

下水汚泥表面溶融炉の燃焼制御

清水 洽*、阿部清一**、上林史朗**

* 久保田鉄工 上下水プラント事業部
 ** 久保田鉄工 環境研究部
 大阪市浪速区数津東1丁目2番47号

概要

現在、下水汚泥の溶融処理は、最終生成物として得られる溶融スラグが、長期間の安全安定性を備え、建設資材等への有効利用も可能となる点から注目を集め、各地で実プラントの建設・稼動が始まっている。

21世紀に向けて下水汚泥処理プラントは、下水汚泥の有効利用化を前提とした大規模化、高度化、省力化を要求され、処理プラントから生産プラントへの質的な変化を遂げようとしている。

このような状況のなか、我々は表面溶融炉における溶融処理の安定化、プラントの安全操業の確保と省力化のための自動制御システムの研究を進めてきた。その結果、表面溶融炉燃焼溶融制御の主制御量は主燃焼室温度であり、それに最も強い影響を与える操作量は、燃焼用空気量であることが確認された。

本報では、それらの関係について考察するとともに表面溶融炉自動制御システム（MFCシステム）について報告する。

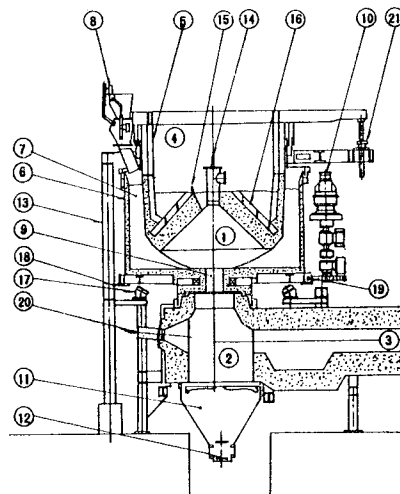
キーワード

下水汚泥 溶融 燃焼 燃焼制御 表面溶融

1. 表面溶融炉の構造と特徴

表面溶融炉の構造断面をFig.1に示す。表面溶融炉は、下水汚泥の燃焼溶融を行う主燃焼室、未燃ガスの完全燃焼を行い燃焼ガスと溶融スラグの分離を行う二次燃焼室とで構成される。主燃焼室は、耐火物を内張りした昇降可能な炉天井と被処理物である下水汚泥とによって紡錘状の空間として形成される。主燃焼室への下水汚泥の供給は外筒の回転により炉天井コーナー部から全周均一に行われる。燃焼空気は、主燃焼室バーナ風箱部から供給される。

主燃焼室においては、Fig.2に示すように、燃焼熱が溶融熱源として利用できる構造になっており、処理対象物の高断熱性と相まって低燃比溶融処理を可能としている。



番号	名 称
①	主 燃 焼 室
②	二 次 燃 焼 室
③	煙 道
④	炉 天 井
⑤	内 筒
⑥	外 筒
⑦	貯 留 室
⑧	二重ダンパー
⑨	スラグポート
⑩	炉 駆 動 機 置
⑪	スラグピット
⑫	スラグ・コンベヤ
⑬	架 台 ・ 支 柱
⑭	主燃焼室バーナ
⑮	パイロットバーナ・ マルチフラクション
⑯	水冷ジャケット
⑰	受 口 ・ ロ ー ラ
⑱	ガイド・ローラ
⑲	ピン・ラック
⑳	二次燃焼室補助バーナ
㉑	天井升降装置

Fig.1 表面溶融炉断面構造図

2. 表面溶融炉の制御特性

2-1. 処理量制御

表面溶融炉主燃焼室における処理対象物への加熱は主として火炎（輻射ガス）からの輻射伝熱で行われ、それを次式で示す。

$$q = 4.88 \phi \cdot A_c \cdot \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right]$$

ここで q : 輻射伝熱量 (Kcal/h)

ϕ : 総括形態係数

A_c : 受熱面面積 (m²)

T_g : 輻射ガス温度 (°K)

T_a : 受熱面温度 (°K)

式より明らかなように、 ϕ 、 A_c 、 T_a を一定とした時、輻射伝熱量 q は、輻射ガス温度 T_g に依存する。

それ故、単位処理対象物あたり溶融までに必要な熱量を q_u (kcal/kg) とすると処理量 M は $M = q/q_u$ (kg/h) であらわされ、処理量制御は、輻射ガス温度、即ち主燃焼室温度で行えることになる。

Fig.3に主燃焼室温度と処理量との関係を示す。

Fig.3からわかるように、主燃焼室温度と処理量は、比例関係にある。

2-2. 主燃焼室温度に与える燃焼空気の影響

燃焼熱量を一定にした時、理論燃焼温度と空気比の関係は Fig.4 で与えられる。即ち、理論空気比 $m = 1$ のとき最高燃焼温度を示す。

Fig.4からわかるように、ある測定温度に対し空気不足の場合（還元雰囲気）と空気過剰（酸化雰囲気）の場合がある。表面溶融炉主燃焼室においては下記の理由で理論空気比に近い空気不足状態にしなければならない。

① 高温雰囲気下でのサーマル NO_x 発生抑制

② 適量の未燃炭素の発生をうながし、それからの輝炎効果で輻射伝熱量の増大を図る

空気比の算定は、直接的な方法として主燃焼室出口での排ガス中残存酸素濃度測定があるが1300℃以上の高温のため測定不可能であり、実用的には他のプロセスデータから推定するしかない。

Fig.5は、燃焼空気量を変化させた場合、主燃焼室温度への影響を示しており、Fig.4において空気比が $m_a \rightarrow m_b \rightarrow m$ と変化したことを表わしている。

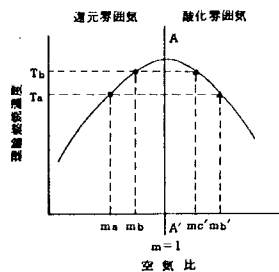


Fig.4 空気比と理論燃焼温度

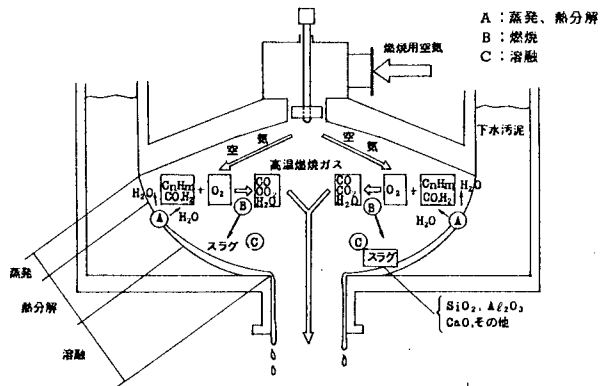


Fig.2 主燃焼室反応モデル

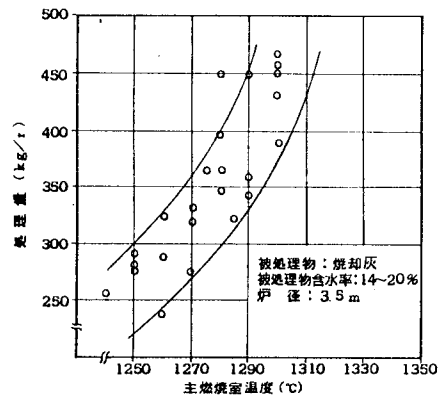


Fig.3 主燃焼室温度と処理量

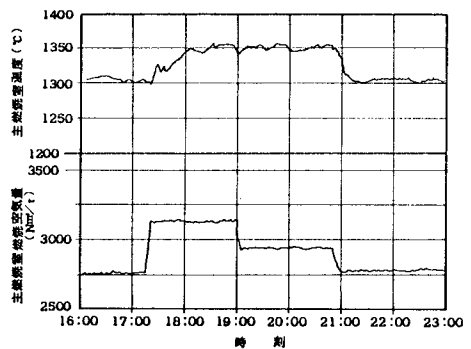


Fig.5 主燃焼室燃焼空気量と主燃焼室温度

3. 表面溶融炉自動制御

3-1 MFCシステムの概要

表面溶融炉の燃焼溶融制御において主制御量は主燃焼室温度であるが、それに関わる操作量は燃焼用空気量のみではなく複数となる (Fig.6)。制御量と操作量との関係が1:1の対応でないため、プロセス値の入出力間に燃焼溶融状態判断操作が必要となってくる。そのため必然的にMFCシステムに対し、

- ① 状態変化に即応できること
- ② 多数のプロセス状態変数を一度に扱って計算制御ができること
- ③ プロセスの状態変化を表示する数式や過去の履歴を保存できること

が要求される。

Fig.7に基本的なMFCシステムの構成を示す。マルチタスク可能とし、プロセスデータの収集、処理計算と制御処理計算とは、分離したソフト構成としている。又Table.1とFig.8に入出力プロセス値とその測定場所を示す。

Table.1で示す第1レベル判断値はサンプリングサイクル時間を5secとし、常時監視が必要なプロセス値である。

3-2 MFCシステムによる制御の実験と課題

MFCシステムによる制御は、溶融炉の運転状態にあわせ4つの大きな制御にわかれている。即ち、① 立上げ制御

- ② 過渡期制御
- ③ 定常制御
- ④ シャットダウン制御

(1) 立上げ制御、シャットダウン制御

立上げ制御、シャットダウン制御は、適切な燃焼管理を行いながら定められた温度勾配で昇温、降温を行う。Fig.9は実炉における手動立上げと、MFCシステムによる立上げ例である。MFC制御の場合、手動立上げでみられるハンチングがなくなり、昇温速度も3℃/minの目標に対し2.96℃/minが得られた。立上げ中に生じるパイロットバーナ停止や汚泥燃焼開始などの外乱を考慮すると十分満足できる結果である。

(2) 過渡期、定常制御

現在の過渡期、定常時における制御では、汚泥性状 (含水率等) の変化、状態の大きな変化 (可燃物の急激な炉内への供給) 等による炉負荷変動に対し追従が不十分で、制御の結果として、安全側のSV値において安定してしまう場合が多い。そこで、MFCシステムにおいては、マンマシン対応性を付加している。MFCシステムのミニコンとPIDコントローラは、1対1に対応しており、人間がPIDコントローラにより、その時適切と考えられるSV値を設定すると、MFCではそれをその時点の最適SV値として確認し、制御を継続するように考慮している。これにより制御目標の変更は、簡便にオペレータが行うことができ、MFCシステムは最適

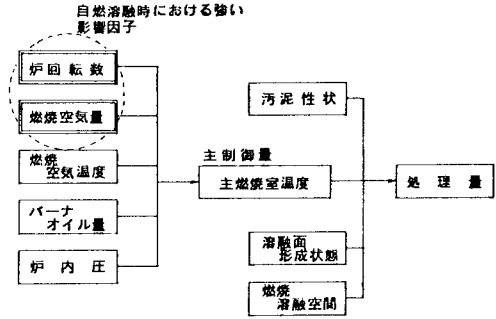


Fig.6 主燃焼室温度とその影響因子

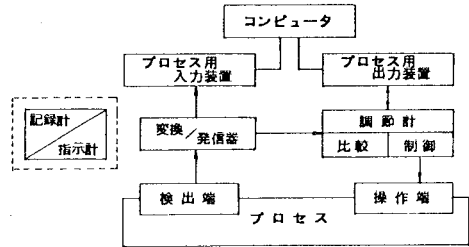


Fig.7 MFCシステム構成図

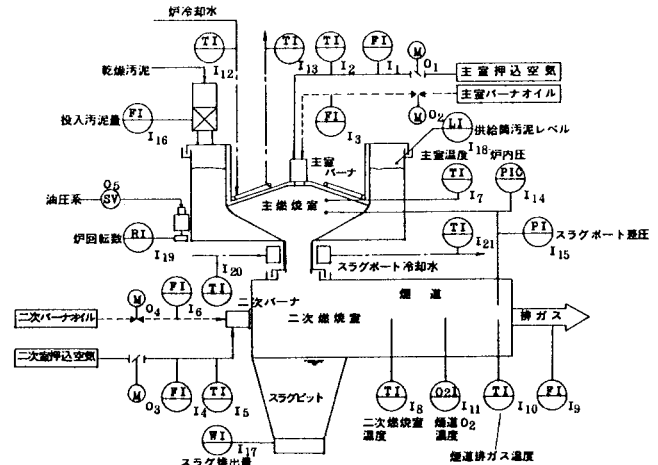


Fig.8 プロセス値のサンプリング位置

な制御状態へと推移することができる。また、定常時における、各温度、流量等のプロセス値の許容変動範囲を設定しており、運転中に許容範囲をはずれた場合、あるいはセンサー故障時等はPV値でなく、MV値を固定した上で制御を待機させるシステムとし、安全性を高めている。

Table. 2 に定常状態下のある運転状態変動に対する原因推定、操作端選択方法を例示する。

(3) MFCシステムの今後の課題

表面溶融炉における制御特性は多変数性である。プロセスの大きな変動に対し、複数の操作因子が存在し、その中から、最適な操作因子を判断、操作量を決定しなければならない。また、表面溶融炉の特長として、定常時では燃焼状態が変化し、燃焼負荷等が変動しても再び元の状態に戻ってくる自己復元性も強い。このため、複数の操作因子を同時に短時間で制御する必要がある時や、少々の変動が生じて、制御は一時保留させておく場合がある。さらに炉内の燃焼溶融現象が非常に複雑であるため、定式化モデルの確立が困難であるという問題も残っている。

以上からMFCシステムの今後の課題として次の点が挙げられる。

- a. 燃焼溶融状態の変動による各プロセス値の変動傾向、解析
- b. 制御量に対する各操作量の影響分析
- c. システム異常傾向の把握とその対応制御の確立

4 まとめ

表面溶融炉は、下水汚泥の持つ熱エネルギーを最大限に利用し、同一空間で燃焼溶融を行う極めて省エネルギー形の溶融システムである。主燃焼室内で蒸発から溶流までの全ての反応が行われるため、その状態把握が難しく、かつそれが制御のポイントとなっている。

本報では、表面溶融炉自動制御システム(MFCシステム)の概要を紹介したが今後、表面溶融炉の特性に合致する制御理論の導入を図り、MFCシステムに求められる問題の解決を進めていく方針である。

Table. 2 主燃焼室温度低下時における制御出力パターン

項目	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	
各プロセス値の変動	主燃焼室放射温度計の変動	小	大	→	→
	二次燃焼室温度	↓	↑	↓	↑
	煙道O ₂ 濃度	↑	↓	↑	↓
	煙道O ₂ 濃度の変動	↓	↑	↓	↑
	熱収支計算からの燃焼負荷	↓	↑	↓	↑
	炉内圧の変動	小	大	→	→
原因の推定	主燃焼室内への汚泥供給不足	主燃焼室内への汚泥供給過多	乾燥汚泥の熱量低下	乾燥汚泥の熱量増加	
	主室バーナ使用時	炉回転数増バーナオイル増	炉回転数減バーナオイル減	炉回転数増バーナオイル増	炉回転数減バーナオイル減
制御出力	主室バーナ使用時	炉回転数増バーナオイル増	炉回転数減バーナオイル減	炉回転数増バーナオイル増	炉回転数減バーナオイル減
	自然燃焼時	炉回転数増	炉回転数減	バーナON	バーナOFF

Table.1 表面溶融炉入出力プロセス値

系	項目	単位	センサー
①	主室押込空気量	Nm ³ /時	オリフィス+差圧発振器
2	主室押込空気温度	°C	熱電対
③	主室バーナオイル量	ℓ/時	パルス発振器
④	二次室押込空気量	Nm ³ /時	オリフィス+差圧発振器
5	二次室押込空気温度	°C	熱電対
⑥	二次バーナオイル量	ℓ/時	パルス発振器
⑦	主燃焼室温度	°C	熱電対
⑧	二次燃焼室温度	°C	〃
9	排ガス量	Nm ³ /h	計算値
10	煙道排ガス温度	°C	熱電対
⑩	煙道O ₂ 濃度	%(wet)	ジルコニア酸素計
12	炉天井冷却水入口温度	°C	铂抵抗抗体
13	炉天井冷却水出口温度	°C	〃
⑪	炉内圧	mmAq	差圧発振器
⑫	スラグポート差圧	mmAq	〃
16	投入汚泥量	kg/h	ロードセル重量計
17	スラグ排出量	kg/h	〃
18	供給汚泥レベル	%(m)	超音波レベル計
19	炉回転数	r.p.m	ロータリーエンコーダ
20	スラグポート冷却水入口温度	°C	铂抵抗抗体
21	スラグポート冷却水出口温度	°C	〃

出力項目(操作項目)

系	項目	単位	アクチュエータ
1	主室押込空気量	Nm ³ /時	コントロールモータ+ダンパ
2	主室バーナオイル量	ℓ/時	コントロールモータ+弁
3	二次室押込空気量	Nm ³ /時	コントロールモータ+ダンパ
4	二次バーナオイル量	ℓ/時	コントロールモータ+弁
5	炉回転数	r.p.m	電圧比例弁+減速モータ

(図中のO_iの項目)
i=1-5

○印は第1レベル判断値 (図中のI_iの項目)
それ以外第2レベル判断値
i=1-21

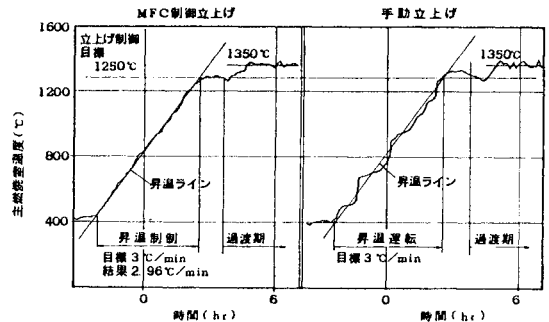


Fig.9 立上げ制御例