

II-448 汚泥処理システムのエネルギー最適化について

京都大学 正員 酒井 伸一、平岡 正勝
武田 信生、松内 孝夫

1.はじめに

我が国における汚泥処理システムの計画、設計を取り巻く種々の問題を考えるとき、汚泥処理がトータルシステムとして設計されることが少ないことが大きな問題として上げられる。これまでエネルギーリサイクルループを考慮した汚泥処理システムの最適設計研究は見当たらず、しかも焼却などの熱操作やメタングスの発電利用などを加えて汚泥処理システムはかなり大規模となっており、設計最適化を行う必要性が生じてきたといえる。そこで本報告では先に示した汚泥処理システムのエネルギー収支モデル¹⁾を用いて、エネルギー最適設計問題として定式化シラグランジュ乗数法を用いて最適解を求めた結果から、乾燥-焼却システムのエネルギー収支や嫌気性消化のエネルギー収支上の得失に関する問題について検討した。

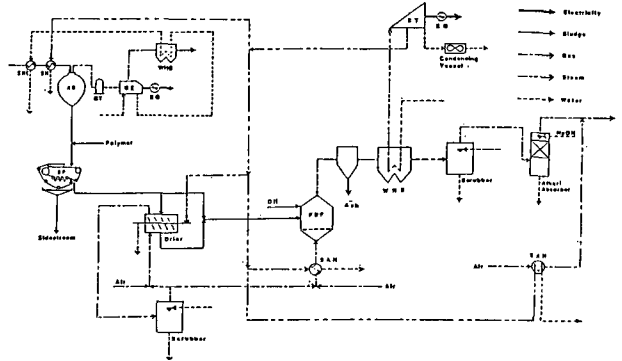


図1 検討対象汚泥処理システムの構造

2.エネルギー最適設計問題の定式化

一般に最適設計問題とはシステムの構造が与えられ、目的関数を最小にするような設計変数を決定することであるが、一般的な非線形計画問題は

$$\text{Min } f(x) \quad (1)$$

$$\text{subj. to } g_i(x) \leq 0 \quad i=1 \sim m \quad (2)$$

$$h_j(x) = 0 \quad j=1 \sim l \quad (3)$$

汚泥処理システムに対するエネルギー最適設計問題を定式化すると $f(x)$ は次式で示される。

$$f(x) = k_1(\sum KWC_i - \sum KW_i) + k_2 OL \quad (4)$$

KWC_i : 各ユニットプロセスの電力消費量

$i=1 \sim 6$ に対し消化、脱水、乾燥、焼却、排ガス処理、廃熱回収の各プロセスを表す。

KW_i : 各ユニットプロセスの電力生産量

OL : 重油消費量

k_i : エネルギー換算係数($k_1=2450\text{kcal/kwh}$, $k_2=9650\text{kcal/kg}$)

等式制約(2)式、不等式制約(3)式はエネルギー収支モデルのプロセス性能、物質収支、熱収支などより構成される。図1のシステムに対するエネルギー最適化問題を考えると、問題は変数の数は42、等式制約の数が1=36、非負制約以外の不等式制約が $m=9$ となり、かなり大規模な非線形計画問題となる。

3. 最適化手法とその適用

ここで用いた最適化手法はラグランジュ乗数法で有制約問題に対する変換解法の1つである。等式制約、不等式制約を有する非線形計画問題(1)~(3)に対する拡大ラグランジュ関数

$$M(x, \lambda, \psi; r) = f(x) + (1/4r) \sum [\{ \max(0, 2rg_i(x) + \lambda_i) \}^2 - \lambda_i^2] + \sum [\psi_j h_j(x) + r \{ h_j(x) \}^2] \quad (5)$$

表1 シミュレーション探索と最適設計の比較
(消化脱水焼却システム)

TS	項目	シミュレーション探索	最適設計	
2%	電力消費	消化	388	203
		脱水	306	305
		乾燥	241	259
		焼却	223	221
		排ガス処理 廃熱回収	362 59	361 59
	計	1557	1409	
	電力生産	G E発電	1910	1838
		蒸気発電	0	0
	計	1910	1838	
	電力収支		-353	-429
重油消費		2379	2314	
エネルギー収支		2027	1885	
4%	電力消費	消化	184	85
		脱水	151	151
		乾燥	250	287
		焼却	125	123
		排ガス処理 廃熱回収	214 44	212 43
	計	967	882	
	電力生産	G E発電	1941	1885
		蒸気発電	0	0
	計	1941	1885	
	電力収支		-973	-1003
重油消費		732	875	
エネルギー収支		-242	-328	

(単位: 10^3 kcal/ton-DS)

を考え最適ラグランジュ乗数 λ, μ を求めるため、適当に大きなパラメータ r に対し(5)の拡大目的関数を最小化すれば元問題の最適解が得られる。無制約計画問題を解くにはDFP公式を用いた準ニュートン法を用いた。最適化手法の適用に際しては等式制約を用いて問題の同値関係を崩さずに変数の数を減らすこと、勾配ベクトルの計算プログラムの作成が容易になるような等式の変形、変数のスケールリング、設計変数のべき指数が実数型である場合の変数変換などを行った。

4. 最適設計例

消化脱水システムに対するシミュレーション探索結果(1)で示したエネルギー収支計算アルゴリズムによる方法)と最適設計結果とを表1に示す。TS=2%の場合では最適設計を行うことによりエネルギー収支で7%の削減を図ることができる。この内訳をみれば、重油消費で3%の低減、電力収支で20%の回収電力の増加となっている。電力収支を消費と生産に分けてみれば、最適設計での消化日数が短いことからガスエンジン発電による電力生産量は少なくなるものの消化槽の電力消費も少なくなっている。TS=4%の場合もほぼ同様の傾向を示し、エネルギー収支量で35%の利得がある。このように嫌気性消化-焼却システムでは最適設計によるエネルギー削減量はかなりの量となることが示されたが、これはシステムモデルの大規模化によるエネルギー収支に対するシステム構造が経験的な判断も必要とするシミュレーション探索では十分に把握されにくいことを示唆

するものである。つまり、直接脱水-焼却システムではエネルギー収支に対するシステム構造が乾燥プロセスの付加による効率化といった点に集約され、比較的全体像を把握しやすいのに対して、嫌気性消化-焼却システムではメタンガス熱回収利用系が加わるにより全体のシステム構造の把握が簡単にはなされないためである。しかも、メタン発酵プロセスではガス発生量、ガス発電量を増加させる上では十分な嫌気性分解を行うことが有効である一方、消化日数を多くとることは槽容積を大きくとることもつながら、系からの放熱量を増加させるといった相反する側面をもつ。これらから嫌気性消化-焼却システムの最適設計結果がかなり良好な結果となったものと考えられるが、実際、シミュレーション探索では消化日数は20日を採用しているのに対し、最適設計結果ではTS=2%で11日、TS=4%で9.3日とかなりの差がみられている。今回、最適設計問題として解いた問題の規模がすでに述べた通り、変数43、等式制約37、非負制約以外の不等式制約9 というようにエネルギー収支に限ってもかなり大規模であること、汚泥処理システムとして最適化を図るには嫌気性消化、脱水、焼却といった単位プロセス設計から嫌気性消化-ガス発電のようなバイオエネルギー生産系や乾燥-焼却-廃熱回収といった基本フレーム設計、さらに大規模な系を考える必要性も今後生じることなどを考え合わせれば、最適設計の有効性はここに示されたといえよう。

5. おわりに

以上汚泥処理システムのエネルギー最適設計問題の定式化と最適化法適用の結果を要約すれば、汚泥処理システムの大規模性から最適設計の必要性が確認された。ここに示した方法により汚泥処理システムにおけるメタン発酵プロセスのエネルギー的得失を検討した結果が表2であるが、汚泥濃度によりメタン発酵のエネルギー的得失に変化がみられることが裏付けられている²⁾。最後に本研究の最適化計算を進めるにあたり有益な御指摘と協力を頂いた甲南大学理学部中山弘隆教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1)松内、平岡、酒井:”汚泥処理システムのエネルギー収支モデルについて”,土木学会第40回講演集pp.707 (1985) 2)酒井、平岡、武田:”嫌気性消化プロセスのエネルギー収支に関する一考察”,同上,pp.723 (1985)

表2 最適設計結果のエネルギー収支比較

TS	項目	ADDシステム	Dシステム	
2%	電力消費	消化	203	0
		脱水	305	358
		乾燥	259	251
		焼却	221	230
		焼却ガス処理	361	347
		廃熱回収	59	68
	計	1409	1244	
	電力生産	GE発電	1838	0
		蒸気発電	0	0
	計	1838	0	
電力収支		-429	1244	
重油消費		2314	0	
エネルギー収支		1885	1244	
4%	電力消費	消化	85	0
		脱水	151	180
		乾燥	267	129
		焼却	123	233
		焼却ガス処理	212	350
		廃熱回収	43	88
	計	882	950	
	電力生産	GE発電	1885	0
		蒸気発電	0	0
	計	1885	0	
電力収支		-1003	950	
重油消費		675	0	
エネルギー収支		-328	950	

(単位: 10³ kcal/ton-D)