

災害調査報告書

パルプ工場で発生した粉じん爆発災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

1. 災害の概要

パルスジェットコレクタ（集塵機）内で爆発が発生した。人的被害はなかったものの、物的被害として、バグフィルタ建屋スレートの全面破損による飛散や、ろ布、リテーナなどの焼損変形があった。

2. 災害発生時の作業内容

中央制御室からの遠隔操作による自動運転により、パルスジェットコレクタにおいてセルロース粉体の捕集作業を行っている際に爆発が発生した。

3. 災害発生原因の検討

3. 1 爆発した物質

災害現場での調査の結果、本件の爆発はセルロース粉体の燃焼によるものであると考えられる。

3. 2 「所内実験および考察」セルロース粉体

セルロース粉体の形状、抵抗率、最小着火エネルギー（MIE: Minimum Ignition Energy）を測定した結果を表1に示す。実験結果によると、セルロース粉体は不定形で、粒径は中央値(D50)41.20 μm であるものの、10 μm 以下の非常に細かい微粉も含んでいる（図1）。体積抵抗率が $10^{12}\Omega \cdot \text{m}$ 以上と非常に高く、表2に示す帯電の大きさの指標¹⁾では「高帯電性物体」に分類され、静電気の帯電を考慮する必要がある。また、今回のMIE実験では、粉体最小着火エネルギー測定装置（図2(a)）において帯電したセルロース粉体が、高電圧印加用電極に付着（図2(b)）して安定な静電気放電が発生しなくなったので、測定ができなかった。このことは、今回のセルロース粉体は上記で述べたように、高帯電粉体であるとの裏付けでもある。ただし、セルロース粉体のMIEは表1によると、3~10mJの間であるので、静電気放電による着火・爆発性は非常に高いと言える。

表1 セルロース粉体の基本特性

| 試料名 | 形状 | 粒径 [μm] | | | 体積抵抗率 [$\Omega \cdot \text{m}$] | 最小着火エネルギー [mJ] |
|-------|-----|----------------------|-----|-----|--------------------------------------|-------------------|
| | | D10 | D50 | D90 | | |
| セルロース | 不定形 | 13 | 41 | 123 | 2.97×10^{12} | 3~10 |

表2 帯電性の指標¹⁾

| 帯電の区分 | 体積抵抗率 [$\Omega \cdot \text{m}$] |
|--------|-----------------------------------|
| 非帯電性物体 | 10^8 以下 |
| 低帯電性物体 | $10^8 \sim 10^{10}$ |
| 帯電性物体 | $10^{10} \sim 10^{12}$ |
| 高帯電性物体 | 10^{12} 以上 |

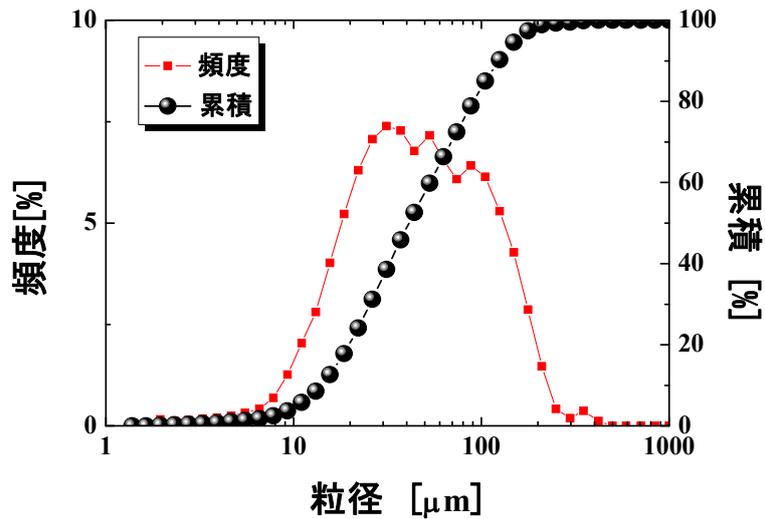
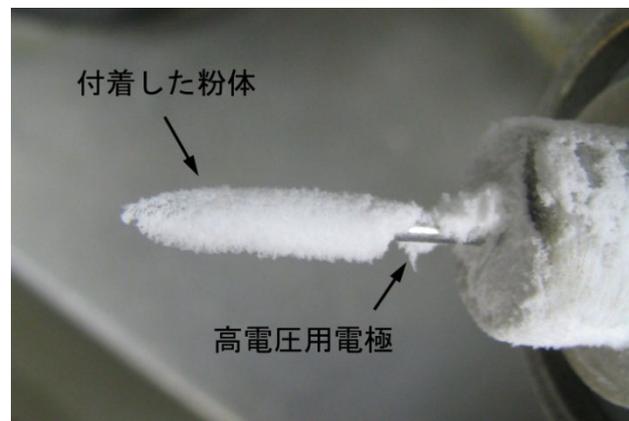


図1 セルローズ粉体の粒度分布測定 (所内実験)



(a) 粉体の最小着火エネルギー測定装置 (b) 高電圧印加用電極に粉体が付着している様子 (Adolf-Kühner, MIKE-3)

図2 粉体の最小着火エネルギー測定 (所内実験)

3. 3 着火源

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高い。しかし、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、今回の災害がパルスジェットコレクタのどの部位で、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。現場では主に以下の静電気放電が発生した可能性がある。

(1) 接地されていない導体からの静電気放電 (火花放電)

接地されていない導体が帯電し、静電気放電(火花放電)が起こると着火源になりやすい。災害現場調査によると、バグフィルタ固定用金属器具(図3 類似品)が接地・ボンディングされていなかった



図3 バグフィルタ固定用金属器具の類似品

た. このことから, 固定用器具が接地不良となり, 帯電粉体が付着したバグフィルタ, 帯電した浮遊粉じん, あるいは, 固定用器具へ直接付着した帯電粉体などによる静電誘導によって固定用器具の電位が上昇し, 火花放電が発生した可能性が非常に高い. 以上のような原因で, 固定用器具が接地不良になった場合, 固定用器具からの放電エネルギーは, 固定用器具の静電容量を 34 pF^* , 金属器具の静電誘導電位は -20 kV とすれば, 6.8 mJ^{**} になる. 高抵抗粉体の場合, 配管内の圧送によって粉体槽に投入した後, 堆積粉体の電位が -50 kV 以上に達しているデータがあり²⁾, さらに, バグフィルタが接地不良になった場合, 急激な帯電現象が現われ, -60 kV 以上の電位が測定された報告もあり³⁾, 今回の推定電位値 -20 kV は決して過大ではない. したがって, 固定用器具からの放電エネルギーは今回爆発したセルロース粉じんの $\text{MIE}(3 \sim 10 \text{ mJ})$ を超えていた可能性はあり得る.

一方, 粉体用流動槽内での粉体粒径は, 流動槽の上部に行くほど, 小さくなり, 上部流動塔での粉体サイズは投入粉体の約 $1/6$ であるという実験結果がある⁴⁾. このことから今回のパルスジェットコレクタの場合も, 固定用器具が設置されているパルスジェットコレクタの上部に浮遊, 付着しているセルロース粉体の粒径はかなり小さくなっていった可能性がある. 木粉や樹脂系の粉体などの場合, 次式を用いて, 粒径サイズ $M_1(4.1(3))$ から今回のセルロース粉体中央値 $D50: 41 \text{ }\mu\text{m}$ に対する MIE_1 の実測値(ここでは 6 mJ)から, 同材質の粒径サイズが M_2 である粉じんの MIE_2 を推定できる⁵⁾.

$$\text{MIE}_2 = \text{MIE}_1 \times (M_2/M_1)^{2.5} \quad (1)$$

実際, 今回のパルスジェットコレクタの上部に存在するセルロース粉体の粒径はパルスジェットコレクタの高さに大きく影響を受ける. 仮に $1/2$ 程度であったとしても, 微粉のセルロース粉体 $M_2(D50: 20 \text{ }\mu\text{m})$ は約 1 mJ の放電エネルギーでも着火する可能性はあると考えられる.

*固定用金属器具の静電容量は, 測定環境や条件によって異なるものの, ここでは, 接地された金属板の上に絶縁フィルム(0.5 mm)を敷いて, 類似の固定用金属器具(直径: 約 113 mm)をこの金属板上にのせ測定した値である.

**放電エネルギーは静電容量 C 及び電圧 V を $CV^2/2$ の式に代入して計算した値である.

また、何らかの理由でバグフィルタ固定用金属器具が離脱し、パルスジェットコレクタ内の堆積粉体上で発見されて離脱落下した場合、固定用金属器具が接地不良となり、浮遊・堆積・付着した帯電粉体によって静電誘導を受け、固定用金属器具の電位が上昇し、固定用金属器具とパルスジェットコレクタ内壁などの金属部との間で火花放電が発生した可能性もある。

(2) バグフィルタによる剥離放電

逆洗エアパルスによる払い落とし工程では一度に多量の帯電粉体が剥離されるため、バグフィルタが絶縁性の物であると帯電粉体の剥離に伴って強いブラシ放電が発生する。その放電によって、最小着火エネルギーが3 mJ程度の着火しやすい粉じんが着火する可能性がある⁶⁾。今回の爆発の原因が剥離放電であることも否定はできない。

(3) パルスジェットコレクタ内での雷状放電

逆洗エアパルスによってバグフィルタから剥離した粉体が元々存在する浮遊粉体に加わってサイロ内の空間電荷雲の比電荷・粉じん濃度を高め、雷状放電の発生を助長する可能性はあるが、今回のパルスジェットコレクタの規模などを考慮すると、雷状放電を起こす可能性は低い*。

*サイロの直径やどの高さにおいても3 m以下、容量60 m³以下の容器内では雷状放電が実験的に観測されていない⁷⁾。

3.4 その他（放散口について）

本件では、爆発圧力放散口が正しく働いたため、大きな被害を避けられたが、放散口が室内であったため、スレート葺の外壁等を損傷するにいたった。すなわち設置方法が適切ではなかったことが被害を大きくしたものと考えられる。以下では、本件で用いられた放散口を爆発圧力放散設備技術指針¹⁰⁾の下に検証する。

爆発圧力放散設備技術指針⁸⁾によれば、必要な放散面積は下記の式で得られる。

$$A_v = (8.535 \times 10^{-5}) (1 + 1.75 P_{stat}) K_{St} V^{0.75} \{ (1 - P_{red} / P_{max}) P_{max} / P_{red} \} \quad (2)$$

ここで、 P_{stat} 、 P_{red} 、 P_{max} は各々静的作動圧力、放散圧力、最大爆発圧力[×100kPa]であり、 K_{St} は爆発指数[×100kPa m/s]、 V は装置体積[m³]である本件におけるバグフィルタ高さ L と直径 D の比は4900/2130で2を超えているため、さらに下記で計算される増分を放散面積に加える必要がある。

$$\Delta A = 1.56 A_v (1 / P_{red} - 1 / P_{max})^{0.65} \log_{10}(L / D - 1) \quad (3)$$

以上の式に $V = 12 \text{ m}^3$ 、 $P_{red} = 0.55 \times 100 \text{ kPa}$ を、爆発圧力放散設備技術指針からセルローズについて $P_{max} = 9.7 \times 100 \text{ kPa}$ 、 $K_{St} = 220 \times 100 \text{ kPa m/s}$ とし、静的作動圧力 $P_{stat} = 0.1 \times 100 \text{ kPa}$ を仮定すると、 $A_v = 0.580 \text{ m}^2$ 、 $\Delta A = 0.147 \text{ m}^2$ が得られる。したがって、設置されている放散口の面積 0.77 m^2 は、要求される面積

0.73 m²よりも大きいため、十分な放散能力を持っていると言える。しかし、粉体の爆発指数はその状況に大きく左右される。例えば、着火源のところで述べたとおり、粉体の沈降速度が大きさによって変化するため、粉体の粒度分布によっては、爆発指数の代表とした220よりも大きくなる場合が考えられる。事実、ヨーロッパコード⁹⁾では爆発指数として270を例示している。他を同条件としたとき、爆発指数 K_{st} を変化させて計算すると、233を超えた時に要求される放散面積が0.77 m²を超え、危険な状態となる。また、粉体の濃度が高く不完全燃焼が進む場合、一酸化炭素の発生に伴って最大爆発圧力が上昇することや、放散口の静的作動圧が経年劣化等によって上昇した場合には、各々最大爆発圧力 $P_{max}=10.8 \times 100$ kPa、静的作動圧力 $P_{stat}=0.14 \times 100$ kPaを超えた時点で放散面積が不足し、やはり危険な状態に陥る。

4. 同種災害の再発防止対策

爆発を起こした可燃性物質はセルロース粉体であると判断される。今回のセルロースの最小着火エネルギー(MIE)は3~10 mJと非常に小さいため、パルスジェットコレクタだけではなく、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。

4. 1 着火源について

- 1) 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、バグフィルタを固定用金属器具で取り付ける場合、必ず、固定用金属器具を接地・ボンディングさせ、導通を確保する。
- 2) 静電気帯電防止フィルタを使用し、導電性部分をアースする必要がある。また、静電気帯電防止バグフィルタ品の中でも剥離帯電防止に効果があるかなどを検討し、選定する必要がある。
- 3) 作業者は静電気帯電防止作業服及び静電気帯電防止用作業靴の着用を徹底する。
- 4) 金属などの導電性床材を使用し、非帯電性物体となるように漏洩抵抗を10⁸ Ω以下とする。もし床材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が床表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となる。
- 5) 静電気に関する災害防止指針を早急に作成し、プラント設計・作業手順書に反映させると共に、日常の作業での静電気災害を防止する。

4. 2 放散口について

- 1) 爆発圧力上昇速度と最大爆発圧力とを製品ごとに測定する必要がある。(3.4)で計算したとおり、セルロースの代表値に対して、用いられている圧力放散口は現時点で問題のあるものではない。しかし、沈降速度等を考慮して分級した上で、爆発圧力上昇速度と最大爆発圧力とを評価しておくことは、安全に寄与するものである。
- 2) 本件で用いられている圧力放散口が蝶番ドア式であるため、復旧時にはその性能すなわち静的作動圧力が損なわれていないかを確認する必要がある。耐圧の設計値に対して静的作動圧は低いので前後の配管を縁切りした上で、実機について静的作動圧を測定しておくことが望ましい。

4. 3 全体について

- 1) 爆発混合気の排除を目的に窒素ガスの導入により、酸素量の減少方策の検討を行う。この場合、作業者の酸欠対策にも十分考慮する必要がある。
- 2) 放散口の放散先を人・物のない、開放空間とする。
- 3) セルロース粉体の導電性を上げる。粉体そのものの改質が難しいようであれば、内部の湿度を上げる等の方法が考えられる。体積抵抗率は $10^8 \Omega \cdot m$ 以下を目安にする。
- 4) 沈降速度やその分級作用について計測しておくことが望ましい。沈降速度の差が爆発圧力上昇速度と最大爆発圧力の評価に影響を与えることは、(3.4) に記した。パルスジェットコレクタによる逆洗回数を増やすことで粉体濃度を下げるという方法についても、粉体の沈降速度等を考慮しないと実際の状況は評価できず、リテーナの脱落や、ろ布から粉体が剥離する回数が増えた分だけ放電の可能性が高くなる。

参考文献

- 1) 労働安全衛生総合研究所(旧産業安全研究所)：静電気安全指針 2007 , p.87 (2007)
- 2) Mizuki YAMAGUMA, Kwang Seok CHOI, and Tomofumi MOGAMI : Suppression of cone discharges in a powder silo using a grounded metal rod J. Loss Prevention in the Process Industries, Volume 23, Issue 5, September, pp. 680-685 (2010)
- 3) 鈴木栄次郎：流動槽乾燥機の安全対策について，化学工学， Vol.40, No.6 pp.319- 323 (1976)
- 4) 崔ら：Experimental Study on Electrostatic Hazards of Polypropylene Powder in a Fluidized Bed Reactor, 未発表資料，2011年12月国際会議で発表する予定である。
- 5) 崔ら：Ignitability of Aluminous Coating Powders Due to Electrostatic Spark, J. Loss Prevention in the Process Industries, PT.2, Vol. 23, No. 1, pp. 183-185 (2010)
- 6) 労働安全衛生総合研究所：静電気安全指針 2007 , p.57 (2007)
- 7) BSI : Electrostatics – Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity, PD CLC/TR 50404:2003
- 8) 産業安全研究所：NIIS-TR-No.38, 爆発圧力放散設備指針(2005)
- 9) The European Standard : EN-1991-1-7-2006