

AUG. 1977

RIIS-RR-26-2

UDC 614.841.41

# 産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF  
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-26-2

## 人工環境下における電気設備の安全化に 関する研究 (第 3 報)

—低圧の容量回路及び抵抗回路の開閉火  
花による可燃性固体の着火限界—

田 中 隆 二  
市 川 健 二

労働省産業安全研究所  
MINISTRY OF LABOUR  
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

# 人工環境下における電気設備の安全化に 関する研究 (第3報)

—低圧の容量回路及び抵抗回路の開閉火花  
による可燃性固体の着火限界—

田中隆二\*, 市川健二\*

## Safety for Electrical Equipment under Artificial Environments

—Ignition of Flammable Solid Materials by Low  
Voltage Capacitive or Resistive Sparks—

By R. Tanaka\* & K. Ichikawa\*

In the previous report, the authors described the result of ignition limits of the flammable solid materials by inductive sparks in oxygen-enriched atmospheres.

In this work the ignition limits by capacitive or resistive sparks have been determined.

The experimental technique used was essentially the same as already reported, except that the spark producer was the Intermittent Mk-II apparatus.

Oxygen and the mixture of oxygen/nitrogen or oxygen/helium, each pressurized up to 1.3 MPa, were used as the test atmosphere.

In the capacitive circuit, the minimum igniting voltages were measured by varying the circuit capacitance between 0.34  $\mu\text{F}$  and 50  $\mu\text{F}$ ; in the resistive circuit, the determination of the minimum igniting currents were made with the supply voltage of 15 to 300 volts.

Almost throughout the experiment, the flammable solid material was the Japanese paper.

The effects of percent oxygen and total pressure of the test atmospheres on the ignition limit, have been investigated in different circuit conditions.

Combination of oxygen concentration and total pressure of oxygen/nitrogen or oxygen/helium mixture, which gives the same ignition limit as that in atmospheric pure oxygen, is also illustrated.

---

\* 電気研究部 Electrical Research Division

## 1. 緒 言

大気圧空気中では可燃性固体に着火しえないような電気火花であっても、大気圧空気中に比べて酸素分圧の高い過剰酸素ふん囲気中においては、電気火花の着火源としての能力が増大し、着火しうようになることが指摘されている<sup>1)</sup>。そのため、過剰酸素ふん囲気中で使用する電気機器については、それが着火源となり、火災爆発の原因にならない構造にしなければならない。そこで、筆者らは、特に過剰酸素ふん囲気中で種々の計測、制御、監視などの目的で使用する電気機器について、第1報<sup>2)</sup>でその対策の一つを提案した。すなわち、可燃性ガス蒸気に対する防爆電気技術の一つとして、すでに実績のある本質安全防爆の原理を過剰酸素ふん囲気中における電気回路の場合にも応用し、正常時及び事故時に発生する電気火花が、可燃性固体の着火源とならないような回路構成とする考え方である。これに基づいて第2報<sup>3)</sup>においては、過剰酸素ふん囲気中における低圧誘導回路の開離火花による可燃性固体の着火限界を明らかにした。本報は、これらに続いて、同じく低圧の容量回路又は抵抗回路の開離火花による可燃性固体の着火限界を測定した結果について述べたものである。

なお、複雑な電気回路から構成される電気機器が、正常時のほか、短絡、断線などの事故時に放出する火花の着火源としての能力は、ある程度、単純な誘導回路、容量回路又は抵抗回路から発生する火花をもとに評価できるので、第2報と本報の結果は、過剰酸素ふん囲気下で使用する本質安全防爆の思想に基づく電気機器の設計基準とすることができる。

## 2. 実 験

### 2.1 実験条件

本実験に用いた過剰酸素ふん囲気の組成と気圧は、前報<sup>3)</sup>の低圧誘導回路の開離火花による実験と同じである。すなわち、ふん囲気の組成としては、100% O<sub>2</sub>のほか、O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>/Heの混合ガスを用い、気圧の範囲としては0.1~1.3 MPa(絶対気圧、以下同じ)である。

可燃性固体として用いた試料も前報<sup>3)</sup>と同じもので

Table 1. Test specimens

Specimen	Weight in mg/cm <sup>2</sup>	Thickness in mm
Japanese paper	1.05	0.05
Cotton fabric	20.0	0.5
PVC film	5.8	0.05

あり、これらを Table 1 に示す。

### 2.2 着火試験装置及び火花着火試験回路

着火試験装置としては、低圧の容量回路及び抵抗回路の開離火花による可燃性ガス蒸気の点火試験用に英国で開発された Intermittent Mk-II apparatus<sup>4)</sup> を利用した。同装置の電極は白金-ルテニウム合金で、形状は Fig.1 に示すように長方形の固定電極と、先端が鋸歯状になった長方形の回転電極からなる。これにより、固定電極と回転電極は数個の開離火花を連続的に発生する。

試料は固定電極と同様の形状としたが、その大きさは固定電極の外周より約 1.5~2.0mm はみ出る大きさにして、固定電極に貼付けた。

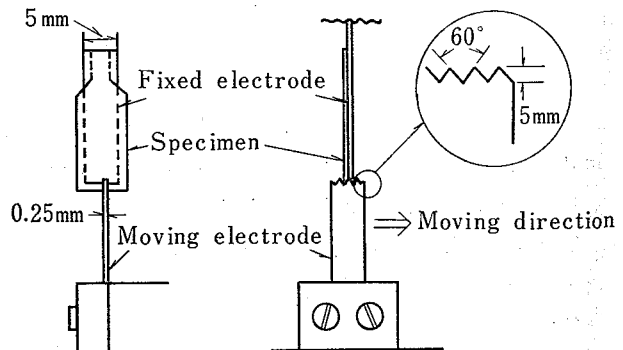


Fig.1 Attachment of test specimen to fixed electrode of 'Intermittent Mk-II apparatus'.

着火試験装置の電極と試料の貼付

着火試験装置の電極間に接続された火花着火試験回路は、Fig.2 に示すように直流電源の簡単な回路である。容量回路に用いたコンデンサー容量は、0.34, 1, 3, 10 又は 50μF である。なお、容量回路の場合には、着火試験装置の電極を開閉するとき発生する火花エネルギーが、コンデンサーのみから供給されて直流電源からは供給されないように、Fig.2 (a) のように高抵抗Rを挿入した。着火試験装置の電極が1回の開閉動作を終わってから次の開閉動作に移るまでの時間は約

1秒であり、コンデンサの充電に要する時定数が、この時間以内におさまるようにRの大きさを選定した。

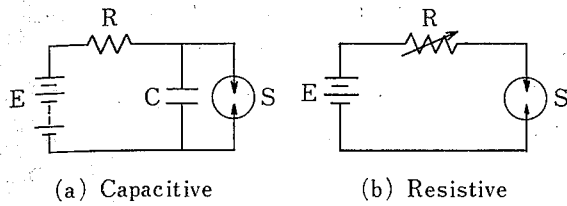


Fig.2 Spark-producing circuits.  
火花着火試験回路

## 2.3 実験方法

試料を固定電極に貼付けた後、着火試験装置全体を内容積が  $0.12\text{m}^3$  の圧力容器に入れた。続いて、容器内部を真空ポンプで排気した後、所定の濃度に混合された試験ガスをポンプから送給し、所定の圧力のふん囲気とした。なお、火花着火試験回路は、圧力容器の壁を貫通して開閉電極に接続した。

開閉火花による着火限界は、容量回路については最小着火電圧で表示し、抵抗回路については最小着火電流で表示した。最小着火電流の定義は前報の誘導回路の場合と同様である。最小着火電圧の定義はつぎによった。すなわち、同一条件の火花着火試験回路で電極を連続200回開閉して開閉火花を発生させ、そのうち一回でも試料に着火した場合は電源電圧を約5%減少させ、この操作を繰り返して1回も着火しない最小の電源電圧を求めた。この電圧とその直前に着火したときの電源電圧との算術平均値を着火限界とみなし、これを最小着火電圧と定義した。以下のグラフはすべて、この最小着火電圧又は最小着火電流でプロットしてある。

着火の有無は、圧力容器の視窓を通して目視によってのもので、火炎が試料全体に燃え広がった場合を着火とし、部分的に燃えて途中で消えた場合は不着火とみなした。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 容量回路の開閉火花による可燃性固体の着火

#### 3.1.1 ふん囲気の気圧と最小着火電圧

##### (1) 試料による差

最も着火しやすいふん囲気は  $100\% \text{O}_2$  であるので、 $100\% \text{O}_2$  ふん囲気中で Table 1 に示した種類の試料

を着火させ、その着火限界を測定した。試験回路のキャパシタンスは、 $50\mu\text{F}$  を用いた。

Fig.3 は、 $100\% \text{O}_2$  のふん囲気で、気圧を  $0.1\text{MPa}$  (大気圧) から  $1.3\text{MPa}$  まで変化させたときの各試料の最小着火電圧を示す。同図より、各試料とも  $\text{O}_2$  気圧の増加は最小着火電圧の減少をもたらす、危険側になる。試料の差として、最小着火電圧が最も大きいのは塩化ビニルで、続いて綿布、和紙の順に小さくなる。この実験結果と前報<sup>3)</sup> で述べた誘導回路の開閉火花による同様な実験結果とは、電気火花の種類(誘導性火花と容量性火花)、着火試験装置の違い(試料の取付け状態、電極の形状と開離速度)があり、直接比較することは必ずしも適切でないが、ふん囲気の気圧の増加による着火限界の低下の傾向、試料間における着火限界低下の傾向は変わらないようである。しかし、今回

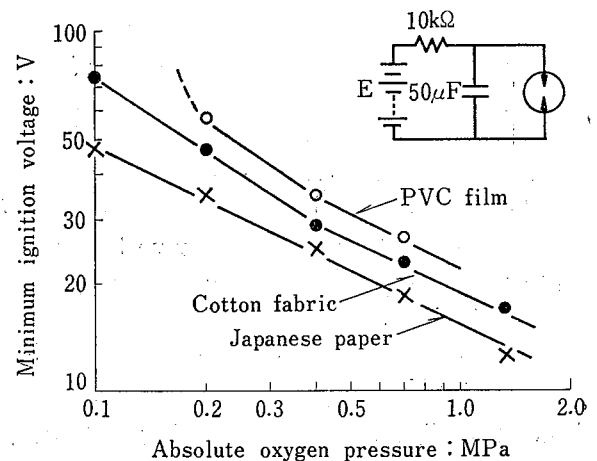


Fig.3 Minimum ignition voltage for Japanese paper, PVC and cotton by capacitive sparks in oxygen at various pressures. 各圧力における酸素中の容量性火花による和紙、塩化ビニル及び綿布の最小着火電圧

の容量回路の開閉火花による実験では、塩化ビニルの着火限界が  $0.2\text{MPa}$  以下の気圧で急激に大きくなり、着火しにくくなること、和紙の着火限界と塩化ビニルのそれとの差がそれ程大きくなること、また、和紙と綿布の着火限界が  $0.4\text{MPa}$  以上の気圧でも一致しないことなど、電気火花の種類、着火試験装置の違いが影響したと思われる差が現われている。

なお、誘導回路の開閉火花による実験で得た最小着火電流 ( $I$ ) によってインダクタンス ( $L$ ) に蓄えられていたエネルギー  $\left(\frac{1}{2} LI^2\right)$  (以下、この値を最小着火蓄積エネルギーという。) を、又、容量回路の開閉

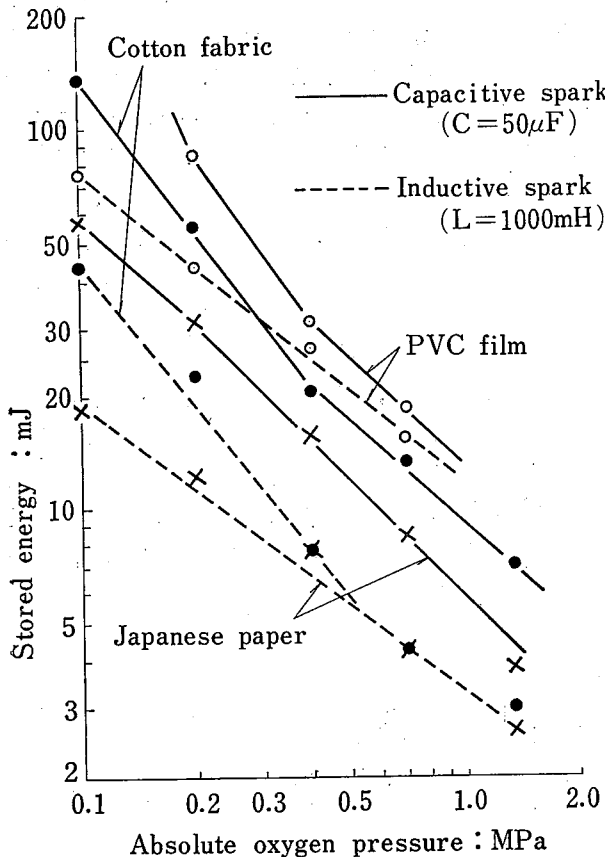


Fig. 4 Energy stored in "L" or "C" before ignition.  
着火前に "L" 又は "C" に蓄積されたエネルギー

火花による実験で得た最小着火電圧 (V) によってキャパシタンス (C) に蓄えられていたエネルギー ( $\frac{1}{2}CV^2$ ) (以下、この値を最小着火蓄積エネルギーという。) を同一グラフ上にプロットし、比較してみると Fig. 4 の通りである。両者とも気圧を約10倍に増加すると、最小着火蓄積エネルギーは約1/7~1/8に減少する。また、大気圧 (0.1 MPa) O<sub>2</sub> 100% の和紙の着火限界に注目すると、キャパシタンス C=50µF のときの最小着火蓄積エネルギーは約 57.6 mJ である。一方、インダクタンス L=1,000 mH の誘導回路 (電源電圧 50V) のときの最小着火蓄積エネルギーは約 18.5 mJ である。これは、火花着火試験回路の電源がほぼ同じ (直流 50V 付近) であっても、キャパシタンス C=50µF の容量回路で発生する開閉火花の方が、インダクタンス L=1,000 mH の誘導回路で発生する開離火花より着火しにくいことを示している。この理由の一つとして考えられることは、誘導回路で使

用した着火試験装置 (Break-flash No. 3 apparatus) と、容量回路で使用した着火試験装置 (Intermittent Mk-II apparatus) における火花電極の消炎効果 (Quenching effect) の差が挙げられる。

Fig. 3 及び Fig. 4 から明らかなように、試料のうち和紙が最も着火しやすいことが確認されたため、以下の容量回路の開閉火花による実験はすべて和紙のみを用いた。

(2) ふん囲気の組成の影響

Fig. 5 は、ふん囲気として 60% O<sub>2</sub>-40% N<sub>2</sub> 又は 60% O<sub>2</sub>-40% He を使用して、和紙の最小着火電圧を測定し、ふん囲気組成の違いによる着火限界を 100% O<sub>2</sub> の場合と比較して示したものである。回路キャパシタンスは 50µF である。同図より明らかなように、同一気圧であっても支燃性ガスである O<sub>2</sub> の量が最も多い 100% O<sub>2</sub> のふん囲気の場合が最も着火しやすいのは当然であるが、60% O<sub>2</sub>-40% N<sub>2</sub>, 60% O<sub>2</sub>-40% He のふん囲気組成の場合のように、同一酸素濃度であっても物質の燃焼には直接関係のない不活性ガスの種類が間接的に影響を及ぼす。これは N<sub>2</sub> の熱伝導率が 0.024 W/(m·K) (at 0°C) であるのに対して、He のそれが 6 倍で、0.144 W/(m·K) (at 0°C)

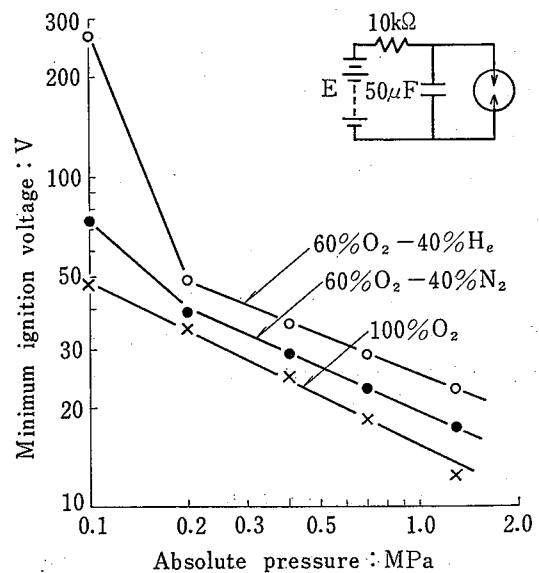


Fig. 5 Influence of inert gases and total pressure on minimum ignition voltage for Japanese paper by capacitive sparks.

容量性火花による和紙の最小着火電圧に及ぼす不活性ガスとふん囲気気圧の影響

と非常に大きいために、電極間に発生する火花の熱エネルギー及び試料の初期燃焼熱が速く失われる結果であると考えられる。

また、最小着火電圧( $V$ )を最小着火蓄積エネルギー( $\frac{1}{2}CV^2$ )に置換し、各気圧における混合ふん囲気中での最小着火蓄積エネルギー( $\frac{1}{2}CV_{60}^2$ )の100%  $O_2$  ふん囲気中での最小着火蓄積エネルギー( $\frac{1}{2}CV_{100}^2$ )に対する比をとり、グラフ上にプロットしたものがFig. 6の実線である。この曲線は気圧が0.2 MPa付近で極小をとった後、多少であるが増大の傾向にある。この傾向についても不活性ガスが $N_2$ であるときよりHeである方が大であることがわかる。また、前報<sup>3)</sup>の誘導回路における同様な実験結果について、上記と同様に最小着火電流( $I$ )を最小着火蓄積エネルギー( $\frac{1}{2}LI^2$ )に置換し、混合ふん囲気中での最小着火蓄積エネルギー( $\frac{1}{2}LI_{60}^2$ )の100%  $O_2$  ふん囲気中での最小着火蓄積エネルギー( $\frac{1}{2}LI_{100}^2$ )に対する比をとり、グラフ上にプロットしたものが同図中の点線である。この曲線も気圧が0.2 MPa付近で多少小さくなったのち、気圧の増加につれて増大する傾向がある。これらより、比の大きさは電気火花の種類に影響されないようである。

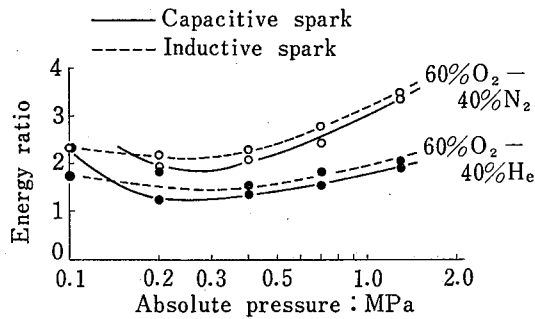


Fig. 6 Ratio of minimum energy stored before ignition in 60%  $O_2$ /40% inert gas to minimum energy stored before ignition in 100%  $O_2$  atmosphere, at various pressures. 各気圧における100%  $O_2$ 時の最小着火蓄積エネルギーと60%  $O_2$ /40%不活性ガス時の最小着火蓄積エネルギーとの比

なお、Fig. 3 と Fig. 5 において、0.2 MPa 以上、1.3 MPa までの気圧の範囲内では、気圧の増加と最小着火電圧との関係は両対数グラフ上でほぼ直線になり、前報<sup>3)</sup>の誘導回路の場合と同様、最小着火電圧 $V$ と気圧 $P$ との間には  $V=kP^{-n}$  ( $k, n$  は定数) の実験

式が成立している。

### 3.1.2 ふん囲気の酸素濃度と最小着火電圧

不活性ガスと酸素との混合ふん囲気中で、酸素濃度を変化させた場合の最小着火電圧を測定した。Fig. 7は不活性ガスとして $N_2$ の場合の、Fig. 8はHeの場合の実験結果である。

当然ながら、酸素濃度が低いほど最小着火電圧は大

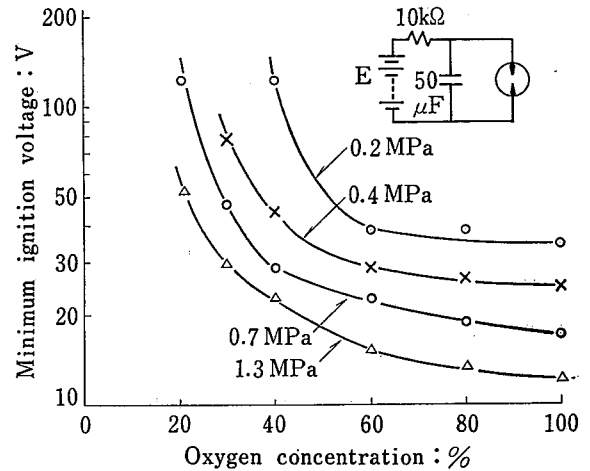


Fig. 7 Influence of percent oxygen and total pressure on minimum ignition voltage for Japanese paper by capacitive sparks in  $O_2/N_2$  atmospheres. 容量性火花による和紙の最小着火電圧に及ぼす  $O_2/N_2$  ふん囲気の酸素濃度と気圧の影響

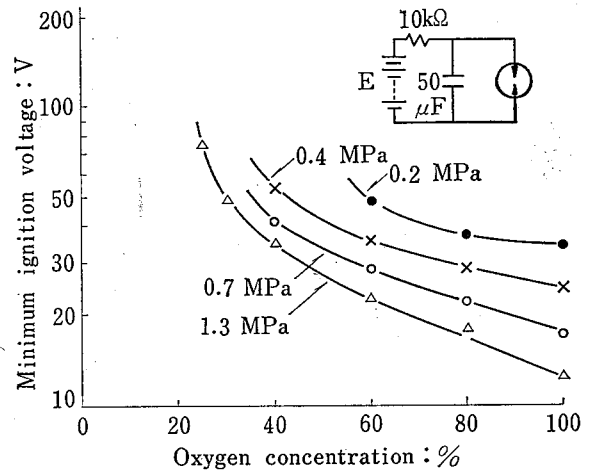


Fig. 8 Influence of percent oxygen and total pressure on minimum ignition voltage for Japanese paper by capacitive sparks in  $O_2/He$  atmospheres. 容量性火花による和紙の最小着火電圧に及ぼす  $O_2/He$  ふん囲気の酸素濃度と気圧の影響

きい。この実験の場合も前報の場合と同様な傾向が示された。すなわち、Fig.7のO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>混合ふん囲気の場合には、酸素濃度が20~40%の間で最小着火電圧が酸素濃度の増加と共に著しく低下するが、40%をこえるとその減少率は鈍化する。

一方、不活性ガスがHeの場合はFig.8に示す通り、酸素濃度が40~100%の間で酸素濃度の増加と共に最小着火電圧が徐々に減少する。これ以下の酸素濃度で20%の場合には、気圧を1.3MPaに高めても本装置では着火させることができなかった。したがって、Heで酸素濃度が40%以下の場合の最小着火電圧は、一般に、酸素濃度の減少と共に大きく増大するものと推定される。

以上のことから、N<sub>2</sub>とHeとでは、全体的にHeの方が最小着火電圧が大きく安全側といえるが、酸素濃度が80%以上になると、両者の間で着火限界の値に大きな差は見られなくなる。

### 3.1.3 ふん囲気の気圧-酸素濃度と最小着火電圧

容量回路の開閉火花による場合、気圧の上昇及び酸素濃度の増加は、いずれも最小着火電圧の減少をもたらす。危険側になる様子が明らかとなった。そこで、ある特定の最小着火電圧に対する気圧と酸素濃度の組合せが存在する筈である。この特定の最小着火電圧値として、大気圧100%O<sub>2</sub>中における値をとるものと

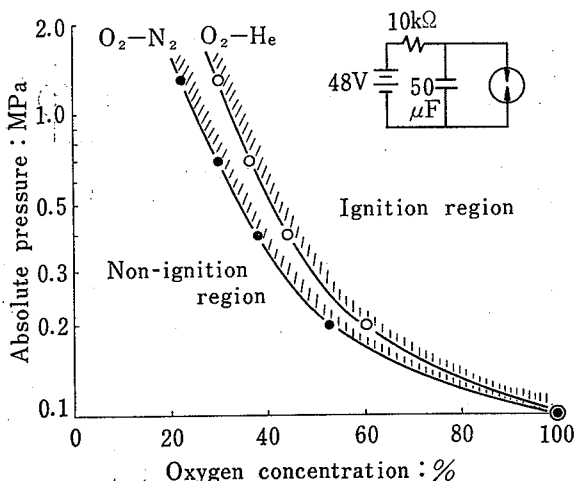


Fig.9 Percent oxygen and total pressure of O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> or O<sub>2</sub>/He atmospheres which give minimum ignition voltages equivalent to those in atmospheric pure oxygen. 大気圧酸素中における場合と等価な最小着火電圧を示すO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>又はO<sub>2</sub>/Heふん囲気の酸素濃度と気圧の関係

する。これはFig.5から48Vである。

Fig.7及びFig.8において、最小着火電圧が48Vである気圧と酸素濃度の組合せを求めて、これを改めて気圧と酸素濃度の関係として示したものがFig.9である。すなわち、Fig.9は直流容量回路(C=50μF)の電圧が48Vである場合に、それを開閉したときの火花が和紙に着火しうるふん固気の気圧と酸素濃度の限界を示したものとイえる。これを利用して回路設計を実際に行なうには電圧値に適切な安全率を見込む必要がある。キャパシタンスが50μFより小さい場合には、さらに安全側になり、Fig.9の曲線の左側の非着火領域は広くなる。

### 3.1.4 回路キャパシタンスと最小着火電圧

Fig.10は、ふん囲気中のガス組成、気圧を特定の値に選んで、回路キャパシタンスを0.34~50μFの範囲で変化させた場合の最小着火電圧を測定したものである。

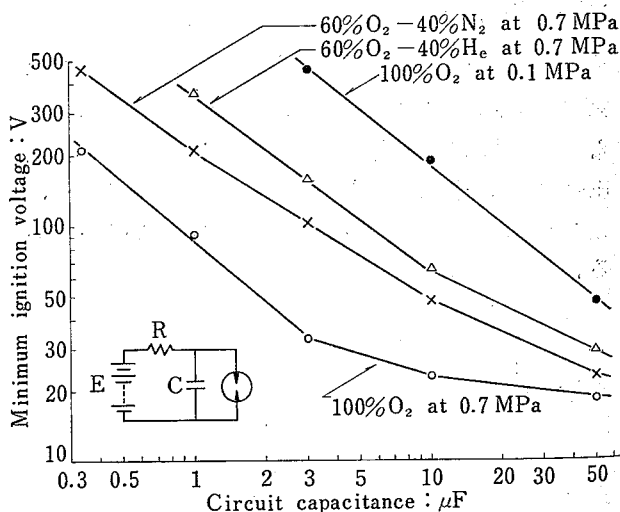


Fig.10 Variation of minimum ignition voltage for Japanese paper by capacitive sparks in various atmospheres with circuit capacitance.

各種ふん囲気中の容量性火花による和紙の最小着火電圧と回路キャパシタンスの関係

同図より、最小着火電圧が約40V以上の範囲では、キャパシタンスと最小着火電圧の関係は両対数グラフ上でほぼ直線的に変化し、キャパシタンスの大きい程最小着火電圧が小さく危険側になる。その直線の勾配は、ふん囲気中のガス組成や気圧に関係なくほぼ一定である。これに対して、最小着火電圧が約40V以下の範囲では、この直線関係からはずれ、キャパシタンスが増加(最小着火蓄積エネルギーが増加)しても、最小

着火電圧がそれほど減少しない。特に、0.7 MPa の 100% O<sub>2</sub> ふん囲気の場合は、最小着火電圧がキャパシタンスの値に関係なくある一定値に近づくように思われる。

容量回路の火花エネルギーは理論的に  $\frac{1}{2}CV^2$  (C: 回路キャパシタンス, V: 充電電圧) で表わされ、このエネルギーは電極の開成時、すなわち、固定電極と回転電極が接近し、放電ギャップ間の絶縁破壊が生じて放出される。しかし、この火花エネルギーの一部は電極の消炎効果や導線のジュール熱などとして失われ、その残りが固体のガス化と着火に使われると考えられる。その際、充電電圧の低下は絶縁破壊を起こさせる電極間の放電距離を非常に小さくするので、電極の消炎効果が大きくなる<sup>5)</sup>。これは、着火源としての火花エネルギーの損失分を増大させ、ある電圧以下では着火能力を失なうことを意味する。最小着火電圧が約 40 V 以下では、このような電極の消炎効果の影響が徐々に現われるため、キャパシタンスの増大による火花エネルギーの増大にもかかわらず、最小着火電圧が低下せずに一定に近づくものと思われる。

また、最小着火電圧が約 40 V 以上でも、容量回路の火花エネルギーは、電極の消炎効果や導線のジュール熱などとして一部消費されるが、Fig.10 に示される通り、回路キャパシタンス C と最小着火電圧 V の間に、ほぼ直線に近い関係が成立している。この直線部分に  $\frac{1}{2}CV^m = K$  なる実験式をあてはめ、直線の勾配 m の値を計算してみると、1.2~1.6 となり、理論値 (m=2) からややはずれている。

### 3.2 抵抗回路の開閉火花による可燃性固体の着火

#### 3.2.1 ふん囲気の気圧と最小着火電流

##### (1) 試料による差

この場合も、100% O<sub>2</sub> ふん囲気中で Table 1 に示した 3 種類の試料を着火させ、その着火限界を測定した。試験回路の電源電圧は直流 50 V である。

Fig.11 は、100% O<sub>2</sub> ふん囲気で、気圧を 0.1 MPa (大気圧) から 1.3 MPa まで変化させたときの各試料の最小着火電流を示す。同図より、試験回路が誘導性又は容量性の場合と同様、各試料とも O<sub>2</sub> 気圧の増加は最小着火電流の減少をもたらす危険側になる。試料の差として、最小着火電流が最も大きいのは綿布で、続いて塩化ビニル、和紙の順に小さくなり、誘導性又

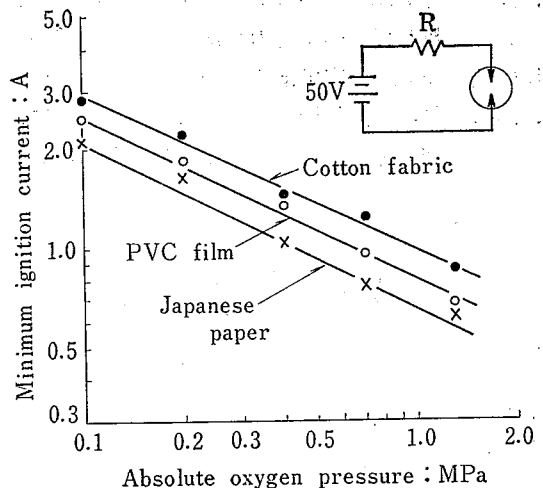


Fig.11 Minimum ignition current for Japanese paper, PVC and cotton by resistive sparks in oxygen at various pressure. 各圧力における酸素中の抵抗性火花による和紙、塩化ビニル及び綿布の最小着火電流

は容量性回路の場合と違った結果を得た。

この理由の一つとして着火試験装置と、それによる放電特性の違いがあると思われたので、これを確認してみた。すなわち、誘導回路における実験で使用した Break-flash No.3 apparatus を用いて、抵抗回路の開閉火花による塩化ビニルと綿布の最小着火電流を測定した結果は、塩化ビニルの方が綿布より着火しにくかった。また逆に、Intermittent Mk-II apparatus を用いて、回路インダクタンスが 1, 3, 10mH の誘導回路の開閉火花による塩化ビニルと綿布の最小着火電流を測定した結果は、本実験の抵抗回路の場合に得た実験結果と一致し、綿布の方が塩化ビニルより着火しにくかった。

一方、容量回路と抵抗回路の場合、着火試験装置が共に同じ (Intermittent) であるのに、容量回路の開閉火花では塩化ビニルの方が綿布より着火しにくい結果になっている。この原因については不明であるが、容量火花の放電継続時間が一般にきわめて短いところから塩化ビニルの気化が困難であったとも考えられる。

なお、この実験結果から和紙が最も着火しやすいことが確認されたので、以下の実験はすべて和紙のみを用いた。

##### (2) ふん囲気の組成の影響

Fig.12 は、ふん囲気として 60% O<sub>2</sub>-40% N<sub>2</sub>, 60% O<sub>2</sub>-40% He を使用して和紙の最小着火電流を測定



し、ふん囲気組成の違いによる着火限界を 100% O<sub>2</sub> の場合と比較して調べたものである。試験回路の電源電圧は直流 50V 一定である。同図より明らかなように、ふん囲気組成、気圧による着火限界の傾向は、前報<sup>3)</sup>の誘導回路や前節の容量回路の場合と同じである。

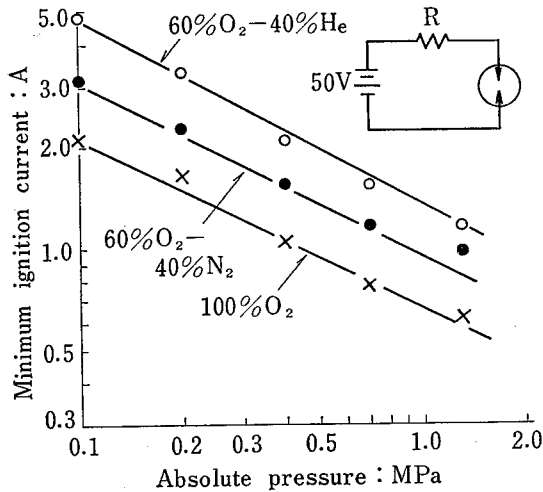


Fig. 12 Influence of inert gases and total pressure on minimum ignition current for Japanese paper by resistive sparks in various atmospheres.

各種ふん囲気中における抵抗性火花による和紙の最小着火電流に及ぼすガス組成と気圧の影響

また、抵抗回路の場合においても、気圧が 0.1 (大気圧)~1.3 MPa の範囲内で、気圧の増加と最小着火電流との関係は、両対数グラフ上で直線になり、前報<sup>3)</sup>の誘導回路の場合と同様、最小着火電流  $I(A)$  と気圧  $P(MPa)$  との間には、次の実験式が成立している。

$$I = kP^{-n} \quad (1)$$

ここで、 $k$  はふん囲気のガス組成と試料の種類によって決まる定数であり、 $n$  は直線の勾配を示す定数である。また、Fig. 11 において、綿布と塩化ビニルについても (1) 式が成立しているため、各試料における  $k, n$  を求めてみると Table 2 のようになる。これより、 $n$  はふん囲気組成のいかんにかかわらずほぼ一定で、0.47~0.56 の値を示した。これは誘導回路の場合の 0.30~0.38 と比べるとやや大きく、抵抗回路の開閉火花の場合の方が気圧の増加に対して最小着火電流の減少率が大きいことを示している。

なお、各気圧における混合ふん囲気中での最小着火

Table 2 Values of  $k$  and  $n$  in equation (1)  
式 (1) の  $k$  と  $n$  の値

Specimen	Atmospher	$k$	$n$
Japanese paper	100% O <sub>2</sub>	0.644	0.50
	60% O <sub>2</sub> -40% N <sub>2</sub>	0.959	0.51
	60% O <sub>2</sub> -40% He	1.333	0.56
PVC film	100% O <sub>2</sub>	0.820	0.48
Cotton fabric	100% O <sub>2</sub>	0.989	0.47

電流 ( $I_{60}$ ) の、100% O<sub>2</sub> ふん囲気中での最小着火電流 ( $I_{100}$ ) に対する比 ( $I_{60}/I_{100}$ ) をとり、グラフ上にプロットしたものが Fig. 13 である。これより、本実験条件内の気圧の範囲では、60% O<sub>2</sub>-40% N<sub>2</sub> の混合ふん囲気中での最小着火電流は 100% O<sub>2</sub> ふん囲気中でのその約 1.5 倍であり、60% O<sub>2</sub>-40% He の混合ふん囲気中でのそれは約 2 倍である。

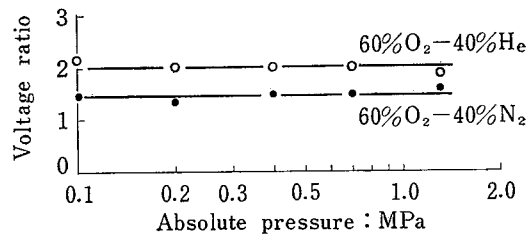


Fig. 13 Ratio of minimum ignition current in 60% O<sub>2</sub>/40% inert gas to minimum ignition current in 100% O<sub>2</sub> atmospheres, at various pressures.

各気圧における 100% O<sub>2</sub> 時の最小着火電流と 60% O<sub>2</sub>/40% 不活性ガス時の最小着火電流との比

### 3.2.2 ふん囲気の酸素と最小着火電流

不活性ガスと酸素との混合ふん囲気中で、酸素濃度を変化させた場合の最小着火電流を測定した。Fig. 14 は不活性ガスとして N<sub>2</sub> の場合の、Fig. 15 は He の場合の実験結果を示す。

この場合にも、当然ながら酸素濃度が大きいほど最小着火電流が小さい。また、酸素濃度の増加に対する最小着火電流の減少の割合は、不活性ガスが N<sub>2</sub> の場合より He の場合の方が大きい。不活性ガスが He で酸素濃度を 20% のふん囲気にした場合は、気圧を 1.3 MPa に高めても最小着火電流が大き過ぎて本装置では着火させえなかった。

抵抗回路の場合にも、不活性ガスが N<sub>2</sub> と He とでは、全体的に He の方が最小着火電流が大きく安全側

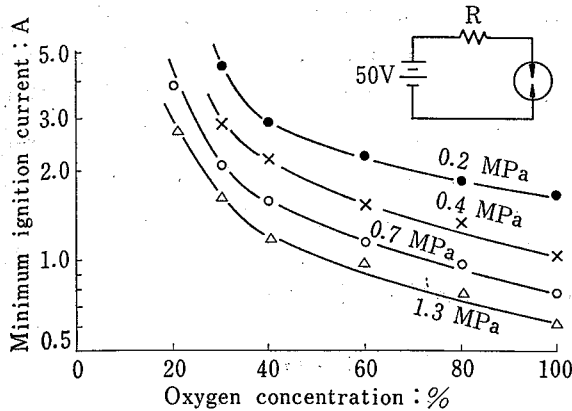


Fig. 14 Influence of percent oxygen and total pressure on minimum ignition current for Japanese paper by resistive sparks in  $O_2/N_2$  atmospheres.

抵抗性火花による和紙の最小着火電流に及ぼす  $O_2/N_2$  ふん囲気の酸素濃度と気圧の影響

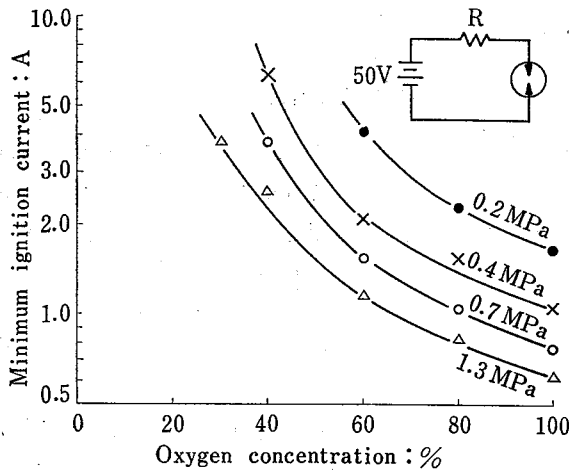


Fig. 15 Influence of percent oxygen and total pressure on minimum ignition current for Japanese paper by resistive sparks in  $O_2/He$  atmospheres.

抵抗性火花による和紙の最小着火電流に及ぼす  $O_2/He$  ふん囲気の酸素濃度と気圧の影響

になる。

### 3.2.3 ふん囲気の気圧-酸素濃度と最小着火電流

抵抗回路の開閉火花で、大気圧 100%  $O_2$  中における最小着火電流は、Fig.12 に示すごとく 2.1A である。そこで、Fig.14 及び Fig.15 において、最小着火電流が 2.1A に相当する気圧と酸素濃度の組合せを求めて、気圧と酸素濃度の関係を示したものが Fig. 16 である。すなわち、Fig.16 は、直流抵抗回路(50V)

の電流が 2.1A である場合に、それを開閉したときの火花が和紙に着火しうるふん囲気の気圧と酸素濃度の限界を示したものである。回路の実用設計上は、電流値に適当な安全率を見込む必要があるが、低圧抵抗回路の火花による着火危険性は、Fig.16の曲線によって評価することがある程度可能である。

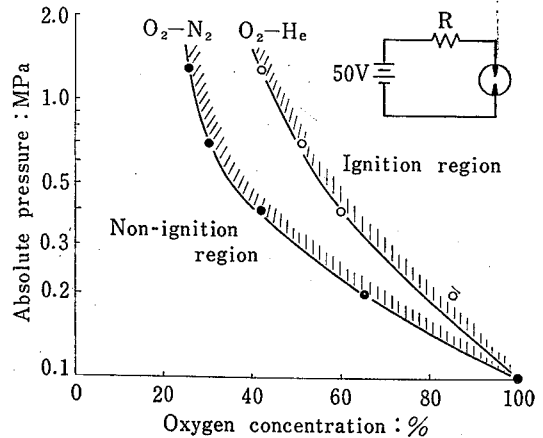


Fig. 16 Percent oxygen and total pressure of  $O_2/N_2$  or  $O_2/He$  atmospheres which give minimum ignition current equivalent to those in atmospheric pure oxygen.

大気圧酸素中における場合と等価な最小着火電流を示す  $O_2/N_2$  又は  $O_2/He$  ふん囲気の酸素濃度と気圧の関係

### 3.2.4 電源電圧と最小着火電流

Fig.17は、種々の組成と気圧のふん囲気のもとで、直流抵抗回路の電源電圧を 15~300V まで変化させた場合の最小着火電流を示す。この図より、電源電圧の増加は最小着火電流を減少させ危険側になる。なお、電源電圧 200V 付近で曲線に“くびれ”を生じ、これらの曲線群の形状が爆発性ガスに対する抵抗性火花着火の曲線の形状<sup>6)</sup>ときわめて類似していることがわかる。これは固体の着火がガスの点火と本質的に同じであることを示している。

また、ふん囲気の組成と気圧の大小に応じて、曲線は互いに Y 軸方向に平行移動した形になり、図中の各曲線より、次のようなことが確認される。

(1) 曲線 (1) と (4) より、ふん囲気の組成が同じ (100%  $O_2$ ) であっても気圧が高い方 (曲線 (4)) が最小着火電流が小さく、これは Fig. 11 の結果とも一致する。

(2) 曲線 (2), (3) 及び (4) より、ふん囲気の気圧が同じ (0.7 MPa) であっても酸素濃度が高い方 (曲線 (4)) が最小着火電流が小さい。また、ふん囲

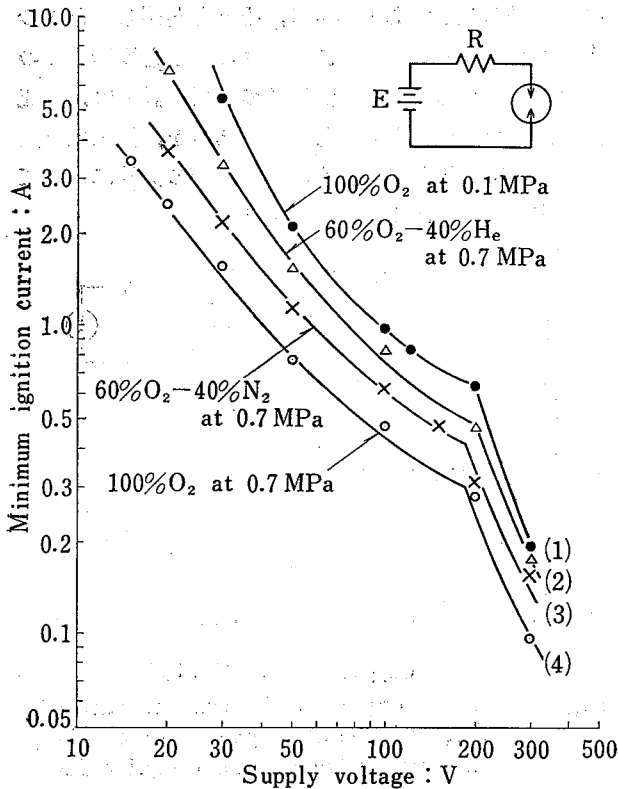


Fig.17 Variation of minimum ignition current for Japanese paper by resistive sparks in various atmospheres with supply voltage.

各種ふん囲気中の抵抗性火花による和紙の最小着火電流と電源電圧の関係

気圧 (0.7 MPa) と酸素濃度 (60%) が同じであっても、不活性ガスの種類によって最小着火電流が異なり、He の方が N<sub>2</sub> よりも最小着火電流が大きい。これらの結果も Fig.12 の結果と一致する。

#### 4. 結論

O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 及び O<sub>2</sub>/He の各ガスのふん囲気 (0.1~1.3 MPa) 中において、容量回路及び抵抗回路の開閉火花を発生させ、固体可燃物 (主に和紙) の着火限界を求めた。その実験結果及びそれから導かれた結論を要約すると次の通りである。

##### 4.1 容量性火花及び抵抗性火花に共通する結論

- (1) 実験で使用した塩化ビニル、綿布及び和紙のうちでは、和紙が最も着火しやすい。
- (2) O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>/He のいずれのふん囲気の場合

も、気圧の増加につれて着火限界は減少する。

(3) 酸素濃度の増加に従って着火限界は減少するが、一方、酸素濃度が低下して空気組成の場合に近い 20% では気圧が増加しても着火しにくくなる。特に、O<sub>2</sub>/He の場合は、気圧が 1.3 MPa においても着火限界はかなり大きくなるものと推定される。

なお、上記 (1)~(3) の結論は前報<sup>3)</sup> の誘導回路の場合の実験結果とも一致する。

##### 4.2 容量性火花の場合

(1) 大気圧 100% O<sub>2</sub> 中で、キャパシタンスが 50 μF の場合の和紙の着火限界は 48V であった。これと同じ着火限界となる O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>/He の気圧と酸素濃度の組合せを見出した (Fig.9)。

(2) 回路キャパシタンスの増加は、一般に着火限界を減少させるが、キャパシタンスの充電電圧が小さくなると、キャパシタンスの値に関係なく着火限界はほぼ一定値に近づく。

##### 4.3 抵抗性火花の場合

(1) 大気圧 100% O<sub>2</sub> 中で、電源電圧が直流 50V の抵抗回路の火花による和紙の着火限界は 2.1A であった。これと同じ着火限界となる O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>/He の気圧と酸素濃度の組合せを見出した (Fig.16)。

(2) 電源電圧の増加は着火限界を減少させ、曲線の形状は電圧 200V 付近で“くびれ”を生じ、爆発性ガスのそれと同じ傾向を示した。

以上の各種データから、過剰酸素ふん囲気中において、着火源とならない容量回路及び抵抗回路を設計しうる基準が得られ、本質安全性を与えることが明らかとなった。

なお、前報<sup>3)</sup> における誘導回路の実験結果と今回の結果を併せると、過剰酸素ふん囲気中において着火源とならない低圧電気回路の設計がある程度可能になった。

(昭和 52 年 6 月 9 日受理)

#### 参考文献

- 1) Brennand R. : "The production and hazards of a hyperbaric oxygen enrichment", P. 107, Pergamon Press (1968)
- 2) 田中, 菅原: 産業安全研究所研究報告 RR-19-6 MAY (1971)

- 3) 田中, 市川 : 産業安全研究所研究報告 RR-24-7, MAR (1976)
- 4) Haig J., Lister H. C., Gordon R. L., "The testing of Flameproof and Intrincically Safe Electrical Apparatus", IEE Conference Report Series No. 3 (1962)
- 5) Lewis, von Elbe, "Combustion, Flames and Explosions of Gas", p.323~329
- 6) Guénault E. M. : SMRE Report, No. 41, July (1952)

産業安全研究所研究報告

RIIS-RR-26-2

---

昭和 52 年 8 月 10 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

〒 108 東京都港区芝 5 丁目 35 番 1 号

電話 (03) 453-8441 番 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

---

UDC 614.841.41 (537.527 : 621.3.049.6)

人工環境下における電気設備の安全化に関する研究 (第3報)

—低圧の容量回路及び抵抗回路の開閉火花による可燃性固体の着火限界—

田中隆二, 市川健二

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-26-2, 1~11(1977)

前報で低圧直流誘導回路の開離火花による可燃性固体の着火限界を測定したが, 今回は, 低圧直流容量回路及び低圧直流抵抗回路の開閉火花による可燃性固体の着火限界を測定した。

可燃性固体として用いた試料は, 主として和紙で, ふん囲気として, 100% 酸素のほか,  $O_2/N_2$ ,  $O_2/He$  の混合ガスを用い, その気圧及び酸素濃度を变化させた。気圧は大気圧以上 1.3 MPa (絶対気圧) までの範囲である。

試料間の差, 気圧の影響, 酸素濃度の影響のほか, 回路キャパシタンスの影響, 電源電圧の影響についても調べ, 過剰酸素ふん囲気中でも電気火花によって可燃性固体に着火しえないような本質安全回路の設計基準の基礎資料を得た。 (表2, 図17, 参6)



UDC 614.841.41 (537.527 : 621.3.049.6)

Safety for Electrical Equipment under Artificial Environments  
—Ignition of Flammable Solid Materials by Low Voltage Capacitive or Resistive Sparks—

R. TANAKA & K. ICHIKAWA

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety, Japan

RIIS-RR-26-2, 1~11(1977)

Continuously from the previous report on the inductive spark ignition, the ignition limits of flammable solid materials by capacitive or resistive sparks in various circuit conditions under pure oxygen, oxygen/nitrogen or oxygen/helium atmospheres are described.

Specimens used were a piece of Japanese paper, cotton cloth and PVC film, and the test atmospheres were pressurized up to 1.3 MPa.

Influence of oxygen concentration, total pressure, and capacitance of the capacitive circuit or supply voltage of the resistive circuit on the minimum ignition limit are investigated in details. (2 Tables, 17 Illus., 6 Refs.)

