產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 protoshape 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 filtrated through a porous sintered body. The filtration diameter had a range from $120\,\mu(0.12\,\text{mm})$ to $10\,\mu$, 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

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-21-1

- 2 -

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 dimentions 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 120μ the minimum L.S.P. was given at the stoichiometric concentration, but that for 100μ 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(火炎防止器とは何か)

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(火炎)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、爆発火炎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 全素子は一般に火炎防止器(フレーム・アレスター、 Flame arrester)*2 と呼ばれている。爆発火炎の阻止 という観点から見れば火炎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。ひとつは爆発火炎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。

火炎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 能および火炎防止器として要求される関連特性につい て検討し、実用的な火炎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. 火炎防止器の理論的背景

火炎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い難い。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で混合ガス中を火炎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パ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炎防止器としての潜 在的能力を有すること***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炎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⁾³⁾もなされており,筆 者らもすでに一部について招介し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 は火炎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。

それは火炎の伝播速度と火炎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炎防止器によってその配管中で 生じた爆発火炎を阻止できるか否かは,配管中を火炎 防止器に向って接近してくる火炎の伝播速度によって 決まる(逆にいえば,火炎伝播速度がある値をこえれ ば火炎は阻止できない)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(Detona-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} 火炎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にのみ触れるにとどめる。

^{*4} 火炎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、火炎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,多孔体からなる火炎防止器にお 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 ンスに加えて火炎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,いわゆる火炎は 阻止できても発火源としての能力を有する熱ガス (Hot gas)が火炎防止器を通過し,これによる発火⁵⁾ も考慮に入れねばならないので,火炎伝播速度のみに 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 火炎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 枠中に最密充塡し、これをその金属の融点より低い温 度で還元性雰囲気炉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。 フィルターなどにかなりの使 用実績を有するので、これに若干の加工を加えて火炎 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 「沪過径」なる表現が一般に用いられている*6。焼結 体のバラツキの原因のおもなものは次の3 者で あろ 30

 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 焼結体の沪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

RIIS-RR-21-1

Table1 のとおりである。すなわち沪過径 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) be-
	fore sintering
	焼結金属の沪過径と焼結前の金属
	粒子径の関係

Nominal Filtration Dia- meter 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
* IIS 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 の沪過径の大きい)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 ものは火炎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っ

^{*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} 沪過径とは、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)を沪過しないかを意味する値であって、 例えば沪過径100µ(ミクロン)と呼ばれる焼結体は直径100 µの球形粒子の95%を沪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。

^{*7} 沪過径と節メツシニ数の関係は焼結体のメーカーによって相異 があるが、沪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。

啠

結論として筆者らは、焼結体の代表値として沪過径 (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、焼結体のパラッキの 影響を除去できるものと信ずる。

3.1.2 材

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 ではこの点に関しての検討を省くこととした**。 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 40 mm の円板で,厚さはほとん どの場合約 2 mm で,一部の実験では 4 mm のもの を用いた。沪過径は **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	Apparent Density g/cm ³							
Material	μ	Range	Average						
	120	4.83~4.91	4.86						
	100	5.07~5.17	5.11						
Bronze	70	5. 34~5. 49	5.43						
	40	5.73~5.82	5.77						
	10	5.86~5.94	5.90						
	120	4.15~4.39	4. 28						
Stainlaga	100	4.29~4.32	4. 31						
staniess	70	4. 28~4. 31	4.29						
Steel	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・sec・℃) 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 で青銅の場合沪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ずると焼結体の空間率 (空隙率)が減ずることによる。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。沪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 1 mm 以上であるが、 密度は厚さとはほとんど関係しない。

— 5 —

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 ごとに変化させた(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10~60% の間で約10%ごとに変化させ、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/cm² 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/cm²、減圧側では 100 mmHg (約 0.13 kg/cm²) 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28mm)または8インチ(内径約200mm) 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(inch)およびL(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。 RIIS-RR-21-1

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4mm 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(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

Assembly	Expl	Explosion chamber										
No.	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							

 Table 3
 Sizes of test enclosure assemblies

 爆発容器の寸法および組合せ

*11 実験は-600mmHg (-760mmHg で 絶対真空とした)まで 行なったが,結果的には-400mmHg 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
- 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 まで送入し,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/cm²の爆発を連続10 回以上阻止しうる焼結体の沪過径を両材質について求 めた。開口径は $d=2\sim28$ (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,沪過径の小さいほど,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, 沪過径,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。 〇は各欄の分数の分母の回数のテストに対して引火の

- 7 -

^{*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、焼結体のすく 近くでの点火を近端点火という。(Central, Far end or Near end ignition)

	$\overline{P_i}$			0					0.5					1.0				1	. 5	
Sintered metal	ď	2	6	12	20	28	2	6	12	20	28	2	6	12	20	28	2	6	20	28
Bronze 120 µ	SM	() 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=2.15~2.35	OR	2/18		0 2/2			6 4/13		$\sum_{2/2}$											
Bronze 100 µ	SM	() 0/2		⊖ 0∕1			0/15		○ 0/15			0 0/15		• 1/1			• 2/9			
$t=2.15\sim2.35$	OR		$\bigcirc 0/2$		0/10	0/15) () 0/2		• 1/1	• 3/3) 0∕15		• 1/1	• 2/2		• 2/4	• 1/1	
Bronze 70μ t=2.35	OR										⊖ 0∕15								⊖ 0∕15) 0/15
Bronze 120μ t=4.10																				0 0/15
Stainless steel 120μ $t=2.15\sim 2.20$															ļ	3) 0/30

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

 Position of the spark plug Position of a sintered metal under test Position of a sintered metal under test Position of a sintered metal under test Pi Initial pressure kg/cm² (gauge) Orifice diameter mm Thickness of sintered metals mm No explosion occurred in the protected chamber Explosion Explosion Chamber (D = 1, L = 10) SM Ignition at the sintered metal side OR Ignition at the orifice side 		1	1	<u> </u>			1		1	1	_ <u>}</u>		1	1
	Protected Chamber (D' = 1, L' = 20) Explosion Chamber (D = 1, L = 10)		1 1	Position Position Initial p Drifice of Thickne No expl Sxplosic Numer nission gnition	of the of a si pressure diamete ess of si osion ou on trans- ics mea s to the at the at the	spark nterec e kg/cr r mm interec ccurre smitte an th numb sinter orifice	plug 1 met n ² (g: d met d in d e rat per of ed m e side	al un auge als r the p tio o tota etal	nder) protec f the l test side	test ted c nut	chami	ber of	explosio	ı tranş

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 10 cm)であるが、二、三の比較実験においては近端 (焼結体から 10 cm)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。〇および●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。 **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 \forall 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 水素濃度を変化させた実験

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

^{*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。

	/~		,			()											· · ·
	P_i		()			0.5	5			1.	0			1	. 5	
Sintered metal	d	2	6	12	28	2	6	12	28	2	6	12	28	2	6	12	28
Bronze 120 µ	SM	0/10	0/10				() 0∕10			1/1	1/1			1/1	• 1/1		
t=2.45	OR		● 1/1				• 1/1								:		
Bronze 100μ	SM	-	0/10		0/10		1/2	1/4	2/2	0/10		1/2	• 2/2	0/10	•* 2/6	• 1/1	2/2
t=2.15~2.30	OR			3 /3						· · ·							
Bronze 70 µ				-										0/15			0/3
t=2.35~2.40										· -)* 0/20
Stainless steel 120μ $t=2.15\sim2.20$	l) 0/3				0/3				0/3				0/40
						* mea	ns th	e far	• end	ignit	ion.						
(D-1, L=2)	(I	D' = 1,	L' =:	10)													

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)

Table 6Quenching 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

	P_i	0				0.5		1.0				1.5				
Filtration Diameter	d	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
<i>t</i> =2.10∼2.20	011			○* 0/4			* 0/10		-		•* 2/10					
70 µ	SM) 0/10		0/11					0/10			
t=2.10~2.15	OR	⊖ 0/2		0/10	0/10 0∕10) 0/10		1/2			 0∕10	▽ 0/10			
40 µ	SM									$ \bigtriangledown 0/20$) 0/20	1/12	
<i>t</i> =2.05~2.20	OR			0/4) 0/11				1/1					▲ 1/1
$10 \mu t=2.15$) 0/10				0/10	-				▲ 1/1
					·											

means the near end ignition.

 \checkmark or \bigtriangledown means whether explosions transmitted or not, the sintered metals under test being deformed either. \blacktriangle means that the sintered metals were fractured and subsequently explosions transmitted.

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-21-1

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)

Carros Links and Links								
P _i Sintered metal	Ō	0.5	1.0	1.5				
Steinless steel 100μ	0/10	0/10)* 0/10		☆			· · · · ·
<i>t=2.15</i>			0/2	0/15		T 00)	(D' = 1, L' = 10)	
Stainless steel 120μ t=2.20) 0/2	0/10	0/10	 (D=8	, L=20)		
Bronze 70μ $t=2.30\sim 2.35$		-) 0/10	1/20				
Bronze 100μ t=2.20	● 1/1	• 1/1						

* 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)

		AL 77			
P _i Sintered metal	0	0.5	1.0	1.5	.
Bronze 70μ t=2.30~2.35	9 2/5	▼ 1/1			(D' = 1, L' = 10)
Bronze 40μ t=2.15) 0/10	▼ 1/1			(D = 8, L = 70)
Bronze 10μ t=2.05) 0/10		0/10	
Stainless steel 120μ t=2.20	▼ 3/3	V 1/1	-		
Stainless steel 100μ t=2.10) 0/10	▼ 1/9		*
Stainless steel 70μ t=2.10			0/10	0/10	

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⁾。

- 10 -

^{*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 大きさの変え方における step-up and down method と 基本的には同じであると考えられる。

火炎防止器に関する研究(第1報)

Sintered Explosion 2.5 0 meta1 Quenched Transmitted Bronze 120 µ \bigcirc 2.0 сm² 100 H Δ ▲ Kg/ $70 \,\mu$ 1.540 µ \diamond ¢ Stainless pressure 1.0 steel 120 µ \bigtriangledown 0.5 Initial 0 -0.5 -1.010 20 30 40 50 60 Hydrogen concentration vol.% in air

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/cm²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のおのの材質と沪過径につき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 濃度一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の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 沪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)度合が少なく、引火 した場合においても、ゆるやかな昇圧にひき続いての 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

- 11 -



RIIS-RR-21-1

産業安全研究所研究報告



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/cm² に対 しておのおの約 14,19,27 kg/cm² 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とは別の 見方が必要である。

一方,爆発側が1インチ管で長さ 120 cm 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



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随 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/cm² 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 かったので, 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/ cm² 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,実用上は沪過



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、容器の長さと径の比 *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、実際上 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ので、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ろう。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 焼結体の沪過径および材質

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/cm² までにつ







Fig. 10 Dependency of pore diameters $(D_1 \text{ and } D_2)$ 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 より小さい沪過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、同じ沪過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、一定濃度における沪過径と非引火圧力(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 の範囲では沪過径の減少と 消炎能力は 直線的に比例関係を有する。沪過径 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 なろう。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(沪過径さえ減ずれば)消炎しやすく、勾配の 大きい濃度ほど消炎は容易である。

沪過径 120μ 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 D₀ とそれぞれの場合の空孔径 D₁, D2 の間には比例関係がある。 沪過径 120 µ の焼結体 の $D_0 = 840 \mu$ とすれば、 $D_1 = 0.13 \, \text{mm}, D_2 = 0.35$ mm となる。 D_2 は消炎径の50%と近い値であるが、 実際には三角形充塡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



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、 沪過径 120 μ の場合についてプロットしたものである (ただ し、P₁=1.0、d=12 のときは 70 H 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関係を 示すものであり、これが図の実線と破線の間にあって 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ずると衝撃的 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,それより小さい沪過径およびス 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 の沪過径 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 120μ 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の変形にもとづく 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ことが示唆される。

5.5.2 従来の諸研究と関連

冒頭に述べたように,従来の火炎防止器の研究では 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,いわゆる火炎防止器を 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 しれず,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) でなければならない理 由はない。沪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 0.1kg/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。



6. 結 言

爆発火炎の阻止を目的とする火炎防止器として焼結 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沪過径で示 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、火炎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) 焼結金属の沪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、沪過

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、 沪過径が 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、火炎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 、いわゆる火炎ではなく、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

- A. C. Egerton *et al.*, "Sintered metals as flame traps", 4th Symposium on Combustion p. 689, (1953)
- 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)
- H. G. Wolfhard and A. E. Bruszak, "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,"粉末ヤ金総説・焼結機 構",日刊工業新聞社(1964) 沙見,"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)
- 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)

產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, $1 \sim 19$ (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)