

RIIS-TN-83-2
UDC 536.46 : 614.839

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1983

ウレタン・フォームの消炎能力と
その応用について

林 年 宏

労働省産業安全研究所

ウレタン・フォームの消炎能力と その応用について*

林 年 宏**

Flame Quenching Performance of Polyurethane Foams and Their Application for Explosion Protection

by T. HAYASHI**

In this paper an evaluation of the flame quenching ability of plastic foam is given, with particular reference to its use as flame arrester element. The material tested is polyurethane foam with cellular structure of skeletal three-dimensional network consisting of a large number of interconnecting open cells: less than 3 per cent of the total volume is occupied by the plastic network, the rest being void. In the present work, average hole diameter of the cell is defined as $25.4/N$ (mm), where N is the number of holes per 25.4 mm on the surface of the foam.

Experiments are carried out in an explosion tube of steel, 286 mm diameter and 2.2 m long, both ends being closed with blank flanges. A foam under test can be mounted in the tube with variations of the distance from the ignition source which is located at one end of the tube. Throughout the experiments a 4.5 per cent by volume propane-air mixture is used. The pressure of the mixture before ignition is either atmospheric or 3 psig. For a given foam, the minimum thickness required for quenching a flame propagating against the foam is determined by inches.

Even though there have been observed some thermal damages on foam surfaces by flame attack, result of experiments shows fairly good agreement with the rule of thumb describing that the hole diameter of arrester element must be smaller than half the quenching diameter of the explosive gas mixture: with foams of average hole diameter of 1.3 mm or less, the minimum thickness for quenching is only several inches for most flames under test, but with larger holes than 2.5 mm even a weak flame can pass through the foam of 1.8 m thick.

Through additional series of experiments, in which the explosion tube is filled with foam except for rather small ignition volume, it is found that the pressure generated is far less than that with no foam, even when a flame has travelled through the cells of foams of larger hole diameter. This result suggests that plastic foams may be used as a filler in some kinds of storage tanks in purpose of preventing the development of explosions.

* この研究の一部は第 13 回安全工学シンポジウム (1983.7 東京) において発表した。

** 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

1. 緒 言

フレイム・アレスタ（火炎防止器ともいう。以下、アレスタと略す）は、配管等の内部に生じた爆発火炎の伝播防止を目的とした安全装置であり、細隙における消炎現象をその原理としている。アレスタの最も重要な構成部品は、火炎を細分化して消滅させるための通気性のある細隙集合体であり、これを消炎素子と呼ぶが、Davyが炭坑用安全ランプに用いた（歴史的にみて最初のアレスタである）金網をはじめとして、細粒充填層、焼結金属、発泡金属（メタル・フォーム）などに代表されるように、実用上の消炎素子は金属やセラミックスなどの無機物を素材としている。これら以外では、ポリ塩化ビニル製の網を用いた駒宮¹⁾の実験が知られているにすぎない。アレスタは、場合によっては反復して火炎を受け、あるいは持続的な火炎にさらされる可能性もあるので、一般的には消炎素子の素材は不燃物とすべきであるが、熱的損傷を受けにくいような条件下においては、その利点を生かしたプラスチック製の消炎素子を用いることも可能であると考えられる。

本報では、家庭用品などに広く用いられているポリウレタン・フォームを消炎素子として、直径 12 インチの密閉管中におけるプロパン-空気炎に対する消炎能力と熱的損傷について実験した結果を報告する。

アレスタは伝播中の火炎を阻止するものであるから消炎素子の細隙は十分に小さいことが必要であり、一般には消炎直径の 1/2 以下とすべきであることが経験則として知られている。一方、火炎伝播の開始時点においては、最初に生じた火炎核がある大きさに成長することが必要であり、この限界を消炎容積と呼んでもよいことは既に報告した²⁾。消炎容積を球状の空間としたときの球の直径は消炎直径よりも大きく、従ってこの大きさの細隙では伝播中の火炎は阻止できない。しかし、消炎容積の大きさの細孔が三次元に連続した空間内を伝播する火炎の速度は小さいとみられ、細隙壁面への熱損失は逆に大きくなるので、こうした細隙

体を充填した容器内を火炎が伝播したとしても、そのとき生ずる圧力はそれほど大きくはならないと考えられる。溶解アセチレンの容器に充填する固形マスはアセチレンの分解爆発を防止するためのものであるが、これに類する方法を可燃性ガスの貯蔵タンク等に応用できると考えられる。この場合、充填物の細隙がある限界以下の大きさであれば火炎が到達してもそこで消滅するが、細隙が限界よりも大きく、火炎が細隙を通過してタンク内全体に伝播したときの結果についてはほとんど知られていない。こうした挙動をしらべるための充填物としては、三次元構造の細隙体であり、かつ熱的影響を受けやすいプラスチック・フォームが最適である。本報では、消炎素子として用いたと同じポリウレタン・フォームをタンク等の爆発防止用充填物として利用することについても検討した。

2. ポリウレタン・フォームの特性

ポリウレタン・フォーム（以下、フォームと略す）はウレタン樹脂の発泡体であり、実験に供したフォームはポリオール（多価水酸基を有するポリエステルまたはポリエーテル）、ポリイソシアネート、発泡剤、助剤、その他を原料とした軟質のフォームである³⁾。フォームの骨格は発泡金属と同じ海綿状の三次元網目構

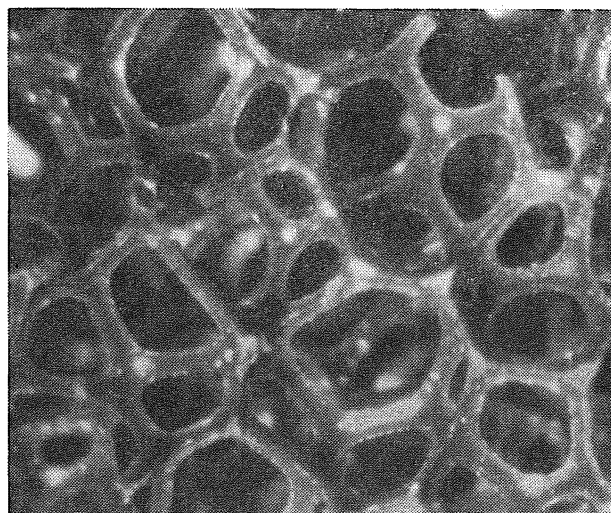


写真 1 フォームの断面拡大写真

表 1 消炎素子としてのポリウレタン・フォームの特性値

フォーム No.	1 インチ間の平均細孔数: N	$25.4/N$ mm	空隙率 %	見掛け密度 g/cm^3	ポリオールの種類
1	8	3.2	97	0.030	ポリエステル
2	17	1.5	98	0.021	ポリエステル
2	10	2.5	98	0.021	ポリエステル
3	22	1.2	98	0.022	ポリエステル
4	11	2.3	98	0.023	ポリエーテル
5	20	1.3	98	0.022	ポリエーテル

造であるが、家庭用品などの素材として用いるフォームとの相異点は、熱処理により発泡膜を完全に除去して骨格だけが残るようにしたことにある。この結果、ほぼ球形の細孔が連続した構造となり、空隙率が大きく通気性に富み、見掛けの密度が小さい細隙集合体が得られる*1。表1に供試フォームの諸特性値を、写真1にフォーム断面の拡大写真を示す。

供試フォームは細隙が三次元的に連続した構造であるため、消炎素子としての細隙寸法を（たとえば金網の目開きのように）明確に定義することはできず、フォームの任意の断面において1インチ間にいくつ細孔があるかをもって示すのが通例である。（発泡金属の場合も1インチ間の細孔数を称呼値としている。）細孔の大きさは発泡条件によって変えうるが、全体的に見たときの細孔の大きさにある程度のバラツキが生ずることは避け難い。表1のフォームの細孔数は $N \pm 2$ の範囲にある。

細孔が球形であるとすればフォームの断面は円の羅列となるが、これらの円の直径は同一ではなく、また、円の中心が直線上に並ぶわけでもない。従って、仮にフォーム骨格の太さを無視するとしても、表の $(25.4/N)$ の値は細孔の大きさそのものを示すのではない。しかし、他に適切な方法がないので、この値を細孔の大きさの尺度として用い、消炎直径との比較などに際しては平均細孔径として扱うこととする。本報の実験では4.5%プロパン-空気混合ガスを用いたが、この混合ガスの消炎直径が2.9mmであること*4から、供試フォームの選択に際しては $(25.4/N)$ の最大値が2.9よりもやや大きく、最小値が2.9の1/2よりもやや小さくなるように留意した。

ポリオールの種類を変えたのは細孔の大きさが同じ場合について素材の影響をしらべるためであり、この意味では表のフォームNo.の2と4及び3と5はそ

れぞれ細孔の大きさが等しくなるように選んだものである。

空隙率は既存の消炎素子のうちでは最大とみられ、見掛け密度は他の消炎素子に比して格段に小さい*2。ASTM D 1692-76に準拠した燃焼試験によれば供試フォームの燃焼速度は約120~270mm/分*3であり、空気中では容易に燃焼する。熱分解開始温度は200°C前後であり、爆発火炎による焼損も当然予想されるが、このことは、金属などの消炎素子とは異なって、フォームへの火炎の侵入経路の観察などを可能にするであろう。

米国では既に、この種のフォームを一部の航空機の燃料タンクの爆発防止用充填物として使用しており、その際に要求される flame arrester characteristics については MIL 規格⁵⁾に定めている。わが国でも、レーシング・カーの燃料タンクに、衝突などによるタンクの破損時の燃料飛散防止のために、上記 MIL 規格に適合するセーフティ・フォームを充填することとしており（JAF 安全燃料タンク規則 1971）、この場合は火炎伝播の防止やタンク自体の爆発防止を目的としてはいないにせよ、この種のフォームを防災のために利用している例として興味深い。

3. 実験装置及び実験方法

実験に用いた爆発管の概要と供試フォームの固定法を図1に示す。爆発管内壁の各所には幅15.5mm、深さ3mmの溝が円周方向に刻んであり、この溝にはめこんだ厚さ15mm、幅10mmのパネ・リング（ピストン・リング）2本を用いてフォームの位置決めと固定を行う。供試フォームは爆発管の内径に合わせて発泡塊から円筒状に截断し、厚さは1インチ刻みで変えたが*4、10インチを超える場合にはフォームを重ね合わせて必要な厚さとした。フォームの前後は直径4mmの棒鋼製の網で押さえた。パネ・リングをはめこむ溝の位置は固定されているので、フォームの位置及び厚さによって押さえ金網とパネ・リングの間隙は異なるが、この間隙には種々の厚さのリング状スペーサを挿入し、固定時にフォームが軽く圧縮されるように調節した*5。

*1 発泡膜を除去したフォームは、他の多くの消炎素子と同様に、フィルタとして既に広く利用されている。また、除膜処理を施す以前のもはクッション材やシール材として利用されている。

*2 空隙率及び見掛け密度はブリヂストンタイヤ(株)による測定値である。発泡金属の空隙率はフォームと同程度か又はやや小さい。また、フォームの密度は従来の消炎素子のうちで見掛け密度が最も小さいとされている発泡金属の約1/20である。

*3 ブリヂストンタイヤ(株)による測定値。なお、この試験規格は現在は廃止されている。

*4 MIL規格を参考とした関係上フォームの厚さはインチ単位で示すが、たとえば厚さが1インチというときは厳密に25.4mmに等しいという意味ではなく、 ± 2 mm程度の截断誤差を含むものと解されたい。

*5 フォームの厚さ（自由厚さ）に対して2~3mm圧縮されるようにした。

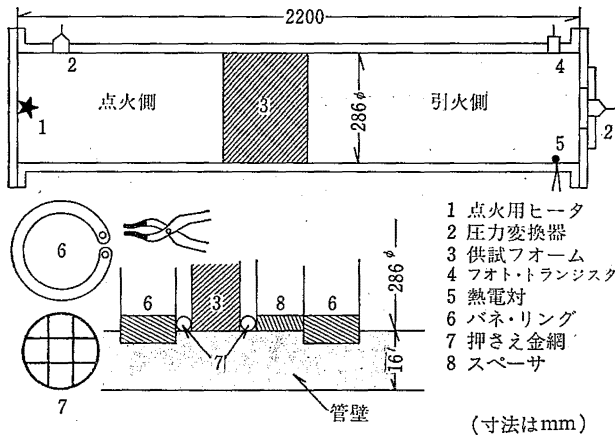


図1 爆発管の概要とフォームの固定法

毎回の実験に際しては、供試フォーム（新品）を装填した爆発管内を真空（絶対圧で2mmHg以下）としたのち、予め調整してある4.5%プロパン-空気混合ガスを所定の圧力（以下、初圧といい、 P_i と記すことがある）にまで満たし、点火側管端中央に設けたニクロム線ヒータで点火する。混合ガスの初圧は0（大気圧）及び0.21 kgf/cm²（圧力はゲージ圧。以下同じ）の2種類である。プロパンは大部分の飽和炭化水素や溶剤類を代表する燃焼特性を示すガスであり、4.5%混合ガスは最も消炎しにくい火炎を生ずる組成のものである。

フォームの種類と厚さ及び点火側空間の容積を変えて実験し消炎する限界の条件を求めたほか、一部の実験では引火側全体にフォームを充填した場合の挙動をしらべた。実験条件の設定に際しては前述のMIL規格の一部を参考とした。実験期間中の大気圧の変動範囲は762~771 mmHgであり、室温は10~14°Cであった。

各実験について、点火後の爆発管内の圧力変化のほか、引火側における火炎の発生の有無を計測した。圧力の測定には歪ゲージ式エンジン指圧計、動歪増幅器及び電磁オシログラフを用い、圧力の較正は分銅式静圧較正装置によった。火炎検出用センサとしてはフォト・トランジスタ及び熱電対を用いた。圧力及び火炎の検出センサの位置はフォームの厚さ及び装填位置によって異なるが、図1には代表的な位置関係を示した。

4. フォームの消炎能力に関する実験の結果及び考察

4.1 フォームの消炎能力とその限界

管中を伝播する火炎が消炎するか否かは消炎素子に接近する火炎の速度（火炎面の見掛けの移動速度）に

よって決まり、火炎速度の大きいほど消炎は困難であるとされている。本実験では火炎伝播距離（点火源からフォームまでの距離）は最大でも約1mにすぎず、この間の火炎速度の有意な測定は困難であり、また本実験においてはそれほど重要ではないので、火炎速度は測定せず、点火側空間の容積を火炎の強さのパラメータとした。（なお、火炎速度については4.4節において考察する。）

爆発管の全内容積を V_t とし、混合ガスの初圧 P_i と点火側空間の容積 V_i を変化させたときの消炎に要するフォームの厚さを図2に示す。他の条件が同じであれば初圧が高いほど消炎しにくいので、 $P_i=0.21$ に対する消炎限界曲線のほうが $P_i=0$ の場合よりも上方に位置することになる。このことを利用すれば図に示していない条件下での結果も推測できるが、 V_i/V_t が0.3以下の場合のNo.2,3及び5のフォームについては、 $P_i=0.21$ の火炎を消炎するに要するフォームの厚さと $P_i=0$ のときの消炎限界厚さの差は0~2インチであり、 V_i が小さい場合には、この程度の初圧の差は消炎限界厚さに大きく影響しないことがわかった。

伝播距離が約1mまでの範囲では火炎速度が距離とともに連続的に増加すること、及び、 V_i の増すほどフォームによって冷却すべき熱ガス（燃焼生成ガス）の量が増すことから予測されるように、限界曲線

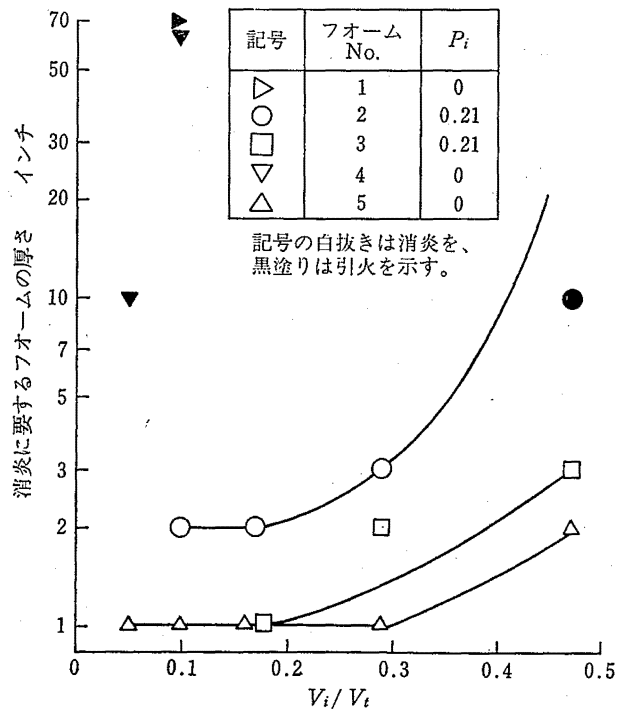


図2 消炎に及ぼす点火側容積の影響

は図のように右上りとなる。(密閉端点火の場合、伝播初期の火炎速度がある距離にわたって一定であるという従来の知見は、この実験において V_i/V_t が 0.2 以下の場合の消炎挙動が V_t によって変化しないという結果と関係づけることができる。)

初圧が高いほど、また V_i が大きいほど、フォームが受ける爆発火炎は「強い火炎」となり消炎しにくいので、強い火炎を消炎できる消炎素子は「消炎能力が大きい」ことになる。こうした観点からみれば、図1の曲線はフォームの厚さとともに消炎能力が増すことを意味するが、フォーム No.1 及び 4 のプロットは、フォームの厚さを増す効果のない場合があることを示唆している。この実験では平均細孔数 N が 17 以上の場合にのみ厚さによる消炎能力の増大がみられた。

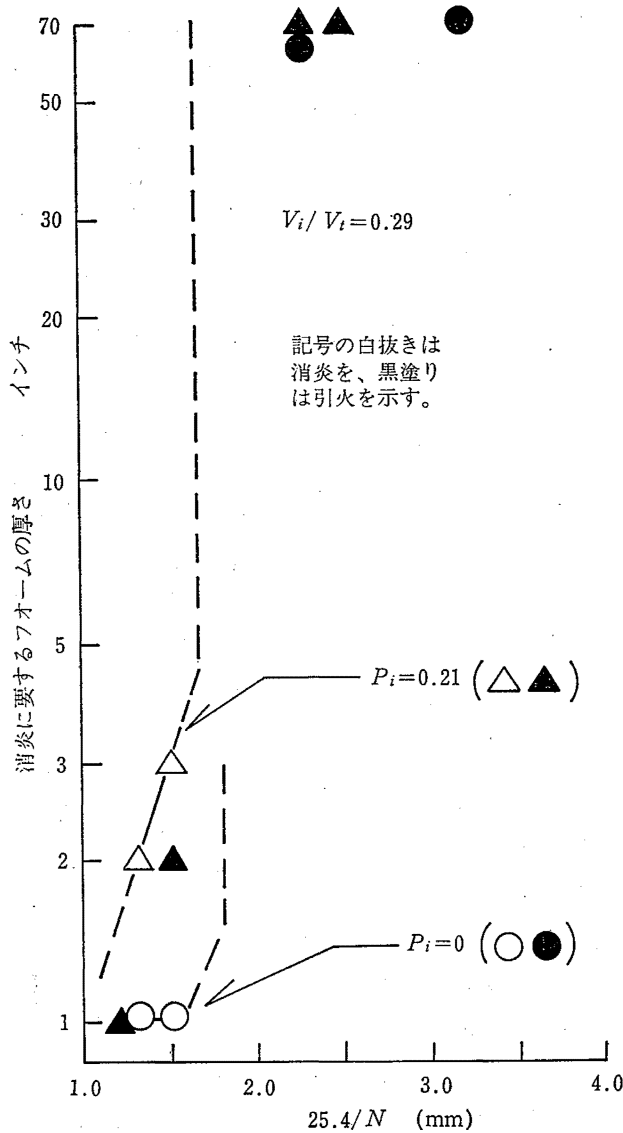


図3 細孔の大きさの効果

N がある値以下では厚さにかかわらず消炎しないという結果は、フォームの細孔の大きさと関連づけたほうが理解しやすい。図3は細孔の大きさ(25.4/ N)を変数として消炎限界厚さを示した例である。細孔の大きさが限定されたためデータの数は少ないが、各初圧における細孔の大きさと消炎限界厚さの関係はある範囲内では右上りの曲線で示され、細孔が大きいくほど限界曲線の変化率は大きくなり、細孔の大きさがある値を超えれば限界曲線は縦軸に平行な直線となることが推測される。フォームの厚さが充分大きくても消炎しないという限界の細孔の大きさは、初圧の高いほど、また V_i の増すほど減ずる。図3の場合には、(25.4/ N)で示した細孔径が 1.5 と 2.3 (mm) の間にこの限界が存在することがわかる。(厳密な限界値を求めるには細孔の大きさを細かく変化させた実験が必要であるが、実用上はここに得られた結果で充分である。)

図4は種々の V_i についての結果を一つの図で示したものであるが、 $V_i/V_t=0.47$ の場合には (25.4/ N) が 1.3 以上のフォームでは消炎できないことがわかる。また、 V_i が小さく初圧が大気圧のときの比較的弱い火炎であっても (25.4/ N) が 2.0 以上のフォームによる消炎は期待できないと考えるべきである。

一方、厚さの限界については、この実験の結果から

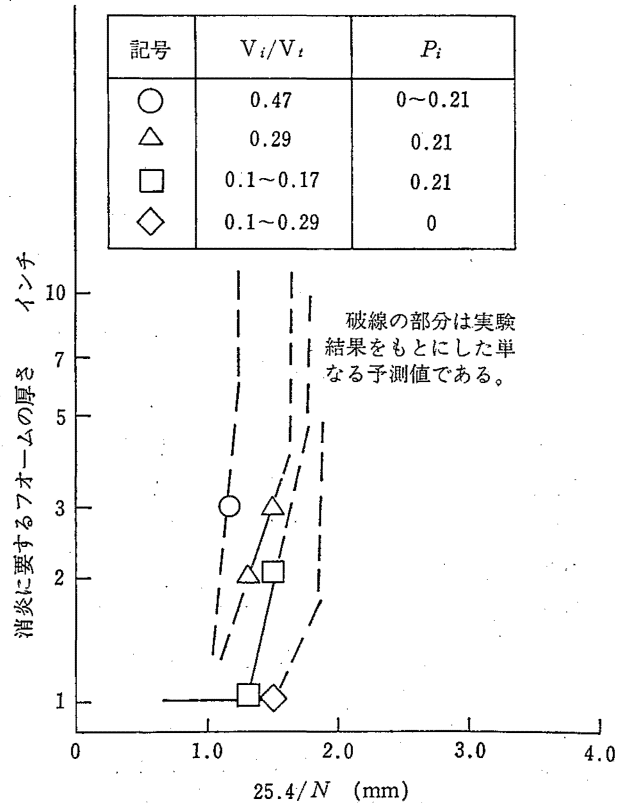


図4 ウレタン・フォームの細孔の大きさと消炎能力の関係

は具体的な数値は明示できないが、厚さが5インチで消炎できないようなフォームはそれ以上厚さを増しても消炎効果は期待できないと考えてよいであろう。

4.2 フォームの細孔の大きさと消炎直径の関係

消炎直径は、火炎背後の圧力が一定（大気圧）に保持された条件下において火炎が伝播しない限界の管径と定義される。消炎直径より僅かに大きい管径においては、火炎はある距離を伝播したのも消炎し、これよりも更に僅かに大きい管径では火炎は混合ガスの存在する限り無限に伝播するはずである。しかし、実験的にはそれほど長い距離を伝播することは確かめられていないようである。一方、実用上の消炎素子についても、むやみに厚さを増すことはできないという現実的な理由もあって、細孔の大きさが消炎直径に近い消炎素子の厚さを充分大きくしたときの挙動をしらべた例はない。

この実験ではフォームの厚さを最大 70 インチ（約 1.8 m）という極端な値にまで増してみたが、図 3 に示したように、消炎直径より小さい細孔のフォームでも全く消炎能力のない場合があることが明白となった。この結果は、アレスタの消炎素子の設計という観点からはあまり意味がないが、細隙における消炎に関する従来の知見を裏づける実験的証左として極めて有意義である。

ところで、消炎直径は大気圧下において定義されているが、火炎背後の圧力が一定という条件が満足されれば加圧下の消炎直径を定義することもできる*6。しかし、本実験の爆発管のような密閉系では火炎の伝播につれて系内の圧力が変化するので、加圧下の消炎直径が測定されたとしてもその値を直接的に適用することはできない。（火炎が消炎素子に達したときの系内の圧力に相応する消炎直径は一つの目安になるであろうが、この分野の研究は全くなされていない。）いずれにせよ、加圧下の消炎直径が大気圧下のそれよりも大きいとは考えられず、また、実際に管中を伝播する火炎の速度が消炎直径（大気圧下の消炎直径をいう。以下同じ）の測定時の火炎速度より小さくなることもないので、実用上の消炎素子の細孔径は少なくとも消

炎直径より小さくしなければならない。消炎素子の細孔径は消炎直径の 1/2 以下とすべきであるという経験則を先に述べたが、これは消炎直径の 1/2 より大きい細孔を有する消炎素子は不相当であることを意味するほか、火炎伝播の状態によっては細孔径を更に小さくする必要のあることを示している。

この実験では、プロパン-空気炎の消炎には (25.4/N) が 1.5 以下のフォームが必要であった。(25.4/N) をフォームの平均細孔径と仮定すれば、1.5 という値はプロパン-空気炎の消炎直径の約 1/2 であり、上述の経験則とよく一致する。先にも述べたように、(25.4/N) を消炎直径と直接に比較することには問題があり、また、1.5(mm) という値もフォームによる消炎の厳密な限界径ではないが、供試フォームのような三次元網目構造の消炎素子については (25.4/N) で定義される値を平均細孔径として扱っても実用上大きな間違いは生じないと考えられる。また、この仮定が正しいとすれば、細隙の構成材料がプラスチックであっても、その消炎挙動は不燃物からなる消炎素子の場合と大差ないことが示唆される。（ただし、消炎素子の厚さの設計に際しては点火側表面の焼損分を考慮に入れることが必要である。）

4.3 フォームの焼損の度合及びフォーム原料の影響

フォームの焼損の度合を定量的に評価する適当な方法がないので、ここではフォームにより消炎した場合について*7 肉眼による観察の結果を述べる。 V_i が小さい場合には、フォームの点火側表面全体にわたってうすく焦げ目がつく程度である。 V_i が大きく、初圧

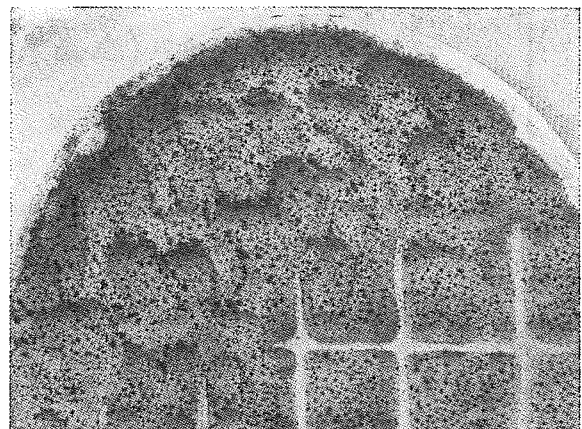


写真 2 火炎によるフォーム表面の焼損例

*6 加圧下の消炎直径の測定に際しては、燃焼生成ガスの膨張による圧力上昇が無視できるように、充分に大きい加圧された空間が必要であるほか、かなり高度の実験手法が必要である。

*7 消炎しなかった場合には、引火側で生じた爆発によりフォームが著しい影響を受けるので、論議の対象とはしがない。

が高い場合には、フォーム表面の、特に上半分に焼損がみられ、えぐられたような窪みが残るが、二、三の場合には flame tongue によって侵されたと思われる鋭角的な切り込みが観察された。写真2に代表的な焼損例を示す。これらの焼損のパターンは比較的再現性がよく、また、押さえ金網の針金で覆われていた部分は焼損せずに残るので、フォーム表面からの焼損深さ(最大値)を焼損の度合を示す尺度とすることができる。この方法によれば、 $V_i=0.1$ 、 $P_i=0$ の場合には焼損深さはフォーム全体にわたって2~5 mm 程度であり、 $V_i=0.47$ 、 $P_i=0.21$ の場合には、局所的な侵食のあったものについても、焼損深さは50 mm (2インチ)程度以下であった。これらのことから明らかのように、4.1及び4.2節で述べた消炎限界のフォーム厚さは焼損分を含めた見掛けの厚さである。たとえば極端な場合には、厚さ1インチで消炎したフォームの実験後の有効な残り厚さが約5 mm という例も観察されている。従って、フォームが焼損しなければ最初のフォーム厚さがもっと小さくても消炎するはずであり、当然のことながら強い火炎を消炎した場合のほうが焼損の影響は大きい。また、この実験の結果から、焼損の影響がないとみられる発泡金属の消炎能力を予測できると考えられる。

この実験ではフォームの細孔の大きさと消炎能力の関係の主としてしらべたので、同一条件下で種類の異なるフォームの焼損度合を比較できるデータは少ないが、比較できるデータ(フォーム No. 3 及び No. 5)に関する限りはポリオールの種類は焼損度合に著しい影響は与えなかった。また、全体的にみてもフォームの細孔の大きさと焼損度合の間に明確な関係は認められなかった。これらのことから、実験結果の処理に際してはポリオールの種類は消炎に大きくは影響しないと仮定したが、実際に消炎能力を支配する最も重要な因子が細孔の大きさであることは先にも述べたとおりである。

なお、消炎に際してフォームが焼損を受けた場合であっても、焼損が及んだ面から5 mm 程度内側(引火側)ではフォームが熱的影響を受けたとみられる痕跡は認められなかった。細孔中を火炎が伝播した場合のフォーム内部の損傷については第5節で述べる。

4.4 発泡金属との比較

発泡金属はこの実験に用いたフォームの素材をプラスチックから金属に置きかえたものと考えことができ、細隙構造はフォームと同じであるが熱的影響は受

けにくい。本節では、発泡金属の消炎能力に関する既知のデータと本実験の結果の比較を行うほか、爆発管中の火炎速度についても考察する。

わが国における発泡金属に関する研究としては水素-空気炎を対象とした堀口ら⁶⁾の実験があるが、実験に用いた発泡金属は本報でいう平均細孔数 N が35以上のものであり、実験結果の比較には適しない。堀口⁷⁾による海外の研究の要約によれば、初圧が大気圧の6.5% エチレン-空気混合ガスの爆発火炎は、厚さ1インチの発泡金属の場合、 $N=10$ では全く消炎しないが、 $N=20$ では火炎速度が80 m/s であれば消炎したという。この混合ガスの消炎直径を1.9 mm とすれば⁸⁾、これはプロパンの消炎直径の約1/1.5であるから、既に述べたフォームに関する実験結果からみて $N=10$ の場合に消炎能力のないことは明らかであり、また、 $N=20$ の場合にはあまり強くない火炎に対してであれば消炎効果があることも予測される。

一方、図1の爆発管のような場合には、点火源からフォームまでの距離が0.3及び1.5 m のときのフォームに接近する火炎の速度はそれぞれ33及び115 m/s であると推定でき⁹⁾、これをもとにして V_i/V_i^* が0.29及び0.47のときの火炎速度を推測してみると⁸⁾、それぞれ約40~50及び60~80 m/s となる。 $N=20$ のフォームでは、 $V_i/V_i^*=0.47$ のときは厚さ1インチでは消炎しないが2インチでは消炎しており、また、 $V_i/V_i^*=0.29$ のときは厚さ1インチでも消炎している。火炎速度が推測値であること及びフォームの焼損の影響を考慮に入れると、 N が同じであれば発泡金属とフォームの消炎能力はほぼ同程度であるとみなすことができる。

次に、密閉系内の火炎伝播に伴う圧力上昇を考慮した実験式をもとに火炎速度を推算してみる。発泡金属の消炎能力について Rogowski らが導いた実験式は次のとおりである¹⁰⁾：

$$v=0.95nyP_0/P \quad (1)$$

ただし、

v は消炎限界火炎速度 (m/s)

n は消炎素子単位面積当たりの細孔数 (cm^{-2})

y は消炎素子の厚さ (cm)

P_0 は大気圧 (絶対圧)

P は火炎が消炎素子に達したときの爆発圧力 (絶対圧)

*8 この推測は、他の実験で得られた伝播距離と火炎速度の関係を示す曲線の形状とのアナロジーを仮定した大まかな推測である。

本報の実験では、厳密な意味で上式の P に相当する圧力は測定していないが、フォームにより消炎した場合の爆発管内の最大到達圧力を P とおくことにする*9。また、引火した場合であっても、引火側に爆発を生ずるまでに時間を要した場合には点火側空間での爆発の圧力を明確に区別できるので、その最大値を P とみなすことにする。上式は消炎する限界の速度を与えるものであるから、フォームにより消炎した場合について計算される v は爆発管中の実際の火炎速度よりも大きいはずであり、また、引火した場合の火炎速度は上式による計算値よりも大きかったことになる。計算を簡略化するために大気圧 P_0 を一定 ($760 \text{ mmHg} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$) とし、また、定義により $n = (N/2.54)^2$ であるから、これらを式 (1) に代入すれば次式を得る。

$$v = 0.152 N^2 y / P \quad (2)$$

Rogowski らの実験条件からみて上式が適用できると考えられるのは、No. 2, 3 及び 5 のフォームで厚さが 1 インチの場合である。これらの場合について式 (2) により計算した火炎速度を図 5 に示す。図の火炎速度は、先に述べた他のデータからの推測値と比較的よく一致するので、今回の実験における爆発管内のフォームに接近する火炎速度のオーダーは図の実線の値と同じであると考えられる。

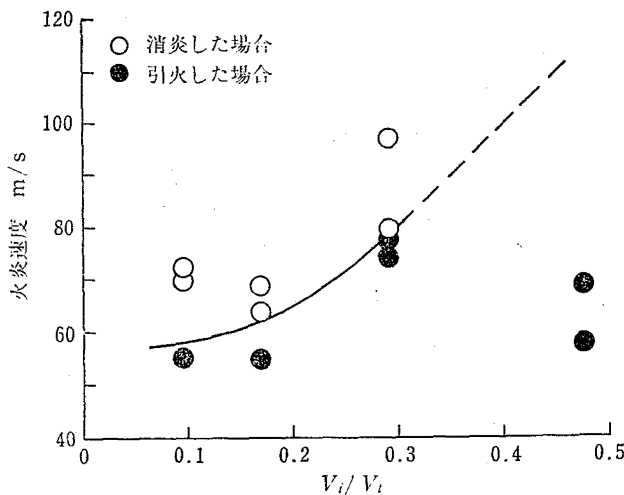
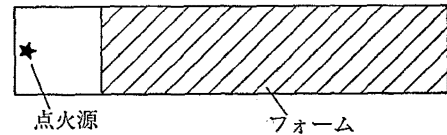


図 5 フォームに接近する火炎の速度 (Rogowski らの実験式に基づく推測値)

*9 消炎に要するフォームの厚さは数インチであり、フォーム内での燃焼による圧力上昇は無視するとすれば、爆発管内が最大圧力に達するのは火炎がフォームに到達した時点であるとみなしても大きな間違いはない。

5. フォームを充填した空間内における火炎伝播

本節では、下図のように爆発管の点火側空間以外にすべてフォームを充填し、初圧を 0.21 kgf/cm^2 として点火した場合の挙動について述べる。第 4 節の結果



からもわかるように、細孔が小さければ火炎はフォームの途中で消滅するが、No. 1 及び 4 のフォームでは火炎は点火源から遠いほうの管端 (引火側管端) にまで達した*10。フォームの点火側表面の焼損度合は 4.3 節に述べたと同じであるが、重要なのは、火炎が引火側管端に達した場合においてもフォーム内部には熱的損傷の痕跡が観察されなかったことである。供試フォームの大きさの細孔中においては、火炎はそれ自体の伝播に必要な限界付近のレベルのエネルギーを保持しながら伝播するとみられ、フォームの壁面 (骨格) に熱的影響を及ぼすだけのエネルギーの余裕はないことがわかる。このことは、フォーム内を伝播する火炎の速度の減少をもたらすと考えられ、従って系内の圧力の上昇速度も減少し、火炎の前方及び背後への圧力の放散速度のほうが大きいので、結果的にはフォーム内を火炎が伝播する間の圧力はほぼ一定となり、点火側空間で生じた爆発圧力が系内の最大圧力を決定することになるとみられる。

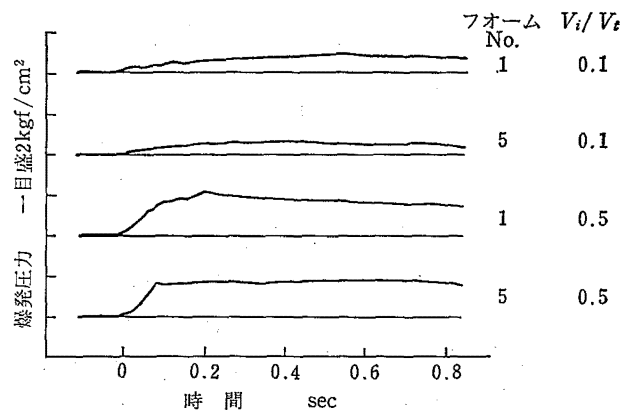


図 6 フォーム充填時の爆発圧力波形 ($P_i = 0.21 \text{ kgf/cm}^2$)

図 6 には、火炎が管端に達した場合 (フォーム No.

1) と消炎した場合 (同 No. 5) の爆発管内の圧力の時

*10 管端フランジには直径 100 mm、奥行き 27 mm の円筒状空間が残るように設計してあり、この空間に火炎が到達したことを検出する。

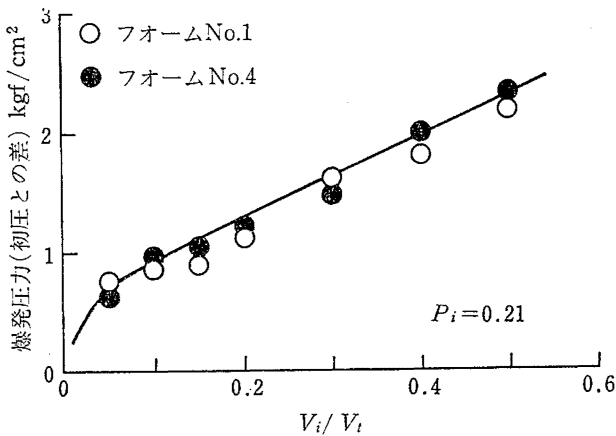


図7 フォーム充填時の最大爆発圧力

間の変化を比較した。点火後に最大圧力に達するまでの時間には幾らか差があるが、最大圧力及び全体的な圧力波形は非常に似ている。図7には点火側空間の大きさが最大圧力に及ぼす影響を示したが、フォームが異なっても最大圧力はほぼ同じ値であった。フォームを全く充填しないからの爆発管に混合ガスを同じ初圧で満たして点火したときの爆発圧力の最大値(初圧との差)は10~11 kgf/cm²であったので、 V_i/V_i が0.2程度以下であれば最大圧力はフォームを充填しない場合の約1/10以下に抑えられることがわかる。なお、表2はフォーム内を火炎が伝播したときの平均速度である。表の速度は点火側管壁と引火側管端に取付けた光センサからの信号の時間差とフォームの厚さから求めた値であり、点火側の光センサからフォーム表面までの(フォームの充填されていない)空間を火炎が伝播する速度を含んだ平均値であるため、フォーム内の実際の火炎速度は表の値よりも幾らか小さくなる。

表2 フォーム内部を伝播する火炎の平均速度

フォーム No.	初圧 kgf/cm ²	V_i/V_i	平均速度 m/s
1	0	0.10	1.9
		0.17	2.8
	0.21	0.05	3.4
		0.10	4.2
		0.10	5.3
		0.15	3.9
4	0.21	0.17	4.9
		0.20	3.1
		0.10	3.7
		0.15	4.6
		0.30	3.7

(注) フォームの厚さは1.54m~2.09mである。

こうした細隙中の火炎速度は従来まったく測定されていないが、細隙による消炎現象の解明に際しては、細隙へ接近する火炎の速度よりも細隙中の火炎速度のほうが重要であると考えられ、今後はそうした観点からの検討を試みる必要がある。

ところで、貯蔵タンク等の内部に爆発性混合ガスが形成され、何らかの原因により発火したとすれば、最大爆発圧力は(初圧が大気圧であっても)7~8 kgf/cm²以上に達するとみななければならず、多くの場合にはタンク等はこの圧力により破壊すると考えられる。しかし、タンク等の内部に供試フォームのような細隙体を充填しておけば、仮に火炎が細隙中に伝播して混合ガスがすべて燃焼したとしても、そのとき発生する圧力は小さく、この圧力に耐えるようにタンク等を製作することはさほど困難ではない。この場合、混合ガスが発火する空間が小さいほど爆発圧力も小さいことは図7に示したとおりである。タンク等の内部に隙間なく細隙体を充填したとすれば、細孔の大きさが先に述べた消炎容積より大きいと否かによって細孔内での発火の有無が決まる。初圧が大気圧のプロパン-空気混合ガスの場合、細孔の直径が3mm程度であれば放電火花のような発火源では火炎伝播は生じない。強力な発火源により仮に発火したとしても、タンク等が密閉状態にあったとしても、発生圧力は爆発空間の存在する場合に比して充分小さくなることに疑問の余地はない。

6. 実用上の問題点について

消炎素子としてのプラスチック・フォームには、軽量である、形状・寸法の自由度が大きい、弾性(変形回復力)が大きいので破断・破壊が生じにくいなどの利点もあるが、熱的損傷を受けやすいなどのプラスチックに固有の欠点も併せ持っている。以下に、本報において実験的に検討しなかった実用上の問題点を挙げる。

(1) 耐熱性

熱的損傷については既に考察したとおりであり、弱い火炎に対する損傷は軽微であり、また、予め損傷を見込んだ設計も可能であるが、回復して火炎を受けたり、燃焼が(特にフォームの表面で)継続するおそれのある場合の消炎素子としては不相当である*11。(タ

*11 金属製の消炎素子であっても反復火炎や継続燃焼による損傷は生ずるが、損傷の程度が全く異なるという意味である。従って、火炎の発生を検出して管路を遮断したり消火剤を散布するなどの設備を設けるのであれば、プラスチック・フォームの利用も可能である。

ンク等に充填する場合については、耐熱性それ自体はあまり問題とはならない。

耐熱性との関係で重要なこととしては、プラスチックの熱分解による有害ガスの発生がある。本報ではこの点については検討しなかったが、プラスチックの種類や消炎素子として設置する場所によっては問題となるかもしれない。

一方、こうした欠点を改良するために、耐熱性の大きいプラスチックを素材とする、フォームの骨格をセラミックスや金属で置きかえるなどの対策が考えられ、かつ実際にも可能であるので、こうした技術によりプラスチックの利点を残したままで耐熱性にすぐれた消炎素子が得られることが期待される。

(2) 圧力損失

フォームによる圧力損失については検討しておらず、他の消炎素子との比較はできないが、細隙の構造（特に空隙率）からみて圧力損失が他の消炎素子より大きいとは考え難い。

(3) 静電気

流体（特に液体）が細隙を通過する際の帯電は、可燃物の移送システムに共通の危険である。液体がフィルタ類を通過する際に特に帯電しやすいことはよく知られているが、本報で実験したフォームは一種のフィルタである。帯電は細隙体の素材が金属やセラミックスであっても生じ、また、帯電量は液体の種類や移送条件にもよるので、プラスチック・フォームが特別に危険というわけではないが、使用目的や設置場所に応じた配慮が必要である。たとえば貯蔵タンクの内部にフォームを充填する場合を例にとると、タンクに液体を張込む際には、液体が帯電してタンク内で放電火花を生じたとしても、前節に述べた理由により爆発の影響は外部に及ばないであろう。しかし、液体を抜出して他の装置へ移送する際の帯電は、フォームの充填により安全化されたタンクとは全く関係のないところで発火源となる危険性を含んでいる。従って、タンクの充填材とする場合であっても、液体に浸漬するのではなく液面上方において液位とともに上下するような使用法が推奨される。

アレスタの消炎素子として用いる場合は細隙を通過するのは気体であり、帯電による危険はそれほど深刻な問題ではない。

(4) 耐薬品性・耐久性

フォームの経年劣化や環境条件の影響についても本報では検討していないが、これらに関するデータはフォームの製造者から得られるであろう。また、定期的

な交換により劣化の弊害を除くことができるとみられるので、使用方法に応じた対策をとることは比較的容易であろう。

7. 結 言

フレーム・アレスタの消炎素子としてプラスチックを用いることの可能性を検討するため、種々の大きさの細隙を有するポリウレタン・フォームによるプロパン-空気炎の消炎について実験した。供試フォームの細隙の大きさに制限があり、また、火炎を受けたフォームの表面が燃損することもあるので、厳密な意味での比較はできなかったが、フォームの消炎能力については細隙における消炎現象に関する従来の知見とよく一致する結果が得られ、細隙の大きさの選択さえ適切であれば実用に供することも可能であることがわかった。

供試フォームは三次元網目構造の骨格を有するが、こうしたフォームの細隙の大きさ（直径）を消炎直径や他の消炎素子の細隙寸法と比較するに際しては、1インチ間の細隙数 N で 25.4 を除した値 (mm) を用いても実用上大きな間違いはないと考えられる。また、同じ細隙構造を有する発泡金属に関する他の実験データとの比較によれば、フォームの熱的損傷を斟酌したときの両者の消炎能力はよい一致を示した。

また、タンク等の内部に充填して爆発を防止するための充填材としての応用についても検討したところ、細隙が消炎直径程度の大きさであるフォームの内部に火炎が伝播した場合においても、タンク内に発生する圧力はフォームを充填しない場合の爆発圧力に比して充分小さく抑えられることがわかった。

実用上の観点からみれば、プラスチック・フォームには同じ細隙構造の発泡金属に比して熱的損傷を受けやすいという欠点はあるが、素材の改良等によりプラスチックの利点を生かした用途も見出せるものと考えられる。

(昭和 58 年 7 月 22 日 受理)

参考文献

- 1) 駒宮, “火災防止器の n -ヘキサンに対する消炎性能”, 安全工学 Vol. 8, No. 4, 209 (1969)
- 2) 林, “消炎容積に関する研究”, 産業安全研究所研究報告 RR-28-1 (1980)
- 3) ブリヂストンタイヤ(株) カタログ, “エバーライト” (No. 1012-8106), “エバーライトスコット” (No. S 011-8106)
- 4) 林, “細隙における消炎現象に関する研究”, 産

- 業安全研究所研究報告 RR-31-1 (1983)
- 5) MIL-B-83054 B, Baffle and Inerting Material Aircraft Fuel Tank (1978)
 - 6) 堀口ら, “水素用フレイムアレスタ (発泡金属の消炎性能)”, 化学技術研究所研究報告 Vol. 75, No. 12, 25 (1980); 高圧ガス Vol. 16, No. 6, 1 (1979)
 - 7) 堀口, “発泡金属を用いた火炎防止器”, 化学と工業, Vol. 32, No. 5, 116 (1979)
 - 8) 安全工学協会編, 安全工学講座 2「爆発」, p. 305, 海文堂(1983)
 - 9) Health and Safety Executive 編, 林 訳, “フレイム・アレスタ 及び 爆圧放散孔”, 産業安全技術協会安全資料 No. 26, p. 15 (1982)
 - 10) Rogowski, Z. W., “Flame arresters in industry” *7th International Symposium on Chemical Process Hazards*, p. 53~65, Instn. Chem. Engrs. (London) (1980)

謝 辞

本研究に用いたポリウレタン・フォームはブリヂストンタイヤ(株)より提供を受けたものである。同社横浜工場化成品設計部(スコットフォーム担当)の武井篤夫・神村保雄両氏には供試フォームの選別や物性値の測定などの面で多大の協力を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表する。

産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-83-2

昭和 58 年 12 月 10 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

〒108 東京都港区芝5丁目35番1号

電話 (03) 453-8441 番(代)

印刷所 新日本印刷株式会社

UDC 536.46 : 614.839

ウレタン・フォームの消炎能力とその応用について

林 年宏

産業安全研究所技術資料

RIIS-TN-83-2, 1~11 (1983)

フレーム・アレスタの消炎素子としてプラスチックを利用することの可能性を検討するため、種々の大きさの細隙を有するポリウレタン・フォームによる4.5%プロパン-空気炎の消炎について実験した。実験は直径12インチ、長さ2.2mの密閉管中において行い、管の途中に装填したフォームにより消炎する限界のフォーム厚さを種々の条件下において求めた。フォームは多数の細孔を有する三次元網目構造であるが、この実験では $25.4/N$ (N は1インチ間の細孔数)を平均細孔径(mm)とした。火炎を受けたフォームの表面は焼損することもあるが、細孔の大きさと消炎能力の関係は従来得られている金属等の細隙による消炎に関する知見とよく一致し、細孔の大きさを適切に選択すれば単発的な火炎に対して充分実用に供しうることが示された。また、タンク等の内部に充填して爆発を防止するための充填材としての応用についても検討したところ、仮にフォームの細孔中を火炎が伝播したとしても、発生する圧力はタンクの破壊に至らない程度となることがわかった。(表2, 写真2, 図7, 参10)

UDC 536.46 : 614.839

Flame Quenching Performance of Polyurethane Foams and Their Application
for Explosion Protection

by T. Hayashi

Technical Note of the Research Institute of Industrial Safety

RIIS-TN-83-2, 1~11 (1983)

Flame quenching ability of polyurethane foams against stoichiometric propane-air flames is studied in a 12-inch diameter explosion tube of 2.2 m long, with particular reference to their use as flame arrester element. The average hole diameter of cells of foam is varied between 1.2 and 3.2 mm. Even though there have been observed some thermal damages of foam surfaces by flame attack, result of experiments shows fairly good agreement with the rule of thumb describing the limiting hole diameter of arrester element required for flame quenching. This result suggests that plastic foams may be used as flame arrester element which is subjected to neither repeated flame attack nor sustained flames. (2 tables, 2 photographs, 7 figures and 10 references)