

# 化学プラントにおける生産スケジューリングシステム導入事例

佐中 俊哉

三菱化学㈱では機能商品、ヘルスケア、化学製品の製造、販売を行っており、安全かつ効率的な運転実現のため、化学プラントのプロセスシミュレーション、機器設計技術、トラブルシューティング、そしてプロセス制御から生産計画立案にいたるまで、プロセス生産技術（PSE）と呼ばれる技術群を用いてその高度化に取り組んでいる。そのなかで複雑な切替パターンなどの制約条件を有するプロセスを対象に、制約論理プログラミングなどを用いたスケジューリングシステムを開発、導入している。本稿では導入経験の整理、連続生産プロセスを対象としたスケジューリングシステムを開発した事例を紹介する。

キーワード：スケジューリング、生産計画、化学製品、プロセス産業、制約論理プログラミング

## 1. はじめに

三菱化学㈱では機能商品、ヘルスケア、化学製品の製造、販売を行っており、安全かつ効率的な運転実現のため、化学プラントにおけるPSE（生産技術）高度化の一環でシステム化技術の高度化に取り組んできた[1][2]。さらにそれらの成果はソリューションパッケージとして三菱ケミカルホールディングスグループ内への展開もすすめている[3]～[6]。

本報告ではまず、われわれがこれまでにさまざまな対象プロセスに生産スケジューリングシステムを開発・導入してきた経験を整理し、次に連続プロセスに対してシステム導入した事例を報告する。

## 2. 開発にあたり

生産スケジューリングシステムの開発にあたり、三菱化学における過去のスケジューリングシステムの導入実績調査を行った。その結果、1990年頃から様々な製品プラントで導入を試みており、市販ツールを利用したものやカスタムメイドで開発したものなど様々な導入のタイプがあった。しかしいずれも導入を試みた形跡はあるが、なかなか運用が定着できていないという結果であった（図2参照）。

これら過去の導入事例において運用が定着されなかった原因を以下のように整理した。

①当時ハード、ソフトなどの環境がそれほど発達していなかったことがあげられる。しかし、近年の情報処理技術の飛躍的な能力進歩と低価格化の進展により、

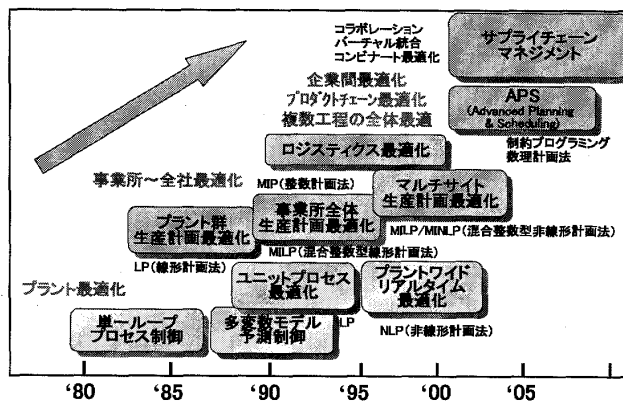


図1 PSEシステム化技術の歩み

対象プロセス	市販/カスタム	状況	解決すべき問題点難しい点	使われなくなった、完成しなかった理由
PlantA	市販ツール	試用	反応物のバッチサイズが異なる品種により装置、経路が異なる	運単位の結果を得られない 新品种の登録が難しい
	市販ツール	運用	反応物のバッチサイズが異なる充填形態の表示(表示自由度小)	担当者転属で手書きに戻る
PlantB	市販ツール	未完成	品種・検定クレード・荷姿が多い 出荷可能在庫が不明確	入力データの加工膨大 オーダー情報の精度限界
	カスタムメイド	試用	タンク繰り リサイクル系のあるスケジューリング	1シミュレーションに20時間以上要 シミュレーション
PlantC	カスタムメイド	未完成	タンク繰り リサイクル系のあるスケジューリング	Lotusファイルの単なるDB化 アプリケーション構築(膨大なバグ)
	カスタムメイド	試用		マスタ保守が非効率で膨大 (製品数2000、原料数800)
PlantE	市販ツール	上手く行っていない		
PlantF	市販ツール	運用	パッケージのカスタマイズなしで 機能限定し、シンプルに使用	

図2 スケジューリングシステム導入実績例

さなか としや  
三菱化学㈱ 技術・生産センター  
〒712-8054 倉敷市潮通 3-10

現在ではこの点はかなり克服されてきた。ハードの進歩により計算機の処理速度が飛躍的に向上し、パソコンが浸透した。また一方でソフトの面では各種計算ツール技術の進歩、グラフィカルI/F、操作性の向上があげられる。そしてその結果として、PC環境の浸透により計画立案者である一般ユーザらのシステムへの親しみや、コンピュータ操作スキルが向上した。以上のような条件が揃い、今またスケジューリングシステムへの期待が高まっていると感じる。

次に導入したシステム製品がパッケージ品か、自社開発のカスタムメイド品かの場合に分けて考える。

②まずパッケージ品の場合は、カスタマイズできる自由度が少なく、あるいはないことからプロセスモデルがうまく表現できず、満足いくスケジュールが得られなかった。何とかマニュアル操作や既存機能で工夫を凝らしてスケジュールを修正し活用しようとするも、前述のようにガントチャート等のインターフェースの操作性がよくなかったため満足いく結果にならずに使わなくなっていた。

③カスタムメイド品の場合は、計画立案者のルールをヒアリングしスケジューリングロジックに採用することになるが、ルールがあいまい、ルール間に矛盾がある、抽出しきれないなどの理由から結局満足いくようなスケジュールが得られなかった。また操作性についてはパッケージ製品と同様な原因があったと考える。

### 3. 対象プラントの分析

図3はわれわれが、近年生産スケジューリングシステムを導入した対象プラントの俯瞰図である。

まず図3の縦軸は計画を立てる上で重要な情報であるオーダ情報の特徴であり、ビジネスモデルの違いから見込み生産、受注生産型が存在する。これは導入するシステムの使われ方、ユーザの計画立案のワークフローに大きく影響を与える。受注型であれば、毎日に

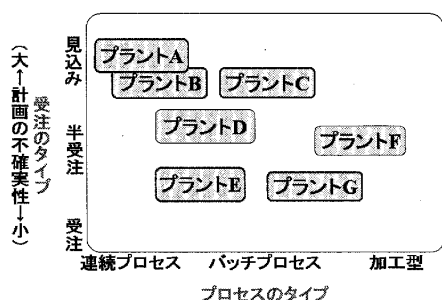


図3 導入実績のマップ

近い頻度で使われ、見込み型であれば、月一回+ $\alpha$ 程度の使用頻度のケースもあり、システムに求められる機能（計算速度、計画の粒度）に大きな違いがある。

次に図3の横軸は対象プロセスのタイプをその特徴から大きく3つに分けており、連続プロセスから、バッチ、加工型プロセスを並べ、これらはスケジューリング計算をするモデルの作成に大きく影響を与える。

以下に連続プロセス型、それ以外のタイプの特徴について述べる。

#### 3.1 プロセス型の分類

スケジューリングモデルを作成する上で考慮が必要と考える点を、対象を連続プロセス型とバッチプロセス・加工型に大別して、個々の特徴を表1、2にまとめた。

一般に石油化学プラントといわれるものは大規模装置から構成され、365日、24時間の連続運転を特徴とする「連続プロセス型」である。スケジューリング計算する上で、製品の品質制約による複雑な切替パターン、製品、装置の物理的な厳しい制約条件により最適解を求めることが難しい。

「バッチプロセス・加工型」に分類されるプラントの特徴としては、プロセスの構成・運転形式が“バッチ”（回分式）工程の繰り返しであったり、加工型では製品の形状がパイプを流れる液体、粉体の流体ではなく、ディスクリット（固体）なものを扱うことが多い。特に製品がディスクリットな加工型プラントでは、概して装置産業色が薄くなり作業員の人手を要することが多いといった特徴を持つ（表2参照）。

#### 3.2 開発アプローチ

われわれを取り巻く環境を見ると、まず前述のよう

表1 「連続プロセス型」の特徴

配管によって各工程が結ばれている、前後工程の装置間でパスの制約が存在する。
製品が流体のため工程間で大量の製品を一旦保管するためには貯蔵スペース（タンク）が必要、更に容量の制約が存在する
装置について銘柄の切り替え時、前後銘柄の組み合わせによる切替制約、ダウンタイム制約がある
365日、24時間の連続運転、かつ装置、品質制約から連続運転のmin/maxの条件が存在し、生産量に影響する
生産順にしたがった押し出し型で、プロセス途中での追い越しが基本的に不可能。
目的関数は切替時間（ダウンタイム）最小化：資本集約的（装置）産業

表2 「バッチプロセス・加工型」の特徴

工程間は物理的に接続（連続）されていないので、装置間のパス制約が存在しない。
比較的少量なので保管場所の制約はない
バッチ運転のため停止可能
工程間が物理的につながっていない、保管制約がないので追い越し可能（工程間の接続がEnd to Endなどの待ち時間の制約が存在する）
目的関数は要員平準化（最小化）：労働集約型産業
人手作業の工程が多い、工数の制約がネック

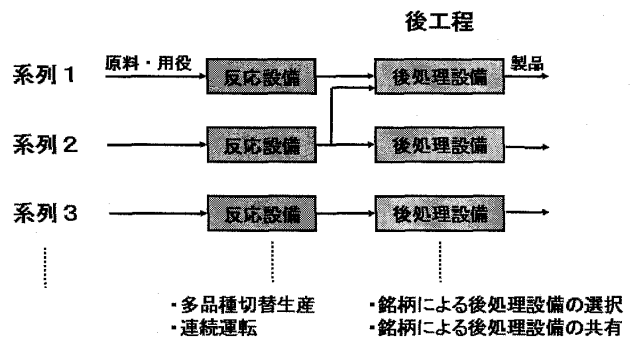


図4 対象プロセス

に情報技術の進歩，ユーザのITリテラシーのレベルアップがあり，パッケージ製品，カスタム製品とも実用的になっている。またメーカ企業に対しては市場からの製品価格の引き下げ要求から一層のコスト削減努力が求められ，企業内部からはスムーズな世代交代の要求などがあることから，それら課題への解決策としてスケジューリングシステムへの期待が高まっている。

以上のことから，生産スケジューリングシステムを開発するにあたり開発者サイドには，対象プロセスのタイプ，求めるスケジュールの粒度，計画を立てる頻度を含めたワークフロー等，問題の規模・特徴・難易度にあわせてパッケージ製品を適用するのか，カスタムメイドで対応するのかを見極めるセンス，能力も重要であると考えている。

現時点では，種々の複雑かつ厳しい制約が存在する「連続プロセス型」にはカスタムメイドで対応，比較的自由度の大きい「バッチ・加工型」ではパッケージ製品で対応するというアプローチがコスト的に有利ではないかと考えている。

今回，弊社の機能性素材を生産する多品種，連続プロセス型のプラントを対象に，生産計画立案からスケジューリングまでの機能をもつ生産計画システムを開発した事例について次節より報告する。

## 4. 開発事例

### 4.1 対象プロセス概要

まず，今回対象とした製品は，その生産拠点が全国に複数あり，系列数は合わせて十数系列，生産する銘柄数は数百であるが，荷姿まで含めるとさらに増える。また，本製品は基本的に営業からの販売見込み情報に基づいた生産を行っている。よって翌月，翌々月の2カ月が本システムの計画立案対象となっている。

次に製造プロセスであるが，図4のように，前工程における反応設備，および後工程における後処理設備

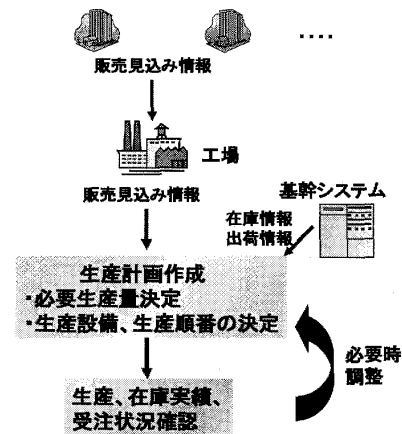


図5 システム全体像

から構成される。反応設備は24時間連続運転で多品種を銘柄を切替ながら生産しており，後工程では銘柄によっては設備を共有し，同時に生産できない銘柄の組み合わせ制約が存在する。その他，具体的なスケジューリングモデルについては後述する。

### 4.2 システム概要

本システムが対象とする業務フローを図5に示す。本システムは生産計画と生産スケジューリングの2つの機能を有しており，まず生産計画では支店営業からの翌月以降の販売見込み情報，計画立案時の在庫情報を元に，生産銘柄とその量を決定する。次にその生産計画を基にして計画期間中の在庫切れを回避しつつ，効率の良い生産タイミングをスケジューリングによって決定している。

### 4.3 販売見込みデータ

本システムの開発にあたっては，生産計画・スケジューリングの精度を高めるために，全国の支店営業で利用する販売見込みデータ作成支援機能を有するツールを開発・配布し，あわせて支店ごとに異なっていた作業の標準化を実施した。これによって支店サイドだけでなく，販売見込みデータの集計業務も軽減することができた。本システムによる計画は本社・支店を含

めたすべての拠点で最新の情報を共有している。

#### 4.4 生産計画

販売見込み情報、現在の在庫量、基準在庫量（下限値、上限値）から各銘柄の必要生産量を求めている。現時点では基準在庫量の値は熟練の計画立案者の経験によるノウハウを用いたルールベースの計算によって決定している。他の製品群では過去の販売実績にもとづく基準在庫量の科学的算出方法のアプローチを適用し成果をあげつつある。

#### 4.5 生産スケジューリング

スケジューリングモデルの構築および計算には制約論理プログラミングを用いた数理計算のソルバーである ILOG Solver, Scheduler を用いた[7]。

生産スケジューリングでは上述の生産計画で求めた生産すべき銘柄を目的関数を見ながら、どの系列で、どういう順番で生産するかを決定する。

本モデルではスケジューリング時、以下のような制約条件を考慮している。

##### (1) 中間製品と販売銘柄の関係と組合せ

本プロセスでは反応設備で生産される中間製品が、その後工程の後処理設備で加工されることにより、複数の最終製品（販売銘柄）となる（図6）。したがって反応設備の生産性向上のためには、販売銘柄の在庫切れを回避しながら、できるだけ中間製品が同一の販売銘柄は連続して生産する必要がある。

##### (2) 銘柄切替回数の上限

運転員の数、作業負荷などの問題から同時期に切替可能な銘柄数（系列の数）の上限が決まっている。

##### (3) 在庫切れを起こさない

本対象は見込み生産であるため、受注生産における「納期」に該当するものとして「在庫切れ日」を設定した。これは各銘柄の生産時期の決定の際、図7に示すような在庫の予測トレンドから各銘柄を生産しなかった場合に在庫量が下限値を下回ってしまう日（「在

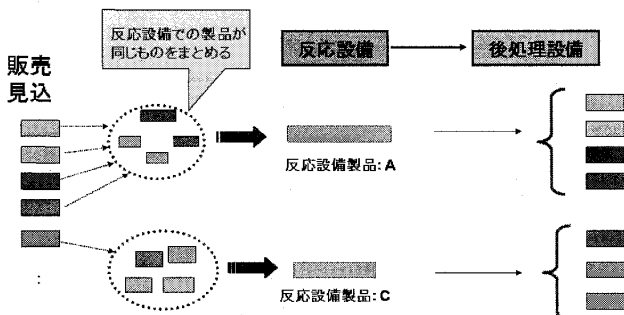


図6 制約のイメージ

庫切れ日」) を求め、この日を「納期」と考え、これよりも前に生産を開始するようにしている。

##### (4) 銘柄切替時の品質差の最小化

品質上の制約から銘柄切替時にはできるだけ切替前後の銘柄の品質特性値が近い組合せとする。

##### (5) 中間製品の連続生産可能期間の制約

反応設備での生産効率などの問題から同一の中間製品を連続して生産する場合に、1回の切替後ある一定期間は切替をすることができない、または同一中間製品の生産は指定された期間以上は連続できないという制約が存在する。

生産スケジュール計算では以上述べたような制約条件を考慮しながら、対象プロセスのダウンタイムを小さくする（生産性アップ）を意識し、全体の目的関数として切替回数が最小となるようなスケジュールを求めている。

#### 4.6 計算例

実際に生産計画を求めた画面の様子を図8、9に記す。計算には次のようなスペックのパソコンを利用している。

- ・ 生産オーダー数：約 100
- ・ 計算期間：1 カ月
- ・ 計算時間：1 分
- ・ ハードウェア：CPU：1.5 GHz, RAM：512 GB

スケジューリングの計算結果については熟練の計画立案者から良好な評価をもらうことができた。その後、新しい担当者への業務引継ぎもスムーズにできたと評価いただいた。

また開発・保守の部隊と現場は異なる事業所で通常勤務しているが、計算結果のログを保守の部隊から参照できるようにし、稼動状況を監視することにより保守性を向上させ、システムの現場への定着度アップに

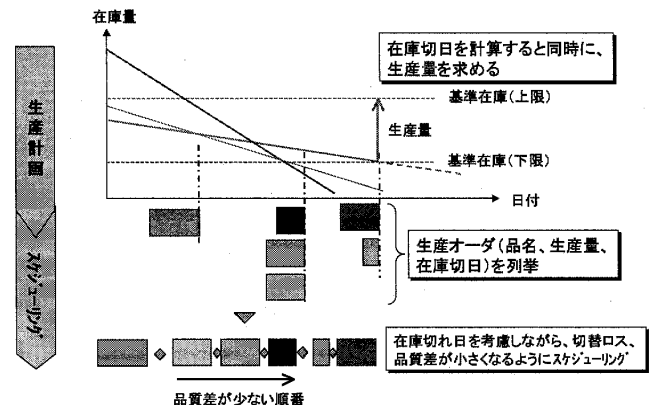


図7 在庫レベルを考慮したスケジューリング

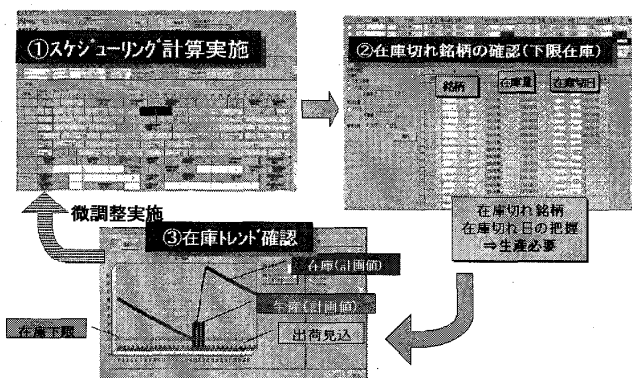


図8 在庫トレンド確認画面例

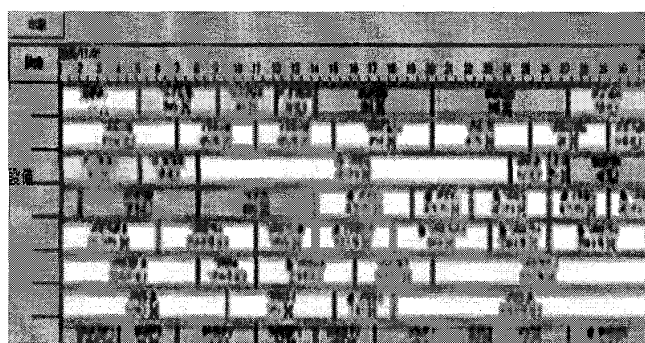


図9 ガントチャート画面例

努めている。

## 5. おわりに

以上のように見込み生産している「連続プロセス型」のプラントを対象に、将来の在庫トレンドによる「在庫切れ日」を考慮しながら、切替ロスを減らし、生産効率を最大化するというスケジューリングシステムを開発し運用中である。

これまでに蓄積してきたこれら「連続プロセス型」のノウハウを、よりビジネススピードの求められる「バッチ・加工型」プロセスをもつ事業群の生産計画、スケジューリングに適用していきたいと考えている。

さらに上位の意思決定、需要予測、適正在庫の算出など生産計画・スケジューリング問題の周辺問題・技術との新たな連携も積極的に考えていきたい[8]。

## 参考文献

- [1] 藤田, 江本, 竹下, 佐中: 「化学産業における最適化技術の応用」, オペレーションズ・リサーチ, 48巻, 8号, pp. 549-554, (2003).
- [2] 竹下, 藤田, 佐中: 「化学プロセスにおける生産スケジューリングシステム導入事例」, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 秋季研究会アブストラクト集, pp. 268-269, (2007).
- [3] 赤松, 佐中, 山中: 「省エネルギーを実現するPSEソリューション」, 化学装置, 9月号 (2005).
- [4] 竹下, 佐中, 藤田, 松川: 「化学プロセスにおける生産スケジューリングシステムの開発」, スケジューリング・シンポジウム2002 講演論文集, pp. 56-61, (2002).
- [5] 竹下, 森山, 藤田: 「化学プロセスへの生産スケジューリングシステムの適用事例」, スケジューリング・シンポジウム2004 講演論文集, pp. 89-92, (2004).
- [6] 佐中, 鈴木, 中田, 「プロセス産業における生産・物流最適化への取り組み」, 経営システム, Vol. 17, No. 4, pp. 295-300, (2007).
- [7] ILOG, ILOG Scheduler 6.0 User's Manual.
- [8] 藤田, 佐中, 竹下: 多品種化学プロセスにおける統合生産計画最適化, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 春季研究会アブストラクト集, pp. 226-227, (2005).