低圧直流誘導回路における電気火花の水素ガスへの点火

電気課　田　中　隆　二

The Ignition of Hydrogen-Air Mixtures By Inductive-Break Sparks in Low Voltage d.c. Circuits

by R. TANAKA

The results of these experiment, with low-voltage d.c. circuits including air-cored inductances in which the current was interrupted by the separation of tungsten wires and a cadmium disc, are given showing the relationships of minimum igniting current to inductances and circuit voltages, together with the effect of shunt linear resistances or a shunt nonlinear resistance on the minimum igniting current. Measurements were also made of the effect of the resistance of the inductance coil which was shunted by a given value of resistor on the minimum igniting current.

1. 緒　言

昭和30年10月に，「工場電気設備防爆指針」が当所の技術指針として制定されて以来，これが当時わが国における唯一の工場防爆電気設備に対する基準として関係者の注目を受け，その後この指針に則って関係法規の一部改正も行なわれて，現在では多くの工場用防爆電気機器の開発，使用が一般化するに至っている。

わが国で現在，電気機器の防爆構造として工場用のものに適用しうるものには下記の5種類があり，これ以外の構造は認められていない。

a）耐圧防爆構造
b）内圧防爆構造
c）油入防爆構造
d）安全増防爆構造
e）特殊防爆構造

以上のうち，a），b），c）は通常の動作中にガスへの点火源となりうる電気火花や高熱を発生する電気機器を主な対象として適用され，通常はそのようなおそれのない機器類には，安全性は前記のものには劣ってはいるが，経済的に安価に製作しうるd）を採用することが多い。e）はa）～d）以外の防爆構造で，電気機器による爆発性ガスへの引火を防止できることを，試験その他によって確認された構造と定義されている。現状ではa）～d）によって製作される場合が大部分で，e）によるものはきわめて少ないといってよい。

一方，爆発危険のおそれのある化学工場などのプロセス工業において，技術革新に伴ない各種工程のオートメーション化が進展するにつれて，温度，圧力，濃度などの計測や制御を電気的に行なう場合がかなり多くなり，このとき検出器，トランスジューサー，制御回路などの防爆構造をいかなる種類のものにすべきかが問題となってくる。すなわち，上記のa）～d）までの防爆構造とすると，機器の動作に影響があって使命を達成することができなくなる場合，または非常に経済的負担が増大し，実際上製作がきわめて困難になる場合が少なくない。しかしながら，幸いにも，一般に計測，制御等に使用される電圧，電流の大きさは，トランジスタをはじめとする各種半導体製品の開発により，低い値となっており，したがって回路の消費エネルギも小さいので，そこで発生する電気火花がもはや爆発性ガスへ点火する能力を有しなくなるのではないかということが推定される。もしもこの限界が明確に表わされるとすれば，安全で安価な防爆構造となしうることができる。このような防爆構造が実現できれば，これは特殊防爆構造に属するものといえよう。国際的には以上のような防爆構造を本質安全防

爆構造 (Intrinsically Safe Electrical Apparatus) と呼び，独立した防爆構造として取り扱っているが，わが国では未だこのような防爆構造に対する認識も十分ではないとはいえこのような電気機器類は個々に試験してその防爆性能の有無を決定することになっており，したがって現状では特殊防爆構造として取り扱っている。

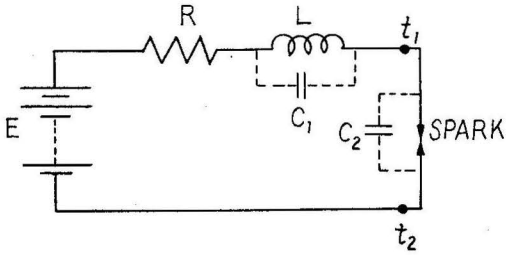
本質安全な機器，回路を設計するにあたっては，まず電気火花のガスへの点火性に関した基礎的研究が必要であるが，従来わが国で発表されているこの種の文献[1)~9)]は主としてメタンガスを主な対象としたもので，これ以外に一般の化学工場などで使用されている多くの危険なガス蒸気によるものはほとんど発表されていない。また，英国をはじめとする諸外国の文献も必ずしも満足すべき資料が見出されない。そこで筆者は，爆発性ガスの中でも二硫化炭素に次いで電気火花により点火されやすいといわれている水素ガスを使用し，低圧直流誘導回路のしゃ断火花による点火限界について若干の実験を行なったので，この結果について報告する。

2. 低圧直流誘導回路の開閉火花特性

電気回路の開閉火花については，これまで多くの研究がなされているが，与えられた回路についていかなるタイプの火花が発するかを的確に予言するまでには至っていない。また，これらの火花が爆発性ガスに点火する機構についても，例えば電極の Quenching effect などが定量的に明らかにされていないため未だ十分に知られてはいない。しかし，各国における研究のテンポも高まっているので，これらの事項も近い将来は解明されるものと考えられる。

さて，本質安全な電気回路で発生する電気火花の形式はいわゆる自続放電ではあるが，過渡的な火花である。誘導回路の開離の際には一般に放電時間が 100μsec程度のグロー放電およびアーク放電となる[11)]が，回路の浮遊容量が影響する場合には，さらに振動的放電(Oscillatory discharge) を伴なうのが普通である。

Fig. 1. Circuit diagram.



いま図1に示すような低圧直流誘導回路を開いてアーク放電が発生する場合について考察してみる。電極間に発生するアークの端子電圧を V_a とすると，つぎの式が成立する。

$$E=Ri+L\frac{di}{dt}+V_a \qquad (1)$$

V_a はアーク電流の大きさのほか，電極構造，電極材料，電極の開離速度などによって異なるとされているので，i の時間的変化は簡単には求められない。しかし，一般にはアークの長さが時間とともに大きくなるので V_a もそれに伴ない増加するものとみなすことができる。

(1)式からアークエネルギ W_a はつぎのように与えられる。

$$\begin{aligned} W_a &= \int_0^T V_a i\, dt \\ &= \int_0^T \left(E-Ri-L\frac{di}{dt}\right) i\, dt \\ &= \int_0^T (E-Ri)\, i dt - \int_{I_0}^0 Lidi \\ &= \int_0^T (E-Ri)\, i dt + \frac{1}{2}LI_0^2 \qquad (2) \end{aligned}$$

ただし，　T：アーク継続時間

I_0：電極開離前の回路電流 $\left(=\frac{E}{R}\right)$

すなわち，アークエネルギは回路を開く前にインダクタンスの中に蓄積されていた電磁エネルギ $\frac{1}{2}LI_0^2$ と，電源から供給されるエネルギ $\int_0^T (E-Ri)\, idt$ との和となる。$\int_0^T (E-Ri)\, idt$ は，アーク継続時間Tが大きいほど大きくなるが，逆にアーク電圧 V_a がきわめて大きくなるような電極を使用して T を小さくすれば O に近づく。しかし，いずれにしてもアークが発生すると，少なくとも $\frac{1}{2}LI_0^2$ のエネルギが放出される。

以上はアーク放電のみの発生を仮定したが，実際にはつぎのような放電となることが多い[11)]。

回路がしゃ断される前の回路電流 I_0 が，アーク放電に必要な最小電流 Imin より大きい場合には，回路しゃ断の瞬間にアーク放電が発生する。このときインダクタンス内に蓄えられたエネルギが全部消費されてしまったときに，なお $\frac{E-V_a}{R}>I_{min}$ の関係が保たれていると，電極間隔の増大によって V_a が増加し，$\frac{E-V_a}{R}=I_{min}$ に至るまでアーク放電が継続し，それ以後はアークが消える。しかし，$\frac{1}{2}LI_0^2$ の消費が終る前に $\frac{E-V_a}{R}=I_{min}$ の関係が成立すると，発生したアークはその時点で消滅するが未だインダクタンスに残っているエネルギは，図1に示した浮遊容量C_1およびC_2を充電するために使用される。このとき開離中の電極間電位差が浮遊容量の充電

により高くなり，電極間の絶縁破壊電圧をこえると，ここで浮遊容量が放電する。通常このときの電圧は約 300 Vである。このような現象が何回となく繰り返されて振動的放電となり，それとともに電磁エネルギが失なわれ，遂には電極間隔が十分大きくなって放電が停止する。

放電が止んでもなお電磁エネルギが残留している場合には回路の振動を生じ，またはグロー放電を生ずることがあるが，いずれも電磁エネルギの消費が一層増大して消滅する。

もしも $I_0 < I_{min}$ であるならばアーク放電を生ずることができず，直ちに上記のような振動的放電となる。

以上は回路を開く場合であるが，回路を閉ぢる場合には電極間隔が十分に小さくなって，その間の電界が強くなり絶縁破壊を生ずる。しかし，実際には電極が接触してしまうので放電が直ちに止む。また電極表面上の突起部が最初の接触により過熱溶融し，再び電極間に突隙ができて放電を起すこともあるが，電流の増加がインダクタンスによって抑制されるので電極の接触が早くて放電が起りにくいと考えられる。

3. 低圧直流誘導回路の点火電流の限界に関する実験

3.1 実験装置

図1 に示した低圧直流誘導回路に図2のような火花発生装置を挿入し，電源電圧の大きさをパラメーターとして，水素ガスに点火した場合の最小点火電流と回路インダクタンスとの関係を測定した。

Fig. 2. Schematic layout for experimental equipment.

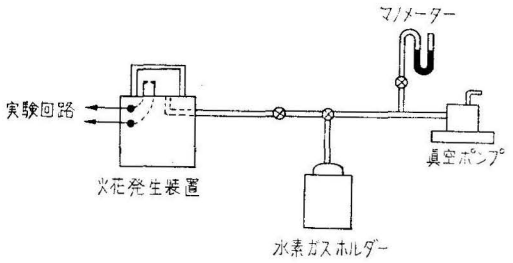


Table 1. Air-cored inductances used

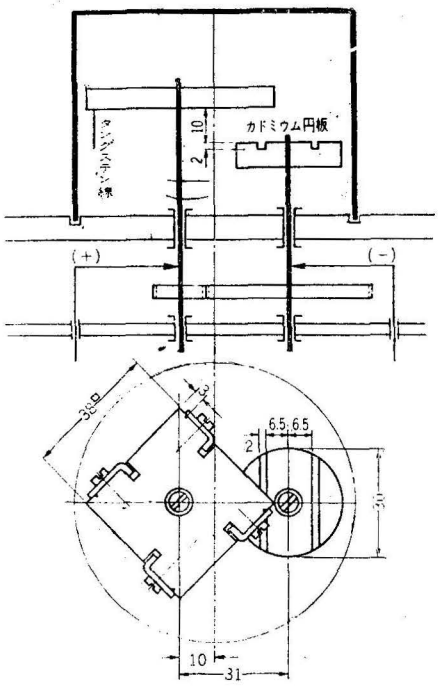
インダクタンス (1,000c/sにて)	コイルの直流抵抗(Ω)
0.1 mH	0.1
3 mH	0.5
30 mH	7
95 mH	23
1 H	250
10 H	2,500

(1) 電気回路　実験回路は図1の構成で，電源Eには鉛蓄電池を使用し，パラメーターとする電圧の大きさを 6 12, 24, 48, 72および96Vとした。インダクタンスLはいずれも空心コイルを使用し，**表1**に示すようなものである。Rは電流制限用の摺動またはダイヤル形抵抗器で無誘導形のものである。

(2) 使用ガス　市販のボンベ入り水素に空気を混合させて使用した。混合比は，水素—空気混合ガスのうちで電気火花による点火性が最も高いといわれている濃度18～24%（体積比）[12]のうち，22±1%の濃度のものについて実験した。混合ガスの温度は室温とし，圧力も大気圧に等しい状態で行なった。また混合ガスについては除湿などの特別な考慮を払わなかった。

(3) 火花発生装置　電気火花のガスへの点火性は，火花発生装置の電極の特性に依存することが大きいことは従来のメタンによる実験結果からも明らかにされているところである。ここでは，現在ドイツにおいて使用され，

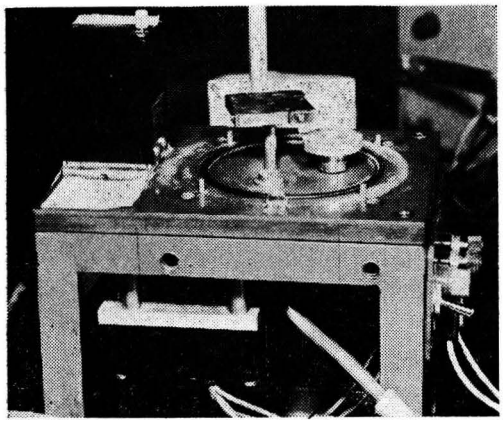
Fig. 3. Construction details of Schnellunterbrecker.



また1964年のＩＥＣにおける本質安全防爆機器専門委員会（ＳＣ　31G）において提案されている火花発生装置(Schnellunterbrecker)を使用した。Schnellunterbreckerの構造[14]は**図3**に概要を示したように，約250cm³の内容積をもつ爆発容器（プラスチックカバー）の中に，開閉電極としてのタングステン線（直径 0.2mm）とカドミウム円板が置かれ，この容器の中に混合ガスが送入され

る。カドミウム円板には図に見るごとく2本の浅い溝がつけられており，タングステン線がカドミウム円板面をこすりながら開閉火花を発するようになっている。タングステン線は4本あり，その自由長さは11mmで，正方形の金属板の角にそれぞれ1本ずつ取り付けられている。金属板は中心の駆動軸によって80r.p.m. の速さで回転する。一方カドミウム円板はギアによって駆動軸と反対の向きに回転する。この回転の速さは駆動軸の速さの $^{12}/_{50}$ になっている。この火花発生装置を直流回路に接続するには，タングステン線を電源の正極側とし，カドミウム円板を負極側になるようにする。**図**4は電極部分の写真である。

Fig. 4. Electrodes view of Schnellunterbrecker.



3.2 実験方法

電気火花のガスへの点火の実験においては，同一回路条件においても，測定値のバラツキが大きくなったり，または実験の再現性が得にくくなることがしばしば起ってくる。これは火花の発生部分，つまり電極構造の微細な変形，摩耗などがかなり影響するからである。そこで一般には実験の前後において，標準回路で火花を発生させ，所定のガスに点火することをもって，電極の状態が標準の感度に保たれていることを確認し，実験値を採用することにしている。

この実験では，95mHの空心インダクタンス，電流制限用無誘導抵抗および24Vの直流電源を含む直列回路に，35mAの電流を流しつつ Schnellunterbrecker により開閉火花を発生させたとき，1,000回の開離にて，少なくとも1回は 3.1の(2)にのべた水素—空気混合ガスに点火するような場合に電極状態が正常に維持されているものとした。もし感度が低下したと思われるときには，電極，なかでもタングステン線の取り替え，調整，清掃などにより，上記の感度を得るようにした。

図2において，真空ポンプを使用して Schnellunterbrecker の電極挿入部分の真空度が約10mmHg 以上に達したのち，水銀シール形簡易ガスホルダーから所定の濃度の水素ガスを送入し，開閉火花を発生させた。

以上の手順のあとに最小点火電流を測定した。最小点火電流の決定はつぎの方法によった。すなわち，与えられた回路条件において，回路に電流を通じながら火花を発生させ，ガスに点火した場合には電流値を約5～10%ずつ減少させた。こうして 1,000回の連続開離火花を生ぜしめても1度もガスに点火しない最高電流値 (I_m) とその直前に点火した電流の最低値(I_ℓ) とを測定し，I_m と I_ℓ との平均値をもって最小点火電流と呼ぶことにした。

I_m および I_ℓ を決定するにあたっては，同一回路条件で実験を数回繰り返し，それらのうちで最小の値を採用した。

3.3 実験結果

表2に電源電圧別の実験結果を示した。**図**5はそれらを対数目盛上に描いたものであるが，図5の場合は最小点火電流値によりプロットしてある。

Table 2. Least current for ignition and maximum current for non-ignition in low voltage d. c. inductive circuit.

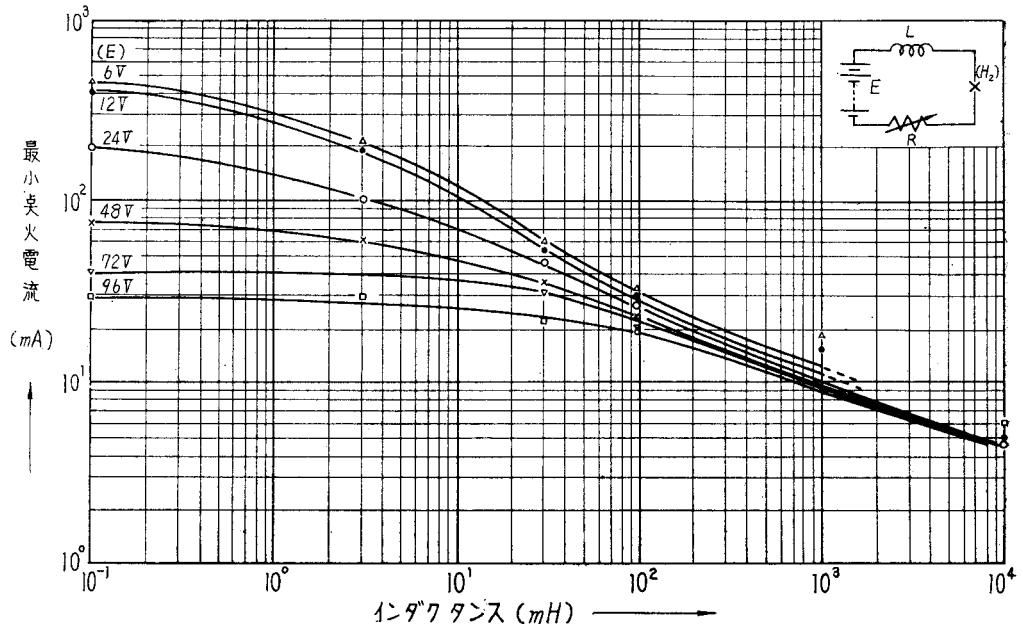
試験ガス：水素-空気混合ガス(濃度21±1%；体積比)
火花発生装置：Schnellunterbrecker

電源電圧	I \ L	0.1mH	3mH	30mH	95mH	1 H	10H
96V	I_ℓ(mA)	30	30	23	20	15	6.2
	I_m(mA)	28	28	22	19	14	6.0
72V	I_ℓ(mA)	42	30	32	21	15	5.8
	I_m(mA)	40	28	30	20	14	5.6
48V	I_ℓ(mA)	78	63	38	24	15	5.0
	I_m(mA)	74	61	36	22	14	4.8
24V	I_ℓ(mA)	203	103	48	28	15	4.6
	I_m(mA)	193	98	46	26	14	4.4
12V	I_ℓ(mA)	420	186	54	31	17	5.0
	I_m(mA)	400	180	52	30	16	4.8
6V	I_ℓ(mA)	470	220	62	34	20	–
	I_m(mA)	450	210	60	32	18	–

I_ℓ＝点火した最小電流値
I_m＝点火しなかった最大電流値

図5から明らかなように，この実験の範囲においては一般に電源電圧が大きいほど最小点火電流が小さくなり

Fig. 5. Relation of minimum igniting current to air-cored inductance.



危険である。しかし，回路のインダクタンスが 100mH 程度以上の場合は電圧の大きさの差はほとんど最小点火電流に影響しなくなる。インダクタンスがそれより小さくなるにつれて電圧の差が現われてくる。これらの結果は過去に行なわれたメタンガスに対する実験結果とほぼ同様な傾向である。

3.3 考　察

インダクタンスが大きい範囲では，最小点火電流 I とインダクタンス L との間にほぼつぎの関係が成立している。

$LI^n = K$ (n, k は定数)

インダクタンスが小さくなり，最小点火電流が大きくなるとこの関係から外れてくるが，その外れる領域は回路の電圧が高いほど大きなインダクタンスのところから始まっている。とくに48V以上の場合にはインダクタンスが約10mH 以下になると，最小点火電流が一定値に近づき，もはやインダクタンスの値にほとんど関係しなくなり，電圧の大きさで決定される傾向が見受けられる。

このようなことの理由としてはつぎのように考えることができる。アーク放電を生ずるには，（電圧）－（電流）－（アーク長）の三者の複雑な関係がある時間満足されていなければならず，一般にアークを維持する電圧はアーク電流が減少し，またはアーク長が大きくなるほど高くなる必要がある。高インピーダンス回路で電流値が小さければ，電圧が大きくならないとアーク発生の要件が満足されない。このような電圧は回路のインダクタンスから得られるのみであり，高インダクタンスで小電流の条件では電源電圧の大きさは点火に対して重要な意義を持つてこない。しかしインダクタンスが小さくなると，そのインピーダンスが減少して大きな電流を通じうるようになり，インダクタンスの両端に誘起する電圧にはほとんど関係なく放電条件が満足されるようになる。このような状態はまた電源電圧が大きいほど早く到達するのである。

$LI^n \fallingdotseq K$ がほぼ成立するインダクタンスの範囲について，$\frac{1}{2}LI^2$ の値を計算してみると**表3**のとおりとなる。

Table 3. Calculated values of $\frac{1}{2}LI_\ell^2$

E(v) \ L	3 mH	30mH	95mH	1 H
96	–	0.008	0.019	0.113
72	–	0.015	0.021	0.113
48	–	0.022	0.027	0.113
24	0.002	0.035	0.037	0.113
12	0.009	0.044	0.046	0.145
6	0.011	0.058	0.055	0.200

ここでは I として，前記の I_ℓ の値を採用した。表3によれば，同一インダクタンスの場合（10Hの場合はデーターのバラツキが大きいので除外する）には，電源電圧が高くなるほど $\frac{1}{2}LI^2$ の値が小さくなっている。つまり，水素一空気混合ガスの最小点火エネルギが一定であると仮定すると，このエネルギの中で占める $\frac{1}{2}LI^2$ の比率は

電圧が低い場合ほど大きいことがわかる。逆に電圧が高いほど $\frac{1}{2}LI^2$ が小さくなり，この分だけ最小点火エネルギの中に占める電源からの供給エネルギ分が増加していることを示しているといえよう。

また同一電源電圧の場合について検討すると，インダクタンスの増加とともに $\frac{1}{2}LI^2$ の値も増加する傾向がある。

4. 点火電流の限界に及ぼす安全素子に関する二，三の実験

前節で述べたような誘導回路の発する火花のガスへの点火能力を抑制するため，回路のインダクタンスに並列に直線抵抗または非直線抵抗を接続し，点火電流の限界を求めた。このような方法は古くからリレー接点の保護のための火花消去回路として実用化されているが，ここでは火花消去の目的があくまで火花のガスへの点火防止という観点に立っている。したがって，接点保護の目的からは十分な火花消去回路となっていても，それが必ずしもガスへの点火防止に必要な火花消去回路とはならないことは注意すべきであろう。そこでここでは，このような目的のために使用する火花消去回路要素を，安全素子と呼ぶことにする。安全素子には直線抵抗，非直線抵抗のほかに，半波整流器，コンデンサ，短絡巻線など各種のものがあるが，この実験では前三者の場合についてのみその効果を調べたものである。

4.1 実験装置および実験方法

実験装置および方法は，電気回路として図1のLに並列に無誘導形の直線抵抗または非直線抵抗を接続したことを除けば，前節と全く同様である。直線抵抗には巻線形抵抗器を使用し，非直線抵抗には外径 15mm，厚さ 1.5mmのディスク形のもので，連続定格 0.72W，制限電源電圧45Vという仕様のもの1個を接続して使用した。

4.2 実験結果および考察

表4および**表5**に結果を示す。**図 6〜9** は表の値を曲線に描いたものである。

Table 4. Least current for ignition and maximum current for non-ignition with shunt linear resistance across the inductance.

試験ガス：水素—空気混合ガス（濃度21±1％；体積比）
火花発生装置：Schnellunterbrecker.

並列抵抗値	電源電圧	L / I(mA)	0.1 mH	3 mH	30 mH	95 mH	1 H	10 H
500Ω	48V	I_ℓ	80	71	56(57)	52(54)	34(51)	(78)
		I_m	76	68	53(54)	50(51)	32(49)	(74)
	24V	I_ℓ	200	128	79(80)	60(62)	56(84)	–
		I_m	190	124	75(76)	58(60)	53(80)	–
	12V	I_ℓ	–	240	119(120)	96(100)	–	–
		I_m	–	220	113(114)	92(96)	–	–
1,000Ω	48V	I_ℓ	–	70	48	42(43)	34(42)	(60)
		I_m	–	67	46	40(41)	32(40)	(67)
	24V	I_ℓ	–	126	71	49(50)	42(52)	–
		I_m	–	122	69	47(48)	40(50)	–
	12V	I_ℓ	–	210	96	69(70)	–	–
		I_m	–	200	90	67(68)	–	–
2,000Ω	48V	I_ℓ	–	–	42	37	28(31)	–
		I_m	–	–	40	35	26(29)	–
	24V	I_ℓ	–	126	61	44	29(33)	–

並列抵抗値	電源電圧	L / I(mA)	0.1 mH	3 mH	30 mH	95 mH	1 H	10 H
2,000Ω	24V	I_m	–	122	59	42	28(31)	–
	12V	I_ℓ	–	–	76	49	39(44)	–
		I_m	–	–	72	47	37(42)	–
4,000Ω	48V	I_ℓ	–	–	–	29	21(22)	–
		I_m	–	–	–	27	20(21)	–
	24V	I_ℓ	–	126	55	39	26(28)	–
		I_m	–	122	53	37	25(26)	–
	12V	I_ℓ	–	–	66	44	32(34)	–
		I_m	–	–	64	42	30(32)	–
8,000Ω	48V	I_ℓ	–	–	–	27	18(19)	(22)
		I_m	–	–	–	25	17(18)	(21)
	24V	I_ℓ	–	–	54	33	25(26)	–
		I_m	–	–	52	31	23(24)	–
	12V	I_ℓ	–	–	62	38	25(26)	–
		I_m	–	–	60	36	23(24)	–
20KΩ	48V	I_ℓ	–	–	–	24	17	(17)
		I_m	–	–	–	23	16	(16)
	24V	I_ℓ	–	–	48	28	19	–
		I_m	–	–	46	26	18	–
	12V	I_ℓ	–	–	58	32	19	–
		I_m	–	–	55	30	18	–

（注） I_ℓ＝点火した最小電流値
I_m＝点火しなかった最大電流値 } いずれもインダクタンスを流れる電流；括弧内は電源を流れる電流値

Table 5. Least current for ignition and maximum current for non-ignition with shunt non-linear resistance across the inductance.

試験ガス：水素—空気混合ガス（濃度21±1％体積比），火花発生装置：Schnellunterbrecker, 非直線抵抗：C—5型シリスター

電源電圧	L / I(mA)	0.1mH	3mH	30mH	95mH	1 H	10H	電源電圧	L / I(mA)	0.1mH	3mH	30mH	95mH	1 H	10H
96V	I_ℓ	30	30	27.2	24	14.8	(34)	24V	I_ℓ	260	140	54	33	26	–
	I_m	28	28	26	22	13	(32)		I_m	250	136	52	31	24	–
72V	I_ℓ	40	42	37	26	20	(40)	12V	I_ℓ	540	200	64	44	28	–
	I_m	38	40	35	24	19	(38)		I_m	500	190	62	42	26	–
48V	I_ℓ	76	76	42	30	24	–	6V	I_ℓ	–	220	68	44	–	–
	I_m	74	72	41	28	22	–		I_m	–	210	66	42	–	–

（注） I_ℓ＝点火した最小電流値
I_m＝点火しなかった最大電流値 } いずれもインダクタンスを流れる電流
括弧内は電源を流れる電流値

Fig. 6. Effect of shunt linear and non-linear resistances on minimum igniting current. (1)

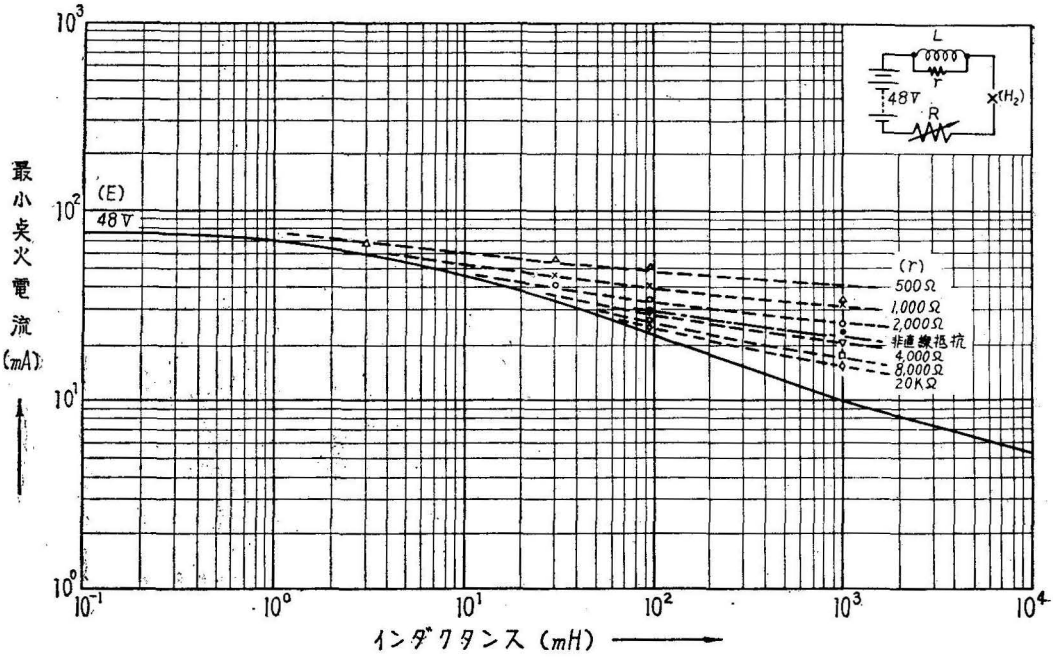


Fig. 7. Effect of shunt linear and non-linear resistances on minimum igniting current. (2)

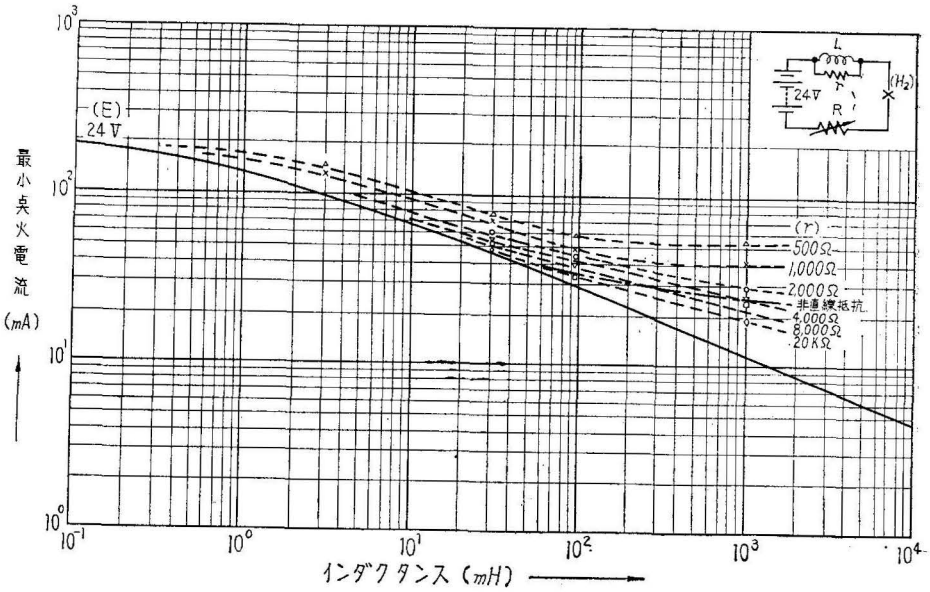


Fig. 8. Effect of shunt linear and non-linear resistances on minimum igniting current. (3)

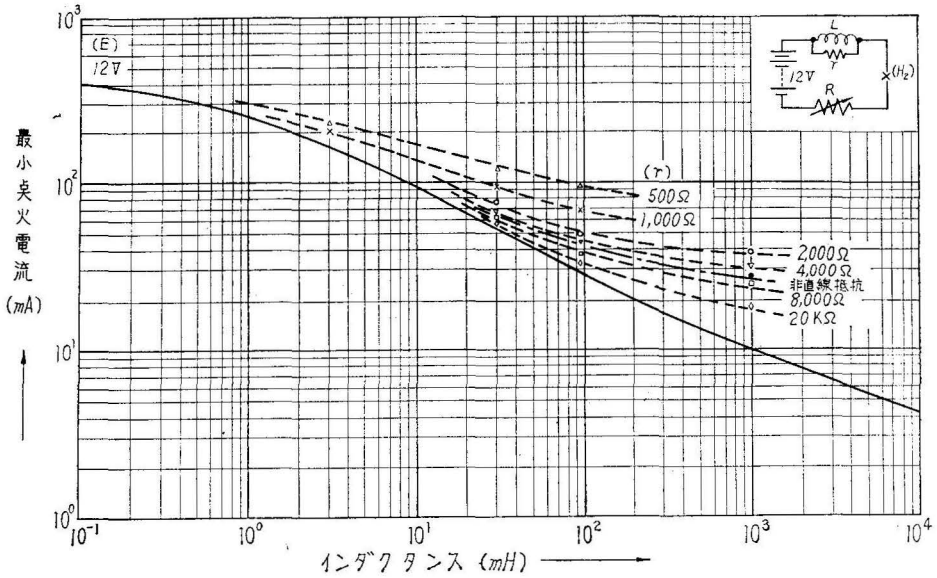
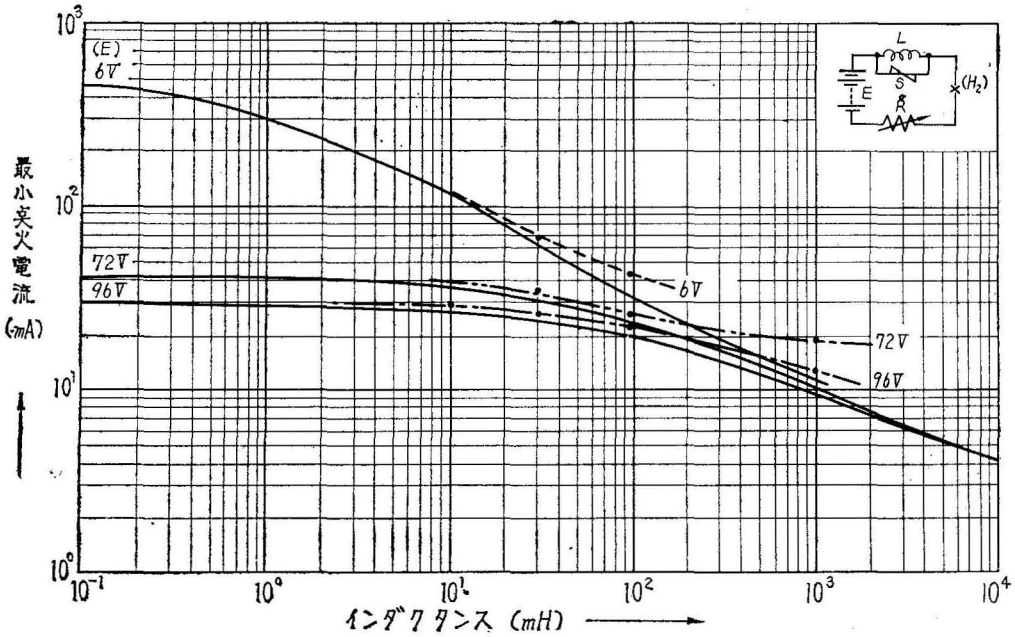


Fig. 9. Effect of shunt non-linear resistances on minimum igniting current.



直線抵抗を並列に接続した場合は，電源電圧が48V（図6），24V（図7）および12V（図8）について実験したが，非直線抵抗の場合は96V～ 6Vまでの 6段階について試み，このうち48V，24V，12Vの場合はおのおの図6，図7および図8に直線抵抗の場合と併せて図示してあるが，96V，72Vおよび6Vの場合はまとめて図9に示した。

図 6，図 7および図 8から明らかなように，直線抵抗を接続した場合でも，インダクタンスLと最小点火電流との間には $LI^n=K$ の関係式が成立する部分が多い。これは Allsop 氏ら[15]のメタンによる実験結果とやはり類似した結果である。実験を行なった電圧48V，24Vおよび

12Vの場合には，約10～100mHのインダクタンスの範囲から並列直線抵抗の効果が現われ始め，それ以上のインダクタンスになるとかなり大きな効果として現われる。一般には並列抵抗値が小さくなるほど，インダクタンスに蓄えられているエネルギが，抵抗とインダクタンスコイルとのループ回路で消費され，火花のエネルギを小さくするので，安全素子としての効果が高くなる。

インダクタンスが小さくなるともはや $\frac{1}{2}LI^2$ のエネルギが火花のエネルギに寄与する割合が無視されるようになるので，並列抵抗を接続しない場合の曲線に近づいてゆく。

つぎに非直線抵抗を接続した場合に得られた曲線は，約4,000Ωの直線抵抗の場合と同程度の安全素子効果を示している。これは非直線抵抗の電圧一電流特性，つまり $I=\beta V^{\alpha}$（β, α は定数で，通常 $1<\alpha<6$ である）から，回路しゃ断時のインダクタンスコイルの端子電圧に依存する非直線抵抗の抵抗値が，直線抵抗の約4,000Ωに相当する値になっていたものと推定される。したがって，非直線抵抗の特性，その他電極の開離特性などによって直線抵抗に相当する値は異なるものとみなされる。非直線抵電は常時は回路に接続されていてもほとんど電力を消費しない利点がある。

5. 直線抵抗で分路されたインダクタンスコイル直流抵抗の点火電流の限界に及ぼす実験

前節4の実験において，点火を生じたときにインダクタンスに流れていた電流値を最小点火電流として採用すると，約10Hのインダクタンスの場合には表4の括弧内に示したように，それより小さなインダクタンスの場合よりかえって電流値が増大する傾向がある。これはおそらくインダクタンスの直流抵抗の大きさが関係しているものと考えられたので，図10の左上に示すような回路によりコイルの抵抗の大きさの影響について一部の実験を行なった。

Fig. 10. Effect of resistance of air-cored inductance shunted by a resistor on minimum igniting current.

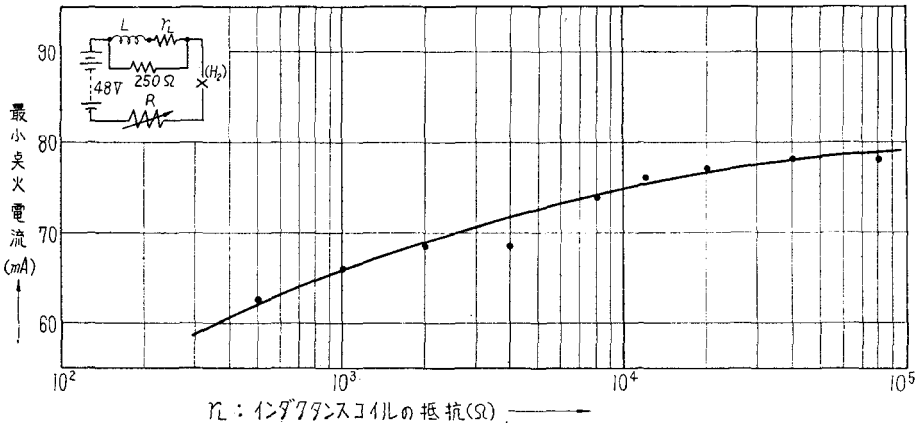


図10の r_L は，表1のコイルの抵抗と外部挿入抵抗との和であり，最小点火電流には回路しゃ断点における電流をとってある。図10の結果から明らかなように，コイルの直流抵抗の増加は，最小点火電流の増加となって示されている。これはコイル抵抗の増加によりインダクタンスに流れる電流分が減少し，したがって $\frac{1}{2}LI^2$ のエネルギも減少するので，これを補償するために大きな電流を通じなければならなくなるからと考えられる。

6. 結　言

水素ガスを使用して低圧直流誘導回路における最小点火電流を Schnellunterbrecker を使用して求めた。また安全素子として，直線抵抗および非直線抵抗を接続した場合の点火限界に及ぼす効果を測定した。さらに，直線抵抗をコイルに分路接続した場合のコイル抵抗の大小が点火電流に及ぼす影響を調べた。

以上の諸結果は，今後本質安全防爆構造の電気機器，回路を設計する人々にとって最も基本的な資料として役立つものと信じている。また，本実験は水素ガスを対象として行なったものであるが，水素以外のガスを対象とする場合の参考資料としても活用してもらえれば幸いである。

参　考　文　献

1）鳥山，斎藤：可燃性ガスの著火に就いて（電学誌，vol. 62, No. 648；昭17）

2) 鳥山，斎藤：メタンガスの点火現象に就いて（電学誌，vol. 63，No. 654；昭18）
3) 鳥山，斎藤，斎藤：接点の火花によるメタンガスの点火に就いて（電学誌，vol. 63，No. 660；昭18）
4) 黒沢，池田：爆発瓦斯の点火源としての電気火花の範囲(一)，(二)（札幌石炭坑爆発予防試験所報告；昭18）
5) 斎藤，江村：高周波工学応用機器の坑内使用について（資源技術試験所北海道支所報告；昭29）
6) Allsop, G., Guenault, E. M. and Nicol, A. D. I.: Intrinsic Safety of Electical Apparatus (S.M.R.B. Paper No.104; 1946)
7) 江村，佐藤：高周波火花によるメタンガス着火（5）に同じ；昭30）
8) 斎藤：直流低電圧火花のメタン着火性について（北海道鉱学誌，vol. 14，No. 2；昭33）
9) 荒木，兼平：電気接点火花によるメタンガスの爆発について）九州鉱学誌，vol. 26，No. 8；昭33）
10) Blanc, M. V., Guest, P. G., von Elbe, G. and Lewis, B.: Ignition of Explosive Gas Mixtures by Electric Sparks (Third Symposium on Combusion and Flame and Explosion Phenomena; 1949)
11) Widginton, D. W.: The Ignition of Methane-Air Mixtures by Electrical Discharges (International Mining Congress Paper; 1963)
12) Guenault, E. M. and Atherton, E.: Intrinscally Safe Electrical Apparatus (E. R. A. Technical Report G/T 257; 1951)
13) I. E. C. Document, SC31G, RM865 (1964)
14) VDE 0171d/1.65
15) Allsop, G., Hartweel, F. J., Guenault, E. M., and Baker, A. R.: Intrinsic Safety of Electrical Apparatus (S. M. R. B. Paper No. 106; 1947)
16) 伏見：接点開離放電によるメタンガスの着火現象（I），（II），（III），（IV）（電試彙報 vol. 15，No. 12；vol. 17，No. 5；vol. 18，No. 1；vol. 18，No. 5）

（付　　録）

Schnellunterbrecker に対する意見

本実験はすべて火花発生装置としてＩＥＣからその特性の吟味を各国に要請されているドイツ国内委員会提案の Schnellunterbrecker を使用して行なったものであるが，本実験において使用した経験からその特性に関して若干の意見を述べてみたい。

電気火花のガスへの点火性能を調べるための火花発生装置としては，目的から二つに分けて考えることができる。すなわち研究用と試験用である。研究用としてはできる限り再現性のある火花を発生することが必要である。ここで再現性のある火花という意味は，例えばブラウン管にて火花電圧の波形を観測するとき，同一電気回路をしゃ断すると，常に同一波形として観測されるということである。これに対して試験用にはたとえ上記のような意味の再現性は悪くとも，感度が高く，単位時間当たりの火花発生回数が多いことが必要となろう。両者の共通事項としては，構造が簡単で電極の摩耗，変形が少ないこと，実際と類似した火花を発生することなどである。

以上の観点から Schnellunterbrecker の特性について見るとつぎのようになる。

(1) 火花の再現性　非常に複雑な火花を発生するので再現性が悪い。

(2) 感度　電極にはタングステンとカドミウムを使用しており，カドミウムは点火電流を小さくする材料の一つであり，またこれを直流電源の陰極側の端子に接続すると感度が高くなることは，筆者が英国留学中に行なったつぎの表の実験結果からも妥当であると考えられる。この場合の実験条件は，24Vの直流誘導回路で，メタン空気混合ガス（8.3% 体積比）を使用し，それぞれスズメッキした銅線数本(これを Wire brush と呼ぶ）の先端を，直径3mm前後のネジ（これを Screw と呼ぶ）または平板（Plate）の上にこすりつ

Effect of electrode materials and polarites on igniting current.

a） WIRE BRUSH (+) ON SCREW (−)

L (henry)	Cd		Steel		Brass		Al		Z_N	
	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)
14	0.015	0.014	0.020	0.019	0.023	0.021	0.017	0.016	0.018	0.016
0.095	0.140	0.130	0.210	0.200	0.200	0.180	0.150	0.140	0.160	0.150
86×10^{-6}	1.2	1.1	5.1	−	3.38	−	4.0	−	2.15	−

b) WIRE BRUSH (−) ON SCREW (+),

L (henry)	Cd		Steel		Brass		Al		Z_N	
	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)
14	0.023	0.022	0.035	0.034	0.038	0.036	0.180	0.160	−	−
0.095	0.300	0.290	0.250	0.240	0.300	0.290	0.200	0.190	−	−
86×10^{-6}	7.4	−	8.2	−	4.8	−	3.7	3.6	−	−

c) WIRE BRUSH (+) ON PLATE (−),

L (henry)	Cd		Steel		Brass		Al		Z_N	
	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)
14	0.056	−	0.160	0.150	0.030	0.028	0.028	0.027	0.032	−
0.095	0.320	0.300	0.360	0.340	0.240	0.220	0.340	0.320	0.280	0.270
86×10^{-6}	5.0	4.0	14.0	−	4.0	3.9	6.5	−	1.5	1.4

d) WIRE BRUSH (−) ON PLATE (+),

L (henry)	Cd		Steel		Brass		Al		Z_N	
	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)	I_ℓ(A)	I_m(A)
14	0.067	−	0.140	0.130	0.040	−	0.040	−	0.040	−
0.095	0.340	0.320	0.800	0.700	0.300	0.290	0.440	0.420	0.400	0.390
86×10^{-6}	15	14	14	12	14.8	−	7.3	−	4.7	−

けて行なったもので，同様な操作を幾回か繰り返して得られた点火電流値の最小を記載してある。

(3) 単位時間当たりの火花発生回数　これは毎分80回であり，実用的に十分である。

(4) 構造　非常に簡単であり，故障も起りにくい。

(5) 電極　使用材料も白金合金ではないので安価であるが，電極の摩耗，変形を受けやすい。

したがって，Schnellunterbrecker の特性を全般的に考えると，試験用として好ましい特性を具備しているように思われる。しかし，最小点電流値の決定のごとき研究用には差し支えないものと思われる。