

(25) 水の供給と処理におけるエネルギー需要

○ 国立公害研究所 水質土壌環境部 田井 慎吾
中日本建設コンサルタント(株) 辻 喜礦

1 はじめに

石油の高価格、供給制約の下で石油代替エネルギーの開発利用が進められ、その補完的なものとして太陽エネルギー、バイオマスエネルギー、廃棄物エネルギーなどのローカル・エネルギーの開発利用と省エネルギーも検討され実施されている。上水道、下水道の分野でも省エネルギー、メタン発酵によるエネルギー回収が検討されている。これまで水の供給と処理におけるエネルギー消費は目立つほど大きなものではなかったが、将来における水需要量の増大と湖沼の富栄養化防止のための窒素、リンの処理などによって水の供給と処理における潜在的なエネルギー需要は大きいものと考えられる。このようなエネルギー需給の逼迫によるエネルギー消費の実態把握の必要性などのため各分野でエネルギー解析が盛んに行なわれている。これは環境汚染防止のための投資などの外部経済要因も含めてシステムやプロセスを評価するには金額ベースのみでは不十分でエネルギーベースでの評価が必要となったためである。本研究はこのような観点からわが国における将来の水の供給と処理に要するエネルギーを求めるとともに、下水汚泥のメタン発酵のエネルギー解析を行ない、さらに、これまでエントロピーによる水処理プロセスの評価に加えてエネルギーによる評価も試たものである。

2 水の供給と処理における運転用エネルギー消費

上下水道は都市の水システムの根幹をなしており、なかでも下水道は全国普及率が昭和55年度末で30%に過ぎず、今後の普及率の向上を考えると将来におけるエネルギー需要の潜在力を秘めたものである。表1に大都市における上下水道システムの運転に係る単位水量当りの電力、薬品およびエネルギー消費量を示した。上水道は浄水場3ヶ所(規模10万 m^3 /日～50万 m^3 /日)で約95万 m^3 /日、下水道は15ヶ所(規模4千 m^3 /日～20万 m^3 /日)で約100万 m^3 /日の処理能力である。上水道では配水に必要なエネルギーが大きく電力量の70%、エネルギー量の67%を占めている。また浄水工程におけるエネルギー消費のうち薬品は0.131MJ/ m^3 であるが、これは原水(木曽川)が良いためで、富栄養化の著しく進んでいる霞ヶ浦湖水を原水とした場合の薬品のエネルギー消費1.933MJ/ m^3 (活性炭を除くと0.53MJ/ m^3)にくらべて極めて小さい。一方、下水道のエネルギー消費のうち38%が汚泥処理であり、さらにそのうち41%を汚泥焼却のための重油が占めている。また下水処理のエネルギー消費のうち約70%がエアレーション用のブローアーによるものである。上下水道全体では、電力消費量は上水道、下水道共に0.3KWH/ m^3 であるが、エネルギー

表1 上下水道におけるエネルギー消費原単位
(N市 昭和54年度)

		単位水量当り使用量	単位水量当りエネルギー量 MJ/ m^3
上水道	取水電力	0.055 KWH/ m^3	0.567
	浄水電力	0.035 KWH/ m^3	0.361
	塩素	1.299 g/ m^3	0.064
	硫酸バク土	10.345 "	0.021
	PAC	0.671 "	0.002
	カ性ソーダ	0.964 "	0.036
	ソーダ灰	1.202 "	0.008
	小計	-	0.492
	配水電力	0.207 KWH/ m^3	2.132
	計	0.297 KWH/ m^3	3.193
下水道	下水処理電力	0.251 KWH/ m^3	2.585
	塩素	2.081 g/ m^3	0.099
	小計	-	2.684
	汚泥処理電力	0.053 KWH/ m^3	0.541
	塩化第二鉄	18.945 g/ m^3	0.227
	消石灰	25.327 "	0.165
	水	7.520 l/ m^3	0.024
	重油	0.017 "	0.671
	軽油	0.0003 "	0.013
	小計	-	1.641
	計	0.304 KWH/ m^3	4.325
合計		0.601 KWH/ m^3	7.516

1 KWH = 10.3 MJ, oil 1L = 39.5 MJ

一消費でみれば下水道は上水道の約 1.4 倍である。なお、表 1 から見るかぎり上水道における大副な省エネルギーは期待できないが、下水道においてはエアレーション用ブローア、汚泥脱水、汚泥焼却において改善の余地が残されている。また下水汚泥の嫌気性消化によるエネルギー回収もローカル・エネルギーの利用として期待できる。

上下水道のほか、水の供給と処理には用水として工業用水道、工業用水の自家処理および農業用水の取送水があり、廃水には工場廃水の回収処理、工場廃水処

理、浄化槽、し尿処理場などが考えられる。合併式浄化槽、除害施設、し尿処理場におけるエネルギー消費の実態調査から求めた電力およびエネルギー消費の原単位を表 2 に示した。実態調査のないものについては表 2 の備考欄のように原単位を仮定し、昭和 50 年における実績水量と国土庁の「長期水需給計画」による昭和 65 年の取水量ベースでの需要予測量とから昭和 65 年の水の供給と処理に要するエネルギーを算定し表 3 に示した。なお、N、P 処理については下水道、工場廃水のうちの生物処理、合併式浄化槽およびし尿処理場のそれぞれの廃水量の $\frac{1}{2}$ を実施するものとし、P 処理は脱リン塔によるものとした。

表 2 水処理の運転用のエネルギー原単位

	電力消費量 KWH/m ³	エネルギー消費量 MJ/m ³	備 考
上 水 道	0.297	3.191	表 1. 工業用水道、回収処理も同じ
下 水 道	0.303	4.323	表 1.
合併式浄化槽	1.149	12.062	(1), 工場廃水(生), 除害施設(生) 畜産廃水も同じ
し 尿 処 理 場	3.157	54.240	(1), 希釈水量(15倍)当り
"	(0.047)	(0.814)	(1), し尿 1 人当り
除 害 施 設	0.240	2.874	凝沈+砂ろ過, (1), 工場廃水も同じ
"	0.085	0.875	砂ろ過, (1)
取 水	0.050	0.515	表 1
下水の N 処理	0.149	1.530	活性汚泥法下水処理の $\frac{1}{2}$
下水の P 処理	0.085	0.875	脱リン塔
"	0.240	3.707	凝沈+砂ろ過

表 3 わが国の昭和 65 年における水の供給と処理におけるエネルギー需要

		昭和 50 年					昭和 65 年				
		水 量 x10 ⁶ m ³ /d	電 力 量		エ ネ ル ギ ー 量		水 量 x10 ⁶ m ³ /d	電 力 量		エ ネ ル ギ ー 量	
			原単位 KWH/m ³	消費量 x10 ⁶ KWH/d	原単位 MJ/m ³	消費量 x10 ⁶ MJ/d		原単位 KWH/m ³	消費量 x10 ⁶ KWH/d	原単位 MJ/m ³	消費量 x10 ⁶ MJ/d
用 水	上 水 道	33.8	0.30	10.14	3.19	107.82	57.9	0.30	17.37	3.19	184.70
	工業用水道	14.9	0.30	4.47	3.19	47.53	31.2	0.30	9.36	3.19	99.53
	自家処理	10.7	0.14	1.50	1.40	14.98	22.4	0.14	3.14	1.40	31.36
	無処理(取水)	178.1	0.05	8.91	0.52	92.61	213.9	0.05	10.70	0.52	111.23
	計	237.5		16.11		170.33	325.4		29.87		315.59
廃 水	回 収 処 理	90.3	0.30	27.09	3.19	288.06	263.2	0.30	78.96	3.19	839.61
	下 水 道	13.7	0.30	4.11	4.32	59.18	18.3	0.30	5.49	4.32	79.06
	下水道 (N, P 処理)	-	-	-	-	-	18.3	0.53	9.70	6.73	123.16
	除害施設(生物)	0.4	0.24	0.10	2.87	1.15	0.7	0.24	0.17	2.87	2.01
	除害施設(生物)	0.4	1.15	0.46	12.06	4.82	0.6	1.15	0.69	12.06	7.24
	工場廃水(生物)	18.8	0.24	4.51	2.87	53.96	32.1	0.24	7.70	2.87	92.13
	工場廃水(生物)	18.8	1.15	21.62	12.06	226.73	16.0	1.15	18.40	12.06	192.96
	工場廃水 (生, N, P)	-	-	-	-	-	16.0	1.38	22.08	14.47	231.52
	畜産廃水	0.8	1.15	0.92	12.06	9.65	0.8	1.15	0.92	12.06	9.65
	畜産廃水(N, P)	-	-	-	-	-	0.8	1.38	1.10	14.47	11.58
	合併式浄化槽	1.0	1.15	1.15	12.06	12.06	2.5	1.15	2.88	12.06	30.15
	合併式浄化槽 (N, P)	-	-	-	-	-	2.5	1.38	3.31	14.47	34.73
	し 尿 処 理	1.4	3.16	4.42	54.24	75.94	0.5	3.16	1.58	54.24	27.12
	し尿処理(N, P)	-	-	-	-	-	0.4	3.39	1.36	56.65	22.66
	計	145.7	-	64.38	-	731.55	371.4	-	154.34	-	1703.58
合 計		383.2	-	89.40	-	994.49	696.8	-	194.91	-	2130.40

昭和65年時点での下水道普及率を40%と仮定したが、昭和65年には年間電力消費量は55億KWHを越えており、昭和54年における年間22億KWHの2.5倍になっている。下水道の普及がさらに進み、N P処理を行う処理場が増えれば下水道のみで年間100億KWHを越えるのはそれほど遠い将来のことではない。

また表3から昭和65年における水の供給と処理に要する総エネルギーは年間7,776億MJとなり、昭和50年の2倍を越え、石油換算すると年間2,000万Kℓとなり昭和65年における「エネルギー需給長期見通し」におけるわが国全体の石油換算エネルギー消費量7億Kℓの2.8%表4 建設資材のエネルギー原単位を占めることになる。また、2,000万Kℓのうち80%に当る1,600万Kℓが廃水処理に係るものである。わが国の民生部門でのエネルギー消費は総消費量の約20%であり欧米先進国の32~36%にくらべるとはるかに低く、水の供給と処理に係るエネルギー消費の28%が多いか少ないかは議論の分れるところであるが、できるだけエネルギー消費を抑える必要はあろう。

		生産に係るエネルギー原単位
セメント		5,200 MJ/t
砂利		500 MJ/m ³
水		3 MJ/m ³
鉄鋼		26,300 MJ/t
ポンプ等機械		130,000 MJ/t

3 下水および汚泥処理施設の建設に係るエネルギー消費

水の供給と処理のためには2で求めた運転用のエネルギーのみでなく、たとえば水処理施設の建設に係る資材と建設に係るエネルギー消費がある。この建設に係るエネルギーも当然将来における水の供給と処理の潜在的なエネルギー需要となる。

「昭和50年生産業連関表によるエネルギー分析結果」(2)と「積算資料」とから求めた下水処理施設に要する建設資材の生産に係るエネルギー原単位を表4に示した。一方、建設された下水処理施設(活性汚泥法)、汚泥処理施設(規模、下水処理量100,000m³/日)の建設資

表5 下水処理施設の建設に係るエネルギー消費原単位
100,000 m³/d

		使用料	エネルギー量 x10 ³ MJ	単位下水当りエネルギー量 MJ/m ³ /d
建設 資材	セメント	25,238 t	131,238	1,312.38
	砂利	97,346 m ³	46,673	486.73
	水	46,150 m ³	138	1.38
	鉄鋼	10,168 t	267,418	2,674.18
	機械	210 t	27,300	273.00
計		—	474,767	4,747.67
建設		—	474,767	4,747.67
合計		—	949,534	9,495.34

$9,495.34 \times (20 \times 365) = 1.300 \text{ MJ/m}^3$

材の量を求め表4の原単位とから下水処理施設および汚泥処理施設の単位下水当りの建設資材および建設(直接、輸送、仮設資材)のエネルギー消費を算定し、それぞれ表5、表6に示した。なお、建設工事に係るエネルギーは「建設白書」(3)を参考に全体の1/2とした。

汚泥処理を濃縮、脱水までとすると下水当り約1万MJとなり、表3において昭和65

表6 汚泥処理施設の建設に係るエネルギー消費原単位

100,000 m³/d

		濃縮・脱水			濃縮・消化・脱水・発電		
		使用量	エネルギー量 x10 ³ MJ	単位下水当り エネルギー量 MJ/m ³ /d	使用量	エネルギー量 x10 ³ MJ	単位下水当り エネルギー量 MJ/m ³ /d
建設 資材	セメント	672 t	3,494	34.94	1,939 t	10,083	100.83
	砂利	2,575 m ³	1,288	12.88	7,425 m ³	3,713	37.13
	水	1,230 m ³	4	0.04	3,548 m ³	11	0.11
	鉄鋼	200 t	5,260	52.60	939 t	24,696	246.96
	機械	175 t	22,750	227.50	445 t	57,850	578.50
計		—	32,796	327.96	—	96,353	963.53
建設		—	32,796	327.96	—	96,353	963.53
合計		—	65,592	655.92	—	192,706	1,927.06

$655.92 \div (20 \times 365) = 0.090 \text{ MJ/m}^3$ $1,927.06 \div (20 \times 365) = 0.264 \text{ MJ/m}^3$

年まで下水道が年間150万m³/日づつ建設すると仮定すると、下水道のみで年間150億MJ、石油量に換算して年間38万Kℓとなる。水の供給と処理に係る施設全体については恐らく1,000万Kℓ/年に近い建設用のエネルギーになると予想され、省エネルギーは運転用においてのみでなく、施設の建設の時点から考える必要がある。

下水道の分野で発生する汚泥の嫌気性消化がエネルギー回収という面から見直され建設が進められている。消化ガスによるエネルギー量は下水処理場(汚泥処理も含めて)の30%ていどを補うことができるといわれており(4)、表8の試算でも同様な値が得られている。しかし、消化ガスを得、それによって発電するためには当然のことながら消化槽およびその付帯設備、ガスタンク、発電機を建設しなければならない。すなわ

ち、消化ガスによるエネルギー回収を評価するためには投入したエネルギーが回収されるに要する年数を求める必要がある。

表7に佐賀終末処理場の概要(5)から求めた汚泥処理に係る運転用エネルギーを示した。これと表6の建設用エネルギーとから濃縮-消化-脱水-ガス発電(A)と濃縮-脱水(B)の差、すなわち消化を行うことによる建設と運転に要するエネルギーの増加分を表8に示した。投入汚泥の固形物当りガス発生量を250 m^3/t とし、消化ガスのエネルギー含量を23 MJ/ m^3 とすると、下水処理量100,000 m^3 /日の処理場では1日当り86,250 MJのエネルギーが回収できる。これから消化に伴う運転用エネルギー20,250 MJを差引と、消化槽などの建設に係るエネルギーを回収するためには、約5年を要することになる。

表7 汚泥処理の運転用エネルギー消費

100,000 m^3/d						
	濃縮・脱水			濃縮・消化・脱水		
	使用量	エネルギー消費量 MJ/d	単位下水当りエネルギー消費量 MJ/ m^3	使用量	エネルギー消費量 MJ/d	単位下水当りエネルギー消費量 MJ/ m^3
電気	1,275 KWH/d	13,133	0.133	3,272 KWH/d	33,702	0.337
薬品	1,069 kg/d	2,673	0.027	1,069 kg/d	2,673	0.027
計	—	15,806	0.158	—	36,375	0.364

表8 下水汚泥消化のエネルギー解析

	運転エネルギー MJ/d	建設エネルギー $\times 10^3$ MJ
A 濃縮、消化、脱水、発電	36,400	192,706
B 濃縮、脱水	15,800	65,592
A - B	20,600	127,114

100,000 m^3/d
(sludge 15 t/d)

消化ガスエネルギー、 $15(t/d) \times 250(m^3/t) \times 23(MJ/m^3) = 86,250 MJ/d$

回収年数 $\frac{127,114,000 (MJ)}{(86,250 - 20,600)(MJ/d) \times 365(d/d)} = 5.3 y$

下水処理(汚泥脱水まで)に占める消化ガスエネルギー $\frac{86,250 (MJ/d) \times 100}{2,684(MJ/m^3) \times 100,000(m^3/d) + 36,400(MJ/d)} = 28.3 \%$

下水処理(焼却まで)に占める消化ガスエネルギー $\frac{86,250 (MJ/d) \times 100}{268,400(MJ/d) + 36,400(MJ/d) + 50,325(MJ/d)} = 24.3 \%$

下水汚泥の嫌気性消化は汚泥の減量化、安定化あるいは脱水性の向上など付随的な効果もあるが、エネルギー収支という点から見れば、小規模の場合は単位下水当りの建設および運転用のエネルギーが大きくなり、また消化ガスの発生量の変動も大きくなると思われることから、回収年数はさらに長くなり得策ではない。なお、表6で消化ガスによる発電は自家発電機(重油)として機械重量を求めた。

4 水処理プロセスのエネルギー解析

各種プロセスの省エネルギーのためには積極的なエネルギー利用の効率化をはかるべきであり、たとえば火力発電プロセスからの排熱のような熱エネルギーの有効利用が必要である。この熱エネルギーの有効利用を含めてプロセスを評価する指標として有効エネルギー(available energy あるいはexergy)が用いられるようになったが、現在では熱エネルギーのみでなく、力学エネルギー、化学エネルギーについても有効エネルギーの概念が広がられている。

有効エネルギーは熱とか電気などのエネルギーから理論的、可逆的に取り出しうる最大の有用な仕事に相当するエネルギーであり、システムの外界を基準にして測る相対量である。すなわち外界と平衡になった場合は有効エネルギーの値は0であり、外界と平衡にない状態や物質は有効エネルギーが正の値を持つ。したがって外界の取り方が問題となるが、水処理プロセスの場合は大気圧(1.033 Kg/cm^2)、外気温(たとえば25℃=298K)、純水(25℃、1気圧の自由エネルギー306.6 KJ/mol)を基準とするのがよいであろう。大気圧をP、外気温をT。とすると熱量と圧力による有効エネルギーは

熱量による有効エネルギー； $Aq = q \frac{T-T_0}{T} = Cp \cdot \rho \cdot Q (T-T_0) (KJ/sec) \quad \text{--- ①}$

圧力による有効エネルギー； $Ap = Q (P-P_0) (KJ/sec) \quad \text{--- ②}$

$$\text{水溶液の有効エネルギー} ; Ag = (G - G_0) \cdot Q' = Q'(-\mu_0 + \sum \mu_i X_i + RT_0 \sum X_i \ln X_i)$$

(KJ/sec) ——— ③

で表わされる。ここで、 q は熱量 (KJ/sec)、 T 、 P はそれぞれ系の温度 (K)、圧力 (Kg/cm²)、 C_p は定圧モル熱容量 (水 ; 4.184 KJ/kg・K)、 ρ は密度 (水 ; 10³ kg/m³)、 G_0 と G はそれぞれ水と水溶液の自由エネルギー (KJ/mol・K)、 μ_0 と μ_i はそれぞれ水と水溶液中の i 成分の化学ポテンシャル (KJ/mol・K) X_i は i 成分のモル分率、 R は気体定数 (8.314 J/mol・K)、 Q は流量 (m³/sec)、 Q' は流量 (mol/sec) である。

図 1 に逆浸透膜法による廃水脱塩プロセスと運転データを示した。原水の TS 373 mg/ℓ が 25 mg/ℓ まで脱塩され、回収率は 73.6% である。また、揚水ポンプと高圧ポンプによって原水に加えられた圧力はポンプによる加圧、逆浸透膜の透過、バルブによる減圧、分岐管および砂ろ過などで熱に変わり、脱塩水と濃縮水によって持ち出されるとともに、それぞれの過程で外気中に散逸される。図 1 には①、②式によって求めた熱と圧力による有効エネルギーを示したが圧力が熱エネルギーに変る様子が良くわかる。一方、原水、脱塩水、濃縮水の有効エネルギーは TS を NaCl と仮定してモル分率、化学ポテンシャルを求め③式によって計算し表 9 に示した。脱塩によって原水の有効エネルギー -0.28 KJ/sec を 0.03 KJ/sec 減少させたことになる。しかし、水処理はエントロピーを減少させる操作であることを考えるならば水の有効エネルギーの減少というのは受け入れがたい。表 9 にはエントロピーの変化も示したが、脱塩によって原水のエントロピーを 0.11 J/sec・K 減少させたことになる。ところで有効エネルギーの効率

図 1 逆浸透膜法による廃水脱塩プロセスのフローシートと運転データ

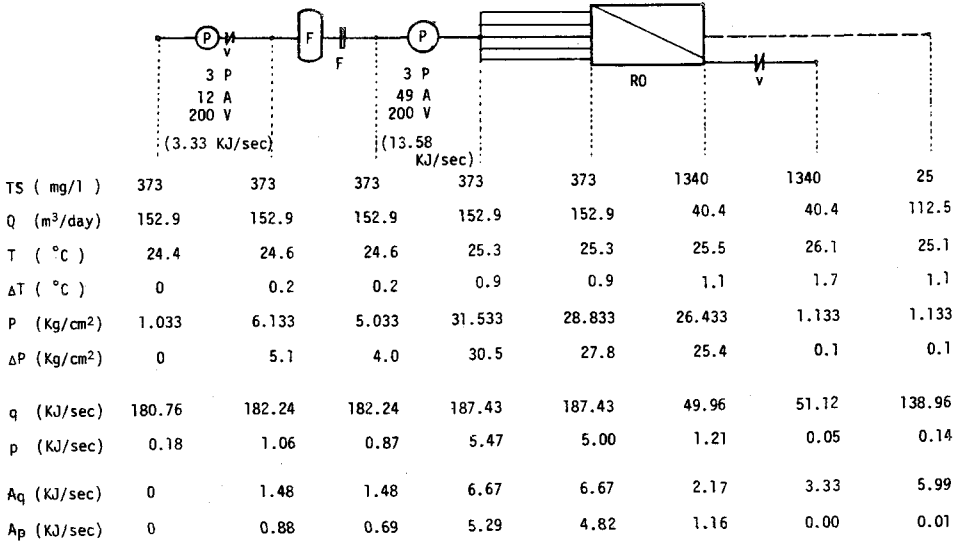


表 9 逆浸透膜法による水の自由エネルギー、有効エネルギー、エントロピーの変化

$$\eta_A = \frac{\text{製品の有効エネルギー}}{\text{供給された有効エネルギー}}$$

で表わされる。供給された有効エネルギーは電力による 16.91 KJ/sec と原水の有効エネルギー -0.28 KJ/sec の和 16.63 KJ/sec であり、製品の有効エネルギーは脱塩水と濃縮水の和 9.08 KJ/sec であるから

		feed	concentrate	permeate
Gibbs free energy ; ΔG	water (KJ/sec)	-30,146	-7,969	-22,177
	TS "	-4.88	-4.63	-0.24
	total "	-30,151	-7,974	-22,177
Gibbs free energy of mixing ; ΔG ^M		-0.28	-0.23	-0.02
available energy ; Ag		-0.28	-0.23	-0.02
standard entropy ; S	water (J/sec.K)	6,876.50	1,817.74	5,058.76
	TS "	0.82	0.77	0.04
	total "	6,877.32	1,818.51	5,058.80
entropy of mixing ; ΔS ^M		0.95	0.78	0.06

図 2 逆浸透膜法による廃水脱塩プロセスのエネルギー、エントロピー収支

$\eta_A = 54.6 \%$ となる。

しかし、図 2 (a) のように脱塩水、濃縮水の持つ熱と圧力による有効エネルギーは外界とあまり差がないため実際上役に立たない。したがってプロセス全体の効率は

$$\eta_g = \frac{\Delta G}{\Delta E - \Delta p - \Delta q}$$

から $\eta_g = 0.4\%$ (膜だけの効率は 1.4%) に著しく低くなる。

図 2 (b) にはエントロピーの収支を示したが、加えられた電気エネルギーのうち 7.55 KJ/sec が散逸されたのであるからプロセスの内部エントロピー生成 (ΔiS) は $25.39 \text{ J/sec} \cdot \text{K}$ である。したがって効率は

$$\eta_s = \frac{|\Delta S|}{\Delta iS + |\Delta S|}$$

から 0.4% (膜のみの効率 1.4%) となり、自由エネルギーの変化に着目した η_g と同じ値となる。

このように有効エネルギーの考え方は排熱が高温である場合は有効であるが一般の水処理プロセスの評価には向かないことがわかる。なお、上の逆浸透膜法では濃縮水の残圧を揚水ポンプの動力に利用することによる省エネルギーは可能である。

5 おわりに

水の供給と処理は将来におけるエネルギー需要の大きな潜在力を秘めていることを示したが、このエネルギーの供給を容易ならしめるためには水処理プロセスでの省エネルギー努力が必要である。下水汚泥からのエネルギー回収は有効な手法であるが、RO の例に示したような各プロセスのエネルギー解析が必要である。

参考文献

- (1) 田井ほか「水処理におけるエネルギー消費」第 3 回京大環境工シンポ講演論文集 20~25 (1981)
- (2) 茅ほか「エネルギー・アナリスとその方法」エネルギー・資源 Vol 2, No 4 45~52 (1981)
- (3) 建設省「建設白書, 昭和 55 年度版」181~185 (1980)
- (4) 小堀ほか「汚泥消化によるエネルギーの回収に関する調査」土研、下水道関係調査研究年報 (1979)
- (5) 石丸日出雄「佐賀市佐賀終末処理場の概要、下水道協会誌 Vol 18 No 203, 46~50 (1981)

