

産業安全研究所安全資料

SAFETY DOCUMENT
OF
RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RIIS-SD-90-1, 1990

可燃性粉じんの爆発危険性評価技術

松 田 東 栄

安全資料SD90-1の印刷訂正について。

下記の誤植がありましたので、次のように訂正をお願い申し上げます。

頁,行	誤	正
3, 2 7, 表2	OSHAはすべての (Fe) ~ 770	OSHAはすべての (挿入) 1462
15, 下から3 (右から)	試験の場合信頼 性が落ち	... 場合に信頼 ...
20, 4 (右)	巻末資料中	資料中
27, 表35	Pred ³ bar g	上ツキの③をトル Pred (bar g)
33, 18	加ふるとともに, その半分...	加ふるとともに, その半分 ...
34, 表 (項目 36,	爆発下限界 (g/m ²)	爆発下限界 (g/m ³)

以上

安全資料『可燃性粉じんの爆発危険性評価技術』

目 次

1. まえがき	1
2. 粉じん爆発危険性評価の目的と傾向	2
3. 粉じん爆発の特徴	3
3.1 粉じん爆発の発生条件	
3.2 粉じん爆発特性値	
3.2.1 爆発限界	
3.2.2 発火温度	
3.2.3 最小発火エネルギー	
3.2.4 爆発限界酸素濃度	
3.2.5 最大爆発圧力, 最大圧力上昇速度および Kst 値	
3.3 粉じん爆発の燃焼形態	
3.4 粉じん爆発の発生過程	
4. 各種の粉じん爆発試験装置	9
4.1 Hartmann 粉じん爆発試験装置	
4.2 石浜式粉じん爆発試験装置	
4.3 15l 標準試験（‘ Nordtest ’）装置	
4.4 発火温度測定装置	
4.5 20l ガス・粉じん爆発試験装置	
4.6 20l 球型爆発装置	
4.7 1m³ 円筒型爆発試験装置	
5. 各国における粉じん爆発試験法	13
5.1 イギリス	
5.1.1 爆発性分類試験	
5.1.2 爆発下限界	
5.1.3 発火温度	
5.1.4 最小発火エネルギー	
5.1.5 爆発限界酸素濃度	
5.1.6 最大爆発圧力および最大圧力上昇速度	

5.2	(西)ドイツ	
5.2.1	爆発下限界	
5.2.2	最小発火エネルギー	
5.2.3	発火温度	
5.2.4	火炎伝ば性	
5.2.5	最大爆発圧力および最大圧力上昇速度	
5.3	その他の国	
5.3.1	アメリカ	
5.3.2	ノルウェー	
5.3.3	スイス	
5.3.4	オランダ・フランスおよびその他	
5.4	我が国における粉じん爆発試験	
5.4.1	粉じん爆発の研究経過と測定機関	
5.4.2	産業安全研究所における試験装置	
6.	粉じん爆発危険性評価の在り方	22
6.1	爆発特性値データの意義	
6.1.1	爆発下限界	
6.1.2	発火温度	
6.1.3	最小発火エネルギー	
6.1.4	最大爆発圧力および最大圧力上昇速度	
6.2	粉じん爆発特性値と危険性評価	
6.3	爆発特性値の適用と防止対策	
6.4	粉じん爆発危険性試験法のまとめ	
7.	結 語	28
	引用文献	29
	付表. 1 粉じん爆発危険特性値データ	33
	付表. 2 昭和58～61年における粉じん爆発災害事例	37

可燃性粉じんの爆発危険性評価技術

松田 東 栄*

The Technical Assessment of Materials liable to Dust Explosion

by Toei Matsuda*

Abstract;—Any combustible solids, when divided into a sufficiently fine condition, may give rise to a dust explosion. Many of the dusts handled in industry are combustible and serious dust explosion incidents have occurred in this country. This safety document reviews the testing methods and explosibility assessment of industrial dusts, established in various countries. The testing is to evaluate some of the explosion hazard parameters: explosibility limits, ignition temperature, minimum ignition energy, explosion limit oxygen concentration, maximum explosion pressure and maximum rate of pressure rise. The parameters are grouped in two categories: explosion sensitivity and explosion severity.

The measurement of the explosion parameters using a relative small apparatus is critically discussed and the effects of turbulence on the parameter should be considered in applying them to industrial situation. It is expected that the testing methods will be changed as our understanding of dust explosion in large scale increases.

Keywords; Dust explosion, explosibility testing, hazard classification

1. ま え が き

工業的に扱われている粉体の多くは、可燃性である。原則的には空気中で燃える物質、すなわち可燃性固体を粉砕して微粉にした場合、いずれも粉じん爆発を起こす可能性があると考えられるので、可燃性粉じんを扱う工程には粉じん爆発の潜在的な危険性が常に存在すると言えるだろう。このような可燃性粉じんには、小麦粉やでん粉、砂糖などの食料あるいは家畜用飼料粉じん、各種金属やプラスチック及び化学製品などの加工用粉じん、薬品並びに燃料としての炭じんなど製品として生産、利用されるものばかりでなく、繊維

屑、研磨・摩耗粉あるいは鋸屑のような副産物ないしはごみ、埃（ほこり）のようなものまで含まれ種類が多い。しかも、原材料の粉体化によって乾燥、混合、成形（焼結金属、セラミック）、運搬（自動化）などが著しく改善されるばかりでなく、粒子表面積の増大によって優れた粉体特性を示すものが多い。そのため、実際、産業界で扱われている可燃性粉体の種類及び量は実に多種多量で膨大な量に達する。また、最近では新素材としての機能性物質や電子材料の開発が盛んに行われているが、これらの製造には何らかの粉体技術が不可欠な場合が多く、粉体を取り扱う工程は増大する傾向にある。

しかし、粉体としての可燃性物質が粉じん爆発を起こすとしても、可燃性ガスや火薬類などの危険物のように、一部の金属粉じん等を除いて、法的にその物質

*化学研究部 Chemical Safety Research Division

としての使用が制限されているわけではない。ただし、労働安全衛生規則においては、粉じんによる爆発防止措置を講じなければならないことが定められている。それ故、扱われる粉じんの爆発危険性については使用者が判断しなければならないことが定められている。ところが、具体的に体系的な防止対策を取る上で、必ずしも十分な資料や指針が整備されているわけではなく、たとえ粉じん爆発の危険性を認識しても、実際には総ての事業所で適切な対策が講じられているとは言い難い現状にあるように思われる¹⁾。このような資料不足を補う意味で、当所では既に粉じん爆発に関する二冊の安全（技術）資料^{2,3)}を発行してきたところであるが、何分大部以前のことになる。その後の内外での粉じん爆発防止に関する研究には少なからぬ進歩があり、産業現場で具体的な防止、防護対策を講ずる上でさしあたり必要でかつ本質的で重要と思われる可燃性粉じんの爆発危険性評価技術について、以下とりまとめ、安全対策上の参考とした。

2. 粉じん爆発危険性評価の目的と傾向

プロセス中で扱われる粉じんが、はたして爆発危険性を有するかどうか、もしあるとすればどの程度の危険性を示すものかどうかといった疑問は、当事者にとっては大変気がかりなことであるはずであろう。このような疑問は、プラントの設計段階で十分検討されるべき問題であるが、現実には危険性に対する関心が薄く、可燃性粉じんの爆発危険性に対する認識がなければ、検討されることは少ないように思われる。可燃性粉じんはほとんど総て粉じん爆発の危険性があるとすると、危険性を評価してその危険性に応じた予防対策と防護対策を施すことが必要になる。

しかし、次節に述べるような粉じん爆発危険性測定によって、その危険性が十分精密に評価できる技術段階にはまだ至っていないように思われる。その最大の理由は、同じ空間爆発の一種でありながら、ガス爆発とは異なる固体の燃焼と流体力学、等を含む複雑な境界領域での現象が対象で、実験的にも理論的にも困難で未解決の点が多いことによるだろう。従って、粉じん爆発危険性評価技術に物理化学的物性値の測定法のような厳密な方法があるわけではないが、近年、世界的に、粉じん爆発に対する関心が産業界で高まり、安全工学や燃焼学の分野で粉じんの爆発と火災を対象と

する技術者、研究者が急増し、危険性評価法にも新しい、より科学的な方法が取り入れられつつある。

実際、安全はより科学的な思考に基づくものでなければならないが、評価方法は危険性を著しく過小評価するものであってはならないし、例外的に評価から除外されるものがあるとしてもならないだろう。

一方、産業界では火災・爆発防止の面で、危険性が疑しき物質またはそれらが未知のものは、科学的にその危険性を測定して産業実態の変化に対応させるといった思想が、国際的な潮流になっている。消防法やその他の法規においても、これらの考え方に則って大幅な改革が行われている⁴⁾。粉じん爆発についても、爆発実験による評価方法の一つが、1985年にISO（国際標準化機構）規格⁵⁾に初めて採択された。このような規格が国際的に広く認知されるようになれば、化学物質をはじめとした可燃性粉体製品の輸出等にあって、爆発・火災危険性データの一つとして今後、粉じん爆発危険性データも相手国から要求されることも予想される。上述のISO規格が、国際上必ずしも全面的な支持を得ているわけではないが、現状では欧米を中心に承認されている。ところで、上述のように可燃性ガスや火薬、反応性物質などのいわゆる危険物は、物質自体が法規制の対象になっているが、可燃性粉じんの大部分は通常どこでも見かけるし、とりわけ危険な物質とはみなされていない。ところが、粉体工学等の進歩に伴って可燃性粉じんが大量に扱われるようになり、各地で種々の粉じん爆発災害が発生した結果何らかの規制の必要性が呼ばれるようになってきた。その代表的な例が、米国穀物取り扱い施設の粉じん爆発災害にみられる。

米国では、穀物加工業も含めた穀物産業だけで毎年多くの爆発災害が発生し、特に1977年から翌年にかけて、21件の粉じん爆発があり65名死亡、84名負傷の災害を記録した。その中で特に被害の大きい5件の事故は、一ヵ月以内に連続して発生し、多数の穀物検査官を巻き添えにして59名の死者、48名の負傷者を出した。その中のある事例では、穀物コンビナートの73連のコンクリート製サイロ中45基が爆発で破壊されるなどして、改めて粉じん爆発の恐ろしさを世界中の人々に印象づける結果となった⁶⁾。しかし、頻発した原因については謎のままとなっている。米国では、その後も事故は絶えず、1979年から1986年の8年間で穀物取り扱い施設で160件の粉じん爆発が発生、合計死者50名、負傷者224名という米農務省への報告があり⁷⁾（図。

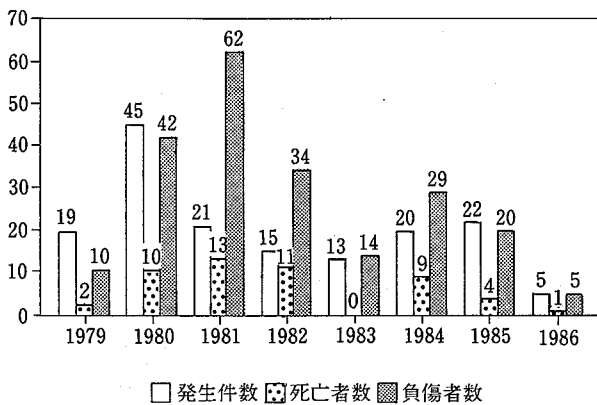


図.1 米国穀物取り扱い施設における粉じん爆発災害発生件数と被害者数の年度別変化⁷⁾

1), 米国 OSHA (労働安全衛生局) では法的規制を強化しつつある⁸⁾。

なお、我が国では粉じん爆発災害件数は、最近年間数件しか公的には報告されていないが、実際にはボヤ程度のもを含めるとかなりの数に達すると推定される。西独では保険組合への災害申告数が年間約 300 件に達し、粉じん爆発災害はほぼ毎日、工場で発生する数になるという⁹⁾。このため、西独及びスイス産業界では化学工業協会が中心になって、1970年代に大規模な粉じん爆発災害防止研究プロジェクトを実施し、いくつかの優れた安全技術指針や規則を作成した。それらの成果の一つが、上記 ISO 規格の原案になっていることは良く知られており、その後も国の援助で大規模な爆発実験を実施したり、関連の国際研究会議を開催したりして、粉じん爆発災害防止に実に精力的である¹⁰⁾。隔年ごとにポーランドで開催されている粉じん爆発国際研究集会でソ連穀物省の人は、穀物生産高が米国に次いで多いソ連邦内でも穀物サイロなどの施設での粉じん爆発災害が頻発しており、情報公開(グラスノスチ)によって災害防止対策立案の一助にしたい旨を述べていた。ついでに古い統計であるが、英国では1962年から1980年の間に可燃性粉じんによる爆発災害が 485件、同火災が 715件発生している¹¹⁾。最近の事例では、アルミニウム、なたね油粕、小麦粉の粉じん爆発による重大災害が英国で発生している¹¹⁾。仏およびベルギーでは砂糖精製工場での大規模な粉じん爆発が1982年に起きたという¹²⁾。また、1987年中国のリンネル織物工場(ハルビン市)で粉じん爆発により死者 58名、負傷者 177名を出す災害も報告されている¹³⁾。

このような国際的な粉じん爆発災害防止に対する関心の高まりの中で、米国 OSHA はすべの穀物取り扱い施設での粉じん防爆電気機器の使用を勧告立案した。これに対してただちに業界関係者から、「穀物粉じんは、はたして爆発危険性物質か？」という疑問が寄せられた。かくして、爆発危険性分類の中での穀物粉じんの位置づけが端緒となり、可燃性ガス、蒸気および粉じん爆発危険性分類に関する国際会議が、ASTM (米国材料・物質試験協会) によって開催された¹⁴⁾。その結果、防爆電気機器に関連して行われてきたガスや蒸気の爆発クラス分けにも問題点があることが指摘され、粉じんの爆発危険性評価については世界各国の参加者から実に種々の意見が述べられた。

ここでは、それらを参考にして最近の粉じん爆発の評価技術と評価を行う上での爆発試験装置および方法について併せて述べるとともに、提起された問題点について解説するが、その前に理解を助けるため次節では粉じん爆発の特徴について解説した。なお、粉じん爆発の危険性と防止対策に関する一般的な解説については、すでにいくつかまとめられているので^{10,15~21)} その詳細については当資料では詳しくは触れない。さらに、粉体機器プラント等の設計時に適用される粉じん爆発危険特性値が、本資料で解説するようにどのように測定、評価されるかを理解すれば、それらの適用限界ならびに注意事項がより明確に把握できるであろうと思われる。資料不足からくる、誤った安全設計や不十分な防護対策ができる限り早急に掃き除かれることを切望する。

3. 粉じん爆発の特徴

3.1 粉じん爆発の発生条件

すでに述べたように、粉じん爆発は空間爆発の一種である。従って、その発生条件はガス爆発のそれと同様であるが、燃料(爆発性物質)としての可燃性粉じんが固体粒子であることに基づいて、次のように書き換えられる²¹⁾。

- (1) 空気中に浮遊、分散すること。
- (2) 浮遊粉じん濃度が、爆発下限界以上の濃度であること。

*従来、粉じん・空気混合物として表記していたが、混合物は固・液相に対する用例で誤解を招きやすく、ここでは(少量の)固相が空気中に浮遊する固・気混合相に該当するので混合気とした。

(3) 十分なエネルギーとエネルギー密度を持つ着火源が存在すること。

一般に上記の三つの条件が達成されると、粉じん爆発は生起可能となり、粉じん・空気混合気*中を燃焼帯が伝ばすることができる。可燃性ガスは、いわば分子状態で空気と混合して爆発性混合気を形成できるが、粉じん爆発を起こす粉じんは浮遊・分散するためにも自とその大きさに制限がある。粉じん爆発が生起するかどうかは、具体的には粉じんが形成される系の形状や寸法、着火（発火）源並びに粉じん混合気の性状に依存するので、一概には言えないが、一般に約 $500\mu\text{m}$ 以下の粒子径を有する可燃性粉じんが粉じん爆発を起こす危険性がある¹⁰⁾。(これには例外が多く、後記の付表によると平均粒径 1mm の粒子でも粉じん爆発を起こすものがある。) 粒子径や固体密度の大きい粒子は、一旦浮遊しても重力沈降で落下してそもそも粉じん・空気混合気を形成し難いので、上記の条件に照らしても、粉じん爆発を起こす危険性は少ない。他方、粒子が非常に小さくてサブミクロンまたは超微粒子($1\mu\text{m}$ 以下)になると、沈降せずにエアロゾルとして空気中に長時間分散し続け、懸濁状態になるものがある。このようになれば、可燃性ガスと同様の危険性があると考えられるが、とりわけ微粒子に成ることによってその表面積が著しく増大し、表面積が増えた以上に表面活性が上り空気と触れただけで発火して、表面燃焼する粉じんもある。しかし、粒子径は通常粒度分布を有するので、粗粉に対する微粉の割合によっても粉じん爆発の危険性は異なる。また、超微粒子になる程に、粒子同志が互いに凝集して空気中には単独粒子として分散しない粉じんや、輸送中に容易に碎粉化する粉体、などの種々の粉体特性が知られているので、画一的な粒子径の解釈だけでは、粉じん爆発危険性を過小評価することになる恐れもある。

粉じん爆発の発生確率は、上記の三つの発生条件の発生確率の積で表わされるだろう。しかし、これらの条件に基づいて産業工程の危険性(の有無、大小)を考える場合には、いくつかの注意が必要である。産業工程での浮遊粉じんの形成は、いくつかの形態に分類されるが、工業的にはこれが種々の状況で組合わされたプロセスがあり、粉じん爆発の危険性もそれらの組合せに依存することが多い。このように爆発可能な濃度範囲の粉じん・空気混合気が形成される粉体プロセスや粉体処理設備は数多く存在するが、浮遊粉じんの滞留時間が短時間で済む場合と定常的に形成される場



図.2 バグフィルターにおける粉じん爆発火炎(木粉)

合がある。バグフィルタのろ布の払い落し作業で形成される浮遊粉じんは定期的ではあるが短時間で済む例であり、粉体空気輸送管中の浮遊粉じんは定常的な場合の例で、粉じん爆発の発生確率はそれらの存在時間に比例するだろう。ところで、粉じん爆発では、最初の爆発で発生した爆風によって堆積粉じんが舞い上げられて、二次爆発を引き起こす現象が知られている。この点においては、たとえ爆発性粉じん・空気混合気というものが予め形成されていなくとも、堆積粉じんが存在することだけで爆発発生条件の一つ(または全部)が満たされることもある。

さらに、このような浮遊、分散する可燃性粉じんを扱う装置の容積全体が爆発範囲の混合気で占有される場合と、容積の一部分でしかそのような混合気が形成されない場合とがあり、その状況によって危険性はかなり異なることになるだろう。従って、その予防並びに防護対策は、一般にその危険性に最も適切に対応できる方法を採用すべきであり、場合によっては工程や装置の変更を行い危険性を排除することが必要になる。

3.2 粉じん爆発特性値^{2,10)}

一般に、爆発は急激なエネルギーの放出を伴う現象を言うが、粉じん爆発では空気中に浮遊した粉じんが空気中の酸素と反応し、燃焼反応帯(通常は火炎をさすが、火炎を形成しない反応帯もある)を形成して混合気中を伝ばすることによってエネルギーを放出する。このエネルギーの放出は、混合系の急激な温度上昇をもたらす、それに伴って圧力上昇を引き起こす。これらの急激な圧力上昇が、容器の破裂や設備破壊をもた

らすことは、爆発災害事例で良く知られていることである(図.2)。このような爆発圧力の最高値を粉じん爆発危険特性値の一つとして評価し、爆発から容器や装置を防護するための設計参考値として活用することができるので、これらの特性値は安全上重要である。粉じん爆発に関連する危険特性値として、最大爆発圧力の他に、最大圧力上昇速度、爆発限界、爆発限界酸素濃度、発火温度及び最小発火エネルギーがある。さらに、これを二分して、爆発の発生状態を表わす爆発のしやすさと、爆発の経過状態を表す爆発の激しさに関連づけることができる。これらの区分は後述するように予防対策及び防護対策を考える上でも重要である。

①爆発のしやすさを表す危険特性値：

- ・爆発限界(爆発下限界, 爆発上限界)
- ・発火温度(最低発火温度)
- ・最小発火エネルギー

②爆発の激しさを表す危険特性値：

- ・最大爆発圧力
- ・最大圧力上昇速度(K_{st} 値)

以下に各危険特性値の概要を示す。

(1) 爆発限界

粉じん爆発の発生条件の一つに、粉じん・空気混合気の単位容積あたりの粉じん量があり、その量が少な過ぎても、逆に多過ぎても爆発が生じなくなる限界値が存在する。このうちの小さいほうの値を爆発下限界(又は爆発下限濃度)、大きいほうを爆発上限界(又は爆発上限濃度)と呼び、ガス爆発の場合と同様に両者を合わせて爆発限界という。實際上より重要なのは爆発下限界で、工業的に取り扱われる大部分の可燃性粉じんのそれは $15\sim 60\text{g}/\text{m}^3$ の範囲にあり、上限界は一般に $2\sim 6\text{kg}/\text{m}^3$ 程度ですぐに重力沈降する程の非常に高い濃度と報告されている¹⁰⁾。しかし、同じ種類の粉じんでも粉じんの特性や測定装置、測定方法によって著しく異なる値が報告されている実状にある。

(2) 発火温度

粉じん・空気混合気を加熱した時に自ら発火する最低の温度をその混合気の発火温度という。発火温度も加熱する容器や測定方法によって大きく異なることが知られているが、実験的には最も発火しやすい粉じん濃度の混合気が測定容器高温表面に触れて発火する場合の表面の最低温度を測定して決定する。

(3) 最小発火エネルギー

粉じん・空気混合気中で電気火花を飛ばした場合、火花のエネルギーが圧力、温度、粉じん濃度等によ

表.1 種々の可燃性粉じんの窒素ガス希釈による爆発限界酸素濃度²⁾

可燃性粉じん	平均粒径 (μm)	爆発限界酸素濃度 (Vol. %)
アルミニウム	22	6
パラホルムアルデヒド	11	6
"	27	7
アミノフェナゾン	<10	9
コーンスターチ	17	9
木粉	27	10
メチルセルロース	70	10
ポリエチレン	26	10
小麦	60	11
ポリアクリロニトリル	26	11
スス	13	12
褐炭	19	11.8
"	42	12.0
"	52	12.4
ライ麦	29	13
青色染料	<10	13
含脂炭	17	14

て決まるある値よりも大きいと発火が起こる。この限界の値を最小発火エネルギーと呼び、電気火花による可燃性粉じんの発火のしやすさの目安の一つとなる。通常、電気火花は放電回路の抵抗あるいはインダクタンスにより時間的に引き延ばされた電極間火花放電で、容量性電気エネルギーを利用する。このような火花放電の着火性が、実際に生ずる放電に対して常に適用できるとは限らないが、静電気による粉じんの発火しやすさの指標としてしばしば引用されている。

可燃性粉じん・空気混合気の最小発火エネルギーは、一般に常温では 1mJ 以上である⁸⁴⁾。混合気の温度の上昇につれて小さくなる。

(4) 爆発限界酸素濃度

粉じん・空気混合気に不活性ガスを添加することによって混合気中の酸素濃度を減少させていくと、どのような粉じん濃度においても粉じん爆発がもはや不可能となる酸素濃度が実験的に求まる。これを(爆発)限界酸素濃度といい、可燃性粉じん及び不活性ガスに特有な値である。

限界酸素濃度を工業プロセスに適用する場合には、安全率を考慮してそれより数%低い最大許容酸素濃度を使用する。表.1に、不活性ガスとして窒素を使用した場合の各種粉じんの限界酸素濃度を示す。

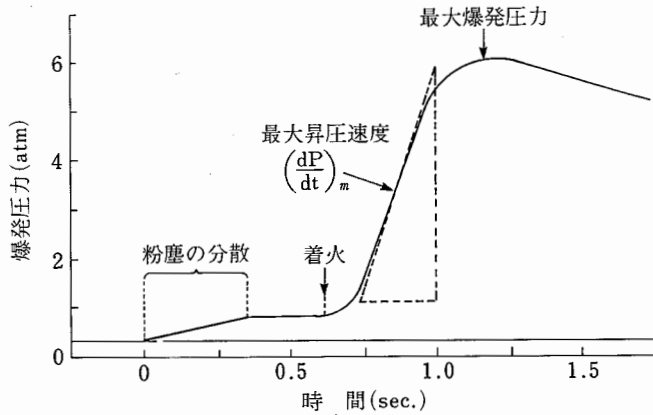


図.3 爆発圧力-時間曲線 (密閉容器)

(5) 最大爆発圧力, 最大圧力上昇速度及び K_{st} 値

上述のように, 密閉容器内の粉じん・空気混合気中を燃焼帯が伝ばすると熱が発生して容器内の圧力が上昇する。広い範囲にわたり粉じん濃度を变化させて, 最適濃度で得られる爆発圧力の最大値を最大爆発圧力という。また, 爆発圧力の時間的変化率の最大値を最大圧力上昇速度 (又は, 最大昇圧速度) とよび, 最大値の代りに平均値を取れば平均昇圧速度が得られる (図.3)。

中心点火における密閉爆発容器 (ただし, $V \geq 20 \text{ l}$) 中での任意の可燃性粉じんに対する最大爆発圧力は, 容器容積 (V) とはほぼ無関係である。これに対して, 最大圧力上昇速度 $(dP/dt)_{\max}$ は容器が増すにつれて, 次のような「立方根法則」にしたがって減少する^{5,10)}。ただし, 混合気の乱れ状態は容器によって変らないものとする。

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}} = K_{st}$$

この K_{st} (ケーエステー) は, 容積 V が 20 l 以上であれば, ある粉じん・空気混合気に対して一定になる。そこで, 爆発の激しさを表す特性値として最大圧力上昇速度の代わりに K_{st} 値を用いることが多い。爆発圧力が混合気を持つエネルギーを表すのに対し, 最大圧力上昇速度はエネルギーの放出速度すなわち燃焼速度に関係する重要な危険特性値である。

3.3 粉じん爆発の燃焼形態

粉じんの発生条件が達成されると, 粉じん爆発は生起可能となり, 粉じん・空気混合気中を燃焼帯が伝ばすることができる。伝ばの機構については定性的なこ

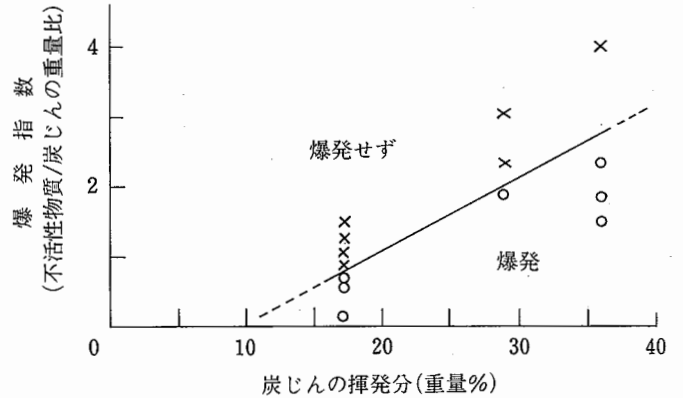


図.4 炭じんの揮発分と爆発指数の関係²⁴⁾

としかわかっていないが, 一般に粉じんの燃焼形態には気相燃焼と異相表面燃焼がある。最も研究が進んでいる炭じんについてこれを説明すると次のようになる²³⁾。

バーナー上に形成させた炭じん火炎の燃焼速度は, 炭じん濃度や粒径分布, 揮発分, バーナー寸法などにもよるが $5 \sim 35 \text{ m/s}$ で, 通常の炭化水素ガス・空気混合気のそれと同等である。しかも, 燃焼速度の最大値は, 揮発分の化学量論組成近傍の濃度範囲で得られることから, 固体成分の燃焼は遅すぎて火炎伝ばには寄与できないものと考えられている。実際規模での炭じん爆発においても低揮発分の炭じんでは, 粒径が非常に小さいものでなければ, 火炎伝ば (爆発) は困難になる。図.4は炭じんの揮発分と坑道での爆発指数の関係を示す。この場合, 揮発分約10%以下の炭じんでは爆発を生じなかった。さらに, 炭じん火炎構造の研究によると, 揮発成分は気相燃焼し, 粒子径はほとんど変わらないが, 粒子全体が丸みがかって, 揮発ガスが放出された後の小穴が多数その表面に形成された炭じん粒子が火炎中から採取できるという²⁵⁾。このように, 粒子表面に熱エネルギーが与えられて表面温度が上がり, 揮発あるいは蒸発により可燃性ガス又は蒸気を放出し (ガス化), これらが空气中で拡散あるいは予混合燃焼する場合をまとめて気相燃焼 (gas phase combustion) という。これに対して, 固体表面での燃焼 (酸化反応) は固体・気体の反応で異相表面反応 (heterogeneous surface reaction) であり, 単に, これを表面燃焼ともいう。炭じんの爆発では加熱速度や粒径, 揮発分によって燃焼形態が影響されるが, 上述のように一般に気相燃焼が主体で進行すると考えられる²⁶⁾。しかし, 揮発分がほとんどない炭じんでも著

表.2 金属とその酸化物の融点ならびに沸点²⁹⁾

金属	融点(℃)		沸点(℃)		燃焼形態
	単体	酸化物	単体	酸化物	
Al	660	2054	2470	2980	気相
Mg	649	2826	1090	3600	"
Zn	420	1975(加圧下)	907	1725(昇華)	"
Na	98	920	883	1230	"
Si	1410	1086	2360	2230	表面
Fe	1540	1377	2750	~ 770	"
Ti	1660	2100	3300	> 3000	"

るしく粒径が小さいものは爆発することから、このような場合は表面燃焼で進行するだろう。揮発分が少ないにもかかわらず、炭じんの加熱速度が早い場合（燃焼速度大）は、気相燃焼と表面燃焼が同時に進行する可能性もある²⁷⁾。

一方、通常の可燃性有機物（高分子物質あるいは農産物等の粉体など）であれば、加熱により熱分解するものが多い。これらは可燃性の熱分解ガスまたは蒸気を放出し（ガス化）、気相燃焼する。浮遊粉じん中でこれらの過程を次々と繰り返して火炎が伝ばして行く場合の熱伝達には熱伝導、放射、対流があるが、いずれが支配的となるかは粉じんの種類、爆発の規模などに依存し、明確にはわかっていない。爆発火炎自身からの放射熱が、未燃粒子の加熱に重要な役割を演じていることは否定できないが、最近ではガス爆発火炎の場合同様に、熱伝導による熱伝達機構が粉じん火炎伝ばにおいて支配的役割を担っていると考える研究者が多い²⁸⁾。

なお、粉じん爆発災害事例の多いアルミニウムやマグネシウムの軽金属粉じんも熔融、蒸発して気相燃焼を行うが、この場合の燃焼生成物は高い沸点を有する

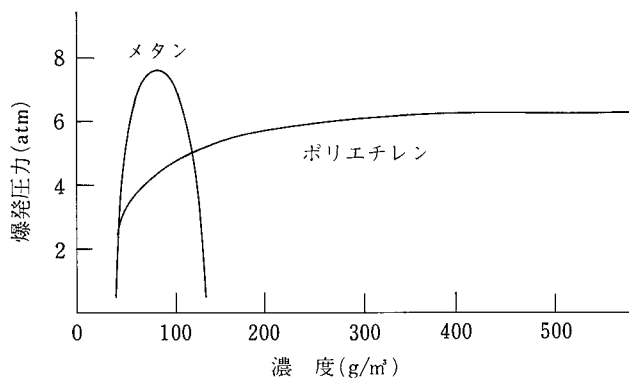


図.5 メタンガスとポリエチレン粉じんの爆発圧力³⁰⁾

固体酸化物（金属酸化物）で、火炎はきわめて明るくエアロゾル状の燃えがらを爆発後に形成する特徴がある。しかし、鉄、チタン、金属ケイ素等の金属粉じんは爆発火炎中では、表面燃焼する。これらの金属の沸点は、金属酸化物の沸点より高く、金属酸化物の沸点が燃焼温度に相当するという。表.2は、金属及びその酸化物の融点並びに沸点を比較したもので、金属の揮発性よりも酸化物のそれが大きい場合（主に、重金属）は、表面燃焼を示す。この場合、酸素は酸化物中を拡散する必要があるので、一般に燃焼速度は遅い²⁹⁾。

ところで、いずれの燃焼形態であれ、粉じん粒子が爆発火炎に取り込まれて（あるいは火炎の予熱帯に進入して）から、火炎中を通過する間に、上記のような燃焼プロセスに従って反応しない粒子は燃焼できない。可燃性有機粉じんと言えども、粒子径の大きいものやある種の耐熱性高分子や難燃性物質の粉じんは粉じん爆発を起こさない所以（ゆえん）である。従って、粉じん爆発では粉じん粒子と火炎が接触する時間、すなわち火炎通過時間が重要で、これは爆発の条件にもよるだろうが、最適条件で通常60~120msの間にあるという²⁶⁾。さらに、粒子の揮発や熱分解によるガス化時間とそれらの燃焼時間（化学反応時間）および乱れ特性に関する時間などの予測に関する研究も行われている。気相拡散燃焼を行なうアルミニウム（粒径15μm）では、蒸発時間 3.0、燃焼時間 2.1 (ms) という予想例も報告されている³¹⁾。

3.4 粉じん爆発の発生過程

すでに述べたように、ガス爆発と比較した場合、粉じん爆発では、可燃性粉じんが燃料として固体粒子状の塊まりに相当するので、燃焼時間が長く、不完全燃焼を起こすなどの特徴を示す。ここでは、可燃性有機

物粉じんの粉じん爆発における発生過程の二、三の特徴について述べ、ガス爆発との相違を示した。

図.5は、空気中におけるメタン（ガス）及びポリエチレン（粉じん）の濃度と密閉容器内爆発圧力の関係を示したものである。メタンの爆発範囲は5.0～15.0 vol.%で、この範囲の濃度でしか爆発しない。これによると、両者の爆発下限界はほぼ同じ濃度を示す。これを爆発の発生過程によって説明すると次のようになる³⁰⁾。

下限界付近の濃度で燃焼するポリエチレンは、ほぼ完全に熱分解（ガス化）して、気相燃焼するだろう。しかも、下限界での消炎機構も本質的には混合ガスのそれと同じで、有機粉じんの下限界は、熱分解ガス（揮発分に相当する放出ガス又は蒸気）量に相当する、といっても過言ではない。これに対して、図のように、ポリエチレンの粉じん濃度を増してもメタンのような“正常”な上限は見られず、化学量論組成の数倍の濃度より高い濃度では爆発圧力はほとんど変わらない。この場合、粉じんが燃焼するためにはまず熱分解（ガス化）して周囲の空気と混合する必要がある。粉じん濃度が増すと、火炎前面での分解ガス化速度が、ガスの燃焼速度よりも遅くなる。その結果、量論組成近くの分解ガス・空気混合気が形成されるや火炎はその混合ガス中を急激に伝ばすることになり、ポリ

エチレンではメタンの場合のような燃料過剰濃度は形成しにくくなる。さらに、粉じん濃度に関係なく、火炎先端では分解ガス量論組成濃度近くで燃焼が起こり、“正常”な上限が存在しない。しかし、かなり高い粉じん濃度では、火炎面に多量の未反応粉じん粒子が沈降、進入する結果、火炎は冷却されて消炎することになり、この意味での上限は存在する。つまり、混合ガスの爆発上限界と粉じん雲のそれは、意味合いが異なると考えられる。

一方、粉じん爆発の発生と伝ばに及ぼす重要な因子に、粉じんの粒径（粒子径）がある。物質を細分化すればする程、その粒子表面積は著しく増大する。細分化は新しい表面状態を形成し、通常、粒子径が小さくなる程分散しやすくなる。また、表面積の増加は熱伝達を容易にし酸化反応あるいは熱分解反応を促進する。これらの結果として大きい粒径では爆発を起こさない粉じんでも、微粉化すると激しい燃焼反応を生ずるようになるものは多い。

図.6は炭じん及びポリエチレン粉じんの爆発下限界に及ぼす粒径の影響を示す。ある特定の粒径以下では爆発下限界は粒径に依存しないが、その粒径以上になると下限界は急激に高くなり、ある粒径以上ではもはや爆発を生じなくなる。このように、一定の粉じんに対して二つの限界粒径が存在する。ポリエチレン粉じんについてこれを爆発の発生過程からみると、下限界が粒径によって変らない領域では、熱分解によるガス化が完全に生じ混合ガス類似の均一系の燃焼が進行すると思われる。しかし、この小さい方の特性粒径以上では、いわゆるガス化速度が急激に遅くなり粒子表面

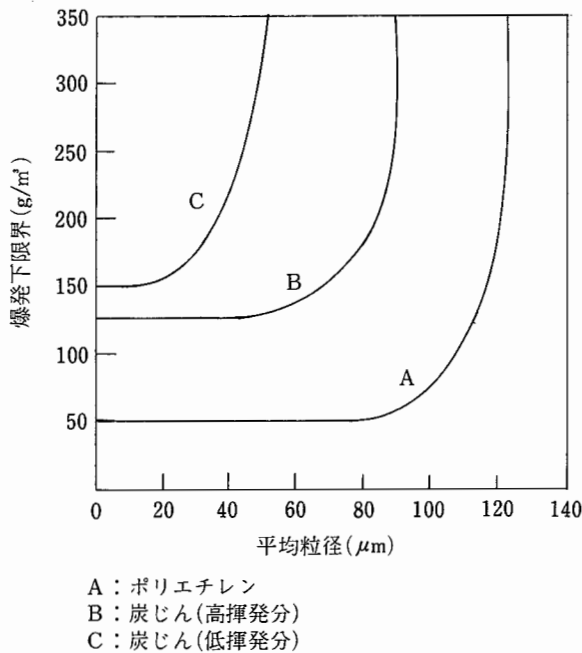


図.6 爆発下限界に及ぼす平均粒径の影響³⁰⁾

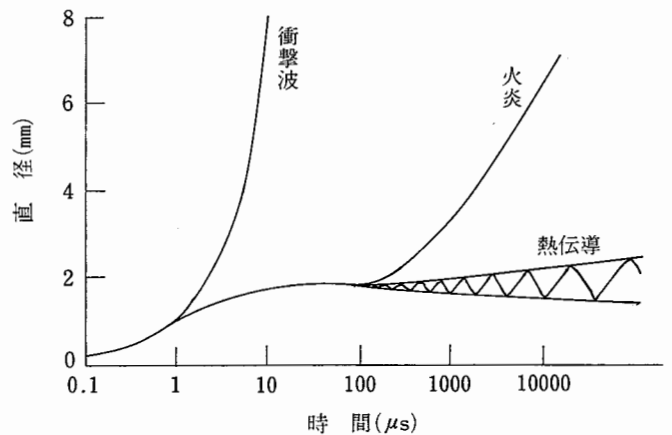


図.7 電気火花による初期火炎の形成と消滅

や鋭角部分でのみガス化が起こるだけで、火炎面が維持されるためには粉じん濃度をより高くすることが必要になる。最終的には、粒径が大きすぎて火炎面が通過する間に可燃性ガスの下限界にも匹敵する量さえもガス化できず、大きい方の限界粒径が存在することになる。

ところで、粉じん爆発が生起するために何らかの着火（発火）源が必要であるが、火炎は着火源からどのように形成されて行くのであろうか。粉じん・空気爆発性混合気中において対向電極間で弱い電気火花を飛ばした場合を想定すると、電気火花による初期火炎の形成と消滅は図.7のように表されるであろう。放電による衝撃波の発生は、電極近傍の粉じん粒子を蹴散すことになり、着火不能に至る場合もあるが、混合気に適した火花持続時間を取って火花エネルギーを付与すれば、高温核が形成される。高温核の温度が当該混合気の発火温度よりも十分高ければ初期火炎（核）が形成され、以後、放熱と冷却の釣合いに依りて火炎の進展ないしは消滅に至ると考えられる。火炎が伝ばするか消滅するかの極限の火炎核の大きさを最小火炎核という。これは任意の混合気の最適濃度において得られ、理論的にはこの小球（核）以下では火炎伝ばは不可能なことから、その直径は火炎幅の2倍に等しく、消炎距離にも相当する。さらに、最小発火エネルギーはとりもなおさず最小火炎核の形成に必要なエネルギーに関係する。これを外部から電気エネルギーとして与える場合、通常直径 d_q の最小火炎核に相当する爆発性混合気温度を火炎温度 ΔT までに上昇させるのに必要なエネルギー量として、定義される。すなわち、混合気の定圧比熱 c_p 、密度を ρ_a とすれば、最小発火エネルギー E_{min} は、次式で近似される³¹⁾。

$$E_{min} = \frac{1}{6} \pi c_p \rho_a \Delta T d_q^3$$

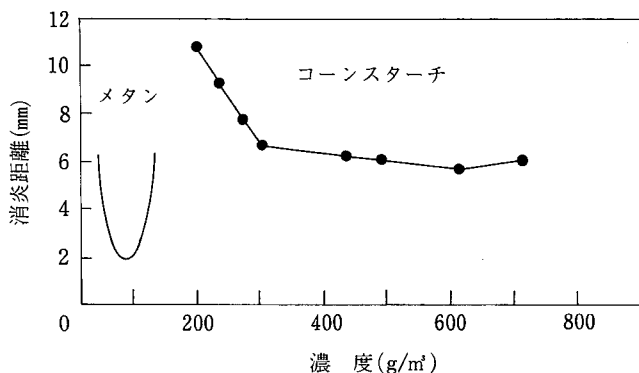


図.8 メタンとコーンスターチ（粉）の消炎距離と濃度の関係^{32,34)}

いま、火炎温度として化学量論組成上の混合気のそれを取り、消炎距離 d_q 以外の変数は上式においてガスと粉じんとして同等であるとすれば、大雑把な近似として、 $(E_{min, 粉じん}/E_{min, ガス}) \propto (d_q, 粉じん/d_q, ガス)^3$ が得られる。図.8は、コーンスターチ粉じん・空気混合気の消炎距離と粉じん濃度の関係を示す。これによると、消炎距離の最小値は5.5mmで、同条件でのメタン・空気混合気のそれは2.0mmである。後者の最小発火エネルギーは0.28mJであるから、コーンスターチのそれはオーダー的にガスと同等かその約10倍の最小発火エネルギーと予想される。測定データは限られているが、コーンスターチの実測データは0.3mJ³³⁾あるいは1.7mJ⁷⁹⁾と報告されている。一方、粉じんの火炎幅もこの例ではガスのそれと同等であり、火炎伝ばを支配するプロセスもあるいは両者で同類なのではないかと推定する研究もある³⁴⁾。

4. 各種の粉じん爆発試験装置

可燃性粉じんの爆発危険性を評価するためには、当該粉じん試料の爆発危険特性値を明らかにすることが要求されるだろう。特性値を計算によって求める方法もいくつか報告されているが^{35~38)}、粉じんが完全燃焼するのは稀で、混合ガスのような平衡計算によって求まる理論値は信頼性に欠けるので²⁸⁾、通常、粉じん爆発試験装置を用いて測定して決定される。試験装置は、一般に粉じん爆発特性値を測定する目的の装置であるが、測定項目は多岐にわたるので、それぞれの特性値に適した種々の装置が開発されてきた。その歴史は50年以上にもわたるが、いかにして均一な粉じん濃度（雲）を形成させるかということに努力が払われてきたことにつぎるようである。その形成方法を、石浜ら³⁹⁾は、(1)吹き込みによる方法（空気と共に試料粉じんを容器内熱源に吹きつける）、(2)吸引による方法、(3)自由落下による方法、(4)その他、の4種に分類して、試験方法の変遷の概要を述べた。これらの方法によるものの中には、粉じん濃度や乱れといった、試験結果に著しい影響を与える因子の概念が考慮されていなかったものもある。ここでは、次章以下の説明にでてくる実験室規模で今日使用されている粉じん爆発試験装置の代表的なものだけを説明した。

*従来ハルトマン装置と呼ばれてきたが、英語読みで訂正した。

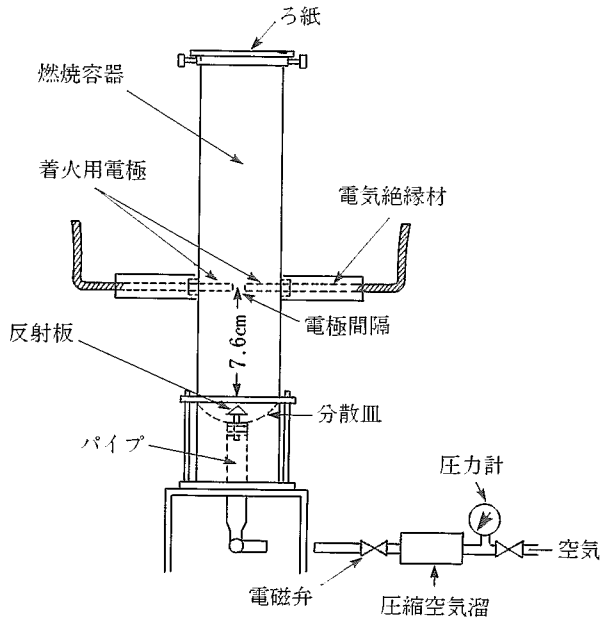


図.9 Hartmann 粉じん爆発試験装置



図.10 図.9の装置における爆発状況

4.1 Hartmann(ハートマン*)粉じん爆発試験装置⁴⁰⁾

米国鉱山局で約30年前に開発された装置で(図.9), 粉じん爆発試験装置といえばこの装置を指す程に有名で世界各国で使用されてきた。垂直管装置, 吹き上げ式装置ともいう。装置の概要および粉じん爆発圧力と圧力上昇速度の測定法は, ASTM (E 789)⁴¹⁾に“1.2l密閉円筒容器による粉じん爆発標準試験法”として採用されている。爆発圧力ばかりでなく, 爆発下限界, 最小発火エネルギーなどの粉じん爆発特性値を測定するのに使用される。爆発圧力を測定する場合に

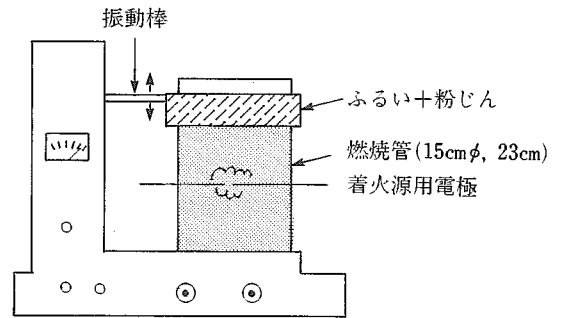


図.11 石浜式粉じん爆発実験装置

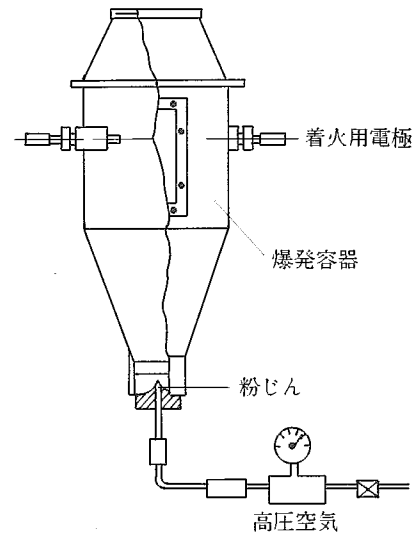


図.12 15l 'Nordtest' 装置

は, 円筒容器を鋼鉄製密閉容器のものとし, 爆発下限界を測定する場合は, 透明ガラス(又は樹脂)製で上蓋をろ紙などの脆弱物で置き換える。激しい爆発の場合は脆弱部が破裂して火炎が噴出するが, 円筒ガラス管は破損しない構造になっている(図.10)。着火源は容器底部から7.5 または10cm 上部に設置され, 通常, 電気火花を用いるが, 電熱コイルや綿火薬も使用されることがある。

4.2 石浜式粉じん爆発実験装置⁴²⁾

内径15cm, 高さ23cmの透明アクリル製円筒爆発容器の上部に, 粉じん試料を入れた標準フルイを置き, このフルイに打撃を与え粉じんを容器内に落下させ均一な粉じん雲を作成する装置である(図.11)。ふるい

落下式装置ともいう。主に、爆発下限界を測定する目的で使用されるが、同原理のものは、すでに19世紀末にWeberによって考案されたという¹⁰⁾。着火源は容器中央で、電気火花または綿火薬を使用する。粉じん雲は乱れを伴わない点に特徴があり、同装置は市販され

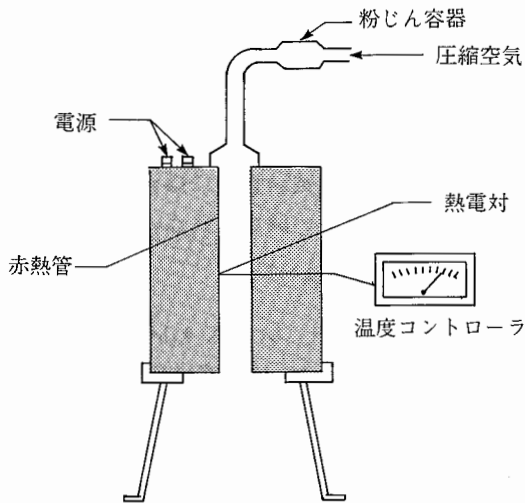


図.13 Godbert-Greenwald 発火温度測定装置⁴⁰⁾

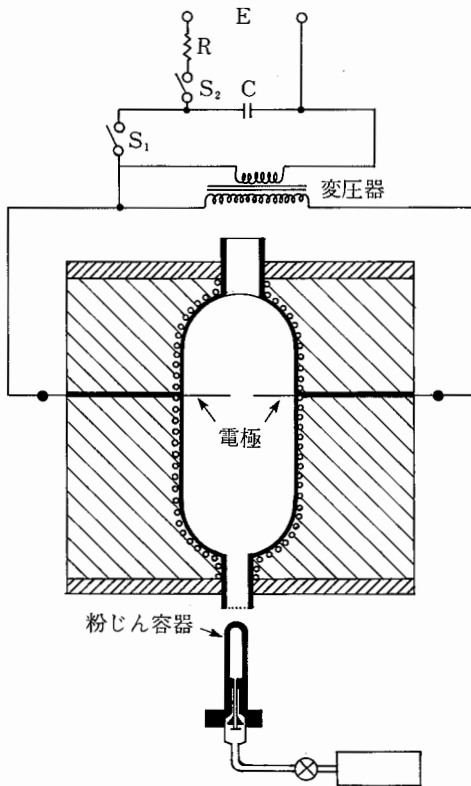


図.14 米国鉱山局の改良型電気炉⁴⁰⁾ (電極は通常使用しない)

ている。凝集しやすい粉じんは分散が困難であり、火炎が伝ばした場合は、金網と火炎が接触しないようにシャッターで遮ぎる必要がある。

4.3 15l標準試験(‘Nordtest’)装置⁴³⁾

ノルエーのCMI (Chr. Michelsen Institute) で開発された、15lの爆発容器から成る粉じん爆発下限界測定装置(図.12)であるが、スウェーデンの国家規格‘Nordtest’として採用されている。基本的にはHartmann装置と類似のものであるが、均一な浮遊粉じんを容器内に達成したことを確認して着火できるように、電磁弁の開放時間が10ms単位で制御できる。着火源は強力な電気火花を使用する。着火の判定は火炎の観察によるもので、少なくとも着火源から100mmの火炎伝ばが認められた場合を着火したとみなし、さらに10回の繰り返し実験で50%着火確率に対する濃度を採用し、この濃度を別に検定測定して下限界を決定する。

4.4 発火温度測定装置

浮遊粉じんの発火温度は、Godbert-Greenwald電気炉(図.13)と呼ばれる装置を使用して測定する。電気炉中のガラス管内が均一温度になるように電熱線で加熱し、一定温度に達したならば管内に一定量の粉じん

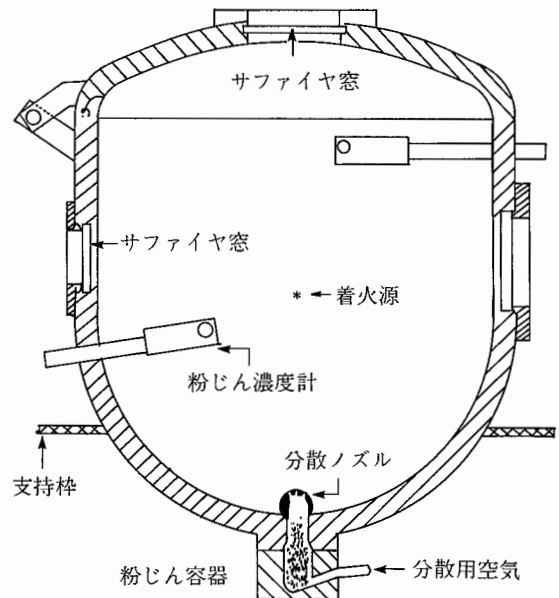


図.15 20lガス・粉じん爆発試験装置⁴³⁾

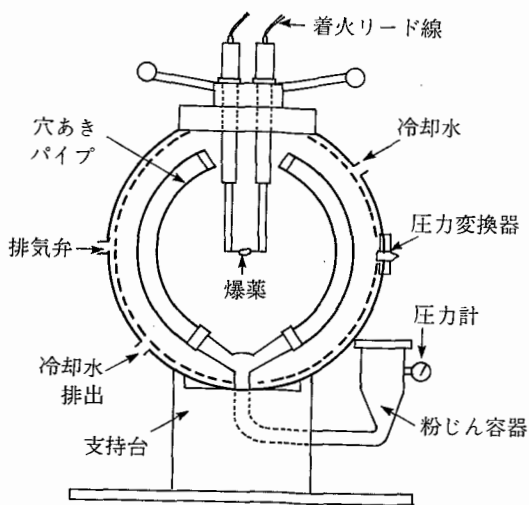


図.16 20L球形爆発装置⁴⁶⁾

を分散させ、発火による火炎伝ばを観察する。火炎が観察されれば、温度を下げ、また粉じん量をも変化させて、発火が起こる最低温度すなわち発火温度を見出す。管内容積は約0.27 lである。

図.14は米国鉱山局で新しく改良された電気炉で、粉じんは容器底部から分散させ、粉じん濃度を变化させ発火温度を測定する。加温容器の容積を1.2 lに増し、別に高温下での電気火花着火用の電極も使用できるようになっている。しかし、この装置の最高加熱温度は600℃である。

4.5 20 l ガス・粉じん爆発試験装置 (米国鉱山局)

1984年に米国鉱山局で Hartmann 装置および 8 l 実

験装置に続いて、新たに製作された爆発試験装置は、図.15に示すような内容量20lの球形に近い爆発容器から成るもので、特に粉じんの均一な分散を心がけて設計された。光学的な粉じん濃度計によって測定した結果、粉じん濃度の均一性はかなり優れているとしている。粉じんの分散方法は Hartmann 装置と同様であるが、着火起爆を 1 atm (大気圧)で行えるように、粉じんを分散する前に容器を約0.2 atm に減圧しておく。0.3 秒間高圧空気で粉じんを分散して、1 atm において火薬で着火する。この時間の粉じん雲はやや乱れた状態にある。この試験装置で爆発圧力、圧力上昇速度、爆発下限界などが測定できるという。

4.6 20 l 球型爆発装置^{6,10)}

この装置 (図.16) は、スイス Adolf Kuhner 社から販売されており⁴⁶⁾、粉じんの爆発特性値を測定する上で少なくとも20lの容積が必要であることから 1 m³標準爆発装置に代わるものとして製作された。爆発容器は水冷外套で覆われており、高温雰囲気での測定もできるようになっている。約21気圧に空気加圧した粉じん容器から、穴あきパイプを通して粉じんを分散する。分散開始後、60 ms の遅れ時間を取って着火する。着火源は10kJの火薬を使用するが、これでは強すぎるという批判があり100 Jの電気火花でも代替できそうである。爆発下限界、最大爆発圧力、最大圧力上昇速度などが測定できるが、もっぱら K_{st} 値を測定するために利用されているようだ。

* 1bar=100kPa=0.9869atm

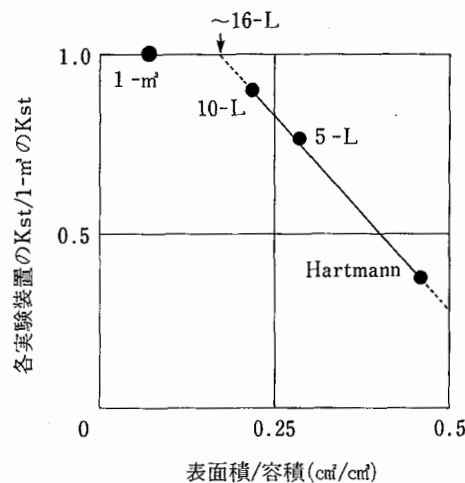
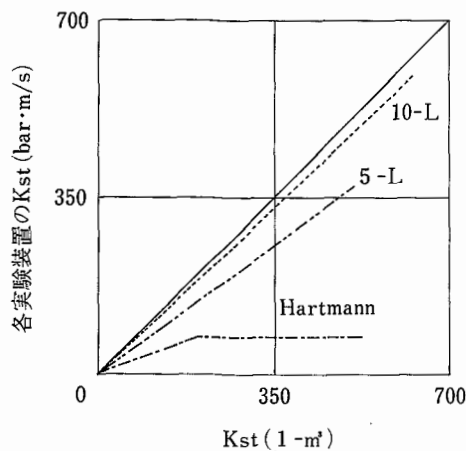


図.17 爆発特性に及ぼす爆発容器容積の影響¹⁰⁾

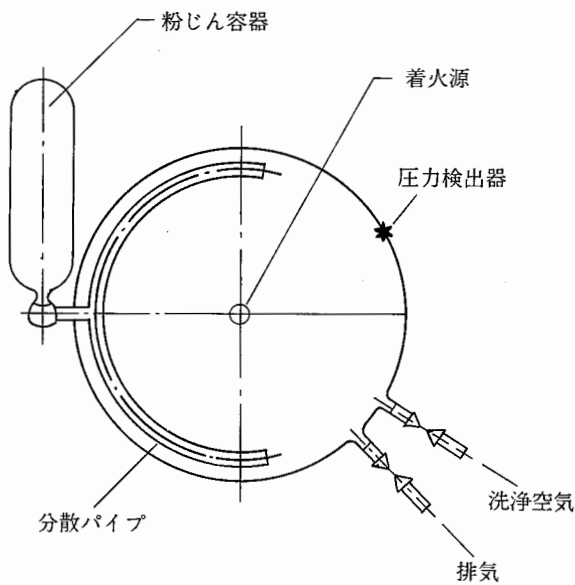


図.18 1 m³ 爆発試験装置⁵⁾

図.17に爆発特性値と爆発容器容積の関係を示す。これらの実験結果から、粉じんの爆発特性値を正確に測定するためには、爆発試験装置の容器容積は最低20 l (0.02 m³)が必要だといわれるようになった。なお、1 m³装置に較べて20 l装置では器壁における火炎の冷却効果が増すので、特に最大爆発圧力が5.5 (bar*)を越える場合には、1 m³装置におけるデータと同等の値を得るためには次式による補正が必要となる。

$$P_{max} = 1.3 (P_{max, 測定値}) - 1.65$$

4.7 1 m³ 円筒型爆発試験装置

本装置(図.18)は、ISO-6184「空気中の可燃性粉じん爆発指数決定法」⁵⁾に記載の直径：高さの比が1に相当する容量1 m³の円筒状容器から成る。5 lの粉じん容器に試料粉じんを入れ21気圧に空気加圧する。この容器は内径19mmのパイプにより爆発容器本体内に設けた半円状の小穴あき(4～6 mmφ, 穴数11～24個)分散パイプに結合されている。粉じん容器のバルブを開放して粉じんを分散開始後600 ms後に10 kJ火薬で着火する。この着火遅れ時間は、混合気の乱れに関係し、最大昇圧速度に大きな影響を与える(図.19)。粉じん容器は、バルブ開放後600msで丁度空になるので、この時点で起爆するように規定している。爆発時の最大爆発圧力および最大昇力上昇速度を広い粉じん濃度範囲にわたって測定し、それらの最大値を決定する。なお、ISO表題中の爆発指数とは、とりもなおさ

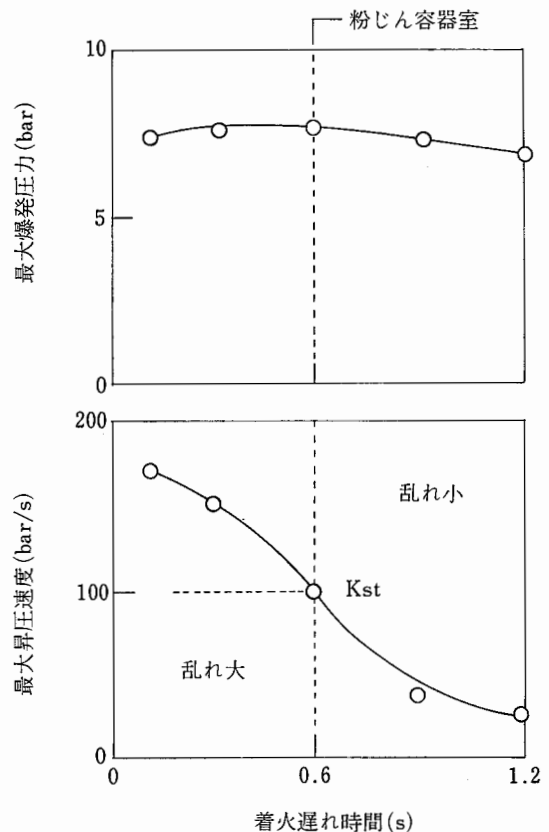


図.19 着火遅れ時間と爆発特性値の関係(炭じん)

ず最大爆発圧力および最大圧力上昇速度を指す。また、この装置を利用して測定した最大昇圧速度は、そのままKst値(3.2参照)に等しく、爆発指数の一つになる。しかし、この装置は実験上扱いにくいので、上記の20 l球型装置が代替装置として製作されたという。西独の二機関が協力して、この装置を主に用いて測定した各種粉じんの爆発危険特性値を、参考までに巻末(付表.1)に掲げた。

5. 各国における粉じん爆発試験法

可燃性粉じんの爆発危険性値は、現状では爆発試験装置を用いて測定しなければならぬため、これまで各国においてそれぞれの試験法を確立し測定が行われてきた。それらの試験法には、ある程度共通点が見られたが、最近では2章で触れたように、特にEC(欧州共同体)を中心に国際的なより広範囲な標準化の方向にある。しかし、爆発試験測定を大部以前から行ってきた二、三の国の試験法には、独自に開発され現在使用されているものがいくつか含まれているので、ここ

では試験を行っている代表的な国別にその概要と問題点について述べる。我が国では明文化された試験法は、これまで公表されていないが、粉じん爆発試験による危険性評価は種々の施設で行われてきた。末節に我が国の現状について記した。

ところで、試験に供する粉じん試料は、扱う粉じんを代表する最も爆発を起こし易いものであるように採取する必要がある¹⁵⁾。そのため、できるだけ粒径が細かく、粒子表面が新鮮で乾燥した試料をサンプリングする。試験法に試料の調整法が記載されている場合が多いが、通常粉じん爆発試験には63 μm (230メッシュ)以下の粒径で水分5%以下の粉じんを使用する機会が多い。さらに、粉じんの毒性や放射能などに対しても注意が必要である¹⁵⁾。

5.1 イギリス

主に火災研究所 (Fire Research Station) で粉じんの爆発性試験が行われており、その方法は王立工場検査機関によって承認されているが、爆発試験方法および爆発防止対策の一般的に受け入れられている国内規格はない¹¹⁾、という。しかし、それらの指針はいくつか出版されている^{48,49)}。

5.1.1 爆発性分類試験

粉じんの爆発性が不明または疑問に思われる場合は、簡単な試験装置で浮遊粉じんの着火、火炎伝ば性を肉眼観察して、爆発性粉じんをグループA、非爆発性粉じん (火炎伝ばしない粉じん) をグループBとして分類する。この分類はまったく定性的なものであるが、ある粉じんについて爆発危険性があるかないかを決定する意味で重要な試験である。新規物質や組成が不明の粉じん、不活性物質を含有する粉じん、あるいは

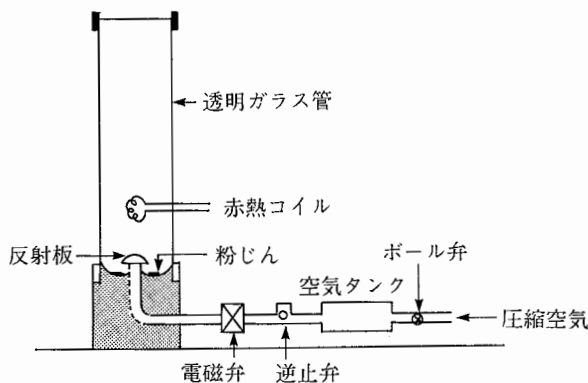


図.20 垂直管装置 (着火源として赤熱コイルを使用した場合)⁶⁾

は種々の加工処理が行われる工場の床や梁に蓄積した粉じんなどが対象となる。試験装置として、Hartmann 試験装置と同等の開放円筒容器から成る垂直管装置 (電気火花, 電熱線) (図.20), 水平管装置 (1300℃に加熱した白熱線), 発炎装置 (電熱線, 電気火花) の三種があるが、垂直管装置のみがもっぱら使用されている。この試験方法の欠点として、弱い着火源を使用していることと温度などの雰囲気条件が変化できないことが指摘されている¹¹⁾。

別の分類法として、VDI-3673⁵²⁾による粉じんの爆発クラスも使用されつつある。

5.1.2 爆発下限界

電気火花または赤熱コイルを着火源として、垂直管装置 (Hartmann 装置) で測定する。着火源は、粉じんを分散させる直前に放電を持続または加熱しておく。従って、着火源に向かって粉じんを噴射する方法となる。管上部は粉じんの飛散を防止するため薄紙で覆い、連続十回の爆発試験で火炎伝ばが生じない最低粉じん濃度を求める。限界付近では火炎は弱く小さいので判断が困難になり、実験する人によって多少異なる値が得られる。この試験装置は、もともと大規模実験で得られる米国ピッツバーグ産炭じんの下限界と同じ値を与えるように設計されたものであるが、炭じん以外の種々の粉じん試料で使用されるようになって以下のような欠点が指摘されてきた。

- ・爆発容器内で均一な粉じん濃度を達成することが困難なこと。
- ・粉じんを分散する時点で既に着火源が存在し、そのため、粉じんが容器全体を満たす前に着火するので低くすぎる下限界が得られること (危険性の過大評価)。
- ・電気火花では着火しないが、電熱線 (コイル) で着火する粉じんもあること。

最近、垂直管装置に代わるものとして、20l球形容器および15l 'Nordtest' 装置が検討されている¹¹⁾。20l球形容器では10kJの強力な着火源 (火薬) を使用し、爆発圧力で粉じんの着火を判断する。Nordtest 装置では、粉じんが容器を十分均一に満たすように分散条件を粉じんの種類によって変化させて試験する。これらの種々の試験装置による同一粉じんの比較測定も行われたが、どの装置がよいかは結論が出ていないようだ。

5.1.3 発火温度

今のところ、従来型である Godbert-Greenwald 電気

炉（長さ216,内径36 mmの燃焼管, 図. 13）を使用している。少量の粉じんを一定温度の燃焼管内に分散して, 火炎の発生を観察する。火炎が認められれば, 温度を下げて, 十回の連続試験で発火が生じなくなる最低温度を求める。この装置の使用限界として,

- ・電気炉が小さく十分な大きさの粉じん雲を形成できないこと。
- ・室温の空気で粉じんを分散し, 粉じん雲の炉内滞在時間が短いこと。
- ・管入口で粉じんが熔融して閉塞しやすいこと。

最近これに代わるものとして, アメリカ鉱山局で開発された内容積1.2l (図.14)の電気炉装置に類似のものが使用されている。これは電極を備えたもので, 高温条件での分類試験が行えるとともに(グループBの粉じんでも電気炉装置では火炎伝ばするものがある), 粉じんの分散は炉下方から行うので, 粉じん雲のより長い滞留時間が保証できる。その反面, 分解ガスの発火の機会を増すことにもなる。

5.1.4 最小発火エネルギー

これまで公表されたデータが最も多く, 伝統的に使用されてきた測定装置は, Hartmann 装置を用い, 低圧で充電されたコンデンサー(容量C) エネルギーを高圧変換器(入力24 V, 出力10 kV, 0.024 A)を通して電極間(間隙0.2 ~ 0.5 mm)で火花放電させるものである(回路は図. 14参照)。そのエネルギーは, 充電電圧をVとして $E=0.5 CV^2$ で求められるが, かなりの熱量損失が回路中で生ずることが一般に認められている。さらに, より長い放電の方が有効であるという放電時間の影響も知られており, 火花発生に最適な放電回路については色々な考え方があ。英国では他にBS-5958(静電気帯電防止規格)⁵⁰⁾に記載の電気回路があるが, その測定方法は同じく $E=0.5 CV^2$ を用いて算出するものである。

5.1.5 爆発限界酸素濃度

以前は, Godbert-Greenwald 電気炉を使用し, 850℃での測定が行われていたが, 高温での測定は工業条件に合わないことから, Hartmann 装置で雰囲気ガスおよび分散ガスを任意の濃度の不活性ガス(通常, 窒素) / 酸素・混合ガスで置換することによって室温で測定する方法が用いられている。この方法によるデータは実際の工業条件にも適用できるという。しかし, 標準容器としての20l球形容器による測定も考慮されている。

5.1.6 最大爆発圧力および最大圧力上昇速度

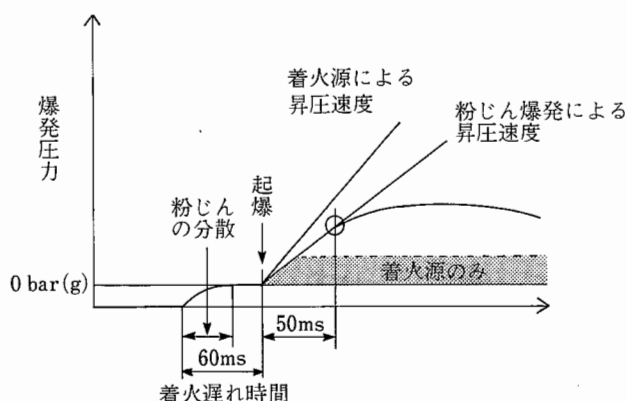


図.21 着火源(火薬)による昇圧速度が粉じんのそれより大きい場合

(起爆後50msの時点での接線から粉じんの最大昇圧速度を求める。)

イギリスでは過去8年間で, これらの特性値の測定は垂直管(Hartmann)装置から20lまたは1 m³爆発装置を用いた方法へ次第に変更してきた。垂直管装置で爆発圧力を測定する場合の欠点として, 爆発容積が小さすぎるため火炎が器壁で冷却され値が小さくなることと, 粉じんの吹き上げによる圧力(初圧)を単に爆発圧力から差し引いていることがあげられる。初圧は通常1.14~1.21 atmあり, 最大爆発圧力をa(atm)とすれば, (a-1.14)と(a/1.14)ではかなりの差を生ずる場合もある。一方, 20l球形爆発容器の使用にあたっては次のような標準条件を定めている。

- ・着火源として, 西独で市販されている火薬(2個×5 kJ)を使用すること。
- ・60 msの着火遅れ時間を取って起爆する。
- ・粉じん容器の空気充填圧力=18~20 bar, g(ゲージ圧)
- ・爆発容器の減圧度=0.4 bar, g

強力な着火源を使用しているので, 着火源のみの起爆による圧力上昇は0.1~1.5 bar, gにも達し, 火薬によってバラツキがあるという。爆発力が弱い粉じんは着火源に基づく昇圧速度の方が大きい値を示すので, 図.21のような方法で最大昇圧速度を求めている⁴⁶⁾。20l爆発容器では, 比較的粗い粒子を試験する場合や信頼性が落ちる点が欠点として指摘されているが, ヨーロッパでは実験室規模で扱える標準爆発試験装置としてかなり普及している。

5.2 (西)ドイツ

可燃性粉じんの爆発・火炎危険性の試験は、BAM (国立材料試験所)やBVS (炭坑研究施設:Bergbau-Versuchsstrecke), BIA (職業組合労働安全研究所)などの他に、いくつかの大きな化学会社で活発に行われてきた。爆発防止基準についても VDI-2263 (粉体火炎と粉じん爆発/危険-評価-防護対策)⁵¹⁾, VDI-3673 (粉じん爆発の圧力放散)⁵²⁾および(職業組合)化学工業協会発行の「爆発防護規則」⁵³⁾などがあり、この方面での先達国である。ここでは、主にVDI-2263に記載されている浮遊粉じんに関する試験方法(図.22)について述べるが、この他にもユニークな堆積粉じんの燃焼試験方法や民間会社で行われている種々の簡易試験方法が多数ある⁵⁴⁾。

5.2.1 爆発下限界

(西)ドイツでは、簡単な計算式によるか、または実験によって測定するか、のいずれかの方法で粉じんの爆発下限界を決めている。計算式は、反応生成物の解離のような複雑な反応式を考慮することなく、1,000℃の

火炎温度が達成された場合に発火するという仮定のもとに熱力学的に導かれたものであるが、金属や硫黄以外の可燃性粉じんでは実測値と非常に良く一致することが確認されているという⁵⁵⁾。この方法は、粉体塗料の西独規格であるDIN-55 990にも採用されており、計算式は、 $H_c(J/g)$ を粉じんの燃焼熱として、

$$\text{下限界}(g/m^3) = 2.52 + 1.235 \cdot 10^6 / H_c$$

で示されている。実験による場合は、20 l球形容器または1 m³爆発装置を使用することが望ましいとされている⁵⁵⁾。

5.2.2 最小発火エネルギー

最小発火エネルギーの測定は、実用的観点から次第に関心が持たれるようになってきた。爆発防止対策の第一目的として着火源の排除を考慮すべき場合が多いことがその理由である。スイスの化学会社並びにノルウェーのCM Iと協力して、西ドイツ化学工業界では標準の最小発火エネルギー測定装置(図.23)および測定方法を確立している⁸⁸⁾。電気抵抗とインダクタンスを有する回路で放電時間を長くできる特徴があり、従来データの1~2桁低い値が得られている。図.24

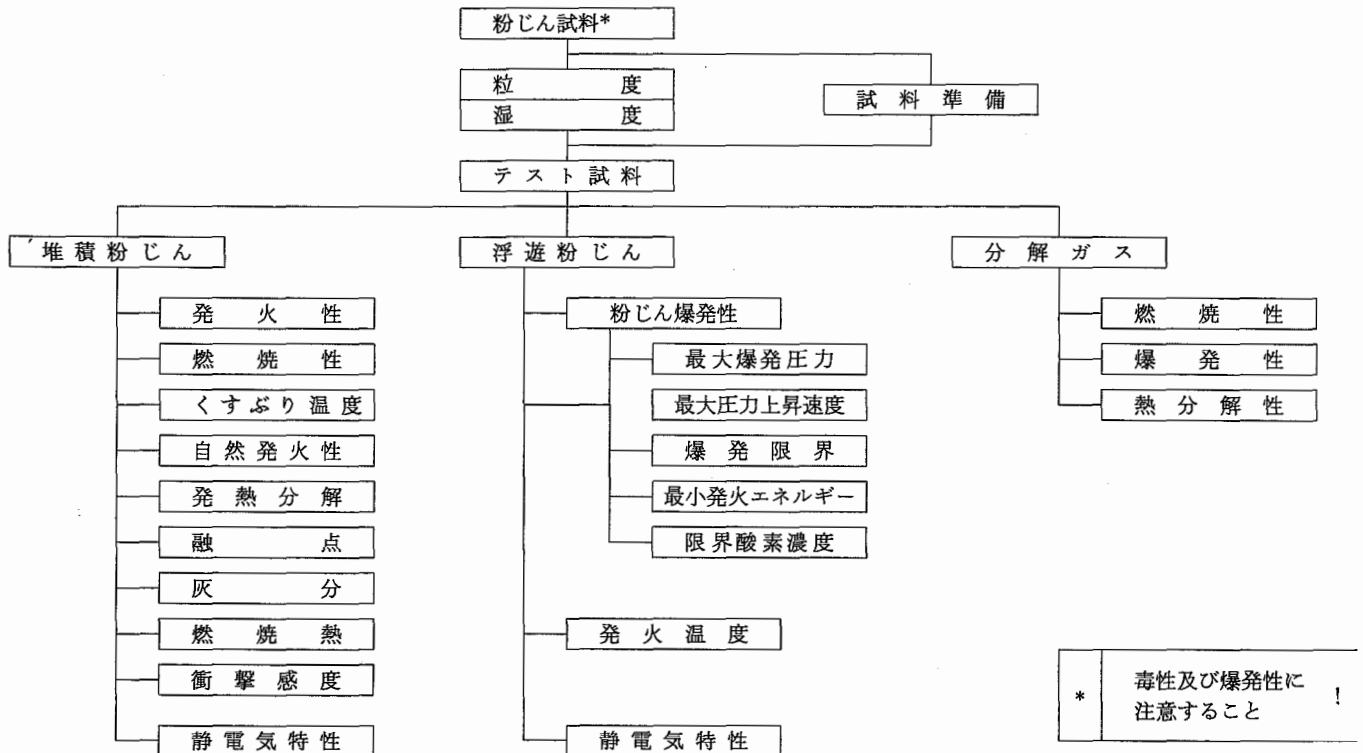


図.22 粉じん燃焼及び粉じん爆発の評価に対する図式

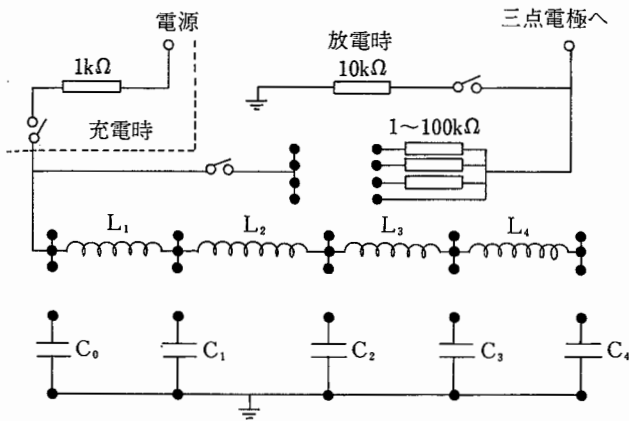


図.23 最小発火エネルギー測定電気回路⁸⁹⁾

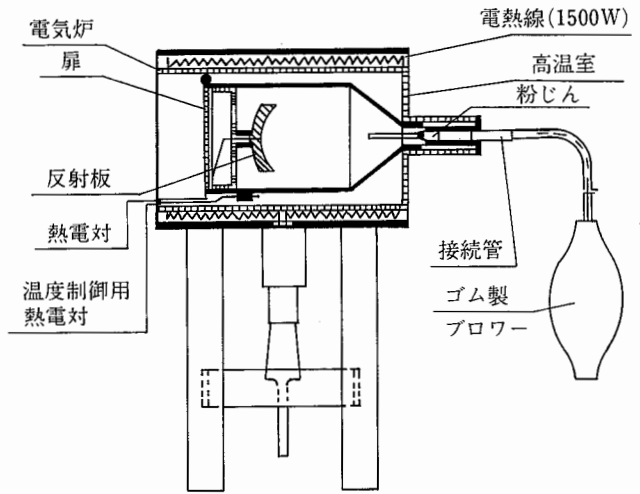


図.25 BAM 式発火温度測定装置⁵⁰⁾

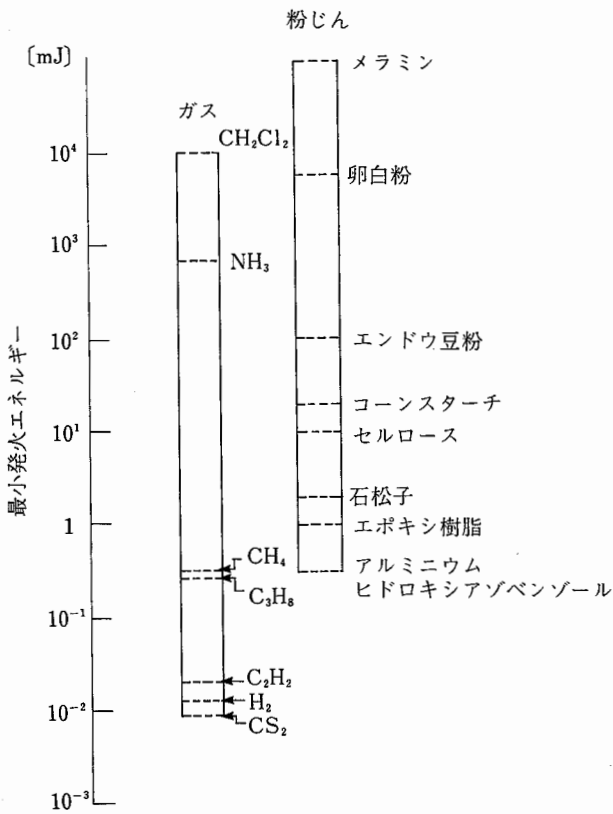


図.24 可燃性ガスと粉じんの最小発火エネルギーの比較¹⁰⁾

は可燃性ガスの最小発火エネルギーと粉じんの測定結果を比較したもので、1 mJ 以下で発火する浮遊粉じんもあることを示している¹⁰⁾。

5.2.3 発火温度

数年前までは、Godbert-Greenwald 炉も使われてい

たが、高温表面（反射板）に手押しブローアで粉じんを水平に吹き付ける形式の BAM 式発火温度測定装置（電気炉）（図.25）が最近開発されて使用されている。いずれも欠点と特徴があり、どれも満足出来るものではないが、BAM 炉では十分長い発火遅れ時間が取れる利点があり、G-G 炉で測定した値と同等または数十度低い発火温度を与える。工業的には粉じんと高温表面が接触する状況はよくあることなので、BAM 炉が標準化されれば、発火温度による可燃性粉じんの爆発危険性分類は可能であるし必要なことかもしれない、と BAM 試験担当者は考えている⁵⁵⁾。

5.2.4 火炎伝ば性

可燃性ガス・蒸気に対する安全細隙（セーフ・ギャップ）と同様な火炎の細隙伝ば性を表す特性値⁵⁷⁾が、可燃性粉じんの場合にも必要なことは間違いないが、そのような火炎の通過性を測定できる装置は、試作品はあるが、まだ十分使用できるまでに至っていない。この問題は工業的にも関心が高いので、将来、ぜひ開発する必要がある、と（西）ドイツでは考えられている⁵⁵⁾。図.26は試作された実験装置の例で、図.27はそれによる測定例を示す。これによると、石松子及びコーンスターチ粉じんの安全細隙はメタンガスと同程度で火炎逸走する危険性があることがわかる。

5.2.5 最大爆発圧力および最大圧力上昇速度⁵⁸⁾

断熱火炎温度を実験的に求めることは頗る困難で、大きな誤差が付きまとうため、熱力学的な計算によって求められている。しかし、粉じん爆発の場合、粉じんは完全燃焼するわけではなく計算値は限定された意

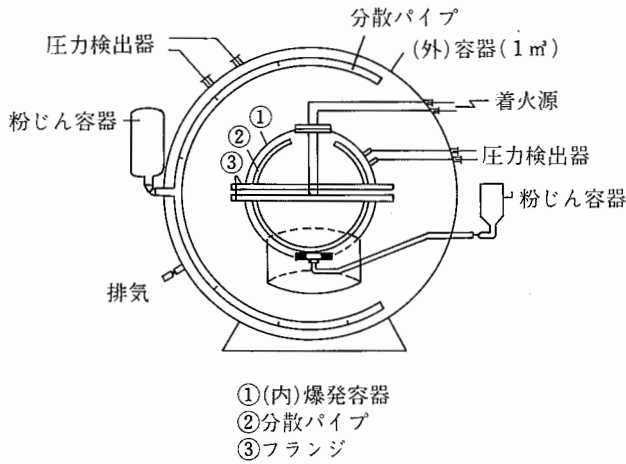


図.26 安全細隙測定装置⁵⁴⁾

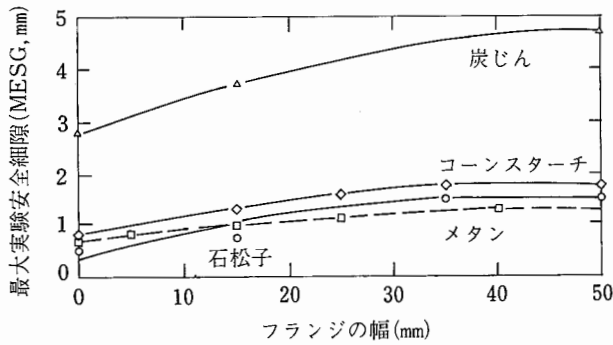


図.27 安全細隙とフランジ幅の関係⁵⁴⁾

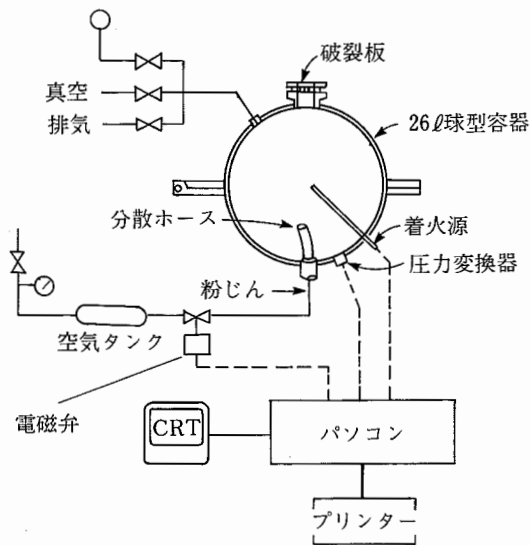


図.28 ユニオン・カーバイド社(米国)の26l球型爆発装置⁵⁵⁾

味しか持たず、ある上限値を示すにとどまる。

最大爆発圧力と最大圧力上昇速度を決定する方法は、(西)ドイツでは過去30年間何度も改定されてきたし、これからも変わるかもしれない。現在、20l球形容器による測定方法(4.6 参照)が最も広く行われており、標準装置となりつつある。この球形容器が容積、形状、耐圧性ともに議論の余地なく優れているからに他ならない。しかし、凝集したり分散中に発火したりする粉じんでは、正確な測定はなしえないと言われている。

また、VDI-3673で標準化されている1m³容器とのデータの比較についてもいくつかの疑問が出ている。比較試験はごくわずかしが行われなかった、という憶測もある。粉じんによっては最大圧力上昇速度のデータもかなりばらつくし、25%以上の誤差を生じることもあるのはまれではない。そこで、同一装置を使用した国際間での比較試験の必要性を(西)ドイツの一部の専門家が強く主張している。また、単にデータの最大値を取ることの意義についても異論が出ている。

5.3 その他の国

5.3.1 アメリカ

炭じんを含む粉じん爆発試験が世界で最も精力的に行われてきた米国鉱山局において、戦後粉じん爆発の試験測定が実施された粉じんは約3,000を越えるという¹⁷⁾。そのほとんどは、鉱山局で開発されたHartmann爆発試験装置を使用して測定されたもので、他にまとまった資料がなかったことやNFPA(米国防火協会)の規格類を通して、それらのデータは1960、70年代にかけて国際的に広く引用されたものである^{2,15)}。ところが、粉じん爆発に関する最近の国際的関心の高まりの中で、すでにいくつか述べたHartmann装置の欠点が指摘されそれらのデータは、鉱山局の担当者が認めるように不適切なものとして次第に棄却される方向にある。現段階では、20l爆発試験装置(4.5.参照)や鉱山局改良型発火温度測定装置(図.14)が研究用に鉱山局では使用されているようであるが、ASTMにはHartmann装置(1.2l密閉円筒容器⁴¹⁾)と最小容積20lを有する爆発装置(例として、4.6で引用した20l球形容器を提示⁵⁹⁾)をそれぞれ用いた試験方法が定めてある。しかし、ASTMとしては最近粉じん爆発²¹⁾や危険性分類に関する国際会議を開催していることから照して(2章参照)、多分に試験方法については模索中という印象を拭えない。

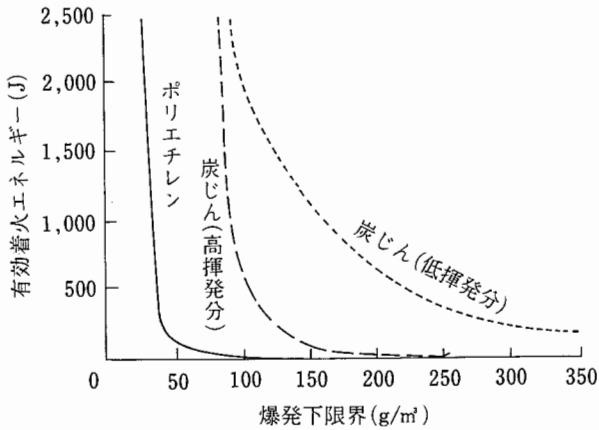


図.29 爆発下限界と着火エネルギーの関係³⁰⁾
 (ポリエチレン (37 μm) = ~35g/m³)
 (炭じん (高揮発分) = 90 ± 10g/m³)

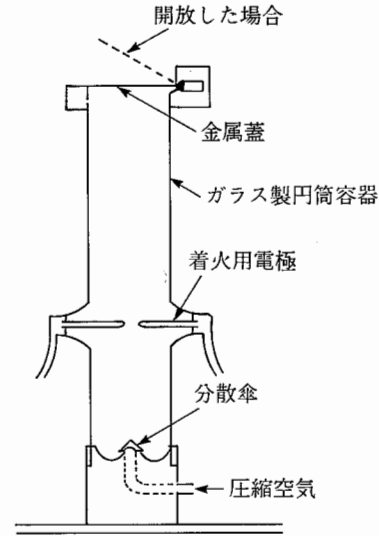


図.31 改良型 Hartmann 装置⁶⁾

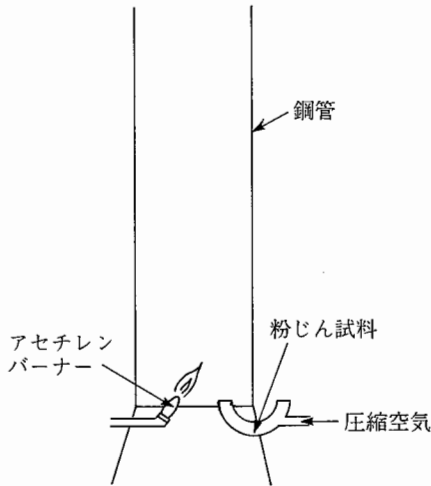


図.30 火炎試験装置⁶⁵⁾

これに対して産業界では、20 l 球型爆発装置に匹敵する各種装置を製作し^{60~62)}、ISO-6184に適合する粉じんの爆発特性値 (K_{st} 値) を測定する方法の整合化を進めている²¹⁾。なかには、1.9 m³ 球型容器⁶³⁾ や 4 m³ 爆発容器⁶⁴⁾ から成る大型装置を使用して粉じん爆発や爆発抑制剤の試験を行っている例もある。図.28は実験室規模の小型爆発装置の例であるが、粉じんの分散をゴムホースを用いて行っている。高圧空気による粉じんの分散に際して、ホースは首振り動作により結構均一に分散されるらしい⁶⁰⁾。

なお、米国鉱山局では20 l ガス・粉じん爆発試験装置 (図.15) を用いて爆発下限界を測定した³⁰⁾。その方法は、図.29に示すように、下限界と着火エネルギー

の関係測定し、エネルギー無限大に対応する値で示すものである。ただし、下限界の定義を初圧に対する最大爆発圧力の比が2倍となる濃度としている。

5.3.2 ノルウェー⁶⁶⁾

1970年代に、ノルウェーの最大の穀物輸入サイロ施設で一連の爆発事故が発生したのを契機に、粉じん爆発危険性試験が同国科学技術省 CMI 研究所で行われるようになった。

ある粉じんの爆発可能性を判断するため、火炎試験装置 (図.30) を使用する。この試験方法はイギリスの爆発性分類試験と同様のものだが、より強力な着火源として溶接用のアセチレンバーナーを利用する点に特徴がある。火炎の長さを観察して爆発性があると判断した場合には、3.2 節で述べた爆発特性値をすべて測定する。測定装置は Hartmann 装置を主に使用していたが、爆発圧力などは他のヨーロッパ諸国同様近年20 l 球型爆発装置で測定している。爆発下限界は、同研究所で開発された15 l ‘Nordtest’ 装置 (図.12) で測定する。表.3は、この装置による各種粉じんの爆発下限界と20 l 球型装置並びに1 m³ 標準装置による下限界測定データを比較したもので、20 l 球型装置のそれはヨーロッパの4機関で同一粉じん試料を用いて測定された値の平均値で示してある。‘Nordtest’ 装置は開放型で火炎を観察して認定するのに対し、他の二つの装置は密閉容器で下限界濃度は爆発圧力の大きさによって判定する違いがある。ほぼ一致するデータも

表.3 試験法の違いによる爆発下限界の比較⁶⁷⁾

粉じん (平均粒径, μm)	試験法及 び場所	20l 球型装置					1m ³	15l "Nordtest"
		A*	B*	C*	D*	平均	A*	C*
石松子	(28)	30	20	15	40	26	30	35±6**
		(0.5)	(0.2)	(0.1)	(0.5)		(0.4)	
コーンスターチ [水分11~12%]	(14)	60	50	90	90	73	80	130±14
		(0.5)	(0.3)	(0.2)	(0.2)		(0.3)	
光防護剤 [商品名"Tinuvin"]	(22)	30	10	20	20	20	40	27±3
		(1.3)	(0.2)	(0.2)	(0.1)		(0.3)	
スペイン産石炭 [揮発分36%]	(24)	40	30	25	30	31	70	98±20
		(0.6)	(0.4)	(0.3)	(0.1)		(0.2)	
亜鉛	(12)	600	600	400	400	500	650	565±65
		(0.9)	(0.3)	(0.3)	(0.1)		(0.6)	

(注) 爆発下限界の単位は, g/m^3 。()内の数値は, 下限界における爆発圧力(最大)から着火源に起因する圧力(20l装置では1.3bar(g), 1m³装置では0)を差し引いた値。

*A チバ・ガイギー社(スイス)

** 標準偏差

*B 火災研究所(イギリス)

*C クリスチャン・マイケルソン研究所(CMI), (ノルウェー)

*D J. M. Madariaga 国立実験所(スペイン)

あるが, 300%以上異なるものもある。

5.3.3 スイス¹⁰⁾

チバ・ガイギー社中央安全サービス室において開発, 使用されてきた粉じん爆発試験法が有名で, 1m³標準装置や20l球型装置ももともとは同社のW. Bartknechtの指導のもとに製作されたもので, 国際的にそれらが現在使用される傾向にあることは既に述べた。試験法の概要は, 上記の(西)ドイツのそれとほとんど同じで, それというのも, Bartknechtは長らく西独BVAで研究に従事して後に転職した人で, (西)ドイツ粉じん爆発試験法の確立にも深く係ってきたからである。ここでは5.2節で触れなかった改良型Hartmann装置(図.31)について述べる。

同装置は粉じん試料の爆発分類試験を簡便に行うために使用されるもので, この装置で爆発性があると判定された試料は20l球型装置等で更に詳しくその爆発性を評価することになっている。この装置のガラス円筒上部は金属蓋で閉鎖され, 爆発時にそれが開放するとともに蓋の開放の度合いが持ち上がり角度によって表示される機構になっている。蓋の開放度合いは単な

る目安であって, 蓋が開放しない場合でも, 火炎が円筒容器高さの半分程度を伝ばすれば弱い爆発性を示す粉じんであると判定して, 別の装置で定量的な測定を行うものである。この装置によるデータは巻末試料中にも包含されている。

5.3.4 オランダ, フランスおよびその他

オランダの粉じん爆発試験方法は, 多くの点で協力関係にあるEC各国のそれと同等または類似のもので, 以前は国立の総合技術研究所であったが, 現在は法人化されたPrins Maurits Lab. TNOで行われている⁶⁸⁾。種々の爆発試験は顧客との契約で行われ, 試験結果は公表されない。粉じん爆発試験はISO-6184およびVDI-3673記載の1m³試験装置または20l球型装置を使用して実施する。爆発または不爆の分類判定試験は1m³装置において通常の3倍のエネルギー(30kJ)を持つ着火源で行う。その他の試験は工場でのプロセスに近い条件で行い, 具体的な爆発防止対策を取る目的で実施している。最小発火エネルギーは, スイスと西独で開発された測定装置を使用して測定しているが, その爆発容器はHartmann装置のそれである⁶⁸⁾。

フランスでの粉じん爆発危険性分類及び試験は、仏国石炭調査・研究センター（CERCHAR）において実施されている⁶⁹⁾。爆発試験装置は主に、Hartmann装置や横長1 m³密閉装置（700φ×2590）であるが、ISO-6184による1 m³円筒型装置を用いた分類とフランスのそれとの間には差があり、独自の試験方法をも提唱している。配管中における火炎伝ば性、爆ごう性などについても研究が行われているが、精度の高い粉じん爆発危険性分類を行うためには更に検討する必要があると同国の研究者達は考えている⁶⁹⁾。

粉じん爆発試験を行っている国には、上記以外に、カナダ、オーストラリア、イタリア、スペイン、ポーランド、ソ連、中国などが知られているがその詳細は、ポーランド⁷⁰⁾以外は必ずしも明らかでないので、ここでは省略する。

5.4 我が国における粉じん爆発試験

5.4.1 粉じん爆発の研究経過と測定機関

昭和20～30年代に頻発した炭じん爆発が契機となって炭じんの爆発危険性に関する研究が一時盛んに行われたが、我が国では採炭産業の衰退に伴って昨今はほとんど行われなくなった。火力発電所等で多量の輸入炭の微粉炭燃焼が行われているにもかかわらず、わずかに石油資源の代替エネルギー源として将来利用する場合の炭じん爆発危険性に関する試験・研究が時折行われる程度で、欧米での盛んな研究とは非常に対照的である。このような炭じん爆発については、国立機関としていくつかの大学の資源工学科や工業技術院公害資源研究所において国内では主に研究されてきた。

一方、産業安全研究所においては、近年多くの産業分野で可燃性粉体が広範に扱われ粉じん爆発災害が散見されるようになったことから、戦後いち早くこれらの安全性確保の重要性を認識し、炭じん以外の粉じんの爆発危険性に関する実験研究に着手して今日に至っている。これまで当所以外にも、工業技術院化学技術研究所、東北大学資源工学科、横浜国立大学安全工学科⁷¹⁾、筑波大学農工系および二、三の製粉会社研究所などで炭じん以外の特定の粉じん（例えば、水素貯蔵合金⁷²⁾、米粉⁷³⁾など）の爆発危険性の実験研究が行われてきたが、粉じん爆発危険特性値の測定依頼は、当所をはじめこれらの一部の機関および（財）総合安全工学研究所などにおいて、研究者が研究の片手間に技術指導の形で測定指導が行われているにすぎない。しかし、一時期測定依頼が急増し広範な産業界の要請に十

分に応えられなかったことや測定装置が容易に製作できることから、産業界では独自にHartmann装置を所有し爆発下限界の測定を主とした爆発試験を行っているところがすでに数十社存在する。中には、測定依頼を請け負うところもある。ところがHartmann装置の細部構造が各社ばらばらなので、測定装置および測定方法の標準化の要望が高まり、それに応えて（社）日本粉体工業技術協会では試験法委員会を作り検討作業を始めた。同中間報告⁷⁴⁾によると、Hartmann装置（吹き上げ装置）と石浜式装置（ふるい落下式装置）による試験法が同協会指針となる様子である。さらに、共通試料を用いた6社の吹き上げ装置による下限界測定値は、石松子で41～50g/m³、コーンスターチで57～200g/m³のばらつき範囲にあった。これを、表. 3の結果と比較してもデータの差は大きい。装置の統一規格が作成されれば、装置間の差は小さくなるだろう。

ところで、測定を行っている各社の爆発下限界の測定目的は必ずしも明瞭ではなく、下限界は爆発のしやすさを元来表す特性値であるにもかかわらず、下限界の大小によってのみ爆発の激しさを評価している場合もあるようだ。また、具体的な対策との相関が明示されていないため、産業現場ではやや混乱した状況も見受けられ、評価法と対策の関連について独自の創意工夫が行われている場合もある。

5.4.2 産業安全研究所における試験装置

当所では早くから米国鉱山局で開発されたHartmann装置と類似の装置を用いて爆発試験を行ってき

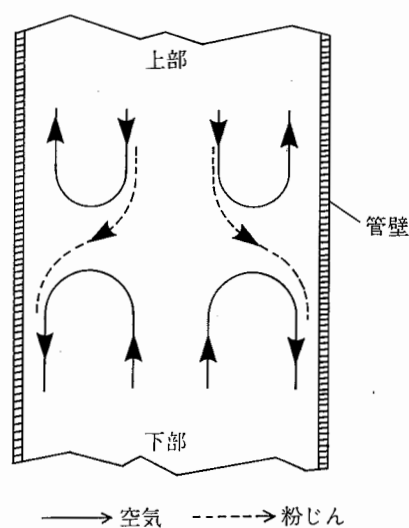


図.32 流下式装置垂直管内の粉じんと空気の動き⁷⁵⁾

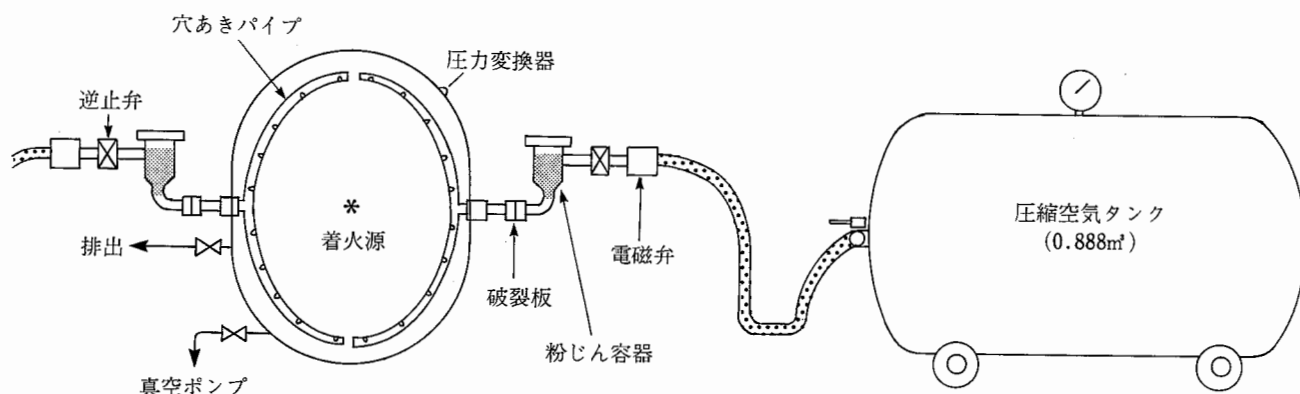
図.33 419l 粉じん爆発実験装置⁷⁵⁾

表.4 石松子粉じんの爆発特性値データ

	419l 装置 (産安研)	1m ³ 標準装置 ⁸⁷⁾	20l 球型装置 ⁴¹⁾
P_{max}	6.7	6.9	7.0 bar
$(dp/dt)_{max}$	222	157	555 bar/s
K_{st}	163	157	151 bar m/s

た。既に述べた同装置の欠点とされる着火タイミングを、粉じんが円筒容器内に十分に分散されたある時間（着火遅れ時間）後に起爆するように測定法を改めた⁷⁵⁾。同時に、最大爆発圧力も、従来初圧を考慮せず単に差し引くだけであった求め方⁴⁰⁾を初圧に対する比で表わすように改めた。しかし、同装置では粉じん濃度の不均一性と乱れの影響は不可避であったことから現在では使用していない。また、直径15cm、高さ180cmの垂直円筒ガラス管の上部から粉じん試料を金網を通りして分散させる流下式を用いて限界酸素濃度を測定したが⁷⁵⁾、このような垂直管内では図.32に示すような再循環流が生じ、粉じん濃度は不均一に分布することが指摘された⁷⁶⁾。

その後、粉じん爆発測定装置として圧送式または真空式空気輸送配管などを用いた実験も行ってきたが^{77,78)}、現在当所ではISO-6184に適合する爆発特性値（ K_{st} と最大爆発圧力）を得るため、内容積419 lの大型粉じん爆発測定装置（図.33）を使用している。同装置は1 m³標準装置と同様に、高圧空気ですり粉じんを押し出し、分散パイプを通りして浮遊粉じん雲を爆発容器内に形成させるものである。当初、粉じん混合気は乱れの強い状態にあるが、上記の特性値に適合する値を得るためには着火遅れ時間70 msを取って起爆す

ればよいことがわかった⁷⁹⁾。表.4に石松子粉じんの標準装置との比較データを示した。

6. 粉じん爆発危険性評価の在り方

6.1 爆発特性値データの意義

爆発試験で得られる特性値データを工業的に適用する際には、後述のようにいくつか注意が必要であるが、実験室規模の種々の試験装置で測定したデータには装置に由来する特性が反映される。それ故、測定データの意義とそれらの適用限界について考慮する必要がある。

6.1.1 爆発下限界

イギリスで行われているような垂直管装置（Hartmann装置）による爆発下限界測定値は、工業規模では爆発しないような低すぎる濃度を示し実際的なものとは言えないだろう。さらに、この装置で爆発しない粉じんでも条件によっては爆発する粉じん（例えばポリ塩化ビニル¹⁰⁾）があるという点で注意が必要である。一方、米国鉱山局から報告されている下限界データ（図.29）や20l球型装置を用いた測定値（表.3）は、密閉容器中で測定された値である。密閉容器中では、真に自己伝ば火炎が存在するかどうかは判断できない

ので、それらが定常状態の火炎伝ばを生ずる下限濃度を示すものかどうかは常に疑問とされるところである。さらに、'Nordtest' 装置で得られるデータは、装置容積が大きく Hartmann 装置でのいくつかの欠点が改善されているが分散方式は同じで、着火確率に基づいて決定される点で装置は改良の余地があるように思われる。

以上述べた装置において、粉じん・空気混合気は何らかの乱れを伴うことは避けられない。乱れの強さは急激に減少する性質のものであるが、下限測定値に影響を及ぼす。その観点からすれば石浜式装置は優れている。しかし、凝集粉じんはこの装置では分散しにくい難点があり、測定データは限られている。下限は、火炎伝ばを維持できる混合気の最低濃度として定義されるが、その限界近傍での火炎速度は10 cm/s以下で非常に弱い火炎伝ばを示す。従って、火炎伝ばを起こす試験装置や方法によって異なる下限界が得られる十分な理由がある。単に、下限界データを比較するばかりでなく、データを引用する場合にはその測定条件を考慮する必要がある。

6.1.2 発火温度

粉じん・空気混合気の発火温度は、電気炉型式の発火温度測定装置で測定される。炉管中に粉じんを分散すると、大部分は浮遊するとしても一部は管壁に付着するだろう。その発火は粉じんの種類に依存して、炉管壁または高温空気中で起きるか、あるいは管壁に接触した粉じんから放出された可燃性ガスが高温空気と混合して発火するかのいずれかと考えられる⁶⁾。管壁と接触して発火するのであれば、測定データは正確なものと考えられるが、空気中で発火する粉じんでは十分に低すぎる発火温度を示す恐れもある。

しかし、一般に工業条件では加熱される浮遊粉じんの容積はもっと大きいので、試験で求めた発火温度よりも低い温度で発火することもあり得る。それらの関係は検討されていない。また、発火に至らないまでもくすぶり燃焼(くん焼)する有機粉じんは多い。(西)ドイツのくん焼温度測定法は VDE 規格 0165⁸⁸⁾ に記載されているが、層状試料の寸法は直径 6 cm、厚み 5 mm で非常に小さく(測定データは付表参照)、一般的にはそのままでは適用できない。

6.1.3 最小発火エネルギー

従来、可燃性粉じんの最小発火エネルギーは既知電圧のコンデンサー放電による電気火花着火によって測定されてきたが、その放電エネルギーの計算にあたっ

て回路中でのエネルギー損失は考慮されなかった。放電時の火花電極間電圧並びに電流の積の時間積分から求めたエネルギーは、回路条件によっては蓄積エネルギーの数%にしかならない場合もある。さらに、回路中に抵抗あるいはインダクタンスを連結して放電持続時間を長くしてやると、衝撃波の発生が抑制され、最小発火エネルギーが著しく低下することが知られている⁸⁹⁾。電極材質や電極間隙によっても影響を受ける。これらの最適条件で得られる粉じんの最小発火エネルギーは、次第に低くなり可燃性ガス混合気のそれに近づく値が報告されている。しかし、粉じんの最小発火エネルギー測定用の標準電気回路は国際間で決っていない。データを参照する場合には、その測定方法及び粉じん粒径にも注意しなければならない。これまで公表されたデータの多くは、旧式の測定法によるものでかなり高い。しかし、新しいデータでまとまったものはみあたらないようである。

既に述べたように、最小発火エネルギーは粉じんの発火の目安となる重要な特性値となるものであるが、測定条件が多岐にわたり現状ではその絶対値は求めようがない。しかし、一定の測定装置で得られたデータであれば、粉じんの着火し易さの比較指標になるだろう。特に静電気放電による着火危険性の目安になるが、試験装置における測定条件では通常アーク(又はグロー)放電に対し静電気では種々の放電形態を取るため、発火性にどの程度の共通点があるか未解決の点が多い。

6.1.4 最大爆発圧力及び最大圧力上昇速度

通常、空気中に分散した粉じんの急激な燃焼反応の結果放出される燃焼熱によって、容器内混合気の温度が上昇して爆発圧力の上昇を起こす。金属粉じんの燃焼生成物は通常固体酸化物で、爆発圧力は窒素ガスの膨張に起因する。有機粉じんではガス状の燃焼生成物を形成するので、反応前後のモル数変化が小さければこれらのガス及び窒素ガスの膨張で爆発圧力が高まる。この意味で爆発圧力は、燃焼(爆発)によって放出される粉じん混合気の持つエネルギーを表わす。そのため、小さな容器で測定した爆発圧力は、器壁での爆発火炎の冷却効果により小さな値を示す。これを避けるためより大きい容器で測定する必要があるが、データの解釈にあたっては注意が必要である。

図.34は419l 容器における最大爆発圧力及び最大圧力上昇速度に及ぼす着火遅れ時間の影響を示す。図.19(1 m³標準容器)の場合と同様に、最大爆発圧

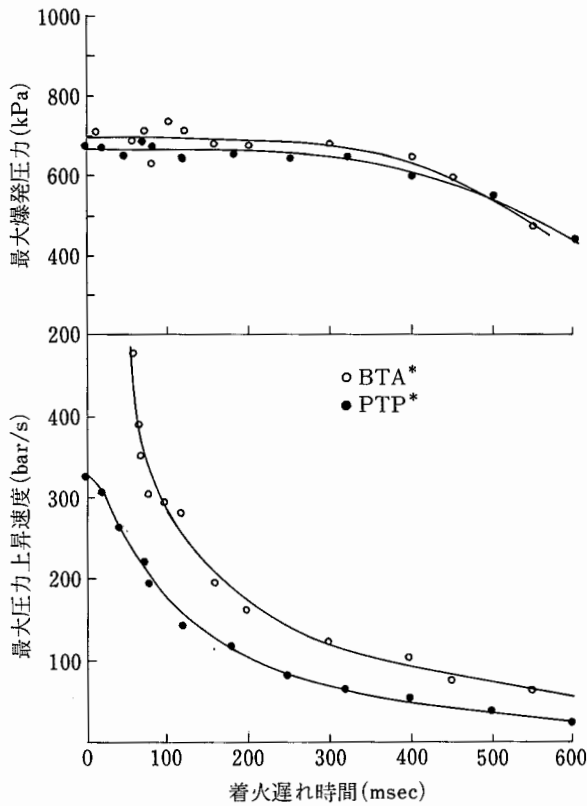


図.34 粉じん濃度600g/m³における爆発圧力と最大圧力上昇速度の着火遅れ時間による変化

(*ベンゾトリアゾール
*ペンタエリスリチルテトラキsproピオネート)

力は着火遅れ時間によってあまり影響を受けないが、最大圧力上昇速度は著しい減少を示す。既に指摘したように、この着火遅れ時間は混合気の乱れ強さに関係し、乱れ強さが急激に減少するにつれて最大圧力上昇速度も小さくなることを示している。圧力上昇速度は燃焼速度に比例し、よく知られているように燃焼速度は乱れによって大きな影響を受ける。しかるに、これまで述べたような粉じん爆発試験装置の大部分では、混合気の乱れは避けられず、これらの装置で測定された爆発特性値は乱れの影響を含んでいる⁸⁰⁾。しかし、その乱れ特性がどのような場合に測定されたかは明記されていない。実際、図のように最大圧力上昇速度もしくは K_{st} 値は乱れのレベルによって種々の値を取る。そこで ISO-6184 に記載された 1 m³ 標準装置で測定された K_{st} 値を求めるとすれば、それに合うような乱れレベル、すなわち着火遅れ時間を選んで測定すること

が必要である。この遅れ時間は各装置固有のもので、それぞれ求める必要がある。

実際の工業プラントにおける混合気の乱れレベルはまちまちで、種々の要因に依存するであろう。その点では爆発特性値 K_{st} は必ずしも工業条件での粉じんの危険特性値を示すものとは言えず、粉じん爆発危険性も工程やプラントに依存する根拠となる。このように、上記 ISO で規定される K_{st} は 1 m³ 標準装置の粉じん容器中の粉じんが全量放出された時点での乱れレベルにおける測定値であるが、工業条件での乱れ状態を代表しているという意見もある⁶⁴⁾。その乱れの強さはかなり高いことは間違いない。

6.2 粉じん爆発危険特性値と危険性評価

可燃性粉じんの爆発危険性の評価は、粉じん爆発の伝ば機構が十分解明されていない現状では、その方法をめぐって多くの議論がある。既に述べたように、評価の目的は粉じん爆発の予防とその防止にあることは自明であるが、爆発危険特性についての理論的解明が欠如しているために評価の基となる基礎データは実測によらざるをえず、実験には通常混合ガスのような均一な粉じん・空気混合気を形成できないなどの欠点と困難が伴う。実際には、5章で触れたように測定方法を確立して長年にわたりデータを蓄積している試験研究機関がいくつかの国にみられ、測定装置も大型化すると共に信頼性の高いデータが得られるようになり、それらに基づいた評価が行われつつある。

一般に、粉じんの爆発危険性の評価方法には個々の危険特性値の大小によって評価する場合とそれらの組合せで行う場合がある。前者の場合には、個々の特性値は異なる意義を持つ危険性を示すもので各特性値間の関連性は見いだされていないが、いずれか一つの特性値で粉じん爆発性を評価できるものであれば簡便で経済的である。そのため、爆発下限界⁸²⁾あるいは最小発火エネルギー¹⁴⁾によってそれを評価する方法が提案されているが、これらの爆発のしやすさを表す危険特性値と爆発の激しさを表す危険特性値との関連性を見出すことは、例外となる粉じんが多すぎて現状では困難である。例えば、爆発下限界及び最小発火エネルギーが非常に小さい値を示すにもかかわらず、 K_{st} 値が小さい粉じんがあれば、その逆の場合を示す粉じんもある¹⁴⁾。また、ある種の超微粉（金属材料）のように空気に触れただけで発火する粉じんが必ずしも高い爆発圧力を示す粉じんとは限らない。このように発火

しやすさと爆発の激しさは、明確に区別して評価する必要がある⁸²⁾。このような状況は、火薬や爆薬等の爆発性物質の危険性評価が、感度並びに威力によって行われていることと類似しており、感度（爆発を起こすのに必要なエネルギー量に関係する特性）の高い爆発性物質は威力（爆発によって発生するエネルギー量に関係する特性）が大きいとは限らない⁹⁰⁾。一般に、爆発性物質では両者は相反することが多い。

爆発のしやすさだけを評価する場合でも、三つの特性値（3.2参照）のうちどれをもって代表すればよいかも意見が分れるところである。例えば、ソ連では爆発下限界が 65g/m^3 あるいはそれ以下の粉じんは爆発性があるとみなし、それ以上のものは可燃性があるものとして規制しているが¹⁵⁾、爆発性の有無だけを評価するものであればいずれの特性値によっても可能であろう。これに対して、爆発の激しさを評価する際には、最大爆発圧力よりもその意義からみて K_{st} 値が使用されることが多い。例えば、ISO-6184 及び VDI-3673 では K_{st} 値によって粉じんを次のように4クラスに分類している。

$K_{st} = 0$	爆発クラス：St0（燃焼・爆発性のない粉じん）
$K_{st} = 0 \sim 200$	爆発クラス：St1（爆発の激しさが弱い粉じん）
$K_{st} = 200 < \sim 300$	爆発クラス：St2（爆発の激しい粉じん）
$K_{st} > 300$	爆発クラス：St3（爆発の激しさが特に大きい粉じん）

このような分類による評価の目的は次節で述べるが、爆発が起きた場合に対する防護対策を検討することにあり、爆発のしやすさの分類にはならないことに注意すべきである。

一方、危険特性値を組合せて評価する場合、個々の特性値に測定上の誤差や精度上の問題があれば誤った評価を導く可能性がある。

今から約25年前、米国鉱山局は、粉じんの潜在的爆発危険性を評価するため、爆発指数なるものを提案した。そのもともとの意義は、実務上の危険性の総体的なランクづけを行うことにあり、粉じん爆発の理論的な解析や事故統計の検討結果に基づくものではなかった。爆発指数（Explosion Index）は爆発のしやすさ（Ignition Sensitivity）と爆発の激しさ（Explosion severity）の二つの変数の積として表され、それぞれの変数は実験室規模の試験装置で測定して決定された。

そのうちの大部分は Hartmann 爆発装置を用いて測定された。ある粉じんの爆発のしやすさは、その粉じん雲の発火温度 (T_{min})、最小発火エネルギー (E_{min}) および爆発下限界 (C_{min}) の三つの測定値の積で、ピッツバーグ産炭じん（標準または参照試料）の同じ三つの測定値の積を割った相対値として定義された。すなわち、

$$\text{爆発のしやすさ} = \frac{(1/E_{min} \cdot T_{min} \cdot C_{min})_{\text{sample dust}}}{(1/E_{min} \cdot T_{min} \cdot C_{min})_{\text{reference dust}}}$$

一方、ある粉じん爆発の激しさは粉じん濃度 500g/m^3 における最大爆発圧力 P_{max} と最大圧力上昇速度 (dp/dt) $_{max}$ の積を、ピッツバーグ産炭じんの同じ二つの測定値の積で割った相対値として定義された。すなわち、

$$\text{爆発の激しさ} = \frac{[P_{max} \cdot (dp/dt)_{max}]_{\text{sample dust}}}{[P_{max} \cdot (dp/dt)_{max}]_{\text{reference dust}}}$$

ピッツバーグ産炭じんが標準試料として選ばれた理由は、炭じん爆発が米鉱山局の主要研究目的で同炭じんを用いた実大規模並びに実験室的規模での爆発実験が精力的に行われていたことによるものであった。このようにして求まる“爆発しやすさ”と“爆発の激しさ”の積が最終的に爆発指数を与えるものであった。すなわち、

$$\text{爆発指数} = (\text{爆発のしやすさ}) \times (\text{爆発の激しさ})$$

この爆発指数によって、任意の可燃性粉じんは弱、中、強、激で表される爆発を生ずる可能性のあるものとして分類されてきた。

弱……………爆発指数 < 0.1

中…………… $0.1 \leq$ 爆発指数 < 1.0

強…………… $1.0 \leq$ 爆発指数 < 10

激…………… $10 \leq$ 爆発指数

現在、この分類方法には多くの批判があり、国際的にも余り参照されなくなっている。米鉱山局でもその評価方法とそれらのデータの棄却を宣言した。その主な欠点として、実用的な爆発特性値を求めるためには、一般に Hartmann 爆発容器は小さすぎるということが認められている。実験室規模での爆発実験では、実用的な大規模装置へ適用できるデータが得られないという批判が、その根底にある。大規模爆発実験では激しい爆発を発生させることが可能な粉じんでも、米鉱山局様式の弱い着火源を使用した、実験室的小規模爆発試験装置では小さい爆発指数しか示さないものもあるこ

とがわかってきたからである。こうなると爆発危険性を過小評価したことになるが、これは危険性評価で最も注意すべき点の一つである。適正評価が最も重要で困難なことは当然であるが、危険性の過大評価も種々の面で困惑するものであり、総じて過小評価は絶対に避けなければならない大事な点であろう。

なお、上記鉱山局の方法について、爆発指数は異なった特性値の掛け合わせであるため、例えば極端に高い値と逆に低い値を組み合わせた場合には中位の平均的な指数が与えられるだけで、危険性の判断を間違え恐れがあること、試料粉じんのパラメータが分母にあるため測定誤差によって“爆発のしやすさ”は大きく変動すること、通常、爆発防護対策は一つの特性値に対処するもので、数個の変数の関数に基づく分類は対策上実用的な意義がないこと、なども指摘されている¹⁴⁾。危険性評価の目的は、そもそも標準粉じん（ピッツバーグ産炭じん）に対する試料粉じんの爆発性を比較することよりも、試料粉じんの処理プラント内での作業条件下での爆発性を明らかにすることであろう。

6.3 爆発特性値の適用と防止対策

各爆発特性値の大小によって、粉じん爆発のそれぞれの危険性を評価するためには、爆発特性値を正確に測定することが必要で、測定自体が評価そのものになるだろう。また、それらの特性値は防止対策を考慮するうえでの技術的な根拠となる。防止対策を予防および防護方法（被害抑制方法）の二つに分けて、特性値との対応を示すと表.5のようになる⁵²⁾。一方、爆発試験で得られる個々の特性値データは実験室規模の比較的小さな装置で測定されたもので、それを工業的条件へ適用する際には自と限界がある。ここでは、適用の方法について簡単に示した。詳しくは参考文献^{6,15)}などを参考にされたい。

一定の試験方法で測定した爆発下限濃度は爆発のしやすさから見た各種粉じんの爆発危険性の比較となるが、工業的には空気輸送や抽出システムなどにおいて粉じん濃度を制御できるような場合にしか適用されない。しかし、このような場合でも場所的には大きな濃度変化が起きる可能性があり、粉じん全輸送量を空気風量で割った平均濃度でしか制御できないだろう。それ故、爆発下限濃度以下の粉じん濃度で作業することは予防対策となることもあるが、完全なものとは言えない。一般に、可燃性粉体を扱う以上爆発範囲内の浮

表.5 予防および防護方法と粉じん爆発特性値との対応

防 止 対 策		指針となる粉じん爆発特性値
予 防	可燃性物質の回避	燃焼性および爆発性の有無
	濃度限界（量制限）	爆発下限界
	不活性化（不活性ガス）	爆発限界酸素濃度
防 護	着火源の回避	発火温度，最小発火エネルギー
	最大爆発圧力に対する耐爆構造	最大爆発圧力
	爆発圧力の軽減（爆発放散口）	最大爆発圧力および K_{st} 値
爆発抑制（自動爆発抑制装置）	最大爆発圧力および K_{st} 値	

遊粉じん雲が形成される危険性が常在するが、重力沈降によって変動、消滅する可能性もあり、濃度限界による予防対策は通常困難である。粉体静電塗装ブーツ内の粉じん濃度を爆発下限界に基づいて、規制している規格がいくつかある⁹¹⁾。それによると、平均濃度はいかなる場合でも爆発下限界の半分以上を越えてはならず、下限界が未知の場合は $5 \sim 15 \text{g/m}^3$ 以下に押さえるように指示している例もある。

発火温度データを適用するうえで、実際のプラント容積は測定装置のそれよりはるかに大きく浮遊粉じんの滞留時間もより長くなり、これらの要因が発火温度に影響するだろう。それ故、試験装置で得られる発火温度データは、一般に大規模プラント等で粉じんが示す発火温度よりも高い温度となる可能性があり、工業プラントでは絶対に越えてはならない基準温度とすべきである。安全率を取って、(西)ドイツでは発火温度の2/3を、イギリスでは同温度の70%を越えてはならないことを定めている^{11,88)}。さらに、工場電気設備防爆指針（粉じん防爆）⁸³⁾においては、浮遊粉じんの発火温度よりも低い堆積粉じんの発火温度（くん焼温度）をもとにした厳しい温度上昇限度を電気機器に課している。

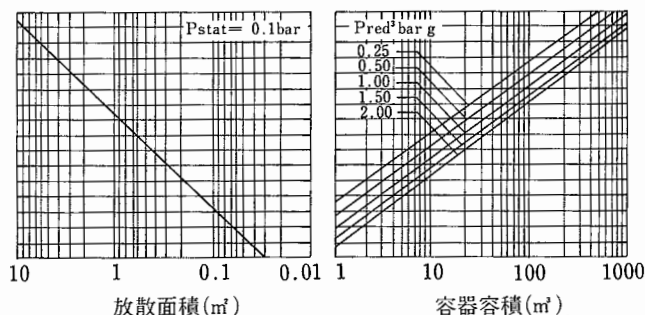
最小発火エネルギーを工業条件へ適用する目的は、静電気による着火危険性を考慮することに関係する。静電気放電形態の中で、非導電性のコンベヤベルトと粉体の分離または強い摩擦によって発生する沿面放電は粉じん・空気混合気を着火させることができるが、高帯電した絶縁体表面からのブラシ放電は粉じんの着火源とはならない⁵²⁾。空気輸送によって高帯電した堆積粉じん表面から導電性プラント部へ起こる放電に

よって、非常に低い最小発火エネルギーを持つ粉じん混合気は着火することがある。直径3 m以下の円筒形容器中では雷状放電は想定できないが、それより大きい容器の場合には、電場の強さが約500kV/m以上になれば着火危険性がある⁵²⁾。このように、静電気着火危険性は放電形態または工程によって異なるが、帯電量と最小発火エネルギーの比較によって危険性が評価される。浮遊粉じんの移動を伴う工程ではある程度帯電は免れず、特に帯電しやすい粉じんや最小発火エネルギーの低い粉じんでは十分な静電気対策⁸⁴⁾が必要になる。また、最小発火エネルギーが25mJ以下の粉じんは静電気によっても着火しやすい粉じんとみなすべきで、作業員からの放電によっても着火する危険性があることが指摘されている⁶⁾。この場合のデータは放電電流と電圧から直接測定したエネルギーである。

爆発限界酸素濃度の測定法については言及しなかったが、十分強力な着火源を用いてこれまで述べたいずれかの爆発試験装置において測定することができる。これを工業的に適用する場合は予防対策としては最も優れているが、閉鎖または循環系でないコストが高くなり実際上困難であろう。また、すでに述べた最大許容酸素濃度になるように不活性ガスで系内を置換する。活性の高い金属の粉砕においては粒子表面で酸化被膜が形成され安定化するので、一般に許容濃度程度の酸素濃度は必要であろう。

最大爆発圧力の値は耐爆構造の強固なプラントを建造する場合に必要である。一般的な場合の耐圧力は最大爆発圧力の1.5倍(静圧)を取る^{15,52)}。しかし、粉じんを扱うプラントでは耐圧装置にすることは実際的ではなく、爆発放散口を設置して装置を防護するかあるいは爆発抑制装置を設置する方法が一般的である。そのためには、最大圧力上昇速度または K_{st} 値が重要になる。ISO及びVDIによる K_{st} 値を用いた粉じんの分類については前節で述べたが、爆発放散口を設置する場合、放散口の最適放散面積を決定することが最大課題になる³⁾。VDI-3673には放散口を設置する装置容積とその耐圧性並びに粉じんの爆発クラスから必要最小限の放散面積を見積ることのできるグラフが記載されている。その一つを図.35に例示した。このグラフは放散口(カバー)の静的作動圧力(P_{stat})が0.1bar(ゲージ圧)の場合に適用される。 P_{red} は、この条件で粉じん爆発を放散させた場合に容器内で達成される最大爆発圧力(あるいは最大放散爆発圧力)を示し、放散口の静的作動圧力よりも高くその2~20倍の場合につい

(a) 爆発クラスSt1の粉じん用放散面積



(b) 爆発クラスSt2の粉じん用放散面積

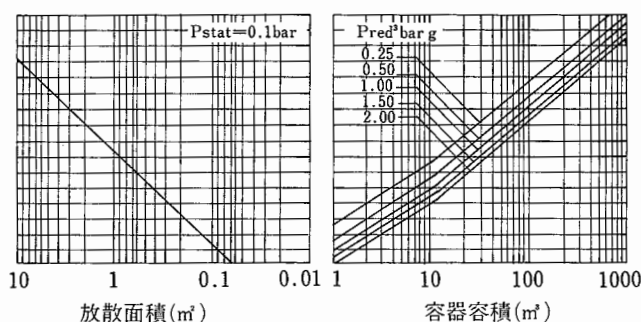


図.35 爆発放散口の放散面積決定用新グラフ⁸²⁾

て表示してある。容器の耐圧力は最大放散爆発圧力の1.5倍は最低必要である。このような放散面積の求め方は、工業条件での乱れの影響を考慮したものであるが、特に容器容積が100m³を越えるような場合(例:サイロや貯槽)、乱れが増すとさらに大きい放散面積が必要になることがわかり⁸⁶⁾、その修正グラフが作成された^{10,87)}。

このように爆発クラスによる分類評価は具体的な防護対策と結びついていることがわかるが、危険性評価の目的は実際に適用できる具体的な予防対策および被害抑制対策を選べるものであることが望ましい。

なお、防護対策にはここでは触れないが、近年色々なものが開発されている。一例をあげれば、急速停止弁又はスライド(爆発防止弁)、火炎しゃ断器、消火剤しゃ断器などで⁵²⁾、一部は輸入販売されている。

6.4 粉じん爆発危険性試験法のまとめ

粉じんの爆発特性値には、これまで述べたように爆発下限界、最小発火エネルギー、発火温度、爆発限界酸素濃度、最大爆発圧力、最大圧力上昇速度があり、

これらは現時点では実験的に測定して決定される。しかし、その前にある粉じんが爆発性を持つかどうかを決定することが必要である。英国ではこれを分類試験（クラス A, B）として実施しているが、着火源の大きさや試験装置の規模、乱れの程度、雰囲気試験温度あるいは粉じんの粒度分布や水分含有量によってその結果が異なるのは明らかであろう。ある試験装置で不爆となる粉じんでも別の条件では爆発性有りとな判断されるので、分類試験は絶対的なものではなく、定性的なものであるが、爆発特性値を測定する前に分類試験はぜひとも必要になるだろう。

爆発下限界（同様に限界酸素濃度も）は、著しく着火エネルギーや乱れ、測定装置の規模および様式に依存し、国際的に認められた標準測定方法はない。データは測定装置や方法によって大きく変わり、粉じん爆発の基礎的特性値となるかどうかは、疑問である。

最小発火エネルギーは、測定装置によってかなり異なる値が報告されている現状なので、ドイツやスイスの化学会社などが使用している一定の測定装置および方法を国際的に定める必要があるといわれている。しかし、それらの方法が根拠としている、できるだけ小さい最小発火エネルギー値を求めべきなのかどうか、やや疑問に思われるところである。別のより良い測定装置および方法を考えれば更に低い値が得られる可能性が次々とでてくる恐れがあるからである。

発火温度についても同じことで、装置の改良によってより低い値が得られる傾向がある。BAM 電気炉では粉じんの滞留時間が長く、分解ガス（熱分解、くすぶり、または揮発化を含む）の発火が起きる可能性があり、低い発火温度が得られている。米鉱山局の改良電気炉による発火温度も従来値と同等または低い値を示している。それ故、この場合も最も低い発火温度に基づく値を採用すべきかどうかという問題に突き当たる。より低い発火温度を示す測定装置が、はたしてより良い試験装置であるのか、その意味のある基準を考えることが必要になる。

密閉容器中における粉じん・空気混合気の最大爆発圧力は原理的にはその系のエネルギーを表し、熱力学的計算から求められる性質のものであるが、化学反応は不完全燃焼で実際とは大きくずれる。不完全の度合は燃焼度合（速度）に依存する。実際、最大爆発圧力と燃焼速度（ K_{st} ）との間には直接的な関係がある²⁸⁾。燃焼度合は装置の規模や乱れレベルに大きく依存するので、最大爆発圧力も粉じん爆発試験装置に依存する

ことになる。

爆発試験装置の大きさ（寸法）は K_{st} によって規格化されるが、それでもなお装置依存性があることは否定出来ない。しかし、ISO-6184のような $1m^3$ 標準装置および測定方法を定め同一の測定装置および方法で測定するようにすれば、爆発放散口設計目的で可燃性粉じんの爆発クラス分けが可能であろう。しかし、 K_{st} が実際の工業条件でのその粉じん爆発危険性を表す特性値と見なしてはならない。また実験室規模の試験装置で測定した値を設計目的に使用してはならないし、もし使用するとすれば十分注意しなければならない。試験装置で測定した値は、せいぜい種々の粉じんの相対的なその装置での類似条件下の爆発性を示すものとして利用すべきものかも知れない。それでは、最近各国で行われているように、実際の工業条件に近いより大きな試験装置で測定すべきかということ、必ずしも一般に考えられているように規模効果が最重要な因子であることは考えられない面もある。もちろん、当面はこのような実大規模の爆発実験は不可欠であるが、国際規格の標準測定装置とその方法を確立して、産業界で利用されているあらゆる粉じんの測定データを蓄積する努力が目下のところ必要であろうと思われる²⁸⁾。

7. 結 語

可燃性粉じんの爆発危険性評価技術の現状と問題点について、網羅的に解説した。その中で粉じん爆発のしやすさを表す特性値として爆発下限界、発火温度、最小発火エネルギー、限界酸素濃度があり、爆発の激しさを表す特性値として最大爆発圧力、最大圧力上昇速度（または K_{st} 値）があることを述べた。現状では、ある粉じん試料についてこれらの特性値を総て測定試験することは、実験設備ばかりでなくかなりの労力と時間を必要とする。したがって、これらの専門の測定機関が存在することが望ましいが、産業界からの要望と協力があれば検討しなければならない問題であろう。測定の目的は、危険性を評価することにあるが、評価はそれ自身が目的ではなく、評価に基づく安全対策が必要である。その意味で、危険性評価は安全の第一歩にすぎず総てではないことは自明だろう。

ところで、実際の危険性は粉じんを扱うプラントや工程に大きく依存する。それ故、試験法はそれらの危険性を十分反映したデータが得られることが望ましいが、装置、工程条件などは千差万別であり、試験で得られるデータはそれらの条件での粉じん爆発危険性を

必ずしも的確に表示するものとは限らない。場合によっては、過大評価になることは避けられないだろう。また、爆発伝ば機構もさることながら爆発の規模効果も十分理解されていない現況では、試験データの利用に当たっては十分慎重に行う必要がある。なお、個々の試験法の詳細については割愛したところが多いので、必要であれば文献を参照して戴きたい。

ここでは粉じん爆発に関する特性値についてもっぱら解説したが、それ以外にも粉じんの火災危険性に関する重要な特性値がある。火災と爆発は不可分の関係にあり、火災から爆発に至る場合もあればその逆の場合もある。それらの特性値は、自然発火、熱分解あるいはくすぶり火災の開始温度で、これらの現象を起こしやすい粉体の貯蔵においては温度管理を怠れば大きな災害を引き起こす危険性がある。特に、最近では貯蔵量が大きくなる傾向にあり、何百トンというサイロ貯蔵粉体物質が自然発火により焼損した例もある。粉体物質を扱う場合、量的な問題は安全実務面できわめて重要である。これらの危険温度特性値の測定法を試験で定めている機関もあるが、不安定化学物質等の熱分解温度または限界発火温度測定法と共通するところがあるので、別に文献等を参考にして戴きたい。あるいはまた、(西)ドイツのように粉体層の温度上昇の結果生ずる分解ガスや乾留ガスの爆発性試験を行ってその危険性を評価している場合もある。これらの試験法についても省略したので留意して欲しい。

今後、実大規模での粉じん爆発現象の解明が進むにつれて試験装置は改良され、試験法も変更されるだろうが、ISO規格に見られるように実状では(西)ドイツやスイスの粉じん爆発試験法が国際的に大きな影響を及ぼしている。ECではいずれ試験法は統一されるであろうし、アメリカではそれを支持するだろう。我が国でも早急に粉じん爆発試験法を整備して、爆発危険性データを蓄積していく必要があると思われる。

最後に、本資料の作成を熱心に勧めてくれた森崎化学研究部長並びに各種資料の入手及び試験法の情報交換に御協力戴いた(社)粉体工業技術協会粉じん爆発試験法委員会(昭和62~平成元年度 当時:委員長伊井谷鋼一京大名誉教授、田森行男公害資源研究所課長(途中交代))と委員各位に深く謝意を表す次第である。

(平成元年2月5日受理)

引用文献

- 1) 中央労働災害防止協会編：粉じん爆発の防止対策，中央労働災害防止協会，1989
- 2) 内藤道夫，松田東栄：粉じん爆発の危険性とその防止対策，産業安全研技術資料 TN-69-1，1969
- 3) 松田東栄，内藤道夫：粉じん爆発に対する圧力放散設備，産業安全研安全資料，RIIS-SD-75-1，1975
- 4) 次郎丸誠男，安全工学，27(4)，188(1988)
- 5) ISO-6184-1: Explosion Protection Systems, International Organization for Standardization, Geneva, 1985
- 6) P. Field: Dust Explosions (Handbook of Powder Technology, Vol.4), Elsevier, 1982
- 7) C. W. Kauffman, Industrial Dust Explosions (K.L.Cashdollar & M.Hertzberg [eds.]), ASTM STP 958, p.243-264, American Society for Testing and Materials, 1987
- 8) 内藤道夫，安全工学，18(3)，145；18(4)，209 (1979)
- 9) W. Bartknecht, VDI-Berichte, Nr.494, 11(1984)
- 10) W. Bartknecht: Staubexplosionen, Springer-Verlag, 1987
- 11) A. R. Abrahamsen, Industrial Dust Explosions (K.L.Cashdollar & M.Hertzberg [eds.]), ASTM STP 958, p.60-73, American Society for Testing and Materials, 1987
- 12) W. J. Geysen, R. Belmans and L. Scheys, Industrial Dust Explosions(K.L.Cashdollar & M. Hertzberg [eds.]), ASTM STP 958, p.234-242, American Society for Testing and Materials, 1987
- 13) Z. Hailin, 3rd Intl. colloquium on dust explosions, Poland, Oct.24-28, 1988
- 14) Proceedings of the intl. symp. on the explosion hazard classification of vapor, gases and dusts. Organized by the committee on studies on hazardous substances, National Material Advisory Board, National Research Council. Pub.N-MAB-447, National Academy Press, New York, 1987
- 15) K. N. Palmer (日本化学会訳編)，粉じん爆発と火災—粉体産業におけるその対策，丸善（株），

- 1981
- 16) J. Cross and D. Farrer: *Dust Explosions*, Plenum Press, New York, 1982
- 17) J. Nagy and H. C. Verakis: *The development and control of dust explosions*, Marcel Dekker, New York, 1983
- 18) F. T. ボダーサ (緒方訳) : 爆発防止技術の実際—産業爆発事故の分析と対策, p.163-185, 海文堂, 1984
- 19) H. Enomoto and T. Matsuda, *Encyclopedia of Fluid Mechanics* (N. P. Chermisinoff ed.), Vol.4, p.563-609, Gulf Pub., Houston, 1986
- 20) 松田, 空気清浄のための浮遊微粒子の計測・制御総合技術 (諫早典夫, 他編集), p.576-595, R&D プランニング, 1987
- 21) K. L. Cashdollar and M. Hertzberg (eds.): *Industrial Dust Explosions*, ASTM STP 958, American Society for Testing and Materials, 1987
- 22) W. Wiemann, *Moderne Unfallverhutung*, 29, 29(1984)
- 23) L. D. Smoot and M. D. Horton, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 3, 235(1983)
- 24) J. K. Richmond and I. Liebman, 15th Intl. Symp. on Combustion, p.115(1975), The Combustion Institute, Pittsburgh.
- 25) M. Hertzberg, K. L. Cashdollar and J. J. Opferman, RI 8360, U.S. Bureau of Mines, p.1-70, 1979
- 26) K. L. Kashdollar, M. Hertzberg and I. A. Zlachower, 22nd Intl. Symp. on Combustion, p.1757(1988), The Combustion Institute, Pittsburgh.
- 27) R. H. Essenhigh, 16th Intl. Symp. on Combustion, p.353(1976), The Combustion Institute, Pittsburgh.
- 28) J. H. S. Lee, 16th Intl. Symp. on Shock Tubes and Waves (H. Gronig ed.), p.21(1987), Aachen, W.Germany
- 29) 疋田強, 秋田一雄: 改訂燃焼概論, コロナ社, 1982
- 30) M. Hertzberg and K. L. Cashdollar, *Industrial Dust Explosions* (K. L. Cashdollar & M. Hertzberg [eds.]), ASTM STP 958, p.5-32, American Society for Testing and Materials, 1987
- 31) D. R. Ballal, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A385, 1(1983)
- 32) J. Jarojinski, J. H. Lee, R. Knystautas and C. Crowley, 21th Intl. Symp. on Combustion, p.1917(1986), The Combustion Institute, Pittsburgh.
- 33) D. M. Hay, D. H. Napier, *I.Chem.E. Symp.Series No.58*, p.209(1980), Institute of Chemical Engineers, Rugby
- 34) D. Bradley and J. H. Lee, *First Intl. Colloquium on Explosibility of Industrial Dusts*, Vol.2(1984)
- 35) J. Zehr, *VDI-Berichte*, Nr.19, 63(1957), VDI-Verlag
- 36) J. Schonwald, *Staub-Reinhaltung Luft*, 31(9), 376(1971)
- 37) 田中達夫, 粉体工学会誌, 2(18), 114(1981); 3(18), 190(1981)
- 38) G. A. Lunn, *J. Hazardous Materials*, (17), 207(1988)
- 39) 石浜渉, 榎本兵治, *安全工学*, 14(4), 195(1975)
- 40) H. G. Dorsett, M. Jacobson, J. Nagy and R. P. Williams, RI 5624, U.S. Bureau of Mines, p.1-21, 1960
- 41) ASTM E 789-88, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.14.02(1988), American National Standards Institute, New York
- 42) 石浜渉, 岡田寿徳, 吉田儀一, *北海道鉱山学会誌*, 14, 1(1958)
- 43) Nordtest Method NT FIRE011, *Dust Clouds: - Minimum Explosible Concentration*, Nordtest, Stockholm, 1986
- 44) R. S. Conti, K. L. Cashdollar, M. Hertzberg and I. Liebman, RI 8798, U.S. Bureau of Mines, p.1-40, 1983
- 45) K. L. Cashdollar and M. Hertzberg, *Rev. Sci. Instrum*, 56(4), 596(1985)
- 46) R. Siwek and C. Cesana, *Operating Instructions for the 20-L Apparatus*, Adolf Kuhner AG, CH-4052, Brisfelden, Switzerland, 1986
- 47) P. Field, *Explosibility Assessment of Industrial Powders and Dusts*, BRE Report, HMSO, London, 1983
- 48) C. Schofield, *Guide to Dust Explosion Prevention and Protection*, Part 1-3, I. Chem. E.,

- Rugby, England, 1986-1988
- 49) User Guide to Fire and Explosions Hazards in the Drying of Particulate Material, I. Chem. E., Rugby, 1977
 - 50) BS 5958, Code of Practice for the Control of Undersirable Static Electricity, British Standards Institute, London, 1988
 - 51) VDI-Richtlinien: VDI 3673, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1983
 - 52) VDI-Richtlinien: VDI 2263, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1986
 - 53) Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Explosionsschutz-Richtlinien, Heiderberg, 1985
 - 54) J. Lutolf, VDI-Berichte, Nr.304, 39(1978)
 - 55) M. Hattwig, p.9-B-1, 上記文献 (14)
 - 56) R. Osswald and H. Wuttig, Moderne Unfallverhuttung, (25), 70(1982)
 - 57) 産業安全研究所技術指針, RIIS-TR-85-1, 工場電気設備防爆指針 (ガス蒸気防爆), 1985
 - 58) G. Schuber, Proceeding of Loss Prev. and Safety Promotion Symp., Oslo, 1989
 - 59) ASTM E 1226-88, Annual Book of ASTM Standards, Vol.14.02(1988), American National Standards Institute, New York
 - 60) S. Chippett and L. G. Britton, Particulate Science and Technology,(3),159(1985)
 - 61) R. E. Cocks and R. C. Meyer, AICHE Loss Prevention, (14), 154(1981)
 - 62) C. J. Dahn, Archivum Combustionis, 3/4(7), 299(1987)
 - 63) J. P. Coll, Report No. PSR-762, Fenwal Inc., Mass., 1977
 - 64) I. Swift, Plant/Operations Progress, 3(7), 159(1988)
 - 65) G. Schuber, Proceedings of Loss Prevention and Safety Promotion Smp., p.14-1, Oslo, 1989
 - 66) R. K. Eckhoff, CMI Report No.77005-2, Bergen, 1978
 - 67) R. K. Eckhoff, CMI Report No.02102-1, Bergen, 1988
 - 68) J. P. Zeeuwen, p.12-1, 上記文献 (14)
 - 69) J. P. Pineau, J. Chaineaux, P. Movillant and G. Ronchall, p.II-1, 上記文献 (14)
 - 70) P. Wolanski, p.VIII-1, 上記文献 (14)
 - 71) 小川輝繁, 三宅淳巳, 吉村恒典, 福山郁生, 高圧ガス, 2(21), 30(1984)
 - 72) 堀口貞滋, 岩坂雅二, 浦野洋吉, 橋口幸雄, 高圧ガス, 17(6),297(1980)
 - 73) S. Yoshizaki and T. Takigawa, Proceeding of Symp. on Grain Dust, Manhattan, Kansas, p.97(1979)
 - 74) 田森行男, 荷福正治, 粉体と工業, 20(8), 63(1988)
 - 75) 内藤道夫, 松田東栄, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-23-1;RIIS-RR-23-2, 1974
 - 76) W. E. Mason and K. V. Saunders, J. Phys. D: Appl.Phys., (8), 1674(1975)
 - 77) 松田東栄, 内藤道夫, 豊永克弘, 野島康弘, 小林誠, 清水民生, 安全工学, 3(22), 155(1983)
 - 78) 松田, 安全工学, 4(26),196(1987)
 - 79) 松田, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-88, 1989
 - 80) R. K. Echhoff, Combust. and Flame, 24,53(1975)
 - 81) P. R. Amyotte, S. Chippett and M. J. Pegg, Prog. Energy Combust. Sci., 14, 293(1988)
 - 82) 榎本兵治, 安全工学, 1(27),31(1988)
 - 83) 産業安全研究所技術指針, RIIS-TR-82-1, 工場電気設備防爆指針 (粉じん防爆), 1982
 - 84) 産業安全研究所技術指針, RIIS-TR-87-1, 静電気安全指針, 1988
 - 85) Th. Glarner, VDI-Berichte, Nr.494, 109(1984)
 - 86) R. K. Eckhoff, K. Fuhre, M. J. Henrt, S. J. Parker and H. G. Thorsen, CMI Report No.82-3307-1(1982), Bergen
 - 87) W. Bartknecht, Plant/Operations Process, 1(4), 4(1985); 及び上記文献 (10)
 - 88) VDE Regulations: 0165/4.66, Federal German Republic, Berlin, 1969
 - 89) W. Berthold, VDI Progress Report No.134, Series 3, VDI-Verlag, 1987
 - 90) 吉田忠雄, 田村昌三編著, 「反応性化学物質と火工品の安全」, 大成出版社, 1988
 - 91) R. K. Eckhoff, G. H. Pedersen and T. Arvidsson, J. of Hazardous Materials, 19,1(1988)
 - 92) NFPA 69 Explosion Prevention Systems 1986, National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 1986
 - 93) BIA/BVS, Brenn-und Explosions kenngruben

von Stauben, Schriftenreihe des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Bonn, 1980

- 94) C. Proust and B. Veysiére, Progress in Astronautics and Aeronautics : Dynamics of Reactive Systems, Vol.113, Pt2, p.43, AIAA, New York, 1988

付表. 1 各種粉じんの爆発危険特性値⁹³⁾

ここで示した測定データは、1 m³ 円筒型爆発試験装置等を用いて西独の BIA 及び BVS (5.2参照) において測定されたもので⁹²⁾、現状では公表データとして優れているので引用することにした。ただし、データの参照にあたっては種々の注意が必要である。特に、粒径の影響を大きく受ける特性値もあるので、物質名が同じでも粒度分布が異なる大部分の粉じん試料では単に参考値として利用すべき資料であることが明記されている。以下に、注釈と簡単な測定方法をまとめて示す。

(1) 粉じん・空気混合気の発火温度は、G-G電気炉装置を用いて測定した温度を示す。粉じん量は 0.1 から 3.5 g まで変化させ、体積 V=50~300cm³、P=1.1~1.6bar の圧縮空気で粉じんを分散させて測定した。

(2) 爆発下限界、最大爆発圧力及び最大圧力上昇速度は 1 m³ 円筒爆発試験装置を用いて同時に測定した。粉じん濃度は 500g/m³ をもとに、250g/m³ ずつ増加するとともに、その半分ずつの濃度で減少させて、最大爆発圧力並びに最大圧力上昇速度を見出す。他方、濃度を半分ずつに減少させて、同一濃度で 3 回着火しない場合(着火遅れ時間 0.6 秒)は、着火遅れ時間を 0.3 秒に短縮して試験する(より激しい乱れでの試験)。この条件で 3 回とも着火しなければ、この濃度を当該粉じん試料の爆発下限界として決定する。() 内の爆発下限界は、ハートマン装置による測定データを示す。

(3) 改造ハートマンの項は、同装置による圧力上昇クラスを示し、'1' は爆発クラス St 1 に、'2' は St 1~3 に相当し、'3' は特に激しい反応性を持つ粉じんに対応する。同装置は、Hartmann 試験装置の円筒容器上部ろ紙の部分に蓋を設置し、爆発時の蓋の開放度合を蓋固定台座指示盤で表示できるようにした簡易試験装置の一つである。アルミ製蓋の中央には直径 3 cm 程の穴が開いており、蓋はドーナツ形状である。この装置では、St 2 の粉じんは明確には決めがたく、より大きい試験装置で測定しなければならない。

(4) くん焼温度は、直径 185mm、厚さ 19mm のアルミ板を下から電氣的に加熱して、その温度を±2℃の精度で任意の高温に維持した場合、板上の直径 60 mm、厚み 5 mm の粉じん層が 2 時間以内でくん焼開始する最低温度を示す。() 内は、その温度以下で 2 時間放置してもくん焼しなかったことを示す。溶はこ

の条件で加熱した場合、熔融または熱分解するものを示す。

(5) 燃焼性は、外部着火源による層状粉じんの燃焼伝ば性を示すもので、下記の結果に対応する。試験方法は、5~10mm 厚みの陶磁板上に成形した幅約 2 cm、長さ 4 cm の堆積層状粉じんの一端に、ガス炎または約 900~1000℃ の温度に加熱した白金線を短時間押しあてて、粉じんの着火及び燃焼性を観察するものである。

- | | |
|---|----------------------|
| 1 | 燃焼せず。 |
| 2 | 着火するが、すぐ消炎。 |
| 3 | 部分的燃焼またはくん焼するが、伝ばせず。 |
| 4 | くん焼伝ば。 |
| 5 | 火炎伝ば。 |
| 6 | 激しい燃焼伝ば。 |

() 内の数値は、粉じん試料に 20 重量% の珪藻土を混合して試験した場合の結果を示し、熔融する物質の燃焼性を表す。このようなデータは、例えばバグフィルター上のろ布上での堆積粉じんの燃焼挙動の評価に役立つ。

産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-90-1

粉 じ ん	平均粒径 (μm)	発火温度 ($^{\circ}\text{C}$)	爆 発 下 界 限 (g/m^3)	最大爆発 圧 力 (bar)	最大昇圧 速 度 (bar/s)	改 造 ハートマン ($<63\mu\text{m}$)	く ん 焼 温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	燃 焼 性	爆発クラス (St)
(1) 金属・無機化合物									
亜 鉛	<10	570	250	6.7	125	2	440	3	1
"	19	800	—	6.0	85	1	(450)	2	1
"	21	790	250	6.7	125	2	(450)	—	1
アルミニウム	29	710	30	12.4	415	3	(450)	4	3
"	27	520	—	13.0	600	3	410	4	3
アルミニウム・鉄合金 (50:50)	21	760	250	9.4	230	—	(450)	—	2
アルミニウム・ニッケル合金	<10	—	—	11.4	300	—	—	—	2
アルミニウム・マグネシウム合金	130	850	—	10.4	52	1	(450)	2	1
硫 黄	20	280	30	6.8	151	2	—	5	1
カルシウム・ケイ素合金 (30%Ca, 60%Si, 6%Fe)	21	770	60	9.8	200	2	(440)	1	1
カルシウム・ケイ素・アルミニウム合 金 (23%Ca, 49%Si, 20%Al)	24	620	30	9.6	190	2	(450)	4	1
ケイ化鉄 (38%Fe, 48%Si, 10%Mg)	27	610	125	9.2	173	1	(450)	4	1
硝酸アンモニウム	120	520	—	0	0	—	溶	1(1)	0
硝酸ナトリウム	195	—	—	0	0	—	溶	1(1)	0
シリコマンガ	68	—	—	0	0	—	—	—	0
鉄, 電解	25	430	—	6.5	65	1	350	3	1
鉄, スポンジ	12	470	(200)	5.7	61	1	390	3	1
鉄, カルボニル	<10	310	125	6.1	111	2	300	3	1
銅	25	—	—	0	0	—	—	—	0
ニッケル	75	—	—	0	0	—	—	—	0
フェロバナジウム	170	—	—	0	0	—	—	—	0
フェロチタン	110	—	—	0	0	—	—	1	0
フェロマンガ	220	—	—	0	0	—	—	—	0
フッ化ナトリウム	26	—	—	0	0	—	—	—	0
ブロンズ, ゴールド	18	390	750	4.1	31	1	260	4	1
マグネシウム	28	—	30	17.5	508	—	—	—	3
"	240	760	500	7.0	12	2	(450)	5	1
マンガ	16	330	—	6.3	157	—	285	—	1
二硫化モリブデン	19	520	250	5.0	37	1	320	4	1
(2) 有機化合物・プラスチック									
アクリル樹脂	37	—	—	7.8	174	—	—	—	1
アジピン酸	10	580	60	8.0	97	2	溶	2(5)	1
アスコルビン酸	39	460	60	9.0	111	2	溶	2(2)	1
L-アスコルビン酸カルシウム	150	520	125	5.2	18	1	(440)	2	1
L-アスコルビン酸ナトリウム	23	380	60	8.4	119	1	380	2	1
アセトアセトアニリド	52	—	30	6.2	39	—	—	—	1
アゾジカルボン酸アミド	<10	—	—	12.3	176	—	—	1	1
アゾ染料, 黄色	10	480	60	11.0	288	2	溶	2(5)	2
O-アミノ安息香酸	50	520	—	8.0	110	—	溶	—	1
アロイン	13	520	30	9.3	145	2	溶	2(2)	1
アントラキノ	<10	—	30	10.6	364	—	—	—	3
エチルセルローズ	21	300	125	8.5	123	—	345	—	1
ABS ポリマー	200	480	60	9.2	147	2	(450)	5	1
エポキシ樹脂	26	510	30	7.9	129	1	溶	2	1
塩酸エフェドリン	10	390	(100)	8.7	129	2	—	2(5)	1
カルボキシメチルセルローズ	24	350	125	9.2	136	1	310	3	1
クマロン樹脂	135	480	15	8.2	161	2	溶	3(5)	1
グルコース	89	520	60	8.3	72	1	420	2	1
合成ゴム	80	450	15	8.6	145	2	240	5	1
酢酸カルシウム	85	680	250	6.5	21	1	(570)	3	1
サポニン	13	440	—	9.4	150	1	(450)	3	1
シアノアクリル酸メチルエステル	260	500	30	10.1	269	2	(450)	5	2
ジエチルジフェニル尿素	<10	530	15	8.8	163	2	溶	2(5)	1
ジヒドロキシアセトン	46	420	60	9.4	176	2	溶	3(5)	1
ジフェニルウレタン	128	660	30	8.9	218	2	溶	2	2
ジ-tert-ブチル-p-クレゾール	92	430	15	8.8	143	2	溶	2	1

可燃性粉じんの爆発危険性評価技術

粉 じ ん	平均粒径 (μm)	発火温度 ($^{\circ}\text{C}$)	爆 発 下 限 (g/m^3)	最大爆発 圧 力 (bar)	最大昇圧 速 度 (bar/s)	改 造 ハートマン ($<63\mu\text{m}$)	く ん 焼 温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	燃 焼 性	爆発クラス (St)
(2) 有機化合物・プラスチック									
ジメチルアミノフェナゾン	10	—	—	10.0	337	—	—	—	3
ジメチルジフェニル尿素	34	530	15	9.3	212	2	溶	2(5)	2
ステアリン酸	1300	500	8	7.2	34	2	溶	1(1)	1
ステアリン酸カルシウム	12	560	30	9.1	132	2	(570)	3	1
ステアリン酸ナトリウム	22	670	30	8.8	123	1	溶	2	1
ステアリン酸鉛	18	590	30	9.4	156	2	溶	2(3)	1
ステアリン酸メラミン	191	400	30	9.2	260	2	(450)	5	2
セルローズ	33	540	60	9.7	229	2	350	5	2
ソルボーズ	195	490	60	6.8	27	2	溶	2(2)	1
チオ尿素	460	440	250	3.5	8	1	溶	2(2)	1
デキストリン	41	510	60	8.8	106	1	(450)	2	1
デキストローゼ	80	500	60	4.3	18	1	570	3	1
テルペンフェノール樹脂	10	480	15	8.7	143	2	溶	2(3)	1
トリニトロアントラキノン	10	570	30	9.5	151	2	溶	2(5)	1
ナフチルアミノスルホン酸	20	—	—	8.2	154	—	—	—	1
p-ニトロアニリン	10	—	30	11.7	183	—	—	—	1
塩化パペベリン	120	470	30	9.0	218	2	溶	2	2
パラホルムアルデヒド	23	460	60	9.9	178	2	(480)	5	1
ビスフェノールポリエステル樹脂	135	—	—	7.8	174	—	—	—	1
フタロシアニン・ブルー	<10	770	(200)	8.8	73	1	355	4	1
フェニチアジアゾール尿素	<10	680	30	9.0	119	2	溶	5	1
フェノール樹脂	11	530	15	9.6	198	—	(450)	—	1
〃	16	610	30	9.4	156	2	(450)	2	1
ヘキサメチレンテトラミン	27	—	30	10.5	286	—	—	—	2
ペンタエリスリトール	175	—	30	7.7	65	—	—	—	1
ポリアクリロアミド	10	780	250	5.9	12	1	410	2	1
ポリアクリルニトリル	25	540	—	8.5	121	2	(450)	5	1
〃	90	—	30	8.8	160	—	—	—	1
ポリアミド・フロック	37	520	30	9.8	93	1	溶	2(3)	1
ポリエチレン, 低圧	<10	420	(30)	8.0	156	2	溶	2(5)	1
〃	24	400	15	7.6	82	2	溶	2(2)	1
〃	105	440	30	8.7	109	2	溶	2(5)	1
ポリエステル	5	—	(100)	8.6	195	2	—	5	1
〃 ・フロック	—	570	(100)	0	0	1	溶	2(5)	0
〃 ・成型粉	10	—	—	6.8	74	—	—	—	1
〃 ・樹脂	162	550	30	8.4	76	1	溶	2(3)	1
ポリ塩化ビニル	<10	—	30	8.4	168	—	—	—	1
ポリ塩化ビニル	20	780	60	7.6	47	1	(450)	2	1
ポリサッカリン・誘導体	28	580	125	9.5	63	—	—	5	1
ポリスチロール, 発泡	650	—	400	5.4	14	—	—	—	1
ポリビニルアルコール	26	460	60	8.9	128	2	溶	5	1
ポリ酢酸ビニル (共重合物)	52	570	30	8.1	148	1	溶	3	1
ポリ酢酸ビニル (高分子)	65	440	30	8.9	147	2	溶	2(5)	1
ポリ酢酸ビニル (低分子)	450	460	15	8.3	133	2	溶	2(5)	1
ポリプロピレン	35	440	15	8.4	123	2	溶	3(5)	1
ポリメタクリル酸	21	550	30	9.4	269	2	溶	5	1
d-マニトール	67	460	60	7.6	54	1	溶	2	1
無水ピロメリト酸	<10	630	60	9.6	228	2	溶	2(3)	1
メチルセルロース	75	420	60	9.5	134	2	320	5	1
メタクリル酸アミド	750	510	15	9.2	125	2	溶	2(5)	1
メラミン樹脂	57	470	60	10.5	172	1	(450)	2	1
ラクトース	23	520	60	7.7	81	2	(450)	3	1
〃	140	480	(100)	6.6	31	1	520	3	1
ルチン, 7%水分	<10	530	60	8.2	111	2	溶	2(2)	1
(3) 農 産 物									
亜 麻 (含油)	300	440	—	6.0	17	—	230	—	1

産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-90-1

粉 じ ん	平均粒径 (μm)	発火温度 ($^{\circ}\text{C}$)	爆 発 下 限 界 (g/m^3)	最大爆発 圧 力 (bar)	最大昇圧 速 度 (bar/s)	改 造 ハートマン ($<63\mu\text{m}$)	く ん 焼 温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	燃 焼 性	爆発クラス (St)
(3) 農 産 物									
イースト	100	520	30	8.6	126	1	590	2	1
大 麦	210	420	750	7.4	29	1	290	4	1
からす麦 (オート麦)	295	410	750	6.0	14	1	350	3	1
紅 茶	76	510	125	8.2	59	1	300	4	1
小 麦	80	370	60	9.3	112	1	290	3	1
小麦でんぷん	22	480	30	9.9	115	2	(450)	3	1
穀物混合物	37	510	125	9.2	131	2	300	4	1
ココア (砂糖混合)	500	580	125	7.4	43	1	460	2	1
コ プ ラ	490	420	250	6.5	20	1	300	3	1
米でんぷん	18	550	60	9.2	101	2	(450)	3	1
コ ル ク	42	470	30	9.6	202	2	300	4	2
砂 糖	30	480	(200)	8.5	138	2	溶	2(3)	1
紙 粉	16	570	125	8.7	60	—	335	—	1
大豆ミール	20	620	(200)	9.2	110	1	280	2	1
ティッシュペーパー	54	540	30	8.6	52	2	300	4	1
タビオカでんぷん	22	450	125	9.4	62	1	290	4	1
動物タンパク	17	540	125	8.3	38	1	(450)	2	1
濃縮飼料	22	520	125	8.1	74	1	295	2	1
ポ テ ト	62	530	250	5.7	20	1	340	4	1
ヒマワリ	420	470	125	7.9	44	1	350	2	1
麦 角	110	490	30	7.4	38	1	400	3	1
フィッシュミール	33	—	—	6.4	90	—	—	—	1
綿フロック	44	560	(100)	7.2	24	1	350	3	1
ミルク, 粉	83	440	60	5.8	28	1	340	3	1
ミルク, スキム	80	500	60	9.0	99	1	330	3	1
ミルク, タンパク	195	450	15	7.6	55	2	440	5	1
とうもろこし (U.S.A)	28	440	60	9.4	75	1	280	3	1
コーングルテン	150	520	125	7.7	110	1	590	1	1
コーンスターチ	7	510	—	10.3	200	—	(450)	3	1
"	12	450	30	9.8	161	2	(450)	3	1
メラミン・木材成型粉	480	760	250	6.8	21	1	(440)	2	1
木 粉 (梨)	27	500	(100)	9.5	211	2	330	5	2
木 粉 (ブナ)	145	490	60	8.1	56	2	320	5	1
"	65	490	60	7.7	83	2	340	5	1
ゴ ム	34	—	(100)	7.4	106	2	—	—	1
(4) 燃料・その他									
亜 炭	32	380	60	10.0	151	1	225	4	1
"	75	450	60	8.5	100	1	250	4	1
活性炭	22	670	—	0	0	—	335	—	0
"	28	700	60	7.7	44	1	(450)	3	1
" , 8%水分	43	630	125	8.4	70	—	—	—	1
カーボンブラック	<10	630	60	8.4	121	1	390	4	1
グラファイト, 91% C	11	—	—	0	0	—	(450)	—	0
石油コークス	15	690	125	7.6	47	1	280	4	1
ス ス	<10	780	—	7.9	26	—	(390)	—	1
泥 炭, 15%水分	58	480	60	10.9	157	1	320	4	1
" , 14%"	400	500	—	5.5	14	—	315	—	1
" , 22%"	46	470	125	8.4	69	1	320	4	1
ト ナ ー	<10	470	15	8.4	162	2	(450)	5	1

可燃性粉じんの爆発危険性評価技術

付表.2 昭和58～61年における粉じん爆発災害事例

発生年月	死傷者数(死)	粉じん名	事故の概要
58. 2	3 (0)	研磨塗料粉	工場内でワイドサンダー機を使用してポリサンディング塗装(ポリエステル樹脂系塗料)した部材を塗面研磨作業中、屋外設置の集じん機が爆発し、爆風が逆流してダクトを伝わり、ワイドサンダー機とダクトから火災が噴き出し、これにより被災者3名が火傷を負ったものである。
58. 4	3 (0)	アルミニウム粉	軽合金工場の自転車用リム自動研磨ラインの自動研磨装置の羽布のドレッシング作業を羽布かき器でおこなっていたところ、羽布かき器のクギが、回転中のフランジに接触し、火花が発生、その火花が、研磨装置内のアルミニウム粉じんや綿ぼこりに着火し、燃え上がった。火が、フードから集じんダクト内へ吸い込まれ、ダクト及び集じん装置内のアルミニウム粉じんに着火、それらの装置が爆発した。この爆発により、工場(3,200㎡)のストレート屋根及び壁、ガラス窓の大半が吹き飛び、工場内で作業していた被害者らが、落ちてきたスレート片等により負傷した。
58. 6	1 (0)	トウモロコシ粉	飼料(トウモロコシ粉、一部コーリヤン粉混合)用サイロの内部構造物修理のため、鉄工業者がサイロ内で溶接作業中、壁面に付着(20cm厚さ)していたトウモロコシ粉が下部排出口より(地表へ向けて)落下し、そこへアーク溶接の火玉が落下して着火、火炎が上方へ伝ばしてサイロ内に入り、内部に浮遊していた粉じんが燃え、サイロ内にいた作業者が全身に火傷を負った。
59. 1	0	β-オキシナフトエ酸(粉)	染料中間体β-オキシナフトエ酸のウェット品(約15%含水)を、気流乾燥機により乾燥して製品とする工程において、乾燥機内で爆発が生じ、点検口が開き、ダクトの変形などを生じたが、人的被害はなかった。
59.10	0	パントテン酸カルシウム	パントテン酸カルシウム合成後、生成物を遠心分離しメタノールと水を含む湿製品を流動乾燥機にかけ、熱風乾燥機により、製品(粉体)とする。流動乾燥方式のため製品は飛散するので、一次および二次のサイクロンを直列に設置して回収している。乾燥には、数時間要するが、終了予定の約10分前にドンという音と共に破裂板が碎れ、炎が吹いた。
59.11	0	モルト粉じん	ふ頭に新設されたサイロ(53基の鉄製穀物サイロが集合)で、朝からモルト(小麦を炒ったもので、ウイスキー用)を搬入していたところ、一つのサイロで爆発が発生、集合サイロ全体にまたがった一枚の天井鉄板のほぼ三分の二がめくれ上がり破片が地上に落ちた。原因は不明であるが、穀物がこすられて発生した粉じんに静電気放電により着火・爆発したと推定されている。
60. 8	6 (0)	コーンスターチ	乾燥洋菓子製造のため、乾燥室から製品を搬出入する作業で、乾燥室入口において手押し式台車に積んだコーンスターチ(除湿用)入りの木箱34枚(1箱あたりのコーンスターチ2kg)を誤って転倒させたため、乾燥室内に粉じんが飛散して、その直後に粉じん爆発に至った。爆風は乾燥室天井の通気孔や天井裏のダクトを通して作業場や屋上などに走り抜け、被害者が多くなった。

産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-90-1

発生年月	死傷者数(死)	粉じん名	事故の概要
60. 9	0	ソアローカスト(農産物)	ソアローカストはイタリア産豆から抽出される、アイスクリームなどの添加物質である。ターボミル粉砕機のベアリングを交換後、最低供給速度で粉砕中、接続運転中のバグフィルターが炎上、機器建屋に損害を与えたが消火器で消火した。粉砕機の故障により発生した摩擦熱でローカストが赤熱され、バグに運ばれて粉じん爆発を起こしたものと推定された。
60.10	0	合板粉	ホットプレスにより合板とした後、ダブルソー及びサンダー(サンドペーパーを巻きつけたドラム)を用いて合板を成形し仕上げする工程において発生する粉じんを吸引する集じん装置(一次集じん、サイクロン2基、二次集じん、バグフィルター140本、三次集じん、ボイラへ空送り)が突然爆発した。
60.12	3(2)	チタン粉	電気分解方式により陰極回転ロール上に、プリント配線板用銅箔を連続して製造する工場において、チタン製回転ロールをバフ研磨中、バフ粉が集じん機またはダクト中で発火して作業者が被災した。この後、別の集じん機内に積った同種集じん粉を電気掃除機で除去しようとしたところ発火して2名が焼死した。
61. 2	8(0)	木粉	木材チップを乾燥、粉砕して接着材を混合し、プレスしてパーティクルボードを製造する工場において、突然乾燥工場付近で爆発が起こり、同時に製造工場全体に火が走り、両工場5200㎡を全焼して翌日午後ようやく鎮火した。 爆発によって破壊された設備は、二次粉砕機の系列(粉砕機、一次サイクロン、二次サイクロン、ファン)のみであることから、粉砕機内で高速回転しているインペラーと金網間に異物が入り衝撃火花が発生し、木材粉じんに着火し、管理が悪く多量の微粉が蓄積していたサイクロン中の木粉を舞い上げ、爆発火炎が拡大し、サイクロン吸引ファンによって、さらに乱された爆発火炎が製造工場に噴出したと推定される。製造工場には、製品用の堆積層粉じんが形成してあったため、これが爆風で舞い上げられ、二次粉じん爆発を誘引し、被害が拡大した。
61. 4	1(0)	アントラセン(粉)	バッチ式乾燥機で、150℃、2.5時間程の乾燥工程の終了した精製アントラセン1,200kgを、連続工程で製品ホッパーに排出作業中、計量ホッパー内のアントラセン粉じんが爆発した。 この工程は無人運転であるが、計量誤差を押さえることから、静電気で計量ホッパー壁に付着するアントラセン粉体を、木槌でホッパー外壁を叩き、落下させていた。計量ホッパーには180kgしか入らないが、5回目の計量が終了した段階で、30kgが投入され同時に爆発が生じ、ホッパージョイント部のキャンパスが焼損し、作業者の顔面に爆風があたり負傷した。
61. 4	0	石油樹脂(粉)	接着剤製造プラントにおいて、その原料である石油樹脂50トンを貯蔵サイロへ空気輸送によって搬送中、サイロが爆発、サイロ上部のマンホール蓋が64m近く吹き飛んだ。また、サイロ排気用ダクトが接続されてあるバグフィルターの安全扉が開放した。石油樹脂は、はじめ710~2000μ以上の粗大粒子であるが、輸送中に粉砕され、しかも粉砕時に静電気帯電が著しく、サイロ内に堆積粉じんと極性の違いによる雷状放電を引き起こして爆発したものと推定された。

可燃性粉じんの爆発危険性評価技術

発生年月	死傷者数(死)	粉じん名	事故の概要
61. 6	1 (0)	コウリャン飼料粉	マイロ(コウリャン)を粉碎した飼料原料を高所原料タンクまで搬送するバケットコンベヤー数十個を連結したリング状のゴムベルト(幅40cm,長さ47m)が切断したので、ガス溶断により修理作業中、バケットコンベヤー・ケース内で粉じん爆発が発生した。溶断終了約10分以上経過後、ケースの開口部から被害者は顔と両手の中に入れて、ゴムベルトの切断端を探るべく、ベルトをたぐり始めたところ、バケットの一部がはずれたのでベルトを手放したところ、ケース下方で粉じん爆発が起き、顔面に熱風をあびた。
61. 7	0	パラオキシン安息香酸(粉)	合成繊維の原料であるパラオキシン安息香酸製造ラインの乾燥工程で気流乾燥機内で、同粉じんが爆発をおこし、乾燥機点検口の歪み、電気ケーブルの焼損等の被害を出したが、2～3分後自衛消防隊が消火した。
61. 7	0	AS樹脂(粉)	レジン製造施設においては、AS樹脂を生産中であった。製造された製品粉を計量式中間サイロに送入、品質チェック後、セントラルサイロに移送し、中間サイロが空になったことを確認し作業を完了した。同時に別系統で製品移送中に、工場南側のサイロ群付近で爆発が生じ、空になった中間サイロ(直径4.8m,高さ14m)内での粉じん爆発を誘爆し、同サイロが転倒した。
61.12	1 (1)	マグアル合金(粉)	マグネシウムとアルミニウムからなる合金(Mg ₂ Al ₃)粗粉を微粉末に粉碎する工場において、粉碎機付近に漏洩した粉じんを電気掃除機で吸引したところ、掃除機が爆発、その火炎がホース内を逆火して粉碎機内に入り、同機ホッパーが大爆発し作業者が吹き飛ばされた。
61.12	4 (2)	アルミニウム粉	アルミ箔圧延ベアラ(箔屑圧縮装置)及び集じんホッパー等の解体工事においてガスバーナを用いて、ホッパー立ち上がりの鉄板を溶断していたところ、建物天井のC型チャンネル溝中のアルミ屑等が溶断火花で着火した。これを消火しようとして、CO ₂ 消火器、少量の水で試みたが消火できなかったため、屋根上にビニールホースを引き込んで水道水を散水したところ、突然爆発(水素ガス爆発と思われる)、更に隣接工場との壁間の横木支柱上に10数年間にわたって“ほこり”として蓄積していたわずかなアルミニウム粉じんを飛散させ粉じん爆発を引き起こし(推定)、壁が数10mにわたり破壊された。

産業安全研究所安全資料

RIIS-SD-90-1

発行日 平成2年9月1日

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 東京(03)453-8441(代)

印刷所 新日本印刷株式会社

SAFETY DOCUMENT
OF
RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RIIS-SD-90-1, 1990

The Technical Assessment of Materials
Liable to Dust Explosion

RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY
MINISTRY OF LABOUR
5-35-1 Shiba Minato-ku Tokyo 108 JAPAN