

## 伝導性微粒子を抵抗体とする電気式プライマーの発火特性

黒 田 英 司

国内では有隙電気点火方式のプライマーおよびデトネータの使用例および関係論文はほとんどない。この論文では狭義の有隙電気点火方式に属し、発射薬点火用に使用する電気プライマーに対する諸発火試験法とその試験によって得られた諸発火特性について述べた。

直列抵抗放電発火試験を特に数多く実施し、その試験結果を V-I 特性図によって考察した結果、狭義の有隙電気点火方式のプライマーには三種の発火機構、すなわち接触抵抗全体加熱発火、気体放電全体加熱発火、火花放電局部加熱発火があることを示し、また他の発火試験における発火もこの三種の発火機構のいずれかによるものであることを示した。

### 1. 結 言

電極間に金属抵抗線のような電橋のない電気点火方式を有隙電気点火方式<sup>1)</sup>と総称しているが、そのうち電極間点火薬に多量の導電性物質が混入されてその電気抵抗が比較的低いものは白熱有隙電気点火方式、導電性物質が少量でその電気抵抗が比較的高いものは狭義の有隙電気点火方式、また導電性がほとんどないものは火花電気点火方式と三種に大別できる。ここに検討する電気式プライマー（点火用雷管）は狭義の有隙電気点火方式に属するものであり、この種の電気点火方式は発射薬点火用の他ピエゾ電源、コンデンサー放電およびパルス電圧によって作動させるような特殊な応用分野に、また回路切り離し等<sup>2)</sup>の特殊スイッチとして非常に有効に応用できる。

伝導性微粒子を抵抗体とする電気式プライマーの電気抵抗特性に関しては既に報告<sup>3)</sup>したので、ここでは発火特性を求めるための諸発火試験法、それらの試験によって求めた諸発火特性およびそれら発火特性間の相互関係、それらの考察の結果考えられた発火機構等に関して報告する。

### 2. 実 験

#### 2.1. 試 料

実験に用いた電気式プライマーは口径 20 mm 弾の発射薬点火に使用している点火用雷管であり、そのプライマーの構造および爆粉の組成、装填状況等は前報告<sup>3)</sup>のものと同じである。プライマーの電気抵抗は測

定条件と環境条件によって大きく変わるが、発射薬の装填された完成弾に取付けられていたプライマーの電気抵抗分布は、印加電圧 3 V で測定した時は 1 KΩ ~ 1 MΩ と非常に広い範囲にあり、分布のピークは 7 ~ 20 KΩ (対数目盛での分布圏でみて) 間にある。乾燥すればプライマーの電気抵抗分布は抵抗値の高い方に移動し湿った大気中に数日間放置すれば抵抗値の低い方に移動する。実験には発射薬の装填された薬莖に取付けられ水分平衡したプライマーおよび乾燥したプライマーを使用した。

#### 2.2. 発火試験法

定電流および定電圧発火試験、2 μF コンデンサー放電発火試験、小容量コンデンサー放電発火試験、直列抵抗放電発火試験等を実施した。定電流および定電圧発火試験の回路は定電流および定電圧電気抵抗測定回路<sup>3)</sup>と同じであるが、それぞれ通電電流および印加電圧を増加させている。

2 μF コンデンサー放電発火試験は、適当な電流に充電した 2 μF のスチロールコンデンサーからプライマーにサイクロン 2D21 をスイッチとして放電させ、発火の有無を調べる試験である。その時プライマー電極間電圧と発火時間を測定すれば、種々の発火特性値が計算できるために、プライマー電極間電圧とホトトランジスタ回路を使用しての発火光とをオシロスコープで観測した。小容量のコンデンサー放電発火試験では、印加電圧が高くなり、瞬間通電電流も多くなり、また浮遊容量が問題となることから、適当なスイッチがないために、銅板と銅棒の接触をスイッチとし

て用いた。うまく接触させると接触不良、チャタリング等はほとんど問題とならない。コンデンサーは全てスチロールコンデンサーを用いた。

直列抵抗放電発火試験は Fig. 1 に示すように大容量コンデンサーから適当な直列抵抗とマーキュリウエッチドコンタクトスイッチを通してプライマーに通電させる試験である。この試験は試験回数がかかり多いために、確実な安全装置を種々組み込んでいる。例えば端子 T の 1 と 2, 1 と 3 にはマイクロスイッチ、機械的接触を利用した安全装置を組み込んでおり、また発火スイッチはまず赤ボタンスイッチを押し、次いで黒押しボタンスイッチを押しした時のみ作動し、しかも

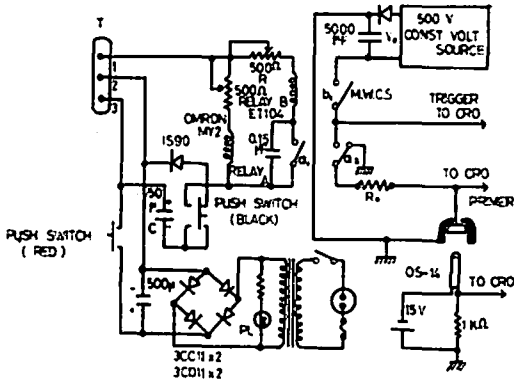


Fig. 1 A schematic diagram of electric discharge apparatus.

その作動時間 C はと可変抵抗 R との積で決まる時間だけで、この場合には約 200 msec としている。その時だけ安全装置用スイッチ  $a_2$  が解除され、それ以外の時間はプライマーの両電極とも接地に接続されている。発火回路は大容量コンデンサー 5000  $\mu$ F (200  $\mu$ F 電解コンデンサーの並列接続)、マーキュリウエッチドコンタクトスイッチ  $b_1$  (日立製 ET104, または日本電気製 MCC-3M), 直列挿入抵抗  $R_0$  (金属皮膜抵抗) およびプライマーからなる簡単な回路であり、オシロスコープによる観測はプライマー電極間電圧と燃焼光について行なった。発火時間は図示のようなホットランジスタ回路で測定し、その光出力の立上り時間とした。

### 3. 試験結果

定電圧発火試験は 5 か 10V 間隔で、定電流発火試験は 5 か 10 mA 間隔で、各点 5 ~ 10 回の試験を行なった。なお通電時間は 1 分間である。試験結果を発火率対電圧または電流グラフにプロットすることによって求めた近似的な発火特性値は以下の通りである。

全数発火電圧	90V
全数不発火電圧	22V
全数発火電流	75 mA
全数不発火電流	10 mA

発火直前までの平均供給電力、すなわち発火電力は両試験結果とも大略同じで、以下の通りである。

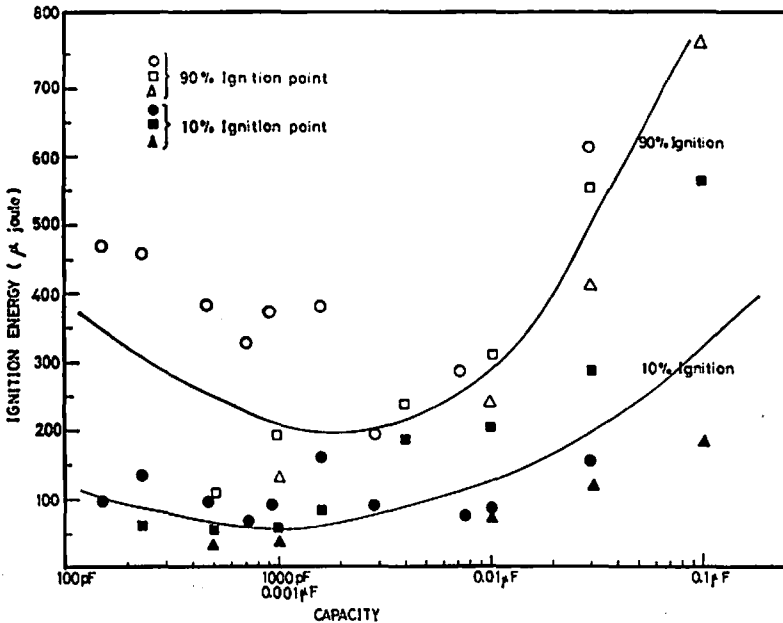


Fig. 2 Threshold ignition energies three different lots primer as a function of capacity.

全数発火電力 7.8 W

全数不発火電力 0.3 W

2  $\mu$ F コンデンサー放電発火試験は 10 V 間隔で、各電圧で 50 個宛試験した。発火エネルギーを  $1/2 CV^2$  (C は 2  $\mu$ F, V はコンデンサー充電電圧) で計算すると、試験結果は次のようになる。

全数発火エネルギー 12 mj

全数発火電圧 110 V

50%発火エネルギー 7 mj

50%発火電圧 85 V

全数不発火エネルギー 0.9 mj

全数不発火電圧 30 V

2  $\mu$ F コンデンサー放電発火試験での オッシロスコブによる測定は、コンデンサー充電電圧 70~145 V の範囲で 5 V 間隔、各電圧につき 3 回行ない、おおまかには次のような結果を得た。

発火エネルギー 0.08~6.5 milli joule

同平均値 (対数平均) 0.8 milli joule

発火までの平均電気抵抗 19~150  $\Omega$

発火時間 75~180  $\mu$ sec

発火エネルギーは  $1/2 CV^2$  の値よりも  $1/2 \sim 1/10$  とかなり低くなっている。

小容量コンデンサー放電発火試験は 200 pF~0.1  $\mu$ F 間の容量で、3 種のロットのプライマーについて行なった。各容量につき充電電圧を変化させ約 50 回試験を行ない、正規確率紙により近似的な 10% 発火エネルギー、90% 発火エネルギーを求めた。いろんな容量についての試験結果を Fig. 2 に示している。発火エネルギー値は  $1/2 CV^2$  で計算した。ロットによって数値がかなり異なるが、発火エネルギーは容量が小さくなるにつれてだんだんと低くなり、100~1000 pF 間の容量の時に最も低くなっている。なお最小発火エネルギーは 300 pF の時に 10  $\mu$ ジュールという非常に低い値となった。

直列抵抗放電発火試験回路の等価回路および回路方程式は Fig. 3 のようになる。ここに  $V_0$  はコンデンサー充電電圧 (50~400 V),  $R_0$  は直列挿入抵抗の抵抗値 (5  $\Omega$ ~10 k $\Omega$ ),  $V_p$  はプライマー電極間電圧, I は

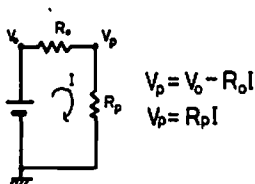


Fig. 3 Equivalent circuit diagram and circuit equation,

回路電流、すなわちプライマー中を流れた電流、 $R_p$  はプライマーの電気抵抗である。ここに  $V_0$ ,  $R_0$  は設定値であり、 $V_p$  と発火時間  $t$  を測定すれば他の発火性値は計算によって求まる。しかし  $V_p$  はオッシログラムで見れば Fig. 4 に示されるように一定電圧ではなく、振動波形となる場合が多い。それで  $V_p$  としては発火時間までの平均値的な値をとった。また発火時間はホトトランジスタ回路からの信号の立上りの認められる時間をとった。このようにして求めたプライマー電流と発火時間およびプライマーの電気抵抗の関係を Fig. 5 に、プライマー電流と発火エネルギーの関係を Fig. 6 に、発火時間と発火エネルギー (プライマーが発火するまでに供給されたエネルギー) の関係を Fig. 7 に示す。

#### 4. 結果の検討および考察

今までに示した諸実験結果だけによって発火機構を推定することは困難である。発火機構を推定するために、直列抵抗放電発火試験結果を  $V$ - $I$  特性図に描く。 $V$ - $I$  特性図とはプライマーの電極間電圧とプライマーを流れる電流間の関係をプロットしたグラフであり、Fig. 3 に示している 2 つの関係式を使用すれば、試験結果を直接にプロットすることができる。例えば Fig. 8 に示すように縦軸を電圧、横軸を電流とし、Y 軸上の充電電圧  $V_0$  点と X 軸上の  $V_0/R_0$  点を結ぶ直線と  $V=V_p$  との交点が求める  $V$ - $I$  点となる。その点  $V$ - $I$  の X 軸の読みが雷管中を流れる電流  $I$  となり、その点と原点を結ぶ直線の勾配がプライマーの抵抗  $R_p$  となる。Fig. 8 の例では、 $V_0=300$  V,  $R_0=150 \Omega$ ,  $V_p=100$  V であり、 $I=1.33$  A,  $R_p=75 \Omega$  となる。この

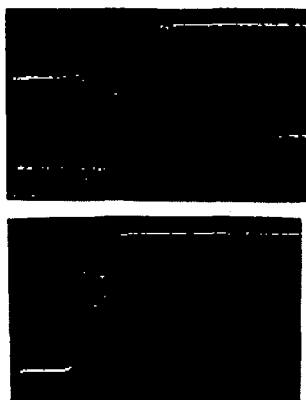


Fig. 4 Samples of recorded signals, Upper beams show voltage across primer; voltage scale, 100 V/div. Lower beams show firing light in arbitrary scal. Time scale, 50  $\mu$ sec/div.

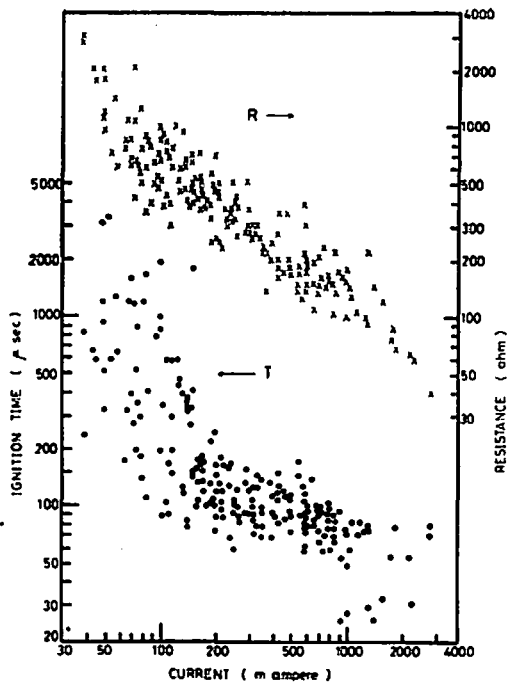


Fig. 5 Resistance of primer and ignition time as a function of current.

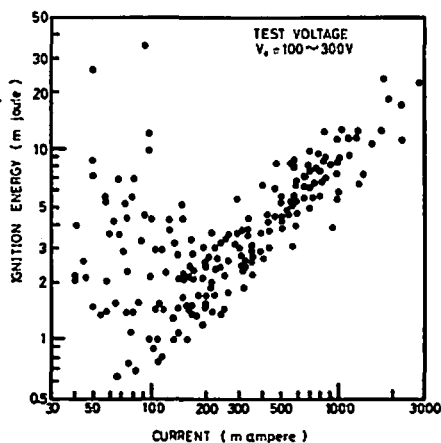


Fig. 6 Ignition energy as a function of current.

ような方法によって直列抵抗放電発火試験結果をプロットしたものが Fig. 9 であり、これをプライマーの V-I 特性と称することにする。

Fig. 9 で 500 mA 以上の電流領域では、V-I 点はほとんど 100V 前後のところにプロットされているが、それ以下の電流領域ではかなり広い範囲となっている。Fig. 9 を模型化した図を Fig. 10 に示す。ほとんどの V-I 点は斜線、点、横線領域のいずれかの内にプロットされている。逆にいえばプライマーは Fig. 10

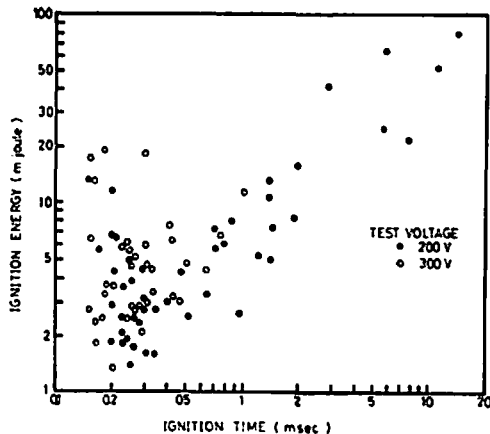


Fig. 7 Ignition energy as a function of ignition time.

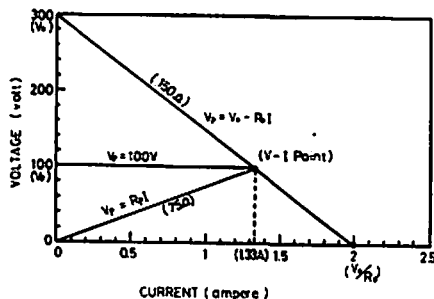


Fig. 8 Graphical method for obtaining V-I characteristics.

の三つの領域内の電気条件下でのみ発火することができる。

この模型図によって発火機構を推定してみる。まず点領域 A について；プライマーの初期抵抗値は 1kΩ ~ 1MΩ と非常に広い範囲に分布しているが、A 領域内ではほとんど 100Ω ~ 1kΩ 内に分布している。この時の抵抗値は初期抵抗値<sup>9)</sup>とは無関係ではなく、初期の接触抵抗値は、印加電圧と通電電流が増加したことによって低下し、100Ω ~ 1kΩ となったものである。この時抵抗の高いものほど著しく抵抗が低下しているが、これは接触抵抗の特徴<sup>9)</sup>である。従ってこの領域では初期のカーボンブラック連鎖組織<sup>9)</sup>は印加電圧、通電電流が増加したとしても破壊されることなく残存し、その接触抵抗部を電流が流れ、爆粉を全体的に加熱し、プライマーが発火に至ると考えられる。このような発火機構は定電流または定電圧発火試験の場合と同じであるが、ただそれらの場合の方が発火電圧、発火電流、発火電力とも全体的に低くなっている。これは直列抵抗放電火試験において直列抵抗を接続するために安定抵抗値に落ち着くのにより多く時間

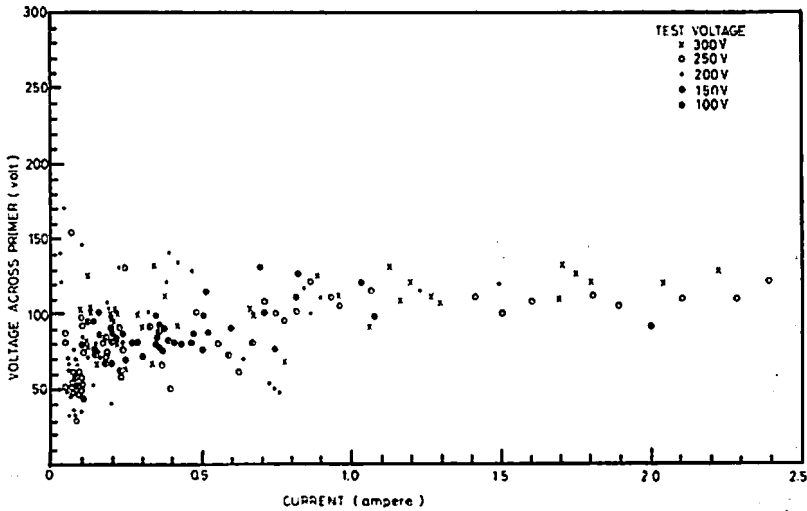


Fig. 9 V-I characteristics of 20 mm primer.

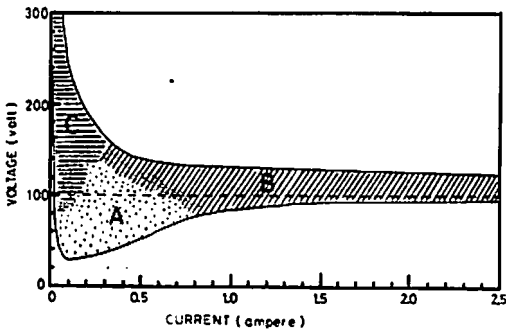


Fig. 10 Three ignition areas on V-I diagram.

を要すること、両者の通電時間の差異 (200 ms と 1 分間) 等によって生じたものであろう。

次に斜線領域 B では電流の如何にかかわらず、プライマー電極間電圧はほぼ一定となり、しかも 100V 近傍にプロットされている。従ってこの領域ではグロー放電が、しかも大気圧以上の圧力下で生じているために高気圧グロー放電<sup>9)</sup>が生じていると考えられる。またさらに電流が増え、3 A 程度になるとプライマー電極間電圧は 10V 程度以下に低下する。それでこの領域ではアーク放電<sup>9)</sup>が生じていると考えられる。このようなことから、領域 B およびそれ以上の電流領域では、カーボンブラック連鎖組織は電圧の印加によって瞬時に破壊され、気体放電が生じ、その放電による全体的加熱によって発火が生じると考えられる。

次に横線領域 C は、微小電流で発火する領域で一種の火花放電<sup>7)</sup>またはトリニネート半導体膜加熱等<sup>8)</sup>による局部加熱による発火領域と考えられる。直列抵抗放電発火試験では、もしこのような局部的に連鎖組織

を破壊する放電加熱による発火が生じたとしても、引き続き電流が送り込まれるために全体的に破壊され、高気圧グロー放電に移ってしまう。したがってこのような発火試験法では火花放電局部発火はあまり明確には現われない。

コンデンサー放電発火試験において全数発火と全数不発火電圧間における発火は、前記三つの発火機構のいずれかによって生じると考えられる。

まず数  $\mu\text{F}$  以上では臨界発火電圧は低くなるためにカーボンブラック連鎖組織は破壊されることはなく、接触抵抗加熱による全体加熱発火が生じる。

おおよそ 0.05~5  $\mu\text{F}$  の容量の場合には、発火電圧はかなり高くなり、カーボン連鎖組織は局部的かまたは全体的に破壊される。局部的破壊の場合も電流がまだ引き続き送られるので全体的破壊に至る。そのためこの範囲では主として気体放電による全体加熱によって発火が生じると考えられる。2  $\mu\text{F}$  という容量では接触抵抗加熱発火と気体放電加熱発火機構の両方を示し、電圧の高い方すなわち全数発火領域での試験は後述する実際の使用条件下で確実に発火するかどうかを判定し、電圧の低い方すなわち全数不発火領域での試験は、定常電流に対する安全性を判定し、爆粉の混合不良等による発火性異常等を検出できる。2  $\mu\text{F}$  コンデンサー放電発火試験は製品検査としてまた実用性能試験として適当な試験であることがいえる。

0.05  $\mu\text{F}$  程度以下の容量になると、全体加熱発火を生ずるには不十分のエネルギーしか貯えることができず、また定常気体放電に移行するに必要な電荷もない。この領域では一種の火花放電による局部加熱による発火と考えられる<sup>7)</sup>。この場合には電流が減少して

も放電路径は小さく、電流密度は高くなり、爆粉中で局部的に発火するのに十分な温度となり、発火を生じさせると考えられ、またこのような火花放電は大容量よりも小容量の方が生じやすい<sup>9)</sup>。トリシノート単体のコンデンサー放電発火試験において、針—平板電極間では最小発火エネルギー 10  $\mu$ joule、棒—平板電極間では 0.01  $\mu$ j という低いエネルギーで発火し、また非常に薄い層となれば 1  $\mu$ A という低い電流でも発火する<sup>9)</sup>が、プライマーでの微小容量コンデンサー放電発火試験においても十分な電気的条件が与えられれば、このような機構による発火も起こりうると思えられる。このようにカーボンブラック連鎖組織が抵抗体となりトリシノートを含んだプライマーは極微のエネルギーで発火するので、静電気に対して非常に敏感であり、危険である反面、ピエゾ電源作動発火器等に有利に応用できることになる。

発火特性を示した Fig. 5, 6 を見ると 100~200 mA のところで特性分布が変わることがわかる。それ以上の電流領域では気体放電発火が有勢となり、プライマー電極間電圧はほぼ一定、発火時間は電流に対してわずかに一の勾配となる。したがって電流に対して抵抗は -1 の勾配で定まる値となり、カーボンブラック、トリシノート、他の成分が適当に混合しておれば、かなり広い抵抗範囲にわたって、初期抵抗値と発火特性間の相関性はないことになり、発火エネルギーは電流に対して +1 よりもわずかに低い勾配となる。(Fig. 6 参照)

一方 100~200 mA 以下の領域では、電力による加熱になるために、電流が減るにつれて急速に発火時間は長くなり(安定抵抗値になる時間も長くなることも加わって)、発火エネルギーは発火時間によって支配されるようになる (Fig. 7 参照)。この領域では初期抵抗値と発火特性は直接の関係がある。

実用ではどの発火領域を利用したら良いかということであるが、これは Fig. 5 から見て 0.5 A 以上であれば発火時間のバラツキが少なくなること、アーク放電を生ずるような電流は電気的接点の寿命を縮めるために望ましくないこと等から、0.5~3 A 程度のところが、すなわち高気圧グロー放電発火領域が適当であるということになる。したがって発火電源はコンデンサー充電電圧  $V_0$  を 200~400 V とし、 $V=V_0-R_0I$  の線と  $V=100$  の線の交点が 0.5~3 A の範囲になるように直列抵抗  $R_0$  を選べば適当である。このような条件のもとではほぼ一定の V-I 点で発火し、発火時間もほぼ一定となる。また電気的接点の消耗も少ない。このためパルス電圧作動発火器、特殊スイッチ等として有効な応用が考えられる。

## 5. 総括

- (1) 定電流および定電圧発火試験、2  $\mu$ F コンデンサー放電発火試験、小容量コンデンサー放電発火試験、直列抵抗放電発火試験等を実施し、それぞれの発火特性値を求めた。
- (2) 直列抵抗放電発火試験を特に数多く実施し、その実験結果を V-I 特性図に整理し考察した結果、カーボンブラックを抵抗体とする狭径の有隙電気点火方式の雷管には、接触抵抗全体加熱発火、気体放電全体加熱発火、火花放電局部加熱発火の三種の発火機構があることが示された。また他の発火試験法による発火との相関関係を示し、それらの発火も三種の発火機構のいずれかによるものであると思えることを示した。
- (3) 初期抵抗値と発火試験における発火直前の抵抗値および発火機構との関係、そして諸発火特性の相関関係等を説明した。
- (4) 発火特性、発火機構等の詳細な検討の際には V-I 特性値を得ることができる直列抵抗放電発火試験が最も都合がよく、20 mm プライマーの実用感度試験としては 2  $\mu$ F コンデンサー放電発火試験が適当であることを示した。
- (5) 発火特性の検討から発射薬点火用を使用する場合の最適電源条件を定め、また特殊スイッチ、パルス電圧およびピエゾ電源作動発火器等に有効に応用できることを示した。

付記、本研究に御援助下さった当社小川利次、古部照夫氏また本稿をまとめるにあたり援助を授かった東京工業試験所第七部、日下部正夫氏に謝意を表す。(本報告は、昭和49年11月、工業火薬協会秋季研究発表講演会において発表した)。

## 文 献

- 1) 岡崎; 工火誌 20, 34 (1959)
- 2) F. Senko, T. B. Johnson; AD 282492 (1962)
- 3) 黒田; 工火誌 22, 269 (1970)  
黒田; 工火協秋季研究発表講演要旨 p. 14  
昭和45年11月
- 4) D. Parkinson; Advance in Colloid Science, 2, 389 (1964)  
B. J. Hodggood, J. R. S. Waring; Trans IRI 17, 50 (1941)
- 5) 電気学会編; 放電ハンドブック p. 155 (昭和40年) オーム社
- 6) 電気学会通信教育会編; 放電現象 p. 133 (昭和42年) 電気学会
- 7) R. M. H. Wyatt, P. W. J. Moore, G. H. Adams

- and J. F. Summer, Proc. Roy. Soc. (London), A246, 186 (1958)
- G. Morris; Brit. J. Appl. Phys, Suppl 2, S 97 p. 597 (1953)
- 8) 黒田, 中野; 工火協 昭和48年度年会講演要旨集 p. 16, 昭和48年5月  
黒田, 中野, 水島; 安全工学研究発表会講演要旨集, p. 25, 昭和49年12月
- J. M. Jenkins (Editor); Proc. of the Symp. on Sensitiveness and Safety of Initiators, WAA/196/015 (1969)
- 9) 井上; 放電加工法, p. 14 (昭和37年), 日刊工業新聞社

### **Ignition characteristics of electric primer containing conductive particles**

by E. Kuroda

There are few references electric primers and detonators of slot type in our country. In this paper, various ignition test methods on slot type primers for propellant and their ignition characteristics are described.

We had many trials especially on ignition by electric discharge through various resistance. Considering V-I characteristics diagram, the mechanism of electric discharge ignition is discussed. Finally it is suggested that there are three thermal ignition mechanisms in slot type primers, that is, bulk ignition caused by current through contact resistance, bulk ignition caused by gaseous discharge and localized ignition by spark discharge.

(Nippon Koki Co., Ltd. Shinbashi-Sakura Bldg. 2-36-1, Nishishinbashi, Minato-ku, Tokyo.)