

9. 下水汚泥保有エネルギーの高度利用システムに関する調査

リサイクルチーム 上席研究員 鈴木 穰
主任研究員 落 修一

1. はじめに

下水汚泥は固形物当り 19kJ/g ほどを有するエネルギー資源である。しかし、これまでの汚泥処理は安定的な処分を図ることを前提とした単位プロセスの組み合わせでしかなかったために、汚泥の処理には多くの電力や化石燃料を必要とし、下水汚泥が保有しているエネルギーの3割ほどしか利用されて来なかったのが実情である。また、水処理プロセスにおいても汚泥処理プロセス以上のエネルギーを消費してきた。

下水道の人口整備率が6割を越えた現在、これからの下水道事業が使用料収入を主体とする経営形態となって行くことを踏まえると、今まで以上に事業運営の効率化が求められる。特に、人件費を除く維持管理費の大部分を占めているエネルギー経費の削減は今後の大きな課題である。下水汚泥が持つ潜在的な保有エネルギーは、下水道施設全体的大幅な省エネルギー、省コストに繋げられる可能性を秘めた唯一の固有資源であり、それを高度に開発・利用するシステム構築が求められる。

2. 調査の目的及び方法

本調査は、現有の汚泥処理プロセスをエネルギー生産プロセスに変革すべく、下水汚泥が持つ保有エネルギーを高度に開発、利用するシステムを構築することを目的とする。そのために、現有の焼却プロセスを発電プロセスに改変して、これと嫌気性消化プロセスとの一体化を図ることにより、メタンガスの再資源化を組み入れた電力・熱回収システムの構築を目指すものである。調査では、エネルギー高度利用評価モデルを整備するとともに、高温燃焼発電システム、消化ガス吸着貯蔵システムを開発する。

3. 平成14年度の調査結果

平成14年度は、開発システムをより効果的なものとするために、既存施設における主要設備・機器毎の電力消費量を年間の連続データとして収集し、解析に着手した。また、発電プロセス開発のために燃焼実験装置を製作し、実際の脱水汚泥を用いた加圧流動燃焼実験を行った。消化ガスの安定・高度利用のために開発、実用化された消化ガス吸着貯蔵法について、ライフサイクルアセスメント(LCA)とライフサイクルコスト(LCC)を解析した。

3.1 下水処理場におけるエネルギー消費実態調査

3.1.1 調査方法

エネルギー開発とその高度利用方法を検討するために、エネルギー消費・変動の実状を詳細に把握し、効果的なエネルギー生産・利用システムを構築するための基礎データを得ることを目的に、下水処理場の実態調査を行った。調査した下水処理場は、分流式下水道の計画処理人口が205,400人、現有処理能力が日最大124,000m³/日の1カ所の下水処理場である。本処理場は、他の下水処理場との汚水や汚泥の受け渡しがなく完全に独立し、水処理では高度処理までを、汚泥処理では嫌気性消化、焼却、熔融までのプロセスを有していることを条件に選定した。調査では、各プロセスや主要設備・機器毎の電力使用量を1年間を通して連

続モニターすると同時に、運転方法や処理量の実績を調べた。得られたデータは、時系列的に整理し、電力・エネルギー消費量の変動量及びその要因解析に資した。

3.1.2 調査結果

平成13年12月から平成15年2月までの間にモニタリングした消費電力量の結果を、水処理系と汚泥処理系毎に時間毎にとりまとめ、経時的な変化として図-1に示した。ここで、図中のコメントの「砂ろ過」は高度処理用砂ろ過設備の稼動により大きな変動があったことを示している。また、「消毒・放流」は、消毒設備が常時稼動している中で、当処理場では処理水の放流に際してポンプ移送が必要な場合があり、そのポンプ稼動による変動があったことを示している。消費電力量は、年間を通じて時間的に、また各種の要因により大きく変動し、その傾向からは周期的な変動と特異的な変動に区別できると思われた。

安定した周期的な変動があったと思われる区間の詳細を図-2に示した。「消毒・放流」の電力量変化に特異性が見られるものの、他の施設、設備における電力量変化には明らかに周期性があり、そして、安定した傾

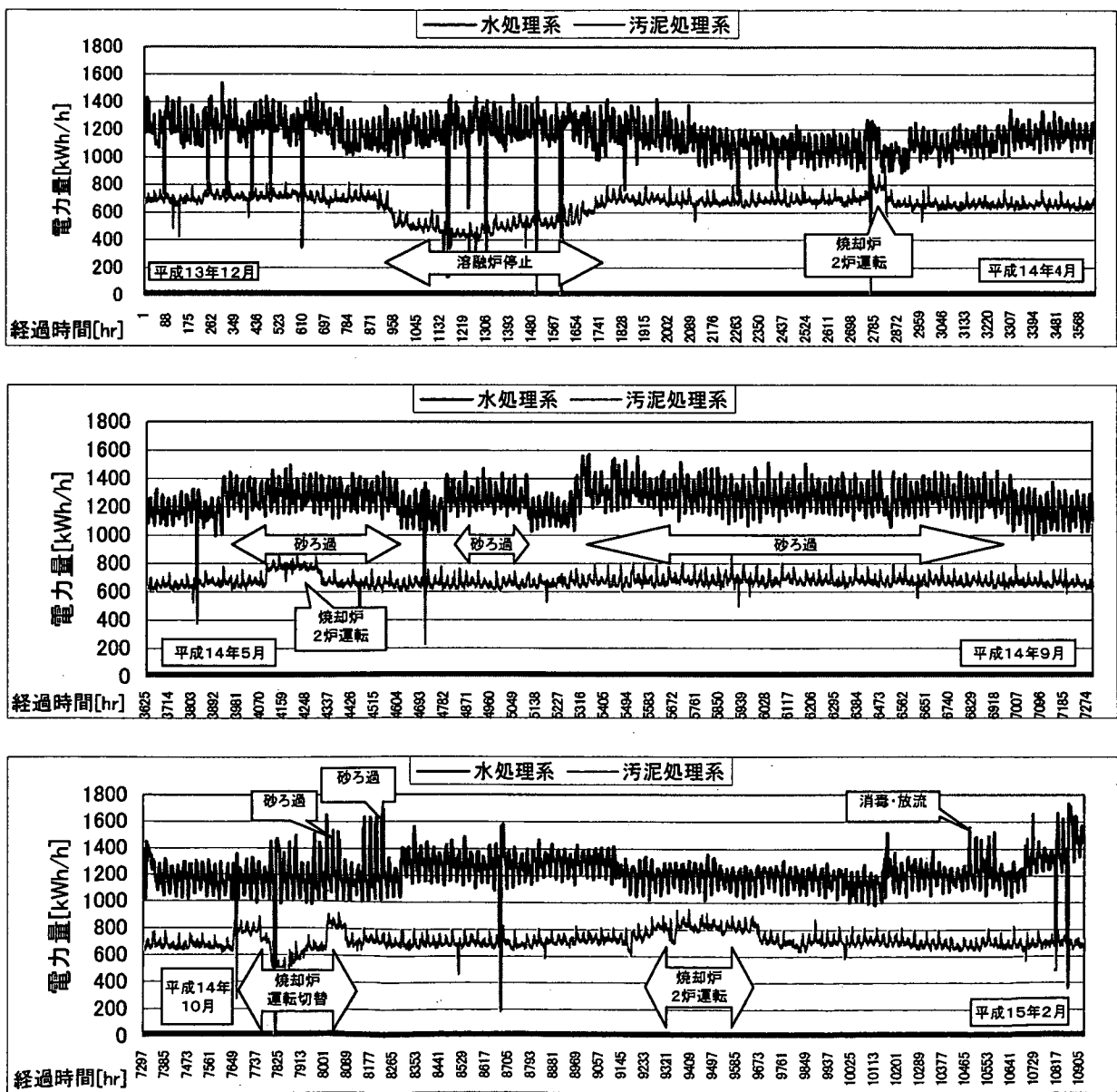


図-1 水処理系と汚泥処理系における年間を通じた消費電力量の経時変化

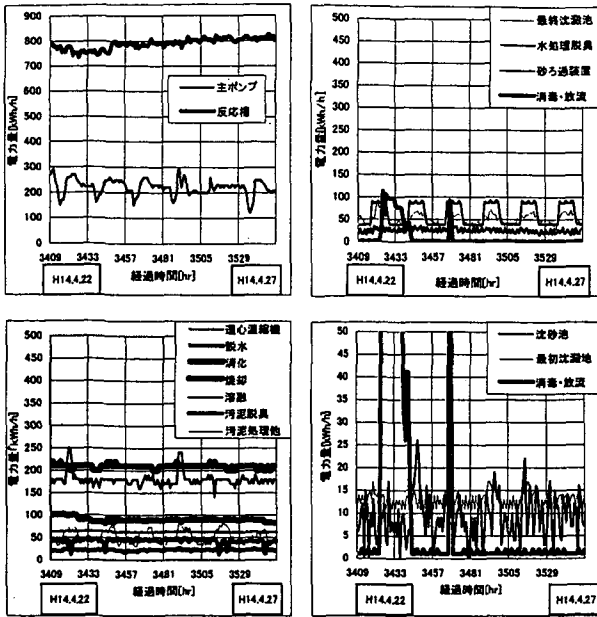


図-2 安定した周期的変動期の電力量内訳

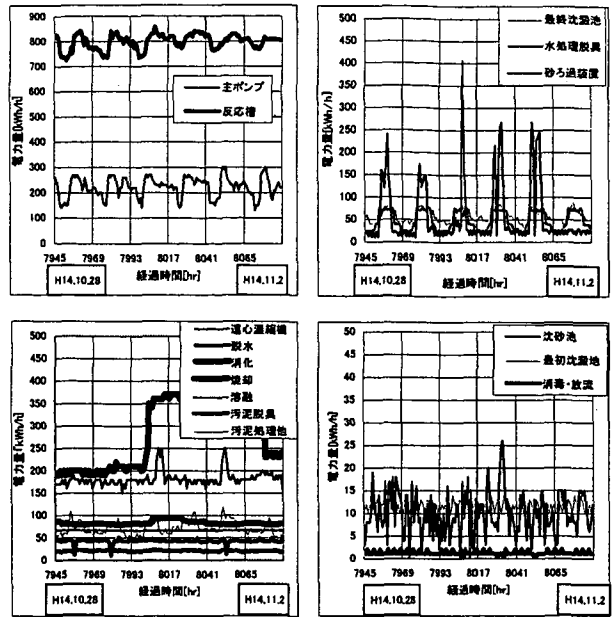


図-3 特異的な変動時の電力量内訳 (例)

向を示していることから、この量や変動の傾向が当処理場の円滑な稼動に必要な電力消費量の基礎・基準となると思われる。

特異的な変動の一例の詳細を図-3に示した。これは、焼却炉が1炉運転から2炉運転となり、170kWh/hほどの大きな消費増の期間があった例である。このときは、高度処理用の砂ろ過装置も稼動しており、本調査期間における最大のトータル消費電力 2,491kW を示した。ここで、図-2に見られるような期間の平均的なトータル消費電力は概ね 1,800kW であることから、これを平常時の電力消費量とすると、特異時は最大で平常時の約 1.4 倍必要としていたことになる。

3.2 高温燃焼発電システムの開発

現在の焼却プロセスを発電プロセスに変革すべく、下水汚泥の高温燃焼発電システムを開発している。開発システムにおける燃焼部は、一般的な脱水汚泥の含水率でも燃焼が可能で、且つ含有する水分も蒸気エネルギーとして利用できる加圧流動床式の燃焼炉を想定している。本年度は、燃焼特性を把握するために実験装置を製作し、実際の脱水汚泥を原料とした燃焼実験を行った。

3.2.1 実験方法

実験は、図-4に示す実験装置を製作し、これを圧力容器内に設置して、高分子系脱水汚泥を連続供給しながら 0.6MPa と 0.8MPa の圧力条件による連続燃焼を行った。実験では、燃焼過程におけるガス雰囲気の状態を観測した。また、燃焼後の流動層灰及びフライアッシュの成分について、フッ化水素酸・硝酸分解後、高周波誘導結合プラズマ発光分光分析法及び同・マススペクトロメトリー¹⁾により測定した。

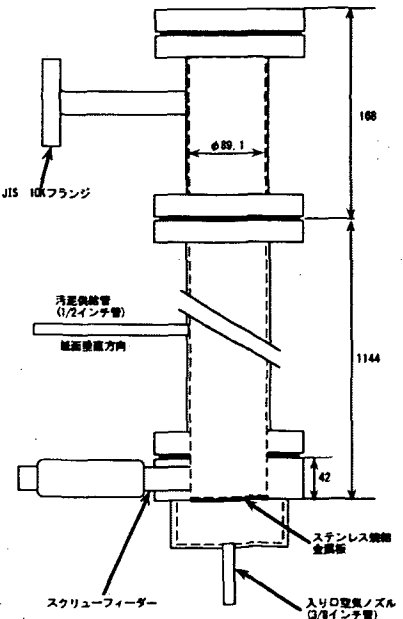


図-4 燃焼実験装置の概要

3.2.2 実験結果

含水率：78～82%、VS/TS：74～82%の高分子系脱水汚泥を実験装置の最上部から供給して加圧流動燃焼を行った結果、流動層温度は750～800℃に安定し、また、フリーボードの中間部温度は約800℃、最上部温度は約900℃に安定した燃焼が得られた。排ガスでは、NO_xが非常に低く、逆にN₂Oは高い傾向を示した。しかし、N₂Oは従来の流動床燃焼炉と同様にフリーボード温度を高めれば減少するものであった。また、排ガス中には多量のSO₂が存在する可能性が示され、これは機器腐食に直結することから実際は燃焼過程での脱硫が重要となると考えられた。灰の成分分析結果を表-1に示す。双方の灰の組成は従来の流動床燃焼炉の場合と大差ないものである。

表-1 灰の成分分析結果

元素	(単位：mg/kg-DS)	
	フライアッシュ	層内残留灰
Fe	138,700	100,000
P	94,700	61,000
Al	57,600	42,500
Ca	53,800	32,800
K	15,690	18,850
Mn	15,100	1,830
Ba	14,480	2,310
Mg	8,920	9,290
Na	7,580	5,140
Zn	1,319	640
Cu	1,034	789
Cr	233	86.1
Ni	88.9	41.8
Pb	71.2	41.1
Sn	62.1	39.5
V	59.6	37.7
As	28.3	8.2
Ag	23.1	11.9
Mo	21.8	14.7
B	21.7	20.2
Co	11.7	6.5
Sb	6.7	4.2
Cd	3.1	1.1
Se	1.3	<0.5
In	0.6	<0.5
Tl	<0.5	<0.5
Te	<0.5	<0.5
Be	<0.5	<0.5

3.3 消化ガス吸着貯蔵法のLCA、LCC解析

消化ガス貯蔵施設に関して、従来のガス発生量の0.5日相当分の貯蔵能力では、消化ガスの全量を安定利用していくことは困難である。このために、大量貯蔵・安定供給のための技術として従来の低圧貯蔵法に比べて単位容積当たりの貯蔵能力が20～30倍となる吸着貯蔵法が開発され、鶴岡市浄化センターに実用化された。実用施設の設置状況

を写真-1に、そのフローと主要設備機器の概略の仕様を図-5に示す。鶴岡市浄化センターには600m³を貯蔵する従来型の低圧ガスホルダが存在する。ここに、この従来型ガスホルダと同量の消化ガス量を約1/20の容積で貯蔵できる吸着貯蔵システムが増設されたものである。ここでは、約1年間の供用データに基づきLCA及びLCCについて解析した。

3.3.1 解析方法

解析の対象は、工場加工、基礎工事、運搬及び組立・設置から成る建設工程と運転、維持管理、補修などからなる供用工程及び撤去・整地（基礎杭は撤去しない）工程までとした。また、比較の意味で、同じ600m³の貯蔵能力を持つ従来の低圧ガスホルダについても解析した。LCA解析では、各工程における必要諸量を最小品目或いは事項毎に積み上げ、これに既報^{2), 3), 4)}の原単位を参考に適用して総CO₂発生量と総エネルギー消費量を求めた。LCC解析では、価格、経費を施設建設時点から現在に至る平成13年度～平成14年度時点で固定し、「ライフサイクル

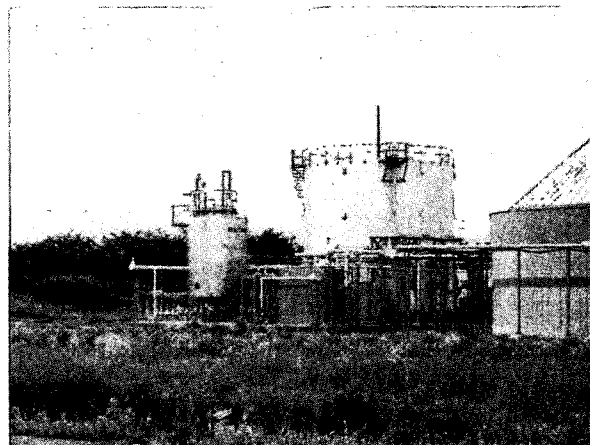


写真-1 吸着貯蔵タンク(左・小)と従来型貯蔵タンク(中央・大)

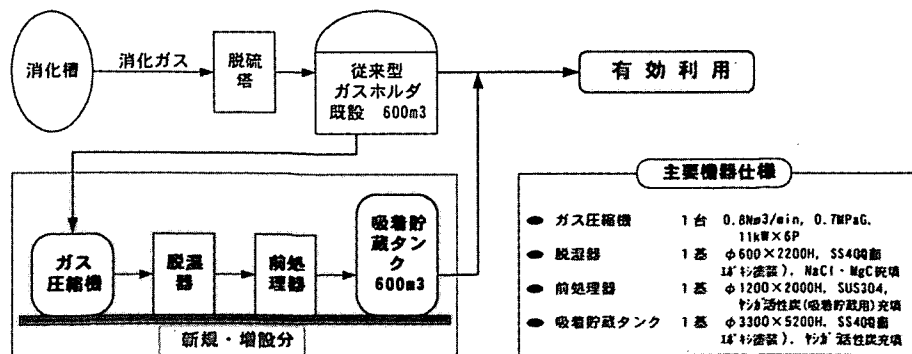


図-5 吸着貯蔵システムのフローと主要設備機器の概略仕様

ルの間における貨幣価値、物価は変わらない」とした。

解析では、運転管理工程における施設の耐用年数が重要な重みを持つ。ここで、開発プロセスは確実な保守点検が実施されて行けば100年以上の長期にわたって供用できる施設である。また、同様のことは従来の低圧ガスホルダについても言えるものである。

しかし、この100年を現実視することは馴染みが薄く、困難であると思われることから、感覚的に現実視できであろう期間として双方の耐用年数を50年に設定した。

3.3.2 解析結果

吸着貯蔵法の供用過程から得られたデータに基づき解析・検討された諸量を表-2に、また、耐用年数の間に必要とする事項の検討結果を表-3に示す。

(1) LCA解析

LCAの解析結果を表-4に示す。鶴岡市浄化センターに実用化した消化ガス吸着貯蔵設備のLCAは、約835t-CO₂ (16.3 × 10¹² J)と見積もられた。LCAにおける構成割合は、建設工程が30%、供用工程が73%、撤去・整地工程が-3%となっている。

従来の低圧ガスホルダと比べた場合、供用工程において従来法では殆どCO₂排出が無かったものが吸着貯蔵法では吸着動力、吸着剤などを必要とするために、この工程がCO₂排出の大部分を占める結果となっている。吸着貯蔵法の建設や撤去・整地に掛かるCO₂排出量は施設実容積がコンパクトとなっている効果から従来法よりも相当に低くなっている。また、吸着貯蔵法では撤去に際してリサイクル用材が多いことからCO₂発生抑制として現れた。

鶴岡市浄化センターに実用化した消化ガス吸着貯蔵設備は、従来法と比べて約136t-CO₂ (7.71 × 10¹² J)ほど多い環境負荷となるものであった。この要因は、供用過程におけるコンプレッサー動力389t-CO₂、脱湿剤160t-CO₂及び貯蔵タンクヒータ175t-CO₂にあり、コンプレッサー動力は別としても脱湿剤や貯蔵タンクヒータの削減法を迫及していく必要がある。一方、吸着貯蔵施設は、消化ガスの有効利用を推進するための施設と位置づけられるものであり、消化ガスの有効利用量が進めば進むほどにこのCO₂排出量は削減され、その削減量は消化ガス(CH₄濃度:60%)利用量当たり約1kg-CO₂/m³と見積もられる。なお、供用過程で排出される610t-CO₂を賄うために消化ガスを有効利用しなければならない1日当たりの利用量は僅かに33m³/日となり、容易に達成できる利用量である。

表-2 吸着貯蔵システムの運転諸量

項目	使用量と根拠	単価
電力	21,170 kWh/年 ガス圧縮機: 50kWh/日 × 0.8 × 365日/年 ヒータ: 30kWh/日 × 0.8 × 0.75 × 365日/年	¥15/kWh
活性炭	前処理用 1.3 t/2.5年 (2.5年に1回全量交換)	¥500/kg
	吸着貯蔵用 15 t/5年 (5年に1回全量交換)	¥500/kg
脱湿剤	250 kg/年 (年に1回の補充)	¥750/kg

表-3 耐用年数の間における主要整備項目

	10年 経過時	25年 経過時
吸着式貯蔵タンク		① コンプレッサー防音カバー・外面塗装 ② 脱湿器・内外面塗装 ③ 貯蔵タンク・内外面塗装
従来型乾式低圧貯蔵タンク	① 外面塗装	① パッチ当て込み ② ゴムシール交換 ③ 内外面塗装

表-4 LCAの解析結果

		吸着貯蔵タンク	低圧ガスホルダー
LCA	(t-CO ₂)	835	699
内訳	(建設)	250	609
	(供用)	610	4.78
	(撤去・整地)	-24.9	84.9

		吸着貯蔵タンク	低圧ガスホルダー
LCA	(10 ¹² J)	16.29	8.58
内訳	(建設)	3.22	7.80
	(供用)	13.35	0.0781
	(撤去・整地)	-0.283	0.707

(2) LCC解析

LCCの解析結果を表-5に示す。鶴岡市浄化センターに実用化した消化ガス吸着貯蔵設備のLCCは、約183百万円と見積もられた。このLCCの構成は、建設経費が61%、供用経費が36%、撤去・整地が2%となっている。従来の低圧ガスホルダと比べた場合、供用経費は吸着動力、吸着剤などを必要とするために約2倍高コストとなっているが、建設や撤去・整地に掛かる経費は施設実容積がコンパクトとなっている効果から相当な低コスト化が図られている。ここで、従来法と比べた場合の供用経費の割高分34百万円(69万円/年)が、消化ガスを安定的に有効利用して行くに必要な貯蔵コストとすることができる。

表-5 LCCの解析結果

		吸着貯蔵タンク	低圧ガスホルダー
LCC (10 ³ ¥)		182,128	232,697
内訳	(建設)	112,130	189,800
	(供用)	66,211	32,006
	(撤去・整地)	3,787	10,891

4. まとめ

平成14年度は、下水処理場におけるエネルギー消費実態調査・解析、高温燃焼発電システムの開発、消化ガス吸着貯蔵法に関するLCA、LCC解析を行い、以下のことが明らかとなった。

- ① 分流式下水道の計画処理人口：205,400人、現有処理能力：日最大124,000m³/日の下水処理場における消費電力量を調べた結果、消費電力は、年間を通じて時間的に、また各種の要因により大きく変動し、周期的な変動と特異的な変動に区別できた。平常時の全消費電力に対する特異時の最大消費電力は約1.4倍であった。
- ② 脱水汚泥の加圧流動燃焼実験を0.6及び0.8MPaの圧力下で行い、安定した燃焼を得た。排ガスのNO_xは非常に低く、逆にN₂Oは高い傾向を示したが、N₂Oはフリーボード温度を高めれば減少するものであった。排ガス中には多量のSO₃が存在する可能性が示され、機器腐食を起こすことから燃焼過程で脱硫する必要性が示された。得られる灰の組成は従来の流動床燃焼炉の場合と大差ないものであった。
- ③ 鶴岡市浄化センターに実用化した貯蔵能力：600m³の消化ガス吸着貯蔵設備のLCAは、約835t-CO₂(16.3×10¹²J)と見積もられた。その構成割合は、建設工程：30%、供用工程：73%、撤去・整地工程：-3%であった。一方、LCCは約183百万円と見積もられた。この構成は、建設経費：61%、供用経費：36%、撤去・整地：2%であった。

【参考文献】

- 1) 鈴木稔, 北村友一, 「下水汚泥有効利用に伴うリスク評価に関する研究」, 平成13年度環境保全成果集, 課題番号63, (2002)
- 2) 日本建築学会, 「建物のLCA指針(案) - 地球温暖化防止のためのLCCO₂を中心として -」, 丸善㈱
- 3) 建設省土木研究所材料施工部化学研究室, 「資源・エネルギー消費量、環境負荷の算定手法の開発と実態調査報告書(その2) - 資源, エネルギー消費量及びCO₂発生量の積み上げ計算 -」, 土木研究所資料第3256号, 平成6年3月(1994)
- 4) 建設省, 「建設省総合技術開発プロジェクト, 省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発 - 第二編建築分野 -, 最終報告書」, 平成8年10月(1996)