

■ 研究論文 ■

ごみ発電によるエネルギー回収およびCO₂排出量の削減効果の推定Energy Recovery and Reduction of Carbon Dioxide Emission through Power Generation
by Municipal Waste

森 保文*・乙 間 末 広**・近 藤 美 則***

Yasuhumi Mori Suehiro Otoma Yoshinori Kondo

鮫 島 良 二****・森 本 林*****

Ryoji Samejima Hayashi Morimoto

(1994年4月18日 原稿受理)

Abstract

To estimate ultimately-recovered energy, a life cycle energy was assessed on a municipal waste incineration system, energy was balanced between input and output components: (A) electric power consumed in the incineration plant, (B) energy needed in building, maintaining and breaking up the main installations, and in producing garbage trucks and collecting waste, (C) energy needed in building, maintaining and breaking up the power generator and related installations, and (D) electric power generated.

Consequently, it was revealed that the municipal waste power plant produces the much more energy than the energy needed to build and operate the plant, as well as reduces the carbon dioxide emission.

1. はじめに

ごみ焼却場に発電施設を付置することが多くなってきた。焼却のみでは無駄に捨てられるエネルギーを、ごみ発電によって回収することが期待されている。ごみ発電によるエネルギーの回収は、一般の発電所の発電量を減少させ、結果的に地球温暖化ガスである二酸化炭素(CO₂)排出量をも削減する。

しかしごみ発電のためには発電機などの施設を追加的に設けねばならず、これからの施設の製造にエネルギーが消費され、CO₂も排出されている。またごみ焼却場そのものの建設などにもエネルギーが投入されている。

本研究では、ごみ発電が本当にエネルギーとCO₂排出量を削減しているか、削減しているとしたらどの程度であるのかを推定する。

なおごみのエネルギーの回収利用には暖房など直接に熱を利用する場合もあるが、ここではごみ処理場から離れた場所でも利用できる電気のみに着目する。

2. 方法

2.1 考え方

以下に述べるのは、特にことわらない限り、エネルギーについての解析である。CO₂についての解析方法も基本的にはエネルギーのものと同一である。CO₂についてはエネルギーの解析後に述べる。エネルギーは一次エネルギーで計算する。

ごみ発電のエネルギー回収を、ごみ焼却場をエネルギー回収装置およびエネルギー発生装置とみなす2つの考え方で評価する。

ごみ発電においては、図-1に示すように、場内消費電力(A)、ごみ発電をしないごみ焼却場においても

*国立環境研究所 社会環境システム部
資源管理研究室主任研究員

** " " 資源管理研究室長

*** " " 環境計画研究室研究員

〒305 つくば市小野川16-2

****(株)タクマ 技術開発本部技術開発部第三プロジェクト
マネジャー

〒530 大阪市北区堂島浜1-4-16アクア堂島西館9階

*****元(株)タクマ

平成6年度第13回研究発表会(4月13日)にて発表

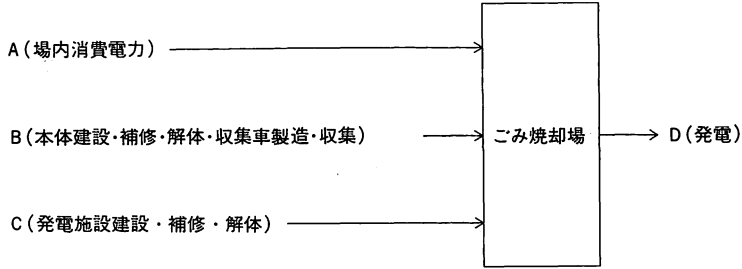


図-1 ごみ発電のエネルギー収支の考え方

必要な施設（以下本体と呼ぶ）の建設・補修・解体、収集車の製造およびごみ収集に必要なエネルギー（B）および発電のために必要な施設即ちボイラーと発電機および蒸気復水設備（以下発電施設と呼ぶ）の建設・補修・解体に必要なエネルギー（C）が入力され、発電によりエネルギー（D）が出力される。

ごみ発電をエネルギーの回収と見た場合、発電施設に必要なエネルギーと発電されるエネルギーを比較することにより、ごみ発電を評価できる。発電施設に必要なエネルギーが発電されるエネルギーよりも大きければ、エネルギーを回収していないことになる。つまり

$$D/C > 1$$

が成り立つことが、ごみ発電を選択する条件である。

ごみ焼却場をエネルギー発生装置と見た場合には、ごみ焼却場に必要なすべてのエネルギーつまりごみ焼却場の建設、運用およびごみ収集に必要なエネルギーと送電されるエネルギーを比較する。前者が後者より大きければごみ発電はエネルギーを失っている。つまり

$$(D - A) / (B + C) > 1$$

が成り立つことが、ごみ発電を選択する条件である。

エネルギーをCO₂排出量およびCO₂排出削減量に置き換えると、同様な比較が、CO₂排出量においてもできる。

ごみ焼却場をエネルギー回収装置と見た場合は、ごみ焼却を前提として、発電すべきかどうかの評価であり、ごみ焼却場をエネルギー発生装置と見た場合には、焼却以外のごみ処理の可能性をも考慮したより幅広いごみ発電の評価である。いずれの場合にも補修や解体まで含めて、いわばライフサイクルアセスメントとして評価しなければならない。

なおここでは、人力は計算に含まれていない。ごみ焼却場がなくても、人力はどこかで使われていると考えたためだが、厳密には計算すべきであり、将来的に

は求めることが必要であろう。

2.2 条件

ごみ焼却場として、1炉当たり処理量が600 t/dの施設を想定した。形式は全連続燃焼方式火格子焼却炉である。ごみ質は平均 2300kcal/kg、発電効率は15.4%（発電量10,300kW）であり、耐用年数は15年とした。

収集車は2.0 tのごみを積載し、一回走行距離は20 tのごみを積載し、一回走行距離は20km¹⁾、燃料はガソリンで燃費は5 km/ℓ²⁾、耐用距離は10万kmとした。

2.3 計算方法

ごみ焼却場は多くの設備からなっており、各設備は多くの企業が製造した部品からなっている。焼却場建設のためのエネルギーの計算のためには多くの企業からデータを収集する必要がある。データは調査票によ

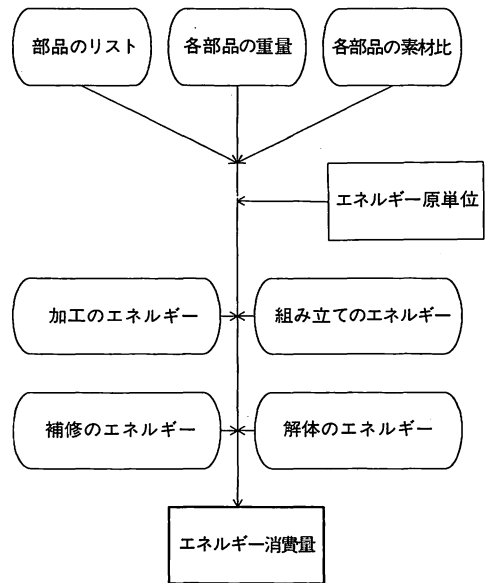


図-2 ごみ焼却設備にかかるエネルギー消費量算定手順

て収集し、図-2に示す手順で計算した。これは積み上げ法である。

まず想定したごみ焼却場に必要部品をリストアップし、同種の各部品を製造している企業から部品の重量と素材比を入手する。これに別途算定した素材別のエネルギー原単位をかけて部品の素材によるエネルギー消費量を計算する。

部品は素材を加工したものであり、また部品は最後には焼却場として組み立てられる。加工および組み立てに必要なエネルギー（電力、重油など）についても企業より入手し、これによるエネルギー消費量を計算して素材の分と足し合わせる。

ごみ収集車製造については重量を1.5tと仮定して、すでに計算した値³⁾を用いた。

補修と解体については、ごみ焼却場および企業へのヒアリングにより、補修の頻度などを調査した。

3. データの処理

3.1 調査票回収状況

各企業には、まず電話により協力をお願いした後、調査票を送付した。表1に調査票の回収の状況を示す。倒産などのためか製造企業と電話連絡が取れなかった部品が40点あった。連絡のとれた企業のうちいくつかの企業ではデータがないために回答できないとのことであった。そのため回答を約束してくれた企業（以後、了解企業）に調査票を送付した。結局部品数にして約6割の部品について調査票を郵送し、それに対して約6割の回答を得た。全部品数に対して約3割の部品の回答を得たことになる。

3.2 データの補正

3.1で述べたように全部品についてのデータは得られなかった。特に加工および組み立てについては調査票に空欄が多く、重量、素材比以外の項目で得られたデータは少なかった。

そのため図-3のようなデータの補正または推定を行った。判明率は、対象処理場の図面の中で回答のあった部分を塗つぶしてその面積から表2のように判断した。

表1 調査票回収状況

企業分類	部品数	了解企業	回答企業	回答率%	対部品%
連絡企業	283	188	107	57	38
不明企業	40				
計	323	188	107	57	33

表2 判明率の推定結果

部 分	判明率%	回答率%
1-受入れ・供給設備	50	21
2-焼却炉設備	80	44
3-ボイラ設備	70	30
4-発電設備	80	79
5-蒸気復水設備	50	36
6-排ガス処理設備	70	33
7-通風設備	50	31
8-灰処理設備	50	33
9-給水設備	30	23
10-排水処理設備	30	22
11-ケーブル類	100	100
12-その他	80	83
13-土木建築	100	100

*判明率は回答のあった部分の図面における面積比である。

判明率は回答率のおよそ2倍となり、設備によっては80%となった。これは大きな部品についての回答率がよかったことを示している。判明率が50%であれば、重量は回答の2倍になる。

加工および組み立てによるエネルギー消費量は、素材エネルギーに比例すると仮定して、加工と組み立てを一緒に扱うこととした。調査票に回答された実際の加工・組み立てエネルギー比（加工・組み立てによるエネルギー消費量を素材エネルギーで割った値）は図-4のように分布した。加工・組み立てエネルギー比のばらつきは大きい。また回答には輸送エネルギーを含むものと含まないものがあった。ここでは輸送も含めてやや大きめの値として加工・組み立て比を50%と仮定した。

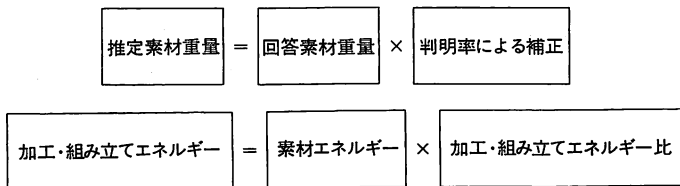


図-3 ごみ焼却場建設のエネルギーの推定

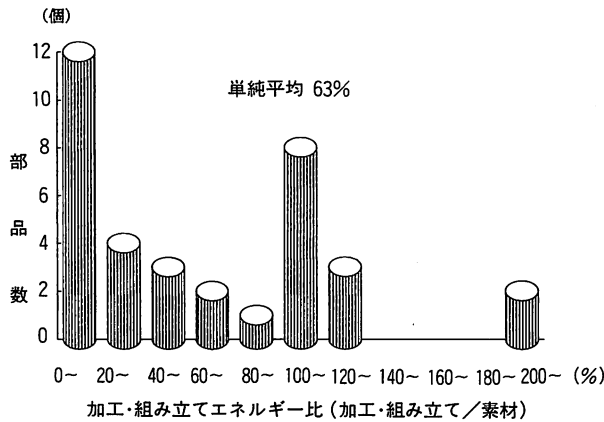


図-4 加工・組み立てエネルギー比の分布

ごみ焼却場の補修については、土木建築物である建屋を除いて、一割の部品の取り替えが行われるとした。ただし焼却炉のストーカについては5回取り替えが行われるとした。これは実際のごみ焼却場でのヒアリング結果と施設の耐用年数から決定したが、データは十分でなく、推定値である。

解体については、十分なデータを得ることができなかった。解体に必要なエネルギーは素材エネルギーに比例すると思われる。一方解体された施設の一部はリサイクルされる。ここでは解体に必要なエネルギーとリサイクルされるエネルギーが等しいと見て、解体のエネルギーはゼロとした。

3.3 素材エネルギー原単位

各素材を製造するのに必要なエネルギーを以下の二つの方法で算出した。一つは積み上げ法³⁾であり、ある素材の製造プロセスごとにエネルギー消費量を推計し、それを合計するものである。二つ目は産業連関分析法⁴⁾で、素材を製造するのに必要な財の移動量を産業連関表から算定して、財の移動量からエネルギー消費量を推計する。積み上げ法は多くの労力がかかり、計算に必要なデータの入手が不可能な場合もあるが、正確な値を得ることができる。一方産業連関表分析法は少ない労力ですむが、その値はある製造部門に含まれる製品の平均値であり、特定の素材の値とは限らない。

ここでは表3に示すように、積み上げ法により値を求めることができる場合には積み上げ法の値の用い、そうでない場合には産業連関分析法の値を用いた。

表3 素材エネルギー原単位

素材	原単位 Mcal/t	算出法
鉄	5500	積み上げ法
鋳鉄	5200	積み上げ法
ステンレス	5500	積み上げ法
アルミニウム	38300	積み上げ法
非鉄金属	20000	積み上げ法
煉瓦	3421	産業関連分析法
樹脂	6000	積み上げ法
ガラス	3900	積み上げ法
コンクリート	463	産業関連分析法

4. 結果

4.1 素材重量

ごみ焼却場の素材重量の見積もりを表4に示す。重量では土木建築の部分が圧倒的に大きい。土木建築は他の16倍の重量がある。土木建築の大部分はコンクリートである。鉄においても半分以上が建屋の鉄筋、鉄骨で占められている。

土木建築を除くと、ごみ焼却場の心臓部である焼却炉設備よりもその他の設備の重量が大きい。なかでも排ガス処理の部分が大きい。排ガス処理ではバグフィルターに多くの鉄が使われている。

発電施設ではボイラー設備の重量が大きい。ボイラー設備には鉄と煉瓦が多く使用されている。

表4 ごみ焼却場の素材重量の見積もり

(単位 t)

部 分	鉄	鋳 鉄	ステン レス	アルミ ニウム	非鉄金属	煉 瓦	樹 脂	ガラス	コンク リート
1-受入れ・供給設備	297	0	0	0	0.004	0	0	0	0
2-焼却炉設備	688	63	11	0.004	0.003	192.4	0	0	0
3-ボイラー設備	729	2	0.4	0	0.051	114.7	0.3	0	0
4-発電設備	78	2	0	0	0	0	0	0	0
5-蒸気復水設備	362	0.8	16	0	0	0	0	0	0
6-排ガス処理設備	1517	0	138	0	19	0	0	6	0
7-通風設備	411	0	2	0	0	0	0	0	0
8-灰処理設備	90	0	6	0	0	0	0	0	0
9-給水設備	6	1	0	0	0	0	0	0	0
10-排水処理設備	25	0	25	5	0	0	79	0	0
11-ケーブル類	0	0	0	0	120.69	0	0	0	0
12-その他	12	0	0	0	0	0	0	0	0
13-土木建築	4690	0	0	0	0	0	0	0	76500
合 計	8905	69	198	5	140	307	79	6	76500

4.2 ごみ焼却場建設およびごみ収集に必要なエネルギー

図-5にごみ焼却場建設およびごみ収集に必要なエネルギーの内訳を示す。素材エネルギーが約4割を占めた。この内土木建築が68%を占める。加工・組み立てが2割、補修が6%を占めた。収集車製造と収集は合わせて3割ほどであった。正確には補修エネルギーの3分の2も素材エネルギーであるから、素材エネルギーは全体で約5割を占める。

4.3 ごみ発電をエネルギー回収装置と

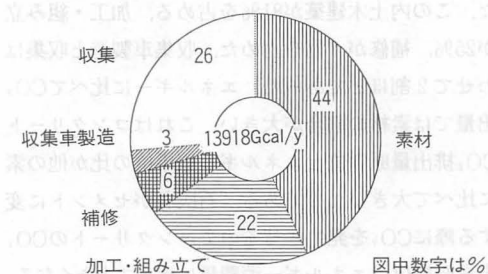


図-5 ごみ焼却場建設および収集に必要なエネルギー

見た場合の評価

図-6にごみ焼却場のエネルギー収支を示す。ごみ焼却場建設およびごみ収集に必要なエネルギーのうち発電施設に関するものを加工・組み立ておよび補修も含めて別に示している。

発電量は発電施設に関するエネルギーに比べて非常に大きく、その比は

$$D/C=78.7$$



図-6 ごみ発電のエネルギー収支

となり、1をはるかに越えている。ごみ発電をエネルギー回収装置と見た場合には、ごみ発電は極めて有効といえる。

4.4 ごみ発電をエネルギー発生装置と

見た場合の評価

図-6によれば、ごみ焼却場建設および運用に必要なエネルギーは送電による量に比べ少ない。その比は

$$(D-A)/(B+C)=9.5$$

であり、1を越えている。ごみ焼却場を建設し、ごみを収集し、発電することは、トータルとしてエネルギーを生産している。

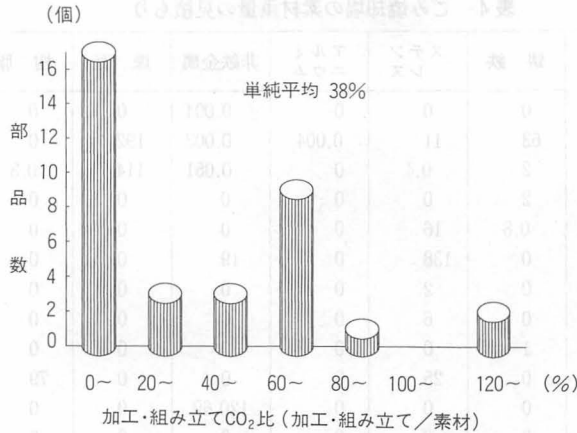


図-7 加工・組み立てCO₂比の分布

4.5 CO₂排出量の削減効果

上記と同様な解析をCO₂排出量について行った。表3の素材エネルギー原単位の代わりに表5の素材CO₂排出原単位を用い、図-7より加工・組み立てCO₂比を50%として計算した。

また電力量当たりのCO₂排出量は、日本における一般の発電所の発電量と発電に使われる燃料の量から算出した値⁵を用いた。つまり電力量当たりのCO₂排出量には、発電所の建設などに関するCO₂排出量は含まれていない。また水力発電や原子力発電はCO₂を排出していないとして計算されている。発電所の建設などに関するCO₂排出量を考慮すれば、あるいは火力発電のみを対象とすれば、電力量当たりのCO₂排出量はさらに多くなる。ごみ発電で削減されるCO₂排出量は、ごみ発電の分だけ一般の発電所の発電量が減少するとして計算した。

図-8にごみ焼却場建設およびごみ収集におけるCO₂

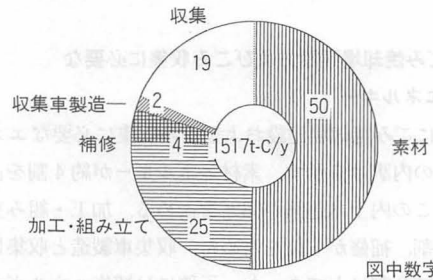


図-8 ごみ焼却場建設および収集で排出されるCO₂量

排出量の内訳を示す。素材CO₂排出量が約5割を占めた。この内土木建築が81%を占める。加工・組み立てが25%、補修が4%を占めた。収集車製造と収集は合わせて2割ほどであった。エネルギーに比べてCO₂排出量では素材の割合が大きい。これはコンクリートのCO₂排出量原単位とエネルギー原単位の比が他の素材に比べて大きいためである。石灰石がセメントに変化する際にCO₂を発生させるのでコンクリートのCO₂排出量原単位はエネルギー消費量に比べて大きくなる。またコンクリートの多く使われている土木建築部分は補修を行わないので、補修に関するCO₂排出量の割合は、エネルギーに比べて少なくなっている。

図-9にごみ焼却場のCO₂収支を示す。ごみ焼却場建設およびごみ収集に関するCO₂排出量のうち発電施設に関するものを加工・組み立ておよび補修も含めて別に示してある。

ごみ発電により一般の発電所で削減されるCO₂排出量は、ごみ発電施設に関するCO₂排出量に比べて非常に大きく、その比は

図-5 素材CO₂排出原単位

素材	原単位 kg-C/t	算出法
鉄	415	積み上げ法
鋳鉄	450	積み上げ法
ステンレス	415	積み上げ法
アルミニウム	2140	積み上げ法
非鉄金属	1280	積み上げ法
煉瓦	294	産業関連分析法
樹脂	440	積み上げ法
ガラス	300	積み上げ法
コンクリート	96	産業関連分析表

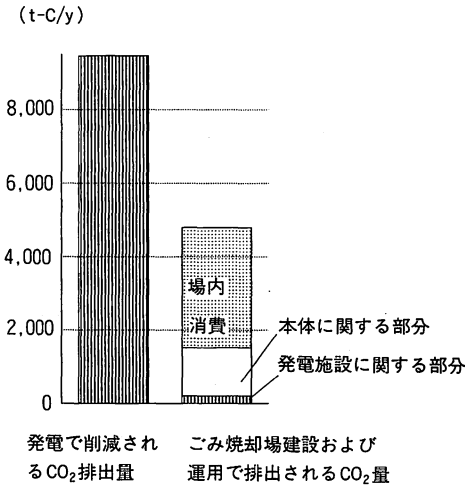
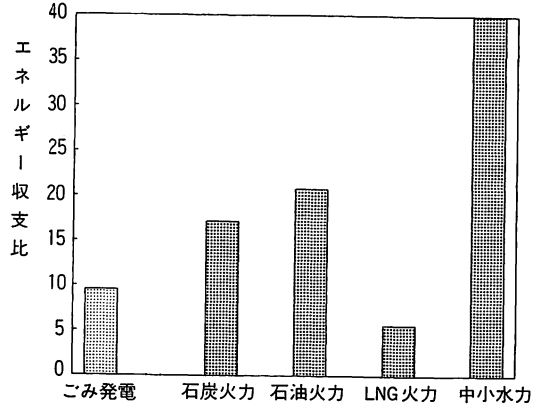


図-9 ごみ発電のCO₂収支



*石炭火力～中小水力は内山・山本(1991)の値

図-10 エネルギー収支比の比較

$D/C = 45.3$

となる。この値はエネルギーの場合の約6割である。ごみ発電は、エネルギー回収ほどではないが、CO₂削減装置と見た場合にも、極めて有効といえる。

図-9によれば、ごみ焼却場建設および運用に関するCO₂排出量は送電による削減量に比べ少ない。その比は

$$(D - A) / (B + C) = 4.1$$

である。この値はエネルギーの場合よりは低いが、1を大きく越えている。ごみ焼却場を建設し、ごみを収集し、発電することは、トータルとしてCO₂排出量を削減している。

なおごみ自身からもCO₂が生産されるが、ごみは焼却してもしなくてもいずれはCO₂を排出するので、ごみ由来のCO₂は計算に含めなかった。

5. 考察

5.1 一般の火力発電所との比較

一般の発電所をライフサイクルアセスメントしたものは少ない。ここでは内山ら⁶⁾の一般の発電所のエネルギー収支分析を用いる。内山らの報告は、素材重量に文献値を用いている点などで本研究と異なるが、手法はほぼ同じである。内山らによると送電量と設備エネルギーなどの比(エネルギー収支比)

$$(D - A) / (B + C)$$

は石油火力発電所で20.75、石炭火力発電所で17.15、LNG火力発電所で5.61である。この比は送電量を重視した評価である。

図-10に示すように、ごみ発電ではこの比は9.5となっ

た。石油火力発電所のほぼ半分、LNG火力発電所の約倍である。火力発電とほぼ等しいエネルギー収支比といえる。

発電効率で劣るごみ発電のエネルギー収支比が、火力発電とほぼ等しくなるのは、火力発電においては燃料の採掘や輸送に多くのエネルギーを消費しているからである。

予想した以上にごみ発電のエネルギー収支はよいといえる。なおここでのエネルギー収支比は燃料およびごみそのものが持つエネルギーを考慮していない。石油などの燃料は他に用途があるので、火力発電において燃料を入力に算入し、ごみはいずれ焼却処理をしなければならぬので入力に含めないとすると、ごみ発電のエネルギー収支は火力発電よりも一段とよい結果になるう。

5.2 ごみ発電のエネルギー収支をよくする方法

本結果からごみ発電のエネルギー収支をさらに向上させるために必要なことをあげると次のようになる。

ごみ発電においては火力発電に比べて場内消費電力の割合が大きい。場内消費電力を小さくできれば、さらにエネルギー収支比はよくなる。

土木建築によるエネルギー消費量が多いので、土木建築物を再利用することが望ましい。つまりごみ焼却場を解体する場合に、土木建築物を残して、ごみ焼却場の内部のみを解体する。そして内部を再建築して、土木建築物を何回も使用するのである。

5.3 ごみ発電の成り立つ発電効率

ごみ発電をエネルギー回収装置と見た場合、発電量が発電施設に必要なエネルギーよりも大きくなければ

ならない。本研究のごみ焼却場の場合、これが成り立つのは0.2%以上の発電効率である。CO₂排出量の削減では、同様に0.3%以上の発電効率が確保できればよい。

ごみ発電をエネルギー発生装置と見た場合には、発電効率が6.4%以上であれば、ごみ焼却場を建設し、ごみを収集し、発電することは、トータルとしてエネルギーを生産する。CO₂排出量の削減では、同様に7.8%以上の発電効率があればよい。

発電効率が、通常のごみ発電よりもかなり低い値の場合でも、エネルギー生産およびCO₂排出量削減の面からは、ごみ発電は有効といえる。コストの問題はあるが、ごみ発電はもっと採用されるべきである。

5.4 今後の課題

以下の点について検討が必要である。

灰の埋め立て、汚水処理などごみ焼却場の外で行われる処理については、計算に含まれていない。また補修、解体のデータの精度は低いといわざるを得ない。今後データの収集が必要である。

ごみ質やごみ量などごみ焼却場の条件は地域によって異なるので、本解析の他の地域の焼却場への応用も必要であろう。

ごみ発電の採用は、コストからも検討される。コスト面からの解析も必要である。

またごみ処理の他の方法、たとえばリサイクルとのエネルギー収支などの比較が必要であろう。

6. まとめ

ごみ発電によるエネルギー回収を、ライフサイクルアセスメントとして評価した。その結果以下のことが明らかになった。

- ①ごみ発電をエネルギー回収装置と見た場合、発電量は発電施設に必要なエネルギーに比べて78.7倍あり、ごみ発電は極めて有効にエネルギーを回収する。
- ②ごみ発電をエネルギー発生装置と見た場合、送電量は

はごみ焼却場建設および運用に必要なエネルギーに比べて9.5倍あり、ごみ発電により多くのエネルギーが得られる。

③ごみ発電をエネルギー回収装置と見た場合、削減されるCO₂排出量は発電施設に必要なCO₂排出量に比べて45.3倍あり、ごみ発電はCO₂排出量削減に有効である。

④ごみ発電をエネルギー発生装置と見た場合、削減されるCO₂排出量はごみ焼却場施設および運用に必要なCO₂排出量に比べて4.1倍あり、ごみ発電はCO₂排出量を削減する。

⑤ごみ発電のエネルギー収支は通常の火力発電とはほぼ等しい。

⑥発電効率がかなり低い場合でもごみ発電はエネルギー回収やCO₂排出量削減に有効である。

謝辞

本研究にあたり、お忙しい中、多くの企業のお手をわずらわせた。高知市と吹田市にはごみ処理の実際について貴重な話をうかがい、また処理場を見学させていただいた。関係者各位に深謝する。国立環境研究所社会環境システム部長後藤典弘氏には多くの助言をいただいた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 厚生省環境衛生局水道環境部；廃棄物の車両収集システム適正調査（1982）
- 2) 厚生省環境衛生局水道環境部；廃棄物の車両収集システム適正調査（1983）
- 3) 近藤美則・森口祐一・清水浩・石谷久；素材生産に伴う二酸化炭素の排出原単位と自動車生産過程への適用，エネルギー・資源学会第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集（1992），309～314
- 4) 近藤美則・森口祐一・清水浩；産業関連表によるCO₂排出構造の経時的分析と分析における部門数別誤差の解析，エネルギー・資源，15巻，2号（1994），77～85。
- 5) 環境庁地球環境部；二酸化炭素排出量調査報告書（1992）
- 6) 内山洋司・山本博巳；発電プラントのエネルギー収支分析，電力中央研究所報告・研究報告：Y90015（1991）