

一般廃棄物処理システムのライフサイクルアセスメントに関する研究
—エネルギーを指標として—

STUDY ON THE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF HOUSEHOLD WASTE
TREATMENT AND DISPOSAL SYSTEMS
—ENERGY CONSUMPTION AS AN INDICATOR—

井村秀文*・中嶋芳紀*・森下兼年**・前田利家***

Hidefumi IMURA*, Yoshinori NAKAJIMA*, Kanetoshi MORISHITA**, and Toshiie MAEDA***

ABSTRACT: A life cycle assessment (LCA) of household waste treatment and disposal systems was carried out in terms of LCE ("life-cycle energy"). Energy required for the construction of incineration plants and their equipment was estimated based on the result of an input-output analysis. Energy consumption for garbage collection, plant operation and ash transportation was also estimated, using the actual data obtained for Fukuoka City. Then, comparative studies were made with respect to the emission of greenhouse gases (CO_2 and CH_4), assuming different combinatory systems of garbage collection, incineration and reclamation.

KEYWORD: LCA, energy analysis, garbage collection, paper recycling, greenhouse gas emission

1. はじめに

LCA (ライフサイクルアセスメント) は、もともとは製品の製造、建設、利用、廃棄にわたる全過程を通じての環境負荷を評価・診断しようとするものであるが、その考え方と手法は、都市を構成する各種インフラ系にもそのまま適用できる。本研究では都市の静脈系を構成する一般廃棄物処理システムに着目し、福岡市をケーススタディ対象として、焼却施設の建設・運転、廃棄物の収集、焼却灰の最終処分場までの輸送を含めたシステム全体のLCAを試みる。また、現在採用されているシステムの評価とともに、紙の分別を行うなど、処理システムを変化させた場合の分析を行い、システムによる評価の違いを検討する。

環境評価項目としては、大気汚染や温室効果ガス (CO_2) の発生等の面で地球環境に及ぼす負荷の重要な指標となるエネルギー消費 (ライフサイクルエネルギー (LCE)) に着目する。また、焼却による CO_2 の発生と、埋立場からの CH_4 の発生に着目し、焼却と埋立の各種方式の組み合わせによる温室効果ガスの発生強度を比較検討する。なお、評価の段階としては、環境影響評価の前段としてのインベントリ分析までにとどめる。

2. 分析方法

今回の分析対象は、焼却処理施設の建設・運転、廃棄物の収集、焼却灰輸送の各ステージとする。それ以外のステージ、例えば、埋立における浸出水の排水処理は評価の今回の分析対象には含めない。ここで、福岡市の可燃性廃棄物の組成と低位発熱量の値は表1に示すとおりである。ただし、解析においては、これら

*九州大学工学部環境システム工学研究センター

Institute of Environmental systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

**東和科学 Towa Kagaku Company Limited

***福岡市役所 Fukuoka City

つては、その消費実績量に製造エネルギー原単位を乗じて算出した。これらの総和を1年間当たりの消費エネルギー（ALCE）とした。その算定スキームを図1に示す。

ごみ収集については、収集車の運転に必要な燃料がある。また、焼却灰処理については、灰の自動車輸送と埋立施設におけるコンパクター運転に必要な燃料消費がある。これらについては、福岡市のパッカ車、トラック、コンパクター1台当たりの燃費、平均走行距離及び使用台数に関する実績データから燃料消費量を算出した（図2、図3）。

ここで、電力のエネルギー換算値としては、電力会社からの受電（買電）については、転換、送電ロスを考慮し、1kWh=2250kcalで一次エネルギーに換算した。また、福岡市の清掃工場（東部・南部・西部の各清掃工場）においては、廃棄物焼却発電によるエネルギー回収を行っている。その電力は所内で消費される一方で、電力会社に逆送電（売電）されている。この回収電力については、回収された正味のエネルギーで評価（1kWh=860kcal）すべきか、一般の電力と等価（1kWh=2250kcal）として換算すべきか、議論の分かれるところであるが、ここでは、所内電力需要の多くを廃棄物焼却発電から得ており、この結果、電力会社からの買電量が削減されていることを重視する立場から前者で算定した。

廃棄物処理の中でも、収集については特に人力に頼るところが大きい。この投入労働力エネルギーも運用エネルギーの一部として計上すべきである。ここで採用すべき原単位についてはいくつかの考え方がある。例えば、労働者1人当たりの食料エネルギー摂取量によって、投入労働力に相当するエネルギー値を換算する方法もあるが、本論文では、廃棄物収集に従事する労働者1人の生活を維持するのに必要なエネルギーの総量として、日本国民1人当たりの家庭用エネルギー消費量⁶⁾を採用し、これを労働者1人1日当りに相当する投入エネルギー原単位とした。また、投入労働力として、廃棄物処理に直接従事する分のみを考えるか、事務部門等の間接部門の分も含めるべきか議論になるが、ここでは、廃棄物処理に直接携わる作業人員のみを考えた。直接作業人員は、福岡市のデータを用いて算出した⁷⁾。

3. 分析結果：福岡市のケーススタディ

3. 1 一般廃棄物処理に要するエネルギー消費量

福岡市の一般廃棄物処理システムの建設エネルギー、運用エネルギー、投入労働力エネルギーを算出し、それぞれにおける収集、焼却処理、焼却灰輸送、埋立の各工程の内訳を表3に示す。また、各工程別に見た運用エネルギー及び労働力エネルギーの内訳を表4に示す。

図4には、福岡市に存在する4つの清掃工場について、焼却工程のエネルギー原単位（焼却廃棄物1t当たり、焼却工程に要する運用エネルギー）を示す。焼却による回収エネルギー（発電量）が買電量を上回る場合、原単位は負になることもある。また、表5には、清掃工場別に、総投入エネルギー（LCE）に占

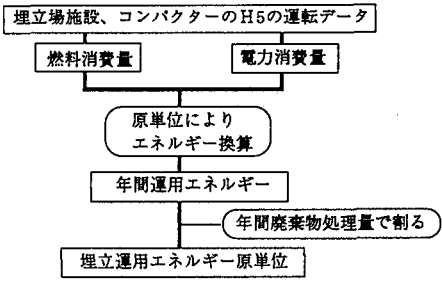


図-3 埋立運用エネルギー算出フロー図

表-3 福岡市の一般廃棄物処理に要する
ライフサイクルエネルギー
(平成5年度一般廃棄物焼却量592,310 t)

		年間投入エネルギー (Gcal/年)	焼却廃棄物1t当たり (Mcal/t・年)
建設	収集	1,633	2.76
	焼却処理	40,319	68.07
	焼却灰輸送	295	0.50
	埋立	885	1.49
	計	43,132	72.82
運用	収集	5,451	9.21
	焼却処理	-21,247	-35.88
	焼却灰輸送	839	1.42
	埋立	4,193	7.08
	計	-10,764	-18.18
労働	収集	1,036	1.75
	焼却処理	401	0.68
	焼却灰輸送	34	0.06
	埋立	50	0.08
	計	1,521	2.57
合計		33,889	57.21

の季節変動は無視し、年間の平均値を用いた。

福岡市において採用されている可燃性一般廃棄物処理のシステムを収集、焼却処理、焼却灰輸送、埋立の各工程に分類し、それぞれの関連施設の建設エネルギー（機械類などの製造も含む）及び運用エネルギー（設備の運転、薬品類の製造エネルギー等を含む）を算出した。ここで、LCE算定のためには、各種資材・薬品等の製造に必要なエネルギーの

原単位が必要になるが、その値は主に吉岡達¹⁾による産業連関分析の結果（1990年）を使用した。一方、施設の運用に関わるエネルギーについては、福岡市の施設運用の実態データ^{2) 3)}を基礎に算出した。対象年度は、運用データが入手できた平成5年度に統一することにした。産業連関分析による値のように、特定の年度についてしかデータが得られない場合は、物価等によって補正して対象年度の値とした。

ここで、建設エネルギーについては、各施設ごとに、その建設時に投入されたエネルギーを施設・機械類の耐用年数で除した値を1年当たりの建設エネルギーとした。この際に仮定した各施設、機械類の耐用年数をまとめて表2に示す。ここで、清掃工場、埋立場については福岡市における各施設の建設運用経験をもとに、また、機械類の耐用年数は一般的な経験値をもとに、それぞれの耐用年数を設定した。

なお、本論文では、上のように1年あたりに換算したLCEのことをALCE（“annualized life-cycle energy”）と称する。

清掃工場建設の建設エネルギー原単位は、総理府作成の産業連関表の統合表（183部門、1985年）と建設部門分析用産業連関表（46部門、1985年）を結合して算定された環境衛生施設の値を用いた。すなわち、この原単位に福岡市の清掃工場の工事金額を建設省所管工事費指数で補正した金額を乗じることによって建設のエネルギーを算出した。また、収集用のパッカ車、焼却灰輸送用のトラック、埋立施設で使用されるコンパクターの製造エネルギーについては、自動車メーカー⁴⁾による原単位を用いて算出した。埋立施設の建設エネルギーについては、建設のために使用された材料（鉄、コンクリート）の量に関する実績データとそれら材料の製造エネルギー原単位⁵⁾から算出した。

施設の運用エネルギーについては、福岡市の関連施設と機械類の運転実績値（年間電力消費量及び燃料消費量（平成5年度））を用いた。また、薬品に

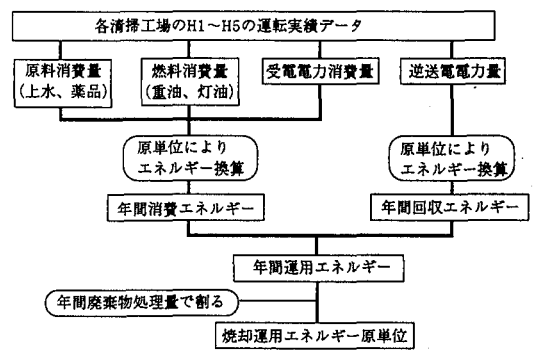
表－1 福岡市の可燃性廃棄物の組成、発熱量

	H1	H2	H3	H4	H5
紙類	43.7	42.7	41.7	45.2	47.8
高分子類	17.1	15.4	15.4	14.9	14.7
木、わら類	8.1	8.8	12.0	7.6	7.5
繊維類	3.6	4.3	4.2	3.8	3.3
雑物	18.3	19.2	17.5	19.4	17.9
不燃物	9.2	9.6	9.2	9.1	8.8
低位発熱量	2,030	2,200	2,170	2,110	2,220

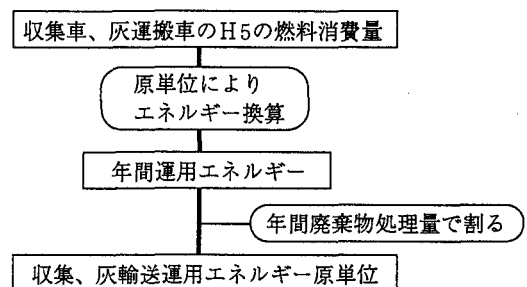
(%, kcal/kg)

表－2 耐用年数

	耐用年数
廃棄物収集車	5年
清掃工場	25年
焼却灰輸送車	6年
埋立場	25年



図－1 焼却運用エネルギー算出フロー図



図－2 収集、灰輸送運用エネルギー算出フロー図

める電力消費量、燃料消費量、薬品消費量、及び送電電力量の寄与割合を示す。

運用エネルギーについては、焼却処理の回収エネルギーを負で計上しているの、清掃工場（南部、西部清掃工場）によっては電力会社への逆送電による回収エネルギーが電力、燃料、薬品の消費エネルギーの合計を上回り、年間の運用エネルギー収支が負となる場合もある。発電を行っていない清掃工場（東部第2工場）では、当然ながら焼却のためのエネルギー原単位は正で、その値は他よりも大きくなっており（図4）、受電電力エネルギーの割合が高くなっている（表5）。その他の発電を行っている清掃工場については、焼却エネルギー原単位は小さく、受電電力の占める割合は小さい。ただし、逆に、焼却排ガスの洗浄に用いられる苛性ソーダの製造のために必要なエネルギー消費が大きくなっている。

以上の全体について、福岡市において焼却処理されている廃棄物1t当たりのALCEの試算結果（工程別内訳）を表3に示す。

また表6は、平成5年度の各清掃工場の施設容量1t当たりの建設ALCE、運用ALCEを示したものである。

3. 2 紙の分別処理

(1) エネルギーバランス

可燃性廃棄物の約45%を占める紙だけをすべて分別して再資源化し、その他の可燃性廃棄物を焼却するときのエネルギーバランスを考える。ただし、処理施設は現在のままとする。

紙の分別を行っていない現在のシステムにおいては、焼却排ガス（主に塩化水素）の洗浄に用いられる苛性ソーダの製造に要するエネルギーが、焼却処理のためのエネルギー全体の約50%を占める。また、現在は焼却発電によってエネルギー回収を行っているが、紙だけを分別して他の可燃性廃棄物を焼却処理することにした場

表-4 運用エネルギーと労働エネルギー

	運用エネルギー	労働エネルギー	合計	労働エネルギーの占める割合
	(Gcal/年)	(Gcal/年)	(Gcal/年)	(%)
収 集	5,451	1,036	6,487	16.0
焼 却 処 理	-21,247	401	-20,846	
焼却灰輸送	839	34	873	3.9
埋 立	4,193	50	4,243	1.2
合 計	-10,764	1,521	-9,243	

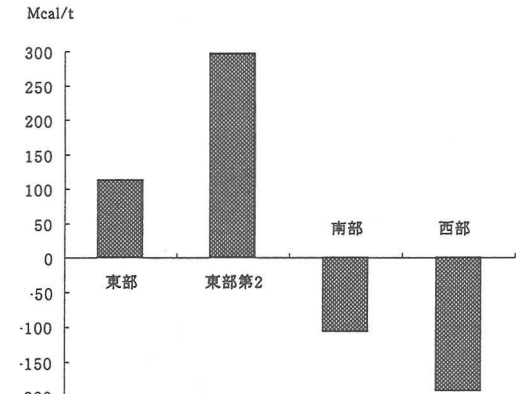


図-4 清掃工場別焼却原単位

表-5 平成5年度清掃工場別エネルギー内訳 (Gcal/年)

	東部	東部第2	南部	西部
受 電 電 力	8,930	13,927	982	1,535
水	144	35	39	29
灯 重	712	814	252	1,888
苛 性	0	0	0	1,390
ソ ー ダ	10,924	0	14,543	17,453
消 石	0	551	0	0
セ メ ン ト	0	243	0	0
送 電 電 力	-1,629	0	-33,315	-60,701
焼 却 運 用 エ ネ ル ギ ー	19,080	15,570	-17,498	-38,407

表-6 平成5年度清掃工場別施設容量1t当たりALCE

		東部	東部第2	南部	西部	合計
施 設 容 量	(t)	219,000	73,000	219,000	273,750	784,750
焼 却 量	(t)	175,216	52,655	165,157	199,282	592,310
建設ALCE	(Gcal/年)	10,941	5,007	8,160	16,210	40,318
運用ALCE	(Gcal/年)	19,080	15,570	-17,498	-38,407	-21,256
施設容量1t当 たり建設ALCE	(Mcal/t・年)	49.96	68.59	37.26	59.21	215.02
施設容量1t当 たり運用ALCE	(Mcal/t・年)	87.12	213.28	-79.90	-140.30	80.20
施設容量1t当 たりALCE	(Mcal/t・年)	137.08	281.87	-42.64	-81.09	295.23

合には、廃棄物の発熱量が低下するため、焼却熱による発電が行えなくなり、エネルギー回収は不可能となる⁹⁾。また、廃棄物を焼却する際、自然するかどうかの発熱量の目安は700kcal/kgとされており、これを下回ると廃棄物は自然せず、焼却のための補助燃料が必要となる。紙をすべて分別すると、廃棄物の低位発熱量が700kcal/kg以下になるため、廃棄物は自然しなくなる。紙を分別しない現在の焼却処理では、燃料は焼却炉の点火の際にのみ用いられているが、紙を分別する場合には、焼却処理の際の補助燃料（主に灯油）が必要になり、これにともなうエネルギー消費量が増加する（表7）。その結果、焼却処理の運用エネルギーは増加する。

他方、紙を分別し再生紙とする場合には、バージンパルプから製造する場合に比べて、紙の製造エネルギーが少なくて済む。そこで、古紙パルプの再資源化によって紙を製造する場合と、それと同じ量の紙をバージンパルプから製造する場合とを比較する。なお、バージンパルプから製造される紙と再生紙では紙質に違いがあるが、ここではそれは無視する。ここで、紙の生産工程を見た場合、パルプ化の工程では古紙パルプ利用とバージンパルプ製造とでエネルギー消費量に大きな差があるが、パルプから紙を製造する抄紙工程では両者に大きな差はない。従って、原料からパルプ化するときのエネルギー消費量の違いのみを考慮すればよい。こうして両者を比較すれば、再生紙の場合、バージンパルプからの紙生産に比べて全体で約2300kcal/kgのエネルギー減少となる⁹⁾。このように、紙の分別を行った場合、廃棄物焼却処理工程での運用エネルギーは増加する一方、紙生産のエネルギーは減少することとなる。その両者のバランス関係を示したのが図5である。

(2) 紙の分別焼却によるCO₂排出量

廃棄物を焼却することによりCO₂が発生する。現在福岡市で行われている一般廃棄物の焼却によるCO₂の排出量と、紙ゴミを分別して他の廃棄物を焼却したときのCO₂排出量の両者を試算したのが図6である。なお、廃棄物焼却によるCO₂排出原単位については、廃棄物の重量ベース排出原単位と発熱量ベース排出原単位の2つがあるが⁹⁾¹⁰⁾、紙ゴミの分別により、発熱量が大きく変わるため、発熱量ベースのCO₂排出原単位を用いた。また、分別を行った場合のCO₂排出量は、廃棄物の焼却によるCO₂排出量と補助燃料（灯油）の焼却によるCO₂排出量の和によって算定した。

(算出式)

i) 現在の焼却処理

$$\text{CO}_2\text{排出量 (tC)} = \text{廃棄物焼却によるCO}_2\text{排出原単位 (tC/10}^7\text{kcal)} \times \text{廃棄物の総発熱量 (kcal)}$$

表-7 焼却運用エネルギーの比較 (Gcal/年)

	現在	分別時
受電	25,374	90,386
電力	246	123
水	3,666	166,022
灯油	1,390	725
重油	42,920	22,375
苛性ソーダ	551	287
消石灰	243	243
セメント	-95,646	0
送電	-21,247	280,161
焼却運用エネルギー		

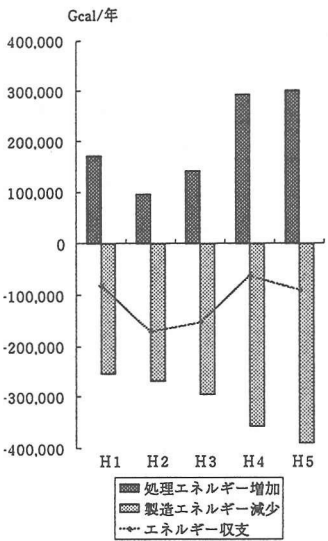


図-5 エネルギーバランス

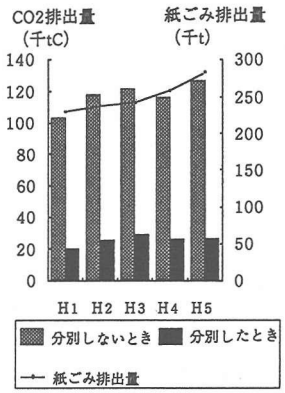


図-6 CO₂排出量の比較

ii) 紙を分別して焼却処理

$$\text{CO}_2\text{排出量 (tC)} = \text{廃棄物焼却によるCO}_2\text{排出原単位 (tC/10}^7\text{kcal)} \times \text{廃棄物の総発熱量 (kcal)} \\ + \text{灯油焼却によるCO}_2\text{排出原単位 (tC/10}^7\text{kcal)} \times \text{灯油の総発熱量 (kcal)}$$

3. 3 埋立による地球温暖化ガスの発生

埋立により発生する温室効果ガスとしてはCO₂とCH₄が主体であるが、これらのガスの発生量及びおよび組成は、埋立方式によって大きく異なる。そこで、以下のケースに分けて、埋立によるガス発生量を検討した。

- (a) 焼却処理をして準好気性埋立を行う場合
- (b) 焼却処理をして嫌気性埋立を行う場合
- (c) 焼却処理をせずに準好気性埋立を行う場合
- (d) 焼却処理をせずに嫌気性埋立を行う場合

埋立場におけるガス発生の源となる易分解性有機物としては、埋立廃棄物に含まれる厨芥類を対象にし、その量については、焼却処理をする場合と焼却処理をしない場合それぞれについて以下のように算定めた。
(算出式)

i) 焼却処理をして埋め立てる場合

易分解性有機物量 = 焼却残渣 × 焼却残渣中の有機物含有率 (%)
ただし、焼却残渣中の有機物含有率 = 6 % とする。

ii) 焼却処理をせずに埋め立てる場合

易分解性有機物量 = 可燃性廃棄物量 × W_G × W_S × W_C
易分解性有機物量算出のためのパラメータは表8に示す。

表-8 易分解性有機物算出のためのパラメータ

W _G (%)	厨 芥 の 組 成 割 合
W _S (%)	厨芥の平均固形分率 (60.5%)
W _C (%)	厨芥の有機物含有率 (80.5%)

平成元年1月～5年12月の月毎のCO₂とCH₄の発生量を算定し、平成6年12月時点でのCO₂とCH₄の発生量累計を算出した(図7)。ここで、埋立廃棄物のガス化率予測モデル式として、松藤の式¹¹⁾を用いた。

(準好気性の場合)

$$y = 36.71 \log x - 12.26$$

(嫌気性の場合)

$y = 0.76 x - 0.02$ (0～4年 酸生成期)
 $y = 30.61 \log x - 6.91$ (4～10年 メタン醗酵期)
y: ガス化率 (%)
x: 経過時間 (month)
ただし、 $x > 1$

CH₄とCO₂の単位重量当たりの温暖化への寄与率(GWP)を比べた場合、前者は後者の30倍であり¹¹⁾、埋立を行うさいにはCH₄の発生を小さくするような埋立方法が望まれる。表9は、焼却処理して準好気性埋立を行った場合の寄与率1として、上の各処理方式による温暖化への影響度合いを比較したものである。焼却処理をして準好気性埋立を行う場合に比べ、焼却せずに嫌気性埋立を行なった場合、地球温暖化への影響は約11倍となる。

4. まとめ

(1) 平成5年度における現存既存施設を対象として、福岡市の

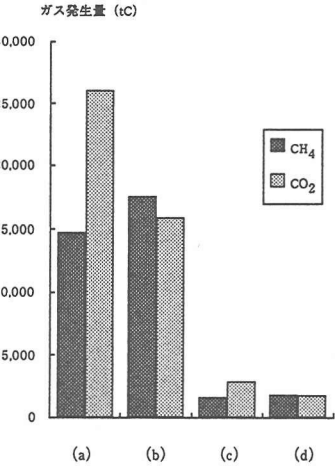


図-7 ガス発生量

表-9 温暖化への影響度

焼却した場合		焼却しない場合	
準好気性	嫌気性	準好気性	嫌気性
1	1.14	9.08	10.55

一般廃棄物処理システムの焼却処理量1 t当たりのALCEは建設ALCEは72.82Mcal/t・年、運用ALCEは-18.18Mcal/t・年と試算された。建設ALCEについては、焼却処理施設が約93%を占めている。運用ALCEについては、焼却処理工程で発電を行っている場合には回収エネルギーが施設のエネルギー需要を上回ることがあり、この場合には負となる。焼却処理工程において発電効率を上げ、エネルギー回収量を増加させることにより運用ALCEを減少させることが可能である。ごみ収集、灰輸送、埋立の各工程の運用ALCEについては、自動車の燃費によるところが大きい。

(2) 平成5年度の福岡市の一般廃棄物処理システムに投入された労働力エネルギーは2.57Mcal/t・年である。そのうち、収集工程が全体の70%を占めている。建設を除いた運用エネルギーと労働力エネルギーの合計に着目した場合、労働力エネルギーが占める割合は、収集工程においては16%と他に比べて高く、他の工程と比べてマンパワーに依存する割合が高い。

(3) 可燃性廃棄物中の紙を分別して資源再生した場合には、焼却処理に必要なエネルギーは増加するが、紙の生産エネルギーは減少する。両者のエネルギーバランスでみると、全体のエネルギー消費量は減少する。また、廃棄物の焼却によるCO₂排出量も約25%に削減できる。

(4) 焼却によって発生するCO₂と埋立から発生するCH₄との温暖化能力(GWP)の違いに着目し、埋立方式による温暖化への影響の度合いを比較評価した。焼却せずに嫌気性埋立を行なった場合に、地球温暖化への影響は一番大きくなる。

参考文献

- 1) 吉岡完治, 早見均, 池田明由, 菅幹雄: 省エネ住宅の環境負荷に関するシミュレーション分析, KEO Occasional Papere No.32, 1993
- 2) 福岡市環境局: 福岡市東部, 東部第2, 南部, 西部清掃工場年報(平成元年~平成5年度版)
- 3) 福岡市環境局: 福岡市東部, 西部埋立場年報(平成元年~平成5年度版)。
- 4) 資源協会: 家庭生活におけるライフサイクルエネルギー, pp.340-367, 1994.
- 5) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編: 総合エネルギー統計(平成5年度版), pp.11-12, p470, 1994.
- 6) 酒井寛二, 漆崎昇: 建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定, 環境情報科学, Vol. 21, No2, 1992.
- 7) 福岡市環境局: 事業概要(平成6年度版)。
- 8) 厚生省ごみ焼却施設における余熱の有効利用に関する検討会: ごみ焼却エネルギーの利用の現状と今後のあり方, pp.2-28, 1991.
- 9) 地球産業研究所: 産業環境ビジョン, pp.69-89, 1994.
- 10) 富士総合研究所: 福岡市地球温暖化対策地域推進計画策定調査資料編, pp.10-13, 1994.
- 11) 小林栄己, 田中綾子, 松藤康司, 花嶋正孝: 埋立構造の違いによる温室効果ガスの発生(4), 第5回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.450-452, 1994.
- 12) 総務庁編: 昭和60年全国産業連関表。
- 13) 建設物価調査会: 昭和60年建設部門分析用産業連関表。
- 14) 日本エネルギー経済研究所エネルギー計量分析センター編: エネルギー・経済統計要覧(平成5年版), pp.70-73.
- 15) 土木学会環境システム委員会: 未利用エネルギー活用LCE調査研究小委員会未利用エネルギー活用に係わるライフサイクルエネルギー評価研究報告書, 1994.