

## 6 パルプ・製紙工場プロセスのモデルベース予測適応制御

B. GOUGH, Richmond, Kanada  
D. MEADE, Richmond, Kanada  
G. ENGLAND, Richmond, Kanada  
S. KOVAC, Richmond, Kanada

### 抄録

本稿では、抄紙機リール白色度制御、ライムキルン温度特性制御、スレーカー温度制御、抽出段階 pH 調整など、困難を伴うことが多いパルプ・製紙工場制御ループに関するモデルベース予測適応プロセス制御の適用について述べる。応答の時間遅れのため、これらのループを制御することは困難である。従って、これらのプロセスの多くは手動で制御されており、その結果として非効率的な運転およびオペレーターの作業量増加を招いている。製紙には従来の PID 法では十分に制御できない多くのプロセスが含まれる。運転費を削減するためにプロセス変動を大幅に減らす実用的な代替手段を得ることがモデル予測制御によって可能となる。

Bill Gough  
Duncan Meade  
Graham England  
Sava Kovac  
IDEAS Simulation & Control Ltd.  
100-13700 International Place  
Richmond, BC V6V 2X8  
Canada  
bill.gough@andritz.com

# PTS

## 革新的プロセス制御

---

### キーワード

モデルベース予測適応制御、BrainWave、リール白色度、スレーカー温度、ライムキルン制御、抽出 pH 調整、パルプ・紙プロセス制御

## 1 緒言

製紙プロセス主要領域のいくつかに存在する長い応答時間のため、製紙には制御上の困難な問題が多く存在する。長い応答時間と長い時間遅れを伴うプロセスは、従来の PID 技術では制御が難しいため、オペレーターによって手動で制御されることが多く、その結果として大きなプロセス変動および運転費の増加を招いている。そのようなプロセスの例として、連続蒸解釜レベル、温度、カップー価の制御、漂白設備におけるパルプ白色度と pH の調整、ライムキルン温度と再苛性化の制御、TMP リファイナー負荷制御、数多くの抄紙機プロセスが挙げられる。工場供給原料につきものの大きな変動のため、指定された目標にプロセスを維持するには、制御を頻繁な外乱に対処させる必要がある。このように主要製紙プロセスの制御ダイナミクスが困難であること、さらに生産費を低減するため外乱を最適な状態で排除する必要性があることにより、高度な制御法を適用する契機が提供されている。

高度な制御とは複雑な PID ベース制御戦略から監視最適化システムまですべてを含む広義の用語である。しかし、重要な製紙プロセスの基本制御要件に対応するために必要なものは、長い応答時間に対処でき、従来の PID 制御よりも適切に外乱を処理できる調整レベルコントローラーである。モデル予測制御 (MPC) は長いプロセス時間遅れの処理に関して十分に実績のある方法である。さらに、測定外乱をフィードフォワードとして制御設計に盛り込むための洗練された枠組みとなり、同じ設計手法を用いた相互作用制御ループのなど多変数系を解決することもできる。要約すると、PID 制御が十分に機能しない場合、モデル予測制御は一般的なほとんどの制御問題に対して良好な解を与え、製紙会社が自社の設備の制御を最適化するためには理想的な代替手段となる。

MPC は製紙会社がプロセス応答を理解したうえで一貫した方法を用いて自社の制御上の問題に取り組むことを可能にする。さらに、MPC は制御担当技術者にプロセス応答の精査を求め、パネル操作だけでは PID の調整パラメータを安定した制御状態にできないようにする。この措置により、プロセス応答自体において生じる実際の変動が確実に認識され、その結果として制御解を問題に対応させその解決にむけて修正できるようにする。そうすることによって、一般的な PID 手法よりも、MPC は制御システムを完全かつ最適な解に進化させるために役立つ。PID 手法は、すべての設備条件下で安定してはいるがそのいずれにとっても最適ではない最小公分母的な解までコントローラーの精度を落とす原因となっている。

これまでモデル予測制御は、その技術を適用するために必要な実施労力および専門知識の水準が原因となり、実用化するには困難であり、また高額な費用を要するものであった。これにはモデル予測制御法を搭載するために開発されたソフトウェアツールの多くの学術的性質もさることながら開発されるモデルの複雑さなどのいくつかの要因がある。

本稿では BrainWave® という商品名で知られているモデルベース予測適応 (MPC) コントローラーのさまざまな製紙プロセスへの適用について述べる。このコントローラーは特許取得済み (米国特許#5,335,164)

のパソコンベース市販ソフトウェアパッケージであり、世界中の様々な業種における導入件数は 1,000 を超える。手動またはその他の自動制御戦略と比べると、予測制御機能によって大幅な性能改善が可能になる。一般に、この手法を用いて 50%以上の変動低減が達成されている。

上述のように、プロセス応答モデルを得ることが MPC コントローラーの搭載においては重要である。当社の設計では、コントローラーはラゲールの多項式に基づく汎用関数級数近似法を用いてシステム応答をモデル化する。この手法は最小限の事前情報で数学的にプロセス応答をモデル化するための単純かつ効率的な方法を提供する。さらに、コントローラーが自動的にプロセス応答モデルのオンライン適応を行うことを可能にする。これらの要素は搭載の労力を減らし、1 用途あたり通常約 1 週間の MPC コントローラーの設置期間を短くするのに寄与している。適応機能は制御技術者がプロセス応答モデルを開発するのに役立つことから、適用する者の専門知識レベルに関係なく同一の良好な結果が得られる。数千のプロセス・コントローラーで大型設備を運転する産業界の顧客にとっては、この利点だけでも非常に有用である。

これらのモデルを予測制御設計の基礎として使い、MPC は PID 型コントローラー使用の場合よりも良好に長時間の遅れまたは応答時間が長いプロセス(または時間遅れが応答ダイナミクスの重要な部分である高速応答プロセス)を制御することが可能である。測定外乱をフィードフォワード変数として制御戦略に組み込むことによってその影響を自動的にモデル化し除去するためにこの手法を用いることもできる。以下の項では、MPC コントローラーの設計で用いられるラゲールのモデル化法、抄紙機リール白色度制御、ライムキルン制御、スレーカー・再苛性化制御、抽出段階 pH 調整を適用した結果について述べる。

## 2 モデルベース予測適応コントローラーの開発

モデルベース予測適応コントローラー設計の第 1 段階は、制御対象のシステムに関してプロセス応答の数学的表現またはモデルを構築することである。当社のコントローラーはブリティッシュ・コロンビア大学で Dr. Guy Dumont と Dr. Chris Zervos によって開発されたプロセス伝達関数モデル化の方法を用いている[1-6]。この方法では、プロセスをオンラインで制御しながら収集したプロセス応答データに従って正規直交ラゲール関数の級数を用いて自動的に伝達関数モデルを構築できるため、正確なプロセスモデルを得るために必要な労力を削減する。制御アルゴリズム開発の全体を[7、8]に示す。

ラゲール関数の級数は以下のように定義される。

$$I_i(t) = \sqrt{2p} \frac{e^{pt}}{(i-1)!} \frac{d^{i-1}}{dt^{i-1}} [t^{i-1} e^{-2pt}] \quad (1)$$

ここで、  $i = 1 \sim N$

$p =$  ラゲールの極

$t =$  時間

適切な重み係数を用いてそれぞれを合計すると、以下のようにプロセス伝達関数が近似される。

# PTS

## 革新的プロセス制御

---

$$g(t) = \sum_{i=0}^{i=\infty} c_i I_i(t) \quad (2)$$

ここで、  $g(t)$  = プロセス伝達関数  
 $c = i$  番目のラグール係数

この方法との類似は、周波数分析器でよく見られるように周期的な信号を近似するためのフーリエ級数法における余弦関数を使用することである。この場合、重み付けした余弦関数を合計したときに元の信号の合理的な近似が得られるように各余弦関数の重みを決定する。この場合、信号はその周波数スペクトルで表される。

プロセス制御では、プロセス伝達関数は本来過渡的であり、周期的ではないため、余弦関数はモデルの基礎として適切な選択ではない。しかし、観測されたデータセットからモデルを見積もる際、フーリエ級数法の正確さによって、簡潔かつ効率的なモデル構造および優れたパラメータ収束などの多くの利点を得られる。当社の研究の目的は、プロセス制御用途においてよく見られる過渡応答をモデル化するために一様に簡潔かつ効率的な方法を見出すことであった。

ラグール関数はモデル化されているプロセスに対して同様の挙動を示すため、プロセス制御で見られる過渡信号の種類をモデル化するのによく適している。さらに、ラグール関数はプロセス応答におけるむだ時間を効率的にモデル化できる。オーバーシュートがほとんどまたは全くない状態でできるだけ速く設定点を得られるようにプロセス応答を予測するため、単純 d ステップ先行予測制御則を用いた適応調整コントローラーの設計の基礎としてこのモデルを用いる。

プロセス制御用 OLE ( OPC ) を用いることにより、MPC コントローラーを既存の工場 DCS または PLC システムに接続する。制御ループのモード ( すなわち、手動、PID 自動、またはコンピューター自動 ) を決定するために、工場 DCS または PLC システムにロジックを組み込む必要がある。コンピューターまたはネットワークの故障が発生すると制御モードが自動的に元の制御に戻るように、コントローラーはロジックプログラムで双方向のハートビートを維持する。利用可能な場合、総合性能を改善するために上流プロセスで測定された外乱をコントローラーがフィードフォワード入力として使用できる。さらに、一般に生産速度または等級の変更によって生じるプロセスダイナミクスの急変に対処するため、コントローラーは多数の事前設定されたモデルおよびパラメータ設定を自動的に切り替えることができる。

### 3 リール白色度制御

代表的なリール白色度制御は開ループであり、オペレーターが離散時間間隔で紙のサンプルを採取し、標準的な実験室手法を用いて紙の白色度と不透明度を測定する。サンプルを採取する間隔は一般に約 1 時間であり、オペレーターは各実験室試験の結果を受けて化学物質添加の変更のみを行う。この方法では、仕様外の紙の生産を避けるためにオペレーターが保守的な ( 高い ) 白色度目標に制御する傾向があるため、化学物質の消費状況が悪化すると共に、紙の白色度制御不良につながることが多い。連続的なリール白色度制御体系では、オペレーターの仕事量が低減すると共に、化学物質の消費成績が改善されることにより紙の品質が改善される。図 1 に制御体系を図示する。

工場で用いられる DCS システムは MXOpen システムである。MPC 制御システムと MXOpen DCS との間の OPC 接続は Informetric による Measurex OD 用 LegacyConnect を用いて実現した。パルプの増白剤としてヒドロ亜硫酸ナトリウムを用いた。プロセス応答試験の結果、むだ時間は約 20 分、ヒドロ亜硫酸ナトリウムの変化は 5 ガロン / 分であり、その結果として Measurex スキャナーが白色度の 1.5 ISO 変化を示し、時定数は約 1 時間であった。これらのプロセスダイナミクスを用いて、コントローラーの更新を 5 分に設定し、出力上限を 12 ガロン / 分 ( 手動制御でオペレーターが同じ上限を使用した ) とした。この上限は経験的にヒドロ亜硫酸ナトリウムの飽和値であることが分かっており、このレベルを超える高用量で観測された白色度の上昇は極めてわずかであった。プロセスデータの高周波ノイズを低減するため、スキャナー白色度測定に 120 秒のフィルターを適用した。このフィルターは制御に支障を来さないようにダイナミクスに比べて十分に小さくなっている。

追加プロセスデータは原料貯蔵所白色度および残留過酸化物から得られる。損紙原料を追加する前に原料貯蔵所白色度を測定する。損紙原料を追加するとパルプの白色度が変わるため、制御戦略において原料貯蔵所白色度をフィードフォワードとして用いることは理想的ではない。計器の較正不足のため、原料貯蔵所で測定した残留過酸化物測定値を使用できなかった。しかし、紙の白色度維持のため過酸化物とヒドロ亜硫酸ナトリウムの両方を使用することから、パルプへの化学物質追加を最適化するために将来これを使用できる可能性がある。

# PTS

## 革新的プロセス制御

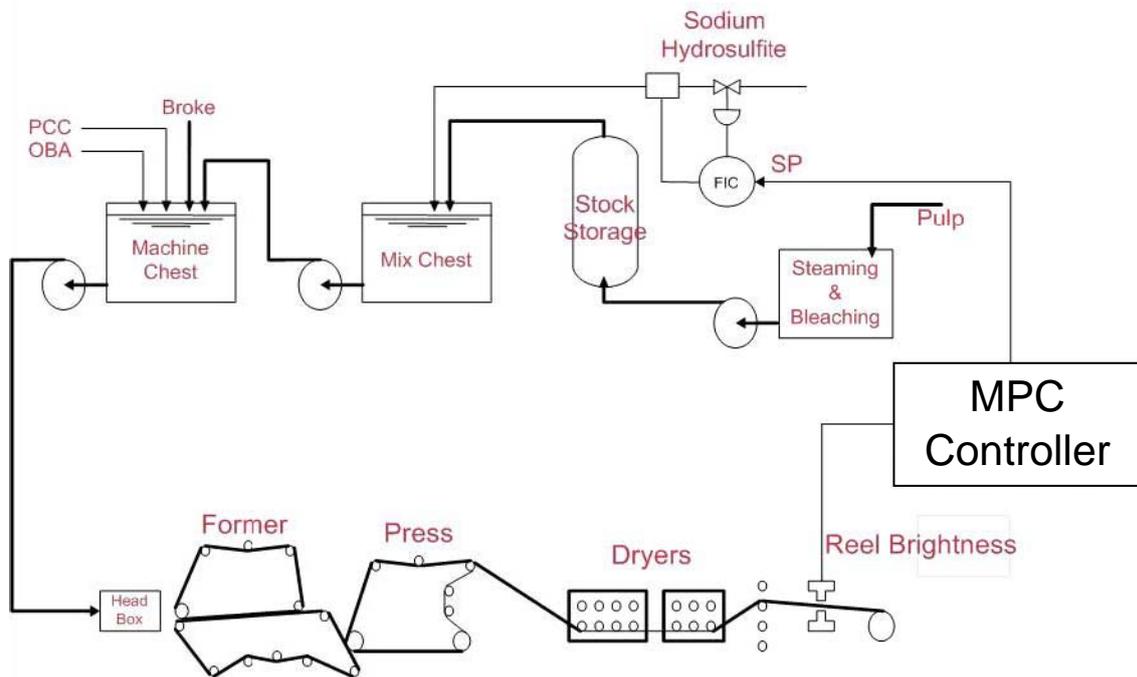


図 1 : リール白色度制御体系

図 2 はリール白色度の MPC 制御の 4 日間を示す。75 ISO から 60 ISO に至るまで、多数の設定値変更がオペレーターによって行われていることが分かる。最初はヒドロ亜硫酸ナトリウム流量の下限を 2 ガロン / 分に設定した。ヒドロ亜硫酸ナトリウム流量はコントローラーによって絶えず操作されているため、次にこれを 1 ガロン / 分に、最終的には 0.5 ガロン / 分まで下げた。

最初の 2 カ月の生産の結果を表 1 に示す。これらの結果は紙の生産 1 トンあたりのヒドロ亜硫酸ナトリウム消費の著しい低下を示している。2 月に MPC の使用を開始したため、この期間の運転は手動制御と MPC 制御の混合であった。従って、この期間中化学物質を節約できた時間は、MPC がプロセスの制御をしていた時間に限定されている。1 月の生産 (MPC 導入前) と 3 月の生産 (MPC による完全制御) を比べると、高い白色度等級において 15~75% の化学物質消費量の低減を示している。例えば、非常に高い白色度 83 等級の生産を比較すると、44% の低下が見られた。この工場の場合、年間の化学物質消費額は一般に US\$500,000 を超えていた。40% の低減で年間の節減は約 US\$200,000 になり、プロジェクト回収期間は 6 カ月未満になる。

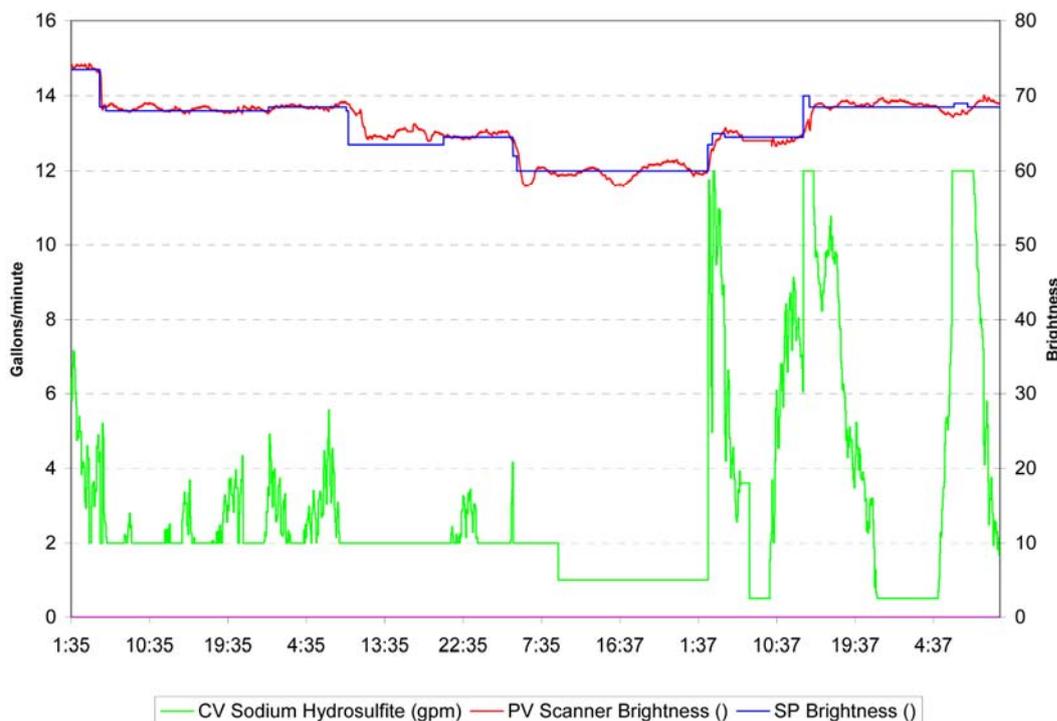


図 2 : MPC 制御におけるスキャナー白色度性能

表 1 : ヒドロ亜硫酸ナトリウム消費量

目標白色度	ヒドロ亜硫酸ナトリウム( ポンド ) / 紙( トン )			%低減	%低減
	1 月 ( 手動制御 )	2 月 ( 使用開始 )	3 月 ( MPC 制御 )	1 月-3 月	2 月-3 月
75	9.49	7.53	2.28	75.96	69.7
80	8.79	11.35	7.41	15.71	34.7
83	-	18.93	10.59	-	44.1

#### 4 ライムキルン制御

キルン温度特性に関する通気と燃料の多変数相互作用および長い時間遅れのために PID を用いた自動制御が実行不可能であることから、一般にライムキルン温度特性は手動で制御される。応答時間は通常 1 時間以上である。オペレーターはこのシステムの長い応答時間に耐えられないことが多く、生産速度変化などのプロセス外乱の間に急速に温度特性を回復させようとして燃料供給速度に大幅な修正を加える傾向がある。これらの行為によってキルン内は極端な温度になり、耐火物寿命の短縮だけでなくリング生成の問題が生じる。さらに、オペレーターはあまり頻繁に注意を必要としない快適な運転余裕を確保するため、ライム燃焼に対して必要以上に高い値および高い過剰酸素レベルで温度特性を制御する傾向がある。これらの習慣は燃料消費および保守費用の増加につながる。

通気と燃料を調整すると、火炎長および過剰酸素レベルが変化する。応答性が良くしかも安定した制御性

# PTS

## 革新的プロセス制御

能を得るため、長い応答時間に加えて、この相互作用にも制御戦略によって対処する必要がある。制御戦略の最終的な目標は、ライム排出温度を一定に保ち、LOIと反応性（スレーキング速度）によって測定されるライム品質を安定させることである。フィーダー側温度コントローラーの目標を調整することによってライム排出温度を制御するために監視用 MPC コントローラーを用いる。この手法によってフィーダー側温度限界を容易に制御戦略に盛り込むことが可能になる。図 3 に制御体系を示す。

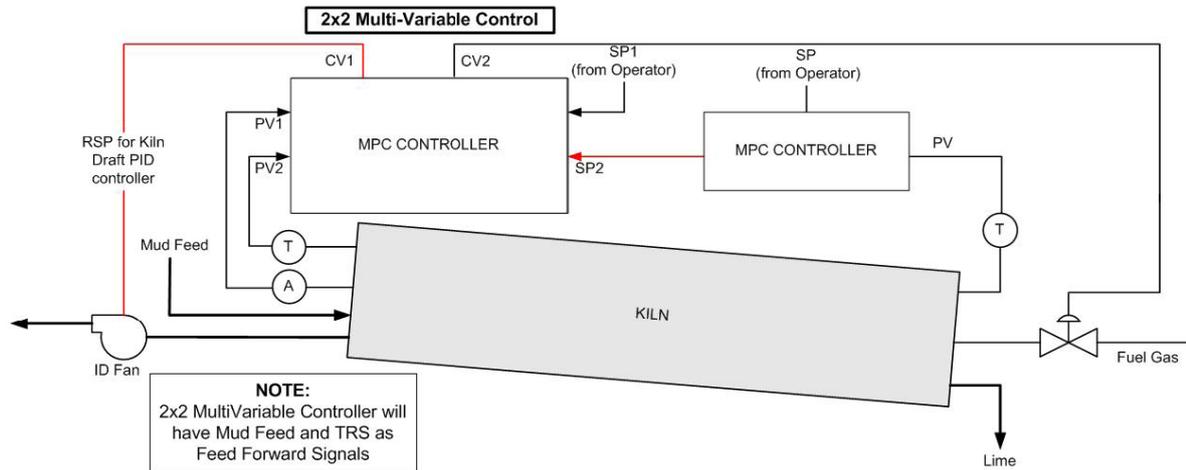
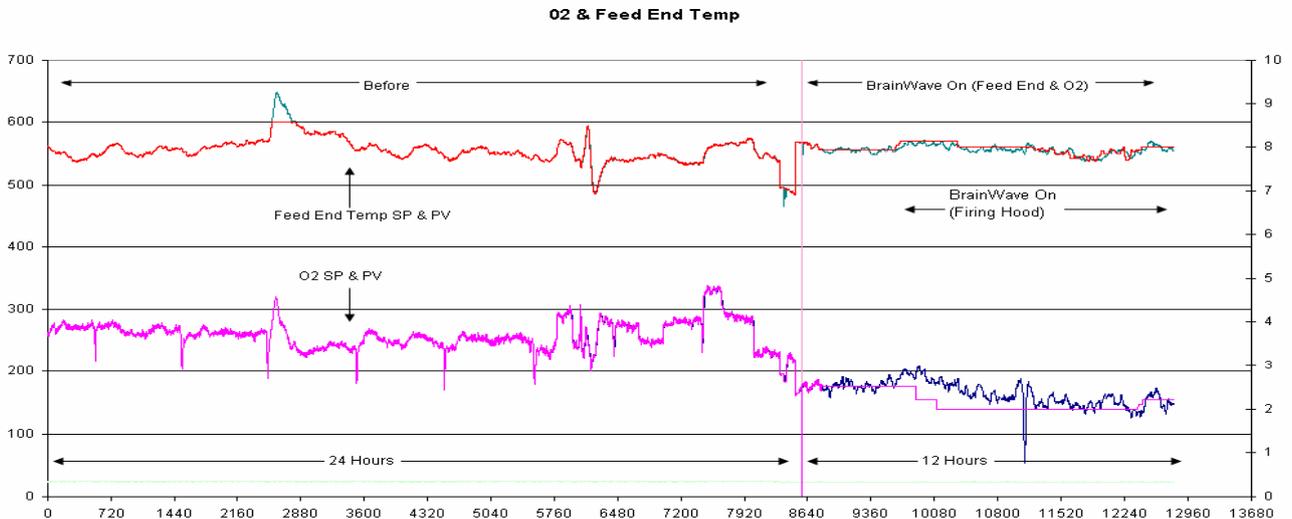


図 3 : ライムキルン MPC 制御体系



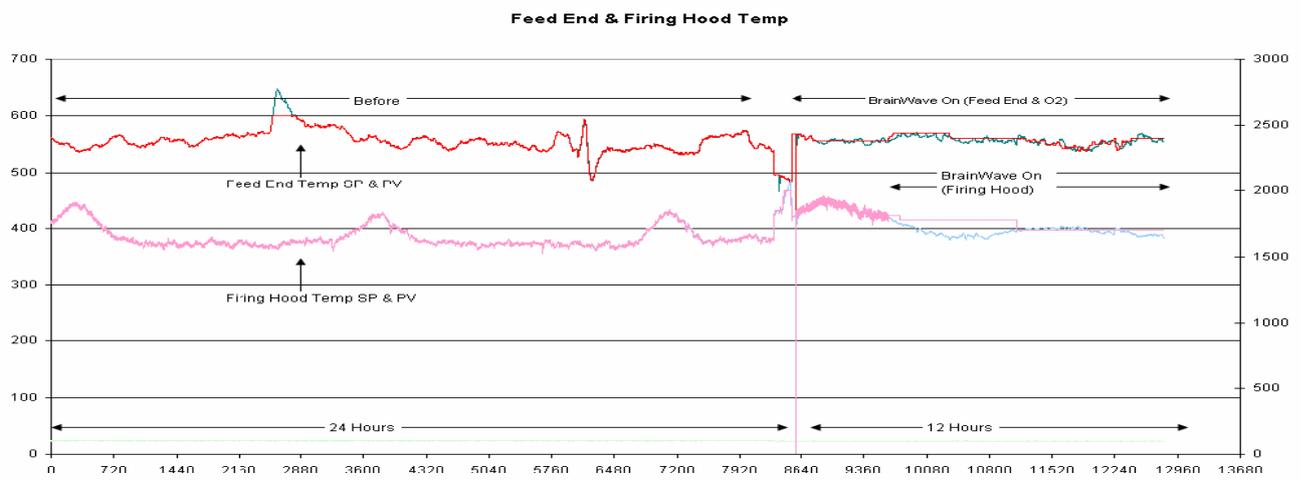


図 4 : ライムキルン制御比較

# PTS

## 革新的プロセス制御

この用途に関して MPC コントローラーによって得られた性能改善の要約を表 II に示す。各プロセス変数の変動の範囲が大幅に減少し、低い過剰酸素と低い平均温度でのキルンの運転が可能になった。これらの改善によって燃料消費が低下し、リング生成の発生率が低下した。石灰泥キルンに関していくつかある他の MPC 用途における経験だけでなく、本用途の結果も踏まえると、MPC 制御システムに対する投資の回収は 3~6 カ月である。

表 II : ライムキルン性能比較

プロセス変動	手動制御	MPC 制御	改善
過剰酸素	1%	0.3%	70%
供給温度	40°F	7°F	82%
ライム温度	200°F	25°F	87%

## 5 スレーカー温度制御

パルプ工場の再苛性化領域内では、一般にスレーカー温度と苛性化槽伝導度は手動で制御される。さらに、プロセスが示す遅いダイナミクスのため、自動制御の実現は困難である。MPC コントローラーを用いると、これらの遅いダイナミクスが容易にモデル化され、厳密な制御が可能になる。図 5 に制御体系を示す。

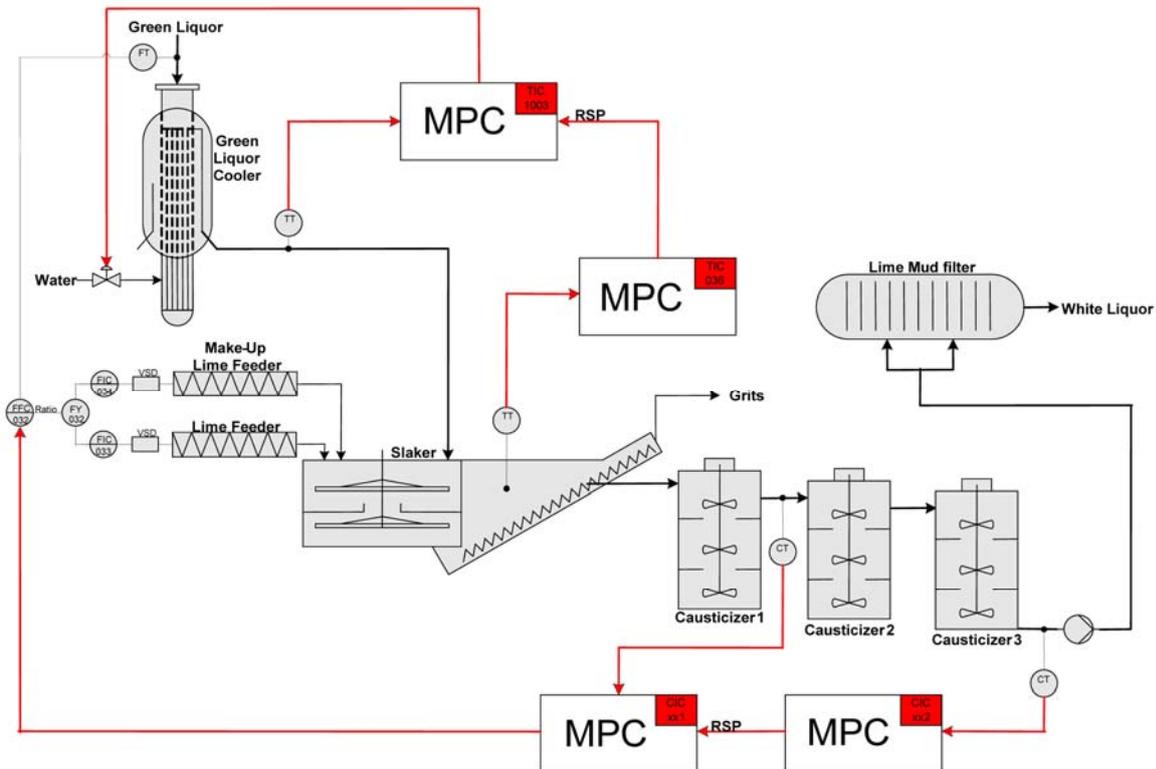


図 5 : スレーカー温度と再苛性化制御体系

オペレーターがスレーカー温度設定値を設定する。スレーカーに入る緑液温度を維持する内部ループコントローラーに合わせて MPC スレーカー温度コントローラーが設定値を調整する。この工場における緑液

温度ループのダイナミクスは適度に速く、むだ時間がほとんどないため、この緑液温度コントローラーは MPC または PID のどちらでもよい。ライム供給速度にどのような変更を加えてもスレーカー温度に影響を及ぼすため、MPC スレーカー温度コントローラーはライム供給のフィードフォワード信号を備えている。再苛性化槽伝導度制御体系によって自動的に調整されるためライム供給は絶えず変化する。

スレーカー温度応答のダイナミクスには 90 秒のむだ時間と 1,000 秒の長い時定数が含まれていた。この短いむだ時間はスレーカーの近くに位置する緑液温度制御を用いたプロセスの設計に起因する。長い時定数は主にスレーカー容器のサイズに起因する。このようなダイナミクスでさえ、オペレーターが絶えずスレーカー温度を監視し、システムの長い応答時間を考慮して変更を加える必要があるため、開ループ制御では不十分である。スレーカー温度が絶えず設定値を下回っているにもかかわらずオペレーターが 16 時間の間に緑液温度設定値に 3 回しか調整を加えていなかったことを図 6 は示している。

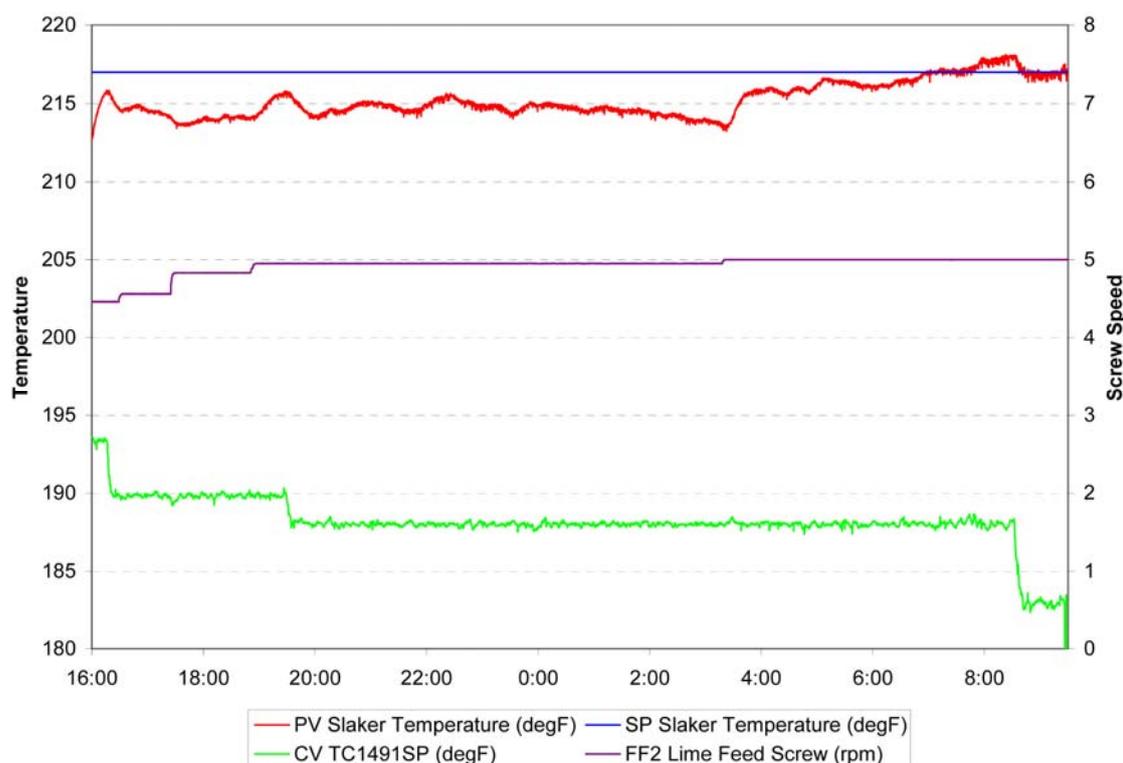


図 6：手動制御におけるスレーカー温度

スレーカー温度の MPC 制御性能を図 7 に示す。得られた性能改善の要約を表 III に示すが、ここでいう「誤差」は設定値とプロセス変数との間の温度の絶対差として定義される。緑液温度の継続的調整を伴う自動制御戦略を用いることにより、スレーカー温度制御は大幅に改善され、それに関連してオペレーターの仕事量が低減した。MPC コントローラーを用いて苛性化槽伝導度の自動制御も実現した。この用途で苛性化効率が 1% 向上した。

# PTS

## 革新的プロセス制御

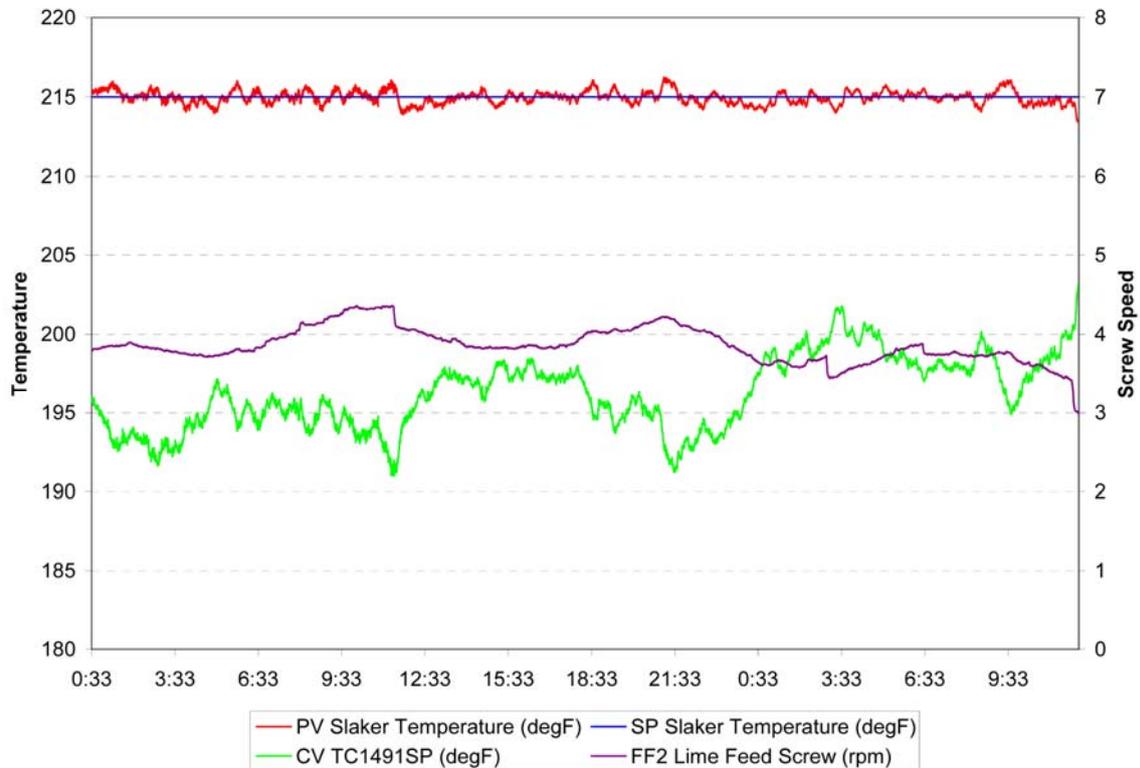


図 7 : スレーカー温度 MPC 制御

表 III : スレーカー温度性能比較

性能指数	手動制御	MPC 制御	改善
平均誤差	1.75	0.02	98%
最大誤差	4.28	1.65	61%
標準偏差	1.1	0.39	65%

## 6 抽出段階タワー出口 pH 調整

むだ時間が長くさらに変動することに加え、むだ時間とプロセスゲインが生産速度と共に 2.5:1 の率で変化するという事実のため、抽出段階タワー出口 pH の調整は困難である。プロセスむだ時間はプロセス時定数の 5 倍の長さであり、この制御用途を特に難しくしている。

工場で働いているオペレーターとエンジニアからの情報に基づき、初期プロセス応答推定値を MPC コントローラーに設定した。プロセスにおけるむだ時間は約 2 時間、時定数は約 17 分と推定した。0.5%二酸化塩素 (%適用率) の制御変数 (CV) の変化によって pH が 2.0 単位変化すると推定された。

生産速度の変化がプロセスダイナミクスに 2.5 倍の影響を与え得るため、生産範囲全体を対象とするように 1 組のプロセスモデルを用いて MPC コントローラーを設定した。4 つの異なるモデルを設定した (図 8 参照)。モデル間の主な相違点はプロセスゲインとむだ時間であった。プロセスゲインの範囲は 0.6~2.0、

むだ時間の範囲は 2,000~6,000 秒であった。低い生産速度では高いゲインと長いむだ時間を用いたモデルが必要になる。生産速度が増加するにつれて、モデルのゲインとむだ時間は減少する。プロセスの変化を補正するために適応のみに依存するよりも速く解が得られることから、MPC コントローラーは生産速度に基づいて適切なモデルに動的負荷をかける。

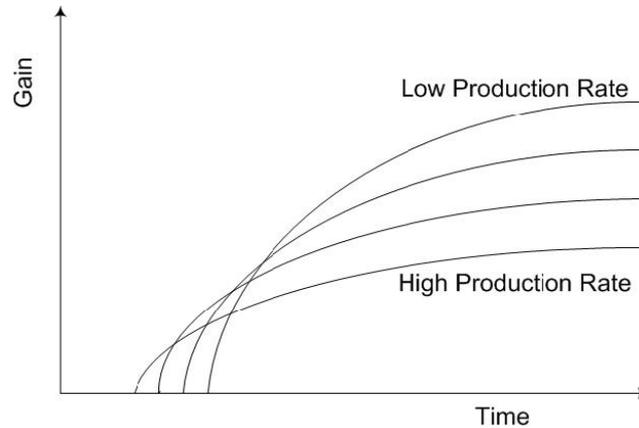
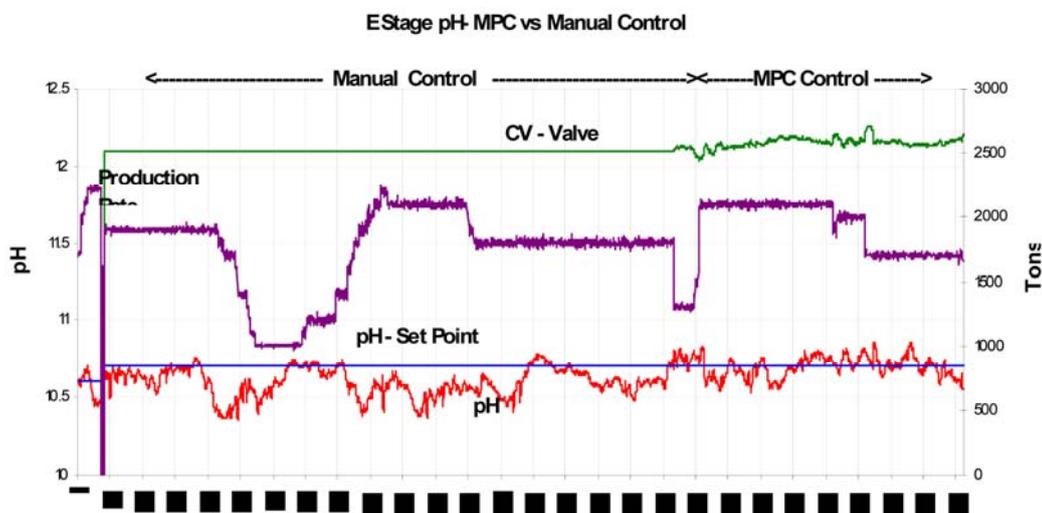


図 8 : MPC に用いた開ループプロセス応答モデル

オペレーターと MPC 制御によって得られた制御性能を図 9 に示す。著しい生産速度変化にもかかわらず、MPC コントローラーは pH の調整に成功した。工場で Dahlin 型コントローラーの搭載を試みたが、長いプロセスむだ時間のためにプロセスを安定した状態に保つことが難しかったことから、手動でプロセスを制御した。MPC 制御と手動制御との比較を表 IV に示す。自動制御によって 10.5 の代わりに 10.2 の平均設定値で運転が可能になり、その結果として苛性ソーダ添加が減少し、年間約\$100,000 に相当する節減になった。

表 IV : E 段階 pH 調整改善の要約

性能指数	手動制御	MPC 制御	改善
標準偏差	0.089	0.032	64%



# PTS

革新的プロセス制御

---

図 9 : pH 調整比較

## 7 結論

これらの4つの代表的なプロセスにモデル予測制御法を適用した結果、製紙会社がこの革新的制御ツールを用いて自社のプロセス制御を大幅に改善できることが実証された。記載した全用途の経済性は、回収期間が6カ月未満という非常に魅力的なものであった。プロジェクト回収期間が6カ月未満でありながら、代表的なクラフト工場において化学物質とエネルギーの費用低減で\$100万~\$200万の利益が得られる可能性があると推定される。その他の産業用途の例を[9-12]に示す。