

高温ガス化直接溶融炉における出滓温度制御

Automatic Combustion Control for a Gasifying and Direct Melting Furnace

津田 和呂 TSUDA Kazuro JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(課長)
田鍋 実 TANABE Minoru JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(課長)
島本 拓幸 SHIMAMOTO Hiroyuki JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(係長)

要旨

JFE グループでは、環境負荷軽減を目指した排出物の無害化・減容化に加え、廃棄物の再資源化といった社会的要請にこたえるべく、一般・産業廃棄物の両方が処理可能なガス化溶融炉を開発した。本プラントを燃焼制御系という観点から見た場合、廃棄物の投入から溶融までの時間が大きな変動むだ時間となり、制御が難しい。この変動むだ時間に対し、オンライン予測モデルを適用することで、より安定した燃焼および溶融を実現した。

Abstract:

JFE Group developed a high-temperature gasifying and direct melting furnace as a completely new waste treatment system that meets the requirements of a recycling-based society. From a control point of view the plant has long and variable time lag depending on a height of waste in the furnace. This paper presents an outline of the completed plants and describes the control system in which online model prediction is effectively combined with rule-based control. Operational results with the control system show the effectiveness of the system.

1. はじめに

現在、日本では一般廃棄物は年間約 5000 万トン排出され、その約 70%が焼却処理により減容化されるが、その際に排出される有害物質や焼却灰処理が問題となっている。一方、産業廃棄物は約 4 億トン排出されるが、リサイクルが困難な廃棄物は焼却処理も難しく、大半が埋立て処理を行っており、その用地確保が困難な状況となっている。

JFE グループでは、1992 年から一般・産業廃棄物の両方が処理可能なガス化溶融炉の開発に着手した。1995 年に処理量 24 t/d という実用規模の試験プラントを建設し、400 日強の操業で 5000 t 以上の廃棄物を処理し、長期安定燃焼できることを実証した。1998 年 7 月には旧厚生省の外郭団体である(財)廃棄物研究財団から技術評価書を取得し本格的な営業活動を開始した。JFE 式高温ガス化直接溶融炉^{1,2)}は、鉄鋼プロセスにおける高炉の溶融技術と、流動床式ごみ焼却炉の攪拌技術を併わせ備えたものである。一つの炉で、廃棄物中の不燃分は無害なスラグとして減容化され、また同時に可燃分はダイオキシン類が抑制されタール分が分解された素性の良いガスとして排気・二次利用することができる。

しかしながら、従来の焼却炉とは異なり、一つの炉で多数の状態・反応が混在しているため、運転員は同時に多数

の項目について監視する必要がある。このため、手動運転では運転員に過度な負荷がかかり、安定操業の継続に負担が大きい。そこで、運転員負荷の軽減、および安定操業の維持を目的として、ガス化溶融炉向け自動燃焼制御装置(automatic combustion control system, 以下 ACC)を開発した。

2. 高温ガス化直接溶融炉の技術的特長

本炉は次の特長を持つ²⁾。

- (1) 幅広い廃棄物に対して安定した処理が可能
補助熱源としてコークスを使用するので、処理対象物の灰分割合や発熱量に左右されることなく、幅広い種類の廃棄物に対し安定したガス化溶融処理の運転ができる。
- (2) 処理時の環境負荷の最小化
溶融炉での高温還元燃焼と二次燃焼炉での高温酸化燃焼という 2 段階制御によって、ダイオキシン類などの有害物質の発生が抑制できる。
- (3) 廃棄物の減容化と処理コストの最小化
廃棄物中の不燃分は高品質なスラグとして利材化でき、最終処分は集じん灰のみで大幅な減容化が達成できる。また低空気比燃焼により発電効率も高い。

Fig. 1 に、高温ガス化直接溶融炉の構造を示す。ガス化

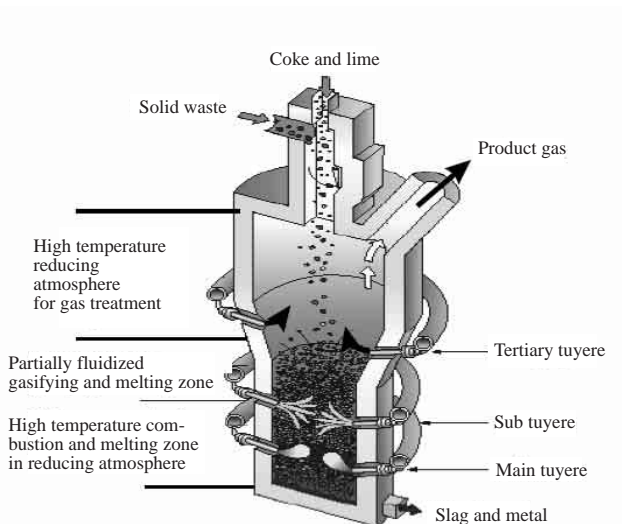


Fig. 1 Schematic diagram of high-temperature gasifying and direct melting furnace

溶融炉は下部から、溶融分離領域（コークス充填層）、乾燥・熱分解領域（流動化層）、高温還元領域（フリーボード）で構成される。Fig. 1には示されていないが、この後段にさらに、溶融炉部で発生した可燃性ガスを完全燃焼するための二次燃焼炉が設置されている。

最下部の溶融分離領域では、主羽口から送風される酸素富化空気により、充填されたコークスと廃棄物中の固定炭素が高温で燃焼している。この燃焼熱により、廃棄物中の不燃分は溶融され、還元雰囲気中で約1600°Cの溶融状態を保ちつつ、炉底の出滓口から溶融スラグとして連続して排出される。燃焼で発生したCO₂はいわゆるソリュションロス反応によってCOに還元され、上昇する。Photo 1に連続出滓の様子を示す。連続出滓はJFE式高温ガス化直接溶融炉の最も優れた特長の一つである。これにより、間



Photo 1 Continuous tapping of molten slag

欠出滓型の溶融炉における出滓口の開口・閉口作業が不要となり、炉の運転負荷を格段に低減することが可能となる。

乾燥・熱分解領域では、投入された廃棄物が副羽口からの送風によって流動状態に維持され、溶融分離領域で発生したガスの一部を燃焼することで約600°Cになっている。この熱によって炉頂から投入された廃棄物は乾燥・熱分解される。不燃分はコークスとともに下部の溶融分離領域へ降り、揮発分はガス化して上方の高温還元領域へ行く。

高温還元領域では三段羽口からの送風によって熱分解生成ガスの一部が燃焼して850°C以上の高温還元雰囲気になっている。ここで、通過する生成ガス中のダイオキシン類発生の抑制やタール分の分解などのガス処理が行われる。この熱分解生成ガスは、後続の二次燃焼炉へ送られる。

二次燃焼炉では、二次燃焼空気により熱分解生成ガスが完全燃焼し、高温の燃焼排ガスはボイラで熱回収され、排ガス処理工程を経て煙突から排出される。

3. 燃焼制御系（ACC）の構成

3.1 ACC 開発の必要性

前述のように、ガス化溶融炉では従来のストーカ方式の焼却炉とは異なり、溶融炉と二次燃焼炉に分かれており、一つの燃焼系で多数の状態・反応が混在しているため、運転員は同時に多数の項目について監視する必要がある。このため、手動運転では運転員に過度な負荷がかかり、安定操業の継続に負担が大きい。

そこで、安定したごみ処理操業および運転員の負荷を目的として、炉の溶融状態および燃焼状態を制御するACCを新たに開発した^{3,4)}。

本ACCにおいて最も重要な機能は、溶融スラグの温度を制御（出滓温度制御）することで連続出滓を安定持続させる機能である。本報告では、出滓温度制御機能を中心に記述する。

2章で述べたごみ中の不燃分が溶融する過程は、投入から系外排出までが数時間オーダーで進行する現象であり、この間、ごみの堆積高さ（層高）を適正に維持し、熱交換の時間を一定に保つことで、溶融スラグの温度を安定化する必要がある。一方、二次燃焼炉内のごみ中の可燃分が熱分解し燃焼する過程は分オーダーで進行する現象であり、ごみ質変動に起因する温度変動などに迅速に対応する必要がある。

このように時間スケールの異なる2つの系を制御するために、ガス化溶融炉ACCは、乾燥・熱分解領域と溶融分離領域に対してはモデル予測型ファジィ制御、高温還元領域と二次燃焼炉のガス燃焼部に対しては従来のストーカ炉の運転で得た知見を反映したファジィ制御ルールに加え、ガス化溶融炉特有の制御ルールを付加した（通常の）ファ

ジイ制御を適用する構成とした。

3.2 溶融炉の制御

溶融炉制御における操作量は、(1)主羽口吹込空気流量、(2)主羽口吹込酸素流量、(3)送風温度、(4)ごみ装入速度、(5)コークス装入速度があり、観測量としては、(1)出滓温度、(2)ごみ層高、(3)各部位の熱電対温度などがある。制御目的は、連続出滓を安定に行うための出滓温度一定化である。

制御系設計の観点からは、炉内に存在する廃棄物の量に応じた、数時間オーダーの変動むだ時間が問題となる。そこで、炉内で生じている向流熱交換のプロセスをオンラインモデルで模擬することで、この変動むだ時間に対応することとした。

操作量は、Fig. 2 に示すように、プロセス量現在値に加え、本オンラインモデルで計算できるプロセス値の予測値を用いたファジィルールにより制御出力を決定する。オンラインモデルは装入物移動モデルおよび向流伝熱モデルから構成される。以下、それぞれについて記述する。

3.3 装入物移動モデル

装入物移動モデルの概念図を Fig. 3 に示す。モデルでは、たとえば 5 min といった一定時間の装入物投入分を一

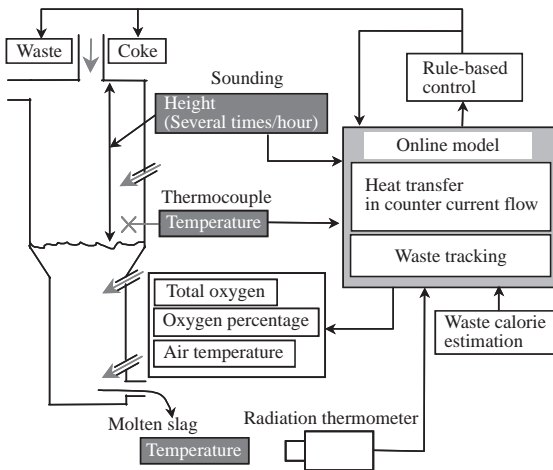


Fig.2 Schematic diagram of ACC with online model for prediction

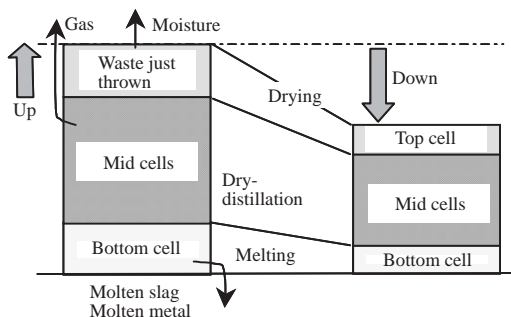


Fig.3 Conceptual diagram of waste tracking model

層とし、水分蒸発や乾留、主羽口先の溶融・排出による体積減少分にしたがい、層が下方に移動するとした。この一層ごとに、炉内装入物重量 (kg) (ごみ, コークス, 石灰), 各成分 (%) (可燃分 [乾留分, 固定炭素分], 水分, 灰分), かさ密度 (kg/m^3) の情報を管理している。この管理情報と炉体形状より、層高を算出する。主な仮定を次に示す。

- ・送酸量にしたがい、最下層の固定炭素分は減少 (燃烧)
- ・固定炭素分減少量に応じ、灰分減少 (= 溶融) 量を決定
- ・乾留領域での熱分解速度は層温度・副羽口流量に比例
- ・ごみの高密度を乾留量比率で変更

3.4 向流伝熱モデル

Fig. 4 に示す向流伝熱モデルは、炉頂から投入されたごみ・コークスが、乾燥・熱分解領域から溶融分離領域に下降していく際に、上昇してくる高温ガスと接触、熱交換を行い、温度が上昇し、ごみ中の不燃分が溶融する過程をシミュレートする。操作量をオンラインで取り込んだ本熱交換計算により、ごみ・コークス層の昇温度合いを推定・予測する。本モデルにおける仮定を次に示す。

- ・ガス流れは定常扱い
- ・流速は吹込空気速度で炉内一定
- ・層内の比熱は一定
- ・主羽口反応： $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$
- ・羽口先で全 O_2 消費
- ・送酸量により、ガス初期温度を決定
- ・副羽口反応： $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$
- ・熱交換係数は、対象層の水分有無で変更
- ・対象層に水分存在の場合は層温度 100°C 以下

具体的には、Fig. 4 のように高さ dz なる炉内ごみ層と高温ガスとの熱交換を考える。ガス流速はごみ降下速度と比較して十分に大であるので、ガス温度は高さ方向の関数とし、ごみ層温度のみを時間の関数として扱う。この際、微小時間 dt 間に交換される熱量は (1) 式のように記述される。(1) 式を時間方向に積分することで、ごみ層温度が算出される。ごみ層温度が求まると、ガス流速を含む (2) 式によりガス温度が決定できる。

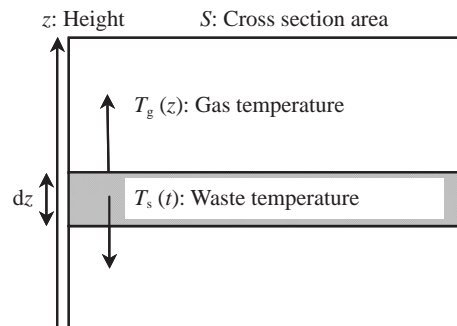


Fig.4 Heat transfer in countercurrent flow model

$$h \cdot a \cdot S \cdot dz(-T_s(t) + T_g(z))dt = C_s \cdot S \cdot dz \cdot dT_s(t) \dots (1)$$

$$C_g \cdot V_g \cdot dt \cdot dT_g(z) = C_s \cdot S \cdot dz \cdot dT_s(t) \dots (2)$$

ここで、 h :伝熱係数(J/m²hK), S :ごみ層の断面積(m²), t :時間(h), C_s :ごみ層比熱(J/KgK), C_g :ガス比熱(J/Nm³K), a :ごみ単位容積あたりのガス接触表面積(m²/m³), z :高さ方向座標(m), $T_s(t)$:ごみ層温度(K), $T_g(z)$:ガス層温度(K), V_g :ガス流速(Nm³/h)である。伝熱係数 h は、対象層の水分の有無で異なる値とし、それぞれ社内実証プラントにおいて実際の溶融スラグ温度と、モデル出力の比較により調整を行った。

モデル内では単位時間に投入されたごみを層として扱い、層ごとに温度変化を求めているので、前述の装入物移動モデルと合わせると、ある時刻に投入されたごみが、どの時刻にどの位置にあり、どのような温度になっているかを追跡することができる。一般に、時間スケールの長いプロセスでは、プロセス量の変化を検出してから対応操作をとっても、安定状態に復帰するまでに長い時間を要してしまう。一方、本ACCでは予測値を用いることにより、迅速な(事前の)補償操作を可能にしている。

3.5 オンラインモデルの検証

モデルの妥当性を検証するために、実証炉の操業において実測値と計算値の比較を行った。

初めに、実証炉操業データを入力とした層高推定値とサウジングと呼ばれる錘付チェーンによる実計測値を比較した結果を Fig. 5 に示す。このオンラインシミュレーションでは、初期状態の違いにより発生した層高差を1時間後に修正している。修正後の両者の挙動は、ほぼ一致(誤差±15%以内)しており、オンラインモデルの精度が、実用レベルであることを確認した。

次に、コークス比、およびそれにとまって送酸量(主羽口からの酸素流量)を増加する際の、向流伝熱モデルのオンラインシミュレーション結果と実測値の比較を Fig. 6 に示す。本図の実測値は出滓温度(溶融スラグ温度)を赤外線放射温度計により測定している点で、バラツキが大き

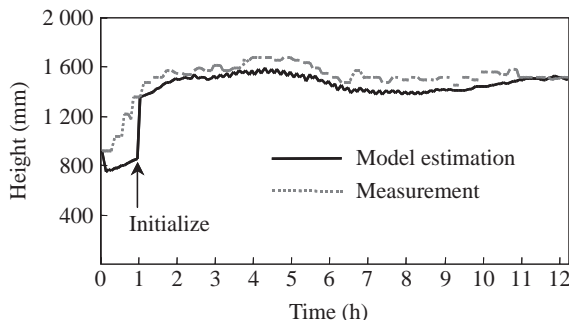


Fig. 5 Comparison between model estimation of height and actual measurement

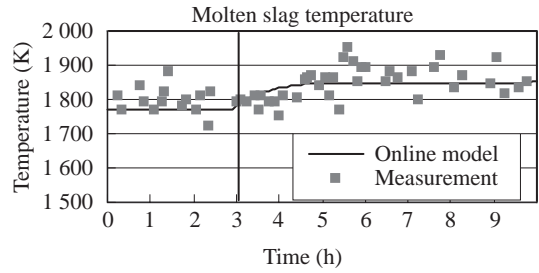


Fig. 6 Comparison between model estimation of molten slag

いが、平均値としてのプロフィールは温度推定モデルの出力に合致している。

3.6 オンラインモデルを利用したファジー制御則

Fig. 7 に前述のオンラインモデルの現在推定値および30 min 後予測値を判断情報としたファジー制御則の一例を、ロジック分岐の形式で示す。出滓温度制御のための操作量は前述したが、たとえば出滓温度が下がることが予測される場合、(1)主羽口吹込み空気の送風温度を高くし、一定時間経過して十分な昇温がなければ、(2)主羽口吹込み空気の酸素濃度を高くする。さらに一定時間経過して十分な昇温がなければ、(3)コークスの比率を高くし、(4)一定時間後にコークス量比率に応じ、酸素量を高くする。ここで、(3)と(4)は対にして操作することが肝要である。コークス量だけの増加、もしくは酸素量だけの増加は層高を乱すことに繋がり、層高の乱れは向流熱交換の時間を乱す。その場合、当然出滓温度も乱れてしまうからである。したがって、(4)の操作はコークス比の高い層が炉下部に降下したタイミングで行うことが大事であり、この意味でも、オンラインモデル中の装入物移動モデルの役割は大である。

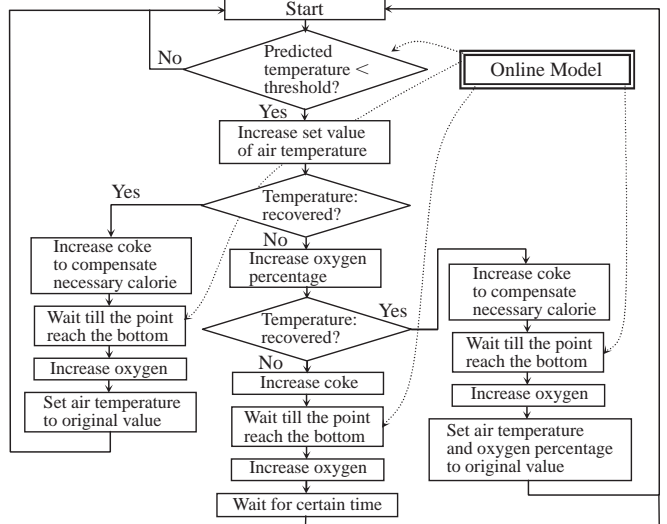


Fig. 7 Rule-based control algorithm with online prediction model

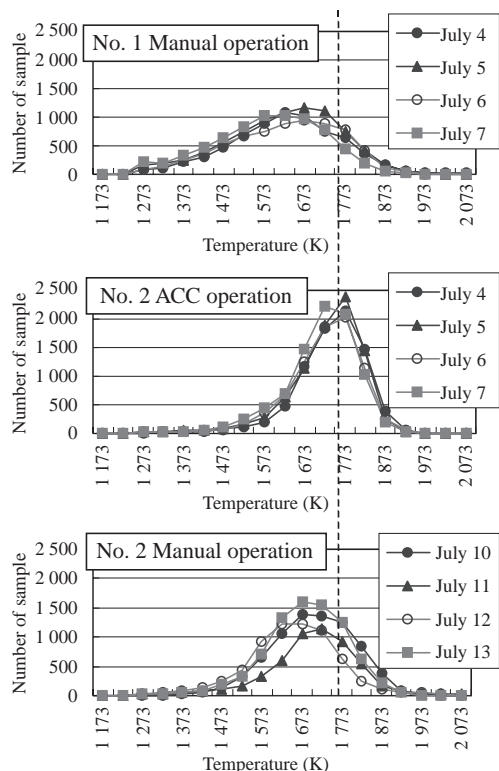


Fig. 8 Comparison of molten slag temperature with ACC and without ACC

4. ガス化溶融炉 ACC の実機運転結果

本 ACC を実機に適用した場合の出滓温度の状況を Fig. 8 に示す。横軸はスラグ温度、縦軸は 5 s に 1 回行っている温度計測でその温度が計測された度数 (回数) の 24 h の度数分布を表しており、度数分布の広がり狭いほど温度変動が小さいことを意味する。Fig. 8 の上段図は ACC をオフにしたオペレータによる 1 号炉の運転結果 (4 日間) のもの、中段図は同期間に ACC をオンラインにして稼働した 2 号炉の結果である。また、下段図は 2 号炉のその後の 4 日間のもので、ACC をオフにしたオペレータ運転の結果である。この間、ごみ質はほぼ一定であった。オフ

ライン時には、運転員が出滓状況を TV モニタで監視しながら、送風温度・酸素濃度・コークス量などを調整した。ACC オンラインの中段図では、スラグ温度変動が小さくなっており、日ごとのバラツキも少ない。また目標出滓温度の 1773 K = 1500°C 周りに制御できている。このことより、本 ACC を適用すれば、スラグ温度を安定化することができ、連続出滓を安定に継続できるので、オペレータの作業負荷低減に寄与できる。

5. おわりに

ガス化溶融炉向け自動燃焼制御装置 (ACC) を開発し、実機に適用して良好な運転結果を得た。本 ACC は 2002 年度完工の 4 工場 11 炉に実装されたのを皮切りに、国内の多くの清掃工場で良好に稼働している。

参考文献

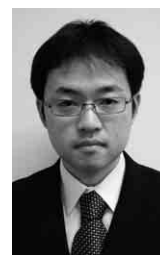
- 1) 松平恒夫ほか. 廃棄物高温ガス化直接溶融炉. NKK 技報. no. 164, 1998, p. 42-48.
- 2) 中村直ほか. 廃棄物高温ガス化直接溶融炉の連続出滓技術. NKK 技報. no. 166, 1999, p. 12-15.
- 3) Tsuda, K. et al. Automatic Combustion Control for a Gasifying and Direct Melting Furnace. 16th IFAC World Cong. 2005.
- 4) 山川裕一ほか. ガス化溶融炉自動燃焼制御システム (ACC) の開発. 第 25 回全国都市清掃会議予稿集. 2004.



津田 和呂



田鍋 実



島本 拓幸