

NOV. 1972

RIIS-RR-21-1

UDC 614.838 : 621.762

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-21-1

火炎防止器に関する研究

(第1報)

—焼結金属の消炎性能について(1)—

林 年 宏・鶴見平三郎

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

火炎防止器に関する研究 (第1報)

—焼結金属の消炎性能について (1)—

林 年 宏*
鶴 見 平 三 郎*

Interruption of Explosions by Flame Arresters (First Report)

—On the Quenching Ability of Sintered Metals (1)—

by Toshihiro HAYASHI* and Heizabro TURUMI*

When a flammable gas-air mixture within certain concentration limits is ignited in a rather long enclosure, it follows initially a slow combustion, and then is accelerated to a deflagration. The deflagration may develop finally to a detonation which is capable of resulting in a serious disaster. To exclude such potential hazards, the explosion should be interrupted as early as possible after the ignition.

The usage of the flame arresters is a typical method for this purpose of protection, and the theoretical background is dependent on the flame quenching phenomenon in a porous body with narrow passages through which explosion flames are unable to propagate. Although various kinds of flame arresters have been developed, most of them are manufactured and used rather empirically. And from the view point of safety their experimental data are not satisfactory.

This report describes about the flame quenching ability of sintered metals as constructional elements of flame arresters. The sintered metals tested were commercial filters, and were discs of 2mm thick with outer diameter of 40mm. Two kinds of metals, bronze and stainless steel, were tested and proto-shape of particles before sintering was nearly spherical for the former and quite irregular for the latter. For the purpose of this study the sintered metals were specified in terms of filtration diameter, which was generally defined as a minimum diameter of a spherical particle which could not be filtered through a porous sintered body. The filtration diameter had a range from 120μ (0.12mm) to 10μ , and these values were assumed to be proportional to the proto-particle sizes.

The disc under test was fitted tightly into a flange (i.e. a mounting flange) and bolted between the end flanges of steel pipe enclosures. One enclosure was "explosion chamber" and the other was "protected chamber". In each mounting flange an orifice was so drilled that the effect of the orifice on the explosion transmission could be determined. The largest orifice diameter was equal to the internal diameter of 1" gas pipe (28mm), and the minimum was 2mm. After setting up, the whole assembly was evacuated, and then filled with premixed hydrogen-air mixture at a desired initial pressure. An explosion was initiated in the explosion chamber by a spark plug, and the pressure changes in both

* 化学研究部 Research Division of Chemical Engineering

chambers were recorded as pressure-time oscillograms. Whether the explosion flame had been quenched in the sintered metal or transmitted through it was shown distinctly by these records.

For the first series of tests the effect of dimensions of the explosion chamber on the flame quenching was studied, and therefore hydrogen content in the mixture was kept constant (i. e. 30% by volume in air); this was a stoichiometric value and considered to give the fastest speed of flame propagation. The diameter of the explosion chamber was either 1" (28mm) or 8" (200mm) and the length was changed in different ways. Initial pressure range was from atmospheric to 2.5 kg/cm²(gauge), with 0.5 kg/cm² steps. The initial pressure which gave ten successive quenchings was defined as limiting safe pressure (L. S. P.) at that condition. The L. S. P., which showed a relative degree of safety from the standpoint of the flame quenching ability, was proportionally increased as the filtration diameter or the orifice diameter decreased, and if compared in terms of L. S. P. the sintered bronzes were shown to be less effective than stainless steel discs for the same filtration diameter. This was probably because of the differences of the particle shape and the method of sintering. The ratio of the length (L) to the diameter (D) of the explosion chamber had a considerable influence on the flame acceleration and therefore on the flame quenching phenomena. The results showed that, for a constant D , increasing the L/D gave more dangerous explosions, and when an detonation-like explosion propagated against an arrester, the disc under test was usually fractured or deformed because of a rapidly applied pressure. For a constant L/D , the larger the pipe diameter the more easily the explosions transmitted into the protected chamber.

In the other series of experiments hydrogen content was varied between 10 and 60% by volume, whilst the test enclosure assembly was fixed to that of 1" pipe. It was shown that for bronze discs of 120 μ the minimum L. S. P. was given at the stoichiometric concentration, but that for 100 μ bronzes the minimum was obtained at a little lower concentration. For those of smaller filtration diameters and for stainless steel discs, the most dangerous mixture was nearly 20% hydrogen content. It might be said, therefore, that the speed of flame propagation was not the only predominant factor, but the aerodynamical movement in flames and/or in unburned gases, produced when passing through a sintered metal and entering the protected chamber, had an important influence on the flame quenching.

1. 緒 言 (火災防止器とは何か)

爆発限界内にある混合ガスで満たされた配管などの内部において発火が生ずると、一般にそれは燃焼から爆燃へと成長し、さらにある濃度範囲にあるときは一定の距離を伝播したのち大きな破壊力を伴ったデトネーション (爆轟) へと発展する。これらの現象^{*1}はこの順序で反応帯の進行速度が大きくなり、したがってその阻止は困難になると考えなければならない。こうした爆発による危険な状態の発生を避けるためには、混合ガスの発火によって生じた反応帯 (火災) をできるだけ早いうちにある限定された小さな空間内において消滅 (消炎, Flame quenching あるいは単に Quenching) させ、それ以上伝播しないようにする必要がある。

このように、爆発火災をその初期段階において消炎させ伝播の拡大を阻止する目的で用いられる方法のうち、多孔体の細隙中における消炎現象を原理とする安全素子は一般に火災防止器 (フレイム・アレスター, Flame arrester)^{*2} と呼ばれている。爆発火災の阻止という観点から見れば火災防止器にはふたつの機能が要求され、ここでは研究の対象をこの両者に限定する^{*3}。ひとつは爆発火災を阻止する消炎能力 (熱力学的特性) であり、他はその条件下で生ずる爆発圧力に耐えること (機械的特性) である。この両機能は従来しばしば混同されたり、あるいは片方が無視されたりする傾向にあるが、当然明確に区別して評価されるべき性質のものである。

火災防止器の応用範囲は広く、したがって現実にはそれだけ必要性も大きいわけであるが、従来使用されてきているものはどちらかといえば経験的に安全であろうとの判断によっているものが多く、安全性の限界についての明確な根拠によっているものは少ない。

このシリーズの研究では各種の多孔体素子の消炎性能および火災防止器として要求される関連特性につい

て検討し、実用的な火災防止器開発の基礎データを得るとともに、実験的な立場から消炎現象に対する説明を試みたいと考えている。本報では、多孔体素子としてフィルターなどに使用されている焼結金属をとりあげ、これらが管中における比較的弱い爆発に対してどの程度の消炎性能を示すかを主として定性的に検討し、部分的にはデトネーションに近い現象に対する挙動を観察した。

2. 火災防止器の理論的背景

火災防止器の理論的背景となる消炎現象の機構については、幾つかの説明が試みられてきているがまだ完成されたとはいえない。これらは主として熱力学的な観点からの接近であり、極めて単純な形として例をあげれば、どの程度細い管中^{*4}で混合ガスを火災が伝播しうるかといった問題に対する定量的解析がそれであり、反応熱と管壁への熱損失のバランスや管壁における活性基の消滅などが主として考えられてきている。

微細な細隙を有する多孔体が火災防止器としての潜在的能力を有すること^{*4}は明らかであり、金網、多孔板、細管束、細粒充填層などについて実験的研究が行なわれている。焼結金属については Egerton ら¹⁾のデータが知られているにすぎない。わが国でもここ数年来この分野に対する関心が高まってきており、二、三の報告もなされている。

消炎機構あるいは火災防止器についての理論的、実験的研究の概要についての解説²⁾もなされており、筆者らもすでに一部について紹介⁴⁾、さらに具体的な内容については別に報告する予定もあるので、ここでは火災防止器についての最近の考え方を簡単に記すにとどめたい。

それは火災の伝播速度と火災防止器の消炎性能を関連づけようとする方法である。すなわち、ある配管中に取り付けた一定の火災防止器によってその配管中で生じた爆発火災を阻止できるか否かは、配管中を火災防止器に向って接近してくる火災の伝播速度によって決まる (逆にいえば、火災伝播速度がある値をこえれば火災は阻止できない) という考え方であり、この考

*1 本報では原則として燃焼 (Combustion) と爆燃 (Deflagration) の両現象を合せて爆発 (Explosion) と称する。なお、混合ガス中における反応帯の進行速度がその混合ガス中における音の伝播速度より大きいときをデトネーション (Detonation) と呼んで区別する。

*2 デトネーションを直接阻止できるものであればデトネーション・アレスターと称することができよう。

*3 火災防止器は気体の流動する部分に取付けられるので、実用上は圧力損失などの因子を無視することができない。これらの因子については実験上特に関係ある場合のみ触れるにとどめる。

*4 火災が伝播しえない最大の管径をその条件における消炎径 (Quenching diameter) と呼ぶことがある。従来の知見によれば、火災防止器として考える場合の多孔体中の細隙の大きさは消炎径の50%以下であることが必要である。

え方は幾つかの実験結果に対する有効な説明となっており、現在のところ一応受け入れられているように思える。しかしながら、多孔体からなる火災防止器における消炎には単純な形状の細管や細隙中の消炎とは異なる因子が含まれると考えるべきであり、熱的なバランスに加えて火災防止器の前後における気体の動きを無視することはできない。そのほか、いわゆる火災は阻止できても発火源としての能力を有する熱ガス (Hot gas) が火災防止器を通過し、これによる発火⁶⁾も考慮に入れねばならないので、火災伝播速度のみによって一律に論ずるには無理があるように思える。

3. 実 験

3.1 焼結金属の仕様

3.1.1 火災防止器としての特性値

焼結金属とは、一定粒度の金属粉を所要の形状の型枠中に最密充填し、これをその金属の融点より低い温度で還元性雰囲気中において焼結したもので、構造的には多くの空孔が複雑な通路でつながった通気性を有する多孔体である⁶⁾。フィルターなどにかんがりの使用実績を有するので、これに若干の加工を加えて火災防止器として利用できれば実用化は容易である。しかしながら焼結金属にはその製造方法に起因して製品 (以下、焼結金属製品の一般的特性に関する叙述に際しては「焼結体」という語を用いることがある) の均一性に幾らか懸念がある。実際問題としては、ある特性の焼結体を得るために指定すべき値 (代表値) はなんであるか、である⁵⁾。ファルターとしての要求上は「戸過径」なる表現が一般に用いられている⁶⁾。焼結体のパラツキの原因のおもなものは次の3者であろう。

- 1) 原料金属粉………金属粉の製法は材質によって大体一定しているので、主として大きさの変動を考えればよい。粉末の粒度範囲は篩分けに用いる篩の目開きにより決まる。本報で実験対象とした焼結体の戸過径と焼結前の粉末の大きさおよびタイラー規格による篩のメッシュ数の関係は

*5 焼結体の特性値の測定法は JIS Z 2500 番台に部分的に規格化されている。

*6 戸過径とは、焼結体をフィルターと考えた場合に、どの程度の大きさの粒子 (異物) を戸過しないかを意味する値であって、例えば戸過径 100 μ (ミクソン) と呼ばれる焼結体は直径 100 μ の球形粒子の95%を戸過しないであろうことを示すが、これらの数値関係は必ずしも厳密なものではない。

Table 1 のとおりである。すなわち戸過径 120 μ の焼結体は、20メッシュの篩は通るが 24メッシュの篩は通過しないという範囲の金属粉から焼結されることになる⁷⁾。なお金属粉の大きさはこの範囲で規則的に分布していると仮定する。篩のメッシュ数の差を小さくするほど粉末の均質度が高くなることは言をまたない。

Table 1 Relation between the filtration diameter of sintered metals and particle size (mesh width) before sintering
焼結金属の戸過径と焼結前の金属粒子径の関係

Nominal Filtration Diameter of Sintered Metal μ	120	100	70	40	10
Metal Particle Diameter before Sintering (Mesh Width)* μ	840	710	500	350	177
Tyler Sieve Number	20	24	32	42	80

* JIS Z 8801

- 2) 粉末の充填………粉末は型枠に最密充填されるが後述するようにそのパターンは数種にわたり、これらをモデル的に考えることは可能であっても実際にはどのように充填されているか明確でない。このことは粉末の大きい (換言すれば焼結体の戸過径の大きい) 場合、および焼結体の厚さの小なる場合に問題にはなるが (実際にはこうしたものは火災防止器の素子としては使用できそうにはないが)、粉末が小さく、厚さがこれに比して十分厚ければ、焼結体内で異常に大きな空孔が連続する確率は小さく、全体的にみた場合の消炎性能に与える影響は小さいとみてよい。一方、充填された粉末、あるいは焼結体の見かけの密度を一定に保つことができれば、均質度はさらに向上される。
- 3) 焼結条件………焼結の過程において金属粉が接触しているところで部分的に溶け合うとすれば、温度等の条件により空孔の大きさが影響される。同一メーカーの製品であればあまり問題はないが、焼結条件を考慮した厳密な比較は場合によ

*7 戸過径と篩メッシュ数の関係は焼結体のメーカーによって相異があるが、戸過径の数値を幾らか変えて考えれば、粉末の粒度範囲については同じものを得ることができることが調査によって判明している。

ては必要となるかもしれない。

結論として筆者らは、焼結体の代表値として汜過径(篩のメッシュ数を前提とする)と焼結体の見かけ密度を選び、これに焼結体の厚さを加えた3者によって消炎性能を比較することとした*8。また実験結果に十分な安全率を乗ずることにより、焼結体のバラツキの影響を除去できるものと信ずる。

3.1.2 材 質

焼結体の材質は青銅とステンレス鋼の2種類で、原料粉末の組成等は JIS の等級でそれぞれ BC 3 および SUS 32 に相当する。この両者の粉末は製造方法が異なるため形状が著しく異なる。すなわち、青銅のほうはほぼ球状で得られるのに反し、ステンレス鋼のほうは種々の不規則な形状の粉末の混合物となる。この結果、同じ篩幅で得られた焼結体の内部構造もまた

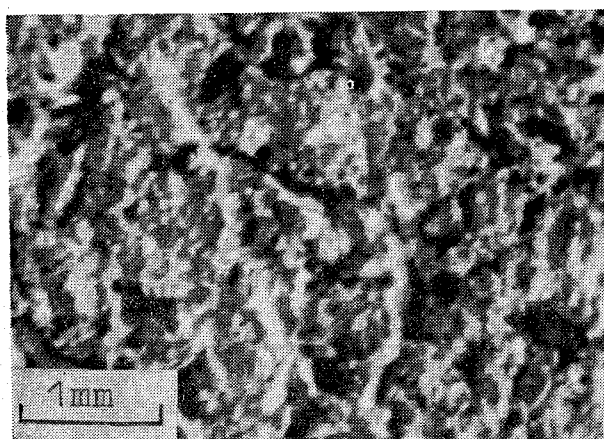
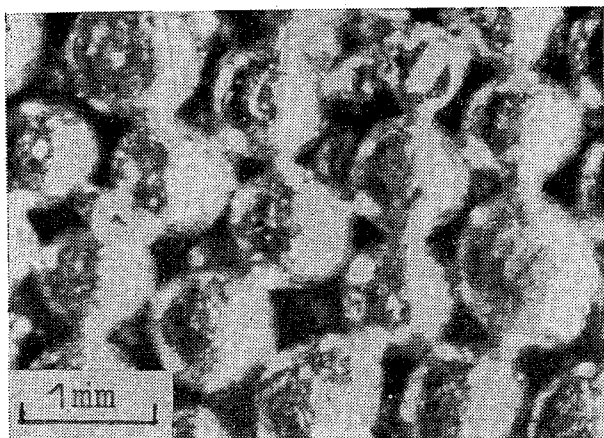


Fig. 1 Surface structures of sintered metals (upper : Bronze 120 μ , lower : Stainless steel 120 μ)

焼結金属表面の拡大写真

*8 例えば、気体の流動に対する圧力損失を消炎性能の指標とすることも検討中である。

異なる。また、消炎現象が固体表面への熱移動と関連するならば、焼結体材質の熱的特性は興味ある問題であるが、上述の構造上の相異の効果が大きいため本報ではこの点についての検討を省くこととした*9。

Fig. 1 に焼結体表面の拡大写真を示す。

3.1.3 外形寸法および密度

供試焼結体は外径 40mm の円板で、厚さはほとんどの場合約 2mm で、一部の試験では 4mm のものを用いた。汜過径は Table 1 に示す5種類である。外形寸法と重量から算出した焼結体の見かけの密度を Table 2 に示す*10。

Table 2 Apparent density of sintered metals
供試焼結金属のみかけ密度

Material	Filtration Diameter μ	Apparent Density g/cm ³	
		Range	Average
Bronze	120	4.83~4.91	4.86
	100	5.07~5.17	5.11
	70	5.34~5.49	5.43
	40	5.73~5.82	5.77
	10	5.86~5.94	5.90
Stainless steel	120	4.15~4.39	4.28
	100	4.29~4.32	4.31
	70	4.28~4.31	4.29
	40	4.15~4.20	4.17
	10	4.36~4.39	4.38

3.2 実験ガス

可燃性ガスとしては火炎伝播速度の最も大きいグループに属する水素を選び、これと空気を混合して実験ガスとした。水素は市販ボンベ入りのものを用い、混合ガスの調整は分圧方式によった。ガス濃度は干渉計式ガス検知器(水素100%用、有効室長 20mm)によりチェックした。

*9 焼結体の熱伝導度に関するデータは見当たらない。粉末の熱伝導度(常温で青銅 0.94, ステンレス鋼 0.18cal/cm \cdot sec \cdot C)から焼結体の熱容量に関する比較は考えられるが、材質の熱伝導度についての議論の展開は困難であろう。

*10 原料粉末の密度は青銅 8.8, ステンレス鋼 8.0g/cm³(常温)である。Table 2 で青銅の場合汜過径の減ずるにつれて密度が増加するのは、成形前の粒子径が減ると焼結体の空隙率(空隙率)が減ることによる。一方、ステンレス鋼では粒子径が不規則なため密度はある程度自由に変化させることができるが、一般には成型時のプレス圧を加減することにより焼結体の密度のほうを一定値におさえている。汜過径がこの表の範囲ではふつう製造される焼結体の厚さは 1mm 以上であるが、密度は厚さとはほとんど関係しない。

爆発容器の形状の影響を検討する実験では水素濃度は当量値付近の $30 \pm 2\%$ (以下、濃度はすべて容量パーセント (%) で示す) の範囲で一定とし、初圧はゲージ圧で 0 (大気圧) から 1.5 kg/cm^2 まで 0.5 kg/cm^2 ごとに变化させた (以下、特に断わらないかぎり圧力はゲージ圧とするほか、図表中に初圧を P_i として示すことがある)。

水素濃度の影響に関する実験では、濃度は $10 \sim 60\%$ の間で約 10% ごとに变化させ、特に必要な場合にはさらに濃度の刻みを小さくした。この実験では初圧は最高 2.5 kg/cm^2 とし、最低は減圧側で爆発の伝播しない圧力までとした*11。初圧の刻みは大気圧以上では 0.1 kg/cm^2 、減圧側では 100 mmHg (約 0.13 kg/cm^2) である。

3.3 爆発容器

爆発容器はガス管 (配管用鋼管) を加工したもので、爆発側 (点火側) と引火側ふたつの容器からなり、両容器の端フランジ間に焼結体をはめこんだ取付けフランジをボルトで固定する。爆発側管径は 1 インチ (内径約 28 mm) または 8 インチ (内径約 200 mm) とし、引火側管径はすべて 1 インチとした。実験した管径と管長の組合せは Table 3 のとおりで、管はすべて直管、系全体は密閉状態とした。(なお、以下において爆発側の管径と管長を $D(\text{inch})$ および $L(\text{cm})$ 、引火側の管径を D' 、 L' として略記することがある。) D, D' がともに 1 インチの場合の爆発容器の外観写真を Fig. 2 に、焼結体の取付け方法を Fig. 3 に示す。

焼結体はゴムパッキンによって十分押しつけられるので、取付けフランジとの接合面を火炎が伝播することはない。また爆発火炎にさらされる焼結体の面積は、最大で 1 インチ管の内径断面積をこえることはない。二、三の理由によりガス*12の通過しうる面積が消炎機構に関係すると予想されたので、取付けフランジにオリフィスを設け、その穴径を 2, 6, 12, 20, 28 (mm) とした。オリフィスの深さはいずれも 4 mm である。オリフィスの径を開口径 (Fig. 3 に d で示す) と呼ぶこととし、以下において単に $d(\text{mm})$ と

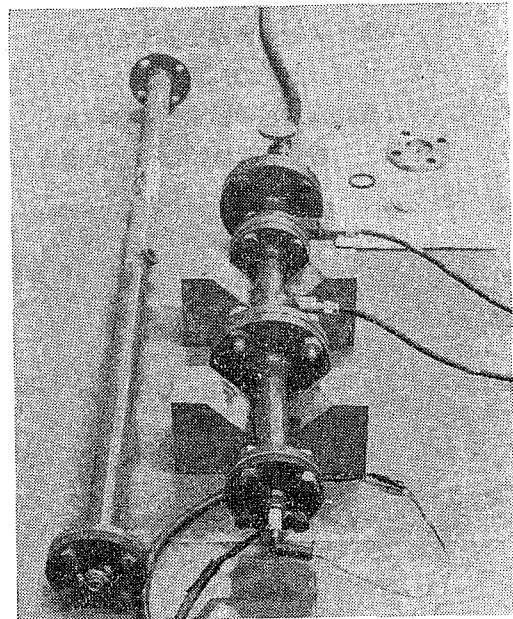


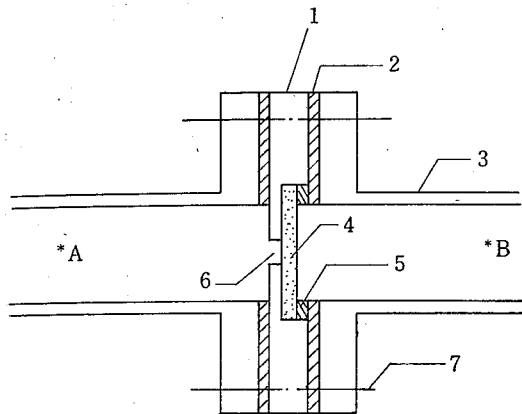
Fig. 2 Test enclosure assembly consisted of 1 inch pipes for both explosion chamber and protected chamber
1 インチ管爆発容器の外観

Table 3 Sizes of test enclosure assemblies
爆発容器の寸法および組合せ

Assembly No.	Explosion chamber			Protected chamber	
	Diameter D inch (cm)	Length L cm	Ratio L/D cm/cm	Diameter D' inch	Length L' cm
1	1 (2.8)	10	3.6	1	20
2	1 (2.8)	20	7.1	1	10
3	1 (2.8)	120	42.9	1	10
4	8 (20.5)	20	1.0	1	10
5	8 (20.5)	70	3.4	1	10

*11 実験は -600 mmHg (-760 mmHg で絶対真空とした) まで行なったが、結果的には -400 mmHg より低圧では火炎はすべて阻止された。

*12 焼結体を通過するのがなんであるかを示すのは困難であり、むしろこの研究の目的ともいえることであるので、ここではガス状のものという意味で単にこのように表現する。



- 1. Mounting flange
- 2. Gasket (super sheet)
- 3. Gas pipe
- 4. Sintered metal under test
- 5. Gasket (synthetic rubber)
- 6. Orifice
- 7. Bolt center
- *A Ignition at the orifice side
- *B Ignition at the sintered metal side

Fig. 3 Method of mounting a sintered metal disc in the test enclosures (schematic cross section)
焼結金属円板の取付け方法と点火サイドの関係

して略記することがある。

このように片側をオリフィスにすれば焼結体の露出面は制限され、Fig. 3 の A, B いずれの側から火炎が伝播してくるかによって焼結体前後のガスの流動に違いが生ずる。これが消炎性能にどう影響するかを検討するため、A側で点火した場合はオリフィス側点火、B側の場合を焼結体側点火と呼んで区別した。ただし $d=28$ の場合には点火サイドの区別は行なわず、また焼結体自体の面の表裏については特に留意しなかった。

3.4 実験方法

実験に際しては、所要の組合せの爆発容器系を組み立て、系内を真空にしたのち混合ガスを所定の初圧にまで送込み、ネオントランスと点火プラグにより爆発側において点火する。供試焼結体の両側の容器中の圧力変化をそれぞれ抵抗線歪計式圧力変換器により検出し、動歪計で増幅したのち電磁オシログラフにより時間-圧力のオシログラムとして記録した。

供試焼結体において消炎したか否かは、引火側において爆発が起こらなかったかどうかという事実によってのみ判断した（以下、引火側において爆発を生じた場合を「引火」と表現することがある）。引火の有無はほとんどの場合引火側の圧力波形により明確に判定

できた。しかし、爆発限界付近の濃度あるいは減圧下における実験では引火側に挿入した熱電対の出力に頼らねばならない場合があった。同一条件においてある回数以上引火しなければ、その条件下では「引火なし」あるいは「非引火」とした。この連続テストの回数は実験の種類により異なるので、初圧の変化のさせ方とともに実験結果の中に併記する。

一定の焼結体については、消炎するか否かは（概念的に表現すれば）爆発側における爆発の強さによる。爆発の強さを支配するおもな因子は爆発管の形状・寸法、ガスの濃度・初圧であり、開口径や点火のサイドも重要であり、そのほかにも点火位置や火炎の伝播方向も無視できない。火炎の伝播速度はこれらの因子を変数とする関数とみなせるものとし、この速度と消炎性能の関係については別に論ずる。

4. 実験結果

4.1 爆発容器の形状を変化させた実験

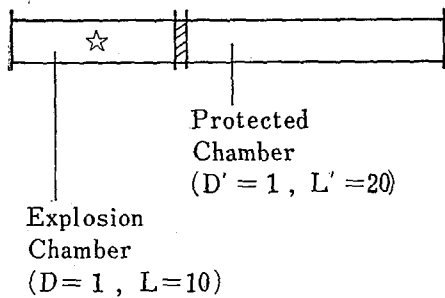
このシリーズの実験では Table 3 の各爆発容器系について、水素30%、初圧 1.5 kg/cm^2 の爆発を連続10回以上阻止しうる焼結体の径過径を両材質について求めた。開口径は $d=2\sim 28$ (mm) の全域について変化させたが、最初の幾つかの実験により開口径の大なるほうが引火しやすいことが判明したので、 $d=28$ で引火しなければそれより小なる d では引火なしとした。また、初圧が低いほど、径過径の小さいほど、また厚さの大なるほど焼結体における消炎が容易であるという経験的事実を前提として実験した。各々の材質、径過径、厚さについて、供試焼結体のサンプル数は原則として3個とした。

爆発側管径 $D=1$ (inch)、管長 $L=10$ (cm)、引火側 $D'=1$ 、 $L'=20$ の場合の結果を Table 4 に示す。点火位置^{*13} は爆発側の中心である。Table 5 は $D=D'=1$ 、 $L=20$ 、 $L'=10$ の場合の結果で、点火は一部が遠端点火のほかは中心点火である。これらの結果ではおのおの条件下における焼結体の消炎特性は、爆発テストの回数に対する引火の回数で示した。○は各欄の分数の分母の回数のテストに対して引火の

*13 爆発側容器中における点火位置は結果の中に示すが、中心点火は爆発側の幾何学的中心付近での点火を意味し、焼結体から離れたほうの端フランジ付近での点火を遠端点火、焼結体のすぐ近くでの点火を近端点火という。(Central, Far end or Near end ignition)

Table 4 Quenching ability of sintered metals for explosions in short pipes (1)
爆発側が短い場合の消炎性能 (1)

Sintered metal	P_t	d	0					0.5					1.0					1.5				
			2	6	12	20	28	2	6	12	20	28	2	6	12	20	28	2	6	20	28	
Bronze 120 μ	SM	OR	○	○	●	●	●	●	●		●	●	●	●		●	●					
			0/15	0/10	1/1	1/1	1/1	2/28	2/17		1/1	1/1	3/5	2/3		1/1	1/1					
$t=2.15\sim 2.35$	OR	OR	●		●			●		●				●								
			2/18		2/2			4/13		2/2				2/2								
Bronze 100 μ	SM	OR	○		○			○		○			○		●				●			
			0/2		0/1			0/15		0/15			0/15		1/1				2/9			
$t=2.15\sim 2.35$	OR	OR		○		○	○		○		●	●		○		●	●		●	●		
				0/2		0/10	0/15		0/2		1/1	3/3		0/15		1/1	2/2		2/4	1/1		
Bronze 70 μ	OR	OR									○								○	○		
$t=2.35$											0/15								0/15	0/15		
Bronze 120 μ																				○		
$t=4.10$																				0/15		
Stainless steel 120 μ																				○		
$t=2.15\sim 2.20$																				0/30		



- ☆ Position of the spark plug
- ▨ Position of a sintered metal under test
- P_t Initial pressure kg/cm² (gauge)
- d Orifice diameter mm
- t Thickness of sintered metals mm
- No explosion occurred in the protected chamber
- Explosion transmitted (Numerics mean the ratio of the number of explosion transmissions to the number of total tests.)
- SM Ignition at the sintered metal side
- OR Ignition at the orifice side

なかったことを、●は分子の数だけ引火したことを示す。

$D=D'=1, L=120, L'=10$ の場合の結果を Table 6 に示す。供試焼結体はステンレス鋼製の厚さ約 2 mm のものに限定し、点火サイドは主としてオリフィス側とした。点火位置は大部分遠端（密閉端から 10cm）であるが、二、三の比較実験においては近端（焼結体から 10cm）点火とした。この実験では焼結体の破損または変形がしばしばみられ、これによる引火が考えられた。一方、変形しても引火しない場合もあり、これらは焼結体の強度と関連するので表中で区別して記した。○および●は先の場合と同じ意味を有し、焼結体に損傷はない。▽は変形したが引火なし、▼は変形して引火した場合を、また▲は焼結体が破損しこの当然の結果として引火したことを示す*14。

*14 変形とはある方向へふくらんだり、細かい亀裂を生じた場合を、破損とは穴があいたり向う側が見通せるような大きな亀裂を生じた場合を、それぞれ意味する。

Table 7 および 8 には爆発側管径が 8 インチ ($D=8$) の場合の結果を示す。いずれも $D'=1, L'=10$ である。 $L=20$ のときは前述のすべての場合と同様に火炎は水平伝播とし、点火位置は中心または遠端（端フランジの中心）とした。 $L=70$ のときは爆発管を垂直に立て、遠端（下端フランジの中心）で点火したので火炎は上方伝播である。この場合には焼結体に変形を生じたので Table 6 と同様に ▼ 記号によって他のふつうの引火と区別した。なお、いずれの場合にも開口径は $d=28$ に限定した。

4.2 水素濃度を变化させた実験

ガス濃度と消炎特性の関係を検討するための実験は、Table 5 の結果を与えたと同じ爆発容器系 ($D=D'=1, L=20, L'=10$) を用いて行なった。焼結体の厚さは $t=2$, 開口径は $d=28$ である。

実験は 2 度繰り返した。1 回目の実験は、別のテストに使用した焼結体のうち外見上損傷のないものを選

Table 5 Quenching ability of sintered metals for explosions in short pipes (2)
爆発側が短い場合の消炎性能 (2)

Sintered metal	P_t	d	0				0.5				1.0				1.5			
			2	6	12	28	2	6	12	28	2	6	12	28	2	6	12	28
Bronze 120 μ	SM		○ 0/10	○ 0/10			● 1/1	○ 0/10			● 1/1	● 1/1			● 1/1	● 1/1		
	OR	$t=2.45$		● 1/1				● 1/1										
Bronze 100 μ	SM			○ 0/10		○ 0/10		● 1/2	● 1/4	● 2/2	○ 0/10	● 1/2	● 1/2	● 2/2	○ 0/10	●* 2/6	● 1/1	● 2/2
	OR	$t=2.15\sim 2.30$			● 3/3													
Bronze 70 μ															○ 0/15			○ 0/3
		$t=2.35\sim 2.40$																○* 0/20
Stainless steel 120 μ						○ 0/3				○ 0/3				○ 0/3				○ 0/40
		$t=2.15\sim 2.20$																

* means the far end ignition.

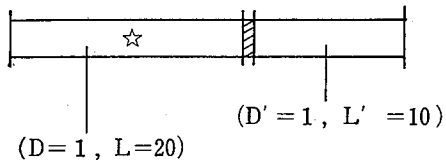
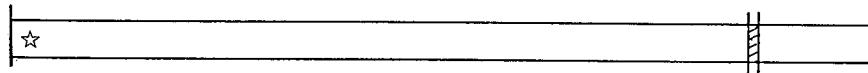


Table 6 Quenching ability of sintered stainless steel discs for explosions in the long pipe
爆発側が長い場合の焼結ステンレス鋼の消炎性能

Filtration Diameter	P_t	d	0			0.5			1.0				1.5					
			12	20	28	12	20	28	6	12	20	28	2	6	12	20	28	
120 μ	OR			○ 0/2	○ 0/12		▼ 2/9	● 1/10		○ 0/10		▼ 4/4	○ 0/10	▼ 1/7	▲ 1/2			▲ 1/1
		$t=2.10\sim 2.20$			○* 0/4			○* 0/10				●* 2/10						
70 μ	SM					○ 0/10			○ 0/11					○ 0/10				
	OR	$t=2.10\sim 2.15$	○ 0/2		○ 0/10	○ 0/10		○ 0/10		▲ 1/2			○ 0/10	○ 0/10				
40 μ	SM										▽ 0/20				○ 0/20	▲ 1/12		
	OR	$t=2.05\sim 2.20$			○ 0/4			○ 0/11					▲ 1/1					▲ 1/1
10 μ		$t=2.15$						○ 0/10					○ 0/10					▲ 1/1



* means the near end ignition.

▼ or ▽ means whether explosions transmitted or not, the sintered metals under test being deformed either.

▲ means that the sintered metals were fractured and subsequently explosions transmitted.

Table 7 Quenching ability of sintered metals for explosions in the cylindrical vessels (1)
($d=28$, horizontal propagation)
爆発側が円筒容器の場合の消炎性能 (1)

Sintered metal	P_i			
	0	0.5	1.0	1.5
Stainless steel 100 μ $t=2.15$	○*	○*	○*	
Stainless steel 120 μ $t=2.20$		○	○	○
Bronze 70 μ $t=2.30\sim 2.35$			○	●
Bronze 100 μ $t=2.20$	●	●		

* means the central ignition.

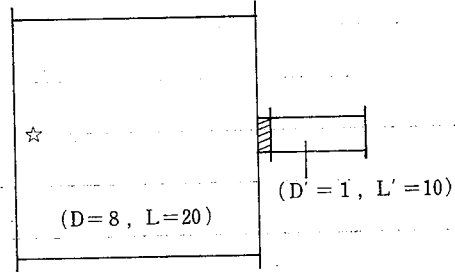
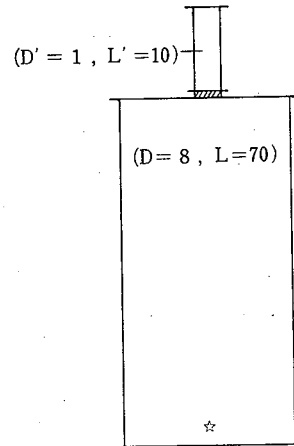


Table 8 Quenching ability of sintered metals for explosions in the cylindrical vessels (2)
($d=28$, upward propagation)
爆発側が円筒容器の場合の消炎性能 (2)

Sintered metal	P_i			
	0	0.5	1.0	1.5
Bronze 70 μ $t=2.30\sim 2.35$	●	▼		
Bronze 40 μ $t=2.15$	○	▼		
Bronze 10 μ $t=2.05$		○		○
Stainless steel 120 μ $t=2.20$	▼	▼		
Stainless steel 100 μ $t=2.10$		○	▼	
Stainless steel 70 μ $t=2.10$			○	○



んでこれらを用いて行なった。ある濃度で引火しない初圧（これを非引火圧力または限界安全圧力と呼ぶことにする）を求める手順は次のようにした。まず初圧を0から0.5 kg/cm² ずつ上げて引火する圧力を求める。次にこの引火した圧力から0.2 kg/cm² 減じた初圧でテストし、引火すればさらに0.2減ずる。また引火しなければ0.1昇圧して引火の有無を確認した。こ

の手順の繰り返しにより同一条件で連続5回引火しなければそのときの初圧を非引火圧力とした。減圧側については、100mmHgの圧力を0.1 kg/cm² に相当するとして同様の昇圧・降圧のさせ方をした*15)。

*15 このような方法は、セーフ・ギャップを求める際のギャップの大きさの替え方における step-up and down method と基本的には同じであると考えられる。

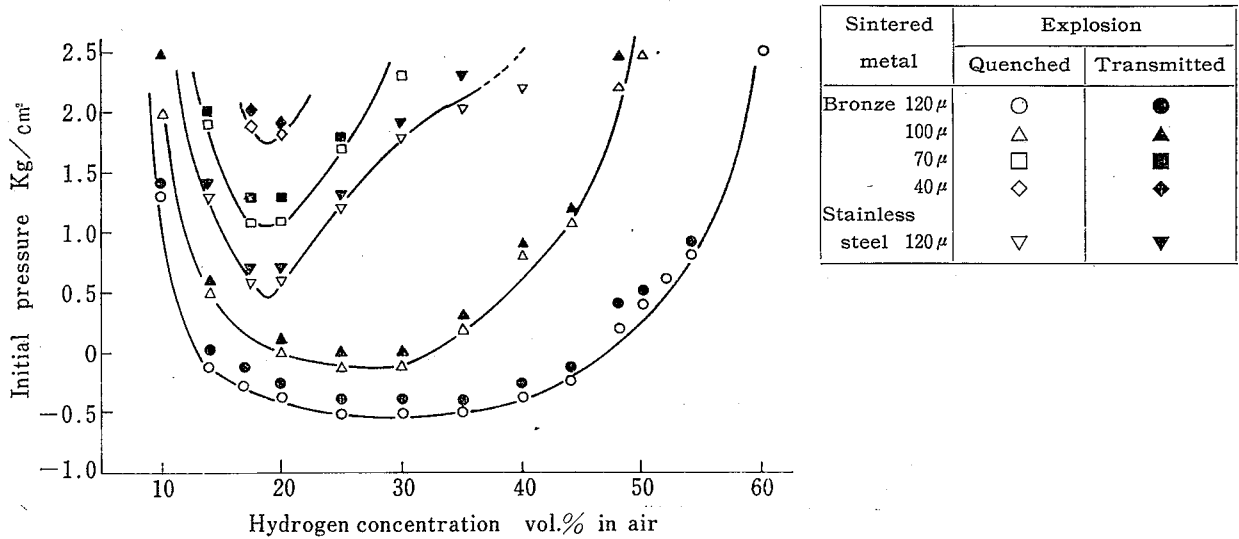


Fig. 4 Effect of the gas concentration on the quenching ability of sintered metals ($D=D'=1$, $L=20$, $L'=10$, $d=28$)
水素濃度と消炎特性の関係

1 回目の実験結果は予想外のものであったので、確認のため新しい別の焼結体を用いて再度実験した。この場合のある濃度についての最初のテスト圧力は、1 回目の結果から得られた非引火圧力に 0.2 kg/cm^2 を加えた値とした。その条件で引火しないときのその後の昇圧の刻みを 0.2 としたほかは、1 回目と同じステップ方式によった。2 回目の実験での焼結体のサンプル数はおおのの材質と汜過径につき3個ずつとし、非引火確認の回数は3回である。2 回目の結果を濃度—非引火圧力の関係として Fig. 4 に示す。1 回目の結果は省略するが、曲線の形状および最小非引火圧力を与える濃度がおおのの焼結体について両実験において完全に一致したことを付言しておく。

5. 考 察

5.1 爆 発 圧 力

実験条件および引火の有無によって焼結体の両側の容器中に観察される圧力波形は種々に変化する。逆に圧力波形のパターンを整理することにより、ほとんどの条件下で引火の有無を判定できた。同一条件において引火の確認をする場合、引火側圧力の昇圧過程および爆発側圧力の降圧過程が明らかに異なることにより判定できる例を Fig. 5 に示す。

引火した場合には引火側において圧力重積現象⁷⁾がしばしば見られ、消炎した場合には多孔体を通しての

圧力放散に関するデータが得られた。これらの現象は消炎機構と無関係なわけではないが、ここで詳述することは煩雑にすぎるとし、別の観点からまとめて論ずるほうが考えやすいので別の機会にゆずることとし、ここでは爆発圧力の一般的挙動と、焼結体の機械的強度に関係する場合について触れるにとどめる。

爆発側の管径1インチ、長さが10あるいは20cm という場合には、これは配管というよりむしろ小型の円筒容器としての特性を示し、点火後の伝播距離が小さいため火炎の加速はみられず、爆発圧力の上昇はほぼ一定の割合で進んだ。また、火炎が爆発側全体に広がるに要する時間が短いため、引火側との容積比が小さく焼結体の汜過径が比較的大きい場合には、焼結体の両側の圧力が均一に分布する速度が大きい。したがって火炎面より先の未燃ガスが圧縮されて引火側の圧力が高くなる(これを予圧縮という)割合が少なく、引火した場合においても、ゆるやかな昇圧に引き続いての急激な圧力上昇という形の圧力重積現象はみられなかった (Fig.6 参照)。このような爆発に対しては、焼結体の強度はあまり重要ではなく、単に消炎能力の有無のみを考慮すればよい。他の条件が同じであれば、混合ガスの初圧が高いほど反応速度が大きく、発生する熱エネルギーが大きいので焼結体で奪われるべき熱量も大きくなければ消炎されないと考えられる。このことはすべての結果に明瞭に示されている。

爆発側が8インチ管で、やや大きな円筒容器とみな

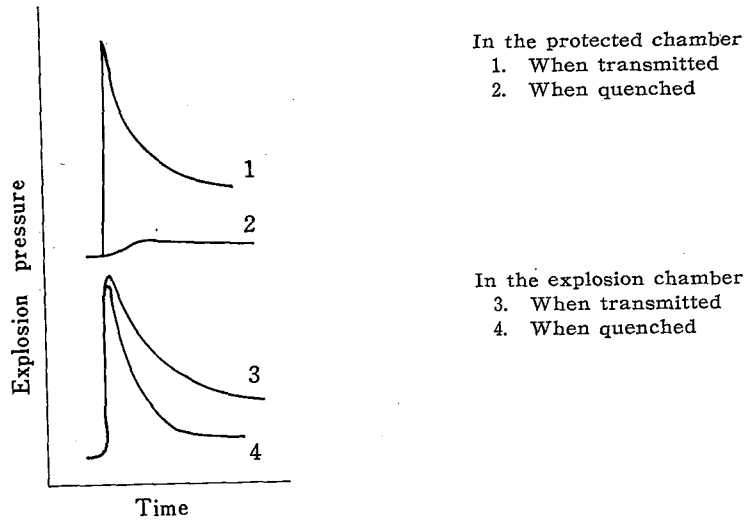


Fig. 5 Comparison of pressure records for the same condition (Whether an explosion was quenched or transmitted into the protected chamber is distinctly shown from these records.)

圧力波形による引火の有無の判定例

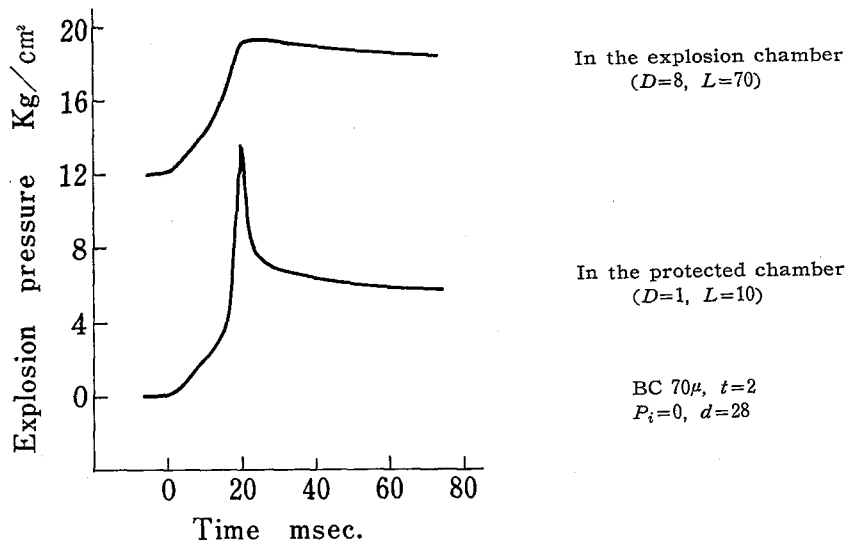


Fig. 6 Typical record of the pressure piling
典型的な圧力重積を示す波形

される場合であっても、爆発の機構自体は1インチ管について上述したこととほぼ同じである。ただ、 $L=70$ のときは爆発側と引火側の容積比が大きい(約360:1)ため、引火時には引火側に明らかな重積圧力を生じた。この値は例えば初圧 0, 0.5, 1.0 kg/cm^2 に対してのおおの約 14, 19, 27 kg/cm^2 というピーク圧になった。典型的な圧力波形を Fig. 6 に示す。これらの高い圧力を受けると焼結体は爆発側へふくらむという変形を示し、そのまま更に低い初圧でテストする

と、あたかも低いほうの初圧で引火したかのような結果を与えることになった。したがって Table 8 の結果は安全側のデータを与えるものであり、一度も引火しないまま初圧を上げていって引火した場合は別の見方が必要である。

一方、爆発側が1インチ管で長さ 120cm という配管に近い形状の場合には、爆発圧力は一般に振動波形を示した。デトネーションに転移するに至らない条件下ではこれらの振動波形は一定のパターンをとること

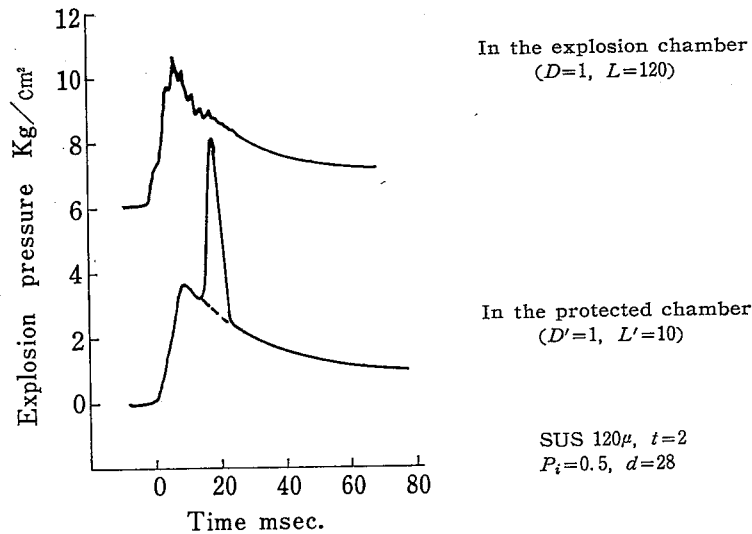


Fig. 7 Explosion record showing a delayed pressure piling in the protected chamber
 圧力重積の特殊な例

が少なく、同一条件での繰り返しテストにおいても種々の波形を示し、不安定な過渡的現象を生じていることが示唆された。圧力測定系の応答特性からみて追従性に疑問はあるが、引火しないときの引火側の圧力上昇の仕方から、30%という濃度では初圧が 1.0 kg/cm^2 をこえればデトネーションまたはこれにかなり近い現象が爆発側に生じていると推定できた。こうした激しい爆発が生ずると焼結体には衝撃的な圧力が加わり、焼結体の破損・変形が多数見られた。このため、強度的に耐えたならば火炎を阻止できたかもしれない焼結体でも引火する場合が生ずる。破損・変形は開口径と重要な関係を持ち、実用上の検討事項となろう。

この配管状容器の場合には圧力重積は4例見られたにすぎない。焼結体両側の容積比は12:1であるが、火炎伝播距離が長いにもかかわらずこうした結果を得たことは、火炎伝播速度が大きく、あまり予圧縮されなかったことによると説明される。重積圧力が生じて

もその程度が小さく、焼結体に影響を与えることはなかった。焼結体の破損などはあくまでも爆発側からの衝撃圧力によるものである。これは焼結体が引火側に向かって変形していることから明らかであり、この点は8インチ管の場合の変形と明確に区別されねばならない。Fig. 7に圧力重積の特殊な波形を示す。Fig. 6との比較から明らかなように、引火側における爆発が爆発側圧力のピークに達してのちに生じている。引火なしの場合には図の破線の径路を経る冷却曲線を描くはずであることを考え合わせると、消炎機構に対するひとつの暗示が含まれているようであるが、これについては5.6で若干の補足的考察をする。

Table 6に見るように、厚さ2mmのステンレス鋼製焼結体は初圧 1.0 でかなり影響を受け、 1.5 kg/cm^2 ではほとんどの条件下で変形・破損を避けることができない。圧力に対する焼結体の挙動は、通気性と引張（あるいは剪断）強度に関係し、実用上は汙過

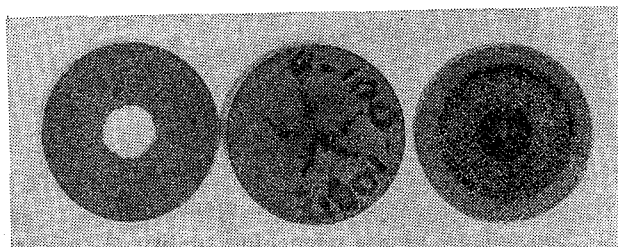


Fig. 8 Sintered metals fractured by explosions in the long ($D=1, L=120$) explosion chamber
 焼結金属の破損例

径の減少により強度とともに通気抵抗がどう増加するかというバランスに立って論ずる必要がある。Fig. 8には衝撃的圧力によって破損した焼結体の例を写真で示す。

5.2 爆発容器の形状効果

ガス濃度および初圧が一定であれば、ある燃結体において消炎されるか否かは、主として爆発側容器の形状による。点火位置および火炎の伝播方向が同じであれば、容器の内容積と、容器の長さとの比 L/D が重要なファクターであろう。

爆発性混合ガス中で発火が生じ、爆発からデトネーションに転移するまでに進む距離（デトネーション誘導距離）は容器径の小なるほど短いとされている（ただし、転移後は径の大きいほうが伝播速度は大となる）。このことは容器径の大きいほど伝播火炎の加速の割合が小なることを意味している。例えば管径1インチについては爆発側の長さ L が短いことは、實際上爆発の生ずる空間の小さい場合、あるいは発火源のすぐ近くに火炎防止器を置く場合に相当し、 $L=120$ では火炎の伝播がある程度すすんだ場合を想定している。1インチ管中の30%水素混合ガスでは、初圧が大

気圧より幾らか高ければデトネーション誘導距離は2m以下であることがわかっているため、本報の条件下では火炎伝播速度はかなり速いとみてよい。

Table 3 に爆発側容器の L/D を示したが、Table 4, 5 と Table 6 の結果の比較、あるいは Table 7 と 8 の比較により、 D が一定であれば L/D が消炎しやすさと関係することが明らかであり、火炎伝播速度と消炎性能を結びつけようとする際の根拠となりうる。一方、Table 4 ($D=1, L=10$) と Table 8 ($D=8, L=70$) は L/D が 3.6 と 3.4 の差から生ずるにしては異なりすぎた結果であり、 L/D が一定の場合には D の大なる（爆発空間の内容積の大なる）ほど危険であることが示される。この事実は消炎機構を焼結体における熱バランスで説明する際の証左とならう。形状効果についてはさらに検討の要があるが、特に内容積を一定とした場合については興味ある結果が期待されよう。

5.3 焼結体の濾過径および材質

多孔体の細隙の小なるほど消炎されやすいことは既に明らかにされているが、焼結金属の場合にも実験的に立証された。水素30%、初圧 1.5 kg/cm^2 までにつ

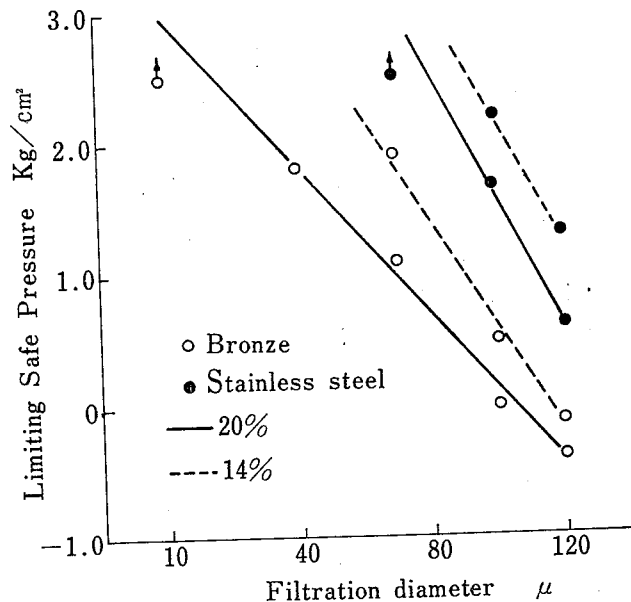


Fig. 9 Dependency of the quenching ability (Limiting Safe Pressure) on the filtration diameter of sintered metals (drawn from results in Fig. 4)
 濾過径と消炎能力（非引火圧力）の関係

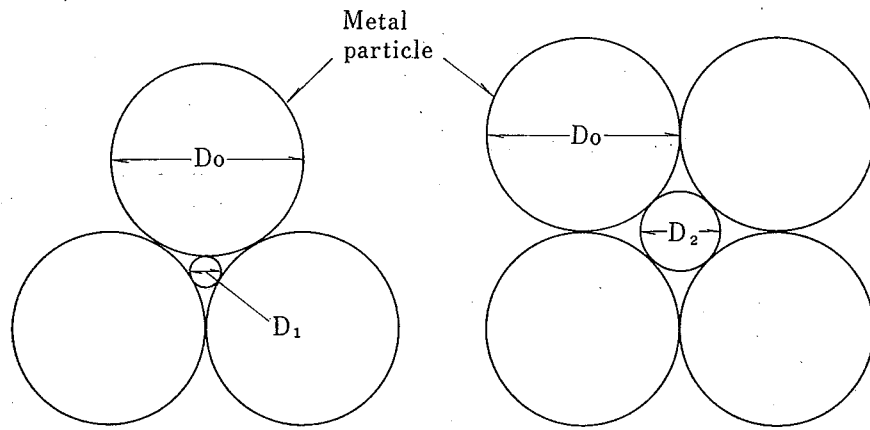


Fig. 10 Dependency of pore diameters (D_1 and D_2) on the filling patterns of spherical metal particles ;
 left : Triangular filling $D_1=0.155 D_0$
 right : Square filling $D_2=0.414 D_0$
 球状粉末の充填パターンと空孔径の関係

いて爆発側容器のみを考えれば、小型円筒容器に対しては厚さ 2mm の焼結体の場合、青銅 70 μ 、ステンレス鋼では 120 μ で消炎できた。やや大きな円筒容器ではこれらの値は 10 μ と 70 μ に減じた。デトネーションあるいはこれに近い爆発に対しては、ステンレス鋼製の 10 μ より小さい孔径のものが必要である。材質については焼結体の構造のゆえに定量的な比較は困難であるが、同じ孔径と厚さについてはステンレス鋼製のほうがはるかに消炎能力にまさり、本報中に示さなかった結果をあわせて考えるならば、ステンレス鋼の 120 μ 、100 μ 、70 μ のものは、青銅製の 70 μ 、40 μ 、10 μ にそれぞれ相当する消炎特性を示すようである。

Fig. 4 の結果から求めたところの、一定濃度における孔径と非引火圧力（初圧）の関係を Fig. 9 に示す。このように焼結体の消炎能力を非引火圧力で示せば、Fig. 9 の範囲では孔径の減少と消炎能力は直線的に比例関係を有する。孔径 10 μ 以下ではこの関係は指数関数的になることが予想される。また仮に 120 μ より粗いほうを考えれば、この条件での爆発限界初圧（濃度により異なる）に対する漸近線となる。なお、図中の各直線の勾配は焼結体の材質とガス濃度が消炎の難易性とどう関係するかを示すパラメータになりうる。例えば勾配（絶対値）の大きい材質ほど（孔径さえ減れば）消炎しやすく、勾配の大きい濃度ほど消炎は容易である。

孔径 120 μ は一般に製造されるフィルターとし

ては最も目の粗い部類に属する。このうち青銅製のものは初圧が大気圧以下であっても火炎を阻止することができない。これを水素-空気混合ガスにつき与えられている 0.9mm という消炎径（脚注 *4）との関係で考えてみる。焼結体の構造については種々考えられるが、球状粒子（粉末）が互いに接触している場合の最も単純な充填パターンとして Fig. 10 の 2 種類を仮定する。粒子径 D_0 とそれぞれの場合の空孔径 D_1 、 D_2 の間には比例関係がある。孔径 120 μ の焼結体の $D_0=840\mu$ とすれば、 $D_1=0.13\text{mm}$ 、 $D_2=0.35\text{mm}$ となる。 D_2 は消炎径の 50% と近い値であるが、実際には三角形充填の割合が多いとされているので 0.13mm と 0.45mm の間の差は大きすぎる。拡大写真によれば粒子は互いに腕をのばして連なっているので、空孔径は計算値よりもっと大きくなるはずである。さらに、消炎径の測定法と本実験の条件は異なるので厳密な一致は期待できないが、消炎機構が多孔体の種類の如何によるかどうかについての興味ある結果といえよう。

5.4 開口径その他の効果

Table 4, 5 および 6 からは、開口径の大なるほど容易に引火すること、また点火源に向って焼結体が（爆発側管内径と同じ径の断面積で）露出している場合のほうがオリフィスが点火源に面しているよりも消炎されやすいことが示される。この事実を結論づけるためにはさらに詳細なデータと気体力学的解明が必要

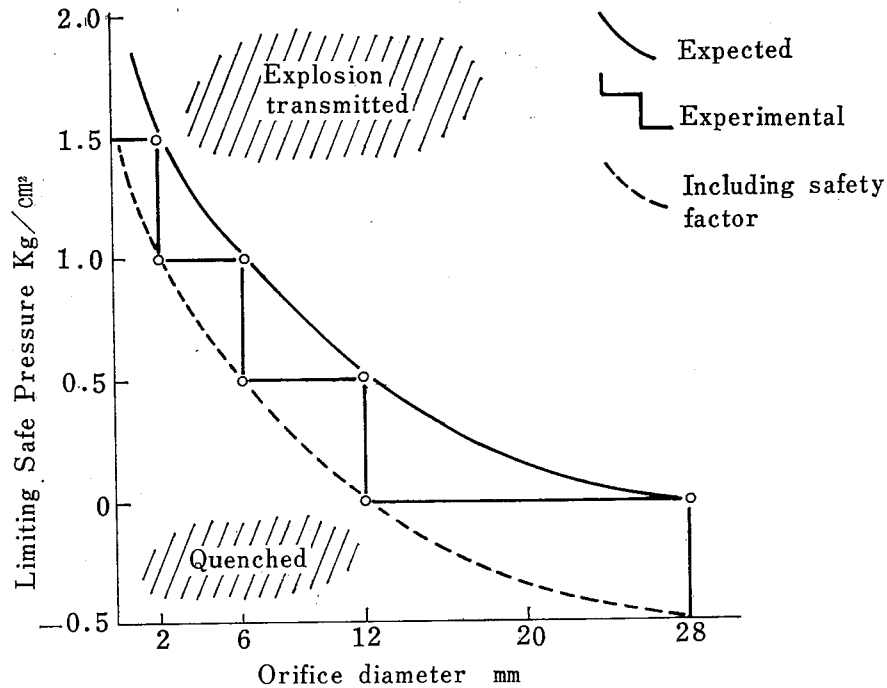


Fig. 11 Effect of the orifice diameter on the L. S. P. (from Table 6)
非引火圧力と開口径の関係

であるが、ここでは消炎能力を示すパラメータである非引火圧力と開口径の関係の例を Fig. 11 に示して一般的傾向を推定するにとどめる。Fig. 11 は Table 6 の焼結ステンレス鋼に関する結果のうち、孔径 120 μ の場合についてプロットしたものである（ただし、 $P_i=1.0$ 、 $d=12$ のときは 70 μ でも引火しているので同じ条件における 120 μ も引火とした）。折れ曲った直線群で囲まれる範囲は実験結果にもとづく消炎域を示し、これらの各端を結ぶ曲線のうち実線は推定消炎域を、また破線は安全率をみこんだ消炎域の限界をそれぞれ示すことになる。非引火圧力と開口径の刻みをさらに細かくして得られる曲線が実際の実験結果を示すものであり、これが図の実線と破線の間であって同様の傾向を示すであろうことには疑いもない。ただし、 $d=0$ では L. S. P. は無限大と考えるべきであり、 $d>28$ では全く別の意味をもってくることはつけ加えておくべきであろう。

なお、すでに述べたように開口径を減ざると衝撃的な圧力に耐えるという事実は実用上の問題と関連して無視することはできない。

焼結体の厚さの効果は 120 μ の青銅製のものについてごく部分的に検討しただけであるが、爆発側容器が小さい場合には厚さを増すと消炎能力が増した。し

かしながら、一般に多孔体の細隙がある程度以上大きいときには厚さの効果が少ないとする見方もあり、さらに検討を要する。

点火源と焼結体の位置関係については部分的な比較実験から結論を急ぐことはできないが、爆発側が長い場合には遠端点火のほうが近端点火より危険であると推測され、このことは容器内での火炎伝播機構についての説明と一致する。一方、短く小さい容器中での爆発に対しては、特に水素のように火炎伝播速度の大きいガスの場合には、点火位置はそれほど影響しないかもしれない。同様のことは火炎の伝播方向についてもあてはまると考えられる。Table 7 と 8 の結果の差は、伝播方向というよりむしろ形状の効果のほうが大きいとみなしたほうが妥当であろう。

5.5 ガス濃度と消炎特性の関係

5.5.1 濃度依存性

焼結金属の消炎特性が混合ガスの濃度によってどう影響されるかを示す結果 (Fig. 4) は極めて興味深いものといわねばならない。すなわち、供試焼結体のうち最も消炎能力の劣る青銅製 120 μ のものについては、曲線の最少値は水素-空気混合ガスの当量濃度付近で得られ、この濃度が最も消炎しにくいことを示し

ている。ところが青銅製 100 μ ではピークが低濃度側にずれ始めており、それより小さい径過径およびステンレス鋼製の焼結体では引火最適濃度は20%付近に移行してしまっている。青銅製 120 μ の場合に似た形状の曲線は、セーフ・ギャップの測定に際して得られる*16。また、当量濃度付近におけるセーフ・ギャップは 0.2mm といった値であり、120 μ の径過径をもつ焼結青銅の空孔径とコンパラブルな値であることに留意したい。

このような結果が得られたことに対する説明は、現段階では行なえない。また、爆発容器の形状を変えた場合にも常に同様の結果を得るとは考えられない。しかしながら本報の結果からただひとつ明らかなことは、焼結体における消炎には火炎伝播速度以外の因子が重要な役割を果たす場合がありうるということである。この因子を明らかにするのが今後の課題であるが、仮にこれを漠然とした形で表現すれば、焼結体の前後におけるガスの気体力学的動きといえよう。焼結体の空孔は一種のオリフィスを形成するとみなされるので、特に引火側容器内におけるガスの乱れ (turbulence) は重要であり、引火側の空間の形状や大きさを無視しては消炎機構の説明はありえないと考えられるが、乱れの度合などを含めてガスの動きの定量化は極めて困難といえよう。

なお、Fig. 4 のうちステンレス鋼製 120 μ についての曲線は30~40%で変則性を示すが、これは供試焼結体の繰り返しテストによるわずかな変形にもとづくものである。この濃度範囲付近は、焼結体に対して特に強度上の考慮が必要なが示唆される。

5.5.2 従来の諸研究と関連

冒頭に述べたように、従来の火災防止器の研究では火炎伝播速度との関係で消炎特性を論じており、実験ガスの濃度は最大の伝播速度を与える値にほぼ限定されているとみてよい。しかし、いわゆる火災防止器を離れて、もう少し広い範囲で火炎の阻止あるいは消炎に関する文献を詳細に検討してみると、これらの現象にガス濃度が関係することを示唆するデータを見出すことができる。

例えば、耐圧防爆構造の電気機器の容器のフランジ・ギャップ (セーフ・ギャップ) における消炎についての Smith の報告⁸⁾ には、あるギャップを抜けて

の火炎逸走を考える場合にはギャップの両側のガス濃度には最も消炎されにくい組合せがあること、およびギャップのすぐ近くで点火したほうが外部着火を容易にすることがある、などを示すデータがみられる。また、カナダにおける細管による爆発伝播防止の実験⁹⁾ では、径が一定の細管については管長の増すほど爆発が伝わり難いことが予測されるにもかかわらず、実際にはある程度の長さを持つ場合のほうがより危険であり、それより小さい長さでは爆発が伝播しないという結果が得られている。

これらは確かに直接にガス濃度と結びつかないかもしれないが、また本報の結果との間に意味づけを行なうことも困難ではあるが、ガス濃度が爆発の過程におけるガスの動きを制する重要なファクターであることを考え合わせるならば、ガス濃度の影響は当然予測されるべきであろう。

5.6 爆発の伝播機構に対するひとつの示唆

本報では、爆発がどのような機構で伝播したかにはかわりなく、引火側において爆発を生じた場合はすべて「引火」とみなした。しかしながら、引火側で爆発を生ずるためにはなんらかの発火能力を有する「もの」が焼結体を通過すればよいわけであって、これがいわゆる火炎 (visible flame) でなければならぬ理由はない。径過径の大きくない焼結体では、消炎径との比較からしても、火炎がその特性を保持したまま微細な空孔を通過するとは考えにくく、むしろ熱ガスによる発火⁵⁾ が引火側で生ずる可能性のほうが大きい。

Fig. 7 で圧力重積の特殊な例として示した圧力波形は、明らかに引火側における発火遅れを示している。この波形の得られた実験では初圧の刻みが 0.5 kg/cm² という大きなステップであったため、この例はむしろ引火しやすい側に近い場合でこのような波形の得られる限界条件に対応するものである。一方、初圧の刻みを 0.1 kg/cm² とした実験ではこうした波形は相当数見られ、第1と第2のピーク間の時間差は更に大きくなった。その最も著しい例を Fig. 12 に示す。この例では爆発側の圧力がピークに達したのち約 270 msec 経て引火側に爆発を生じており、引火しない側の限界条件に近いとみられる。このような現象は焼結体を通過した高温の熱ガスによると考えられ、いわゆる発火温度と発火遅れの関係の類似として捕えることができそうである。

*16 ただし、その場合にはたて軸はギャップの大きさであるが、消炎能力のパラメータとしては同じ意味と解してよい。

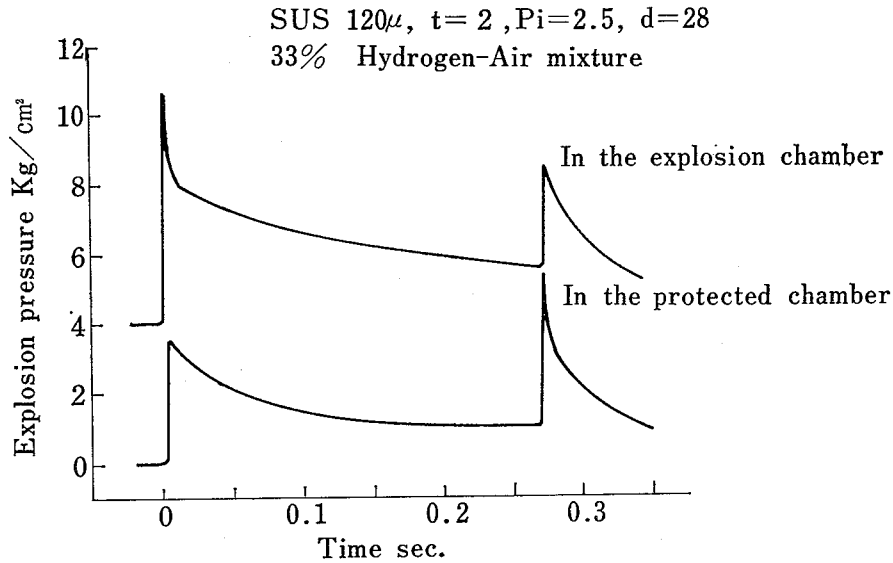


Fig. 12 Pressure record suggesting a delayed ignition in the protected chamber for an explosion initiated in the long chamber
引火側における極端な発火遅れを示す圧力波形

6. 結 言

爆発火災の阻止を目的とする火災防止器として焼結金属がどの程度の消炎能力を有するかを検討した。実験は水素-空気混合ガスを対象とし、各種形状の爆発容器系について密閉・静止系で行なった。焼結金属の一方の容器中で生じた爆発が、他方の容器中に伝播するか否かを観察し、焼結金属の消炎性能は爆発が伝播しないときの混合ガスの初圧（非引火圧力）で評価した。焼結金属の特性はフィルターとしての汙過径で示し、種々の条件下で爆発テストを繰り返したところ、焼結金属の厚さが 2mm であってもかなりの消炎性能を有することが示され、火災防止器の素子として実用化が期待できることが明らかとなった。主なる結果を列挙すれば次のとおりである。

- 1) 爆発の生ずる容器の形状・寸法は消炎性能に影響を与える。容器の長さとの径の比 L/D を考えれば、 D が一定の場合には L/D の大なるほうが、また L/D が一定の場合には D の大なるほうが、焼結金属における消炎は困難となる。同一の容器では点火源と焼結金属の位置関係も重要であろう。
- 2) 焼結金属の汉過径の減ずるほど消炎能力は増す。消炎能力を非引火圧力で示せば、実験の範囲内では両者は直線的に反比例する。材質については、汉過

径および厚さが同じであればステンレス鋼製のほうが青銅製のものよりはるかに有効であり、例えば前者の 120 μ のものは後者の 70 μ に相当する消炎能力を示した。

3) 爆発容器の断面積に対する焼結金属の露出面積の比は重要なファクターであり、露出面積を減ずると消炎能力は指数関数的に向上するとともに、耐圧力も増加する。

4) ガスの濃度は予想外の影響を与えた。120 μ の焼結青銅に対しては、非引火圧力の最小値は水素30%（当量濃度付近）で得られたが、汉過径が 70 μ 以下およびステンレス鋼製のものでは最も危険な濃度は 20% 付近となった。この結果は爆発容器が小さい場合についてであるが、火災伝播速度のみが消炎性能に関係するであろうという従来の考え方に反するものである。

5) 焼結金属を通して爆発が伝播しうる限界条件下では、爆発側で反応が終了したとみなされる時点からかなりの時間遅れ（例えば 270 msec）があったのちに引火側で発火の生ずることがわかった。このことは、いわゆる火災ではなく、熱ガスによる発火としてとらえることができそうである。

6) 爆発がデトネーションに転移してしまったあとは、衝撃圧力による焼結金属の破損という強度上の問題が加わるため、伝播阻止はより困難となろう。焼結

金属の露出面積を減ずることは効果的ではあるが、根本的にはデトネーションをいったん中断させてから阻止する方法¹⁰⁾がとられるべきである。

(47.8.23 受理)

参 考 文 献

- 1) A. C. Egerton *et al.*, "Sintered metals as flame traps", 4th Symposium on Combustion p. 689, (1953)
- 2) 秋田, "細隙による Flame quenching の理論", 災害科学研究会, (1970)
- 3) 橋口, "ガス爆発の阻止について", 化学工業資料, 31, (4), 45, (1963)
- 4) 林, "防爆対策としての火炎防止器と爆圧放散孔の応用について", 爆発災害防止講習会資料, 産業安全研究協会 (1972)
- 5) H. G. Wolfhard and A. E. Bruszk, "The passage of explosions through narrow cylindrical channels", Combustion and Flame, 4, 149 (1960)
- Also in : Bureau of Mines R.I. 5457 and 5495 (1959)
- 6) 焼結金属については例えば
粉末冶金技術協会編, "粉末冶金総説・焼結機構", 日刊工業新聞社 (1964)
汐見, "焼結フィルターのあらまし", 計装 5, (6), 23 および 5, (8), 34 (1962)
- 7) 林, "圧力重積現象について", 産業安全研究協会安全資料, No. 16, (1971)
- 8) P. B. Smith, "The role of flanges in conferring protection on flameproof electrical enclosures", S.M.R.E. R.R. No. 77(1953)
- 9) E. D. Dainty and G. K. Brown, "An investigation of gas explosion transmission through short cylindrical channels of varying length and diameter", Paper presented to Restricted Internl. Conf. Directors of Safety in Mines Research, (1965)
- 10) 松井, "管路の拡大による気体爆轟波の中断(第1報)", 産業安全研究所研究報告, RR-20-5 (1972)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-21-1

昭和 47 年 11 月 15 日

発行所 労働省産業安全研究所

東京都港区芝 5 丁目 35 番 1 号

電話 (03) 453-8441 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 108

UDC 614.838 : 621.762

火炎防止器に関する研究 (第1報)

——焼結金属の消炎性能について (1)——

林 年宏・鶴見平三郎

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-21-1, 1~19 (1972)

火炎防止器 (フレーム・アレスター) の素子としての利用を前提として, フィルターとして市販されている焼結金属円板の消炎性能を, 青銅とステンレス鋼の両材質について, 水素-空気混合ガスを対象として実験した。当量濃度付近の爆燃に対する消炎性能は比較的良好であり, 実用化が期待されるが, デトネーションに対しては強度的に難点があるとわかったほか, 焼結金属の濾過径と材質, 爆発容器の形状, ガス濃度などと消炎性能との関係について有益な知見を得た。

(表8, 図12, 参10)



UDC 614.838 : 621.762

Interruption of Explosions by Flame Arresters (First Report)

——On the Quenching Ability of Sintered Metals (1)——

by T. HAYASHI and H. TURUMI

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety RIIS-RR-21-1, 1~19 (1972)

The flame quenching ability of sintered metals, made of bronze or stainless steel particles, were studied using hydrogen-air mixtures in the enclosed explosion chambers. Sintered discs sold as filters showed good quenching ability against deflagrations of stoichiometric mixture, but they were less effective against detonations because of mechanical strength. It was shown that the filtration diameter of the sintered metal, as well as the shape and size of the explosion chamber, had an important effect on the quenching ability or flame quenching phenomenon.

(8 tables, 12 figures, 10 references)

