

■ 研究論文 ■

スーパーごみ発電のライフサイクル分析

Life Cycle Analysis of a "Super Incineration Power Plant"

南雲 秀哉*・平田 賢**・内山 洋司***

Hideya Nagumo Masaru Hirata Yoji Uchiyama

(原稿受付日1999年12月13日, 受理日2000年8月4日)

Abstract

In Japan, the first gas turbine repowered incineration power plant was introduced in Takahama city at Gunma prefecture in November, 1996. Here, the term of a gas turbine repowered incineration power plant means the steam produced by the incineration plant is superheated by the exhaust gas of a gas turbine introduced additionally within the plant, resulting in the increase of the efficiency of the bottoming steam turbine cycle. This new plant is named the "Super Incineration Power Plant" in short.

This study aims to evaluate the energy analysis ratio and the CO₂ emission per kWh of the super incineration power plant, a conventional garbage incineration plant, and a small-sized gas turbine-steam turbine combined cycle plant with a bottom-up approach for life cycle analysis.

The results are summarized as follows :

- (1) The energy analysis ratio of the super incineration power plant is higher than that of the conventional garbage incineration plant, but is lower than that of the small-sized combined cycle plant.
- (2) The CO₂ emission per kWh of the super incineration power plant is larger than that of the small-sized combined cycle plant. But if the direct CO₂ emission from the combustion of garbage is excluded from the life cycle CO₂ emission in the calculation, the CO₂ emission per kWh of the super incineration power plant becomes lower than that of the small-sized combined cycle plant.
- (3) The super incineration power plant could improve the energy analysis ratio and the CO₂ emission per kWh in comparison with the average values calculated from the conventional garbage incineration plant and the small-sized combined cycle plant.

1. はじめに

地球温暖化抑止のため、CO₂やメタンなどの温暖化ガス削減が人類の目標となっている。日本のCO₂排出量に関してはエネルギー転換部門の割合が大きく、温暖化の問題はエネルギー政策に大きな影響を与えている。そのため、環境負荷の少ない発電システムの開発と選択が重要であり、有望なシステムの一つとしてごみ焼却熱の高効率利用が挙げられる。

一般廃棄物の処理施設は全国に約1900ヶ所あるが、焼却熱を利用して発電している施設は1997年末では178ヶ所、発電設備容量は74.3万kWに留まっている。仮にごみ発電量を2000kcal/kg、発電効率を15~30%とすると潜在発電規模は180~360万kWとなる¹⁾。この試算はごみ焼却熱が新しい電力供給源であることを

示している。

ごみ焼却熱を有効に利用するため、ごみ発電の高効率化の検討が進められてきた。中でも、リバウリングの原理をごみ発電に適用した「スーパーごみ発電」が注目されており、新しい発電システムとしてエネルギー効率や温暖化影響を分析・評価することが求められている。

本論文では、「ゆりかごから墓場まで」のライフサイクル分析をスーパーごみ発電、従来型ごみ発電、小型LNG複合発電に適用し、エネルギー収支比とCO₂排出原単位を求めて、スーパーごみ発電の特性を明らかにすることを目的とする。

2. スーパーごみ発電

これまで、ごみ発電の熱効率改善は、蒸気条件の高高温高圧化によって図られてきた。しかし、この方法では、ごみ燃焼ガスによるボイラチューブの高温度腐食の問題があるため、通常のボイラチューブでは蒸気温度を300℃以上に上げることが出来ず、熱効率は低く抑えられていた。

* 東京工業大学大学院総合理工学研究所人間環境システム
専攻修士課程2年

〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259

** 芝浦工業大学システム工学部教授

〒330-0003 埼玉県大宮市深作307

*** 筑波大学機能工学系教授

〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1

第18回研究会発表会(1999年6月9~10日)にて発表

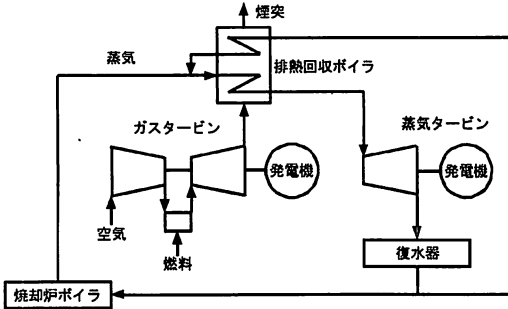


図1 スーパーごみ発電（ガスタービン複合方式）

スーパーごみ発電は、図1に示すように、ごみ焼却炉で発生させる蒸気の温度を塩素腐食の起こらない300℃以下に抑え、その蒸気を別途燃料を焚くガスタービンの排熱でスーパーヒート（過熱）するコンバインドサイクルを構成している。このリパワリング技術の導入がシステムの出力と熱効率を高めるのである。すでに日本第1号のスーパーごみ発電として群馬県の高浜発電所が1996年11月から運転を開始し、堺市、北九州市と続いている。また千葉市にも導入が予定されている。

3. スーパーごみ発電のライフサイクル分析

3.1 ライフサイクル分析

ライフサイクル分析とは、製品システムやサービスシステムの原材料の採取から製造、輸送、使用、廃棄に至る間のインプット、アウトプットをまとめ、環境影響を分析する手法である。ライフサイクル分析は、

- ・環境負荷の大きな工程を特定できる
- ・同じ機能を持つ複数の製品の環境負荷を比較できるなどの利点があり、様々な研究がなされている。

3.2 分析対象

本論文の分析対象である3つの発電システムの概要を表1に示す。

3つの発電システムを対象とした理由は、リパワリングの原理を適用したスーパーごみ発電が、従来型ごみ発電と小型LNG複合発電の2つのシステムを総合的に評価した場合に比べて、どれだけメリットがあるかを分析するためである。比較を可能とするために、ごみ焼却量やガスタービンの発電出力は共通のスペックを選定した。

3.3 インベントリ分析

発電システムのライフサイクル分析は、燃料採掘、輸送、プラント建設、運用、廃棄物処理のライフサイクルにわたるエネルギー消費や環境負荷の大きさを明

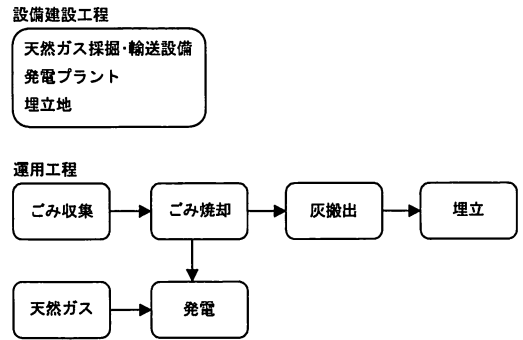


図2 スーパーごみ発電の分析範囲

表1 各発電システムの概要（表中の発電熱量はLHV，発電効率もLHV基準である）

		スーパーごみ発電	従来型ごみ発電	小型LNG複合発電
全 般	総発電出力	kW	25,000	4,000
	発電効率	%	34.5	15.7
	所内率	%	6	6
	寿命	年	25	25
焼 却 炉	焼 却 量	t/d	300	300
	ごみ発電熱量	kcal/kg	2,000	2,000
焼却炉ボイラ	蒸気温度	℃	255	255
	蒸気圧力	ata	20	20
	蒸気量	t/h	28	28
蒸気タービン	形 式	復水タービン	復水タービン	復水タービン
	入口温度	℃	395	250
	入口圧力	ata	16.5	16.5
	蒸気流量	t/h	51.3	26.5
	排気真空度	mmHg	700	700
	発電出力	kW	10,000	4,000
ガスタービン	形 式	開放単純サイクル	—	開放単純サイクル
	燃 料	都市ガス 12A	—	都市ガス 12A
	ガス発電熱量	kcal/Nm ³	9,030	—
	燃料使用量	Nm ³ /h	4,490	—
	発電出力	kW	15,000	—

らかにするインベントリ分析が基本である。スーパーごみ発電のインベントリ分析を行うため、本研究では工程を図2に示す設備建設工程、運用工程に分類し、各工程において入力、出力されるもの、ここでは投入エネルギーとCO₂排出量を積み上げ法で分析した。ここで用いた財・サービスのCO₂排出原単位は、主に文献2)による。

以下、スーパーごみ発電のインベントリ分析で検討した各工程について計算手順を説明する。

①設備建設工程：天然ガス採掘・輸送設備、発電プラント、埋立地の設備建設のエネルギー消費量とCO₂排出量を求めた。

②運用工程

・ごみ収集工程：清掃車(2t車)の平均往復距離を30kmと仮定し、原単位³⁾からエネルギー消費量とCO₂排出量を計算した。

・ごみ焼却工程：ごみ焼却場のエネルギー消費量からCO₂排出量を求めた。また、ごみ燃焼分のCO₂排出量も計算した。

・天然ガス工程：液化設備の運転エネルギーと輸送エネルギー、それに伴うCO₂排出量を求めた。液化設備

の運転エネルギーは天然ガス生産量の12.5%⁴⁾とした。また採掘時のメタン洩れも考慮し、天然ガス生産量の1%⁵⁾として計算した。

・発電工程：焼却炉で作った蒸気と天然ガスを利用して発電している。スーパーごみ発電におけるガスタービンの運用形態はWSS(Weekly Start & Stop)運転とし、ガスタービン停止時は蒸気タービン単独の運転とする。エネルギー消費量は所内電力、CO₂排出量は天然ガス燃焼分を算出した。

・灰搬出工程：10t車で、平均往復距離を20kmと仮定し、これに原単位³⁾を掛けてエネルギー消費量とCO₂排出量を求めた。

・埋立工程：ごみ1kg当り4.5kcalのエネルギーを消費する⁶⁾として計算した。

インベントリ分析から得られたスーパーごみ発電の投入エネルギーの内訳を図3、CO₂排出量の内訳を図4に示す。図4では議論を分かり易くするために、ごみ焼却工程におけるごみ燃焼分のCO₂排出量を分けて図示した。

図3に示したように、スーパーごみ発電の投入エネルギーの内訳は運用工程のエネルギーが97.1%、設備建設工程のエネルギーが2.9%である。運用の各工程の内訳を見ると、天然ガス工程の液化・輸送エネルギーが47.7%と投入エネルギーの約半分を占めている。その他は、発電工程が25.1%、ごみ焼却工程が21.4%となっている。

図4のCO₂排出量の内訳は、ごみと天然ガスの燃焼から発生したものが84.6%と大半を占めており、それ以外の運用工程が14.8%、設備建設工程が0.7%である。

上記のことから、ライフサイクルでは燃料燃焼の影響が大きく、投入エネルギーとCO₂排出量の削減のためには燃料使用量を減らすこと、つまり発電効率の改善が効果的であることがわかる。

3.4 エネルギー収支比とCO₂排出原単位

次に各発電システムを比較する指標であるエネルギー収支比とCO₂排出原単位を求める。

発電システムのエネルギー収支比とは、生産するエネルギー(発電電力量)がシステムに直接、間接に投入されたエネルギー(設備・運用エネルギー)の何倍になるかを示すもので次式のように表される。

$$\text{エネルギー収支比} = \frac{\text{生産エネルギー}}{\text{投入エネルギー}} \quad (1)$$

一般的に投入エネルギーに発電用燃料を含めな

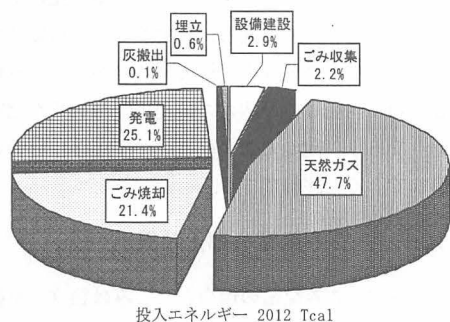


図3 スーパーごみ発電の投入エネルギーの内訳

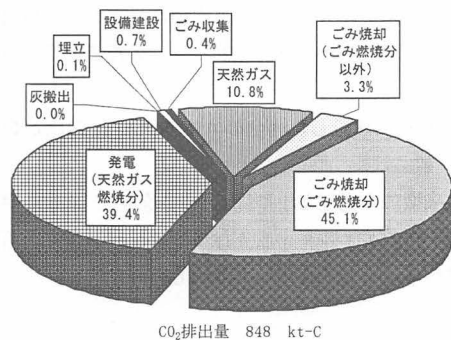


図4 スーパーごみ発電のCO₂排出量の内訳

め、生産エネルギーは投入エネルギーよりも大きくなる。

CO₂排出原単位とは1 kWhの電力を生産するために排出された直接・間接のCO₂量のことであり、次式で求める。

$$\text{CO}_2\text{排出原単位} = \text{CO}_2\text{排出量} / \text{送電電力量} \quad (2)$$

本論文の分析結果を他のシステムと比較するために、エネルギー収支比を図5に、CO₂排出原単位を図6に文献5)の値と共に示す。図6では上述のインベントリ分析の図4と同様に、運用分から燃料分とごみ燃焼分を分けて表示している。これ以降も同様に表示する。また文献5)で分析されている発電システムの概要は表2のとおりである。

従来型ごみ発電は、発電効率が16%程度と低いので、図5でわかるように、従来型ごみ発電のエネルギー収支比は小さい。それに比べて、天然ガスを追加燃料とするスーパーごみ発電は、発電効率が35%程度と従来型ごみ発電より高いので、エネルギー収支比は従来型

ごみ発電よりも改善されている。

一方、図6に示すようにスーパーごみ発電のCO₂排出原単位は、ごみ燃焼分のCO₂排出量を含めた場合、従来型ごみ発電や石炭火力よりは小さいが、その他の発電システムに対して優位性はない。しかしIPCC第2次報告書⁷⁾においてごみはバイオマスとされており、「バイオマスを燃焼して排出されるCO₂は、その再生時に吸収されるCO₂によって相殺されるものとし、正味のCO₂排出は無い」ものと認識されている。つまりCO₂排出原単位からごみ燃焼分を差し引くものと考えることができる。その結果、図6に示すように、スーパーごみ発電のCO₂排出原単位は132 (=37+95) (g-C/kWh)と大型LNG複合発電以下になり、温暖化影響の小さい発電システムであることを示している。ここで従来型ごみ発電のCO₂排出原単位は46 (g-C/kWh)とさらに小さくなる。この結果は、CO₂排出原単位においてごみ燃焼分の寄与が大きいことから明らかであり、CO₂排出削減の視点からごみ発電を導入していくことは好ましい。しかし、エネルギー需要を満たすにはごみ発電だけではなく、化石燃料や他の再生可能エネルギーも必要である。この点で天然ガスを使用したスーパーごみ発電を単にごみ発電と比較するだけでなく、他の火力発電と比較することが重要になる。スーパーごみ発電は小規模でありながら、ごみ焼却熱を有効に利用して天然ガスの利用度を高めた発電システムであり、他の火力発電と比べて温暖化影響の点で優れていると評価できる。

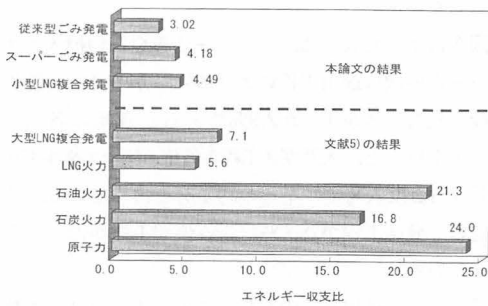


図5 各発電システムのエネルギー収支比

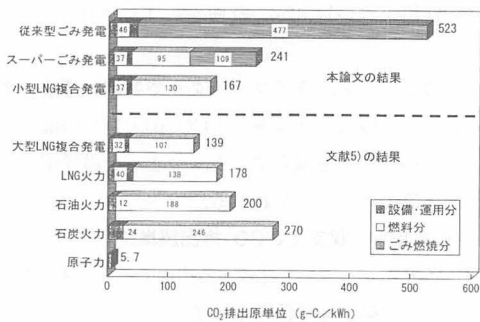


図6 各発電システムのCO₂排出原単位

表2 文献5)の発電システムの概要

	石炭火力	石油火力	LNG火力	大型LNG複合発電	原子力発電
発電出力 (MW)	1000	1000	1000	1000	1000
発電効率(LHV基準)	43%	43%	43%	55%	33.5%

4. スーパーごみ発電の導入効果

次にスーパーごみ発電の場合と、ごみは独立した従来型ごみ発電で発電し天然ガスは別に小型LNG複合発電で発電する場合についてエネルギー収支比とCO₂排出原単位を比較してみる。これは、リパワリングの原理を適用したスーパーごみ発電にはどれだけ複合のメリットがあるかをライフサイクルの視点で問う分析である。

4.1 別々に建設した場合のエネルギー収支比との比較

従来型ごみ発電と小型LNG複合発電を別々に建設した場合のエネルギー収支比は、インベントリ分析の結果から以下の式を用いて算出した。

$$R = \frac{2250 (P_i + P_g)}{E_i + E_g} \quad (3)$$

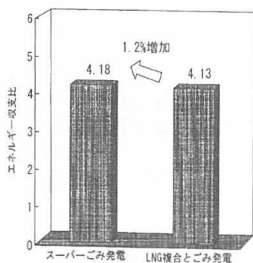


図7 エネルギー収支比の比較

但し、

R : 別々に建設した場合のエネルギー収支比
 2250 (kcal/kWh)⁵⁾ : 日本の火力平均の電力原単位

P_i (kWh) : 従来型ごみ発電の発電電力量
 P_g (kWh) : 小型LNG複合発電の発電電力量
 E_i (kcal) : 従来型ごみ発電の投入エネルギー
 E_g (kcal) : 小型LNG複合発電の投入エネルギー

式(3)を用いて計算すると従来型ごみ発電と小型LNG複合発電とを別々に建設した場合のエネルギー収支比は4.13となる。スーパーごみ発電のエネルギー収支比は4.18であり、図7に示すように1.2%とわずかなではあるが大きくなる。

4.2 別々に建設した場合のCO₂排出原単位との比較

従来型ごみ発電と小型LNG複合発電を別々に建設した場合のCO₂排出原単位は、インベントリ分析の結果を用いて以下の式から求める。

$$RC = \frac{C_i + C_g}{RT_i + RT_g} \quad (4)$$

但し、

RC (g-C/kWh) : 別々に建設した場合のCO₂排出原単位

C_i (g-C) : 従来型ごみ発電のCO₂排出量
 C_g (g-C) : 小型LNG複合発電のCO₂排出量

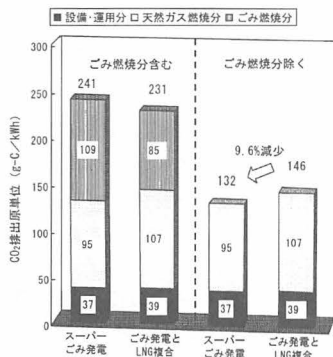


図8 CO₂排出原単位の比較

PT_i (kWh) : 従来型ごみ発電の送電電力量

PT_g (kWh) : 小型LNG複合発電の送電電力量

式(4)を用いて計算すると図8に示すように別々に建設した場合のCO₂排出原単位は231 (g-C/kWh)、ごみ燃焼分のCO₂排出量を除いた場合には146 (g-C/kWh)となる。他方、ごみ燃焼分を除いたスーパーごみ発電のCO₂排出原単位は132 (g-C/kWh)と小さく、1kWhあたりCO₂排出量を14 (g-C) (9.6%)だけ削減することができる。

5. おわりに

スーパーごみ発電のエネルギー収支比は、従来型ごみ発電の値に比べて改善される。しかし、天然ガスを燃料とした複合発電システムと比較するとその値は劣っている。

他方、スーパーごみ発電のCO₂排出原単位は、単純に比較すると従来型ごみ発電や石炭火力よりは小さいが、石油火力、LNG火力、LNG複合発電よりは大きくなる。しかし、ごみの燃焼から直接排出されるCO₂は、ごみがバイオマスであるため計算から除外すると、スーパーごみ発電のCO₂排出原単位は、化石燃料を用いる従来の発電方式と比べて改善される。このことは、未利用エネルギーであるごみ焼却熱をスーパーごみ発電のような高効率発電に用いればCO₂削減に効果があることを示している。

さらに、スーパーごみ発電と、従来型ごみ発電及び小型LNG複合発電を別々に建設した場合との比較では、スーパーごみ発電の建設を選択した方が省エネルギー性とCO₂排出削減効果の両面で優れていることを明らかにした。

参考文献

- 1) 今野国輔, 岩崎崎頭; 廃棄物発電の概況と今後の展望について, 日本機化学会関東支部講演会資料 (1996), 17-26.
- 2) 日本建築学会; ライフサイクルCO₂で建物を測る (1995).
- 3) 本田大作, 藤井修二, 湯浅和博; 廃棄物のLCAによるごみ発電プラントの性能評価に関する研究, エネルギー・資源学会 第17回研究発表会講演論文集 (1998), 205-210.
- 4) 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, Y90015 (1991).
- 5) 内山洋司; 発電システムのライフサイクル分析, 電力中央研究所報告, Y94009 (1995).
- 6) 永田勝也; 廃棄物処理・リサイクルの現状とLCA的検討, クリーンエネルギー, 7-1 (1998), 6-17.
- 7) Robert T. Watson, Marufu C. Zinyowera, Richard H. Moss; Climate change 1995: impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses, (1996), 603, Cambridge University Press.