

堺化学工業株式会社 湯本工場 亜鉛末工場

爆発火災事故調査報告書

2022年1月7日

堺化学工業株式会社
湯本工場事故調査委員会

目次

1. 序	
1. 1 はじめに.....	1
1. 2 事故調査委員会の構成.....	1
1. 3 事故調査委員会の経緯.....	2
2. 工場概要	
2. 1 工場概要.....	3
2. 2 製品概要.....	4
2. 3 設備概要.....	5
2. 4 プロセス概要.....	6
2. 5 取り扱い物質および可燃物の保管状況.....	8
2. 6 操業体制.....	8
3. 事故概要	
3. 1 事故概要.....	9
3. 2 被害状況.....	10
3. 3 事故に至った経緯と事故後の状況.....	18
3. 3. 1 事故発生時の状況（当日）.....	18
3. 3. 2 事故発生後の状況（翌日以降）.....	20
4. 事故原因	
4. 1 事故の調査方法.....	22
4. 2 事故の原因推定.....	22
4. 3 事故原因の絞り込み.....	30
1) 原因物質の検証.....	30
2) 着火源の検証.....	30
3) 系内粉じん濃度の推定.....	33
4) 火災の検証.....	34

5. 事故原因の整理	
5. 1 事故に至ったシナリオ	36
5. 2 事故原因の整理	39
5. 2. 1 物質	39
5. 2. 2 人	39
5. 2. 3 設備	39
5. 2. 4 作業	40
5. 2. 5 管理	40
6. 再発防止策	
6. 1 直接原因に対する対策	41
6. 1. 1 物質	41
6. 1. 2 人	41
6. 1. 3 設備	41
6. 1. 4 作業	42
6. 1. 5 協力会社の管理	43
6. 2 関連事項の水平展開（カイゼン）	43
6. 2. 1 全社全般	43
6. 2. 2 取り扱う物質の危険性評価と周知	44
6. 2. 3 設備対策	44
6. 2. 4 管理対策	44
6. 2. 5 その他	44
6. 3 今後の課題	44
6. 3. 1 人の育成と技能継承	44
6. 3. 2 設備ならびにリスクアセスメント	45
6. 3. 3 人と機械との関係	45
6. 3. 4 協力会社の管理	45
7. おわりに	46

1. 序

1. 1 はじめに

2021年5月11日、福島県いわき市の堺化学工業株式会社（以下、堺化学と略す）小名浜事業所 湯本工場内の亜鉛末工場において、爆発および火災事故が発生した。協力会社社員8名のうち、4名が被災した（1名重症、3名軽傷）。また、近隣企業ならびに住民の方々にも、ご迷惑ならびにご心配をお掛けする事態となった。

このような重篤な事故が発生したことから、同年6月5日に、社外3名を含む湯本工場事故調査委員会を発足し、原因究明、再発防止策等を図ることとした。また、この委員会の下部組織として、原因究明チームも発足させ、原因究明に向けて関係者へのヒアリング、原因調査、外部機関での爆発性評価および事故発生時の模擬再現テストなどを実施した。

事故調査委員会を計6回開催し、議論を積み重ねた。原因の特定ならびに再発防止策を取りまとめたので、事故調査報告書として報告する。

ここでまとめた再発防止策は、他製品の製造プラントの安全運転に水平展開が必要である。

この事故で判明したこと、ならびに再発防止策として取りまとめたことが、類似製造設備を有する他企業の安全対策に寄与できればと願っている。

1. 2 事故調査委員会の構成

外部委員3名、社内委員5名で構成した。下部組織の原因究明チームは社内メンバー6名で構成した。

事故調査委員会（8名）

委員長	中村 昌允	東京工業大学 環境・社会理工学院 イノベーション科学系・技術経営専門職学位課程 特任教授
委員	土橋 律	東京大学大学院 工学系研究科 教授
同	山隈 瑞樹	公益社団法人 産業安全技術協会 会長
同	中原 慎治	取締役 研究開発本部長兼生産技術本部副本部長
同	矢倉 敏行	取締役 管理本部長
同	土橋 真	執行役員 小名浜事業所 副所長兼大剣工場長
同	加藤 聡	執行役員 堺事業所 副所長兼第二工場長兼泉北工場長
同	日田 達也	管理本部 品質環境安全部長

原因究明チーム（6名）

チームリーダー	徳永 宏	小名浜事業所 第一工場 技術課長
メンバー	石川 哲	堺事業所 業務管理部 環境保全課長
同	仲尾 佳文	小名浜事業所 第一工場 製造第2課長
同	西田 雅宏	堺事業所 第一工場 製造課
同	小田 准司	生産技術本部 生産技術部 小名浜施設課長
同	志水 勇介	小名浜事業所 第一工場 技術課

1. 3 事故調査委員会の経緯

事故調査委員会の開催日、場所および主な審議内容は、表1のとおり。

表1 事故調査委員会の開催日、場所および審議内容

	開催日	開催場所	審議内容
		2021年6月5日(土)	
第1回	2021年6月5日(土)	堺化学工業株式会社 湯本工場	・発災現地視察 ・事故概要、関係者ヒアリング聴取結果の説明 ・今後の進め方等の打ち合わせなど
第2回	2021年7月17日(土)	堺化学工業株式会社 湯本工場	・実況検分後の設備の再確認視察 ・推定した原因の検証 ・製品および集塵粉の爆発危険性評価結果 ・焼損設備、過去ヒヤリハット事例の確認、爆発規模の推定など
第3回	2021年9月18日(土)	堺化学工業株式会社 小名浜事業所 東京事務所 堺事業所	・着火源検証テスト結果の検証 ・着火源等の絞り込み ・事故原因ならびに発生シナリオの推定 ・再発防止策等の整理など
第4回	2021年10月23日(土)	堺化学工業株式会社 小名浜事業所 湯本工場	・着火源検証テストの再確認 ・分級工程設備の解体実地検証 ・着火源の絞り込み ・事故発生シナリオの確認 ・再発防止策等の見直しなど
第5回	2021年11月27日(土)	堺化学工業株式会社 小名浜事業所 東京事務所 堺事業所	・事故調査報告書案の内容確認 ・今後の進め方など
第6回	2021年12月28日(火)	堺化学工業株式会社 堺本社 小名浜事業所	・事故調査報告書の最終確認 ・クロージングスケジュールの確認 ・委員会総括など

※上記以外にも、複数の個別打ち合わせを実施した。

2. 工場概要

2. 1 工場概要

工場所在地：福島県いわき市常磐岩ヶ岡町沢目1番地1

堺化学工業株式会社 小名浜事業所 湯本工場

当工場の沿革としては、1969年に当工場が完成し、大阪府堺市堺事業所で製造していた「亜鉛華（酸化亜鉛）」製品を製造移管した。その後、1974年以降、「金属亜鉛粉末（以降、亜鉛末と省略）」製品を含め順次移管を行い、1986年に亜鉛製品専用工場になった。敷地面積は1.6万m²で、工場の全体配置図および外観写真は図1および図2のようになる。

当工場は、亜鉛末および酸化亜鉛の二つの製造工場で構成されている。亜鉛末は橋梁、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に、また、酸化亜鉛は有機加硫促進剤の助剤として、ゴムタイヤの用途に、主に用いられている。近年では、酸化亜鉛はバリスタ・フェライトの電子材料原料としても使用されている。事故が発生した工場は亜鉛末工場である。

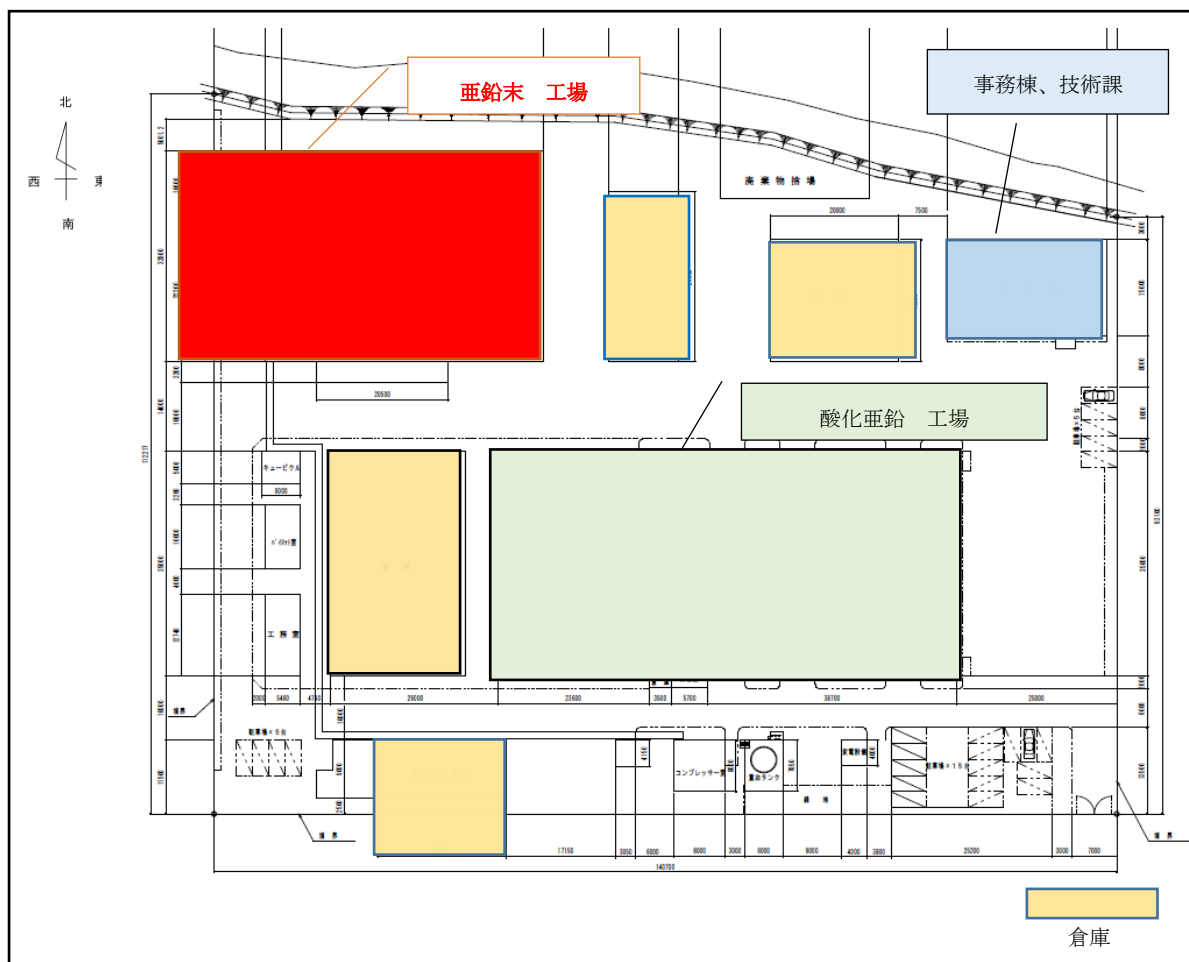


図1 湯本工場 配置図

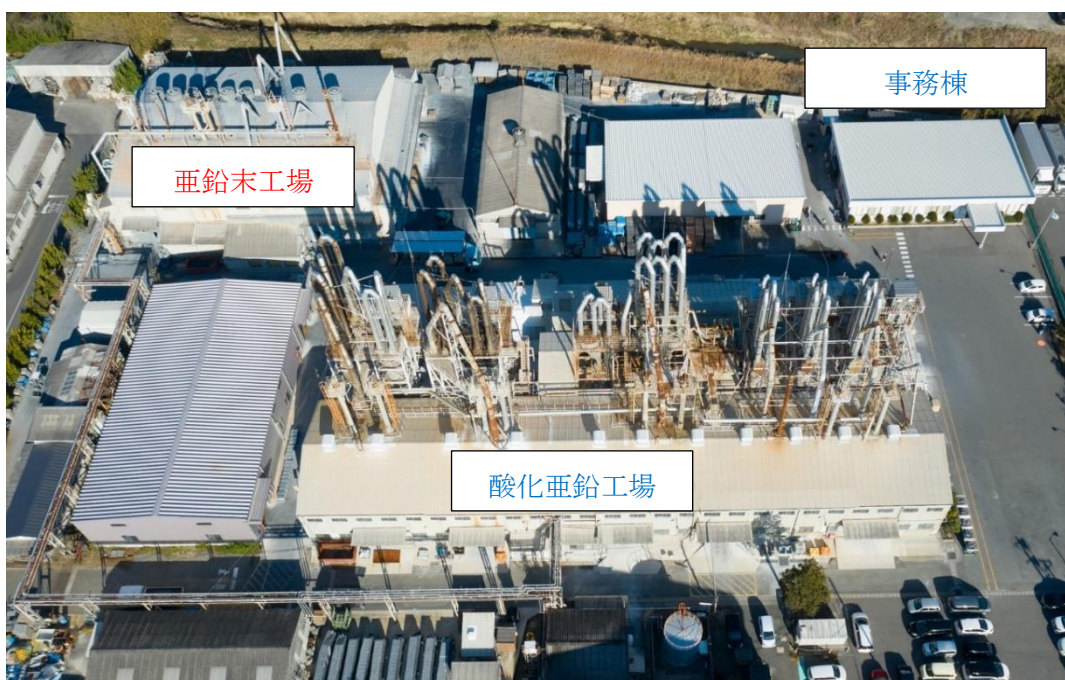


図2 湯本工場 外観写真（事故前）

2. 2 製品概要

事故が発生した工場で製造している亜鉛末（以後、亜鉛微粉も含めて亜鉛末と記載）は、外観では灰色粉末、密度は 7.14g/cm^3 、酸や濃アルカリ、水に触れると水素を発生させる化学的性質を持っている。



図3 亜鉛末の外観写真

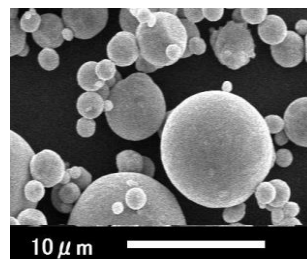


図4 亜鉛末粒子のSEM写真

粒子表面は薄く酸化亜鉛の被膜層で覆われており常温の空気中では安定であるが、加熱すると青緑色の炎で燃えて酸化亜鉛となる。

当工場では、金属亜鉛を溶融して、亜鉛蒸気を発生させ、窒素ガス雰囲気中で冷却、凝縮、その後、種々の分級工程を経て、亜鉛末の各グレードを包装している。具体的に、大きくは4種類のグレード、すなわち気流分級品、未分級品、大粒子および混合末（亜鉛末に他機能付与原料を混合したもの）がある。亜鉛末の製造は、堺化学社員が「亜鉛溶融—冷却—粉末化工程」を担当し、協力会社社員が亜鉛末の「分級—混合—包装」工程を担当して行っていた。

また、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していた。

参考までに、亜鉛末の一般的な物性は、以下のようになる。

【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。

2. 3 設備概要

事故が発生した亜鉛末工場は、図1湯本工場の配置図のとおり、湯本工場内の北西に位置して、建屋の屋根および外壁はスレート葺き構造になっている。工場内の設備配置図を図5に示す。大きくは二つの製造工程で分けられていて、それらは①亜鉛溶融、冷却する工程と②冷却された亜鉛末を分級および包装する工程になる。エリアの配置としては、工場内で南北のエリアで別れている。

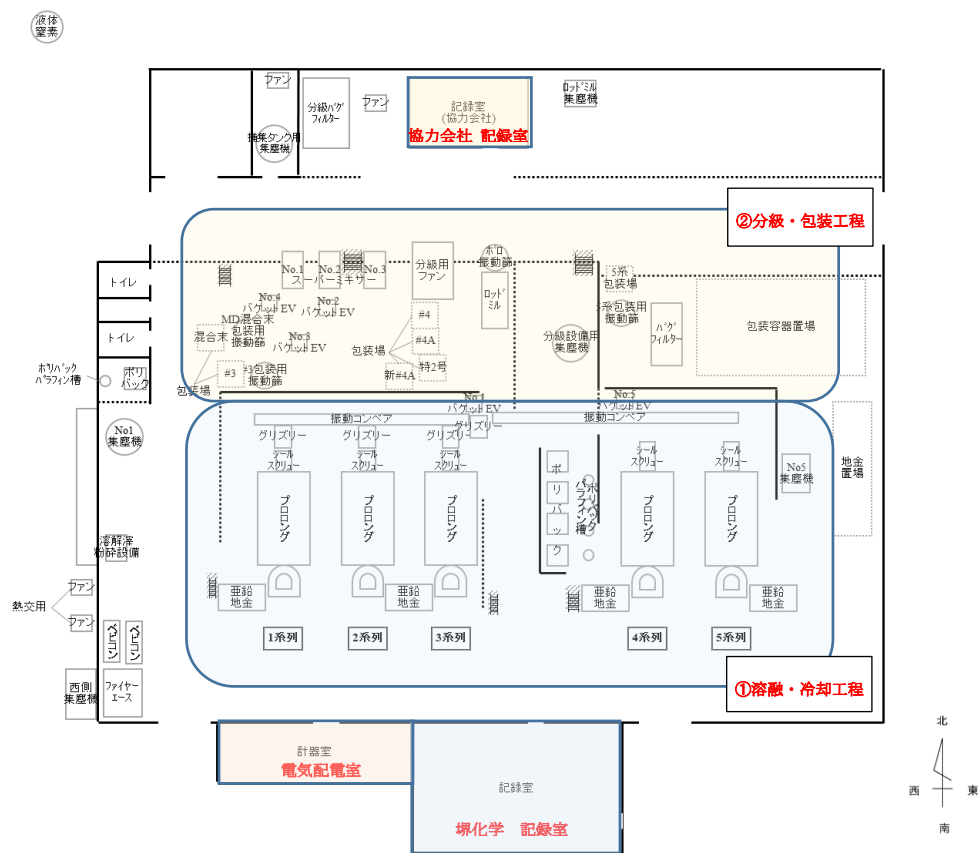


図5 亜鉛末工場内の設備配置図

前工程に当たる①亜鉛溶融および冷却する工程は堺化学社員が担当していて、製造状況を監視する記録室は南側に、一方、後工程に当たる②冷却された亜鉛末を分級および包装する工程は協力会社社員が担当していて、その記録室は北側にある。主要な設備の電気配電室は南西側にあり、堺化学社員の記録室に隣接している。

主な工程設備は、前工程では、溶融炉および付帯の冷却設備プロロングが各 5 基ある。前工程でできあがった仕掛品亜鉛末は、後工程へコンベアおよびバケットエレベータで、行き先が大きく二つに分けられ、粗末ビン*と 5 系製品貯槽とに搬送される。

*粗末ビンとは、溶融、冷却した亜鉛末の中継ホッパーで、設備の社内名称。

4. 2 (3) 項 図 16 に記載している。

粗末ビンの仕掛品は、振動篩後に、气流分級工程において分級機セパレーター1 基およびマルチサイクロン4 基で各々分級され、包装・製品化される。一方、5 系製品貯槽の仕掛品は、振動篩後に包装され、製品化される。

事故当日は、前工程溶融炉および付帯の冷却設備プロロングの 5 系列の内、2 系列が前日から連続稼働していた。一方、後工程分級工程は前日夕方から停止しており、当日は設備の立ち上げ途中であった。

2. 4 プロセス概要

当該工場の製造プロセスのフローは、図 5 亜鉛末工場内の設備配置図に示すとおり、亜鉛地金を溶融、冷却・凝縮する工程および分級・包装する工程の二つから成り立っている。具体的なプロセスフローを図 6 亜鉛末工場の製造プロセスのフローおよび図 7 气流分級プロセスのフローに示す。

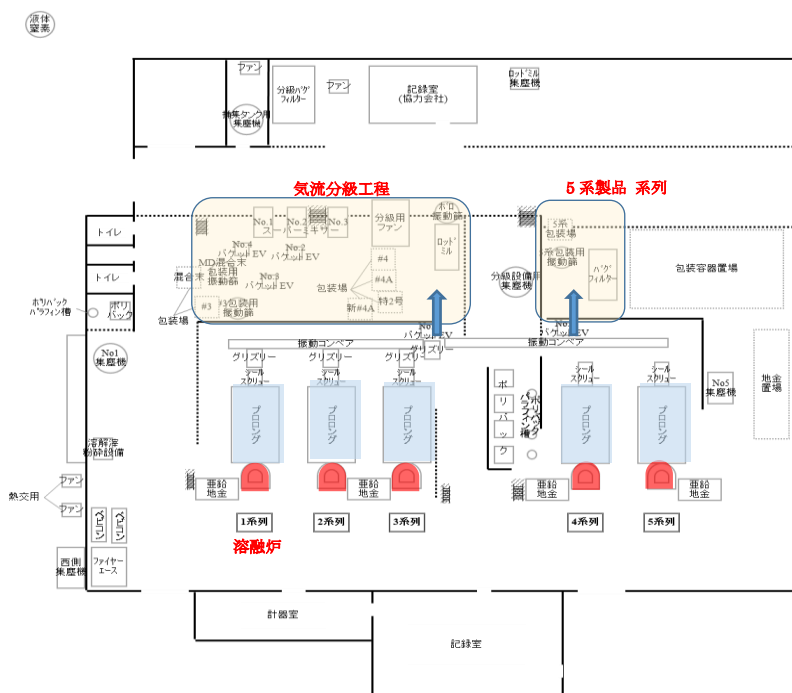


図 6 亜鉛末工場の製造プロセスのフロー

行き配管が接続されていて、微粒をバグフィルター用ファンで回収している。なお、回収した亜鉛末は、分級工程へリサイクルしている。

具体的な担当者の割り振りは、前工程は堺化学社員 1 名および管理担当職長 1 名、後工程は協力会社社員 8 名であり、内訳は管理担当 1 名（他作業補助あり）、設備稼働担当 2 名および包装担当 5 名となっている。

2. 5 取り扱い物質および可燃物の保管状況

当該工場は亜鉛末製造専用工場であり、場内に保管されているのは、工程内外にある亜鉛末のほかに、可燃物として、溶融炉を加熱するための燃料の再生重油、包装資材のフレキシブルコンテナ、紙袋、工程設備の付属ポリバッグ（ポリバッグ用パラフィン含む）、および製品を積載する木製パレットがある。

2. 6 操業体制

湯本工場の組織は、製造課、技術課および協力会社から構成されている。製造課は、工場長が製造課長を兼務し、スタッフ 1 名、職長 1 名が定時勤務、工場作業担当は 1 班 2 名の 3 交替勤務となっている。技術課は小名浜事業所 第二工場 技術課長が同課長を兼務し、スタッフ 1 名、検定担当 3 名の体制になっている。協力会社への業務委託については、勤務時間は日曜日定休の日勤で 8 時から 17 時まで、作業内容は、主に製品の包装作業および関連する設備の運転、倉庫への製品運搬、製品出荷を行っている。堺化学社員の職長が協力会社の班長へ当日の作業内容を指示し、その班長が各担当者へ当日の作業指示をしている。図 8 に湯本工場の組織図および業務委託の流れを示す。



図 8 湯本工場の組織図および業務委託の流れ

3. 事故概要

3. 1 事故概要

2021年5月11日7時42分、福島県いわき市の堺化学工業株式会社 小名浜事業所 湯本工場 亜鉛末工場において、爆発、火災が発生した。人的被害としては、重傷者1名、軽傷者3名、物的被害としては、工場建物および設備が損傷した。損傷した工場建物の外観写真を、図9に示す。

発生日時：2021年5月11日（火）7時42分

気象状況：天候 曇り

気温 16.8℃

湿度 47%

風向 北東

風速 1.2m/s

※福島県一般環境大気測定局（常磐）データ 8時から抜粋

発生場所：湯本工場 亜鉛末工場

発生状況：分級工程の設備を立ち上げ途中、分級ファンを稼働させた直後に、爆発が起こった。その後、連鎖的な爆発・燃焼によって、各分級設備および集塵機の損壊、亜鉛末仕掛品および包装資材の可燃物の燃焼、電気ケーブルへの延焼および電気配電室の全損を伴う壊滅的な工場火災にいたった。



図9 損傷した工場建物の外観写真

3. 2 被害状況

1) 人的被害

人的被害は以下のとおりであった。

(亜鉛末工場内で作業中)

重傷者 1名 協力会社社員 (社員 a)

軽傷者 3名 協力会社社員 (社員 b, c, d)

図 10 に、事故発生時の当該工場内の人員配置図を示す。

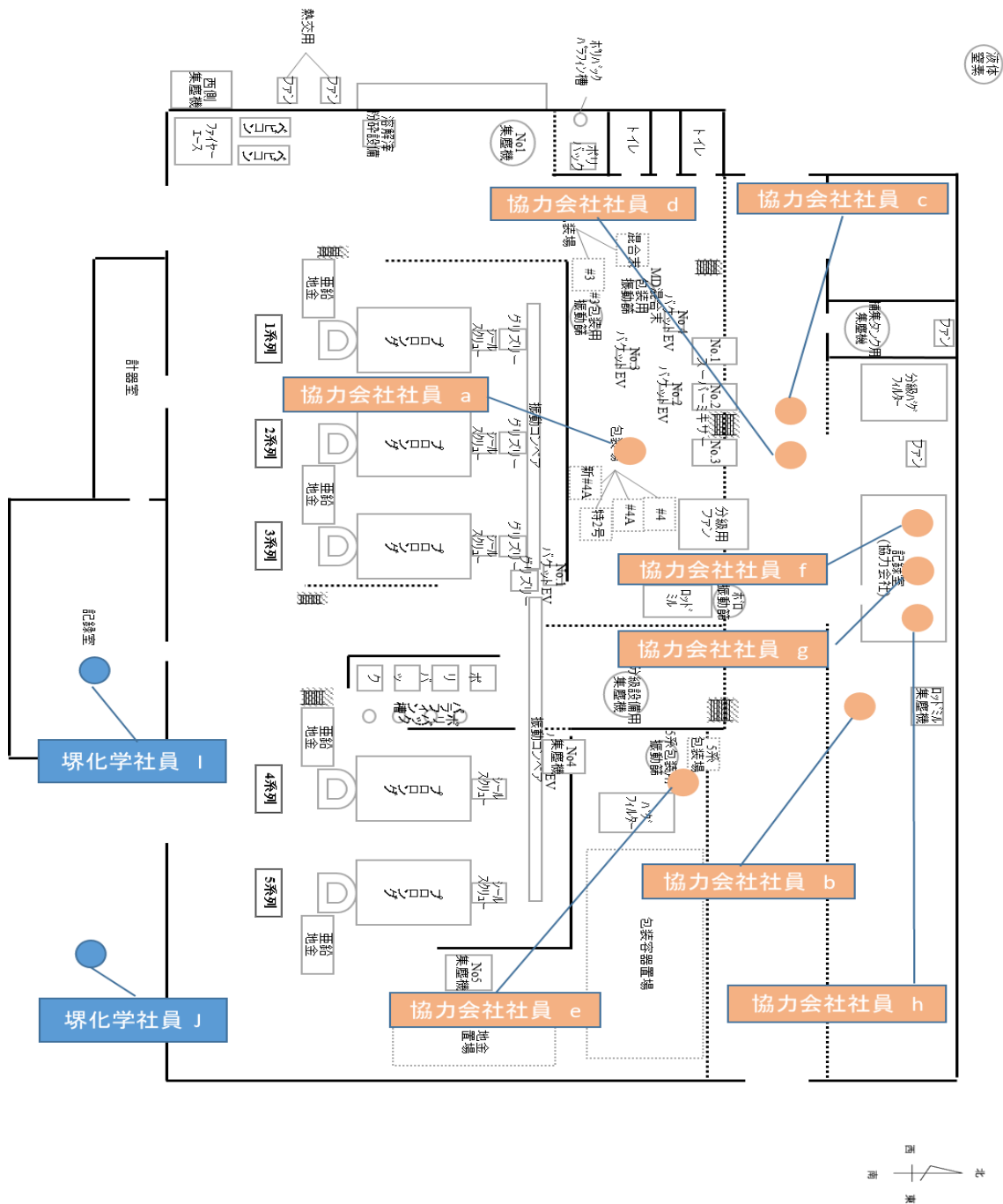


図 10 事故発生時の当該工場内の人員配置図

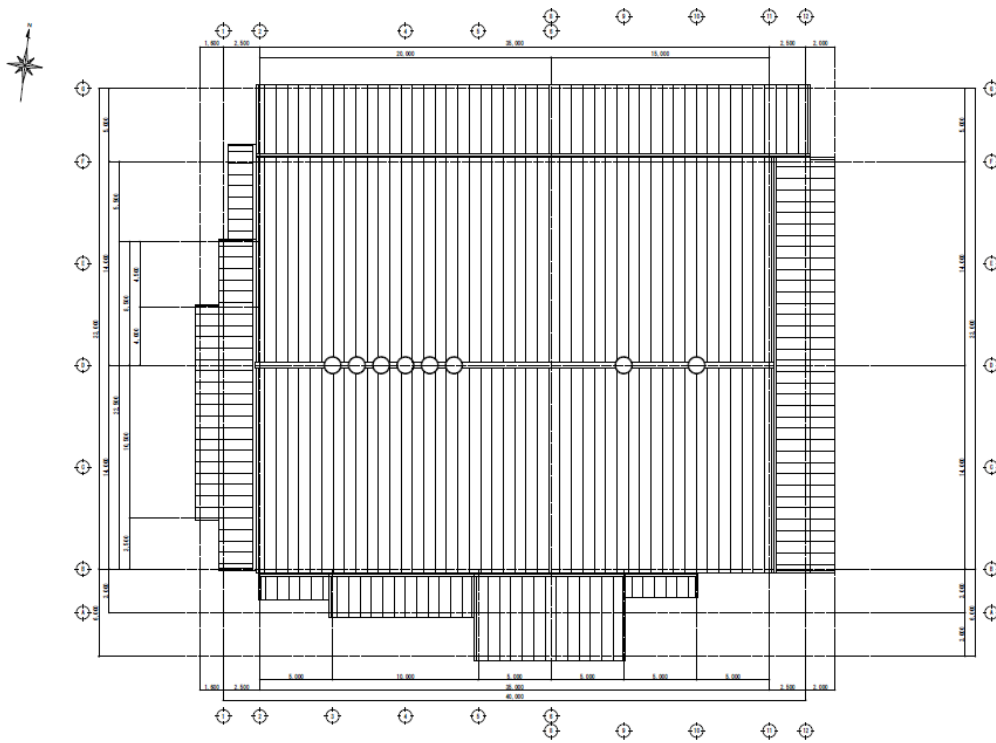
2) 物的被害

当該工場は亜鉛末分級設備を中心に甚大な損壊となり、飛散物による周辺の損壊が一部にあった。湯本工場内のその他施設については、損壊はなかった。

以下、図11、12および13に、工場建屋の図面、建屋および設備の損壊状況の写真を示す。各設備の損壊状況を表2に整理する。

表2 各設備の損壊状況

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ていました。
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災が伝播し全焼



建屋 屋根伏せ図

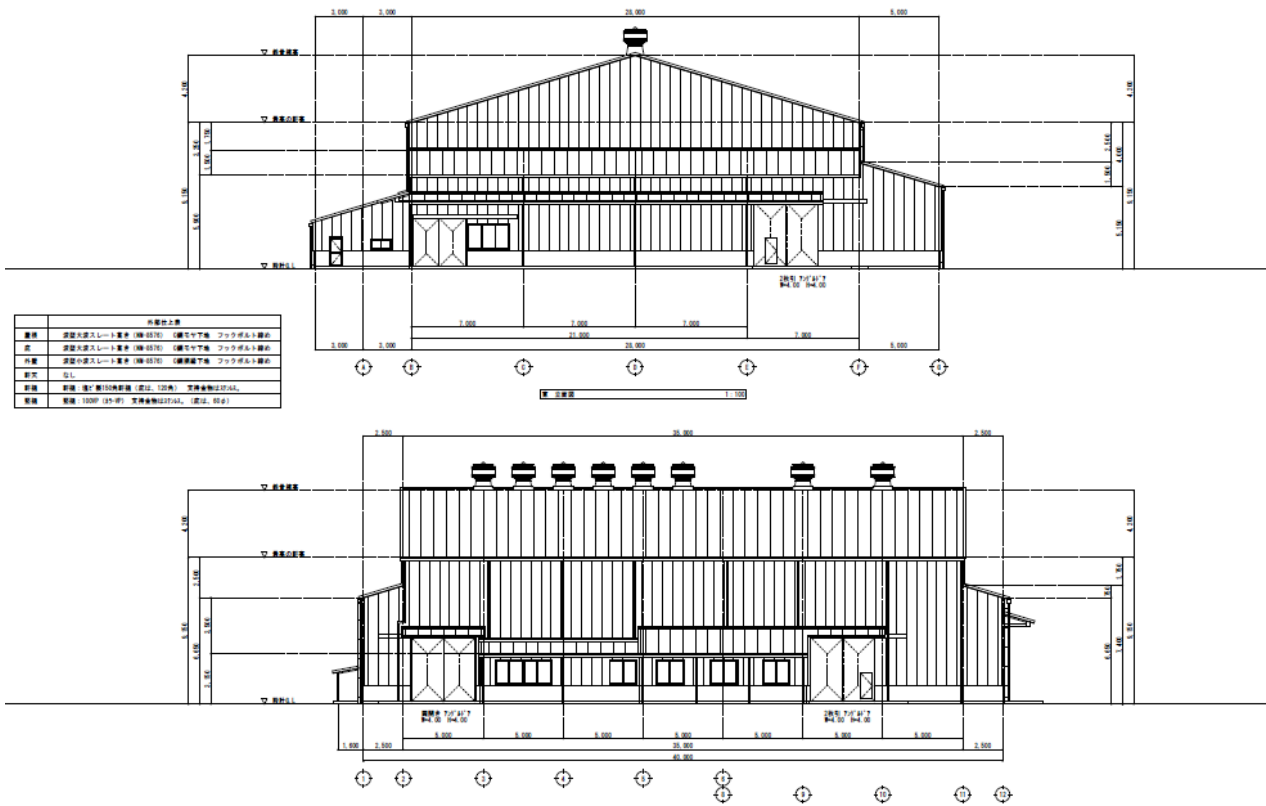


図 1 1 亜鉛末工場建屋 立面図



建屋東側



建屋西側



建屋南側



建屋北側



建屋俯瞰

図 1 2 亜鉛末工場の損壊状況の写真



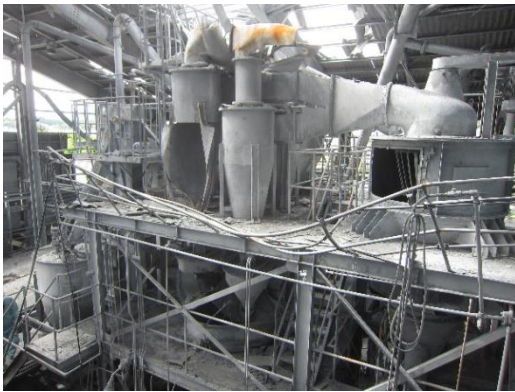
分級ファン
(ケーシング)



分級ファン
(ベアリングボックス)



分級バグフィルター



マルチサイクロン、分級機セパレーター



レーザータンク (マルチサイクロン下)



西側集塵機



ロッドミル集塵機



No.5 集塵機



電気配電室

図 1 3 亜鉛末工場内の設備の損壊状況の写真

3) 近隣の被害範囲

工場隣接周辺へスレートや設備由来の金属片等のがれき飛散があった。具体的には、図 1 4 に示す。また、爆発地点から約 500m 南西に位置する太陽光パネルおよび水田に亜鉛末の飛散が確認された。

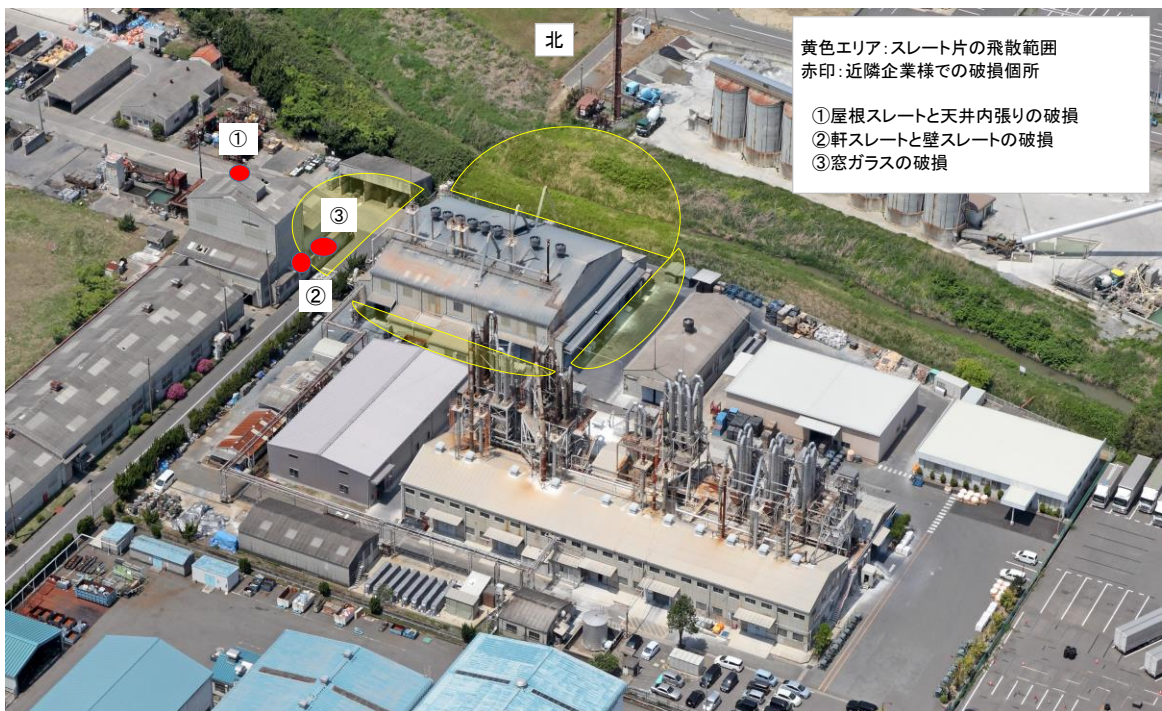
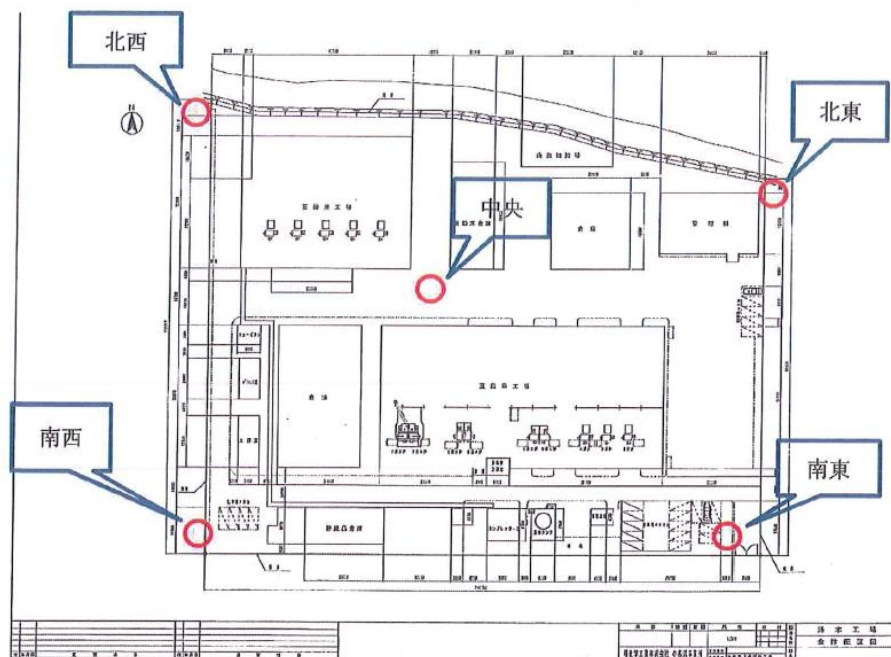


図 1 4 近隣の被害状況

4) 建屋スレート材に含まれるアスベスト飛散の影響調査

当該建屋スレート材にアスベスト（クリソタイル、クロシドライト）が含有していることが判明した。そこで、大気中のアスベスト濃度を工場敷地内5地点（中央、北西、北東、南東、南西）で測定した。採取地点および測定結果は次のとおり。



採取日	測定	北西	北東	南東	南西	中央
2021/5/17	総繊維数濃度 (f/L)	0.96	1.1	1.9	2.5	1.7

※総繊維数濃度とは、長さ5 μ m以上、幅（直径）3 μ m未満で、かつ長さとの比（アスペクト比）が3:1以上の繊維状物質を計数したものの。

測定結果は、大気汚染防止法に基づく「特定粉じん発生施設」の敷地境界基準 10f/Lと比較して十分に低く、いわき市の各地点で過去に測定された結果と有意差がないものであった。

したがって、事故によるアスベスト濃度の増加は確認されず、現存した濃度も健康には影響しないものであった。

5) 亜鉛末工場の電気ケーブルおよび電気配電室の被害状況

爆発が発生した工場内の全ての電気機器は防爆構造で、それらへの配線方法も、金属管を用いるなど防爆仕様となっていた。また、工場内設備のモーターからの電気火花発生・過熱、配線の短絡痕・ショートによる溶解火花発生の痕跡は見られなかった。これらのことから、電気機械および器具による火花および過熱によって火災が発生したものではないこと、ならびに現場火災の発生時刻からみて、亜鉛末分級工程で起きた火災によって電気ケーブルが延焼し、それが電気配電室の火災になったものと推定した。工場内のケーブルラックの敷設レイアウトと焼損状況の写真を、図15に示す。

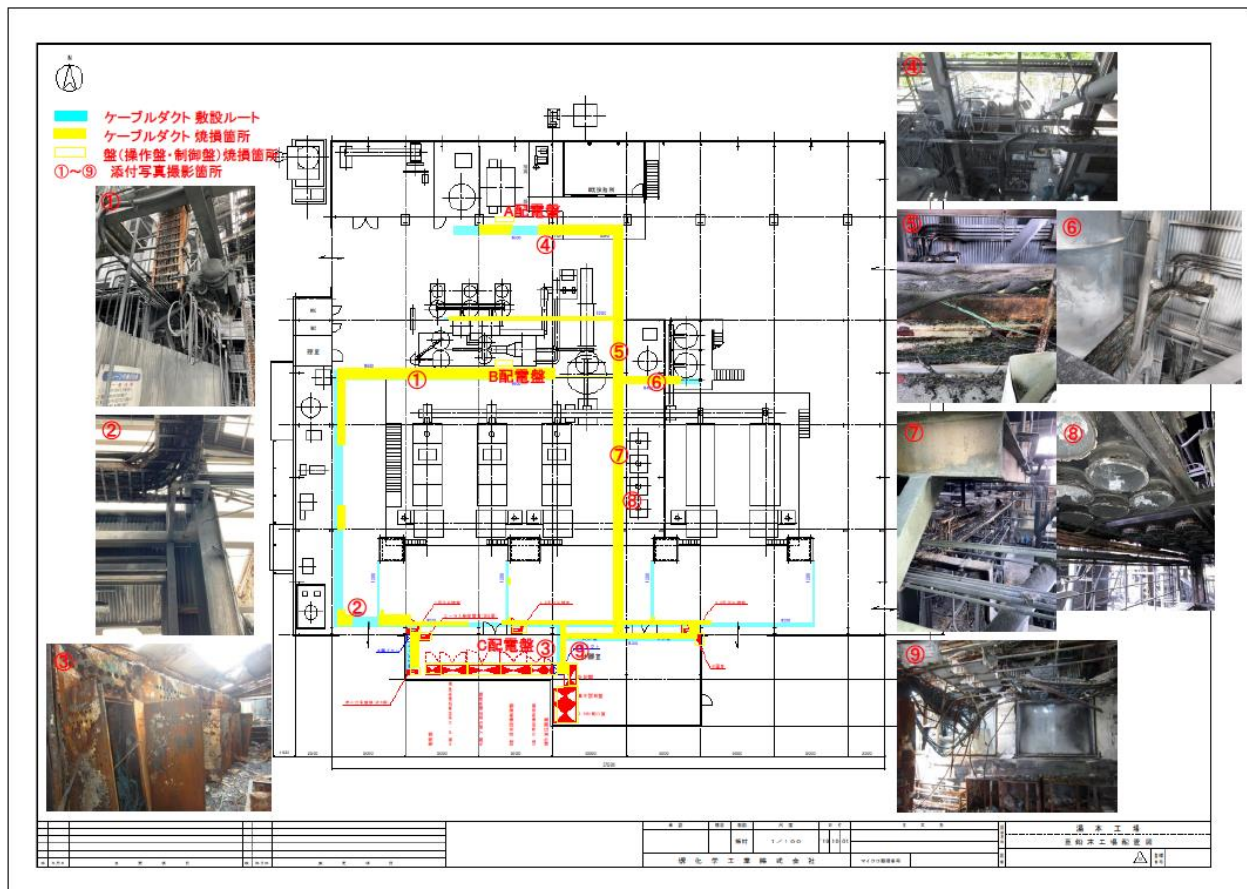


図 1 5 工場内のケーブルラック敷設レイアウトと焼損写真

主なケーブル類の焼損については被覆および絶縁材が可燃物であることから、爆発後、ダクト上の堆積粉じんが燃えたことにより発火したものと考えられる。これは堺化学社員がケーブル上で堆積粉じんが燃え広がっていたとの目撃証言から裏付けられた。更に、工場内の配線用ブレーカーは、NFB（ノーヒューズブレーカー、過電流遮断の機能のみ）であったが、トリップしていなかったため、火災中も通電したままの状態が続いていたと考えられる。すなわち、ほとんどの機器は、爆発火災後も動作しており、特に、集塵機・集塵機用ブロワー等は、爆発火災後もしばらくは正常に稼働していたと考えられる。これにより、集塵部ダクトから燃焼粉も集塵され、各集塵機内に貯留されていた亜鉛末に着火・爆発、更に、爆発した集塵機付近の亜鉛末仕掛品および可燃物に燃え広がり、被害を広めてしまったと考えられる。

また、補足ではあるが、亜鉛末工場の電気配電室は全焼していたが、その元電源にあたる工場外のキュービクル側は焼損に至らなかった（キュービクル内の主幹線ブレーカーは切れていなかった）。爆発事故後、堺化学社員がキュービクルの扉を開けた際に、燻っている匂いがしたとの証言があり、これは、キュービクルと亜鉛末工場との電気ケーブルが埋設配管で敷設されていたため、亜鉛末工場の電気配電室側からの延焼が酸素不足等により抑えられたものの、臭気は伝わったものと考えられる。もし、臭気ではなく可燃性ガスであればキュービクルでも爆発が発生したかもしれない。

結果として、他工場への火災被害はなかった。

3. 3 事故に至った経緯と事故後の状況

3. 3. 1 事故発生時の状況（当日）

（協力会社）

2021年5月11日（火）

- 1) 当日は協力会社社員8名（a, b, c, d, e, f, g, h）が出社。
- 2) 前日夕方に設備を停止していた。発災当日、事故発生前の7時35分から、順次各設備の立ち上げを行った。
- 3) 当該設備および工程の作業担当は、協力会社社員が行った。

時刻	作業者	作業内容
7時25分	協力会社社員 a, b, c, d, e, f, g, h	協力会社記録室にて、作業前の全体ミーティングを実施し、作業内容の確認
7時35分		ミーティング終了
	協力会社社員 a, b	前日包装した製品を包装場から取り出し、入り目作業を手分けして開始
	協力会社社員 c, d	分級バグフィルター（集塵機）、その後、後工程の設備を順次稼働 ※4. 2項に詳細記載
	協力会社社員 e	5系包装場でフレキシブルコンテナを設置、集塵機を稼働させて、1階から3階へ昇り製品貯槽の点検口へ移動
	協力会社社員 f, g, h	ミーティング後、記録室内で待機
7時40分	協力会社社員 c, d	分級ファン稼働開始

これら段階までは、協力会社社員へ聴取した結果からは、手順どおりに作業を行っており、各種設備の起動に関する異常はなかった。

※当該設備は各工程をシーケンス制御しており、DCS制御ではないため、電子データによる当日の稼働状況確認は出来なかった。

事故発生時の関係者からのヒアリング

7時42分	協力会社社員 a	分級ファンの回転が高速段階になった際に、ガタガタと音が大きくなった。分級ファンを停止させようと、スイッチの箇所まで走った。スイッチを切る前に、スイッチの箇所付近で、爆風を浴びた。
	協力会社社員 b	パキーンという音を2回聞いた直後に、爆発、火の粉が上部から降ってきた。

協力会社社員 c, d	分級ファンの回転が高速段階まで正常に上がった後、床面が地震のような振動をして、ダクト内部では大きな音がした。ダクト上部の亀裂に閃光が見え、火が出た直後に黒煙が噴出した。爆風を浴びた。
協力会社社員 e	5系製品貯槽の点検口を開放した際に、分級ファンの方向から、いつもと異なるガタガタという音がし、直後に爆発、火の粉が上部から降ってきた。
協力会社社員 f	ドドドという音の後、床面が地震のような振動をした直後に爆発、窓越しに火の粉が降っているのが見えた。
協力会社社員 g	金属の擦れた音（ギューン）がして、その後、床面が振動した後に、窓越しに火の粉が降っているのが見えた。
協力会社社員 h	金属の擦れた音（ギューン）がして、その後、床面が振動した後に、窓越しの少し見上げる上くらいに、炎と煙が迫ってくるのが見えた。

- 7時42分 当該設備へ送電している他工場の配電盤の電子データから、当該時刻に爆発した事を推定
- 9時02分 当該設備へ送電している他工場の配電盤の電子データから、当該時刻に堺化学社員が電源遮断したことを推定

事故発生の状況（当日）

（堺化学）

2021年5月11日（火）

- 1) 当日は堺化学社員2名（I,J）が出社。
- 2) 当該設備は協力会社担当であり、事故発生時には、堺化学社員は同じ工場内の別の記録室にいた（同工場内で、協力会社と堺化学で担当する工程、設備が各々あり）。

時刻	作業者	作業内容
6時50分	協力会社社員 a 堺化学社員 I	協力会社記録室にて作業内容の打ち合わせ
7時15分	堺化学社員 I, J	堺化学記録室にて作業内容の打ち合わせ
7時40分	堺化学社員 I 堺化学社員 J	堺化学記録室内で、作業指示書を作成開始 堺化学記録室から当該工場の外に出た。
7時42分	堺化学社員 I 堺化学社員 J	爆発を感じた（一瞬赤い光とゴーという大きな音を聞いた）。 （工場外で）爆発を感じた。

堺化学および協力会社の関係者からの聞き取り調査をもとに、事故発生状況を推定すると、7時40分頃プラントを起動させた直後の7時42分頃、大きな異音が発生し、その直後、閃光が出て、爆発・火災が発生したものと判断される。

事故発生後の状況（当日）

湯本工場での全般の状況を、消火および救助活動含めて、以下に記載する。

7時42分	爆発発生
7時45分	消防覚知（付近通行人の119番通報）
7時50分	湯本工場事務所棟脇へ、負傷者搬送、救護
7時57分	先着消防隊到着（以降、延べ消防隊59隊が活動）
8時04分	先着救急隊到着（以降、延べ救急隊6隊が活動）
8時43分	市から延焼中の一般取扱所に対して消防法第12条の3第1項による緊急使用停止命令（口頭）が発令される。（命令書は翌日交付）
9時30分	発災状況を確認しつつ消火方法を協議し、粉末消火器及び乾燥砂を使用した消火活動が開始される。
11時30分	黒煙発生（電線ケーブル燃焼による）
12時30分	黒煙消える
15時30分	工場内亜鉛末仕掛品を消防署員によるバケツ手渡しリレーで工場外へ搬出
19時00分	消火活動、一旦終了
	19時以降は、堺化学社員が交代で亜鉛末仕掛品砂山を監視、消防署員2名、警察署員2名は湯本工場内で待機

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、大量の砂をかけて酸素を極力遮断し、延焼の拡大を防ぎつつ、仕掛品の温度低下を待つことにした。

3. 3. 2 事故発生後の状況（翌日以降）

2021年5月12日	6時から消防隊による消火活動再開 雨水対策として、亜鉛末仕掛品へ防災シートを被せる養生実施 警察署、消防署、堺化学の三者調整会議開始
5月13日	2時頃亜鉛末仕掛品砂山から発煙、消防署緊急出動、(防砂による)消火活動、 4時26分消防署撤収 警察署、消防署、労働基準監督署、他関係者、工場内立ち入り、調査開始。 いわき市長へ危険物製造所等災害発生届出書を提出
5月14日	警察署立ち入り、製造フローを説明、消防署から亜鉛末仕掛品砂山の処理の ロードマップの提出要請 (亜鉛末仕掛品砂山 温度監視を継続)

- 5月17日 消防署へロードマップ提出
- 5月31日 消防署鎮火宣言（三者調整会議終了）
- 6月01日 危険物取扱所廃止届出の提出に伴う緊急使用停止命令の解除
- 6月05日 事故調査委員会発足、第1回開催、場内視察
- 6月16日 警察署、消防署、労働基準監督署による実況見分（分級ファンの分解検証）
- 6月18日 警察署による各設備への規制線指定
- 7月01日 警察署、消防署による実況見分（分級ダクトの検証）
- 7月17日 第2回事故調査委員会開催、場内視察
- 8月18日 警察署による各設備への規制線解除
- 8月23日 警察署へ爆発性評価試験結果（事故調査資料）提出
- 8月31日 労働基準監督署へ事故調査委員会議事録（第1,2回開催分）提出
- 9月18日 第3回事故調査委員会開催
- 10月23日 第4回事故調査委員会開催、接触模擬テスト実施
（警察署 分級工程解体調査立ち合いあり）
- 11月26日 労働基準監督署へ事故調査委員会議事録（第3,4回開催分）提出
- 11月27日 第5回事故調査委員会開催
- 12月28日 第6回事故調査委員会開催

表3 当該工場内の作業関係者の被災状況、年齢、経験年数、担当作業

社員区分	被災状況	年齢	経験年数	担当作業
協力会社社員 a	重傷	63	20	指示、監督、補助（副班長）
協力会社社員 b	軽傷	62	9	包装作業
協力会社社員 c		29	4ヶ月	設備立ち上げ、停止作業等
協力会社社員 d		42	2ヶ月	設備立ち上げ、停止作業等
協力会社社員 e	無傷	65	2	包装作業
協力会社社員 f		73	16	包装作業
協力会社社員 g		48	4	包装作業
協力会社社員 h		60	6ヶ月	包装作業
堺化学社員 I		48	14	指示、監督（職長）
堺化学社員 J		48	12	前工程設備の運転

4. 事故原因

4. 1 事故調査の方法

今回の事故、爆発・火災の原因究明の検証に関しては、次のような方法で行った。

- 1) 当該工場の設備はシーケンサー制御で、DCS制御していない。また、電気配電室も全焼したため、操業状況に関する記録類が焼失していた。
そこで、発災状況は、設備の損壊状況と、当日、当該工場に出勤していた堺化学社員および協力会社社員からの聞き取り調査によって推定した。また、推定内容が事故後の現況から見て合理性があることを、分級ファン、分級セパレーター、マルチサイクロンの解体調査によって裏付けを取った。
- 2) 事故前の設備の状況については、設備台帳、図面、点検記録、設備メーカー、修繕会社、堺化学社員および協力会社社員のヒアリングから、把握した。

4. 2 事故の原因推定

(1) 発災設備の推定

以下の情報をもとに、最初の発災箇所は、分級ファンであると特定した。

- ①関係者5名からの「分級ファン稼働直後に、ファン付近から異音、床面が地震のように振動し、爆発した。」、「分級ファン付近からの異音とともに、ダクトの亀裂から閃光と黒煙の噴き出すのを見た。」というヒアリング内容が一致していたこと
- ②分級ファンのケーシングの中央部が膨らんでいることから、ここで小爆発があったと推定されること
- ③爆発起源となった設備として、分級ファン、分級セパレーターおよびマルチサイクロンの可能性を考えたが、着火源が存在する設備が、分級ファン以外になかったこと
- ④爆発後の火災状況から見て、電気配電室の火災は、爆発後の火災で電気ケーブルに延焼したことが原因と考えられること

(2) 爆発物質の危険性

当該プロセスにある可燃性物質は亜鉛粉末、重油およびポリバッグ用パラフィンであった。重油およびポリバッグ用パラフィンは当該プロセス内に入ることはない。亜鉛末は金属粉末のため、酸・アルカリや水との接触により水素ガスを発生させるが、工場内で酸・アルカリや水の使用はないため、水素爆発の可能性はないと判断した。

そこで、亜鉛粉末の爆発性評価を外部機関の公益社団法人「産業安全技術協会」に依頼し、表4に示す結果を得た。試験サンプルとして、堺化学製品で一番細粒の亜鉛末#3と、事故後に分級バグフィルター（集塵）下にあった回収ドラム缶に残されていた集塵亜鉛末を選んだ。この結果から、亜鉛末は粉じん爆発危険性を有するものの、粉じん爆発クラスはSt1で、最も低いランクで着火には比較的大きなエネルギーが必要（静電気火花程度では着火困難）であり、爆発下限濃度はおよそ1,000g/m³程度であることが確認された。

表4 2種類の亜鉛末粉の爆発性評価結果

	亜鉛末 #3 (気流分級/最小粒製品)	分級バグフィルター抽出粉
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
粉じん爆発クラス	St 1	St 1

※別紙報告書添付

(3) 事故後の分級ファンの状況

分級工程の一連の設備レイアウトを図16に、設備の立ち上げ操作手順を、表5に示す。

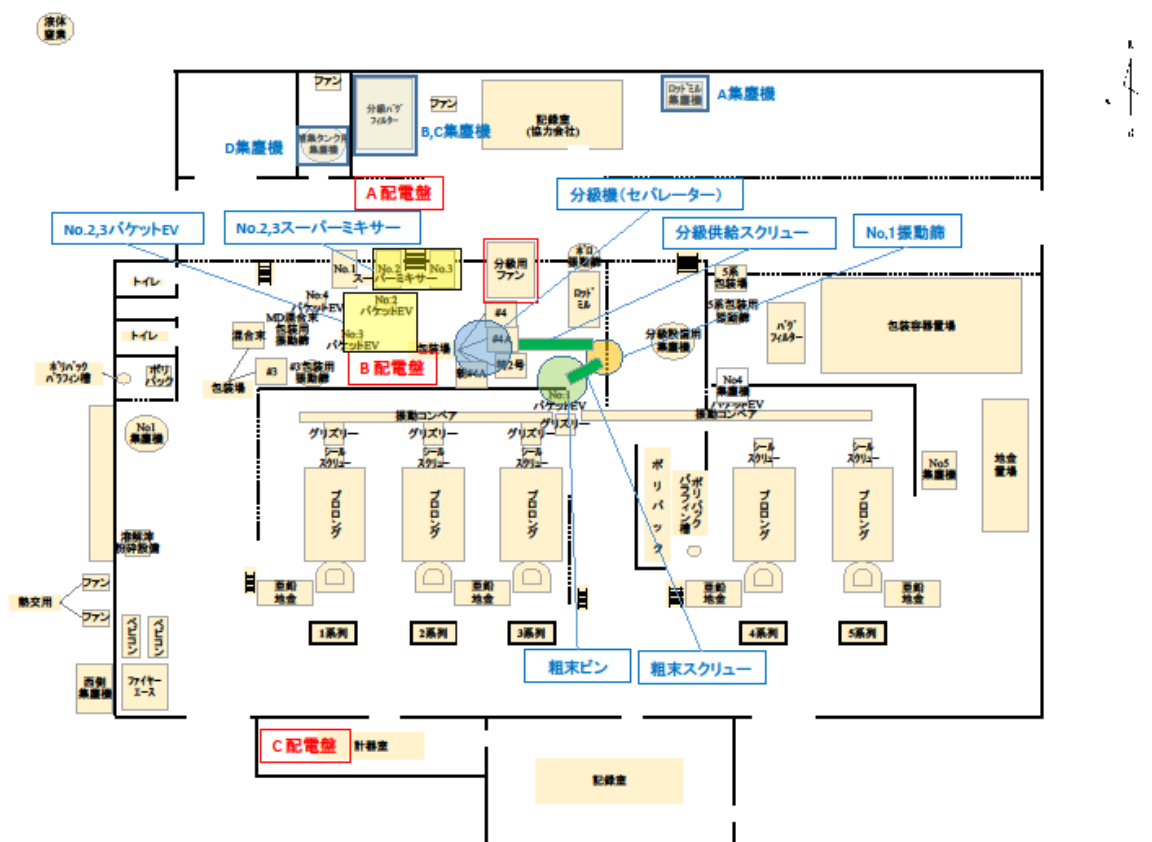


図16 分級工程の一連の設備レイアウト

表5 分級工程 設備立ち上げ操作手順 (概要)

手順番号	操作	配電盤の場所
①	ロッドミル集塵機 (A 集塵機) 捕集タンク用集塵機 (D 集塵機)	A 配電盤
②	No.2,3 スーパーミキサー排出スクリュー	
③	分級バグフィルター (B,C 集塵機)	
④	No.2,3 バケット EV	
⑤	各スクリューコンベアおよび振動篩など	B 配電盤
⑥	分級機 (セパレーター)	B,C 配電盤
⑦	分級ファン	B 配電盤
⑧	分級供給スクリュー	B 配電盤
⑨	No.1 振動篩	C 配電盤
⑩	粗末スクリュー	

分級設備の運転を担当している協力会社社員は、始めに集塵機や搬送スクリューやバケットコンベア等を立ち上げ、分級ファンで気流を起こし、最後に亜鉛末を工程内に供給する粗末スクリューを稼働させる手順で作業を行っている。事故当日の作業では、表中の作業番号⑦の分級ファンを稼働させた直後 (約 2 分後) に、爆発が発生した (作業番号⑧以降は実施せず)。参考までに、図 1 7 に分級工程設備の稼働フローを示す。

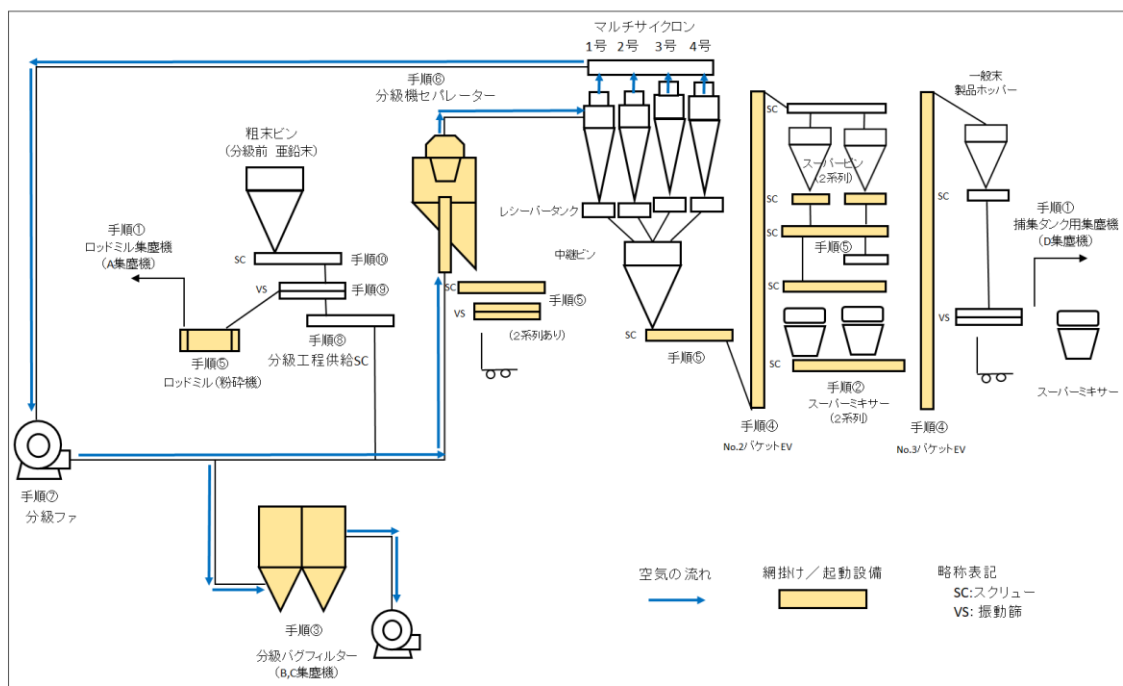


図 1 7 分級工程設備の稼働フロー

そこで、当該分級ファンを事故後に実地検証したところ、以下の点が観察された。

① ケーシングの変形、中央部に約 4cm の膨れがあった。その写真を図 1 8 に示す。

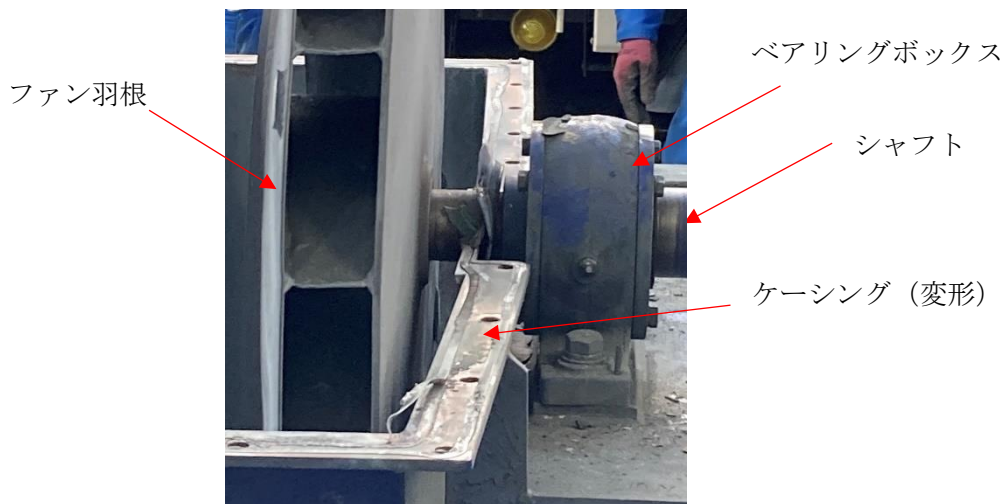
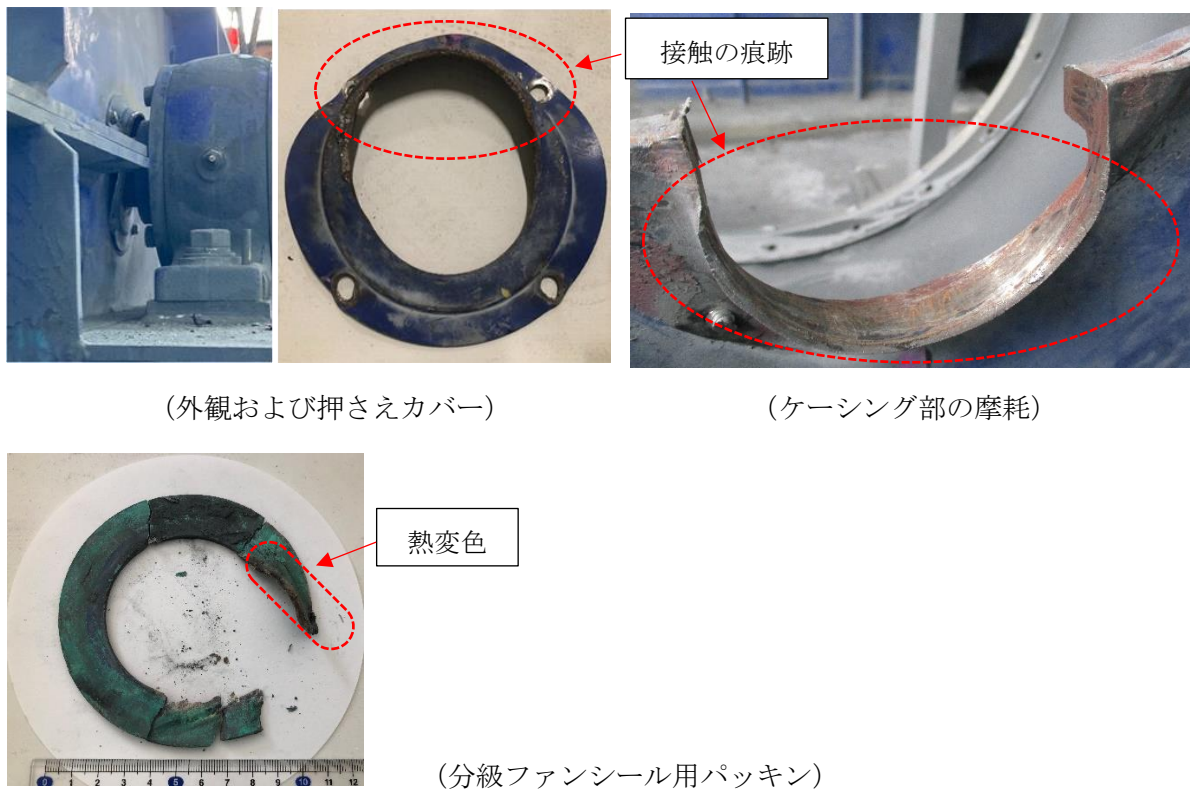


図 1 8 分級ファンケーシング変形、中央部の膨れ写真

② ケーシングとシャフトのシール箇所に着目したところ、ケーシングとシャフトが接触した痕跡があった。また、シール部パッキンを回収したところ熱変色が見られた。それらの写真を図 1 9 に示す。



(外観および押さえカバー)

(ケーシング部の摩耗)

(分級ファンシール用パッキン)

図 1 9 分級ファンケーシングとシャフトのシール箇所の写真

- ③ ベアリングボックスは、モーター側とファン羽根側の 2 箇所にある。今回ファン羽根側にあるベアリングボックスが、固定部の左右 2 箇所で共に破断していた（図中 A、B）。それぞれの箇所を回収して、外部機関にて破断面の観察、破断状況の検証を行った。なお、破断箇所 B に関しては、破断面の両端で切断した（図中 B1、B2）。図 2 0 にベアリングボックスの破断状況を示す。



図 2 0 ベアリングボックスの破断状況

外部機関での検証結果から、以下のことが分かった。

- a) 過大な負荷が掛かったために生じる延性破壊の痕跡であるディンプルが、破断箇所 A および B 共に観察された。参考までに、破断箇所 A の観察結果を、図 2 1 に示す。

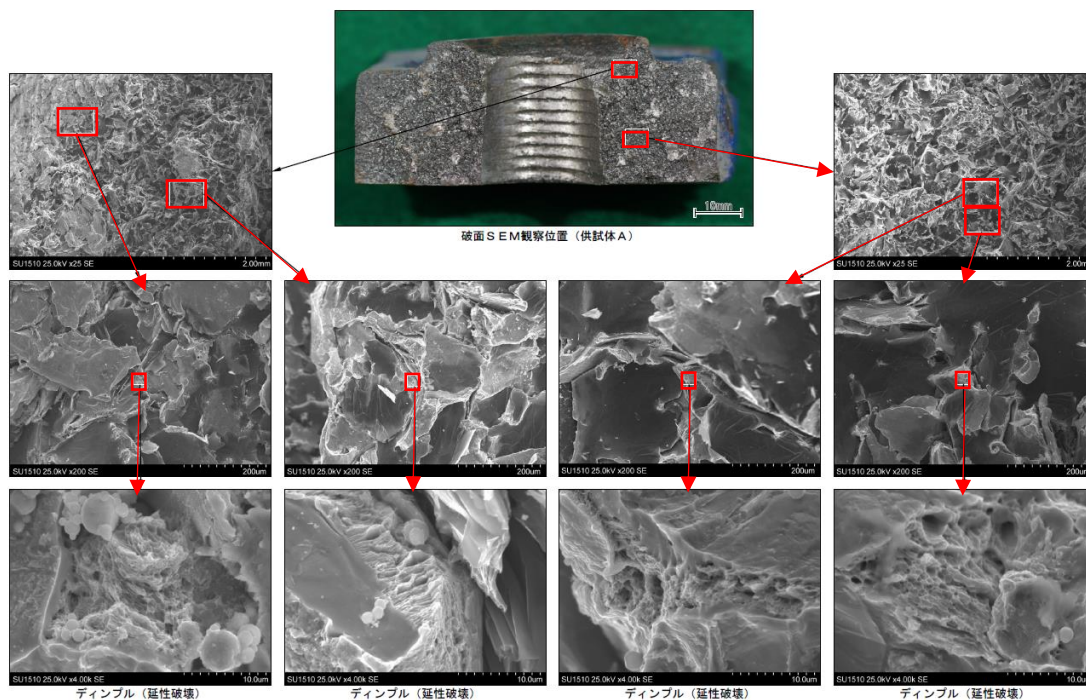


図 2 1 破断箇所 A の SEM 観察結果

- b) 亀裂進展方向に関しては、破断箇所 A および B は各々図 2 2 のようであった。特に、破断箇所 B では、破断後にある程度の期間、破断面同士（B1 および B2）の接触が繰り返り生じていたと推定された。
- c) ベアリングの損傷は特に認められなかった。※別紙修繕メーカー報告書添付

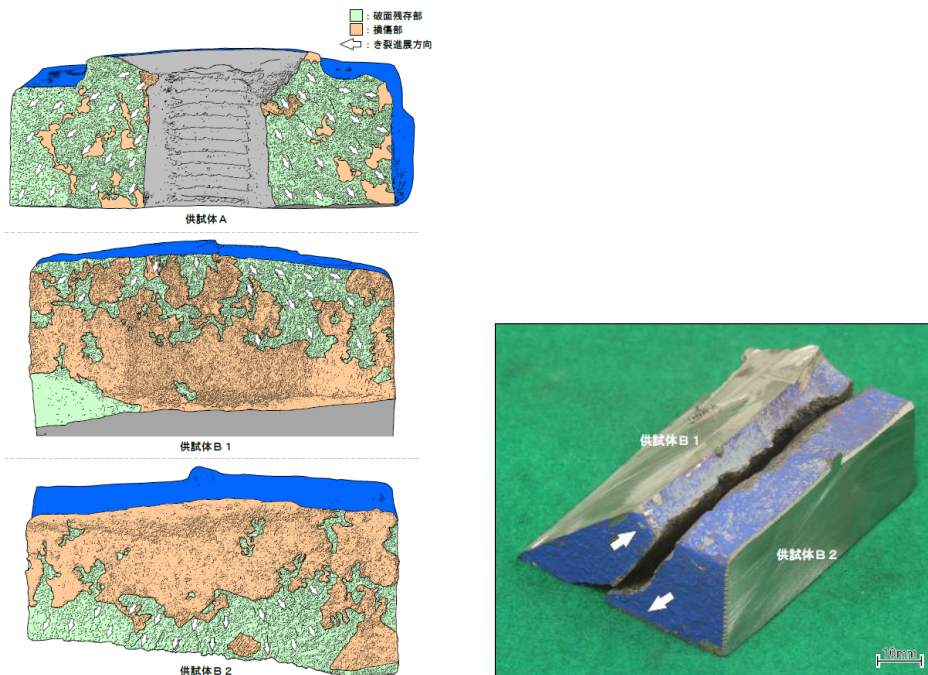


図 2.2 ベアリングボックス破断箇所の亀裂進展方向

このことから、ベアリングボックスに繰り返し負荷が掛かっていたのではなく、発災当日、急激に相当の負荷が掛かって破断に至ったと推定される。なお、なぜ、過大な負荷が掛かったかについての機構は分からないという所見であった。※別紙外部機関報告書抜粋添付

- ④ 分級ファン羽根には、全体的にスケールが付着していた。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ったが、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なかった。スケールを全て回収したところ、約 4kg であった。図 2.3 に分級ファン羽根に付着したスケールの写真を示す。

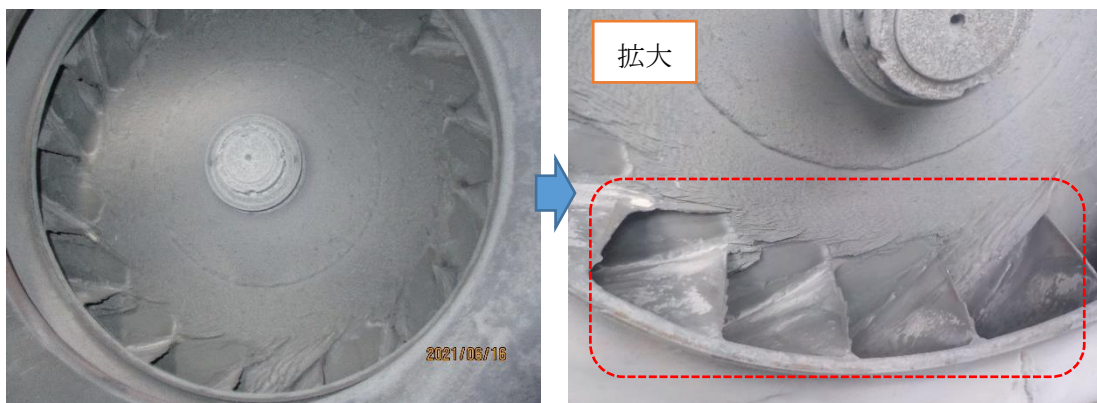


図 2.3 分級ファン羽根のスケール付着写真

- ⑤ ファンケーシング下部には、大小さまざまな垂鉛末スケールの破片があった。図 2.4 に状況写真を示す。スケール全量は 5.6kg であった。ファンケーシング下部とファン羽根とが接触した痕跡はなかった。



(ケーシング下部)

(大きなスケール片 ※左 0.4kg 右 1.6kg)

図 2 4 分級ファンケーシング下部の亜鉛末スケールの破片、塊写真

④⑤のように設備内にスケールが生成する原因は、亜鉛末の粒子径が数 μm ~100 μm と細かいこと、および外気から取り込まれた分級工程中の気流に含まれる湿分によるものと推定される。具体的には、気流により設備管壁に衝突した亜鉛末粒子が管壁表面層の凹凸部に入り込み、気流中の水分が亜鉛末粒子間に介在して反応し、微量の酸化亜鉛を生成し、これが粒子同士を接着すると考えられる。分級工程が稼働している際には、亜鉛末粒子が連続して管壁部に接触するため、上述の現象が管壁表面層で絶えず生じて、スケール成長に繋がると推定される。

(4) 分級機セパレーターおよびマルチサイクロンの状況

分級ファン以外の設備を観察したところ、分級機セパレーターについては、以下の点が挙げられた。

- ①セパレーターブレードに損傷なし
- ②シャフト可動部ベアリングに損傷なし
- ③分級機内の底部に、粗粒仕掛品の残留あり
- ④セパレーターブレードの点検口が吹き飛んでいた。

図 2 5 に分級機セパレーターのブレードおよび底部仕掛品残留の写真を示す。

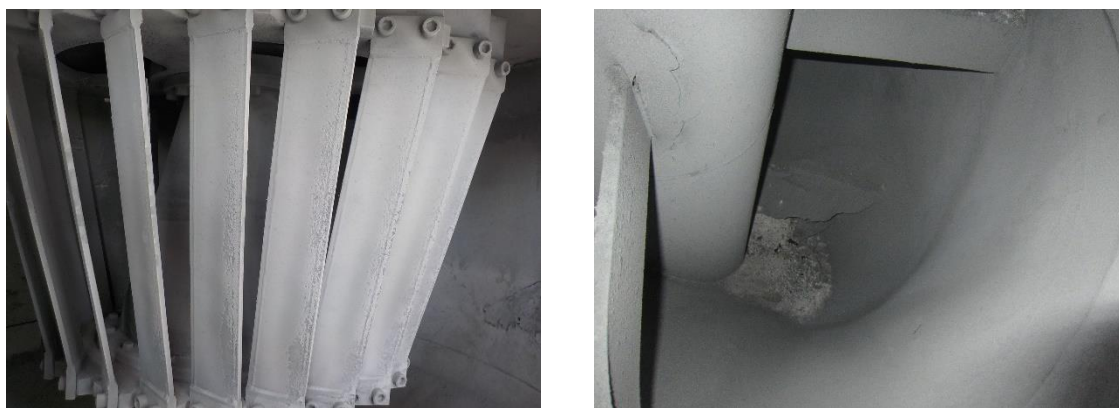


図 2 5 分級機セパレーターのブレードおよび底部仕掛品残留の写真

マルチサイクロン4基については全て破損しており、1基が胴部で大きく破裂し、その他は上下部で破裂していた。分級機セパレーターおよびマルチサイクロンの破損写真を図26に示す。

分級機セパレーター、マルチサイクロンの破壊状況は、分級ファンに比較してかなり大きかったと推定される。



図26 分級機セパレーターおよびマルチサイクロン胴部破損

(5) マルチサイクロン内の亜鉛末の堆積状況

堺化学社員および協力会社社員の複数名から、これら4基の内、1基が少なくとも数年前から亜鉛末が詰まって閉塞していた（ブリッジ）との聞き取りを得た。

マルチサイクロン4基下部レシーバータンクから抜き出された亜鉛末が貯留される、中継ビン下の抜き出しスクリー付近には、事故後、噴き出した亜鉛末がステージ床に大量に残されていた。図27にその状況写真を示す。このことはマルチサイクロン下部に多量の亜鉛末が溜まっていたことを裏付けている。付近に噴出していた亜鉛末量を試算したところ、211kgであった。

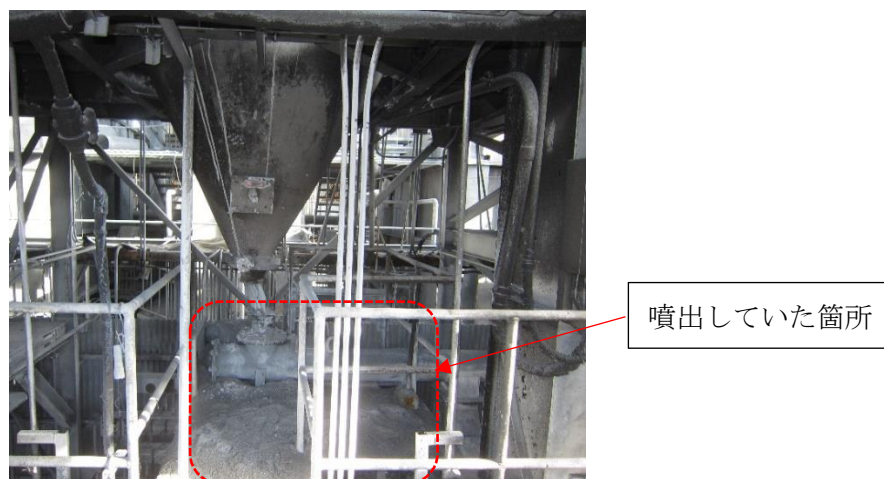


図27 中継ビン下の抜き出しスクリー付近に噴出していた亜鉛末粉

これらをまとめると、事故後に、工程で滞留している亜鉛末が確認された箇所は、分級ファンケーシング内、分級機セパレーター内、マルチサイクロン後の中継ビン下の抜き出しスクリー付近、および分級バグフィルターの4か所となる。工程内の全てのダクトには、水平部分を含めて残されていた亜鉛末はほとんど観察されなかった。

4. 3 事故原因の絞り込み

事故原因に関して、物質、着火源、系内粉じん濃度の推定および火災に分けて、以下に整理し、検証した。

1) 原因物質の検証

原因物質は亜鉛末と特定した。事故前日の操業状況を協力会社社員複数名から聴取した結果からは、粗末ビンスクリーから分級工程への亜鉛末の供給停止後、充分時間を設けて工程仕掛品を払い出し、系内の亜鉛末を無くす作業を行った。事故当日は系内へ亜鉛末を供給していなかった。しかしながら、一方で、複数名の堺化学社員および協力会社社員からマルチサイクロン4基の内、1基はサイクロン下部で詰まりがあったとの聞き取りがあり、爆発後の実地調査においても、前述のように、ステージ床に多量の亜鉛末が噴出していることが確認されたことから、工程内の配管系、分級機セパレーター、マルチサイクロンなどに、亜鉛末があったものと推定される。

また、実際に粉じん爆発が発生するためには、分級工程内で粉じん雲の発生が必要となる。

これは、分級ファンの異常振動が発生した際に、分級ファンとダクトで連結されているマルチサイクロンも同様に振動し、それによりサイクロン内に堆積していた亜鉛末が舞い上がったと推定される。なお、ある場所で粉じん爆発が発生すれば、その爆風が伝播するので、堆積粉体は瞬時に舞い上がると言われている。

2) 着火源の検証

着火源の可能性のある事象を表6に示す。

表6 着火源の可能性のある事象の一覧

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スケールとの接触火花	×	ケーシング内部に残留していた大きなスケール片に接触痕が見られなかった。
	シャフトとケーシングの接触火花	○	シャフトの該当箇所に、円周状の接触痕が見られた。
	シャフトとケーシングの接触発熱	○	ケーシングの該当箇所に、摩耗が深い接触痕が見られた。
分級機	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が見られなかった。
	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み、高速回転による加熱で着火する可能性がある。事故後にセパレーター羽根が手でまわせる状態で、ベアリング部の損傷は無かったので、可能性は低い。
サイクロン	対象なし	×	設備に駆動部がないため。
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	×	事故後のダクト外観から衝突痕が見られなかった。
	分級ファンケーシング金属摩耗片との衝突による火花	×	
分級バグフィルター(集塵)	対象なし	×	設備に駆動部がないため。

※ ○：可能性あり △：可能性ややあり ×：可能性低い

なお、亜鉛末は導体であり、設備も接地されていた状況から、亜鉛末の静電気帯電による着火の可能性はないと判断した。

以上より、着火源は分級ファンと分級機セパレーターでの接触による発熱、ならびに分級ファンとケーシングとの接触火花の可能性が高いと推定した。なお、各設備は接地されていることも確認した。事故後、分級機セパレーターを解体して検証したところ、セパレーター羽根ブレードと駆動部に異常は見られなかった。その結果から、分級ファンでのシャフトとケーシングの接触による発熱および衝撃火花が着火源となった可能性が高いと推定した。

これを裏付けるために、分級ファンと同機種のもーター、シャフト等を準備して、接触模擬テストを実施した。図28に接触模擬テストの設備図面および条件を示す。なお、シャフトとケーシングの初期接触幅は、分級ファンの設備図面から、5mmとした。

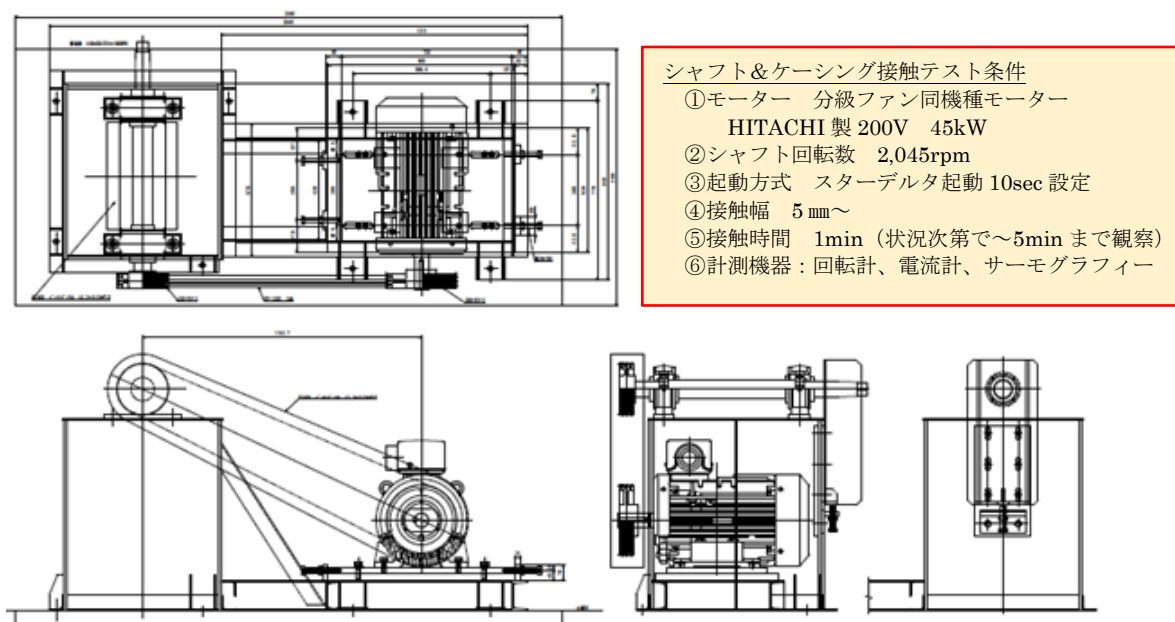


図28 接触模擬テストの設備図面および条件

2021年10月23日(土)に事故調査委員および原因究明チームメンバー立ち合いのもと、接触模擬テストを行い、以下のことを確認した。

- ①シャフトとケーシング接触により衝撃火花が発生すること
- ②ケーシング部が接触により、直ちに赤熱し、最高温度570℃に達すること
- ③ケーシング部が接触により破損、高温の金属摩耗片が発生すること
- ④ケーシング部にあるパッキンも過熱、変質すること を観察した。

図29に接触模擬テスト時の接触部写真、熱分布、および温度推移を示す。

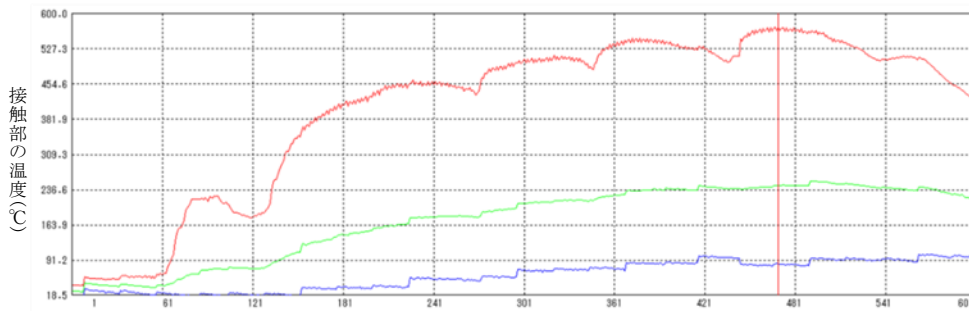


図 2.9 接触模擬テスト時の接触部写真、熱分布および温度推移

事故は分級ファンの起動開始2分後に起きているので、接触模擬テスト時にシャフトとケーシングの接触により直ちに衝撃火花が出て、ケーシング部が赤熱し、急激に温度上昇していることは、ケーシング部の接触による高温部が着火源となった可能性が高いことを示している。この火花の実体は高温となった金属摩耗片であり、金属摩耗片は後述するように、事故後、採取された金属摩耗片とほぼ同等の大きさであった。

これらの結果から、シャフトとケーシングの接触による衝撃火花（すなわち、高温の金属摩耗片）が着火源となった可能性が極めて高いと推定される。シャフトのずれについては、分級ファンの羽根が付着したスケールの剥離により偏芯する兆候があった。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、シャフトが偏芯したと考えられる。図 3.0 に分級ファン内部での着火イメージを示す。

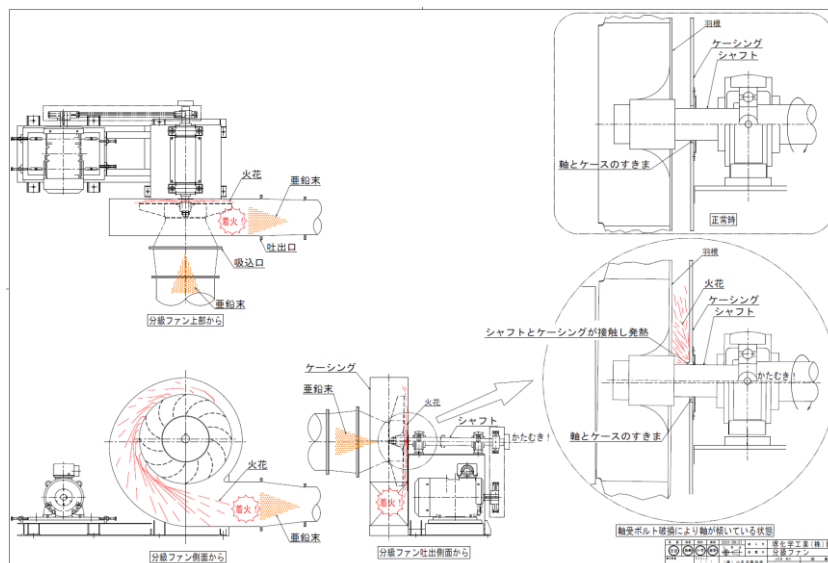


図 3.0 分級ファン内部での着火イメージ

上述で示した高温の金属摩耗片に関しては、実際に事故後に分級機セパレーター内部に残留していた仕掛品中から、同じような大きさおよび材質の金属摩耗片を発見した。同様の事象が事故時に発生していたことと合わせて裏付けることが出来た。

図3 1 に接触模擬テスト時に回収した金属摩耗片および事故後に分級機セパレーター内部で発見した金属摩耗片の写真を示す。

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。

図3 1 接触模擬テスト時および工程内から回収した金属摩耗片

3) 系内粉じん濃度の推定

各設備内の粉じん濃度が、爆発下限濃度 $1,000\text{g}/\text{m}^3$ 以上であったかを試算する。

まず、爆発に必要な亜鉛末の数量について、分級工程の各設備の容量と爆発下限濃度 $1,000\text{g}/\text{m}^3$ とを掛け合わせた結果を、図3 2 に示す。

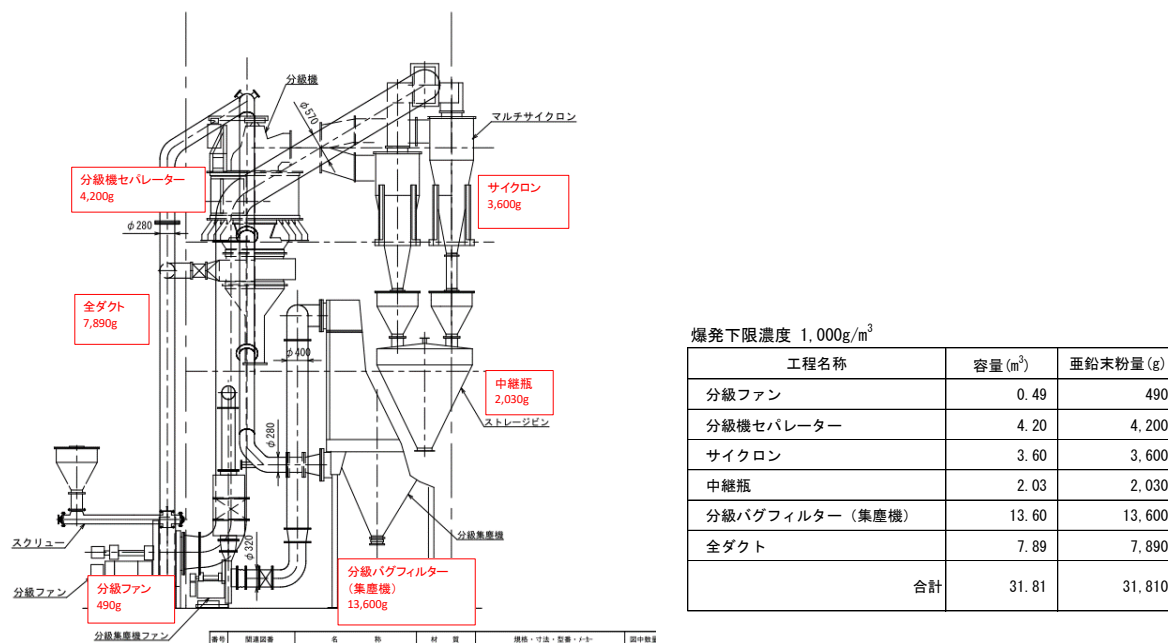


図3 2 分級各設備で粉じん爆発に必要な亜鉛末量の試算

発災当日、マルチサイクロン1基の下部に滞留していた亜鉛末量は、マルチサイクロン容量および亜鉛末かさ容量から最大約 710kg 滞留していた可能性があると試算した。分級ファンは始動していたので、このマルチサイクロン残量に加えて、配管内水平ダクト部に堆積した粉を含めて設備内を亜鉛末が浮遊していたと考えられる。また、発災当日、分級ファンの偏芯による振動で、マルチサイクロン内の堆積粉が舞い上がった可能性がある。配管系を含めた全容積を浮遊していたと仮定すると、マルチサイクロン残量だけであったとしても、粉じん濃度は 22,300g/m³ と算出される。また、事故後に現地確認し、図 27 で示した中継ビン下の抜き出しスクリー付近に噴出していた亜鉛末粉量の試算は 211kg で、粉じん濃度は 6,633g/m³ と試算される。

以上より、発災当日、分級工程の各設備内は爆発下限濃度 1,000g/m³ を十分に超す濃度であったと推定される。

前項で、着火源が、分級ファンシャフトとケーシング部の接触による衝撃火花(すなわち、高温の摩耗片)の可能性があると考えられた。マルチサイクロンに滞留していた亜鉛末が、分級ファン内部に気流搬送され、シャフトとケーシング部の接触による衝撃火花により着火し、粉じん爆発が発生して、ダクトで繋がっている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(集塵機)の設備に火炎が伝播し、損傷に至ったと考えられた。

分級ファンで起きた最初の爆発が、ダクトで繋がっている分級機セパレーター、マルチサイクロン、集塵機などの設備へ伝播し、損傷に至ったと考えられる。

4) 火災の検証

当該工場で取り扱っている可燃物は亜鉛末、再生重油、包装資材フレキシブルコンテナ、紙袋、工程設備の付属ポリバッグ(ポリバッグ用パラフィン含む)および製品を積載する木製パレットになる。分級工程内での粉じん爆発によりマルチサイクロン、分級機セパレーターや分級バグフィルター(集塵機)などが破壊され、燃焼している亜鉛末が工場内の空間中に放出された。この燃焼している亜鉛末は、工場内空間の浮遊粉じんを集塵している集塵機(No.1、No.5 集塵機など)に吸い込まれ、機内に滞留していた亜鉛末を着火させて粉じん爆発を発生させ、その結果集塵機が破壊され機内の多くの亜鉛末が燃焼しながら工場内の空間中に放出されたと考えられる。これらの過程で工場内の空間中に放出された燃焼している亜鉛末は、前述した工場内の可燃物を着火させて火災が発生したと考えられる。包装資材フレキシブルコンテナもほとんど燃焼した。なお、再生重油およびポリバッグ用パラフィンには着火しなかった。工場内の火災状況を、図 33 に示す。

工場内で火災被害が大きかった箇所は、南側の電気配電室とそれに隣接する堺化学社員記録室になる。粉じん爆発の火炎が電気ケーブル上の堆積亜鉛末に燃え移り、電気ケーブルを伝わって、最終的に電気配電室および記録室の配電盤、記録室全体の延焼に繋がった。また、以下の3箇所に保管されていた工場内の亜鉛末仕掛品にも(図中黄色エリア3箇所)各々近くにあった集塵機からの火炎が燃え移った。

- ① 協力会社記録室の東側にあるロッドミル集塵機脇の包装場

- ② ①の向かい5系包装場
- ③ 西側1号集塵機付近

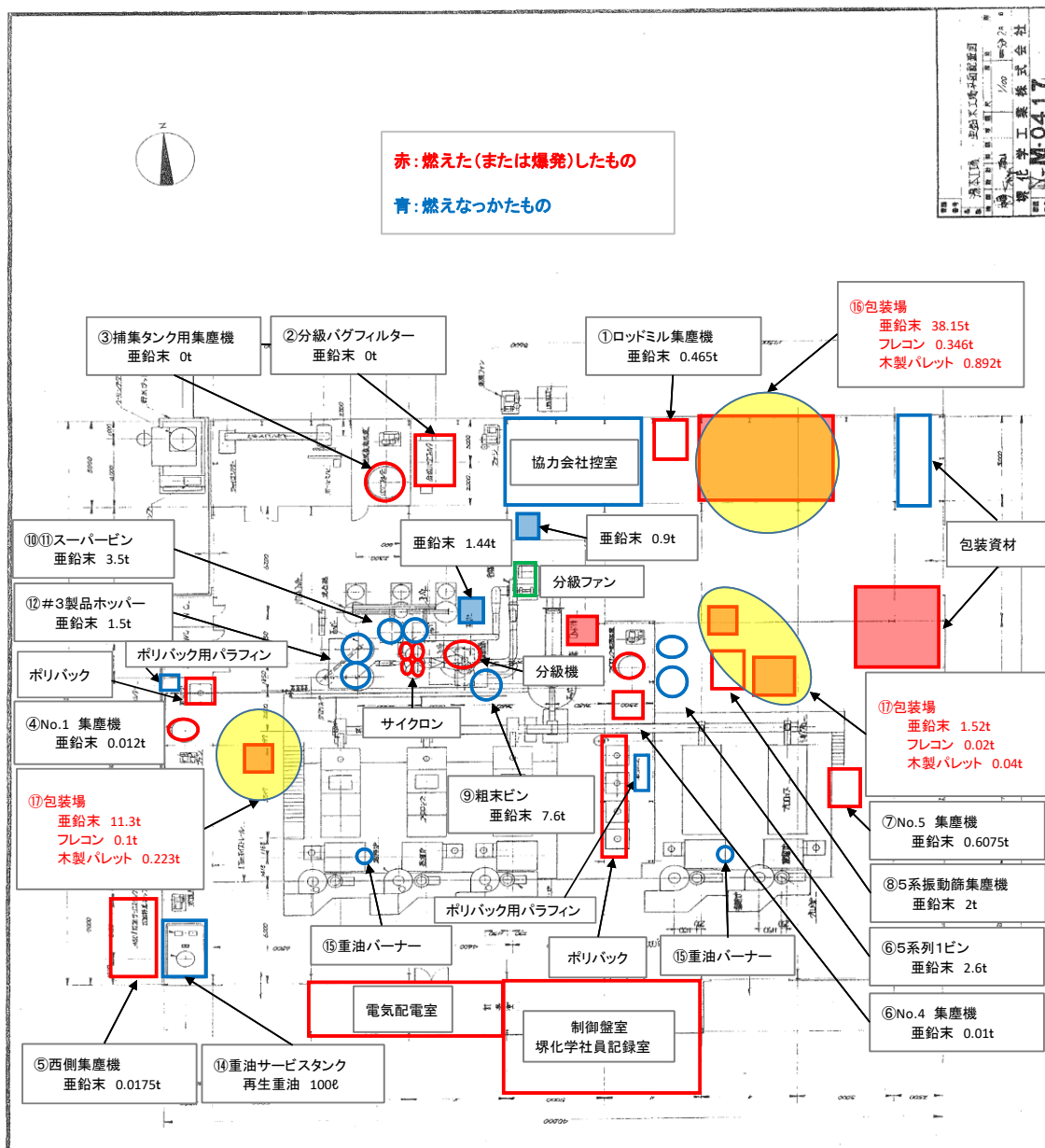


図33 亜鉛末工場内の火災状況（可燃物の保管状況含む）

そこで、これら亜鉛末仕掛品の延焼が拡大すると判断して、急遽、防火砂で覆う処置を行った。亜鉛末仕掛品の温度が完全に低下したのは、事故発生から約3週間経った5月31日であった。

5. 事故原因の整理

5. 1 事故に至ったシナリオ

事故に至ったシナリオ事象の概要を、表7に示す。

表7 事故に至ったシナリオ事象

		事象
第一段階	爆発	<ul style="list-style-type: none"> ・分級工程の運転をスタート ・分級ファンのシャフトがずれてケーシングと接触 ・分級ファンの異常振動がマルチサイクロンへ伝わり、堆積亜鉛末が浮遊し、空気流によって工程内に拡がる。 ・ケーシング部が発熱し、衝撃火花（すなわち、高温の金属摩耗片）が発生し、分級ファン内で火炎伝播（粉じん爆発）が開始する。 ・爆発によって生じた火炎が、分級機セパレーター、マルチサイクロンおよび集塵機に伝播する。
第二段階	火災	マルチサイクロン、分級バグフィルター（集塵）の破壊により、爆風が火炎とともに建屋内に漏れて、火災となる。

詳しくは、以下のような順序で各事象が発生し、繋がり、事故に至ったと推察される。

- 1) 分級工程内に浮遊すると工程内が粉じん爆発下限濃度以上となる亜鉛末が堆積していた。
- 2) 分級ファンの高温部分の発生
 - ①分級ファンの羽根が付着したスケールの剥離により偏芯する兆候があった。
 - 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、シャフトが偏芯した。
 - ③シャフトとケーシングが接触し、衝撃火花（すなわち高温金属摩耗片）が発生し、ケーシング部は高温となった。
- 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、空気流によって分級工程内に拡がっていった。
- 4) 分級ファン内に送り込まれた浮遊亜鉛末の濃度が上昇して、浮遊亜鉛末が衝撃火花と接触・着火し、分級ファン内で火炎伝播（粉じん爆発）が開始した。
- 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、および分級バグフィルター（集塵機）で激しい損壊が発生した。
- 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したと推定された。

これら一連の事故に至ったシナリオ事象のフロー図を、図34に示す。

No.	分級工程内の状態図	状態説明
1		<p>分級ファン 稼働</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。
2		<p>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。</p>
3		<ul style="list-style-type: none"> 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

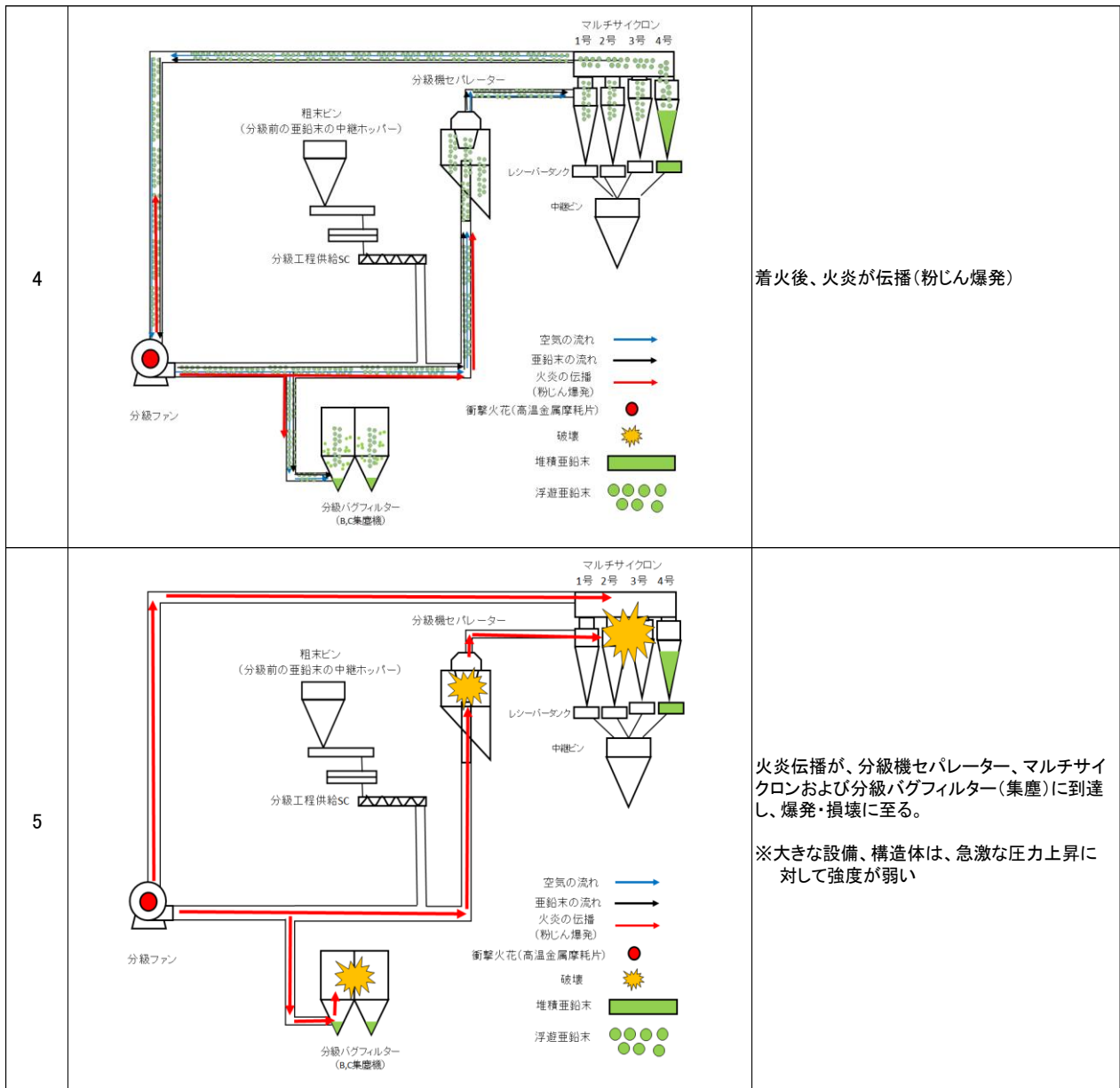


図 3 4 事故に至ったシナリオ事象のフロー図

5. 2 事故原因の整理

5. 2. 1 物質

亜鉛末は粉じん爆発を起こす物質であり、その爆発下限濃度は $1,000\text{g/m}^3$ 、最小着火エネルギーは約 200mJ 、そして、粉じん爆発クラスは St1、自然発火点は 460°C である。

亜鉛末の粒子径は数 μm ~ $100\mu\text{m}$ 程度と細かく、装置管壁に付着しやすく、密度が 7.14g/cm^3 と高く、重力沈降しやすく、堆積しやすい物質である。

したがって、亜鉛末はこれらの性質を考慮して設備を維持管理し、作業しなければ、爆発・火災事故が発生する。

5. 2. 2 人

1) 堺化学では創業以来、亜鉛末の生産・販売を行い、事業活動を続けてきた。湯本工場では 50 年間にわたって亜鉛末を生産してきた。この間、小火などのトラブルが複数回起きていたが、その都度対応策を実施し、1993 年の小火以降、約 30 年間、目立った事故はなかった。

このため、会社全体ならびに運転員の亜鉛末に対する危険性の認識が希薄になってきて、安全に運転できているという思い込みがあった。

2) この 30 年間に、当初から運転に携わっていたベテラン社員が退職し、次の世代に人が入れ替わって、亜鉛末の取り扱いに関するトラブル経験や技能が十分に継承されていなかった。特に、運転上の留意点の継承が希薄になっていた。

3) 亜鉛末の危険性と取扱いに関する教育も不十分であった。

5. 2. 3 設備

1969 年に湯本工場が完成した。1974 年から「亜鉛末」生産を開始し、1986 年からは湯本工場は亜鉛製品専用工場となった。発災設備は約 50 年運転されてきたが、適時、設備更新が行われ、外観上、老朽化している状況ではなかった。

しかし、亜鉛末は、上述のように装置や配管壁に付着しやすい物質で、付着したスケール除去や堆積粉の除去を考慮した設備設計と維持管理が不十分であった。

1) 分級ファンの羽根に付着したスケールが剥離することで、羽根回転が偏芯する兆候があったが、速やかにスケール除去等が実施されていなかった。

2) スケール付着に起因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トラブルは、今回が初めてのことであった。

3) 分級ファンのシャフトとケーシング部との接触による衝撃火花（すなわち高温金属摩耗片）の発生が起きることによって、亜鉛末が燃焼することを想定していなかった。

4) 分級バグフィルター（集塵）および他集塵機に、爆発などによる急激な内部圧力上昇に備えた圧力放散口が設置されていなかった。また、ほとんどの集塵機は建屋内に設置されていた。

5) マルチサイクロン 4 基の内、1 基の底部に詰まりがあり、亜鉛末が堆積していた。

- 6) 仕掛品および包装材料等の可燃物が工場建屋内に置かれていた。それらの可燃物は、工場内の集塵機と隔離されていなかったため、爆発後の火災が大きくなった。

5. 2. 4 作業

- 1) 作業マニュアルに、設備管理に関わる作業手順および注意事項に関する記載が不十分であった。
- 2) これまで毎日作業後に床の粉じんの除去・掃除を実施し、年1回(年末)は建屋全体の堆積粉じんの除去・掃除を実施していた。しかし、昨年、系外捕集用集塵機と集塵ダクトを整備し集塵効率のカイゼンを行ったため、年1回(年末)の全体の除去・掃除を昨年末に実施しなかった。

5. 2. 5 管理

亜鉛末の製造は、溶融亜鉛を冷却して亜鉛末を製造する工程と、亜鉛末を分級して製品に仕上げる二つの工程から成り立っている。亜鉛末製造工程は堺化学が担当し、分級・製品化工程は協力会社が担当している。

- 1) マルチサイクロン下部に詰まりの兆候があることの報告とその対応措置の実施が的確に行われなかったことなど、協力会社の安全管理、設備維持管理に対する教育と指導に、不十分なところがあった。
- 2) 協力会社の安全管理および設備管理に関する監査を行っていなかった。

6. 再発防止策

6. 1 直接原因に対する対策

6. 1. 1 物質

当該工場で取り扱っている亜鉛末は金属粉で、粉じん爆発の危険性がある物質である。また、粒子の大きさは数 μm ～100 μm 程度で、装置管壁に付着しやすく、密度が7.14g/cm³と高く、重力沈降しやすいもので堆積しやすい性質を有している。

この物質の特性に対応した設備対策と維持管理、ならびに作業基準を定める必要がある。

6. 1. 2 人

1993年の事故以降、無事故であったために、運転員の亜鉛末の危険性に関する認識が希薄になっていた。そこで、亜鉛末の危険性と取り扱い方法に関する教育を実施する必要がある。

- 1) 今回の事故を反省し、毎年5月11日に社長通達を発出し、当該工場ならびに堺化学全体で安全に関する意識の注意喚起と安全への誓いを新たにする。
- 2) 当該工場に関わる堺化学社員および協力会社社員に、年1回の頻度で、以下の社内特別教育を実施する。
 - ・製品SDSならびに亜鉛末危険性データに基づく教育
 - ・粉じんの取り扱いに関する基礎知識の教育
 - ・製造作業マニュアルで規定された取り扱い方法の周知徹底
 - ・今回の事故ならびに過去の事故事例に基づく、爆発・火災の予防に関する安全教育
- 3) 事故調査の過程で、1993年以降、無事故であったが、ヒヤリハット事例はいくつかあった。特に、マルチサイクロンの下部が閉塞しているという報告が活かされなかったことを反省し、これまで実施してきた「ヒヤリハット活動」を継続することは勿論、小さな異常も報告するよう周知し、報告のあった案件に対して適切な対策を講じるとともに、危険性の高いものは積極的に水平展開を図らなければならない。更に、毎年5月度のヒヤリハット重点項目を「爆発・火災」とし、集中して取り組む仕組みを入れ、協力会社を含めて推進する必要がある。

6. 1. 3 設備

この事故は、主に、設備の設計、ならびに維持管理の不備に起因して起きた。

1) 着火源対策

「分級ファンの羽根に付着した亜鉛末スケールの剥離による偏芯トラブル」への対応

- ・分級ファンの偏芯異常を振動センサーで検知し、緊急停止できるように計装化する。
- ・分級ファンの羽根に付着した亜鉛末スケールの除去頻度を増やす。

年2回から年4回に変更し、スケールの付着状況を見て、適正頻度の設定を行う。

2) 亜鉛末スケールの工程内詰まり対策

マルチサイクロン下部の亜鉛末の堆積は、亜鉛末スケールによって下部出口が塞がれたことによって起きた。

- ・作業マニュアルに、スケール除去できるまで運転を停止することを明記する。
- ・詰まり状態を点検しやすいように、点検口を設置し、定期点検を実施する。
詰まりがあった場合には、この点検口を利用して、治具を用いて除去作業を実施する。

3) 被害の拡大防止対策

分級工程内で粉じん爆発が発生し、その火炎が集塵機ダクトを通過して、各集塵機で粉じん爆発となり、その火炎が亜鉛末仕掛品、包装資材および電気ケーブルに燃え移り、建屋内の火災に繋がった。

- ・集塵機は基本的に屋外に設置する。
- ・集塵機には、圧力放散口を設置する。

なお、レイアウト上、屋外に設置できない場合でも、圧力放散口の向きは、必ず、屋外に向ける。

4) 建屋内に可燃物が存在し、火災規模を拡大したことへの対応

工場内の亜鉛末仕掛品、包装資材など可燃物を、集塵機から隔離保管する。

5) 電気配電室火災への対応

工場設備と電気配電室との区間で、電気ケーブル貫通部の防火施工を実施する。

6. 1. 4 作業

当該作業に関する安全衛生管理基準、設備管理基準、および注意事項が記載された詳細なマニュアルがなかった。このため、日々の床面掃除を実施していたが、堆積粉じんの除去を目的とした年1回の定期掃除を、集塵機および集塵機ダクトの整備を行い集塵効率のカイゼンを実施した理由から、直近昨年末に実施しなかった。そこで、具体的に、以下の対策を実施する必要がある。

1) 工程エリアを区分して、粉じん除去・掃除の頻度および方法を定めたマニュアルを作成する。

工程エリアの区分については、IEC (International Electrotechnical Commission 国際電気標準会議) 60079-10-2に基づいて、表8のように、ゾーン2 1と2 2の二つのゾーンと清掃基準を具体的に設定する。

表8 工程エリアのゾーン設定一覧

危険箇所	定義	対象工程エリア	社内清掃基準
ゾーン20	空気中に粉じん雲状で、連続または長期化若しくは頻繁に存在する場所	対象外（設備内）	
ゾーン21	通常の運転中において、空気中に粉じん雲状で時々生成させる可能性がある場所	製品包装場	毎日 目視で堆積無い事
ゾーン22	通常の運転中において、空気中に粉じん雲状で生成させる可能性が少なく、生成されたとしても短時間である場所	分級工程の2～4階フロアー	1カ月毎 目視で堆積無い事
		建屋梁、電気ケーブルラック、設備など	2年毎 目視で堆積無い事

- 2) 集塵機について、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する。
 ・実施頻度：年1回

6. 1. 5 協力会社の管理

- 1) 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、設備管理方法の詳細なマニュアルを作成する。
 特に、設備の日常・定期点検および製品の取り扱いに関する注意事項を周知徹底する。
- 2) 協力会社から堺化学へ報告すべき項目を明記する。
- 3) 毎年定期的に協力会社の安全監査および設備監査を実施する。
 ・内容：安全衛生管理基準の遵守状況、設備管理の実施状況
 ・頻度：最初は半年に一度とし、定着状況を見て、年1回の頻度で実施する。

6. 2 関連事項の水平展開（カイゼン）

6. 2. 1 会社全般

- 1) これまで「全社安全衛生方針」を年度毎に定めて安全衛生活動を展開してきたが、中長期の会社方針として「安全衛生基本方針」と「行動指針」を制定し、全社員に周知徹底する。
- 2) 毎年7月に開催する安全大会で、総括安全衛生管理者より事故の話題に触れ、風化させずに次の世代に語り継ぐ。
- 3) 今回の事故を反省し、事故が発生した5月度のヒヤリハット重点項目を毎年「爆発・火災」とし、各部署での職場安全会議では「爆発・火災」に関連したKYTモデルシートを活用するなど、集中して取り組む。併せて協力会社にも同様に実施する。

6. 2. 2 取り扱う物質の危険性評価と周知

- 1) 堺化学で取り扱う物質、製品の粉じん爆発の危険性を総点検する。
粉じん爆発の危険性がある製品については、外部機関で爆発性評価を行い、その結果を担当部署に周知し、定期的に社内安全教育を実施する。
- 2) 粉じん爆発の危険性がある製品に対しては、作業マニュアルを見直し、具体的な作業および注意事項を明記する。
- 3) 粉じん爆発の危険性がある製品を取り扱う工場においては、同工場内の仕掛品や包装資材などの可燃物を、安全に保管する。

6. 2. 3 設備対策

- 1) 粉じん爆発の危険性がある製品の製造工場内にある回転機械に対しては、振動検知センサーを取り付け、異常検知時には運転停止する安全計装システムを検討する。
- 2) 集塵機は、屋外設置することを基本とする。
特に、粉じん爆発の危険性がある製品に対しては、集塵機を屋外に設置する。
更に、集塵機には、圧力放散口を設置する。
集塵機が屋内に設置されている場合には、圧力放散口の向きを屋外にする。

6. 2. 4 管理対策

- 1) 協力会社を含め職場で起きている小さな設備異常などのヒヤリハットが報告されるように、周知徹底する。
- 2) 協力会社の安全監査および設備監査を定期実施する。
- 3) 協力会社の教育体制、特に取り扱う物質の危険性に関する教育を実施する。

6. 2. 5 その他

- 1) 万一、禁水性物質の爆発火災事故が発生した際に、円滑に消火活動が出来るように、防火砂を該当工場内に常備保管、維持するようにする。

6. 3. 今後の課題

6. 3. 1 人の育成と技能継承

職場からベテラン社員が退職し、新たな世代に移行してきている。ベテラン社員が有していた経験や技能が次の世代に継承できているとはいえない。

一方、設備の新設、増設の機会が少なくなり、OJTを通して人材を育成することが難しくなってきた。

この状況を踏まえて、これからの人材育成に対して、対策を講じる必要がある。

- 1) 作業マニュアルを、現場の実情に合わせて改定する。併せて、作業マニュアルを理解する機会を設ける。
- 2) 限られた OJT の機会を有効に活用するために、これからの製造現場、安全マネジメント

を担う人材を計画的に育成する。

- 3) 社員の資格取得・教育研修の履修情報をデータベース化し、各部門・部署で必要な資格の取得や教育研修の受講を計画的に実施する。

6. 3. 2 設備ならびにリスクアセスメント

人は変化し、設備も確実に経年劣化している。これらに対応するには、リスクアセスメントを、定期的に繰り返し実施していく必要がある。

リスクアセスメントの対象は、新規設備、改造、既存設備とする。

- 1) 設備の新設、改造を行う場合には、必ず設備に対するリスクアセスメントを実施する。
- 2) 既存設備は、設備の規模、取り扱う物質の危険性に応じて、定期的にリスクアセスメントを実施する。

6. 3. 3 人と機械との関係

人的能力が及ばないプラント操作および制御等は、設備システムで補う必要がある。

今回の事故で、分級ファンの異常振動およびサイクロン下部の閉塞などが問題になった。

分級ファンの異常振動の発端となったベアリングボックスの破断異常は、起動開始数分で起きており、人間の能力では対応することが難しいと判断する。これらは、進歩している最新のセンサー技術および安全計装技術を取り入れて、設備状態を監視し、安全に停止させるシステムが求められる。メンテナンスは、事後保全体制から、時間基準の予防保全体制に移行し、設備点検や修理のインターバルを見直す必要がある。特に、回転機械に対しては、上述のセンサー技術を取り入れて予知保全も取り入れていく必要がある。

6. 3. 4 協力会社の管理

この事故は協力会社が業務請負していた「分級工程」で発生した。

これまでの状況をみると、統括管理責任は業務を依頼した堺化学にあるが、業務実態は協力会社が良く知っており、経験も有している。

このような状況での管理は、業務依頼者である堺化学と協力会社との密接な連携体制が不可欠である。特に、業務上の気掛かり事項は確実に、協力会社から業務依頼者である堺化学に迅速かつ確実に報告され、対策について協議する場を設ける必要がある。

あわせて、業務依頼者である堺化学による定期的な安全監査、ならびに設備監査も有効な管理手法と考える。粉じん爆発の危険性がある製品の製造工場に関わる協力会社に対して、年1回の頻度で安全監査と設備監査を実施する必要がある。

7. おわりに

事故調査委員長総括

この事故は亜鉛末の粉じん爆発事故で、重軽傷者 4 名の被害者を出し、近隣の皆様にも影響が及び大きな被害が出ました。

原因調査は、社外委員 3 名、社内委員 5 名で構成する事故調査委員会と下部組織として事故原因究明チームの下で行われました。粉じん爆発に続いて起きた火災によって運転記録が焼失していたために、現場の設備損壊状況と関係者からの聞き取り調査に基づいて、事故発生シナリオを想定し、その妥当性を現場の状況と照合し、また、発生シナリオを見直し妥当性を検証し直すことを繰り返すことによって結論に辿り着けたと考えております。

着火源は、分級ファンに付着していたスケールが、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物体や火花であることが、再現実証実験によって確認できたことにより特定できました。

事故調査を振り返り、改めて、粉じんを取り扱うことの難しさを感じます。

一つ目は、ガス爆発は燃焼の 3 要素（可燃性物質、酸素、着火源）を検討すれば発生がほぼ予測できますが、粉じん爆発は燃焼の 3 要素だけではなく、粉じんの浮遊分散状況や粉じんの粒子径なども影響する複雑な現象となり予測も困難となります。

当該工場では 1993 年に小さな事故がありましたが、それ以降は事故がなかったため、関係者は「この設備は安全である」という思い込みがあったように思われます。粉じんを取り扱うには小さな兆候を見逃さずに、“Process Safety”の観点から大きな事故につながる可能性がないかを検討していくことが重要です。日々の生産活動の中で起きるヒヤリハット、また、設備本来の姿からのずれを見つけた場合は、直ちに対策を講じることが重要です。日々の安全活動の中で、「ヒヤリハット報告活動」、「気がかり事項報告活動」をさらに強化していく必要があります。

二つ目は、粉じん爆発防止の基本は、粉じんを堆積させないことです。当該工場は建屋内は比較的きれいに清掃されていましたが、亜鉛末粉じんは付着しやすい性質があるために、分級ファンや分級機セパレーターファンにスケールが付着していたこと、サイクロンに粉じん堆積がありました。

スケール付着については、振動センサーを取り付けて回転体の振動音を連続的に監視し、異常があれば停止する予知保全システムの導入、配管を含む設備内の粉じん堆積は、点検口を取り付けて定期的に点検し取り除くことにしました。

三つ目は、粉じん爆発は一次爆発に続いて二次爆発が起きると大規模になります。粉じんが最も滞留する設備は集じん機です。集じん機の屋外設置、圧力放散口の取り付けは、各設備の接地の徹底と共に、粉体プロセスに関する重要事項と考えます。

全体を総括して、小さな逸脱が繰り返されると、遂には大きな事故につながることを感じます。「これくらいは大丈夫」ではなく、設備やプラントの正常運転状態はどんな状態かを念頭に置いて、正常状態とは違う兆候を見つけたならば直ちに対処することが必要です。

「逸脱の正常化」によって起きた事故として広く知られているのは、スペースシャトルの爆発事故です。1986年「チャレンジャー号爆発事故」は、燃焼ガスの漏れ防止ために取り付けていた「Oリング」が低温のためにシール不十分となったことによって起きましたが、関係者は「Oリング」の多少の不具合は許容可能と判断していました。2003年「コロンビア号爆発事故」は、大気圏に再突入の際に、スペースシャトル表面に張り付けてあった断熱材の一部が剥離していたことによって起きましたが、関係者は多少の剥離は許容可能と判断していました。すなわち、いずれの事故も「逸脱の正常化」が背景要因になっております。

粉じん爆発事故を防止するには、粉じんを溜めないようにすることが基本ですが、「これまで事故が起きていないから大丈夫」ではなく、可燃性粉じんは常に爆発の危険性があることを念頭において、事故につながる小さな兆候を見逃さずに対処していくことが必要です。

本調査報告書が、当該設備の事故再発防止はもちろんのこととして、他事業所さらには他社の類似設備の事故防止にも寄与できることを願っております。

堺化学工業株式会社湯本工場爆発火災事故調査委員会委員長

東京工業大学 大学院環境・社会理工学院 特任教授 中村昌允



試 験 結 果 書

依 頼 者	堺化学工業株式会社	
試 験 の 種 類	粉体の爆発性の有無及び爆発下限濃度(吹上げ式)	
試 料	亜鉛末 #3	
試 験	測 定 装 置	<p>JIS Z 8818 : 2002“可燃性粉じんの爆発下限濃度測定方法”に 定める吹上げ式試験装置を使用した。</p> <p>すなわち、内径 7cm, 内容積1.2Lの硬質ガラス製爆発筒内に、試料粉体を下部から加圧空気で吹き上げて分散させ、着火源には2次側出力15kV, 容量20mAのネオントランスによる放電火花を用いる爆発試験装置である。</p>
	測 定 方 法	<p>上記の規格に定める方法に準拠した。</p> <p>すなわち、一定量の粉体を筒内に吹き上げるとほぼ同時（放電開始時間0.1秒）に、放電火花を発生させ、このとき粉じん雲が爆発するか否かを目視により判定する。必要に応じて空気の圧力等を変化させて、この操作を繰り返し、爆発性を示す最低粉じん濃度を爆発下限濃度（見掛けの爆発下限濃度）とする。</p>
受 付 番 号 (受 付 年 月 日)	C21-042 2021年6月23日	
試 験 結 果	別紙(1/1)のとおりです。	

2021年 7月 13日

公益社団法人 産業安全技術協会 会長



様式-702-01B

試 験 結 果

依 頼 者 : 堺化学工業株式会社

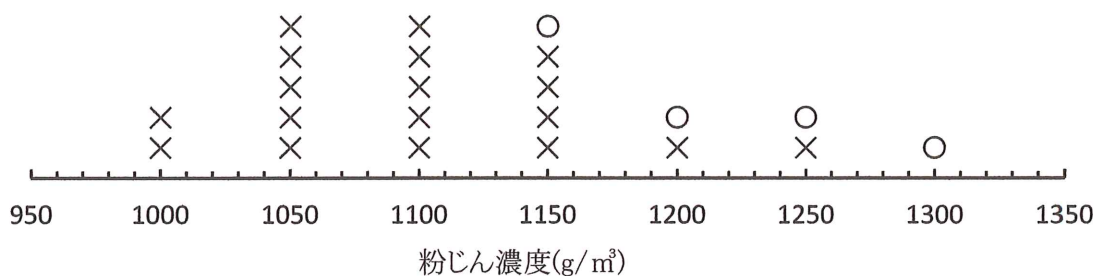
試 料 : 亜鉛末 #3

試験条件 : 温度23℃ 湿度65% 吹き上げ圧力 50~70kPa

粉じん濃度 (g/m ³)	爆発の有無	粉じん濃度 (g/m ³)	爆発の有無
(1000)	×	1100	×
(1000)	×	1150	×
1050	×	1150	×
1050	×	1150	×
1050	×	1150	×
1050	×	1150	○
1050	×	1200	×
1100	×	1200	○
1100	×	1250	×
1100	×	1250	○
1100	×	1300	○

○ : 爆発有り × : 爆発無し

() : 参考計測値



以上の結果により、この試料の爆発下限濃度は1150 g/m³となる。

なお、試験は5回繰り返すが、爆発が確認された回で中止した。
本試験データおよび結果は、提供された試験試料についてのみ有効であり、
また試料の粒子径分布が変化すれば、異なる結果となることに注意すること。



試 験 結 果 書

依 頼 者	堺化学工業株式会社	
試 験 の 種 類	粉体の爆発圧力特性(20L容器法)	
試 料	亜鉛末 #3	
試 験	測 定 装 置	<p>JIS Z 8817:2002 “可燃性粉じんの爆発圧力及び圧力上昇速度測定方法”の附属書1並びに、“Explosive atmospheres -Part 20-2:Material characteristics - Combustible dusts test methods”の”7.2 20-litre sphere”に定める20L球形粉じん爆発試験装置を使用した。</p> <p>この装置は、密閉したステンレス鋼製20L球形爆発容器内に、減圧下で試料粉体を、下部から高压空気で吹き上げて分散させ、容器中心部の化学着火剤に電流を与えて点火したときに発生する10kJのエネルギーを用いて試料粉体を着火させる構造である。爆発圧力測定は、容器壁に設置した2個の圧力変換器と記録計を接続して行う。</p>
	測 定 方 法	<p>上記の規格に定める方法に準拠した。⁽¹⁾</p> <p>すなわち、容器底部に一定量の試料粉体を入れたのち、密閉して減圧し、高压空気で粉体を吹き上げるとほぼ同時に、着火剤を点火して粉じん雲に着火する。このときの2箇所の圧力変換器により求められた爆発圧力-時間曲線の記録の平均値から、爆発圧力、圧力上昇速度を算出し、1m³円筒形爆発容器で測定した値に相当するように補正する。粉じん濃度と爆発圧力並びに圧力上昇速度の関係を求め、それらの最大値を表示する。さらに、K_{St}値を算出して、対応の粉じん爆発クラスを表示する。</p> <p>⁽¹⁾:規格では、「通常、受理した粉体をそのまま試験に供するが、可能な限り試験粉体はJIS Z 8801-1に規定する目開き63μmのふるい通過品とする。」と規定しているが、今回の試験では提供された試料をそのままを使用した。</p>
受 付 番 号 (受付年月日)	C21-044 2021年6月23日	
試 験 結 果	別紙(1/3)~(3/3)のとおりです。	

2021年 7月 13日

公益社団法人 産業安全技術協会 長



試験結果のまとめ

依頼者： 堺化学工業株式会社

試料： 亜鉛末 #3

最大爆発圧力 P_{\max} [$\times 10^2$ kPa, Gauge](平均値)	5.1
最大圧力上昇速度(最大値) $(dp/dt)_{\max}$ [$\times 10^2$ kPa/s](平均値)	245
爆発指数 K_{St} [$\times 10^2$ kPa \cdot m/s](平均値)	66
粉じん爆発クラス	St 1

【備考】

- 1) 測定値は、提供された粉体試料についてのみ有効である。粒子径分布が変わると測定値が異なるので、安全上特に注意されたい。
- 2) 最大爆発圧力 P_{\max} は、最適粉じん濃度における爆発圧力 P の最大値である。
なお、爆発圧力は、JIS Z 8817で基準とする1m³ 円筒形爆発容器で測定した値に相当するように、同JIS記載の換算式を用いて補正した値(ゲージ圧)である。
- 3) 最大圧力上昇速度 $(dp/dt)_{\max}$ とは、最適粉じん濃度における爆発圧力の時間に対する変化率の最大値をいう。
- 4) 爆発指数 K_{St} とは、測定容器の容積 V (本試験設備では20L=0.02m³) に対して次式で求められる数値である(単位:10² kPa \cdot m/s)。

$$K_{St} = (dp/dt)_{\max} \times V^{1/3}$$

この数値は1m³ 容器中における最大圧力上昇速度(最大値)に相当し、爆発の激しさを表わす特性値である。

- 5) JIS Z 8817:2002の解説によると、粉じん爆発クラス:St 0~St 3は、 K_{St} 値によって次のように分類される。

爆発クラス	K_{St}	爆発の激しさ
St 0	0	爆発せず
St 1	1~200	弱
St 2	201~300	強
St 3	301~	激

試験結果

	粉じん濃度 (g/m ³)	1回目	2回目	3回目	平均値
爆発圧力 P ($\times 10^2$ kPa, Gauge) (ピーク値)	3000	4.3	4.6	4.7	4.5
	4000	5.4	5.0	4.8	<u>5.1</u>
	5000	5.1	4.8	4.8	4.9

	粉じん濃度 (g/m ³)	1回目	2回目	3回目	平均値
爆発圧力上昇速度 dp/dt ($\times 10^2$ kPa/s) (ピーク値)	3000	154	152	198	168
	4000	296	228	210	<u>245</u>
	5000	256	193	199	216

上表のデータから

- 最大爆発圧力 $P_{\max} = 5.1 \times 10^2$ kPa (ゲージ圧) (下線で示す平均値)
- 最大圧力上昇速度の最大値 $(dp/dt)_{\max} = 245 \times 10^2$ kPa/s (下線で示す平均値)
- 爆発指数 $K_{St} = 245 \times 10^2 \times 0.02^{1/3} = 66 \times 10^2$ kPa·m/s (平均値) となる。

粉じん濃度と爆発圧力の関係を図-1に、粉じん濃度と最大圧力上昇速度の関係を図-2に示す。

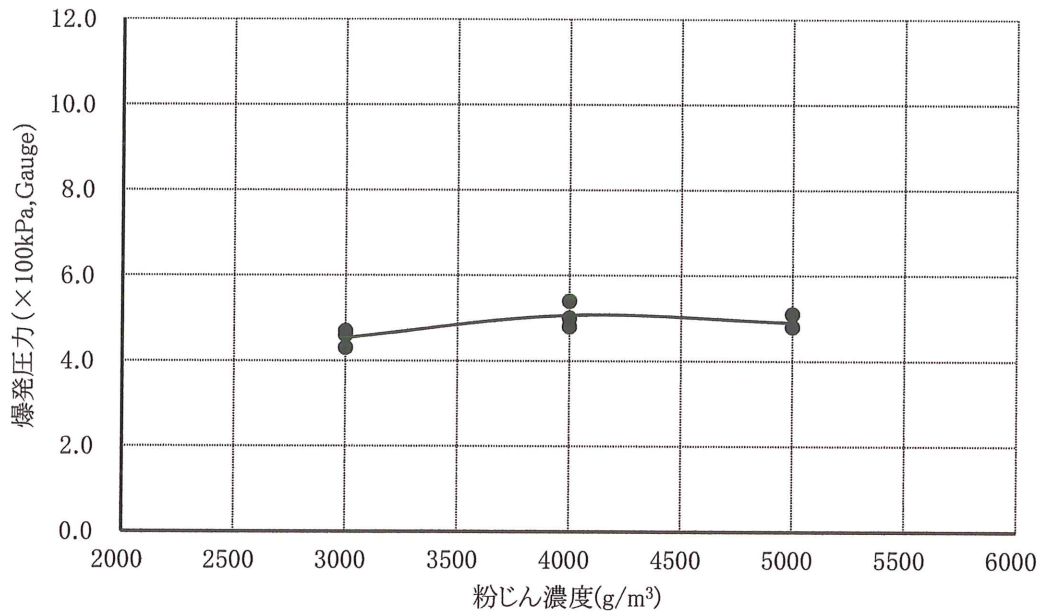


図-1 粉じん濃度と爆発圧力の関係

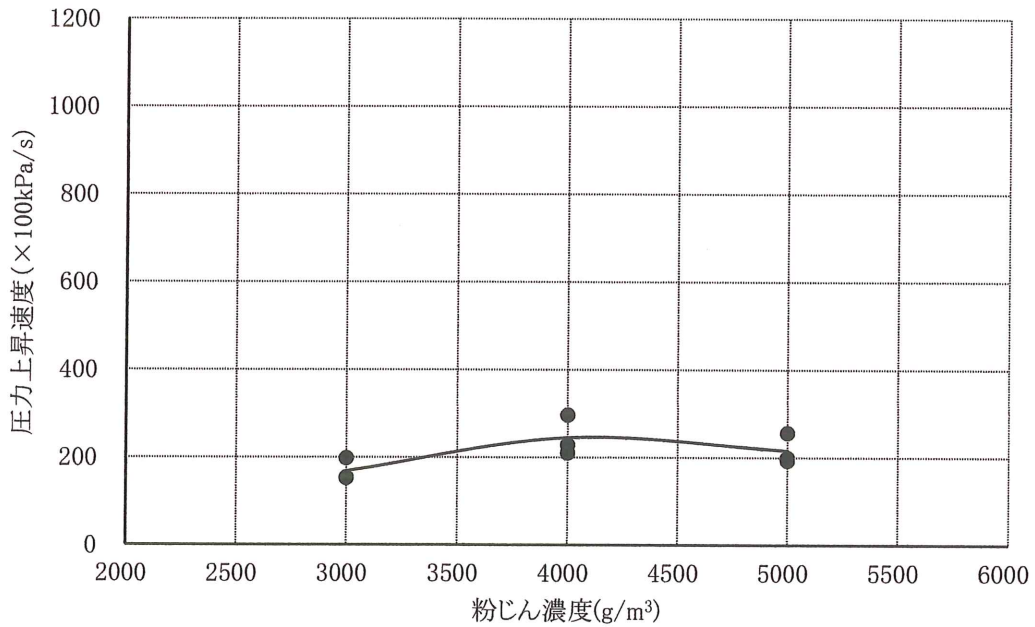


図-2 粉じん濃度と圧力上昇速度の関係

本試験データおよび結果は、提供された試験試料についてのみ有効であり、また、試料の粒径分布が変化すれば、異なる結果となることに注意すること。



試 験 結 果 書

依頼者	堺化学工業株式会社	
試験の種類	浮遊粉体の最小着火エネルギー (インダクタンス有り)	
試料	亜鉛末 #3	
試験	測定装置	<p>国際規格“ ISO/IEC 80079-20-2 Edition 1.0 2016-02 : 8.3 Method for determining minimum ignition energy of dust/air mixtures” に準拠して製作されたAdolf Kühner AG社製の最小着火エネルギー測定装置(MIKE 3型)を使用した。 この装置は、放電エネルギーを容量放電形式で、1mJ, 3mJ, 10mJ, 30mJ, 100mJ, 300mJ及び1Jの7段階に変えることができ、また試料粉を圧縮空気により吹き上げて1.2Lの爆発筒内に分散させる方法を採用している。</p>
	測定方法	<p>上記装置の使用マニュアルに定められた方法による⁽¹⁾。 すなわち、所定の試料量と放電エネルギーとによる試験を10回行って着火の有無を調べ、1回でも着火すれば、その条件で着火性があると判定する。</p> <p>次に、試料量と放電エネルギーを種々変化させてこの操作を繰り返し、試料量ごとに所定の放電エネルギーによる着火の有無を求め、必要ならば、着火遅延時間を変更して着火の有無を求める。 試料量と放電エネルギーの関係をグラフにプロットし、着火領域と非着火領域の範囲を明示する。 最小着火エネルギー(E_{min})は、着火した最小の放電エネルギー(E_1)と着火しなかった最大の放電エネルギー(E_2)との間に存在する($E_2 < E_{min} < E_1$)。</p> <p>⁽¹⁾: 規格では、「試料粒子径が不明な場合は、$63\mu m$以下で試験する。」ことを推奨しているが、今回の試験では提供された試料をそのままを使用した。</p>
受付番号 (受付年月日)	C21-046 2021年6月23日	
試験結果	別紙(1/2)~(2/2)のとおりです。	

2021年 7月 13日

公益社団法人 産業安全技術協会長



試 験 結 果

依 頼 者 : 堺化学工業株式会社

試 料 : 亜鉛末 #3

試料量 (g)	粉じん濃度 (g/m ³)	放電エネルギー (mJ)	着火遅延時間 (ms)	着火の有無
1.2	1000	1000	120	×
〃	〃	1000	90	×
〃	〃	1000	60	×
1.8	1500	1000	120	×
〃	〃	1000	90	×
〃	〃	1000	60	○ *3
〃	〃	300	60	×
2.4	2000	1000	120	×
〃	〃	1000	90	○ *8
〃	〃	300	90	×
〃	〃	300	60	×
3.0	2500	1000	120	○ *1
〃	〃	300	120	×
〃	〃	300	90	×
〃	〃	300	150	×
3.6	3000	300	120	×
〃	〃	300	150	○ *6
〃	〃	100	150	×
〃	〃	100	180	×
4.2	3500	300	150	○ *2
〃	〃	100	150	×
〃	〃	100	180	×

○ : 着火有り, × : 着火無し

備考: 1) 同一条件で10回試験を行い、1度も着火しなかった場合を×とした。

2) *の後の数字は、繰返し試験のうち、何回目に着火したかを示す。

3) 一般に、放電回路内に適量のインダクタンスを接続すると着火しやすくなることが知られているので、通常1 mH のインダクタンスを接続してある。



上記の結果を粉じん濃度と放電エネルギーの関係としてプロットしたものが次図である。すなわち、この試料の最小着火エネルギー (E_{min}) は、 $100 \text{ mJ} < E_{min} < 300 \text{ mJ}$ であり、その統計的最小着火エネルギー (E_s)⁽²⁾ は、219 mJとなる。

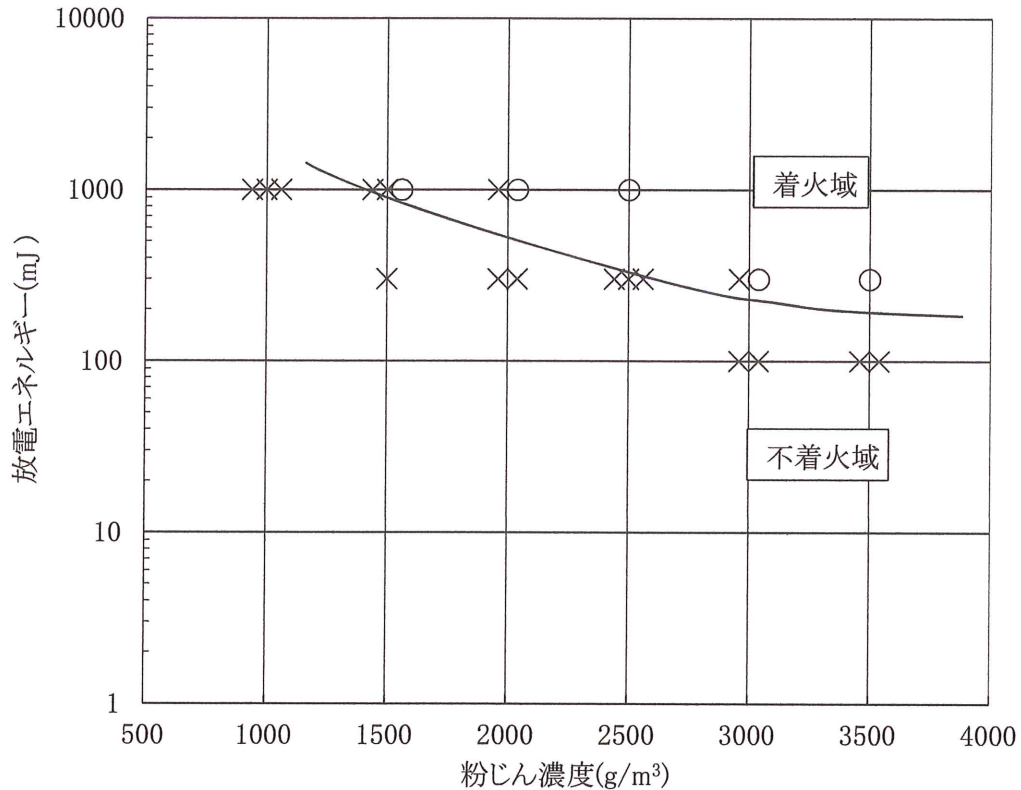


図 粉じん濃度と放電エネルギーの関係

本試験データおよび結果は提供された試験試料についてのみ有効であり、また、試料の粒子径分布が変化すれば、異なる結果となることに注意すること。

⁽²⁾：統計的最小着火エネルギーは、JIS Z 8834:2016に記載されている算出式を基に計算している。



試 験 結 果 書

依 頼 者	堺化学工業株式会社	
試 験 の 種 類	粉体の爆発性の有無及び爆発下限濃度(吹上げ式)	
試 料	亜鉛末 バグフィルター下粉末	
試 験	測 定 装 置	JIS Z 8818 : 2002“可燃性粉じんの爆発下限濃度測定方法”に 定める吹上げ式試験装置を使用した。 すなわち、内径 7cm, 内容積1.2Lの硬質ガラス製爆発筒内に、試料粉体を下部から加圧空気で吹き上げて分散させ、着火源には2次側出力15kV, 容量20mAのネオントランスによる放電火花を用いる爆発試験装置である。
	測 定 方 法	上記の規格に定める方法に準拠した。 すなわち、一定量の粉体を筒内に吹き上げるとほぼ同時（放電開始時間0.1秒）に、放電火花を発生させ、このとき粉じん雲が爆発するか否かを目視により判定する。必要に応じて空気の圧力等を変化させて、この操作を繰り返し、爆発性を示す最低粉じん濃度を爆発下限濃度（見掛けの爆発下限濃度）とする。
受 付 番 号 (受 付 年 月 日)	C21-043 2021年6月23日	
試 験 結 果	別紙(1/1)のとおりです。	

2021年 7月 13日

公益社団法人 産業安全技術協会長



様式-702-01B



試 験 結 果 書

依頼者	堺化学工業株式会社	
試験の種類	粉体の爆発圧力特性(20L容器法)	
試料	亜鉛末 バグフィルター下粉末	
試験	測定装置	<p>JIS Z 8817:2002 “可燃性粉じんの爆発圧力及び圧力上昇速度測定方法”の附属書1並びに、“Explosive atmospheres -Part 20-2:Material characteristics - Combustible dusts test methods”の”7.2 20-litre sphere”に定める20L球形粉じん爆発試験装置を使用した。</p> <p>この装置は、密閉したステンレス鋼製20L球形爆発容器内に、減圧下で試料粉体を、下部から高圧空気で吹き上げて分散させ、容器中心部の化学着火剤に電流を与えて点火したときに発生する10kJのエネルギーを用いて試料粉体を着火させる構造である。爆発圧力測定は、容器壁に設置した2個の圧力変換器と記録計を接続して行う。</p>
	測定方法	<p>上記の規格に定める方法に準拠した。⁽¹⁾</p> <p>すなわち、容器底部に一定量の試料粉体を入れたのち、密閉して減圧し、高圧空気で粉体を吹き上げるとほぼ同時に、着火剤を点火して粉じん雲に着火する。このときの2箇所の圧力変換器により求められた爆発圧力-時間曲線の記録の平均値から、爆発圧力、圧力上昇速度を算出し、1m³円筒形爆発容器で測定した値に相当するように補正する。粉じん濃度と爆発圧力並びに圧力上昇速度の関係を求め、それらの最大値を表示する。さらに、K_{St}値を算出して、対応の粉じん爆発クラスを表示する。</p> <p>⁽¹⁾:規格では、「通常、受理した粉体をそのまま試験に供するが、可能な限り試験粉体はJIS Z 8801-1に規定する目開き63μmのふるい通過品とする。」と規定しているが、今回の試験では提供された試料をそのままを使用した。</p>
受付番号 (受付年月日)	C21-045 2021年6月23日	
試験結果	別紙(1/3)～(3/3)のとおりです。	

2021年 7月 13日

公益社団法人 産業安全技術協会長



試験結果のまとめ

依頼者： 堺化学工業株式会社

試料： 亜鉛末 バグフィルター下粉末

最大爆発圧力 P_{\max} [$\times 10^2$ kPa, Gauge](平均値)	5.0
最大圧力上昇速度(最大値) $(dp/dt)_{\max}$ [$\times 10^2$ kPa/s](平均値)	287
爆発指数 K_{St} [$\times 10^2$ kPa \cdot m/s](平均値)	78
粉じん爆発クラス	St 1

【備考】

- 1) 測定値は、提供された粉体試料についてのみ有効である。粒子径分布が変わると測定値が異なるので、安全上特に注意されたい。
- 2) 最大爆発圧力 P_{\max} は、最適粉じん濃度における爆発圧力 P の最大値である。
なお、爆発圧力は、JIS Z 8817で基準とする1m³ 円筒形爆発容器で測定した値に相当するように、同JIS記載の換算式を用いて補正した値(ゲージ圧)である。
- 3) 最大圧力上昇速度 $(dp/dt)_{\max}$ とは、最適粉じん濃度における爆発圧力の時間に対する変化率の最大値をいう。
- 4) 爆発指数 K_{St} とは、測定容器の容積 V (本試験設備では20L=0.02m³) に対して次式で求められる数値である(単位: 10² kPa \cdot m/s)。

$$K_{St} = (dp/dt)_{\max} \times V^{1/3}$$

この数値は1m³ 容器中における最大圧力上昇速度(最大値)に相当し、爆発の激しさを表わす特性値である。

- 5) JIS Z 8817:2002の解説によると、粉じん爆発クラス: St 0～St 3は、 K_{St} 値によって次のように分類される。

爆発クラス	K_{St}	爆発の激しさ
St 0	0	爆発せず
St 1	1～200	弱
St 2	201～300	強
St 3	301～	激

試験結果

	粉じん濃度 (g/m ³)	1回目	2回目	3回目	平均値
爆発圧力 P ($\times 10^2$ kPa, Gauge) (ピーク値)	5000	4.7	4.7	4.7	4.7
	6000	5.1	4.8	5.0	<u>5.0</u>
	7000	4.7	4.8	4.8	4.8

	粉じん濃度 (g/m ³)	1回目	2回目	3回目	平均値
爆発圧力上昇速度 dp/dt ($\times 10^2$ kPa/s) (ピーク値)	5000	208	242	231	227
	6000	346	271	243	<u>287</u>
	7000	222	253	255	243

上表のデータから

- 最大爆発圧力 $P_{\max} = 5.0 \times 10^2$ kPa (ゲージ圧) (下線で示す平均値)
- 最大圧力上昇速度の最大値 $(dp/dt)_{\max} = 287 \times 10^2$ kPa/s (下線で示す平均値)
- 爆発指数 $K_{St} = 287 \times 10^2 \times 0.02^{1/3} = 78 \times 10^2$ kPa \cdot m/s (平均値)となる。

粉じん濃度と爆発圧力の関係を図-1に、粉じん濃度と最大圧力上昇速度の関係を図-2に示す。



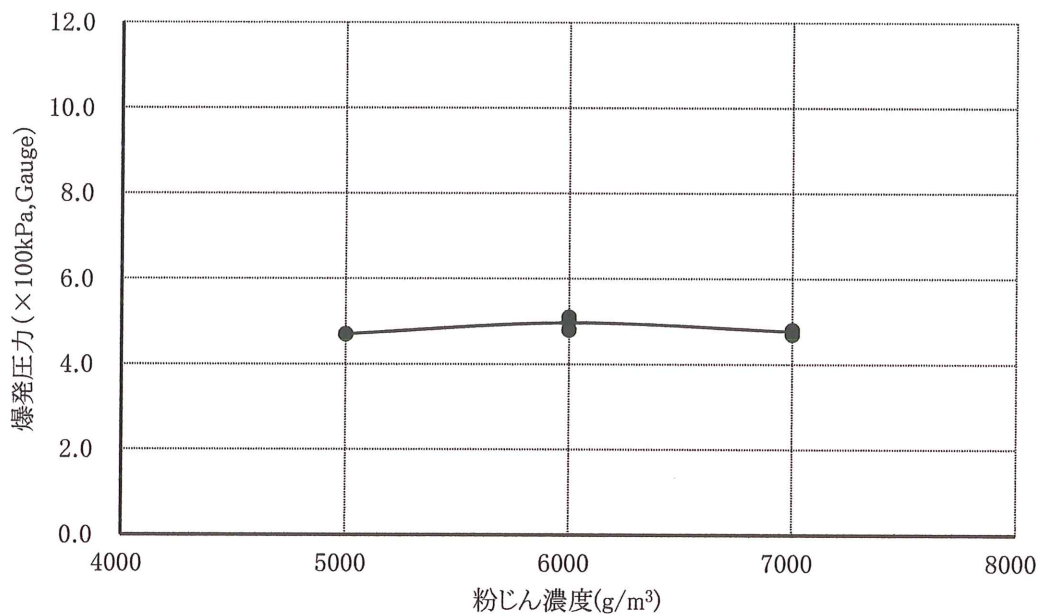


図-1 粉じん濃度と爆発圧力の関係

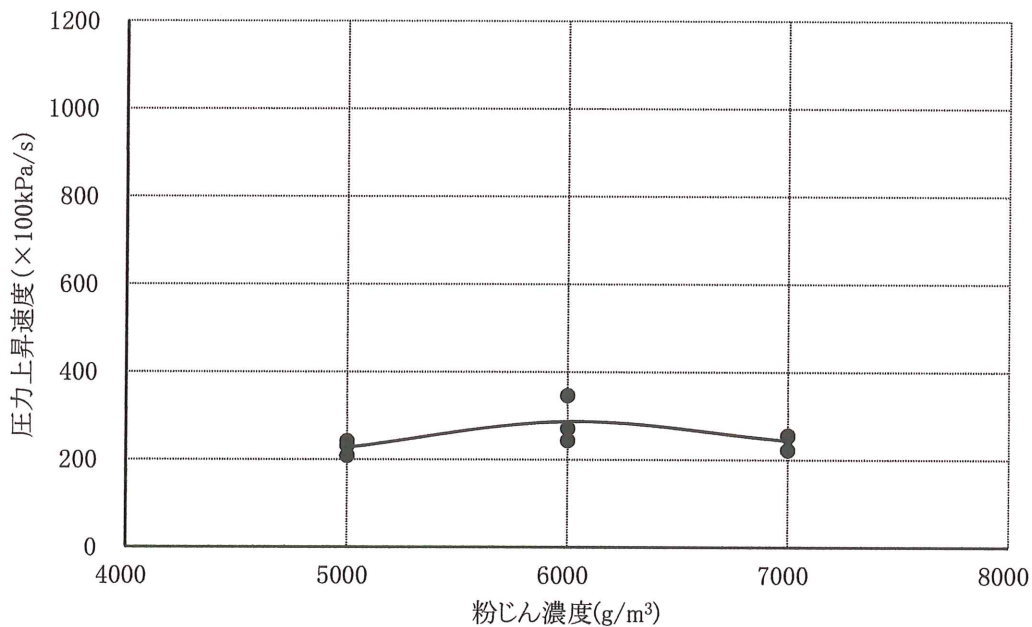


図-2 粉じん濃度と圧力上昇速度の関係

本試験データおよび結果は、提供された試験試料についてのみ有効であり、また、試料の粒径分布が変化すれば、異なる結果となることに注意すること。





試 験 結 果 書



依 頼 者	堺化学工業株式会社	
試 験 の 種 類	浮遊粉体の最小着火エネルギー (インダクタンス有り)	
試 料	亜鉛末 バグフィルター下粉末	
試 験	測 定 装 置	<p>国際規格“ ISO/IEC 80079-20-2 Edition 1.0 2016-02 : 8.3 Method for determining minimum ignition energy of dust/air mixtures” に準拠して製作されたAdolf Kühner AG社製の最小着火エネルギー測定 装置(MIKE 3型)を使用した。 この装置は、放電エネルギーを容量放電形式で、1mJ, 3mJ, 10mJ, 30mJ, 100mJ, 300mJ及び1Jの7段階に変えることができ、また試料粉を 圧縮空気により吹き上げて1.2Lの爆発筒内に分散させる方法を採用し ている。</p>
	測 定 方 法	<p>上記装置の使用マニュアルに定められた方法による⁽¹⁾。 すなわち、所定の試料量と放電エネルギーとによる試験を10回行って着火 の有無を調べ、1回でも着火すれば、その条件で着火性があると判定する。</p> <p>次に、試料量と放電エネルギーを種々変化させてこの操作を繰り返し、 試料量ごとに所定の放電エネルギーによる着火の有無を求め、必要なら ば、着火遅延時間を変更して着火の有無を求める。 試料量と放電エネルギーの関係をグラフにプロットし、着火領域と非着火 領域の範囲を明示する。 最小着火エネルギー(E_{min})は、着火した最小の放電エネルギー(E_1) と着火しなかった最大の放電エネルギー(E_2)との間に存在する ($E_2 < E_{min} < E_1$)。</p> <p>⁽¹⁾: 規格では、「試料粒子径が不明な場合は、$63\mu m$以下で試験する。」 ことを推奨しているが、今回の試験では提供された試料をそのままを使用 した。</p>
受 付 番 号 (受付年月日)	C21-047 2021年6月23日	
試 験 結 果	別紙(1/2)～(2/2)のとおりです。	

2021年 7月 13日

公益社団法人 産業安全技術協会長



試 験 結 果

依 頼 者 : 堺化学工業株式会社
 試 料 : 亜鉛末 バグフィルター下粉末

試料量 (g)	粉じん濃度 (g/m ³)	放電エネルギー (mJ)	着火遅延時間 (ms)	着火の有無
1.8	1500	1000	120	×
〃	〃	1000	90	×
〃	〃	1000	60	×
2.4	2000	1000	120	×
〃	〃	1000	90	○ *9
〃	〃	300	90	×
〃	〃	300	60	×
3.0	2500	1000	120	○ *1
〃	〃	300	120	×
〃	〃	300	90	×
〃	〃	300	150	×
3.6	3000	300	120	×
〃	〃	300	150	○ *5
〃	〃	100	150	×
〃	〃	100	180	×
4.2	3500	300	150	○ *2
〃	〃	100	150	×
〃	〃	100	180	×
4.8	4000	300	150	○ *3
〃	〃	100	150	×
〃	〃	100	180	×

○ : 着火有り, × : 着火無し

- 備考: 1) 同一条件で10回試験を行い、1度も着火しなかった場合を×とした。
 2) *の後の数字は、繰返し試験のうち、何回目に着火したかを示す。
 3) 一般に、放電回路内に適量のインダクタンスを接続すると着火しやすくなること
 が知られているので、通常1 mH のインダクタンスを接続してある。

上記の結果を粉じん濃度と放電エネルギーの関係としてプロットしたものが次図である。すなわち、この試料の最小着火エネルギー(E_{\min})は、 $100 \text{ mJ} < E_{\min} < 300 \text{ mJ}$ であり、その統計的最低着火エネルギー(E_s)⁽²⁾は、187 mJとなる。

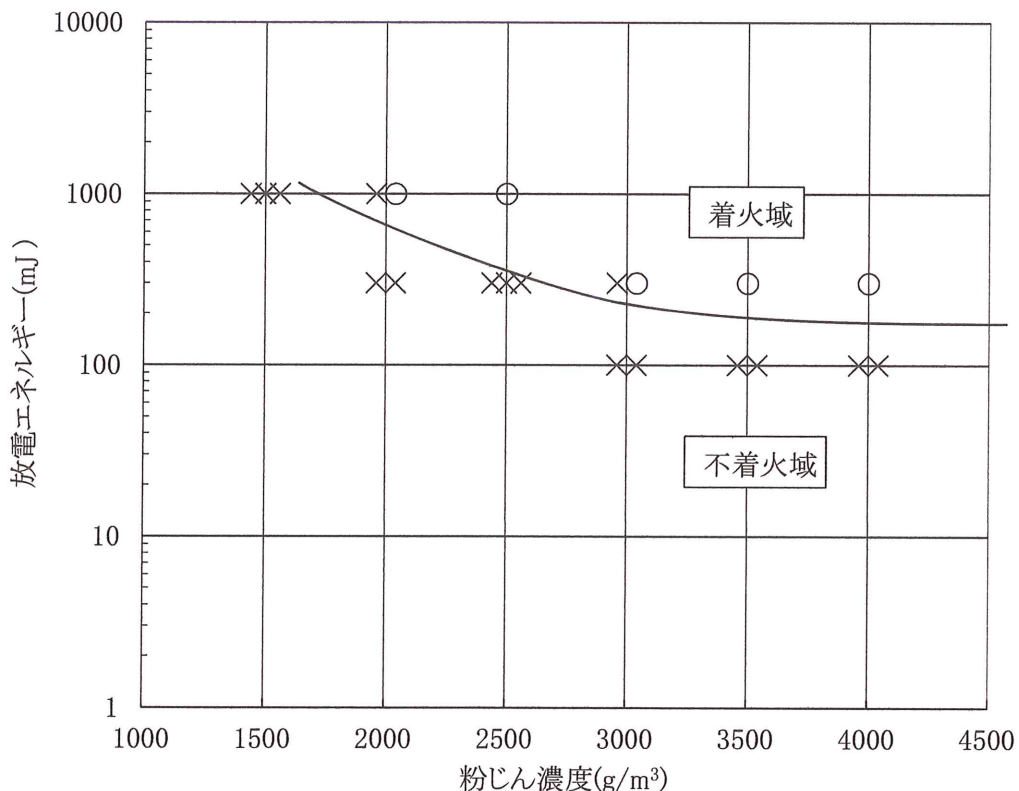


図 粉じん濃度と放電エネルギーの関係

本試験データおよび結果は提供された試験試料についてのみ有効であり、また、試料の粒子径分布が変化すれば、異なる結果となることに注意すること。

⁽²⁾：統計的最低着火エネルギーは、JIS Z 8834:2016に記載されている算出式を基に計算している。

施設課 高松様 仕様書No

1.工事件名 MD 分級設備撤去修理

2.対象機器 セパレーター:1基、分級ファン吐出側ダクト:一式、サイクロン:4基

3.数量 上記機器一式

4.工事期間 R3.9.27~10.13

株式会社小名浜製作所

TEL 56-7242

担当名 庄司 

FAX 56-7250

1. 修理内容		チェック
1) セパレーター分解、点検		○
2) セパレーター本体撤去		○
3) セパレーター下部ホッパー及びスクリュー撤去		○
4) 分級ファン下部ケーシング及びモーター撤去		○
5) 分級ファン～セパレーター間ダクト撤去		○
6) サイクロン4台撤去		○
7) セパレーター～サイクロン間ダクト撤去		○
8) 上記機器横持ち、湯本工場内に仮置き養生		○
○印は仕様範囲、作業上の問題はありませんでした。		
2. 修理後の状況		
1) セパレーターを分解、点検したところ、駆動側、反駆動側軸受ともに動作不良等の異常は確認されませんでした。又、軸受グリスにも変色は確認されず、正常でした。		
2) セパレーター羽根及びその他部品、ケーシング内部にスケールは付着していたものの、通常整備時に付着している状態と変わらず、特殊なスケールは確認されませんでした。		
3) サイクロン、ホッパー及び各ダクト内部を点検したところ、セパレーター同様特殊なスケールは確認されず、異常は確認されませんでした。		
4) その他の作業に問題点は確認されませんでした。		
5) 施工写真は別紙参照。		

施設課 高松様

仕様書No

1.工事件名 MD 分級設備撤去修理

2.対象機器 セパレーター:1基、分級ファン吐出側ダクト:一式、サイクロン:4基

3.数量 上記機器一式

4.工事期間 R3.9.27~10.13

株式会社小名浜製作所
担当名 庄司

TEL 56-7242
FAX 56-7250



写真-1. Vベルト取外し



写真-2. 駆動側軸受状況



写真-3. 分級羽根取外し

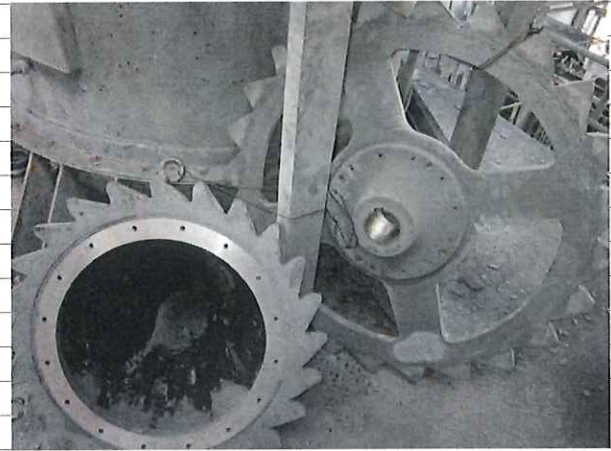


写真-4. 上下分級羽根取付台座取外し



写真-5. 中間短管取外し



写真-6. シャフト取外し

施設課 高松様

仕様書No

1.工事件名 MD 分級設備撤去修理

2.対象機器 セパレーター:1基、分級ファン吐出側ダクト:一式、サイクロン:4基

3.数量 上記機器一式

4.工事期間 R3.9.27~10.13

株式会社小名浜製作所
担当名 庄司

TEL 56-7242

FAX 56-7250



写真-7. 反駆動側軸受外輪取外し



写真-8. 反駆動側軸受内輪状況



写真-9. 駆動側軸受取外し



写真-10. 分解完了



写真-11. ケーシング内部状況



写真-12. 分解完了

施設課 高松様

仕様書No

1.工事件名 MD 分級ファン点検修理

2.対象機器 分級ファン

3.数量 1式

4.工事期間 R3.9.15~10.6

株式会社小名浜製作所

TEL 56-7242

担当名 庄司

FAX 56-7250

1. 修理内容	チェック
1) 分級ファン軸受分解、点検	○
2) 分級ファンインペラサンドブラスト前重量計測	○
2) 分級ファンインペラサンドブラスト前バランス計測	○
3) 分級ファンインペラサンドブラスト	○
4) 分級ファンインペラサンドブラスト後重量計測	○
5) 分級ファンインペラサンドブラスト後バランス計測	○
6) 分級ファンユニット納品	○

○印は仕様範囲、作業上の問題はありませんでした。

2. 修理後の状況

- 1) 分級ファン軸受を分解し、点検したところ、駆動側、反駆動側ともに軸受動作に異常は確認されず正常でした。
又、軸受グリスもほぼ変色しておらず異常は確認されず正常でした。
- 2) 軸受ハウジング内径を計測結果は下記通りで異常は確認されませんでした。
駆動側：φ 150+0.01mm
反駆動側：φ 150+0.01mm
- 3) シャフト軸受嵌め合い部寸法計測結果は下記通りで異常は確認されませんでした。
駆動側：φ 70-0.02mm
反駆動側：φ 70-0.02mm
- 4) 分級ファンインペラ重量計測結果は下記の通りです。
サンドブラスト前重量：61.539kg
サンドブラスト後重量：57.770kg
スケール重量：61.539-57.770=3.769kg
- 5) 分級ファンバランス測定結果は下記通りです。
①分級ファンインペラサンドブラスト前バランス測定結果
アンバランス量：300g
②分級ファンインペラサンドブラスト前後バランス測定結果
アンバランス量：24.8g
*許容値6.7g以内
分級ファンバランス測定結果詳細は別紙参照。
- 6) シャフトの軸封部に摩耗が確認されました。計測結果は下記通りです。
正規：φ 65-0.01mm
計測値：φ 65-0.02mm
- 7) その他の作業に問題点は確認されませんでした。
- 8) 施工写真は別紙参照。

施設課 高松様

仕様書No

1.工事件名 MD 分級ファン点検修理

2.対象機器 分級ファン

3.数量 1式

4.工事期間 R3.9.15~10.6

株式会社小名浜製作所
担当名 庄司

TEL 56-7242
FAX 56-7250



写真-1. 分解完了



写真-2. インペラ状況



写真-3. インペラ近接スケール付着状況



写真-4. 駆動側軸受状況



写真-5. 反駆動側軸受状況



写真-6. サンドブラスト前重量計測

施設課 高松様

仕様書No

1.工事件名 MD 分級ファン点検修理

2.対象機器 分級ファン

3.数量 1式

4.工事期間 R3.9.15~10.6

株式会社小名浜製作所
担当名 庄司

TEL 56-7242
FAX 56-7250



写真-7. サンドブラスト前重量計測値



写真-8. サンドブラスト前バランス計測



写真-9. サンドブラスト後状況



写真-10. サンドブラスト後重量計測



写真-11. サンドブラスト後重量計測値



写真-12. サンドブラスト後バランス計測

施設課 高松様

仕様書No

1.工事件名 MD 分級ファン点検修理

2.対象機器 分級ファン

3.数量 1式

4.工事期間 R3.9.15~10.6

株式会社小名浜製作所

TEL 56-7242

担当名 庄司

FAX 56-7250



写真-13. シャフト軸封部摩耗状況



写真14. シャフト軸封部摩耗計測

別紙 外部機関によるベアリングボックス破断に関する報告書より抜粋
(最終結果の箇所のみ)

鋳鉄品ベアリングボックスについて破面観察を実施し、以下に記す結果を得た。

- (1) 供試体の破損部では、マクロ的な様相から破壊機構を推定することが困難であったが、SEMでの微視的な観察では、過大負荷による延性破壊の痕跡であるディンプルが認められた。
- (2) 破面は接触による損傷が進行しているが、残存している放射状模様から推定されるき裂進展方向は図3の模式図に示したとおりである。
- (3) 供試体B1およびB2は、破面の形状がほぼ一致していることから、同じ破損部の一对の破面と推定され、その接触痕の状況から、破断後の有る程度の期間、破面同士が接触が繰り返し生じていたと考えられた。