

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1969

粉じん爆発の危険性とその防止対策

内藤道夫
松田東栄

粉じん爆発の危険性とその防止対策

内 藤 道 夫*・松 田 東 栄*

1. ま え が き

粉じんが爆発するという事実に対する認識は、炭鉱における炭じん爆発の可能性について論ぜられたことに端を発するとされており、1870 年頃から可燃性ガスが存在しなくても炭じんのみで爆発することが認められ、1886 年にはイギリスでは炭鉱爆発調査委員会が炭じんに爆発性があることを正式に認めた。それ以前のイギリスにおける炭鉱爆発はすべて坑内で発生するメタンが爆発するとされていたのである。大体欧米諸国における炭じん爆発についての研究は 19 世紀後半から 20 世紀初期にかけて開始しており、現在ではその成果がかなり上がっていて大規模な炭鉱爆発は減少している。

我が国における炭鉱爆発も、その大規模なものはほとんど炭じんによるもので、まだ我々の記憶に新しい昭和 38 年 11 月、福岡県三池炭鉱の大災害も炭じん爆発であった。このように粉じんの中でも炭じんは爆発性を持ち、危険であることは、過去における数々の大爆発から一般に知られているし、またこのような性質を利用して微粉炭燃焼として利用されている。しかし、他の多くの粉じん類については、かなり昔から爆発災害が発生していながら一般には案外その危険性が知られていない。一般の製造工業における粉じん爆発災害は現状では火薬その他爆発性粉じん類による災害を除けば、可燃性ガスや引火性液体類による爆発災害に比較すると、その発生件数や損害程度はずっと少ないが、最近のようにプラスチック工業、有機合成工業、粉末金属工業、飼料工業など技術の進歩により、原料、製品を粉体で取り扱う工程が多くなっており、このような粉体の取扱分野の拡大、取扱量の増大、工程の連続化、スピードアップ化の傾向は粉じん爆発の潜在危険性を増大する結果となっている。実際、最近数年間

において何件かの重大な粉じん爆発災害をみている。

外国の場合、米国火災防止協会 (N. F. P. A.) の統計¹⁾によれば 1900 年以降 1956 年までの半世紀間に米国全土において 1,083 件の粉じん爆発が発生し、640 名の死者と 1,709 名の負傷者を出し、損害額は 97,828,678 弗に達するという。またイギリスにおいては 1951 年より 1960 年までの 10 年間に 243 件の粉じん爆発が発生²⁾し、22 名の死者と 182 名の負傷者を出しており、粉じん爆発による災害は年々増大する傾向がある。このため各国ともこの種の爆発災害の防止には真剣に努力を払っており、我が国も、後述するような事例を見るまでもなく、この種災害の防止に最大の努力を払う必要があろう。

ただ粉じん爆発は、災害事例となって表面に出る例が比較的少ないことと、爆発条件や粉じんそのものの爆発特性において理解し難い面があり、いわゆる一般の常識とまでいっていない面が認められるので、工場事業場におけるこの種災害防止の努力を推進するうえに何等かの参考ともなれば幸いと考え、粉じん爆発の危険性とその防止対策について解説してみる。

2. 粉じん爆発災害の状況

我が国では、労働省に報告されたところによると、昭和 27 年 (1952) より昭和 42 年 ('67) 末までの 16 年間に粉じん爆発による災害事故は合計 115 件を数え、死亡 45 名、負傷 277 名の犠牲者を出しているほか、多大の物的損害を与えている。

表 1 は年次別による粉じん爆発の発生状況を示したものであり、報告されていない小事故も含めればかなりの数にのぼるかもしれない。以上に示した粉じん爆発災害には炭鉱における災害は除いてある。これらの爆発による死傷者の多くは火災をあげて火傷を負ったものであるが、なかには爆発が起きたときの転落や消火作業中の打撲傷または中毒などの例も見受けられ

* 化学課

表 1 年次別粉じん爆発発生状況(1952年～67年)

年度(昭和)	発生件数	死傷者数	死	傷
1952 (27)	6	33	7	26
53 (28)	9	17	1	16
54 (29)	9	20	1	19
55 (30)	4	—	—	—
56 (31)	7	21	7	14
57 (32)	4	8	2	6
58 (33)	8	22	4	18
59 (34)	7	12	3	9
60 (35)	6	1	—	1
61 (36)	3	6	—	6
62 (37)	8	26	3	23
63 (38)	11	32	2	30
64 (39)	7	11	2	9
65 (40)	12	42	1	41
66 (41)	6	23	3	20
67 (42)	8	48	9	39
計	115	322	45	277

る。

表 2 は種類別粉じん爆発の発生状況を示しているが、有機化学薬品、金属粉、無機薬品、合成物、農産

表 2 種類別粉じん爆発発生状況(1952年～67年)

粉じんの種類	発生件数	死傷者数	死	傷
石炭	23	45	7	38
無機薬品	20	29	6	23
イオウ	13	15	—	15
カーボン	2	1	—	1
ケイ化石灰	5	13	6	7
金属	19	43	10	33
アルミニウム	12	21	8	13
マグネシウム	2	2	—	2
その他金属	5	20	2	18
農産加工品	16	74	11	63
米ぬか	1	9	2	7
澱粉	5	33	4	29
小麦粉	2	8	1	7
小きび粉	1	4	—	4
さらしあん	1	3	3	—
ビール酵母	1	1	—	1
ふすま	1	2	—	2
大麦粉	1	—	—	—
飼料粉	3	14	1	13
合成物	18	49	5	44
染料中間物	7	5	2	3
プラスチック	9	28	2	36
合成洗剤	1	3	1	2
合成糊料	1	3	—	3
有機化学	23	51	5	46
無水フタル酸	11	20	3	17
加硫剤	1	—	—	—
医薬品	2	4	1	3
その他	9	27	1	26
木質	7	31	1	30
木コルク粉	1	11	—	10
リグニン	1	2	—	—
紙の粉	1	18	—	18
計	115	322	45	277

表 3 粉じん爆発工程別発生状況(1952年～67年)

工 程 別	発生件数
粉碎製粉工程	38
集じん分離工程	17
乾燥工程	14
輸送工程	10
貯蔵工程	7
燃 焼 室	2
そ の 他	27
計	115

加工品などが目立って多い。特に最近数年間は上記の物質で無機薬品以外のものによる爆発がふえている。

表 4 粉じん爆発発火源別発生状況(1952年～67年)

点 火 源 別	発生件数
摩 擦 衝 撃	46
異物混入	17
その他	29
メタルの過熱	10
裸 火	6
静電気スパーク	10
電気設備	6
溶接溶断の火花	7
自然発火	17
不 明	7
そ の 他	6
計	115

点検などといった工程作業において発生している。これを発火源別に分類すると表 4 のように示すことができる。衝撃および金属片、小石などの異物混入による Hot Spot、スパークなどが発火源となった例が断然多く、大体 4 割近くをしめている。また自然発火が原因となった例もかなり多く注目される。その他機械のメタルの過熱、溶接断の火気、静電気スパーク、裸火や電気設備も発火源となっている。これらの発火源のうち操業上これを完全に除去しにくいもの、例えば衝撃や摩擦、静電気といったものは、常に粉体の取扱過程で付随しているので、爆発原因と断定される傾向がある。したがって原因の真因とかけ離れてしまうことも往々にして散見される。

3. 災 害 事 例

災害が発生したときは、その原因を明らかにして災害の再発を防止しなければならないが、これと同時に外部の類似の業種における災害事例を集めて、これによって抜かりのない防止対策を樹てることも忘れてはならない。

最近の粉じん爆発事例に見られる特徴は、爆発災害 1 件当りの被害の大きい重大災害が、かなり発生していることであって、操業規模の大型化と同時に、管理面の欠陥も表わしているものと考えられる。

次に我が国で最近発生している工場事業場における主要な粉じん爆発災害の事例を幾つか紹介することにする。ただし炭鉱の粉じん爆発はこれには含まない。

(1) 化学工業 昭 37. 6. 15 傷 3

原料フェノール樹脂、木粉、縮合剤等の混合物を衝撃式粉砕機にて微粉碎中、室内に発散した粉じんが爆発した。

原因は粉砕機の機械部分の摩擦によるものと思われる。

(2) 化学工業 昭 37. 11. 23 傷 1

テレフタル酸乾燥機内にて静電気によりテレフタル酸粉じんが爆発したものと思われる。

(3) 化学工業 昭 38. 1. 14 傷 2

ナフタリンから無水フタル酸製造中、結晶補集塔が爆発し、安全弁および掻出口の蓋が飛んだ。原因は熱交換器付近に低温発火物質が生じ、これが点火源となったものと思われる。(写真 1)



写真 1 爆発で破壊した結晶補集塔

(4) 化学工業 昭 38. 6. 15 傷 10

ポリプロピレン微粉除去用バッグフィルター室のマンホール 2 カ所をあげ、内圧を抜き、内部を点検し、下部スクリーコンベヤ室内に粉末がたまっていないことを確認した。そしてマンホールを仮締めして上部に戻り、バッグ(純毛製)のつまり具合を調べたが、空気混入をおそれ、直ちに蓋を締めた。その 3 分後一斉にバッグをジスコン棒塩ビ棒で粉末を落すため 2, 3 回たたいた時爆発した。点火源不明

(5) 化学工業 昭 38. 6. 23 死 2

珪灰石灰をクラッシャーで粉碎後、サイズ別に包装

作業中、ロールクラッシャーの点検と缶詰作業を行ない、更に製品を置場に置いた時爆発した。原因はクラッシャーのモーターに無理がきてコイルが焼け、これが点火源となったものと思われる。

(6) 化学工業 昭 38. 12. 19

硫黄を第一石臼でこまかく砕く作業を実施中、異物が混入したため爆発して火災となった。

(7) パルプ製造業 昭 39. 2. 12 傷 2

リグニン工場においてスプレードライヤーの清掃作業中、リグニン粉じんが爆発し、排気ダクトが吹飛んだ。

原因は溶接の火の粉が入ったものと思われる。

(8) 食料品製造業 昭 39. 4. 21 傷 2

原料のふすまペレットを粉碎ビンに送り込み作業中、原料の入り具合を見るため、ビンの蓋をあけたところ、ビン内で粉じん爆発が生じた。原因は静電気によるものか、異物混入による火花か、またはビンの蓋の開閉時の火花のいずれかと思われる。

(9) 金属工業 昭 39. 11. 5 死 2

空気の流れによってアルミ粉末を 4 種の粒度に選別するため、風選機で選別中、突然爆発した。原因は 325 メッシュの粉を集積する集粉機のバッグフィルターの静電気より発火し、アルミ粉が爆発したものと思われる。(写真 2)



写真 2 アルミ篩別工場の爆発現場

(10) 化学工業 昭 40. 2. 25 傷 3

合成糊料製造工程で、粉砕機を使い作業中、機内の金網が粉砕翼と接触発火し、綿製受袋が焼け、その火

の粉が粉じん爆発を起した。

(11) 化学工業 昭 40. 5. 3 傷 2

粉碎機上部ホップよりモノメチルテレフタレート (MMT) を仕込中発火した。粉碎機内に金属物質が混在しており、回転している間に火花を発し、粉碎機からスクリーコンベア内のシュートをへて、バケットコンベア下の粉碎された MMT に着火したと思われる。

(12) 化学工業 昭 40. 6. 21 傷 3

テレフタル酸粉碎機の出口シュート部分に亀裂を生じたのでアーク溶接を行ったところ、粉碎機内に残存していたテレフタル酸粉じんに着火爆発した。

(13) 食料品工業 昭 40. 8. 5 傷 7

流動乾燥装置の流動槽でデキストリンの焙焼作業を終え、流動槽内の壁の粉体を落そうと外壁を金槌で叩いたところ爆発した。槽内の整流板の金あみの間に残っていた粉じんが発火したと思われる。

(14) 化学工業 昭 40. 11. 15

フタル酸カリ溶液を熱風で噴霧乾燥するスプレー式ドライヤーで、熱風の通るフィルタに可燃性粉じんが付着、これが空気と共に熱交換器に運ばれ着火、火の粉となって乾燥装置内に入り火源となって爆発した。

(15) 飼料製造業 昭 41. 2. 6 死 1 傷 12

当日は休日で操業を休んでサイロに取付けた各機械の清掃点検及び修理を行ったが、5階でスパウトの溶接作業を行い、6階、7階では清掃作業中であつたところ、サイロ内に爆発が生じ、全工場にわたって爆発が波及した。原因は溶接中にスパウトの変形を直すためにハンマーで叩いたのでスパウト内の飼料粉じんが舞い立ち、これが爆発して、配管系統を伝わって全工場に波及したものである。(写真 3, 4, 5 はこれを示



写真 4 破壊した倉庫



写真 5 破壊したサイロの外壁

している。)

(16) 金属工業 昭 41. 8. 8 傷 4

アルミ製品をブラスト機で研磨作業中のところ、発生した火花から、付近に浮遊および堆積していたアルミニウム屑粉末に着火部屋中が火の海となって爆発した。

(17) 飼料製造業 昭 41. 12. 9 傷 2

飼料粉じんを輸送するためのエレベーターピット内でエレベーターを修理中、電気溶接火花から堆積している飼料粉じんに着火し、さらに浮遊粉じんに引火爆発した。

(18) 化学工業 昭 42. 3. 1 死 2 傷 14

砥石材料のフェノール樹脂粉製造工程において、結合したフェノール樹脂を粉碎した後、アトマイザーにて微粉末とするが、この現場で粉じん爆発が生じた。発生原因となる場所はアトマイザー付近であり、その



写真 3 点火源となったスパウトの溶接部分

点火源はアトマイザーのハンマーと固定部の間に入った樹脂粉末が固化・炭化して発火したものと推定された。この事故の被害の拡大した原因は防塵用の扉を開いていたため、工場全体に波及したのである。

(19) 製材業 昭 42. 4. 20 死 1 傷 4

オガ屑集積室と同じ棟の中にある作業員休憩室において、始業開始前、作業員 4 名が更衣室で更衣および休憩中、休憩室の天井の一部が落下し、木粉がたちこめたとたん、大爆発が生じ上記のような被害者が出た。原因はおが屑集積室との間仕切りが不完全なため、隙間から入ったおが屑粉末が休憩室天井に長年にわたってたまり、数十糎にもなったため、その重みに耐えられなくなった天井が陥没したので、3 トンにも及ぶ木粉が休憩室にたちこめ、採暖用のストーブから引火爆発したものである。

(20) 植物油製造業 昭 42. 6. 22 死 2 傷 6

食用油抽出工場でスチームトラップ切断中、アセチレン切断用バーナーを消火したときに、漏洩していたノルマルヘキサン蒸気に引火爆発し、さらに米糠粉じんの爆発を誘起した。

(21) 製薬工場 昭 42. 8. 31 傷 2

ダイナミックドライヤーを使用してアスピリンアルミニウムを主剤とする顆粒を乾燥し始めたところ、同乾燥機が爆発した。顆粒中にはエタノールが含まれており、また微粉状のアスピリンアルミニウムがバグフィルターに付着しているところからみて、舞い上がった粉体による静電気火花で、エタノール蒸気に引火し、さらに粉じん爆発を起したのではないかと考えられる。

(22) 顔料製造工場 昭 43. 12. 24 死 3 傷 4

防蝕塗料の原料であるシアナミド鉛を乾燥後、コンベアにのせ、粗砕器にかけて袋詰めを行なっており、そのとき舞い上がる微粉を集じん器からのびたゴムホースで吸引していたところ、コンベアにのせるホッパー付近で発火し、同時に集じん器が爆発して、付近の作業員が被災した。原因はコンベアの機械部分の不良による摩擦熱か、集じん機のバグフィルター付近の静電気によるものかはっきりしていないが舞い上がったシアナミド鉛の粉じん爆発である。(写真 6)

(23) 合成化学工業 昭 44. 1. 13 死 1 傷 1

潤滑油の酸化防止用添加剤合成反応のため、 C_4 、 C_6 のイソアルコールを反応器に仕込み、五二硫化磷をドラム缶から投入中、缶内で爆発が生じ、仕込口から火

炎が吹き上げた。原因は発生した硫化水素に何等かの発火源（静電気または衝撃）から着火し、さらに五二硫化磷の粉じん爆発を起したものである。当時不活性ガスとして窒素を流入中であつたが、パーシ不足と見られる。



写真 6 顔料粉じんが爆発した集じん機（バグフィルターは完全に焼け落ちている）

以上に示した災害事例は、代表的なものの一部であつて、無水フタル酸の製造工業や、アルミ粉など金属粉の製造工場またはアルミ製品の研磨、合成樹脂粉や飼料用の粉じんを扱う現場では数多く発生しているし、件数として数え上げられないような小爆発もかなり、存在しているようである。

前記の事例で明らかなように、粉じんの舞い立つような作業や、工程で着火源となるような火気の不用意な取扱い、静電気の蓄積、物質自体の発熱、機械的な発熱などが原因となって爆発が生じており、関係する粉じんの危険性に対する正確な知識の欠如、危険作業の隔離や被害の軽減といった対策の不備が根本原因であることが分る。特に可燃性の蒸気やガスと共存している場合は粉じん単独の場合に比較して非常に爆発危険が多いし、また粉じんと引火性液体を同一棟の工場内で取扱う場合には、非常に被害が拡大するからプラントレイアウトに考慮を払う必要が認められる。

以上のような災害事例を参考に、根本的には先ず粉じんの爆発特性をよく理解し、これに合った安全対策を定め、爆発防止と被害軽減の具体策をたてる必要がある。

4. 粉じん爆発の危険性

一口に粉じんといっても、生活上、生産上欠かせないものから、ちりや煤煙のように不要なものまで、広い範囲にわたっている。これらは常に我々の周囲に存在しているのであるが、いつでも、どこでも爆発するというものではなく、ある条件が揃って始めて危険状態となるわけである。

粉じんの燃焼爆発危険性を考えるとき、空気中に浮遊した場合と、構造物の上に堆積した場合に分けられる。いずれの場合も可燃性である、すなわち、空気中の酸素と反応して発熱する性質を持っている物質を対象とする。粉じんは可燃性の固体を細分化したものと考えてよいが、非常に粒子が小さくて、たとえば直径が 10^{-6}cm 以下となればエアロゾルとして空気中に分散してけんたく状態³⁾となる。これらは液体の微粒子、すなわちミストの状態とほぼ同じであって、沈下を生じない。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てよいが、実際に我々が直面する粉じんは更に粒子が大きくて大体 10^{-3}cm 程度以上の粒子であって、浮遊は永久的でないものである。また粉じんはその生成の過程において均一な粒度のものは殆どなく、エアロゾルのようなこまかいものから、かなり大きいつぶとしてはっきり確認できるものまで、粗さの異なるものが混合しているのが常識である。

このような粉じんの爆発は、空気とよく混合している浮遊状態が必要である。あまりにも大きい粒子は簡単に浮遊しないし、一旦浮遊しても直ぐに沈下してしまうので爆発危険性は少くなる。したがってある程度の微粒子で、何等かの外部から機械的な移動作用を粉じんに加えてある時間粉じん雲を生成せねばならない。なぜならば沈降する粉じんは自身ではガスや蒸気のような拡散性を持たないからである。拡散性を持たない粉じんは、放置すれば沈降し堆積する。堆積粉じんは空気を多量に含んだゲルであり、エアロゲル³⁾と呼ばれる。これはまた発火危険が存在する。

このような発火爆発危険のある粉じんの生成条件は可燃性塊体の粉碎、移送、篩分、攪拌など外部から機械的な作用を与え、また粉体物質の乾燥、混合、篩別、計量などを行う工程で存在し易い。

粉じんの発火爆発も、物質自身で常温で酸化発熱する一部の金属類を除くと、発火源の存在が必要であ

る。

したがって粉じんが発火爆発するための条件としては、

- (1) 可燃性
- (2) 微粉状態
- (3) 支燃性ガス（空気）中での攪拌と流動
- (4) 発火源の存在

という各種の条件が必要になる。また粉じんが長時間加熱され乾溜ガスが発生するとガス爆発の危険があり粉じん爆発の原因となりうる。

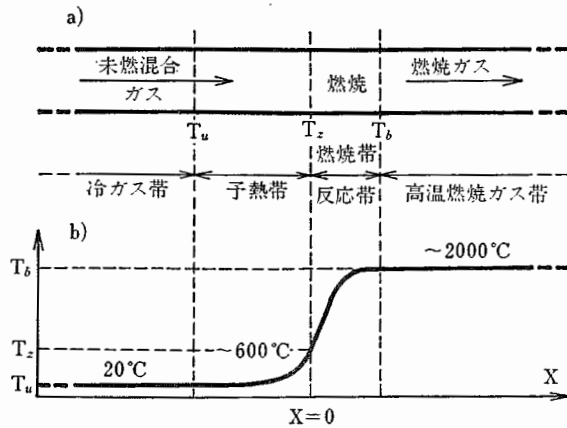
5. 可燃性粉じんの着火爆発機構

粉じんの爆発は、粉じん粒子の表面において酸素と反応が生ずるものであって、ガス爆発のように酸化剤（空気）と可燃物が均一に混合して反応するのではなく、あるかたまりになっている可燃物の周囲に酸化剤が存在するという不均一な状態で反応が生じ、丁度ガス爆発と火薬の爆発の中間にあると考えられ、爆発により放出されるエネルギーは最高値と比較するとガス爆発の数倍⁴⁾に達する。しかし粉じん爆発は、ガス爆発や火薬の爆発とは異って発火に要するエネルギーがはるかに大きい。これは粉じんの爆発する過程が次のようになるためである。

- (1) 粒子表面に熱エネルギーが与えられ、表面温度が上昇する。
- (2) 粒子表面の分子が熱分解あるいは乾溜作用を起し、気体となって粒子の周囲に放出する。
- (3) この気体が空気と混合して爆発性混合気を生成し、発火して火炎を生ずる。
- (4) この火炎により生じた熱は、さらに粉末の分解を促進し、つぎつぎと気相に可燃性気体が放出され、空気と混合して発火伝播する。

したがって粉じん爆発も結局は本質的にガス爆発で、粉じん自体に可燃性のガスが貯蔵されているものと考えても差支えないことになる。ただこのような爆発の過程で、前記(1)においては粒子表面温度を上昇せしめる手段として熱伝導のみではなくて、輻射伝熱が大きな役割を占めることがガス爆発と異なる点である。

例えば図1⁵⁾は可燃性ガス空気混合気の爆発現象の機構を示したもので、管a)を左方から爆発性混合ガスが右方へと流れ、 $X=0$ の点で着火したとすると、


 図 1 混合ガスの管中における燃焼伝播状況と温度の状態⁵⁾

流速を火炎伝播速度に等しいものとすれば、b) のような空間温度分布が得られる。すなわち温度 T_u の混合ガスは予熱帯で T_z まで加熱されて燃焼を開始し、最高温度 T_b になる。大体予熱帯と燃焼帯 (0.1mm) の合計長さは通常 1mm 程度である。この場合火炎面の伝播速度は Mallard-Le Chatlier の式で示される。ただし熱エネルギーの供給は熱伝導のみとする。

$$V = \frac{\lambda(T_b - T_z)}{\rho c b (T_z - T_u)} \quad [I]$$

ここで V : 伝播速度

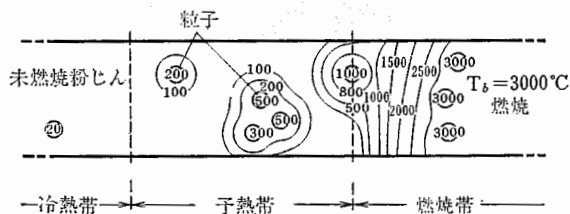
b : 燃焼帯の長さ

λ : 未燃ガスの熱伝導率

ρ : 同上 密度

c : 同上 平均比熱

ところが粉じん雲の場合、熱エネルギーの供給は熱伝導のほかに、輻射伝熱^{5)~9)}が加わるため、火炎伝播の様子が図2のように示される。


 図 2 粉じん爆発の火炎伝播状況⁵⁾

このように燃焼帯の長さがガスの場合に比較してはるかに長くなる。また粒子は燃焼に際して発生する噴出ガスのため、さまざまな方向に飛散し、粒子自体も破裂飛散するので、これもまた一つの火炎伝播機構を形成するとされている。この火炎伝播速度を Cassel 等は輻射伝熱を考慮して [I] 式を修正して次の [II]⁶⁾ 式を導いた。

$$V_{st} = \frac{\frac{\lambda(T_b - T_z)}{b} + \frac{bw\sigma\alpha F(T_b^4 - T_c^4)}{\rho_{st}r}}{(c\rho + c_{st}w)(T_z - T_u)} \quad [II]$$

ここで V_{st} : 火炎の伝播速度

w : 粉じん濃度 α : 補正係数

σ : 輻射能 F : 幾何学因子

ρ_{st} : 粉じん密度 r : 粉じんの平均半径

c_{st} : 粉じんの平均比熱

なお、 λ , ρ , c は粉じん空気の未燃混合物の熱伝導率、密度、平均比熱である。

このように粉じんの燃焼機構はガスに比較して複雑であり、多くのファクターが関係するため、後述する爆発特性も、定量的な数値を明確にきめることが困難であって、むしろ相対的な比較値として危険性を論ずる場合が多い。

6. 粉じん爆発の特徴

粉じん爆発は災害結果として表われる場合、閉塞された場所や、室内で生ずると、ガス爆発と同様な破壊力を示すので、このような危険なプラントはできるだけ露天状態で操業して、安全な制御室でコントロールするという、いわゆる最近の最新化学工業における手法を取り入れるべきであるが、現実にはそのようなプラントは殆ど見当たらない。したがって粉じん爆発特有の悲惨な結果を招くことになる。

粉じんの燃焼速度や爆発圧力はガスのそれに比較すると、比較的小さいが、燃焼帯の長さが長く、発生エネルギーが大きいため、加えられる力（破壊力と焼け）が著るしいのが特徴である。特に粒子が燃えながら飛散するので、これを受ける可燃物に局部的な焼けを生ずる。

粉じん爆発の場合、プラント内の空気全体にわたって爆発可能な濃度の粉じんが分散浮遊していることは殆どなく、局部的に舞い立っているものが何等かの原因で爆発することが多い。最初の爆発はたいして大きいものではなく、気にするほどではなくても、これによって生じたわずかな爆風が、周辺に堆積している粉じんを攪拌して舞い立たせ、熱、光の伝達および輻射により、更に爆発を生ぜしめる。いわゆる二次爆発²⁾である。これは最初に比較して規模が拡大し、次々と粉じん爆発を誘起して、粉じんの堆積している現場はすべて破壊し、燃尽す結果となる。これが災害としての粉じん爆発の大きな特徴であって、炭鉱などにおい

ては坑道に沿って数千米の長さにわたって爆発が伝播^{10)~11)} することがある。したがって建物の構造や、堆積粉じんの処理ということが防爆対策上非常に大きなウエイトを占めている。

次に粉じん爆発では、爆発の際発生する跡ガス中の成分で、ガス爆発に比較して CO がかなり多い¹¹⁾。このことは単位空間当りの酸素燃料比がガスに比較して燃料リッチになり、不完全燃焼を起す傾向があるためと思われ、炭坑など閉塞した場所における粉じん爆発では、被害者の大多数が CO 中毒という結果を招いている。なお跡ガスを完全に分析することによって爆発した物質がガスか粉じんかを計算により、C/H 比で出して、確認することができるという¹¹⁾。メタンの場合には 2.3~2.8 程度であるものが炭じんでは 3~16 であるとされている。炭じんを始め多くの粉じん類は爆発伝播過程では粉じん粒子の熱変質および乾留作用により、CO、CO₂、CH₄、H₂ などのほか乾留ガスの発生もあり、また HCN のような有毒ガスも存在することが知られてきている。

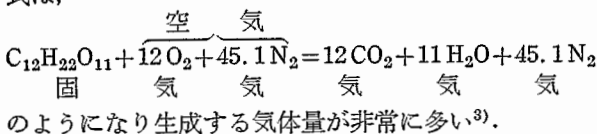
7. 粉じんの爆発性に影響するファクター

粉じんの爆発しやすさや爆発の激しさ、着火の難易などは、ガス爆発同様、個々の粉じんの種類により非常に異なるものであるが、特に粉じんの場合には、その物理的・化学的性状が大いに関係するので、これらのファクターを十分知っておく必要がある。

7.1 粉じんの化学的性質と組成

粉じんの爆発性に関するファクターとして、粉じん自身の化学的な構造や反応性は非常に大きい意味を持つ。

例えば酸化反応によって生成する気体量の非常に大きいもの、反応の前後で容積が変化しないものや、かえって減少するもの、またそのような場合に発生する燃焼熱の大小などが、粉じんの爆発の激しさに影響する。この例として砂糖粉じんの場合、完全燃焼の反応式は、



次に硫黄では、 $\text{S} + \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2 = \text{SO}_2 + 3.76\text{N}_2$ で反

応前後の気体量は変化なく、燃焼熱による温度上昇の結果の熱膨張という結果になる³⁾。一方アルミニウム粉じんの場合は $4\text{Al} + 3\text{O}_2 = 2\text{Al}_2\text{O}_3$ となつてかえつ

て容積が減少するが、燃焼熱が非常に大きいため、周囲の空気の激しい熱膨張を招き、爆発の激しさが大きい³⁾。表 5 は可燃性有機固体の発熱量の概要を示したものである。

表 5 可燃性有機固体の上部発熱量⁸⁾

物 質 名	発 熱 量
炭 化 水 素 類	>10,000 kcal/kg
合 成 品 (高分子)	3,000~11,000 //
石 炭	7,000~9,000 //
木 (材)	3,500~5,000 //

次に炭じんその他の粉じんで揮発成分 (VM) の含有の大小が大きな影響を与え、VM の多いほど爆発しやすい。

炭じんでは揮発分が 11% 以上あって爆発しやすく、爆発の伝播が容易なものを爆発性炭じんといっている¹¹⁾。一方粉じん中の灰分含有量の大小が爆発性に影響し、例えば 15~30% の灰分を有するれき青炭で、40% 以上の VM を持つものが爆発しないと云われている³⁾。なお粉じん自体の熱分解のしやすさや、炭化水素系気体の発生速度なども関係する。図 3³⁾ は灰分と揮発性物質を含んだ各種の炭じんの空気中における濃度と火炎速度の関係を示したものである。

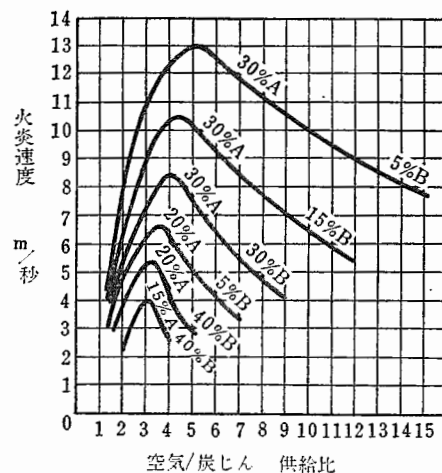


図 3 ジェット混合の空気-炭じん系の燃焼速度と石炭中の揮発分と灰分の含有量の関係
A : 揮発分 B : 灰分

7.2 粒度および粒度分布

粉じんの爆発し易さは、粉じんの粒度や粒度分布に

大きく左右される。粉じんの燃焼機構で述べたように、粒子表面において反応するため、表面積が粒子体積に比較して増大すると、熱の発生速度が、放散速度を上回り、爆発性が増す。たとえば、表 6⁹⁾ に示すように、1cm 立方の正四角立方体の表面積は 6cm² にすぎないが、これを分割し、1 ミクロン立方にする

表 6 細かく粉砕した場合の表面積の増え方

「表面積 6cm ² 、一辺 1cm の立方体の粉子 1 個を粉砕した場合」					
1 個……→千個の立方体：一辺 1mm：表面積 0.006m ²					
1 万個	〃	：	〃	100μ	〃 0.06 〃
10 万個	〃	：	〃	10μ	〃 0.6 〃
100 万個	〃	：	〃	1μ	〃 6.0 〃

と、総計の表面積は 6m² にも達する。ある一定の重量をもつ粉じんの表面積を表わす場合、比表面積という表現を使用する。これは次のような関係式²⁾で示される。

$$S = \frac{N \times k_s d^2}{N \times \rho \times k_v d^3} = \frac{\phi}{\rho d} \quad \text{〔Ⅲ〕}$$

ここで S = 比表面積 $\phi = \frac{k_s}{k_v}$
 d = 平均粒子径 N = 粒子数
 ρ = 粉じん密度

k_s, k_v 形状係数、球状粒子では $k_s = \pi, k_v = \frac{\pi}{6}$

したがって平均粒子径が小さく、密度の小さいものほど比表面積は大きくなり、表面エネルギーも大きくなる。

粉じんの粒度が各種の爆発パラメーターに大きな影響を与えることについては多くの研究報告¹³⁾があるが、図 4¹⁴⁾はその一例である。

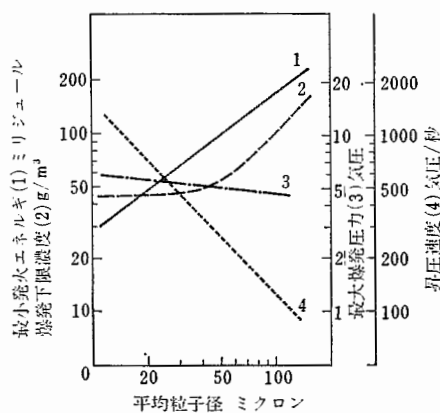


図 4 噴霧状アルミニウムの平均粒子径と爆発パラメーターの関係¹⁴⁾

なお単独粒子の場合と雲状粉じんの場合で粒度による影響の仕方の相違について理論的に考察された報告もある⁶⁾。粒度があまり小さくなると、粉じんの種類によっては互に引き合って、分散が不良となり、かえって爆発性が減ることもあり⁶⁾、粒子の電気的性質も関係してくる。

粒子の大きさは通常ミクロンまたは、通過する標準篩のナンバーで示される。粒子の平均径と通過篩のナンバーの関係は表 7¹⁴⁾ のようになる。

表 7 篩番号と通過ミクロンの関係

Sieve No.	Size μ	Sieve No.	Size μ
20	840	270	53
100	149	325	44
140	105	400	37
200	74		

粉じんの粒度を示す場合、200 メッシュ全通、あるいは 100~150 メッシュ、というような表現を用いるが、このことは対象粉じんの完全な粒子の大きさを示すわけではない。同じ篩を通過したものでも、通過粒子の粒度はかなり異なる場合があるので、通過粉じんの粒度分布を知る必要がある。ただし、粒度分布の相違による爆発特性の変化については一部の文献以外あまり知られていないが、より小さい粒径の粒子を含む粉じんの方が爆発性が高いものと考えてよい。

7.3 粒子の形状と表面の状態

平均粒形が同一の粉じんであっても、形状や表面の

表 8 粉じんの爆発と粒子の形状の関係¹⁵⁾

試料粉じん	爆発指数	
	球状	不定形
メタクリル酸メチル成形コンパウンド	6.1	>10
メタクリル酸メチル、アクリル酸共重合体	7.2	>10
石炭酸樹脂	<0.1	>10
同上 非加熱反応物	2.3	>10
同上 誘導体	5.8	>10

表 9 空気にばくろした効果と発火エネルギーの関係¹⁷⁾

金属試料	雲 状		層 状	
	ばくろ前	ばくろ 6 週間後	ばくろ前	ばくろ 6 週間後
チ タ ン	15 ミリジュール	25 ミリジュール	8×10 ⁻⁶ ジュール	8×10 ⁻⁶ ジュール
同 上	10	15	2×10 ⁻⁴	8×10 ⁻⁵
ジルコニウム	5	15	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶
同 上	15	1J	3×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵

1J 25 ミリジュールで発火せず

表 10 空気中を自然落下する粉体の落下速度 (cm/秒) と、
粒子の大きさ、密度、ふんいきの温度の関係 (常圧)⁸⁾

粒子の大きさ [μ] ミクロン	粉じん密度 σ [g/cm ³]					
	$\sigma=1$			$\sigma=2$		
	温 度 [°C]			温 度 [°C]		
	20	177	370	20	177	370
5	0.075	0.055	0.043	0.150	0.109	0.085
10	0.30	0.22	0.17	0.60	0.44	0.34
30	2.68	1.96	1.53	5.32	3.91	3.06
50	7.25	5.39	4.24	14.1	10.7	8.43
70	13.5	10.4	8.23	25.4	20.1	16.3
100	24.7	20.1	16.4	45.6	37.6	31.7
200	68.5	62.9	55.2	115	108	101
500	200	199	196	316	328	325
1,000	390	415	426	594	642	685
5,000	1,160	1,420	1,650	1,680	2,070	2,390

状態も爆発性に大きな影響を与える。前記〔Ⅲ〕式において、比表面積には形状係数が大きな因子を持つことが示されているが、球状粒子では $\phi=6$ で、最も小さく、針状であると >6 であり、扁平状では >50 にも達する¹²⁾。

たとえばある種の合成樹脂では表 8¹⁵⁾ に示すように爆発指数が

形状によってかなり異なることが分る。

なお粒子の形状、比表面積等についての文献¹⁶⁾ も知られているから参考にするとよい。

また、粒子表面が空気 (酸素) に対して活性である場合、たとえば、新鮮な表面をしていて、ばくろ時間が短いものにあつては、爆発性は高く¹¹⁾¹⁷⁾ なる。表 9¹⁷⁾ はある種の金属の空気ばくろ時間と発火エネルギーの関係を示したものである。このことは酸化被膜を直ぐに生成する金属粉に共通することで、アルミニウム粉でも、ステアリン酸被覆をしたり、含脂粉の方が爆発し易い。また石炭粉じんなども、新鮮なものの方が危険性が大きいので、摩砕や粉砕という作業工程で生ずる粉じんは活性が高く危険性も大きいと云える。

7.4 粉じんの浮遊性

一般に粒子が細かく、軽いものは空気中に散乱、浮遊しやすい。浮遊性の大きいものほど空気中に滞留する時間が長く、危険性も増加する。表 10⁸⁾ は粉体の粒度と自然落下時間の関係を示したもので、温度および密度による影響が大きい。200 ミクロンより小さい粒度のものでは、粒度が小さく、温度が高く、密度が小さいほど落下速度が小さくなる。また 500 ミクロン付近の粒度では温度に関係がなく、これより大きな粒子では反対に温度が高いほど落下速度が大きくなる。

次に、空気分粒法によって粉じんの浮遊性を測定した報告によると、風量 P (l/min) と浮遊流出量 w (%) の関係を各種の粉じん で求めたところ図 5¹⁹⁾ のように示される。この場合、 $w=k \cdot p^n$ の実験式が得られ、

k , n は一定の粒度分布を持つ粉体に固有の定数であつて、 k の大きい粉じんは弱い風によって容易に浮遊上昇する。 n は通常 1~2.6 の値を持ち、 n の大きい粉じんは強い風のとときによく浮遊する。したがって n の大きい粉じんは凝集性が大きいのであつて、流動の場合には粉じんの浮遊性は細さの持続性、すなわち凝集の難易に左右される¹⁹⁾。

このような浮遊性は、粒子の帯電性や帯電の極性、

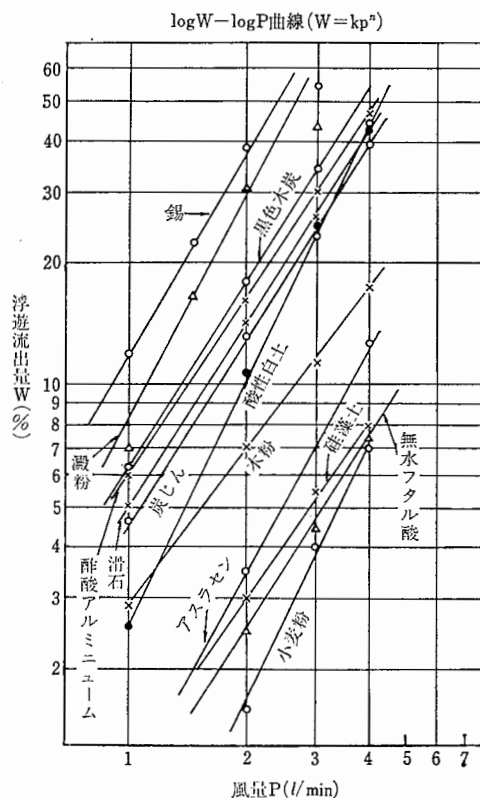


図 5 各種粉体の浮遊性¹⁹⁾

吸湿性が大きく影響する。なお粉じんの分散性および物理的性状に関する幾つかの考察^{20)~21)}が知られている。

7.5 水 分

粉じんに存在する水分は爆発性に影響を与える。すなわち粉じんの浮遊性を抑制する。ただ疎水性の粉じんについては、浮遊性にあまり影響しないが、水分の蒸発で点火に有効なエネルギーが減少すること、蒸発した水蒸気が不活性ガスとして働くこと、帯電性を減少せしめるような効果がある。なおマグネシウム、アルミニウムなどは水と反応して水素を発生し、かえって危険性を増すことがある。なお物質によっては図 6³⁾のように水分の存在の影響による相違が極端な場合がある。

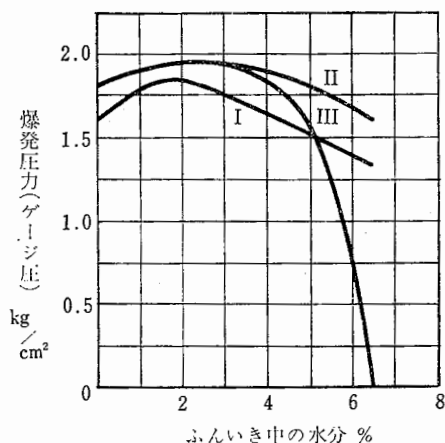


図 6 炭じんの爆発圧力とふんいき中の水分の関係
I : Kiselëvsk 炭 II : Ukrainian 褐炭
III : Donets ガス炭

8. 粉じんの爆発特性

前記 7 で述べた粉じんの爆発性に影響するファクターは、次に述べる粉じんの爆発特性と密接な関係があり、切り離して考えることはできない。爆発特性は温度、圧力、ふんいき中のガス組成、不活性物質の存在等、前記以外のファクターによっても大きな影響を受けるが、元来特性を測定する場合には、物理的条件のばらつきが大きいので、結果として得られた特性値をそのまま絶対的なものとして信用することは当を得たものでなく、相対的な比較値として利用することが望ましい。ただ条件をかなり厳密に設定した場合には、比較的再現性のある特性値が得られるので信頼でき

る。以下に主要な爆発特性値について説明する。

8.1 爆発限界濃度

気体爆発と同様に、粉じん爆発においても、ある濃度限界外では火炎伝播しない。したがって粉じんの種類によりそれぞれ固有の爆発限界濃度（空气中）があるわけであるが、ガスのそれのように、はっきりした数値は求め難い。特に上限界については一般にはあまり知られていない。炭化水素系粉じん、たとえばポリエチレンやポリプロピレンなどの粉じんの爆発下限界は、それが完全にガス化して燃焼し切るものと考えると可燃性ガスの爆発下限界と同様に、Burgess-Wheeler の関係が成り立つものと思われる²⁵⁾。すなわち

$$C \times Q = K$$

ここに C : 爆発下限濃度 $V\%$ または $W\%$

Q : その物質の燃焼熱/モルまたは燃焼熱/グラム

K : 定数

炭化水素では重量あたりの燃焼熱がすべてほぼ等しいから重量%で示した C は大体等しく、 $45 \sim 50 \text{ g/m}^3$ となる筈である。したがって粉じんにおいても爆発下限濃度は炭化水素類にあっては $45 \sim 50 \text{ g/m}^3$ の範囲にあるべきで^{26) 27)}、これ以下というのは信頼し得ない。なおこの場合粒径が 20μ 以下であれば、完全に燃焼し前記の条件が成り立つが²⁸⁾、一般には粒度分布が広く、かなり大きい粒子が混ざっているの、むしろ下限濃度は高くなっている場合が多い。また実測による爆発下限濃度は、爆発確率によって相違があり、図 7²⁹⁾ のようにポリプロピレン粉じんでは 100% 爆発下

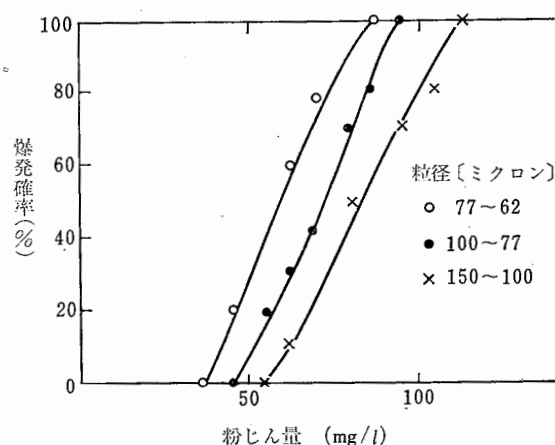


図 7 ポリプロピレン粉じんの爆発下限濃度と爆発確率の関係²⁹⁾

限濃度は大体 73 g/m^3 であるが、10% 爆発下限濃度はほぼ 48 g/m^3 であって、かなりの相違がある。

測定方法によっては爆発上限界も測定でき、発表されている例がある^{30) 31)}。たとえば表 11³¹⁾ は火炎の長さにより、爆発限界を定めており、50% 爆発濃度を爆発下限および上限界濃度としている。爆発確率と限界濃度の関係は表 12³¹⁾ に示すとおりであり、図 7³¹⁾ は火炎の長さの確率と濃度の関係を図示したものである。この図によっても爆発下限濃度はかなり再現性のある一定した傾向をもっているが上限濃度の場合にはばらつきが大きく、信頼性に欠ける点がある。

表 11 垂直管式による粉じん（炭じん）の火炎伝播の 0.5 確率と爆発上下限界濃度（火炎伝播の長さの 4 段階について限界濃度と、標準偏差がきめられている）³²⁾

火炎の長さ m	下限濃度 0.5 確率の点 g/l	下限濃度の 標準偏差 g/l	上限濃度 0.5 確率の点 g/l	上限濃度の 標準偏差 g/l
0.4	0.23	0.02	2.07	0.20
0.5	0.24	0.02	1.73	0.11
1.0	0.27	0.02	1.22	0.05
1.5	0.31	0.02	1.02	0.10

表 12 火炎の長さ 1.5m の場合、爆発確率と限界濃度、標準偏差（炭じん）³¹⁾

確 率	爆 発 下 限 界		爆 発 上 限 界	
	濃度 g/l	標準偏差	濃度 g/l	標準偏差
0.10	0.15	0.03	1.32	0.07
0.20	0.21	0.02	1.22	0.05
0.25	0.23	0.02	1.18	0.06
0.30	0.25	0.02	1.14	0.06
0.40	0.28	0.02	1.08	0.08
0.50	0.31	0.02	1.02	0.10
0.60	0.34	0.03	0.96	0.12
0.75	0.39	0.04	0.87	0.16
0.80	0.42	0.04	0.83	0.17
0.90	0.47	0.05	0.73	0.21

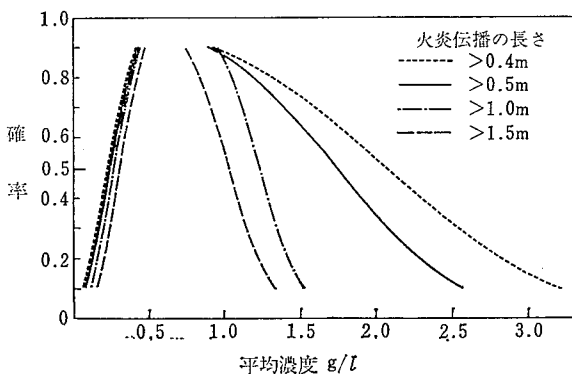


図 8 種々の火炎の長さとその確率、粉じん濃度の関係³¹⁾

一般に粉じんの爆発下限濃度は $20 \sim 60 \text{ g/m}^3$ 、爆発上限濃度は $2,000 \text{ g} \sim 6,000 \text{ g/m}^3$ の範囲内にある⁸⁾とされているが、粒度や粒度分布その他のファクターによって変動がある。

8.2 爆発限界濃度に影響を及ぼすファクター

8.2.1 粒度および粒度分布

粉じんの爆発限界濃度、特に下限濃度は粉じんの粒度や粒度分布により大きな影響を与える。図 9¹³⁾ は平均粒径と爆発下限濃度の関係を、また図 10³²⁾ は粒度分布の相違との関係を示したもので、粒度の小さいほど爆発下限濃度は低くなる。

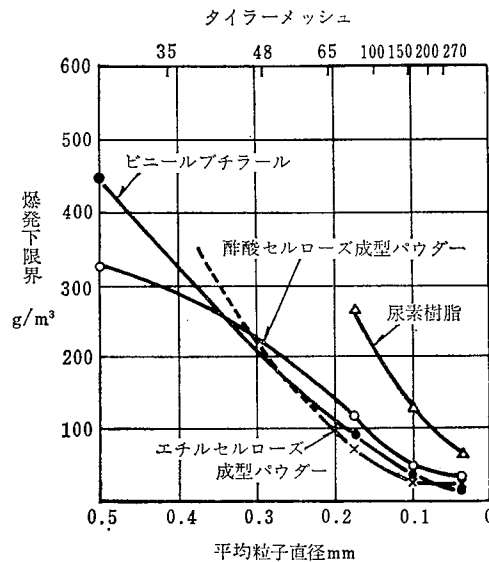


図 9 プラスチック粉じんの平均粒子直径と爆発下限界の関係¹³⁾

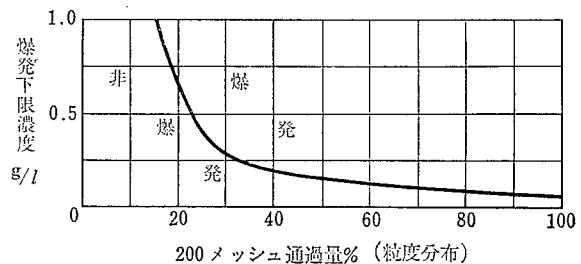


図 10 炭じんの爆発下限濃度と粒度分布の関係³²⁾

8.2.2 水 分

粉じん空気系に水分があると爆発下限濃度は高くなり、爆発性を失うようになる。図 11³²⁾ はこの関係を示している。

8.2.3 酸 素 濃 度

粉じんの分散するふんいき中の酸素濃度が変化する

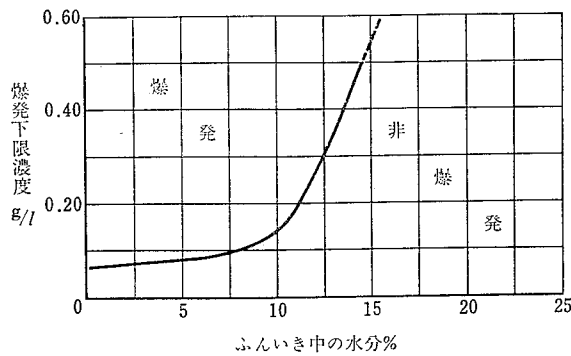


図 11 爆発下限濃度とふんいき中の水分の関係
200 メッシュ通過ピツパグ炭じん³²⁾

と爆発限界濃度も影響を受ける。たとえば酸素中と空気中とでは図 12³²⁾ のように下限界濃度は低くなると同時に、粒度の大きいものも爆発性をもつようになる。一方、酸素濃度を減少せしめると図 13³³⁾ のように爆発下限濃度が高くなり、爆発不可能域が生ずる。

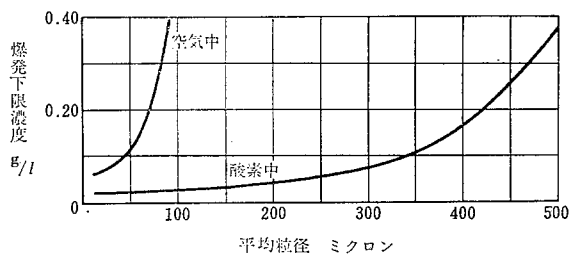


図 12 粒度と空気中および酸素中における爆発下限濃度の関係³²⁾ (ピツパグ炭じん)

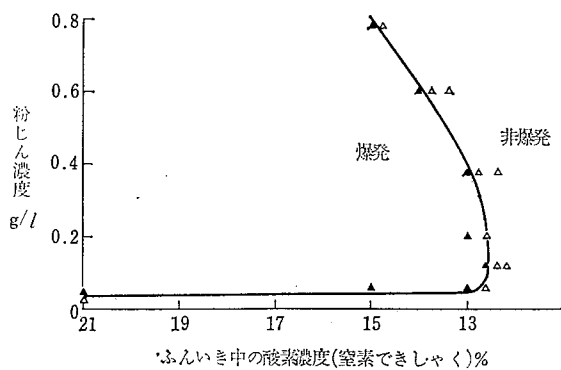


図 13 テレフタル酸粉じんの爆発範囲とふんいき中の酸素濃度の関係³³⁾

8.2.4 可燃性ガス

メタンその他の可燃性ガスや引火性液体の蒸気が粉じん空気系に混入してくると爆発下限界濃度は低下し、危険性が增大する。図 14³⁷⁾ は低濃度メタンが炭じんの爆発下限濃度に与える影響を示したもので、ガス濃度の増加に比例して直線的に下限濃度が低下して

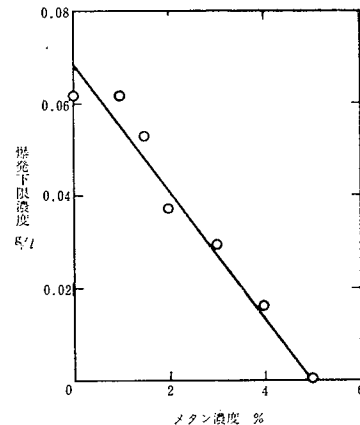


図 14 メタン空気混合気中における炭じんの爆発下限濃度³⁷⁾

いることを示している。次に図 15³⁴⁾ はメタンの濃度と炭じんの爆発上下限界の関係を示している。この図では堆積粉じんの燃焼限界濃度も示しているが、雲状の場合とかなり相似している。

当然ガスの爆発範囲に入れば粉じんが存在しなくとも爆発するし、発火エネルギーはより小さいから危険性は大きい。ただ粉じんの爆発上限濃度では、ガスそのものの濃度が爆発範囲に入っている粉じん濃度が大きすぎると、結局燃料過剰で爆発性を失う。

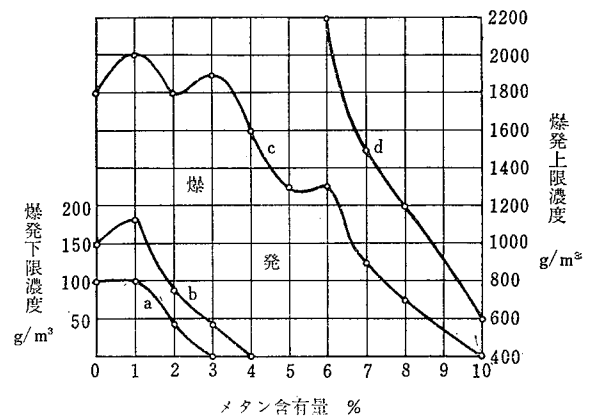


図 15 115ℓ 爆発室における雲状粉じんの爆発限界と層状粉じんの燃焼範囲とメタン量の関係(炭じん)³⁴⁾

a. 爆発下限濃度 b. 層状粉じんの燃焼下限濃度 c. 層状粉じんの燃焼下限濃度 d. 爆発上限濃度

8.2.5 発火源

爆発下限濃度も発火源の種類によって異なる。特に粉じんに接触する発火源の温度や表面の状態によって

影響を受ける。温度が高く、表面積の大きい発火源の方が爆発下限濃度が低くなる。表 13³⁾はこの関係を示したものである。また綿火薬やメッケルバーナーを使用すると、電気スパークでは爆発しない濃度まで爆発するようになる³³⁾。

表 13 爆発下限濃度と発火源の種類³⁾

粉じんの種類	爆 発 下 限 濃 度 g/m^3			
	高熱物体白金線 1200°C	電気火花	33V 5A	誘導コイル 6.5V 3A
澱粉	7.0	10.3		13.7
砂糖	10.3	17.2		34.4
アルミニウム	7.0	7.0		13.7

8.3 発火温度

粉じんの発火温度はガス、蒸気と同様に測定方法によりかなり異なるので、絶対的な物性定数とはいえないが、危険性の度合を判定するうえで、およその見当をつける相対値としては重要である。粉じんの発火温度は、粉じんの状態によって非常に異なる。すなわち、粒度や、形状、単独と集合状態、雲状と層状など影響するファクターも数多く存在する。

8.3.1 雲状と層状の相違

一般に層状の粉じんは雲状の場合に比較して、粒子間の距離が小さく、非常に接近しているので、酸化反応の過程において単位体積当りの熱の損失はずっと少い。したがって層状の場合の方が発火温度は雲状の場合よりもかなり低い値である。

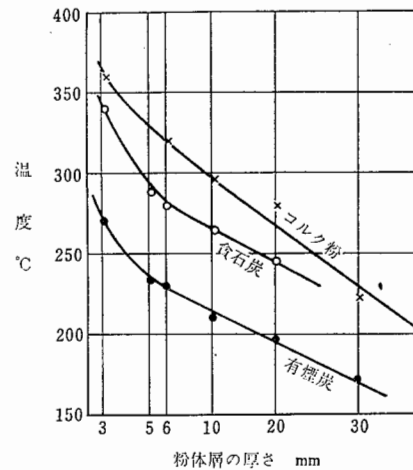
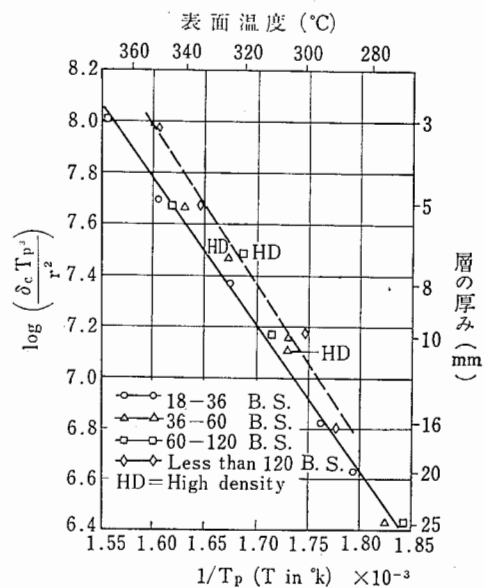
層の場合の粉じんの発火温度は Glimtemperatur というが、これは粉じんの厚みでも変るし、またこの温度よりはるかに低い温度で熱分解を起し、時間の経過にしたがって着火し易い物質になるようなプラスチックの粉じんも存在するので、通常知られた発火温度だけを安全のファクターとしてみることは注意を要するべきである。特にこのような温度条件になっているときに空気の侵入があると自然発火して、爆発の原因となる場合がある。

8.3.2 層の厚み

加熱された金属表面を使用して測定された粉じん層の厚みによる発火温度の相違は、表 14⁸⁾、および図 16³⁵⁾ に示すようになり、層の厚みが大きいほど発火温度が低くなる。そこで、堆積粉じんの最低発火温度を決める場合、高温に加熱された平面上に 5mm の厚みで平均に置いて、約 2 時間以内に発火しうる最低温度という条件が VDE 0165 によって一般的に定め

表 14 粉じん層の厚さと関係する着火温度(°C)⁸⁾

粉じんの種類	層 の 厚 さ mm					
	3	5	6	10	20	50
有煙炭 <70 μ	270	234	230	210	195	171
貧石炭 <70 μ	340	288	280	265	245	
コルク粉末	360		320	297	280	222 約200

図 16 層状粉体の発火温度 (Glimtemperatur) と粉体量の厚さの関係³⁵⁾ (表 14)図 17 加熱表面におけるぶな材のおが屑の発火³⁶⁾ (表 14)

られている⁸⁾。粉じん層の発火についての理論的考察は Townshend³⁶⁾等によってなされているが、Arrhenius の式および Frank-Kamenetskii, Thomas 等の理論より、層の密度 δ_c 、厚み $2r$ 、最低発火温度 T_p の関係は、 $\log \frac{\delta_c T_p^2}{r^2}$ と $\frac{1}{T_p}$ の間で $-E/2, 303R$ の傾斜 (E =活性化エネルギー, R =ガス定数) をもつ直線関係があ

ることを示した。(図 17³⁶⁾). この結果、粉じん層の発火温度には粒度はあまり関係しないが、密度は薄い層の場合に関係がある。

8.3.3 粉じん雲

粉じん雲の発火温度は、限られた時間内に浮遊した粉じんが発火する温度で、炉内のような壁の影響がある場合と、粉じん雲中に加熱線を入れたような壁の影響のない場合とに分けられる。前者の場合は後者に比較してかなり低く、房村¹¹⁾によると炭じんの場合、加熱炉内に吹き込むと 580~620°C、熱線では 810~915°C であった。

粉じん雲の発火温度も爆発限界濃度と同様に粒度や揮発分の含量、ふんいきの酸素量などによって影響を受ける。Cassel 等の報告⁶⁾⁷⁾によると単一粒子の発火温度は粒子の半径、すなわち粒度が小さいほど高く、大きいほど低くなる。この関係は双曲線に似たものであり、Mg 粉のみでなく炭じんでもそうであるという。また粉じん濃度と発火温度の関係では、粒度の小

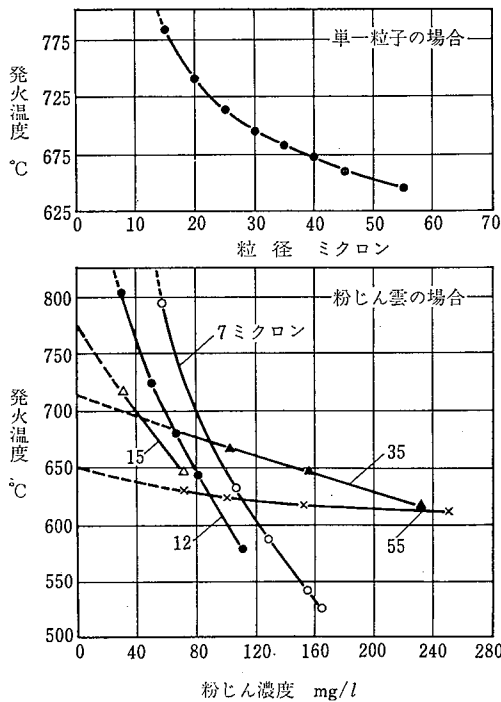


図 18 マグネシウム粉じんの発火温度と粒径濃度の関係

さいほど、濃度による発火温度の影響が大きく、濃度が大になるほど発火温度は低くなる一方、粒度が大きくなると影響の受け方が少い。この関係は図 18⁸⁾ に示すとおりである。このことは熱の発生と放散のバラ

ンスに関係しており、単一粒子のように熱放散がよく、輻射熱を受けない場合と、雲状で粒子間が比較的狭く、輻射熱を大きく受ける場合の差異である。ただ

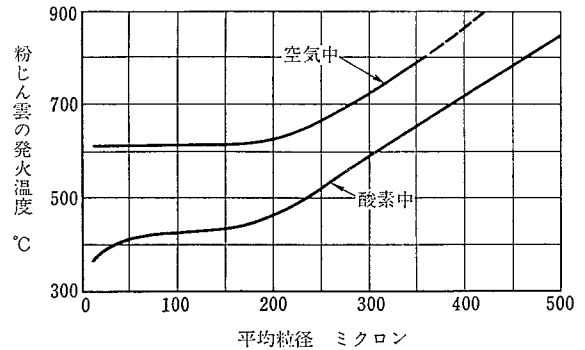


図 19 粉じん雲の発火温度と粒径の関係³²⁾

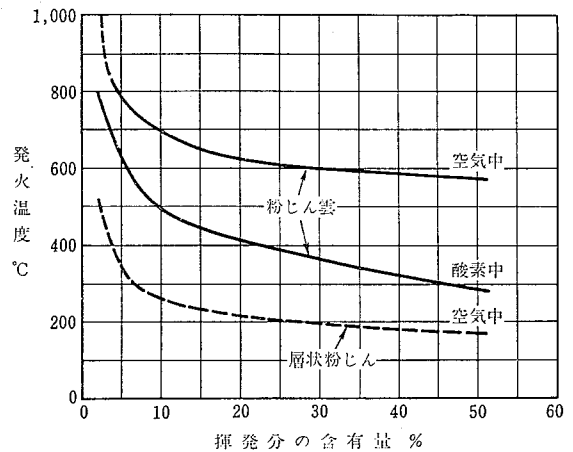


図 20 炭じん中の揮発分の含有量と発火温度の関係³²⁾

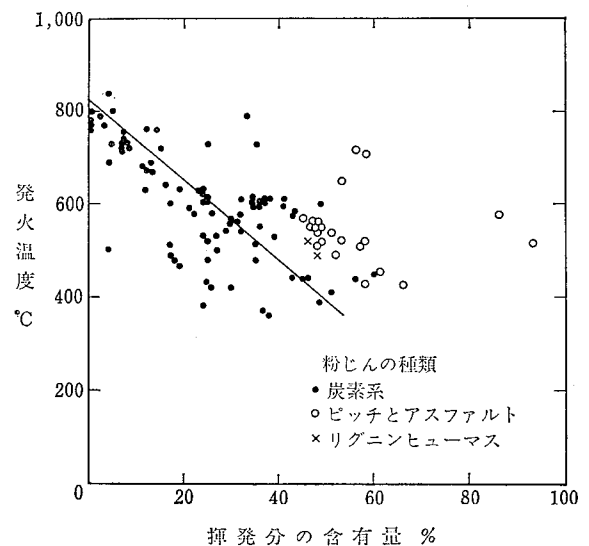


図 21 雲状粉じんの発火温度と揮発分の含有量の関係

以上の結果は、粉じんが非常に微少で、濃度も低い金属粉の場合であって、他の報告では全く反対の結果を示していることについて論ぜられているし⁶⁾¹³⁾、実際に、図 19³²⁾ に示すとおり粉じん雲の濃度が非常に高い場合は、粒度の影響は 150 ミクロン程度までほとんどなく、それ以上の場合に大きくなる。

ふんいき中の酸素濃度および粉じん中の揮発分と発火温度の関係は図 20³²⁾ に示すとおりであって、発火温度は酸素中では低く、揮発分の増すに従って低下している。なお層状と雲状の場合では揮発性成分の含有量によって発火温度が低下する状態は図 21⁴³⁾、22⁴³⁾ で示されるように異なる。このように粉じんの発火温度は、それをはっきり解明することは、条件によって異なるものであるから理論的には困難な場合が多い。

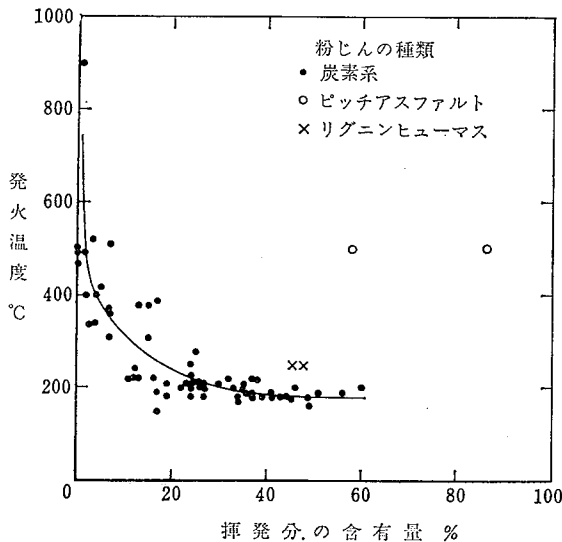


図 22 層状粉じんの発火温度と揮発分の含有量の関係⁴³⁾

8.4 最小発火エネルギー

粉じん雲に火花をとばすと発火し、爆発にいたることがあり、また層状粉じんにおいても同様に発火することがある。この発火のために必要な最小エネルギーの値が当然存在するわけで、一般にこの値を粉じんに対する最小発火エネルギーというのである³⁸⁾。

最小発火エネルギーは粉じんが電気的な発火源による危険性を知るうえに重要であるが、同時に粉じんそのものの相対的な危険性を知るうえに重要である。ただ粉じんのもつ独特の性格から、過去に測定された数値は、絶対的なものではなく、実験条件によって異なるので、定量的に論ずることは困難である。

一般に粉じんの最小発火エネルギーはガスや蒸気のそれと比較して $10^2 \sim 10^3$ 倍も大きく、大体 $10 \sim 100 \text{ mJ}$ 程度である。最小発火エネルギーは火花放電によって求めるが、放電電極と並列に一定容量の蓄電器をおき、この容量を C とし、電極にかかる電圧を V とすると放電エネルギーは大体 $1/2 CV^2$ となる。

最小発火エネルギーも多くの因子によって影響を受ける。すなわち、粒度が小さいとエネルギーは小さくなり(図 23³²⁾)、酸素中では空気に比較して小さい。(同

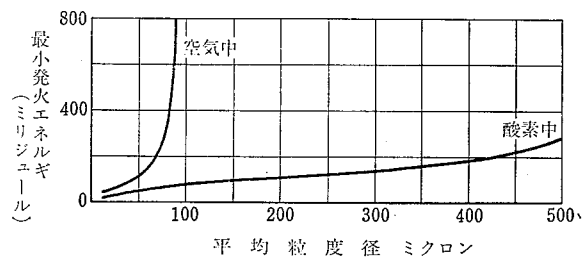


図 23 炭じんの粒径と最小発火エネルギーの関係³²⁾

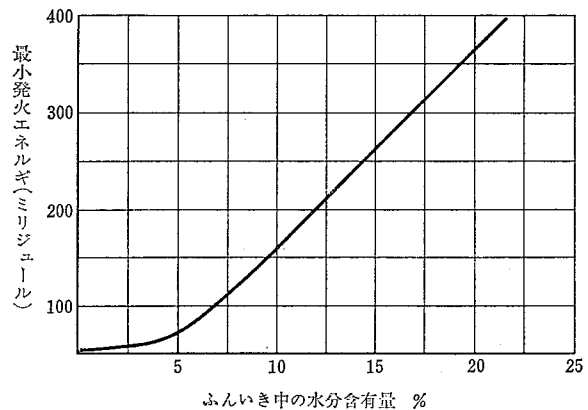


図 24 最小発火エネルギー(炭じん)に対する水分の影響³²⁾

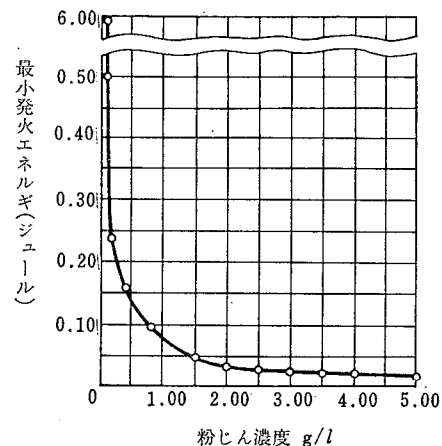


図 25 チタン雲状粉じんを¹⁷⁾ 点火させるのに必要な最小発火エネルギー

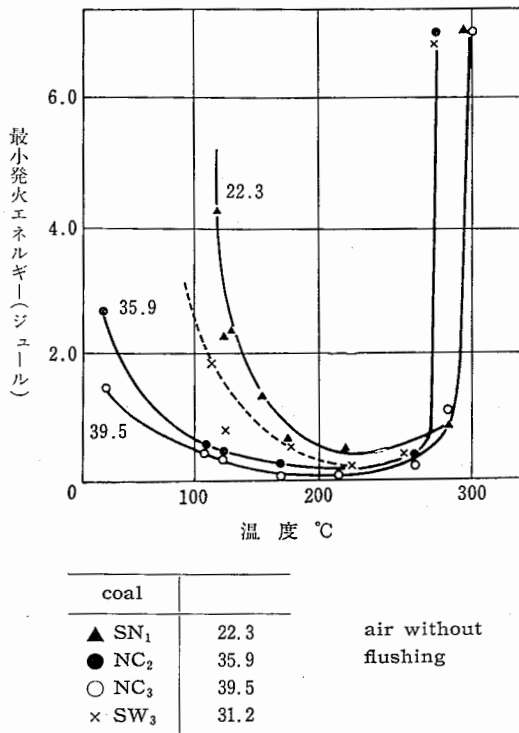


図 26 各種石炭粉じんの最小発火エネルギーと温度の関係（二次空気を送らない場合）
 (注) VM: 揮発分% SW₁, NC₂, NC₃, SW₃: 試料名

上). 水分が多いと、大きくなる (図 24³²). 粉じん濃度が一定量以上必要である, (図 25¹⁷). 揮発分を含む粉じんでは, ふんいき温度が上昇すると, 小さくなるが, ある温度以上になると, 揮発分が飛んでしまうため, 反対に発火しにくくなる. (図 26³⁹).

8.5 最高爆発圧力および圧力上昇速度

可燃性の粉じんの爆発において, その破壊力を示すのが爆発圧力および圧力の上昇速度であって, そのいずれもが大きい粉じんは破壊危険の大きい粉じんといえる. この特性は粉じん系を対象とする建物や装置, 配管の安全設計の基本となるので重要である.

粉じん爆発の圧力-時間の関係を図で示すと, 図 27⁴⁰ で表わすことができる. この図で $\overline{BC}$ が最大爆発圧力, $\overline{BC}/\overline{AC}$ が平均圧力上昇速度, $\overline{EF}/\overline{DE}$ が最大圧力上昇速度, $\overline{BX}$ が初圧の較正值を示したものである.

爆発圧力, 圧力上昇速度も, 粉じん濃度, ふんいき中の酸素量, 粒度, 不活性物質の混入量, 初圧などの多くの因子により影響を受ける.

爆発圧力の最大値は常圧では大体 8 気圧であるとされており, 化学量論組成付近の粉じん濃度で最大値が

得られる.

この場合体積比は大抵の粉じんでは 200~500 cm³/m³⁸⁾ で全容積の 0.05% 以下の濃度であって, ガスの場合とはかなり異っている.

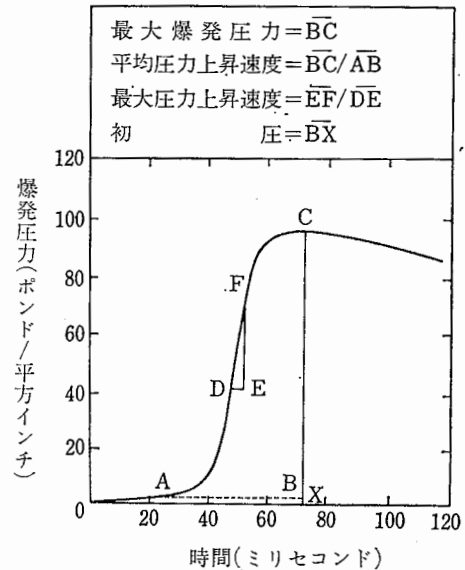


図 27 爆発圧力-時間の記録図⁴⁰⁾

図 28⁴¹⁾ は爆発圧力と濃度, 酸素量の関係を示したもので, 酸素量の減少は著しく爆発圧力の低下をまねく.

図 29⁴²⁾ は粉じん濃度と初圧および燃焼時間, 爆発圧力の関係を示したもので, 初圧の増加は爆発圧力を増大させている. また爆発圧力, 粉じん濃度, 粉じんの形状の関係を示したのが図 30¹⁴⁾ であって, 球状に比較して扁平状の粒子は爆発圧力が高い.

圧力上昇速度, 爆発圧力は, 粒度によって大きな影響を受け図 31¹³⁾ のように粒子の平均径が小さくなると上昇する. 次に図 32³²⁾ に示すように, 揮発分が増加すると, 圧力, 圧力上昇速度が増大し, 特に酸素中においては, 数パーセントの揮発分の増加は倍以上の爆発圧力を生ずることが注目される. 水分の混入も大きく影響するが, 粉じんの種類により, その影響の仕方が異なる. (図 33³⁹⁾). 種類の異なる粉じんでは, 爆発圧力や圧力上昇速度が異なるものを混合した場合の状態は図 34⁴⁴⁾ で示すように, 圧力は成分比にほぼ比例するが, 圧力上昇速度は, 高→低へ急激に変化する.

爆発圧力や圧力上昇速度が粉じん濃度や, 粉じんの種類によって相違する理由は, 有機粉じんの場合では燃焼時における酸素の消費量や発生する燃焼生成ガス (跡ガス) の種類と成分比に関係がある.

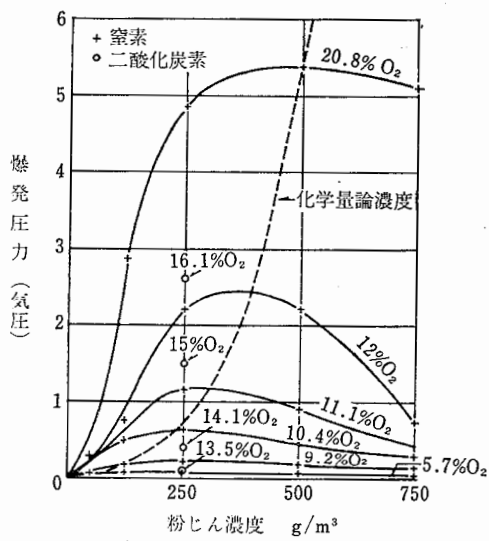


図 28 褐炭粉じんの濃度と爆発圧力および酸素濃度の関係⁴¹⁾

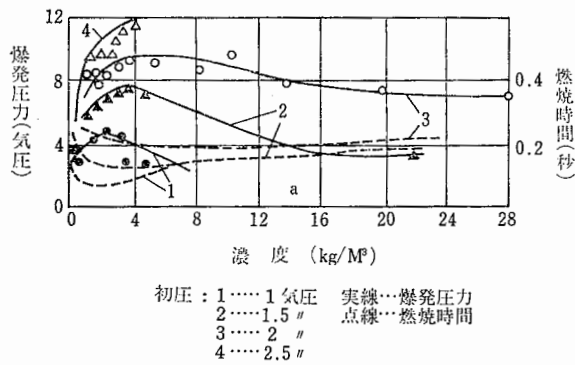


図 29 炭じん (泥炭) 濃度と爆発圧力, 燃焼時間, 初圧の関係⁴²⁾

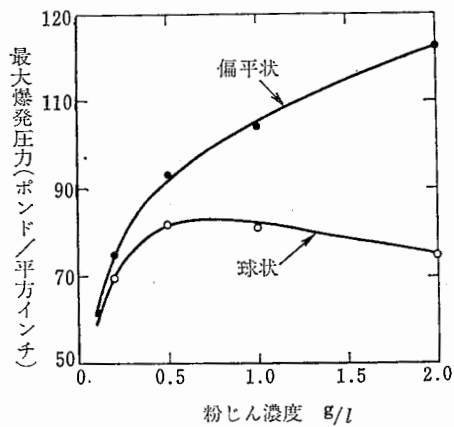


図 30 アルミニウム粉じんの最大爆発圧力と濃度の関係, 粒子の形状の影響¹⁴⁾

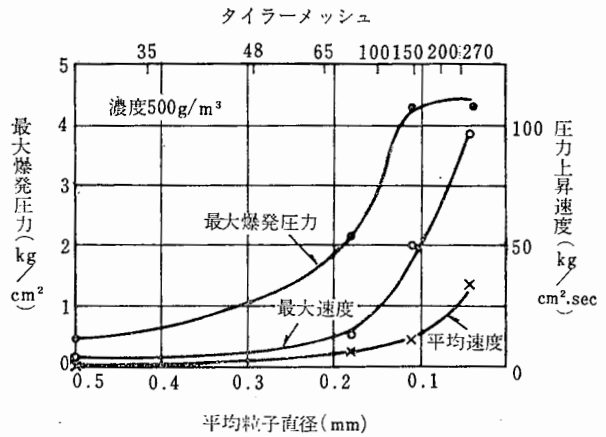


図 31 粉じんの平均粒子直径と最大爆発圧力および圧力上昇速度の関係 (酢酸セルローズ成型パウダー)¹³⁾

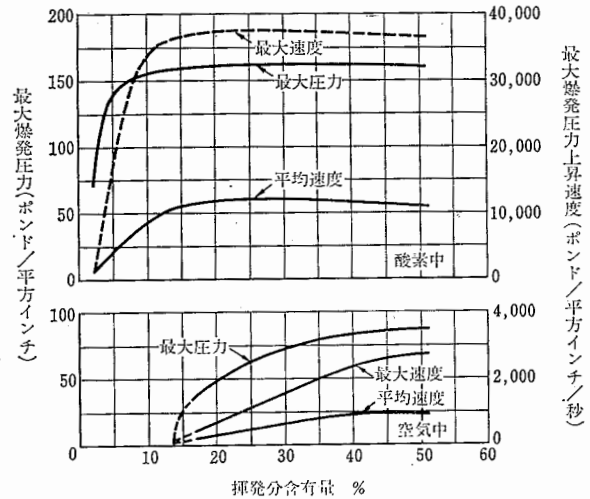


図 32 炭じんの爆発圧力, 爆発圧力上昇速度と揮発分の含有量の関係³²⁾

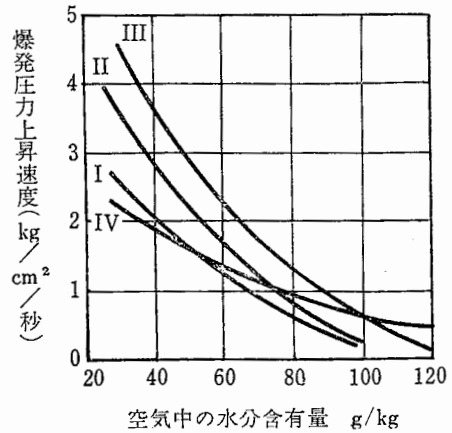


図 33 泥炭粉じんの爆発性と水分および濃度の関係³⁾

I : 432 g/m³ II : 1,080 g/m³
III : 2,160 g/m³ IV : 6,480 g/m³

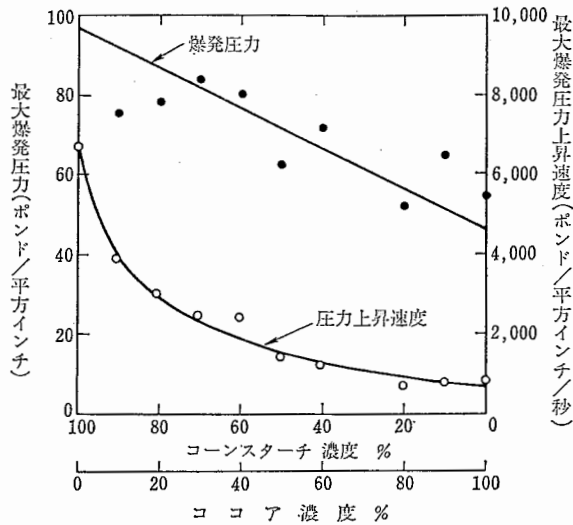


図 34 ココアとコーンスターチ混合粉じんの最大爆発圧力と最大圧力上昇速度⁴⁴⁾

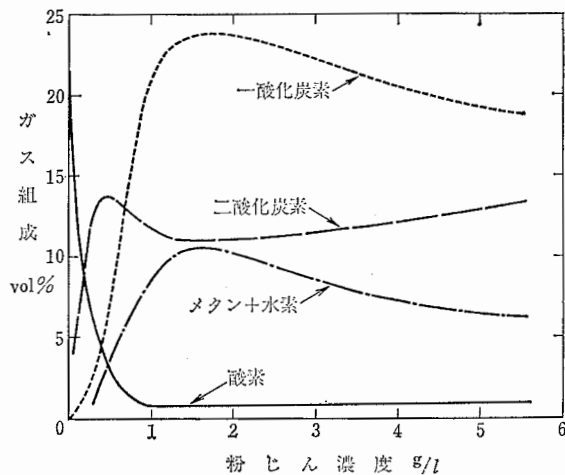


図 35 コーンスターチの燃焼跡ガス組成と濃度の関係⁴⁴⁾

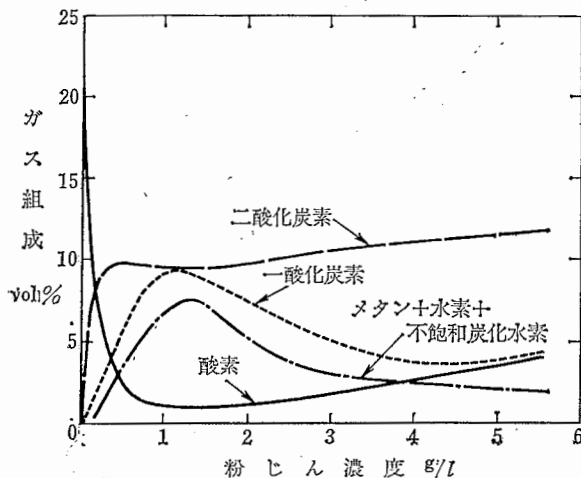


図 36 ジフェニルの燃焼跡ガス組成と濃度の関係⁴⁴⁾

化学量論組成より粉じん濃度が小さいときは、大抵の粉じんの跡ガスとしては二酸化炭素と水蒸気にすぎないが、濃度が大きいと非常に複雑になる。特に濃度の大きい組成で跡ガスに一酸化炭素の含有量の多いものは爆発威力が大きい。図 35⁴⁴⁾ はコーンスターチの跡ガス組成と粉じん濃度の関係を示したものであるが、図 36⁴⁴⁾ のジフェニルの場合と比較して、酸素の消費傾向や、一酸化炭素の含有量の差がはっきりしている。なお金属粉では、燃焼熱とその輻射効果が影響する。

8.6 不活性物質と限界酸素濃度

浮遊または堆積している粉じんのふんいき中の酸素濃度を他の不活性ガスの添加によって、減少せしめたり、不活性粉じんを添加することで、粉じんの爆発性を低下させることは、爆発防止対策面で応用範囲が広いので、よく知られていることである。限界酸素濃度や、爆発を抑制する不活性粉じん量は、個々の粉じんや、不活性物質の種類によって異なるほか、周囲の温度、揮発分の含有量、他の可燃性ガスの存在有無、粉じん濃度や粒度によって影響を受ける。

8.6.1 不活性粉体

炭酸カルシウム、珪藻土、シリカゲル、無機塩などの不活性の粉体は、粉じんに中に混入すると、比熱の大きさに、冷却効果をもたらすほか、浮遊性を抑制する効果も存在する。図 37²⁾ は炭酸カルシウムをコーンスターチに添加した場合の、爆発圧力、圧力上昇速度と混合比の関係を示したものである。また添加する不活

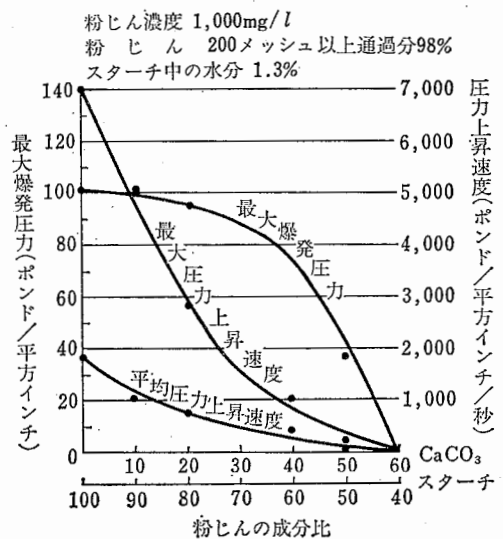


図 37 不活性粉じんの混入による爆発圧力および爆発圧力上昇速度に対する影響²⁾

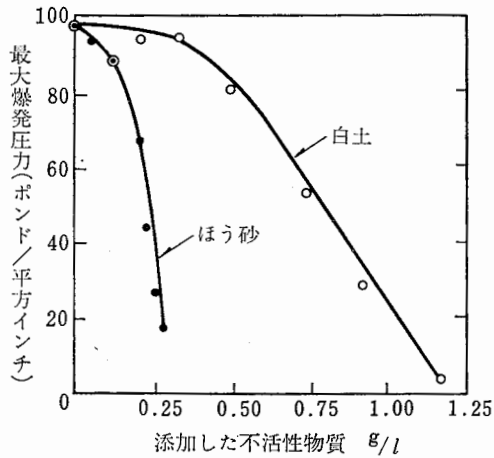


図 38 濃度 0.5 g/l のコンスターチの爆発圧力と添加した不活性粉じんの影響⁴⁴⁾

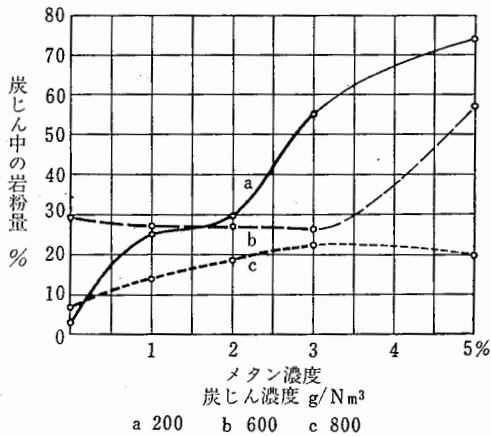


図 39 爆発を防止する岩粉量とメタンおよび炭じん濃度の関係³⁴⁾

性物質の添加量と種類別の爆発圧力の関係は図 38⁴⁴⁾のように示され、かなり種類により差がある。図 39³⁴⁾はふんいき中に可燃性ガス（メタン）が存在しているとき、炭じん爆発を防止すべき岩粉量とメタン濃度、炭じん濃度の関係を示したもので、炭じん量が多い場合は、メタン量と岩粉含有率はあまり大きな変化がないが、炭じん量の少ない場合は差が大きく、メタン量の増加につれて多量の岩粉を必要とする。

8.6.1 限界酸素濃度

可燃性ガスと同様に、爆発可能な限界酸素濃度が粉じんにも存在する。表 15¹⁷⁾は浮遊金属粉じんの限界酸素濃度を示したもので、金属の種類によっては、全く酸素の存在しないふんいきで発火するものがある。一般に酸素濃度が小さくなれば爆発圧力や圧力上昇速度は小さくなり、遂には爆発性を失うようになる。図 40¹³⁾はこれを示したものである。またふんいきの温

表 15 各種不活性ガス中における金属および金属ハイドライドの限界酸素濃度 (%)¹⁷⁾

金 属	限界酸素濃度 %			
	二酸化炭素	窒 素	ヘリウム	アルゴン
アルミニウム	3.0	9.0	10.0	—
マグネシウム	a	2.0b	3.0	—
アルミニウムマグネシウム合金 (50—50)	a	5.0	6.0	—
ダウメタル	a	3.0b	3.0	—
チタン	a	6.0b	7.0	4.0
鉛	10.0	10.0	—	—
ウラン	a	1.5	2.5	2.0
トリウム	a	2.5	5.0	2.0
ジルコニウム	a	3.5b	5.0	4.0
ウランハイドライド	0.5	2.5	4.0	2.0
トリウムハイドライド	6.0	5.0	5.0	4.0
ジルコニウムハイドライド	11.0	8.5	8.5	6.0
チタンハイドライド	13.5	10.0	8.5	8.0

a. 純二酸化炭素中でも発火する。
b. 高温下では純窒素中で発火する。

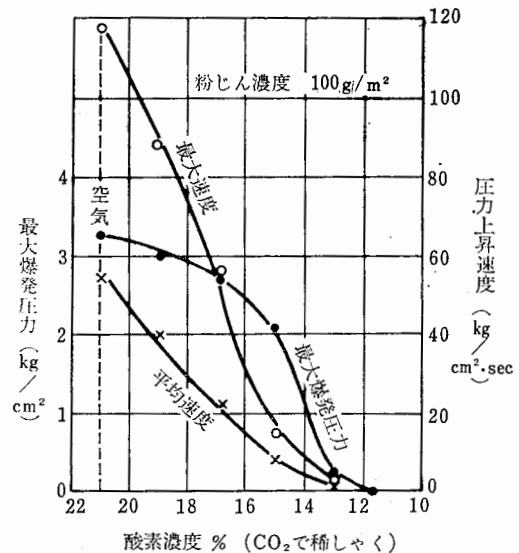


図 40 雰囲気中の酸素濃度と最大爆発圧力および圧力上昇速度の関係（酢酸セルロース成型パウダー、200 メッシュ以下）¹³⁾

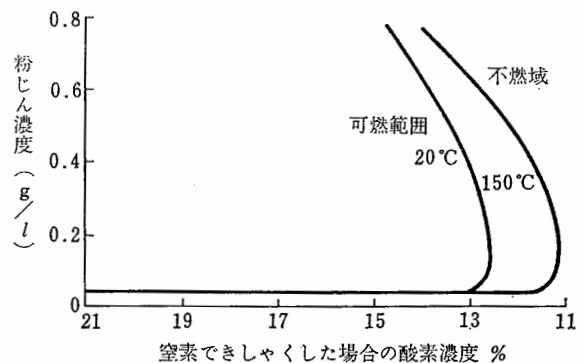


図 41 テレフタル酸粉じんの限界酸素濃度と粉じん濃度の関係の温度による影響

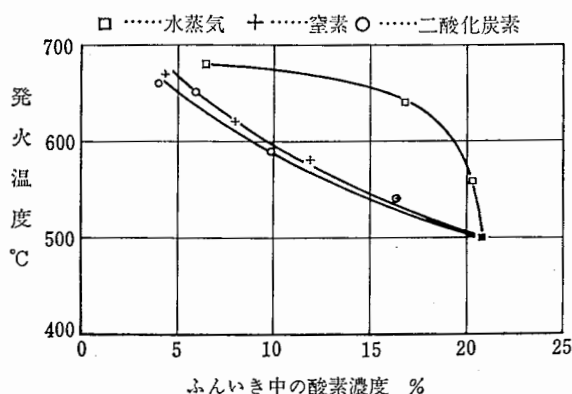


図 42 褐炭粉じんの発火温度と酸素濃度および不活性ガスの種類の関係⁴¹⁾

度が上昇すると限界酸素量は減少する。図 41³³⁾ はテレフタル酸粉じんの場合のこの関係を示したものである。また堆積粉じんの発火温度も酸素濃度によって変化し、不活性ガスの種類によって多少の差異があることが図 42⁴¹⁾ で示される。

9. 粉じんの爆発性試験法

粉じんの爆発性を測定する場合には、実験室的規模から、大規模な実大実験規模まで行なわれる。実験室的な試験において、粉じんの爆発特性の詳細にわたって測定され^{40) 48) 64)}、中規模試験では主として爆発抑制対策上に必要なデータを得るため、また大規模試験では試験坑道のような実際の炭坑で遭遇する可能性のある粉じん爆発や、火薬類による着火爆発危険性について実大的に行なわれている。

粉じんの実験室的な測定装置としては、粉じんを浮遊状態で爆発発火特性を調べるものと、堆積状態における着火性を調べるものがある。前者の場合、粉じんを吹き上げて散布する方法、粉じんを自然落下させる方法、粉じんを吹き下ろしたり、または強制的にじゅん還させる Dynamic な方法がある。いずれの方法によっても均一な濃度条件の粉じん雲を生成せしめることが必要であるが、実際にはかなり困難で、実験にかかる前の粉じんの調整が問題となる。

9.1 粉じん試料の前処理

米国鉱山局において実験された粉じんはすべて次のように処理されている⁴⁰⁾。

粉じんは No. 20 シーブ (表 8) 以下のものを一応

試料とし、そのうち No. 200 シーブ以下のもの 95% 以上含むものを実験標準試料としている。

前記標準試料はすべて (除石炭) 75°C、24 時間乾燥炉で乾燥する。但し石炭は 105°C、2 時間乾燥する。加熱で影響を受ける物質は常温で過塩素酸マグネシウムのデシケーターで乾燥を行ない、いずれも水分を 5% 以下にして、粉じんの分散性に影響のないようにしている。その他、形、大きさについてもあらかじめ測定し、炭素質物質に対しては工業分析が行われる。

9.2 粉じんの分散方法 (実験室的な方法)

9.2.1 吹き上げ方式

米国鉱山局では、粉じんの爆発下限濃度、最小発火エネルギーなどを測定するために図 43⁴⁰⁾ のような吹き上げ分散方式の Hartmann 装置を使用している。最大爆発圧力と圧力上昇速度を測定する場合は爆発筒を耐圧容器^{40) 47)}とする。

この方法は粉じんを散布する条件で測定値が変化するので、吹き上げに使用する空気の圧力や、容量および吹き上げ時間を粉じんの種類や粒度などによって変え、もっともシビアな条件で測定する必要がある。

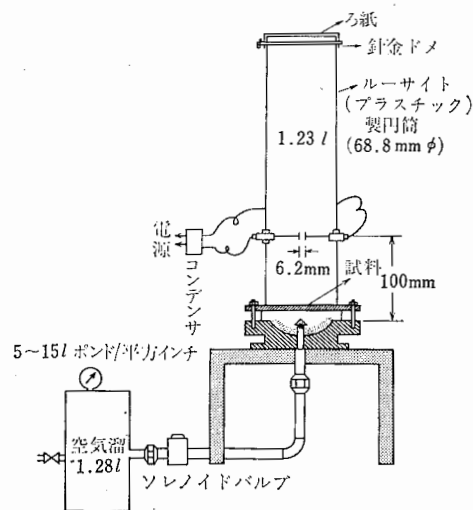


図 43 粉じん爆発性試験装置⁴⁰⁾ (吹き上げ式)

9.2.2 自然落下方式

英国の鉱山保安研究所その他で使用されているもので、図 44²⁰⁾ に示す長い爆発管 (透明なガラス管) の上方から粉じんを自然落下させ、下端において点火し、火炎の上方へ上る長さにより爆発性を判定する方法であって、粉じんの落下量を正確にコントロールで

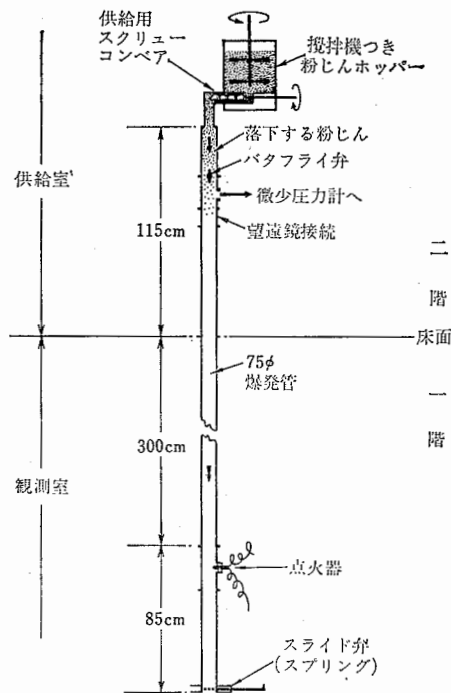


図 44 自然落下式爆発試験装置²²⁾

きれば、ある瞬間には管内の粉じん—空気系が非常に homogeneous な組成として得られるし、また爆発上限界濃度や、限界酸素濃度を求めることができる。爆発管が数米におよぶ場合は、火炎の長さを高速回転カメラで記録する。

9.2.3 吹き下し方式

粉じん雲の発火温度の測定に使用される Godbert-

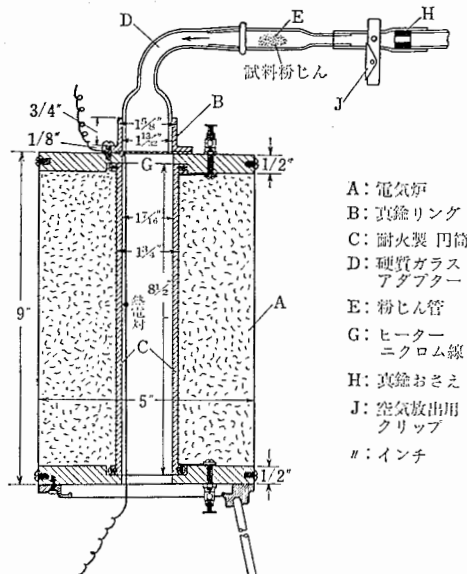


図 45 粉じん発火温度測定器 (Godbert-Greenwald)

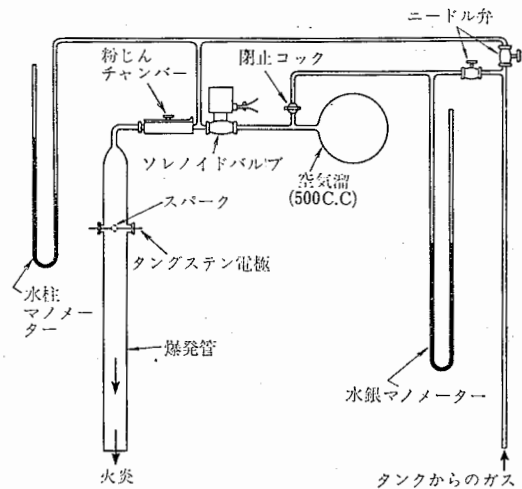


図 46 粉じんの相対的爆発性試験装置⁴⁶⁾
(種々のふんいきガスで粉じんを吹き下す)

Greenwald 炉 (図 45⁴⁰⁾) や限界酸素濃度を測定する装置 (図 46⁴⁰⁾) には粉じんを空気やその他のふんいきガスで爆発管を吹き下ろす方法がとられている。

9.2.4 その他の方式

容閉した大型の円筒容器 (40l) 内に粉じんを舞い

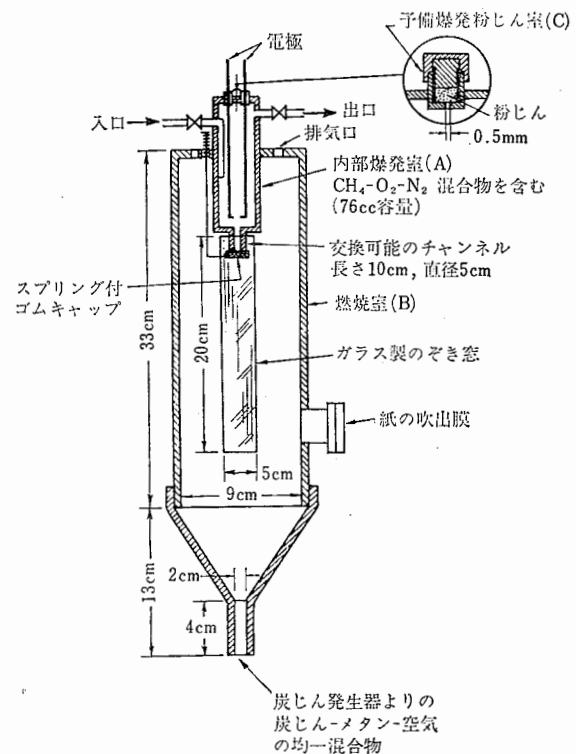


図 47 粉じん爆発実験装置⁴⁶⁾ (内部爆発から外部爆発へ)

立たせ、均一な粉じん雲を生成させ、これを爆発させて、爆発圧力—時間の関係を求める方法⁴⁵⁾、可燃ガス—空気混合物を着火させ、この着火火炎で外側の粉じん—ガス—空気混合物を発火させる方法 (図 47⁴⁶⁾)、爆発筒を減圧しておいてから空気によって粉じんを吹き込んで粉じん雲を作る方法²⁶⁾など、実験室的にはかなり多くの方法が知られており、各種の方法を比較検討した例もある⁴⁸⁾。

以上のべた装置は、装置そのものに特色があり、どれも一長一短があるので、標準がきまっているわけではないが、取扱いに簡単であることと、実験誤差に大きな問題がないことで、静的方法による米国鉱山局の方式が一般的とされる⁴⁸⁾。

9.3 中規模の試験装置

爆発ペントや爆発戸の設計や性能を決めるため、また二次爆発の危険性、火薬類の粉じん着火の危険性などを調査研究する目的で、実大に近い規模で実験が行われている^{49)~51)}。

この場合粉じんの散布には圧縮空気、電気雷管などを使用し、点火源として、電気スパーク、綿火薬、バーナーなどが用いられる⁵¹⁾。

9.4 炭坑の試験坑道

1886 年、英国のアルフット試験坑道が使用されたのが最初で、その後各国で試験坑道ができ、わが国でも碓井 (福岡県) に設置されている。最近では長さ 400m のものが完成され、実験に使用されている。英国、ソ連、ポーランド等の国では 700m とか 1km を超す長大なものも使用されているという。このような試験坑道では、爆発圧力の測定、火炎および圧力の伝播速度の測定、岩粉棚、散水などの効果、坑内火災の消火方法について実験が行なわれている。

10. 粉じんの爆発危険性と級別について

粉じんの危険性を何等かの形で表わし、これにより、危険等級別に分類して、安全対策の基礎とするやり方が各国において行なわれている。米国における爆発指数 (Index of Explosibility) の考え方は一つの例であって、これにより爆発の程度を四段階に分けて表 16¹⁵⁾ のように分類している。しかし表 17¹⁵⁾ に示すように代表的な粉じんであっても、指数で示される

表 16 爆発の程度と爆発指数の関係¹⁵⁾

爆発の程度	発火しやすさ	爆発の強さ	爆発指数
弱い爆発	<0.2	<0.5	<0.1
中位の爆発	0.2~1.0	0.5~1.0	0.1~1.0
強い爆発	1.0~5.0	1.0~2.0	1.0~10
きわめて強い	>5.0	>2.0	>10

表 17 粉じんの爆発性の難易¹⁵⁾

粉 じ ん	爆発指数	粉 じ ん	爆発指数
ナイロン	4.0~>10	ロジン	>10
酢酸セルローズ	3.2~>10	セラック	>10
ポリエチレン	2.4~>10	合成ゴム	7.4~>10
ポリプロピレン	<0.1~>10	セルロース	1.2~>10
レイヨン	0.1~0.2	コルク	2.0~9.7
リグニン	0.8~>10	木粉	5.0~>10
ゴム	0.3~>10	ピツパーグ炭	1.0

危険性には非常にはばがあり、単に物質の名称だけでは区別し難い。

爆発指数は米国鉱山局が相対的な粉じんの爆発性を示す数値として次のように算出した一つの表示方法である。^{14)~15) 18)}

これは米国ペンシルバニア州ピツパーグ市付近で産出する石炭粉じんを標準としている。すなわち、
発火しやすさ (ignition sensitivity)

$$= \frac{\text{炭 じ ん の (最小発火エネルギー)} \times (\text{爆発下限濃度}) \times (\text{発火温度})}{\text{試料粉じんの (最小発火エネルギー)} \times (\text{爆発下限濃度}) \times (\text{発火温度})}$$

爆発の激しさ (explosion severity)

$$= \frac{\text{試料粉じんの (最大圧力)} \times (\text{最大圧力上昇速度})}{\text{炭 じ ん の (最大圧力)} \times (\text{最大圧力上昇速度})}$$

爆発指数 (Index of explosibility)

$$= (\text{発火しやすさ}) \times (\text{爆発の激しさ})$$

のように示され、数字で粉じんの爆発危険性を比較するもので、実用的に使用されている。

また西独で爆発性をもつ粉じんを爆発指数 (Explosionskennziffer K_{ex}) 6 以上としている例がある⁵²⁾。この爆発指数は $\alpha 10^{-3} \text{atm}^2/\text{sec}^2$ で示される爆発圧力速度の最高と平均の積という概念であって、物質そのものの危険性を示しているのではなく、ある条件における粉じん雲の爆発の激しさを表わしているのである。

ソ連では粉じんの危険性を次の四段階に分けている⁵³⁾。

1 級 爆発下限濃度 15g/m^3 以下のもの

例：硫黄 (2.3g/m^3)、ナフタリン (2.5g/m^3)、

樹脂 (5.0 g/m³), エポナイト (7.6 g/m³),
ビート糖 (8.9 g/m³), 小麦粉 (10.1 g/m³),
ビート (10.1 g/m³)

2 級 爆発下限濃度 16~65 g/m³

例: アルミニウム (53.0 g/m³), ジャがいも澱粉
(40.3 g/m³), リグニン (30.2 g/m³), リネン
(16.7 g/m³), 乾草 (2.02~70.5 g/m³), 茶
(32.8 g/m³), 穀粉 (30.2~63.0 g/m³)

3 級 爆発下限濃度 >65 g/m³, 堆積状態の発火温
度が <250°C のもの

例: タバコの粉末

4 級 爆発下限濃度, >65 g/m³, 堆積状態の発火
温度が >250°C のもの

例: おが屑の粉末

以上のうちで, 1 級と 2 級の粉じんを危険な爆発性
粉じんと称し, 3 級と 4 級の粉じんを可燃性粉じんと
している。

英国では, 工場で取扱われる主要な粉じんの危険性
を 3 等級に級別して, 危険のある工程やプラントを紹介
している。これは表 18²⁾ に示す。この等級は次の
ように決められている。

1 級: 発火に必要な熱源は小さく, 直ちに発火し,
火炎が伝播する粉じん。

表 18-1 粉じんの種類と危険な工程²⁾

粉じんの種類	爆発危険のある工程, プラントおよび作業
アルミニウム	アルミ粉末 (風損) 製造工場: 集じん室, サイクロン, バグフィルター, コンベヤー, 建物 アルミ箔製造工場: 箔製造機ダクト, 集じん工程, 作業場 アルミ粉末 (粉碎) 製造工場: ボールミル 金属粉吹付作業: 集じん機と作業場
アルミニウムの スアテリン酸塩	粉碎機, バグフィルター, 温風乾燥器
研磨工程から発 生するキャラコ と金属粉	バグフィルター, (火災により一つの建物は非常 に損害を受けることがある)
牛の飼料(cattle cake)複合飼料, 綿実かす飼料, まぐさ, ひまわ りの種, 亜麻仁 粉	粉碎機, 破砕機, バケットエレベーター, サイ クロン, バグフィルター, 回転ドラム, 乾燥機, 貯 蔵ビン, サイロ, 作業室
石 炭	粉碎機, 選別機, サイクロン, ダクト, バグフィ ルター, (微粉炭製造工場)
コ ル ク	粉碎機, コンベヤー, 選別機, サイクロン, バグ フィルター, 作業場
糊 原 料	炉, 混合工場, 給湿機, 破砕機
フェロマンガ	粉碎機, 空気輸送および選別工場
レコード原料	粉碎機およびサイクロン

表 18-2

粉じんの種類	爆発危険のある工程, プラントおよび作業
マグネシウム	ハンマーミル, ボールミル, コンベヤー, 選別 機, サイクロン, および粉碎工程, 磨砕工程, 掻き取り工程と連結した集じん室 (不適当に設 置された洗滌機を含む)
麦 芽	蒸溜工場における粉碎機, バケットエレベータ ー, 醸造工場ではあまり大きな爆発が生じない
石 炭 酸 樹 脂	粉碎機, サイクロン, 集じん室
ポリスチレン	射出機, 温風乾燥機, サイクロン, バグフィル ター, 貯蔵ビン, 作業場
ゴ ム	タイヤ修理作業に使用する磨耗機に連結した粉 じん室と集じん室
澱 粉	澱粉製造工場: 破砕機, サイクロン, バグフィ ルター, バケット, エレベータ ー, 温風乾燥機, 砂糖菓子工場の澱粉まぶし工程: 作業場
木 粉	粉碎工場, サイクロン, 選別機, 貯蔵ビン, 等 で粉碎作業と連結したもの

あまりひどい損害や労働災害を起さない場合

粉じんの種類	爆発危険のある工程, プラントおよび作業
ア ジ ビ ン 酸	回転乾燥機, コンベヤー, 貯蔵ビン, 換気用ダ クト, 作業場
アルミニウムの ラウリル酸塩	温風乾燥機, サイクロン, バグフィルター
大 麦	粉碎機, サイクロン, バグフィルター, 薄片乾 燥機, および作業場
セルロイド	廻転鋸に取り付けた局所排気装置と連結したサ イクロン
酢 酸 纖 維 素	粉碎機, 篩分機, 配合工場およびモールド工場

表 18-3

粉じんの種類	爆発危険のある工程, プラントおよび作業
コ コ ア	破砕工場と連結したサイクロンおよび集じん室
デ リ ス の 根	集じん室とバグフィルター
染 料	粉碎および混合機
エ ポ ナ イ ト	粉碎工程と連結したサイクロンやバグフィルター
魚 粉	廻転乾燥機
小麦粉, 小麦の 選別	粉碎機, サイクロン, バグフィルター, 集じん 室, サイロ, 廻転乾燥機
落花生のフレーク	ローラーミル
とうもろこし	廻転乾燥機, サイロ, バケットエレベーター, ホッパー, サイクロン
無水フタル酸	コンデンサー, サイクロン, ダクト
ピ ッ チ	ピッチ粉碎機と連結したサイクロン, バケット エレベーター
炭化したぼろ	機械的シエーカー, 集じん室
鋳 屑	キルン, サイクロン, バケットエレベーター, 作業室
砂 糖	粉碎機, サイクロン, バグフィルター, 篩分機, 静電沈積器
尿素ホルマリ ン樹脂	噴霧乾燥工場および粉碎機

3. 粉じん発火によってあまり大きくない爆発を起すような物質類
ホップ(粕), ジャがいも, 穀物および加工品, からす麦, 黄鉄
鉱, ウイスキー蒸溜用の麦粉, 粉胡椒, 大豆粉, 乾燥した草, フ
ェノチアジン, 亜鉛, ガム(一種の松), 燐, ジルコニウム, ヘ
キサミン, ペンタサルファイド

2級：容易に発火するが、より大きな発火源を必要とする粉じん。

3級：実験では発火しない粉じん。

なお米国火災防止協会（N.F.P.A.）では、ガス、蒸気、粉じんを含め、爆発圧力上昇速度によって、次の3階級に分類している。⁵⁹⁾

A級……圧力上昇速度のゆるいもの。

銅、鉛、アントラセン、コーヒー、茶など。

B級……圧力上昇速度がやや早いもの。

マンガン、亜鉛、ポリエチレン、無水フタル酸など。

C級……圧力上昇速度が非常に早いもの

アルミニウム、マグネシウム、ジルコニウム、アセトン、エーテル、アセチレン、水素、ガソリンなど。

11. 予 防 と 対 策

粉じん爆発を防止するためには、粉じん雲の生成の防止、点火源の除去、不活性物質の添加が第一と考えられるが、粉じん雲の生成防止は粉じんを取扱う工程装置内では殆ど不可能であるうえ、プラントにおいて、不活性物質の添加や、不活性ガスパージは操業中においては殆ど不可能な場合が多い（経済性と品質のうえから）。したがって、工程装置内における粉じんの発火爆発という一次的な災害はある程度可能性を認めて、これによる二次的な大きな災害を防止するのが粉じん爆発対策の主眼点となっているので、以下簡単に予防と対策を述べる。

11.1 作業場の清掃と整備

作業場内には無用な粉じんの堆積や散乱をできるだけ避け、これを除去清掃する。定期的な除じんのために真空掃除機を活用すべきである。作業室内に堆積する粉じんの最大の許容厚みを対象粉じんの爆発下限濃度と、室内の高さ、及び堆積粉じんの密度から次のような関係式によって決定している例がある。⁵⁸⁾

$$k_s = \frac{U_z G_r \cdot H_R}{\rho_s \cdot 10^3} \quad (N)$$

ここで

k_s ：粉じんの最大許容厚さ（mm）

$U_z G_r$ ：粉じんの爆発下限濃度（g/m³）

H_R ：室の高さ（m）

11.2 建物の位置と構造

可燃性粉じんを取扱うプラントも、他のガス、液体類を使用するプラントと同様に、できるだけ建物を開放室にして、屋外露出型とすべきであり、独立させて他の危険性の少い建物と隔離することが望ましい。

建築物内にプラントを収容するのであれば、骨組みの周囲を不燃性の軽い材料（プラスチック板等）で覆う程度の放爆構造とする。

建物内には粉じんがたまりにくい構造であり、また直ぐに清掃できるものとする。そのため、天井や屋根の部分には裸出した梁を設けたり、壁に突出部や凹凸部を設けるようなことはなるべく避け、平滑にする。

建物の内容積は一単位でできるだけ小型とする。また階段は屋外にとりつけたり、通路とは切り離すが、扉は外開きとする。

建物の位置は、もし爆発が生じ、軽い屋根や壁を通して爆発火炎が外部へ放出されても、他の作業場や、建物に被害を及ぼさないような場所を選定する。

建物全体をすべて軽量化できない場合には、屋根等

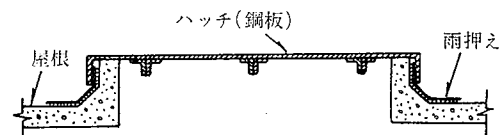


図 48 爆発放散型屋根ハッチ⁵⁴⁾（ハッチは気圧で放散する重量となっている）

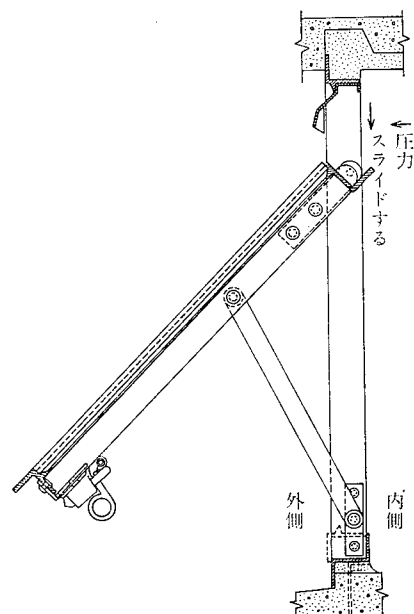


図 49 爆発放散用窓の一例

に図 48⁵⁴⁾ に示すような屋根ハッチを設けたり、側壁にヒンジパネルなどを設けるとよい¹⁰⁾。また図 49⁵⁴⁾ は側壁の窓をわずかな内部圧力で自動的に開放するようになっている例である。

11.3 工程及び装置

プラントはできるだけユニット別に分離し、爆発の波及を避けるわけであるが、粉じんを取り扱う工程をできれば湿式プロセスとする。また粉じんそのものが必要でないような場合は湿式のスクラバーを設けるのがよい。この場合スクラバーはできるだけ近くに設け、3m 以内とし²⁾、スラッジは常時取除が必要がある。

このような湿式プロセスは、水と反応する物質に対しては使用できないが、水の代りに揮発性の低い油類を使用することもできる。

可燃性粉じんを扱う装置類は完全密閉し、粉じんが外部漏洩するのを防止する。空気輸送をする配管、機器の内部圧力は大気圧よりも多小低めにするのが望ましい。

ただ配管のつなぎ目や機械などによって粉じんが漏洩するような箇所は、吸引や密閉を完全に行なう。

空気で排気する場合、ユニット毎に集じん機を使用するが、これらのユニットは、ダクトで再結合するようなことを避ける。

粉じんの出し入れする装置で、作業時に呼吸作用により粉じん発散する場合には、自動的に粉じんを掃除するような対策が必要である。

コンベヤやエレベーターの幅はできるだけせまくし、その囲部分の断面積を小さくする必要がある。

空気輸送方式の空気の取り入れには安全な場所からであって、逆火しても心配のないような場所とする。

物質を過剰にコンベヤに供給して溢れたり、過熱するおそれがある場合には、供給とコンベヤの運転をマイクロスイッチ等で連動させるとよい。

プラントをユニット別に分離し、不連続にすることが作業能率の上で問題があるため、これを連続式とする場合、コンベヤやバルブ類にチョークを設ける。ロータリーバルブ (図 50⁵⁴⁾) や、スクリーンの一部を欠いたチョーク (図 51²⁾) はこの目的に合致する。

以上述べた対策のほか、爆発ペント、爆発抑制装置、不活性ガス放出装置、酸素濃度感知器などの利用が考えられるが、これは以下に詳述する。なお、製粉

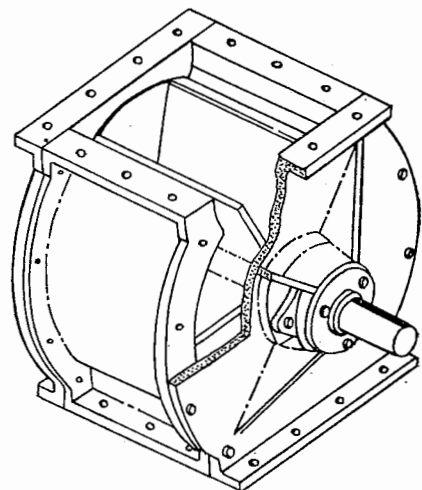


図 50 ロータリーバルブ⁵⁴⁾

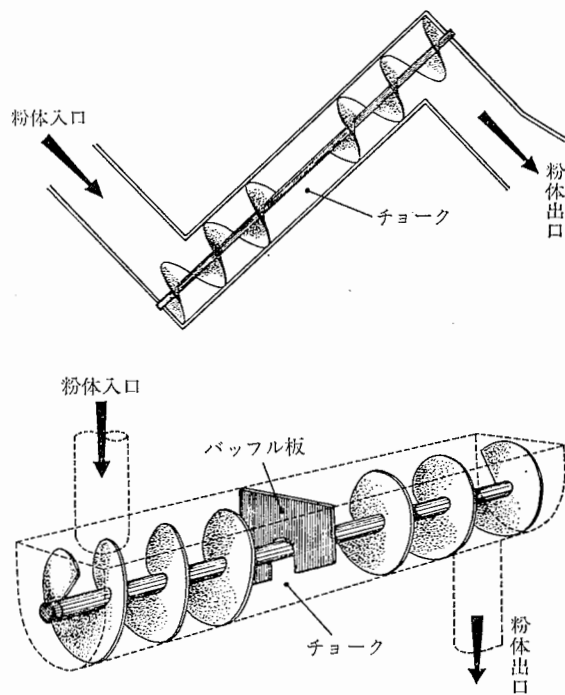


図 51 スクリューコンベヤにおけるチョークの一例²⁾

工場などに対する詳細な対策については各種の文献があるので⁵⁵⁻⁵⁷⁾、個々のプラントユニット、(たとえばサイロ、粉碎室など) については省略する。

11.4 爆発ペント (爆圧放散孔)

装置、建物、容器内における爆発が避けられない場合、爆発の被害を軽減するため、ある部分の強度を全体よりも小さくしておき、爆発圧力がせいぜい 11lb/in^2 (0.07kg/cm^2) 程度以内で破壊し¹⁰⁾、圧力上昇をしな

いうちに完全な大気中に火炎及び未燃の粉じん—空気混合物を放出する工夫が爆発ベントである。

爆発ベントはガス、蒸気の爆発、急激な化学反応による圧力の急上昇の際にも安全装置として有効であるが、その機構の設計や強度の計算は対象物質の燃焼特性、すなわち最大爆発圧力や最大爆圧上昇速度を考慮した圧力放散面積を算出せねばならない。

装置の形状や構造、材料も大きな関係がある。たとえば円筒形のダクトは平面で囲んだものよりも強度が大きいし、わん曲部は平板よりも丈夫である。また装置の種類により強度が異なるので、爆発ベントをとりつける装置はサイクロン、バグフィルター、サイロ、ビンなどのように空間が広い割合に強度が小さいものにはできるだけとりつけるようにする。

爆発ベントをつける場合に考慮すべきことは、爆発圧力上昇速度の大きさであって、あまり大きいものにはベント効果はなく、3300 psi/s (241 kg/cm²/秒) 以上の圧力上昇速度（最大爆発圧力 7 kg/cm² とした場合、これを平均速度とすると最大圧力に達するまでの時間は約 29 ミリ秒である）であると殆ど設計不可能である⁴⁷⁾。したがって爆発ベント設計の際には対象粉じんの爆発特性をよく知らねばならない。

爆発の生じた場合放散孔によって希望の低い圧力、大体 11 lb/in² (0.07 kg/cm²) 程度で放出させねばならない。この場合放出すべき容積 V_0 と放散孔の断面積 F との間に次のような関係がある。⁵⁸⁾

$$f = \frac{F}{V_0} = \frac{\dot{P} \sqrt{MT_0}}{P_0 \phi \alpha \sqrt{2gR}} \times \frac{P_\alpha \left(1 - \frac{P_u P_0}{P_\alpha P_{ex}}\right)}{P_{ex} - \frac{P_u (P_b + P_0)}{P_\alpha}} \quad (V)$$

(f … ベント比 m^2/m^3)

ただし

$$\phi = \sqrt{\frac{x}{x-1}} \times \sqrt{\left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{2/x} - \left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{x+1}{x}}} \quad (VI)$$

ここで F : 放散孔断面積

P_{ex} : 最大爆発圧力

V_0 : 爆発空間体積

P_b : ベントの設定圧力

M : 粉じん分子量

x : 放出媒体の断熱係数

T_0 : 平均排出温度

$\dot{P}$: 平均昇圧速度

T_α : 作業温度

P_0 : 放出圧力

P_α : 作業圧力

α : オリフィス係数

P_u : 開放直前の圧力

この近似式からベントの安全な放散圧力 P_0 とベント比 $f = \frac{F}{V_0}$ の関係は圧力上昇速度変数 $\dot{P} \sqrt{MT_0}$ の影響を受けて図 52⁵⁸⁾ のような曲線が得られる。

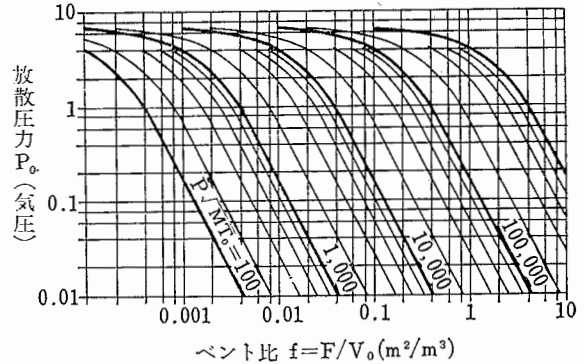


図 52 ガス、蒸気の種々の圧力上昇速度によるベント比と放散圧力の関係⁵⁸⁾

このグラフに示す他の変数は次のような値である。

T_α : 293°K (20°C) α : 0.8

P_u : 1 気圧(ゲージ) P_{ex} : 7 気圧(ゲージ)

P_b : 0 気圧(ゲージ) P_α : 0 気圧(ゲージ)

x : 1.4

なお $\dot{P}$, M , T_0 は物質によって個々に求めるわけであるが、トウモロコシでん粉の場合を例にとると、

$\dot{P}$ = 90 気圧/秒, M = 30 (仮定), 燃焼の最高温度 T_v は 2,000~3,000°K の間にあるが、放散孔部分を考慮すると、平均排出温度 T_0 = 1,600°K 程度と予想される。したがって $\dot{P} \sqrt{MT_0}$ = 2,000 となり、放出圧力 $P_0 \leq 0.3$ 気圧とすると図 52 からベント比を 0.15 m²/m³ にとる必要がある。

この関係はまた次のように表わせる。^{47) 61)}

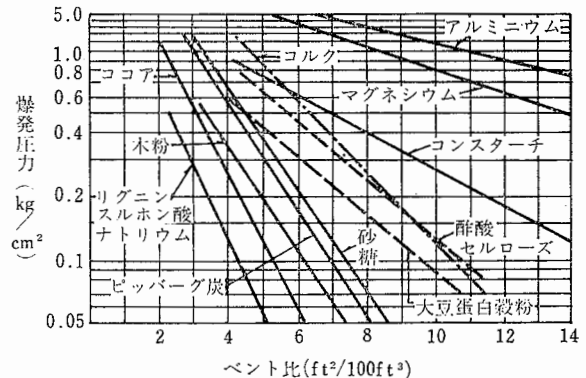


図 53 ベント比と爆発圧力の関係⁵¹⁾ (爆発容器 1 立方フィート)

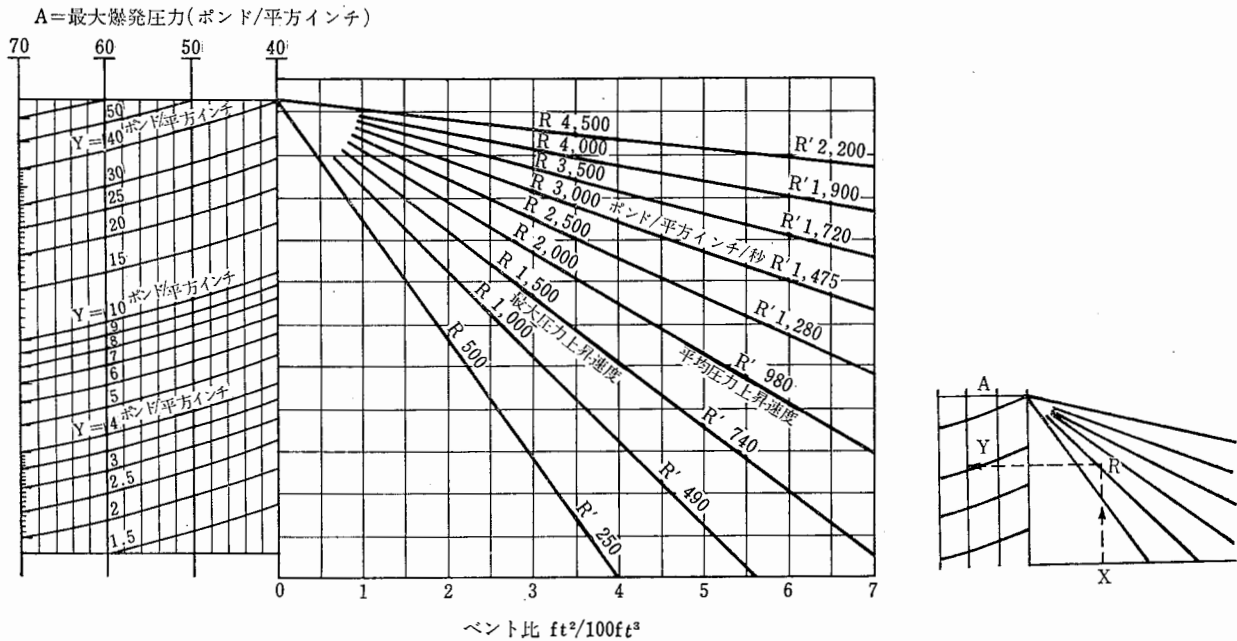


図 54 ベント比を求めるモノグラフの一例(A, R, R', Y が既知であると求められる)⁴⁷⁾

$$P_0 = \frac{P_{ex}}{10^{kf}} \quad \text{すなわち} \quad P_0 = P_{ex} e^{-kf}$$

ここで k はベント比に対する放出圧力関係直線の傾斜を示すもので物質によって異なる。

この場合 P_0 : kg/cm², P_{ex} : kg/cm², f : ft²/100ft³ で示される。図 53⁵¹⁾ にはこの関係を各種の粉じんについて示したものである。

また最大圧力上昇速度と平均圧力上昇速度とも密接な関係があり、ベント比を求める場合図 54⁴⁷⁾ のようなモノグラフを用いて、最大爆発圧力 A 、放出圧力

P_0 、最大圧力上昇速度 R 、平均圧力上昇速度 R' が実験により既知であれば、 P_0 に対応するベント比を求めることが可能である。

ベントに放散管(ダクト)をつけた場合、ダクトの長さ L により放出圧 P_0 が変化する。図 55⁵¹⁾ はこの関係を示したもので、ダクトが長くなると圧力も高くなる。またダクトの直径が小さいほど爆発圧力が増大し、長さが 15ft 以上になると、ベントが開放されていようと、ダイヤフラムを付けようと、圧力に差が無くなる⁵¹⁾。

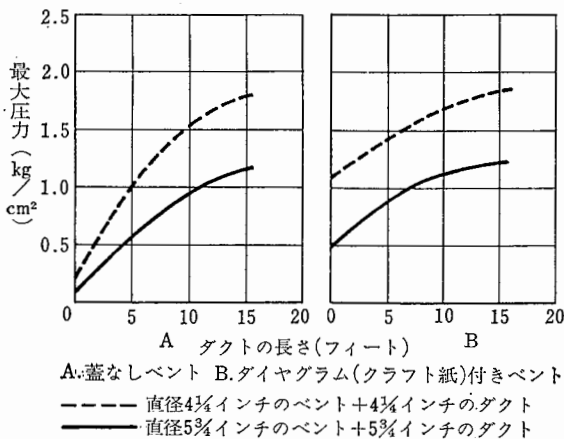


図 55 ダクトの長さの爆発圧力に与える影響
(爆発容器 1 立方フィート、コンスターチ)

11.5 爆発ベント等の装置における適用

爆発ベントに使用する破裂板は、耐水紙、布、ゴム引きアスベスト、ポリセンのシート、セロファン、金属のフویل、石膏ボード、ゴムダイヤフラム等が適当である。これらの破裂板は放散しやすくするためにナイフカッターをつけたり、雨水などによる腐蝕、劣化を防止するためにウェザーフードをつける。また操業時の破損を防ぐため、破裂板の内側(外側は不可)に格子網を張って保護する。図 56²⁾ はこの一例を示したものである。

ベントの取付け位置は、大容量の装置、長い部分などには平均に数多く分散して取りつけるべきであって、図 57⁵⁹⁾、58⁵⁹⁾、などがその例である。なおベン

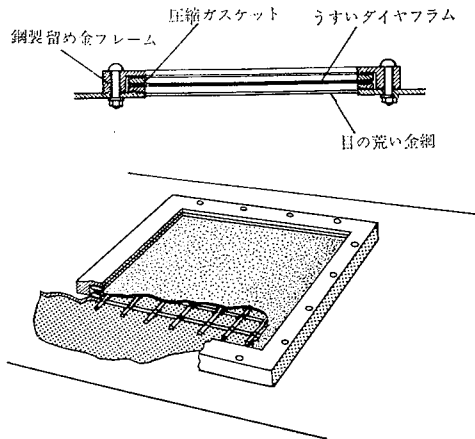


図 56 破裂板の構造の一例²⁾

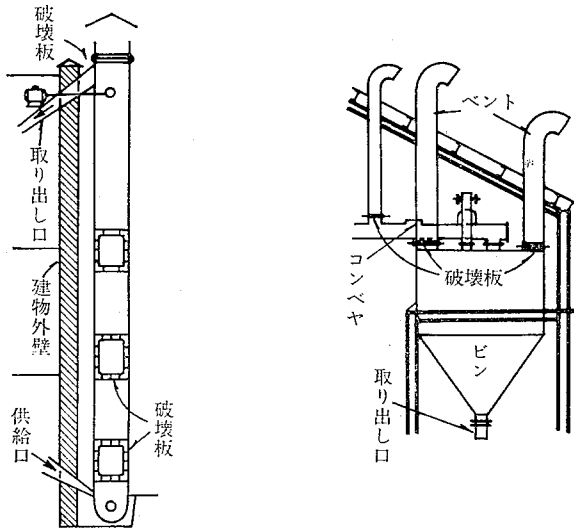


図 57 爆発ベントを設けたバケットエレベーター

図 58 爆発ベントを設けた貯槽

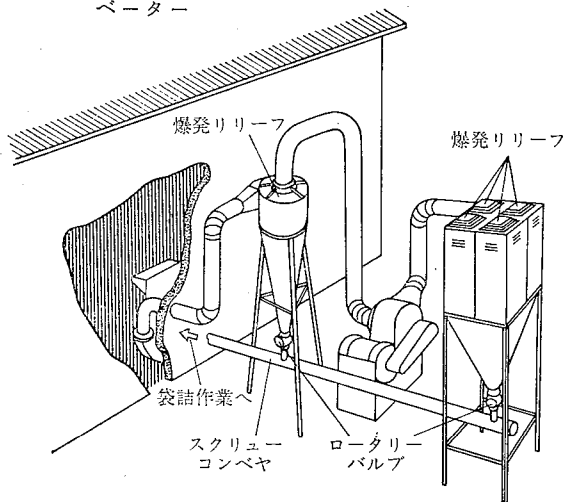


図 59 集じん装置の安全設計の一例²⁾

トにつける放出用ダクトは十分な強度を持ち、真直ぐであることが必要である。

図 59²⁾ は一つのユニットにおける、爆発リリーフや、ロータリーバルブの設置例である。

また米国火災防止協会 (NFPA) は次の表 19 に示すような建物や装置の大きさおよび強度にしたがった推奨ベント比を定めている。

表 19 装置および建物に対する推奨ベント比 (N. F. P. A.)

装置および建物の種別	推奨ベント比 (ft^2/ft^3)
1. 1,000 立方フィート以下で軽量構造の機械および炉	1/10~1/30
2. 1,000 立方フィート以下で強い圧力に耐える構造の機械および炉	1/30
3. 1,000~25,000 立方フィートのビン、サイロ、部屋、貯蔵タンクなど (この場合、ベントに対する爆発発生点の相対的位置および爆発の起りうる容積を考慮しなければならない)	1/30~1/50
4. 25,000 立方フィート以上の部屋または建物で危険な装置がその小部分を占めるとき	
1) 重量・鉄筋コンクリート壁	1/80
2) 軽量・鉄筋コンクリート、煉瓦または木造	1/60~1/80
3) 簡易組立パネルなどの軽量構造	1/50~1/60
5. 25,000 立方フィート以上の大きな部屋または建物で危険な装置がその大部分を占めるとき	1/10~1/50

11.6 爆発抑制設備の利用

大抵の多くのガスや粉じんの爆発では、発火してから最大爆発圧力に達するまでの時間は 40 ミリ秒より小さいことはないで、爆発の抑制、圧力放散、不活性ガスの導入や分離、自動的なプラントの運転停止などの措置を、すべて自動的に行うことができる。特に粉じんの場合はその時間が長いので、これらの対策が有効であるが、中でも爆発抑制設備の活用は、爆発ベントなどと共用することによって効果的に爆発被害を最小限に食い止めることができる^{2) 60)~62)}。

爆発抑制装置 (サプレッサー) で、その形式の最も簡単なものは爆発感知部、増幅部、いくつかのサプレ

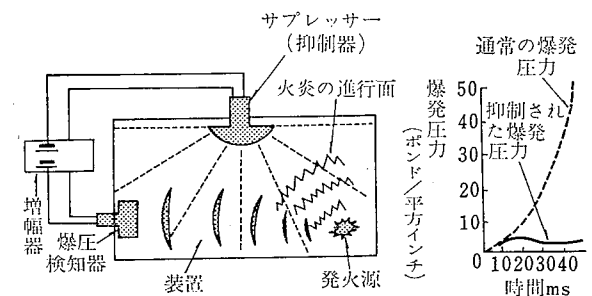


図 60 爆発圧力抑制装置の一例⁶¹⁾

ッサーからなっている。図 60⁶¹⁾ はその機構を示すものであって、わずかな圧力の急上昇で爆発を感知し、これによる信号を増幅部で拡大し、サブレッサーを働かして、消火剤を放出させる。この作動時間は感知後 1 ミリ秒以内で行なわれるため、わずかな爆発圧力上昇で抑圧されて、装置には何の被害も与えない。このような機構は自動ベント破壊装置（電管つきのベント）にも応用できて、急速に爆圧を放散することができるし、また前者と組合わせて取り付けすることもできる。（図 61²⁾）

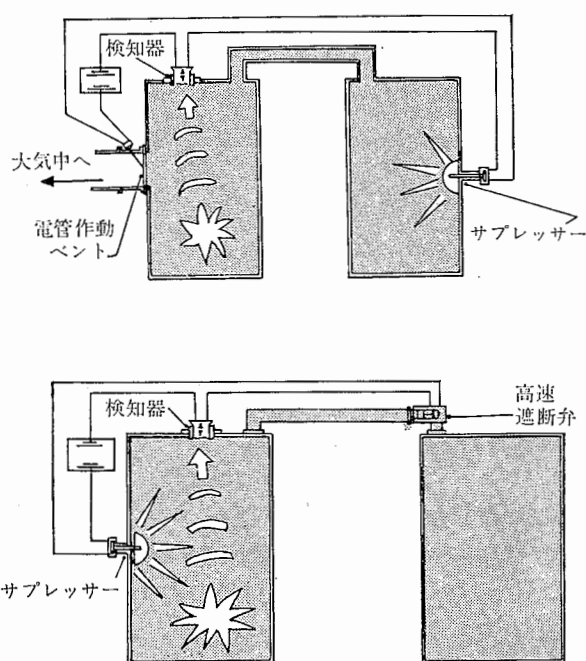


図 61 サブレッサーとベント遮断弁の組合せた一例²⁾

これを適用する場合には、感知部と、サブレッサーの位置関係、装置の構造や取付場所の選定、その数量などを検討せねばならない。ただ電子管式的方式を使用するため、費用の点で多少高価になる不利益はある。

11.7 不活性物質の利用

前記 8, 6 で述べたように、粉じんの爆発性は粉じんに不活性粉じんが混入したり、ふんいきの酸素濃度を不活性ガスで稀釈すると、小さくなり、失われてしまうので、爆発防止対策に利用することができる。特に発火危険の大きい装置、機器で密閉状態で可燃性粉体を取り扱う場合にはこれらの利用は推奨できる

し、また、二次、三次の爆発防止のために建物内の必要な場所に不活性粉体を置くことが望ましいが、化学工業等で粉じん自体の品質が問題となったり、不活性ガスの使用量が非常に大量を要するために経済的に不利となる場合は、常時、これらを使用することは不可能であって、前記 11. 6 のように緊急時に放出する以外には、その使用用途が限られる。したがって、大型の貯蔵タンクや、不活性ガスを循環再使用できる装置に限定されるであろう。

この場合、炭酸ガス計や酸素計などのガス分析装置を併用し、常にふんいきが限界酸素濃度以下であることを確認するとともに、万一危険状態に近付いたときには警報を発し、同時に工程の運転中止や、不活性ガスの追加投入などを自動的に行うような機構になっていることが望ましい。

不活性粉体の利用は炭鉱では岩粉撒布や岩粉棚の設置として大いに利用されており、その価値も大きい。一般の製造工業では常時これを使用することに困難な問題があるため、実用化には至っていない。

11.8 発火源の除去

ある種の粉じん雲は 190℃ というような低温度の発火源でも着火するし、5 ミリジュール以下の電気スパークで発火するが、大きな火災や、高熱表面というものは電気スパークのような小さな点の発火源よりも、粉じん爆発には危険性が大きい。しかしながら、すべての発火源となるものは危険な粉じんを使用する建物や地域から除去せねばならない。

11.8.1 直火と高熱物体

危険な粉じんを扱う場所では、燃焼装置や加熱装置で直火や電気ヒーターなどの熱源を使用するものは非常に危険であるからできるだけ置かないようにして、隔離したり、できれば加熱源に蒸気や間接加熱法を使用すべきであって、粉じんが蓄積するような場所では作業用の火気のほか、その他の火気や喫煙は絶対に避けねばならぬ。

11.8.2 溶接作業

多くの粉じん爆発は電気やガスの溶接作業から生じているので、プラントが運転停止し、プラントの内外で粉じんの蓄積を完全に取除いた状態でなければ、溶接断作業のように高熱の着火源を伴う作業を行ってはいないのである。

11.8.3 自然発火

多くの粉じんは貯蔵しているうちに自然発熱を起しやすいものであるから、この熱が放散されないと、発火温度に達してしまう。自然発火の結果は火災をひきおこすが、これが更に粉じん爆発の原因となり易い。特に粉じんの中で穀粉、魚粉、ゴム粉のような有機物類で、しかも不飽和油で汚染されている場合はその傾向がある。また金属粉は、微粉状態で酸素にふれていないと、ふれたときに自然発熱する傾向がある。

したがってそのような金属粉を高温で扱うような工程では、それを貯蔵したり、袋詰めする前に冷却しておく必要がある。

自然発熱を起すような粉じんを貯蔵するサイロやその他のプラントでは、温度記録計を備えつける必要があるし、もしその温度が上昇していることが分ったならば、粉じんから熱を放散するように、プロセスを再循環させる必要がある。貯蔵状態における湿度も影響するから、物質によっては、湿度のあまりにも大きい場合、または小さい場合をできるだけ避けるようにする。これは静電気の発生とも関係があるわけである。金属粉を不活性ガス中で扱う場合には、わずかの酸素を混入して、粒子表面に酸化被膜をつくることで発熱を防止できる。

11.8.4 衝撃摩擦火花

粉砕機や磨砕機で、これに供給する原料中に異物が存在していると爆発の原因となるし、また実例も数多い。

金属片の混入は、原料をこのような装置に供給する工程の適切な位置に磁力（マグネット）分離機をつけて防止せねばならない。また、原料がペースト状であるとか、マグネットで除去するにはあまりにも大きい金属片の場合には、マグネットによる金属探知機を取りつけて、自動的に工程の運転を停止し、手で除去することが必要である。電磁石を利用する場合に、通電が遮断されたときは、原料を、他へ落すことも自動的に連動できるような対策が望ましい。

金属片、非金属片を問わず、すべての異物は空気式分離機を利用して除去することが可能である。これは物質間の密度の差を利用したものである。図 62²⁾ はマグネット分離機の一例を、また図 63²⁾ は空気式分離機の一例を示した。

機械装置自身も発火源となるが、ベアリングの摩擦は過熱すると粉じんを発火させるほどになるので、十分な注油、点検、清掃が必要である。したがって過熱

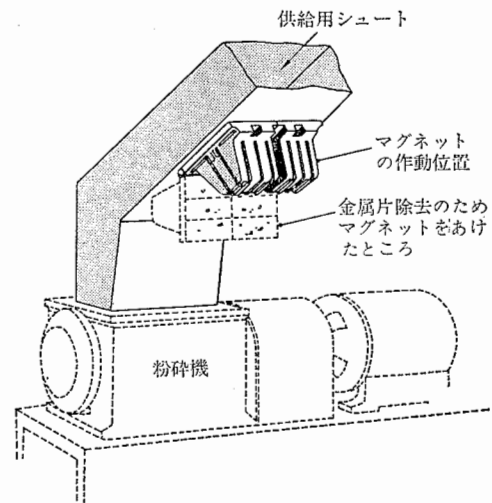


図 62 粉砕機への供給口にとりつけたマグネット式異物除去装置の一例²⁾

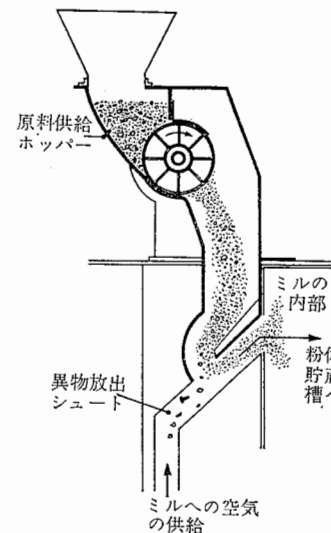


図 63 空気分離式異物除去器の一例²⁾

するおそれのあるベアリングはできれば粉じんを扱う部屋の外に出すようにする。

鋼製の工具を点検や修理作業の際に使用すると、打撃の火花が発火源となるので、危険な粉じんが存在するような場所では非鉄金属製の無火花工具を使用したり、鉋なしの安全靴の着用、火花の出ない床の設計などの対策が必要である。

11.8.5 電気設備

スイッチの火花、ヒューズの熔断、配線や電気設備の破損や不良は粉じん爆発の発火源となる。また機器の表面に粉じんが堆積すると、表面温度が過度に上昇して発火に至ることがある。

電気設備を設ける場合、それは粉じん雲に曝露されないような場所かプラントの外に設けるのが望ましい。

スイッチは作業室から離れた制御室に設け、照明はプラント外で粉じんが洩れないような窓越しに照らすことができるような位置にとりつける。これは固定燈であって、粉じんが存在するサイロ、ビン、ホッパーなどでは移動灯は使用しない。もし危険場所に設けなければならない場合には粉じん防爆構造や内圧防爆構造の機器を使用せねばならない。これらの機器は温度上昇の限度が保証されているものでなければならない。

粉じん防爆の電気設備については、米国では NEC, 500 Hazardous Location Class II, Class III に基準が定められており、また西独では VDE 0165 に規定されている。

わが国では労働省産業安全研究所技術指針（粉じん防爆—1961）が発表され、その基準を定めている。また法規としては労働省告示第 42 号「電気機械器具防爆構造規格」により定められている。炭じんについては鉱山関係の法規に定められている。したがって以上に述べた多くの規定を参考にとよい。

11.8.6 静電気

粉じんを取扱うプラントでは静電気の発生蓄積をできるだけ減らすような注意が必要である。粉じんが流動する場合、装置や機器との摩擦、はく離、粉じん同志の摩擦、衝突などによって粒子自体が電荷を持つ。したがってこれらの電荷が蓄積せぬように、できるだけ早く逃してやる必要がある。これは粉じん濃度をできるだけ少くすることや、空気中の湿度、粉じん中の水分を或る程度増加させること、また、電導性の材料からできている機器や構造物、建物を有効に接地してやり定期的にその接地抵抗を測定することによりかなり静電気の蓄積を防止できる。

非電導性の材料、たとえばコンベヤベルトやゴム製のスリーブなどはできれば電導性の材料に取り換えることが望ましい。

大量の粉じんを堆積すると非常に長期間、静電気がそのまま蓄積されていることがあり、粉じんの電気的抵抗が $10^7 \sim 10^8 \Omega/\text{cm}^2$ にも達するとその傾向が大きいので、工程を乾燥し過ぎないように注意せねばならない。

静電気の火花放電は、(a) 誘導電荷による放電、

(b) コロナまたはブラシ・コロナによる放電、(c) コロナを経由する火花放電、(d) 外部電界があるときの火花放電などによることが多いが、特に、接地側に突起物があると、(b)、(c) の現象が生じ易い。したがって突起物の先端の曲率半径をできるだけ小さく (0.005 cm 程度) するか、全く突起物を除いてしまうことが必要である²⁸⁾。

また粉じん雲の発生する空間を接地された金属板や金網で分割して、空間電荷電界を低下させることも必要である。

なお小麦粉の粉じん爆発の原因究明のため小麦粉の静電帯電に関しての測定^{65)~67)} 報告もあるので参考にするとよい。

11.9 消火対策

粉じん火災の消火で最も問題となる点は、消火のために他の未燃粉じんを吹き上げて、逆に二次、三次の粉じん爆発を誘発する可能性があることである。

特に棒状注水や、ジェット式で消火剤を吹きつけることは避けねばならない。

最も適切な方法は各プラントの天井や構造物の適当な位置に適当なスプリンクラーヘッドを設け、噴霧注水をするのが望ましい。この場合、スプリンクラーヘッドのあまりにも近くに粉体の堆積や原料、製品の積上げによって、機能を低下させるようなことはしないようにする必要がある。

消火剤としては、その適用は粉じんの種類によって異なる。金属粉に対しては水は使用できないし、その他の物質でも水と反応するものには使用できない。このようなときは乾燥砂や、グラファイト、タルクなどの不活性粉体の活用が望ましい。粉末消火剤や、泡消火剤、二酸化炭素、揮発性液体などの消火剤は金属粉に対しては適切ではない。

携帯用消火器を使用する場合も前記のような注意が必要である。また粉末消火剤は長い柄のついたスコップで手操作によって使用することが望ましい。

粉体貯蔵タンクや装置、機械などの内部に火災が発生した場合、運転中に内容物を取り出すことは危険であるから、完全に水浸しにしてからでなくてはならない。

その他粉じんによる火災の特殊な危険性については日常十分な教育と訓練を行っておくことが大切である。

11.10 参 考

1963年5月6日、午後1時3分、カナダのセントローレンス精糖工場で大きな粉じん爆発が生じ、工場全体に大きな損害を生じた。

この爆発の原因についての探究や安全上の問題の討議、工場の改善等に関する詳細な報告が発表されている。詳細は文献を参考にするとよいので、ここでは概略を説明する。

図 64⁶³⁾ は精糖工場の平面図(上)、側面図(下左)、断面図(下右)であって、この図で

X：4階の目撃者の位置
Y：3階の目撃者の位置

①、②、③：爆発の生じたと思われる個所を示している。

なお左下の図によれば、工程の流れは4基の幅45cmのスクリーコンベヤAから、篩分機を経てバケットエレベーターBへ、さらに各750トンの容量を持つ10基の製品ビンの上に取付けた供給用コンベヤベルトCに送られ、ビンに落ち、次にコンベヤベルトD(4基)にビンから放出され、これが再びAのスクリーコンベヤに還る。3階の包装機へは、Aスクリーコンベヤから重力で供給される。この作業は3交替制で、そのうち2回まで操業され、3回目のビンに溜まった砂糖粉は翌日まで置

かれる。

次に右下の図で、粉体調整プラントは、各2,600立方フィートの10基のビン(強化ポリエステル加工ガラス繊維製)があり、供給用のスクリーコンベヤ、排出用のベルトコンベヤがついている。

爆発の原因は目撃者の証言と詳細な装置部分の調査

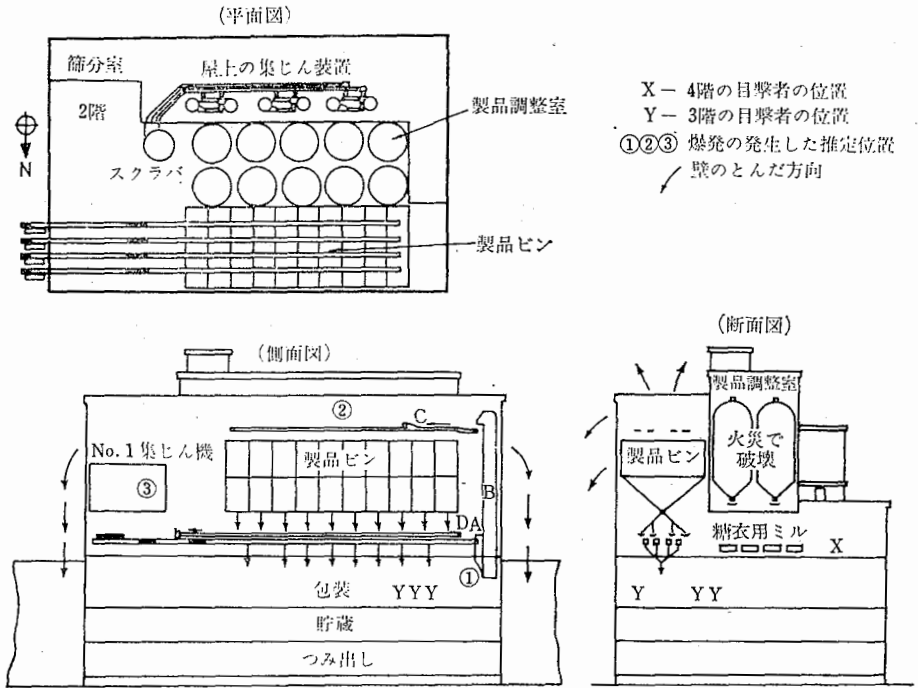


図 64 爆発した砂糖工場の一例⁶³⁾

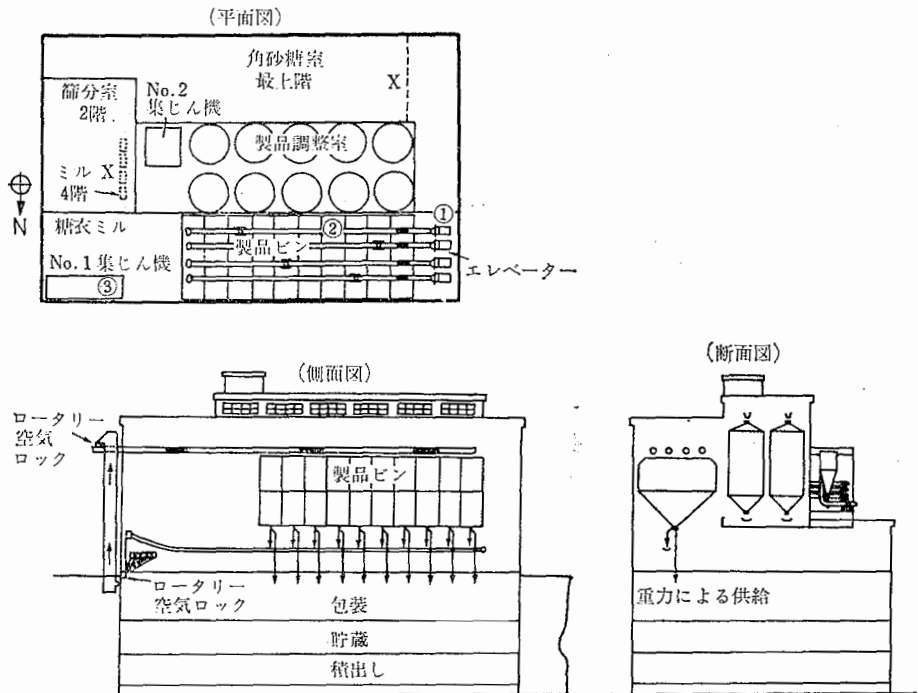


図 65 爆発後改善した砂糖工場の一例⁶³⁾

から、ビンからの砂糖の供給と包装機の包装能力の間に、均衡が破れ、包装機が空運転したために、砂糖粉の供給を増大せしめたところ、スクリーコンベヤや、バケットエレベータに過負荷がかかり、No.1 スクリーコンベヤのカップリングボルトを切断して、火花が生じ、これが発火源となったものと考えられた。

したがって比較的小さい粉じん爆発がエレベーターで生じ、これがビンの上の爆発へと伝播し、またダクトを通して集じん機を爆発させ、建物を吹飛ばす結果となった。

この爆発の教訓から次のような防爆を考慮した再建案が生れた。図 65⁶³⁾がこれを示しているのので、図 64 と比較対照するとよい。

- (1) 4 階以上のすべての電気用開閉器は防爆構造とするか、安全が認められた制御室に設置する。
- (2) 集じんは各々が独立した 6 区画に分け、ファンとサイクロンをそれぞれ単独に設備し、しかもこれらは屋根上に置く。またサイクロンからの排気は湿式の除じん機(スクラバー)へ入る。
- (3) 3 基のバケットエレベーターは除去し、4 基の回遊式エレベーターは建物の外側に設置する。建物の中に残された 1 基のエレベーターは爆発ベントを設け、その放散孔は屋根の上に出す。
- (4) ベルトコンベヤのかわりに 45cm のスクリーコンベヤをビンの上に設置し、ビンからの排出は包装機へ直接重力で行ない、エレベーターに過負荷のかからぬようにする。
- (5) エレベーターの供給と排出の個所はロータリーバルブで切断する。
- (6) 建物には放爆用サッシュを $1\text{ft}^2/50\text{ft}^3$ の割合で設ける。
- (7) 4 階上部の内部隔壁を取り去って密閉場所を無くする。

- (8) 砂糖を 1 つの建物から他の建物へ移送する場所では、運搬装置と通路はともに建物間に爆発が伝播しないように設計する。

以上のような改善計画は、貴重な爆発の教訓から得られたものであるが、爆発が生ずる前にこのような対策を計画することにより、大きな被害は未然に防止できる筈であるから、これは防爆対策上の参考となるであろう。

12. む す び

以上粉じんの爆発危険性と爆発防止対策の概略について述べたが、一般製造工業において取り扱われている粉体の種類も多く、その危険性も十分知られていないものがあるので、実際に対象となる粉じん個々の場合について検討せねば粉じん爆発を防止することはできない。したがって文献の調査、実験を行って危険性を確認すると同時に、作業上、立地上、経済上の条件を考慮して、実際に最も適当と思われる対策を確立する必要があるが、本書がこれに対し何等かの参考となれば幸である。

なお以下に示す参考文献により詳細を知るならばなお一層の効果が得られるであろうし、末尾の表 20 および表 21 に示す各種粉じんの爆発危険性数値表も役立つと思われる。表 20 に示すものは米国鉱山局の報告から抜粋したものであり、表 21 は西ドイツの材料試験所で測定または計算されたもので、実験方法も異なっているので両者の間にかなりの相違があり比較対照されるとよい。ただこの表に示されたデータは常に固定した数値ではないので、そのままのみにするべきでなく、相対的な参考値として利用されることを希望する次第である。

当所においても逐次粉じんの実験装置を整え、各種の危険性データの把握に努力しているので、今後大いに活用されることを併せて希望したい。

表 20 各種粉じんの爆発特性

粉 じ ん の 種 類	a) 浮遊粉じんの発火点 ℃		最小点火 エネルギー mj	爆発下限 界 g/m ³	最大爆発 圧力 c) kg/cm ²	圧力上昇速度 d) kg/cm ² ・sec		浮遊粉じんの 電気スパー クによる 発火を防止 するための 限界酸素濃 度 e) %	粉じん爆発 防止のため の最大許容 酸素濃度 e) f) %
	浮 遊 状	層 状				平 均	最 大		
(金 属)									
ジ ル コ ニ ウ ム	室 温		15	40	2.9	102	280	b')	b)
マ グ ネ シ ウ ム	520		80	20	5.0	308	333	b')	—
ア ル ミ ニ ウ ム	645		20	35	6.2	151	399	3	—
マグネシウム—アルミニウム合金 (50—50)	535		80	50	4.3	158	210	b')	—
ダ ウ メ タ ル	430		80	20	3.9	112	179	b')	—
チ タ ン	460		120	45	3.1	53	77	b')	—
シ リ コ ン	775		900	160	4.3	32	84	15	—
フ ェ ロ チ タ ン	370		80	140	2.4	42	98	13	—
フ ェ ロ シ リ コ ン	860		400	425	2.5	14	21	19	—
鉄	316		<100	120	2.5	16	30	10	—
マ ン ガ ン	450		120	210	1.8	14	21	15	—
亜 鉛	680		900	500	0.9	11	21	10	—
バ ナ ジ ウ ム	500		60	220	2.4	14	21	13	—
ア ン チ モ ン	416		—	420	1.4	6	55	16	—
(農 産 物)									
コ ン ス タ ー チ	470		40	45	5.0	74	151	—	—
大 豆	560		100	40	4.6	56	172	17	—
小 麦	470		160	60	4.1	—	—	—	—
ビ ー ナ ツ 穀	570		370	85	2.9	14	245	—	—
砂 糖	410		—	19	3.9	—	—	—	—
(そ の 他)									
石 炭 (れ き せ い)	610		40	35	3.2	25	56	16	—
コ ー ル タ ー ル ・ ピ ッ チ	—		80	80	3.8	25	45	15	—
石 け ん	430		60	45	4.2	46	91	—	—
硫 黄	190		15	35	2.9	49	137	11	—
ステアリン酸アルミニウム	400		15	15	4.3	53	147	—	—
o-オキシベンズアルデヒド	430		15	20	4.1	151	221	—	—
フ ェ ノ チ ア ジ ン	540		—	15	3.0	42	102	16	—
p-ジニトロクレゾール	440		—	25	3.9	91	158	15	—
パ ル プ	480		80	60	4.2	36	102	—	—
(熱硬化性プラスチック)									
フェノール・ホルムアルデヒド	500	320	10	25	7.4	210	770	14	9
フェノール・ホルムアルデヒド・成型 コンパウンド	490	—b)	10	30	6.6	161	770	14	7
フェノール・ウルフラール	520	310	10	25	6.3	140	595	14	11
尿 素 ・ ホ ル ム ア ル デ ヒ ド	470	—	80	70	4.2	49	126	17	11
尿素・ホルムアルデヒド・成型コンパ ウンド	450	—	80	75	6.4	63	161	17	11
メラミン・ホルムアルデヒド	790	—	50	65	6.4	56	126	15	—
アリルアルコール・エステル CR-39	500	—	20	35	7.5	196	840	13	4
エ ポ キ シ	540	—	15	20	6.0	140	420	12	—
(熱可塑性プラスチック)									
ポ リ エ テ レ ン	410	380	10	20	6.0	112	385	12	7
ポ リ プ ロ ピ レ ン	420	—	30	20	5.3	105	350	—	—
ポ リ 塩 化 ビ ニ ル	660	400	g)	—	—	—	—	—	—
ポ リ 酢 酸 ビ ニ ル	550	—	160	40	4.8	35	70	17	11
ポリ塩化ビニル-酢酸ビニル	690	—	g)	—	—	—	—	—	—
ポリ塩化ビニル-アクリロニトリル (60—40)	570	470	25	45	3.4	56	112	—	—
ポリビニル・アルコール	520	440	120	35	5.3	91	217	—	—
ポリビニル・ブチラール	390	—	10	20	5.9	70	140	14	5
ポリ塩化ビニル-デン成型コンパウンド	900	—	g)	—	—	—	—	—	—
ポ リ ス チ レ ン	490	470	40	20	5.1	105	280	14	7
ポリスチレン・成型コンパウンド	560	—	40	15	5.4	105	350	14	9

粉 じ ん の 種 類	a) 浮遊粉じんの発火点 ℃		最小点火 エネルギー mj	爆発下限 界 g/m ³	最大爆 発圧力 c) kg/cm ²	d) 圧力上昇速度 kg/cm ² ・scc		浮遊粉じんの 電気スパー クによる 発火を防止 するための 限界酸素濃 度 e) %	粉じん爆発 防止のため の最大許容 酸素濃度 e) f) %
	浮 遊 状	層 状				平 均	最 大		
ポリスチレンアクリロニトリル (70—30)	500	—	30	35	5.0	42	98	—	—
ポリスチレンブタジエン・ラテックス	470	—	60	30	5.6	35	98	—	—
四 弗 化 エ チ レ ン	670	570	g)	—	—	—	—	—	8
一 塩 化 三 弗 化 エ チ レ ン	600	720	g)	—	—	—	—	—	—
ポリメチルメタクリレート	480	—	20	30	5.9	63	140	11	8
ポリメチルメタクリレート成型コンパ ウンド	440	—	15	20	7.1	32	126	14	7
ポリ・イソブチル・メタクリレート	500	280	40	20	5.1	112	145	—	—
ポリ ア ク リ ル ア ミ ド	410	240	30	40	5.2	63	112	—	—
ポリ ア ク リ ロ ホ ト リ ル	500	460	20	25	6.2	140	350	13	—
ポリエチレンテレフタレート	500	—	35	40	6.4	133	385	13	—
ナ イ ロ ン	500	430	20	30	6.7	70	154	13	6
酢 酸 セ ル ロ ー ス	420	390	15	35	7.8	151	455	13	7
酸酸セルロース・成型コンパウンド	410	—	40	35	6.3	70	133	14	7
三 酢 酸 セ ル ロ ー ス	430	—	30	35	6.2	112	301	12	6
プロピオン酸セルロース	460	—	45	25	7.3	112	329	—	—
メ チ ル・セ ル ロ ー ス	360	340	20	30	6.9	168	385	13	—
エ チ ル・セ ル ロ ー ス	340	330	15	20	7.0	182	490	12	8
エチルセルロース成型コンパウンド	320	—	10	25	7.1	147	420	11	7
カルボキシ・メチルセルロース	350	260	180	165	5.7	42	84	16	5
ビスコース・レーヨンフロック	520	250	240	55	6.2	56	119	—	—
ポ リ カ ー ボ ネ イ ト	710	—	25	25	5.5	112	329	15	—
ア セ ー ル	440	—	20	35	6.2	112	287	11	—
アルキッド・成型コンパウンド	500	270	120	155	1.1	7	105	15	—
ク マ ロ ン・イ ン デ ン	520	—	10	15	6.5	196	770	14	11
ポリエチレンオキサライド	350	—	30	30	6.2	70	140	12	5
ポ リ ウ レ タ ン ホ ー ム	510	440	15	25	6.2	98	259	—	—
ゴ ム (硬 質)	350	—b)	50	25	5.6	84	266	15	13
合 成 ゴ ム (硬 質)	320	—	30	30	6.5	77	217	18	11
シ エ ラ ッ ク	400	—	10	20	5.1	98	252	14	9
ロ ジ ン	440	—	—	55	5.7	133	525	17	10
リ グ ニ ン	510	—	160	65	5.6	119	329	17	13
樹 脂 酸 ナ ト リ ウ ム	350	220	60	40	6.7	105	252	14	—
(プラスチック一次原料)									
ア ジ ピ ン 酸	550	—	60	35	5.3	84	189	—	—
イ ソ フ タ ル 酸 ジ メ チ ー ル	580	—	15	25	5.5	126	490	13	—
塩 素 化 パ ラ フィ ン 70% 塩 素	840	—	g)	—	—	—	—	—	—
カ ゼ イ ン	520	—	60	45	4.6	28	70	17	7
ジ ー ト プ チ ル P-ク レ ゾ ー ル	420	—	15	15	5.7	203	695	13	9
テ レ フ タ ル 酸	680	—	20	50	5.1	119	420	15	—
テ レ フ タ ル 酸 ジ メ チ ル	570	—	20	30	6.4	217	840	12	6
P-オキシベンズアルデヒド	380	430	15	20	5.4	140	420	—	—
P-フェニレンジアミン	620	—	30	25	6.0	105	329	—	—
パ ラ ホ ル ム ア ル デ ヒ ド	410	—	20	40	7.1	175	910	12	—
ビ ス フ ェ ノ ー ル A	570	—	15	20	5.2	161	455	12	—
ヘキサメチレンジアミン	410	—	10	15	6.9	168	770	14	11
ペンタエリスリトール	450	—	10	30	6.3	119	665	14	7
無 水 フ タ ル 酸	650	—	15	15	5.0	91	294	14	11
(プラスチック充填剤)									
α-セ ル ロ ー ス	410	300	80	50	7.2	105	420	17	7
セ ル ロ ー ス・フ ロ ッ ク	420	260	40	55	7.2	140	490	13	—
綿 フ ロ ッ ク	470	—b)	25	50	6.6	120	420	17	7
コ ル ク	470	230	45	35	7.1	140	385	—	—
木 粉	430	260	30	40	7.1	161	525	17	7

注. a) 試料は 200 メッシュ全通. b) —は測定結果の得られていないことを示す. b') 純炭酸ガス中で発火することを示す. c) 最大爆発圧力は、粉塵濃度 500 g/m³ で得た値である. d) 平均圧力上昇速度は、最大爆発圧力を点火よりそれに達するに要する時間で除して得られたものであり最大圧力上昇速度は、圧力時間曲線における最大勾配を示している. e) 不活性ガスとして炭酸ガスを使用した場合の値を示す. f) 850℃ の炉内においても発火を生じ得ないときの空気不活性ガス混合気中の酸素濃度を示す. g) 8.32 ジュールで発火を認めず.

表 21 可燃性粉体の危険特性⁸⁾

粉 体 名	燃 焼 熱 (上部発熱量)	粒子断面径	層状粉体の 密度	高温表面での粉体層 (厚さ 5mm) の発火温度	雲状粉体の 発火温度	爆発下限界 濃度 (等温等圧で の計算値)	化学量論組 成濃度 (計 算)	最大爆発圧 力		
	kcal/kg	ミクロン	kg/l	℃	℃	g/Nm ³	g/Nm ³	気 圧		
金 属	アルミニウム (表面処理)	7040	10-15	0.42	320	590	37-50	340	爆発せず	
	アルミニウム (含 脂)		10-20	0.31	230	400	37-50	340		
	鉄 (鉄カルボニル) {粗 粉 } 1780	7-8	4.2	270	420	153-204	695			
	鉄 (鉄カルボニル) {微 粉 }	<5	4.2	220	315					
	鉄 (そ の 他)	1780	100-150	1.6	240	430	153-204	695		
	グラファイト	7840	15-25	0.24	発火せず	>750	36-45	110		
	マグネシウム	6020	5-10	0.62	340	470	44-59	455		
	燐 (赤 リ ン)	5800	30-50	0.99	305	360	48-64	230		
	カーボン・ブラック	7840	10-20		535	>690	36-45	110		
	イ オ ウ	2210	30-50	0.67	溶融 (S)	235	120-160	300		
	チ タ ン	4550		1.85	290	375				
	亜 鉛	1280	10-15	4.9	430	530	212-284	1220		
	カルシウム・カーバイド		<200	0.78	325	555				
	カルシウム・ケイ素・アルミ合 金 (8%Ca-30%Si-55%Al)			0.78	290	465				
	フェロシリコン (45%Si)			2.0	>450	640				
硫 化 鉍	約2200	<90	2.14	445	555		約 350	爆発せず		
ジ ル コ ン	2840	5-10		305	360	92-123	850	1.5		
化 学 薬 品	ステアリン酸 亜鉛		8-15	0.12	S	315			2.2	
	ナ フ タ リ ン	9600	80-100	0.53	S	575	28-38	100	5.9	
	ア ン ス ラ セ ン	9510	40-50	0.49	S, 昇華	505	29-39	100	3.5	
	ア ジ ビ ン 酸	4580		0.70	S	580	65-90	210	3.0	
	フ タ ル 酸	4630	80-100	0.62	S	650	61-83	205	4.2	
	無水フタル酸 (粗)	5260			S	605	52-71	185		
	フタル酸ジニトリル	7300		0.49	S	>700	37-50		2.9	
	無水マレイン酸 (粗)	3440			S	500	82-113	305		
	酢酸ナトリウムエステル	5590	5-8	0.56	S	520	51-70	205		
	染料 ナフトール	2220		0.78	395	415	133-184	395		
	クリスタル・ヴァイオレット	7770	15-30	0.52	S	475	46-70	125		
	四ニトロカルバゾール	3460		0.41	S	395	92-129	380		
	ジニトロクレゾール		40-60	0.42	S	340				
	ア ス ビ リ ン	8850	60	0.40	S	405	31-41	130	3.6	
	洗 剤 (石 け ん 粉)	8200	80-100	0.24	S	575			5.3	
青 色 洗 剤	4830	300-500	0.12	350	465			0.8		
合 成 樹 脂	ポリエチレン	11100	30-50	0.29	S	410	26-35	85	2.8	
	ポリプロピレン	11120		0.32	S	430	25-35	85	3.6	
	ポリスチロール	9940	40-60	0.23	S	475	27-37	95	4.0	
	スチロール (70%) とブタジエン (30%) からなるポリマー	10180			S	420	27-37	95	2.4	
	ポリビニルアルコール	6880	5-10	0.46	S	450	42-55	165	5.4	
	ポリアクリロニトリル	7480	5-7	0.12	S, 炭化	505	35-55	130	3.3	
	ポリウレタン	6330	50-100	0.11	S	425	46-63	155	4.0	
	ポリエチレンテトラフタレート	5400	<200	0.59	S	480	52-71	180	2.7	
	ポリビニルピロリドン	6880	10-15	0.44	S	465	42-58	135	1.0	
	ポリビニルクロライド	4750	4-5	0.55	S, 炭化	595	63-86	230	爆発せず	
	塩ビ (70%) とスチロール (30%) からなるポリマー	6490	30-40	0.18	S, 炭化	520	44-60	165	爆発せず	
	フェノール樹脂 (Novolak)	7560	10-20	0.51	S, 炭化	520	36-49	130	3.2	
	ゴ ム ・ 天 然 樹 脂	プレキシガラス粉			0.23	S, 炭化	485			3.5
		Kaurit'-ニ カ ワ	3610	20-50	0.54	過 沸	475			
		硬 ゴ ム	7740	20-30	0.30	〃	360	36-49	115	2.7
軟 ゴ ム		8240	80-100	0.37	〃	425			4.2	
セ ラ ッ ク		7530	20-30	0.58	S	370	38-52	135	4.3	
コ ー パ ル		9290	20-50	0.47	S	330	30-41	110	4.6	
ゴ ム ・ 天 然 樹 脂	コ ロ フ ォ ニ ウ ム	8170	50-80	0.49	S	325				

粉 体 名	燃 焼 熱 (上部発熱量)	粒子断面径	層状粉体の 密度	高温表面で の粉体層 (厚さ 5mm) の発火温度	雲状粉体の 発火温度	爆発下限界 濃度 (等温等圧で の計算値)	化学量論組 成濃度(計 算)	最大爆発圧 力
	kcal/kg	ミクロン	kg/l	℃	℃	g/Nm ³	g/Nm ³	気 圧
ピ ン グ 類 ・ 石 炭 タ ー ル ビ ッ チ	硬 い ろ う (OP-鉾山ろう)	10880	30-50	0.53	S	400	26-36	115
	ワ イン ビ ッ チ (EP 54°)	8800	50-80	0.77	S	620		
	硬 ビ ッ チ (EP 150°)	8910	50-150	0.72	S	620		
	石 炭 タ ー ル ビ ッ チ	8710		0.75	S	580		2.6
農 産 物 ・ せ ん い ・ 魚 粉 な ど	裸 麦 粉	3910	30-50	0.31	325	415	67-93	310
	裸 麦 穀 物 粉 (粗)	3880	50-100	0.19	305	430		
	裸 麦 篩 分 け 粉 (粉砕)	3790	30-40	0.37	305	415		
	小 麦 粉	3940	20-40	0.47	炭 化	410		
	小 麦 穀 物 粉	3860	15-30	0.37	290	420		
	小 麦 篩 分 け 粉 (粉砕)	4130	3-5	0.31	290	410		
	カ ラ ス ム ギ ・ 大 麦 ・ 穀 物 粉		50-150	0.17	270	440		
	米 篩 分 け 粉	4360	50-100	0.18	270	420		
	ト ウ モ ロ フ シ デ ン プ ン	3630	20-30	0.46	炭 化	410		
	ジ ャ ガ イ モ デ ン プ ン	3380	60-80	0.70	炭 化	430		
	ブ デ イ ン グ 粉 末	3520	10-20	0.58	〃	395		
	デ キ ス ト リ ン	3770	20-30	0.83	〃	400	71-99	255
	粉 末 砂 糖	3940	20-40	0.65	S	360	77-107	265
	ミ ル ク 入 砂 糖	3740	20-30	0.56	S	450	83-115	280
	カ カ オ (軽く脱脂)	5270	30-40	0.43	245	460		
	抽 出 コ ー ヒ ー 粉		40-80	0.32	ちぢれ	600		
	ビ ー ル 麦 芽		100-150	0.32	285	405		
	ク ロ ー バ , ム ラ サ キ ウ マ ゴ ヤ ン (層)	3170	200-500	0.24	280	480		
	亜 麻 搾 粕 穀 粉	4190		0.43	285	470		
	ナ タ ネ 糟 粉 (抽出)		400-600	0.53	炭 化	465		
	油 種 子 精 製 粉			1.01	295	490		
	魚 粉	4150	80-100	0.66	炭 化	485		
	タ バ コ		50-100	0.36	290	485		
	木 綿 粉	4160			385	浮遊しにくい		浮遊しにくい
	ス テ ー プ ル , フ ァ イ バ ー 粉	3260			305	〃		〃
	亜 硫 酸 塩 セ ル ロ ー ズ	4180			380	〃		〃
	細 胞 粉 末 (リグニン)	5610	40-80	0.27	250	445		4.2
	紙 粉 じ ん	3920		0.07	360	浮遊しにくい		浮遊しにくい
	ヤ シ 粉		100-200		280	450		
	コ ル ク 粉 末	6470	30-40	0.07	325	460	44-59	170
	針 葉 樹 粉 (松)	4600	70-150	0.22	325	440		約 200
	硬 木 粉 (ブナ)	4580	70-100	0.22	315	420		約 200
燃 料 炭 素 系	泥 炭 (堆積粉)	4370	60-90	0.09	260	450		
	泥 炭 細 末 (微細)	4330	300-500	0.07	295	420		
	褐 炭 (厚, リグナイト)	6500	2-3	0.39	260		49-68	175
	〃 (煉 炭)	6310	3-5	0.47	230	485		
	有 煙 炭	7700	5-10	0.42	235	595	41-57	155
	ガ ス 炭	8230	5-10	0.41	225	580	35-48	125
	コ ー ク ス 炭	8600	5-10	0.42	280	610	33-45	115
	貧 石 炭	8600	5-7	0.43	285	680	34-45	120
	無 煙 炭 (ふるい分け)	7780	100-150	0.71	>430	>600		
	木 炭 (硬)	7600	1-2	0.36	340	595	39-52	140
	泥 炭 コ ー ク ス	7600	1-2	0.33	360	615	40-54	150
	褐 炭 コ ー ク ス		4-5	0.45	235			
	石 炭 コ ー ク ス	6560	4-5	0.74	430	>750	37-50	125
	石 炭 着 火 材 粉	8080			350	530		3.6

この表は西ドイツ材料試験所、ベルリンの測定による。数値は1つの試料で行ったので厳密には、その試料にのみあてはまる。したがって同じ名前の粉体に対してはそれが同態で扱われる限り、一つの基準値として使用できよう。

参 考 文 献

- 1) "Dust Explosions", N.F.P.A. Quarterly, (1) 216~244 (1957)
- 2) "Dust Explosions in Factories" Safety, Health and Welfare, New series No.22, Ministry of Labour, H.M. Stationery Office, U.K. (1963)
- 3) P.G. Demidov "Combustion and Properties of Combustible Substance" Report No. AD-621738 Translation Foreign Technology Division U.S. Air Force. 「Copy コウケン技術 (株)」 p. 234~260 (1965).
- 4) 疋田強 "爆発" コロナ社. p. 17 (1965)
- 5) G. Leuschke "Beiträge zur Erforschung des Mechanismus der Flammenausbreitung in Staubwolken" Staub 25 (5) 180~186 (1965)
- 6) H.M. Cassel, I. Liebman "The Cooperative Mechanism in the Ignition of Dust Dispersions". Combustion and Flame 3, 467~75 (1959)
- 7) H.M. Cassel, "Some Fundamental Aspects of Dust Flames" Report of Investigation 6551 U.S. Bureau of Mines (1964)
- 8) J. Zehr "Handbuch der Raumexplosionen, Abschnitt IIb, Eigenschaften brennbar Stäube und Nebel in Luft" Verlag Chemie, Weinheim p. 164~184 (1965)
- 9) V.D. Long, W.L. Murray "Theoretical Considerations of the Pre-Reaction Zone of a Coal-Dust Flame"; Research Report No. 145, Safety in Mines Research Establishment, Ministry of Power, U.K. (1958)
- 10) J.H. Burgoyne "Designing for Protection against Dust Explosions" Chemistry and Industry, May. 27 854~858 (1967)
- 11) 房村信雄 "炭じん爆発" 安全工学, 7 (3) 192~200 (1968)
- 12) 田中達夫 "粉体とは何か" 科学の実験, 16 (3) 195~198 (1965)
- 13) 例えば, I. Hartmann, J. Nagy "Inflammability and Explosibility of Powders used in the Plastic Industry" Report of Investigation 3751 U.S. Bureau of Mines (1944)
- 14) M. Jacobson, A.R. Cooper and J. Nagy "Explosibility of Metal Powders" Report of Investigation 6516 U.S. Bureau of Mines (1964)
- 15) M. Jacobson, J. Nagy and A.R. Cooper "Explosibility of Dust in the Plastics Industry" Report of Investigation 5971 U.S. Bureau of Mines (1962)
- 16) 井伊谷鋼一編 "粉体工学ハンドブック" 朝倉書店 p. 54~80 (1965)
- 17) I. Hartmann, J. Nagy, M. Jacobson "Explosive characteristics of Titanium, Zirconium, Thorium, Uranium and Their Hydrides" Report of Investigation 4835 U.S. Bureau of Mines (1951)
- 18) M. Jacobson, J. Nagy, A.R. Cooper, "Explosibility of Agricultural Dusts" Report of Investigation 5753 U.S. Bureau of Mines (1961)
- 19) 疋田強 "粉体爆発に関する研究" 工業火薬協会誌. 10 (4) 148~153 (1944)
- 20) K.C. Brown, R.H. Essenhigh "Dust Explosions in Factories: A New Vertical-Tube Test Apparatus" Research Report No. 165, Safety in Mines Research Establishment, Ministry of Power, U.K. (1959)
- 21) J.G. Dawes "Notes on Physics of Dust Dispersion" Research Report No. 3, Safety in Mines Research & Testing Branch, Ministry of Fuel and Power. U.K. (1950)
- 22) R. Hattersley, B.A. Maguire "A Laboratory Dust Cloud Producer" Research Report No. 103, Safety

- in Mines Research Establishment, Ministry of Fuel and Power U.K. (1954)
- 23) J. G. Dawes "Dispersion of Dust Deposits by Blast of Air Part I"; Research Report No. 36, Safety in Mines Research Establishment, Ministry of Fuel and Power. U.K. (1952)
- 24) J. T. Burdekin, J. G. Dawes "A Standard Dust Cloud for Testing Purposes"; Research Report No. 141, Safety in Mines Research Establishment, Ministry of Power. U.K. (1957)
- 25) 北川徹三 "安全工学", 第7版, 日刊工業, p. 48 (1966)
- 26) 北川徹三, 長谷川和俊, 目黒誠, 白井正 "粉じん爆発の下限界測定装置の研究", 安全工学, 5 (4) 291~295 (1966)
- 27) 望月昌 "ポリエチレン粉体の爆発について" 工業火薬協会誌. 19 (5) 364~366 (1958)
- 28) 増田閃一 "静電気の管理について" 第13回静電気研究発表会特別講演要旨 (1968)
- 29) 内藤, 松田, 未発表 (1968)
- 30) J. Zehr: "Die experimentelle Bestimmung der oberen Zündgrenze von Staub/Luft-Gemischen als Beitrag zur Beurteilung der Staubexplosionsgefahren" Staub 19 (5) 204~214 (1959)
- 31) B. A. Maguire, C. Slack, A. J. Williams "The Concentration Limits for Coal Dust-Air Mixtures for Upward Propagation of Flame in a Vertical Tube", Combustion and Flame, 6 (12) 287~294
- 32) I. Hartmann, M. Jacobson, and R. P. Williams "Laboratory Explosibility Study of American Coals" Report of Investigations 5052, U.S. Bureau of Mines (1954)
- 33) A. D. Craven and M. G. Foster "Dust Explosion Prevention-Determination of Critical Oxygen Concentration by Vertical Tube Method" Combustion and Flame. 11 (5) 408~414 (1967)
- 34) N. Helwig "Die Löschwirkung von Gesteinsstaub bei Explosionen von Kohlenstaub-Methan-Luft-Gemischen", Glückauf-Forschungshefte, 28 (4) 83 (1967).
- 35) G. Kühnen "Beurteilung der Explosionsgefahr bei brennbarem Staub" Staub-Reinhalt Luft, 27 (12) 731 (1967)
- 36) P. C. Bowes, S. E. Townshend "Ignition of Combustible Dusts on Hot Surfaces" Brit. J. Appl. Phys. 13. p. 105~14 (1962)
- 37) J. Nagy, W. M. Portman "Explosibility of Coal Dust in an Atmosphere containing a Low Percentage of Methane" Report of Investigation 5815, U.S. Bureau of Mines, (1961)
- 38) 内藤道夫, 梅津実 "粉じんの最小発火エネルギー" 災害科学研究会爆発部会, 損害保険料率算定会 (1967).
- 39) D. I. Carpenter and D. R. Davies "The Variation with Temperature of the Explosibility Characteristics of Coal Dust Clouds using Electric Spark Ignition" Combustion and Flame. 11 (1) (1958).
- 40) H. G. Dorset, I. M. Jacobson, J. Nagy "Laboratory Equipment and Test Procedures for Evaluating Explosibility of Dusts" Report of Investigation 5624 U.S. Bureau of Mines (1960)
- 41) N. Helwig "Versuch zur Inertisierung der Explosionen und Glimmreaktionen von Braunkohlenstaub mit Stickstoff, Kohlendioxid und Wasserdampf" Mitteilungen der VGB. 106 (2) 44~47 (1967)
- 42) С. А. ШАГАЛОВА, В. А. РЕЗНИК "Влияние начального давления на характер развития взрывов пыли натуральных топлив" Телознергетика No. 7 63~65 (1965)
- 43) J. Nagy, H. G. Dorsett, and A. R. Cooper "Explosibility of Carbonaceous Dusts" Report of Investigations 6597, U.S. Bureau of Mines (1965)
- 44) J. Nagy, A. R. Cooper, J. M. Stupar "Pressure Development in Laboratory Dust Explosions" Report of Investigations 6561, U.S. Bureau of Mines (1964)
- 45) N. Helwig "Untersuchungen über den Einfluss der Korngrößen auf den Ablauf von Kohlenstaubexplosionen" Staub-Reinhalt, Luft. 26 (2) 65~69 (1966)
- 46) "1965 国際鉱山保安研究所長会議提出論文の概要, No. 13" 採鉱と保安. 11 (9) 469 (1965)

- 47) R. F. Schwab and D. F. Other "Dust Explosions" Chem. Proc. Enging., April (No. 4) 165~174 (1964)
- 48) L. A. Eggleston and A. J. Pryor "The Limits of Dust Explosibility" Fire Technology, 3, 77 (1967)
- 49) K. C. Brown and G. E. Curzon "Dust Explosions in Factories : Field Scale Tests, on an Explosion Detector and two Types of Quick-closing valve" Research Report No. 194, Safety in Mines Research Establishment, Ministry of Power, (1960)
- 50) K. C. Brown and G. E. Curzon "Dust Explosions in Factories : Explosion vents in Pulverized Fuel Plants" Research Report No. 212, Safty in Mines Research Establishment Ministry of Power U.K. (1963)
- 51) I. Hartmann and J. Nagy "Venting Dust Explosions" Ind. Eng. Chem. 49 (10) 1734~1740 (1957)
- 52) N. Helwig "Die Explosionsgrenzen von Fettkohlenstaub und ihre Veränderung durch explosions-trägerung groben Staub" Gluckauf-Forschungshefte. 5, 229 (1967)
- 53) G. Kühnen "Wann gelten Räume als Staub explosions gefährdet?" Staub-Reinhalt, Luft 26 (2) 63 (1966)
- 54) "Handbook of Industrial Loss Prevention 2nd. Edit." Factory Mutual, McGRAW-HILL 66 (1967)
- 55) J. Tunstall "Fire and Explosion Precautions in Feed Mills" Milling-March 5, 242~244 (1965)
- 56) M. R. H. Coombs "Hazards in Flour Mills Affecting Fire Insurance" Milling. December 1, 413~416, 422 (1967)
- 57) "National Fire Codes Vol. 3 Combustible Solids, Dusts & Explosives" N. F. P. A. 61c (1964~65)
- 58) W. Straumann "Dimensionierung von Druckentlastungs-Öffnungen gegen Explosionen in Chemischen Apparaten" VDI-Berichte Nr. 96, 130~140 (1965)
- 59) "National Fire Codes Vol. 9, Occupancy Standard & Process Hazards" N. F. P. A. 68 (1964~65)
- 60) D. W. Merewood "Industrial Explosion Protection" British Chemical Engineering. April 188~190 (1958)
- 61) J. Gabowski "Industrial Explosion Protection" Journal of the American Oil Chemist Soceity 36 (2) 57~59 (1959)
- 62) "New System Supresses Explosions" Safety Maintenance. November 33~36, 54 (1960)
- 63) "Sugar Explosion in Canada" The International Sugar Journal, September 262~266 (1967)
- 64) G. Leuschke "Über die Untersuchung brennbarer Staube auf Brand-und Explosionsgefahren" Staub-Reinhalt, Luft 26 (2) 49~57 (1966)
- 65) 上月他 "スパウトにおける粉体の帯電現象" 労働省産業安全研究所報 No. 1 (1955)
- 66) 木脇他 "小麦粉の帯電現象に関する実験結果" 電気試験所彙報, 18 (5) 33~37 (1954)
- 67) 上月他 "放射性同位元素による静電気の除去についての研究 (第3報) —粉体帯電の除去—", 14 (3) 7~18 (1966)

産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-69-1

昭和 44 年 6 月 10 日 発行

発行所／労働省産業安全研究所

東京都北多摩郡清瀬町梅園 1 丁目 4 番 6 号

電 話 (0424) 91—4512 番

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 180—04