

流動床式ガス化溶融炉における排ガス CO, NO_x 制御技術

A Control Technology for CO and NO_x Reduction in Fluidized Bed Gasification and Melting Furnace



江口 徹*
Toru Eguchi
博士 (工学)



伊藤 正**
Tadashi Ito



上古閑久欣***
Hisayoshi Kamikoga



下梨 孝****
Takashi Shimonashi
技術士 (電気電子部門)

流動床式ガス化溶融炉は廃棄物のガス化、燃焼、灰の溶融処理を一貫して行う処理プロセスであり、廃棄物の量的・質的变化に伴って運転状態は動的に変化する特徴を有する。著者らは、時に運転員の手動介入を要した排ガス CO, NO_x 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ことで排ガス CO, NO_x 制御の全自動化を実現できた。本稿では、開発技術の特徴および実機における試験結果について報告する。

Fluidized Bed gasification and melting furnace is a process which executes combustion, gasification and melting of wastes consistently, and its operational conditions alter dynamically according to changes of wastes in quality and quantity. We have developed a technology automating manual operations to reduce CO/NO_x in exhaust gasses which sometimes occur in operations of gasification and melting furnace. This technology could achieve full-automatic CO/NO_x emission control by extracting an estimation function using operational big data, machine learning and expert operator's knowledge automatically. In this paper, we will report these features of our developed technology and its evaluations in actual plants.

Key Words :

ガ ス 化 溶 融
一 酸 化 炭 素
窒 素 酸 化 物
機 械 学 習
ビ ッ グ デ ー タ

Gasification and melting
Carbon monoxide
Nitrogen oxides
Machine learning
Big data

ま え が き

流動床式ガス化溶融炉は図1に示すとおり、廃棄物の保有する熱エネルギーを利用することで外部燃料を使用せずに廃棄物のガス化、燃焼、灰の溶融処理を一貫して行う経済的なプロセスであり、その開発から15年以上が経過し、全国各地で施設が稼働する一般的な都市ごみ処理方式の一つとなっている。流動床炉が広範囲のごみ質に対応できるという特徴を生かし、汚泥や災害廃棄物の混焼、最終処分場に埋

立てられている焼却灰を掘起こして溶融し、最終処分場の再生（残余年数の拡大）を行っている実績を有する。

流動床式ガス化溶融炉は、制御応答性が良好で高い発電効率を得られるという特徴を有する一方、廃棄物の量的・質的变化によって運転状態が変化するという特性から、安定稼働のために自動制御技術が重要である。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し、実用化を

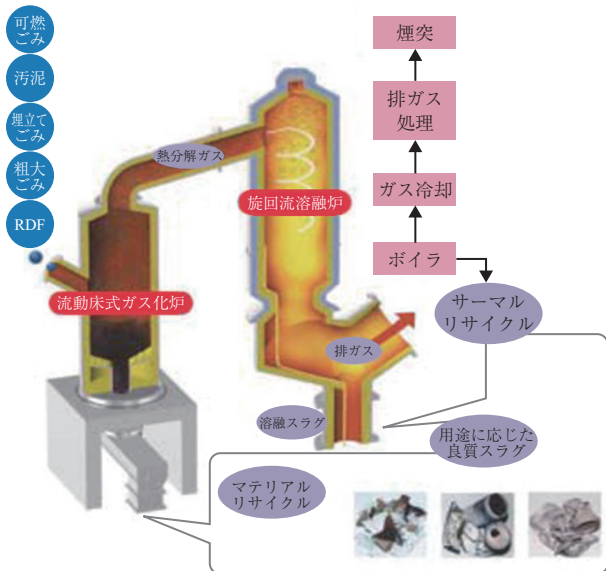


図1 流動床式ガス化溶融炉

達成した¹⁾。その一方で、排ガス中の一酸化炭素(CO)や窒素酸化物(NO_x)に関して、処理対象となる廃棄物の性状が急激に変化する場合や、廃棄物に混入した焼却不適物のため焼却処理が不安定となり、既存の制御システムに加えて運転員による手動介入が必要となる場合があった。

本稿では、流動床式ガス化溶融炉の運転負荷軽減を目的として、排ガスCO、NO_x抑制を自動化する制御技術を開発したので、制御技術の概要および実機における試験結果について報告する。

1. 排ガスCO、NO_x抑制の自動化

1.1 制御技術の概要

開発した排ガス抑制の自動制御技術は、CO、NO_x抑制に関する手動介入の自動化を目的として、プロセス情報および発生メカニズムからCO、NO_x発生状況を推定し、推定結果を基に燃焼空気量を制御してCO、NO_xの抑制を図るというものである。

過去の運転データを使って機械学習によりモデル化し、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ものであり、特徴として以下の機能を有する。

① 機械学習(決定木)による排ガス特性のモデリング

機械学習の一手法(決定木)で過去の運転データを学習させることで、運転員が手動介入の要否を判断するロジックを明示化し、自動判断ロジックとして組込む。

② オンデマンドな排ガス対応制御の実行

前述の自動判断ロジックによって排ガスのCO

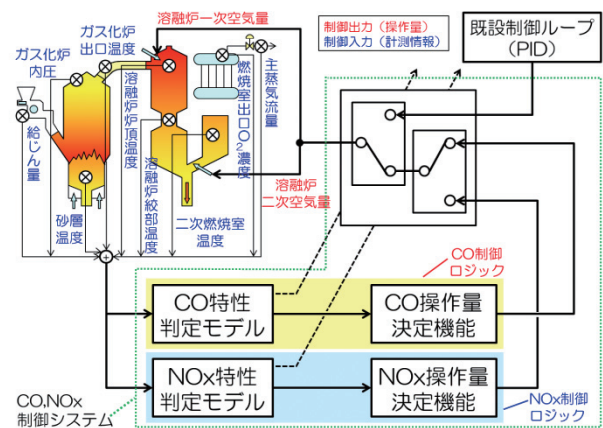


図2 制御システムの概要

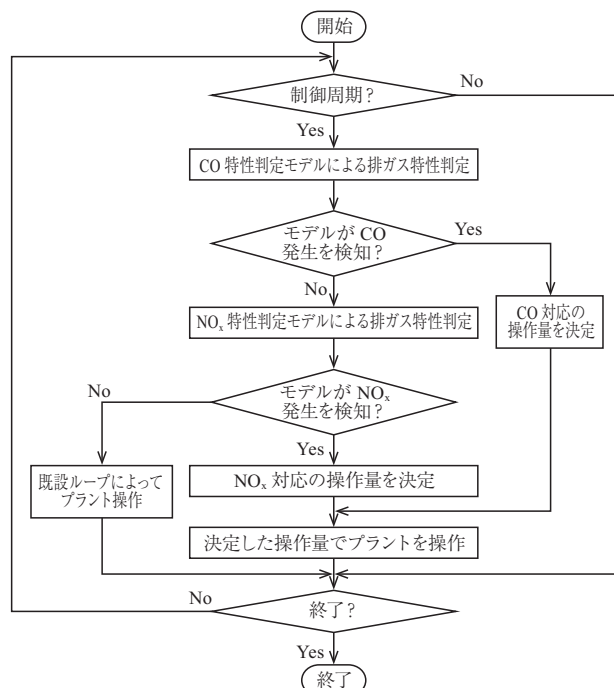


図3 開発システムの動作フローチャート

やNO_xの上昇を予測し、必要な排ガス抑制操作(溶融炉の一次/二次空気量の調整)を事前に行う。操作介入は必要なタイミングのみとし、プラントの運転状態に与える影響を最小限に留め、運転の安定化を図る。

制御システムの概要を図2に示す。制御システムはCO、NO_xのそれぞれを制御対象としたロジックで構成されている。各ロジックにはガス化炉の砂層温度や炉内圧、溶融炉空気比を始めとする燃焼特性に関する計測情報が入力され、溶融炉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。

開発した制御システムの動作フローチャートを図3に示す。COとNO_xの制御ロジックは前述の計測

情報を入力とした CO, NO_x 特性判定モデルによる CO, NO_x 上昇の推定結果を基に、いずれかの制御ロジックが操作介入必要と判定した場合に限り、排ガス抑制操作を実行する。操作介入不要の場合は、既設の制御ループ (PID 制御) によって通常の制御が実行される。また、各制御ロジックの動作において、CO 制御ロジックによる操作の方が優先される。

1.2 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

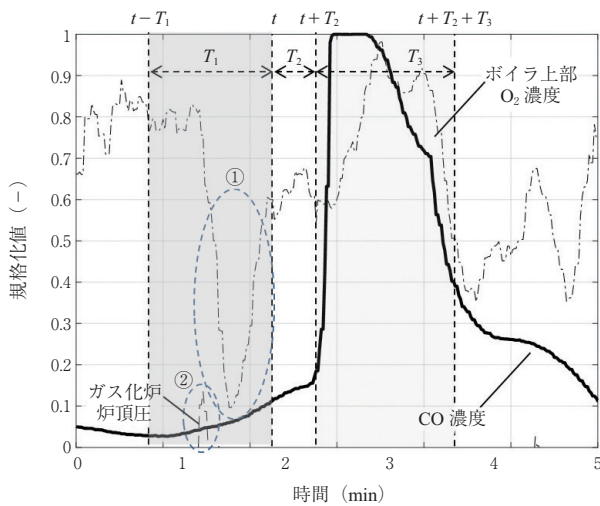


図4 ガス化溶融炉における CO 発生時のトレンド

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、その一定時間前において特定のプロセス情報に特徴的な変化となって現れることが経験的に知られている。具体的には図4に示すように、ある時刻 t から T_1 秒遡った時点までの期間 $[t-T_1 \sim t]$ に起こった、①ボイラ上部 O₂ 濃度の急落や、②ガス化炉炉頂圧の一時的な増加等が挙げられる。なお、図4では各プロセス値を 0~1 の範囲にスケールしている。

開発技術では上記①②の事象を始め、CO ピーク発生と因果関係のある表1に示す13種類の特徴量を定義し、決定木学習の入力変数とした。決定木の学習データは、過去の運転データに対して期間 $[t-T_1 \sim t]$ における表1の特徴量値と、図4の期間 $[t+T_2 \sim t+T_2+T_3]$ (T_2, T_3 : CO 発生までの遅延時間) におけるピーク発生有無の識別情報 (0: ピーク発生なし / 1: ピーク発生あり) を紐付ける形で作成する。決定木学習の結果、得られたルール群のうち分類クラス1 (ピーク発生あり) の予測ルールが CO 特性判定モデルとして組込まれる。

また CO 対応の操作量は、特徴量の一つである「ボイラ上部 O₂ 濃度の条件付き積算値1」が発生する CO ピークの規模 (総発生量) に正の相関を持つという知見から、本特徴量に対する折線関数を定義し一次・二次空気量の指令値を決定する (図5)。

1.3 NO_x 制御ロジック

NO_x 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を始め、炉内各部

表1 CO 特性判定モデルの特徴量

項目	備考	
1	ボイラ上部 O ₂ 濃度の最小値 (%)	
2	ボイラ上部 O ₂ 濃度の最大値 (%)	
3	ボイラ上部 O ₂ 濃度変化率の最小値 (%/sec)	
4	ボイラ上部 O ₂ 濃度の条件付き積算値 1 (%)	評価期間内で O ₂ 濃度 < 3.5 % となる場合のみ積算
5	ボイラ上部 O ₂ 濃度の条件付き積算値 2 (%)	評価期間内で O ₂ 濃度 > 8 % となる場合のみ積算
6	ガス化炉炉頂圧の最大値 (kPa)	
7	ガス化炉炉頂圧変化率の最大値 (kPa/sec)	
8	ガス化炉炉頂圧の条件付き積算値 (%)	評価期間内で炉頂圧 > -0.2 kPa となる場合のみ積算
9	押込空気量変化率の最小値 (kNm ³ /h·sec)	
10	風箱圧力の平均値 (kPa)	
11	給じん装置速度の平均値 (%)	
12	砂層温度の平均値 (°C)	
13	砂層温度の平均値 (°C)	

※評価期間は $[t-T_1 \sim t]$ とする

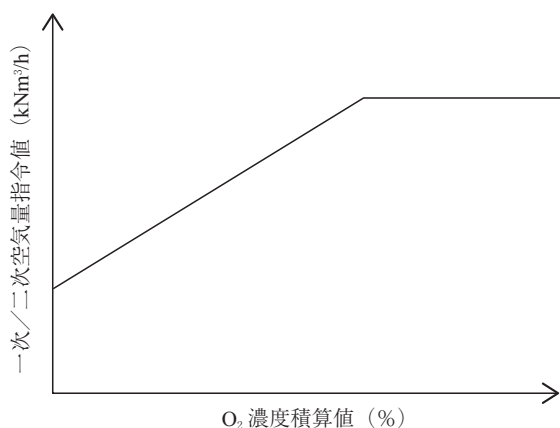


図5 CO 対応操作量決定用の折線関数

(ガス化炉砂層、溶融炉炉頂等)の温度と強い相関を持つ。NO_x制御ロジックの構築にあたり、上記の情報を始めとする表2に示す12項目の特徴量を考慮した。CO制御ロジックと同様に、過去の運転データにおいて時刻*t*の特徴量値と、時刻*t*+*T*₄ (*T*₄: NO_x発生までの遅延時間)におけるNO_x濃度の発生情報(0: NO_x濃度 ≤ 閾値, 1: NO_x濃度 > 閾値)を紐付ける形で作成する。

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、NO_x発生予測/操作量決定の各目的に使用される。NO_x制御ロジックの動作はCO制御ロジックと同様、NO_x特性予測モデル(クラス1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特徴量に対する折線関数で決定するのに対し、NO_x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、次節で

説明するように現在の運転状態にもっとも近い目標状態をクラス0の分類ルール群から抽出し、操作量を決定する。

1.4 NO_x制御ロジックの操作量決定方法

NO_x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0(NO_x濃度 ≤ 閾値)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*x̄*_{*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*x̄*_{*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*X̄*_{*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*μ*_{*i*}、*σ*_{*i*}は*x̄*_{*i,j*}のルール集合における平均、標準偏差である。こうして求めた代表点*X̄*_{*i,j*}は「NO_xが閾値以下となる代表的な運転状態の集合」を意味し、これを操作量を決定する上での目標状態とする。

表2 NO_x特性判定モデルの特徴量

項目	備考
1 溶融炉空気比 (-)	[ガス化炉入口~溶融炉入口までの総空気流量] × 0.21
2 溶融炉上流側酸素流量 (kNm ³ /h)	
3 ガス化炉バーナ空気量 (kNm ³ /h)	
4 排ガス流量 (kNm ³ /h)	
5 主蒸気流量 (t/h)	
6 風箱温度 (°C)	
7 砂層温度 (°C)	
8 ガス化炉出口温度 (°C)	
9 溶融炉炉頂温度 (°C)	
10 溶融炉絞部温度 (°C)	
11 二次燃焼室温度 (°C)	
12 ボイラ垂直煙道ガス温度 (°C)	

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

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

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

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 $d_{ij}(t)$ 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。

目標値ベクトル $\bar{X}^*(t)$ は表 2 の 12 次元の変数で構成されるが、このうち操作量である一次・二次空気量の決定には、1：溶融炉空気比 $G_{ar}(t)$ 、2：溶融炉上流側酸素流量 $G_{po2}(t)$ を用いる。近傍距離 $d_{ij}(t)$ の計算において $G_{ar}(t)$ 、 $G_{po2}(t)$ に対する重みを他変数に比べて小さくすることで、抽出した代表点は $G_{ar}(t)$ 、 $G_{po2}(t)$ 以外の要素（すなわち、操作に直接関係ない変数）については現在の入力変数ベクトルと近い値となる。すなわち、現在の入力変数ベクトルから目標値ベクトルまでの操作は概ね、上記 2 変数による操作（＝一次・二次空気量の操作）と考えることができる。

$G_{ar}(t)$ 、 $G_{po2}(t)$ と一次・二次空気量との関係は、プロセスの特性を考慮の上、下式 (4a)、(4b) の関係式を定義した。なお、式 (4a) の係数パラメータ $a_0 \sim a_{11}$ は過去の運転データから最小二乗法によって求めた。

$$\begin{aligned} G_{ar}(t) = & a_0 + a_1 \cdot d_{o2}(t)^2 + a_2 \cdot d_{o2}(t) + a_3 \cdot \sqrt{d_{o2}(t)} \\ & + a_4 \cdot (F_1(t) + f_{osh}(t) + f_{p \text{ sup}}(t)) + a_5 \cdot f_{o2}(t) \\ & + a_6 \cdot F_2(t) + a_7 \cdot d_{o2}(t) \cdot (F_1(t) + f_{osh}(t) + f_{p \text{ sup}}(t)) \\ & + a_8 \cdot d_{o2}(t) \cdot f_{o2}(t) + a_9 \cdot d_{o2}(t) \cdot F_2(t) \\ & + \frac{a_{10}}{F_1(t) + f_{osh}(t) + f_{p \text{ sup}}(t) + f_{o2}(t)/0.21 + F_2(t)} \\ & + \frac{a_{11} \cdot d_{o2}(t)}{F_1(t) + f_{osh}(t) + f_{p \text{ sup}}(t) + f_{o2}(t)/0.21 + F_2(t)} \end{aligned} \quad \dots (4a)$$

$$G_{po2}(t) = (F_1(t) + f_{p \text{ sup}}(t)) \cdot 0.21 + f_{o2}(t) \quad \dots (4b)$$

ここで、式 (4a)、(4b) 中の数式記号の意味はそれぞれ以下のとおりである。

- $d_{o2}(t)$: ボイラ上部 O_2 濃度 (%)
- $F_1(t)$: 一次空気量 (kNm^3/h)
- $F_2(t)$: 二次空気量 (kNm^3/h)
- $f_{osh}(t)$: 押込空気量 (kNm^3/h)
- $f_{p \text{ sup}}(t)$: 補助空気量 (kNm^3/h)
- $f_{o2}(t)$: 溶融炉一次側酸素流量 (kNm^3/h)
- $d_{o2}(t)$: ボイラ上部 O_2 濃度 (%)

最終的に、式 (4a)、(4b) から以下の式 (5a)～(5k) によって一次・二次空気量 $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ が求まる。

$$F_1(t) = \frac{G_{po2}(t) - f_{o2}(t)}{0.21} - f_{p \text{ sup}}(t) \quad \dots (5a)$$

$$F_2(t) = \frac{C_5(t) - C_3(t) \cdot C_6(t) + C_9(t)}{2 \cdot C_3(t)} \quad \dots (5b)$$

$$\begin{aligned} C_1(t) = & G_{ar}(t) - d_{o2}(t)^2 \cdot a_1 - d_{o2}(t) \cdot a_2 \\ & - \sqrt{d_{o2}(t)} \cdot a_3 - f_{o2}(t) \cdot (a_5 + d_{o2}(t) \cdot a_8) - a_0 \end{aligned} \quad \dots (5c)$$

$$C_2(t) = a_4 + d_{o2}(t) \cdot a_7 \quad \dots (5d)$$

$$C_3(t) = a_6 + d_{o2}(t) \cdot a_9 \quad \dots (5e)$$

$$C_4(t) = a_{10} + d_{o2}(t) \cdot a_{11} \quad \dots (5f)$$

$$\begin{aligned} C_5(t) = & C_1(t) - C_2(t) \cdot \\ & \left(\frac{G_{po2}(t) - f_{o2}(t)}{0.21} + f_{osh}(t) \right) \end{aligned} \quad \dots (5g)$$

$$C_6(t) = \frac{G_{po2}(t)}{0.21} + f_{osh}(t) \quad \dots (5h)$$

$$C_7(t) = C_3(t) \cdot C_6(t) - C_5(t) \quad \dots (5i)$$

$$C_8(t) = C_4(t) - C_5(t) \cdot C_6(t) \quad \dots (5j)$$

$$C_9(t) = \sqrt{C_7(t)^2 - 4 \cdot C_3(t) \cdot C_8(t)} \quad \dots (5k)$$

2. 実機プラントへの適用

2.1 施設概要

開発した排ガス抑制の制御システムを導入した施設の概要を表 3 に示す。本施設は、一般収集ごみ、し尿汚泥、下水汚泥および併設するリサイクル施設

表3 施設概要

処 理 方 式	流動床式ガス化溶融炉
処 理 規 模	143 t/d (71.5 t/d × 2 炉)
排ガス冷却方式	廃熱ボイラ+水噴霧式
蒸 気 条 件	350℃×4 MPa
排ガス処理方式	無触媒脱硝+バグフィルタ+触媒反応塔
排水処理設備	凝集沈殿・砂ろ過+膜処理設備
発 電 量	1 970 kW

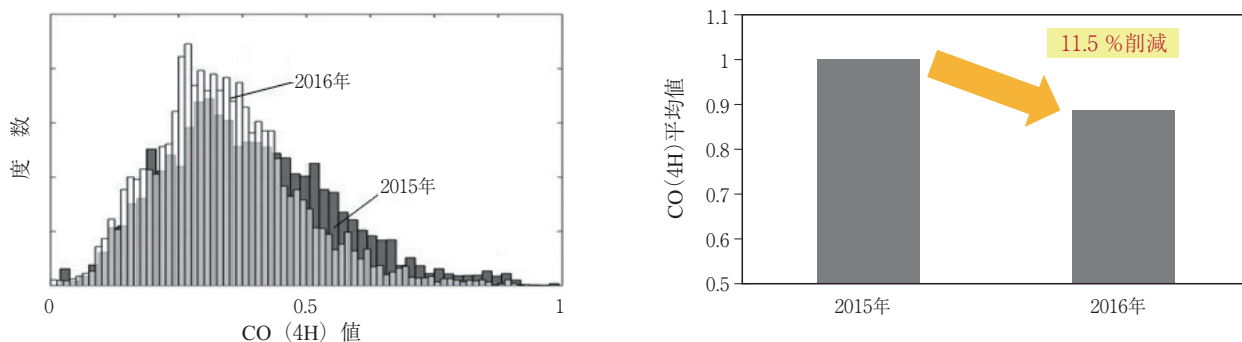


図6 CO 4時間平均濃度

で発生する可燃残渣、不燃残渣と多様なごみの受入れ、発電量の最大化のために溶融炉のボイラ化および高度排水処理（膜処理）の採用、無触媒脱硝と触媒反応塔の併用等の特徴を有する施設である。

2.2 排ガス抑制の制御システムの評価

CO、NO_x抑制の制御システムの評価期間は2016年9月上旬からの1ヶ月とし、前年同時期の運転データを比較対象とした。また、NO_x抑制に関しては触媒反応塔入口に設置したNO_x分析計の指示値にて評価を行った。

1) CO制御ロジックの評価とCO抑制効果

開発したCO制御ロジックの導入により、CO上昇を事前に予測し、手動介入が必要と判定した場合に燃焼空気量の制御変更を自動で行った結果、評価期間中の通常運転時におけるCO抑制のための手動介入は0であった。

評価期間および比較対象期間中のCO 4時間平均濃度（以降、CO(4H)値と記す）を図6に示す。CO(4H)値の度数分布から、開発システムの導入により2016年の評価期間は高濃度のCO発生を中心に抑制されたことがわかる。CO(4H)値の度数分布は低濃度側にシフトし、比較対象期間のCO(4H)値の平均値を1とした場合、評価期間中のCO(4H)平均値は0.885と、11.5%の低減効果が確認された。

2) NO_x制御ロジックの評価とNO_x抑制効果

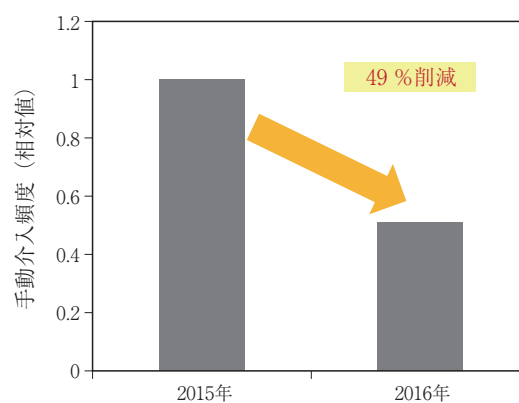


図7 NO_x抑制の手動介入頻度の比較

評価期間および比較対象期間中のNO_x抑制のための手動介入頻度の比較を図7に示す。評価期間における手動介入頻度は比較対象期間を1とした場合、0.51と約半減することができた。NO_x上昇の判定時の対応として燃焼空気量と無触媒脱硝の制御があるが、今回の試験では燃焼空気量の制御のみを対象とした。さらに無触媒脱硝制御を組み合わせることにより手動介入頻度0が達成可能と想定される。

評価期間および比較対象期間中のNO_x 1時間平均濃度（以降、NO_x(1H)値と記す）を図8に示す。開発システムの導入により、NO_x(1H)値の度数分布も2016年の評価期間は低濃度側にシフトし、

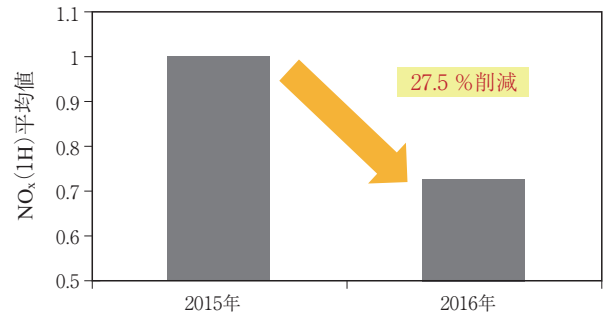
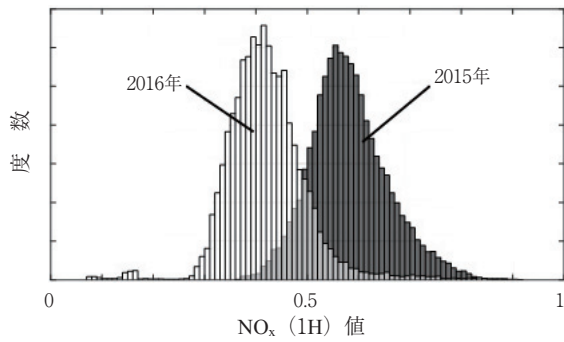


図8 NO_x 1時間平均濃度

比較対象期間のNO_x (1H) 平均値を1とした場合、評価期間中のCO (4H) 平均値は0.725と、27.5%の低減効果が確認された。

むすび

流動床式ガス化溶融炉は、広い範囲の廃棄物を処理対象として適用でき、制御応答性が良好で高い発電効率が見られるという特徴を有する一方、廃棄物の量的・質的变化によって運転状態が変化するという特性から自動制御技術が重要である。これまでの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に加えて、排ガスCO、NO_x抑制を自動化する制御システムを開発し、実プラントに適用してそ

の有効性を確認できた。

当社は、近年のICT技術の進歩を受けてセンシングやデータ処理等の最新の制御技術の活用により運転の自動化と高度化を進展させ、経済性、エネルギー回収性、資源回収性に優れるといった流動床式ガス化溶融プロセスの特徴をさらに活かして、社会ニーズに対して応えていく所存である。

[参考文献]

- 1) 友近ら：神戸製鋼技報, Vol.56, No.1, pp.64-68 (2006)
- 2) 江口ら：環境システム計測制御学会誌, Vol.21, No.2/3, p.152-156 (2016)