

## 下水汚泥溶融炉ファジィ制御システム

鮎川正雄、開発啓全、鈴木一如、入山守生、臼井高史、片山岳史

(株) 荏原製作所 エンジニアリング事業本部  
港区港南 1-6-27

### 概要

当社の下水汚泥溶融施設における溶融炉本体の自動制御には、ファジィ制御を採用しており、当社の溶融炉設計者や熟練オペレータの運転知識を登録することにより、安定した溶融運転を実現している。

このシステムの特長は次の通りである。

- ①最大 128 セットのファジィ制御規則が登録可能であり、汚泥の性状にあわせて制御規則群を選択できる。
- ②ファジィ制御規則はオンライン、リアルタイムで登録、変更でき、更に制御規則の評価機能を有する。
- ③溶融炉の昇温、乾燥炊きについても、任意に設定した温度曲線に基づいて、自動制御を行う。

### キーワード

ファジィ制御、下水汚泥溶融炉、運転知識、安定溶融、NOx 低減

## 1. はじめに

下水道の普及に伴い発生する下水汚泥の量も増加の一途をたどっており、近年、その処分方法として溶融処理が注目を集めている。当社は、平成7年3月にS市、平成8年3月にM市に下水汚泥溶融設備を納入し、現在順調に稼働している。

この設備では、溶融炉本体の制御システムとして、ファジィ制御システムを採用しており、当社の溶融炉設計者や熟練運転員の経験に基づいたプログラムをあらかじめ登録することにより、安定した運転を実現している。

本稿では、下水汚泥溶融ファジィ制御システムの構成ならびに運転データについて報告する。

## 2. 下水汚泥溶融炉

### 2.1 溶融炉の構成

図1に示す多段旋回流型溶融炉は、縦型一次燃焼室と傾斜型二次燃焼室から構成されている。

乾燥汚泥は、空気輸送により一次燃焼室上部に接線方向に投入される。室内は1200℃前後に保たれており、汚泥は同室内を旋回しながら自身の持つ熱量で燃焼、溶融し、二次燃焼室へと流下する。二次燃焼室では、可燃分の完全燃焼とスラグの完全溶融が行われ、三次燃焼室にて溶融スラグおよび溶融ミストを排ガスから分離する。

溶融スラグは水砕トラフに流下し、冷却、小粒径化して、スラグホッパに貯留する。排ガスは、空気予熱器、熱交換器により熱回収され、電気集塵機にて煤塵を除去した後、大気に放出する。

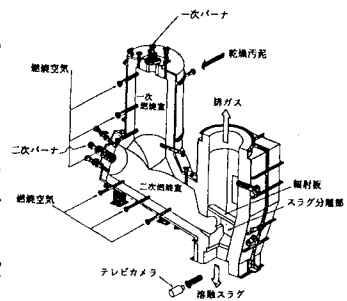


図1 多段旋回流型溶融炉

## 2. 2 溶融炉の制御

下水汚泥溶融のプロセスには、下水処理プロセス、汚泥濃縮・脱水プロセスの運転条件の他、季節的な要因にも左右されて生ずる汚泥性状の変動に抗して、安定した溶融スラグを生成することが要求される。この要求を満たすため、下水汚泥溶融炉の制御目的は、次のように設定される。1)

- ① 汚泥性状の変動があっても、常に安定した操業温度を維持する。
- ② 完全燃焼を行い、かつエネルギー消費量を抑制するため、低空気比で効率のよい燃焼空気の供給を行う。
- ③ NO<sub>x</sub> 生成をできるだけ抑制する燃焼を行うため、炉各部へバランスよく、燃焼空気の供給を行う。

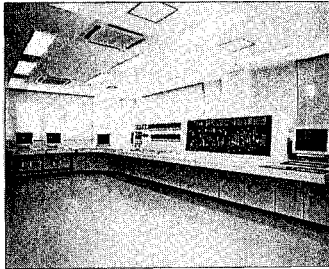


写真1 ファジィ制御システム外観

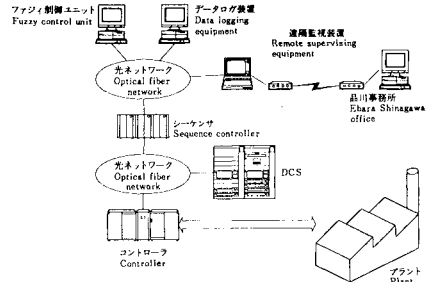


図2 ファジィ制御システム構成

## 3. ファジィ制御システム

### 3. 1 全体構成

ファジィ制御システムの外観を写真1に、システム構成を図2に示す。

ファジィ制御システムは、ファジィ制御装置、データ処理装置、シーケンスコントローラおよび遠隔監視装置から構成され、各装置は光ネットワークにて接続されている。本システムは、下水汚泥溶融設備全体の監視制御を司るDCS(分散制御システム)の上位計算機に位置し、DCSを介して収集した溶融炉の運転データ(PV値)よりファジィを行う。推論によって得られた制御データ(SV値)はDCSへ送られ、DCSでのPID制御により溶融炉制御を実現する。

### 3. 2 ファジィ制御装置

リアルタイムマルチタスクOSを搭載した32ビット工業用コンピュータを使用し、ファジィ推論は専用のマイクロチップを搭載したボードを実装して実現している。図3にファジィ制御規則例、図4に表示画面例を示す。主な機能は、次の通りである。

#### ① ファジィ推論機能

- ・ ファジィ推論は速度型であり、MAX-MIN-重心法を採用している。
- ・ 前件部(IF)を一次室上部炉内温度、スラグ温度、溶融炉出口排ガス濃度(酸素、窒素酸化物)、後件部(THEN)を炉内各燃焼室供給空気量、バーナ燃料流量、乾燥汚泥投入量としている。

#### ② 理論燃焼空気量、汚泥発熱量、汚泥溶流点演算機能

- ・ 演算値より、計測値の補正を行う。

#### ③ 昇温/乾燥焚き曲線、各制御工程パラメータ設定機能

- ・ オンライン、リアルタイムでの設定が可能である。

#### ④ 運転制御状況モニタリング機能

- ・ 各制御工程における現在値、設定値を表示する。
- ・ ファジィ推論出力値、発火している制御規則とその適合度を表示する。

#### ⑤ ファジィ制御規則編集・評価機能

- ・ 最大128セット(128規則/セット)登録可能であり、オンライン、リアルタイムにて選択可能である。
- ・ オンラインオンライン、リアルタイムにて規則セットの編集や評価を行うことができる。
- ・ 汚泥性状の季節変動を考慮して複数の規則セットを用意しておき、適切な規則群を選択交換することで、

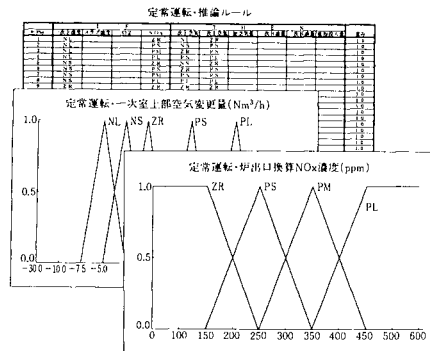
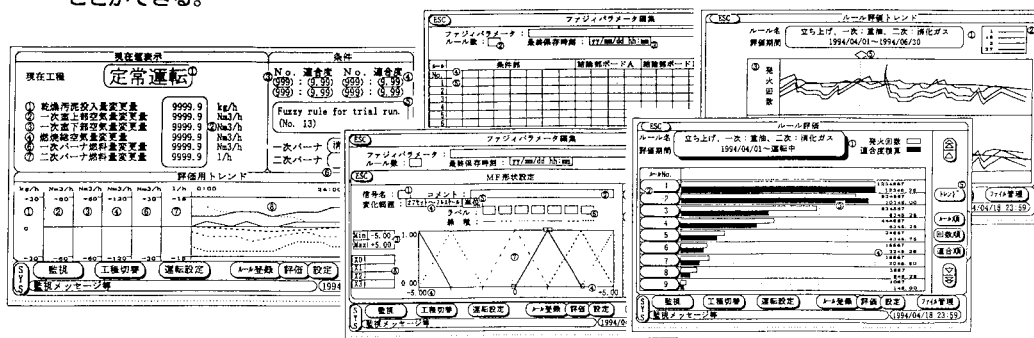


図3 ファジィ制御規則例

炉の状況に速やかに対応したファジィ制御を実行することができる。

- ・ 制御状況を監視しながら、規則やメンバシップ関数のチューニングが可能である。
- ・ 各ルールの発火回数、適合殿時系列データを監視することで、制御規則の妥当性や制御性能を評価することができる。



a) 運転制御状況モニタリング画面    b) ファジィ制御規則登録画面    c) ファジィ制御規則評価画面  
**図4 ファジィ制御装置画面例**

### 3. 3 データ処理装置

リアルタイムマルチタスク OS を搭載した 32 ビット工業用コンピュータを使用し、次の機能を有する。

- ①データロギング機能
  - ・グラフィック画面、トレンドグラフ、警報/運転記録、日月報帳票印刷、データバックアップ etc.
- ②副ファジィ制御装置機能 ~ファジィ制御装置の二重化

### 3. 4 シーケンスコントローラ

プログラマブルコントローラを使用し、次の機能を有する。

- ①熔融炉制御工程管理機能
- ②ファジィ制御システム監視機能
- ③対 DCS インタフェース機能

### 3. 5 遠隔監視装置

遠方に設置したパソコンから一般公衆電話回線経由にて、下水污泥溶融設備全体の運転データを収集し、グラフィック画面によるリアルタイム運転状況監視機能、トレンドグラフ表示機能、データ保存機能を提供する。

## 4. 熔融炉制御工程

ファジィ制御システムでは、熔融炉の運転工程を昇温、乾燥焼き、立ち上げ、定常運転、立ち下げおよび保温の6工程に分割して管理している。

### 4. 1 昇温工程

熔融炉内の温度を約 1100°C まで徐々に上げる工程である。昇温は、オペレータが設定した昇温曲線に従って、一次バーナの燃料流量および曲線に従って演算した空気供給量を自動制御することにより行う。また、炉内の各燃焼室に過大な温度差が生じないように、二次バーナの燃料流量を自動制御する。

### 4. 2 乾燥焼き工程

熔融炉壁の水分を蒸発させるため、設定した乾燥焼き曲線に従って、炉内温度を上昇させる工程である。本工程における制御は、昇温工程と同様のアルゴリズムである。

### 4. 3 立ち上げ工程

乾燥污泥の投入を開始し、投入量を計画値まで増やす工程である。乾燥污泥の溶融に必要なバーナの燃料流量、空気供給量を制御し、炉内が溶融に適した状態になった後、乾燥污泥の投入を開始する。投入後は、熔融炉出口排ガスの酸素濃度や一酸化炭素濃度を監視しながら、ファジィ制御により乾燥污泥投入量を徐々に計画値まで増加させる。

### 4. 4 定常運転工程

ファジィ制御により、安定した溶融を継続する工程である。

#### 4. 5 立ち下げ工程

溶融炉の保守、点検のために溶融運転を停止し、溶融炉内の温度を徐々に下げている工程である。乾燥汚泥の投入停止後、炉内供給空気用ダンパを全閉とし、炉内の温度が急激に低下しないように、バーナ燃料流量を制御する。

#### 4. 6 保温工程

溶融炉内の温度を溶融運転中の温度よりやや低い温度に保ち、溶融の前段にある汚泥乾燥設備のみを稼働させるような場合に選択する工程である。オペレータが設定した溶融炉内温度を保つように、バーナの燃料流量、炉内供給空気量を制御する。

#### 5. 運転データ

図5は処理量を定格の65%程度に固定して定常運転を行い、バーナ燃料流量と燃焼空気供給量のみについてファジィ制御を行った結果である。

以下に示すような外乱がありながらも、ファジィ制御により、安定した溶融運転を継続していることがわかる。

- ① 乾燥汚泥投入開始後、完全に安定していない状況にて、ファジィ制御による運転に切り替えたが、徐々に炉出口排ガス NO<sub>x</sub> 濃度が収束している。
- ② 一次室上部炉内温度がやや下がり傾向にあるため、一次バーナで助燃したが、バーナ着火時の外乱にて NO<sub>x</sub> 濃度が一時的に上昇するも、次第に NO<sub>x</sub> 濃度が収束している。しかし、バーナの影響で NO<sub>x</sub> 濃度がやや高くなっている。
- ③ 一次室上部炉内温度が上昇してきたので、炉内各燃焼室への供給空気量バランスを変化させるファジィ制御規則セットに切り替えたところ、空気バランスが改善し、NO<sub>x</sub> 濃度が低くなっている。
- ④ 一次室上部炉内温度が十分に上昇したため、一次バーナを消火したところ、バーナ消火時の外乱にて NO<sub>x</sub> 濃度が一時的に上昇するも、次第に NO<sub>x</sub> 濃度が収束している。
- ⑤ 一次室上部炉内温度がやや下がり傾向にあるため、ファジィ制御規則セットを元に戻し、安定した溶融運転を継続している。(最大偏差 4%、平均偏差 2.5%)

図6は乾燥焼き工程における自動制御結果である。<sup>2)</sup> ※部のバーナ燃料切り替え(重油↔消化ガス)時の失火トラブルによる不安定な状態を除けば、設定した乾燥焼き曲線による自動制御が順調に推移しているのがわかる。

#### 6. おわりに

ファジィ制御による下水汚泥溶融制御において、安定した制御結果を得ることができた。また、長時間に及ぶ溶融炉の昇温、乾燥焼き運転を自動化することで、運転員の労力の低減を図ることができた。

今後は、運転データを蓄積し、ファジィ制御規則セットを充実させるとともに、ファジィ制御規則のチューニング技術やITV画像情報との融合を図り、下水汚泥溶融炉ファジィ制御システムをよりよいシステムにしたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 鈴木一如, 他: 『計装』, Vol.39, No.8, pp.20-25 (1996)
- 2) 鮎川正雄, 他: 『エバラ時報』, No.171, pp.77-82 (1996)

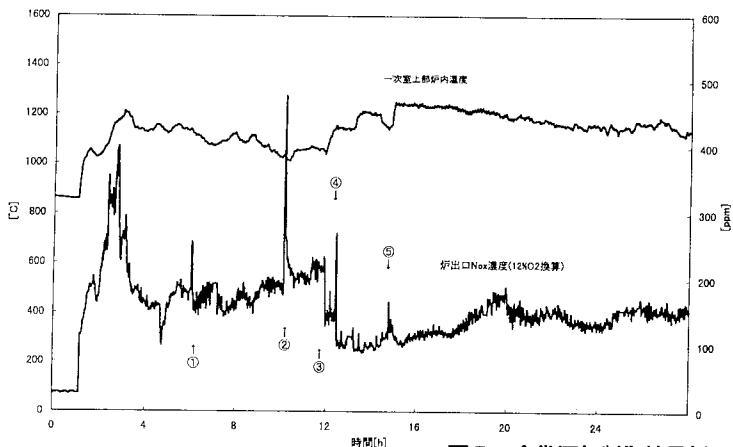


図5 定常運転制御結果例

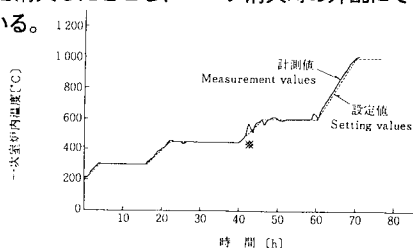


図6 乾燥焼き工程制御結果例