

# ガス化溶融炉における予測制御システムの開発

## Predictive control systems for Pyrolytic gasification and Melting furnaces

○前田知幸<sup>1)</sup>, 友近信行<sup>1)</sup>, 伊藤正<sup>2)</sup>, 細田博之<sup>2)</sup>, 下梨孝<sup>2)</sup>

1) (株)神戸製鋼所, 2) (株)神鋼環境ソリューション

○Tomoyuki Maeda<sup>1)</sup>, Nobuyuki Tomochika<sup>1)</sup>, Tdashi Ito<sup>2)</sup>, Hiroyuki Hosoda<sup>2)</sup>, Takashi Shimonashi<sup>2)</sup>

1) Kobe Steel, Ltd., 2) Kobelco Eco-Solutions Co.,Ltd.

### Abstract

The automatic control system for the pyrolytic gasification and melting furnaces was developed by using model predictive control theory. This control system is able to stabilize steam generation rate, fluidized bed temperature and other section temperature inside the furnace by manipulating waste feeder speed and a steam control valve with the automatic control technology based on predictive control theory. Furthermore, automatic operation is assured by setting up a suitable daily amount of incinerated waste automatically according to change of the quality of waste. Application results at the commercial fluidized bed type municipal pyrolytic gasification and melting furnaces show the usefulness of the proposed method.

**Key Words :** pyrolytic gasification and melting furnaces (PGMF), automatic operation, steam generation rate, model predictive control

### 1 はじめに

ダイオキシン発生の抑制、最終処分場の延命化ならびにリサイクルの向上を目的とした廃棄物処理施設として、ガス化溶融プロセスが注目を集めており、各地で商用炉の稼働実績が得られている。ガス化溶融炉の安定稼働のためには運転の自動化、自動制御技術の開発が必要不可欠である。当社グループでは既に商用炉施設向けの自動制御技術を開発し、今なお自動運転の継続を実現している。その技術をベースに自動制御技術の大型炉への展開を図り、新たな自動制御システムの構築を行い、連続適用によりその効果を確認した。

本報告では、自動制御システムの概要とその中心をなすモデル予測制御システムについて報告する。

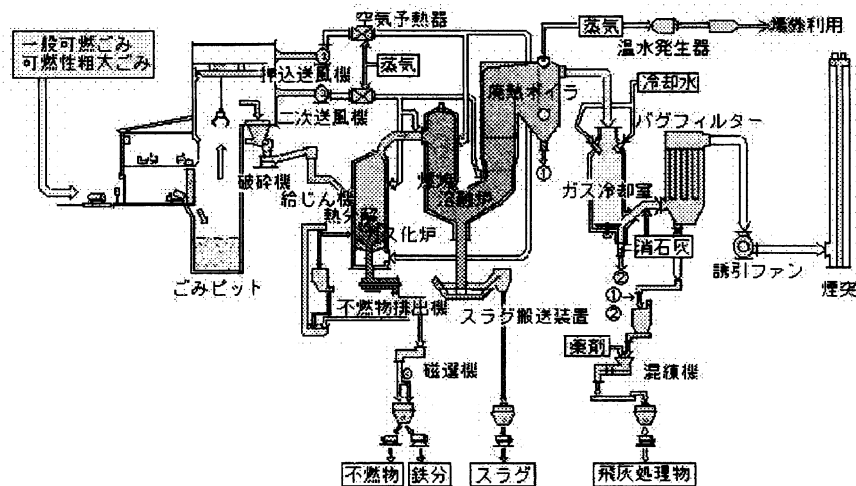


Fig.1 ガス化溶融施設のフロー図

## 2 制御システムの概要

本制御システムは、以下の4つの制御系・機能から構成されている (Fig.2)。

### ①モデル予測制御システム

蒸気発生量とボイラドラム圧力を目標値に制御するために、多変数モデル予測制御手法を用いて、給じん機速度、主蒸気弁開度を操作する。結果的に砂層温度も適正範囲に保持する。

### ②蒸気発生量目標値設定機能

処理量指令値とごみ発熱量推定値からモデル予測制御システムにおける蒸気発生量の目標値を自動設定する。

### ③溶融炉燃焼制御システム

溶融炉炉内温度を一定に保持し、炉内が最適な燃焼状態になるように溶融炉の燃焼空気量と助燃量を操作する。

### ④CO抑制制御システム

過負荷状態を検知して、二次燃焼部にて燃焼空気を吹き込むことによって未燃分を完全燃焼させ、COの発生を抑制する。

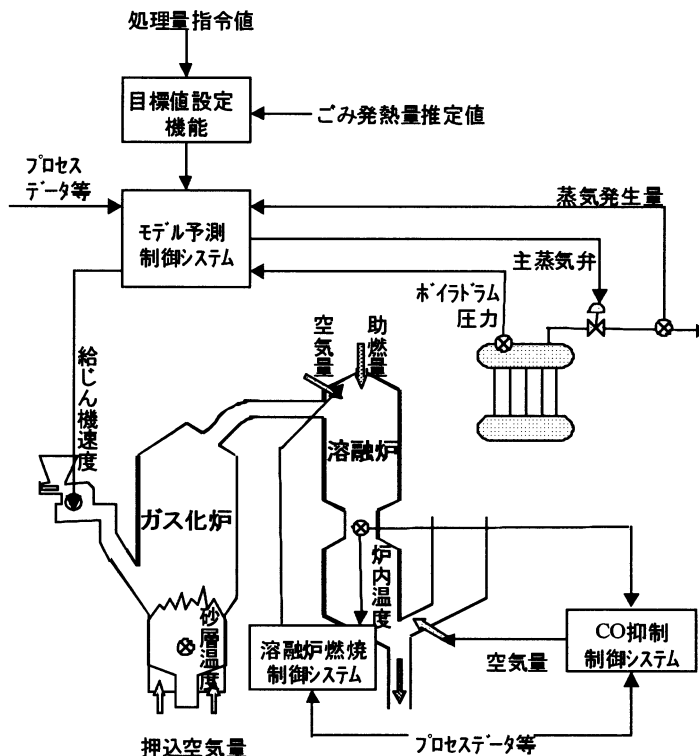


Fig.2 ガス化溶融炉の制御システム構成

## 3 モデル予測制御システムの構築

ガス化溶融プロセスには、むだ時間が存在するため、PID制御などのフィードバック制御手法ではゲインアップによるハンチング誘発が懸念され、十分な制御性能を得ることは困難である。また、給じん量や空気量などの変動が、砂層温度や溶融炉炉内温度など複数の制御量にそれぞれ影響を及ぼすなど、干渉が存在するため、SISO系による制御性能には限界がある。そこで、ガス化溶融炉の自動制御開発でのむだ時間と干渉の問題に対応すべく、多変数モデル予測制御手法が有効であると考えた。モデル予測制御手法とは、制御周期ごとに、モデルを使って今後の制御量の変動を予測し、予測された将来の制御量が所望の目標値に近づくように操作量を決定することを特徴とする (Fig.3)。したがって、むだ時間の存在する制御系に対して非常に有効であり、多入力多出力モデルを使用することによって干渉を考慮し、複数の操作量を最適化することができる。

### 3.1 制御系設計、モデリング<sup>3)</sup>

筆者らは既に小型炉向けに蒸気発生量とボイラドラム圧力、砂層温度を制御量とする制御システムを構築した実績がある<sup>1)</sup>。今回、大型炉への展開を図るにあたり実機データを用いて制御量、操作量の選択を行った。ガス化溶融炉の安定操作のためには給じん負荷の変動を抑制し、砂層温度および発生蒸気量を適正範囲に保つことが重要である。大型炉において、給じん負荷変動のうち応答時間が長いもの (数時間程度) は砂層部分のバッファ機能の影響により吸収される。つまり、砂層部分は自らの安定性を保持しようとする機能が強力であり、その機能により砂層温度を適正な変動範囲に維持することが可能である。そこで、本制御システムでは砂層温度を制御量とせず、砂層部分で吸収されない応答時間の短い負荷変動抑制を重視して

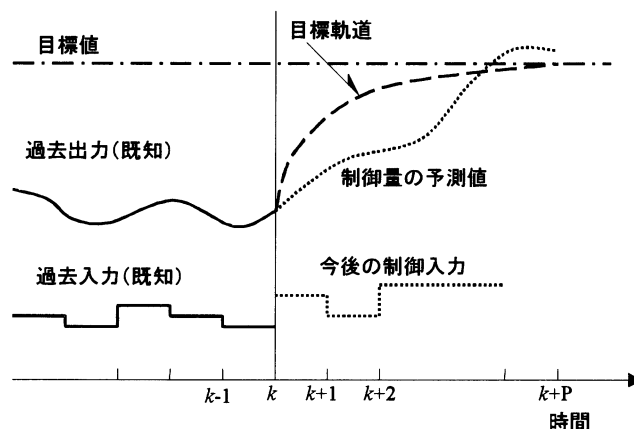


Fig.3 モデル予測制御の概念

制御系設計を行った。具体的には、制御量を蒸気発生量とボイラドラム圧力とし、多変数モデル予測制御手法を用いて、給じん機速度、主蒸気弁開度を操作する制御システムを構築した。なお、蒸気発生量とボイラドラム圧力を制御量として選んだ理由は、応答時間の比較的短い給じん機速度の変動は蒸気系の変動に顕著に現れるからである。また、発電設備付きのプラントを想定した場合、蒸気系の安定化自体が必要不可欠になるからである。

以上の考えに基づいて制御系設計を行い、予測制御用モデルのモデリングを行った。具体的には制御対象である大型ガス化溶融プラントに対し同定実験をおこない、取得したデータを元に多入力多出力モデルを作成した。Fig.4に示すモデル予測の結果と、実データとを比較することにより精度の良い予測が可能であることが確認できる。

### 3.2 モデル予測制御アルゴリズム

以下、本モデル予測制御アルゴリズムについて述べる。ここで、 $y$ は制御量(蒸気発生量、ボイラドラム圧力)に関するベクトル、 $u$ は操作量(給じん機速度、主蒸気弁開度)に関するベクトルを表し、 $w$ は観測入力を表す。ここで、 $z^{-1}$ は遅延演算子を表し $\Delta=1-z^{-1}$ とする。また、 $A(z^{-1})$ は、 $A$ が $z^{-1}$ に関する多項式行列であることを意味する。

まず、モデルによる $y$ の変動量予測値 $\Delta y_m$ が次式で表されるとする。

$$\Delta y_m(k+i) = F_i(z^{-1})\Delta y_m(k) + G_i(z^{-1})\Delta u(k+i) + H_i(z^{-1})\Delta w(k+i) \quad (1)$$

ここで、 $F_i$ 、 $G_i$ 、 $H_i$ は $i$ ステップ先を予測するための多項式行列を表している。

次に、制御量の現在の値 $y(k)$ から、目標値に近づけるように目標軌道 $y_r(k+i)$ を設定すると、目標軌道と制御量予測値との差 $\Delta y_e(k+i)$ は次式で求まる。

$$\Delta y_e(k+i) = y_r(k+i) - y(k) - \Delta y_m(k+i) \quad (2)$$

そして、(2)の $\Delta y_e(k+i)$ を用いて表される次式の評価関数 $J$ を最小化する $\Delta u(k)$ を求めればよい。

$$J = \sum_{i=L}^P \{ \Delta y_e(k+i)^T Q^T Q \Delta y_e(k+i) \} \quad (3)$$

ここで、 $L$ 、 $P$ は制御量を目標軌道に一致させる区間( $1 \leq L \leq P$ )を指定するパラメータであり、 $Q$ は制御量の重み係数行列である。さらに、操作入力 $\Delta u(k+i)$ に関する制約条件式を付加することもでき、その場合は操作量の絶対値あるいは変動幅に関する上下制限約だけでなく、場合によっては制御量に関する制約条件なども操作量の関数として、次式に帰着できる。

$$A\Delta U \leq b, \quad \Delta U = [\Delta u(k)^T \quad \Delta u(k+1)^T \quad \Delta u(k+2)^T \quad \dots \quad \Delta u(k+P)^T]^T \quad (4)$$

以上の問題は、二次計画問題として解かれ、制御周期ごとに $\Delta u(k)$ を求めることによって制御操作をおこなえばよい。

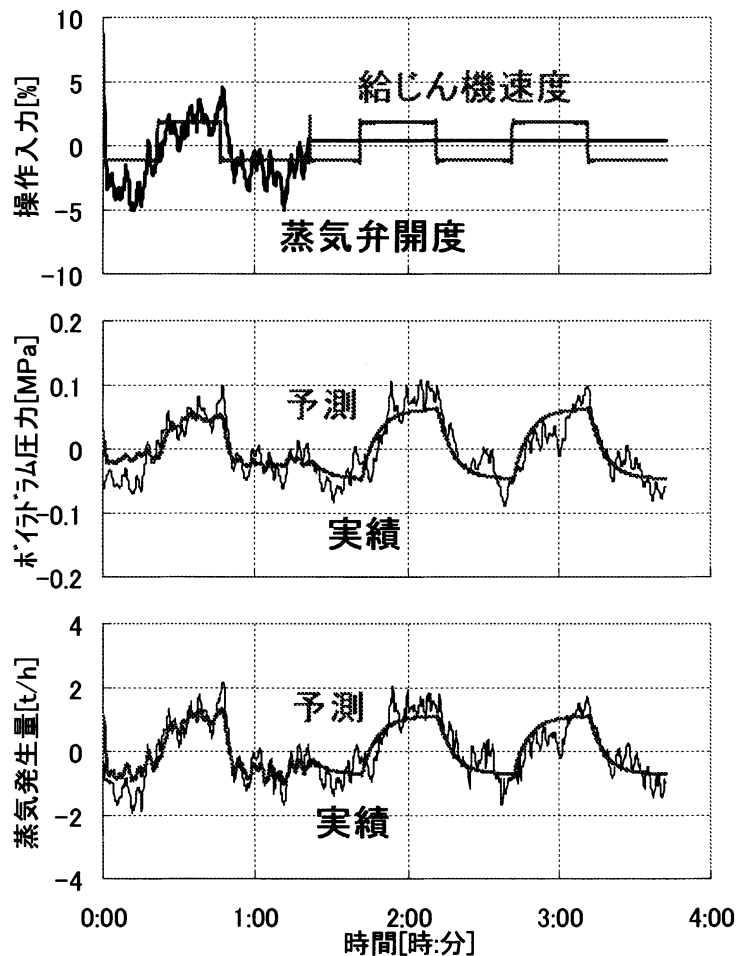


Fig.4 予測シミュレーション結果

#### 4 運転状況

本制御システムを用いた実機運転状況を Fig.5 に示す。

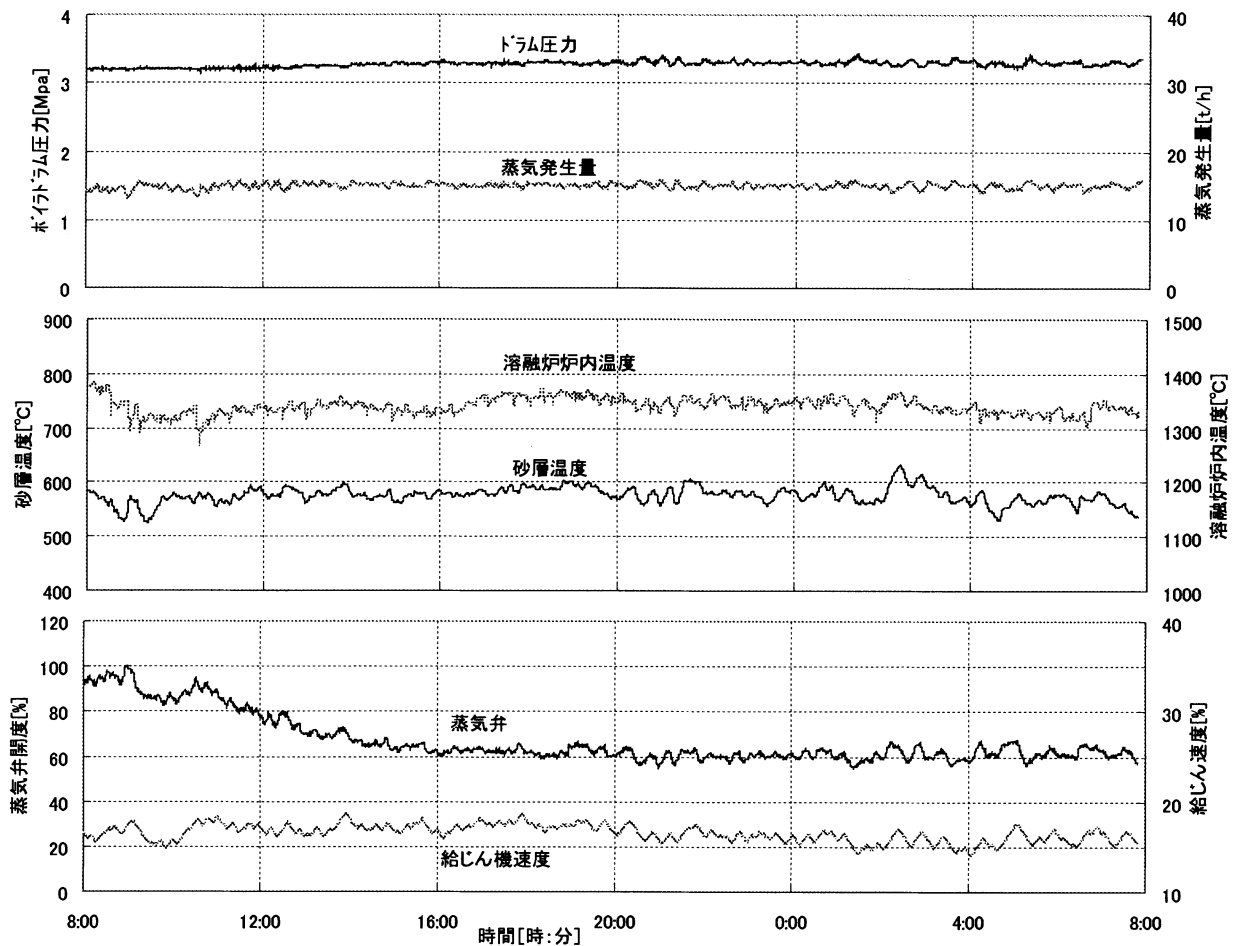


Fig.5 実機運転状況

図よりごみ処理量指令値とごみ発熱量推定値に基づいて計算される蒸気発生量目標値に対し、蒸気発生量の変動は±5%以内に抑制されている。また、同時にボイラドラム圧力も安定化できていることが確認できる。砂層温度に関しては結果的に±50℃以内の適正範囲となっている。また、熔融炉の炉内温度も灰の溶流点よりも約100℃高い1300℃程度に維持されており、熔融スラグの出滓状況も安定していた。

以上のように、多変数モデル予測制御システムを核として自動制御システムを構築することによって、応答性が早くバランスの良い制御操作を実現でき、ごみ質などの給じん変動に対しても、炉の挙動を予測しながら事前に制御操作をするため、炉内各部温度が大きく変動することなく安定稼働を可能としている。

#### 5 おわりに

大型炉商用炉において、ガス化熔融炉の自動制御システムを構築し、自動運転を実現した。今後とも、予測モデル精度の向上、制御システムの拡張など、さらなるブラッシュアップを図っていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 木村大文, 浜田靖信, 下梨孝, 二階堂宏央, ガス化熔融プラントにおける制御システムの検証, 第23回全国都市清掃研究発表会講演論文集, pp.228-230, 2002
- 2) E.F.Camacho and C.Bordons, Model Predictive Control, Springer, 1998
- 3) 足立修一, 制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局, 1996