影響を与えていると推測される。

まず、アーク自体が有するエネルギーはアーク電流とアーク電圧の積を持続時間により積分したものであり、それが気圧に対してどの様に変化するかをアーク電流、アーク電圧および持続時間に分けて検討する。

Fig.10 は、Fig. 2 において試験片の代わりにセラミックの板を用いて、電極間距離を 6.35 mm としたときの放電電流波形である。セラミックの板を使用したのは観測中に試験片が劣化し、電流波形が変化するのを避けるためであるが、通電直後の試験片の場合の電流波形と比較して、外観上の大きな差は見られなかった。電極間距離を 6.35 mm としたのはこの値が JIS-K-6911 や ASTM-D-495 に規定された値であり、大気圧中において多くの観測結果があり、それらとの比較ができるからである⁴⁾。なお、アークに耐える時間の急速な減少は 3 , 5 および 7 mm のいずれにおいても発生しており、この傾向を検討する上で特に支障がないと考えられる。

Fig. 11 は、代表的な電流波形の 2 サイクル分から $1/2$ サイクルを単位として、その中で発生するアーク電流の最大 (4 個) を表している。なお、Fig. 11 の●は 2 個のデータを表す。

気圧の増加とともに放電開始電圧が上昇し、電荷が線路の浮遊容量に蓄積されることから、放電開始時のアーク電流は大きくなると思われたが、設定されたアーク電流の最大 $10\sqrt{2}$ mA を越えるものがあるものの、この値を中心に変化している。これは本試験回路のように大きなインダクタンスを含む回路の特性と考えられる。

アーク電圧は放電開始電圧に比較して非常に小さいため測定は出来なかったが、圧力の増加に対していくらか大きくなると推測される⁵⁾。

1 サイクル当たりのアーク持続時間は、Fig. 10 の電流波形が示すように、気圧の上昇とともにアークは間欠的になるために短くなる。

これらの検討から、1 サイクル当たりのアークのエネルギーは気圧の増加と共に減少するが、放電電流の最大が $10\sqrt{2}$ mA を越える放電もあるため、エネルギーの瞬時値の最大は大気圧中に比べ、大きくな

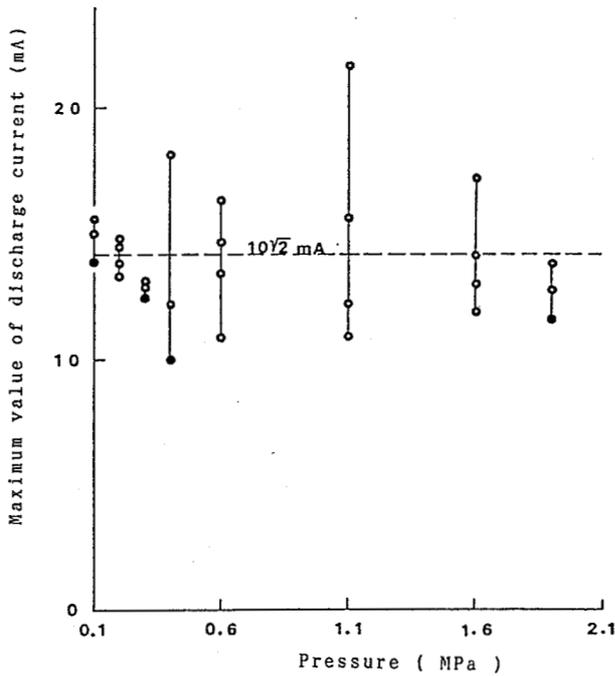


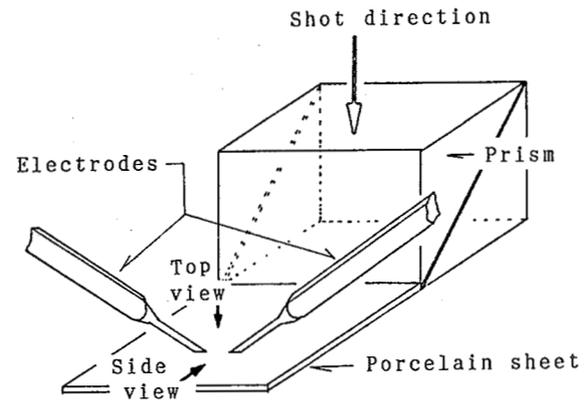
Fig. 11 Examples of maximum value of discharge current in half cycle. $d = 6.35 \text{ mm}$, $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$ in air
 放電電流の、半周期当たりの最大値 $d = 6.35 \text{ mm}$, $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$

ると推測される。アークのエネルギーの減少はアークに耐える時間を長くする方向に作用するが、エネルギーの瞬時値の増加は試験片の表面に炭化物の核(トラッキングの芽)の発生する機会を増やすことから、トラッキングの進展を招き、アークに耐える時間を減少させる方向に作用する。特に、トラッキングの芽の発生し易い試験片、例えばABS樹脂、ポリカーボネイト樹脂においてはアークに耐える時間を急速に減少させる原因の一つであると考えられる。

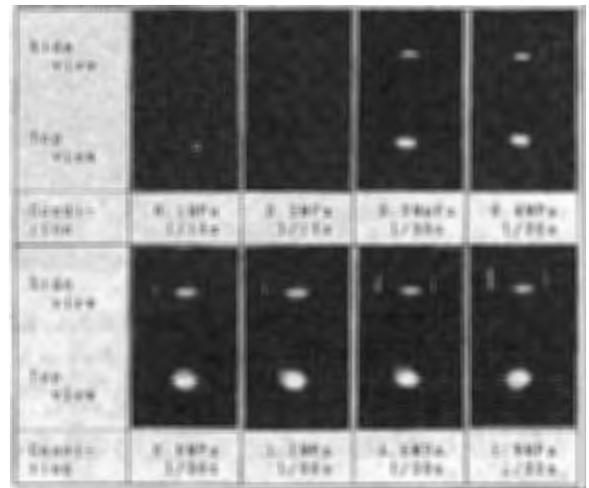
次に、アークに含まれるエネルギーが熱となって試験片に伝わる割合、言い換えれば、アークの試験片との位置関係について検討する。

Fig. 12 は試験片をセラミック板としたときのアークを上方および側方から撮影したものであり、放電条件は (Air, 7 mm, 10 mA, 50 kV) である。なお、絞りは 1/16 であり、シャッタースピードはアークの光が弱い 0.1 MPa, 0.2 MPa において 1/15sec., アークが輝き始めた 0.3 MPa から 1/30sec. とした。なお、1/15, 1/30sec. はそれぞれ約 3.3, 1.7 サイクル分のアークに対応する

アークは大気圧下 (0.1 MPa) では、明るくないが、



(a) Shot direction and disposition of electrodes
 アークの形状の撮影方法



(b) Top and side view. $F = 1/16$
 アークの平面及び側面 $F = 1/16$

Fig. 12 Electric-arc on pocelain sheet in pressurized air. $d = 7 \text{ mm}$, $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$
 加圧空気におけるアークの形状 $d = 7 \text{ mm}$, $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$

上方からほぼ直線として、また、側方から弧状の線として観測されている。

しかし、0.3 MPa を越える気圧では明るくなるとともに、上方からは楕円形として、側方からはセラミックの板の上を沿うような帯状のものとして観測されている。これらの形状は 1.7 サイクル分のアークを重ねたものであるが、楕円形の外側にもアークが見られることから、アークの経路は定まっていないと推測される。また、Fig. 10 の放電波形から間欠的なアークであることがわかる。

ところで、Fig. 12 でははっきりしないが、0.2 MPa におけるアークは電極の近くにおいて試験片に近づ

くように観測されること、そして、アーク電流の最大が増加していないことから (Fig. 11 参照), この気圧におけるアークは試験片に接近するという変化の過程にあると考えられる。

アークの経路が定まらないことは熱が分散されることになり、試験片の炭化に時間がかかることになるが、試験片に沿うことからアークの有するエネルギーのうち試験片に伝えられるエネルギーの割合は大きくなることが予想される。この割合はアークから試験片までの距離の逆数に比例すると考えられるが、アークが試験片の沿面を通ることから、大気中と比較にならないほどの割合でアークのエネルギーが試験片に伝えられていると推測される。

以上の検討から、加圧にともなってアークに耐える時間が急速に減少する最大の原因は加圧されるに従ってアークが試験片に近づくことにあると推定される。

4.1.2 供試試験片の特性

4.1.1 の検討から、アークに耐える時間と気圧との関係は単調に減少する L 字形になることが予想されるが、フェノール樹脂、エポキシガラス積層板については気圧の高い範囲で増加する U 字形である。これは、試験片の特性が主な要因であると考えられる。フェノール樹脂については、Fig. 9 に示したように、気圧の高い範囲において表面が削られ、新しい炭化しない表面が現れるという、フェノール油脂の脆いという特性が影響していると考えられる。しかし、エポキシガラス積層板については明らかでないが、他の試験片よりも深い溝状の破壊痕跡となることから、これが影響しているように思われる。

4.1.3 使用ガスの特性

空気は加圧されると酸素分圧が増加する。このため、発火温度は低下し、火炎伝ば速度が増大し、周辺に炭化物を生成することになる。その結果、トラッキングの芽の形成やその進展が助長され、アークに耐える時間が短くなる方向に作用すると考えられる⁶⁾。

4.2 加圧下でのアークに耐える時間に影響を及ぼす主な因子

アークに耐える時間に関係する主な因子を、アークに耐える時間を短くする方向に作用するものを (+), 長くする方向に作用するものを (-) として、まとめると Table 3 のようになる。

Table 3 Main factors related with resistance of dry arc in pressurized atmosphere.
アークに耐える時間に係る主な要因

a. Increase of partial pressure oxygen
·Reduction of firing point (+)
·Increase of burning speed (+)
b. Changes of arc characteristic
·Decrease of discharge duration time (-)
·Increase of maximum arc current (+)
·Approach of arc column to surface of test specimen (+)
c. Characteristics of specimen
·Facility of carbonization (-)
·Melt (+)
·Fragility (-)
·Extrication of carbon from material (+)

(+); accelerating, (-); decelerating

4.3 加圧空気中においてアークに耐える時間が短くなることによる危険性と対策

現在、一般的に作業が行われている加圧空気中としては、圧気工法における作業現場がある。この場所では 0.2 ~ 0.3 MPa 程度であることから、0.3 MPa の加圧状態において、有機絶縁材料のアークに耐える時間が大気圧中と比べてどの程度変化するかという観点から実験結果をまとめると Table 4 のようになる。

Table 4 の数値 (平均) は試験片の材質によって大きく異なるが、一例としてフェノール樹脂についてその数値 (平均) を見ると、(5 mm, 10 mA, 50 kV) において大気圧中の 5% に、また (5 mm, 10 mA, 12.5 kV) において 18% と、大きく減少することがわかる。言い換えれば、高圧回路を有する電気機器を、この実験条件に近い加圧空気中に持ち込んだとき、この表の割合で故障が発生し易いことを意味している。故障の結果は、単に電気機器の機能が失われるだけでなく、誤動作や、加圧空気中ということから火災の原因となることも予想されるため、防止対策が必要になると思われる。

対策としては、高圧回路の絶縁には無機材料を使用すること、アークを発生させないように高圧回路をモールドすること、そして、空間距離、沿面距離を大きくとる等の方法が有効であるが、それに加えて、加圧下で使用される絶縁材料についてはその使用雰囲気模擬した条件での耐アーク性試験が必要になる

Table 4 Arc-resistance time decrement (%), at 0.3 MPa of materials tested. $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$ in air
0.3 MPa におけるアークに耐える時間の減少率 $I_a = 10 \text{ mA}$, $V_o = 50 \text{ kV}$ in air

Materials	d(mm)	decrement(%)
Melamin-glass	7	68
	5	32(84)*
	3	66
Epoxy-glass	7	40
	5	26
	3	6
Phenol resin	7	6
	5	5(18)*
	3	5
ABS resin	7	15
Poly-carbonate resin	7	9

*; In case of $V_o=12.5\text{kV}$

と思われる。

5. ま と め

本報では、前報に引き続いて、加圧下での有機絶縁材料のアークに耐える特性について検討した。得られた結果は、大きく二つの現象に分けられる。一つは、加圧の初期にアークに耐える時間が急速に減少することである。もう一つは、さらに加圧したときにいくつかの材料においてアークに耐える時間が増加したことである。

前者の現象は加圧に伴う次のような現象に起因する。

1. エネルギーの瞬時値の最大は大気圧中より大きくなる場合があり、トラッキングの芽が発生し易くなる。
2. アークは弧を描く細い線状の安定なアークから試験片の表面に接近または沿う間欠的なアークへと変化し、試験片に与える熱を大きく増加させ、材料表面の炭化を急速に促進する。
3. 加圧空気中では酸素分圧が増加することから、材料の燃焼が促進され、結果として炭化部分が生じ易くなり、アークに耐える時間は大気圧空気中よりも短くなる。

後者の現象は主に、材料の特性による。

試験片に対しては次のような特徴が見られた。

1. フェノール樹脂、ABS樹脂およびポリカーボネイト樹脂において、アークに耐える時間は加圧と

共に急速に減少する。

2. メラミンガラス積層板において、(Air, 7 mm, 10 mA, 50 kV) の場合、0.5 MPa を越えるとアークに耐える時間は急速に減少する。
3. メラミンガラス積層板、ABS樹脂およびポリカーボネイト樹脂において、アークに耐える時間と気圧の関係は L 字形の関係を示し、エポキシガラス積層板およびフェノール樹脂において U 字形の関係を示す。

また、破壊痕跡については次のような特徴がある。

1. 供試材料の破壊痕跡は、一般的に、加圧されるにしたがい、形状は楕円状から帯状に変化し、その面積も小さくなる傾向にある。これらの傾向の材質による差は小さい。
2. メラミンガラス積層板、エポキシガラス積層板の場合、電極間距離およびアーク電流にかかわらず気圧に対してもほぼ同様の破壊痕跡を示しており、基材であるガラス繊維の特性の影響を受けたと考えられる。
3. フェノール樹脂の場合、気圧の高い条件のもとで表面に削られたような破壊痕跡が生じる。これは、材料の特性による。
4. ABS樹脂およびポリカーボネイト樹脂の場合、ススを多く発生する材料であることから破壊痕跡の周辺にススの付着が、特に、ポリカーボネイト樹脂の場合、溶けた材料に付着したススが観察される。

以上のような結果が得られたが、加圧下で使用する電気機器の絶縁材料として有機絶縁材料を使用する場合には、使用する気圧と絶縁材料の耐アーク性との関係を十分に考慮して、電気機器の高圧回路を構成することが望ましいと考えられる。また、防止対策としてはアークが発生しないように高圧回路をモールドするか、空間距離、沿面距離をとることが必要であると考えられる。

(平成3年4月22日受理)

参 考 文 献

- 1) 例えば、朝日新聞(90/2/26)等
- 2) JIS K 6911“熱硬化性プラスチック一般試験方法(5.15 耐アーク性)”, 1979
- 3) 田中, 本山: “高気圧 N_2 ガス中における絶縁材料の耐アーク性(第1報)”, (産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-77-3), 労働省産業安全

- 研究所, (1977)
- 4) プラスチック電気用品安全研究会耐アーク性試験法小委員会研究報告, 社団法人日本合成樹脂技術協会 (昭 49)
- 5) 放電ハンドブック (改訂新版), 電気学会, P209, (昭 62)
- 6) 駒宮: “過剰酸素中の燃焼危険性と安全対策”, (産業安全研究所安全資料, RIIS-SD-72-1), 労働省産業安全研究所, (1973)