

## 〈研究発表〉

流動床式ガス化溶融炉における排ガス CO, NO<sub>x</sub> 制御技術江口 徹<sup>1)</sup>, 伊藤 正<sup>2)</sup>, 木下 民法<sup>2)</sup>上古閑 久欣<sup>2)</sup>, 下梨 孝<sup>2)</sup><sup>1)</sup> (株)神戸製鋼所

(〒 651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台 1 丁目 5-5 E-mail: eguchi.toru1@kobelco.com)

<sup>2)</sup> (株)神鋼環境ソリューション

(〒 651-0086 兵庫県神戸市中央区磯上通 2 丁目 2-21 E-mail: td.ito@kobelco-eco.co.jp)

## 概要

流動床式ガス化溶融炉は廃棄物のガス化、燃焼、溶融処理を一貫して行うプロセスであり、廃棄物の量的・質的变化によって運転状態は動的に変化する。著者らは時に運転員の手動介入を要した排ガス CO, NO<sub>x</sub> 制御を自動化する技術を開発した。本技術は制御の核となる運転状態の推定機能を、熟練運転員のノウハウをベースに大量の操業データから機械学習によって自動抽出する点を特徴とする。本発表では、開発技術の特徴および実機における試験結果を報告する。

キーワード：ガス化溶融炉、CO、NO<sub>x</sub>、機械学習、ビッグデータ

原稿受付 2016.6.30

EICA: 21(2・3) 152-156

## 1. はじめに

廃棄物処理プロセスにおける環境負荷低減、最終処分場の延命化、リサイクル性向上を特徴とする流動床式ガス化溶融プロセスは、2000年代以降に国内での実用化が進み、当社グループも各地の商用炉で稼働実績を得てきた。ガス化溶融炉の安定稼働のためには、廃棄物の量的・質的变化によって変動する運転状態に適応した、自動制御技術の開発が必要である。当社グループではこれまでに、ボイラや燃焼炉等の各プロセスを対象とした自動制御技術を開発、実用化を達成した<sup>1)</sup>。その一方で、CO, NO<sub>x</sub> を始めとする規制物質の抑制に関しては、それら排ガス特性の複雑さや、法令による規制遵守の制約から、既存の制御システムに加え、運転員による手動介入が必要となる場合があった。

以上の点に鑑み、当社グループではガス化溶融プロセスの排ガス CO, NO<sub>x</sub> 抑制に関する運転負荷軽減を目的とした制御技術を開発した。本技術の特徴はこれまで複雑とされてきた排ガス特性を、形式知に加えて、過去の操業データを用いた機械学習技術によりモデル化し、獲得した特性モデルの推定情報に基づき制御を実行する点にある。本発表では、開発技術の概要および、実機プラントによる検証結果を報告する。

## 2. 制御システムの概要

2.1 流動床式ガス化溶融プロセスの CO, NO<sub>x</sub> 発生メカニズム

流動床式ガス化溶融プロセスの概略図を Fig. 1 に

示す。本プロセスでは、破碎ごみをガス化炉で低空気比燃焼させてガス化し、続いて溶融炉で灰溶融可能な温度 (1200℃以上) まで高温燃焼させる。各燃焼プロセスにより生成・除去された不燃物や金属、スラグ等はリサイクルされ、燃焼後の排熱はボイラで回収され電力として所内電源、売電等に活用される。熱回収後の排ガスは集塵、脱硝等のプロセスを経て、最終的に環境規制物質が規制値以下の状態で大気中に放出される。



Fig. 1 Outline of Gasification and Melting Process

CO, NO<sub>x</sub> といった規制物質は、各燃焼プロセスにおけるごみ (燃料) と助燃空気の不均衡によって発生

する。通常運転時は自動制御システムによって、ごみの質的・量的な変動に応じて適切な空気量がガス化炉、溶融炉へ供給される。そのため、燃焼プロセスは安定化し、CO、NO<sub>x</sub>濃度を規制値以下に維持できる。

ところが、既存システムの範疇を超えたごみ質や量の変動が時として起こり、ごみと空気の不均衡な燃焼状態が形成され、CO、NO<sub>x</sub>の過剰発生を引き起こすことがある。その際、運転員の手動介入によって燃焼状態を改善し、CO、NO<sub>x</sub>抑制が図られてきた。

## 2.2 CO, NO<sub>x</sub> 制御技術の概要

開発技術は、CO、NO<sub>x</sub>抑制に関する手動介入の自動化を目的に、プロセス情報と発生メカニズムから推定したCO、NO<sub>x</sub>発生状況の推定結果を基に空気量を制御して、CO、NO<sub>x</sub>の抑制を図る。

Fig. 2に示すように、開発技術を搭載した「CO、NO<sub>x</sub>制御システム」はCO、NO<sub>x</sub>の2種類の制御ロジックから構成される。各ロジックにはガス化炉の砂層温度や炉頂圧、溶融炉空気比を始めとする燃焼特性に関する計測情報を入力とし、溶融炉の上流側の一次空気量、下流側の二次空気量の操作指令値を出力とする。計測情報をもとに、過去の操業データと機械学習手法（決定木アルゴリズム<sup>2)</sup>）で求めた排ガス特性モデルを用いて燃焼状態を推定し、その状態に応じて各空気量を制御する。一次/二次空気量を操作量に選んだ根拠は、CO、NO<sub>x</sub>の発生原因となるごみと空気の不均衡解消に両操作が有効な点による。

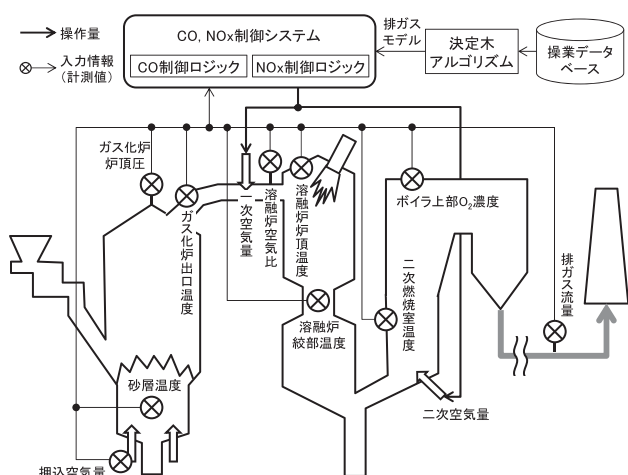


Fig. 2 Structure of the Proposed CO/NO<sub>x</sub> Control System

開発システムの動作を以下に説明する。CO、NO<sub>x</sub>制御ロジックは一定周期で実行され、各周期で制御が必要な場合だけ、既存の制御システムに代わり制御を実行する。制御の必要有無は、各ロジックに内蔵された「CO/NO<sub>x</sub>発生予測モデル」が現時点の運転状態をもとに、将来のCO、NO<sub>x</sub>の発生を予測する。CO/

NO<sub>x</sub>の発生が予測されると、該当するロジックが空気量の操作指令値を算出し、所望の空気量が燃焼炉内に供給される。次節より、各ロジックの詳細を述べる。

## 3. CO, NO<sub>x</sub> 制御技術の詳細

### 3.1 CO制御ロジック

ガス化溶融プロセスにおけるCOガスは、燃焼時の非定常な事象によって一時的に燃焼炉内の酸素が不足することで発生し、局所的な増加（ピーク）の特性を示す。CO制御ロジックは、上記事象に関するプロセス情報と前述の予測モデルからCOピーク発生を予測した場合に、一次・二次空気量指令値を所定の値に変更する。なお、予測モデルは決定木学習で抽出されたIf-thenルールベースの形式を取る。

燃焼プロセスにおけるCOピークの発生要因は、Fig. 3に示した ①ボイラ上部O<sub>2</sub>濃度の急落や、②ガス化炉炉頂圧の一時的な増加といった形式知で与えられる。なお、Fig. 3では各プロセス値を0~1の範囲にスケーリングしている（以降のグラフも同様）。

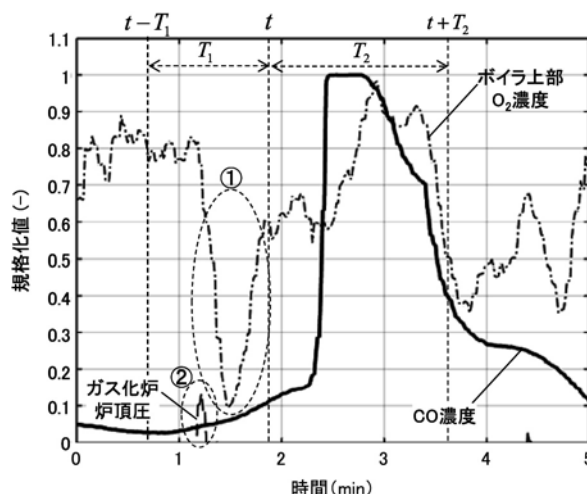


Fig. 3 Mechanisms of CO Generation in Gasification and Melting Processes

開発技術では、形式知による因果律から以下の形式で記述されるピーク発生予測ルールを定義した。

『時刻  $t$  から  $T_1$  遡った期間における以下3種類の特徴量が、定義された閾値条件（上下限值）を満足する場合、時刻  $t$  から将来  $T_2$  に渡る期間にCOピークが発生』

〈特徴量〉

- i) ボイラ上部O<sub>2</sub>濃度の期間内最小値
- ii) ガス化炉炉頂圧の期間内最大値
- iii) ボイラ上部O<sub>2</sub>濃度変化率の期間内最小値

上記形式のルールを得るために、過去の操業データに対して、時刻 $t-T_1 \sim t$ の期間の特徴量情報（入力変数）と、期間 $t \sim t+T_2$ の期間のピーク発生有無（出力変数/分類クラス）が紐付いたデータセットを作成し、決定木を学習させた。学習の結果、特徴量の閾値判定の組合せから CO ピークの発生有り/無しを予測するルール群が得られ、CO 制御ロジックへは分類クラス「ピーク発生有り」を予測するルールが予測モデルとして組み込まれる。

### 3.2 NO<sub>x</sub> 制御ロジック

NO<sub>x</sub> ガスは主に溶融炉の酸素量が過剰となることで発生し、溶融炉へ供給される空気の割合を示すプロセス情報である溶融炉空気比と強い相関を持つ。NO<sub>x</sub> 制御ロジックの構築にあたり、NO<sub>x</sub> 発生に最も支配的な溶融炉空気比を主に、他の因子を含む **Table 1** の 12 項目の特性因子を考慮した。操業データより抽出した特性因子情報を入力変数とし、NO<sub>x</sub> 特性（分類クラス：(A) 閾値以上/(B) 閾値未満）を出力変数として紐付けたデータセットを作成し、決定木を学習させた。

**Table 1** Considered Factors to Develop NO<sub>x</sub> Control Logic

項目	備考	
1 溶融炉空気比(-)	測定プロセス情報から取得	
2 ガス化炉空気量(kNm <sup>3</sup> /h)		
3 排ガス流量(kNm <sup>3</sup> /h)		
4 砂層温度(°C)		
5 ガス化炉出口温度(°C)		
6 溶融炉炉頂温度(°C)		
7 溶融炉絞部温度(°C)		
8 ボイラ二次燃焼室温度(°C)		
9 溶融炉絞部-二次燃焼室温度比率(-)		No.7と9の比率を計算
10 溶融炉炉頂-二次燃焼室温度比率(-)		No.6と9の比率を計算
11 砂層-溶融炉温度履歴指標1(-)		No.4~7の昇温変化分の総和
12 砂層-溶融炉温度履歴指標2(-)		No.4~7の昇温変化分の分散

なお、決定木学習で獲得したルール群は、ルールの分類クラス毎に分割し、後述の目的別に使用する。

NO<sub>x</sub> 制御ロジックの動作は CO 制御ロジックと同様、NO<sub>x</sub> 特性予測モデル（クラス(A) の分類ルール群）による予測を経て、ルール適合時に操作量を決定する。ただし CO 制御ロジックでは操作量を一意に決定するのに対し、NO<sub>x</sub> 制御ロジックでは操作による燃焼プロセスへの影響を最小限に抑えるため、現在の運転状態に最も近い目標状態をクラス (B) の分類ルール群から抽出し、操作量を決定する点で動作が異なる。次節では、NO<sub>x</sub> 特性予測後の操作量決定方法を説明する。

### 3.3 NO<sub>x</sub> 制御ロジックの操作量決定方法

NO<sub>x</sub> 制御ロジックにおける操作量決定では、事前準備として、前述のデータセットをクラス(B) の各ルールで分類評価する。前提として、ルール $j$ に分類

されたデータ $k$ の入力変数を $x_{i,j,k}$  ( $i$ : 入力変数の添字)、ルール $j$ に分類されたデータ数を $K_j$ とおくと、各ルールを代表する入力変数値 $\bar{x}_{i,j}$ は、ルール毎の変数値の平均として下式(1)で計算される。

$$\bar{x}_{i,j} = \frac{1}{K_j} \sum_{k=1}^{K_j} x_{i,j,k} \quad \dots(1)$$

求めた $\bar{x}_{i,j}$ を、ルールの集合 $J$ において式(2a)、(2b)、(2c)で標準化し、ルール代表点 $\bar{X}_{i,j}$ を計算する。

$$\bar{X}_{i,j} = \frac{\bar{x}_{i,j} - \mu_i}{\sigma_i} \quad \dots(2a)$$

$$\mu_i = \frac{1}{|J|} \sum_{j \in J} \bar{x}_{i,j} \quad \dots(2b)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{|J|} \sum_{j \in J} (\bar{x}_{i,j} - \mu_i)^2} \quad \dots(2c)$$

ここで $\mu_i$ 、 $\sigma_i$ は $\bar{x}_{i,j}$ のルール集合における平均、標準偏差となる。こうして求めた代表点 $\bar{X}_{i,j}$ は「NO<sub>x</sub>が閾値以下となる代表的な運転状態の集合」を意味し、これが操作量を決定するうえでの目標状態となる。

次に、現在時刻 $t$ における入力変数値 $y_i(t)$ を式(3a)で標準化したのちに、式(3b)によって各代表点との重み付け近傍距離 $d_{i,j}(t)$ を計算する。

$$Y_i(t) = \frac{y_i(t) - \mu_i}{\sigma_i} \quad \dots(3a)$$

$$d_{i,j}(t) = \sqrt{\sum_{i \in I} (Y_i(t) - \bar{X}_{i,j})^2 \cdot w_i} \quad \dots(3b)$$

ここで、 $Y_i(t)$ は $y_i(t)$ を平均0、分散1に標準化した値、 $w_i$ は変数毎に設定する重みパラメータ、 $I$ は入力変数集合である。上式で得られた $d_{i,j}(t)$ について、入力変数の最近傍となる代表点 $\bar{X}^*(t)$ を現在時刻の目標値ベクトルとする。

最後に、目標値ベクトル $\bar{X}^*(t)$ の一成分である溶融炉空気比目標値 $r_{goal}^*(t)$ および、現在時刻の一次・二次空気量の測定値 $s'_1(t)$ 、 $s'_2(t)$ に対し、式(4a)、(4b)によって一次・二次空気の操作量 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ を計算する。

$$s_1(t) = \frac{C_1(t) \cdot (r_{goal}^* - C_3(t) - C_2(t) \cdot s'_2(t)) + C_2(t)^2 \cdot s'_1(t)}{C_1(t)^2 + C_2(t)^2} \quad \dots(4a)$$

$$s_2(t) = \frac{r_{goal}^* - C_3(t) - C_1(t) \cdot s_1(t)}{C_2(t)} \quad \dots(4b)$$

ここで $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$ 、 $C_3(t)$ は、次式(5a)~(5d)で与えられる溶融炉空気比 $r(t)$ と一次・二次空気量 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ および、ボイラ上部O<sub>2</sub>濃度 $ox(t)$ 、押込空気量を始めとするその他空気量の総和 $s_{other}(t)$ との関係式から導出した多項式の計算結果であり、式中のパラ



メータ  $a_1 \sim a_8$  は過去の操業データから最小二乗法によって求めた値を使用した。

$$r(t) = C_1(t) \cdot s_1(t) + C_2(t) \cdot s_2(t) + C_3(t) \quad \dots (5a)$$

$$C_1(t) = a_4 + a_5 \cdot ox(t) \quad \dots (5b)$$

$$C_2(t) = a_6 + a_7 \cdot ox(t) \quad \dots (5c)$$

$$C_3(t) = a_1 \cdot ox^2(t) + a_2 \cdot ox(t) + a_3 \cdot \sqrt{ox(t)} + a_4 \cdot s_{other}(t) + a_5 \cdot ox(t) \cdot s_{other}(t) + a_8 \quad \dots (5d)$$

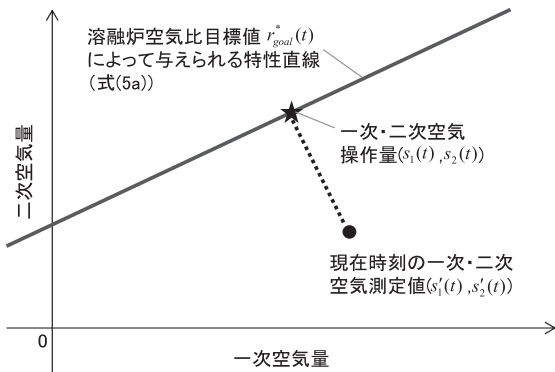


Fig. 4 Mechanisms to Determine Operation Inputs in NOx Control Logic

一連の操作量計算を Fig. 4 に図示すると、一次・二次空気量の空間上に引かれた式(5a)の目標状態の特性直線に向かって、 $s'_1(t), s'_2(t)$ の座標点から下ろした垂線との交点が  $s_1(t), s_2(t)$  となる。すなわち、常に目標状態に向かうような空気量操作が実行される。

#### 4. 実機プラントによる評価

開発した制御ロジックを、実機プラントにて評価した。本節では、各ロジックの検証結果について述べる。

##### 4.1 CO 制御ロジックの動作検証

検証時に発生した CO ピークにおける、CO 制御ロジック動作の詳細を、Fig. 5 に示す。ロジック動作信号 (0: 停止, 1: 起動) のトレンドから、開発ロジックがピーク発生を数十秒前に検知し、一次・二次空気

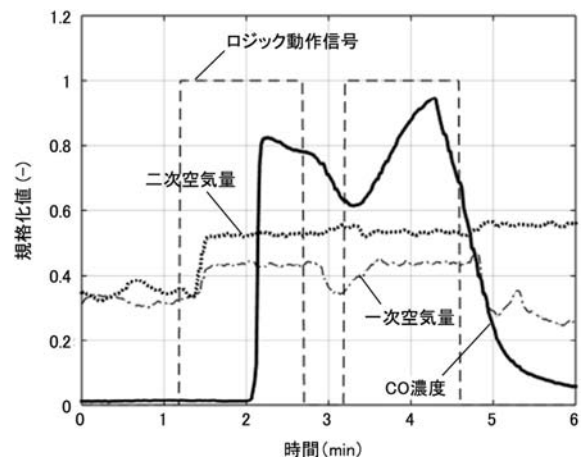


Fig. 5 Trend of CO Control Logic Execution and Process Information

量を増加させており、妥当な動作となっていることがわかる。

また、一定期間のロジック動作で観測されたピーク発生時の CO 発生総量を、ロジック非動作時の評価結果と共にプロットした図を Fig. 6 に示す。なお、Fig. 6 中の各プロットは個別の発生 CO ピークを意味する。図の横軸はピーク発生前の  $O_2$  濃度の落ち込み (Fig. 3 の①) 量进行评估したもので、CO 総発生量と正の相関を持つ。また、各軸数値は 0~1.4 の範囲にスケールリングした。Fig. 6 より、開発ロジック動作時の相関

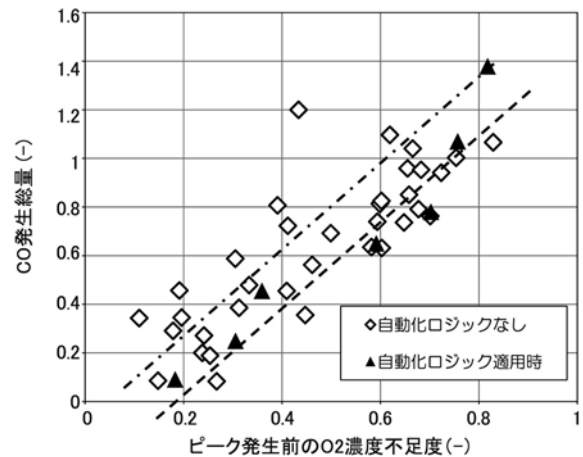


Fig. 6 Comparison between cases where the Proposed CO Control Logic is Active or Not Active

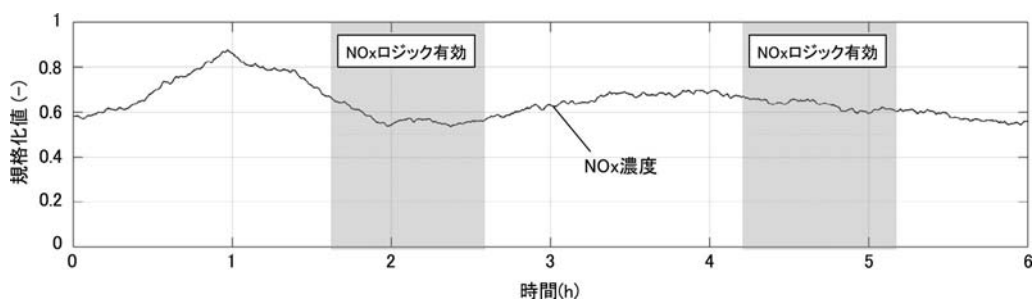


Fig. 7 Test Result of NOx Control Logic (NOx Emission Trend)

近似直線（破線）は、非動作時のそれ（一点鎖線）よりも全体的に右下へ位置しており、CO 抑制効果を確認できる。

#### 4.2 NO<sub>x</sub> 制御ロジックの動作検証

NO<sub>x</sub> 制御ロジック適用時の排ガス NO<sub>x</sub> 濃度のトレンドを **Fig. 7** に示す。図中のハイライト部分がロジックを有効とした時間帯であり、その直前の時間帯との比較から、NO<sub>x</sub> トレンドの低減効果を確認できる。

### 5. おわりに

本発表では、流動床式ガス化溶融プロセスの排ガス

CO, NO<sub>x</sub> 抑制を目的とした制御技術を開発し、実機プラントにおいてその有効性を確認した。今回は CO, NO<sub>x</sub> の各制御ロジック単体での性能評価に留まったが、今後は両者を併用したケースでの性能評価を重ね、更なる性能向上を図っていく計画である。

#### 参考文献

- 1) 前田, 友近, 伊藤, 他 2 名: ガス化溶融炉における予測制御システムの開発, 環境システム計測制御学会研究発表会予稿集. Vol. 9, No. 2, pp. 201-204 (2004)
- 2) Breiman, L., J. Friedman, R. Olshen, and C. Stone. Classification and Regression Trees. Boca Raton, FL: CRC Press. (1984)