

システム技術開発調査研究

19 - R - 15

平成19年度

アルミニウム粉塵爆発のリスクアセスメント

実施に資する基礎調査および安全対策

マニュアルの作成に関する調査研究

報告書

要旨

平成20年3月

財団法人 機械システム振興協会  
委託先 社団法人 日本アルミニウム協会



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



## 序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人機械システム振興協会では、財団法人日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、機械システムに関する調査研究等補助事業、新機械システム普及促進補助事業を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 東京大学 名誉教授 藤正 巖氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を実施しております。

この「アルミニウム粉塵爆発のリスクアセスメント実施に資する基礎調査および安全対策マニュアルの作成に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が社団法人日本アルミニウム協会に委託して実施した調査研究の成果であります。今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成20年3月

財団法人機械システム振興協会

## はじめに

粉塵爆発の災害統計によると、発生件数、死傷者数は、粉塵の種類別では「金属」が最多であり、金属の中では「アルミニウム」が最多である。

しかしながら、アルミニウム製造現場で発生するアルミニウム粉塵は、粒度分布は一定ではなく、酸化の程度も幅があり、従来、爆発のリスクを定量的に把握することは難しく、粉塵爆発のリスクアセスメントの実施が見送られてきた。

本調査研究では、このような状況を打破し、製造現場でのアルミニウム粉塵爆発のリスクアセスメントの実施を可能ならしめるために、アルミニウム製造業の各種工程、設備から採取した実際の粉塵について、粒径分布測定と爆発試験を実施しデータを評価することにより、粉塵爆発のリスクを定量的に把握することを意図している。

その知見を盛り込んだ「アルミニウム粉塵爆発防止マニュアル」を作成し、アルミニウムの製造業、ユーザー業界に広く配布、アピールすることにより、それぞれの製造現場でのアルミニウム粉塵爆発防止の検討が活発になり、リスクアセスメントの実施が促されることにより、アルミニウム粉塵爆発防止対策が着実に実施され、社会全体のアルミニウム粉塵爆発のリスクが低減されることの一助となるよう図っていきたい。

最後に、本調査研究の実施にあたり、ご指導ご支援いただいた官庁、関係機関の各位に深く感謝の意を表します

平成 20 年 3 月

社団法人 日本アルミニウム協会  
理事 高杉 篤美

## 目 次

### 序

#### はじめに

1. 調査研究の目的	1
2. 調査研究の実施体制	2
3. 調査研究の内容	5

### 第1章 製造現場のアルミニウム粉塵による粒径、爆発下限濃度、最小着火エネルギーおよび最大爆発圧力測定

1.1 目的	6
1.2 アルミニウム粉塵の採取	6
1.3 アルミニウム粉塵の測定	6
1.3.1 粒径測定	6
1.3.2 爆発試験	10
1.3.3 粉塵の酸化の影響	14
1.3.4 アルミニウム粉塵の高温酸化のメカニズム	14
1.4 まとめ	16

### 第2章 アルミニウム粉塵爆発対策マニュアルの作成

2.1 粉塵爆発全体の発生状況	17
2.1.1 年次別の発生件数と負傷者数	17
2.1.2 粉塵の種類別の発生件数と負傷者数	18
2.1.3 金属粉塵の爆発事例	20
2.1.4 アルミニウム粉塵爆発事例の写真	32
2.2 粉塵爆発3条件	33
2.2.1 粉塵爆発3条件	33
2.2.2 爆発し易い要因は	34
2.2.3 粉塵爆発はどのような工程で起こるか	35
2.3 爆発原因	36
2.3.1 着火源別の発生件数の統計データ	36
2.3.2 着火源別の発生原因	36
2.4 可燃性粉塵の爆発特性	37
2.4.1 可燃性粉塵の爆発特性	37
2.5 アルミニウム粉塵の爆発特性	40
2.5.1 〔解説〕アルミニウム粉塵の高温酸化のメカニズム	46
2.5.2 アルミニウム粉塵の安全対策	48
2.6 予防と対策（粉塵一般）	50
2.6.1 作業場の対策	50

2.6.2 堆積の防止	51
2.6.3 摩擦・衝撃に対する対策	52
2.6.4 溶接・溶断作業に対する作業	53
2.6.5 静電気・帯電防止対策	54
2.6.6 不活性ガスによる対策	54
2.6.7 不燃性粉体の添加	54
2.7 アルミニウム粉塵火災の消火	55
4. 調査研究の成果(まとめ)	56
5. 調査研究の今後の課題および展開	57

## 1. 調査研究の目的

アルミニウムの粉塵爆発は、過去半世紀の統計では、年1回程度の頻度で発生し、粉塵の種類別では最多であり、1件当たりの死傷者数も多い。日本アルミニウム協会では、かかる実態を踏まえ平成18年度に予備調査として、会員企業の種々の製造現場のアルミニウム粉塵を採取し粉塵の粒径分布を調査した。その結果、粉塵爆発のリスクが高い100 $\mu$ m以下の粒径の粉塵がある程度の比率で存在することが判明した。

しかしながら、予防対策の具体的なステップであるリスクアセスメントを実施するためには、アルミニウム粉塵に関する爆発下限濃度、最小着火エネルギーなどの必要なデータが絶対的に不足している。

そこで、各種アルミニウム製造業の各種設備のアルミニウム粉塵について、粒径、爆発下限濃度、最小着火エネルギー、最大爆発圧力の基礎データを測定し、各製造現場でアルミニウム粉塵爆発のリスクアセスメントを可能ならしめることが本事業の目的である。

また、調査の成果を盛り込んだアルミニウム粉塵爆発対策マニュアルを作成することも本事業の目的である。

そしてアルミニウム粉塵爆発対策マニュアルをアルミニウム製造業界およびアルミニウムのユーザー業界に配布・普及することも意図している。

## 2. 調査研究の実施体制

### (1) 実施体制

財団法人機械システム振興協会内に総合システム調査開発委員会を、社団法人日本アルミニウム協会内に安全委員会を設置した。社団法人日本アルミニウム協会が本調査研究を管理運営し、協会の安全委員会が本調査研究内容の検討承認を行い、安全委員会の中に安全委員および外部の学識経験者からなる粉塵爆発対策ワーキンググループ（7名で構成）を設け、本調査研究を実施した。

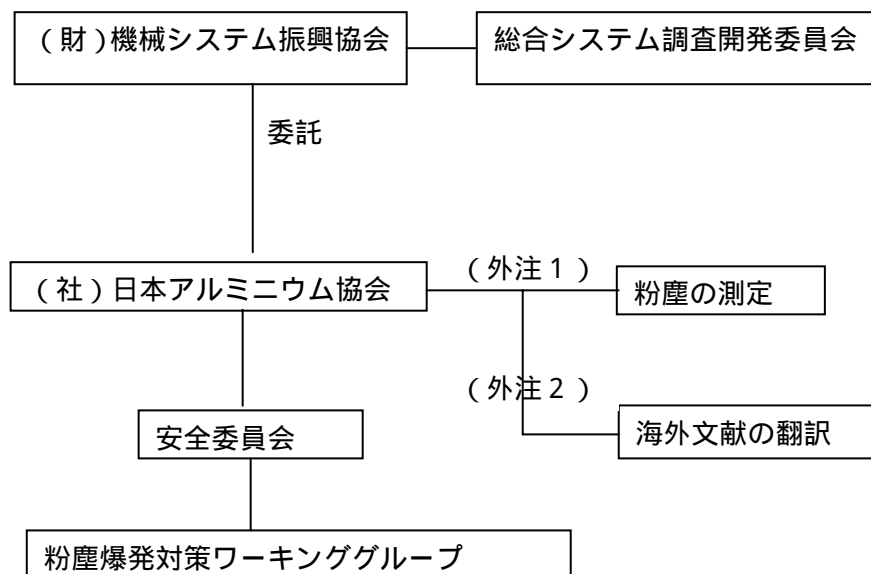


図.1 調査研究の全体実施体制

### (2) 粉塵爆発対策ワーキンググループ業務分担

ワーキンググループは、会員各社の委員で構成する安全委員会の委員の中から選ばれた委員と学識経験者によるワーキンググループとした。

安全委員会委員：・・・・・・・・・・6人

学識経験者：・・・・・・・・・・1人

合計 7名（他事務局2名）

## 総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	東京大学 名誉教授	藤 正 巖
委 員	埼玉大学 地域共同研究センター 教授	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 副研究部門長	金 丸 正 剛
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携推進部門 産学官連携コーディネータ	志 村 洋 文
委 員	東北大学 工学研究科 教授 (未来科学技術共同研究センター長)	中 島 一 郎
委 員	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学大学院 工学系研究科 准教授	藤 岡 健 彦
委 員	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授(副研究科長)	大 和 裕 幸

「平成19年度 アルミニウム粉塵爆発のリスクアセスメント実施に資する  
基礎調査および安全対策マニュアルの作成に関する調査研究」委員会

委員構成

	氏名	所属団体・企業名	所属部署・役職
委員長	手塚 浩	株式会社神戸製鋼所	アルミ・銅カンパニー 企画管理部 リスクマネジメントグループ長
委員	松崎 邦男	独立行政法人 産業技術総合研究所	評価部 総括主幹
委員	秋山不二夫	住友軽金属工業株式会社	生産本部 名古屋製造所 安全衛生室 担当課長
委員	石川 倫男	日本軽金属株式会社	人事部 安全衛生担当
委員	上野 善正	三菱アルミニウム株式会社	事務部 安全環境課長
委員	中川 一則	古河スカイ株式会社	総務部 安全担当部長
委員	野村 正義	昭和電工株式会社	技術本部 環境安全室スタッフ・マネージャー
事務局	高杉 篤美	社団法人 日本アルミニウム協会	理事
事務局	* 正路 美房	社団法人 日本アルミニウム協会	部長

\*平成19年11月1日付けで参加。

### 3. 調査研究の内容

今回の本調査研究は製造現場でのアルミニウム粉塵爆発対策を推進する安全に関わる調査研究である。安全対策の第一歩はリスクアセスメントの実施であるが、アルミニウム粉塵についてはリスクアセスメントが可能な粉塵の物性データが不足しており、これを調査することによりリスクアセスメントを可能ならしめるものである。

今回の調査研究は2つの項目からなる。

#### 1) 製造現場のアルミニウム粉塵による粒径、爆発下限濃度、最小着火エネルギーおよび最大爆発圧力測定

粉塵爆発のリスクアセスメントに資することを目的にしているため、粉塵サンプルは実際の各種の業種・設備から採取したものを使用した。

爆発特性の指標となる、粒径、爆発下限濃度、最小着火エネルギー、最大爆発圧力を調査した。

#### 2) アルミニウム粉塵爆発対策マニュアルの作成

アルミニウム粉塵の物性調査により判明した各種粉塵の爆発リスクをまとめ、既存の各種のテキスト類の知見を編集し、粉塵爆発対策安全マニュアルを作成した。

## 第1章 製造現場のアルミニウム粉塵による粒径、爆発下限濃度、最小着火エネルギーおよび最大爆発圧力測定

### 1.1 目的

アルミニウムの粉塵爆発防止については、内外に先進事例があり、マニュアルなども見受けられるが、アルミニウム粉塵の物性に言及したものはなく、このため製造現場で粉塵爆発のリスクアセスメントの実施を企画しても現実には実施できない状況である。そのため、今回はアルミニウム製造業の各業種・設備から採取したアルミニウム粉塵について、粒径分布を測定し、爆発試験により爆発下限濃度、最小着火エネルギー、最大爆発圧力を測定し、必要な基礎データを収集し、アルミニウム粉塵爆発のリスクアセスメントの実施に資することを目的とした。

### 1.2 アルミニウム粉塵の採取

各種アルミニウム製造業（圧延、押出、鋳物、鍛造、加工）の各種工程（溶解、塑性加工、仕上げ加工等）から合計 130 件のサンプルを採取した。

### 1.3 アルミニウム粉塵の測定

#### 1.3.1 粉塵粒径測定

現場の粉塵は広範囲の粒度のものが混在した状態であり、爆発リスクの区分の目安である  $710\mu\text{m}$  で篩い分けをし、篩いを通じたものについて、平均粒径、 $300\mu\text{m}$  以下の体積%、 $75\mu\text{m}$  以下の体積%を測定した。測定値を表 1.3-1 ~ 1.3-3 に示す。

また、粒度分布データの一部で、平均粒径と  $75\mu\text{m}$  以下体積%の関係を図 1.3-1 に示す。平均粒径が小さいのは、炉の集塵、ドロス関係、研磨関係が多い。

表 1.3-1 粉塵粒度分布測定結果表（試料 No.1～41）

No.	試料略称	試料 総量 (g)	710 $\mu$ mふるい分け		710 $\mu$ mふるい下の粒度分布		
			ふるい上 (質量%)	ふるい下 (質量%)	平均粒径 ( $\mu$ m)	300 $\mu$ m以下 (体積%)	75 $\mu$ m以下 (体積%)
01	A 1 : パフ研磨	31.5	20.9	79.1	14.8	100	81.0
02	A 2 : 1.スクラップ	10.7	97.7	2.32	測定不可 (試料不足のため)		
03	A 3 : 2.スクラップ 建屋棧	44.8	11.0	89.0	11.7	100	98.7
04	A 4 : 3.鑄造保持炉	64.8	24.4	75.6	5.52	100	100
05	A 5 : 4.ドロス処理	58.8	1.68	98.3	11.7	100	99.1
06	A 6 : 5.面削スクラップ	32.7	5.09	94.9	20.4	100	96.2
07	A 7 : 6.プレートスクラップ	6.56	4.42	95.6	106	95.3	34.9
08	B 1 : 溶解炉周辺	51.2	45.6	54.4	6.53	100	100
09	B 2 : 湯口切断機	8.93	96.1	3.91	測定不可 (試料不足のため)		
10	B 3 : 仕上ベルトサダ-	32.5	6.26	93.7	56.0	100	86.0
11	B 4 : UBC解砕くず	19.6	100	0.00	測定不可 (試料不足のため)		
12	B 5 : UBC溶解炉ドロマ	54.8	2.28	97.7	12.9	100	99.8
13	B 6 : 押出溶解	23.6	2.75	97.2	36.9	100	77.8
14	B 7 : 押出鑄造	21.8	25.2	74.8	33.9	90.6	68.4
15	B 8 : 押出プレート	3.43	95.8	4.17	測定不可 (試料不足のため)		
16	B 9 : 押出仕上げ	30.3	85.0	15.0	532	34.1	23.5
17	B 10 : 押出磨き粉	27.1	4.85	95.1	73.4	90.6	50.4
18	C 1 : 溶解保持炉	38.9	12.3	87.7	32.2	100	81.4
19	C 2 : ドロマ処理集塵	27.0	0.78	99.2	23.6	100	97.8
20	C 3 : 切断機スクラップ	55.0	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
21	D 1 : 灰しぼり機	16.5	10.8	89.2	4.33	100	100
22	D 2 : 溶解炉周辺	12.7	5.24	94.8	31.0	100	86.7
23	D 3 : 加工機	21.8	96.3	3.71	測定不可 (試料不足のため)		
24	D 4 : フライス-1	45.6	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
25	D 5 : フライス-2	56.4	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
26	D 6 : パフ研磨粉	70.0	10.5	89.5	245	60.7	1.69
27	D 7 : 切削粉	33.6	58.3	41.7	20.7	100	95.4
28	D 8 : 溶滓処理	30.2	9.59	90.4	12.4	100	98.3
29	D 9 : 面削機	30.4	1.05	98.9	47.0	98.1	65.7
30	D 10 : 炉廻りダケ	16.5	6.92	93.1	17.2	100	96.7
31	E 1 : ドロマ処理集塵	21.6	4.31	95.7	18.0	100	90.8
32	E 2 : R-列-リンドダ	42.3	1.66	98.3	23.5	95	79.4
33	E 3 : 溶解保持炉	32.3	2.10	97.9	20.1	100	96.3
34	F 1 : 溶解炉ピット	32.9	33.9	66.1	29.8	100	93.1
35	F 2 : 溶解炉上部	24.8	0.89	99.1	28.4	100	96.9
36	F 3 : 溶湯処理槽蓋	75.0	14.1	85.9	231	60.8	5.60
37	F 4 : 灰処理小屋	19.0	4.90	95.1	24.8	100	100
38	F 5 : 溶解炉上部	28.5	3.44	96.6	31.5	100	87.8
39	F 6 : 保持炉上部	35.7	2.62	97.4	25.7	100	92.1
40	F 7 : 保持炉下部	38.0	18.8	81.2	30.2	100	78.3
41	F 8 : グラインダ-研削	31.8	0.00	100	26.7	100	98.7

表 1.3-2 粉塵粒度分布測定結果表（試料 No.42～80）

No.	試料略称	試料 総量 (g)	710 μmふるい分け		710 μmふるい下の粒度分布			
			ふるい上 (質量%)	ふるい下 (質量%)	平均粒径 (μm)	300 μm以下 (体積%)	75 μm以下 (体積%)	
42	G 1 : 加工機	38.1	2.86	97.1	62.9	95.7	57.5	
43	G 2 : バフ面取	31.1	0.91	99.1	31.6	100	91.6	
44	H 1 : 切断集塵機	20.8	49.3	50.7	68.3	92.0	52.0	
45	H 2 : ビレット研磨集塵	65.6	0.42	99.6	130	100	16.7	
46	H 3 : アルミ溶解ドラ	41.9	5.63	94.4	116	82.9	36.7	
47	I 1 : アルミ集塵機内	26.6	4.98	95.0	44.3	100	72.6	
48	J 1 : サクション室	29.7	測定不可（油分が多く、ふるい分けができない。）					
49	J 2 : セパレーター	4.05	84.4	15.6	44.4	99.1	85.1	
50	K 1 : 鑄造Si集塵機内	10.1	0.00	100	34.6	100	88.9	
51	K 2 : 溶湯運搬炉	26.6	2.78	97.2	26.9	100	95.2	
52	K 3 : 帯刃切断機	4.60	36.3	63.7	60.0	100	65.9	
53	L 1 : 切断機	1.62	42.1	57.9	643	0.00	0.00	
54	L 2 : NC加工機	1.89	78.4	21.6	92.8	93.8	40.4	
55	M 1 : PSW集塵機	19.0	92.1	7.89	測定不可（試料不足のため）			
56	N 1 : 鑄物切断切粉	15.5	98.6	1.44	測定不可（試料不足のため）			
57	N 2 : 鑄物切断ダケ	52.2	21.9	78.1	59.9	100	73.5	
58	N 3 : 鑄物研磨機	50.2	0.27	99.7	65.9	100	61.5	
59	O 1 : 溶解保持炉	23.0	9.04	91.0	12.8	100	98.7	
60	O 2 : ドロスタダケ	67.6	39.9	60.1	94.6	77.4	44.8	
61	O 3 : ビレット切断機	3.15	100	0.00	測定不可（試料不足のため）			
62	O 4 : 形材切断機	20.6	82.4	17.6	597	37.1	17.2	
63	O 5 : バフ研磨機	11.3	75.7	24.3	41.1	100	71.2	
64	O 6 : 切断機	7.02	54.9	45.1	230	86.0	15.1	
65	P 1 : 灰処理場	52.0	23.9	76.1	27.3	100	74.4	
66	P 2 : 溶解炉上	21.7	2.61	97.4	33.6	100	83.1	
67	Q 1 : 鑄造集塵灰	138	10.4	89.6	22.9	100	96.5	
68	Q 2 : 面削屑サイロン	271	67.9	32.1	98.1	100	29.4	
69	Q 3 : プレート切断切粉	146	測定不可（油分が多く、ふるい分けができない。）					
70	Q 4 : 熱間切断切粉	497	34.1	65.9	143	96.4	12.5	
71	Q 5 : 冷間切断切粉	224	65.5	34.5	55.1	87.6	57.6	
72	Q 6 : アルミ切断切粉	338	25.5	74.5	133	77.3	32.7	
73	Q 7 : バリ取り研磨粉	203	4.18	95.8	25.0	100	94.1	
74	Q 8 : 表面研磨粉	233	8.01	92.0	22.7	100	93.3	
75	Q 9 : ショットブラスト集塵	1100	3.75	96.2	165	75.6	20.0	
76	Q 10 : 亜鉛溶射集塵	3280	0.81	99.2	23.2	100	91.5	
77	R 1 : 溶解炉ダケ1	12.6	34.1	65.9	21.5	100	96.8	
78	R 2 : 溶解炉ダケ2	14.5	19.0	81.0	27.6	100	88.4	
79	R 3 : ドロスタダケ1	25.3	22.5	77.5	46.9	94.5	64.4	
80	R 4 : ドロスタダケ2	37.8	48.9	51.1	40.4	98.1	67.5	

表 1.3-3 粉塵粒度分布測定結果表（試料 No.81 ~ 130）

No.	試料略称	試料 総量 (g)	710 $\mu$ mふるい分け		710 $\mu$ mふるい下の粒度分布		
			ふるい上 (質量%)	ふるい下 (質量%)	平均粒径 ( $\mu$ m)	300 $\mu$ m以下 (体積%)	75 $\mu$ m以下 (体積%)
81	R 5 : 形材切断機周り	8.03	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
82	R 6 : 形材切断機集塵	18.0	90.0	10.0	測定不可 (試料不足のため)		
83	S 1 : 押出チップソー1	86.5	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
84	S 2 : 押出チップソー2	78.2	96.7	3.28	測定不可 (試料不足のため)		
85	T 1 : トロ集塵機	32.7	0.00	100	22.5	100	99.1
86	T 2 : 溶解炉フィルター	31.6	3.12	96.9	73.1	100	50.3
87	T 3 : 溶解炉電気集塵	18.1	28.3	71.7	2.25	100	100
88	T 4 : 切粉乾燥炉フィルター	48.2	10.2	89.8	34.1	100	78.8
89	T 5 : 溶解炉集塵	72.3	0.25	99.7	51.7	100	70.7
90	T 6 : 切粉乾燥炉集塵	56.5	15.5	84.5	65.0	100	60.6
91	T 7 : トロ処理	55.3	33.6	66.4	33.5	97.6	69.9
92	T 8 : 切粉集塵フィルター	33.6	0.34	99.7	18.1	100	87.1
93	U 1 : 鋳物仕上ライン	30.8	18.6	81.4	102	98.6	35.1
94	U 2 : 鋳物研磨周り	22.2	4.16	95.8	67.4	100	54.9
95	V 1 : ラミネート切断機	9.28	89.5	10.5	186	75.6	4.37
96	W 1 : 押出工場炉	49.8	76.8	23.2	584	36.9	13.8
97	X 1 : ダイカストアルミショット	135	70.2	29.8	618	5.31	0.00
98	X 2 : ホイルステンレスショット	232	0.18	99.8	129	97.5	22.6
99	X 3 : 砂型ステンレスショット	124	0.12	99.9	148	98.2	11.5
100	Y 1 : インライン設備集塵	9.71	0.00	100	13.9	100	99.5
101	Y 2 : シュレッダー-破砕粉	17.0	0.00	100	4.71	100	100
102	Y 3 : シュレッダー-飛散ダスト	30.9	0.24	99.8	55.0	100	66.3
103	Y 4 : 400m <sup>3</sup> 集塵ダスト	32.9	0.00	100	17.4	100	95.3
104	Y 5 : 回転炉	36.7	1.28	98.7	138	96.4	24.3
105	Y 6 : ハンダー集塵	37.6	8.69	91.3	40.5	100	79.3
106	Z 1 : 溶解炉集塵フード	17.8	0.36	99.6	42.2	100	77.6
107	Z 2 : ダイカスト研磨加工	1.27	5.77	94.2	36.0	100	84.2
108	AA1 : 溶解炉堆積粉	28.0	8.91	91.1	23.9	100	93.8
109	AA2 : 加工品バフ研磨	8.01	26.1	73.9	21.6	99.7	79.1
110	AA3 : 加工品スコッチ研磨	15.2	13.3	86.7	8.91	100	100
111	BB1 : 切粉乾燥排出	47.0	0.00	100	38.0	100	86.7
112	BB2 : 切粉乾燥ふるい下	55.9	0.13	99.9	197	78.6	5.03
113	BB3 : トロAl-Mg	37.2	0.00	100	15.4	100	94.9
114	BB4 : トロAl-Cu-Si	31.6	0.00	100	13.2	100	97.9
115	BB5 : トロAl-Mg	34.6	0.00	100	23.4	100	94.6
116	BB6 : トロAl-Cu-Si	31.4	0.00	100	17.2	100	99.5
117	BB7 : Al回収装置集塵	16.6	18.5	81.5	6.45	100	100
118	CC1 : アルミナ	409	0.00	100	1.58	100	100
119	CC2 : 水酸化アルミニウム	440	0.00	100	2.18	100	100
120	DD1 : 形材生地材切断	11.4	95.7	4.27	測定不可 (試料不足のため)		
121	DD2 : 形材複合皮膜材切断	7.88	70.0	30.0	118	86.8	35.8
122	F 9 : 研削粉450 加熱	355	0.38	99.6	31.5	100	85.5
123	F 10 : 研削粉800 加熱	45.6	0.16	99.8	20.1	100	96.2
124	B 11 : 板材砥石研磨	61.6	29.3	70.7	16.6	100	86.7
125	B 12 : 押出材バフ研磨	54.3	28.6	71.4	25.8	100	82.6
126	B 13 : 面削切粉	278	94.7	5.31	182	74.3	25.8
127	B 14 : 板材砥石研磨	117	64.7	35.3	122	98.7	32.6
128	B 15 : 板材バフ研磨	98.1	27.9	72.1	84.4	92.0	43.2
129	F 11 : 鍛造品研削粉	73.3	3.3	96.7	118	87.8	28.0
130	F 12 : 鍛造品ショットブラスト	123	13.6	86.4	20.5	100	84.1

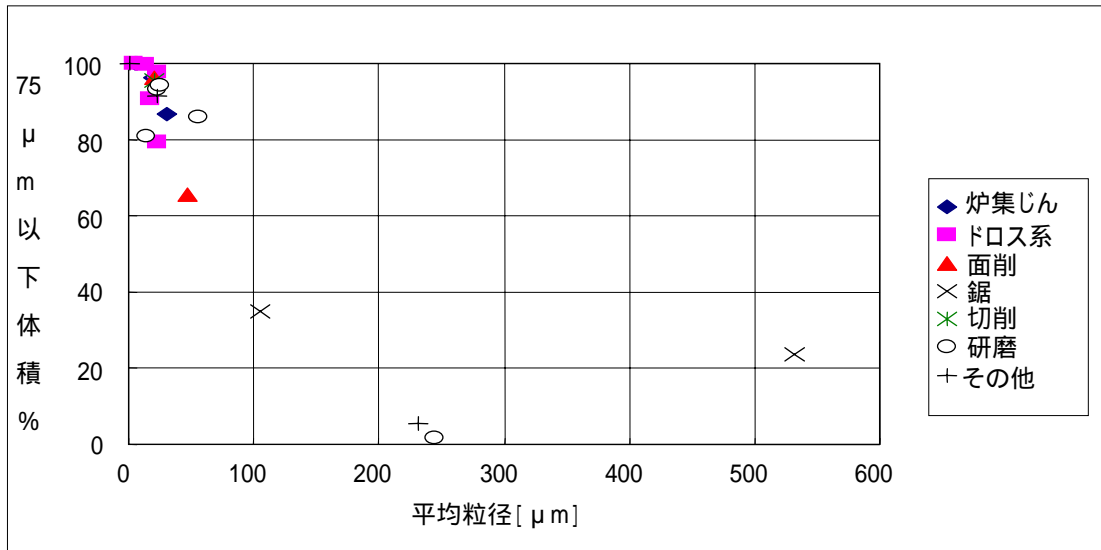


図 1.3-1 工程別粒度分布

### 1.3.2 爆発試験

粒径測定の結果より、粒径の大きさに3グループに分類し、各々のグループより合計37件を選択し爆発試験を実施した。試験項目は、爆発下限濃度試験、最小着火エネルギー試験、爆発圧力・圧力上昇速度試験とした。爆発試験装置の外観写真を写真 1.3-1 に示す。



写真 1.3-1 爆発試験装置

#### (1) 爆発試験結果

爆発試験の結果を表 1.3-4 に示す。

表 1.3-4 粉塵爆発危険性試験結果表

爆発受付 No.	粒度受付 No.	平均粒径 (μm)	爆発下限濃度 (g/m <sup>3</sup> )	最小着火エネルギー	最大爆発指数(K <sub>max</sub> ) (×10 <sup>2</sup> kPa・m/s)	最大爆発圧力(P <sub>max</sub> ) (×10 <sup>2</sup> kPa)	爆発危険性の分類	備考
01	01	15	300~320	10mJ<MIE 30mJ	23	5.7	C	
03	04	6	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
04	06	20	320~340	30mJ<MIE 50mJ	99	9.7	C	
05	07	106	100~110	300mJで着火せず	82	9.3	B	
06	08	7	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
07	10	56	700~750	300mJで着火せず	29	5.1	B	
08	12	13	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
09	16	532	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
10	19	24	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
11	36	231	480~500	300mJで着火せず	21	3.2	B	
12	41	27	80~85	1mJ<MIE 3mJ	432	9.7	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
13	21	4	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
14	22	31	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
15	26	245	380~400	300mJで着火せず	33	6.7	B	
16	27	21	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
17	29	47	650~700	300mJで着火せず	54	8.1	B	
18	31	18	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
19	32	24	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
20	33	20	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
21	118	2	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
22	73	25	70~75	1mJ<MIE 3mJ	389	11.1	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
23	74	23	95~100	3mJ<MIE 10mJ	334	11.0	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
24	76	23	1000~1100	300mJで着火せず	49	6.5	B	
25-1	122	32	120~130	1mJ<MIE 3mJ	297	10.2	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
25-2	123	20	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
26	124	17	200~220	3mJ<MIE 10mJ	50	6.8	C	
27	125	26	90~95	3mJ<MIE 10mJ	338	11.9	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
28	127	122	200~220	10mJ<MIE 30mJ	---	---	C	粉体不足のため圧力試験を中止した。
29	126	182	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
32	90	65	220~240	300mJで着火せず	50	8.2	B	
33	94	67	500~550	300mJで着火せず	88	10.5	B	
34	101	5	340~360	300mJで着火せず	69	9.8	B	
35	109	22	220~240	3mJ<MIE 10mJ	38	6.3	C	
36	110	9	65~70	1mJ<MIE 3mJ	190	10.7	C	
37	128	84	400~420	300mJで着火せず	---	---	B	粉体不足のため圧力試験を中止した。
38	129	118	340~360	30mJ<MIE 50mJ	40	6.8	C	
39	130	21	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	

\* 爆発受付 No.02,30,31 は、サンプル採取困難等の理由により、測定を中止した。

本試験での爆発危険性は、A：安全，B：爆発有/着火せず，C：注意，D：危険の記号で4つのクラスに分類した。

クラスA・安全： 爆発下限濃度 2000g/m<sup>3</sup>で爆発しなかった。

クラスB・爆発有/着火せず： 最小着火エネルギー - 300mJ で着火しなかった。

クラスC・注意： 最小着火エネルギー - 1~50mJ で着火した。

最大爆発指数が 200x10<sup>2</sup>kPa・m/s 以下であった。

クラスD・危険： 最小着火エネルギー - 1~10mJ で着火した。

最大爆発指数が 300x10<sup>2</sup>kPa・m/s 以上であった。

試験結果より、爆発リスクを A、B、C、D の4ランクに分類した(表 1.3-4 参照)。

クラスA: 粉塵爆発の可能性の目安である 2000g/m<sup>3</sup>で爆発せず、安全と判断される。

このクラスの特徴は、表 1.3-1~3 と対比すると明確であるが、粉塵粒径

が小さくても、炉集塵、ドロス系など高温酸化をしているものは安全と言える。粒度受付 No.41 (クラス D) を 450 °C で加熱した No.122 はクラス D だが、800 °C で加熱した No.123 はクラス A になっていることでも明確である。また、完全な酸化物のアルミナ (No.118) もクラス A である。

クラス B : 爆発はするが、静電気による着火の目安である 300mJ では着火せず。高温酸化している No.76 の亜鉛溶射集塵はクラス B。溶湯処理装置に堆積した粉塵である No.36 はクラス B である。各クラスの区分は微妙である。(クラス A といっても安心は禁物。)

クラス C : 最小着火エネルギー 1 ~ 50mJ で着火、静電気ですぐに着火するので要注意、要静電気対策。最大爆発指数は  $200 \times 10^2 \text{kPa} \cdot \text{m/s}$  であり、弱い。

クラス D : 最小着火エネルギー 1 ~ 10mJ で着火、最大爆発指数が  $300 \times 10^2 \text{kPa} \cdot \text{m/s}$  以上であり最も激しいランク。

なお、表の備考にあるように、この測定値は測定者と測定器保護のため濃度制限をして測定した結果であり、実際の値はより大きいと解釈すべきである。早急に具対策を実施すべきである。

静電気対策のみでなく、湿式での加工などの検討も望まれる。

工程別に見た爆発下限濃度と最小着火エネルギーの関係を図 1.3-2 に示す。

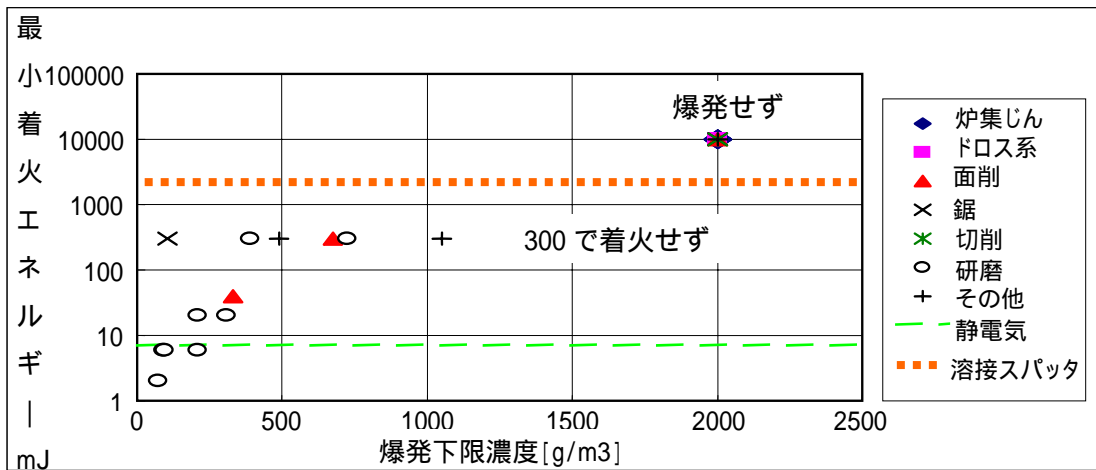


図 1.3-2 工程別に見た爆発下限濃度と最小着火エネルギー

「炉集塵機」、「ドロス系」は爆発しない。グラフの左下の危険領域には「研磨」が集まっている。

表 1.3-5 に製造工程と爆発危険性ランク (A、B、C、D) の関係を示す。

クラス D は全て「研磨」であり、「炉集じん」、「ドロス系」は全てクラス A である。

表 1.3-5 製造工程と爆発危険性 (A,B,C,D) の関係

安全 ← ⇔ → 危険

		A	B	C	D	計
素材工程	炉集じん	4				4
	ドロス系	5				5
	面削	1	1	1		3
仕上工程	鋸	1	1			2
	切削	1				1
加工工程	研磨	1	4	6	5	16
	その他	2	4			6
計		15	10	7	5	37

以上の結果より、爆発リスクのイメージを図 1.3-3 に示す。

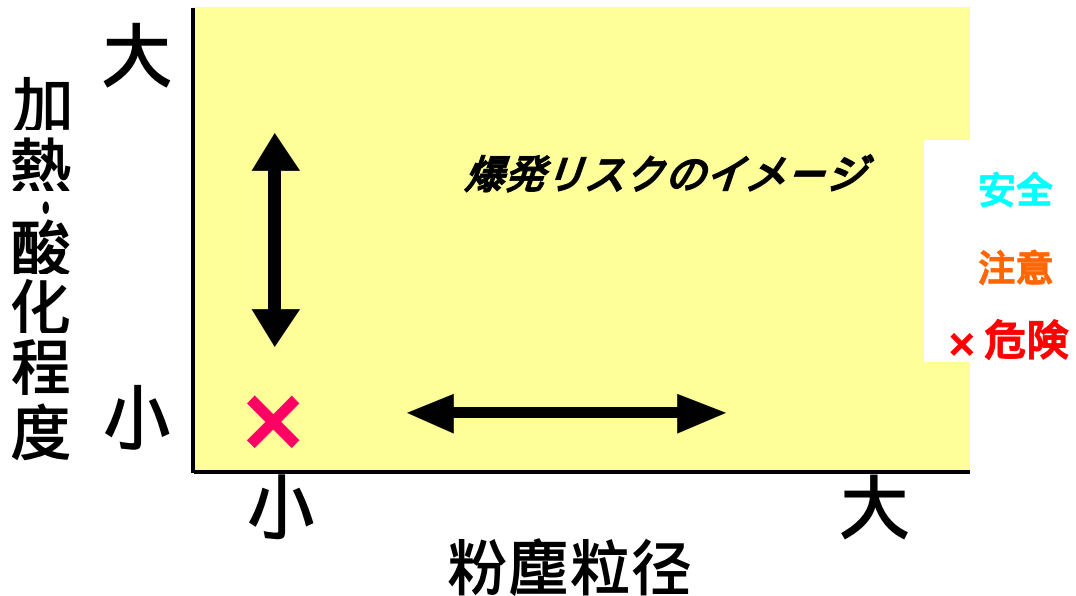


図 1.3-3 爆発リスクのイメージ

図 1.3-3 で、粉塵粒径が大きい場合に (注意) であるのは、現場で発生する粉塵は一見して粒径が大きい場合でも細かい粉塵も含んでおり、集塵された粉塵、集塵されず特定の箇所に滞留した粉塵が細かいものの比率が高い可能性も想定され、平均粒径で判定するのは危険であるためである。

### 1.3.3 粉塵の酸化の影響

前項の「クラス A」の説明に、アルミニウム粉塵が高温酸化されたものは爆発せずと記述したが、表 1.3-4 の粒度受付 No.122 と No.123 は、最大爆発指数が最大、最小着火エネルギーが最小で、最も爆発リスクが高いと判定される No.41 の粉塵を、それぞれ 450 °C、800 °C で加熱したサンプルであるが、450 °C 加熱の No.122 はクラス D と加熱前と同様最も危険なクラスに分類され、一方、800 °C 加熱の No.123 は安全なクラス A となった。この結果より、加熱しても焼鈍温度程度では粉塵の酸化は爆発リスクを低下させるほどには進行せず、溶解温度程度の加熱であれば爆発リスクは大幅に低下する。

表 1.3-4 の粒度受付 No.36 は溶湯処理装置の蓋に堆積した粉塵、No.76 は押出の亜鉛溶射（アークで溶射される）の粉塵であり、いずれもクラス C であり、高温に曝されたからといって安全と決め付けることはできない。

### 1.3.4 アルミニウム粉塵の高温酸化のメカニズム

微細なアルミニウム粉塵は粉塵爆発の危険性が高いが、酸化によりその危険性を低減できる可能性があると考えられるため、酸化の影響を調べた。用いた試料は表 1.3-4 に示された爆発受付 No.12（粒度受付 No.41）の粉塵で、研磨により生じた粉塵である。その平均粒径は 27 μm で、爆発の危険性はクラス D に分類された。はじめに、粉塵の酸化挙動を調べるため、粉塵を大気中、20 /min で加熱した場合の重量変化と発熱・吸熱変化を示差熱天秤（TG-DTA）により測定し、その結果を図 1.3-4 に示した。500 以下では、重量および発熱、吸熱の反応は見られず、酸化は生じていない。その後、530 近傍より重量の増加がはじまり、580 で急激に増加している。それに伴い、大きな発熱ピークが見られており、この温度付近で酸化が急激に生じていること示している。さらに温度が上昇すると、重量は徐々に増大するのが見られる。一方、660 付近には融解に伴う吸熱ピークが見られる。そこで、粉塵を大気中で 450、12h および 800、1h 加熱して酸化処理を行い、粉塵爆発の危険性を調べた。酸化後の平均粒径は 450 および 800 で酸化した粉塵で、それぞれ 32 μm および 20 μm で、酸化前とほぼ同じであった。表 1.3-4 の結果からは、爆発 No25-1 および 25-2 に見られるように、450 での酸化では爆発の危険性はクラス D であるが、800 で酸化した場合には、クラス A になり、粉塵爆発の危険性は著しく低減している。また、800、1h 酸化した粉塵について、Tg-DTA により調べた結果を図 1.3-5 に示した。800 までの加熱で重量変化は見られず、580 付近の大きな発熱ピークも見られない。660 付近にはアルミニウムの溶融に伴う吸熱ピークのみが見られており、粉塵は完全に酸化されていないことを示している。800 で酸化した場合には、表面が酸化し、それ以上酸化は進行しないと考えられる。一方、450 では表面の酸化が十分に生じていないため粉塵爆発の危険性は高いと考えられる。

以上のことから、高温で酸化した試料では、微細な粉塵においても、表面が十分に酸化物で覆われて粉塵爆発の危険性を低減していると考えられる。

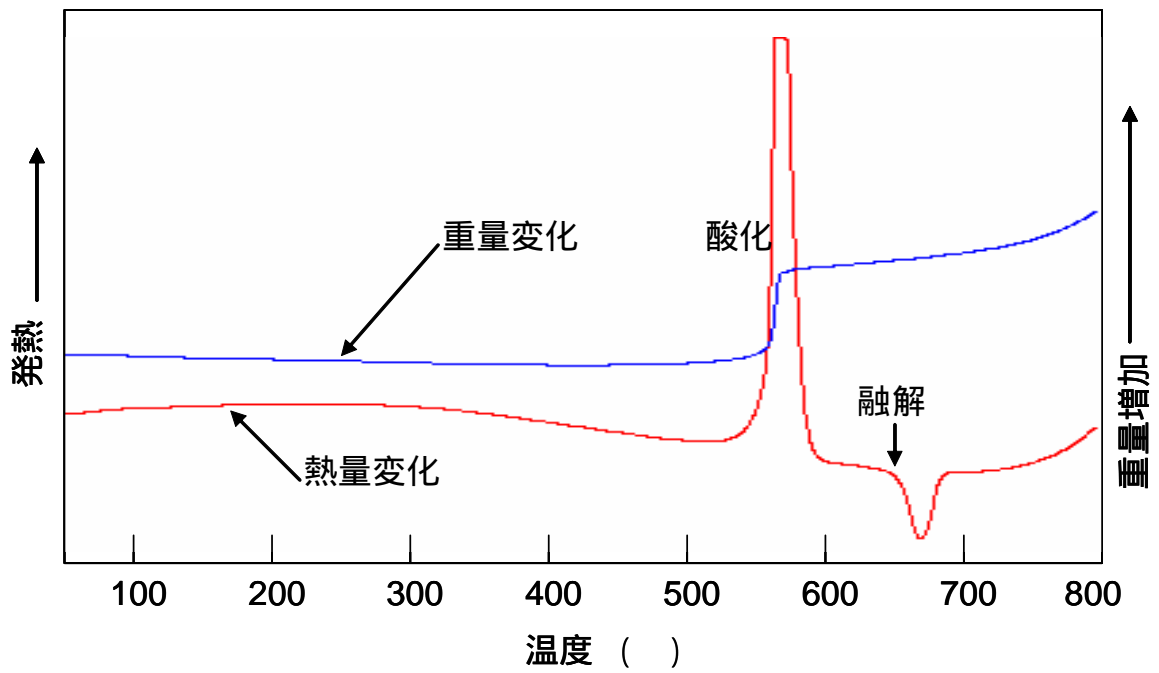


図 1.3-4 アルミニウム粉末を大気中で加熱した場合の重量および熱量の変化

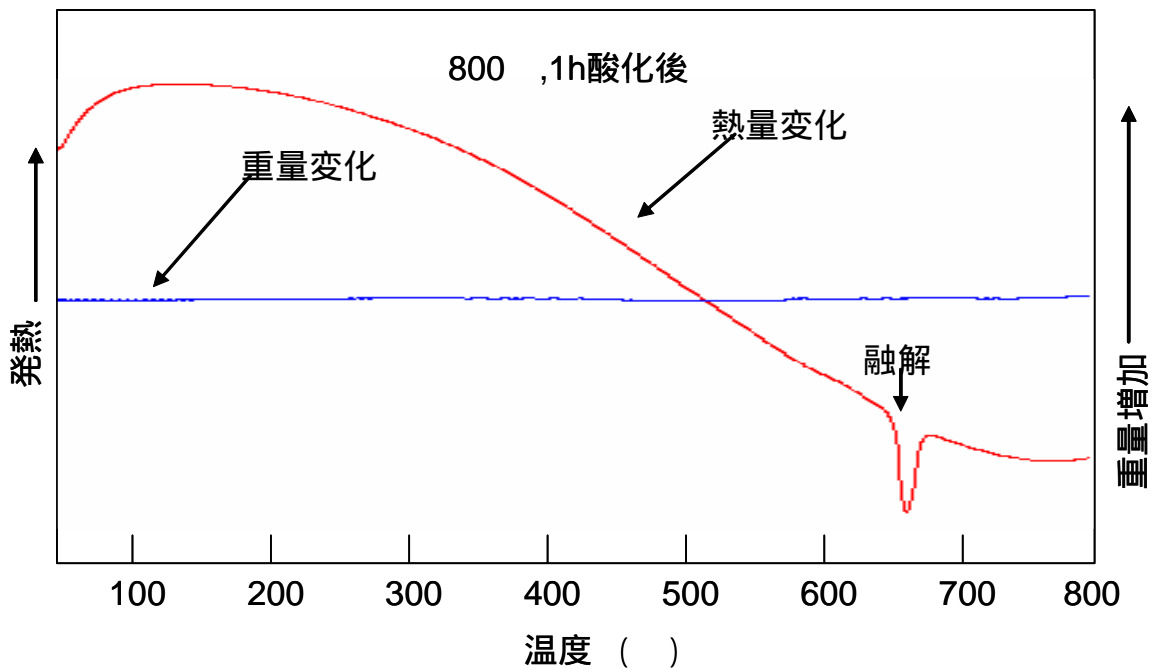


図 1.3-5 800 、1h 酸化したアルミニウム粉末を大気中で加熱した場合の重量および熱量の変化

## 1.4 まとめ

以上の測定結果を要約すると、以下のようになる。

- (1) アルミニウム製造業の各種工程・設備でアルミニウム粉塵を採取し、粉塵の粒径測定と爆発試験を実施した結果、爆発リスクが極めて大きな粉塵も安全な粉塵も普通に存在することが確認された。
- (2) 爆発リスクを決定する最大の要因は、粉塵が高温（溶解温度近傍）酸化されているか否かであり、高温酸化されたものは粒径が微細でも安全クラス（4ランクの中で）に分類された。
- (3) もう1つの要因は粉塵粒径であり、目安として平均粒径 50  $\mu\text{m}$  以下は要注意である。粒径測定の前処理で、水分・油分により篩いの目を通過しないものは乾燥処理を施したが、粉塵が空気中に浮遊しないように湿式で処理することは有効な対策である。
- (4) 実際の製造現場のアルミニウム粉塵は、種々の粒度のものが混在していること、酸化の程度、アルミニウムの含有率などの要因により、爆発リスクの分類は微妙であり、今回の結果は安心の判断材料ではなく、より安全な状態を実現するための判断材料として活用されることが望ましい。  
特に、今回クラス D に分類された粉塵の当該現場においては、早急な対策の実施が望まれる。

## 第2章 アルミニウム粉塵爆発対策マニュアルの作成

(ここでは、マニュアルの内容を記載するので、図、表は1章とダブル。)

### 2.1 粉塵爆発全体の発生状況

#### 2.1.1 年次別の発生件数と負傷者数

表 2.1-1 に 1952～1997 年の 46 年間の国内の一般工場（炭坑での炭塵爆発を除く）の爆発事故のデータを示す。

発生件数は年平均 6.1 件、死傷者は 697 名で、そのうち死者は 110 名に達する。

表 2.1-1 年次別粉塵爆発発生件数と負傷者数（1952～1997 年）<sup>2)</sup>

発生年 度	発生 件数	死傷者 数	死者 数	負傷 者数	発生年 度	発生 件数	死傷者 数	死者 数	負傷 者数
1952	6	33	7	26	1975	9	17	3	14
1953	9	17	1	16	1976	4	3	0	3
1954	9	20	1	19	1977	6	4	2	2
1955	4	0	0	0	1978	8	12	3	9
1956	7	21	7	14	1979	9	28	2	26
1957	4	8	2	6	1980	3	8	0	8
1958	8	22	4	18	1981	2	7	0	7
1959	7	12	3	9	1982	3	5	3	2
1960	6	1	0	1	1983	3	6	0	6
1961	3	6	0	6	1984	3	0	0	0
1962	8	26	3	23	1985	5	9	3	6
1963	11	32	2	30	1986	8	15	3	12
1964	7	11	2	9	1987	1	0	0	0
1965	12	42	1	41	1988	3	9	0	9
1966	6	23	3	20	1989	1	0	0	0
1967	8	48	9	39	1990	6	11	0	11
1968	12	21	4	17	1991	4	8	1	7
1969	8	17	6	11	1992	4	9	2	7
1970	6	12	7	5	1993	1	2	1	1
1971	7	14	2	12	1994	5	31	6	25
1972	7	28	6	22	1995	7	8	0	8
1973	12	55	2	53	1996	6	17	4	13
1974	7	13	3	10	1997	6	6	2	4
					合計	281	697	110	587

表 2.1-1 をグラフにしたものを図 2.1-1 に示す。

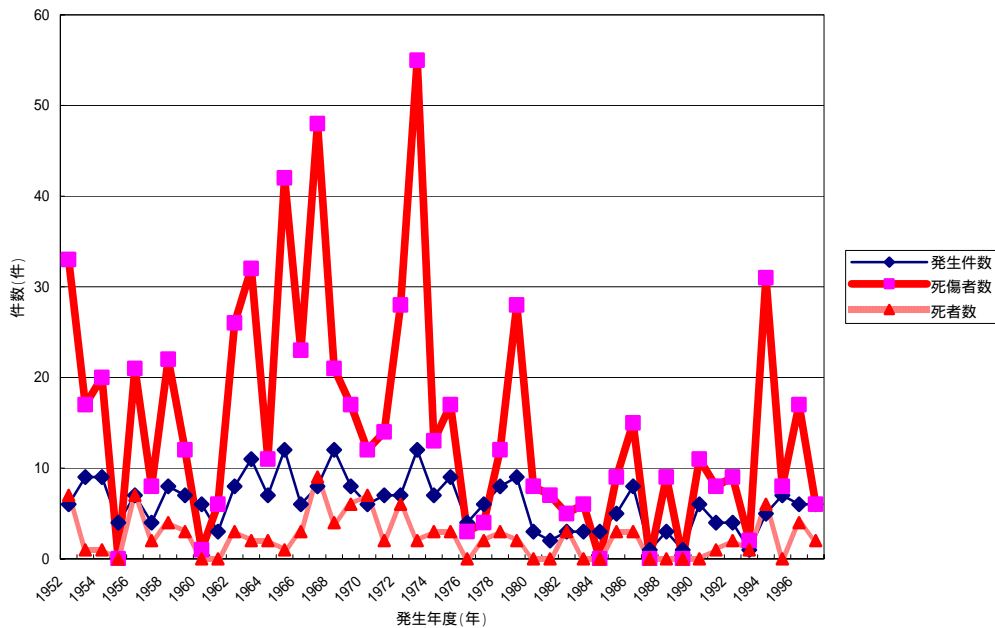


図 2.1-1 年度別粉塵爆発発生件数と死傷者数

### 2.1.2 粉塵の種類別の発生件数と負傷者数

表 2.1-2 に粉塵の種類別の発生件数と負傷者数を示す。金属による割合が約 25%で最も多く、その中でもアルミニウムが最大である。粉塵爆発を起こした粉塵の種類は時代によって変化し、金属粉による発生件数の比率は1981～1997年の17年間で約38%を占め、近年増加傾向にある。アルミニウム材料の利用が広がってきている反映でもあろう。粉塵爆発を引き起こした粉塵の種類も産業界の動向に大きく左右される。事故は、新しい製造法、物質などの採用時にしばしば発生する傾向があるので、技術開発に際しては事前に十分なリスクアセスメントを行い、その対策を実施する必要がある。

表 2.1-2 粉塵の種類別粉塵爆発発生件数と負傷者数（1952～1997年）<sup>2)</sup>

粉塵の種類	発生件数	死傷者数	死者数	負傷者数
石炭	13	48	7	41
無機化合物	31	38	10	28
硫黄	20	20	3	17
カーボン	5	4	0	4
珪化石灰	5	13	6	7
その他	1	1	1	0
金属	70	200	42	158
アルミニウム	39	134	29	105
マグネシウム	5	10	2	8
その他	26	56	11	45
農産加工品	48	128	17	111
飼料粉	16	24	3	21
でんぷん	8	42	4	38
小麦粉	7	14	1	13
米糠	3	16	5	11
その他穀粉	14	32	4	28
化学合成品	36	68	6	62
プラスチック	21	40	2	38
染料中間体	8	8	2	6
合成洗剤	2	6	1	5
その他	5	14	1	13
有機化学薬品	49	81	13	68
無水フタル酸	11	20	3	17
医薬品	7	9	1	8
ビスフェノールA	2	4	4	0
その他	29	48	5	43
繊維類	30	102	8	94
木粉	23	68	8	60
紙粉	4	23	0	23
その他	3	11	0	11
その他	4	32	7	25
合計	281	697	110	587

表 2.1-2 をグラフにしたものを図 2.1-2 に示す。

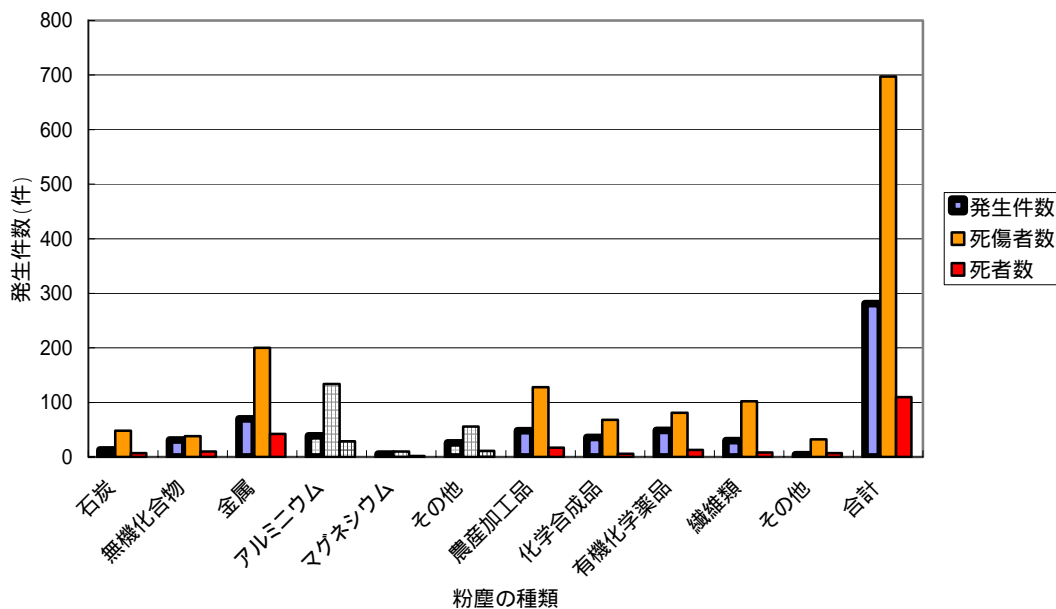


図 2.1-2 粉塵種類別の爆発発生件数と死傷者数

### 2.1.3 金属粉塵の爆発事例

表 2.1-3 に 1969～2008 年の爆発事例を示す。

表 2.1-3 1969～2008 年の爆発事例<sup>2)</sup>

番号	発生年月	業種	被害	状況	原因
1	1969年 5月	金属粉製造業	負傷者なし	スタンプ方式粉砕機にてアルミニウム箔を粉砕作業中、工場建屋棟より突然発火、水にて消火したが、粉塵爆発を起こした。(水による消火は不可)	危険に対する正確な知識の欠如。集塵機の未設置。
2	1969年 7月		死者 6 名 負傷者 2 名	アルミダイカスト部品、バリ取り機付属の集塵機が爆発した。	静電気による。静電気対策の不備。火花侵入による

					設備構造上の欠陥。
3	1970年 4月	金属粉製造工場	死者3名 負傷者3名	アルミニウム粉末のふるい分け作業中、集塵装置掃除中爆発、工場は壊滅した。	静電気がアルミニウム微粉末を発火。 集塵機の選定ミス、静電気対策の不備。 危険に対する正確な知識の欠如、職場の安全教育の不備。
4	1970年 7月	金属粉末製造業	死者3名 負傷者1名	アルミニウム粉製造篩別作業中、爆発した。	設備工事の溶接火花がアルミニウム粉に引火。 危険に対する正確な知識の欠如。工事業者に対する安全教育の不備。職場の整理整頓の不備。
5	1971年 7月	金属粉末製造業	負傷者1名	スタンプ方式粉砕機にてアルミニウム箔を粉砕作業中、出口壁側の刃型開閉器より発火し、工場内のアルミ粉塵に着火、爆発した。	危険に対する正確な知識の欠如。 集塵機の未設置。
6	1972年 6月	金属製品製造業	死者2名 負傷者2名	アルミインゴット製造工程にて、加温し型流し後、インゴット抜き棒のグラインダー研磨中、火花がアルミ粉末に引火し、堆積粉塵に着火、バグフィルターが爆発した。	作業内容により作業場所の隔離。 危険に対する正確な知識の欠如。

7	1972年 8月	金属製品 製造工場	死者2名 負傷者4名	アルミダイカスト、ショットブラスト工場 で休日、操業停止時設備工事の電気溶接火花が集塵機内アルミニウム粉末の堆積に引火、赤熱し、暫くして集塵機が爆発した。	危険に対する正確な知識の欠如。工事業者に対する安全教育の不備。
8	1972年 11月	塗料製造業	負傷者2名	金属粉塗料製造の亜鉛粉分解工程においてパイプレータ稼働中、浮遊亜鉛粉塵が爆発した。	整流器の絶縁不良から、電流がパイプレータに流れスパーク引火。設備管理（点検）の不備。
9	1973年 5月	金属粉末 製造業	死者1名 負傷者1名	フェロマンガン粉製造中、乾燥工程で爆発。休日で急な運転によるガス爆発が装置外の粉塵二次爆発を起こした。	乾燥設備の構造上の欠陥（直接加熱方式）、清掃管理の不備。職場の安全教育の不備。
10	1973年 10月	金属製品 製造業	負傷者3名	マグネシウム合金のダイカスト工場にて半製品の荒仕上げ工程中、作業者が鉄製ヤスリを尖らす目的でベルトサンダーに触れたところ、火花発生、集塵機に入り爆発した。	設備構造上の欠陥。（前処理の必要性） 危険に対する正確な知識の欠如。  （注）ショットブラスト、ベルトサンダー等の表面仕上用装置は粉塵爆発の危険性が大きい装置である。

11	1978年 9月	金属製品 製造業	死者2名 負傷者2名	マグネシウム合金ダイカスト鋳物の表面仕上げ工程で、集塵機の不調により粉塵が室内に充満。修理時不注意にもグラインダーへ鉄棒を接触させ、火花発生と同時に引火爆発した。	設備管理の不備。 設備構造上の欠陥。
12	1983年 4月	金属製品 製造業	負傷者3名	自転車リムの自動研磨ライン研磨装置の回転中のフランジに金属が接触し火花が発生。研磨装置内のアルミニウム粉塵や綿ぼこりに着火、燃え上がった。火がダクト・集塵機に着火し、それらが爆発した。	火花がアルミニウム粉塵、綿ぼこりに着火。ダクト・集塵機内のアルミ粉塵に着火し、爆発。 職場の安全教育の不備。 設備構造上の欠陥。
13	1988年 11月	セメント 製造業	負傷者3名	セメント用金属サイロ下部の補修作業でグラインダがけを行っていたところ、火花がサイロ室の隙間から屋外に漏れ、おりからの強風のため作業所屋上に堆積していたアルミ粉に着火、近くの塩ビ管を燃やし、さらにアルミ貯蔵室に引火、一部のアルミ粉を舞い上げて粉塵爆発を起こした。アルミ粉は、軽量気泡コンクリートの気泡生成（水素ガス発生）用の原料として使用。臨時作業中の事故である。	

14	1990年 2月	金属製品 製造業	負傷者3名	アルミ軸を研磨作業中、研磨機とカバーが接触。発生した火花がサイクロン集塵機ダクト内の堆積アルミ粉に着火し、集塵機が爆発した。	火花がアルミニウム粉塵を発火。集塵機の選定ミス。 危険に対する正確な知識の欠如、職場の安全教育の不備。 設備構造上の欠陥。
15	1990年 9月	非鉄金属2 次製錬業	負傷者1名	アルミ・カルシウム合金を破砕場で1mm以下の金属粉に破砕中、作業中発生した火花で着火し、隣接のバグフィルターが爆発。通常、火花が発生することがあるので窒素ガスをゴムホースから吹出しながら破砕していたが、事故時はそれを忘れた。	火花がアルミ・カルシウム合金粉塵を発火させた。集塵機の選定ミス。 職場の安全教育の不備。
16	1990年 12月	非鉄金属1 次製錬業	負傷者1名	金属クロムを粉砕、化学処理および成形する工程で、自動運転中局所排気装置のダクトおよび除塵装置内で粉塵爆発が発生した。	塩ビダクト内で発生した静電気が、排風ファンの摩擦熱による着火でサイクロン内で一次爆発し、バグフィルター内で二次爆発を誘発したものと推定。

17	1992年 7月		負傷者 4 名	屋外で、耐火レンガの原料になるアルミ・マグネ粉の金属缶から、高さ 1.5m のビニル袋内に投入し、落下途中で水を噴霧して、金属粉表面の酸化状況の試験中に爆発し、作業員 4 名がやけどで被災した。	金属粉と水が反応して水素を発生、それがビニル袋と金属粉との接触で発生した静電気で着火し、さらに金属粉の粉塵爆発を起こしたと推定。
18	1993年 10月		死者 1 名 負傷者 1 名	アルミ・マグネ合金粉末製造設備で、合金塊のフレコンをクレーンにより原料ホッパに投入中、鉄製のホッパとの間で衝撃火花が発生、ホッパ下の堆積粉塵などが燃えた。乾燥砂で消火し外から火は見えなくなったが、30 分程して密閉型ベルトコンベア内で爆発が起こった。	ベルトが焼き切れるまで時間がかかり、切れると同時に堆積粉塵が舞い上がり粉塵爆発が発生したと推定。
19	1994年 7月	清掃センター不燃物処理場	負傷者なし	清掃センター不燃物処理場で、不燃ごみを破砕機にかけて処理中、粉塵爆発が発生した。	破砕時に発生する衝撃火花により、金属粉（小型ボンベ、アルミ缶、スチール缶、スプレー缶等を破砕中）や木粉などが着火と推定。破砕機投入口の手動式散水装置は使用せず。

20	1995年 2月	飲料用アルミ缶再 処理工場	負傷者2名	飲料用アルミ缶を再 処理する新設工場で 設備全体を試運転中、 乾式集塵機が爆発し、 火災となった。	アルミ缶を細片 にし、溶解・成型 する工程において、 糖分の含まれた液体 の付着が多く、破砕 機のフィーダスクリー ンが目詰まりを起 こし、細片が繰 り返し破碎を受け、 アルミ粉が形成さ れたためと推定。 着火源は不明。
21	1995年 6月		負傷者1名	アルミ灰を水に溶解 する作業中、小爆発 が発生した。爆発音 を聞いた作業者が 駆け付け、水槽周 辺を点検中に2回 目の爆発が発生し た。	事故品に塩化アルミ が混入し、気中の湿 気と反応して発熱し 、これが金属アルミ の水和反応を促進し 、空気と触れて自然 発火したため、アル ミの粉塵爆発と水素 のガス爆発が生じた と推定。
22	1996年 6月	亜鉛メッキ鋼管製 造工場	負傷者なし	亜鉛メッキ鋼管製造 工程で発生する亜鉛 粉塵(20~30 $\mu$ m) の局所排気装置にお いて異常音があった 直後、集塵機内で粉 塵爆発を起こし、集 塵機やダクトおよび 連結部などが破損し た。	局所排気装置のファ ンの軸に粉塵などが 付着してバランスが 崩れ、偏摩耗によっ て稼働中に軸が疲労 破壊して折損し、そ の衝撃火花が集塵機 に達して着火源にな ったと推定。

23	1997年 2月	電気メッキ工場	負傷者 1 名	電気メッキ工場でクロムメッキされたロッドをバフ研磨中、研磨機がオーバーランして金属部分に触れたため摩擦火花が生じ、その火花が集塵機に達し、集塵機内の研磨材が粉塵爆発を起こした。この際、研磨機の操作盤で操作していた作業者が火炎を浴びて火傷を負った。	
24	1997年 2月		負傷者 1 名	稼働開始のため、純アルミ粉製造ラインを運転開始してから、約30分後、突然大きな音が立て続けに2度鳴り、当該ラインと隣接ラインの順に爆発、火災となった。爆発により、サイクロン室やバグフィルタ室が全壊、付近の建物の壁の一部や近隣住宅の窓ガラスが破損した。	プレートファン室内での浮遊アルミ粉が静電気等で着火したことで、バグフィルタ室へ誘爆、続いて隣接ラインが2次爆発したと推定。
25	1997年 4月	タンタル粉製造工場	死者 1 名 負傷者 1 名	携帯電話等の電子機器に使用される高性能コンデンサ用として需要の高いタンタル粉の製造工場で、局所排気設備のバグフィルタにおいて集塵したタンタル粉を回収作業中、突然集塵機が発火、作業者の着衣等に引火した。	静電気放電着火の可能性大。

26	1998年 5月	マグネシウム 鋳物 工場	死者1名	マグネ鋳造品のバリ 取り作業用に設置し てあった集塵機内の 回収粉を処理中、爆発 が発生し、作業者が全 身火傷で死亡した。	
27	1998年 9月	マグネシウム 鋳物 工場	死者1名 負傷者1名	マグネ鋳造品(ビデオ カメラケース)を研磨 する工程に設置され ている集塵機内に溜 まったマグネ粉を取 り出そうとして、フィ ルタを動かすシェー キングレバーを操作 したところ、なんらか の原因で発火し爆発 を起こし、工場が炎上 した。	
28	1999年 1月		死者1名 負傷者1名	マグネ合金粉塵の集 塵機の改造工事のた め、集塵機内の堆積粉 塵の除去作業を行っ ていたところ、集塵機 内で爆発した。	原因不明。作業者の身 体に帯電した静電気が 着火源となった可能 性。

29	1999年 5月	フェロマン ガンの金 属粉碎 工場	死者1名 負傷者1名	フェロマンガンの金属粉碎工場で爆発が起き、爆風で鉄骨平屋一部3階建て工場約760m <sup>2</sup> の屋根やスレート壁の一部が吹き飛ばされ、従業員1名が全身火傷で死亡、他の従業員も重体となった。爆発当時、粉末状のマンガンを製造中で、爆発前に金属粉等を集める集塵ダクト付近で金属粉が燃えるぼや騒ぎが発生したため、従業員らが消し止めた後、機械等の点検作業中に粉碎機とダクトをつなぐパイプが過熱しているのに気づき、高さ7~8mのダクト最上部の蓋を開けたところ、爆発が発生した。	空気の流入が被害を拡大させたと推定。
30	2000年 9月		死者1名 負傷者1名	マグネ合金製の携帯電話筐体の研磨作業により発生する粉塵を捕集するバグフィルタ集塵機内を清掃中、同集塵機内で爆発が発生した。	
31	2000年 11月		負傷者3名	マグネシウム集塵機の移設作業のため、アーク溶接機を使用したところ、集塵機内にマグネ粉塵が残存していたため、アークが	

				着火源となって爆発した。	
32	2001年 8月		負傷者6名	携帯電話の筐体をバフ研磨機により仕上げ作業中、バフ研磨機の粉塵を捕集するダクト内で爆発した。	バフ研磨作業を行う作業者の身体に帯電した静電気の放電により着火したマグネ合金粉塵がダクト内に吸引され、ダクト内で爆発したと推定。
33	2002年 1月	アルミホイール製造工場	負傷者2名	アルミホイールなどの自動車部品を生産している工場内で、アルミの切り粉を天然ガスで燃焼させて溶かす装置が爆発、近くで安全点検を行っていた従業員2名が火傷を負った。「ドーン」という爆発音がし、工場の屋根のトタンや壁の一部が焼け、窓ガラスが割れた。	
34	2006年 3月	アルミペースト製造工場	負傷者3名	アルミペーストの原料供給作業中、集塵系統で爆発が起き、その火炎が他の分級機集塵ダクトに入り2回目の爆発が起き、それによりダクトが外れ、内部のアルミ粉が建屋内部に飛散、その粉塵に爆発の火が着火源になり、3回目の大きな爆発が起きた。	原料供給機内の軸受け部で擦られたアルミ粉に新生面ができ、集塵ラインで空気中の酸素と反応し発熱、これが着火源になり、最初の爆発が発生したと推定。

35	2006年 12月	化学品製 造工場	負傷者2名	鑄型の保温剤を製造 中、アルミ粉と珪砂な どを混合作業中に爆 発が3回起き、工場の 屋根や壁が吹き飛ん だ。	
36	2007年 10月	マグネシ ウム脱硫 剤製造工 場	負傷者2名	工場の解体作業中、外 付けダクト（送風機） につながる集塵機を ガスバーナで切断作 業中、爆発が発生し た。	ダクトはマグネシウ ムの保管場所につな がっており、ダクト内 側に付いていたマグ ネシウム粉に火花が 引火した可能性あり。
37	2008年 1月	アルミニ ウム粉末 製造工場	負傷者1名	鉄鋼用発熱剤製造作 業中爆発が発生した。	

#### 2.1.4 アルミニウム粉塵爆発事例の写真

爆発現場の写真を写真 2.1-1、写真 2.1-2 に示す。



写真 2.1-1 粉塵爆発現場



写真 2.1-2 粉塵爆発現場

## 2.2 粉塵爆発3条件

### 2.2.1 粉塵爆発3条件

爆発は「酸素」、「爆発下限濃度以上の粉塵」、「最小着火エネルギー」の3条件が揃って起こる。この3条件が1つでも欠けると粉塵爆発は起こらない。(図2.2-1参照。)

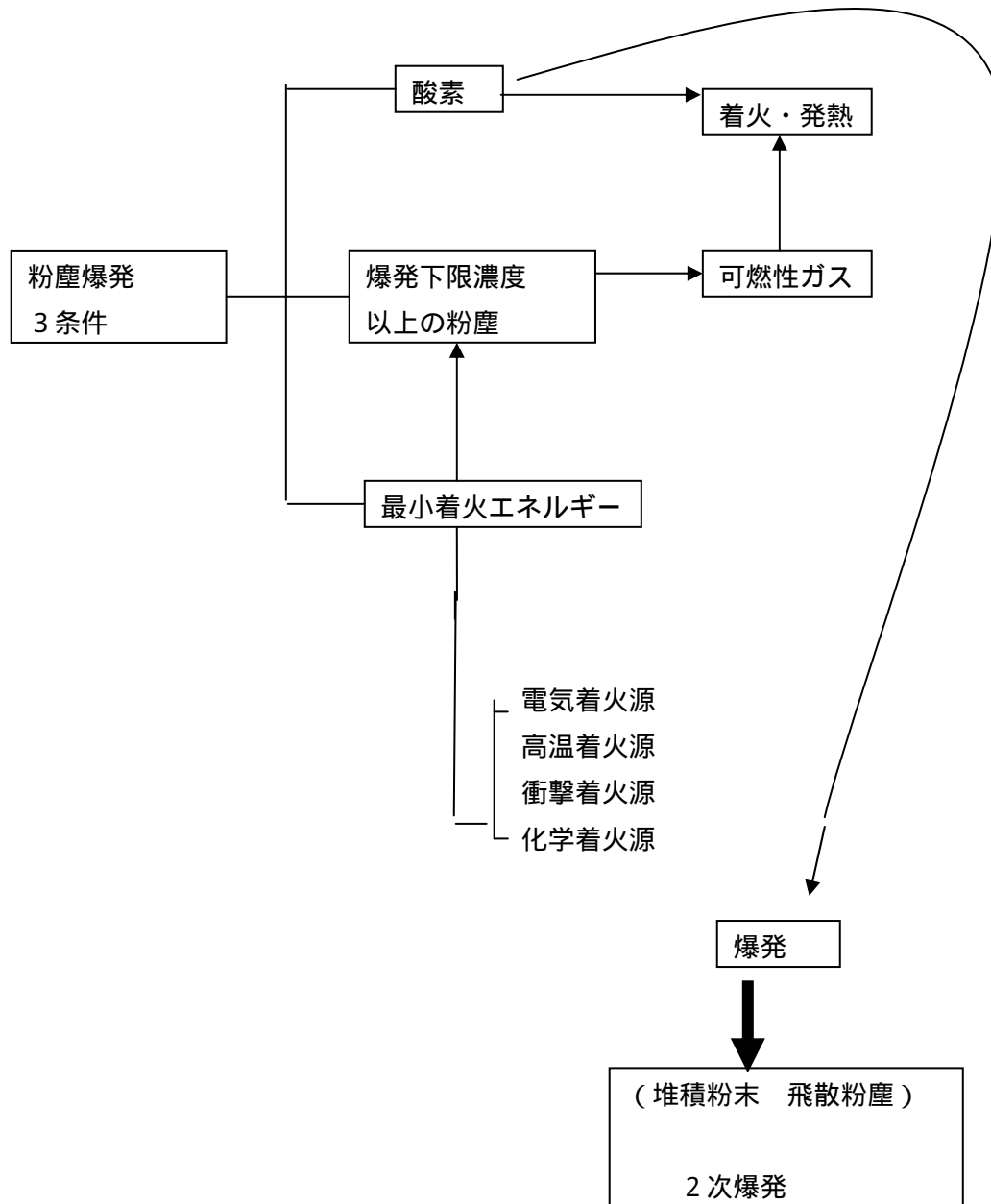


図 2.2-1 粉塵爆発3条件

## 2.2.2 爆発し易い要因は

爆発し易さの一般的傾向を表 2.2-1 に示す。諸条件がそろえば大災害になる。

表 2.2-1 粉塵爆発に関する因子と一般的傾向

項目	因子	爆発し易さの一般的傾向
粉塵の性質	化学的成分	酸素と反応し易い 可燃性ガスを発生し易い 発熱量が高い 不活性成分が少ない
	粒子径、粒度分布	粒子径が小さい
	粒子の形状	比表面積が大きい
	水分	水分が少ない
	温度	温度が高い
	飛散・浮遊性	浮遊・飛散する
	濃度	爆発可能濃度範囲では濃度が高い (爆発下限濃度)
雰囲気	酸素濃度	酸素濃度が高い
	不活性ガス	不活性ガスが少ない
	湿度	湿度が低い
	温度	温度が高い
	圧力	圧力が低い
	スペース	スペースが広い
着火源	エネルギーの種類	熱に変換し易い
	着火源の形	持続するもの
	温度	温度が高い

\* 粉塵爆発に対する水分の作用（水分は粉塵爆発の抑制に効果的）

飛散・浮遊性を抑制する。

水蒸気が酸素濃度を低下させる。

水分が気化 発熱量を低下 冷却作用 反応抑制 消炎効果

水蒸気が不活性ガスとして発熱量を低下させる。

静電気の発生を低下する。

静電気の放電を促進する。

## アルミニウム粉塵は要注意！！

アルミニウム、マグネシウム粉は水と反応し激燃焼（爆発）するので、消火には絶対に水を使用してはならない。

### 2.2.3 粉塵爆発はどのような工程で起こるか

表 2.2-2 に示すように爆発場所の工程別分類では、粉碎製粉工程と集塵分離工程が非常に多く、その他の工程でも、粉塵発生場所や粉塵取扱場所では必ず集塵分離工程があるので、粉塵爆発の多くはここで発生する。

また、輸送工程や貯蔵工程の中で、空間部分が大きく、粉塵雲が存在し、その流速のゆるやかな場所では大きな爆発を生じる危険性がある。

可燃性粉塵の堆積層に、空気による攪拌や混合なしに着火しても粉は爆発することはない。これは空隙に浸透する酸素が限定されていることによる。その結果、燃焼は限られ粉は単に燻るのみである。しかし、堆積粉塵が何らかの作用により一部が空気と混合し、爆発濃度の粉塵雲を生じ着火した場合、第一次爆発として浮遊粉塵が爆発し、その爆発エネルギーにより堆積粉塵が巻き上げられ、確実に大規模な第二次粉塵爆発が起こる。このため、爆発の引き金と爆発の中心（場所）が一致するとは限らず、発生場所を特定することは非常に難しい。

表 2.2-2 工程別発生状況（1952～1997年）<sup>2)</sup>

一次爆発の工程	発生件数
粉碎・製粉	58 (20.6%)
集塵・分離	58 (20.6%)
乾燥	36 (12.8%)
輸送	24 (8.5%)
貯蔵	21 (7.5%)
燃焼室	6 (2.1%)
研磨	9 (3.2%)
修理	19 (6.8%)
その他	50 (18.8%)
合計	281

## 2.3 爆発原因

### 2.3.1 着火源別の発生件数の統計データ

着火源別の発生状況を表 2.3-1 に示す。(1952～1997年)

表 2.3-1 着火源別発生状況<sup>2)</sup>

	着火源別	発生件数(比率%)
高温 着火 源	摩擦衝撃	88(31.3%)
	異物混入	28(10%)
	その他	60(21%)
	メタルの過熱	14(5.0%)
	裸火	17(6.0%)
	溶接・溶断火花	29(10.3%)
電気 着火 源	静電気のスパーク	48(17.1%)
	電気設備	13(4.6%)
化学 着火 源	自然発火	30(10.7%)
	不明	25(8.9%)
	その他	17(6.0%)
	合計	281

### 2.3.2 着火源別の発生原因

#### (1) 摩擦・衝撃による災害発生原因(88件、31.3%)

搬送工程における物質重量調整の誤りによる機器の過剰負荷による摩擦発熱。

工程中における、金属・石などの異物混合による摩擦・衝撃による発熱。

プラント機器の損傷による発熱、ねじの緩み・回転部の損傷。

作業者の清掃・点検・修理作業によるミス。

#### (2) 裸火(17件、6.0%)

作業者のタバコ喫煙による粉塵着火。危険に対する正確な知識の欠如。

(3) 溶接・溶断 (29 件、10.3%)

プラント機器の修理作業中の溶接溶断火花による粉塵着火。危険に対する正確な知識の欠如。

(4) 静電気現象 (48 件、17.1%)

粉体を種々の手段により移動する場合、接触、衝突などにより静電気が帯電発生、静電気の火花放電により粉塵爆発となるケースが非常に多い。

\* (2)、(3)の 46 件、16.3%は職場の安全教育により減少できる。

## 2.4 可燃性粉塵の爆発特性

### 2.4.1 可燃性粉塵の爆発特性

粉塵自体の酸化反応によって生じる気体量の大小、燃焼熱の大小、気体熱量の発生速度の大小は、爆発の激しさを左右する要因である。

(1) 熱分解ガスの発生量の大きい有機薬品やプラスチック粉塵、燃焼熱が非常に大きなアルミニウム粉塵などは、激しい爆発を起こす。

揮発分の少ない炭素質粉塵などは、燃えるが激しい爆発は起こらない。また、農産物等の天然物質の粉末で灰分の多いものや、発熱量の少ない鉱物粉などは、弱い爆発をする。多くの可燃性粉塵は、純物質は少なく、ほとんどが混合組成のものや構造のはっきりしないものが多いので、危険性も実測しないと断定できない。

(2) 爆発のし易さ、激しさは、粒子が小さいほど大きくなる。粉塵の大きさは、当然浮遊性にも関係し、粒径が小さいものほど浮遊時間が長く、落下速度が小さいため、空気中に爆発性混合気を生成する時間が長く、燃焼の伝播が容易である。また二次的な爆発を生じ易いという危険性もある。

表 2.4-1 に金属・鉱物・無機化合物などの可燃性粉塵の爆発危険性の特性データ(抜粋)を示す。

表 2.4-1 金属・鉱物・無機化合物などの爆発危険特性

名 称	平均粒 径 μm	爆発下 限濃度 g/m <sup>3</sup>	最大爆 発圧力 MPa	爆発指数 (Kst) bar・m/s	くすぶ り温度 °C	最 小 発 火エネルギー - mJ
亜鉛（集塵機から）	< 10	250	0.67	125	440	
アルミニウム/鉄（50:50）	21	250	0.97	230	> 450	
アルミニウム/ニッケル （50:50）	< 10		1.14	300		
アルミニウム/マグネシウム	130		1.04	52	> 450	
アルミニウム粉	22	30	1.15	1100	> 450	
珪素（集塵機から）	< 10	60	0.95	116	> 450	250
コバルト/アルミニウム/チタン（62:18:20）	25	500	0.74	134	> 450	
鉄（集塵機から）	12	500	0.52	50	> 450	
フェロシリコン（22:78）	21	125	0.92	87	> 450	
フェロマンガン	< 10		0.68	84	> 450	
マグネシウム	28	30	1.75	508		
マンガン	16		0.63	157	285	
褐炭（電気集塵機から）	55	60	0.90	143	240	
木炭	19	60	0.85	117	270	
硫黄	20	30	0.68	151		
すす（集塵機から）	< 10	30	0.88	88	570	
赤燐	18		0.79	526	340	

表の説明

爆発下限濃度	最大爆発圧力	爆発指数 (Kst)	くすぶり温度	最小発火 (着火) エネルギー
g/m <sup>3</sup>	Pa	bar · m/s	°C	mJ
<p>粉塵爆発は、粉塵濃度が低すぎても高すぎても爆発が生じなくなる限界がある。この内、濃度の低い方を下限濃度という。爆発下限濃度は「爆発のし易さ」を表す特性値として用いる。</p>	<p>密閉容器内で最適粉塵濃度における爆発圧力の最大値をいう。Kst値と共に放散口の開口面積の計算に用いる。</p>	<p>容器 1m<sup>3</sup>の基準爆発容器における最大爆発圧力上昇速度に相当する値で次式で表す。  <math>Kst=(dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3}</math>                      (dp/dt)<sub>max</sub> は試験装置での最大爆発圧力上昇速度 (bar · m/s), V は試験装置容積(m<sup>3</sup>)。Kst 値は「爆発の激しさ」を表す特性値で放散口の開口面積の計算に用いる。</p>	<p>金属板上に置かれた可燃性粉塵が金属板を加熱した時に自ら着火 (発火) する最低の温度。</p>	<p>最適粉塵濃度において着火・爆発する発火 (着火) エネルギーの最小値。</p>
<p>数値が小さい程、爆発し易い。</p>	<p>数値が大きい程、危険。</p>	<p>数値が大きい程、爆発が激しく危険。</p>	<p>数値が小さい程、着火し易い。</p>	<p>数値が小さい程、着火し易い。</p>

## 2.5 アルミニウム粉塵の爆発特性

アルミニウム製造業の現場で発生するアルミニウム粉塵の爆発リスクの特徴を、図 2.5-1 に示す。

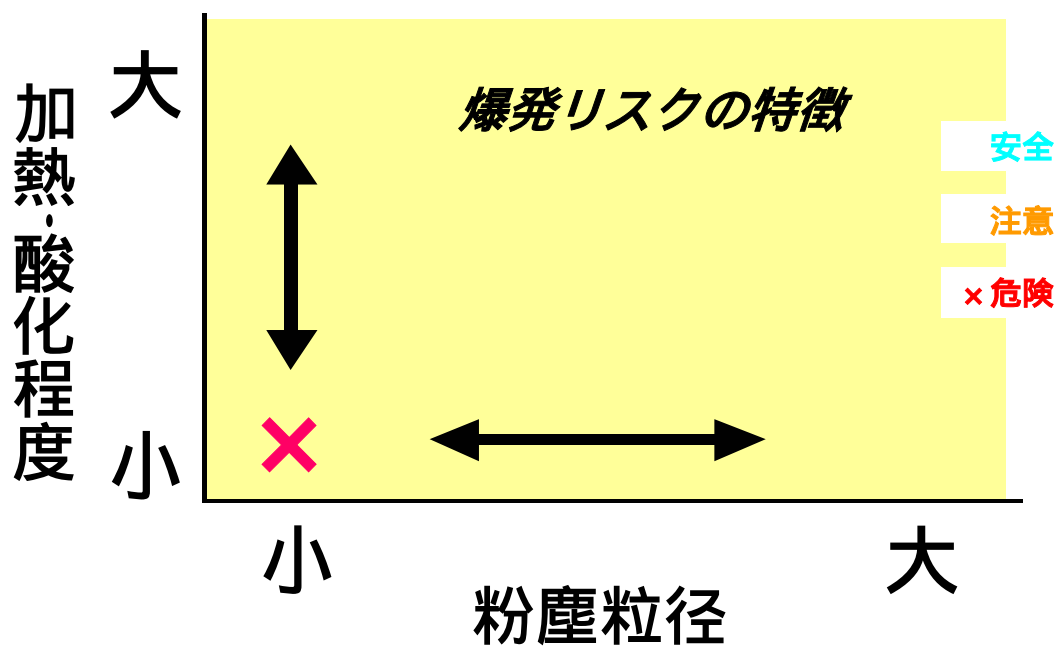


図 2.5-1 アルミニウム粉塵の爆発リスクの特徴

溶解温度に近い温度で酸化された粉塵は安全性が高く、高温酸化されていない粉塵は粉塵粒径が小さい程爆発リスクは高い。

製造工程と爆発リスクの関係を、表 2.5-1 に示す。

表 2.5-1 製造工程と爆発リスク (A,B,C,D) の関係

安全 ←————→ 危険

		A	B	C	D	計
素材工程	炉集じん	4				4
	ドロス系	5				5
	面削	1	1	1		3
仕上工程	鋸	1	1			2
	切削	1				1
加工工程	研磨	1	4	6	5	16
	その他	2	4			6
計		15	10	7	5	37

表で明らかなように、最も危険なクラス D は全て「研磨」である。粉塵が高温酸化している「炉集じん」、「ドロス系」は全て最も安全なクラス A である。

図 2.5-2 に、工程別に見た爆発下限濃度と最小着火エネルギーの関係を示す。

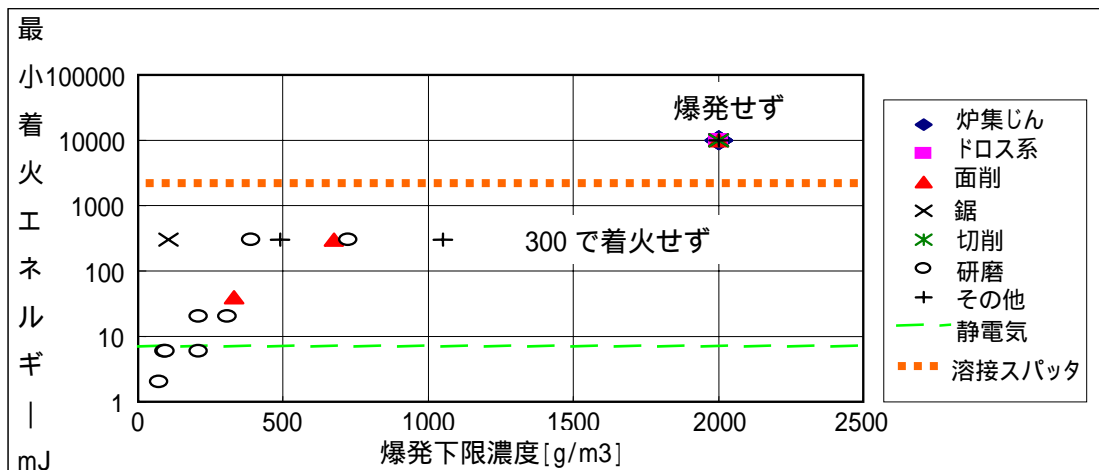


図 2.5-2 工程別に見た爆発下限濃度と最小着火エネルギー

最も危険な領域である左下の最小着火エネルギーが小さく、爆発下限濃度が低いところには「研磨」が集中している。

これまで示した、図 2.5-1、表 2.5-1、図 2.5-2 は、表 2.5-2～4 粉塵粒度分布測定結果表と、表 2.5-5 粉塵爆発危険性試験結果表とをまとめたものである。

表 2.5-5 では粉塵爆発のリスクを 4 ランクに分類したが、アルミニウム製造業の現場には、最も危険なクラスから安全なクラスまでの粉塵が普通に存在していることが判る。表 2.5-2～4 の粉塵粒度分布測定結果と照合し、爆発特性の特徴とリスクの大きさを理解し、アルミニウム粉塵爆発リスクの低減に役立てて欲しい。

表 2.5-2 粉塵粒度分布測定結果表（試料 No.1～41）

No.	試料略称	試料総量 (g)	710 μmふるい分け		710 μmふるい下の粒度分布		
			ふるい上 (質量%)	ふるい下 (質量%)	平均粒径 (μm)	300 μm以下 (体積%)	75 μm以下 (体積%)
01	A 1 : パフ研磨	31.5	20.9	79.1	14.8	100	81.0
02	A 2 : 1.スクラップ	10.7	97.7	2.32	測定不可 (試料不足のため)		
03	A 3 : 2.スクラップ 建屋棧	44.8	11.0	89.0	11.7	100	98.7
04	A 4 : 3.鑄造保持炉	64.8	24.4	75.6	5.52	100	100
05	A 5 : 4.ドロス処理	58.8	1.68	98.3	11.7	100	99.1
06	A 6 : 5.面削スクラップ	32.7	5.09	94.9	20.4	100	96.2
07	A 7 : 6.プレートスクラップ	6.56	4.42	95.6	106	95.3	34.9
08	B 1 : 溶解炉周辺	51.2	45.6	54.4	6.53	100	100
09	B 2 : 湯口切断機	8.93	96.1	3.91	測定不可 (試料不足のため)		
10	B 3 : 仕上げベルトサダ-	32.5	6.26	93.7	56.0	100	86.0
11	B 4 : UBC解砕くず	19.6	100	0.00	測定不可 (試料不足のため)		
12	B 5 : UBC溶解炉ド口	54.8	2.28	97.7	12.9	100	99.8
13	B 6 : 押出溶解	23.6	2.75	97.2	36.9	100	77.8
14	B 7 : 押出鑄造	21.8	25.2	74.8	33.9	90.6	68.4
15	B 8 : 押出プレート	3.43	95.8	4.17	測定不可 (試料不足のため)		
16	B 9 : 押出仕上げ	30.3	85.0	15.0	532	34.1	23.5
17	B 10 : 押出磨き粉	27.1	4.85	95.1	73.4	90.6	50.4
18	C 1 : 溶解保持炉	38.9	12.3	87.7	32.2	100	81.4
19	C 2 : ド口処理集塵	27.0	0.78	99.2	23.6	100	97.8
20	C 3 : 切断機スクラップ	55.0	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
21	D 1 : 灰しぼり機	16.5	10.8	89.2	4.33	100	100
22	D 2 : 溶解炉周辺	12.7	5.24	94.8	31.0	100	86.7
23	D 3 : 加工機	21.8	96.3	3.71	測定不可 (試料不足のため)		
24	D 4 : フライス-1	45.6	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
25	D 5 : フライス-2	56.4	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
26	D 6 : パフ研磨粉	70.0	10.5	89.5	245	60.7	1.69
27	D 7 : 切削粉	33.6	58.3	41.7	20.7	100	95.4
28	D 8 : 溶滓処理	30.2	9.59	90.4	12.4	100	98.3
29	D 9 : 面削機	30.4	1.05	98.9	47.0	98.1	65.7
30	D 10 : 炉廻りダケ	16.5	6.92	93.1	17.2	100	96.7
31	E 1 : ド口処理集塵	21.6	4.31	95.7	18.0	100	90.8
32	E 2 : R-列-ベルトダスト	42.3	1.66	98.3	23.5	95	79.4
33	E 3 : 溶解保持炉	32.3	2.10	97.9	20.1	100	96.3
34	F 1 : 溶解炉ピット	32.9	33.9	66.1	29.8	100	93.1
35	F 2 : 溶解炉上部	24.8	0.89	99.1	28.4	100	96.9
36	F 3 : 溶湯処理槽蓋	75.0	14.1	85.9	231	60.8	5.60
37	F 4 : 灰処理小屋	19.0	4.90	95.1	24.8	100	100
38	F 5 : 溶解炉上部	28.5	3.44	96.6	31.5	100	87.8
39	F 6 : 保持炉上部	35.7	2.62	97.4	25.7	100	92.1
40	F 7 : 保持炉下部	38.0	18.8	81.2	30.2	100	78.3
41	F 8 : グラインダ-研削	31.8	0.00	100	26.7	100	98.7

表 2.5-3 粉塵粒度分布測定結果表（試料 No.42 ~ 80）

No.	試料略称	試料 総量 (g)	710 $\mu\text{m}$ ふるい分け		710 $\mu\text{m}$ ふるい下の粒度分布		
			ふるい上 (質量%)	ふるい下 (質量%)	平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	300 $\mu\text{m}$ 以下 (体積%)	75 $\mu\text{m}$ 以下 (体積%)
42	G 1 : 加工機	38.1	2.86	97.1	62.9	95.7	57.5
43	G 2 : バフ面取	31.1	0.91	99.1	31.6	100	91.6
44	H 1 : 切断集塵機	20.8	49.3	50.7	68.3	92.0	52.0
45	H 2 : ビレット研磨集塵	65.6	0.42	99.6	130	100	16.7
46	H 3 : アルミ溶解ドラ	41.9	5.63	94.4	116	82.9	36.7
47	I 1 : アルミ集塵機内	26.6	4.98	95.0	44.3	100	72.6
48	J 1 : サクション室	29.7	測定不可（油分が多く、ふるい分けができない。）				
49	J 2 : セパレーター	4.05	84.4	15.6	44.4	99.1	85.1
50	K 1 : 鑄造Si集塵機内	10.1	0.00	100	34.6	100	88.9
51	K 2 : 溶湯運搬炉	26.6	2.78	97.2	26.9	100	95.2
52	K 3 : 帯刀切断機	4.60	36.3	63.7	60.0	100	65.9
53	L 1 : 切断機	1.62	42.1	57.9	643	0.00	0.00
54	L 2 : NC加工機	1.89	78.4	21.6	92.8	93.8	40.4
55	M 1 : PSW集塵機	19.0	92.1	7.89	測定不可（試料不足のため）		
56	N 1 : 鑄物切断切粉	15.5	98.6	1.44	測定不可（試料不足のため）		
57	N 2 : 鑄物切断ダケ	52.2	21.9	78.1	59.9	100	73.5
58	N 3 : 鑄物研磨機	50.2	0.27	99.7	65.9	100	61.5
59	O 1 : 溶解保持炉	23.0	9.04	91.0	12.8	100	98.7
60	O 2 : ドロスタダケ	67.6	39.9	60.1	94.6	77.4	44.8
61	O 3 : ビレット切断機	3.15	100	0.00	測定不可（試料不足のため）		
62	O 4 : 形材切断機	20.6	82.4	17.6	597	37.1	17.2
63	O 5 : バフ研磨機	11.3	75.7	24.3	41.1	100	71.2
64	O 6 : 切断機	7.02	54.9	45.1	230	86.0	15.1
65	P 1 : 灰処理場	52.0	23.9	76.1	27.3	100	74.4
66	P 2 : 溶解炉上	21.7	2.61	97.4	33.6	100	83.1
67	Q 1 : 鑄造集塵灰	138	10.4	89.6	22.9	100	96.5
68	Q 2 : 面削屑サイロン	271	67.9	32.1	98.1	100	29.4
69	Q 3 : プレート切断切粉	146	測定不可（油分が多く、ふるい分けができない。）				
70	Q 4 : 熱間切断切粉	497	34.1	65.9	143	96.4	12.5
71	Q 5 : 冷間切断切粉	224	65.5	34.5	55.1	87.6	57.6
72	Q 6 : アルミ切断切粉	338	25.5	74.5	133	77.3	32.7
73	Q 7 : バリ取り研磨粉	203	4.18	95.8	25.0	100	94.1
74	Q 8 : 表面研磨粉	233	8.01	92.0	22.7	100	93.3
75	Q 9 : ショットブラスト集塵	1100	3.75	96.2	165	75.6	20.0
76	Q 10 : 亜鉛溶射集塵	3280	0.81	99.2	23.2	100	91.5
77	R 1 : 溶解炉ダケ1	12.6	34.1	65.9	21.5	100	96.8
78	R 2 : 溶解炉ダケ2	14.5	19.0	81.0	27.6	100	88.4
79	R 3 : ドロスタダケ1	25.3	22.5	77.5	46.9	94.5	64.4
80	R 4 : ドロスタダケ2	37.8	48.9	51.1	40.4	98.1	67.5

表 2.5-4 粉塵粒度分布測定結果表（試料 No.81 ~ 130）

No.	試料略称	試料 総量 (g)	710 $\mu$ mふるい分け		710 $\mu$ mふるい下の粒度分布		
			ふるい上 (質量%)	ふるい下 (質量%)	平均粒径 ( $\mu$ m)	300 $\mu$ m以下 (体積%)	75 $\mu$ m以下 (体積%)
81	R 5 : 形材切断機周り	8.03	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
82	R 6 : 形材切断機集塵	18.0	90.0	10.0	測定不可 (試料不足のため)		
83	S 1 : 押出チップソー1	86.5	測定不可 (油分が多く、ふるい分けができない。)				
84	S 2 : 押出チップソー2	78.2	96.7	3.28	測定不可 (試料不足のため)		
85	T 1 : トロ集塵機	32.7	0.00	100	22.5	100	99.1
86	T 2 : 溶解炉フィルター	31.6	3.12	96.9	73.1	100	50.3
87	T 3 : 溶解炉電気集塵	18.1	28.3	71.7	2.25	100	100
88	T 4 : 切粉乾燥炉フィルター	48.2	10.2	89.8	34.1	100	78.8
89	T 5 : 溶解炉集塵	72.3	0.25	99.7	51.7	100	70.7
90	T 6 : 切粉乾燥炉集塵	56.5	15.5	84.5	65.0	100	60.6
91	T 7 : トロ処理	55.3	33.6	66.4	33.5	97.6	69.9
92	T 8 : 切粉集塵フィルター	33.6	0.34	99.7	18.1	100	87.1
93	U 1 : 鋳物仕上ライン	30.8	18.6	81.4	102	98.6	35.1
94	U 2 : 鋳物研磨周り	22.2	4.16	95.8	67.4	100	54.9
95	V 1 : ラミネート切断機	9.28	89.5	10.5	186	75.6	4.37
96	W 1 : 押出工場炉	49.8	76.8	23.2	584	36.9	13.8
97	X 1 : ダイカストアルミショット	135	70.2	29.8	618	5.31	0.00
98	X 2 : ホイルステンレスショット	232	0.18	99.8	129	97.5	22.6
99	X 3 : 砂型ステンレスショット	124	0.12	99.9	148	98.2	11.5
100	Y 1 : インライン設備集塵	9.71	0.00	100	13.9	100	99.5
101	Y 2 : シュレッダー-破砕粉	17.0	0.00	100	4.71	100	100
102	Y 3 : シュレッダー-飛散ダスト	30.9	0.24	99.8	55.0	100	66.3
103	Y 4 : 400m <sup>3</sup> 集塵ダスト	32.9	0.00	100	17.4	100	95.3
104	Y 5 : 回転炉	36.7	1.28	98.7	138	96.4	24.3
105	Y 6 : ハンダー集塵	37.6	8.69	91.3	40.5	100	79.3
106	Z 1 : 溶解炉集塵フード	17.8	0.36	99.6	42.2	100	77.6
107	Z 2 : ダイカスト研磨加工	1.27	5.77	94.2	36.0	100	84.2
108	AA1 : 溶解炉堆積粉	28.0	8.91	91.1	23.9	100	93.8
109	AA2 : 加工品バフ研磨	8.01	26.1	73.9	21.6	99.7	79.1
110	AA3 : 加工品スコッチ研磨	15.2	13.3	86.7	8.91	100	100
111	BB1 : 切粉乾燥排出	47.0	0.00	100	38.0	100	86.7
112	BB2 : 切粉乾燥ふるい下	55.9	0.13	99.9	197	78.6	5.03
113	BB3 : トロAl-Mg	37.2	0.00	100	15.4	100	94.9
114	BB4 : トロAl-Cu-Si	31.6	0.00	100	13.2	100	97.9
115	BB5 : トロAl-Mg	34.6	0.00	100	23.4	100	94.6
116	BB6 : トロAl-Cu-Si	31.4	0.00	100	17.2	100	99.5
117	BB7 : Al回収装置集塵	16.6	18.5	81.5	6.45	100	100
118	CC1 : アルミナ	409	0.00	100	1.58	100	100
119	CC2 : 水酸化アルミニウム	440	0.00	100	2.18	100	100
120	DD1 : 形材生地材切断	11.4	95.7	4.27	測定不可 (試料不足のため)		
121	DD2 : 形材複合皮膜材切断	7.88	70.0	30.0	118	86.8	35.8
122	F 9 : 研削粉450 加熱	355	0.38	99.6	31.5	100	85.5
123	F 10 : 研削粉800 加熱	45.6	0.16	99.8	20.1	100	96.2
124	B 11 : 板材砥石研磨	61.6	29.3	70.7	16.6	100	86.7
125	B 12 : 押出材バフ研磨	54.3	28.6	71.4	25.8	100	82.6
126	B 13 : 面削切粉	278	94.7	5.31	182	74.3	25.8
127	B 14 : 板材砥石研磨	117	64.7	35.3	122	98.7	32.6
128	B 15 : 板材バフ研磨	98.1	27.9	72.1	84.4	92.0	43.2
129	F 11 : 鍛造品研削粉	73.3	3.3	96.7	118	87.8	28.0
130	F 12 : 鍛造品ショットブラスト	123	13.6	86.4	20.5	100	84.1

表 2.5-5 粉塵爆発危険性試験結果表

爆発受付 No.	粒度受付 No.	平均粒径 (μm)	爆発下限濃度 (g/m <sup>3</sup> )	最小着火エネルギー	最大爆発指数(K <sub>max</sub> ) (×10 <sup>2</sup> kPa・m/s)	最大爆発圧力(P <sub>max</sub> ) (×10 <sup>2</sup> kPa)	爆発危険性の分類	備考
01	01	15	300~320	10mJ<MIE 30mJ	23	5.7	C	
03	04	6	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
04	06	20	320~340	30mJ<MIE 50mJ	99	9.7	C	
05	07	106	100~110	300mJで着火せず	82	9.3	B	
06	08	7	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
07	10	56	700~750	300mJで着火せず	29	5.1	B	
08	12	13	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
09	16	532	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
10	19	24	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
11	36	231	480~500	300mJで着火せず	21	3.2	B	
12	41	27	80~85	1mJ<MIE 3mJ	432	9.7	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
13	21	4	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
14	22	31	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
15	26	245	380~400	300mJで着火せず	33	6.7	B	
16	27	21	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
17	29	47	650~700	300mJで着火せず	54	8.1	B	
18	31	18	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
19	32	24	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
20	33	20	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
21	118	2	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
22	73	25	70~75	1mJ<MIE 3mJ	389	11.1	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
23	74	23	95~100	3mJ<MIE 10mJ	334	11.0	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
24	76	23	1000~1100	300mJで着火せず	49	6.5	B	
25-1	122	32	120~130	1mJ<MIE 3mJ	297	10.2	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
25-2	123	20	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
26	124	17	200~220	3mJ<MIE 10mJ	50	6.8	C	
27	125	26	90~95	3mJ<MIE 10mJ	338	11.9	D	測定者および測定器保護のため濃度制限した。
28	127	122	200~220	10mJ<MIE 30mJ	---	---	C	粉体不足のため圧力試験を中止した。
29	126	182	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	
32	90	65	220~240	300mJで着火せず	50	8.2	B	
33	94	67	500~550	300mJで着火せず	88	10.5	B	
34	101	5	340~360	300mJで着火せず	69	9.8	B	
35	109	22	220~240	3mJ<MIE 10mJ	38	6.3	C	
36	110	9	65~70	1mJ<MIE 3mJ	190	10.7	C	
37	128	84	400~420	300mJで着火せず	---	---	B	粉体不足のため圧力試験を中止した。
38	129	118	340~360	30mJ<MIE 50mJ	40	6.8	C	
39	130	21	2000g/m <sup>3</sup> で爆発せず	---	---	---	A	

\* 爆発受付 No.02,30,31 は、サンプル採取困難等の理由により、測定を中止した。

本試験での爆発危険性は、A：安全，B：爆発有/着火せず，C：注意，D：危険の記号で4つのクラスに分類した。

クラスA・安全： 爆発下限濃度 2000g/m<sup>3</sup>で爆発しなかった。

クラスB・爆発有/着火せず： 最小着火エネルギー - 300mJ で着火しなかった。

クラスC・注意： 最小着火エネルギー - 1~50mJ で着火した。

最大爆発指数が 200x10<sup>2</sup>kPa・m/s 以下であった。

クラスD・危険： 最小着火エネルギー - 1~10mJ で着火した。

最大爆発指数が 300x10<sup>2</sup>kPa・m/s 以上であった。

試験結果より、爆発リスクを A、B、C、D の4ランクに分類した(表 2.5-2 参照)。

クラスA: 粉塵爆発の可能性の目安である 2000g/m<sup>3</sup>で爆発せず、安全と判断される。

このクラスの特徴は、表 2.5-2~4 と対比すると明確であるが、粉塵粒径

が小さくても、炉集塵、ドロス系など高温酸化をしているものは安全と言える。粒度受付 No.41 (クラス D) を 450 °C で加熱した No.122 はクラス D だが、800 °C で加熱した No.123 はクラス A になっていることでも明確である。また、完全な酸化物のアルミナ (No.118) もクラス A である。

- クラス B : 爆発はするが、静電気による着火の目安である 300mJ では着火せず。高温酸化している No.76 の亜鉛溶射集塵はクラス B。溶湯処理装置に堆積した粉塵である No.36 はクラス B である。各クラスの区分は微妙である。(クラス A といっても安心は禁物。)
- クラス C : 最小着火エネルギー 1 ~ 50mJ で着火、静電気ですぐに着火するので要注意、要静電気対策。最大爆発指数は  $200 \times 10^2 \text{kPa} \cdot \text{m/s}$  であり、弱い。
- クラス D : 最小着火エネルギー 1 ~ 10mJ で着火、最大爆発指数が  $300 \times 10^2 \text{kPa} \cdot \text{m/s}$  以上であり最も激しいランク。なお、表の備考にあるように、この測定値は測定者と測定器保護のため濃度制限をして測定した結果であり、実際の値はより大きいと解釈すべきである。早急に具対策を実施すべき。静電気対策のみでなく、湿式での加工などの検討も望まれる。

### 2.5.1 〔解説〕アルミニウム粉塵の高温酸化のメカニズム

微細なアルミニウム粉塵は粉塵爆発の危険性が高いが、酸化によりその危険性を低減できる可能性があると考えられるため、酸化の影響を調べた。用いた試料は表 2.5-5 に示された爆発受付 No.12 (粒度受付 No.41) の粉塵で、研磨により生じた粉末である。その平均粒径は 27  $\mu\text{m}$  で、爆発の危険性はクラス D に分類された。はじめに、粉塵の酸化挙動を調べるため、粉塵を大気中、20 /min で加熱した場合の重量変化と発熱・吸熱変化を示差熱天秤 (TG-DTA) により測定し、その結果を図 2.5-3 に示した。500 以下では、重量および発熱、吸熱の反応は見られず、酸化は生じていない。その後、530 近傍より重量の増加がはじまり、580 で急激に増加している。それに伴い、大きな発熱ピークが見られており、この温度付近で酸化が急激に生じていること示している。さらに温度が上昇すると、重量は徐々に増大するのが見られる。一方、660 付近には融解に伴う吸熱ピークが見られる。そこで、粉塵を大気中で 450 ,12h および 800 、1h 加熱して酸化処理を行い、粉塵爆発の危険性を調べた。酸化後の平均粒径は 450 および 800 で酸化した粉塵でそれぞれ 32  $\mu\text{m}$  および 20  $\mu\text{m}$  で、酸化前とほぼ同じであった。表 2.5-5 の結果からは、爆発 No25-1 および 25-2 に見られるように 450 での酸化では爆発の危険性はクラス D であるが、800 で酸化した場合には、クラス A になり、粉塵爆発の危険性は著しく低減している。また、800 、1h 酸化した粉塵について、Tg-DTA により調べた結果を図

2.5-4 に示した。800 までの加熱で重量変化は見られず、580 付近の大きな発熱ピークも見られない。660 付近にはアルミニウムの溶融に伴う吸熱ピークのみが見られており、粉塵は完全に酸化されていないことを示している。800 で酸化した場合には、表面が酸化し、それ以上酸化は進行しないと考えられる。一方、450 では表面の酸化が十分に生じていないため粉塵爆発の危険性は高いと考えられる。

以上のことから、高温で酸化した試料では、微細な粉塵においても、表面が十分に酸化物で覆われて粉塵爆発の危険性を低減していると考えられる。

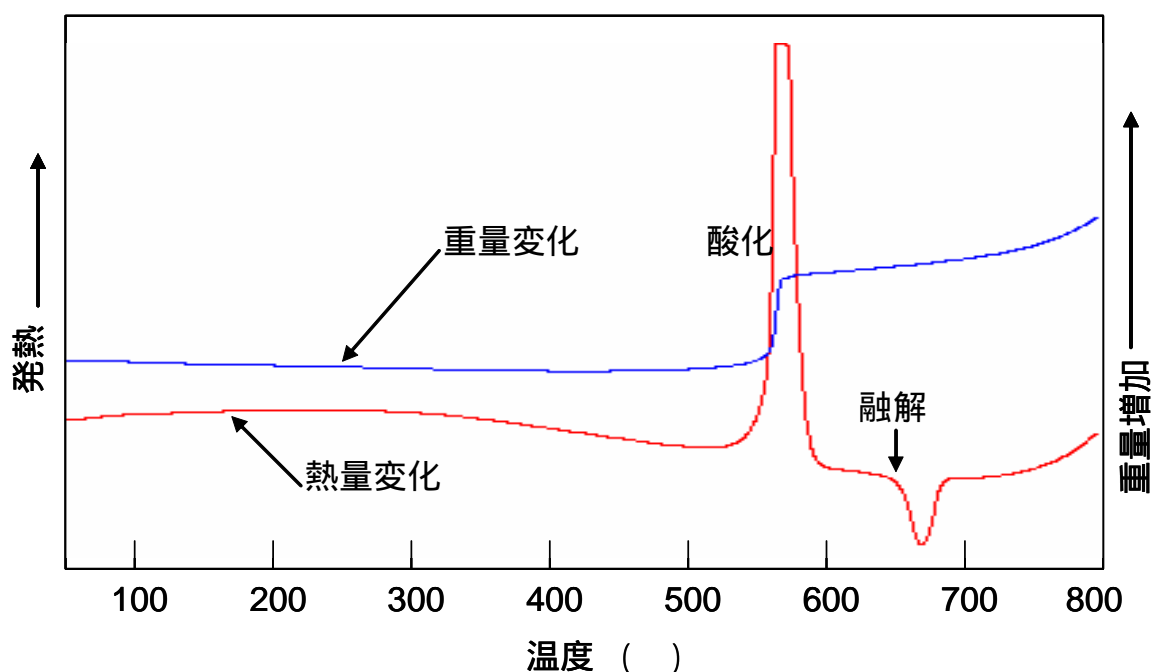


図 2.5-3 アルミニウム粉末を大気中で加熱した場合の重量および熱量の変化

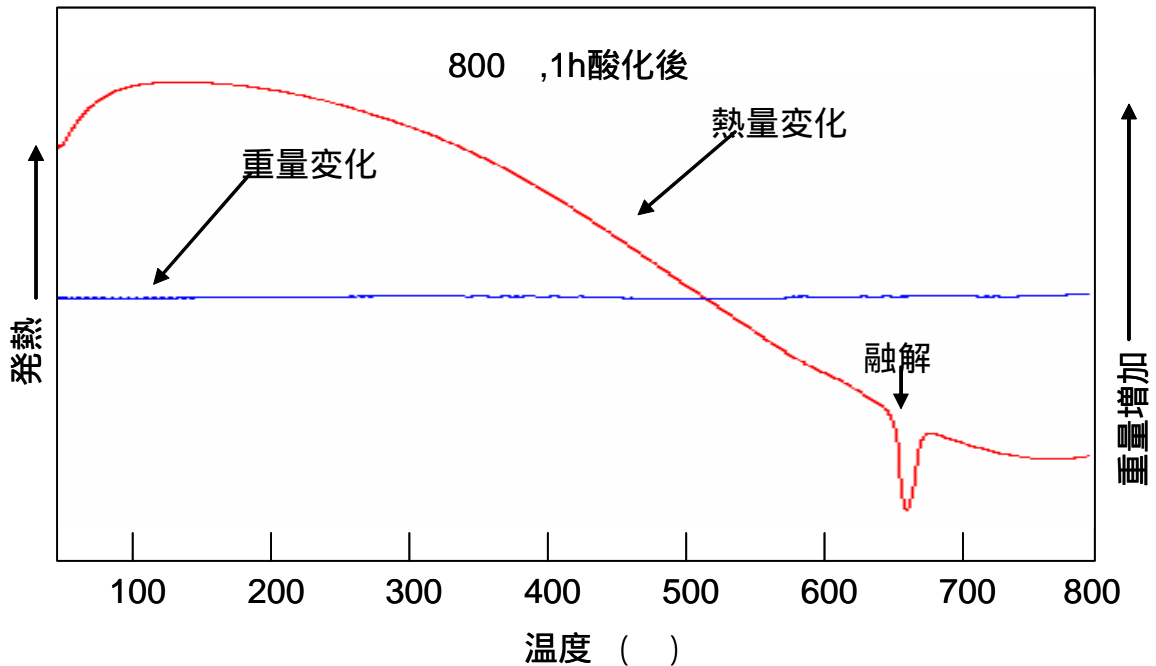


図 2.5-4 800℃、1h 酸化したアルミニウム粉末を大気中で加熱した場合の重量および熱量の変化

### 2.5.2 アルミニウム粉塵の安全対策

アルミニウムは、粉塵爆発を起こしやすい上に、その爆発は激しく多くの可燃性粉塵の中でも危険性の高いものである。また実際に災害事例も多い。災害事例の多くは、粒度分布が均一な粉体そのものである場合が多いが、基本的には製造現場で発生する粉塵も同様である。アルミニウム粉塵が可燃性物質であることを十分に認識して、適切に対処することが重要である。

(以下の具体策は、中央労働災害防止協会「粉塵爆発防止対策」からの抜粋)

#### (1) 発火の防止

アルミニウム粉を取り扱ったり、製造したりする建物内および粉体輸送システムの操作中には静電気、電気事故、また鉄その他異物などとの衝突による火花の発生を避けるように注意すること。

水はアルミニウム粉と接触して自然発熱を招くおそれがあるので建物内への水分の侵入を防ぐこと。

アルミニウム粉塵の爆発危険性がある区域内では軸受部の加熱など機械類の局部摩擦による発熱を避けること。

ボールベアリングまたはローラーベアリングは防塵型のものを用いること。

建屋の暖房は温風加熱方式か、蒸気または温水を用いた熱交換加熱方式を用いること。

粉体と接触する機械は、原料の金属粉を供給して、操業に入る前に十分掃除し、かつ水分を除去し乾燥させておくこと。

アルミニウム粉の工場内の輸送容器には、無火花性の非鉄金属またはステンレス製のものを使用し、輸送中は蓋で覆うこと。

空気輸送で爆発危険が大きい場合は、不活性ガスを使用すること。

研削または研磨仕上げ工程の近くには、引火性の溶剤を使用する洗浄装置を置いてはならない。

電気的な発熱体の使用禁止、機械の局部加熱の防止には警報器の設置などを考慮する。

異物を除去するため、マグネットセパレータなどの除去設備を設置すること。

## (2) 電気設備

爆発危険性のある区域内的の電気設備や配線は、工場電気設備防爆指針（粉塵防爆）によること。

全ての電気設備は一定期間内に点検、清掃を行うこと。

全ての電気設備は完全にアースしておくこと。

## (3) 静電気除去

機械装置類はもちろん、移送用の車両付装置に至るまで、全ての機器は静電気が蓄積しないように確実にアースすること。

## (4) 工場の清掃、および補修作業

床や建屋の梁など、また配管類の上に粉塵が堆積した状態にしないこと。とりこぼした粉塵は、直ちに導電性および無火花性スコップまたは粉塵爆発安全対策型真空掃除機で取り除くこと。

アルミニウム粉塵が発生する建屋内では裸火を使用してはならない。

電気、ガス溶断、切断、穴あけ、切削などの高温粒子を生じる補修工事を行う場合は、区域内の全ての堆積粉塵を除去した後でなければ許可してはならない。

アルミニウム粉を取り扱う場所は、常に掃除が行き届いた状態を保つこと。

スコップ、シャベルおよびスクレーパは導電性で必要に応じアースすること。

## (5) 服装

作業服は静電気を蓄積しないもので、ズボンは粉塵が留まるおそれのある折り返しがないこと。また作業服は外側にポケットがないものが望ましい。

## 2.6 予防と対策（粉塵一般）

粉塵爆発の予防と対策は難しい問題ではあるが、大災害になる可能性もあり、着実に改善を実施する必要がある。

粉塵爆発の防止には、「粉塵雲の発生防止」、「着火源の除去」、「不活性物質の添加」が必須事項であるが、粉塵雲の発生は粉塵を取り扱う工程内では避けられない。

一方、着火源については、粉塵を取り巻く職場環境の改善、作業手順の見直しなどにより減少させることが可能である。そして、一次災害を未然に防止し、万一発生した場合二次災害への波及を最小限におさえることが重要である。

### 2.6.1 作業場の対策

(1) 粉塵が発生する作業場は他の作業場と分離する。

作業場には、集塵装置あるいは換気扇を設置し、粉塵濃度を下限濃度以下にする。

(2) 研磨、切断など、粉塵を発生する設備は密閉構造とし、粉塵の飛散を防止する。

飛散した場合は速やかに除去し、広範囲に飛散しないようにする。

粒度の細かいものは要注意。

(3) 粉塵または雰囲気湿度を高くする。

不活性の固体、不活性ガス（ $N_2$ 、 $CO_2$ 等）を用いるのも有効である。

(4) 水と反応しない、あるいは水と結合して有毒・有害物を作らない物質を扱う作業場ではスプリンクラーを設置することが好ましい。

(5) 粉塵を発生させる機械・装置は隔離や無人化し、作業者は別室から操作するのが好ましい。

(6) 点火源となるものは作業場から除去する。

裸火の使用・接近は禁止。

マッチ・ライターなどの持ち込みは禁止。

鋏のない靴を使用し、金具類は持ち込まない。

粉粒体中の異物は、ふるい・マグネットセパレータなどで除去する。

(7) 作業場の床面は平滑で継ぎ目がなく、水洗いが容易なものとする。

(8) 粉塵が舞い上がる場合には、床を格子網として、その下は粉塵溜の凹部を設ける。粉

塵溜は常に清掃排出可能な構造にし、堆積を防止する。

- (9) 建物は防火構造とし、他の建物との連絡口には防火ドアおよびシャッターを設ける。
- (10) 壁面は平滑で、突出部は設けない。やむを得ず設ける場合は、突出部は水平に対して60°以上の傾斜をとり、粉塵の堆積を防止する。
- (11) 粉塵の堆積防止のため、ドアや窓は突出部は設けず、カーテンやカーテン架はつけない。  
窓際には腰掛けや柵などを設けず、通風を良くする。
- (12) 室内の暖房・照明・配管などの設備は極力制限する。  
室内暖房は避け、照明は粉塵・ガスが漏れない別室から透明窓を通して行うことが望ましく、粉塵発生場所での電気器具・スイッチ・モーター類などの設備は、工場電気設備防爆指針（粉塵防爆型）のものを使用する。
- (13) 静電気の発生要素を減らし、各機器の接地（アース）を完全に行う。（第三種接地工事）
- (14) 配管類は露出部分は減らし、壁の埋め込むのが望ましい。露出の場合は配管の被覆は滑らかで不燃材料とする。
- (15) 爆発の危険が想定される部屋・ダクトなどには、安全窓、特定の強度の低い壁・薄板部・爆発放散ダクトなどを設け、爆風を逃がす構造とする。  
また、部屋などは小さく分割して1箇所あたりの被害を少なくする構造とする。
- (16) 機械類にもカバーをして密封し、粉塵が入らず堆積しないようにする。カバーは60°以上の傾斜をもたせ、粉塵の堆積を防止する。

## 2.6.2 堆積の防止

- (1) 清掃管理は最重要事項。
- (2) 清掃は全ての作業場で行い、床・露出した構造物・配管ダクトなどの堆積粉塵は常時完全に除去する。
- (3) 定期清掃を行い、責任者は堆積粉塵に注意。定期清掃は機械の動力を停止して行い、頻度は少なくとも週1回は行う。

- (4) 清掃工具は、柔らかいブラシ・ゴム雑巾・無火花スコップ・粉塵爆発安全対策型真空掃除機を使用する。
- (5) 真空掃除機の配管や吸引ホースなどは静電気帯電防止のため、アースする。
- (6) 大量の堆積粉塵の除去には、真空掃除機の使用前に、柔らかいブラシや、無火花スコップで除去する。
- (7) 各機器は粉塵の侵入が最小限になるようにし、ベアリングは防塵型ローラー・ボールとする。ニューマチックコンベアでは各装置への動力供給は電氣的にインターロックされる電気構造とする。
- (8) 空気輸送やコンベアなどの粉体搬送装置は下流側の装置と電氣的にインターロックする。

### 2.6.3 摩擦・衝撃に対する対策

- (1) 工程での扱い量による場合  
扱い量が過大になると負荷オーバーになり、粉砕プラント・コンベアなどに火花を発生させることがある。  
予防としては、粉体供給調整装置や重量計による自動動力遮断装置の設置が有効。
- (2) 工程中に、金属片・石などの異物が混入する場合  
磁石式または空気式異物分離機の設置が有効。
- (3) プラントの損傷による場合  
過熱したベアリングによる災害が多く、粉塵の侵入による場合と単なる摩耗による場合がある。  
予防としては、ベアリング部を粉体コンベアの外側に設置するような構造とし、かつ保守点検が常時できる構造とする。特に温度上昇は、たえず監視できるようにする。  
部品の破損・緩みによる破損、粉塵のために機器の摩擦抵抗が大きくなり損傷がある場合がある。  
予防としては、異物分離機やプラントの過負荷の場合の自動電源遮断装置が有効。
- (4) 作業員による場合  
作業員の工具類による災害発生は、災害事例集でも目立ち、不注意および安全に対する知識不足からくるものが多く、何よりも作業員自身が危険にさらされる。

( 防止対策 )

細かな注意、基本的な作業手順、安全動作の確認などは常時点検し、安全に対する知識・意識の高揚に努める。

ドリルなどの動力工具は局部的な過熱を引き起こすので厳密に管理する。

工具を使用する場合は、プラント内外近傍から粉塵を除去しておき、そのプラントを閉鎖停止してから作業する。特に最小着火エネルギーが小さい粉塵を扱う場合は要注意である。

適当な消火装置を設置しておき、その取扱方法は作業者全員に周知徹底させる。密閉された場所、爆発下限濃度より高い粉塵濃度がある場所での作業は、機械的手段を用いる。

#### 2.6.4 溶接・溶断作業に対する作業

溶接・溶断による災害発生は、主として操業休止中の清掃・点検・修理作業時に集中している。

( 防止対策 )

「プラントを停止して、あらゆる実際的な手段によって、プラント内、外部から可燃性または爆発性粉塵を排除するまで、溶接・溶断、熱の使用を含むその他の修理作業は一切おこなってはならない。」 ( 英国・工場法 )

プラント付近に置いてある可燃性物質は、どのようなものでも溶接火花の飛び散る範囲外に除去する。不可能な場合は、不燃シートで完全に防護する。

付近の木製製品も、同様に不燃性シートで完全に防護する。

木製床面は、修理作業開始前にカバーをすく濡らしておく。

壁や床面にある開口部や割れ目にも注意を払い隣室や階下にある可燃性物質は安全な場所に移動しておく。

適当な消火器を設置する。火災の危険性が想定される場合は、火災発生監視人をおき、作業終了後も 30 分間はその場所を監視する。

非常に狭い場所での溶接作業においては、雰囲気的清浄にするために、局所排気装置を設置する。

大気中の酸素分が多いと物質の燃焼性は著しく増すため、狭い空間内での清浄化を目的とした酸素の導入は絶対にしないこと。

ガス漏洩があると、たとえ微量でも長期間にわたると蓄積されて危険なため、狭い空間での作業は、ガス防具を使用する。

中に入って作業しても安全であることが責任者によって保証されない限り、いかなる場合でも限定された空間とか、大きな容器などへの立入りは要求してはならない。 ( 英国・工場法 )

電気溶接の場合、何らかの可燃性物質が入っていたり、あるいはこれまで入れてあったどの容器の近くにも、生きた電極をそのまま放置したり、置き去りにして

はならない。

(英国・工場法)

#### 2.6.5 静電気・帯電防止対策

##### (1) 造粒

粉体の粒径が細かいほど静電気が発生し易く、また静電気放電によって着火し、粉塵爆発を起こしやすいので、極力大きな粒径で取り扱うことが望ましい。粒を大きくする(造粒)ことは、粉塵の飛散、粉塵雲の形成防止にも有効である。

##### (2) 接地

可燃性粉体の取扱準備設備、装置などは、極力金属導体または導電性材料のものを使用し、これらの導体部分をアースする。

##### (3) 帯電防止に水は禁物

アルミニウム粉体には水は厳禁である。(他の粉体では帯電防止目的で水蒸気を与える場合があるので誤解しないように。)

粉体または周囲がどの程度帯電しているかは、静電気チェッカーで検出・測定しておく。数千ボルト以上は要注意。

機械類はアースをしておくこと。(第三種接地工事)

##### (4) 空気のイオン化

空気中で放電を行って、これをイオン化し、帯電を中和させるのも有効である。

#### 2.6.6 不活性ガスによる対策

不活性ガスの活用は、空気輸送のような密閉装置やガス循環系によく使用され、気密が十分保たれる場合にのみ有効である。

粉塵爆発防止のため不活性ガス(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>)添加によって雰囲気中の酸素濃度を減少させることは、有効な安全対策であるが、一次災害的な堆積粉塵の燻りをおさえるには、困難と時間がかかる。危険度の高い粉塵に対して、空気輸送を行う場合には、不活性ガスの混入は望ましい。

一般には、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>が使用されるが、軽金属類はCO<sub>2</sub>と反応して酸化物を生成することがあるのでN<sub>2</sub>が好ましい。有機粉塵にはCO<sub>2</sub>が有効であるが作業者が酸素欠乏の危険にさらされないよう十分な注意を要する。

#### 2.6.7 不燃性粉体の添加

炭酸カルシウム、珪藻土などの不燃性粉体を可燃性粉塵中に混入すると冷却効果による爆発性の消失をもたらすと共に、浮遊性を抑制する効果もある。

例えば、炭酸カルシウムをコーンスターチに添加した場合両者の混合比が60:40程度になると爆発性はほとんど消失することが知られている。

## 2.7 アルミニウム粉塵火災の消火

- (1) アルミニウム粉の大火災の消火はほとんど不可能なため、火災は初期段階で制御することが重要である。
- (2) 初期の火災は乾燥砂、乾いた不活性の粉状物、認可済の粉末消火剤などを使用する。
- (3) 火災発生の場合には、集塵装置を含む全てのファンや機械類を停止すること。さらに極力通風も避けること。
- (4) 水や液体の消火剤は使用しないこと。また消火剤を使用する場合には、小さな粉塵雲も舞い立たせないように最大の注意を払うこと。

### 〔参考文献〕

- (1) アマノ(株)編：粉塵爆発「その原因と対策」(2004)、アマノ(株)
- (2) (社)日本粉体工業技術協会 粉塵爆発委員会編：粉じん爆発火災対策(2006)、  
オーム社  
\*一部転載箇所：表 2.1-1、表 2.1-2、表 2.1-3、表 2.2-2、表 2.3-1
- (3) 中央労働災害防止協会編：粉塵爆発防止対策調査委員会報告書(1988)

#### 4. 調査研究の成果（まとめ）

アルミニウムの粉塵爆発については、今までは、内外にテキスト類も多くあり一般的な注意事項は理解できたが、アルミニウム粉塵の物性データに言及したものがなく、爆発リスクが定量化できず、製造現場でリスクアセスメントできない状態であった。その意味では、今回の成果はリスクアセスメントを可能ならしめ、結果として、具体的な粉塵爆発リスクの低減対策の実施を促すものと評価されるものである。本調査研究の成果を以下にまとめる。

##### (1) 製造現場のアルミニウム粉塵による粒径、爆発下限濃度、最小着火エネルギーおよび最大爆発圧力測定

製造現場で採取したアルミニウム粉塵の粒径測定と爆発試験により、粉塵の爆発リスクを4ランクに分類し、爆発リスクの大きさは、高温酸化の履歴と粒径分布に依存することが明確になった。

高温酸化は580℃近傍で急激に進行し、実験で、最も爆発リスクが高いDランクの粉塵をそれ以下の450℃で熱処理したものは、爆発リスクが下がらないことが明確となった。同様に800℃で熱処理したものは、最も安全なAランクになった。

結果として、最も爆発リスクが高いDランクは、全て研磨工程の粉塵（高温酸化を受けず粒度も細かい）であった。

580℃以上で高温酸化を受けていると判断される溶解工程の集塵粉塵やドロスは、全て最も安全なAランクであった。

##### (2) アルミニウム粉塵爆発対策マニュアルの作成

アルミニウム粉塵の爆発特性を盛り込んだ粉塵爆発対策マニュアルを作成することにより、アルミニウム粉塵を扱うアルミニウム製造業、アルミニウムユーザー業界において、粉塵爆発のリスクアセスメントが実施され、爆発リスク低減のための対策が実施されることが期待できる。

## 5. 調査研究の今後の課題及び展開

今回、アルミニウム粉塵の爆発特性を明らかにすることを目的に調査研究を行い、貴重なデータと解析結果を得て、その結果から、アルミニウム粉塵爆発の対策マニュアルを作成した。ただ、より重要なのは、この対策マニュアルを広くアルミニウム製造業界およびユーザー業界に普及し、各製造現場でのリスクアセスメントの実施とそれに基づく対策の実施を促すことである。

このため、対策マニュアルを 5,000 部作成し、アルミニウム製造業およびユーザー業界に配布する。さらに平成 20 年度は、東京（5 月）、愛知（6 月）、大阪（11 月）で「アルミニウム粉塵爆発防止研修会」を開催し、対策マニュアルの説明を中心に啓発を行う。

禁無断転載

システム技術開発調査研究 19 - R - 15

アルミニウム粉塵爆発のリスクアセスメント  
実施に資する基礎調査および安全対策  
マニュアルの作成に関する調査研究  
(要旨)

平成20年3月

作成 財団法人 機械システム振興協会

東京都港区三田一丁目4番28号

TEL 03-3454-1311

委託先名 社団法人 日本アルミニウム協会

東京都中央区銀座4丁目2番15号

TEL 03-3538-0221