

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

バイオマス廃棄物のメタン発酵（着手段階）

Methane Production from Biomass Wastes by Anaerobic Fermentation
(First step)

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

独立行政法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

平成 26 年 3 月

LCS-FY2013-PP-05

概要

下水汚泥や食品残渣からバイオガスを生成する場合、たとえば日本の人口 1 億 2 千 7 百万人の 10% を対象とする時、約 12PJ/y のエネルギー発生のパテンシャルをもっている。(PJ: ペタ (10^{15}) ジュール)

バイオマス廃棄物は大きなエネルギー源となる見込みが高いが、現状では製造コストが高く、大規模な普及の妨げになっている。現状のコスト、市況のエネルギー単価に近づけるための課題などを検討することにより、実用化への道筋が見えてきた。

1. 諸言

日本においても、下水処理工程からの余剰活性汚泥、各種食品残渣、家畜の糞尿などから、嫌気性のメタン発酵処理によるバイオガス発生を行い、エネルギーとして利活用する取り組みは行われているが、処理コストなどの問題からまだ本格的な導入に問題がある。しかしドイツ、スウェーデンなど欧州では本格的な導入が進んでいる。日本においても、貴重なエネルギー源であり、本検討では、バイオガスのコストを解析し、広範囲な導入のための問題点を明確化し、重点的に開発すべき課題を整理した。

尚、ここでは一般的なメタン発酵処理についてコスト試算を行った。今後は、特定地域におけるバイオマス廃棄物の種類、排出量、収集方法、最終処分状況等の諸データに基づいた検討が必要である。

2. コスト評価結果

1) 設備規模

一般にコストにおける設備費対応の負担額は、設備規模が小さいときは大きく影響を受けるが、一定規模以上の設備では影響は小さくなる。スウェーデンの Chalmers Univ. のレポート¹⁾では、精製バイオガス（ガス成分： CH_4 98vol%、残 CO_2 など）発生量が 30GWh/y ($108\text{TJ}/\text{y}$) 以上になると規模の影響は小さいと報告されている。

本検討では生産規模を 40GWh/y ($144\text{TJ}/\text{y}$) とした。(GWh: ギガ (10^9) ワットアワー, TJ: テラ (10^{12}) ジュール)

2) バイオマス廃棄物

対象とするバイオマス廃棄物としては、全国に共通して存在する下水排水処理場で発生する余剰活性汚泥（下水汚泥）および食品残渣とした。

下水汚泥の発生量については、東京都での実績値²⁾で代表した。含水率を 98.5% とすると発生量（乾燥品基準）は $0.104\text{t-DM}/\text{人}/\text{y}$ である。

食品残渣の発生量は 2005 年の食糧バランスを参考にして、全国での廃棄量³⁾ $183\text{kg}/\text{人}/\text{y}$ の約 1/3 である $50\text{kg-wet}/\text{人}/\text{y}$ とした。また含水率は 73% とする。

3) メタン発酵（発生）量

メタン発酵は 35°C の中温で行い、バイオマス廃棄物からの CH_4 発生量は下水汚泥の場合 $195\text{Nm}^3/\text{t-DM}$ 、食品残渣の場合 $118\text{Nm}^3/\text{t-wet}$ とした。また CH_4 の発熱量は $35.9\text{MJ}/\text{Nm}^3\text{-CH}_4$ とした。

以上より人口 1 万人あたりの CH_4 発酵によるエネルギー発生可能量は、

下水汚泥: $195 \times 0.104 \times 10^4 \times 35.9 = 7.2\text{TJ}/\text{y}/\text{万人}$

食品残渣: $118 \times 0.050 \times 10^4 \times 35.9 = 2.1\text{TJ}/\text{y}/\text{万人}$

計 9.3TJ/y/ 万人 $\text{CH}_4:0.26 \times 10^6 \text{ Nm}^3/\text{y}/ \text{万人}$ ）である。

4) バイオガスプラント

バイオ廃棄物処理対象人口規模は、15 万人（生産規模：40GWh/y）とし、年間稼働日数を 330 日（7920 h）とする。

バイオガスプラントは、粗バイオガス製造工程（ CH_4 60vol%）とバイオガス精製工程（ CH_4 98vol%）からなる。

CH_4 発生量は、 $513 \text{ Nm}^3/\text{h}$ （粗バイオガス： $855 \text{ Nm}^3/\text{h}$ に相当）であり、下水汚泥からの CH_4 発生量が 77%である。

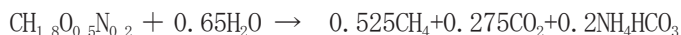
・粗バイオガス製造工程

下水汚泥は含水率 98.5%で受け入れ、汚泥濃縮機で 95%まで濃縮し、汚泥調整槽で濃度を調整後メタン発酵槽に供給する。食品残渣は生ごみとして含水率 73%で受け入れ、水を混ぜスラリー状にして異物を除去した後、生ごみ解砕機で細かく解砕し、生ごみ調整槽で含水率 95%に調整後、メタン発酵槽に供給する。

メタン発酵は 35°C の中温で行い、滞留時間は 20 日とする。この時所要滞留量は、 $45.8 \text{ m}^3/\text{h} \times 24\text{h}/\text{d} \times 20\text{d} = 22,000 \text{ m}^3$ （ $7,000 \text{ m}^3$ タンク、4 基）であり、発酵槽への有機物負荷量は $2.5 \text{ kg}/\text{m}^3/\text{d}$ である。発酵したバイオガスは、 $855 \text{ Nm}^3/\text{h}$ （ CH_4 ： $513 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、 CO_2 ： $342 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ）である。これらは汚泥中の有機分から生成するので、発酵槽での有機物の消化量は $1 \text{ t}/\text{h}$ であり、消化率は 43%である。

次にメタン発酵反応での発熱量を推定する。

有機物をバイオマスとして $\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$ （標準生成エンタルピー： $-91 \text{ kJ}/\text{mol}$ ）と近似する。メタン発酵反応式は次式で表せる。



この場合反応での標準生成エンタルピーは、 $-35.9 \text{ kJ}/\text{mol}$ -biomass であり、発熱反応である。発生メタン基準では、 $-68.4 \text{ kJ}/\text{mol}$ - CH_4 である。しかし汚泥の加温などのために加熱しなければならない。

メタン発酵槽出口液は含水率 97%であり、消化汚泥脱水機で含水率 81%まで脱水後、系外に排出され、コンポストとして利用または汚泥焼却炉で焼却される。排液は、液体肥料として利用されるかもしくは下水処理される。

・バイオガス精製工程

粗バイオガスの組成を CH_4 ：60vol%と CO_2 ：40vol%とし、精製バイオガス組成は、 CH_4 98vol%（露点： -50°C 以下）圧力： 0.9 MPa とした。また CH_4 精製収率は 94%である。

粗バイオガスは、消化ガス圧縮機で 1 MPa 程度に加圧されたのち、吸収塔底部に供給される。塔頂からの加圧水との交流接触により、 CO_2 は水側に吸収され、塔頂からは CH_4 濃度 98vol% のガスを得、除湿器を経て精製ガスとなる。塔底からの水は、減圧タンクを経て放散塔頂部に送られ、塔底から供給される空気によって、吸収した CO_2 を放散し、再び吸収水として循環使用する。なお、循環水は、チラーを用いて 7°C 程度に冷却して吸収塔に送られる。精製バイオガスとして、 $492 \text{ Nm}^3/\text{h}$ を得る。

図 1 にバイオガス生成プロセスフロー、表 1 に粗バイオガス工程主要機器表、表 2 にバイオガス精製工程主要機器表を示す。

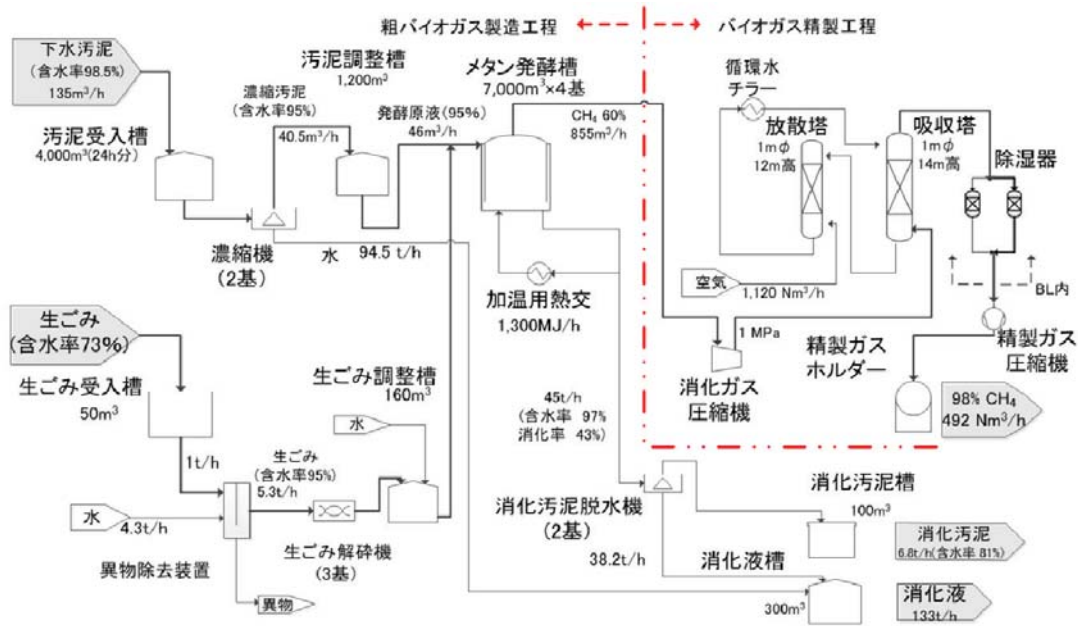


図 1 下水汚泥および生ごみからバイオガス生成プロセス

表 1 粗バイオガス工程 主要機器表

| 機器名 | 仕様 | 基数 | コスト | | エネルギー | |
|----------|---------------------|----|------|----------|-------|----------------|
| | | | 百万円 | 重量 トン | kW | MJ/h |
| 汚泥受け入れ槽 | 4000m ³ | 1 | 55 | 100 | | |
| 濃縮機 | 35m ³ /h | 2 | 170 | 18 | 180 | |
| 汚泥調整槽 | 1200m ³ | 1 | 25 | 40 | | |
| 生ごみ受け入れ槽 | 50m ³ | 1 | 7 | 6 | | |
| 異物除去装置 | 7m ³ | 1 | 5 | 2 | | |
| 生ごみ解砕機 | 5m ³ /h | 2 | 20 | 2 | 60 | |
| 生ごみ調整槽 | 160m ³ | 1 | 7 | 9 | | |
| メタン発酵槽 | 7000m ³ | 4 | 312 | 640 | | |
| 加温用熱交 | 10m ² | 4 | 6 | 2 | | 1,300 |
| 消化汚泥脱水機 | 25m ³ /h | 2 | 120 | 18 | 180 | |
| 消化液槽 | 300m ³ | 1 | 10 | 13 | | |
| 消化汚泥槽 | 100m ³ | 1 | 5 | 6 | | |
| ポンプ類 | | 14 | 11.2 | 2.9 | 72.1 | |
| ブロー | | 4 | 20 | 6 | 74 | |
| 小計 | | | | | 566 | 5,100 (効率 40%) |
| 計 | | | 773 | 865 | | 6,400 |

表 2 バイオガス精製工程 機器リスト

| 機器名 | 仕様 | 基数 | コスト | | エネルギー | | |
|-----------|-----------------|------------------------|-----|----------|-------|------|-------|
| | | | 百万円 | 重量 トン | kW | MJ/h | |
| 吸収塔 | 1.04 φ x14m SUS | 11 m ³ | 1 | 16 | 3 | | |
| 放散塔 | 1.04 φ x12m SUS | 10 m ³ | 1 | 15 | 3 | | |
| 減圧タンク | SUS | 5 m ³ | 1 | 3 | 2 | | |
| ミストセパレーター | SUS | 3 m ³ | 1 | 3 | 2 | | |
| 消化ガス圧縮機 | 2 段、吐出圧 1MPa | 92 kW | 1 | 28 | 2 | 77 | |
| 循環水ポンプ | 吐出圧 1MPa | 799 l/min | 1 | 1 | 0 | 4 | |
| 消化ガス供給ブロー | 差圧 500mmAq | 22 m ³ /min | 1 | 2 | 1 | 3 | |
| 空気ブロー | 差圧 500mmAq | 22 m ³ /min | 1 | 2 | 1 | 3 | |
| 循環水チラー | | 58 RT | 1 | 21 | 4 | 75 | |
| 除湿器 | 2 塔式 | 500 Nm ³ /h | 1 | 30 | 5 | 1 | |
| 小計 | | | | 120 | 22 | 162 | 1,454 |

(効率：40%)

5) バイオガス製造コスト試算

製造コストは変動費および固定費より成り立つ。

変動費として、原料としての下水汚泥、食品残渣、排出物である消化汚泥と消化液の評価および用役費用がある。ここでは下水汚泥、消化汚泥と消化液はいずれも 0 円評価とした。

食品残渣については、0 円評価の場合、および食品残渣処理費用として 17 円 /kg（横浜市生ごみ焼却処分費相当額）を戻入する場合について検討した⁴⁾。また用役費用についてはエネルギーコストを 2 円 /MJ として評価した。動力費については熱電変換効率を 40% としてエネルギーコストに変換して評価した。動力費は 18 円 /kWh に相当する。

固定費は設備対応と人件費対応の二つに大別できる。設備対応固定費は、年間費用を建設費用（主要機器費用×2と推定する）に、年経費率として 15% を乗じて求めた。なお、年経費率の内訳は、設備償却費 9%、補修費用 3%、金利・税金等 2% とした。

人件費については、運転人員 13 人、労務費 4 百万円 / 人 / y とした。本検討ケース（40GWh/y=144TJ/y）の場合 0.36 円 /MJ に相当する。

食品残渣処理費の戻入がない場合のコストを表 3、食品残渣処理費の戻入を 17 円 /kg で評価できる場合を表 4 に示す。

表 3 食品残渣処理費戻入 0 円 /kg の場合

前提条件

| | | | |
|-----|---|------------------------|-----------|
| 設備費 | : | 粗バイオガス製造工程 | 1,546 百万円 |
| | | バイオガス製造工程 | 240 百万円 |
| | | 計 | 1,786 百万円 |
| 用役費 | : | 2 円 /MJ | |
| 人件費 | : | 人員 13 名、400 万円 / 人 / 年 | |

| バイオガス製造コスト (単位熱量当たり) | | | |
|----------------------|------------|-----------|-----|
| 円 /MJ | | | |
| | 粗バイオガス製造工程 | バイオガス精製工程 | 計 |
| 設備費 | 1.7 | 0.3 | 2.0 |
| 用役費 | 0.7 | 0.2 | 0.9 |
| 人件費 | 0.3 | 0.1 | 0.4 |
| 計 | 2.7 | 0.6 | 3.3 |

バイオメタン発熱量 : 35.9 MJ/Nm³

表 4 食品残渣処理費戻入 17 円 /kg の場合

| バイオガス製造コスト (単位熱量当たり) | | | |
|----------------------|------------|-----------|------|
| 円 /MJ | | | |
| | 粗バイオガス製造工程 | バイオガス精製工程 | 計 |
| 設備費 | 1.7 | 0.3 | 2.0 |
| 用役費 | 0.7 | 0.2 | 0.9 |
| 人件費 | 0.3 | 0.1 | 0.4 |
| 戻入費 | -1.0 | - | -1.0 |
| 計 | 1.7 | 0.6 | 2.3 |

精製バイオガスの製造コストは戻入のない場合は 3.3 円 /MJ であるが、戻入のある時は 2.3 円 /MJ となる。

日本における天然ガス輸入価格を 18.3\$/MBTU (1.7 円 /MJ に相当) と考えるとき、食品残渣処理費の戻入などを考慮すると、天然ガス輸入価格に近くなる。

3. 今後の科学技術開発の内容

- 1) 製造プロセスの合理化として、高速メタン発酵菌の創製による発酵槽容量の低減（発酵時間の縮減）や発酵工程前後の汚泥濃縮プロセスの合理化が必要である。
たとえば、現状では発酵槽関連設備で機器コストの約 4 割を占める。現状の滞留時間 20 日を 10 日まで短縮出来れば 0.4 円 / MJ の製造コストの合理化が見込める。
- 2) メタン発酵工程は、図 2 に示すように加水分解菌、酸発酵菌、酢酸菌、メタン菌など多段階の工程から構成されている。メタン発酵の素工程の解析・改良が必要である。

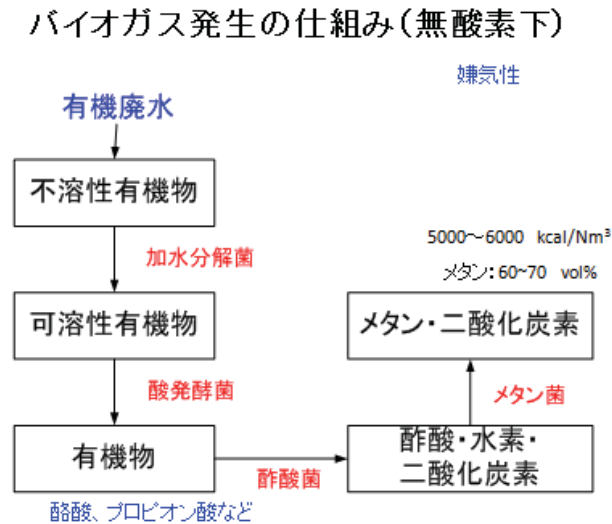


図 2 メタン発酵工程

4. 政策立案のための提言

人口約 15 万人で 144TJ/y (40GWh/y) のエネルギー発生のポテンシャルを持っている。たとえば日本の人口 127 百万人の約 10% から発生する、下水汚泥や食品残渣からバイオガスを生成する場合、約 12PJ/y のエネルギー発生のポテンシャルを持っている。

大きなエネルギー源であるが、現状ではコストが高い。コストを引き下げ、市況のエネルギー単価に近づけ、有効に利活用するために、次の技術課題・社会システム課題に積極的に取り組む必要がある。

- ・ 技術課題：メタン発酵素工程の解析と改良、高速メタン発酵菌の創製による発酵槽容量の低減（発酵時間の縮減）や発酵工程前後の汚泥濃縮プロセスの合理化が必要である。
- ・ 社会システム課題：バイオマス廃棄物の効率的な収集と処理システムの構築と評価、排出物である消化液の肥料などへの有効利用など社会システムとしての改善検討が必要である。

5. 参考文献

- 1) The economic potential for production of upgraded biogas used as vehicle fuel in Sweden. Technical report N0 FRT 2010:03, Chalmers University of Technology

- 2) 東京都の下水道 2010 - 数字で見る東京の下水道 東京都下水道局
- 3) 食品ロス削減の取り組み 平成 24 年度農林水産省 資料
- 4) ごみの処理について 平成 21 年度決算から 横浜市 資源循環局

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

バイオマス廃棄物のメタン発酵（着手段階）

Methane Production from Biomass Wastes by Anaerobic Fermentation (First step)

Strategy for Technology Development,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2014.3

独立行政法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

平成 26 年 3 月

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 上席研究員 三森 輝夫 (Teruo MITSUMORI)
上席研究員 岩崎 博 (Hiroshi IWASAKI)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2014 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
