

MAR. 1969

RIIS-RR-17-7

UDC 614.83 : 621.313/.39-213.34 : 537.527

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-17-7

加圧下のメタン-空気混合気中における本質
安全防爆電気回路の基礎的研究

田 中 隆 二

労働省産業安全研究所

MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

加圧下のメタン-空気混合気中における本質 安全防爆電気回路の基礎的研究

田 中 隆 二*

Basic Study of Intrinsically Safe Circuits for Methane-Air
Mixtures under Hyperbaric Pressure

Ryuji TANAKA*

The minimum ignition limits in low-voltage inductive, resistive and capacitive circuits are determined under hyperbaric methane-air mixtures using the IEC-type spark-producing apparatus.

In inductive circuits the minimum igniting current decreases with increase of the pressure and reaches the lowest value under a certain pressure each depending upon the circuit inductance, and after that the m. i. c. begins to increase with the pressure. Particularly with the circuit inductance of 1H, the m. i. c. in the range of pressure examined is shown to be larger than that under the atmospheric where the pressure exceeds 10 kg/cm² in gauge pressure.

In resistive circuits, the m. i. c. also decreases at first with increase of the pressure and the lowest value is attained under the atmospheres of some 4 kg/cm². Following that the m. i. c. increases with the pressure and gets into a region of "plateau" corresponding to supply voltage under the pressure of 10 kg/cm² or more.

The minimum igniting voltage of capacitive circuits, however, is shown to decrease monotonously with increasing the pressure, eventually arriving at a certain constant value corresponding to the capacitance, which is smaller than that under the atmospheric. The constant values seem to be attained again under the mixtures of 10 kg/cm² or more.

Finally, some problems are discussed on designing and testing intrinsically safe circuits under hyperbaric mixtures.

Showering discharge durations with the pressure under particular inductive circuit conditions are appended.

* 電気課 Electrical Section

1. 緒 言

一般に工場用、炭坑用を問わず、爆発危険場所で使用する防爆電気機器は、大気圧下の爆発性雰囲気中で動作しても点火源となりえないように設計・製作されていることはいうまでもなく、本質安全防爆構造の電気機器もこの例外ではない。すなわち、本質安全防爆構造は、その防爆原理上、回路で発生する放電火花が対象とする爆発性ガスに点火しないことが試験、その他によって確認された構造とされているが、これはあくまで常温および常圧（大気圧）下における爆発性ガスを意味している。

周知の通り、本質安全防爆構造の発達の歴史は、他の防爆構造に比較して国際的にも未だ新しく、わが国でも本格的に取り上げられるようになったのは、1965年版の工場電気設備防爆指針の中にその構造基準等が定められたのが最初である。最近では各国で本質安全防爆構造に関する研究活動も次第に活発化しており、関係基準の整備などが進められているが、最新の上記防爆指針（1967年修正Bを含む）でも、本質安全防爆構造の電気機器は他の防爆構造のものでは爆発防止技術上使用することが好ましくないところのいわゆる0種（危険）場所においても使用を許されており、将来益々適用分野の発展が予想されている。

「0種場所」とは、防爆指針の定義に従えば、「引火性液体の容器またはタンク内の液面上部の空間などの濃度が連続して爆発下限界以上となる場所（爆発上限界をこえる場合を含む）をいう」とされているが、この場合容器またはタンク内の液面上部の空間は、常圧であることが当然の条件として理解されている。

しかしながら、最近の急速な技術開発の現状に注目すると、生産活動の多くの分野において爆発性ガスを多種多量に使用しつつあることのほか、環境条件についても質的な変化が現われようとしていることに気が付くようになってきた。その一つの例として、常圧より高い圧力の下で作業をし、または加圧下の可燃性ガス中で電気機器を使用すべき事態に到達していることが具体的な事実として示されるようになってきた。たとえば、建設事業における潜函工事中の環境、加圧されたガスタンク内部、あるいは近い将来を約束されている海底作業地などである。ここに挙げたような人工環境などを特長づける共通の因子の一つは、そこが加

圧下にあるということであろう。本質安全防爆構造が常圧下の爆発性雰囲気中で計測、制御、通信などの電気回路の防爆構造化に種々の面で大きな役割を果たしているが、これがさらに“新しい”危険場所においてもその特長を生かすことができるならば、産業の発展を支える安全技術としてさらに一層の期待が寄せられる。

このような客観的情勢に対処し、本質安全防爆構造の原理を加圧下の爆発性雰囲気についても適用するには、従来常圧下の条件で求められていた放電火花のガス点火限界を基準にとることはできず、全く新たな実験に基づく点火限界が必要となる。しかるに、このような加圧下における爆発性雰囲気中における放電火花の点火限界として信頼できる報告は内外を通じてほとんど知られていない現状である。

筆者は、従来放電火花による常圧ガスの点火限界の測定に使用していたIEC形火花発生装置を、0～15気圧までの高気圧下においても使用できるように改良整備し、簡単な誘導回路、抵抗回路および容量回路の放電火花について、加圧下のメタン空気混合気に対する点火限界を求めて検討を加えるとともに、その結果から加圧下における雰囲気中における本質安全防爆電気回路の設計方針および試験方法についても若干の考察をした。以下これらについて報告し、関係者の御参考に供する次第である。

2. 実験設備と方法

2.1 設備の概要

常圧下における爆発性ガス点火の実験を、加圧下のそれに拡大するための実験技術上の基本方針は、放電火花の発生装置全体を加圧爆発性ガスと同じ気圧の空気または窒素で満たした密閉タンク内に入れて行なうことにある。これは主につぎの二つの理由に基づくものである。第一は、火花発生装置の爆発室内に加圧ガスを送給したとき、爆発室の内容積が比較的小さいため、電極回転用シャフトの貫通部を通じて爆発性ガスが漏洩して実験中に気圧の低下を招くおそれがあったこと、第二は、放電火花によって爆発を生じた場合に、爆発圧力の急上昇により、プラスチック製の爆発室チェンバーを破壊し、または電極回転用シャフトの貫通部に設けられた真空保持用のウィルソンシールを

損傷して爆発室の気密性を失なうおそれがあったこと、である。

しかるに、火花発生装置を加圧用タンクに入れ、タンク内を空気（または窒素）で満たし、その圧力を爆発室内の爆発性ガスの気圧と同圧に保つならば、見かけの上では常圧下における場合とほぼ同じ条件で実験を進めうることになるからである。ただ、爆発室内のガスに点火をして爆発を生じた場合の爆発圧力のピーク値は、常圧ガスの爆発圧力のピーク値に比べて格段の大きくなるので、これに対応した安全対策を講じておく必要がある。

以上の方針に基づいて、本実験で使用したガス系統図を示すと Fig. 1 のとおりである。配管は大部分が内径 4mm の銅管で、バルブ取付部には一部鉄管を使用している。

火花発生装置は、前述したように、Fig. 2 に構造の概略を示した IEC 形のものを採用した。これは筆者がこれまで同装置による常圧下の爆発性ガスの点火限界を求めた結果¹⁾と対比するためであり、また今後発

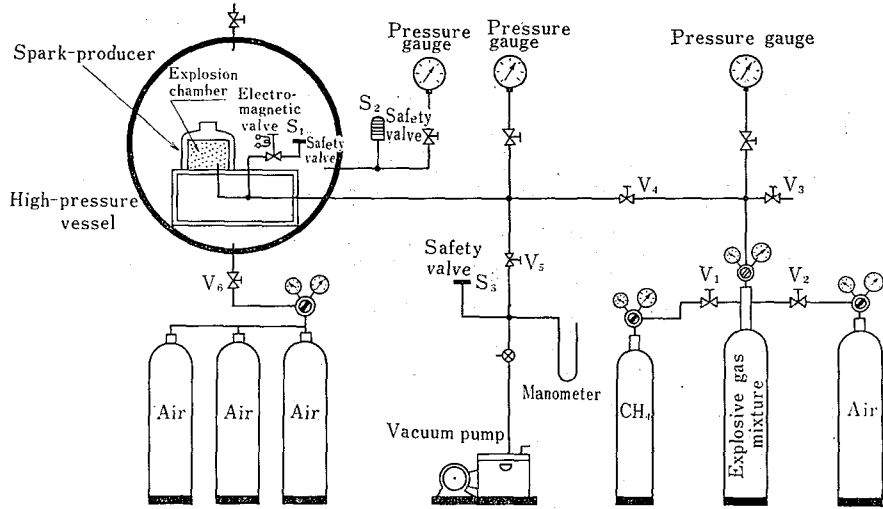


Fig. 1 Experimental layout for determining minimum igniting current under the hyperbaric methane/air mixtures.

加圧下の爆発性ガス点火実験装置ガス系統図

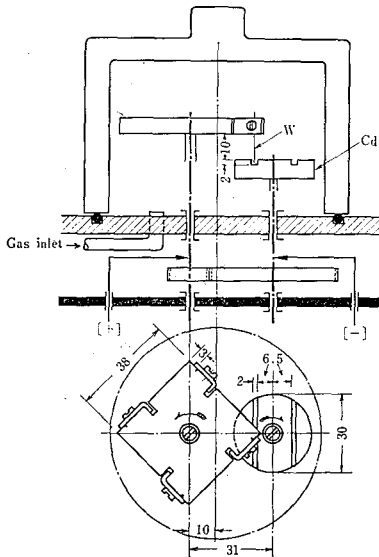
表が予想される同種の報告との比較も容易にしたためである。

なお、火花発生装置には Fig. 1 のガス系統図の中に示した位置に電磁弁を付けてあり、爆発性ガスを送入する場合にはこの電磁弁を閉じておき、電極が開閉動作をするときには開いて安全弁に通ずるようになっている。これにより、点火時の爆発圧力をタンク内の加圧空気（または窒素）中に安全に放散させるようにした。

高圧タンクは内径 80 cm、長さ約 170 cm の円筒形の鉄製耐圧容器（耐圧力 60 kg/cm²）で、一方の鏡板

は溶接されているが、これと相対する他の鏡板取付部に相当する部分には、急速開閉扉 (quick-release door)^{*)}があり、これを開くことにより、タンク内に設置した火花発生装置の電極の交換、調整、点検などが容易に行なわれる。

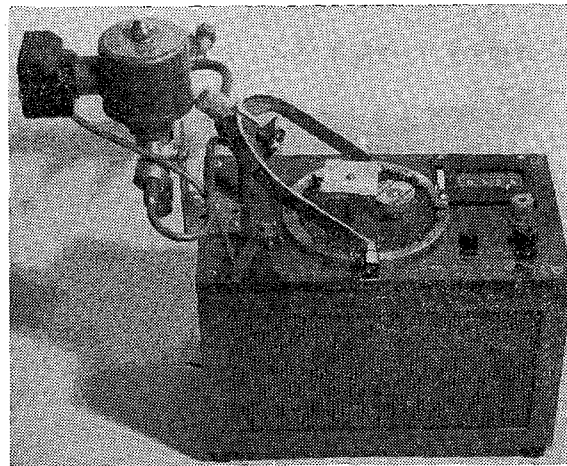
なお、高圧タンク



(a) Constructional details (in mm).

構造図

Fig. 2 IEC type spark-producing equipment. IEC 形火花発生装置



(b) Outside view

外観図

*) この種の実験では急速開閉扉の使用は実験能率を高める上で不可欠のものである。

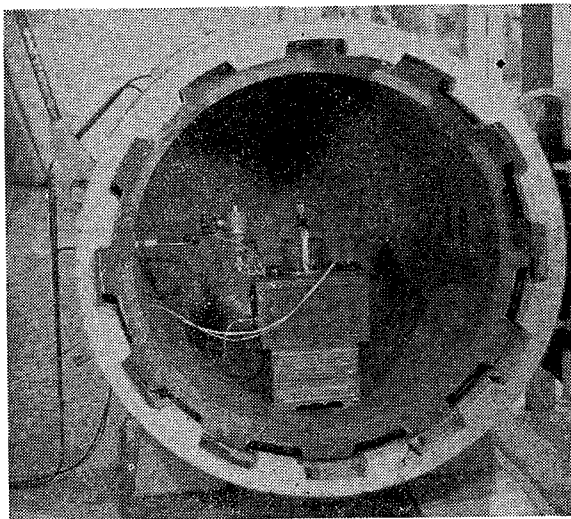


Fig. 3 Inside view of high-pressure vessel.
高圧タンク内部

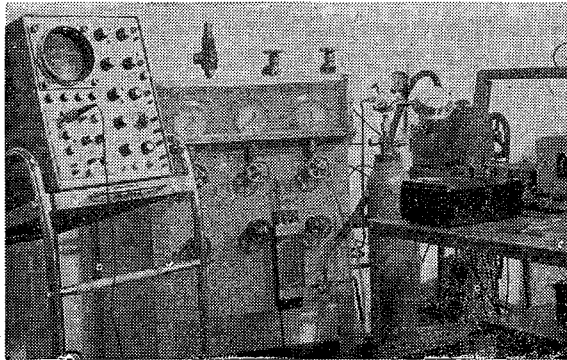


Fig. 4 Control panel of hyperbaric mixture flow.

バルブ操作盤

の上部と横部には観測用窓があり、加圧下における火花発生の状況などが観測できる。Fig.3 は高圧タンクの開閉扉を開いた場合の写真であり、Fig.4 はバルブ操作盤等を示したものである。

2.2 実験方法

火花発生装置の爆発室に所定の圧力の混合ガスを満たすにはつぎの順序による。

先づ、バルブ V_6 を開いてタンク内を所定の圧力まで空気で満たす。つぎに真空ポンプを動作させて、バルブ V_5 を開くと爆発室が排気される。その真空度を水銀マンローによって監視し、水銀柱の差がほとんどなくなった後にバルブ V_5 を閉じ、続いて素早くバルブ V_4 を開く。混合ガスは爆発室に導入されるが、その気圧は高圧タンクの空気の圧力より若干高くなるようにガス圧力調整器によって調整しておく。かくして

混合ガスの導入が終わってから V_4 を閉じ、その後に電磁弁を開くと、過剰圧力の混合ガスの一部が安全弁 S_1 を通じてタンク内へ放出されるので、爆発室内の混合ガス圧力は、高圧タンク内の所定圧力と均衡する。

ここで、火花発生装置の電極間に試験回路を接続して通電し、電極開閉用電動機を回転させれば、電極間に開閉火花が発生し、点火実験を行なうことができる。

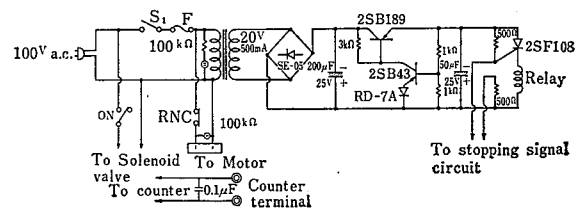


Fig. 5 Automatic stopping circuit of spark-producing equipment.

火花発生装置の点火時自動停止回路

火花によって加圧ガスに点火を生ずると、爆圧によって安全弁 S_1 が開き、この開放動作に連動させた自動停止回路 (Fig.5) が動作して、電極の開閉を停止する。また、これと同時に、爆発室用圧力計の指示値が、ガスの燃焼の結果、所定の圧力より低下するため、タンク外部から点火の生じたことが容易に判明する。

なお、圧力計はすべてブルドン管式圧力計で、0~20 kg/cm² の指示値を有し、最小目盛が 0.5 kg/cm² のものである。

2.3 実験回路と点火限界の決定法

火花発生装置の電極間に接続した供試電気回路は、いずれも本質安全防爆電気回路として基本的なものであり、Fig.6 に示したような直流電源 (鉛蓄電池) の簡単な回路である。

誘導回路におけるコイルは、インダクタンス L が 0.1 mH~1 H までの空心コイルで、同回路および抵抗回路における電流調整用抵抗は手製の無誘導形のものを使用した。

容量回路のコンデンサーは、キャパシティー C が 0.01~1 μ F までは標準空気コンデンサーを、10 および 100 μ F は市販のケミカルコンデンサーを使用した。

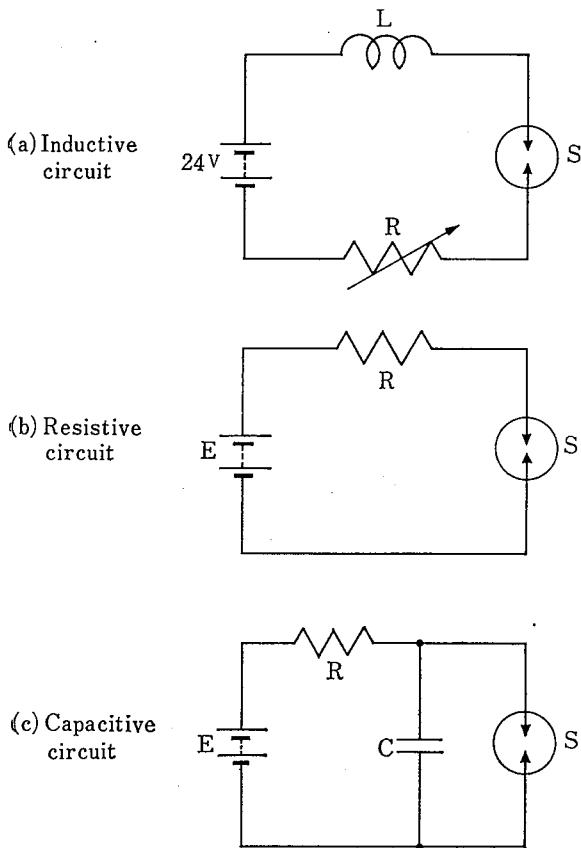


Fig. 6 Test circuits.
試験回路

点火限界の決定はつぎの方法による。すなわち、火花発生装置の爆発室内を所定の気圧の爆発性ガスで満たした後、電極間に試験回路を接続して、開閉火花を発生させる。連続 3,000 回以内の開閉動作の繰り返しによって点火を生じた場合、a) 誘導回路および抵抗回路については、他の条件はそのままにして、回路電流のみを約 5~10% 減少させ、また b) 容量回路については、他の条件は同じにして電源電圧 E のみを適宜減少させた。かくして、いずれの回路においても連続 3,000 回以上の回路開閉火花によって 1 回も高圧下のガスに点火を生じなくなる回路電流（誘導回路および抵抗回路の場合）の最高値 I_m または電源電圧（容量回路の場合）の最高値 E_m を求め、これらをその圧力における不点火の上限とし、それぞれ最高不点火電流 I_m または最高不点火電圧 E_m と呼ぶ。そして、 I_m または E_m の値より大きくて、連続 3,000 回以内の開閉火花によってガスの点火を生じた最低の点火電流 I_e または点火電圧 E_e をもって、点火の下限とし、それぞれ最低点火電流 I_e または最低点火電圧 E_e

と呼ぶ。

点火限界をグラフの上で表現する場合は、以下すべて I_e と I_m , または E_e と E_m の算術平均を用いてプロットしてある。

なお、容量回路の点火限界測定にあたっては、火花発生装置のタングステン線陽極の数を一部少なくして実験を行なった。その理由は、本来は 4 本のタングステン線を使用するのであるが、1 本のタングステン線がカドミウム陰極面を離れた瞬間から、そのつぎのタングステン線が陰極面に接触するまでの時間は約 60 ms であり、これに比べてコンデンサーの充電に要する時定数が大きすぎるおそれがあったからである。ちなみに、使用したコンデンサー容量 C および抵抗値 R を示すと Table 1 のとおりである。C が 1 μ F 以上の場合はタングステン線の数を相対する 2 本にして実験し、それ以外は 4 本を使用した。

Table 1 Circuit constants of capacitive circuits.
容量回路の定数

C (μ F)	R (k Ω)
0.05	50
0.1	50
0.2	50
0.3	50
1	50
10	4
100	0.3

3. 加圧下におけるメタン-空気混合気の放電火花による点火限界

3.1 最小点火限界濃度の測定

大気圧下におけるメタン-空気混合気を点火するに要するエネルギーが最小になるのは、その濃度が 8.3~8.5% (体積比、以下すべて同じ) であることはよく知られている事実である。これは、点火源としての火花を生ずる電気回路の種類のかんにかかわらず、またある程度は大気圧より低い気圧の場合でも変わらないことが実験的に確認されている。したがって、混合気の圧力が大気圧をこえる場合であっても、同様な値の濃度が最小点火限界濃度 (most easily ignitable concentration) となるであろうことは外挿法によってある程度は予測されるところである。

このことを確認する意味と、また以下の加圧下の点火実験において使用すべき混合ガスの濃度を決定するためにも、先ず最初に気圧の大きさと最小点火限界濃度の関係を求めておく必要がある。

ここでは、とりあえず Fig.6 (a) に示した誘導回路において、 $E=24V$ 、 $L=95mH$ とし、Break-flash No.3 Apparatus²⁾ を用いて最小点火電流と気圧の関係を求め、その結果から最小点火限界濃度を決定することにした。

混合ガスの気圧を $2kg/cm^2$ および $4kg/cm^2$ とした場合の測定例を Fig.7 に示す。この例から明らかなように、気圧が高い場合でも大気圧下の場合と同様に最小点火限界濃度の大きさは、ほぼ 8.5% 程度であることが確認できた。

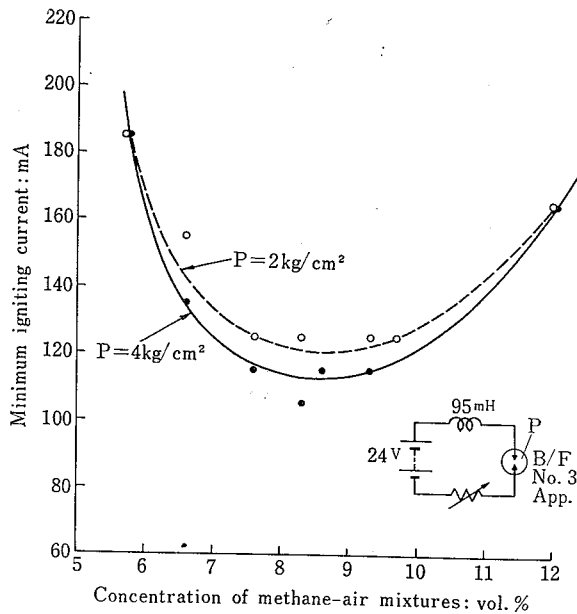


Fig. 7 Determination of most easily ignitable concentration for the mixtures.

加圧下の混合気における最小点火限界濃度測定例

大気圧下の場合、この濃度は火花発生装置の種類や特性に関係がないことが知られているので、本実験では火花発生装置として IEC 形を使用しても変わらないものとみなすことにした。

したがって、以下の実験ではすべての場合に、メタン空気混合気の濃度を 8.3~8.5% として行なった。

3.2 誘導回路における点火限界と気圧の関係

電源電圧 $E=24V$ とした場合の最小点火電流と気圧の関係を各インダクタンスについて測定した結果を

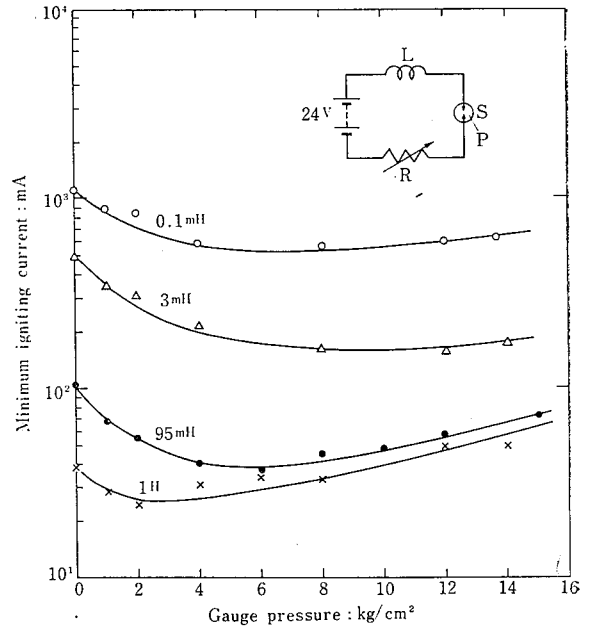


Fig. 8 Effect of pressure of the mixtures on minimum igniting current of inductive circuits.

誘導回路における混合気圧力の影響

Fig.8 に示す。

これらの曲線から明らかな一般的事実、混合気の気圧が常圧（ゲージ圧、 $P=0$ ）力から次第に高まってゆくと、最初は次第に点火限界が低下するが、ある気圧において最小点火電流が極小値に達し、引続いてさらに気圧を増加すると、逆に点火限界がゆっくりと上昇するようになることである。

これをさらに詳しく検討すると、 $L=1H$ の場合には点火限界が極小値に到達する気圧は割合に小さく、 $2kg/cm^2$ 付近であるが、それ以降は気圧の増加につれて点火限界の増加率がやや大きく、 $10kg/cm^2$ 程度になると、もはや常圧における点火限界と同様のレベルになり、これ以上気圧が高くなると、かえって常圧の場合よりも点火限界が高くなり、安全側になることは注目すべきである。また $L=95mH$ の場合には、気圧が $6kg/cm^2$ 付近で極小値を示し、これ以降はやはり気圧の増大とともに点火限界も高くなるが、その増加率は $1H$ の場合ほど大きくはない。しかし、 $L=3mH$ または $0.1mH$ のように、インダクタンスの大きさが比較的小さくなると、点火限界曲線が極小値を示す気圧の大きさも大きい方へ移るとともに、極小値である気圧の範囲が広まる傾向がある。また気圧の増大に伴う点火限界曲線の増加率は一層小さくなり、

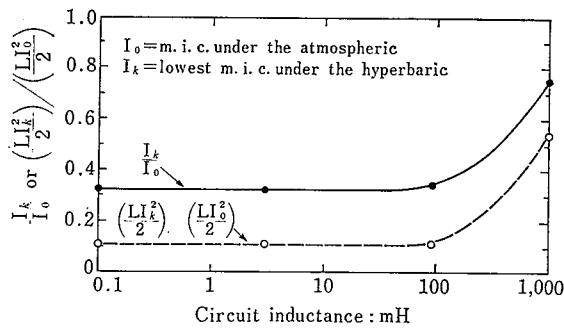


Fig. 9 Current ratio $\frac{I_k}{I_0}$ or energy ratio $\left(\frac{LI_k^2}{2}\right)/\left(\frac{LI_0^2}{2}\right)$ versus inductance.

誘導回路のインダクタンス対電流比 $\frac{I_k}{I_0}$
 またはエネルギー比 $\left(\frac{LI_k^2}{2}\right)/\left(\frac{LI_0^2}{2}\right)$ の関係

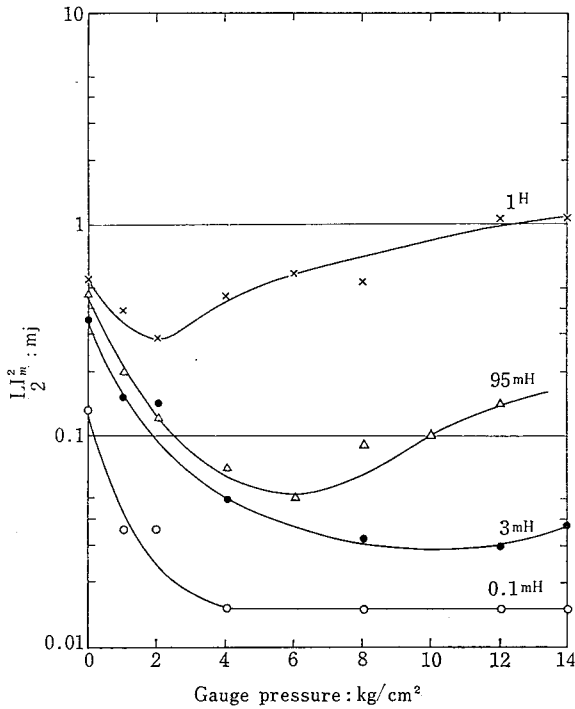


Fig. 10 Pressure of the mixtures versus $\frac{LI_m^2}{2}$ in inductive circuits (24V).

混合気圧力と誘導回路 (24V) の電磁エネルギー $\frac{LI_m^2}{2}$ との関係

次第に 0 に近づく傾向もある。これはインダクタンスが小さいために、次項で述べる抵抗回路の場合の点火限界特性に接近してゆくためと考えられる。

ここで常圧下における最小点火電流 I_0 と、ある気圧で極小値となる最小点火電流 I_k との比を、各イン

ダクタンス回路について求めてみると Fig. 9 のようになる。すなわち、0.1, 3 および 95mH の範囲では、加圧下における最小点火電流は、常圧下の場合に比べて約 1/3 まで低下しうるが、1H では 3/4 程度までしか低下しないことが明らかである。

一方、これを放電エネルギーの面から眺めるために、回路の開離前にインダクタンス L のコイルに蓄積

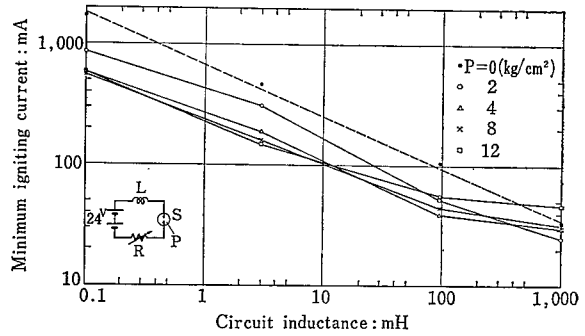


Fig. 11 Minimum igniting current of inductive circuits in the hyperbaric mixtures.

加圧下の混合気中における誘導回路の開閉火花による点火限界

されていた電磁エネルギー $LI_m^2/2$ がすべて放電エネルギーとして混合ガス中に放出され、これが 100% ガス点火に寄与したと仮定して図示してみると、Fig. 10 のようになる。これによると、インダクタンスが小さい場合に加圧下の点火エネルギーの低下が著しいことがわかる。常圧下のエネルギーに対する加圧下のエネルギー極小値の比を示すと、Fig. 9 のようになり、100 mH 以下では点火エネルギーが常圧に対してほぼ 1/10 に低下しうるが示されているが、1H では約 1/2 にしかならない。

ちなみに、圧力をパラメータとしたインダクタンス対最小点火電流曲線を描いてみると、Fig. 11 のように、両対数目盛上ほぼ直線となり、常圧の場合と同様な勾配をもった関係で結びつけられていることがわかる。

3.3 抵抗回路における点火限界と気圧の関係

電源電圧を 24~210V の範囲において測定した抵抗回路の最小点火電流と気圧の関係を Fig. 12 に示す。

この場合も前節と同じく、最初は気圧の上昇と共に点火限界が一般に低下し、気圧が 4kg/cm² 程度において極小値に達する (48V の場合は例外で、明らかな極小値が見出されなかった)。

以後は気圧の増大について最小点火電流も増加する。

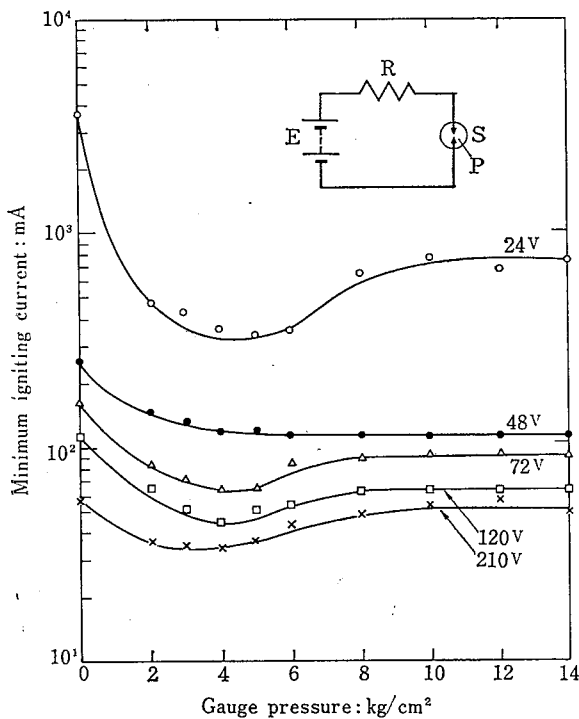


Fig. 12 Effect of pressure of the mixtures on minimum igniting current of resistive circuits.

抵抗回路における混合気圧力の影響

極小値に達するまでの最小点火電流曲線の横軸に対する幾何学的勾配は、24V の場合を除き、電源電圧の大きさにかかわらずほぼ同じであり、この勾配の値は、また誘導回路の場合の曲線の勾配とほとんど一致していることは甚だ興味深いことである。

しかしながら、極小値を過ぎた気圧の範囲では、最小点火電流が気圧と共に増大はするものの、10kg/cm² 程度の気圧で飽和値に達し、もはやそれ以上最小点火

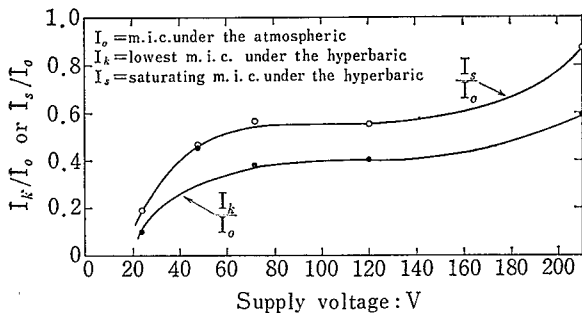


Fig. 13 Current ratio $\frac{I_k}{I_0}$ or $\frac{I_s}{I_0}$ versus supply voltage of resistive circuits.

抵抗回路の電源電圧と電流比 $\frac{I_k}{I_0}$ または $\frac{I_s}{I_0}$ の関係

電流が大きくなる点誘導回路と対比して異なる点である。しかも、これらの飽和電流値は、いずれもそれぞれの常圧下における最小点火電流よりも小さくなっている。

常圧下における最小点火電流に対する極小値および飽和値の比率を、各電源電圧について求めて示すと Fig. 13 になり、電圧が低いほどそれらの比が小さくて、圧力の影響を受けやすいといえることができる。

ちなみに、Fig. 12 を描き直して、電源電圧対最小点火電流の関係にしたものを、気圧が 0, 4 および

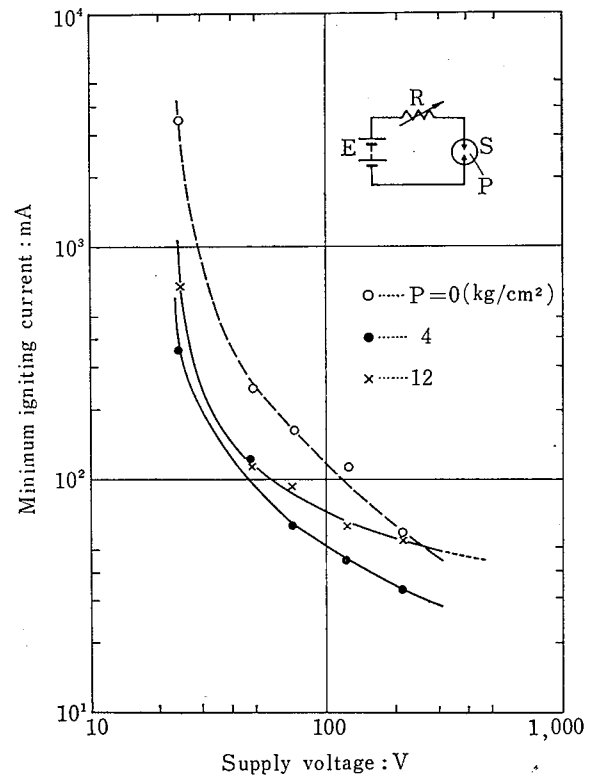


Fig. 14 Minimum igniting current of resistive circuits in the hyperbaric mixtures.

加圧下の混合気に対する抵抗回路の開閉火花による点火限界

12kg/cm² の場合についてのみ一部示すと Fig. 14 のようになる。気圧が 4kg/cm² では、0kg/cm² と類似の点火限界特性となっているが、12kg/cm² で電圧が 200V 程度になると点火限界は常圧と等しくなり、さらに高電圧では常圧をこえる点火限界となることが予想される。

3.4 容量回路における点火限界と気圧の関係

Fig. 6 の容量回路において、C の大きさをパラメータとした気圧対最小点火電圧曲線を示すと Fig. 15 の

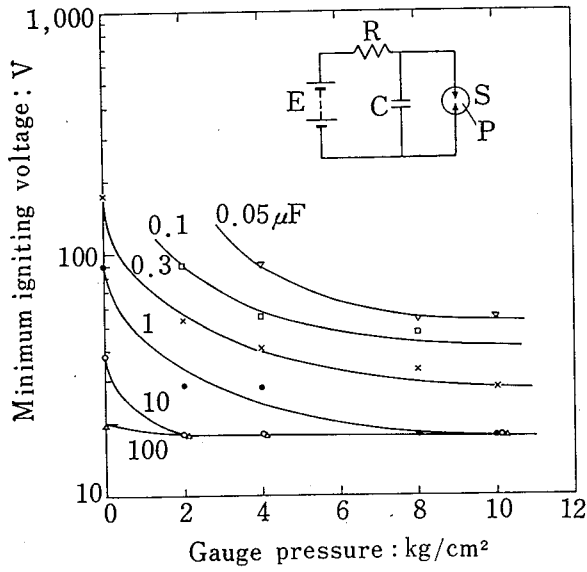


Fig. 15 Effect of pressure of the mixtures on minimum igniting current of capacitive circuits.

容量回路における混合気圧力の影響

ようになる。

この場合は、誘導回路または抵抗回路の場合のように点火花限界曲線が或る気圧において極小値となることはなく、気圧と共に最小点火花電圧が次第に飽和値に近づき、約 10 kg/cm² の気圧で、それぞれ一定の飽和値に到達する。この特性は抵抗回路の場合と似ている。

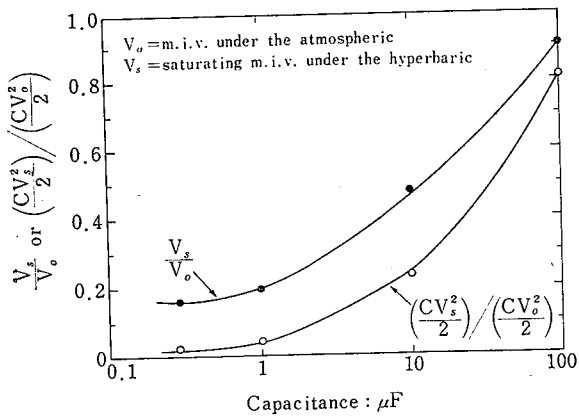


Fig. 16 Voltage ratio $\frac{V_s}{V_0}$ or energy ratio $\frac{(CV_s^2/2)}{(CV_0^2/2)}$ versus capacitance of capacitive circuits.

容量回路のキャパシタンス対電圧比 $\frac{V_s}{V_0}$

またはエネルギー比 $\frac{(CV_s^2/2)}{(CV_0^2/2)}$ の関係

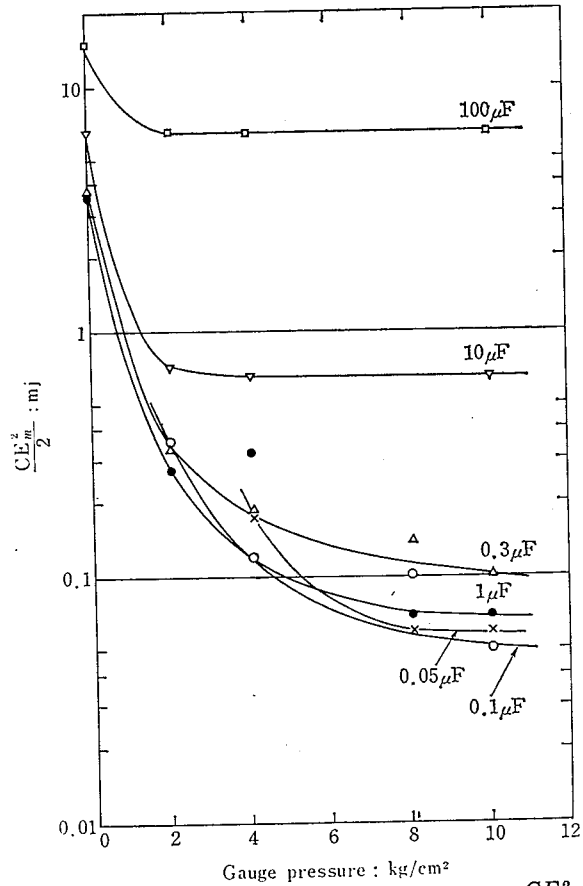


Fig. 17 Pressure of the mixtures versus $\frac{CE_m^2}{2}$ in capacitive circuits.

混合気圧力と容量回路の静電エネルギー $\frac{CE_m^2}{2}$ との関係

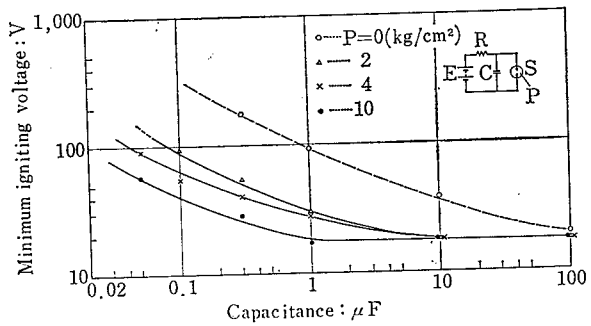


Fig. 18 Minimum igniting voltage of capacitive circuits in the hyperbaric mixtures.

加圧下の混合気中における容量回路の閉路火花による点火花限界

一般には、キャパシタンスの小さな回路ほど気圧上昇による点火花限界低下の割合が大きく、したがってその影響が大きい。

常圧下における最小点火花電圧 V_0 に対する加圧下の

飽和点火電圧 V_s の比率を Fig. 16 に、また最低点火電圧 E_m に対応した点火エネルギー ($1/2 CE_m^2$) の圧力による変化の様子を Fig. 17 にそれぞれ示す。これらによると、容量回路においては、ある大きさの範囲のキャパシタに対して電圧比またはエネルギー比が一定となることはなく、キャパシタが大きくなるに従って、それらの比も次第に大きくなるということができる。なお、常圧下の点火エネルギーに対して、加圧下のエネルギーの割合がいかに変化するかを計算して Fig. 16 に描いてある。

なお、Fig. 18 は気圧をパラメータとしたキャパシタ対最小点火電圧曲線を示したもので、誘導回路または抵抗回路の場合の曲線 (Fig. 11 および Fig. 14) に見られるように、曲線が気圧の大小によって互に一部重なる現象は生じていない。

4. 加圧下における本質安全防爆電気回路の設計と試験方法に関する試案

4.1 設計基準

前節において明らかなように、加圧下における爆発性ガス中の放電火花の点火限界は、気圧が重要な因子の一つとして関与することが示された。そこで本節では、このような加圧雰囲気の下で使用できる本質安全防爆電気回路の設計をいかなる方針で進めるべきかを検討する。

基本的な立場から考えると、気圧の大小にかかわらず安全な回路が設計できればよい。幸いにも、すでに誘導、抵抗および容量回路の点火特性曲線から明らかなように気圧の増大が点火限界の無限の低下を招くようなことはなく、いずれも点火限界に極小値ないし最低値が存在することが示された。したがって、この極小値または最低値を対象として設計すればよいと考えられる。しかしながら、実際には技術的または経済的な制約を受けこれでは設計製作が無理となる場合も少なくないと思われる。そこで、加圧下の本質安全防爆電気回路を試みにつぎの2種類に区分し、また危険場所としての加圧環境を気圧変動の態様に従って以下のように分類する。

(1) 電気回路の区分注)

注) 現在、本質安全防爆電気回路は、このような区分がなされているわけではないので注意のこと、またこのような区分をするとしても、回路ごとの安全率の大きさについても、別途考慮が必要であろう。

Table 2 Selection of class of intrinsically safe circuit corresponding to range of hyperbaric pressure and basis for circuit design.
高気圧下における本質安全防爆電気回路の種類選択と回路設計の基本

Description	Pressure	Atmospheric	Hyperbaric		
		P=0	P=P ₀	P=P ₁	P=P ₂
Draft class of intrinsically safe circuit	A	○	○	×	○
	B	○	○	○	○
Minimum ignition limit		S_N	S_m	S_c	S_c
Criteria for design		$\frac{S_N}{s.f.}$	$\frac{S_m}{s.f.}$	$\frac{S_c}{s.f.}$	$\frac{S_c}{s.f.}$

s. f. = safety factor

- a) 通電中に正常状態として火花を発生する部分のある回路 (これをA-回路と呼ぶ)
- b) 通電中に正常状態として火花を発生する部分のない回路 (これをB-回路と呼ぶ)

(2) 加圧環境の気圧(P:ゲージ圧力)による分類

- a) Pが常時大気圧をこえる大きな変動範囲をとりうる環境 (P₀ 環境という)
- b) Pが常時は大気圧をこえる一定値に保持されているが、万一変動するようなことがあると危険側の圧力になりうる環境 (P₁ 環境という)
- c) Pが常時は大気圧をこえる一定値に保持されているが、万一変動するようなことがあっても、必ず安全側の圧力になりうる環境 (P₂ 環境という)

以上の電気回路の区分と気圧による環境の分類とを組合わせて、本質安全防爆電気回路実現の可能性を検討した結果を、常圧の場合と対比してまとめて示すと Table 2 のようになる。同表中、○印は設計可能、×印は設計不可を意味する。

Table 2 について以下説明を加える。常圧下においては、大気圧を意味するから常に P=0 である。この場合は電気回路が正常状態として火花を発生するか否かは問題とせず、したがってA-回路、B-回路いずれの場合にも本質安全防爆性が認められなければならない。(現在では、常圧下において、A-回路またはB-回路のみを本質安全防爆回路として取り扱う建前にはなっていない)

なお、常圧下における点火限界値 S_N が与えられれば、回路設計の基準値は $S_N/(\text{安全率})$ で示される。

つぎに加圧下においてはつぎのようになる。

P_0 環境の場合：正常時はもとより、B-回路のように事故時時のみ火花を発する場合でも、最も危険な気圧を対象として設計基準を定めることにより、本質安全防爆回路とすることが許される。この場合、点火限界としては点火限界曲線の極小値 S_m をとらなければならない。

P_1 環境の場合：気圧が一定値 P_0 に保たれている限り、その気圧における点火限界から設計基準を定めることはできるが、気圧が危険側に変動することを考えると、 P_0 における点火限界によって設計されている

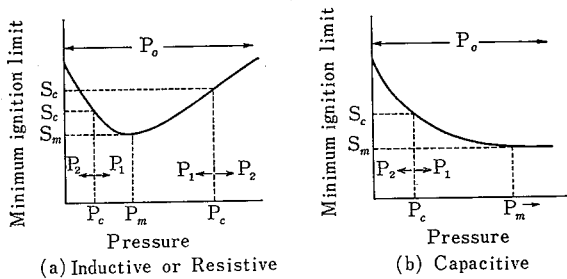


Fig. 19 Criteria for designing intrinsically safe circuits in hyperbaric explosive atmospheres.

加圧下の爆発性ガス中で使用する本質安全防爆電気回路設計基準の考え方

るA-回路は、常時点火源を有するため、危険な回路となりうる。したがってA-回路は本質安全防爆回路としては許容し得ない。しかし、B-回路の方は、常時は点火源を有しないため、たとえ気圧が危険側に変動するようなことがあっても直ちに爆発を生じないので、許容される。ただし、気圧の変動が同時にB-回路の故障などを誘起して火花を生ずるようなことがあってはならない。

なお、B-回路の設計基準には、気圧 P_0 における点火限界 S_0 をもとにして定めればよいと考えられる。

P_2 環境の場合：気圧が一定値 P_0 か、または安全側にのみ変動するので、A-回路、B-回路とも、 P_0 における点火限界を求め、これより設計基準を樹立することができる。

これらのことを概念的に図示すると Fig.19 のようになる。同図の (a) は誘導回路および抵抗回路の場合を、(b) は容量回路の場合を意味する。(a) の場合は、 P_0 の値として、図のように二つのケースが考

えられ、それぞれに応じて気圧変動のとり方、つまり P_1 また P_2 のとり方が異なる。

しかし、(b) の場合には、 P_0 の値に応じた P_1 または P_2 のとり方が一義的に定まることはいうまでもない。

4.2 点火試験の方法

加圧下の爆発性ガス中で使用すべき本質安全防爆電気回路の点火試験の方法は、原則として、回路の特性、すなわち、誘導性、抵抗性または容量性に応じて、またその環境の気圧変動を考慮して、両者から最も適当な気圧の試験ガス中に行なうべきである。しかし、実際には対象とする回路が誘導性、抵抗性、または容量性のいずれに属するかが明らかでない場合が少なくなく、また、最も危険な気圧は予めわかっていないので、一つの気圧値でのみ試験を実施することはできないと考えられる。したがって、実用上は、簡単な回路の場合を除いては、ある気圧範囲で数点の気圧を選んで実施することが必要となる。これは試験実施者の立場からいっても、時間を要することを別にすれば、加圧ガス中における点火試験は技術的にさして困難なことではないからである。

むしろ将来の研究課題として、このような加圧雰囲気を使用する代りに、常圧において同様の点火特性を有する雰囲気（例えばメタン-空気混合気の代わりにメタン-酸素雰囲気のように稀釈ガスの種類を変えたり、水素-空気雰囲気のようにガスの種類を変える）を使用することが指摘される。

5. 結 論

以上、加圧下のメタン-空気混合気についての実験結果およびそれから導かれた結論を要約するとつぎのようになる。

(1) 最小点火限界濃度は、常圧の場合と同じく 8.3~8.5 vol. % である。

(2) 誘導回路における点火限界

a) 最小点火電流の大きさは気圧の上昇と共に減少し、回路インダクタンスに応じた或る気圧で極小値に達する。それ以後は気圧の増加に伴って増大し、インダクタンスに応じた或る気圧で、常圧の場合における最小点火電流より大きくなる。

b) 常圧における最小点火電流と、加圧下の最小点

火電流の極小値との比率は、回路インダクタンスが大きいか小さい。

(3) 抵抗回路の点火限界

a) 最小点火電流の大きさは気圧上昇と共に減少し、電源電圧の大小にかかわらず、約 4~6 kg/cm² の気圧下において極小値となる。これ以後は、気圧の増大と共に増加するが、約 10 kg/cm² 以上の気圧では、電源電圧の大きさに対応した一定の値に落ち着く。

b) 常圧における最小点火電流と、加圧下の最小点火電流の極小値との比率は、電源電圧の大きいほど小さい。

(4) 容量回路の点火限界（最小点火電圧）は、一般に気圧の増加と共に単調に減少する曲線で示され、約 10 kg/cm² 以上の気圧になると、キャパシタの大きさに対応した一定値に到達する。

(5) 加圧爆発性雰囲気中に使用すべき本質安全防爆電気回路の設計にあたっては、当該電気回路が常時火花を発生するか否か、また爆発性雰囲気の気圧変動を考慮して行なうことがある程度実用的な一つの方法ではないかと考えられる。

参考文献

- 1) 田中，産業安全研究所研究報告，RIIS-RR-17-6 (1969)
- 2) H. Lloyd & E. M. Guenault. SMRE Research Report No. 33 (1951)

(昭和 44 年 1 月 31 日受付)

付 録 加圧雰囲気中における放電火花特性の一例について

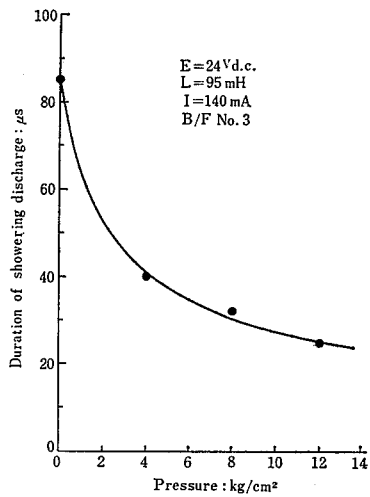
常圧下における低圧電気回路の開閉接点火花の特性については、すでに Holm 氏 (Electric Contacts Handbook 3rd ed., 1958) および Widginton 氏 (The ignition of methane-air mixtures by electrical discharges; Proceedings of the Third International Mining Congress, Salzburg, 1963) らによって研究されており、一般にはアーク放電、グロー放電および高周波間けっ放電が生ずることが知られている。これらの放電はいずれも気圧の変化に従って特性に変化をもたらす、とくに低気圧の場合については多くの研究者によって研究されているが、大気圧をこえる場合であっても、本質安全防爆電気回路において対象とする小電流回路の場合の放電特性についてはあまりよく知られていないように思われる。

ここでは加圧下の放電形成の問題を論ずるのは目的ではないが、高周波間けっ放電が顕著に現われる場合を例に、気圧の影響について若干測定した結果を参考までに述べる。

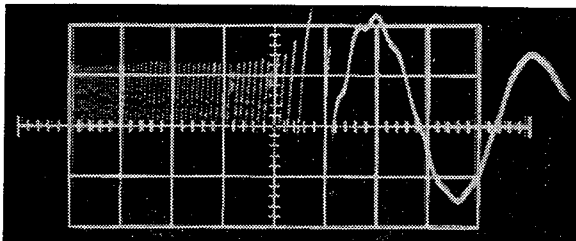
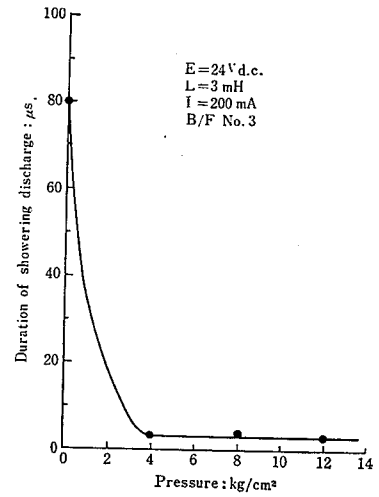
実験回路は本文 Fig. 6 の誘導回路で、次の実験条件で測定した。

- | | | | |
|---|----------|--|----------|
| (1) 電源電圧=24 V
インダクタンス=95 mH
回路電流=140 mA | } 実験条件 1 | (2) 電源電圧=24 V
インダクタンス=3 mH
回路電流=200 mA | } 実験条件 2 |
|---|----------|--|----------|

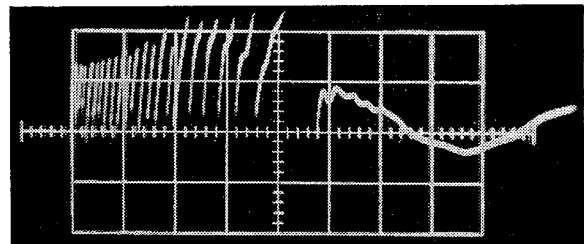
(実験条件 1)



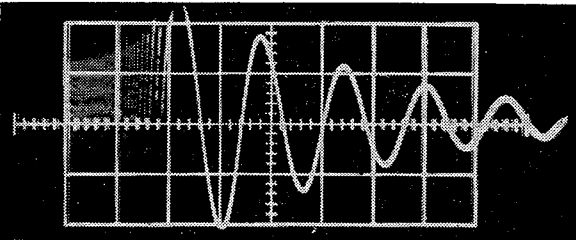
(実験条件 2)



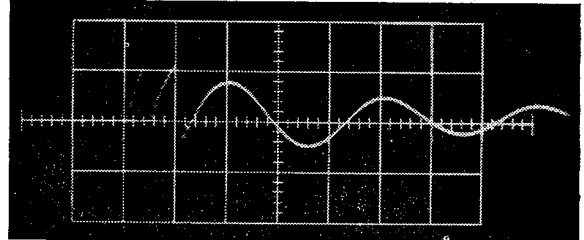
(a) $P=0 \text{ kg/cm}^2$ [E=300 V/div, T=20 μs/div]



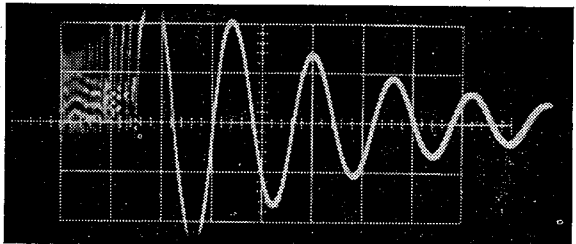
(a) $P=0 \text{ kg/cm}^2$ [E=300 V/div, T=20 μs/div]



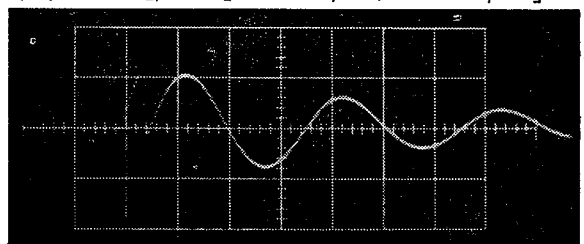
(b) $P=4 \text{ kg/cm}^2$ [E=300 V/div, T=20 μs/div]



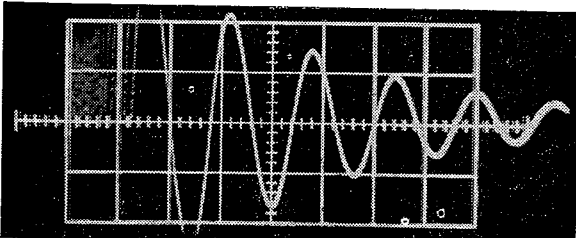
(b) $P=4 \text{ kg/cm}^2$ [E=300 V/div, T=2 μs/div]



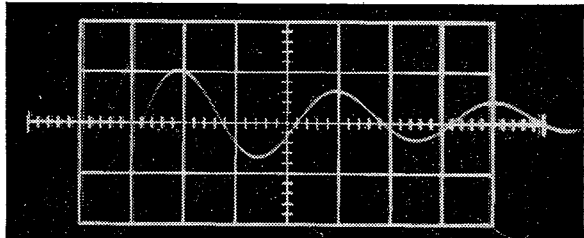
(c) $P=8 \text{ kg/cm}^2$ [E=300 V/div, T=20 μs/div]



(c) $P=8 \text{ kg/cm}^2$ [E=300 V/div, T=2 μs/div]



(d) $P=12 \text{ kg/cm}^2$ [E=300 V/div, T=20 μs/div]



(d) $P=12 \text{ kg/cm}^2$ [E=300 V/div, T=2 μs/div]

Fig. A-1 Examples of duration of showering discharges by breaking inductive circuits under varying air-pressures.

加圧下の空気中における誘導回路の高周波間けつ放電継続時間測定例

火花発生装置には Break-flash No. 3 Apparatus を使用した。

雰囲気には乾燥空気を用い、火花発生装置の白金電極を調整して、開離時の電極間の過渡電圧波形が主に高周波間けっ放電が顕著な場合になるように注意した。なお、放電波形の観測は岩崎通信機製シンクロスコープ（本体 SS 1011, 前置増幅器 SP-80D）によった。

電極の状態が良好であれば、同一実験条件の下における高周波間けっ放電の継続時間が、電極の開閉を反復してもほとんど一定となる。

実験条件 1 の場合は、 $P=0$ 、つまり大気圧下における放電継続時間が約 $85 \mu\text{sec}$ であり、これが気圧の上昇につれて Fig. A-1 のグラフのように単調に減少する。しかし、実験条件 2 のようにインダクタンスが小さいと、大気圧下に比べて加圧下の放電継続時間は急な下降勾配をもって減少し、一定値になる。

放電継続時間が気圧によって変化することは、つぎのような内容をもつものと考えられる。元来、誘導回路では電極の開離時に、回路に蓄積されている電磁エネルギー $\left(\frac{1}{2}LI^2\right)$ が気圧の大小のいかんにかかわらず放出される筈である。放電継続時間が気圧の増加につれて減少するという事は、とりもなおさず間けっ放電の周波数の増加あるいは放電電圧・電流の瞬時ピーク値の増大を伴わなければならない。周波数の増大または電圧・電流の瞬時ピーク値の増大は、加圧雰囲気中における単位時間当たりのエネルギー放出率を大きくし、したがって点火能率が高められると考えられる。このため、気圧が高くなるにつれて、小さな電流で点火するようになるものと考えられる。すなわち、平均エネルギー放出率を E_m とすると、

$$E_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot v(t) dt$$

である。

ただし、 $i(t)$ = 電流の瞬時値

$v(t)$ = 電極間電圧の瞬時値

T = 放電継続時間

E_m が大きいほどガス点火をしやすいと考えられているが、一方、雰囲気の気圧が高くなると、単位体積の雰囲気の燃焼反応によって発生する熱量は増加するので、この面からも気圧の増加は雰囲気ガスの点火を生じやすくなる。（最小点火エネルギー E_m の圧力 P への依存は $E_m \propto 1/P^2$ の関係によって与えられている）

しかし、点火限界電流に極小値が生ずる理由の一つとして、間けっ放電の周波数が高くなる結果、放電回路の抵抗中で消費されるエネルギーが増加すること；また高周波になるため実効抵抗の増大による回路抵抗中での消費エネルギーの一層の増加などが考えられる。

抵抗回路または容量回路の場合については、高気圧中の放電特性をさらに十分に検討しなければ、点火限界曲線に関する理解が困難なものと思われる。この点についてはさらに検討してみたい。

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-17-7

昭和 44 年 3 月 25 日 発行

発行所／労働省産業安全研究所

東京都北多摩郡清瀬町梅園 1 丁目 4 番 6 号

電話 (0424) 91-4512 番 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 180-04

UDC 614.83 : 621.313/.39-213.34 : 537.527

加圧下のメタン-空気混合気中における本質安全防爆電気回路の基礎的研究

田中隆二

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-17-7, 1~14 (1969)

ゲージ圧力が 0~15 kg/cm² の範囲のメタン-空気混合気 (8.3 vol. %) に対して, 誘導回路, 抵抗回路および容量回路の点火限界を IEC 形火花発生装置を使用して測定し, 大気圧下における場合の点火限界と対比して示した.

本実験の結果に基づき, 加圧下において使用するべき本質安全防爆電気回路の実用設計および試験方法の基本方針を検討した.

(表 2, 図 20, 参 2)



UDC 614.83 : 621.313/.39-213.34 : 537.527

Basic Study of Intrinsically Safe Circuits for Methane-Air Mixtures under Hyperbaric Pressure

R. TANAKA

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety

RIIS-RR-17-7, 1~14 (1969)

The minimum ignition limits of low-voltage inductive, resistive and capacitive circuits are determined under hyperbaric methane-air mixtures (0~15 kg/cm² in gauge pressure, 8.3 vol. %) in contrast to those under the atmospheric mixtures, using IEC-type spark-producing equipment.

Some problems involving designing and testing of intrinsically safe circuits under hyperbaric environment are discussed.

Variations of showering discharge duration with increase of air pressure are also investigated as an appendix.

(2 Tables, 20 Illus., 2 Refs.)

