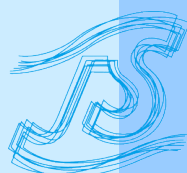


技術開発年次報告書

(令和6年度)



日本下水道事業団 技術開発室

序 文

日本下水道事業団（JS）では、2022（令和 4）年 3 月に『JS 技術開発・活用基本計画 2022』（計画期間：2022～2026 年度）を策定しました。本計画に定める 2 つの基本方針に基づき設定した 5 つの開発課題に対し、JS が固有財源を用いて行う「基礎・固有調査研究」、民間企業などと共同で行う「共同研究」、国などからの委託を受けて行う「受託調査研究」という 3 つの実施スキームを通じて、新たな技術の開発に取り組んできました。

上記の『JS 技術開発・活用基本計画 2022』は、2022 年 3 月に策定された「第 6 次中期経営計画」（計画期間：2022～2026 年度）を踏まえています。少子高齢化・人口減少の進行、脱炭素社会の実現に向けた国家目標の達成、財政状況の逼迫や執行体制の脆弱化など、下水道事業を取り巻く環境が変化する中、新技術の開発および活用を通じて、下水道事業の変革・発展を牽引していくことを目的としています。従来の基本計画で位置付けていた技術開発に係る取組みに加え、新技術導入や基準化といった開発技術の活用に係る取組みも含め、JS における技術開発・活用に関する基本的な方針と具体的な実施内容を定めています。また、2024（令和 6）年 10 月には、技術開発実験センターに隣接する真岡市水処理センター他の維持管理業務の受託を契機に、技術開発実験センターの活用と研究開発活動の拠点化を推進するため、本計画を改定しました。

『JS 技術開発・活用基本計画 2022』の 3 年目である 2024 年度は、開発課題ごとに調査研究を次のとおり実施しました。

- 「Ⅰ-1 2030 年目標に向けた脱炭素化技術の開発」
基礎・固有調査研究 3 件、共同研究 3 件、受託調査研究 1 件
- 「Ⅰ-2 カーボンニュートラル型下水処理システムの開発」
基礎・固有調査研究 1 件、受託調査研究 1 件
- 「Ⅱ-1 下水処理の更なる低コスト化技術の開発」
基礎・固有調査研究 3 件、共同研究 6 件
- 「Ⅱ-2 下水道資源利活用技術の開発」
基礎・固有調査研究 1 件、共同研究 1 件、受託調査研究 1 件
- 「Ⅱ-3 下水処理場における ICT・AI 活用技術の開発」
基礎・固有調査研究 2 件、共同研究 2 件、受託調査研究 1 件

この「技術開発年次報告書」は、JS における技術開発の 1 年間の活動の集大成として作成しました。ご一読いただき、皆様の業務の一助となれば幸いです。また、課題を解決する新しい技術を紹介する JS のホームページ「ニーズに応える新技術」（<https://www.jswa.go.jp/new-technology/>）、毎月お届けしていますメールマガジン「JS 技術開発情報メール」も、ぜひ併せてご覧ください。所期の成果が得られるよう、職員一丸となって調査研究に取り組みますので、JS 技術開発への皆様のご理解・ご協力を引き続きお願い申し上げます。

2025 年 11 月

技術開発室長 三宅晴男

目 次

第 1 章 試験研究調査活動

1. 試験研究調査	
1. 1 令和 6 年度試験研究調査一覧	1
1. 2 令和 6 年度開発課題別の調査研究成果	
I-1 2030 年目標に向けた脱炭素化技術の開発	7
I-2 カーボンニュートラル型下水処理システムの開発	73
II-1 下水処理の更なる低コスト化技術の開発	93
II-2 下水道資源利活用技術の開発	129
II-3 下水処理場における ICT・AI 活用技術の開発	163
2. 共同研究	
2. 1 令和 6 年度共同研究実施状況	205
2. 2 令和 6 年度完了共同研究の概要	208

第 2 章 技術評価委員会活動

1. 技術評価委員会	217
2. 令和 6 年度活動状況	218
3. 技術評価の推移	220

第 3 章 試験研究調査の成果

1. 令和 6 年度研究発表等	227
2. 令和 6 年度雑誌掲載論文等	231
3. 表彰	232
4. 知的財産権	238
5. 新技術の選定・導入	241
5. 1 令和 6 年度末現在選定技術一覧	242

付

1. JS 技術開発・活用基本計画 2022（概要版）	247
2. 技術開発実験センターの概要	255

第 1 章 試験研究調査活動

1. 試験研究調査

1. 1 令和 6 年度試験研究調査一覧

研究費目	試験研究テーマ	研究担当者	頁
試験研究費	I - 1 2030年目標に向けた脱炭素化技術の開発	高田祥暉 村岡正季 他 5 名	7
	I - 2 カーボンニュートラル型下水処理システムの開発	山本明広 熊越瑛 他 4 名	73
	II - 1 下水処理の更なる低コスト化技術の開発	高田祥暉 小柴卓也 他 4 名	93
	II - 2 下水道資源利活用技術の開発	熊越瑛 島田正夫 他 3 名	129
	II - 3 下水処理場における ICT・AI活用技術の開発	山本明広 村岡正季 他 4 名	163
受託調査研究費 (国受託)	省エネ型深槽曝気技術実証研究 (B-DASH)	糸川浩紀 山本明広 小柴卓也	I - 1 に掲載
	ICTの活用による下水道施設広域監視制御システム実証研究 (B-DASH)	井上剛 村岡正季 他 2 名	II - 3 に掲載
	縦型密閉発酵槽による下水汚泥の肥料化、エネルギー化技術実証研究 (B-DASH)	三宅晴男 村岡正季 他 2 名	II - 2 に掲載
	下水汚泥消化ガスのEx-situ型バイオメタネーション反応技術に関する研究 (B-DASH FS調査)	三宅晴男 村岡正季 他 3 名	I - 2 に掲載

1. 2 令和6年度開発課題別の調査研究成果

I－1 2030 年目標に向けた脱炭素化技術の開発

I-1 2030 年目標に向けた脱炭素化技術の開発

高田祥暉、村岡正季、山本明広、熊越瑛、島田正夫、糸川浩紀、三宅晴男

1. 開発課題の概要

本開発課題では、「地球温暖化対策計画」（2021 年 10 月 22 日閣議決定）における 2030 年度の温室効果ガス（GHG）排出量削減の中期目標達成に向けて、速やかに導入できる脱炭素化技術*の開発や既存技術の改善・改良等を実施する。

1.1 背景および目的

我が国は 2050 年カーボンニュートラル実現に向けて、2030 年度の GHG 排出量を 2013 年度比で 46%削減（以下、「2030 年目標」と表記）、更に 50%削減の高みに向けて挑戦を続けることを表明した。これを受けて下水道分野においても、省エネ・創エネ対策の推進、下水污泥焼却の高度化等により、2013 年度比で 208 万 t-CO₂を削減することとした¹⁾。また、2022 年 3 月にとりまとめられた「下水道政策研究委員会 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書」²⁾では、2030 年目標の達成に向けて、「脱炭素化に資する新技術を総動員して計画的に取り組んでいくこと」を求めている。この中では、JS をはじめとする公的機関が強化すべき脱炭素化に向けた取り組みとして、「2030 年までに実装可能な技術開発」や、「下水道管理者の取組に対する案件形成から施設整備までの支援」等が盛り込まれている。

そこで本開発課題では、2030 年目標の達成に向けた脱炭素化技術の導入加速を目的に、速やかに実装可能な新技術の開発、既存の脱炭素化技術の改良・改善、導入された新技術の事後評価調査、案件形成支援に活用する技術の調査を実施する。

1.2 開発項目

本開発課題では、以下の 4 つの開発項目について技術開発を行う。

（1）水処理省エネ化技術

下水処理場における GHG 排出量の中でも水処理に係る消費電力の寄与が大きいことから、水処理の更なる省エネ化が必要であるが、小規模処理場を中心に現状の技術ラインナップは十分とは言えない。そこで、水処理の更なる省エネ化を可能とする「水処理省エネ化技術」について、「JS 技術開発・活用基本計画 2022」（以下、「本計画」と略記）の期間内（2022～2026 年度）の実用化を目標に、新たな技術に関する調査研究および開発を行う。特に、小規模処理場に適用できる水処理省エネ化技術等の実用化に向けて、開発動向調査や実態調査を行うと共に、公募型共同研究を新たに実施する。

* 「JS 技術開発・活用基本計画 2022」では、「脱炭素化技術」を「省エネルギー化や創エネルギー、その他の GHG 排出量削減策、再生可能エネルギー利用など、下水処理の脱炭素化に資する技術」と定義している。

① 開発動向調査・実態調査

2022 年度からの 2 か年で国内外の文献調査やオキシデーションディッチ（OD）法の実態調査を実施し、水処理省エネ化技術の開発の方向性を見定めると共に、2024 年度に水処理省エネ化技術の公募型共同研究を開始する際の基礎資料とする。

② 小規模省エネ化技術の開発・実証

2021 年度に開始した共同研究「回転繊維ユニット RBC を用いた下水処理技術の開発」により、OD 法の省エネ化・処理能力増強を可能とする新技術の実証・確立を進める。また、2024 年度には水処理省エネ化技術を対象とした新たな共同研究の公募を開始する。

③ アナモックス併用高度処理の基礎実験

アナモックス反応を下水の高度処理に活用する可能性を検証するために、過年度から引き続きラボスケールの基礎実験を行うと共に、JS 技術開発実験センターにおいて実下水を用いたベンチプラント実験を行う。

④ 省エネ型深槽曝気技術の実規模実証（B-DASH）

2022 年度に採択された B-DASH プロジェクト「省エネ型深槽曝気技術に関する実証事業」を実施する。

⑤ 水処理省エネ化技術の体系化等

①～④の成果を統合し、技術ラインナップの体系化や導入検討マニュアルの作成を図る。

（2）バイオガス活用技術

GHG 排出量削減に向け、嫌気性消化により得られるバイオガスの活用が重要な役割を担うと考えられるが、現状では下水汚泥のバイオガスとしての利用割合は 16%程度³⁾にとどまっている。そこで、効率的なバイオガスの創出や未利用バイオガスの活用、小規模施設向けのバイオガス活用を可能とする「バイオガス活用技術」について、本計画期間内の実用化と実施への導入を目標に、新たな技術の調査研究を行う。更に、新たな公募型共同研究による開発・実用化を進めると共に、開発動向調査・実態調査や基礎実験の実施によりバイオガス活用に関する基礎的知見の蓄積を図る。

① 開発動向調査・実態調査

2023～2025 年度において継続的に、下水道におけるバイオガス活用技術に関する文献調査や実態調査を実施する。併せて、効率的なバイオガス創出に関する実態調査や下水道分野以外のバイオガス活用状況の調査等を実施する。

② バイオガス創出に係る基礎実験

JS 技術開発実験センターにおいて、高温消化の基礎実験を実施するとともに、嫌気性消化施設の導入検討に資する基礎実験等を実施する。

③ バイオガス創出・活用技術の開発・実証

2022～2023 年度にかけて公募した共同研究「脱炭素社会実現に向けたバイオガス活用技術および嫌気性消化技術の開発」により、消化効率の向上、バイオガスのポテンシャル活用、低コスト化に資する新技術の開発を行う。

④ バイオガス創出・活用技術の体系化

①～③を踏まえて、技術ラインナップの体系化や導入検討マニュアルの作成を図る。

（3）事後評価調査・技術評価（脱炭素化技術）

GHG 排出量を削減するためには脱炭素化技術の実施設への導入促進が必要である。そこで、実施設への導入実績を有する脱炭素化技術を対象に、性能や機能等に関する事後評価調査を実施する。調査の結果に基づき基準化(JS 内部基準への反映)することで更なる普及促進を図る。

① JS 新技術の事後評価調査・技術評価（脱炭素化技術）

以下の 4 技術を対象に、導入実績を有する新技術の事後評価調査を行う。また、鋼板製消化タンクに係る事後評価調査の一環として、嫌気性消化技術全般に係る運転管理について実態調査を実施する。

- ・ OD 法における二点 DO 制御システム
- ・ 次世代型焼却炉システム*
- ・ 鋼板製消化タンク†
- ・ アンモニア計を利用した曝気風量制御技術

（4）脱炭素化推進方策

地方公共団体による脱炭素化事業に対して JS が案件形成の技術的な支援（案件形成支援）を効果的に行うためには、対象となる下水処理場に導入可能な技術の抽出と、その効果に対する定量的な評価等を的確に実施するための基本的な知見が必要である。そこで、JS が脱炭素化事業の案件形成支援を行うための知見の蓄積を目的に、脱炭素化に資する技術の実態調査や体系的整理を行うと共に、案件形成支援を効率的に実施していくための各技術の導入効果の推定手法を構築する。また、これらの知見を活用し、地方公共団体に対する案件形成支援を実施する。

* JS の選定新技術 8 技術を示す。

過給機を用いた流動床炉向け省電力送風装置（流動タービン）、多層燃焼流動炉、過給式流動燃焼システム、高効率二段燃焼汚泥焼却炉、気泡式高効率二段焼却炉、階段炉による電力創造システム、多段最適燃焼制御付気泡流動炉、二段燃焼式旋回流動炉

† JS の選定新技術 5 技術を示す。

下部コーン型鋼板製消化タンク、高濃度対応型ろ過濃縮・中温消化システム、4 分割ピット式鋼板製消化タンク、噴射ノズル式鋼板製消化タンク、パッケージ型鋼板製消化タンク

① 脱炭素化性能指標の実態等に関する調査

下水処理場で使用されている機器・装置の現状の技術水準を把握するため、エネルギー削減量や GHG 排出削減量等の脱炭素化性能に関する実態調査を実施する。

② 脱炭素化技術の体系化

下水道分野の脱炭素化を推進するため、脱炭素化に資する技術を洗い出し、体系的に整理すると共に、各技術の導入効果を推定して簡易に評価する手法を確立する。

③ 脱炭素案件形成支援業務

①・②を活用した JS の業務メニューの拡充を目標に、下水道分野のカーボンニュートラル実現を目指す地方公共団体を対象に、国土交通省の委託業務を通じて案件形成支援を実施する。

1.3 本年度の実施内容

本年度は、1.2 節に記載の開発項目のうち、以下の 2 項目を実施した。

（1）水処理省エネ化技術

- ② 小規模省エネ化技術の開発・実証（2.1 節）
- ③ アナモックス併用高度処理の基礎実験（2.2 節）
- ④ 省エネ型深槽曝気技術の実規模実証（B-DASH）（2.3 節）

（2）バイオガス活用技術

- ① 開発動向調査・実態調査（3.1 節）
- ② バイオガス創出に係る基礎実験（3.2 節）
- ③ バイオガス創出・活用技術の開発・実証（3.3 節）

2. 水処理省エネ化技術

2. 1 小規模省エネ化技術の開発・実証

（1）検討の概要

1.2 節で述べた通り、現状では、オキシデーションディッチ（OD）法に代表される小規模下水処理場を対象とした水処理省エネ化技術が少なく、ラインナップの充実を図る必要がある。本検討では、2030 年目標の達成に向けて、特に小規模下水処理場向けの水処理省エネ化技術を中心に、民間企業との共同研究等により早期の実用化に向けた開発・実証を行う。

過年度は、東芝インフラシステムズ株式会社（現・株式会社東芝）との共同研究（2021 年 8 月～2024 年 3 月）において、OD 法の省エネ化や処理能力増強を可能とする「回転繊維ユニット RBC を用いた下水処理技術」について、実規模での実証実験を実施し共同研究を完了した。なお、本共同研究において OD 法の前処理設備として十分な省エネ化および処理能力増強の効果が認められたことから、同技術は「回転繊維体を用いた OD 法向け前処理技術」として 2025 年 3 月に JS の新技術 I 類に選定された。

本年度は、「新たな水処理省エネ化技術の開発」として、(a)OD 法の省エネ化を可能とする技術、(b)その他の活性汚泥法（標準活性汚泥法、高度処理法）の省エネ化を可能とする技術、のいずれかに該当する技術を開発する共同研究の公募を開始した。

2.2 アナモックス併用高度処理の基礎実験

（1）検討の概要

本検討では、アナモックス反応を利用して省エネ化等を図る新たな窒素除去プロセスについて、実現可能性を検証するための基礎実験を行う。アナモックス反応を利用した排水処理プロセス（アナモックスプロセス）は、下水処理分野では、窒素濃度および水温が高い嫌気性消化汚泥の脱水分離液を対象とした返流水処理技術として実用化され⁴⁾、国内でも実施が稼働している。一方、これよりも窒素濃度および水温が大幅に低い下水の高度処理への同反応の活用についても活発に研究・開発が行われており^{5)・7)}、本検討もこのような試みの一環として位置付けられる。

具体的には、循環式硝化脱窒法（MLE*）の反応タンクに対して、微好気槽による一槽式アナモックス処理を組み込むことで付加的な窒素除去機能を付与する処理フロー（図 2-1；以下「MLE+アナモックス法」と略記）を想定し、2019 年度以降、ラボ実験等の基礎的な検討を継続的に実施している^{8)・11)}。本処理フローにより、従来の窒素除去法と比較して、曝気風量および硝化液循環量の低減による省エネ化・低コスト化に加えて、窒素除去性能の向上、余剰汚泥発生量の削減といった効果が期待できる。

過年度は、ラボ実験において、(a)微好気槽で使用するアナモックス担体（アナモックス細菌を保持する浮遊担体）の比表面積が大きい方が同槽における窒素の除去速度や除去率の向上に有利である、(b)MLE+アナモックス法の連続処理において活性汚泥が共存することが微好気槽での窒素除去に顕著な悪影響を与えない、等を示す結果を得た。また、前年度には $\text{NH}_4\text{-N}$ のみを含む排水を用いたアナモックス汚泥の新たな大量培養方法に関するラボ実験を開始し、培養時期に応じて原水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を切り替えることで実用的な窒素除去速度を持つ担体を培養できる可能性を示した。更に、MLE+アナモックス法のベンチ規模の実験プラントについて、実下水（初沈越流水）を原水とした運転を開始した。

本年度は、ラボ実験として、微好気槽における環境因子（水温、MLSS 濃度）や基質濃度（ T-N 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 C/N 比）がアナモックス担体の活性に及ぼす影響を詳細に調べる回分実験を新たに実施すると共に、アナモックス汚泥の新たな大量培養方法に関する検討を前年度から継続した。加えて、前年度に立ち上げたベンチプラントを用いて、実下水を原水とした連続処理実験を行った。



図 2-1 MLE+アナモックス法の処理フロー

* Modified Ludzack-Ettinger。

（２）検討方法

① 環境因子や基質濃度がアナモックス担体の活性に及ぼす影響の確認

微好気槽における一槽式アナモックス処理に関して、これまで、水温、原水の有機物や窒素の濃度、硝化液循環比（内部循環比）等の処理条件が窒素除去性能に及ぼす影響を調べるラボ実験を実施してきた。一方、アナモックス担体の活性（窒素除去速度）を推定する手法として「マノメトリック手法」を前年度に新たに見出したことから、本年度はこれを活用し、環境因子（水温、MLSS 濃度）および基質濃度（T-N、NO₂-N、C/N 比）がアナモックス担体の活性に及ぼす影響を改めて調べる回分実験を行った（表 2-1）。使用したアナモックス担体は、アイオン社製の 10mm 角 PVA* スポンジ担体を使用し、下水処理場の返送汚泥から無機合成排水を用いて集積培養したものである。

表 2-1 回分実験における環境因子および初期基質濃度の設定値

検討対象	設定値	備考
水温(°C)	15、20、25、30、35	T-N: 105mgN/L (NO ₂ -N/NH ₄ -N 比: 1.3)
MLSS 濃度 (mg/L)	0、500、1,000、2,000	T-N: 231mgN/L (NO ₂ -N/NH ₄ -N 比: 0.47※)、水温: 25°C
T-N (NH ₄ -N+NO ₂ -N) 濃度 (mgN/L)	18、35、70、105、140	NO ₂ -N/NH ₄ -N 比: 1.3 (固定)、 水温: 25°C
NO ₂ -N 濃度 (mgN/L)	30、60、120、240、480	NH ₄ -N: 40mgN/L、水温: 25°C
C/N 比	0、0.2、0.4、1.0、1.5	炭素源 (C) として酢酸ナトリウムを使用、 T-N: 150mgN/L (固定; NO ₂ -N/NH ₄ -N 比: 1.3)

※活性汚泥 (MLSS) が存在することに伴う NH₄-N の低減を考慮して NH₄-N 濃度を高めに設定した。

ここで、マノメトリック手法とは、密閉容器内で供試担体（アナモックス担体）を培養した際の気相の圧力の変化から N₂ ガス（アナモックス反応の生成物）の生成速度を推定することで、同担体の活性（最大窒素除去速度）を推定する手法である¹²⁾。気相の圧力を計測するために、市販のボトルキャップ型の圧力センサー（OxiTop Multi3620、WTW 社製）†を使用している。

* PVA：ポリビニルアルコール。

† 本製品は元来、好気条件での BOD の測定用に販売されているものであるが、本手法ではこれを無酸素条件での N₂ ガス生成量の推定用に転用している。

本手法を用いた回分実験では、アナモックス担体 40 粒を培養容器（有効容積約 600mL のデュラン瓶）に入れ、気相部の容積が 100mL になるまで原水を注ぎ入れた後に気相部を N₂ ガスで置換し、圧力センサーを瓶口に取り付けて密閉した。その後、3～4d の期間、恒温槽内で培養を行い、瓶内気相の圧力の変化を計測した。同期間内の圧力の最大上昇速度から、気体の状態方程式を用いて N₂ ガスの最大生成速度を算定し、これを担体容積当りの窒素除去速度に換算したものをアナモックス担体の活性と見なした（次式）*。

$$k_{N2}=k_P \times V_g / (R \times T)$$

$$K_{DN}=k_{N2} \times 28 \times 24 \times 10^6 / X_a$$

k_{N2} ：最大 N₂ ガス生成速度（molN₂/h）、 k_P ：最大圧力上昇速度（Pa/h）、 V_g ：気相の容積（L）、 R ：気体定数（8314J/(mol・K)）、 T ：温度（K）、 K_{DN} ：アナモックス担体の活性（最大窒素除去速度；kgN/(m³・担体・d)）、 X_a ：担体量（mL）である。

② アナモックス汚泥の新たな大量培養方法の検討

MLE+アナモックス法に限らずアナモックスプロセスでは一般に、増殖速度が極めて小さいアナモックス細菌を含む汚泥（アナモックス汚泥）を種汚泥として如何に大量に準備できるかが、当初の実装段階における課題となる。アナモックス汚泥の培養には NH₄-N と NO₂-N の両者を含む合成基質を使用するのが通例であるが、下水処理場内で発生する、NH₄-N のみを主要な窒素成分とし NO₂-N を含まない排水を使用した培養が可能になれば、種汚泥の供給に係るコストを大幅に低減可能と考えられる。そこで、汚泥処理返流水等の高濃度の NH₄-N を含む排水を使用して NO₂-N を添加せずにアナモックス汚泥を大量培養する新規の手法の可能性について、前年度に引き続き基礎的な実験を行った。

前年度の実験では、窒素除去速度の変化に応じて原水の NH₄-N 濃度を切り替えることが有効である可能性を見出したものの、窒素除去速度の変動が大きく、その要因として槽内での部分亜硝酸化による NO₂-N の供給が安定しなかった可能性が考えられた。そこで本年度は、少量の NO₂-N を原水に加えることで培養を安定化させる可能性について検討した。

前年度と同一の容積 80L・上向流式の一槽式アナモックスの反応槽を培養槽とし、原水として任意の窒素濃度に調整した無機合成排水を連続的に供給して窒素除去速度（kgN/(m³・槽容積・d)：槽容積当たりの NH₄-N の除去速度）の変化を追跡した。実験開始時に、新品の PVA スポンジ担体（アイオン社製、10mm 角）を嵩充填率 50%で反応槽内に充填した状態で、実下水処理場の返送汚泥から集積培養したアナモックス汚泥を投入し、以降、原水を連続的に供給した。原水の NH₄-N 濃度を 105～131mg/L、反応槽の HRT を 56～93hr とした条件で培養を開始し、4 日目から NO₂-N/NH₄-N 比が概ね 0.3～0.4 の範囲となるように原水に NO₂-N を加えた。21 日目からは、更に NO₂-N/NH₄-N 比が概ね 0.6～0.8 となるように原水の NO₂-N 量を増加させ、計 50 日間の培養実験を行った。本期間を通して、反応槽内で担体を流動させると共に

* 本手法で推定しているのは N₂ ガスの生成速度である。このため、アナモックス反応の速度（NH₄-N+NO₂-N の減少速度）を推定しているわけではなく、窒素（総無機性窒素）の除去速度を推定していることになる。また、同様の理由から、従属栄養型の脱窒が進行する場合には、これも含めた窒素除去速度が推定されることになるが、N₂ ガス生成速度の時間変化曲線から、アナモックス反応と従属栄養型脱窒それぞれによる窒素除去速度を別箇に推定する方法についても検討中である¹²⁾（2024 年度時点では検討途中であるため本報の掲載対象とはしない）。

液面からの酸素供給を促進するため、インペラ式攪拌装置により槽内を常時 120rpm で攪拌した。

③ ベンチプラントによる連続処理実験

JS 技術開発実験センター内に設置したベンチ規模の実験プラント（反応槽の総有効容量 450L×2 系列；図 2－2）を用いて、実下水（初沈越流水）を原水とした連続処理実験を行った。2 系列のプラントのうち、No.2 系列を MLE＋アナモックス法（微好気槽にアナモックス担体を投入）の実験系とし、No.1 系列は従来の MLE で運転（微好気槽を硝化槽として運転）する対照系とした。

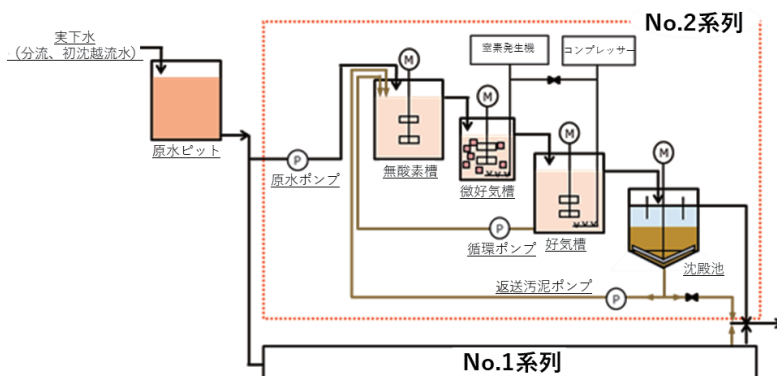


図 2－2 MLE＋アナモックス法のベンチプラントのフロー

前年度に本プラントを立上げた後、装置的な改良を加えた上で、2024 年 11 月に改めて種汚泥（下水処理場の返送汚泥）を投入し、両系列を MLE とする運転を開始した。両系列の処理状態が安定した後、実験系（No.2 系列）において、2025 年 1 月 7 日に微好気槽へアナモックス担体 20L（微好気槽の有効容量 90L に対する添加率として約 22%）を投入し、MLE＋アナモックス法の運転を開始した。一方、対照系（No.1 系列）では、それまで無酸素槽として運用してきた微好気槽を同日に好気槽に切り替えた上で、MLE としての運転を継続した。以降、微好気槽の運用方法（アナモックス担体の有無を含む）を除き両系列の条件が同等となるように連続運転を実施した。

両系列の原水量は当初は 460L/d（反応槽の総 HRT:23.8hr）とし、2025 年 2 月 5 日に 560L/d（同 HRT:19.3hr）に増加させ、以降、同年 3 月 13 日まで同水量にて運転を継続した。また、これらの期間を通して、両系列共に汚泥返送比を 0.7、総合循環比を 1.7 で固定とした。2025 年 1 月 7 日から実験終了の 3 月 13 日における反応槽の水温（微好気槽にて計測）は、両系列共に 18～20℃で推移した（ヒーターによる温度調整を実施）。反応槽の MLSS 濃度については、実験系へアナモックス担体を投入した 2025 年 1 月 7 日以前には、実験系、対照系で各々平均 1,250、1,030mg/L であったのに対し、同日以降は各々 2,130～2,150、1,450～1,680mg/L と実験系の方が明らかに高くなった。

本ベンチプラントの運転期間中、週 2 回の頻度で、流入水、無酸素槽、微好気槽、好気槽を対象に BOD、COD、各態窒素の測定を行った。

（３）検討結果

① 環境因子や基質濃度がアナモックス担体の活性に及ぼす影響の確認

１）水温の影響

マノメトリック手法による回分実験において、水温を 15～35℃の範囲で設定した際のアナモックス担体の活性（最大窒素除去速度；各水温について 2～3 回測定）の推定結果を図 2－3 に示す。アナモックス担体の活性は、水温が低いほど低下する傾向が明らかであり、15℃では平均 0.28kgN/(m³・担体・d)と 30℃における活性(平均 0.82kgN/(m³・担体・d))の 34%となった。ここで、同活性の温度依存性を定量的に確認するため、アレニウスプロットから活性化エネルギー*を推定すると 52kJ/mol となった（35℃における活性は測定値がばらついたため推定から除外）。本値は、同程度の水温範囲において推定されたアナモックス反応の活性化エネルギーの文献値（51～93kJ/mol^{13)・15)}）の範囲と比較しても小さい水準にあり、低水温域での処理が可能なアナモックス担体が形成されていたと考えられた。

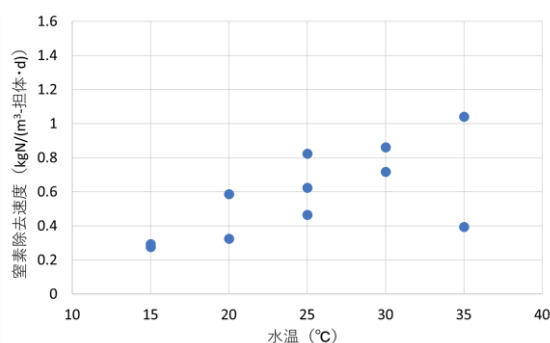


図 2－3 水温とアナモックス担体の活性の関係

２）MLSS 濃度の影響

培養開始時に、③で示すベンチプラントから採取した活性汚泥を MLSS 濃度換算で 500、1,000、2,000mg/L となるように添加してアナモックス担体の活性を推定した結果を表 2－2 に示す（活性汚泥を添加しない MLSS 濃度＝0mg/L での結果を含む）。アナモックス担体の活性は、MLSS 濃度が 0、500mg/L ではそれぞれ 0.89、0.86kgN/(m³・担体・d)と同等であったが、1,000mg/L で 1.32kgN/(m³・担体・d)、2,000mg/L で 2.71kgN/(m³・担体・d)と MLSS 濃度が高い条件では顕著に上昇した。ここで、マノメトリック手法では従属栄養型の脱窒反応が同時に進行した場合にこれも活性として推定されてしまうことから、培養前後の S・T・N 濃度の差から推定される窒素除去率と、NH₄-N 濃度の差から推定されるアナモックス反応による窒素除去率とを比較したところ、MLSS 濃度が 500、1,000mg/L の条件では両者が概ね一致しており、窒素除去の主体がアナモックス反応であると考えられた。一方、MLSS 濃度が 2,000mg/L の条件では、アナモックス反応によると考えられる窒素除去率が 0%と推定され、測定された活性に対しては従属栄養型脱窒が卓越していたものと考えられた。このため、MLSS 濃度が 2,000mg/L 程度と高い条件でアナモックス反応を安定的に進行させるためには、担体の添加率など処理条

* 化学反応に必要な最小のエネルギーを指し、これが小さいほど反応に必要なエネルギーが小さく低温でも反応が進行しやすい。活性化エネルギーは、アレニウスプロットの近似直線の傾きから求めることができる。

件の詳細な検討が必要であると考えられた。

表 2-2 初期 MLSS 濃度を変えた際のアナモックス担体の活性

MLSS 濃度 (mg/L)	窒素除去速度 (kgN/(m ³ -担体・d))
0	0.89
500	0.86
1,000	1.32
2,000	2.71

3) T-N 濃度の影響

由来が異なる 2 種類のアナモックス担体 (担体 A、担体 B) を使用し、初期の T-N 濃度 (NH₄-N+NO₂-N 濃度) を 18~140mg/L (NO₂-N/NH₄-N 比=1.3 で固定) の範囲で変えた際のアナモックス担体の活性の推定結果を表 2-3 に示す。ここで、担体 A は培養中の装置より採取したもの (以下、「培養担体」と表記)、担体 B は培養後に約 2 年半にわたり冷蔵庫で保管していたもの (以下、「冷蔵保管担体」と表記) である。

担体 A では初期 T-N 濃度が増加するほど活性が上昇した。一方、担体 B では初期 T-N 濃度が低い条件での活性が担体 A より小さく、さらに初期 T-N 濃度が 105mg/L 以上の条件では活性が 0 となりアナモックス反応が進行しなかった。T-N 濃度が 105mg/L を超えるような状態は、下水処理場では返流水処理を除いて想定されないものの、担体 B のように活性が小さい担体では T-N 濃度の影響を受けやすいと考えられた。本結果は、担体が持つ活性の大小がアナモックス反応の進行に影響することを示すもので、アナモックス反応による窒素除去を安定して行うためには、担体の活性を高い状態で維持する必要があると考えられた。

表 2-3 初期 T-N 濃度を変えた際のアナモックス担体の活性

T-N 濃度 (mg/L)	窒素除去速度 (kgN/(m ³ -担体・d))	
	担体 A (培養担体)	担体 B (冷蔵保管担体)
18	0.111	0.058
35	0.381	0.277
70	0.646	0.217
105	0.711	0
140	0.976	0

4) NO₂-N 濃度の影響

初期の NO₂-N 濃度を 30~480mg/L の範囲で変えた際のアナモックス担体の活性の推定結果を表 2-4 に示す (NH₄-N 濃度は 40mg/L で固定)。本実験は、上述の 3) と同様に 2 種類の担体 (担体 A、B) を用いて行った。培養中で活性が高い担体 A では初期 NO₂-N 濃度が 100mg/L を超える条件でもアナモックス活性が低下しなかったが、活性が低い担体 B では初期 NO₂-N 濃度が 120mg/L 以上で活性が 0 となった。NO₂-N はアナモックス反応に対して不可逆的な阻害作用を持つことが知られているが、その影響は担体が有するアナモックス活性により大きく異なることが示され、上述の T-N 濃度の影響についても NO₂-N の影響が強いものと推定された。

表 2-4 初期 NO₂-N 濃度を変えた際のアナモックス担体の活性

NO ₂ -N 濃度 (mg/L)	窒素除去速度 (kgN/(m ³ -担体・d))	
	担体 A (培養担体)	担体 B (冷蔵保管担体)
30	0.624	0.353
60	0.782	0.277
120	データ欠損	0
240	0.735	0
480	0.774	0

5) C/N 比の影響

基質の T-N 濃度を 150mg/L (NO₂-N/NH₄-N 比=1.3) で固定した上で、酢酸ナトリウムを添加することにより初期の C/N 比を 0~1.5 の範囲で変えた際のアナモックス担体の活性の推定結果を表 2-5 に示す。アナモックス担体の活性は、C/N 比が 0 の条件で 1.19kgN/(m³-担体・d)、0.2 の条件で 2.05kgN/(m³-担体・d)、0.4 以上の条件で 3.01~3.11kgN/(m³-担体・d)の範囲となった。C/N 比が低い条件において同比が増加するほど活性が高くなる傾向が明らかであるが、これに対しては、2)の MLSS 濃度の影響と同様に、従属栄養型脱窒に起因する可能性が高いと考えられた(ただし、2)に記したような培養前後の水質の変化に基づく検証は未実施)。

表 2-5 初期 C/N 比を変えた際のアナモックス担体の活性

C/N 比	窒素除去速度 (kgN/(m ³ -担体・d))
0	1.19
0.2	2.05
0.4	3.01
1.0	3.01
1.5	3.11

② アナモックス汚泥の新たな大量培養方法の検討

アナモックス汚泥の培養実験における培養開始後の原水の NO₂-N/NH₄-N 比と窒素除去速度の推移を図 2-4 に示す。NO₂-N/NH₄-N 比を 0.3~0.4 とした期間では、同比が高いほど窒素除去速度が上昇する傾向が見られた。同比を 0.6~0.8 に上げると直ちに窒素除去速度が上昇し、以降の期間では同比の変動に関わらず窒素除去速度は 0.02~0.03kgN/(m³-槽容積・d)の範囲で安定した。

このように、アナモックス反応の化学両論 (NO₂-N/NH₄-N=1.32) よりも大幅に小さい量の NO₂-N を添加することで、前年度よりも大幅に安定した窒素除去速度を得ることができた。ただし、同比を 0.3~0.4 とした条件では窒素除去速度に対して NO₂-N が制限因子となっていた点は明らかである。本実験では、インペラ式攪拌装置により 120rpm で反応槽内の攪拌を行うことで、水面からの酸素溶解により NH₄-N の部分亜硝酸化を進行させることを意図したが、本条件は必ずしも最適化されたものではない。反応槽への酸素供給条件を見直すことで、NO₂-N 添加量の低減、更には基質として NH₄-N のみを用いた大量培養を可能とする余地があることから、今後も検討を継続する。

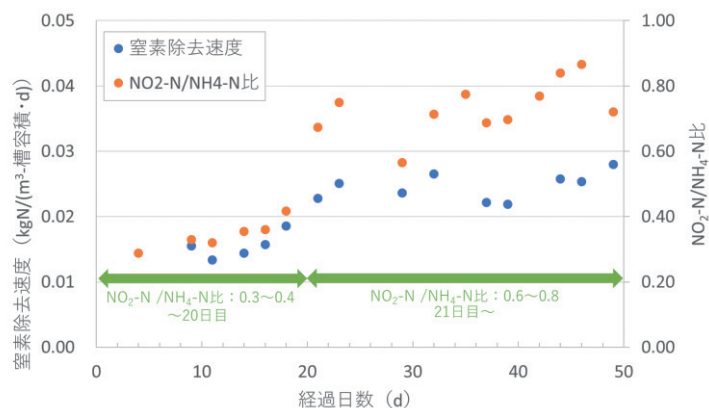


図2-4 アナモックス汚泥の培養実験における原水の
NO₂-N/NH₄-N 比と窒素除去速度の推移

③ ベンチプラントによる連続処理実験

ベンチプラントにおける 2024 年 11 月～2025 年 3 月までの両系列の窒素除去率の推移を図 2-5 に示す。実験系（No.2 系列）にアナモックス担体を添加した 2025 年 1 月 7 日の前後いずれの期間においても両系列の窒素除去率に明確な違いは見られず、両系列の流入水量を増加させた 2025 年 2 月 5 日以降の期間を含めて、実験系を MLE+アナモックス法の処理フローに切り替えたことによる窒素除去率の向上効果は認められなかった。両系列間に明確な違いが見られなかった要因として、内部循環比等の運転条件を両系列で同一とした点、加えて反応タンクの総 HRT が 19hr 以上と低負荷の条件で運転した点が想定されるため、今後、実験系における MLE+アナモックス法としての運転条件を最適化していく必要がある。加えて、微好気槽の攪拌方法や DO 濃度等、同槽の運転条件についても改良が必要と考えられる。

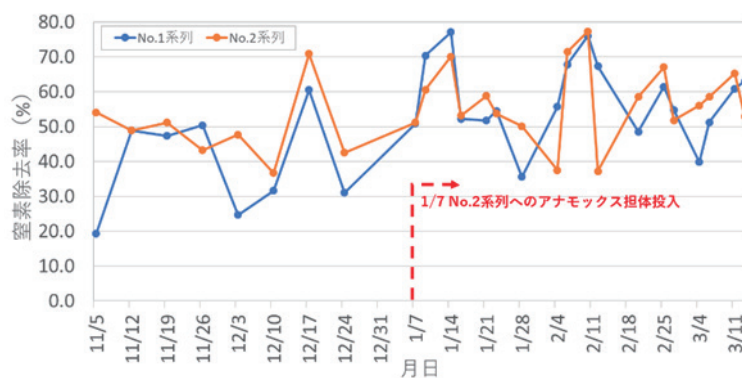


図2-5 ベンチプラントにおける両系列の窒素除去率の推移

（４）まとめ

ラボ実験において、マノメトリック手法を活用して環境因子や流入基質濃度がアナモックス担体の活性に及ぼす影響を調べると共に、過年度から引き続きアナモックス担体の新たな大量培養方法を検討した。加えて、MLE＋アナモックス法のベンチプラントを用いた実下水の連続処理実験を進めた。

- マノメトリック手法を活用した回分実験により、(a)水温が低いほどアナモックス担体の活性は低下するものの活性化エネルギーの推定結果は文献値の中でも小さい水準にある、(b)MLSS 濃度や C/N 比が高い条件では従属栄養型脱窒が卓越する可能性がある、(c)高濃度の T-N や $\text{NO}_2\text{-N}$ によりアナモックス担体の活性が受ける影響の度合いは担体の培養状態により大きく異なる可能性がある等の知見が得られ、アナモックス担体の活性を簡易に推定する手法としてマノメトリック手法が一定の有用性を持つことを確認した。
- 無機合成基質および担体を用いたアナモックス汚泥の培養実験において、アナモックス反応の化学量論よりも大幅に小さい 0.6～0.8 程度の $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比で $\text{NO}_2\text{-N}$ を添加することにより安定した窒素除去速度を得ることができた。今後、反応槽内の攪拌条件（酸素供給条件）を見直すことで、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 添加量の低減、更には $\text{NH}_4\text{-N}$ のみを用いた大量培養へと至る見通しが得られた。
- ベンチ規模の MLE＋アナモックス法の実験プラントを用いて実下水（初沈越流水）の連続処理実験を行ったが、実験系を同フローへ変更した後の 65 日の期間、対照系（従来の循環式硝化脱窒法）との間に窒素除去性能の明確な差は見られなかった。比較実験としての流入負荷の条件や、実証系における MLE＋アナモックス法としての運転条件等を改善する必要があると考えられた。

次年度は、MLE＋アナモックス法のベンチプラントを用いた連続処理実験について、ラボ実験で得た知見等も踏まえて実験条件を見直した上で、より長期間の運転を行い、本処理法の実用可能性について引き続き検証する。また、アナモックス汚泥の新たな大量培養方法についても、継続してラボ実験を行う。

2.3 省エネ型深槽曝気技術の実規模実証(B-DASH)

(1) 検討の概要

「省エネ型深槽曝気技術」¹⁶⁾は、深槽式反応タンク*において、メンブレンパネル式散気装置を底部に設置する「深槽全面エアレーション」を行うことで酸素移動効率を従来よりも大幅に高め、曝気風量を低減して送風機動力を削減（省エネ化）すると共に、建設費・維持管理費の縮減、日常点検等の労力軽減や維持管理性の向上を可能とする技術である。本検討は、下水処理場において本技術の実規模実証実験を行うことで性能等を確認し技術的な確立を図るもので、国土交通省が実施する B-DASH プロジェクトの実規模実証「省エネ型深槽曝気技術に関する実証事業」として 2022 年度に採択され、前澤工業(株)、JS、埼玉県の 3 者からなる共同研究体により、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究（実証研究）として実施する。なお、B-DASH プロジェクトとしての実証研究は 2022～2024 年度の 3 ヶ年度で実施し、以後は共同研究体による自主研究として研究を継続する。

過年度は、実証フィールドに実証施設を設置して長期実証実験を開始し、本技術による消費電力量の削減効果や処理性能に係るデータの取得を進めた¹⁷⁾。加えて、本技術における反応タンク内の DO 濃度分布や酸素移動効率の測定¹⁸⁾、深槽曝気に伴う活性汚泥混合液中の溶存窒素（N₂）ガス濃度の測定方法の検討¹⁹⁾、反応タンクにおける一酸化二窒素（N₂O）排出量の調査等の各種検討を実施した。

本年度は、過年度から引き続き長期実証実験や個別の調査等によりデータを取得し、実証研究として設定した 3 つの評価項目（消費電力量および温室効果ガス排出量の削減効果、コストの削減効果、実証技術の性能）について目標の達成状況を検証した。加えて、前年度に見出した活性汚泥混合液中の飽和溶存 N₂ ガス濃度の測定方法を用いた脱気操作（後述）の効果検証、散気装置の酸素移動効率の測定、N₂O 排出量の調査等の検討を行った。

(2) 検討方法

① 省エネ型深槽曝気技術

本技術は、高水深での曝気を可能とする高圧対応型送風機（容積式スクリュブロー）を用いることで、深槽式反応タンクの底部全面に散気装置を設置し深槽曝気（深槽全面エアレーション）を行うものである（図 2-6）。これまで深槽式反応タンクで採用されてきた旋回流式エアレーション（散気水深 5m 程度）よりも酸素移動効率が大幅に向上することで曝気風量が削減される。これにより、送風機の所要動力が削減される他、散気装置の設置数が削減されるため、建設費および維持管理費が縮減される。さらに、散気装置が底部に設置されることにより、設備更新や点検に係る作業の労力軽減や安全性の向上が期待できる¹⁶⁾。

本技術のように深い水深で曝気を行うと、高水压下で活性汚泥混合液中に N₂ ガスが過飽和に溶解し、これが最終沈殿池において再気泡化して汚泥に付着し汚泥の浮上等を引き起こすことが知られている²⁰⁾。本技術では、反応タンク末端で脱気操作を行い N₂ ガスを揮散させることで、これを防止する。

* 本技術に係る B-DASH 実証研究では、水深が 6m を超える反応タンクを深槽式として研究を開始したが、最終的に、十分な導入効果が得られる条件として水深 7m 以上の反応タンクを適用対象として想定している。

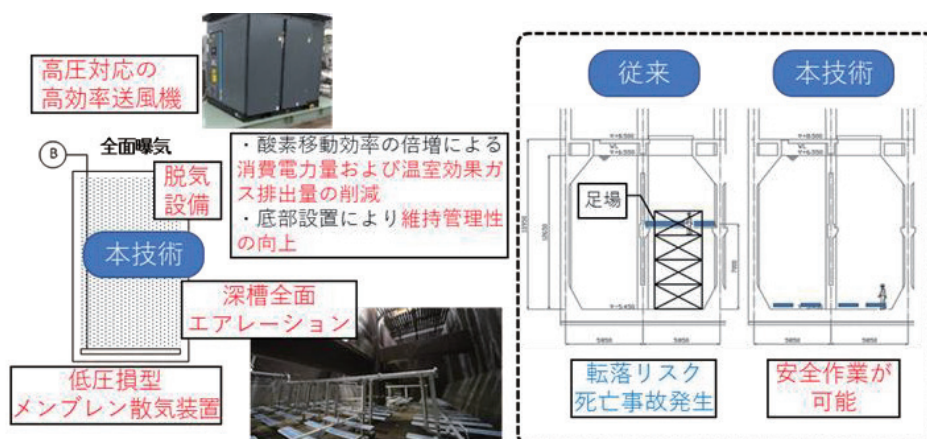


図2-6 省エネ型深槽曝気技術の概要

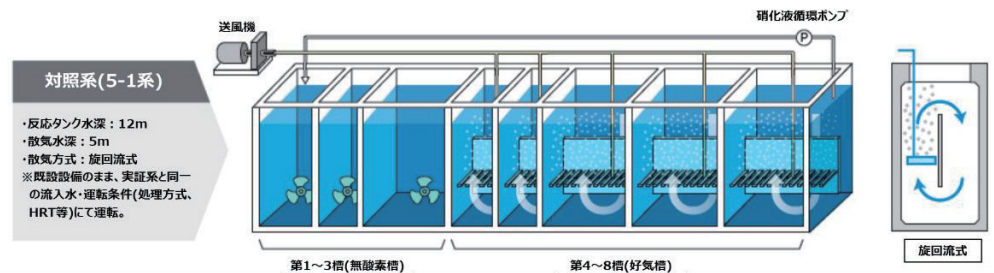
② 実証研究方法

a) 実証フィールドおよび実証施設

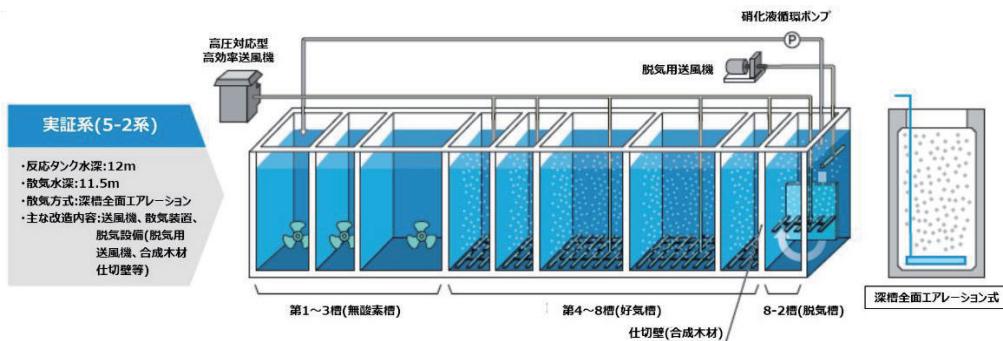
本実証研究では、埼玉県が管理する新河岸川水循環センター（現有処理能力 $697,900\text{m}^3/\text{d}$ 、分流式）を実証フィールドとして実規模での実証実験を行う（表2-6）。現有水処理施設5系列のうち、凝集剤添加循環式硝化脱窒法の5系（5-1～5-4系、処理能力 $140,000\text{m}^3/\text{d}$ ）について、5-2系（反応タンク2池、最終沈殿池4池）を改造して深槽全面エアレーションを行う実証系とし、同一の構造・処理方法で従来の旋回流式エアレーション（散気水深 5m ）を行う5-1系（池数は5-2系と同じ）を対照系としている（各々処理能力 $35,000\text{m}^3/(\text{d}\cdot 2\text{池})$ ）。両系の反応タンクは水深が 12m で、図2-7に示す通り第1～8槽の8区画から構成されるが、このうち第1～3槽は無酸素槽である。実証系では、第4～7槽において槽底部から 0.5m （散気水深 11.5m ）の位置に低圧損型メンブレン散気装置を設置し、深槽全面エアレーションを行う好気槽としている。また、最下流の第8槽は流れ方向に2分割（8-1、8-2槽）した上で、下流側の8-2槽について、既存の散気装置を用いて旋回流式の曝気による脱気操作を行う脱気槽（水処理機能としては好気槽を兼用）としている。一方、上流側の8-1槽については、深槽全面エアレーションによる好気槽と、旋回流式による脱気槽としての運用が切り替え可能な構造としているが、後述する実証期間の大半（Run 1-2を除く全期間）において、8-1・8-2槽の両者を脱気槽とする運用を行っている。なお、実証系の反応タンク流出部には、更なる脱気を行うための粗大気泡散気装置と脱気用送風機を設置しているが、一部の期間（Run 1-2）を除いてこれらは使用していない。

表2-6 実証フィールドおよび実証施設の概要

項目		内容	
処理場名		荒川右岸流域下水道 新河岸川水循環センター	
現有処理能力		697,900m ³ /d (処理人口:1,553,176 人)	
排除方式		分流式	
実証施設	水処理方式	凝集剤添加循環式硝化脱窒法	
	対照系 (5-1 系)	反応タンク (2 池)	処理能力: 35,000m ³ /d HRT: 15hr 水深: 12m、散気水深: 5m 曝気方式: 旋回流式エアレーション
		最終沈殿池 (4 池)	2 階層式 水面積負荷: 18.6m ³ /(m ² ・d)
	実証系 (5-2 系)	反応タンク (2 池)	処理能力: 35,000m ³ /d HRT: 15hr 水深: 12m、散気水深: 11.5m 曝気方式: 深槽全面エアレーション
		最終沈殿池 (4 池)	2 階層式 水面積負荷: 18.6m ³ /(m ² ・d)



対照系(5-1 系)



実証系(5-2 系)

図2-7 実証施設の反応タンクフロー

b) 評価項目

本技術の導入効果や水処理性能への影響を評価するための項目（評価項目）として、「消費電力量および温室効果ガス排出量の削減効果」、「コストの削減効果」、「実証技術の性能」の 3 項目を設定し、実証実験およびモデル設計等による検証を行う（表 2-7）。

加えて実証実験の過程では、上記の実証項目以外にも、反応タンクにおける N_2O 排出量の調査、反応タンクにおける水深方向の DO 濃度分布の調査、散気装置の酸素移動効率の測定、反応タンク内の過飽和 N_2 ガス濃度の測定（測定方法の検討を含む）等の各種検討を行う。

表 2-7 評価項目および評価指標

評価項目	評価指標および目標値		実証方法
消費電力量および温室効果ガス排出量の削減効果	消費電力量原単位	10%以上削減	・実証実験（対照系との比較） ・モデル設計
	GHG(CO_2) 排出量	10%以上削減	
コストの削減効果	建設費	10%以上削減	・モデル設計
	維持管理費	10%以上削減	
	総費用（年価換算値）	10%以上削減	
実証技術の性能	処理水質（BOD,SS,T-N,T-P 等）	対照系と同等	・実証実験（水質分析）
	最終沈殿池における汚泥沈降性	対照系と同等	・実証実験（沈降試験、汚泥界面計による界面計測）

c) 実証実験

実証実験では、実証系（5-2 系）と対照系（5-1 系）を並行して運転し、各系の運転条件が曝気の方式および制御方法（後述）以外は同一となるよう設定する（汚泥返送比：50%、内部循環比：80%）。両系の原水は同一の最初沈殿池流出水であり、また、両系では返送汚泥経路を共有しているため活性汚泥性状についても両系で同等と見なしてよい。なお、流入水量については、両系共に施設能力（各 35,000 m^3/d ）相当量を概ね 24hr 均等に流入させるが、これは本実証実験を行う以前から当該系列において実施されてきた方法である。

(3) 検討結果

① 運転状況

2023 年 5 月より実証系の処理を開始し、各種運転調整等を行った後、同年 9 月から両系の比較を行う本格的な実証実験期間へと移行した。これ以降、2025 年 1 月までの期間（2023 年 9 月 16 日～2025 年 1 月 31 日）を「実証期間」と定義し、前述の評価項目の検証等の対象期間とした（後述の通り消費電力量等の削減効果を除く）。ここで、実証系では、本実証期間内に主として第 8 槽における脱気操作の方法・条件、好気槽全体の曝気風量調整方法を変更したことから、実証期間全体を表 2-8 に示す通り 5 つの期間（Run）に区分した。以降に示す結果は、原則としてこれら全期間の実験データに基づくものである。ただし、曝気風量、消費電力量、温室効果ガス（GHG）排出量の削減効果については、実証系において DO 一定制御を実施した Run 3-1（2024 年 2 月 14 日～8 月 31 日）のみを評価期間として検証した。ここで、これに続く Run 3-2 の期間については、実証系の運転条件を Run 3-1 から変更していないが、対照系に

において実証実験外の理由により曝気風量を引き上げる運転操作が行われた結果、曝気風量や消費電力量の削減率が過大となっているため、評価期間から除外したものである。

表 2－8 実証期間の Run 毎の主要条件

項目		Run 1-1	Run 1-2	Run 2	Run 3-1	Run 3-2
		2023.9.16 ～2024.1.8	2024.1.9 ～1.25	2024.1.25 ～2.13	2024.2.14 ～8.31	2024.9.1 ～2025.1.31
流入水量		全期間平均 33,500m³/d(実証系・対照系とも)				
脱気操作 (第 8 槽)	脱気時間	60min (両区画)	30min (第 8-2 槽のみ)	60min (両区画)		
	空気源	既設 送風機	実証系送風機			
	曝気強度 (Nm³/(m³・h))	0.43	0.36	0.20	0.17	
	脱気用送風 機(反応タン ク流出部)	停止	運転	停止		
曝気風量 制御方法	対照系	手動調整(DO 濃度管理値: 1.4～1.7mg/L)				
	実証系	手動調整(DO 濃度が対照系と 同程度となるように調整)			DO 一定制御(目標 DO 濃度: 1mg/L 程度)	

※本表は、好気槽(第 4～8 槽)の運転条件である。第 1～3 槽は無酸素槽として運転(攪拌のみ)している。

実証期間における流入水量は両系共に平均 33,500m³/d で、処理能力(35,000m³/d)に近い水量負荷での運転が行われた。曝気風量については、両系共に反応タンク第 7 槽に設置されている DO 計の計測値を管理指標とし、対照系では本実験開始以前からの運用方法として、DO 濃度の管理値を 1.4～1.7mg/L とする手動調整が行われた。一方、実証系については、当初の Run 1-1～2 では DO 計測値に基づく手動調整(対照系と同程度の DO 濃度となるよう調整)を行ったが、Run 3-1 において DO 一定制御へ切り替え、以降、目標 DO 濃度を 1mg/L 程度(微調整あり)とした自動制御運転を行った。ここで、実証系における DO 濃度目標値が対照系の管理値よりも低くなっているが、これは、両系の好気槽内の水深方向の DO 濃度分布を調査した結果に基づき、槽全体の平均 DO 濃度が両系で同等となるように設定したもので、実証系における DO 濃度を対照系よりも引き下げているわけではない。

実証系における脱気操作については、Run 1-2 において反応タンク第 8-2 槽のみを脱気槽とし、更に反応タンク流出箇所の脱気用送風機を稼働させた運用を一時的に行ったが、それ以外の期間については、第 8-1・8-2 槽の両者を脱気槽とし、脱気用送風機は使用しない運用とした。

② 消費電力量および温室効果ガス排出量の削減効果²¹⁾

実証期間における実証系と対照系の曝気風量の推移を図 2－8 に示す。期間を通して実証系の方が曝気風量が小さいことが明らかであるが、このうち Run 3-1(消費電力量等の評価期間)について見ると、両系の曝気風量の平均値が、実証系: 84,671m³/d、対照系: 145,317m³/d となり、対照系に対する実証系の削減率は平均 42%であった。なお、本削減率は、両系における

曝気風量の制御方法の違い（手動調整と DO 一定制御）や散気装置の性能差による過大評価にはなっていないことを別途確認している（データ非掲載）。

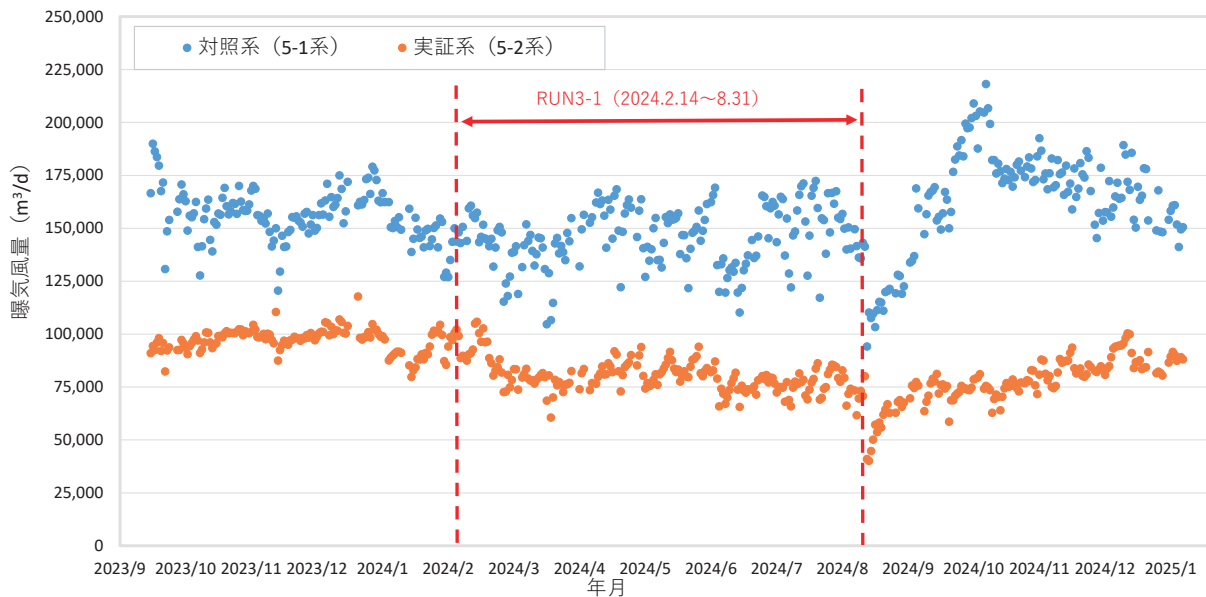


図2－8 実証系と対照系の曝気風量の推移

実証期間における両系の消費電力量原単位（水量当たり原単位）の月間平均値の推移を図2－9に示す。ここで、消費電力量は送風機の運転に係る電力量で、実証系については脱気用の送風分も含む。前掲の曝気風量と同様に期間を通して実証系の方が消費電力量原単位が小さく、Run 3-1における平均値は実証系：0.087kWh/m³、対照系：0.107kWh/m³であった。対照系に対する実証系の削減率は平均 19%となり、実証研究の目標（10%以上；表2－7参照）を上回った。なお、曝気風量の削減率（平均 43%）に対して消費電力量原単位の削減率が小さくなっているのは、実証系において深槽曝気に伴い送風量当たりの送風機動力が増加する影響が、曝気風量が削減されることによる効果の一部を相殺するためである。実際、同期間の実績では、実証系・対照系の送風量当たり送風機動力原単位はそれぞれ 0.035、0.024kWh/Nm³と、実証系の方が 46%高くなっている。

GHG 排出量の削減率については、本実証研究では送風機の電力消費に係る CO₂ 排出量のみを対象としたため、Run 3-1における削減率は、上述の消費電力量原単位の削減率と同一の平均 19%となる。

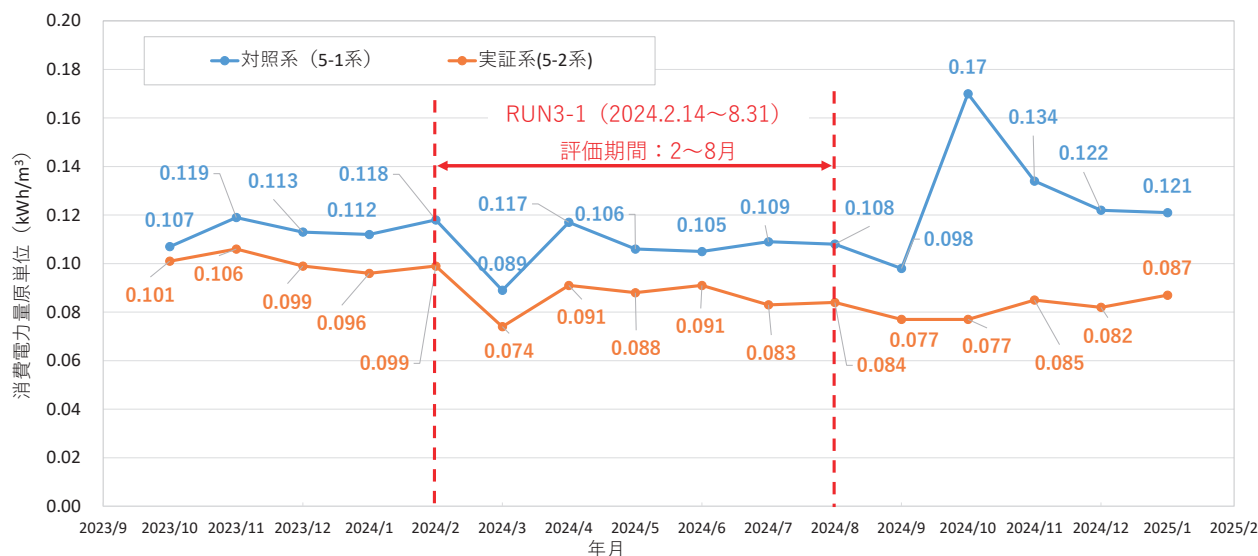


図2－9 実証系と対照系の消費電力量原単位（月間平均値）の推移

③ 実証技術の性能²¹⁾

実証期間における反応タンク流入水（両系共通）および各系の処理水（最終沈殿池流出水）の BOD、SS、T-N、T-P 濃度の平均値、最大値、最小値を表 2－9 に示す。これらは、概ね週 2 回の頻度で、24hr コンポジット採水試料に対して測定した結果に基づく。BOD、SS、T-P については、実証系と対照系で処理水質に明確な違いが見られなかった。T-P については、不定期に処理水濃度が増加することがあり、平均値に対して最大値が大きくなっている。その際には両系共に増加する傾向にあり、本実証技術に起因しない要因によるものと思われるが、明確に要因を特定するには至っていない。

一方、T-N については、実証期間を通した処理水濃度の平均値が実証系：9.5mg/L、対照系：8.8mg/L と、いずれも実証フィールドにおける目標水質（10mg/L）を満足したものの、前年度から見られた実証系の方が高い傾向が継続した。実証期間を通して処理水には $\text{NH}_4\text{-N}$ が殆ど残存しておらず、ここで見られた T-N 濃度の差は $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の違いによるものである。本年度の実証研究の中で、反応タンクの流下過程での無機態窒素濃度の変化を調べるプロファイル調査を実施したところ、好気槽の上流端（第 4 槽）では $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度のいずれについても明確な系列間の差が見られなかった一方、好気槽の下流側（第 7 槽以降）では実証系の方が $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高くなっており、これが処理水濃度の差として現れている（データ非掲載）。両系の好気槽内の DO 濃度分布を調査した結果では、実証系では水深方向で DO 濃度が概ね均一である一方、対照系では槽底部に DO 濃度が 0mg/L 付近まで低下する領域が生じており（データ非掲載）、好気槽における意図せぬ同時硝化脱窒の進行状況の違いが、両系の処理水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の差をもたらした要因である可能性が極めて高い。なお、汚泥返送比および内部循環比から定まる理論最大窒素除去率を用いて、両系の流入水 T-N の平均濃度から想定される処理水 T-N 濃度を算定すると 10mg/L となり、実証系ではこれに近い処理水質であった一方、対照系ではこれよりも明らかに処理水濃度が低くなった点も、対照系の好気槽において脱窒が進行していた点の間接的な証拠となる。

表 2-9 実証系および対照系における流入水質および処理水質（2023.9.16～2025.1.30）

項目		反応タンク流入水			実証系処理水			対照系処理水		
		平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
BOD	mg/L	85	140	41	2.0	6.0	1.0	1.9	4.0	0.0
SS		39	62	22	2.2	6.5	1.0	3.0	15.0	1.0
T-N		30.3	38.0	18.0	9.5	13.9	5.7	8.8	11.7	5.6
T-P		3.2	4.2	1.9	0.3	1.0	0.1	0.3	0.8	0.1

※分析回数：112 回、期間中概ね週 2 回実施。

※流入水質は、スカムが混入した 3 回（2023/10/24、10/31、11/2）の分析を除く。

④ コストの縮減効果

処理能力 10 万 m^3/d 規模で、有効水深 10m の深槽式反応タンクを有する標準活性汚泥法の下水处理場を想定したモデル設計により、従来技術（旋回流式エアレーション）に対する本技術のコスト縮減効果を検証した。主要な試算条件は以下の通りである。

- 既設の反応タンクに本技術もしくは従来技術を導入することを想定し、これに係る機械・電気設備の建設費および維持管理費を推定する。
- 計上対象とする設備の範囲は、本技術について散気装置（曝気用および脱気用）、送風機（曝気用および脱気用）、脱気槽用仕切壁、従来技術について散気装置（架台を含む）、送風機とする（図 2-10）。
- 建設費として、機械設備工事費（機器費 $\times 1.6$ ）、電気設備工事費（送風機に係る機械設備工事費 $\times 0.54$ ）を算定する。
- 維持管理費として、電力費（単価 22.37 円/kWh）、補修費（機器費の 2%/yr）を算定する。
- 建設費から建設費年価（耐用年数 15yr、利子率 2.3%を仮定）を算定し、これに維持管理費を加算して総費用（年価換算値）を算定する。

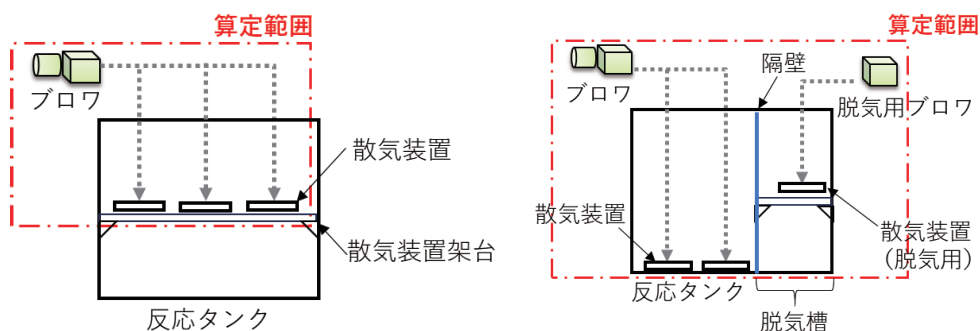


図 2-10 モデル設計における対象設備およびコスト算定範囲（左：従来技術、右：本技術）

本技術および従来技術の導入に係る総費用（年価換算値）の試算結果について、内訳と併せて図 2-11 に示す。総費用（年価換算値）は、従来技術が 272 百万円/yr、本技術が 217 百万円/yr となり、従来技術に対する本技術のコスト縮減率は 20%と実証研究における目標（10%以上、表 2-7 参照）を上回った。建設費単独で見ると本技術による縮減率は 21%で、これに対しては所要の送風量が減少することによる送風機および散気装置に係る機器費の低減が大きく寄与している。一方、維持管理費単独では 17%の縮減となり、これについても送風機の運転動力の低減の寄与が大きい。

本試算結果について、本技術による送風機の運転に係る消費電力量の削減率を算定すると 17% となり（電力消費に係る GHG 排出量削減率も同値）、表 2-7 に示した目標（10% 以上）を満足することが、モデル設計によっても検証された。

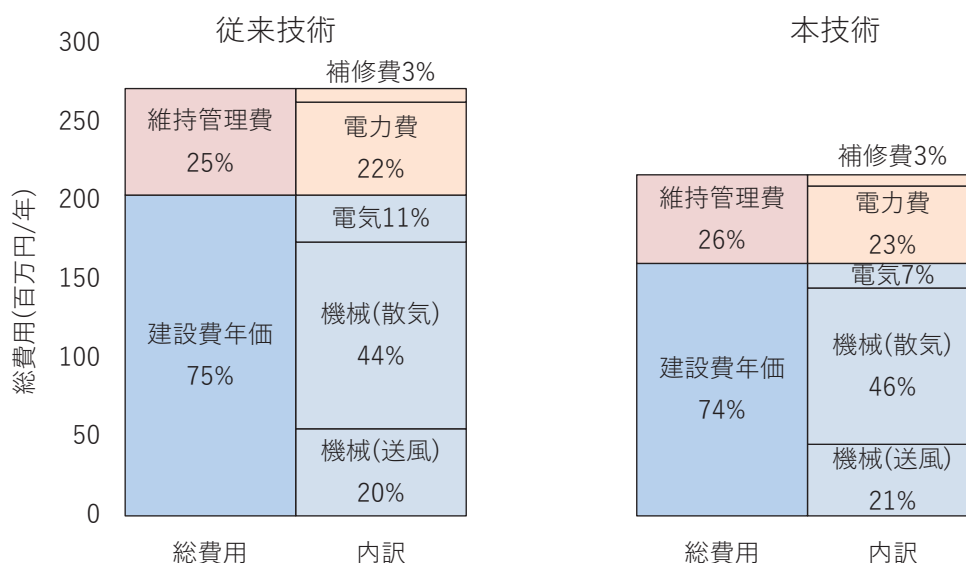


図 2-11 本技術および従来技術の導入に係る総費用（年価換算値）の試算結果

⑤ 最終沈殿池における汚泥沈降性²¹⁾

実証期間を通して、実証系および対照系の反応タンク末端（第 8-2 槽）で採取した活性汚泥に対して SSV_{30}^* を測定したところ（平日の概ね全日に実施）、各系の平均値は各々 19%、18% で、最終沈殿池に流入する活性汚泥の沈降性に明確な系列間の差異が生じていないことを確認した。また、実証系において第 7 槽（脱気操作前）の活性汚泥についても不定期に SSV_{30} を測定したところ、測定の途中で汚泥が浮上したことから、第 8 槽における脱気操作が汚泥浮上の防止に効果的であることは明らかである（後述の⑥も参照）。

加えて実証系において、最終沈殿池の流入部・中間部・末端部に設置された汚泥界面計により、汚泥界面高さの連続計測を実施した。中間部および末端部において汚泥界面の形成が認められたものの、中間部で概ね 50cm 程度、末端部で概ね 40cm 程度と、低い値で推移した。末端部においては一時的に界面高さが上昇することがあったが、このような期間を含めて沈殿池水面へ汚泥が浮上するような事象は認められず、本結果からも反応タンク末端における脱気操作の効果が検証された。

* SSV (stirred sludge volume) は、活性汚泥の沈降性の指標である SV の変法で、 SV において課題となるメスリンダー壁面の摩擦抵抗の影響（いわゆる壁面効果）を軽減することを目的に、攪拌装置を使って汚泥を緩やかに攪拌しながら SV を測定する方法である²²⁾。本実証研究では、両系の活性汚泥の沈降性の比較や、実証系における脱気操作前後の沈降性の比較に際して、従来の SV_{30} よりも SSV_{30} の方が優れると考え、後者を基本的なモニタリング指標とした。

⑥ 過飽和 N₂ ガス濃度の測定による脱気効果の検証²³⁾

実証系の反応タンク第 8 槽における脱気操作の効果を定量的に把握することを目的として、前年度の実証研究において見出した過飽和分の溶存 N₂ ガス濃度の測定法（超音波測定方法）*を用いて、実証系および対照系の好気槽における活性汚泥混合液中の過飽和 N₂ ガス濃度を測定した。試料中の溶存 N₂ ガスの「飽和度」を次式により定義した上で、各所での測定結果について飽和度を指標として整理したものを図 2-12 に示す。

$$\text{溶存 N}_2 \text{ ガスの飽和度} = \frac{\text{溶存 N}_2 \text{ ガスの過飽和濃度の測定値} + \text{溶存 N}_2 \text{ ガスの飽和濃度の理論値}}{\text{溶存 N}_2 \text{ ガスの過飽和度の理論値}} \times 100$$

実証系では、好気槽（第 4 槽以降）に入ると飽和度が上昇し、特に下流側（第 6～7 槽）で高くなっている。一方、対照系の飽和度はこれよりも明らかに低く、実証系において深槽曝気により溶存 N₂ 濃度が実際に上昇していることが確認できる。これに対して、実証系では第 8-1 槽～第 8-2 槽にて脱気操作を行うと飽和度が減少し、第 8-2 槽および最終沈殿池入口では、対照系と同程度になっていることから、本実証研究において実施した脱気操作により、十分な脱気効果が得られていることが定量的に確認された。

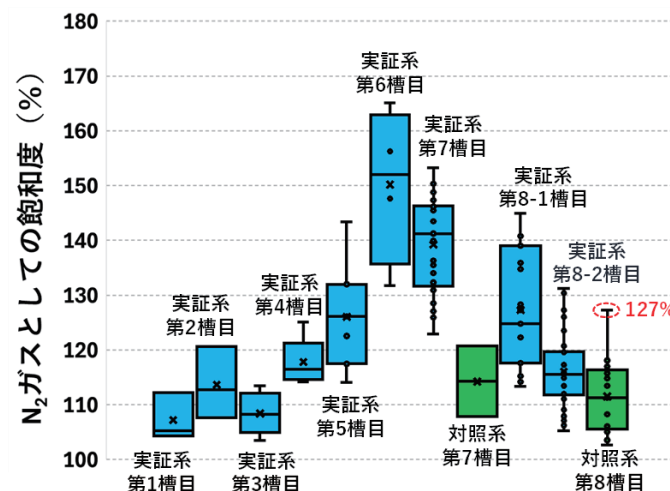


図 2-12 実証系および対照系における反応タンク各槽の溶存 N₂ ガス飽和度
 （2024 年 4 月～12 月の測定結果）
 測定回数：119 回（実証系）31 回（対照系）
 ※測定回数は槽によって異なる

* 本手法は、活性汚泥中の溶存ガスを超音波洗浄器により気泡化させ、揮散した気体の体積から試料中の溶存ガス濃度を推定するものであるが、概ね過飽和分の溶存ガスのみが揮散し測定されることが実験的に確認されているため¹⁹⁾、過飽和分の溶存ガス濃度を推定する手法として取り扱っている。

⑦ その他の検討項目

上記以外に本年度に実施した調査項目について、概要を以下に記す。

- 散気装置の酸素移動効率の測定²⁴⁾：深槽全面エアレーションを行う条件での散気装置の酸素移動効率について、前年度から改良を加えたガス捕集フード（捕集面積を拡大）を用いたオフガス法による測定を試みたが、散気装置の想定性能値と合致する結果を得るには至らなかったため、推定方法について今後も検討を継続する。
- N_2O 排出量の調査：実証系および対照系の反応タンクにおける N_2O 排出量（ガス態排出量、溶存態流下量）の調査を 2 回実施した。実証系・対照系における N_2O 排出係数がそれぞれ平均 4.1、9.4mg $\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ と、両系共に顕著な排出が生じていないデータを得たものの、溶存態 N_2O の消長と整合しない結果となっており、調査方法の改良を含めて今後も検討を継続する。

（4）まとめ

省エネ型深槽曝気技術について、B-DASH プロジェクトによる 3 ケ年度の実証研究を完了した。実証研究において掲げた 3 つの評価項目に対して、以下の結果が得られた。

- 消費電力量および温室効果ガス排出量の削減効果：実証実験において、実証系の送風機に係る消費電力量原単位は対照系と比較して平均 19%削減され（GHG 排出量削減率も同値）、目標（10%以上）を十分に満足した。加えて、モデル設計による試算においても同削減率は 17% となり、実証実験結果が特異的なものではないことが確認された。
- 実証技術の性能：実証実験において、実証系の処理水質は、BOD、SS、T-P について対照系と同等であった。一方、T-N については実証期間を通して実証系の方が処理水濃度が高くなった。その差は平均 0.7mg/L と大きなものではないが、これに対しては対照系の好気槽における脱窒の進行が要因として推定され、同様の処理場への導入に際しての重要な留意事項が得られた。また、深槽曝気に伴う最終沈殿池での汚泥の沈降性については、SSV₃₀や汚泥界面のモニタリング結果、反応タンクの活性汚泥混合液中の過飽和 N_2 ガス濃度の測定結果から、実証系において実施した脱気操作により汚泥浮上のリスクが十分に抑制可能であることが示された。
- コストの削減効果：10 万 m^3/d 規模の水処理施設を想定したモデル設計により、本技術の採用による総費用（年価換算値）の削減率は 20%（従来技術＝旋回流式エアレーション）と試算され、目標（10%以上）を十分に満足した。

今後、本実証研究の成果に基づき、国土交通省国土技術政策総合研究所から本技術の「導入ガイドライン(案)」が公表される予定である。

次年度からは、共同研究体による自主研究へと移行し、引き続き実証施設における長期の実証実験を進める。

3. バイオガス活用技術

3. 1 開発動向調査・実態調査

（1）検討の概要

2030 年目標の達成に向けて、下水道事業においては嫌気性消化により得られるバイオガスの活用の促進が期待されている。この目標を達成するためには、嫌気性消化施設の導入促進に加え、バイオガスの発生量を増加させる等の消化を促進する技術や、バイオガスを有効利用することが可能な技術についても導入促進を図る必要がある。これまで JS では、消化の効率化に向けた技術開発等を実施してきたが、更なる導入促進のためには、2030 年度までに見込まれる技術のラインナップや効果等を整理することが有効であると考え。また、処理場におけるバイオガスの回収量は、消化タンク関連設備の運転のみではなく、水処理施設を含めた処理場全体の運転管理手法に大きく影響される。そのため、バイオガスの活用の促進には、新技術の開発・実装のみではなく、処理場全体の運転の最適化が重要である。

本検討では、2023～2025 年度において、バイオガスの効率的な生成・活用技術に関する文献調査や実態調査を実施する。前年度は、下水道分野以外も含め、バイオガスの発生量を増加させる等の消化促進技術およびバイオガス活用技術の開発動向に係る文献調査を行った。本年度は、以下の 2 項目について実態調査を行った。

① 処理場の運転管理状況が嫌気性消化に与える影響等に関する実態調査

下水処理場の嫌気性消化においては、処理場へ流入するバイオマスを効率的に回収し消化タンクへ投入することで、消化ガス発生量の増加や有機物の分解率向上による発生汚泥量の削減、および水処理に要する消費電力量の削減が期待される。本調査では、下水処理場の運転管理状況が嫌気性消化に与える影響を把握するため、嫌気性消化を採用する処理場のうち、流入水量当たりまたは消化タンク投入 VS 当たりのガス発生量の多い処理場、単位流入水量当たりの脱水汚泥発生量の少ない処理場、および流入水量当たり消費電力量の小さい処理場を選定し、運転管理状況に関するヒアリング調査を実施した。

② 高濃度消化の運転状況実態調査

高濃度消化では、消化タンクへの投入汚泥濃度を高めることで、必要となる消化タンク容量の削減や、消化タンクの加温に必要となる消化ガス量が減少することで、有効利用可能な消化ガスの回収量の増加が期待される。発生する消化汚泥の容量も少ないため、後段の脱水設備の規模縮小も期待される。消化タンク投入汚泥の TS が 6～8% の場合を高濃度消化と定義すると、我が国の下水処理場では 2 箇所が該当する²⁵⁾。本調査では、発生汚泥の全量の高濃度消化を行っている静岡県富士市東部浄化センターを対象として、運転状況を確認した。

（2）検討方法

① 処理場の運転管理状況が嫌気性消化に与える影響等に関する実態調査

調査対象処理場の選定は以下の通り行った。令和 3 年度版下水道統計²⁵⁾において、嫌気性消化を採用している処理場のうち、集約処理や外部バイオマスの受入等を実施しておらず、かつデータの信頼性が高いと判断した処理場の中から、単位流入水量当たりまたは消化タンク投入

VS 当たりガス発生量の多い処理場、単位流入水量当たり脱水汚泥発生量の少ない処理場、および単位流入水量当たり消費電力量の小さい処理場をそれぞれ 6～7 箇所ずつ選出した。

1) ガス発生量の多い処理場

調査対象とする処理場の選定にあたり、まずその傾向を把握した。令和 3 年度版下水道統計によれば、消化タンク投入 VS 当たりガス発生量の平均は $502\text{m}^3/\text{tVS}$ 、単位流入水量当たりのガス発生量の平均は $667\text{m}^3/\text{万 m}^3$ であり、処理場によって大きな違いがある。図 3-1 に単位流入水量当たりガス発生量と投入 VS 当たりガス発生量の関係を示す。流入水の BOD 濃度等もガス発生量に影響を与えるが、図に示すように、これら二つの指標間には相関関係が認められる。本調査においては、単位流入水量当たりガス発生量が概ね $1,000\text{m}^3/\text{万 m}^3$ 以上の処理場、または消化タンク投入 VS 当たりガス発生量が概ね $700\text{m}^3/\text{tVS}$ 以上の処理場の中から、地域性等を考慮して図中の記号（A～G）で示す 7 箇所を調査対象として選定した。

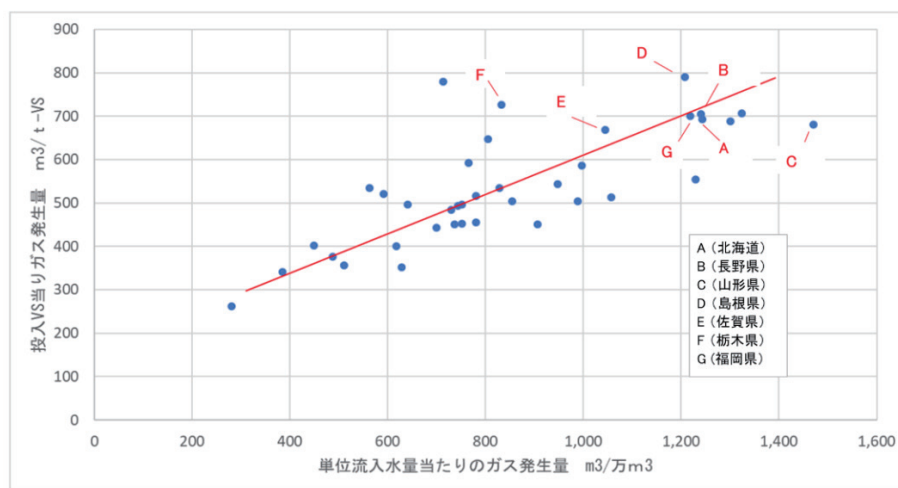


図3-1 単位流入水量当たりガス発生量と投入 VS 当たりガス発生量の関係

※嫌気性消化を採用する処理場のうち、①集約処理や外部バイオマスの受入等を未実施、
②データの信頼性が高いと判断される処理場、のみ対象とした。

2) 脱水汚泥発生量の少ない処理場

調査対象とする処理場の選定にあたり、まずその傾向を把握した。単位処理水量当たりの脱水汚泥発生量は、水処理方法や脱水方法等、様々な要因に影響されるが、図 3-2 に示すように、流入水の SS 濃度は脱水汚泥発生量に大きく影響することがわかる。本調査においては、図中に示す、両者の関係を示す近似直線を下回る処理場、すなわち流入水の SS 濃度に対して脱水汚泥発生量が少ない傾向にあると考えられる処理場の中から、地域性等を考慮し図中の記号（B、F、H、I、J、K）で示す 6 箇所を選定した。なお、1)～3) の対象処理場で重複するものは同一の記号で表現している。

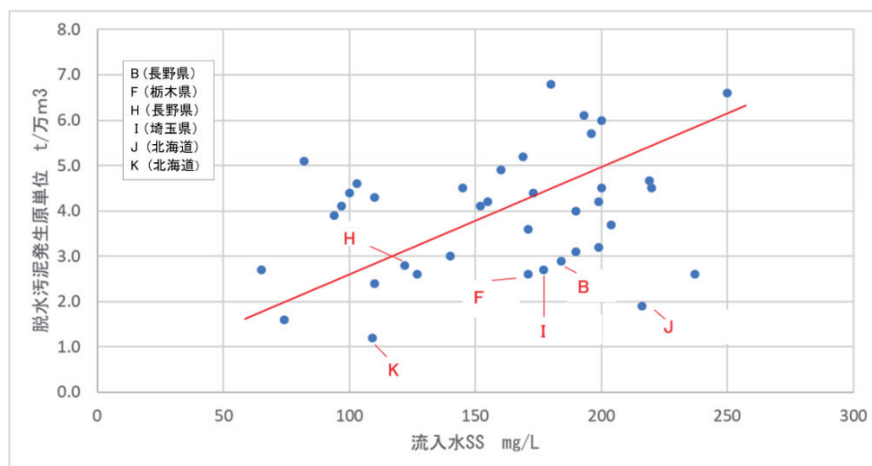


図3－2 流入水の SS 濃度と脱水汚泥発生量の関係

※嫌気性消化を採用する処理場のうち、①集約処理や外部バイオマスの受入等を未実施、
②データの信頼性が高いと判断される処理場、のみ対象とした。

3) 消費電力量原単位の小さい処理場

調査対象とする処理場の選定にあたり、まずその傾向を把握した。消費電力量原単位には、流入負荷量をはじめ様々な影響要因があるが、処理場規模に大きく影響を受けるため、ここでは日平均流入水量が 10,000～50,000m³/d の中規模処理場について、流入水 BOD と消費電力量原単位（下水道統計のデータをベースに算出）の関係を図 3－3 に示した。電力量の対象とする施設の範囲は、場内ポンプから水処理、汚泥処理の一連の処理場施設を含んでいる。0.25～0.59kWh/m³ の処理場が多く、平均は 0.43kWh/m³ である。本調査においては、消費電力量原単位が概ね 0.350kWh/m³ 以下の処理場の中から、地域性等を考慮し図中の記号（B、F、H、J、K、L）で示す 6 箇所を選定した。

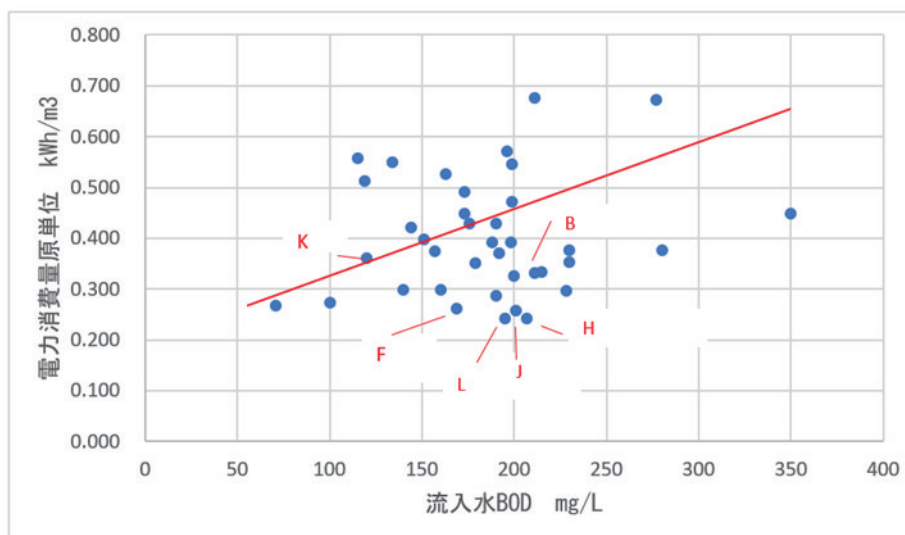


図3－3 流入水 BOD 濃度と消費電力量原単位の関係
（日平均流入水量 10,000～50,000m³/d の処理場）

※嫌気性消化を採用する処理場のうち、①集約処理や外部バイオマスの受入等を未実施、
②データの信頼性が高いと判断される処理場、のみ対象とした。

1) から 3) で選定した合計 12 処理場に対して、2024 年 6 月～11 月の期間で実態調査を実施した。本調査では、過去 5 か年の下水道統計を基に、各処理場の運転状況が大きく変わっていないことを確認したうえで、処理場全体の詳細な運転管理データ 1 年分の提供を依頼した。受領したデータをもとに、汚水流入状況（水量、水質）、汚泥発生状況（発生量、VS 分解率等）、各施設の運転状況（最初沈殿池汚泥（以下、「初沈汚泥」と略記）の引抜率、反応タンク MLSS・HRT・SRT、重力濃縮槽滞留時間等）、消化タンク運転状況（消化温度、日数、ガス発生量）、使用電力量等を整理した。なお、各処理場のデータの整理状況により、整理に用いたデータは、処理場により 2022 年度、または 2023 年度のものを用いている。また、電話または現地ヒアリングによる調査を実施し、整理した各種状況等を踏まえ、処理場全体の運転管理状況の実態や特異事項等の確認を行った。

② 高濃度消化の運転状況実態調査

1) 対象処理場および汚泥処理設備の概要

表 3-1 に調査を行った静岡県富士市東部浄化センターの施設概要、図 3-4 に概略処理フローを示した。当センターの処理法は標準活性汚泥法（AO 運転）、2023 年度における平均処理水量は 33,600m³/d である。表 3-2 に当センターにおける高濃度消化関係の主な設備仕様を、図 3-5 に高濃度消化設備の概略フローを、図 3-6 に高濃度消化設備の全景を示す。当センターの高濃度消化設備は 2018 年度採択の国土交通省・B-DASH プロジェクト「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に関する実証事業」で設置された設備の一部である。消化タンクに投入する未消化汚泥と、消化タンクから汚泥を一部返送し混合して濃縮することで NH₄-N を消化阻害が生じない濃度に調整できるため、汚泥の高濃度化と消化日数の短縮（消化タンク容積を従来約 1/3 に削減）を実現しつつも、消化性能を従来技術と同等に維持可能な技術とされている²⁶⁾。

表 3-1 富士市東部浄化センターの施設概要(2023 年度時点)

	概 要
水処理施設	排除方式 : 分流式
	処理水量 : 33,600m ³ /d(R5年度実績日平均)
	流入水質 : BOD 174mg/L SS 194mg/L
	水処理方式 : 標準活性汚泥法 (AO運転) MLSS:1280mg/L HRT6.1hr 硝化抑制運転
汚泥処理施設	濃設備備 : 初沈汚泥 重力濃縮 余剰汚泥 機械 (ベルト) 濃縮
	消化設備 : 高濃度消化 高濃度濃縮 (スクリー式) + 消化 消化タンク 銅板製 容量1000m ³ 消化温度 40℃ 消化日数 15~17d
	脱水設備 : 難脱水対応型スクリーンプレス
	処分方式 : 脱水汚泥で場外搬出

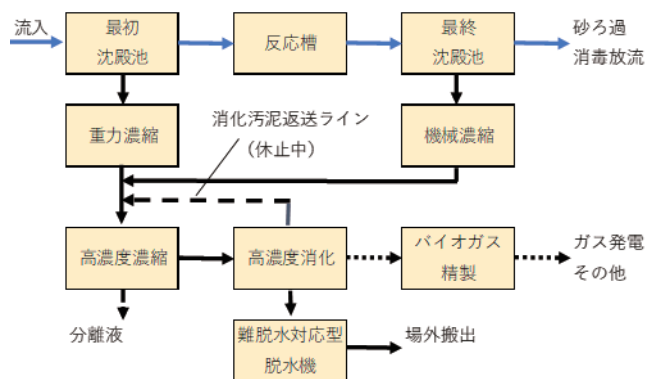


図 3-4 富士市東部浄化センターの概略処理フロー

表 3-2 富士市東部浄化センターにおける高濃度消化設備（主たる設備）の仕様

設備名	容量・能力	主な仕様
高濃度濃縮設備	350kgDS/h × 2基	一軸スクリー式 12.5kW（総合）/基
消化タンク 送泥ポンプ	0.20MPa × 2基	一軸ねじ式 7.5kW/基
高濃度消化設備	有効容積 1,000m ³ × 1槽	鋼板製 インペラ式攪拌機 7.5kW

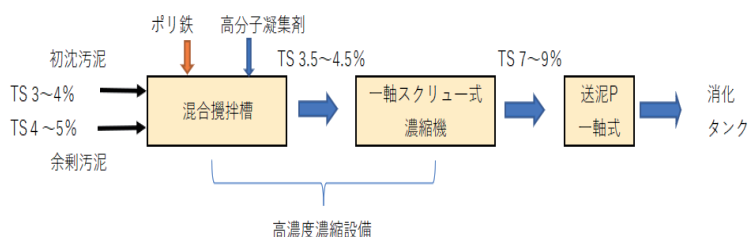


図 3-5 高濃度濃縮設備の概略フロー



図 3-6 高濃度消化設備の全景

主な設備は高濃度濃縮設備、消化タンク送泥ポンプ、高濃度消化設備から構成され、当センターで発生する初沈汚泥、余剰汚泥の全量を処理対象としている。重力濃縮後の初沈汚泥（TS3～4%）と機械（遠心）濃縮後の余剰汚泥（TS4～5%）を混合攪拌槽にて、ポリ鉄と高分子凝集剤を加えて混合し、一軸スクリー式濃縮機で TS7～9%に濃縮する。高濃度に濃縮した汚泥は、一軸ねじ式汚泥ポンプで消化タンク頂部から投入している。消化タンクの有効容量は 1,000m³で、消化温度 40℃、消化日数 15～17d で管理している。通常の中温消化と比較して消化温度を高く設定しているのは、高濃度消化設備における運転の安定化を念頭に置いたものである。なお後述のとおり、本施設では調査を実施した 2024 年度時点において、NH₄-N による消化阻害が生じる状況ではなく、消化汚泥の返送を行っていないため、消化タンクの SRT は HRT と同一値である 15～17d となる。消化タンクの攪拌はインペラ式で、一般的な同規模の消化タンク攪拌機より 5 倍程度動力の大きい攪拌機（7.5kW）を採用している。

2) 調査項目

当センターから最新（2023 年度）の維持管理年報等の運転管理データの提供を受けると共に、当該処理場の運転管理担当者を対象とした現地ヒアリング調査により、運転状況の実態や高濃度消化関連の施設に関する意見等を確認した。また高濃度濃縮設備関連の固形物収支等を把握するために汚泥等性状調査を 1 回実施した。

（３）検討結果

① 処理場の運転管理状況が嫌気性消化に与える影響等に関する実態調査

１）ガス発生量の多い処理場

表 3-3 に、主な運転管理状況の調査結果を示す。対象処理場のうち、流入水の BOD、SS が 200mg/L 以上と高い処理場が多かったが、200mg/L に達しない D、F でも投入 VS 当たりガス発生量は 700m³/tVS 以上の高い値が得られていた。これらの処理場では中継ポンプ場や最初沈殿池でポリ鉄の添加が行われており、流入する有機物が初沈汚泥として効率的に回収されているものと考えられる。また、初沈汚泥の引抜率が A、B、C では 2.6～5.1%と高い*。過年度の調査²⁸⁾等によると、投入 VS 当たりガス発生量は余剰汚泥の約 300～400m³/tVS に対し、初沈汚泥では約 600～750m³/tVS と約 2～3 倍高い。処理場 A、B、C においては、多くの有機物が反応タンクで分解される前に最初沈殿池で回収され、消化タンクに供給される量が増加していることがガス発生量に影響したと考えられる。また重力濃縮槽の滞留時間も 4.0～7.1hr と短く†管理されていたことが寄与したと考えられる。図 3-7 に示すように、重力濃縮槽の滞留時間が標準より長めとなっても重力濃縮汚泥の固形分率に顕著な向上は見られない一方、有機分率は大きく低下する傾向が見られることから、重力濃縮槽の滞留時間を短く管理することがガス発生量の増加に寄与したものと考えられた。初沈汚泥は加水分解と酸発酵が進みやすい炭水化物主体の汚泥である。汚泥の滞留時間が比較的短いことで、加水分解や腐敗（酸発酵）の進行度合いの低い、比較的新鮮な汚泥が消化タンクに投入されていたものと推察される。

表 3-3 ガス発生量の多い処理場の運転管理状況

	流入水量	流入水質 mg/L		ガス発生量		初沈汚泥		反応タンク			消化タンク		ポリ鉄添加	備 考
	m ³ /日	BOD	SS	m ³ /万 m ³	m ³ /tVS	引抜率 %	重力濃縮時間 hr	MLSS mg/L	HRT hr	SRT 日	消化温度 °C	消化日数 日	水処理・濃縮	
A(北海道)	65,600	280	190	1,243	693	2.8	7.1	1,730	10.1	7.9	37	47	—	水産加工排水受け入れ
B(長野県)	30,000	211	184	1,240	705	2.6	4.0	1,080	6.9	4.3	40	25	○	
C(山形県)	23,800	230	200	1,470	681	5.1	4.4	1,900	7.3	8.4	38	27	—	
D(島根県)	25,800	151	196	1,208	790	1.4	16.8	1,750	8.5	4.5	37	59	○	常圧浮上濃縮（余剰）
E(佐賀県)	18,700	350	250	1,044	668	1.8	—	1,920	6.7	—	40	21	○	水産加工排水受け入れ、常圧浮上濃縮（混合）
F(栃木県)	25,800	169	171	833	727	1.7	9.5	1,320	10.0	11.8	36	32	○	中継ポンプ場にポリ鉄添加
G(福岡県)	35,700	230	220	1,324	706	1.4	13.5	1,430	5.8	6.1	50	21	—	

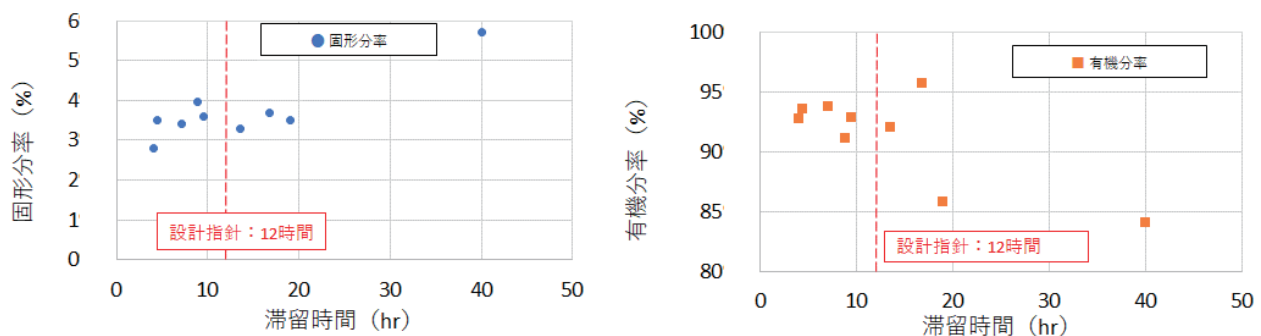


図 3-7 重力濃縮槽滞留時間と汚泥性状の関係
(左：濃縮汚泥の固形分率 右：濃縮汚泥の有機分率)

* 設計指針²⁷⁾によると、処理水量に対する初沈汚泥の引抜量の比率は 1.5%程度が標準。

† 設計指針²⁷⁾によると、重力濃縮槽の滞留時間は 12hr が標準とされている。

反応タンクの SRT が長いと活性汚泥の自己分解が進むため、ガス発生特性に大きく影響を与える*。F を除いて 4.3～8.4 日（硝化抑制運転）と比較的短い SRT で管理されており、ガス発生量が多い要因になっていると推察される。また、D および E では常圧浮上濃縮が行われていた。SRT の短い汚泥は腐敗しやすいため、貯留槽等に長時間貯めこまず速やかに濃縮して消化タンクに投入することが推奨されるが、常圧浮上濃縮装置では好気性条件下で濃縮が行われるため、腐敗進行が抑制されガス発生量増大の要因になっていると考えられる。

2) 脱水汚泥発生量の少ない処理場

表 3－4 に、主な運転管理状況の調査結果を示す。6 か所のうち 4 か所が合流区域を有する処理場であった。汚泥の発生量は流入水質（特に SS）に大きく影響されるが、H と K を除いて 171～219mg/L と平均的な SS 濃度であった。合流区域を有する処理場の最初沈殿池の設計水面積負荷†は、分流処理区の処理場より一般に小さく（沈澱時間が長くなる）設定される。このため、最初沈殿池における固形物回収率が年間を通じて高くなり、消化タンクへ供給される有機物量が増加する。初沈汚泥は余剰汚泥に比べ消化タンクでの有機物分解率が高いため、結果的に汚泥の発生量が少なくなっているものと推察される。

表 3－4 脱水汚泥発生量の少ない処理場の運転管理状況

	流入水量		排除方式		流入水質mg/L		脱水ケーキ		VS 分解率 %	初沈汚泥		反応タンク			消化タンク			ポリ鉄 添加 水処理・ 濃縮	備 考
	m ³ /日		分流ha	合流ha	BOD	SS	発生量 wet/万m ³	含水率 %		引抜率 %	重力濃縮 時間 hr	MLSS mg/L	HRT hr	SRT 日	消化温度 ℃	消化日数 日	2槽目固 液分離		
B(長野県)	30,000		4,403	0	211	184	2.9	81	68.2	2.6	4.0	1,080	6.9	4.3	40	25	—	○	
F(栃木県)	25,800		5,583	0	169	171	2.6	80	68.5	1.7	9.5	1,320	10.0	11.8	36	32	—	○	中継 p にポリ鉄添加
H(長野県)	64,800		4,403	323	207	122	2.8	82	65.6	1.4	8.9	1,220	9.5	8.7	34	31	—	○	
I(埼玉県)	24,000		698	356	192	177	2.7	82	46.1	1.1	40.0	2,500	14.9	21.0	39	83	○	—	
J(北海道)	39,900		2,302	241	201	216	1.9	80	57.9	1.3	19.0	1,470	7.5	6.9	38	40	○	—	
K(北海道)	13,400		794	203	120	109	1.2	78	61.0	混合濃縮		1,800	7.2	7.1	38	51	○	—	余剰汚泥を初沈分配槽に戻し混合濃縮

I、J、K では 2 段消化の 2 段目で固液分離が行われ、投入汚泥量の 3～5 割程度が脱離液として最初沈殿池の前に返送されている。これにより、消化タンク内で生成される一部の成分（無機水酸化物等）が洗い出されること、また固形物の処理場全体としての滞留時間が長くなることで、水処理における好気性分解、消化処理における嫌気性分解を通し、未分解の有機物の分解が促進されること等により、結果的に脱水汚泥発生量の削減につながっていると推察される。

I では反応タンクの MLSS が 2,500mg/L、SRT が 21d と大きいことによる反応タンクでの自己分解、および消化タンクでの長期滞留（消化日数 83d）による汚泥の分解が、脱水汚泥発生量削減の要因になっていると考えられる。

B、F、H では流入管渠や汚泥の濃縮工程でポリ鉄の添加が行われ、最初沈殿池や重力濃縮工程での凝集沈降性が改善（有機分分解率の高い初沈汚泥としての固形物回収率向上）され、消化タンクへ供給される有機物量が増加し、嫌気性分解が促進されることで、結果的に脱水汚泥発生量の低減に効果があったと考えられる。

* JS 内部資料（未公表）。

† 設計指針²⁷⁾において、最初沈殿池の水面積負荷は、分流式：35～70m³/(m²・d)、合流式：25～50m³/(m²・d)である。

3) 消費電力量原単位の小さい処理場

表 3-5 に、主な運転管理状況の調査結果を示す。6 箇所のうち 3 箇所（H、J、K）が一部合流式の処理場であった。J では電気代節約のため処理場全体で徹底した節電対策を講じていた。

表 3-5 消費電力量原単位の小さい処理場の運転管理状況

	流入水量	排除方式		流入水質mg/L		初沈出口水質mg/L		電力消費 量原単位	初沈汚泥		反応タンク			消化タンク		備 考
	m ³ /日	分流ha	合流ha	BOD	SS	BOD	SS		引拔率 %	重力濃縮 時間 hr	MLSS mg/L	HRT hr	SRT 日	消化温度 ℃	消化日数 日	
B(長野県)	30,000	4,403	0	211	184	133	63	0.332	2.6	4.0	1,080	6.9	4.3	40	25	
F(栃木県)	25,800	5,583	0	169	171	69	35	0.262	1.7	9.5	1,320	10.0	11.8	36	32	中継 p にポリ鉄添加
H(長野県)	64,800	4,403	323	207	122	102	35	0.243	1.4	8.9	1,220	9.5	8.7	34	31	
J(北海道)	39,900	2,302	241	201	216	131	52	0.258	1.3	19.0	1,470	7.5	6.9	38	40	
K(北海道)	13,400	794	203	120	109	51	26	0.361	—	—	1,800	7.2	7.1	38	51	余剰汚泥を初沈分配槽に戻し混合濃縮
L(佐賀県)	57,100	4,264	0	195	171	—	—	0.243	0.6	—	1,560	8.0	12.6	40	25	担体投入・常圧浮上濃縮（混合）

処理場における消費電力量のうち、反応タンクの曝気に要する電力量は大きな割合を占める。今回調査した処理場では、最初沈殿池流出水（反応タンク流入水）の BOD 濃度が低い特性を持つ処理場（F、K）、硝化抑制運転（低 MLSS または低 SRT（あるいは両者併用））を実施（B、H、J、K）、水処理運転系列の削減運転（F）といった運転管理状況がみられた。硝化抑制や稼働水処理系列の削減等の運転は、反応タンクでの曝気量を抑制し消費電力量を削減するだけでなく、嫌気性消化へ供給する有機物を増加させる方向と一致するものでもあり、消化ガス発生量の増加にも寄与しているものと考えられる。

なお、上記 6 箇所のうち K を除く 5 箇所では消化ガス発電（FIT 売電含む）を行っており、全量消化ガス発電を行っている 3 箇所（B、F、L）の流入水量当たりの平均発電量は 0.158～0.192kwh/m³であった。これは処理場の消費電力量の 60～70%に相当し、消化ガス発電の導入が処理場の電力量の多くを賄える可能性があることを示唆している。

4) 各運転手法の関連性を踏まえた推奨される運転管理

今回の調査で選定された、1)～3) に該当する処理場の運転管理状況を確認した結果、効率的な嫌気性消化を実現するためには、複数の運転管理要素が相互に関連し、処理場全体の効率化に寄与していることが示唆された。特に、「処理場に流入する有機物を最初沈殿池で効率的に回収し、新鮮な状態で消化タンクに投入する」という運転管理は、以下の複数の効果を同時に発揮する、極めて重要な要素であることが確認された。

- バイオガス発生量の増加：今回の調査でガス発生量の多い処理場（表 3-3 の A、B、C 処理場等）では、初沈汚泥の引拔率が高く、重力濃縮槽の滞留時間が短く管理されており、有機物分解率の高い初沈汚泥を新鮮な状態で消化タンクに供給することで、嫌気性消化による有機物分解が促進され、ガス発生量が増加することが示唆された。
- 脱水汚泥発生量の削減：脱水汚泥発生量の少ない処理場（表 3-4）では、最初沈殿池での有機物回収率向上や、反応タンクでの自己分解による汚泥減量、および消化タンクでの長期滞留等による有機物の分解促進等により、結果として発生汚泥量が削減されることが確認された。また、反応タンクへの有機物負荷が低減されることで、初沈汚泥と比較して嫌気性分解しにくい余剰汚泥の発生量も抑制されることが示唆された。

- 消費電力量の削減：消費電力量原単位の小さい処理場（表 3－5）では、最初沈殿池での有機物の効率的な回収や、硝化抑制運転、水処理運転系列の削減等により、反応タンクへの BOD 負荷が低減され、送風量削減による消費電力量の低減に繋がることが確認された。なお、消化ガス発電を組み合わせることで、処理場全体の電力自給率向上に大きく貢献できる。

これらの相乗効果を最大限に引き出すためには、以下の運転管理を総合的に実施することが推奨される。

- 最初沈殿池の運転最適化：初沈汚泥の引抜率を適切に管理し、ポリ鉄等の凝集剤を効果的に活用することで、最初沈殿池における有機物の回収率を高める。
- 汚泥の新鮮度維持：図 3－8 に示すように、汚泥中の有機分率が 90%から 85%に低下しただけでも汚泥中の有機分は概ね半減する。初沈汚泥や濃縮汚泥の滞留時間を短縮し、速やかに消化タンクへ投入することで、酸発酵や腐敗の進行を抑制し、返流水等として水処理系へ戻る有機物負荷を削減する。常圧浮上濃縮などの技術も有効である。
- 反応タンクの硝化抑制運転：SRT を短くするため、低 MLSS（1,000～1,200mg/L）や HRT を 5～7hr 程度とする運転により、反応タンクでの自己分解を抑制し、消化タンクへの有機物供給量を確保すると共に、送風量削減による省エネルギー化を図る。

これらの運転管理手法は、個別の効果だけでなく、処理場全体のエネルギー収支、汚泥処理コスト、ひいては環境負荷の低減に複合的に寄与するものである。

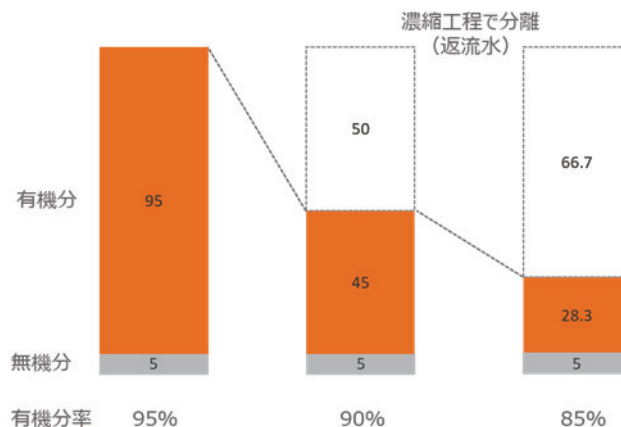


図 3－8 下水汚泥中の有機分率と実際の有機分量の変化例

② 高濃度消化の運転状況実態調査

1) 運転実績

表 3－6 に、当センターにおける 2023 年度の高濃度消化の運転実績を示す。高濃度濃縮設備へは、年間平均で初沈汚泥が 101.1m³/d (TS3.61%)、余剰汚泥が 52.7m³/d (TS4.61%) の合計 153.8m³/d 投入されている。消化タンクへの投入汚泥を高濃度化するために混合攪拌槽で添加される凝集剤の使用量（購入量から推計）はポリ鉄が 0.441m³/d、高分子凝集剤が 16.4kg/d、濃縮汚泥固形物当たりの添加量はそれぞれ約 11%DS、約 0.3%DS である。

本施設で設置されている設備の動力は、高濃度濃縮設備が 12.5kW、消化タンク投入ポンプが 7.5kW、高濃度消化タンク攪拌機が 7.5kW と、一般的な消化設備と比較して大きなものが用いられている。高濃度消化関連設備のみでの具体的な年間消費電力量データは入手できなかったが、各設備の定格動力と運転時間に基づいた推定では、処理場全体の消費電力量（5,430 千 kWh/y）の 2～3%程度であった。通常、汚泥処理設備の消費電力量は処理場全体の 15～20%程度であり、高濃度消化に関連する設備の運転に要する消費電力量はこの 1 割程度と推察される。

高濃度消化後の汚泥濃度は平均 3.84%であり、通常の中温消化と比較して非常に高く、後段の汚泥脱水設備の効率的な運転に繋がっている。

表 3－6 高濃度消化の運転実績（2023 年度）

	単位	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	年間合計	日平均
初沈汚泥量（重力濃縮）	m3	3,250	3,288	3,146	3,274	3,187	2,971	2,871	2,816	3,099	3,112	2,890	2,997	36,901	101.1
初沈汚泥濃度（TS）	%	3.58	3.77	3.51	3.48	3.43	3.51	3.59	3.66	3.62	3.63	3.74	3.75	—	3.61
余剰汚泥量	m3	1,697	1,581	1,483	1,689	1,542	1,552	1,526	1,658	1,623	1,738	1,491	1,657	19,238	52.7
余剰汚泥濃度（TS）	%	4.50	4.83	4.77	4.73	4.53	4.28	4.48	4.38	4.70	4.56	4.91	4.60	—	4.61
余剰汚泥有機分率（VS/TS）	%	77.6	80.8	80.6	81.5	79.7	81.0	80.2	79.7	77.2	77.7	79.1	79.7	—	79.5
初沈汚泥・余剰汚泥量合計	m3	4,947	4,869	4,629	4,963	4,729	4,523	4,397	4,474	4,722	4,850	4,381	4,654	56,139	153.8
高濃度濃縮汚泥量	m3	2,219	2,134	1,959	1,943	1,920	2,135	1,866	1,969	2,032	2,094	1,894	2,070	24,235	66.4
消化汚泥濃度	%	3.87	3.71	3.78	3.89	3.92	3.84	3.80	3.93	3.92	3.89	3.82	3.79	—	3.84
消化汚泥有機分率（VS/TS）	%	77.5	77.5	76.8	77.7	78.9	78.6	78.3	79.1	78.6	78.9	78.4	78.8	—	78.2
消化ガス発生量	Nm3	82,233	82,107	78,902	82,956	75,219	73,398	73,634	76,170	80,384	84,593	78,031	82,198	949,825	2,602
ポリ鉄（購入量）	m3	19	8	15	16	11	7	15	14	16	8	16	16	161	0.441
高分子凝集剤（購入量）	kg	300	300	300	300	300	300	300	300	300	1,500	1,500	300	6,000	16.4
電力量（B-DASH全体）	千kWh	62.09	60.87	59.00	63.32	60.82	54.71	58.31	55.06	63.36	61.22	60.58	52.10	711.40	1.95
脱水汚泥量	t-wet	376.4	258.7	234.2	239.7	253.0	262.9	243.2	255.6	276.8	271.5	263.8	255.8	3,092	8.5
脱水汚泥含水率	%	72.6	71.8	72.3	72.9	73.4	73.0	73.0	73.3	73.6	73.5	73.1	72.4	—	72.9

2）消化特性

表 3－7 に調査対象処理場における高濃度消化の運転状況をまとめて示した。年間平均の消化温度 40℃、消化日数 15.1d、投入 VS 負荷量 4.77kgVS/(m³・d)で、極めて高い投入負荷条件にも関わらず、投入 VS 当たりのガス発生量は 544Nm³/(t・VS)、VS 分解率は 61%と、一般的な中温嫌気性消化における運転と同等の良好な運転が継続されている。

図 3－9 に 1 日当たりの平均ガス発生量の年間変動、図 3－10 に 1 日当たりガス発生量の推移の事例を示した。夏季にガス発生量がやや低下しているが、この現象は通常の消化方式でも同様である。ガス発生量の日間変動は、通常の処理場では年間平均値に対し 1～2 割程度の変動がみられるが、当該処理場における日間変動は 5%程度と比較的小さい。高濃度濃縮を行うことにより、消化タンクへの投入汚泥の負荷変動が小さく、その結果、ガス発生量も比較的小さかったものと推察された。

表 3－7 調査対象処理場における運転状況

項目	単位	年平均値
消化日数	d	15.1
消化温度	℃	40
投入VS負荷量	kg-VS/m ³ d	4.77
投入TS当りガス発生量	Nm ³ /t-TS	490
投入VS当りガス発生量	Nm ³ /t-VS	544
VS分解率	%	61.0
ガス成分濃度		
CH ₄	%	56
CO ₂	%	41

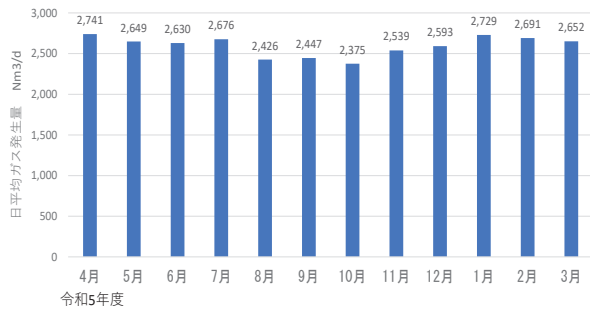


図3-9 1日当たり平均ガス発生量の年間変動

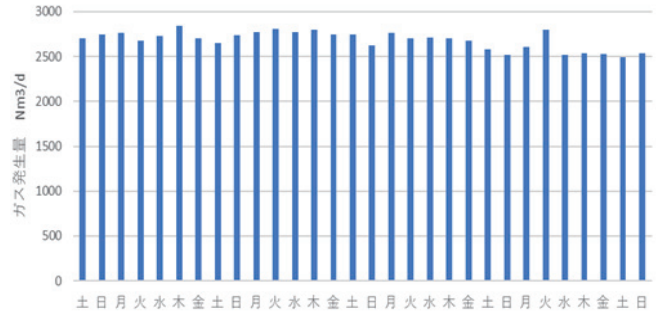


図3-10 1日当たり平均ガス発生量の月間変動(2023年7月)

なお、稀に高濃度濃縮設備の不調等で所定の汚泥濃度まで濃縮できない場合があり、その際は消化日数確保のため濃縮汚泥の一部を消化タンクに投入せず脱水設備へ直送して対応しており、運転担当者から、安定して全量を消化処理するためには消化日数 20d を確保できる槽容量が望ましいとの意見もあった。

3) 高濃度濃縮設備プロセスにおける汚泥性状と安定化要因

下水道統計²⁵⁾によると、消化タンク設備への投入有機物負荷は 0.20～1.40kgVS/(m³・d)の処理場が多く、平均では 0.791kgVS/(m³・d)と計算される。これに対し当センターでは平均 4.77kgVS/(m³・d)と極めて高負荷な条件下で安定した運転がなされている。高負荷条件下での安定運転を可能とする要因を探るため、高濃度濃縮設備関連の汚泥性状を調査した。図3-11にフロー図を、表3-8に分析の結果を示した。

水処理施設の各沈殿池から引き抜かれた汚泥は重力濃縮槽や機械濃縮槽で予備濃縮されてから高濃度濃縮設備に投入されるため、前処理時間が長い。投入汚泥の pH は 5.5、揮発性有機酸の濃度が 1,900mg/L を示す等、非常に酸発酵が進行し、通常の処理方式では酸敗現象を招きかねないレベルである。し

かし高濃度濃縮機において有機酸の約 1/3 は高濃度濃縮の分離液に移行するため、消化タンク投入汚泥における揮発性有機酸の負荷は低減される。消化タンク内のメタン菌濃度が高いこととの相乗効果により、安定したメタン発酵が行われる要因の一つとなっていると考えられる。

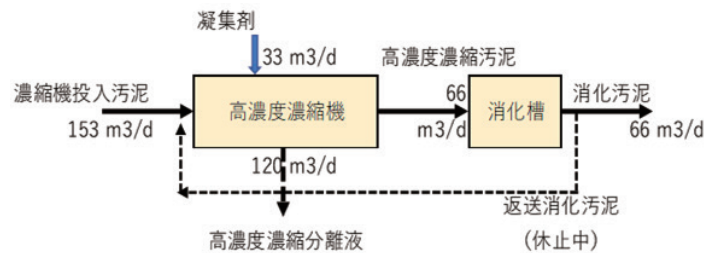


図3-11 高濃度濃縮設備廻りのフロー

表3-8 高濃度濃縮プロセスにおける汚泥性状分析結果

	単位	濃縮機投入汚泥	高濃度濃縮汚泥	高濃度濃縮分離液	分離液の負荷量比率※	消化汚泥	単位	脱水汚泥
水量(一部計算値)	m³/d	153	66	120	78	66	t/d	8.4
pH	—	5.5	—	6.0	—	7.3	—	—
アルカリ度	mg/L	820	—	410	39	4,300	—	—
揮発性有機酸	mg/L	1,900	—	780	32	190	—	—
蒸発残留物(TS)	mg/L	32,000	72,000	3,000	7	25,000	%wet	28.9
強熱減量(VS)	mg/L	28,000	65,000	1,700	5	18,000	%wet	23.2
	%TS	87.5	90.3	56.7	—	72.0	—	80.3
浮遊物質(SS)	mg/L	30,000	—	930	2	25,000	—	—
CODcr	mg/L	45,000	89,000	3,200	6	38,000	—	—
全窒素	mg/L	2,620	14,500	212	6	4,660	%wet	1.74
溶解性アンモニア窒素	mg/L	309	—	—	—	2,140	—	—
全りん	mg/L	929	1,450	305	26	1,060	%wet	0.77
りん酸イオンりん	mg/L	565	—	—	—	837	—	—

※高濃度濃縮機投入負荷量に対する濃縮分離液の負荷量(消化槽に投入されない負荷量)の比率

なお、高濃度消化においては消化タンク内のアンモニア濃度が高くなり消化阻害を引き起こす可能性があるため、本設備では消化汚泥の一部を高濃度濃縮設備に返送しアンモニアを濃縮分離液として削減するフローとなっている。消化汚泥の T-N が 4,660mg/L、NH₄-N が 2,140mg/L と、一般的な中温消化の約 2 倍の値ではあるが、メタン発酵阻害が生じるレベル²⁹⁾には達していないため、消化汚泥の返送は現在行われていない。

1) から 3) の結果から、当センターの高濃度消化設備においては、高負荷条件下でも安定した消化性能を発揮し、良好なガス発生量と VS 分解率が得られていることが確認された。高濃度濃縮設備等の追加設備や薬品コストは要するものの、本調査で得られた知見は、高濃度消化が消化タンク容量の削減や後段脱水設備の縮小を可能とし、特に大都市等の用地制約がある処理場において有望な選択肢の一つとなり得ることを示す事例といえる。

(4) まとめ

① 処理場の運転管理状況が嫌気性消化に与える影響等に関する実態調査

本調査では、ガス発生量の多い処理場、脱水汚泥発生量の少ない処理場および消費電力量原単位の小さい処理場を対象に、処理場運転管理手法と嫌気性消化の関係について、合計 12 処理場を対象に実態調査を行った。その結果、効率的な嫌気性消化の実現には多くの運転管理要素が関係していることが確認された。特に、処理場に流入するバイオマスを最初沈殿池で効率的に回収し、新鮮な状態で消化タンクに投入する運転管理が、バイオガスの増量、汚泥発生量の削減、および処理場の消費電力量の削減に繋がる重要な要素であることが示唆された。

今後は、これらの知見を基に、処理場に流入する溶解性有機分を最初沈殿池で効率的に回収する手法、および窒素除去を目的に高度処理を行っている処理場（反応タンクで高 SRT 運転）における効率的な消化タンクの運転方法の検討を予定している。

② 高濃度消化の運転状況実態調査

消化タンク投入汚泥 TS7～9%、有機物負荷 4.77kgVS/(m³・d)で運転している処理場の実態調査を行った結果、大きなトラブルもなく平均ガス発生量は 544m³/tVS、平均 VS 分解率は 61% と良好な運転が行われていることが確認できた。高濃度濃縮設備等の追加設備や薬品代等のコストは要するものの、本実態調査で確認された当センターの高濃度消化施設における運転実績は、消化タンク容量の大幅な削減、加温に要するエネルギーの低減、および高濃度な消化タンクからの引抜汚泥による後段の脱水設備の縮小といった期待ができることを示している。これらの特徴を持つ高濃度消化法は、特に大都市等の用地に制限を受ける処理場等において有望な選択肢の一つになると考えられた。

投入汚泥濃度が TS6%を超える新しい高濃度消化処理場もみられることから、今後はそれらの運転状況に関する情報を収集し、高濃度消化システムの得失を明らかにしていく予定である。

3.2 バイオガス創出に係る基礎実験

（1）検討の概要

GHG 排出量の削減に向け、嫌気性消化による汚泥の減量化やそれにより得られるバイオガスの活用が重要な役割を担うと考えられる。国内の下水道分野では、嫌気性消化を採用する約 300 処理場のうち、消化温度 36℃程度、消化日数 20d 程度の「中温消化」が 8 割以上で採用されており、主流となっている。一方、消化温度 55℃付近で運転される「高温消化」は、処理がやや不安定とされるものの、15d 程度の消化日数で中温消化と同等の消化率が得られることが知られている³⁰⁾。しかし、高温消化におけるバイオガス発生量や消化汚泥の性状等を一般的な中温消化と具体的に比較した知見は少なく、技術の普及促進には、運転条件の違いが消化性能に与える影響を明らかにする基礎的な知見の蓄積が求められている。

更に、消化設備の長期安定運転には定期的な消化タンクの開放点検が不可欠である。しかし、消化タンクの数が 1 槽あるいは少ない処理場では、消化を継続しながらの点検が困難である。高温消化は短期間で高い消化率が得られるため、点検時に一部タンクを高温消化に切り替えることで処理能力を増強し、全量を消化する状態を維持することや、未消化での汚泥搬出量の削減、およびその期間の短縮といった可能性が考えられる。

こうした背景のもと、本検討では嫌気性消化の基礎的な知見を蓄積するための実験を行う。過年度は JS 技術開発実験センターのラボスケールの実験装置を用いて高温消化および中温消化の連続消化実験を実施し、投入負荷条件の違いによる消化特性を検証した。本年度は、中温消化と高温消化の切り替え運転の可能性を検証するため、ラボスケールで連続消化実験を行った。

（2）検討方法

本実験では、消化設備の開放点検時を想定し、他の消化タンクの運転条件を中温消化から高温消化へ一時的に切り替え、点検終了後に再び中温消化に戻す運転手法の可能性を検証した。この検証は、消化タンクの連続運転を維持しつつ、点検期間中も汚泥減量化を継続できる可能性を探ることを目的とした。既往の知見では、中温消化と高温消化では活動する菌群が異なるため、それぞれの温度での馴致期間が必要とされている³¹⁾が、本実験では、温度・消化日数を段階的に切り替えることで短期間での移行が可能であることを検証した。



図3－12 連続消化実験装置の外観

JS 技術開発実験センターに設置された連続消化実験装置（容量 5L、図 3－1 2 参照）1 槽を用い、1 回の連続実験を行った。この実験では、真岡市水処理センターの消化タンク（消化温度 36℃、消化日数 35d）から採取した消化汚泥を種汚泥とし、同センターの混合濃縮汚泥を投入汚泥とした。消化温度の切り替え期間や運転条件は、メタン菌の増殖速度（数日～数週間）や過去の馴致期間の知見（1 ヶ月程度で安定）を参考に設定した（図 3－1 3 参照）。消化温度 36℃程度（35～37℃）、消化日数 25d で 2 週間運転を継続した後、約 4 週間かけて温度を 1 週間当たり 3℃ずつ上昇させ、同時に消化日数を減少させ、最終的に消化温度 50℃、消化日数 15d

となるよう運転を設定した。更に、高温消化で 2 週間程度安定性を確認できた場合、以降は同様の期間をかけて元の消化温度と消化日数に戻す運転条件を設定した。汚泥投入は、実験の都合上、1 週間分を月～金の 5 日間で均等に投入した。運転状況を確認するため、実験期間中は消化ガス発生量を連続的に測定した。また、発生ガスのメタン濃度、投入汚泥および消化汚泥の性状を 2 週間ごとに分析した。

（3）検討結果

実験は、まず消化温度 36℃程度、消化日数 25d で安定運転を確認後、（2）で示した計画に従い消化温度および投入汚泥量を段階的に増加させて高温消化（消化温度 50℃、消化日数 15d）への移行を試みた。実験期間における主要な運転条件（消化温度、投入負荷）および主要な消化状況の指標（消化ガス発生量、消化ガス中の CH₄ 濃度、有機酸濃度）の推移を図 3－13 および図 3－14 に示す。運転中、ガス発生量が不安定となったため、汚泥の投入を一時的に中止する等、投入条件を見直した結果、実験期間を約 2 週間延長した。

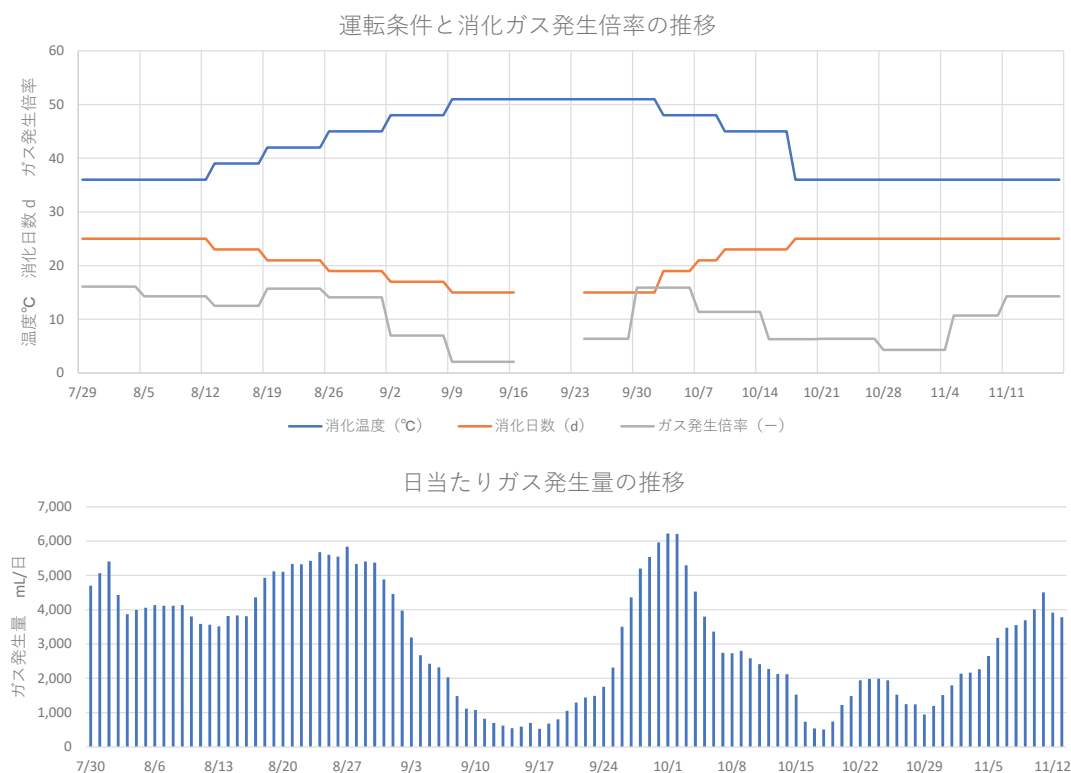


図 3－13 消化槽運転条件（消化温度、投入負荷の変更）とガス発生量の推移

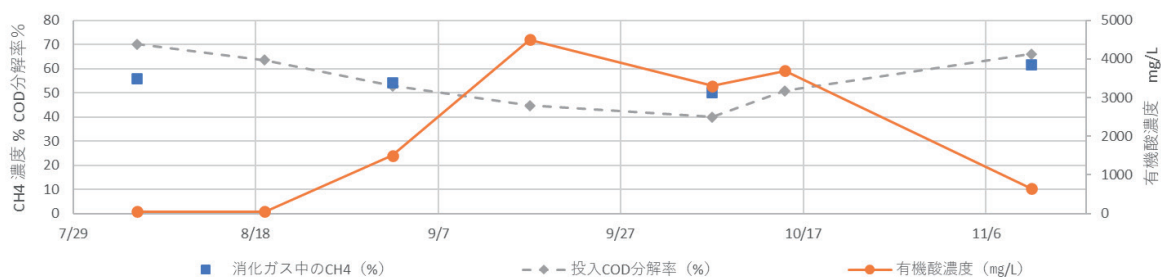


図 3－14 実験期間における主な消化指標の推移

時系列での主な結果は以下の通りである。

- 第 1～2 週目は、消化温度 36℃前後の中温条件で運転し、ガス発生倍率は 14.3～16.1 倍と安定していた。
- 第 3 週目から消化温度および投入負荷量を段階的に上昇させ、第 4 週目まではガス発生倍率が 15.7 倍と高い値を維持した。
- 第 5 週目に、消化温度を 45℃に上昇させた時点からガス発生倍率が徐々に低下し始めた（第 6 週 48℃で 7.0 倍、第 7 週 50～55℃で 2.1 倍）。これに伴い、タンク内有機酸濃度も上昇し、第 9 週には 4,500mg/L に達した。
- 50～55℃の高温状態において、一時的に汚泥投入を停止した結果、9 週目以降ガス発生量が徐々に回復し、第 10 週には 15.9 倍まで回復した。これは高温メタン菌の増殖によるものと推察される。
- その後、中温消化に移行するために消化温度を段階的に下げたが、47～49℃の温度帯でガス発生倍率が急激に低下し、35～37℃の中温消化に戻してから回復するまで約 4 週間を要した。

これらの結果から、高温消化への切り替え後、3～4 週間でガス発生量が回復したことから、高温メタン菌が増殖したと推察されるものの、高温から中温への切り替え時にも同様に、ガス発生量の回復に時間を要し、菌群の遷移・馴致に時間を要したことが示唆された。45～49℃の中間温度帯ではガス発生量が大きく低下したことから、中温メタン菌、高温メタン菌いずれも活性が低い状態であったと推察される。これらの傾向は既往文献^{31),32)}でも示されている。以上の結果から、本実験で設定した短期間での温度切り替え運転では、消化性能の維持が困難であることが明らかとなった。

しかしながら、実務的には消化タンクの開放点検や設備の改築時において、消化温度の切り替え期間中に汚泥の一部を嫌気性消化を経ずに脱水することで一時的に対応し、菌群の馴致期間を確保することで、消化温度の切り替え自体は可能であると考えられる。点検整備期間が長期化する場合等、全期間を直接脱水で対応するよりも、高温消化への切り替えを活用する方がコスト低減や処理効率向上につながる可能性も示唆された。ただし、切り替えに要する期間や運転条件の最適化には、現場の実態や過年度の調査結果等を踏まえた慎重な検討が必要である。

（４）まとめ

本実験では、消化設備の開放点検を容易に実施するため、一部の消化タンクの温度条件を一時的に中温消化から高温消化へ切り替え、点検終了後に再び中温消化に戻す運転手法の可能性をラボスケールで検証した。本実験で得られた主な結果は以下の通りである。

- 本実験で設定した短期間での温度切り替え運転では、消化性能維持が困難であることが明らかとなった。特に、消化温度 45～49℃の中間温度帯ではガス発生量が大きく低下したことから、中温メタン菌、高温メタン菌いずれも活性が低い状態であったと推察される。
- 高温消化への切り替え時だけでなく、高温から中温への切り替え時においても、ガス発生量の回復に時間を要し、菌群の遷移・馴致に時間を要したと示唆された。
- 消化温度の切り替えを実務的に行う場合は、菌群の馴致期間を考慮し、移行期間中は汚泥の一部を、嫌気性消化を経ずに脱水する等の方法で対応することが現実的と考えられる。

3.3 バイオガス創出・活用技術の開発・実証

下水処理場において嫌気性消化の導入を推し進めるには、運転方法の改善や技術の改良等により消化効率を向上させてバイオガス発生量の増加を図ると共に、バイオガスの持つポテンシャルを最大限に引き出すために未利用バイオガスの活用やバイオガスの効率的な利活用を可能とする技術が必要である。また、建設コストや維持管理コストの縮減を図る必要もある。

本検討では、民間企業との共同研究等により新たな嫌気性消化技術を開発・実用化するための実証試験等を実施する。2022 年度から 2023 年度にかけて、「脱炭素社会実現に向けたバイオガス利活用技術および嫌気性消化技術の開発」として、(a)消化効率（投入 VS 当たりガス発生量等）の向上によりバイオガス発生量の増加に寄与する嫌気性消化技術、(b)発生したバイオガスの持つポテンシャルを最大限に引き出すことに寄与する利活用技術、(c)低コスト化に寄与する嫌気性消化技術、のいずれかまたは 2 つ以上に該当する技術を開発する新たな共同研究の公募を行い、2023 年度より 3 件の共同研究者を開始した。2024 年度も引き続き、以下の 3 技術に関する共同研究を実施した。

○集中加温型高速中温消化システムとステンレス合板製消化タンクによる低コスト嫌気性消化技術

（共同研究者：メタウォーター㈱）

○中小規模向けユニット式下水汚泥消化システム

（共同研究者：日立プラントサービス㈱）

○予熱加温保持消化技術とボルト接合型パネルタンクによる低コスト嫌気性消化システム

（共同研究者：㈱神鋼環境ソリューション）

3.3.1 集中加温型高速中温消化システムとステンレス合板製消化タンクによる低コスト嫌気性消化技術

（1）検討の概要

一般的な中温嫌気性消化システムに対し、余剰汚泥を集中的に加温することで消化日数の短縮を図る集中加温型高速中温消化システム（以下、「集中加温システム」と略記）と、ステンレス合板で製作することでコスト縮減等が可能なステンレス合板製消化タンクの組み合わせにより、従来よりも LCC 縮減が可能な嫌気性消化技術の開発を行う。過年度は、実証設備を設置し実証実験、安定性等に関する補足実験等を行った。本年度は実証実験、補足実験および導入効果についての机上検討を実施し、共同研究を完了した。

（２）検討方法

① 技術の概要

本技術は、集中加温システムとステンレス合板製消化タンクを組み合わせたものである（図 3-15）。集中加温システムは、濃縮余剰汚泥のみを 60℃以上に加温（以下、「集中加温」と表記）することで余剰汚泥中の菌体を不活性化し、その後の消化タンク内での分解を促進する。この分解過程で、菌体内に多く含まれるタンパク質からアンモニア性窒素等が生成され、アルカリ度が増加することで pH の急激な変化を抑制する緩衝作用が強化される。これにより、一時的に有機酸が大量に生成された場合でも酸敗を防ぎ、安定した嫌気性消化が可能となることで、消化日数の短縮に寄与する。加温された余剰汚泥は無加温の初沈汚泥と消化タンク内で混合され中温消化（37℃程度）が行われることとなる。ステンレス合板製消化タンクは、防食性能を有するステンレス合板を用いることで、底部以外の防食塗装を不要とする。また、インペラ型の高効率攪拌機を採用することで、低動力化と堆積砂対策を図っている。

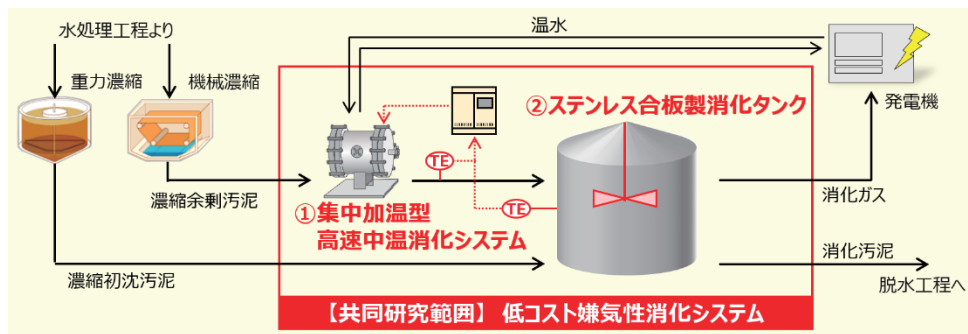


図3-15 「集中加温型高速中温消化システムとステンレス合板製消化タンクによる低コスト嫌気性消化技術」のフロー

② 調査概要

下水処理場に有効容量 50m³ のステンレス合板製消化タンクを 1 槽（以下、「1 系」と表記）、4m³ の消化タンク 2 槽（以下、「2 系」、「3 系」と表記）を設置し、2023 年 11 月から 2024 年 12 月まで実証実験を行った。設備概要および実験条件を図 3-16 および表 3-9 に示す。1 系と 2 系は集中加温システムを用い、1 系は消化日数 10d、2 系は過負荷耐性試験のために消化日数 8d で運転した。3 系は対照系として消化日数 20d とした。更に、限界負荷等の確認のため、ラボスケールでの補足実験も併せて実施した。

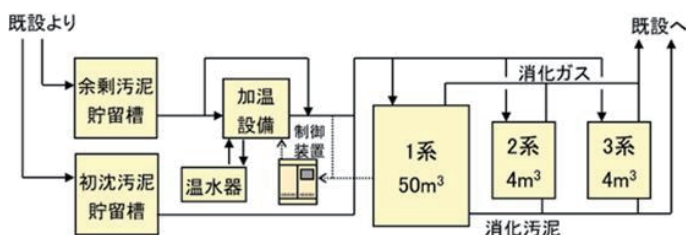


図3-16 設備の概略フロー

表3-9 各実験条件

	系列	有効容積	固形物比 (生/余剰)	集中加温	消化日数
実証実験	1系 実証系	50m ³	1.0～1.5程度	あり	10d
	2系 過負荷系	4m ³		あり	8d
	3系 対照系	4m ³		なし	20d
補足実験	実験系	2L	1.0～3.0	あり	8～10d
	対照系	2L		なし	8d

ステンレス合板製消化タンクは、1 系を用いた通年の消化性能の確認を行うと共に、テストピースを用いた耐久性確認試験や、流体解析による攪拌能力の評価を行った。耐久性は耐腐食性（硫酸・有機酸）、耐摩耗性の観点から実験方法・評価方法等を設定し、加速試験を実施した（表 3－10）。攪拌能力は、通常攪拌と堆積物を巻き上げて消化汚泥と共に排出する強攪拌の両条件で、流体解析を用いて評価した（表 3－11）。

表 3－10 ステンレス合板製消化タンク 耐久性確認実験の概要

	耐腐食性	耐摩耗性
実験方法	酸浸漬試験	サンドブラスト試験
試験片	SUS316Ti	実験対象：SUS316Ti（母材：鋼板） 比較対象：A 種防食（母材：鋼板）
実験条件	試験溶液：10%硫酸、5%酢酸 試験日数：1d、3d、30d	砂粒径：4 号珪砂 砂吹付条件：0.2MPa／30°／60sec
評価方法	重量変化から減肉速度を算出、 35 年相当の減肉深さとして評価	A 種防食との相対比較および厚み変化 から 35 年相当の摩耗深さとして評価

表 3－11 ステンレス合板製消化タンク 攪拌能力評価のための流体解析条件

項目	設定条件		備考
	通常攪拌の確認	強攪拌の確認	
有効容積	4,000m ³		本タンクの想定最大規模
槽形状	円筒形 Φ17.2m×H17.2m		一般的な鋼板製消化タンク程度
粘性条件	300cP（＝mPa・s）		消化汚泥 3%（投入汚泥 6%）相当
対象流体	1 流体（汚泥）	2 流体（汚泥＋砂）	砂物性：粒径 0.4mm、密度 2.65g/cm ³ 沈砂池を抜ける粒径より設定 ³³⁾
砂添加量		4m ³ 、48m ³	1 ヶ月分、1 年分相当 ³⁴⁾
回転数	1.6, 2.9, 3.5rpm	3.5rpm	
評価指標	有効容積のうち死水域が占める割合	砂の浮遊率、 堆積削減率	死水域：流速＜0.01m/s の領域 浮遊率から堆積削減率を机上計算

本技術の導入によるコスト削減効果の検証として、消化なし（Case0）、従来中温消化（Case1）、今回技術の導入（集中加温のみ：Case2-1、SUS 合板槽のみ：Case2-2、両技術：Case2-3）の各ケースについて、処理場規模毎に LCC を試算した。

（3）検討結果

① 集中加温システムに関する検討³⁵⁾

1) 消化性能

各系列の槽容量当たりの消化ガス発生量の推移を図 3－17、実験期間全体の各種指標値（平均）を表 3－12 に示す。なお、定格消化日数到達後の設備トラブル期間（Ⅰ～Ⅲ；図 3－17 の着色期間）は各種指標値の試算対象外とした。1 系（消化日数 10d）は、3 系（消化日数 20d）の 2 倍の投入汚泥量において槽容積当たりガス発生量は 1.9 倍であった。2 系は 2.5 倍の投入汚泥量に対し、槽容積当たりガス発生量は 1.5 倍にとどまった。投入 VS 当たりガス発生量では、1 系（521Nm³/t-投入 VS）と 3 系（550Nm³/t-投入 VS）は概ね同等で、2 系は 340Nm³/t-投入 VS と低い値となった。消化日数が 8d の場合では、消化タンクからの排出までに有機分の

分解が十分に進行せず、未分解の有機分が 10d や 20d の場合と比較して増加したことで、ガス発生量が低下したと考えられる。また、1 系と 3 系の消化汚泥を対象に遠心脱水を模擬した簡易脱水試験およびろ液性状分析（S-TN、S-TP、S-COD_{Cr}）を実施した。その結果、1 系の脱水性およびろ液性状は 3 系と同等であり、集中加温システムによる消化日数の短縮が脱水性やろ液性状へ悪影響を及ぼさないことを別途確認している（データ非掲載）。

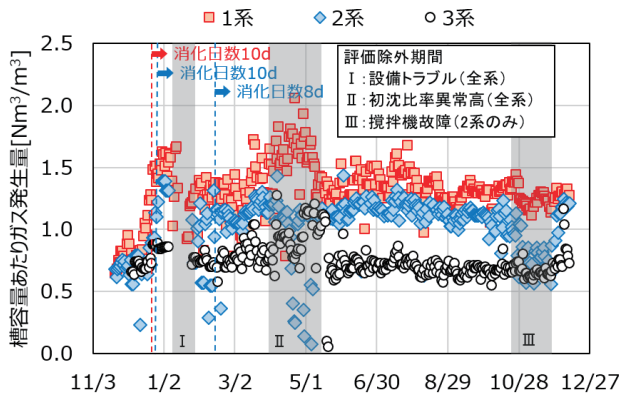


図3-17 槽容積あたりガス発生量の推移

表3-12 各種指標値（全期間平均）

項目		1系 実証系	2系 過負荷系	3系 対照系
消化日数	d	9.9	8.0	19.7
	対3系(負荷として)	2.0	2.5	1
槽容積あたり ガス発生量	Nm³/m³	1.34	1.06	0.71
	対3系	1.9	1.5	1
投入VSあたり ガス発生量	Nm³/t-投入VS	521	340	550
	対3系	0.95	0.62	1
VS分解率	%	54.8	53.9	56.9
	対3系	0.96	0.95	1

2) 消化の安定性

各系列の消化汚泥の pH と VFA（揮発性有機酸）の推移を図3-18に示す。1 系と 3 系では pH の低下や VFA の顕著な蓄積といった安定性指標への影響は確認されず、2 系でもほぼ安定していたが、設備トラブルにより初沈汚泥の比率が高くなった期間 II で VFA の蓄積が確認された。この時には固形物比（初沈/余剰）が 2.5 程度まで上昇しており、緩衝能力が低下して嫌気性消化が不安定になったと考えられる。また、補足実験でも消化日数 8d、固形物比 2.5 とした場合に VFA の蓄積が見られたが、消化日数 10d では固形物比 3.0 でも蓄積は確認されなかった（図3-19）。

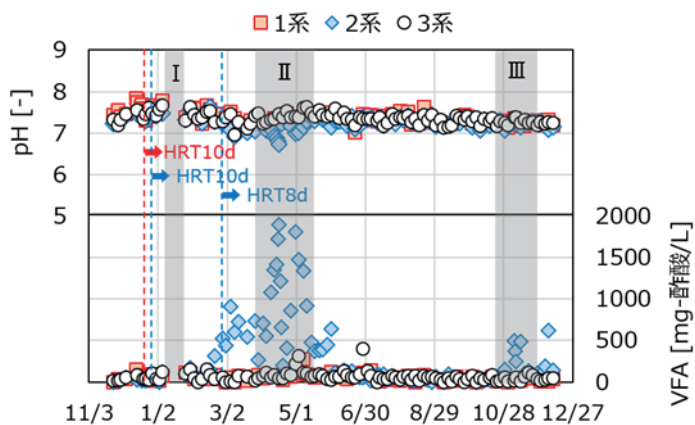


図3-18 各系列の pH および VFA の推移

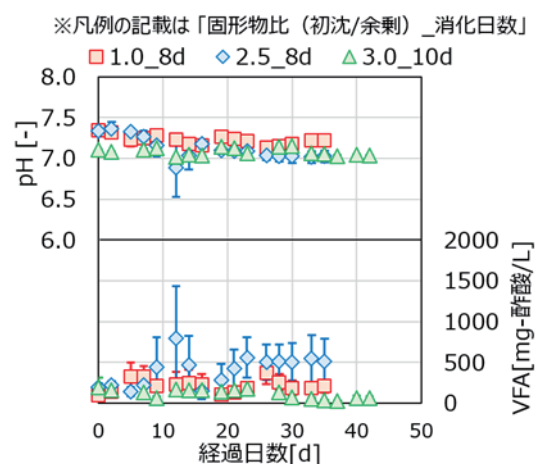


図3-19 汚泥比率および消化日数による安定性指標の影響（補足実験）

補足実験（消化日数 8d、固形物比 1.0）では、実験系は対照系と比べて VFA/M アルカリ度*が平均で約 64%低減しており、集中加温の導入により嫌気性消化の安定性が向上したと考えられる³⁶⁾（図 3-20）。実証実験において、2 系の期間Ⅱでは、VFA が約 500mg/L 以上になるとメタン濃度が 55%以下に低下し、その 9d 後に pH が 7.0 未満となった（図 3-21）。このことから、VFA またはメタン濃度の連続監視が、嫌気性消化の異常を監視する指標として実用可能であると評価した³⁷⁾。

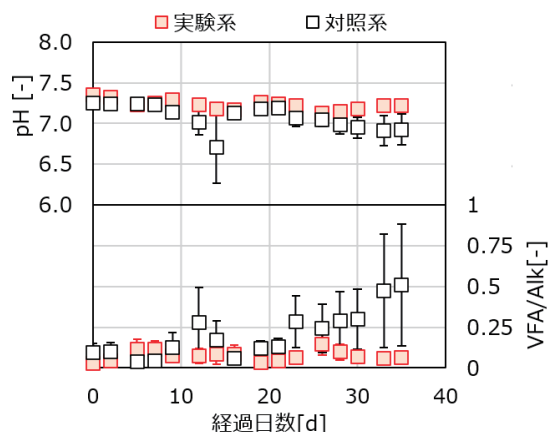


図 3-20 各系列の pH および VFA の推移（補足実験）

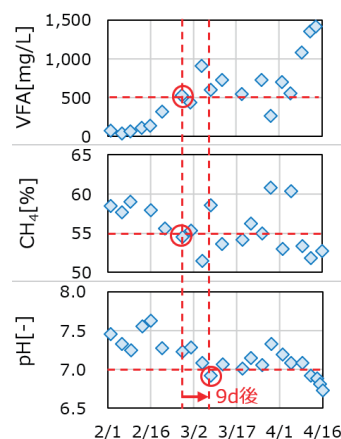


図 3-21 2 系（期間Ⅱ周辺）の汚泥・ガス性状の推移

② ステンレス合板製消化タンクに関する検討

1) 耐久性

耐腐食性について、酸浸漬試験による加速試験の結果をもとに算出した減肉速度を図 3-22 に示す。30d 経過時点では初期よりも減肉速度が低下しており、ステンレスの表面に不動態被膜が形成されたことによるものと考えられる。30d 後の減肉速度から算出した 35 年相当の減肉深さは、硫酸および酢酸いずれも SUS 厚 0.3mm の 10%未満であった（図 3-23）。耐摩耗性について、サンドブラスト試験の結果、SUS316Ti の 35 年相当の摩耗深さは SUS 厚 0.3mm の 17%程度であり、A 種防食よりも優れていた。以上より、本研究で使用したステンレス合板は 35 年以上の耐久性（耐腐食性・耐摩耗性）を有すると考えられる。

* 消化汚泥中の VFA（揮発性有機酸）と M アルカリ度の比率が低下すると、VFA に対するアルカリの緩衝能が強くなり、嫌気性消化の安定性が向上すると考えられる。

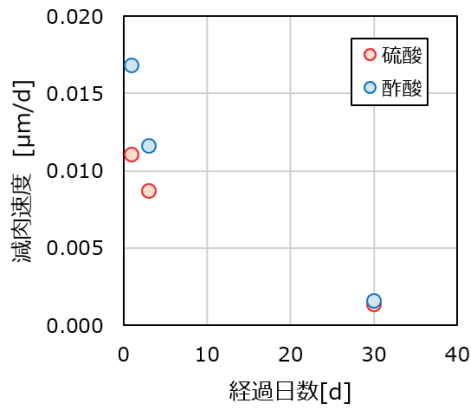


図3-22 耐腐食試験における減肉速度の推移

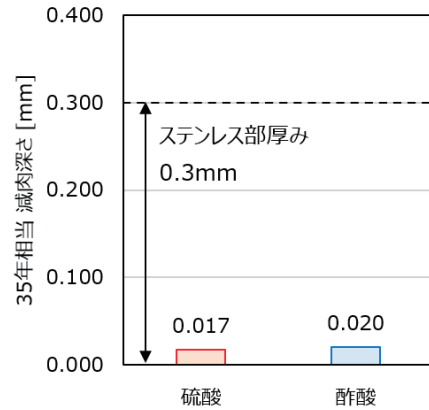


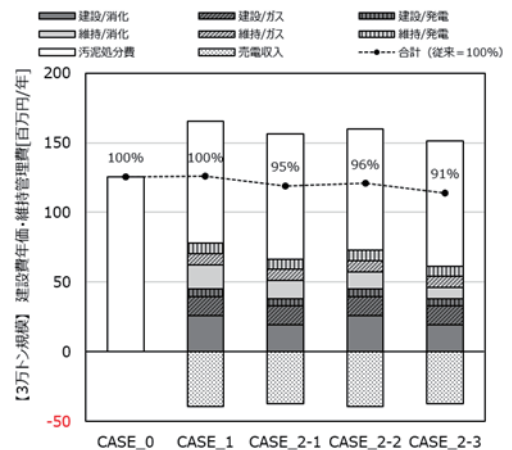
図3-23 35年相当減肉深さ(試算結果)

2) 攪拌力

通常攪拌の解析では、回転数 1.6～3.5rpm のいずれでもタンク内全域に流動が形成され、投入動力密度 $0.24\text{W}/\text{m}^3$ 以上の場合には死水域の割合が 0.1%以下になることが流体解析の結果、確認された。強攪拌の解析は、過去の報文³⁴⁾を参考に、消化タンク内に 1 ヶ月分および 1 年分の砂が堆積した状態を模擬して行った。その結果、1 ヶ月分の堆積砂を模擬したケースでは、強攪拌により砂の堆積は解消され、ほぼ 100%が浮遊することが確認された。一方、1 年分の砂の堆積を模擬したケースでは、中央部に砂の偏在が見られたものの、槽容量の 4%に相当する砂が底部に偏在した。この結果をもとに 10 年後のタンク内堆積量を試算したところ、10d に 1d の間隔で強攪拌運転をすることにより砂の堆積量が 70%削減できることが示された。

③ コスト削減効果の検討

コスト削減効果の試算結果を図 3-24 に示す。処理場規模 3 万 m^3/d の場合、消化なし (Case0) や従来消化技術 (Case1) と比べて、集中加温システム、SUS 合板製消化タンクを単独導入、または共に導入した場合 (Case2-1～Case2-3) のいずれも LCC は同等以下となった。また、処理場規模毎に消化施設導入の損益分岐点を推定した結果、各技術単独の導入で 2 万 m^3/d 台半ば、両技術の導入で 1 万 m^3/d 台後半となった。

図3-24 コスト試算結果
(3 万 m^3/d 規模)

（４）まとめ

本研究は、過年度から実証実験や補足実験を実施し、導入効果等の机上検討を行い、本年度をもって完了した。

- ・ 集中加温システムでは消化日数 10d で安定した消化性能が得られることを確認した。
- ・ ステンレス合板製消化タンクは、使用するステンレス合板が 35 年相当の耐久性を有していること、10d に 1d の強攪拌で砂等の堆積物量を約 70%削減できること等を検証した。
- ・ 3 万 m^3/d 規模の下水処理場における LCC の試算結果において、消化なしや従来の消化技術と比べて LCC は同等以下となった。
- ・ 処理場規模毎に消化施設導入の損益分岐点を検証した結果、各技術単独の導入で 2 万 m^3/d 台半ば、両技術の導入で 1 万 m^3/d 台後半になることを確認した。

今後は、これらの成果を踏まえ技術資料の整理等を行う予定である。

3. 3. 2 中小規模向けユニット式下水汚泥消化システム

（１）検討の概要

中小規模の下水処理場向けに特化したユニット式下水汚泥消化システムにより、従来と比べて LCC 縮減が可能な嫌気性消化技術を開発する。過年度は実証設備の設計検討を行った。本年度は実証設備を建設し、実証実験を開始した。また、要素技術のひとつである振動濃縮装置について性能等を検証した。

（２）検討方法

① 技術の概要

本技術は、中小規模の下水処理場への嫌気性消化の導入促進を目的とし、従来よりも小型化・簡易化されたユニット式下水汚泥消化システムである。汚泥前処理ユニット、ガスホルダー一体型組立式消化タンク、補機・制御ユニットの 3 つの要素技術を組み合わせることで、システム全体として効率的かつ経済的な汚泥処理を実現し、その導入拡大を目指す（図 3-25）。

各ユニットは以下の役割を担い、システム全体として機能する。汚泥前処理ユニットは、簡易的な毛髪除去技術と振動濃縮装置による高濃度の濃縮技術から構成され、消化タンクの安定運転と施設容量の縮減を図る。ガスホルダー一体型組立式消化タンクは、消化タンクとガスホルダーとを一体的な組み立て型とすることで、省スペース化と短期間での設置を可能とする。また、ガスホルダー内の生物脱硫担体による脱硫用の活性炭消費量を削減し、タンク内の 2 台の水中攪拌機による定期的な強攪拌により堆積砂対策を行うことで維持管理の簡素化を図る。補機・制御ユニットは、ガス精製装置や発電装置等を同一のコンテナボックス内に収め、コンパクトで短工期の据付けを実現する。発電時の排熱を消化タンクの加温に利用することでエネルギー効率を高め、システム全体の運用コスト削減に寄与する。

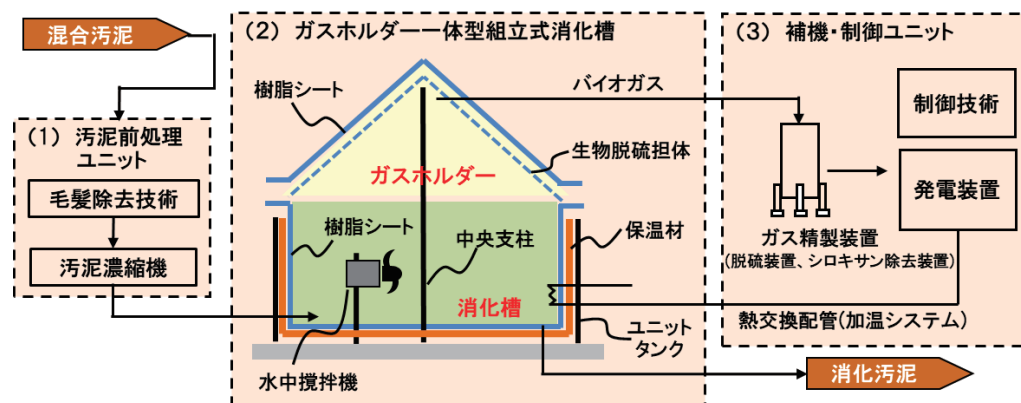


図3-25 「中小規模向けユニット式下水汚泥消化システム」のフロー

② 調査概要

本研究では、下水処理場内にガスホルダー一体型消化タンクの実証設備を設置し、現地据付等に要する期間を確認、通年での嫌気性消化の性能等を確認するとともに、要素技術である汚泥前処理ユニットの性能確認や樹脂シートの材料試験等を行う。同処理場は標準活性汚泥法であり、余剰汚泥は汚水分配槽へ返送され、初沈汚泥と共に引き抜かれ重力濃縮槽で濃縮分離された後に既設消化タンクへ送泥される。実証設備には重力濃縮後の汚泥の一部を供給する。実証設備の消化タンク容量は 176m^3 であり、TS6%程度に濃縮した汚泥を投入し、消化日数 30d の中温消化で運転する。評価項目と目標値を表3-13に示す。嫌気性消化の安定性確認のため、pH、M アルカリ度、アンモニア、有機酸を測定した。

表3-13 実証試験での評価項目と目標値

評価項目	目標値		
投入 VS 当たりのガス発生量	500Nm ³ /tVS 以上		
消化率	50%以上		
消化の安定性に係る項目	一般的な嫌気性消化における値 ³⁷⁾ と同等	pH	6.4<
		VFA	<40(mg-CH ₃ COOH/L)
		M アルカリ度	1,500~5,000 mg-CaCO ₃ /L
		メタン濃度	60%程度

汚泥前処理ユニットの汚泥濃縮装置について、ラボ実験による汚泥濃縮性等の性能確認と、実規模を想定したスケールアップの検討を行った。振動濃縮装置はトラフ部にスクリーンを設置し、加振による振動で汚泥を移送させながら、凝集汚泥と間隙水を分離する構造とした（図3-26）。ラボ実験では、400mmL×50mmW、 $\theta \approx 7.5^\circ$ の有効スクリーン形状を持つ装置に、150mL の重力濃縮汚泥（TS1.0~1.7%、SS8,700~15,000mg/L）に TS 比 0.5%となるように

高分子凝集剤を添加したものを供給し、濃縮性や SS 回収率等を評価した。スクリーンにはパンチングメタル（ $\phi 1\text{mm}$ 、開口率 22.6%）を用いており、分離距離 400mm 以上の評価では、他のパンチングメタル（ $\phi 1.5\text{mm}$ 、開口率 22.6%）も併用した。

実規模を想定した装置では、 $1,000\text{mmL} \times 50\text{mmW}$ 、 $\theta \simeq 13^\circ$ のスクリーンを用い、ラボ実験と同様に調整した汚泥を 2L 供給して評価を行った。

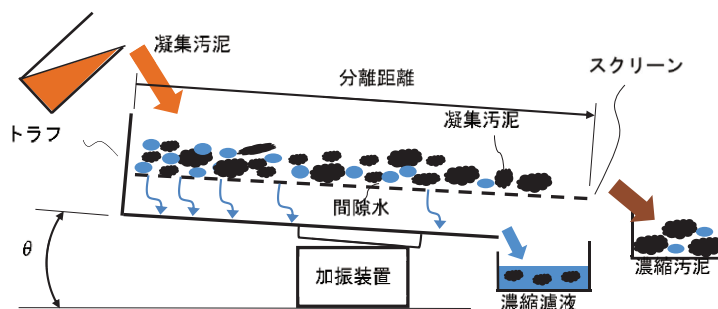


図3-26 汚泥濃縮実験装置のイメージ

上記の他、毛髪除去技術の実験、樹脂シートの材料試験、生物脱硫効果の検証、堆積砂対策のシミュレーション試算等も実施した（結果非掲載）。

（3）検討結果

① ガスホルダー一体型消化タンクの組立確認・評価

図3-27～3-29に実証設備の組立状況を示す。補機・制御ユニットを設置後、パネルをボルト接合し、内部に防食性を有する樹脂シートと支柱を設置した。その後、水張試験を実施した後に、ガスホルダー部分を樹脂シートで覆い、設置を完了した。本研究で用いた 176m^3 規模の消化タンクの設備の設置に要した期間は、施工時に生じたトラブル等の対応を除くと、土木基礎工事に 30d 程度、消化タンク本体の組立に 7d 程度、機械・電気工事等に 90d 程度、合計 127d 程度を要した。今後はこの結果を精査し、実規模での工期を算定して工期の短縮効果を確認する予定である。



図3-27 消化タンクの組立



図3-28 樹脂シートの設置

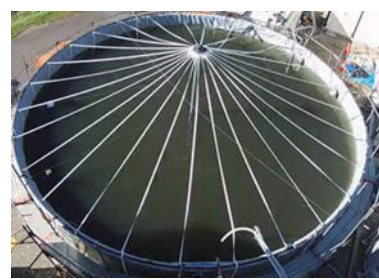


図3-29 水張試験

② 冬季の運転結果³⁸⁾

実証設備の冬季の運転結果を表 3-14 に示す。消化タンクは消化ガス発電排熱を利用して加温している。冬季（1 月～3 月）の各月の平均気温は-6.1～-2.2℃と低かったが、発電排熱を用いて加温して中温消化することが可能であり、投入 VS 当たりガス発生量および消化率はいずれも目標を達成した。また、表 3-15 に示すとおり、各種項目についても一般的な中温嫌気性消化と同程度の値であり、安定した嫌気性消化が維持されていたと考えられる。

表 3-14 消化施設の運転結果（冬季）

評価項目	1月	2月	3月
投入VS当たりのガス発生量 (Nm ³ /tVS)	558.7	583.5	516.8
消化率 (%)	57.8	53.4	50.8

表 3-15 消化施設の安定性に関わる測定結果（冬季）

評価項目	1月	2月	3月
pH (-)	7.03	7.07	7.07
VFA (mg-酢酸/L)	42	10	61
Mアルカリ度 (mg-CaCO ₃ /L)	2800	2600	2700
メタン濃度 (%)	54.1	55.9	56.4

③ 振動濃縮装置に関する検討³⁹⁾

ラボスケールでの試験結果として、スクリーン別の分離距離と汚泥濃縮効果を図 3-30 に示す。目幅 φ1mm（開口率 22.6%）のパンチングメタルで TS≧6%を達成するには、分離距離が 1,600mm 以上必要であった。一方、目幅 φ1mm（開口率 22.6%）のスクリーンを用い、400mm の分離距離で固液分離した後、更に φ1.5mm（開口率 22.6%）のスクリーンに供した場合、合計の分離距離 800mm 以上で TS≧6%を達成した。また、SS 回収率は一部の条件を除き 95%以上を達成した（図 3-31）。今後はこれらの知見を踏まえ、実際にガスホルダー一体型消化タンクの前処理設備として組み込み、データ取得を行う予定である。

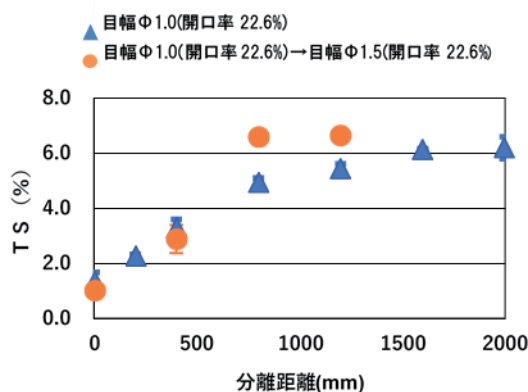


図 3-30 スクリーン別の分離距離と汚泥濃縮効果

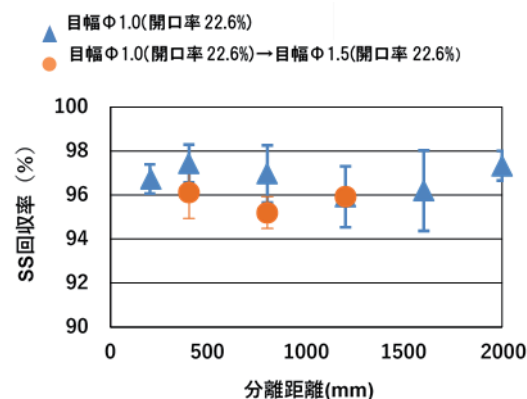


図 3-31 スクリーン別の分離距離と SS 回収率

（４）まとめ

本年度は実証設備を建設し、冬季の運転状況を確認した。また、要素技術のひとつである振動濃縮装置について性能等を検証した。

- 現地における組立期間が合計 127d 程度であることを確認した。
- 冬季の実験において、一般的な中温嫌気性消化と同程度の、良好な消化性能が得られることを確認した。
- 汚泥前処理ユニットの要素技術である振動濃縮装置については、ラボスケールおよびスケールアップを想定した実験を行い、濃縮汚泥の TS6%以上、SS 回収率 95%以上を達成した。

今後は実証実験を継続して行うと共に、実規模での組み立て工期の短縮効果や毛髪除去設備の有効性の検証、コスト削減効果の試算等を行う予定である。

3. 3. 3 予熱加温保持消化技術とボルト接合型パネルタンクによる低コスト嫌気性消化システム

（１）検討の概要

本研究では、一般的な中温嫌気性消化システムに対し余剰汚泥を予め加温することで消化日数の短縮を図る予熱加温保持技術（以下、「予熱加温保持」と略記）と、建設工期の短縮が可能なボルト接合型パネルタンク（以下、「パネルタンク」と略記）を組み合わせた消化システムにより、従来よりも LCC 縮減が可能な嫌気性消化技術を開発する。過年度は、実証設備の設計検討を行った。本年度は実証設備を建設し、実証実験を開始した。

（２）検討の方法

① 技術の概要

本技術は、予熱加温保持とパネルタンクの二つの要素技術を組み合わせたものである（図 3-32）。予熱加温保持により消化日数を短縮して消化タンク容量を縮減し、ボルト接合型のパネルタンクにより工期短縮を図ることで、システム全体として従来の嫌気性消化施設と比べて LCC を縮減する。各要素技術の概要を以下に示す。

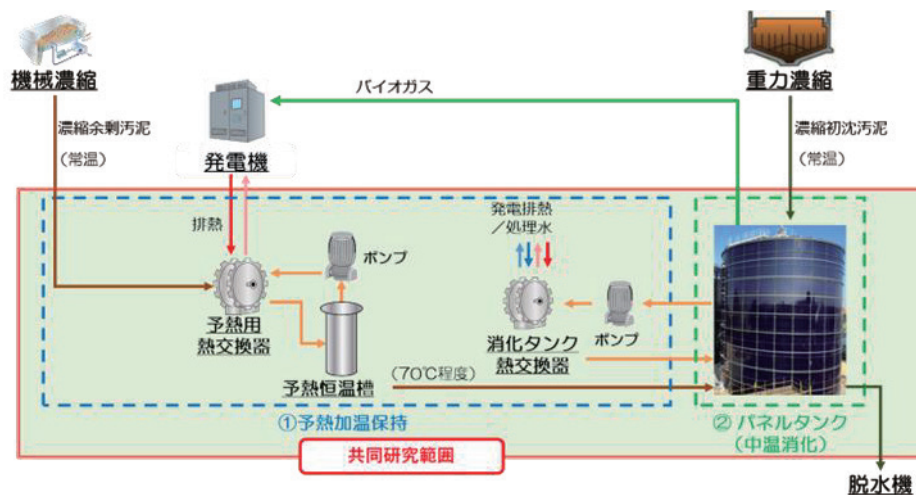


図3-32 「予熱加温保持とボルト接合型パネルタンクによる低コスト嫌気性消化システム」のシステムフロー

- 予熱加温保持：濃縮余剰汚泥を所定の温度にて一定時間加温することで不活性化させ、分解を促進する。余剰汚泥量の変動等、負荷変動が生じた場合にも安定して適切な熱量を一定時間加えるため、予熱用熱交換器を通した余剰汚泥を予熱恒温槽に送泥し、一定温度を保持する時間を確保する。
- パネルタンク：パネル同士をボルトで接合し、更にジャッキアップ工法を採用することにより、従来の鋼板製タンクで必要であった溶接工事や仮設足場を最小限とする。これにより、大幅に建設工期を短縮できる。パネルには、鋼材の表面にガラス質の層を形成するグラスライニング処理を施したグラスライニングパネルを採用する。本パネルは耐食性が高く防食塗装を不要とする。

② 調査概要

本研究の確認項目を表3-16に示す。下水処理場内に実証設備を設置して実証試験を通年行い、予熱加温保持の消化日数短縮効果および嫌気性消化の安定性を確認すると共に、パネルタンクによる建設費縮減効果等を検討する。本報では、本年度に実施した予熱加温保持の消化日数短縮効果の検討について記載する。

実証設備の概略フローを図3-33に示す。予熱加温保持の効果を確認するため、パネルタンク（100m³）および小型タンク（3m³）に、無加温の濃縮初沈汚泥および予熱加温保持した濃縮余剰汚泥を投入し、消化日数10dで運転した。また、対照系列として小型タンク（3m³）に、無加温の濃縮初沈汚泥および予熱加温保持をしていない濃縮余剰汚泥を投入し、消化日数20dで運転した。各系列の消化温度は37℃とした。予熱系（パネルタンクおよび予熱系小型タンク）と従来系（従来系小型タンク）の差異で、予熱加温保持の効果を検証した。

2024年7月から2025年3月までの運転条件を表3-17に示す。初沈汚泥／予熱（余剰）汚泥のTS供給比率は、実証設備を設置した下水処理場の比率に合わせ1.5に設定した。

表 3-16 本研究における確認項目

対象技術	確認内容
予熱加温保持	<ul style="list-style-type: none"> ・消化日数を短縮した運転をした際に、次の項目について、従来消化と同等の性能を有することを確認する。 消化性能、負荷変動への安定性、水処理への影響、脱水性、消化温度制御 ・最適な予熱加温保持条件を決定する。 ・異なる水処理方法の汚泥に対する適用性を確認する。
パネルタンク	<ul style="list-style-type: none"> ・建設工期、耐久性を確認する。
技術全体	<ul style="list-style-type: none"> ・予熱加温保持およびパネルタンクの技術単体および組み合わせシステムにおいて、導入コストを算出する。 ・交付金要件を満足することを確認する。

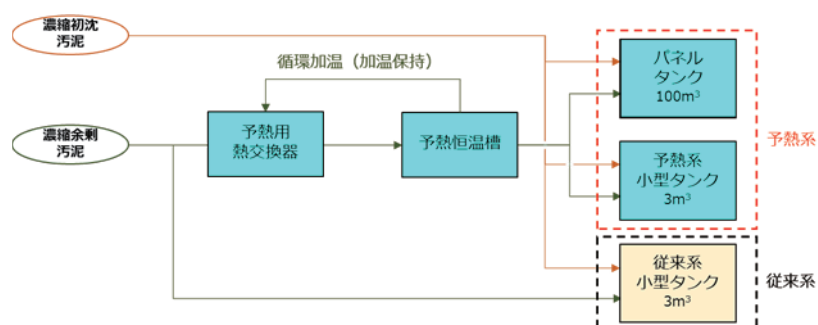


図 3-33 実証設備概略フロー

表 3-17 実証施設の運転条件
(上段が平均値、下段が最小値～最大値。以降の表も同様。)

項目	単位	従来系	予熱系
消化日数 設定値	日	20	10
消化温度 設定値	℃	37	
濃縮初沈汚泥 TS 濃度測定値	%	3.3 (2.5～4.4)	
濃縮余剰汚泥 TS 濃度測定値	%	4.0 (3.0～4.5)	
生/余剰 TS 比率設定値	—	1.5	

(3) 検討結果

実証試験における、予熱系と従来系の運転結果を表 3-18 に示す。本試験においては 8 月～9 月の間に予熱系、従来系共に投入汚泥の腐敗に起因すると思われる消化の不調が生じた。この不調によりパネルタンクへの汚泥供給を一時的に停止したため、供給停止の影響があった 2024 年 8 月 20 日から 2025 年 1 月 17 日までのパネルタンクの運転データは本検討の対象から除外した。表 3-18 および図 3-34～3-38 に示す予熱系のデータは、以下の理由によりパネルタンクと予熱系小型タンクのデータを統合して作成した。不調に至るまでの期間における両タンクの運転結果を比較したところ、運転結果の各項目に大きな差異がみられなかったため、両タンクのデータを合わせて予熱系として、従来系との比較を行うこととした。具体

的には、予熱系については 7 月 1 日から 8 月 19 日及び 1 月 17 日以降はパネルタンクの運転結果を、8 月 20 日～1 月 8 日は小型タンクの運転結果を採用している。

試験の結果、確認したすべての項目で予熱系と従来系に大きな差異が見られなかった。このことから、本年度検証した範囲において、予熱加温保持を用いた消化日数短縮運転（消化日数 10d）で、従来消化（消化日数 20d）と同様の消化が可能と評価できる。各項目の詳細について、以下の図 3-34～3-38 に示す。また、消化温度制御性の検討結果として、パネルタンク内の温度推移を図 3-39 に示す。

表 3-18 実証試験期間における予熱系および実証系における各種数値比較

項目	単位	従来系	予熱系
消化汚泥 TS 濃度	%	1.8 (1.6～2.3)	1.9 (1.7～2.2)
VS 分解率	%	55.0 (40.0～61.8)	53.5 (36.7～61.1)
消化ガス 発生原単位	Nm ³ /t-投入 VS	529 (222～688)	524 (341～727)
pH	—	7.01 (6.27～7.43)	7.02 (6.25～7.44)

① 消化汚泥 TS 濃度および VS 分解率

消化汚泥中の TS 濃度の推移を図 3-34 に示す。予熱系と従来系には大きな差異が見られなかった。VS 分解率の推移を図 3-35 に示す。予熱系については、消化汚泥と濃縮初沈汚泥および予熱加温保持前の濃縮余剰汚泥を比較し、分解率を計算した。予熱系、従来系共に、消化不調時に分解率が低下したものの、その他の試験期間においては予熱系で平均 54.5%（48.1～60.7%）、従来系で平均 56.3%（43.7～61.8%）であり、概ね安定していた。

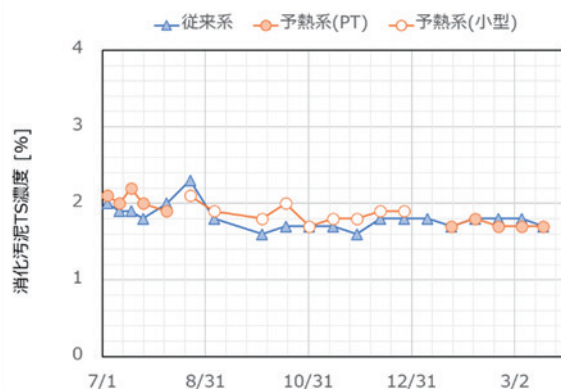


図 3-34 消化汚泥 TS 濃度の推移

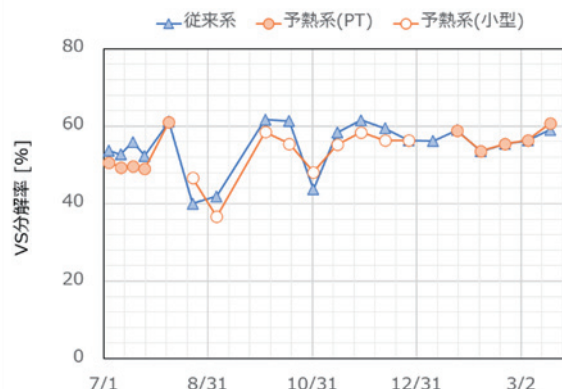


図 3-35 VS 分解率の推移

② 消化ガス発生量原単位

試験期間中の日々の消化ガス発生量の推移を図 3-36 に示す。消化不調時および既設設備の影響に伴う汚泥の投入停止時を除き、ガス発生量は安定していた。このことから、消化不調はあったものの、その他の期間においては安定した運転ができたと考えられる。次に、投入 VS 当たりの消化ガス発生量原単位の推移を図 3-37 に示す。予熱系と従来系には大きな差異が

見られなかった。予熱系において、消化日数を 10d に短縮しても、消化日数 20d の従来系と同等のガス発生量が得られることが分かった。

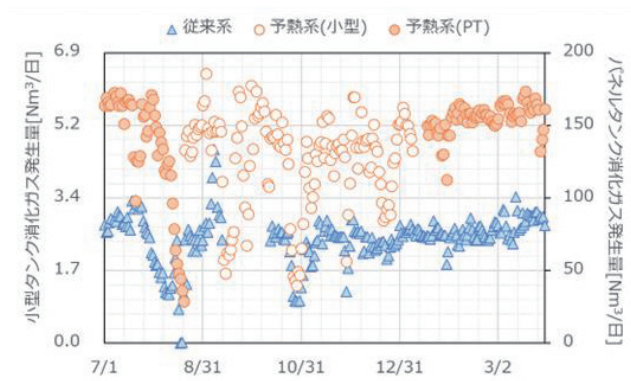


図3-36 消化ガス発生量の推移

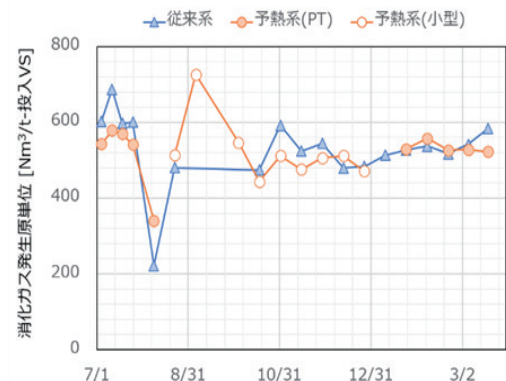


図3-37 消化ガス発生量原単位の推移

③ pH

pH の推移を図3-38に示す。予熱系と従来系には大きな差異が見られなかった。不調時の低下傾向および不調からの回復傾向は、予熱系と従来系で同様であった。

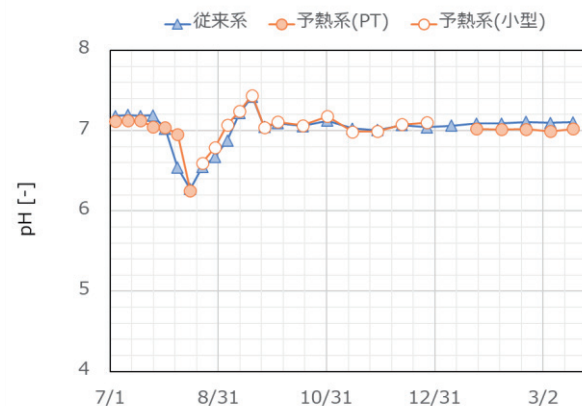


図3-38 pH の推移

④ 消化温度制御

予熱系タンク（パネルタンク）の消化温度推移を図3-39に示す。試験当初は気温が高かったため、予熱加温保持汚泥の投入により消化温度が上昇した。このため消化タンク循環加温用の熱交換器へ通水している温水を処理水に切り替えた（冷却モード）。冷却モードに切り替えることで消化温度は直ちに設定値の 37℃まで低下し、安定した。その後 10 月に消化温度低下が見られたため、処理水を温水に切り替え（加温モード）、消化温度を維持した。以降、加温モード、冷却モードを切り替えることで、予熱加温保持をしながら消化温度を制御する運転が継続できている。

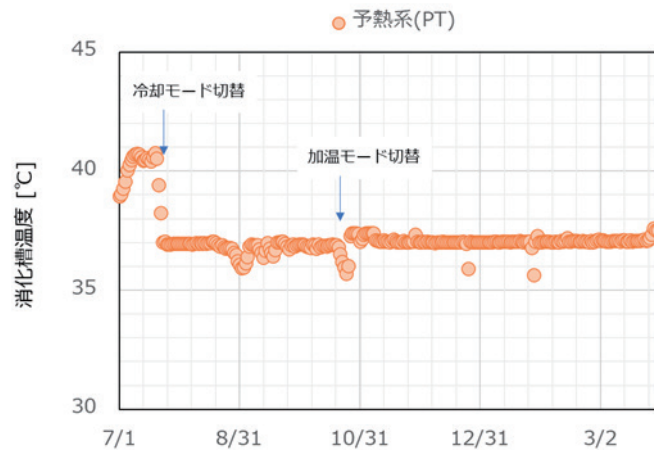


図3－39 予熱系タンクの消化温度推移

（4）まとめ

2024 年 7 月～2025 年 3 月にかけて、予熱加温保持技術を用いた消化日数短縮運転を実施した。8 月から翌年 1 月にかけて予熱系（パネルタンク）の不調により汚泥の供給停止をしていたため、予熱系（小型タンク）のデータを用いて評価を補完した。消化汚泥の TS 濃度、VS 分解率、消化ガス発生量原単位、pH 等を評価したところ、予熱系は従来系と概ね同等の結果であることを確認した。

今後の予定としては、次年度も実証試験を継続してデータを取得すると共に、ラボスケールで限界負荷の確認や異なる水処理方法への適用を検討する。パネルタンクについては、部材評価試験を通じ耐久性を評価する。また、予熱加温保持およびパネルタンクの二つの要素技術について、それぞれおよび組み合わせた場合の経済性を評価する。

4. 検討結果の総括

4.1 本年度の成果

(1) 水処理省エネ化技術

① 小規模省エネ化技術の開発・実証

「新たな水処理省エネ化技術の開発」と題した共同研究の公募を開始した。なお、過年度に共同研究が完了した「回転繊維ユニット RBC を用いた下水処理技術」について、OD 法の前処理設備として十分な省エネ化および処理能力増強の効果が認められたことから、「回転繊維体を用いた OD 法向け前処理技術」として 2025 年 3 月に JS の新技術 I 類に選定された。

② アナモックス併用高度処理の基礎実験

MLE+アナモックス法に関するラボスケールでの回分実験により環境因子や基質濃度がアナモックス担体の活性に及ぼす影響の確認し、ベンチ規模の実験プラントの連続処理実験とアナモックス汚泥の新規培養方法の検討を行った。

- マノメトリック手法を活用した回分実験により、(a)水温が低いほどアナモックス担体の活性は低下するものの活性化エネルギーの推定結果は文献値の中でも小さい水準にある、(b)MLSS 濃度や C/N 比が高い条件では従属栄養型脱窒が卓越する可能性がある、(c)高濃度の T-N や $\text{NO}_2\text{-N}$ によりアナモックス担体の活性が受ける影響の度合いは担体の培養状態により大きく異なる可能性がある等の知見が得られ、アナモックス担体の活性を簡易に推定する手法としてマノメトリック手法が一定の有用性を持つことを確認した。
- 無機合成基質および担体を用いたアナモックス汚泥の培養実験において、アナモックス反応の化学量論よりも大幅に小さい $0.6\sim 0.8$ 程度の $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比で $\text{NO}_2\text{-N}$ を添加することにより安定した窒素除去速度を得ることができた。今後、反応槽内の攪拌条件（酸素供給条件）を見直すことで、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 添加量の低減、更には $\text{NH}_4\text{-N}$ のみを用いた大量培養へと至る見通しが得られた。
- ベンチ規模の MLE+アナモックス法の実験プラントを用いて実下水（初沈越流水）の連続処理実験を行ったが、実験系を同フローへ変更した後の 65 日の期間、対照系（従来の循環式硝化脱窒法）との間に窒素除去性能の明確な差は見られなかった。比較実験としての流入負荷の条件や、実証系における MLE+アナモックス法としての運転条件等を改善する必要があると考えられた。

③ 省エネ型深槽曝気技術の実規模実証(B-DASH)

過年度から継続して長期実証実験や個別の調査等を実施し、実証研究として設定した 3 つの評価項目（消費電力量および温室効果ガス排出量の削減効果、コストの削減効果、実証技術の性能）について目標の達成状況を検証すると共に、そのほかの検討項目について検証等を行った。

- 実証系の送風機に係る消費電力量原単位は対照系と比較して平均 19%削減され（GHG 排出量削減率も同値）、目標（10%以上）を十分に満足した。加えて、モデル設計による試算においても同削減率は 17%となり、実証実験結果が特異的なものではないことが確認された。

- 実証系の処理水質は、BOD、SS、T-P について対照系と同等であったが、T-N については実証期間を通して実証系の方が高くなった。これは対照系の好気槽における意図せぬ脱窒の進行が要因として推定され、同様の処理場への導入に際しての重要な留意事項が得られた。また、深槽曝気に伴う最終沈殿池の汚泥の沈降性については、実証系において実施した脱気操作により汚泥浮上のリスクが十分に抑制可能であることが示された。
- 10 万 m^3/d 規模の水処理施設を想定したモデル設計により、本技術の採用による総費用（年価換算値）の縮減率は 20%（従来技術＝旋回流式エアレーション）と試算され、目標（10% 以上）を十分に満足した。

（２）バイオガス活用技術

① 開発動向調査・実態調査

バイオガスの利活用の促進・普及拡大を目的として、以下の 2 項目について運転管理状況等に関する実態調査を行った。

➤ 処理場の運転管理状況が嫌気性消化に与える影響等に関する実態調査

下水処理場の運転管理状況が嫌気性消化に与える影響を把握することを目的に、嫌気性消化を採用する処理場のうち、ガス発生量が多い処理場、脱水汚泥発生量の少ない処理場、消費電力量単位の小さい処理場を対象として運転手法に関するヒアリング調査を実施し、以下の結果が得られた。

- 有機物分解率の高い初沈汚泥を新鮮な状態で消化タンクに供給することで、嫌気性消化により分解される有機物が増加し、ガス発生量が増加する。
- 最初沈殿池での有機物回収率向上は、消化タンクでの有機物分解率を高め、結果として発生汚泥量を削減する。また、反応タンクへの有機物負荷が低減されることで、初沈汚泥と比較して嫌気性分解しにくい余剰汚泥の発生量も抑制される。
- 初沈殿池で有機物を効率的に回収することで、反応タンクへの BOD 負荷が低減され、送風量削減による消費電力量の低減に繋がる。なお、消化ガス発電を組み合わせることで、処理場全体の電力自給率向上に大きく貢献できる。
- 上記 3 点の相乗効果を最大限に引き出すためには、(a)最初沈殿池における有機物の回収率を高める「運転の最適化」、(b)初沈汚泥や濃縮汚泥の滞留時間を短縮し、速やかに硝化タンクに投入することで、水処理系に戻る有機物負荷を削減する「汚泥の新鮮度維持」、(c)低 MLSS や低 HRT の運転により、消化タンクへの有機物供給量を確保する「反応タンクの硝化抑制運転」、それぞれの運転管理を総合的に実施することが推奨される。

➤ 高濃度消化の運転状況実態調査

高濃度消化は、消化タンクへの投入汚泥濃度を高めることで、施設のコンパクト化や有効利用可能な消化ガスの回収量が期待されることから、発生汚泥の全量を高濃度消化している下水処理場 1 箇所を対象として運転状況調査を実施し、以下の結果が得られた。

- 調査した下水処理場の高濃度消化施設においては、高負荷条件下でも安定した消化性能を発揮し、良好なガス発生量と有機物分解率が得られていることが確認された。
- 高濃度濃縮設備等の追加設備や薬品コストは要するものの、高濃度消化は消化タンク容量の削減や後段脱水設備の縮小が期待でき、特に大都市等の用地制約がある処理場において有望な選択肢の一つであると評価される。

② バイオガス創出に係る基礎実験

消化設備の解放点検を容易に実施することを目的に、JS 技術開発実験センターにおいて、ラボスケールでの連続消化実験を行い、中温消化と高温消化を切り替える運転手法の可能性を検証した。

- 本実験で設定した短期間での温度切り替え運転では、消化性能維持が困難であることが明らかとなった。特に、消化温度 45～49℃ の中間温度帯ではガス発生量が大きく低下したことから、中温メタン菌、高温メタン菌いずれも活性が低い状態であったと推察される。
- 高温消化への切り替え時だけでなく、高温から中温への切り替え時においても、ガス発生量の回復に時間を要し、菌群の遷移・馴致に時間を要したと示唆された。
- 消化温度の切り替えを実務的に行う場合は、菌群の馴致期間を考慮し、移行期間中は汚泥の一部を、嫌気性消化を経ずに脱水する等の方法で対応することが現実的と考えられる。

③ バイオガス創出・活用技術の開発・実証

「脱炭素社会実現に向けたバイオガス利活用技術および嫌気性消化技術の開発」として、(a)消化効率（投入 VS 当たりガス発生量等）の向上によりバイオガス発生量の増加に寄与する嫌気性消化技術、(b)発生したバイオガスの持つポテンシャルを最大限に引き出すことに寄与する利活用技術、(c)低コスト化に寄与する嫌気性消化技術、のいずれかまたは 2 つ以上に該当する技術を開発する新たな共同研究の公募を行い、過年度から継続して以下の 3 技術に関する共同研究を実施した。このうち 1 件の共同研究は、本年度をもって完了した。

➤ 集中加温型高速中温消化システムとステンレス合板製消化タンクによる低コスト嫌気性消化技術

（共同研究者：メタウォーター株式会社 2022 年度共同研究者選定）

本研究は、過年度から実証実験や補足実験を実施し、導入効果等の机上検討を行い、本年度をもって完了した。

- 集中加温システムに関して、年間を通じて消化日数 10 日においても安定消化が継続し、概ね良好な消化性能（消化ガス発生倍率の平均値 521Nm³/tVS・投入、VS 分解率の平均値 54.8%）で運転可能であることが確認された。
- ステンレス合板製消化タンクに関しては、使用するステンレス合板が 35 年相当の耐久性を有していること、10d に 1d の強攪拌で砂等の堆積物量を約 70%削減できること等を検証した。

- 3 万 m³/d 規模の下水処理場における LCC の試算結果では、消化なしや従来の消化技術と比べて LCC は同等以下となった。
- 処理場規模毎に消化施設導入の損益分岐点を検証した結果、各技術単独の導入で 2 万 m³/d 台半ば、両技術の導入で 1 万 m³/d 台後半になることを確認した。

➤ 中小規模向けユニット式下水汚泥消化システム

（共同研究者：日立プラントサービス株式会社 2023 年度共同研究者選定）

下水処理場内に実証施設を設置し実証実験を実施し、本システムの組立期間が 127d 程度あることを確認した。また、冬季の実験において良好な消化性能が得られた。加えて、汚泥前処理ユニットの要素技術である振動濃縮装置については、ラボスケールでの実験を行い濃縮汚泥の TS6%以上、SS 回収率 95%以上を達成した。

➤ 予熱加温保持消化技術とボルト接合型パネルタンクによる低コスト嫌気性消化システム

（共同研究者：株式会社神鋼環境ソリューション 2023 年度共同研究者選定）

2024 年 7 月～2025 年 3 月にかけて、予熱加温保持技術を用いた消化日数短縮運転を実施した。8 月から翌年 1 月にかけて予熱系（パネルタンク）が不調により汚泥の供給停止をしていたが、予熱系（小型タンク）のデータを用いて評価を補完した。消化汚泥の TS 濃度、VS 分解率、消化ガス発生量原単位、pH 等を評価したところ、予熱系は従来系と概ね同等の結果であることを確認した。

4.2 今後の予定

1.2 節に記載の開発項目について、次年度の実施予定は以下のとおりである。

（1）水処理省エネ化技術

- 小規模省エネ化技術の開発・実証：新たな水処理省エネ化技術を実証・開発する共同研究の公募を継続する。
- アナモックス併用高度処理の基礎実験：引き続きラボ実験で得た知見等を基に MLE+アナモックス法のベンチプラントを用いた連続処理実験について、より長期での処理実験を行い本処理法の実用可能性を検討する。また、アナモックス汚泥の大量培養方法について検討を進める。
- 省エネ型深槽曝気技術の実規模実証（B-DASH）：B-DASH プロジェクトによる 3 ヶ年度の実証研究が完了したことから、共同研究体による自主研究に移行し、引き続き実証施設において長期の実証実験を進める。

（2）バイオガス活用技術

- 開発動向調査・実態調査：高度処理を行っている処理場での効率的なメタン発酵処理法の検討および高濃度消化について更なる情報収集を実施し、高濃度消化システムの得失を明らかにしていく予定である。

- バイオガス創出に係る基礎実験：高温消化と中温消化について更なる知見を得るために、消化温度を実験途中で変更する実験等を行う予定である。
- バイオガス創出・活用技術の開発・実証：引き続き共同研究を進め、バイオガス創出・活用技術の開発を行う。

謝辞

2.2 節に掲載した基礎実験において、担体の提供およびラボ実験、ベンチプラントを用いた連続処理実験にご協力いただいた東洋大学の角野教授・清水教授を始め関係者各位に感謝の意を表します。

2.3 節に掲載した検討は、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究として、前澤工業（株）・日本下水道事業団・埼玉県共同研究体により実施されたことを明記すると共に、関係者各位に感謝の意を表します。

3.1 節に掲載した調査において、当該自治体下水道担当部局から運転管理データの提供、現地調査等について多大な協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

3.3 節に掲載した共同研究の遂行にあたり、実験設備の設置および試験へのご協力をいただいた下水処理場の関係者各位に感謝の意を表します。

最後に、本報で紹介した全ての共同研究の関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：地球温暖化対策計画，環境省，2021.
- 2) 国土交通省・国土保全局下水道部，日本下水道協会：下水道政策研究委員会 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書～脱炭素社会を牽引するグリーンイノベーション下水道～，国土交通省水管理・国土保全局下水道部，日本下水道協会，令和 4 年 3 月。
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001476160.pdf>
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン ー平成 29 年度版ー，国土交通省水管理・国土保全局下水道部，平成 30 年 1 月。
<https://www.mlit.go.jp/common/001217263.pdf>
- 4) 日本下水道事業団技術開発部：アナモックス反応を利用した窒素除去技術の評価に関する報告書，技術開発部技術資料 10-003，2010.
- 5) Wang,Z., Zheng,M., Duan,H., Yuan,Z., Hu,S.: A 20-year journey of partial nitrification and anammox (PN/A): from sidestream toward mainstream, Environmental Science & Technology, Vol.56, pp.7522-7531, 2022.
- 6) Zhang,L., Jiang,L., Zhang,J., Li,J., Peng,Y.: Enhancing nitrogen removal through directly integrating anammox into mainstream wastewater treatment: Advantageous, issues and future study, Bioresouce Technology, Vol.362, 127827, 2022.
- 7) Wang,L., Gu,W., Liu,Y., Liang,P., Zhang,X., Huang,X.: Challenges, solutions and prospects of mainstream anammox-based process for municipal wastewater treatment, Science of the Total Environment, Vol.820, 153351, 2022.
- 8) 大森史士，中島維，石田将希，角野立夫，相川えりか，橋本敏一：アナモックス反応を利用した下水処理プロセスの開発，第 57 回下水道研究発表会講演集，pp.49-51，2020.
- 9) 相川えりか，糸川浩紀，谷賢太郎，伊藤悠稀，岩本京太，角野立夫：アナモックス反応を組込んだ新たな下水処理プロセスの窒素除去性能検証，第 58 回下水道研究発表会講演集，pp.716-718，2021.
- 10) 相川えりか，糸川浩紀，角野立夫：アナモックス反応を組込んだ新たな下水処理プロセスの処理特性，第 59 回下水道研究発表会講演集，pp.676-678，2022.

- 11) 茂木志生乃, 山本明広, 糸川浩紀, 五月女瞬, 角野立夫, 清水和哉: アナモックス反応を組込んだ下水処理プロセスの処理条件の検討, 第 60 回下水道研究発表会講演集, pp.1039-1041, 2023.
- 12) 五月女瞬, 角野立夫, 清水和哉, 山本明広, 糸川浩紀: マノメトリック手法を用いたアナモックス菌付着担体の活性に及ぼす環境因子の影響, 第 62 回下水道研究発表会講演集, pp.31-33, 2025.
- 13) Rysgaard,S., Glud,R.N., Risgaard-Petersen,N., Dalsgaard,T.: Denitrification and anammox activity in Arctic marine sediments, *Limnology and Oceanography*, Vol.49, pp.1493-1502, 2004.
- 14) Strous,M., Kuenen,J.G., Jetten,M.S.M.: Key physiology of anaerobic ammonium oxidation, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.65, pp.3248-3250, 1999.
- 15) 井坂和一: 嫌気性アンモニア酸化反応を活用した高効率窒素除去プロセスの開発, 早稲田大学博士論文, 2008.
- 16) 中町和雄: 省エネ型深槽曝気技術 (B-DASH プロジェクト), 下水道協会誌, Vol.62(750), pp.51-54, 2025.
- 17) 中町和雄, 綿引綾一郎, 円谷輝美, 山本明広, 糸川浩紀, 中島浩, 吉野徳幸, 千島俊吾, 小澤光二郎, 安藤芳浩, 山田裕史: 省エネ型深槽曝気技術の電力削減効果等の実証, 第 61 回下水道研究発表会講演集, pp.823-825, 2024.
- 18) 寛尚輝, 綿引綾一郎, 円谷輝美, 石川岳学, 山本明広, 糸川浩紀, 中島浩, 吉野徳幸, 山田裕史: 省エネ型深槽曝気技術における反応タンク酸素移動効率の検証, 第 61 回下水道研究発表会講演集, pp.829-831, 2024.
- 19) ガンバトゾルザヤ, 張亮, 山本明広, 糸川浩紀, 中島浩, 吉野徳幸, 山田裕史: 省エネ型深槽曝気技術における反応タンクの溶存窒素濃度の測定方法, 第 61 回下水道研究発表会講演集, pp.826-828, 2024.
- 20) 藤井秀夫: 深層曝気法による下水処理の新しい展開, *環境技術*, Vol.15, pp.836-841, 1986.
- 21) 中町和雄, 綿引綾一郎, 円谷輝美, 山本明広, 糸川浩紀, 筒井大輔, 添田喜栄, 千島俊吾, 小澤光二郎, 安藤芳浩, 原田美冬: 省エネ型深槽曝気技術の実規模実証実験における省エネ効果および処理性能, 第 62 回下水道研究発表会講演集, pp.845-847, 2025.
- 22) Water Environment Federation : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (21st ed.), 2710C, 2005.
- 23) ガンバトゾルザヤ, 張亮, 中町和雄, 山本明広, 糸川浩紀, 筒井大輔, 添田喜栄, 原田美冬: 省エネ型深槽曝気技術における過飽和ガス濃度測定による脱気効果の定量化, 第 62 回下水道研究発表会講演集, pp.848-850, 2025.
- 24) 石川岳学, 綿引綾一郎, 円谷輝美, 中町和雄, 山本明広, 糸川浩紀, 筒井大輔, 添田喜栄, 原田美冬: 省エネ型深槽曝気技術におけるオフガス測定方法の改良とその効果, 第 62 回下水道研究発表会講演集, pp.851-853, 2025.
- 25) 日本下水道協会: 令和 3 年度版下水道統計, 第 78 号, 日本下水道協会, 2023.
- 26) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 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導入ガイドライン(案), 国総研資料第 1139 号, 2020.
- 27) 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説 後編ー2019 年版ー, p.47, p458, 2019.

- 28) 日本下水道事業団：汚泥処理の広域化、地域バイオマスの活用等によるバイオマス利活用促進（平成 29 年度～令和 3 年度）報告書，pp.2-4～2-6，2022.
- 29) 野池達也編著：メタン発酵，技報堂出版，p.125，2009.
- 30) 野池達也編著：メタン発酵，技報堂出版，p.119，2009.
- 31) 松井三郎，高島正信（監訳）：産業廃水処理のためのバイオテクノロジー，技報堂出版，p.87，1999.
- 32) 北尾高嶺：生物学的排水処理工学，コロナ社，p.231，2003.
- 33) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 前編－2019 年版－，p.479，2019.
- 34) 日本下水道新技術機構：汚泥消化タンク改築・修繕技術資料，日本下水道新技術機構，p.31，2007.
- 35) 藤原雅人，坪井博和，表孝史，熊越瑛，島田正夫，三宅晴男：余剰汚泥への集中的加温によるダウンサイジング型中温消化の実証，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.992-994，2025.
- 36) US EPA：Anaerobic Sludge Digestion Operations Manual，1976.
- 37) 日本下水道協会：下水道維持管理指針 実務編－2014 年版－，日本下水道協会，pp.837-841，2014.
- 38) 中山善雄，麻生伸二，海老塚恵，青木一泰，大塚真之，熊越瑛，島田正夫，三宅晴男：中小規模向けユニット式下水汚泥消化システムの組立及び冬季の汚泥消化の状況，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.983-985，2025.
- 39) 大塚真之，麻生伸二，海老塚恵，青木一泰，中山善雄，熊越瑛，島田正夫，三宅晴男：中小規模向けユニット式下水汚泥消化システムの汚泥前処理技術の検討，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.986-988，2025.

I-2 カーボンニュートラル型下水処理 システムの開発

I-2 カーボンニュートラル型下水処理システムの開発

山本明広、熊越瑛、村岡正季、島田正夫、三宅晴男、糸川浩紀

1. 開発課題の概要

本開発課題では、2050 年度までの下水道分野の温室効果ガス（GHG）排出量の実質ゼロを実現するため、2040 年度までの実用化を目標に、従来の下水処理システムに替わる革新的な「カーボンニュートラル型下水処理システム*」を開発する。

1.1 背景および目的

我が国では、2020 年 10 月に「2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言した。この長期目標の達成に向けて、下水道分野においても中長期的な視点で取り組む必要があるが、カーボンニュートラル（GHG 排出量の実質ゼロ）を実現するためには、現在の技術水準を上回る革新的な下水処理システムへの転換が必要である。2022 年 3 月にとりまとめられた「下水道政策研究委員会 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書」¹⁾においても、従来の下水処理方式のみにとらわれず、抜本的な GHG 排出量削減を進めていくことを求めている。

そこで本開発課題では、2050 年カーボンニュートラルを見据え、革新的な下水処理システムの 2040 年度までの実用化に向けて、現在の技術を上回る水準での処理に係るエネルギー使用量の極小化や処理工程での GHG 排出量の極小化、下水が有するエネルギーポテンシャル利用の最大化の実現を目標に、従来の下水処理システムに替わる「カーボンニュートラル型下水処理システム」の開発を目指す。なお、本開発課題は中長期的に取り組む必要があることから、「JS 技術開発・活用基本計画 2022」の計画期間においては、カーボンニュートラル型下水処理システムのコンセプトおよび次期計画期間における研究・開発方針を提示することを目標とし、次期計画期間以降、早期に要素技術等の基礎実験に着手することを想定している。

1.2 開発項目

本開発課題では、以下の開発項目を設定して技術開発を行う。

（1）カーボンニュートラル型下水処理システム

下水道分野の 2050 年カーボンニュートラルの達成に向けては、現行の下水処理技術の改良・改善に加えて、これらに替わる革新的な下水処理システムの開発と導入が必要である。そこで本開発項目では、「カーボンニュートラル型下水処理システム」の要素となり得る技術（要素技

* 「JS 技術開発・活用基本計画 2022」では、「カーボンニュートラル型下水処理システム」を以下のように定義している：「下水が有するエネルギーポテンシャルを最大限に利用する下水中の有機物回収/濃縮技術と創エネルギー技術の組み合わせや、これに従来の活性汚泥法に替わる超省エネルギー型の水処理技術（嫌気性水処理技術、新規膜処理技術等）をさらに組み合わせる等、水処理・汚泥処理の全体最適化により、カーボンニュートラルを達成する新たな下水処理システム」。

術）の開発動向調査の実施や、要素技術を組み合わせ導入によるカーボンニュートラル型下水処理システムの脱炭素化効果の検討等を実施すると共に、次期計画期間において具体的な技術開発に着手するための研究・開発方針を定める。

① 国内外の開発動向調査

文献やホームページ等による国内・海外の技術調査および「カーボンニュートラル型下水処理システム」の要素となり得る技術の抽出を行う。

② 新たな下水処理システム構築に向けた調査

①で得られた技術情報に基づき、カーボンニュートラル型下水処理システムの確立に向けて、要素技術の目標性能の設定、要素技術の組み合わせによる導入効果を検討する。

③ Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術の調査（B-DASH FS 調査）

2024 年度に採択された B-DASH プロジェクト（FS 調査）「下水汚泥消化ガスの Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術に関する調査事業」を実施する。

④ 成果集約・FS などの検討

上記の成果をとりまとめ、カーボンニュートラル型下水処理システムのコンセプトおよび次期基本計画での実施事項を検討する。

1.3 本年度の実施内容

本年度は、前節に記載の開発項目・実施項目のうち、以下について実施した。

（1）カーボンニュートラル型下水処理システム

② 新たな下水処理システム構築に向けた調査（2.1 節）

③ Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術の調査（B-DASH FS 調査）（2.2 節）

2. カーボンニュートラル型下水処理システム

2.1 新たな下水処理システム構築に向けた調査

（1）検討の概要

本検討は、2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、2040 年までのカーボンニュートラル型下水処理システムの確立を目指し、要素技術を組み合わせて導入することの効果を検討することを目的とする。過年度に実施した国内外の開発動向調査で抽出された、カーボンニュートラル型下水処理システムの要素技術となりうる技術に関する調査結果²⁾等に基づき、各要素技術の諸元を設定する。現時点における国内の一般的な下水処理フローを基準として物質収支および GHG 排出量を算定した上で、これを基本条件として、要素技術を組み合わせて導入した場合の両者の変化を比較することで、要素技術を組み合わせて導入することの効果を定量化し、現行の下水処理フローの抜本的な転換の可能性や必要性を検討する。加えて、下水処理場外からの地域バイオマスの受け入れや他分野事業との連携等、バウンダリーを広げたカーボンニュートラルの取り組みの方向性についても検討する。なお、本検討は 2024～2026 年度の 3 ヶ年度での実施を予定している。

本年度は、各要素技術の諸元の設定を行うと共に、現行の一般的な下水処理フローを設定した上で、要素技術を組み合わせた下水処理システムを設定し、それぞれの物質収支および GHG 排出量を試算した。

（2）検討方法

① 要素技術の諸元値の設定

過年度（2022 年度）に実施した開発動向調査で抽出した要素技術³⁾に関する性能等の情報を追加工集し、物質収支および GHG 排出量の試算に必要な各種諸元を設定した。

カーボンニュートラル型下水処理システムの検討の対象とした、処理工程およびそれに該当する要素技術を表 2-1 に示す。処理場に流入する有機物をエネルギー源として最大限回収し、さらに水処理に要するエネルギーを削減するため、反応タンクの前段で「有機物回収」を行う各種技術を挙げた。「水処理」工程では、曝気による消費電力量を大幅に削減する技術として高度散水ろ床および嫌気性処理を挙げた。また、高度処理に関連する技術としてアナモックスプロセスを要素技術とした。汚泥処理においては、発電等に利用可能な消化ガス量を一般的な消化より増加させる「高効率消化」工程として高濃度消化および汚泥可溶化技術を挙げた。嫌気性消化後の「汚泥資源化」工程に係る技術としては、乾燥、炭化、水熱炭化および肥料化を挙げた。

ここで挙げた要素技術には、パイロット規模での研究から実用化まで幅広い開発段階の技術が含まれており、現時点で物質収支や GHG 排出量の試算に必要な各種諸元値（電力消費量原単位、固形物・有機物・窒素の除去率・回収率等）が定まっているものばかりではない。そのため本検討では、各種文献における実験値等から各要素技術の性能を想定し、今回の試算に用いる諸元値を設定した（関連文献および具体的な設定値は本報非掲載）。

表 2-1 検討対象とした処理工程および要素技術

処理工程	要素技術	役割・特徴
有機物回収 流入有機物の徹底的な回収	膜ろ過(MF/UF 等)	固液分離により有機物を効率的に回収
	CEPT	凝集剤を用いて一次処理での有機物回収率を向上
	BEPT	活性汚泥の吸着・凝集作用を利用し、一次処理での有機物回収率を向上
水処理 (反応タンク)	高度散水ろ床(DHS、無曝気循環式)	無曝気または低曝気で有機物を除去し、消費電力を大幅に削減
水処理の超省エネ化	嫌気性処理(AnMBR)	嫌気条件下で有機物を除去し、メタンガスを回収
	アナモックスプロセス	アンモニアと亜硝酸を嫌気条件下で直接窒素へ変換。曝気量を大幅に削減しながら窒素を除去
高効率消化	高濃度消化	消化タンクへの投入汚泥濃度を高め加温に必要なエネルギーを削減(利用可能なエネルギーを増量)
嫌気性消化の効率化	汚泥可溶化	汚泥を前処理で可溶化し、汚泥の分解効率を向上および消化ガス発生量を増量
汚泥資源化	乾燥	汚泥の含水率を低下させ、燃料や肥料として利用
下水汚泥資源のカスケード利用	炭化	汚泥を炭化し、燃料や土壌改良材として利用
	水熱炭化	高温高圧水中で汚泥を炭化し、燃料や土壌改良材として利用
	肥料化	汚泥を肥料として再利用

※MF: Microfiltration(精密ろ過膜)、UF: Ultrafiltration(限外ろ過膜)

CEPT: Chemically enhanced primary treatment(化学的強化一次処理)

BEPT: Biologically enhanced primary treatment(生物学的強化一次処理)

DHS: Downflow hanging sponge(下降流懸垂型スポンジ)

AnMBR: Anaerobic membrane bioreactor(嫌気性膜分離活性汚泥法)

② 要素技術導入シナリオ別の GHG 排出量試算

現時点における国内の一般的な下水処理フロー（以下、「現行フロー」と略記）に要素技術を導入した場合の物質収支および GHG 排出量を試算した。現行フローとして、処理場規模（日最大処理水量）別に、5,000m³/d（小規模）ではオキシデーションディッチ（OD）法の 1 ケース、50,000m³/d（中規模）と 150,000m³/d（大規模）で標準活性汚泥法と高度処理（循環式硝化脱窒法；リン除去は除く）の 2 ケースをそれぞれ設定した。汚泥処理方法は、下水道統計のデータを参考に各規模で標準的と考えられるフローを設定し、中・大規模では嫌気性消化を前提とした。これらの組み合わせにより、計 5 ケースの現行フロー（ケース①～⑤）を設定した（表 2-2）。

表 2-2 本検討で設定した現行の下水処理フロー

項目		ケース①	ケース②	ケース③	ケース④	ケース⑤
処理場規模 (日最大処理水量)	m³/d	5,000	50,000		150,000	
日平均処理水量		4,000	40,000		120,000	
水処理方法		OD 法	標準法	高度処理 (循環法)	標準法	高度処理 (循環法)
汚泥処理方法		重力濃縮→脱水 (多重板型スクリーンプレス)		分離濃縮→消化→脱水(遠心)		

各ケースにおける物質の挙動を把握し、物質質量やエネルギー消費量を定量的に評価するため、水量、固形物、有機物（COD_{Cr}）および窒素（T-N、NH₄-N）の物質収支図を作成した。各工程の除去率や回収率等は、（公財）日本下水道協会が発行する「下水道施設計画・設計指針と解説－2019 年版－」や、独立行政法人土木研究所が発行する調査報告書、JS 独自の調査研究成果を参考に設定した。収支計算の基本となる流入水質は、典型的な下水を想定し、表 2－3 に示す値を用いた。

表 2－3 流入水質の設定値

項目	単位	数値
BOD	mg/L	200
T-COD _{Cr} /BOD 比		2.4
T-COD _{Cr}		432
S-COD _{Cr}		160
T-N		40
NH ₄ -N		26

GHG 排出量の試算範囲として、本年度は現行フローのうち図 2－1 の「検討範囲」に示す施設を対象とした。GHG 排出量に影響が大きいと考えられる施設は試算範囲に含めたが、消毒工程は影響が小さいと判断し範囲から除外した。算定対象とする GHG は、電力や補助燃料等エネルギー消費に伴う CO₂、および水処理・汚泥処理の各工程で直接排出されるメタン（CH₄）と一酸化二窒素（N₂O）である。また、消化ガス発電による外部電力使用量の削減効果、汚泥の有効利用による GHG 排出量の削減効果（肥料化による化学肥料削減、土壌への炭素貯留*、燃料化による石炭代替†）も算定範囲に含めた。一方、地域バイオマスの受け入れ、処理水の放流先での N₂O 排出、汚泥の運搬による自動車の走行や汚泥の処分先で発生する GHG の排出量は考慮していない。

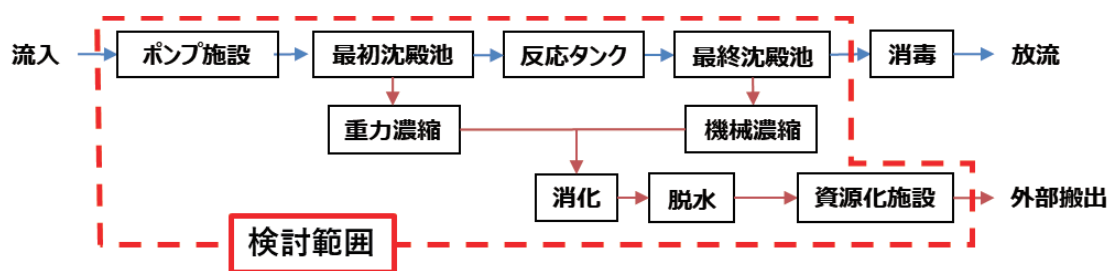


図 2－1 GHG 排出量の試算範囲（設定ケースにより、含まれない工程がある）

GHG 排出量の算定方法および排出係数、地球温暖化係数は環境省が示す算出方法・排出係数一覧⁴⁾および下水道における地球温暖化マニュアル⁵⁾を用いた。なお、電力の排出量原単位は、電気事業連合会が公表している将来予測値（2030 年度値）⁶⁾を用いた。これは、将来の電源ミックスによる排出係数の変化を考慮したものである。

* 土壌への炭素貯留効果の算定には、農研機構の試算方法⁷⁾を便宜的に活用した。

† 燃料化による石炭代替効果は、処理場外で石炭代替として活用した場合の削減量を含む。

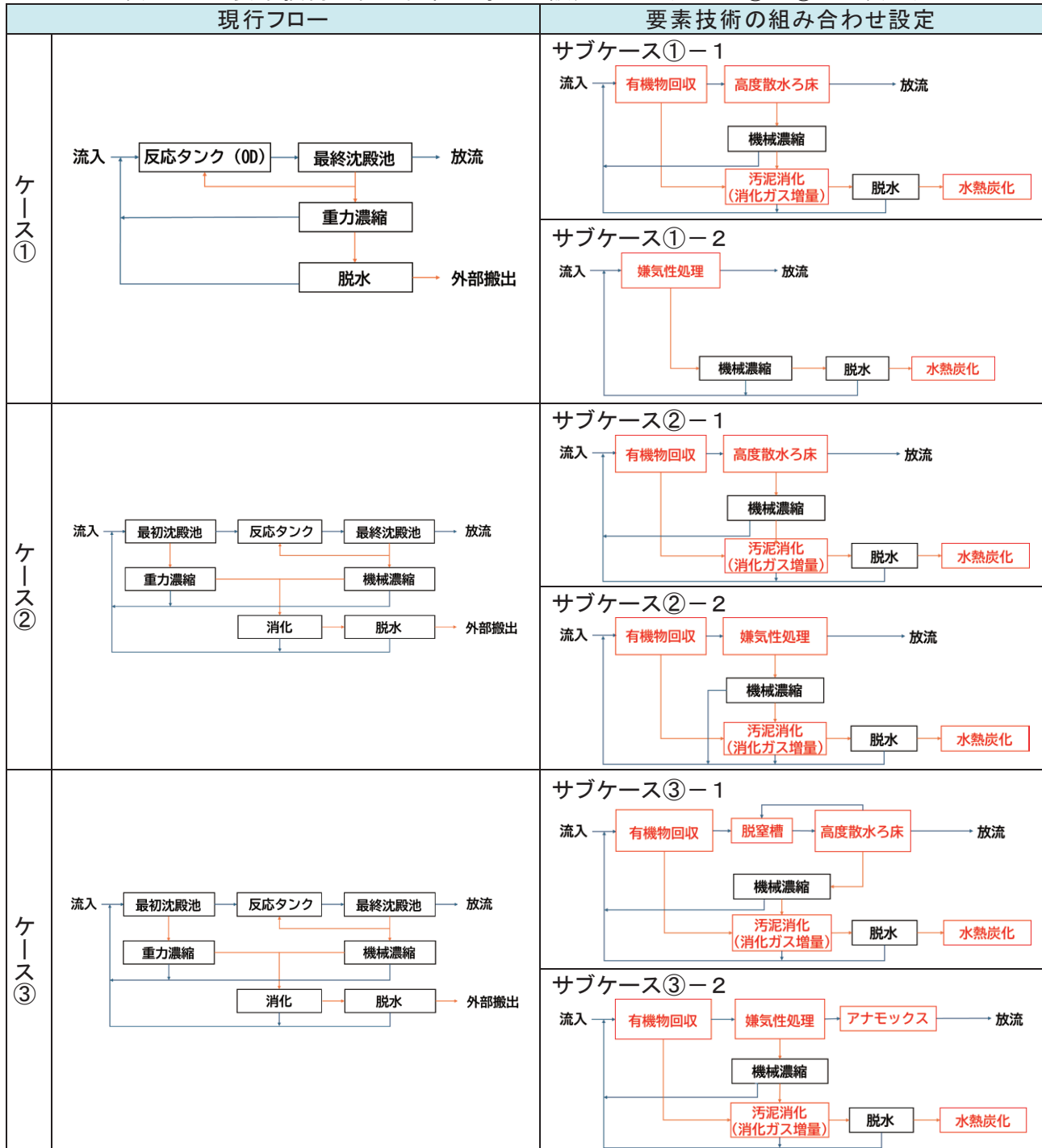
設定した 5 つの現行フロー（ケース①～⑤）を対象に、表 2-1 に示した要素技術を組み合わせたサブケースを複数（サブケース①-1～サブケース⑤-2 等）設定した。有機物回収工程として複数の要素技術が分類されているが、基本的に類似した役割を持つものとしてまとめて「有機物回収」技術として用いた。高効率消化では分解効率とガス発生量の増加を見込める可溶化技術を用いた。汚泥資源化では、各要素技術の正味の GHG 排出量（資源の有効利用によるマイナス計上等を考慮した排出量）の試算結果が最も小さくなった水熱炭化技術を用いた。なお、処理水質は現行フローと同程度を維持することを前提とした。また、個々の要素技術の各サブケースへの適用可能性は考慮しているものの、具体的な費用や既存施設への導入可能性といった詳細な検討は本試算の範囲外とした。

表 2-4 に、現行フロー（ケース①～③）に対して設定した要素技術を組み合わせたサブケース（サブケース①-1～③-2）を示す。なお、ケース④、⑤においてもケース②、③と同様のサブケース分けにより GHG 排出量を試算したが、処理規模は異なるもののケース②、③と GHG 排出量に概ね類似した傾向が確認されたため、本報では掲載を省略する。

各サブケースは、主に有機物回収の有無、水処理方式（高度散水ろ床、嫌気性処理、アナモックスプロセス等）、および汚泥資源化（水熱炭化）の組み合わせにより設定した。例えばケース①（5,000m³/d；OD 法）では、有機物回収と高度散水ろ床を組み合わせたサブケース①-1 と、有機物回収を行わず嫌気性水処理を導入するサブケース①-2 を設定した。ケース②（50,000m³/d；標準法）では、有機物回収と高度散水ろ床を組み合わせたサブケース②-1 に加え、嫌気性処理を導入するサブケース②-2 を検討した。ケース③（50,000m³/d；高度処理）では窒素除去を考慮し、高度散水ろ床と脱窒槽を組み合わせたサブケース③-1、および嫌気性処理とアナモックスプロセスを組み合わせたサブケース③-2 を設定した。

これらの各設定ケースおよびサブケースに対し、物質収支および各工程、正味の GHG 排出量を試算した。

表 2-4 要素技術の組み合わせ導入の設定ケース(ケース①～③のみ表示)



(3) 検討結果

ここでは、各ケースにおける GHG 排出量の試算結果を図 2-2～図 2-4 に示す。これらの図は、各工程からの GHG 排出量をプラス値、消化ガス発電や汚泥資源化による GHG 排出削減量をマイナス値として積み上げたものである。また排出量から削減量を差し引いた正味の GHG 排出量を合計として示した。

ケース①における GHG 排出量の試算結果を図 2-2 に示す。いずれのサブケースにおいてもカーボンニュートラルに至っていない。サブケース①-1 では、有機物回収と高度散水ろ床

の導入による水処理の消費エネルギーの削減、消化ガス発電および水熱炭化物の活用効果が大きく、水熱炭化によるエネルギー消費の増加があったものの、正味の GHG 排出量は現行フローと比較して減少した。サブケース①－2 では、正味の GHG 排出量は、現行フローよりも減少したが、水処理に伴うエネルギー消費による GHG 排出量が大幅に増加したため、サブケース①－1 よりも増加した。サブケース①－2 で用いた嫌気性 MBR の消費電力量原単位（今回 0.695kWh/m³*）は過大である可能性があると考えられ†、引き続き情報の収集が必要である。

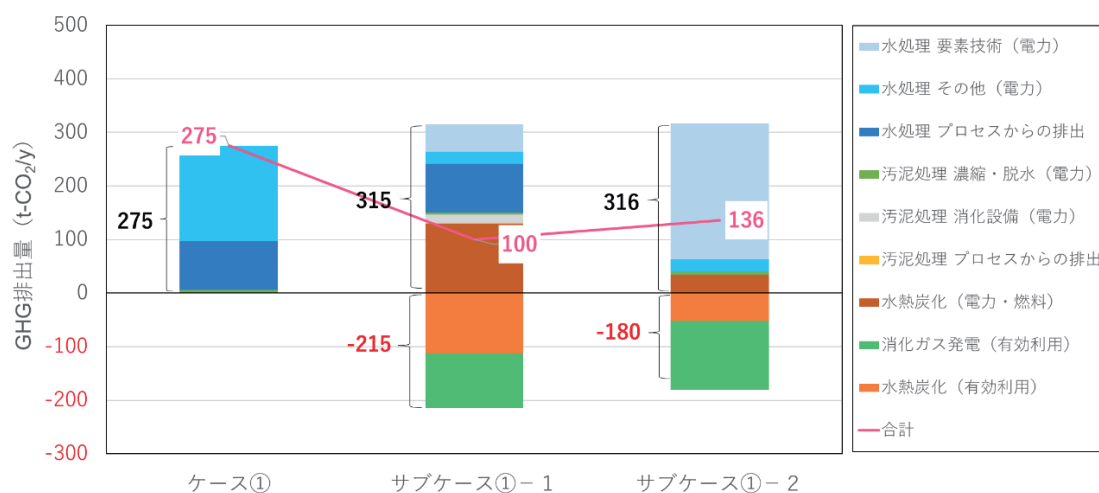


図2－2 ケース①(5,000m³/d; OD 法)における GHG 排出量の試算結果

ケース②における GHG 排出量の試算結果を図 2－3 に示す。いずれのサブケースにおいてもカーボンニュートラルに至っていない。ケース②と比較して、サブケース②－1 および②－2 共に、水熱炭化の導入によりエネルギー消費等による GHG 排出量は現行フローより増加するものの、消化ガス発電および水熱炭化物の活用による削減量を考慮すると、正味の GHG 排出量は減少した。特にケース②－1 の正味の GHG 排出量は、現行フローの約 1/3 となった。これは、有機物回収と高度散水ろ床の組み合わせにより、水処理における電力消費による排出が大幅に抑制されたためである。なお、本試算では水処理プロセスにおける CH₄ および N₂O の排出係数は標準活性汚泥法と高度散水ろ床法とで同数値を用いており、これが GHG 排出量に大きく影響している点も今後考慮する必要がある。

* 参照した文献により 0.04～1.35kWh/m³ まで幅があったことから、今回は最大値と最小値の平均値を諸元値とした。

† 参照した文献以外では、当該値を 0.384Wh/m³,⁸⁾と設定している事例が見られる。

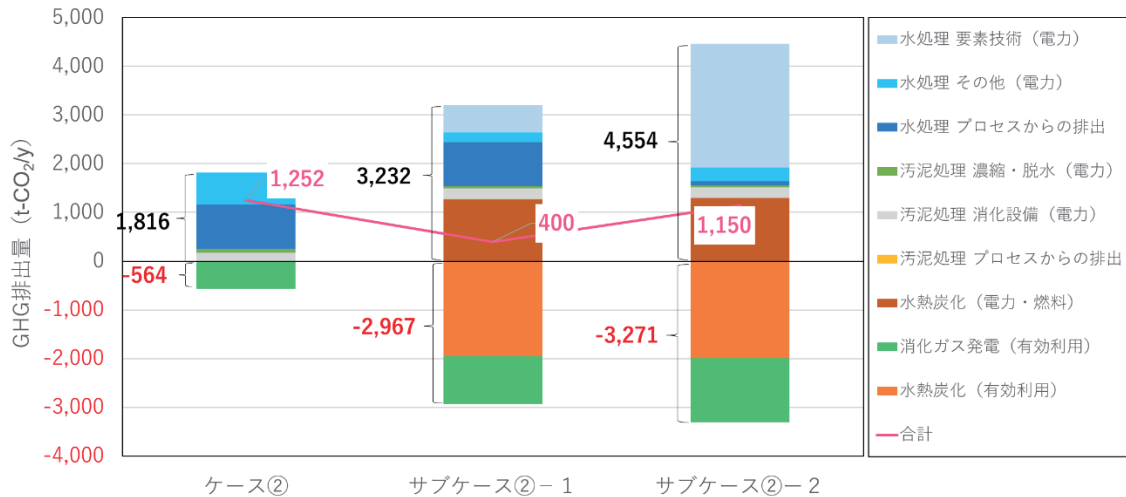


図 2-3 ケース②(50,000m³/d; 標準法)における GHG 排出量の試算結果

ケース③における GHG 排出量の試算結果を図 2-4 に示す。いずれのサブケースにおいてもカーボンニュートラルに至っていない。ケース③と比較して、サブケース③-1 および③-2 共に、水熱炭化の導入により、エネルギー消費等に伴う GHG 排出量は現行フローよりも増加した。しかし消化ガス発電や水熱炭化物の活用による GHG 排出削減量を考慮すると、正味の排出量は減少した。特にサブケース③-1 では、要素技術（「脱窒槽」+「高度散水ろ床」）の導入により、現行フローで GHG 排出量に占める割合が大きかった送風機および循環ポンプによる電力消費量の削減による GHG 排出量の削減が大きく影響した。なお本ケースでは、水処理水プロセスからの N_2O の排出係数に高度処理の値を用いたため、サブケース②-1 と比較して水処理プロセスからの GHG 排出量は減少しているが、消化ガス発電による排出削減量も減少した影響で、正味の GHG 排出量はケース②-1 より増加する結果となった。

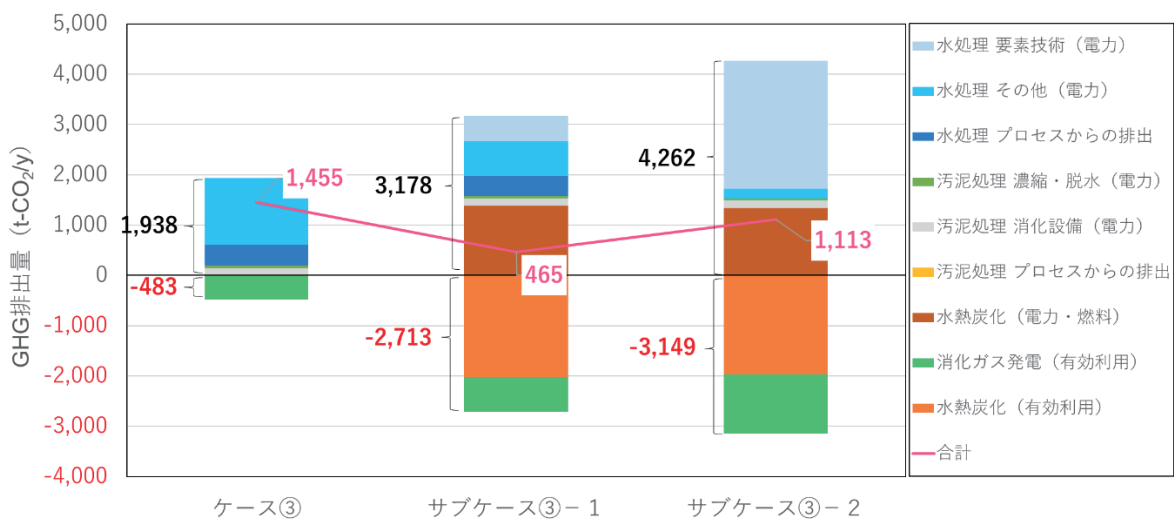


図 2-4 ケース③(50,000m³/d; 高度処理)における GHG 排出量の試算結果

今回設定した試算条件においては、特に有機物回収と高度散水ろ床の組み合わせは、水処理における電力消費に伴う GHG 排出を大幅に抑制し、有効利用可能な消化ガス発生量を増加させることで、GHG 排出量削減に大きく寄与したものの、いずれのケースにおいてもカーボンニュートラル達成には至らなかった。一方で、水処理プロセスからの GHG 排出および嫌気性処理における電力消費に伴う排出量については、諸元値の妥当性について、さらなる情報収集と検証が必要である。

今回の検討結果においては、試算に用いた要素技術の性能設定が現状の技術水準に留まり、将来的な進展を十分に盛り込めていない面があった。今後は、今回検討対象とした処理工程や要素技術の将来的な技術水準の見通しに留まらず、更なる将来的な可能性を含めた要素技術の選定や組み合わせによる効果想定 of 検討が必要と考えられた。それに併せて、地域バイオマスの受け入れ等による、下水道が地域や他分野にもたらす GHG 排出量削減効果の検討等にも取り組んでいく必要がある。

（4）まとめ

本年度は、要素技術を組み合わせて導入することによる GHG 削減効果を検討するため、現行フローに対し要素技術を組み合わせた複数ケースを設定し GHG 排出量を試算した。主な結果は以下のとおりである。

- 現行フロー（小規模、中規模、大規模）に対し、要素技術を組み合わせた複数のサブケースを設定した。いずれも正味の GHG 排出量は削減される試算結果となったものの、今回の試算条件ではいずれもカーボンニュートラル達成には至らなかった。
- 今回の要素技術の組み合わせの範囲において、有機物回収と高度散水ろ床の組み合わせ等、前段で有機物を回収する技術、および反応タンクでの曝気動力を削減する技術は、水処理における電力消費を大幅に抑制し、GHG 排出量削減に大きく寄与することが示唆された。
- 一方、資源利用については、消化の高効率化や汚泥の資源化に伴うエネルギー消費による GHG 排出量は現行フローよりも増加するものの、消化ガス発電および資源化汚泥の活用（特に外部エネルギー消費量の少ない資源化技術の導入）を考慮すると、正味の GHG 排出量を大きく削減する試算結果となった。

引き続き、要素技術に関する情報収集等により、各技術の諸元値の妥当性を精査すると共に、各ケースにおける要素技術の適用可否や既存施設への導入可能性等の検討を行う。さらに今回の処理工程や要素技術の検討に留まらず、更なる将来的な可能性を含めた要素技術の選定や組み合わせによる効果想定 of 検討を行う。また、下水処理場外からの地域バイオマスの受け入れや他分野事業との連携等、バウンダリーを広げたカーボンニュートラルの取り組みの必要性について検討する。

2.2 下水汚泥消化ガスの Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術に関する調査

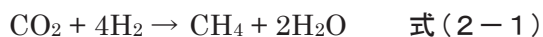
(1) 検討の概要

2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、下水が有するエネルギーポテンシャルの最大限の活用等、現在の技術水準を上回る革新的な技術の開発が求められている。現在、下水道分野における創エネ技術としては、嫌気性消化によって発生する消化ガスを利用した発電技術が主流である。しかし、将来的には固定価格買取制度の期間終了や再生可能エネルギーの普及による電力由来の CO₂ 排出係数の低下等により、消化ガス発電技術の導入意欲や社会的貢献度が減少する可能性がある。こうした背景を受けて、消化ガスを活用した脱炭素社会の実現に資する新たな技術の開発を目的として、Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術の性能確認および導入可能性の検討を行う。なお、本調査は、国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）の FS 調査「下水汚泥消化ガスの Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術に関する調査事業」として 2024 年度に採択されたもので、カナデビア㈱と JS の 2 者からなる共同研究体により、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究として実施する。本年度は、実証場所（実証フィールド）へ設置したパイロット施設にて調査を開始した⁹⁾。なお、本調査は 2024～2025 年度の 2 ヶ年度で実施する予定である。

(2) 検討方法

① 技術の概要

メタネーションとは、水素 (H₂) と一酸化炭素 (CO) または二酸化炭素 (CO₂) からメタン (CH₄) を合成する反応プロセスである。特に CO₂ を原料とする反応は式 (2-1) で示され、再生可能エネルギー由来の H₂ を利用することで、カーボンニュートラル社会の実現に貢献するものとして注目されている。



メタネーション技術は、化学反応を利用する方法と生物反応を利用する方法に大別される。化学反応を利用したメタネーションは、主にニッケル等の触媒を用いて高温・高圧条件下で CH₄ を生成するサバティエ反応を利用する。一方で、生物反応を利用したメタネーション（以下、「バイオメタネーション」と表記）は、微生物の代謝機能を利用した手法である。バイオメタネーション反応は図 2-5 に示すように、嫌気性

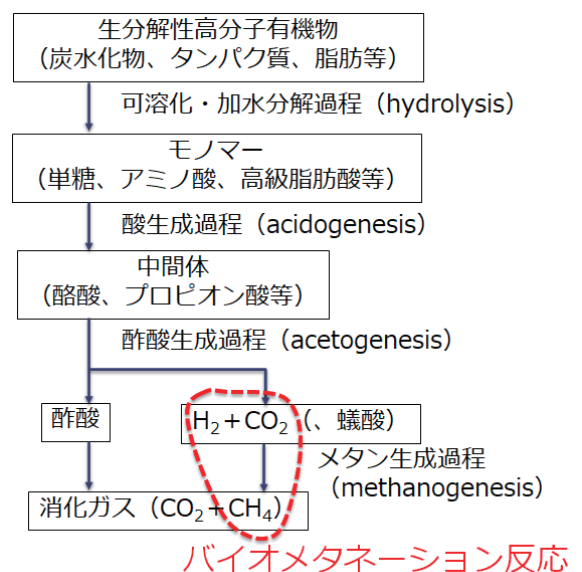


図 2-5 嫌気性消化プロセス
とバイオメタネーション反応

消化プロセスの最終段階における反応経路の一つに相当する。通常の嫌気性消化プロセスでは主に酢酸資化による CH₄ 生成が進行しており、消化ガスの生成プロセスで H₂ は微量しか存在しないため、H₂ を基質とする CH₄ 生成経路（すなわちバイオメタネーション反応）は限定的である。そこで、消化ガス中に約 40%含まれる CO₂ に対して外部から H₂ を加えることでバイオメタネーション反応を意図的に促進し、CH₄ 生成量を高めることが出来る。バイオメタネー

ション技術はその反応方式により In-situ 型と Ex-situ 型の 2 種類に大別される。In-situ 型は嫌気性消化槽内に H_2 を直接添加し、消化槽内で CO_2 と H_2 を反応させて CH_4 を生成する方式である。一方、Ex-situ 型は嫌気性消化槽とは別に設けたメタン化反応槽内で、 H_2 とバイオガス中の CO_2 を反応させて CH_4 を生成する。本調査で対象とする Ex-situ 型バイオメタネーションは、専用のメタン化反応槽を用いることで、 H_2 と CO_2 の反応に特化した最適な条件下でプロセスを運転できる。これにより、一般的に In-situ 型よりも高濃度の CH_4 （95%程度）を高い生成速度で得られる特徴があるとともに、反応槽を分離することで、消化ガス発生量の変化に伴う負荷変動等への対応が容易となる。消化ガス中の CO_2 の有効利用が可能になるだけでなく、生成ガスの高濃度化により発電用途のみならず都市ガス代替等への利用も期待される。

本調査では、下水汚泥の嫌気性消化ガスを対象とした Ex-situ 型バイオメタネーションの実用化に向け、パイロットスケールでの実験を実施する。

② 試験設備の概要

本調査は、鳥取市秋里下水終末処理場に設置された Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術の試験設備を用いて検討を行った。当該処理場は現有水処理能力：72,000m³/d の標準活性汚泥法で、汚泥処理は分離濃縮→嫌気性消化→脱水→焼却である。試験設備のフローを図 2-6 に示す。本設備では、消化汚泥を充填した 100L のメタン化反応槽内に消化ガスと H_2 を連続的に供給し、バイオメタネーション反応により高濃度の CH_4 を含むガスを生成する。メタン化反応槽には原料ガスとして、既設の消化槽から発生したのちに脱硫処理した消化ガス、および水素カードル（ボンベ）から供給される H_2 を用いた。本設備では、消化ガスを 12m³/d 以上供給し、消化ガス中の CO_2 に対して式（2-1）に示す化学量論に基づき反応に必要な H_2 を供給することで、4.8m³/d 以上の CH_4 を生成する仕様としている。生成したガスは、既設のガスホルダーへ返送すると共に、設備の性能確認のために成分分析を行う。メタン化反応槽内は 100℃ 未満、1.0MPa 未満の反応条件となるように温度や圧力を調節する。同槽内では、メタネーション反応により水が生じて汚泥が希釈されるため、槽内の希釈された汚泥（以下、「排水汚泥」

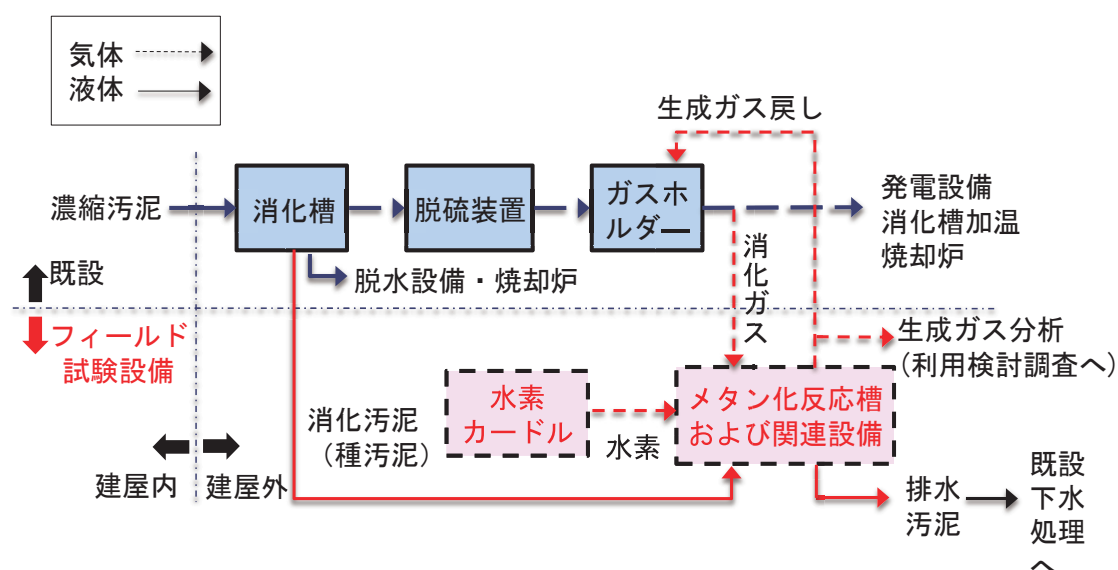


図 2-6 Ex-situ 型バイオメタネーション試験設備のフロー図

と表記）は定期的に引き抜き、既設の反応タンクに返送するとともに、既設消化槽から種汚泥として消化汚泥を投入している。

③ 評価項目

本調査において、2024 年度は Ex-situ 型バイオメタネーション試験設備の性能確認（生成ガスの CH₄ 濃度および CH₄ 生成速度）、および各季節における上記性能の安定性を夏季、秋季、冬季に確認した。またガス供給量の変動がある場合や間欠運転を行う場合の安定性を確認した。更に、生成ガスの都市ガス利用等の検討および事業可能性の検証に着手した（表 2－5）（都市ガス利用等検討および事業可能性検証の検討結果は非掲載とする）。

表 2－5 試験実施項目（2024 年度）

実施項目	評価指標	目標	研究内容
性能確認	CH ₄ 濃度	生成ガス CH ₄ 濃度 95%以上	消化ガスと生成ガスに含まれる CO ₂ および CH ₄ 濃度をモニタリングし、生成ガスの CH ₄ 濃度が 95%以上であることを確認する。
	CH ₄ 生成速度	50NL/(L・d)以上	メタン化反応槽内の汚泥量、原料ガス量と生成ガス量、CH ₄ および CO ₂ 濃度をモニタリングし、反応槽内汚泥量に対する 1d あたりの CH ₄ 生成量 (NL/(L・d)) を CH ₄ 生成速度として算出し、50NL/(L・d)以上であることを確認する。
安定運転	季節変動	生成ガス中 CH ₄ 濃度平均 95%以上	四季を通じた安定運転を確認するために、「性能確認」と同一の運転条件下で、2024 年度は夏、秋、冬の 3 季節において、メタン化反応槽 HRT の 3 倍以上の期間で性能を確認する。 1 回/月程度の頻度で、消化汚泥と排水汚泥、原料消化ガスと生成ガスの組成分析および菌叢解析を実施する。
	負荷変動	生成ガス中 CH ₄ 濃度平均 95%以上	季節変動確認時の運転条件での原料ガス供給量（負荷）を 100%としたとき、50%と 100%の負荷変動を 1d 毎に繰り返した運転を行い、性能を確認する。
	間欠運転	生成ガス中 CH ₄ 濃度平均 95%以上	日中や平日のみの運転を想定し、起動/停止の繰り返し運転を行い、性能を確認する。
都市ガス利用等検討	水素調達方法	水素調達方法	水素調達方法の情報収集を行う。
	必要技術、制度	必要技術、制度	生成ガス分析結果を用いて国内で都市ガス利用の制度に適用するために必要な処理設備およびコスト、基準値等の情報収集を行う。
事業可能性検証 （全体の効果（FS 等））	総費用	総費用	経費回収の試算を行う。
	省エネ （エネルギー収支）	省エネ（エネルギー収支）	エネルギー創出の試算を行う。
	省 CO ₂ （CO ₂ 排出量）	省 CO ₂ （CO ₂ 排出量）	CO ₂ 削減の試算を行う。

（3）検討結果

性能確認および安定運転（①季節変動、②負荷変動、③間欠運転）の結果を以下に示す。

① 性能確認

性能確認では、定格速度で消化ガスおよび H_2 をメタン化反応槽に供給した際の CH_4 生成速度*と CH_4 濃度で評価を実施した。性能目標は、 CH_4 生成速度 $50NL/(L \cdot d)$ 以上、 CH_4 濃度 95% 以上と設定したが、実際の運転では $80NL/(L \cdot d)$ の条件でも CH_4 濃度 95% 以上の安定した運転が可能であることを確認した。具体的な実験データは安定運転の項目にて示す。

② 安定運転

1) 季節変動

各季節における運転状況の一例として、秋季の運転におけるガス濃度等の推移を図 2-7 に示す。生成ガスは、 CH_4 濃度および CO_2 濃度をそれぞれモニタリングしており、同図ではこれらの濃度の合計と 100% からの差分を生成ガス中に含まれる H_2 等濃度として示している。性能確認で検証した通り、運転期間を通じて生成ガスの CH_4 濃度が 95% 以上、 CH_4 生成速度 $80NL/(L \cdot d)$ であった。同様に夏季および冬季においても安定した運転が可能であることを確認した。

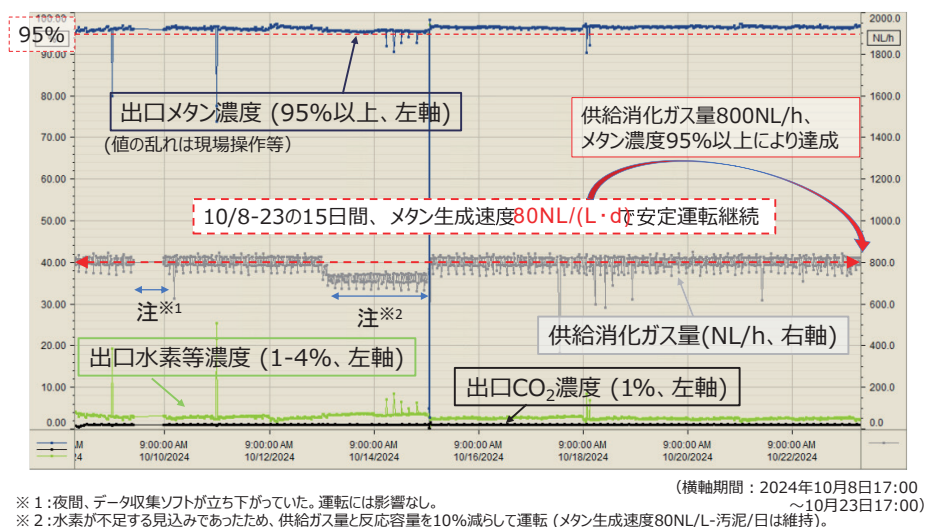


図2-7 秋季の運転におけるメタン化反応槽出口ガス濃度等の推移

2) 負荷変動

季節変動の運転において供給した消化ガス量（ $800NL/h$ ）を 100% として、供給する消化ガス量を 100% と 50% の間で 1d 毎に交互に切り替えて運転した場合の生成ガスの CH_4 濃度の推移を確認した。図 2-8 は 1) の秋季運転に引き続いて実施した調査の結果である。供給消化

* CH_4 生成速度は、メタン化反応槽内の汚泥量に対する 1d 当たりの CH_4 生成量を表す。
 CO_2 から生成した CH_4 量は、メタン化反応槽入口と出口の CO_2 の差分量（濃度×供給ガス量）が全量 CH_4 に転換したものと求めている。

$$\text{メタン生成速度}(NL/(L \cdot d)) = \frac{CO_2 \text{ から生成した } CH_4 \text{ 量}(NL/d)}{\text{汚泥量}(L)}$$

ガス量を切り替えた場合でも生成ガスの CH_4 濃度は 95%以上を維持しており、供給ガス量を 50%とした場合は生成ガスの CH_4 濃度が数ポイント上昇した。これは供給ガス量を下げることによって微生物への基質負荷が低下し、メタン化反応槽内のヘッドスペース内でガス滞留時間が長くなったため、 CH_4 の生成効率が向上し、 CH_4 濃度が高くなった可能性が考えられる。

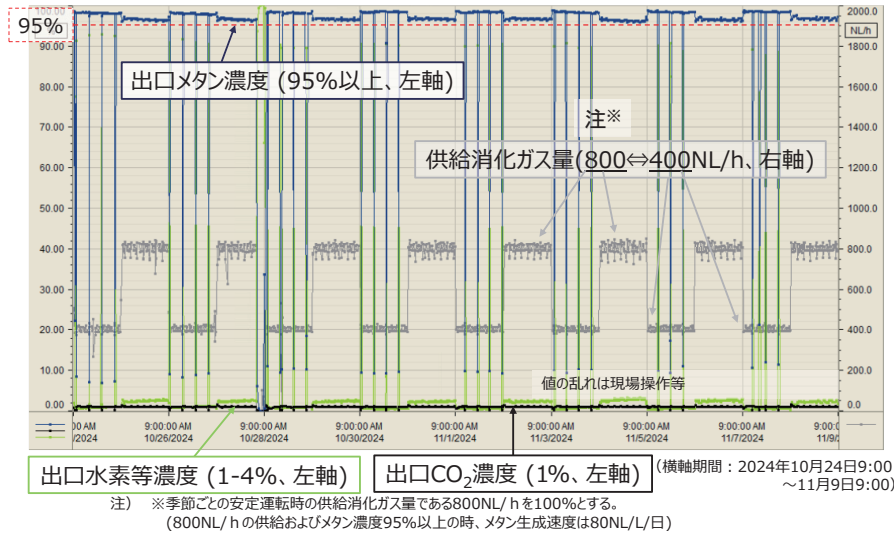


図2-8 負荷変動運転におけるガス濃度等の推移

3) 間欠運転

夜間や休日等にバイオメタネーション施設を停止する場合を想定し、メタン化反応槽内の温度調整を行わない条件で 2d~3d 間停止させた後、再立ち上げの際に加温を再開するという間欠運転を繰り返し実施し、 CH_4 濃度および CH_4 生成速度の推移を確認した。当試験は、冬季の安定性確認試験に引き続き実施した。図2-9に示すように、立ち上げ後直ちに CH_4 濃度が 95%以上および CH_4 生成速度約 80NL/(L・d)を達成した。このことから、実際の運用でも休日等に施設を停止する運用は十分可能であると考えられる。

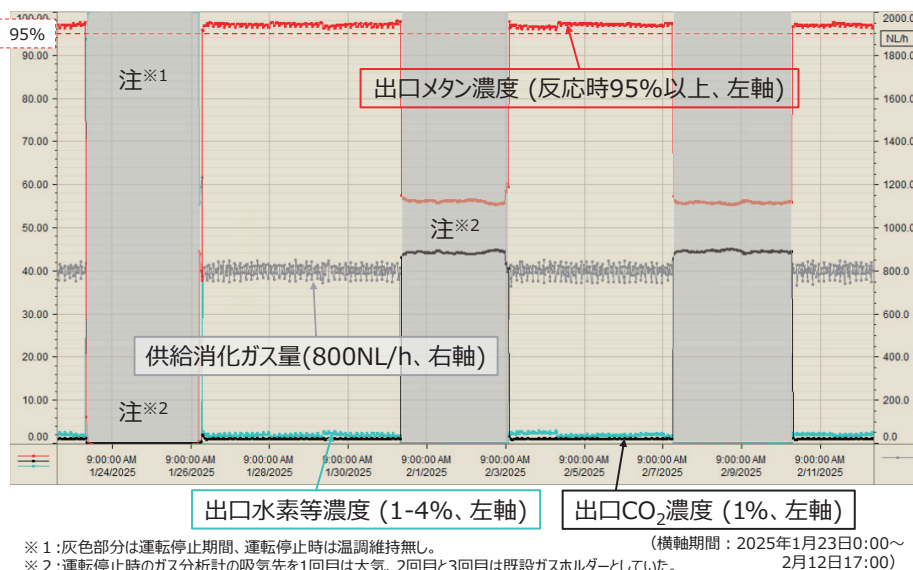


図2-9 間欠運転時におけるガス濃度等の推移(反応槽内温度維持無し)

（4）まとめ

Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術について、夏季、秋季、冬季において「性能確認」および季節変動における「安定運転」に関する試験を実施した。また「安定運転」の確認として、ガス供給量を変動させた運転を秋季に、バイオメタネーション試験設備の起動/停止の繰り返し運転を冬季に行い、CH₄濃度の推移を確認した。その結果、目標性能とする生成ガスの CH₄濃度 95%以上を達成すると共に、目標以上の CH₄生成速度（約 80NL/(L・d)）で運転できることを確認した。また、負荷変動運転や間欠運転を行った場合にも、目標とする CH₄の濃度や生成速度を達成することを確認した。今後は、春季の運転確認や引き続き事業可能性等の調査等を実施する予定である。

3. 検討結果の総括

3.1 本年度の成果

(1) カーボンニュートラル型下水処理システム

① 新たな下水処理システム構築に向けた調査

本年度は、要素技術を組み合わせて導入することによる GHG 削減効果を検討するため、現行フローに対し要素技術を組み合わせた複数ケースを設定し GHG 排出量を試算した。主な結果は以下のとおりである。

- 現行フロー（小規模、中規模、大規模）に対し、要素技術を組み合わせた複数ケースを設定した。いずれも正味の GHG 排出量は削減される試算結果となったものの、今回の試算条件ではいずれもカーボンニュートラル達成には至らなかった。
- 今回の要素技術の組み合わせの範囲において、有機物回収と高度散水ろ床の組み合わせなど、前段で有機物を回収し、反応槽での曝気動力を削減する組み合わせ技術は、水処理における電力消費とプロセスからの排出を大幅に抑制し、GHG 排出量削減に大きく寄与することが示唆された。
- 一方、資源利用については、消化の高効率化や汚泥の資源化に伴うエネルギー消費による GHG 排出量は現行フローよりも増加するものの、消化ガス発電および資源化汚泥の活用（特に外部エネルギー消費量の少ない資源化技術の導入）を考慮すると、正味の GHG 排出量を大きく削減する試算結果となった。

② Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術の調査（B-DASH FS 調査）

Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術について、夏季、秋季、冬季において「性能確認」および季節変動における「安定運転」に関する試験を実施した。また「安定運転」の確認として、ガス供給量を変動させた運転を秋季に、バイオメタネーション試験設備の起動/停止の繰り返し運転を冬季に行い、CH₄の推移を確認した。その結果、目標性能とする生成ガスの CH₄ 濃度 95%以上を達成すると共に、目標以上の CH₄ 生成速度（約 80NL/(L・d)）で運転できることを確認した。また、負荷変動運転や間欠運転を行った場合も目標とする CH₄ 濃度や生成速度を達成することを確認した。

3.2 今後の予定

(1) カーボンニュートラル型下水処理システム

- 新たな下水処理システム構築に向けた調査：要素技術に関する情報収集等を継続し、各技術の諸元値の妥当性を精査すると共に、各ケースにおける要素技術の適用可否や既存施設への導入可能性等の検討を行う。更に今回の処理工程や要素技術の検討に留まらず、抜本的な下水処理フローの転換の可能性や必要性を検討する。また、下水処理場外からの地域バイオマスの受け入れや他分野事業との連携等、バウンダリーを広げたカーボンニュートラルの取り組みの必要性について検討する。
- Ex-situ 型バイオメタネーション反応技術の調査（B-DASH FS 調査）：春季における運転性能の確認を実施すると共に、事業可能性等の検証等を継続する。

謝辞

2.2 節に掲載した検討は、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究としてカナデビア（株）・日本下水道事業団共同研究体により実施されたものであることを明記すると共に、各機関の関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部，公益社団法人 日本下水道協会：下水道政策研究委員会 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書 ～脱炭素社会を牽引するグリーンイノベーション下水道～，国土交通省水管理・国土保全局下水道部，公益社団法人 日本下水道協会，2022.
- 2) 村岡正季，山本明広，新川祐二：カーボンニュートラル型下水処理システムの一提案，第 61 回下水道研究発表会講演集，pp.250-252，2024.
- 3) 日本下水道事業団：技術開発年次報告書（令和 4 年度），pp.81-83，2024.
- 4) 環境省：算出方法・排出係数一覧，pp.1,23，2025.
https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/itiran_2023_rev4.pdf
- 5) 環境省・国土交通省：下水道における地球温暖化対策マニュアル（平成 28 年 3 月），2016.
<https://www.env.go.jp/content/900444538.pdf>
- 6) 電気事業連合会：電気事業におけるカーボンニュートラル行動計画（令和 4 年 6 月），2022.
https://www.fepc.or.jp/carbon_neutrality/about/keikaku/
- 7) 農研機構：土壌の CO₂ 吸収「見える化」サイト.
<https://soilco2.rad.naro.go.jp/>
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所：令和 4 年度下水道技術開発会議エネルギー分科会（第 3 回），資料 3-1，2023.
- 9) 高木玄，林俊介，舩石圭介，青田圭治，熊越瑛，島田正夫，三宅晴男：下水汚泥消化ガスの Ex-situ 型バイオメタネーションフィールド試験，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.175-177，2025.

Ⅱ－１ 下水処理の更なる低コスト化技術の開発

Ⅱ-1 下水処理の更なる低コスト化技術の開発

高田祥暉、小柴卓也、山本明広、村岡正季、糸川浩紀、三宅晴男

1. 開発課題の概要

本開発課題では、地方公共団体における持続的な下水道事業経営に貢献するため、社会インフラとして下水道施設が有すべき機能の維持・向上に資する技術の開発・活用を推進する。

1.1 背景および目的

我が国における下水道施設の普及は 1970 年代から 2000 年代にかけて急速に進み、2005 年以前に供用開始した下水処理場の割合は 9 割にものぼる。そのため、現在では標準耐用年数を超える大量の施設・設備のストックを抱える下水処理場が多く、再構築の需要が高まっている。加えて、今後、広域化・共同化の過程で施設の統廃合を実施するケースが増加することが想定される。しかしながら、人口減少に伴う下水道使用料の減少等により施設の再構築や統合時の増設等に必要な費用を確保することが厳しい状況にある地方公共団体が多い。

地方公共団体において持続的な下水道事業の経営を行うためには、下水道施設の再構築等の際して、下水処理に係るコスト（建設費および維持管理費）を従来よりも削減できる低コスト化技術の開発・実用化を更に進める必要がある。

本開発課題では、水処理・汚泥処理における低コスト化に資する新たな技術を開発・実用化すると共に、過去に開発された低コスト化技術についても導入施設における事後評価調査を行い技術の改良・改善等を図る。

1.2 開発項目

本開発課題では、以下の 4 つの開発項目について技術開発を行う。

（1）水処理能力増強技術

従来、流入水量の増加や高度処理化に伴う水処理能力の低下に対しては、施設増設が第一の選択肢にあった。しかしながら、水処理施設の増設はコストが大きく、更には人口減少等に伴い将来的に流入水量が減少する場合には増設分の能力が不要になってしまう可能性がある。そこで、既存施設を有効活用してライフサイクルコスト（LCC）を抑えながら処理能力を増強することが可能な「水処理能力増強技術*」について、新たな技術の開発・実用化を行う。

前・基本計画（2017 年～2021 年度）からの共同研究を継続すると共に、新たに実施する開発動向調査を踏まえて公募型共同研究を実施する。更に、開発・実用化された水処理能力増強技術を速やかに実施施設へ導入できるように、技術を体系的に整理した上で導入検討マニュアルの

* 水処理能力増強技術とは、流入水量の増加や高度処理化等に伴い、既存の水処理施設（最初沈殿池、反応タンク、最終沈殿池）の容量では処理能力（処理可能水量）が不足する場合に、当該容量での処理可能水量を増加させることが可能な技術を指す。

策定を行う。一方、既に実施設へ導入された水処理能力増強技術についても、処理性能等を確認し技術の改良・改善を図るための事後評価調査等を実施する。

① 水処理能力増強技術の海外動向調査

国外で実用化されている水処理能力増強技術について、ホームページや文献等で調査を行い、処理性能や導入効果等の情報を集約する。

② 水処理能力増強技術の開発・実証

水処理能力増強技術の実証実験を行い、実用化を図る。前・基本計画期間に開始した共同研究 2 件を進めると共に、2023 年度には新規の共同研究を公募し反応タンクおよび最終沈殿池を対象とした新たな水処理能力増強技術の開発を行う。

③ 事後評価調査（導入フォローアップ）

水処理能力増強技術に類する新技術等について、導入第一例となる下水処理場や、その他導入後の課題対応を要する下水処理場等を対象に、フォローアップのための事後評価調査を行う。

④ 水処理能力増強方策の検討手法の確立

複数の水処理能力増強方策（水処理能力増強技術の導入に限らない）から最適な方策を選定できる手法や導入効果の評価手法を検討すると共に、マニュアル化を図る。

（2）水処理改築低コスト化技術

設備更新や耐震補強の工事等に伴う水処理施設の一時的な処理能力不足に対して、仮設の水処理技術が有用であるが、現状では仮設水量が千 m^3/d を超える規模を対象とした技術が十分ではない。そこで、水処理施設の改築時等に低コストで仮設処理を行うことが可能な技術の開発を行う。

MBBR（Moving Bed Biofilm Reactor：移動床式生物膜法）を用いる新たな仮設水処理技術を実証し実用化を図る。加えて、既に JS 新技術 I 類に選定されている仮設水処理装置について、供用時に事後評価調査を行い、基準類への反映に向けて稼働状況や性能等を整理する。

① 仮設水処理技術の開発・実証

MBBR を用いる新たな仮設水処理技術について 2022 年度からの共同研究にて開発を行う。

② 事後評価調査（単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット）

2017 年 3 月に JS 新技術 I 類に選定された「単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット」について、設備更新工事に際してこれを使用する下水処理場において処理性能等を確認するための事後評価調査を行う。

（３）下水処理低コスト化技術*

汚泥処理においては、低動力化・低含水率化等による低コスト化が求められている。加えて、近年の高 VS 化等の汚泥性状の変化や、消化汚泥等の難脱水汚泥の増加に対し、安定した脱水性能を維持しつつ、効率的な処理が求められている。そこで、これらの課題に対応する、汚泥処理の低コスト化に資する汚泥濃縮・脱水技術の開発を行う。

実施内容として、汚泥濃縮・脱水技術について、公募型共同研究を行う。また、開発・実用化された技術を速やかに実装できるように、技術を体系的に整理した上で導入検討マニュアルの策定を行う。

さらに、近年の下水道事業における執行体制の脆弱化や使用料収入の減少等による経営環境の悪化を踏まえ、下水処理の維持管理トータルコストの縮減に寄与する技術の開発を行う。

① 低コスト型汚泥濃縮機・汚泥脱水機の開発・実証

2022 年度から新規の共同研究を公募し、汚泥濃縮機および汚泥脱水機の処理性能向上や LCC の縮減を図ることが可能な技術を開発する。

② 低コスト型汚泥濃縮・脱水技術の体系化

JS が開発に関与した汚泥濃縮機および汚泥脱水機に係る新技術等の体系化を図ると共に、低コスト化技術を集約化し、導入機種を検討するためのマニュアル化を行う。

③ 下水処理の維持管理トータルコストの縮減に寄与する技術の開発・実証

2025 年度から新規の共同研究を公募し、単独または複数の下水処理場を対象として、運転管理に要する人件費やユーティリティ費の縮減を可能とする技術を開発する。

（４）事後評価調査（低コスト化技術）

地方公共団体において、持続的な下水道事業の経営を行うための 1 つの方策として下水処理の低コスト化技術の導入が想定されるが、導入実績を有する新技術（選定技術）について、更に導入を進めるために、基準類への反映に向けた事後評価調査を行う。

① JS 新技術の事後評価調査（低コスト化技術）

以下の 5 技術を対象に、導入施設における事後評価調査を実施する。

- ・圧入式スクリープレス脱水機（Ⅳ型）による濃縮一体化脱水法
- ・破碎・脱水機構付垂直スクリー式除塵機
- ・多重板型スクリープレス脱水機-Ⅱ型
- ・全速全水位型横軸水中ポンプ
- ・下水汚泥由来繊維利活用システム

* 「JS 技術開発・活用基本計画 2022」の第 2 回改定（2024 年 10 月）において、「汚泥処理の低コスト化」から開発項目名を変更。汚泥処理に限らず、下水処理（水処理・汚泥処理）のトータルコストの縮減に寄与する技術の開発を目指すものとした。

1.3 本年度の実施内容

本年度は、1.2 節に記載の開発項目のうち、以下の 4 項目を実施した。

（1）水処理能力増強技術

- ② 水処理能力増強技術の開発・実証（2.1 節）
- ③ 事後評価調査（導入フォローアップ）（2.2 節）

（2）水処理改築低コスト化技術

- ② 事後評価調査（単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット）（3.1 節）

（3）下水処理低コスト化技術

- ① 低コスト型汚泥濃縮機・汚泥脱水機の開発・実証（4.1 節）

（4）事後評価調査（低コスト化技術）

- ① JS 新技術の事後評価調査（低コスト化技術）
 - ・ 破碎・脱水機構付垂直スクリー式除塵機（5.1 節）

2. 水処能力増強技術

2.1 水処理能力増強技術の開発・実証

（1）検討の概要

現在、我が国では担体投入活性汚泥法や膜分離活性汚泥法（MBR）といった水処理能力増強技術が実用化されているものの、コストが高い等の理由から必ずしも導入実績は多くない。より多様な条件において低コストで処理能力の増強を図るためには、技術のラインアップを充実させるための技術開発を継続して実施する必要がある。

本検討では、民間企業との共同研究等により新たな水処理能力増強技術の開発・実用化のための実証実験等を実施する。前・基本計画期間（2017～2021 年度）に開始した共同研究を継続すると共に、2023 年度に新たな共同研究を公募し更に新規の水処理能力増強技術の開発を行う。

過年度は、前・基本計画期間から継続している 4 件の共同研究を実施し、2 件について完了した。加えて、2023 年度に「新たな水処理能力増強技術の開発」と題した共同研究の公募を開始し、1 件を選定した。

本年度は、前・基本計画期間から継続している 2 件の共同研究（以下の①、②に対応）を進め、両者について完了した。また、2023 年度に選定した公募型共同研究 1 件（以下の③に対応）を開始すると共に、同公募において更に 1 件（以下の④に対応）を選定し共同研究を開始した。

- ① 能力増強型水処理システム（JS、荏原実業㈱；2018～2024 年度完了）
- ② 最終沈殿池の処理能力向上技術（メタウォーター㈱・日本下水道事業団・松本市共同研究体；2016～2024 年度完了）
- ③ MABR 併用型活性汚泥法を用いた水処理能力増強技術（JS、三機工業㈱；2024 年度～）
- ④ ハイドロサイクロンを用いた汚泥性状改善による水処理能力増強技術（JS、㈱明電舎；2024 年度～）

① 能力増強型水処理システム

標準活性汚泥法の既設反応タンクに固定床担体を付加することで処理能力を 1.5 倍程度に増強可能な「能力増強型水処理システム」の実用化を目指し、JS 技術開発実験センター内にパイロットプラントを設置して実証実験等を行うもので、2024 年 12 月に完了した。

② 最終沈殿池の処理能力向上技術

最終沈殿池の流出部にろ過機能を付加することで、最終沈殿池の処理性能を量的もしくは質的に向上させることが可能な「最終沈殿池の処理能力向上技術」を確立することを目的に、実規模の実証実験を行ってきた。本検討は、2017、2018 年度の B-DASH プロジェクト（実規模実証）において松本市両島浄化センターを実証フィールドとして処理性能等を実証した後、2019 年度以降は、前記の共同研究体による自主研究として、継続して処理水質の長期安定性の確認や課題解決策の検討等を実施し、2025 年 3 月に完了した。

③ MABR 併用型活性汚泥法を用いた水処理能力増強技術

国外で導入実績がある MABR（Membrane Aerated Biofilm Reactor：膜通気式生物膜法）を用いて反応タンクの処理能力増強を図る「MABR 併用型活性汚泥法」について、国内下水を対象とした水処理方法としての確立を目的に、実下水を用いたパイロット規模の実証実験を行うもので、2024 年 4 月に共同研究を開始した。なお、本年度については、実験プラントを立ち上げ、各種運転条件の調整・最適化等の基礎検討を進めた段階であることから、本報では開発技術および実施内容の概要のみを紹介する。

④ ハイドロサイクロンを用いた汚泥性状改善による水処理能力増強技術

各種活性汚泥法においてハイドロサイクロンを用いて活性汚泥の沈降性を向上させることで、反応タンクや最終沈殿池の処理能力増強を可能とする技術の実用化を目的に、実証実験等を行うもので、2024 年 10 月に共同研究を開始した。本研究では、先ず JS 技術開発実験センターにおいてパイロット規模の実験プラントを用いて基礎的な性能を確認した上で、下水処理場の水処理系列を用いた実規模での実証実験へと進める予定である。なお、本年度については、机上での事前検討等を経て実験プラントへ装置を設置し運転条件等の調整を始めた段階であることから、本報では開発技術および実施内容の概要のみを紹介する。

（2）検討方法

① 能力増強型水処理システム¹⁾⁻⁴⁾

本技術は、標準活性汚泥法の反応タンクの上流端区画に接触ろ材を設置して固定床型反応槽とし、生物膜法と活性汚泥法の直列の併用処理とすることで、反応タンクの処理能力増強を可能とする新たな水処理システムである。4 区画に分割された標準活性汚泥法の一般的な反応タンク構造を想定した場合、上流端の 1 区画に接触ろ材を投入して「固定槽」とし、残りの 3 区画を活性汚泥法による「浮遊槽」とした上で、流入水（最初沈殿池流出水）を固定槽と浮遊槽第 2 槽目に所定の水量比でステップ流入させる。最終沈殿池からの返送汚泥を浮遊槽第 1 槽目に流入させることで、固定槽は活性汚泥が存在しない固定床の反応槽となる。本技術では硝化促進運転を前提とし、浮遊槽第 2 槽目は、曝気を抑制することで脱窒によるアルカリ度の回復を図る無酸素槽とする。

上述の処理フローを有するパイロットプラント（図 2-1）を JS 技術開発実験センター内に設置し、標準活性汚泥法に対して 1.5 倍の水量負荷の条件にて目標処理水質（BOD：10mg/L 以下、SS：10mg/L 以下）を達成することを目指して各種条件での処理性能等を確認してきた。本プラントの処理能力は 90m³/d で、本水量において、反応タンク HRT が 5.3hr と標準活性汚泥法の一般的な HRT（8hr）に対して 1.5 倍の水量負荷となる。

過年度の実証実験において、硝化の悪化を防止し N-BOD の発現を抑制するための運転方策として、(a)原水の分配比率の見直し、(b)原水へのアルカリ添加、の 2 点を見出し、両者を探り入れた上で通年での実証運転を 2023 年 7 月に開始した。本年度は、同実証運転を 2024 年 7 月まで継続し、通年での実証を完了した。加えて、パイロットプラントに併設したベンチ規模のプラントを用いて標準活性汚泥法を模擬した運転を行い、本技術の比較対象となるデータを取得した。

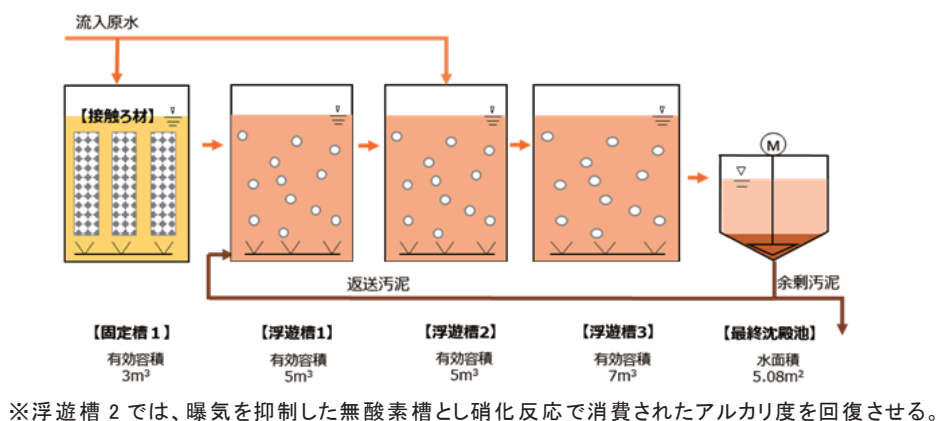


図2-1 能力増強型水処理システムのパイロットプラントの処理フロー

② 最終沈殿池の処理能力向上技術

本技術は、最終沈殿池の流出部にろ過設備を設置し、沈殿分離し切れなかった浮遊物質を捕捉・除去することで、最終沈殿池の処理性能を向上させるものである。ろ過処理を継続すると必然的にろ層内に固形物が蓄積するため、これを定期的に洗浄し最終沈殿池より上流へ排出する洗浄設備を併せて設置する（図2-2）。なお、本技術では、従来の最終沈殿池と同等の処理水質を得ながら従来に対して処理水量の増加を可能とすることを「量的向上」、従来と同等の処理水量において急速ろ過水相当の処理水質を可能とすることを「質的向上」と称している。

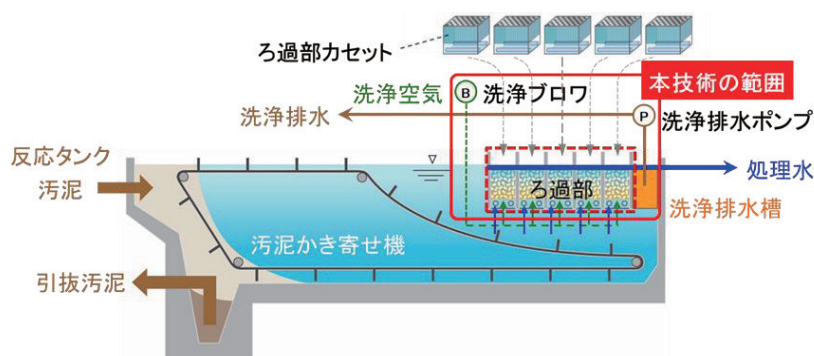


図2-2 最終沈殿池の処理能力向上技術の概要

2017年度のB-DASH実証研究において、松本市両島浄化センターの水処理系列1系（処理能力 10,950m³/d）の最終沈殿池3池（1池あたり 3,650m³/d）に本技術を設置して実証設備（実証系）とし、以降、隣接する2系の最終沈殿池1池を対照系として長期間の実証実験を行った。

2017、2018年度のB-DASH実証研究では、対照系の流入水量に対して、実証系1池の流入水量を2倍程度にした条件で運転した結果、四季を通して実証系の処理水質は対照系と同等であり量的向上の効果が確認された。加えて、実証系と対照系の流入水量が同程度の条件において運転した結果、実証系では対照系よりも良好な処理水質（急速ろ過並み）が得られ質的向上の効果が確認された。

一方、2019年度に開始した自主研究では、引き続き実証設備の運転を継続し、以下の事項を検討した。

- 2 倍水量での長期運転データの蓄積
- 量的向上と質的向上の両立を図る運用の確立
- 運用に際して見出された設備的課題の解決策の検討および改良効果の検証
- 本技術の「導入ガイドライン(案)」の見直しに向けた検討

本年度は、ろ過部カセットの底部スクリーンの閉塞対策として昨年度に実施したスクリーンの仕様変更（実証施設 3 池のうち 1 池においてパンチングスクリーンからメッシュスクリーンへ変更）について、引き続き効果の検証を実施した。加えて、自主研究で得られた実験データを総合的に解析し、本技術の適用条件や導入時の計画・設計方法の見直し等、本技術の「導入ガイドライン(案)」⁵⁾の見直しに向けた検討を行った。

③ MABR 併用型活性汚泥法を用いた水処理能力増強技術

本技術は、従来の活性汚泥法に MABR を組み合わせることで、反応タンクの処理能力を増強するものである。MABR は、ガス透過性膜を用いて酸素供給を行い、同膜の表面に形成される生物膜を利用して生物学的処理を行う新たな排水処理方法である⁶⁾（図 2－3）。ガス透過性膜を高密度に配置したユニット（MABR ユニット）を反応タンクに設置することで、反応タンク内に高濃度の微生物を保持することが可能となり、高い容積負荷での生物学的処理が可能とされる。また、MABR における酸素供給はガス透過性膜を介した分子拡散により行われることから、従来の曝気による酸素供給よりも酸素移動効率が大幅に向上し、省エネ化も可能である。加えて MABR では、酸素が供給される生物膜の内側に好気条件が、その外側に無酸素・嫌気条件が形成され、単一の生物膜において、有機物に加えて硝化・脱窒による窒素の除去が可能とされる。

世界的には、MABR は下水処理を含めた各種排水処理の用途で実装されている状態にあり、そこでは、活性汚泥法との併用処理（IFAS*）とする方法と、活性汚泥を介在させない純粋な生物膜法としての処理方法のいずれもが使用されている。このうち本共同研究では、反応タンクの上流区画内に MABR ユニートを設置し IFAS としての処理を行うことで、従来の活性汚泥法よりも単位容積当たりの処理能力を増強すると共に反応タンクにおける省エネ化を可能とする水処理方法を確立するものとし、これを「MABR 併用型活性汚泥法」と称している。本技術は、既存の活性汚泥法の反応タンクの改造による導入が可能で、既設の処理能力の増強により水処理施設の増設を回避することで建設コストも削減される等、LCC の縮減も可能になると期待される。なお、本技術が想定する処理能力増強の対象は反応タンクであり、最終沈殿池は含まない。

* IFAS : Integrated fixed-film activated sludge（生物膜と活性汚泥の併用法）。

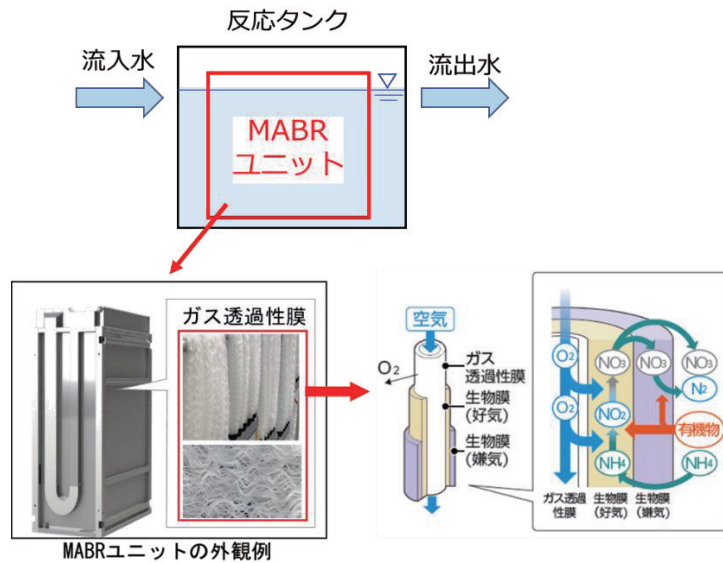


図2-3 MABR の概要

共同研究では、従来の活性汚泥法（標準活性汚泥法、A2O 等）に対して、(a)反応タンクの処理能力を 1.5 倍以上に増強、(b)消費電力量および LCC をそれぞれ 30%以上削減、を開発目標としている。これを実証するために、下水処理場内に本技術の実験プラント（処理能力：60m³/d；図2-4）を設置し、実下水（最初沈殿池流出水）を原水として、通年試験を含めた実証実験を行う。本プラントでは、等容量の 4 区画に分割した反応タンクの第 1 槽に MABR ユニットの設置し、標準活性汚泥法や高度処理法に準じた処理フローにて連続処理実験を実施する。MABR ユニットの、中空糸膜型のガス透過性膜を約 6 万本（総膜面積：約 200m²）収納したもので、ガス透過性膜に空気を供給するための「プロセスブロウ」に加えて、生物膜の剥離を促進し適正な生物膜量を維持するための「洗浄ブロウ」、エアリフトポンプによりユニット内外で活性汚泥混合液を循環させるための「エアリフトブロウ」という 3 系統の送風機が付随している。

本年度は、実験フィールドに同実験プラントを設置して立ち上げ運転を行った後に、MABR ユニットの係る事項を中心に運転条件の調整や最適化を進めた。

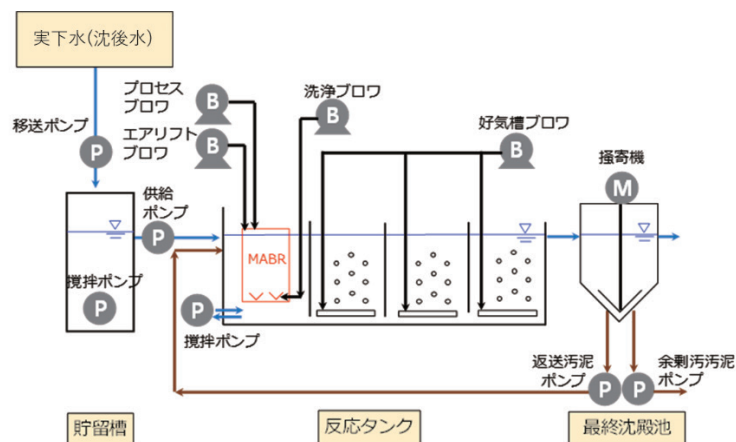


図2-4 MABR 併用型活性汚泥法の実験プラントのフロー

④ ハイドロサイクロンを用いた汚泥性状改善による水処理能力増強技術

本技術は、各種活性汚泥法において、ハイドロサイクロンを用いて活性汚泥の沈降性を向上させることで既設の水処理能力を増強させるものである。ハイドロサイクロンは活性汚泥中の粒子をサイクロンセパレータの原理により比重に基づき選別するもので、装置の上部から圧入された活性汚泥混合液のうち、比重が大きい粒子は装置下部からアンダーフローとして、比重が小さい粒子は装置上部からオーバーフローとして、それぞれ流出する（図 2－5）。これを返送汚泥や余剰汚泥のラインに設置し、アンダーフローのみを反応タンクに返送（オーバーフローは余剰汚泥として排出）する操作を連続的に実施することで、活性汚泥の沈降性の向上を図る。これにより最終沈殿池の処理能力増強が可能になるほか、反応タンクの MLSS 濃度を引き上げれば反応タンクの水処理能力増強も可能となる。

共同研究では、(a)活性汚泥の沈降性向上効果として SVI_{30} を 100mL/g 以下、(b)反応タンクもしくは最終沈殿池の処理能力増強効果として技術導入前に対して 1.5 倍以上、の 2 点を開発目標としている。まず、JS 技術開発実験センターにおいて JS が運転しているパイロット規模の実験プラント（標準活性汚泥法、処理能力： $50\text{m}^3/\text{d} \times 2$ 系列）を用いて、ハイドロサイクロンの基本的な性能（汚泥分離特性、汚泥沈降性改善効果等）を確認する。次いで、実規模での実証実験に移行し、下水処理場（標準活性汚泥法）の水処理施設 1 系列の返送汚泥経路にハイドロサイクロンを設置して通年での実証運転を行う。

本年度は、活性汚泥の沈降性向上効果に応じた反応タンクおよび最終沈殿池の処理能力増強効果を机上で試算した上で、実験プラントにハイドロサイクロンを設置し運転条件等の調整を開始した。

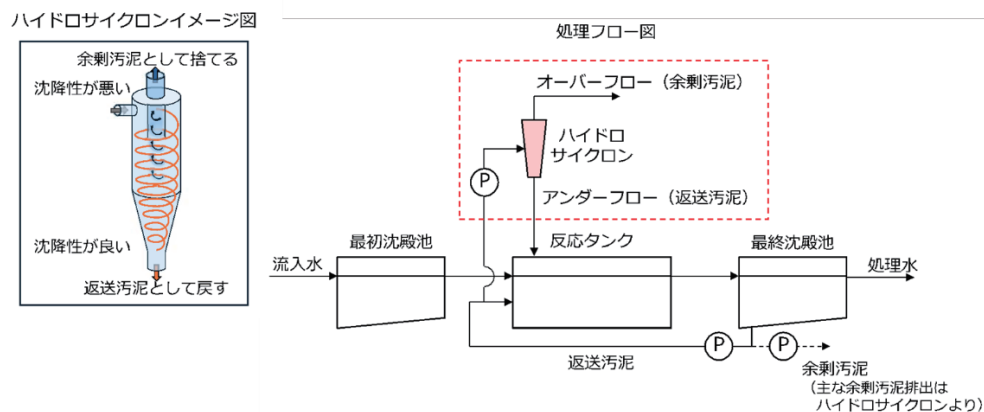


図 2－5 活性汚泥法におけるハイドロサイクロンの導入のイメージ

（３）検討結果

① 能力増強型水処理システム⁴⁾

本技術のパイロットプラントについて、一般的な標準活性汚泥法の 1.5 倍に相当する水量負荷条件（流入水量：90m³/d、反応タンク HRT：5.3hr、流入水量の時間変動ピーク比：1.4）にて通年（2023 年 7 月～2024 年 7 月）での実証運転を行った。そこでは前述の通り、安定的に硝化を促進し処理水における N-BOD の発現を抑制するために、(a)固定槽と浮遊槽 2 への原水のステップ流入比率の見直し（75：25 から 55：45 へ変更）、(b)原水へのアルカリ剤添加の追加（アルカリ度/NH₄-N 比が 7 を下回る時間帯に同比を 7 程度まで引き上げ）という二つの措置を導入した。

本期間における原水および処理水の BOD、SS 濃度の推移を図 2－6 に示す。処理水の BOD、SS 濃度はそれぞれ平均で 4mg/L（範囲 1～8mg/L；以下同様）、1.5mg/L（0.4～6.8mg/L）と、いずれも年間を通して目標値（各々 10mg/L 以下）を達成した。なお、固定槽流出水の S-BOD 濃度は平均 20mg/L（データ非掲載）で、同槽における原水の S-BOD に対する低減率は平均 61%となり、同槽の性能目標である 50%を上回った。

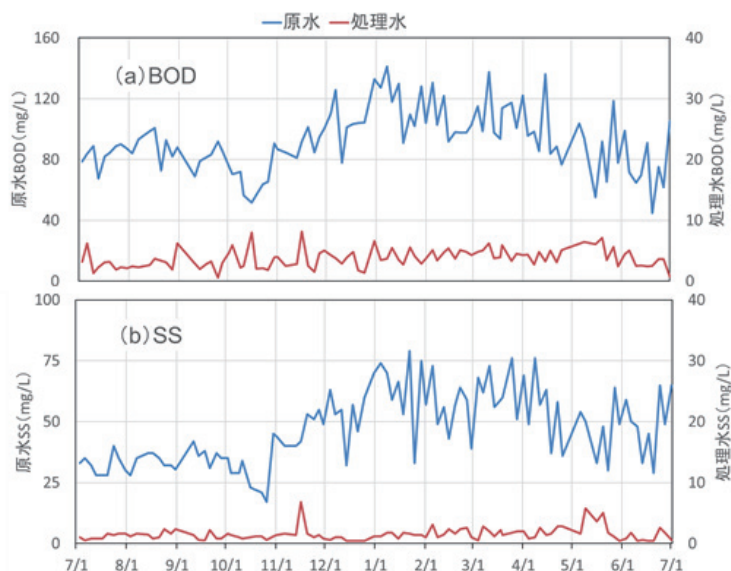


図2－6 実証運転期間における原水および処理水の BOD、SS 濃度の推移

次に、実証運転期間における原水の NH₄-N 濃度および処理水の NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N 濃度の推移を図 2－7 に示す。処理水の NH₄-N 濃度は冬季を含めて概ね 1mg/L 以下と硝化が概ね完全に進行し、過年度に見られたような NO₂-N の蓄積も見られなかった。その結果、N-BOD は平均 1.4mg/L（データ非掲載）と低く、前述の二つの措置により年間を通して N-BOD の発現を抑制した運転が可能であることが確認された。なお、上記プラントに併設したベンチプラントを用いて、本実証運転と同一の反応タンク HRT（5.3hr）による標準活性汚泥法の運転を低水温期（2023 年 2～4 月）に実施したところ、処理水に NH₄-N および NO₂-N が残存し N-BOD が大きく上昇したことも確認されている。

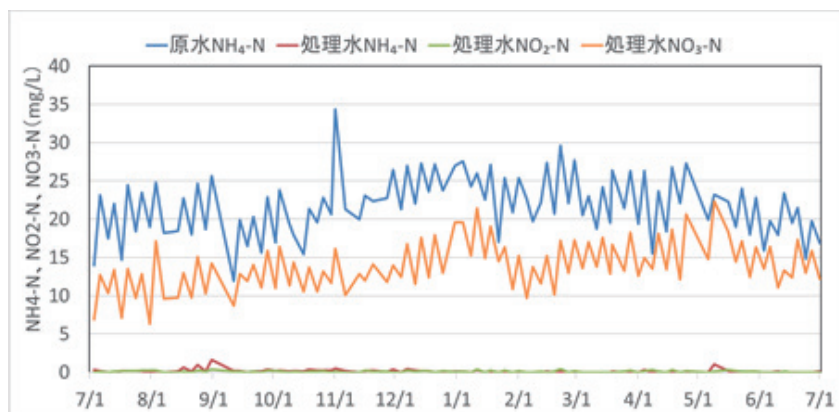


図2－7 実証運転期間における原水の $\text{NH}_4\text{-N}$ および処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度の推移

② 最終沈殿池の処理能力向上技術

2019 年度から 6 年間にわたり実施してきた自主研究が本年度をもって完了したことから、本報では、自主研究期間全体の主要な成果として、以下の 1)～4)の事項について結果の概要を掲載する。

1) 量的向上(2 倍水量)での長期運転データの蓄積⁸⁾

実証系・対照系の処理水量および処理水 SS 濃度（換算値*）について、2020 年 9 月～2025 年 3 月の期間における月間平均値の推移を図 2－8 に示す。本期間内に、対照系に対して実証系の処理水量を 2 倍程度へと引き上げる「量的向上」の条件での運転を、冬季を中心に延べ 12 ヶ月間実施した。本運転期間における実証系/対照系の処理水量の倍率は平均 1.9 倍で、量的向上として概ね想定通りの運転が行われた。本運転期間の処理水の SS 濃度（換算値）は、実証系で平均 5.2mg/L（範囲：3.2～10.1mg/L；以下同様）、対照系で平均 7.2mg/L（5.3～12.0mg/L）と、実証系の方が良好であった。また、同期間における両系の処理水の BOD（T-BOD）濃度はそれぞれ 2.4mg/L（1.5～3.2mg/L）、3.0mg/L（1.6～4.4mg/L）と同等（データ非掲載）であり、量的向上（2 倍水量）の運転において、少なくとも対照系と同等の処理水質が得られることが長期的に実証された。

2) 量的向上と質的向上の両立を図る運用の確立⁸⁾

B・DASH 実証研究においては、本技術の効果として前述の「量的向上」（2 倍水量にて同等の処理水質）、もしくは「質的向上」（水量を変えずに処理水質を急速ろ過水並みへ向上）のいずれかが可能であることを実証した。これに対して自主研究では、これらを両立させる新たな運用として、処理水量を 1.5 倍程度に増強しながら処理水質を急速ろ過水並み（下水道法施行令に基づき BOD が 10mg/L 以下）とすることを目的とした実証運転を行った。具体的には、実

* ここで示す SS 濃度は、濁度の計測値から推定した換算値である。本研究では、実証系と対照系の最終沈殿池の流出トラフおよび実証系のろ過設備流入部において濁度を連続的に計測しており、実証実験の過程で見出した濁度計測値と SS 濃度の関係式を用いて SS 濃度を推定している。

証系の処理水量を対照系の 1.5 倍程度に調整した条件での運転を延べ 10 ヶ月間実施した（2021 年 4～6 月、同年 11 月～2022 年 5 月；図 2－8 参照）。

本運転期間における処理水の BOD 濃度は、実証系が平均 2.7mg/L（0.5～5.8mg/L）、対照系が平均 3.5mg/L（1.1～7.1mg/L）で、両系において冬季に上昇する傾向があったものの、全体的に実証系の方が良好であった（図 2－9）。同期間における実証系の BOD 濃度の最大値は 5.8mg/L と、急速ろ過水並みの処理水質として設定した目標（10mg/L 以下）を満足した。これより、上述の量的向上と質的向上の両立を図る運用が可能であることが確認された。

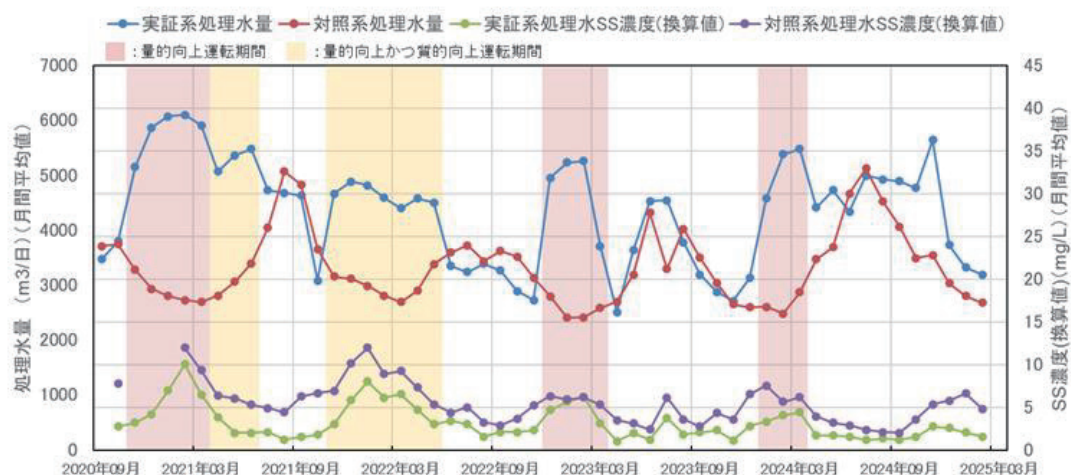


図 2－8 自主研究期間における実証系・対照系の処理水量および SS 濃度（換算値）の推移（2020 年 9 月～2025 年 3 月；「量的向上」および「量的向上かつ質的向上」の運転期間を着色で表示、それ以外の期間については両系を同等の水量として運転）

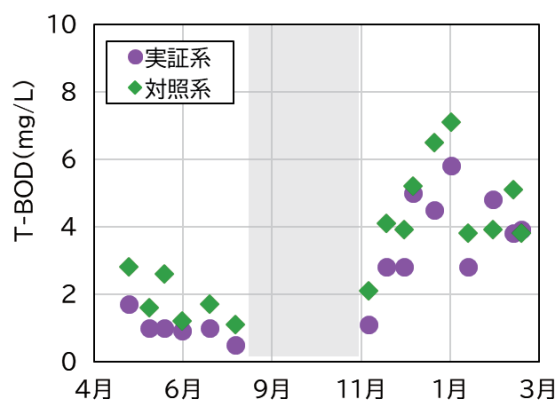


図 2－9 量的向上と質的向上の両立運転期間における実証系・対照系の処理水の BOD 濃度の推移（2021 年 4 月～2022 年 3 月）

3) 運用に際して見出された設備的課題の解決策の検討および改良効果の検証

ろ過部カセットの底部スクリーンの閉塞対策として、2023 年 12 月にスクリーンの仕様を変更し、その後の効果検証を行った。具体的には、ろ過部カセット上部および下部の両スクリーンについて、実証施設 3 池のうち 1 池を対象に従前のパンチングスクリーンからメッシュスクリーンに変更した。

対策実施後の運転日数経過に伴う閉塞度指数の推移について、当初の対策なしの状態、底部からの空気洗浄（底部空洗）のみを追加した状態（2019 年度に実施）における推移と併せて図 2-10 に示す。ここで、閉塞度指数とは底部スクリーンの通水抵抗を流量で除したもので、底部スクリーンの閉塞度を示す指標である。底部空洗の追加により底部スクリーンの閉塞が大幅に抑制されるが、これにメッシュスクリーンを組み合わせることで更に効果が向上し、約 1 年間にわたって閉塞度指数が上昇しない運転が可能であった。

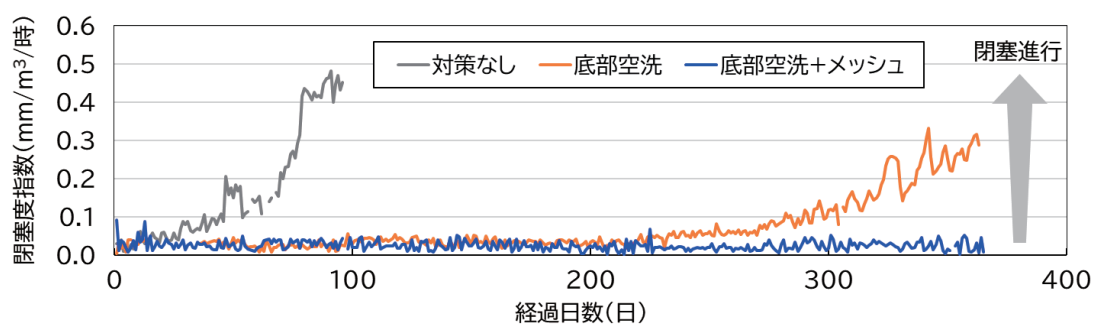


図 2-10 底部スクリーンの閉塞対策に応じた閉塞度指数の推移

4) 本技術の「導入ガイドライン(案)」の見直しに向けた検討

自主研究期間における実証系のろ過部流入水の SS 濃度（換算値）と処理水 SS 濃度（換算値）の関係を図 2-11 に示す。実証系における処理水量引上げの有無に関わらず、処理水の SS 濃度がろ過部流入水の SS 濃度に応じて増減する傾向が明確であった。これは B-DASH 実証研究で見られたものと同様の傾向で、本技術の適用に際してろ過部流入水の SS 濃度を推定することが重要である点が再確認された⁹⁾。

これより、自主研究期間に得られたデータを総合的に解析し、ろ過部流入水の SS 濃度を予測する式を構築した。本技術の計画・設計において、本予測式を用いて本技術導入後の処理水 SS 濃度を推定する新たな手法を見出した。

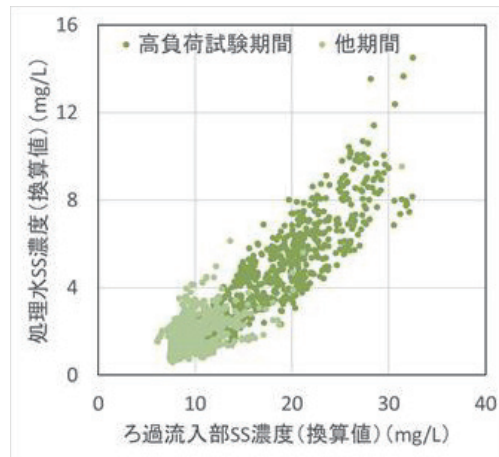


図2－11 実証系におけるろ過部流入水と処理水の SS 濃度（換算値）の関係
（R2～6 全期間；「高負荷試験期間」は処理水量を 1.5 倍または 2 倍とした期間を意味する）

（4）まとめ

共同研究において 4 つの水処理能力増強技術の開発・実証を進め、2 件について完了した。当該 2 件について、主要な成果を要約すると以下の通りである。

① 能力増強型水処理システム

標準活性汚泥法の 1.5 倍の水量負荷の条件にて通年（2023 年 7 月～2024 年 7 月）での実証運転を行った結果、年間を通して硝化が安定して進行し、目標処理水質（BOD：10mg/L 以下、SS：10mg/L 以下）が達成された。

② 最終沈殿池の処理能力向上技術

6 年間にわたる長期の自主研究において、冬季を中心に量的向上（2 倍水量）の運転実績を蓄積すると共に、量的向上（1.5 倍水量）と質的向上の両立を図る新たな運用が可能であることを実証した。本技術の運転に際して生じたるろ過部カセットの底部スクリーン閉塞に伴う清掃頻度の増加という課題に対して、カセット底部からの空気洗浄に加えてメッシュスクリーンへの仕様変更により、閉塞を大幅に抑制可能であることを確認した。自主研究により得られた知見・データを総合し、本技術の適用条件や計画・設計方法の見直しを図った。

2.2 事後評価調査（導入フォローアップ）

（1）検討の概要

本検討は、実施設に導入された水処理能力増強技術について、同施設での運転実績から性能等の確認や評価を行い、技術の改良・改善を図ると共に、これらの結果を導入検討手法・設計手法へ反映させることを目的とするものである。

過年度は、2022 年度に「雨天時活性汚泥法」について、長期間の稼働実績を有する下水処理場 1 箇所を対象に安定運転のための課題の解決方策を検討する調査を行ったほか、2022～2023 年度に「最終沈殿池用傾斜板沈殿分離装置」（JS 新技術 I 類）について、導入第一例となる下水処理場を対象に技術の性能や処理能力を検証するためのフォローアップ調査を実施した。

本年度は、循環式硝化脱窒型膜分離活性汚泥法（MBR）よりも大幅に高い窒素除去性能を有する「超高度処理型 MBR」について、導入第一例となる施設が 2024 年 4 月に稼働したことから、同下水処理場において通年での処理性能等を確認するフォローアップ調査を開始した。

（2）検討方法

① 対象技術

「超高度処理」とは、従来の高度処理法（循環式硝化脱窒法（＋凝集剤添加）や嫌気無酸素好気法に代表される生物学的窒素・リン除去法に急速ろ過を組み合わせた水準）に対して、有機物、窒素、リンを更に高度に除去する水処理技術である¹⁰⁾。JS では、1996～2000 年度に滋賀県から受託した調査において、生物学的処理（3 段式のステップ流入式多段硝化脱窒法（ステップ多段法）＋後脱窒＋凝集剤添加）の後段に物理化学的処理（砂ろ過＋オゾン処理＋生物活性炭処理）を組み合わせることで、従来の高度処理よりも更に高度な目標処理水質（COD_{Mn}：3mg/L、T-N：3mg/L、T-P：0.02mg/L）を達成可能な処理技術について、実施設およびパイロットプラントによる実証実験を実施し、設計手法等を確立した。

このうち生物学的処理の部分（3 段式ステップ多段法＋後脱窒＋凝集剤添加）について、MBR と組み合わせることで施設のコンパクト化を図った処理技術を本検討では「超高度処理型 MBR」（図 2－1 2）と呼ぶ。本技術は、滋賀県からの受託調査において JS が 2001～2004 年度に実施したパイロットプラント実験により処理性能等が実証されたもので¹¹⁾、前述の通り、その導入第一例として処理能力 34,400m³/d の施設が 2024 年 4 月に稼働した。なお、2025 年度には導入第二例となる施設が稼働する予定である。

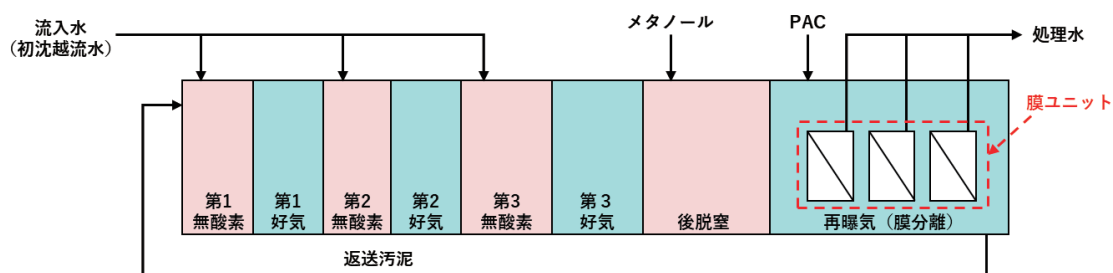


図 2-12 超高度処理型 MBR の処理フロー*

② 調査内容

本フォローアップ調査では、超高度処理型 MBR の実施設において水質調査等を実施し、生物学的処理や膜処理について、年間を通じた処理性能や処理特性を確認する。このうち本年度は、前述の稼働施設 1 箇所を対象に、維持管理資料を収集し稼働後の運転・処理の経過をフォローした（結果については調査完了年度に集約することとし、本報では非掲載）。

次年度には、同施設において通年での水質調査を実施すると共に、新たに稼働予定の 1 施設においても調査を開始する予定である。

* 本図には、膜ユニットを再曝気タンクに設置する処理フローを示してあるが、「超高度処理型 MBR」の方式としては、この他に膜ユニットを第 3 好気タンクに設置するタイプもある。このうち、本年度に稼働した施設では、同図と同一の処理フローが採用されている。

3. 水処理改築低コスト化技術

3.1 事後評価調査（単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット）

（1）検討の概要

「単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット」は、仮設処理用の可搬式水処理装置として 2017 年 3 月に JS の新技術 I 類に選定されたもので、これ以降、小規模の下水処理場の改築工事において本技術の活用実績が着実に増加している。本検討は、実運用における本技術の運転状況や処理状況等を確認し、技術の改良・改善、更には JS の技術基準への盛込みに繋げるための事後評価調査を実施するもので、2024 年度に開始し 2026 年度まで実施予定である。

本年度は、プレハブ式オキシデーションディッチ（POD）法を使用する下水処理場 1 箇所を対象に、水処理設備の改築工事に際して本技術（単槽式 MBR ユニットのみのみ）が使用された期間に調査を実施した。なお、次年度以降にも複数の下水処理場を対象に調査を実施する予定であることから、本報では技術の概要および調査内容を紹介するに留め、結果については調査完了年度に集約して報告する。

（2）検討方法

① 対象技術

単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニットは、JS・(株)日立製作所・(株)日立プラントサービスによる共同研究（実施期間：2013 年 3 月～2016 年 9 月）において開発された可搬式の水処理装置である^{12),13)}。原則として仮設水量 1,200m³/d 以下を適用対象としており、POD 法等の極小規模の水処理施設の改築工事において、処理能力を維持するための仮設処理としての適用が主要な用途となる。コンパクトな生物学的処理法である単槽式 MBR のユニット（処理能力 300m³/d）と物理化学的処理法である高速凝集沈殿法（高沈）のユニット（同 500m³/d）を単独または組み合わせで使用する（図 3－1）。

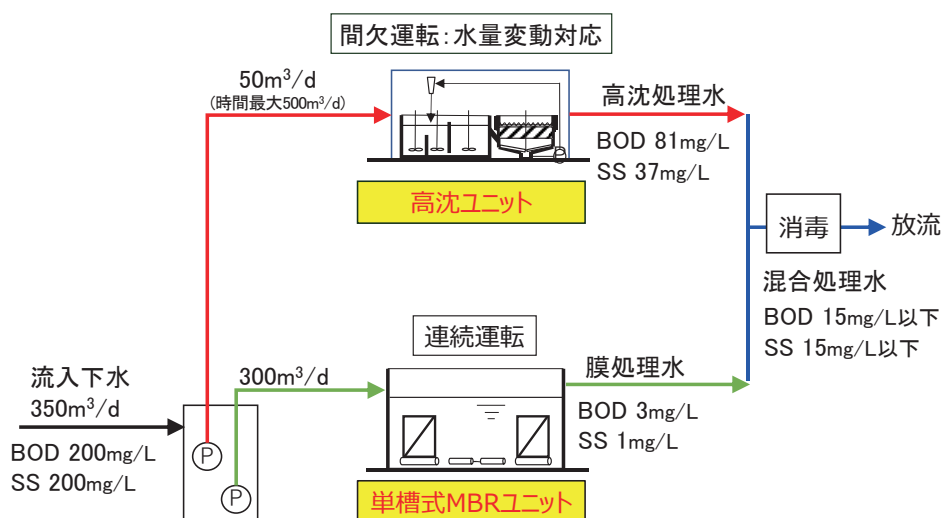


図 3－1 単槽式 MBR と高沈のユニットの組み合わせ処理フローの例

② 調査内容

本年度は、POD 法の改築工事に際して本技術が使用された下水処理場 1 箇所において、本技術の運用期間（2024 年 9～12 月；立ち上げ・馴養期間を含む）に運転・計測データの収集、流入水・処理水等の水質測定等を実施し、本技術の運転状況・処理状況等に係るデータを蓄積した。

4. 下水処理低コスト化技術

4. 1 低コスト型汚泥濃縮機・汚泥脱水機の開発・実証

（1）検討の概要

持続的な下水道事業経営の実現には、汚泥処理の低コスト化技術が不可欠である。近年では、生活様式の変化により流入水中の有機物量が増加する傾向にあることや、脱炭素社会実現に向けた嫌気性消化技術の導入が促進される等、汚泥の難脱水化が進んでおり、低コスト化を図るためには、汚泥処理性能の向上が求められる。

このような背景から、本検討では汚泥処理の要である濃縮技術と脱水技術を対象として、汚泥処理の低コスト化技術の開発を行う。2022 年度から 2023 年度にかけて「汚泥処理の低コスト化に向けた汚泥濃縮技術及び汚泥脱水技術の開発」を開発課題として共同研究を公募した。

昨年度は汚泥脱水機の処理能力増強技術として 2 技術を選定し、うち水 ing エンジニアリング(株)との共同研究（2022 年 12 月～2024 年 12 月）において、「ダウンサイジング対応型同軸差動式スクリュースプレ脱水機」（以下、「同軸差動式 SP 脱水機」と略記）の実証実験として、混合汚泥および消化汚泥を対象とした脱水性能の確認を開始した。

本年度は、昨年度に別途選定した研究者との共同研究を新たに開始（共同研究者との協議により、共同研究期間中は情報非公表）するとともに、昨年度に開始した上記実証実験について通年での脱水試験を継続し、共同研究を完了した。ここでは「同軸差動式 SP 脱水機」の実証実験について報告する。

（2）検討方法

① 技術の概要

難脱水化が進んでいる汚泥の脱水処理において低コスト化を図るためには、処理能力の増強、凝集剤や電力使用量の削減が求められる。また、脱水機の適切な運転には熟練技術者による専門的な知識が必要である。同軸差動式 SP 脱水機は、高効率凝集装置と同軸差動式スクリュースプレ脱水機の組み合わせにより、従来技術（JS 機械設備標準仕様書の「圧入式スクリュースプレ脱水機Ⅲ型」が該当）と比較してスクリーン径あたりの処理速度を 1.5 倍以上に増加させ、LCC を縮減する技術である。さらに、人工知能（AI）を活用した運転支援機能を用い、技術者への運転手法ガイダンスの提示や自動運転を行うことで汚泥の脱水処理の最適化を目指すものである。

同軸差動式 SP 脱水機は、図 4-1 のシステムフローに示すように、凝集部、濃縮部、脱水部および動力制御盤で構成される。脱水機に供給される汚泥は、まず凝集部において高効率凝集装置に投入された汚泥と高分子凝集剤が高速攪拌され、高分子凝集剤が汚泥中に均一に分散し電荷の中和が促進される。その後、凝集混和槽において追加の高分子凝集剤との緩速攪拌により凝集反応が促進され、強固なブロックが形成される。この凝集汚泥は濃縮部の濃縮スクリーンに供給される。濃縮スクリーンは楕円板レーキと固定スクリーンで構成されており、楕円板レーキは汚泥の濃縮促進、移送、スクリーンの目詰まり防止の役割を果たす。凝集汚泥は回転する楕円板レーキで移送されながら過濃縮により減容化され、脱水部へ非圧入で投入される。脱水部はパンチングを有する円筒スクリーン内部に、前段と後段で回転数を変更可能な 2 つのスクリュース軸を同一軸上に配置し、2 つのスクリュース軸の差速で汚泥を圧搾する構造であ

る。後段軸が逆回転することで汚泥を意図的に滞留させる形式となっており、従来技術において必要に応じて技術者による手動調整が必要であった背圧板が不要となる。これにより、操作因子がスクリー軸回転数のみとなり、運転制御のシンプル化が図られ、自動制御運転への適用性が高まっている。

脱水機としての機能は上述の凝集部、濃縮部および脱水部のみで成立するが、経験の浅い技術者等に対する汚泥脱水処理の安定運転をサポートする運転支援機能をオプションとして組み込んだ動力制御盤を提供している。この機能は、脱水汚泥の含水率や SS 回収率を予測する機械学習モデルを搭載しており、過去の運転データを AI に学習させることで、ガイダンスとしての運転設定値の提示や処理目標に応じた運転モードの設定、提示値を用いた自動運転を可能としている。

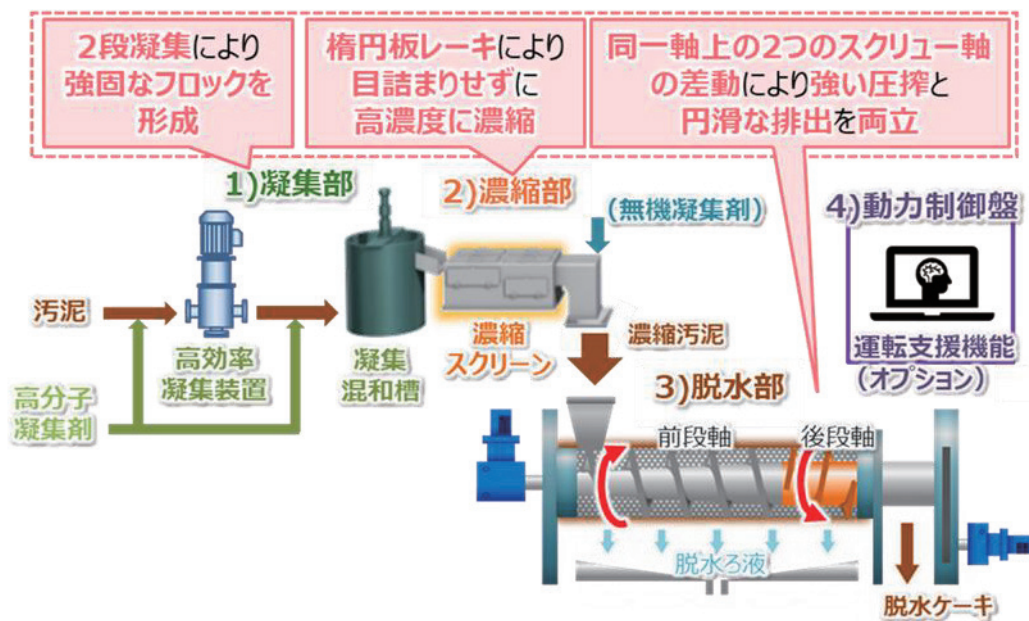


図4-1 同軸差動式 SP 脱水機のシステムフロー

② 開発目標

脱水性能の目標値は、JS 機械設備標準仕様書の従来技術の性能値を参考に表 4-1 の通り設定した。高効率凝集装置についてはその有無による同軸差動式スクリープレス脱水機の性能を評価した。対象汚泥（混合汚泥、消化汚泥）別の目標値は以下の考え方により設定した。

脱水性能については、高効率凝集装置なしの場合は、混合汚泥・消化汚泥ともに同一スクリーン径あたりの処理速度、脱水汚泥含水率、SS 回収率および薬注率を従来技術と同等以上とした。高効率凝集装置ありの場合は、脱水汚泥含水率、SS 回収率および薬注率は従来技術と同等以上を達成した上で、混合汚泥ではスクリーン径あたりの処理速度を 1.5 倍以上、消化汚泥では同 2.0 倍以上とした。なお、本調査を通し、高効率凝集装置なしの場合、同軸差動式スクリープレス脱水機の費用対効果を発現させることは難しいと判断されたため、以下、高効率凝集装置ありの場合のみの実施内容および結果について示す。

運転支援機能については、AI による含水率予測値と同等の含水率実測値がガイダンスに沿った運転により得られること、および各種運転モード（含水率優先、薬注率抑制、コスト縮減）の実用可能性を確認することを目標とした。

③ 試験設備の概要

試験設備（脱水機スクリー径φ300mm、φ600mm）を下水処理場（標準活性汚泥法、現有処理能力48,000m³/d）内に設置し、2023年10月から2024年9月まで実証運転を行った。試験設備の概略フローを図4-2に示す。なお、同処理場の汚泥処理方法は濃縮－消化－脱水であるため、混合汚泥を対象とした試験では、同処理場で発生する重力濃縮汚泥と機械濃縮後の余剰汚泥を固形物量比2：1で混合した汚泥を試験設備への供給汚泥とした。

表4-1 脱水性能の目標値

脱水対象汚泥性状	水処理方式			標準活性汚泥法				
	汚泥の種類			混合汚泥		消化汚泥		
	汚泥性状	強熱減量（VTS）	（％）	89～86	86～83	76～73	73～70	
		供給汚泥濃度	（％）	1.7～2.4		1.0～1.1		
		繊維状物（100メッシュ）	（％）	16～34	16～34	3～5	3～5	
機械濃縮	1液調質	脱水汚泥含水率		（％）	77	75	84	82
		処理速度（kg-DS/h・Φ300）			66	71	24	26
		固形物（SS）回収率		（％）	95以上		93以上	
		薬注率（対TS：ポリマー）		（％）	1.4以下	1.3以下	2.4以下	2.3以下
	2液調質	脱水汚泥含水率		（％）	73	71	81	79
		処理速度（kg-DS/h・Φ300）			66	71	26	28
		固形物（SS）回収率		（％）	95以上		93以上	
		薬注率	（対TS：ポリマー）	（％）	1.4以下	1.3以下	2.6以下	2.4以下
（対TS：無機）	（％）		22以下	20以下	26以下			

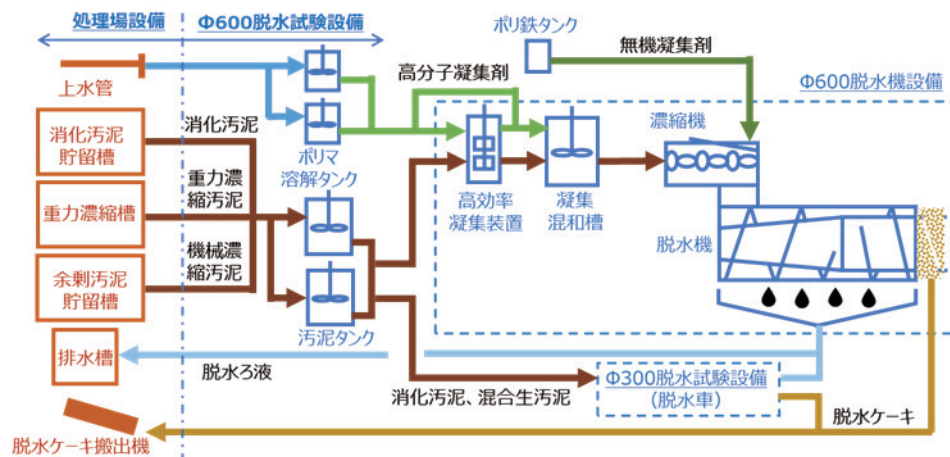


図4-2 試験設備概略フロー

④ 実施内容

本研究の開発目標達成のため、以下の項目について確認を行った。

- 長期実証での脱水性能：対象汚泥は混合汚泥および消化汚泥とし、季節変動等の汚泥性状の変化に対して、表 4－1 に示す混合汚泥および消化汚泥に対する本脱水機の見目標値を安定して達成できることを、季節毎の運転で確認した。薬注方式として 1 液（高分子凝集剤のみ）および 2 液（高分子凝集剤＋無機凝集剤：ポリ鉄）の条件で実証試験を行った。なお安全率を考慮し、表 4－1 に記載の値より 2pt 低く設定した値を実証実験での目標含水率（以下、「実験目標含水率」と表記）とした。
- スケールアップ：スクリュूपレス脱水機においては、同等の汚泥性状および含水率の条件下で、処理速度がスクリュウ径の比率の 2.2 乗になるというデータがあり、スクリュウ径 φ 300 の脱水機の処理速度を確認することにより、式（4－1）によって、スクリュウ径の異なる脱水機の処理速度を計算することが可能である。ここでは、スクリュウ径 φ 300mm と φ 600mm の 2 台の脱水機を用い、これらを同時期に運転し、同等の脱水性能を発揮した際の処理速度をそれぞれ確認した。その後、式（4－1）により処理速度とスクリュウ径関係からスケールアップ係数（ α ）を算出した。この α が他のスクリュूपレス脱水機と同様の 2.2、あるいはそれ以上の値となるかを確認することで、本脱水機においても本式がスケールアップ時の処理速度の算定に適用可能であるかを評価した。

$$Q_A = \left(\frac{A}{300}\right)^\alpha \times Q_{300} \quad \dots \dots \dots \text{式（4－1）}$$

Q_A	: スクリーン径 φ A mm の処理速度	kg-DS/h
Q_{300}	: スクリーン径 φ 300 mm の処理速度	kg-DS/h
A	: スクリーン径	mm
α	: スケールアップ係数	—

- 運転支援機能の検証：実証実験中のデータを AI に取り込み機械学習モデルを構築した。このモデルを用いてスクリュウ径 φ 300mm の試験設備での脱水試験を行い、運転支援機能で予測した含水率が実測値と同程度の値（±1.0pt 程度）が得られること、各運転モードにおける予測に従った運転による各優先項目（含水率（薬注率固定）、薬注率、コスト縮減）への影響を確認した^{14),15)}。

なお、運転支援機能で予測した含水率が実測値と同程度の値が得られることは前年度確認しているため、本年度は各運転モードの実証試験結果について報告する。

- コスト比較：実証実験を通して得られた脱水性能や必要ユーティリティ量等の結果を踏まえ、LCC（建設費と 15 年間の維持管理費）の試算を行った。

（3）検討結果

実証試験の結果を、過年度の結果も含め以下に取りまとめた。

① 長期実証試験での脱水性能

長期実証試験の結果総括を表 4－2 に、同表に示す各実証結果（処理速度の倍数）を各脱水試験データから導出した例として、2024 年 6 月から同 8 月に実施した消化汚泥 1 液調質の条件における試験結果を図 4－3 に示す。同図では、横軸を汚泥処理速度、縦軸を脱水汚泥含水率としてプロットした際の近似直線を用いて、実験目標含水率における本脱水機の処理速度を求めている。本期間においては、VTS は表 4－1 に示す 73～70% の範囲内であったため、同表において当該 VTS 範囲に該当する含水率 82% に対する実験目標含水率である 80% を基準とし処理速度は 27.2kg-DS/h となり、従来技術に対する本技術の処理速度は 2.12 倍と算出される。表 4－2 に示すとおり、各条件における最低の倍率（表中の着色箇所）においても 1.5 倍または 2.0 倍以上の結果が得られており、従来技術と同等の SS 回収率、薬注率および同等の脱水汚泥含水率が得られている条件下で、各汚泥種類、調質方法および時期において目標値である混合汚泥で 1.5 倍以上、消化汚泥で 2.0 倍以上の処理速度を達成した^{16),17)}。

表 4－2 脱水性能試験結果

汚泥種類	調質	目標性能	実証結果			
			2023.10～ 2024.1	2024.2～ 2024.5	2024.6～ 2024.8	2024.8～ 2024.9
混合汚泥	1液	表 4－1 の処理速度 (混合汚泥の場合 1.5 倍、消化汚泥の場合 2.0 倍を示す) による	1.59倍	1.56倍	2.40倍	1.51倍
	2液		1.62倍	2.19倍	2.13倍	1.67倍
消化汚泥	1液		2.37倍	2.92倍	2.12倍	2.01倍
	2液		2.00倍	2.95倍	2.04倍	2.14倍

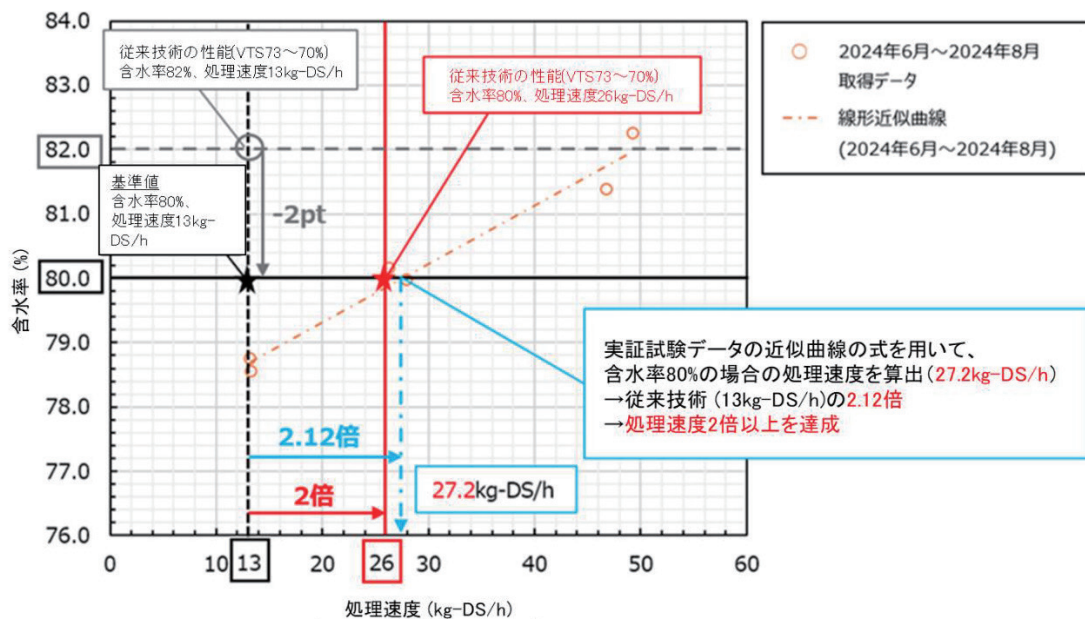


図 4－3 脱水性能評価方法の例
(消化汚泥 1 液調質、2024 年 6 月～8 月のデータ)

② スケールアップ

スクリーン径 $\phi 300\text{mm}$ と $\phi 600\text{mm}$ の脱水機を用いた試験から得られた処理速度データに基づき、スケールアップ係数（ α ）を算出した。試験結果の 1 例として、2 液で調質した消化汚泥での結果を表 4－3 に示す。試験の結果、消化汚泥、2 液調質において、 α の値が 2.2 以上となることが確認された。また、他のケースでも同様に 2.2 乗以上となることが確認された。これにより、同軸差動式 SP 脱水機において、同等の汚泥性状、同等の含水率の時、処理速度がスクリーン径の比率の 2.2 乗以上となり、同軸差動式 SP 脱水機においても式（4－1）によりスケールアップ時の処理速度を算定可能であると評価した。

表 4－3 スケールアップ係数の算出結果（2 液調質、対象汚泥：消化汚泥）

	スクリーン径	TS	VTs	懸濁状物(100メッシュ)	処理量	スケールアップ係数	薬注率(高分子凝集剤)	薬注率(ポリ鉄)	含水率	SS回収率
	mm	%	%/TS	%/SS	kg-ds/h	-	%/TS	製品%TS	%	%
2023.10～ 2024.1	$\phi 300$	1.12	72.8	5.66	28.1	2.26	2.20	24.9	77.1	96.5
	$\phi 600$	1.18	73.3	6.81	135.0		2.36	25.5	76.7	97.4
2024.2～ 2024.5	$\phi 300$	1.19	73.8	2.46	29.8	2.21	2.22	22.0	79.7	95.2
	$\phi 600$	1.15	73.5	3.55	137.9		2.19	21.3	79.0	94.5
2024.6～ 2024.8	$\phi 300$	0.98	75.1	3.60	26.7	2.25	2.30	25.6	78.6	95.0
	$\phi 600$	0.99	75.5	3.50	126.6		2.40	25.2	78.1	99.0
2024.8～ 2024.9	$\phi 300$	0.96	72.9	4.68	28.3	2.23	2.34	22.1	77.3	96.3
	$\phi 600$	0.95	73	4.78	133.2		2.24	22.9	77.3	97.6

③ 運転支援機能の検証

各運転モードに対する実証試験結果を表 4－4 に示す。A（含水率優先モード）および B（薬注率抑制モード）の評価項目は本脱水機の性能目標値（含水率：82.0%、薬注率：2.40%）とし、C（コスト削減モード）の比較対象は薬品・産業廃棄物処分単価を設定した際のコスト（ランニングコスト：108.1 円/kg-TS）とした。なお、実証試験中は薬注率を固定して脱水機の運転を行った。

実証試験の結果、運転支援機能の最適運転条件の推奨値で運転した場合、A および B の運転モードでは脱水機の性能目標値を満たし、C の運転モードではコストの低減が可能であり、各運転モードに沿った脱水機の運転ができることを確認した。

表 4－4 運転支援機能の実証試験結果

項目	薬注率 (%)	含水率 (%)	SS 回収率 (%)	ランニングコスト (円/kg-TS) ^{※1}
性能目標値	2.40	82.0	93.0	(108.1) ^{※2}
A.含水率優先モード /薬注率固定	2.43 (設定:2.40)	81.7	94.7	107.2
B.薬注率抑制モード	2.32	82.0	97.5	107.7
C.コスト削減モード	2.54	81.5	94.9	106.8

※1 実証試験結果に対し、薬品単価 800 円/kg、産廃コスト 16,000 円/t として試算した際のコスト

※2 本脱水機の性能目標値に対するコスト（単価設定は※1 と同様）

④ コスト比較

従来技術と本技術の 15 年間の LCC（建設費＋15 年間の維持管理費）を表 4－5 に示す条件で試算した結果を図 4－4 に示す。図中の数値は費用（百万円）を示し、カッコ内の数値は従来技術の LCC に対する本技術の LCC の割合を示している。特に建設費に関しては、処理速度の増加効果が大きく、機器のスクリーン径を小さくできたことで建設費を抑制し、LCC は従来技術の 86%に縮減する試算結果となった。

表 4－5 LCC の試算条件

項目	設計条件
計画 1 日最大汚水量	30,000m ³ /d
計画流入 SS 濃度	200mg/L
計画放流 SS 濃度	10mg/L
排除方式	分流式
水処理方式	標準活性汚泥法
濃縮方式	初沈：重力式 余剰：機械式
脱水対象汚泥	消化汚泥
汚泥調質	1 液調質
強熱減量（VTS）	73～70%
汚泥濃度	1.0%
繊維状物（100 メッシュ）	5%
脱水機運転時間	7 時間/日、5 日/週
脱水汚泥処分方法	産廃処理

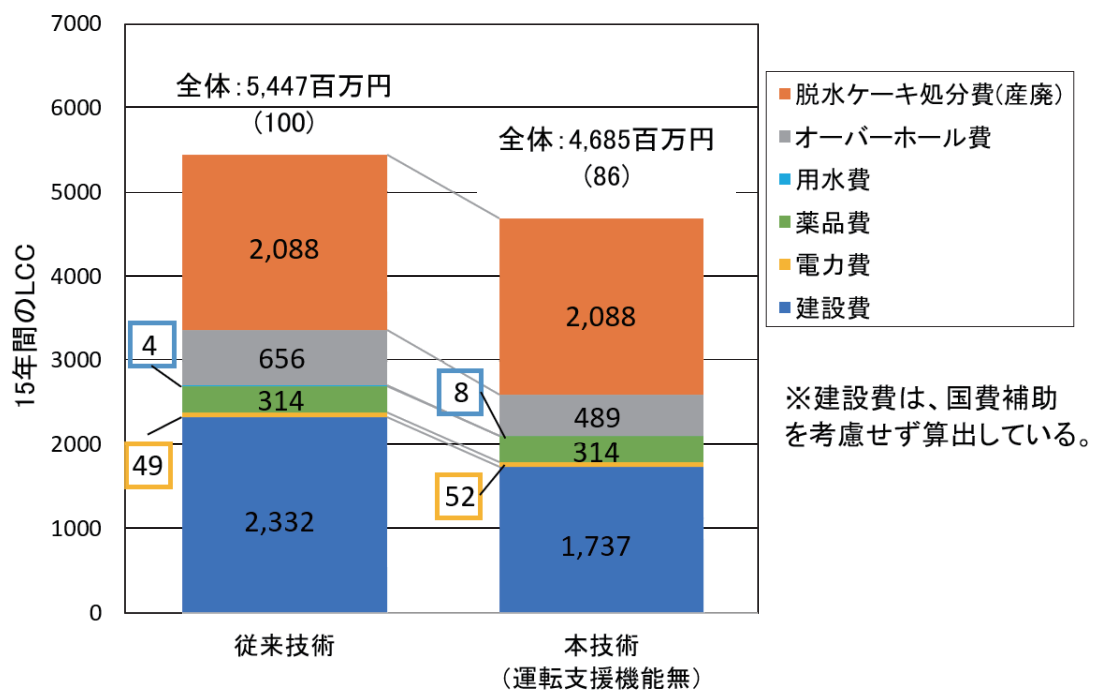


図 4－4 従来技術との LCC 比較

（４）まとめ

汚泥脱水機の処理能力増強技術として 2 件の共同研究を進めた。現時点で情報非公表として いる 1 件を除く 1 件について、主要な成果を要約すると以下の通りである。

- 従来技術に対し、混合汚泥で 1.5 倍以上、消化汚泥で 2.0 倍以上の脱水性能を達成した。
- 同等の汚泥性状および含水率の条件下で、スケールアップ係数（ α ）が 2.2 乗以上と算出されたことから、同軸差動式 SP 脱水機において、スクリー径 $\phi 300\text{mm}$ の脱水機の処理速度を基に、式（４－１）によりスケールアップ時の処理速度が算定可能であると評価した。
- 運転支援機能について、各運転モードに沿った脱水機の運転ができることを確認した。
- 同一の処理場規模条件で従来技術と比較した結果、建設費を抑制し、LCC を縮減可能であることが確認された。

なお、同軸差動式 SP 脱水機に関しては、2024 年 12 月に共同研究が完了し、2025 年 3 月に JS 新技術 I 類に選定された。

5. 事後評価調査（低コスト化技術）

5.1 事後評価調査（破碎・脱水機構付垂直スクリー式除塵機）

（1）検討の概要

下水処理場やポンプ場の沈砂池では、除塵機、しき搬出機、しき破碎機、しき洗浄装置、しき脱水機、しきホップ等の複数の設備から構成されるしきの除去・処理システムが広く使用されているが、機器点数が多く維持管理が煩雑であることや、糞塊等の有機物を含んだしきを掻き上げるため不衛生である、といった課題がある。

本検討は、上述の課題を解決可能な技術として JS の新技術 I 類に選定された「破碎・脱水機構付垂直スクリー式除塵機」¹⁸⁾について、導入実績が増加していることから、複数の導入箇所（7 箇所程度を予定）を対象に導入後の運転・処理状況や課題等を調査するものである。調査は 2024～2025 年度にかけて実施する予定で、2024 年度については 1 箇所を対象に調査を開始した段階である。このため、本報では技術の概要および調査内容を紹介するに留め、結果については調査完了年度に集約して報告する。

（2）検討方法

① 対象技術

破碎・脱水機構付垂直スクリー式除塵機（図 5－1）は、2016 年 1 月～2017 年 3 月にかけて JS と住友重機械エンバイロンメント(株)による共同研究において開発され、2017 年 5 月に JS の新技術 I 類に選定されたしきの除去・処理設備である。従来から使用されてきたスクリーン付破碎機（JS 標準仕様）に対して、除塵・脱水機能付き垂直搬出機を組み合わせることで、しきの除塵、破碎、搬送、脱水、搬出を 1 台で行うことが可能な、衛生的でコンパクトなしき処理システムである¹⁸⁾。なお、本技術は分流式の下水処理場またはポンプ場を対象としている。

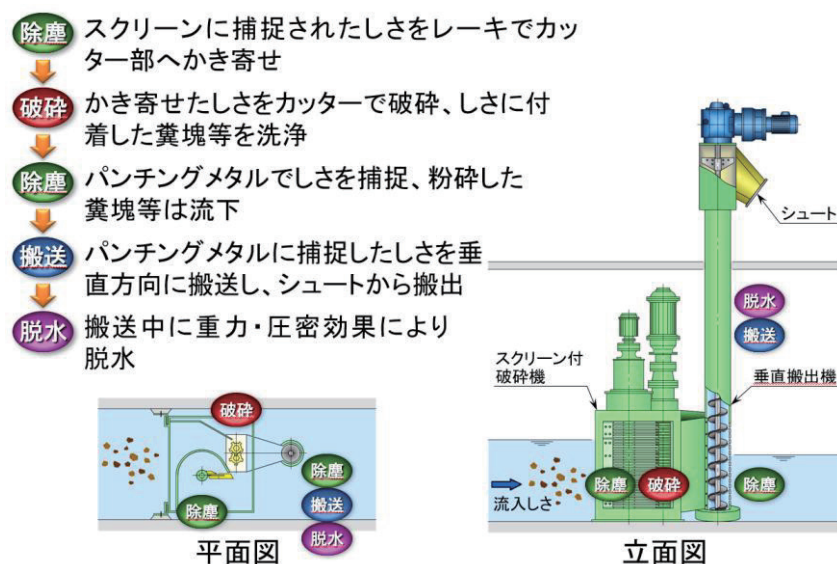


図5－1 破碎・脱水機構付垂直スクリー式除塵機の概要

② 調査内容

本年度は、2018 年に本技術が導入された下水処理場 1 箇所を対象に、(a)維持管理資料（年報等）による運転状況の把握、(b)装置前後の下水水質の測定、(c)分離・脱水されたしき性状の測定、(d)運転者へのヒアリングによる課題や改善事項の把握、を実施した。2025 年度にも 6 箇所程度を対象に調査を実施する予定である。

6. 検討結果の総括

6.1 本年度の成果

（1）水処理能力増強技術

① 水処理能力増強技術の開発・実証

前・基本計画期間に開始した 2 つの水処理能力増強技術について、民間企業等との共同研究による実証実験を進め、両者について完了した。また、2023～2024 年度に選定した公募型共同研究 2 件について研究を開始した。完了した 2 件の主要な成果は以下のとおりである。

- 能力増強型水処理システム：標準活性汚泥法の 1.5 倍の水量負荷の条件にて通年での実証運転を行った結果、年間を通して目標処理水質（BOD：10mg/L 以下、SS：10mg/L 以下）が達成された。
- 最終沈殿池の処理能力向上技術：長期の実規模実証実験において、量的向上（1.5 倍水量）と質的向上の両立を図る新たな運用が可能であることを実証した。また、ろ過部カセットの底部スクリーンの閉塞対策として、カセット底部からの空気洗浄に加えてメッシュスクリーンへの仕様変更により、閉塞を大幅に抑制可能であることを確認した。加えて、自主研究により得られた知見・データを統合し、本技術の適用条件や計画・設計方法の見直しを図った。

② 事後評価調査（導入フォローアップ）

「超高度処理型 MBR」について、導入第一例として本年度に稼働した施設を対象に、通年での処理性能等を確認するフォローアップ調査を開始した。

（2）水処理改築低コスト化技術

① 事後評価調査（単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット）

水処理設備の改築工事に際して仮設処理用に単槽式 MBR ユニットが使用された下水処理場 1 箇所を対象に調査を実施し、同ユニットの運転状況・処理状況等に係るデータを蓄積した。

（3）下水処理低コスト化技術

① 低コスト型汚泥濃縮機・脱水機の開発・実証

「同軸差動式 SP 脱水機」について、混合汚泥および消化汚泥を対象とした脱水機の性能の確認をする実証実験を 2023 年 10 月から約 12 ヶ月間実施し、以下の結果が得られた。本共同研究は 2024 年 12 月に完了し、同技術は 2025 年 3 月に JS 新技術 I 類に選定された。

- 従来技術に対する本技術のスクリーン径あたりの処理速度は目標値（混合汚泥で 1.5 倍以上、消化汚泥で 2.0 倍以上）を達成した。
- 同等の汚泥性状および含水率の条件下で、スケールアップ係数（ α ）が 2.2 乗以上と算出されたことから、同軸差動式 SP 脱水機において、スクリーユ径 $\phi 300\text{mm}$ の脱水機の処理速度を基に、式（4-1）によりスケールアップ時の処理速度が算定可能であると評価した。

- 運転支援機能について、各運転モードに沿った脱水機の運転が可能であることを確認した。
- 同一の処理場規模条件で従来技術とのコスト比較した結果、建設費が抑制され LCC を低減可能であることを確認した。

（４）事後評価調査（低コスト化技術）

① 破砕・脱水機構付垂直スクリー式除塵機

「破砕・脱水機構付垂直スクリー式除塵機」について、導入施設における事後評価調査を開始し、本年度は下水処理場 1 箇所を対象に調査を実施した。

6. 2 今後の予定

1.2 節に記載の開発項目について、次年度の実施予定は以下のとおりである。

（１）水処理能力増強技術

- 水処理能力増強技術の開発・実証：本年度に開始した 2 技術に係る共同研究（MABR 併用型活性汚泥法を用いた水処理能力増強技術、ハイドロサイクロンを用いた汚泥性状改善による水処理能力増強技術）を継続する。
- 事後評価調査（導入フォローアップ）：「超高度処理型 MBR」について、本年度に開始した 1 施設におけるフォローアップ調査を継続するとともに、新たに稼働予定の 1 施設における調査を開始する。

（２）水処理改築低コスト化技術

- 事後評価調査（単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット）：新たに本技術を使用予定の下水処理場 1 箇所を対象に本年度と同様の調査を実施する。

（３）下水処理低コスト化技術

- 低コスト型汚泥濃縮機・汚泥脱水機の開発・実証：2023 年度に選定した共同研究を継続する。
- 下水処理の維持管理トータルコストの縮減に寄与する技術の開発・実証に向け、新たな共同研究の公募を開始する。

（４）事後評価調査（低コスト化技術）

- 「破砕・脱水機構付垂直スクリー式除塵機」について、新たに 6 箇所程度の下水処理場を対象に今年度と同様の調査を開始する。
- 「多重板型スクリープレス脱水機・Ⅱ型」、「全速全水位型横軸水中ポンプ」、「下水汚泥由来繊維利活用システム」および「導入効果等実態調査」について、新たに調査を開始する。

謝辞

2.1 節に掲載の「最終沈殿池の処理能力向上技術」の実証実験では、国土交通省国土技術政策総合研究所から借り受けた実証設備を使用したことを明記すると共に、同研究所の関係者各位、共同研究体の関係者各位に感謝の意を表します。

2.1 節に掲載の「MABR 併用型活性汚泥法を用いた水処理能力増強技術」において、実験フィールドや各種データを提供いただいた地方公共団体の関係者各位に感謝の意を表します。

2.2 節、3.1 節、5.1 節に掲載した事後評価調査にご協力頂いた地方公共団体の関係者各位に感謝の意を表します。

4.1 節に掲載した実証において、実験フィールドや各種データを提供いただいた地方公共団体の関係者各位に感謝の意を表します。

最後に、本報で紹介した全ての共同研究の関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 南大介，中谷輝，高村啓太，荒川清美，糸川浩紀：能力増強型水処理システムの流入負荷変動に対する処理水質の安定性向上，第 58 回下水道研究発表会講演集，pp.791-793，2021.
- 2) 高村啓太，南大介，荒川清美，山森隼人，糸川浩紀：能力増強型水処理システムにおける最適な運転条件の確立，第 59 回下水道研究発表会講演集，pp.787-789，2022.
- 3) 中谷輝，南大介，荒川清美，山森隼人，糸川浩紀：能力増強型水処理システムにおける低水温期の硝化の安定化，第 61 回下水道研究発表会講演集，pp.742-744，2024.
- 4) 長谷川司，中谷輝，南大介，荒川清美，高田祥暉，糸川浩紀：能力増強型水処理システムと標準活性汚泥法の硝化性能の比較，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.815-817，2025.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所：最終沈殿池の処理能力向上技術導入ガイドライン（案），国総研資料第 1089 号，2019.
- 6) He,H., Wagner,B.M., Carlson,A.L., Yang,C., Daigger,G.T.: Recent progress using membrane aerated biofilm reactors for wastewater treatment, Water Science & Technology, Vol.84, pp.2131-2157, 2021.
- 7) Bauhs, K., Armenta,M., Maltos,R., Sturm,B., Regmi,P.: Making waves: Riding the densification wave from current understanding to advancement, Water Research, Vol.257, 121690, 2024.
- 8) 五味茉尋，岡村知也，中村高士，鈴木重浩，高田祥暉，糸川浩紀，社本英夫：最終沈殿池の処理能力向上技術の長期実証－量的・質的向上効果の両立－，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.893-895，2025.
- 9) 高田祥暉，糸川浩紀，五味茉尋，岡村知也，中村高士，鈴木重浩，社本英夫：最終沈殿池の処理能力向上技術の長期実証－低水温期における処理性能－，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.890-892，2025.
- 10) 村上孝雄：超高度処理による健全な水循環の形成に向けて，下水道協会誌，Vol.40(483)，pp.28-32，2003.
- 11) 村上孝雄，太田秀司：琵琶湖流域下水道湖南中部浄化センター膜分離法適用調査，技術開発部報（平成 16 年度），技術開発部技術資料 05-002，日本下水道事業団，2005.
- 12) 日本下水道事業団技術戦略部：単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット，月刊下水道，Vol.40(8)，pp.70-74，2017.

- 13) 高田祥暉：シリーズ新技術紹介③ 単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット，上下水道情報，No.2016，pp.38-39，2024.
- 14) 鈴木美有，飯倉智弘，森本雄也，鎌田晃人，鈴木真祐子，島本仙，新川祐二，小柴卓也：機械学習を用いた脱水機の運転支援システムの検証，第 61 回下水道研究発表会講演集，pp.376-378，2024.
- 15) 飯倉智弘，鈴木美有，森本雄也，鎌田晃人，鈴木真祐子，島本仙，小柴卓也，三宅晴男：機械学習を用いた脱水機の運転支援システムの検証，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.385-387，2025.
- 16) 鎌田晃人，鈴木真祐子，島本仙，新川祐二，小柴卓也：同軸差動式スクリープレス脱水機による下水汚泥の脱水処理性能，第 61 回下水道研究発表会講演集，pp.910-912，2024.
- 17) 鈴木真祐子，鎌田晃人，島本仙，小柴卓也，三宅晴男：同軸差動式スクリープレス脱水機による消化汚泥の脱水処理性能，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.965-967，2025.
- 18) 日本下水道事業団技術戦略部：破碎・脱水機構付垂直スクリー式除塵機，月刊下水道，Vol.40(11)，pp.65-69，2017.

Ⅱ－２ 下水道資源利活用技術の開発

Ⅱ-2 下水道資源利活用技術の開発

熊越瑛、島田正夫、小柴卓也、村岡正季、三宅晴男

1. 開発課題の概要

本開発課題では、下水中に含まれる有機物、窒素、リン等の「下水道資源」をエネルギーや肥料として利活用することにより循環型社会の実現に資することを目指して、下水や下水汚泥のエネルギー利用および農業利用に着目した「下水道資源利活用技術」の開発を行う。

1.1 背景および目的

2015 年 5 月の下水道法改正により、下水汚泥の燃料または肥料としての再生利用が努力義務化された。このため、下水処理場の広域化・共同化や改築に合わせ、下水汚泥のエネルギー利用や農業利用への積極的な取組が求められている。

下水汚泥はその固形成分の約 8 割が有機分であり、乾燥や炭化等により固形燃料として火力発電所やセメント工場等において石炭の代替として利用することができる。また、下水や下水汚泥に含まれるアンモニアは燃焼させても CO₂を排出しないことから、近年はカーボンニュートラルに資する燃料として注目されている。一方、下水汚泥には窒素やリンが豊富に含まれており、肥料原料の殆どを輸入に頼っている我が国においては、肥料化・リン回収等による下水汚泥の農業利用の社会的ニーズが急速に高まっている。「食料安全保障強化政策大綱」（2022 年 12 月 27 日食料安定供給・農林水産業基盤強化本部決定）においては、2030 年までに堆肥・下水汚泥資源の利用量を倍増し、肥料の使用量（リンベース）に占める国内資源の利用割合を 40% まで拡大することが示された¹⁾。また、下水中にも窒素、リン、有機物、その他微量元素等が含まれており、循環型社会実現のためにこれら資源の回収および有効利用が求められる。しかし、全国の下水处理場が有する下水道資源の賦存量や、各処理工程での下水道資源の動態等に関する調査事例は乏しい状況にある。

そこで本開発課題では、バイオガス利活用技術を除く*下水や下水汚泥のエネルギー利用および農業利用に着目した下水道資源利活用技術の普及拡大を目的に、技術開発動向や利用実態の調査、基礎実験を行うと共に、共同研究や実規模実証により速やかに社会実装可能な新技術の開発を実施する。

* 「JS 技術開発・活用基本計画 2022」において、バイオガス利活用技術については開発課題「Ⅰ-1 2030 年目標に向けた脱炭素化技術の開発」の開発項目として扱われている。

1.2 開発項目

本開発課題では、下水道資源利活用技術の開発を行う。下水汚泥の肥料利用の社会的ニーズが急速に高まったことを踏まえ、2022 年度末に開発項目を以下の 2 つに分けて実施することとした*。

（1）下水汚泥資源エネルギー利活用技術

下水汚泥中の有機物のうち、バイオガス発電や固形燃料化等、エネルギー利用された割合を示す下水汚泥エネルギー化率は、第 5 次社会資本整備重点計画における 2025 年度までの目標値である 30%に対し、2022 年度時点で 26%であり、バイオガス利用を除くと約 9%に留まっている²⁾。また、下水処理場に流入するアンモニア等もエネルギーやそのほかの有効利用が可能な資源であり、これらの下水道資源の有効利用を促進することも重要である。バイオガス利用と併せ、下水汚泥資源のエネルギー利活用技術（以下、「エネルギー利活用技術」と略記）の更なる普及拡大を図るためには、技術のラインアップを更に充実させていくことが不可欠である。

以上の背景から、本開発項目では、国内外のバイオマス利用状況や関連技術等を調査すると共に、公募型共同研究による新たな技術の開発を実施する。また、エネルギー利活用に資する下水道資源の量や回収技術等の知見は必ずしも多くはない状況にあるため、下水処理場に流入するアンモニア等のエネルギー資源の賦存量や、回収・利用技術の開発動向の調査を実施する。これらを踏まえてエネルギー利活用技術を体系化し、下水道資源の更なる利用促進を図る。

① バイオマス利活用に関する調査（（2）①と一部共通）

2022 年度からの 2 か年で、国内外の下水汚泥の利用状況や下水道分野以外のバイオマスのエネルギー利用状況等に関して、文献調査や実態調査を実施する。

② 下水道資源の有効利用に係る基礎調査（（2）②と一部共通）

下水処理場に流入するアンモニア等の下水道資源の有効利用に向けて、2022 年度、2023 年度において文献調査により基礎情報を収集すると共に、下水の処理過程における下水道資源の賦存量調査を実施する。また、2023 年度以降に、これらの下水道資源を対象とした利活用技術の早期の開発・実用化に向けた検討を実施する。

③ 下水汚泥資源エネルギー利活用技術の開発

①の調査結果を踏まえて、2023 年度以降に、エネルギー利活用技術を対象とした公募型共同研究を実施する。

④ 下水汚泥資源利活用技術の体系化（エネルギー利活用技術）

①～③の成果を踏まえて、技術ラインナップの体系化や導入検討マニュアルの作成を図る。

* 2022 年 3 月に策定した「JS 技術開発・活用基本計画 2022」の当初版では本開発課題に対して一つの開発項目「下水汚泥資源利活用技術」を設定していたが、本文記載の経緯から、2023 年 3 月に同計画を改定し開発項目を 2 件に分割したものである。

（２）下水汚泥資源農業利活用技術

社会情勢の変化に伴い下水汚泥の肥料としての利用拡大が求められているが、我が国の下水処理場で発生した全汚泥量に対して緑農地利用されたものの割合は 10%程度²⁾にとどまっている。そのため、下水汚泥の肥料化やリン回収技術等を含む下水汚泥資源の農業利活用技術（以下、「農業利活用技術」と略記）について、更なる普及拡大を図る必要がある。そのためには、その他のバイオマスの利活用状況や利活用技術等を踏まえ、技術のラインナップを更に充実させる必要がある。また、下水汚泥の肥料利用については、実際に肥料を製造し成分の測定等を行うことにより、基礎的な知見を増やす必要がある。

以上の背景から、本開発項目では、国内外のバイオマスの農業利活用に関する状況や技術等を調査し、公募型共同研究等を新たに実施する。また、下水道資源のうち農業利用に資するものの量や回収技術等については基礎的な知見が乏しい状況にあるため、下水処理場に流入する窒素、リン、カリウム、その他微量元素等の資源の賦存量を把握すると共に、これらの回収・利用技術等の調査を実施する。下水汚泥を原料として製造した肥料（以下、「下水汚泥肥料」と略記）については、技術開発実験センターで肥料を製造すると共に施肥効果等の調査を行う。これらの調査結果を踏まえて技術の体系化を図ることにより、農業利活用技術の更なる普及促進を図る。

① バイオマス利活用に関する調査（（１）①と一部共通）

2022 年度からの 5 か年で、国内外の下水汚泥の利用状況や下水道分野以外の農業利用状況等に関して、文献調査や実態調査を実施する。

② 下水道資源の有効利用に係る基礎調査（（１）②と一部共通）

下水処理場に流入する窒素、リン、カリウム、その他微量元素等の下水道資源の有効利用に向けて、2022 年度、2023 年度において文献調査により基礎情報を収集すると共に、下水の処理過程における下水道資源の賦存量調査を実施する。

③ 下水汚泥資源農業利活用技術の開発

①の調査結果を踏まえて、2023 年度以降に農業利活用技術を対象とした公募型共同研究を実施する。また、B-DASH プロジェクトにおける実規模実証を実施する。

④ 下水汚泥肥料の製造および施肥効果等に係る基礎調査

JS 技術開発実験センターにおいて、下水汚泥肥料を製造し、肥料成分の測定や施肥効果の検証を行う。また、地方公共団体の要請に応じて、下水汚泥肥料化施設の導入検討に資する基礎実験を実施する。

⑤ 下水汚泥資源利活用技術の体系化（農業利活用技術）

①～④を踏まえて、技術ラインナップの体系化や導入検討マニュアルの作成を図る。

1.3 本年度の実施内容

本年度は、1.2 節に記載の開発項目のうち、以下の 2 項目を実施した。

（１）下水汚泥資源エネルギー利活用技術

- ③ 下水汚泥資源エネルギー利活用技術の開発（2.1 節）

（２）下水汚泥資源農業利活用技術

- ③ 下水汚泥資源農業利活用技術の開発（3.1 節）
- ④ 下水汚泥肥料の製造および施肥効果等に係る基礎調査（3.2 節）

2. 下水汚泥資源エネルギー利活用技術

2.1 下水汚泥資源エネルギー利活用技術の開発

（1）検討の概要

下水汚泥は量・質ともに安定したバイオマス資源であり、これをエネルギーとして利活用することで循環型社会の実現に貢献できる。本検討では、下水汚泥資源のエネルギー利活用の普及拡大を目的として、新たなエネルギー利活用技術を開発するために実証試験等を実施する。

前年度は、下水汚泥資源の利活用の普及拡大に資する技術を対象とした共同研究「循環型社会の実現に向けた下水汚泥資源の利活用技術の開発」*の公募を行い、以下の 1 技術に係る共同研究者を選定して実証試験を開始した。本年度は引き続き、長期の運転データを取得することで本技術の省エネ・創エネ性、脱炭素効果、経済性、炭化物性状および既設処理施設への影響を確認し、2024 年 12 月に共同研究を完了した。

○循環型社会の実現に向けた下水汚泥資源の利活用技術の開発

ー水熱炭化を用いたカーボンニュートラルの達成に向けた実証ー

（共同研究者：㈱神鋼環境ソリューション）

（2）検討方法

① 技術の概要

水熱炭化（Hydrothermal carbonization）は、脱水汚泥を加圧・加熱することにより脱水汚泥中の有機物を可溶化・炭化させ、生じた炭化スラリーを圧搾（固液分離）することで炭化物を生成する方法である（図 2-1、図 2-2）。従来の熱分解による炭化（以下、「従来炭化」と略記）とは異なり、水分を蒸発させることなく炭化物を得るため、従来炭化に比べ必要エネルギーが少ないという特徴を有する。

本共同研究で実証した「水熱炭化を用いた下水汚泥の燃料化技術」（以下、「水熱炭化技術†」と略記）は、上述の方法を用いて、脱水汚泥から燃料・肥料利用が可能な炭化物を製造する技術である。水熱炭化技術は図 2-3 に示すとおり、脱水汚泥を可溶化・炭化する反応器と固液分離機（無薬注のフィルタープレス）のほか、製造した炭化物の含水率を調整する養生設備（養生ホップ）、および返流水処理設備（凝集沈殿槽）を設けている。

脱水汚泥を加圧・加熱する反応器の条件は 0.9MPa、170℃程度であり、バイオガス発電排熱等を利用することができる。また、効率的に可溶化・炭化するために炭化促進剤として酸を添加する。また、含水率 30～40%程度の炭化物は肥料として利用が可能であり、更に養生することで燃料として利用可能な含水率に調整することができる。養生工程では湿潤状態で炭化物を貯留するため、炭化物の自己発熱による火災や爆発等のリスクを低減することが期待される。圧搾後のろ液は溶解性有機物を多く含むため、既設の消化槽に返送することで有機物をガス化・

* 本公募は、(A) 下水汚泥資源の農業利活用の普及拡大に資する技術、(B) 下水汚泥資源のエネルギー利活用の普及拡大に資する技術、のいずれか又は両方に該当する技術の開発を行うものである。

† 本技術は「湿式炭化による下水汚泥利活用技術」として 2025 年 3 月に JS 新技術 I 類として選定されており、その際、従来の乾燥工程と蒸し焼きによる炭化工程を有する「炭化」と相対する概念として「湿式炭化」と表現している。

分解させる。消化槽に返送しても分解されなかった有機物による既設水処理への返流負荷の上昇を抑制するため、必要に応じて消化汚泥の脱水ろ液に対して返流水処理を行う。

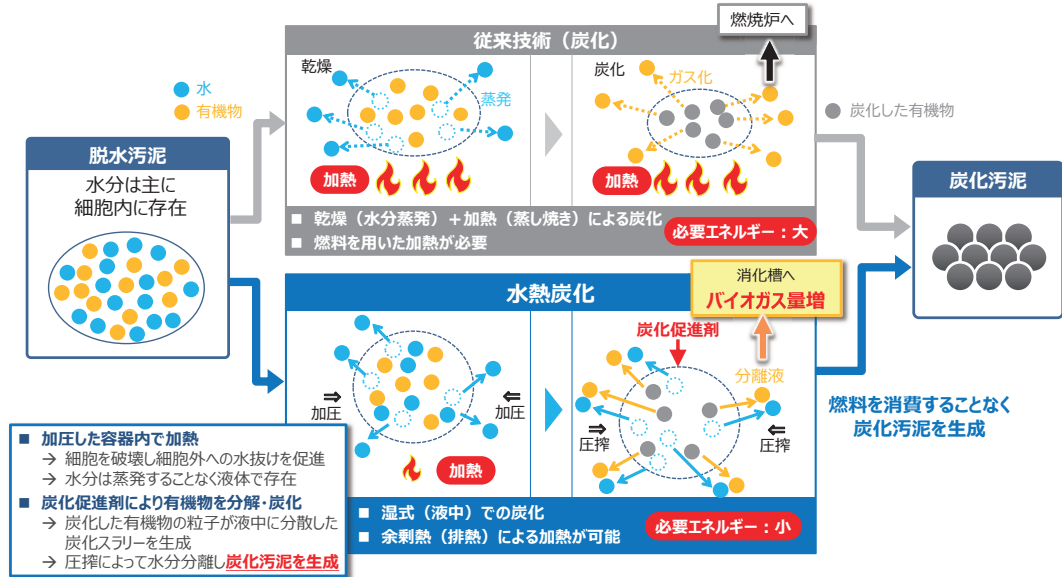


図2-1 水熱炭化の原理



図2-2 炭化スラリー（左）および炭化物（右）

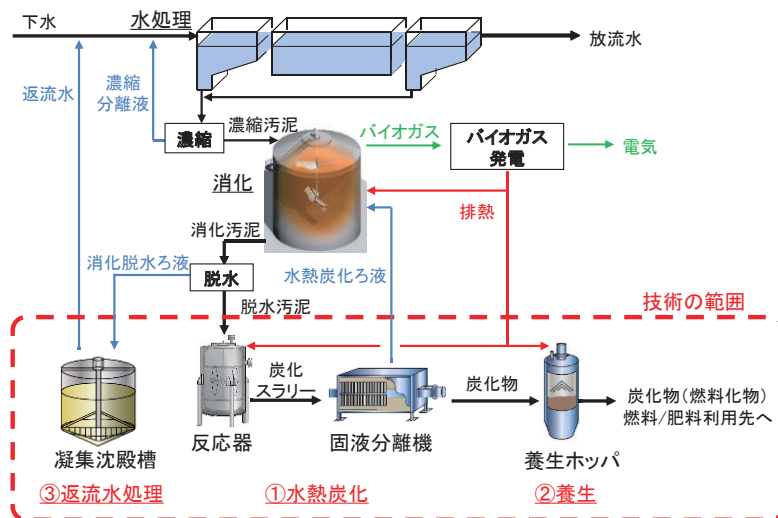


図2-3 水熱炭化技術のフロー

② 研究内容

下水処理場の実証プラント（脱水汚泥処理量：5t-wet/d）を設置し、2023 年 11 月から 2024 年 9 月にかけて運転を行った。同処理場は分流式で、標準活性汚泥法を採用しており、現有処理能力は 50,750m³/d（2023 年度時点）である。分離濃縮した汚泥は嫌気性消化後に脱水し、場外搬出の上、外部委託により再資源化している。

実証では、同処理場の脱水汚泥の一部を実証プラントに供給し、炭化スラリーの固液分離後に発生する水熱炭化ろ液は、有機分の分解を目的として既設の消化槽へ返送した。なお、消化脱水ろ液には水熱炭化により生成された難分解性有機物も含まれるため、返流水処理を経た後、既設の水処理工程へ返送した。また、ラボスケールの実験装置を用いた補足試験を行い、消化脱水ろ液が水処理に与える影響についても確認を行った³⁾。

本共同研究では、実証プラントを用いて、反応器の反応条件（温度、圧力、反応時間等）、固液分離機の圧搾条件、養生条件等の最適後の水熱炭化技術の性能を確認した。加えて、24 時間連続運転によるエネルギー収支の検討や、水熱炭化ろ液の返送による消化ガス発生量への影響検討等を実施した。また、本研究では以下の 5 つの目標を設定した。

- 炭化物性状の確認

需要者のニーズに応じて性状調整が容易であり、下水汚泥固形燃料に関する日本産業規格（JIS Z7312）の基準や菌体りん酸肥料の基準値を満たし、燃料や肥料として利用可能な炭化物が得られること。

- 省エネ・創エネ性の検証

生成される炭化物のエネルギーが投入エネルギーを上回ること、炭化処理のエネルギー自立が可能なこと。

- 脱炭素効果の検証

処理場外での炭化物利用による温室効果ガス排出量の削減効果を含めた条件で、嫌気性消化施設を保有する下水処理場に本技術を適用することで、下水処理場のカーボンニュートラルを実現できること。

- 経済性の検証

従来炭化と比較して経済性に優れていること。

- 既設処理施設への影響の確認

本技術を導入する下水処理場の水処理、汚泥処理に顕著な影響を与えないこと。

（３）検討結果

実証結果に基づき上述の 5 項目を評価した。

① 炭化物性状の確認

各サンプリング日における脱水汚泥、炭化物および養生後の炭化物（以下、「燃料化物」と表記）の含水率を図 2－4 に示す。含水率 81～82%の脱水汚泥を反応器内で 0.9MPa、170℃程度、6 時間の条件で反応させた後、固液分離することにより、含水率が約 30～40%まで低減した。更に、養生処理によって下水汚泥固形燃料に関する日本産業規格（JIS Z7312）の基準である 20%以下の含水率を満たす燃料化物を得ることができた。燃料化物の高位発熱量（含水率 20%換算）は平均 14MJ/kg-wet であり、JIS Z7312 に定める基準（8MJ/kg-wet 以上）を上回る値を示した（図 2－5）。

また、各季節にサンプリングした炭化物について肥料成分（りん酸）と重金属の含有量を分析した結果、全ての項目について公定規格である菌体りん酸肥料の基準値を満足した（表 2－1）。加えて、炭化物の植害試験では、供試による植害は認められなかった（データ非掲載）。

以上の結果から、水熱炭化技術により、下水汚泥から燃料や肥料として利用可能な燃料化物または炭化物を製造できることが示された。

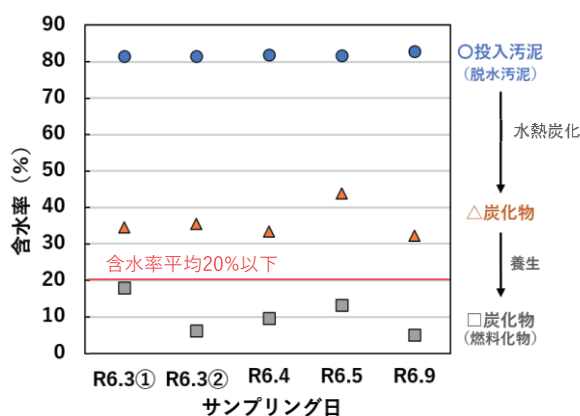


図 2－4 脱水汚泥、炭化物および燃料化物の含水率測定結果

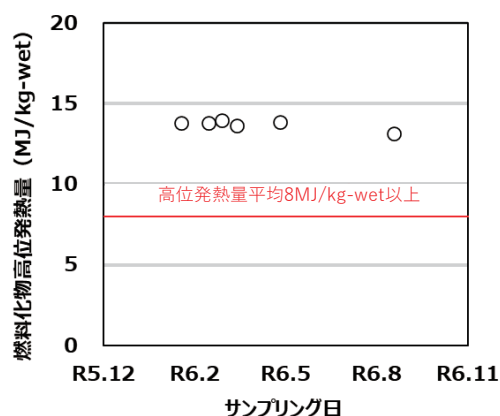


図 2－5 燃料化物の高位発熱量測定結果（含水率 20%換算）

表 2－1 炭化物の肥料成分（りん酸）と重金属の含有量の測定結果および基準値※

	単位	基準値	冬季 R6.2.13	春季 R6.4.11	夏季 R6.9.10	秋季 R6.11.15
りん酸全量	%	≧ 1.0	5.36	7.76	11.6	8.18
As	mg/kg-DS	≦ 50	9.6	7.2	3.9	6.2
Cd		≦ 5	0.8	0.8	0.8	1.1
Hg		≦ 2	0.15	0.26	0.44	0.20
Ni		≦ 300	32	27	34	41
Cr		≦ 500	44	34	49	68
Pb		≦ 100	14	14	16	16

※菌体りん酸肥料の基準値を記載

② 省エネ・創エネ性の検証

実証試験から得られた水熱炭化技術の所要熱量と消費電力を踏まえ、表 2－2 の条件で、投入汚泥量 25t-wet/d における汚泥燃料化のエネルギー収支を試算した。また、技術の有効性を確認するために、従来炭化と比較した。また、試算においては、消化ガス発電を併用し、本技術への発電排熱利用するものとした。また、製造した炭化物の石炭等の代替利用効果を含めるものとした。

図 2－6 に示すとおり、燃料化に必要な電気（一次エネルギー換算値を計上）、熱および製造した燃料化物の発熱量からエネルギー収支を試算した。その結果、処理場外での燃料利用による削減効果を含めると、燃料化物のエネルギーが投入エネルギーを上回っており（エネルギー収支<0）、燃料化のエネルギー自立が可能であることが示された。これは主に、従来炭化で必要となる蒸発による水分除去に比べて、水熱炭化における圧搾による水分除去の方が、必要なエネルギーが小さいためであると考えられる。なお、投入汚泥量の規模別に同様に試算したところ、小規模になるとスケールメリットが十分に発揮できず、エネルギー収支が悪化して燃料化のエネルギー自立が困難になる場合があることを確認した。

表 2－2 各炭化技術のエネルギー収支の試算条件

項目	条件	備考
試算規模	投入汚泥処理量：25t-wet/d	－
脱水汚泥（消化汚泥）	含水率：81% 高位発熱量：17.23MJ/kg-dry	実証結果等に基づき設定
燃料化物（水熱炭化）	含水率：15% 高位発熱量：17.06MJ/kg-dry	実証結果等に基づき設定
燃料化物（従来炭化）	高位発熱量：14.50MJ/kg-dry	下水汚泥エネルギー化技術ガイドラインー平成 29 年度版ーに基づき設定
CO ₂ 排出係数	電気：0.00025t-CO ₂ /kWh 都市ガス：0.00223t-CO ₂ /m ³ 石炭：2.33t-CO ₂ /t	下水道における地球温暖化対策マニュアル等に基づき設定、電気は 2030 年に想定される排出係数を使用
温暖化係数	CH ₄ ：28, N ₂ O：265	地球温暖化対策推進法施行令
必要エネルギー：		
主ポンプ/水処理/汚泥処理（燃料化に関する範囲を除く）	下水道における地球温暖化対策マニュアル等に基づき設定	
必要エネルギー：水熱炭化	実証結果等に基づき設定	
必要エネルギー：従来炭化	下水汚泥エネルギー化技術ガイドラインー平成 29 年度版ー	

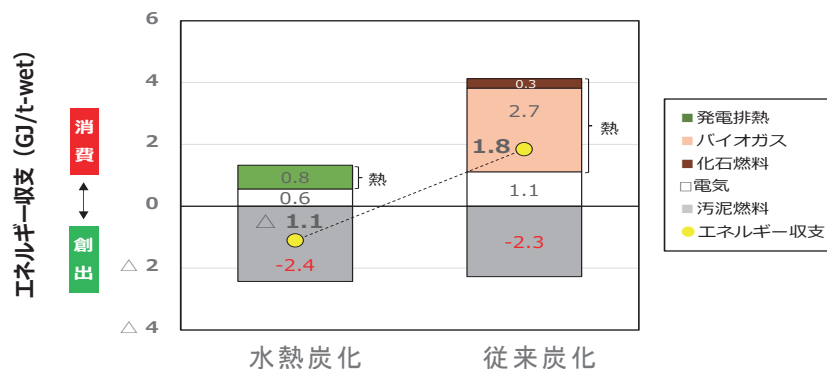


図 2－6 各炭化技術のエネルギー収支の比較（投入汚泥量 25t-wet/d）

③ 脱炭素効果の検証

本検証では、下水処理場におけるカーボンニュートラル実現の可能性を評価した。表 2-2 の条件で、処理場外での燃料化物の利用を含む投入汚泥量 25t-wet/d における下水処理工程（水処理・汚泥処理）全体の CO₂ 収支を試算した結果を図 2-7 に示す。この規模において、嫌気性消化施設を保有する下水処理場に本技術を適用し、処理場外での炭化物利用による削減効果を含めることで、下水処理工程全体の CO₂ 排出量を実質的にゼロ以下にできる可能性が示された（CO₂ 収支<0）。一方、投入汚泥量の規模別に同様に試算したところ、小規模な処理場ではスケールメリットが十分に発揮されず、CO₂ 排出削減量が排出量を上回らない、すなわち CO₂ 収支がゼロ以下にならない場合があることも確認された。

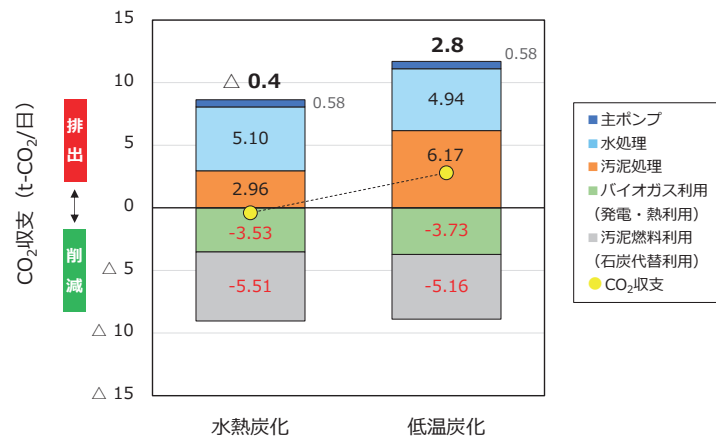


図 2-7 各炭化技術の CO₂ 収支の比較（投入汚泥量 25t-wet/d）

④ 経済性の検証

表 2-2 の条件に基づき、下水汚泥エネルギー化技術ガイドラインに示される費用関数を建設工事費デフレーターで補正して試算した処理単価（建設費年価＋維持管理費）を図 2-8 に示す。投入汚泥量 25t-wet/d 規模において、水熱炭化は従来炭化に対して安価で、さらに脱水汚泥の一般的な委託処分費（23 千円/t-wet と仮定）よりも安価と試算された。

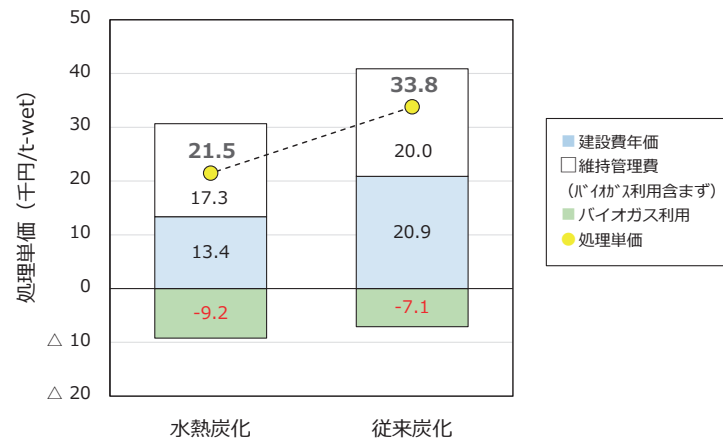


図 2-8 各炭化技術の処理単価の比較（投入汚泥量 25t-wet/d）

⑤ 既設処理施設への影響の確認

実証試験およびラボスケールでの補足試験を踏まえた検討を実施して、同処理場の嫌気性消化汚泥を全量水熱炭化処理した場合における既設処理への影響を試算したところ、水熱炭化技術の導入前後でバイオガス量、脱水汚泥含水率、放流水の COD および T-P はほぼ変化しないと推測された一方で、本技術の返流水処理施設の有無にかかわらず、返流水の T-N 濃度が 2 割程度上昇する可能性があることが明らかとなった（データ非掲載）。

（4）まとめ

本検討では水熱炭化技術の実証を行い、以下の知見を得た。

- 含水率 81～82%の脱水汚泥から含水率約 30～40%の炭化物を製造できることを確認した。
- 炭化物は菌体りん酸肥料の基準値を満足し、養生処理後の炭化物（燃料化物）は JIS Z7312 の下水汚泥固形燃料に関する規格（含水率 20%以下、8MJ/kg-wet 以上）を満足することを確認した。
- 本技術の省エネ・創エネ性の試算においては、小規模施設ではエネルギー自立が困難であるが、投入汚泥量 25t-wet/d においては、消化ガスによる発電利用および発電排熱の本技術への利用、並びに製造した炭化物の石炭等の代替利用効果を含めることで、燃料化のエネルギー自立が可能であることが示された。
- 同様の試算により、小規模施設ではスケールメリットが働かないが投入汚泥量 25t-wet/d では GHG 排出量よりも削減の効果が上回り、下水処理場のカーボンニュートラル化の可能性が示された。

本共同研究は 2024 年 12 月に完了し、その成果を踏まえ、本技術は 2025 年 3 月に「湿式炭化による下水汚泥利活用技術」として JS 新技術 I 類に選定された。

3. 下水汚泥資源農業利活用技術

3.1 下水汚泥資源農業利活用技術の開発

(1) 検討の概要

下水汚泥には窒素やリン、有機物といった資源が含まれており、これを農業に利活用することで、循環型社会の実現に貢献できる。そのため、下水汚泥資源の農業への利活用を普及させるためには、技術の低コスト化や生成物の高品質化等を図るための技術開発が必要である。

このような背景から、本検討では下水汚泥資源の農業への利活用を推進するための技術の開発を目的とした共同研究や実証実験を行う。過年度は、下水汚泥資源の新たな農業への利活用技術を開発・実用化するための共同研究の公募を行った。更に、国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）の実規模実証「縦型密閉発酵槽による下水汚泥の肥料化技術に関する実証事業」に着手した。

本年度は、公募型共同研究については募集期間中に応募が無かったため公募を終了した。一方、B-DASH プロジェクトについては実証設備の運転を開始して性能確認等を実施した。なお、B-DASH プロジェクトとしての実規模実証は 2023～2025 年度の 3 ヶ年度で実施し、それ以後は共同研究体による自主研究として継続する予定である。

(2) 検討方法

① 実証技術

本実証技術の原理を図 3-1 に示す。本技術は、畜糞堆肥化で多数の実績がある縦型密閉発酵槽を下水汚泥の肥料化技術として応用したものである。縦型密閉発酵槽に下水汚泥と副原料（外部バイオマス）を適切な配合で投入することで槽内の発酵乾燥処理を促進し、汚泥の処理期間を短縮する。発酵乾燥汚泥は、地域・季節や社会情勢によるニーズに柔軟に対応するため、肥料としての利用だけでなくセメント工場等でのエネルギー源としての利用も想定している。断熱性が高くコンパクトな槽内で発酵を行うことで、熱効率が高くなり乾燥用の外部熱源が不要となる。また、発酵制御システムにより、発酵槽の状態に応じて汚泥投入量や送気量を調整し、処理の安定化と省人化を図っている。気密性を有する発酵槽により臭気の拡散を抑制し、発酵過程で生じた臭気は脱臭設備で処理される⁴⁾。

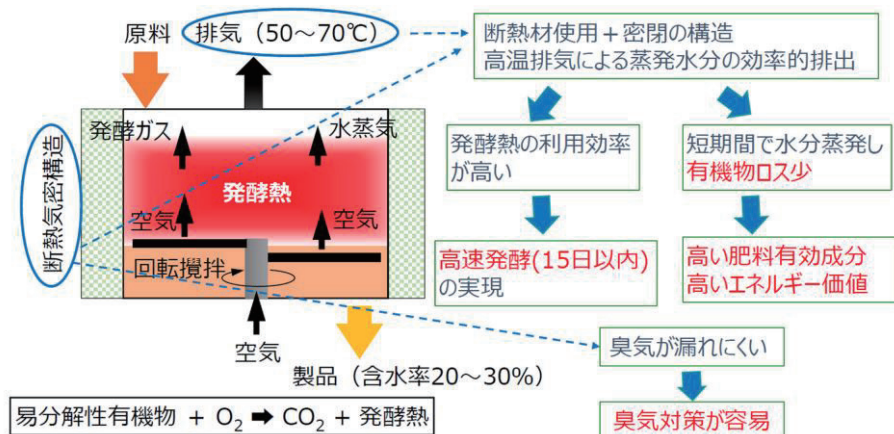


図3-1 縦型密閉発酵槽の原理

② 実証フィールド

本実証研究では、島根県が管理する宍道湖流域下水道宍道湖西部浄化センターを実証フィールドとして、実規模での実証実験を行う。本処理場は分流式で、標準活性汚泥法を採用しており、現有処理能力は 36,000m³/d（2023 年度時点）である。発生した汚泥は嫌気性消化後に脱水し、場外搬出の上、外部委託により再資源化している。2023 年度実績で、脱水汚泥発生量は 15.1t-wet/d である。

③ 実証設備

本研究で使用する実証設備のフローを図 3-2 に示す。主な機器として、汚泥供給設備、副原料受け入れ供給設備、発酵槽本体設備、製品出荷設備、脱臭設備から構成される。90m³の発酵槽 1 基を実証フィールドに設置し、同フィールドで発生した脱水汚泥 5t-wet/d を処理する。発酵槽では毎日 1 回、生成した発酵乾燥汚泥を槽外へ引き抜いた後、脱水汚泥と副原料（発酵鶏糞、廃白土）を発酵槽に投入し、発酵日数 15 日で処理する。投入された汚泥は、攪拌羽根による槽内の攪拌および送気ブロワからの強制通気により発酵乾燥処理される。また、発酵槽で発生した排気ガスは除塵塔、アンモニア吸収塔、酸化洗浄塔、活性炭塔から構成される脱臭設備で処理される。

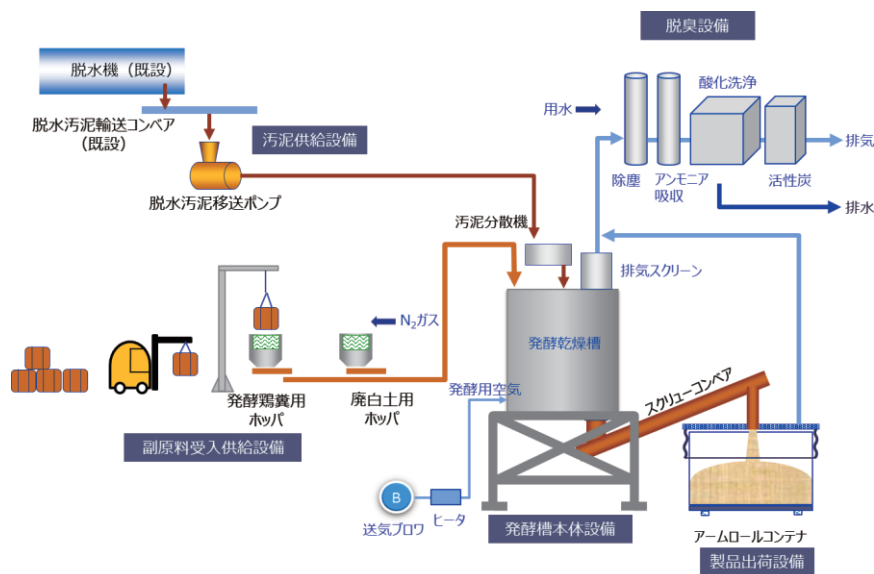


図3-2 実証設備の概要

④ 評価項目

本実証研究では、縦型密閉発酵槽、品質安定化・省人化、受取先安定確保、全体の効果（FS等）の観点から評価を実施する（表 3-1）。なお、本報告では本年度の実証結果のうち、発酵槽性能値、発酵制御システム、副原料、肥料利用、セメント工場利用について示す。

表 3-1 評価項目等

要素	評価項目	評価指標等	研究内容
縦型密閉 発酵槽	①発酵槽 性能値	製品含水率	製品含水率が 20～30%で安定していることを確認
		発酵日数	15 日以内の高速発酵を確認
		処理能力	15 日以上連続運転データで 5t/d を確認
	②環境影響	脱臭性能	アンモニア他、悪臭防止法の規制基準内であることを確認。脱臭装置出口と敷地境界で 2 回/y の計測
品質安定化 ・省人化	③発酵制御 システム	送気量制御	発酵状況に応じて自動で送気量を制御できるように、実証運転により制御プログラムおよび制御パラメータを最適化
		投入量・排出量 管理	発酵槽重量変化値をモニタリングし、汚泥投入量、副原料配合量、製品排出量の調整を行い、安定運転方法のマニュアルを作成
	④副原料	配合方法	実証運転により、副原料の配合量を最適化（最小化）すると共に、効率的な副原料の投入方法（タイミング、分割投入等）を確認
受取先 安定確保	⑤肥料利用	肥料適性	汚泥肥料、(菌体リン酸肥料)としての適性を確認（成分分析、植害試験、栽培試験）
	⑥肥料流通	流通方策	県農政部局や地元農家へのヒアリングによる課題検討、化学肥料との混合の検討
	⑦セメント 工場利用	影響有無 GHG 削減	キルンの運転への影響の確認、セメントクリンカー品質の確認 乾燥汚泥発熱量を分析し、石炭削減量のケーススタディを実施
全体の効果（FS 等）	⑧費用	LCC	モデルケースを設定し、従来技術のコンポスト化と対比試算
	⑨省 CO ₂	温室効果ガス (GHG)排出量	モデルケースを設定し、従来技術のコンポスト化と対比試算

(3) 検討結果

2024 年 5 月から実証設備の運転を開始し、投入汚泥量や副原料添加率、製品含水率、発酵日数等の基本性能を確認・調整した。具体的には、脱水汚泥処理能力 5t/d、製品含水率 20～30%での安定運転、発酵日数 15 日以内の高速発酵といった基本性能を確認した。また、これらの性能を満足するため、副原料（発酵鶏糞、廃白土）については予め想定した添加率を基本とした運転を行い、製品含水率や発酵日数、発酵温度の推移を指標として最適化を検討した。発酵制御システムにおける送気量は、発酵槽排気ガス温度の計測結果に基づき、アルゴリズムを用いて自動制御した。更に、同年 10 月からは発酵制御システムによる送気量制御、製品である発酵乾燥汚泥の性状分析による肥料・燃料利用の適用性、セメント工場での活用可能性等の検証を行った。

① 発酵槽の基本性能確認

本年度の汚泥投入量、副原料添加率、発酵乾燥汚泥含水率の推移を図 3－3 に示す。設備の立ち上げ時には段階的に汚泥投入量を増加させた後、汚泥投入量を 5t-wet/d として運転した。全期間を通して、製品含水率は目標である 20～30%の範囲内で推移した。そのほかの評価結果は、次以降の項目で詳述する。

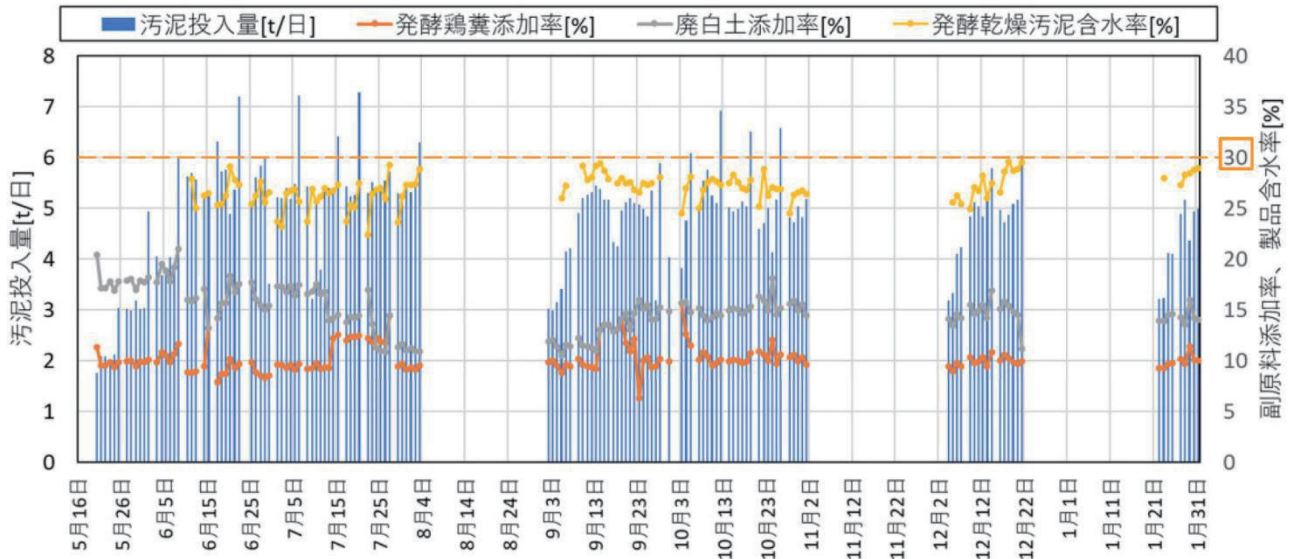


図3－3 投入汚泥量、副原料添加率、発酵乾燥汚泥含水率の推移

② 副原料添加率と製品含水率の安定性の確認

副原料添加率と製品含水率の推移の一例として、令和 6 年 12 月におけるデータを図 3－4 に示す。副原料として発酵鶏糞および廃白土を用い、脱水汚泥の湿潤重量に対する添加率をそれぞれ 10%および 15%で一定とした。この期間における製品含水率は安定的に推移しており、平均 27.5%であった。また、この時の発酵槽内の温度の推移を図 3－5 に示す。上述した副原料の添加率において、発酵槽の中部温度が最大 69℃に到達し、良好な発酵状況であったと考えられる。

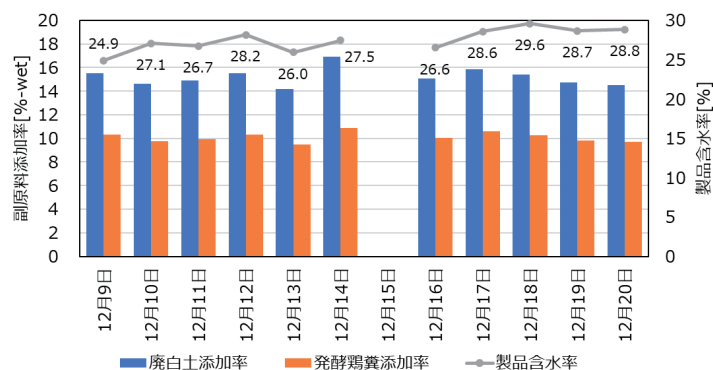


図3－4 副原料添加率と製品含水率の推移

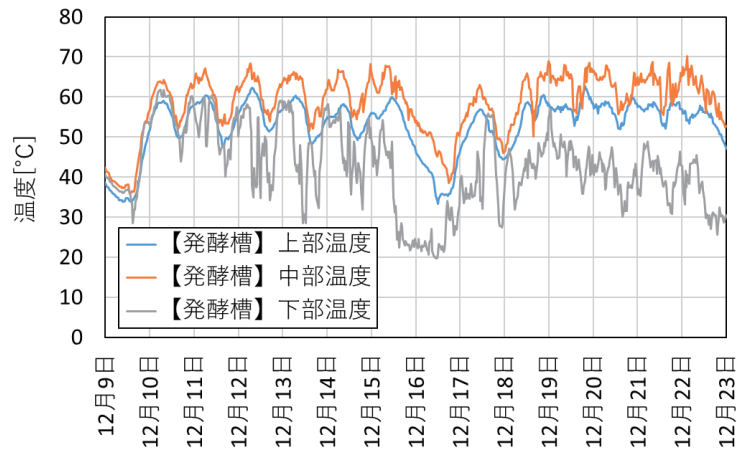


図3-5 発酵槽内部の温度の推移

③ 発酵制御システムの評価

発酵制御システムによる送気量の自動制御状況の推移を図3-6に示す。1日の運転サイクルとして、脱水汚泥等の原料投入による温度低下後に送気量を増加することにより遅滞なく温度が上昇し、発酵が進行することを確認した。加えて、温度上昇がピークを迎えた後は、送気量を低下させることにより放熱による極端な温度低下を抑制できることを確認した。これらの結果から、発酵制御システムの自動送気パラメータを適切にチューニングすることで、送気不足による発酵の遅延や過剰送気による極端な温度低下がなく、日々の温度トレンドが安定して繰り返されていることを確認した。

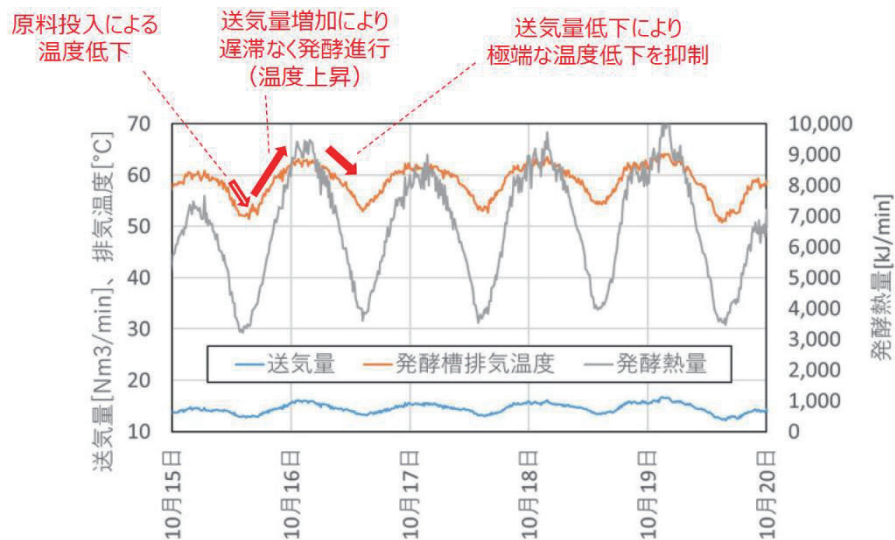


図3-6 発酵制御システムによる送気量の自動制御状況の推移

④ 肥料・燃料としての成分評価

発酵乾燥汚泥の肥料成分および発熱量等の分析結果を表 3-2 に示す。肥料成分としては、全窒素および、全リンがそれぞれ 35,000～43,000、24,000～25,000mg/kg-dry 含まれていた。また、発酵鶏糞由来のカリウムが 10,000～12,000mg/kg-dry 含まれており、一般的な下水汚泥肥料には少ないカリウム成分による施肥効果も期待できる。更に、植害試験を実施したところ異常は見られず、肥料として利用可能であることを確認した。発酵乾燥汚泥は 11,600～15,700J/g-dry の高位発熱量を有しており、燃料としての利用も可能であることを確認した。

表 3-2 発酵乾燥汚泥の肥料成分・発熱量等分析結果

項目	単位	発酵乾燥汚泥		
		R6/7/8 発酵鶏糞添加率 10% 廃白土添加率 17%	R6/10/24 発酵鶏糞添加率 10% 廃白土添加率 15%	R6/12/16 発酵鶏糞添加率 10% 廃白土添加率 15%
水分	%-wet	23.7	25.4	26.3
灰分	%-dry	53.3	43.8	44.1
固定炭素	%-dry	3.2	2.8	2.0
揮発分	%-dry	43.5	53.4	53.9
高位発熱量	J/g-dry	11,600	15,100	15,700
全窒素	mg/kg-dry	35,000	43,000	43,000
全リン	mg/kg-dry	24,000	25,000	24,000
カリウム	mg/kg-dry	12,000	10,000	12,000

⑤ セメント原料・エネルギー源としての評価

セメント原料やエネルギー源としての利用可能性を評価するため、発酵乾燥汚泥の工業分析を行い、燃焼性や品質を確認した。また、セメント工場において発酵乾燥汚泥をセメントキルン前段の仮焼炉に投入し、ハンドリング性の確認も実施した。工業分析の結果、DAF (Dry Ash Free) ベースの高位発熱量と燃料比は従来の脱水汚泥と同等であり、有機成分は従来脱水汚泥と同等の燃焼性を有すると考えられた（表 3-3）。保有水分を考慮して仮焼炉投入時の有効熱量を試算すると、脱水汚泥はマイナス（多量に保有する水分を蒸発させるため追加燃料が必要）であるが、発酵乾燥汚泥はプラスで瀝青炭の 30% の有効熱量を有すると考えられた。また、仮焼炉への投入においては、自然発熱や閉塞等のハンドリング上のトラブルや炉内温度等の燃焼性への影響は確認されなかった。以上より、発酵乾燥汚泥はセメント原料（灰分組成や重金属濃度は従来の脱水汚泥と同等）として利用可能であり、加えてエネルギー源としてセメントキルンの石炭使用量の削減に寄与できると評価した。

表 3-3 発酵乾燥汚泥の工業分析結果

項目	単位	脱水汚泥	発酵乾燥汚泥	瀝青炭
高位発熱量	MJ/kg-dry	17.6	12.4	28.3
	MJ/kg-DAF	23.0	22.1	34.4
燃料比 (固定炭素/揮発分)	—	0.16	0.17	1.74
有効熱量 (保有水分を考慮)	MJ/kg-wet	-0.9	8.1	27.2

(4) まとめ

2024 年 5 月から B-DASH プロジェクトの実規模実証「縦型密閉発酵槽による下水汚泥の肥料化技術に関する実証事業」の実証設備の運転を開始した。2025 年 1 月までに得られた主な成果は以下の通りである。

- 脱水汚泥 5t-wet/d に対して、副原料として脱水汚泥湿潤重量比で発酵鶏糞 10%、廃白土 15%を投入した結果、発酵日数 15 日以内で安定した発酵乾燥処理が可能であることを確認した。
- 発酵制御システムにより温度変化を監視して送気量を調整することで、槽内温度の低下を抑制できることを確認した。
- 発酵乾燥汚泥の肥料利用について成分分析したところ、全窒素、全リン、カリウムがそれぞれ 35,000～43,000、24,000～25,000、10,000～12,000mg/kg-dry 含まれていることを確認した。また、植害試験を実施したところ異常は見られず、肥料利用が可能であることを確認した。更に、燃料利用について成分分析したところ、高位発熱量が 11,600～15,700J/g-dry であることを確認した。
- 発酵乾燥汚泥の工業分析と、セメント工場の仮焼炉への投入によるハンドリング性の確認を行った結果、セメント原料としての利用可能性と、エネルギー源としてセメントキルンの石炭使用量の削減に寄与できることを確認した。

次年度も実証実験を継続し、処理能力や発酵乾燥汚泥の性状等を確認するとともに、発酵乾燥汚泥を用いた栽培試験、コストや GHG 排出量削減効果の試算等を行う予定である。

3. 2 下水汚泥肥料の製造および施肥効果等に係る基礎調査

（1）検討の概要

下水汚泥肥料の利用促進には、多様な成分・性状の下水汚泥から肥料が製造可能であることを明確にし、その肥料成分の特性や施肥効果に関する基礎的知見を充実させると共に、これを広く周知することが重要である。本調査は、下水汚泥肥料の有効利用促進に資する基礎的知見を蓄積することを目的として、様々な下水汚泥を用いて実際に下水汚泥肥料を製造する肥料化試験を行うと共に、肥料成分の測定および栽培試験により施肥効果の検証を行うものである。

過年度は、下水汚泥肥料と他肥料との肥料成分比較、消化汚泥の液肥利用および消化脱水汚泥の直接施肥を想定した衛生学的安全性に関する調査を実施した。また、JS が保有するコンポスト実験装置を用いた未消化汚泥のコンポスト試験製造と基本性状確認、水処理にポリ鉄を使用する処理場の汚泥由来肥料のリン成分溶出試験、汚泥肥料へのカリウムの補給源としての木質燃焼灰の混合利用試験等を実施した。

本年度は、以下の試験を行った。

- ① 下水汚泥肥料と他の有機質肥料の分解・肥効特性
- ② 汚泥の発酵肥料と乾燥肥料との肥効特性

① 下水汚泥肥料と他の有機質肥料の分解・肥効特性比較

一般に有機質肥料は、動植物由来の有機物を原料とし、土壤中で微生物により分解される過程で窒素分が徐々に無機化*されるため、肥効が長く持続する緩効性†が特徴の一つである⁵⁾。下水汚泥肥料は生物由来の有機物を多く含むことから同様の特徴を有するとされる。しかし、過去の調査では、下水汚泥肥料は当初からアンモニア態窒素を含むものの、土壤施用後は有機態窒素からの新たな無機化がほぼ生じない、すなわち緩効性の窒素肥料ではないとみなす事例が報告されている⁶⁾。この結果は、下水汚泥肥料が緩効性であるという一般的な見解と相反し、下水汚泥肥料の施肥方法にも大きな影響を及ぼす。そのため、下水汚泥肥料の分解・肥効特性や無機化率について検証する必要があるが、一般的に用いられる無機化試験は期間と費用を要するため、より簡便な試験方法が望まれる。本年度は、下水汚泥肥料の分解・肥効特性を従来方法よりも簡便的に評価するため、有機質肥料の分解・肥効特性を評価する試験法として、無機化試験よりも比較的簡便で新しい「酸性デタージェント試験（以下、「AD 試験」と略記）」⁷⁾の活用を試みた。この試験は、窒素成分分析と組み合わせることで、窒素の肥効特性を推測する試験法として期待できる。併せて酸性デタージェント試験とリンの分析を組み合わせることにより、リン酸の溶出特性の想定を試みた。

* 有機態窒素がアンモニアや硝酸態といった植物が利用しやすい窒素形態になること。

† 緩効性とは、窒素の肥効特性のうち、肥効の速さや持続性に着目した分類のうちのひとつ。有機質肥料の肥効特性は土壤の種類、温度、有機物の種類等、多くの要因により大きく変動する。以下はあくまで一般的な目安。

速効性：施用後すぐ（数日～1 週間程度）に植物に吸収され、短期間で肥効が現れる特性。

準速効性：速効性よりは遅いが、比較的短期間（数週間程度）で肥効が現れ、持続性も持つ特性。

緩効性：土壤中ですくずかに分解（数週間～数か月）され、長期間にわたって肥効が持続する特性。

非効性・難効性：通常の作物生育期間ではほとんど肥効が期待できず、土壤中に残存する特性。

② 汚泥の発酵肥料と乾燥肥料の肥効特性比較

下水汚泥の緑農地利用には、リン回収等による利用と、発酵または乾燥させたものを肥料として利用する場合がある。コンポスト化は、対象とする汚泥の処理規模が小さくなるほど導入および運転管理コストが嵩むことが課題である。一方、嫌気性消化工程を経た脱水汚泥は、易分解性有機分が既に分解・安定化され、臭気も削減されているため、乾燥処理のみで安定した肥料としての活用が可能である。しかし、消化汚泥の発酵肥料化と乾燥肥料化の違いによる肥効特性を比較した事例は少ない。本年度は、発酵および乾燥という肥料化方法の違いが肥効特性に与える影響を確認するため、各汚泥肥料の窒素の分画試験、無機化試験、野菜の栽培試験を試みた。

（２）検討方法

① 下水汚泥肥料と他の有機質肥料の分解・肥効特性比較

下水汚泥肥料として、JS 技術開発実験センターにて製造した発酵汚泥（以下、「JS 発酵汚泥肥料」と表記）および乾燥汚泥（以下、「JS 乾燥汚泥肥料」と表記）等、入手元や製造方法が異なる 5 種類の下水汚泥肥料、および牛ふん堆肥等の市販の代表的な有機質肥料 3 種を対象とした（表 3－4）。肥料の分解特性、可給態窒素の含有量、および肥効特性等の推定を行うため、形態別の窒素（有機態窒素、無機態窒素）を分析すると共に、デタージェント分析を行った。対象とした肥料間の比較のため、電気伝導度、炭素窒素比（C/N）、およびリン酸の溶出特性（水溶性、可溶性、ク溶性、非効性リン酸）を分析した。

一般にデタージェント分析とは、家畜飼料を界面活性剤（デタージェント、すなわち洗剤）で煮沸処理した後の残さの量から、家畜による飼料の消化しやすさを評価する手法である。本検討で用いた AD 試験は、酸性の界面活性剤を用いる。近年、AD 試験を家畜ふん堆肥に応用し、その分解特性や可給態窒素（速効性および緩効性の窒素）の含有量を推定する事例が増加している⁸⁾。本方法では、AD 試験により、対象物中の分解しやすい有機物である酸性デタージェント可溶有機物（ADOM*）、および難分解性有機物である酸性デタージェント繊維（ADF[†]）の乾物量（%DS）を測定する。AD 試験に加え、対象物中の無機態窒素、煮沸処理に用いた界面活性剤に溶出した窒素、および ADF 中の窒素量を測定することで、対象物中の有機分の分解特性や可給態窒素（速効性と緩効性の窒素）の含有量を推測する。従来の無機化試験よりも短期間および簡易に推定可能と考えられる方法であるが、下水汚泥肥料に対する本試験の活用事例は少ないため、今回でその有用性も含め評価を行った。上記項目の分析は、「堆肥等有機物分析法」に基づいて実施した。

* ADOM : Acid Detergent Organic Matter。酸性デタージェント液で煮沸処理したとき溶解する有機物。全有機物（強熱減量）から ADF を除いたもので、ここに存在する窒素は速効性・緩効性とされる。

† ADF : Acid Detergent Fiber。酸性デタージェント液で煮沸処理したとき溶解せず残存するもの。ここに存在する窒素は難分解性であり、非効性・難効性窒素とされる。施用後概か月以上残存する有機物に相当するとされている。

表 3-4 試験対象とした肥料

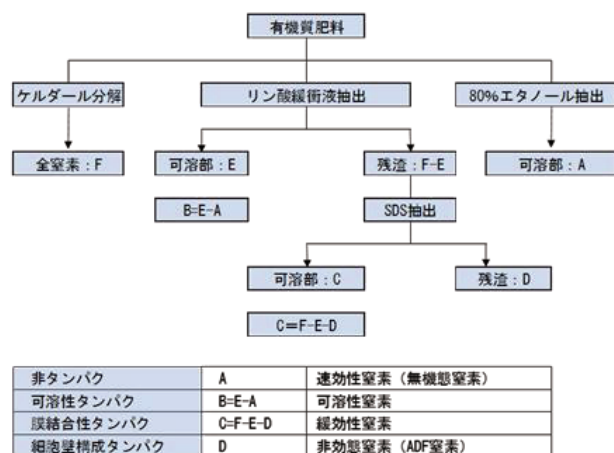
対象試料名		内 訳	備 考
汚泥肥料	JS発酵汚泥肥料	コンポスト実験装置（容量250L、電熱ヒーター付横軸攪拌式）で45日間かけて発酵処理したもの	M市水処理センター消化脱水汚泥
	JS乾燥汚泥肥料	市販の家庭用生ごみ処理機（パナソニックMS-N53XD: 800W 槽容量6L）により130℃熱風で急速乾燥したもの	M市水処理センター消化脱水汚泥
	高温発酵汚泥肥料	生脱水汚泥を超高温発酵処理（90℃45日間）により製造したもの	T処理場より入手
	自然乾燥汚泥肥料	消化脱水汚泥を主原料として、温室内で自然乾燥により製造したもの	福井県内民間肥料会社より入手
	もみ殻添加発酵汚泥肥料	消化脱水汚泥に破碎もみ殻を重量比で2～3割添加、発酵処理したもの	T市コンポストセンターより入手
家畜ふん その他	牛ふん堆肥	市販牛ふん発酵堆肥（木質チップ入り）	販売元 A園芸(株)
	鶏ふん堆肥	市販の発酵乾燥鶏ふん堆肥	販売元 (株) T社
	油かす	市販のなたね油かす	販売元 S社 (株)

② 汚泥の発酵肥料と乾燥肥料の肥効特性比較

①で用いた JS 発酵汚泥肥料（以下、②においては「発酵汚泥」と略記）および JS 乾燥汚泥肥料（以下、②においては「乾燥肥料」と略記）を対象として、肥効特性を把握するために窒素の分画試験、無機化試験、野菜の栽培試験を実施した。なお、無機化試験および栽培試験においては、汚泥肥料との比較として、有機質肥料として活用されることの多い牛ふん堆肥を比較対象とした。

1) 窒素分画試験

各対象肥料に含まれる窒素化合物の溶出特性（肥効特性）を把握するため、窒素分画試験^{7),9)}を実施した。本試験は、有機質肥料中に含有する窒素を非タンパク性の窒素（速効性窒素）、可溶性タンパク（準速効性窒素）、膜結合性タンパク（緩効性窒素）、細胞壁構成タンパク（非効性・難効性窒素）に区分し*、それらの含有割合で窒素の肥効特性を評価する。分画方法を図 3-7 に示す。

図 3-7 窒素分画試験における分画方法^{7),9)}

* 非タンパク性の窒素：植物が直接吸収可能な無機態窒素や低分子有機態窒素で、速効性の肥効を示す。
 可溶性タンパク：水溶性で微生物により比較的速やかに分解され、準速効性～緩効性の肥効を示す。
 膜結合性タンパク：細胞膜などに結合し、微生物によりゆっくりと分解され、緩効性の肥効を示す。
 細胞壁構成タンパク：細胞壁を構成する難分解性のタンパク質で、通常の作物生育期間ではほとんど肥効を示さず、土壌有機物として蓄積される。

2) 無機化試験

有機質肥料中の有機態窒素（肥料中のタンパク質中に多く含有される）が植物に利用されやすいアンモニアや硝酸態窒素へ経時的に変化する状況を調べる試験として、土壌環境分析法の保温静置法¹⁰⁾に基づき、無機化試験を実施した。実施状況を図 3－8 に示した。



図 3－8 無機化試験の実施状況



図 3－9 野菜栽培試験の実施状況

3) 野菜の栽培試験

消化汚泥の発酵肥料化と乾燥肥料化との違いが野菜の生育に及ぼす影響を比較するため、野菜の栽培試験を実施した。試験の手順は農林水産省の通知「植物に対する害に関する栽培試験の方法・解説」¹¹⁾に準拠した。試験区の設定を表 3－5、試験条件を表 3－6 に示す。各試験区のポットの反復（個数）は 5 とした。試験期間中は発芽率を 3 日目と 7 日目、草丈と SPAD 値*を 14 日目、21 日目、28 日目に測定し、28 日目に生体重量、乾燥重量を測定した。各試験結果の評価には、解析ソフトとして EZR 1 ver.1.54 を、解析手法として多重比較検定である Tukey-Kramer 検定を用い、有意な差の有無を確認した。図 3－9 に野菜栽培試験の実施状況を示した。

表 3－5 栽培試験区の設定

試験区	資材添加量（N成分）	基肥（mg/pot）		
	g / pot (200mg)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
対照区（化学肥料）	0.2	50	50	50
JS製造発酵肥料	4.1			
JS製造乾燥肥料	3.5			
市販牛ふん堆肥	26			

* SPAD 値：SPAD（Soil and Plant Analyzer Development）メーターを用いて測定される、葉の相対的な葉緑素含有量（緑色度）を示す数値。植物の栄養状態、特に窒素含有量の指標として利用される。

表 3－6 栽培試験条件

項 目	内 容
作物（品種）	コマツナ（夏楽天）
容器（容量）	1/5000aワグネルポット（3000mL）
土壌	黒ボク土
水分条件	最大圃場容水量 50～60%水分管理
栽培密度	3本/pot（20粒播種後、発芽が揃った段階で3株に間引き）
栽培期間	28日間
処理方法	土壌混和
温度/湿度	20℃ /50-60%
光条件	点灯時間12 h /照度18000-20000lx

(3) 検討結果

① 下水汚泥肥料と他の有機質肥料の分解・肥効特性比較

各肥料の性状分析結果を表 3－7 に示す。揮発分（強熱減量）を有機物とした場合、汚泥肥料の有機分率は一部を除き 70～80%程度であった。これは油粕中の有機分 94.2%には及ばないが、牛ふん堆肥（64.5%）や鶏ふん堆肥（67.0%）と比較して高い有機物含有率を示した。

表 3－7 各肥料の性状分析結果

分析項目		単位	汚泥肥料					家畜ふんその他		
			JS製造 発酵肥料	JS製造 乾燥肥料	高温 発酵肥料	自然乾燥 肥料	もみ殻添加 発酵肥料	牛ふん堆肥	鶏ふん堆肥	油かす
一般項目	水分	%	26.9	10.2	33.2	10.4	36.8	32.8	8.2	10.2
	pH	—	7.8	6.6	8.2	6.8	6.0	9.4	8.7	5.9
	電気伝導度（EC）	meq/100g	7	2.7	5.5	5.9	7.4	3.8	6.5	2.7
	有機炭素	%	23.2	36.3	9.0	32.8	22.1	12.7	20.8	37.9
	窒素全量	%	4.85	5.80	2.19	5.55	2.28	0.77	4.08	5.60
	アンモニア性窒素	%	0.81	0.53	0.33	1.00	0.41	<0.05	0.56	<0.05
	硝酸性窒素	%	0.58	0.24	0.11	<0.05	0.12	0.19	0.24	0.43
	C/N	—	5	6	4	6	10	17	5	7
	リン酸全量(P ₂ O ₅)	%	6.49	5.35	3.33	4.75	2.72	0.82	3.50	2.34
	水溶性リン酸(P ₂ O ₅)	%	0.84	0.58	0.02	0.67	1.33	0.20	0.67	0.59
	可溶性リン酸(P ₂ O ₅)	%	6.0	4.5	3.0	4.4	2.7	0.7	3.2	2.1
	ケ溶性リン酸(P ₂ O ₅)	%	5.67	4.5	3.15	3.88	2.68	0.72	3.28	2.24
	全カリウム(K ₂ O)	%	0.34	0.16	0.11	0.13	0.22	2.03	2.31	1.53
AD試験 関係	AD繊維	%DS	20.4	21.7	12.0	28.0	34.3	37.0	18.8	18.0
	AD-全窒素	%DS	3.45	5.31	3.55	3.46	2.81	1.55	3.73	3.18
	AD-全リン酸	%DS	0.25	0.28	0.15	0.16	0.03	0.07	0.08	0.11
強熱減量 関係	粗灰分（強熱残渣）	%DS	31.8	20.5	53.8	20.7	23.9	35.5	33.0	5.8
	揮発分（強熱減量）	%DS	68.2	79.5	46.2	79.3	76.1	64.5	67.0	94.2

※一般項目の含有量単位％はwetベース

1) AD 試験を用いた有機物の分解特性評価

図 3-10 に、AD 試験結果から得られた各肥料中の有機物の分解特性を示す。固形物に占める ADF の含有率は、JS 製造発酵肥料も JS 製造乾燥肥料も 20%DS 程度で、鶏ふん堆肥と概ね同等であった。もみ殻添加発酵汚泥肥料および牛ふん堆肥の ADF の比率は 34.3～37.0%DS と、JS 製造発酵肥料および JS 製造乾燥肥料の 1.5 倍程度高い値であった。ADOM の比率は、JS 製造乾燥肥料で 57.8%DS であったのに対し、発酵肥料は 47.8%DS、高温発酵肥料は 34.2%DS と低く、発酵が進むほど分解性有機物の割合が低下する傾向が認められた。汚泥肥料の ADOM は、家畜飼料にも利用される油かすの 76.2%DS には及ばないものの、鶏ふん堆肥と同程度の概ね 50%DS 前後であった。熟成の進んだ高温発酵堆肥では 34.2%DS と低めであり、全体として汚泥肥料中の有機物の 40～60%DS が分解性有機物であると評価された。

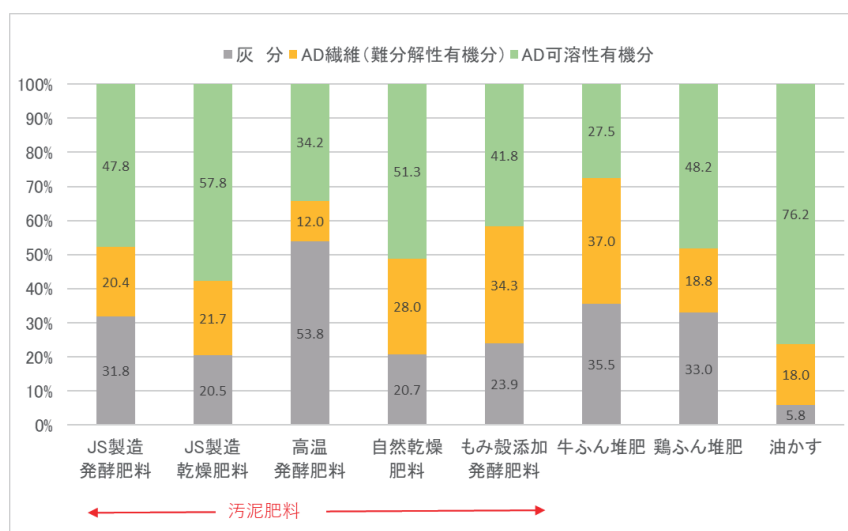


図 3-10 各肥料における有機物分解特性の比較

2) AD 試験を踏まえた窒素の分類想定

各肥料の全窒素、無機態窒素、および AD 試験の ADF 中の窒素を分析することで、各肥料中の速効性窒素、緩効性窒素、および難効性窒素の存在状況の想定を試みた。図 3-11 に想定される含有量を示す。緩効性窒素は全窒素から速効性と難効性の窒素分を差し引いたものとして求めた。今回試験製造した JS 発酵汚泥肥料、JS 乾燥汚泥肥料は共に全窒素含有量が 6%DS 以上であり、高価な市販の有機質肥料である油かすと同等以上の値であった。一方、汚泥肥料の中でも熟成度の高い高温発酵肥料、および副資材としてもみ殻を添加した汚泥肥料の全窒素含有量は約 4%DS とやや低く、牛ふん堆肥や鶏ふん堆肥と同様、緩効性窒素はゼロと判断された。

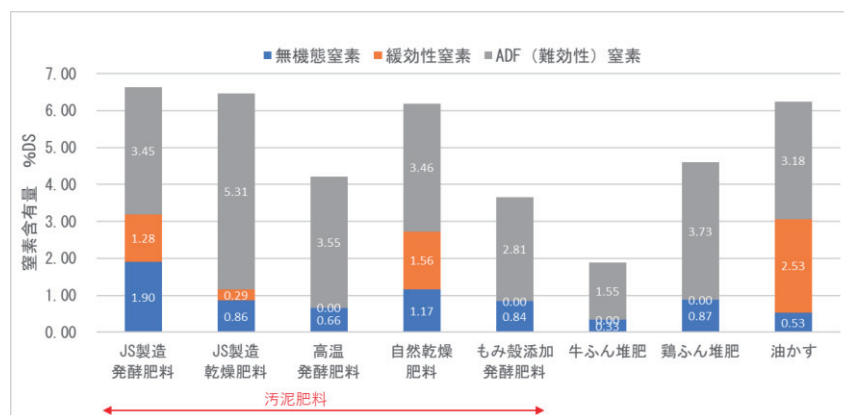


図3-11 各肥料中の速効性、緩効性および難効性窒素の想定含有量

※無機態窒素：即効性、煮沸後の界面活性剤中の窒素：緩効性、
ADF中の窒素：難効性 と想定

1)の有機物分解特性試験では汚泥肥料の約50%が分解性（ADOM）であったのに対し、窒素成分については多くが難効性窒素として測定された。ただし、②の試験で行った窒素分画法における緩効性窒素、および非効性窒素の試験結果とも差異がみられたことから、無機化試験の代替試験法としてAD試験と窒素分析の組み合わせ法の活用に向けては、更なる検証が必要であると考えられた。

3) リン酸の存在形態

図3-12に、各肥料中のリン酸の存在形態を示す。汚泥肥料中のリン酸含有量は種類によって差は見られるが5～6%DS程度あり、油かす、および家畜ふん堆肥中のそれと比較して2～3倍高い値であった。各肥料中のリン酸のうち、ADF中に存在する量はごくわずかであり、8～9割以上が可給態であることが示唆された。この可給態リンの割合は、従来から用いられている可溶性リン酸の分析結果と概ね一致した。

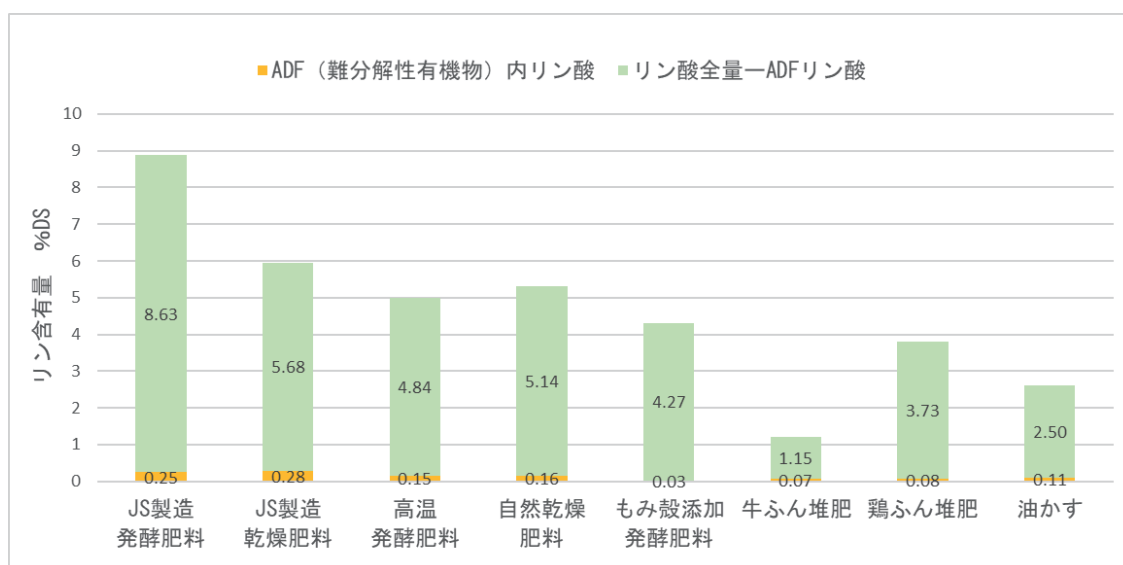


図3-12 各肥料中のリン酸の存在形態

以上、AD 試験の結果では汚泥肥料の有機分の分解特性、リン酸の存在形態（溶出特性）は他の有機質肥料とおおむね同等以上であることが確認された。ただし、窒素の分類想定については、汚泥肥料の製造方法の違いで大きな差がみられた。分析方法の課題も考えられたことから再検証が必要である。

② 汚泥の発酵肥料と乾燥肥料の肥効特性比較

1) 窒素分画試験

図 3－13 に、発酵肥料および乾燥肥料の窒素分画試験の結果を示す。共に肥料中の窒素含有量は 6.5%DS と同程度であったが、発酵肥料と比較して乾燥肥料の速効性および準速効性の窒素（非タンパク性の窒素および可溶性タンパク）は 11.4 ポイント低く、逆に非効性・難効性の窒素（細胞壁構成タンパク）は 9 ポイント程度高かった。乾燥工程における熱風（130℃）の影響で、可溶性タンパクの一部が熱変性を受け、分解性が低下し、細胞壁タンパクの一部に分類された可能性が考えられた。

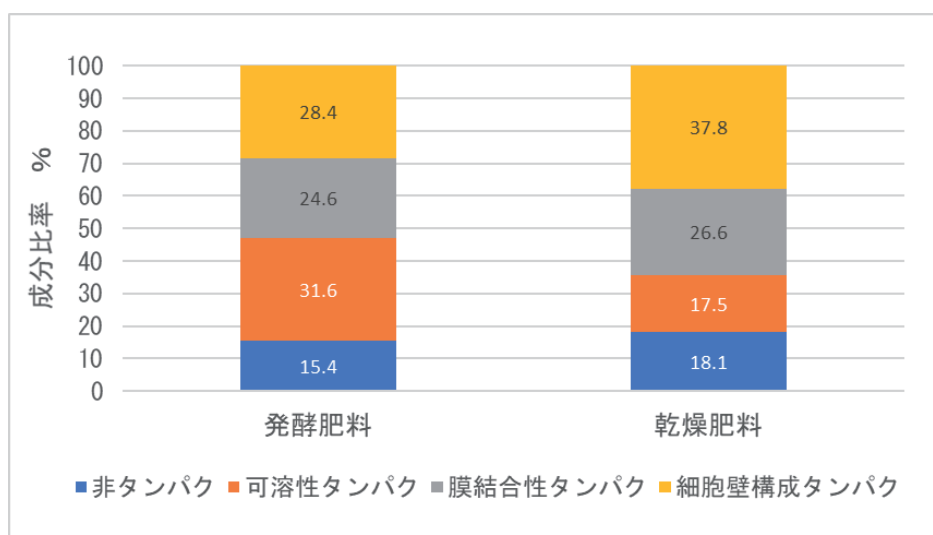


図 3－13 窒素分画法による発酵肥料と乾燥肥料の窒素成分比較

2) 無機化試験

肥料別の無機化率の推移を図 3－14 に示した。いずれも試験開始時点で 13～28%程度の無機態窒素が存在していた。JS 発酵汚泥肥料および JS 乾燥汚泥肥料は、共に最初の 5～10 日間で 25～30%が無機態化した。その後無機化はゆっくりと進行し 60 日で 45%となり、グラフの変化状況から 60 日以降も無機化の進行が予測された。比較対象とした牛ふん堆肥の無機化率は試験開始時の 25%から 1%に大きく低下した。窒素濃度が低く C/N の大きい牛ふん堆肥で有機分の分解に伴う窒素消費（有機態化）が発生したためと推測される。30 日以降でも無機化率は 10%と低い値であった。牛ふん堆肥は養分供給よりも土壌改良的働きを目的とする資材であることを示している。汚泥肥料では発酵肥料、および乾燥肥料に差は見られず、長期間にわたり無機化が進行する緩効性の肥料（有機質肥料）であることが確認された。窒素分画試験の結果では、発酵肥料が乾燥肥料に比べ無機化されやすい可溶性窒素や緩効性窒素分が大きいという結果であったが、無機化試験ではその傾向は見られなかった。今回の無機化試験は 30℃の高

温で実施（促進試験）したことが影響したと推察された。地温の低い冬季の栽培では両者に肥効の差が生じやすいが、地温の高い夏季の栽培ではその差は少ないと推測された。

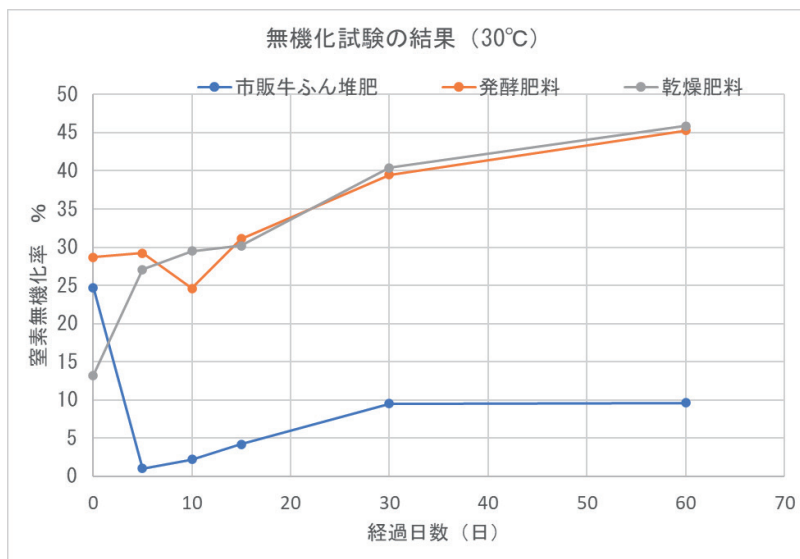


図3－14 肥料別の無機化率の推移

3) 野菜栽培試験

図3－15に、栽培試験におけるコマツナの発芽状況（播種7日目）と生育状況（28日目）を示す。また、表3－8に栽培試験の結果をまとめて示した。発酵肥料の地上部生体重量で対照区（化学肥料）と有意差が認められたが、その他の発芽率、草丈、SPAD値については発酵肥料、および乾燥肥料ともに有意な差は認められず、ほぼ同等の肥効があると推察された。無機化試験で汚泥肥料と大きな差が出た市販牛ふん堆肥でも生育試験では大きな差は認められなかった。これは無機化試験の培養温度（30℃）と生育試験の温度（20℃）の違い、および生育期間の短いコマツナでの試験であったことが要因と考えられる。



図3－15 コマツナの発芽状況（播種7日目）と生育状況（28日目）

表 3-8 栽培試験の結果

平均±標準偏差

	3日目		28日目					
	発芽率		草丈		地上部生体重量		SPAD値	
	(%)	判定	(cm)	判定	(g/株)	判定	(-)	判定
対照区（化学肥料）	99.0±2.2	a	14.0±1.1	a	34.4±5.4	b	55.2±2.4	a
発酵肥料	97.0±4.5	a	13.4±1.1	a	28.4±2.2	a	59.4±2.9	a
乾燥肥料	99.0±2.2	a	14.1±1.0	a	31.8±2.1	ab	56.9±1.6	a
市販牛ふん堆肥	96.0±4.2	a	13.3±0.8	a	30.8±2.0	ab	55.3±3.3	a

判定欄において、共通するアルファベットを含む試験区間（aとa、aとab等）では有意差なし、共通するアルファベットを含まない試験区間（aとb）では有意差ありと評価した（Tukey-Kramer test, $P<0.05$ ）

同じ下水汚泥原料から製造した発酵肥料と乾燥肥料の肥効特性について、窒素分画試験、無機化試験、コマツナを用いた栽培試験による比較を行った。窒素分画試験では、速効性窒素分の含有量について乾燥肥料が発酵肥料より 2 割程度小さいという結果がみられたが、無機化試験および栽培試験の結果では両者の肥効特性に大きな差はみられなかった。

（4）まとめ

① 下水汚泥肥料と他の有機質肥料の分解・肥効特性比較

AD 試験の結果からみた汚泥肥料とその他の有機質肥料における有機物分解特性、窒素およびリン酸の存在形態は以下のとおりである。

- 汚泥肥料中の有機分は高温発酵肥料を除いて 70～80%DS を占めた。また ADOM も 50～60%DS 存在し、発酵鶏ふん堆肥と概ね同等であった。
- 今回製造した下水汚泥肥料中の窒素含有量は 6%DS 以上であり、発酵鶏ふん堆肥（4%DS）より多く、高価な有機質肥料である油かすと概ね同等であった。しかし作物の生育に直接的に寄与する速効性（無機態）窒素、および緩効性窒素の存在率には汚泥肥料の製造方法で大きな差が認められた。分析方法に課題がある可能性も考えられるため再検証が必要である。
- 各肥料中のリン酸は有機物の分解特性とは関係なく、その大部分は速効性（可給態）であることが確認された。

② 汚泥の発酵肥料と乾燥肥料の肥効特性比較

今回製造した発酵肥料および乾燥肥料を対象とした肥効特性の比較結果は以下のとおりである。

- 窒素分画試験の結果、発酵肥料では非タンパク画分の窒素が 15.4%、可溶性タンパク画分の窒素が 31.6%であり両者を合わせた速効性窒素含有量が 47.0%を占めた。これに対し、乾燥肥料の速効性窒素の割合は 35.6%と発酵肥料に比べ 2 割程度低かった。これは、乾燥工程における熱風（130℃）によるタンパクの熱変性の影響と推察された。
- 無機化試験の結果、発酵肥料、および乾燥肥料とも最初の 5～10 日で全窒素の 25～30%が無機態となり、その後も無機化は徐々に進行し 60 日で 45%となった。発酵肥料と乾燥肥料に差は見られず、共に緩効性の肥料であることが確認された。

- 栽培試験の結果、発芽率、草丈、SPAD 値について発酵肥料、および乾燥肥料ともに有意な差は認められず、ほぼ同等の肥効があると推察された。

4. 検討結果の総括

4.1 本年度の成果

（1）下水汚泥資源エネルギー利活用技術

① 下水汚泥資源エネルギー利活用技術の開発

前年度に引き続き、下水汚泥資源のエネルギー利活用の普及拡大を目的として、以下の共同研究を継続し、共同研究を完了した。

➤ 水熱炭化を用いたカーボンニュートラルの達成に向けた実証

（共同研究者：㈱神鋼環境ソリューション、共同研究期間：2023 年 10 月～2024 年 12 月）

本技術は脱水汚泥を湿式（液中）で炭化させ、炭化スラリーを固液分離して炭化物を製造する。本共同研究では、製造した炭化物が菌体りん酸肥料の基準値を満足すること、養生処理後の炭化物（燃料化物）が下水汚泥固形燃料に関する規格（JIS Z7312）を満足することを確認した。また、一定の処理規模以上における試算において、燃料化物の保有エネルギーが製造に要するエネルギーを上回ること、下水処理場からの温室効果ガス排出量を上回る排出量削減効果が得られること、従来の炭化技術と比較して低コストであることを確認した。また、これらの成果を踏まえ、本技術は 2025 年 3 月に JS 新技術 I 類「湿式炭化による下水汚泥利活用技術」として選定された。

（2）下水汚泥資源農業利活用技術

① 下水汚泥資源農業利活用技術の開発

下水汚泥資源の農業利活用の普及拡大を目的とした共同研究の公募を完了した。また、前年度に引き続き、国土交通省が実施する B-DASH プロジェクトの実規模実証「縦型密閉発酵槽による下水汚泥の肥料化技術に関する実証事業」について、縦型密閉発酵槽を用いて下水汚泥の肥料化・燃料化技術の実証実験を行った。脱水汚泥の定格処理量に対して、所定の重量比で発酵鶏糞および廃白土 15%を混合処理した結果、目標とする発酵日数で安定した発酵乾燥処理が可能であることを確認した。また、発酵乾燥汚泥は、肥料法に基づく肥料登録条件を十分に満足すること、燃料利用が可能な高位発熱量を有していること等を確認した。

② 下水汚泥肥料の製造および施肥効果等に係る基礎調査

植物の育成に資する下水汚泥肥料の成分の特徴を把握することを目的に、有機質肥料との比較、および発酵肥料と乾燥肥料の比較調査を実施した。下水汚泥肥料は、有機分および窒素含有量において発酵鶏ふん堆肥や油かすと同等またはそれ以上であることが確認された。ただし、速効性窒素の存在率には製造方法による差が見られたため、再検証が必要である。リン酸は大部分が速効性であった。発酵肥料と乾燥肥料の比較では、発酵肥料の方が速効性窒素の割合が高いものの、無機化試験および栽培試験の結果から、両者共に緩効性の肥料であり、ほぼ同等の肥効を持つことが示唆された。

4.2 今後の予定

1.2 節に記載の開発項目について、次年度の実施予定は以下のとおりである。

（1）下水汚泥資源エネルギー利活用技術

- 下水道資源の有効利用に係る基礎調査：アンモニア等の下水道資源の有効利用に向けた情報収集等を実施する。

（2）下水汚泥資源農業利活用技術

- 下水汚泥資源農業利活用技術の開発：今年度に引き続き、B・DASH プロジェクトの実証研究を行う。
- 下水汚泥肥料の製造および施肥効果等に係る基礎調査：技術開発実験センターにおいて下水汚泥肥料を製造し、消化汚泥を対象とした低コスト肥料製造に関する検討や、下水汚泥肥料の肥効率の調査等を行う。

謝辞

2.1 節に掲載した共同研究の遂行にあたり、実証プラントの設置および試験へのご協力をいただいた下水処理場の関係者各位に感謝の意を表します。

3.1 節に掲載した検討は、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究として(株)クボタ・UBE 三菱セメント(株)・中部エコテック(株)・日本下水道事業団・島根県共同研究体により実施されたものであることを明記すると共に、各機関の関係者各位に感謝の意を表します。

3.2 節に掲載した下水汚泥肥料の製造および施肥効果等に係る基礎調査で試験試料の採取等に多大なご協力をいただいた下水処理場の関係職員各位に感謝の意を表します。

最後に、本報で紹介した共同研究の関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省：食糧安全保障強化政策大綱，2022.
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/attach/pdf/anteikyokyukiban-4.pdf>
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局上下水道企画課：脱炭素化／資源・エネルギー利用，2024.
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000124.html
- 3) 田中裕大，隅晃彦，佐藤朋弘，宮本博司，熊越瑛，島田正夫，三宅晴男：湿式炭化による下水汚泥利活用技術の開発と実証，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.157-159，2025.
- 4) 永江信也，松井寛幸，武内晴彦，立道隆幸，熊越瑛，島田正夫，田中亮一，芦村正憲，竹内和敏，青葉隆仁：縦型密閉発酵槽による下水汚泥の肥料化技術に関する実証研究，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.142-144，2025.
- 5) 清和肥料工業：有機質肥料講座 植物油かす類の肥効（無機化）特性.
<https://www.shk-net.co.jp/seminar/ofsl-04/>.
- 6) （公財）日本下水道新技術機構：下水由来肥料の利活用マニュアル，pp.277-280，2019.
- 7) 日本土壌協会：堆肥等有機物分析法（2010 年版），pp.35-52，2010.
- 8) 古賀伸久：酸性デタージェント可溶有機態窒素含有量を用いた有機質資材窒素肥効見える化の取り組み，農業と科学，No.754，pp.6-9，2023.
- 9) 植物栄養実験法編集委員会編：植物栄養実験法，博友社，pp.188-215，1990.
- 10) 日本土壌環境学会：土壌環境分析法，pp.255-259，1997.
- 11) 農林水産消費安全技術センター：植物に対する害に関する栽培試験の方法・解説，2022.

Ⅱ－３ 下水処理場における ICT・AI 活用技術の開発

Ⅱ-3 下水処理場における ICT・AI 活用技術の開発

山本明広、村岡正季、小柴卓也、高田祥暉、三宅晴男、糸川浩紀

1. 開発課題の概要

本開発課題では、下水処理場における水処理・汚泥処理の運転管理の効率化・高度化や設備の保全管理の効率化等に資する ICT・AI*活用技術について、新技術の開発・実用化や、速やかな普及展開に向けた取り組みを行う。

1.1 背景および目的

全国の下水处理場では、施設・設備の老朽化が進んでおり、下水道サービスを提供しながらこれらの点検・調査、修繕・改築を計画的かつ効率的に進める必要がある。また、下水処理場の運転管理に対しては、公共用水域の水質保全といった基本的役割に加えて、放流水質と消費エネルギーのバランスを考慮した運転や、地域によっては栄養塩類（窒素、リン）の能動的運転管理が求められる等、更なる高度化が求められるようになっている。

しかし、人口減少社会の到来により、使用料収入の減少による経営環境の悪化、施設管理や運転管理に携わる熟練技術者の減少等、下水道の持続的かつ安定的な事業運営が将来的に困難になることが懸念されている。「人」、「モノ」、「カネ」の限られたリソースを有効活用するためにも、下水道施設の管理や下水処理を効率化・高度化する技術の開発が必要である。

近年、このような課題への解決策として、ICT や AI といったデジタル技術が注目され、国内外で活発な研究・技術開発が行われている。JS においても、持続的な下水道の事業運営に向けた課題へのソリューションとして、デジタル技術を活用する「ICT・AI 活用技術」の開発を継続して行ってきた¹⁾。

本開発課題では、下水処理場の運転管理の効率化・高度化に資する新たな ICT・AI 活用技術の開発・実用化を進めると共に、過去に開発されたものを含めた下水処理場における AI 活用技術について、技術評価や活用マニュアルの作成等、速やかな普及展開に向けた取り組みを行う。

1.2 開発項目

本開発課題では、以下の 3 つの開発項目について技術開発を行う。

（1）AI による水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術

下水処理場の運転管理では、栄養塩類の能動的運転管理に代表されるように放流水質に対する要求水準が多様化している一方で、水処理・汚泥処理での更なる省エネ化等、より一層の効率化・高度化が求められるようになっている。しかし、そこで重要な役割を担う熟練技術者は減少しており、運転管理に係るノウハウ等の技術継承すら困難となることが懸念されている。

* ICT: 情報通信技術 (Information and Communication Technology)、AI: 人工知能 (Artificial Intelligence)。

近年、水処理の運転管理を中心に AI を活用する技術の開発が活発化しており、熟練技術者による運転を学習した AI による運転ガイダンスや自動制御等が、前述の課題への一つの解決策になると期待されている。

そこで本開発項目では、水処理・汚泥処理の運転ガイダンス、自動制御、性能予測等、下水処理場の運転管理支援を行う AI 活用技術について、計画期間内の新技術の開発・実用化を目標に調査研究および開発を行う。共同研究等による新たな技術の開発に加えて、研究成果の体系的整理や技術評価を行う。

① AI 活用手法の開発動向調査

国内外の文献調査や民間企業を対象としたヒアリング調査等により、下水道分野への適用が期待できる AI を活用した技術・手法について、開発動向を把握する。

② 能動的運転管理の実態調査

栄養塩類の能動的運転管理を実施・試行中の下水処理場を対象に、同運転管理の実施状況・方法、課題等の実態を調査する。

③ AI を活用した水処理・汚泥処理の支援・制御技術の開発

AI を活用した水処理・汚泥処理の運転管理支援や水処理の性能等の予測を行う技術について、公募型共同研究等による開発を行う。また、過年度から実施している民間企業との共同研究により AI 活用技術の早期の実用化を図る。

④ パイロットプラントを用いた AI 水処理自動制御実験

パイロット規模の活性汚泥法の実験プラントにおいて AI による自動制御運転を試行し、AI を用いた水処理の自動制御の実現可能性を検証すると共に、実用化に向けた課題等を見出す。

⑤ AI 活用技術の体系化と技術評価

得られた研究成果を基に、AI 活用技術を体系的に整理すると共に、普及促進に向けた技術評価を行う。

（2）ICT・AI による設備劣化予測・異常診断技術

下水処理場の機械・電気設備は、標準耐用年数を超えても継続使用される場合が多く、老朽化による設備の不具合や故障の発生リスクが増大している。これらのリスクを低減しながら下水処理機能を維持するため、予防保全型の維持管理を行う必要があるが、施設・設備の点検に係る労力やコストが大きいことが課題として挙げられる。このような予防保全型の維持管理を効率化するため、これまでに下水処理場内の施設・設備の劣化予測や異常診断を行う技術開発が進められているが、これらの技術の普及展開のためには、最新の開発動向や導入に向けた課題を把握し、技術の活用方法を検討することが必要である。

そこで本開発項目では、ICT・AI を活用した設備劣化予測・異常診断技術について、活用方法のマニュアル化や技術性能確認のためのデータライブラリの構築を目標に、開発動向調査、設備劣化データの集約・ライブラリ化を行う。

① 設備の劣化予測・異常診断技術の開発動向調査

国内外の文献調査や設備メーカーへのヒアリング等により、ICT・AI による設備の劣化予測・異常診断技術の開発動向や知見を蓄積する。

② 設備劣化データの集約・ライブラリ化

技術性能を確認するための設備のモニタリングデータ等を収集し、技術の性能評価方法等の共通化に向けてライブラリ化を図る。

③ ICT・AI を活用した設備の劣化予測・異常診断技術の活用方法のマニュアル化

前述の調査等により収集した知見や情報を体系的に整理し、維持管理における活用方法のマニュアル化を行う。

（3）ICT による広域監視・制御システム

下水道施設の効率的な管理手法として、管理拠点を設置して複数の下水処理場・ポンプ場を集中管理する広域監視が注目されている。しかし、施設毎に管理システムが異なるため、技術的に集約化が困難である等、解決すべき課題がある。そこで本開発項目では、複数の処理場・ポンプ場の広域管理を可能とする ICT による新たな広域監視・制御システムについて、国土交通省が実施する B-DASH プロジェクトの実規模実証を通して、システムの信頼性や建設・維持管理コストの縮減効果等について検証する。

① ICT の活用による下水道施設広域監視制御システムの開発（B-DASH）

B-DASH プロジェクトでの実規模実証等により広域監視・制御システムの技術的確立を図る。

1.3 本年度の実施内容

本年度は、1.2 節に記載の開発項目のうち、以下の 3 項目を実施した。

（1）AI による水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術

③ AI を活用した水処理・汚泥処理の支援・制御技術の開発（2.1 節）

④ パイロットプラントを用いた AI 水処理自動制御実験（2.2 節）

（2）ICT・AI による設備劣化予測・異常診断技術

① 設備の劣化予測・異常診断技術の開発動向調査（3.1 節）

（3）ICT による広域監視・制御システム

① ICT の活用による下水道施設広域監視制御システムの開発（4.1 節）

2. AI による水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術

2. 1 AI を活用した水処理・汚泥処理の支援・制御技術の開発

（1）検討の概要

本検討では、民間企業との共同研究等により、水処理・汚泥処理の運転の安定化や高度化（処理水質の高度化、能動的運転管理への対応等）、省エネ化等を可能とする、AI を活用した水処理・汚泥処理の運転支援および自動制御技術の開発を行う。

過年度は、前・基本計画期間（2017～2021 年度）より継続している水処理関連の 2 技術について共同研究を進め、うち 1 件を完了した。加えて、新たに「下水処理場の運転管理における AI 活用技術の開発」と題した共同研究の公募を開始し、1 件の新規共同研究に着手した。

本年度は、引き続き以下の 2 技術について共同研究による開発・実証を進め、うち 1 件（以下の②）を完了した。

① 単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術

新たな高度処理プロセス（単槽型硝化脱窒プロセス）に対して ICT および AI を活用した自動制御（曝気風量および送風機吐出圧力の制御）を組み合わせた高度処理技術について、実規模の実証実験を行う。本検討は、メタウォーター㈱、JS、町田市の 3 者による共同研究体として実施するもので、2019・2020 年度の B-DASH プロジェクト（実規模実証）において町田市成瀬クリーンセンターを実証フィールドとして処理性能等を実証した後、2021 年度より、上記の共同研究体による自主研究として継続的に長期間の実証実験を行っているものである。

② AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術

既存のアンモニア制御技術「アンモニア計による送気量フィードフォワード制御技術」（2020 年 2 月に JS 新技術 I 類に選定；以下、「NH₄-FF+FB 制御技術」と表記）に対して、AI による処理水質予測（以下、「処理水質予測 AI」と表記）を組み合わせることで、より積極的な曝気風量の削減を可能とする「AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術」の開発を行う。本検討は、JS、日新電機㈱による共同研究として、実下水処理場をフィールドに 2024 年 1 月より開始し、同年 12 月に完了した。

（2）検討方法

① 単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術

本技術は、ICT および AI を活用した自動制御と独自の高度処理プロセスを組み合わせることで、従来の高度処理法（A2O 法）と比較して、同等の処理水質を達成しながら、反応タンク HRT の短縮（処理能力増強）、消費電力量の削減（省エネ化）、維持管理負担の軽減を図る新たな高度処理技術である。「統合演算制御システム」、「単槽型硝化脱窒プロセス」、「負荷変動追従型送風ユニット」という 3 つの要素技術から構成され（図 2-1）、統合演算制御システムによる曝気風量の自動制御を前提とした単槽型硝化脱窒プロセスに対して、負荷変動追従型送風ユニットによる送風機吐出圧力の自動制御により更なる省エネ化を図る（技術の詳細については後述の「導入ガイドライン(案)」²⁾を参照）。このうち、曝気風量の自動制御に際して統合演算制御システムが行う(a)目標風量の演算、(b)制御パラメータの自動チューニング、という 2 つの

機能において、それぞれ統計的機械学習、最適化理論（進化計算法）という AI 手法が使用されている³⁾。

本検討では、2019 年度の B-DASH プロジェクトにおいて町田市成瀬クリーンセンターの 1 系列 4 池へ同技術を導入して実証施設とした上で、以降、同施設において実規模の実証実験を行っている。2019・2020 年度の B-DASH 実証研究の成果に基づき本技術の「導入ガイドライン(案)」²⁾が公表されているが、2021 年度以降も共同研究体による自主研究として、長期的な技術性能を確認すると共に、更なるコスト縮減、窒素除去率の向上、反応タンクにおける本技術固有の処理メカニズムの解明や一酸化二窒素（ N_2O ）排出量の把握、その他本技術の適用先拡大を目的とした実証実験を継続している^{4)・10)}。

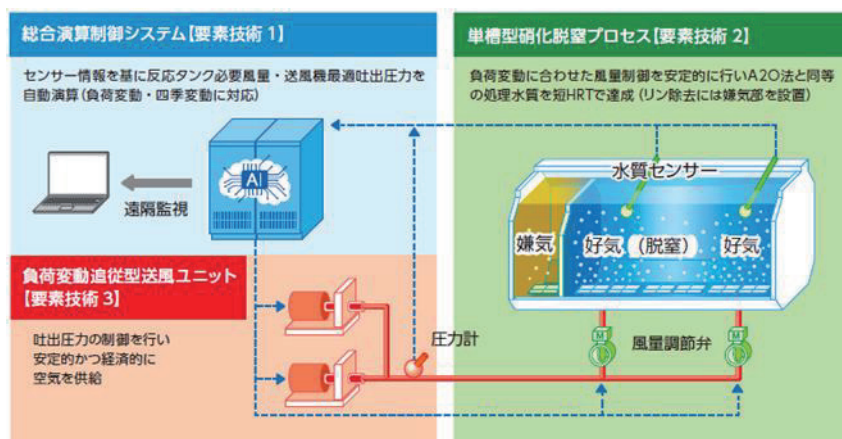


図2-1 単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術の概要

本年度は、過年度から引き続き実証施設において、本技術の導入コスト縮減方策の一環として複数池の一括制御方法の検証を行うと共に、本技術における N_2O 排出量の調査を進めた。更に、本技術の曝気風量制御手法をアンモニア制御へ展開するための検討を新たに開始した。加えて、ステップ流入を付加することによる窒素除去性能向上の可能性について、過年度に開始した小型実験装置を用いた検証を進めた。

② AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術

本技術は、既に JS 新技術 I 類に選定されている $\text{NH}_4\text{-FF+FB}$ 制御技術¹¹⁾（図2-2）に対して、処理水質予測 AI を組み合わせることで、同制御における目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を従来よりも引き上げる際のリスクを軽減し、更なる曝気風量の削減を図るものである（図2-3）。処理水質予測 AI は、図2-4に示すとおり、監視制御装置に集約される計測データを用いて処理水の COD（ COD_{Mn} ）濃度の予測を行うもので、目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の引き上げに伴う処理水の有機物濃度の上昇リスクを事前に検知する役割を担う。そのための AI 手法として長短期記憶（LSTM：Long Short-Term Memory）を用いており、過去の計測データを用いて生成する予測モデルを用いて、10 分毎の計測データから 6 時間程度先の処理水 COD 濃度を予測する。なお、この COD 濃度の予測結果は運転者に提示されるのみのガイダンス用途であり、これが $\text{NH}_4\text{-FF+FB}$ 制御の演算に取り込まれるわけではない。

加えて、同制御技術の導入コストを削減することを目的に、本技術を導入した反応タンク（代表池）で計測される $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度から、他の反応タンク（参照池）を制御する複数池一括制御の手法についても、要素技術の一つとして検討対象に加える（図2-3）。

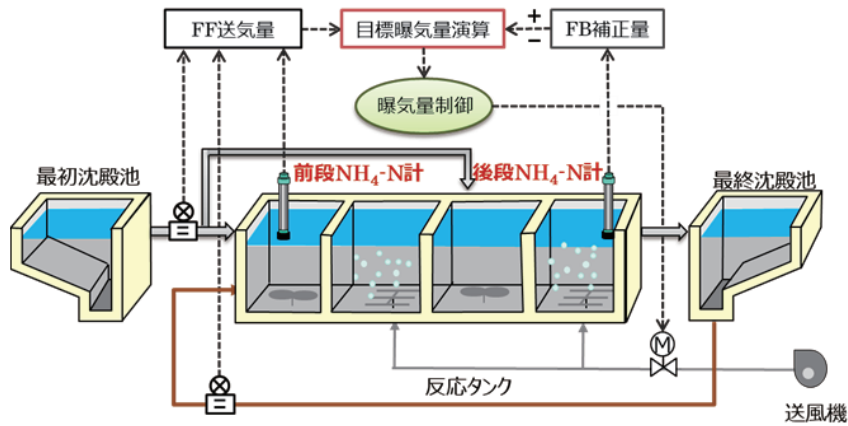


図2-2 アンモニア計による送気量フィードフォワード制御技術 (NH₄-FF+FB 制御技術) の制御フロー

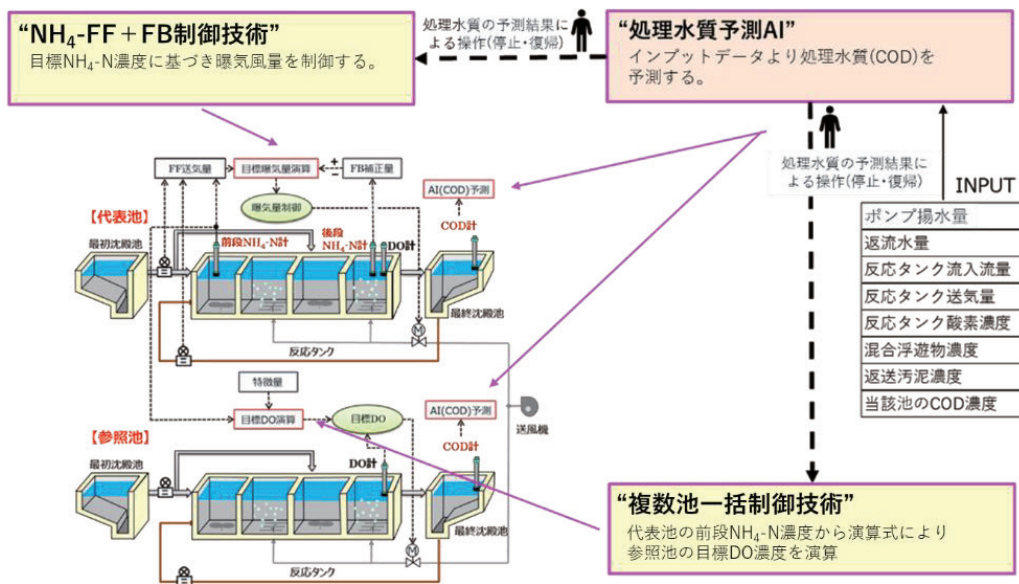


図2-3 AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術の概要

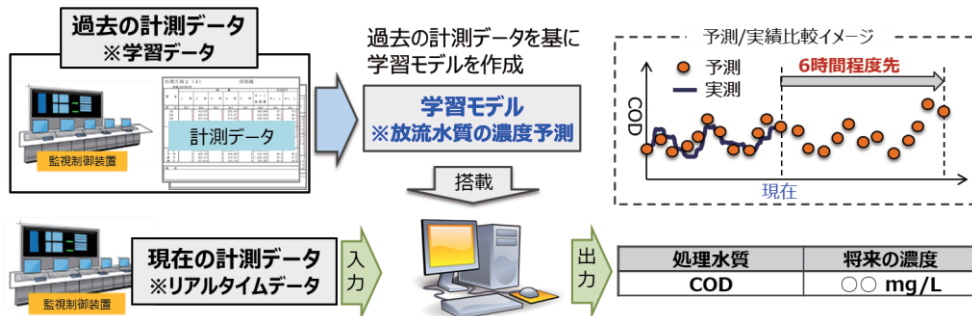


図2-4 処理水質予測 AI における予測のイメージ

本検討では、下水処理場の反応タンク 2 池（処理能力 2,800m³/(d・池)、ステップ流入式多段硝化脱窒法（2 段））を使用し、1 池を実験系、隣接する 1 池を対照系として実証実験を行う。両池に NH₄-FF+FB 制御技術を実装し、実験系は目標 NH₄-N 濃度を変更した複数の条件で、対照系は目標 NH₄-N 濃度を一定とした条件で NH₄-FF+FB 制御の運転を行い、目標 NH₄-N 濃

度の引き上げによる曝気風量の削減効果や処理水質への影響を確認する。併せて、処理水質予測 AI の予測精度や目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の引き上げに伴うリスク軽減の効果等を評価する。複数池一括制御に関する検討では、上述の実験系 1 池を代表池、対照系 1 池を参照池として 2 池の一括制御運転を行い、参照池における制御性能等を検証する。

（3）検討結果

① 単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術

本検討については、長期間の自主研究における中間年度であることから、検討項目毎の結果の概要のみを掲載し、データについては非掲載とする。なお、以下に記す検討項目のうち、アンモニア制御および窒素除去率向上（ステップ流入の導入）に係る検討については、独立した報告書として取り纏め、国土技術政策総合研究所のホームページにおいて「令和 6 年度自主研究成果資料」¹²⁾として公表されている。

- 複数池一括制御方法の検討⁵⁾：本技術に係るコスト削減に向けた検討として、複数池の水処理施設において、1 池のみに水質センサーを設置して曝気風量制御を行う「代表池」とし、他の池については代表池の風量演算結果に補正を加えて制御を行う「展開池」とすることで導入コストの削減を図る複数池一括制御について、2021 年度から継続している検討を進めた。本年度は、代表池×1 池、展開池×3 池の組み合わせにおいて、過年度の検討により見出した補正方法を用いた 3 池各々の一括制御を長期間（2024 年 5 月～2025 年 2 月のうち計 220 日間）実施した。代表池と展開池の水質センサー計測値（反応タンク中間の $\text{NO}_x\text{-N}$ 濃度、同末端の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度）の差は平均 1mg/L 以内で、複数池一括制御が十分に機能することを確認した。
- N_2O 排出量の調査⁹⁾：本技術の排出量を把握するために、過年度から引き続き実証施設において N_2O 排出量の調査を実施した。2024 年 7～12 月にかけて計 6 回の調査を行った結果、 N_2O 排出係数は全調査回の平均値で 13.8mg $\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ と、過年度の調査結果と同様に従来の高度処理法（11.7mg $\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ ）と比較して明確に高い傾向は認められなかった。また、反応タンク内の各ゾーンにおける N_2O 排出量と溶存 N_2O 濃度を測定し、ゾーン毎の N_2O の収支を推定した結果、前半・後半の各好気ゾーンでの N_2O 排出量が大きく、その起源として各ゾーンでの生成が主要であると推定された。
- アンモニア制御の検証¹⁰⁾：本技術における AI を用いた曝気風量制御手法について、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 計のみを用いるアンモニア制御へ応用する可能性を検証するために、統合演算制御システムと反応タンク末端の $\text{NH}_4\text{-N}$ 計のみを用いた曝気風量制御を試行した。反応タンクの処理フローとして単槽型硝化脱窒プロセス、標準活性汚泥法（疑似嫌気好気運転）の 2 通りについて、反応タンク末端の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度（ $\text{NH}_4\text{-N}$ 計による計測値）の目標値を 6mg/L* とした曝気風量制御を各 2 週間程度実施した結果、両期間の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度計測値は平均

* 一般にアンモニア制御では処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の目標値が 1～2mg/L 程度に設定されることが多いが、本検討では、実施設を用いた検証であることから、反応タンクにおける脱窒量の減少に伴うアルカリ度減少・pH 低下のリスクを避けるため、高めの制御目標値を設定したものである。これをアンモニア制御技術として確立するためには $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の目標値を更に引き下げた検証が必要と考えるが、本年度の実験結果自体は、いわゆる能動的運転管理において放流水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を意図的に引き上げるための方策として、本アンモニア制御が活用できる可能性を示すものとも言える。

5.9mg/L と、目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に追従させるアンモニア制御が可能であることが確認された。

- 窒素除去率向上に向けた検討：単槽型硝化脱窒プロセスにおいて、ステップ流入を採り入れることで窒素除去率を更に向上させる可能性を検証するために、実証施設に併設したベンチスケールの小型実験装置を用いて、ステップ流入の有無が窒素除去性能に与える影響を確認した。原水の半量を脱窒ゾーンへステップ流入させた系では、ステップ流入を行わない系と比較して、反応タンクにおける見かけ脱窒量（総無機性窒素の減少量）が増加することが確認され、ステップ流入により窒素除去性能を向上できる可能性が示された。

② AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術

処理水質予測 AI について、13 ヶ月分（2023 年 4 月 1 日～2024 年 4 月 30 日）の計測データ（流入水量、MLSS 濃度、処理水 COD 濃度を含む 6 項目）を学習データとして AI モデルを生成した。本モデルによる処理水 COD 濃度の予測結果の例として、2023 年 7 月 27～29 日における予測値を実績値と併せて図 2－5 に示す。これは学習データ期間内での予測であるが、予測値は実用上十分な精度で実績値をトレースできている。ただし、学習データ期間外のデータを用いた検証や、本技術の本来の目的である COD 濃度が上昇する事象を取り込んだモデルの生成は、本検討の中では実施できなかった。このため、実際に処理水質予測 AI をリアルタイムで援用しながら目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を引き上げる $\text{NH}_4\text{-FF+FB}$ 制御の実証運転についても実施できていない。

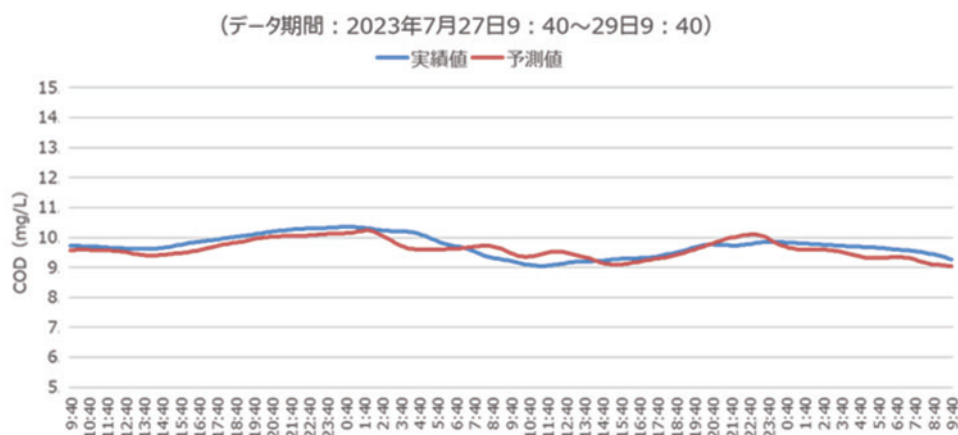


図 2－5 処理水 COD_{Mn} 濃度の予測値と実測値の比較（2023 年 7 月 27～29 日；学習データ期間内の予測である点に注意）

$\text{NH}_4\text{-FF+FB}$ 制御において目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を従前より引き上げる可能性を検証するために、同制御を実装した反応タンク 1 池(実験系)を用いて、目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を 1.5mg/L から 4.0mg/L まで、2 週間毎に 0.5mg/L ピッチで段階的に引き上げる運転を試みた。本期間を通して、隣接する 1 池(対照系)では目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を 1.0mg/L に固定した状態で同制御の運転を行った。実験系では、目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の引き上げ後、後段 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度（反応タンク末端の $\text{NH}_4\text{-N}$ 計による計測値）が速やかに追従することが確認できた（データ非掲載）。これに伴い曝気風量が減少することも確認されたが（データ非掲載）、目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が 3.0mg/L に至った段階で曝気風量が設備的な下限に達する時間帯が長くなったため、これ以上の目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の引き

上げは実施しなかった。目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を引き上げた期間において、実験系の処理水 BOD 濃度が対照系より高くなる傾向が見られたが、顕著な悪化は生じなかった（データ非掲載）。本結果より、目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を $2\sim 3\text{mg/L}$ へと引き上げた制御が可能である点、それにより曝気風量が削減できる可能性が示されたと言えるが、本検討の中では、目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の条件数および 1 条件当たりの実験期間のいずれの観点からも、実装のための十分なデータを取得するには至らなかった。

本技術における複数池一括制御の手法として、代表池において $\text{NH}_4\text{-FF+FB}$ 制御で運転した期間の計測データを用いて、後段 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度から反応タンク末端の DO 濃度を推定する予測式を作成し、参照池ではこれ为目标値とした DO 制御を行う方法を試行した。参照池の後段 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が代表池の目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と同等になることを目標に短期間の運転を実施したところ、参照池の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が大きく変動する結果となり（データ非掲載）、検討した方法では実用的な複数池一括制御が困難であると結論付けた。

（4）まとめ

① 単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術

本技術のコスト縮減に向けた検討として複数池一括制御に係る実証を進め、過年度の検討により見出した補正方法を用いた一括制御により、複数池一括制御が長期間にわたって十分に機能することを確認した。また、反応タンクにおける N_2O 排出量について、排出係数等の推定結果を蓄積すると共に、反応タンクにおける N_2O の生成・排出場所として好気ゾーンが重要であることを示す知見を得た。加えて、本技術の曝気風量制御手法をアンモニア制御に応用する可能性、ステップ流入の導入により本技術の窒素除去率を向上できる可能性をそれぞれ示した。

次年度は、複数池一括制御の検証を更に進め実用的な手法としての確立を図ると共に、本技術における処理メカニズムの解明、 N_2O 生成・排出の特性および抑制方法、アンモニア制御への応用、ステップ流入による処理水質向上方策等について引き続きデータ・知見の蓄積を図る予定である。

② AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術

2024 年 1 月に開始した共同研究を同年 12 月に終了した。処理水質予測 AI について、処理水の COD 濃度を予測可能な AI モデルを生成できたものの、予測精度を十分に検証するには至らなかった。 $\text{NH}_4\text{-FF+FB}$ 制御について、目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を 3mg/L まで引き上げた制御が可能である点、それにより曝気風量の低減が見込める点を示したが、多様な目標濃度において十分な実証データを取得することはできなかった。複数池一括制御については、検討した手法では良好に機能しない点が判明し実証運転を断念した。

2.2 パイロットプラントを用いた AI 水処理自動制御実験

（1）検討の概要

下水処理（水処理）の運転管理における AI の活用方法として、ガイダンスや状態診断・異常検知だけでなく、AI を用いた自動制御についても検討されるようになってきている。しかし国内では、AI の出力を直接的に運転操作量に反映するような自動制御の試みはほとんど行われていない。そこで本検討では、パイロット規模の活性汚泥法の実験プラントを用いて、AI による曝気風量の自動制御（AI 自動制御）の運転を試行し、AI 自動制御の性能や特有の挙動等について実験的に確認する。具体的には、2018・2019 年度の B-DASH プロジェクト（FS 調査）において性能を検証した AI（ランダムフォレスト；後述）を用いた運転操作因子の予測・ガイダンス技術を活用し、本 AI が出力する予測値に基づく曝気風量の自動制御運転を行う。これにより、AI 自動制御の適用可能性を検証すると共に、実用化に向けた課題等を見いだすことを目的とする。なお、本検討は、前・基本計画期間（2020 年度）から継続して実施しており、2024 年度にて完了したものである。

過年度の検討では、ランダムフォレストを用いた曝気風量の自動制御が現実的に機能することを確認すると共に、AI の学習に供する教師データ量の違いや教師データに含まれない未学習条件が AI 自動制御の性能に与える影響度合い等について検討した^{13)・15)}。

本年度も引き続き、未学習条件での運用や AI モデルの生成条件が AI 自動制御の性能や挙動に及ぼす影響について、パイロット規模の実験プラントを用いて確認した。

（2）検討方法

① AI 技術および実験プラント

本検討で使用する AI 技術は、2018・2019 年度の B-DASH プロジェクト（FS 調査）「AI を活用した下水処理運転管理支援技術に関する調査事業」において性能等を確認した水処理のガイダンス技術「水処理制御支援技術」¹⁶⁾である。本 AI 技術は、過去の運転データを教師データとして生成した AI モデルにより、リアルタイムの計測データ（入力値）に基づいて運転操作量（例：曝気風量、余剰汚泥引抜量）の予測値（ガイダンス値）を出力するものである。AI 手法としてランダムフォレスト（以下、「RF」と略記）を使用しているが、これは、複数の決定木と呼ばれるツリー状のデータ分割構造を自動生成し、各々の決定木が出力した値を統合（平均化等）して AI モデルの出力値とする手法で、機械学習の一種である。各決定木の出力は、教師データに基づきデータの場合分け構造の各々の中で定式化された回帰式により行われる。決定木の本数や階層数はハイパーパラメータとして利用者が設定する。

本検討では、同 AI 技術が出力する予測値を直接的に操作量とする自動制御運転を試行することで、AI 自動制御の適用可能性を検証している。具体的には、パイロット規模の実験プラントにおいて、曝気風量を予測する AI モデルを構築した上で、これを用いた曝気風量の自動制御運転を行う、という実験を様々な条件で実施している。

使用した実験プラントは、実下水（分流式、最初沈殿池越流水）を原水とする処理能力 50m³/d の活性汚泥法のパイロットプラントである。処理方式は標準活性汚泥法とし、等容量の 4 区画に分割された反応タンクの第 1 区画を嫌気条件とする嫌気－好気運転で運用した。

本実験プラントにおいて計器により自動計測される 10 項目（流入水量、総曝気風量、第 4 区画の DO 濃度および MLSS 濃度、返送汚泥の流量および濃度、引抜汚泥の流量および濃度、積

算引抜汚泥量、電力使用量）を 5 分間隔で取得したデータを入力値とし、5 分後の曝気風量の値を出力する AI モデルを生成した。RF のパラメータである決定木の本数および階層数は、過年度の検討に基づきそれぞれ 100 本、10 階層とした。AI モデルの出力値は、これら 100 本の決定木が出力した値の平均である。以降に示すモデル生成において使用した教師データは、いずれも同プラントを DO 一定制御で運転した期間のものである。すなわち、本検討で実施した AI 自動制御は、DO 一定制御における曝気風量を模倣する動作を行うもの、ということになる。なお、AI 自動制御の運転では、上述の AI モデルにより 5 分後の曝気風量の予測値を出力し、これを設定風量として出力時点から 5 分間固定するという制御を行った。

② 未学習条件が AI 自動制御の性能に与える影響

AI モデルの生成に用いた教師データの範囲から外れる「未学習条件」において、AI 自動制御がどのような動作となるのか、どこまで機能するのか等を把握することは、AI 自動制御技術の実用化や運用方法を検討する上で重要である。過年度の実験では、流入水量を一定とした条件にて取得した教師データに対して、水量を減少させる方向で時間変動を与えた条件を未学習条件として AI 自動制御運転を行ったが、制御の性能や挙動に対する明確な影響は確認されなかった。そこで本年度は、曝気風量に与える影響がより大きいと考えられる反応タンクの MLSS 濃度を対象に、教師データに含まれる範囲よりも高濃度となる運転操作を意図的に実施した状態で AI 自動制御運転を行った。MLSS 濃度が未学習条件に至る前後の過程で、AI が出力する曝気風量の挙動や DO 濃度の変化を確認した。

実験条件を表 2-1 に示す。教師データは、DO 一定制御（目標 DO 濃度：1.0mg/L）で運転した 14 日間分の計測データ（10 項目×5 分間隔で各項目について 4,032 データ）とし、これを用いて AI モデルを生成した。同表に示したとおり、教師データ取得用の運転期間は 19 日間であるが、このうち計測値に異常なドリフトが確認された 5 日分を除外したものである。AI 自動制御運転は、教師データの取得が完了した翌日の午後から開始した。まず、教師データ取得時と同一の運転条件にて AI 自動制御運転を約 6 日間行った（RunA）。次いで、AI 自動制御運転は継続した状態で、反応タンクの MLSS 濃度を引き上げるために余剰汚泥引抜量を段階的に引き下げながら約 7 日間の運転を実施した（RunB）。

表 2-1 実験条件（未学習条件が AI 自動制御の性能に与える影響の確認）

項目		条件
流入水量 (教師データ/AI 自動制御運転共通)		41.1m ³ /d、 時間変動あり(0.020～0.035m ³ /min)
教師データ	曝気風量制御方式	DO 一定制御(目標 DO 濃度: 1.0mg/L)
	データ項目数および取得間隔	自動計測の 10 項目を 5 分間隔で取得
	データ期間	2024/9/21～10/9 ただし、9/27～29、10/6～7 を除く 14 日間分
AI 自動制御運転	実験 期間	RunA(学習条件) 2024/10/10 13:20～10/16 9:15(約 6 日間)
		RunB(未学習条件) 2024/10/16 14:55～10/23 13:00(約 7 日間) 余剰汚泥引抜量を 0.630m ³ /d から 0.210m ³ /d(10/16～)、0.105m ³ /d(10/18～)へと 段階的に減少

③ 教師データ量の違いが AI 自動制御の性能に与える影響

教師データ量（データ項目数、項目当たりのデータ数等）の違いが、AI 自動制御の性能等に与える影響を把握することは、実運用におけるモデルの学習条件や更新頻度を検討する上で重要である。過年度の検討では、項目当たりのデータ数が極端に異なる教師データより生成した複数の AI モデルを用いた自動制御運転により、データ数の多さが制御性能の向上に必ずしもつながらないとの結論を得た¹⁴⁾。本年度は、教師データの項目数の違いが AI 自動制御の性能に与える影響について検討した。

具体的には、これまでの実験において教師データの項目数として使用してきた 10 項目から、意図的にデータ項目数を減らした教師データのセットを複数作成し、各々を使用して生成した AI モデルを用いて実験プラントの自動制御運転を行うことで、教師データの項目数が制御の性能や挙動に与える影響を確認した。

これに先立ち、実験に供する教師データの項目数や除外する項目を選定するために、同実験プラントにおいて取得済みの運転データを用いて事前検討を行った。まず、実験プラントを DO 一定制御にて運転した 2024 年 9 月 19 日～30 日（異常値が含まれる 9 月 27 日～29 日を除く 9 日間）の運転データより全 10 項目を使用して AI モデルを生成し、各データ項目の「重要度」を算出した（表 2-2）。ここで「重要度（feature importance）」は、RF モデルによる予測結果に対して各データ項目が有する相対的な影響度合いを示すもので、学習済みの個々の RF モデルに対して計算することができる指標である。

表 2-2 各データ項目の重要度

データ項目	重要度
曝気風量	0.961
DO 濃度	0.020
MLSS 濃度	0.007
返送汚泥濃度	0.005
返送汚泥流量	0.003
流入流量	0.003
実験設備電力量	0.001
引抜汚泥濃度	0.000
引抜汚泥量	0.000
引抜汚泥流量	0.000

次いで、同表に示した 10 項目のうち、重要度の値が低いものから順に除外した 2～10 項目から成る 9 種類の教師データ、および制御対象である曝気風量を除外した 9 項目から成る教師データを用いて計 10 種類の AI モデルを生成した。2024 年 10 月 1 日の 1 日分（5 分間隔×24hr）の運転データを使用して曝気風量を予測させ、同期間の曝気風量の実績に対する予測誤差率（MAPE 値）を算出した（図 2-6）。データ項目数が 4 の場合に MAPE 値が最小となり、これより項目数を減らすと MAPE 値が増大する傾向が見られた。一方、項目数を 5 以上とした場合には MAPE 値に大きな相違は生じなかった。また、制御対象であり重要度が最も高い曝気風量を教師データに含めない場合には、他と比較して MAPE 値が極端に大きくなった。

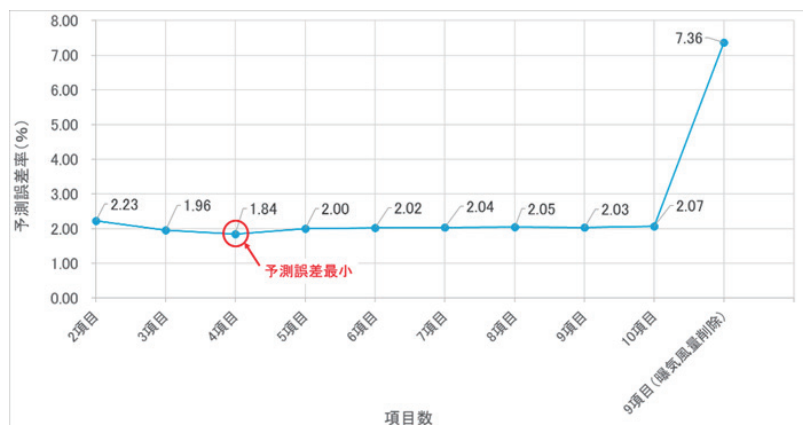


図2-6 教師データ(データ項目数)の違いによる予測誤差率(MAPE 値)の変化

上述の机上検討は、DO 一定制御による運転実績に対して各 AI モデルによる予測誤差を確認したものであり、各 AI モデルによる制御性能を直接的に評価したものではないものの、これを参考として本実験で対象とする教師データの項目数を設定した。すなわち、(a)従前と同一の全 10 項目 (Run1) に加えて、(b)図 2-6 において MAPE 値が最小となった 4 項目 (曝気風量、DO 濃度、MLSS 濃度、返送汚泥濃度; Run2)、(c)同図において MAPE 値が最大となった曝気風量を除外した 9 項目 (Run3) について、各々を教師データとして 3 通りの AI モデルを生成し、各々を用いて実際に実験プラントの曝気風量の自動制御運転を行うこととした。

本実験の条件を表 2-3 に示す。上述の 3 つの AI モデルを使用した自動制御運転 (Run1～3) をそれぞれ 7 日間ずつ、連続した期間に実施した。

表 2-3 実験条件(教師データのデータ項目数の違いが AI 自動制御の性能に与える影響の確認)

項目			条件
流入水量 (教師データ/AI 自動制御運転共通)			41.1m ³ /d、 時間変動あり(0.020～0.035m ³ /min)
教師データ	曝気風量制御方式		DO 一定制御(目標 DO 濃度: 1.0mg/L)
	データ項目数および取得間隔		自動計測の 10 項目を 5 分間隔で取得
	データ期間		2024/10/24～11/11 ただし、10/30～31、11/2～4 を除く 14 日間分
AI モデル	RF パラメータ		決定木本数: 100 本、階層数: 10 階層
	出力方法		各決定木の出力値の平均
AI 自動制御 運転	実験 期間	Run1(10 項目)	2024/11/12 13:00～11/19 13:00(7 日間)
		Run2(4 項目)	2024/11/19 13:00～11/26 13:00(7 日間)
		Run3 (9 項目、曝気風量含まず)	2024/11/26 13:00～12/3 13:00(7 日間)

(3) 検討結果

① 未学習条件が AI 自動制御の性能に与える影響^{17),18)}

RunA、B における AI 自動制御運転期間中の MLSS 濃度、DO 濃度、曝気風量の推移を図 2-7 に示す。教師データにおける MLSS 濃度の範囲は 1,263～1,681mg/L であるが、RunA (学習条件) では、一時的に 1,681mg/L を超えることがあったものの期間の大半において MLSS 濃度は教師データの範囲内であった。一方、RunB (未学習条件) では、期間当初の 10 月 16 日

に MLSS 濃度を増加させるために余剰汚泥引抜量を引き下げた（ $0.630 \rightarrow 0.210 \text{ m}^3/\text{d}$ ）ところ、2 日後の 10 月 18 日午後から教師データの最大濃度を超えるようになった。同日以降、余剰汚泥引抜量を更に引き下げる操作（ $0.210 \rightarrow 0.105 \text{ m}^3/\text{d}$ ）を行った結果、期間を通して MLSS 濃度は上昇を続け、1 日平均の MLSS 濃度は $1,851 \text{ mg/L}$ に達した。そこで、以降の記載では、RunB のうち、MLSS 濃度が教師データの最大濃度（ $1,681 \text{ mg/L}$ ）を超えた 10 月 18 日 12:00 から実験を終了した 10 月 23 日 13:00 までの期間を「未学習期間」と称する（図 2－7 参照）。

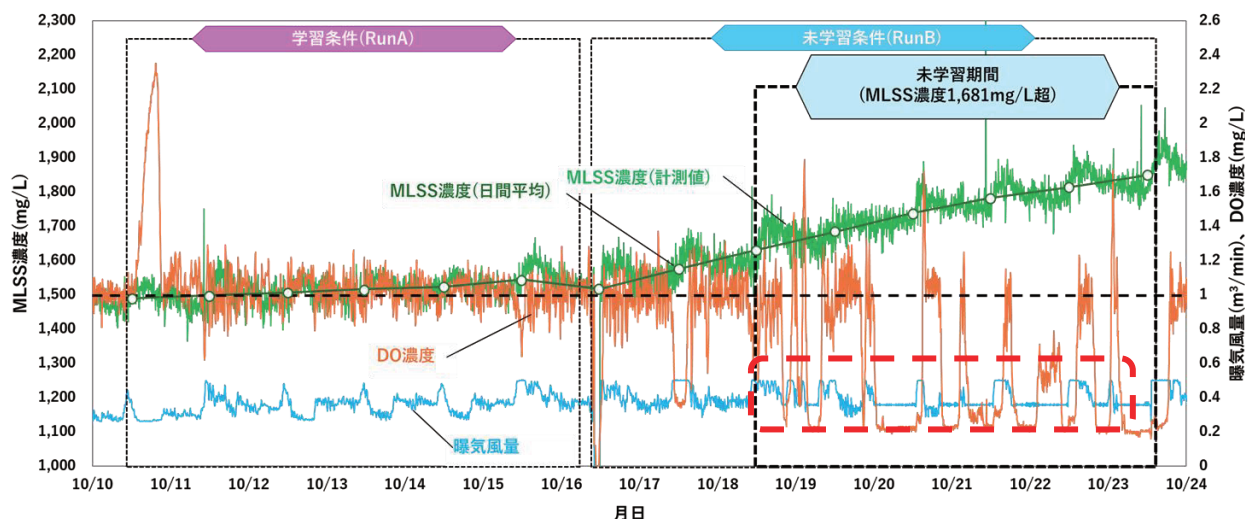


図 2－7 AI 自動制御運転 (RunA、B) における DO 濃度、曝気風量、MLSS 濃度の推移

図 2－7 において DO 濃度を見ると、RunA では概ね 1.0 mg/L 前後 (期間平均値: 1.06 mg/L) で推移し、教師データを模倣した制御が行われた。RunB では、MLSS 濃度が教師データの範囲内であった 10 月 18 日 12:00 以前の期間では、制御の出力が送風機の運転可能範囲を超えた時間帯を除くと DO 濃度は概ね 1.0 mg/L 前後で推移した。一方、MLSS 濃度が教師データの範囲を超えた未学習期間に入ると、DO 濃度が大きく低下する現象が何度も生じるようになった（図 2－7 の波線赤囲み部）。これは、DO 濃度が 1.0 mg/L 以下へ低下しているにもかかわらず曝気風量が減少したためであり、未学習期間の DO 濃度は平均 0.53 mg/L と、明らかに制御性能が悪化した。このような現象は、RunB の中でも MLSS 濃度が教師データの範囲を超えた未学習期間でのみ発生したことから、MLSS 濃度が制御の挙動に影響を与えた可能性が高いと考えられた。

未学習期間では、DO 濃度が高い状態で曝気風量が減少した後に、DO 濃度が低下しているにもかかわらず曝気風量が一定範囲（ $0.35 \sim 0.36 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度）で推移し、その後に増加に転じるという挙動が複数箇所で見られた。そこで、このような挙動が生じた原因について、本 AI モデルの実体である決定木に基づく解析を試みた。上記の挙動が生じた 10 月 28 日 19:00～21:00 の 3 時間分の運転データ（図 2－8）を用いて、(a)曝気風量が減少した後に一定範囲となった現象（同図の区間①）、(b)その後に曝気風量が増加に転じた現象（同図の区間②）のそれぞれについて、決定木単位での出力を詳細に確認した。

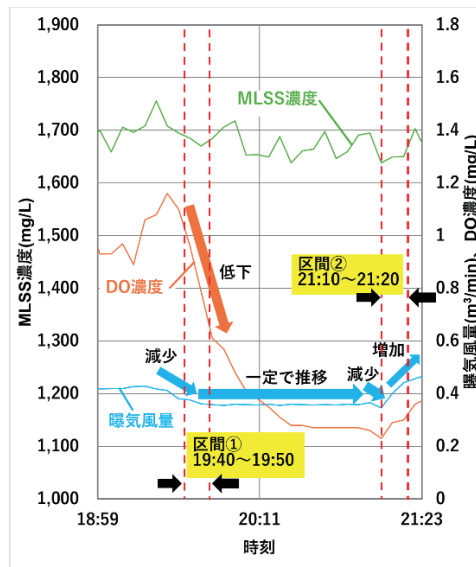


図 2－8 2024/10/28 19:00～21:00 付近の運転データ

まず、区間①（図 2－8 の 19:40～19:50）において、DO 濃度が低下しているにもかかわらず曝気風量が一定の範囲に維持された原因について解析した。AI モデルが 19:40、19:45、19:50 に出力した曝気風量について、100 本の決定木のそれぞれが出力した曝気風量を度数分布として整理すると（図 2－9）、19:45 以降に、それ以前には存在しなかった $0.29 \sim 0.30$ 、 $0.44 \sim 0.45 \text{ m}^3/\text{min}$ の範囲の曝気風量を出力する決定木が出現していた。これらの決定木から無作為に 1 本ずつを抽出し、各決定木におけるデータの場合分け条件（閾値）を確認すると、MLSS 濃度に関する場合分けの閾値がそれぞれ $1,571$ 、 $1,601 \text{ mg/L}$ となっていた。ここで、本 AI モデルの教師データにおける MLSS 濃度の分布を見ると（図 2－10）、これらの閾値を超えるデータ数は全体に対してそれぞれ 6.37% ($257/4,032$ データ)、 0.89% ($36/4,032$ データ) と僅かであった。すなわち、両決定木では、MLSS 濃度が上述の閾値を超えるような入力データに対して、極めて少ないデータ数に基づき生成された回帰式により曝気風量が出力されていたことになる。このように、MLSS 濃度が教師データの範囲を超えた状態では、これに該当する教師データ数の不足により、DO 濃度を始めとした入力データの変化を十分に反映できる決定木が生成されにくく、特定の曝気風量を出力する決定木が多数生じた結果として、曝気風量が一定範囲で推移する挙動を引き起こしたと推察される。本考察は RF に特有のモデル構造に基づくものであるが、同様の現象は、他の AI 手法を用いる場合であっても、教師データ内に類似のデータ数が少ない条件において発生する可能性があると考えられる。

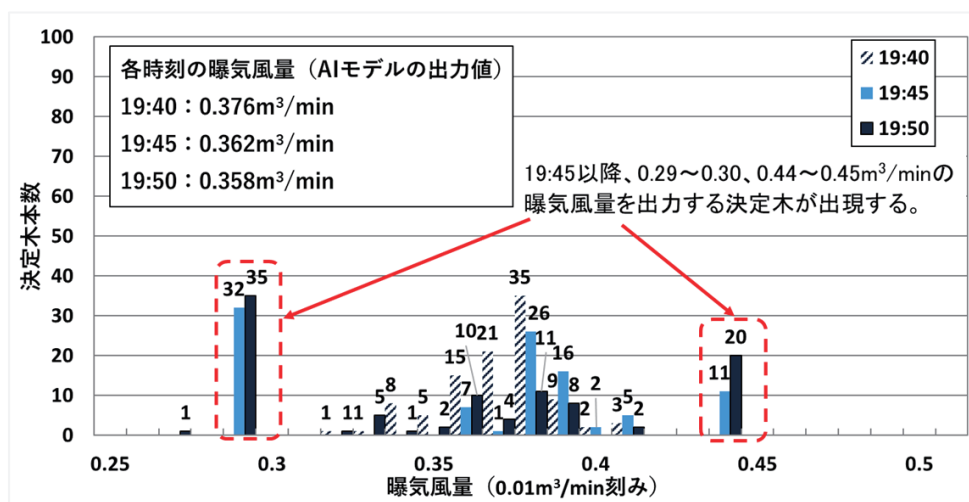


図 2-9 各時刻で決定木が出力した曝気風量の度数分布 (区間①)

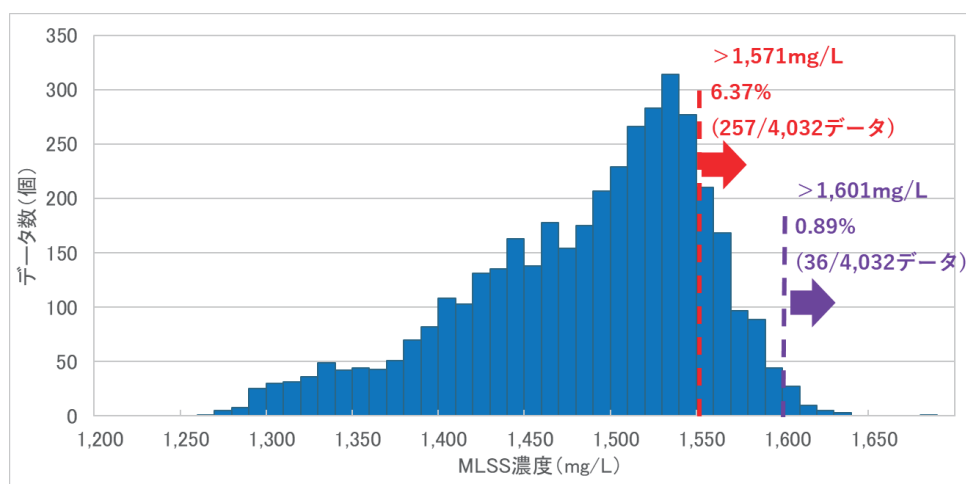


図 2-10 教師データにおける MLSS 濃度の度数分布

次に、曝気風量が増加に転じた区間②（図 2-8 の 21:10～21:20）について、曝気風量の挙動を詳細に見ると、同図に示すとおり、曝気風量の出力が 21:10 に一度 $0.346\text{m}^3/\text{min}$ へと僅かに減少した後に、21:15、21:20 にそれぞれ 0.400 、 $0.442\text{m}^3/\text{min}$ へと引き上げられたことが分かる。同様に一時的に曝気風量が減少する現象は、未学習期間内で繰り返し確認された。この曝気風量の減少に関して、前述の区間①と同様に 100 本の決定木が出力した曝気風量の度数分布を見ると（図 2-11）、 $0.29\sim 0.30\text{m}^3/\text{min}$ の区間の出力が 21:10 に特異的に出現したことが原因となっていた。同時刻の入力データを確認すると実験設備電力量が 0kWh となっており、同様の現象が見られた他のケースについても実験設備電力量がゼロとなった場合に曝気風量の出力が減少していることが確認された*。しかし、本教師データにおいて、設備電力量と DO 濃度や曝気風量等の間には明確な関連性が見られず、MLSS 濃度が高い範囲での教師データ量が少ない結果として、本来は関連性が低い項目間を関連付けるモデルが生成され、制御出力に影響を与えた可能性が考えられた。図 2-11 を見ると、曝気風量が減少した次の出力（21:15 の

* 実験設備電力量は毎時の積算値を計測したもので、教師データ取得時の運転では、ほとんどの時刻において 0.1kWh であるが、計測タイミングにより 0kWh となるデータが含まれていた。

出力) 以降、 $0.44\text{m}^3/\text{min}$ を超える曝気風量を出力する決定木が増加している。そこでは、21:10 時点での曝気風量の減少が、決定木におけるデータの場合分け（個々の決定木による分類先）が変化するきっかけとなり、曝気風量が増加に転じたと考えられた。このように、入力データの変化により出力値の傾向が大きく変わる現象は、極めて少ないデータ数に基づき回帰式が生成されていたことによると考えられる。

本実験で見られたように、AI（機械学習）を用いた自動制御では、教師データに含まれない条件や、教師データの範囲内であってもデータ量が少ない条件において、AI モデルの出力が特定の値に固定化される、出力が急に変化する等、制御が正常に機能しなくなる可能性があると考えられる。これに対応できるよう、AI 手法自体の検討に加えて、適切な学習方法（教師データの質・量、モデルの更新頻度等）やバックアップ措置（従来の制御方法との併用等）に関する検討が今後も必要である。

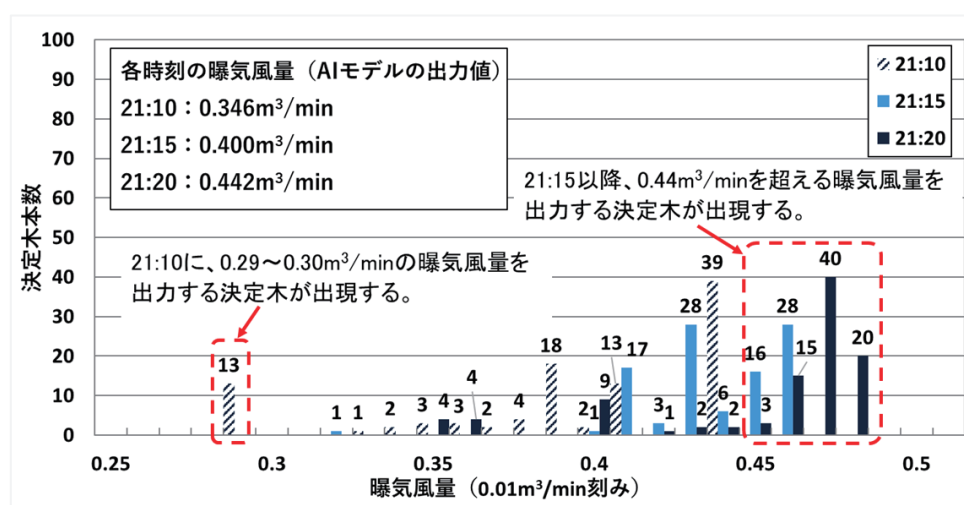


図2-11 各時刻で決定木が出力した曝気風量の度数分布(区間②)

② 教師データ量の違いが AI 自動制御の性能に及ぼす影響

教師データの項目数を 10 項目 (Run1)、4 項目 (Run2)、9 項目 (曝気風量を除外 ; Run3) とした AI モデルを用いて自動制御運転を順次行った際の DO 濃度および曝気風量の推移を図 2-12 に示す。

Run1 (10 項目) は、これまでに行ってきた実験と同等の AI モデルであり、曝気風量が送風機の運転下限に至り DO 濃度が上昇した期間を除けば、従来の実験と同様に DO 濃度を 1mg/L 前後に維持する制御が行われた。

これに対してデータ項目数を 4 項目へと減らした Run2 では、DO 濃度が 1.0mg/L を超えた時点で曝気風量が一定となる現象が複数回発生し (図 2-12 の紫囲み部)、Run1 と比較して制御性能が悪化した。本実験の条件では、教師データの項目数を 10 項目から大幅に減少できる余地は小さいと言える。なお、前述した事前の机上検討では、データ項目数を 4 項目とした場合に MAPE 値が最小となったが、実際の制御運転では制御の結果が入力データへ反映されるプロセスが繰り返されるため、結果に相違が生じたものと考えられる。

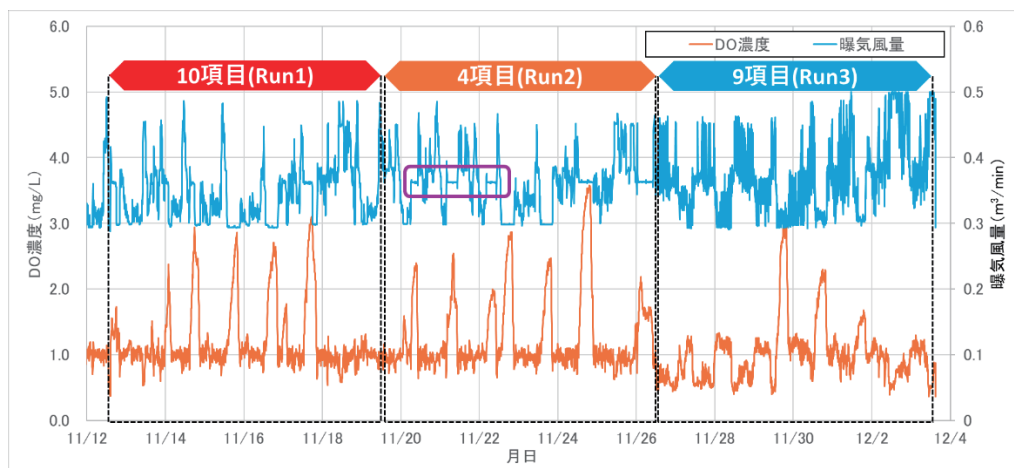


図2-12 Run1～3におけるDO濃度、曝気風量の推移

Run3は、10種類のデータ項目のうち「重要度」の値が圧倒的に高い曝気風量のみを除外した9項目を使用したものであるが、DO濃度と曝気風量がいずれも大きく変動し、制御が正常に機能しているとは言えない状態となった。曝気風量は本制御の出力対象であり、「重要度」の値が極めて高いことから、これを入力データから除外した場合に制御性能が悪化する点は半ば自明であるものの、それを実際の運転により確認する結果となった。

(4) まとめ

過年度から引き続き、パイロット規模の実験プラントを用いてAI(RF)による曝気風量の自動制御に関する基礎的な実験を行った。本年度は、教師データに含まれないMLSS濃度範囲での自動制御運転を行うことでAIが未学習の条件での制御の動作を確認すると共に、AIモデルの生成で使用する教師データ（データ項目数）の違いが制御性能に及ぼす影響について検討した。主たる成果は以下のとおりである。

- 反応タンクのMLSS濃度について、教師データに含まれる範囲よりも意図的に引き上げた未学習条件にて曝気風量のAI自動制御運転を行った結果、制御性能が大幅に悪化した。ここで見られた特徴的な制御の挙動として、DO濃度が低下しているにもかかわらず曝気風量の出力が増加せず一定範囲に保持される現象について、個々の決定木の出力等を詳細に解析した結果、MLSS濃度が高い条件での教師データ数が少なく入力データの変化を十分に反映できないモデルとなっていた点が要因と考えられた
- 教師データの項目数について、従来の10項目から意図的に減じた教師データを用いてAIモデルを生成しAI自動制御運転を行った。項目数を4項目としたAIモデルでは、事前の机上検討では実績データに対する予測誤差率(MAPE)が最小であったものの、10項目を用いたAIモデルと比較して制御性能が悪化し、本検討の条件において教師データの項目数を大幅に削減する余地は小さいと考えられた。また、制御対象であり「重要度」値が圧倒的に高い曝気風量のみを減じた9項目の教師データを使用したAIモデルでは、AI自動制御が正常に機能せず、このようなデータ項目を教師データから除外することが不適切であることが実験的に確認された。

- AI 自動制御に関する一連の実験により、外乱要因が少ないパイロットプラントという条件下ではあるものの、項目数が 10 項目と少ない教師データを用いた AI モデルであっても、教師データである DO 一定制御を模倣した自動制御が可能であることが示された。一方、教師データにおけるデータ数が少ない、もしくは全く含まれていない条件下では、自動制御が正常に機能しない恐れがある点も示されたことから、このような自動制御技術を実用化するには、これに対応できるような AI 手法や、必要な教師データ量、AI モデルの更新頻度、異常時のバックアップ措置（従来の制御への切り替え等）等について、事前に十分な検討が必要と言える。また、制御性能を事前に机上で検討する際には、本検討で実施したような過去データに対する予測性能を評価する方法では不十分であり、制御の結果が運転状態に反映されるような数値シミュレーション等が必要になると考えられた。

3. ICT・AI による設備劣化予測・異常診断技術

3. 1 設備の劣化予測・異常診断技術の開発動向調査

（1）検討の概要

下水処理場内の施設・設備の劣化予測や異常診断を行う技術については、JS において過去に ICT や IoT を活用した技術の開発を実施した実績があるが（例えば文献 19））、近年では AI を活用した技術も台頭してきており、技術開発動向が大きく変化していると想定される。そこで本検討では、ICT・AI 等のデジタル技術を活用して施設・設備の劣化予測や異常診断を行う技術について、国内外の最新の研究開発動向を把握することを目的とした調査を行う。具体的には、2024 年度単年度の検討として、①国内外の学術論文を対象とした文献調査、②国内外の水関連企業のウェブサイトを対象とした調査、③国内企業を対象としたヒアリング調査を実施した。なお、これらの調査においては、下水処理場以外の下水道施設を対象とした類似技術についても技術の進展が速いことから、対象を下水処理場内に限定せず、管路等を含む下水道施設・設備全般に広げて調査を実施した。

（2）検討方法

本調査では、「劣化予測・異常診断技術」を、「劣化予測や状態診断、異常検知等により、施設の保全管理を支援する技術」と定義し、このうち、(a)ICT・IoT・AI 等のデジタル技術を活用するもの、(b)適用対象として下水道管路施設およびポンプ場・終末処理場の土木施設・機械設備類を想定したもの、の両者に合致する技術（以下、「対象技術」と表記）について、情報収集およびヒアリング調査を行った。このため、終末処理場の運転管理のみを支援する技術や、下水道以外の廃水処理施設のみを対象とする技術は本調査の対象外である。

これらの技術を対象に、以下の①～③に示す 3 通りの方法により、最新の情報を収集した。

① 文献調査

研究・基礎検討段階のものを含めた国内外における全体的な研究開発動向を把握することを目的として、学術文献を対象とした文献調査を行った。文献情報データベース JDreamⅢを用いて、以下の a)、b)の 2 段階で文献を抽出・整理した。

a) 一次抽出

JDreamⅢの検索機能を使用し、以下の条件およびキーワードに適合する文献を抽出した。

＜検索条件＞

- ・ 発行年：2015～2024 年（過去 10 年間）
- ・ 言語：日本語、英語
- ・ 記事区分（文献の種類）：原著論文、総説論文（レビュー論文）

＜キーワード＞

キーワードは、下記の 3 つの区分に基づき設定した。

- ・ 第 1 キーワード：デジタル技術（ICT、IoT、AI）を抽出
例：人工知能、IoT、機械学習、デジタルトランスフォーメーション 等

- ・ 第 2 キーワード：下水道施設に適用可能な技術を抽出
例：下水道、下水処理場、ポンプ場、下水管 等
- ・ 第 3 キーワード：対象技術の定義に合致する技術を抽出
例：劣化、腐食、診断、保全管理 等

各区分に分類したキーワードはそれぞれ異なる切り口での抽出を目的としており、各区分から選んだキーワードを組み合わせた総当たりによる検索を行った。検索により得られた文献から、重複するもの、タイトルや抄録から読み取れる内容から明らかに対象技術と無関係であるもの、運転管理支援技術のような対象外のものを除外し、更に、同一著者による同一技術に関する複数の文献についてはいずれか 1 つを選定した。

以上により抽出された文献（以下、「一次抽出文献」と表記）について、抄録の内容に基づき、各文献で取り上げられている技術を表 3－1 に示す項目により分類・整理した。

表 3－1 一次抽出文献の分類に用いた項目

カテゴリ	項目	定義・内容
対象施設	管路	下水管、パイプライン等
	ポンプ場	汚水ポンプ、雨水ポンプ等
	下水処理場	下水処理場内の施設・設備等
	下水道全般	抄録から、下水道分野であるが、対象施設が不明もしくは下水道分野全体を対象であることが読み取れたもの
対象設備	土木	土木躯体、コンクリート等（管路を含む）
	機械設備類	電動機、駆動部等の機械設備関係（電気設備を含むものも含める）
	電気設備	ケーブル、操作盤、受配電盤、通信設備等の電気設備関係（電気設備を対象とすることが明確なもの）
機能	劣化・異常予測	現状の情報をもとに将来の劣化や異常を予測する技術（評価モデル等）
	劣化・異常診断	現状の情報をもとに現状の劣化度合いや異常を検知する技術
	その他	劣化および異常に関するガイドラインや、導入効果の検討（コスト等）、プラットフォーム等
開発段階	基礎検討段階	研究開発もしくは検討段階の技術
	実証実験段階	実施設等で実証実験が行われている段階の技術
	実用化段階	実際に使用されている、導入実績の情報がある技術

b) 二次抽出

一次抽出文献に掲載された技術のうち、技術の機能で大半を占めていた「劣化・異常診断」に係る技術について、更に詳細な内容を把握する文献を抽出した（二次抽出）。当初、対象施設については、JS の主な事業対象が下水処理場やポンプ場であることを考慮し、「管路」以外を想定していたが、一次抽出で「管路」を対象とした文献が多く、今後の ICT・AI 技術の活用方法を検討する際に参考とできるよう、「管路」を除外せずに抽出する方針とした。

まず、文献の形式や掲載された技術のカテゴリに基づき、以下の方針により一次抽出文献 170 件を 81 件まで絞り込んだ。

- ・ 記事区分の絞り込み：「原著論文」のみを選択（「レビュー論文」を除外）
- ・ 機能による絞り込み：「劣化・異常診断」技術に分類されるものを選択
- ・ 重複の排除：同一技術を対象とした文献は発行が最新年のものを選択

続いて、「管路」以外を対象とした 21 件、「管路」を対象とし開発段階が「実用化段階」または「実証実験段階」の 8 件、この 8 件以外で「管路」を対象とし抄録から技術構築に係るデータセットの公開を行っていることが分かる 2 件の合計 31 件を選定した（以下、これらを総称して「二次抽出文献」と表記）。これら二次抽出文献については、文献の全文把握により対象データの種類（画像、振動、温度等）やデータ取得方法（閉回路テレビ（CCTV）カメラ、センシング技術等）等の情報を整理した。なお、この整理過程で対象施設や対象設備、開発段階の分類を精査し、必要に応じて修正した。

② ウェブサイト調査

国内外において実用化段階にある技術の動向を更に把握するために、水関連企業のウェブサイトからの情報収集を行った。調査の対象とする企業は、経済産業省が公開している「水ビジネス海外展開施策の 10 年の振り返りと今後の展開の方向性に関する調査（令和 3 年 3 月）」²⁰において「世界の主要企業における水ビジネス売上高」に掲載されている企業や、これらとは別に対象技術に係るキーワードをインターネット検索してヒットした企業とした。これらの企業のうち、対象技術を有する 6 社について、各企業のウェブサイトに掲載されている情報に基づき、技術の概要、原理、活用事例等を整理した。

③ ヒアリング調査

対象技術を開発し導入する立場から見た現状や課題を把握するため、国内で対象技術を開発または保有する民間企業を対象に、技術の開発・導入状況や今後の展望、設備の劣化予測・異常診断を行う技術全般の普及展開に向けた課題等についてインタビュー方式によるヒアリングを行った。ヒアリング先は、本検討の対象技術に関して、過去に JS と B-DASH プロジェクトや共同研究を実施した 2 社、その他 B-DASH プロジェクトの実施実績を有する 1 社、その他 2 社の合計 5 社を選定した。

（3）検討結果

① 文献調査

a) 一次抽出

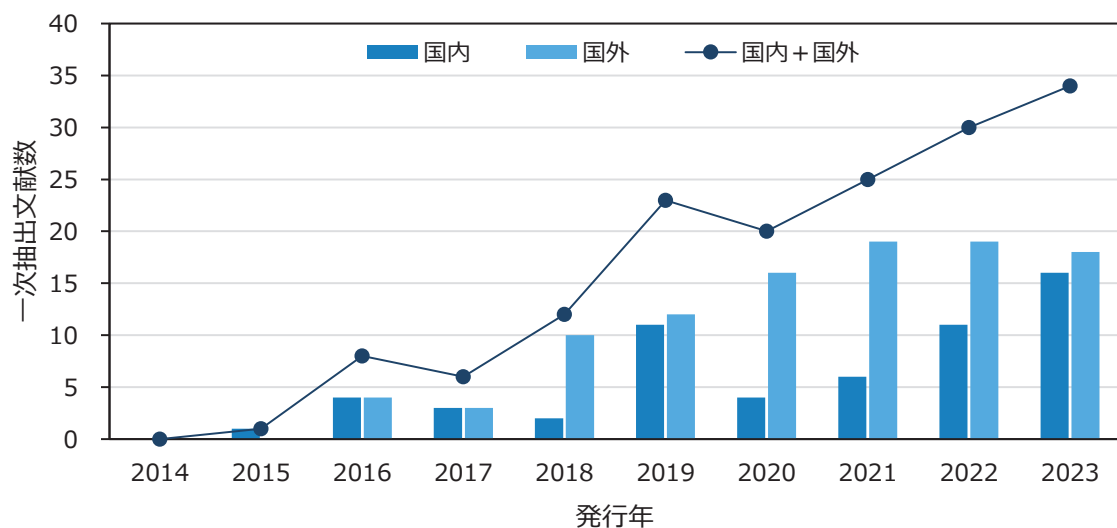
キーワード検索によりヒットした文献は、重複を除くと 4,651 件となった。このうち、文献タイトルから明らかに対象技術に当てはまらないものを除外すると 500 件、更に抄録の内容から対象外となるものを除外すると 170 件に絞り込まれ、これらを一次抽出文献とした。

図 3-1 に示すとおり、一次抽出文献の発行数は年々増加傾向にあった。なお、一次抽出を実施したのは 2024 年 10 月であり、同年については 1 年間分のデータとならないため同図には表示していない。

文献に記載された技術に基づき、対象施設（管路、ポンプ場、下水処理場、下水道全般）および対象設備（土木、機械設備類、電気設備）の区分で文献数を整理したものを図 3-2 に示す。対象施設で見ると、管路を対象とした文献が 116 件（68%）と最多であった。設備区分については、管路を対象とする文献は全てが土木を対象とするものであった一方、ポンプ場では 15 件中 10 件が、下水処理場では 10 件中 6 件が、機械設備類を対象とした文献であった。なお、いずれの施設区分においても、電気設備を対象とした文献は含まれなかった。

次に、技術の機能区分（劣化・異常予測、劣化・異常診断、その他）に基づき一次抽出文献を整理すると、表 3-2 のとおりとなった。両設備区分（土木、機械設備類）のいずれにおいても診断技術の文献数が比較的多く、各設備区分の中でそれぞれ 62%、74% を占めていた。特に、文献数では管路を対象とした診断技術が他よりも明らかに多い点が特徴的であった。

技術の開発段階で文献数を整理した結果について、対象施設・設備の各区分における開発段階の内訳を表 3-3 に示す。全体の 78% が基礎検討段階、15% が実証実験段階で、これら実用化以前の段階のものが合わせて 90% 以上を占め、実用化段階にあるものは 7% と少なかった。実用化段階にある技術数が多い施設区分は管路で、6 件であった。下水処理場の施設区分について見ると、総数 10 件のうち実用化段階にあるものは、土木施設の診断技術および予測技術が各 1 件、機械設備類の診断技術が 1 件の計 3 件であった。



※2024 年 10 月に一次抽出作業を行ったため、同年の件数は省略した。

図3-1 一次抽出文献数の推移

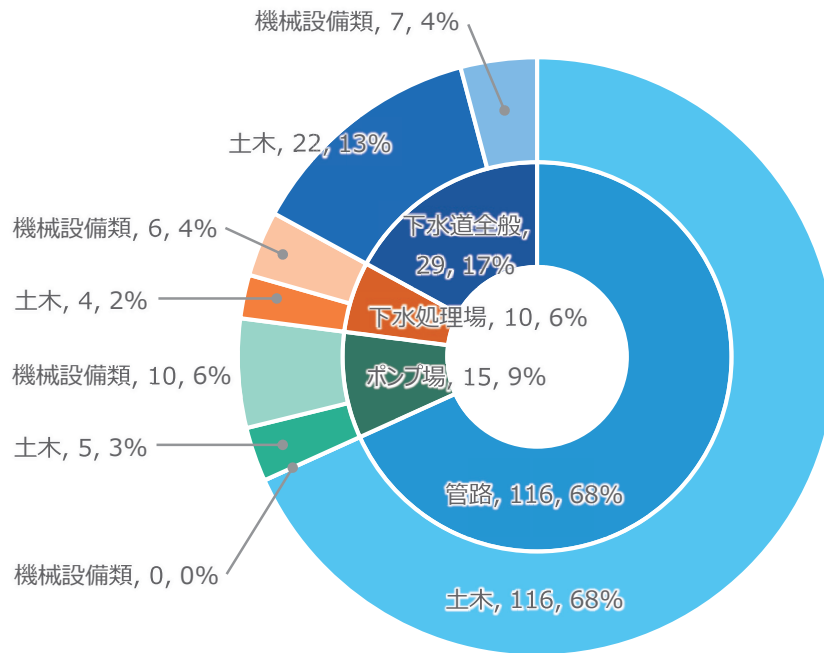


図3-2 一次抽出文献の施設区分・設備区分別内訳 (全 170 件)

表3-2 一次抽出文献における技術の機能区分の内訳

対象施設	土木			機械設備類			合計
	劣化・異常 予測	劣化・異常 診断	その他	劣化・異常 予測	劣化・異常 診断	その他	
管路	29	78	9				116
ポンプ場	2	2	1	4	6		15
下水処理場	1	3			5	1	10
下水道全般	9	8	5	1	6		29
合計	41	91	15	5	17	1	170
	(28%)	(62%)	(10%)	(22%)	(74%)	(4%)	

※セル着色は対象施設ごと（行ごと）に文献数の多いものほど濃くなるよう濃淡をつけた。最下段は対象設備（土木、機械設備類）における割合を示す。

表 3－3 一次抽出文献の開発段階内訳

対象施設	対象設備	機能区分	開発段階		
			基礎検討段階	実証実験段階	実用化段階
管路	土木	劣化・異常予測	27	2	
		劣化・異常診断	65	8	5
		その他	5	3	1
		小計	97	13	6
ポンプ場	土木	劣化・異常予測	2		
		劣化・異常診断	2		
		その他		1	
		小計	4	1	
	機械設備類	劣化・異常予測	4		
		劣化・異常診断	3	3	
		小計	7	3	
下水処理場	土木	劣化・異常予測			1
		劣化・異常診断	2		1
		小計	2		2
	機械設備類	劣化・異常診断	1	3	1
		その他	1		
		小計	2	3	1
下水道全般	土木	劣化・異常予測	5	2	2
		劣化・異常診断	8		
		その他	3	1	1
		小計	16	3	3
	機械設備類	劣化・異常予測	1		
		劣化・異常診断	3	3	
		小計	4	3	
合計			132 (78%)	26 (15%)	12 (7%)

※セル着色は対象施設や設備、技術区分によらず文献数の多いものほど濃くなるよう濃淡をつけた。
小計や合計の行には着色していない。

b) 二次抽出

二次抽出文献について、精査後の開発段階を表 3－4 に、文献に記載された各技術の検出・分析対象や手法、AI の使用有無を整理したものを表 3－5 に示す。なお、両表では、後述するウェブサイト調査の結果を同様に整理した結果を併記しており、以降での文献数(対象技術数)は二次抽出とウェブサイト調査の結果を合算して表記する。

精査の結果、対象施設が管路である技術が 20 件、その他が 17 件となった。このうち実用化段階にある技術は 8 件あり、管路内の画像を分析するものが 4 件、管路に敷設した音響光ファイバーで音を検出する技術が 1 件、ポンプ場および下水処理場の機器に設置したセンサーを用いたセンシング技術がそれぞれ 1 件、ポンプ場の監視データを解析するものが 1 件であった。

技術の内容で見ると、管路を対象とした技術で採用されている手法 20 件のうち、撮影した画像を分析して劣化や異常を判定するものが 16 件（80%）を占めていた。一方、ポンプ場や下水処理場を対象とした 15 件のうち、センサーを使用し運転中の機器の状態から異常を判定するセンシング技術が 10 件（67%）と多く、次いで蓄積した監視データを解析する手法が 3 件（20%）あった。

二次抽出文献およびウェブサイト調査により情報の得られた技術の検出・分析対象別に AI 使用の有無を整理したものを表 3－6 に示す。比較的件数の多かった画像や振動等の検出・分析技術においては、AI の使用率がそれぞれ 82%、78%となった。一方、監視データを解析する技術では AI の使用は見られなかった。

表 3－4 二次抽出文献の開発段階内訳

対象施設	開発段階			合計
	基礎検討段階	実証実験段階	実用化段階	
管路	9	6	5(3)	20(3)
ポンプ場	3(1)	3	2(1)	8(2)
下水処理場	1	5	1(1)	7(1)
下水道全般	1	1		2
合計	14(1)	15	8(5)	37(6)

※カッコ内はウェブサイト調査結果で抽出された技術で、内数

表 3-5 二次抽出文献およびウェブサイト調査に基づく技術の概要

対象施設	対象設備	検出・分析対象	測定手法等										AIの使用		合計
			CCTV	ドローン	ドローン +3Dレー ザースキャナ	ドローン +センシング 技術	無線 カメラ	管内 カメラ	触覚 ロボット	センシング 技術	電力 ロガー	データ 活用	あり	なし	
管路	土木	画像	7(2)	2	1		2	2				2	13(2)	3	16(2)
		3D点群データ										1	1		1
		温度								1				1	1
		音								1(1)			1(1)		1(1)
		コンクリート強度							1				1		1
ポンプ場	機械設備類	振動等								4(2)		1	4(2)	1	5(2)
		監視データ										2		1	2
		電氣的パラメータ									1			2	1
下水処理場	機械設備類	画像				1							1		1
		振動等								4(1)			3(1)	1	4(1)
		温度								1				1	1
		音								1			1		1
下水道全般	機械設備類	監視データ										1		1	1
		データ収集方法										1		1	1
合計			7(2)	2	1	1	2	2	1	12(4)	1	8	25(6)	12	37(6)

※カッコ内はウェブサイト調査結果で抽出された技術で、内数

※検出・分析対象について

振動等：振動、渦電流、排ガス成分等

電氣的パラメータ：電流、電圧、電力等

※測定手法等について

CCTV：閉回路テレビ（Closed Circuit Television）。本表では文献中に CCTV が明記されていたもののみを分類した。

触覚ロボット：4 本足ロボットの接地箇所に力覚・トルクセンサーを取り付けたもの。

センシング技術：振動や温度、音等、センサーを用いて測定を行う技術の総称。

データ活用：収集・蓄積したデータを統計的に解析する等の手法。

表 3-6 二次抽出文献およびウェブサイト調査に基づく検出・分析対象別 AI 使用状況

検出・分析対象	技術数合計※ ¹	AI 使用あり※ ²	AI 使用率※ ³
画像	17	14(2)	82%
振動等	9	7(3)	78%
音	2	2(1)	100%
3D 点群データ	1	1	100%
コンクリート強度	1	1	100%
監視データ	3	-	0%
温度	2	-	0%
電氣的パラメータ	1	-	0%
データ収集方法	1	-	0%
総計	37	25(6)	68%

※1 二次抽出文献とウェブサイト調査で得られた文献数（技術数）の合計値

※2 カッコ内はウェブサイト調査結果で抽出された技術で、内数

※3 AI 使用率は二次抽出文献とウェブサイト調査の合計値に対する割合として算出

② ウェブサイト調査

ウェブサイト調査の結果、本検討の対象技術を保有する企業 6 社について、6 技術の情報を得た。これら 6 技術について、①の文献調査と同様に、対象施設や対象設備、機能区分を整理したものを表 3-7 に示す。振動や音響等のセンシングデータに基づく診断技術が 4 件、画像分析技術が 2 件であった。実用化段階にある技術は 5 件、実証実験段階と基礎検討段階がそれぞれ 1 件あった。文献調査では管路を対象とし実用化段階にある技術は 2 件とも画像解析によるものだったが、ここでは音響光ファイバーを用いたセンシングデータに基づく診断技術も実用化段階にある技術として抽出された。ウェブサイト調査で得られた技術は、いずれも画像やセンシングデータを分析し劣化・異常の診断を行うプロセスに AI を採用することで、診断作業の効率化を図っていた。このうち下水処理場を対象とした 1 技術（表 3-7 No.6）は、設備に取り付けたセンサーのモニタリングデータを AI が解析し、通常と異なる振動から異常を検知する維持管理ツールである。

なお、これらの整理結果を文献調査の結果と統合したものは①で示したとおりである。

表 3-7 企業のウェブサイト調査により抽出された技術

No.	企業	国	技術名称等	対象施設	対象設備	機能区分	検出・分析対象	測定手法等	開発段階	AIの使用
1	United Utilities	イギリス	Automated asset inspection	管路	土木	診断	画像	CCTV	実用化段階	○
2	AECOM	アメリカ	PipeInsights	管路	土木	診断	画像	CCTV	実用化段階	○
3	Xylem	アメリカ	SoundPrint AFO	管路	土木	診断 (予測含む)	音	センシング技術	実用化段階	○
4	Korea Water Resources	韓国	Predictive Maintenance System	ポンプ場	機械設備類	診断 (予測含む)	振動等	センシング技術	基礎検討段階	○
5	Grundfos	デンマーク	Grundfos Machine Health	ポンプ場	機械設備類	診断	振動等	センシング技術	実用化段階	○
6	Veolia Environnement	フランス	Bob assistant	下水処理場	機械設備類	診断	振動等	センシング技術	実用化段階	○

③ ヒアリング調査

国内企業へのヒアリングの結果、各社の保有する技術は、処理場やポンプ場の機械設備類を対象とし、振動等のセンシングデータや画像データを AI により解析することで、劣化予測または異常診断を行う技術であり、概ね実用化段階にあった。しかし、一部の技術を除くと実績数は伸びていないとの回答であった。また、劣化予測や異常診断の精度を向上させるためにはデータの蓄積が必須であるが、導入実績を持つ社は着実にデータを蓄積する一方で、導入実績の少ない社は蓄積も少ない、またはほとんどないという状況であった。

今後、下水道施設の老朽化や下水道技術者の人手不足により、設備の劣化予測や異常診断の技術に対するニーズが高まるとの認識は全社で共通していた。一方で、現時点で導入が進まない背景、導入における課題として、「下水道設備は故障頻度が低く効果を実感しにくい」（5 社）、「機械学習のためのデータの蓄積が少ない」（3 社）といった点が指摘された。また、劣化予測や異常診断の技術の普及を促進するために、全社に共通して「国からの交付金・補助金の充実」

（5 社）という意見があった。以上を踏まえると、技術の導入促進によりデータの蓄積が進み、劣化予測や異常診断の精度が向上して、更なる普及に繋がると考えられる。

（4）まとめ

ICT・AI 等のデジタル技術を活用して下水道施設・設備の劣化予測や異常診断を行う技術の研究開発動向を把握するため、国内外を対象とした文献調査、国内外の水関連企業のウェブサイトを対象とした調査、対象技術を開発している国内企業へのヒアリング調査を実施した。主な成果は以下のとおりである。

- 文献調査：文献情報データベースにおいて学術論文を対象にキーワード検索を行い、抄録の内容に基づき対象施設・設備を整理すると、管路（土木）を対象とする技術が他よりも明らかに多く、また、ポンプ場や下水処理場に係る技術の中では半数以上が機械設備類を対象としていた。技術の機能を「劣化・異常予測」と「劣化・異常診断」で分類すると、診断技術のほうが多い傾向にあった。そこで、劣化・異常の診断技術に係る文献を精査し、ウェブサイト調査の結果と併せて整理すると、管路では画像データを、ポンプ場や下水処理場では振動等のセンシングデータを解析し診断を行う技術の割合が高く、更に、いずれにおいても 8 割程度の技術で AI が使用されていた。
- ウェブサイト調査：文献調査では抽出されなかった技術として、音響光ファイバーを用いたセンシング技術に基づく劣化・異常の診断技術が抽出された。また、ウェブサイト調査で得られた 6 技術全てについて、診断のプロセスに AI を採用していた。
- ヒアリング調査：国内企業 5 社へのヒアリングの結果、設備の劣化予測や異常診断を行う技術は概ね実用化段階にあるものの、一部の技術を除くと導入実績数は伸びておらず、導入における課題として、「下水道設備は故障頻度が低く効果を実感しにくい」という点が全社から挙げられた。また、「機械学習のためのデータの蓄積が少ない」といった利用可能なデータ量に係る事項も半数以上の社が課題として認識していた。

4. ICT による広域監視・制御システム

4.1 ICT の活用による下水道施設広域監視制御システムの開発

（1）検討の概要

本検討では、「ICT の活用による下水道施設広域監視制御システム」（以下、「広域監視制御システム」と略記）の実規模実証実験を行い、異なる製造者により設置された施設の監視・制御・帳票作成を行う設備または装置の通信の信頼性・安定性、建設費・改修費および維持管理費の削減効果等を実証するものである。本システムは複数の下水道施設を広域的に監視制御する技術であるため、広域化・共同化の一手法として実証技術を普及展開することを目標に開発を進めている。

本検討は 2021 年度に国土交通省の下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）として採択され、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託を受けて日本下水道事業団・東芝インフラシステムズ・日立製作所・三菱電機・明電舎・メタウォーター・倉敷市共同研究体が実施している。岡山県倉敷市の下水道施設を実証フィールドとし、水島下水処理場および倉敷市役所を広域管理拠点に、下水処理場 4 施設を含む全 27 施設を監視対象に選定して検討を行ってきた。上記 B-DASH プロジェクトとしての実証期間は 2021 年度から 2024 年度の 4 年間である。

これまでの検討では、工場における通信試験や、100Mbps の広域イーサネット（帯域が確保された専用回線）を使用した現地実証により、装置の操作性・応答性、通信の信頼性・安定性等について問題が無いことを確認した。

本年度は現地での実証実験を継続し、確保される帯域を縮小した広域イーサネットによる実証実験、更にベストエフォートタイプの IP・VPN 回線による実証実験を行うと共に、モデルケースにおけるコスト試算を行った。

（2）検討方法

① 技術の概要

本システムは、異なる製造者の監視制御設備における相互の通信を容易にするものであり、図 4-1 に示す「共通プロトコル方式」、「リモートデスクトップ（RDP）方式」の一方を用いる、または両方式を組み合わせることによって複数の下水道施設の監視制御を実現するものである。

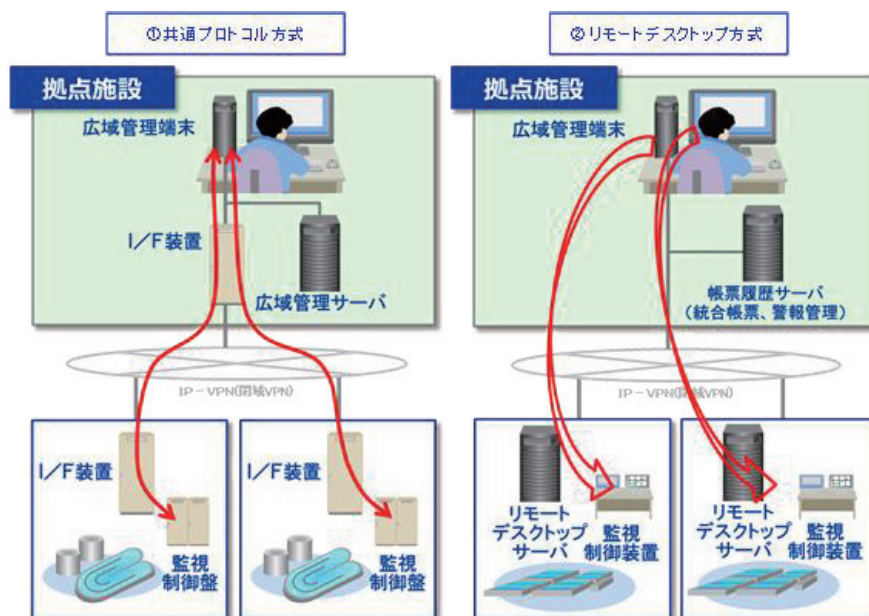


図4-1 共通プロトコル方式および RDP 方式の概要

a) 共通プロトコル方式

製造者間の共通のプロトコル（ネットワーク上でデータを通信する際に用いられる手順や言語、ルール）を定めることで、異なる製造者により設置された監視制御盤または監視制御装置間の通信を行う技術であり、その特徴は以下のとおりである。

- ・異なる製造者による監視制御盤または監視制御装置と、広域管理拠点側の監視制御装置とが共通プロトコルを用いて信号の授受を行うことで、広域管理拠点から各施設の監視制御が可能であり、また、複数施設の帳票データの統合と一括出力が可能。
- ・異なる製造者による監視制御盤または監視制御装置において、相互に信号を授受する伝送装置（I/F装置）とデータ変換装置の機能を I/F 装置に集約し、これらを各製造者の共通の仕様とすることで汎用化を実現。

b) RDP 方式

Microsoft Windows のリモートデスクトップ機能を活用して、監視制御装置が設置されている下水道施設の監視等を行う技術であり、その特徴は以下のとおりである。

- ・Microsoft Windows のリモートデスクトップ機能を活用することにより既存のシステム改修範囲と新規システム構築規模を最小化できるため、共通プロトコル方式に比べて安価で施設ごとの監視、制御、帳票印刷が可能。
- ・共通プロトコル方式の一部機能（ヒストリカルデータの授受のみ）を併用することにより、コスト面のメリットを大きく損なうことなく広域管理拠点で警報発報、帳票データの統合を行うことも可能。

② 実証方法

本実証実験では、2022 年度に設置した広域監視制御システムを使用し、2 箇所の広域管理拠点から、共通プロトコル方式または RDP 方式を使用して 27 箇所の下水道施設を監視してい

る。本年度の実証実験における目標値は表 4－1 に示すとおりであり、応答速度とコスト削減率を評価した。

表 4－1 本年度の実証における目標値

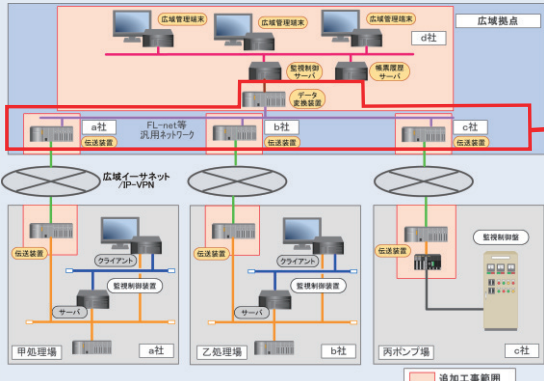
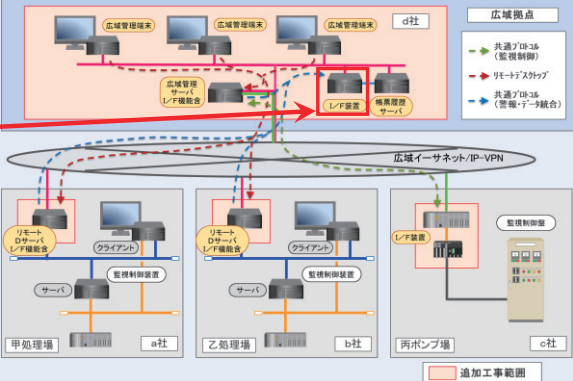
実証項目	共通プロトコル方式	RDP 方式
応答速度の評価	6sec 程度	3sec 程度
従来技術と比較したコスト削減率の評価 （新規導入・改修・保守点検、LCC）	30%	30%

応答速度の評価において、前年度の実験では、十分に余裕のある通信回線を使用して通信量を定量的に確認し、広域監視制御システムが技術的に運用に足ることの基礎データを取得することを目的とした。具体的には、100Mbps の広域イーサネットを使用し、共通プロトコル方式および RDP 方式における応答速度が目標値を満足することを確認した。本年度は、100Mbps の広域イーサネットは通信コストが高価であるという課題を踏まえ、低コスト化による広域監視制御システムの伝送遅延や応答速度、安定性、セキュリティ面への影響を確認した。まず、広域イーサネットの帯域を 1～20Mbps に縮小した。続いて最大 1Gbps の IP-VPN に変更し、各々 3 か月間のデータ収集期間を設けた。この期間において通信環境における伝送遅延や応答速度を確認し、各々 100Mbps の広域イーサネットの場合と比較した。広域監視に支障のない応答速度を確保するため、前年度と同様に共通プロトコル方式では操作応答 6sec 程度、RDP 方式では操作応答 3sec 程度を目標とした*。

コスト削減率の評価では、共通プロトコル方式および RDP 方式における新規導入時のコスト、導入後の改修（機能増設）コスト、10 年間の保守点検に要するコストを、監視対象の処理場数を 3、4、5、16 箇所とした場合について試算し、本プロジェクト採択時の目標である「従来技術と比較して 30%の削減」に対する達成状況を確認した。複数のメーカーが混在する機場間の信号を授受するためにデータ変換装置で構築する従来技術と、広域監視制御システムのシステム構成はそれぞれ表 4－2 のとおりである。建設費（新規導入工事、改修工事）、維持管理費（保守点検費）および LCC の削減効果の試算は、これを基本条件とした。従来技術のデータ変換装置および伝送装置が、広域監視制御システムではインターフェイス装置に置き換わることで、機器点数の削減（＝コスト削減）が可能となっている。また、改修とは、監視対象の処理場等におけるプラント設備増改築時に、新たに広域監視制御システムへ信号を追加する等の機能増設工事を意味する。加えて、これらのコスト試算結果を基に LCC 削減率を算出し、同じく当初の目標である「従来技術と比較して 30%削減」の実現可能性を検証した。なお、LCC の算出において、広域イーサネットや IP-VPN の使用は従来技術と同じ条件となるため、通信に係るコストは含めていない。

* 各応答速度は JS 電気設備工事一般仕様書の操作応答時間を参照した。

表 4-2 従来技術と広域監視制御システムのコスト試算条件

	従来技術	広域監視制御システム
システム構成	 <p>複雑なシステム構築が必要</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 広域拠点 広域管理端末 3 セット ・ 広域拠点 監視制御サーバ 1 式 ・ 広域拠点 帳票履歴サーバ 1 式 ・ 広域拠点 データ変換装置 1 式 ・ 広域拠点 伝送装置 3 セット ・ 処理場 伝送装置 3 セット ・ 処理場 既設監視制御システム改造費 3 セット 	 <p>シンプルなシステム構築が可能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 広域拠点 広域管理端末 3 セット ・ 広域拠点 広域管理サーバ (I/F機能含) 1 式 ・ 広域拠点 帳票履歴サーバ 1 式 ・ 広域拠点 I/F装置 1 式 (機器数減) ・ 処理場 リモートストップサーバ (I/F機能含) 2 セット ・ 処理場 I/F装置 1 セット ・ 処理場 既設監視制御システム改造費 3 セット
その他	①現地試験においては、異なる製造者間による対向試験を実施する。 ②新規設置の場合、機器費の40%を工事費とし、その他の必要諸経費も見込む。 ③改修の場合、100点相当の信号を追加することを想定する。工事費、諸経費の計上は新規設置と同様。 ④保守点検は10年間（LCCでは15年間）の製造者標準の保守点検費用を算出する。 ⑤監視対象はオキシデーションディッチ法の下水処理場を想定する。	

(3) 検討結果

1~20Mbps の広域イーサネットおよび最大 1Gbps の IP-VPN の条件下で応答速度を計測したところ、表 4-3 に示すとおり、共通プロトコル方式で 6sec 程度、RDP 方式で 3sec 程度とした目標を満足した。両方式共に、伝送遅延等は無く、操作応答時間はいずれの回線を採用しても 100Mbps の広域イーサネットと同程度であり、広域監視制御システムの運用に問題が無いことを確認した。

ただし、IP-VPN を使用した実証実験において、外部のメンテナンスや工事によりサービスが中断する可能性があることが確認された。約 3 か月間のデータ収集期間においてサービスの停止はなかったが、3 件の工事情報が通告されたため、実際の運用におけるリスクを想定しておくことが重要である。一方で、広域イーサネットは通信量により帯域を選定することが可能であるが、帯域を増加させると費用が高価になる。

表 4-3 応答速度の計測結果

	共通プロトコル方式 (目標: 6sec 程度)	RDP 方式 (目標: 3sec 程度)
広域イーサネット (1~20Mbps、帯域確保)	平均 3.75sec (2.08~5.54sec)	平均 2.75sec (2.25~3.65sec)
IP-VPN (最大 1Gbps、ベストエフォート)	平均 4.00sec (2.44~5.48sec)	平均 2.55sec (1.95~3.06sec)
参考 広域イーサネット (100Mbps、帯域確保)	平均 3.32sec (2.35~4.21sec)	平均 3.03sec (2.45~3.46sec)

新規導入時のコスト、導入後の改修（機能増設）コスト、10 年間の保守点検に要するコストを試算し、従来技術と比較した各々の削減率を算定し、それらを基に本技術の LCC 削減率を算定した。算定結果を表 4－4 に示す。両方式の新規導入、改修、保守点検、LCC のいずれの項目においても、目標値である 30%削減を達成した。共通プロトコル方式は、新規導入コスト、改修コストおよび LCC において従来技術の 1/2 程度であった。RDP 方式は、従来技術に比べて新規導入コストと LCC が 3 割程度、改修コストは 1/3 程度であり、共通プロトコル方式に比べても低コストであった。保守点検コストは両方式とも同程度であり、従来方式に比べて約 4 割の削減効果が見込まれた。

表 4－4 従来技術と比較したコスト削減効果

試算項目	監視対象の 処理場数	共通プロトコル方式		RDP 方式	
		削減率	平均削減率	削減率	平均削減率
新規導入	3 箇所	47%	49%	78%	74%
	4 箇所	48%		76%	
	5 箇所	49%		74%	
	16 箇所	51%		67%	
改修	3 箇所	46%	48%	66%	65%
	4 箇所	45%		65%	
	5 箇所	46%		64%	
	16 箇所	56%		65%	
保守点検	3 箇所	47%	43%	50%	44%
	4 箇所	37%		44%	
	5 箇所	39%		41%	
	16 箇所	48%		43%	
LCC	3 箇所	47%	48%	73%	69%
	4 箇所	46%		70%	
	5 箇所	47%		69%	
	16 箇所	52%		64%	

（4）まとめ

本年度は、通信の低コスト化による応答速度への影響を確認するため、1～20Mbps の広域イーサネットおよび最大 1Gbps の IP-VPN 回線を使用して実証実験を行った。前年度に使用した帯域 100Mbps の広域イーサネットと同様の応答速度であったことから、広域監視制御システムにいずれの回線を採用しても問題が無いことが確認できた。また、広域監視制御システムの新規導入時のコスト、導入後の改修（機能増設）コスト、10 年間の保守点検にかかるコストは、従来技術と比較してそれぞれ目標の 30%削減を達成すると共に、従来技術と比較した LCC 削減率も目標の 30%を達成した。

本検討は国土交通省の B-DASH プロジェクトとして採択され、2021 年度から 4 年間の事業は本年度で完了した。4 年間の実証実験により、広域監視制御システムの通信の信頼性・安定性、建設費・改修費および維持管理費の削減の 2 項目について検証し、それぞれの目標を達成することができた。今後は、本実証事業の成果を踏まえて、国土交通省国土技術政策総合研究所から「導入ガイドライン（案）」が発刊される予定である。また、倉敷市とともに、B-DASH

プロジェクトで設置した実証施設を活用し、自主研究として長期的な運用の安定性と信頼性を確認する予定である。

5. 検討結果の総括

5.1 本年度の成果

（1）AI による水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術

① AI を活用した水処理・汚泥処理の支援・制御技術の開発

過年度から継続している 2 件の共同研究等を進めた。

「単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処技術」について、更なるコスト削減を目的とした複数池一括制御が長期間にわたって十分に機能することを確認した。また、反応タンクにおける N_2O 排出量に関するデータを蓄積すると共に、 N_2O の生成・排出場所として好気ゾーンが重要であることを示す知見を得た。加えて、本技術の曝気風量制御手法をアンモニア制御に応用する可能性、ステップ流入により本技術の窒素除去率を向上できる可能性を見出した。

「AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術」について、2024 年 1 月に開始した共同研究を同年 12 月に完了した。処理水の COD 濃度を予測可能な AI モデルを生成できたものの、予測精度を十分に検証するには至らなかった。 $\text{NH}_4\text{-FF+FB}$ 制御について、目標 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を 3mg/L まで引き上げた制御が可能である点、それにより曝気風量の低減が見込める点を示したが、多様な目標濃度において十分な実証データを取得することはできなかった。複数池一括制御については、検討した手法では良好に機能しない点が判明し実証運転を断念した。

② パイロットプラントを用いた AI 水処理自動制御実験

過年度から引き続き、パイロット規模の実験プラントを用いて AI（RF）による曝気風量の自動制御に関する基礎的な実験を行った。主たる成果は以下のとおりである。

反応タンクの MLSS 濃度について、教師データに含まれる範囲よりも意図的に引き上げた未学習条件にて曝気風量の AI 自動制御運転を行った結果、制御性能が大幅に悪化した。個々の決定木の出力等を詳細に解析した結果、MLSS 濃度が高い条件での教師データ数が少なく入力データの変化を十分に反映できないモデルとなっていた点が要因と考えられた。

教師データの項目数について、従来の 10 項目から意図的に減じた教師データを用いて AI モデルを生成し AI 自動制御運転を行った。項目数を 4 項目とした AI モデルでは、事前の机上検討では実績データに対する予測誤差率（MAPE）が最小であったものの、10 項目を用いた AI モデルと比較して制御性能が悪化し、本検討の条件において教師データの項目数を大幅に削減する余地は小さいと考えられた。また、制御対象であり「重要度」値が圧倒的に高い曝気風量のみを減じた 9 項目の教師データを使用した AI モデルでは、AI 自動制御が正常に機能せず、このようなデータ項目を教師データから除外することが不適切であることが実験的に確認された。

AI 自動制御に関する一連の実験により、外乱要因が少ないパイロットプラントという条件下ではあるものの、項目数が 10 項目と少ない教師データを用いた AI モデルであっても、教師データである DO 一定制御を模倣した自動制御が可能であることが示された。一方、教師データにおけるデータ数が少ない、もしくは全く含まれていない条件下では、自動制御が正常に機能しない恐れがある点も示されたことから、このような自動制御技術を実用化するには、これに対応できるような AI 手法や、必要な教師データ量、AI モデルの更新頻度、異常時のバックアップ措置（従来の制御への切り替え等）等について、事前に十分な検討が必要と言える。ま

た、制御性能を事前に机上で検討する際には、本検討で実施したような過去データに対する予測性能を評価する方法では不十分であり、制御の結果が運転状態に反映されるような数値シミュレーション等が必要になると考えられた。

なお、本検討は、前・基本計画期間（2020 年度）から継続して実施してきたもので、2024 年度にて完了した。

（2）ICT・AI による設備劣化予測・異常診断技術

① 設備の劣化予測・異常診断技術の開発動向調査

下水道施設・設備を対象とする劣化予測・異常診断技術について、最新の研究開発動向を把握することを目的として、国内外を対象とした文献調査およびウェブサイト調査、国内の民間企業を対象としたヒアリング調査を行った。文献調査およびウェブサイト調査では、(a)管路施設を対象とした技術が多くを占める点、(b)ポンプ場や下水処理場を対象とする技術では振動等のセンシングデータに基づく診断技術が多くデータの分析等で AI の利用が進んでいる点等が示された。国内企業へのヒアリングからは、これらの技術の導入促進に向けた課題として、下水道設備では故障頻度が低く効果を実感しにくい、機械学習のためのデータの蓄積が少ない、といった点が挙げられた。

（3）ICT による広域監視・制御システム

① ICT の活用による下水道施設広域監視制御システムの開発

広域監視制御システムの通信に 1～20Mbps の広域イーサネットおよび最大 1Gbps の IP-VPN 回線を使用して実証実験を行い、広域監視制御システムの運用にいずれの回線を使用しても問題が無いことが確認できた。また、広域監視制御システムの導入、改修、保守点検コストおよび LCC を試算し、目標である従来技術比 30%削減を達成した。2021 年度からの 4 年間の実証試験により、広域監視制御の通信の信頼性・安定性、建設費・改修費および維持管理費の削減の 2 項目についてそれぞれの目標を達成し、2024 年度をもって本実証事業を完了した。

5.2 今後の予定

1.2 節に記載の開発項目について、次年度の実施予定は以下とおりである。

（1）AI による水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術

- AI を活用した水処理・汚泥処理の支援・制御技術の開発：「単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術」について実規模実証実験を継続し、複数池一括制御の検証を更に進め実用的な手法としての確立を図ると共に、本技術における処理メカニズムの解明、N₂O 生成・排出の特性および抑制方法、アンモニア制御への応用、ステップ流入による処理水質向上方策等について引き続きデータ・知見の蓄積を図る予定である。

（2）ICT・AI による設備劣化予測・異常診断技術

- 設備劣化データの集約・ライブラリ化：劣化予測・異常診断技術に係る性能確認のための共通基盤としての活用、更には既存技術の予測・診断の精度向上や新規技術の開発促進のための活用を想定した設備のモニタリングデータの集約・ライブラリ化の可能性や方法について、調査・検討を開始する。

（3）ICT による広域監視・制御システム

- B-DASH プロジェクトは本年度で完了したが、今後も引き続き倉敷市と共に、本施設を活用した自主研究として、長期的な運用の安定性と信頼性を確認する予定である。

謝辞

2.1 節の①に掲載した検討では、国土交通省国土技術政策総合研究所から借り受けた実証設備を使用したことを明記すると共に、同研究所および共同研究体の関係者各位に感謝の意を表します。

2.1 節の②に掲載した検討において、実証実験のフィールドや各種データ提供をいただいた地方公共団体の関係者各位に感謝の意を表します。

2.2 節に掲載した検討は、安川オートメーション・ドライブ(株)のご協力により実施した研究であることを明記すると共に、感謝の意を表します。

3.1 節に掲載した検討において、ヒアリング調査にご協力いただいた民間企業の関係者各位に感謝の意を表します。

4.1 節に掲載した検討は、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究として、共同研究体により実施されたものであることを明記すると共に、関係者各位に感謝の意を表します。

最後に、本報で紹介した全ての共同研究の関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本下水道事業団：技術開発年次報告書（令和 3 年度），pp.10,12-13,25，2021.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術導入ガイドライン(案)，国総研資料第 1190 号，2022.
- 3) 徳田 渉：単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術，電気学会研究会資料（公共施設研究会），No.2024.12.23，pp.37-40，2024.
- 4) 中大輔，高橋宏幸，糸川浩紀，松井穰：単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術における複数池一括制御の検討，第 34 回環境システム計測制御学会研究発表会，pp.30-34，2022.
- 5) 中大輔，堀野太郎，高田祥暉，糸川浩紀，松井穰，井上史郎：単槽型硝化脱窒プロセスにおける複数池一括制御の長期実証，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.884-886，2025.
- 6) 堀野太郎，中村高士，鈴木重浩，糸川浩紀，松井穰：ICT・AI を活用した単槽型硝化脱窒プロセスにおける窒素除去率向上の可能性，第 61 回下水道研究発表会講演集，pp.763-765，2024.
- 7) 草野吏，堀野太郎，中村高士，鈴木重浩，糸川浩紀，松井穰：ICT・AI を活用した単槽型硝化脱窒プロセスにおける N_2O 生成特性，第 61 回下水道研究発表会講演集，pp.766-768，2024.
- 8) 草野吏，堀野太郎，中村高士，鈴木重浩，糸川浩紀，松井穰：単槽型硝化脱窒プロセスにおける N_2O 排出特性，第 27 回日本水環境学会シンポジウム講演集，pp.173-174，2024.
- 9) 高田祥暉，糸川浩紀，草野吏，中村高士，鈴木重浩，松井穰：単槽型硝化脱窒プロセスにおける N_2O の生成・放出挙動，第 59 回日本水環境学会年会講演集，p.16，2025.
- 10) 堀野太郎，中大輔，中村高士，鈴木重浩，高田祥暉，糸川浩紀，松井穰：統合演算制御システムによるアンモニア計を用いた曝気風量制御の検証，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.887-889，2025.
- 11) 日本下水道事業団技術戦略部：アンモニア計による送気量フィードフォワード制御技術，月刊下水道，Vol.43(8)，pp.73-77，2020.

- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所：単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術実証事業 令和 6 年度自主研究成果資料，2025.
- 13) 山本明広，糸川浩紀，平林和也，藤原翔：AI による曝気風量自動制御の水量変動等に対する制御特性，第 59 回下水道研究発表会講演集，pp.808-810，2022.
- 14) 山本明広，糸川浩紀，平林和也，藤原翔：AI による曝気風量制御における教師データに対する出力特性，第 60 回下水道研究発表会講演集，pp.892-894，2023.
- 15) 山本明広，糸川浩紀，平林和也，藤原翔：AI による曝気風量制御に特徴的な挙動，第 61 回下水道研究発表会講演集，pp.391-393，2024.
- 16) 平林和也，藤原翔，大場正隆，綿引綾一郎，石川進，張亮，グェンタンフォン，糸川浩紀，橋本敏一，松橋学：AI を活用した水処理制御支援技術による運転管理設定値の予測の汎用性検証，第 57 回下水道研究発表会講演集，pp.895-897，2020.
- 17) 山本明広，高田祥暉，糸川浩紀，藤原翔，平林和也：活性汚泥法における曝気風量の AI 自動制御に対する未学習条件の影響，第 59 回日本水環境学会年会講演集，p.19，2025.
- 18) 山本明広，糸川浩紀，平林和也，藤原翔：AI による曝気風量自動制御において未学習条件が制御の挙動に及ぼす影響，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.388-390，2025.
- 19) 富樫俊文，中川浩二，川上高男：振動診断とビッグデータ分析による下水道施設の劣化状況把握・診断技術実証研究（B-DASH），技術開発年次報告書（令和元年度），p.16，日本下水道事業団，2019.
- 20) 経済産業省：水ビジネス海外展開施策の 10 年の振り返りと今後の展開の方向性に関する調査，2021.
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/waterbiz/kenkyukai/kaigai_infra/210401_business.pdf

2. 共同研究

2. 共同研究

2. 1 令和 6 年度共同研究実施状況

整理 No.※1	研究名称	研究 期間	研究目的	研究 担当者	共同研究者
(提) 242	最終沈殿池の処理能力 向上技術の開発	2016～ 2024	B-DASHプロジェクト「最終沈殿池 の処理能力向上技術実証事業」につ いて、最終沈殿池にろ過部を設置し、 処理能力を向上することで、系列を 増設することなく、低コストで、量的 または質的に処理能力を向上できる 技術であることを実証する。	糸川浩紀 高田祥暉	メタウォーター株式会社
(提) 281	能力増強型水処理シス テムの開発	2018～ 2024	①処理場の統廃合・広域化等による 既存施設を活用した処理能力増強ニ ーズに対応するため、固定式生物処 理法と浮遊式生物処理法をハイブリ ッドすることで、標準活性汚泥法に 比べ 1.5 倍程度の流入水量を処理で きるシステムを開発する。②代替施 設を構築することなく、反応タンク 等の改築更新工事が可能な仮設水処 理システムを開発する。	糸川浩紀 高田祥暉	荏原実業株式会社
(提) 285	AI搭載型次世代水処理 最適化システムの実証 に関する共同研究	2018～ 2027	B-DASH プロジェクト「単槽型硝化 脱窒プロセスの ICT・AI 制御による 高度処理技術実証事業」について、 ICT・AI を活用した①流入負荷変動、 季節変動に対応した空気量制御によ る単槽型反応タンクにおける A2O 法 同等処理水質の短 HRT での達成、② 空気量制御と連動した送風機吐出圧 力制御による消費電力の削減効果を 実証する。	糸川浩紀 高田祥暉	メタウォーター株式会社
(公) 299	ICTを活用した広域監 視・制御システムの技術 開発	2020～ 2024	B-DASH プロジェクト「ICT の活用 による下水道施設広域監視制御シス テム実証事業」について、製造業者が 異なる複数の監視制御設備を大規模 な改修を行わずに接続・通信を可能 とする要素技術①共通プロトコル方 式、②リモートデスクトップ方式で 構成される広域監視制御システムの 実規模施設を設置し、「通信の信頼 性・安定性」、「建設費・維持管理費の 削減」を実証する。	井上剛 村岡正季 小川剛 小柴卓也	株式会社日立製作所
					三菱電機株式会社
					株式会社明電舎
					メタウォーター株式会社
					東芝インフラシステムズ株 式会社
(提) 306	省エネ型深槽曝気技術 の開発	2021～ 2026	B-DASH プロジェクト「省エネ型深 槽曝気技術に関する実証事業」につ いて、深槽式反応タンクにおける省 エネ型深槽曝気技術の消費電力量お よび温室効果ガス排出量の削減効果 や、LCC の削減効果を実証する。	糸川浩紀 山本明広 小柴卓也	前澤工業株式会社

※1 (公)：公募型共同研究，(提)：提案型共同研究，(簡)：簡易提案型共同研究，(特)：特定共同研究

整理 No. ^{※1}	研究名称	研究 期間	研究目的	研究 担当者	共同研究者
(公) 311	ダウンサイジング対応 同軸差動式スクリー プレス脱水機の開発	2022～ 2024	高効率凝集装置と同軸差動式スクリープレス脱水機の組合せにより、脱水機処理能力の大幅な増強を図り、従来脱水機（圧入式スクリープレス脱水機Ⅲ型）に対し LCC を低減する汚泥脱水技術の開発を行う。また、拡張機能として、AI を用いた自動運転モードについても開発・検証を行い、運転操作性の向上について評価する	三宅晴男 村岡正季 小柴卓也	水ingエンジニアリング株式 会社 水ing株式会社
(提) 312	発酵熱を利用した下水 汚泥の効率的なコンポ スト化技術の開発	2022～ 2028	B-DASH プロジェクト「縦型密閉発酵槽による下水汚泥の肥料化技術に関する実証事業」について、縦型密閉発酵技術を下水汚泥に適用し、副原料配合の最適化を含めた高速発酵乾燥技術を実証する。	三宅晴男 村岡正季 島田正夫 熊越瑛	株式会社クボタ UBE三菱セメント株式会社 中部エコテック株式会社
(公) 313	集中加温型高速中温消 化システムとステンレ ス合板製消化タンクに よる低コスト嫌気性消 化技術の開発	2023～ 2024	余剰汚泥を集中的に加温し消化効率を向上することによる、消化日数の短縮やステンレス合板で製作した消化タンクの耐食・耐久性等および高効率攪拌装置の攪拌性能について確認する。	三宅晴男 島田正夫 熊越瑛	メタウォーター株式会社
(公) 315	中小規模向けユニット 式下水汚泥消化システ ム	2023～ 2025	中小規模の下水処理場に特化したユニット式下水汚泥消化システムを用いた実規模での実証試験を通じて本技術を確認する。	三宅晴男 島田正夫 熊越瑛	株式会社日立プラントサー ビス
(公) 316	水熱炭化を用いたカー ボンニュートラルの達 成に向けた実証	2023～ 2024	循環型社会及び下水道分野のカーボンニュートラルの実現に向けて、温室効果ガス削減、消費エネルギー削減、創出エネルギー増大及び低コスト化が可能な水熱炭化技術を開発する。	三宅晴男 島田正夫 熊越瑛	株式会社神鋼環境ソリュー ション
(公) 317	予熱加温保持消化技術 とボルト接合型パネル タンクによる低コスト 嫌気性消化システムの 開発	2023～ 2025	余剰汚泥を予め加温する予熱加温保持技術による消化日数の短縮と、ボルト接合型パネルタンクの採用による現地工期の短縮、ならびにこれらを組み合わせたシステムの技術開発を行い、嫌気性消化技術の導入コストの縮減効果について確認する。	三宅晴男 島田正夫 熊越 瑛	株式会社神鋼環境ソリュー ション

※1 (公)：公募型共同研究，(提)：提案型共同研究，(簡)：簡易提案型共同研究，(特)：特定共同研究

整理 No.※	研究名称	研究 期間	研究目的	研究 担当者	共同研究者
(公) 318	AI処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術	2023～ 2024	処理水質を予測する AI を既存の NH ₄ -N 制御に組込むことで、処理水質を管理基準値内に収めつつ、更なる省エネ効果を発現する曝気風量制御技術を開発する。	糸川浩紀 高田祥暉 山本明広	日新電機株式会社
(提) 319	下水汚泥消化ガスの Ex-situ 型バイオメタネーション反応を用いた二酸化炭素利用及び合成メタン製造による GHG 排出量削減技術	2023～ 2025	海外で実用化されている、Ex-situ 型（槽外型）バイオメタネーションにて消化ガスを高濃度のメタンガスへと変換し、日本の条件・制度に適応した都市ガス利用等の確認を行い、国内処理場への適用性を検証する。	三宅晴男 村岡正季 島田正夫 小柴卓也 熊越瑛	カナデビア株式会社
(公) 321	MABR 併用型活性汚泥法を用いた既存水処理施設の能力増強技術	2024～ 2025	標準活性汚泥法や嫌気無酸素好気法に対して、既設を活用して反応タンク容量あたりの水処理能力を 1.5 倍以上に増強し、ライフサイクルコスト（LCC）の縮減を可能とする「MABR 併用型活性汚泥法」の開発を目的とする。	糸川浩紀 山本明広 高田祥暉	三機工業株式会社
(公) 322	ハイドロサイクロンを用いた汚泥性状改善による水処理能力増強技術の実証	2024～ 2026	ハイドロサイクロンにより活性汚泥の沈降性を向上させることで水処理能力を増強する技術について、国内下水処理への適用性や導入効果を実証することにより技術を確立し実用化を図る。	糸川浩紀 高田祥暉 山本明広	株式会社明電舎
(公) 323	好気性グラニュールによるダウンサイジング可能な水処理技術の実証	2024～ 2029	AB-Cross プロジェクト「好気性グラニュールによるダウンサイジング可能な下水処理技術に関する実証事業」について、好気性グラニュール法を用いた下水処理技術の処理性能や消費電力の低減効果を実証する。	糸川浩紀 山本明広 小柴卓也	メタウォーター株式会社

継続… 13 件

新規… 4 件



計 17 件（うち非掲載 1 件）

※1 (公)：公募型共同研究，(提)：提案型共同研究，(簡)：簡易提案型共同研究，(特)：特定共同研究

2. 2 令和 6 年度完了共同研究の概要

令和 6 年度は、7 件の共同研究が完了した。

整理 No.※1	研究名称	研究期間	共同研究者	頁
(提) 242	最終沈殿池の処理能力向上技術の開発	2016～2024	メタウォーター株式会社	209
(提) 281	能力増強型水処理システムの開発	2018～2024	荏原実業株式会社	210
(公) 299	ICTを活用した広域監視・制御システムの技術開発	2020～2024	株式会社日立製作所 三菱電機株式会社 株式会社明電舎 メタウォーター株式会社 東芝インフラシステムズ株式会社	非掲載
(公) 311	ダウンサイジング対応同軸差動式スク リュープレス脱水機	2022～2024	水ingエンジニアリング株式会社 水ing株式会社	211
(公) 313	集中加温型高速中温消化システムとス テンレス合板製消化タンクによる低コ スト嫌気性消化技術の開発	2023～2024	メタウォーター株式会社	212
(公) 316	水熱炭化を用いたカーボンニュートラ ルの達成に向けた実証	2023～2024	株式会社神鋼環境ソリューション	213
(公) 318	AI処理水質予測を活用した省エネ型曝 気風量制御技術	2023～2024	日新電機株式会社	214

※1 (公)：公募型共同研究，(提)：提案型共同研究，(簡)：簡易提案型共同研究，(特)：特定共同研究

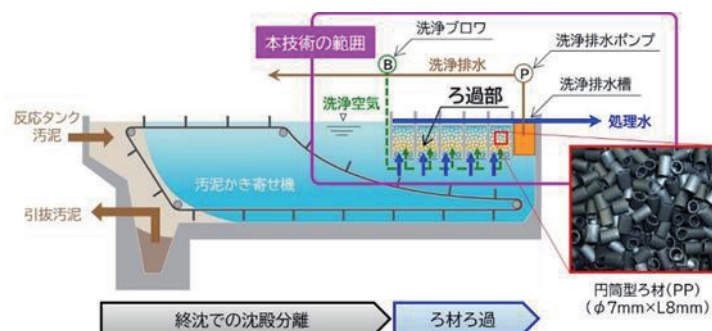
242	メタウォーター株式会社	最終沈殿池の処理能力向上技術の開発	糸川 浩紀 高田 祥暉
-----	-------------	-------------------	----------------

1) 共同研究の目的

本研究では、最終沈殿池の処理能力増強もしくは処理水質向上を可能とする「最終沈殿池の処理能力向上技術」を確立するために、実規模の実証実験等を行った。2017～2018 年度に国土交通省の B-DASH プロジェクトとしてメタウォーター（株）・日本下水道事業団・松本市共同研究体により実証研究を実施した後に、引き続き 2019～2024 年度に同研究体による自主研究として実施したものであるが、B-DASH 実証研究の成果については国土技術政策総合研究所から「技術導入ガイドライン(案)」が公表されていることから、本稿では自主研究期間の主要な成果を報告する。

2) 共同研究の概要

同技術は、最終沈殿池の流出部にろ過ユニット（ろ過部）を設置し、池内上澄水中に含まれる浮遊物質を除去するものである（図－1）。これにより、(a)従来の最終沈殿池と同等の処理水質を得ながら従来に比べて処理水量を増加させる「量的向上」、もしくは(b)従来と同等の処理水量において急速ろ過水相当の処理水質を得る「質的向上」を図ることができる。

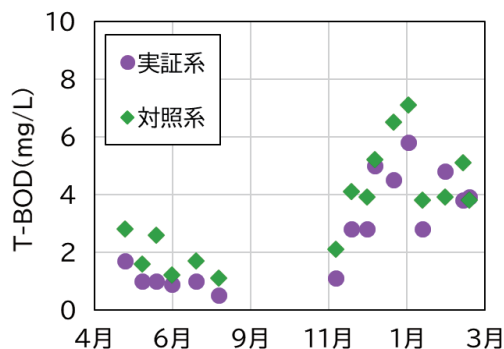


図－1 最終沈殿池の処理能力向上技術の概略

自主研究では、松本市両島浄化センターの水処理系列 1 系の最終沈殿池 3 池（処理能力 3,650m³/(d・池)）に設置した実証設備（実証系）について 6 年間にわたる長期の実証運転を行い、本技術の性能検証、適用先拡大、運用に際して見出された課題解決等に係る各種検討を実施した。

3) 共同研究の成果

- ・ 対照系に対して実証系の処理水量を 2 倍程度まで引き上げる量的向上運転において、対照系と比べて同等以上の処理水質が安定して得られることを長期にわたり確認した。
- ・ 量的向上と質的向上の両立を図り本技術の適用先拡大を可能とする新たな運用として、対照系に対して実証系の水面積負荷を約 1.5 倍とした条件で運転した結果、下水道法施行令に基づく急速ろ過法の処理水質水準（BOD≤10mg/L）を満足する処理水が得られることを確認した（図－2）。
- ・ ろ過部を構成する底部スクリーンにおいて汚泥やし渣による閉塞が生じる課題に対して、従来のパンチングスクリーンからメッシュスクリーンに変更することで閉塞を抑制できることを確認した。



図－2 量的向上かつ質的向上を図る運転における処理水の T-BOD の推移

4) 関連資料・報文等

- ・ 国土交通省国土技術政策総合研究所：最終沈殿池の処理能力向上技術導入ガイドライン(案)，2019。
- ・ 神座，鈴木，宮内，橋本，社本，島崎，藤井：第 55 回下水道研究発表会講演集，pp.911-913，2018。
- ・ 神座，鈴木，山下，水田，社本，矢野，藤井：第 56 回下水道研究発表会講演集，pp.1067-1069，2019。
- ・ 五味，岡村，中村，鈴木，高田，糸川，社本：第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.893-895，2025。
- ・ 高田，糸川，五味，岡村，中村，鈴木，社本：第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.890-892，2025。

【謝辞】本研究はメタウォーター(株)・日本下水道事業団・松本市共同研究体により実施されたことを明記すると共に、関係者各位に感謝の意を表する。

281	荏原実業株式会社	能力増強型水処理システムの開発	糸川 浩紀 高田 祥暉
-----	----------	-----------------	----------------

1) 共同研究の目的

人口減少下での污水処理事業の持続的な運営の観点から污水処理施設の広域化・共同化が求められており、一部の下水処理場では流入汚水量の増加が見込まれることから、これに対応可能な水処理技術が必要とされている。本研究では、標準活性汚泥法の既設反応タンクに固定床担体を付加することで処理能力を1.5倍程度まで増強可能な「能力増強型水処理システム」を確立することを目的に、パイロットプラントを用いた実証実験を行った。

2) 共同研究の概要

本技術は、標準活性汚泥法の反応タンクの上流端区画に接触材を設置して活性汚泥が存在しない固定床型反応槽（以下、固定槽）とし、生物膜法と活性汚泥法の直列の併用処理とするものである。4区画から構成される反応タンクの場合、上流端の1区画に接触材を投入して「固定槽」とし、残りの3区画を活性汚泥法による「浮遊槽」とする。原水（最初沈殿池越流水）を固定槽と浮遊槽第2槽に所定の水量比でステップ流入させ、最終沈殿池からの返送汚泥を浮遊槽第1槽に流入させる。本技術では硝化促進運転を前提とし、浮遊槽第2槽は曝気を抑制することで脱窒によりアルカリ度を回復させる無酸素槽とする。

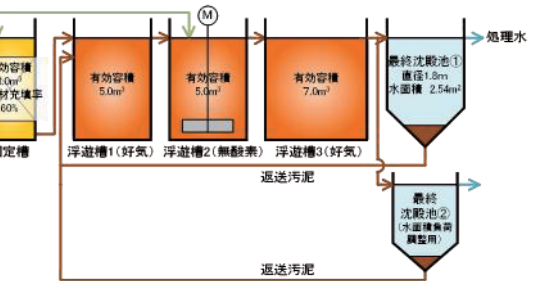


図-1 パイロットプラントの処理フロー

共同研究では、4区画の反応タンクと最終沈殿池から構成されるパイロットプラント（処理能力90m³/d；図-1）をJS技術開発実験センター内に設置し、隣接する下水処理場の最初沈殿池越流水を原水として実証実験を実施した。システムの改良や運転方法・条件の調整等を経て、2023年7月～2024年7月の期間、通年での実証運転を実施した（原水の水温：13.7～28.0℃、BOD濃度：45～140mg/L）。

3) 共同研究の成果

- 反応タンクのHRTが5.3hr（標準活性汚泥法の一般値である8hrに対して1.5倍の能力増強に相当）、流入水量の時間変動ピーク比が1.4の条件にて、処理水のBODおよびSS濃度が目標値（各10mg/L以下）を満足することが通年で実証された（図-2）。
- 原水のアルカリ度/NH₄-N比が7以下となる条件において、原水へアルカリ剤を添加することで硝化を促進する手法を見出した。これを低水温期に併用することで、処理水のNH₄-N濃度は期間を通して概ね1mg/L以下となり、低水温期を含めてN-BODの発現を抑制することが可能であった。

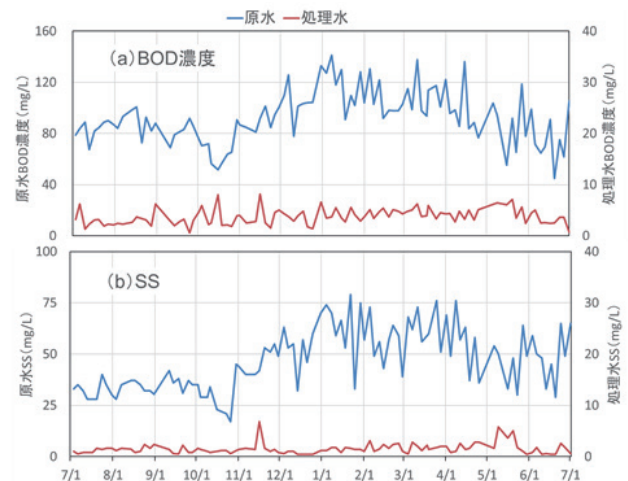


図-2 通年実証運転における原水・処理水質の経日変化

4) 関連資料・報文等

- 南，中谷，高村，荒川，糸川：第58回下水道研究発表会講演集，pp.791-793，2021.
- 高村，南，荒川，山森，糸川：第59回下水道研究発表会講演集，pp.787-789，2022.
- 中谷，南，荒川，山森，糸川：第61回下水道研究発表会講演集，pp.742-744，2024.
- 長谷川，中谷，南，荒川，高田，糸川：第62回下水道研究発表会講演集，pp.815-817，2025.

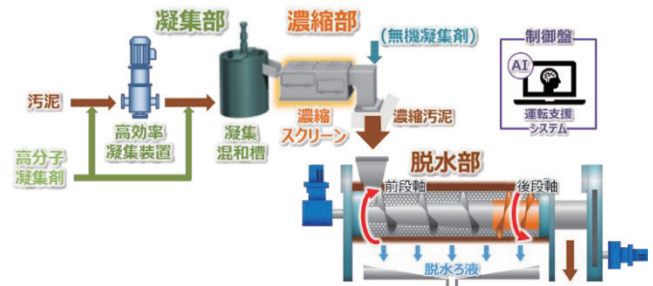
311	水 ing エンジニアリング株式会社 水 ing 株式会社	汚泥処理の低コスト化に向けた汚泥濃縮技術及び汚泥脱水技術の開発 ーダウンサイジング対応同軸差動式スクリュープレス脱水機ー	三宅 晴男 村岡 正季 小柴 卓也
-----	----------------------------------	---	-------------------------

1) 共同研究の目的

下水汚泥の脱水においては、汚泥の難脱水化に対応する処理性能の向上や、熟練技術者の減少に対応した運転操作の省力化等の課題がある。本研究では、高効率凝集装置と同軸差動式スクリュープレス脱水機の組み合わせ、および AI を用いた運転支援機能の付加により、従来技術※1 と比較して低コスト化およびダウンサイジングが可能な脱水機の開発を目的とした（※1 JS 機械設備標準仕様書の「圧入式スクリュープレス脱水機Ⅲ型」）。

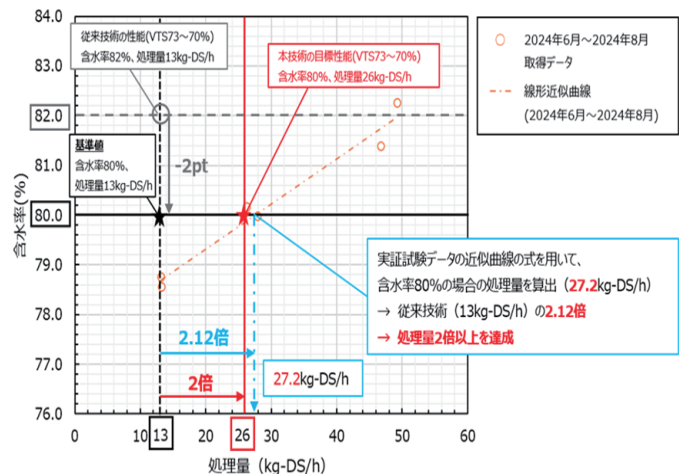
2) 共同研究の概要

本技術は、凝集部、濃縮部、脱水部、運転支援システムから構成される汚泥脱水装置（図－1）であり、従来技術と比較してスクリーン径当たりの処理速度を増加させ、設備のダウンサイジングによる低コスト化を目的としている。



図－1 本技術の概略フロー

本研究では、標準活性汚泥法の実下水処理場（現有処理能力：48,000m³/d）に試験脱水機を設置し、年間を通じた実証試験を実施した。供試汚泥は混合生汚泥と嫌気性消化汚泥とし、各汚泥について 1 液および 2 液調質の両方式で試験を行った。また高効率凝集装置の有無による汚泥処理速度や含水率への影響等を確認した。AI 運転支援機能については、含水率予測モデルを構築し、AI が推奨する運転による含水率予測と実運転の結果を比較評価した。



図－2 脱水性能評価例（消化汚泥 1 液調質の場合）

3) 共同研究の成果

- 高効率凝集装置なしの場合、年間を通じて従来技術と同等の含水率、SS 回収率、薬注率を達成した。
- 高効率凝集装置付きの場合、従来技術と同等の含水率、SS 回収率、薬注率にて、スクリーン径当たりの処理速度が混合生汚泥で 1.5 倍以上、嫌気性消化汚泥で 2 倍以上を達成した（例：図－2）。
- AI 運転支援機能を用いた場合、含水率予測モデルの予測値と実際の含水率測定値との乖離が±1.0pt 程度以下であることを確認した。また運転支援機能の各運転モード（含水率優先運転モード、薬注率抑制運転モード、コスト削減運転モード）で運転を行った結果、本脱水機が各運転モードにおいて設定された性能値を満たし、また過去データと比較して良好に運転が行えることを確認した。

4) 関連資料・報文等

・鎌田ら：第 61 回下水道研究発表会講演集，pp.910-912，2024.、・鈴木ら：第 61 回下水道研究発表会講演集，pp.376-378，2024.、・飯倉ら：第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.385-387，2025.、・鈴木ら：第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.965-967，2025.

313	メタウォーター株式会社	脱炭素社会実現に向けたバイオガス利活用技術及び嫌気性消化技術の開発 ー集中加温型高速中温消化システムとステンレス合板製消化タンクによる低コスト嫌気性消化技術の開発ー	三宅 晴男 島田 正夫 熊越 瑛
-----	-------------	---	------------------------

1) 共同研究の目的

下水処理場の脱炭素化には嫌気性消化技術の普及が重要であり、導入促進には低コスト化が不可欠である。本研究は、消化日数の短縮による消化タンクの小型化と、建設工期および内部防食コストの削減を可能とする技術を組み合わせ、従来よりも LCC を低減する中温消化技術の開発を目的とした。

2) 共同研究の概要

本技術は、①中温消化に必要な熱量を余剰汚泥のみに 60℃程度で集中的に与えることで速やかかつ安定的な分解・ガス化を実現し消化日数を短縮する「集中加温型高速中温消化システム」（以下、「集中加温システム」と略記）、②ス

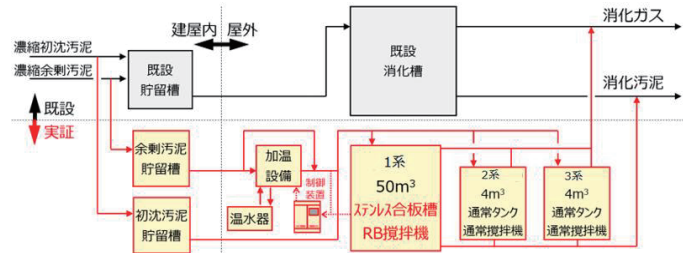


図-1 実証設備のフロー

テンレス合板の巻き上げ工法による消化タンク製作により建設工期および防食コストを削減する「ステンレス合板製消化タンク」（以下、「ステンレスタンク」と略記）の 2 技術を組み合わせたものである。

下水処理場に有効容量 50m³ のステンレスタンク 1 槽（以下「1 系」と表記）、4m³ の消化タンク 2 槽（以下「2 系」、「3 系」と表記）設置し、1 年間の実証実験を行った（図-1）。1 系は消化日数 10d、2 系は過負荷耐性把握のために 8d、3 系は対照系として 20d で運転した。本研究では、集中加温システムにおける初沈汚泥と余剰汚泥の投入比率や余剰汚泥性状による消化日数の短縮効果の評価、ステンレスタンクの防食性・耐摩耗性確認および流体解析による攪拌能力の検討、LCC 試算等を行った。

3) 共同研究の成果

- 集中加温システムを用いた場合、初沈汚泥／余剰汚泥＝0.5～3 の範囲において、消化日数 10d の運転でも投入 VS 当たりのガス発生量は 20d と概ね同等で、タンク容積あたりのガス発生量は 1.9 倍であった（表-1）。一方で、消化日数 8d では運転は可能であったものの、ガス発生量の低下を確認した。また、本技術で処理した消化汚泥の脱水性およびろ液の性状は、ラボ実験により一般的な中温消化と同等であることを確認した。更に、異なる下水処理場の汚泥を用いたラボ実験でも、本技術の適用により同様の消化日数短縮効果が得られることを確認した。加えて、消化ガス中のメタン濃度を監視することで、酸敗等の異常発生を速やかに検知できると判断した。
- ステンレスタンクは、テストピースを用いた実験により、耐用年数 35 年を満たす耐腐食性（耐硫酸、耐有機酸）および耐摩耗性を有することを確認した。また流体解析の試算結果から、死水域を 0.1% 未満に抑え、10d に 1d の強攪拌により消化タンク内の堆積物を従来比で約 70%削減可能と判断した。
- LCC 試算により、処理場規模毎に消化施設導入の損益分岐点を検証した結果、各技術単独の導入で 2 万 m³/d 台半ば、両技術の導入で 1 万 m³/d 台後半になることを確認した。

表-1 実証期間における消化性能(平均値)

項目		1系 実証系	2系 過負荷系	3系 対照系
消化日数	d	9.9	8.0	19.7
(投入量負荷)	対3系(負荷として)	2.0	2.5	1
槽容積あたり	Nm³/m³	1.34	1.06	0.71
ガス発生量	対3系	1.9	1.5	1
投入VSあたり	Nm³/t-投入VS	521	340	550
ガス発生量	対3系	0.95	0.62	1
VS分解率	%	54.8	53.9	56.9
	対3系	0.96	0.95	1

4) 関連資料・報文等

- 藤原ら：第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.992-994，2025。

316	株式会社神鋼環境ソリューション	循環型社会の実現に向けた下水汚泥資源の 利活用技術の開発 ー水熱炭化を用いたカーボンニュートラル の達成に向けた実証ー	三宅 晴男 熊越 瑛 島田 正夫
-----	-----------------	--	------------------------

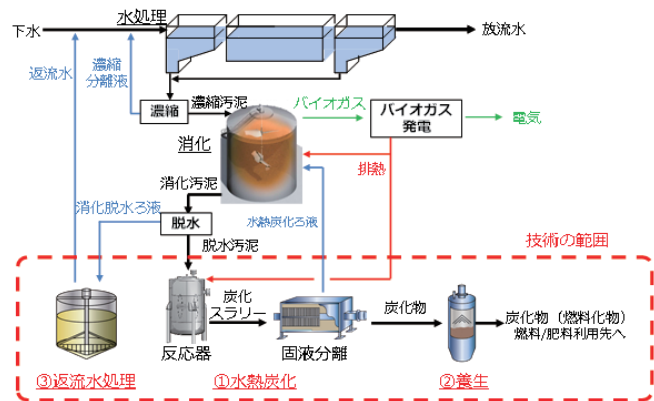
1) 共同研究の目的

下水汚泥資源は量・質ともに安定したバイオマス資源であり、その利活用は循環型社会の実現に寄与する。本研究は、下水汚泥資源のエネルギー利活用の普及拡大に資する技術として、水熱炭化を用いた炭化技術の開発を目的とし、実規模で実証実験を行った。

2) 共同研究の概要

水熱炭化とは、脱水汚泥等の含水率の高い湿潤バイオマスを加圧・加温処理後、固液分離することで燃料や肥料に利用可能な炭化物を得る技術である。従来の熱分解炭化で必要な前乾燥処理が不要で省エネルギーという特徴がある。

今回実証した水熱炭化技術は以下の 3 要素で構成される（図－1）。①水熱炭化：反応器内で消化脱水汚泥を 170℃・1MPa 未満で処理し、炭素割合の高い炭化スラリーに変換した後、固液



図－1 水熱炭化技術のフロー

分離により炭化物を得る。②養生：通風により炭化物の含水率および発熱・発火性を低減させる。③返流水処理：消化脱水ろ液を凝集沈殿処理することで既設水処理への返流負荷の上昇を抑制する。富士市西部浄化センター（処理能力 50,750m³/d）に実証プラント（脱水汚泥処理量：5t-wet/d）を設置し、2023 年 11 月から 2024 年 9 月にかけて実証実験を行った。

3) 共同研究の成果

- 本実証において、含水率 81～82%の脱水汚泥から含水率約 30～40%の炭化物を製造できた。養生処理後の炭化物（燃料化物）は含水率 20%以下、かつ高位発熱量が平均 14MJ/kg-wet であり、JIS Z7312 で規定される下水汚泥固形燃料の含水率（20%以下）および BSF（8MJ/kg-wet 以上）を満足することを確認した。また炭化物は菌体りん酸肥料の基準値を満足することを確認した。
- 実証で得られた各種原単位を用いて、脱水汚泥量 25t-wet/d におけるエネルギー収支を試算した結果、燃料化物の保有エネルギーが製造に要するエネルギーを上回ることを確認した。
- 同規模における脱炭素効果を試算した結果、消化ガス発電の併用および本技術に発電排熱を利用し、製造した炭化物を石炭等の代替として利用することで、処理場からの温室効果ガス排出量以上の削減の可能性があることを確認した。
- 同規模における汚泥処理単価（建設費年価＋維持管理費）を試算した結果、従来の炭化技術の処理単価や脱水汚泥の一般的な委託処分費（23 千円/t-wet と仮定）と比較して低いことを確認した。
- 実証実験およびラボによる補足試験では、バイオガス量、脱水汚泥含水率、放流水の COD 及び T-P はほぼ変化せず、返流水の T-N 濃度が 2 割程度上昇する可能性があることが明らかとなった。

4) 関連資料・報文等

- 田中裕大，隅晃彦，佐藤朋弘，宮本博司，熊越瑛，島田正夫，三宅晴男：湿式炭化による下水汚泥利活用技術の開発と実証，第 62 回下水道研究発表会講演集，pp.157-159，2025。

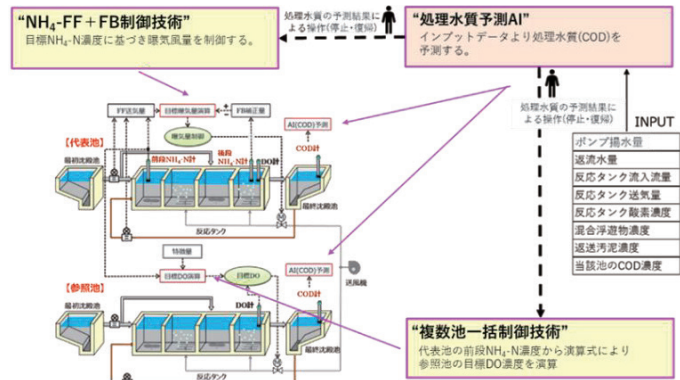
318	日新電機株式会社	下水処理場の運転管理における AI 活用技術の開発 —AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術—	糸川 浩紀 高田 祥暉 山本 明広
-----	----------	--	-------------------------

1) 共同研究の目的

本研究では、既存のアンモニア制御技術「アンモニア計による送気量フィードフォワード制御技術」（2020 年 2 月に JS 新技術 I 類に選定；以下、「NH₄-FF+FB 制御技術」）に対して、AI による処理水質予測技術を組み合わせることで、より積極的な曝気風量削減を可能とする「AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術」（図－1）の開発を目的に、実規模での実証実験を行った。

2) 共同研究の概要

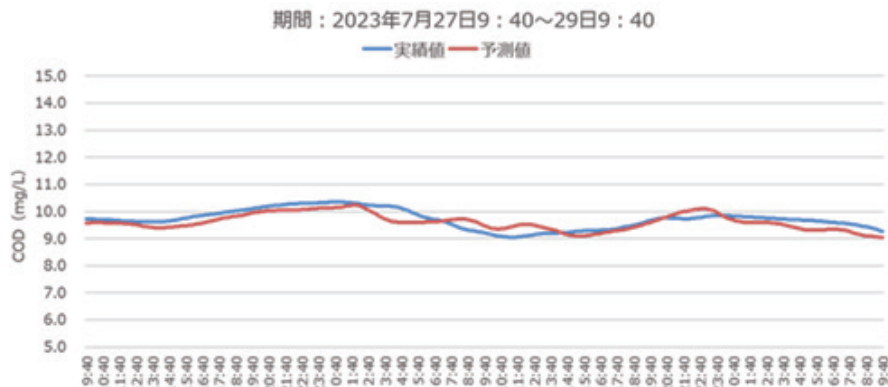
高度処理を行う実下水処理場をフィールドとして、各種計測データから放流水の COD_{Mn} 濃度を予測する AI（LSTM）モデルを構築し、COD 計の計測値と比較することで予想精度を検証した。併せて、同処理場の反応タンク（処理能力 2,800m³/(d・池)）に NH₄-FF+FB 制御技術を実装した上で、目標 NH₄-N 濃度（後段 NH₄-N 計測値）を 1.5mg/L から 3mg/L まで段階的に引き上げた複数の条件にて同制御の運転を行い、目標 NH₄-N 濃度に対する追従性や曝気風量の削減効果を確認した。加えて、同制御技術の導入コスト削減を意図して、同制御を実装した「代表池」における NH₄-N 濃度計測値に基づき他の反応タンク（参照池）を制御する複数池一括制御についても実証を試みた。



図－1 AI 処理水質予測を活用した省エネ型曝気風量制御技術の概要

3) 共同研究の成果

- AI による処理水質予測について、6 項目×13 ヶ月分の計測データを用いた機械学習により、処理水の COD_{Mn} 濃度を予測する AI モデルを生成できたものの（図－2）、本研究内では予測精度を十分に検証するには至らなかった。
- NH₄-FF+FB 制御技術について、目標 NH₄-N 濃度を 3mg/L まで引き上げた制御が可能であり、それにより曝気風量の低減が見込めることが示された。
- 複数池一括制御については、検討した手法では良好に機能しないことが試行において判明し、参照池の制御方法を見直す必要があると結論付けた。



図－2 AI モデルによる処理水 COD_{Mn} 濃度の予測値と実績値の比較
（2023.7.27～29；学習データ期間内(2023.4.1～2024.4.30)の予測である点に注意）

第2章 技術評価委員会活動

1. 技術評価委員会

日本下水道事業団技術評価委員会は、新技術実用化の適正な評価を行い、下水道技術の研究、調査及び試験に関する重要事項を審議するために設置された理事長の諮問機関で、学識経験者、国及び地方公共団体の下水道部局の長から構成されている。

さらに、必要に応じて専門の事項を調査するための専門委員会を設けている（令和 6 年度は設置なし）。

技 術 評 価 委 員 会

令和 7 年 3 月 31 日現在

	氏 名	所 属 職 名
会 長	古米 弘明	中央大学研究開発機構教授
委 員	長岡 裕	東京都市大学建築都市デザイン学部都市工学科教授
〃	池 道彦	大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻教授
〃	高岡 昌輝	京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻教授
〃	石井 宏幸	国土交通省水管理・国土保全局大臣官房参事官（上下水道技術）
〃	三宮 武	国土交通省国土技術政策総合研究所上下水道研究部長
〃	佐々木 健	東京都下水道局長
〃	寺川 孝	大阪市建設局長
〃	吉田 薫	埼玉県下水道局長
〃	中島 義成	公益社団法人日本下水道協会常務理事

2. 令和 6 年度活動状況

令和 6 年度は、技術評価委員会を 2 回開催した。

〔第 90 回 技術評価委員会〕

(1) 開催日 令和 6 年 10 月 17 日（木）

(2) 場所 日本下水道事業団本社 8 階 大会議室 及び WEB 会議

(3) 議題

- ① 前回議事概要の確認
- ② 「JS 技術開発・活用基本計画 2022」の中間見直しについて（報告）
- ③ 新規公募型共同研究の課題設定方針について（審議）
- ④ 令和 5 年度試験研究実施状況および令和 6 年度試験研究計画について（審議）
- ⑤ 開発課題別試験研究の実施状況について（報告）

(4) 出席者

会長 古米 弘明

委員 長岡 裕、池 道彦、石井 宏幸、三宮 武、佐々木 健、
寺川 孝、吉田 薫

(5) 議事内容

（１）前回議事概要の確認
令和 6 年 3 月 18 日に開催された第 89 回技術評価委員会の議事概要について説明し、承認された。

（２）「JS 技術開発・活用基本計画 2022」の中間見直しについて（報告）
「JS 技術開発・活用基本計画 2022」の中間見直しの内容について説明し、質疑が行われた。

（３）新規公募型共同研究の課題設定方針について（審議）
令和 6 年度に追加で公募予定の共同研究の課題設定方針について説明し、審議を経て承認された。

（４）令和 5 年度試験研究実施状況および令和 6 年度試験研究計画について（審議）
JS が実施する試験研究について、令和 5 年度の実施状況および令和 6 年度の試験研究計画の概要を説明し、審議を経て承認された。

（５）開発課題別試験研究の実施状況について（報告）
令和 6 年度の各開発課題・開発項目の実施状況を報告し、質疑が行われた。

[第 91 回 技術評価委員会]

- (1) 開催日 令和 7 年 3 月 28 日（木）
- (2) 場所 日本下水道事業団本社 8 階 大会議室 及び WEB 会議
- (3) 議題 ① 前回議事概要の確認
② 令和 6 年度試験研究の実施状況について（報告）
③ 真岡市水処理センター等における維持管理の取組みについて（報告）
④ その他
- (4) 出席者 会長 古米 弘明
委員 長岡 裕、池 道彦、高岡 昌輝、石井 宏幸、
山下 洋正（代理出席）、田中 尚（代理出席）、吉田 薫、
中島 義成
- (5) 議事内容 (1) 前回議事概要の確認
令和 6 年 10 月 17 日に開催された第 90 回技術評価委員会の議事概要について説明し、承認された。
- (2) 令和 6 年度試験研究の実施状況について（報告）
令和 6 年度の試験研究の実施概況に加えて、個別テーマ 1 件および公募型共同研究の実施状況を報告し、質疑が行われた。
- (3) 真岡市水処理センター等における維持管理の取組みについて（報告）
令和 6 年度に開始した真岡市水処理センター等の維持管理業務の効率化に向けた取組み等を報告し、質疑が行われた。
- (4) その他
古米会長、長岡会長代理が退任される旨を報告し、会長代理として池委員が指名された。

3. 技術評価の推移

技術評価は、JS が開発した新技術について、JS における試験研究の成果などに基づき、その技術の特徴や性能、設計や維持管理における留意点などの事項について、体系的に公正かつ客観的な評価を行うものである。

技術評価委員会では、昭和 49 年度以来、これまでに 33 件の諮問を行い、44 件の答申を行ってきた。

技術評価の答申内容は、JS の内外に公表されており、JS 内部の設計基準類への反映などにより、JS における当該技術の迅速かつ円滑な実施への導入や普及促進に寄与するだけでなく、公益社団法人日本下水道協会発行の「下水道施設計画・設計指針と解説」などにも反映され、わが国の下水道事業の発展に多大な貢献をしている。

(1)	膜分離活性汚泥法（令和3年11月諮問）	
	膜分離活性汚泥法の技術評価に関する第3次報告書 －MBRの省エネ化と流量変動対応－	令和4年3月
(2)	アンモニア計を利用した送風量制御技術（平成31年3月諮問）	
	アンモニア計を利用した曝気風量制御技術の評価に関する報告書	令和2年4月
(3)	下水汚泥由来繊維利活用システム（平成27年10月諮問）	
	下水汚泥由来繊維利活用システムの技術評価に関する報告書	平成28年12月
(4)	シートライニング工法（光硬化型）による防食技術（平成26年10月諮問）	
	シートライニング工法（光硬化型）による防食技術の技術評価に関する報告書	平成27年7月
(5)	膜分離活性汚泥法（平成24年3月諮問）	
	膜分離活性汚泥法の技術評価に関する第2次報告書 －MBRの適用拡大へ向けて－	平成25年4月
(6)	エネルギー回収を目的とした嫌気性消化プロセス（平成22年11月諮問）	
	エネルギー回収を目的とした嫌気性消化プロセスの評価に関する報告書	平成24年4月
(7)	アナモックス反応を利用した窒素除去技術（平成21年3月諮問）	
	アナモックス反応を利用した窒素除去技術の評価に関する報告書	平成22年3月
(8)	オゾン処理技術（平成20年3月諮問）	
	オゾン処理技術の技術評価に関する報告書	平成21年4月
(9)	下水汚泥固形燃料化システム（平成19年3月諮問）	
	下水汚泥固形燃料化システムの技術評価に関する報告書	平成20年4月
(10)	耐硫酸モルタル防食技術（平成17年12月諮問）	
	耐硫酸モルタル防食技術の技術評価に関する報告書	平成20年4月
(11)	活性汚泥モデルの実務利用（平成16年10月諮問）	
	活性汚泥モデルの実務利用の技術評価に関する報告書	平成18年1月

(12)	汚泥減量化技術（平成15年9月諮問）	
	汚泥減量化の技術評価に関する報告書	平成17年4月
(13)	下水汚泥の炭化システム及び生成される炭化製品の諸物性（平成14年10月諮問）	
	下水汚泥の炭化システム及び生成される炭化製品の諸物性の技術評価に関する報告書	平成15年11月
(14)	膜分離活性汚泥法（平成14年10月諮問）	
	膜分離活性汚泥法の技術評価に関する報告書	平成15年11月
(15)	ステップ流入式多段硝化脱窒法（平成12年11月諮問）	
	ステップ流入式多段硝化脱窒法の技術評価に関する報告書	平成14年5月
(16)	下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術（平成11年3月諮問）	
	下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術の評価に関する報告書 －硫酸によるコンクリート腐食の機構と総合的対策の方針－	平成13年3月
(17)	研究開発評価（平成11年11月諮問）	
	研究開発評価制度に関する報告書	平成12年3月
(18)	オキシデーションディッチ法（平成10年9月諮問）	
	オキシデーションディッチ法の評価に関する第3次報告書 －OD法の運転管理手法及び高度処理化－	平成12年3月
(19)	最近の消毒技術（平成6年9月諮問）	
	最近の消毒技術の評価に関する報告書	平成9年3月
(20)	包括固定化担体を用いた硝化促進型循環変法「ペガサス」（平成4年10月諮問）	
	包括固定化担体を用いた硝化促進型循環変法「ペガサス」の評価に関する報告書	平成5年4月
(21)	効率的な汚泥濃縮法（平成2年8月諮問）	
	③効率的な下水汚泥濃縮法の評価に関する第3次報告書 －浮上濃縮法について－	平成6年4月
	②効率的な下水汚泥濃縮法の評価に関する第2次報告書 －遠心濃縮法について－	平成4年4月
	①効率的な下水汚泥濃縮法の評価に関する第1次報告書 －造粒濃縮法について－	平成3年4月
(22)	下水汚泥の熔融システム（昭和62年6月諮問）	
	下水汚泥の熔融システムの評価に関する第1次報告書	平成元年3月
(23)	自燃焼却システム（昭和60年8月諮問）	
	自燃焼却システムの評価に関する報告書	昭和62年10月

(24)	回分式活性汚泥法（昭和60年8月諮問）	
	②回分式活性汚泥法の評価に関する第2次報告書	昭和63年5月
	①回分式活性汚泥法の評価に関する第1次報告書	昭和61年11月
(25)	微生物を利用した窒素及びリン除去プロセス（昭和59年11月諮問）	
	③微生物を利用した窒素及びリン除去プロセスの評価に関する第3次報告書 ー単段式及び二段式活性汚泥循環変法による窒素除去ー	平成2年4月
	②微生物を利用した窒素及びリン除去プロセスの評価に関する第2次報告書 ー嫌気 - 好気活性汚泥法によるリン除去ー	昭和63年5月
	①微生物を利用した窒素及びリン除去プロセスの評価に関する第1次報告書 ー活性汚泥循環変法による窒素除去ー	昭和61年11月
(26)	オキシデーションディッチ法（昭和57年12月諮問）	
	②オキシデーションディッチ法の評価に関する第2次報告書	昭和60年9月
	①オキシデーションディッチ法の評価に関する第1次報告書	昭和58年12月
(27)	汚泥コンポスト化設備（昭和56年6月諮問）	
	資源利用のための汚泥コンポスト化設備の評価に関する報告書	昭和60年9月
(28)	回転生物接触法（昭和52年8月諮問）	
	②回転生物接触法の評価に関する第2次報告書	昭和57年12月
	①回転生物接触法の評価に関する第1次報告書 ー家庭下水を主とする一般下水への回転生物接触法の適用についてー	昭和53年11月
(29)	汚泥蒸発乾燥設備（昭和52年8月諮問）	
	汚泥蒸発乾燥設備の評価に関する報告書	昭和54年8月
(30)	回転炉床焼却設備（昭和52年8月諮問）	
	回転炉床焼却設備の評価に関する報告書	昭和55年11月
(31)	既存焼却設備（昭和50年7月諮問）	
	既存焼却設備の評価に関する報告書	昭和55年6月
(32)	酸素活性汚泥法（昭和49年7月諮問）	
	③酸素活性汚泥法の評価に関する第3次報告書 ーカバー付酸素活性汚泥法の適用についてー	昭和56年6月
	②酸素活性汚泥法の評価に関する第2次報告書 ー家庭下水を主とする一般下水へのカバー付酸素活性汚泥法の適用についてー	昭和53年11月
	①酸素活性汚泥法に関する第1次報告書	昭和50年10月

(33)	下水処理場の自動制御（昭和49年7月諮問）	
	③下水処理場の自動制御の評価に関する第3次報告書	昭和58年8月
	②下水処理場の自動制御の評価に関する第2次報告書 ー汚泥処理システムへの自動制御の導入についてー	昭和55年6月
	①下水処理場の自動制御方式に関する第1次報告書	昭和50年10月

第 3 章 試験研究調査の成果

1. 令和 6 年度研究発表等

発表題名	著者名	会議・講演集名	主催者	頁	開催 年月
カーボンニュートラル型下水処理システムの一提案	○村岡正季 <u>山本明広</u> <u>新川祐二</u>	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	250~252	2024.7
機械学習を用いた脱水機の運転 支援システムの検証	○鈴木美有 飯倉智弘 森本雄也 鎌田晃人 鈴木真祐子 島本仙 <u>新川祐二</u> <u>小柴卓也</u>	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	376~378	2024.7
AIによる曝気風量自動制御に特 徴的な挙動の解析	○ <u>山本明広</u> <u>糸川浩紀</u> 平林和也 藤原翔	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	391~393	2024.7
能力増強型水処理システムにお ける低水温期の硝化の安定化	○中谷輝 南大介 荒川清美 <u>山森隼人</u> <u>糸川浩紀</u>	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	742~744	2024.7
ICT・AIを活用した単槽型硝化 脱窒プロセスにおける窒素除去 率向上の可能性	○堀野太郎 中村高士 鈴木重浩 <u>糸川浩紀</u> 松井穰	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	763~765	2024.7
ICT・AIを活用した単槽型硝化 脱窒プロセスにおけるN ₂ O生成 特性	○草野吏 堀野太郎 中村高士 鈴木重浩 <u>糸川浩紀</u> 松井穰	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	766~768	2024.7
省エネ型深槽曝気技術の電力削 減効果等の実証	○中町和雄 綿引綾一郎 円谷輝美 <u>山本明広</u> <u>糸川浩紀</u> 中島浩 吉野徳幸 千島俊吾 小澤光二郎 安藤芳浩 山田裕史	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	823~825	2024.7

注) 著者名(下線)は JS 所属
○は発表者

発表題名	著者名	会議・講演集名	主催者	頁	開催 年月
省エネ型深槽曝気技術における 反応タンクの溶存窒素濃度の測 定方法	○ガンバト ゴルザヤ 張亮 <u>山本明広</u> <u>糸川浩紀</u> 中島浩 吉野徳幸 山田裕史	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	826~828	2024.7
省エネ型深槽曝気技術における 反応タンク酸素移動効率の検証	○寛尚輝 綿引綾一郎 円谷輝美 石川岳学 <u>山本明広</u> <u>糸川浩紀</u> 中島浩 吉野徳幸 山田裕史	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	829~831	2024.7
パッケージ型MBBR装置を用い た仮設排水処理システムの長期 実証時処理性能	○安中祐子 松岡秀美 濱田眞輔 小関進介 <u>山森隼人</u> <u>村岡正季</u> <u>糸川浩紀</u>	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	856~858	2024.7
回転繊維ユニットRBC-OD法に よる処理能力増強効果の長期実 証	○柿沼建至 胡錦陽 茂庭忍 小原卓巳 大月伸浩 <u>福井智大</u> <u>糸川浩紀</u>	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	859~861	2024.7
長期実証実験に基づくDHSシス テムを用いた水量変動追従型水 処理技術の導入効果	○大森聖史 松枝孝 <u>糸川浩紀</u> 谷脇基文	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	871~873	2024.7
圧入式スクリープレス脱水機 (IV型)による濃縮一体化脱水法の 事後評価調査	○ <u>小柴卓也</u> <u>新川祐二</u>	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	895~897	2024.7
同軸差動式スクリープレス脱 水機による下水汚泥の脱水処理 性能	○鎌田晃人 鈴木真祐子 島本仙 <u>新川祐二</u> <u>小柴卓也</u>	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	910~912	2024.7

注) 著者名(下線)は JS 所属
○は発表者

発表題名	著者名	会議・講演集名	主催者	頁	開催 年月
中小規模向けユニット式下水汚 泥消化システムの汚泥前処理技 術の基礎検討	麻生伸二 海老塚恵 青木一泰 ○中山善雄 <u>熊越瑛</u> <u>島田正夫</u> <u>新川祐二</u>	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	940~942	2024.7
嫌気性消化施設の運転管理実態 調査と施設設計に関する一考察	○ <u>熊越瑛</u> <u>島田正夫</u> <u>新川祐二</u>	第61回下水道研究 発表会講演集	日本下水道協会	958~960	2024.7
単槽型硝化脱窒プロセスにおけ るN ₂ O排出特性	○草野吏 堀野太郎 中村高士 鈴木重浩 <u>糸川浩紀</u> 松井穰	第27回日本水環境 学会シンポジウム 講演集	日本水環境学会	173~174	2024.9
回転繊維ユニットRBC-OD法の 能力増強性能と微生物相評価	○柿沼建至 胡錦陽 茂庭忍 小原卓巳 大月伸浩 <u>高田祥暉</u> <u>糸川浩紀</u>	第27回日本水環境 学会シンポジウム 講演集	日本水環境学会	267~268	2024.9
AIの予測値を用いた自動曝気風 量制御の特徴解析	○藤原翔 平林和也 <u>糸川浩紀</u> <u>山本明広</u>	第36回環境システム 計測制御学会 (EICA) 研究発表会 (学会誌「EICA」)	環境システム 計測制御学会	Vol.29 No.2/3 19~23	2024.10
回転繊維ユニットRBC-OD法に よる処理能力増強効果とその有 機物除去機構	○胡錦陽 小原卓巳 柿沼建至 <u>高田祥暉</u> <u>糸川浩紀</u>	第36回環境システム 計測制御学会 (EICA) 研究発表会 (学会誌「EICA」)	環境システム 計測制御学会	Vol.29 No.2/3 50~54	2024.10
マノメトリック手法を用いたア ナモックス反応特性の評価	○五月女瞬 角野立夫 清水和哉 <u>山本明広</u> <u>糸川浩紀</u>	日本農芸化学会 2025年度大会 講演要旨集	日本農芸化学会	—	2025.3
単槽型硝化脱窒プロセスにおけ るN ₂ Oの生成・放出挙動	○ <u>高田祥暉</u> <u>糸川浩紀</u> 草野吏 中村高士 鈴木重浩 松井穰	第59回日本水環境 学会年会講演集	日本水環境学会	16	2025.3

注) 著者名(下線)は JS 所属
○は発表者

発表題名	著者名	会議・講演集名	主催者	頁	開催 年月
活性汚泥法における曝気風量の AI自動制御に対する未学習条件 の影響	○ <u>山本明広</u> <u>高田祥暉</u> <u>糸川浩紀</u> 藤原翔 平林和也	第59回日本水環境 学会年会講演集	日本水環境学会	19	2025.3

注) 著者名(下線)は JS 所属
○は発表者

2. 令和 6 年度雑誌掲載論文等

論文等題名	著者名	書籍名	発行所	巻号 頁	発行 年月
シリーズ新技術紹介① OD 法における二点 DO 制御システム	<u>橋本敏一</u>	上下水道情報	公共投資 ジャーナル社	No.2013 26~27	2024.8
シリーズ新技術紹介② 膜分離活性汚泥法	<u>糸川浩紀</u>	上下水道情報	公共投資 ジャーナル社	No.2015 30~32	2024.9
シリーズ新技術紹介③ 単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット	<u>高田祥暉</u>	上下水道情報	公共投資 ジャーナル社	No.2016 38~39	2024.10
シリーズ新技術紹介④ 全速全水位型横軸水中ポンプ	<u>丸山徳義</u>	上下水道情報	公共投資 ジャーナル社	No.2017 52~53	2024.11
シリーズ新技術紹介⑤ 下水汚泥繊維利活用システム	<u>三宅晴男</u>	上下水道情報	公共投資 ジャーナル社	No.2018 50~51	2024.12
シリーズ新技術紹介⑥ 鋼板製消化タンク（4 技術）	<u>熊越瑛</u>	上下水道情報	公共投資 ジャーナル社	No.2019 48~49	2025.1
シリーズ新技術紹介⑦ 汚泥処理フローの簡素化に寄与する汚泥脱水技術	<u>小柴卓也</u>	上下水道情報	公共投資 ジャーナル社	No.2020 46~47	2025.2
処理能力増強・ダウンサイジングに 貢献する JS の新技術	<u>三宅晴男</u> <u>糸川浩紀</u>	月刊下水道	環境新聞社	Vol.48 No.3 7~11	2025.2

注) 著者名(下線)は JS 所属

3. 表彰

受賞年度	受賞名称	表彰機関	受賞対象
昭和 56 年度	全建賞	全日本建設技術協会	活性汚泥循環変法
昭和 57 年度	全建賞	全日本建設技術協会	回分式 OD 法
昭和 62 年度	全建賞	全日本建設技術協会	プレハブ OD 法
平成 2 年度	全建賞	全日本建設技術協会	汚泥溶融システム
	全建賞	全日本建設技術協会	圧縮焼成技術
平成 3 年度	推奨賞	科学技術庁	微生物による下水処理（ビデオ） （活性汚泥法）
平成 4 年度	技術賞	日本水環境学会	「包括固定担体を用いた硝化促進型循環変法（ペガサス）」 日本下水道事業団 日立プラント建設株式会社
平成 5 年度	注目発明賞	科学技術庁	汚水の硝化处理装置（ペガサス）
	環境賞 （環境庁長官賞優秀賞）	環境調査センター （株）日刊工業新聞社	包括固定化硝化細菌による排水の窒素除去技術の開発（ペガサス）
平成 9 年度	技術賞	日本水環境学会	「炭化による下水汚泥の有効利用技術（炭化システム）」 日本下水道事業団 大同特殊鋼株式会社 株式会社 TYK 研究所
平成 10 年度	優秀論文賞	環境システム計測 制御学会	降雨レーダー情報を活用した雨水排水施設の効率的な運転操作に関する基礎調査
平成 13 年度	化学工業会 技術賞	化学工学会	造粒濃縮法（BEST システム）
平成 17 年度	技術賞	日本水環境学会	「逆受身ラテックス凝集法を用いた亜硝酸酸化細菌の迅速定量技術」 日本下水道事業団 株式会社ヤクルト中央研究所

注）著者名（下線）は JS 所属

受賞年度	受賞名称	表彰機関	受賞対象
平成 17 年度	第 42 回 下水道研究発表会 優秀発表賞	日本下水道協会	「様々な流入負荷変動に対する活性汚泥モデルの応答」 <u>糸川浩紀</u>
平成 19 年度	第 44 回 下水道研究発表会 最優秀発表賞	日本下水道協会	「モンテカルロ法による各種活性汚泥法の水質変動要因の解析」 <u>糸川浩紀</u>
平成 20 年度	奨励賞論文	日本下水道協会	「中空糸気液接触方式を用いた消化ガスからの二酸化炭素除去技術」 <u>澤原大道</u> <u>島田正夫</u> <u>山本博英</u> <u>猪木博雅</u>
	第 45 回 下水道研究発表会 優秀発表賞	日本下水道協会	「耐硫酸モルタル防食工法の確立に向けて（Ⅱ）」 <u>持田雅司</u>
平成 21 年度	推進賞	日本オゾン協会	継続的なオゾン処理技術の導入促進の先導等
	論文奨励賞	日本オゾン協会	「下水処理水中のノロウィルスへのオゾン消毒効果」 <u>岩崎 旬</u>
平成 22 年度	奨励賞論文	日本下水道協会	「汚泥の熱可溶化技術を組み込んだ高効率嫌気性消化法の実用化に関する調査研究」 <u>中沢俊明</u> <u>水田健太郎</u> <u>猪木博雅</u> <u>島田正夫</u>
平成 23 年度	科学進歩賞	日本化学会	「肥料利用を目指したリン酸イオン吸着材料の開発」 <u>辻 秀之</u> <u>堀内昭子</u> <u>辻 幸志</u>
	下水道協会誌 優秀論文 (有功賞)	日本下水道協会	「包括固定化担体を用いた亜硝酸型硝化アナモックスプロセスによる汚泥脱水ろ液中の窒素処理」 <u>井坂和一</u> <u>能登一彦</u> <u>生田 創</u> <u>糸川浩紀</u> <u>村上孝雄</u>

注) 著者名(下線)は JS 所属

受賞年度	受賞名称	表彰機関	受賞対象
平成 24 年度	奨励賞	化学工学会	「包括固定化微生物担体を用いたリン除去における基礎検討」 下田圭祐 藏本克昭 鈴木将史 角野立夫 辻 幸志 川口幸男 <u>橋本敏一</u>
	第 49 回 下水道研究発表会 優秀発表賞	日本下水道協会	「南蒲生浄化センターの応急復旧段階における水処理方式の処理性能」 <u>橋本敏一</u>
平成 27 年度	第 52 回 下水道研究発表会 優秀発表賞	日本下水道協会	「濃縮工程を省略した新しい処理システムの設計手法」 <u>碓井次郎</u>
	第 8 回 国土交通大臣賞 〈循環のみち下水道賞〉 グランプリ	国土交通省	「産官学が連携した効率的な下水処理技術の開発」 前澤工業株式会社 高知大学 高知県 香南市 日本下水道事業団
	技術賞	日本水環境学会	「オキシデーションディッチ法における二点 DO 制御システム」 藤原 拓 陳 小強 <u>橋本敏一</u> 中町和雄
平成 29 年度	奨励賞	環境システム計測 制御学会	「担体法と高速砂ろ過を用いた既存水処理施設の処理能力増強技術の開発」 福沢正伸 土井知之 穴田健一 斉藤 功 青木 順 馬場 圭 <u>橋本敏一</u>
	奨励賞	環境システム計測 制御学会	「遠隔監視システムへの適用を目的とした制御性能改善技術の信頼性向上」 難波 諒 平岡由紀夫 <u>橋本敏一</u> 糸川浩紀 井上英男 矢野洋一郎

注) 著者名(下線)は JS 所属

受賞年度	受賞名称	表彰機関	受賞対象
平成 30 年度	論文賞	環境システム計測 制御学会	「遠隔監視システムへの適用を目的とした制御性能改善技術の信頼性向上」 難波 諒 平岡由紀夫 橋本敏一 糸川浩紀 井上英男 矢野洋一郎
	第 44 回優秀環境 装置表彰 経済産業省 技術環境局長賞	日本産業機械工業会	「無曝気循環式水処理装置」 高知市上下水道局 国立大学法人高知大学 日本下水道事業団 メタウォーター株式会社
	第 44 回優秀環境 装置表彰 日本産業機械 工業会会長賞	日本産業機械工業会	「圧入式スクリュープレスによる 濃縮一体化脱水システム」 日本下水道事業団 株式会社石垣
	第 55 回 下水道研究発表会 最優秀賞 (英語口頭発表 部門)	日本下水道協会	「Excess Sludge Reduction by Multi-stage Fixed Bed Biofilm Process-Full-scale Demonstration」 <u>糸川浩紀</u>
令和元年度	Frontiers of Environmental Science & Engineering(FESE)'s Best Paper of 2018	Frontiers of Environmental Science & Engineering	「Energy reduction of a submerged membrane bioreactor using a polytetrafluoroethylene (PTFE) hollow-fiber membrane」 Taro Miyoshi) Thanh Phong Nguyen) Terumi Tsumuraya) Hiromu Tanaka) Toru Morita) <u>Hiroki Itokawa</u> <u>Toshikazu Hashimoto</u>
	下水道協会誌 奨励論文 (実務部門)	日本下水道協会	「セラミック平膜を用いた浸漬型 MBR システムの省エネ化と合流式下水道への対応に関する研究」 打林真梨絵 豊岡和宏 新井喜明 佐野 勇 <u>山下喬子</u> <u>橋本敏一</u>
	「STI for SDGs」 アワード 優秀賞	国立研究開発法人 科学技術振興機構	「汚水処理の持続性向上に向けた高知家（こうちけ）の挑戦～産官学による新技術開発と全国への展開～」 高知大学 香南市 高知県 前澤工業株式会社 日本下水道事業団

注) 著者名(下線)は JS 所属

受賞年度	受賞名称	表彰機関	受賞対象
令和 2 年度	下水道協会誌 優秀論文 (実務部門)	日本下水道協会	「最初沈殿池汚泥から回収した繊維状物の脱水助材としての利用が嫌気性消化を伴う下水汚泥処理に及ぼす影響」 朽岡英司 山下 学 碓井次郎 三宅晴男 寺田昭彦 細見正明
令和 3 年度	第 47 回優秀環境 装置表彰 経済産業大臣賞	日本産業機械工業会	「二点 DO 制御を用いた省エネ型 OD 装置」 前澤工業株式会社 国立大学法人高知大学 日本下水道事業団
	奨励賞	環境システム計測 制御学会	「単槽型硝化脱窒プロセスにおける ICT・AI を活用した風量制御の性能及び特性」 中 大輔 高橋宏幸 糸川浩紀 松井 穰 藤井都弥子
令和 4 年度	第 48 回優秀環境 装置表彰 日本産業機械工業会 会長賞	日本産業機械工業会	「新型汚泥焼却設備 (OdySSEA (オデッセア))」 JFE エンジニアリング株式会社 日本下水道事業団 川崎市上下水道局
令和 5 年度	第 49 回優秀環境 装置表彰 経済産業大臣賞	日本産業機械工業会	「脱水乾燥システム」 月島アクアソリューション株式会社 日本下水道事業団
	第 49 回優秀環境 装置表彰 日本産業機械工業会 会長賞	日本産業機械工業会	「省電力送風装置（流動タービン）を用いた下水汚泥焼却設備」 愛知県 日本下水道事業団 メタウォーター株式会社 株式会社クボタ

注) 著者名(下線)は JS 所属

受賞年度	受賞名称	表彰機関	受賞対象
令和 6 年度	第 50 回優秀環境 装置表彰 日本産業機械工業会 会長賞	日本産業機械工業会	「ダウンサイジング型ベルトプレス脱 水機（DSBP）」 月島 JFE アクアソリューション株式 会社 日本下水道事業団

注) 著者名(下線)は JS 所属

4. 知的財産権

（令和 7 年 3 月 31 日現在）

種別	発明の名称	発明者 (JSのみ)	特許権者 (JS共同特許権者)	出願日	出願番号	登録日	特許 番号
特許	分水方法および分水装置	本部 村上孝雄	—	H18.7.4	2006-184575	H21.8.7	4354468
特許	汚泥の炭化処理設備	本部 山本博英 弓削田克美 猪木博雅 嘉戸重仁	大同特殊鋼(株)	H19.3.28	2007-085938	H23.6.10	4756556
特許	炭化製品の発熱抑制 処理方法及び発熱抑制 処理装置	本部 山本博英 弓削田克美 猪木博雅 嘉戸重仁	大同特殊鋼(株)	H19.3.28	2007-085937	H25.1.18	5179082
特許	耐酸性コンクリートの 製造方法	本部 稲毛克俊 須賀雄一 森田美也	日本ヒューム(株) (株)安藤・間組	H19.4.6	2007-100716	H24.8.31	5071844
特許	耐酸性複合体及び補 修工法	本部 稲毛克俊 須賀雄一 森田美也	電気化学工業(株)	H19.11.27	2007-305731	H25.10.4	5376794
特許	熱可溶化乾燥を組み 合わせた嫌気性処理 方法	本部 島田正夫 猪木博雅 水田健太郎	三菱化工機(株)	H21.2.4	2009-023378	H23.12.16	4886798
特許	有機性汚泥の嫌気性 消化処理方法	本部 島田正夫 猪木博雅 水田健太郎	三菱化工機(株)	H21.2.4	2009-023377	H24.6.1	5007311
特許	下水処理場の運転支 援装置及び運転支援 方法	本部 中沢 均 川口幸男	(株)ウォーターエージェンシー	H22.12.27	2010-289267	H27.7.10	5775296
特許	プロセス監視診断装 置	本部 佐野勝実 橋本敏一 佐々木稔	(株)東芝	H22.12.28	2010-293048	H27.8.14	5793299
特許	プロセス状態監視装 置	本部 佐野勝実 橋本敏一 佐々木稔	(株)東芝	H22.12.28	2010-291645	H27.10.2	5813317
特許	排水処理装置及びそ の運転方法	本部 中沢 均 川口幸男	国立大学法人高知大学 前澤工業(株)	H23.1.11	2011-003089	H27.4.10	5725869
特許	排水処理装置	本部 中沢 均 橋本敏一 川口幸男 辻 幸志	(株)東芝	H23.6.1	2011-123611	H27.10.2	5813377
特許	排水処理装置	技術戦略部 橋本敏一 戸田技術開発分室 川口幸男	国立大学法人高知大学 前澤工業(株)	H23.11.15	2011-249470	H28.1.8	5863409
特許	有機性排水処理装置	技術戦略部 橋本敏一 三宅十四日 戸田技術開発分室 川口幸男	(株)東芝	H25.3.14	2013-051395	H29.2.17	6091943

注）発明者の所属は当時のもの。

種別	発明の名称	発明者 (JSのみ)	特許権者 (JS共同特許権者)	出願日	出願番号	登録日	特許 番号
特許	プロセス監視診断装置	技術戦略部 佐野勝実 濱田知幸	(株)東芝	H25.3.14	2013-051930	H29.9.29	6214889
特許	リン回収装置	技術戦略部 橋本敏一 若山正憲	(株)東芝	H25.7.23	2013-153096	H29.5.12	6139315
特許	膜分離活性汚泥処理装置及び膜分離活性汚泥処理方法	技術戦略部 橋本敏一 糸川浩紀	(株)日立プラントサービス	H26.6.19	2014-126563	H29.11.17	6243804
特許	汚泥脱水処理方法および汚泥脱水処理システム	技術戦略部 山本博英 碓井次郎 岩崎 旬 島田正夫 三宅十四日	(株)石垣	H26.11.25	2014-237580	H30.3.23	6309883
特許	省エネルギー型汚泥処理システム	技術戦略部 山本博英 岩崎 旬 碓井次郎 三宅十四日 東海総合事務所 宮内千里	メタウォーター(株)	H27.3.16	2015-052048	H31.2.22	6482913
特許	繊維状物測定装置及びその測定方法	技術戦略部 山本博英 碓井次郎 岩崎 旬 島田正夫 三宅十四日	(株)石垣	H27.3.31	2015-070931	H30.8.24	6389137
特許	汚泥処理システム及び汚泥処理方法	技術戦略部 山本博英 碓井次郎 岩崎 旬 島田正夫 三宅十四日	(株)石垣	H27.3.31	2015-070930	H30.3.2	6298792
特許	繊維状物回収装置	技術戦略部 山本博英 碓井次郎 岩崎 旬 島田正夫 三宅十四日	(株)石垣	H27.3.31	2015-070929	H30.3.23	6309912
特許	汚泥脱水装置及び汚泥脱水方法	技術戦略部 山本博英 碓井次郎 岩崎 旬 島田正夫 三宅十四日	(株)石垣	H27.3.31	2015-070928	H30.3.2	6298791
特許	固液分離システムおよび傾斜板	技術戦略部 橋本敏一 笹部 薫	積水アクアシステム(株) (公財)愛知水と緑の公社	H27.9.25	2015-188827	H29.7.28	6182190

注) 発明者の所属は当時のもの。

種別	発明の名称	発明者 (JSのみ)	特許権者 (JS共同特許権者)	出願日	出願番号	登録日	特許 番号
特許	汚泥消化槽	技術戦略部 細川 恒 碓井次郎 島田正夫 池上 梓	月島JFEアクアソリューション(株)	H29.1.13	2017-004210	H29.12.15	6259535
特許	逆電気透析を利用して水素を発生させる方法及び装置	技術戦略部 細川 恒 碓井次郎	国立大学法人山口大学 (株)正興電機製作所 (株)アストム	H28.11.21	2016-225692	H30.8.10	6382915
特許	散水ろ床の洗浄方法	—	メタウォーター(株) 高知市 国立大学法人高知大学	H30.3.30	2018-068183	R1.6.28	6545857
特許	汚泥濾過装置	技術戦略部 細川 恒 碓井次郎 金澤純太郎	住友重機械エンバイロメント(株)	H29.3.23	2017-058220	R2.11.30	6802099
特許	固液分離システムおよび固液分離方法	技術戦略部 橋本敏一 清水克祐	積水アクアシステム(株) (公財)愛知水と緑の公社	H31.2.4	2019-018232	R4.12.2	7187340

注) 発明者の所属は当時のもの。

5. 新技術の選定・導入

JS では、地方公共団体の多様なニーズに応える新技術を下水道事業へ積極的に活用するため、優れた新技術を受託建設事業に円滑に導入することを目的として、平成 23 年度から新技術導入制度を運用している。なお、本制度で選定した新技術は、JS の受託建設事業における適用性を確認したものであり、JS 受託建設事業以外での性能等を評価したものではない。

本制度では、JS が単独または共同研究により開発した技術を「新技術Ⅰ類」、公的な機関により開発・評価され、JS が技術確認を行った技術を「新技術Ⅱ類」、民間企業が独自に開発し、JS が技術確認を行った技術を「新技術Ⅲ類」に区分の上、選定している。なお、技術選定の有効期間は、選定日（変更選定を受けた場合は変更選定日）から 5 年間であり、技術選定を受けた者の申請により 1 回に限り延長が可能である（最長 10 年）。

令和 6 年度には新たに新技術Ⅰ類を 3 技術選定した。同年度末までに選定された新技術は、累計で、新技術Ⅰ類 43 技術（うち 8 技術は有効期間満了）、新技術Ⅱ類 5 技術（うち 2 技術は有効期間満了）、新技術Ⅲ類 2 技術の計 50 技術である。

また、JS 受託建設事業における導入決定件数は、令和 6 年度末現在、23 技術、145 件である。

5. 1 令和 6 年度末現在選定技術一覧

区分	類型	技術名	技術選定を受けた者	備考※
水処理等	Ⅰ 類	アンモニア計による送気量フィードバック制御技術	日新電機(株)	
		アンモニア計と制御盤から構成される風量調節弁制御装置	(株)神鋼環境ソリューション	
		セラミック平膜を用いた省エネルギー型 MBR システム	(株)明電舎	
		細径 PVDF 中空糸膜を用いた省エネルギー型 MBR システム	三菱ケミカルアクア・ソリューションズ(株)、水 ing エンジニアリング(株)、三菱化工機(株)	
		オゾン水による膜洗浄を用いた省エネルギー型 MBR システム	三菱電機(株)	
		初沈代替高速ろ過システム	メタウォーター(株)	
		多槽循環式 MBR システム	(株)クボタ	
		最終沈殿池用傾斜板沈殿分離装置	積水アクアシステム(株)	
		単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット	(株)日立プラントサービス	
		破碎・脱水機構付垂直スクリー式除塵機	住友重機械エンバイロメント(株)	
		ディスク式特殊長毛ろ布ろ過装置	メタウォーター(株)、前澤工業(株)	
		回転繊維体を用いた OD 法向け前処理技術	東芝インフラシステムズ(株)	
		OD 法における二点 DO 制御システム	高知大学、前澤工業(株)	満了 標・基
		担体投入活性汚泥法（リンポープロセス）	(株)西原環境	継続
		高速吸着剤を利用したリン除去・回収技術	旭化成ケミカルズ(株)	満了
		ゴムメンブレン式超微細気泡散気装置	JFE エンジニアリング(株)、三菱化工機(株)、(株)西原環境	満了
	Ⅱ 類	担体利用高度処理システム（バイオチューブ）	JFE エンジニアリング(株)	満了
	Ⅲ 類	高速砂ろ過システム（高速上向流移床型砂ろ過）	(株)タクマ	
雨水	Ⅰ 類	全速全水位型横軸水中ポンプ	(株)石垣	

区分	類型	技術名	技術選定を受けた者	備考※
脱水	I 類	圧入式スクリープレス脱水機(Ⅳ型)による濃縮一体化脱水法	(株)石垣	
		回転加圧脱水機Ⅳ型	巴工業(株)	
		ダウンサイジング型ベルトプレス脱水機	月島機械(株)	
		多重板型スクリープレス脱水機－Ⅱ型	アムコン(株)	
		難脱水対応強化型スクリープレス脱水機	(株)神鋼環境ソリューション、(株)北凌	
		下水汚泥由来繊維利活用システム	(株)石垣	
		ダウンサイジング対応型同軸差動式スクリープレス脱水機	水 ing エンジニアリング(株)、水 ing(株)	
		後注入 2 液型ベルトプレス脱水機	メタウォーター(株)	
		圧入式スクリープレス脱水機(Ⅲ型)	(株)石垣	満了 標・基
		難脱水性汚泥対応型ベルトプレス脱水機	住友重機械エンバイロメント(株)	満了
		回転加圧脱水機Ⅲ型	巴工業(株)	満了
消化	I 類	高濃度対応型ろ過濃縮・中温消化システム	月島機械(株)	
		下部コーン型鋼板製消化タンク	月島機械(株)	標・基
		4 分割ピット式鋼板製消化タンク	(株)石垣	標・基
		噴射ノズル式鋼板製消化タンク	JFE エンジニアリング(株)、(株)フソウ	標・基
		パッケージ型鋼板製消化タンク	(株)神鋼環境ソリューション	標・基
		熱改質高効率嫌気性消化システム	三菱化工機(株)	継続
		担体充填型高速メタン発酵システム	メタウォーター(株)	満了
アナモックス	I 類	アナモックス反応を利用した窒素除去技術	(株)タクマ、メタウォーター(株)	継続

区分	類型	技術名	技術選定を受けた者	備考※
電力 創造	I 類	階段炉による電力創造システム	(株)タクマ	
焼却 ・ 燃料化	I 類	多段最適燃焼制御付気泡流動炉	三菱重工環境・化学エンジニアリング(株)	
		二段燃焼式旋回流動炉	水 ing エンジニアリング(株)	
		過給機を用いた流動床炉向け省電力送風装置（流動タービン）	メタウォーター(株)、(株)クボタ	
		電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術	(株)神鋼環境ソリューション	
		汚泥性状変動対応型蒸気乾燥システム	水 ing エンジニアリング(株)	
		湿式炭化による下水汚泥利活用技術	(株)神鋼環境ソリューション	
		循環型多層燃焼炉	メタウォーター(株)	満了
	II 類	多層燃焼流動炉	メタウォーター(株)	継続
		気泡式高効率二段焼却炉	(株)神鋼環境ソリューション	継続
		過給式流動燃焼システム	月島機械(株)、三機工業(株)	満了
	III 類	高効率二段燃焼汚泥焼却炉	(株)神鋼環境ソリューション	継続

※技術選定後、一定期間が経過した技術についての取り扱い

標・基：標準化・基準化された技術

満了： 技術選定された日から一定期間が経過し、有効期限が満了した技術

継続： 継続導入技術（有効期間が満了した後も、引き続き導入の必要性が認められるとして JS が指定した技術）

付 1. JS 技術開発・活用基本計画 2022（概要版）

JS技術開発・活用基本計画2022

～ 脱炭素社会の実現に向けて下水道技術のイノベーションを牽引 ～

－ 概要版 －

2022年 3月
2024年10月改定



構成(目次)

1. 計画策定の目的等
 1. 計画策定の目的
 2. 計画期間
2. 技術開発・活用基本方針
3. 技術開発
 1. 開発課題
 2. 実施スキーム
 3. 試験研究施設
4. 技術活用
 1. 開発技術の導入
 2. 開発技術の基準化
 3. その他技術の活用
5. 計画のフォローアップ

1. 計画策定の目的等

■ 計画策定の目的

- 「**JS技術開発・活用基本計画2022**」(以下、「本計画」という。)は、第6次中期経営計画(以下、「6次中計」という。)に示すJSの3つの役割 (下水道ソリューションパートナー、下水道イノベーター、および下水道プラットフォーム)を着実に果たしていくため、**6次中計期間中に取り組む技術開発および開発成果の活用に関する基本方針**、ならびに、**具体的な実施内容を定める**ことを目的とする。
- 本計画では、6次中計の事業推進計画のうち、主に以下の事項に係る実施内容を定めている。

2 下水道イノベーターとして下水道事業の変革を積極的に推進

- ③ 脱炭素社会実現への貢献
- ④ 新技術の開発・活用

3 下水道プラットフォームとして共通の基盤づくりにより社会全体の発展に貢献

- ② 技術基準の策定

- 本計画は、2017(平成29)年度～2021(令和3)年度の5ヶ年度を計画期間とする「**JS技術開発基本計画(4次計画)**」および「**基礎・固有調査研究の中期計画**」を統合した後継の計画の位置付けである。

■ 計画期間

- 6次中計との整合を図り、**2022(令和4)年度から2026(令和8)年度の5ヶ年度**とする。

2. 技術開発・活用基本方針

■ 概ね20～30年先をイメージした中長期的な基本方針

- 人口減少や脱炭素化、デジタルトランスフォーメーション(DX)など、今後想定される様々な**社会変化に対して、常に時代の先を読み、下水道技術の発展を先導**するとともに、受託事業の実施を通じて、これらの社会変化に対応する**新技術の社会実装を推進し、社会全体の発展に貢献**する。

■ 計画期間内(2022～26年度)の基本方針

- 6次中計の事業推進計画に則り、新技術の開発・活用に取り組むことにより、**受託事業の推進に貢献**するとともに、**下水道事業の変革を牽引し、社会全体の発展に貢献**する。

I. 脱炭素化実現に向けた技術の開発・活用の推進

- 2030年までの温室効果ガス排出量46%削減の実現に貢献するため、**下水処理の脱炭素化に資する技術**について、更なる省エネルギー化や創エネルギーの効率向上など、**計画期間中に実用化可能な既存技術の改良・改善(技術開発)**を加速するとともに、**全ての受託事業において着実な導入**を図る。
- 2050年カーボンニュートラル実現に貢献するため、**2040年までの実施設への導入着手を目標として、カーボンニュートラルを達成する新たな下水処理システムの開発に着手し、下水道技術のイノベーションを先導**する。

II. 政策やニーズを踏まえた技術の開発・活用の推進

- **人口減少下における持続的な下水道事業経営に貢献**するため、社会インフラとして下水道施設が有すべき**機能の維持・向上や下水道事業の生産性向上・高度化に資する技術の開発・活用**を推進する。
- 下水汚泥の**再利用の促進や地域における資源循環利用の構築**などに貢献するため、下水汚泥の肥料利用や下水汚泥中の窒素(アンモニア)やリンの回収・利用など、**下水道資源利活用技術の開発・活用**を推進する。

3.1 開発課題

- 脱炭素化や持続可能な社会実現に向けた国における最近の動向、地方公共団体の下水道事業における課題や技術開発に対するニーズに関するアンケート調査結果、ならびに、6次中計の事業推進計画に定めるJSにおける今後の事業の取組みなどを踏まえ、2つの技術開発・活用基本方針に対して、本計画期間中に具体に取り組む**開発課題5課題および各開発課題の開発項目などを設定**する。

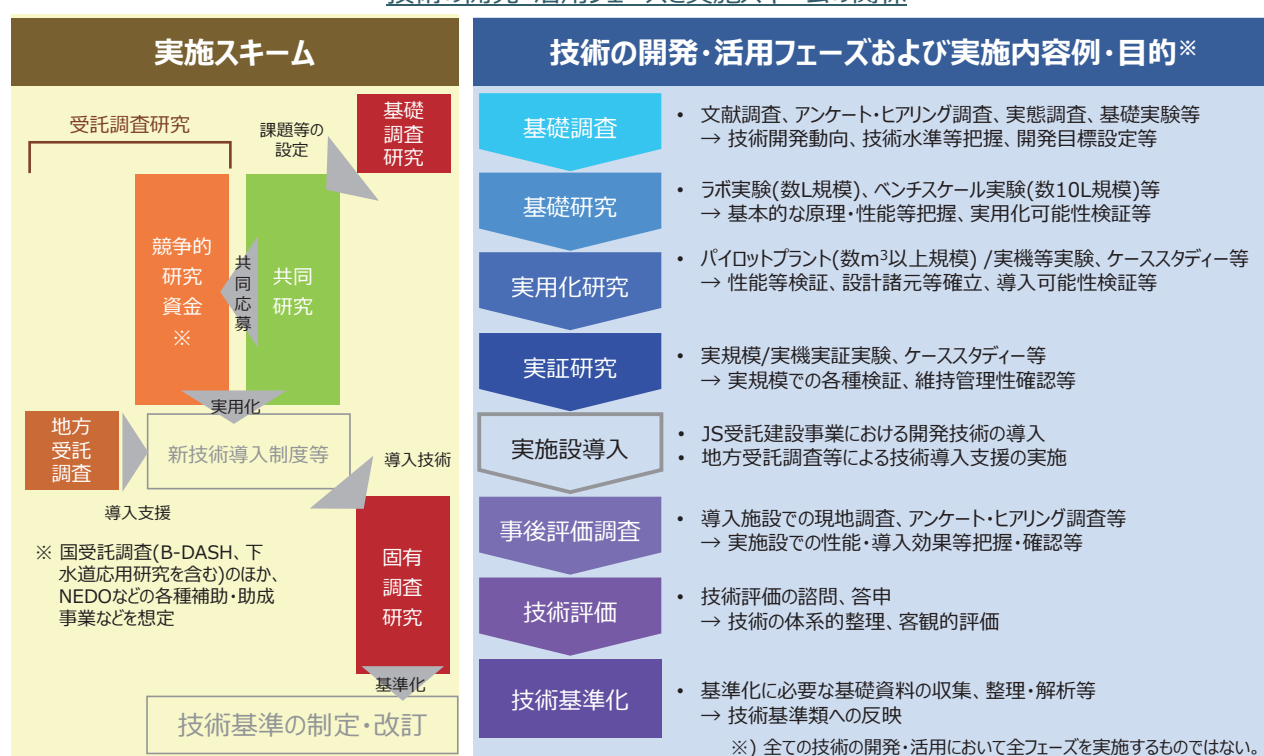
開発課題および開発項目

技術開発・活用基本方針		開発課題	開発項目
Ⅰ. 脱炭素化実現に向けた技術の開発・活用の推進	2030年温室効果ガス排出量削減目標の実現への貢献	I-1 2030年目標に向けた脱炭素化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水処理省エネ技術 ・ バイオガス活用技術 ・ 事後評価調査(脱炭素化技術) ・ 脱炭素化推進方策
	2050年カーボンニュートラル実現への貢献	I-2 カーボンニュートラル型下水処理システムの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ カーボンニュートラル型下水処理システム
Ⅱ. 政策やニーズを踏まえた技術の開発・活用の推進	人口減少下における持続的な下水道事業経営への貢献	Ⅱ-1 下水処理の更なる低コスト化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水処理能力増強技術 ・ 水処理改築低コスト化技術 ・ 下水処理低コスト化技術 ・ 事後評価調査(低コスト化技術)
		Ⅱ-2 下水道資源利活用技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下水汚泥資源エネルギー利活用技術 ・ 下水汚泥資源農業利活用技術
		Ⅱ-3 下水処理場におけるICT・AI活用技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ AIによる水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術 ・ ICT・AIによる設備劣化予測・異常診断技術 ・ ICTによる広域監視・制御システム

3.2 実施スキーム

- 技術の開発・活用のフェーズに応じて、「**基礎・固有調査研究**」(JS固有財源)、「**共同研究**」および「**受託調査研究**」(競争的研究資金を含む)の3つのスキームにより実施する(下図)。

技術の開発・活用フェーズと実施スキームの関係



3.2 実施スキーム

実施スキーム	区 分	説 明
基礎・固有調査研究	基礎調査研究	技術開発動向や技術水準の把握などを目的とした調査、開発目標や開発条件の設定などに必要な実態調査や基礎実験などについて、JS自らが行うもの。
	固有調査研究	開発成果の体系化、導入技術の事後評価調査や技術評価、技術基準化に向けた基礎資料の収集、整理・解析などを目的としてJS自らが行うもの。 ※事後評価調査、技術評価の実施予定は参考資料(P.20～21)参照
共同研究	公募型共同研究	JSが課題を設定し、共同研究者を公募して行うもの。今後の新規共同研究は公募型を基本とする。
	提案型共同研究	民間企業等から提案を受けた課題について行うもの。今後、原則として競争的研究資金への共同応募を目的とする課題提案、簡易提案型およびフィールド提供型に限るものとする。
	簡易提案型共同研究	短期間(6ヶ月以内)での機器・装置の性能などの確認を目的とするもの。
	フィールド提供型共同研究【新設】	JS技術開発実験センターの実験フィールドの提供のみを目的とするもの(JSは研究実施に関与しない)。
受託調査研究	特定共同研究	JSが相手方に共同研究を申し込むなど、上記に該当しないもの。 ※ 大学や民間企業などの基礎研究の実施、公益法人や業界を代表する協会などの共同研究が想定される。
	国等受託調査研究	国における課題の技術的解決などを目的として国土交通省より受託するもののほか、競争的研究資金(B-DASH、下水道応用研究、各種研究補助・助成事業など)の受入れにより行うもの。
	地方受託調査研究	地方公共団体の抱える個別の技術的課題の解決を目的として、地方公共団体からの受託を受けて行うもの(実施設計業務等の一部を分担して実施するもの(受託連携)を含む)。

Japan Sewage Works Agency

6

3.3 試験研究施設

■ 試験研究施設(技術開発実験センター)の概要

- 分流式下水道の実下水を用いたパイロットプラント規模の実証実験のための常設実験ヤードを確保するとともに、民間企業などとの共同研究をさらに推進することなどを目的として、2001(平成13)年6月に開所。
- 技術開発実験センターでは、隣接する真岡市水処理センターより送水した分流式下水道の実下水を用いて、比較的規模の大きいパイロットプラント実験を行えるほか、実規模の反応タンクを模擬した多目的実験用水槽を用いて、各種機器の性能試験などを行うことが可能。
- 「基礎・固有調査研究の中期計画」(計画期間：2017～2021年度)に基づき、2020(令和2)年度に新たに実験棟を建設し、活性汚泥処理実験プラント等、JSが独自に行う調査研究のための実験設備・装置を整備。

開 所 年 月	2001(平成13)年6月
所 在 地	栃木県真岡市八木岡1309番2
敷 地 面 積	約 13,000m ²
主 要 施 設	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究棟(RC造、地上2階) ・ 実験棟(S造、平屋建) ・ 中央実験ヤード(230m²×9区画) ・ 多目的実験用水槽 (W6m×L12m×D6m×1槽)
実 験 原 水	隣接する真岡市水処理センターより分流汚水を取水 <ul style="list-style-type: none"> ・ 流入下水：740m³/日 ・ 初沈後水：540m³/日
共 同 研 究 利 用 実 績	累計67者利用 (2022年3月現在)



3.3 試験研究施設

■ 中長期的な施設活用の基本方針

JS技術開発実験センターを脱炭素化技術の開発拠点、災害支援の資機材備蓄拠点及び技術開発部門の活動拠点としての活用を図るものとする。併せて隣接する真岡市水処理センター他1施設を活用することにより、研究開発のさらなる促進を図る。

■ 計画期間内(2022～26年度)の施設活用の基本方針

□ 脱炭素化技術の開発拠点化

➤ 脱炭素化技術の開発を促進、先導するため、技術開発実験センターおよび真岡市水処理センター等を活用した開発プロジェクトを提案、誘致することにより脱炭素化技術のショーケース化を目指す。

□ 災害支援資機材の備蓄による拠点化[財源：災害時維持修繕準備金]

➤ 地方公共団体が有する下水道施設が被災した場合の調査や応急復旧に必要な可搬式水処理施設や排水ポンプを整備し、技術開発実験センター内に備蓄することにより、災害支援の拠点とする。

□ 活動拠点化の推進と多様な開発ニーズへの対応

- 新たに真岡分室を設置し職員（常駐）を配置。今後も、JS全体での働き方改革の進展などを踏まえつつ、技術開発部門の活動拠点化を進める。
- 真岡市水処理センター（標準法）、二宮水処理センター（OD法）を活用した共同研究の公募等を行うことで、パイロット試験から実規模実証までの幅広い開発ニーズに応える。
- 実験施設(実験フィールド、多目的実験用水槽)の活用を促進するため、研究インフラの提供のみを行う「フィールド提供型共同研究」を新たに創設する。(令和4年度実施済み)

Japan Sewage Works Agency

8

4. 技術活用

■ 新技術導入制度について

- JSでは、受託事業における新技術の円滑な導入を促進するため、開発者の申請に基づき、JSが積極的に導入を図る新技術を選定(技術選定)する「新技術導入制度」を2011(平成23)年度より実施している。
- 本制度における新技術とは、JSにおいて基準化されていない下水道技術であって、下表に示すものをいう。

新技術導入制度における新技術の分類

分類	説明 ※1	対象技術 ※2	
		処理プロセス	機器・装置
新技術Ⅰ類	共同研究等によりJSが開発に関与した技術のうち、技術選定を行った技術	○	○
新技術Ⅱ類	公的な機関により開発・評価され、JSが技術確認、技術選定を行った技術	○	×
新技術Ⅲ類	民間により開発され、JSが技術確認、技術選定を行った技術	○	×

※1：技術確認とは、JSが実施設への適用性について確認を行うこと、技術選定とは、JSが受託事業への適用性を確認し、新技術として選定することをいう。

※2：処理プロセスとは、国土交通省下水道事業課長通知「下水道施設の改築について」(平成28年4月1日国水下水事発第109号)別表中の中分類以上の施設等に係る技術、機器・装置とは、同別表の小分類に係る技術をいう。

- 本制度に基づき、2024年3月末までに**47技術が選定**(うち10技術は有効期間※終了)され、うち**23技術が143件の受託事業での導入が決定**している。

※ 技術選定の有効期間は選定通知の日から5年であり、1回に限り延長が可能である(最大10年)。

4. 技術活用

■ 開発技術の導入

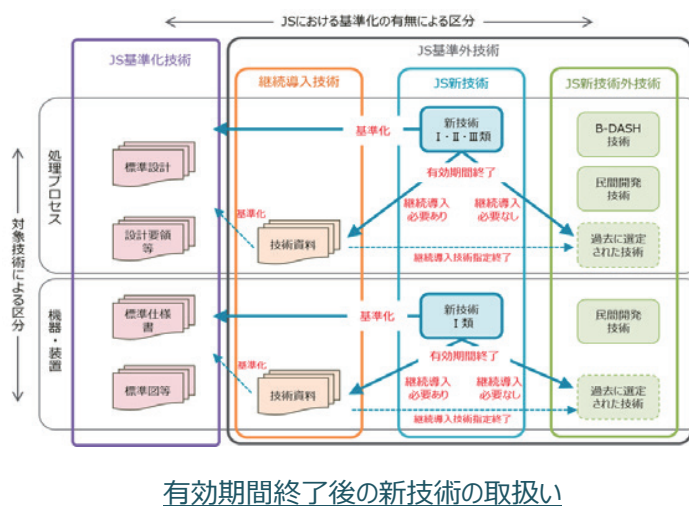
- JS新技術導入制度に基づく**新技術の選定を積極的に実施**する。【6次中計公表KPI】計画期間中15技術選定
- 全ての受託案件で新技術やJSが関与したB-DASHにより開発された技術(以下、「新技術等」)の導入検討を実施するほか、積極的な情報発信などを行うことにより、**新技術等の受託事業における導入件数拡大**を図る。
【6次中計公表KPI】計画期間中60件導入決定、新技術導入率100%(2026年度末)
- 複数の導入実績を有する新技術等の**事後評価調査の実施**など、**導入技術のフォローアップの強化**を図る。
- 有効期間終了後も継続して受託事業での導入が必要な新技術(標準化済みを除く)を「**継続導入技術**」に指定し、新技術と同等に取り扱うことにより、**有効期間終了後も引き続き導入・活用**を図る(下図)。【新設】

■ 開発技術の基準化

- 複数の実施設で導入・供用された新技術について、**事後評価調査結果などに基づき、迅速に基準化**を図ることにより、新技術の**導入を加速**する。
【6次中計公表KPI】11新技術の基準化

■ その他技術の活用

- 脱炭素化や低コスト化、下水道施設の機能維持・向上、下水道事業の生産性向上・高度化などに資する、**民間企業等が独自にまたは公的機関と共同で開発した技術**についても、JSが開発に関与した新技術等と同様に**受託事業における積極的な活用**する。



有効期間終了後の新技術の取扱い

Japan Sewage Works Agency

10

5. 計画のフォローアップ

- 本計画の実効性を確保し、技術開発・活用を円滑かつ確実に実施するため、6次中計で定める**KPIの定期的なフォローアップ**、ならびに、JS全体の事業の実施状況や社会情勢の変化、技術開発・活用の進捗状況などを踏まえ、**必要に応じて計画の中間見直し**を行うものとする。
- 上記に加えて、本計画に定める**技術開発(開発課題)の実施状況**については、**技術評価委員会**において、研究開発評価の一環として毎年度実施する、前年度の試験研究実施状況および当該年度の試験研究実施計画の報告を通じて、**フォローアップを継続的**に行う。なお、本計画の計画期間の**最終年度(2026年度)**には、技術評価委員会において、**技術開発の実施状況に係る完了評価**を実施し、その結果を**次期計画に反映**するものとする。

付 2. 技術開発実験センターの概要

技術開発実験センターの概要

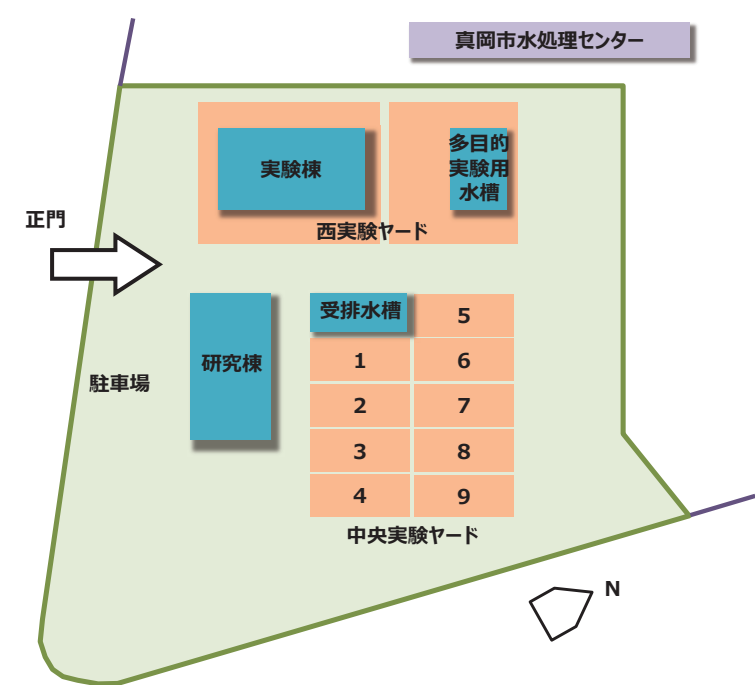
技術開発実験センターは、分流式下水道の実下水を用いたパイロットプラント規模の実証実験のための常設実験ヤードを確保するとともに、民間企業などとの共同研究をさらに推進することなどを目的として、2001年6月に開所した。

技術開発実験センターでは、隣接する真岡市水処理センターより送水した分流式下水道の実下水を用いて、比較的規模の大きいパイロットプラント実験を行えるほか、実規模の反応タンクを模擬した多目的実験用水槽を用いて、各種機器の性能試験などを行うことが可能である。令和6年度末までの共同研究による利用件数は68者となっている。

技術開発実験センター施設概要

所在地	栃木県真岡市八木岡 1309 番 2
敷地面積	約 13,000 m ²
開所年月	2001 年 6 月
主要施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究棟（鉄筋コンクリート造、2 階建） ・ 実験棟（鉄骨造、平屋建） ・ 中央実験ヤード（230 m²×9 区画） ・ 多目的実験用水槽（鋼製、幅 6 m×有効水深 6 m×長さ 12 m×1 槽）
実験原水	隣接する真岡市水処理センターより分流汚水を取水 <ul style="list-style-type: none"> ・ 流入下水：740 m³/日（中央実験ヤード1区画あたり最大 80 m³/日） ・ 最初沈殿池流出水：540 m³/日（同上 60 m³/日）

施設平面図および中央実験ヤード使用実績（2024 年度）

施設平面図	中央実験ヤード	
	区画	利用者
 <p>真岡市水処理センター</p> <p>正門</p> <p>駐車場</p> <p>研究棟</p> <p>実験棟</p> <p>多目的実験用水槽</p> <p>西実験ヤード</p> <p>受排水槽</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p> <p>中央実験ヤード</p> <p>N</p>	1	—
	2	—
	3	—
	4	—
	5	—
	6	—
	7	—
	8	—
	9	—
	多目的実験用水槽	
	—	
	実験棟（活性汚泥処理実験プラント）	
	（株）明電舎	
	2025 年 2 月～2026 年 9 月	

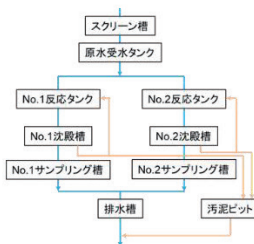
また、JS では技術開発における基本的な方針や方向性、具体的に取り組むべき技術分野や開発課題を設定した基本計画（付1 参照）に基づき、JS 自らの財源を確保して安定的かつ継続的な調査研究（基礎・固有調査研究）を実施している。基礎・固有調査研究の実施に必要な施設は、施設整備拡充準備金を原資として技術開発実験センター敷地内に整備しており、2020 年度に実験棟や活性汚泥処理実験プラント等の実験設備を整備し、これら実験設備を使った調査研究を行っている。

実験棟



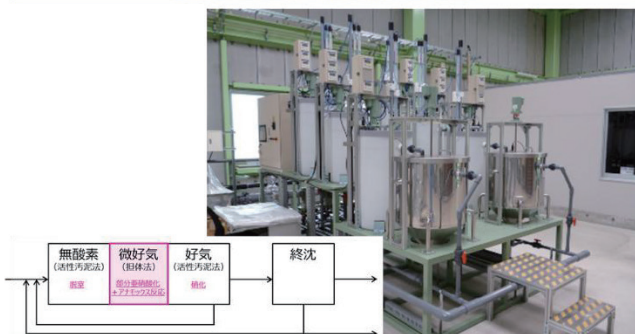
構 造	鉄骨造平屋建
階 高	約7m
床 面 積	390m ²
収容実験設備	<ul style="list-style-type: none"> ・活性汚泥処理実験プラント(R2.12月完成) ・アナモックス実験装置(R3.3月完成) ・コンポスト実験装置(R3.3月完成)

活性汚泥処理実験プラント



構 造	鋼板製
水処理方式	標準活性汚泥法
処理能力	日最大50m ³ /日×2系列
調査研究テーマ	AIによる水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術

アナモックス実験装置



構 造	PE製
水処理方式	循環式硝化脱窒法と一槽式アナモックス (微好気槽)のハイブリッド処理
処理能力	設計水量100L/h×2系列
調査研究テーマ	水処理省エネ化技術

コンポスト実験装置



構 造	回転攪拌パドル式
処理対象	下水汚泥、バイオマス等
処理能力	日最大50kg/日×2台
調査研究テーマ	下水汚泥資源農業利活用技術

Copyright 2025 by Japan Sewage Works Agency

All rights reserved. No parts of this report may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without written permission of Japan Sewage Works Agency.

この報告書に関する全ての権利は、日本下水道事業団にあります。本報告書の全部又は一部の転載、複製には、日本下水道事業団の文書による許可が必要です。

ISSN 2187-347X

技術開発室技術資料 25-001

技術開発年次報告書（令和6年度）

令和7年11月

編集・発行 日本下水道事業団 技術開発室
〒113-0034 東京都文京区湯島2丁目31番27号
湯島台ビル
電話 (03)6892-2021

印刷 株式会社サンワ

