

ガス化溶融炉における自動制御システムの開発

木村大文¹，浜田靖信¹，下梨孝²
 二階堂宏央²，西田吉晴²，○友近信行²

¹ 中部上北広域事業組合

² 株式会社 神戸製鋼所

概要：ガス化溶融炉を対象として、ボイラ蒸気発生量、砂層温度や溶融炉炉内温度などの炉内各部温度を安定化するために、給じん機速度や主蒸気弁開度、押込空気量などを自動操作する制御システムを開発した。本制御システムは、ガス化溶融プロセスに存在するむだ時間や干渉の問題を解決するために、多変数モデル予測制御システムを核として構成しており、ごみ質の変化に応じて制御目標値を自動的に適正化することによって、自動運転を実現している。国内初の都市ごみ向け流動床式ガス化溶融施設である中部上北清掃センターにおいて、本制御システムは実機稼働しており、操業の自動化が図られている。

キーワード：ガス化溶融炉，自動運転，モデル予測制御，多変数制御，目標値適正化

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次世代型廃棄物処理施設として、近年、ガス化溶融プロセスが注目を集めており、各地で受注・建設・稼働が始まっている。ガス化溶融炉が本格的に普及するためには、実機における運転方法の確立と自動化が必要不可欠となっており、ガス化溶融炉向けの自動制御システムの開発が望まれている。その中で、国内初の都市ごみ向け流動床式ガス化溶融施設である中部上北清掃センター（処理量 30t/24hr×2 炉、Fig.1）では、自動制御システムの効果が検証され、操業の自動化が図られている。

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。

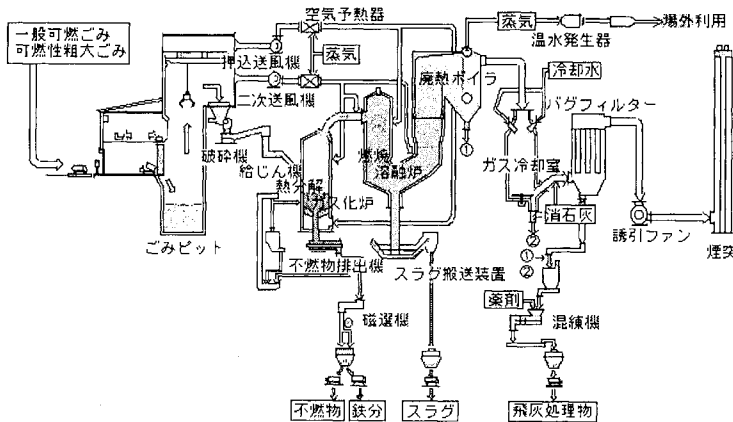


Fig.1 ガス化溶融施設のフロー図

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

砂層温度を適正範囲に保持し、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、押込空気量を操作する。

① 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。

② 熔融炉燃烧制御システム

熔融炉炉内温度を一定に保持し、炉内が最適な燃烧状態になるように熔融炉の燃烧空気量と助燃量を操作する。

③ CO 抑制制御システム

過負荷状態を検知して、二次燃烧部にて燃烧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。

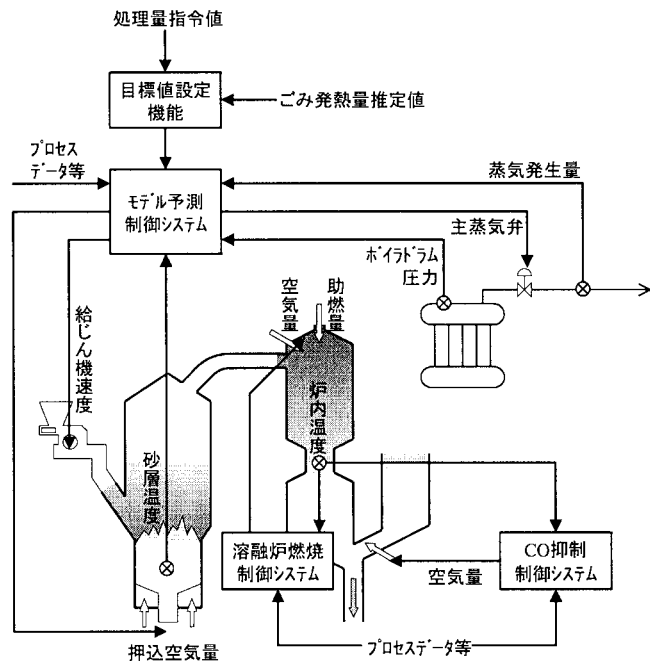


Fig.2 ガス化熔融炉の制御システム構成

3. モデル予測制御システムの構築

ガス化熔融プロセスには、むだ時間が存在する。したがって、一般によく用いられるPID制御などのフィードバック制御手法ではハンチングを誘発するため、ゲインを上げることができず、十分な制御性能を得ることができない。また、給じん量や押込空気量など操作量の変動が、砂層温度や熔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。

以上のように、ガス化熔融炉の自動制御においては、むだ時間と干渉の問題は無視しがたい問題であり、特に、相対的に給じん外乱の影響を受けやすい小規模な施設であるほど、その傾向は顕著であるといえる。したがって、ガス化熔融炉の制御手法としては、多変数モデル予測制御²⁾が有効であると考えられる。

さて、ガス化熔融炉の安定操業のためには、まずは、投入されたごみを安定して継続的に熱分解することが必要である。そのためには、ガス化炉における給じん負荷の変動を抑制し、砂層温度を適正範囲に保つことが重要となる。したがって、給じん機速度と押込空気量の操作がポイントとなる。

そこで、蒸気発生量とボイラドラム圧力、砂層温度を制御するために、多変数モデル予測制御手法を用いて、給じん機速度、押込空気量、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、給じん負荷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。

3. 1 モデル予測制御のコンセプト

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。

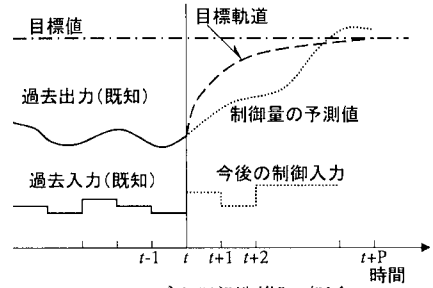


Fig.3 モデル予測制御の概念

3.2 モデリング³⁾

制御対象である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。

モデルによる予測結果と、実データとの比較を Fig.4 に示す。図を見てわかるように、精度の良い予測が可能であることが確認できる。

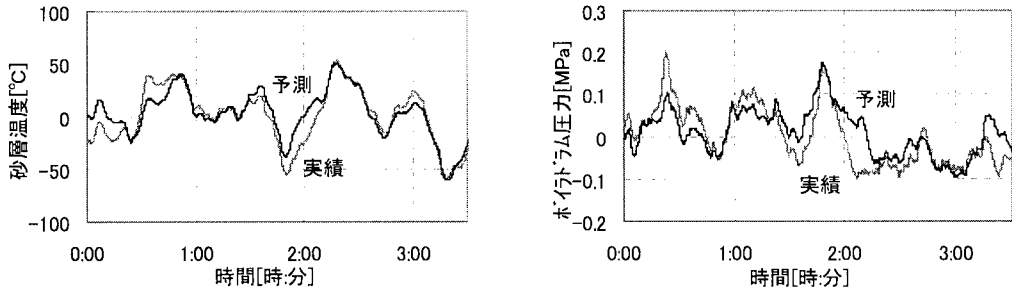


Fig.4 予測シミュレーション結果

3.3 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、砂層温度) に関するベクトル、 u は操作量 (給じん機速度、押込空気量、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 Δy_m が次式で表されるとする。

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

次に、制御量の現在の値 $y(k)$ から、目標値に近づくように目標軌道 $y_r(k+i)$ 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。

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

さらに、操作入力 $\Delta u(k+i)$ に関する制約条件式を求める。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。

$$A\Delta U \leq b, \quad \Delta U = [\Delta u(k)^T \quad \Delta u(k+1)^T \quad \Delta u(k+2)^T \quad \dots]^T \quad (3)$$

そして、制約条件(3)の下で、次式の評価関数 J を最小化する $\Delta u(k)$ を求めればよい。

$$J = \sum_{i=L}^P \left\{ \Delta y_e(k+i)^T Q^T Q \Delta y_e(k+i) \right\} \quad (4)$$

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。

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。

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。

図を見てわかるように、蒸気発生量、ボイドラム圧力、砂層温度ともに安定していることがわかる。蒸気発生量の目標値は、ごみ処理量指令値とごみ発熱量推定値に基づいて、目標値設定機能により適正化されている。定められた目標値に対し、蒸気発生量の変動は $\pm 5\%$ 以内に抑制されている。

また、熔融炉の炉内温度も灰の溶流点よりも約 100°C 高い 1300°C 程度に維持されており、熔融スラッグの出滓状況も安定している。

排ガス中のダイオキシン類濃度については定期的に測定しているが、いずれの測定においても保証値である 0.1ng-TEQ/Nm^3 以下を十分達成しており、処理量 30t/24hr の小規模な炉でありながら、 0.01ng-TEQ/Nm^3 を下回る場合も存在した¹⁾。

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、むだ時間と干渉のあるガス化熔融プロセスに対し、応答性が早くバランスの良い制御操作を実現できる。ごみ質の変動に対しても、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が可能である。

5. おわりに

中部上北清掃センターにおいて、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。本制御システムは、現在も順調に稼働を続けている。今後とも、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) 木村大丈, 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

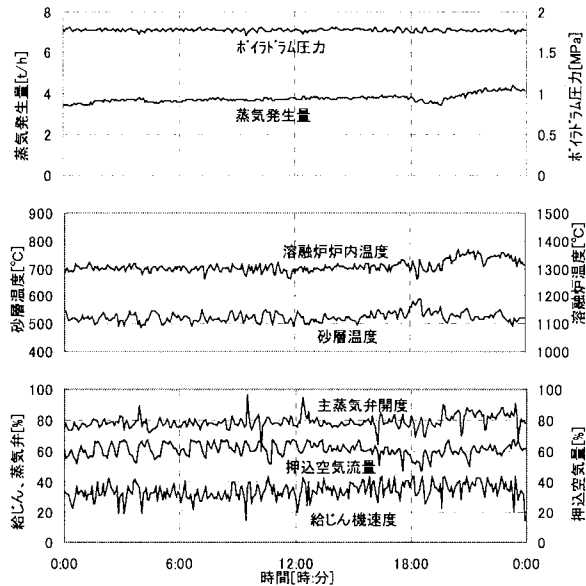


Fig.5 実機運転状況