

製紙会社での計測制御に関する取組み

森 芳立*

Activity of the Measurement and Control Engineer in a Paper Company

Yoshitatsu Mori

Abstract - The process control is recognized as one of the important technical fields in the pulp and paper industry. In this field, the following elements have been greatly expected as important themes: the automated plant operations, the improvements of production efficiency, the production cost reductions, the quality improvements on the static operation periods, and so on. This paper exhibits several intelligent production control trials in the pulp and paper mill. The topics consist of the themes from the most upstream of the production scheduling problems on the mill management, through the midstream of the process control problems, to the most downstream of the logistics problems along the flow of the pulp and paper production processes.

Key Words: Process Control, Scheduling, Pulp and Paper Industry, Measurement and Control Engineer.

1 はじめに

紙パルプ産業においても「計測制御」は重要な技術分野の一つである。製紙工場の操業では、生産コストの低減、生産効率の向上、製品の品質向上、プラント運転の自動化などが重要な課題となってくるが、これらの実現には多くの計測制御技術が使われている。

また、このプラント運転において、定常操業時だけではなく、製品変更や生産量変更などに伴って操業状態が不安定となる操業切替え時の非定常操業時にも高い生産効率や即応性を維持していくことが求められており、ここでは、製紙工場で行ったインテリジェント生産技術の事例について紹介する。

2 製紙会社の生産プロセス

紙パルプの製造プロセスでは、固体状の原料である木材チップが、「パルプ工程」で薬液(苛性ソーダ)により蒸解されてパルプ懸濁液状の連続流体に形を変え、さらに水によって稀釈されたこの流体原料が次の「抄紙工程」で抄紙機により抄上げられ乾燥されて、連続した固体状の薄い紙シートの巻取りに姿を変えていく。

この上流の「パルプ工程」、「抄紙工程」は連続プロセスであるのに対して、一番下流にある「仕上げ工程」では、その前の「抄紙工程」で作られた大きな紙の巻取りロールを小巻取りに分割したり、平判と呼ばれるシート状に断裁し、個別に包装して最終製品に仕上げていく。そのため最下流の「仕上げ工程」の物の流れは、組立産業のように離散的で非連続な工程となり、上流の連続工程と取扱い形態が大きく異なってくる特徴を持つ。

Fig.1 に製紙会社の紙パルプ工場の生産に係わる大まかな流れを示す。一番上の「需給計画」によって、紙の販売動向(需要と供給)から翌月の生産量が決められ、それ

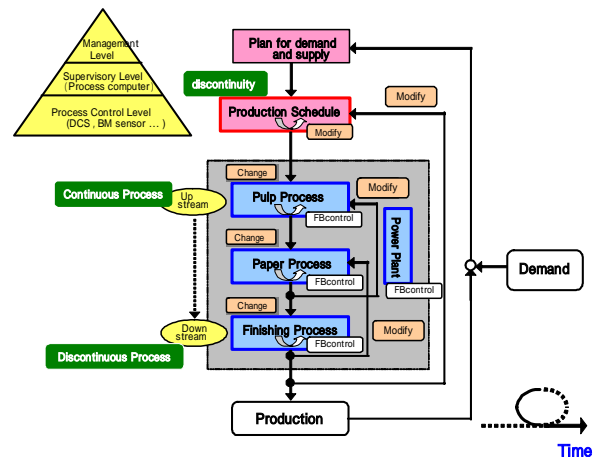


Fig.1: Flow of a pulp and paper production

を基に、「生産計画」が作られる。そして上流の「パルプ工程」から、次の「抄紙工程」へ、そして、下流の「仕上げ工程」へと生産が進んでいく。

工場では「生産計画」に従って製品を切り替えて作っていくが、常に全体のバランスを取りながらスムーズに物が流れるよう各工程内での切り替え操作が行なわれていく。また、工程間では必要に応じてフィードバックでの修正操作も加えられていく。紙パルプ製造ではこの生産のループを回しながら、さらに、このループを時間軸に沿って進転させて毎日の生産活動が続けられていく。

3 切り替え操作について

紙パルプ工場の生産設備の運転は、DCS(Distributed Control System)、そして、BM計と呼ばれる抄紙機に特有な制御装置を使って行なわれていく。

紙パルプ産業も他産業と同じく製品数は多く、必要な製品を必要な時に製造していくジャストインタイム的な生産形態が志向されている。その場合、供給原料や複数の運転条件をタイミング良く切り替えて、限られた生産設備

* 王子製紙(株) 製紙技術研究所
Pulp and Paper Research Laboratory, Oji Paper Co., Ltd.

の中で効率良く多品種の製品を製造していくことができる、より良質な切り替え操作の機能が必要になってくる。

本報では、最上流の「工場統括レベル」に位置付けられ、工場の管理部門で作成されていく「生産計画」の作成システム、そして、その下の「部門管理レベル」において、「生産計画」に基づいて各工程の「運転計画」を作成するシステム、そして、一番下の「プロセス制御レベル」において、各工程の「切り替え操作」を実際に行っていくシステムでの取り組み事例について紹介する (Fig.1)。

4 生産計画を作成する問題

製紙工場の管理部門は本社の営業部門とも相談しながら、毎月、毎週の「生産計画」を立てていく。「生産計画」のコントロール対象は工場そのもので、目標は効率的な操業、品質が安定する良質な計画の作成であり、同時に工程間の連携も図って工場全体の生産効率を向上させ、収益性を最大にしていく計画作成が期待される。そして、この「生産計画」に基づいて、「パルプ工程」、「抄紙工程」、「仕上げ工程」で実際の生産が行なわれていくが、間接部門である「動力工程」は生産に必要な電力、蒸気などを過不足なく供給していかなければならない。

4.1 抄紙機の生産計画作成

これは工場運営で最も重要な、抄紙機の生産切り替えのタイミングを決めて指示していく「月次生産計画」と、「週間計画 (抄造実行計画)」を作成していく生産計画作成のための支援システムである。本システムでは、エキスパートシステムとCAD機能を用いて、計画作成担当者の作業負担を低減しながら、より良質の生産計画作成を Fig.2 に示すような形で、半自動的にこなされていく¹⁾。製品間の抄造順序に係わる制約条件をルールとして抽出、エキスパ

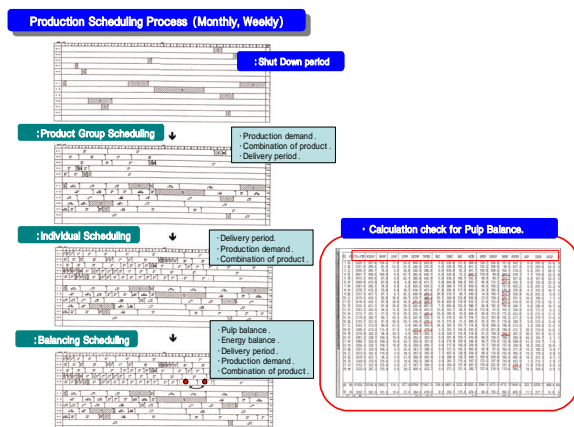


Fig.2: Monthly production scheduling

ートシステム機能も用いて、納期制約などを加味しながら、200個程の抄造製品を10台の抄紙機からなる日程計画表の中に配置、その後、パルプ生産量制約を満たすよう製品の置き替え操作を行って生産計画を作成していく。

4.2 パルプ工程の運転計画作成

これは前節の「生産計画システム」で作られた抄造計画に基づいて、工場の自家発電電力 (火力、水力)、及び、安価な夜間の購入電力と、既存の大容量のパルプ貯蔵槽をより効果的に運用していくことにより、総製造コストを最小とする効率的なパルプ製造設備の運転計画を作成する機能の開発である。

計画問題の最適化計算手法として、一般的によく使われる「線形計画法 (LP)」と、「ネットワーク計画法 (NW)」の「最小費用流問題」を使ってモデル化し、Fig.3 に示すような大規模スケジュールの最適化計算を試みた²⁾。その結果、作成された運転スケジュールは、人間系の判断による操業に対し、総運転電力費の2~3%程度のコスト削減が見込めることが判った。僅かな比率低減ではあるが、大規模プラントでのスケールメリットは大きい。尚、「NW」による計画作成は「LP」と比較して、問題の定式化に若干の制限を受けるが、大規模な問題に対しても計算処理速度が速く、同時に、コンピュータの小さなハード構成で実行可能という利点があることが判った。

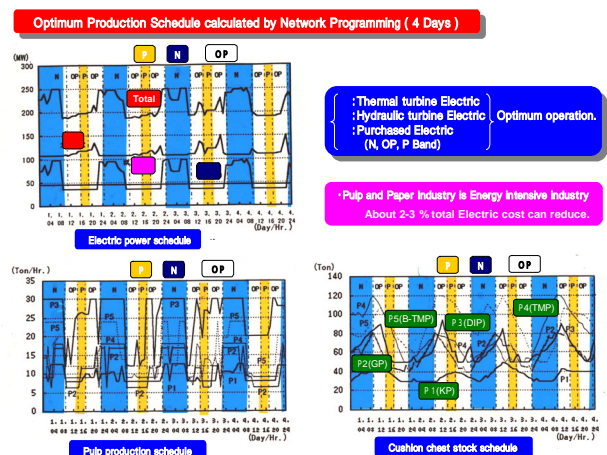


Fig.3: Operation scheduling for a pulp-mill

5 パルプ工程でのプロセス制御

これ以降の章では、作成された生産計画の指示に従って、各工程において実際の切り替え操作を実行していくためのシステム開発の取り組み事例について述べる。

尚、これらの機能はDCSに上位計算機 (プロセスコンピューター、または、PC) を接続して実現している。

5.1 パルプ蒸解釜での制御

パルプ工程において、連続蒸解釜の「蒸解度制御」と「材種の自動切り替え制御システム」の開発に取り組んだ³⁾。「蒸解度制御」は、高さが60m程あり、高温高压下、6～8時間の長い滞留時間を持つクラフトパルプの連続蒸解釜に対して、Hファクター（蒸解温度と蒸解時間から計算される反応速度指標値）と蒸解薬液濃度（特殊センサーで測定）を変数とする重回帰形式の予測式を用いてパルプ原料の蒸解状態を先行制御する機能の開発である。

また、この蒸解釜では生産品の必要性から、パルプ原料となる広葉樹と針葉樹のチップ材種を、日に2回程の高頻度で切り替えていく難易度の高い作業を行っている。その場合、時間と共に連続蒸解釜の多くの操作端を適切に切り替えていく操作が必要になるが、「材種の自動変更制御システム」において、この非定常時の操作を自動化する制御システムの開発に取り組んだ (Fig.4)。

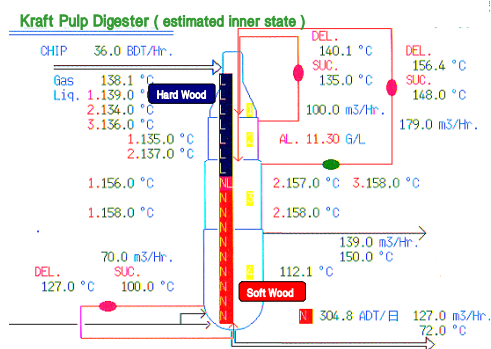


Fig.4: Kraft-pulp digester's cooking control

5.2 晒工程での白色度制御

クラフトパルプの連続蒸解釜からブローされるパルプは濃い茶褐色をしている。そのため、後ろに続く晒工程で、高白色度のパルプになるように漂白していくが、この晒工程においてパルプの「白色度制御」に取り組んだ。

晒工程では Fig.5 の写真のような多段構成の漂白塔に二酸化塩素、苛性ソーダ、過酸化水素などの漂白薬品を順番に添加し、常圧下、70 程の高温条件下の反応で、パルプの漂白を行っていく。晒工程には、パルプの白色度をオンラインで計測していく光学式の特種センサー、その他にpH計などを設置している。また、漂白塔の容量は大きく、原料滞留時間は各塔約2時間、漂白工程全体で合計8時間程の長時間となる。そのため、各漂白塔の入口で漂白薬液を増添してから、白色度計でパルプ白色度の上昇効果が計測されるまでに長い時間遅れが伴う。

さらに、漂白反応は流入してくるパルプの白色度、漂白薬品の添加率、pH、原料温度、原料濃度、生産レートに伴う原料の滞留時間の変化など、複数の変数が相互に複雑に影響し合う多入力多出力制御系である。そのためここでは、パルプ白色度をコントロールしていく「白色度制御」機能にモデル予測制御 (MPC) の適用を試みた⁴⁾。その結果、主要漂白薬品の添加率の削減 (約10%)、そして、最終パルプ白色度の安定化が確認できた。

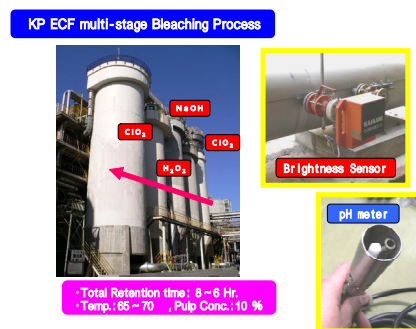


Fig.5: Pulp brightness control for bleaching process

6 抄紙工程でのプロセス制御

続く抄紙工程では、製品品種の「自動抄替え制御システム」、非干渉制御を用いた抄紙機ワイヤーパートでの「リテンション制御」の取り組み事例について述べる。

6.1 抄紙機の自動抄替え制御システム

「自動抄替え制御システム」は、製品切り替え (抄替え) の多い抄紙機において効率良く抄替えを実行する制御機能である⁵⁾。この「抄替え制御機能」は紙の坪量制御 (単位重さ)、水分制御、含有灰分制御、そして抄速変更制御などの複合システムからなり、10分間程度の短時間に複数の操作端の変更操作を同期を取って行っていく。ここでは、抄紙機の運転制御を行なっているBM計に外付けのPCシステムを接続して、より高効率で抄替えを実施できるシステムの開発に取り組んだ。「抄替えシステム」

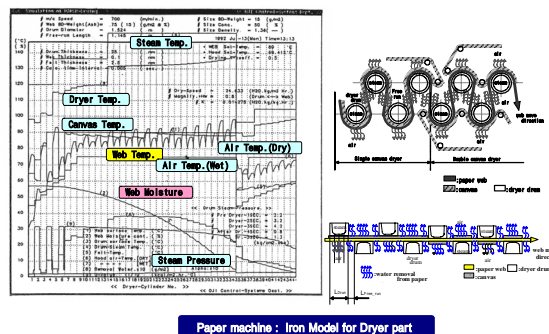


Fig.6: Dryer prediction control for the grade change

の中でも非線形な応答になるため特に難しいとされる「紙の水分制御」において、「アイロンモデル」と呼ぶ Fig.6 に示すような伝熱乾燥モデルを考案し、湿紙の乾燥状態を高速で精度良くシミュレーションすることを可能にした。

また、これらの機能を利用して、乾燥ドライヤー設備の抄替え時における蒸気圧力の予測制御、そして、原料流量予測がより高精度で行なえるようになり、従来のBM計単独による機能と比較して約19%の抄替え時間短縮を実現するシステムが開発できた。

6.2 抄紙機でのリテンション制御

最初に抄紙機ウェットパート(濾過工程)のワイヤー装置から濾過されていく、ごく低濃度の白水中に含まれるパルプ濃度(約0.3%)と灰分濃度(約0.2%)を分離してオンラインで測定する光学式の特種センサーを導入した。

次に、この特種センサー(低濃度センサー)を有効に活用するため、パルプ原料に、ごく僅かに加えられる歩留向上剤の添加率をコントロールすることによって抄紙機ウェットパートの原料歩留り(リテンション)を安定化させ、製品品質を向上させる「リテンション制御」に取り組んだ。

抄紙機ウェットパートの操作変数の中には、相互干渉により互いに強く影響しあう変数が多く、この取り組みでは原料歩留りが低い抄造製品において、BM計の制御機能との相互干渉による激しいハンチング現象を引き起こしコントロールが不能となった。この対策として、Fig.7 に示すように非干渉制御を適用することにより、プロセスの状態を不安定にすることなく、ワイヤー濾過白水の濃度を安定化する「リテンション制御」が実行できるようになった⁶⁾。

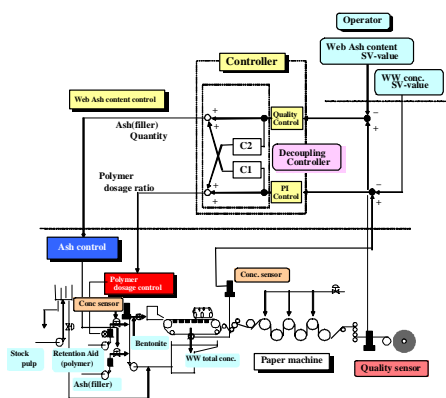


Fig.7: Retention control system utilized decoupling control

7 仕上げ工程の物流問題

工場の最下流、仕上げ工程の非連続な物流搬送において発生した「AGV巻取り搬送能力」問題について解析

した。多数の大径巻取りが発生する仕上げ工程の搬送設備において、複数台数のAGV(自動搬送台車)が使われる仕上げ工程の搬送路を対象に、Fig.8 に示すようなベトリネット手法を用いたシミュレーション⁷⁾により複数の発生地点から複数の目的地点に巻取りを運搬するAGV同士の正面衝突や追突を回避しながら効率良く巻取りを搬送していくAGV搬送の知的な運行ルールを見出した。その結果、運行法の工夫により、従来の運行法と比べて搬送能力で約30%の向上が見込めること、そして、この搬送路内を走行する適切なAGV台数も見出した。

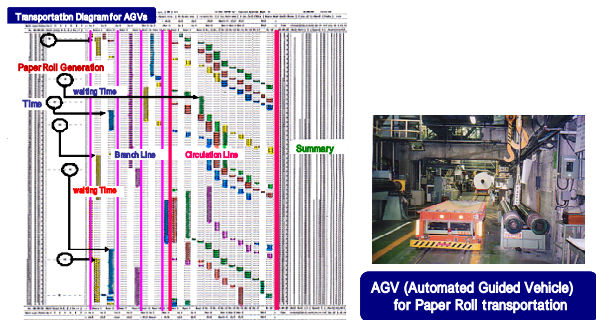


Fig.8: AGV transportation diagram of the finishing process

8 まとめ

紙パルプ生産工程の最上流に位置付けられている「生産計画」の作成問題から、製造工程の流れに沿って、「パルプ工程」、「抄紙工程」、そして、最下流に位置する「仕上げ工程」までの紙パルプ生産工程全体に渡る操業切り替えに対応するインテリジェント生産技術の取り組み事例について紹介した。

参考文献

- 1) 森原,松田,小島,製紙工場向け生産計画エキスパートシステム,東芝レビュー,44-10,(1989).
- 2) 森,最小費用流問題を用いたパルプ製造工程の生産スケジューリング,システム制御情報学会,第41回自動制御連合講演会,(1998).
- 3) Mori,Sueda,Takeuchi, Pulp cooking control and wood species change control for a Kamyr continuous digester, Annual Conference SICE2003,(2003).
- 4) 森,川北,西村,末吉,紙パルプ漂白工程におけるモデル予測制御の適用と効果,計装,Vol.50-6,(2007).
- 5) Mori,Shimizu,Takao, Development of a new automatic grade change control system for a paper machine, Pulp and paper technical association of Canada, Control Systems 2000,(2000).
- 6) Mori,Imai,Hara,Nishimura, Retention control system for the wet-end section in a paper machine, Annual Conference SICE2004,(2004).
- 7) 森,伊達,ベトリネットによる大径巻取り搬送用AGVの搬送能力検討,日本機械学会年次大会,(2001).