

東京都区部の下水污泥処理・再資源化における エネルギー消費分析

原 圭史郎¹ 佐藤 弘泰² 味埜 俊³

¹ 東京大学大学院博士後期課程 新領域創成科学研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

² 東京大学大学院助教授 新領域創成科学研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³ 東京大学大学院教授 新領域創成科学研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

下水処理に伴って排出される下水污泥は、脱水・焼却などの工程を経て処理され、その後、埋立てや再資源化工程へと流れていく。現在、各自治体ごとに様々な污泥再資源化のあり方が試みられているが、持続可能な污泥の処理・再資源化を考えていくためには、それぞれの工程におけるエネルギー効率性が重要な要素の一つである。本研究では、東京都の污泥処理・再資源化施設における複雑な污泥のフローを把握し、そのフローもとにして污泥処理工程、再資源化工程にて消費される年間のエネルギー量と二酸化炭素排出量の算出を試みた。また、污泥再資源化施設における3つの再資源化工程でのエネルギー消費量を相対比較することで、それぞれの工程におけるエネルギー効率性を相対的に把握した。これらの算出結果をもとに、東京都における污泥処理、再資源化工程のエネルギー消費の現状が把握された。

Key Words: Sludge flow, sludge recycling, Energy consumption

1. はじめに

下水処理に伴って排出される大量の「下水污泥」(産業廃棄物に分類される)は、高度処理の普及や合流式下水道の改善に伴い、今後も排出量が増加していくことが予想されている。各自治体において、污泥の処理処分、または再資源化に対して様々な取り組みが行われているが、大量に排出されている污泥の効率的処分は重要課題である。

昨今、污泥の焼却処分後に最終処分場に埋め立てる、という従来型の処分法だけではなく、污泥の再資源化や、再利用に向けた試みが積極的に推進されている。具体的な例としては、コンポスト化による肥料としての利用、セメントの原料としての利用、焼却灰を原料としたレンガや路盤材の製造などで、各自治体の特徴に応じて様々な取り組みがなされている。例えば東京都では、臨海部に位置する「南部スラッジプラント」において、污泥を利用したメトロレンガ、スラジライト(軽量細粒材)、熔融スラグ等の製造が行われており、これらの製品は、建設資材などとして再利用されている¹⁾。

下水污泥の処理プロセスや、レンガの製造などといった污泥再資源化のプロセスにおいては、多くのコストや

エネルギーが必要とされており、将来にわたっても持続可能で効率的な処理・再資源化のあり方を追求していくことが重要である。

エネルギー消費の観点から、効率的な污泥処理・再資源化プロセスのあり方を考えていくために、まずは実情としてどれほどのエネルギーが消費されているのか、現状についての定量的把握が必要であると考えた。本研究では、平成9年度の東京都における污泥の処理工程と再資源化工程を具体例として取り上げ、年間のエネルギーの消費量と二酸化炭素排出量の2指標について、定量的な算出を行った。算出の結果、上記の2指標について、平成9年度の年間総量が確認された²⁾。東京都では、排出された污泥フローとその輸送方法が非常に複雑なため(平成9年度現在)、算出を行う前段階として、下水処理場から排出された污泥のフローを詳細に追う必要がある。本研究では再資源化プロセスに流れる污泥のフローについても詳細に把握を行い、その污泥フローをもとに、メトロレンガ、スラジライト、熔融スラグといったそれぞれの污泥再資源化工程におけるエネルギー消費の相対比較も試みた。これらの算出結果によって、エネルギー消費の観点から、東京都における下水污泥の処理、再資源化の現状が把握された。

表－１ 各下水処理場から排出された汚泥のフローのまとめ（H9年度）

下水処理場 (汚泥排出源)	汚泥処理場 (脱水工程)	汚泥処理場 (焼却工程)	処理された汚泥 の行き先	汚泥使用割合 (資源化)
三河島 砂町	砂町 263,158wt	砂町 9,114t	埋め立て、その他	－
有明	東プラ 82,615wt	東プラ 3,965t	埋め立て、その他	－
中川 葛西 小菅	葛西 162,076wt	葛西 7,854t	埋め立て、その他	－
中野 落合 小台	小台 111,348wt	小台 6,203t	埋め立て、その他 南プラ(レンガ) 南プラ(スラジ)	－ 全レンガ製造の 96% 全スラジ製造の 8%
新河岸	新河岸 138,039wt	新河岸 5,432t	埋め立て、その他 南プラ(スラジ)	－ 全スラジ製造の 6%
芝浦(1部)	芝浦 48,747wt	南プラ 15,785t	南プラ(スラグ用)	全スラグ製造の 100%
芝浦(残り) 森ヶ崎	南プラ 252,940wt		南プラ(レンガ用) 南プラ(スラジ用) 埋め立て、その他	全レンガ製造の 4% 全スラジ製造の 86% －

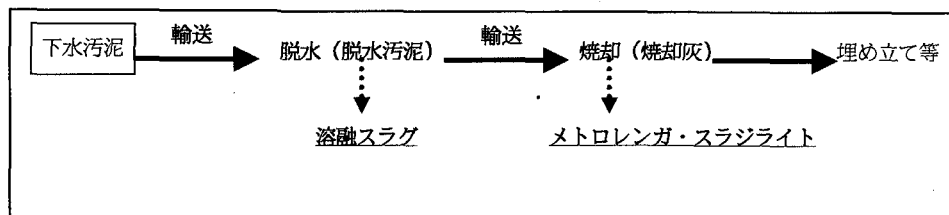


図1 下水汚泥の処理・再資源化のプロセス概要

2. 東京都の汚泥処理・再資源化

(1) 処理汚泥のフロー

本研究においては、東京都で実際に行われている下水汚泥の処理工程、再資源化施設を具体例として取り上げており、東京都内で稼働している12ヶ所の下水処理場から排出された下水汚泥を対象としている。

前述したように、平成9年度現在の東京都の汚泥処理システムは非常に複雑であり、排出された汚泥は、汚泥の性状などに応じて車両輸送（トラック輸送）、管路輸送、海送（船舶輸送）の3通りの輸送方法によって汚泥処理場へと運びこまれ（ただし、この輸送方法については、将来的には、管路輸送へと一元化される予定である）、脱水・焼却を経た処理汚泥のうちの一部

が、南部スラッジプラントで稼働している汚泥再資源化施設へとまわされている。本研究において、南部スラッジプラントの再資源化施設で取り上げた再資源化工程は、レンガ化（メトロレンガ製造）工程、溶融スラグ化工程、スラジライト化工程の3工程である。なお、南部スラッジプラントの再資源化工程へ回らない処理汚泥については、埋め立て地へ流れていくか、その他の材料として利用されている。

本研究を行う上で、12ヶ所の下水処理場から排出された汚泥の流れと、その量を詳細に把握するために、東京都の汚泥関係の資料やデータ^{3) 4)}と、東京都へのヒアリングをもとにして、下水処理後の汚泥発生から、最終処分までの汚泥全体のフローを確認し、整理した。その結果、汚泥フローを表－1のようにまとめること

ができた。

東京都の 12 ケ所の下水処理場から排出された汚泥は、表-1 のような流れで処理、再資源化されている。数字は平成 9 年度における年間総量である。各下水処理場から排出された汚泥は、前述した 3 種類の輸送形態のいずれかの方法で輸送されて、表-1 のように脱水・焼却工程を経る。また、処理汚泥のうち 1 部が、再資源化製品のための原料として、南部プラントへと送られ、溶融スラグ、メトロレンガ、スラジライトとして再資源化（製品化）されている（図-1 参照）。脱水工程、焼却工程での数値は、それぞれの工程における処理された後の汚泥の発生量を示す。脱水工程に表記されている「wt」は、脱水汚泥重量（t）を表す。

「南プラ」は南部スラッジプラントを、「東プラ」は東部スラッジプラントを表す。また、「スラグ」は溶融スラグを、「レンガ」はメトロレンガを、「スラジ」はスラジライト（軽量細粒材）を指す。処理汚泥の行き先について、「その他」は、外部委託などによる他の製品の原料化としての利用などが含まれているが、本研究では取り扱わない。また、「汚泥使用割合」とは、各再資源化製品の製造に使われた全汚泥のうちで、それぞれの汚泥排出源（各下水処理場）からでた汚泥が占める割合を表し、重量％で示してある。

（２）汚泥再資源化工程の概要

東京都の汚泥再資源化施設（南部スラッジプラント）で行われている汚泥の再資源化工程の概要は以下のようである^{5) 6)}。

a) メトロレンガ（圧縮焼成ブロック）

メトロレンガについては、下水汚泥の焼却灰のみを原料として、金型に入れた後、約 1 t/cm² の圧力でプレス形成した後、1,050℃前後で焼成して作られる。このメトロレンガは、歩道、コミュニティー道路、広場、公園などの舗装材などに用いられている。

b) 溶融スラグ

脱水ケーキを乾燥、粉碎して 1,400℃～1,500℃で加熱し、有機物を熱分解すると同時に、無機物は流動性のある「溶融スラグ」として取り出し、冷却固化する。溶融スラグの生成法としては、冷却水で急冷水粉し、ガラス上の水粉スラグとする方法と、スラグをゆっくり冷やして空冷スラグ（結晶化）とする方法とがある。

c) スラジライト（軽量細粒材）

下水汚泥の焼却灰を原料として、水、バインダ（結合材）を加えた後、混練、造粒、乾燥させたものを約 1,050℃で焼成する。このとき表面が半溶融状態になると同時に、内部に気泡が生じる。それを空冷すると、固い殻で覆われた発泡体ができる。これが軽量細粒材と呼ばれるものである。

3. 汚泥処理、再資源化工程におけるエネルギー消費量、二酸化炭素排出量の算出方法

（１）各工程での年間総量の算出

平成 9 年度 1 年間の汚泥処理工程や再資源化工程におけるエネルギー消費（燃料消費・電力消費）と、それに伴う二酸化炭素排出量の 2 指標について算出を行った。この 2 指標について、算出の対象とした範囲は、下水汚泥処理プロセス全体（図-1 参照）のうち「輸送工程」、「脱水工程」、「焼却工程」の 3 工程と、再資源化工程である「レンガ工程」「スラグ工程」「スラジ工程」（それぞれ、メトロレンガ製造、溶融スラグ製造、スラジライト製造の各工程に対応する）であり、それぞれについて定量算出を行った。

a) 輸送工程における燃料消費、電力消費、二酸化炭素排出量の算出

下水処理場から排出された汚泥は、脱水工程、焼却工程が行われている処理場へと、3 種類の輸送方法のいずれかの方法により運ばれている。車両輸送（トラック）と海送（船）それぞれについて、輸送開始地点（各下水処理場）と輸送終了地点（汚泥処理場）の 2 点から、もっとも可能性のある輸送ルートを図上上で想定し、2 地点間の距離を G I S 用ソフト（MapInfo）に読み取らせることで輸送距離を出した。また管路輸送の距離に関しては、東京都からのデータにもとづき、実際の値を使用した。表-2 は、汚泥輸送距離と輸送方法、汚泥の輸送総量をまとめたものである。

（車両輸送での燃料消費）

$$F_c = W_c / 10t \times (L_c / 3.5 + L_c / 8.0) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

F_c : 燃料消費 (l)
W_c : 輸送汚泥量 (t/year)
L_c : 汚泥輸送距離 (km)

（海送での燃料消費）

$$F_s = 0.00203 \times L_s \times W_s / 10t \times (10t + 2t) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

F_s : 燃料消費 (t)
W_s : 輸送汚泥量 (t/year)
L_s : 汚泥輸送距離 (km)

表-2 汚泥の輸送距離と輸送法のまとめ

出発地点 下水処理場	汚泥輸送距離 (km)	輸送法	輸送汚泥総量 (t/year)
砂町	15.2	車両	9,114
有明	7.3	管路	58,440
中川	15	管路	1,676,280
葛西	12.8	車両	9,647
小菅	15.6	管路	1,435,960
中野	9.5	管路	257,990
落合	10.6	管路	2,678,920
小台	19.4	車両	6,243
新河岸	25.8	車両	5,433
芝浦	8.6	管路	2,530,270
	7.5	船舶	48,747
森ヶ崎	3.2	管路	2,628,120
	1.7	船舶	219,878

表-5 発熱係数・二酸化炭素排出原単位

	g-CO ₂ /1000kcal	Kcal/l, Kcal/m ³
A 重油	290.08	9,300
都市ガス	214.1	10,000
購入電力	469.33 g-CO ₂ /kWh	-
灯油	284.1	8,900

車両輸送・海送いずれの輸送についても、下水汚泥輸送時の積載量を、往路では10t、復路では2tであったと仮定し、表-2の数値と、表-3、表-4で示されている原単位を用いて、式(1)、式(2)の計算をもとに、燃料消費量の計算をおこなった。管路輸送に関しては、エネルギー消費としては、電力のみの消費を扱うこととし、この電力消費量に関しては東京都からの観測データをそのまま用いた。

また、二酸化炭素排出量に関しては、算出されたエネルギー消費量（燃料消費、電力消費）の結果にもとづいて、表-5、表-6の二酸化炭素排出原単位等⁷⁾を用いて算出を行った。

b) その他の工程における燃料消費量、電力消費量、二酸化炭素排出量の算出

脱水・焼却・再資源化工程（メトロレンガ、溶融スラグ、スラジライト）それぞれの工程については、表-1で表記してある汚泥のフローデータと、各汚泥処理場における燃料消費量、電力消費量に関しての、東京都による実測データ^{3) 4)}を整理して、各処理場で消

表-3 燃料消費原単位

車両送	燃料消費 (km/l)	
	10tトラック	3.5
	2tトラック	8.0
海送	燃料消費 (kg/t・km)	
	内航油タンカー 往路10t、復路2t	0.00203

表-4 燃料換算表

軽油（トラック）	9700 Kcal/l
重油（タンカー）	10300Kcal/kg

表-6 輸送工程（陸送、海送）に使用する原単位

車両送	CO ₂ (kg/km)	
	10tトラック(往路)	0.742
	2tトラック(復路)	0.323
海送	CO ₂ (kg/t・km)	
	内航油タンカー 往路10t、復路2t	0.00634

費された量を全て積算することによって求めた。燃料源として、重油、都市ガス、灯油があるが、汚泥処理場によって異なっているため、処理場ごとの燃料源を詳細に把握した上で、表-5の原単位を用いて燃料消費量をcal単位で求めた。

また、二酸化炭素排出量に関しては、算出されたエネルギー消費量（燃料消費、電力消費）の結果にもとづいて、表-5の二酸化炭素排出原単位を用いて算出を行った。

(2) 各再資源化工程のエネルギー消費量の相对比较

前述したように、平成9年度現在、東京都における汚泥のフローは非常に複雑であり、どこの処理場から排出された汚泥がどれほどの量、どの再資源化工程に流れているか、について詳細に把握するのは非常に困難だったが、本研究において、資料の読み込みと、ヒアリング調査を行うことにより、汚泥フローの状況を突き止めることができた（表-1参照）。

表-7 各資源化工程で使用する脱水汚泥の排出源と使用量、工程ごとのエネルギー消費量（年間）

	使用される汚泥排出源（脱水汚泥）	使用汚泥量（wt換算）	燃料消費（Kcal）	電力消費（kWh）	燃料消費単位 当り（Kcal/wt）	電力消費単位 当たり（kWh/wt）
レンガ製造	小台 南ブラ	44,994 1,996	5,278,780,000	3,088,326	112,337	66
スラグ製造	南ブラ	33083	15,463,410,000	5,468,795	467,413	165
スラジ製造	小台 新河岸 南ブラ	3,755 3,987 42,967	27,688,549,000	14,288,330	67,775	30
焼却〔葛西〕	中川、小菅、葛西	162,076	27,688,549,000	14,288,330	170,837	88

表-8 工程ごとのエネルギー消費量と二酸化炭素排出量（年間）

	脱水工程	焼却工程	レンガ工程	スラグ工程	スラジ工程	輸送工程
二酸化炭素排出(t-CO2/year)	94,800	103,000	2,580	5,880	1,440	2,220
電力消費(mWh/year)	94,600	86,400	3,090	5,470	1,500	4,590
燃料消費（Gcal/year）	174,000	250,000	5,280	15,500	3,440	255

この表1をもとにして、メトロレンガ、溶融スラグ、スラジライトそれぞれの再資源化工程へと流れている（再資源化に使用されている）汚泥の排出源（どの下水処理場から排出された汚泥か）と、その量を確認することができた。

各再資源化工程ごとのエネルギー消費の相对比较については、各資源化工程にて、製品製造に使用されている単位脱水汚泥当り（1wt）を基準とした上で比較を行った。レンガ化やスラジ化では、焼却灰を使って製造するが、その焼却灰の元となる脱水汚泥の量と、その出処が把握されたために、この脱水汚泥レベルを基準にしての、全ての工程の相对比较が可能である。本研究においては、脱水処理工程を経た脱水汚泥の性状や含水率は、どの処理場の出処であっても同一であると仮定する。各再資源化工程で消費された燃料と電力とを、その工程にて使用された、元々の脱水汚泥量（単位：wt）によって除し、単位脱水汚泥（1wt）あたりのエネルギー消費量を計算した。

ここでは、各再資源化工程と焼却工程との比較も行っている。焼却工程で要される燃料消費の傾向は、焼却設備によって多少エネルギー消費の傾向が異なるが、本研究では、他との汚泥処理場と比較して焼却工程のエネルギー消費が平均的であった「葛西」汚泥処理場を取り上げて、これを焼却工程のエネルギー消費の代表例とした。表-7に、各工程で使用する汚泥の排出源、汚泥使用量、また要されるエネルギー消費量を

まとめてある。数字は年間あたりの量を表す。

4. エネルギー消費量・二酸化炭素排出量に関する算出結果

（1）各工程での年間総量

算出方法に基づいて計算を行った結果、汚泥処理（脱水・焼却）、再資源化の各工程での平成9年度年間のエネルギー消費量（燃料消費、電力消費）、二酸化炭素排出量について、表-8のような結果を得た。算出結果については、有効数字3桁で統一してある。

また表-8の結果をもとに、燃料消費、電力消費、二酸化炭素排出量それぞれの指標について、全体総量に対する各工程の貢献度を示したのが図-2である。

a) エネルギー消費

燃料、電力とも「脱水工程」「焼却工程」における消費は非常に大きい。これらの工程でエネルギー効率のよい設備を用いて、いかに効率のよい処理を行うことができるかが重要な鍵である。なお、脱水、焼却を経て処理された汚泥の全量が再資源化工程に流れるわけではないため、脱水工程や焼却工程と、各再資源化工程とのエネルギー消費効率の相対的な比較は行うことは、この時点ではできないが、年間の絶対量として見た場合、平成9年度現在、全エネルギー消費量のうちの再資源化工程が占める割合は小さい。

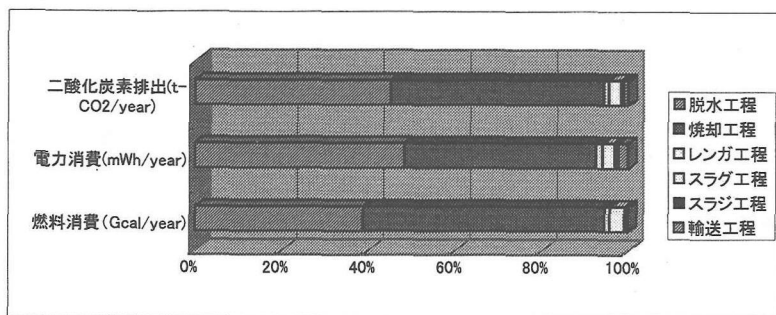


図-2 電力・燃料消費量、二酸化炭素排出量それぞれにおいて各工程の占める割合

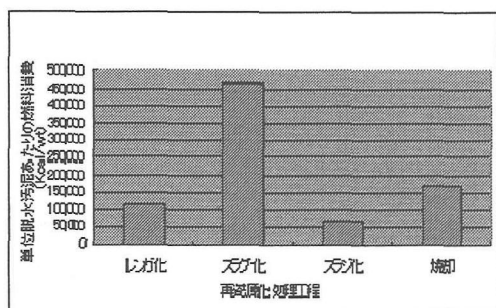


図-3 工程ごとの燃料消費相対比較

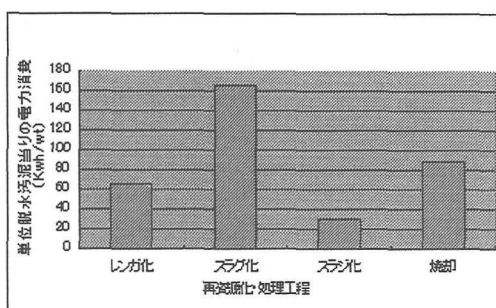


図-4 工程ごとの電力消費相対比較

b)二酸化炭素排出

燃料や電力の消費に伴って排出される二酸化炭素量に関しては、本研究にて対象とした「輸送工程」「脱水工程」「焼却工程」「再資源化工程」の4工程を全て足し合わせた合計が、年間で約20万トンの結果になった。

(2) 再資源化工程の相対エネルギー消費

汚泥のフローを詳細に把握することから表-7が確認された。この表をもとにして、脱水汚泥レベルを基準として、メトロレンガ製造(レンガ工程)、溶融スラグ製造(スラグ工程)、スラジライト製造(スラジ工程)、焼却工程での燃料消費、電力消費の相対比較を行った。図-3、図-4がその結果である。

この結果から、単位脱水汚泥あたりを基準としてみると、製品化するのに要するエネルギー消費が大きいのは溶融スラグ製造で、逆にもっともエネルギー消費が小さいのは、スラジライトの製造ということになった。2-(2)で記述したように、レンガは、1,050°C前後で焼成して作られることから、エネルギー消費が大きい印象を抱くが、工程に投入される単位脱水汚泥

を基準にしてみても相対比較した場合、焼却工程と比べてもエネルギー消費が小さいという結果になった。以上、エネルギー効率の観点からは、溶融スラグの製造工程における負荷が圧倒的に大きいという結論が導き出された。

5. まとめ

本研究を通して、平成9年度における、東京都の汚泥処理、再資源化工程における複雑な汚泥のフローを明らかにし、処理や再資源化のプロセスに伴うエネルギー消費量・二酸化炭素排出量について年間総量を具体的に把握することができた。また、南部スラジプラントにおける、3つの再資源化工程におけるエネルギー消費量の相対比較を行うことによって、汚泥の再資源化施設での工程ごとのエネルギー効率性が明らかになった。

エネルギー消費の絶対量としては、平成9年度時点では、再資源化施設の各工程と比べて脱水工程と焼却工程が非常に大きいことが分かった。

東京都の平成9年度時点の汚泥処理、再資源化システムにおいては、脱水、焼却などの処理プロセスを経た全汚泥が再資源化施設に行くわけではなく、またスラグ化では脱水汚泥を、スラジ化とレンガ化では焼却灰を利用するために、処理・再資源化工程におけるエネルギー効率性の相対比較の議論は難しかった。しかしながら、汚泥フローを把握したことにより、各工程にて使用された汚泥量を脱水汚泥のレベルで確認できることから、単位脱水汚泥あたりを基準として、エネルギー消費量の相対比較を試みた。その相対比較で見た場合、再資源化のスラジ化工程での消費が非常に大きく、焼却工程と比較しても消費量は圧倒的に大きいことがわかった。また、レンガ化工程については、焼却工程と比較してエネルギー消費量は少ないことが分かった。再資源化工程の中ではスラジライト化がもっともエネルギー消費が小さく負荷は小さいという結果を得た。以上、今回対象とした3つの再資源化工程においては、エネルギーの観点から見て、熔融スラジ化工程が非常に負荷が大きいことが明らかになった。平成14年度、東京都の下水汚泥による熔融スラジ製造は中止となっている。

今後ますます増えていくであろう下水汚泥の適正な処理と、その再利用のあり方が問われている。将来も持続可能なシステムを考える上で、エネルギーの効率性は重要な視点である。今回は、将来的な効率的な汚泥の処理や再資源化のあり方を考えていくきっかけとして、東京都の汚泥処理・再資源化工程におけるエネルギー消費の現状把握を目的に研究を行った。具体的に、持続可能な汚泥処理・再資源化・再利用などの方策を考えていく上では、エネルギー消費の側面以外にも、コスト面、需要動向、再資源化製品の安全性など、多面的に見ていく必要があり、それは今後の課題

である。また、昨今汚泥再利用の方策として、セメントの材料としての利用が有望視されており、東京都においてもセメント材料としての利用が年々増加してきている。今回取り上げた3つの再資源化工程以外にも、セメントの材料として利用する場合や、汚泥処理後にそのまま最終処分場で埋め立てる場合、などとのエネルギー効率性の比較なども今後の課題である。

参考文献

- 1) 東京都下水道局： 下水汚泥の再資源化に関する調査報告書（II．汚泥資源利用の 今後の展開に関わる検討） 1998
- 2) 原圭史郎、佐藤弘泰、味埜俊： 下水汚泥処理に伴う発生負荷の現状評価と汚泥管理の将来展望 東京都を例として 環境システム研究論文集 Vol29 pp.209-214, 2001
- 3) 法人日本下水道協会： 平成9年度版下水道統計—行政編 1997
- 4) 東京都下水道局： 下水汚泥の再資源化に関する調査報告書（I．既存資源化施設に関わる技術等の評価） 1998
- 5) 東京都下水道局： 南部スラッジプラント 平成10年度版 1998
- 6) 東京都下水道局： 下水道リサイクルガイド 平成9年度版 1997
- 7) 環境庁規格調整局、環境研究技術課監修、環境情報科学センター： ライフサイクルアセスメントの実践、環境負荷低減を目指して 化学工業日報社 1996

Analysis of energy consumption in sludge treatment and recycling processes in the Tokyo area

Keishiro Hara, Hiroyasu Satoh, Takashi Mino

A large amount of sludge is discharged from sewage treatment plants, and therefore efficient sludge management system is needed to cope with the growing amount of sewage sludge. Energy efficiency in sludge treatment system is one of the important aspects so as to pursue the sustainable sludge management system.

Tokyo metropolitan government has been promoting recycling of sewage sludge as its sludge management policy. In order to evaluate the Tokyo's sludge management policy, we think it significant to analyze the aspects of energy consumption of the current sludge treatment processes such as dewatering and incineration, along with recycling plants.

In the Tokyo area, however, complicated sludge treatment systems have been historically applied, and it was difficult to comprehensively grasp sludge flow and energy consumption in sludge treatment systems.

In this study, we calculated the energy consumption and CO2 emission of each unit process in existing sludge treatment system and recycling plants in Tokyo, by looking into actual and detailed flow of sludge, which was clarified from primary data and hearing to Tokyo metropolitan government. We also conducted a comparative analysis of energy consumption between three sludge-recycling plants, and then examined current status of sludge treatment and recycling system in terms of energy consumption.