

現場技術報告

コークス炉新制御技術の開発

Development of New Control System at Coke Oven Plant

NKK京浜製鉄所 杉岡 真吾*・宮原弘明・山本修一
松村進・石黒宏樹・福島康博

1. 緒言

製鉄所においてコークス工場は多量の原料とエネルギーを消費するプロセスとなっており、コスト削減の観点から原料費及びエネルギーコスト削減が大きな課題となっている。

まず、原料費削減の観点からみると、近年の高炉操業技術の進歩によりコークス強度の低下が可能となり、それに伴って、非微粘炭などの安価原料の使用比率が増加してきている。しかし、こうしたコークス強度低減においては、より高精度の品質予測が求められているにもかかわらず、従来法では十分な予測精度が得られないのが現状である。

また、エネルギーコスト削減の観点からみると、大きく分けて乾留する際の供給熱量削減と回収エネルギー増加が課題としてあげられる。乾留熱量低減については、すでにコークス炉自動燃焼制御システム (Computerized Combustion Control System) が導入されており、多大な効果をあげているが、回収エネルギー増加の面では若干遅れているのが現状である。

これらの諸問題を解決すべく、京浜製鉄所ではコークスプロセス計算機のリプレースを機に、高精度なコークス品質予測システムと熱物質収支モデルに基づく最適運転を可能とするCDQ (Coke Dry Quenching) 制御システムを開発したので以下に報告する。

2. コークス品質予測システム

2.1 開発の背景

コークス品質の制御は、配合・乾留情報からドラム強度を予測し、その予測値に基づく配合調整により行われる。従来は、このドラム強度予測には、重回帰式が使用されていた。しかし、重回帰式によるドラム強度推定方法では、現在の原料コスト低減に対するニーズを満足できる精度は確保できていない。その原因は以下のように考えられる。

(1) 重回帰式パラメータの変動

近年銘柄集約により短期的な銘柄構成変動が大きくなってきており、標準操業範囲を外れることによる、重回帰式の係数パラメータが大きく変動するようになった。

(2) 線形特性の検証

Fig.1にコークス品質に影響を与える因子である、最大流動度 (Max. Fluidity) とドラム強度 (Drum Index) の関係を示す。コークス強度と因果性がある操業因子は、MF以外も長いレンジでは非線形特性を有することがわかっており、これらの特性を線形回帰式で表現することには限界がある。

上記(1)(2)ような問題を解決するため、ニューラルネットワーク (Neural Network, 以下NNで表記) の線形分離及びデータ間非線形補完といった機能に着目し、推定精度を向上させるための対策を行った。

(1) 配合銘柄構成および操炉条件の変動に対応できるようにパラメータ決定データを類似操業ごとに分類し、個々にモデルを有する構成とした。操業分類にはNNの線形分離機能を用いる。

(2) コークス強度と因果性がある操業管理項目とコークス強度間の非線形関係をNNの非線形補完機能により決定する。

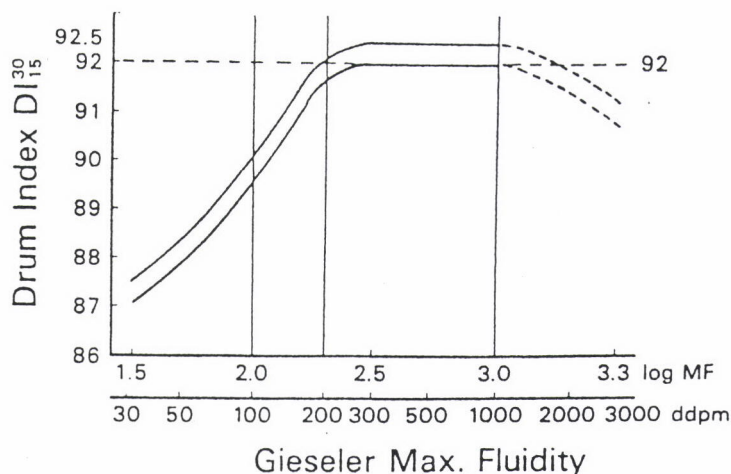


Fig.1. Relationship between coal property and Drum Index.

1996年4月25日受付 (Received on Apr.25,1996)

* Shingo Sugioka (Keihin Works, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

2.2 機能と構成

コークス品質に影響を与える因子を、品質制御の観点から整理すると、稼働率・入船計画など工場操業の外的要因に起因する操作不可能な操業条件項目と、品質制御の操作量として品質安定化のために変更アクションをとる操作項目とに分けられる。本システムでは操業条件変数を用いて類似操業状態に分類し、類似操業条件内で操作項目のデータを変化させることにより推定ドラム強度の調整が行えるようになっている。

2.2.1 構成

Fig.2にコークス品質予測システムの構成を示す。本システムは、操業分類用と品質推定用の2種類のNNで構成される。操業分類NNは、操業条件項目の最新データを入力して、類似した操業に分類し、分類クラスを出力する。品質推定NNは、操業分類NNで選択されたクラスのNNに操業条件項目と操作量各項目の最新データを入力し、ドラム強度を推定する。操業技術者は本システムを用いて、推定値が目標に合うように、操作量項目の入力データを変更し配合調整を行う。

2.2.2 学習

Fig.2に示すNNの学習データは、過去の操業データを類似操業に分類して求められる。この学習データは、ドラム強度が測定されるごとに修正される。Fig.2に示すようにドラム強度予測値は測定強度と比較され、予測に失敗した場合、品質予測NNの中から実績に的中するクラスを探す。的中するNNが存在する場合、そのクラスと操業条件データをセットで分類用NNの教師データに追加し学習する。ここで、品質予測NNの中に的中するものがない場合は、原因追求のためのオフライン解析用データとして保存される。

2.3 適用結果

Fig.3に本システムと従来方法（重回帰式）の推定精度の機能比較を示す。分類用NNの入力層に操業条件項目の中から3項目選定し、学習用データが十分集まった12クラスに分けて学習した。操業データ（学習データを除く）を用いて従来方式と比較した結果、従来と比べてバラツキが半分以下となり、当初目標としていた推定精度（ $\sigma=0.2$ 以下）が得られた。

本システムでは、実操業で使用するごとに学習され、推定精度はさらに、自動的に向上していくと考えられる。

3. CDQ最適運転システム

3.1 設備概要

Fig.4にCDQ設備の概要を示す。CDQ冷却塔上部から装入されたコークスは循環ガスにより消火・冷却され、下部か

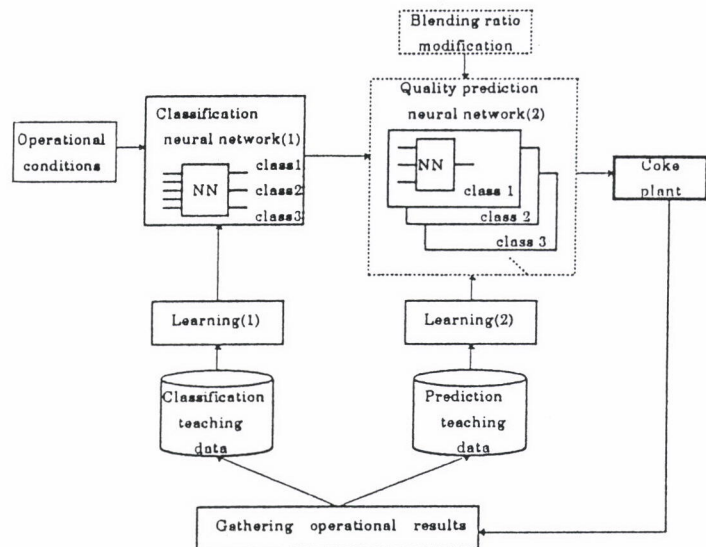


Fig.2. Schematic diagram of coke quality prediction process.

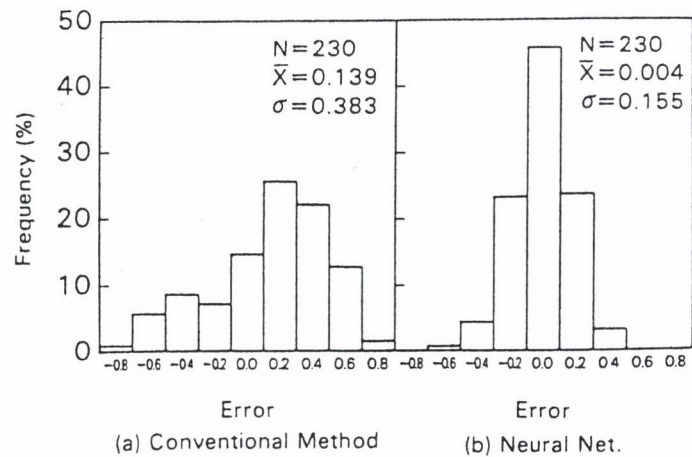


Fig.3. Coke quality prediction result.

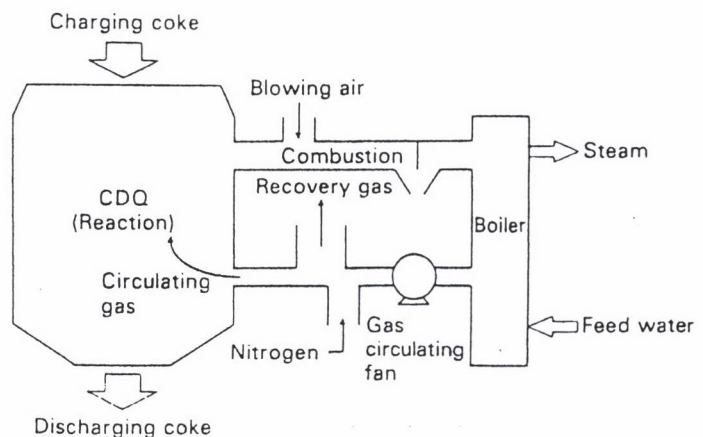


Fig.4. Schematic diagram of coke dry quenching facility.

ら切出される。CDQ冷却塔内ではソリューションロス反応や水性ガス化反応が起きていると考えられ、長期的にはこれら反応の平衡点で循環ガス組成をバランスは保っている。

CDQから出てくる循環ガスには、装入コークスが持ち込む残留ガスが混合しており、CDQ出側で空気を吹き込むことにより燃焼し、循環ガスは昇温される。ボイラで熱交換された循環ガスは窒素により稀釈され、さらに、一部がガス回収後、再びCDQ冷却塔下部から炉内へ吹き込まれる。

3.2 CDQの高効率運転

Fig.5にコークス切出量一定の条件下で循環ガス量を変化させた実操業試験の結果を示す。図中のプロットはCDQ出側ガス顕熱、ボイラ効率および蒸気側への移行顕熱の実績値を示している。図から蒸気発生量最大となる循環ガス量が存在することがわかる。最適点が存在する理由は、循環ガス量を増加させると、CDQ冷却塔内の熱交換量が増加しCDQ出側の循環ガス顕熱が上昇するが、循環ガス流量が多すぎると逆にCDQ冷却塔内の熱交換量は頭打ちとなり、また、ボイラ入側循環ガス温度の低下により、ボイラ熱交換効率が低下するためと考えられる。この最適点は主にコークス切出量・装入コークス温度により変化するため、コークス炉体側の操業条件（窯出しスケジュール）に応じて、循環ガス量の最適運転ポイントを常に定量的に決定する必要がある。

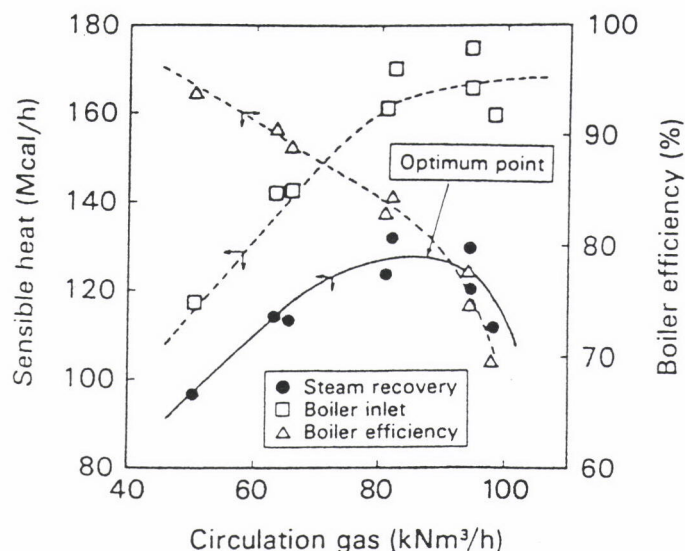


Fig.5. Results of sensible heat and efficiency measurement test.

Table 1. CDQ heat balance input and output item.

	Cooling chamber	Boiler
Input	Charging coke Circulating gas (intake) Dust (intake) Residual gas Blowing air Blowing nitrogen	Circulating gas (intake) Dust (intake) Feed water
Output	Discharging coke Circulating gas (outlet) Dust (outlet) Heat removal from the surface Recovery gas	Circulating gas (outlet) Dust (outlet) Steam Heat removal from the surface
Evolution	Heat of reaction Combustion	

3.3 制御モデル

CDQ操業を定量的かつ的確にとらえるため、物質収支と熱収支をベースとした制御モデルを開発した。Fig.6に制御モデルの処理フローを示す。本モデルははじめに、空気吹き込み位置前後のガス組成 (CH_4 、 H_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 N_2) を推定し、各組成変化を基に燃焼による発熱量を計算する。このガス組成は、(1)式で表わされる循環ガスのC、O、H、Nに関する物質収支、およびCDQ冷却塔内におけるソリューションロス反応 ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$) のそれぞれの平衡条件を表わす(2)、(3)式から求めている。

$$dH/dt = M_i - M_o \quad \dots\dots\dots(1)$$

H : 蓄積量、 M_i : 流入量、 M_o : 流出量

$$Kp = p_{\text{CO}_2} / a \cdot p_{\text{CO}_2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$Kp^2 = p_{\text{CO}_2} \cdot p_{\text{H}_2} / p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{CO}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

K : 分圧平衡定数、 P : 分圧、 a : 活量

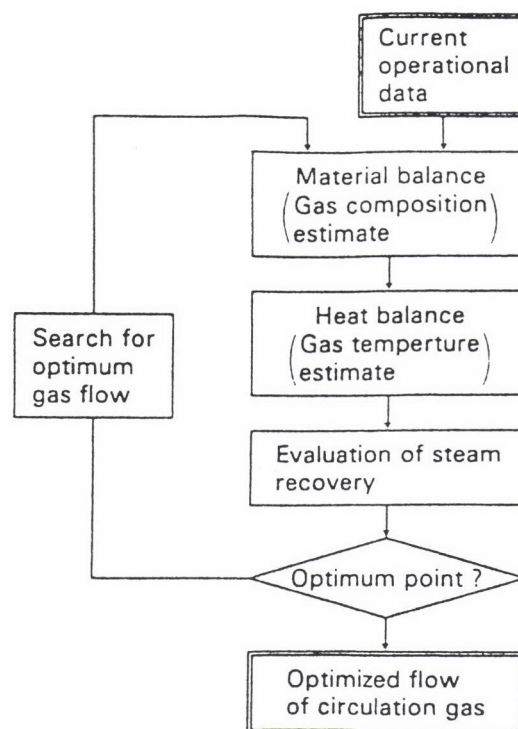


Fig.6. Flow of optimum gas flow calculation.

次に、ボイラ入側・出側の循環ガス温度および切出コークス温度を未知変数として、Table 1に示すCDQ冷却塔とボイラにおける入出熱に関して、(4)式に示す熱収支を考える。「ボイラから蒸気側への出熱量」は、(5)式に示す熱交換効率により算出される。

$$C \cdot dT_h / dt = C_i \cdot T_i - C_o \cdot T_o + Q_g \quad \cdots (4)$$

C : 熱容量、 T_h : 内部温度、 T_i : 流入物質温度

Q_g : 発熱量、 T_o : 流出物質温度 (比熱×流量)

$$\varepsilon = Q_s / Q_m \quad \cdots (5)$$

Q_s : 蒸気発生移行顕熱、 Q_m : ボイラ入側熱

ボイラにおける熱交換は(6)式に示すように「熱貫流率」と「循環ガスと蒸気間の温度差」により決まるため、ボイラ効率はこれらの影響を受けると考えられる。

$$Q = K \times A \times \Delta T \quad \cdots (6)$$

Q : 交換熱量 [kcal/h]、

K : 熱貫流率 [kcal/(m²・h・°C)]、

A : 伝熱面積 [m²]、

ΔT : 温度差 [°C]

熱貫流率はガスの動粘度・流速で定まるが、温度差は主にボイラ入側温度で変化することが判明したため、ボイラ効率を循環ガス流量とボイラ入側循環ガス温度の関数として定義した。

以上の計算の結果、循環ガス量を変更した場合のボイラ入側・出側の循環ガス温度の変化および蒸気回収量を推定することができる。本モデルを用いて、循環ガス流量を放物線近似法により探索することにより、最大蒸気発生量となる最適点が決定される。

3.4 適用結果

本モデルにしたがって循環ガス流量を操作したときの、回収蒸気流量の推移をFig.7に示す。試験では、6号CDQと7号CDQのコークス切出量を同一にして、6号CDQをモデル制御、7号CDQを通常運転で両号炉の比較を行った。図中の↓印の時刻で、両CDQともコークス切出量を35t/hから31t/hへ変更し、このタイミングでモデルガイダンスにしたがい6号CDQの循環ガス流量を65,000Nm³/hから75,000Nm³/hへ変更した。このときの蒸気回収量は0.5t/hであった。

4. 結言

京浜製鉄所コークス工場ではコークスプロセス計算機のリプレースを機に、高精度コークス品質予測システムとCDQ最適運転システムの開発を進めてきた。現在、コークス品質予測システムは、実操業に適用できる目処を得たのでオンライン自動学習機能の開発等のシステムのレベルアップをはかりつつ、実操業で使用中である。また、CDQ最適操業システムは順調に稼働し、省エネルギーに大きな効果をあげており、コークス工場の製造コスト低減に大いに貢献している。

参考文献

宮原弘明、山本修一、杉岡真吾、松村進、利光亮一、石黒宏樹；NKK技報, No.152, (1995)

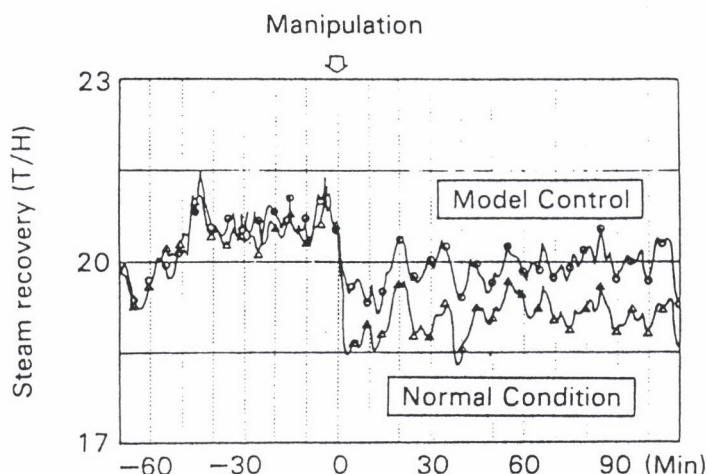


Fig.7. Effect of optimum gas flow control.