

膜分離メタン発酵発電

Methane Fermentation System with Membrane Bioreactor

富田 洋平 TOMIDA Yohei JFE エンジニアリング 技術本部 総合研究所 主任研究員【現 CN 技術総括部】
力久 信介 RIKIHISA Shinsuke JFE エンジニアリング 環境本部 アクア事業部
牧田 辰洋 MAKITA Akihiro JFE エンジニアリング 技術本部 総合研究所

要旨

厨芥を対象としたメタン発酵の効率化に向けて、膜分離メタン発酵システムの開発に取り組んだ。本技術は発酵液を膜分離処理し、未分解の発酵残渣を発酵槽に返送するもので、有機物分解率の向上および発酵槽汚泥濃度増加による処理時間の短縮を狙っている。基礎実験として、従来システムに対して汚泥濃度を 2 倍に濃縮したところ、処理時間を半減させても有機物分解率は 83% から 98% に向上した。その結果、メタンガス発生量は 21% 増加し、汚泥発生量は 75% 削減された。次に、長岡市生ごみバイオガス発電センターで、発酵槽 2 槽のうち 1 槽に本システムを適用して実証実験を行った。汚泥濃度を従来システムの 1.5% から 4% に濃縮でき、従来システムに対してメタンガス発生量は 22% 増加、汚泥発生量は 64% 削減という結果が得られた。また、施設全体として発電量が実証実験前の 2017 年平均値と比較して 27% 増加した。

Abstract:

The objective of this study is to improve the organic decomposition of food waste by applying microfiltration membranes for methane fermentation systems. JFE Engineering conducted experiments of the developed system in a laboratory scale. When digestion sludge concentration was doubled, organic decomposition rate was enhanced up to 98%, methane production was increased by 21% and sludge production was decreased by 75% compared with conventional systems, even though hydraulic retention time was reduced by half. Next, JFE Engineering applied this system to the Garbage Electric Generation Center in Nagaoka City as a demonstration test. The digestion sludge was concentrated from 1.5% to 4%, methane production rate was increased by 22% and the sludge production was decreased by 64% compared with conventional systems. In addition, electric power generation of the entire facility was increased by 27% compared to the average in 2017 before this system was installed.

1. はじめに

循環型社会の構築や SDGs への対応に向けて、下水汚泥や生ごみ等の有機性廃棄物を対象としたメタン発酵技術への注目が高まっている。メタン発酵とは、酸素のない嫌気条件下で、微生物により有機物からメタンガス濃度約 60% となるバイオガスを生成させる技術である。バイオガス発電は、2012 年 7 月から始まった固定価格買取制度で電力買取単価が優遇されており、メタンガス発生量増加による売電増大のニーズが高い。また、未分解の有機物を含む汚泥は発酵残渣として焼却処理や乾燥・炭化等の燃料化処理が必要となるため、汚泥発生量削減による処理費用削減が望まれている。これらのニーズに対応するためには有機物分解率の向上が求められる。有機物分解率は、発酵槽での有機物の滞留時間が長いほど高くなることが知られている¹⁾。

そこで、当社では、有機物を発酵槽に長時間留めること

が可能な膜分離処理を組み合わせた膜分離メタン発酵システムを開発した。本稿では、東北大学と共同研究で行った基礎実験と、長岡市生ごみバイオガス発電センターで実施した実証試験結果を報告する。

2. 開発システムの特長

表 1 に膜分離メタン発酵システムの概要を示す。表中の Total solids は汚泥濃度の指標であり、COD_{Cr} (化学的酸素要求量) は有機物濃度の指標である。開発システムではメタン発酵槽に発酵液を固液分離するための膜分離装置を組み合わせる。この固液分離により、未分解の有機物を多く含有する固形物は発酵槽に返送され、有機物をほとんど含まない膜ろ過水は系外に排出される。開発システムは、表 1 に示したとおり以下のメリットが得られる。

- 1) 未分解有機物を発酵槽に保持できるため、有機物の滞留時間を増加でき、有機物分解率が向上する。
- 2) 汚泥中に存在するメタン発酵に寄与する微生物を高濃度

2022 年 3 月 29 日受付

表 1 膜分離メタン発酵システムの概要

Table 1 Concept of methane fermentation system with membrane bioreactor

	Conventional system	Developed system
Outline process flow		
Total solids (%)	1.3	2.5
Digester volume ^{*1} (-)	100	50
CODcr removal (%)	83	90
Methane production rate (m ³ /t ^{*2})	82	94
Sludge production (kg/t ^{*2})	52	31
Ammonium (mg/L)	<2 000	<2 000

*1 100 means the same volume as conventional, *2 as weight of food waste

化できるため、発酵槽を小型化できる。

3) 発酵阻害物質として知られる溶存態アンモニアは膜ろ過水とともに系外に排出される。このことから、汚泥高濃度化に際して溶存態アンモニアは濃縮せず、安定した発酵槽の運転が可能である。

3. 基礎実験による発酵特性の検証

東北大学との共同研究で実施した基礎実験で、開発システムと従来システムの発酵特性を比較した。

3.1 実験方法

図 1 に開発システムの実験装置の概略を示す。発酵槽容積は 12 L、水温は 35±1°C とし、80 日間運転した。表 2 に膜仕様を示す。分離膜には、住友電気工業株式会社製の小型実験用の中空糸膜を用いた。分離膜での汚泥の目詰まりを防止するため、エアポンプを用いて発酵槽気相部より吸込んだバイオガスを膜下部より散気した。発酵原料とした模擬厨芥の作成方法は、過去の論文を参考¹⁾として Total solids 濃度が 4.8% となるように水道水で希釈した。

3.2 実験結果

表 3 に実験結果を示す。開発システムでは、従来システムに対して発酵槽の汚泥濃度を 2 倍に濃縮し、かつ発酵槽の処理時間（発酵槽と膜分離槽の合計容積/模擬厨芥投入量）を半減させた。本実験条件で、CODcr 分解率は 98% に

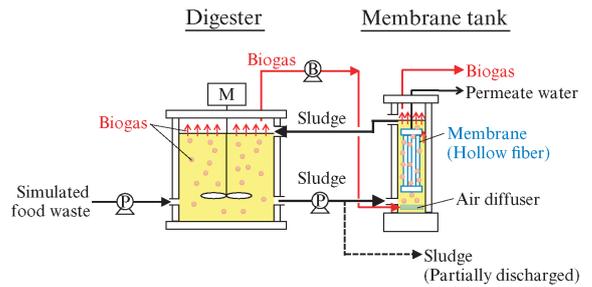


図 1 開発システムの基礎実験装置の概略

Fig. 1 Schematic diagrams of lab-scale examination

表 2 基礎実験に用いた膜の仕様

Table 2 Specifications of membrane in lab-scale examination

Type	Hollow fiber
Membrane material	PTFE
Membrane area	0.1 m ²
Pore size	0.1 μm

表 3 基礎実験結果

Table 3 Results of lab-scale examination

	Conventional system	Developed system	
		Result	Target value
Total solids (%)	1.3	2.5	2.5
Hydraulic retention time (L/(L/day))	30	15 (△50%)	15 (△50%)
CODcr removal (%)	83	98	90
Methane production rate (m ³ /t)	82	99 (+21%)	94 (+15%)
Sludge production (kg/t)	52	13 (△75%)	31 (△40%)
Ammonium (mg/L)	880	730	≤ 880

向上した。その結果、メタンガス発生量は 21% 増加し、汚泥発生量は 75% 削減した。また、溶存態アンモニアが濃縮されることが確認でき、すべての項目で目標値が達成された。

4. 長岡市生ごみバイオガス発電センターにおける実証実験

基礎実験で目標値の達成が確認されたため、実機で用いられる規模の分離膜（実機膜）を用いて、長岡市生ごみバイオガス発電センター（以下、本施設と称する）において実証実験を行った。

4.1 本施設の概要

本施設における生ごみ処理量計画値は 65 t/日、発電量設計値は 12 300 kWh/日である²⁾。発酵槽は 1 800 m³×2 槽

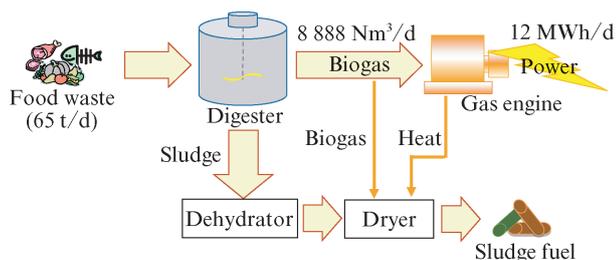


図2 長岡市生ごみバイオガス発電センターの概略処理フロー
Fig. 2 Process flow of the Garbage Biogas Electric Generation Center in Nagaoka City

(1系・2系)が設置されている。図2に本施設の概略処理フローを示す。混合・調整槽に貯留された発酵原料は、2つの発酵槽へそれぞれ同量が投入される。発生したバイオガスは、発電用のガスエンジンと発酵残渣の乾燥機に供給され、乾燥された発酵残渣は燃料として外部施設で有効利用される。

4.2 安定運転条件の探索と発酵特性の評価

4.2.1 実証実験装置および方法

写真1に実証実験装置の外観を示す。膜分離装置は発酵槽とガスホルダーの間に設置した。鉄筋コンクリート製の躯体である膜分離槽の内部に実機膜を設置した。図3に実証実験装置フローを示す。図3中の赤線は、本実証試験にあたり増設した設備である。1系発酵槽から発酵液を膜分離槽に供給し、濃縮された汚泥は発酵槽に返送した。一方で、2系発酵槽は比較系列として従来方式で運転した。膜分離槽



写真1 実証実験装置の外観
Photo 1 Appearance of demonstration plant

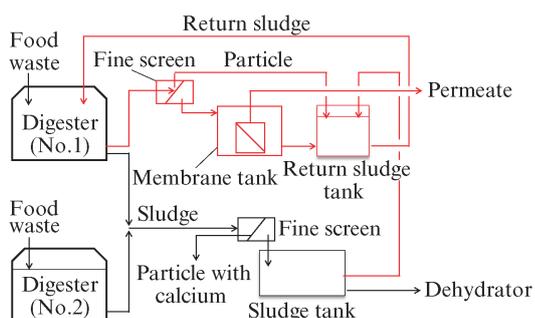


図3 実証実験装置フロー
Fig. 3 Schematic diagram of demonstration plant

に供給する汚泥に関し、夾雑物による膜への物理的なダメージを防ぐため、微細目スクリーンにより固形物を除去した。除去された固形物は、膜ろ過した濃縮汚泥とともに発酵槽へ返送した。また、本施設では、厨芥に卵殻が多く含まれていることから、カルシウムスケールによる配管閉塞等が懸念される。この対策として、発酵液を貯留槽に送液する際に、スクリーンによりカルシウムを含むし渣分を除去している。実証実験の発酵液返送に関しても本対策を実施することとした。

表4に膜分離槽および実機膜の仕様を示す。実機膜には、固形物によるトラブルが生じにくい平膜である東レ株式会社製TMR140J-200Dを用いた。表5に膜の運転条件を示す。運転条件は、膜メーカー推奨の運転条件に従い設定した。膜の薬品洗浄は、膜ろ過水配管を通じて透過側から膜表面に注入するインライン方式で行った。薬品注入量は膜有効面積1m²当たり3.6Lとした。酸洗浄はカルシウムなどの無機物由来の膜閉塞を、アルカリ洗浄は有機物由来の膜閉塞を抑制するために実施した。膜分離処理の安定運転性能を検証するため、膜間差圧の運転期間中の推移を評価した。膜間差圧は膜閉塞の指標であり、膜メーカー推奨値は15kPa以下であるが、実証実験では5kPa未満を目安に運転することとした。

4.2.2 実験結果

(1) 膜の安定運転性

図4に膜透過フラックス(単位膜面積当たりの水透過量)および膜間差圧、1系発酵槽の汚泥濃度を示した。2019年3月より、膜透過フラックス0.04m³/m²/日から運転を開始した。薬品洗浄頻度は、酸洗浄1回/週、アルカリ洗浄

表4 膜分離槽および実機膜の仕様

Table 4 Specification of membrane tank and module in demonstration plant

Tank volume	88 m ³
Tank size	5 m ^W × 3.2 m ^L × 5.5 m ^H
Type	Flat sheet
Membrane material	PVDF
Membrane area	280 m ² /unit
Pore size	0.1 μm

表5 膜装置の運転条件

Table 5 Operating conditions of membrane process

Unit number of membrane	2~4 unit
Area of membrane	560~1 120 m ²
Suction pump operation	7 min (ON) - 2 min (OFF)
Chemical for membrane cleaning	①Acid 1.5 wt% citric acid ②Alkaline 0.5 wt% NaClO

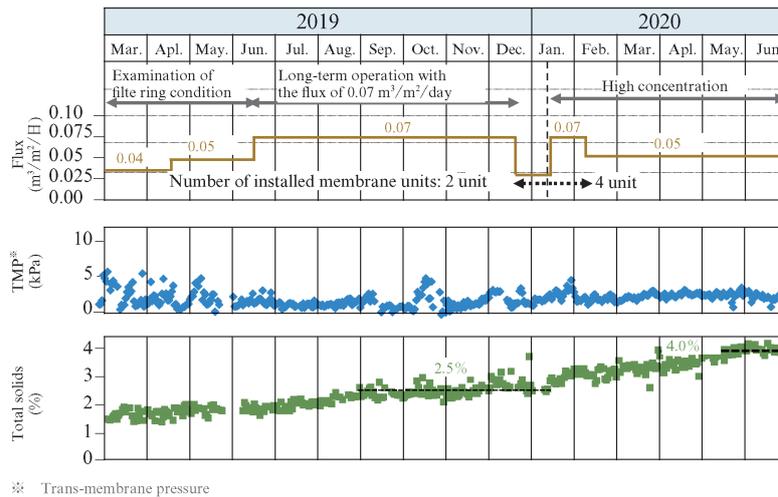


図4 膜の連続運転状況 (膜透過フラックス, 膜間差圧, 汚泥濃度)

Fig. 4 Long-term operation of membrane process (flux, TMP, total solid of digestion sludge)

1回/月で安定運転できた。通常の有機性排水の膜分離処理では、膜閉塞はバイオフィウリングに由来することが知られており³⁾、酸洗浄頻度よりアルカリ洗浄頻度が高くなることが多い。本実験において酸洗浄頻度の方が高くなった原因は、発酵原料に含まれる卵殻由来のカルシウムが主要な膜閉塞の要因であったためと考えられた。

2019年6月より膜透過フラックスを0.07 m³/m²/日として運転した結果、同年9月以降、汚泥濃度2.5%で運転できた。この運転条件で膜間差圧の顕著な上昇は見られず、12月まで安定運転を達成した。そこで、更なる効率化に向けて膜を4基に増設して汚泥濃縮を行った。膜透過フラックス0.07 m³/m²/日の運転では、2020年2月に汚泥濃度3%で膜間差圧が急上昇した。そこで、安定運転可能な膜ろ過条件を検討した結果、膜透過フラックス0.05 m³/m²/日で良好な運転成績が得られた。その後、同年4月に汚泥濃度は4.0%に到達し、6月まで安定運転を達成できた。なお、全実験期間において薬品洗浄条件および頻度は変更しなかった。

(2) 発酵特性

表6に開発システム(1系発酵槽における実証実験)と従来システム(2系発酵槽における通常運転)の発酵特性を比較した。汚泥濃度2.5%では有機物(CODcr)分解率は97%であった。さらに汚泥濃度4.0%に濃縮することでCODcr分解率は98%に向上し、厨芥1tonあたりのメタンガス発生量は22%増加し、汚泥発生量は64%削減した。汚泥4.0%でCODcr分解率が向上した理由は、汚泥濃度の増加により有機物の発酵槽での滞留時間が165日から318日に延長したためと考えられた。また溶存態アンモニア濃度は、基礎実験と同様に濃縮されないことが確認された。表7に膜ろ過水の水質分析結果を示す。同じ表に従来システムの脱水ろ液の分析結果も示した。本分析結果より、膜ろ過水は、固形物(SS)や有機物の指標となる生物化学的酸素要求量

表6 開発システムと従来システムの発酵特性

Table 6 Comparison of fermentation characteristics between developed system and conventional system

	Conventional system (Digester No.2)	Developed system (Digester No.1)	
Total solids (%)	1.5	2.5	4.0
HRT ^{*1} (m ³ /(m ³ /day ^{*3}))	38	38	38
SRT ^{*2} (m ³ /(m ³ /day ^{*3}))	38	165	318
CODcr removal (%)	83	97	98
Methane production rate (Nm ³ /t ^{*4})	104	120 (+15%)	127 (+22%)
Sludge production (kg/t ^{*4})	60	28 (△53%)	22 (△64%)
Ammonium (mg/L)	1 500	1 500	1 500

*1 Hydraulic retention time, *2 Sludge retention time, *3 as volume of food waste, *4 as weight of food waste

表7 膜ろ過水の水質分析結果

Table 7 Permeate quality

	Developed system	Conventional system
	Permeate	Liquid from dehydrator
pH (-)	7.8	8.3
SS ^{*1} (mg/L)	<1	1 400
BOD ₅ ^{*2} (mg/L)	30	1 300

*1 Suspended solids, *2 Biochemical oxygen demand

(BOD₅)が非常に低濃度となる結果が得られた。このことから、未分解有機物は、本開発システムの狙いどおりに汚泥として発酵槽内に濃縮されていると考えられる。

(3) 本施設における開発システムの導入効果

表8に本施設全体への導入効果を示す。ここでは、前述

表8 本施設への開発システム導入効果
Table 8 Effect of application of developed system

Period	Before demonstration test F.Y.2017	Result of demonstration test [No.1: Developed system No.2: Conventional system]	
		'19/Jun. ~ '20/Jan.	'20/Apl. ~ '20/May.
Total solids ^{※1} (%)	1.3	2.5	4.0
Methane production rate (Nm ³ /t ^{※2})	96	101 (+5%)	105 (+10%)
Sludge production (kg/t ^{※2})	36.4	32.1 (△12%)	29.0 (△20%)
Electricity generated (kWh/t ^{※2})	237	263 (+11%)	300 (+27%)
Polymer usage (g/t ^{※2})	248	189 (△24%)	166 (△32%)
Moisture content of dewatered cake (%)	72	69 (△3points)	68 (△4points)

※1 in digester No.1, ※2 as weight of food waste

のとおり、2槽の発酵槽のうちの1槽のみに開発システムを適用した場合の施設全体での結果と、開発システム導入前の2017年度の運転結果を比較した。開発システムの導入によって、導入前と比較して汚泥濃度を4.0%に濃縮した場合には、メタンガス発生量が10%増加、汚泥発生量が20%削減、発電量が27%増加していた。メタン発酵効率化の効果は、汚泥濃度を4.0%とより高濃度とした場合の方が顕著であった。発電量増加の要因としては、メタンガス発生量の増加に加えて、汚泥発生量低減に伴い乾燥機でのバイオガス使用量が削減され、発電へのバイオガス使用量が増加したことが挙げられた。また、脱水ケーキ含水率が4ポイント低下した要因としては、有機物分解率の向上に伴い、発酵汚泥に含まれる無機物の割合が増加したことが考えられた⁴⁾。

(4) 経済的メリットの試算

実証実験開始前の2017年度を基準として、汚泥濃度が4.0%の条件で運転した2020年4~5月の実験結果を基に、開発システムの経済的メリットを試算した。本試算も、生ごみ処理量のうち半分を開発システムで処理する場合を前提とした試算である。表9に実証実験における経済的メリットの試算結果を示す。

効果額の対象項目として、売電量の増加および汚泥発生量削減による汚泥処理費削減などが挙げられる。一方で膜分離装置の運転費は、膜の洗浄用薬剤費および膜装置電力費等とした。売電単価や汚泥処理単価は現地単価を使用し、膜洗浄費および電力消費量は実績値を用いた。膜交換および機器補修費は耐用年数をそれぞれ5年、10年と仮定して算定した。その結果、25.6百万円/年の収益改善効果が期待される試算結果が得られた。

本試算は、生ごみ処理量の半分を開発システムで処理した試算結果であり、今後生ごみ全量を開発システムで処理

表9 実証実験における経済的メリットの試算結果

Table 9 Economic benefits estimated based on results of demonstration test

(Unit; Million JPY per a year)

	Economic benefits
Increase in generated electricity	+ 24.9
Reduction of sludge disposal cost	+ 5.1
Reduction of polymer usage cost	+ 0.3
Reduction of power consumption by existing plant equipment	+ 1.4
Chemicals cost for membrane cleaning	▲ 1.5
Power cost consumed by demonstration plant	▲ 0.2
Membrane replacement cost	▲ 1.8
Maintenance cost of demonstration plant	▲ 2.6
Total	25.6

することを検討する予定である。

5. おわりに

厨芥を対象としたメタン発酵で、有機物分解率を向上させる高効率な技術として、膜分離メタン発酵の開発に取り組んだ。基礎実験を通してコンセプトを検証した後に、長岡市生ごみバイオガス発電センターで実証実験を行った。実証実験では、汚泥濃度4%の運転条件で、以下の結果を得た。

- (1) COD_{Cr}分解率は従来システムの83%に対して、98%まで向上した。厨芥1tonあたりのメタンガス発生量は22%増、汚泥発生量は64%減となった。
- (2) 施設全体では、実証前と比較し、メタンガスが12%

増加し、汚泥発生量は30%削減され、発電量は27%増加した。また、脱水ケーキ含水率は4ポイント低減した。

(3) 経済的なメリットを試算した結果、25.6百万円/年と算定された。

今後、本施設について開発システムの処理時間を短縮した場合の発酵特性を評価し、商用化を目指す。また、生ごみ全量を開発システムで処理する実証試験により、本施設における開発システムの効果の最大化を検討する。

謝辞

共同研究者である東北大学大学院 工学研究科の李玉友教授および関係者に深く感謝いたします。

また、実証実験にご協力いただいた長岡市の関係者の皆様に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

1) 李玉友, 佐々木宏, 鳥居久倫, 奥野芳男, 関廣二, 上垣内郁夫, 生ご

みの高濃度消化における中温と高温処理の比較. 環境工学研究論文集. 1999, vol. 36, p. 413-421.

- 2) 井上侑香, 長部恵介. 長岡市生ごみバイオガス化事業 (PFI 事業). 廃棄物資源循環学会誌. 2014, vol. 25, no. 1, p. 31-35.
- 3) 稲葉知大, 羽部浩. 微生物と膜を使って汚れた水をきれいに再生する: 技術的課題とプレイクスルー. 化学と教育. 2020, vol. 68, no1, p. 32-35.
- 4) 神村正樹. 汚泥の濃縮・脱水における凝集剤の効果. 環境技術. 1973, vol. 2, p. 919-927.



富田 洋平



力久 信介



牧田 晟洋