

# 粉体工場のプラントエンジニアリング

Plant Engineering for Powder Processing Factories

日清エンジニアリング株式会社 秋山 聡  
Satoshi AKIYAMA

## 1. はじめに

粉体機器を使用して生産を行っている工場は、極めて広範囲な分野に渡っているが、工場が抱えている課題や生産設備に対する要望は共通する点が多い。製品分野や工場の規模などで優先順位は異なるものの、生産性向上、品質向上、製品安全、作業安全、環境対策は、プラント建設の際に顧客から要望される事項である。近年では、東京オリンピックに向けたインフラ整備などの影響で建築需要が増大し建築コスト上昇と工期の長期化が進んでいるため、その対応が多くの業界に共通する重要な課題になっている。

一般的に、プラント建設にあたっては、それを実施することによる経済的な優位さや利益性などを分析するフィージビリティ・スタディ（Feasibility Study＝経済性評価）を実施して事業計画を策定し、どのような工場をめざすのか検討を重ねてコンセプト、マスタープラン（基本設計）を作成する流れで進められる。プラント工事の規模や内容により、あるステップを簡略化したり、省略したりする。そして、マスタープランに基づいて、具体的に機器を選定し、能力・性能に関しわずかでも懸念事項があれば確認実験を行い、必要に応じてマスタープランの修正が行われ、最終的にプラントの詳細設計を実施する<sup>1)</sup>。これらの設計を遂行する際は、技術・装置面だけではなく、あらゆる角度からの調査・分析が必要である。プラント設計で考慮すべき要件は成書にまとめられており、それを図-1に示す<sup>2)</sup>。

プラントの設計においては、同じ機器構成の同一製品の設備であっても、全く同じ内容となることは極めてまれである。設置場所の関係でレイアウトが異なったり、プラント毎に設計を再度見直す場合が多い。また、プラント設計はいろいろな

制約条件の下に実施されることが多く、唯一の正解がない。しかしながら、プラント技術者にとって、プラント設計の経験は大きな財産であり、他の設計における成功および失敗事例は大変有用な情報となっている。

本稿では、多くの工場に関心の高いと思われる省エネ、製品安全、製造管理システムについて、粉体工場を中心としたプラント設計の事例を紹介する。

## 2. 空気輸送の省エネ設計<sup>3)</sup>

### 2-1 小麦製粉工場の空気輸送

粉粒体の原料や製品を取り扱う多くの工場では、各工程間を固定配管で接続し、粉体を空気と一緒に輸送する空気輸送が採用されている。空気輸送には、①粉じんの飛散がない、②被輸送物への異物の混入がない、③輸送経路を柔軟に選ぶことができる、④複数の地点で被輸送物を供給、回収することが容易である、⑤システムの維持管理費が少ない、⑥自動化が容易である、などの多くの長所がある。一方、消費動力が大きく多大なエネルギーを要することが最大の欠点として挙げられる<sup>4)</sup>。

小麦製粉工場の主な機器は、小麦を挽碎するロール機と小麦粉をある粒子径で分離するシフター（ふるい分け機）であるが、これらを複数台設置して多段的に処理しており機器間の粉粒体の搬送は空気輸送で行っている。原料小麦と小麦粉製品は、主にルーツブロワによる圧送式空気輸送が用いられ、中間品の輸送には、ファンによる吸引式空気輸送が使用されている。製粉工場では多数の貯槽サイロを備えており、一台のルーツブロワの輸送配管を途中で分岐させ、複数の貯槽サイロに輸送している。また、輸送能力も原料の種類によりさまざまである。そのため、従来では空気輸送設備の設計の際には、想定される原料、輸送

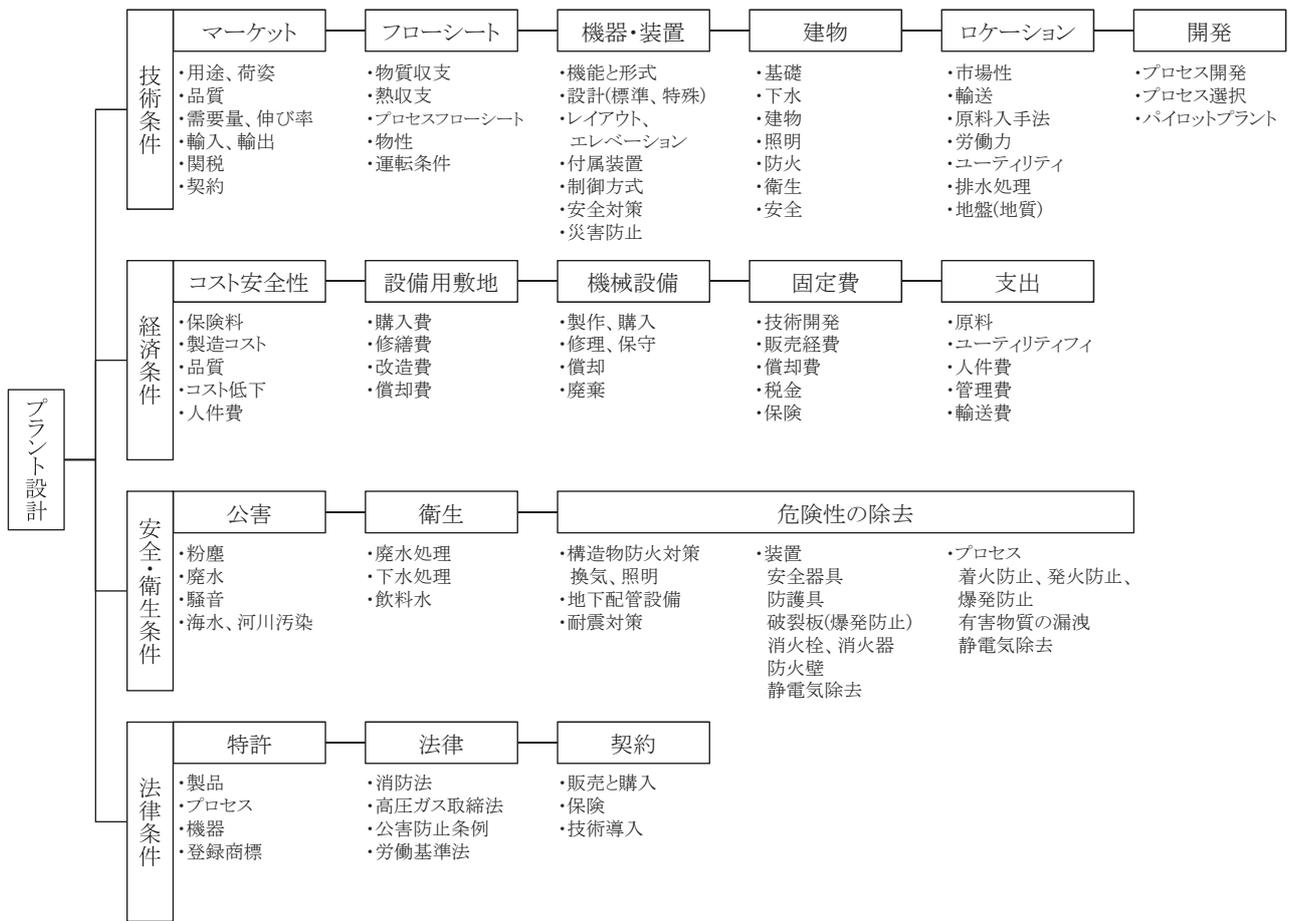


図-1 プラント設計で考慮すべき要件<sup>2)</sup>

量、輸送距離の内でも最も厳しい条件においても確実に輸送できて閉塞などのトラブルを発生しない十分に余裕を持たせた設計を行っていた。

ある製粉工場の設備に取り付けられた駆動モータの定格容量は、ロール機28%、ルーツブロワ18%、ファン16%、機械式コンベア6%の比率であり、送風機の占める割合が高い。そのため、製粉工場では空気輸送の省エネ設計法の確立が大きな課題であった。

ここでは、(株)日清製粉グループ本社と日清製粉(株)で開発し、当社で販売しているルーツブロワの省エネ最適化運転システム「ニューマエコ」の原理と特徴を紹介する。

## 2-2 空気輸送の省エネ理論と制御

ルーツブロワには、「消費電力 $\propto$ 風量 $\times$ 吐出圧」の関係がある。また、吐出圧は、風量の2次関数で近似できる。小麦粉の輸送において、吐出圧が極小値となる風量より少ない風量では閉塞しやすいが、それ以上の風量では閉塞は発生せず、吐出圧が最小となる風量が省エネのための適正風量であることが実験により確認され、ブロワ運転制御に利用されている。

ニューマエコでは、任意の輸送先に対して輸送開始時に吐出圧を常に監視しながら、インバータによりルーツブロワのモータを初期周波数から徐々に減速させ、減速周波数差  $\Delta F$  に対する減少圧力差  $\Delta P$  の比「圧力傾き  $\Delta P/\Delta F$ 」を算出する。その「圧力傾き  $\Delta P/\Delta F$ 」がゼロに近づいたら適正風量に達したと見なし、その条件で運転を継続するアルゴリズムを採用している。ただし、輸送物流量や輸送配管内の輸送物の滞留状況など、長時間の運転中にはさまざまな変動が生じるため、実ラインでの実験結果を考慮して閉塞を回避する安全対策を追加してある。

## 2-3 製粉工場での事例

図-2のような設備で輸送物の流量を一定にして輸送距離をパラメータに実験し、輸送距離により適正風量と動力がどの程度変化するか調べた。適正風量の結果を図-3に示す。輸送距離が62、46、24mのときの省エネ適正風量は6.0、4.8、4.2 $m^3/min$ 程度である。回転数を制御しない場合には最も遠い62mのサイロに輸送するときの風量6.0 $m^3/min$ にルーツブロワを設定するのが一般的である。この場合の消費電力は遠いサイロ

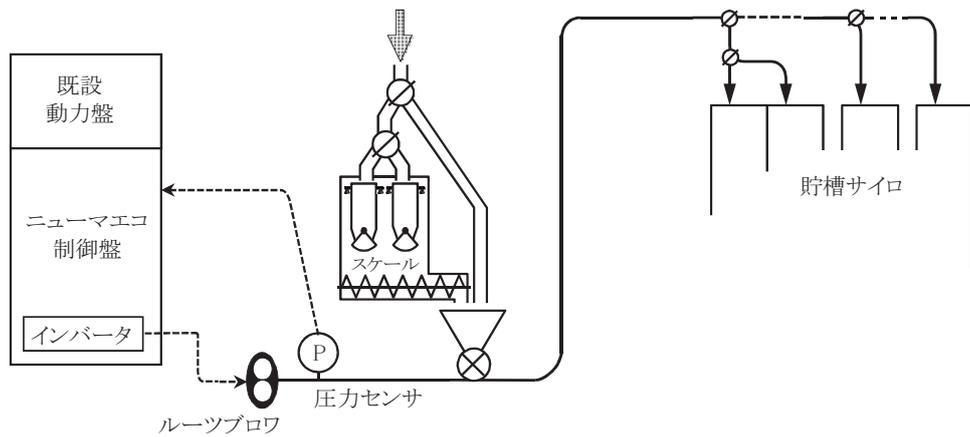


図-2 ニューマエコシステムの構成

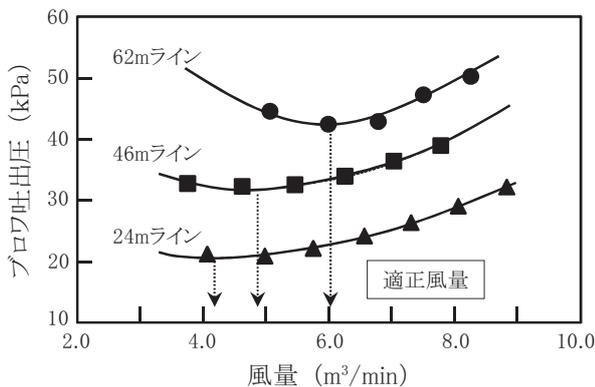


図-3 ルーツブロワの風量と吐出圧の関係

から順に9.7、7.8、6.0kWである。一方、輸送先が変わるごとに各々の省エネ適正風量となるように回転数を変化させると、46mのサイロでは6.4kW、24mでは4.1kWとなり、それぞれ1.4kW、1.9kWの省エネが図れることになる。

図-4は、ニューマエコを実際の製粉工場の空気輸送ラインに設置し、約1週間運転したときの結果である。制御した場合には、制御しない場合と比較すると約25%の消費電力削減効果が得られた。

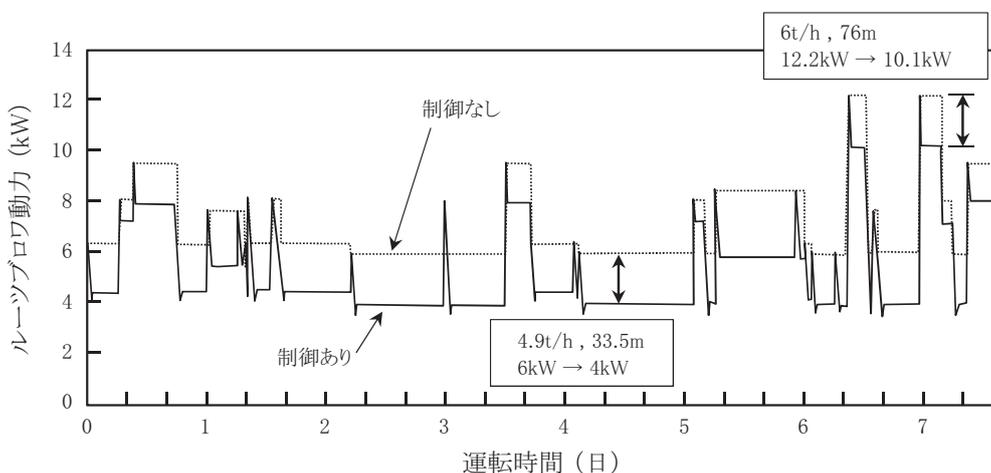


図-4 ニューマエコ導入効果

### 3. 容器搬送プラントの設計

#### 3-1 マトコンシステムの概要

消費者ニーズの多様化、商品サイクルの短命化などにより、多品種少量生産が要求される場合も多い。クロスコンタミネーションの許容レベルが厳しく規定され、微量の混入が問題になる場合には、空気輸送では配管を製品切り替えのたびに清掃する必要があり、多大な労力と時間が掛かる。また、完全な清掃も困難である。空気輸送設備を品種ごとに専用化することも考えられるが、多大な設備コストが掛かってしまい現実的ではない。

近年、多品種少量生産向けに、粉粒体用コンテナ (IBC ; Intermediate Bulk Container) によるハンドリングシステム<sup>5)</sup>が期待されている。IBCシステムは、貯蔵、計量、混合、造粒などの各工程の機器で処理された粉粒体を一度コンテナで受け取り、搬送機器によってそのコンテナごと次の機器まで移動させ、コンテナから粉粒体を排出して受け渡す方法である。

マトコン社製のコンテナと排出バルブを図-5

に示す。このコンテナは、底部にコーンバルブと呼ばれる円錐形のバルブ（ふた）を備えており、コンテナから粉体を排出させる際には、排出装置である排出ステーションによりコーンバルブが上下に動かされ、排出口とコーンバルブに生じた隙間から粉体の排出を行う。マトコン排出ステーションでは、コーンバルブ自体にエア駆動により強い振動を与えることができ、バタフライバルブやスライドゲートといった一般的なバルブでは排出が困難な粉粒体でも安定的に排出できる。

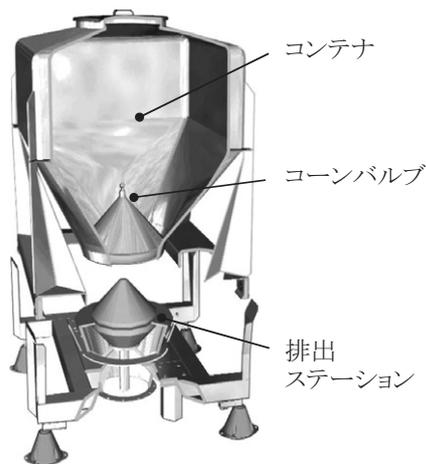


図-5 マトコン社製コンテナと排出ステーション

### 3-2 粉体工場の設計事例

簡易清掃化、省人化を実現するためマトコンシステムを適用した粉体工場の設計例を紹介する。本工場は、多種の粉体原料を配合・混合し、粉体製品を製造する工場である。図-6に製造工程のブロックフローシートを示す。混合は、一般原料用のコンテナ回転式混合器（マトコンブレンダー）と、難混合原料用の高速ミキサーの2方式を使用している。これにより、混合機と充填機の

組み合わせが自由に選択でき、新品種にも対応可能なフレキシブルなライン構成となっている。また、コンテナ自動洗浄機を設置して全自動でコンテナの内外面の洗浄を行えるプラントとなっている。

図-7はコンテナ保管棚からスタックークレーン（STCと略す；Stacker Crane）でコンテナを搬出するところであり、図-8はマトコンブレンダーで混合したコンテナを無人フォークリフト（AGFと略す；Automated Guided Forklift）で



図-7 保管棚とスタックークレーン（STC）



図-8 ブレンダーと無人フォークリフト（AGF）

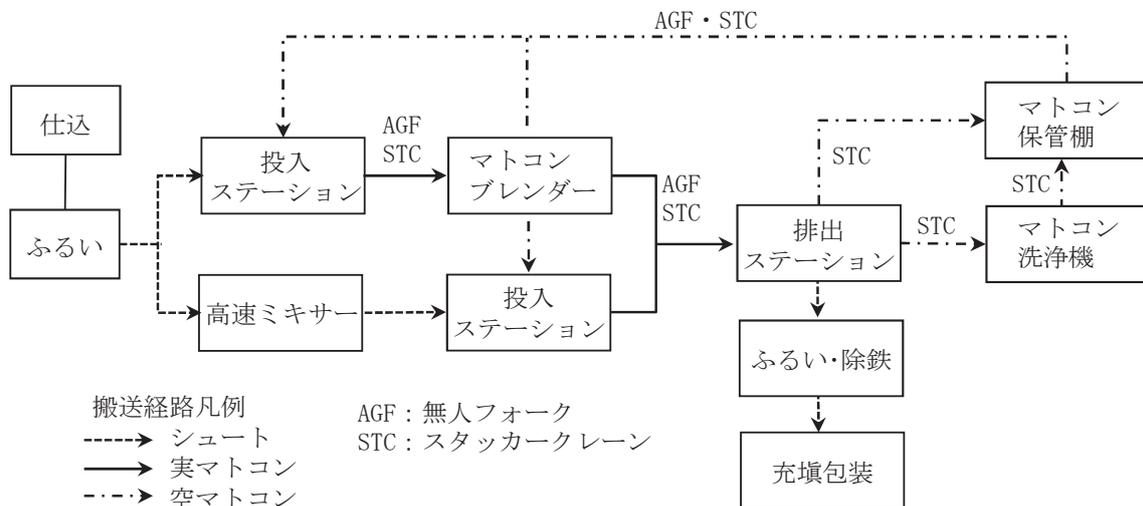


図-6 コンテナハンドリングの製造ブロックフローシート

受け取りに行く様子である。STCは、ガイドフレームに沿って上下するフォークを装備し、倉庫の高所の荷を出し入れするために使用されるクレーンである。

図-9にマトコンテナブレンダーの作動の様子と原理を示す。AGFでコンテナブレンダーにコンテナを運び自動でセットする。そしてコンテナを縦方向に回転させコンテナ内の粉体を混合する。マトコンブレンダーは配合された粉体が入ったコンテナ自体を混合槽として利用するため、混合終了後はそのコンテナごと取り外して搬送できる。そのため混合工程での原料粉体の投入や回収の必要はなく、そのための時間が短縮できる。

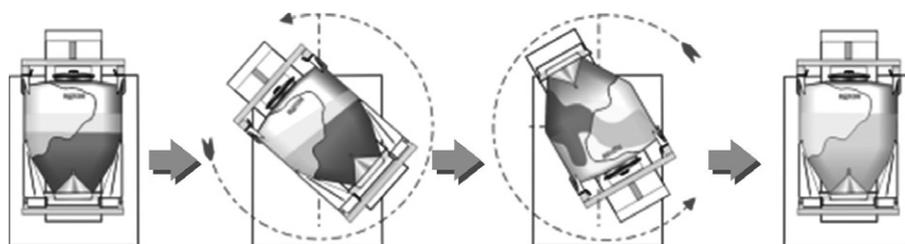


図-9 マトコンテナブレンダーの作動と混合原理

また、粉体の出し入れがないことから異物混入のリスクを最小限にできる。

### 3-3 製造タイムチャート

コンテナを用いた搬送は、空気輸送やベルトコンベアーなどの機械輸送と異なり、バッチ方式となるため、各プロセス機器の稼働率を高められるように、各プロセス機器の運転時間、投入・排出時間、搬送時間などを詳細に調べて、プロセス設計を行う必要がある。製造タイムチャートの例を図-10に示す。このチャートでの各工程の所要時間は、実績または試験により決定した。バッチ方式の混合機であるが、複数の混合機の運転タイミ

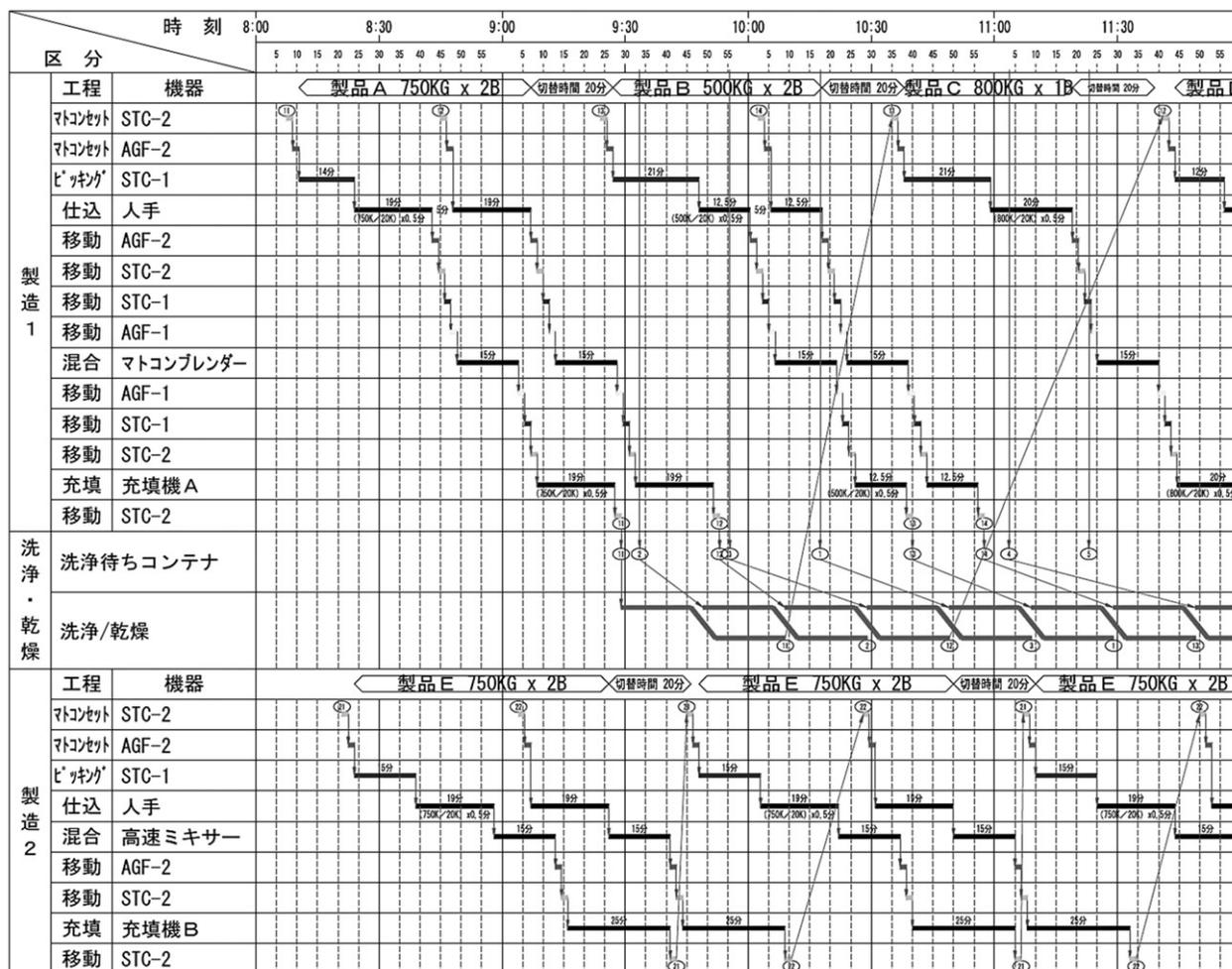


図-10 混合設備の製造タイムチャート

ングを考慮して製造システムを構築することで、主要機器の稼働率を高め、連続方式に近い製造が可能である。

製造1工程では空コンテナを保管棚から搬出するところから始まり、原料ピッキング、コンテナへの原料投入、マトコンブレンダーへのコンテナの搬送と続く。マトコンブレンダーにコンテナが到着すると、所定の時間で混合し、充填機上部の排出ステーションにコンテナが搬送される。排出ステーションではコンテナから排出を行い、充填機へ混合製品を供給し充填包装される。全量排出されてコンテナが空になると、コンテナは洗浄乾燥機に搬送され、洗浄乾燥される。その後次バッチの搬送要求まで待機する。製造2工程は、第1工程と並行して固定式の高速ミキサーに仕込み、混合した後、コンテナに投入、搬送し、充填包装が行われる。

このようにタイムチャートを用い、コンテナの必要個数、搬送スピードや充填包装能力の検討およびプラントのトータル能力の検討が実施される。

## 4. 製造管理とトレーサビリティ

### 4-1 マルチプラネットパック

粉体工場に限らずさまざまな製品で消費者の安全・安心に対する要求は厳しくなっている。製品品質のトラブルが企業経営に与える影響は大きく、不良品の回収や在庫破棄といった不具合対応のために多大な労力とコストがかかるだけでなく、消費者からの信頼の失墜は、企業にとって大きな

ダメージとなる。万が一の品質トラブルの際に迅速かつ的確に対応できるよう、トレーサビリティの構築は多くの工場で重要な課題となっている。

一方、少量多品種製品の増加に伴い、多様な原料をさまざまなパターンで配合して投入することが求められている。最終製品の品質は、この配合に大きく影響するため、慎重な作業が要求される。食品の場合、アレルゲン原料を扱う際は、消費者が重篤な健康被害を発症する可能性もあり特に注意が必要である。

このような背景から、手作業の多い食品粉体の製造用にトレーサビリティ対応の製造管理システム「マルチプラネットパック」が開発された。本システムは、当社の食品粉体工場建設の経験や日清製粉グループの食品工場の運営実績から、手作業の多い中小規模のラインで確実に生産管理が実施できるように工夫してある。また、食品粉体工場に必要な機能だけをパッケージ化することで、通常のオーダーメイドソフトと比較して大幅なコストダウンを実現している。

マルチプラネットパックは、バーコードを使用して原料を個別に管理することで人手による作業ミス（誤計量、誤投入）を防止し、製造情報を自動的にシステムに記録する。図-11にマルチプラネットパックによる品物と情報の流れを示す。本システムは、管理サーバー、計画端末、電子天秤、秤量端末、仕込端末、ハンディターミナルなどから構成されている。本システムの特徴と導入効果について以下に述べる。

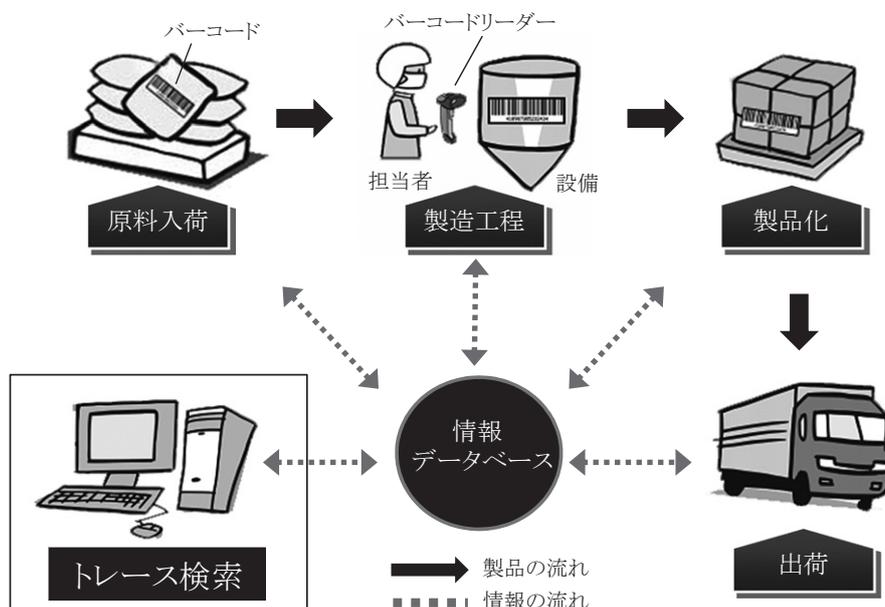


図-11 製造管理システムの流れ

## 4-2 特徴

### 4-2-1 手作業の多い工程の支援

原料入荷では、荷姿ごとに商品名、ID、使用期限などを印字したバーコードを貼り付ける。製造オペレータは、使用する原料の袋などに貼ってあるバーコードを読み込み、作業を進める。バーコードで読み込まれた情報は、「原料誤り」、「使用期限切れ」、「投入順番誤り」、「工程順番誤り」などが発生していないかシステムで確認される。これは、オペレータの作業確認、さらには責任者などのチェックなどと、従来から運用されてきたことと同じであるが、人間に代わってシステムが確認を自動的に行う仕組みになっている。そのため、どんなに注意しても防ぎきれなかったヒューマンエラーが防止できる。

### 4-2-2 実績の記録

多くの工場では、原料を使用する際に手作業で製造指示書などにその原料のロットや作業内容を記録している。その場合、オペレータは記録のための手間が掛かり、記入ミスや記入もれが発生する可能性もある。マルチプラネットパックでは、工程ごとにバーコードを読み取ることで、確実に実績をシステムに記録できる。また、実際に行われた作業に基づいて実績を記録するため、イレギュラーな処理の際にも確実に記録を残すことができる。

### 4-2-3 作業結果の追跡

製品名とロット番号を人力すれば、システムに蓄積された作業実績の情報から、どんな製造情報でも簡単に短時間で検索が行える。これは手書きの記録では難しいが、本システムを利用すれば、どんな原料を使い、どの作業者が、どの時刻に、どの設備を使って、どの作業をしたのかが検索できる。そのため、異物混入などのトラブルが発生した際、対応が迅速に行える。

### 4-2-4 柔軟な拡張性

マルチプラネットパックでは、既に導入されている上位系ソフト（計画作成、受発注、在庫管理など）や現場制御系（PLCなど）、インクジェットプリンタ、電子天秤などとのデータの受け渡しが柔軟に行えるように設計されている。

## 4-3 導入効果

食品粉体工場に本システムを導入した効果を表-1に示す。システム導入前は原料の使用ミスが年に数回発生していたが、導入後、2年以上経過した現在もミスは起きていない。また、人によ

るチェックが不要になったことで、確認作業の負担が減り、作業時間も減少したと客先からも高評価を得ている。また、トレース検索は、導入前は手書きの帳票での管理であったため数時間かかっていたが、導入後は、コンピュータを使い数分間での検索ができるようになった。

表-1 マルチプラネットパック導入効果

	導入前(帳票管理)	導入後
トレースフォワード	2~6時間	5~10分
トレースバック	1~2時間	5~10分
原料使用ミス	年数回程度のミス有	ミス無
原料ロット記録作業	30分/日	0分

## 5. 建物と建築設備

### 5-1 建築の設計

工場における建物の配置は、外からの原料の搬入や中間品の移動、製品の搬出などの工場内の品物の動きや生産に携わる作業者の動き（動線）を考慮して決められる。製造環境の厳密な管理が要求される場合には、製造室の温度、湿度、気圧、空気の清浄度などを、空調機器、換気機器などで制御する。また、省エネ効果と虫の誘引性低減を目的にLED照明などを採用することもある。このように、建物と建築設備は作業効率と製品品質にも影響を与えるため、建物も製造設備の一部であるとの認識を持つことが重要である。

### 5-2 粉体工場の事例

粉体製造を行う建物では、粉じん爆発防止の観点から、粉じんの堆積防止と清掃のしやすさを考慮した設計が必要となる。これは品質管理の側面からも重要な事項で、AIB（American Institute of Baking：米国製パン研究所）国際検査統合基準においても要求されている。このAIB基準は、食品工場の食品安全衛生レベル向上のためのガイドラインであり、このシステムを導入する国内の食品メーカーも増加している。ここでは、AIB基準に対応した食品粉体工場で実際に採用している建築関係の設計例<sup>6)</sup>を紹介する。

図-12(a)のように機器は床に直接設置せず、機器架台の足をかさ上げし機器の下も清掃できるようにスペースを確保することが要求される。一方、機器を設置する架台の足には、角パイプなどの部材を使用し、図-12(b)のように架台の足と

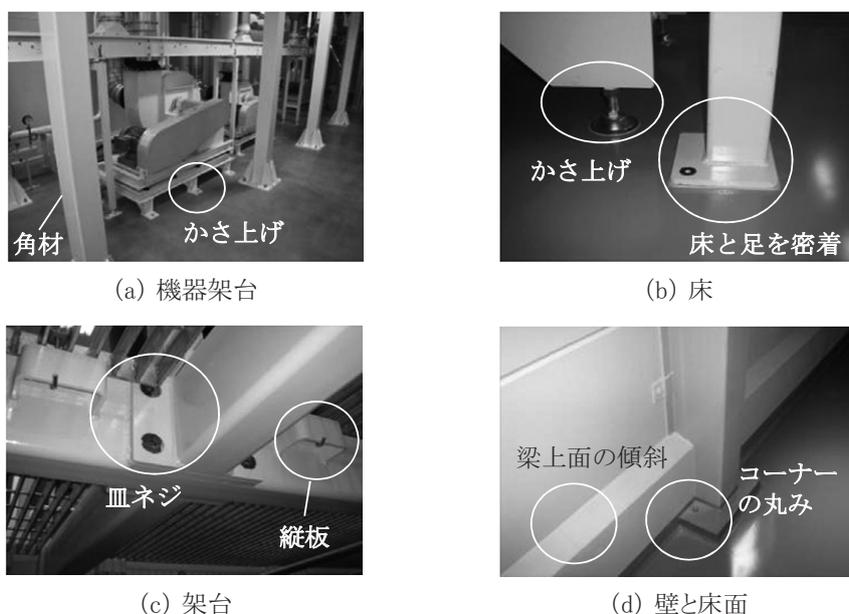


図-12 AIB 基準対応の設計例

床面を密着させ、粉やホコリが部材の中や設置面に入り込まないように配慮が必要である。図-12(c)は共通架台であるが、架台の接合部をシンプルな構造として粉だまりを防止している。また、部材の締結は通常の六角ボルトではなく皿ネジを使用し、ネジによる突起が生じることを防いでいる。架台床面などでは鋼板を縦方向に向けて使用し、粉だまりを防止するとともに清掃しやすい工夫も重要である。図-12(d)のように建物の梁上面は、傾斜をつけ粉だまりを防ぎ、壁と床、壁と柱などのコーナー部分（入り隅）は、粉が入り込まないようにすき間を塞ぐとともに、さらに丸み（R）をつけて清掃しやすくしている。

## 6. おわりに

効率的で機能的な粉体工場を設計するためには、生産機械だけではなく、建物、建築機械、生産管理システム、電気設備などを総合的に検討することが必要である。

当社は、プラント設計にあたっては、顧客から提示される計画や仕様を設計に反映するだけではなく、潜在的な課題・問題を見出して改善案を盛り込んだ提案をすることが重要であると考えている。粉体エンジニアリング会社として、顧客が理想とする粉体工場の実現にお手伝いできるような提案力の向上に一層努力していきたい。

## 引用文献

- 1) 今西忠：“化学プラントの建設とその安全対策の一考察”、化学装置、7、p. 56-63 (2013)
- 2) 坂下攝：“入門粉体プラント設計”、工業調査会、p. 225 (1992)
- 3) 加納理：“低濃度空気輸送の省エネ制御装置”、粉体工学会誌、46、p. 763-766 (2009)
- 4) 粉体工学会編：“粉体工学ハンドブック”、朝倉書店、p. 471 (2014)
- 5) 岡田隆史：“粉体容器システムを使った粉体ハンドリング”、粉体技術、5、p. 1090-1095 (2013)
- 6) 伴昌樹：“食品工場向けトレースの出来る工程管理システム—マルチプラネットパッカー—”、食品工業、p. 1-5 (2010)
- 7) 七蔵司和哉：“ドライ系食品工場建設における計画/設計の現状と課題”、化学装置、6、p. 62-69 (2009)



あきやま さとし  
秋山 聡  
日清エンジニアリング(株)  
エンジニアリング事業本部 プラント第二部  
取締役 部長

〒103-8544 東京都中央区日本橋小網町14-1  
住生日本橋小網町ビル5F  
TEL: 03-3660-3444 FAX: 03-3660-3085  
E-mail: akiyama.satoshi@nisshin.com