

多目的性を考慮した 下水汚泥処理システム更新計画の評価

中西 有紀¹・中久保 豊彦²・大野 浩一³・東海 明宏⁴

¹学生会員 大阪大学大学院博士前期課程 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail:nakanishi@em.see.eng.osaka-u.ac.jp

²学生会員 大阪大学大学院博士後期課程 工学研究科 (同上)

³正会員 大阪大学大学院准教授 工学研究科 (同上)

⁴正会員 大阪大学大学院教授 工学研究科 (同上)

下水汚泥に含有されるリンの回収、有機分のエネルギー利用、温室効果ガス (GHG) 排出量の削減に向け、資源循環型の汚泥処理システムへ更新することが望まれている。また、更新コストの低減も重要な技術選択基準となる。そこで本研究では、下水汚泥資源化技術導入ケースを4つ (Ⅱ; 通常焼却+灰アルカリ抽出法, Ⅲ; コンポスト, Ⅳ; 高温焼却+灰アルカリ抽出法, Ⅴ; 炭化+MAP法) 設定し、運用時のエネルギー消費量, GHG排出量, リン回収量, コストの4指標をとりあげ、ケーススタディを通じて比較評価した。ケーススタディにおいては、実際の処理区域を対象として、計画目標年次を2035年とし人口の変化ならびに発生汚泥量を与件として解析を行った。その結果、各ケースにおいて、今後の技術の進化・普及促進等を通じた技術変数等の更新はあるものの、今回の設定条件下における、エネルギー消費量, GHG排出量, リン回収量の間のトレードオフの関係を明らかにすることができた。

Key Words : recycling of sewage sludge, energy consumption, Greenhouse gas, phosphorous recovery, cost

1. はじめに

下水汚泥は有機分を多く含有するバイオマスエネルギー源であるが、含水率が高く扱いづらいため汚泥処理において多くの温室効果ガス (GHG) を排出している。1990 年以降、埋立処分場における埋立処分量の低減に向け汚泥焼却炉の整備を進めた結果、2006 年において、下水汚泥焼却過程で発生する N_2O の排出量は 1990 年比で約 93%、汚泥処理に要する電力に起因する CO_2 も 93% 増加しており¹⁾、汚泥処理においても GHG 排出抑制が必要とされてきた。

現状ではバイオガス・汚泥燃料としてエネルギー利用されている割合は 1 割程度にとどまっており²⁾、エネルギー源という観点では十分に利活用されていない。しかし地球温暖化対策の一環としてバイオマス・ニッポン戦略の中でも、「マテリアル利用だけでなく、エネルギー利用など一層の効率的な利活用が期待される」など、そのエネルギー利活用への期待は高まってきている³⁾。

また、近年の世界的なリン資源枯渇、輸出規制の危機に対応するため、全消費量を輸入に依存する日本におい

てリンを回収・活用することは急務であり、全輸入量の約 1 割を占める下水道からのリン回収が期待されている³⁾。

以上の背景から、下水汚泥処理システムの更新時期を迎える自治体には、地球温暖化防止・エネルギー消費量の削減・リン回収など複数の目的を達成することが求められる。また、更新計画の立案にあたりコストも重要な検討事項となる。現在、様々な循環利用システムが実証・運用段階を迎えているが、全ての指標において秀でた技術は存在しない。例えば、高温焼却法と炭化の技術選択に対し GHG 排出量と運用時コストの間でトレードオフが生じている⁴⁾。このようなトレードオフの下で意思決定を行わなければならないのが現状である。そこで本研究では、リン資源回収ができ、エネルギー利用、マテリアル利用を通じて環境負荷の低減が可能な下水汚泥処理システム更新計画を設計し、システム運用時のリン回収量, エネルギー消費量, GHG 排出量, コストの 4 指標で評価し、ケーススタディを通じて、多目的性を考慮した技術選択について考察することを目的とした。

2. 下水汚泥処理システム更新ケースの設定

エネルギー消費量、GHG 排出量の少ない汚泥変換技術と、実用段階に入っているリン回収技術を組み合わせ、表-1 に示した 5 つのケースを設定した。汚泥変換技術間の比較に焦点を当てるため、水処理法は標準活性汚泥法で統一した。ケースⅠは現在最も普及しているベースケースとして設定した。以下に各ケースで設定した技術の概要を説明する。

a) 汚泥高温焼却

流動焼却炉において燃焼温度を 800℃から 850℃に上げることにより、CO₂ の 310 倍の温室効果を有する N₂O を約 6 割削減することが可能であるとされており⁹⁾、燃料消費の増加に伴う CO₂ 排出量の増加を差し引いてもトータルでの GHG 排出量を軽減できる。ケースⅣにおいて、焼却灰を原料としたリン回収技術と組み合わせ採用した。

b) 焼却灰中リン回収（灰アルカリ抽出法）

灰アルカリ抽出法は、下水汚泥焼却灰中にはリンが高濃度で含まれており、その回収方法は主に酸を用いて焼却灰からリンを抽出させ、リン酸カルシウムまたは液肥として回収する方法である⁹⁾。回収量あたりの設備が小さくなる点、抽出液を循環して再利用する点に特徴がある。ケースⅡ、Ⅳでは、水酸化ナトリウム水溶液を用いてリンを溶出させ、後者のリン酸カルシウムとして資源化する方法を想定した。

c) コンポスト

コンポスト化過程において有機物中に含まれるリンは分解されずほぼ全量がコンポスト中に堆積するとされており⁷⁾、高効率でリンの回収が可能である。また、処理エネルギーが比較的に少ないことや、減容化が可能であること、下水汚泥のもつ独特の汚物感や臭気が軽減され取り扱いしやすくなることなどが長所として挙げられている⁸⁾。

表-1 ケース設定

	汚泥変換技術	リン回収技術
I	通常焼却	—
II	通常焼却	灰アルカリ抽出法 (b)
III	コンポスト化 (c)	
IV	高温焼却 (a)	灰アルカリ抽出法 (b)
V	炭化 (d)	MAP法(e)

d) 汚泥炭化技術（熱分解燃料化技術）

汚泥を炭化し再生品を石炭代替燃料として火力発電所で使用することにより下水汚泥の持つエネルギーを有効利用できる技術である。ケースⅤにおいて、脱水ろ液からリンを回収する技術と組み合わせ採用した。

e) 排水中リン回収法（MAP 法）

リン濃度の高い嫌気性消化液または脱水ろ液を対象にアンモニウムイオン、マグネシウムイオンを添加しリン酸マグネシウム六水和物（MAP）を生成する方法である。ケースⅤにおいて脱水ろ液からリン酸を回収するものとした。

3. 下水汚泥処理システムの比較評価方法

(1) 更新計画の設計

本研究では、大阪府吹田市の正雀下水処理場を対象地とした。計画面積は 458 ha⁹⁾、処理人口は 63,100 人⁹⁾の処理区である。施設老朽化が進行し更新検討の優先順位が高く、雨水排除方式は分流式で生活排水割合が高いため対象地に選定した。

計画目標年次は日本下水道協会¹⁰⁾に従い現在から 25 年後の 2035 年とし、人口の将来変化を踏まえて処理規模を以下のように設定した。まず 2035 年における吹田市の将来人口推計値¹¹⁾に、現状での吹田市人口に対する正雀下水処理場処理区域人口の比率を乗じて、処理区内人口を推定した。なお、この比率は過去 10 年間の処理区内人口をトレンド予測により求めた。

次に、計画処理流入水量、計画流入水質は計画処理区内人口に表-2 に示す生活污水量原単位、発生汚濁負荷原単位を乗じて算出した。ただし、汎用性のある更新計画にするため、処理水は地域によらず遍在する生活排水のみを対象とした。

下水汚泥発生量は、日本下水道協会⁴⁾に従い、汚泥処理施設全体の固形物のフローをもとに汚泥の含水率を考慮して設定した。脱水汚泥の含水率は 80 %¹¹⁾とした。

以上の推算手順により、2035年度の処理人口は34,665 人となり、脱水汚泥3,096.4 t-wet/y（固形物量：577.0 t-dry/y）ならびに下水処理場への流入リン量15 t-P/yの利活用を機能単位として、更新ケースの比較評価を行った。

表-2 生活污水の発生原単位ならびに汚濁負荷原単位

	排水量 [L/人・d]	BOD [g/人・d]	COD [g/人・d]	SS [g/人・d]	T-N [g/人・d]	T-P [g/人・d]	出典
生活排水	250	47	33	38	11	1.2	—
生活雑排水	200	29	13	18	2	0.3	12)、13)
し尿	50	18	20	20	9	0.9	10)

(2) エネルギー消費量の推計

下水汚泥処理場および炭化汚泥有効利用地における最終エネルギー消費量を脱水汚泥変換過程、リン回収過程、汚泥燃料利用過程を対象に推計した。表-3 に汚泥変換過程ならびにリン回収過程における電力、燃料、薬品等の投入原単位を示す。各々の投入量に対して、電力・燃料は表-4 の発熱量原単位を乗じてエネルギー消費量に換算し、薬品は製造に係るエネルギー消費量を考慮した原単位（表-4）を乗じてエネルギー消費量を算定した。なお、電力は2次エネルギー（1 kWh=3.6 MJ）で換算した。

(3) 温室効果ガス排出量の推計

脱水汚泥変換過程、リン回収過程、残渣処理過程、リン肥料製造過程、汚泥燃料利用過程をバウンダリーにとり、処理過程ごとに電力、燃料、薬品の投入量を表-3より算出しCO₂排出原単位（表-4）を各々に乗じて温室効果ガス排出量を推計した。なお、電力のCO₂排出原単位はケーススタディの対象地に電力を供給する関西電力の値を用いた。また、汚泥変換プロセスで発生するCH₄、N₂Oは表-3に示すように設定し、各々の地球温暖化係数21、310¹⁵を乗じてCO₂排出量に換算した。

表-3 各処理過程の算出パラメータ

処理過程			単位	値	出典	
通常焼却	エネルギー消費量	電力投入量/脱水汚泥投入量	kWh/t-wet	110	(14)	
		A重油投入量/脱水汚泥投入量	GJ/t-wet	0.821	(14)	
	CH ₄ 、N ₂ O発生原単位	CH ₄ 排出量/脱水汚泥投入量	t-CH ₄ /t-wet	9.7 × 10 ⁻⁷	(15)	
		N ₂ O排出/脱水汚泥投入量	t-N ₂ O/t-wet	0.00151	(15)	
	薬品消費原単位	水酸化ナトリウム水溶液	kg/t-wet	11.5	(7)	
	水	kg/t-wet	38000	(7)		
高温焼却	エネルギー消費量	電力投入量/脱水汚泥投入量	kWh/t-wet	116.6	(14)	
		A重油消費/脱水汚泥投入量	GJ/t-wet	1.11	(14)	
	CH ₄ 、N ₂ O発生原単位	CH ₄ 排出量/脱水汚泥投入量	t-CH ₄ /t-wet	9.7 × 10 ⁻⁷	(15)	
		N ₂ O排出/脱水汚泥投入量	t-N ₂ O/t-wet	0.000615	(15)	
	薬品消費原単位	水酸化ナトリウム水溶液	kg/t-wet	11.5	(15)	
	水	kg/t-wet	38000	(14)		
汚泥コンポスト	汚泥コンポスト	有機物分解率（脱水汚泥→コンポスト）	-	0.222	(16)	
	エネルギー消費量	電力投入量/脱水汚泥投入量	kWh/t-wet	63.7	(17)	
		A重油投入量/脱水汚泥投入量	GJ/t-wet	0.191	(17)	
	資材投入原単位	次亜塩素酸ナトリウム水溶液	kg/t-wet	8.0	(7)	
		水酸化ナトリウム水溶液(20%)	kg/t-wet	6.0	(7)	
		木チップ	m ³ /t-wet	0.025	(7)	
		硫酸	kg/t-wet	27	(7)	
	堆肥化過程のP収支	P回収率	-	1.0	(17)	
焼却灰中アルカリ抽出リン回収	リン酸塩産出量	CH ₄ 排出量/脱水汚泥投入量	t-CH ₄ /t-wet	0.004	(15)	
		N ₂ O排出/脱水汚泥投入量	t-N ₂ O/t-wet	0.0003	(15)	
	脱リン灰算出量	焼却灰中リンからのリン回収率	-	0.64	(18)	
	焼却灰発生量	リン酸塩濃度	%(P)	13.1	(19)	
	電力消費量	脱リン灰/焼却灰	t/t-ash	0.76	(19)	
MAP法	リン回収率	焼却灰/流入水量	t/m ³	3.4 × 10 ⁻⁵	(14)	
		電力使用量/回収リン量	kWh/kg-P	1.22	(14)	
	リン回収量	資源投入原単位(灰量あたり)	消石灰	kg/t-ash	431	(19)
		水酸化ナトリウム水溶液	kg/t-ash	121	(19)	
		硫酸	kg/t-ash	30.0	(19)	
炭化	エネルギー消費量	リン回収率	-	0.8	(18)	
		電力消費量	電力使用量/回収リン量	kWh/kg-P	7.08	(18)
	炭化汚泥有効利用量	資材投入量原単位(回収リン量あた)	水酸化マグネシウム	kg/kg-P	1.03	(18)
			硫酸	kg/kg-P	3.62	(20)
	資源投入原単位	電力投入量/脱水汚泥投入量	kWh/t-wet	117	(21)	
		A重油投入量/脱水汚泥投入量	GJ/t-wet	1.48	(21)	
		炭化物産出量/脱水汚泥投入量	t-wet/t-wet	0.087	(21)	
		炭化物発熱量	GJ/t-wet	13.0	(21)	
CH ₄ 、N ₂ O発生原単位	ボイラ薬品	kg/t-ds	0.014	(21)		
	水酸化ナトリウム水溶液	kg/t-ds	14.0	(21)		
	工業用水	kg/t-ds	145	(21)		
	CH ₄ 排出量/脱水汚泥投入量	t-CH ₄ /t-wet	0	(14)		
埋立	エネルギー消費量	N ₂ O排出/脱水汚泥投入量	t-N ₂ O/t-wet	0.00035	(14)	
		電力投入量/埋立灰	kWh/t-ash	58.6	(22)	
	資源投入量原単位	軽油投入量/埋立灰	kl/t-ash	0.00062	(22)	
		水酸化ナトリウム/埋立灰	t/t-ash	0.053	(22)	

表-4 エネルギー消費量原単位, CO₂排出量原単位, コスト原単位

		エネルギー消費原単位			CO ₂ 排出原単位			コスト原単位		
		単位	値	出典	単位	値	出典	単位	値	出典
燃料	A重油	GJ/kl	39.1	(23)	t-CO ₂ /GJ	0.069	(23)	円/L	66	(28)
	一般炭				t-CO ₂ /GJ	0.088	(23)			
	電力	GJ/kWh	0.0036	(23)	t-CO ₂ /kWh	0.00035	(23)	円/kWh	15	(27)
資材・薬品	硫酸	GJ/kg	0.0020	(24)	t-CO ₂ /t	0.034	(25)	円/kg	20	(7)
	水酸化マグネシウム	GJ/kg	0.0069	(24)	t-CO ₂ /t	0.348	(26)	円/kg	23	(29)
	水酸化カルシウム(消石灰)	GJ/kg	0.0018	(24)	t-CO ₂ /t	0.447	(24)	円/kg	24	(7)
	水酸化ナトリウム	GJ/kg	0.0115	(24)	t-CO ₂ /t	0.671	(26)	円/kg	30	(29)
	次亜塩素酸ナトリウム	GJ/kg	0.0038	(30)	t-CO ₂ /t	0.32	(26)	円/kg	40	(7)
	木チップ	GJ/kg	0.31	(22)	t-CO ₂ /t	0.65	(7)	円/m ³	7000	(7)
	上水道	GJ/kg	0.0066	(24)	t-CO ₂ /t	0.002	(15)	円/L	0.0013	(30)

(4) リン回収量の推計

下水処理場に流入したリンは水処理過程において標準活性汚泥法の場合 3 割程度²⁹⁾が初沈汚泥として除去される。その後の処理過程においても同様にリン含有量は処理過程を経るごとに除去・移行により変化するため、大下ら²⁹⁾にないリンのフローを収支式を立て脱水汚泥中のリン量 (P_i) を算定した。ケースⅡ～Ⅴについて、リン回収プロセスに流入するリン量 ($P_{II} \sim P_V$) とリン回収量の関係式は式(1)～(3)のように表せる。リン除去率または回収量の各パラメータは記号も含めて表-5 に示した。

$$P_{II} = P_{IV} = \tau_p \times \theta_p \times P_i \quad (1)$$

$$P_{III} = \eta_p \times P_i \quad (2)$$

$$P_V = \kappa_p \times (1 - \xi_p) \div \xi_p \times P_i \quad (3)$$

(5) コストの推計

廃棄段階を除き建設段階、運用段階のコストを、維持管理費（電力・燃料のエネルギー消費に伴うコスト、薬品費、メンテナンス費、人件費）、設備固定費、資源化製品売却収入、残渣処理費に分けて過程ごとに算定した。電力・燃料のエネルギー消費に伴うコスト、薬品費は GHG 排出量と同様に、各消費量に表-4 に示したコスト原単位を乗じて算出した。

焼却施設、コンポスト施設については、建設費および人件費を文献²⁹⁾より費用関数を用いて推定し、メンテナンス費は建設費の 1.8%²⁷⁾とした。設備固定費は、式(4)～(6)により算出した。灰アルカリ抽出設備については設備固定費、維持管理費の値を焼却灰 1 t あたり 7,463 円³¹⁾、19,354 円³¹⁾、炭化設備は脱水汚泥 1 t あたり 9,344 円²¹⁾、18,031 円²¹⁾とした。MAP 法設備については建設費およ

表-5 リン回収量の推計に用いるパラメータ

処理過程	記号	値	出典
脱水(加圧)	ζ_p	(脱水汚泥中 T-P)/(濃縮汚泥中 T-P)	98% (11)
焼却 (流動床)	θ_p	(焼却灰中 T-P)/(脱水汚泥中 T-P)	78% (11)
コンポスト	η_p	TP 回収率	100% (11)
焼却灰中 リン回収	ι_p	焼却灰中リンからの リン回収率	64% (16)
MAP 施設	κ_p	排水ろ液中リンから のリン回収率	80% (16)

表-6 売却単価、残渣処分単価

	単位	値	出典
売却費	コンポスト	円/20kg 袋詰め	400 (7)
	リン酸塩	円/灰 1 t	18900 (31)
	脱リン灰	円/灰 1 t	76 (31)
	炭化汚泥	円/t	79 (21)
	M A P	円/kg-MAP	28 (32)
残渣処分	灰の埋立	円/t	8000 (22)

び維持管理費は文献²⁹⁾より費用関数を用いて推定した。ただしこの維持管理費には人件費を含まない。

資源化製品売却収入は、資源化量に表-6 の売却単価を乗じて算出し、マイナス勘定した。残渣処理費も同様に、残渣発生量に表-6 の処分単価を乗じて算出した。

$$\text{設備固定費} = \text{設備投資額} \times \text{資本回収係数} \quad (4)$$

$$\text{設備投資費} = \text{建設費} - \text{補助金} \quad (5)$$

$$\text{資本回収係数} = (1 - r[i + i/(i+1)^n - 1]) \quad (6)$$

r : 割合 = 10/100

i : 利子率 = 4%

n : 耐用年数 = 20年

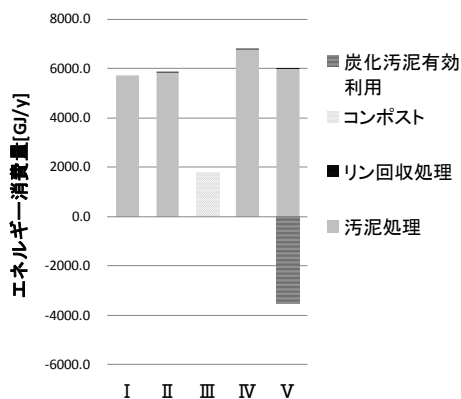


図-1 エネルギー消費量

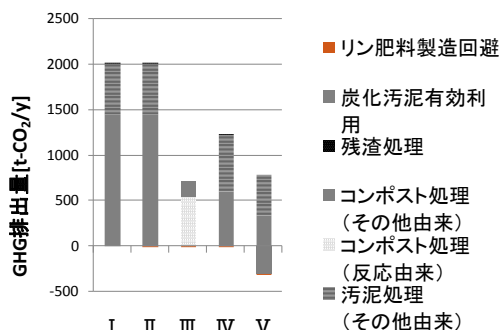


図-2 処理プロセス別 GHG 排出

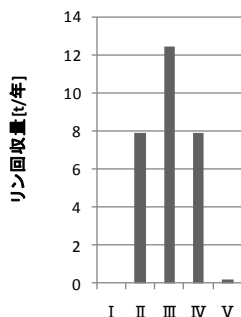


図-3 リン回収量

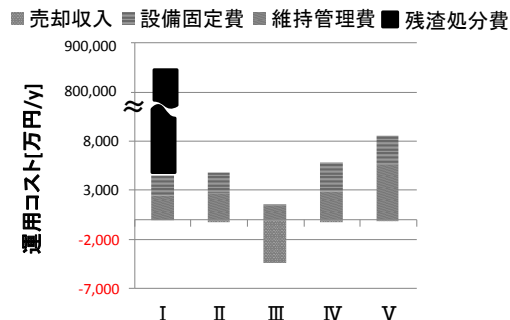


図-4 運用時コスト

4. 算定結果

(1) エネルギー消費量

処理プロセス別のエネルギー消費量を図-1に示す。

ケースIIIは最もエネルギー消費量が小さく、ベースケースのIと比較して69%のエネルギー消費量削減効果があった。ケースIVは汚泥焼却を高温化するためにケースIIと比較してエネルギー投入量が19%増しになった。

プロセス別に見ると、リン回収処理プロセスのエネルギー消費量は少ない。例えば、ケースIIはケースIのシステムにリン回収プロセスを付加したシステムであるが、エネルギー消費量の差は139 GJ/yと全エネルギー消費量のわずか2.4%に過ぎず、現有のシステムに追加的にリン回収技術を組み込んだとしても、エネルギー消費量の増分は小さいと推計された。

(2) GHG排出量

処理プロセス別のGHG排出量を図-2に示す。

ケースVは、汚泥エネルギーの有効利用によりGHG排出量が480 t-CO₂/yと最小で、ケースIと比較して76%の削減の可能性がある。

ケースIIIはGHG排出量が695 t-CO₂/yとケースIと比較して65%の削減可能性があるものの、コンポスト化過程で発生するGHG排出割合は高い。これはコンポスト化においてCH₄が12.4 t/y排出されるためである。ケースIVのGHG排出量は1,209 t-CO₂/yと、ケースI・IIの2,010 t-CO₂/y・2,005 t-CO₂/yと比べ小さく、汚泥の焼却温度を高温化することで汚泥焼却時のGHG排出を抑制でき、全体でケースIと比較して40%削減できることが示された。これは地球温暖化係数が310倍大きいN₂Oが4.7 t/yから1.9 t/yと60%減少し、燃料消費の増加に伴うCO₂排出の増分が相殺されたためであると考えられる。

(3) リン回収量

各ケースにおけるリン回収量の算出結果を図-3に示す。ケースIはリン回収技術を適用していないシステムであるため、リン回収量はゼロである。ケースIIIのコンポスト化では、脱水汚泥中に流入下水中のリンの約81%が含まれ、コンポスト化プロセスではリンが完全に回収されるため、回収量が12.4 t-P/yと最大となった。また、ケースIIとケースIVでリンの回収量は7.8 t-P/yと同量になったが、これは汚泥の焼却温度による差を考慮していないためである。ケースVは脱水ろ液中からリンを回収するシステムで、回収量は最小で0.2 t-P/yとなった。これは、リン回収設備(MAP法)の回収率は80%と高いものの下水中のリンは主に炭化汚泥に移行し、脱水ろ液中には流入下水中の2%しかリンが含まれないためである。

(4) コスト

コストを算出した結果を図-4に示す。ケースⅠは焼却灰の埋め立て処理費用が高いため、他のケースに比べコストは非常に大きくなった。ケースⅢのコンポスト化処理は売却単価が高く、設備投入費も小さいため全体として2,751万円/yの収益が望めることが明らかになった。ケースⅡとケースⅣを比較すると、汚泥焼却高温化により電力・燃料代が増加したため維持管理費が増加する結果になった。ケースⅤは炭化処理の維持管理費の原単位が高く、処理量も多い一方で、炭化汚泥やMAPの売却単価が安いいため、他ケースよりコストは大きくなった。

また全ケースを通じて設備固定費に大差はなく、維持管理費や売却収入が大きく寄与していることが明らかになった。運用時コスト削減のためには維持管理費の削減や売却単価の決定が重要であるといえる。

5. 多目的性を考慮した技術選択に関する考察

(1) リン回収量を技術選択基準としない場合

リン資源回収の優先度が低い場合、汚泥のエネルギー資源循環利用を志向する組A(Ⅲ, Ⅴ)と設定したシステムは汚泥処理処分志向の組B(Ⅱ, Ⅳ)に分類された。組Bにおいて、ケースⅣは高温焼却するためにケースⅡよりもエネルギー消費量が957 GJ/y増加するが、焼却時の N_2O の発生抑制によりGHG排出量は796 t- CO_2 /y削減できることがわかった。以上のように組内でエネルギー消費とGHG排出のトレードオフが生じる。

(2) リン回収量を技術選択基準とする場合

4. より、リン資源回収の優先度が高い場合において、リン回収量が最大で、エネルギー消費量、コストが最小となったシステムはケースⅢであった。すなわち、ケースⅢの汚泥のコンポスト化は4指標中3指標で最良の結果となり、最も満足なシステムであると示唆された。しかし実現のためには安全性、健康リスクへの懸念や臭気の問題、受入地となる農緑地の不足、化学肥料からの代替可能性などの検討が必要であるため、他の指標を含めて多目的化での技術選択を行う場合には違う解になる可能性がある。

一方GHG排出量は、ケースⅤが最小になり、4.(2)で述べたように炭化汚泥のエネルギー循環利用によりケースⅠと比較して76%削減の可能性があると示された。ただしリンの回収量は0.2 t-P/y(図-3)と少なく、コストも割高なため、GHG排出削減がリン回収やコストよりも優先される場合において優れたシステムといえる。

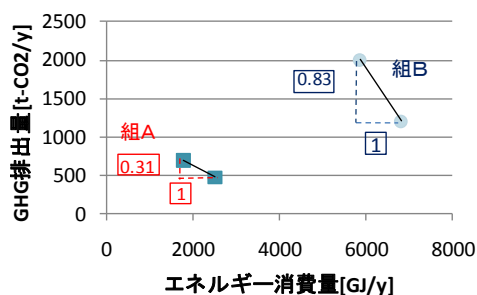


図-5 エネルギー消費量と GHG 排出量の関係

6. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

第一に、引用した原単位の不確実性或技術の発展の可能性などに対する検討は行われておらず、算定結果自体については今回用いた条件設定や原単位等に大きく制約される。また、リンの回収については、一律リン量で評価しており還元性の差について考慮していない。

第二に、エネルギー消費量と GHG 排出量のトレードオフの関係が明らかになったこと、エネルギー消費量、GHG排出量、リン回収量、コストの4指標ではコンポスト化が最も優れたシステムであると示唆されたことなど、本研究によって多目的性を考慮した技術選択を行う際のプロトタイプモデルを構築することができた。

参考文献

- 1) 岡本誠一郎：下水汚泥の再生利用技術の新しい展開，環境技術，Vol. 39, No. 11, pp. 25-29, 2010.
- 2) 田辺義貴：我が国の下水道の現状と最近の動向について，環境技術，Vol. 39, No. 1, pp. 25-32, 2010.
- 3) 原田洋平：迫りくるリン資源の枯渇に向けて，水環境学会誌，Vol. 34, No. 1, pp. 2-6, 2011.
- 4) 高久慎太郎，山本祐吾，吉田登，盛岡通：地域で発生する厨芥類・下水汚泥を対象とした循環利用システムの導入効果の評価，環境システム研究論文集，Vol. 38, pp. 421-428, 2010.
- 5) 資源のみち委員会：資源のみちの実現にむけて，2007.
- 6) 守屋由介，坪井博和，池田裕一，柳瀬哲也：アルカリ抽出法による下水汚泥焼却灰からのリン回収システム，用水と排水，Vol. 51, No. 10, pp. 833-838, 2009.
- 7) 加藤文隆：下水処理システムへの各種リン回収技術の仮想的適用および評価，土木学会論文集，Vol. 62, No. 1, pp. 27-40, 2006.
- 8) 藤田賢二：コンポスト化技術 廃棄物有効利用のテクノロジー，技報堂出版，1993.
- 9) 吹田市下水道部：吹田市下水道年報（2009年度版），2010.
- 10) 日本下水道協会：下水道施設更新計画・設計指針と解説 前編 -2001年版-，日本下水道協会，2001.

- 11) 国家社会保障・人口問題研究所：市町村別将来人口推計，2010.
- 12) 資源のみち委員会：資源のみちの実現にむけて，2007.
- 13) 山根敦子，岡田光正，須藤隆一：生活排水に占める洗濯用洗剤に由来する汚濁負荷，下水道協会誌，Vol. 18，No. 210，pp. 11-19，1981.
- 14) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価，技報堂出版，2005.
- 15) 国土交通省：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き，2009.
- 16) 有機性汚泥の緑地利用編集委員会編：有機性汚泥の農緑地利用，日本土壌肥料協会，2000.
- 17) 農林水産バイオサイクル研究システム化サブチーム編：バイオマス利活用システムの設計と評価，2006.
- 18) 霧巻峰夫，吉田綾子，星山英一：リン資源循環を実現するシステム構築のための基礎的条件に関する検討，環境システム研究論文集，Vol. 36，pp. 217-225，2008.
- 19) 日本ガイシ株式会社，岐阜市上下水道事業部：下水汚泥焼却灰からのりん回収にかかわる技術評価書，下水汚泥資源化・先端技術誘導プロジェクト報告書，2007.
- 20) 島村和彰，田中俊博，石川英之：2 槽式流動層 MAP リアクタによる高効率りん回収方法の検討，エバラ時報，No. 206，pp. 22-32，2005.
- 21) (財) 下水道新技術推進機構：汚泥熱分解燃料化マニュアル，2010.
- 22) 産業環境管理協会：JEMAI-LCA Pro Ver. 2
- 23) 環境省：温室効果出す排出量算定・報告マニュアル，2008.
- 24) 大下和徹：前凝集プロセスを組み込んだ下水処理システムの特性とその評価に関する研究，環境衛生工学研究，Vol. 21，No. 4，pp. 24-33，2011.
- 25) 独立行政法人 国立環境研究所：産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) HP，原単位データファイル 2000 年 生産者価格ベース (基本分類)，2000.
- 26) 化学工業日報社：ライフサイクルインベントリー分析の手引き，1998.
- 27) 五島典英，古市徹，石井一英，谷川昇：動脈系・静脈系連携によるエネルギー循環のための廃棄物バイオガス化システムの提案～石狩湾新港地域でのバイオガス直接利用システムの検討，環境システム研究論文集，Vol. 38，2010.
- 28) 財団法人 日本エネルギー経済研究所 石油情報センター：小型ローリー納入 2010 年 10 月 小型ローリー価格 <http://oil-info.ieej.or.jp/price/price_sangyo_a_juuyu_getsuji.html>
- 29) (財) 日本環境衛生センター：MA P 法によるリン回収資源化システム 処理技術検証結果概要書
- 30) 古野間達：資源循環型の静脈系インフラ構築を目的とした L C A モデルの構築—急速熱分解による下水汚泥の高度循環利用システムを事例に—，大阪大学大学院工学研究 修士論文 2009.
- 31) NTS：汚泥の処理とリサイクル技術 可溶化・減量化・脱水技術の開発動向と実際例およびエネルギー・リン回収技術，2009.
- 32) 萩野隆生，平島剛：下水汚泥からのリン回収プロセスの開発，環境資源工学 Vol. 52，No. 4，pp172-182，2005.

(2011 9. 8 受付)

EVALUATION ON RENEWAL PLANS OF SEWER SLUDGE TREATMENT SYSTEMS UNDER MULTI-OBJECTIVE DECISION MAKING

Yuki NAKANISHI, Toyohiko NAKAKUBO, Koichi OHNO and Akihiro TOKAI

Five renewal plans of urban sewer systems that realize recovery of phosphorus, energy saving, and reduction of green house gases (GHGs) emission have designed. The scale of the sewer systems was determined based on the future demographic shifts of the sewerage treatment area. Each system was evaluated in terms of four objectives: amount of recovery of phosphorus, amount of GHGs emission, energy consumption, and operational cost. As a result, it was found that the optimal system depends on the priority among the four objectives. For example, if recovery of phosphorus, reduction of energy consumption, low cost is the most important, composting sludge would be the optimal system.