

# バイオマスエネルギー利用の燃料電池の現状と展望

久保田 康幹（くぼた こうかん）

黒田 健一（くろだ けんいち）

秋山 幸司（あきやま こうじ）

## 1 まえがき

循環型社会の構築に向けた法整備や技術開発、ビジネスの動きがある中で、環境調和型の石油代替エネルギー資源として、自然エネルギーの中心となるのはバイオマスエネルギー（271 ページの「解説」参照）といわれている。バイオマスエネルギーは、世界レベルで大量に導入していくことが提唱されており、特に新エネルギーの導入が遅れている日本では、現在大量に廃棄されている廃木材、木くず、汚泥、生ごみ、廃棄食用油、畜産廃棄物などの「廃棄物バイオマス」の利用が地球温暖化防止をも含めた環境対策の面で期待されている。

富士電機では、1999 年から生ごみのメタン発酵ガスによるりん酸形燃料電池の適用開発に着手し、良好な運転結果を得てきた。また、2001 年から 2002 年にかけて、100 kW りん酸形燃料電池を生ごみバイオガスと下水消化ガスに適用したものを納入した。

本稿では、生ごみメタン発酵設備と下水処理場への導入事例について、そのシステムの概要について述べる。

## 2 都市ガスとバイオガスの相違点

一般的に有機性廃棄物を嫌気性発酵させて発生するガスはバイオガスと呼ばれているが、その成分はメタン約 60 %、二酸化炭素約 40 % である。そのほかに不純物とし、硫化水素、アンモニア、塩化水素などが含まれている（表 1 参照）。このガスの低位発熱量は約 23 MJ/m<sup>3</sup> と都市ガスの約半分である。また、硫化水素などの不純物は、燃料電池発電装置で使用している触媒への触媒毒として作用するため、あらかじめ何らかの処理をして除去する必要がある。都市ガス中にも付臭剤として硫黄化合物が含まれるが、バイオガスの方が数百倍も多いため、通常は燃料電池発電装置の前にバイオガスの前処理装置を設置して対応する。脱硫方式は表 2 に示すように各種の方式があるが、バイオガスではハンドリングのしやすさと安価であることから通常乾式脱硫が採用される。また、硫化水素以外の不純物に

表 1 バイオガス（消化ガス）の一般的な性状

| 成 分                                     | バイオガス（消化ガス）     |               | 都市ガス（13A） |
|-----------------------------------------|-----------------|---------------|-----------|
|                                         | 性 状（例）          | 燃料電池許容値（標準仕様） |           |
| メ タ ン                                   | 60 % 程度         | 60 ± 2.5 %    | 88 %      |
| エ タ ン                                   | -               | -             | 6 %       |
| プロパン                                    | -               | -             | 4 %       |
| ブ タ ン                                   | -               | -             | 2 %       |
| 二酸化炭素                                   | 40 % 程度         | 40 ± 2.5 %    | -         |
| 窒 素                                     | 0.8 % 以下        | 0.1 % 以下      | -         |
| 酸 素                                     | 0.2 % 以下        | 50 ppm 以下     | -         |
| 硫化水素                                    | 500 ~ 1,000 ppm | 2 ppm 以下      | -         |
| 硫黄化合物（硫化水素以外）                           | 500 ppb 以下      | 50 ppb 以下     | 6 ppm     |
| アンモニア                                   | 1 ppm 以下        | 1 ppm 以下      | -         |
| 発 熱 量（kJ/m <sup>3</sup> ） <sup>*1</sup> | 21,500          | 21,500        | 41,600    |

\*1：低位発熱量，0，1 気圧基準

ついては、その量にもよるが活性炭塔を設置して除去している。このようにして処理したバイオガスは、通常の都市ガスや LPG（Liquefied Petroleum Gas）を燃料とした燃料電池発電装置に若干の改造を施すことによって発電に利用できる。

## 3 生ごみメタン発酵設備と下水処理場への適用例

富士電機では、2001 年 7 月に生ごみメタン発酵設備とバイオガスを利用した燃料電池発電施設（環境省、神戸市ポートアイランド地区）を、また、2002 年 3 月には下水処理場の消化ガスを利用した燃料電池発電装置（山形市浄化センター）を納入した。

以下にこれらのシステムについて述べる。

### 3.1 生ごみバイオガス発電施設

#### 3.1.1 システムの概要

本システムは、図 1 に示すとおり、前処理設備、メタン



久保田 康幹

りん酸形燃料電池発電装置のシステム開発、水素製造装置の開発に従事。現在、事業開発室燃料電池部課長。化学工学会会員。



黒田 健一

オンサイト用りん酸形燃料電池のプラントエンジニアリングに従事。現在、事業開発室燃料電池部主務。



秋山 幸司

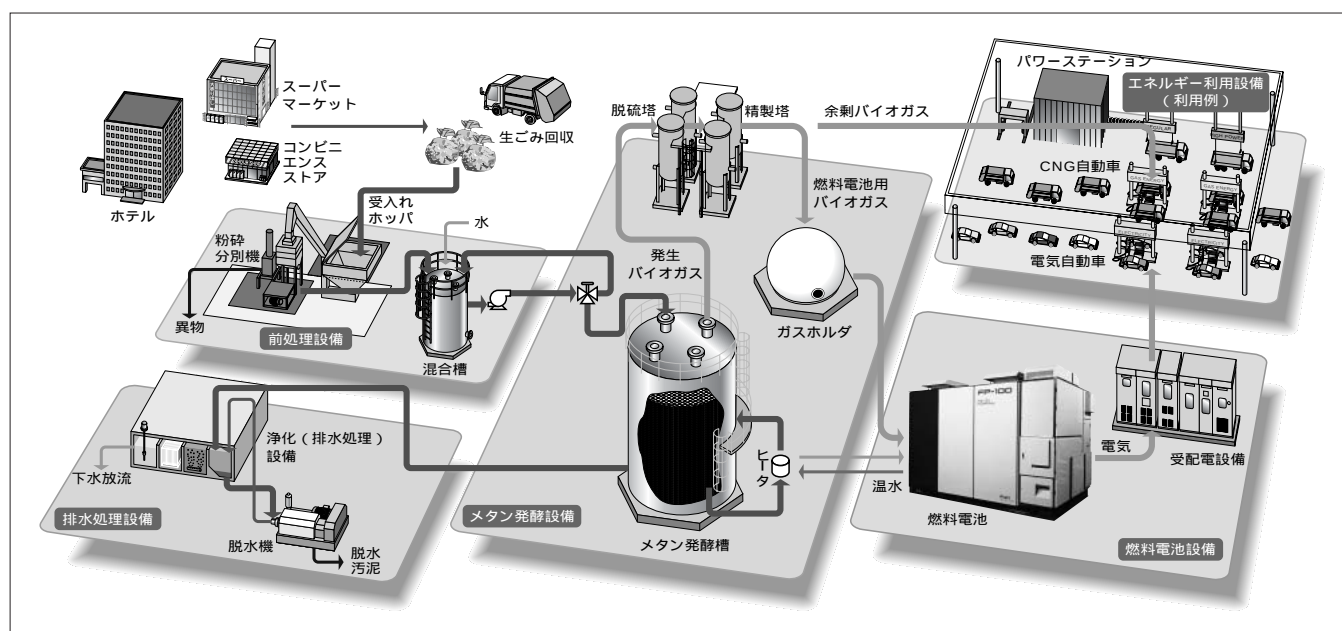
環境分野における廃棄物処理プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー環境システム事業部環境プラント技術部主任。

表 2 脱硫方式の比較

| 脱硫方式<br>項 目 | 常温脱硫                                     | 水添脱硫                                                                                                                               | 乾式脱硫                                                                                                       | 乾式脱硫                                                                                                      |
|-------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 脱硫剤名称       | ゼオライト系                                   | Ni-Mo 系 + ZnO<br>Co-Mo 系 + ZnO                                                                                                     | 酸化鉄系                                                                                                       | 鉄-亜鉛系酸化物系                                                                                                 |
| 硫黄種         | TBM (ターシャリブチルメルカプタン)<br>DMS (ジメチルサルファイド) |                                                                                                                                    | H <sub>2</sub> S (硫化水素)                                                                                    | H <sub>2</sub> S (硫化水素)                                                                                   |
| 脱硫方式        | 物理吸着                                     | 化学吸着                                                                                                                               | 化学吸着                                                                                                       | 化学吸着                                                                                                      |
| 主な反応        | —                                        | R-CH <sub>2</sub> SH + H <sub>2</sub><br>→ R-CH <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> S<br>H <sub>2</sub> S + ZnO → ZnS + H <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3H <sub>2</sub> S<br>→ Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> + 3H <sub>2</sub> O | ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> + 3H <sub>2</sub> S + H <sub>2</sub><br>→ ZnS + 2FeS + 4H <sub>2</sub> O |
| 反応温度        | 常温                                       | 250 ~ 300                                                                                                                          | 常温                                                                                                         | 440 ~ 450                                                                                                 |
| 用途          | 都市ガス, LPG                                | 都市ガス, LPG                                                                                                                          | 消化ガス, バイオガス                                                                                                | 石炭ガス化                                                                                                     |
| 適用燃料電池      | 固体高分子形燃料電池                               | りん酸形燃料電池                                                                                                                           | りん酸形燃料電池                                                                                                   | 熔融炭酸塩形燃料電池                                                                                                |

TBM : CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CHSH, DMS : CH<sub>3</sub>SCH<sub>3</sub> (硫化メチル)

図 1 生ごみバイオガス化燃料電池発電システムの概要



発酵設備、排水処理設備、燃料電池設備およびエネルギー利用設備（将来設置予定）により構成される。システムのうち、メタン発酵システムについては、鹿島建設（株）の「高温メタン発酵式有機性廃棄物処理システム」（商品名：メタクレス）を採用し、燃料電池システムは、富士電機が開発・製造・商品化している「100 kW りん酸形燃料電池発電装置」（商品名：FP-100）を採用している。両システムの組合せは、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「平成 11 年度新規産業創造型提案公募事業<sup>(1)</sup>」により、実験室レベルでの検証が完了しているが、実用機レベルでのシステム構築は今回が初めてである。

外観を図 2 に示す。

本システムの各設備の概要を以下に述べる。<sup>(3)</sup>

#### (1) 前処理設備

神戸市内のホテルから排出された生ごみ（6 t/日）は、収集車により施設に搬入され、受入れホッパに投入される。そして、破袋・破砕された後、油圧プレス式粉碎分別機により異物（ラップ、金属片、割りばしなど）を分別し、微

図 2 生ごみバイオガス化燃料電池発電システムの外観



生物分解に適した有機物のみをペースト化する。しかし、ペースト化された有機物は粘度が高く、また粒度も大きいいため、混合槽にて同量程度の希釈水を加えた後、粉碎ポンプ（カタポンプ）により微粉碎した生ごみスラリーとし

て、後段のメタン発酵槽に投入する。

なお、収集の際使用するビニル袋は、生分解性ビニル袋を環境省が準備し、ホテル（生ごみ排出者）に支給して、協力を要請している。生分解性ビニル袋は、粉碎分別機による異物除去ができなかった場合でも、後段の排水処理設備により微生物分解される。

## (2) メタン発酵設備

メタン発酵槽本体は、内径 5,200 mm、高さ 8,500 mm のステンレス鋼製円筒形の固定床式リアクタである。内部には直径 100 mm、長さ 6,500 mm の円筒形炭素繊維微生物担体を充てんしている。微粉碎された生ごみスラリーは、メタン発酵槽上部から投入され、下向流しながら、メタン生成菌を主体とする高温嫌気性微生物により嫌気性発酵する。平均滞留時間は約 8 日である。また、リアクタ下部から引き抜かれた発酵液は、熱交換器を介し、55℃ に加温されリアクタ上部へ循環させる。この際の熱源には、燃料電池から排出される温水を利用する。

高温嫌気性発酵により発生するバイオガスは、メタンと二酸化炭素がその主成分であるが、硫化水素、アンモニアなどの不純ガス成分も含まれている。こうした不純ガス成分は、後段の燃料電池発電装置に悪影響を及ぼすため、脱硫塔（酸化鉄）、精製塔（活性炭）を通し、不純ガス成分を取り除いた後、燃料電池設備へ供給される。

また、脱硫・精製されたバイオガスは、二重バルーン構造のガスホルダ（30 m<sup>3</sup>）にも貯留され、バイオガス発生量の変動に対応している。

## (3) 排水処理設備

メタン発酵槽のオーパフローにより排出される発酵廃液や、各プロセスから排出される污水は、施設内にある排水処理設備に集められる。嫌気・好気性処理を行った後、浸漬膜を通した処理水を下水道に放流する。また、排水処理により発生した汚泥は、脱水処理し、施設外に排出する。

## (4) 燃料電池設備

りん酸形燃料電池は、バイオガス中のメタン（CH<sub>4</sub>）を燃料電池パッケージ内の改質器で改質された水素（H<sub>2</sub>）と、空気中の酸素（O<sub>2</sub>）による電気化学反応により、電気（直流）を取り出すものであり、取り出された電気（直流）はインバータにより AC 200 V・60 Hz の交流に変換して施設内に電力を供給する。施設内の消費電力はすべて燃料電池で賄い、約 40 % の電力は余剰となり、有効活用が可能である。

## (5) エネルギー利用設備（将来）

環境省による本事業では、地域における循環型事業を目指し、発生した電力・ガスのうち、余剰分について地域循環に適した利用を計画している。

現在、余剰ガス・電力を利用した「ガス自動車用ガススタンド」「電気自動車用電気スタンド」を施設わきに併設することを検討している。

### 3.1.2 バイオガス発電の導入効果

本システムを導入することにより以下の効果が期待される。

- (1) 生ごみを焼却することなく減容化することによる、化石燃料削減および CO<sub>2</sub> 発生抑制
- (2) 余剰電力の有効利用による化石燃料削減および CO<sub>2</sub> 発生抑制
- (3) 余剰ガスの有効利用による化石燃料削減および CO<sub>2</sub> 発生抑制
- (4) 生ごみを分別回収することによる廃棄物全体量の削減（リデュース）
- (5) 本事業をテーマにした環境実践教育による波及効果  
なお、本事業における実施検証期間は 3 年間で予定している。

### 3.2 下水処理場への導入

現在、下水汚泥の嫌気性処理は、国内の下水処理場では約 300 施設が稼働している。これら施設の消化ガスの総発生量は約 2.6 億 m<sup>3</sup>/年であり、その利用は消化タンクの加温や消化ガス発電、汚泥燃焼の補助燃料などに利用されている。消化ガス発電には約 15 % が利用されているが、発電の形態はガスエンジンがほとんどである。最近、従来のガスエンジンによる発電に比較して発電効率や環境面に優れている燃料電池の導入が試みられている。富士電機においても、山形市浄化センターに 2002 年 3 月に燃料電池を納入した。山形市浄化センターは日平均流入量 40,000 m<sup>3</sup>/日の下水処理場である。また下水汚泥は、嫌気性発酵して約 4,200 m<sup>3</sup>/日の消化ガスが発生している。発生した消化ガスの一部は 178 kW のガスエンジンで発電し、有効利用しているが、消化ガス量の増大に対応するために 100 kW りん酸形燃料電池を 2 台導入して、電力を回収するとともに、同時に発生する熱は消化タンクの加温に利用するシステムとしている。システムの概要を図 3 に示す。また、燃料電池設備の仕様を表 3 に示す。

燃料電池を導入することによって、省エネルギー効果・環境効果は、

- (1) 原油換算省エネルギー効果：458 kL/年（燃料電池 2 台導入分）
- (2) CO<sub>2</sub> 削減効果：1,140 t/年（燃料電池 2 台導入分）
- (3) NO<sub>x</sub> 削減効果：460 kg/年（燃料電池 2 台導入分）
- (4) SO<sub>x</sub> 削減効果：412 kg/年（燃料電池 2 台導入分）が可能である。

## 4 今後の展開

燃料電池発電は、一般的なガス発電機関（ガスエンジン、ガスタービンなど）と違い、燃料ガスを燃焼させることなく発電できることから、排気がきわめてクリーン（NO<sub>x</sub>：5 ppm 以下、SO<sub>x</sub>：検出限界以下）であると同時に、回転エネルギーを介することなく発電できることから、高い発電効率を得られる。また、発電に要する電気化学反応の際発生する温水は、熱回収することにより利用が可能である。

「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）の施行により、産業界では生ごみバイオ

図3 山形市浄化センター向け燃料電池発電設備の概略フロー図

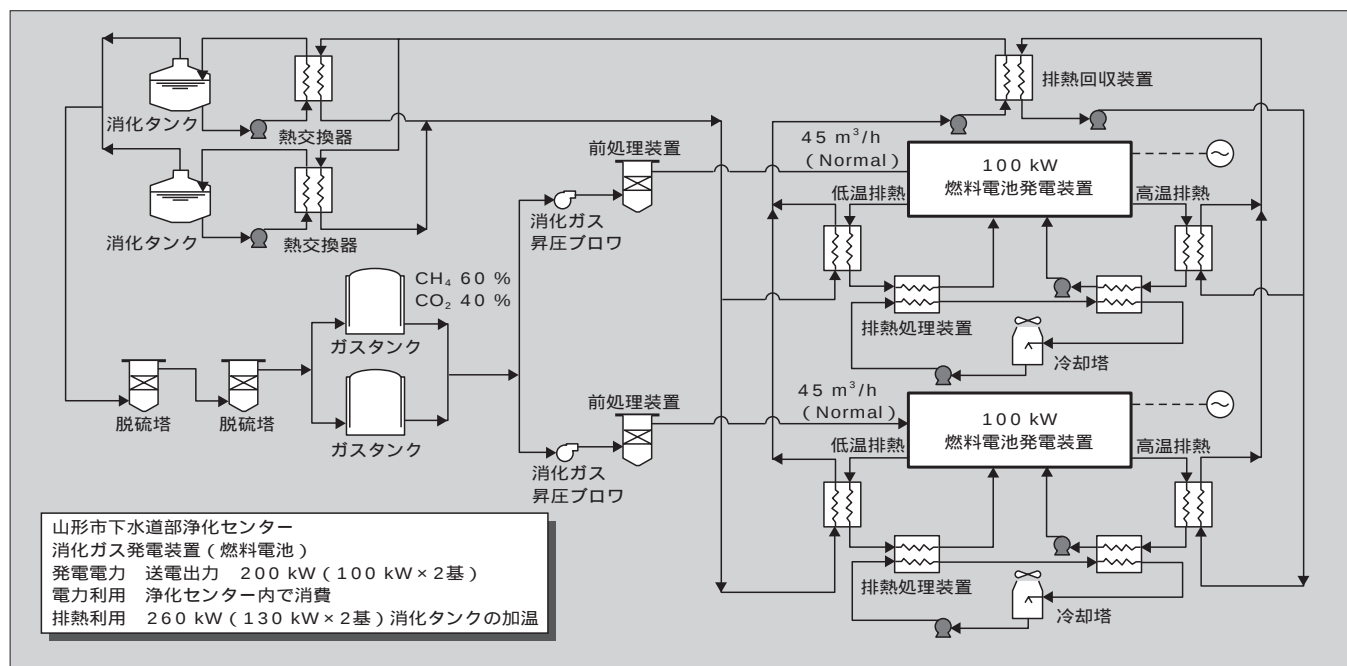


表3 山形市浄化センター向け燃料電池発電装置の仕様

| 項目       | 仕様                           |
|----------|------------------------------|
| 定格出力     | 100 kW（送電端）                  |
| 出力電圧・周波数 | 210 V，50 Hz                  |
| 発電効率     | 38 %（定格時，送電端，LHV）            |
| 総合効率     | 87 %（定格時，送電端，LHV）            |
| 原燃料      | 消化ガス（メタン 60 %，二酸化炭素 40 %）    |
| 消費量      | 45 m³/h（Normal）              |
| 運転形態     | 全自動運転・系統連系                   |
| 熱出力      | 20 %（90 温水）<br>29 %（50 温水）   |
| 排ガス      | NOx：5 ppm 以下 SOx：検出限界以下      |
| 騒音特性     | 65 dB（A）（機側 1 m 平均値）         |
| 代表寸法     | 2.2 m（W）× 4.1 m（L）× 2.5 m（H） |
| 質量       | 12 t                         |

ガス発電の実証試験の3年を待たずに，リサイクルの実践が加速されると考えている。この生ごみバイオガス発電システムは，こうした食品リサイクル法の実証例となる。

今後，実施検証により，上記効果が検証されることにより，食品リサイクルと地球温暖化防止の輪が広がりを見せることを期待したい。

また，下水の消化ガス施設で 100 kW 燃料電池を稼働させるのに必要な消化ガス発生量を有する施設は約 100 か所以上あり，現在はボイラ燃料など熱エネルギーとして利用されている。今後 CO<sub>2</sub> 排出削減のためには分散電源として消化ガスを利用する燃料電池が普及していくものと予想される。政府においても，資源エネルギー庁の総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会の報告書において 2010 年のバイオマス発電の導入目標を設備容量で 33 万 kW/年（1999 年に対し約 4 倍，原油換算で 34 万 kL/年）として

示している。<sup>(4)</sup>

今後は，バイオガスの燃料電池への適用例を増やしていくために以下の開発に注力していく考えである。

- (1) 50 %程度の低メタンガス濃度に対応した燃料電池の開発
- (2) バイオガス発生量の変動（0～100 %）に追従する燃料電池の開発
- (3) メタン発酵設備に適した排熱利用の開発

## 5 あとがき

生ごみのメタン発酵によるバイオガスや下水汚泥の消化による消化ガスを利用したりん酸形燃料電池の適用例について述べた。有機性廃棄物の減容化を推進するうえでメタン発酵技術はその省エネルギー性からいっても最適であると考えられ，発生するメタンガスの利用方法としては，燃料電池が適している。

さらに，バイオガスを利用した燃料電池発電が導入されるよう関係各方面のご指導・ご支援をお願いしたい。

## 参考文献

- (1) 東郷芳孝・新エネルギー・産業技術総合開発機構平成 11 年度新規産業創造型提案公募事業成果報告会予稿集，2000，p.822．
- (2) 黒田健一・燃料電池を用いた生ごみ処理システム．第 7 回燃料電池シンポジウム講演予稿集，2000，p.52．
- (3) 秋山幸司・生ごみバイオガス化燃料電池による発電施設．OHM．vol.88，no.9，2001，p.101．
- (4) 新エネルギー部会報告書（案）～今後の新エネルギー対策のあり方について～．総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会，2001-5．



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。