

# 災害調査報告書

アルミ粉製造工場で発生した爆発災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

## 1. 災害概要

アルミニウム粉末の製造工場において、爆発が発生し、作業員数名が軽傷を負うと共に、ライン内のサイクロン、バグフィルター、これらをつなぐダクト等が破損した。

### 1.1 ラインの概要

アルミニウムの溶解→アルミニウム粉の生成→エアーで搬送→複数のサイクロンで粉体回収→バグフィルターで粉体回収

### 1.2 事故発生時の状況

停止状態にあったアルミ粉末の製造・回収ラインを再稼働させるため、作業員 A (被災者) は、アルミ粉の回収装置であるサイクロンに設置されているパルスエアを稼働させるため操作盤のスイッチを入れたところ、数秒後にサイクロンが爆発した。その後、瞬時にサイクロンから離れた場所に設置されているバグフィルターが誘爆した。

## 2. 災害の発生原因 (推測される事故発生シナリオ)

災害調査によると、現場では、ライターなどの明確な着火源は見当たらなかったことから、今回の災害は静電気放電による着火の可能性が非常に高い。ブローアを稼働させる前にサイクロンのパルスエアを稼働させたことにより、サイクロン内壁に付着していたアルミ粉体が剥離され舞い上がり、内部に爆発下限界濃度以上のアルミ粉じん雲 (爆発性雰囲気) が形成された。

サイクロン内の帯電したアルミ粉の塊等の絶縁された導体から火花放電、あるいは、帯電したアルミ粉体により形成された粉じん雲からブラシ放電が発生し、粉じん雲を着火させ爆発に至った可能性が高い。

## 3. シナリオの根拠

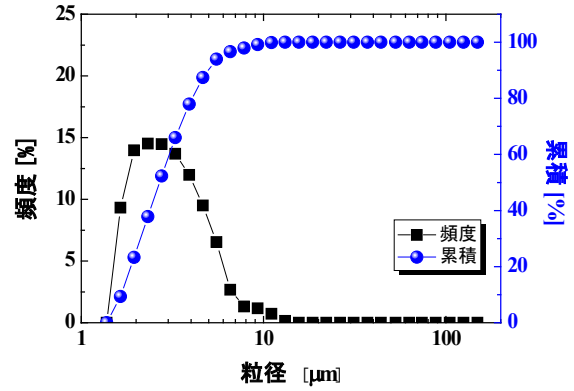
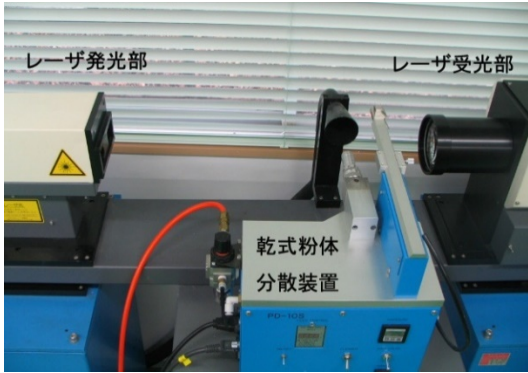
### 3.1 爆発したアルミ粉体の静電気特性

アルミ粉体の形状、粒径、帯電量 (比電荷)、および最小着火エネルギー (MIE) を測定した結果を表 1 に示す。結果によると、アルミ粉体は球状で、粒径は 2.6  $\mu\text{m}$  (中央値  $D_{50}$ ) であり、ほとんどの粉体は 5  $\mu\text{m}$  以下の非常に細かいものであった (図 1 参照)。比電荷は平均で 244 nC/g と非常に高く (図 2 参照)、静電気帯電による危険性が高く帯電しやすい粉体に分類される<sup>1)</sup>。また、最小着火エネルギーが 1.4 mJ であることから、静電気放電による着火・爆発の危険性が非常に高い (図 3 参照)。

表 1 アルミ粉体の基本特性

試料名	形状	粒径 [ $\mu\text{m}$ ]			比電荷 [nC/g]	MIE [mJ]
		$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$		
アルミ粉体	ほぼ球状	1.6	2.6	4.9	244*	1.4

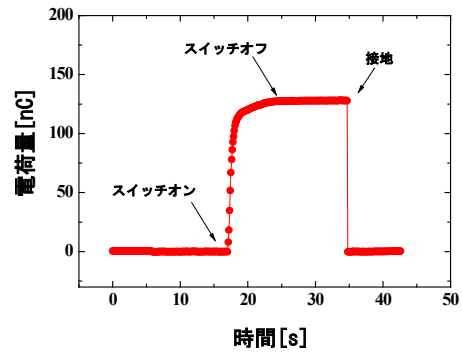
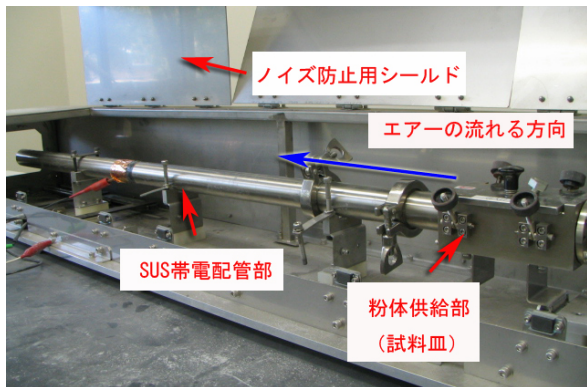
\*測定 5 回分の平均値



(a) レーザー光式粒度分布測定装置（東日コンピュータアプリケーションズ，LDSA-1400A）

(b) アルミ粉体の粒度分布

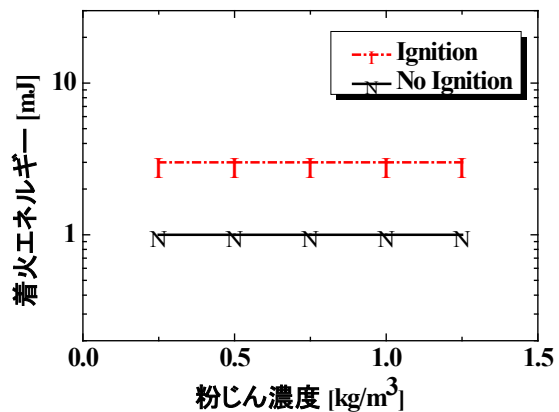
図1 アルミ粉体の粒度分布測定（所内実験）



(a) 電荷量測定装置

(b) 圧縮空気でアルミ粉体を流した時の電荷量の時間変化の一例

図2 粉体摩擦帯電量測定（所内実験）



(a) 粉体の最小着火エネルギー測定装置 (Adolf-Kühner, MIKE-3) (b) アルミ粉体の濃度と静電気放電エネルギーとの関係

図3 アルミ粉体の最小着火エネルギー測定 (所内実験)

### 3.2 現場で発生した可能性がある静電気放電

静電気放電による着火・爆発の場合、放電による痕跡が残ることがないため、今回の事故がサイクロン内のどの部位で、どのような静電気放電が発生したかを特定することはできないが、主に以下の静電気放電が発生した可能性がある。

#### 3.2.1 接地されていない導体からの静電気放電

接地されていない導体（接地不良の導体という）が帯電し、静電気放電（火花放電）が起こると着火源になりやすい。接地不良のアルミ粉体の塊が連続パルスエアにより帯電する場合、周りの接地導体との間で火花放電が発生する可能性がある。ここでは、接地不良の導体となるアルミ粉体の塊から発生する静電気放電による着火危険性を推定する。まず、模擬アルミ粉体の塊を試作し、その静電容量の測定を行った。静電容量は、試料の測定環境や姿勢によって変動があるが、ここでは、接地された金属床の上に絶縁フィルム（厚さ：3 mm）を敷き、その上に模擬試料を載せ測定した値である。模擬試料は聞き取り調査の結果を参考にし、厚さ 2 cm で直径の異なる計 4 種類（直径：1 cm, 2 cm, 3 cm, 5 cm）の円柱形とした。その実験結果を表 2 に示す。静電容量の値は、模擬試料の大きさに強く依存し、最小で 2.4 pF（試料 A）、最大で 8.5 pF（試料 D）であった。

ここで、仮にサイクロンで発生したアルミ粉体の塊の静電容量を 5 pF とすると、それが 25 kV 以上に帯電した場合、式(1)による火花放電エネルギーは、アルミ粉体の最小着火エネルギーである 1.4 mJ を超えることになる。

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \text{-----(1)}$$

ただし、 $W$ [J]: 放電エネルギー、 $C$ [F]: 静電容量、 $V$ [V]: 帯電電位である。

実際にサイクロンでアルミ粉体の塊が 25 kV に帯電するか、実験で確かめることはできない。しかし、比電荷が一般粉体よりかなり高い（「帯電しやすい粉体」、表 1 の結果値参照）こと、また、電荷量が一定なら静電容量の小さい物体の帯電電位は大きくなること\*から、帯電電位 25 kV は現場で発生し得るレベルである。なお、サイクロン内に、その他の接地不良の導体（小さい金属部品など）が存在した場合も、同じ現象に至った可能性がある。

表 2 模擬浮き導体の静電容量

模擬アルミ粉体塊	静電容量 [pF]
試料 A (直径：1 cm, 厚み：2 cm)	2.4
試料 B (直径：2 cm, 厚み：2 cm)	3.8
試料 C (直径：3 cm, 厚み：2 cm)	5.6
試料 D (直径：4 cm, 厚み：2 cm)	8.5

### 3.2.2 帯電した浮遊粉じん雲からの静電気放電

パルスエアや機械的な打撃による払い落とし工程では、剥離、摩擦された多量の粉体が浮遊し、帯電した粉じん雲が形成されるため、着火事故が起こりやすい。ここでは、サイクロン内部で形成された浮遊アルミ粉じん雲に起因する静電気危険性について述べる。サイクロン上部の電荷密度  $\rho$  [C/m<sup>3</sup>] が一様であると仮定すれば、側壁における電界強度  $E$  [V/m] は式 (2) により推定できる。ここでは計算を容易にするため、サイクロン上部と同体積の球形であると仮定した。

$$E = \rho \cdot a / (3 \cdot \epsilon) \text{ -----(2)}$$

ただし、 $a$  [m] は浮遊粉じん雲が存在する空間の半径、 $\epsilon$  [F/m] は空気の誘電率（≒真空の誘電率=  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m）である。

電荷密度  $\rho$  [C/m<sup>3</sup>] は式 (3) から計算できる。

$$\rho = q \cdot M \text{ -----(3)}$$

ただし、 $q$  [C/kg] は粉体の比電荷、 $M$  [kg/m<sup>3</sup>] は粉じん濃度である。

今回の事故では、アルミ粉体の比電荷  $q$  が 244  $\mu$ C/kg、浮遊粉じん雲が存在する空間の半径  $a$  が 0.86 m\*\*であり、仮にアルミ粉じん濃度を 0.05 kg/m<sup>3</sup> とすると、サイクロン上部側壁（正確には浮遊粉じん雲の端部）での電界強度は式 (2) により、3.9 kV/cm となる。この値は、ブラシ放電の発生限界値 1 kV/cm<sup>2)</sup> を超える。つまり、浮遊アルミ粉じん雲近傍に先端の尖った突起物がある場合、突起物でブラシ放電が発生する可能性がある。今回の事故では排気筒固定用ボルトの先端、あるいは、内壁に付着したアルミ粉体の塊などが突起物に該当した可能性がある。ブラシ放電エネルギーが最大値で 4 mJ 程度<sup>3)</sup> であり、今回のアルミ粉体の最小着火エネルギー、1.4 mJ を超えているため、着火・爆発に至った可能性は否定できない。

\*電荷量  $Q$ 、静電容量  $C$ 、電圧  $V$  は  $Q = CV$  の関係であり、電荷量を一定のもとでは、静電容量と帯電電位は反比例の関係である。

\*\* サイクロン上部の体積は 2.62 m<sup>3</sup> であり、これと同体積の球の半径  $a$  は  $V = 4\pi a^3/3$  より求めた。ただし、 $V$  は体積 [m<sup>3</sup>] である。

一方、粉体用流動槽内での粉体粒径は、流動槽の上部ほど小さくなる。このことから類推すると、今回のサイクロンの上部に浮遊しているアルミ粉体の粒径は平均値（2.6 μm，図 1 参照）よりかなり小さくなっていった可能性がある。一般に粉体の粒径が小さいほど、最小着火エネルギーは小さくなる。木粉や樹脂系の粉体などの場合、粒径サイズ  $M_1$  (今回のアルミ粉体の中央値， $D_{50}$ : 2.6 μm) およびその粉体の最小着火エネルギーの実測値  $MIE_1$  (1.4 mJ) から、次式(4)を用いて、同材質の粒径サイズが  $M_2$  である粉体の最小着火エネルギー  $MIE_2$  を推定できる。

$$MIE_2 = MIE_1 \times (M_2 / M_1)^{2.5} \text{ -----(4)}$$

今回のサイクロンの上部に存在するアルミ粉体の粒径は 2 次マルチサイクロンの高さに依存している。バグフィルターで回収した粉体の粒径は  $D_{50}$ : 1.3 μm であり、これを  $M_2$  とすると式 (3) により、 $MIE_2 = 0.24 \text{ mJ}$  となり、小さい放電エネルギーでも着火することになる。実測するのは不可能\*\*\*であるが、1 mJ 以下であることは容易に考えられる。

したがって、サイクロンの上部では粉体粒径が小さくなることを考慮すると、ブラシ放電が発生した場合にアルミ粉体が着火する可能性ははるかに高くなる。このような現象は、上記の火花放電による着火にも当てはまる。

なお、今回のサイクロンの規模や構造などを考慮すると、雷状放電が発生した可能性は低い。

#### 4. 再発防止対策

今回のアルミ粉体の最小着火エネルギーは 1.4 mJ と非常に小さいため、サイクロンだけではなく、全工程において静電気放電による着火・爆発の可能性は十分にある。したがって、今回と同種の災害を防止するには、着火源となりうる静電気の対策が不可欠であり、具体的には次の通りである。

- ① 設備を起動する手順によって静電的に危険となる場合がある。現在の手順には誤り（ブロアーを稼働する前にパルスエアスイッチを入れたこと）があるため、見直しが必要である。
- ② 現場では、接地・ボンディングされていない金属治具が多く見られた。これらは、火花放電の発生源となる。静電気対策として、全ての金属機器、装置、器具の接地・ボンディングを徹底する。特に、絶縁性配管、フィルタなどを固定する金属器具は、必ず、接地・ボンディングさせ、導通を確保する。
- ③ アルミ輸送配管（ダクト）などでアルミ粉体が堆積しないような対策が必要である。粉体の堆積状況の点検および掃除を容易にできる仕組みにする。
- ④ ブロアーのモーター表面に粉体が堆積したり、内部に粉体が入り込まないように構造とする。
- ⑤ 作業者は必ず、静電気帯電防止用の作業服および作業靴を着用する。
- ⑥ 室内では、導電性床材を使用し、漏洩抵抗を  $10^8 \Omega$  以下とする。床を塗装する場合には導電性塗料を使用する。なお、床材は長期間使用していると粉体などが床面に付着して床の導電性が保持できないこともあり得るので、定期的な床の清掃が必要である。
- ⑦ アルミ粉体の爆発混合気の排除を目的に窒素ガスを導入し、酸素量の減少を行う。

---

\*\*\* 今回使用したハルトマン式の MIE 測定装置では 1 mJ 未満の微弱な放電を発生させることができない。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人労働安全衛生総合研究所：JNIOSH-TR-No.42, 静電気安全指針 2007, p.56 (2007)
- 2) 産業安全研究所：RIIS-TR-87-1, 静電気安全指針, p.47 (1988)
- 3) BSI：Electrostatics – Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity, PD CLC/TR 50404:2003, p.73