

<特集>

有機性廃棄物のバイオガス化

Biogasification of Organic Wastes

後藤雅史

鹿島建設(株)技術研究所 EBグループ*

Masafumi Goto

Kajima Technical Research Institute, EB Group

Abstract

Alternative technologies other than incineration systems, that are capable of converting organic wastes to recyclable material and/or energy resources, are much desired in recent years. The anaerobic digestion, which is a proven technology in the fields of sanitary and environmental engineering since the 19th century, has been re-evaluated for its energy-saving characteristics and capability of recovering fuel in the form of biogas. Technological modifications on the system including thermophilic operation and new reactor designs have substantially improved system performance, especially, on garbage, and several actual biogasification plants on garbage are already in operation.

1 背景

環境と開発に関する世界委員会(ブルントラント委員会)は、1987年に公表した報告書で「持続可能な開発: 将来の世代の欲求を満たしつつ、現在の世代の欲求も満足させる開発」を提唱した¹⁾。この考え方は、1992年の地球サミット(国連環境開発会議)におけるリオ宣言の中心原則となり、有効で国際的に開かれた経済システムの構築を促すことが求められることになった。さらに1994年には国連大学が産業活動における生産等の工程を再編成し廃棄物の発生をできる限りゼロに近づける循環型産業システム、すなわち「ゼロエミッション」システムを提唱し、リサイクルの重要性を指摘した。地球サミットから10年を経た2002年には、持続可能な開発に関する世界首脳会議(ヨハネスブルグ・サミット)が開かれ、各国首脳による持続可能な開発に向けた政治的意思を示す成果文書「持続可能な開発に関するヨハネスブルグ宣言」、な

らびに、「ヨハネスブルグ実施計画」として、貧困の撲滅、持続可能でない生産消費形態の変更、天然資源の保護と管理、持続可能な開発を実現するための実施手段、制度的枠組みなど、各国の指針が採択された。

これらの議論を受け、日本では1993年に環境基本法が成立し、翌1994年にはその実現のための計画として環境基本計画が閣議決定された。環境基本計画は2002年に改正され、「持続可能な社会」の定義、ならびに、その実現のために必要な方策が示されることになった²⁾。新エネルギー法は1997年4月に公布されているが、その後、施行令の一部が2002年1月に改定され、食品・農業系廃棄物を燃料とするバイオマスエネルギーと雪や氷を保冷源として利用する雪氷冷熱エネルギーが、同法の規定する「新エネルギーの利用」に追加された³⁾。また、2002年12月に石油代替エネルギーの供給目標も見直され、エネルギー使用者が実施すべき新エネルギー種類ごとの導入目標が改定された⁴⁾。導入目標によると、2010年度における国内総一次エネルギーに占める新エネルギーの割合は約3%(対策ケース)と設定されている。

一方、2002年12月に公表されたバイオマス・ニッポン総合戦略では、地球温暖化防止、循環型社会形成、新

*〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1
TEL:0424-89-7422 FAX:0424-89-2896
E-mail:m-goto@kajima.com

Tab.1 Annual Discharge of Biomass/Wastes⁵⁾

type	livestock wastes	food wastes garbage	paper wastes	black liquid	sewage sludge
amount (1,000t)	91,000	19,000	14,000	14,000	76,000
type	night soil sludge	lumber wastes	felling wastes	construction wastes	agricultural residue
amount (1,000t)	32,000	6,100	3,900	4,800	13,000

規戦略的産業育成，ならびに，農林漁業，農山漁村活性化を達成するために，再生可能な物質資源・エネルギー資源としてバイオマス（有機性廃棄物も含む）を有効活用することの重要性が説かれている⁵⁾。

2 廃棄物

毎年，国内で発生する廃棄物量は膨大である．環境白書によると，一年間に発生した産業廃棄物は約 40,600 万トン，一般廃棄物は 5,200 万トン（いずれも平成 12 年度）である⁶⁾．中でも汚泥（有機汚泥，無機汚泥），畜産排泄物，生ごみなどの発生量が多い（Tab.1）．

また，古紙や廃木材を含めた木質系廃棄物（約 4,000 万トン），籾殻や稲ワラなどの農業残渣（1,300 万トン）などの発生量も極めて多い⁵⁾．これらの廃棄物処理・処分の現状は，古紙などリサイクルされているものもあるが，平成 12 年度には，一般廃棄物の 77.4% が直接焼却されており，産業廃棄物については発生量の約 2/3 が直接焼却（30.5%）あるいは脱水処理（38.6%）されていた⁷⁾．

バイオマス・ニッポン総合戦略によると，廃棄物系バイオマスの年間発生量は約 30,500 万トン*（湿潤重量，乾燥重量で約 5,600 万トン）と見込まれている．これはエネルギーに換算すると 2,400 万 kL の原油に相当し，生物由来の有機物であることから，カーボンニュートラルな物質・エネルギー資源とすることができる．

近年，これらの有機性廃棄物の処理・処分が大きな問題になってきた．その理由の一つに，2000 年 6 月に公布された循環型社会形成推進基本法⁸⁾，ならびに，個々の所謂リサイクル法の整備がある．例えば，飼育頭数 10 頭以上の農家が圃場や畑地に牛糞尿を散布することは 2004 年 11 月以降，家畜排泄物法によって禁止される⁹⁾．また，食品の製造，流通，販売，外食などに関わる食品関連事業者は，2003 年 6 月に改正された食品リサイクル法に基づき，2006 年度までに廃棄物年間排出量の 20% 削減

*古紙として再利用されている紙類 1,700 万トンなども含む．

を達成しなければならない¹⁰⁾．これらは，リサイクルを実施することで，産業活動等に伴って排出される廃棄物量の低減を促すことによって上に述べた循環型社会の構築を目指すものである．そしてその実現のために，従来の技術に代わる環境負荷の低い処理・処分システムの開発とともに，資源循環技術あるいは，エネルギー資源の回収・再利用技術の開発が求められている．特に，リサイクルの観点からは，有機性廃棄物処理・処分の最終産物として，飼料・肥料などの物質資源，あるいはバイオガスや熱などのエネルギー資源を回収できるものが必要とされている．

3 エネルギー資源化技術

エネルギー資源化技術には，廃棄物を直接的に燃料とする焼却法に加えて，RDF（廃棄物固形化燃料）化・焼却法，微生物機能を利用したバイオガス化法あるいは物理化学反応を利用した加熱ガス化法などがある．木質系バイオマスを糖化し微生物発酵によってアルコールを生産する技術もすでに国内でもパイロットスケールで実証試験が行われている．海外では，トウモロコシやサトウキビを原料にしてアルコール（バイオアルコール）を生産する実設備がすでに稼働しているが，これらのシステムでは，栽培植物の可食部（でん粉や糖類）を原料とするものであり，セルロースを起点とする木質系バイオマスのアルコール発酵とは若干異なっている．新しい技術としては，有機物を超臨界条件下で触媒反応させて直接メタンなどに変換する技術が研究・開発されている．

有機性廃棄物の中で発生量の多い生ごみや有機汚泥，畜産廃棄物は水分が多く，腐敗性である．これらの有機性廃棄物を，安定化処理せずにそのまま埋め立て処分すれば衛生上の問題があるだけでなく，環境中の微生物の作用を受け，温室効果ガスである二酸化炭素やメタンなどとして大気中に放出されてしまう．したがって，これらの廃棄物に対しては，減量・減容化だけではなく，安定

Tab.2 Typical Composition of Biogas from Thermophilic Methane Fermentation on Organic Wastes (commercial garbage)

methane	CO ₂	H ₂ S	NH ₃	Cl ₂
63.4%	36.5%	654.7ppm	27.6ppm	5.8ppm

化のための処理も必要であり、焼却処理せざるを得ないのが現状である。一方、分別収集・リサイクルが進むにしたがって、焼却場に搬入される廃棄物に混入する紙・プラスチック類やペットボトルなどの割合が減少する傾向にある。この結果、焼却処理される廃棄物の組成は、水分が多く自然し難い生ごみなどが相対的に多くなり、適切な燃焼条件を維持するための発熱量が不足する場合も生じる。この場合、不完全な焼却はダイオキシンなどの汚染物質を生成する可能性があるため、助燃料として化石燃料（重油）の併用が必要となる。また、焼却設備の場合は回収できるエネルギー資源は廃熱に限られる。大型の都市ごみ焼却施設には廃熱を有効利用したスーパーごみ発電システムやより高温の蒸気回収ができる高温焼却が可能な耐腐食性の炉材などが導入され、廃熱エネルギーの回収・再利用の効率向上を図っている例もあるが、一般に、その効率は高くないのが実情である。

4 メタン発酵

嫌気性微生物によるメタン発酵（嫌気性消化）プロセスは、衛生工学・環境工学分野では古くから使われている技術である。19世紀末までには、生物的廃水処理技術の一つとして嫌気イムホフ法がすでに確立されており、下水処理や下水汚泥の処理システムとして長く使われてきている実績がある。メタン発酵プロセスの特徴の一つは、利用する微生物が酸素を必要としないため曝気が不要となることである。すなわち、曝気のための送風エネルギーが不必要な省エネルギー型のプロセスであると言える。さらに、メタン発酵処理で発生するバイオガスは50~70%程度のメタンを含んでいるが、天然ガスの主成分でもあるメタンは約8,600Kcal/Nm³の発熱量(LHV)を有しているため、バイオガスも燃料的な価値を持っている。すなわち、ごく一般的なバイオガスのメタン濃度を約60%とすると、バイオガスは5,200Kcal/Nm³程度の発熱量を持つガス燃料と言える。なお、ガス組成の残分はほぼ全てが二酸化炭素であるが、微量成分として硫化水素、アンモニアなどの悪臭・腐食性ガスも含まれており、用途によってこれらの微量成分を除去する必要がある。微量成分の濃度は、メタン発酵処理される有機物の組成に大きく依存するが、生ごみを例に取る

と、あるメタン発酵システム（高温メタン発酵）から回収されるバイオガスの平均的な組成例はTab.2のとおりである¹¹⁾。

近年、下水や下水汚泥の減量・減容・安定化のための中間処理としてだけでなく、より積極的にバイオガスをエネルギー資源としてリサイクルしようとする動きが顕著になってきた。食品リサイクル法などの施行に伴い、バイオガス化システムがリサイクル施設として国庫補助の対象になり得ることも、バイオガス化システム導入を検討する積極的な動機付けの一つになっていると考えられる。しかし、従来のメタン発酵システムは中温発酵法(37°C前後)が中心であり、生物反応速度が遅く、容積効率(有機物負荷)が高いものではなかった。すなわち、設備効率が低いと同時に、投入した有機物に対するバイオガス回収率(ガス化率)も高いとは言えないのが実情であった。そこで、このような欠点を改善する一つの手法として、高温メタン発酵システムが見直され、実規模の施設にも適用されるようになってきた。

高温メタン発酵システムとは、55°C前後の高温嫌気雰囲気下でメタン発酵を行うもので、従来の中温メタン発酵に比べて発酵速度や容積負荷率の大幅な向上が期待できるものである。しかし、中温メタン発酵システムに比べて、付着担体や自己造粒汚泥によってリアクタ内に微生物を高密度に維持することがやや困難であり、その対策が必要であった。バイオリアクタ内に微生物を高密度に維持するにはいくつかの方法が考えられるが、筆者らは、固形分を多量に含む有機性廃棄物・廃液を対象とするシステムには、一般的な上昇流型(スラッジブランケット型)ではなく下降流型が適していると判断し、微生物の付着担体を開発・実用化することによって問題の解決を図った。この結果、中温メタン発酵システムに比べて、バイオリアクタにおける滞留時間の大幅な短縮、および有機物容積負荷の増大が可能となった。

筆者らが1997年に大型ショッピングモールに導入した固定床下降流型高温メタン発酵方式(TDAPR: Thermophilic Down-Flow Anaerobic Packed-Bed Reactor)による生ごみ・厨芥処理設備の運転データを例にとると、生ごみ(事業系)処理量1t/日あたりのバイオガス発生量は約220m³/日であり、このプラントにおけるバイオガス中の平均メタン濃度は66%であった。したがって、回

Tab.3 Biogasification Plants for Garbage in Operation (2003)

Location	Desgin Capacity	Management
Takigawa Hokkaido	55t/day	Nakakita Sorachi Sanitation Facility Association (中空知衛生施設組合)
Sunagawa Hokkaido	22t/day	Sunagawa Region Sanitation Association (砂川地区保健衛生組合)
Fukagawa Hokkaido	16t/day	Kita Sorachi Sanitation Center (北空知衛生センター組合)
Toyama Toyama	24t/day	Toyama Green Food Recycle, Inc. (富山グリーンフードリサイクル (株))
Shiroishi Miyagi	3t/day	Shiroishi City (白石市)

収バイオガスの持つ熱エネルギーは約 1.2Gcal/日/t-生ごみとなる¹²⁾。

回収したバイオガスの有効再利用法として、筆者らは温水ボイラ、リン酸型燃料電池 (PAFC)、固体高分子形燃料電池 (PEFC)、マイクロガスタービン (MGT) の実装、実証試験を実施してきた。1999 年には、通産省 (現、経済産業省) の即効型提案公募事業として、事業系生ごみの高温メタン発酵によって回収したバイオガスと商用 PAFC の組み合わせで発電が可能であることを初めて実証した¹¹⁾。本実証試験では、生ごみ投入量 1 トン/日あたりに換算すると約 1.8GJ (500kWh) の電力を回収することが可能であることが示されたが、これは、一般的な家庭が消費する電力の約 50~60 日分に相当する。その後、2003 年度夏まで実施していた環境省・地球温暖化対策実施検証事業では、神戸市ポートアイランドに建設した事業系生ごみ計画日処理量 6 トンの TDAPR および定格出力 100kW の PAFC による有機性廃棄物バイオガス化・連続発電の実証試験を実施した。本実証試験施設は、環境省の燃料電池活用戦略検討会の報告書によると、本実証試験施設は化石燃料由来の二酸化炭素削減に有効であるが、廃棄物の中間処理施設としては処理単価が割高であると評価されている¹³⁾。その後、北海道、富山県、宮城県などに、国内各社による本格的な有機性廃棄物のエネルギー資源化施設が 2003 年春前後に相次いで竣工し、順調に稼働している (Tab.3)。

これらの例に見られるとおり、有機物濃度が比較的高く、かつ、ある程度の生分解性が期待できる生ごみのバイオガス化技術はほぼ実用化の段階に達していると判断される。なお、これらの施設は、いずれも MGT 発電設備を併設している。

一方、すでに述べたように、膨大な国内発生量である畜産廃棄物や有機汚泥のエネルギー資源化については、まだ課題が多く残されている。都市圏では、大量に発生す

る下水余剰汚泥をメタン発酵し、回収したバイオガスによる発電を実施している自治体の例もある。一方、日処理量 40 トン程度の大型畜産廃棄物メタン発酵試験施設も各地で稼働を始めている。しかし、これらの廃棄物は一般に生分解性が低く、したがって、バイオガス化効率は高くない。また、排出された状態では含水率が高く有機物濃度が比較的低いために、単位処理量あたりのバイオガス回収量が少ない場合が多い。このことは、これらの有機性廃棄物のメタン発酵システムを、経済性のあるエネルギー生産プロセスとして成り立たせることが困難であることを示している。

5 展望

バイオガスは燃料ガスとして有効利用することができる。しかし、その発熱量は天然ガスに比べると 1/3 程度低い値である。また、バイオガスは必ず硫化水素やアンモニアなどの不純成分を含んでおり、エネルギー資源として有効再利用を図るためにはこれらの効率的な除去が必要である。一方、微生物反応産物であるバイオガスの発生量を時間単位で制御することは難しく、バイオガスは一日を通じて持続的に発生するものと考えなければならない。したがって、無駄のない有効利用を実現するためには、回収したエネルギーを消費する機器類の稼働状況と余剰バイオガス一時貯留設備の容量のバランスをうまく調整する必要がある。しかし、同時に、その性状や発生量は常に変動する可能性があり、バイオガスに適した制御系の開発が求められる。

新エネルギー導入目標によると、国内の 1 次エネルギー全体に占める新エネルギーの割合を、1998 年の 1.2% から 2010 年には 3.1% にまで高めると謳われている。新エネルギー由来の電力については、太陽光エネルギー利用 482 万 kW、風力エネルギー利用 300 万 kW に対して、廃

棄物エネルギー利用および廃木材等利用を合わせた数値はほぼ同程度の450万kW(内、バイオマス利用発電量は33万kW)がそれぞれの2010年度目標値になっている。一方、熱利用については、太陽熱439万kL(原油換算、以下同様)、未利用エネルギー(雪氷冷熱も含む)58万kL、廃棄物熱利用14万kL、バイオマス67万kL、廃木材・黒液等494万kLが目標値となっている。これらの目標値と1999年の実績値を比較すれば、太陽光発電や風力発電は23~38倍もの増加が目指されているが、廃棄物利用、バイオマス利用の発電および熱利用については1.1~6倍程度の増加が目標とされているに過ぎず、エネルギー密度が低くエネルギー獲得のためのプロセスが成立しにくい廃棄物系バイオマスの特性を反映していると考えられる。

しかし、日常的な生活、生産活動の結果として生じる有機性廃棄物を処理することによって有効利用可能なエネルギー資源を回収し、廃棄物処理に必要なエネルギーの一部を賄うことができれば、従来法に代わる環境負荷のより低い廃棄物処理システムの構築が可能となる。筆者は、直接的あるいは間接的に化石燃料消費の低減に寄与できるこれらの技術も循環型社会を形成するための大切な要素であると考えられる。

[参考文献]

1) Bruntland, G. (ed.), "Our common future: The World Commission on Environment and Development", Oxford University Press, Oxford, UK, (1987).

- 2) "環境基本計画-環境の世紀への道しるべ-", 改正, (2000年12月).
- 3) "新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法(新エネ法)施行令", 改正, (2002年1月).
- 4) "新エネルギー利用等の促進に関する基本方針", 改正, (2002年12月).
- 5) "バイオマス・ニッポン総合戦略", 閣議決定, (2002年12月).
- 6) 環境省, "平成15年版 環境白書", (2003年).
- 7) 環境省, "平成15年版 循環型社会白書", (2003年).
- 8) "循環型社会形成推進基本法", 公布, (2000年6月).
- 9) "家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律(家畜排泄物法)", 公布, (1999年7月).
- 10) "食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律(食品リサイクル法)", 公布, (2000年6月).
- 11) 東郷, 多田羅, 後藤, "生ごみのバイオガス化と燃料電池発電の組み合わせシステム", 鹿島技研研究所年報, vol. 48, pp. 131-136, (2000).
- 12) 東郷, 多田羅, 後藤, "生ごみの高温メタン発酵処理システム", 鹿島技研研究所年報, vol. 47, pp. 135-140, (1999).
- 13) 燃料電池活用戦略検討会, "バイオマス資源の有効利用に資する燃料電池活用戦略", 環境省, (2003).