

<研究発表>

下水流動焼却設備の省エネ運転支援方法

○山下 貴嗣<sup>1</sup>、林 哲生<sup>2</sup>、西山 守<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 月島機械(株) 水環境事業本部(〒104-0051 中央区佃 2-17-15 E-mail:t.yamashita@tsk-g.co.jp)

<sup>2</sup> 月島テクノメンテナンス(株) エンジニアリング二部(〒104-0052 中央区月島 4-8-14 E-mail:tetsuo\_hayashi@tsk-g.co.jp)

<sup>3</sup> 月島機械(株) 研究開発部(〒104-0051 中央区佃 2-17-15 E-mail:m.nishiyama@tsk-g.co.jp)

概要

下水気泡流動焼却設備において、コンピュータ演算によって省エネ運転を支援するシステムを開発。省エネ手法の考え方と実機場での適用結果について報告する。設備からの計測信号をもとにエネルギー収支計算にもとづいた複合的な演算を行い、最も省エネとなる運転設定を求めてガイダンス表示する手法を用いている。

キーワード： 下水焼却、運転支援、省エネルギー、シミュレーション、地球温暖化

1. はじめに

京都議定書の批准、改正省エネ法の施行により、下水処理場においても省エネや温暖化ガス排出量削減に向けた対策が重要視されている。下水処理プロセスの中では焼却設備のエネルギー消費量は比較的多く、特に補助燃料使用量の低減が要望されているため、設備の運転方法においても一層の工夫が求められている。前報<sup>1)</sup>で筆者らは、焼却設備の「運転支援」機能と「設備診断」機能を統合したシステムの手法と評価の概要について報告した。本報ではその続報として、従来運転より省エネとなる「運転支援」方法について、その手法と実機によるテスト結果を報告する。

1) 学会誌「EICA」9巻2号P55(2004)：下水流動焼却設備の運転支援・診断システムとその適用

2. 下水流動焼却設備の省エネ運転の概要

下水焼却設備における焼却物は、汚泥を脱水処理した後の脱水ケーキであり、この脱水ケーキを焼却処理するために、現在では気泡流動床式焼却炉(以下流動焼却炉)が最も多く採用されている。

流動焼却炉内に供給するのは、Fig. 1に示すように「脱水ケーキ」、  
「流動空気」、「補助燃料」である。弊社製設備の標準的な制御方法として、脱水ケーキと流動空気はオペレータが所定量を設定し、炉内上部のフリーボード部の温度が一定値(例えば850℃)になるように補助燃料供給量を自動制御する構成になっている。省エネ運転においては、流動空気量の設定に着目する。流動空気は砂層部の流動性を維持し、燃烧反応に必要な酸素を供給する役割を成しており、供給量が少ないと未燃ガスが発生する。脱水ケーキは水分や発熱量などの性状が変動するため、一般的には流動空気量を多めの値にすることで安定燃焼を優先した運転を行っている。

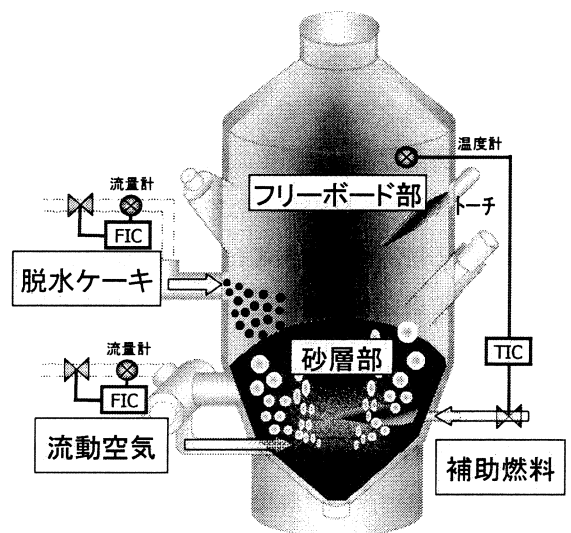


Fig.1 流動焼却炉の制御 概念図

一方、必要量以上の空気を炉内に供給することは、燃焼に寄与しない余剰空気を加熱することになり、補助燃料をその分余計に消費することになる。以上のことから、流動空気量を必要最小限の値にコントロールすることで、補助燃料の低減による省エネが可能になる。

Fig. 2に流動空気量の調整について、従来方式と本運転支援システム（以下、本システム）の比較を示す。

流動空気量の最適値を求める手法として、空気比一定制御やファジー制御なども考えられるが、本システムでは後述する数学的手法を採用した。

また、既存設備への適用を容易にするため、プロセス信号の取得以外は既存設備に手を加えず、最適流動空気量などの演算結果をガイダンス表示して、オペレータはその指示に従って運転設定を行う運用とした。

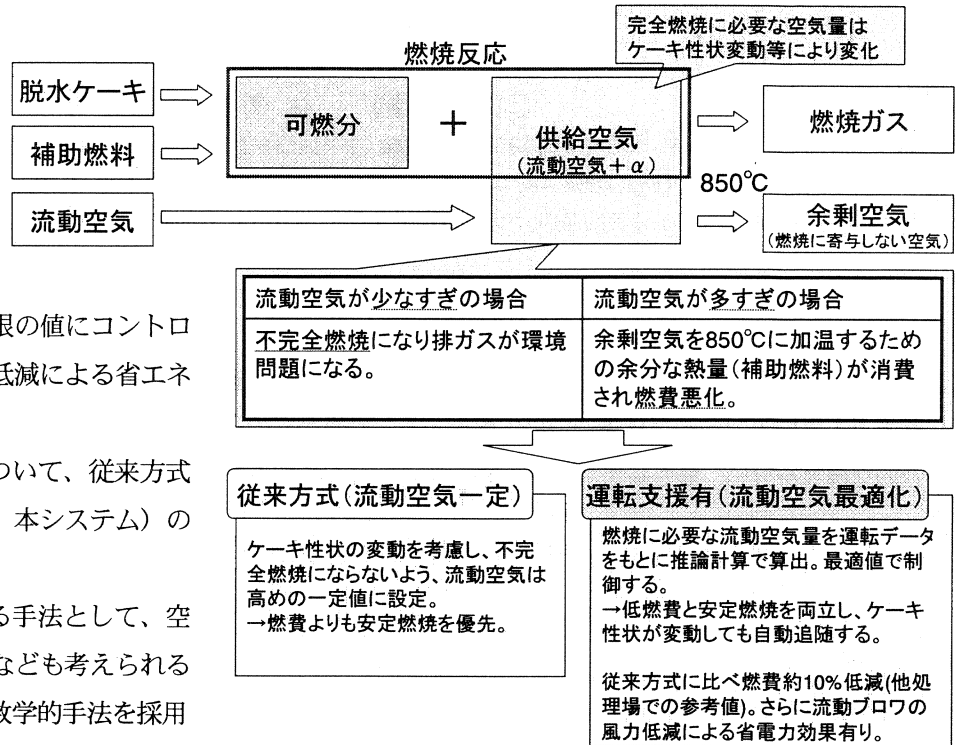


Fig.2 流動空気量のコントロール 考え方と従来方式との比較

### 3. 運転支援システム概要

本システムでは、焼却設備の物質収支・熱収支計算式に基づいて設備の挙動をモデル化(以下、数式モデル)している。数式モデルを使用するメリットとして、任意に運転条件を変更した時の設備の挙動をシミュレーションで予測でき、安全でより最適な運転が行えることである。低燃費運転において必要となる流動空気量の最適値は、燃焼計算の数式モデルをもとに算出できる。数式モデルを用いた演算には、オンラインで取得する設備のプロセスデータや、設備設計上の諸条件、補正係数の他に、工業分析で10日程度要する脱水ケーキの性状把握が必要となる。当システムでは、脱水ケーキの性状把握として、事前に求めたケーキ性状の統計情報と数式モデルを用いて、工業分析せずに近似値を求めるケーキ性状推論機能を考案した。

本システムの機能と演算の流れをFig. 3に示す。最初に運転中のプロセスデータと、直前に測定して求めたケーキ水分値をもとに、数式モデルを用いた計算にて燃焼中のケーキ性状を求める。次に、運転シミュレーション機能を用いて、オペレータが入力した運転条件と先ほど求めたケーキ性状をもとに、低燃費優先などの目的に適した運転指示値を計算し画面に表示する。

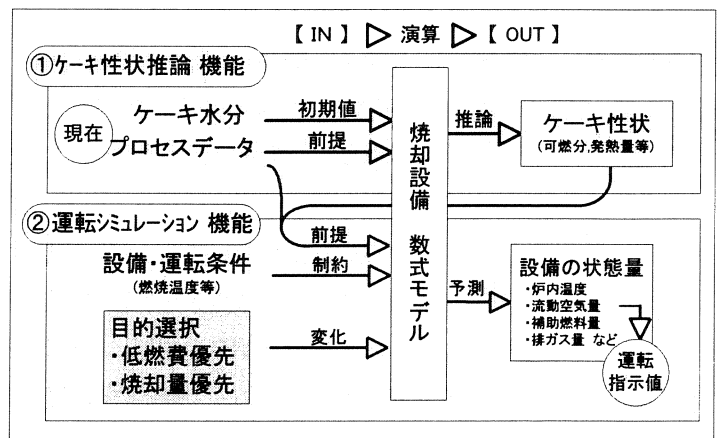


Fig.3 本システムの機能と演算の流れ

使用する数式モデルを Table 1 に模式的に示す。Table 1 の A と B は炉周りの物質・熱収支計算を示す。C は炉内の砂層・フリーボードを分離した収支計算、D は今回実証テストを行った設備の構成機器の関係を示す。

4. 各機能について

① ケーキ性状推論機能

1) 考え方

ケーキ性状のうち、水分、可燃分 5 元素 (C,H,O,N,S) の固形分中比率、及び固形分発熱量が数式モデルの演算上必要となる。テスト機場にて性状の異なるケーキを採取し、その工業分析結果から要素間の相関関係を求め、その相関式の概要を Table 2 に示す。Table 2 の  $f(x)$  は、要素  $x$  との相関式であることを表す。

ケーキ性状推論機能として、未知数は可燃分中の C 成分(%-ds)と 3 つの補正值とし、他の要素はその相関式として近似的に表現した。

未知数を求めるために、Table 1 の A~C の 3 つの数式モデルを用いて、ケーキ性状以外のデータは既知とし、各等式から未知数を求める非線形の方程式として解く。

2) 推論結果

焼却設備が定常状態であることを確認してケーキ性状推論の計算を行った。計算では Table 3 に示す A・B・C の各式を共にゼロに収束させる評価関数を用いており、各々の評価関数の誤差が小さい値であると、計算精度が高いことを示す。

結果として、推論したケーキ性状をもとに燃焼計算を行って求めた炉内温度の計算値と、プロセスデータをもとにした実測値を比較すると、その差は多くのケースで  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  以内であり、 $850^{\circ}\text{C}$  に対して  $\pm 1.8\%$  の実用的な誤差内であることを確認した。

Table 1 使用数式モデルの概念図

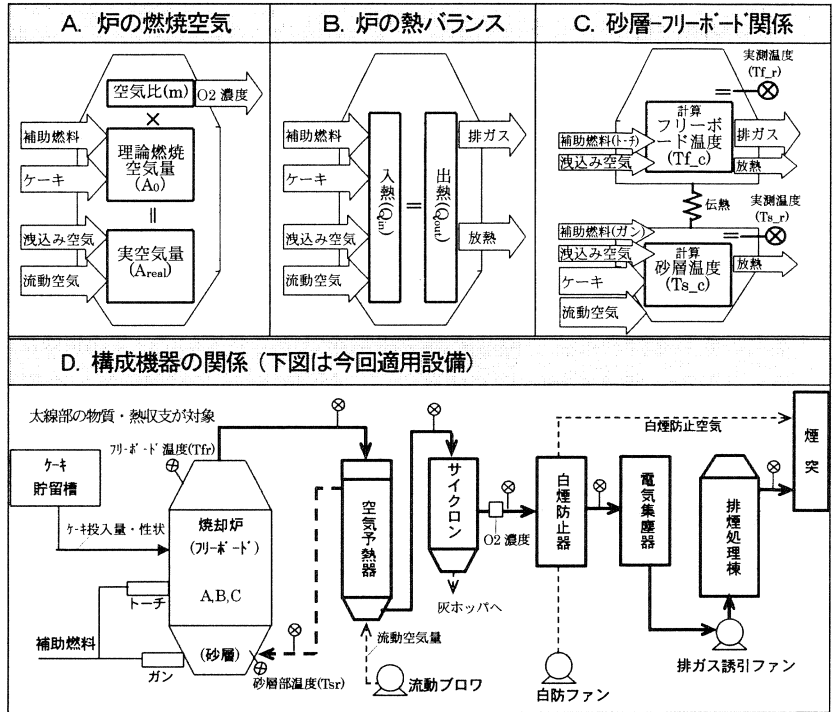


Table 2 ケーキ性状の相関式

要素	単位	入力値・相関式
水分	%	= (日常測定値) + <補正值>
可燃分	C(炭素)	%-ds = <入力値>
	H(水素)	%-ds = f(C)
	O(酸素)	%-ds = f(C) + <補正值>
	N(窒素)	%-ds = f(C, O)
	S(硫黄)	%-ds = f(C, O)
計	%-ds	= (上記の和)
発熱量	KJ/g	= f(可燃分計, C) + <補正值>

Table 3 ケーキ性状の収束評価式と誤差

収束計算式 (0 に収束)	単位	誤差	(備考) 計算時の状態量
A式: $m \times A_0 - A_{real}$	Nm <sup>3</sup> /h	$\pm 90$	Areal: 3700~4200
B式: $Q_{in} - Q_{out}$	MJ	$\pm 180$	Qin, Qout: 16000~20000
C式: $T_{fc} - T_{fr}, T_{sc} - T_{sr}$	$^{\circ}\text{C}$	$\pm 15$	Tf: 800~850, Ts: 650~720

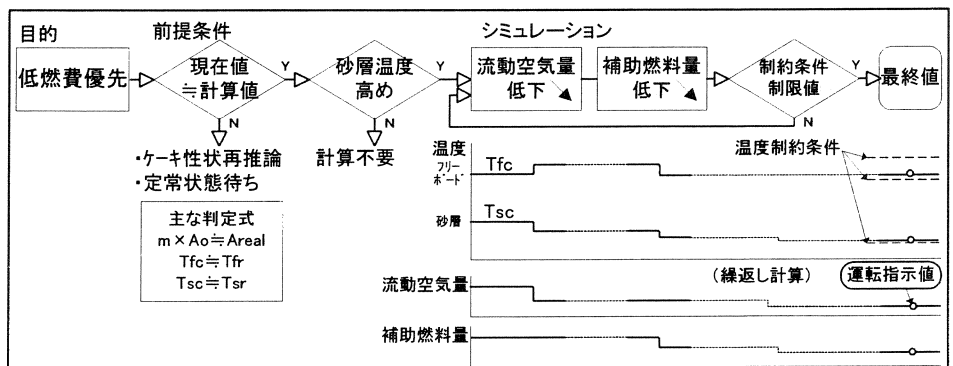


Fig. 4 低燃費優先時の動作ブロック図

## ②運転シミュレーション機能

低燃費優先時の運転シミュレーションの動作の流れを Fig. 4 に示す。演算開始時点のプロセスデータをもとに前提条件成立を確認後、シミュレーション演算を行う。最初に流動空気量を一定量低下させ、炉内砂層・フリーボード温度を計算する。

演算においては、フリーボード温度が上昇すると、それを抑えるよう補助燃料使用量を低下させている。Table 4 に示す制約条件を全て満たす範囲で、流動空気を徐々に下げる操作を繰り返す演算を行い、砂層温度などが制約条件の限界に達した時点で計算終了し、その時の流動空気量を最適の「運転指示値」としてガイダンス表示する。

Table4 シミュレーションの制約条件例

項目	制約条件	備考
流動空気量	砂層空塔速度設計値 以上 流動ブロウ能力限界 以下	
排ガス量	誘引ファン能力限界 以下	
砂層水分負荷率	設計条件以下	=ケーキ中水分÷砂ホールド量
炉熱負荷率	設計条件以下	=入熱(Qin)÷炉本体内面積
フリーボード温度 Tf	800℃以上、850℃以下	(*)運転条件による
砂層温度 Ts	660℃以上	(*)運転条件による
空気比 m	1.3 以上	

## 5. 実機におけるテスト結果

実機テストは、補助燃料使用量を自動制御ではなく、本システムのガイダンスをもとに手動調整して行った。テストは図5に示す(A)点を基準に、砂層温度が制約条件の660℃になるまで補助燃料使用量と流動空気量を段階的に低下させる低燃費シミュレーション計算を行い、その結果を実機で確認したものである。

本システムは最初に(A)点でケーキ性状推論を行い、実測値と計算値がほぼ一致する状態を確認し、次に低燃費運転のシミュレーション計算を行った。その結果、流動空気量は400Nm<sup>3</sup>/h 低下できることを予測し、実機にて実際に流動空気量を低下させた。補助燃料を段階的に下げた場合の計算結果が(B)-2、(C)-2である。この計算結果を元に、実機で補助燃料使用量を下げた時の測定値が(B)-1、(C)-1である。

実機テストにおいて、補助燃料(都市ガス)の削減量は次の結果となった。

補助燃料: 12Nm<sup>3</sup>/h 低下 (18%削減)  
予測値との差 1Nm<sup>3</sup>/h

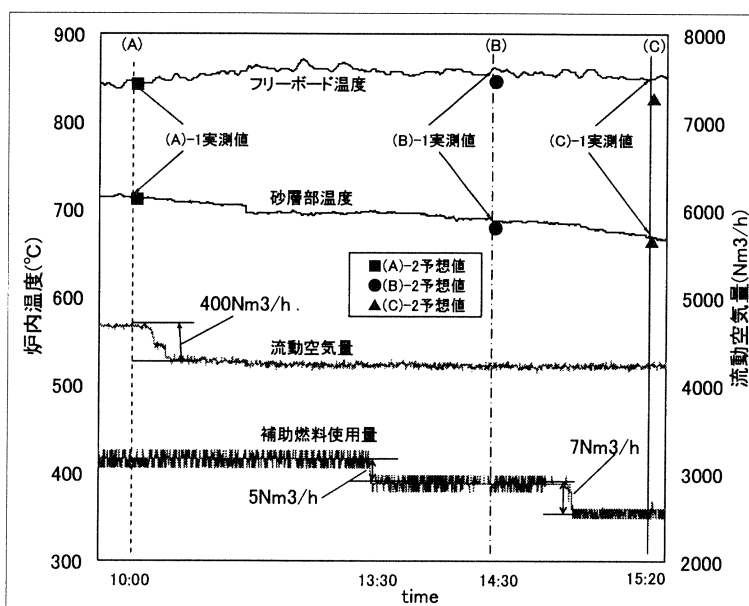


Fig.5 流動空気・炉内温度の推移

Table5 実測値と計算値の比較

時間		含水率 (%)	可燃分 (%-DS)	FB温度 (°C)	砂層温度 (°C)	補助燃料 (Nm <sup>3</sup> /h)	流動空気量 (Nm <sup>3</sup> /h)
(A)-1	実測値	78.8	83.3	844.0	713.0	67.0	4670
(A)-2	計算値	78.8	85.1	842.4	712.9	—	—
(B)-1	実測値	—	—	860.0	687.0	62.0	4210
(B)-2	予測(計算)値	—	—	847.3	677.4	62.0	4200
(C)-1	実測値	—	—	848.0	669.0	55.0	4222
(C)-2	予測(計算)値	—	—	833.0	660.7	55.0	4200

## 6. まとめ

今回のテストは脱水ケーキ投入量が炉の定格値で運転されている条件で実施し、数式モデルをもとに流動空気量の最適値を求めて、補助燃料使用量を削減できることが確認できた。数式モデルを用いた手法は計算精度を保つことが当初からの課題であったが、ケーキ性状推論機能など計算上の補正係数を自動調整する仕組みを盛り込み、ほぼ実用レベルに達することができた。今後も実設備においての検証を継続しながら、計算方法やユーザーインターフェイスに改善を加え、省エネ運転や温暖化ガスの低減を実現していきたい。