

汚泥消化ガス燃料電池発電システム

Fuel Cell Power Plant Running on Anaerobic Digester Gas

篠崎 功
SHINOZAKI Tsutomu

草間 伸行
KUSAMA Nobuyuki

小川 雅弘
OGAWA Masahiro

消化ガス燃料電池発電システムは、下水処理場の汚泥処理で発生する消化ガスを燃料として、燃料電池で発電するクリーンエネルギーシステムである。このシステムは、消化ガスに含まれる燃料電池に有害な微量成分を除去する前処理装置と200 kW リン酸型燃料電池(PC25_{TM}C)から構成される。システムの開発課題は、最適な前処理装置の開発と燃料電池の消化ガス対応であった。開発は横浜市下水道局と共同で行われ、国内初の実用機が横浜市北部汚泥処理センターで稼働している。この技術は、環境規制の強化を背景に、米国でも実用化が進み、エネルギー供給会社などが電力の特定供給事業を目的にその導入を図っている。

A fuel cell power plant running on anaerobic digester gas (ADG) produced at a wastewater treatment plant has been constructed as a new renewable energy system. This system consists of a 200 kW fuel cell power plant (Toshiba's PC25_{TM}C system), and a gas pretreatment unit which removes the very small quantity of contamination from ADG. In order to realize the system, we developed the gas pretreatment unit and remodeled the PC25_{TM}C fuel cell power plant. Toshiba and the Yokohama Municipal Sewage Works Bureau jointly conducted the technology development, and the fuel cell power plant at the Hokubu Sludge Treatment Center was Japan's first to run on ADG.

This type of system is also installed at municipal wastewater treatment plants in the United States in order to conform with the strict environmental regulations, and is usually owned and operated by an energy enterprise under a specific power supply contract with a municipality or local government.

1 まえがき

下水道は、公共水域の水質保全や住みよい生活環境の整備などを目的に整備が進められてきた。近年は、社会ニーズの多様化により地球温暖化防止などの新たな環境問題への対応も求められ、下水道資源・エネルギーの有効利用の取組みもなされている。

こうしたなか、当社では、横浜市下水道局と下水処理場の汚泥処理で得られる嫌気性消化ガス(以下、消化ガスと略記)を有効利用した消化ガス燃料電池発電システムを開発、実用化した。このシステムは、消化ガスに含まれるメタンガスを燃料として、燃料電池で発電するクリーンエネルギーシステムである。この技術は、米国でも実用化が進んでおり、エネルギー供給会社などが電力の特定供給を目的に導入している。

ここでは、消化ガス燃料電池発電システムの開発と実用化の経緯、及び米国でのシステム導入事例について述べる。

2 燃料電池発電への消化ガス利用

2.1 200 kW オンサイト型燃料電池

燃料電池は、外部から供給された水素と酸素を触媒作用により電気化学的に反応させ、燃料から直接電気エネルギー

と熱エネルギーを同時に取り出すエネルギー変換装置である。通常、水素は天然ガスに含まれるメタンを改質して供給され、酸素は空気から供給している。燃料電池の酸素と水素の両極間には、電解質と呼ばれるイオン透過層があり、燃料電池は電解質の種類で分類される。当社は、電解質にリン酸を用いたリン酸型燃料電池を商用化している。

当社のリン酸型燃料電池は、200 kW オンサイト型燃料電池PC25_{TM}Cである。システムフローを図1に示す。PC25_{TM}Cは、天然ガスが燃料の場合、発電効率は約40%で、熱利用も図れば総合効率は約80%になる。また、従来のエネルギーシステムと比べて排気ガスの窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)がほぼゼロと少なく、低騒音・低振動である。

当社のオンサイト型燃料電池は、全世界で約200台導入され、既に運転時間が4万時間に達したものもある。燃料電池は、天然ガスを標準燃料としている。しかし、近年は、環境保全の面から食品工場やごみの最終処分場で得られるバイオガスなどを燃料とする燃料多様化が進められている。下水汚泥の消化ガス利用も燃料多様化の一つである。

2.2 消化ガスとは

消化ガスは、下水汚泥の嫌気性処理で発生する発酵ガスである。その成分は、メタン60~65%、二酸化炭素35~40%で、燃料電池に有害な硫化水素、アンモニア、塩化分も微量に含んでいる。また、その低位発熱量は約23 MJ/Nm³と

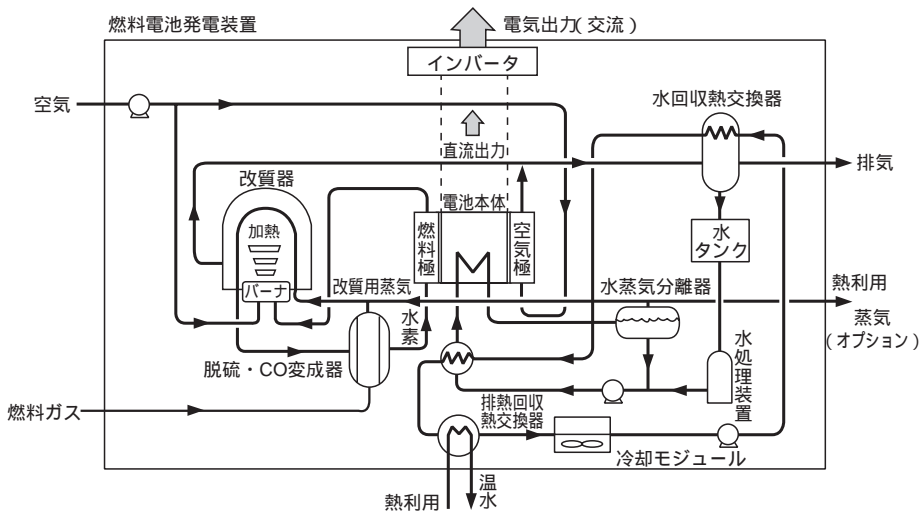


図1. PC25_{TM}Cのシステムフロー
燃料電池は化学エネルギー変換装置である。
System flow of PC25_{TM}C fuel cell power plant

天然ガスの約36 MJ/Nm³に比べ低い。

現在、下水汚泥の嫌気性処理は国内の下水処理場の約26%で行われている。消化ガスの総発生量は250,000万Nm³/年を越し、賦存するエネルギー量は5,000～6,000 TJ/年になると推定される。

従来、消化ガスは消化タンクの加温や汚泥焼却炉の補助燃料として利用されていた。1980年代には、ガスエンジン発電機による消化ガス発電が実用化され、現在全国21か所の下水処理場に導入されている。消化ガス燃料電池発電システムは、従来の消化ガス発電よりもクリーンなエネルギー利用として期待されている。

2.3 消化ガス燃料電池発電システム

消化ガス燃料電池発電システムは、消化ガスに含まれる有害物質を除去する前処理装置と消化ガス用に改良した燃料電池PC25_{TM}Cから構成される。システム構成例を図2に示す。その性能は、天然ガスを燃料とする燃料電池とほぼ同等であり、従来のガスエンジンによる消化ガス発電と比べ、エネルギー効率や環境面で優れている。両システムの性能比較を表1に示す。

なお、ガスエンジンの情報は、既存の消化ガス発電の実績値に基づいている。

3 消化ガス燃料電池発電システムの開発と実用化

当社は、94年から98年にかけて横浜市下水道局との共同研究により、消化ガス燃料電池発電システムを開発した。その成果として、国内初の実用機を99年11月、横浜市北部汚泥処理センターに導入している。

なお、この研究では、96年2月、世界初の消化ガスによる燃料電池発電に成功している。

3.1 開発課題

システムの開発主眼は、天然ガスを標準燃料とする燃料

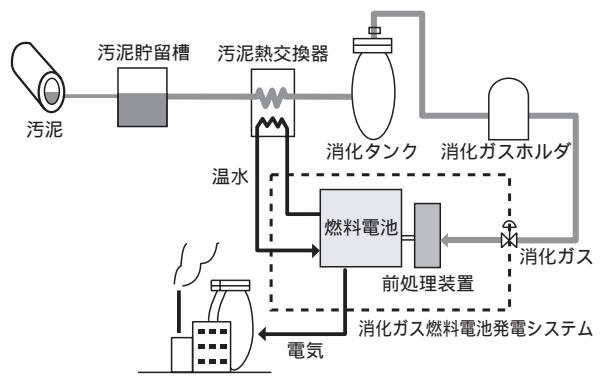


図2. 消化ガス燃料電池発電システムの構成
消化ガス燃料電池発電システムは、前処理装置と燃料電池から構成される。
System configuration of plant running on ADG system applied to sludge treatment plant

表1. 燃料電池発電とガスエンジン発電の比較
Comparison of fuel cell and gas engine power plants

| 項目 | 燃料電池 | ガスエンジン |
|---------------------------|---|-----------------------------|
| 発電効率 (%LHV) | 38(送電端) | 30(送電端) |
| 排熱回収効率 (%LHV) | 40 | 36 |
| 熱供給形態 | 標準 60 温水(高温水/蒸気対応可) | 100 蒸気 85 温水 |
| NO _x (ppm) | 5以下 | 80以下 |
| SO _x (ppm) | 微量 | 15以下 |
| CO ₂ (C-ton/年) | 240 | 300 |
| 騒音 (dB(A)) | 65 | 95 |
| 始動時間 | 3時間 | 15秒 |
| 保守点検 | 運転中点検(1回/3か月) 停止点検(1回/年) オーバーホール(1回/5年) | 停止点検(1回/月) オーバーホール(1回/年) |

LHV: 低位発熱量

電池が消化ガスでも効率的に性能を発揮することである。そして、開発課題は、以下のとおりである。

- (1) 消化ガスに含まれる微量な硫化水素, アンモニア, 塩

化分の除去に最適な前処理装置の開発

(2) 発電性能を確保するための燃料電池の消化ガス対応
また、現地での約5,000時間に及ぶ実証運転で開発技術の検証を実施している。

3.2 前処理装置の開発

消化ガス中に含まれる硫化水素、アンモニア、塩化分は、燃料電池に有害で、その含有量は許容値を超えている。消化ガスを燃料とするには、あらかじめそれらを除去する前処理装置が必要となる。また、消化ガスは、主成分であるメタンを含めて、各成分が季節ごとに変化するため、季節ごとのガス組成の挙動を分析し、最適な前処理装置を開発した。ガス分析結果を表2に示す。

前処理装置は、硫化水素を除去する脱硫器とアンモニアと塩化分を除去する吸着器から構成される。脱硫器には、酸化鉄系の吸着剤を用いる乾式と苛性(かせい)ソーダなどを用いる湿式がある。脱硫器には除去すべき量が少ないことから、安価で運用が容易な乾式を採用した。また、吸着器には、実績の多い活性炭による方式を採用した。前処理装置のフローを図3に示す。

表2 . 各季節の消化ガス成分
Seasonal ADG composition

| 成分 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 |
|---------------|------|------|------|------|
| メタン (vol %) | N/M | 59.6 | 64.0 | 63.2 |
| 二酸化炭素 (vol %) | N/M | 38.2 | 35.4 | 35.4 |
| 窒素 (vol %) | 2.1 | 3.0 | 0.8 | 1.5 |
| 酸素 (vol %) | 0.06 | 1.0 | 0.3 | 0.3 |
| 硫化水素 (ppmv) | N.D | N.D | 2.7 | 2.0 |
| 塩素 (ppmv) | N.D | N.D | N.D | N.D |
| 塩化水素 (ppmv) | N.D | N.D | 4.0 | 23.0 |
| アンモニア (ppmv) | N.D | N.D | N.D | N.D |
| 水分 (vol %) | N/M | 1.4 | 2.5 | 1.3 |

N/M : 測定せず N.D : 検出限界以下 ppmv : (v = volume)

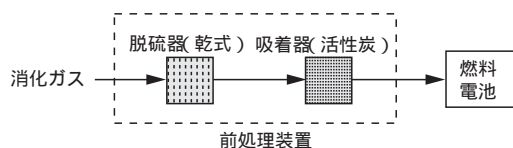


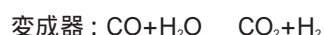
図3 . 前処理装置のフロー 前処理装置は、脱硫器と吸着器から構成される。

System flow of gas pretreatment unit

3.3 燃料電池の消化ガス対応

消化ガスは、メタン濃度の低い低カロリーガスであり、標準の燃料電池では、天然ガスと同等の性能は確保できない。性能を確保するには、改質器と変成器の反応効率改善とシステムの低カロリーガス対応が必要である。

3.3.1 改質器・変成器の反応効率改善 燃料電池内の改質器と変成器は、メタンから水素を生成する反応器である。改質器と変成器は、蒸気を用いて以下の反応式により水素を生成している。



改質器と変成器の反応効率は、蒸気とメタンの比率であるS/C (Steam/Carbon ratio)で変化する。S/Cは、高ければ、反応効率(メタン転化率など)を向上させるが、排熱のエクセルギー^(注1)を低下させ、排熱利用に影響が出る。

消化ガスは、天然ガスと比べメタン濃度が低く、天然ガスのS/C (= 3.0)では、メタン転化率の低下が予想される。消化ガスに最適なS/Cを調整するため、燃料処理系の試験装置を用いて、図4の特性データを得た。更に、そのデータによりシミュレーションし、メタン濃度60%で、メタン転化率が90%となるようにS/C (= 3.5)を設定した。

3.3.2 システムの低カロリーガス対応 標準の天然ガス機(200 kW)は、消化ガスでは160 kW程度しか発電しないことが実証運転でわかった。その原因は、200 kW出力に必要なカロリーを確保できなかったからである。カロリーの確保には、前処理装置でのメタン濃縮があるが、コストや維持管理の面で問題がある。この開発では、燃料電池への消化ガスの供給量を増大させ、カロリーの確保を図った(標準供給量43 Nm³/hを88 Nm³/h以上に増加)。これにより、燃料電池は、①燃料ガス系の配管サイズと弁容量の拡大、

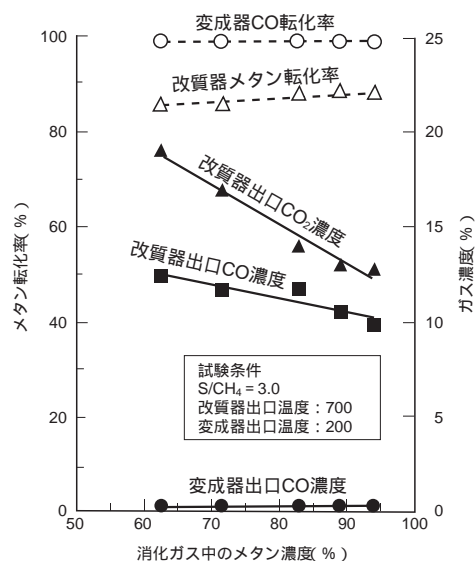


図4 . メタン濃度変化による反応器の挙動 (S/C=3.0) 消化ガス中のメタン濃度変化による改質器と変成器の反応特性の試験結果を示す。

Bench-scale test results of reactor performance for reforming and shift reaction (S/C = 3.0)

(注1) 系の保有するエネルギーを外界に変換できる最大エネルギー。有効エネルギーとも言う。

② エゼクタの容量拡大, ③ ガス供給量増加による制御ソフトウェアの改造をした。また, 実用化に際しては, ガス供給量の増加によるリン酸蒸発などを防ぐためセルスタックや反応器類の一部を改造した。更に, 現在は, これらの成果を踏まえた消化ガス対応の燃料電池をラインアップしている。

3.4 実用機の導入

99年11月, 消化ガス燃料電池発電システムを北部汚泥処理センターに導入した。北部汚泥処理センターは, 市域5か所の下水処理場からの汚泥を集約処理している。発生する消化ガス量は, 約5万Nm³/日である。当センターは, 従来から920kW発電機を4台, 1,100kW発電機を1台設置し, 消化ガス発電をしている。

今回導入した消化ガス燃料電池発電システムは, 2000年2月末現在で, 運転時間2,720時間を記録し, その稼働率は約95%である。システムフローを図5に, プラントの外観を図6に示す。

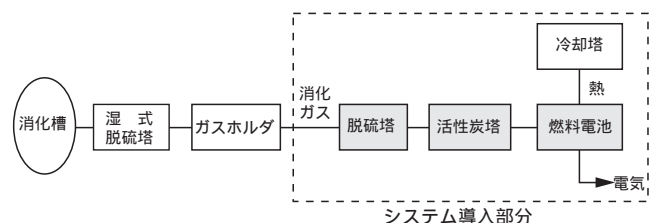


図5 . システムフロー(横浜市北部汚泥処理センター) 消化ガスは, 脱硫塔と活性炭塔から成る前処理装置で有害物質が除去され, 燃料電池に供給される。

System flow of fuel cell power plant running on ADG (Yokohama City)



図6 . 燃料電池の外観(横浜市北部汚泥処理センター) この燃料電池は, 99年11月から稼働している。

View of fuel cell power plant running on ADG (Yokohama City)

4 米国における消化ガス燃料電池発電システム

世界で初めて消化ガスによる燃料電池発電に成功したのは日本であるが, 実用化では米国が先行している。ここで

は, 米国における動向と事例を紹介する。

4.1 米国の動向

97年, ニューヨーク州のユンカー処理場で, 世界初の燃料電池発電システムが実用化された。その後, 現在までに, ディアアイランド(マサチューセッツ州), ポートランド(オレゴン州), カラバサス(カリフォルニア州)の各下水処理場に導入されている。米国では, 環境に対する関心が年々高まっており, 政府もEPA(合衆国環境保護局)のCAA(Clean Air Act)政策などで環境規制を強化している。規制の特徴としては, 二酸化炭素対策よりも, 大気汚染防止の観点からNO_x, SO_x低減を重要視していることが挙げられる。一方, 米国の嫌気性処理を実施している下水処理場では, 従来発生するメタンは放出又は燃焼という形態が一般的であった。現在, 環境規制に対応するため, NO_x, SO_xがほとんどゼロである燃料電池が, 有力な解決策として期待されている。このような背景から, 合衆国政府もEPAやDOE(合衆国エネルギー省)が, 燃料電池導入を支援する補助金制度を設けている。現在, 米国で稼働している消化ガス燃料電池発電システムには, すべて補助金が適用されている。

4.2 導入形態

米国の消化ガス燃料電池発電システムは, 日本のように, 自家用発電設備として設置する場合だけではない。図7に示すように, 公益事業者や特定電気事業者などのエネルギー供給会社がシステムを設置し, 処理場からの消化ガスを得て, 電気と熱を供給する例もある。現在, ユンカーとディアアイランドがこのような導入形態となっている。

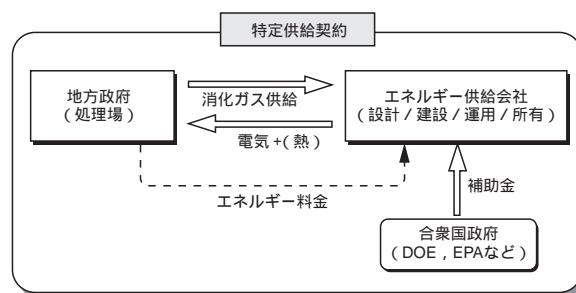


図7 . 米国の導入形態 米国では, エネルギー供給事業者が下水処理場と供給契約を交わし, システムを導入している。

Contract structure for operation of fuel cell power plant running on ADG in U.S.

4.3 米国サイトの紹介

ここでは, 世界で始めて実用化されたニューヨーク州のユンカー処理場と, 最新の設備であるカリフォルニア州のカラバサス処理場の導入事例について紹介する。

4.3.1 ユンカー処理場 ニューヨーク州にあるユンカー処理場は, 約3,000Nm³/日の消化ガスが排出される中規



図8．燃料電池の外観(コンカー処理場) 世界初の消化ガス燃料電池発電システムである。

View of fuel cell power plant running on ADG (Yonker)

模処理場である。ここで97年4月に世界で初めて消化ガス燃料電池発電システムの実用運転が始まった。コンカー処理場のシステム外観を図8に示す。

この所有者は、ニューヨーク州最大の電力会社 NYPA (New York Power Authority) である。NYPAは、発生する電気をコンカー処理場に販売している。

コンカー処理場では、世界初の実用機であったため、初期調整に期間を要したが、その後は順調に稼働しており、99年11月現在までに14,128時間の運転実績を残している。また稼働率については、初期調整期間が多少影響しており、60%を越す程度となっている。なお、このシステムは、DOEの補助金を得て導入している。

4.3.2 カラバサス処理場 カリフォルニア州のカラバサス処理場は、4,000 Nm³/日の消化ガスが排出されている中規模処理場である。99年9月から消化ガスを燃料とする燃料電池2台が稼働している。カラバサス処理場のシステムを図9に示す。

カラバサス処理場のシステムは、過去の実績を踏まえた最新設計となっており、以下の先進的な特長を持っている。

- (1) 2台並列のロードシェアリング運転
- (2) 系統停電時、重要負荷に電源供給可能な独立運転
- (3) 消化ガスと天然ガスの2種燃料対応
- (4) 排熱による消化タンクの加温

99年11月現在、2,316時間の運転実績があり、稼働率は80%以上である。カラバサス処理場では、燃料電池を導入することで、厳しい環境規制に対応したエネルギーの安定供給を実現した。なお、このシステムは、環境保全の優位性からEPAとDOEの両機関から補助金を得ている。

5 あとがき

当社は、横浜市下水道局との共同研究により消化ガス燃

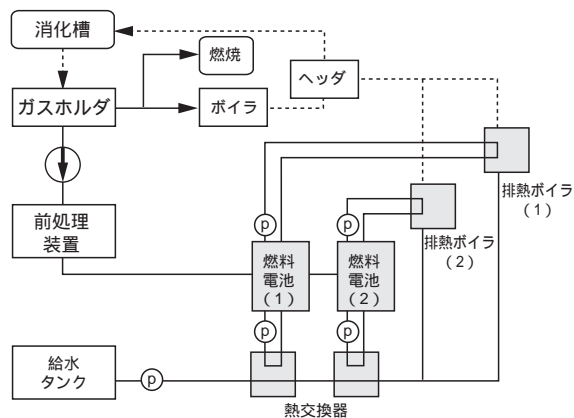


図9．システムフロー(カラバサス処理場) このシステムは、燃料電池2台のロードシェアリング運転や排熱による消化タンクの加温ができる。

System flow of fuel cell power plant running on ADG (Calabasas)

料電池発電システムを開発した。このシステムは、下水道資源・エネルギーを有効利用した環境に優しいクリーンエネルギーシステムである。

この技術は、米国でも実用化が進み、消化ガスのクリーンエネルギー利用として、その導入気運が高まっている。

現在、燃料電池の普及にはコスト低減が最大の課題であるが、国内外の導入促進策や電力自由化による分散電源の拡大などにより、課題は解決されていくものと期待される。当社としても、ライフサイクルでのコスト低減を図るとともに、新たなエネルギー供給事業への取組みも踏まえ、システムの普及拡大に貢献する所存である。

文 献

- (1) Nakayama Y., et al. "FCPP Application to Utilized Anaerobic Digester Gas". Fuel Cell Seminar . 1998 , p.702 - 705.
- (2) 高橋元洋,ほか . 燃料電池発電プラントの燃料多様化への取組み . 東芝レビュー . 53 , 8 , 1998 , p. 59 - 63 .



篠崎 功 SHINOZAKI Tsutomu

情報・社会システム社 社会インフラシステム事業部 公共システム技術第一部主務。下水道プラントのシステムエンジニアリング業務に従事。情報処理学会、日本プロジェクトマネジメントフォーラム会員。

Public Use Systems Div.



草間 伸行 KUSAMA Nobuyuki

電力システム社 燃料電池事業推進部 システム技術担当主務。燃料電池システムの開発・設計業務に従事。

Fuel Cell systems Div.



小川 雅弘 OGAWA masahiro

電力システム社 燃料電池事業推進部 システム技術担当主務。燃料電池システムの開発・設計業務に従事。

Fuel Cell systems Div.