

第1節 粉体装置操作におけるヒューマンエラー事例とその対策

はじめに

粉体の攪拌混合ハンドリングプロセスを設計する場合、事前に粉体物性を確認し、試験機で実際に試験したうえで、設計に取り掛かることが一般的であるが、実際にプラントを納めて粉を流し始めると、設計通りにいかないことがある。設計ミスをしたわけでもないのに、設計通りに粉体プロセスが流れないのはなぜ起こるのか？原因としては色々あるが、大きく分けて、① 粉の性状に起因するもの、② プロセス設置環境によるもの、③ 設備機器に由来するもの、④ 人間由来によるもの（オペレーター他）が考えられる。攪拌混合操作のヒューマンエラーを考えると④のみを考えがちであるが、②③でも設計するのは人であり、①も粉の性状を知ってそれに適切に対処することもヒューマンエラー対策の一つと考えられる。失敗を全体でとらえ、どうすれば再発防止ができるかという視点を持つことが大切で、過去の失敗事例をしっかりと検証し、同様の失敗を未然に防ぐことが重要である。

まず、粉の性状に起因するものであるが、粉体は、試験用に受け取った時の状態と、実際に生産ラインで流れている粉とは、性質が大きく異なることがある。この違いのために問題が発生する。プロセス環境によるものは、温度・湿度等の環境条件が試験の時と変わっていて、粉体プロセスに影響が出る場合が多い。設備機器に由来するものとして、機器の前後のつながりのなかで発生する問題が多い。もちろん機器そのものでコンタミなどの問題を起こすこともある。操作する人間によるのは、主にヒューマンエラーで設計通りに操作しない（できない）場合に起こることが多い。この節では、これらについて例をあげて紹介し、あわせてその対策法についても論じる。

1. 粉の性状に起因する失敗例

粉体の特性は、以下の評価指数で測定される。① ゆるめかさ密度 ② 固めかさ密度（圧縮度）③ 安息角 ④ 流動度 ⑤ スパチュラ角 ⑥ 凝集度 ⑦ 崩潰角（差角）⑧ 分散度などを指標して測定されるが、事前の測定時と実際に製造プロセスで流れる粉とは性状が異なることがある。一例をあげると、電池用微粉体材料の生産ラインで、高速回転型混合機を設置したときに槽内部に付着が発生し、完全に混合できていないものが製品中に混入するという事例があった。実機を使った事前の数時間の確認試験では全く問題なかったものの、生産ラインに設置したときに問題が発生した。設備提供者側としては、同じ機械を使用し、環境条件に大きな違いはなく、原因は粉の性状の違いとしか考えられなかった。機械を使う顧客側としては、同じ粉を機械に供給しているのになぜ付着が発生するのかということになり、責任は機械側にあるとの見解を会社として出さざるを得なくなった。

このケースでは、機械に付着が発生するところを鏡面研磨し、それでも付着するところには、超高分子量ポリエチレンを貼りつけることで、最終的には問題が解決されたが、そこに至るまでに多くのトライ・アンド・エラーを現地で行わなければならなかった。生産に使われている機械での問題はユーザー側にとって深刻な問題であり、生産の継続と問題解決を同時に図らなければならない。ユーザーの設備担当者にとっては設備導入の責任を問われかねない事態で、プラント設計者、機械メーカー、ユーザー、それぞれが問題解決のために協力したことで最終的に解決ができた。

この事例から得られる教訓は、粉の性状は変わりうることを事前に三者（ユーザー、プラント設計者、機械メーカー）が想定し、共通認識を持ち、起こりうる問題とその対策について、事前に話し合っておくことの重要性を示唆する。生産ラインに設置した後、機械を粉が設計通りに通過しない場合に迂回する経路をどう設けるか、迂回したものを正常品と区別してどう管理するかなど、事前にどれだけリスクを想定しておけるかが、問題が起こった時に損害を少なくすることにつながる。

機械メーカーは、起こりうる問題をユーザーに事前に提示する責任を負っている。初めて機械を導入するユーザーにとって、特長をまだ知らない機械にどのような問題が起こりうるのかは、想定できない。一方で、ユーザーは粉を製造している立場として、粉の性質について、全ての情報を機械メーカーとプラント設計者に開示する必要がある。しかし、これをもってしても、まだ起こりうる問題が粉にはあるのだということを全員が共通認識を持つておかなければならない。

粉がセラミックス等の摩耗性の高い粉体の場合は、特に事前の三者打ち合わせが重要である。最終製品の金属コンタミの許容値をユーザーが示し、機械メーカーは予想される金属コンタミの上昇値を示し、エンジニアリング会社が全体をまとめることになる。事前の予想値と実際の数値に差が出ることはよくあることで、原料粒度が少し異なるだけで摩耗性が変わることが知られている。筆者の経験では、10 ミクロンを超える粒子が多く存在すると、金属コンタミが飛躍的に上昇する。耐摩耗対策としては、ベンドや、回転する機械部分のすぐ外の接粉部内側にウレタンライニング、プラズマ溶射（アルミナ、タングステンカーバイド）が一般的である。さらに耐摩耗性を高めるためには、超硬やセラミックス焼結体（アルミナ、SIALON、SiC、Si₃N₄など）を、粉体と接触する金属内部表面に貼り、配管や機械のケーシングに穴が開くのを防ぐ対策が広く行われている。

気をつけなければいけないのは、耐摩耗対策と、耐コンタミ対策の区別である。耐摩耗対策は、金属の摩耗を色々な方法で防ぐことで、製品粉体中に含まれる金属コンタミを 100 PPM 以下にまで下げるためには、さらに一步踏み込んだ対策が必要となる。たとえば、連続ミキサーで空気等のガスを常時流すようなタイプの機械における耐金属コンタミ対策では、設計上粉体が通過しないところであっても、空気の流入するところは、粉体の舞い上がり接触を想定し、接ガス部全ての金属を覆い隠す必要が出てくる場合もある。

2. プロセス設置環境に由来する失敗例

試験ではうまくいったのに、実機納入後トラブってしまうケースに、設置環境に違いがあることも理由になる。実際の生産ラインでは湿度が極端に低いために、想定以上の静電気が発生し、粉体の凝集が発生し機械の性能が変わってしまうケースがあった。このケースでは、部屋全体の加湿を行うことで解決した。湿度でいえば、逆の例もある。湿度が高すぎて粉体が凝集することもある。つまり、試験の時と、実際の生産ラインで環境条件（温湿度など）の何が異なるのかを事前に調査・確認しておくことが重要で、ユーザーと協力して、事前にできるだけの対策を行っておかなければならない。

3. 設備機器に由来する失敗例

粉体を混合機に定量供給するスクリーフィーダーの場合、粉体の性質に合わせて、フィーダーの構造は適切に設計・選択されなければならない。粉体圧は主にホッパーの構造、粉体充填密度はアジテーター・スクリーウの構造、粉体の崩壊性は排出する落ち口の構造に影響を与える。粉体の物性を測定し、上記を総合的に検討し、スクリーフィーダーの構造を決定（設計）する必要がある。検討の結果、スクリーフィーダーで定量供給ができないと判断すれば、別の方式（コイルフィーダー、テーブルフィーダー、振動フィーダー、サークルフィーダーなど）も検討することになる。

設備機器に由来するケースは、設計時に想定されていなかった条件が実際の生産で発見され、機械がそれに対応していないというケースが多い。

食品工場・食品プラントの建設を手がける会社でよく取り扱う小麦粉、米粉、コーンスターチなどの粉末原料へのコンタミ（異物混入）防止は大きなテーマになっている。かつては、粉末原料が加工され最終製品で形状が変わると異物の発見は難しかったが、最近は検出技術の向上等で、最終製品出荷段階前に異物を発見することがかなりのレベルで可能になってきた。また、トレーサビリティ設備導入企業が増加し、消費者のコンタミ防止に対する厳しい要求レベルに対応するためにも、原料段階において異物除去することの重要性が高まってきているので、この例を取り上げたい。

3.1 異物混入失敗事例

食品への異物混入が消費者（ユーザー）で発見された場合、新聞等で大きく取り上げられることが多く、異物混入を起こした企業は大きなダメージを受けることになる。過去、篩装置に関して異物混入事例が多く発生しており、原料メーカー、食品製造工場、製造機器メーカーが三位一体となって解決に取り組む必要があるので失敗事例として紹介する。

【事例 1】2012 年 11 月 14 日に大手新聞にお詫び・回収依頼広告が載ったが、某大手食パンメーカーの関東の工場では食パン製造に使用していた篩装置（強制篩式ラウンドシープ型）のナイロン網が破れて、白色の軟質プラスチック片が混入した可能性があるとのことで、消費期限が 2 日間にも及ぶ製品を回収した例がある。

【事例 2】2003 年 3 月 27 日に中日新聞にお詫び・回収依頼広告が載っていたが、某大手製麺会社の協力工場で製造に使用していた篩装置（これも、事例 1 と同じ強制篩式ラウンドシープ型）のステンレス網が破れて製品に混入し、製品を回収した例がある。図 1 にラウンドシープの概念図を示す。



図 1 ラウンドシープの概念図

【事例 3】2003 年 12 月 14 日に大手新聞にお詫び・回収依頼広告が載ったが、某パン粉メーカーの製造工程中に設置されている空気輸送配管用（ニューマ搬送）のフレキ樹脂ホース内部に埋め込まれているアース用の糸状銅線が何らかの理由で脱落し、パン粉製品に混入し、それがユーザーで発見された（太さ 0.17 mm, 長さ 1.0 cm）。このパン粉を使っている多くの会社（冷凍食品、ハム・ソーセージメーカー等）で自主回収を行うことになった。

【事例 4】某海外メーカー製のインライン・シフター（ラウンドシープ）を網破れ検知装置付きで納入したが、それが検知せず、工場では網が破れたことに気づかず運転を続け結局異物混入事故が発生し、損害が派生した。その損害を機器メーカーに対して賠償請求しているという海外の事例もある。

これらの事例から、異物除去を目的とする機械であっても、使用法を誤ると異物を発生・混入させてしまうことがあるということが分かる。

3.1.1 インライン異物除去装置

小麦粉やミックス粉、澱粉などの食品粉体を原料として使用する食品加工メーカーで、多くの異物除去装置が使われている。食品粉体を複数の混練ミキサーに効率的に供給する方法として、空気輸送がよく用いられるが、混練ミキサーで液体を添加する前の最終異物除去にインライン・シフターを設置するケースが増えてきた。インライン式を設置する場合は、重力落下中に設置する場合に比べて、総機器点数が少なくなり、異物管理ポイントが減ることから、最近スポットが当てられてきている。この製品の特長は、空気輸送配管中に設置することが可能で、製品混練ミキサー送りのほかに製品出荷空気輸送ライン、包装機送りライン等の重要な管理ポイントで異物を除去・コントロールすることができる。

3.1.2 インライン・シフター

空気輸送ライン中に配置できる篩装置で、最大 550 kg/分(33 トン/時、強力小麦粉ベース)の処理が可能(30 メッシュ、600 ミクロンの目開き)な機種もあり、アメリカ製パン業衛生標準委員会 (BISSC) の衛生基準適合証明書付きの装置も日本で販売されている。異物・虫が破損して製品へ混入することがないように、異物除去を目的に食品粉体を篩うシフターは緩やかな旋回運動が最適（一方で粉体を解砕しながら篩う目的には、ラウンドシープ型が優れている）とされ

ている。アジテーターやビーターなどで網に直接力をかけると、虫をばらばらにしたり、網を破いてしまう可能性が高まる。破れは2次異物につながることから、慎重に機器選定すべきである。また、篩オーバーに製品が混ざると、ロット切り替え時に粉が切れず、トレーサビリティもなくなるので、オーバーに製品が全く混ざらないシフターが理想的である。(図2にその代表例である米国グレートウエスタン社のインライン・シフター QA シリーズのフローを示す。)

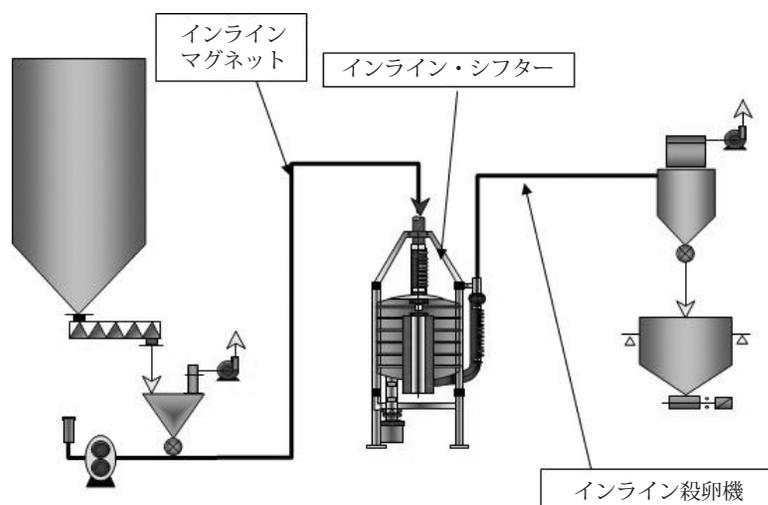


図2 インライン・シフターの使用例 (フロー図)

異物検出・除去装置を設置する場合、一般に以下のポイントを押さえる必要がある。① 装置自体が異物発生装置にならないか？ ② 工程を複雑にしていないか？ ③ 簡単に内部の点検ができるか？ (週に一回、30分以内で) ④ 目的を明確にする (異物チェックか、異物除去なのか)、などである。

3.2 密閉ハンドリング (パイプレスシステム) の検討

食品、医薬用に粉体製造プロセスを検討する場合、空気輸送を多用すると、次のような問題が発生することがある。

- ① 設備に粉塵が飛散、堆積する。
- ② 切り替え洗浄に時間がかかるため、製造品目変更に対するフレキシビリティがない。
- ③ 空気輸送が多用され、空気と一緒に室内外の異物の混入する可能性が高い。

一般に粉粒体プロセスといっても各種あるが、食品工場で多く見られる、配合・混合・包装連続製造プロセスでは、原料、中間製品を空気輸送によりハンドリングすることが多いが、トレーサビリティを厳格に管理する必要のある工程では、パイプレスシステムを使った新しいハンドリング技術が最近注目を集めている。パイプレスシステムの代表的技術としてはコンテナシステムがあり、また、製造仕掛品として中間容器として使うという意味から、このコンテナシステムをIBC (Intermediate Bulk Container: 工程間搬送用粉粒体コンテナ) システムと呼ぶことが多い。特徴としては、① 多品種、多原料の生産に対応でき、② コンタミ、クロスコンタミの防止、③ 作業員への粉塵飛散防止 (コンテインメント - 封じ込め) が可能であるが、空気輸送に比べコスト高になるので、ある生産規模になるか、単価の高い製品 (医薬品等) で主に採用されている。

(図3に簡単なIBCシステム例を示す)。

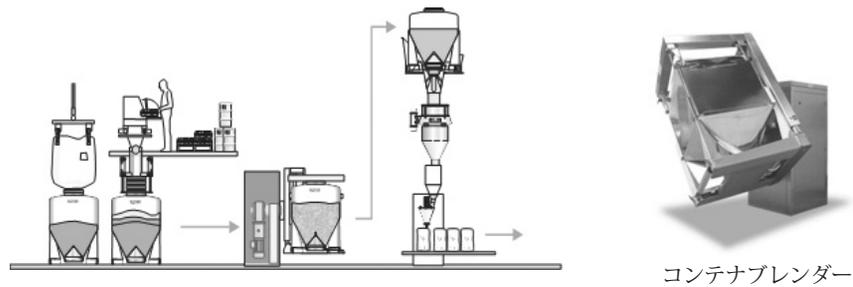


図3 簡単なIBCシステム例とマトコン社のコンテナブレンダー写真

4. 人間に由来する失敗例

ヒューマンエラーはどこでも起こるとして考えて、事前に対策しておく必要がある。設備面・運用面両方で検討すべきである。また、操作ミスがあった時に、すぐにそれを検知し、ラインを止めることができるよう、プラント側でできることもある。そのためにも、センサーを各所に配置し、生産ラインの見える化を図ることは大変重要である。

命にかかわる失敗例を以下にあげる。粉じん爆発の例で、米国で実際にあったケースだが、金属粉を粉砕している工程で爆発事故があり、このケースでは、オペレーターが死亡しており、正確な経緯は確認できていない。事故調査から、製造運転後の掃除中に何らかの火花が集塵機内で発生・混入により粉じん爆発が発生したと報告されている。運転中は不活性ガスを使用しているが、掃除のときは酸素が入るので、十分な安全確認をしたのちに行われなければいけないが、操作ミスが疑われている。

次は、日本国内の粉じん爆発例で、製麺工場的小麦粉のタンクを改造中に粉じん爆発を起こし、作業員が大けがをしたケースがある。このケースでは、小麦粉サイロに粉が残った状態で、溶接機を使ったもので、非常に初歩的な作業ミスである。酸素、粉じん濃度（高すぎても低すぎても爆発しない）、着火源の3つがそろった時に粉じん爆発が発生するという粉じん爆発の知識があれば防げた事故と言える。大手製粉会社の規定では、小麦粉の貯槽タンクを溶接等で改造する場合は、必ず、完全に水洗いし乾かしたのち、工場の安全責任者が工事責任者と一緒に現地を確認したのち、作業開始にかかることになっている。

最後も日本国内の粉じん爆発の例だが、金属粉を粉砕・分級している工場で、粉じん爆発・火災が発生した。これは、ダスト捕集用の集中集塵システムの終端集塵機に何らかの火花が入り、それが着火源となり粉じん爆発が発生し、配管を伝って火を各所に拡散させることとなった。幸い人的被害はなかったものの、製造室内にある主要な機器が大きく壊れ損害を発生させた。このケースは操作ミスではないものの、通常の管理では見過ごされてしまうところから事故が発生するという教訓で、マニュアルを絶対視せず、いつもどこかに危険が潜んでいるという問題意識を持つことの重要性を教えてくれる。もちろん、最初の集塵システムの設計時に、このような危険が潜むことに関するフェールセーフ設計を怠った（もしくは不十分であった）設計者の責任も指摘しておきたい。

おわりに

ユーザーは、問題発生時に、生産に支障をきたさぬよう最大限配慮した生産運用（原材料・製品管理、機械使用・保守、人員配置・教育）を行い、また、機械メーカーは対処のための費用と時間を最小限にできるよう、事前の準備、リスク予想、情報共有することで、全体の損害を減らすことが可能である。これらすべてを調整し、全体設計に落とし込んでゆくのがプラントエンジニアの役目である。粉体プラントを設計するエンジニアは、製造現場で実際に粉体製造に携わらなくても、過去の経験を生かしつつ、大いなる想像力を駆使し、オペレーター、ユーザー（消費者）の安全を最重要課題ととらえ、装置・システムの設計時にフェールセーフをいつも念頭に置いておくことが重要である。異物を混入したことに気づいたら、もしくは生産ラインの何らかの異常に気づいたら、職制を通じ連絡が工場長、経営層に即座に報告が上がる仕組みを作っておくことが必要で、失敗を報告しやすい雰囲気をごろから会社全体で作っておくこと

が特に重要である。

操作ミスではないものの、通常の管理では見過ごされてしまうところから事故が発生するということがあるので、マニュアルを絶対視せず、いつもどこかに危険が潜んでいるという問題意識を持つことが重要である。機械装置やプロセス設計をする人は、人間は失敗をするという前提で、フェールセーフの設計をすることが強く求められる。また、プロセスを使う人は、機械はいつ壊れるかもしれない、自分自身で異物混入原因を作っていないか（毛髪、菌など）などを絶えず考え、謙虚に生産に向きあう心構えが大事である。機械に頼るのではなく、機械を使いこなすことが大事で、機械を生かすのも殺すのも、すべては人間であることを最後に強調しておきたい。

文 献

- 1) 柴田力：「粉粒体プロセスにおけるトラブルシューティングと対策」, 食品機械装置, 平成 14 年 6 月号, (2002), P98
- 2) 沢野修, 七蔵司和哉：「HACCP システムと食品工場のハード整備計画」, 食品機械装置, 平成 12 年 11 月号, (2000), pp. 61-69
- 3) 石戸克典：「異物を未然に防ぐ為のハード面でのシステム作りのポイントとは？」食品製造工場における各種異物の混入防止／原因究明事例集, 第 2 部第 3 章 (技術情報協会発行) 2011 年 2 月 28 日発行
- 4) 石戸克典：「粉体装置操作におけるヒューマンエラー」, 《研究, 開発, 製造, 検査現場における》ヒューマンエラー対策事例集, 第 10 章 第 8 節 (技術情報協会発行) 2013 年 1 月発行
- 5) 野村正次他：「粉体の精密供給装置の動向」, ファームテックジャパン, Vol.4 No.3 (1988) P77
- 6) 山田幸良, 安口正之：「分級技術 Q&A」, 化学装置, 昭和 60 年 7 月号, (1985), pp. 50-59