報 文

新しい熱操作システムの解析 (2)

笠 倉 忠 夫*・井 元 義 訓*・森 隆 之*

1. はじめに

下水污泥熱操作システムにおいて、省エネルギー、創エネルギーの観点から流動焼却システムが注目されている。この流動焼却システムについて図-1の4つのシステムを構成し、エネルギー解析及び経済性評価を試みた。このうち、前報ではエネルギー解析結果について報告したので、本報では前報と同じケーキ性状($qcl = -18 \sim -689 \text{ kcal/kg}$)のもとに行った経済性評価の結果について報告する。

2. システムの経済性評価について

システムの経済性評価はシステムを総合的に評価する際の定量的な基礎を与えるもので、污泥処理分野においても近年しばしば取り上げられるようになってきた^{1),2)}。しかし、下水污泥処理プラントの様な公共施設の経済性評価の手法に関しては必ずしも明確な定義があるわけではなく、ある程度恣意的な評価が行われてきた。従って、これについても、今後十分な議論が行われることが望まれるが、ここでは次の様な考え方に

システム 1

システム 3

システム 2

システム 4

図-1 解析対象としたシステム

* 日本ガイシ(株)エンジニアリング事業本部
Tadao KASAHARA, Yoshinori IMOTO,
Takayuki, MORI

基づいてシステムの経済性評価を行った。

一般に公共投資の経済効果を評価する手法として、しばしば費用便益分析 (cost-benefit analysis) が用いられる³⁾。この分析では、投資対象となるプロジェクトの現在の価格に換算した総費用 (TC)

$$TC = \sum_{t=1}^n \frac{OM_t}{(1+i)^t} + IC \quad \text{..... ①}$$

とこのプロジェクトによって得られる総便益 (TB)

$$TB = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} \quad \text{..... ②}$$

とを比較する。ここで、下水汚泥脱水ケーキの熱操作の様な処理システムの便益については、処理の目的から考えていずれの代替システムをとっても便益は一定と考えて良いであろう。得られる便益が一定であるならば、システム間の経済性は耐久年数内の総費用 (処理コスト) のみによって評価出来ることになる。いま、耐久年数 n 年間で維持管理コスト (OM) が変化しないものとする、①式は、

$$TC = \sum_{t=1}^n \frac{OM}{(1+i)^t} + IC = OM \cdot \left\{ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right\} + IC \quad \text{..... ③}$$

となる。この③式の総処理コストによる評価は Middleton et al⁴⁾ によって下水処理システムの最適化研究において目的関数として用いられており、松田⁵⁾は③式による評価法を「現在価値法」(Net Present Worth)と呼んで下水処理プラントなどの公共施設の経済性評価手法とすることを提案している。この様に総費用 (TC) は経済性評価にとって重要な概念であるが、ここでは、投下資本の負担割合を明確にするため、③式の右辺を現価係数 $\{ (1+i)^n - 1 / i(1+i)^n \}$ で割った年間の処理コスト (AC) に変換する。すなわち、

$$AC = OM + \left\{ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right\} \cdot IC \quad \text{..... ④}$$

ここで、 $\{ i(1+i)^n / (1+i)^n - 1 \}$ は回収係数又は年間資本負担係数と呼ばれ、投下資本の年間に必要な回収割合又は年間処理コスト中に占める年間の資本費の負担割合を示す係数である。ただし、下水処理プラント建設の様な補助事業において、初期投資額 (IC) をどの様に設定するかには議論がある。初期投資のうち補助割合を α とすれば、担当する地方自治体の立場で経済評価をした場合の年間処理コストは、

$$AC = OM + (1-\alpha) \cdot \left\{ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right\} \cdot IC$$

$$= OM + \beta \cdot IC \quad \text{..... ⑤}$$

となり、 $\beta = (1-\alpha) \cdot \{ i(1+i)^n / (1+i)^n - 1 \}$ は年間自己資本負担係数と考えて良いであろう。(以下単に負担係数と略す)。

本文ではさらに、他のデーターと比較しやすい様に⑤式を年間処理量 (W) で割りつけて処理単価 C (円 / T-DS) に換算する。すなわち、経済性評価関数 C は次の様に定義される。

$$C = \frac{1}{W} \cdot (OM + \beta \cdot IC) \quad \text{..... ⑥}$$

さて、ここで利子率 (i) を 6.7%，耐久年数 (n) を 10 年の一定と置いて、補助割合 (α) に 0, 0.5, 0.9 及び 1.0 の 4 水準を選ぶと、これに伴って負担係数 β が 0.14, 0.07, 0.014, 及び 0 と定まるので、この 4 水準の負担係数の下で経済性の比較を行う。本文においてこの様な特定の負担係数を選定した理由は次の通りである。まず、 $\beta = 0$ は処理単価 (C) に投下資本 (建設費) を全く反映させない、あるいは、投下資本の全額補助 ($\alpha = 1.0$) を受けて維持管理費用 (OM) のみを評価対象とする考え方である。考え方としては一般的でないが、この値は極限としての意味を持っている。これに対して、 $\beta = 0.14$ は補助率 $\alpha = 0$ に対応する値で、投下資本に対して補助の無い場合、つまり経済性評価としては、最も一般的な考え方と言えよう。他方、 $\beta = 0.014$ 及び 0.07 は投下資本に対して国庫その他の補助がある場合を想定したもので、前者は補助率の高い場合 ($\alpha = 0.9$)、後者は投下資本の半額が補助で賄われる場合 ($\alpha = 0.5$) に相当する。汚泥処理プラントに対して、どの程度の α 又は β を想定すべきかについては、にわかには決し難い。例えば平岡ら²⁾はそのシステム評価において自己資本相当分を 1/16、すなわち補助率として 15/16 を適用している。又、松永ら¹⁾は経済性評価のパラメータを次の様に設定している。すなわち、彼等は処理原価として起債利子及び減価償却費及び現場管理費の合算値を用いるが、起債利子、原価償却費が建設費に係る費用となる。そして、機械電気設備を対象とした場合、本文の β 値に相当する処理原価中の建設費に係る係数は 0.59 と与えられる。更に、松田ら⁶⁾はメタン発酵プロセスの経済性評価において、本文と全く同じ考えに基づき $\alpha = 0$ 、 $\beta = 0.117$ を与えている。この様に α 又は β 値は考え方によってかなりの巾があり、経済性評価上は広い巾を用いた方が比較がより明確となるので、本文では上記の特定値を採用した。

尚、負担係数 β を設定する上で、利子率(i)及び耐久年数(n)に特定値を採用しているが、これらの絶対値にはあまり大きな意味はなく、ここでは負担係数 β の相対的な値に重きを置いている。

3. 経済性計算結果とその考察

システムの経済性計算のための設定条件を表1に又、この条件に基いた各システムの建設費(IC)と年間維持管理費(OM)の計算結果を図-2に示した。又、これらの結果から⑥式を用いて各システムの処理単価(C)が求められるが、これを図-3から図-6に示した。因みに維持管理費(OM)のみについては、松永ら¹⁾

表1 経済性計算のための条件

1. ユティリティ単価			
補助燃料費	A重油	60円/ℓ	
用水費	処理水	23円/㎡	
	市水	400円/㎡	(清缶剤含)
薬品費	苛性ソーダ	65円/kg (48%)	
脱硝費		500円/1,000 N㎡	
電力費	(受電, 回収共)	20円/kwhr	
灰処分費		10,000円/T-Ash	
2. 補修費	年間建設費の1.0~1.5%		
3. 人件費	500万円/年・人		
4. プラント運転時間	8,000 hr/年		
5. プラント建設費	50T-DS/日プラント一式		(土木, 建築費を含む)

図-2 各システムの建設費(IC)と年間維持管理費(OM)

図-3 システムの年間処理単価(システム1)

図-4 システムの年間処理単価(システム2)

図-5 システムの年間処理単価(システム3)

図-6 システムの年間処理単価(システム4)

は消化汚泥について濃縮から焼却までの汚泥処理原価を50,000～80,000円/T-DS、平岡ら²⁾は生汚泥の濃縮から焼却までの汚泥処理コストを約45,000円/T-DSと与えている。これらに対応する本解析の値は、濃縮、消化、脱水の各プロセスを除いてそれぞれ25,000～47,000円/T-DS及び20,000～30,000円/T-DSであり、ほぼ妥当な値と考えられる。

さて、図-3～図-6には経済性評価指標である処理単価(C)が2つの評価因子；ケーキ燃料価(qcl)及び負担係数(β)の関数として図示されており、処理単価(C)はqcl- β 平面上にオーバーハングする曲面によって表されている。各システム毎の曲面形状は互いに類似しており、低qcl-高 β 地点から高qcl-低 β 地点へ向かって降り勾配を持った曲面であるが、各曲面の持つ曲率の違いが各システムの経済性評価に変化を与えるのである。以下これらの関係について定量的考察を行う。

3.1 負担係数を変数とした場合の経済性評価

ケーキ燃料価(qcl)を一定とした場合の負担係数(β)と処理単価(C)との関係は、各曲面を β -C平面上に投影して出来るグラフで、ケーキ燃料価毎に整理したものを図-7から図-9に示したが、両者の関係はいずれも直線を与える。ケーキ燃料価及びシステムを特定すると、⑧式中の(OM/W)及び(IM/W)が常数となり処理単価(C)が負担係数(β)の一次関数となるからである。つまり、いずれのシステムにおいても一定のケーキ燃料価のもとで負担係数を増やせば処理単価は直線的に増加するということである。

図-7と図-8又は図-7と図-9とを比較すると、負担係数(β)と処理単価(C)との間に興味深い関係が見出される。すなわち、ケーキ燃料価の低い場合(qcl=-18kcal/kg)には、建設費(IC)が高くとも

図-7 負担係数と処理単価の関係 (qcl=-18kcal/kg)

図-8 負担係数と処理単価の関係 ((qcl=345 kcal/kg)

図-9 負担係数と処理単価の関係 (qcl=689 kcal/kg)

エネルギー効率の高いシステムが負担係数のほぼ全範囲に渡って処理単価が低く経済性が高い。ただし、高負担係数下では処理単価の差は少なくなる。これに対して、燃料価の高い領域では、ある負担係数の所で評価のほぼ等しくなる点が生じ、この等価点を境にシステムの評価が逆転し、高負担係数では、建設費(IC)が低く、より簡単なシステムが経済的に有利となって来る。いま図から経済性評価の等価点はqcl=345kcal/kgで $\beta=0.06\sim0.07$ 、qcl=689kcal/kgで $\beta=0.03\sim0.04$ と求められる。以上の事実は、現今の様に比較的燃料価の高いケーキが発生する状況下では、負担係数の考え方が今後の重要な検討課題であることを示唆するものである。

3.2 ケーキ燃料価を変数とした場合の経済性評価

前項とは逆に、負担係数(β)を一定とした場合のケーキ燃料価(qcl)と処理単価(C)との関係は図-3～図-6の各曲面をqcl-C平面上に投影したものであり、その一例を図-10に示した。一定の負担係数のもとでの燃料価の関係は、燃料価の増加に伴って処理単価は曲線的に減少する。

システム間の経済性評価については、ケーキ燃料価

図-10 ケーキ燃料価と処理単価の関係 ($\beta=0.07$)

を変数としてまとめると次の通りである。すなわち、負担係数が低い場合 ($\beta = 0, 0.014$) にはほぼケーキ燃料価の全範囲に渡って建設費 (IC) は高くともエネルギー効率の高いシステムの処理単価が低く経済性が高い結果を与えているが、高燃料価になると単価の差は縮まる。そして、負担係数が高い場合 ($\beta = 0.07, 0.14$) にはここでも評価の逆転が生じている。ただし、等価点あるいはシステム間の評価順位は前項程明確ではないが、大凡、高い負担係数の下では、燃料価が低い場合にエネルギー効率の高いシステムが経済的に有利で、燃料価が高くなると建設費 (IC) の低いシステムが有利となると言えよう。これらのことは、汚泥熱操作システムにあっては、「省エネルギー」あるいは「創エネルギー」を目的として複雑化したシステムよりも条件によって従来型のシステムの方が選好され得ることを示すものである。

3.3 発電システムの経済性評価

発電システムの経済性を評価するため、発電システムと非発電システムの処理単価差を評価関数 $\Delta C = C_{\text{system 2}} - C_{\text{system k}} (k=1, 3 \& 4) \dots \textcircled{7}$ とし、関数値が非負 ($\Delta C > 0$) の場合を発電システムが経済的に成立する条件とする。図-11から図-13に⑦式の関係を示したが、各図の $qcl-\beta$ 平面上に発電システムが成立する領域が図示されている。

3.3.1 システム1 (直投システム) での発電

図-11 から、本システムで発電が経済的に成立する領域は $qcl \geq 590 \text{ kcal/kg}$, $\beta < 0.85$ と極く限られた領

図-11 発電システムの経済性とその成立範囲 (システム1)

図-12 発電システムの経済性とその成立範囲 (システム3)

図-13 発電システムの経済性とその成立範囲 (システム4)

域である。この発電成立領域の意味するものは、ケーキ燃料価がシステムの自然点以上の高い値にある場合も、発電の可否は負担係数によって決定されるということである。すなわち、負担係数が低くければ発電を行うシステム（システム1）が経済的に有利であり、逆に負担係数が高い場合には発電を行わないシステム（システム2）が有利である。尚、システム1では発電をおこなわない場合にシステム2より経済的に有利な領域が $q_{cl}=345 \text{ kcal/kg}$ 、 $\beta=0.14$ を中心とした付近に存在するが、この領域ではシステム1では補燃をしておりシステム2よりエネルギー効率が低く、いわばエネルギー効率と経済性とがトレードオフ関係にあると言える。

3.3.2 システム3（乾燥システム）での発電

本システムでの発電成立領域の境界線は $q_{cl}-\beta$ 平面上、 $\beta<0.07$ で q_{cl} 軸に対して凸な曲線である（図-12）。つまり、本システムでは負担係数の高い領域では発電は経済的に全く成立せず、さらに $\beta=0$ においても $q_{cl}<40 \text{ kcal/kg}$ では成立しない。ただし、 $q_{cl}\geq 40 \text{ kcal/kg}$ では補燃領域でも負担係数が一定値以下であれば非発電システム（システム2）よりも発電システム（システム3）の方が経済的に有利である。つまり、条件によって補燃しても経済的には発電が成り立つことがあり、その可否は他の評価によらなければならない。

3.3.3 システム4（再脱水システム）での発電

本システムでは図-13に示されている様に、発電の経済性評価関数を表す曲面が低 q_{cl} -低 β 点から急勾配で高 q_{cl} -高 β 点へ落ち込む形状である。つまり、本システムによる発電の経済性は低 q_{cl} -低 β で著しく高く、逆に高 q_{cl} -高 β 点で著しく低く、システムを複雑にし建設費を掛けてエネルギー効率を高く採るシステムの特徴が良く表わされている。そして、 $q_{cl}-\beta$ 平面がこの曲面を切る発電成立領域の境界線は原点からみて凹な曲線である。この発電成立領域は他のシステムに比較して最も広く、かつ同一条件での経済性は極く一部の領域を除き、他のシステムに比較してすぐれている。

3.3.4 発電システムの経済性とその位置付

汚泥熱操作に伴う発電については、以上述べて来た様にその経済性は建設費の負担係数によってまとめることが出来よう。

まず、負担係数の低い範囲では、経済性評価にシステムの建設費が影響しないのでシステムのエネルギー

効率が発電システムの経済性に関係する。前報の結果からシステム2（非発電システム）のエネルギー効率は全て $\eta_h<0.24$ であるのに対して、 $\beta=0$ において発電の成立するシステムのそれはいずれも $\eta_h>0.24$ であり、エネルギー効率が低いことと発電が経済的に成立する（ $\Delta C>0$ ）ことが極めて良く一致する。つまり、経済性評価において維持管理費のみを評価対象とするならば、建設費に無関係にエネルギー効率の高いシステムを用いて発電を行うことが可能なのである。

これに対して、経済性評価において建設費の負担係数を高めれば発電システムの経済性とエネルギー効率の関係はくずれ、発電システムの経済的に成立する領域は当然せばめられる。例えば、本解析範囲の中程度の負担係数 $\beta=0.07$ ではシステム1及び3の発電は全く成立せず、システム4の $q_{cl}\leq 380 \text{ kcal/kg}$ の範囲で成立するのみとなる。この様に経済性評価の中である程度以上の建設費負担を考慮すると、経済的に発電を成立せしめるためにはシステム4（再脱水システム）の様な特定の複雑なシステムが必要となって来る。発電システムの経済性とシステム構成（ここでは、構成のシンプルさをすぐれたシステムと考える）とがトレードオフ関係にあると言えよう。そして、一般的な経済性評価とも言える $\beta=0.14$ で発電が経済的に成立するのはシステム4の極く限られた特定の範囲（ $q_{cl}\leq 100 \text{ kcal/kg}$ ）となり、この様な評価の下では、一般的にいうて発電システムが成立するとは言い難い状況である。ただし、注目すべき点はシステム4（再脱水システム）がケーキ燃料価（ q_{cl} ）の低い所でエネルギー的にも経済的にも大きなメリットを発揮することである。下水汚泥ケーキ燃料価の低いものとしては消化汚泥が挙げられるが、消化プロセスは汚泥濃度が高い場合にエネルギーメリットをもたらすことが明らかにされている⁷⁾。従って、高濃度消化とシステム4の様な熱操作を組み合わせるシステム構成は高い評価が予想される。現在 Los Angeles市 Hyperion 処理場で実施されつつある汚泥処理システムは、熱操作の前端プロセスに多重効用蒸発を用いているが、その考え方は上述と軌を一にするものである⁸⁾。しかし、ケーキ燃料価を与条件として熱操作システム以降を評価する場合の状況は前述の通りである。

以上の様に、汚泥熱操作システムにおける発電システムは経済性指標で評価する限り、その成立条件はあまり一般的なものではなく、かなりの余剰エネルギーが排出されても発電システムを普遍的なシステムとし

て位置付けることは困難である。つまり余剰エネルギーを有効エネルギーに転換し、創エネルギーシステムを構成する場合、現在のエネルギー事情の下での汚泥熱操作システムにあっては創出エネルギー価格が転換費用を上回りにくい状況にあるということである。

4. ま と め

選定した4つのモデルシステム(図-1)について経済性評価を行い、次の結論を得た。

システムの経済性はケーキ燃料価と建設費に係わる負担係数とを評価因子として評価することが出来、両因子の組合せによって経済的に選好されるシステムが決定される。すなわち、両因子の低い値の範囲では建設費に関係なくエネルギー効率の高いシステムが、両因子が高い値を採る場合にはよりシンプルなシステムが経済的にすぐれている。

発電システムについては、経済的にその成立範囲を広げるためには複雑なシステムが必要となり、それでも尚、現状では一般的な経済性評価因子の下では発電システムは成立しにくいと考えられる。

5. お わ り に

下水汚泥の新しい熱操作システムとして流動床炉を中心としたシステムが省エネルギーあるいは創エネルギーシステムとして検討され、一部は実用化される様になった。しかし、これらについては未だ充分評価、位置付けが行われておらず、それらへのアプローチの一つとしてこれらのシステムのエネルギー解析及び経

済性の評価を試みた。

システムの評価として、ここでは、上記の様に定量的に解析可能な項目を取り上げたが、システム評価には松永らが取り上げた様な多数の定性的な評価項目もあり、これが総合されて始めてより正確なシステム評価となる。さらに熱操作システムは元来汚泥処理システムの中の一つのサブシステムであり、汚泥処理システム全体の中での位置付けが必要である。この様な意味から定量的評価のみ行った今回の解析は熱操作システムの評価として必ずしも充分とは言えないが、今後の研究の端緒として役立ち得ればと考える次第である。

参 考 文 献

- 1) 松永一成他：「汚泥処理のシステム評価に関する研究」環境技術, 15, 1, 91; 2, 169; 3, 202 (1986)
- 2) 平岡正勝他：「熱変成メタン発酵システムのパイロット研究」下水道協会誌, 23, 264, 38, (1986)
- 3) 木下栄蔵：「計画数学入門」(啓学出版)(1984)
- 4) A. D. Middleton et. al : "Least design of activated sludge systems" Jour. WPCF, 48, 5, 889, (1980)
- 5) 松田智他：「メタン発酵プロセスの経済性評価」環境技術, 15, 8, 649 (1986)
- 6) 酒井伸一他：「汚泥処理システムのエネルギー最適化について」土木学会第41回年次学術講演概要集 II - 448, p.895, (1986)
- 7) R. T. ; Haug et al : "Energy Recovery and Optimization : The Hyperion Energy Recovery System", International Conference on Thermal Conversion of Municipal Sludge, Hartford, CT., March, 1983

製品ニュース

環境機器「電子集塵機」 Piシリーズ

アマノ㈱は、環境機器電子集塵機の新シリーズとして、インテリジェントコレクター(知能を持った集塵機)“Piシリーズ”を新発売。

“Piシリーズ”は情報化社会やファクトリオートメーション化の進行する中で、集塵機が自分の中にソフトウエアを持ち、メッセージ機能(デジタル表示)により作業者と対話し、状況を知らせ運転することで、効率的集塵の管理・省エネ・生産性向上を計ることを

最大の目的とし、ユーザーの志向(使い易さ)にマッチした集塵機である。

Piシリーズ定価

Pi 15	490,000
Pi 30	610,000
Pi 45	710,000
Pi 60	970,000

〔問い合わせ先〕

アマノ ㈱ 販売情報室
横浜市港北区大豆戸町275
TEL 045 (433) 1441