八代工場回収ボイラ最適燃焼制御システムについて

十條製紙(株)八代工場 塩 越 陽 平

Optimum Combustion Control System for Recovery Boiler

Youhei Shiokoshi

Yatsushiro Mill, Jujo Paper Co., Ltd.

Recovery boiler is a part of kraft pulp process. Untill now, it has been difficult to keep stable combustion in a recovery boiler.

We have developed optimum combustion control system using meny new techniques. This system aimed at improvement of combustion stability, boiler efficiency and smelt reduction efficiency which were successfully established in our mill. In this paper, the summary of the system being introduced.

Keywords: Recovery boiler, Computer control, Combustion control, Optimum control.

1. はじめに

KP 設備の一部門である回収ボイラは、チップ蒸解工程より排出される黒液を燃焼し、蒸解薬剤の回収及び蒸気を発生させるボイラである。この種のボイラでは燃焼が不安定になりやすいなどのため燃焼維持、薬品回収率のアップなどに従来は多くのオペレータの手が必要であった。また石油ショックによるエネルギーの高騰などもあり、近年回収ボイラへの省エネルギー

ー、省力化、省資源などのニーズが高まり、それらの対応として、少数オペレータによる燃焼の安定化、高薬品回収率の維持、蒸気出力の最大化、低公害化など、ボイラハード設計を含めたより一層きめ細やかな制御システムが必要となってきた。筆者らは回収ボイラの最適化制御システムを開発、実用化し好結果を得ているのでこのシステムの概要及び稼動結果を報告する。

写真1は当システムを導入したパワープラント中央操作室の全景である。尚、本稿は1986年10月、第10

写真1 パワープラント中央操作室全景

回紙パルプ計装技術発表会で講演した内容に加筆したものである。

2. パワープラントの設備概要

当工場は新聞用紙、上質紙、書籍用紙などを年間約27万t生産している。これらのエネルギーセンターとして新回収ボイラを含め常用3缶2機に再編成した。パワープラントのエネルギー設備系統図を図1に、今回最適制御システムを導入した川崎重工 KJ-4200 S ボイラ諸元を表1に示す。

3. 最適燃焼制御を前提とした高効率ボイラの特徴

表1に示すような高温・高圧蒸気を発生する本ボイラの概略フローを図2に、最適化制御システムとボイラハードとの関係を図3に示す。ボイラは計算機制御を行うに当たり、ハード面からも多くの新技術の導入を含めた改良が行われ、計算機による燃焼制御の効果をより大きなものにした。その中で特に制御の安定化に寄与したシステムに次のものが上げられる。

図1 八代工場エネルギー系統図

表.1 川崎 KJ-4200 S 形諸元

形 式	川崎 KJ-4200 S 形 ボイラ
黒液固形分処理量	700t/d
黒 液 濃 度	70%
過熱器出口蒸気圧力	104kg/cm ²
過熱器出口蒸気温度	500°C
節炭器入口給水温度	135°C
蒸 発 量	105t/h
燃 焼 方 式	黒液専焼

図 2 回収ボイラプラント概略フロー図

図 3 最適制御システムとボイラハードとの関係図

1) 間接式黒液ヒーター

ドロップサイズ制御で、黒液温度変化により粘度を変化させ、噴射黒液の液滴サイズを変化させる目的で使用するが、従来の直接式ヒーターと異なり、加温用蒸気と黒液が直接接触しないため、制御による温度変化に伴う、黒液加温用蒸気のドレン混入による黒液濃度変化などが無くなり、黒液ヒーターでの大きな外乱要因の一つが除去され、安定したドロップサイズ制御が可能となった。写真2がその全景である。

写真2 間接式黒液ヒーター全景

2) エアポート自動クリーニング装置

この装置は従来から数時間ごとに、人力で実施していた、空気投入口に附着するスメルト及びダストの除去作業を自動化したものである。今回は汚れの度合いが早い一次低エアポートに設置した。

省力効果に加えてチャーベットの形状が安定した。これはダスト汚れにより、エアポートごとの風圧のアンバランスを発生し、チャーベット形状変動の主因となっていたが、自動化し一定周期で、人力時より早いクリーニング周期としたので、エアポート形状が常時一定となり、風圧のアンバランスが無くなったための効果である。写真3に缶前側の設置状態を示した。

写真3 缶前側のエアポート自動クリーニング装置

これら2つのシステム以外にも、燃焼制御の安定化につながった新型4段空気投入方式、チャーベット形状安定に寄与した黒液4面噴射方式、省エネルギーにつながったFDF、IDF他のインバータ制御化などが上げられる。いずれも最適燃焼制御システムの機能をフルに発揮させるための有用な設備となっている。

4. 最適燃焼制御計算機システム構成

本システムは、パワープラントのVDT(ビジュアル・ディスプレイ・ターミナル)設備の一部分で構成しており、最適燃焼制御用としては演算周期の高速性が要求される燃焼制御、及びマイナーループ制御については、分散形DDCであるTOSDIC-SSに、その他の最適化制御及び電力デマンド制御、日報処理データ収集解析機能、及びメンテナンス機能を上位計算機であるTOSBAC7/40Eに機能分担している。図4に計算機システム構成図を示した。

5. 最適燃焼制御システムとセンサー

最適燃焼制御システム構築上、従来から設置されていたセンサーの他に次に挙げるセンサー及び新たに開発した演算処理方法によって運転状態の監視が充分に出来るようになった。

1) 排ガスセンサー(FGA)

燃焼排ガス中の成分としてCO、CO₂、SO₂濃度を制御用データ(後述)として電気集塵機(E/P)出口でオンライン測定し、CO濃度はO₂濃度と共に低過剰空気燃焼制御用に、CO₂濃度は燃焼状態の監視に用いられている。測定器は、CO、CO₂オパシティーはECONICS7700を、SO₂はSYCONEX-5000を使用した。これらの他に、環境監視用SO₂計として堀場S100形(サンプリング方式)を使用した。

2) ガンマ線式密度計及び屈折式濃度計

これらのセンサーは、噴射黒液の成分濃度を知る目的で従来から使用されている。ガンマ線密度計は黒液の無機成分に、屈折式濃度計は黒液の有機成分に感度が高いといわれている。両センサー共、通常はメンテナンスフリーの機器である。今回は従来より使用されている両測定データに噴射黒液温度を考慮する事により、噴射黒液の有機成分濃度を推定する方法を開発し、これを外乱の把握及び補償制御に用い、従来困難とされていた有機成分濃度をベースとした運転指標を用いる事が可能となり、本制御システムの基本制御データの一角となった。ガンマ線式密度計はYOKOGAWA 8800を、屈折式濃度計はLSC社 Model-829 Nを使用した。

図 4 計算機システム構成図

図 5 光の大気透過率

3) スキャンニングパイロメーター (放射温度計)

従来から炉内チャーベッドの温度及び高さの監視制御の目的のために、多くのパイロメーターが使用されている。その多くは測定波長に $0.5\mu\text{m}$ 近傍より $0.9\mu\text{m}$ 近傍の近赤外領域を使用している。しかし近赤外領域の下方では、ガス体温度にも感度が高いので炉内チャーベッドレベル及び表面温度を測定する際には、炉内燃焼ガス体温度とチャーベッド表面温度との差が小さく、正確なチャーベッド表面温度及びチャーベッドレベルの測定が出来なかった。そこで今回のシステ

ムは、炉内ガス体の影響を極力少なくするために、測定波長に 赤外領域の $3.8\mu\text{m}$ 、半値幅 140nm を使用し、スキャン角度 50° 、スキャンスピード $5\sim 50\text{ rps}$ のパイロメーターを試作し良好な結果を得た。また従来複数個のスポット式パイロメーターによりデジタル的チャーベッドレベル測定しか行えず、情報量も少なかったが、アナログの測定が可能となり情報量も上がった。但しチャーベッド温度は測定出来てもガス体温度が測れないため、チャーベッド直上ガス温度を測定する場合には、 $0.5\mu\text{m}$ 波長域測定のパイロメーターが必要

図 6 光学材料の光透過率

である。現システムではスラグスクリーン直下、S/H 入口に燃焼ガス温度測定用温度計 (K 素子) を取付けている。図 5 に光の大気透過率グラフを示した。測定波長が赤外域の $3.8\mu\text{m}$ であるため、光学系材料として一般的ガラスや石英ガラスなどは使えず CaF_2 (螢石) により構成した (図 6 参照)。しかし CaF_2 の材料特性として急熱・急冷に弱いことから炉内・外遮断用フィルターには冷却用ページ空気取入口構造などを含め、のぞき穴の設計を綿密に行う必要がある。また本シ

テムでは測定位置が炉底から約 2500mm の所にあるが、スメルト・ダストによるエアポート汚れを除去し、正常なチャーベッドレベル測定状態を維持するためには、エアポート自動クリーニング装置を取付けた方が良い。本システムではスキャンングパイロメータより数点の情報を取出しているが、パイロメータ信号を画像処理する事で、より多くの情報が入手出来る。写真 4 はスキャンパイロメータでチャーベッド温度を計測した信号に画像処理を施したもので、チャーベッドレベルが明確に判別出来る。写真 5、写真 6 は S/H 最下部に取付けられているスートブロー蒸気により、チャーベッド及びチャーベッド直上燃焼ガス温

写真 5 スートブローによりチャーベッドが冷されていく過程

写真 4 画像処理後のスキャンパイロメータのデータ

写真 6 スートブロー終了直後の冷されたチャーベッド

度が下げられていく過程をとらえた写真である。これらの写真からわかるように画像処理をする事で、オペレーターが判読しやすい情報となり、よりきめ細かな操業に寄与するものと考えられる。パイロメーターは韓チノー製 IR-E 改造型である。

6. 最適燃焼制御システム機能構成及び概要

本システムは演算周期の高速性要求などから上位下位計算機により制御を分担している（図7）。

1) 燃焼制御

目的は過剰空気の低減であり、今回開発した黒液有機成分流量によって基本的2次総空気流量を決め、フィードフォワード制御を行っている。また、CO、O₂濃度により燃焼状態に応じたフィードバック補正を行っている。また、スートブローなどでの一次的な回流芒硝量の増加による燃焼不安定対策として、1次低空気流量を一時的に増加させる芒硝補償制御などがある。黒液有機成分流量による発熱量管理は有機成分濃度推

定式の開発により確立されたもので、有機成分濃度推定式は約200サンプルの黒液のオフライン分析データを統計処理して確立したもので、図8に推定式を用いて黒液有機成分濃度を推定し、それから求めた有機成分流量と主蒸気流量との実機データの相関図を示した。有機成分濃度が精度良く求められている事がわかる。

2) ドロップサイズ制御(チャーベッドレベル制御)

噴射黒液の適正な浮遊乾燥状態の維持を目的として、黒液の情報を基本とし炉内状況、排ガス情報より補正を加える制御である。補正項目としては噴射黒液圧力、噴射黒液温度、噴射ガンの種類、チップ材種、SO₂、空気流量などがある。また、チャーベッドレベル制御ではチャーベッドレベルが適正範囲に入るように、パイロメータの測定信号変化により黒液温度を変化させ、黒液の粘度を変化させる事で液滴サイズを変化させる。これにより黒液の落下時間が変化し、乾燥度合及び浮遊燃焼時間が変化し、結果的にチャーベッドを上下させる制御である。また、極端に山の高さが高低した場

図7 最適燃焼システム機能構成図

図 8 主蒸気流量と黒液有機成分流量相互図

合には、一次低及びチャーベッド頂上部空気流量の増減を併用し、すばやく適正範囲内に戻せるようになっている。

3) ブラックアウトの監視と制御

黒液の高濃度化及びボイラ本体の性能向上によって、従来のような極端なブラックアウトは発生しなくなった。しかし、低過剰空気燃焼制御を志向するシステムでは、チャーベッド全体にたえず十分な燃焼用空気を行きわたらせ、均一な燃焼を行わせることが必要である。

このため、局所的な空気不足による燃焼不良などについては監視が必要であり、本システムでは蒸発力、燃焼温度、排ガス分析、黒液性状などに関連した 18 項目のブラックアウト監視用変数を用意した。変数はそれぞれ絶対値の高低、変化率、長期的変化傾向の 4 つの属性を持たせ、各変数の属性の AND・OR の組み合わせにより監視を行っている。回避制御では燃焼状態を適正な状況に戻すため、各段空気及び黒液温度を一時的に増加し、燃焼状態回復後、回避動作前の状況に戻る。

これらの制御は、オペレータの経験的な知識を移植しパターン化して登録したもので、オペレータによるロジックの追加・変更・登録が簡単に出来るようになっている。

4) 還元ゾーン最適化制御

ボイラの燃焼用空気の各段投入比率を最適な配分状態にする制御である。評価関数は蒸気発生効率、還元効率の双方を考慮したボイラ効率、チャーベッド温度、排ガス分析値の非線形結合式を用い、1 次低空気量とチャーベッド直上空気配分比を操作している。また回収ボイラの場合は操作量と評価関数との間の再現性に難があるため、制御のモデル化はむずかしく実用性に乏しかった。このため本システムでは試行探索法によ

り最適化制御を行った。探索アルゴリズムは既存の手法を改良した簡略シンプレックス法を使用している。また、本システムでは規定値以上に早い変化率で変化する外乱での影響については除外して評価を進め、規定値以下の遅い変化率での変化についてのみ制御動作するように設計されている。この考え方はボイラの長期安定燃焼維持に大きく寄与した。

5) スートブロー最適化制御

炉内のダスト汚れの効率的除去と、回流芒硝増加による燃焼への外乱補償など、オペレータの経験を考慮に入れたシーケンススートブロー、そしてコンピュータの常時監視による状態量変化データにより起動するグループスートブローとの組み合わせにより、スートブロー蒸気量の省エネルギーを旨とした制御である。またボイラの操業期間が長くなるにつれて、スートブローパターンが変化するが、2 種類のスートブロー方式を組合わせた事によりオペレータの監視が容易になった。またオペレータがシーケンス変更などを考慮する際のフォローとして、スートブロートレンド画面などを使用し、迅速に判断ができ簡単に制御パターン及び条件変更が出来るようになっている。写真 7、写真 8、写真 9 に画面を示す。

(1) シーケンススートブロー

オペレータの経験及びデータ解析の結果などに基づき、1 工程最大 64 ステップのスートブロー順序を設定出来る。各ステップ間ごとの休止時間長もおのの任意に設定出来る。またグループスートブローがシーケンススートブローに割込むかたちで運転されるが、グループスートブローの割込が終わった後、設定された時間中はグループスートブローイングされたランス NO をスキップしながらシーケンススートブローを行う。

(2) グループスートブロー

写真7 スートブロー制御画面

写真8 スートブロートレンド画面

写真9 トレンドプロット画面

ボイラ本体及びエコを含め全体を8グループに分割し、各グループごとに燃焼排気ガスドラフト差圧、燃焼排気ガス温度差、蒸気及び水の温度差、熱伝達率、主蒸気温度、グループスートブロー起動時間間隔(但しグループスートブローの時のみ)、など6項目をコンピュータにて常時監視し、設定値を越えると各グループ単位でスートブローが行われる。また、各グループ最大10ステップのブローイングパターンを作る。また、ドラフト差圧、排気ガス温度差、主蒸気温度などで起動した場合は、ブローイング中に監視データーが正常に戻った時点で、スートブローを中止して起動されていたグループスートブローを終了する。その他ブラックアウト時にS/H部ランスをスキップするなど数種類の制御条件を用意している。

6) データ収集・解析及びメンテナンス機能

最適制御システムとは、メーカー及び計装担当者を含めた初期ファインチューニング終了後も、蒸解黒液性状の変化や、その他操業状況の変化に伴う制御方法の変更や、制御を使い込むほどに向上するオペレータの操業ノウハウを含めた、より高度なファインチューニングの実施などが行われるであろう性質のものである。このため本システムでは制御アルゴリズムのオペレータへの公開及び教育を含め、一般的にあまり大規模でない変更やファインチューニングについては後述の機能を使用し、いちいちメカの手をわずらわなくてもオペレータの手で調査し、メンテナンス機能を使用する事により容易に変更出来るように設計されている。このほか外部でデータ解析をする場合などの対応として、8インチフロッピーディスクへのデータバック機能も用意してある。以下おもなデータ解析機能について列記する。

○データ収集範囲

今回 CRT 制御システムにタグナンバー登録をしているすべての入出力に対して、データ集収が可能である。通常はオンラインにより次の様な仕様でデータを取込める(ここでは上位計算機担当分のみ記載した)。

○ヒストリカルデータ解析

同時に114点集収、1点あたり最大2048データプロット可能

データプロット条件

- ・最適燃焼制御が安定定常状態のみ集収、20点
- ・還元ゾーン制御が定常状態のみ集収、22点
- ・指定周期集収、72点

データ解析機能

- ・自己相関 ・相互相関 ・主成分分析
- ・2変数相関プロット処理
- ヒストリカルデータバック機能
 - 8インチフロッピーディスクに IBM フォーマットにより 256 点バック, 1265 データ/点
- トレンドグラフ
 - 最大 30 点, オートフレームコピー可能
- トレンドデータログ
 - 最大 32 点データをプリントアウト
- 日報処理データ
 - 各プラントごとにプリントアウト

以上、最適燃焼制御システムの概略を述べてきたが、制御画面についてもオペレータの監視操作がやりやすいように作らなければならない。制御画面の代表的なものを写真7から写真11に示した。

写真10 黒液、重油、蒸気関係プラント表示

写真11 燃焼空気・排ガス関係プラント表示

7. 最適燃焼制御システム導入による効果

本システムは1984年末に完成し、連続運転に入った。その後ボイラ本体の一部改良に伴う調整を含め、1985年末にすべての調整が終了し現在に至っている。この間以下の様な効果が確認されている。

(1) 操業の安定

計算機制御を前提としたボイラ本体の設計及び計算機によるきめ細かな運転制御を行う事により、高効率で安定な燃焼を維持する事が出来た。

(2) 省エネルギー

エコー出口の O_2 濃度で3.5%前後の過剰空気率から1.2%±0.4%程度の低過剰空気率燃焼を確立、スートブローの頻度を90本/日から70本/日に削減、 O_2 低燃焼による燃焼空気の減少に伴ないスチームエアヒータの蒸気量の削減、IDF、FDFのインバータ化による電流量削減など省エネルギー金額は全体で年間約1億円に達した。

(3) 薬剤回収

常に96~97%の高スメル還元率の維持に寄与。

(4) 公害防止

平均 SO_2 値は手動操業の約半分、 NO_x 値も2/3に減少した。

(5) 省力化

燃焼状態の監視制御の自動化、スートブローの自動化、黒液性状変化の追従などの効果により、大幅にオペレータの負荷を軽減する事が出来た。また直接最適制御とは関連しないが、CRTオペレーションに当たり、オペレータにとっての最適なオペレーション設備のありかたとして、今まで多数構築されたシステムを見ると、CRTオペレーション=ボードレスオペレーションという考えか？ 何もかにもCRTにおし込み、オペレータがアラーム処理やページ替に追われている設備や、その逆に多くのパネル計器（指示計他）をハードでCRT附近に設置し、オペレータがすばやく目的の計器を探すことが出来ず、ビニールテープなどで目印を付けて操業している設備などが見うけられる。どちらの場合もプラントの異常時など緊急を要する場合、CRTオペレータへの作業のさまたげとなり、緊急処置におくれを生じる可能性がある。

当システムではこれらの点に注目し、CRTとパネル計器との最適な棲み分けによる使いやすい設備を目ざし、人間工学的見地からの検討も含め十分な検討を加えた。その結果としてオペレータのCRTによる確認頻度が特に高く、重要な指示値はディジ

タル表示器で常時表示とした。またこの表示器はオペレータがまちがわずに、一目で探せる数しか設置しないという考えで、当システムは最大12個(現状10個)に制限した。アナソシエータも重要度別に3ランクに分け、更に最重要ランクはハードで表示した。このことによりオペレータの監視作業に広がりがあった。写真1のCRT前方のデジタル表示器が設置されているパネルが本システムで検討した結果にもとづき設置したパネルである。また省力化により小人数のオペレーションが可能になるが(当システムは6人で操業)、反面CRTオペレータと現場パトロール員の連絡が悪くなりがちである。このため同時無線通話装置などを操業管理者、CRT監視オペレータ、現場パトロール要員に常時携帯させ、常に操業状態についての情報交換、作業報告、作業指示などを全員で受けられるようにする事により、異常発生時の処理などが後手にならずに済む。またCRTオペレータの操業中の孤独感や責任の重圧感などからくる心細さや不安感などの精神的負荷などが軽減され、オペレータのより信頼性のオペレーションが可能となった。

8. あとがき

現在では省エネルギー効果のみを取り上げると、円高ドル安、重油単価値下げなど、システム導入当時とは大幅な環境の変化があったが、全体的視野から見ると現時点でも大幅な投資効果があったものと確信している。特に回収ボイラに対する技術的な面について述べると、従来まではただ薬品が回収出来れば良い、蒸

気が出れば良いなどの域で操業されており、技術データの的にはあまりアプローチされていなかったが、今回データ集収、オペレータノウハウに対するデータ解析による解明など多くの技術向上につながる技術蓄積が出来た。特にオペレータの操業方法の変化の一つとして、アナログ的、定性的操業感覚だったのが、デジタル的、定量的操業感覚に変化し、これによる操業レベルの向上には著しいものがあった。今後より最適なセンサー及び制御アルゴリズムの開発により、より最適な制御が可能となる事を期待する。本システムは当社と株式会社、川崎重工株式会社との3社共同開発により完成されたものである。またスキャンニングパイロメータの開発については株式会社、多様な御協力を得た。その他このシステムを完成させるために御協力下さった関係各位に深く感謝すると共に敬意を表する次第である。

参考文献

- 1) 黒崎, 井床, 他: 回収ボイラ最適化制御システムの開発, 川崎重工技報 第94号 (1986.12)
- 2) 松田: 回収ボイラの現状技術と将来の展望, 紙パ技協誌 40(6) (1986)
- 3) 塩越, 熊木: 紙パ動力設備における最近の計装制御技術, 計装 28(7) (1985)
- 4) 飯塚, 村松, 他: 紙パルプ工業プロセスの最適化制御システム, 東芝レビュー 41(10) (1986)
- 5) 飯塚, 他: 回収ボイラおよび連続蒸解釜の最適化, 紙パルプ技術タイムス 29(9) (1986)