

ファジィ制御による汚泥溶融炉の安定燃焼

塩野 俊一 白井 高史 入山 守生 鈴木 一如 中 洋太

荏原インフィルコ株式会社 〒108東京都港区港南1-6-27 tel 03-5461-5581

概要 本報では、下水汚泥溶融炉の燃焼制御へのファジィ制御の応用事例を報告する。下水汚泥溶融処理法は、下水汚泥の減容化、安定無害化、再資源化に効果的な方法として注目されている。溶融炉の内部で生起する現象が複雑で不確かさをともなうために、溶融プラントの運転には熟練が要求される。筆者らは、旋回流方式の下水汚泥溶融炉の運転制御にファジィ制御を採用し、炉内温度、炉出口ガス O_2 濃度、 NO_x 濃度の制御に有効に機能することを確認した。

キーワード 下水汚泥、溶融炉、ファジィ制御、スラグ温度、 NO_x 、 O_2

1. まえがき

生活が快適で便利になっていく一方で、増大し続ける廃棄物の最終処分が問題になっている。下水道から発生する汚泥の処分においても同様で、問題解決のために様々な試みがなされてきた。汚泥溶融法はこれらの試みの一つであり、既に国内数カ所で実炉が稼働している。

汚泥を脱水・乾燥した後、千数百度の高温で燃やすと、汚泥中の無機分は灰にはならず溶融物になる。これを取り出して冷却するとスラグと呼ばれるガラス質の固形物になる。

汚泥の中に含まれていた重金属等の有害物質はこのスラグの中に取り込まれて溶出しなくなる。また焼却灰に較べて容積が小さくなり、飛散等の問題もなく、取扱いが容易になる。さらに建設資材などへの有効利用も試みられている。

下水汚泥の溶融プロセスにおいては、被溶融物である汚泥の組成や性状が、発生元の水処理、汚泥処理プロセスの運転条件の変化や季節的な要因により大幅に変動する。また炉内温度は非常に高温であり、一般に、センサー保護の為に間接的に計測することから、観測値は時間遅れを生じる。更にプロセスを制御するための操作因子が複数個あり、これらが互いに干渉しあうことなどで、最適な制御を行う上での難しさがあり、溶融炉の運転制御は焼却炉等の運転同様、多く運転者の経験に頼るところが大きい。

筆者らはこれまで汚泥の回転乾燥焼却炉、都市ゴミ焼却プラントの運転制御にファジィ制御を応用して検討を行ってきた経緯があり、今回下水汚泥溶融炉の燃焼制御にファジィ制御を採用した。

2. 下水汚泥溶融炉の運転

図1は豊橋市で稼働中の下水汚泥溶融設備のフローシートである。

全体の設備は汚泥脱水乾燥設備、溶融炉設備、熱回収排ガス処理設備からなっており、設備処理能力は脱水ケーキ換算で15ト/日である。ファジィ制御を採用したのはこのうちの溶融炉設備の部分である。

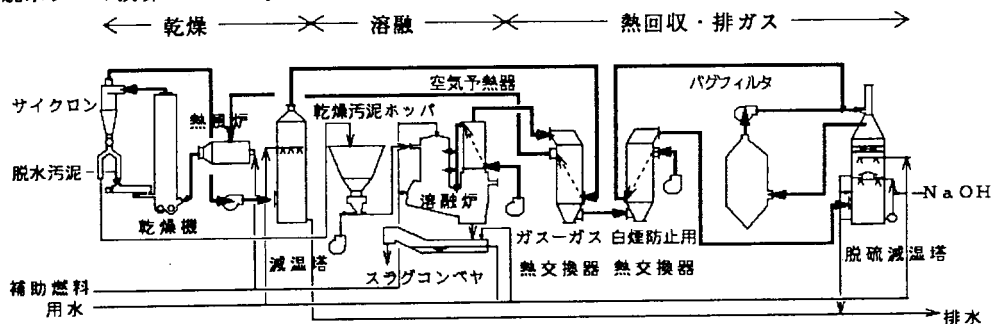


図1 下水汚泥溶融システムフロー

図2には旋回溶融炉の断面と制御装置を示す。

溶融炉の運転は次のように行われる。

- (1) 汚泥の供給は、処理計画に基づき定量供給を行う。
- (2) 汚泥の発熱量が十分でなく、溶融スラグの流動性を確保できない場合には、二次バーナを着火し、油量を調節して温度を適正に維持する。
- (3) 炉出口ガスの O_2 濃度を監視しながら、溶融炉に吹き込む総燃焼空気量を調節して、空気比を一定に保つ。
- (4) 炉内各部の温度及び炉出口ガス中の NO_x 濃度は、炉内各部に吹き込む燃焼空気の比率を調節する事により適正な値に制御する。
- (5) 燃焼反応は若干の負圧下で行われるが、炉内圧力調整は排ガス誘引ファンのダンパ開度の調節により行う。

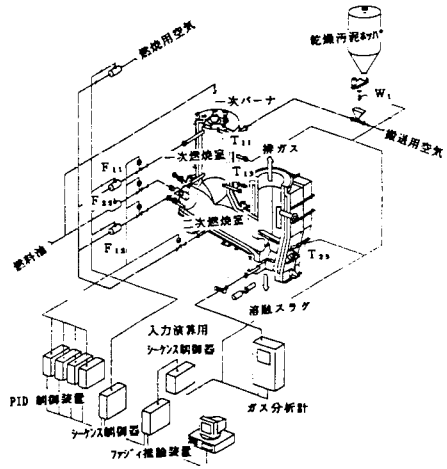


図2 溶融炉及び制御装置

3. ファジィ制御システムの構築

汚泥溶融炉の燃焼制御にファジィ制御システムを適用するにあたり、約10ヶ月にわたる手動運転を行ってプラントの状態量を計測し、運転データの統計的解析、運転操作における経験則の整理を行った。

3.1 制御目的と制御系入出力

溶融炉の燃焼制御では炉内温度、流出スラグ温度、燃焼空気比、出口ガス NO_x 濃度、炉内圧力の制御が必要となるが、これらのうち炉内圧力制御には従来のPID制御を用い、他のものについてはファジィ制御による自動化を図り、運転者の負担を軽減すると同時に、処理の安定化を図ることを制御の目的とし、ファジィ制御の制御系を次のように定めた。

【制御系入力】	【制御系出力】
T_{11} : 一次室上部温度	F_0 : 総燃焼空気量
T_{13} : 一次室下部温度	F_{11} : 一次室上部燃焼空気量
T_{23} : スラグ温度	F_{12} : 一次室下部燃焼空気量
O_2 : 炉出口ガス O_2	F_{22} : 二次バーナ油量
NO_x : 炉出口ガス NO_x	
W_1 : 乾燥汚泥供給量	
F_0 : 総燃焼空気量	

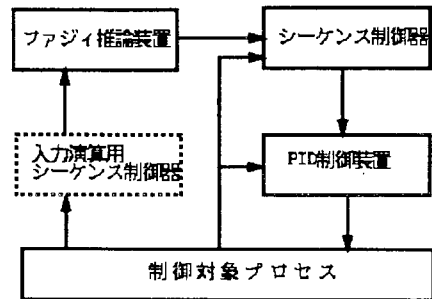


図3 制御システム

3.2 ファジィ制御システムの構成

多変数、相互干渉系である溶融炉運転制御に、図3に示す制御システムを用意した。制御系は3階層の構造を持ち、最上層がファジィ推論装置、中層がシーケンス制御装置、最下層がPID制御装置から構成されている。各々の機能は以下の通りである。

(1) ファジィ推論装置

制御量の観測値（一部補正演算処理）を入力値とし、制御規則とメンバシップ関数に基づいたファジィ推論を行って操作量の変更量を出力する。推論アルゴリズムにはMAX-MIN重心法を採用した。

(2) シーケンス制御装置による操作量の出力

ファジィ推論装置の出力である操作量の変更量を現在の操作量に加算してPID 制御装置の目標値として出力する。

シーケンス制御装置では操作量および変更量の入力値を10ms毎にサンプリングし、その信号の90秒間の平均値から操作量の目標値を計算する。これを操作変数ごとに3～30分の周期でPID 制御装置に出力する。出力周期は制御系の応答遅れおよび計測の時間遅れを考慮して最小時間を決定した。シーケンス制御装置はこの他に、O₂ ガス分析計の異常警報出力、ファジィ推論による制御不能警報出力の機能をもっている。

入力変数				出力変数	
T _{1s} 下付温度	T _{2s} 上付温度	NO _x 出口	O ₂ 出口	炉内温度	炉内温度
ZR	PL	ZR	-	NS	ZR
PS	PL	ZR	-	NS	ZR
PL	PL	ZR	-	NL	ZR
ZR	PL	PS	-	NS	ZR
PS	PL	PS	-	NS	ZR
PL	PL	PS	-	NL	PS
ZR	PL	PM	-	NS	ZR
PS	PL	PM	-	NL	PS
PL	PL	PM	-	NL	PS
ZR	PL	PL	-	NS	ZR
PS	PL	PL	-	NL	PS
PL	PL	PL	-	NL	PS
-	-	-	NL	-	PS

図4 制御規則例

(3) PID 制御装置

シーケンス制御装置により設定された目標値に制御量が追従するように操作端の電動弁開度を制御する。

3.3 制御規則とメンバシップ関数

図4 に制御規則の一例を、図5 にメンバシップ関数の一例を示す。メンバシップ関数は、手動運転で得られた適正な運転条件から設定した。制御規則は、主に経験則を基に初期データを作成したのちに、実装置で試運転を行いながらチューニングを重ねて完成させた。

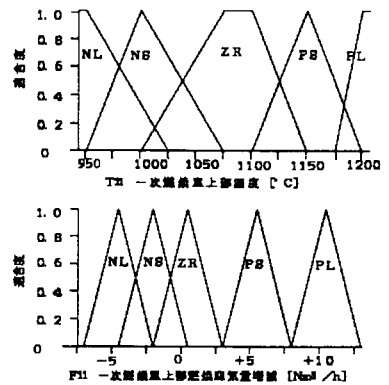


図5 メンバシップ関数例

3.4 入力値の補正処理

汚泥の性状変化にともない、溶流点（温度）は年間で1150～1350℃と変動する。炉内温度T_{1s}及びスラグ温度T_{2s}の制御においては、対象汚泥の溶流点に基づいた目標温度を設定し、必要以上に高くしないことが望ましい。従って変化する汚泥の溶流点をリアルタイムでとらえ、炉内温度T_{1s}及びスラグ温度T_{2s}の目標値の設定に反映させていく必要がある。

本システムでは汚泥搬送用空気を含む総燃焼空気量と炉出口ガスO₂および乾燥汚泥供給量から汚泥の溶流点を次のように推定し、溶流点推定値をもちいて炉内温度T_{1s}及びスラグ温度T_{2s}の補正をおこなった。

溶流点推定値T_sを(1)式で求める。

$$T_s = 1490 - \left(\frac{21 - O_2}{21} \times \frac{A}{Q \times \frac{100 - W}{100}} \right) \times 69 \quad [^\circ\text{C}] \dots (1)$$

- A : 総燃焼空気量 [Nm³/h]
- O₂ : 炉出口O₂ [%]
- Q : 乾燥汚泥供給量 [kg/h]
- W : 乾燥汚泥水分 [%]

溶流点推定値を制御システムに適用するにあたり、T_{1s}、T_{2s}のメンバシップ関数を変えずに測定値を補正し、補正温度を制御系入力とする方法をとった。補正温度Tは(2)式で求める。

$$T = T_0 + \Delta T \quad [^\circ\text{C}] \quad \dots (2)$$

T : 補正温度

T₀ : 計測温度

ΔT : 温度補正值

$$\text{ここで } \Delta T = a(T_s - b) \quad [^\circ\text{C}] \quad \dots (3)$$

パラメータ a, b の値は T₁₁, T₂₃ 各々について最適運転条件が得られるように設定した。

4. ファジィ制御実験結果

図6 に MAN. → AUTO. へと運転モードを切り換えた前後の運転結果を示す。16時過ぎまで総燃焼空気量 F₀、一次室上部燃焼空気量 F₁₁、一次室下部燃焼空気量 F₁₂ を手動設定により操作して、一次室上部温度 T₁₁、スラグ温度 T₂₃、NO_x、O₂ を制御し、その後これらの制御を自動に切り換えた。

切り換え直後から F₀ はやや高い O₂ を修正すべく制御を開始し、2.5% 前後によくコントロールしている。また 20 時前から 21 時にかけて、ファジィ推論装置は T₁₁ をやや低いと判断し F₁₁ を徐々に増加させている。T₁₁ は 2 時間以上遅れて 23 時頃から上昇を始めている。

これらの結果から、ファジィ制御は有効に機能し手動運転以上の制御安定性を有することがわかる。

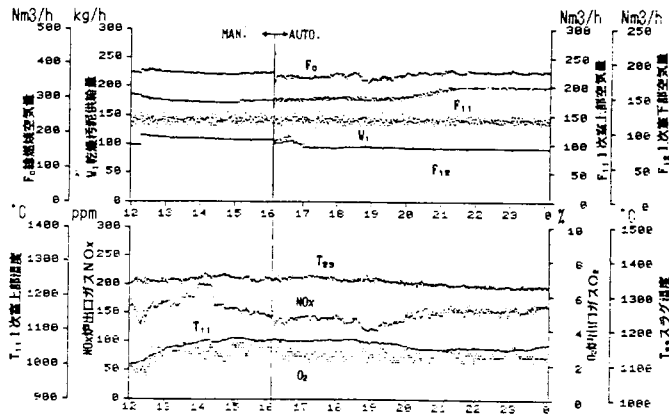


図6 運転結果

5. おわりに

下水汚泥溶融炉の燃焼制御にファジィ制御を採用し、PID 制御装置、シーケンス制御装置と共に階層制御システムを構成して運転を行い、良好な結果を得ることができた。今後の課題としてスラグ流れの監視における画像解析の評価、全体システムの運転バランスの評価などへのファジィ制御の適用が残されており、実験を継続中である。

[参考文献]

- 1) 白井高史, 入山守生, 塩野俊一, 内田隆治
"下水汚泥の溶融システム", 荏原インフィルコ時報 第106号, pp23-30, (1992)
- 2) 鈴木一如, 入山守生, 鈴木保
"下水汚泥回転焼却炉のファジィ制御", 第26回下水道研究発表会講演集, pp662-664, (1989)
- 3) 鈴木一如, 田中一男, 宮村彰, 静間誠
"都市ごみ焼却炉のファジィモデリング", 第7回ファジィシステムシンポジウム論文集, pp335-338, (1991)