

し尿・浄化槽汚泥等の液状廃棄物処理施設の ライフサイクルインベントリー分析

松井康弘¹・山田正人²・井上雄三³・河村清史⁴・田中 勝⁵

¹工博 独立行政法人国立環境研究所 流動研究員 循環型社会形成推進・廃棄物研究センター

(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

²正会員 工博 独立行政法人国立環境研究所 主任研究員 循環型社会形成推進・廃棄物研究センター

(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³正会員 工博 独立行政法人国立環境研究所 室長 循環型社会形成推進・廃棄物研究センター

(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

⁴正会員 工博 埼玉県環境科学国際センター 研究所長 (〒347-0115 埼玉県北埼玉郡騎西町大字上種足914番地)

⁵正会員 Ph.D. 岡山大学 教授 環境理工学部 (〒700-8530 岡山県岡山市津島中3-1-1)

し尿処理施設のもたらす環境負荷を定量的に評価することを目的として、稼働中の複数の処理方式のし尿処理施設及び汚泥再生処理センターを対象に、エネルギー消費及び二酸化炭素発生に関するライフサイクルインベントリー分析を実施した。処理量1kl当たりのエネルギー消費量及び二酸化炭素発生量は、従来型処理方式の19施設の平均がそれぞれ1,099MJ/kl, 74kg-CO₂/klであった。一方、汚泥再生処理センターでは944MJ/kl, 63kg-CO₂/klであったが、発電及びコンポスト化によって約3%が削減されることが明らかとなった。また、環境負荷に対する施設の規模、構成プロセス、処理水質の水準等の施設条件の影響を検討するとともに、従来型のし尿処理施設と下水道終末処理施設、汚泥再生処理センターの比較を試みた。

Key Words : inventory analysis, night soil, Johkasou sludge, LCE, LC-CO₂

1. はじめに

日本において、し尿は主にし尿処理施設、浄化槽及び公共下水道の3つの方法によって処理されており、浄化槽から発生する汚泥の約86%はし尿処理施設に投入されて処理されている(平成9年度)¹⁾。平成11年度末現在、下水道の普及率(処理人口普及率)は約60%となっているが、その整備水準は大都市と中小市町村では大きな格差があり、特に人口5万人未満の市町村の普及率は24%と低く²⁾、こうした地域の水質保全に対してし尿処理施設及び浄化槽は大きな役割を担っている。

し尿処理施設は、水質保全に対する要求の高まりを受けて、様々な技術が開発されてきた。開発された処理方式を順に見ると、嫌気性消化活性汚泥処理方式、好気性消化活性汚泥処理方式、湿式酸化活性汚泥処理方式、標準脱窒素処理方式、高負荷脱窒素処理方式、膜分離高負荷脱窒素処理方式、浄化槽汚泥対応型膜分離高負荷脱窒素処理方式^{3),4)}となり、こうした技術開発の進展を背景として、処理水質の

高度化、施設のコンパクト化等が図られてきている。

また近年では、循環型社会の構築に向けてあらゆる分野で取り組みを進めることが必要となってきており、し尿処理分野においてもエネルギー回収や再生物の循環利用の推進、環境負荷の低減が求められてきている。国のし尿処理行政においても、平成10年度からし尿の衛生処理のみを目的としたし尿処理施設は国庫補助対象外とし、し尿・浄化槽汚泥に他の有機性廃棄物を併せて再生処理する「汚泥再生処理センター」事業を新たに補助対象として循環システムへの転換が図られている⁵⁾。

こうしたことから、今後低環境負荷・資源循環型の処理体系を構築するに当たっては、各処理技術の環境負荷等に関する定量的評価の実施が不可欠であると考えられる。

これまでに、排水処理分野に関するLCAの研究としては、松本・井村⁶⁾、井村ら⁷⁾、鶴巻⁸⁾、鶴巻・野池⁹⁾、伊藤ら¹⁰⁾が下水道を対象に施設の建設及び運転に関わる環境負荷について事例的検討を実施している。しかし、液状廃棄物処理システムの一部とし

表-1 本研究の検討範囲と主要項目

範囲	資材・ユーティリティの区分	主要項目
建設	土木工事 建築工事 機械工事 配管設備工事 電気・計装設備工事	処理棟・管理棟に関連する土木工事 処理棟、管理棟の建築工事 処理機材の機械工事 鋼管、塩ビ管、バルブ類等 電線類、配線器具類、工業計器等
運転	電気使用量 水道使用量 燃料使用量 薬剤使用量	プラント使用電力 プロセス用水 汚泥焼却用重油等 pH調整、凝集沈殿、脱臭、消毒用薬剤
機材の更新	耐用年数の到来による機材の更新	
解体・廃棄	施設の解体工事・原状復帰工事、廃棄物の運搬・処分	

て大きな役割を担っているし尿処理施設について検討したLCAの研究例はほとんど見られず、その環境負荷についての定量的評価がなされていないのが実状である。

そこで本研究では、実際に稼働中のし尿処理施設、及び汚泥再生処理センターを対象にエネルギー消費量及び二酸化炭素発生量についてライフサイクルインベントリー（LCI）分析手法を用いて積算を行い、ライフサイクルの視点からみた負荷構成の特徴や下水道終末処理施設との比較、汚泥再生処理センターの循環利用施設としての評価の考え方、などについて考察した。

一方、環境負荷には処理規模や構成プロセス等様々な要因が影響すると考えられる。井村ら⁷⁾の検討においては、下水処理場が大きくなるに従って処理量あたりのエネルギー消費量が小さくなる、いわばスケールメリットが指摘されており、また黄ら^{11),12)}は下水道の汚泥処理プロセスに焦点を当てて、構成プロセス、処理規模による二酸化炭素発生量の違いについて検討している。

そこで、本研究では様々な処理方式、処理規模の施設を対象に積算を実施し、それらの積算結果を用いて環境負荷に対してどのような要因が影響を及ぼしているのかを統計的に検討することとした。

2. 方法

(1) 検討対象施設

嫌気処理方式（以下、「嫌気」とする）の処理施設1施設（100kl/日）、標準脱窒素処理方式（以下、「標準脱窒」とする）の処理施設3施設（40, 98, 160kl/日）、高負荷脱窒素処理方式（以下、「高負荷」とする）の処理施設4施設（70, 80, 113, 136kl/日）、膜分離高負荷脱窒素処理方式（以下、「膜分離高負荷」とする）の処理施設8施設（31,

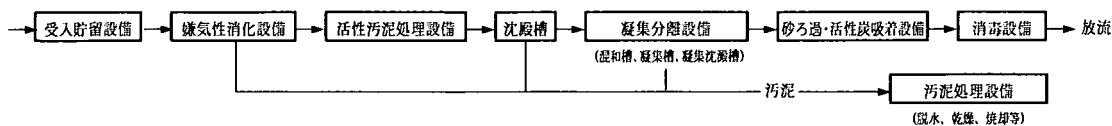
38, 45, 45, 64, 82, 94, 115kl/日）、浄化槽汚泥対応型膜分離高負荷脱窒素処理方式（以下、「浄化槽対応」とする）の処理施設2施設（30, 50kl/日）、湿式酸化処理方式（以下、「湿式酸化」とする）の処理施設1施設（80kl/日）の計19施設及び汚泥再生処理センター1施設（80kl/日及び事業系生ごみ1.3t/日、再資源化設備としてメタンガス発酵設備・ガス発電設備・汚泥堆肥化設備を備える施設）を対象に検討を実施した。本研究で対象とした処理方式のフロー例を図-1に示した。

(2) 検討範囲及び資材・ユーティリティ消費量の把握

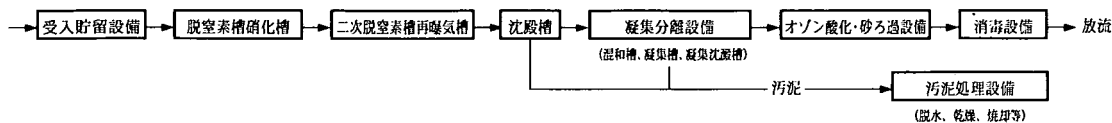
本研究では、施設の建設時、運転時、解体・廃棄時、及び機材の更新時に投入される資材・ユーティリティに係わるエネルギー消費量及び二酸化炭素発生量について検討することとした。検討範囲及びその主要項目を表-1に示した。

施設建設については、土木工事、建築工事、機械工事、配管設備工事、電気・計装設備工事を検討対象とし、施設設計時の積算資料に基づき投入資材量を把握した。なお、建築工事については、建物の延床面積に延床面積あたりの環境負荷原単位を乗じて計算した。その他、建設時の環境負荷としては、資材消費以外に施工機械の稼働に伴って環境負荷が発生すると考えられる。齋巻⁸⁾は、最終処分場浸出水処理施設を対象にしたケーススタディにおいて、建設時の資材消費と施工それぞれの環境負荷の寄与を工種別に検討しているが、土木工事においては対象工種全体の環境負荷に対する施工の寄与が大きく無視できないこと、機械工事・配管設備工事においては施工の寄与が1%未満と小さいことが示されている（エネルギー消費・二酸化炭素発生）。よって、本研究では土木工事については施工に関する環境負荷を検討対象に含めることとし、機械工事、配管設備工事、電気・計装設備工事については施工に関する

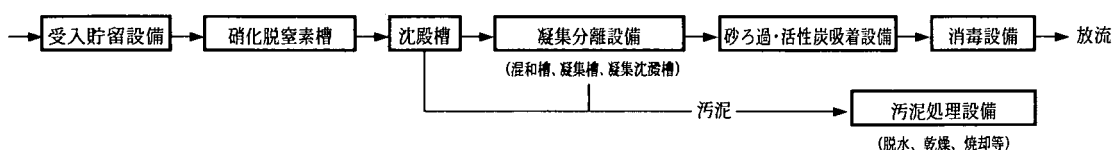
(1) 嫌気性消化活性汚泥処理方式



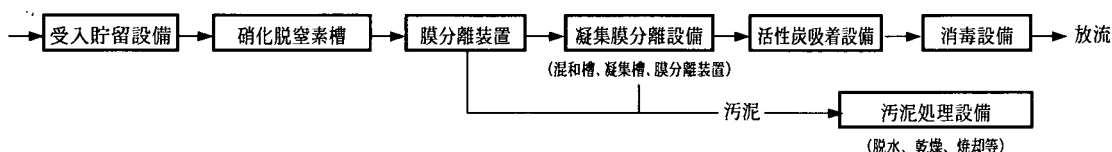
(2) 標準脱窒素処理方式



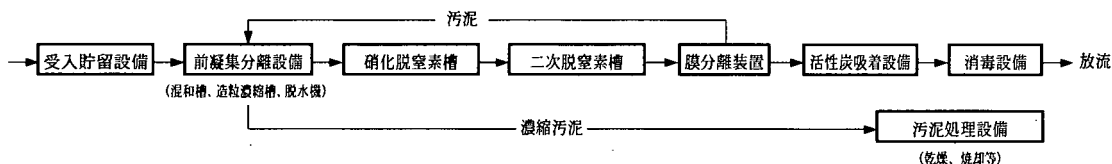
(3) 高負荷脱窒素処理方式



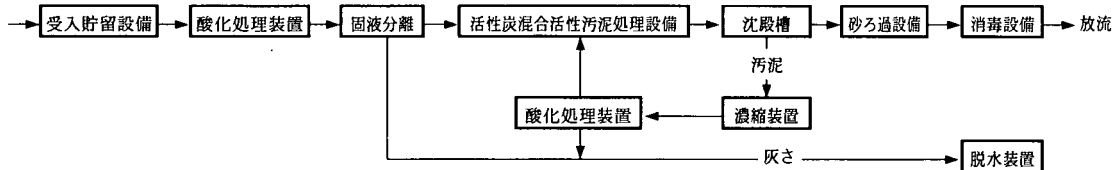
(4) 膜分離高負荷脱窒素処理方式



(5) 浄化槽汚泥対応型膜分離高負荷脱窒素処理方式



(6) 湿式酸化活性汚泥法処理方式



(7) 汚泥再生処理センター方式

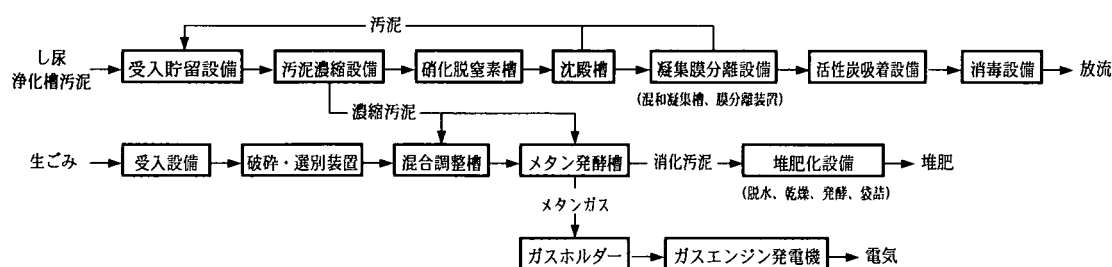


図-1 本研究で対象とした処理方式のフロー例^{3),4),5)}

る環境負荷を検討対象外とした。

運転時に投入されるユーティリティとしては、対象施設の運転管理資料より電気使用量、水道使用量、

燃料使用量、薬剤使用量について、直近年度の実績値を把握した。汚泥再生処理センターについては、本格稼働を開始してからそれほど期間が経過してお

らず、評価に必要な実績データが十分に得られなかったため、適宜計画値で代用した。

また、し尿処理施設では、汚泥の焼却によって処理量1klあたり3kg程度の残渣が発生し、最終処分されているが、その寄与は小さいものと考えられる。齋巻⁸⁾は、下水道終末処理施設を対象にしたケーススタディにおいて、処理施設全体の環境負荷（エネルギー消費・二酸化炭素発生）に対する汚泥処分の寄与を検討しているが、その割合は1%未満ときわめて小さいことが示されており、本研究では汚泥の最終処分に関する環境負荷を検討対象外とした。

機材の更新については、各機材の耐用年数を収録している資料^{13),14),15)}、実施設での機材の更新実績を参考に、機材毎に耐用年数を設定し、式(1)に従って施設の耐用年数あたりの更新回数を求めて積算を行った。なお、施設の耐用年数は施設の実態を考慮して20年と仮定した。

$$Fi = \text{ROUND}\left(\frac{a}{bi}\right) - 1 \quad (1)$$

Fi : 各機材の更新回数

a : 施設の耐用年数 = 20(年)

bi : 各機材の耐用年数

ROUND: 小数点以下を四捨五入する関数

施設の解体については、鉄筋コンクリート（地上部、地下部）の圧砕に関する燃料消費、機器損料等を対象とした。発生する廃棄物は全量が最終処分されるものと見なし、廃棄物の運搬（輸送距離30km）に関する燃料消費、機器損料等、及び最終処分に関する環境負荷を対象とした。

(3) 積算方法

本研究では、上述の資材・ユーティリティ投入量（重量、体積等）に物量ベースの環境負荷原単位を乗じてエネルギー消費量及び二酸化炭素発生量の積算を行った。環境負荷原単位としては、(社)日本建築学会の産業連関表を利用したデータベース¹⁶⁾を用いた。このデータベースには、各品目のエネルギー消費・二酸化炭素発生等の環境負荷の推定値が与えられている。

なお、複数の資材を組み合わせる構成される資材については、対応する原単位がデータベースに収録されていないため、構成資材毎に分解して重量を求め、それぞれ原単位と対応づけて積算を行った。機能単位は「し尿・浄化槽汚泥・生ごみ等の混合した液状廃棄物1klの処理」とした。生ごみの比重は1と仮定した。

建設時の環境負荷は、施設の建設に投入される資

材に関わる環境負荷量の合計を施設の耐用年数20で除して1年当たりの環境負荷を求め、さらにこれを1年当たりの計画処理量(kl)で除して1kl当たりの環境負荷（建設時）を算出した（式(2)）。また、機材の更新、施設の解体・廃棄に関する環境負荷についても同様に計算した。

なお、解体によって発生した廃棄物は安定型処分場に搬入されるものと考えられ、最終処分の積算にあたっては安定型処分に関わる環境負荷原単位を使用して計算すべきであるが、そうしたデータが得られなかったため、管理型処分場における環境負荷の積算事例¹⁷⁾のデータを代用して計算を行った。

運転時の環境負荷は、直近年度のユーティリティ消費量から1年当たりの環境負荷を求め、これを1年当たりの実績処理量(kl)で除して1kl当たりの環境負荷（運転時）を算出した（式(3)）。処理対象の廃棄物に含まれる生物分解性の炭素については、二酸化炭素発生量の積算において計上しないこととした。

$$Lc = \frac{\sum Mci \times Di}{Qp \times a} \quad (2)$$

$$Lo = \frac{\sum Moi \times Di}{Qa} \quad (3)$$

Lc : 処理量1klあたりの施設の建設に関する環境負荷量合計(MJ/kl等)

Lo : 処理量1klあたりの施設の運転に関する環境負荷量合計(MJ/kl等)

Mci : 施設の建設に投入される各資材量(kg等)

Moi : 施設の1年間あたり運転に投入される各ユーティリティ量(kg/年等)

Di : 各資材の環境負荷原単位(MJ/kg等)

Qp : 施設の1年間あたりの計画処理量(kl/年)

Qa : 施設の1年間あたりの実績処理量(kl/年)

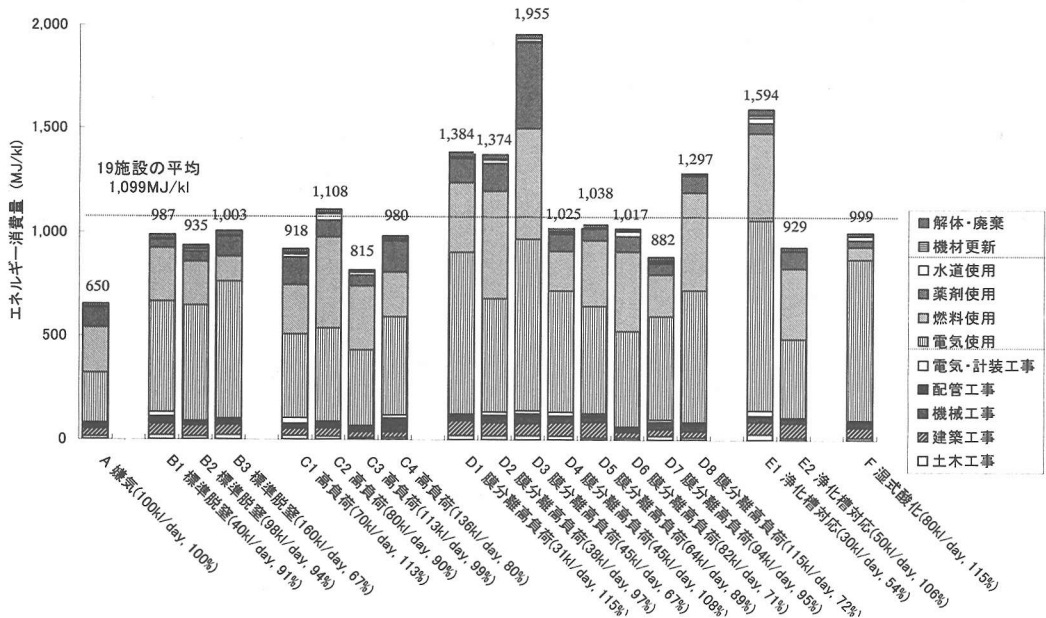
a : 施設の耐用年数 = 20年

なお、汚泥再生処理センターにおける発電、コンポスト化によって、それぞれ「電力」、「有機質肥料」が代替されるものとみなし、Avoided Impact手法によって間接的な環境への貢献分として取り扱った。これらの環境負荷低減効果は、前述のデータベース収録の環境負荷原単位¹⁶⁾に基づいて計算した。

3. 積算結果

(1) 従来型のし尿処理施設におけるエネルギー消費及び二酸化炭素発生

検討対象施設における処理量 1kl 当たりのエネルギー消費量の積算結果を図-2 及び表-2 に示した。対象とした 19 施設の平均は 1,099MJ/kl であった。



※ かつこ内に施設の規模、負荷率を示した。

図-2 従来型処理方式のエネルギー消費量

表-2 従来型処理方式のエネルギー消費量の内訳 (単位: MJ/kl, 数値は平均±標準偏差)

処理方式	嫌気	標準脱窒	高負荷	膜分離高負荷	浄化槽対応	湿式酸化	全施設
対象施設数	1	3	4	8	2	1	19
対象規模(kl/day)	100	40~160	70~136	31~115	30~50	80	30~160
建設	78	106±22	92±22	112±28	124±25	94	106±25
土木	13	18±3.6	13±4.6	15±4.5	18±12	11	15±5.2
建築	38	51±3.3	32±6.2	52±20	64±9.6	49	48±16
機械	19	20±6.4	29±23	26±7.4	21±7.6	22	25±11
配管	3.9	6.0±3.4	3.9±1.4	6.8±2.1	3.7±2.4	7.7	5.6±2.4
電気・計装	4.8	11±7.6	15±8.6	11±5.0	17±13	4.6	12±7.0
運転	554	846±29	842±114	1,109±324	1,110±428	889	971±283
薬剤	94	62±31	104±46	127±120	67±25	32	99±84
燃料	220	197±70	301±101	370±133	381±57	63	305±132
水道	12	12	20±9.8	10±8.0	15±17	19	14±9.2
電力	240	583±68	423±49	605±134	646±379	775	557±174
機材の更新	4.3	3.7±1.2	7.4±3.7	8.0±5.0	6.7±8.6	2.1	6.5±4.5
解体・廃棄	13	19±3.5	13±3.7	17±4.6	21±8.5	13	17±4.7
合計	650	975±36	955±122	1,246±342	1,261±470	999	1,099±303

処理方式別に見ると、「嫌気」で650MJ/kl, 「標準脱窒」で平均975MJ/kl, 「高負荷」で平均955MJ/kl, 「膜分離高負荷」で平均1,246MJ/kl, 「浄化槽対応」で平均1,261MJ/kl, 「湿式酸化」で999MJ/klであった。

内訳は、運転時が84~92%と大半を占めた。項目別に見ると、いずれの方式においても運転時に使用される電力及び燃料によるエネルギー消費量がかなり大きく、この2項目で全体の70~85%を占めた。次いで運転時に使用される薬剤、建設時の建築工事

におけるエネルギー消費量が大きかった。なお、機材の更新、施設の解体・廃棄に関わる環境負荷はそれぞれ2~8MJ/kl, 13~21MJ/klと、全体の環境負荷に占める割合は1%程度とかなり小さいことが明らかになった。

処理方式別の傾向を見ると、建設時におけるエネルギー消費量の平均値では、表-2に示すように「膜分離高負荷」、「浄化槽対応」の2方式が全体の平均より若干高い傾向を示した。

また、運転時におけるエネルギー消費量の平均値

表-3 従来型処理方式の二酸化炭素発生量の内訳 (単位: kg-CO₂/kl, 数値は平均±標準偏差)

処理方式	嫌気	標準脱窒	高負荷	膜分離高負荷	浄化槽対応	湿式酸化	全施設
対象施設数	1	3	4	8	2	1	19
対象規模(kl/day)	100	40~160	70~136	31~115	30~50	80	30~160
建設	5.7	7.8±1.5	6.6±1.4	8.1±2.0	9.1±1.9	6.8	7.6±1.8
土木	1.2	1.8±0.34	1.2±0.44	1.5±0.44	1.8±1.2	1.1	1.5±0.5
建築	2.7	3.7±0.24	2.3±0.45	3.7±1.40	4.6±0.69	3.5	3.4±1.2
機械	1.2	1.3±0.41	1.9±1.5	1.7±0.48	1.3±0.49	1.4	1.6±0.8
配管	0.25	0.38±0.21	0.24±0.087	0.43±0.13	0.23±0.15	0.49	1.0±2.2
電気・計装	0.31	0.70±0.48	1.0±0.53	0.72±0.32	1.1±0.81	0.29	1.1±1.0
運転	38	57±2.0	57±7.7	75±22	75±28	59	65±19
薬剤	6.7	4.3±2.3	7.2±3.2	8.8±8.3	4.6±1.7	2.3	6.8±5.8
燃料	15.1	13.6±4.8	20.7±6.9	25.7±9.2	26.3±3.9	4.4	21±9.1
水道		0.82	1.3±0.64	0.67±0.52	1.0±1.1	1.3	0.93±0.61
電力	15.9	38.5±4.5	27.9±3.2	40.0±8.9	42.7±25.1	51.2	37±11
機材の更新	0.28	0.23±0.086	0.47±0.24	0.51±0.32	0.42±0.54	0.13	0.42±0.29
解体・廃棄	0.92	1.3±0.20	0.90±0.25	1.2±0.32	1.5±0.59	0.93	1.2±0.33
合計	45	66±2.5	65±8.3	84±23	86±31	67	74±21

についても、表-2に示すように「膜分離高負荷」, 「浄化槽対応」が若干高い傾向を示した。特に処理規模, 負荷率共に小さい施設において, 処理量あたりの電力消費量・薬剤消費量の高い事例が見られ(例えば, 図-2のD3の施設(膜分離高負荷45kl/日, 負荷率67%)で電力826MJ/kl, 薬剤415MJ/kl, E1の施設(浄化槽対応30kl/日, 負荷率54%)で電力914MJ/kl), これによって平均が押し上げられる等, 運転に関わるエネルギー消費量は規模, 負荷率といった施設条件によって大きく変動するものと考えられる。

また, 検討対象施設における処理量1kl当たりの二酸化炭素発生量の積算結果を表-3に示した。19施設の平均は74kg-CO₂/klであり, 「嫌気」45kg-CO₂/kl, 「標準脱窒」平均66kg-CO₂/kl, 「高負荷」平均65kg-CO₂/kl, 「膜分離高負荷」平均84kg-CO₂/kl, 「浄化槽対応」平均86kg-CO₂/kl, 「湿式酸化」67kg-CO₂/klであった。

内訳は, エネルギー消費量とほぼ同様の傾向を示し, いずれの方式においても運転時に使用される電力及び燃料による二酸化炭素発生量がかなり大きく, 次いで運転時に使用される薬剤, 建設時の建築工事におけるエネルギー消費量が大きかった。機材の更新, 施設の解体・廃棄に関わる環境負荷はそれぞれ0.04~1.2kg-CO₂/kl, 0.6~1.9kg-CO₂/klと, 全体の環境負荷に占める割合は1~2%程度とかなり小さいことが明らかになった。

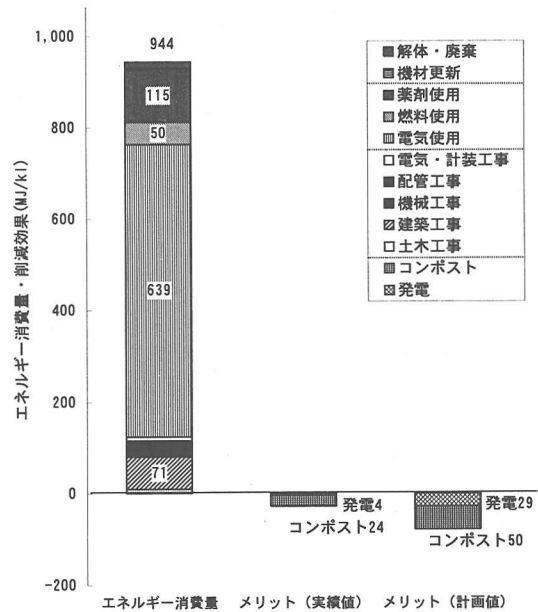


図-3 汚泥再生処理センターのエネルギー消費量及び資源化によるメリット

(2) 汚泥再生処理センターにおけるエネルギー消費・二酸化炭素発生, 及び発電・コンポスト化のメリット

検討対象施設(し尿・浄化槽汚泥処理の負荷率97.5%, 生ごみ処理の負荷率61.5%)における処理量1kl当たりのエネルギー消費量の積算結果を図-3に示した。対象施設のエネルギー消費量は944MJ/klであり, 運転に使用される電気が639MJ/kl, 薬剤115MJ/klと大半を占めた。従来型処理方式の同規模の施設の環境負荷と比較すると, 高負荷80kl/dayの施設で1,108MJ/kl, 膜分離高負荷82kl/dayの施設で

表-4 建設の各項目に関わるエネルギー消費量と施設条件に関する諸変数の相関係数

		土木工事	建築工事	機械工事	配管工事	電気計装工事	更新	解体
施設規模(kl/日)		-0.63 *	-0.83 ***	0.36	-0.20	-0.30	-0.08	-0.84 ***
浄化槽汚泥比率 (計画値)		-0.12	0.20	0.18	-0.13	-0.02	-0.03	-0.00
膜の種類	回転平膜	0.63 *	-0.04	0.05	-0.16	0.31	0.36	0.50
	回転平膜以外の膜	-0.23	0.54	-0.17	0.60 *	-0.36	-0.21	0.03
	膜分離なし	-0.28	-0.57 *	0.16	-0.46	0.18	-0.04	-0.45
処理水質	計画処理水質の BOD 設定値	-0.20	-0.34	0.01	-0.41	-0.26	0.21	-0.31
	計画処理水質の COD 設定値	-0.07	-0.30	0.43	-0.08	-0.20	0.39	-0.18

表-5 運転の各項目に関わるエネルギー消費量と施設条件に関する諸変数の相関係数

		薬剤	燃料	水道	電力
施設規模(kl/日)		-0.19	-0.30	-0.17	-0.53 *
負荷率		-0.22	-0.51	-0.40	-0.49
浄化槽汚泥比率 (実績値)		-0.15	0.31	0.12	0.11
膜の種類	回転平膜	-0.27	-0.15	0.12	0.44
	回転平膜以外の膜	0.24	0.39	-0.45	0.15
	膜分離なし	-0.05	-0.29	0.40	-0.52
処理水質	計画処理水質の BOD 設定値	0.01	-0.08	0.01	-0.01
	計画処理水質の COD 設定値	0.34	-0.27	-0.28	0.04

* p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

※有意な相関が認められた項目を網掛けで示した。

1,017MJ/klと大きな差は見られなかった。ただし、汚泥再生処理センターにおいては汚泥を焼却しないことから、燃料に関するエネルギー消費量が50MJ/klと従来型施設の平均305MJ/klと比較して小さかった。

資源化のメリットについては、実績値では発電によるメリット（電力消費の節約）が4MJ/kl、コンポスト化によるメリット（有機質肥料生産に対するエネルギー消費の回避）が24MJ/klとなり、合計で消費量の約3%に相当するエネルギー消費量の削減効果があることが示唆された。ただし、この数値は生ごみの搬入量の少ない低負荷率の状態におけるものであり、計画通り生ごみの負荷率が100%の状態であれば、発電によるメリットが29MJ/kl、コンポスト化によるメリットが50MJ/klで、合計で消費量の約8%に相当する削減効果が見込まれる。

一方、処理量1kl当たりの二酸化炭素発生量は63kg-CO₂/kl、資源化のメリットは実績値では発電0.3kg-CO₂/kl、コンポスト化1.6kg-CO₂/klと発生量の約3%に相当する削減効果があることが示唆された。

4. 考察

(1) 環境負荷の影響要因の検討

結果において述べたように、施設の建設、運転に伴う環境負荷に対しては、施設の規模や負荷率等の様々な条件が影響するものと考えられる。本研究では、エネルギー消費量を例にして各施設の積算結果と施設条件の相関を分析し、その影響を統計的に検討することとした。

プロセスフローの類似している「高負荷」、「膜分離高負荷」、「浄化槽対応」の3方式14施設を対象にして、施設規模、負荷率、浄化槽汚泥比率、処理機材の種類等の施設条件を表す諸変数と処理量1klあたりのエネルギー消費量の相関について検討した結果を表-4及び表-5に示した。なお、質的変数については各カテゴリーにダミー変数を割り当てて分析を行った。

建設に関するエネルギー消費量については、土木工事、建築工事及び解体工事において「施設規模」と負の相関が見られ、スケールメリットがあることが示唆された。膜の種類については「回転平膜」と土木工事に正の相関、「回転平膜以外の膜」と配管工事に正の相関、「膜分離なし」と建築工事に負の相関が認められた。回転平膜装置は一般に大型であるため、こうした装置を採用している施設の土木工

事量が増大している可能性が示唆された。また「回転平膜以外の膜」を採用している施設においては、配管工事が複雑となった結果、その工事数量が大きくなっている可能性が考えられる。

なお、「膜分離なし」、すなわち「高負荷」の施設において建築工事と負の相関が見られ、膜分離を採用していない施設の方が建築に関するエネルギー消費量が小さいことが示唆された。本来、膜分離技術を採用する場合に施設のコンパクト化が図られ、その結果建築工事に関するエネルギー消費量が小さくなると考えられるが、逆の相関が示される結果となった。

ただし、膜分離を採用している施設について、個別に建築に関するエネルギー消費量を見ると、図-2のD1～D5, E1, E2の処理規模の小さい施設において58～74MJ/klと大きいものに対して、処理規模が80kl/日を超えるD6～D8の施設では28～31MJ/klと半分程度となっていた。膜分離を採用する「膜分離高負荷」、「浄化槽対応」の2方式の対象施設には「高負荷」の対象施設より多くの小規模施設が含まれているため、そうしたスケールデメリットによって膜分離採用施設のエネルギー消費量が相対的に大きくなり、「膜分離なし」と建築工事の間に見かけ上の相関が発生したものと考えられる。なお、施設規模を制御変数として「建設工事」に関するエネルギー消費量と「膜分離なし」の偏相関を検討した結果、偏相関係数は-0.23(n=11, p=0.45)となり、有意な相関とならなかった。

浄化槽汚泥比率の計画値及び計画処理水質と建設に関するエネルギー消費量の間には相関が認められなかった。

運転に関するエネルギー消費量については、電力において「施設規模」と負の相関が見られ、スケールメリットがあることが示唆された。負荷率、浄化槽汚泥比率の実績値、膜の種類及び計画処理水質との相関は認められなかった。

本研究では、統計的手法を適用する上でケース数が少なかったため、プロセスフローの類似している3つの処理方式をまとめて分析を行ったが、今後環境負荷の影響要因をさらに詳細に検討していくにあたっては、嫌気等のケース数の少ない各処理方式についても積算事例を増やして処理方式毎に分析することや、重回帰分析等の多変量解析手法によって検討することが必要と考えられる。

(2) 除去BOD当たりの環境負荷及び下水道終末処理施設との比較

し尿処理施設と競合するシステムとしては下水道

表-6 除去BOD当たりのエネルギー消費量及び二酸化炭素発生量 (数値は平均±標準偏差)

処理方式	施設数	エネルギー消費量 (MJ/kg-BOD)	二酸化炭素発生量 (kg-CO ₂ /kg-BOD)
嫌気	1	51	3.5
標準脱窒	3	97±15	6.5±1.0
高負荷	4	119±27	8.1±1.8
膜分離高負荷	7	193±73	13.1±5.0
浄化槽対応	2	230±103	15.6±6.9
湿式酸化	1	75	5.0
全体	18	150±76	10.2±5.2
(参考) 下水道終末処理施設 ⁹⁾		51	2.5

終末処理施設が挙げられ、両者の環境負荷の比較について次に検討する。ただし、処理対象の性状は両者で異なっており、例えば流入水のBOD濃度の計画値は、下水道終末処理施設で約200mg/lであるのに対して、本研究の対象としたし尿処理施設で5,000～13,000mg/l程度と濃度が25～65倍となっている。単位処理量(体積)当たりの除去BOD量は両者で大きく異なっていることから、比較にあたっては機能単位を「BOD1kgの除去」と設定した場合の環境負荷量を用いることとした。

従来型のし尿処理施設について、施設設計値に基づいて除去BODを式(4)に従って算出し、式(2)、式(3)に準じて除去BOD当たりのエネルギー消費量及び二酸化炭素発生量を算定した結果を表-6に示した。

$$R_{BOD} = I_{BOD} - O_{BOD} \times D \quad (4)$$

R_{BOD} : 除去BOD(mg/l)
 I_{BOD} : 流入水のBOD濃度の計画値(mg/l)
 O_{BOD} : 放流水のBOD濃度の計画値(mg/l)
 D : 希釈倍率の計画値

一方、下水道終末処理施設(処理規模: 平均86,400m³/日)の調査事例⁹⁾では、除去BOD当たりエネルギー消費量は51MJ/kg-BOD、二酸化炭素発生量は2.5kg-CO₂/kg-BODであった。施設の処理プロセス、運転条件、処理規模、評価対象範囲、使用した原単位等が異なっているため単純比較はできないが、本研究の対象施設のエネルギー消費量、二酸化炭素発生量は、ほぼ同等もしくは高い値を示す結果となった。

なお、し尿処理システムと下水道処理システムを比較するにあたって、本来は対象範囲、機能単位及び使用する原単位等について整合を図ることが必要である。本研究では処理過程のみを対象として検討を行ったが、今後、本研究で検討できなかったし尿の収集・運搬(車両)、下水道の管渠・ポンプ場、

表-7 2つのシナリオにおけるエネルギー消費量の内訳

(カッコ内は「②汚泥再生処理センター」の合計 74,415MJ を100%とした場合の各プロセスの割合を示した)

	機能単位	し尿処理 (※1)	焼却 (※2)	汚泥再生処理	資源化による削減効果 (※3)	合計
①し尿処理+生ごみ焼却	し尿80kl	1,108MJ/kl×80kl = 88,633MJ (119.1%)				91,409MJ (122.8%)
	生ごみ1.3t		2,130MJ/t×1.3t = 2,769 MJ (3.7%)			
②汚泥再生処理センター	し尿80kl 生ごみ1.3t			944MJ/kl×81.3kl = 76,747 MJ (103.1%)	コンポスト -24.2MJ/kl×81.3kl = -1,971MJ (-2.6%)	74,415MJ (100%)
					発電 -4.4MJ/kl×81.3kl = -361MJ (-0.5%)	

※1 本研究の高負荷80kl/dayの施設における計算結果を引用した

※2 文献17から、一般廃棄物の焼却（処理規模：360t/日）に関わるエネルギー消費量のデータを引用し、発電によるメリットは考慮しなかった

※3 本研究の汚泥再生処理センターの施設における計算結果（実績値）を引用した

残渣の最終処分を含め、各処理システムを構成する全ての過程にわたって情報収集し、種々の計算条件を統一した上で評価する必要がある。

(3) 汚泥再生処理センターの循環利用施設としての評価

汚泥再生処理センターの循環利用施設としての評価を実施するにあたって、他の処理方法・処理システムと比較することが考えられるが、その際は機能単位を統一する必要がある。例えば処理過程に焦点を当てて、①従来のし尿処理+生ごみの焼却と、本研究の検討対象とした②汚泥再生処理センターによるし尿と生ごみの混合処理、の2つのシナリオの比較を想定した場合、機能単位を「80klのし尿処理及び1.3tの生ごみ処理」と処理対象量を統一して評価を行うことが考えられる。

参考までに、各シナリオのエネルギー消費量について試算した結果を表-7に示した。①の方が②と比較して2割程度エネルギー消費量が大いことが明らかとなった。

なお、評価対象とした汚泥再生処理センターは、し尿・浄化槽汚泥の計画処理量80kl/日に対して、生ごみ（事業系）の計画処理量1.3t/日と、生ごみの処理規模が比較的小規模な施設であり、発電、コンポスト化のメリットの合計は、実績値で28MJ/kl、1.9kg-CO₂/klと小さかった。ただし、資源化による環境負荷削減効果は、処理対象廃棄物中の生ごみの比率によって大きく変化することが予想される。

平井ら²⁰⁾が生ごみの資源化処理システムについてLCAを実施した研究例では、生ごみのメタン発酵とコンポスト化を組み合わせた処理システムにおいて、生ごみ1t当たり約70kg-CO₂のメリット（本研究の実績値の約35倍）があると評価されており、汚泥再生処理センターにおいて、搬入物の生ごみの比率が高まれば資源化による環境負荷削減効果も増大することが期待される。近年、家庭系生ごみを資源化対象として生ごみの処理規模の大きな汚泥再生処理センターを建設する自治体も見られ、今後こうした事例に対しても同様な評価を行い、その処理に伴う環境負荷と環境負荷削減効果のバランスを評価していくことが必要と考えられる。

なお、本研究では汚泥再生処理センターについて十分な運転データがえられなかったため、一部計画値に基づいた試算にとどまったが、今後施設の運転に関する実績値に基づいて再評価、検証していく必要があると考えられる。また、本研究では処理過程のみを対象として試算を行ったが、生ごみの再生にあたってはその分別収集が不可欠であり、収集体系の変化をもたらすことが予想される。今後、本研究で検討できなかった収集・運搬、残渣の最終処分を含めた全ての過程にわたって情報収集し、システム全体を評価する必要がある。また、環境負荷量は施設条件によって大きく変動すると考えられる。システム間の比較を行うにあたっては、変動要因となりうる諸条件について比較するシステム間での統一を図る、あるいは統計的に制御する等、十分配慮する

必要があろう。

5. 結論

本研究では、し尿処理施設のもたらす環境負荷を定量的に評価することを目的として、複数の処理方式のし尿処理施設19施設及び汚泥再生処理センター1施設を対象に、エネルギー消費及び二酸化炭素発生量の積算を実施した。その結果、処理量1kl当たりのエネルギー消費量及び二酸化炭素発生量は、従来型処理方式の19施設の平均がそれぞれ1,099MJ/kl, 74kg-CO₂/klであり、内訳はいずれの方式においても運転時に使用される電力及び燃料の寄与が大半を占め、次いで運転時に使用される薬剤、建設時の建築工事の寄与が大きかった。汚泥再生処理センター1施設の処理量1klあたりのエネルギー消費量及び二酸化炭素発生量はそれぞれ944MJ/kl, 63kg-CO₂/klであり、発電及びコンポスト化によって約3%が削減されることが明らかとなった。

また、環境負荷の影響要因を検討するため、1klあたりのエネルギー消費量と、施設規模、負荷率、浄化槽汚泥比率及び処理機材の種類等の施設条件を表す諸変数との相関について検討した。その結果、土木工事、建築工事、解体工事、電力に関するエネルギー消費量と「施設規模」との間に負の相関が見られ、スケールメリットがあることが示唆された。また「回転平膜」装置を採用している施設の土木工事に関するエネルギー消費、「回転平膜以外の膜」装置を採用している施設の配管工事に関するエネルギー消費が大きいものと考えられた。

本研究では環境負荷に様々な要因が影響を及ぼすことが明らかとなったが、低環境負荷・資源循環型の処理体系を構築するに当たっては、種々の要因が定量的にどの程度影響しているのかについての情報が不可欠である。今後、評価事例数の拡充を図って重回帰分析等による統計的検討を実施するとともに、設計ノウハウ等の理論面からの考察等を加え、環境負荷を予測するモデルの構築を進めていく必要があると考えられる。

謝辞：本研究は、厚生科学研究費補助金による「創薬等ヒューマンサイエンス総合研究事業」で実施した。本研究の遂行にあたり、多大のご助力をいただいた浅野工事(株)、アタカ工業(株)、(株)荏原製作所、(株)クボタ、栗田工業(株)、住友重機械工業(株)、東レエンジニアリング(株)、(株)新潟鐵工所、(株)西原環境衛生研究所、三井鉱山(株)、三井造船(株)、三

菱化工機(株)、三菱重工業(株)、及び(財)廃棄物研究財団に深謝いたします。また、とりまとめにあたってご助言いただいた独立行政法人国立環境研究所大迫政浩主任研究員にこの場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 厚生省生活衛生局水道環境部環境整備課：平成9年度一般廃棄物処理事業実態調査結果の概要、都市清掃、第53巻第238号、pp.564-568, 2000.
- 2) 国土交通省都市局下水道部：平成11年度末の下水道普及率について、2000.
- 3) 厚生省水道環境部監修：し尿処理施設構造指針解説、(社)全国都市清掃会議、1988.
- 4) 河村清史：し尿処理技術の現状と開発動向、都市清掃、第49巻、第214号、pp.544-551, 1996.
- 5) 河村清史：汚泥再生処理センター等の性能指針および施設整備の計画・設計要領について、都市清掃、第54巻、第244号、pp.505-510, 2001.
- 6) 松本 亨、井村秀文：都市インフラ整備のLCA、クリーンエネルギー、第7巻、第1号、pp.37-45, 1998.
- 7) 井村秀文、銭谷賢治、中島芳紀、森下兼年、池田秀昭：下水道システムのライフサイクルアセスメント：LCE及びLC-CO₂による評価、土木学会論文集、No.552/VII-1, pp.75-84, 1996.
- 8) 齋巻峰夫：環境調和性を考慮した排水処理システムの評価手法に関する研究、1998.
- 9) 齋巻峰夫、野池達也：LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究、土木学会論文集、No.643/VII-14, pp.11-20, 2000.
- 10) 伊藤久明、尾崎正明、久保忠雄：下水処理施設のLCA試算について、第36回下水道研究発表会講演集、pp.1092-1097, 1999.
- 11) 黄 龍雨、花木啓介、田中俊博：汚泥処理システムにおけるLCCO₂に関する考察、下水道協会誌、第33巻、第405号、pp.75-87, 1996.
- 12) 黄 龍雨、花木啓介、田中俊博：LCCO₂による汚泥集約処理の評価、下水道協会誌、第33巻、第405号、pp.88-95, 1996.
- 13) 厚生省水道環境部環境整備課監修：し尿処理施設改良・改造技術に関する手引書、(財)日本環境衛生センター、1997.
- 14) 建設大臣官房官庁営繕部編集：改訂建築物のライフサイクルコスト、(財)経済調査会、2000.
- 15) 建築ストック対策委員会：建築物のLC評価用データ集(改訂版)、(社)建築・設備維持保全推進協会、1999.

- 16) (社)日本建築学会：建物のLCA指針（案），(社)日本建築学会，1999.
- 17) Matsui, Y., Tanaka, M., Ohsako, M., Saitoh, A. and Fujii, T.: Case Study on Inventory Analysis of Municipal Solid Waste Management System, *Proceedings of The Fourth International Conference on EcoBalance*, pp.339-342, 2000.
- 18) LCA実務入門編集委員会編：LCA実務入門，(社)産業環境管理協会，1998.
- 19) 戦略LCA研究フォーラム訳：LCA 製品の環境ライフサイクルアセスメント，(株)サイエンスフォーラム，1994.
- 20) 平井康宏，村田真樹，酒井伸一，高月 紘：食品残渣の循環処理過程におけるライフサイクルアセスメント，第4回エコバランス国際会議講演集；pp.335-338，2000.

(2001. 4. 13受付)

LIFE CYCLE INVENTORY ANALYSIS OF TREATMENT FACILITIES FOR LIQUID WASTE

Yasuhiro MATSUI, Masato YAMADA, Yuzo INOUE, Kiyoshi KAWAMURA and Masaru TANAKA

The object of this study is to evaluate quantitatively environmental burdens of the night soil treatment. Energy consumption and CO₂ emission were calculated for the night soil treatment facilities and the sludge recycling/treatment center in operation. Averages of 19 facilities for night soil treatment were 1,099MJ/kl and 74kg-CO₂/kl on energy consumption and CO₂ emission, respectively. Energy consumption and CO₂ emission of a sludge recycling/treatment center were 944MJ/kl and 63kg-CO₂/kl, respectively. The reduction effects by applying power generation and composting were accounted for 3% of total environmental burdens. The authors also examined the influence of the design variables such as the scale of facility, the constituent processes and the treatment level of the water quality on environment burdens. In addition, the authors tried to compare the night soil treatment facilities with the sludge recycling/treatment center and the sewerage treatment facility.