

モデル予測制御に基づく

ガス化溶融炉制御システム



Model Predictive Control Systems for Pyrolytic Gasification and Melting Furnaces

技術開発本部
プロセス技術開発部廃棄物処理室

細田博之

Hiroyuki Hosoda

伊藤正

Tadashi Ito

技術開発本部知的財産室

二階堂宏央

Hiroo Nikaido

技術本部計電技術室

下梨孝

Takashi Shimonashi

(株)神戸製鋼所

生産システム研究所計測制御研究室

前田知幸

Tomoyuki Maeda

友近信行

Nobuyuki Tomochika

ガス化溶融炉を対象として、ボイラの蒸気発生量、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、給じん機出力や主蒸気弁開度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操作量の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されている。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ごみ処理量を補償し、実機において操業の自動化が図られており、安定運転を実現している。

An automatic control system for the pyrolytic gasification and melting furnaces is 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 model predictive control theory. Furthermore, automatic operation is assured by setting up a suitable daily amount of incinerated waste automatically according to change of the calorific value of waste. Application results in the commercial plants show the usefulness of the proposed method.

Key Words :

廃棄物処理

都市ごみ

ガス化溶融

モデル予測制御

Waste treatment

Municipal solid waste (MSW)

Gasification and melting

Model predictive control system

まえがき

ガス化溶融プロセスはリサイクル性、維持管理費低減、有害物質の排出抑制などの環境負荷低減を大きな特長として、灰の溶融処理までを一貫しておこなう次世代型プロセスとして注目を集め、1990年代に開発が進められた。現在、全国各地で商業施設が稼働する状況にあり、当社も流動床式ガス化溶融施設の国内第1号機である中部上北清掃センターをふくめ、全国で5施設が商業施設として稼働中であり、2施設が建設中という状況にある。

ガス化溶融プロセスは、先にも述べたとおり、ガス化、燃焼、溶融処理を一貫しておこなうことを特長としており、実機における安定運転には効果的な自動制御化が重要な要素になってくる。そのなかで、実機において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およびごみ処理量補償機能の効果について報告する。

1. 流動床式ガス化溶融炉の概要

ガス化溶融炉は、メーカー各社によって採用している方式が異なる。当社では、流動床式ガス化炉と堅型の旋回流溶融炉から構成される流動床式ガス化溶融炉を採用している。詳細については前号^{1), 2)}にて報告したので省略する。

2. 制御システムの概要

ガス化溶融炉に採用されている制御システムは、



図1 流動床式ガス化溶融炉

以下の4つの制御系・機能から構成されている(図2)。なお、ここで示す機能は代表的なもので、施設によって異なる。

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もちいて、給じん機出力、主蒸気弁開度、押込空気量を操作する。

②ごみ処理量補償機能

1日のごみ処理量が所定の量となるように、蒸気発生量の目標値を自動的に補正する。

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、場合によっては助燃量を操作する。

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。

3. モデル予測制御システムの構築

ガス化溶融炉には、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、十分な制御性能をえることは困難である。また、給じん量(ごみ供給量)や空気量などの操作量の変動が、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の干渉が存在するため、1入力

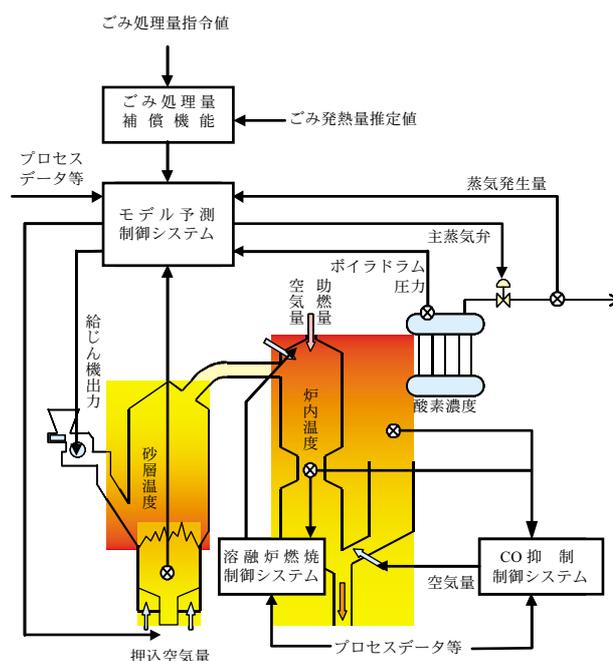
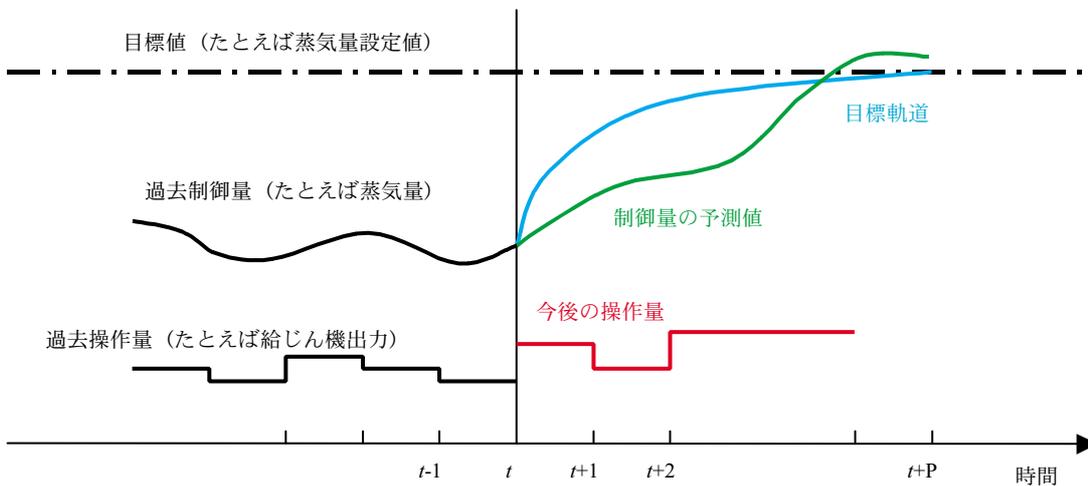


図2 ガス化溶融炉の制御システム構成

表1 モデル予測制御の実施例

	施設 A	施設 B	施設 C
施設概要	30 t/24 h × 2 炉 ボイラ付 (発電なし)	115 t/24 h × 2 炉 ボイラ発電付	30 t/24 h × 2 炉 ボイラなし
施設の特長	・小型炉でごみの発熱量が低い ため、ガス化炉の砂層温度が 低下しやすい。	・大型炉で砂層温度は安定し ている。 ・発電付のため蒸気量の安定 化が重要である。	・小型炉だがごみの発熱量が 比較的高く、砂層温度は比 較的安定している。 ・ボイラがないため炉への入 熱をあらわす蒸気発生量の 代替制御量の選定が必要で ある。
モデル予測制御 制御量	蒸気発生量 ボイラドラム圧力 ガス化炉砂層温度	蒸気発生量 ボイラドラム圧力	ガス冷却室噴射水量
操作量	給じん機出力 主蒸気弁 押込空気量	給じん機出力 主蒸気弁	給じん機出力



この評価関数 J を最小化するように操作量を求める。

$$J = \sum \{ \underbrace{\alpha(\text{予測値} - \text{目標軌道})^2}_{\text{予測値と目標軌道の差違}} + \underbrace{\beta(\Delta\text{操作量})^2}_{\text{操作量の大幅な変更を防止するために追加される項}} \}$$

(α, β は補正係数)

図3 モデル予測制御の概念図

1 出力系による制御性能には限界がある。

そこで、ガス化熔融炉における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。

3.1 制御系の設計

ガス化熔融炉において、モデル予測制御システムを導入するうえで制御量（なにを）、操作量（なにを）を適切に選択することが重要である。これまで3カ所の施設においてモデル予測制御システムの導

入、テストを実施してきており、その内容を表1に示す。

施設 A は小型炉でボイラ付きだが発電設備のない施設、施設 B は大型炉でボイラ発電付きの施設である。施設 C は小型炉でボイラも発電設備もない施設であり、それぞれの施設に適した制御量、操作量を選択している。

大きな特長として、ボイラ付きの炉はボイラでの蒸気発生量を適正範囲に保つことが重要になってく

る。これは、蒸気発生量が炉内に供給されるごみの熱量（場合によっては助燃の熱量との和）を代表することに代わって、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。また、小型炉ではガス化炉径が小さく、砂層の熱容量も小さくなり、結果として砂層温度は供給されるごみの量、質の変動の影響を受けやすくなっていく。ガス化炉の砂層温度の安定化は、安定したガス化反応に不可欠であり、小規模でかつごみ発熱量が低い施設における制御系の設計の重要なポイントになっていく。ボイラのない炉においては、蒸気発生量にかわる入熱を表す制御量の選定が必要であり、施設Cでは検討の結果、排ガス温度を冷却するために供給するガス冷却室噴射水量を制御量として選択した。

3.2 モデル予測制御の計算手順

モデル予測制御の計算手順の詳細説明については参考文献³⁾にゆずるとして、ここでは簡単に概要のみを説明する。図3はモデル予測制御の概念図である。図中に示される「制御量の予測値」が構築され

た予測モデルによってえられる値であり、この予測値と目標軌道の差を最小にするように制御周期毎に計算がおこなわれる。

また、制御量を目標値に急激に近づけるとプラントの運転が乱れるおそれがあるため、制御量を目標値にどのように近づけるかを定める目標軌道をもっている。目標軌道は、応答性と安定性のバランスを考慮して決定される。

3.3 モデリング

ここでは、モデル予測制御システムを構築するうえで重要なポイントである予測モデルの作成方法について、施設Aを一例にして説明する。

施設Aは表1に示すように、3入力3出力の多変数モデル予測制御システムで構築した。

予測モデルは、実機で実施される同定実験の結果に基づいて作成する。予測モデルの作成の流れは図4に示すとおりであり、予測精度が十分なモデルがえられるように適正な同定実験をおこなうことが重要である。今回は給じん機の出力をステップ状に変化させるステップ応答実験などの結果に基づいて予

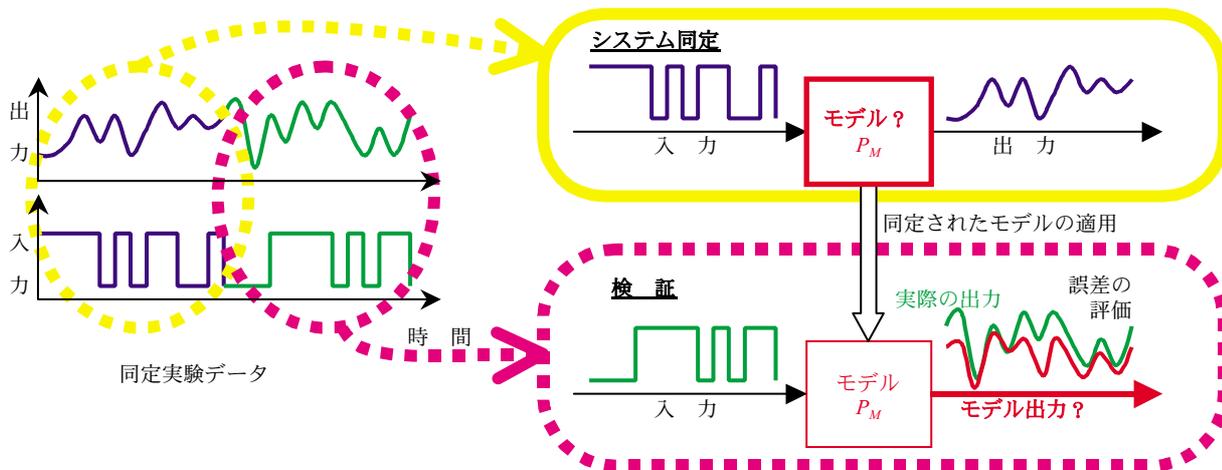


図4 予測モデルの作成の流れ

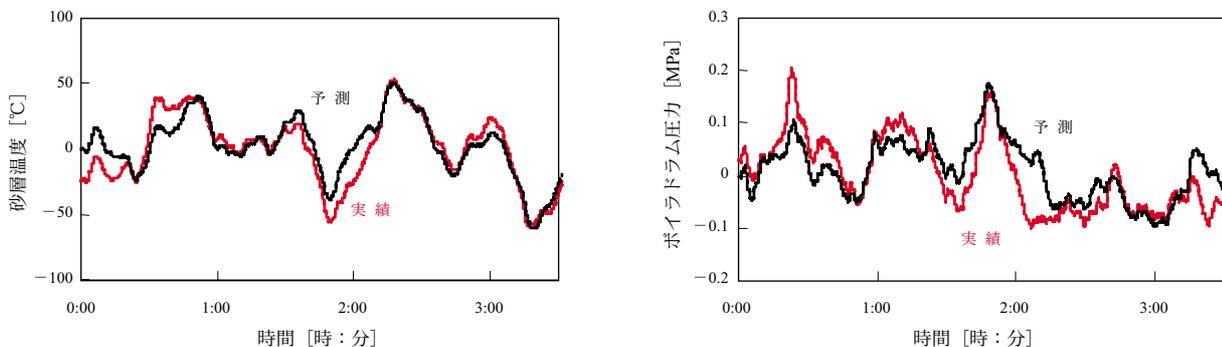


図5 予測シミュレーション結果

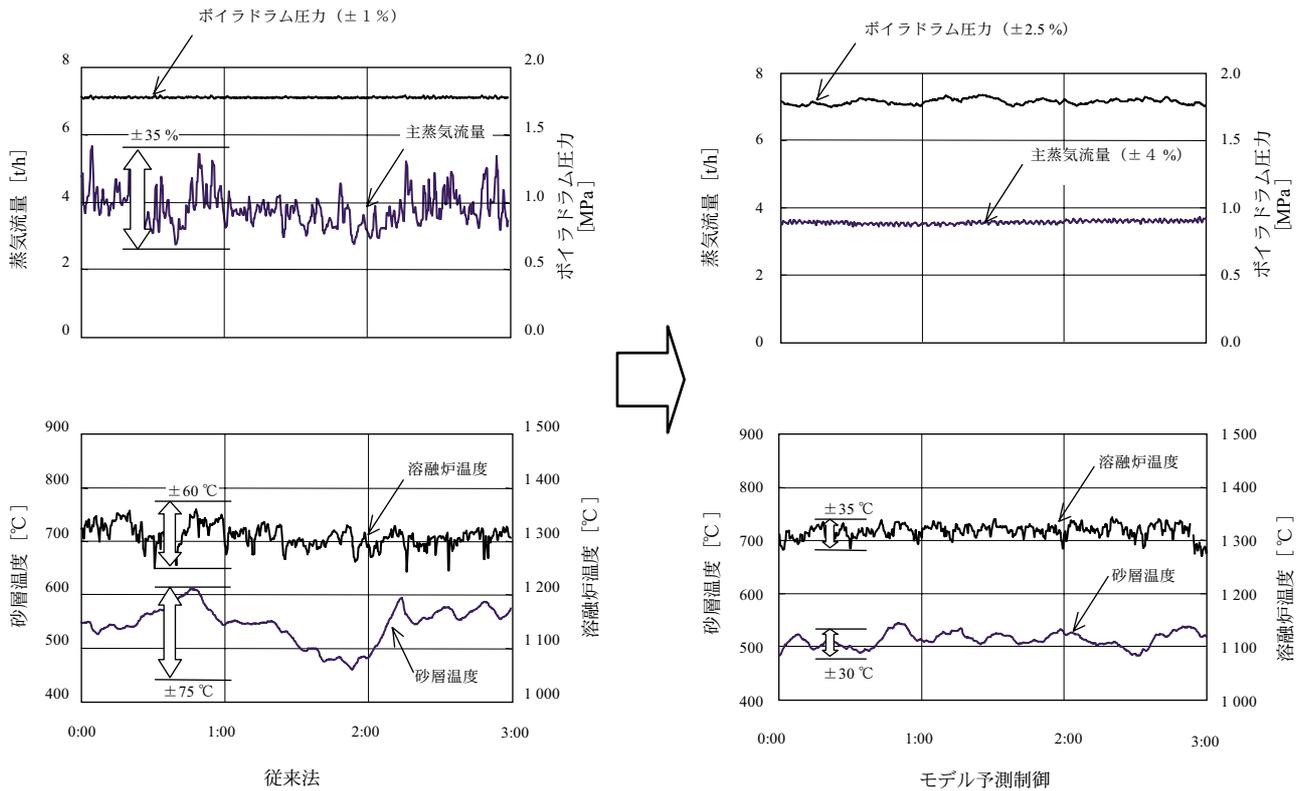


図6 モデル予測制御の効果

測モデルを構築した。

施設 A で決定された予測モデルによる予測結果と、実機データとの比較を図5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。

3.4 制御結果

本制御システムによる施設 A (30 t/24 h 炉) の実機運転状況を図6に示す。

図中の従来法とは、PID 制御によるボイラドラム圧力制御+押込空気量と給じん機出力の手動補正による運転を意味する。

モデル予測制御による運転で、蒸気発生量の変動は±5%以内に抑制されると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。これは、炉内への入熱の制御が良好におこなわれていることを示している。砂層温度に関しても±50℃以内の適正範囲に制御できていることが確認できる。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より安定化できている。応答性が良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。

本結果は30 t/24 h 炉という小型炉での結果であるが、同様の制御を大型炉 (115 t/24 h 炉) でも適用して蒸気発生量の変動を±5%以内に抑制できることを確認している。⁴⁾

4. 処理量補償機能の構成

ガス化熔融炉においては、ボイラで回収される熱量は、ごみの供給熱量、場合によっては助燃の供給熱量の和と正の相関を持つ。助燃量の熱量は供給されるとしてもごみの供給熱量にくらべて少ないため、ごみ質が一定であると仮定すると、給じん量によって蒸気系 (蒸気発生量およびボイラドラム圧力) が変動することになる。一般に、蒸気系においてボイラドラム圧力目標値は一定であるから、給じん量の変動は蒸気発生量にあらわれ、給じん量と蒸気発生量とが正の相関をもつことになる。したがって、蒸気発生量を決定すれば、給じん量ひいては1日のごみ処理量が決まることになる。

前章で示したモデル予測制御運転では、蒸気発生量の目標値は手動で補正されていた。したがって、目標値の補正が不適切であると、ごみ処理量が過大または過小になり、ごみ処理計画に悪影響をおよぼすおそれがある。

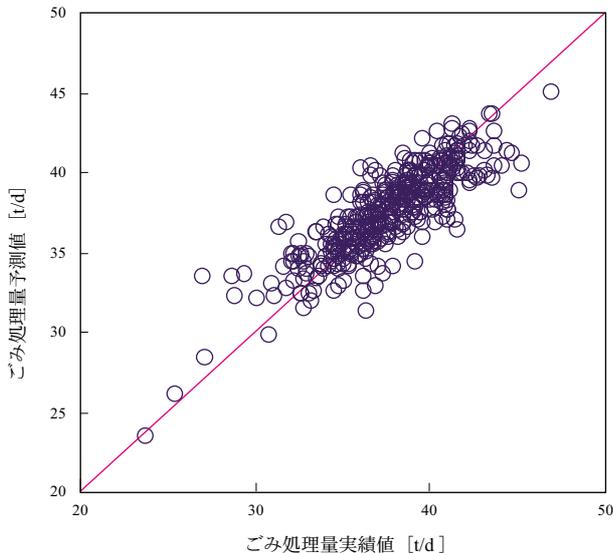


図7 ごみ処理量予測値と実績値の相関

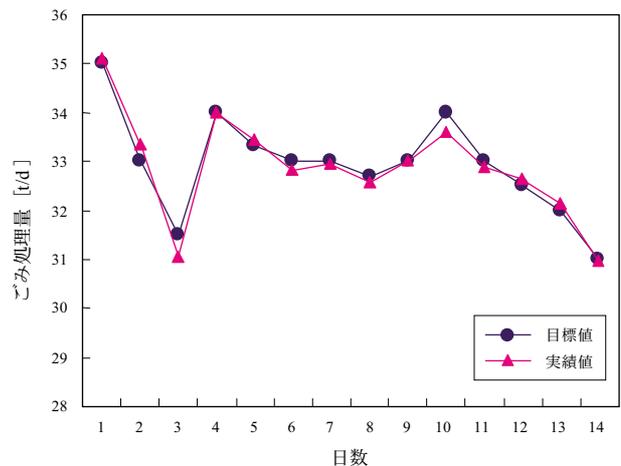


図8 ごみ処理量補償結果

また、ガス化溶融炉は定格処理量付近で炉の状態が最適となるように設計されているため、ごみ処理量を基準に蒸気発生量目標値を決定することは、ガス化溶融の安定化を実現する上でも効果的であると考えられる。

そこで、ごみ処理量目標値に応じて、蒸気発生量目標値を自動設定し、既存制御系のさらなる安定化とごみ処理量の管理を両立できる上位機能（ごみ処理量補償機能）を開発した。本章では、ごみ処理量補償機能の構成と適用結果について述べる。

4.1 ごみ処理量補償機能

まず、ごみ処理量目標値に応じた蒸気発生量を求めるため、これらの関係式を導く。蒸気発生量は給じん量だけでなく、ごみ発熱量や供給空気量、助燃量などさまざまな操作量の影響を受ける。そこで、実機の操業データを使って、これらの関係を重回帰計算で求めた。

ごみ処理量を正確に予測することが重要であるから、ごみ処理量を目的変数とし、蒸気発生量やその他のデータを説明変数とすることにした。ここで、データのばらつきをなくすために、実機データを4時間ごとに平均した値を使用した。また、クレーンでごみホッパに投入したごみ重量を4時間分累計し、それを6倍したものをごみ処理量 [t/d] とみなし目的変数とした。

総数で400を超えるデータに対し、説明変数や式構造を試行錯誤で変更し、重回帰モデルを求めたところ、蒸気発生量、ごみ発熱量推定値、助燃量の3項目を説明変数とする次式の重回帰モデルでごみ処

理量を推定できる可能性を見いだした。

$$W = a_F X_F + a_C X_C + a_O X_O + b$$

ここで、 W はごみ処理量、 X_F は蒸気発生量、 X_C はごみ発熱量、 X_O は助燃量、 a_F 、 a_C 、 a_O はそれぞれの係数、 b は定数項である。推定値と実績値との散布図を図7に示す。上式によって予測される予測値と実績値は高い相関関係があり、上式によってごみ処理量を推定できることがわかる。

重回帰計算により求まる上式の係数と操炉中にえられるごみ発熱量推定値、助燃量、ごみ処理必要量のデータをもちいることで、蒸気発生量の目標値を求めることができる。実際には1時間毎にこの計算をおこない、蒸気発生量目標値の適正化を図っている。

4.2 ごみ処理量補償結果

図8に本アルゴリズムをもちいた2週間分の実機での操業結果を示す。ごみ処理量目標値に対し、 ± 0.5 [t/d] の範囲内に実際のごみ処理量が制御できており、実用上十分な精度をえることができた。

また、このときの蒸気発生量の目標値変更状況およびごみ処理量補償機能をくわえたモデル予測制御運転結果を図9に示す。状況に応じて蒸気発生量の目標値が調整されているとともに、定められた目標値まわりに蒸気発生量が制御されていることがわかる。また砂層温度および溶融炉の温度も安定域に保持されており、安定的なガス化溶融運転が実現できていることがわかる。

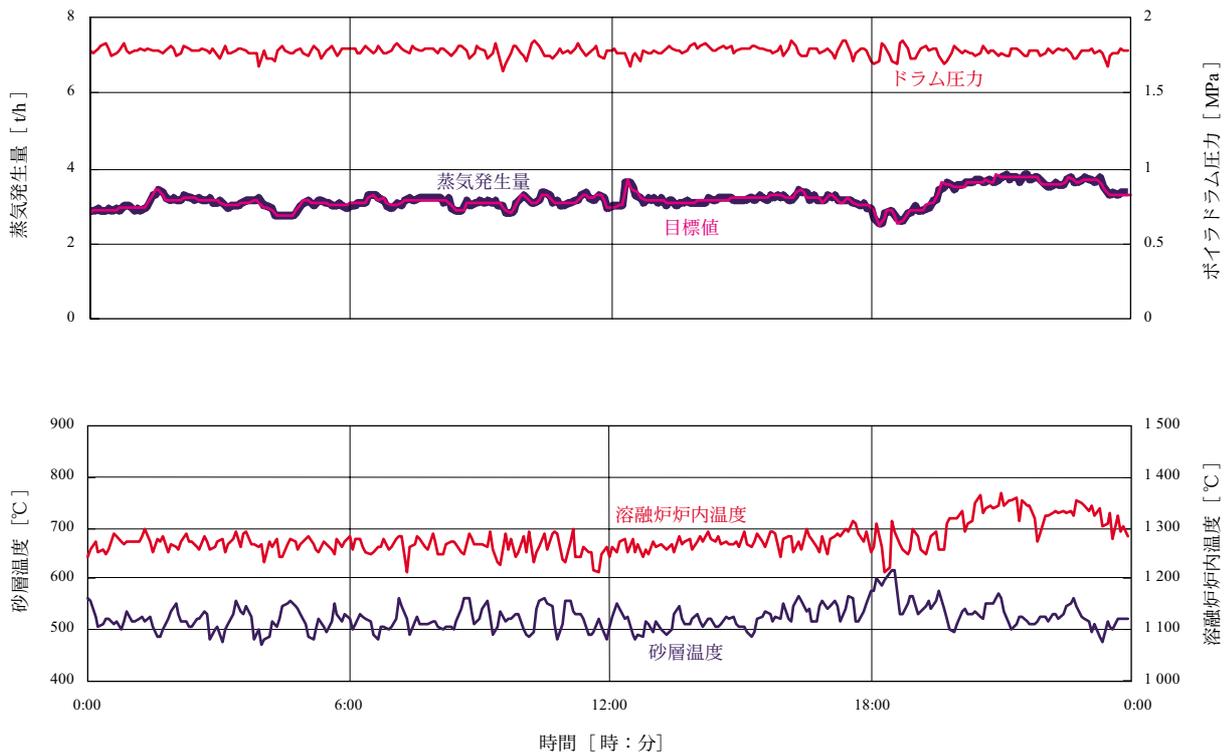


図9 ごみ処理量補償機能をくわえたモデル予測制御運転結果

むすび

ガス化溶融炉を対象としたモデル予測制御システムを構築し、長時間連続適用によりその効果を確認した。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) 高橋：神鋼環境ソリューション技報「当社の廃棄物

処理技術」, Vol.1 (1), p.22-27, (2004)

2) 佐藤, 細田：神鋼環境ソリューション技報「ガス化溶融施設の連続安定運転」, Vol.1 (2), p.27-32, (2004)

3) 友近, 二階堂ら：システム制御情報学会論文誌「ガス化溶融炉におけるモデル予測制御システムの開発」, Vol.17 (8), pp.338-348, (2004)

4) 前田, 下梨ら：第5回計測自動制御学会制御部門大会「モデル予測制御に基づくガス化溶融炉制御システムの開発」, pp.189-192, (2005)