

堺化学工業株式会社 湯本工場

亜鉛末工場爆発火災事故

堺化学工業株式会社 湯本工場

事故調査委員会

概要

1. はじめに
2. 事故概要
3. 事故原因調査
4. 再発防止策
5. おわりに

1. はじめに

1. 2021年5月11日、福島県いわき市の堺化学工業株式会社(堺化学)小名浜事業所湯本工場の亜鉛末工場において、爆発火災事故が発生した。
2. 同年6月5日、社外委員3名、堺化学5名から成る事故調査委員会を立ち上げ、事故原因調査、並びに、再発防止策について検討してきました。事故原因を特定でき、再発防止策がまとまりましたので、報告いたします。

委員長	中村 昌允	東京工業大学 環境・社会理工学院 特任教授
委員	土橋 律	東京大学 大学院工学研究科 教授
委員	山隈 瑞樹	公益社団法人 産業安全技術協会 会長
委員	中原 慎治	堺化学 取締役 研究開発本部長兼生産技術本部副本部長
委員	矢倉 敏行	同 取締役 管理本部長
委員	土橋 真	同 執行役員 小名浜事業所副所長 兼 大剣工場長
委員	加藤 聡	同 執行役員 堺事業所副所長兼第二工場長兼泉北工場長
委員	日田 達也	同 管理本部 品質環境安全部長
原因究明 チームリーダー	徳永 宏	同 小名浜事業所 第一工場 技術課長

堺化学 小名浜事業所 湯本工場概要

1. 工場所在地 福島県いわき市常磐岩ヶ岡町沢目1番地1
2. 工場の沿革 1969年 湯本工場が完成、大阪府堺市堺事業所で製造していた「亜鉛華(酸化亜鉛)」製品を製造移管
1974年 「金属亜鉛粉末」製品移管
1986年 亜鉛製品専用工場として操業 (敷地面積は1.6万m²)

	亜鉛末の主な用途
亜鉛末	橋梁、海上コンテナ、大型鋼構造物の腐食を防止する錆止め塗料
酸化亜鉛	有機加硫促進剤の助剤(ゴムタイヤ)、バリスタ・フェライト (電子材料原料)

亜鉛末

金属亜鉛を溶融して、亜鉛蒸気を発生させ、窒素ガス雰囲気下で、冷却、凝縮、その後、種々の分級工程を経て、亜鉛末各グレード製品を製造する。

【亜鉛末の一般的な物性】

化学式 : Zn

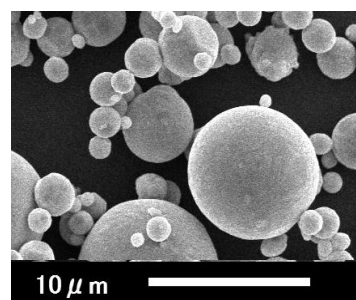
物理状態(形状) : 固体(粉状)

自然発火点 : 460°C

溶解性 : 常温で水にほとんど不溶、酸・アルカリに可溶

密度 : 7.14g/cm³

その他 : 適切な消火剤／金属火災用消火剤、乾燥砂
水と反応して水素ガスを発生するため、注水は避ける事。



※1994年には気流分級品で最も粒径が小さいグレード(つまり一番危険性が高いと判断される)亜鉛末#3について、外部機関(日本カーリット株式会社)で危険物評価を行い(小ガス炎着火試験)、消防法第二類危険物に該当しない事を確認

2. 事故概要

2021年5月11日7時42分、湯本工場 亜鉛末工場で、爆発、火災事故が発生した。

- ・ 人的被害：重傷者1名、軽傷者3名
- ・ 物的被害：工場建物および設備損傷

亜鉛末工場の分級工程の運転スタート時、分級ファンを起動させた直後に、爆発事故が発生した。

その後、分級機セパレーター、マルチサイクロン、集じん機において、爆発・火災が発生し、全工場に拡大。

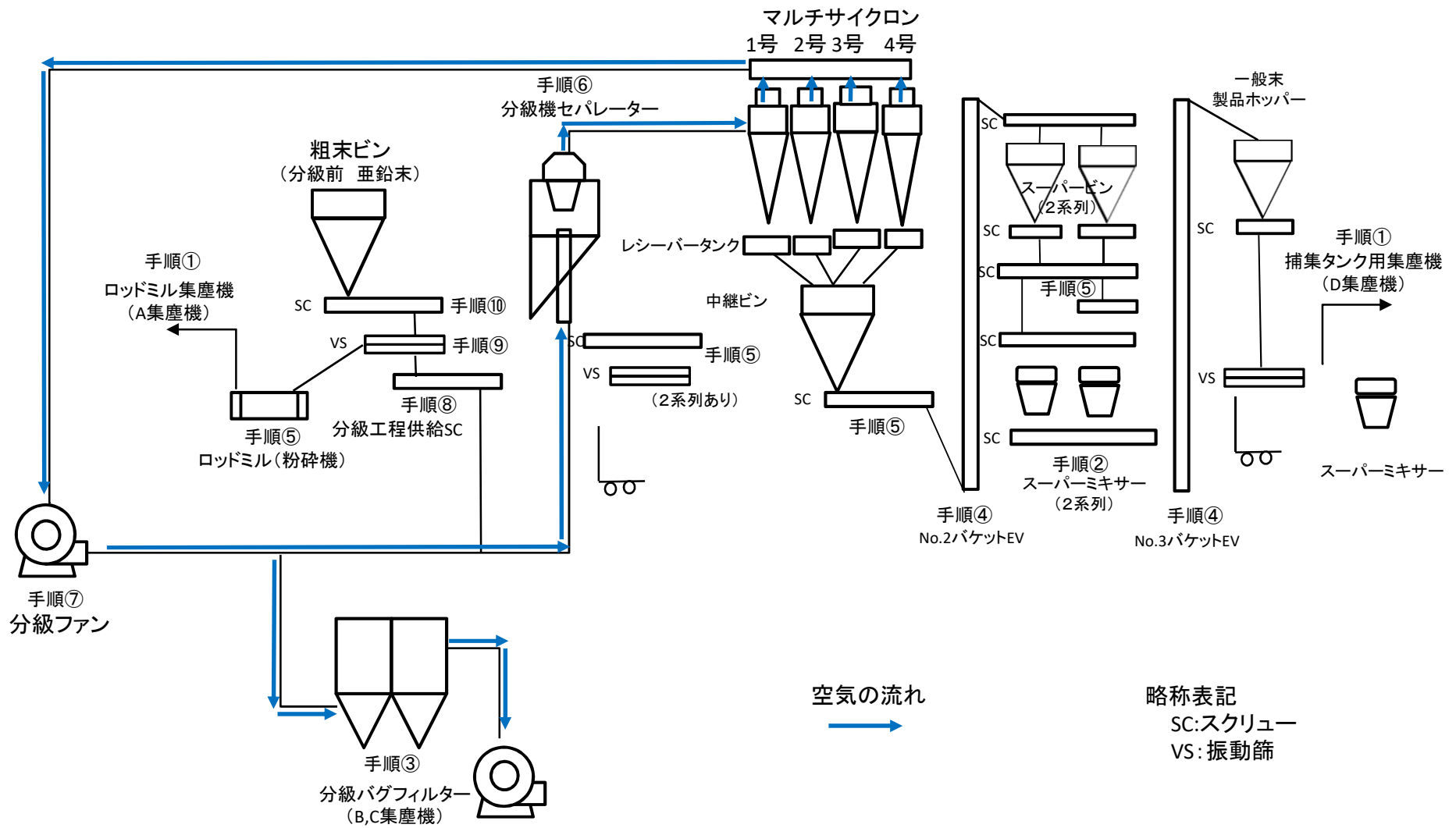
爆発事故後の
工場建物の外観



(1) 事故当日の状況

時刻	状況
6:50	堺化学社員と協力会社社員とが、作業内容の打ち合わせ
7:25	協力会社社員、作業内容の打ち合わせ
7:40頃	分級ファンの起動を開始
7:42頃	爆発発生 大きな異音が発生し、その直後に、赤い閃光とゴーという大きな音を聞いた。
7:45	消防署へ通報
7:50	湯本工場事務所棟脇に負傷者搬送、救護
7:57	消防隊入場
8:04	救急車入場
9:30	発災状況を確認しつつ、消火方法を協議し、粉末消火器および乾燥砂による消火開始。
11:30	電線ケーブル燃焼による黒煙発生
19:30	消火活動を一旦終了 亜鉛末は注水禁止物質のため、亜鉛末仕掛品の山は、消防署の指導により、大量の砂をかけて空気(酸素)との接触を極力遮断し、延焼の拡大を防ぎ、仕掛品の温度低下を待つことにする。
5月31日	消防署 鎮火宣言

分級工程



(2) 各設備損壊状況

設備名		損壊状況
1. 分級ファン		ケーシングに膨らみあり ベアリングボックスの破損
2. 分級セパレーター		側面点検扉が吹き飛ばされ、 胴部とコーン部の継ぎ目が裂ける
3. マルチサイクロン		上下部および胴部の破裂
4. 集塵機	分級バグフィルター	胴部の破裂および内部焼損
	他集塵機	内部焼損
5. 電気配電室		電気ケーブルを伝わって火炎が伝播し全焼

設備損壊状況



分級ファン
(ケーシング)



分級ファン
(ベアリングボックス)



マルチサイクロン
分級セパレータ



分級ファン
バグフィルター



ロッドミル集塵機



レシーバータンク
(マルチサイクロン下)



西側集塵機



電気配電室

3. 原因調査

(1) 事故調査方法

電気配電室が全焼したため、操業状況に関する記録類が焼失。
そこで、当日出勤していた関係者からの聞き取り調査により、発災状況を推定し、設備の損壊状況及び解体調査と照合することによって、推論をまとめた。

(2) 爆発物質

- ・ 当該工場中に存在した可燃物は、亜鉛末、重油、およびパラフィンであった。重油、パラフィンは、プロセス中に入ることはないので、亜鉛粉末と特定した。
 - ・ 亜鉛末は、酸・アルカリおよび水との接触により水素ガスを発生する可能性があるが、発災当日、工場内で酸・アルカリおよび水の使用がないため、水素ガス発生の可能性はない。 → 亜鉛末の粉じん爆発
- ・ なお、亜鉛末は、粉じん爆発危険性を有するが、爆発クラスはSt1と最も低いランクで、着火には比較的大きなエネルギーを要する。（静電気火花程度では着火困難）
- ・ 爆発下限界濃度は、約1,000 g/m³程度で、発災当日、この粉じん濃度以上であったと推定される。

亜鉛末の爆発性評価結果

	亜鉛末#3 (気流分級/最小粒製品)	分級バグフィルター (集じん機) 抜出粉
測定年月日	2021年7月	
測定機関	公益財団法人 産業安全技術協会	
爆発下限濃度 (g/m ³)	1,150	1,000
最小着火エネルギー (mJ)	219	187
最大爆発圧力 (kPa)	5.1×10^2	5.0×10^2
最大圧力上昇速度 (kPa/s)	245×10^2	287×10^2
爆発指数 Kst (kPa・m/s)	66×10^2	78×10^2
爆発危険等級	St 1	St 1

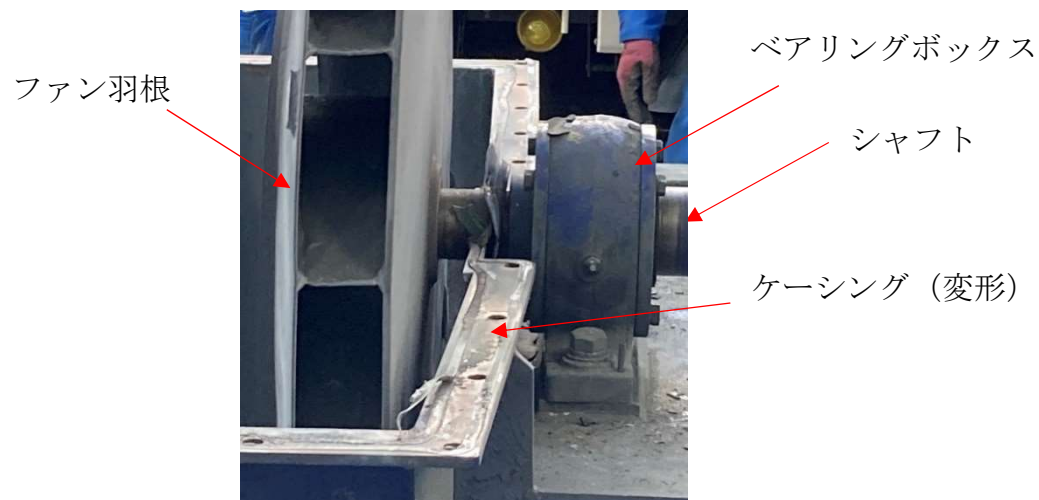
爆発危険等級	Kst($\times 10^2$ kPa・m・s ⁻¹)	爆発の激しさ
St0	0	0(爆発せず)
St1	$0 < Kst \leq 200$	弱
St2	$200 < Kst \leq 300$	強
St3	$300 \leq Kst$	激

(3) 発災設備

下記の情報に基づき、最初の爆発設備は、分級ファンと特定。

- ① 関係者5名からのヒアリングの結果、
 - ・分級ファンの起動開始直後に、ファン付近から異音、床面が地震のように振動し、爆発が起きた。
 - ・分級ファン付近からの異音とともに、ダクトの亀裂部から閃光と黒煙が噴き出すのを見た。
- ② 分級ファンのケーシングの中央部が膨らんでおり、分級ファンで小爆発があったと推定されること
- ③ 最初の爆発設備として、分級ファン、分級セパレーター、マルチサイクロンの可能性を検討したが、最初の発災設備となる可能性があるのは、分級ファンである。
- ④ 電気配電室の火災は、分級工程の爆発後、電気ケーブルに延焼したので、最初の爆発とはなりえない。

分級ファンケーシングの変形

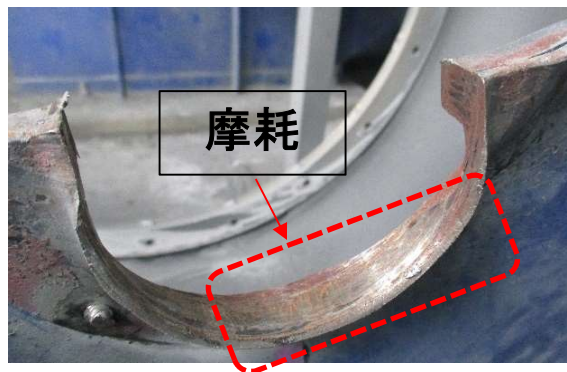


中央部に約4cmの膨れがある

ケーシングとシャフトのシール箇所

ケーシングとシャフトが接触した痕跡がある。

分級ファンシール用
パッキンの熱変色



＜ベアリングボックスの損傷＞

- ① 過大な負荷がかかったために生じる延性破壊の痕跡がベアリング破断個所に認められた。
- ② ベアリングの破断後にある程度の期間、破断面同士の接触が繰り返された。
- ③ ベアリングの損傷は認められなかった。

＜鑑定所見＞

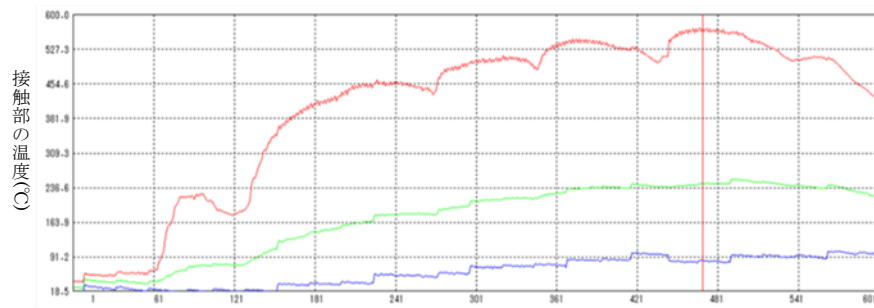
ベアリングボックスの破壊は、ベアリングボックスに繰り返し負荷が掛かったのではなく、発災当日、急激に相当の負荷が掛かって破断に至った。

(4) 着火源

着火箇所	着火源	可能性	理由
分級ファン	羽根とケーシングの内部との接触火花	×	ケーシング内部に残っていたスケールに接触痕が認められなかった。
	シャフトとケーシングとの接触火花	○	シャフトの該当箇所に、円周状の接触痕が認められた。
	シャフトとケーシングとの接触発熱	○	ケーシングの該当箇所に、摩耗が酷い接触痕がみられた。
分級機セパレーター	セパレーター羽根とスケールの接触火花	×	セパレーター羽根に接触痕跡が認められなかった。
	セパレーター駆動部での発熱	×	駆動部ベアリングに亜鉛末粉が入り込んで、加熱されれば着火する可能性があるが、事故後、羽根を手で回せる状態であり、ベアリング部の損傷はなかったため、可能性は低い。
マルチサイクロン	対象なし	×	設備に駆動部分はない。
ダクト	分級ファン羽根から剥がれたスケール片との衝突による火花	×	事故後のダクト観察では衝突痕が認められなかった。
	分級ファンケーシング金属摩耗片との衝突による火花	×	
バグフィルター	対象なし	×	設備に駆動部分はない。

着火源検証試験

1. 分級ファンのシャフトとケーシングの接触による火花、高温物質の可能性が高いと考えられるので、分級ファンと同機種のモーターとシャフトを準備し、接触模擬テストを実施。
2. 確認できたこと
 - ① シャフトとケーシング接触による衝撃火花発生
 - ② ケーシング部が接触により、直ちに赤熱し、最高温度570°Cに到達。
 - ③ ケーシング部の接触による破損、高温の金属摩耗片が発生すること
(金属摩耗片と爆発時に分級ファンやセパレーターから回収された残留物と一致)
 - ④ ケーシング部にあるパッキンが過熱、変色すること



接触模擬テスト時	分級ファン内部から回収	分級セパレーター内部から回収
接触模擬テスト後、飛散物を回収したもののうち最も大きいもの	分級ファンの内部に残留していたスケールから回収	分級セパレーター底部に堆積していた粉塵内部より回収 ※事故後、設備および建屋屋根破損箇所は保管維持で、雨ざらしとなっていたため、回収物に一部錆が見られる。

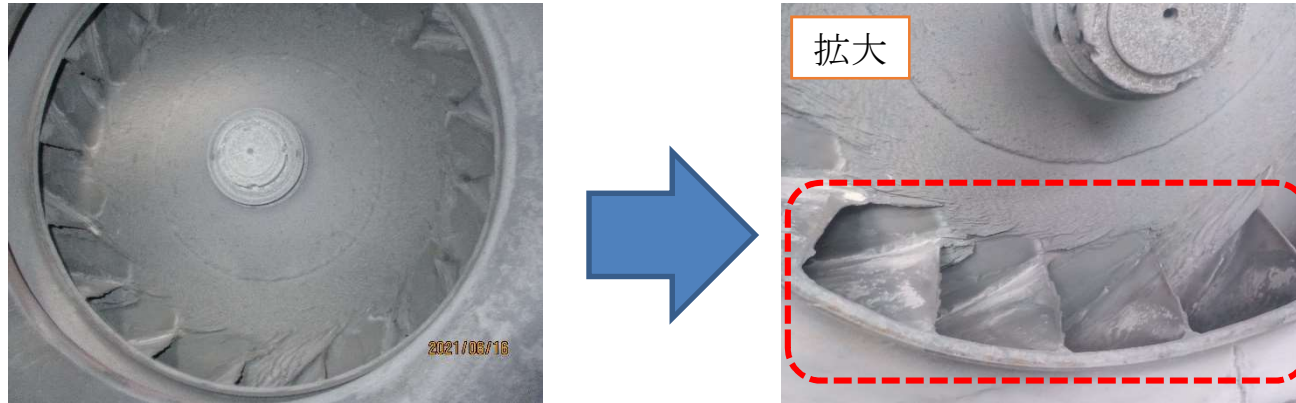
(5) 粉じん濃度の推定

1. 亜鉛末粉が粉じん爆発する爆発下限濃度(1, 000 g/m³)を基に、各工程で、爆発下限濃度を確保するのに必要な亜鉛末量

工程	容量(m ³)	亜鉛末量(g)
分級ファン	0. 49	490
分級機セパレーター	4. 20	4, 200
マルチサイクロン	3. 60	3, 600
中継ビン	2. 03	2, 030
分級バッグフィルター	13. 60	13, 600
全ダクト	7. 89	7, 890
合計	31. 81	31, 810

2. マルチサイクロン4本中の1本が閉塞していた。
マルチサイクロン1本には、710 kg の亜鉛末が滞留していた。
この滞留量は、爆発下限濃度以上を確保するのに必要な亜鉛末量 約32kgに比較して十分に大きく、発災当日、分級工程内は、爆発下限濃度以上の粉じん濃度であったと推定される。

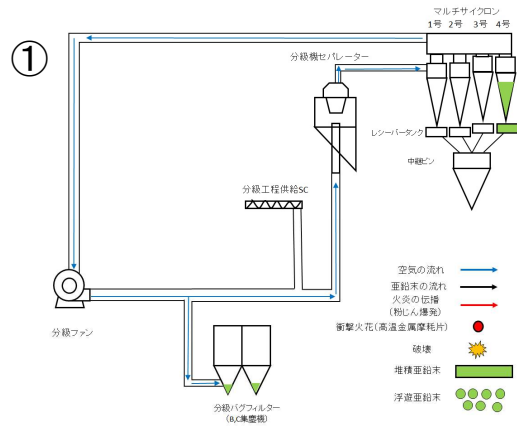
(6) 分級ファン羽根へのスケール付着



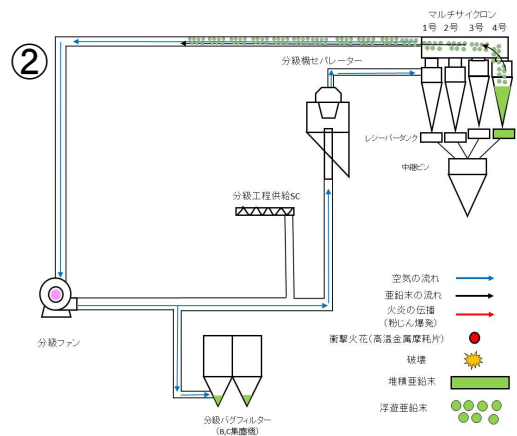
- ・分級ファン羽根には、全体的にスケールが付着していました。
これまで分級ファン羽根にスケールが付着し、スケールは固いものの、一部脆い部分があり、羽根の遠心力で剥離するケースがありましたが、今回も一部スケールが剥離している箇所があった。
- ・ファン羽根には損傷は認められませんでした。
- ・スケールを全て回収したところ、約 4 kg ありました。

(7) 事故発生に至ったシナリオ

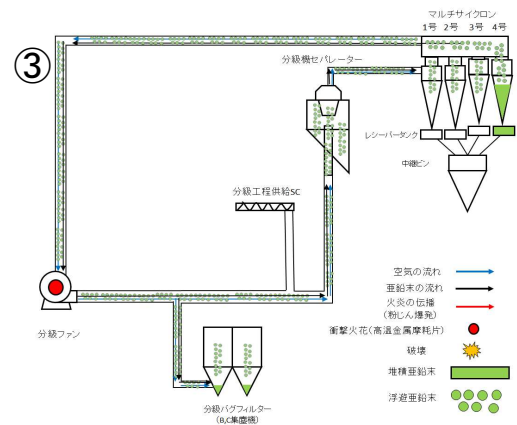
- 1) 工程内に粉じん爆発下限濃度以上となる亜鉛末が存在していた。
- 2) 分級ファンの高温部分の発生
 - ① 分級ファンの羽根に付着していたスケールの剥離により偏芯。
 - ② 分級ファンの羽根の偏芯によって、分級ファンのシャフトを固定するベアリングボックスが破断して、シャフトが偏芯。
 - ③ シャフトとケーシングが接触し、衝撃火花(高温金属摩耗片)が発生し、ケーシング部が高温になる。
- 3) 分級ファンの偏芯に伴う異常振動が、ダクトで繋がっているマルチサイクロンに伝わり、内部の亜鉛末が浮遊して、空気流に乗って分級工程内に拡がる。
- 4) 分級ファン内の浮遊亜鉛末の濃度が上昇し、衝撃火花(高温金属片)と接触・着火し、分級ファン内で火炎伝播(粉じん爆発)が起きた。
- 5) 分級ファン内から火炎伝播(粉じん爆発)が拡がり、分級機セパレーター、マルチサイクロン および バグフィルター(集塵機)で激しい損壊が発生。
- 6) 5)によって生じた爆風が火炎とともに建屋内に漏れて、堆積亜鉛末にも着火し、電気ケーブル、亜鉛末製品の仕掛品および包装材料等の可燃物の延焼等の火災が発生。



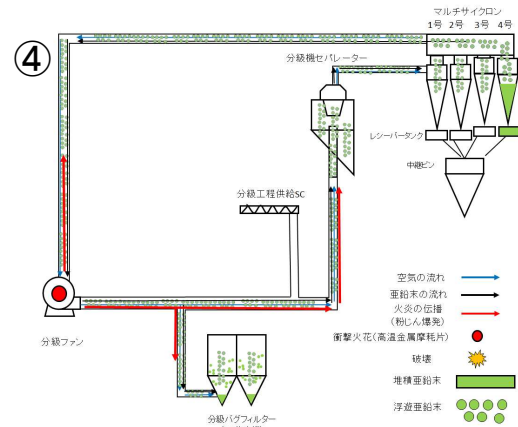
分級ファン 稼働
 ・供給SC(スクリュー)が停止しているため、
 空気流のみ
 ・浮遊亜鉛末はほとんど無い。



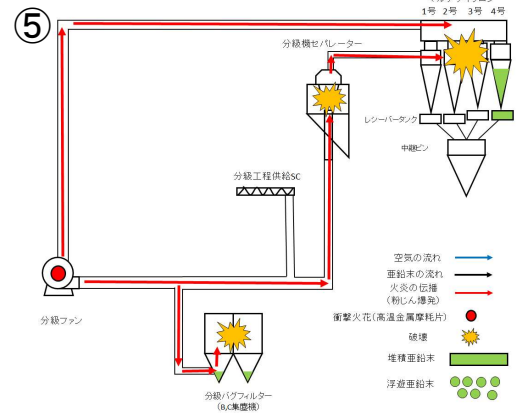
分級ファンのシャフトとケーシング部が接触し、振動が大きくなり、マルチサイクロン堆積亜鉛末が浮遊して、空気流によって工程内に拡がる。



・浮遊亜鉛末が工程内全体に拡がる。
 ・分級ファン内の浮遊亜鉛末濃度が上昇する。
 ・分級ファンのシャフトとケーシング部の接触による衝撃火花(高温金属摩耗片)により着火



着火後、
 火炎が伝播(粉じん爆発)。



火炎伝播が、分級機セパレーター、マルチサイクロンおよび分級バグフィルター(集塵)に到達し、爆発・損壊に至る。

※大きな設備、構造体は、
 急激な圧力上昇に対して強度が弱い

(※)別紙A3資料に拡大版がございますので、
 ご参照下さい。

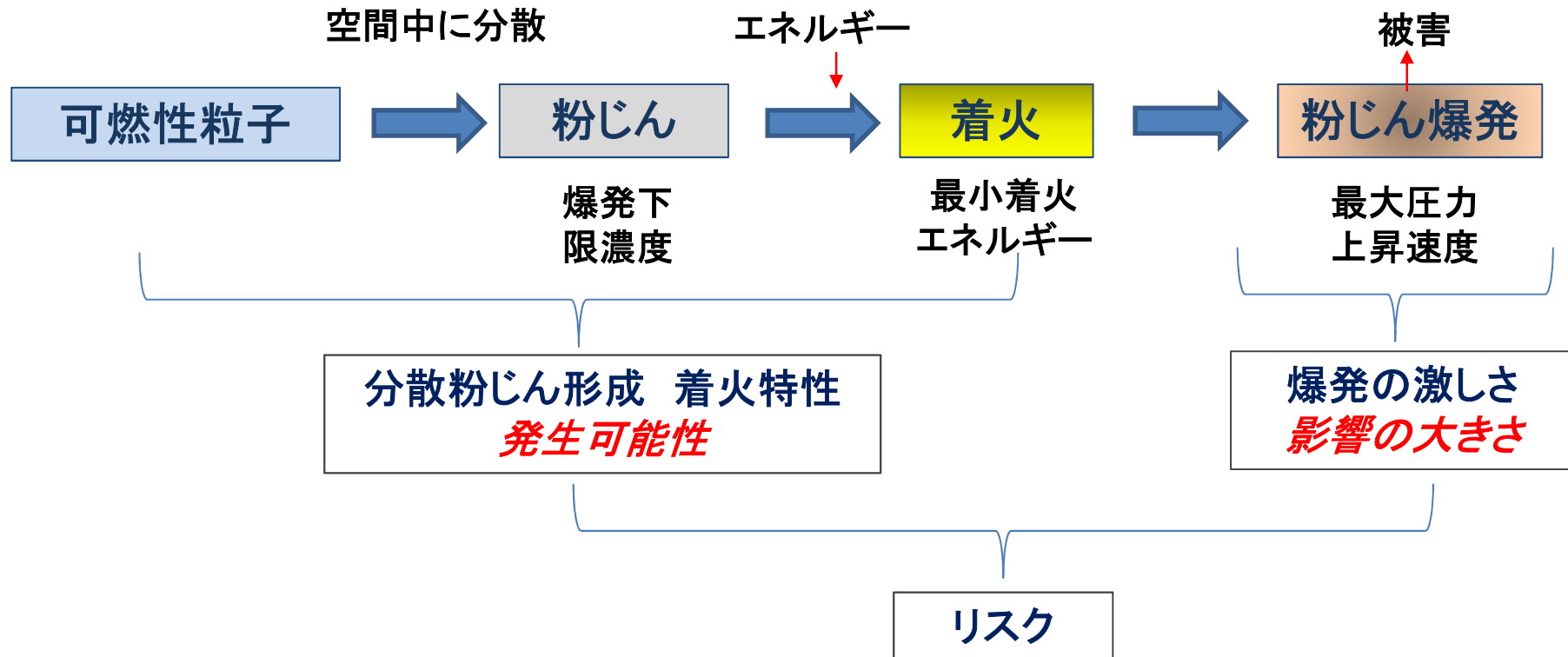
4. 再発防止

- ・当該プラントは、1993年に小さな事故があったが、それ以降、約30年間、事故がなかった。
関係者には、「当該プラントは安全である」という思い込みがあったものと思われる。
- ・粉じん爆発の発生には、ガス爆発と同様に燃焼の3要素（可燃物、酸素、着火源）が揃う必要がある。
粉じん爆発では可燃性粉末は浮遊している必要があり、また粒子径などの影響も受ける。そのため、粉じん爆発での可燃物の条件は、ガス爆発より多くの要因の影響を受ける。
 - (1) 粉じん爆発の特徴
 - (2) 再発防止対策の考え方
 - (3) 再発防止対策詳細

(1) 粉じん爆発

1. 粉じん爆発の特性

粉じん爆発は燃焼現象により発生するので、
燃焼の3要素(可燃物、酸素、着火源)が揃わないと発生しない。



(2) 再発防止対策の考え方

(1) 安全意識の徹底

約30年間、事故がなかったことが、安全であることを保証するものではない。

- ① 経営トップからの安全メッセージを、毎年5月11日に通達。

(2) 設備対策

① リスクアセスメントの徹底

- ・人的能力の低下を設備・システムで補う。 Ex. 予知保全

② 被害拡大防止対策(粉じんの堆積防止)

- ・集じん機の屋外設置、建屋内清掃の徹底とルール化

(3) 作業マニュアル

- ① 当該作業に関する安全衛生管理基準、設備管理基準の詳細マニュアル

(4) 管理対策および教育

① 協力会社の安全監査、設備監査の実施

② 堺化学、協力会社を含めた安全に関する特別教育の実施

- ・取り扱い物質の危険性、粉じん爆発に関する教育

③ 危険予知、ヒヤリハット報告活動の強化

④ 協力会社との十分なコミュニケーションの場

(3) 再発防止対策詳細

事故に至った原因		再発防止対策
人	<ul style="list-style-type: none"> ・亜鉛末に対する危険性の認識が希薄 ・亜鉛末に対する危険性と取扱い教育が不足 	<ul style="list-style-type: none"> ・毎年5月11日、安全に関する社長通達。 ・堺化学、協力会社への安全特別教育(年1回) ・ヒヤリハット報告活動の強化 小さな異常も報告することの周知徹底 毎年5月のヒヤリハット活動の重点:爆発火災
設備	<ul style="list-style-type: none"> ・分級ファンの羽根に付着したスケールの剥離によって、回転が偏芯する。 ・マルチサイクロンの1本に詰りがあった。 ・集じん機に圧力放散口が設置されていない ・ほとんどの集じん機が屋内に設置されていた。 	<ul style="list-style-type: none"> ・分級ファンの偏芯異常を振動センサーで検知し緊急停止の安全計装化(予知保全) ・羽根スケールの定期除去(年2回→年4回) ・詰り発生の際は、除去するまで運転停止 ・サイクロンに点検口の設置と定期点検 ・集じん機:屋外設置を基本、圧力放散口設置
作業条件	<ul style="list-style-type: none"> ・作業マニュアルの記載が一部不十分であった。 ・建屋全体の堆積粉じんの除去・掃除を年1回実施していたが、系外捕集用集じん機を設置したため、昨年末は実施しなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・IEC 60079-10-2 に基づいて、工程内を、ゾーン21と22の二つのゾーンとし、清掃基準を設定。 ・集塵機:年1回の定期自主点検に加えて、内部点検および掃除を定期実施
管理	<ul style="list-style-type: none"> ・マルチサイクロンの下部に詰りの兆候があることを、情報共有できていなかった。 ・協力会社への安全管理、設備維持管理の教育が不十分 ・協力会社への安全管理、設備管理に関する監査を実施していなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・協力会社に依頼している作業に関する安全衛生管理基準、設備管理方法の見直し ・協力会社から堺化学へ報告すべき事項を明記 ・毎年定期的に協力会社の安全監査の実施 安全衛生管理基準の遵守状況、設備管理の実施状況

5. まとめ

1. この事故は、亜鉛末の粉じん爆発事故である。
粉じん爆発は、粉じんの浮遊分散状況や粒子径によっても異なるが、
燃焼3要素が揃えば爆発する。
2. 当該プロセスは、1993年の小火以降、事故がなかったため、関係者は「安全」と
思い込んでいたと思われるが、「これまで事故がなかったから、今後も事故がない
とはいえない」ところに、粉体を取り扱う難しさがある。
それだけに、ヒヤリハット報告活動、気掛かり事項報告活動を強化し、設備本来の
姿からのズレなど、小さな兆候も見逃さずに直ちに対策を講じる必要がある。
3. 着火源は、分級ファンに付着していた亜鉛末スケールが、ファン起動時に偶発的に
剥離し、回転体のバランスが崩れて偏芯し、回転部が高温になったために生じた
高温火花である。
4. 再発防止対策は、安全意識の徹底、設備対策、作業条件、協力会社管理対策と
してまとめており、類似プラントの粉じん爆発事故対策にも適用できる。
5. 安全は、「危険な物質を注意して取り扱うことによって確保されている」ことを
念頭において取り組む必要がある。
この事故を教訓として、一層の安全技術の向上を図り、特長ある「製品」創りに
つなげる。