

富士市東部浄化センターにおける高濃度消化・省エネ型 バイオガス精製による効率的エネルギー利活用技術実証研究 (B-DASH プロジェクト)

Demonstration of Efficient Energy Utilization Technology using High-Solids
Anaerobic Digestion and Energy-Saving Biogas Purification at the Tobu
Wastewater Treatment Plant in Fuji City (B-DASH Project)



小野田草介*
Sosuke Onoda
博士 (工学)



佐藤朋弘*
Tomohiro Sato



渡邊航介*
Kosuke Watanabe



宮本博司**
Hiroshi Miyamoto

B-DASH プロジェクト (Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project) とは、国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業で、下水道事業における大幅なコスト縮減や省エネルギー・創エネルギー効果を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するものである¹⁾。

当社、日本下水道事業団および富士市からなる共同研究体は、平成30年度 B-DASH プロジェクトに採択され、平成30年度～令和元年度の2カ年にわたり国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究として、高濃度消化および省エネ型バイオガス精製に関する革新的技術の実証を行い、目標値を満足する結果が得られた^{2, 3)}。

The B-DASH Project is a MLIT program created specifically to promote research into innovative wastewater technologies. Its objectives are to significantly reduce costs and create energy-saving and energy-generating effects in wastewater service, and support Japanese enterprises in their efforts to expand the water business overseas. Joint research into high-solids anaerobic digestion and energy-saving biogas purification conducted by Kobelco Eco-Solutions Co., Ltd., the Japan Sewage Works Agency, and Fuji City was selected for the B-DASH Project in 2018, which led to two years of corroborative testing (2018-2019) under NILIM contract and yielded good results.

Key Words :

嫌 気 性 消 化	Anaerobic digestion
メ タ ン 発 酵	Methane fermentation
バ イ オ ガ ス	Biogas
精 製	Purification
水 素	Hydrogen

【セールスポイント】

- ・投入汚泥を高濃度に濃縮することで消化槽の容量を大幅に削減可能
- ・シンプルな機器構成で不純物を一括除去できるバイオガス精製技術
- ・燃料電池自動車の初期需要を考慮した小規模設備とすることで、維持管理費の低減が可能な水素製造・供給設備
- ・余剰水素の有効利用を可能にする高濃度メタン生成技術

まえがき

第4次社会資本整備重点計画において、下水汚泥エネルギー化率は、2020年度に約30%とする目標が設定されているが、2018年度末時点で約23%にとどまっている⁴⁾。代表的なエネルギー化技術である消化技術は、導入にあたって大容量の槽を建設する必要があるため初期投資（建設費）が大きい。また、バイオガス利活用技術のひとつとして、これまでに研究実績のある水素製造・供給技術は、機器点数の多さから維持管理が煩雑化するほか、有資格者の選任や法定点検が必要であり、維持管理費の負担が重い。そのため、人員・財政に余裕がない中小規模自治体が有する処理場での採用が進んでいない。

以上の背景を踏まえ、本研究は、槽容量の大幅削減によって初期投資の削減が可能な高濃度消化技術、および従来技術よりシンプルな機器構成とすること等により維持管理を容易にした省エネ型バイオガス精製技術を実証し、国内下水処理場での汚泥消化・バイオガス利活用設備の普及を促進し、下水汚泥のエネルギー利用促進に貢献することを目的として実施した。

1. 実証フィールドの概要

実証施設設置場所：富士市東部浄化センター
（静岡県富士市富士岡南260番地-1）

規模：日最大55 800 m³/d
（処理人口約100千人）

排除方式：分流式

処理方式：

〔水処理〕標準活性汚泥法

〔汚泥処理〕濃縮→脱水→外部処分
（焼却・再生利用）

2. 革新的技術の概要

2.1 構成

革新的技術の構成を図1、実証施設全景を写真1に示す。高濃度消化技術（高濃度濃縮装置、高濃度消化槽）、省エネ型バイオガス精製技術（バイオガ



写真1 実証施設全景

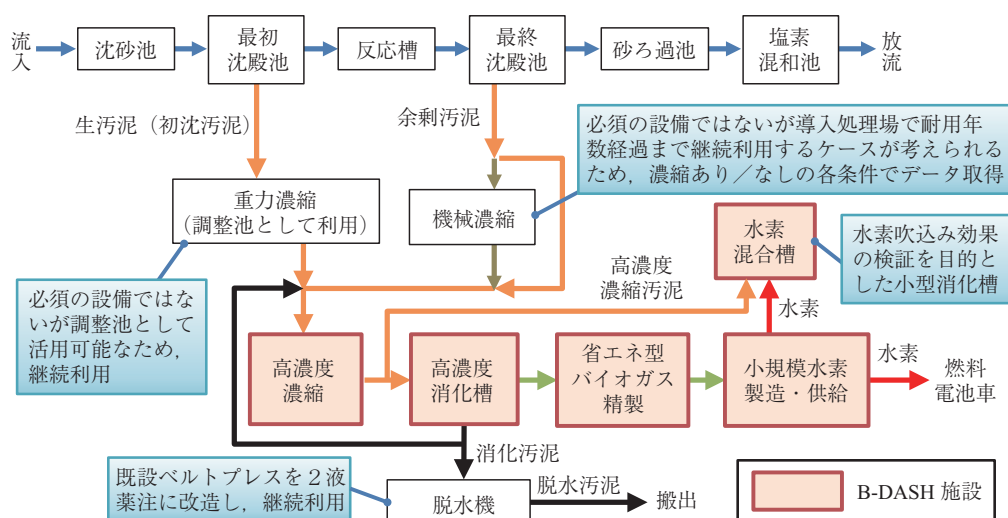


図1 革新的技術の構成

表1 設備の主仕様

設備名	容量・能力	主仕様
1) 高濃度濃縮設備 2) 高濃度消化設備 3) バイオガス精製設備 4) 水素製造・供給設備 5) 高濃度メタン生成設備 (水素混合槽)	350 kg-DS/h × 2 基 有効容積 1 000 m ³ バイオガス処理量 100 m ³ N/h 圧縮機能力 29.75 m ³ N/d 有効容積 3.9 m ³	スクリー式 銅板製, インペラ式攪拌機 高圧水吸収法 水蒸気改質, 充填圧力: 35 MPa 水素吹込み用消化槽

ス精製装置, 中圧ガスホルダ), 小規模水素製造・供給技術 (水素製造装置, 水素供給装置), 高濃度メタン生成技術により構成されている。

2.2 特徴

各設備の主な仕様を表1に示す。設備の処理汚泥量は日最大5.3 t-DS/dであり, これは実証処理場における発生汚泥を全量処理可能な規模である。

2.2.1 高濃度消化技術

高濃度化と消化日数の短縮により, 消化槽容量を従来の約1/3に削減できる技術である。消化汚泥を返送し原料汚泥と混合して濃縮することにより, アンモニア性窒素 (NH₄-N) を濃縮分離液に溶解させ, 消化阻害が生じないレベルに調整できるため, 従来と同等の消化性能, 脱水性を維持することができる。

2.2.2 省エネ型バイオガス精製技術

不純物の成分ごとに除去装置を設けることなくシンプルな機器構成で効率的に不純物を一括除去できる高圧水吸収法を原理とした技術である。従来よりも運転圧力を低下させるとともに, 除湿器での吸着能力を向上させることで, 水素製造装置で求められるメタン濃度, ならびに, シロキサンおよび硫化水素の除去性能を維持しつつ, 消費電力を低減することができる。

2.2.3 小規模水素製造・供給技術

燃料電池自動車の初期需要を考慮した小規模設備とすることで, 有資格者の確保および法定点検が不要となり, 従来より少ない負担で水素製造・供給設備の導入を可能とする技術である。

2.2.4 高濃度メタン生成技術

余剰水素を有効活用するため消化槽に返送し, メタンを再生成する技術である。消化槽に水素を吹き込むと, 消化槽内に存在する水素資化性メタン生成菌の働きにより, 消化槽内 CO₂ からメタンが生成され, バイオガス中のメタン濃度を上昇させることができる (図2)。

本実証においては, 短期間の委託研究期間内に高濃度消化技術の検証と並行して実証を行うため, 水素吹込み用の消化槽 (水素混合槽) を併設した。

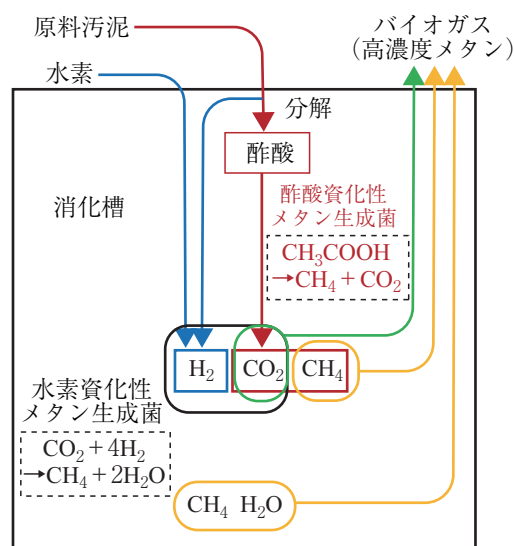


図2 消化槽への水素吹込みによるメタン生成反応

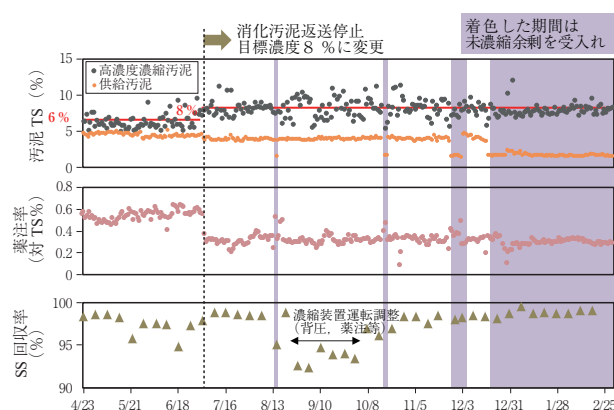


図3 高濃度濃縮装置での汚泥 TS, 薬注率, SS 回収率 (定格時)

3. 実証試験結果

3.1 高濃度消化技術

3.1.1 高濃度濃縮の安定性

2019年4月より定格負荷での濃縮運転を開始し, 初沈汚泥, 余剰汚泥, 返送消化汚泥の混合汚泥を TS (Total Solids; 全蒸発残留物濃度) = 6 % 以上 (原料汚泥 TS = 8 % 相当) に濃縮可能であることを確認した (図3)。消化槽内の NH₄-N が管理値以下であったため, 7/3より消化汚泥の返送を停止し,

目標濃度を8%としたが問題なく濃縮することができた。薬注率は、返送消化汚泥の混合割合により0.3~0.6%対TS程度、SS回収率は概ね95%以上を維持した。余剰汚泥については、既設機械濃縮による濃縮汚泥を受入れた条件と、革新的技術の基本フローに合わせ未濃縮汚泥(TS=0.8~1.0%)を受入れた条件(図3の着色期間)の両方で運転を行い、いずれも濃縮可能であることを確認した。

3.1.2 高濃度消化の安定性

消化槽投入TS量は、ほぼ全期間にわたり設計の日最大値を上回り、とくに5~6月および11月以降に高い状況となった(図4)。これは実証開始後、重力濃縮槽からの汚泥引抜を速やかに行うよう運用変更した結果、重力濃縮槽における回収率が上昇し、汚泥量が増加したためである。消化汚泥TSは5~6月は5%前後まで上昇した(図5)。これは投入負荷が高い状況で、既設脱水機を消化汚泥対応とするための運転調整の期間中、消化汚泥引抜量を

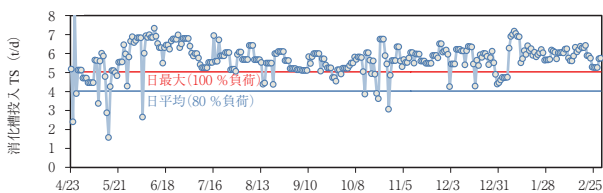


図4 消化槽投入TS量(定格時)

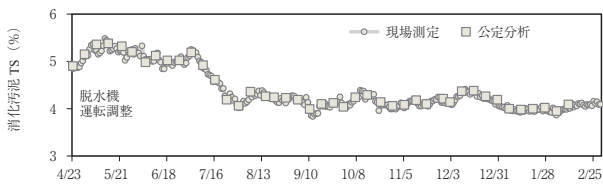


図5 消化汚泥TS(定格時)

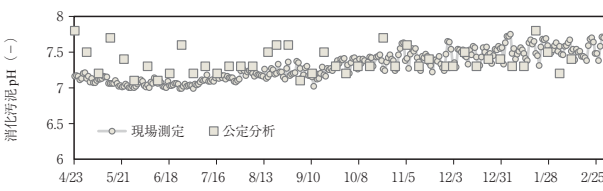


図6 消化汚泥pH(定格時)

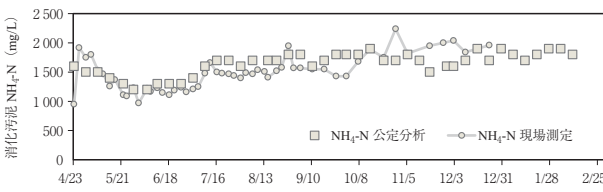


図7 消化汚泥NH₄-N(定格時)

減じたためである。7月以降は4%台前半で安定した。

図6, 7に、定格時の消化汚泥pH, NH₄-Nを示す。pHは7~8を維持した。NH₄-Nは消化汚泥を返送している期間は1500mg/L以下で、管理値を大きく下回ったため、7/3以降消化汚泥の返送を停止し、その後は1500~2000mg/Lで推移した。

図8にバイオガス量の推移を示す。定格負荷となつてから滞留時間の3倍が経過した7月以降は2400m³N/d程度まで上昇し、設計日最大負荷である4.4kg/m³d以下のVS(Volatile Solids; 強熱減量。主に有機物を示す。)負荷においては、投入VS当りバイオガス量は目標値である500m³N/t-VS以上を満足した。

3.2 省エネ型バイオガス精製技術

図9にバイオガス処理量当りの電力原単位(バイオガス精製装置に供給したバイオガス量当りの消費電力量)を示す。電力原単位はバイオガス量が少ないほど上昇する傾向があり、バイオガス量2400m³N/d(100m³N/h)における四季平均の電力原単位は0.43kWh/m³N-バイオガスであった。一方、同じく高圧水吸収法を原理とし平成23年度B-DASHで実証された大規模処理場向け精製技術では、電力原単位はバイオガス量2400m³N/d(100m³N/h)において0.6~0.7kWh/m³N-バイオガス程度である⁵⁾。したがって、今回実証した精製技術は約30%の電力低減が可能であることが示された。

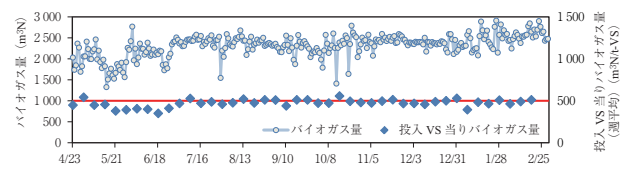


図8 バイオガス量, 投入VS当りバイオガス量(定格時)

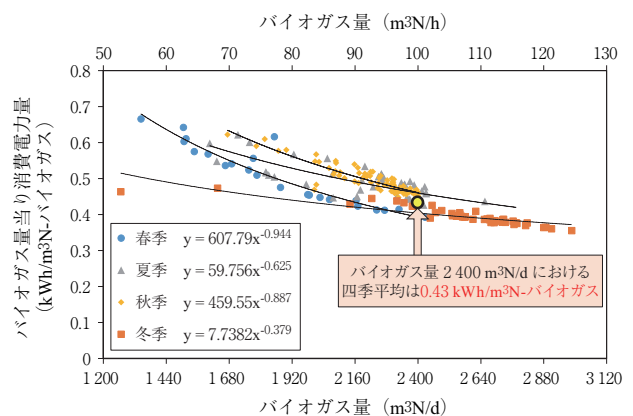


図9 省エネ型バイオガス精製装置の消費電力原単位

表2 バイオガス組成

		2019/8/27		2020/1/31	
消化槽		高濃度消化槽 1 000 m ³	水素混合槽 3.9 m ³	高濃度消化槽 1 000 m ³	水素混合槽 3.9 m ³
吹込み条件		水素吹込みなし	昼間のみ 1.6 NL/min 吹込	水素吹込みなし	常時 2.0 NL/min 吹込
CH ₄	%	56	59	56	51
CO ₂		41	35	40	27
N ₂		0.5	2.2	2.6	1.6
O ₂		<0.1	0.6	0.8	0.6
H ₂		<0.05	2.5	<0.05	21
メタン濃度 (CH ₄ + CO ₂ を100%とする)		58	63	58	65

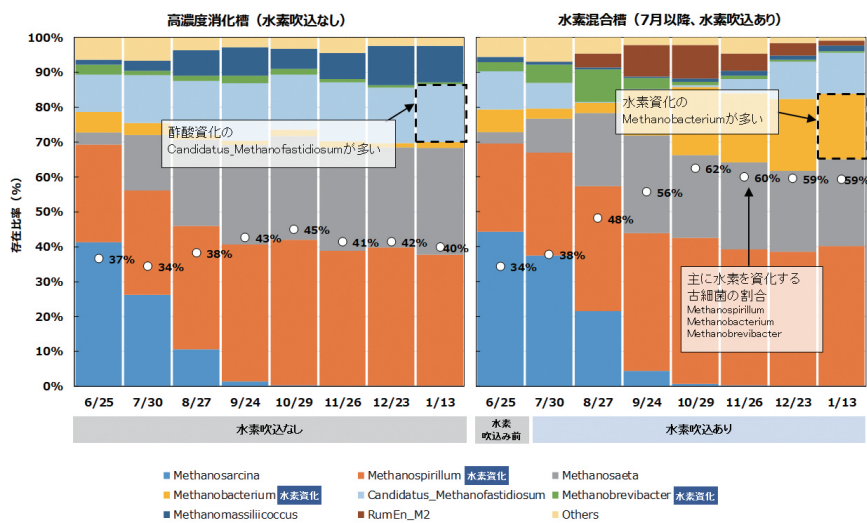


図10 高濃度消化槽および水素混合槽における古細菌存在比率

なお、精製バイオガス中の不純物濃度（硫化水素濃度、シロキサン濃度）については、四季を通じて目標値（硫化水素濃度：0.1 ppm 以下、シロキサン濃度：1 mg/m³N 以下）を満足した。

3.3 小規模水素製造・供給技術

精製ガスを原料として製造した水素ガスの品質（純度および不純物濃度）は、四季を通じて燃料電池車燃料品質規格（ISO14 687-2）を満足した。

また、製造した水素ガスは水素供給装置を用いて実際に市販の燃料電池自動車に充填し、燃料として活用した。

3.4 高濃度メタン生成技術

3.4.1 水素吹込みによるメタン濃度上昇

5/23に水素混合槽（有効容積5 m³／発酵容積3.9 m³）に種汚泥として高濃度消化槽の消化汚泥を投入し、高濃度濃縮汚泥の投入を開始した。さらに7/14より水素混合槽への水素吹込みを開始した。12

月までは昼間のみ1.6 NL/min、2020年1月より常時2 NL/min 吹込んだ（それぞれ0.4、0.5 NL/min/m³-発酵容積）。この吹込み量は、事前に実施したラボ試験にて求めた、メタン濃度を5ポイント上昇させるための吹込み量に基づき設定した。

表2に高濃度消化槽と水素混合槽のバイオガス組成をガスクロマトグラフにて分析した結果を示す。水素混合槽におけるメタンと二酸化炭素の合計に対するメタンの割合が、水素を吹込んでいない高濃度消化槽に対して5～7ポイント程度上昇していることが確認された。

3.4.2 微生物叢解析

水素吹込みによる微生物叢の変化を確認するため、次世代シーケンス解析（NGS 解析）による高濃度消化槽および水素混合槽の消化汚泥中の古細菌の微生物叢解析を行った。図10に古細菌の存在比率を示す。水素混合槽への水素吹込みを開始した7

月以降、両槽の微生物叢に違いが認められた。水素混合槽では *Methanobacterium* 等の水素資化性古細菌の存在比率が高く、高濃度消化槽では *Candidatus_Methanofastidisum* 等の酢酸資化性古細菌の存在比率が高いことがわかった。本結果から、水素吹込みによるメタン濃度の上昇が、水素資化性古細菌の増加による可能性が示唆された。

む す び

高濃度消化技術、省エネ型バイオガス精製技術、小規模水素製造・供給技術、高濃度メタン生成技術により構成される革新的技術の実証試験を行い、以下の結果を得た。

- ・原料汚泥 TS 濃度 8 % の高濃度消化において、設計日最大負荷である $4.4 \text{ kg/m}^3/\text{d}$ 以下の VS 負荷においては、投入 VS 当りのバイオガス発生量 $500 \text{ m}^3\text{N/t-VS}$ 以上を満足することができた。
- ・省エネ型バイオガス精製技術において、大規模処理場向け従来技術に比べ電力原単位を約 30 % 削減することができた。
- ・精製ガスを原料とした小規模水素製造において、燃料電池自動車燃料品質規格を満足する水素ガスが得られた。

・余剰水素ガスの有効利用として実施した高濃度メタン生成技術では、小型の消化槽内に水素を吹込むことによりバイオガス中のメタン濃度が 5～7 ポイント程度上昇することが確認された。

なお、本成果は、当社、日本下水道事業団および富士市からなる共同研究体が受託した平成30年度・令和元年度国土技術政策総合研究所委託研究「高濃度消化・省エネ型バイオガス精製による効率的エネルギー利活用技術実証研究」によるものである。

[参考文献]

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部 水 処 理 研 究 室：<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm>
- 2) 小倉ら：高濃度消化・省エネ型バイオガス精製による効率的エネルギー利活用技術実証研究，第56回下水道研究発表会講演集（2019）
- 3) 小倉ら：高濃度消化・省エネ型バイオガス精製による効率的エネルギー利活用技術実証結果，第57回下水道研究発表会講演集（2020）
- 4) 国土交通省：都道府県別下水汚泥エネルギー化率（平成30年度末），<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/seweraage/content/001320628.pdf>
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No.2 バイオガスを活用した効果的な再生可能エネルギー生産システム導入ガイドライン（案）（2013），p.135