

災害調査報告書

OA リサイクル工場における 粉じん爆発災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

要旨

コピー機等のトナーカートリッジのリサイクル工場において、稼働中の集じん機で爆発が発生した。幸い、死傷者はなかった。調査の結果、廃トナーカートリッジを破碎機に投入作業中に、発生したトナー等の破碎粉じんが集じん機に吸引されていたところ、集じん機内で静電気の放電により粉じん爆発が発生したと推定された。粉じんの静電気放電の原因は、絶縁性のトナーとプラスチック粉（すなわち帯電しやすい）と導電性のある金属フィルムなど異種のを吸引していたため、逆洗によるはく離帯電、誘導帯電などにより火花放電が生じたためである。トナーの測定を行った結果、トナーの最小着火エネルギーは数 mJ であることが判明した。また、トナーの爆発危険性を明らかにし、従来のものよりも爆発危険性が高くなっていることがわかった。

1. 調査項目

- ① 被害状況の調査
- ② 爆発災害の原因解明のための調査及び実験
- ③ 同種災害の再発防止対策の検討

2. 災害の概要

- ① 事故災害の形態：爆発災害
- ② 爆発起因物質：トナー粉
- ③ 爆発装置：集じん機と破碎機
- ④ 人的被害：死傷者 0 名
- ⑤ 物的被害：集じん機の破壊・焼損，集じん・排気ダクトの外れ・焼損，窓ガラス・壁の損壊等。被害額は不明。
- ⑥ 発生状況の概要
午後から廃トナーカートリッジ（使用済みの空のケース）の破碎作業を実施していたところ、50 分経過した頃、集じん機で爆発が発生した。作業開始から廃トナーカートリッジを 50～60 個投入していた。火は現場作業員の初期消火で対処した。その後、消防と警察が出動した。
- ⑦ 気象状況
工場最寄り消防署における気象の記録は、次のとおりである。
気温 6.7℃，湿度 32.1%，実効湿度 50%，晴れ，乾燥注意報発令中

3. 設備の概要

3.1 OA 機器のリサイクル

当事業所では、廃棄 OA 機器（パソコン、コピー機、ファックス、トナーカートリッジ等）の解体とリサイクル部品の抜取り、選別を行い、金属、被覆銅線などの有価物は売却、プラスチック類はペレットや自社製品への加工や有価物として売却している。写真 3-1 に工場内の様子を示す。



写真 3-1 各地から回収された廃トナーカートリッジが載せられた台車

3.2 工程・作業の流れ

(1) 破碎工程

本工程では電子基板、トナーカートリッジ等を破碎し回収する。被破碎物はベルトコンベヤに載せられ、破碎機の上部に投入される。図 3-1 に集じんダクトの系統を示す。

(2) 主な装置

① 破碎機

方式：縦型スイングハンマー

回転数：320rpm

写真 3-2 に被災前の破碎機の様子を示す。

② 比重選別機

方式：空気ジグ選別（乾式比重選別）

③ 集じん機

方式：バグフィルターによるろ過

払い落とし方式：パルスジェット

3.3 破砕機を使った通常の作業体制

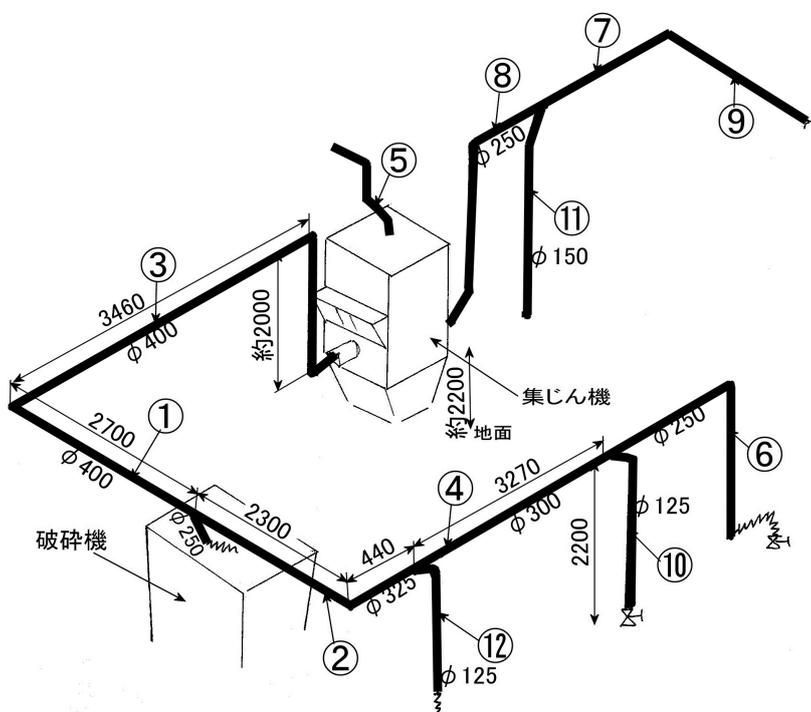
通常の作業はパート労働者3名で行われていた。

① 機械の運転時間

事業場の作業時間に合わせて午前8時から19時ぐらいまで。ただし、事故前はしばらく休止していた。

② 作業

パート労働者3名は、それぞれ、トナーカートリッジを破砕機に投入する作業、破砕物を回収する作業、集じん機からトナーを回収する作業に従事していた。



単位:mm

図 3-1 集じんダクトの系統 (ただし、番号は便宜的につけたもの)



写真 3-2 被災前の当該破砕機

4. 被害状況と爆発前後の様子

4.1 被害の状況等

(1)被害状況

主な被害状況等は以下の通りである。

1)建物外壁

- (a) 西側の排煙用のガラス窓の留め金が壊れ、窓が開放した。
- (b) 窓ガラスが破損した。5 枚。

2)建物内

- (a) 集じんダクトがはずれ、焼損した。集じんダクト③（図 3-1）の集じん機吸い込み側の鉛直部と両端の曲管部。集じんダクト⑦と⑨の間の曲管部。

3)集じん機

- (a) バグフィルター交換扉（点検扉）の開放，変形（外側への膨らみ）。
- (b) 爆発放散口（ドア式）の開放。
- (c) バグフィルターの焼損。
- (d) 逆止弁の弁体が外側に向かって変形していた。
- (e) 逆止弁は正常時は開閉するが，爆発後，変形のため完全に閉じなくなり，隙間（弁体と弁座の間隔 30mm）が生じていた。通常は，全開で使用する。

4)破砕機

- (a) 上部の点検扉が外に向かって折れた格好で変形した。
- (b) 溶接してあったゴム板押さえ金具がはずれた。4 箇所。

5)ほかの機器

- (a) 集じん機と破砕機のほかは燃えた形跡がなかった。

(2)その他の情報

- (a) 破碎作業は災害発生の5か月前から行っていた。
- (b) 前月下旬、集じん機のバグフィルターに付着したトナーを刷毛等でこそげ落とし作業を行った後、当日まで当該設備を稼動していなかった。
- (c) この清掃作業時にはバグフィルターを取り外していなかった。
- (d) その他の清掃は、ロータリーバルブの詰まりを除くための清掃を過去2回ほど行った。
- (e) 集じん機のボンディングをしていない箇所があった。

4.2 爆発前後の様子(作業者の聞き取りより)

- (a) 事故前、当該設備はしばらくの期間休止していた。
- (b) 投入作業は労働者Aが1名で作業を行っていた。
- (c) 連続して投入すると破碎機が過負荷状態となるため、5から6個を順次投入し、少し休んでから投入を繰り返していた。
- (d) 周囲に火の気はなく、いつもどおりの作業であった。
- (e) Aの作業服はいつもどおり会社指定の物であったが、特に帯電防止機能のついた作業衣ではなかった。
- (f) 爆発の音は1回聞こえた。
- (g) 破碎機からは音はしなかったと思う。
- (h) 破碎機からは炎は出てこなかったと思う。

5. 測定・実験

5.1 破碎物の外観・種類

被災現場から破碎物と廃トナーカートリッジを採取した(写真5-1～5-2)。



写真 5-1 破碎機内の排出口板上にあったもの



写真 5-2 破碎機出口、振動コンベヤ上にあったもの

5.2 トナーカートリッジ

(1) 廃トナーカートリッジの分解

写真 5-3 に採取した廃トナーカートリッジ（マゼンタ）の構成部品を示す。トナーは半透明のプラスチック製の袋（(b)中の A）に入っていた。これらの構成部品と破砕機内部、排出部、振動コンベヤにあったものとを比較すると、よく一致することがわかる。すなわち、当時はトナーカートリッジのみを破砕していたことがわかる。



(a) 金属製の部品

(b) プラスチック製の部品



(c) トナー（マゼンタ）
（ガラス容器にて保存）

写真 5-3 廃トナーカートリッジを分解した様子

(2) 廃トナーカートリッジの質量とトナーの残量

廃トナーカートリッジについて、各々10個分解し、内部に残っているトナーの残量を測定した。トナーの平均残量は269gであった。さらに新品のトナーカートリッジのトナー粉の充てん量を測定した結果より、トナーの平均使用率は55.1%であり、半分弱の粉が残り、トナーカートリッジごと回収されていたことが判明した。しかし、残トナーの中には90%程度残っていたものもあった。

5.3 部品の導電性

廃トナーカートリッジを分解した部品について、絶縁抵抗計（横河電機製，デジタル絶縁抵抗計 MY40）を使って電気抵抗を測定した。得られた結果は次の通りである。

- ①金属製部品について：すべて導電性あり。
- ②プラスチック製部品（ケース，取っ手を含む）について：
 - スポンジ製のローラー部品 B（写真 5-3(b)）は $6.6 \times 10^3 \Omega$ （250V 印加）で導電性あり。ほかの部品は $2 \times 10^9 \Omega$ 超（1,000V 印加）で導電性が低い。
- ③シール： $2 \times 10^2 \Omega$ （250V 印加）で導電性あり。
- ④トナー：表 5-1 の通り。導電性が極めて低く，帯電性は高いと判断される。

表 5-1 トナーの導電率(実測値)(26°C, 34%RH)

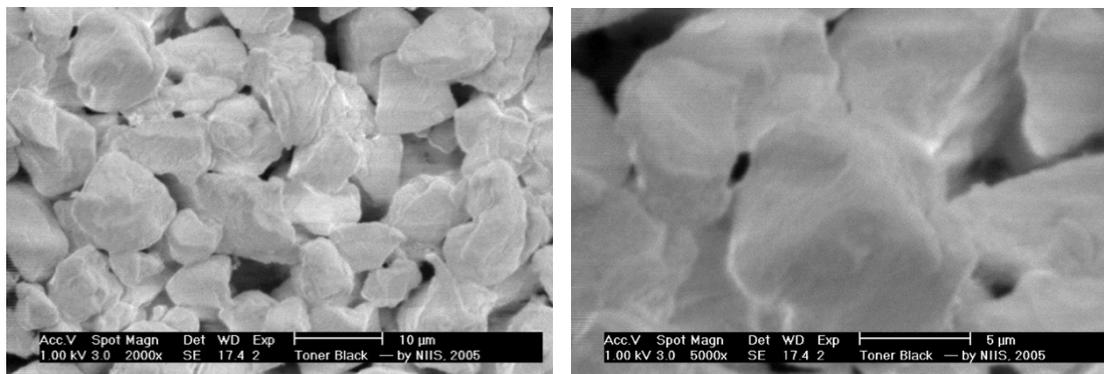
トナー種別	測定電圧 [V]	導電率(1分値) [S/m]
ブラック	1,000	1.0×10^{-14}
マゼンタ	1,000	1.0×10^{-14}
イエロー	1,000	9.0×10^{-15}
シアン	1,000	8.3×10^{-15}
混合物	1,000	7.5×10^{-15}

測定方法は産業安全研究所技術指針¹⁾に従った。

5.4 トナーの性状

(1)電子顕微鏡写真

SEM（走査型電子顕微鏡）写真撮影を行い，粒子形状，表面の様子を観察した。写真 5-4 に SEM によるトナーの外観を示す。



(a)ブラック ×2000 倍

(b)ブラック ×5000 倍

写真 5-4 SEM によるトナーの外観

(2)粒度分布

粒度分布を調べた結果、各トナーの
中位径 $D(v,0.5)$ は約 $10\ \mu\text{m}$ であり、
粒がよくそろっていることがわかつた。
 $2\ \mu\text{m}$ 以下の粒子の存在も認めら
れるが、これは、粒子の角が取れて細
かくなったものと考えられる。

測定装置：湿式レーザ回折式粒度分
布測定装置（マスターサイザーマイク
ロ，Malvern 社）

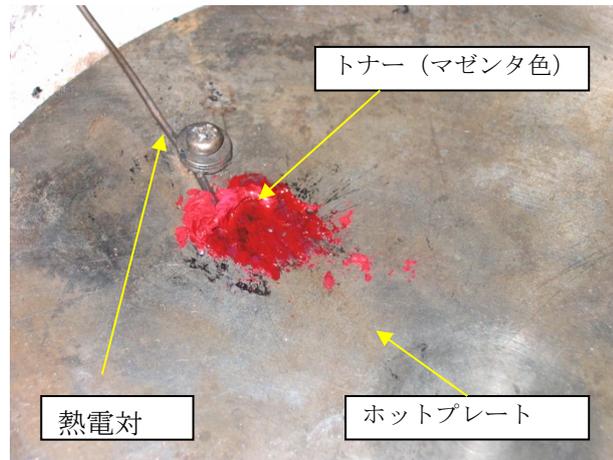


写真 5-5 軟化温度の測定の様子
(マゼンタトナーについて)

(3)トナーが軟化する温度

破砕作業では、衝突，切断，摩擦を
繰り返すため，破砕機の中は温度が高い状態にあったと考えられる。トナー等のプラスチ
ックは，高温では性状が変化する。ここでは，トナーが軟化を開始する温度を測定した。
ただし，本実験での「軟化する温度」は，昇温させながら調べるのではなく，目標温度に
設定したときに軟化するかどうかを調べた。プラスチックの試験方法における軟化点（ビ
カット軟化点）は JIS K 7206 に，熱変形温度は JIS K 7207 に定められている。本実験は
規格試験によらない簡易的なものである。軟化の判断は，その設定温度に達したときの色
の変化と金属へらでトナーに触れ，粘りをみることで行った。写真 5-5 に測定の様子を示
す。得られた結果は次の通りである。

①ブラックについて：86～87°C

②マゼンタについて：83～84°C

両トナーとも，その温度以上ではゴム状になることがわかつた。

(4)熱重量分析

ブラックとマゼンタのトナーについて，窒素あるいは空気の雰囲気における熱重量変化
を調べた。得られた結果は次の通りである。

①ブラックについて

窒素雰囲気中：減量開始温度 374.2°C，（変曲点462.5°C）

空気雰囲気中：減量開始温度360.0°C，ピーク温度566°C→燃焼した。

ピーク温度が発火温度（くすぶり温度ではない）に相当する。

②マゼンタについて

窒素雰囲気中：減量開始温度 368.9°C，（変曲点466.9°C）

空気雰囲気中：減量開始温度 374.7°C，ピーク温度 576.3°C →燃焼した。

測定装置：熱重量分析装置 TGA-51（島津製作所）

測定条件：空気あるいは窒素 10mL/min, 20°C/min (800°Cまで), 白金試料皿, 試料量 7.7
~20.0mg

5.5 破砕物の燃焼性

(1) 堆積状態における燃焼性状

採取した破砕物をセラミックファイバーボード（断熱板）上に置き、手持ち式の着火器具を使って燃焼の様子を調べた。

実験の結果、トナーカートリッジのプラスチック製の部品（ケース、取っ手を含む）、各トナーはすべて燃えることがわかった（写真 5-6）。ただし、黒煙（すす）の発生量には違いが見られた。ケースに張ってあったシールも燃えることがわかった。

ダクト⑨内から採取した粉も容易に着火し、黒煙を上げて燃えることがわかった（写真 5-7）。燃焼中はゴムの臭いがあった。燃焼挙動が突発的に変化することはなかった。途中で消すと粉に光沢が見られた。



(a)ブラック

(b)シアン

(c)イエロー

(d)マゼンタ

写真 5-7 各トナーの燃焼の様子
(F3.2, 1/60s, ISO200 相当)



写真 5-7 集じんダクト⑨から採取した粉の燃焼の様子
(F3.2, 1/60s, ISO200 相当)

(2)浮遊するトナーの粉じん爆発下限濃度

吹き上げ式（ハートマン式）の爆発試験装置を使い、ブラックとシアンのトナーについて、粉じん爆発下限濃度を測定した。さらに新しいブラックのトナーについても調べてみた。得られた結果は次の通りである。

- ①廃トナー（ブラック）について：70 g/m³
- ②廃トナー（シアン）について：70 g/m³
- ③新しいトナー（ブラック）について：70 g/m³

なお、測定条件については吹き上げ圧力 78 kPa, 点火遅れ 0.08 秒, 火花放電 (15 kV, 20mA, 定格), 放電時間 1.0 秒, 室温 15°C, 相対湿度 43%であった。

(3)浮遊するトナーの最小着火エネルギー

吹き上げ式の着火試験装置（MIKE-3）を用い、トナーが浮遊する状態での最小着火エネルギーMIE (mJ) の測定を行った。測定ではトナーは未調製のもの（現場から入手した状態であり、ふるい分けをせず、乾燥処理をしていないもの）を使用した。

得られた結果は次の通りである。

- ①ブラックについて：1 < MIE < 3 mJ
- ②シアンについて：3 < MIE < 10 mJ
- ③イエローについて：3 < MIE < 10 mJ
- ④マゼンタについて：1 < MIE < 3 mJ
- ⑤混合したものについては 1 < MIE < 3 mJ

ただし、粉じん濃度範囲は 750 から 1,500g/m³である。

(4)トナー粉じん雲の機械的火花による着火性・火炎の伝ば性

現場で回収した破砕物について、回転砥石（グラインダー、電動サンダー）に押し当てた際に発生する火花（衝撃火花）によって浮遊粉じんが着火するかどうかを調べる装置を製作した（写真 5-8）。装置は、アクリル円筒（内径 100mm、高さ 560mm）、試料片を取り付ける空気圧シリンダー、回転砥石（直径 100mm）、粉を分散するパイプ、円筒上部を閉じるアルミニウム箔から構成される。試料は空気シリンダーの報復運動により、一定時間、回転する砥石車に接触させることができる。粉の吹き出し方向を上方と下方、砥石は上向きと下向きと変えて行ってみた。得られた結果は次の通りである。

①火花の発生の有無

プラスチック製の部品はいずれもなし

金属製の部品は丸棒（写真 5-3(a)中）のみあり

②トナーの着火性・火炎の伝ば性

マゼンタ色のトナーを 0.9g 使用（アクリル円筒内にすべて均一に分散したと仮定した場合の粉じん雲の平均濃度は 200g/m³）

- a) 砥石を上向きに回転・上向きに分散した場合について：不着火，火炎の伝ばなし
- b) 砥石を上向きに回転・下向きに分散した場合について：不着火，火炎の伝ばなし
- c) 砥石を下向きに回転・上向きに分散した場合について：不着火，火炎の伝ばなし
- d) 砥石を下向きに回転・下向きに分散した場合について：粒子が着火するが，火炎の伝ばなし

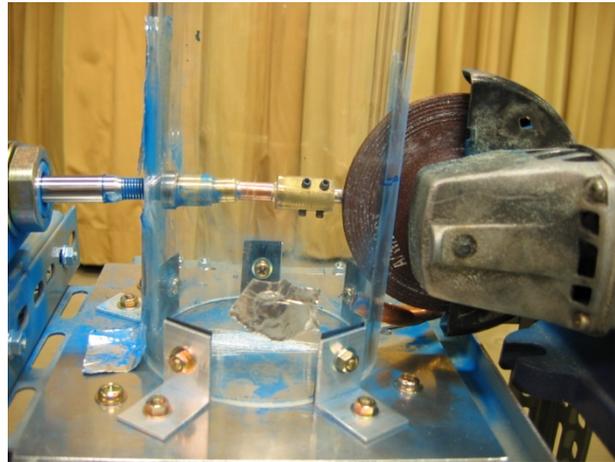
条件：砥石の粒度 36 番（標準品），回転数 5443（周速 28 m/s）～11,148 rpm（周速 58 m/s），分散パイプからの粉の平均噴出速度 48 m/s，破砕物の（推算）接触時間 0.8 秒，試料の変位量（磨耗する長さ）0.8～1.0mm（接触時間 0.8 秒の時）

写真 5-9 に砥石を下向きに回転，粉を下向きに分散させた場合の様子を示す。この状態がアクリル円筒下部で局所的に高い粉じん雲濃度であり，空間あたり高い頻度で火花が形成するため，着火，火炎が伝ば（爆発）しやすい状態にあると考えられる。明るい粒子がたくさん見られるが，これは金属棒が削られて発生した高温状態の粒子である。火花のほかにトナー粒子が着火しているようであるが，火炎が伝ばしていないことがわかる。周囲に気流があり短時間の火花の接触では着火，火炎が伝ばしにくいことがわかった。

この伝ばしない原因としては，この程度の粉じん雲濃度について，発生する火花の着火エネルギーは小さいことが上げられる。火花（高温状態の研磨された粒子）の温度は，赤熱した色からすると，温度は 800 から 1100℃程度²⁾であると推定される。この温度で空間あたりの火花の発生密度が高く，トナーの粉じん雲の濃度が高ければ着火する可能性が高く，おそらく，静止気流に近い状態では着火がより達成されやすい。しかし，周囲に気流がある条件下では気流速度の増加とともに，着火しにくくなる。

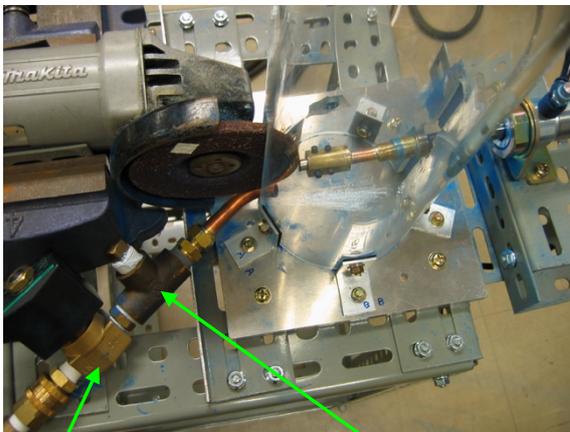


(a) 全景



(b) 試料片と回転砥石の接触の状況

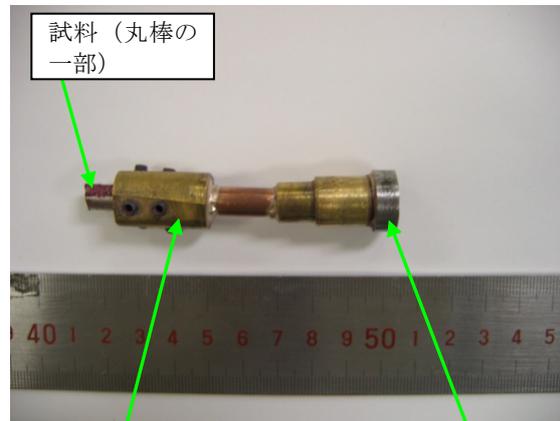
写真 5-8 摩擦火花による着火性実験を行った装置



電磁弁

粉溜め

(c) 粉の吹き出し部



試料 (丸棒の一部)

ねじで試料を固定する

空気圧シリンダーに固定する

(d) 試料片固定具

写真 5-8 摩擦火花による着火性実験を行った装置 (続き)

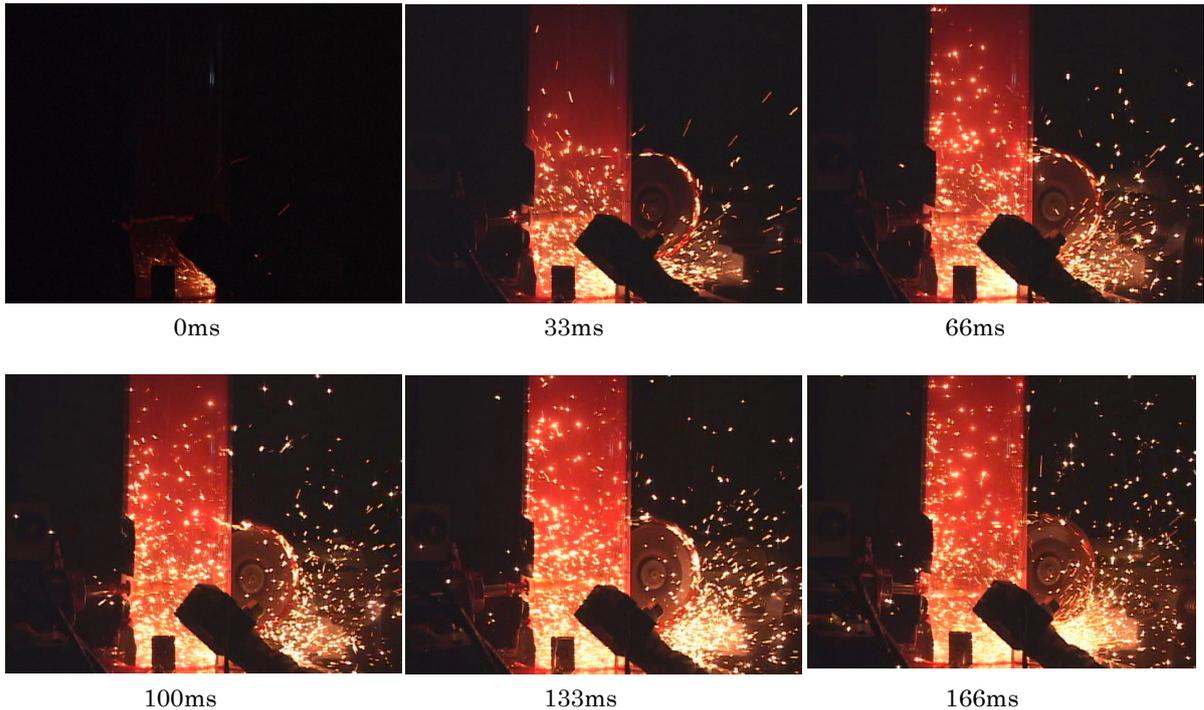


写真 5-9 砥石を下向きに回転，下向きに粉を分散させた場合の様子（マゼンタ色，ビデオによる連続映像）
（火花が大量に発生するが，火炎は伝ば，爆発していない）

(5)爆発の激しさ（強さ）

20リットル密閉爆発試験容器を用い，最大爆発圧力 P_{max} と爆発指数 K_{St} を測定した。ただし，粉じん雲濃度 C は125から750 g/m³の範囲で変化させた。得られた結果を図5-1に示す。最大値は次の通りである。

①ブラックのトナーについて： $C=500$ g/m³において， $P_{max}=8.7\text{bar}$ （870kPa）， $K_{St}=278$ bar・m/s（278×100 kPa・m/s）

②マゼンタのトナーについて：500 g/m³において， $P_{max}=8.5\text{bar}$ （850 kPa）， $K_{St}=296$ bar・m/s（296×100 kPa・m/s）

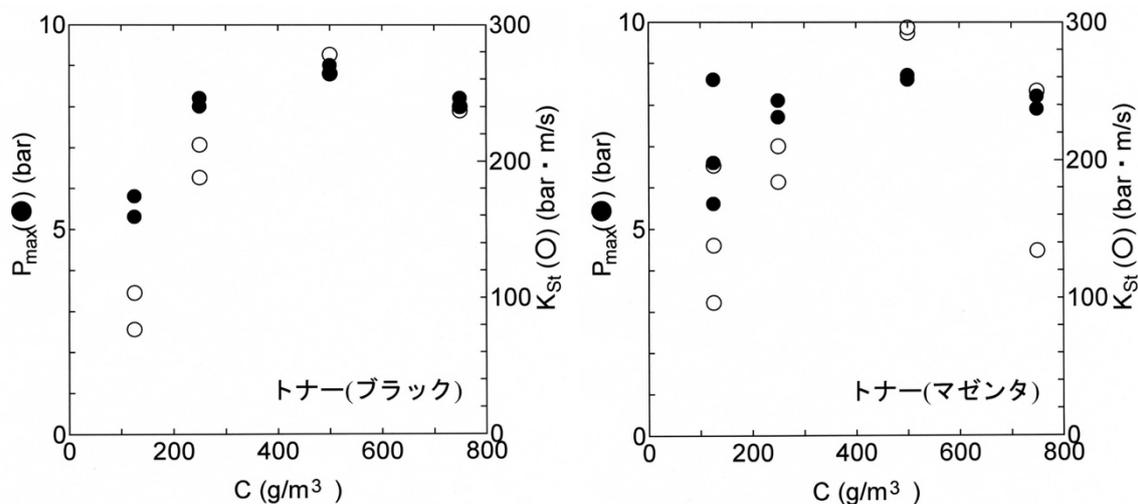


図 5-1 爆発圧力 (20 リットル爆発試験装置による)

8.6 トナーが堆積する速度

トナー (マゼンタ) が堆積する速度をダクトの内径を変えて調べてみた。実験では、内径 35, 50, 60 mm のアクリル円管 (長さ 2 m) を使用した。写真 5-10 に測定の様子を示す。気流の乱れについて表 5-2 に、流路断面の流速分布を図 5-2 に示す。実験は、乱れの少ない流れ場で行った。得られた結果は次の通りである。

- ①ダクト内径 35 mm について：平均流速 9 m/s までは塊状のものが下流に運ばれる。12 m/s ではほとんど運ばれるが、壁に付着が残る。21 m/s まで調べたが、壁に薄く付着したものははがれずそのまま残った。
- ②ダクト内径 50 mm について：平均流速 9 m/s では、すべて下流に運ばれない。13.5 m/s まで調べたが、すべて運ばれず壁に付着したものが残った。
- ③ダクト内径 60 mm について：平均流速 5 m/s では、塊状のトナーが下流に運ばれる。10 m/s では、ほとんど運ばれるが、壁に付着したものが残った。

以上から、堆積していたものは 5 m/s 以上で運ばれるようになるが、壁面に薄く付着したものはそのまま残ることがわかった。粉が堆積する場合には粒子の形状、密度、ダクト表面の境界層内のせん断応力などに依存する。トナーは、集じんダクト内で 17m/s の気流速度があればほとんど堆積しないことがわかった。

表 5-2 ダクト内の気流の乱れ

管内径	50 mm		60 mm
	平均速度	5.2 m/s	9.0 m/s
中心軸 (流路断面中央)	0.50 %	0.59 %	0.39 %
底面より 1mm 上	2.7 %	2.5 %	2.7 %

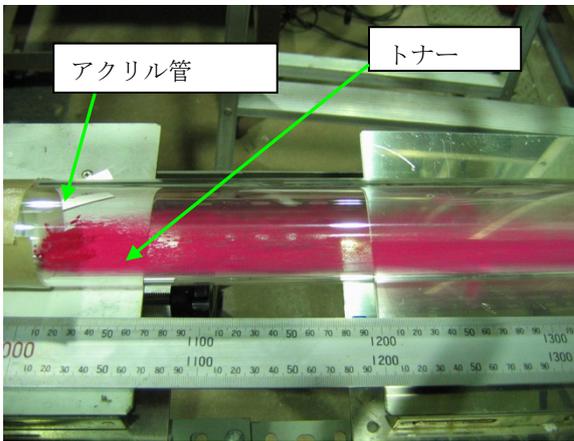


写真 5-10 堆積実験の様子

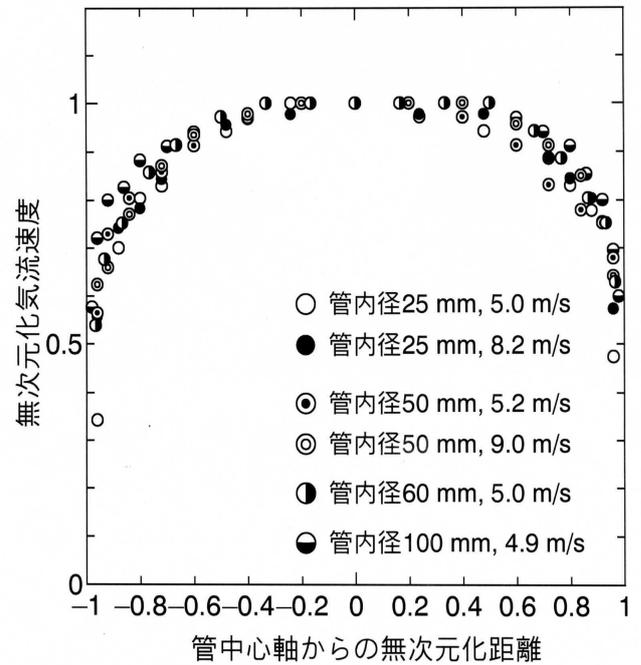


図 5-2 ダクト内の流速分布（無次元表記）
 （内径 25, 50, 60, 100mm のダクトを使った場合の参考データ）

5 章の参考文献

- 1) 「静電気安全指針」 RIIS-TR-87-1, 産業安全研究所, p.117 (1988)
- 2) 理科年表 2003, 丸善 p.392

6. 考察

6.1 破碎物の燃焼性

(1)可燃性の物

破碎機内を目視とファイバースコープを使った観察の結果、破碎機の排出口板上には破碎中の廃トナーカートリッジ、排出口板下部には廃トナーカートリッジの小片や電子基板の小片等があった。可燃性ガスの入ったスプレー缶は見あたらなかった。廃トナーカートリッジの材質は、金属、プラスチック、トナーに分けられる。実験の結果、金属の部品はそのままの形状、大きさでは燃えないことがわかった。しかし、すべてのプラスチックとトナーは良く燃えることがわかった。金属の部品のうち、丸棒が鉄（鉄鋼）であり、ほかは軟らかい非鉄金属（亜鉛合金等）と推定されたが、回転砥石による火花発生実験では丸棒以外は火花を生じないことがわかった。

(2)初めに燃焼した物と着火源

爆発に関与した可燃性の物としては破碎粉が考えられる。トナーは、金属破碎粉やプラスチック破碎粉に比べて、トナーカートリッジ内のトナーバックが破れることですぐに周囲に大量に飛散する。そのため、粉じんの発生量と燃焼性からすると、爆発に関与した可燃性のものとしてはトナーの可能性が高い。初めに着火するものは易燃性の物となるが、これもトナーが考えられる。本災害では、初めにトナーに着火し、その後プラスチック破碎粉などに燃え移ったと考えられる。トナーの着火性を調べた結果、最小着火エネルギーは小さく、1 mJ から 3 mJ の範囲にあり、静電気の放電レベルでも着火する可能性があることがわかった。しかし、着火のエネルギーレベルが高い¹⁾と考えられる衝撃火花による着火実験では、周囲の気流の影響があり、着火しにくいことがわかった。静電気による放電でも同様に周囲気流の影響によっては着火しにくいと考えられる。従って、衝撃火花や静電気の放電が着火源となるならば、粉じん雲の濃度にもよるが、装置内の気流速度が小さいところであると推定される。

(3)トナーの燃焼と爆発の激しさ

最近製造されているトナーは高性能となっており、①帯電しやすこと、②粒子径が小さいこと、③大きさが揃っていること、④樹脂の含有率が高いこと、④融点が低いこと、などの理由から着火しやすくなっており、1mJ 程度のエネルギーでも着火する。トナーの高性能化とともに、印字性能の向上に付随して着火性、燃焼性が高まることになる。トナーの燃焼挙動は、細かく浮遊しやすく空間に広く分散し、火炎の近傍で溶融が容易であるため、液滴のそれに近くなる。液滴の燃焼では、10 μ m よりも小さいと、火炎の伝ばよりも先に気化するため気体状の燃焼、爆発形態になる²⁾。

実験によると、爆発の激しさは爆発指数 K_{St} で表すと 300 bar \cdot m/s (300 \times 100 kPa \cdot m/d s) 程度であることがわかった。これまで、トナーについては、木粉や小麦粉程度 100 bar \cdot m/s

と言われてきたが³⁻⁴⁾、トナーの高性能化により、 K_{St} が3倍程度大きくなっていることには注意が必要である。表 6-1 と 6-2 にトナー等の粉じん爆発の危険性を示す。

表 6-1 可燃性粉じんの爆発危険特性データより³⁾

粉じんの種類	平均粒径 [μm]	爆発下限濃度 [g/m^3]	最大爆発圧力 [$\text{bar}(\text{g})$]	爆発指数 K_{St} [$\text{bar} \cdot \text{m}/\text{s}$]	発火温度 (G.G.法) [$^{\circ}\text{C}$]	最小着火エネルギー [mJ]
小麦粉	57	60	8.3	87	430	なし
アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン共重合体	200	60	9.2	147	480	なし
ポリエチレン (高压法)	26	なし	8.7	104	490	なし
ポリエチレン (低压法)	<10	(30)	8.0	156	420	なし
アルミニウム粉	<10	なし	11.2	515	560	なし
マグネシウム粉	28	30	17.5	508	なし	なし
トナー* (→下表 2574 と同じ)	<10	60	8.9	196	なし	4
トナー* (→下表 2575 と同じ)	<10	30	8.7	137	なし	1

表 6-2 トナー爆発危険特性データより⁴⁾

トナー (データ整理番号)	平均粒径 [μm]	爆発下限濃度 [g/m^3]	最大爆発圧力 [$\text{bar}(\text{g})$]	爆発指数 K_{St} [$\text{bar} \cdot \text{m}/\text{s}$]	発火温度 (G.G.法) [$^{\circ}\text{C}$]	最小着火エネルギー [mJ]
トナー (0803)	<10	15	8.4	162	470	なし
トナー (2574)	<10	60	8.9	196	520	<4
トナー (2575)	<10	30	8.7	137	530	<1
トナー (2576)	<10	なし	7.9	138	530	なし
トナー (2577)	<10	60	8.9	127	520	<1
トナー (2578)	<10	30	9.1	164	540	なし

6.2 集じんダクト内の粉じん雲の濃度

(1) 粉じん雲濃度の推算

メーカー工場での集じん機の被害状況調査では、焼損したバグフィルターのそばにアルミ箔のようなフィルムが見つかった。集じん機の吸引速度が 17 m/s（メーカー値）と十分な吸引性能を有していたことから、トナー、プラスチック破砕粉のほか、さらに軽量の金属粉が集じん機に運ばれていたと推定される。廃トナーカートリッジ 1 個あたりについてトナーとプラスチックを合わせた平均質量は 607 g であった。約 3 秒ごとに投入していたため、1 秒あたり平均 203 g の粉じんが発生することになる。ただし、プラスチックの中には、小さいもの、薄い板状のものがあるため、ハンマーで砕かれずにそのままの排出口板から落下するものがあり、おそらく、発生する粉じんの多くはトナーであったと考えられる。残トナー（マゼンタ）の平均質量は 296 g、新品では 600 g（推定値）であった。

実験によると、トナーの爆発下限濃度は 70 g/m³ であった。次に被災した集じんダクト内の粉じん雲の濃度を推算してみる。

集じんダクト①と③の径は 400 mm より、断面積は 0.126 m² である。集じん機の吸い込み速度 17 m/s をダクト内の平均流速とみると、単位時間の体積は 2.14 m³/s となる。従って、ダクト内の単位空間に占める粉じん雲の平均濃度は $296.22 \div 2.14 \div 3 = 46 \text{ g/m}^3$ 、新品トナーの場合は 93 g/m³ となる。バグフィルターに目詰まりなどがあれば、吸い込み風速は低下するため、濃度は増加することになる。以上より、集じんダクト内は爆発下限濃度付近にあったことが推算された。

トナーは粒子径が 10 μm と小さく、17 m/s の気流によく追従し、破砕機から集じん機までのトナーの輸送時間は 0.5 秒程度である。廃トナーカートリッジが破砕機に投入され、ハンマーで砕かれ、すぐトナーバックから周囲に飛散したトナーは 1 秒足らずで集じん機に運ばれることになる。次の廃トナーカートリッジが破砕機に投入される前にすでにトナーは集じん機に運ばれている。このことからすれば、ダクト内の粉じん雲の濃度は投入間隔約 3 秒で高い濃度と低い濃度が繰り返すことになる。しかし、実際は、破砕機内でのハンマーの動きに伴う旋回流があるため、トナー等の粉じんが滞留し、すぐにすべての粉じんが集じん機に運ばれると限らない。ダクト内の粉じん雲の濃淡は 3 秒間隔で明確に区別できなかった可能性もある。

(2) 投入作業の速度

約 3 秒ごとに 5、6 個の廃トナーカートリッジを破砕機に投入する速度では、一連の作業に 30 秒はかからない。総投入数の 50 から 60 個を 3 秒間隔で投入したとしても 5 分はかからない計算である。15 時に作業を開始し、50 分後に爆発が発生しているが、投入作業はそれほど急いではいなかったのではないかと推定される。

6.3 集じん機における着火性放電の発生

トナーは導電性が極めて低いので、①トナー容器破碎時、②ダクトを通して集じん機に吸引される際の摩擦および③集じん機のフィルターから逆洗で剥離する際に帯電する可能性が高い⁵⁾。また、その際、ダクト、フィルター等はトナーと逆極性の静電荷が発生する。現地調査の結果、粉碎器、ダクト、集じん機の金属部材間の導通に異常は認められなかった。また、集じん機内のフィルターは帯電防止型（導電性素材）であり、特に接地不良等の異常の形跡も認められなかった。

以上のことから、粉碎器、ダクト及び集じん機（フィルター含む）で発生した静電荷は速やかに消失し、帯電しなかったと推定される。また、トナーは、帯電はするものの粒径が小さくかつ抵抗率が大きいいため、それから1mJ程度を超える着火性放電が発生することは考えにくい。

一方、トナーカートリッジに限らず破碎物には導電性部材が含まれており、特に、ラベルやカバー等に用いられている金属を蒸着したポリフィルムは軽量で柔軟性があるため、ほとんど破碎されることなく集じん機内に吸い込まれていた。このような導電性物体は、帯電したトナーの付着またはフィルターからの剥離の際に帯電する可能性がある。例えば、金属蒸着ポリフィルム（面積30cm²）が帯電したまま浮遊し、接地体との間隙が1cmとなったときに放電すると仮定した場合*、放電エネルギーおよび電荷量は以下のように推定できる。

*）平板上の接地体と平行にフィルムが存在すると仮定する。

金属蒸着ポリフィルムの静電容量 C は、 $C = \epsilon_0 A/d$ より、

$$\begin{aligned} C &= 8.85 \times 10^{-12} \times 3 \times 10^{-3} / 1 \times 10^{-2} \\ &= 2.7 \times 10^{-12} \text{ F} \\ &= 2.7 \text{ pF} \end{aligned}$$

となる。ただし、 ϵ_0 : 真空（≒空気）の誘電率（ 8.85×10^{-12} F/m）、 A : フィルムの面積（ 3×10^{-3} m²）、 d : フィルムと接地体の間隔（ 1×10^{-2} m）。

空气中で放電が発生するのは、間隙の電界 E が（空気の）絶縁破壊強度 3×10^6 V/m（=30 kV/cm）以上となるときであるから、このときの電位 V は、 $V > Ed$ より、 $3 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-2} = 3 \times 10^4$ V（=30 kV）でなければならない。このとき、フィルムに蓄積される静電エネルギー W は、 $W = 1/2 CV^2$ より、

$$W > 1.2 \text{ mJ} \quad (= 1/2 \times 2.7 \times 10^{-12} \times (30 \times 10^3)^2 = 1.2 \times 10^{-3} \text{ J})$$

となる。フィルムの金属面の抵抗が十分に小さければ、放電エネルギーは静電エネルギーにほぼ等しくなる。また、このとき、フィルムの電荷量 Q は、 $Q = CV$ より、

$$Q > 8.1 \text{ nC} \quad (= 2.7 \times 10^{-12} \times 30 \times 10^3 = 8.1 \times 10^{-8} \text{ C})$$

となる。

一般の製造工程においては、摩擦・剥離等によってフィルム状の物体が30kV以上に帯電することはしばしば観測されていることであるから、上記に示したように、金属蒸着フ

イルムの帯電によって1mJ以上の放電が発生することは不可能なことではないと推定される。また、その他の導電性部材についても、トナー堆積物等の介在物によって接地不良となっている状態であれば、帯電したトナーの付着または静電誘導によって帯電し、電位及び静電容量が適当であれば1mJ以上の着火性放電が発生する可能性がある。

6.4 集じん機の放散面積の検証

爆発放散口は集じん機の側面に2つ設けられ、上方に爆風を逃がすようにちょう番ドアが取り付けられていた。集じん機に著しい変形が見られたことから、放散面積が妥当であったかどうか、技術指針⁶⁾に基づき検証した。

計算の結果、取り付けられていた放散面積 A は技術指針に示した設計上の放散面積 A_v よりも3倍以上大きくとられていたことがわかった。しかし、ちょう番ドアに止め金具が取り付けられていたことのほか、装置の耐圧性、補強の不足など構造的な問題点、さらには、トナーの爆発が予想よりも激しかったことから、集じん機本体が変形したものと考えられる。おそらく、爆発が発生してすぐに爆発放散口が開放しなかったことが、変形を大きくした直接の原因と考えられる。

6 章の参考文献

- 1) Bartknecht, B., *Dust Explosion*, Springer-Verlag, pp.144-161,(1989)
- 2) 水谷幸夫, 燃焼工学 (第2版), 森北出版, 第5章, (1989)
- 3) 産業安全研究所技術指針「可燃性粉じんの爆発圧力及び圧力上昇速度の測定方法」, RIIS-TR-94-1, 産業安全研究所, (1994)
- 4) BGIA (Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz, ドイツ職業保険組合, 労働安全衛生研究所), 粉じん爆発データベース GESTISDUST-EX
- 5) 山隈瑞樹, 児玉勉, バグフィルタでの粉じんの剥離帯電特性, 静電気学会誌, 第28巻, 第1号, 65-70, (2004)
- 6) 「爆発圧力放散設備技術指針 (改訂版)」, NIIS-TR-No.38(2005), 産業安全研究所

7. 爆発原因の推定

7.1 爆発原因の推定(爆発の概要)

本調査により、次のように爆発原因を推定した。

廃トナーカートリッジを破碎機に投入作業中に、発生したトナー等の破碎粉じんが集じん機に吸引されていたところ、集じん機内で粉じんの帯電による静電気放電により粉じん爆発が発生した。集じん機の破壊とともに、火炎が集じんダクトを伝わり破碎機に入ったことで破碎機内でも爆発が発生した。前月下旬の集じん機のバグフィルターの掃除の後、

装置を再稼動したが、初めのうちは吸引能力が大きく、トナー以外にも異種材料を吸い込んでいたが、時間の経過とともに各種粉じんが集じん機内に堆積し、高い粉じん雲濃度になっていた。粉じんの静電気放電の原因は、絶縁性のトナーとプラスチック粉（すなわち帯電しやすい）と導電性のある金属フィルムなど異種のを吸引していたため、逆洗によるはく離帯電、誘導帯電などにより火花放電が生じたためである。このとき、バグフィルターの接地不良の可能性は排除できない。トナーの最小着火エネルギーは数 mJ であることが判明したが、これは静電気放電でも十分に着火できるほど小さい。

爆発後、集じん機はバグフィルターが燃え続けた。集じん機にはちょう番ドア式の爆発放散口が取り付けられていたが、ドアを金具で止めていたことのほか、装置の耐圧性、補強の不足など構造的な問題点、さらにはトナーの爆発が予想よりも激しかったことから、集じん機本体が大きく変形した。逆止弁は適正に作動しなかった。

7.2 当日爆発に至った理由

トナーが可燃性であり、粒子の大きさ、帯電性、最小着火エネルギーから、常に粉じん爆発を起こしやすかったと考えられる。この日、この時間に爆発に至った理由としては、次のことが挙げられる。

- ① バグフィルターの接地不良の可能性があったこと。
- ② バグフィルターの掃除後で吸引能力が高く、トナー以外の導電性の物も吸引していたこと。
- ③ 時間とともに集じん機内の粉じんの堆積量が増え、潜在的に高い粉じん雲濃度環境にあったこと。
- ④ 冬季で当日は空気が乾燥していたため、静電気が発生しやすい環境にあったこと。

8. 同種災害の再発防止対策

8.1 一般事項

OA 機器、トナーカートリッジの破碎作業により生じるプラスチック等の破碎粉、トナー粉は可燃性であり爆発の危険性があるので、取扱い関係者（事業者、労働者、破碎機・集じん機メーカー等）は粉じん爆発の危険性を認識し、爆発の防止対策を実施すべきである。そのため、事業者は労働者に対し、適切な安全教育を行い、作業工程の安全管理が求められる。集じん機・設備メーカーは設備の設計段階で、予め取り扱う粉体の種類、発生する粒子の大きさ、発生量、粉じん爆発の危険性を評価し、それに対応したものを設計、設置する。粉じん爆発の防止対策としては予防と防護があるが、両方とも実施するべきである。

8.2 静電気対策について

当該作業では可燃性粉じんが発生することから、静電気放電による着火を防止するため、工程及び作業員（労働者、事業者を含む）に対して以下の対策を実施すべきである。作業床及び作業員の帯電防止の詳細については、「静電気安全指針 RIIS-TR-87-1」（産業安全研究所）¹⁾を参照すること。

- ① 配管、ダクト、集じん機、破砕機等の設備の材質は導電性のものとし、接地を行なうが、ガスケットを介して設備を接続する箇所は、ボンディングにより導通を確保する。
- ② 発じんを伴う工程に従事し、または接近する可能性のある作業員は、帯電防止作業靴および帯電防止作業服を着用する。
- ③ 集じん機の底部から溜まった破砕粉じんを作業員が接近して直接回収する際には、床にビニールシート等の電気絶縁物を敷かないようにする。また、なるべく粉じんを舞上げないように丁寧に作業する。
- ④ 特に、集じん機には帯電防止型フィルターを使用するとともに、定められた定期的保守および点検を行う。

8.3 集じんについて

以下のほか、集じん機器を用いた集じん作業については、「集じん機及び関連機器における粉じん爆発防止技術指針 NIIS-TR-No.36」（産業安全研究所）²⁾を参照すること。

- ① 現設備ではトナー粉のほか、プラスチック等の軽量の粉、破片等が吸引されるようになっている。
 - (a) バグフィルターの目詰まり、異種粉じんによる静電気放電などを低減させるために、種々の破砕物粉じんが集じん機に流入する前に風力選別、異物除去などを実施することが望ましい。
 - (b) 風力選別の方法としては、異口径ダクト接続（輸送風速変化）、サイクロンの設置などがあり、異物除去の方法としては、ふるい（金網）、ストレーナー、スクラバーの設置などがある。
 - (c) 特に、金属箔及び薄いアルミ板は十分に裁断されないまま、集じん機内へ流入する可能性があるため、破砕物にこれらが含まれる場合には、破砕機へ投入前に除去しておく。
- ② 粉がダクト内に堆積しない風速を確保する。表 8-1 と 8-2 を参照。
- ③ 集じん機の底部から溜まった破砕物粉じんを作業員が接近して直接回収する際には集じん機、破砕機の運転を停止した後で行なうか、作業員が集じん機から離れた位置で行なえるようにする。静電気対策は 8.2 を参照。
- ④ 機械運転中の立入り禁止区域の設定、警告標示を行なう。
- ⑤ フィルターの点検、清掃、交換作業はメーカーの説明書、手順書、助言等に従い適正

に行なうこと。ただし、その作業は決められた者が行なうようにする。

⑥ 集じん機について（メーカー、ユーザーに対して）

- (a) 爆発圧力放散に関して、「爆発圧力放散設備技術指針 NIIS-TR-No.38」（産業安全研究所）⁵⁾を参考とする。
- (b) 爆発圧力放散先の周辺の防護対策，2次的な爆発等を防止する措置を講じる。
- (c) 集じん機は建屋外に設置することが望ましいが，建屋内に設置する場合には放散用ダクトを設け，外気に安全に放散させる構造とする。
- (d) 当該事業場に設置する集じん機の形式として，乾式，湿式は問わない。
- (e) 爆発指数，最大爆発圧力，装置の容積，装置の強度等を考慮して爆発放散面積を再設計する。
- (f) ちょう番ドア式の放散口のベントカバーは軽量とし，その質量は12 kg/m³を超えないようにする。
- (g) フック等の金具でベントカバーを固定し，適正なベントカバーの作動を妨げないようにする。
- (h) 2次的な爆発等を防止するため集じん機内部からダクトへの火炎逸走防止用の逆止弁を設ける。ただし，弁の慣性を考慮して適性に高速で作動する必要がある。
- (i) 静電気対策を実施する。8.2を参照。
- (j) 集じん機等の設備・機器を据え付ける際あるいは納品の際には，設置記録，初期点検記録などの文書をユーザーに提出する。

表 8-1 一般的に求める場合の搬送速度の範囲³⁾

汚染物	例	搬送速度 (m/s)
ガス，蒸気，フェーム及び極めて軽い粉じん	各種のガス蒸気； 酸化亜鉛：酸化アルミニウムのフェーム； 木粉及び綿；	10
軽い乾燥粉じん	原綿，パフ発生粉じん，麻くず，おがくず，穀粉，ゴム粉，ベークライト粉	～15～
一般工業粉じん	毛，木くず，かんなくず； サンドブラスト発生粉じん； グラインダ作業発生粉じん；	～20～
重い粉じん	鉛粉； 鑄造砂落とし粉じん； 旋盤作業発生粉じん；	～25～
重く，かつぬれた比較的大きな粉じん	ぬれた鉛粉； ぬれた鑄造作業発生粉じん	25 以上

表 8-2 従来の多くの装置における輸送空気速度の程度⁴⁾

粉粒体の種類	およその輸送空気速度, (m/s)
小麦, 米, 合成樹脂ペレット	16~24
穀類, 炭酸カルシウム粉末	16~23
ソーダ灰, 砂糖	15~20
塩化ビニール粉末	20~26
カーボン粉末	18~24
セメント	18~28
アルミナ	24~32
砂	23~30

8章の参考文献

- 1) 「静電気安全指針」RIIS-TR-87-1, 産業安全研究所(1987) (現「静電気安全指針 2007」)
- 2) 「集じん機及び関連機器における粉じん爆発防止技術指針」NIIS-TR-No.36, 産業安全研究所(1999)
- 3) 労働省安全衛生部労働衛生課編, 改訂 局所排気装置の標準設計と保守管理<基本編>, 中央労働災害防止協会(1980) (現「局所排気・プッシュプル型換気装置及び空気清浄装置の標準設計と保守管理 (改訂第4版), 2019」)
- 4) 狩野武, 粉体輸送技術, 日刊工業新聞社(1991)
- 5) 「爆発圧力放散設備技術指針 (改訂版)」NIIS-TR-No.38, 産業安全研究所 (2005)