

# 生ごみバイオガス化によるごみ処理の最適なシステムの検討

佐野 充 (sano@info.human.nagoya-u.ac.jp)

森部 総一・加藤 博和・日比野 高士

[名古屋大学]

## The optimum system of the waste treatment by the garbage biogasification

Mitsuru Sano

So-ichi Moribe, Hirokazu Kato, Takashi Hibino

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Japan

### Abstract

The optimum waste treatment was examined for the system of a garbage bio-gasification along with an incineration. Inventories of the environmental loading and costs of the life cycle are calculated for the combination system of the garbage bio-gasification facility and the gasification fusion furnace. The life cycle cost and the environmental loading are greatly dependent on applications of the generating bio-gas and purifying methods of the waste water from the facility. The desirable system is that garbage is sorted in home and is treated with the bio-gasification facility and the bio-gas is introduced and combined to the power generation of the incinerator, leading to the high efficient power generation, and that the waste water from the bio-gas facility is run in the public sewerage after the simple purification in the system.

### Key words

optimum waste treatment, garbage bio-gasification, inventory of environmental loading, cost of life cycle

### 1. はじめに

家庭から排出されるごみの量は増え続け、ごみ処分場は枯渇しつつある。(厚生省, 1999) 処分場の枯渇は、焼却による減容化を促し、ガス化熔融炉による焼却と焼却残渣の処分地への埋設が廃棄物の処理法として一般化しつつある。一方、容器包装リサイクル法をはじめとする各種リサイクル法の施行、ダイオキシンなどの汚染物質の排出抑制、さらには高齢化社会による公共コストの削減、温暖化ガスの地域削減構想など、廃棄物の処理は、焼却から新たな段階を模索しつつある。

都市域では、生ごみ(厨芥類)を一般廃棄物として排出し、焼却処理するのが一般である。しかし、容器包装リサイクル法の施行により、一般廃棄物に含まれる生ごみの比率は湿ベースで約40%に増加した。生ごみは水分約80%、可燃分約20%で、発熱量は約300 kcal/kgであり、湿ベースの紙類やプラスチック類の発熱量3,000 kcal/kgや7,000 kcal/kgに比べて著しく低い。(東京都, 1997) このような低位発熱量を含む都市域の一般廃棄物の焼却処理において、不足する熱量を補うために施設によっては重油などを加えることもある。また、焼却炉からの汚染物質の排出量規制が厳しくなり、発生を抑制するために焼却炉の温度は厳密に制御されており、その運転にはごみ1t当たり約500 kWhの多量の電気が消費されている。(掛川市, 2004)

一方、焼却炉から発生する熱を有効に利用するために、

多くの焼却炉はごみ発電を実施している。しかし、生ごみに含まれる塩分は腐食性の塩化水素ガス(HCl)を発生させ、ごみ発電用の水蒸気発生器のステンレスパイプを腐食させる。ステンレスの腐食は、350℃以上で著しいため、ごみ発電の蒸気温度は約300℃、蒸気圧は約2.8 MPaに設定されるのが通例で、熱-電気変換効率は7~9%程度であり、発電効率は低く、中小都市の焼却炉はごみ発電を実施しているにも関わらず、多量の電気を購入し、運転経費の増大を招いている。

生ごみの分別処理は、焼却されるごみがより燃えやすくなり、焼却ごみに含まれる塩分量が少なくなって焼却に伴う環境負荷が小さくなり、さらに焼却炉の耐久性が向上するなど、利点が多い。

近年、市町村合併により、複数個所で焼却処理していた一般廃棄物を効率的に1箇所で処理するために、ごみ焼却炉を増設する自治体が多い。また、廃棄物処理法や循環型社会形成推進基本計画では、廃棄物の焼却に由来する二酸化炭素排出削減対策が求められている。

本報告では、既存の焼却炉に加えてガス化熔融炉を増設する場合(ケースA)と既存の焼却炉に新たに生ごみバイオガス化処理施設を併設した場合(ケースB)を、ライフサイクルコストと環境負荷量の両面から比較し、バイオガス化施設を利用した効率的な一般廃棄物の処理システムを検討する。

既に、バイオガス化施設による廃棄物処理について、CO<sub>2</sub>の環境負荷量の研究が報告されている。いずれの研究も既設施設を参考に生ごみバイオガス化施設のCO<sub>2</sub>負荷量を計算し、それが著しく減ることを示しているが、現状の

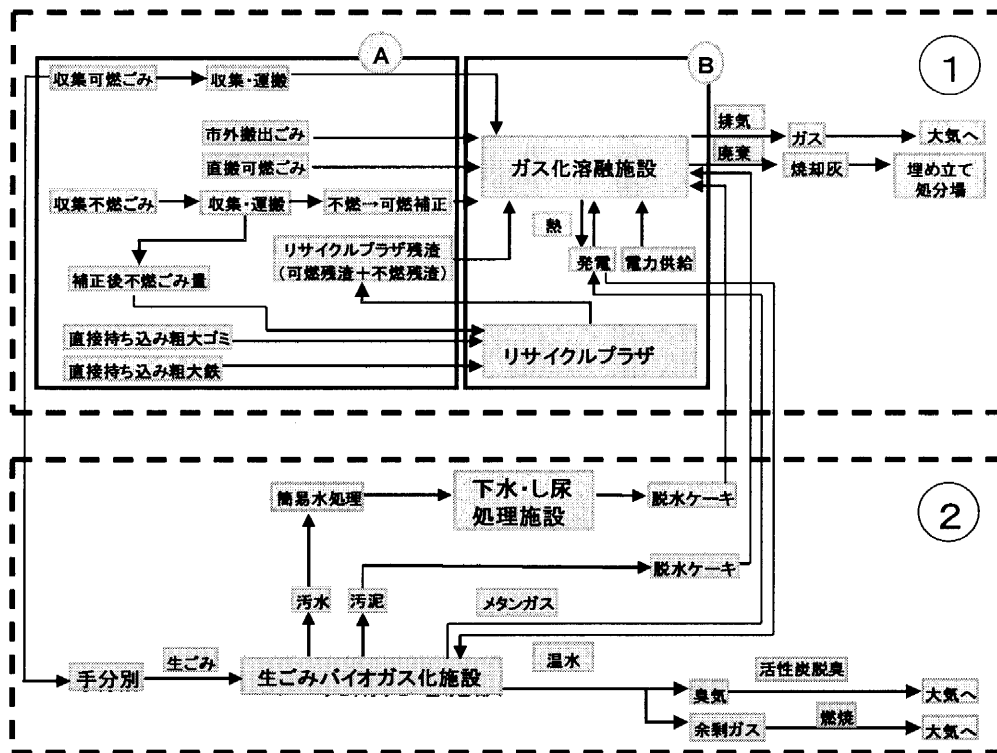


図1：評価対象システムとシステムの境界

分析に留まっている。(中村他, 1999; 田原他, 2004; 高橋他, 2004; 藤倉, 2004) 既施設は、汚水処理などに見られるようにごみ処理システムとして最適化されておらず、焼却炉とバイオガス化施設が併設した場合の利点を十分に検討しているとは言えない。また、既報はバイオガス化施設において最適な処理システムがどのようなものかについて述べられていない。

## 2. 方法

図1に示したように、静岡県K市の一般廃棄物の焼却処理システム①と北海道S市の生ごみバイオガス化施設②を参考に、ケースAとケースB、それぞれにおけるごみの収集・輸送、施設建設、運転・廃棄物の処理の各段階におけるライフサイクルコストと各段階から発生する環境負荷(対象物質: CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>)の推計を行い、システム全体及び段階別における発生環境負荷の違いを検討する。(掛川市パンフレット; 深川市パンフレット)

計算では、ごみ処理の日量を100 t/日とし、可燃ごみは70 t/日、生ごみを30 t/日とした。一般的な調査では、家庭ごみの約50%が生ごみであるとされているが、全量を生ごみとして分別収集することは難しいと考え、北海道地区における生ごみ分別回収の実績から、家庭から分別排出される生ごみ量を30%と想定した。

ケースAでは、40 t/日処理できるガス化熔融炉を増設し、全量(100 t/日)をガス化熔融炉で焼却処理する。また、ケースBでは、生ごみバイオガス化施設(処理能力は40 t/日)

を新設し、可燃ごみは70 t/日を焼却処理し、生ごみ30 t/日をバイオガス化処理する。

## 3. 検討するシステムの特徴

一般廃棄物を焼却処理するガス化熔融炉のシステム①と生ごみバイオガス化施設②の概要を図1に示す。ケースAのシステム①のみの場合、生ごみを分別しないで収集した一般廃棄物は、大きな不燃異物を取り除いた後、ガス化熔融炉で焼却処理する。焼却灰は埋め立て処理し、排気ガスは環境基準に達するまで処理されて外気に排出される。また、焼却熱を利用して水蒸気を発生させ、その蒸気でタービンを回し、発電するが、先に述べたように施設の耐久性の点から水蒸気温度や水蒸気圧は低く、発電効率も低く、多量の電気を購入している。

一方、ケースBは、システム①とシステム②を組み合わせたものであり、生ごみと可燃ごみを分別収集する。可燃ごみはシステム①により焼却処理される。一方、分別収集された生ごみは、生ごみバイオガス化施設で異物分別を機械的に行った後にスラリー状にすり潰され、中温度のメタン発酵タンクに送られ、メタン発酵を約10日間行う。その後、汚水は簡易処理されて下水に放流される。残渣量は発酵温度により異なるが、中温度発酵では極めて少なく、脱水処理されてガス化熔融炉で焼却処理される。生成したバイオガス(約60%がメタンガス、約40%が二酸化炭素)は、脱硫処理された後、種々の用途に使われる。

#### 4. 2つのシステムのライフサイクルコストの推定

増設するガス化溶融炉および新設するバイオガス施設は、処理能力を40 t/日として、既存の施設建設費を参考にした。運営費も同様に既存のガス化溶融炉施設及びバイオガス施設の費用を参考に、表1のように算出した。運営に関わる人件費は、両施設とも、4人の増員を見込むこととした。ごみ収集費は、ケースAでは週2回の収集、ケースBでは週3回収集とし、K市のごみ収集費を参考に、算出した。

建設費は、両施設とも24億円と推定した。ただし、バイオガス化施設については、汚水は完全浄化せずに、簡易浄化して公共下水道に放流することとし、そのための簡易処理施設及び配管費用が1.5億円かかり、その分、初期投資が増加する。運営費と人件費とごみ収集費を合計したランニングコストは、ケースAの場合が2.92億円、ケースBの場合が2.75億円と、ケースBが約2,000万円程度有利となる。

ケースBでは、発生するバイオガスの有効利用によってバイオガス益を見込むことができる。バイオガス発生量は30 t/日の生ごみで、既存施設実績から約150万m<sup>3</sup>/年と推定される。これを用いて発電した場合、売電収入は約3,000万円/年となる。ランニングコストの差分とこのバイオガス益により、年間約5,000万円程度のコストが削減され、汚水処理施設の初期投資は3年程度で回収できることとなる。

表1：ケースA及びケースBのライフサイクルコスト

(単位：100万円)

	ケースA	ケースB
ガス化溶融炉建設費	2,400	
バイオガス化施設建設費		2,400
汚水処理及び下水道配管		150
初期投資総額	2,400	2,550
施設運営費	174	127
人件費	28	28
ごみ収集費	90	120
施設運営費 総計	292	275

#### 5. コスト面から望ましい処理システム

ケースAとケースBをコストの点から比較するとケースBが優位である。しかし、処理システムによって、その優位性は大きく異なる。特に、発生するバイオガスの有効利用と汚水の処理が重要である。生ごみバイオガス化施設を焼却炉に併設せず、得られたバイオガスで発電し、また廃水を放流基準まで施設内で浄化するような場合には、コスト面では不利になることもある。

既設のバイオガス化施設では、ガスエンジンなどで発電

する例が多いが、発電効率は必ずしも高くない。発生するバイオガスを有効に利用するには、ガス化溶融炉の発電システムにバイオガスを導入し、コンバインドサイクル化を図ることにより高い発電効率を持たせることが可能になり、バイオガス化施設や焼却炉に必要な電気を買電せずに、すべてまかなうことが可能になる。このような場合には、ケースBが著しく有利になる。

また、汚水処理について、既設のすべてのバイオガス化施設において汚水を浄化し河川放流していた。バイオガス化施設の廃水を放流基準にまで浄化するには、施設運営費は0.3億円程度コストアップし、建設費もより高くなるため、ケースBの有利性は著しく減じる。バイオガス化施設からの汚水を簡易処理して下水放流し、施設の整った下水処理施設で他の大量の下水・し尿とともに浄化処理するシステムが最も良い。

以上のように、生ごみバイオガス化施設を単独で建設することはコスト面、エネルギー面から避けるべきであり、廃棄物処理施設の一部として生ごみバイオガス化施設を考え、焼却炉に併設して発生するバイオガスを有効利用し、生成する汚水を簡易処理して下水道放流することが望ましいシステムの形態である。

#### 6. 2つのシステムの環境負荷のインベントリ分析

発生環境負荷の推計には、ライフサイクルアセスメント(LCA)の手法を用い、対象物質であるCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>のインベントリデータとして整理する。システム境界は図1の定義に従い、各プロセスにおける資材・エネルギー投入量に各環境負荷の内包原単位(投入物質の原料調達や製造段階にまで遡及した分を考慮した原単位)を乗じて合計する「プロセス法(積み上げ法)」を用いた。原単位データとしては(社)産業環境管理協会が提供する日本で最も標準的なデータである「JLCA-LCAデータベース」を用いたが、不足するデータについては、関係するメーカーや自治体などへのヒアリングによって補足した。(LCA日本フォーラム)ガス化溶融炉及びバイオガス化施設に関するデータは、既設の施設のデータをヒアリング調査によって収集して用い、処理量に比例する原単位として整備した。インベントリ分析結果を表2と表3に示す。

CO<sub>2</sub>の発生量は、ケースAで27,259 t、ケースBでは22,354 tとなり、ケースBの場合、約5,000 tの排出抑制が可能という結果になった。ごみ焼却及びバイオガスからのCO<sub>2</sub>を除けば、ケースAは5,801 t、ケースBは6,198 tとなることから、大半は施設内で消費される電力によるものであることが分かる。電気を施設内発電で自給することは環境負荷の点からも重要であり、先に述べたように、発生するバイオガスを有効に使い、発電効率を向上させるような工夫が必要である。また、ケースBでは、汚水処理に要するエネルギー消費もCO<sub>2</sub>発生量を増加させている。先のコスト比較においても述べたが、既設のバイオガス化施設のように施設内の汚水完全浄化と河川放流は、汚水処理に関わるエネルギー消費を著しく増加させるため、コストばかりで

表2: ガス化溶融炉で全量100tを焼却処理する場合(ケースA)の発生環境負荷

	CO <sub>2</sub> [t]	SOx [kg]	NOx [kg]
ごみ収集 週2回	190	6	1,191
電気	5,580	754	1,507
上下水道	6	1	2
燃料(灯油)	607	31	292
油脂類(潤滑油)	2	18	12
ごみ焼却	21,458	7,554	0
焼却灰	18	2	18
総計	27,259	8,365	3,021

表3: 生ごみ30tをバイオガス化処理し、ガス化溶融炉で70tを焼却処理する場合(ケースB)の発生環境負荷

	CO <sub>2</sub> [t]	SOx [kg]	NOx [kg]
ごみ収集 週3回	285	9	1,786
電気	1,121	151	303
上下水道	3	0	1
焼却処理	245	557	117
汚水処理	159	4	2
生成 CO <sub>2</sub>	1,136	-	-
小計	2,664	712	423
電気	3,943	527	1,055
上下水道	4	1	1
燃料	424	22	205
油脂類	1	12	8
焼却	15,020	5,287	0
焼却灰	12	2	12
小計	19,405	5,851	1,281
総計	22,354	6,572	3,490

なく CO<sub>2</sub> 発生の点からも、汚水処理は簡易処理に留め、下水放流すべきである。また、ごみ収集に関わる CO<sub>2</sub> を減らすために、発生したバイオガスをごみ収集車の燃料とすることも考慮すべきだろう。

SOx の発生は、焼却処理によるものが主なものであり、焼却処理量が多いケース A において発生量が多くなる。

一方、NOx は、ごみ収集と電力消費からの発生量が主なものであり、ごみ収集回数の多いケース B で多くなる。ごみ収集の NOx は収集車の燃料に含まれる窒素に由来するものが大半であり、窒素分を含まないバイオガスを燃料と

して用いた場合には NOx 発生量を大きく減らすことが可能になる。

## 7. 生ごみバイオガス化施設の課題

既に述べたように、一般廃棄物の処理において生ごみバイオガス化処理の導入は、コストや環境負荷の点からも望ましい形態である。しかし、いくつかの解決すべき課題が存在するので、ここではその課題について述べる。

### (1) 生ごみの分別

機械的に分別する方法もあるが、設備費と維持・運転経費なども問題であり、排出する市民が分別に協力することが望ましい。山形県長井市、北海道深川市、滝川市、砂川市に見られるように、市民が協力して生ごみ分別が行われている例もあり、分別に対する市民への啓発活動が必要であろう。

### (2) 臭気

施設内・周辺にたどよう臭気は深刻な課題である。一般家庭から出された生ごみの臭気は集積所などで問題になるものではないが、多くの施設では施設区域に入るや苦痛になるほどの臭気を感じる。焼却施設には、地元住民への利益還元のための入浴施設や温水プールが併設されていることが多い。また、リサイクル品を展示したり、社会学習に使用される施設が併設されていることも多く、臭気対策は深刻な技術課題であろう。バイオガス化施設内を低圧化して臭気を外気に出さない施設にすべきであるが、建設費や維持管理費の低コスト化が可能かどうか検討する必要がある。また、施設によって臭気の強さが著しく異なり、臭気的面からのバイオ発酵の技術の取組・改善も必要であろう。

### (3) バイオガスの有効利用

バイオガスを利用してごみ発電をコンバインド化することを筆者は提案するが、この場合の技術的な課題を早急に検討する必要がある。横須賀市のように、ごみ清掃車の燃料とする場合もあるが、この場合のコストパフォーマンスや環境負荷量について精査が必要であろう。

さらに、バイオガス化施設からの汚水処理を筆者は簡易処理に留め、下水放流するべきであると述べてきたが、技術的に可能かどうか精査が必要であろう。

## 8. おわりに

ごみを分別し、生ごみをバイオガス化することは、コストや環境負荷の点から望ましい形態であることが、ライフサイクルコストや環境負荷のインベントリ分析より明らかになった。しかし、生ごみ分別や処理システムの組み合わせにより、優位性は大きく異なるため、システムの最適化を図る必要がある。

コスト・環境負荷低減の観点から望ましいシステムとは、家庭での生ごみ分別である。それにより、焼却炉及びバイオガス化施設への負担は軽くなり、生ごみはバイオガ

ス化施設で処理し、バイオガスは燃料として焼却炉のごみ発電のコンバインド化に使用されるのが望ましい形である。また、汚水は簡易浄化して下水放流する形態が望ましい。

最後に、筆者らが提案する処理システムが実機として運用された場合には、システム全体の詳細な評価を行い、問題点を洗い出すとともに、改善点を検討すべきであろう。

なお、本報告の一部の結果は、文献（森部他，2005）と、掛川市地域新エネルギー詳細ビジョン策定調査報告書（委員長：佐野充）で報告している。

### 謝辞

資料収集の機会を得るに当たって、掛川市環境保全課及び地域開発研究所の諸氏の好意に依存することが大きく、深く感謝します。また、施設の見学にご協力を頂いた神戸市、京都府八木町、上越市、深川市、砂川市、滝川市、横須賀市、鹿島、住友重機械工業の関係諸氏にも深く感謝致します。

### 引用文献

- 藤倉まなみ、一般廃棄物のバイオガス化を選択した北海道  
中北空知ブロック3地区の取組、資源環境対策、Vol.40  
(2)、pp.47-52 (2004)
- 深川市、深川市リサイクルプラザパンフレットより  
掛川市：平成16年度 掛川市の環境、p.131 (2004)
- 掛川市、環境資源ギャラリーパンフレットより  
厚生省生活衛生局：日本の廃棄物処理、平成8年度(1999)  
LCA日本フォーラム、JLCA - LCA データベース2004年  
試験公開版
- 森部総一・佐野充・加藤博和、ライフサイクルコスト及び  
環境負荷による一般廃棄物処理システムにおける生ゴミ  
処理方法の検討、環境科学会2005年会講演要旨集、  
pp.48-49 (2005)
- 中村一夫・南秀明、京都市におけるバイオガス化技術実証  
研究プラントの取組について、都市清掃、p.52、231号、  
353-356 (1999)
- 田原聖隆・稲葉敦・坂根優・小島紀徳、都市ごみ処理にお  
ける生ごみ分別処理の効果、廃棄物学会論文誌、Vol.15  
(4)、pp.276-282 (2004)
- 高橋富男・松本智文・龍吉生・坂田幸久・長尾竜二・浅野  
啓一、生ごみバイオマス資源としての有効活用、第25  
回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集、pp.92-94  
(2004)
- 東京都清掃研究所：平成7年度 東京都清掃研究所研究報  
告、pp.22-51 (1997)

(受稿：2006年10月25日 受理：2006年11月17日)