

# 溶融炉スラグ排出口の監視制御について

石川 理 \*1 石綿 勝 \*2 ○内藤利昭 \*3

- \*1 日本ガイシ株式会社エンジニアリング事業本部電機設計部機械設計課 052-872-8577  
\*2 日本ガイシ株式会社エンジニアリング事業本部電機設計部第1電気計装課 052-872-7451  
\*3 日本ガイシ株式会社エンジニアリング事業本部開発部第1プラント開発課 0569-23-5787

## 概要

近年の汚泥処理技術のひとつとして溶融操作があげられるが、減容化、無害化、資源化などの優れた特長を持っている。しかし、灰性状や溶融温度などにより溶融特性が変化するためスラグの排出口の安定化は重要な操作技術のひとつである。その対処として運転員がITVを通して監視しているのが現状であるが、定性的判断や運転員ごとの対処では差異が存在してしまう。この課題に対処すべく運転技術としてスラグ排出口の状況を画像処理を行いデータを得てニューラルネットワークを適用した溶融炉の安定化制御の方法について報告する。

## キーワード

溶融炉 画像処理 ニューラルネットワーク エキスパートシステム

### 1 はじめに

溶融炉は減溶化、安定無害化、再資源化の点で優れた特徴を持ち、近年注目されている。当社においてもその技術を確立し現在プラントを稼動させている。ところで溶融炉には重要な管理因子が存在しており、そのひとつにスラグ排出口（以下湯口）が上げられる。具体的には、湯口に固化スラグが堆積したり、湯口下部に垂下固化したスラグがツララ状となって成長したりする。そのため、溶融炉下部に監視カメラを設置し監視しているが運転員の負担が少なくない。この状況解決のため、画像処理を適用し湯口状況の定量化を行い、湯口からのスラグの安定排出を図り、また、同時に溶融炉の安定運転を行うためにニューラルネットワークを適応した制御方法を説明する。

### 2 設備の概要

#### 2.1 傾斜形旋回溶融炉の概要

傾斜形旋回溶融炉の概略構造を図-1に示す。投入粉体は傾斜円筒形状した炉内へ接線方向に旋回噴入され、1400℃前後の高温雰囲気内で溶融され溶融物は炉内壁へ溶着し溶融スラグ流となって炉下部の湯口部より排出される。この時、溶融スラグ流を炉から排出する湯口の下部にスラグが垂下固化（垂下固化スラグの形成成長）したり、湯口において排出スラグの固化堆積（湯口狭窄の進行）により湯口閉塞してしまう可能性がある。なお、当社の溶融炉湯口の特長として、湯口部から排ガス（湯口排ガス）を排出させる構造となっている。

## 2.2 溶融炉の特徴

今回対象とする溶融炉は灰溶融炉であるが、その構造は駆動部がなく簡単で、入熱源も燃料のみと理解しやすい。一方、測定不可能な部分が多く、例えば灰の性状はリアルタイムでの測定は難しい。また、灰の性状変動を考えた場合その融解熱や溶融状態のスラグ持出熱の変動も測定不可能である。さらに、溶融炉自体の放熱などの計測も困難である。また、溶融炉は燃料変化などによる湯口状況応答は非常にむだ時間が長いいため、現象が確認されてからの調節では遅れてしまう。

一方、運転操作に関しては、溶融炉の湯口をITVにより監視している場合が多い。このことは目視監視のために運転員ごとの個人差が生じてしまい対処判断にばらつきが生じてしまう可能性がある。

溶融炉の入熱源は燃料のみであるため灰の性状や投入量など何らかの変動がない限り溶融炉は安定して運転が可能と考えられる。しかし、実際には灰の性状の変動や変化、或いは投入する灰重量や燃料流量などが機械的影響などで変動が発生するため、それまでの適正な運転条件のバランスが崩れて湯口状況が悪化すると考えられる。

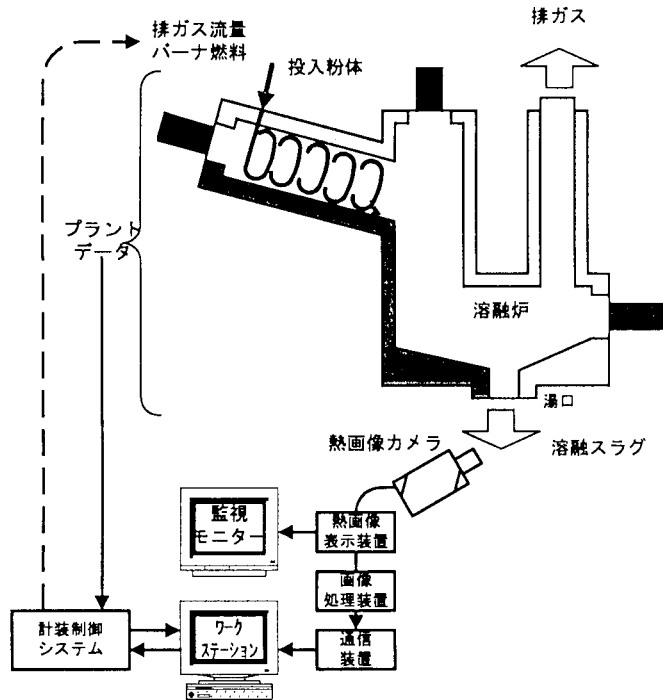


図-1 溶融炉及び監視制御システムの概要

## 2.3 湯口監視安定化制御システムへの要求

上述の特徴に対応する湯口監視安定化制御システムへの要求は以下の様に考えた。

- ・計測不可能なプロセスデータの代替を検討する
- ・むだ時間対応とする
- ・湯口状況の定量化を図り運転員ごとの差異を無くす
- ・湯口のための安定化だけでなく溶融炉の安定化を図る

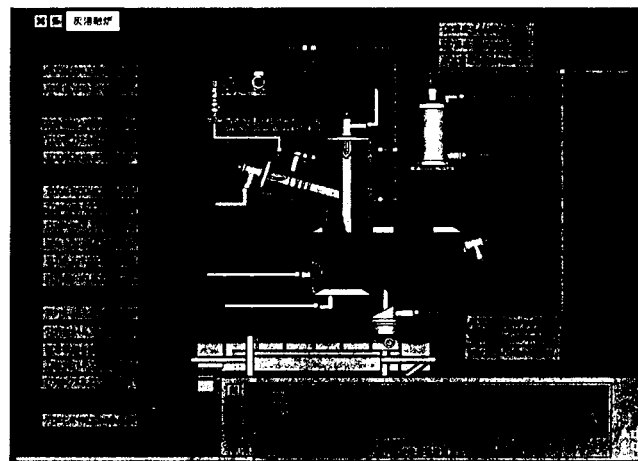


図-2 監視安定化制御の画面

### 3 湯口監視安定化制御システムの概要

#### 3.1 ハードウェア概要

湯口監視安定化制御システムのハードウェア構成は図-1に示す。湯口状況を熱画像カメラにて撮像し、画像処理装置において収集した湯口映像を画像処理演算及び数値計算処理によりノイズ除去及び特徴抽出を行っている。ここでは、湯口状況データとして2つのプロセスデータ(湯口開口度、垂下固化スラグ成長度)を得ている。熱画像カメラにて得られた映像を写真-1、写真-2、写真-3に示す。

ワークステーションでは、プラントの計装制御システム及び画像処理装置の通信機器との間でデータ送受信を行い、データ収集及び溶融炉制御のための設定値出力が可能となっている。また、画面上には溶融炉のプロセスデータのトレンドグラフや各種ガイダンスが表示されるようになっている。ワークステーション上に表示される湯口監視安定化制御画面を図-2に示す。

なお、今回は当社実験炉であるため、計測制御システムからの制御量設定操作はなく、実験運転員への運転支援とした。

#### 3.2 溶融炉の運転制御の考え方

溶融炉の特徴で述べた通り、溶融炉において、Inputに変動がなく適切な条件下での運転では安定運転が可能である。そのため、安定運転が不安定運転となる場合として、不適正条件での運転の実施、或いは何らかの変動のため適切条件も変動したと考えられる。そのため、不安定状態になる場合は各制御量において規格値運転状態から何らかの変動分に相応した変動分を増減する制御を検討した。この制御方法をフローチャートとして図-5に示す。

このフローチャートにおいて規格値とは安定化運転可能な各制御条件を表している。また、このフローチャート内の課題として安定の判断と変動の判断が上げられ、安定を直接判断するプロセスデータはなく、また、同様に変動を判断するプロセスデータもない。前述の通りITVによる湯口状況判断がもっとも妥当と考えられる。そのため、湯口状況の定量化データとその他のプロセスデータを利用し、むだ時間対応としてプロセスの予測を行うこととした。この時、溶融炉のモデル化を検討したが測定不可能なプロセスデータが存在するため数値モデル化ではなくニューラルネットワークによる予測モデルを適応することとした。

また、溶融炉の制御量を表-1に示すが、

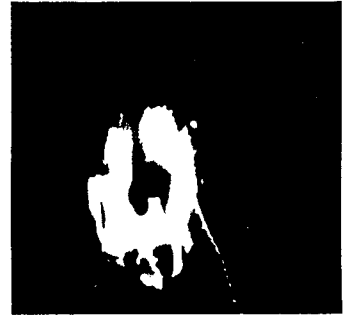


写真-1 溶融炉湯口その1



写真-2 溶融炉湯口その2



写真-3 溶融炉湯口その3

表-1 制御量の相互干渉

干渉先 制御量	湯口排ガス 流量	主排ガス 流量	炉内圧	炉内温度	湯口温度	湯口状況
湯口排ガス流量	○	○	○		○	○
主排ガス流量	○	○	○	○		
炉内圧	○	○	○		○	○
燃料流量	○	○	○	○	○	○
燃焼空気流量	○	○	○	○		
灰供給量					○	○
灰性状				○	○	○

その多くは相互干渉しているため、一般的なPID制御では困難と考えた。そのため、フローチャートにおける安定化判断や変動判断を含め運転員の運転知識を集約したエキスパートシステムにより制御を行うこととした。

### 3.3 湯口状況の定量化

湯口状況の定量化として、湯口の閉塞状況を表す湯口開口度と湯口部に発生する固化スラグの状態を固化スラグ成長度として定量化した。熱画像カメラの映像において湯口部分を抽出し湯口開口度とした。垂下固化スラグ成長度は、熱画像の平均輝度を基に計算した。なお、CCDカメラでとらえた映像は塵埃や煙等による光学的外乱の影響を受けやすい点という問題が存在するため画像の平均化などの処理を行い極力ノイズ除去に努めている。フローチャートを図-3に示す。

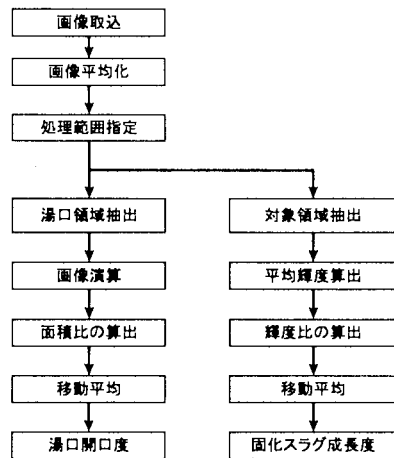


図-3 湯口定量化のフロー

### 3.4 ニューラルネットワークによる予測

ニューラルネットワークによるプロセス予測を行うために次式にて表すモデルを適用した。

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n+1)) \quad \text{式-1}$$

ここで、 $k(=0,1,2,\dots)$  は時間刻みであり、 $y$  は出力である。また、 $y(k), \dots, y(k-n+1)$  をニューラルネットワークへの入力とし、 $y(k+1)$  を出力としたデータの組をネットワークに学習させれば関数  $f$  の近似関数をニューラルネットワークで構築することができると考えた。そしてニューラルネットワークの入力として上述の制御量及び干渉先とした。また、今回採用したニューラルネットワークは Back Propagation 法による3層型ニューラルネットワークである。

一方、ニューラルネットワークの学習データは実プラントから収集することになるが経時変化とともにプロセスが変化するため汎化性が問題となる。そのため、学習データも逐次変更する必要があると考え、自己学習可能なニューラルネットワークとした。そのため、学習データをバックグラウンドにて収集し新たなニューラルネットワークを計算しその後切り替える方法で行うこととした。ニューラルネットワークによる湯口状況の予測結果を図-4に示す。

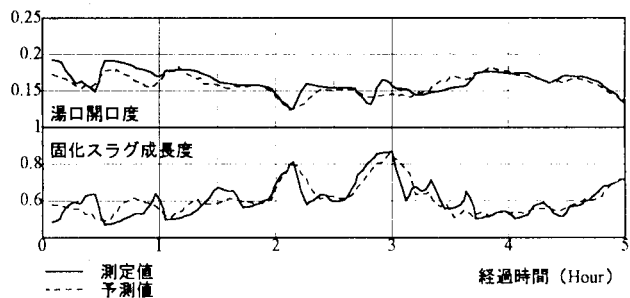


図-4 湯口状況予測結果

### 3.5 溶融炉の安定化制御

湯口の安定化のために図-5に示すフローの処理を行うが、安定化の判断と変動の判断は前述の通り湯口状況を運転員が確認し判断している。また、変更設定値の決定は運転員の過去の知見に基づき決定している。これら処理をエキスパートシステムを使用することにより決定した。

#### (1) 安定の判断と変動の判断

運転員による湯口部の安定の判断や湯口状況の変動の判断は表-2、表-3、及び表-4に表すように湯口温度の変化具合により異なっている。湯口部の状況や固化スラグの落下状況から今後どうなるかを予測し、過去と現在の湯口状況を併せて判断している。ここで湯口開口度と固化スラグ成長度からさらに演算処理した結果とのMatrixにより処理が決定される。今回適用したエキスパートシステムでは過去と現在だけではなくニューラルネットワークによる未来の予測値を含めて判断処理することとした。この方法でむだ時間によるプロセスの遅れの対処をする事にした。

また、湯口温度が下降の場合でも、安定化しておりかつ恒久的変動と判断される場合がある。これは、湯口温度より湯口状況の判断のほうが優先されているためで、湯口が安定化した状況にあるという判断に基づく。

#### (2) 変更設定値の決定

湯口状況を安定化あるいは改善化する適切な方法として湯口排ガスからスラグ流への熱供給が考えられる。そのため、湯口排ガス量を的確かつ迅速に変更できる方法として、湯口排ガス流量を制御するより炉内圧を変更することが経験上得られている。この経験をエキスパートシステムに適用し、相互干渉している各制御量の変更は以下の順で行っている。

- ① 炉内圧を変更
- ② 指定範囲内の各排ガス流量であれば変更しない
- ③ 炉内圧上限となっても安定化しない場合湯口パーナー流量を増加
- ④ 安定化した場合は可能な限り元に戻す

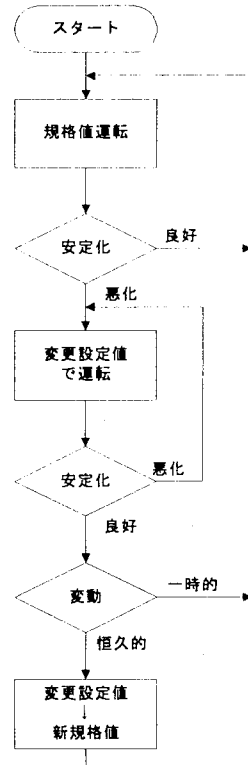


図-5 制御基本フロー

表-2 湯口温度上昇時の湯口判断

湯口開口度 固化スラグ	大きくなる	変化無し	小さくなる
	落下し易い	一時的変動	一時的変動
変化無し	一時的変動	一時的変動	不安定
落下し難い	×	不安定	不安定

表-3 湯口温度変化無し時の湯口判断

湯口開口度 固化スラグ	大きくなる	変化無し	小さくなる
	落下し易い	一時的変動	恒久的変動
変化無し	一時的変動	恒久的変動	不安定
落下し難い	×	不安定	不安定

表-4 湯口温度下降時の湯口判断

湯口開口度 固化スラグ	大きくなる	変化無し	小さくなる
	落下し易い	一時的変動	恒久的変動
変化無し	一時的変動	恒久的変動	不安定
落下し難い	×	不安定	不安定

#### 4 実験の結果

当社灰溶融炉において行った実験の結果を図-6に示す。実験の内容は、安定運転状態時に変動を与え不安定状態にした後、湯口安定化制御システムを起動し溶融炉を安定させる実験である。制御開始は約0.5時間経過後である。また、当社の実験溶融炉の特性として炉圧変化及び燃料流量変化による湯口への影響は約15分程度遅れて表れることがわかっているため、今回の実験では5分周期による制御メッセージ表示とした。

湯口排ガス温度の低下状態の時、湯口開口度が小さくなり、また、固化スラグは変化なしという状態であるため、不安定と判断し炉圧を上昇させた。また、湯口開口度が大きくなりかつ固化スラグの成長が減少の時は安定かつ一時的変動の判断より炉圧を元に戻す操作を行った。

湯口安定化制御により湯口の安定化状態が維持可能でかつ溶融炉自体の安定化に努めていることがわかる。

#### 5 まとめ

定量化した湯口状況データとプロセスデータによる溶融炉の予測とエキスパートシステムにより、湯口監視安定化制御を実現し、運転員負担の削除、溶融炉の効率運転が実現可能になると考える。今後は、長期安定性の実証と、実機での適応を行い溶融炉の安定運転の実現化に向けて努力する所存である。

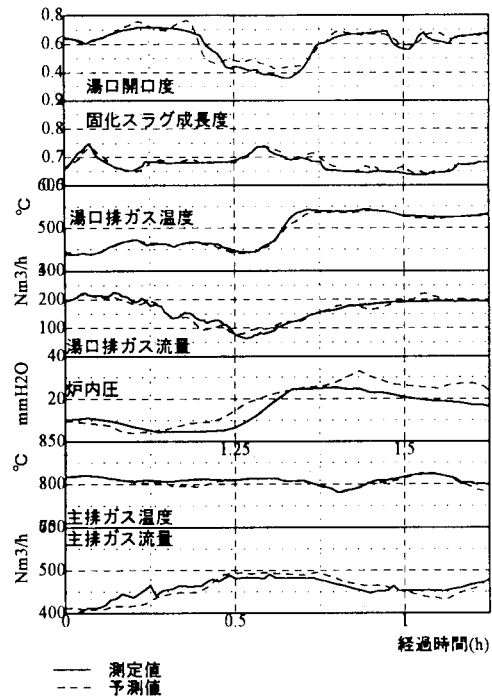


図-6 実験結果