

# 災害調査報告書

トナー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. 災害の概要

トナー原料用粉体貯蔵ホッパー内で爆発が発生した。人的被害はなかったものの、物的被害として投入ホッパー投入口、内部、粉体貯蔵層等が焼損した。

## 2. 災害発生時の作業内容

作業現場において、作業員がフレキシブルコンテナバック（フレコンバック）の底のひもを外しホッパーに粉体（トナー原料）投入作業を開始した直後に爆発が発生した。

## 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、本件の爆発は粉体貯蔵ホッパーで取り扱うトナー原料用粉体の燃焼によるものであると考えられる。

### 3. 2 実験および考察：トナー原料用粉体の静電気特性

トナー原料用粉体の形状、粒径、体積抵抗率、帯電量（比電荷）、および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。結果によると、トナー原料用粉体は不定形で、粒径は試料の採集場所によって異なるため、正確な測定はできないが、フレコンバック中で採集した試料は、142  $\mu\text{m}$ （中位径  $D50$ ）であった。体積抵抗率が  $6.17 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$  以上と非常に高く、「高帯電性物体」に分類<sup>1)</sup>され、静電気の帯電による危険性が高い。実際の比電荷も平均で -14 nC/g と非常に高い値を示した。また、MIE が 5 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 1 参照）。

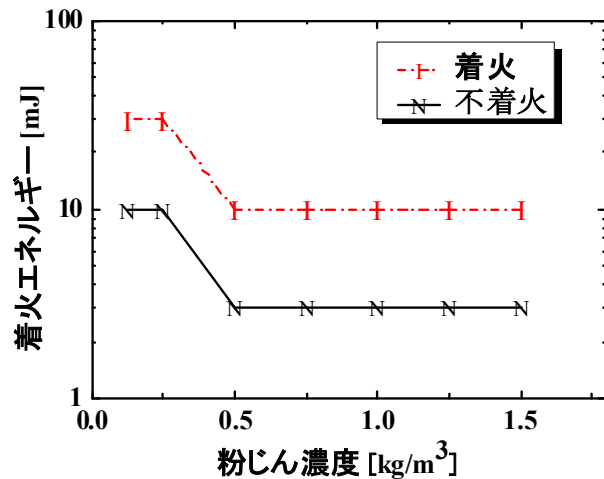
表 1 トナー原料用粉体の基本特性

粉体試料名	形状	粒径 [ $\mu\text{m}$ ]			体積抵抗率* [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	比電荷** [nC/g]	MIE*** [mJ]
		$D10$	$D50$	$D90$			
トナー原料	不定形	46	142	235	$6.17 \times 10^{12}$	-14.4	5

\*3 回の平均値

\*\*5 回の平均値

\*\*\*ふるい（網の 1 目の 1 辺の長さ：75 $\mu\text{m}$ ）を通した微粉体のデータ



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

図1 トナー原料用粉体の最小着火エネルギー測定 (所内実験)

### 3. 3 着火源

災害現場調査によると、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、今回の災害が設備（粉体貯蔵ホッパー）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。

災害現場調査により、投入シュートとホッパーを繋ぐゴムホースを固定する金属器具が、ホッパー内に離脱した状態で発見された。このことから、固定用金属器具が接地不良となり、① フレコンバックから投入される帯電粉体、② ホッパー内の堆積している帯電粉体、③ ホッパー内の浮遊帯電粉じん、④ 固定用金属器具に直接附着した帯電粉体などによる静電誘導を受け、固定用金属器具の電位が上昇し、固定用金属器具とホッパー壁などの金属部との間で火花放電が発生した可能性がある。以下、接地不良となった固定用金属器具から発生する静電気放電による着火危険性について推定する。

まず、接地不良となった固定用金属器具から発生する火花放電について、模擬実験を通して検証を行った。模擬実験装置は粉体貯蔵ホッパー（ステンレス製円筒型、胴長：3.3 m、直径：1.5 m、容量：3.8 m<sup>3</sup>）、配管（材質：ステンレス、直径：0.1 m、全長：約 30 m）、輸送空気の制御盤（最大風量：11 m<sup>3</sup>/min、インバータ制御型）、空調ユニット（温度：30℃、相対湿度：30%）、イメージインテンシファイア付き光学カメラ（以下、高感度カメラという）、粉体（ポリプロピレン、約 2 mm、約 300kg、「帯電しやすい粉体」）等から構成されている。

模擬実験は、以下の手順で行った。

- ① 粉体貯蔵ホッパー内の堆積粉体の上に固定用金属器具を乗せる（固定用金属器具とホッパー内壁との距離：約 3 cm，写真 1 参照）。
- ② 帯電した粉体\*を粉体貯蔵ホッパー内へ投入する（粉体供給量：約 0.4 kg/s）。
- ③ その間，粉体貯蔵ホッパー上部屋根の点検用ガラス窓に取り付けた高感度カメラで静電気放電を観察する（図 2）。

実験結果の一部を写真 2 に示す。結果によると，帯電粉体を粉体貯蔵ホッパー内へ投入を開始するとほぼ同時に固定用金属器具と堆積粉体表面との間でブラシ放電\*\*が発生した。その後，固定用金属器具とホッパー内壁との間で強い火花放電が発生した。これらの静電気放電（ブラシ放電，火花放電）は 1 秒間当たり数回，繰り返し発生した。

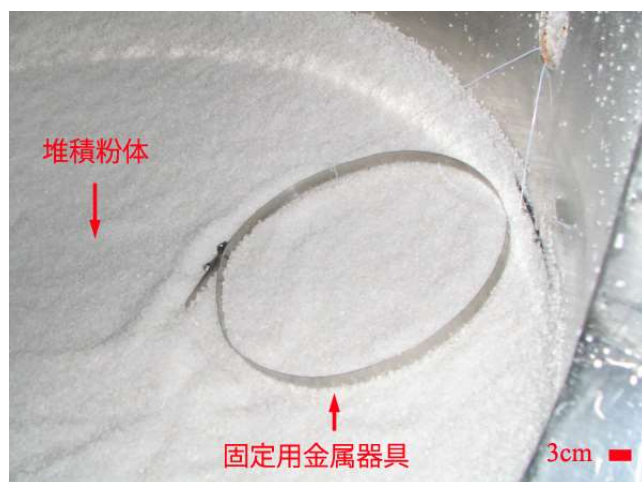


写真 1 堆積粉体の上に固定用金属器具（同等品）を置いた様子

---

\*粉体の帯電量（比電荷）は約-11 nC/g であり，大型カバー付きファラデーケージを粉体貯蔵ホッパー内に取り付け測定した値である。

\*\*ブラシ放電は，空間的・時間的に分散するので，正味の放電エネルギーで比較すると火花放電よりも着火性が低いため，ここではその考察は省略する。

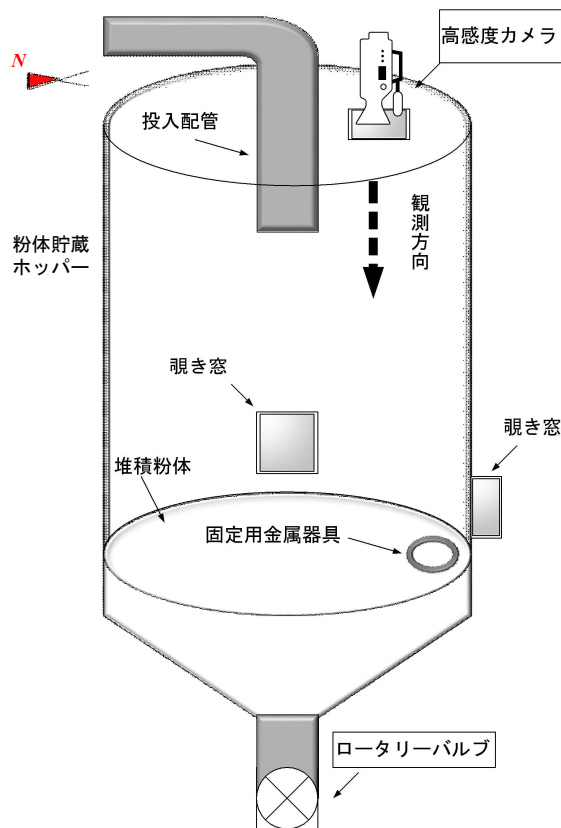


図2 粉体貯蔵ホッパー内で発生する静電気放電の観測の模式図



写真2 固定用金属器具とホッパー内壁との間で発生した静電気放電

次に、固定用器具から発生する火花放電エネルギーを推定するため、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、静電気放電観測の模擬実験と同様に堆積粉体の上に固定用金属器具を置いて測定した。その結果、静電容量の値は、20 pFであった。

このことから、火花放電エネルギー（式(1)）は、固定用器具が23 kV（以下、絶対値）以上に帯電した場合、トナー原料粉体の最小着火エネルギーである5 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.

実際にホッパー内で固定用金属器具が 23 kV に帯電するか, 実験で確かめることはできない. しかし, トナー原料粉体の比電荷が一般粉体より, かなり高いこと (帯電しやすい, 表 1 の結果値参照), 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\*, 所内の粉体貯蔵ホッパーを使用した模擬実験での堆積粉体の電位が 50 kV 以上\*\*に達していることから, 今回の推定電位値 23 kV は決して過大ではない. したがって, 固定用器具からの火花放電エネルギーが今回爆発したトナー原料粉体の最小着火エネルギーを超えていた可能性はあり得る.

なお, 今回爆発を引き起こした設備内に, その他の接地不良の導体が存在した場合も, 同じ現象に至って火花放電が発生した可能性が非常に高い.

## (2) 帯電したフレキシブルコンテナからの静電気放電 (ブラシ放電, 沿面放電)

フレコンバック, 紙袋等からの粉体投入作業中に発生する爆発・火災は, 静電気災害の中でも多い部類に入る.

今回, 現場で使用したフレコンバックは, 絶縁性であり, 静電気帯電防止品ではなかった. したがって, フレコンバックで粉体投入作業をする際に, 主にブラシ放電, 火花放電, 沿面放電が発生した可能性がある. ただし, ここでは火花放電については省略する.

まず, ブラシ放電は, フレコンバックが帯電したときに, これから導体 (作業員 (人体), 金属類など) に向かって発生するものである. 現場作業員への聞き取り調査によると, 「フレコンに腕が近づくと, 産毛が逆立つように感じる場合がある」という証言があり, 現場では, ブラシ放電が発生していた可能性はある. しかしながら, ブラシ放電は空間的・時間的に分散するので, 着火能力が低いことから, ごく一部の極めて鋭感な粉体を除き (例えば MIE : 1 mJ 以下), 粉じんの着火源とはなりにくい.

沿面放電は, フレコンバックとトナー原料用粉体との摩擦帯電によって, フレコンバックの内面電荷密度が高くなると, 投入台座等接地された導体などに向かって発生する放電である. この沿面放電はブラシ放電より着火能力が高い. 特に, 投入最終段階でフレコンバックの振り払いなどを行うと, 危険性が高まる. しかしながら, 今回のフレコンバックは内袋がないタイプであったこと, 粉体投入作業を開始した直後に爆発があったことから沿面放電が起こった可能性は低い. したがって, 今回の事故は, 帯電したフレコンバックが災害の直接的な原因になった可能性は低い.

---

\*電荷量  $Q$ , 静電容量  $C$ , 電圧  $V$  は  $Q = CV$  の関係であり, 電荷量一定のもとでは, 静電容量と帯電電位は反比例の関係にある.

\*\*静電電位センサーの測定限界を超え, 正確な測定は不可能である.

### (3) 帯電した人体からの静電気放電

帯電した人体からの静電気(火花)放電は着火源になりやすい。しかし、今回の現場調査によると、現場が静電気帯電防止床であること、さらに、作業者は静電靴を着用していたことから、帯電した人体からの火花放電が発生した可能性はかなり低い。したがって、今回の事故は、帯電した人体が災害の直接的な原因になった可能性は低い。

## 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トナー原料用粉体であると判断される。今回のトナー原料用粉体の最小着火エネルギー(MIE)は5mJと非常に小さいため、粉体貯蔵ホッパーだけではなく、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 現場では、接地・ボンディングされていない金属製治具が多く認められた。したがって、静電気対策として、全ての金属製機器、装置、器具の接地・ボンディングを徹底する必要がある。特に、絶縁性配管、フィルタなどを固定する金属製器具は、必ず、接地・ボンディングすることで、導通を確保しなければならない。また、金属製器具は離脱を防止できる構造にしなければならない。

② フレコンバックは、必ず、静電気帯電防止用品を使用する。

③ 粉体の堆積状況の点検および掃除を容易にできる構造とする。

④ 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、定期的な床の清掃や点検が必要である。

⑤ 粉体の爆発性混合気の排除を目的に窒素ガスを導入し、酸素量を減少させる。なお、粉体試料(トナー)を取扱う場合、静電気放電による着火爆発災害を防止するために、窒素濃度84%以上で使用すると効果的であるとの報告がある<sup>2)</sup>。しかし、窒素ガス導入による効果は粉体毎に異なる可能性があるため、現場で取り扱う粉体(特に、微粉体)を対象に評価・対策を行う必要がある。

⑥ 現場責任者、作業従事者に対して静電気による危険性やその対策に関する教育を定期的実施する。

⑦ 静電気に関する災害防止対策を早急に確立し、プラント設計・作業手順書に反映させるとともに、作業者に周知徹底させる。

## 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, 2007, p.87.
- 2) 崔, 安全工学発表会, 2013, pp. 139-142.