

家庭用ディスポーザ排水の効率的なエネルギー回収システムの開発

吉田 耕治 久保田 洋
石川 光祥 酒井 有希
矢島 聡

概 要

持続可能な社会への関心から、再生可能なバイオマスの利活用が進められている。その一つである食品廃棄物は年間約1,900万トン排出され、その45%を占める事業系ではリサイクル率の向上が見られるのに対し、一般家庭から排出される約1,000万トンの生ごみの利活用はごくわずかである。

近年集合住宅において、キッチンのシンクで生ごみ処理ができるディスポーザの普及が進んでいる。ディスポーザを導入すると、原則としてディスポーザ排水はそのまま下水道へ排出できず、ディスポーザ排水処理システムの設置が求められる。本研究では、ディスポーザ排水処理システムと同等の処理性能を持ちながら、排水処理過程において生ごみをバイオガス化し、エネルギーとしてリサイクルできる生ごみ処理システムの構築を行った。

ディスポーザにより破碎された排水中の生ごみを効率的にバイオガス化させるためには、希薄に存在する固形物を低エネルギーかつ高効率に回収しなければならない。また、メタン発酵装置導入による装置規模拡大を抑制するため、メタン発酵の滞留時間短縮、装置のコンパクト化をしなければならない。これらの課題を解決するため、ドラム式固液分離装置、メタン-メタン二段発酵、好気・嫌気回分式排水処理からなる生ごみ処理システムの検討を行った。本システムはディスポーザ排水に含まれる固形物を67%回収し、回収物中の炭素を83%バイオガスに変換し、排水はディスポーザ排水基準を満たすことに成功した。

Development of the effective energy recovery system from kitchen garbage disposer effluent

Abstract

Biomass use in Japan is increasing year-on-year due both to high oil price and desire to build a more sustainable society. Food waste is a large source of biomass, with around 19 million tons being disposed of each year. Forty-five percent of the total (8.4 Mt) is industrial food waste - of which 56% was being recycled by 2006. In comparison, research suggests only 5% of the 10.6Mt is currently recycled.

Recently, domestic garbage disposers have become increasingly common, especially in condominiums. When such garbage disposers are set up, many local governments require the installation of treatment facilities to prevent adding any pollution load to sewerage system. We investigated a recycling-oriented kitchen garbage effluent treatment system, which incorporates methane fermentation into these facilities. We set some targets for the system as follows:

1. Solid matter in dilute disposer effluent is collected efficiently at low energy.
2. Carbon and nitrogen in kitchen garbage are converted into biogas or removed efficiently.
3. The facility is compact.

We have developed a high performance kitchen garbage treatment system containing a drum-type solid-liquid separator, methane-methane two step-wise fermentation and aerobic-anaerobic batch-wise treatment facilities. We collect 67% of solids in disposer effluent and convert 83% of carbon in the solids into biogas, with sufficient clarification potential to allow the discharge of the treated effluent into sewerage.

キーワード: メタン発酵 固液分離 排水
処理 生ごみ バイオマス

§1. はじめに

近年、バイオマス利活用への機運が高まっている。その理由として、持続可能な社会構築への希求、二酸化炭素排出量の削減などが挙げられる。バイオマスの中では食品廃棄物は、年間 1,888 万トンと発生量が多いにもかかわらず、再資源化率が低いのが特徴である。食品製造業や小売業など事業者を対象とした食品リサイクル法の制定により、事業系生ごみ排出量は平成 18 年度に 843 万トンまで減少し、そのうちの 56%が再生利用されているが、生活系生ごみの排出量は横ばいが続き、同年度排出量 1,045 万トンで再資源化率はわずか 5%と低迷している¹⁾。

生活系の生ごみは、都市部ではほとんどが可燃ごみとして収集され、焼却処分されている。生ごみは水分を含んで重いこと、腐敗しやすく悪臭の原因となること、衛生害虫の発生源となることから、これらを解決するものとして近年、都市部の集合住宅を中心に、家庭用のディスポーザの普及が進んでいる。キッチンのシンクにディスポーザを設置し、生ごみを破砕し、排水として流すもので、住民にとっては生ごみの排出を行わなくて済み、生ごみの発生の都度処理できるので、生ごみの腐敗や悪臭発生が少ないといったメリットがある。ただし日本では下水処理場への流入負荷を抑制するため、ディスポーザ排水を処理する上での基準²⁾（以下「ディスポーザ排水基準」という）が定められた。

これに準拠して多くの自治体では、ディスポーザを導入する場合、排水処理装置の設置を義務付けている。しかしながらディスポーザ排水処理システムでは、生ごみの再資源化が考慮されておらず、生活系生ごみのリサイクル率を向上させる上での課題となっている。

§2. 本開発の趣旨

生ごみは水分を多く含むウェットバイオマスであり、これに適するメタン発酵でバイオガス化、得られたガスを燃焼させることによって、電気や熱に変換することができる。ディスポーザ排水は生ごみを破砕するための水とキッチン排水の混合排水であり、有機物が非常に希薄になっているため、バイオガス化によるエネルギー回収が困難である。したがって、効率的な有機物回収技術の確立によって、エネルギー回収に寄与できるものである。

本研究開発では、ディスポーザ排水から有機物を効率的に回収し、バイオガス化による生ごみの再資源化率を向上させ、ディスポーザ排水基準を満たす固液分離装置、メタン発酵装置、排水処理装置を組み合わせた生活系生ごみ処理システムの構築を行った。全体的なシステムの概要を図 1 に示す。これら 3 項目について最適化のための検討をそれぞれ行い、その一連のシステムとして小型の実証試験装置を設計、製作した。

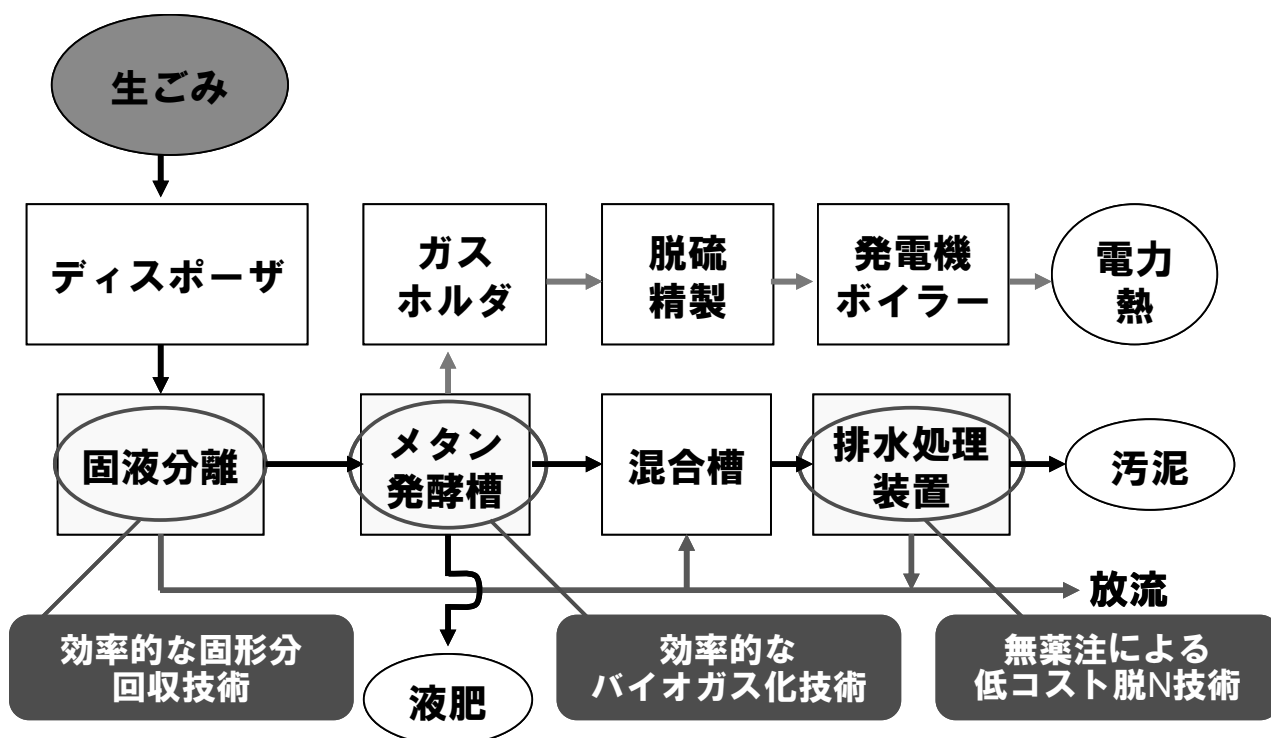


図 1. エネルギー回収型ディスポーザ排水処理システムの概要高機能生活系生ごみ処理システムの概要

§3. 固液分離

3.1 はじめに

破碎された生ごみを本システムで効率的にエネルギー変換するためには、排水中の固形分を低エネルギーで効率よく回収し、メタン発酵に供することが肝要である。そこで最適な固液分離技術開発に向けて、プレコート法によるドラム式固液分離装置による固形分の回収方法を検討した。本稿で言うプレコートとは、メッシュなどの表面に固液分離しようとする排水に含まれる固形物を付着させ、形成させたち密なる過層を指す。プレコートによって懸濁微粒子を捕捉するものである。ドラム式の固液分離装置では、ドラム内外に水頭差を生じさせ、ドラム外の懸濁液がドラム内へ流れようとする時、ドラムに張られたメッシュ表面に懸濁物のプレコートを形成させ、粗大粒子とともにメッシュサイズより微細な粒子が回収される。このドラムを低速で回転させることで連続的に排水に含まれる固形物を回収することができる。ここではディスポーザ排水基準において、排水処理システムへの流入水の浮遊物質 (SS) 濃度の標準値が 1,340 mg/L、システムの排水処理部からの流出水の SS 濃度の基準が 400 mg/L 未満とされていることを踏まえ、SS 回収率を 70%とすることを目標とした。

3.2 ドラム式固液分離装置を用いた固液分離

本実験ではまず、ラボスケールのドラム式固液分離装置を作製して試験を行った。この装置のドラム直径は 20 cm、ドラム幅は 20 cm である。表面のメッシュの目開きを 0.5、0.15 mm に設定した。原水にはディスポーザ排水を模擬した、SS 濃度 600 mg/L の有機性排水を使用した。

0.5 mm メッシュを用いた試験ではプレコートの形成が認められなかったが、0.15 mm メッシュを用いた試験においては、水頭差が大きくなることでドラム表面にプレコートが形成され (図 2)、水頭差 20 cm で SS 濃度が 70 mg/L まで低下した。回収率は 88%であったことから、メッシュサイズは 0.15 mm が適切であると考えられた。

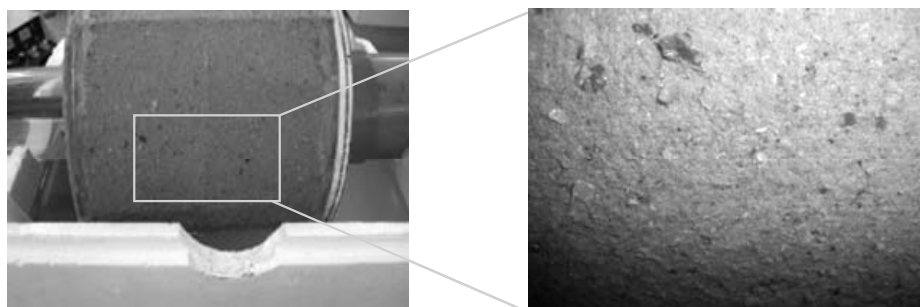


図 2 固液分離時のドラム表面 (ラボスケール固液分離装置)

次に製紙業で使用されるドラム式固液分離装置を使用してディスポーザ排水への適用試験を行った。装置はドラム幅 1 m、ドラム直径 1 m、槽容量約 1 m³ で、ドラム表面に 0.15 mm メッシュを張った。試料にはディスポーザ模擬排水を用い、試験開始時はドラムを停止させ、水頭差が 30 cm 以上となったときにドラムの回転を開始した。回転数は間欠タイマーを用いて調整した。ドラムの中の通過水は循環させた。各水頭差の各段階と、回転後 10、30、60 分後にサンプリングを行った。固液分離時のドラム表面の状況を図 3 に示す。プレコートが形成され、ろ過水中の SS 濃度は水頭差が大きくなるほど低下した。固形分の回収率は、重力沈降のみでは 50%であったのに対し、このドラム式固液分離装置を併用することによって 67%まで向上した³⁾。これにより、水頭差を形成・維持することで、良好な固液分離が行えることが示唆された。

3.3 固液分離のまとめ

本項で構築した固液分離装置は、固形分が低濃度のディスポーザ排水から効率よく固形分を除去し、清澄なる水を得ることが可能となった。この結果、有機物の回収量の増加により、後段にあるメタン発酵でのバイオガス生産量の増加に繋がるものとなった。



図 3 固液分離時のドラム表面 (大型試験機)

§4. メタン発酵

4.1 はじめに

メタン発酵には分解効率に優れた高温発酵法や、水分の少ない乾式メタン発酵法などがあるが、本研究では、基礎試験の結果から⁴⁾⁵⁾、湿式中温発酵法（約37°Cで運転）を基本として、メタン発酵を二槽で行うメタン-メタン 2 段発酵法により滞留時間（HRT）を短縮させ、発酵の効率化を図ることとした。メタン発酵は通常、基質の投入初期が最もガス発生量が多く、その後徐々に減少していく。これは、易分解性の基質は投入直後から、難分解性の基質は徐々に分解されてバイオガス化されているものと考えられる。これらを第一槽（易分解性基質処理）と第二槽（難分解性基質処理）で役割を分担することで全体の発酵時間の短縮を目指した。

ここでは卓上型発酵装置（ジャーファメンター）を用い、標準生ごみ²⁾を基質にして連続的にバイオガス化を行い、最適な運転方法を明らかにすることを目的とした。

4.2 材料と方法

実験には、容量5 Lのジャーファメンターを2台用い、易分解性の基質をバイオガス化する第一槽と、第一槽からの消化液に含まれる比較的難分解性の基質をバイオガス化する第二槽とした。

標準生ごみ²⁾をディスポーザで破碎し、1 mmメッシュのふるいで回収された破碎生ごみを第一槽に1日あたり90 g FW投入した。第一槽から第二槽へは1日500 mLの割合で消化

液を移送し、第二槽から同量の消化液を引抜いた。引抜いた消化液のうち410 mLは第一槽に返送した。各発酵槽の液量は第一槽2 L、第二槽4 Lである。発生するバイオガスをガスパックで捕集し、バイオガス量とバイオガス中のメタンおよび二酸化炭素濃度を随時測定した。投入した破碎生ごみ中の炭素がバイオガス中メタンまたは二酸化炭素に変換された割合を炭素変換率として評価した。

4.3 結果と考察

第一槽ではメタンガス濃度60%以上を維持していたが、一時的なメタンガス濃度の低下（二酸化炭素濃度の上昇）がこの期間に3-4回発生した。この時にはバイオガス発生量が低下しており、何らかの発酵阻害が起きていたと考えられた。第二槽は、第一槽のような急激な濃度の変化はわずかであり、安定した発酵が行われていた（図5）。これは、第一槽で一定の発酵を受けた消化液を受け入れているため、基質が均質化されていることが要因と考えられた。図5に示した2009年4月から2010年1月までの約9ヶ月間におけるメタンガス濃度は平均72.8%であった。

2009年4月から2010年1月までの期間、バイオガスが第一槽から約662.2 L、第二槽から660.3 L発生した。投入した生ごみは19.79 kg FWであり、炭素変換率は83%であった。このメタン-メタンの2段発酵方式では自然流下で槽間の消化液の移送が可能であり、また薬品を必要とすることなく、生ごみの効率的なバイオガス化が可能であると示唆されることから、この方式を採用することとした。



図4 メタン-メタン連続発酵試験

右側が第一発酵槽、中央が第二発酵槽である

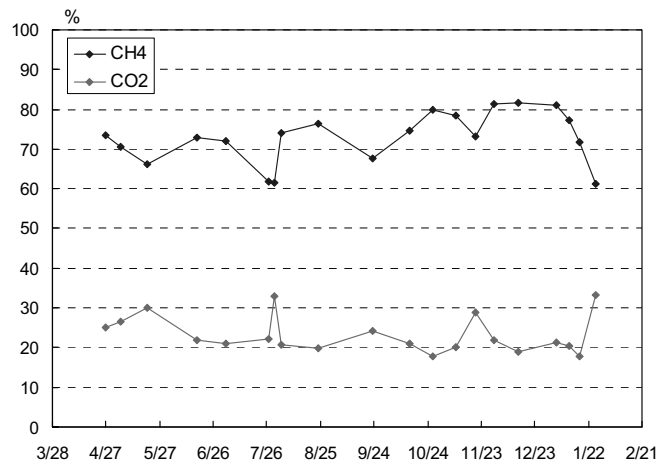


図5 連続発酵試験での第二槽のメタン・二酸化炭素濃度

§5.排水処理

5.1 はじめに

本システムの排水がディスポーザ排水基準を満たすよう、固液分離装置で分離された濾水やメタン発酵槽から排出される消化液を適切に処理しなければならない。近年水環境保全に対する関心が高まっている状況を勘案し、処理対象の排水中に多量に含まれている窒素についても、有機物や浮遊物質と同時に除去するための最適な運転方法を構築することを目的とした。通常の好気嫌気方式による窒素除去では、水素供与体としてメタノールなどの添加が行われるが、本システムでは窒素除去に有効な回分式間欠曝気法を用い、排水中に含まれる有機物を水素供与体として利用した無薬注での窒素除去を目指した。ここではディスポーザ排水基準における生物処理タイプの流出水的设计目標水質に従い、目標値を BOD 300 mg/L (TOC 換算で 300 mg/L)未満、SS 300 mg/L 未満に設定した。全窒素濃度 (TN) は下水道基準及び水質汚濁防止法による排水基準である 60 mg/L を目標値とした。

5.2 運転方法の検討

窒素の除去のために、回分式間欠曝気法を採用した(図 6)。これは同一の槽で流入・曝気・沈殿・排出を行うものであり、間欠的に曝気することで好気・嫌気条件を作り、窒素分の硝化・脱窒素反応を行える利点がある。ここでは、メタン発酵消化液ときこ懸濁水(固液分離装置からの濾水を模擬したもの)を用いて、回分式間欠曝気法の詳細な運転条件を検証した。実験装置の容量は 1.5 L、活性汚泥は標準法の下水処理場由来のものを用いた。

MLSS 量に対する流入水の TOC 量を示す汚泥負荷量の検証では、0.1 kg TOC/kg MLSS・日の条件で TOC、TN 除去率が最良となった。実証機稼動時の排水の負荷から計算

すると、槽内の MLSS は約 4,500 mg/L が最良だと考えられるため、この汚泥濃度を基本とした。

好気・嫌気の時間配分に関しては、一サイクル中の好気/嫌気時間の配分を 40 分/60 分で運転した際の TOC 除去率が最良であった。

運転時の溶存酸素濃度 (DO) は、過曝気を防ぐために 1-2 mg/L となるよう制御を行った。また DO の監視は、流入負荷が急に大きくなった場合には DO の上昇が通常よりも鈍化することから、適切に対応することでバルキングを予防することができた。

運転制御の方法として、pH を指標とした制御についても検討した。槽内の pH 変化を指標とした曝気の調節を行うことにより、硝化・脱窒素を効率的に進めることができたが、槽内の状態が一度非定常状態になると回復に時間がかかることがわかったため、今回の制御には用いなかった。

5.3 排水処理のまとめ

これらの検討を踏まえ、メタン発酵槽からの消化液と固液分離装置からの濾水の混合液を適切に処理するための運転条件を設定し、検討時と同じ模擬排水を用いて連続運転を行った。具体的には MLSS 濃度を 4,500 mg/L 程度とし、処理サイクル数 4 回/日、好気 40 分/嫌気 60 分、過曝気を防ぐため DO 濃度を 1-2 mg/L とした。この運転条件による処理では、TOC、TN ともに除去率は 70-90%であった。放流水の SS は 100 mg/L 程度であり、目標値 (300 mg/L 未満) を満足した。

検証に基づいた運転条件によりディスポーザ排水規準の水質を達成することができた。窒素に関しては、この回分式間欠曝気法の運転方法を適切に設定することにより、無薬注でも、下水道規準および水質汚濁防止法による排水基準 (60 mg/L) はもちろん、上乘せ基準 (20 mg/L) を満たすことも可能と考えられた (図 7)。

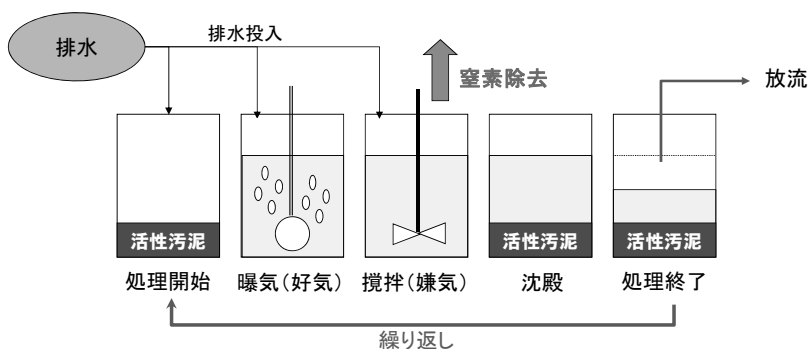


図 6 回分式間欠曝気法

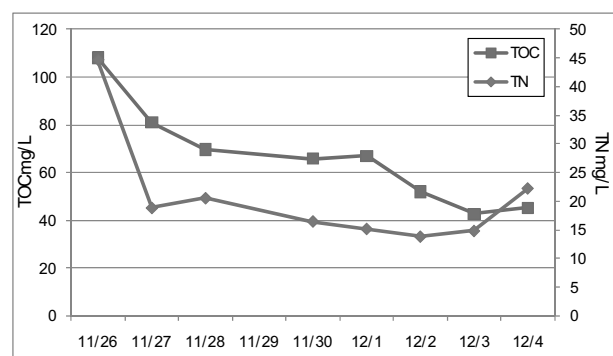


図 7 試験運転時の水質

§6. 実証試験装置

固液分離、メタン発酵、排水処理に関する上記の検討結果を踏まえ、ディスポーザ排水処理装置としての機能を満たす実証機を構築した。この実証機は、ディスポーザ排水処理装置の認定取得に向けた規模とするため、生ごみ 1.25 kg/day、排水量 175 L/day を処理できる能力で設計した。現在、この実証試験装置を用いて性能評価を行っており、システムの安定性・信頼性を検証している。

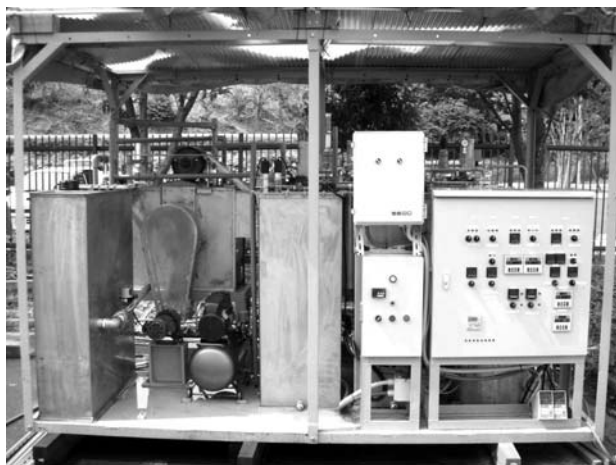


図 8 実証試験装置の外観

§7. まとめ

ディスポーザ排水という希薄な有機性排水から効率よくエネルギー回収を行うため、固液分離効率を向上させてより多くの有機物をバイオガス化し、ディスポーザ排水基準に適合する排水処理能力を持った処理システムを構築した。

- ① ドラム式の固液分離装置により、ディスポーザ排水に最適化することで、固形分を 67%回収することを可能とした。
- ② 2 段発酵方式のメタン発酵装置により、基質の分解性に応じた発酵槽の割り当てとすることで効率的なバイオガス化発酵時間の短縮を可能とした。
- ③ 排水処理は好気・嫌気の回分式間欠曝気法により、有機物と同時に窒素の除去をも可能とした。

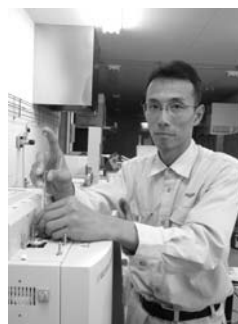
以上の結果より、ディスポーザ排水において生ごみの再資源化（エネルギー回収）と排水処理を両立させるシステムを構築することができた。

参考文献

- 1) 環境省、平成 21 年版 環境白書/循環型社会白書/生物多様性白書、2009 年 6 月 8 日
- 2) 社団法人日本下水道協会、下水道のためのディスポーザ排水処理システム性能基準(案)、2004 年 3 月
- 3) 石川光祥 ら：ディスポーザ排水からの浮遊固形物回収用固液分離システムの開発、第 20 回廃棄物循環資源学会研究発表会講演論文集、p.237-238、2009
- 4) 吉田耕治 ら：ディスポーザ破碎生ごみの粒径組成とメタン発酵特性、第 19 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、p.326-328、2008
- 5) 吉田耕治 ら：前処理したディスポーザ破碎生ごみのメタン発酵特性、第 20 回廃棄物循環資源学会研究発表会講演論文集、p.235-236、2009

ひとこと

希薄な懸濁性排水であっても効率よくエネルギー変換ができることがこのシステムの最大の特徴です。バイオマス利活用の拡大は喫緊の課題であり、このシステムを多くのお客様に採用していただき、環境配慮社会、持続可能社会の構築に少しでもお役に立ちたいと願っております。



吉田 耕治