容量回路の本質安全防爆性*

羽田 博 憲¹ 高橋 保 盛¹

Intrinsic Safety of Capacitive-Resistive Circuit

by Hironori HANEDA¹ and Yasumori TAKAHASHI¹

1. National Institute for Resources and Environment, CMSRC.
Hokkaido, Shiroishi-ku, Sapporo 003

Electric-arc ignition test of methane gas has been carried out for some capacitive-resistive circuit models. The results of the minimum ignition voltages (V_m) for circuits with particular parameters and with the discharged energy values, has been evaluated. The main results obtained are as follows ;

- (1) Capacitive-resistive circuit connected with a power-supply is more liable to ignite methane than that without a power-supply in certain conditions.
- (2) Discharging resistor R 2 and bleeder R 3 act to raise up the V_m , or enlarge the safety V-C zone.
- (3) The spark duration is found to be 50 μ sec by means of both high-speed cameras and observation of sparking current.
- (4) The discharging energies for different capacitor values are found in consideration of the capacitor-discharging character in the model with sparking duration of 50 μ sec.
- (5) An easier method is proposed for calculating V_m .
- (6) The theoretically obtained values of V_m coincide with measured ones.

KEY WORDS : Intrinsic Safety, Capacitive Circuit, Discharging Energy, Minimum Ignition Voltage

1. 緒 言

平成5年2月東京で、下水道工事の地下空間で爆発事故が発生し犠牲者を出したことはまだ記憶に新しい。このように地下空間で可燃性ガスが引火すると膨大な損害を被ることになるため、石炭鉱山などの地下空間では爆発事故防止の目的から、使用する電気機器すべてが防爆構造となっている。

炭鉱用防爆機器の中でも保安監視、省力化、自動化などに関わる各種センサ類の多種多様化の傾向はますます拡大している。センサ類としては各種ガス濃度、温度、湿度、振動、風速、圧力および変位などの計測器が挙げられるが、これら電気機器が可燃性ガスの存在する場所で使用される場合には爆発の火源とならないように本質安全防爆構造でなければならない。本質安全回路とは「正常時および事故時に電気機器の回路から発生する電気火花および高温部により可燃性ガスに引火しない構造の電気回路」と定義されている¹⁾。

石炭鉱山では保安規則²⁾により、可燃性ガス濃度が1.5%を越える区域への送電停止が義務づけられているが、本質安全防爆構造の電気機器はこの適用から除外されている。このため本質安全回路構成による機器はその利用範囲も広く、かつ有用性はきわめて拡大される。

本質安全回路のメタン点火限界値についてコンデンサ容量値と最小点火電圧値との関係で明らかになっているのはJIS C-0901¹⁾に示されている通り300V程度までである。

本論文では電気機器を本質安全防爆構造とみなしうるか否かの判

断基準とされるJIS C-0901の限界曲線の拡張に係わる基礎資料を得るため、広い電圧範囲におけるコンデンサ容量値と最小点火電圧値との関係および評価指標としての放電エネルギーについて論ずる。

2. 実験装置および方法

Fig. 1は実験構成の概略を示す。著者らは以前に間欠回路（放電時は電源を切り離す）の報告⁴⁾をしたが、本実験ではDC電源を接続したままの接続回路で点火試験を行った。実験はコンデンサC、充電抵抗R1、放電抵抗R2および閉回路放電抵抗R3の組合せによりR1-C、R1-R2-C、R1-R2-R3-Cの各回路について検討した。電源電圧値の設定は真空スイッチSを電圧計M側

V:DC-source C:Capacitor S:Switch M:Voltmeter
A:SW-controller R1:Charge resistor R2,R3:Discharge resistor T:Explosion tester G:CH₄ gas feeder
B:Memory recorder D:Voltmeter E:Explosion detector
F:Spark detector L:Light source m:Lens K:High-speed camera

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

* 1993年7月14日受付 10月28日受理 資源・素材学会北海道支部平成5年度春季講演会にて一部発表（平成5年6月14日）

1. 正会員 資源環境技術総合研究所北海道石炭鉱山技術試験センター
キーワード：本質安全，容量，放電エネルギー，最小点火電圧

Fig. 2 Explosion testers of 3 types.

に切替えて行った。点火試験は真空スイッチを回路側にし、点火試験装置Tでの放電を開始した。

放電現象の観測は点火試験装置の爆発検知E、フォトセンサFによる火花発生を観測、放電抵抗による短絡時間および短絡電流などをメモリーレコーダにより記録を行った。また、火花の持続時間およびメタンフレームの観測は光源Lと集光レンズmを用いたシュリーレン法³⁾と高速カメラの組合せで行った。

Fig. 2は点火試験装置の概略を示す。IEC型の装置はその仕様限界のために約400Vの電圧まで使用した。この装置は直径0.2mmのタングステン電極A4本とカドミウム円板電極Bからなり、その双方とも回転し両電極間に開閉火花が発生する。電極の回転数は1分間に80回である。改良型の装置は耐電圧を高く保てるように改良したもので約400Vから1.5kVまでの電圧範囲で使用した。この装置は直径0.2mmのタングステン固定電極とカドミウム円板電極からなり、両電極間に開閉火花が発生する。電極の回転数は1分間に42回である。針状放電型の装置は電圧が約1.5kV以上の場合に使用した。この装置は両電極とも固定で直径0.2mmのタングステン電極と銅針状電極Cからなり、電極間の絶縁破壊により火花を発生する。これら3装置のガスチャンバDの内容積は300mlである。

実験方法は電源電圧、コンデンサ容量、各抵抗、点火試験装置の電極などの設定を行った後、点火試験装置のガスチャンバに8.5±0.5 vol%のメタン-空気混合ガスを入れて、電極の回転による開閉火花、または、電極間の絶縁破壊による放電火花を発生させて点火試験を行った。はじめに、チャンバ内のメタンに点火するような電圧値で点火試験を行い、その電圧値を徐々に小さくして火花発生回数が1,200回でメタンに点火しなくなったときの電圧値をメタン最小点火電圧 V_m とし、回路条件を変えて点火試験を繰返し行った。

3. 実験結果および考察

3・1 間欠(C)回路と抵抗容量連続(R1-C)回路の V_m 比較

3種類のコンデンサを用い充電抵抗R1とメタン最小点火電圧 V_m の関係をFig. 3に示す。各コンデンサ容量における間欠回路のメタン最小点火電圧値は先に筆者らが報告した値⁴⁾を図中に記した。図の横軸は充電抵抗値を示し、縦軸はメタン最小点火電圧値を示す。

図から間欠回路と連続回路の最小点火電圧値を比較すると、各容量値においてR1の小さい方で間欠回路より連続回路のメタン最小点火電圧が低く示された。

充電抵抗と最小点火電圧の関係については容量が1 μ Fの場合は充電抵抗が0.5k Ω 以下では電源からのエネルギーが点火に寄与して

Fig. 3 The effect of R1 on minimum ignition voltage for R1-C circuit.

おり、それ以上の値では最小点火電圧値が一定(80V)になり電源の寄与がなくなること示している。容量が1,400pFの場合では充電抵抗が0.5M Ω 以下では電源の寄与を受け、その後一定(1.6kV)となる。容量が11pFの場合では充電抵抗1G Ω 以上でも電源の寄与を受け最小点火電圧は上昇した。

点火試験装置の使用電圧境界部では改良型と針状型との最小点火電圧は双方ともに充電抵抗との関係は同様の傾向を示し、改良型の方が僅かに点火しやすいことが分かった。

以上のように、充電抵抗をある値以上にすると間欠回路と連続回路のメタン最小点火電圧がほぼ同じになる。このように電源からのエネルギーを無視できる、おおよその充電抵抗値はJIS C-0901および池田ら⁵⁾が示している電圧-電流限界曲線から求められる値であることが分かった。つまり、電源からのエネルギーを無視できるためには電圧-電流の関係でメタンに点火しない範囲の充電抵抗を選択すべきである。充電抵抗値がこの限界値以下の値のものを接続すると電源からのエネルギーが供給され最小点火電圧は低くなるのは上記実験結果から明らかである。

3・2 抵抗バリアの影響

バリアとして放電抵抗を挿入したR1-R2-C回路の抵抗と最小点火電圧の関係をFig. 4に示す。試験装置は改良型を用い容量は1,400pFである。

図は、放電抵抗値を大きくするに伴って各充電抵抗における最小点火電圧が増大する傾向を示している。また、電源からのエネルギーの影響については各々充電抵抗が0.5M Ω 以下では点火に寄与を受けている。充電抵抗0.5M Ω 以上の場合には放電抵抗が10k Ω 以下で

Fig. 4 The effect of R1 and R2 on minimum ignition voltage for R1-R2-C circuit.

Table 1 The effect of resistors R1, R2, R3 on minimum ignition voltage (V_m) for R1-R2-R3-C circuit.

C	R1	R2	R3	V_m
1 μ F	500 Ω	100 Ω	500 Ω	160 V
1 μ F	500 Ω	100 Ω	1000 Ω	140 V
1 μ F	500 Ω	1000 Ω	1000 Ω	200 V
1 μ F	500 Ω	1000 Ω	5000 Ω	145 V
1 μ F	500 Ω	1000 Ω	10000 Ω	125 V
1400 pF	1 M Ω	100 Ω	5 M Ω	3400 V
1400 pF	1 M Ω	100 Ω	10 M Ω	3200 V
11 pF	100 M Ω	1000 Ω	50 M Ω	11500 V
11 pF	100 M Ω	1000 Ω	100 M Ω	7500 V

は最小点火電圧が一定となり電源は寄与していない。10k Ω 以上では電圧も高くなり電源の影響を受ける傾向にある。全体としては放電抵抗の値を大きくすると最小点火電圧は上昇しメタンに対する安全範囲が広がる効果を示している。

さらにバリヤとして閉回路放電抵抗R3を挿入したR1-R2-R3-C回路の最小点火電圧値をTable 1に示す。

容量1 μ Fにおいて充電抵抗および放電抵抗を一定とし閉回路放電抵抗を小さくすると最小点火電圧は上昇する。容量1,400pFおよび11pFにおいても同様の結果であった。

以上のことから、バリヤとして放電抵抗を用いると安全範囲が拡大し、有効であることが明らかになった。

3・3 放電時間の測定

容量による放電エネルギーを調べるのに、点火試験装置の火花持続時間および回路の電流持続時間の検討を行った。

火花持続時間の観測はシュリーレン法と高速度カメラの組合せにより放電火花の撮影を行った。その瞬間写真をFig. 5 (a)に示す。この写真は1コマ20 μ secで回路条件はR1-C回路でコンデンサ容量1 μ F、電圧80Vでありメタン最小点火電圧を求めた条件である。この写真の進行順序は左上から下に、左下から2列目下へ、そして上へと流れている。この写真から火花の確認は3列目の1コマと4～5列目の3コマである。後者の3コマから火花放電時間は40 μ sec以上60 μ sec以下であることが判明した。同一条件で繰り返し観測したデータから求めた火花持続時間の平均値は約50 μ secであった。

Fig. 5 (b)火花発生からメタン点火、フレイムの拡大する過程の瞬間写真である。回路条件は容量100 μ F、電圧45Vである。これは

(a) 20 μ sec interval R1-C circuit 1 μ F 80V

(b) 640 μ sec interval R1-C circuit 100 μ F 45V

Fig. 5 High-speed schlieren photographs of spark (a) and methane flame (b) for R1-C circuit.

Fig. 6 The current transition wave at ignition for R1-R2-C circuit.

撮影条件上点火確率が100%で行った。そのため、目的である最小点火電圧での点火時間の測定はできなかったが、メタンの燃焼過程の様子がうかがえる。これは興味深いことだが本論と離れるので別の機会に検討したい。

電流持続時間の測定は点火試験装置のメタン爆発の圧力をトリガとし、放電火花をフォトダイオードで検知し、放電電流の波形を放電抵抗の両端で測定した。そのデータをFig. 6に示す。回路条件

は R1-R2-C 回路でコンデンサ容量 $300\mu\text{F}$ 、電圧 16V である。この波形からメタン点火時の電流持続時間は $50\mu\text{sec}$ 程度であることが分かり、瞬間写真の観測とほぼ同じ持続時間であることが判明した。

3・4 蓄積および放電エネルギーの検討

コンデンサの蓄積エネルギー W_C は充電抵抗と容量との R1-C 回路から得られたメタン最小点火電圧 V_m を用い次式により時間を ∞ とし求めた。

$$\begin{aligned} W_C &= \int V_C \cdot i_1 \cdot dt \\ &= \int V_m \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{CR_1} \cdot t\right) \right\} V_m / R_1 \cdot \exp\left(-\frac{1}{CR_1} \cdot t\right) \cdot dt \\ &= \frac{C \cdot V_m^2}{2} \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

ただし、 W_C : コンデンサの蓄積エネルギー (J)

V_C : 充電電圧 (V)

i_1 : 充電電流 (A)

t : 充電開始からの時間 (sec)

C : コンデンサ容量値 (F)

V_m : メタン最小点火電圧 (V)

このように充電時間を ∞ としたときのコンデンサの蓄積エネルギーは充電抵抗値に関係なく容量値と最小点火電圧値で決まる。

点火試験装置への放電エネルギー W_T は容量と電源からエネルギーが供給され次式になる。

$$\begin{aligned} W_T &= \int V_C \cdot i_2 \cdot dt \\ &= \int V_m \cdot \left\{ \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{R_1 + R_2}{CR_1 R_2} \cdot t\right) \right) \right. \\ &\quad \left. + \exp\left(-\frac{R_1 + R_2}{CR_1 R_2} \cdot t\right) \right\} \cdot i_2 \cdot dt \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

ただし、 W_T : 放電エネルギー (J)

V_C : t 秒後の容量の電圧 (V)

i_2 : R_2 を流れる電流 (A)

t : 放電開始からの時間 (sec)

次に容量のみによる放電特性の検討を行った。間欠回路において実験で求めたメタン最小点火電圧と容量の関係から容量別の放電電流と放電時間の関係を Fig. 7 に示す。容量回路の放電電流は次式により求めた。

$$i_C = \frac{V_m}{R_2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{CR_2} \cdot t\right) \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 i_C : 容量により R_2 を流れる電流 (A)

R_2 : 線路抵抗を 1Ω とした

Fig. 7 から容量値が $10\mu\text{F}$ では $50\mu\text{sec}$ で放電電流がほぼ零になるのに対して、 $1,000\mu\text{F}$ では $100\mu\text{sec}$ 後も 25A の電流を流しうることが分かる。このように、容量値が小さいと短時間に蓄積エネルギー

Fig. 7 Variation of discharge current with time at V_m for R1-C circuit.

Fig. 8 The effect of C on ignition energy for capacitive-resistive circuit.

のすべてを放出しているのに対し、容量値が大きくなると蓄積エネルギーのすべてを放出するのに長い時間を必要としている。

3・5 蓄積および放電エネルギーの計算

R1-C 回路において蓄積エネルギーは(1)式により、放電エネルギーは放電時間を $50\mu\text{sec}$ とし(2)式により、各容量値に対して各々のメタン最小点火電圧値から計算により求めたもので、これらの結果を Fig. 8 に示す。各メタン最小点火電圧値を求めたときの充電抵抗は先に述べた通り、電源からエネルギー的影響を受けないような値を用い、放電抵抗値は線路抵抗として 1Ω を用いた。

Fig. 8 から、容量値 11pF から $10\mu\text{F}$ までは蓄積エネルギーより放電エネルギーが僅かに大きいと両者はほぼ一致しており、蓄積エネルギーはほぼすべてが点火に寄与していることが分かる。最も小さい容量値 11pF のエネルギーは 0.37mJ であり、約 $0.01\mu\text{F}$ までエネルギーは上昇する。容量値 $0.01 \sim 10\mu\text{F}$ 間では両エネルギーともに約 3.5mJ とほぼ一定であった。

容量値 $10\mu\text{F}$ 以上では蓄積エネルギーは放電エネルギーよりも大きな値になる。この原因は蓄積エネルギーは容量の持つ全エネルギーを示しており、放電エネルギーのように火花の持続する時間的要素が考慮されないためである。放電エネルギーは容量が大きくなるに従い徐々に上昇し、 $1,000\mu\text{F}$ で約 10mJ を示した。

容量値が $0.01\mu\text{F}$ 以下および $10\mu\text{F}$ 以上で各エネルギーが変動する原因は、容量値が小さくなると最小点火電圧が高くなり放電初期の短時間に大電流が流れ点火効率が良くなる、また、容量値が大きくなると最小点火電圧が低くなり放電初期電流が小さいため点火効率が低下することが考えられる。

Fig. 8 に示す曲線から簡易的な放電エネルギーを実験式で容量値別に示すと次のようになる。

$$W_L = 0.149 \cdot C_L^{0.380} \dots\dots\dots(4)$$

W_L : $10 \sim 4,000\text{pF}$ 間の点火エネルギー (mJ)

C_L : $10 \sim 4,000\text{pF}$ 間の容量値 (pF)

$$W_M = 3.468 \dots\dots\dots(5)$$

W_M : $4,000\text{pF} \sim 3\mu\text{F}$ 間の点火エネルギー (mJ)

$$W_H = 2.778 \cdot C_H^{0.202} \dots\dots\dots(6)$$

W_H : $3 \sim 1,000\mu\text{F}$ 間の点火エネルギー (mJ)

C_H : $3 \sim 1,000\mu\text{F}$ 間の容量値 (μF)

このように広範囲の各容量値に対するメタン点火の指標となる放電エネルギーの概略値を容易に求められることが明らかになった。

3・6 放電エネルギーを用いた計算例

3・6・1 連続回路と間欠回路の放電エネルギー 放電エネルギーを求める(2)式を用い、R1-C 回路について充電抵抗による放電エネルギーの変化を Fig. 9 に示す。図には間欠回路の放電エネルギーも示してある。回路条件は容量値 $1\mu\text{F}$ 、電圧 80V 、線路抵抗 (R_2) 1Ω である。

Fig. 9 The effect of R_1 on discharge energy for R_1 -C circuit.

Fig. 9 から、間欠回路の放電エネルギーは充電抵抗に関係なく 3.287 mJ と一定である。連続回路の放電エネルギーは充電抵抗が 10 Ω で 6.2 mJ, 100 Ω で 3.36 mJ, 1,000 Ω で 3.29 mJ と充電抵抗を大きくすると徐々に低下し、間欠回路の放電エネルギーに近づき、電源によるエネルギーの影響を受けなくなる。このことは Fig. 3 の 1 μ F における充電抵抗とメタン最小点火電圧の関係と良く一致している。

3・6・2 R_1 -C 回路における最小点火電圧の計算例 前項の式(4), (5), (6)より求めた各容量値別の放電エネルギーを指標とし(1)および(2)式を用いてメタン最小点火電圧を計算し実験値とともに Table 2 に示す。なお、計算では線路抵抗(R_2) 1 Ω を用いた。

Table 2 から、容量値 11 pF から 30 μ F までは蓄積および放電エネルギーの式から計算した最小点火電圧は実験値との差が約 1~3 % で両者とも良く一致していることが明らかである。容量値 100 μ F 以上では蓄積エネルギーの式で計算した最小点火電圧は、エネルギー値に放電エネルギーを用いたため実験値より小さくなっている。当然だが放電エネルギーの式で計算した最小点火電圧値は実験値と良く一致している。

3・6・3 R_1 - R_2 -C および R_1 - R_2 - R_3 -C 回路における最小点火電圧の計算例 R_1 - R_2 -C 回路について(2)式を用い、最小点火電圧を計算した結果、1 μ F の場合 R_1 =100 Ω , R_2 =100 Ω の条件では実験値が 100 V, 計算値が 98 V とほぼ一致する。1,400 pF の場合、Fig. 4 に示す R_2 =100 k Ω の条件では R_1 =100 k Ω で実験値が 1,700 V, 計算値が 2,220 V, R_1 =500 k Ω で実験値が 2,300 V, 計算値が 2,250 V, R_1 =1 M Ω で実験値が 2,700 V, 計算値が 2,250 V であり、条件により一致するもの、しないものが混在した。

Table 2 Calculated and by-test values of minimum ignition voltage for R_1 - R_2 -C circuit.

C F	V_m by test. V	W by cal. mJ	by formula 1 V	by formula 2 V
11 p	8100	0.37	8200	8100
1400 p	1800	2.34	1830	1810
0.1 μ	270	3.47	263	261
0.3 μ	150	3.47	152	151
1 μ	80	3.47	83	82
3 μ	45	3.47	48	47
10 μ	27	4.42	30	29
30 μ	20	5.52	19	19
100 μ	16	7.04	12	15
300 μ	14	8.79	8	14
1000 μ	14	11.2	5	15

11 pF の場合は R_1 =100 M Ω , R_2 =1,000 Ω の条件で実験値は 4,800 V, 計算値は 8,150 V となり実験値が低い値を示し、他の条件でも同様の傾向を示した。

R_1 - R_2 - R_3 -C 回路については(2)式中の V_m を R_1 と R_3 分圧とし、 R_2 には R_2 と R_3 の合成抵抗値を用い計算した。実験値は Table 1 の通りである。実験値と計算値が最も近いのは容量値 1 μ F, R_1 =500 Ω , R_2 =100 Ω , R_3 =1,000 Ω , の条件で実験値が 140 V, 計算値が 165 V で実験値が低い値を示した。他も実験値がすべて低い値を示し、その比は 1.5 から 2 倍の範囲であった。

以上のことから、放電エネルギーを指標としメタン最小点火電圧を求める場合、放電抵抗が小さければ Fig. 8 の放電エネルギーと(2)式を用いることにより回路条件が決まれば広範囲の容量におけるメタンに対する最小点火電圧を容易に計算できることが明らかになった。しかし、放電抵抗が入った回路で容量値が 1 μ F 以下、電圧値で 100 V 以上の範囲になると実験値と計算値の離隔は徐々に大きくなる。この原因としては回路に存在する浮遊容量および抵抗に含まれるインダクタンス(実測値 0.3~1 mH)などが影響していると考えられる。特に高電圧、大電流になると僅かなインダクタンスでもメタン点火に大きな影響を及ぼす。インダクタンスを含めた広い範囲の L - R -C 回路の検討は今後の課題である。

4. む す び

広い電圧範囲の容量回路について、その本質安全防爆性評価のために、メタンに対する点火試験を行い、メタン最小点火電圧値を求める、さらにメタン点火に必要な放電エネルギーについて検討を行った。その結果、次の事項が明らかとなった。

- (1) 連続容量回路は条件により間欠回路よりメタンに点火しやすい。
- (2) 放電抵抗および閉回路放電抵抗の挿入によりメタン最小点火電圧を上昇させ安全範囲を拡大することが可能である。
- (3) 高速カメラでの撮影および放電波形の測定による放電火花観測の結果、火花持続時間は約 50 μ sec であることが分かった。
- (4) 時間要素を含めた容量の放電特性から各容量値におけるメタン点火に必要な放電エネルギーが明らかになった。
- (5) 広範囲の容量値に対してメタン最小点火電圧値を容易に計算できることを明らかにした。
- (6) 計算より求めたメタン最小点火電圧値と実験値は良く一致することが判明した。

以上の結果から、広範囲における容量回路の本質安全防爆性の基礎資料として利用される可能性が大きいと考えるが、本質安全防爆機器は可能な限り低い電圧で使用されることが望ましく、高電圧範囲においては本報告の実験データを含め、まだ多くの検討を重ね、より精度の高いデータが必要と考える。

謝辞 本研究の高速写真撮影を行うにあたり資源環境技術総合研究所安全工学部、勝山室長、野田研究員、和田研究員および(株)ナック安藤課長に多大な御協力を賜ったことに深甚なる感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) JIS C 0901: 炭鉱用電気機器の防爆構造 (1983)
- 2) 通商産業省立地公害局: 石炭鉱山保安規則, 平安 4 年改訂版, 白亜書房
- 3) 倉谷・土屋: 衝撃波の化学物理, 第 3 版, p. 91-92, (1978), 裳華房
- 4) 羽田・高橋・木山: 高電圧領域におけるメタンの点火限界, 安全工学, Vol. 28, p. 139-144, (1989)
- 5) 池田・中川: 高電圧領域におけるメタンの着火限界, 安全工学, Vol. 27, p. 268-273, (1988)