

1. 試験研究調査

1. 1 令和4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 | 村岡正季 福井智大 他9名 | 2 |
| | I-2 カーボンニュートラル型下水処理システムの開発 | 村岡正季 山本明広 他2名 | 79 |
| | II-1 下水処理の更なる低コスト化技術の開発 | 山森隼人 鈴木博子 他4名 | 85 |
| | II-2 下水道資源利活用技術の開発 | 熊越瑛 島田 他1名 | 118 |
| | II-3 下水処理場におけるICT・AI活用技術の開発 | 山本明広 茂木志生乃 他5名 | 156 |
| 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 山森隼人 | 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) | 井上賀雅 村岡正季 | II-3に 掲載 |
| 受託調査研究費 (地方受託) | 富山市公共下水道浜黒崎浄化センターにおける最適な改築更新計画の策定に向けた体制構築に係る技術的援助 (受託連携) | 山本明広 山森隼人 | 非掲載 |
| | ゼロカーボンに向けた汚泥分析試験業務 | 新川祐二 熊越瑛 島田正夫 | 非掲載 |
| | 令和4年度札幌市公共下水道に係る計画設計業務委託 (廃熱発電検討) (受託連携) | 村岡正季 | 非掲載 |
| その他 | 1件 | | |

1. 2 令和 4 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

村岡正季、福井智大、茂木志生乃、山本明広、山森隼人、熊越瑛、
島田正夫、岡村五朗、井上剛、糸川浩紀、新川祐二

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・改良などを実施する。

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」と略記）、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、下水汚泥焼却の高度化などにより、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」など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、本計画期間内の実用化を目標に、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などの実用化に向けて、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

本年度からの 2 か年でオキシデーションディッチ（OD）法の実態調査や国内外の文献調査を実施し、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 年度以降の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公募型共同研究を開始する。

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)

本年度に採択された 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など

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利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利活用、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。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

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、下水道分野の遊休余剰施設の利用可能性や下水道分野以外のバイオガス活用状況などの調査を実施する。

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、高濃度消化、乾式消化などの基礎実験を実施する。また、嫌気性消化施設の導入検討に資する基礎実験を実施する。

③ バイオガス創出・活用技術の開発・実証

本年度より、新規の公募型共同研究「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」を開始し、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。

(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、性能や機能など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、導入施設における事後評価調査を実施する。「次世代型焼却炉システム」については、JS 外部技術評価委員会による技術評価の実施を予定する。また、嫌気性消化技術の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など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。

* 日本下水道事業団の選定新技術 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

† 日本下水道事業団の選定新技術 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などに関する調査

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 排出削減量など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

JS の案件形成支援を効果的に実施するため、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簡易に推定・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 4 項目を実施した。

(1) 水処理省エネ化技術

- ①開発動向調査・実態調査（オキシデーションディッチ法の運転実態調査）（2.1 節）
- ②小規模省エネ化技術の開発・実証（2.2 節）
- ③アナモックス併用高度処理の基礎実験（2.3 節）
- ④省エネ型深槽曝気技術の実規模実証（2.4 節）

(2) バイオガス活用技術

- ②バイオガス創出に係る基礎実験（3.1 節）
- ③バイオガス創出・活用技術の開発・実証（3.2 節）

(3) 事後評価調査・技術評価(脱炭素化技術)

- ①JS 新技術の事後評価調査・技術評価（脱炭素化技術）
 - ・ OD 法における二点 DO 制御システム（4.1 節）
 - ・ 次世代型焼却炉システム（4.2 節）
 - ・ 鋼板製消化タンク（4.3 節、4.4 節）

(4) 脱炭素化推進方策

- ①脱炭素化性能指標の実態などに関する調査（5.1 節）
- ②脱炭素化技術の体系化（5.2 節）
- ③脱炭素案件形成支援業務（5.3 節）

2. 水処理省エネ化技術

2.1 オキシレーションディッチ法の運転実態調査

(1) 検討の概要

オキシレーションディッチ（OD）法は、小規模の下水処理場を中心に広く導入されており、処理場数ベースで国内全体の半数近くを占めている。このため、下水道分野での GHG 排出量削減を進める上では、OD 法施設の省エネ化方策を検討することも重要である。

OD 法では、処理水量当りの消費電力量原単位（以下、「消費電力量原単位」と略記）が標準活性汚泥法を始めとした他の処理方式より高い傾向にあり⁴⁾、省エネ化の余地が大きいと考えられる一方、他の処理方式と比べて適用可能な省エネ化技術が少ない⁵⁾のが現状である。OD 法の反応タンク（OD 槽）では、エアレーション装置の回転数や ON/OFF などの運転サイクルを任意に設定できるため運転条件の融通幅が広く、これが消費電力量に直接的な影響を与える。OD 法施設の省エネ化方策を検討する上では、これを含めた OD 法の運転方法や処理状況などの「現状」を把握することが必要不可欠であるが、これを全国的に調査した事例は近年では存在しない。

このような観点から、本検討では、OD 法施設の運転方法・条件や処理状況などの現状を把握し、OD 法の省エネ化に資する新たな技術開発の注力点や開発目標の検討に活用することを目的として、全国の OD 法施設を対象とした実態調査を実施する。本年度は、地方公共団体からアンケート方式にて情報・データを収集し、OD 法の運転に係る全体的な現況を整理した上で、消費電力量に対する影響因子について解析を行った。加えて、現状の課題や新技術への要望に関する回答結果についても整理を行った。

(2) 検討方法

全国の OD 法を採用している全ての下水処理場（1,042 箇所）を対象に、アンケート方式にて情報・データ（以降、「データなど」と表記）を収集し、整理・解析を行った。

「下水道統計（令和元年度版）」に基づき OD 法（高度処理 OD 法を含む）を採用している下水処理場 1,042 箇所を抽出し、全箇所を対象にアンケート方式（調査票の送受）によるデータなどの提供を依頼した（2022 年 12 月実施）。調査項目は表 2-1 のとおりである。

表 2-1 調査項目

| 分類 | 項目 | 対象期間 |
|-------------|--|-----------|
| 施設概要 | 水処理施設概要（日最大処理水量、系列・池数、OD池の形状・容量・曝気装置、最終沈殿池の池数・水面積負荷）、汚泥処理施設概要（汚泥処理・濃縮方式、汚泥濃縮現有能力、汚泥脱水の種類・汚泥処理量） | 令和4年3月末時点 |
| 運転状況 | 曝気攪拌装置の運転状況（制御方法、DO設定値、運転時間等）、運転管理値の設定状況（MLSS、ASRT等）、処理水質の管理目標（BOD、COD、SS等）、運転条件の変更状況、省エネの工夫、汚泥脱水運転（運転日数・時間） | 令和4年3月末時点 |
| 運転実績 | 流入水量、流入水質、放流水質、余剰汚泥量、各汚泥処理工程の処理汚泥量、脱水ケーキ量、含水率、消費電力量（施設全体、水処理、汚泥処理） | 令和2,3年度分 |
| 維持管理体制 | 人員体制（人員体制、維持管理人数）、維持管理方法（管理方法・人数） | 令和4年3月末時点 |
| 現状の課題・新たな技術 | 運転管理上の課題、水処理施設において必要と考える新たな技術 | |

収集したデータなどを基に、OD法の運転に係る全体的な現況（運転方法・条件、処理状況など）を整理した上で、消費電力量を対象に影響因子（施設・設備の諸元、運転状況、運転実績など）との関連性について解析を行った。加えて、運転上の工夫や維持管理体制、現状の課題、新技術の要望についての回答について整理を行った。

（3）調査結果

① データなどの収集状況

調査票を送付した下水処理場 1,042 箇所のうち、672 箇所からデータなどが収集できた（回収率 64.5%）。

収集したデータについて、「下水道統計（令和2年度版）」を用い、OD法の母集団全体と回答があった処理場とで地域および現有処理能力の分布を比較し、回答があった処理場に偏りがないことを確認した（データ非掲載）。

なお、収集データなどには、一部の項目のみに回答があった処理場が含まれるため、以降の結果の記述では、個別に有効回答数（n）を付記する。また、以降で使用する消費電力量原単位は、水処理施設の年間消費電力量を年間の流入水量で除した、水処理施設における年間平均の水量当り原単位である。これ以外を含めた運転・処理実績に係るデータは全て 2020、2021 年度の平均値である。

② 施設・設備および消費電力量の概況

情報が得られた全処理場を対象に、現有処理能力、エアレーション装置型式、消費電力量原単位の内訳を図2-1に示す。現有処理能力は、平均値 2,237m³/d（中央値 1,440m³/d）、標準偏差 2,390m³/d であり、3,000m³/d 未満の処理場が全体の 78%、1,000m³/d 未満の処理場が 33% を占める。OD槽におけるエアレーション装置の型式は、縦軸型が全体の 46%と最も多く、以下、スクリー型が 28%、横軸型およびプロペラ型が各 12%の順である。消費電力量原単位は、平均値 0.62kWh/m³（中央値 0.52kWh/m³）、標準偏差 0.67kWh/m³ であり、0.25～0.5kWh/m³ および 0.5～0.75kWh/m³ の範囲の処理場が各々 37%、31%と比較的多数である。

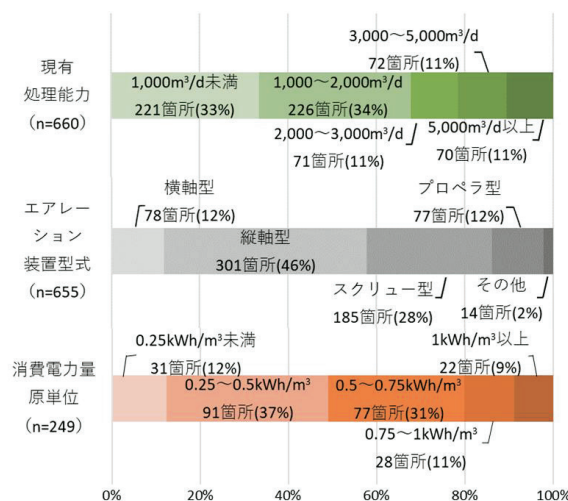


図2-1 現有処理能力・エアレーション装置型式・消費電力量原単位に係る処理場数の内訳

③ 汚水流入率およびエアレーション装置の運転方法

全処理場の汚水流入率（流入水量÷現有処理能力）の内訳を図2-2に示す。汚水流入率の平均値は49%、標準偏差は19%であり、50%以下の処理場が全体の59%を占め、70%以上の処理場は14%と、比較的汚水流入率が低い処理場が多い。

エアレーション装置の制御方式は、タイマー制御が90%以上を占め、DO一定制御を実施している処理場は3%に過ぎなかった。タイマー制御を行っている処理場について、エアレーション装置の運転サイクル（好気/無酸素/停止の工程*の構成）および1日の中での各工程の総運転時間について整理した結果を図2-2に示す。エアレーション装置を好気工程のみで運転している処理場は全体の5%に過ぎず、好気工程に対して無酸素工程もしくは停止工程のいずれかを組み合わせている処理場が各々22%、38%、好気+無酸素+停止としている処理場が35%と、OD法の設計方法において示されている⁶⁾無酸素工程だけでなく、停止工程を組み込んだ運転が全処理場の73%と広く実施されていることが分かる。好気時間については、8~12hrまで短縮している処理場が全体の29%と多いが、8hr未満と極めて短い処理場も同割合で存在する。

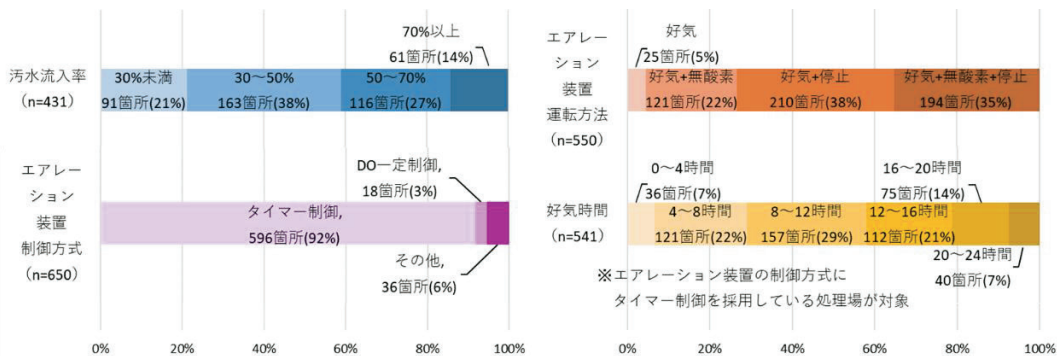


図2-2 汚水流入率エアレーション装置の制御方式・運転サイクル等に係る処理場数の内訳

④ 消費電力量への影響因子

消費電力量原単位に対する影響が大きいと想定される因子として、施設規模(現有処理能力)の影響を確認した。データが得られた全処理場 (n=246) の消費電力量原単位について、現有処理能力の区分毎の累積頻度分布として整理したものを図2-3に示す。同図に示した全処理場の消費電力量原単位の中央値は0.51kWh/m³であるが、処理場間のばらつきが極めて大きい。現有処理能力の区分毎に見ると、5,000m³/d以上、3,000~5,000m³/d、2,000~3,000m³/d、1,000~2,000m³/d、1,000m³/d未満の各区分の中央値は各々0.39、0.40、0.44、0.53、0.64kWh/m³で、全体的には現有処理能力が大きいほど消費電力量原単位が小さくなる傾向がある。

上と同様に消費電力量原単位に対する影響が大きいと想定される因子として、施設利用率に相当する汚水流入率の影響を確認した。全処理場 (n=246) の消費電力量原単位について、汚水流入率の区分毎の累積頻度分布を図2-4に示す。汚水流入率が70%以上、50~70%、30~

* 本調査では、「無酸素」は酸素供給を抑制/停止しOD槽内の攪拌（水流維持）のみを行う工程、「停止」は曝気・攪拌を全て停止する工程とした。

50%、30%未満の各区分の中央値は各々0.40、0.47、0.55、0.65kWh/m³で、全体的には汚水流入率が高いほど消費電力量原単位が小さくなる傾向が確認できる。

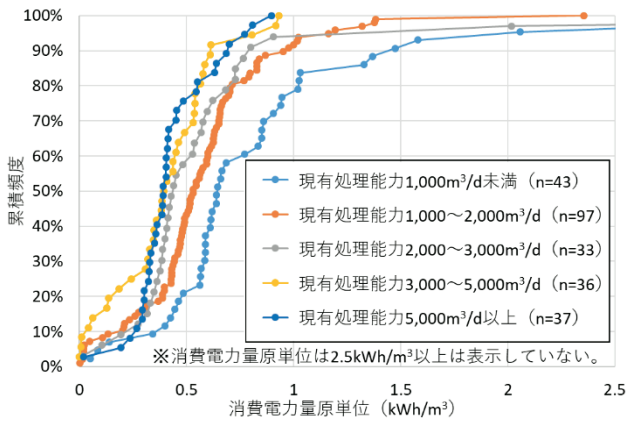


図2-3 現有処理能力の区分毎の消費電力量原単位の累積頻度分布

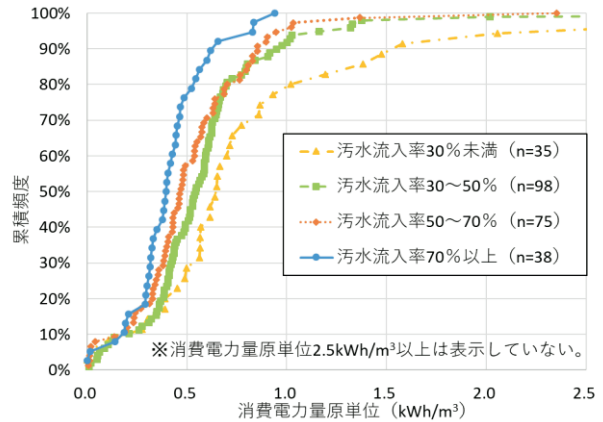


図2-4 汚水流入率の区分毎の消費電力量原単位の累積頻度分布

水処理施設の消費電力量に対してはエアレーション装置の寄与が大きいことから、エアレーション装置の運転方法の影響を確認した。汚水流入率 50%以上の処理場 (n=95) の消費電力量原単位について、好気時間の区分毎の消費電力量原単位の分布を図 2-5 に示す。全体的には好気時間が長いと消費電力量原単位の中央値が高くなる傾向が見られ、特に好気時間 20~24hr の区分においては比較的高い範囲で分布している。ただし、処理場間でのばらつきも大きく、好気時間 8~20hr の各区分においては、好気時間の違いによる顕著な相違は見られない。

次に停止時間の影響について、上と同様に汚水流入率 50%以上の処理場 (n=95) を対象に、停止時間の区分毎の消費電力量原単位の分布を図 2-6 に示す。停止時間 12hr 以上の区分においては消費電力量原単位の中央値が他の区分よりも明らかに小さくなっているものの、ここでも処理場間のばらつきが大きく、停止時間 12hr 未満の各区分の間には消費電力量原単位に明確な相違は見られなかった。

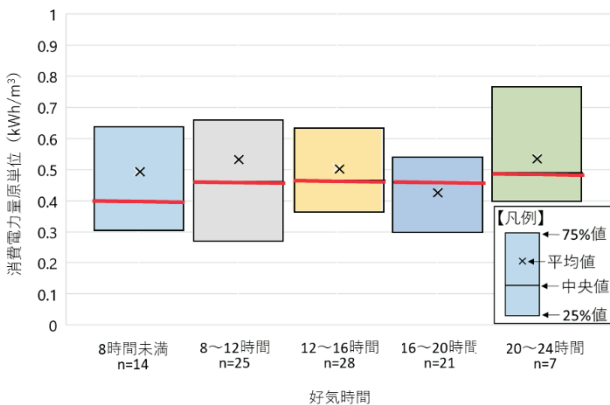


図2-5 好気時間の区分毎の消費電力量原単位の分布(汚水流入率 50%以上)

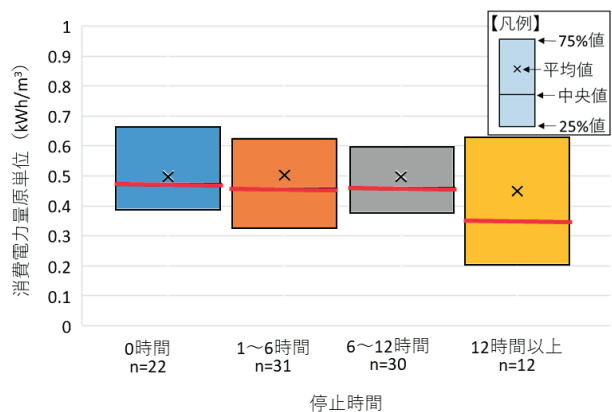


図2-6 停止時間の区分毎の消費電力量原単位の分布(汚水流入率 50%以上)

水処理施設の省エネ化のためにエアレーション装置の運転動力を過剰に削減すると放流水質の悪化に至る恐れがあることから、消費電力量原単位と放流水質との関係を確認した。放流水の BOD および NH₄-N 濃度について（各々 n=247、190）、消費電力量原単位の区分毎の累積頻度分布を図 2-7、2-8 に示す。放流水の BOD 濃度は、消費電力量原単位 0.5kWh/m³ 未満の区分においてやや高い処理場が見られるが、全体数の 95% の処理場では 5mg/L 未満と良好な水質であり、他の区分と比較して顕著に悪化しているわけではない。放流水の NH₄-N 濃度については、完全硝化を必ずしも目指していない処理場が含まれると想定されるが、消費電力量原単位が小さい区分においても明確に増加する傾向は見られなかった。これらの処理場では、放流水質を悪化させることなく消費電力量原単位を低く維持した運転が行われていると言える。

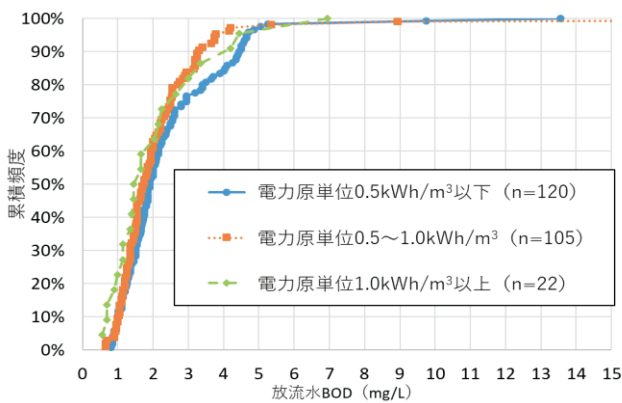


図 2-7 消費電力量原単位の区分毎の放流水 BOD 濃度の累積頻度分布

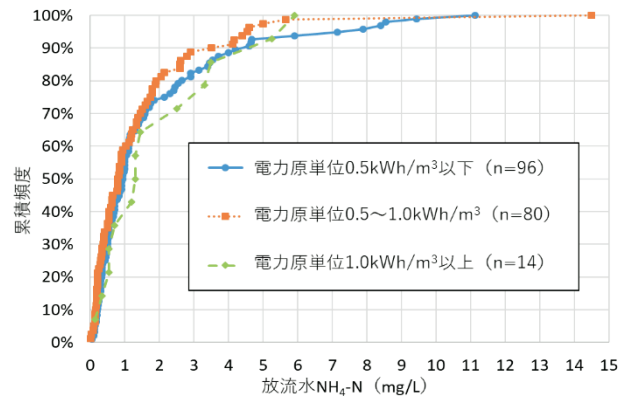


図 2-8 消費電力量原単位の区分毎の放流水 NH₄-N 濃度の累積頻度分布

⑤ 省エネのための運転上の工夫

省エネのための運転上の工夫について、自由回答方式の回答を分類して集計した結果を図 2-9 に示す（n=118；複数回答あり）。OD 槽におけるエアレーション装置の運転時間の調整を行っている処理場が 44 箇所（37%）と最多で、同装置の回転数の制御（15 箇所；13%）がこれに続いており、消費電力量に対する寄与が大きいエアレーション装置の運転方法に工夫を行っている処理場が多いことが解る。なお、同図において「その他」に分類されている回答の中には、盤内ヒーターや不要な照明・空調機の停止などが含まれる。

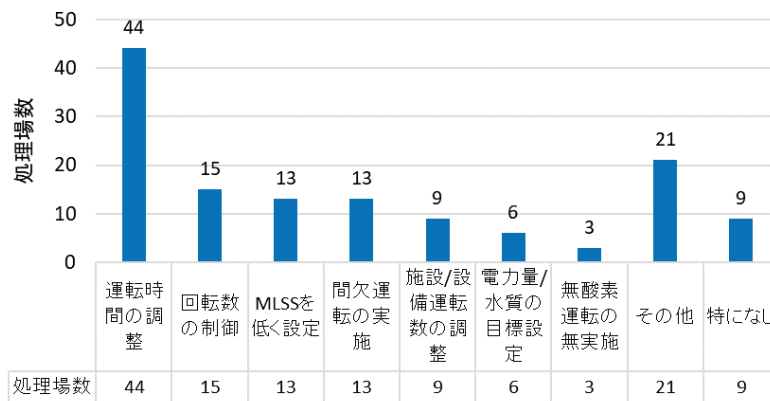


図 2-9 省エネのための運転上の工夫の内訳

⑥ 維持管理体制

維持管理の委託/直営の別に関する情報が得られた全処理場（n=660）について、維持管理会社などへの全部委託が 80%、一部委託が 20%、直営が 1%以下であり、大半の処理場が全部/一部委託を行っている（データ非掲載）。

維持管理体制に係る 3 項目について、処理場数の内訳を図 2-10 に示す。維持管理方法は、巡回管理が 61%、常駐管理が 38%と、巡回管理を行っている処理場が多い（n=661；図 2-10 左図）。巡回管理における巡回頻度は、2 回/週が 43%、3 回/週が 21%と、週の半分未満（3d 以下）の処理場が 81%占めている（n=408；図 2-10 中央図）。常駐管理の場合の人数は、2~5 人が 48%、1~2 人が 38%と 5 人以下で管理している処理場が 86%を占めている（n=253；図 2-10 右図）。

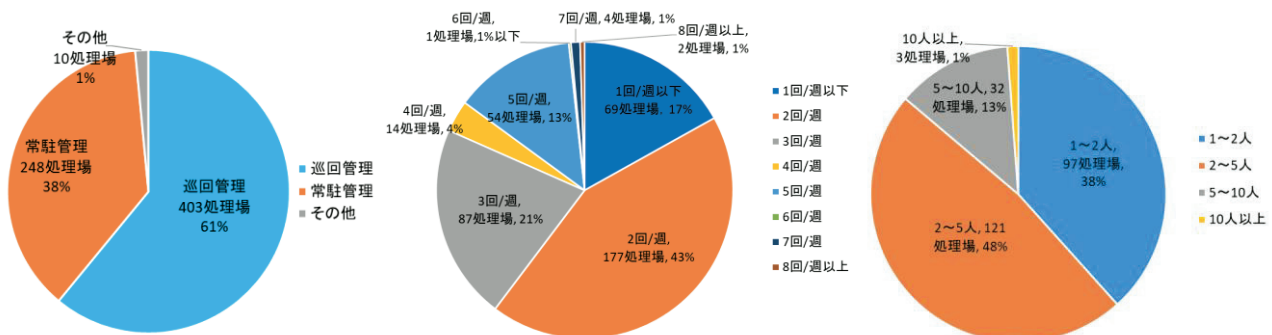


図 2-10 維持管理体制に係る処理場数の内訳
 (左図:維持管理方法、中央図:巡回管理の場合の頻度、右図:常駐管理の場合の人数)

⑦ 現状の課題および新技術への期待

処理場の運転管理上の課題および水処理施設において必要と考えられる新たな技術の各々について、優先順位第 1~3 位の回答数（選択式）を整理したものを図 2-11 示す。運転管理上の課題は、施設・設備の老朽化が 484 回答あり回答処理場数全体の 33%と最多であるが、消費電力量についても 203 回答あり 14%と比較的多くの処理場で課題として認識されている。水処理で必要と考えられる新技術については、省エネ化技術（316 回答、24%）、安価な設備（299 回答、23%）の 2 点の回答数が明らかに多く、省エネ化・低コスト化を可能とする新技術に対する要望が強いことが解る。

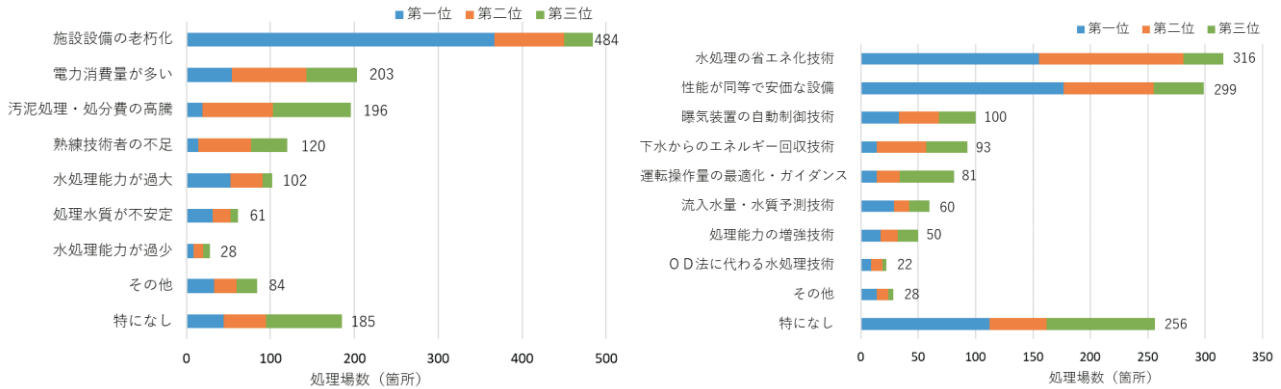


図2-11 運転管理上の課題および水処理で必要とされる新技術に関する回答数の集計結果
 (左図：運転管理上の課題、右図：水処理の新たな技術)

(4) まとめ

OD法を採用している全国の下水处理場を対象にアンケート形式で運転状況、消費電力量、維持管理方法、運転管理上の課題などに関する実態調査を行い、672処理場から情報・データを収集した。

- エアレーション装置の運転方法について、無酸素もしくは停止工程を組み込んでいる処理場が全体の95%を占め、停止工程についても全体の73%と広く実施されていた。
- 消費電力量原単位の中央値は0.51kWh/m³で、現有処理能力が大きいほど、また汚水流入率が高いほど小さくなる傾向が見られたが、それ以上に処理場間のばらつきが大きく、複数因子の複合的な影響を考慮して解析する必要があると考えられた。
- 消費電力量原単位が比較的小さい処理場においても放流水質（BOD、NH₄-N）の悪化は見られず、放流水質を悪化させることなく消費電力量原単位を低く維持した運転が可能であることが示唆された。
- 運転管理上の課題として、施設・設備の老朽化を挙げた処理場が圧倒的に多かったが、消費電力量が大きい点についてもこれに次いで多かった。また、水処理施設において必要と考えられる新技術については、省エネ化技術および安価な設備の回答数が比較的多かった。

今後は、消費電力量について複数因子の複合的な影響に関する解析を行い、消費電力量に対する各種条件の影響度合いや、消費電力量原単位が小さい処理場に特徴的な事項などを明らかにしていく。

2.2 小規模省エネ化技術の開発・実証

(1) 検討の概要

1.2節で述べたとおり、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、ラインア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などにより早期の実用化に向けた開発・実証を行う。

本年度は、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」（以下、「RBC-OD 法」と表記）について、実規模での実証実験を開始した。なお、本検討は東芝インフラシステムズ㈱との共同研究（2021 年 8 月～）として実施したもので、2023 年度まで実施予定である。

（2）検討方法

「RBC-OD 法」は、低動力で有機物などの負荷低減が可能な「回転繊維ユニット RBC」（以下、「RBC 装置」と表記）を OD 法の前処理に使用することで、反応タンク（OD 槽）への有機物などの負荷量を効率的に低減し、反応タンクにおける消費電力量の削減や処理能力増強を図る技術である⁷⁾⁻¹⁰⁾（図 2-12）。本 RBC 装置は、網目状の繊維体を用いる回転生物接触法（Rotating Biological Contactor ; RBC）の処理装置で、繊維体に形成される生物膜の剥離を促進し肥大化を防ぐための弱い散気のみで有機物などを低減する。繊維体は、塩化ビニリデン系の特殊繊維を空隙率 95～98%の立体網目状に加工したもので、微生物を高濃度に保持することが可能である。

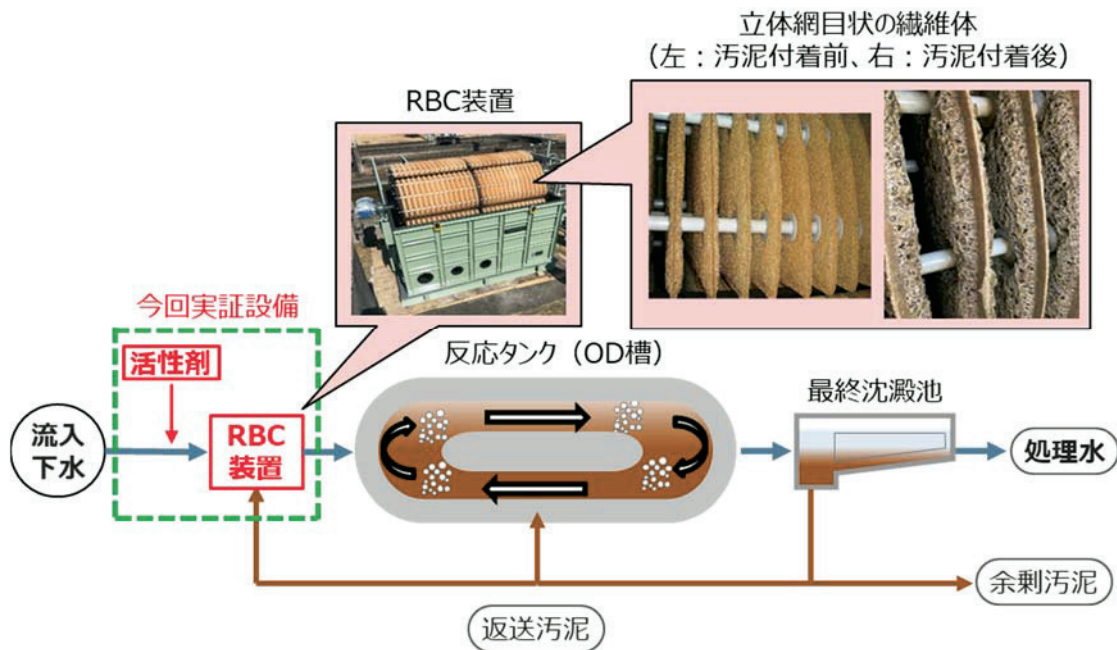


図 2-12 回転繊維ユニット RBC を用いた下水処理技術の概要

「RBC-OD 法」では、OD 槽の前段に RBC 装置を設置した上で、OD 法の最終沈殿池からの返送汚泥の一部を同装置へ分配する。更に、RBC 装置内の生物膜や OD 槽内の活性汚泥におけるバチルス属細菌の存在量を増加させるため、カルシウムやマグネシウムなどのミネラルを主成分とする活性剤を同装置の流入水に添加する。バチルス属細菌は土壌細菌の一種であり、その存在量を増加させることで有機物の処理性能を安定化させるなどの効果が期待できる¹¹⁾。

本共同研究では、OD 法の下水処理場の実証設備を構築し実規模での実証実験を実施している。実証設備は、処理能力 1,160m³/d を有する系列（1 系：580m³/d×2 池）の OD 槽の前段に RBC 装置を設置して実証系列とし、隣接する 2 系（処理能力 1,230m³/d×1 池）を対照系列として、RBC-OD 法による省エネ性能を確認する「省エネ性能試験」および処理能力増強効果を確認

認する「負荷増強試験」を実施した（図2-13）。実証系列では、最終沈殿池からの返送汚泥の一部（流量としての分配比 13%程度）を RBC 装置へ供給すると共に、前述の活性剤を連続的に添加した。また、両系列の曝気装置（横軸型）はタイマーで曝気時間を制御する ON/OFF の間欠運転を行った。後述するとおり、実証実験期間中には曝気時間の変更を行ったが、RBC 装置の設置前後でその他の運転方法の変更はない。

実証実験期間中、省エネ性能試験では週 3 回、負荷増強試験では週 1 回の頻度で各所（流入下水、RBC 装置出口水、各系列処理水（最終沈殿池流出水）、各系列返送汚泥；図2-13 参照）の水質測定を実施した（全て 9:30~10:00 のスポット採水）。ここで、RBC 装置出口水は同装置に供給した返送汚泥を含むため、採取直後に 10 分間静置した上澄水を試料として水質測定に供した。また、RBC 装置入口水の水質については、流入下水と返送汚泥の水質から算出した。

実証設備は、2022 年 4 月より運転を開始し、RBC 装置の基本性能の確認、設備や運転条件の各種調整を実施した後、同 7 月以降、以下に記す 2 つの試験へと移行した。

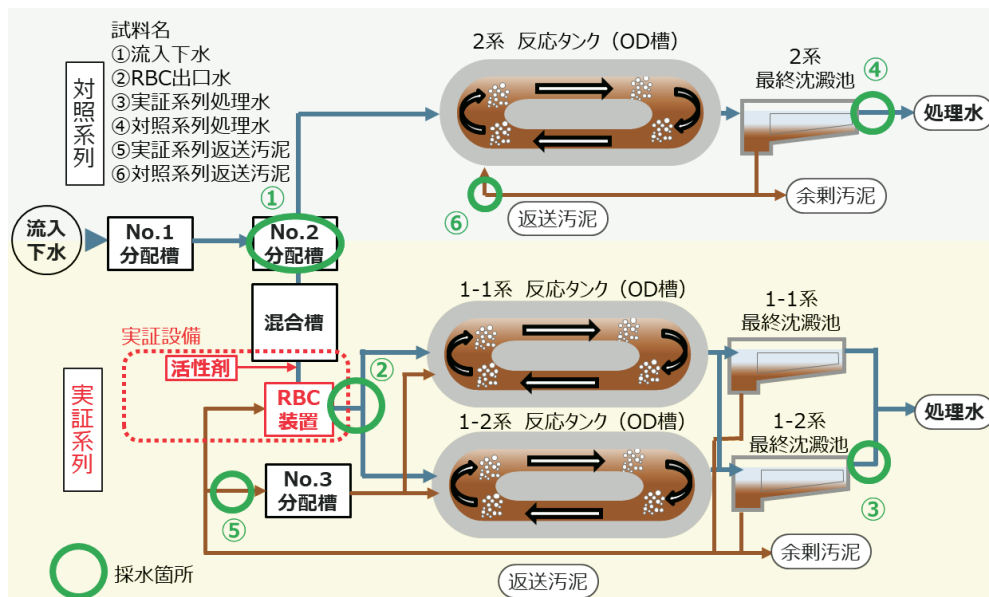


図2-13 実証設備のフローおよび水質測定箇所

① 省エネ性能試験

省エネ性能試験では、実証系列にて OD 槽 2 池を運用し、OD 槽容量と処理水量が同等の条件で実証系列と対照系列の消費電力量などの比較を行った。試験期間は、2022 年 7 月 4 日～2023 年 1 月 9 日の約 6 ヶ月である。試験期間中は、流入下水の流量、BOD、SS、T-N 濃度や OD 槽の MLSS、MLVSS 濃度、返送汚泥の SS 濃度などの運転データを基に OD 槽における必要酸素量を推定し、これに応じて実証系列の曝気時間を段階的に短縮した運転を行った。省エネ性能試験時の運転条件の実績は表 2-2 に示すとおりである。なお、RBC 装置の HRT（原水量基準）は約 15min と極めて短く、これは負荷増強試験においても同様である。

② 負荷増強試験

負荷増強試験では、両系列への処理水量分配を変えずに、実証系列において OD 槽 1 池の運転を停止することで同系列の槽容量当りの流入水量を倍増させた条件にて、対照系列との間で処理水質や消費電力量などの比較を行った。本試験では、2023 年 1 月 10 日より年間を通した試験を開始したが、2023 年 3 月 15 日までの運転条件の実績は表 2-3 に示すとおりである。

表 2-2 省エネ性能試験時の運転条件実績
(2022.7.4~2023.1.9 の期間平均値)

| 項目 | 単位 | 実証系列 | 対照系列 | |
|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|
| 流入下水 | | | | |
| 流量 | m ³ /d | 1,085 | 869 | |
| BOD濃度 | mg/L | 241 | | |
| RBC装置 | | | | |
| 汚泥返送量(A) | m ³ /d | 152 | — | |
| RBC汚泥分配比(A)/(B) | % | 13 | — | |
| HRT | min | 14.5 | — | |
| 反応タンク (OD槽) | | | | |
| HRT | hr | 34.7 | 34.0 | |
| MLSS濃度 | mg/L | 2,980 | 3,250 | |
| SRT | d | 40.0 | 33.0 | |
| 曝気時間 | hr/d | RUN1(7/4~) | 11.25 | 11.75 |
| | | RUN2(8/16~) | 10.45 | 11.83 |
| | | RUN3(9/5~) | 9.88 | 11.36 |
| | | RUN4(10/25~) | 9.58 | 10.70 |
| | | RUN5(11/5~) | 10.25 | 10.70 |
| 曝気装置 | | 横軸型 7.5kW×2台/池 | 横軸型 15kW×2台/池 | |
| 最終沈殿池 | | | | |
| 仕様 | | φ8.6m×2池 | φ14m×1池 | |
| 水面積負荷 | m/d | 9.3 | 5.6 | |
| 汚泥返送量(B) | m ³ /d | 1,171 | 1,135 | |
| 汚泥返送比 | % | 108 | 131 | |

表 2-3 負荷増強試験時の運転条件実績
(2023.1.10~2023.3.15 の期間平均値)

| 項目 | 単位 | 実証系列 | 対照系列 |
|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 流入下水 | | | |
| 流量 | m ³ /d | 1,006 | 781 |
| BOD濃度 | mg/L | 281 | |
| RBC装置 | | | |
| 汚泥返送量(A) | m ³ /d | 133 | — |
| RBC汚泥分配比(A)/(B) | % | 13 | — |
| HRT | min | 15.6 | — |
| 反応タンク (OD槽) | | | |
| HRT | hr | 18.7 | 37.8 |
| MLSS濃度 | mg/L | 2,980 | 3,250 |
| SRT | d | 18.8 | 36.0 |
| 曝気時間 (1/10~) | hr/d | 17.17 | 10.73 |
| 曝気装置 | | 7.5kW×2台/池 横軸型 | 15kW×2台/池 横軸型 |
| 最終沈殿池 | | | |
| 仕様 | | φ8.6m×2池 | φ14m×1池 |
| 水面積負荷 | m/d | 8.7 | 5.1 |
| 汚泥返送量(B) | m ³ /d | 997 | 1,081 |
| 汚泥返送比 | % | 99 | 138 |

(3) 検討結果

本稿では、今年度に完了した省エネ性能試験について、結果を掲載する。

省エネ性能試験では、RBC 装置の運転条件は固定とし、実証系列において OD 槽の曝気時間を対照系列と同程度の 11.25hr/d (RUN1 ; 7/4~) から、10.45hr/d (RUN2 ; 8/16~)、9.88hr/d (RUN3 ; 9/5~)、9.58hr/d (RUN4 ; 10/25~)、10.25hr/d (RUN5 ; 11/5~) へ順次変更して処理性能および省エネ効果を確認した (表 2-2)。

RBC 装置入口水の BOD、S-BOD (溶解性 BOD) 濃度が試験期間 (2022 年 7 月 4 日~2023 年 1 月 9 日) の平均で各々 213、76mg/L であったのに対して、RBC 装置出口水では平均 77、52mg/L であり、返送汚泥の影響が小さい S-BOD で見ても低減率は平均 30%と、RBC 装置による有機物負荷の低減効果が確認された*(図 2-14)。P-BOD (浮遊性 BOD ; BOD と S-BOD

* 本技術では RBC 装置へ返送汚泥を投入しているため、ここに示した BOD などの低減効果は浮遊汚泥への吸着分を含めた見かけの低減量である点に注意が必要である。本来、浮遊汚泥に吸着され OD 槽へ流入する負荷量は低減されたことにはならないため、汚泥への吸着量を別途推定し RBC 装置における真の負荷低減効果を定量化する試みを 2023 年度の実証実験の中で実施中である。

の差として算出) については、RBC 装置前後の低減率が平均 81%であり、生物膜における浮遊性物質の捕捉による寄与が大きいことが示唆された。

前述のとおり実証系列の OD 槽では曝気時間を段階的に短縮して運転を行ったが、各系列の処理水（OD 法の最終沈殿池流出水）の全期間での平均 BOD 濃度は実証系列：2.3mg/L、対照系列：1.5mg/L と同程度の水質であった。また、RUN 毎の処理水の S-BOD、P-BOD 濃度は各々で同程度であった（データ非掲載）。

RBC 装置入口水と出口水の NH₄-N 濃度は各々平均 24.6、23.7mg/L と低減率は 3%であり、HRT が約 15min と短い運転条件では RBC 装置における NH₄-N の低減は殆ど見られなかった。一方、有機性窒素の低減率は平均 57%と大きかったが、これは前述のとおり有機物が低減されたためである（図 2-15）。

各系列の処理水の T-N 濃度は実証系列：平均 1.7mg/L、対照系列：平均 1.4mg/L、NO_x-N 濃度はいずれも 0.5mg/L 以下で、RBC 装置による有機物負荷低減に伴う OD 槽での脱窒への影響は認められなかった。

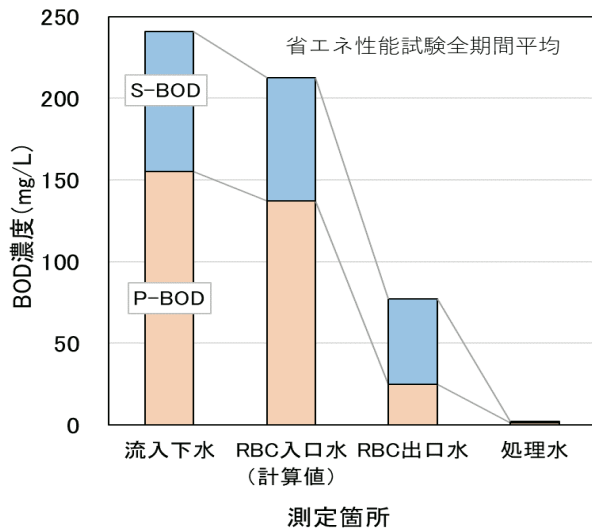


図 2-14 実証系列における BOD 濃度の変化

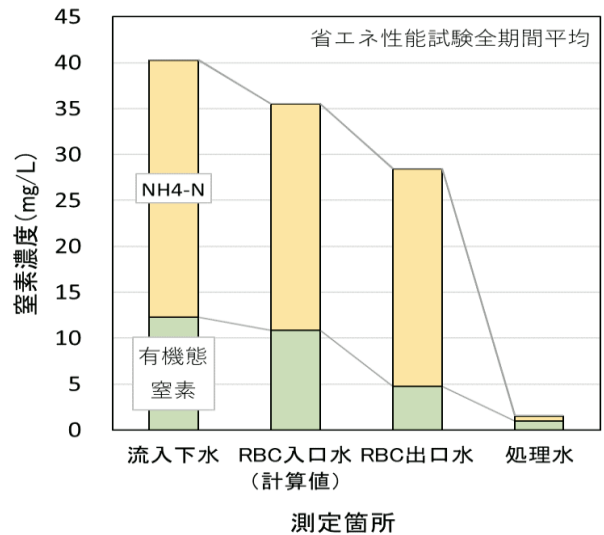


図 2-15 実証系列における窒素濃度の変化

実証系列と対照系列における RUN 毎の消費電力量原単位の実績（期間平均値）を図 2-16 に示す。ここで、消費電力量原単位の計上範囲は、実証系列が RBC 装置と曝気装置、対照系列が曝気装置である。実証系列では、RBC 装置における有機物などの負荷低減により OD 槽での曝気時間を短縮することが可能となり、消費電力量が削減された。消費電力量原単位は全ての RUN において対照系列より実証系列の方が低く、本試験期間全体での消費電力量原単位は、実証系列と対照系列で各々平均 0.26、0.31kWh/m³ であり、実証系列における削減率は平均 15.3%（RUN 毎の平均削減率の範囲は 4.1~20.7%）であった。なお、実証系列の消費電力量のうち、RBC 装置が占める割合は 10%程度である。

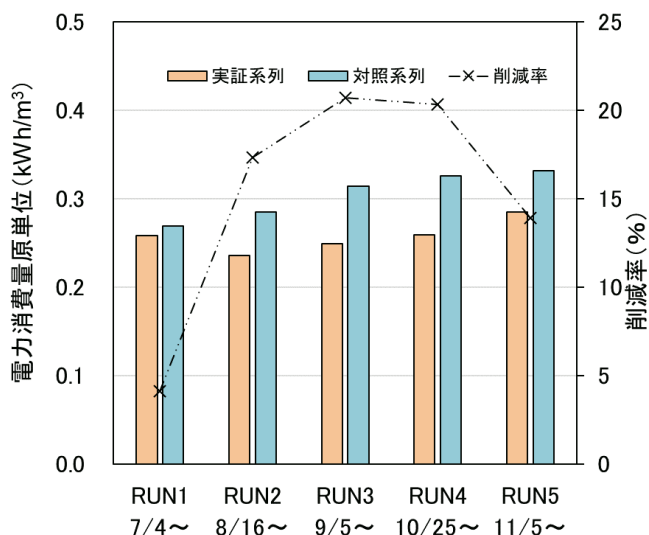


図2-16 消費電力量原単位の実績(省エネ性能試験の各 RUN 期間平均)

(4) まとめ

回転繊維ユニット RBC を用いた下水処理技術の実規模実証実験を開始し、約 6 ヶ月間の省エネ性能試験より以下の結果が得られた。

- 実証系列において曝気時間を段階的に短縮した運転を行ったが、処理水 BOD 濃度は実証・対照各系列で各々平均 2.3、1.5mg/L、処理水 NH₄-N 濃度は各々平均 1.7、1.4mg/L と、同等の水質が得られた。
- 消費電力量原単位は実証・対照各系列で各々平均 0.26、0.31kWh/m³ となり、実証系列では対照系列に比べて平均 15.3%削減できた。

2023 年度も実証実験を継続し、年間を通した負荷増強試験を行うと共に、RBC 装置での有機物負荷低減機構を明確にするための実験的検討を行う。これらの実証実験結果に基づき、本技術による消費電力量削減および処理能力増強の効果の一般化、本技術の導入検討手法・設計手法の作成など、技術的確立に向けた検討を行う。

2.3 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など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¹²⁾、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^{13)・15)}、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、循環式硝化脱窒法の反応タンクに一槽式アナモックス処理（微好気槽）を組み

込み付加的な窒素除去機能を付与する処理フロー（図2-17；以下「MLE+アナモックス法」と略記）を想定し、2019年度以降、ラボ実験などの基礎的な実験を継続的に実施してきた。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。これまでに、低窒素濃度の合成排水を用いた一槽式アナモックス処理のラボ実験により、低水温・低窒素濃度においても窒素除去が可能であること¹⁶⁾、これを循環式硝化脱窒法に組み込んだ MLE+アナモックス法について、合成排水を用いた室内実験により、微好気槽に流入する C/N 比や S-BOD 濃度の条件によっては内部循環比を低く抑えつつ現実的な窒素除去率が得られる下水処理プロセスが成立しうること^{17),18)}などを確認してきた。

本年度は、上記に引き続く検討として、微好気槽で使用する担体サイズなどが T-N 除去速度に与える影響、担体法に対して活性汚泥を併用することによる影響などについてラボ実験を進めた¹⁹⁾。



図2-17 MLE+アナモックス法の処理フロー

(2) 検討方法

以下の2通りのラボ実験を実施した。各実験においては、種汚泥として群馬県の下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使用した。本汚泥は *Candidatus Kuenenia* が優占している汚泥であった。

① 一槽式アナモックス処理における担体サイズなどの影響確認実験

微好気槽で使用する担体のサイズなどが同槽における T-N 除去性能に与える影響を確認するために、ラボ実験装置を用いて一槽式アナモックス処理の連続実験を実施した。装置の概略を図2-18に、用いた担体と槽容量の条件を表2-4に示す。原水には NH₄-N 濃度 30~40mg/L の無機合成排水を使用し、連続運転中の反応槽の HRT を 3~24hr、水温を 10~20℃ の範囲で変化させた。反応槽内は空気：窒素=1：9 の混合ガスを用いて曝気攪拌して DO 濃度を低く維持（実績として 0.1~1.7mg/L）した他、0.5N の塩酸を用いて pH を 7.0~8.0 の範囲に制御した。

表2-4 担体*と槽容量の条件

| | 槽容量 | 担体サイズ | 担体添加率 |
|-----|------|--------|-------|
| 条件1 | 1.5L | 10mm 角 | 10% |
| 条件2 | 1.5L | 4mm 角 | 10% |
| 条件3 | 80L | 10mm 角 | 20% |

*担体の素材はいずれも PVA スポンジ

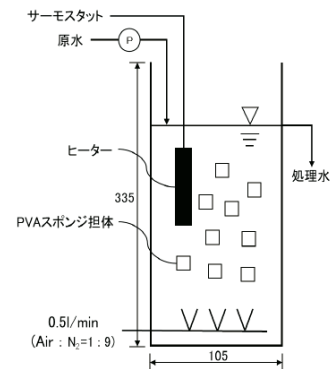


図2-18 一槽式アナモックス処理のラボ実験装置

② MLE+アナモックス法における活性汚泥併用の影響確認実験

MLE+アナモックス法について、過年度までは活性汚泥を使用しない担体法（MBBR）として処理性能を確認してきたが、本年度は、より現実的な活性汚泥法との併用処理（IFAS）とした場合に微好気槽における一槽式アナモックス処理が正常に機能するかどうかを確認した。ベンチ規模の実験装置（図2-19）において、活性汚泥法として運転を開始した後、52日目に微好気槽にアナモックス担体を5%添加してMLSS濃度が1,190~3,790mg/Lの範囲で運転を継続し、70日目までの窒素除去状況を確認した。上記の期間をとおして、原水にはNH₄-N濃度26~41mg/Lの無機合成排水を使用し、反応槽の総HRTは8~9時間、水温は23~25℃とした。

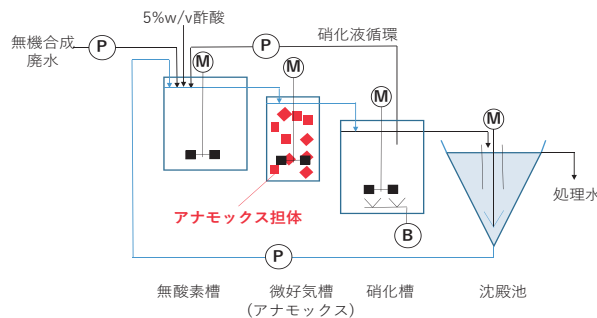


図2-19 MLE+アナモックス法の装置フロー

(3) 検討結果

① 一槽式アナモックス処理における担体サイズなどの影響

条件1~3の一槽式アナモックス処理におけるT-N除去速度および除去率について、条件毎の水温の影響としてプロットしたものを図2-20、2-21に示す（両図における凡例の①~③は条件1~3に対応）。ここで、T-N除去速度は、担体添加率20%換算での反応槽容積当りの速度である。データのばらつきが大きいですが、いずれの条件においても水温の低下に伴いT-Nの除去性能が低下する傾向がみられ、特に水温13℃以下では除去速度・除去率共に極端に低下した。また、同一の担体添加率においては10mm角担体（条件1）に比べて4mm角担体（条件②）の方がT-N除去速度・除去率が高い傾向にあり、担体のサイズが小さい方が、表面積が大きくなることで処理性能の見地から有利になると考えられた。

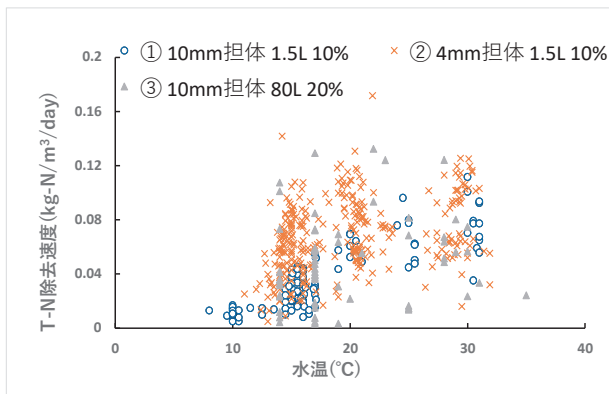


図2-20 水温とT-N除去速度の関係

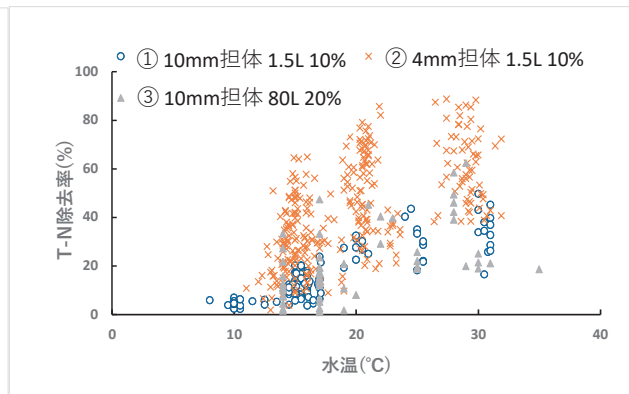


図2-21 水温とT-N除去率の関係

② MLE+アナモックス法における活性汚泥併用の影響

微好気槽にアナモックス担体を投入した前後の期間における同槽の T-N 除去寄与率（反応槽全体の T-N 除去量に対する微好気槽での除去量の割合）の推移を図 2-22 に示す。担体投入前にも活性汚泥による若干の T-N 除去がみられたが、担体投入後に T-N 除去寄与率が向上し 16～57%で推移した。約 20 日間と短期間の実験結果ではあるが、微好気槽における担体による一槽式アナモックス処理に対して、活性汚泥の共存による顕著な悪影響は生じないことが期待できる。

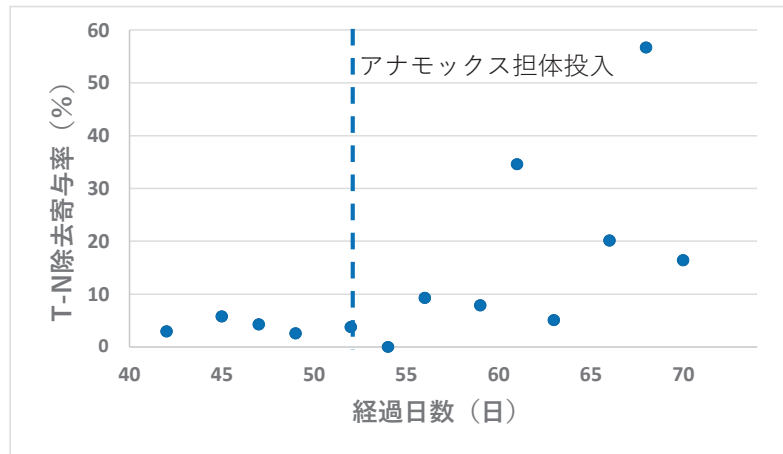


図2-22 微好気槽の T-N 除去寄与率の推移

(4) まとめ

MLE+アナモックス法について、(a)微好気槽（一槽式アナモックス処理）で使用する担体サイズなどの影響、(b)活性汚泥を併用することによる影響、の 2 点を確認するラボ実験を実施した。

微好気槽で使用する担体について、充填率が同一の場合に担体サイズが小さい方が T-N の除去速度・除去率が高い傾向が見られ、窒素除去性能の見地からは比表面積が大きくなる担体を使用の方が有利であると考えられた。また、短期間の実験結果ではあるものの、MLE+アナモックス法において担体添加による微好気槽の T-N 除去寄与率が向上したことから、同槽での担体による一槽式アナモックス処理に対して、活性汚泥を併用しても顕著な悪影響は生じないものと期待できる。

今後は、MLE+アナモックス法における活性汚泥併用の影響についてラボ実験による知見を蓄積すると共に、スケールアップした装置を用いた実下水の連続処理実験へと検討を進める予定である。

2.4 省エネ型深槽曝気技術の実規模実証

(1) 検討の概要

「省エネ型深槽曝気技術」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、

* 本技術に係る B-DASH 実証研究では、水深 6m 以上の反応タンクを深槽式としている。

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・維持管理費の縮減、日常点検など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、性能などを確認し技術の確立を図るもので、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」として本年度に新規採択され、前澤工業㈱、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）として実施するものである。

本年度は、研究計画を作成した上で、実証設備の機器製作および実証場所（実証フィールド）への設置を開始した。本年度末時点では実証実験は未着手であり、本稿では本技術や実証研究の概要を報告する。なお、B-DASH プロジェクトとしての実規模実証は 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計画である。

（2）検討方法

① 省エネ型深槽曝気技術

従来の深槽式反応タンクでは、タンクの中間水深（水深 5m 程度）付近の片側に散気装置、中央部に導流板を設置し、旋回流式でエアレーションが行われるのが普通である。ここで、散気装置を反応タンクの底部に設置し散気水深を大きくする深槽曝気が出来れば、理論的には酸素分圧が上がることで飽和溶存酸素濃度が高くなると共に、水中での気泡の滞留時間が旋回流式に比べて長期化することにより、水中への酸素移動効率が上がり、同一量の酸素を供給するために必要な曝気風量を削減することが可能となる。しかし、従来は深槽曝気を行うための高圧対応型の送風機が無く、更には深槽曝気に伴い過飽和に溶存する窒素が最終沈殿池にて再気泡化して汚泥に付着し、汚泥浮上などの固液分離障害を引き起こし得る点が課題であった。

また、従来の旋回流式では、反応タンク中間水深付近に設置された散気装置の点検などを行う際に、大がかりな足場の設置や高所作業が必要であり、作業労力や作業の安全面での課題があった。

本技術（図 2-23）では、従来の送風機よりも断熱効率の向上や機械損失の低減が図られた高効率の高圧対応型送風機（容積式スクリュブロー）を用いることで、深槽全面エアレーションを可能とし、これに低圧損型のメンブレンパネル式散気装置を組み合わせることで必要な曝気風量が削減される。最終沈殿池での溶存窒素の再気泡化による汚泥浮上に対しては、反応タンク末端での脱気操作²⁰⁾により、最終沈殿池の手前で溶存窒素を揮散させることで防止する。本技術により、曝気風量の低減による送風機の電動機動力の削減（省エネ化）、散気装置の設置数削減や底部設置により設置架台が不要になることによる建設・維持管理費の縮減、散気装置の点検などの労力軽減や維持管理性の向上が図られる。

本技術は、水処理方式を問わず、深槽式の好気タンクであれば新設・既設いずれにも導入が可能である。既設の深槽式反応タンクに導入する場合は、好気タンク末端で脱気操作を行うための仕切り壁を設置する必要があるが土木構造を大幅に変える必要はなく、概ね設備の更新のみで導入が可能である。

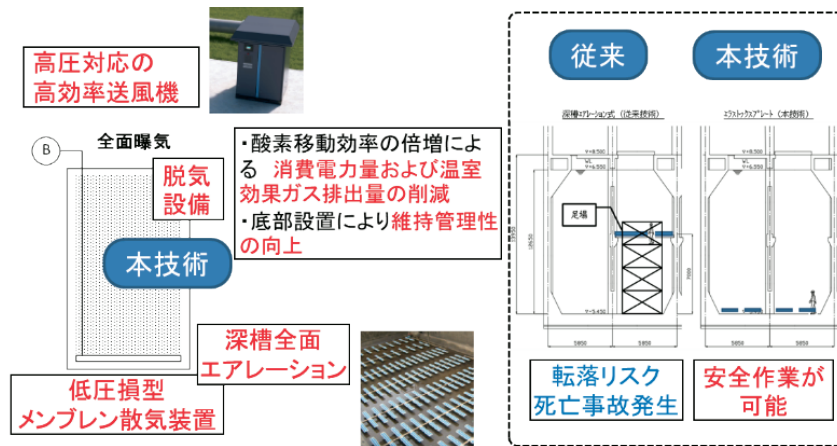


図2-23 省エネ型深槽曝気技術の概要

② 実証研究の概要

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2-5）。本処理場は、排除方式が分流式で、現有処理能力は697,900m³/d（全体5系列）である。実証実験では、凝集剤添加循環式硝化脱窒法の5系（5-1～4系、処理能力140,000m³/d）の反応タンクおよび最終沈殿池のうち、5-2系（反応タンク2池、最終沈殿池4池）を実証系、5-1系（池数は5-2系と同じ）を対照系（各々処理能力35,000m³/(d・2池)）とした（図2-24）。両系の反応タンクの水深は12mで、第1～8槽に分割されている。最終沈殿池は2階層式である。

表2-5 実証フィールドおよび実証施設の概要

| | | | |
|-----------|---|---------------|---|
| 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 | |
| | 実証系 (5-2系) | 反応タンク(2池) | 処理能力:35,000m ³ /d 水深:12m、散気水深:11.5m |
| | | 最終沈殿池(4池) | 2階層式 |
| | 対照系 (5-1系) | 反応タンク(2池) | 処理能力:35,000m ³ /d 水深:12m、散気水深:11.5m |
| 最終沈殿池(4池) | | 2階層式 | |

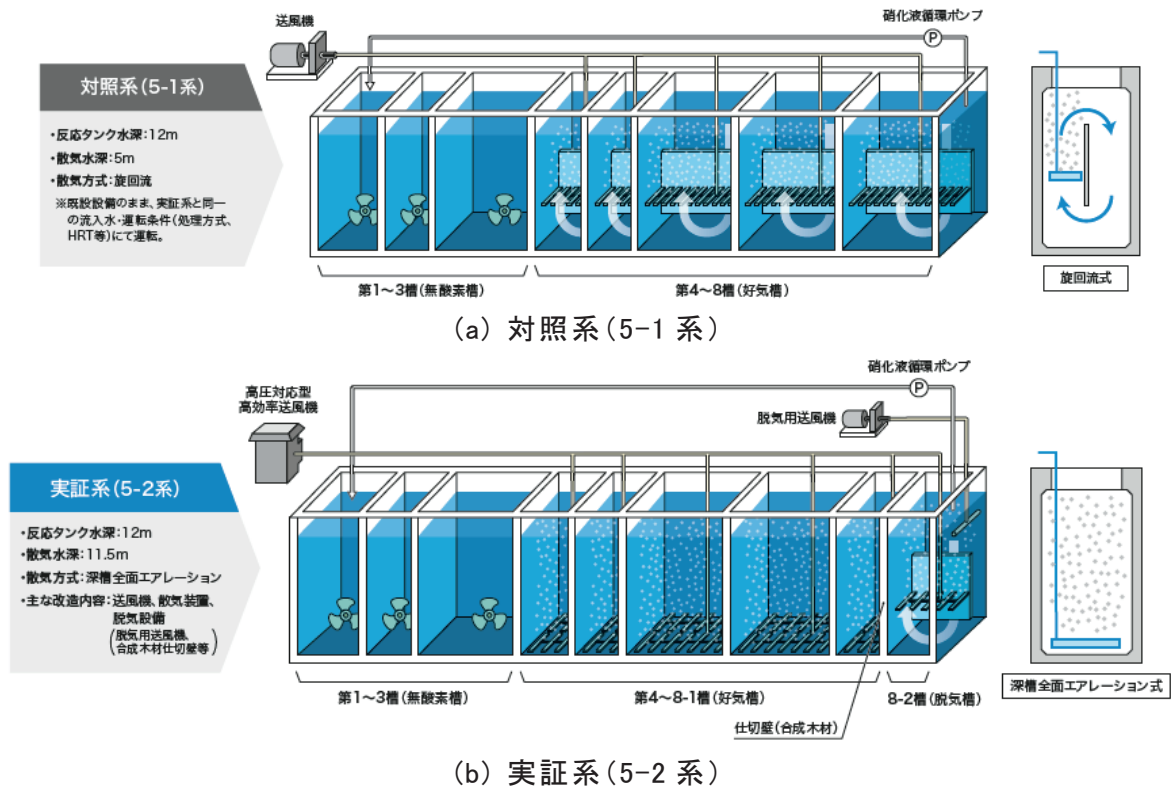


図 2-24 実証施設の反応タンクフロー

b) 実証設備

本実証研究で設置する実証設備の仕様・台数を表 2-6 に示す。送風機（深槽曝気用）は 2 台（うち、1 台予備）設置し、曝気風量はインバータによる回転数制御を行う。本技術では、既設の曝気方式よりも高圧で曝気するため、既設の配管系統と切り離した個別送風方式としている。好気槽である第 4～8-1 槽では、散気装置（深槽曝気用）を底部（散気水深 11.5m）に設置するが、既設の散気設備一式をバックアップ用として残置する。実証系の第 8 槽は、仕切り壁により 2 区画（8-1 槽と 8-2 槽）に分割した上で、反応タンクの最下流となる 8-2 槽は脱気操作を行う槽（脱気槽）とし、散気装置（脱気用）を散気水深 5m の位置に設置する。脱気用の送風機は、上述の深槽曝気用とは別個に 2 台（うち、1 台予備）設置する。

実証系では、アンモニア計、リン酸イオン計を反応タンク末端部に、汚泥界面計を最終沈殿池に設置するが、これらの計器は処理状況の確認などを目的に設置したもので、本技術に必須の設備ではない。最終沈殿池には、汚泥浮上が発生した場合に汚泥の流出を防ぐために、汚泥流出防止装置を設置する。なお、実証系の反応タンク第 1～3 槽（無酸素槽）は、実証設備の設置はなく既設のみである。

表2-6 実証設備の概要

| 設備名称 | 仕様 | 台数 | 備考 |
|-----------------|--|------------------|--------------------------|
| 散気装置 (深槽曝気用) | メンブレンパネル式 散気水深 11.5m | 5-2 系 (2 水路分) | 第 4~7、8-1 槽 全面エアレーション |
| 散気装置(脱気用) | メンブレンパネル式 散気水深 5.0m | 5-2 系 (2 水路分) | 第 8-2 槽 旋回流 |
| 送風機 (深槽曝気用) | 高効率容積式スクリュブロー | 2 (1 台予備) | |
| 送風機(脱気用) | 片吸込ターボブロワ 10m ³ /min × 10kPa × 5.5kW | 2 (1 台予備) | 電力計内蔵制御盤 |
| 風量計 | 熱式気体流量計 | 1 | |
| 脱気用風量計 | 熱式気体流量計 | 1 | |
| アンモニア計 | イオン選択電極式 | 2 | 実証系 1、対照系 1 |
| DO 計 | 光学式 | 2 | 実証系 1、対照系 1 |
| リン酸イオン計 | 吸光高度式 | 1 | |
| 汚泥界面計 | 超音波パルス反射方式 | 3 | 界面監視用 |
| 実証設備制御盤 | 自立制御盤 | 1 | |
| 動力変圧器一次 | 自立型 | 1 | |
| 動力変圧器 | 自立型 | 1 | |
| 動力変圧器二次 | 自立型 | 1 | |
| ブロワ制御盤 | 自立型 | 2 | |
| 計装設備中継盤 | 自立型 | 1 | |
| 汚泥流出防止装置 | 無閉塞水流傾斜板 | 5-2 系終沈(4 水路) | 汚泥浮上時の 対応設備(仮設) |

c) 評価項目

本実証研究では、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、①消費電力量および温室効果ガス排出量の削減効果、②コストの縮減効果、③実証技術の水処理性能、の3点を設け、各々評価指標および目標値を設定して実証実験およびモデル設計などによる評価を行う(表2-7)。

表2-7 評価項目

| 評価項目 | 評価指標 | | 評価方法 |
|-----------------|---------------------------------|----------|-------------------------------|
| | ①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 | |
| | 温室効果ガス排出量 | 10%以上削減 | |
| ②コストの縮減効果 | 建設費 | 10%以上縮減 | モデル設計 |
| | 維持管理費 | 10%以上縮減 | |
| | 総費用(年価換算値) | 10%以上縮減 | |
| ③実証技術の 水処理性能 | 処理水質 (BOD,SS,T-N,T-P) | 対照系と同等 | 実証実験(水質分析) |
| | 最終沈殿池における 汚泥沈降特性 | 対照系と同等 | SV30 の測定、 汚泥界面計による 界面計測 |

この他、評価項目以外の確認項目として、N₂O 排出量、長期の水処理安定性、反応タンク内の DO 濃度の分布や混合攪拌特性などについても、実証実験の中で確認することとしている。

（3）今後の予定

2023 年度より実証施設の連続運転を開始し、前述の評価項目などについて実証する予定である。

3. バイオガス活用技術

3.1 バイオガス創出に係る基礎実験

(1) 検討の概要

GHG 排出量削減に向け、嫌気性消化およびそれにより得られるバイオガスの利活用が重要な役割を担うと考えられる。バイオガス活用技術の一つとして注目されている嫌気性消化の更なる普及拡大を図るためには、従来技術を改良するだけでなく、普及が進んでいない技術に着目した実験的検討を行い導入可能な技術の幅を広げていくことが重要である。下水道分野においては、消化温度 36℃、消化日数 20d 程度で運転が可能な「中温消化」が多く採用されているが、それ以外の運転条件における嫌気性消化の特性などについては、知見が少ない状況にある。

このような背景から、本検討では、JS 技術開発実験センターにおいて、高温消化、高濃度消化、乾式消化などの基礎実験を実施する。本年度は、36℃付近で運転される中温消化と 55℃付近で運転される高温消化の連続消化実験をラボスケールで行い、消化特性の違いを確認した。

(2) 検討方法

中温消化と高温消化における消化特性の違いを把握することを目的に、異なる消化温度と消化日数における連続消化実験をラボスケールで実施した。実験条件を表 3-1 に示す。消化温度として 36℃（中温消化）と 55℃（高温消化）、消化日数として 10d と 20d を組み合わせた異なる 4 つの条件を設定し同時並行で 46d 間の連続式消化実験を行った。なお、実験作業の都合上、汚泥の投入は平日のみ行ったが、1 週間当りの投入汚泥量が所定の消化日数における投入汚泥量となるよう平日の投入汚泥量を決定した。

表 3-1 実験条件

| 実験 No. | 消化温度 (°C) | 消化日数 (d) | 投入汚泥量 (L/d) | | 備考 |
|---------|-----------|----------|-------------|-----------|------|
| | | | 平日投入量 | 1 週間あたり換算 | |
| RUN 1-1 | 36 | 10 | 0.70 | 0.50 | 中温消化 |
| RUN 1-2 | 36 | 20 | 0.35 | 0.25 | |
| RUN 2-1 | 55 | 10 | 0.70 | 0.50 | 高温消化 |
| RUN 2-2 | 55 | 20 | 0.35 | 0.25 | |

RUN1-1・1-2 における消化汚泥は、A 浄化センターから採取した中温消化の汚泥を用いた。また、RUN2-1・2-2 における消化汚泥は、A 浄化センターから採取した消化汚泥を消化温度 55℃で予め培養したものをを用いた。投入汚泥は、A 浄化センターから採取した混合濃縮汚泥を用いた。なお、混合濃縮汚泥は、実験期間中に 2 度採取している。

各実験条件における消化特性の違いを確認するために、種汚泥および引抜き消化汚泥の pH、TS、VS、アルカリ度、COD_{Cr}、T-N、T-P などを分析した。

本実験では、容量 5.0L の反応槽を 2 槽有する実験装置を 2 基用いた（図 3-1）。本装置ではポンプを用いて汚泥の投入と引抜きを行うほか、反応槽を所定の温度に保つことが可能である。



図3-1 連続消化実験装置の外観

(3) 検討結果

① 投入汚泥の性状

投入汚泥の TS は平均 50,000mg/L、VS は平均 46,000mg/L であった。投入有機物負荷量は、消化日数 10d の RUN1-1・2-1 では平均 4.6 g-VS/(L・d)（最大 6.4 g-VS/(L・d)）、消化日数 20d の RUN1-2・2-2 では平均 2.3 g-VS/(L・d)（最大 3.2 g-VS/(L・d)）であった。

② ガス発生特性

各 RUN における 1d 当りガス発生量の推移を図 3-2 に示す。1 週間単位でガス発生量が増減しているが、これは前述のとおり平日にのみ汚泥を投入しているためである。また、RUN1-1 および RUN2-1 と比べて、RUN1-2 および RUN2-2 のガス発生量が多いのは、後者の方が 1 日当りの消化汚泥の投入量が多いためである。

RUN1-1（中温消化、10d）では、実験開始後 17d 目頃からガス発生量が急激に低下した。これは、消化日数が短く、投入有機物量が過負荷となりメタン発酵阻害が生じたためと考えられる。一方、RUN2-1（高温消化、10d）では、このようなガス発生量の低下は確認されなかったことから、中温消化と比べて高温消化の方がより短い消化日数で運転可能である点が改めて確認された。

RUN1-2（中温消化、20d）および RUN2-2（高温消化、20d）では、実験期間を通じてガス発生量の急激な低下は確認されず、必要な消化日数が十分に確保されており、投入有機物負荷量が適切であったと考えられる。

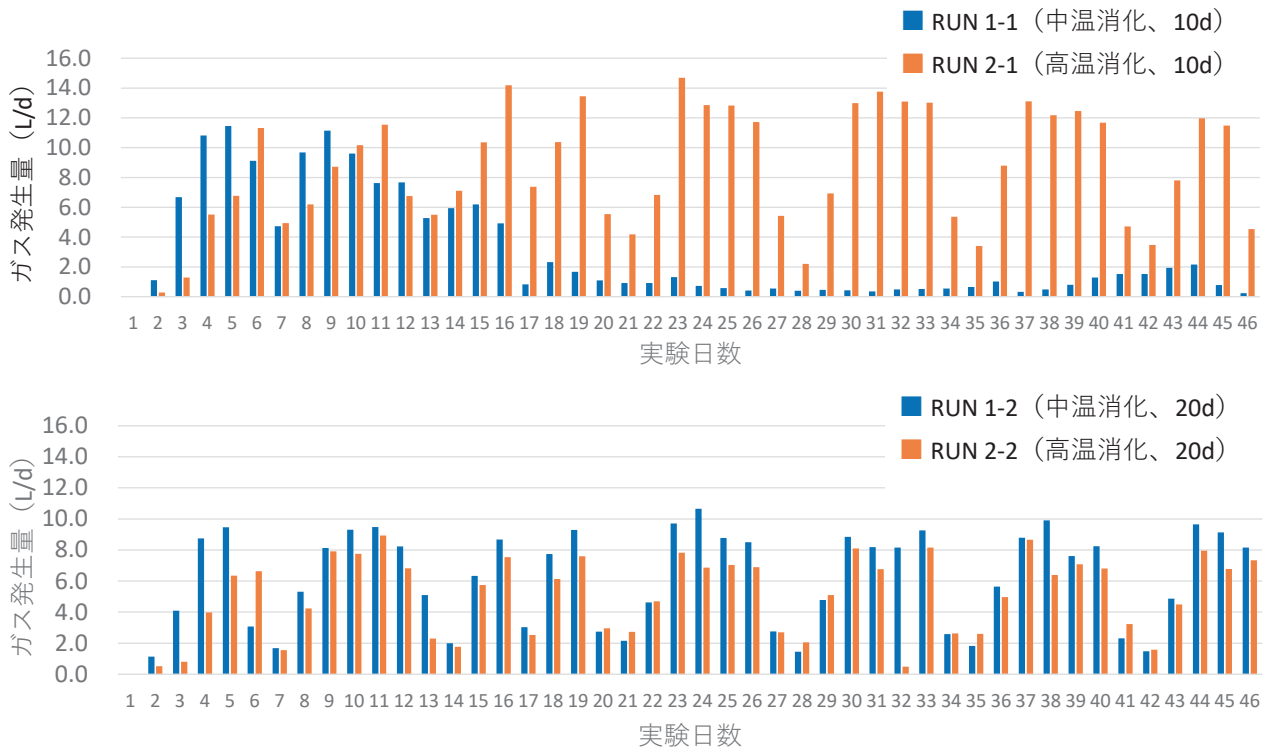


図3-2 1d 当りガス発生量の推移

各 RUN における消化ガスの発生特性を示す各種指標を表 3-2 に示す。また、実験終了時点における投入汚泥量に対するガス発生倍率を図 3-3 に、投入 VS 当りガス発生量を図 3-4 に示す。今回の実験では、メタン発酵阻害が生じたと考えられる RUN1-1 (中温消化、10d) を除くと、各 RUN の累積ガス発生倍率は 16.8~25.1 倍の範囲であった。RUN2-1 (高温消化、10d) のガス発生倍率は 16.8 倍で、RUN2-2 (高温消化、20d) や RUN1-2 (中温消化、20d) と比べて 20~30%程度低かった。加えて RUN2-1 (高温消化、10d) では、投入 VS 当りガス発生量についても 456L/kg-VS と RUN2-2 (高温消化、20d) や RUN1-2 (中温消化、20d) と比べて 20~30%程度低かった。また、消化日数が 20d の両 RUN において中温消化 (RUN1-2) と比べて高温消化 (RUN2-2) の方が投入 VS 当りガス発生量が低い結果となった。後述するように RUN2-1 (高温消化、10d) の消化汚泥中の有機酸濃度が他と比べて高くなっていたことから、同 RUN では、RUN1-1 のような急激なガス発生量の低下は生じていないものの、ある程度のメタン発酵阻害が生じておりガス発生量が低下していた可能性がある。原因を明らかにするためには更なる知見を得る必要があり、今後も同様の実験を継続する予定である。

表3-2 消化ガス発生特性

| | 単位 | RUN 1-1 | RUN 1-2 | RUN 2-1 | RUN 2-2 |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 中温消化 | | 高温消化 | |
| | | 10d | 20d | 10d | 20d |
| 累積投入汚泥量 | L | 23.1 | 11.6 | 23.1 | 11.6 |
| 累積投入 VS 量 | kg-VS | 0.852 | 0.426 | 0.852 | 0.426 |
| 累積ガス量 | L | 139.5 | 290.4 | 388.9 | 239 |
| ガス発生倍率 (ガス発生量/投入汚泥量) | L / L | 6.0 | 25.1 | 16.8 | 20.7 |
| 投入 VS 当りガス発生量 | L/kg-VS | 164 | 682 | 456 | 561 |

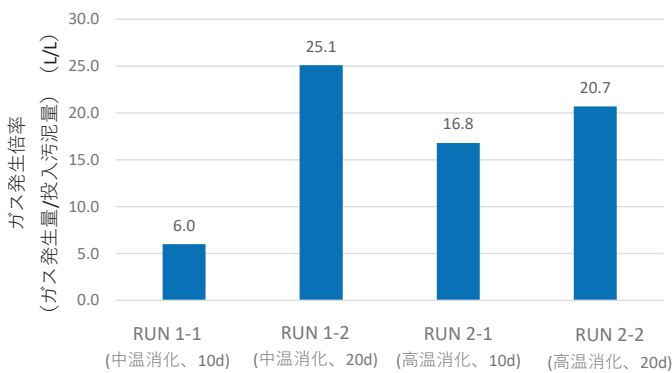


図3-3 ガス発生倍率

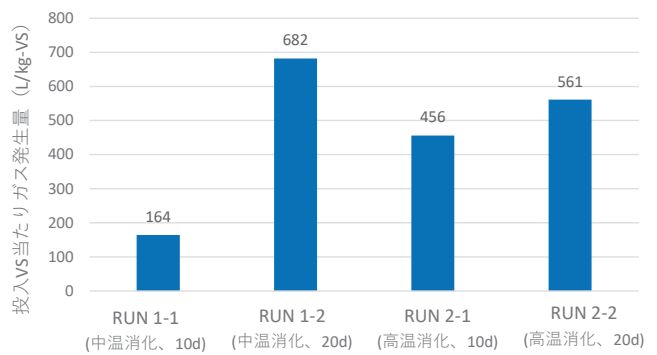


図3-4 投入 VS 当りガス発生量

③ 固形分・有機分の分解特性

各 RUN の投入汚泥に対する引抜き消化汚泥の固形分・有機分などの減少率（分解率）を表3-3に示す。なお、引抜き消化汚泥は、実験日数 22d 目および 46d 目に採取した試料の測定結果の平均値で示している。また、RUN1-1（中温消化、10d）では前述のとおり消化が不調となったため、データは省略した。

RUN2-2（高温消化、20d）における VS の減少率は 68%であり、RUN1-2（中温消化、20d）の 67%と同等であった一方、RUN2-1（高温消化、10d）の VS 減少率は 62%と他と比べて低い値であった。これらの傾向は、COD_{Cr} の減少率についても確認された。また、RUN2-1（高温消化、10d）における SS の減少率は 76%で、RUN2-2（高温消化、20d）や RUN1-2（中温消化、20d）と同程度であった。

表3-3 引抜き消化汚泥の固形分・有機分などの減少率（分解率）

| 項目 | 単位 | 投入汚泥 | RUN 1-2 | | RUN 2-1 | | RUN 2-2 | |
|-------------------|------|--------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|
| | | | 中温消化、20d | | 高温消化、10d | | 高温消化、20d | |
| | | | 平均 | 分析値 | 減少率% | 分析値 | 減少率% | 分析値 |
| pH | — | 5.35 | 7.55 | — | 7.45 | — | 7.85 | — |
| 有機酸 | mg/L | 1,850 | 105 | 94 | 1,350 | 27 | 285 | 85 |
| TS | mg/L | 50,000 | 18,500 | 63 | 21,000 | 58 | 18,000 | 64 |
| VS | mg/L | 46,000 | 15,000 | 67 | 17,500 | 62 | 14,500 | 68 |
| | %TS | 92.0 | 81.1 | — | 83.3 | — | 80.6 | — |
| SS | mg/L | 41,000 | 11,500 | 72 | 10,000 | 76 | 11,250 | 73 |
| COD _{Cr} | mg/L | 46,000 | 20,500 | 55 | 24,000 | 48 | 19,500 | 58 |

※消化が不調であった RUN1-1（中温消化、10d）のデータは省略

④ 消化汚泥の性状など

引抜き消化汚泥の性状について、投入汚泥の性状などと併せて図3-5～図3-16に示す。分析項目毎の結果および考察は、以下のとおりである。なお、これらの図における引抜き消化汚泥の測定値は、③と同様に実験日数22日目および46日目に採取した試料の平均値である。

i) pH
 RUN1-1（中温消化、10d）の引抜き消化汚泥の pH は 5.25 であり、その他の RUN における消化汚泥の pH は 7.45～7.85 であった。このことから RUN1-1（中温消化、10d）においては、投入汚泥量や有機物負荷の過大により消化ガス生成が進まなくなる酸敗現象によるメタン発酵阻害が生じていたと考えられる。

図3-5 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状 (pH)

ii) アルカリ度
 RUN1-1（中温消化、10d）ではメタン発酵阻害が生じていたと考えられ、アルカリ度は 1,700mg/L と低い値であった。「下水道維持管理指針」²¹⁾でも 1,000～3,000mg/L になるとガス発生が阻害されメタン発酵が停止するとされている。RUN1-2（中温消化、20d）および RUN2-2（高温消化、20d）のアルカリ度は 4,000mg/L 以上であった。RUN2-1（高温消化、10d）では 3,500mg/L とやや低い値であり、加えて先述のように消化日数が 20d の両 RUN と比べて VS 当りガス発生量が低かったことを踏まえると、RUN2-1（高温消化、10d）ではある程度のメタン発酵阻害が生じていた可能性がある。

図3-6 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状 (アルカリ度)

iii) 有機酸*

RUN1-1（中温消化、10d）の消化汚泥の有機酸は 6,900mg/L であり、他の RUN と比べて極めて高い値であった。「下水道維持管理指針」²¹⁾でも 2,000mg/L 以上になるとガス発生が阻害され消化が停止するとされている。この結果からも、RUN1-1（中温消化、10d）では酸敗現象が生じていたと考えられる。

RUN1-2（中温消化、20d）および RUN2-2（高温消化、20d）の有機酸は 300mg/L 以下であるのに対し、RUN2-1（高温消化、10d）では 1,350mg/L と比較的高い値であった。このことは、RUN2-1（高温消化、10d）において、ある程度のメタン発酵阻害が生じていた可能性があることを示唆している。

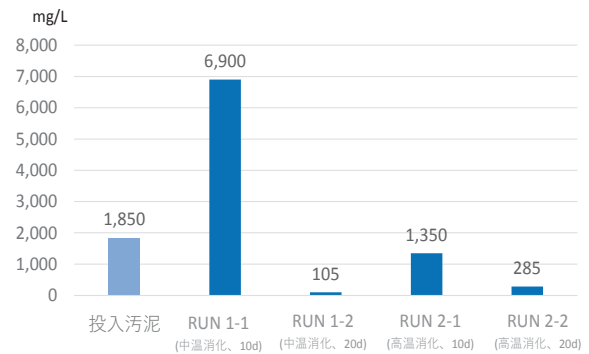


図3-7 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状(有機酸)

iv) TS

RUN2-1（高温消化、10d）の消化汚泥の TS は 21,000mg/L であり、RUN1-2（中温消化、20d）や RUN2-2（高温消化、20d）と比べて 10～15%程度高い値であった。これは、消化日数が短いため引抜き消化汚泥中に消化が進んでいないものがより多く含まれていたためだと考えられる。

メタン発酵阻害が生じていたと考えられる RUN1-1（中温消化、10d）の消化汚泥の TS は 23,000mg/L であり、他の RUN と比べて 10～20%程度高い値であったが、有機酸ほどの顕著な違いではなかった。

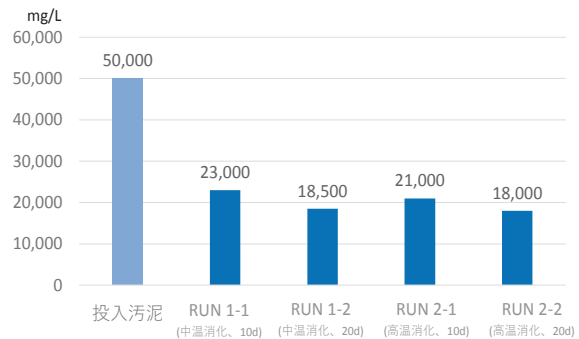


図3-8 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状(TS)

* 有機酸は「下水試験方法」²²⁾に示された揮発性有機酸（低級脂肪酸 C1～C6）の試験方法で測定を行っており、測定された低級有機酸の総量を当量の酢酸量として示した。

v) VS、COD_{Cr}

RUN2-1（高温消化、10d）の消化汚泥の VS は 17,500mg/L で、RUN1-2（中温消化、10d）や RUN2-2（高温消化、20d）と比べて 15% 程度高い値であった。また、COD_{Cr}においても、同様の傾向が見られた。これは、TS と同様に、消化日数が短いため引抜き消化汚泥中に消化が進んでいないものがより多く含まれていたためだと考えられる。

メタン発酵阻害が生じたと考えられる RUN1-1 では、消化汚泥の VS は他の RUN と同程度であるが、これは有機酸などの揮発性物質を正確に測定することが出来なかったためと考えられ、実際、COD_{Cr}を見ると RUN1-1 が他と比べて明らかに高くなっている。

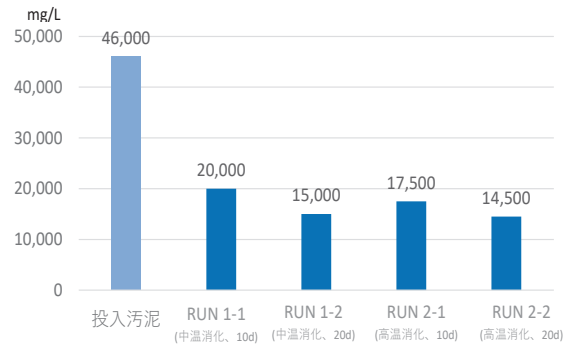


図3-9 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状 (VS)

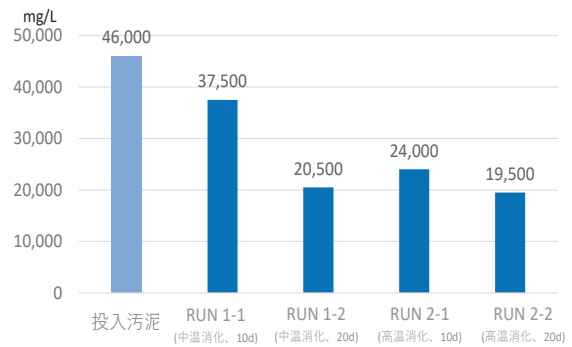


図3-10 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状 (COD_{Cr})

vi) T-N、NH₄-N

消化汚泥の T-N は、RUN1-1（中温消化、10d）および RUN2-1（高温消化、10d）では 2,600mg/L 前後であった一方、RUN1-2（中温消化、20d）および RUN2-2（高温消化、20d）では、各々 2,320、2,200mg/L と 10～15%程度低い値であった。これは、消化日数が長くなるにつれて、消化汚泥中の NH₄-N が消化ガスと共に揮散する量が増加した結果、消化汚泥中に含まれる T-N が低くなったと推測される。

また、投入汚泥の NH₄-N は 283mg/L であったが、いずれの RUN においても消化汚泥の NH₄-N は約 900～1,100mg/L と高い値であった。これは、消化工程によって汚泥中のたんぱく質などの有機性窒素が分解して無機化したためと考えられる。

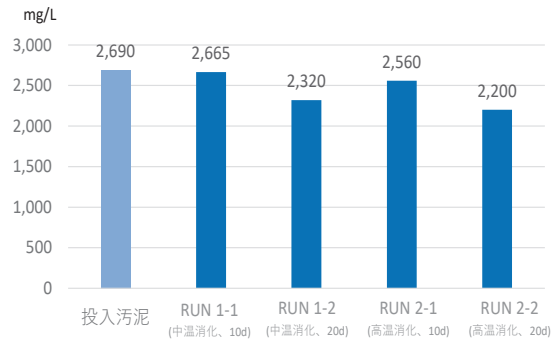


図3-11 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状 (T-N)

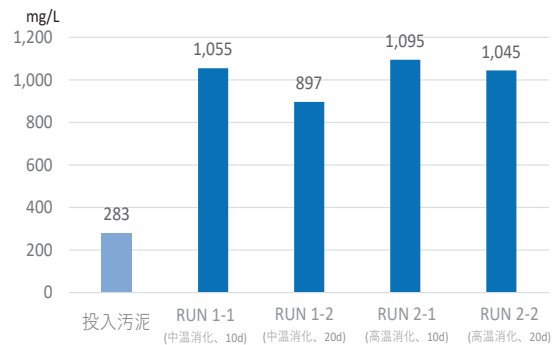


図3-12 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状 (NH₄-N)

vii) T-P、PO₄-P、溶解性 PO₄-P

消化汚泥の T-P は、全ての RUN において 450mg/L 前後で概ね同等であった。

消化汚泥の PO₄-P は 310mg/L 前後であり、全ての RUN において 50～60%程度が溶解性であった。ただし、消化不調となった RUN1-1（中温消化、10d）では、消化汚泥中の PO₄-P の 90%程度が溶解性であった。

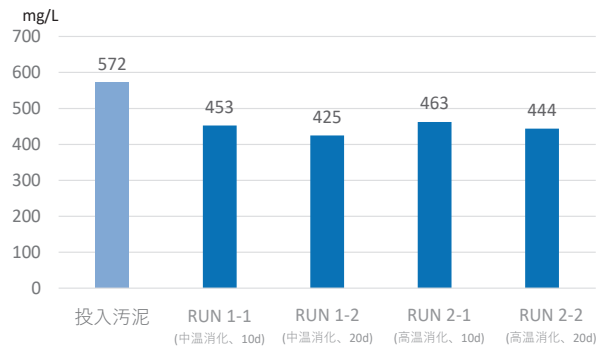


図3-13 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状 (T-P)

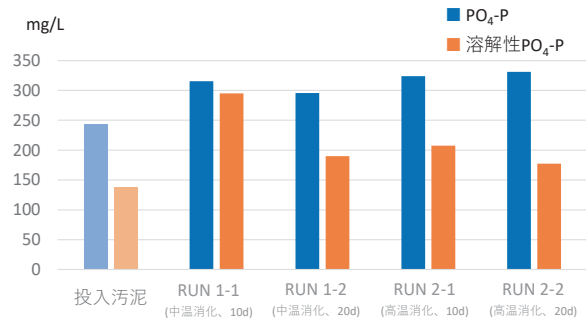


図3-14 投入汚泥および各 RUN の消化汚泥の性状 (PO₄-P)

viii) 繊維状物

投入汚泥の繊維状物（100mesh）が 26.3%であったのに対し、高温消化である RUN2-1・2-2 の消化汚泥では 7.1～8.7%まで減少していた。

RUN1-2（中温消化、20d）の消化汚泥よりも 0.9～2.5 ポイント低いことから、高温消化の方が繊維状物質の分解率が高く、脱水性が悪化する可能性が示唆された。

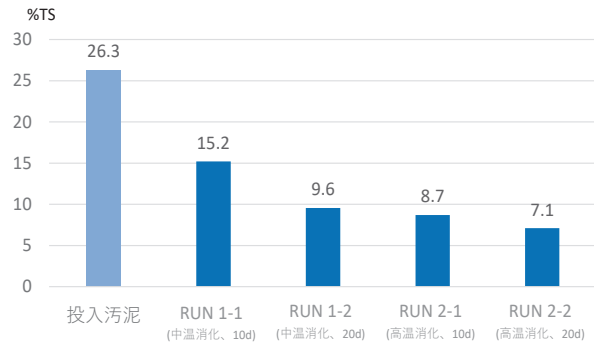


図3-15 投入汚泥および各 RUN の繊維状物

ix) 消化ガス

RUN2-1（高温消化、10d）における CH₄ 濃度は 57.8%であり、RUN2-2（高温消化、20d）と概ね同等であった。

消化不調となった RUN1-1（中温消化、10d）では、CH₄ 濃度が 28%と低かったが、RUN1-2（中温消化、20d）では 51.6%であり、中温消化と高温消化では CH₄ 濃度に大きな違いは確認されなかった。

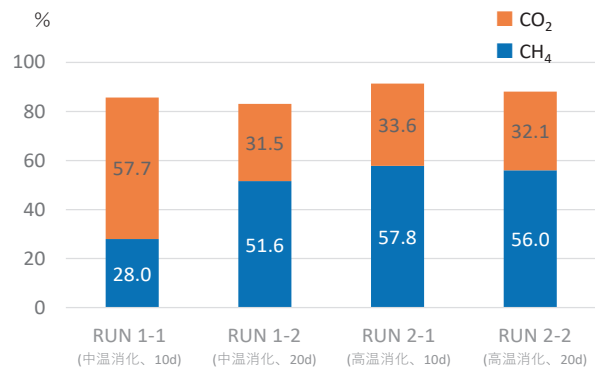


図3-16 消化ガスの成分構成

(4) まとめ

バイオガス利活用技術の一つとして注目されている嫌気性消化の更なる普及拡大を図ることを目的に、普及が進んでいない技術に着目した実験的検討として、JS 技術開発実験センターにおいて、高温消化および中温消化のラボスケールでの連続消化実験を 46d 間行い、消化特性の違いを確認した。

高温消化では 10d、20d のいずれの消化日数においてもガス発生量の急激な低下は確認されなかったことから、中温消化と比べてより短い消化日数で運転可能であることが改めて確認された。しかしながら、消化日数が短い 10d の場合においては、消化日数 20d の場合と比べて投入 VS 当りガス発生量や VS 減少率が低くなったこと、他の消化汚泥と比べて有機酸が多く存在していたことから、急激なガス発生量の低下は生じていないものの、わずかにメタン発酵阻害が発生していた可能性があると考えられる。

高温消化においてメタン発酵阻害が生じた原因を明らかにするためには、更なる知見を得る必要があり、今後も同様の実験を行う予定である。

3.2 バイオガス創出・活用技術の開発・実証

(1) 検討の概要

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、既存技術の改善および改良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利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など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などを実施する。本年度は、「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 当りガス発生量など）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開始し、以下の 1 技術に係る共同研究者を選定した。

○集中加温システムとステンレス合板製消化タンクを用いた低コスト消化技術の開発

（共同研究者：メタウォーター株式会社）

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、並びに消化タンク本体をステンレス合板で製作することによる防食塗装範囲縮小の実現可能性を実証すると共に、両技術を組み合わせることにより従来技術よりも LCC 縮減が可能な嫌気性消化技術の開発を行う。

(2) 検討方法

① 技術の特徴

本技術は、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の 2 つの要素技術を組み合わせたものである（図 3-17）。各要素技術の概要を以下に示す。

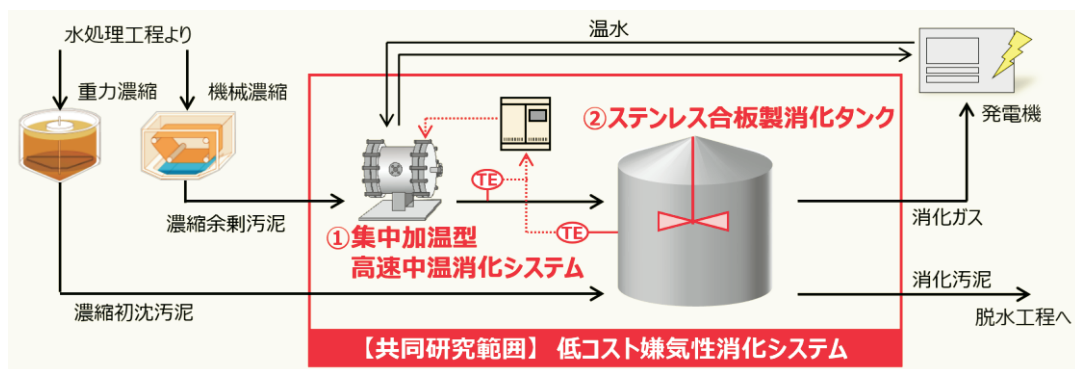


図 3-17 「集中加温システムとステンレス合板製消化タンクを用いた低コスト消化技術」のシステムフロー

- 集中加温型高速中温消化システム（図 3-18）：中温消化に必要な熱量を投入余剰汚泥へ集中的に付与し、余剰汚泥中の微生物の不活性化により汚泥の分解・ガス化を促

進する。消化日数を短縮しても安定消化が期待され、消化設備の建設費削減が可能となる。

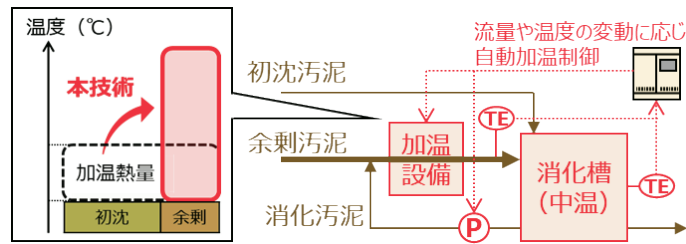


図3-18 集中加温型消化高速中温消化システムの概要

- ▶ ステンレス合板製消化タンク（図3-19）：ステンレスを貼り合わせた特殊合板を消化タンク材質に用いることで、底部以外の防食塗装および補修塗装が不要となる。加えて、高効率攪拌機により攪拌の低動力化を図ると共に、最適運用によりタンク内の堆積物量の抑制を図ることで、消化設備のLCC削減が可能となる。

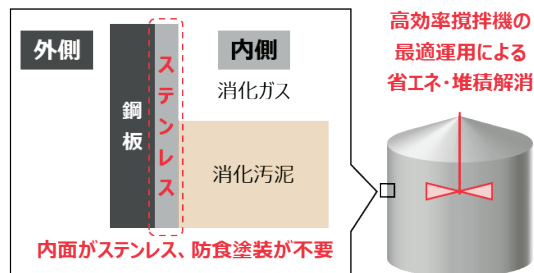


図3-19 ステンレス合板製消化タンクの概要

② 研究開発項目

本研究の研究開発項目を表3-4に示す。集中加温型高速中温消化システムの消化特性について実証試験を行い確認すると共に、得られたデータおよび数値解析結果から消化日数短縮の実現可能性および嫌気性消化の安定性などを確認する。また、ステンレス合板製消化タンクの耐久性、高効率攪拌機の攪拌能力や堆積物の堆積防止能力などについて検証する。

表 3-4 研究開発項目

| 対象技術 | 項目 | 内容 |
|-------------------------|--------|-------------------------|
| 集中加温型 高速中温消化 システム | 消化特性 | 消化日数短縮運転時の消化性能の確認 |
| | 過負荷耐性 | 従来よりも安定性が向上することの確認 |
| | 限界負荷 | 各種条件における限界消化日数の確認 |
| | 普遍性 | 異なる水処理方式や季節に対する効果の普遍性確認 |
| | 自動制御性 | 自動加温制御の追従性確認 |
| ステンレス合板製 消化タンク | 消化特性 | 一般的な消化性能が得られること確認 |
| | 耐久性 | ステンレス部の摩耗・劣化状況確認 |
| | 攪拌能力 | 消化槽内を十分に攪拌可能であること確認 |
| | 堆積防止能力 | 攪拌機の最適運用による堆積削減効果確認 |
| システム全体 | 消費電力 | 交付金要件*を満足すること確認 |
| | コスト | 従来消化技術に対する LCC 削減効果確認 |

③ 試験場所

本研究では、実下水処理場である M 浄化センター内に実証試験設備（消化タンク容量 50m³）を建設し、実証試験で得られたデータおよび数値解析結果を踏まえ、実規模への適用性を検討する。M 浄化センターの概要は以下のとおりである。

- ・ 水処理方法 : 担体投入型活性汚泥法
- ・ 処理水量 : 現有処理能力 37,500m³/d
日平均（2020 年度実績） 29,165m³/d
- ・ 汚泥処理方法 : 濃縮－消化－脱水－焼却

(3) 今後の予定

2023 年度より実証施設の運転を開始し、前述の評価項目などについて実証する予定である。

* 交付金要件として、国土交通省通達「下水道事業におけるエネルギー効率に優れた技術の導入について（2017 年 9 月 15 日 国水下水第 38 号）」²³⁾が定めるエネルギー効率の性能指標値を満足することを確認する。

4. 事後評価調査・技術評価(脱炭素化技術)

4.1 事後評価調査(OD法における二点DO制御システム)

(1) 検討の概要

「OD法における二点DO制御システム」（以下、「二点DO制御システム」と略記）は、2014年7月にJSの新技术I類に選定され、2022年度末時点で9件（うちJS受託建設工事8件）の導入実績がある。

本技術は、オキシデーションディッチ（OD）法において、OD槽内の2箇所に設置するDO計により曝気風量と槽内循環流速を独立して制御して槽内に好気ゾーンと無酸素ゾーンを安定的に形成

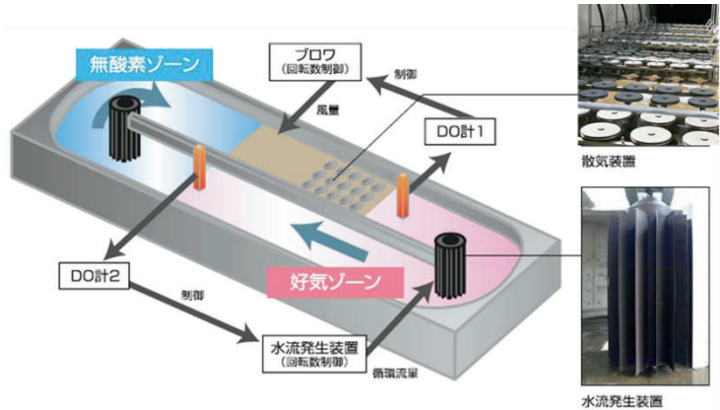


図4-1 二点DO制御システムの概略図

することで、流入負荷変動に対する処理の安定化・省エネ化や一時的な流入負荷の増大に対する処理能力増強を図るものである（図4-1）^{24), 25)}。具体的には、設定したDO濃度を維持して両DO計間のDO濃度勾配が一定に保たれるよう、専用のコントローラーにより曝気風量（ブローの回転数）と槽内流速（水流発生装置の回転数）を自動で調整する。これにより、槽内では流れ方向に好気ゾーンと無酸素ゾーンが所定の容積比率で維持されることになり、有機物除去だけでなく硝化・脱窒による窒素除去が可能となる。

本技術の導入実績が増加していることから、JSでは本技術をOD法の技術基準に盛り込み（基準化）更なる普及を図る計画としている。そこで、2020年4月から2022年12月にかけて、本技術が導入された下水処理場1施設において、処理性能や導入効果などを検証するために、流入水・処理水の水質分析や消費電力量のモニタリングなどを行う長期の事後評価調査を実施した（2022年度完了）。本稿では主に、対象施設において定常的な運転が行われていた2021年12月から2022年12月の約1年間の調査内容・結果²⁶⁾を報告する。これ以前の調査結果については、既報²⁷⁾を参照されたい。

(2) 検討方法

① 調査対象施設

処理能力3,720m³/d、2系列（2池/1系列）の長円形のOD法施設にて調査を行った。本施設では、し尿処理施設の廃止に伴うし尿・浄化槽汚泥の受け入れによる有機物・窒素などの流入負荷量の増加に対して、増設を回避しライフサイクルコストを低減させることを目的に、2系の2池に二点DO制御システムが導入されている（図4-2）。

2系の各池（調査池）の処理能力は1,230m³/d、OD槽容量は1,100m³である。OD槽内には低圧損

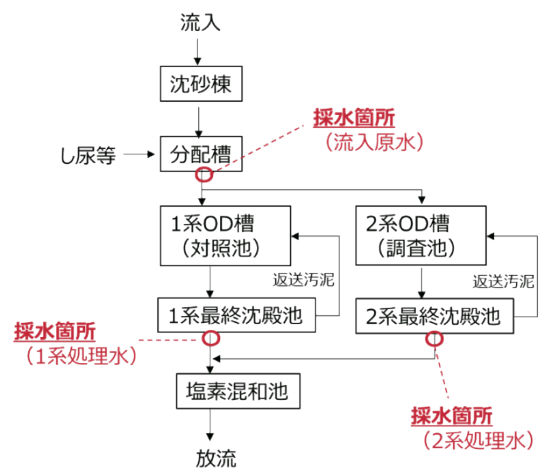


図4-2 調査対象施設の水処理フロー

型メンブレン式散気装置と縦軸型水流発生装置が設置されており、槽内の 2 箇所に設置された DO 計（蛍光式）の計測値に基づき曝気風量および槽内流速が制御されている。前述のとおり、し尿などの受け入れに伴う流入負荷量の増大に対して二点 DO 制御システムを導入した 2 系の 2 池で処理能力を確保する計画となっている。

一方、1 系の 2 池（対照池）は 2 系と同容量であるが、1 池あたりの処理能力は 630m³/d と 2 系の約半分である。

② 調査期間

本調査では、2020 年 4 月から 2022 年 12 月にかけて、調査池と対照池において各種データの取得を行った。前述のとおり、このうち本稿では、年間を通して定常的な運転が行われていた 2021 年 12 月から 2022 年 12 月までの約 1 年間のデータを対象期間とする。

③ 運転条件

上記の対象期間における両系（調査池、対照池）の主要な運転条件の平均値を表 4-1 に示す。調査池では、対照池に対して約 1.5 倍の水量負荷であり、同池の処理能力に対する期間平均の流入率は 80% である。

本期間の調査池では、好気ゾーン上流（散気装置末端）の DO 計（DO1）と好気ゾーン下流の DO 計（DO2）の設定値

表 4-1 調査対象施設の OD 槽の運転条件
(2021 年 12 月～2022 年 12 月までの期間平均値)

| | | 調査池 (本技術導入) | 対照池 (従来OD法) |
|------------|-------------------|----------------|----------------|
| 水温 | ℃ | 16.8 | |
| 処理水量 | m ³ /d | 985 | 644 |
| HRT(1池当たり) | hr | 26.8 | 41.0 |
| MLSS | mg/L | 4,944 | 4,774 |
| SRT | d | 23.2 | 43.7 |
| BOD-SS負荷 | kgBOD/(kgSS・d) | 0.033 | 0.023 |

(DO 濃度目標値)をそれぞれ 1.0、0.2mg/L として自動制御により運転されており、夜間などの流入負荷が低い場合には自動的に曝気を停止する低負荷モードに切り替わる。一方、対照池では、スクリー形機械式曝気装置が概ね 24 時間連続で運転されていた。

④ 制御状況の確認

二点 DO 制御システム専用のコントローラーに蓄積された DO 濃度計測値、ブロワおよび水流発生装置の回転数のデータを収集し、制御状況を確認した。

⑤ 処理性能の確認

週 1 回の定期採水と年 4 回の通日採水による水質調査を実施し、各系における有機物・窒素などの処理性能を確認した。採水箇所は、し尿などと下水が混合する分配槽（流入原水）、調査池および対照池の最終沈殿池流出部（1 系および 2 系処理水）である（図 4-2 参照）。なお、定期採水は、1 日の平均と推定される時刻でかつ、し尿などの受け入れ時間内である 15:00～17:00 でのスポット採水とし、通日採水は、2 時間ごとのスポット採水（自動採水器による 1hr 毎のスポット採水試料を 2hr 分混合）とした。

⑥ 消費電力量の確認

本技術の導入による省エネ効果を検証するために、調査池および対照池それぞれに電力モニタを設置し、各池の OD 槽における消費電力量を測定し比較を行った。測定対象は調査池および対照池の各 1 池分の主要機器とし、調査池ではルーツ式ブロワ 2 台（共通予備機含む；定格

出力（以下同様）18.5kW×2）と水流発生装置2台（2.2kW×2）、対照池ではスクリー形機械式曝気装置4台（4.5kW×2、9.0kW×2）とした。

⑦ 設備運転状況の確認

(a) OD 槽内 DO 濃度勾配

本技術における OD 槽内の好気ゾーンと無酸素ゾーンの形成状況を確認するために、槽の周長方向の DO 濃度を調査した。具体的には、通日採水と同じ日に、既設の DO 計 2 台（DO1 および DO2）以外に、ポータブル DO 計 2 台（DO1' および DO2'）を設置し、槽内 4～5 箇所の DO 濃度を 24 時間計測した。

(b) 散気装置圧損

調査池における散気装置の圧損を把握するために、通日採水と同じ日に、OD 槽のライザー管に設置したポータブル圧力計により空気管圧力を測定し、式(1)の関係から散気装置の圧損を推定した。

$$\text{測定圧力(kPa)} = \text{散気水深(m)} \times 9.81(\text{kPa/m}) + \text{散気装置圧損(kPa)} + \text{配管圧損(kPa)} \quad (1)$$

(c) 定流量排出装置の運転状況

定流量排出装置は、OD 槽から最終沈殿池への流出部に設ける電動の可動堰で、越流水深を一定に制御することが可能な装置である。これにより、OD 槽の流入水量の時間変動に対して、最終沈殿池への流出水量を平滑化することが可能となり、最終沈殿池における汚泥の流出（キャリアオーバー）などのリスクを低減できる。

本装置による OD 槽流出水量の平滑化効果を検証するために、通日採水と同一日における本装置付属制御盤の記録値（水位センサから水面までの距離と可動堰開度）から本装置の越流水深を推定した。

(3) 検討結果

① 制御状況

調査池における対象期間（2021年12月～2022年12月）各日の好気ゾーンの平均DO濃度（DO1 およびDO2の計測値の平均値）と好気ゾーン比の変化を図4-3に示す。ここで、好気ゾーン比はOD槽の全容量に対する好気ゾーン容量の比率であり、DO濃度が0.2mg/L以上と推定される範囲を好気ゾーンと見なして算出したものである。具体的には、DO1およびDO2の計測値と各DO計の散気装置上端からの距離を用いて、水路長に対するDO濃度の変化を表す1次関数を見出し、DO濃度が0.2mg/Lとなる位置（散気装置上端からの距離）を算定することで、好気ゾーン比を推定した。

同図を見ると、2021年12月から2022年6月までは、2箇所のDO濃度が安定して設定値（DO1：1.0mg/L、DO2：0.2mg/L）付近で推移している。これにより、この期間の調査池の好気ゾーン比は目標である50%前後に維持されており、後述するように本期間には処理水のT-N濃度が10mg/L以下であったことから、良好に好気・無酸素ゾーンが形成されていたと推定できる。一方、2022年7月以降は各DO濃度計測値が設定値から外れることが多くなった。8月下旬から10月上旬の期間には設定値からの乖離がとりわけ大きくなっているが、これはDO計のセンサ部分に汚泥が付着し、正常にデータを取得できていなかったためと推測される。

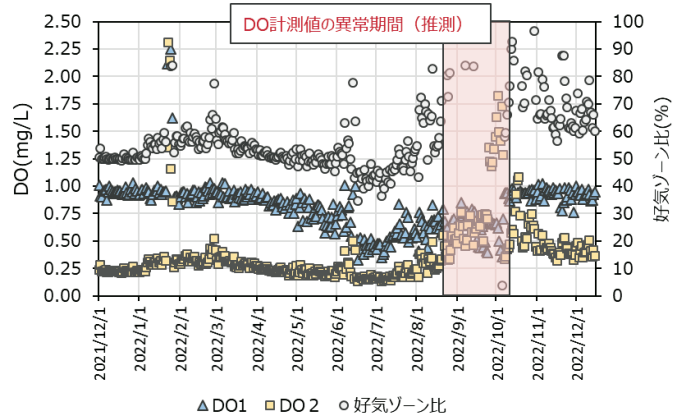


図4-3 DO 濃度（日平均）と好気ゾーン比の経日変化
（2021 年 12 月～2022 年 12 月）

② 処理性能

②-1 定期採水による水質調査

対象期間における流入原水および両系（調査池、対照池）の処理水の BOD 濃度の経日変化を図 4-4 に示す。流入原水の BOD 濃度が平均 239mg/L であったのに対して、調査池および対照池の処理水では各々平均 3.4、6.9mg/L まで低減された。調査池では、対象期間を通して、対照池より流入負荷が高いにもかかわらず安定して有機物が除去されていたことを確認した。

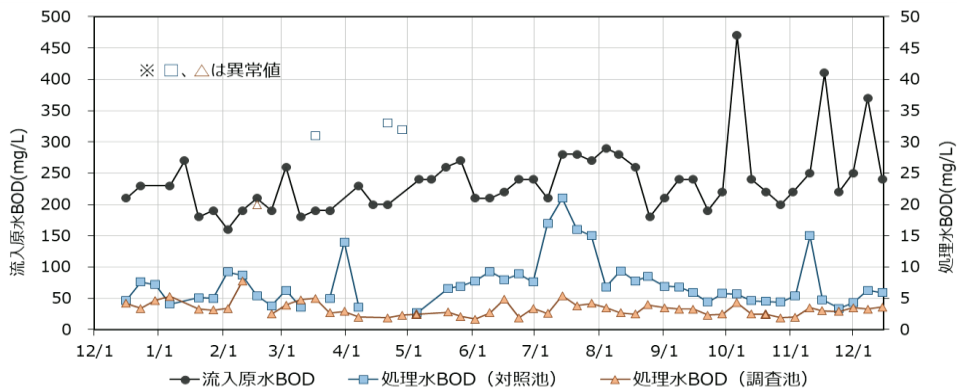


図4-4 流入原水および各系処理水の BOD 濃度の経日変化
（2021 年 12 月～2022 年 12 月）

調査池について、対象期間における流入原水および処理水の T-N 濃度、NH₄-N 濃度の経日変化を図 4-5 に示す。流入原水の NH₄-N 濃度が平均 30.9mg/L であったの対して、調査池の処理水では平均 0.2mg/L であり、期間を通して硝化は良好に進行していた。一方、T-N 濃度についても、流入原水が平均 39.4mg/L であったのに対して、調査池の処理水では平均 3.6mg/L（除去率 90.6%）まで低減され、平均的には良好な処理状況であった。特に、2021 年 12 月から 2022 年 6 月まで好気ゾーン比が 50%程度と安定して好気・無酸素ゾーンが形成されていたと推測される期間では、処理水の T-N 濃度が 10mg/L を超えることはなく、硝化・脱窒が良好に進行していたことが確認された。一方、2022 年 8 月下旬以降、DO2 の DO 濃度が上昇し、

好気ゾーン比が高い傾向にあった期間では、処理水に $\text{NO}_3\text{-N}$ が残留するようになり T-N 濃度が上昇し、無酸素ゾーン容量が減少した影響が現れた。

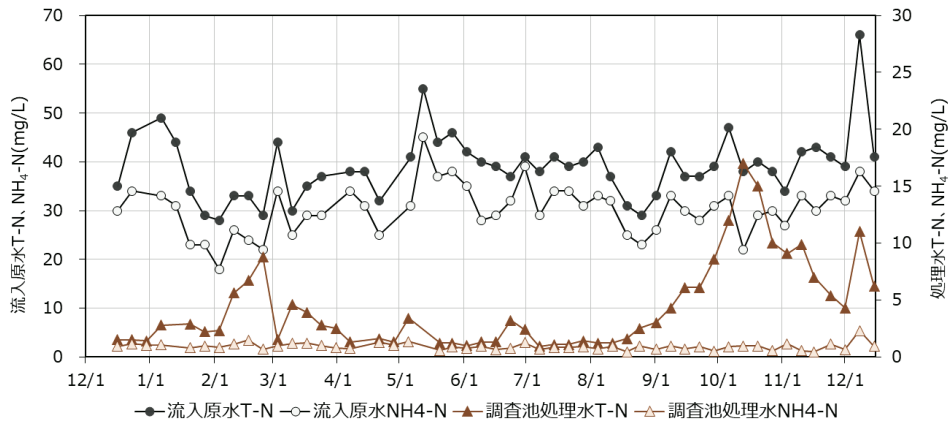


図4-5 流入原水および処理水(調査池)の T-N および $\text{NH}_4\text{-N}$ の経日変化 (2021年12月~2022年12月)

②-2 通日採水による水質調査

4回の通日採水における調査池の処理水の ATU-BOD 濃度の経時変化を図4-6に示す。ここで、BODについては、有機物除去の状況を把握するために、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の影響が除外される ATU-BOD を指標として用いている。流入水量の時間変動ピーク比（最大値/1日平均値）が 1.57~1.80 がかつ、1日の中でし尿などの投入が断続的に行われている（7:00~10:00 の間のみ投入無し）にも関わらず、処理水の ATU-BOD 濃度は安定して 5mg/L 以下を推移していた。

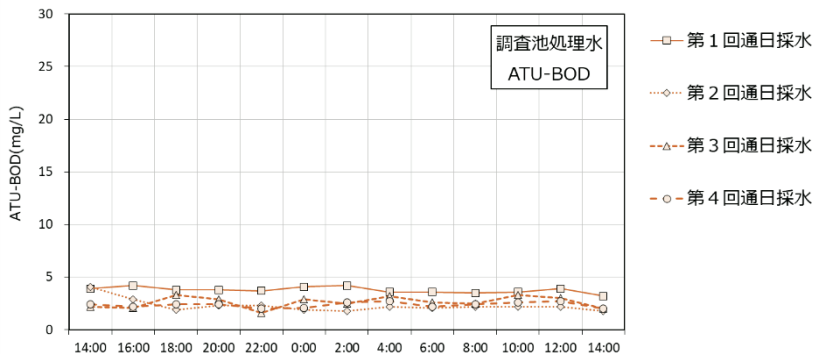


図4-6 調査池の処理水における ATU-BOD の経時変化

4回の通日採水各回における調査池の処理水の各態窒素濃度の経時変化を図4-7に示す。流入原水の1日平均 T-N 濃度は 27~61mg/L と調査回により大きく異なったが、どの調査回においても調査池の処理水 T-N 濃度は1日を通して 5mg/L 以下であり、良好に窒素が除去されていたことが確認された。

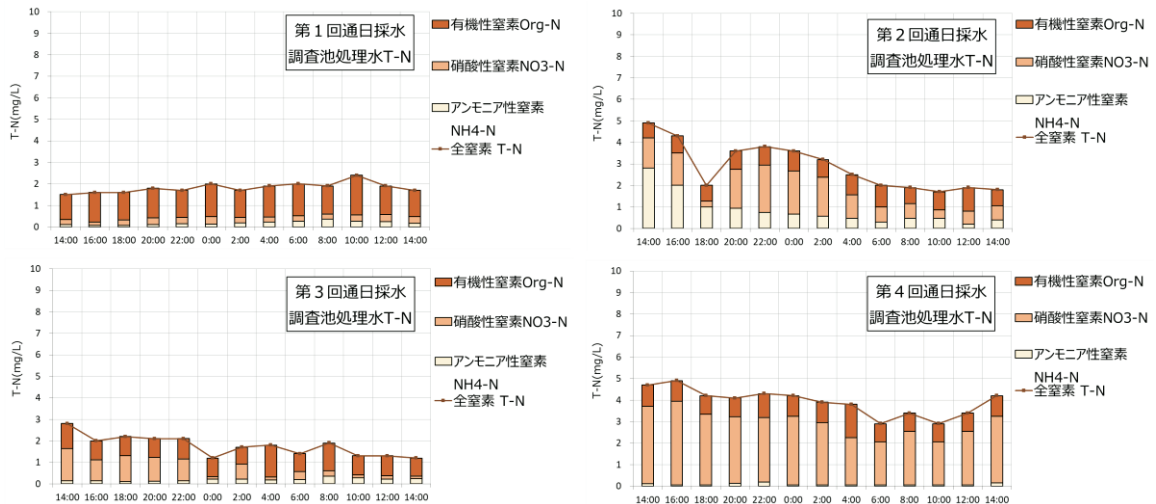


図4-7 調査池の処理水における T-N、Org-N、NH₄-N、NO₃-N の経時変化

③ 消費電力量

調査池および対照池それぞれの電力モニタ計測データに基づき、主要機器（調査池：ブロワおよび水流発生装置、対照池：スクリー型機械式曝気装置）の消費電力量から処理水量当りの消費電力量原単位を算出し、月別の平均値として表示したものを図4-8に示した。月別の消費電力量原単位は、調査池で 0.18~0.39kWh/m³、対照池で 1.17~1.37kWh/m³ の範囲で、調査池の方が明らかに小さく、同系における削減率は 70~84%と計算された。

ここで、対照池の消費電力量原単位が大きかった点について、同系の曝気装置の1日当り運転時間が概ね 24hr と過大であった可能性が高いことから、流入水質・MLSS 濃度から推定される必要酸素量と曝気装置の定格酸素供給能力に基づき、必要酸素量に見合った最低限の曝気装置運転時間を月毎に推定すると 11~16hr となった。この運転時間を仮定して対照池の消費電力量原単位を補正したところ（図4-8における「補正あり」）、0.61~0.88kWh/m³ と計算された。これを比較対象とした場合の調査池における消費電力量原単位の削減率は 41~66%へと低下するが、それでも十分な省エネ効果が得られていると言える。

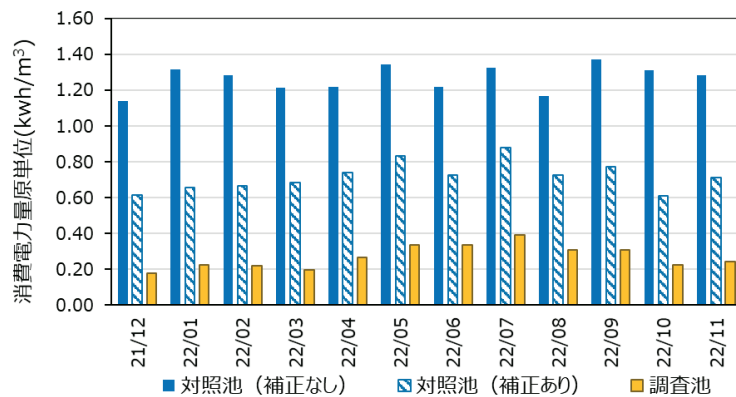


図4-8 月別の処理水量当り消費電力原単位(2021年12月~2022年11月)

④ 設備運転状況

④-1 OD 槽内 DO 濃度勾配

通日採水第 2 回実施時に取得した調査池における OD 槽内 4 箇所の DO 濃度を図 4-9 に示す。DO1 および DO2 における DO 濃度は、一部の時刻を除いて設定値付近となっており、2 箇所の DO 制御が正常に機能している状況が確認された。また、流下方向に DO 濃度勾配が生じており、無酸素ゾーンの下流地点に相当する DO2' では大半の時刻で DO 濃度が 0.1mg/L 以下となっていたことから、槽内に概ね想定とおりの好気ゾーン・無酸素ゾーンが形成されていたことが解る。

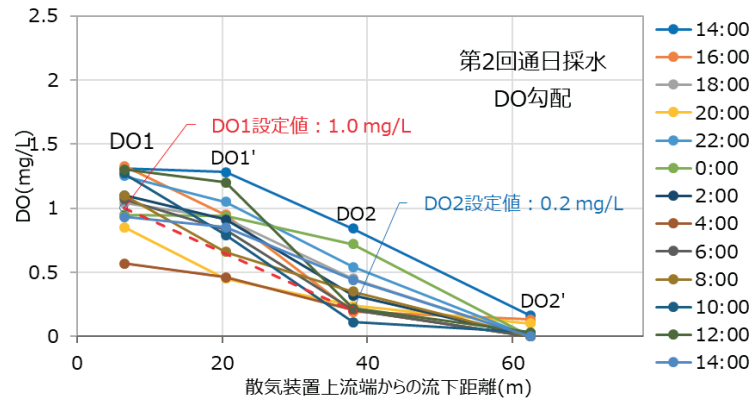


図4-9 OD 槽内の DO 濃度の測定結果(第 2 回通日採水 2022 年 2 月)

④-2 散気装置圧損

通日採水第 1 回から第 4 回において測定した調査池の OD 槽の空気管圧力に基づき、散気装置の圧損を推定した結果を図 4-10 に示す。若干の圧損上昇の傾向は見られるものの、装置設計上の圧損 (6kPa) 以下で運転されていることを確認した。

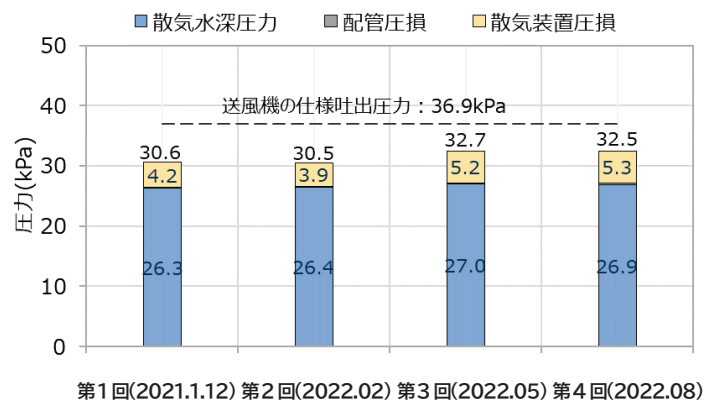


図4-10 通日採水時における散気装置の圧損状況

④-3 定流量排出装置の運転状況

4 回の通日調査実施時に OD 槽から最終沈殿池への流出部に設けた定流量排出装置の越流水深を推定したところ、いずれの調査回においても越流水深の実績値と制御目標値が 1 日を通して同等であったことから（データ非掲載）、本装置が適正に機能していることが確認された。

（4）まとめ

「OD 法における二点 DO 制御システム」の導入施設 1 箇所において、長期の事後評価調査を完了した。定常的な運転が行われた約 1 年間の運転・処理実績は以下のとおりである。

- 同技術が導入された調査池では、2021 年 12 月から 2022 年 6 月までは、OD 槽内 2 箇所の DO 濃度が設定値（DO1：1.0mg/L、DO2：0.2mg/L）近傍で推移しており、好気ゾーン比も 50%程度と、良好に好気・無酸素ゾーンが形成されていたと推測された。一方 7 月以降は DO 濃度が設定値を外れることが多くなった。8 月下旬から 10 月上旬の期間には設定値からの乖離がとりわけ大きくなったが、これは DO 計のセンサ部分に汚泥が付着し、正常にデータを取得できていなかったためと推測された。
- 同技術未導入の対照池では処理水 BOD 濃度が期間平均で 6.9mg/L であったのに対して、調査池では 3.4mg/L であり、調査池においては約 1.5 倍の流入負荷があるにも関わらず安定して有機物が除去されていた。
- 調査池において、好気ゾーン比が 50%程度で安定して好気・無酸素ゾーンが形成されていた期間には、良好に硝化・脱窒が進行していた。一方、DO 濃度が設定値から外れ好気ゾーン比が上昇した期間には、NO₃-N の残留に伴い処理水 T-N 濃度が上昇した。
- 月別の流入水量当りの消費電力量原単位について、対照池では 1.17～1.37kWh/m³、調査池では 0.18～0.39kWh/m³であり、調査池における削減率は 70～84%と計算された。一方、対照池では曝気装置の 1 日当り運転時間が概ね 24hr と過大であった可能性が高いと判断し、流入水質などから推定される必要酸素量と曝気装置の定格酸素供給能力に基づき、必要酸素量に見合った最低限の曝気装置運転時間を月毎に推定すると 11～16hr となった。この運転時間を仮定して対照池の消費電力量原単位を補正したところ、0.61～0.88kWh/m³と計算された。これを比較対象とした場合の調査池における消費電力量原単位の削減率は 41～66%へと低下したが、それでも十分な省エネ効果が得られていると言える。

上記成果を基に、今後、本技術の基準化を行い更なる普及展開を図る予定である。

4.2 事後評価調査（次世代型焼却炉システム）

（1）検討の概要

本検討は、地球温暖化対策計画に位置付けられている「焼却の高度化」に貢献するため、JS が技術選定した次世代型焼却炉システム*を対象に、実稼働施設の実態調査を実施するものであ

* JS の新技術導入制度において選定された以下の 8 技術を指す。

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、階段炉による電力創造システム、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）、気泡式高効率二段焼却炉、多段最適燃焼制御付気泡流動炉、二段燃焼式巡回流動炉

る。焼却の高度化については、2030 年度までに N₂O 排出抑制型の焼却炉への更新や高温焼却率を 100%（2019 年度時点で 73%）とすることなどで、2013 年度比で約 78 万 t-CO₂ を削減する目標が掲げられている。これは、地球温暖化対策計画における下水道全体の目標削減量である 208 万 t-CO₂ の約 4 割を占めるため、目標達成に向けて極めて重要かつ喫緊の施策となっている。

本検討は全体で 2 か年度の調査を予定しており、本年度は次世代型焼却炉システム 8 技術のうち 4 技術を、次年度は残りの 4 技術を対象に実施することとしている。

2022 年度： 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、階段炉による電力創造システム

2023 年度： 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）、

気泡式高効率二段焼却炉、多段最適燃焼制御付気泡流動炉、

二段燃焼式巡回流動炉

（2）検討方法

表 4-2 に示す調査対象技術について、各技術を導入した下水処理場に対するアンケート調査またはヒアリング調査により、焼却炉の運転条件および処理量、燃料使用量、電力使用量、エネルギー収支、排ガス性状（N₂O、窒素酸化物、重金属など）などの運転状況を確認した。

表 4-2 次世代型焼却炉システム 4 技術の実績

| 技術名称 | 技術選定時の選定区分 | 選定年月日 | 開発メーカー | 2022年12月時点の実績件数 (建設中を含む件数) |
|----------------|------------|------------|-----------------|-------------------------------|
| 多層燃焼流動炉 | Ⅱ類 | 2012年5月7日 | メタウォーター(株) | 19件 (26件) |
| 過給式流動燃焼システム | Ⅱ類 | 2012年5月7日 | 月島機械(株)、(株)三機工業 | 12件 (20件) |
| 高効率二段燃焼汚泥焼却炉 | Ⅲ類 | 2012年5月7日 | (株)神鋼環境ソリューション | 3件 (3件) |
| 階段炉による電力創造システム | Ⅰ類 | 2016年5月31日 | (株)タクマ | 2件 (3件) |

（3）検討結果

各技術を導入した下水処理場に対するアンケート調査またはヒアリング調査の結果、稼働施設の運転状況は概ね良好であり、処理場個別の実情に応じた運転管理が行われていた。調査対象施設の 2021 年度の運転状況（平均値）と各技術の現行の技術資料に記載の性能とを比較した結果を表 4-3 に示した。

表4-3 次世代型焼却炉システム4技術の運転状況（技術資料の性能値との比較）

| 技術名称 | | 調査対象 施設数（基） | 調査対象施設 の規模（t/日） | 燃料使用量 (GJ/t-wet) | 電力使用量 (kWh/t-wet) | N ₂ O排出量 (kg-N ₂ O/t-wet) |
|--------------------|---------------------------------------|----------------|--------------------|----------------------------|----------------------|--|
| 多層燃焼流動炉 | 技術資料に記載の 性能値 ^{※1} | — | — | 0.093 1.544 | 117.6 | 0.234 0.195 |
| | 調査結果 ^{※1} | 8 2 | 15~300 20~50 | 0.266~1.846 2.616~3.822 | 64.0~219.3 | 0.086~0.223 未測定 |
| 過給式流動燃焼システム | 技術資料に記載の 性能値 ^{※1} | — | — | 1.005 2.397 | 58.7 | 0.198 0.173 |
| | 調査結果 ^{※1} | 7 1 | 60~300 70 | 0.039~1.084 1.487 | 38.5~89.0 | 0.125~0.727 0.550 |
| 高効率二段燃焼 汚泥焼却炉 | 技術資料に記載の 性能値 ^{※2} | — | — | 0.704~0.841 | 89.4 | 0.100~0.300 |
| | 調査結果 ^{※2} | 3 | 60~145 | 0.596~1.272 | 79.6~158.4 | 0.080~0.081 |
| 階段炉による 電力創造システム | 技術資料に記載の 性能値(TYPE-D) ^{※2} | — | — | 0.003 | 49.5 | 0.1 |
| | 調査結果 ^{※2} | 2 | 100~140 | ≒0 | 33.5~66.0 | ND~0.026 |

※1：多層燃焼流動炉及び過給式流動燃焼システムの性能値と調査結果は、上段に混合生汚泥の数値、下段に消化汚泥の数値を各々示す。

※2：高効率二段燃焼汚泥焼却炉及び階段炉による電力創造システムの性能値と調査結果は混合生汚泥の数値を示す。

① 多層燃焼流動炉

技術資料に記載の性能値と比べて、燃料使用量や電力使用量が多くなっている一方で、N₂O排出量を測定している5箇所全てで満足していた。燃料使用量や電力使用量の増加は小規模施設で顕著であったため、頻繁な焼却炉の立上げ・立下げや低負荷運転によるものと考えられた。

② 過給式流動燃焼システム

技術資料に記載の性能値と比べて、燃料使用量や電力使用量は概ね満足していたが、N₂Oは8箇所中6箇所性能値より多く排出されていた。昨今の燃料費高騰などを受けて、概ね850℃以上の高温燃焼を実施しつつも低燃費運転を行っているためと考えられた。

③ 高効率二段燃焼焼却炉

調査対象施設は3基のみであるが、技術資料に記載の性能値と比べて、消化汚泥を焼却処理している1処理場で燃料使用量や電力使用量が多くなっていたものの、N₂O排出量の性能値は3基全てで満足していた。

④ 階段炉による電力創造システム

調査対象施設は2基のみであるが、電力使用量は1基で技術資料に記載の性能値を満たしていなかったものの、燃料使用量およびN₂O排出量は満足していた。これは、付帯設備の電力使用量や運転立上げ時の燃料消費量が含まれているためと考えられる。

(4) まとめ

本年度は、JS新技術のうち、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、階段炉による電力創造システムの事後評価調査を、アンケート調査またはヒアリン

グ調査により実施した。実稼働施設は、各処理場個別の実情（低燃費運転の実施、N₂O 排出抑制の推進など）に応じた運転管理が行われているため、一部の施設で技術資料に記載の性能値を満足していなかったが、概ね良好な運転状況であった。

4.3 事後評価調査(鋼板製消化タンク)

(1) 検討の概要

鋼板製消化タンクは、従来のコンクリート製消化タンクと比べて建設工期の短縮や LCC の縮減が可能といった利点を有しており、近年の導入実績が増えつつある。JS が技術選定した鋼板製消化タンクは 2022 年度末時点において 4 技術*あり、2030 年目標に向けたバイオガス利活用技術の普及促進を図るために、前・基本計画（2017 年度～2021 年度）から継続して実稼働施設の事後評価調査を実施しており、本検討は本年度で完了予定である。

本年度は、JS の新技術Ⅱ類に選定され M 浄化センターで供用開始した「パッケージ型鋼板製消化タンク」(以下、「本技術」と略記)を対象として、建設工期、運転状況および省エネ性能、不具合とその対策事例などに関する事後評価調査を実施した。本技術は、消化タンク本体を鋼板で製作することで従来のコンクリート製消化タンクと比べて建設工期の短縮が可能であり、更には低動力のインペラ式攪拌機を採用することで LCC の縮減を実現するなどの特徴を有している。

(2) 検討方法

① 調査内容

本調査では、M 浄化センターにおける建設時の管理記録や供用時の維持管理年報をもとに、建設工期短縮の検証や消化タンクの運転状況の確認を行った。また、同浄化センターの現地にて本技術の運転状況を確認すると共に、施設管理者に対して不具合の発生状況や対策などに関するヒアリングを行った。

② 調査対象処理場

2019 年度に本技術を導入した M 浄化センター（晴天時日最大処理能力：166,200m³/d）を対象とした。同処理場に導入された本技術の外観を図 4-11 に示す。消化タンクは 3 槽設置され、有効容量は各々 5,000m³（φ 20m×H18m）である。消化温度は 35～40℃の中温消化、消化日数は 27～29d で、3 槽の消化タンクの各々が単段消化で運転されている。消化タンクには、各槽に 1 基ずつインペラ式攪拌機（攪拌翼：3 段、攪拌動力：5.5kW）が設置されているが、し渣などの異物の絡みつきを防止するために攪拌機を週に 1 回 30 分逆転運転している。消化タンクには生汚泥と余剰汚泥の混合濃縮汚泥が投入されており、1 槽につき 2 時間の連続投入が 1 日に 4 回実施されている。消化汚泥は、消化タンクの底部中央の 1 箇所から、テレスコープ弁を用いて水頭差によって引き抜かれる。

* 4 技術：パッケージ型鋼板製消化タンク、下部コーン型鋼板製消化タンク、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。

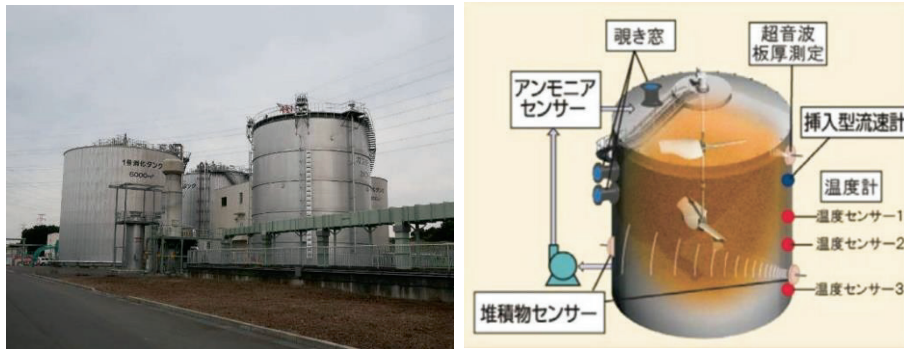


図4-11 パッケージ型鋼板製消化タンクの外観およびイメージ(M 浄化センター)

(3) 検討結果

① 建設工期

M 浄化センターにおける本技術の設計・工場制作および現地据え付けを含めた建設工期は2年2か月（うち現地工事期間1年2ヶ月）で、試運転・立ち上げまでを含めた全体工期は3年であった。消化タンク本体および攪拌機の工事期間は、機器設計期間が5ヶ月、工場製作期間が消化タンク本体で7ヶ月、攪拌機で15ヶ月、現地工事期間が14ヶ月で、計26ヶ月であった。ガスタンクほか付帯設備は、設計期間6ヶ月、工場製作期間5ヶ月、現地工事期間10ヶ月で、計21ヶ月であった。電気設備の工事期間は、設計期間5.5ヶ月、工場製作期間4ヶ月、現地工事期間8ヶ月で、計17.5ヶ月であった。試運転・立上げの期間は、10ヶ月間であった。

過去の実績では、同容量の一般的なコンクリート製消化タンクの現地工事期間は基礎工事を含めて3年程度であるのに対して、本技術では1年2ヶ月と現地工事期間を半分以下へ短縮可能であることを確認した。

② 消化タンクの運転状況

各消化タンクの稼働開始後3年間の運転状況を表4-4に示す。1日当りの汚泥投入量（1槽当たり）は、設計値 $191\text{m}^3/\text{d}$ に対して、年平均値で $167\sim 187\text{m}^3/\text{d}$ と概ね設計値に近い値であった。

「下水道施設計画・設計指針と解説」²⁸⁾（以下、「設計指針と解説」と略記）では、一般的な消化率は50%、投入汚泥の有機物1t当りの消化ガス発生量は $500\sim 600\text{m}^3/\text{VS-t}$ と示されている。M 浄化センターでは、3槽の消化率は年平均値で $56.2\sim 60.1\%$ であった。3槽の投入VS当りガス発生量は年平均値で $456\sim 508\text{m}^3/\text{VS-t}$ と若干低い値であったが、施設管理者に実施したヒアリングでは、ガスの発生自体は安定しているとのことであったため、問題はないと考えられる。また、M 浄化センターでは、2020年度に1回、2021年度に2回、消化ガスの成分分析を実施しており、 CH_4 濃度は $55.8\sim 56.8\%$ 、 CO_2 濃度は $39.2\sim 40.2\%$ であった。「設計指針と解説」では、一般的な消化ガス中の CH_4 濃度は $60\sim 65\%$ 、 CO_2 濃度は $33\sim 35\%$ と示されている。一方、「汚泥消化タンク改築・修繕技術資料」²⁹⁾にあるアンケート結果では、回答のあった85%以上の処理場で消化ガス中の CH_4 濃度は55%以上であった。M 浄化センターの消化ガス成分は「設計指針と解説」からは外れた結果ではあるが、アンケート結果と比較し差異はないことから、消化性能として問題はないと考えられる。

今回の調査結果から得られた消化性能の年平均の実績は概ね良好なものであることから、本技術導入後の3年間において安定した嫌気性消化施設の運転が行われていたと考えられる。

表4-4 供用開始後3年間の消化タンク運転状況(年平均値)

| 項目 | | 単位 | 2019年度 | 2020年度 | 2021年度 | |
|---------------|---------------|----------------------|----------------------|--------|--------|-------|
| 初沈濃縮汚泥 TS | | % | 3.35 | 3.42 | 3.25 | |
| 初沈濃縮汚泥 有機分率 | | % | 91.5 | 91.2 | 91.4 | |
| 余剰濃縮汚泥 TS | | % | 4.09 | 3.98 | 4.00 | |
| 余剰濃縮汚泥 有機分率 | | % | 86.0 | 85.6 | 83.9 | |
| 1号消化タンク | 投入汚泥量 | 初沈濃縮汚泥 | m ³ /d | 115 | 118 | 100 |
| | | 余剰濃縮汚泥 | m ³ /d | 69 | 68 | 75 |
| | | 小計 | m ³ /d | 184 | 118 | 174 |
| | 循環汚泥 pH | | — | 7.2 | 7.2 | 7.1 |
| | 循環汚泥 TS | | % | 1.73 | 1.75 | 1.73 |
| | 循環汚泥 VFA | | mg/L | 102 | 105 | 105 |
| | 消化ガス発生量 | | m ³ /d | 2,686 | 2,692 | 2,686 |
| | 投入 VS 当りガス発生量 | | m ³ /VS-t | 456 | 454 | 496 |
| 2号消化タンク | 投入汚泥量 | 初沈濃縮汚泥 | m ³ /d | 114 | 115 | 97 |
| | | 余剰濃縮汚泥 | m ³ /d | 69 | 67 | 73 |
| | | 小計 | m ³ /d | 183 | 182 | 170 |
| | 循環汚泥 pH | | — | 7.2 | 7.3 | 7.1 |
| | 循環汚泥 TS | | % | 1.72 | 1.71 | 1.73 |
| | 循環汚泥 VFA | | mg/L | 96 | 92 | 99 |
| | 消化ガス発生量 | | m ³ /d | 2,697 | 2,673 | 2,707 |
| | 投入 VS 当りガス発生量 | | m ³ /VS-t | 461 | 458 | 516 |
| 3号消化タンク | 投入汚泥量 | 初沈濃縮汚泥 | m ³ /d | 113 | 115 | 95 |
| | | 余剰濃縮汚泥 | m ³ /d | 68 | 67 | 72 |
| | | 小計 | m ³ /d | 185 | 182 | 167 |
| | 循環汚泥 pH | | — | 7.2 | 7.2 | 7.1 |
| | 循環汚泥 TS | | % | 1.71 | 1.73 | 1.74 |
| | 循環汚泥 VFA | | mg/L | 102 | 91 | 101 |
| | 消化ガス発生量 | | m ³ /d | 2,664 | 2,672 | 2,655 |
| | 投入 VS 当りガス発生量 | | m ³ /VS-t | 460 | 457 | 513 |
| 消化日数 | | d | 27 | 27 | 29 | |
| 消化率 | | % | 56.4 | 60.1 | 56.2 | |
| 投入 VS 当りガス発生量 | | m ³ /VS-t | 459 | 456 | 508 | |

③ 分解 VS 当りの消費電力量（エネルギー効率の性能指標との比較）

本技術の省エネ性能を確認するために、国土交通省通達「下水道事業におけるエネルギー効率に優れた技術の導入について（2017 年 9 月 15 日 国水下水第 38 号）」²³⁾が定めるエネルギー効率の性能指標値について、達成状況を確認した。

分解 VS 当り消費電力量の算出結果について、エネルギー効率の性能指標値と併せて表 4-5 に示す。なお、同表に示した消化設備消費電力量は、消化タンク 3 槽分の消化設備について、各機器の電動機定格に対して負荷率を 0.7 と仮定して算出したものである。本技術導入後の 3 年間における分解 VS 当り消費電力量は 104.8～126.0kWh/Δt-VS と計算され、性能指標値（280kWh/Δt-VS 以下）を十分に満足していた。

表 4-5 分解 VS 当り消費電力量の性能指標値との比較

| | 分解 VS 量 t-VS/d | 消化設備 消費電力量 kWh/d | 分解 VS 当り 消費電力量 kWh/Δt-VS | 性能指標値 kWh/Δt-VS |
|---------|-------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|
| 2019 年度 | 10.20 | 1,098 | 107.7 | ≤ 280 |
| 2020 年度 | 10.48 | 1,098 | 104.8 | |
| 2021 年度 | 8.69 | 1,098 | 126.0 | |

④ 不具合と対策事例

現地確認および施設管理者へのヒアリングを実施し、不具合とその対策の事例を収集した。

・ MAP(りん酸マグネシウムアンモニウム)による配管閉塞

消化タンク上部に設置されたテレスコープ弁の後段に位置する消化汚泥引抜管について、MAP による閉塞トラブルが発生していた（図 4-1 2）。閉塞トラブルの多くは、現合管として設置されたステンレス製の配管部分で発生していた。本施設では、MAP 対策として、月 1 回程度の頻度で消化汚泥引抜管の洗浄（逆洗）を行っている。しかし、定期的な洗浄を行っても閉塞する箇所が 15 箇所ほどあり、その都度配管を着脱して人力による除去を行う必要があるため、維持管理上の大きな負担となっている。ヒアリングでは、維持管理の省力化のため、クエン酸での配管洗浄、MAP が付着しにくい樹脂製管や合成樹脂ライニング管への変更、配管の二条化を検討しているとのことであった。

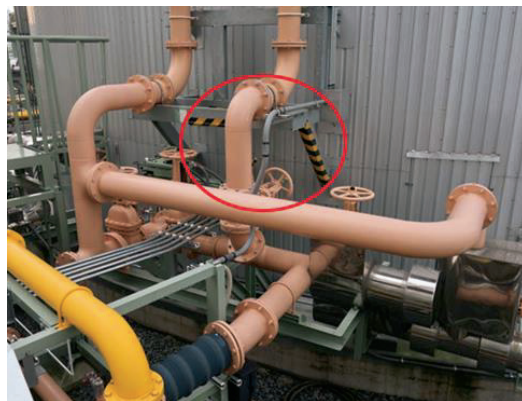


図 4-1 2 MAP による閉塞箇所（例）

・ 異常発泡

消化タンク内部において消化汚泥の異常発泡が年に 1 回程度発生していた。その対策として、消泡剤は使用しておらず、消化タンク頂部に設けた消泡ノズルからマイクロストレーナ処理した下水処理水を散水することで対応していた。消泡ノズルは 2 種類あり、通常は散水強度が標準のノズルを使用し、異常発泡が改善しない場合には散水強度がより強いノズルを使用していた。

・ 酸敗

酸敗とは、投入汚泥量や有機物負荷の過大、酸性排水の流入などにより、過剰な酸が消化タンク内に蓄積してメタン生成古細菌の増殖速度が低下し、消化ガス生成が進まなくなる現象のことである。本調査においては、酸敗に起因するトラブルは発生していなかった。

・ 消化タンクの温度センサの計測値異常

ヒアリングにおいて、消化タンク側面（上・中・下部）に設置されている温度センサの測定結果では、下部（底面から 1.5m ほど上）が 30℃程度と上・中部と比較して低温になっており、消化タンク内の温度が不均一になっている可能性が示唆された。そこで、今回の調査の中で消化タンク上部から可搬式温度センサを投げ込み、消化タンクの側面から 1m ほど内側の地点における温度を測定した。測定の結果、上・中・下部の温度差がほぼないことを確認した。このことから、消化タンク側面（下部）に設置されている温度センサの計測値が 30℃程度となっていた点に対しては、消化タンク底部側面付近における汚泥の堆積、もしくは温度センサへのし渣などの絡みつきが原因と推測された。

（4）まとめ

2030 年目標に向けたバイオガス利活用技術の普及促進を図るために、2019 年度に M 浄化センターに導入された「パッケージ型鋼板製消化タンク」の事後評価調査を実施し、本年度で調査を完了した。一般的な同容量のコンクリート製消化タンクの現地工事期間は基礎工事を含めて 3 年程度であるのに対し、本技術での現地工事期間は 1 年 3 ヶ月であり、現地工事期間は半分以下への短縮が可能であった。

消化タンクの稼働後の約 3 年間の実績では安定した嫌気性消化運転が行われていたと考えられる。

分解 VS 当りの消費電力量を推定したところ、年平均値で 104.8～126.0kWh/Δt-VS であり、国土交通省の通知が示す性能指標値（280kWh/Δt-VS 以下）を満足していた。

テレスコープ弁を経由する消化汚泥引抜管のステンレス製配管部分で MAP による閉塞トラブルが発生しており、維持管理上の負担となっていた。

異常発泡は年に 1 回程度発生しており、消泡ノズルから散水することで対応していた。酸敗に起因するトラブルは発生していなかった。

消化タンク内の下部で低温度域が計測されたが、この原因は消化タンク底部の側面付近における汚泥の堆積もしくは温度センサへのし渣などの絡みつきであると推測された。

今後は、過年度までに実施したものを含めて計 2 技術の事後評価調査結果を統合し、鋼板製消化タンクの基準化（JS 内部基準への反映）に向けた整理を行う予定である。

4.4 嫌気性消化技術の運転管理に関する実態調査

(1) 検討の概要

脱炭素社会の実現に向けて、下水道分野では嫌気性消化により得られるバイオガスの利活用の推進が期待されている。今後、わが国の下水処理場では嫌気性消化施設の新設・増設が増えると予想されるが、これまでに導入された嫌気性消化施設について、運転管理における課題や不具合発生事例、これらへの対応状況などに関する情報は極めて少ない。

そこで本検討では、今後の嫌気性消化施設の設計および運転管理に反映すべき基礎情報を得ることを目的に、嫌気性消化施設を有する下水処理場を対象に運転状況や不具合などに関する実態調査を行う。本年度は、嫌気性消化施設を有する全ての下水処理場を対象としたアンケート調査を実施した。

(2) 検討方法

下水道統計に基づき、嫌気性消化施設を有する下水処理場 286 箇所を抽出し、アンケート調査を実施した。アンケート調査の概要は以下のとおりである。

- ・調査期間：2022年10月31日～11月30日
- ・調査対象：嫌気性消化施設を有する下水処理場 286 箇所
- ・調査方法：メールによるアンケート送付、回答收受
- ・回答数：218 箇所（回収率：76.2%）。

アンケート調査では、嫌気性消化施設の概要（設備能力、汚泥性状、ガス発生量など）、運転管理状況、不具合発生事例、維持管理面から見た嫌気性消化施設に関する意見などの項目について照会した。

日平均処理水量（実流入量）別のアンケート回収結果を図4-13に示す。5,000m³/d 未満の下水処理場からの回収率は50%であったが、それ以外の下水処理場からは70%以上の回収率であった。

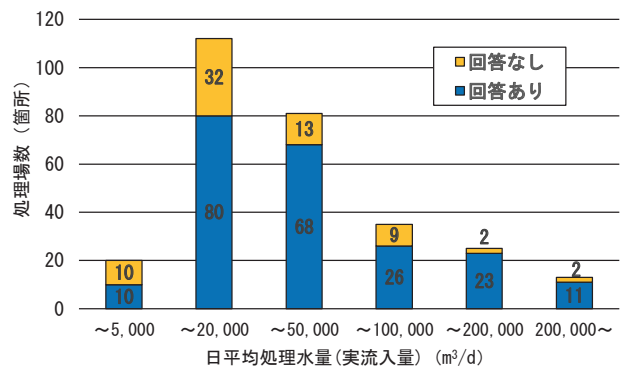


図4-13 日平均処理水量(実流入量)別のアンケート回収結果

(3) 検討結果

アンケート調査にて収集した情報・データのうち、本稿では①消化タンクの維持管理に係る不具合発生事例、②消化タンクの運転管理状況、③維持管理面から見た嫌気性消化施設に関する意見、の3つに着目した結果を示す。

① 消化タンクの維持管理に係る不具合発生事例

消化タンクの維持管理に係る 3 つの典型的な不具合の発生事例について、各下水処理場における発生頻度と対策状況を整理した結果を以下に示す。なお、各不具合発生事例と、施設規模、消化日数、投入汚泥濃度などとの関連性は確認されなかった。

・ 酸敗

酸敗とは、4.3 節でも示したとおり、投入汚泥量や有機物負荷の過大、酸性排水の流入などにより、過剰な酸が消化タンク内に蓄積してメタン生成古細菌の増殖速度が低下し、消化ガス生成が進まなくなる現象のことである。酸敗の発生事例の有無・頻度の集計結果を図 4-14 に示す。有効回答（n=212）のうち、25%の下水処理場でこれまでに酸敗の発生事例があった。また、全体のうち 7%の下水処理場で年に 1 回以上酸敗が発生しており、維持管理上の不具合を抱えていることが分かった。

酸敗現象が発生した際の対応方法の集計結果を図 4-15 に示す。対策として最も多いのは、汚泥投入量の調整であった。

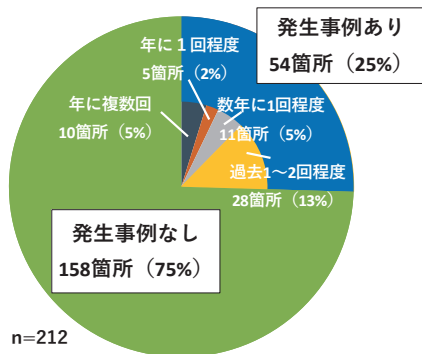


図 4-14 酸敗の発生事例 (有無・頻度)

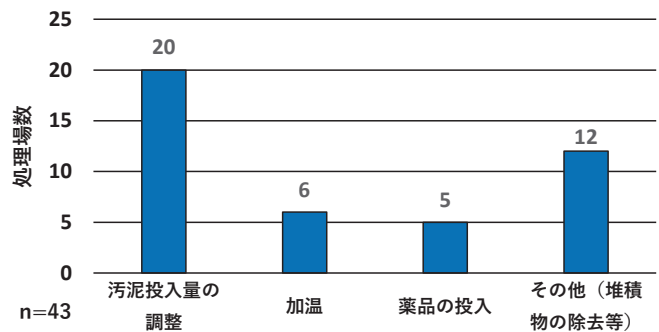


図 4-15 酸敗発生時の対応方法

・ 異常発泡・スカム

異常発泡・スカムの発生事例の有無・頻度の集計結果を図 4-16 に示す。有効回答（n=212）のうち、42%の下水処理場でこれまでに異常発泡・スカムの発生事例があった。また、全体のうち 14%の下水処理場で年に 1 回以上発生しており、異常発泡・スカムによる不具合を抱えている下水処理場が酸敗よりも多いことが分かった。

これらが発生した際の対応方法の集計結果を図 4-17 に示す。対策として、消泡剤の投入、汚泥投入量の調整、汚泥引き抜きによる液位管理などが比較的多く行われていた。

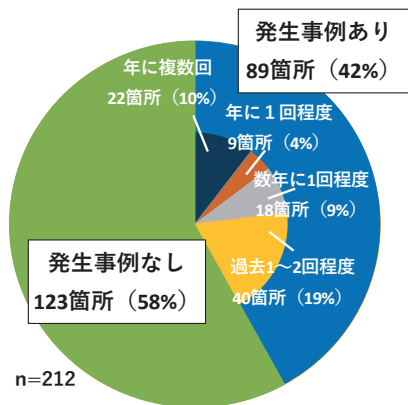


図4-16 異常発泡・スカムの発生事例(有無・頻度)

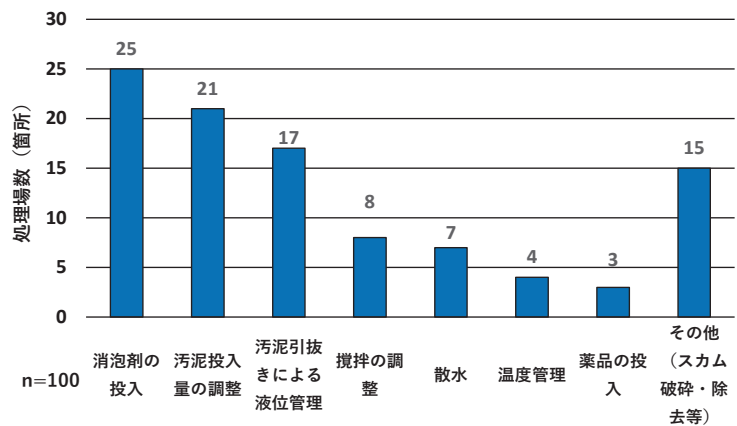


図4-17 異常発泡・スカム発生時の対応方法

・ MAP(リン酸マグネシウムアンモニウム)による配管閉塞

MAP による配管閉塞の発生事例の有無・頻度の集計結果を図4-18に示す。有効回答(n=213)のうち、59%の下水処理場でこれまでにMAPによる配管閉塞の発生事例があった。また、全体のうち34%の下水処理場で年に1回以上発生しており、アンケートにて確認した3つの不具合の中では最も多い結果となった。MAPによる配管閉塞が発生した際の対応方法の集計結果を図4-19に示す。高圧洗浄や工具などでの物理的除去、薬品洗浄などが比較的多く行われていた。

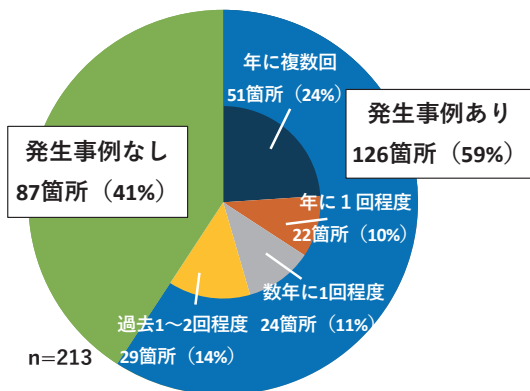


図4-18 MAPによる配管閉塞の発生事例(有無・頻度)

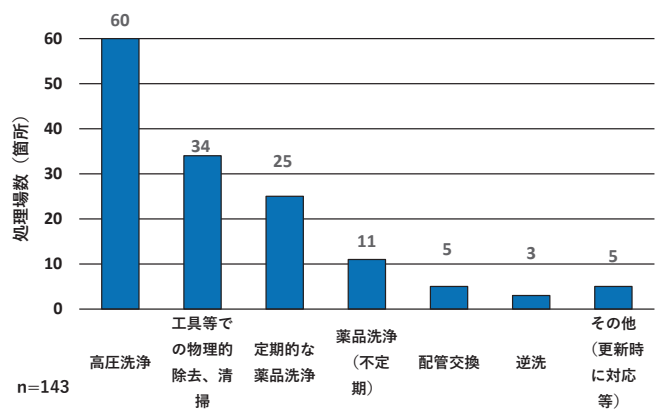


図4-19 MAP発生時の対応方法

② 消化タンクの運転管理状況

消化タンクの運転管理状況として、無機凝集剤の使用状況、消化タンクの開放点検の実施状況について整理した結果を以下に示す。

・ 無機凝集剤の使用状況

嫌気性消化施設における硫化水素の発生抑制や臭気対策などの運転管理上の課題に対する改善策の一つとして、無機凝集剤の添加が挙げられる。無機凝集剤の添加目的と添加箇所の集計結果を図4-20に示す。有効回答（n=132）のうち、硫化水素抑制、臭気抑制、MAP対策を目的に、汚泥濃縮工程に無機凝集剤を添加している下水処理場が比較的多いことが分かった。また、無機凝集剤を汚泥濃縮工程で添加する処理場とそれ以外（未添加または濃縮工程以外で添加）の処理場について、脱硫装置前の硫化水素濃度を累積頻度で整理した結果を図4-21に示す。無機凝集剤を汚泥濃縮工程で添加する下水処理場では、脱硫装置前の硫化水素濃度が、それ以外の下水処理場と比べて全体的に低い傾向にあることが確認された。なお、本調査では、無機凝集剤の添加による臭気抑制効果やMAP対策効果についてはアンケートの設問に含まれておらず結果が得られていないため、継続調査が必要である。

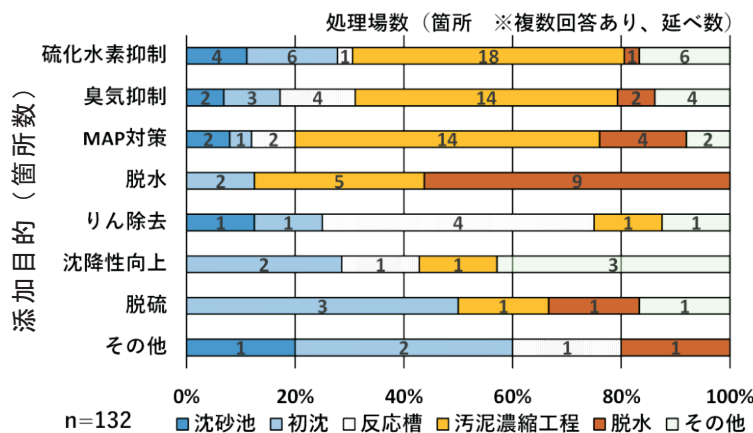


図4-20 無機凝集剤の添加目的・添加箇所

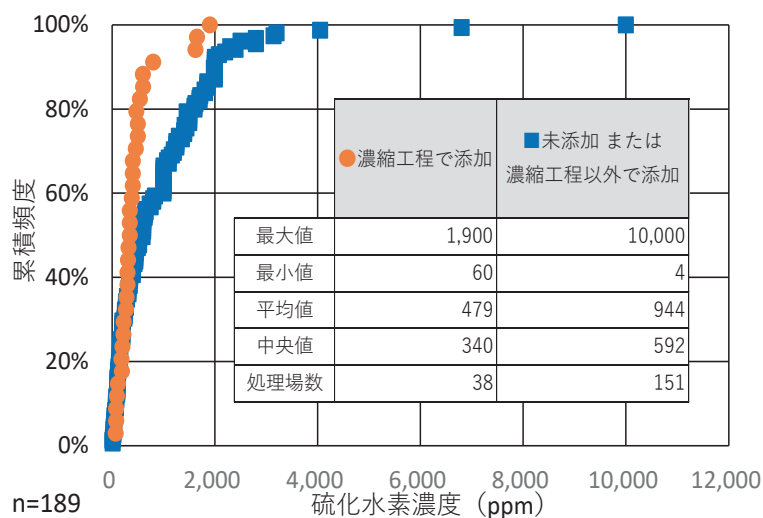


図4-21 脱硫装置前の硫化水素濃度の累積頻度分布

・ 消化タンクの開放点検の実施状況

消化タンクの開放点検の実施頻度を集計した結果を図4-22に示す。有効回答（n=215）のうち、定期的な開放点検を行っている下水処理場は全体の11%に留まり、38%の下水処理場

では一度も開放点検を実施していないことが分かった。また、各下水処理場が有する消化タンク数別の開放点検の実績を図4-23に示す。消化タンクを4槽以上有する下水処理場では、58箇所中48箇所（83%）で過去に一度以上開放点検した実績があるが、1槽しか消化タンクを有していない下水処理場では、30箇所中8箇所（27%）しか開放点検の実績が無く、更に消化タンクの保有数が多くなるほど開放点検を実施している処理場の割合が高くなる傾向が確認された。

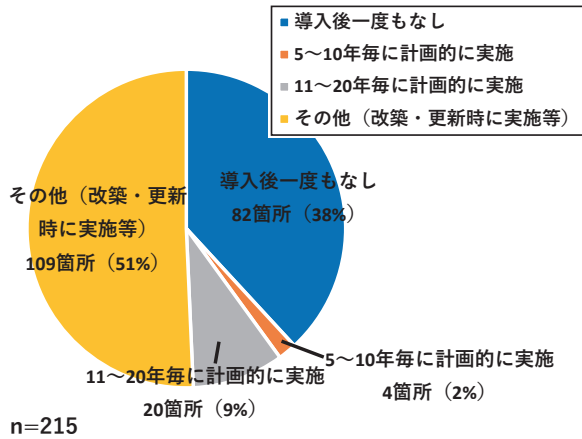


図4-22 開放点検の頻度

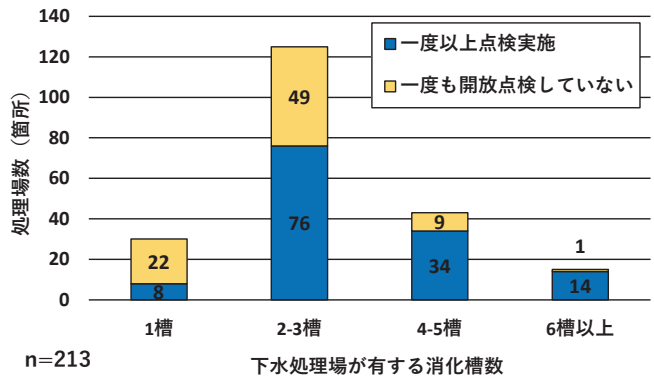


図4-23 開放点検の実績（槽数別）

③ 維持管理面から見た嫌気性消化施設に関する意見

下水処理場の維持管理者から見た嫌気性消化施設に対する意見（自由回答）について、回答を分類して延べ数で整理した結果を表4-6に示す。嫌気性消化施設導入のメリットとして意見が多かった順に、「脱水汚泥量の低減」、「汚泥性状の安定化、臭気低減による作業環境などの向上」となった。また、消化ガスの有効利用や、クッションタンクとしての役割もメリットとして挙げられていた。嫌気性消化施設導入のデメリットとしては、消化タンクの開放点検や付帯設備の保守点検に要するコストを挙げる下水処理場が最も多かった。また、嫌気性消化施設の導入に関する維持管理者から見た要望などの意見としては、設備の複数化や点検・維持管理の容易化などの要望が多く、嫌気性消化施設の導入検討や設計において特に留意すべき事項であると考えられる。

表4-6 嫌気性消化施設に対する意見(自由回答)

| 項目 | 意見 | 件数 (延べ数) |
|----------------|---------------------------|-------------|
| 消化施設導入のメリット | 脱水汚泥量の低減 | 129 |
| | 汚泥性状の安定化、臭気低減による作業環境などの向上 | 113 |
| | 消化ガスの有効利用、GHG 排出量削減への貢献 | 80 |
| | クッションタンクとしての機能 | 44 |
| 消化施設導入に伴うデメリット | 消化槽の開放点検や付帯設備の保守点検に要するコスト | 89 |
| | 安定した施設運転に熟練を要す | 43 |
| | 汚泥の脱水性の低下 | 42 |
| | MAP などによる配管・機器などの閉塞トラブル | 33 |
| | 返流水による水処理への影響 | 18 |
| 消化施設導入に関する意見 | 設備の複数化 | 33 |
| | 点検・維持管理の容易化 | 19 |
| | 開放点検が不要な設備、手法 | 13 |
| | 能力的に余裕のある施設（機器、配管径など） | 10 |
| | MAP 対策 | 8 |

(4) まとめ

嫌気性消化施設の設計および運転管理に反映すべき基礎情報を得ることを目的に、嫌気性消化施設を有する全国の下水处理場を対象にアンケート調査を実施し（回答数 218 箇所）、不具合の発生状況や運転管理状況などを整理した。

嫌気性消化施設の維持管理に係る 3 つの典型的な不具合のうち、MAP による配管閉塞、異常発泡・スカム、酸敗の順に発生事例が多かった。特に MAP については、有効回答のうち 34% の下水处理場で年に 1 回以上の頻度で発生しており、消化施設に対する意見も踏まえると維持管理の負担になっていることが明らかとなった。

汚泥濃縮工程で無機凝集剤を添加している下水处理場では、未添加または濃縮工程以外で添加している下水处理場と比べて脱硫装置前の硫化水素濃度が低い傾向にあることが確認された。消化タンクの定期的な開放点検を実施している下水处理場は 11%に留まっており、下水处理場の消化タンクの保有数に応じて解放点検を実施している処理場の割合が高くなる傾向が見られた。

嫌気性消化施設導入のメリットとして、脱水汚泥量の低減が最も多い意見であった。また、嫌気性消化施設導入のデメリットとして、開放点検や保守管理のコストに関する意見が多く挙げられた。嫌気性消化施設導入に関する要望として、設備の複数化や点検・維持管理の容易化などを求める意見が多く、嫌気性消化施設の導入検討や設計において特に留意すべき事項として挙げられた。

2023 年度は、本アンケート調査で特徴のあった、維持管理上の不具合が発生している下水处理場などを対象に追加調査を実施し、その原因の究明や対応策についての検討を進める予定である。

5. 脱炭素化推進方策

5.1 脱炭素化性能指標の実態などに関する調査

(1) 検討の概要

本検討は、下水処理場で使用されている機器・装置のエネルギー削減量および GHG 排出量（以下、「脱炭素化性能」と略記）について現状の技術水準を把握するため、JS の「機械設備標準仕様書」³⁰⁾に掲載されている機器の性能に関して実態調査を行うものである。本年度の実態調査を踏まえ、機器・装置の省エネ性能に係る基準を設けるなどにより、JS の受託事業においてエネルギー効率などに優れた機器・装置などが導入されることを目指す。

(2) 検討方法

表 5-1 に示す機器の効率などに関するヒアリング調査を実施した。ヒアリング対象は、一般社団法人日本下水道施設業協会正会員の 34 社に加えて、2007～2017 年に JS が発注した建設工事において納入実績のあるメーカーの中から、同表に示した機器を取り扱うメーカー 78 社を抽出した。

ヒアリング調査結果を基に、ポンプ効率、全断熱効率、攪拌動力密度などを整理し、JS の「設計要領 機械設備編」³¹⁾（以下、「設計要領」と略記）の数値と比較した。

表 5-1 対象機器とヒアリング調査内容

| 対象機器 | 機械設備標準仕様書の記載箇所 | ヒアリング調査内容 |
|-----------|-----------------------------|-----------|
| 主ポンプ | 第 3 章第 1 節§1：立軸渦巻斜流ポンプ | ポンプ効率 |
| | 第 3 章第 1 節§2：立軸斜流ポンプ | |
| 送風機 | 第 4 章第 1 節§1：直結式多段ターボブロワ | 全断熱効率 |
| | 第 4 章第 1 節§2：歯車増速式単段ターボブロワ | |
| | 第 4 章第 1 節§3：ロータリ（ルーツ式）ブロワ | |
| | 第 4 章第 1 節§4：鋼板製直結式多段ターボブロワ | |
| | 第 4 章第 1 節§5：高速軸浮上式ターボブロワ | 総合効率 |
| 水中攪拌式曝気装置 | 第 6 章第 9 節§1：水中攪拌式曝気装置 | 攪拌動力密度 |

① 主ポンプ

立軸渦巻斜流ポンプは、モデルケースとして $10\text{m}^3/\text{min} \times \phi 300 \times 15\text{m}$ 、 $30\text{m}^3/\text{min} \times \phi 500 \times 15\text{m}$ 、 $80\text{m}^3/\text{min} \times \phi 800 \times 15\text{m}$ の機種を、立軸斜流ポンプも同様に $30\text{m}^3/\text{min} \times \phi 500 \times 10\text{m}$ 、 $80\text{m}^3/\text{min} \times \phi 800 \times 10\text{m}$ 、 $180\text{m}^3/\text{min} \times \phi 1,200 \times 10\text{m}$ の機種を対象とした。各メーカーのヒアリング結果を、設計要領「第 3 章 ポンプ場設備」に掲載されているポンプ効率と比較した。

② 送風機

調査対象とした送風機の仕様は、設計要領「第 4 章 送風機設備」に基づく各機種の風量範囲から代表的な 2 点を選定し、鋳鉄製直結式多段ターボブロワは $100\text{m}^3/\text{min}$ 、 $280\text{m}^3/\text{min}$ 、鋼板製直結式多段ターボブロワは $35\text{m}^3/\text{min}$ 、 $55\text{m}^3/\text{min}$ 、歯車増速式単段ターボブロワは $65\text{m}^3/\text{min}$ 、 $100\text{m}^3/\text{min}$ 、ロータリ（ルーツ式）ブロワは $15\text{m}^3/\text{min}$ 、 $30\text{m}^3/\text{min}$ 、高速軸浮上式ターボブロワは $65\text{m}^3/\text{min}$ 、 $105\text{m}^3/\text{min}$ の能力の機種とした。いずれも 60kPa 、 20°C 、1 気圧、

湿度 65%の標準状態における効率を調査した。各メーカーのヒアリング結果を、設計要領に掲載されている全断熱効率（断熱効率と機械効率を統合した効率）と比較した。ただし、高速軸浮上式ターボブロワについては総合効率（総合効率＝インバーター効率×電動機効率×全断熱効率）を比較した。

③ 水中攪拌式曝気装置

水中攪拌式曝気装置は、モデルケースとしてタンク容量 350m³×縦横比 1：1.1 以下×水深 5m、タンク容量 480m³×縦横比 1：1.5 以下×水深 5m、タンク容量 640m³×縦横比 1：2 以下×水深 5m に対する機種について、攪拌動力密度の調査を行った。これらの結果を、設計要領「第 5 章 水処理設備」に掲載されている攪拌動力密度と比較した。

(3) 検討結果

① 主ポンプ

表 5-2 に示すとおり、立軸渦巻斜流ポンプは、いずれの機種においても、設計要領に記載のポンプ効率と同等であり、周波数（50Hz/60Hz、以下同じ）における差異も見られなかった。

立軸斜流ポンプは、いずれの機種においても、設計要領に記載のポンプ効率と比較して平均値で 0.5～1 ポイント下回っていた。なお、周波数における差異は見られなかった。

表 5-2 主ポンプに関するヒアリング調査結果

| 対象機種 | | 設計要領のポンプ効率 | ヒアリング調査結果 平均値（範囲/回答社数） |
|-----------|------------------------------------|------------|---------------------------|
| 立軸渦巻斜流ポンプ | 10m ³ /分 min×φ 300×15m | 70% | 70%（70～70%/4 社） |
| | 30m ³ /min×φ 500×15m | 78% | 77.7%（76～78%/6 社） |
| | 80m ³ /min×φ 800×15m | 81% | 80.7%（79～81%/6 社） |
| 立軸斜流ポンプ | 30m ³ /min×φ 500×10m | 78% | 77.5%（77～78%/6 社） |
| | 80m ³ /min×φ 800×10m | 81% | 80.5%（80～81%/6 社） |
| | 180m ³ /min×φ 1,200×10m | 84% | 83.0%（81～84%/6 社） |

② 送風機

表 5-3 に記載のとおり、鋳鉄製直結式多段ターボブロワは、100m³/min では設計要領に記載の全断熱効率と概ね同等であったが、280m³/min では平均値で 1 ポイント程度下回っていた。なお、周波数における差異は見られなかった。

鋼板製直結式多段ターボブロワは、いずれの機種においても設計要領に記載の全断熱効率と同等であり、周波数における差異も見られなかった。

歯車増速式単段ターボブロワは、いずれの機種においても設計要領に記載の全断熱効率と概ね同等であり、周波数における差異も見られなかった。

ロータリ（ルーツ式）ブロワは、いずれの機種もメーカーによるばらつきが大きいですが、15m³/min の機種では設計要領に記載の全断熱効率と比較して平均値が 10 ポイント以上、30m³/min の機種では平均値が 5 ポイント以上、上回っていた。なお、周波数における差異は見られなかった。

高速軸浮上式ターボブロワは、65m³/min の総合効率は設計要領の値と比較して2ポイント程度上回っていたが、105m³/min では各メーカーの調査結果の平均値と概ね同等であった。なお、周波数における差異は見られなかった。

表5-3 送風機に関するヒアリング調査結果

| 対象機種 | | 設計要領の 効率* | ヒアリング調査結果 平均値（範囲/回答社数） |
|--------------------|------------------------|--------------|---------------------------|
| 鋳鉄製直結式 多段ターボブロワ | 100m ³ /min | 70% | 70%（70～70%/3社） |
| | 280m ³ /min | 76% | 74.7%（72～76%/3社） |
| 鋼板製直結式 多段ターボブロワ | 35m ³ /min | 61% | 61%（61～61%/3社） |
| | 55m ³ /min | 65% | 65%（65～65%/3社） |
| 歯車増速式 単段ターボブロワ | 65m ³ /min | 66% | 66.7%（66～67%/3社） |
| | 100m ³ /min | 70% | 70%（70～70%/3社） |
| ロータリ（ルーツ式） ブロワ | 15m ³ /min | 54%～ | 65.3%（53～88%/4社） |
| | 30m ³ /min | 57～59% | 64.7%（56～85%/4社） |
| 高速軸浮上式 ターボブロワ | 65m ³ /min | 69% | 71%（71～71%/3社） |
| | 105m ³ /min | 72% | 72.3%（69～74%/3社） |

※鋳鉄製直結式多段ターボブロワ、鋼板製直結式多段ターボブロワ、歯車増速式単段ターボブロワ、ロータリ（ルーツ式）ブロワは全断熱効率を、高速軸浮上式ターボブロワは総合効率を各々記載。

③ 水中攪拌式曝気装置

水中攪拌式曝気装置は、いずれの機種もメーカーによるばらつきが大きいですが、表5-4に記載のとおり、タンク容量350m³では、設計要領に記載の攪拌動力密度と比較して平均値で0.6ポイント程度上回っていた。しかし、タンク容量480m³および640m³では、各メーカーの調査結果の平均値は設計要領に記載の攪拌動力密度を下回っていた。なお、周波数における差異は見られなかった。

表5-4 水中攪拌式曝気装置に関するヒアリング調査結果

| 対象機種 | | 設計要領の ポンプ効率 | ヒアリング調査結果 平均値（範囲/回答社数） |
|---------------|---|--------------------|---|
| 水中攪拌式 曝気装置 | タンク容量350m ³ ×縦横比 1:1.1以下×水深5m | 6W/m ³ | 6.6 W/m ³ (5～10.57W/m ³ /4社) |
| | タンク容量480m ³ ×縦横比 1:1.5以下×水深5m | 8W/m ³ | 7.4 W/m ³ (5～11.46W/m ³ /4社) |
| | タンク容量640m ³ ×縦横比 1:2以下×水深5m | 10W/m ³ | 8.4 W/m ³ (6～11.46W/m ³ /4社) |

(4) まとめ

本検討では、下水処理場で使用されている機器・装置の脱炭素化性能について現状の技術水準を把握するため、JSの機械設備標準仕様書に記載の機器を対象に、効率などに関するヒアリング調査を実施した。各メーカーから得られた調査結果を、設計要領に記載の効率などと比較した。

主ポンプにおけるポンプ効率は、概ね同等または若干下回っていた。送風機では機種により結果が異なり、鋳鉄製または鋼板製直結式多段ターボブロワおよび歯車増速式単段ターボブロワでは概ね同等または若干下回っていたが、ロータリ（ルーツ式）ブロワはメーカーによるば

らつきがあるものの大きく上回っていた。また、高速軸浮上式ターボブロワは、概ね同等またはやや上回っていた。水中攪拌式曝気装置については、タンク容量 350m³ 規模では若干上回っていたが、480m³ や 640m³ 規模ではやや下回っていた。

今後は、本検討結果を含めて技術的な知見を蓄積し、JS 基準類の改善を図っていく予定である。

5.2 脱炭素化技術の体系化

(1) 検討の概要

本検討は、下水道分野の脱炭素化に向けた案件形成支援を JS の新たな業務メニューに加えることを想定し、対象とする下水処理場の条件に応じて脱炭素化技術の導入効果を簡易に推定・評価する手法を確立するものである。全体で2か年度の調査研究を予定しており、本年度は脱炭素化技術の体系的な整理および脱炭素化技術の導入効果推定方法の検討を行い、次年度は脱炭素化技術の導入効果推定方法の検証およびケーススタディを実施する計画としている。

2022年度：脱炭素化技術の体系的な整理、脱炭素化技術の導入効果推定方法の検討

2023年度：脱炭素化技術の導入効果推定方法の検証、ケーススタディの実施

(2) 検討方法

① 脱炭素化技術の体系的整理

現行で利用可能な脱炭素化技術を抽出し、導入可能な処理場規模、水処理/汚泥処理の対象分野、効果種別（省エネ、創エネ、再エネ利用、N₂O 対策）などに基づき分類した。また、各技術に対して、従来技術と比較した GHG 排出削減効果を整理し、脱炭素化技術リストを作成した。対象技術は、調査時点で実用化されている技術を基本とし、従来から採用されている標準的な技術および公的な評価を受けた新技術とした。なお、機器・装置などの整備によるハード対策に加えて、運転管理方法などのソフト対策も対象とした。具体的には、表5-5に示す公表資料から計400技術を洗い出し、表5-6の分類に従って整理すると共に、技術ごとの GHG 排出削減効果などをとりまとめた。各公表資料に GHG 排出削減効果の記載が無い場合は、技術保有企業の Web サイトや技術カタログの調査または個別ヒアリング調査による情報収集を行った。

表5-5 対象技術を抽出した公表資料

| 番号 | 調査対象技術抽出公表資料 | 対象技術数 |
|----|---|-------|
| ① | 日本下水道事業団 選定新技術 | 40 |
| ② | 国土交通省 下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト) | 41 |
| ③ | 日本下水道新技術機構 令和3年度審査証明技術 | 58 |
| ④ | 日本下水道新技術機構 低炭素下水道システム・創エネ・再生可能エネルギーに関する技術 | 36 |
| ⑤ | 環境省 温室効果ガス排出削減等指針(下水道) | 90 |
| ⑥ | 経済産業省資源エネルギー庁 上下水道事業等の事業の中長期計画作成指針 | 135 |
| | 合計 | 400 |

注)対象技術数には重複がある。

表5-6 脱炭素化技術の分類項目

| | |
|------|---|
| 施設規模 | 大規模(50,000m ³ /日以上) 中規模(10,000～50,000m ³ /日) 小規模(10,000m ³ /日以下) その他(管路、ポンプ場など) |
| 分野 | 水処理(標準法) 水処理(OD法) 水処理(高度処理) 汚泥処理(濃縮・脱水) 汚泥処理(消化) 汚泥処理(焼却・燃料化) 維持管理 |
| 効果種別 | 省エネ 創エネ 再エネ利用 N ₂ O対策 |
| 対策種別 | ハード対策 ソフト対策 |

② 導入効果推定方法の検討

①で作成した脱炭素化技術リストをデータベースとして利用し、下水処理場の規模や処理方式に応じて適用可能な技術を絞り込むと共に、これらの技術を導入した場合の GHG 削減量を算出するツール（以下、「導入効果算出ツール」と表記）の開発を行った。本ツールの作成に当たっては、統計情報などを活用して処理場全体および処理プロセスごとの GHG 排出量を推定し、適用可能な脱炭素化技術の絞り込みとその効果の評価を簡易に行えることを目指した。なお、処理場全体の GHG 排出量の推定は、環境省・国土交通省が策定した「下水道における地球温暖化対策マニュアル」³²⁾（以下、「地球温暖化対策マニュアル」と略記）の考え方を基本とし、同マニュアルの参考資料「温室効果ガス排出量計算シート」を基にした。

(3) 検討結果

① 脱炭素化技術の体系的整理

表5-1に示した公表資料に記載のある400技術のうち、重複を除いた361技術を対象に、表5-6の分類に従って整理した結果、表5-7のとおりとなった。この分類結果に個別技術のGHG排出削減効果を加えて脱炭素化技術リストとし、次項に示す導入効果算出ツールに利用した。

表5-7 対象技術の整理結果

| 分類項目 | | 技術数 (のべ数) |
|------|-------------------------------------|--------------|
| 施設規模 | 大規模(50,000m ³ /日以上) | 110 |
| | 中規模(10,000~50,000m ³ /日) | 115 |
| | 小規模(10,000m ³ /日以下) | 83 |
| | その他(管路、ポンプ場等) | 3 |
| 分野 | 水処理(標準法) | 86 |
| | 水処理(OD法) | 3 |
| | 水処理(高度処理) | 29 |
| | 汚泥処理(濃縮・脱水) | 45 |
| | 汚泥処理(消化) | 39 |
| | 汚泥処理(焼却・燃料化) | 56 |
| | 維持管理 | 20 |
| 効果種別 | 省エネ | 333 |
| | 創エネ | 50 |
| | 再エネ利用 | 18 |
| | N ₂ O対策 | 21 |
| 対策種別 | ソフト対策 | 79 |
| | ハード対策 | 297 |

② 導入効果推定方法の検討

地球温暖化対策マニュアルの参考資料「温室効果ガス排出量計算シート」を基に、図5-1に示す算出ステップで構成される導入効果算出ツールを作成した。

Step 1 処理場全体及び処理プロセスごとの温室効果ガス排出量の算出

処理場の基礎データ(処理水量、電力・燃料消費量、下水汚泥量、上工水・薬品等の使用量)から算出

Step 2 脱炭素化技術(温室効果ガス排出抑制対策)の抽出

脱炭素化技術リストを利用して、対象処理場に適用可能な技術を抽出

Step 3 脱炭素化技術の導入(対策実施)による排出削減量の算出

処理場全体の温室効果ガス削減量
 $= \sum(\text{従来技術による温室効果ガス排出量} \times \text{削減効果}(\%))$

図5-1 導入効果算出ツールの算出ステップ

Step 1 では、統計情報などを用いて対象処理場の基礎データを入力することで、処理場全体および設備（図5-2 1)の左端列)ごとの GHG 排出量を算出することができる。計上対象とする GHG 排出量は、地球温暖化対策マニュアルを参考に以下のとおりとした。

- ・ エネルギーの消費に伴う温室効果ガス排出量
- ・ 施設運転に伴う処理プロセスからの温室効果ガス排出量
- ・ 上水、工業用水、薬品などの消費に伴う温室効果ガス排出量

- ・ 下水道資源の有効利用に伴う温室効果ガス削減量（負の排出量として計上）

Step 2 では、①で作成した脱炭素化技術リストをデータベースとして利用し、対象とする下水処理場の基本情報や条件に基づき、適用可能な脱炭素化技術の検索・絞り込みを行う。絞り込まれた技術の概要や適用条件、GHG 排出削減効果などを確認して、当該処理場への導入が可能と思われる脱炭素化技術をツール利用者が抽出する。

Step 3 では、Step 2 で抽出された脱炭素化技術の導入効果について、処理場全体の GHG 排出削減量として算出する。本年度末時点での本ツールの出力イメージを図 5-2 に示す。

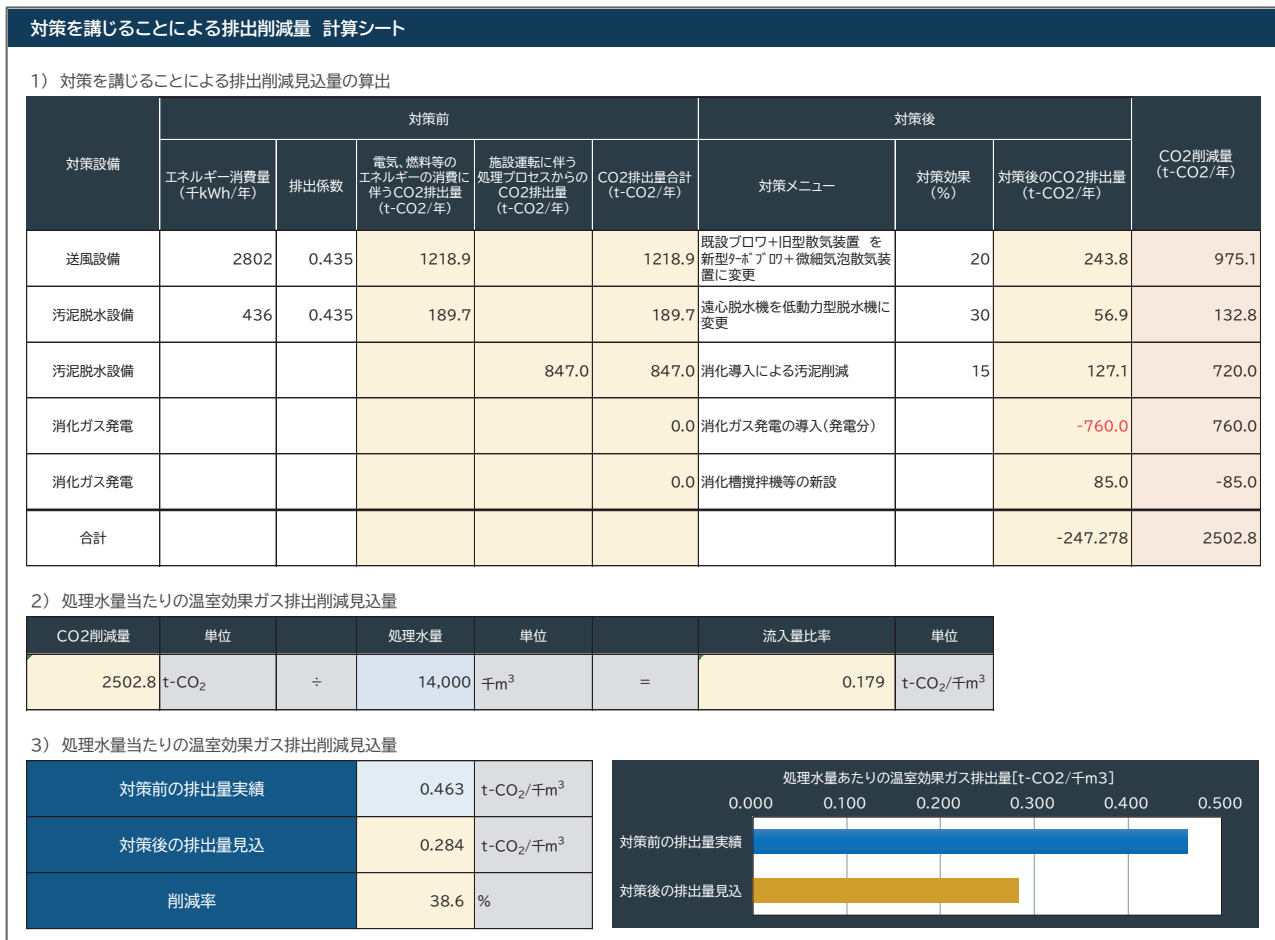


図5-2 導入効果算出ツールの出力イメージ

(4) まとめ

本検討では、下水道分野の脱炭素化に向けた案件形成支援を JS の新たな業務メニューに加えることを想定し、下水道分野の脱炭素化技術を体系的に整理して脱炭素化技術リストを作成した上で、これをデータベースとして活用する脱炭素化技術の導入効果算出ツールを開発した。地球温暖化対策マニュアルに掲載されている地球温暖化対策推進計画の策定フローは、本算出ツールを活用することで図 5-3 に示すものとなり、各下水処理場の目標の設定や GHG 排出抑制対策の選定の一助になることが期待される。次年度は、本年度の検討に続き、導入効果推

定方法の検証およびケーススタディを実施することで、導入効果算出ツールの操作性や情報の網羅性を向上させる予定である。

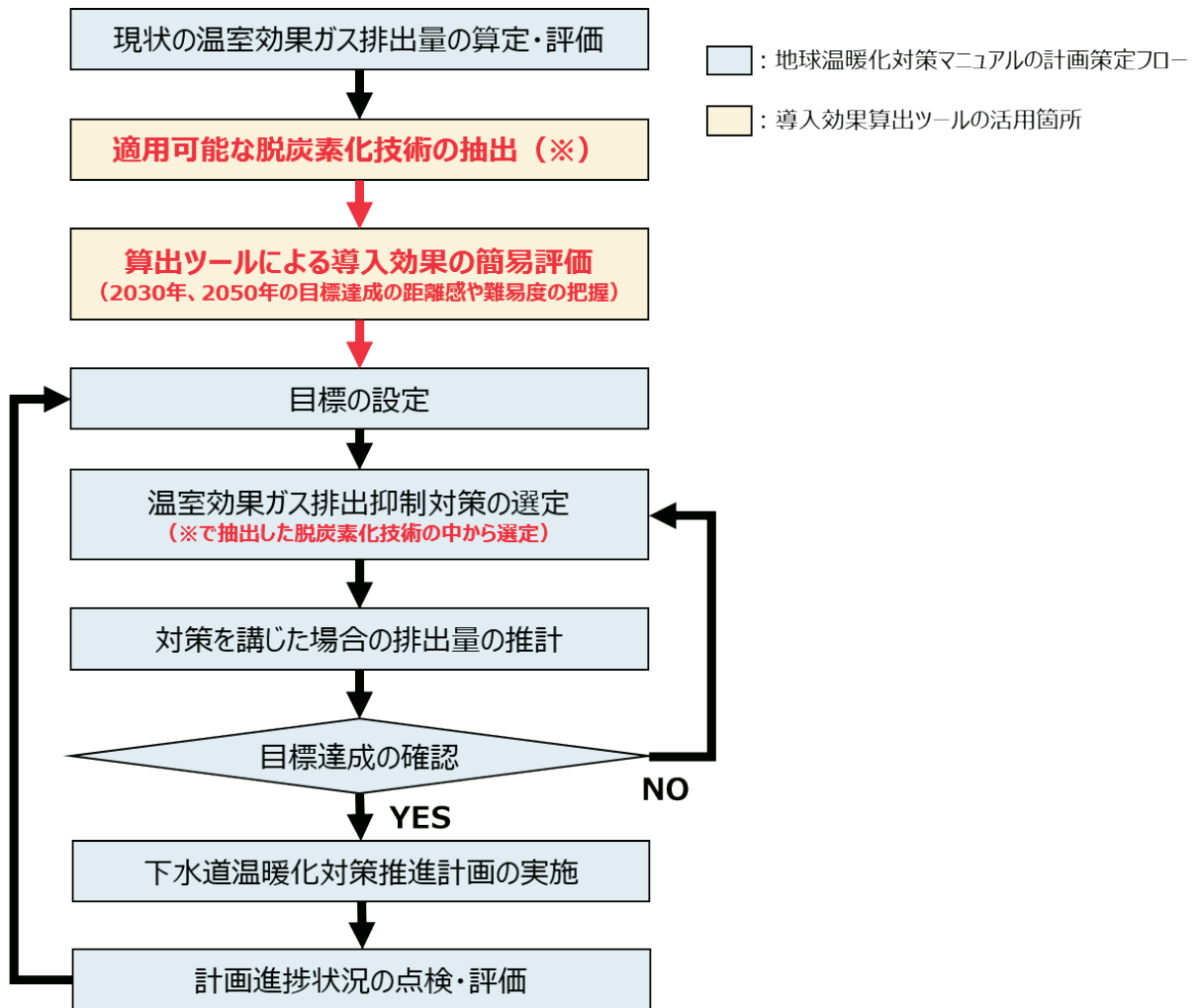


図5-3 導入効果算出ツールを活用した計画策定フロー(案)

5.3 モデル都市における脱炭素化方策の検討

国土交通省から委託を受けた「下水道のエネルギー自立化に向けた検討支援業務」（以下、「本支援業務」と略記）を通じて、JS と公益財団法人日本下水道新技術機構の共同研究により、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案件形成支援を実施する。

(1) 検討の概要

国土交通省から委託を受けた本支援業務を通じて、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案件形成支援を実施した。本支援業務は、モデル都市の下水道分野における脱炭素化に道筋を付け、省エネ対策の実施や創エネ・再エネの導入を支援すること、並びにその知見を全国に展開することで、下水道事業における脱炭素化の推進と持続可能性の向上に資することを目的としたものである。

（2）検討方法

都市規模や既存の下水道施設などを考慮して選定された下水処理場を対象に、適用可能な省エネ・創エネ・再エネ施策（以下、「脱炭素施策」と略記）の検討とその導入前後の脱炭素化効果の評価、更に脱炭素施策の事業化に向けた計画策定を支援した。本支援業務の検討フローを図 5-4 に示す。

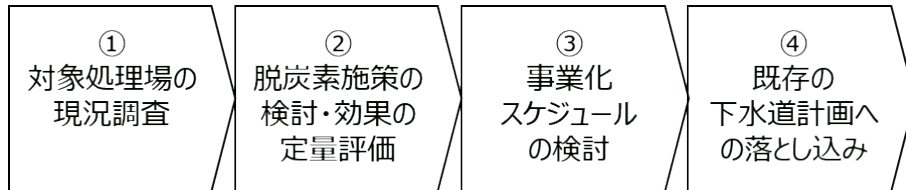


図5-4 案件形成支援における検討フロー

① 対象処理場の現況調査

検討対象とする下水処理場の規模、処理方式、現有施設などを確認すると共に、現状の運転方法に係る情報や維持管理データなどの提供を受け、当該処理場における 2013 年度および最新のエネルギー使用状況および GHG 排出状況を把握した。

② 脱炭素施策の検討・効果の定量評価

現況調査結果に基づき、対象処理場に適用可能な脱炭素施策をリストアップし、これらの導入効果を 2013 年度比の GHG 排出量により定量的に評価（見える化）した。

③ 事業化スケジュールの検討および④既存の下水道計画への落とし込み

②でリストアップした各脱炭素施策について、導入施設・設備の規模と経済性の概略検討を行った。また、事業計画やストックマネジメント計画などの現行計画における各施策の導入予定を確認し、導入を計画していない場合は将来計画への位置付けを検討すると共に、モデル都市が実施可能なロードマップ案を作成した。

（3）検討結果

本支援業務の結果は国土交通省のホームページにおいて『モデル都市・地域を対象とした脱炭素化案件形成支援』の事例集³³⁾として公開されているため、本報告書では検討結果の一例を示す。

① 対象処理場の現況調査

2018 年度から 2022 年度に国土交通省の「下水道エネルギー拠点化コンシェルジュ事業」で採択された地方公共団体や、地球温暖化対策推進法に基づく実行計画において下水道の取り組みを位置付けている地方公共団体などから、国土交通省により選定された表 5-8 に示す 8 団体 10 処理場を対象とした。本項目では、各処理場の処理規模・方式や保有施設などを確認すると共に、施設の運転条件などを確認して各処理場における 2013 年度および最新のエネルギー使用状況および GHG 排出状況を把握した。

表5-8 本年度に選定したモデル処理場（都市名は非公表）

| No. | モデル都市 | 処理場名 | 日平均流入水量 (R1下水道統計) | 水処理方式 | 汚泥処理方式 |
|-----|-------|---------|---------------------------|---------------|-------------|
| 1 | A | A 1 処理場 | 約210,000m ³ /日 | 標準法 | 濃縮・脱水・焼却 |
| 2 | B | B 1 処理場 | 約150,000m ³ /日 | 標準法 一部高度処理 | 濃縮・消化・脱水・焼却 |
| 3 | C※ | C 3 処理場 | 約30,000m ³ /日 | 標準法 | 濃縮・消化・脱水・炭化 |
| | | C 4 処理場 | 約14,000m ³ /日 | 標準法 | 濃縮・消化・脱水 |
| 4 | D | D 1 処理場 | 約11,000m ³ /日 | 標準法 | 濃縮・脱水 |
| | | D 2 処理場 | 約37,000m ³ /日 | 標準法 | 濃縮・脱水 |
| 5 | E | E 1 処理場 | 約27,000m ³ /日 | 標準法 | 濃縮・消化・脱水 |
| 6 | F | F 1 処理場 | 約2,200m ³ /日 | OD法 | 濃縮・脱水 |
| 7 | G | G 1 処理場 | 約33,000m ³ /日 | 標準法 | 濃縮・消化・脱水 |
| 8 | H | H 1 処理場 | 約16,000m ³ /日 | 標準法 | 濃縮・消化・脱水 |

※C 1、C 2 処理場は 2021 年度に選定したため、本年度はC 3、C 4 処理場を対象とした。

② 脱炭素施策の検討・効果の定量評価

対象処理場に適用可能な脱炭素施策をリストアップした上で、各施策について表5-9に示すような電力消費量の試算に加えて創エネ量や再エネ量を検討し、これを元に表5-10のように、全施策を総合した2030年度および2050年度におけるGHG排出量と、2013年度比のGHG排出量削減率を算出した。なお、固形燃料化やコンポストなど、下水道分野以外のGHG排出量削減に貢献する施策の効果は、本支援業務では原則として導入効果に加味せずに参考扱いとした。

表5-9 適用可能な省エネ対策の検討と効果の定量評価(例)

| 設備 | 省エネ区分 | 省エネ対策 | 削減エネルギー (千kWh/年) | 消費エネルギー (千kWh/年) | |
|------|---------|------------------------------|---------------------|---------------------|-------|
| | | | | 改善前 | 改善後 |
| 主ポンプ | 運転手法の改善 | 号機選択及び号機毎の最低送水量の見直し | 97 | 979 | 861 |
| | 省エネ機器 | 主ポンプの更新（主ポンプ用電動機の高効率化） | 21 | | |
| 送風機 | 運転手法の改善 | 号機選択の見直し | 128 | 1,861 | 1,164 |
| | 運転手法の改善 | 水路曝気等送風量の削減 | 106 | | |
| | 省エネ機器 | 散気装置を高効率散気装置（全面曝気）に更新 | 417 | | |
| | 省エネ機器 | 送風機更新（送風機用電動機の高効率化） | 46 | | |
| 水処理 | 運転手法の改善 | 水中攪拌機的好気運転の取り止め＋間欠運転 | 7 | 812 | 614 |
| | 運転手法の改善 | 返送汚泥ポンプの回転速度低減（プーリ交換又はVVVF化） | 182 | | |
| | 省エネ機器 | 水中攪拌機を省エネ型反応タンク攪拌機（＋散気装置）に更新 | 9 | | |
| 汚泥処理 | 省エネ機器 | 1系消化タンク省エネ型消化槽攪拌機へ更新 | 8 | 1,130 | 903 |
| | 省エネ機器 | 2系消化タンク省エネ型消化槽攪拌機へ更新 | 220 | | |
| その他 | - | - | - | 479 | 479 |
| 合計 | | | 1,241 | 5,261 | 4,020 |

表5-10 脱炭素化効果の試算結果(例)

| 項目 | | 単位 | 2013年度 | 2030年度 | 2050年度 |
|-------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------|----------------|----------------|
| GHG排出量 | | t-CO₂/年 | 6,422 | 3,467 | 3,261 |
| 電気・燃料等のエネルギー消費に伴うGHG排出量 | | | 5,565 | 2,726 | 2,608 |
| 施設の運転に伴う処理プロセスからのGHG排出量 | | | 858 | 830 | 741 |
| 下水道資源の有効利用に伴うGHG排出量の削減 | | | 0 | ▲ 88 | ▲ 88 |
| GHG削減率 | | % | - | 46 | 49 |
| 参考 | 外部貢献の評価 | t-CO₂/年 | - | ▲ 3,143 | ▲ 3,143 |
| | 固形燃料化物の石炭代替による効果 | | | ▲ 2,963 | ▲ 2,963 |
| | 繊維利活用システムの導入に伴うセメント工場の燃料削減効果 | | | ▲ 180 | ▲ 180 |
| | 外部貢献を加味したGHG削減率 | % | - | 95 | 98 |

③ 事業化スケジュールの検討および④既存の下水道計画への落とし込み

②でリストアップした各脱炭素施策について、導入施設・設備の規模と経済性の概略検討を行うと共に、地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地方公共団体実行計画、下水道事業計画、下水道事業経営戦略、ストックマネジメント計画などの現行計画を確認し、モデル都市に適用可能な脱炭素施策の導入時期を検討した。これらのうち、現行計画に既に盛り込まれているものは同計画のとおり、現行計画に盛り込まれていないものは次期計画以降に事業化できるように、図5-5に示すようなロードマップ案を作成した。

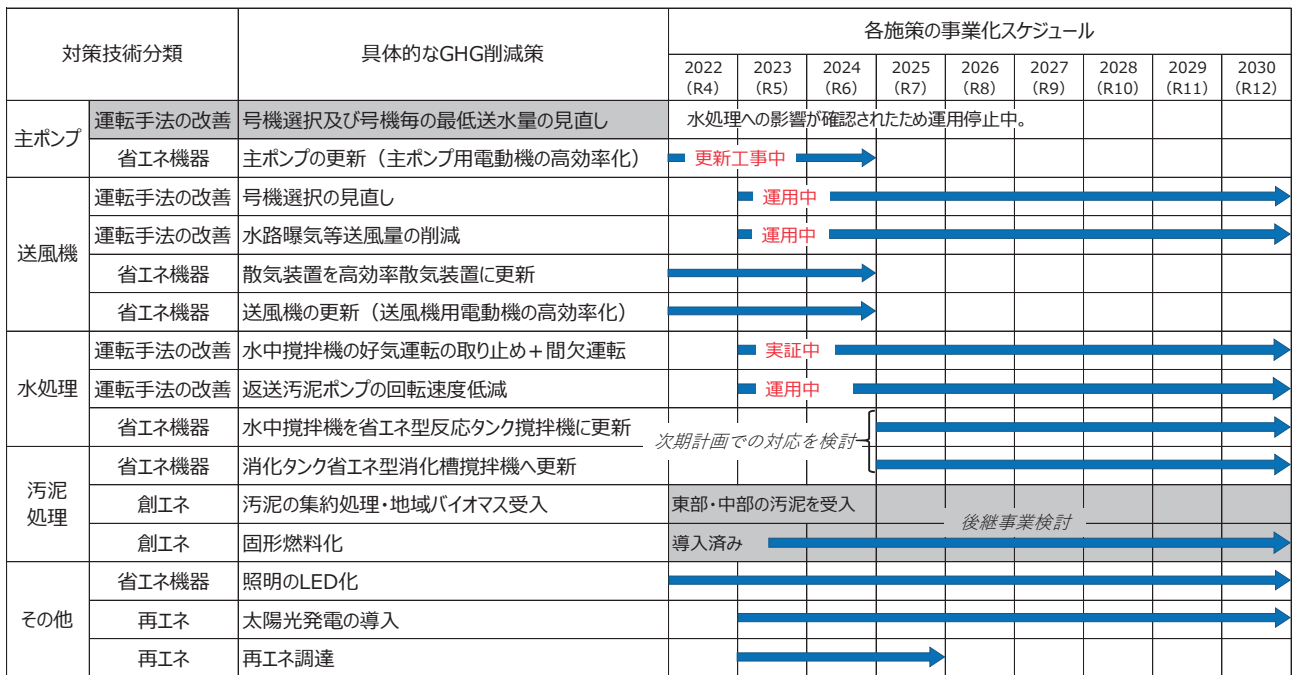


図5-5 モデル処理場のロードマップ案(例)

(4) まとめ

本検討では、国土交通省の委託業務を通じた案件形成支援の実施により、下水道分野の脱炭素化に向けて、短期間での脱炭素施策（省エネ対策の実施や創エネ・再エネの導入）の実現を

図るための道筋を付けることができた。中でも、モデル都市 C の C 3 処理場においては、本支援業務の成果を活用して国土交通省の「カーボンニュートラル地域モデル処理場計画」に応募し、登録された。また、モデル都市 G の G 1 処理場では、本支援業務の結果を踏まえて、PPA* モデルを活用した太陽光発電事業に着手した。このほかのモデル都市においても、本支援業務の結果が下水道分野や地域の脱炭素化に向けた計画などに活用された。

一方で、本年度に採択された 8 団体と協議する中で、今後、下水道分野の脱炭素化を進めるに当たっての課題も明らかとなった。

① 脱炭素化事業の優先度とインセンティブ

地方公共団体の事務事業の中でも GHG 排出量が多いと言われている下水道分野の取り組みは、2030 年目標の達成、2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて大いに期待されているところである。また、下水道資源を活用した発電事業や燃料化事業などによる地域貢献を含めると、そのポテンシャルが極めて大きいことは、下水道分野では十分に理解されている。しかしながら、脱炭素化を目的とした下水道使用料の改定や下水道事業費の増額は困難であるため、下水道機能の確保のための老朽化対策や雨水対策などと比較すると優先度が低くなっているのが実情である。したがって、地方公共団体に対する脱炭素化事業の優先度を高める施策、脱炭素化事業推進に対するインセンティブを付与する施策が求められる。

② GHG 削減の外部貢献の見える化

地球温暖化対策計画では、下水道分野の施策の一つとして下水汚泥エネルギー化率の向上により約 70 万 t-CO₂ の GHG 削減を目標としており、これは消化ガス発電の FIT 制度[†]の活用や固形燃料化などを見込んだものである。また、「脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会」では、他分野への貢献度の見える化に取り組む[‡]こととしており、外部貢献を定量的に評価すべきと考えられている。しかしながら、外部貢献分を地方公共団体実行計画の目標値として位置付けている例はほとんど無い。したがって、外部貢献の評価方法が確立されることを期待する一方で、実行計画を所管している環境部局と下水道部局との連携により、下水道分野の脱炭素社会への貢献を見える化していく必要があると考えられる。

* PPA：電力販売契約

環境省のホームページ (<https://ondankataisaku.env.go.jp/re-start/howto/03/>) では、「PPA (Power Purchase Agreement) とは電力販売契約という意味で第三者モデルともよばれています。」と概説している。

† FIT 制度：再生可能エネルギーの固定価格買取制度

経済産業省資源エネルギー庁のホームページ

(https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/surcharge.html) では、「再生可能エネルギーで発電した電気を、電力会社が一定価格で一定期間買い取ることを国が約束する制度」と概説されている。

‡ 「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～」では、「各処理場の水・資源・エネルギーのポテンシャルやその利活用の状況、温室効果ガス排出や削減に向けた取組状況、各種の連携状況、他分野への貢献度など、脱炭素化に向け下水道事業のあらゆる「見える化」に取り組む。」としている。

6. 検討結果の総括

6.1 本年度の成果

(1) 水処理省エネ化技術

① 開発動向調査・実態調査(オキシレーションディッチ法の運転実態調査)

OD 法施設の運転方法・条件や処理状況などの現状を把握し、OD 法の省エネ化に資する新たな技術開発の注力点や開発目標の検討に活用することを目的として、全国の OD 法施設を対象とした実態調査を実施し、以下のことが確認できた。

- 現有処理能力、汚水流入率、エアレーション装置の好気時間・停止時間といった因子と消費電力量原単位との関連性を解析したが、処理場間のばらつきが大きく明確な影響因子を見出すには至らなかったため、複数因子の複合的な影響を考慮する必要があると考えられた。
- 消費電力量原単位が比較的低い処理場においても放流水質の悪化は見られず、放流水質を悪化させることなく消費電力量原単位を低く維持した運転が可能であることが示唆された。

② 小規模省エネ化技術の開発・実証

回転繊維ユニット RBC を用いた下水処理技術の実規模実証実験を開始し、約 6 ヶ月間の省エネ性能試験より以下の結果が得られた。

- 実証系列において曝気時間を段階的に短縮し運転を行ったが、処理水 BOD 濃度は実証・対照系列で各々平均 2.3、1.5mg/L であり、処理水 NH₄-N 濃度は各々平均 1.7、1.4mg/L と、同等の水質が得られた。
- 消費電力量原単位は実証・対照系列で各々平均 0.26、0.31kWh/m³ であり、実証系列は対照系列に比べて平均 15.3%削減できた。

③ アナモックス併用高度処理の基礎実験

循環式硝化脱窒法に一槽式アナモックス処理を組み込む「MLE+アナモックス法」について、微好気槽（一槽式アナモックス処理）で使用する担体サイズなどの影響、担体法に対して活性汚泥を併用することによる影響、の 2 点を確認するラボ実験を実施した。

- 一槽式アナモックス処理では、担体のサイズが小さい方が窒素除去性能の見地からは有利であると考えられた。
- 短期間の実験結果ではあるものの、微好気槽における担体による一槽式アナモックス処理に対して、活性汚泥を併用しても顕著な悪影響が生じない可能性を示す結果を得た。

④ 省エネ型深槽曝気技術の実規模実証(B-DASH)

深槽式反応タンクにおいて「深槽全面エアレーション」を行うことで送風機動力の削減や建設費・維持管理費の縮減などを図る「省エネ型深槽曝気技術」の実規模実証について、実証設備の製作および実証フィールドへの設置を進めた。

（2）バイオガス活用技術

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、高温消化および中温消化のラボスケールでの連続消化実験を 46 日間行い、消化特性の違いについて検証を行った。

- RUN1-1（中温消化、10d）では、実験開始後 17 日目頃からガス発生量が急激に低下しており、消化日数が短く投入有機物量が過負荷であったため、メタン発酵阻害が生じたと考えられた。一方で、RUN2-1（高温消化、10d）ではガス発生量の低下は確認されなかったことから、中温消化と比べて高温消化の方がより短い消化日数で運転可能である点が改めて確認された。
- RUN2-1（高温消化、10d）の投入 VS 当りガス発生量は 456L/kg-VS であり、RUN2-2（高温消化、20d）や RUN1-2（中温消化、20d）と比べて 20～30%程度低い値であった。
- RUN2-1（高温消化、10d）の VS 減少率は平均 62%であり、RUN2-2（高温消化、20d）や RUN1-2（中温消化、20d）と比べて低い値であった。
- RUN2-1（高温消化、10d）の消化汚泥中には平均 1,350mg/L の有機酸が存在していたことから RUN1-1 のような急激なガス発生量の低下は生じていないが、わずかにメタン発酵阻害が発生していた可能性があると考えられる。

③ バイオガス創出・活用技術の開発・実証

新たに「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」の共同研究の公募を開始し、以下の 1 技術に係る共同研究者を選定した。

- 集中加温システムとステンレス合板製消化タンクを用いた低コスト消化技術の開発
（共同研究者：メタウォーター㈱）

（3）事後評価調査・技術評価（脱炭素化技術）

① JS 新技術の事後評価調査・技術評価（脱炭素化技術）

➤ OD 法における二点 DO 制御システム

本技術の処理性能や導入効果などを検証するために、流入水・処理水の水質分析や消費電力量のモニタリングなど、長期の事後評価調査を実施した。

- 本技術が導入された調査池では、2021 年 12 月から 2022 年 6 月までは、OD 槽内 2 箇所の DO 濃度が設定値（DO1：1.0mg/L、DO2：0.2mg/L）近傍で推移しており、好気ゾーン比も 50%程度と、良好に好気・無酸素ゾーンが形成されていたと推測された。一方、7 月以降は DO 濃度が設定値を外れることが多くなった。8 月下旬から 10 月上旬の期間には設定値からの乖離がとりわけ大きくなったが、これは DO 計のセンサ部分に汚泥が付着し、正常にデータを取得できていなかったためと推測された。
- 本技術未導入の対照池では処理水 BOD 濃度が期間平均で 6.9mg/L であったのに対して、調査池では 3.4mg/L であり、調査池においては約 1.5 倍の流入負荷があるにも関わらず安定して有機物が除去されていた。

- 調査池において、好気ゾーン比が 50%程度で安定して好気・無酸素ゾーンが形成されていた期間には、良好に硝化・脱窒が進行していた。一方、DO 濃度が設定値から外れ好気ゾーン比が上昇した期間には、NO₃-N の残留に伴い処理水 T-N 濃度が上昇した。
- 月別の流入水量当りの消費電力量原単位について、対照池では 1.17~1.37kWh/m³、調査池では 0.18~0.39kWh/m³ であり、同系における削減率は 70~84%と計算された。一方、対照池の曝気装置 1 日当り運転時間が概ね 24hr と過大であった可能性が高いと判断し、流入水質などから推定される必要酸素量と曝気装置の定格酸素供給能力に基づき、必要酸素量に見合った最低限の曝気装置運転時間を月毎に推定すると 11~16hr となった。この運転時間を仮定して対照池の消費電力量原単位を補正したところ、0.61~0.88kWh/m³ と計算された。これを比較対象とした場合の調査池における消費電力量原単位の削減率は 41~66%へと低下するが、それでも十分な省エネ効果が得られていると言える。

➤ 次世代型焼却炉システム

JS 新技術のうち、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、階段炉による電力創造システムの事後評価調査を、アンケート調査またはヒアリング調査により実施した。

- 実稼働施設は、各処理場個別の実績に応じた運転管理が行われていた。
- そのため、一部の施設で技術資料に記載の性能値を満足していなかったが、概ね良好な運転状況であった。

➤ 鋼板製消化タンク

「パッケージ型鋼板製消化タンク」を対象として、建設工期、運転状況および省エネ性能、不具合とその対策事例などに関する事後評価調査を実施した。

- 一般的な同容量のコンクリート製消化タンクの現地工事期間は基礎工事を含めて 3 年程度であるのに対し、本技術での現地工事期間は 1 年 3 ヶ月であった。
- 消化タンクの稼働後の約 3 年間の実績を確認したところ、安定した嫌気性消化運転が行われていたと考えられる。また、分解 VS 当りの消費電力量を推定したところ、年平均値で 104.8~126kWh/Δt-VS であり、国土交通省の通知が示す性能指標値（280kWh/Δt-VS 以下）を満足していた。
- テレスコープ弁を経由する消化汚泥引抜管のステンレス製配管部分で MAP による閉塞トラブルが発生しており、配管のクエン酸洗浄、樹脂製管や合成樹脂ライニング管への変更、配管の二条化といった対策を検討しているとのことであった。その他、異常発泡は年に 1 回程度発生しており、消泡ノズルから散水することで対応していた。

➤ 嫌気性消化技術の運転管理に関する実態調査

嫌気性消化施設を有する下水処理場を対象にアンケート調査を実施し、不具合や運転管理状況などについて整理した。

- 維持管理に係る不具合は、MAP による配管閉塞、異常発泡・スカム、酸敗の順に発生事例が多かった。特に MAP については、有効回答（n=213）のうち 34%の下水処理場で年に 1 回以上の MAP 発生を経験しており、維持管理の負担になっていることが明らかとなった。

- 汚泥濃縮工程で無機凝集剤を添加している下水処理場では、未添加または濃縮工程以外で添加している下水処理場と比べて脱硫装置前の硫化水素濃度が低い傾向にあることが確認された。
- 消化タンクの定期的な開放点検を実施している下水処理場は 11%に留まっており、消化タンクの保有数に比例して解放点検を実施している処理場の割合が高くなる傾向が見られた。

（4）脱炭素化推進方策

① 脱炭素化性能指標の実態などに関する調査

下水処理場で使用されている機器・装置の脱炭素化性能について、JS の機械設備標準仕様書に記載の機器を対象に、効率などに関するヒアリング調査を実施した。

- 主ポンプ設備におけるポンプ効率は、設計容量に記載のポンプ効率と比較して概ね同等または若干下回った。
- 送風機設備では機種により結果が異なり、鋳鉄製または鋼板製直結式多段ターボブロワおよび歯車増速式単段ターボブロワは設計要領に記載の全断熱効率と比較して概ね同等または若干下回っていた。ロータリ（ルーツ式）ブロワはメーカーによるばらつきがあるものの設計要領に記載の全断熱効率を大きく上回っていた。また、高速軸浮上式ターボブロワは、設計要領に記載の総合効率と概ね同等またはやや上回った。
- 水中攪拌式曝気装置については、タンク容量 350m³ 規模では設計要領に記載の攪拌動力密度を若干上回っていたが、480m³ や 640m³ 規模ではやや下回った。

② 脱炭素化技術の体系化

下水道分野の脱炭素化に向けた案件形成支援を JS の新たな業務メニューに加えることを想定し、下水道分野の脱炭素化技術の体系的な整理および脱炭素化技術の導入効果推定方法の検討を実施した。

- 国土交通省、日本下水道新技術機構、JS などの公表資料より抽出した脱炭素化技術を体系的に整理し、脱炭素化技術リストを作成した。
- 脱炭素化技術リストをデータベースとして活用する脱炭素化技術の導入効果算出ツールを開発した。

③ 脱炭素案件形成支援業務

国土交通省の委託業務を通じて、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 8 団体を対象とした案件形成支援の実施により、短期間での脱炭素施策の実現を図るための道筋を付けることができた。中でも以下の 2 件については早期の事業化に貢献した。

- モデル都市 C の C 3 処理場においては、本支援業務の成果を活用して国土交通省の「カーボンニュートラル地域モデル処理場計画」に応募し、登録された。
- モデル都市 G の G 1 処理場では、本支援業務の結果を踏まえて、PPA モデルを活用した太陽光発電事業に着手した。

6.2 今後の予定

(1) 水処理省エネ化技術

- 開発動向調査・実態調査：本年度に収集した OD 法の運転実態調査データについて詳細な解析を進め、消費電力量に影響を与える複数因子の複合的な影響などを明らかにする。加えて、水処理省エネ化技術について、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を実施し、最新の研究・技術開発動向を調査する。
- 小規模省エネ化技術の開発・実証：RBC-OD 法の実証実験を継続し、年間を通じた負荷増強試験を行うと共に、RBC 装置での有機物負荷低減機構を明確にするための実験的検討を行う。
- アナモックス併用高度処理の基礎実験：ラボ実験により MLE+アナモックス法における活性汚泥併用による影響に係る知見を蓄積すると共に、実下水を用いたベンチスケールの連続処理実験を行う。
- 省エネ型深槽曝気技術の実規模実証 (B-DASH)：実証設備を稼働させて実証実験を開始し、消費電力量および温室効果ガス排出量の削減効果を検証すると共に水処理性能への影響について確認する。その他、 N_2O 発生量の調査など、各種調査・実験を進める。

(2) バイオガス活用技術

- バイオガス創出に係る基礎実験：RUN2-1（高温消化、10d）の消化汚泥中でメタン発酵阻害が生じた原因を明らかにするため、更なる知見を得る必要があり、今後、同様の実験を再度行う継続する予定である。
- バイオガス創出・活用技術の開発・実証：本年度に選定した共同研究の実証設備を建設し研究に着手すると共に、共同研究の公募を継続し、バイオガス創出・活用技術の開発を行う。

(3) 事後評価調査など

- JS 新技術の事後評価調査・技術評価（脱炭素化技術）：本年度未実施の次世代型焼却炉システム 4 技術の事後評価調査を実施する。また、嫌気性消化技術の運転管理に関する実態調査については、維持管理上の不具合が発生している下水処理場などを対象に追加調査を実施し、その原因の究明や対応策についての検討を進める。

(4) 脱炭素化推進方策

- 脱炭素案件形成支援業務：引き続き、国土交通省の委託業務などを活用し、地方公共団体への案件形成支援を実施する。

謝辞

2.4 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、各機関の関係者各位に感謝の意を表します。

2.1 節および 4.4 節に掲載した実態調査、5.1 節および 5.2 節に掲載したヒアリング調査、4.1 節、4.2 節および 4.3 節に掲載した事後評価調査にご協力いただいた民間企業および地方公共団体の関係者各位に感謝の意を表します。

2.3 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にご協力いただいた東洋大学の関係者各位に感謝の意を表します。

3.1 節に掲載した基礎実験の汚泥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) 環境省：地球温暖化対策計画，環境省，2021.
- 2) 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～，令和 4 年 3 月，国土交通省水管理・国土保全局下水道部，公益財団法人日本下水道協会，2022.
<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：下水道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) 日本下水道新技術機構：活性汚泥法等の省エネルギー化技術に関する技術資料，日本下水道新技術機構，2014.
- 5) 橋本敏一，渡邊航介，高村和典：省エネ技術導入による下水処理場の電力消費量削減効果の検討，第 56 回下水道研究発表会講演集，pp.635-637，2019.
- 6) 日本下水道事業団：オキシデーションディッチ法標準設計，日本下水道事業団，2010（JS 内部資料）.
- 7) 福井智大，茂木志生乃，糸川浩紀，柿沼建至，胡錦陽，茂庭忍，小原卓巳，大月伸浩：回転繊維ユニット RBC-OD 法の直列処理における除去性能及び省エネ効果，第 57 回日本水環境学会年会講演集，p.183，2023.
- 8) 柿沼建至，胡錦陽，茂庭忍，小原卓巳，大月伸浩，福井智大，糸川浩紀：回転繊維ユニット RBC-OD 法の省エネ及び能力増強性能，第 60 回下水道研究発表会講演集，pp.904-906，2023.
- 9) 柿沼建至，大月伸浩，小原卓巳，胡錦陽，伊藤司，山本瞬：回転繊維ユニット RBC による下水処理法の開発～実施設での処理性能評価～，第 57 回下水道研究発表会講演集，pp.61-63，2020.
- 10) 柿沼建至，大月伸浩，小原卓巳，胡錦陽，伊藤司，山本瞬：回転繊維ユニット RBC の異なる原水に対する処理性能評価，第 58 回下水道研究発表会講演集，pp.1-3，2021.
- 11) 村上弘毅，土井幸夫，青木満，入江鎌三：好気性し尿処理槽における *Bacillus spp.* の優占化とそれらの生化学的性質，水環境学会誌，Vol.18，No.2，pp.97-108，1995.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.

- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 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, No.11, pp.836-841, 1986.
- 21) 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, 2014.
- 22) 日本下水道協会: 下水試験方法 -2012 年版-, 日本下水道協会, 2012.
- 23) 国土交通省: 国水事第 38 号 下水道事業におけるエネルギー効率に優れた技術の導入について, 国土交通省, 2017.
- 24) 藤原拓, 町和雄, 陳小強, 川口幸男, 橋本敏一, 津野洋: 実規模高負荷二点 DO 制御 OD 法における下水処理性能の評価, 第 48 回下水道研究発表会講演集, pp.806-808, 2011.
- 25) 中町和雄, 藤原拓, 陳小強, 橋本敏一, 川口幸男, 津野洋: 高負荷二点 DO 制御 OD 法の消費電力, 第 48 回下水道研究発表会講演集, pp.812-814, 2011.
- 26) 山森隼人, 糸川浩紀, 畑田康助, 中町和雄: 高負荷二点 DO 制御 OD 法の消費電力, 第 60 回下水道研究発表会講演集, pp.955-957, 2023.
- 27) 日本下水道事業団: 既存施設活用による改築更新円滑化・処理能力増強(平成 29 年度~令和 3 年度) 報告書, pp.3-1-3-12, 2021.
- 28) 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説 -2019 年版- pp. 482, 498, 2019.
- 29) 下水道新技術推進機構: 汚泥消化タンク改築・修繕技術資料, p.137, 2017.
- 30) 日本下水道事業団: 機械設備標準仕様書, 令和 4 年度.
- 31) 日本下水道事業団: 設計要領機械設備編, 令和 4 年度.
- 32) 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~下水道部門における温室効果ガス排出抑制等指針の解説~, 環境省・国土交通省, 平成 28 年 3 月.
- 33) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部: モデル都市・地域を対象とした脱炭素化案件形成支援, 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 令和 5 年.

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001601844.pdf>

I-2 カーボンニュートラル型下水処理システムの開発

村岡正季、山本明広、新川祐二、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、GHG 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発生する GHG 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を実現する、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ラボスケールおよびベンチスケール規模の基礎実験までの実施を目標とし、次期計画期間中にパイロットプラント規模の実証試験などへ展開することを想定している。

1.2 開発項目

本開発課題では、以下の開発項目について技術開発を行う。

(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、これらに代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

* 「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。

「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、新規膜処理技術など）をさらに組み合わせるなど、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。」

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の開発動向調査などを実施すると共に、公募型共同研究や新たな技術開発プロジェクトによる基礎実験を実施する。

① 国内外の開発動向調査

文献などによる国内・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 要素技術・システムの目標性能などの検討

①の技術情報などに基づき、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た要素技術のシステム化や、③④の基礎実験を実施するために必要な要求性能などを検討する。

③ 要素技術・システム化基礎実験（共同研究）

新規共同研究などにより、カーボンニュートラル型下水処理システムのラボスケール又はベンチスケール実験を実施する。

④ 要素技術・システム化基礎実験（受託研究）

新規開発プロジェクトへの参画や技術開発実験センターへのプロジェクト誘致などにより、カーボンニュートラル型下水処理システムの基礎実験を実施する。

⑤ 成果集約・FS などの検討

①～④の成果をとりまとめると共に、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、1.2 節に記載の開発項目のうち、以下の 1 項目を実施した。

(1) カーボンニュートラル型下水処理システム

① 国内外の開発動向調査（2.1 節）

2. カーボンニュートラル型下水処理システム

2.1 国内外の開発動向調査

(1) 検討の概要

国内の多くの下水処理場で採用されている標準活性汚泥法やオキシデーションディッチ法などの好気性・浮遊型の生物処理法は、処理性能や処理水質の信頼性が高い技術である一方で、曝気や攪拌のための動力が大きく、下水処理場の消費電力量の約半分を占めている。また、水処理の過程で発生する汚泥は、一部の処理場で嫌気性消化や固形燃料化などによるエネルギー利用が行われているものの、一般には水分の除去による減容化を目的とした濃縮や脱水にとどまり、これらにかかる消費電力量も少なくない。したがって、下水道分野の 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、これらの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技術の開発と導入も必要である。

そこで、カーボンニュートラル型下水処理システムの開発における第一ステップとして、本年度は文献による国内外における技術シーズなどの開発動向を調査し、本システムの要素技術となり得る技術を抽出した。本検討は全体で 2 か年の調査研究を予定しており、本年度は文献などによる国内・海外の技術調査とシーズ技術の抽出を、次年度は抽出技術の詳細調査、海外下水道分野の趨勢調査、カーボンニュートラル型下水処理システムの開発ロードマップの作成を各々行う。

本年度：文献などによる国内・海外の技術調査とシーズ技術の抽出

次年度：抽出技術に関するヒアリングなどによる詳細調査

海外下水道分野における温室効果ガス排出量削減の趨勢調査

カーボンニュートラル型下水処理システムの開発に向けたロードマップ作成

(2) 検討方法

本検討では、下水や下水汚泥の処理技術に限定せず、国内外の排水処理分野全般における脱炭素化技術を対象に、文献データベース（ScienceDirect[†]）によるキーワード検索を行った。

表 2-1 に示す海外のレポートや、地球温暖化対策計画の下水道分野の目標設定項目を参考に、検索キーワードを抽出し、検索を実行した。

表 2-1 参照した主な文献

| 発行元 | タイトル | 発刊時期 |
|-----|--|------------|
| IWA | Pathways to Water Sector Decarbonization, Carbon Capture and Utilization | 2022 年 3 月 |
| | Resource Recovery from Water: Principles and Application | 2022 年 2 月 |

検索した文献から、研究の目的、技術概要と原理、技術開発の段階や深度、効果の見通しなどを確認し、これらの情報を基に技術分類を整理した。この結果が、カーボンニュートラル型下水処理システムのシーズとなり得る技術になると考え、今後の詳細調査の基礎情報とした。

[†] Elsevier 社が提供する文献データベース。生化学、遺伝学、分子生物学、化学、臨床医学、エンジニアリング、獣医学など 24 の学問分野にわたる 2,500 誌以上の科学技術・医学・社会科学分野の文献を検索できる（<https://www.sciencedirect.com/>）。

なお、ここでは、既に国内の下水道で採用又は実用化されている技術（曝気風量制御、リン回収技術など）や、機器開発に重きが置かれる技術（汚泥濃縮・汚泥脱水・汚泥焼却・固形燃料化・肥料化）は、主に 2030 年の中期目標（GHG 排出量を 2013 年度比で 46%削減）の達成を目的としているため対象外とした。

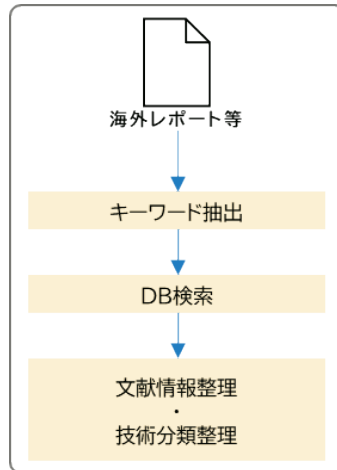


図2-1 検討フロー

(3) 検討結果

前述の検討フロー（図2-1）に従い、文献検索を実行した。検索結果を表2-2に示す。

表2-2 検索結果

| カーボンニュートラル型下水処理システムを構成する技術分野 | 期待される要素技術 | 検索文献数 | | |
|------------------------------|---------------------------------------|-------|------|------|
| | | 2023 | 2022 | 2021 |
| エネルギー化のための流入有機物の分離・回収 | AB法（初期吸着法） | 10 | 19 | 14 |
| | FO | 216 | 612 | 490 |
| エネルギー回収のための嫌気性消化の機能向上 | 汚泥可溶化 | 12 | 32 | 9 |
| | メタネーション | 9 | 30 | 6 |
| 水処理の効率化・機能向上 | 好気MBR | 1435 | 3814 | 3224 |
| | 嫌気MBR | 118 | 317 | 236 |
| | aMBR (Attached growth MBR) | 49 | 183 | 161 |
| | AGS-MBR (Aerobic Granular Sludge MBR) | 82 | 265 | 166 |
| | MEC・MFC | 130 | 472 | 324 |
| アンモニア回収 | アンモニア回収 | 1978 | 5441 | 4711 |
| | アナモックス | 2 | 3 | 5 |
| | コマモックス | 40 | 115 | 79 |
| 藻類・微生物培養による成分回収 | 光合成廃水処理（微細藻類含む） | 724 | 2328 | 1622 |
| | 紅色光合成細菌（PPB） | 75 | 176 | 138 |
| | セルロース回収 | 37 | 125 | 37 |
| | バイオプラ原料（PHA）回収 | 266 | 702 | 559 |
| | タンパク質製造・原料回収 | 1 | 4 | 3 |

3. 検討結果の総括

3.1 本年度の成果

本年度は文献などによる国内外の開発動向調査を実施し、カーボンニュートラル型下水処理システムのシーズとなり得る要素技術を抽出した。

3.2 今後の予定

次年度は、図3-1に示すとおり、本年度の抽出技術の詳細調査、海外下水道分野の趨勢調査を踏まえて、カーボンニュートラル型下水処理システムの開発ロードマップの作成を行う予定である。

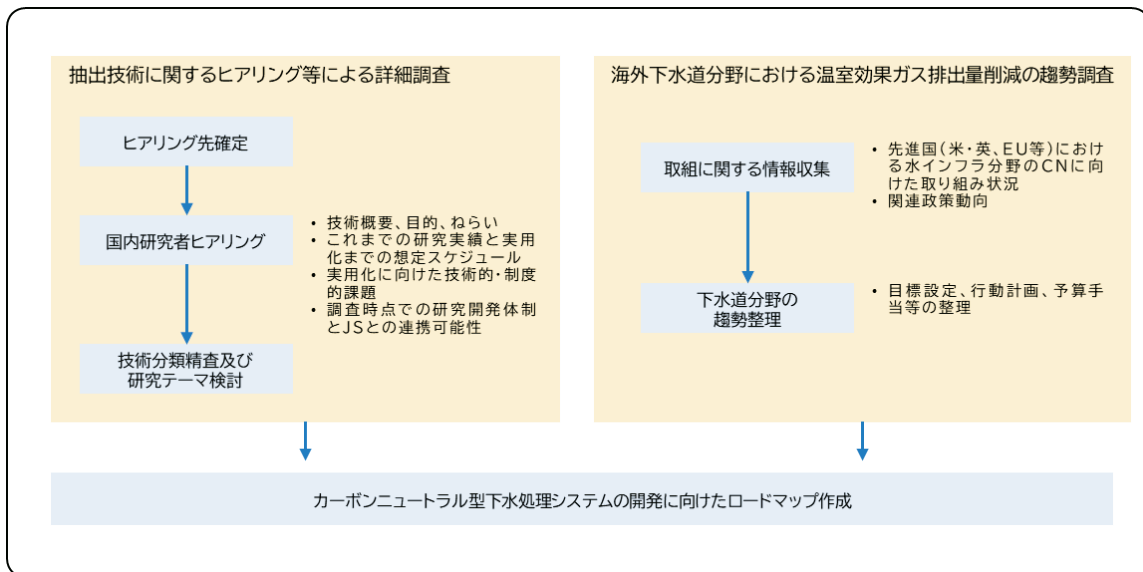


図3-1 今後の予定

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.

II-1 下水処理の更なる低コスト化技術の開発

山森隼人、鈴木博子、山本明広、村岡正季、糸川浩紀、新川祐二

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などにより施設の再構築や統合時の増設など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などに際して、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・実用化するとともに、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・改善などを図る。

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、更には人口減少など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 年度～2021 年度）からの共同研究を継続するとともに、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

* 水処理能力増強技術とは、流入水量の増加や高度処理化などに伴い、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。

ルの策定を行う。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などを確認し技術の改良・改善を図るための事後評価調査などを実施する。

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などで調査を行い、処理性能や導入効果などの情報を集約する。

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 件を進めるとともに、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などについて、導入第一例となる下水処理場や、そのほか導入後の課題対応を要する下水処理場などを対象に、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評価手法を検討するとともに、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など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など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などを整理する。

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（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、導入施設において処理性能などの確認をするための事後評価調査を行う。

（3）汚泥処理低コスト化技術

汚泥処理においては、低コスト化・低動力化・低含水率化が求められると共に、近年、汚泥性状の高 VS 化が進む下水汚泥や消化汚泥などの難脱水性汚泥に対して安定した脱水性能が求められる。そこで、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。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。

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 が開発に関与した新技術などの体系化を図ると共に、各技術の導入検討のためのマニュアル化を行う。

（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、更に導入が進み低コスト化に寄与するために、以下の 5 技術を対象に基準類への反映に向けた事後評価調査を行う。

- ・ 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

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）水処理能力増強技術

- ① 水処理能力増強技術の海外動向調査（2.1 節）
- ② 水処理能力増強技術の開発・実証（2.2 節）
- ③ 事後評価調査（導入フォローアップ）（2.3 節）
- ④ 水処理能力増強方策の検討手法の確立（2.4 節）

（2）水処理改築低コスト化技術

- ① 仮設水処理技術の開発・実証（3.1 節）

（3）汚泥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）

2. 水処理能力増強技術

2.1 水処理能力増強技術の海外動向調査

(1) 検討の概要

下水処理場における水処理能力増強技術として、国内では担体投入活性汚泥法および膜分離活性汚泥法（MBR）が代表的で、どちらも 20 件を超える導入実績を有する。これらはいずれも反応タンクの処理能力を増強する技術であるが、国外では、これら以外にも同様の用途で使用される水処理プロセスが幾つも見られ、世界的な技術のラインナップは、はるかに多様である。

そこで本検討では、水処理能力増強技術の世界的な技術水準などを把握し、今後の国内での技術開発の目標設定などに活用することを目的として、国外の下水処理場で既に使用されている反応タンクの処理能力増強技術のうち代表的なものについて情報収集を行う。なお、本実施項目は、2022 年度単年度の検討として実施したものである。

(2) 検討方法

反応タンクの処理能力増強を可能とする排水処理法（処理プロセス）のうち、国外の下水処理場において複数の導入実績を有する以下の 4 つについて、個別技術の処理性能や導入効果、導入実績などの情報を収集した。

- ① IFAS (Integrated Fixed-film Activated Sludge) : 生物膜と活性汚泥の併用法
- ② MBBR (Moving-Bed Biofilm Reactor) : 移動床式生物膜法
- ③ AGS (Aerobic Granular Sludge) : 好気性グラニュール法
- ④ MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor) : 膜通気式生物膜法

検索エンジンを用いた Web 上でのキーワード検索により、これら 4 つの処理法に該当する技術を有する国外企業を抽出した上で、各企業のホームページや公表文献などから情報を収集した。

(3) 検討結果

抽出した企業の情報を表 2-1 に示す。IFAS および MBBR については多数の企業が扱っているため各 5 社を選定した。AGS および MABR については、各々 1 社、3 社が抽出された。

表2-1 抽出した企業の情報など(2022年12月時点)

| 企業名 | 所在国 | URL (企業の HP) |
|---|-------|---|
| ① IFAS (Integrated Fixed-film Activated Sludge) : 生物膜と活性汚泥の併用法 | | |
| Aqwise | イスラエル | https://www.aqwise.com/ |
| Levapor | ドイツ | https://levapor.com/ |
| Ovivo Water | カナダ | https://www.ovivowater.com/en/ |
| BRENTWOOD | アメリカ | https://www.brentwoodindustries.com/ |
| SSI Aeration, Inc. | アメリカ | https://www.ssiaeration.com/ |
| ② MBBR (Moving-Bed Biofilm Reactor) : 移動床式生物膜法 | | |
| Aqwise | イスラエル | https://www.aqwise.com/ |
| Levapor | ドイツ | https://levapor.com/ |
| Veolia Water Technologies | フランス | https://www.pmtwatersolutions.com/en |
| SUEZ | フランス | https://www.suez.com/en |
| SSI Aeration, Inc. | アメリカ | https://www.brentwoodindustries.com/ |
| ③ AGS (Aerobic Granular Sludge) : 好気性グラニュール法 | | |
| Royal Haskoning DHV | オランダ | https://nereda.royalhaskoningdhv.com/ |
| ④ MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor) : 膜通気式生物膜法 | | |
| Fluence | アメリカ | https://www.fluencecorp.com/ |
| Dupont | アメリカ | https://www.dupont.com/ |
| SUEZ | フランス | https://www.suez.com/en |

これらの企業のホームページから、該当する技術の処理性能や導入効果、導入実績などに係る情報を収集した。このうち本報では、4つの処理法毎に共通する特徴などについて、技術の概要と併せて以下に紹介する。

① IFAS(生物膜と活性汚泥の併用法)

【技術の概要】

IFAS は、同一の反応タンクにおいて生物膜法と活性汚泥法を併用する排水処理法の総称である。活性汚泥法の反応タンク内に微生物保持用の担体を投入することで、タンク内の微生物濃度を高めることができるほか、硝化細菌のように増殖速度が小さい微生物を生物膜内に保持することが可能となることから、反応タンクの容量を縮小（処理能力を増強）することができる。各種生物処理フローとの組み合わせが可能で、有機物除去のための好気処理だけでなく、無酸素タンクや嫌気タンクと組み合わせた生物学的窒素・リン除去法としても使用される。そこでは、処理能力のボトルネックになりやすい好気タンクに担体を投入することが多いが、リンポープロセスのように反応タンク全体で浮遊担体を循環させるプロセスも見られる。

国内ではペガサス法やリンポープロセスを始めとする担体投入活性汚泥法が古くから実用化されているが、これらは浮遊担体を用いる IFAS と位置付けられる。一方、国外でも多数の企業が多様な担体を用いた技術を商用化しており、浮遊担体だけでなく固定床担体を用いる IFAS も見られる*。

【個別技術の特徴など】

抽出した 5 社の技術の中では、浮遊担体を用いるものと固定床担体を用いるものが各々3、2 点である。いずれも生物処理フローについては限定しておらず、有機物除去に加えて窒素・リン除去フローとの組み合わせが可能とされている。処理能力増強の効果を明示している 2 技術の中では、従来の活性汚泥法に対する処理水量の倍率として 2 倍程度が提示されている。導入効果としては、処理能力増強に加えて、省スペース化などがアピールされていることが多い。適用水温については明示されていないものが多いが、10℃以下の低水温への導入実績を有する技術も存在する。

各社が公開している資料の記載値を総計すると、5 技術全体での導入実績は 65 箇所であり、このうち 57 箇所が下水処理、残りは産業排水処理である。処理規模を見ると、対象排水に関わらず 10,000m³/d 以下の小規模処理場への実績が多いが、それ以上の実績を有するものもある。

② MBBR(移動床式生物膜法)

【技術の概要】

MBBR は、浮遊担体を反応タンクに導入し、そこに付着する生物膜により生物学的処理を行う排水処理法の総称である。通常は汚泥返送を行わず生物膜のみによる処理を行うものを指す。一般に担体の添加率は IFAS よりも高く、有機物や窒素の容積負荷を従来の活性汚泥法よりも高く設定できることから、反応タンクの処理能力の増強が可能となる。流入する浮遊物質の一部や担体から剥離した生物膜が反応タンクから流出するため、後段に固液分離工程を設けるのが普通であるが、必ずしも活性汚泥と同等の沈降性が得られないため、沈殿池以外に加圧浮上 (DAF[†]) やメディアろ過などの固液分離装置も使用される。IFAS と同様に、好気処理（有機物除去）だけでなく無酸素タンクや嫌気タンクとの組み合わせにより生物学的窒素・リン除去も可能であるが、生物膜単独での処理であることから、IFAS とは異なり、原則として全ての反応タンクに担体が投入される。プラスチック製の担体を使用するのが普通であるが、そのバリエーションは多様であり、多数の企業が商用化している。

次に示すとおり、世界的には多数の導入実績を有するが、現在のところ国内の下水処理場における導入実績は無い‡。

* 2.2 節で紹介する「能力増強型水処理システム」は、固定床担体を用いる IFAS と見なせる。

† DAF: Dissolved Air Flootation。

‡ 3.1 節で紹介する仮設排水処理技術は、Veolia Water Technologies 社が世界展開するパッケージ型の MBBR 装置を用いる仮設排水処理システムである。

【個別技術の特徴など】

抽出した 5 社の技術の中では、ポリエチレン製担体を用いるものとポリウレタン製担体を用いるものが各々 4、1 点ある。いずれも生物処理フローについては限定しておらず、有機物除去に加えて窒素・リン除去フローとの組合せが可能とされている。処理能力増強の効果を明示している 1 技術では、従来の活性汚泥法に対する処理水量の倍率として 1.5~2 倍程度が提示されている。導入効果としては、処理能力増強に加えて、省スペース化などがアピールされていることが多い。適用水温については具体的なデータを把握できなかったが、低水温（水温 5℃）での導入実績のある技術が存在する。

各社が公開している資料の記載値を総計すると、5 技術全体での導入実績は 1,400 箇所程度あるが、このうち Veolia Water Technologies の技術が 1,200 箇所以上（対象排水は不明）を占め、残りが他社の技術である。

③ AGS(好気性グラニュール法)

【技術の概要】

AGS は、自己造粒させたグラニュール状の汚泥を利用して好気処理を行う排水処理法の総称である。形成されるグラニュール汚泥は密度が高く、活性汚泥よりも著しく高い沈降速度を有する。これにより反応タンク容積当りの微生物量を高く維持できるほか、グラニュールの内部に無酸素・嫌気条件が形成されるため単一の反応タンクにて有機物・窒素・リンの除去が可能とされる。これらにより、従来の活性汚泥法と比較して反応タンク容量や施設面積の大幅な縮小（処理能力の増強）が可能となる。

研究開発の開始が 1993 年、最初の実施設導入が工場排水処理で 2005 年、下水処理で 2011 年と、前述の IFAS や MBBR と比較して新しい技術であり、現時点で世界的に商用化されているのは Royal Haskoning DHV 社による Nereda プロセスのみである。AGS において良好なグラニュールを形成するには流入基質（有機物）の間欠投入が有利とされており、Nereda プロセスでは回分式の反応タンクを使用するが、連続流式への展開については多数の研究者が研究開発を行なっている状況である。現在のところ国内の下水処理場における導入実績は無い。

【個別技術の特徴など】

Nereda プロセスの資料では、従来の回分式活性汚泥法に対する処理水量の倍率として 2 倍程度が提示されている。導入効果としては処理能力増強に加えて、消費エネルギーの削減および省スペース化（活性汚泥法に比べてそれぞれ最大 50%削減、75%縮減）がアピールされている。また、同資料に記載の適用水温は 10~35℃である。

導入実績は 100 箇所を超え、このうち、89 箇所が下水処理、残りは産業排水処理である。処理規模については、10,000m³/d を超える規模への実績が 51 箇所ある。

④ MABR(膜通気式生物膜法)

【技術の概要】

MABR は、酸素透過性の膜により酸素供給を行うとともに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排水処理法の総称である*。膜を酸素供給装置として使用すると同時に生物膜の支持体としても使用する点が、従来の生物学的処理法と原理的に大きく異なる。膜を高密度に配置したユニット型の装置を反応タンクに設置することで、タンク内に高濃度の微生物を保持することができ、有機物や窒素について従来の活性汚泥法よりも高い容積負荷での運転が可能とされる（処理能力増強）。さらに、酸素供給は膜の細孔を介した分子拡散により行われ、気泡を介した従来の酸素供給方法と比較して著しく高い酸素溶解効率が得られることから、処理能力増強だけでなく省エネ化も可能な技術とし

* MBfR（Membrane Biofilm Reactor）など、MABR 以外の呼称が使われることもある。

て期待されている。生物膜の外側から有機物や窒素などの基質が供給されるのに対して、酸素が生物膜の内側から供給される「対向拡散」というユニークな特徴を持つ。これにより、生物膜の内側に好気条件、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。排水処理プロセスとしての使用形態には、生物膜法単独で処理を行うスタンドアローン型のほか、活性汚泥法の反応タンクに膜ユニットを浸漬させる IFAS 型の方法がある。

MABR の発想自体は古くから存在したが、民間企業により商用化され実施へ導入されるようになったのは 2010 年代前半以降であり、本調査で対象とした 4 つの処理法の中では最も新しい技術と言える。現時点では、Fluence、Dupont、SUEZ の 3 社が世界展開しているが、大学や研究機関による研究開発も活発に行われている。現時点で国内の下水処理場での導入実績は無いが、2023 年度から B-DASH において 2 件の FS 調査が始まっている。

【個別技術の特徴など】

処理能力増強および消費エネルギー削減の効果を明示している 2 技術では、従来の活性汚泥法に対する処理水量の倍率として 1.5 倍程度、消費エネルギー削減率として 75%程度が提示されている。

各社が公開している資料の記載値を総計すると、3 技術全体での導入実績（下水処理および産業排水処理に関わらず）は 16 箇所と、現時点では他の処理法に比べて少ない。

(4) まとめ

国外で実用化されている 4 つの水処理能力増強技術について、現状の技術水準などを調査した。本成果は、次年度以降に実施する新たな水処理能力増強技術の開発（公募型共同研究）において、性能水準のベンチマークなどの用途で活用していく予定である。

2.2 水処理能力増強技術の開発・実証

(1) 検討の概要

現在、わ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、コスト高など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、民間企業などとの共同研究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などを実施する。過年度（前・基本計画期間）に開始した実証実験を継続すると共に、2023 年度には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予定である。

2022 年度は、前・基本計画期間に開始した以下の①～④の 4 技術に係る共同研究などを継続し、2 件について完了した。このうち本節では、①、②について研究内容・結果の概要を紹介する（2022 年度に完了した③、④については本年次報告書の「2.2 令和 4 年度完了共同研究の概要」参照）。

- ① 能力増強型水処理システム（JS、荏原実業㈱；2018 年度～）
- ② 最終沈殿池の処理能力向上技術（メタウォーター㈱・JS・松本市共同研究体；2018 年度～）
- ③ 省エネ型 PVDF 平膜ユニットを用いた中・大規模処理場向け MBR（JS、水道機工㈱、東レ㈱；2018 年度～2022 年度完了）
- ④ オゾン水による膜洗浄技術を適用した省エネルギー型 MBR（JS、三菱電機㈱；2019 年度～2022 年度完了）

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 2019 年 7 月から長期の実証実験を行っている。

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いる。本検討は、2017、2018 年度の B-DASH プロジェクト（実証研究）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などを実証した後、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などを行っているものである。

(2) 検討方法

① 能力増強型水処理システム¹⁾

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（最初沈殿池越流水）を固定槽と浮遊槽第 2 槽目に所定の水量比（これまでの研究実績では 3 : 1）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りアルカリ度を回復させる無酸素槽とする。

上記の処理フローを有するパイロットプラント（図 2-2）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、各種条件での処理性能などを確認してきた。本プラントの処理能力は 90m³/d であるが、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。

本年度は、流入水量に時間変動を与えた条件での処理性能を確認した。運転条件として、流入水量 90m³/d（HRT : 5.3hr）で時間あたりの流量変動（50~130m³/d ; ピーク比 1.4 倍）を与える運転を高水温期、中水温期にそれぞれ実施した（表 2-2）。

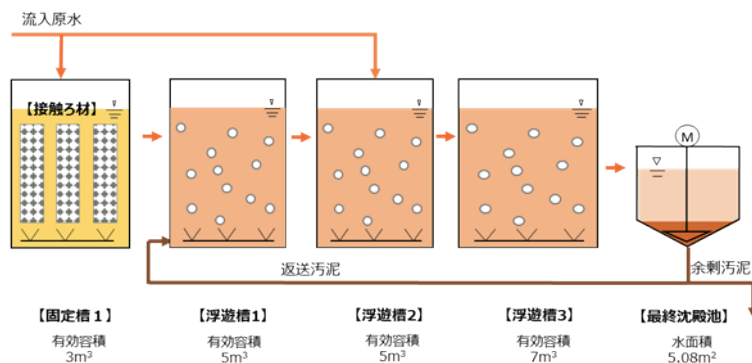


図 2-1 パイロットプラントの処理フロー

表2-2 パイロットプラントの運転条件(令和4年度)

| 条件 | | 高水温期 流量変動有 | 中水温期 流量変動有 |
|---------------------------|------------|---------------|---------------|
| 運転期間 | | 9/12~10/20 | 10/21~11/14 |
| 水温(℃) | | 22.5~25.7 | 21.2~23.1 |
| 全体処理水量(m ³ /d) | | 50~130 | 50~130 |
| 固定槽 | 接触材充填率(%) | 60 | 60 |
| 浮遊槽 | MLSS(mg/L) | 2280 | 2460 |
| | 返送汚泥比 | 0.35 | 0.35 |

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、本技術の実証実験では、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。

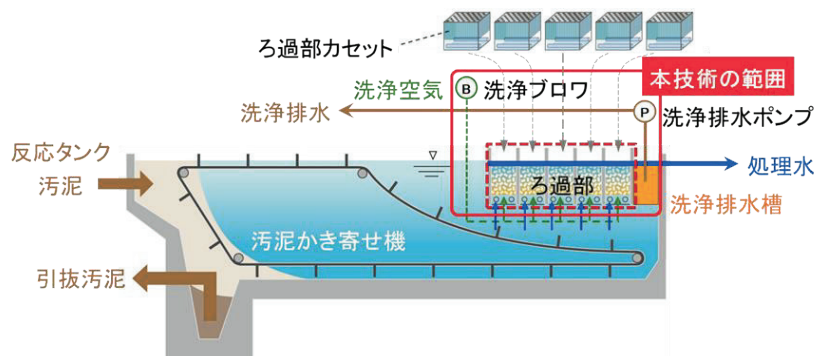


図2-2 最終沈殿池の処理能力向上技術の概略図

2017年度のB-DASH実証研究において、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てきた。

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²⁾。

一方、2019年度からの自主研究では、引き続き実証設備の運転を継続し、以下の事項を検討している。

- 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者を図る運転の長期(通年)実証
- 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
- 本技術の適用条件の明確化の検討(処理可能水量の推定方法の検討)

これらのうち、本年度では、量的かつ質的向上を目標とした長期の実証運転を 2021 年度から継続するとともに、実証設備の改良策の検討を行った。具体的に、前者については、対照系に対して実証系の流入水量が 1.5 倍になるように流量調整を行った運転を継続し、1.5 倍の流入水量に対して急速ろ過並み（BOD 濃度 10mg/L 以下）の処理水質が得られるかを検証した。また、後者については、ろ材が充填されたろ過部カセットの底部スクリーンがし渣やオイルボールの付着により閉塞し人力での清掃を要する問題に対して、対応策として検討してきたスクリーン仕様の変更について、その効果を小型ろ過装置で検証した。

（3）検討結果

① 能力増強型水処理システム

高水温期において、処理水（最終沈殿池流出水）の BOD および SS 濃度が目標の 10mg/L 以下であることが確認された。一方、中水温期については、処理水の BOD 濃度が目標を超過することがあった。その主たる要因は、残存した $\text{NH}_4\text{-N}$ に起因する N-BOD であり、本結果に基づき、N-BOD の発現を抑制可能な流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度上限について解析した。

② 最終沈殿池の処理能力向上技術

対照系に対して実証系の流入水量を 1.5 倍とした運転において、年間（2021、2022 年度）をとおして、実証系における処理水 BOD 濃度は最大 6.0mg/L であり、目標（10mg/L 以下）を満足したことが確認された。参考として、対照系の処理水を小型砂ろ過設備でろ過したろ過水とも比較したが、同砂ろ過水の BOD 濃度は最大 3.0mg/L で、実証系における処理水 BOD 濃度の方がやや高いことが確認された。

また、ろ過部カセットの底部スクリーンの閉塞への対応策については、小型ろ過装置を用いた検証において、従来のパンチングスクリーン（開口 ϕ 4mm、開口率 10%）に代えてメッシュスクリーン（開口 4mm、開口率 50%）を使用することで通水抵抗の上昇が大幅に抑制されることが確認された。

（4）まとめ

共同研究において 2 つの水処理能力増強技術に係る実証実験を行った結果、以下の成果が得られた。

① 能力増強型水処理システム

高水温期では、流量変動があっても概ね目標とする処理水質（BOD : 10mg/L 以下、SS : 10mg/L 以下）が得られることが確認されたが、中水温期では、N-BOD の発現により BOD 濃度が目標を超過することが確認された。

今後は硝化細菌の活性が低下する低水温期や通年を通しての処理性能の確認を行う必要がある。

② 最終沈殿池の処理能力向上技術

量的および質的向上の達成を目的に、対照系に対して実証系の流入水量を 1.5 倍にした条件で実証したところ、処理水 BOD 濃度が 10mg/L 以下と急速ろ過並みの処理水質が得られることが確認された。また、ろ過部カセット底部の汚泥閉塞の対策として、メッシュスクリーンを採用したところ、大幅な閉塞の緩和がみられた。

今後も継続して、実証実験を行い処理性能の検証を行いつつ、実証設備を改造しスクリーン仕様の改良効果の検証などを行う。

2.3 事後評価調査(導入フォローアップ)

(1) 検討の概要

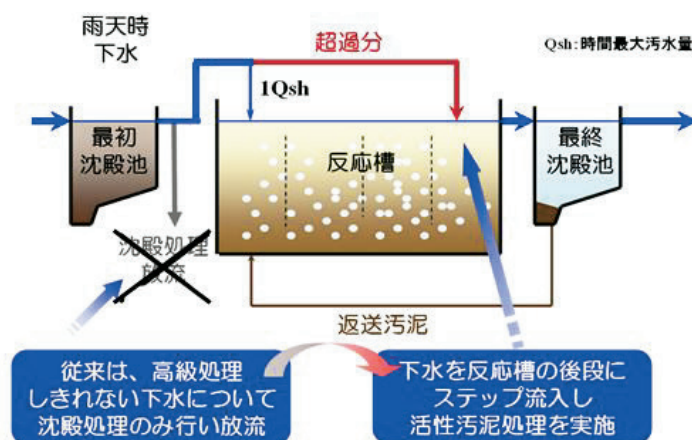
本検討は、実施設に導入された水処理能力増強技術について、実施設での運転実績から性能に関する評価を行い、その結果を導入検討・設計手法などの見直し、また技術の改良・改善を図ることを目的とするものである。

本年度は、最終沈殿池の処理能力増強技術として JS の新技術 I 類に選定されている「最終沈殿池用傾斜板沈殿分離装置（以下、「傾斜板」と略記）」および合流式下水道における雨天時の処理能力増強技術に位置付けられる「雨天時活性汚泥処理法（以下、「3W 処理法」と略記）」のについて調査を行った。傾斜板については、2022 年度は事後評価のための運転データの取得のみを行った。事後評価調査としての取りまとめは、次年度以降を予定している。3W 処理法については、既に 10 年以上にわたり運転している下水処理場 1 箇所を対象に、本処理法を安定的に運転するための技術的知見を得ることを目的とした単年度の調査を実施した。ここでは、本年度に調査を完了した 3W 処理法の調査結果について報告する。

(2) 検討方法

① 技術の概要

3W 処理法は、既存反応タンクおよび最終沈殿池の処理能力を最大限活用して、雨天時の流入水量の増大に対応可能な汚濁負荷削減技術で、合流式下水道において採用されてきた。3W 処理法では、1Qsh（Qsh：晴天日時間最大汚水量）を超えた流入水量を反応タンクの後段にステップ流入させ、活性汚泥による汚濁物質の吸着能（いわゆる初期吸着の機能）を利用した液中からの汚濁物質の除去と、最終沈殿池への流入固形物負荷の低減により、最終沈殿池から流出する汚濁負荷量を削減する（図 2-3）。おおむね 3Qsh の雨天時下水を活性汚泥処理する処理方式である。反応タンク後段で活性汚泥に吸着された汚濁物質は、最終沈殿池で沈殿し、反応タンクに返送され、そこで酸化・分解される³⁾。



出典：大阪市建設局業務論文集 No.24、2005 年度

図2-3 3W 処理法の概要

3W 処理法のポイントは大きく分けて、活性汚泥の初期吸着機能を利用した短時間での汚濁物質の除去、反応タンク後段へのステップ流入による最終沈殿池への流入固形物負荷の増加抑制の 2 点である（図 2-4）。

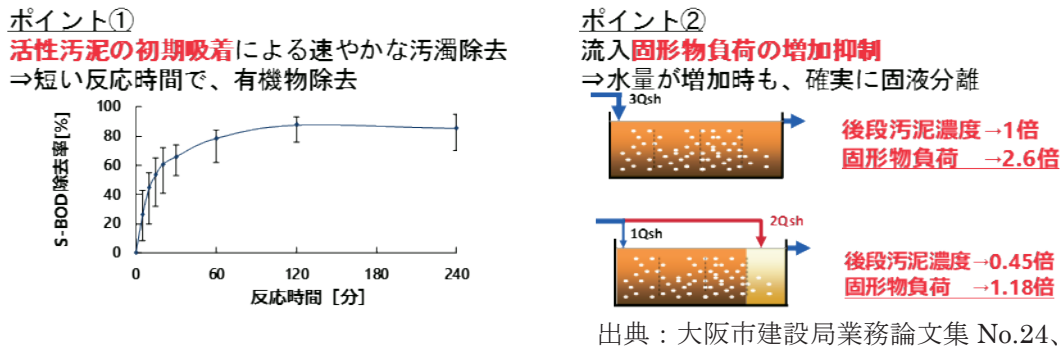


図2-4 3W 処理法のポイント

3W 処理法は、既存水処理施設の軽微な改造で導入可能であるため、分流化や雨水滞水池などの貯留施設の建設に比べて低コストでの雨天時の流出汚濁負荷量の削減を可能とする技術である。しかし、3W 処理法の運転では、活性汚泥の沈降性能や、最終沈殿池の流入固形物負荷の管理など、雨天時の流入水量増加時に安定処理を行うために留意すべき事項があり、運用実績を踏まえた各処理場個別の管理基準の設定が重要な技術である。

② 調査対象施設

調査対象施設は、現有処理能力 39,200m³/d の分流式（一部合流式）の下水処理場で（表 2-3）、3W 処理法は旧系 6 系列（現有処理能力 33,600m³/d）に導入されている。下水は全て自然流下で処理場に流入する施設構造となっているため、流量変動の影響を直接受ける。晴天日の流入水量実績は 20m³/min 程度であるが、これを超える水量が流入した際は、平常時に使用していない最初沈殿池 1~2 系列で貯留を開始し、流入水量が晴天日時間最大汚水量である 40m³/min（=1Qsh）に達した時点で 3W 処理法を開始（3W 処理）している。水量の上限は設計上最大 90m³/min（2.25Qsh）であるが、現状は処理状況を考慮して最大 70m³/min（1.75Qsh）で運用している。これを超える水量は沈殿処理放流される。

表2-3 調査対象施設の概要

| 項目 | 内容 |
|--------|--|
| 供用開始 | 昭和 51 年 6 月 |
| 放流先 | 一級河川 |
| 排除方式 | 分流式(一部合流式) |
| 事業計画水量 | 50,400m ³ /d |
| 現有処理能力 | 39,200m ³ /d 旧系 6 系列：33,600 m ³ /d 新系 1 系列：5,600 m ³ /d |
| 水処理方式 | 標準活性汚泥法(AOAO 法として運用) |
| 汚泥処理方式 | 濃縮（混合濃縮）→消化→脱水（スクレープレス） |

③ 調査の内容および方法

本調査では、資料の収集・整理や現地ヒアリングを行い、過去の 3W 処理の実績や管理基準について整理した上で、対象施設における 3W 処理の課題を抽出し各々の対応方針（短期対策および長期対策）を検討した。

(3) 検討結果

本実態調査では、2020、2021 年度の維持管理年報などの運転管理データや 3W 処理を行った際の時系列データを収集したが、2021 年度は処理場内工事による施設停止があり、平常時の運転とは異なる状況であったため、2020 年度のデータを用いて整理・検討を行った。

① 流入水量および処理水量

2020 年度の処理場流入水量の推移を図 2-5 に示す。晴天日の流入水量は、25,000~29,000m³/d で推移した。降雨時は水量が増大し、降雨日の多かった 6 月後半~8 月初頃頃は、流入水量が現有処理能力を上回る 40,000~60,000m³/d で推移した。

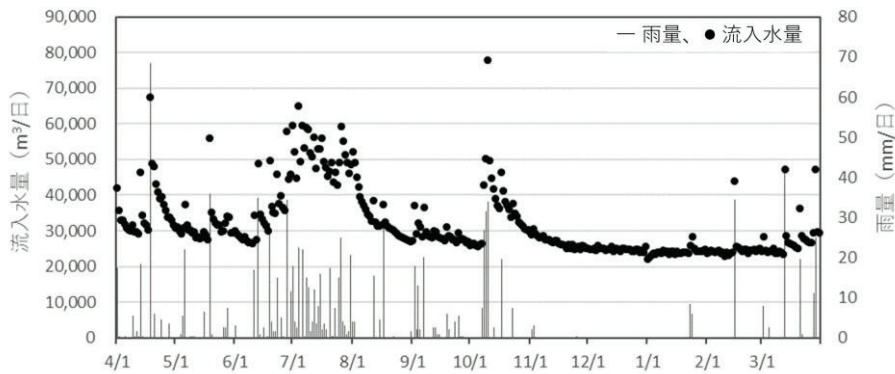


図2-5 処理場流入水量の推移(2020 年度)

降雨日が集中し流入水量が多かった 2020 年 6、7 月の処理水量の推移を図 2-6 に示す。沈殿放流水が多いため、管理基準の見直しなどにより 3W 処理の水量を増大（沈殿放流水量の低減）させることで、雨天時に放流される汚濁負荷量の更なる削減ができると考えられた。

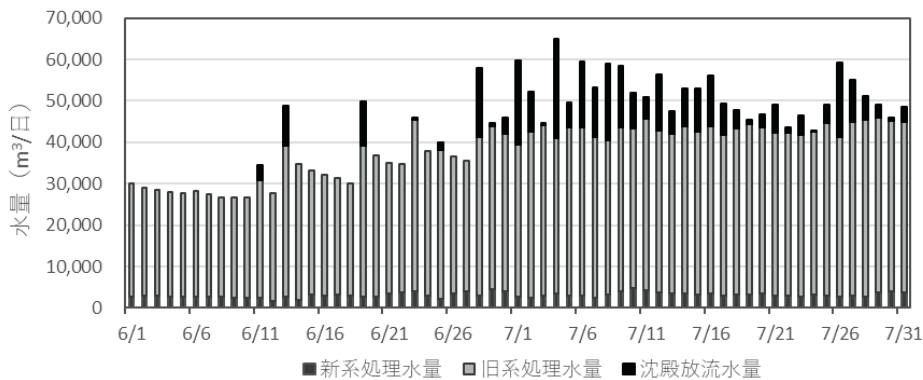


図2-6 処理水量の推移(2020 年 6、7 月)

② 3W処理の運転状況

雨天時は、 $40\text{m}^3/\text{min}$ 以上（1Qsh）で 3W 処理を開始する。1Qsh を超える水量は、反応タンク後段の第 4 区画に導水して最大 $90\text{m}^3/\text{min}$ （2.25Qsh）まで 3W 処理する設計であるが、現状は処理状況を考慮して最大 $70\text{m}^3/\text{min}$ （1.75Qsh）で運用している。3W 処理を停止する運転管理基準は、 $35\text{m}^3/\text{min}$ 以下の水量が 10 分間以上継続した場合に自動停止するほか、最終沈殿池末端で汚泥界面高さ 1.8m 以上、濁度 50mg/L 以上、反応タンク末端の MLSS $1,500\text{mg/L}$ 未満のいずれかとなった場合に手動停止する基準となっている。

2020 年度に 3W 処理を行った日の運転実績を図 2-7 に示す。3W 処理は合計 40 回実施され、1 回当たりの平均運転時間は 1 時間 12 分、最大運転時間は 6 時間 58 分であった。40 回の内、流入水量の減少による自動停止が 6 回（15%）、界面上昇による手動停止が 16 回（40%）、MLSS 低下による手動停止が 18 回（45%）で、手動停止によって 3W 処理の継続時間が短くなり、その分、沈殿放流される水量が多くなっている状況である。

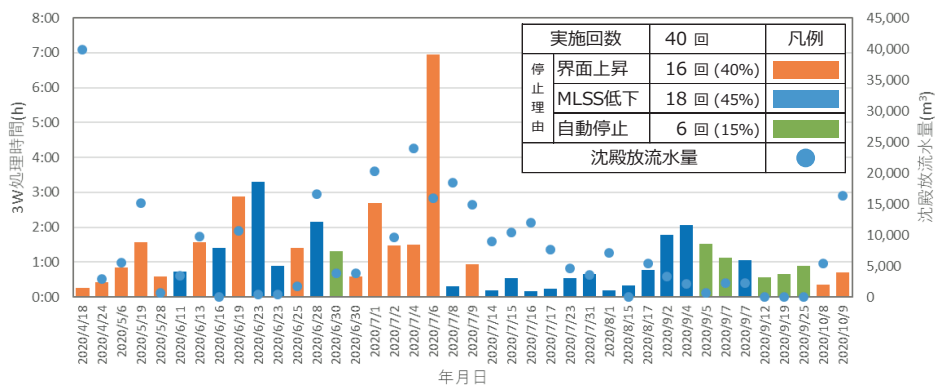


図2-7 3W 処理実施日の運転実績(2020 年度)

③ 課題の抽出

MLSS 濃度の低下により 3W 処理が約 2 時間（3W 処理の運転時間は、12:26～14:23）で停止された 2020 年 9 月 2 日の放流水の BOD、濁度、最終沈殿池の汚泥界面の推移を図 2-8 に示す。図中の赤点線の着色部が 3W 処理を行った時間帯を表している。3W 処理の開始後すぐに BOD が最大 38mg/L となったが、運転開始 1 時間後には 15mg/L 以下となり、3W 処理終了後は 3 時間程度 $5\sim 10\text{mg/L}$ の範囲で推移し、以降は概ね開始前程度となった。BOD の上昇は、汚濁物質の分解が不十分で上昇したのではなく、同時に濁度も上昇していたことから、放流水中の SS の上昇が原因であると考えられる。

水量およびステップ流入後の反応タンク末端の MLSS 濃度の推移を図 2-8 に示す。MLSS は 3W 処理により低下するが、終了後には速やかに回復している。この日の 3W 処理の停止理由は MLSS 濃度の低下であったが、「 $1,500\text{mg/L}$ 未満」という停止基準を可能な範囲で下げて処理を継続することで、放流汚濁負荷をさらに削減できた可能性が考えられ、MLSS 濃度の停止基準が高いことが解決すべき課題の一つと考えられた。

その他の課題として、常態として 3W 処理開始時にステップゲートが急激に全開となることで汚泥界面が急上昇し短時間の運転で 3W 処理が停止（図 2-7 における「界面上昇」による停止が相当）することや、汚泥沈降速度が低い（高 SVI）ことが挙げられた。

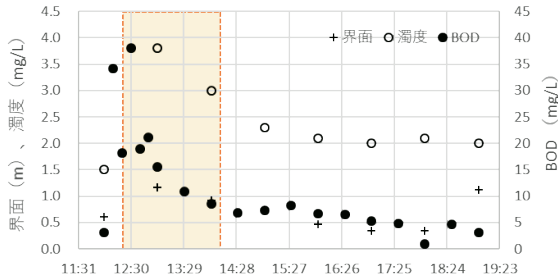


図2-8 3W 処理実施時の BOD、汚泥界面、濁度の推移(R2.9.2 の例)

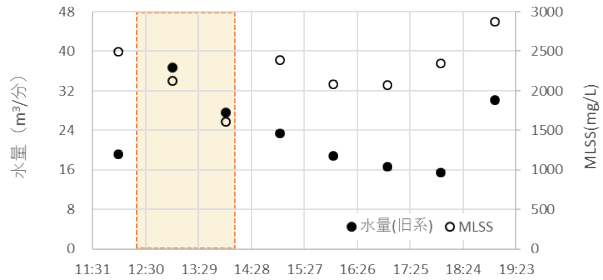


図2-9 3W 処理実施時の処理水量および MLSS の推移(R2.9.2 の例)

④ 3W 処理の課題解決策

調査対象施設における 3W 処理の課題（MLSS 濃度の停止基準、汚泥界面の上昇、高 SVI）に対する解決策を検討した。今回抽出した課題に対してから、MLSS の停止基準値の見直しや汚泥界面の上昇を抑える方策を講じることで、3W 処理の運転時間を延ばし、放流汚濁負荷の更なる削減が可能であると考えられた。課題解決策は、短期で対応可能な方策と今後の施設計画を踏まえた長期で対応可能な方策に分けて整理した（表 2-4）。

表2-4 解決策

| 課題解決策 | | 内容 |
|-------|--------------------------------|------------------------------------|
| 短期方策 | MLSS 停止基準の変更 | MLSS 低下理論値までの停止基準の引き下げ |
| | 汚泥界面の上昇抑制 | ステップゲートの段階的な開操作による終沈への流入固形物負荷量の平準化 |
| | SVI の低下 | SVI の改善による汚泥沈降速度の向上 |
| 長期方策 | MLSS 濃度の低減 (反応タンク内活性汚泥量の低減) | 汚泥処理設備の増設による水処理系外への汚泥排出 |
| | 新系列への 3W 処理法の導入 | 3W 処理水量の増加 |

(4) まとめ

2022 年度は、傾斜板と 3W 処理法の 2 技術に関する調査を行った。本年度調査を完了した 3W 処理法に関する調査については、実際の下水処理場を対象に、3W 処理に関する実績データなどの情報を収集・整理し、3W 処理の運転上の課題抽出とその解決策を検討した。解決策の検討では、雨天時の流入水量増加時の処理能力増強技術として安定して運転するための方策と 3W 処理の停止基準の見直しなどの短期方策と施設の増設・改造などの長期方策に分けた整理を行った。短期方策として検討した事項については、今後、試験的に実施してその改善効果について検証する必要がある。

2.4 水処理能力増強方策の検討手法の確立

(1) 検討の概要

計画設計や実施設計、もしくはその前段の検討の場面で水処理施設の能力増強を検討する際には、既存の水処理施設に対して、複数技術の組み合わせを含めた最適な方策を見出す必要がある。個別の水処理能力増強技術については、導入検討手法や設計手法が各々の技術資料などにおいて提示されているが、

多数の技術の候補の中から所与の条件に対して最適なもの（組み合わせを含む）を選定するための方法論は整備されていない。

本検討は、既存の水処理施設に対して、新技術（水処理能力増強技術）の導入を含めた最適な水処理能力増強方策*を選定する汎用的な手法を見出し、マニュアルなどの形で取り纏めることを目的に、過年度（前・基本計画期間）から継続して実施するものである。その過程で、個別の水処理能力増強技術の導入効果（処理能力増強効果、コスト縮減効果など）を適正に評価するための標準的な手法についても検討する。

本年度は、上記の水処理能力増強方策の検討手法について、基本的な検討項目および手順を盛り込んだ検討フローを作成した。

（2）検討方法

水処理施設の能力増強が必要な下水処理場（一部の系列を対象とするケースを含む）に対して、以下の方針に基づき、最適な方策を体系的に選定するための汎用的な「水処理能力増強方策の検討手法」を確立することとし、その基本フレームとなる検討項目・フローを検討した。

- 対象とする施設や技術を限定しない汎用的な手法とする。
- 検討対象とする水処理施設の範囲として、最初沈殿池、反応タンク、最終沈殿池を想定する。
- 主要な方策として新技術の導入を想定するが、これに先立ち、運転方法の変更など、より簡易な方策による対応可能性を検討するステップを盛り込む。
- 対象施設における既定の方策（既設の処理方法による系列・池の増設、従来の処理方法による高度処理化など）に対して、より適確な方策を見出すことを検討の主眼とする。
- 既設の処理能力を推定した上で、所要の増強能力（不足能力）を設定する。
- 上記の処理能力の推定に際しては、既定の処理能力（公称処理能力など）を前提とせず、既設における流入水量・水質や水温、処理条件、処理水質などの実績を踏まえた適正な能力評価を行う。
- 複数の方策を抽出した上で、コストを含めた総合的な比較検討により最適な方策を選定する。

（3）検討結果

同検討手法における実施内容について、図 2-10 に示すとおり検討項目および手順（フロー）を作成した。

* ここで言う「水処理能力増強方策」は、新技術（水処理能力増強技術）の導入だけでなく運転方法の変更などにより、既存の水処理施設の処理能力を増強し、系列・池の増設を回避または最小化するための方策を指す。更に本検討では、最適な水処理能力増強方策を見出すための一連の検討を「水処理能力増強方策の検討手法」と称している。

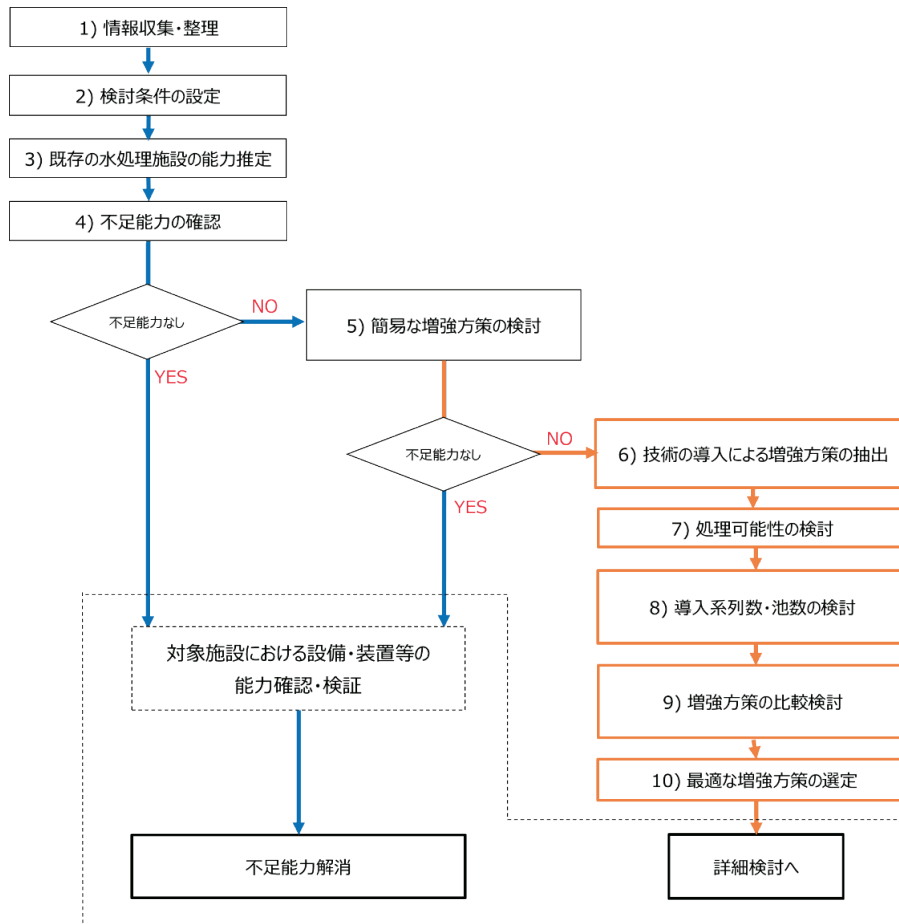


図2-10 水処理能力増強方策の検討手法における実施手順

1) 情報収集・整理

当該下水処理場に係る基本計画（全体計画、事業計画など）、改築・更新に係る計画（ストックマネジメント計画など）、維持管理資料（維持管理年報など）、その他関連する検討資料を収集し、以降の検討で必要となる情報について、①関連する下水道計画および既存施設の運転状況など、②将来の見通し、の各々に係る事項を整理する。

① 関連する下水道計画および既存施設の運転状況などに係る情報

以下の事項について、計画値および実績値を整理する。

- 施設諸元
- 流入水量
- 流入水質・処理水質/放流水質
- 流入水温
- 各施設の運転条件
- 汚泥発生量

② 将来の見通しに係る情報

将来の流入水量や設備更新などを含めた既設能力の将来見通しを整理する。

2) 検討条件の設定

既存の水処理施設の中での検討対象範囲や水処理能力増強方策を講じる想定年次を設定した後、施設の処理性能の推定などに必要な以下の検討条件を設定する。

- 設計流入水量（流入実績や将来予測から設定される水量など）
- 水質条件（設計流入水質、目標処理水質など）
- 既設最初沈殿池の施設諸元（水面積、除去率など）
- 既設反応タンクの施設諸元（タンク容量など）
- 既設最終沈殿池の施設諸元（水面積、SVI など）

3) 既存の水処理施設の能力推定

前項で設定した検討条件に基づき、既存施設の処理能力を推定する。運転実績や既設の施設諸元などの情報から既設躯体での処理可能水量を把握する。そのための具体的方法の一例として、①最初沈殿池の能力推定、②反応タンクの能力推定、③最終沈殿池の能力推定を行い、既存の水処理施設における処理可能水量を設定する方法がある。

① 最初沈殿池の能力推定

BOD および SS の除去率と水面積負荷の実績値から許容水面積負荷を設定し、所与の水面積から処理可能水量を推定する。

② 反応タンクの能力推定

標準活性汚泥法施設の処理水量の増加の場合、「下水道施設計画・設計指針と解説 -2019年版-」³⁾（以下、「設計指針」と略記）に準拠して、SRT と最終沈殿池流出水の C-BOD の関係から、目標処理水質に対する必要 SRT（硝化促進運転の場合は、ASRT に読み替える。）を求め、MLSS 濃度当たりの処理可能水量を算出する。

標準活性汚泥法施設を高度処理化する場合、目標処理水質を達成できる既定の高度処理法を想定し容量計算を行い、既設躯体容量での MLSS 濃度当たりの処理可能水量を算出する。

③ 最終沈殿池の能力推定

設計指針に記載の活性汚泥の性状を考慮した最終沈殿池水面積負荷の推定式から許容水面積負荷を算出し、上記反応タンクと同様に MLSS 濃度当たりの処理可能水量を算出する。

上記①～③の結果を基に、検討対象施設（検討対象範囲）における処理可能水量を設定する。

4) 不足能力の確認

前項で求めた既存施設の処理可能水量と、設計流入水量の差分から不足能力を確認する。

5) 簡易な増強方策の検討

水処理能力増強技術の導入によらない比較的簡易な方策（運転方法の変更など）で処理能力を増強できるか検討する。

6) 技術の導入による増強方策の抽出

前項において処理能力不足を解消できないと判断された場合には、水処理能力増強技術の導入による方策を検討する。

ここでは、想定される技術の適用条件を確認し、条件に合致する技術を抽出する。

7) 処理可能性の検討

前項にて絞込みを行った水処理能力増強技術に対して、検討対象施設へ導入する場合の処理能力を推定し、処理能力不足が解消可能か検討を行う。ここでは単独の技術導入のほか、複数技術の組み合わせについても検討する。なお、導入による効果が小さいと考えられる組み合わせについてはあらかじめ除外する。

8) 導入系列数・池数の検討

これまでの検討で抽出された水処理能力増強技術の中には、2) で設定した系列・池数よりも少ない導入数で処理能力不足を解消できる場合や、反対に当初より導入系列・池数を増やさなければならない場合が想定される。そのため、ここでは、前項において処理可能と推定された増強技術の処理能力を加味し、最適な導入系列・池数を検討する。

9) 増強方策の比較検討

抽出された水処理能力増強技術の導入による増強方策と従来の施設増設による方策について、コストを含めた複数の項目により総合的に比較検討を行う。評価項目としてはコストの他に増強技術の長所および短所、脱炭素・省エネ性能、維持管理性などが考えられる。必要に応じて施設管理者などにもヒアリングを実施し、ニーズを反映した項目の追加も想定される。

10) 最適な増強方策の選定

前項の検討結果をもとに最適な水処理能力増強方策を選定する。

(4) まとめ

既存の水処理施設に対して、新技術の導入を含めた最適な水処理能力増強方策を選定する汎用的な手法の検討を行った結果、水処理施設における処理能力増強方策を選定するための1つの汎用的な検討手法を提示することができた。

今後は実施内容や検討フローなどを見直すとともに、汎用的に活用できる手法を確立し、当該手法のマニュアル化を図る。

3. 水処理改築低コスト化技術

3.1 仮設水処理技術の開発・実証

(1) 検討の概要

近年、全国の下水道施設で再構築需要が高まっている。水処理施設の改築・更新工事では、一部の系列・池を一時的に停止することになるが、それに伴い処理能力が不足する場合には、仮設の水処理設備による処理能力の補完が有力な選択肢となる。JS では、プレハブ式オキシデーションディッチ (POD) などの小規模処理場の改築・更新時に活用できる「単槽式 MBR と高速凝集沈殿法による仮設水処理ユニット」を新技術 I 類に選定しているが、メーカーによるユニットの在庫数確保などの観点から、技術の適用条件の中で仮設水量を 1,200m³/d 程度以下に限定しており、標準活性汚泥法などの更に規模が大きい下水処理場に適用可能な仮設水処理技術の確立が待たれるところである。

このような背景から、本検討では、数千 m³/d 規模の仮設水処理技術の確立を目指し、実証実験を中心とした技術開発を行う。具体的には、西原環境㈱との共同研究により、処理能力が 1,000m³/(d・基)の可搬式の仮設水処理技術について、実規模の実証実験を行う。2022 年度は、本共同研究としての実証実験を 5 月に開始し^{*}、DO 制御方法や凝集剤添加方法などの基本的な運転条件の検討期間を経て、9 月から通年で長期実証運転を開始した⁵⁾。ここでは、このうち長期実証運転の途中結果を中心に報告する。

(2) 検討方法

① 対象技術

本検討で実証する技術は、パッケージ型 MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor ; 移動床式生物膜法) 装置の後段に凝集・ろ過ユニットを組み合わせた可搬式の仮設水処理装置である (図 3-1)。最初沈殿池越流水を目幅 2mm のスクリーンに通した後、MBBR による生物学的処理および凝集・ろ過による固液分離を行い、有機物 (BOD) および浮遊物質 (SS) を除去する。

MBBR は、反応タンク内に流動担体を投入し、担体表面に形成される生物膜により生物学的除去を行う処理法である (2.1 節参照)。パッケージ型 MBBR 装置は、本処理法の生物反応タンク部分をパッケージ化したもので、鋼板製反応タンク (23m³×2 槽直列)、散気装置、送風機などで構成されており、反応タンク内に高密度ポリエチレン製の流動担体 (AnoxKaldnes 社 K5 担体 ; 直径 25mm、厚み 3~4mm) を 45%の嵩容積比で投入する。本装置の設計水量は 1,000m³/d であるが、これに対応する反応タンク HRT は約 1.1hr と、極めてコンパクトな装置容量にて有機物除去を行う。

凝集・ろ過ユニットは、パッケージ型 MBBR 装置の流出水に対して固液分離 (SS 除去) を行うもので、凝集混和槽、高分子凝集剤溶解設備、固液分離ろ過装置 (目幅 40μm のドラムフィルター) から構成される。凝集混和槽にてカチオン系高分子凝集剤により SS などを凝集させた後、ドラムフィルターにてろ過を行う。ドラムフィルターでは、目詰まりによる圧力損失 (装置内水位上昇) が検知されると自動で逆流洗浄 (逆洗) が行われ、その洗浄排水を既設の汚泥処理施設に排出するが、これが本システムにおける余剰汚泥に相当する。

^{*} 実験設備の設置および立上げは、当該共同研究が開始した令和 4 年 4 月以前の期間に、西原環境㈱により行われた⁴⁾。

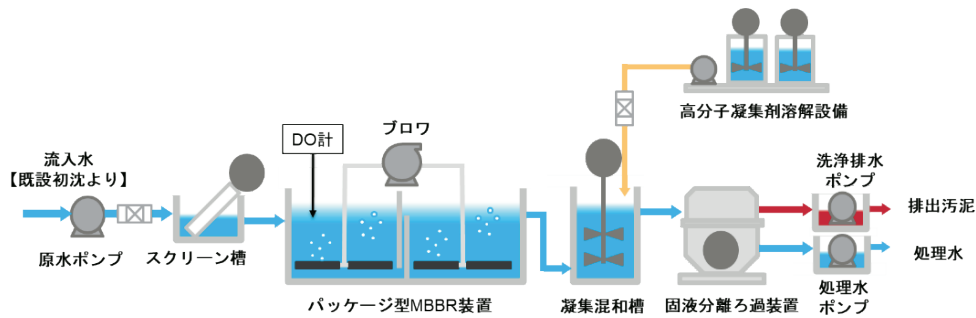


図3-1 本技術の処理フロー

② 実験方法

茨城県内の下水処理場（分流式）に設置された実規模の実験設備を用いて、既設の最初沈殿池流出水を原水とした実証実験を開始した。本実験設備の設計水量は 1,000m³/d で、機器の構成は図 3-1 に示したものと同等である。反応タンクでは、第 1 槽に DO 計が設置されており、本 DO 計測値に基づく曝気風量の自動制御（DO 一定制御）が行われる。

連続運転中の本実験設備を用いて、2022 年 5～8 月の期間に、反応タンクにおける基本的な処理特性や DO 制御値の影響を確認すると共に、後段の固液分離工程における凝集剤の添加方法（薬剤種類および添加位置）の改善を図った。これに続く 9 月以降、本技術の長期的な処理性能などを確認するために通年での運転を開始した。本技術を標準活性汚泥法施設の仮設処理に適用することを想定し、下水道法施行令において同処理方法が適合する計画放流水質区分の上限値（BOD=15mg/L）を目標処理水質とした。

運転開始後の 2022 年 9 月～2023 年 1 月の期間における実験設備の運転条件を表 3-1 に示す。本設備の設計水量である 1,000m³/d での運転を基本としたが、流入水量を 750m³/d へと低下させる期間（Run2 および Run3）および DO 制御値を 1.5～3.0mg/L の範囲で変化させる期間（Run1～5）を盛り込むことで、複数の異なる運転条件下での処理性能を確認した。

運転期間を通して、流入原水（最初沈殿池流出水）および処理水（ドラムフィルター流出水）のコンポジット試料（2hr ピッチ×24hr）を週 1～2 回の頻度で採取し、BOD、溶解性 BOD（S-BOD）、SS などの水質を測定した。加えて、パッケージ型 MBBR 装置の反応タンク第 1 槽および第 2 槽の流出水（以下、各々を「第 1 槽流出水」、「第 2 槽流出水」と略記）のスポット採水試料を同一日に採取し、同様の水質測定を行った。

表3-1 長期実証における運転条件(2022 年 9 月～2023 年 1 月)

| Run No. | Run1 | Run2 | Run3 | Run4 | Run5 |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| 期間 | R4/9/28~10/18 | R4/10/19~11/1 | R4/11/2~11/22 | R4/11/23~12/1 | R4/12/2~R5/1/31 |
| 処理水量(m ³ /d) | 1,000 | 750 | 750 | 1,000 | 1,000 |
| 反応タンクHRT(hr) | 1.1 | 1.5 | 1.5 | 1.1 | 1.1 |
| DO設定値(mg/L) | 1.5 | 1.5 | 2.5 | 2.0 | 3.0 |
| 凝集剤注入率(mg/L) | 4.3 | | | | |
| 各運転期間における反応タンク水温(°C) | 25.0 | 24.4 | 23.7 | 22.9 | 20.4 |

(3) 検討結果

2022年9月から2023年1月までのプロセス各所のBOD、S-BOD、SS濃度の経日変化を図3-2～図3-4に示す。

本期間における処理水のBOD濃度は4～18mg/Lの範囲で、流入原水のBOD濃度が180mg/Lと高かった1点を除き、目標処理水質（BOD：15mg/L以下）を満足した。SSについては、反応タンク第2槽流出水のSS濃度が60～100mg/Lであったのに対して処理水では2～10mg/Lまで低減されており、凝集・ろ過による固液分離性能は良好であった。このため、処理水のBODにおける浮遊性BOD(P-BOD)の寄与は小さく、S-BOD濃度が3～13mg/Lと大半を占めた。なお、流入水量1,000m³/dの条件でDO制御値を1.5～3.0mg/Lの範囲で変化させた期間（Run1、4、5）におけるBOD除去率は90%程度であり、処理性能に大きな違いは見られなかった。

反応タンク第1槽および第2槽におけるS-BODの変化を見ると、第1槽での除去量が大きく、反応タンク全体でのS-BOD除去量に対して、当該期間の平均で第1槽が約74%を占めた。第2槽単独ではS-BODの除去率（第1槽流出水に対する第2槽流出水での低減率）が平均47%と必ずしも高くなく、結果として同槽流出水ではS-BODが5～27mg/Lと、15mg/Lを超えるデータが幾つも見られた。これに対して、後段の凝集・ろ過工程において、固液分離だけでなくS-BODが低減された結果、前述の通り、大半のデータで処理水のBOD濃度が目標値を満足したと考えられた。

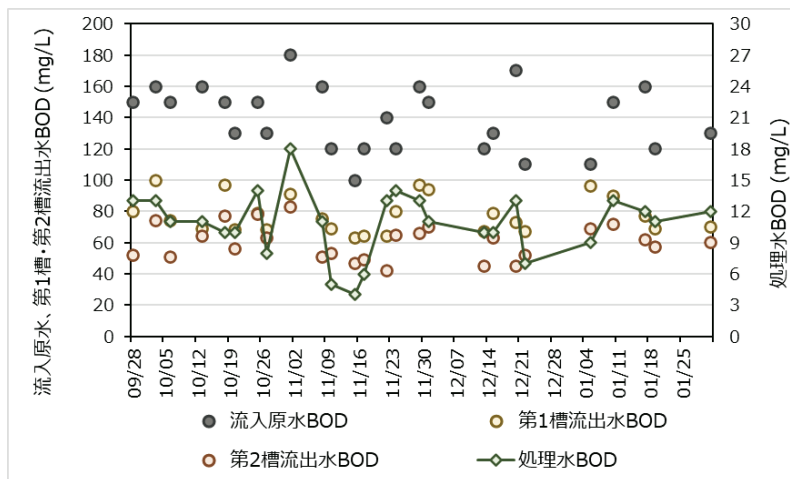


図3-2 流入原水、パッケージ型 MBBR 装置の反応タンク各槽流出水、処理水の BOD 濃度の経日変化(2022年9月～2023年1月)

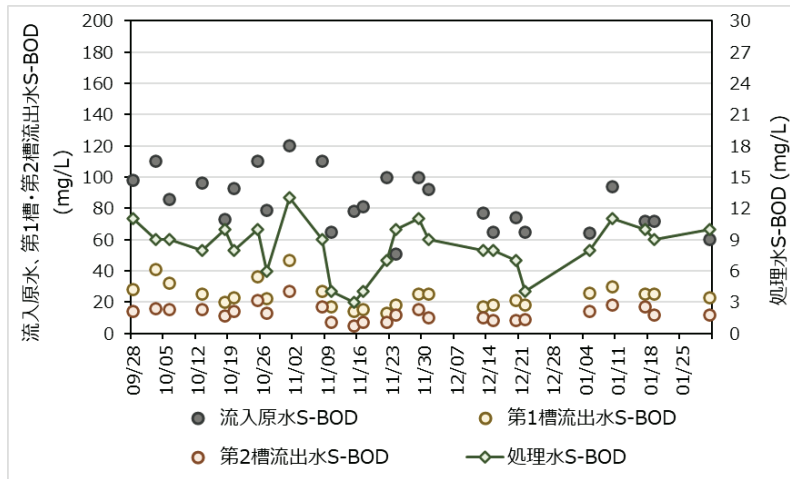


図3-3 流入原水、パッケージ型 MBBR 装置の反応タンク各槽流出水、処理水の S-BOD 濃度の経日変化(2022 年 9 月～2023 年 1 月)

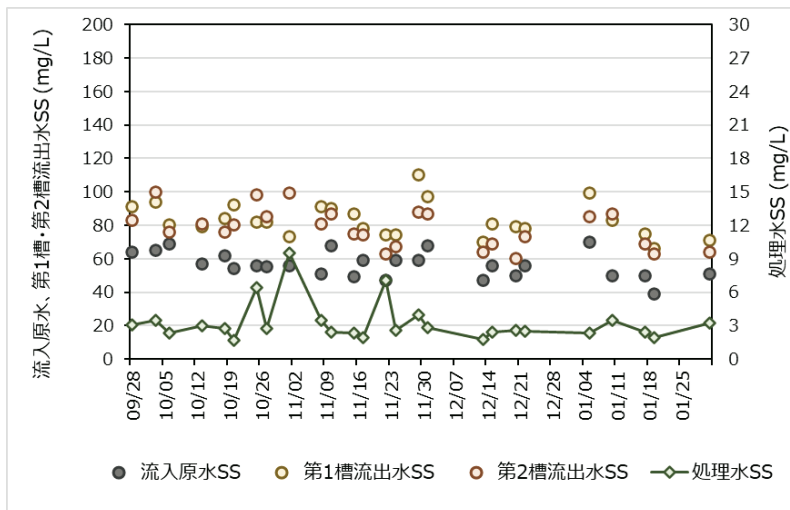


図3-4 流入原水、パッケージ型 MBBR 装置の反応タンク各槽流出水、処理水の SS 濃度の経日変化(2022 年 9 月～2023 年 1 月)

(4) まとめ

パッケージ型 MBBR 装置に凝集・ろ過ユニットを組み合わせた仮設水処理技術について、通年での長期実証運転を開始した。以降の4ヶ月間（2022年9月～2023年1月）の途中段階でのデータではあるものの、主要な成果は以下の通りである。

- 反応タンクの HRT が 1.1hr と極めて短い処理条件において、処理水の BOD 濃度を目標値 (15mg/L) 以下まで低減できる可能性が示された。ただし、流入原水の BOD 濃度が高い場合には目標値を超過するケースも見られたことから、適用する流入水濃度に上限を設ける必要が出てくる可能性も示唆された。
- 上述の目標 BOD 濃度の達成に対して、後段の凝集・ろ過ユニットにおける S-BOD の低減効果が寄与していることが示された。

2023 年度も長期実証運転を継続し、通年での処理性能の安定性や本技術を適用可能な流入水質などを確認するとともに、本技術で発生する余剰汚泥の濃縮・脱水性や、本技術の処理水が既設処理水と混合した後の N-BOD 発現リスクの有無などについて確認を行う予定である。

4. 汚泥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のため、汚泥処理の低コスト化技術が求められている。近年では、脱炭素社会実現に向けた取り組みとして嫌気性消化の導入が期待される一方、汚泥の難脱水化が進んでおり、汚泥処理の低コスト化に加えて汚泥処理性能の向上も求められている。

このような背景から、本実施項目では、本年度に民間企業などとの共同研究を新たに公募し、汚泥濃縮機および脱水機の LCC の縮減や処理性能向上を図ることが可能な技術を開発・実用化するための実証実験などを実施する。本年度は、以下の 1 技術に係る共同研究を開始した。本稿では、当該技術と研究の概要を紹介する。

- ・共同研究名称：汚泥処理の低コスト化に向けた汚泥濃縮技術およ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ープレス脱水機の開発ー
- ・共同研究者：水 ing エンジニアリング(株)、水 ing(株)
- ・共同研究期間：2022 年 12 月 1 日～2024 年 6 月 30 日
- ・研究の概要：高効率凝集装置と同軸差動式スクリープレス脱水機を組み合わせた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（以下、「本技術」と略記）によって、従来技術である圧入式スクリープレス脱水機Ⅲ型（以下、「SPⅢ型」と略記）に対し、LCC の低減や汚泥処理能力の増強が可能な汚泥脱水技術の開発を行う。

(2) 検討方法

① 技術の特徴

本技術の主な特徴を以下に、システムフローを図 4-1 に示す。

- ・投入汚泥を高効率凝集装置で超高速攪拌し凝集反応を促進させることで、汚泥処理量増加運転を可能とする。
- ・濃縮スクリーンで濃縮した汚泥は、2 つのスクリー軸が直列に配置され、背圧板が無い構造の脱水機（同軸差動式スクリープレス脱水機）で脱水する。
- ・本脱水機は操作因子がスクリー回転数のみであり、運転が簡便なことから、人工知能（AI）への適用性が高い。
- ・運転支援システムは、過去の運転データを AI に学習させることで目標性能を達成できる運転設定値の算出が可能であり、動力制御盤に組込むことで、汚泥処理の安定運転や LCC 低減を支援する。

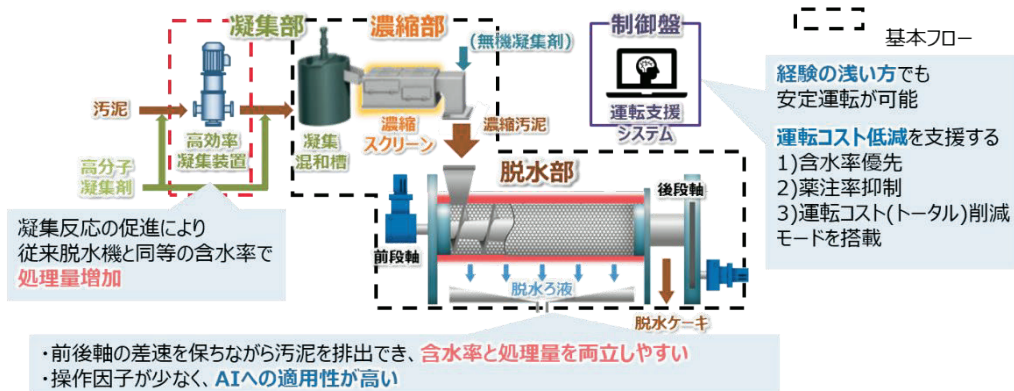


図4-1 本技術のシステムフロー

② 開発目標

本技術の研究開発目標を以下に示す。

- 目標①：高効率凝集装置なしの脱水性能
 - ・SPⅢ型と同等の脱水性能を満足すること。
- 目標②：高効率凝集装置の付加による脱水性能
 - ・高効率凝集装置の付加により、目標①での脱水性能を維持した上で、固形物処理量を1.5～2倍以上に増強できること。
- 目標③：AIを組み込んだ運転支援システムでの運転操作性
 - ・基本性能としてAI予測含水率が実測値と同程度（±1.0pt）であること。
 - ・応用機能として搭載する運転モード（含水率優先、薬注率抑制、トータルコスト削減）に適用性があること。

③ 試験場所

実証試験機（脱水機スクリー径φ300、φ600）を実証フィールドに設置し実証試験を行った。実証フィールドの概要を以下に、試験設備の概略フローを図4-2に示す。

- ・水処理方法：標準活性汚泥法
- ・処理水量：現有処理能力 48,000m³/d
日平均処理量 32,417m³/d
- ・汚泥処理方法：濃縮－消化－脱水

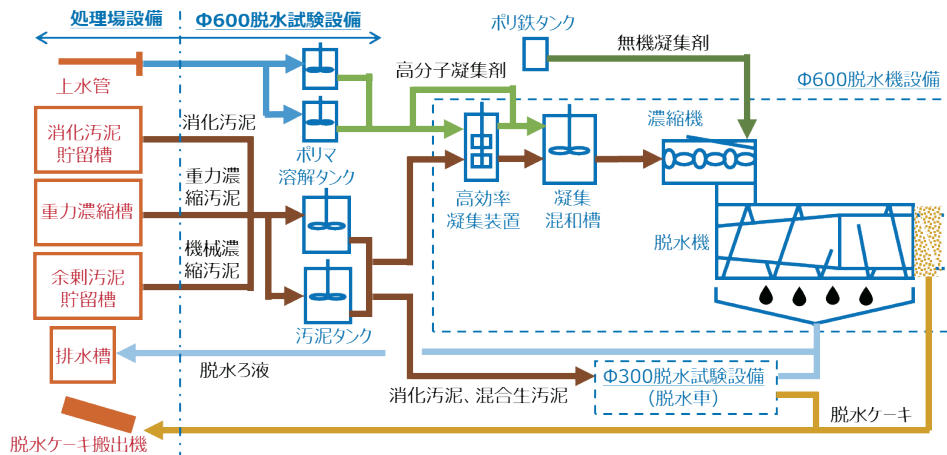


図4-2 試験設備概略フロー

④ 研究実施内容

- ・ 四季などの汚泥性状の変化に対して安定した運転が出来ることを確認する。
- ・ 対象汚泥は消化汚泥、混合生汚泥とするが、実証フィールドの汚泥は消化汚泥のため、混合生汚泥は、重力濃縮槽汚泥と余剰汚泥貯留槽汚泥を水処理での発生固形物量比に合せた 2:1 で混合して実証試験を行う。
- ・ 実証試験では、スケールアップ効果*を確認するため処理能力の異なる 2 台の脱水機を用いる（スクリーユ径φ 300 およびφ 600）。
- ・ 実証試験は、高効率凝集装置の有り又は無し、および薬注方式の 1 液（高分子凝集剤のみ）または 2 液（高分子凝集剤+無機凝集剤：ポリ鉄）の条件で行う。
- ・ AI を組み込んだ運転支援システムの検証では、実証試験中のデータを AI に取り込み機械学習モデルを構築し、構築したモデルを用いて脱水機スクリーユ径φ 300 の実証試験機での脱水試験を行いモデルの精度を確認する。加えて、運転支援システムに搭載した各種運転モードでの適用性について確認を行う。

本年度は、本共同研究としての実証実験を 2022 年 12 月に開始し、設備の設置や薬品選定などの準備期間を経て、2023 年 1 月から通年での長期実証運転を開始した。

(3) 検討結果

本技術について、途中段階ではあるが、3 ヶ月間の実証試験を行った結果、以下の成果が得られた。

- ・ 2 種類の対象汚泥（消化汚泥、混合生汚泥）を対象に高効率凝集装置の有無、1 液および 2 液薬注運転の計 8 パターンの脱水運転を行い、基礎データを取得した。
- ・ 当初の想定より VS が高かったことや、汚泥性状変動が大きく混合汚泥の調整に時間を要したが、性能確認試験では、研究開発目標および性能目標値に対して概ね良好な結果が得られた。なお、実証試験期間中であることから、本報での詳細データの記載は避けるものとした。

今後は、汚泥性状の変動に対して薬注率や投入固形物量などの運転条件を見極め、安定した脱水運転と、引き続き AI 搭載データの取得を行い本技術の確立を目指す予定である。

* スケールアップ効果：スクリープレス脱水機では同等の汚泥性状、同等の含水率の時、処理量がスクリーユ径の比率の 2.2 乗になるというデータがあり、このような効果をスケールアップ効果と呼ぶ。

5. 検討結果の総括

5.1 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海外動向調査

国外で実用化されており水処理能力の増強が可能な 4 つの処理法（IFAS、MBBR、AGS、MABR）について、現状の技術水準などを把握した。

② 水処理能力増強技術の開発・実証

以下の 2 つの水処理能力増強技術について、民間企業などとの共同研究による実証実験を進めた。

a) 能力増強型水処理システム

高水温期では、流量変動があっても概ね目標とする処理水質（BOD：10mg/L 以下、SS：10mg/L 以下）を得られることが確認されたが、中水温期では、N-BOD の発現により BOD 濃度が目標を超過することが確認された。

b) 最終沈殿池の処理能力向上技術

量的および質的向上の達成を目的に、対照系に対して実証系の流入水量を 1.5 倍にした条件で実証したところ、処理水 BOD 濃度が 10mg/L 以下と急速ろ過並みの処理水質が得られることが確認された。また、ろ過部カセット底部の汚泥閉塞の対策として、メッシュスクリーンを採用したところ、大幅な閉塞の緩和がみられた。

③ 実施設における水処理能力増強技術の実態調査

本年度調査を完了した 3W 処理法に関する調査については、実際の下水处理場を対象に、3W 処理に関する実績データなどの情報を収集・整理し、3W 処理の運転上の課題抽出とその解決方策（短期対策および長期対策）を検討した。

④ 水処理能力増強方策の検討手法の確立

既存の水処理施設に対して、新技術（水処理能力増強技術）の導入を含めた最適な水処理能力増強方策を選定するための手法の検討を行い、汎用的な検討項目および手順を盛り込んだ検討フローを作成した。

(2) 水処理改築低コスト化技術

① 仮設水処理技術の開発・実証

パッケージ型 MBBR 装置に凝集・ろ過ユニットを組み合わせた仮設水処理技術について、通年での長期実証運転を開始した。当初の 4 ヶ月間の途中段階でのデータではあるものの、主要な成果を以下に示す。

- 反応タンクの HRT が 1.1hr と極めて短い処理条件において、処理水の BOD 濃度を目標値 (15mg/L) 以下まで低減できる可能性が示された。ただし、流入原水の BOD 濃度が高い場合には目標値を超過するケースも見られたことから、適用する流入水濃度に上限を設ける必要が出てくる可能性も示唆された。

- 目標 BOD 濃度の達成に対して、後段の凝集・ろ過ユニットにおける S-BOD の低減効果が寄与していることが示された。

(3) 汚泥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

高効率凝集装置と同軸差動式スクリーンプレス脱水機の組合せた汚泥脱水技術について、通年での実証運転を開始した。以降の 4 ヶ月間（2022 年 12 月～2023 年 3 月）の途中段階でのデータではあるものの、主要な成果を以下に示す。

- 消化汚泥・混合汚泥において、高効率凝集装置の有無、1 液および 2 液薬注運転の計 8 パターンの脱水運転を行い基礎データの取得後、実証試験での性能目標値に対する性能確認試験を実施した。
- 性能確認試験では、研究開発目標および性能目標値に対して概ね良好な結果が得られた。

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のとおりである。

(1) 水処理能力増強技術

- 水処理能力増行技術の開発・実証：2 技術に関する共同研究を継続すると共に、2023 年度に新規に共同研究を公募し、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（実証実験など）に着手する。
- 水処理能力増強方策の検討手法の体系化：新技術の効果（能力増強効果、コスト削減効果など）をよりの確に定量化する手法の検討を開始する。
- 事後評価調査（導入フォローアップ）：最終沈殿池用傾斜板沈殿分離装置の導入施設における性能などの調査を継続する。

(2) 水処理改築低コスト化技術

- 仮設水処理技術の開発・実証：パッケージ型 MBBR を用いた仮設水処理技術について長期実証運転（通年試験）を進め、共同研究を完了する。

(3) 汚泥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：高効率凝集装置と同軸差動式スクリーンプレス脱水機を組み合わせた汚泥脱水技術について、2023 年度も実証運転を継続する。

(4) 事後評価調査(低コスト化技術)

- 「圧入式スクリーンプレス脱水機（IV型）による濃縮一体化脱水法」の事後評価調査を開始する。

謝辞

本検討の実施にあたり、多大なご協力を頂いた下水処理場および自治体の職員各位に感謝の意を表する。

2.2 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。

2.3 節に掲載した事後評価調査の対象の下水処理場の関係者各位、3.1 節および 4.1 節に掲載した実証実験の実施場所である下水処理場の関係者各位にも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いたします。

参考文献

- 1) 日本下水道事業団：既存施設活用による改築更新円滑化・処理能力増強（2017 年度～2021 年度）報告書，2022.
- 2) 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.
- 3) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説－2019 年版－，日本下水道協会、2019.
- 4) 松岡秀美，濱田眞輔，安中裕子，小関進介：パッケージ型担体処理装置を用いた仮設排水処理システムの実用化研究，第 59 回下水道研究発表会講演集，pp.775-777，2022.
- 5) 安中裕子，松岡秀美，濱田眞輔，小関進介，山森隼人，村岡正季，糸川浩紀：パッケージ型担体装置を用いた仮設排水処理システムの処理性能，第 60 回下水道研究発表会講演集，pp.997-999、2023.

II-2 下水道資源利活用技術の開発

熊越瑛、島田正夫、新川祐二

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、リンなどの「下水道資源」をエネルギーや肥料として利活用することより循環型社会の形成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とから、下水汚泥のエネルギー利用や農業利用について、下水処理場の広域化・共同化や改築に合わせた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 割以上が有機分であり、乾燥や炭化などの固形燃料化処理により燃料として活用できる。下水汚泥由来の固形燃料は、火力発電所やセメント工場など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。さらに、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・リン回収など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・アンモニア、リン、有機物、その他微量元素などが含まれており、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ているが、全国の下水処理場が有する下水道資源の賦存量や下水処理場内の各処理工程における下水道資源の動態などの調査を実施した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、速やかに社会実装可能な新技術の開発を実施する。

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[†]。

* 「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。

† 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。

（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、バイオガス利活用を除いてエネルギー利用されたものの割合は2021年度時点において12%程度²⁾にとどまっており、更なる普及拡大が必要であるが、そのためには技術のラインナップをさらに充実させる必要がある。そこで、下水汚泥資源エネルギー利活用技術（以下、「下水汚泥資源エネルギー利活用技術」と称する）の更なる普及拡大を図るために、国内外のバイオマスの利活用状況や関連技術などを調査するとともに、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、下水道資源のうちエネルギー利活用に資する資源の量や回収技術などについては必ずしも知見が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などのエネルギー資源の賦存量を調査するとともに、これらの回収・利用技術などの開発動向調査を実施する。これらを踏まえて技術の体系化を行うことにより、下水汚泥エネルギー資源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（(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などに関して、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

下水処理場に流入するアンモニアなどの下水道資源の有効利用に向けて、2022年度から2025年度まで継続的に、文献調査により基礎情報を収集するとともに、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、下水汚泥資源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。

（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、下水汚泥資源の農業利活用技術（以下、「下水汚泥資源農業利活用技術」と称する）について、更なる普及拡大を図る必要がある。下水汚泥資源農業利活用技術の更なる普及拡大を図るためには、その他のバイオマスの利活用状況や利活用技術などを踏まえ、技術のラインナップをさら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などを行うことにより、基礎的な知見を増やす必要がある。そこで、国内外のバイオマスの農業利活用に関する状況や技術などを調査し、公募型共同研究などを新たに実施する。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など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、その他微量元素などの資源の賦存量を把握するとともに、これらの回収・利用技術などの調査を実施する。下水汚泥肥料については、技術開発実験センターで肥料を製造するとともに施肥効果などの調査

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事によりにより、下水汚泥農業資源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 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農業利用状況などに関して、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、その他微量元素などの下水道資源の有効利用に向けて、2022 年度から 2024 年度まで継続的に、文献調査により基礎情報を収集するとともに、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 年度以降に下水汚泥資源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（実証研究）などの競争的研究資金を活用した研究にも積極的に参加する。

④ 下水汚泥肥料の製造および施肥効果などに係る基礎調査

JS 技術開発実験センターにおいて、下水汚泥肥料の肥料成分の測定や施肥効果の検証を目的とした下水汚泥肥料の製造を実施する。また、地方公共団体の要請に基づき、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

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、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。なお、前述のとおり本開発項目は 2 つに分割されたが、本年度調査はそれ以前に実施したものであることから、次章以降では、検討実施時点における内容に準拠して開発項目を 2 つに分けず、2.1 節および 2.2 節についても現行の 2 つの開発項目を統合して実施した内容として報告する。

(1) 下水汚泥資源エネルギー利活用技術

- ① バイオマス利活用に関する調査（2.1 節）
- ② 下水道資源の有効利用に係る基礎調査（2.2 節）

(2) 下水汚泥資源農業利活用技術

- ① バイオマス利活用に関する調査（2.1 節）
- ② 下水道資源の有効利用に係る基礎調査（2.2 節）
- ④ 下水汚泥肥料の製造および施肥効果などに係る基礎調査（2.3 節）

2. 下水汚泥資源利活用技術

2.1 バイオマス利活用に関する調査

(1) 検討の概要

下水汚泥のバイオマスとしての有効利用の促進を図るためには、下水汚泥やその他のバイオマスの利活用状況や利用技術などを把握した上で、下水汚泥資源利活用技術の開発の方向性を見極めることが重要である。そこで本検討では、2022 年度からの 2 か年で、下水汚泥に限らないバイオマスを対象として、国内外における利活用の状況や関連技術などの調査を実施する。

このうち本年度は、(a)日本国内における汚泥等のバイオマス資源の現在の発生量および有効利用状況、(b)下水道事業において導入可能性が高いと思われるバイオマス資源の有効利用技術および有効利用事例、の 2 点について調査を実施した。

(2) 検討方法

① 汚泥等バイオマス資源の発生量と有効利用状況

国内における汚泥等の各種バイオマス資源の発生量、処分量、有効利用率および有効利用方法について、公開されている統計情報などをもとに整理した。調査対象としたバイオマス資源は、下水汚泥、家畜排せつ物、農業集落排水汚泥、し尿・浄化槽汚泥、食品廃棄物である。

法令などに基づくこれらバイオマス資源の廃棄物としての分類および処理人口などを表 2-1 に示す。下水汚泥は、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（廃掃法）の適用を受け、産業廃棄物に該当する。一方で、農業集落排水汚泥やし尿・浄化槽汚泥は、「浄化槽法」の適用を受け、一般廃棄物に該当する。

動物のふん尿は、家畜農業由来の場合は廃掃法の適用を受け、産業廃棄物に該当する。一般家庭で飼育される動物由来のふん尿は一般廃棄物となるが、その発生量に係る統計情報の入手が困難なため、本調査ではこれを含まないものとした。

食品廃棄物は廃掃法に基づき分類すると、食料品製造業から発生する食品加工廃棄物は産業廃棄物、レストランやスーパーから発生する野菜のくずなどは事業系一般廃棄物、一般家庭から排出される家庭系廃棄物に大別される。しかし、これらには食品以外の廃棄物も含まれているため、食品廃棄物のみを抽出して発生量を整理することが困難である。そのため本調査では、環境省の公表データをもとに、食品廃棄物は事業系食品廃棄物と家庭系食品廃棄物に大別して発生量および有効利用量を整理するものとした。

② 汚泥等バイオマス資源の有効利用技術および有効利用事例

下水汚泥以外のバイオマス資源に関する国内の有効利用技術および有効利用事例について、インターネット検索により情報を収集し、技術の特徴、下水道事業で適用する場合の課題などについて整理した。インターネット検索では、検索エンジンとして Google を用い、検索語として「家畜排せつ物」、「農業集落排水汚泥」、「し尿」、「浄化槽汚泥」、「食品廃棄物」などの各バイオマスに関する単語と、「リン回収」、「アンモニア回収」、「再利用」の回収方法に関する単語を組み合わせることで検索することにより、技術情報を取得した。

表 2-1 各バイオマスの廃棄物としての分類および処理人口など

| バイオマス種別 | 廃棄物としての分類 | 処理人口など |
|----------|---|--|
| 下水汚泥 | 廃掃法第 2 条第 4 項に該当する下水道汚泥については、下水道管理者が自ら行う処理については「下水道法」の適用を受けるものであり、「廃掃法」の適用は受けないこととされている（衛環 233 号（平成 4 年 8 月 13 日））。しかし、処理を他人へ委託する場合は「廃掃法」の適用を受けることとなり（国都下企第 74 号（平成 16 年 3 月 29 日））、その際、下水道汚泥は産業廃棄物に該当する（環整 45 号（昭和 46 年 10 月 25 日））。 | 下水道人口：101,226 千人（2020 年度末） ³⁾ |
| 家畜排せつ物 | 廃掃法施行令第 2 条第 10 号および第 11 号に規定されているとおり、「畜産農業」由来の動物のふん尿は、産業廃棄物となる。一般家庭で飼育されている動物のふん尿は、一般廃棄物となる。 | 乳用牛：137 万 1 千頭 ⁴⁾ 肉用牛：261 万 4 千頭 ⁴⁾ 豚：894 万 9 千頭 ⁴⁾ 採卵鶏：1 億 8 千 266 万羽 ⁴⁾ ブロイラー：1 億 5 千 923 万羽 ⁴⁾ |
| 農集排汚泥 | 集落排水事業の汚水処理施設は、浄化槽法第 2 条第 1 号に規定される浄化槽として位置付けされることから、この処理施設より排出される集落排水汚泥は、浄化槽汚泥として位置付けられ、一般廃棄物に該当する。 | 農集排人口：3,211 千人（2020 年度末） ³⁾ |
| し尿・浄化槽汚泥 | し尿は非水洗の汲み取り便所から、浄化槽汚泥は、浄化槽法第 2 条第 1 号に規定される浄化槽から排出される汚泥であり、廃掃法第 2 条第 2 項および施行通知 環整 128 号・環産 42 号（昭和 54 年 11 月 26 日）「廃棄物の処理及び清掃に関する法律の疑義について」より、一般廃棄物に該当する。 | 非水洗化人口：5,541 千人（2020 年度末） ⁵⁾ 合併処理浄化槽処理人口：11,470 千人（2020 年度末） ⁵⁾ 単独処理浄化槽処理人口：9,319 千人（2020 年度末） ⁵⁾ |
| 食品廃棄物 | 食品系バイオマスのうち、食品加工廃棄物に関して、食料品製造業（日本産業分類の中分類）において、原料として使用した動物または植物に係る固形状の廃棄物は動植物性残さに該当し、産業廃棄物になる。しかし、業種に該当しない場合、レストランやスーパーの野菜のくずなどは事業系一般廃棄物となる。一般家庭から排出される生活系厨芥類は生活系一般廃棄物であり、事業所などから発生する厨芥類については、事業系一般廃棄物となる。 | |

(3) 検討結果

① 汚泥等バイオマス資源の発生量と有効利用状況

汚泥等バイオマス資源の発生量（湿潤重量または乾物換算量）、有効利用率、有効利用方法について、最新の公開情報をもとに整理した結果を表 2-2 に示す。農業集落排水汚泥は、2014 年度以降に発生量などのデータが公表されていないが、農業集落排水人口はほぼ横ばいであることから、2014 年度以降の発生量の変化は小さいものと考えられる。各汚泥等バイオマス資源の調査時点における最新年度の乾物換算の発生量は、下水汚泥 228 万 t/年、家畜排せつ物 1,309 万 t/年、農業集落排水汚泥 3 万 t/年、浄化槽汚泥 14 万 t/年、し尿 7 万 t/年、事業系食品廃棄物 351 万 t/年、家庭系食品廃棄物 151 万 t/年であった。

各汚泥等バイオマス資源の調査時点における最新年度の有効利用率は下水汚泥 75%、家畜排せつ物 86%、農業集落排水汚泥 69%、浄化槽汚泥 16%、し尿 16%、事業系食品廃棄物 72%、家庭系食品廃棄物 7%となった。下水汚泥の場合は大部分が焼却処理されているため、リサイ

クル率もセメント化などの建設資材化の割合が 51%を占める。家庭系食品廃棄物の有効利用率は 7%と極めて低い、大部分が可燃ごみとして焼却処分されているためと考えられる。家庭系食品廃棄物をリサイクルする手法のうち、下水道に関するものとしては、ディスポーザーを用いて流入下水とともに受け入れる方法や、分別収集した後に下水道施設で受け入れる方法などが挙げられる。しかし、具体的な受け入れについては、行政上での連携や住民の協力、具体的な手法の策定などについて検討する必要がある。

表 2-2 各種バイオマスの発生状況および有効利用率

| 計上対象など | | 発生量 万 t/年 | 対象年 | 有効利用率 | 備考 |
|--------|---------------------------|--------------------------------|-------------------|--|--|
| 下水汚泥 | 発生汚泥（引抜き）* | 48,270 ⁶⁾ ** | 2020 (令和 2 年) | — | *初沈+余剰+混合汚泥 **単位換算：万 m ³ =万 t |
| | 濃縮汚泥 | 7,800 ⁷⁾ | 2020 (令和 2 年) | 74% ⁷⁾ | |
| | 発生汚泥乾燥固形物 | 228 ⁷⁾ | 2020 (令和 2 年) | 75% ²⁾ 建設資材 51% 緑農地 14% 固形燃料 9% | |
| | 下水道バイオマスリサイクル率 | | 2020 (令和 2 年) | 37% ²⁾ 農業利用 10% バイオガス 16% 汚泥燃料焼却 排熱利用など 11% | |
| 家畜排せつ物 | ふん尿排せつ物 (乾物換算)* | 8,057 ⁴⁾ (1,309) | 2022 (令和 4 年) | 86% ⁷⁾ 肥料化 70%* 浄化(尿)15% メタン化 1% | 尿からは固形物発生は無いとして、各家畜のふん尿排出割合およびふんの含水率から排泄物発生量を用いて乾物換算 *処理形態別分量から推計 |
| 農集排汚泥 | 引抜き汚泥 (乾物換算)** | 163 ³⁾ * (3.3) | 2014 (平成 26 年) | 69% ⁸⁾ *** 農地還元 48% 建設資材 21% | *含水率 98%と仮定して換算 **固形物濃度 2% ***2020 年度有効利用率 71% |
| 浄化槽汚泥 | 引抜き汚泥 (乾物換算)* | 1,456 (14.1) | 2020 (令和 2 年) | 16% ⁵⁾ ** 堆肥化、メタン 発酵 13.5% 農地還元 2.4% | 単位：10×千 kL=万 t *SS=9,700mg/L ⁹⁾ **し尿処理施設処理工程残渣のバイオマス有効利用率(発生汚泥の 91%→し尿処理施設) |
| し尿 | 引抜きし尿 (乾物換算)* | 549 ⁵⁾ (7.1) | 2020 (令和 2 年) | 16% ⁵⁾ ** 堆肥化、メタン 発酵 13.5% 農地還元 2.4% | 単位：10×千 kL=万 t *SS=13,000mg/L ⁹⁾ **し尿処理施設処理工程残渣のバイオマス有効利用率 |
| 食品廃棄物 | 事業系 廃棄物 (乾物換算) | 1,756 ¹⁰⁾ (351) | 2019 (令和元年) | 72.3% ¹⁰⁾ 飼料化 52%** 肥料化 11% エネルギー化 6% | 家庭生ごみの含水率を転用 *家庭生ごみ含水率 80% (代表値) **食品リサイクル法における再利用割合 |
| | 家庭系 廃棄物 (乾物換算) * | 754 ¹⁰⁾ (151) | 2019 (令和元年) | 7% ¹⁰⁾ 肥料化・メタン 化など 7% | |

② 汚泥等バイオマス資源の有効利用技術および有効利用事例

現時点で下水汚泥を対象とした適用がない、あるいは適用があったとしても過去にあまり採り上げられてこなかった技術のうち、今後の適用可能性が高いと思われる 12 の技術および有効利用事例を抽出し、適用可能性に係るコメントと併せて表 2-3 のとおり整理した。同表の「検討レベル」については、参考にした論文などにに基づき、実験室などでの基礎的な検討段階である「基礎」、技術の適用対象となる現場でのパイロットまたは実証プラントなどでの検討段階である「実証」、他分野汚泥を対象に既に実用化されている技術を「実用」に分類したものである。

8 技術が家畜排せつ物を対象としたもの、3 技術が農業集落排水汚泥を対象としたもの、2 技術がし尿・浄化槽汚泥を対象としたもの、2 技術が食品廃棄物を対象としたもの、1 技術が各種有機性廃棄物を対象としたものであった。検討レベルは、6 技術が「実用」、5 技術が「実証」、1 技術が「基礎」であった。

下水汚泥への適用にあたってのハードルが比較的 low 実現可能性が高いと思われるのは、同表に示す No.7、8 の堆肥化工程の排気からのアンモニア回収技術、No.9、10 のペレット化技術などである。

また、今後の研究開発動向を注視すべき新たな技術として、No.4 のメタンから常温反応でメタノールとギ酸を生産する技術や、No.5 の昆虫の飼料としての利用技術などが挙げられる。

表 2-3 下水汚泥への実用可能性が高い技術の概要

| No. | 技術名 | 対象 バイオマス | 検討レベル | | | 備考 | 下水道施設への 適用可能性 | 参考 文献 |
|-----|-----------------------------|--------------------|-------|----|----|------------------------------|--|----------|
| | | | 基礎 | 実証 | 実用 | | | |
| 1 | 亜臨界水処理による未利用有機物の高速高度資源化 | 家畜排せつ物、食品廃棄物、有機性汚泥 | ○ | | | 基礎実験 | バイオマス資源の肥料化および飼料化に資する技術であるが、検討レベルは基礎段階であり、技術の低コスト化および反応の安定化を図る必要がある。 | 11)-13) |
| 2 | 豚ふん堆肥からのリンの回収（炭化、粉碎分離システム） | 家畜排せつ物 | | ○ | | ベンチスケール炭化ロータリーキルン（500φ×4500） | 豚ふん堆肥の炭化過程における炭化粒子表面へのリンの集積現象を応用したものであり、下水汚泥の炭化においても同様の現象が起き得るのか検証する必要がある。 | 14)-17) |
| 3 | 消化液濃縮液肥、消化液脱水ケーキ炭製造技術 | 家畜排せつ物 | | ○ | | メタン発酵投入量：牛糞尿 4t、野菜残渣 0.6t | 技術的には従来の技術の延長線上であり、技術導入に係るハードルは低いと考えられるが、運転管理費用が高額になる懸念がある。 | 18) |
| 4 | バイオガスからメタノールとギ酸を製造する光化学プラント | 家畜排せつ物 | | ○ | | パイロット試験を開始するという報道 | 低コストでの反応の安定性が図れるとすれば、メタンガスの有効利用先が大きく開けることとなり、今後注視が必要な技術である。 | 19),20) |

| | | | | | | | | |
|----|----------------------|--------------|--|--|---|-------------------------------------|--|---------|
| 5 | 昆虫の飼料としての利用技術 | 家畜排せつ物、食品廃棄物 | | | ○ | 家畜排せつ物を利用した養殖実証（現状の主力は食品廃棄物を利用した養殖） | イエバエ、アメリカミズバエは家畜排せつ物での飼育が可能であり、下水道施設においても適用可能性が高いと考えられる。これらの昆虫を原料とした飼料化技術の検討は付加価値の高い有効利用という観点から将来性を有していると考えられるが、飼料安全法などの関連法制度への対応が大きな課題と考えられる。 | 21)-25) |
| 6 | 農業集落排水汚泥の天日乾燥技術の改良 | 農集排汚泥 | | | ○ | 実験規模は不明だが小規模と推測される | 小規模下水処理場への適用に関して技術的なハードルは低いと考えられるが、近隣への悪臭や、生産される堆肥および液肥の利用先の確保が課題となる。 | 26),27) |
| 7 | 吸引通気式堆肥化技術 | 家畜排せつ物 | | | ○ | 搾乳牛 120頭・母豚 200頭（実証プラント） | 堆肥化過程における臭気対策として、排気中のアンモニア回収と熱回収および回収熱の有効活用を狙った技術であり、下水汚泥の堆肥化においても適用可能な技術と考えられる。 | 28)-30) |
| 8 | 高度堆肥化システム（スマートコンポスト） | 家畜排せつ物 | | | ○ | No.1の技術開発を受けた研究開発の統合 | No.7と同様に、排気中のアンモニア回収と熱回収および回収熱の有効活用を狙った技術であり、下水汚泥の堆肥化においても適用可能な技術と考えられる。 | 31) |
| 9 | 成分調整堆肥の生産利用技術 | 家畜排せつ物 | | | ○ | 日生産量 6t, 成分調整ペレット堆肥化 | 肥料取締法の改正により、ペレット化を含めて堆肥の高付加価値化に道を開くものであり、No.1、No.2の技術で回収されたアンモニアの有効利用先として下水道施設への適用が可能な技術と考えられる。 | 32)-37) |
| 10 | 粒状肥料化技術 | 農集排汚泥 | | | ○ | 処理人口 1,000人に対する汚泥処理施設 | 20年程度前に実用化された小規模向けの技術であり、下水道施設への適用には、技術的な課題よりも生産される肥料の利用先と流通方法の検討が重要と考えられる。 | 38) |

| | | | | | | | | |
|----|------------------------|----------------|--|--|---|--|---|---------|
| 11 | メタン発酵消化液（液肥）の肥料利用 | 農集排汚泥、し尿・浄化槽汚泥 | | | ○ | JARUS 発酵槽 2.5m ³ 、みやま市発酵液 20,000t/年 | 嫌気性消化は下水道施設で従来から導入されており適用可能性は極めて高いが、液肥利用というシステムを効率的に運用することが大きな課題となる。 | 39)-42) |
| 12 | 自然エネルギー（太陽熱）を利用した汚泥肥料化 | し尿・浄化槽汚泥 | | | ○ | し尿・浄化槽汚泥日処理量 1m ³ | 小規模下水処理場への適用に関して技術的なハードルは低いと考えられるが、近隣への悪臭や、生産される堆肥および液肥の利用先の確保が課題となる。 | 43) |

(4) まとめ

今回の調査で得られた最新年における各汚泥等バイオマス資源の乾物換算発生量は、下水汚泥 228 万 t/年、家畜排せつ物 1,309 万 t/年、農業集落排水汚泥 3 万 t/年、浄化槽汚泥 14 万 t/年、し尿 7 万 t/年、事業系食品廃棄物 351 万 t/年、家庭系食品廃棄物 151 万 t/年であった。また、各汚泥等バイオマス資源の調査時点における最新年度の有効利用率は下水汚泥 75%、家畜排せつ物 86%、農業集落排水汚泥 69%、浄化槽汚泥 16%、し尿 16%、事業系食品廃棄物 72%、家庭系食品廃棄物 7%であった。家庭系食品廃棄物の有効利用率が 7%と最も低く、家庭系食品廃棄物のリサイクルシステムの確立が今後のバイオマス資源有効活用の一つの課題となる。この解決方法の一つとして、下水道施設における家庭系食品廃棄物の受け入れが挙げられる。

下水汚泥以外のバイオマス資源の有効利用技術について、下水汚泥での適用事例がなく、今後の適用可能性が高い技術として、12 技術が抽出された。この中で実現可能性が高い技術は堆肥化工程の排気からの悪臭成分であるアンモニアの回収、ペレット化などである。メタンから常温反応でメタノールとギ酸を生産する技術や、廃棄物を昆虫の飼料として利用する技術も研究が進められており、今後の開発動向が注視される。

2.2 下水道資源の有効利用に係る基礎調査

2.2.1 下水道資源の回収などに関する文献調査

(1) 検討の概要

下水道資源の回収および有効利用を促進するためには、現時点における各種下水道資源の回収および利用技術の開発や実用化の動向を把握した上で、普及促進に向けた課題を把握する必要がある。このため、本調査では、2022 年度の 1 か年において、下水道資源の回収・利用技術の開発動向と、実用化された技術の事例と課題について、文献調査を実施した。

(2) 検討方法

本調査では、下水に含まれるリン、窒素、その他資源の回収（除去を主目的とするものを含む）および有効利用に資する技術を対象に、国内における学術誌、業界誌、インターネット掲載記事などの公開情報をもとに研究開発・導入などの事例を収集し、技術概要、検討レベル、課題などを整理した。

下水道分野における学術誌・業界誌として、「下水道協会誌」、「再生と利用」、「下水道協会誌論文集」、「月刊下水道」、「用水と廃水」、「下水道研究発表会講演集」を選定し、直近 10 年間（2012 年～2022 年）に掲載された報文を調査対象とした。また、下水に類似する排水や廃棄物として、家畜排せつ物、食品廃棄物、し尿・浄化槽汚泥についても補足的に、学術誌や業界誌などを中心に調査を実施した。一方、インターネット検索では、検索エンジンとして Google を用いて、「窒素」、「リン」などの調査対象物質に「回収」、「除去」などのキーワードを組み合わせることで検索することにより情報を収集した。

収集した報文などについて、窒素、リン、その他有用資源の回収・利用技術に分類した上で、表 2-4 に示した考え方にに基づき「基礎」、「実証」、「実用」のいずれかの検討レベルを設定するとともに、技術開発・実用化の状況および課題を整理した。

表 2-4 検討レベルの考え方

| 検討レベル | 検討レベルの考え方 |
|-------|---|
| 基礎 | ラボスケールやベンチスケールによる基礎的研究・検討など |
| 実証 | 下水処理場に設置したパイロットスケール規模以上の実証試験など ※B-DASH による検討は実規模の場合が多いが、本調査では「実証」として分類 |
| 実用 | 下水処理場における実規模施設の試験検討、実用事例など |

(3) 検討結果

本稿では調査結果のうち、各技術の検討レベル毎の報文数、検討レベルが「実用」の報文を中心に、試験検討や実用事例の内容および課題などを紹介する。

① リンの回収・利用技術

本調査で得られたリン回収・利用技術の概要、検討レベル毎に得られた報文数を表 2-5 に示した。吸着法 13 報、MAP（リン酸マグネシウムアンモニウム）法 20 報、HAP（ヒドロキシアパタイト）法 6 報、抽出法 32 報、凝集沈殿法 3 報、その他 8 報であった。

吸着法については、検討レベルが「実用」の報文は見られず、「実証」の報文が 4 報あった。下水処理水や脱水ろ液を対象としたパイロット規模での吸着剤によるリン除去性能に関するものであり、いずれも良好な試験結果が示されていた^{44)・47)}。

MAP 法については、既に実用化されていて実機も稼働しており、その運転事例や課題についての報文が出ているほか、パイロット規模での新規システム開発事例などの報文が最近でも多数出ていて技術開発も進んでいる。本調査においても、検討レベルが「実用」の報文が 4 報あった。いずれも脱水ろ液や消化汚泥を対象とした実施の運転事例に関する報文であった。技術的課題として、MAP 顆粒生成のための運転調整が難しい点、機器の劣化、維持管理の負担などが挙げられており、今後の普及展開に向けた課題として考えられる^{48)・51)}。

HAP 法について、検討レベルが「実用」の報文 1 報は、し尿・浄化槽汚泥を対象とした汚泥再処理センターにおける実設備の導入事例紹介であった⁵²⁾。

抽出法について、検討レベルが「実用」の報文は 7 報あり、いずれも下水汚泥の焼却灰を対象として灰アルカリ法でリンを回収する事例であった。回収プラントの稼働初期において、生産量と肥料メーカーの需要の間にギャップが生じること、品質の安定化などが課題として挙げ

られており、その後の流通経路を確立したことが問題解決の一助になったとされている^{53)・55)}。
また、別の施設における課題として稼働状況や回収物の品質の安定化が挙げられていた⁵⁶⁾。

上記以外の技術として、その他に区分されたリンの利用技術のうち、検討レベルが「実用」の報文は、放流水中のリンの利用を目的とした季節別運転管理に関するものであった^{57)・58)}。

総合的な結論としては、既に実用化されている MAP 法、HAP 法、抽出法などを対象に導入を促進するためには、設備の維持管理性や品質の安定化、流通の確保などの課題に対応する必要があると言える。

表2-5 リンの回収・利用技術

| 技術名 | 技術概要 | 報文数 | | | 合計 |
|-------|--|-------|----|----|----|
| | | 検討レベル | | | |
| | | 基礎 | 実証 | 実用 | |
| 吸着法 | 無機系、有機系の選択的リン吸着剤を充填した塔に原水を通液することで水中のリンを吸着除去するものであり、吸着剤からのリンの脱着および吸着剤の再生利用が重要となる。 | 9 | 4 | — | 13 |
| MAP 法 | 返流水などのリンおよびアンモニアの含有量が多い排水を対象として、水中のリン酸イオンに塩化マグネシウムなどのマグネシウムイオン源を添加し、さらに pH 調整することで、リン酸マグネシウムアンモニウム $MgNH_4PO_4$ を晶析させるものである。 | 1 | 15 | 4 | 20 |
| HAP 法 | 返流水などの高濃度リン含有排水を対象として、水中のリン酸イオンに消石灰や塩化カルシウムなどのカルシウムイオン源を添加し、さらに pH 調整することでヒドロキシアパタイト $Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$ を種結晶の表面に晶析させるものである。 | 3 | 2 | 1 | 6 |
| 抽出法 | 焼却灰からリン酸あるいはリン酸塩を回収する手法で、灰アルカリ抽出法、灰酸抽出法、部分還元溶融法があるが、灰アルカリ抽出法が一般的であり、NaOH 溶液を添加してリン酸を溶出させ、消石灰を反応させ、リン酸カルシウムとして回収する。 | 17 | 6 | 7 | 32 |
| 凝集沈殿法 | アルミニウムや鉄などの凝集剤を加えてリン化合物としてリンを析出させ沈降除去を行う方法である。低濃度から適用可能であるが、大量の汚泥が発生する。 | — | 2 | 1 | 3 |
| その他 | - | 6 | - | 2 | 8 |

② 窒素の回収・利用技術

本調査で得られた窒素の回収・利用技術の概要、検討レベル毎に得られた報文数を表2-6に示した。アンモニアストリッピング法4報、吸着法2報、生物電気化学的手法1報、微細藻類4報、その他7報であった。なお技術によっては、検討レベルが「実用」に区分された報文が得られなかったものもあるため、その場合は「実証」や「基礎」に区分された報文も含めて紹介する。

アンモニアストリッピング法については既に実用化されている技術であるが、今回の調査では検討レベルが「実用」の報文が1報あった。スラッジセンターにおける返流水を対象とした

事例の紹介であった⁵⁹⁾。ただし、本報文で紹介されている事例では窒素の回収を目的とはしておらず、返流水中から除去して得られたアンモニアは酸化・還元処理を経た後に大気拡散されている。

吸着法については、消化汚泥からのアンモニア除去に関する報文が得られた。いずれの報文も消化液を対象として吸着剤を用いてアンモニア除去を行うものであり、本調査における検討レベルは「基礎」に分類した^{60),61)}。

生物電気化学的手法については、微生物燃料電池を用いた硝化、脱窒による窒素除去に関する報文が得られた。一槽式の微生物燃料電池での硝化、脱窒による窒素除去特性についての報文であり、本調査における検討レベルは「基礎」に分類した⁶²⁾。

微細藻類については、下水、二次処理水、脱水ろ液などを対象にした微細藻類の培養条件に関する報文が得られたが、本調査における検討レベルは「基礎」に分類した⁶³⁾⁻⁶⁶⁾。

その他の窒素の利用技術として検討レベルが「実用」の報文は、放流水中の窒素の利用を目的とした季節別運転管理に関するものなどがあつた⁶⁷⁾。

また、基礎研究レベルではあるが、内閣府のムーンショット型研究開発制度により、2020年から窒素資源の回収に関する研究プロジェクト「産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出」が開始されている⁶⁸⁾。下水道分野に対しては、下水中のアンモニア性窒素に加えて有機性窒素をアンモニア資源として変換・回収することを含めた一連のシステムの開発を目指しており、2028年からパイロット試験を行う予定とされている。

総合的な結論としては、窒素の回収・利用を目的とした「実用」レベルの報文は、アンモニオストリッピング法によるアンモニア除去に関する1報しか得られなかったが、内閣府主導の基礎研究などが進められており、今後の開発動向に注視する必要がある。

表2-6 窒素の回収・利用技術

| 技術名 | 技術概要 | 報文数 | | | |
|---------------|--|-------|----|----|----|
| | | 検討レベル | | | 合計 |
| | | 基礎 | 実証 | 実用 | |
| アンモニアストリッピング法 | 返流水などの高濃度アンモニア含有排水を対象として、アルカリ性かつ加温条件下でばっ気により液中からアンモニアを揮散させて除去するが、排気中のアンモニア濃度が低いのが回収への課題である。 | 3 | — | 1 | 4 |
| 吸着法 | 無機系、有機系の選択的アンモニア吸着剤を充填した塔に原水を通液することで水中の窒素を吸着除去するものであり、吸着剤からの窒素の脱着および吸着剤の再生利用が重要となる。 | 2 | — | — | 2 |
| 生物電気化学的手法 | 発電菌と呼ばれる微生物の働きにより、排水中の有機物を分解処理するとともに、アンモニア性窒素を酸化することが可能である。 | 1 | — | — | 1 |
| 微細藻類 | 下水処理水などに含まれるアンモニア性窒素などの栄養塩により微細藻類などを集積培養して得られたバイオマスを飼料原料、肥料原料、メタン発酵原料として利活用させるものであるが、薬品成分など特異な有価物を産生する藻類を対象とする場合もある。 | 4 | — | — | 4 |
| その他 | — | — | 2 | 5 | 7 |

③ その他資源の回収・利用技術

本調査では、その他の資源としてカリウムに関する報文が得られた。カリウムの回収・利用技術の概要、検討レベル毎に得られた報文数を表 2-7 に示した。MPP（リン酸カリウムマグネシウム）法が 1 報、生物吸着法が 3 報、その他が 1 報であり、本調査の分類ではいずれの検討レベルも「基礎」であった。

MPP 法はリンとカリウムが同時に回収可能な技術であるが、本報では下水処理場の汚泥処理返流水について最適な MPP の晶析条件が検討されていた⁶⁹⁾。生物濃縮法ではゼオライト吸着した下水中のカリウムを塩化ナトリウム水溶液へ溶脱させ、好塩古細菌を用いて生物濃縮した後にカリウムを回収する手法である。本調査で得られた報文では、好塩古細菌の培養条件の最適化や生物濃縮後の塩化カリウムの分離手段の検討などが行われていた^{70)・72)}。その他としては机上検討の報文で、「生産型下水道システム」を構築する要素の一つとして、RO 膜で処理水や脱ろ液を濃縮してリンやカリウムを含んだ液肥として農業利用するものであった⁷³⁾。

総合的な結論としては、カリウムの回収・利用を目的とした「実証」・「実用」レベルの報文は得られなかった。基礎的な検討や机上検討が行われているが、実用化に向けては更なる検討が必要である。

表 2-7 カリウムなど他成分の回収・利用技術

| 技術名 | 技術概要 | 報文数 | | | |
|-------|--|-------|----|----|----|
| | | 検討レベル | | | 合計 |
| | | 基礎 | 実証 | 実用 | |
| MPP 法 | 返流水などの高濃度カリウム含有水を対象として、塩化マグネシウムなどのマグネシウムイオン源を添加し、さらに pH 調整することで、リン酸マグネシウムアンモニウム $MgKPO_4$ を晶析する。 | 1 | - | - | 1 |
| 生物濃縮法 | ゼオライト吸着した下水中のカリウムを塩化ナトリウム水溶液へ溶脱させ、好塩古細菌を用いて生物濃縮する。 | 3 | - | - | 3 |
| その他 | - | 1 | - | - | 1 |

(4) まとめ

本調査では、下水に含まれる窒素、リン、その他資源の下水道資源の有効利用を促進することを目的として、回収・利用技術の開発動向と、実用化された技術の事例と課題について、文献調査を実施した。

リンについては、既に実用化されている MAP 法、HAP 法、抽出法などを対象に導入を促進するためには、設備の維持管理性や品質の安定化、流通の確保などの課題に対応する必要があると言える。

窒素については、アンモニアストリッピング法について「実用」レベルに区分された報文があったが、これ以外の技術に関する報文の多くは「基礎」に区分され、実用化の事例や課題などに関する情報はほぼ得られなかった。ただし、内閣府主導で窒素資源の回収に関するプロジェクトが行われており、パイロット試験も予定されているため、今後の開発動向に注視する必要がある。

その他の資源として、カリウムの回収について基礎検討段階の複数の報文が得られたが、今後の実用化に向けては更なる検討が必要であると考えられる。

2.2.2 下水道資源に係る動態調査（窒素、リン、カリウム）

（1）検討の概要

下水中には窒素、リン、カリウムなどの下水道資源が含まれているが、下水処理場の各処理工程における動態や、我が国の下水道が有するこれら資源のポテンシャル（以下、「賦存量」と表記）を評価した事例は多くない。

そこで本調査では、2022 年度からの 2 か年において、複数の下水処理場の各処理工程における水質などを測定することで、下水処理場における下水道資源の動態を把握するとともに、我が国の下水道が有する下水道資源の賦存量を推定する。本年度は、3 箇所の下水処理場において調査を実施した。

（2）検討方法

3 箇所の下水処理場を対象に、各処理工程において試料を採取し、水質などの測定を行った。表 2-8 に、調査対象とした下水処理場の平均処理水量の実績値⁶⁾、水処理方式、汚泥処理方式を示す。生活排水を主体とする下水が流入する処理場を対象としたが、幅広い知見を得るために、流入水量規模、水処理方式、汚泥処理方式が異なる 3 箇所を選定した。2023 年 1 月中旬に、各下水処理場において流入水、放流水、生汚泥、余剰汚泥、脱水汚泥、焼却灰（焼却実施箇所のみ）をそれぞれ 1 回ずつ採取し、分析に供した。

表 2-8 各処理場の概要

| 処理場名 | 平均処理水量 (実績値) | 水処理方式 | 汚泥処理方式 |
|----------|---------------------------|---------------------------|------------|
| A 浄化センター | 14,800 m ³ /d | 標準活性汚泥法 (硝化促進運転) | 混合濃縮+消化+脱水 |
| B 浄化センター | 41,200 m ³ /d | 標準活性汚泥法 (硝化抑制運転) | 分離濃縮+脱水+焼却 |
| C 浄化センター | 122,300 m ³ /d | 標準活性汚泥法 (硝化促進運転) + 砂ろ過 | 分離濃縮+脱水+焼却 |

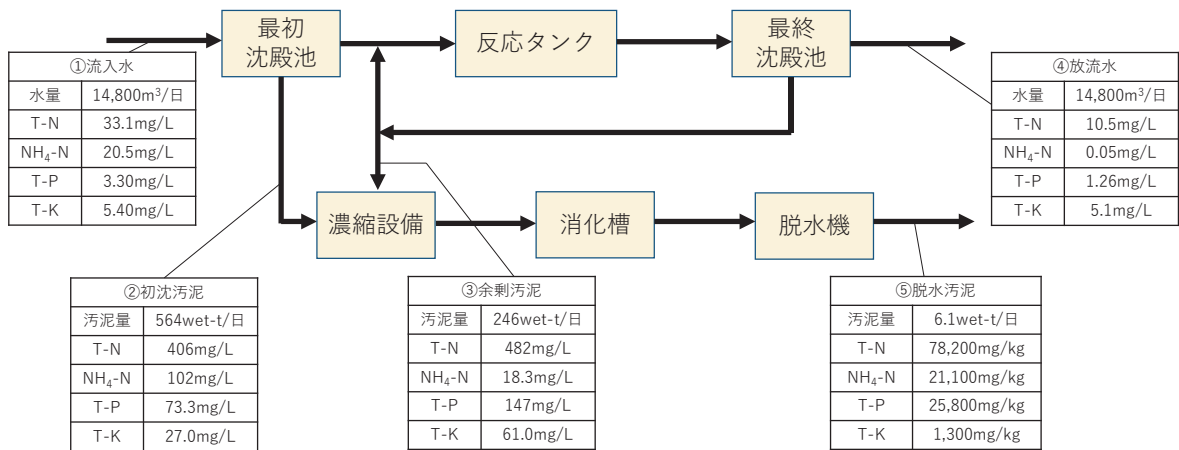
本調査では、窒素、リン、カリウムを対象とし、窒素については全窒素 (T-N)、およびアンモニア性窒素 (NH₄-N)、リンについては全リン (T-P)、カリウムについては全カリウム (T-K) について測定を行った。なお、採取した試料は、浮遊性分および溶解性分をあわせた全量分析とした。

（3）検討結果

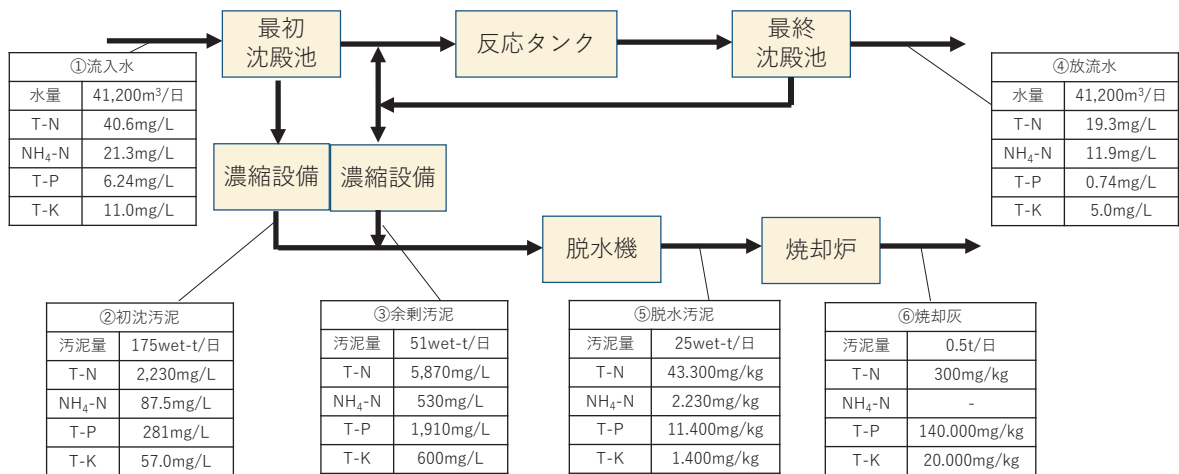
① 各処理工程における下水道資源の動態

各処理場における処理フローと試料の採取位置および測定結果を図 2-1 に示す。

A 浄化センター



B 浄化センター



C 浄化センター

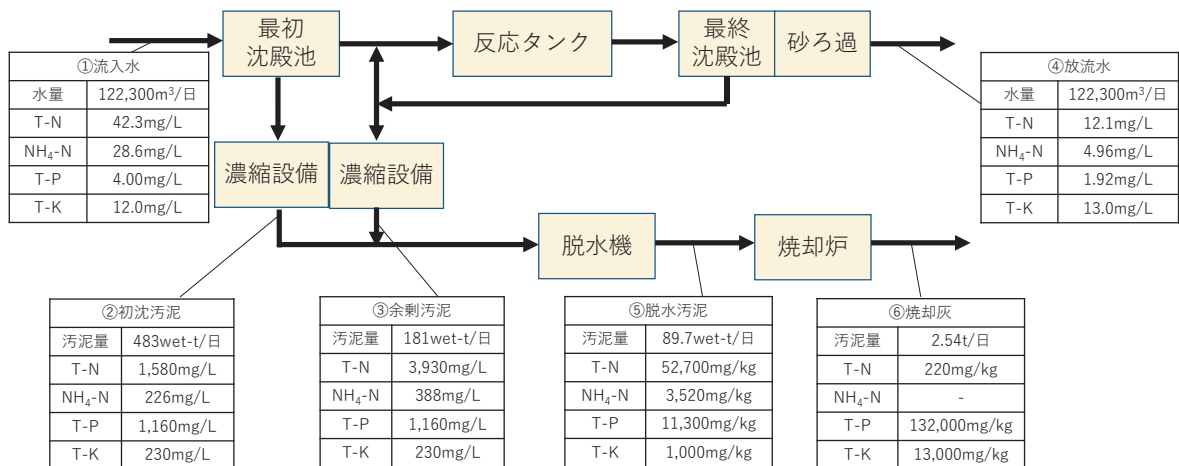


図2-1 各処理場の処理フローと各処理工程における水質測定結果

測定結果をもとに、下水処理過程での各下水道資源のフローを推定した結果を以下に示す。なお、各処理工程における動態は流入水中の賦存量を 100%とした比率である。

・ T-N

流入水の T-N 濃度の 3 処理場の平均値は 38.7mg/L であった。流入水の T-N に対して、29～48%が放流水として流出していた。また、流入水の T-N 量に対して、15～22%が脱水汚泥として排出されていた。焼却灰には T-N はほとんど含まれていない。また NH₄-N については、流入水の平均値は 23.5mg/L であり、このうち硝化促進運転を行っている処理場では 0～17%、硝化抑制運転を行っている処理場では 56%が放流水として流出していた。

・ T-P

流入水の T-P 濃度の平均値は 4.51mg/L であった。流入水の T-P に対して、嫌気性消化を行っている処理場では 38%、嫌気性消化を行っていない処理場では 12～48%が放流水として流出していた。また、流入水に対して 30～50%の T-P が脱水汚泥に含まれていた。焼却灰に含まれる T-P の動態の比率は 27～58%であった。T-P は、T-N、NH₄-N、T-K と異なり脱水汚泥や焼却灰に多く含まれていることから、汚泥処理工程における資源回収や有効利用が期待される。脱水汚泥や焼却灰に含まれる T-P をより多くするには、水処理工程で汚泥に移行する T-P を増やす必要がある。

・ T-K

流入水の T-K 濃度の平均値は 9.5mg/L であった。流入水の T-K に対して、48～108%が放流水として流出していた。B 浄化センターの流入水に対する放流水の T-K の動態は 48%と他と比べて低い結果であった。汚泥処理側に含まれる T-K は多くなく、物質収支が大きく不整合となっているが、原因は現時点では不明である。その他の 2 処理場では、放流水中の T-K の動態は流入水とほぼ同等であった。この結果として、流入水の T-K に対して、脱水汚泥や焼却灰に含まれる動態は 1～2%と極めて少ない。

② 我が国の下水道が有する資源の賦存量

上記の下水処理場 3 箇所における流入水の測定結果の平均値から、我が国の下水道全体が有する窒素、リン、カリウムの賦存量を概算した（表 2-9）。我が国の下水道における年間の処理水量は 150 億 m³ であり⁶⁾、これを流入水の平均濃度に乗じると、下水道に流入する総資源量は、T-N：581 千 t/年、アンモニア（NH₃ 等量）：427 千 t/年、T-P：67.7 千 t/年、T-K：143 千 t/年と推定される。

各推定値について、国内における各資源の肥料としての需要量と対比した結果（肥料需要量に対する賦存量の比率）についても同表に示してある。肥料要覧に示された肥料としての需要量⁷⁾に対して下水道の賦存量の比率は、T-N：155%、アンモニア（NH₃ 等量）：206%、リン（P₂O₅ 換算）：52%、カリウム（K₂O 換算）：75%と計算される。肥料の需要量に対する下水道資源の賦存量は極めて大きく、我が国における貴重な肥料原料の一つとなりうることを確認された。

一方で、アンモニアは火力発電における燃料としても利用が期待されている。2019 年時点の国内における原料用アンモニアの消費量は年間 108 万 t であるが、2030、2050 年度にはそれ

ぞれ年間 300、3,000 万 t と急速な需要拡大が見込まれている⁷⁵⁾。本検討で推定した下水道のアンモニア賦存量は、2019 年時点の国内消費量の 39%に相当し、燃料用としても無視できない量である。

表2-9 我が国の下水道が有する資源の賦存量
(下水処理場 3 箇所の流入水質に基づく概算)

| | 単位 | 窒素 | | リン | | カリウム | | |
|------------------------|--|-------|-----------------|------|-------------------------------|------|------------------|------|
| | | T-N | NH ₃ | T-P | P ₂ O ₅ | K | K ₂ O | |
| 下水道における 賦存量 | 流入水の平均濃度 | mg/L | 38.7 | 28.4 | 4.51 | 10.3 | 9.5 | 11.5 |
| | 流入下水 1 万 m ³ 当たり | kg | 387 | 28.4 | 45.1 | 103 | 95.0 | 115 |
| | 我が国の下水道（流入下水量 150 億 m ³ /年）における賦存量 | 千 t/年 | 581 | 427 | 67.7 | 155 | 143 | 172 |
| 肥料としての需要量 | 千 t/年 | 375 | 207 | - | 300 | - | 229 | |
| 肥料需要量に対する下水道における賦存量の割合 | - | 155% | 206% | - | 52% | - | 75% | |

(4) まとめ

本調査では、下水処理場 3 箇所を対象に処理工程の複数箇所で水質を測定し、下水道資源として窒素、リン、カリウムの動態を把握するとともに、3 処理場の流入水質の平均値を用いて、我が国の下水道全体が有するこれら下水道資源の賦存量を推定した。

流入水の T-N の平均値は 38.7mg/L、NH₄-N の平均値は 23.5mg/L であった。また、NH₄-N のうち硝化促進運転を行っている処理場では 0~17%、硝化抑制運転を行っている処理場では 56%が放流水として流出していた。

流入水の T-P の平均値は 4.51mg/L であった。流入水に対する T-P は、脱水汚泥に 30~50%、焼却灰には 27~58%含まれており、リンの有効利用を想定して脱水汚泥や焼却灰中の含有量をより多くするには、水処理工程において汚泥に移行する T-P を増加する必要がある。

流入水の T-K の平均値は 9.5mg/L であった。3 処理場のうち、物質収支が大きく不整合となった B 浄化センターを除いて、大部分が放流水として流出していた。その他の 2 処理場では、放流水中の T-K の賦存量は流入水とほぼ同等であり、脱水汚泥や焼却灰に含まれる賦存量は 1~2%と極めて少なかった。

我が国の下水道が有する資源の賦存量を試算した結果、T-N で 581 千 t/年、アンモニア (NH₃ 等量) は 427 千 t/年、T-P で 67.7 千 t/年、T-K で 143 千 t/年程度であった。我が国の肥料やアンモニア原料の需要量に占める下水道資源の賦存量の割合は極めて大きく、我が国の貴重な資源となりうるということが明らかとなった。

今後は、本年度とは異なる水処理方式を有する下水処理場を対象に、流入水の時間変動に伴う各資源の変化などについて調査する予定である。

2.2.3 下水道資源に係る動態調査(微量元素など)

(1) 検討の概要

下水道には様々な微量元素が含まれているが、下水処理場の各処理工程における資源の動態などを評価した事例は少ない。そこで本調査では、2022 年度からの 2 か年において、複数の下水処理場の各処理工程における微量元素などを測定することで、下水処理場の各処理工程における資源の動態を調査する。

本年度は、3 箇所の下水处理場において調査を実施した。

（2）検討方法

本調査では、2.2.2 項と同一下水処理場 3 箇所を対象に、各処理工程から試料をそれぞれ 1 回ずつ採取し、微量元素を測定した。

2023 年 1 月中旬に各下水処理場で採取した試料について、下水試験方法⁷⁶⁾を参考に前処理を行った後、ICP-MS (Agilent 7800) を用いてレアメタル・レアアース⁷⁷⁾を含む 69 種の元素の分析（半定量分析）を行った。

（3）検討結果

測定した全 69 元素のうち、検出されたものは 33 元素で、残り 36 元素については 3 処理場いずれにおいても検出されなかった。処理場間で比較すると、同じ処理工程で検出された元素の傾向や濃度に大きな差異は見られなかった。

流入水、脱水汚泥、焼却灰の各々で検出された元素について、3 処理場の測定結果の平均値に基づき 4 つの濃度区分に分けて整理した結果を表 2-10 に示した。本調査における分析は半定量分析であるため、厳密な濃度（含有量）の評価はできないが、肥料成分である Mg、K、Ca、Fe は流入水、脱水汚泥、焼却灰のいずれにおいても中濃度（1,000～5,000mg/kgDS）または高濃度（5,000mg/kgDS 以上）で存在していた。また、レアメタル、レアアースなどの希少金属元素の含有量は、流入下水、脱水汚泥、焼却灰の昇順で高いことが確認された。レアメタル・レアアースのうち、中濃度（1,000～5,000mg/kgDS）以上で存在するものは、脱水汚泥では Ba、焼却灰では Ba、Ti、Ga、Mn であった。焼却灰には 19 種類のレアメタル・レアアースが確認され、貴金属である Ag も含まれていた。

初沈汚泥と余剰汚泥について、各元素の含有率の処理場間平均値をプロットした結果を図 2-2 に示す。元素の種類によって、初沈汚泥と余剰汚泥の含有量に差はみられるものの、いずれかの汚泥にのみ特異的に高濃度で存在する元素は確認されなかった。

表 2-10 流入水、脱水汚泥、焼却灰の含有元素（濃度別）

| | 流入水 | 脱水汚泥 | 焼却灰 |
|----------------------------------|------------------------------------|--|---|
| 比較的高濃度で存在する元素 5,000mg/kgDS 以上 | Na、Mg、K、 Ca | Mg、Al、Ca、Fe | Na、Mg、Al、K、 Ca、Fe、 Ba |
| 中濃度で存在する元素 1,000～5,000mg/kgDS | Al、Fe、Br | K、 Ba | Ti 、Cu、Zn、 Ga 、 Mn |
| 低濃度で存在する元素 100～1,000mg/kgDS | Cu、Zn、Sr、 Ba 、 Mn | Na、 Ti 、 Mn 、 Cu、Zn、 Ga | Cr 、 Ni 、 Sr 、 La |
| わずかな痕跡を有する元素 100mg/kgDS 以下 | Ga | B 、 V 、 Cr 、 Co 、 Ni 、 Sr 、 Sn 、 La 、 Pb 、 W 、 Sb | Li 、 B 、 V 、 Co 、 As 、 Se 、 Rb 、 Zr 、 Mo 、 Ag 、 Sn 、 Ce 、 W 、 Pb 、 Sb 、 Nd 、 Pb |

※赤字:レアメタル、レアアース

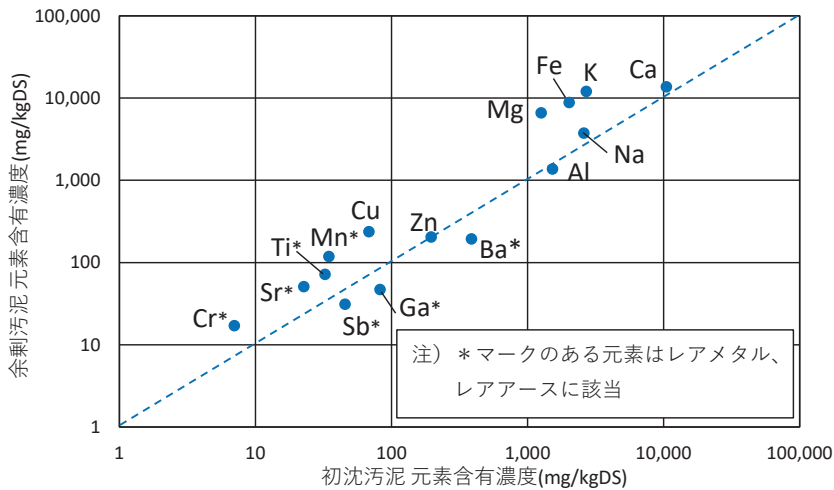


図2-2 初沈汚泥と余剰汚泥中の元素含有量の比率

(4) まとめ

本調査では、下水に含まれる有用資源の回収および利活用を検討するための基礎データを得ることを目的に、複数の下水処理場を対象に、微量元素の含有量の調査を実施した。レアメタル・レアアースを含む69元素を測定した結果、検出されたものは33元素、無検出が36元素であり、処理場間で比較した場合においても同じ処理工程で検出された元素の傾向や濃度に大きな差異は見られなかった。

Mg、K、Ca、Feといった肥料成分は、流入下水、脱水汚泥、焼却灰のいずれの試料でも比較的中濃度（1,000～5,000mg/kgDS）または高濃度（5,000mg/kgDS以上）で存在していた。レアメタル、レアアースなどの含有量（乾燥重量当り）は流入下水、脱水汚泥、焼却灰の昇順に高いことが確認され、脱水汚泥ではBa、焼却灰ではBa、Ti、Ga、Mnが中濃度（1,000～5,000mg/kgDS）以上で存在していた。

元素の種類によって初沈汚泥と余剰汚泥に含まれる元素の含有量に多少の差はみられるものの、片方の汚泥にのみ高濃度で存在する元素は確認されなかった。

今後は、本年度とは異なる水処理方式を有する下水処理場を対象に、各資源の動態について調査する予定である。

2.3 下水汚泥肥料の製造および施肥効果などに係る基礎調査

下水汚泥肥料の利用の促進を図るためには、多様な成分・性状の下水汚泥を対象に肥料が製造可能であることを明確にし、その肥料成分などの施肥効果に関する基礎的知見を増やすとともにこれを周知することが重要である。このため、本調査では2022年度からの4か年において、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ともに、肥料成分の測定や栽培試験による施肥効果の検証、下水汚泥肥料の有効利用の促進に資する事項について検討を行う。

本年度は、下水汚泥肥料の肥効成分をその他肥料などと比較する調査を実施した。また、下水汚泥肥料の新たな利用方法として消化汚泥の液肥利用や消化後の脱水汚泥の直接施肥の可能性を検討する一環として、消化汚泥の衛生学的安全性に関する調査を実施した。

2.3.1 下水汚泥肥料の成分に関する調査

(1) 検討の概要

過去に JS が実施した下水汚泥肥料の最終需要者などを対象としたヒアリング調査⁷⁸⁾では、「野菜の味が良くなった」、「野菜・花卉の日持ちが良くなった」などの意見が多く寄せられた。このような効果をもたらす理由は現時点では解明されていないが、表 2-11 に示すように、下水汚泥肥料に含まれる 3 要素以外の 2 次要素や微量元素あるいは有機態窒素などが関与していることが考えられる*。

そこで本調査では、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、下水汚泥肥料およびその他肥料などを対象に成分の測定を実施し、各種成分の含有量を比較した。

表 2-11 肥料成分の要素と主な肥料効果(文献⁷⁹⁾に基づき作成)

| 要素の種類 | | 主な肥料効果 |
|-------|-------------|--------------------------------|
| 3 要素 | 窒素 (N) | 葉、茎、根の生長促進（葉肥）、成長に影響する最も重要な元素 |
| | リン (P) | 核酸・酵素の構成元素で開花、結実を促進（花肥・実肥） |
| | カリウム (K) | 細胞の浸透圧調整に関与、根の発育促進、耐病性を高める（根肥） |
| 2 次要素 | カルシウム (Ca) | 細胞組成の強化、根の生長促進などに関与 |
| | マグネシウム (Mg) | 葉緑素を作るとともに、リン酸の運搬や吸収を助ける |
| | 硫黄 (S) | タンパク質、ビタミンなどを作るうえで欠かせない元素 |
| 微量元素 | ほう素 (B) | 炭水化物・窒素代謝、細胞壁の形成・維持に関与 |
| | マンガン (Mn) | 葉緑素、光合成、ビタミン類の合成に関与 |
| | 鉄 (Fe) | 光合成に必要な葉緑素の合成に関与 |
| | 銅 (Cu) | 植物体内の酸化還元や葉緑素の合成に関与 |
| | 亜鉛 (Zn) | 葉緑素や植物ホルモン、タンパク質の合成に関与 |
| | モリブデン (Mo) | 窒素の消化吸収、ビタミンの合成などに関与 |
| | 塩素 (Cl) | 光合成の明反応に関連したり、でんぷん生成に関与 |
| | ニッケル (Ni) | 尿素をアンモニアに分解する酵素（ウレアーゼ）の構成元素 |

(2) 検討方法

本調査では、下水汚泥肥料およびその他肥料などを対象に、各種成分を測定して比較した。対象とした下水汚泥肥料およびその他肥料などを表 2-12 に示す。下水汚泥肥料 3 種、混合肥料 3 種、化学肥料 1 種、コンポスト製造時に発酵促進剤（副資材）として利用される有機資材 2 種の計 9 種類の試料の成分を測定した。図 2-3 に試料の外観の例を示す。下水汚泥肥料については、消化汚泥を脱水した後に機械乾燥処理した下水汚泥肥料 A、消化汚泥を脱水した後に自然乾燥処理した下水汚泥肥料 B、OD 法の脱水汚泥を自然乾燥処理した下水汚泥肥料 C の 3 種類である。

* 肥料の 3 要素、2 次要素、微量元素は、いずれも植物の成長に必須の元素であるが、植物の成長過程における要求度によって以下のように大別される⁸⁰⁾。

- ・ 3 要素：窒素、リン、カリウムは植物が最も多く必要とする養分であり、土壤中で不足しがちなため、肥料として補給する必要がある
- ・ 2 次要素：3 要素に次いで植物の要求度が高い要素である
- ・ 微量元素：植物の要求度自体はそこまで高くないが、植物の育成には不可欠であり、酵素の合成などにも関与する

成分の測定項目は、表 2-11 に示した 14 項目に、有機分率、有機態窒素、無機態窒素（全窒素から有機態窒素の差分として算出）を加えた計 17 項目とした。有機態と無機態の各窒素について測定結果を整理したのは、緩効性（有機態）と速効性（無機態）という肥効性の違いを確認するためである。また、成分の測定は、肥料等試験方法⁸¹⁾に基づき実施した。

表 2-12 測定対象とした試料

| 試料名 | 原料など |
|----------|----------------|
| 下水汚泥肥料 A | 消化汚泥（脱水、機械乾燥） |
| 下水汚泥肥料 B | 消化汚泥（脱水、自然乾燥） |
| 下水汚泥肥料 C | OD 汚泥（脱水、自然乾燥） |
| 混合肥料 A | 下水汚泥＋食品汚泥 |
| 混合肥料 B | 牛糞など |
| 混合肥料 C | 鶏糞＋生ごみ |
| 化学肥料 | 普通化成肥料 8-8-8 |
| 有機資材 A | 油かす |
| 有機資材 B | 米ぬか |

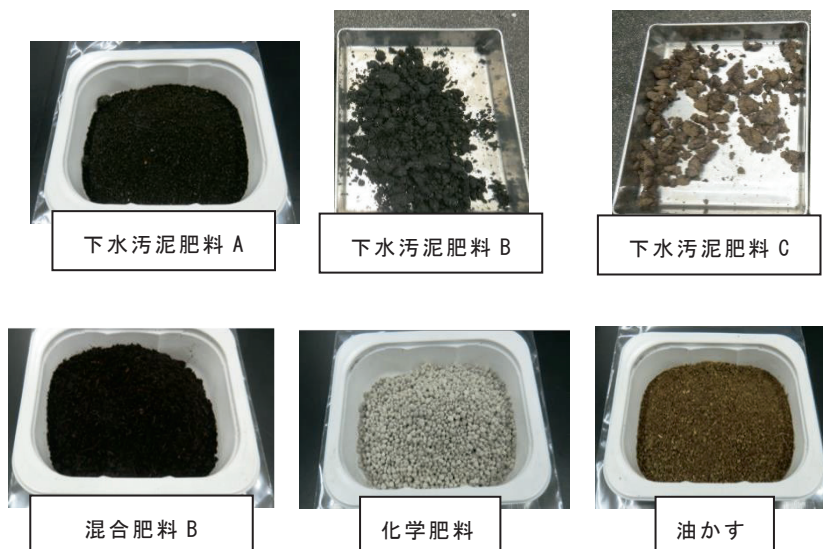


図 2-3 下水汚泥肥料およびその他肥料などの外観の例

(3) 調査結果

測定結果の一覧を表 2-13 に示す。以下、測定項目毎に結果と考察を記載する（図 2-4～図 2-18）。

表2-13 下水汚泥およびその他肥料などの測定結果

| | | 備考 | 単位 | 下水汚泥肥料A | 下水汚泥肥料B | 下水汚泥肥料C | 混合肥料A | 混合肥料B | 混合肥料C | 化学肥料 | 有機資材A | 有機資材B |
|------|-----------|----------------------------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|-------|----------|-------------|-------|-------|
| | | | | 消化汚泥 (脱水、機械乾燥) | 消化汚泥 (脱水、自然乾燥) | OD汚泥 (脱水、自然乾燥) | 下水汚泥 + 食品汚泥 | 牛糞等 | 鶏糞 + 生ごみ | 普通化成肥料8-8-8 | 油かす | 米ぬか |
| 3要素 | 窒素全量 | — | %TS | 6.7 | 7.8 | 10.7 | 5.0 | 2.3 | 3.9 | 9.3 | 7.0 | 2.4 |
| | リン全量 | P ₂ O ₅ 換算 | %TS | 6.4 | 4.7 | 10.0 | 1.8 | 3.2 | 2.3 | 8.3 | 2.5 | 4.4 |
| | カリウム全量 | K ₂ O換算 | %TS | 0.2 | 0.5 | 1.3 | 0.2 | 3.1 | 1.5 | 6.5 | 1.2 | 1.1 |
| 2次要素 | カルシウム全量 | CaO換算 | %TS | 2.0 | 2.1 | 7.5 | 0.5 | 3.4 | 6.8 | 7.2 | 0.8 | 0.1 |
| | マグネシウム全量 | MgO換算 | %TS | 1.1 | 1.0 | 2.5 | 0.2 | 1.4 | 0.7 | 0.5 | 0.9 | 0.6 |
| | 硫黄全量 | SO ₃ 換算 | %TS | 2.4 | 11.5 | 9.4 | 2.0 | 0.4 | 0.8 | 24.8 | 1.2 | — |
| 微量元素 | ほう素全量 | — | mg/kgDS | 7 | 14 | 15 | 19 | 23 | 19 | 6 | 16 | 2 |
| | マンガン全量 | — | mg/kgDS | 204 | 379 | 691 | 17 | 320 | 206 | 70 | 56 | — |
| | 水溶性鉄 | — | mg/kgDS | <40 | <40 | <40 | 93 | 72 | <40 | 45 | <40 | 42 |
| | 銅全量 | — | mg/kgDS | 408 | 133 | 92 | 40 | 35 | 16 | 141 | 5 | 9 |
| | 亜鉛全量 | — | mg/kgDS | 523 | 119 | 264 | 83 | 187 | 114 | 10 | 50 | 112 |
| | モリブデン全量 | — | mg/kgDS | 8 | 8 | 24 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 塩素全量 | — | mg/kgDS | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.7 | 0.5 | 7.7 | 0.1 | 0.1 |
| | ニッケル全量 | — | mg/kgDS | 14 | 10 | 77 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| その他 | 有機分（強熱減量） | — | %TS | 79.4 | 77.8 | 90.5 | 67.2 | 71.2 | 72.1 | 44.3 | 93.4 | 90.1 |
| | 有機態窒素 | — | %TS | 4.8 | 6.8 | 6.9 | 2.0 | 1.6 | 2.9 | 0.1 | 5.9 | 2.1 |
| | 無機態窒素 | — | %TS | 1.9 | 1.0 | 3.8 | 3.0 | 0.7 | 1.0 | 9.2 | 1.0 | 0.3 |

① 窒素全量

下水汚泥肥料 A～C の窒素全量は 6.7～10.7%TS と、家畜ふん由来の混合肥料 B、C と比べて 2～3 倍程度高く、化学肥料と同等の含有量であった。

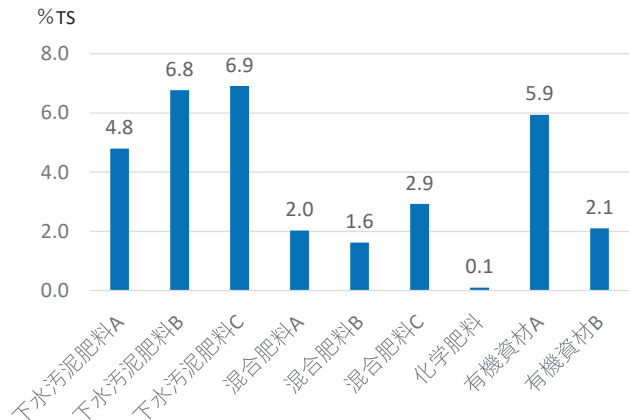


図2-4 窒素全量

② 有機態窒素、無機態窒素

下水汚泥肥料 A、B、C の有機態窒素含有量は 4.8～6.9%TS であり、油かす由来である有機資材 A の 5.9%TS と同程度に高い値であった。一方、化学肥料中の窒素成分はほぼ無機態窒素であった。下水汚泥肥料は、家畜ふん堆肥や化学肥料と比較されることが多いが、これらと比べて有機態窒素の含有量の高さが大きな特徴の一つといえる。下水汚泥肥料 A、B、C には、活性汚泥中の微生物に由来するタンパク質が多く含まれており、有機態窒素濃度が高くなったと考えられる。

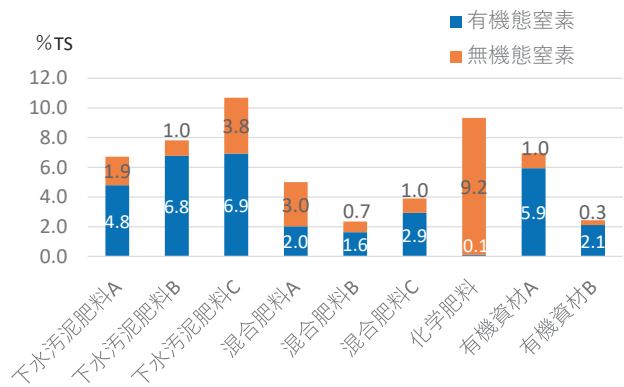


図2-5 有機態窒素、無機態窒素

③ リン全量

下水汚泥肥料 A、B、C のリン全量（ P_2O_5 換算）は 4.7～10.0%TS であり、家畜ふん由来の混合肥料 B、C と比べて 2～3 倍程度高く、化学肥料に近い含有量のものもあった。

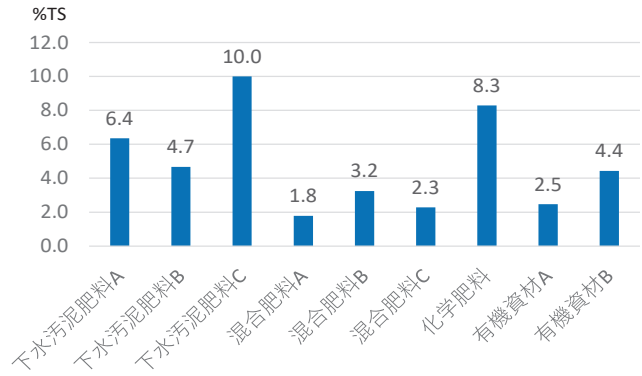


図 2-6 リン全量 (P_2O_5 換算)

④ カリウム全量

下水汚泥肥料 A、B、C のカリウム全量（ K_2O 換算）は 0.2～1.3%TS であり、家畜ふん由来の混合肥料 B、C や化学肥料と比べて低い値であった。

これは、2.2 節の調査結果で示したとおり、カリウムは大部分が放流水として流出しているためと考えられる。下水汚泥肥料を使う際には、状況に応じて化学肥料などでカリウムを補う必要がある。

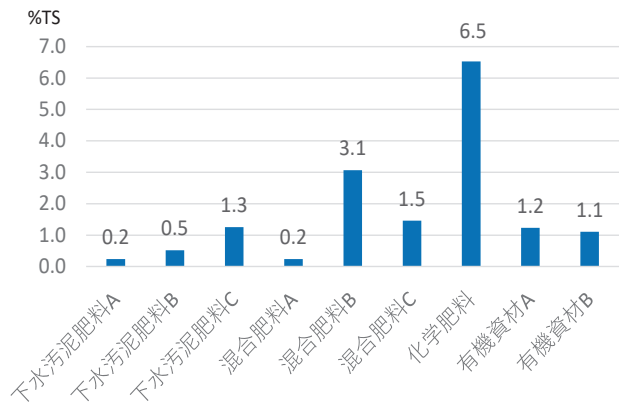


図 2-7 カリウム全量 (K_2O 換算)

⑤ カルシウム全量

下水汚泥肥料のカルシウム全量（ CaO 換算）は、脱水工程における凝集剤として石灰を使用するか否かで大きく異なる。石灰を用いない場合 1～2%前後、石灰を用いる場合 10～20%程度である。下水汚泥肥料 C のカルシウム全量は 7.5%TS と高い値を示したが、同処理場の脱水工程では高分子凝集剤のみを使用しており、何らかの別の要因があると考えられる。一方、下水汚泥肥料 A、B のカルシウム全量は 2.0%TS 程度であった。また、採卵鶏の鶏糞や石灰質などが原料として用いられることのある化学肥料は、カルシウム分が高い結果となった。混合肥料 C にも鶏糞が含まれており、カルシウム分が高い結果であったと考えられる。

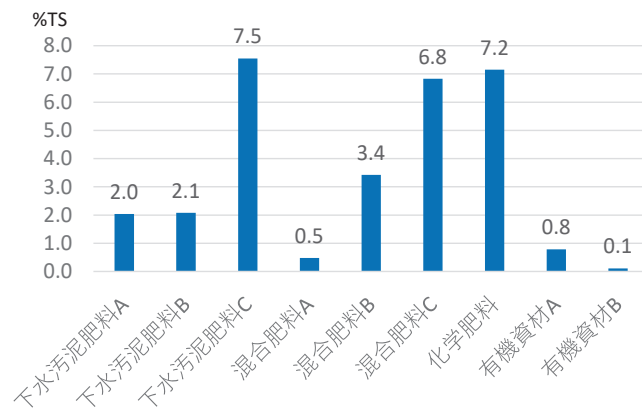


図 2-8 カルシウム全量 (CaO 換算)

⑥ マグネシウム全量

下水汚泥肥料 A、B、C のマグネシウム全量 (MgO 換算) は 1.0~2.5%TS であり、家畜ふん由来の混合肥料 B、C の 0.7~1.4%TS と同程度であった。また、化学肥料や有機資材 A、B の 0.5~0.9%TS と比べ 2~3 倍高い含有量であった。

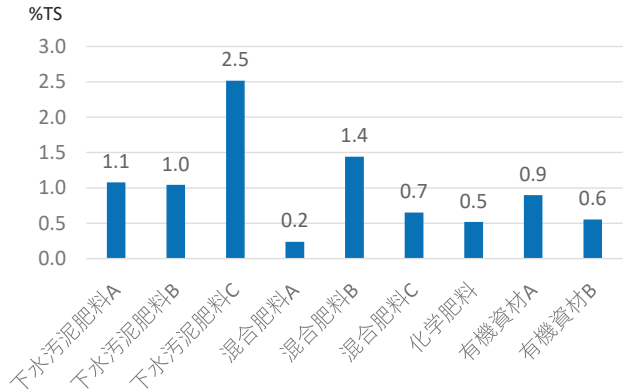


図2-9 マグネシウム全量 (MgO 換算)

⑦ 硫黄全量

下水汚泥肥料 A、B、C の硫黄全量 (SO₃ 換算) は 2.4~11.5%TS であり、化学肥料の 24.8%TS より少ないが、家畜ふん由来の混合肥料 B、C の 0.4~0.8%TS と比べて 5~10 倍程度高い値であった。化学肥料の硫黄全量が高いのは、硫安などを原料として製造しているためと考えられる。

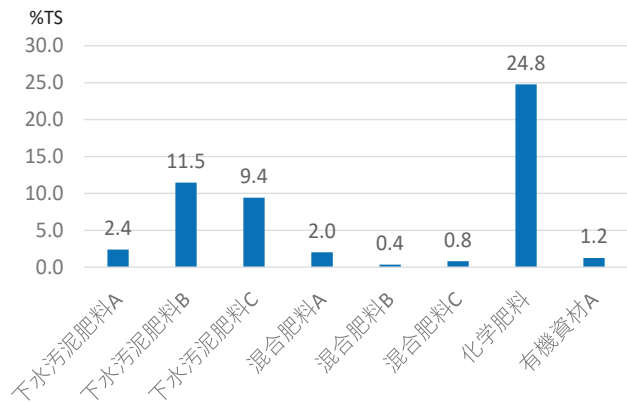


図2-10 硫黄全量 (SO₃ 換算)

⑧ ほう素全量

下水汚泥肥料 A、B、C のほう素全量は 7~15mg/kgDS であった。家畜ふん由来の混合肥料 B、C は 19~23 mg/kgDS、化学肥料は 6mg/kgDS であり、これらの中間程度の含有量であった。

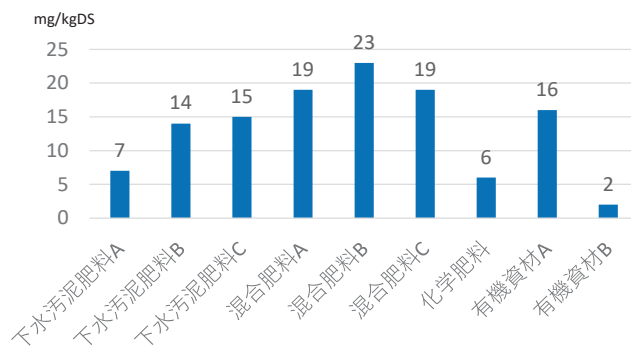


図2-11 ほう素全量

⑨ マンガン全量

下水汚泥肥料 A、B、C のマンガン全量は 204～691mg/kgDS で、化学肥料の 3～10 倍で、家畜ふん由来の混合肥料 B、C の 206～320mg/kgDS と同程度であった。

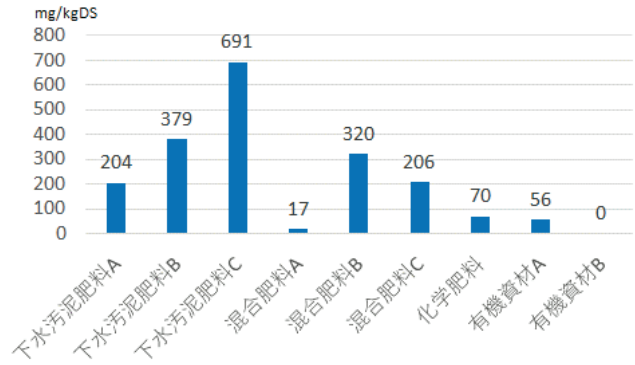


図 2-12 マンガン全量

⑩ 水溶性鉄

下水汚泥肥料 A、B、C のいずれも、水溶性鉄は分析下限値（40mg/kgDS）以下であった。

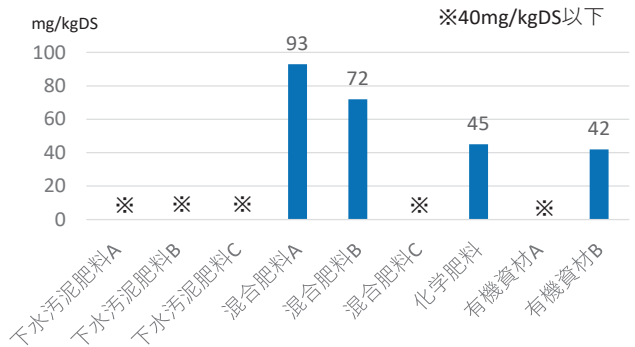


図 2-13 水溶性鉄

⑪ 銅全量

下水汚泥肥料 A の銅全量は 408mg/kgDS と、下水汚泥肥料 B、C の 92、133mg/kgDS と比べて 3～4 倍程度高い値であった。これは、水道水源の違いなどが影響していると考えられる。これを除けば下水汚泥肥料の銅全量は家畜ふん由来の混合肥料よりは高く、化学肥料と概ね同等の値であった。

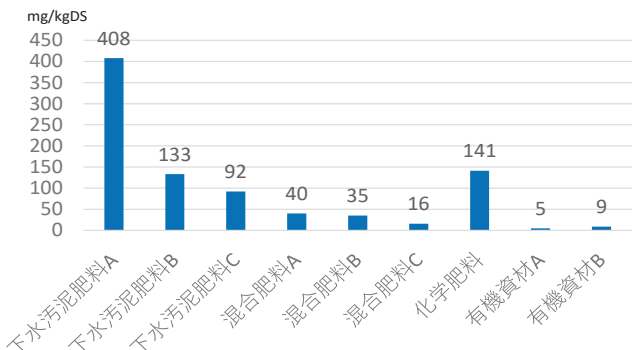


図 2-14 銅全量

⑫ 亜鉛全量

下水汚泥肥料 A、B、C の亜鉛全量は 119～523mg/kgDS と他の肥料などと比べて同等以上の値であった。有機資材 A、B にも 50～112mg/kgDS 含まれているが、化学肥料は 10mg/kgDS と低い値であった。

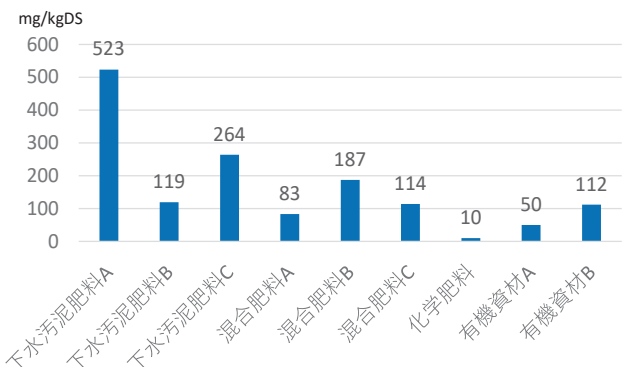


図 2-15 亜鉛全量

⑬ モリブデン全量

下水汚泥肥料 A、B、C のモリブデン全量は 8～24mg/kgDS であった。下水道には、生活排水や工場排水などの多様な排水が流入していることから、他の試料と比べて高い値を示したと考えられる。モリブデンはビタミンの合成に関与している成分であり、下水汚泥肥料を用いて育成した作物のビタミン含有量が高くなる可能性が示唆された。

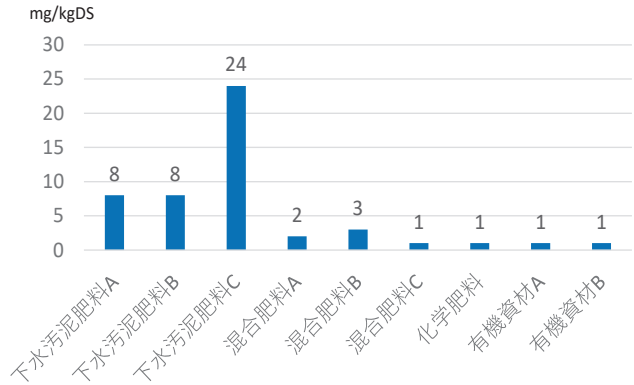


図2-16 モリブデン全量

⑭ 塩素全量

下水汚泥肥料 A～C の塩素全量は有機資材のそれと同じく 0.1mg/kgDS で、混合肥料 (0.2～0.7mg/kgDS)、化学肥料 (7.7mg/kgDS) と比べ低い値であった。

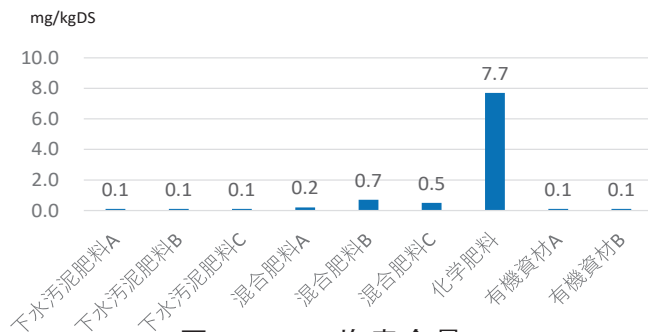


図2-17 塩素全量

⑮ ニッケル全量

下水汚泥肥料 C のニッケル全量は 77 mg/kgDS と著しく高い値を示したが、他の下水汚泥、混合肥料、化学肥料、有機資材では 10mg/kgDS 程度の値であった。汚泥肥料のニッケル含有量は肥料法で 300mg/kgDS 以下と定められているが、十分に低い含有量であった。

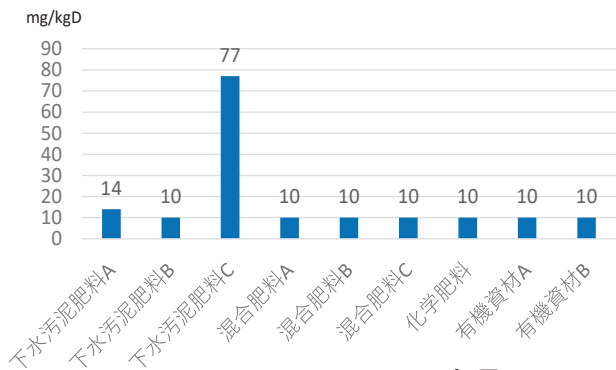


図2-18 ニッケル全量

(4) まとめ

下水汚泥肥料の含有成分のうち、3 要素（窒素、りん、カリウム）については、下水汚泥肥料は他の試料と比べて有機態窒素が多く含まれていた。下水汚泥には活性汚泥中の微生物由来のタンパク質が多く含まれているため、有機態窒素の値が高くなったと考えられる。また、家畜ふん由来肥料などと比べ、下水汚泥肥料はカリウムが少なかった。2.2 節で示したようにカリウムは下水汚泥に取り込まれることなく放流水として流出するためであると考えられる。

2 次要素（カルシウム、マグネシウム、硫黄）について、下水汚泥肥料 C は他の下水汚泥肥料と比べてカルシウムが多く含まれていたが、同処理場の脱水工程では石灰を使用していないため、何らかの別の要因があると考えられた。また、マグネシウムは化学肥料より 2～3 倍高く家畜ふん由来の混合肥料 B、C と同等であった。硫黄分は化学肥料より少ないが、家畜ふん由来の混合肥料より 5～10 倍高い値であった。

微量元素については、家畜ふん肥料由来の混合肥料や化学肥料と比べて汚泥肥料は、亜鉛やモリブデンを多く含有していた。また、マンガン、銅、ニッケルも家畜ふん肥料由来の混合肥料や化学肥料と比べて同等以上に下水汚泥肥料に含まれていた。

今後は、下水汚泥肥料や他肥料を対象に、肥料成分の溶出特性などに関する試験を実施する予定である。

2.3.2 消化汚泥の衛生学的安全性に関する調査

(1) 検討の概要

下水汚泥の肥料利用を促進する上で、肥料の製造コストを抑えることが大きな課題の一つとして挙げられる。その解決策として、消化汚泥を液肥として利用する方法や、消化汚泥を脱水した後に直接肥料利用する方法などが考えられる。

下水中には各種病原性微生物が存在する可能性があることから、下水汚泥をコンポスト化する場合、衛生学的安全性の観点から 65℃以上で 48 時間以上処理することが推奨されている⁸²⁾。一方で、下水汚泥を嫌気性消化することで、病原性微生物の不活化効果により衛生学的な安全性が向上するとされており⁸²⁾、下水汚泥を肥料利用の際の安価な方法として、消化汚泥やその脱水汚泥をそのまま肥料として緑農地利用することも可能と期待できる。

本検討では、消化汚泥やその脱水汚泥を肥料または肥料原料として利用する上での基礎情報を得ることを目的として、これら汚泥の衛生学的な安全性について調査を行った。

(2) 検討方法

本調査では、下水処理場から採取した各種汚泥試料を対象に衛生学的指標を測定・比較した。対象とした試料を表 2-14 に示す。下水処理工程の汚泥として、標準活性汚泥法で下水処理を行っている D 浄化センターの初沈汚泥、余剰汚泥、混合濃縮汚泥、消化汚泥、脱水汚泥（同表の①～⑤）を調査対象とした。混合濃縮汚泥、消化汚泥、脱水汚泥については年間の時期による違いを把握するために夏季と秋季に採取を行い、その他については 1 回のみ採取とした。加えて、下水汚泥肥料の衛生学的安全性を把握するために、D 浄化センターの脱水汚泥から自然乾燥（24 時間）または強制乾燥（100℃、60 分）により試験的に製造した 2 種類の乾燥汚泥（同表の⑥、⑦）、D 浄化センターの脱水汚泥をコンポスト化した下水汚泥肥料（2021 年度製造；同表の⑧）を調査対象とした。また、参考情報とするため、OD 法で下水処理を行っている E 浄化センターで採取した濃縮汚泥（同表の⑨）についても調査対象に加えた。

採取した各試料に対して、衛生学的指標として大腸菌群数を測定するとともに、参考情報として TS、pH を測定した。

表2-14 調査対象試料

| 試料 | | 採取した処理場 | 採取時期 | 備考 |
|----|----------------|----------|-------|------------|
| ① | 初沈汚泥 | D 浄化センター | 秋季 | — |
| ② | 余剰汚泥 | D 浄化センター | 秋季 | — |
| ③ | 混合濃縮汚泥 | D 浄化センター | 夏季、秋季 | — |
| ④ | 消化汚泥 | D 浄化センター | 夏季、秋季 | — |
| ⑤ | 脱水汚泥 | D 浄化センター | 夏季、秋季 | — |
| ⑥ | 脱水汚泥（自然乾燥） | D 浄化センター | 夏季 | 24 時間 自然乾燥 |
| ⑦ | 脱水汚泥（強制乾燥） | D 浄化センター | 秋季 | 100℃、60 分 |
| ⑧ | 下水汚泥肥料（コンポスト化） | D 浄化センター | 夏季 | 2021 年度製造 |
| ⑨ | OD 濃縮汚泥 | E 浄化センター | 夏季 | — |

（3）検討結果

各試料の測定結果を表2-15に示す。混合濃縮汚泥の大腸菌群数が $1.3 \times 10^6 \sim 3.4 \times 10^6 \text{cfu/g}$ であるのに対し、消化汚泥では $1.8 \times 10^2 \sim 1.9 \times 10^3 \text{cfu/g}$ と3～4桁低い値で、コンポスト化した下水汚泥肥料と同程度であった。このことから、嫌気性消化による病原菌の不活化効果は高いことが再確認され、衛生学的安全性の見地からは、消化汚泥をそのまま液肥利用することができるかと期待できる。

秋季に採取した脱水汚泥の大腸菌群数は $2.2 \times 10^3 \text{cfu/g}$ あるのに対し、夏季では $9.1 \times 10^7 \text{cfu/g}$ と4桁高い値であり、夏季の結果においては嫌気性消化で減少した大腸菌群数が大幅に増加していた。また、夏季に採取した脱水汚泥を自然乾燥して作成した乾燥汚泥の大腸菌群数は、 $3.3 \times 10^6 \text{cfu/g}$ と脱水汚泥と同様に高い値であった。一方で、秋季に採取した脱水汚泥を強制乾燥によって作成した乾燥汚泥では、採取時期や乾燥方法が異なるため単純な比較はできないが、測定限界以下（ $< 10 \text{cfu/g}$ ）まで減少した。このことから、嫌気性消化によって衛生学的な安全性が大きく向上したとしても、後段の汚泥処理工程で衛生学的な安全性が低下する可能性があることが示唆された。本調査結果から、特に気温の高い夏季においては、速やかな脱水、乾燥処理を行うことで病原性微生物の再増殖を抑える必要があることが示唆された。

表2-15 汚泥性状および大腸菌群数の測定結果

| 試料 | | pH | | | TS % | | | 大腸菌群数 cfu/g | | |
|------|--------------------|----------|-----|----------|----------|----------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | D 浄化センター | | E 浄化センター | D 浄化センター | E 浄化センター | | D 浄化センター | E 浄化センター | |
| 採取時期 | | 夏季 | 秋季 | 夏季 | 夏季 | 秋季 | 夏季 | 夏季 | 秋季 | 夏季 |
| ① | 初沈汚泥 | — | 6.3 | — | — | 1.4 | — | — | 6.8×10^4 | — |
| ② | 余剰汚泥 | — | 6.5 | — | — | 0.5 | — | — | 2.0×10^2 | — |
| ③ | 混合濃縮汚泥 | 5.1 | 5.5 | — | 3.4 | 4.6 | — | 3.4×10^6 | 1.3×10^2 | — |
| ④ | 消化汚泥 | 8.2 | 8.3 | — | 1.7 | 1.7 | — | 1.9×10^3 | 1.8×10^2 | — |
| ⑤ | 脱水汚泥 | 8.1 | 8.2 | — | 16.2 | 15.5 | — | 9.1×10^7 | 2.2×10^3 | — |
| ⑥ | 脱水汚泥 (自然乾燥) | 7.9 | — | — | 19.2 | — | — | 3.3×10^6 | — | — |
| ⑦ | 脱水汚泥 (強制乾燥) | — | 7.3 | — | — | 86.3 | — | — | <10 | — |
| ⑧ | 下水汚泥肥料 (コンポスト化) | 7.7 | — | — | 77.8 | — | — | 7.6×10^2 | — | — |
| ⑨ | OD 濃縮汚泥 | — | — | 7.5 | — | — | 1.5 | — | — | 5.2×10^5 |

(4) まとめ

本検討では、消化汚泥やその脱水汚泥を肥料または肥料原料として利用する上での基礎情報を得ることを目的として、これら汚泥の衛生学的な安全性に関する調査を実施した。嫌気性消化により、濃縮汚泥中の大腸菌群数は3~4桁程度低くなった。消化汚泥は大腸菌群数がコンポスト化した下水汚泥と同程度であったことから、衛生学的な安全性が高く、消化液をそのまま液肥利用することも期待できる。

一方で、消化後の脱水工程や乾燥工程における処理方法によっては再び大腸菌群数が増加する可能性があることが明らかとなった。特に気温の高い夏季においては、速やかな脱水、乾燥処理を行うことで、病原性微生物の再増殖を抑える必要があることが示唆された。

3. 検討課題の総括

3.1 本年度の成果

3.1.1 下水汚泥資源利活用技術

(1) バイオマス利活用に関する調査

下水汚泥のバイオマスとしての有効利用促進を図るための基礎情報を得ることを目的として、日本国内における汚泥等のバイオマス資源の現在の発生量および有効利用状況、下水道事業において新たに導入可能性が高いと思われる有効利用技術および有効利用事例など、の 2 点について調査を実施した。主要な成果を以下に示す。

- 汚泥等バイオマス資源として、下水汚泥、家畜排せつ物、事業系食品廃棄物、家庭系食品廃棄物、浄化槽汚泥、し尿、農集排汚泥の発生状況および有効利用状況を整理した結果、家庭系食品廃棄物の有効利用率が 7%と極端に低かった。この解決方法の一つとして、下水道施設における家庭系食品廃棄物の受入が考えられる。
- 下水道事業において実現可能性が高いバイオマス資源の有効利用技術として、堆肥化工程における排気ガスからのアンモニア回収、肥料のペレット化、混合堆肥複合肥料生産などが挙げられた。

(2) 下水道資源の有効利用に係る基礎調査

① 下水道資源の回収などに関する文献調査

下水に含まれるリンや窒素などの下水道資源の有効利用を促進することを目的として、下水道資源の回収・利用技術の開発動向と、実用化された技術の事例と課題について、文献調査を実施した。主要な成果を以下に示す。

- リンについては、MAP からの回収に係る「実用」レベルでの報文が最も多かったが、技術的課題として、MAP 顆粒生成のための運転調整が難しい事や、機器の劣化、維持管理の負担などが挙げられていた。
- 窒素については、「実用」レベルの報文はアンモニアストリッピングの 1 報得られたが、これ以外の技術に関する報文の多くは「基礎」レベルに区分され、実用化の事例や課題などに関する情報はほぼ得られなかった。一方で、内閣府のムーンショット型研究開発制度において基礎研究が進められており、今後の開発動向に注視する必要がある。
- その他の資源として、カリウム資源の回収や利用に関する「基礎」レベルの報文が複数得られたが、今後の実用化に向けては更なる検討が必要である。

② 下水道資源に係る動態調査

下水処理場の各処理工程における資源の動態およびわが国における下水道資源の賦存量を把握することを目的に、3 か所の下水処理場の各処理工程において水質などの測定を実施した。主要な成果を以下に示す。

- 3つの処理場の流入水質の平均値に基づき国内全体の下水処理場に流入する資源の賦存量は、T-Nで581千t/年、アンモニア（NH₃等量）は427千t/年、T-Pで67.7千t/年、T-Kで143千t/年と推定され、我が国の肥料やアンモニア原料の需要量に占める下水道資源の賦存量の割合は極めて大きいことが明らかとなった。
- 3か所の処理場の流入下水や汚泥などについてレアメタルやレアアースなどを含む69元素を測定した結果、検出されたものは33元素、無検出が36元素であった。
- Mg、K、Ca、Feといった肥料成分は、流入下水、脱水汚泥、焼却灰のいずれの試料でも比較的中濃度（1,000～5,000mg/kgDS）または高濃度（5,000mg/kgDS以上）で存在していた。
- レアメタル、レアアースなどの含有量は流入下水、脱水汚泥、焼却灰の順に高いことが確認された。
- 元素の種類によって初沈汚泥と余剰汚泥に含まれる元素の含有量に多少の差はみられるものの、片方の汚泥にのみ高濃度で存在する元素は確認されなかった。

（3）下水汚泥肥料の製造および施肥効果などに係る基礎調査

① 下水汚泥肥料の成分に関する調査

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、下水汚泥肥料およびその他肥料などを対象に成分を測定した。主要な成果を以下に示す。

- 下水汚泥肥料では、家畜ふん由来肥料などと比べカリウムが少なかった。下水中のカリウムは下水汚泥に取り込まれることなく、放流水として流出するためと推察される。また、マグネシウムは化学肥料より2～3倍高く、硫黄分については家畜ふん由来肥料の5～10倍高い値であった。
- 下水汚泥には他の肥料などと比べて有機態窒素が多く含まれていた。これは、活性汚泥中の微生物由来のタンパク質が多く含まれているためと考えられる。

② 消化汚泥の衛生学的安全性に関する調査

消化汚泥やその脱水汚泥を肥料または肥料原料として利用する上での基礎情報を得ることを目的として、各種汚泥試料を対象に衛生学的な安全性に関する調査を行った。主要な成果を以下に示す。

- 嫌気性消化により汚泥中の大腸菌群数は3～4桁程度低くなった。消化汚泥は、大腸菌群数がコンポスト化した下水汚泥と同程度であったことから、衛生学的な安全性は高く、消化液をそのまま液肥利用することも可能と考えられた。一方で、脱水工程や乾燥工程における処理方法によっては再び大腸菌群が増加する可能性があるため、速やかな脱水、乾燥処理を行うことで、病原性微生物の再増殖を抑える必要があることが示唆された。

3.2 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。なお、「JS 技術開発・活用基本計画 2022」の改定に伴い、次年度以降の開発項目は、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の 2 つに分けて記載する。

（1）下水汚泥資源エネルギー利活用技術

- 海外における下水汚泥のエネルギー利用に関して、有効利用の動向や有効利用事例の調査を実施する。
- 下水処理場における資源の動態を把握するための継続調査として、本年度とは異なる水処理方式を有する下水処理場を対象に、流入水の時間変動に伴う各資源の変化などについて調査する。
- 下水汚泥資源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。

（2）下水汚泥資源農業利活用技術

- 海外における下水汚泥の農業利用に関して、有効利用の動向や有効利用事例の調査を実施する。
- 下水処理場における資源の動態を把握するための継続調査として、複数の下水処理場の各処理工程における水質などの測定を実施する。
- 下水汚泥資源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とともに、B-DASH プロジェクト（実証研究）などの競争的研究資金を活用した研究にも積極的に参加する。
- 技術開発実験センターにおいて下水汚泥肥料を製造し、他の肥料とともに肥料成分の溶出特性などに関する試験を実施する。

謝辞

2.2 節に掲載した下水道資源の動態調査の調査対象としてご協力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。

2.3.1 項に掲載した肥料の成分調査で汚泥肥料などを提供いただいた肥料製造業者の関係者各位に感謝の意を表します。

2.3.2 項に掲載した消化汚泥の衛生学的安全性に関する調査で汚泥を提供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。

参考文献

- 1) 農林水産省：食糧安全保障強化政策大綱，農林水産省，2022.
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/attach/pdf/anteikyokyukiban-4.pdf>
- 2) 国土交通省国土保全局下水道部：脱炭素化／資源・エネルギー利用，国土交通省・国土保全局下水道部，2021.
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000124.html
- 3) 環境省：令和 3 年度末の汚水処理人口普及状況，2021.
https://www.env.go.jp/press/press_00434.html
- 4) 農林水産省：畜産統計（2022 年 2 月 1 日現在），2021.
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/tiku_toukei/r4/
- 5) 環境省環境再生・資源循環局：日本の廃棄物，2020.
https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/stats.html
- 6) 日本下水道協会：令和 2 年度版下水道統計，日本下水道協会，2022.
- 7) 農林水産省：バイオマス活用推進基本計画（第 3 次），2022.
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/index-22.pdf>
- 8) 農林水産省農村振興局：農業集落排水資源の再生利用に関する手引き（案），2016.
https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/nn/n_nouson/syuhai/170825.html
- 9) 金子光美，河村清史，中島淳：生活排水処理システム，技報堂，1998.
- 10) 環境省：食品リサイクル関連 | 食品ロスの削減・食品廃棄物等の発生抑制，2019.
https://www.env.go.jp/recycle/food/post_5.html
- 11) 吉田弘之：亜臨界水処理による未利用有機物の高速高度資源化と農林水産・畜産分野への応用の可能性，2004.
<https://lin.alic.go.jp/alic/month/dome/2004/sep/chousa-1.htm>
- 12) 三澤孝史，小西正郎，中木秀一：亜臨界水処理による下水汚泥のメタン発酵特性，奥村組技術研究年報，No.34，pp.97-102，2008.
- 13) 三澤孝史，中木秀一，小西正郎：亜臨界水処理による下水汚泥のメタン発酵特性に関する研究，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，pp.115-116，2008.
- 14) 上田浩三，阪本亮一，蒲谷淳，徳尾真信：畜産系廃棄物からの有用資源回収技術の開発，Hitz 技法，Vol.74，No.2，pp.71-76，2013.
- 15) 大阪府立環境農林水産総合研究所：プレスリリース「豚ふんに含まれるリン資源の回収実証が国に採択され研究事業化決定」，2013.
http://www.kannousuiken-osaka.or.jp/nourin/info/doc/2013091200011/file_contents/20130912.pdf
- 16) 日本農業新聞：収量増めざし高機能バイオ炭開発へ 施用体系づくりも ぐるなび、全農、農研機構など，2022.
<https://www.agrinews.co.jp/news/index/127996>
- 17) 矢内純太，川村まりな，山田秀和：下水汚泥炭化物のリンの化学形態と溶出特性の評価，日本土壤肥科学雑誌，Vol.85，No.4，pp.358-361，2014.
- 18) 岩佐博邦：メタン発酵消化液由来資材の肥料的効果の検証とその施用技術，再生と利用，No.160，pp.80-84，2019.

- 19) エア・ウォーター：バイオガスからメタノールとギ酸を製造する光化学プラントの実用化に向けた開発について，2022.
<https://www.awi.co.jp/ja/business/news/news-270299860324482039.html>
- 20) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：NEDO 先導研究プログラム，2021.
<https://www.nedo.go.jp/content/100953056.pdf>
- 21) 川崎浄教：昆虫の飼料利用に関する研究動向と今後の課題，日本畜産学会報，Vol.92，No.3，pp.265-278，2021.
- 22) 本多淳裕：汚废水处理と増殖微生物の餌飼料化，生活衛生日本畜産学会報，Vol.15，No.3，pp.63-74，1971.
- 23) 大阪府環境農林水産総合研究所：昆虫が食品廃棄物から新たなタンパク源を生む，2018.
https://www.knsk-osaka.jp/_files/00120807/h30-B11mizuabu.pdf
- 24) 愛媛大学：昆虫を原料とした次世代型機能性養殖用飼料の開発，2013.
https://www.ehime-u.ac.jp/data_study/data_study-12727/
- 25) SMART AGRI：持続可能農業の救世主，イエバエが堆肥と飼料を生み出す仕組みとは〜ムスカ CEO 流郷綾乃，2020.
<https://smartagri-jp.com/smartagri/1187>
- 26) 農村工学研究所：農業集落排水汚泥の天日乾燥技術の改良，2003.
<https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/nkk/2003/nkk03-18.html>
- 27) 中村真人，柚山義人：農業集落排水汚泥の天日乾燥技術，農業工学研究所技報，Vol.202，pp.71-80，2004.
- 28) 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構：研究パンフレット「堆肥化中に発生するアンモニアと熱を回収して利用するシステム」，2006.
https://www.naro.go.jp/project/results/research_digest/digest_technology/digest_animals/054722.html
- 29) 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構：2006年研究成果「堆肥化中に発生するアンモニアを効率的に回収する吸引通気式堆肥化システム」，2006.
<https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2006/nilgs06-03.html>
- 30) 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構：2012年研究成果「低温熱源である堆肥発酵熱を回収して温水へ変換するシステム」，2012.
https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2012/220d0_01_49.html
- 31) 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構：研究パンフレット「養豚経営基盤強化に資する高度堆肥化システム（スマートコンポスト）の実証」，2019.
https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/innovation/inobe_result_2019_kaihatsu_33_28025C.pdf
- 32) 薬師堂謙一：成分調整堆肥の生産・利用技術の開発，農業機械学会誌，Vol.64，No.5，pp.25-29，2002.
- 33) 岡山県農林水産総合センター：新規格肥料「混合堆肥複合肥料」の製造技術の検討，2015.
https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/457740_3161523_misc.pdf
- 34) 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構：技術マニュアル「混合堆肥複合肥料の製造とその利用」，国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構，2020.
- 35) 三重県：肥料の生産・輸入・販売に係るルールが変わります，2020.

<https://www.pref.mie.lg.jp/common/content/000970682.pdf>

- 36) 農林水産省：ペレット堆肥の広域流通に向けて，2020.
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/pellet_kouiki.html
- 37) 農林水産技術会議：農林水産技術会議委託プロジェクト研究成果概要，2013.
<https://www.affrc.maff.go.jp/docs/project/genba/pdf/130105.pdf>
- 38) 岩崎慎也，宮崎成生，森聖二，大村裕顕：農業集落排水汚泥の粒状肥料化とその肥効，日本土壌肥料学雑誌，Vol.72，No.3，pp.444-448，2001.
- 39) 岩田将英，濱井和博，杉田秀雄：(社)地域資源循環センターにおけるメタン発酵消化液の液肥利用促進に向けた取り組みについて，再生と利用，No.129，pp.34-37，2010.
- 40) 中村真人：農業集落排水汚泥と食品廃棄物を原料とするメタン発酵消化液の肥料利用，再生と利用，No.170，pp.41-46，2022.
- 41) 一般社団法人地域資源循環センター，国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構：集排汚泥とバイオ液肥の利活用を伴う小規模メタン発酵システム導入の手引き（案），一般社団法人地域資源循環センター，国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構，2021.
- 42) 坂田隼一：みやま市が進める資源循環の取り組みについて～液肥を利用した農業振興など～，再生と利用，No.156，pp.37-40，2017.
- 43) 佐藤稔：離島における自然エネルギー（太陽熱）を利用した汚泥肥料化施設，下水道協会誌，No.677，pp.21-23，2019.
- 44) 大屋博義：高速リン吸着剤を用いた排水からのリン除去・回収，再生と利用，No.143，pp.108-114，2014.
- 45) 明戸剛：排水からのリン回収・肥料化に関する取り組み，再生と利用，No.143，pp.115-118，2014.
- 46) 山下喬子，若山正憲，橋本敏一：高速リン吸着剤を用いた下水二次処理水からのリン除去・回収技術の実証試験，第 50 回下水道研究発表会講演集，pp.841-843，2013.
- 47) 豊嶋喜貴，佐野浩希，片岡誠：吸着剤（使い切り型）による脱水分離液からのりん回収・資源化技術の開発，第 59 回下水道研究発表会講演集，pp.880-882，2022.
- 48) 橋本繁義：福岡市の MAP 法によるリン資源回収の現状について，再生と利用，No.170，pp.59-61，2022.
- 49) 飯島宏：MAP 法におけるりん・窒素の回収と利用，下水道協会誌，No.553，pp.20-28，2008.
- 50) 川端優：消化汚泥への MAP 法の適用－送泥管のスケール防止とリン回収－，下水道協会誌，No.573，pp.26-28，2010.
- 51) 工藤修一：福岡市の MAP 法によるリン回収の現状について，下水道協会誌，No.573，pp.23-25，2010.
- 52) 船石圭介，山口滋，奥野芳男：汚泥再生処理センターにおける余剰汚泥削減とリン回収技術の組み合わせ効果について，Hitz 技報，Vol.78，pp.11-16，2017.
- 53) 太田淳一：岐阜市における下水汚泥焼却灰からのリン回収について，再生と利用，No.156，pp.41-45，2017.
- 54) 中村亮太：下水汚泥焼却灰からのリン回収技術の実用化について，下水道協会誌，No.607，pp.25-28，2013.

- 55) 中川博：下水汚泥焼却灰からのリン回収技術，下水道協会誌，No.591，pp.28-31，2012.
- 56) 山根陽一：下水道汚泥焼却灰からのリン回収における取組みについて，再生と利用，No.141，pp.46-48，2013.
- 57) 白水正道，山口律子，菅谷悌治，山根沙織，太田陽子，田中藍：福岡市西部水処理センターにおけるリンの季節別管理運転方法の検討，第54回下水道研究発表会講演集，pp.850-852，2017.
- 58) 金郁磨，佐々木正之，高館尚史，伊藤歩，石川奈緒，海田輝之，笹本誠：MAP抑制を目的とした機械濃縮汚泥中の元素類の低減化に関する研究，第54回下水道研究発表会講演集，pp.762-764，2017.
- 59) 録家和友：汚泥集中処理化による脱水分離液の集約処理とその効果について，下水道協会誌，No.650，pp.35-37，2016.
- 60) 藤本雅之，田中聡，南公隆，桜井孝二，内田達也，川本徹，雷中方：金属ヘキサシアノ錯体吸着材を用いた消化槽内アンモニアの除去技術の検討，第53回下水道研究発表会講演集，pp.1118-1120，2016.
- 61) 藤本雅之，田中聡，南公隆，桜井孝二，内田達也，川本徹，雷中方：金属ヘキサシアノ錯体吸着材を用いたメタン発酵におけるアンモニア除去の影響評価，第54回下水道研究発表会講演集，pp.1063-1065，2017.
- 62) 渡邊智秀，窪田恵一：一槽式微生物燃料電池における窒素処理の特性，用水と廃水，Vol.58，No.10，pp.44-49，2016.
- 63) 乙幡雄介，藤井大地，齋藤利晃，小沼晋，窪田恵一：下水からの窒素回収を目的とした微細藻類の細胞内蓄積有機物活用技術の提案，第59回下水道研究発表会講演集，pp.22-24，2022.
- 64) 岡安祐司，山崎廉予，重村浩之：消化汚泥の脱水分離液を用いて培養した藻類の燃料化物としてのポテンシャルについて，環境システム計測制御学会誌，Vol.23，No.2/3，pp.94-100，2018.
- 65) 永禮英明：微細藻類を用いた下水のリファイナリー～下水リン回収の自発的普及に向けて～，月刊下水道，Vol.44，pp.81-84，2021.
- 66) 山崎廉予，重村浩之：下水汚泥を利用した自然発生微細藻類培養の効率化の検討，土木学会論文集，Vol.74(7)，pp.III73-III81，2018.
- 67) 不動寺正臣，松尾保成，花島勲，三島悠一郎：下水処理場の季節別運転管理中におけるノリ養殖海域の栄養塩及び塩分の現地調査，第58回下水道研究発表会講演集，pp.126-134，2021.
- 68) 窒素循環技術：ムーンショット型研究開発制度 革新的な窒素循環技術，2020.
<https://www.n-cycle.jp/>
- 69) 中尾賢志，西尾孝之：下水汚泥処理工程からのカリウム回収技術～肥料の三要素を下水処理場から回収する基礎研究～，再生と利用，No.153，pp.63-67，2016.
- 70) 中川晴菜，森康弘，高橋正宏，佐藤久，深沢達矢：カリウム回収に利用する好塩古細菌の増殖に及ぼす余剰汚泥とMg添加の影響，第52回下水道研究発表会講演集，pp.452-454，2015.
- 71) 中山翔太，高橋正宏，佐藤久，深沢達矢，森康弘，中川晴菜：カリウム回収の仕上げ工程としての塩化物混合物からの塩化カリウムの分離，第52回下水道研究発表会講演集，pp.449-451，2015.

- 72) 楊子然, 森康弘, 中川晴菜, 野村惇喜, 高橋正宏, 佐藤久, 深澤達矢: 下水処理水中カリウムの回収に向けた好塩古細菌の動力学的解析, 第 53 回下水道研究発表会講演集, pp.95-92-961, 2016.
- 73) 川口幸男: 生産型下水道システム” ACEⅡ” の構築に向けて, 2019.
https://www.sbmc.or.jp/05_investion/DATA/1-1-3.pdf
- 74) 農林統計協会: 肥料要覧 2019/2020, 農林統計協会, 2020.
- 75) 資源エネルギー庁: 我が国の燃料アンモニア導入・拡大に向けた取組について, 2021.
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/gi_006_03_06.pdf
- 76) 日本下水道協会: 下水試験方法 (2012 年版), 日本下水道協会, 2012.
- 77) 国立研究開発法人 物質・材料研究機構: レアメタル・レアアース特集,
<https://www.nims.go.jp/research/elements/rare-metal/study/index.html>
- 78) 日本下水道事業団: 基礎・固有調査研究報告書 C-2「中小都市向け汚泥燃料化・肥料化等、地域の実情に応じた汚泥利活用」, 日本下水道事業団, 2021.
- 79) 八木宏典: 史上最強カラー図解 プロが教える農業のすべてがわかる本, ナツメ社, p.49, 2010.
- 80) 太陽肥料株式会社: 肥料雑学 植物の必須元素,
<https://www.taiyohiryo.co.jp/knowledge/required.html>
- 81) 独立行政法人農林水産消費安全技術センター: 肥料等試験方法 (2022), 2022.
http://www.famic.go.jp/ffis/fert/bunseki/sub9_shiken2022.html
- 82) 日本下水道協会: 下水道維持管理指針 実務編, 日本下水道協会, 2014.

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、井上賀雅、茂木志生乃、福井智大、新川祐二、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

全国の下水処理場では、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など、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、将来的に下水道の持続的かつ安定的な事業運営が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など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 が運転支援や自動制御を行うなど、上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 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の開発について、公募型等での共同研究を実施する。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。このため、これまでに ICT や AI を活用した設備劣化予測・異常診断技術の開発が進んでいるが、技術情報等の整理が行われていない。

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法のマニュアル化

上述の調査等により収集した成果を体系的に整理し、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など、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・維持管理コストの低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 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り、ガイドライン化や JS 技術基準へ反映する。

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) AIによる水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術

- ① AI 活用手法の開発動向調査（2.1 節）
- ② 能動的運転管理の実態調査（2.2 節）
- ③ AI を活用した水処理・汚泥処理の支援・制御技術の開発（2.3 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（2.4 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（3.1 節）

2. AI による水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術

2.1 AI 活用手法の開発動向調査

(1) 検討の概要

AI を活用した下水処理場の運転管理支援技術の開発に当っては、関連技術に関する世界的な開発動向を把握しておくことが重要である。そこで、AI を活用した技術・手法（以下、「AI 活用手法」と略記）のうち、下水道分野を対象としたもの、および下水道分野への適用が期待できるものについて、国内外における最新の開発動向を把握するための調査を実施する。

具体的には、本年度において、①国内外の学術論文を対象とした文献調査、②海外の民間企業等を対象としたホームページ調査、③国内の民間企業を対象としたヒアリング調査、の 3 点を実施した。

なお、本検討では、下水道分野における AI 活用技術の全体的な開発動向を把握する意図から、調査対象は下水処理場の運転管理支援技術に限定せず、下水道施設全体（管路、ポンプ場、終末処理場等）を範囲とし、設計・計画（シナリオ解析・予測等）、運転管理（水量・水質予測、状態診断、操作量ガイダンス、自動制御等）、保全管理（異常検知、画像診断等）を支援する技術・手法とした。

(2) 検討方法

① 文献調査

研究段階の取り組みを含めた開発動向を把握するために、国内外の学術論文を対象とした文献調査を実施した。以下の 2 ステップで AI 活用手法に関する論文を検索・抽出し、開発分野（機能、用途等）、開発段階、活用事例等について全体的な傾向を整理した。

a) 文献の検索・一次抽出

文献情報データベース (JDreamⅢ) の検索サービスを使用して過去 5 年間 (2018~2022 年) に公表された国内外の原著論文 (総説は含まず) を対象にキーワード検索を行い、下水道分野における AI 関連の文献を抽出した (一次抽出)。

検索キーワードは、以下の第 1 キーワード (AI 関連の語句) と第 2 キーワード (下水道関連の語句) の and 検索とした (第 1・2 キーワード内は or 検索)。

- ・第 1 キーワード：artificial intelligence (人工知能)、machine learning (機械学習)
- ・第 2 キーワード：sewage (下水)、sewerage (下水道)、wastewater (排水)

b) 文献の二次抽出・整理

一次抽出した文献について、タイトル、要約、キーワードに基づき下水道分野との関連性を 4 段階 (3：完全に対応、2：完全に対応しないが下水道分野で活用の可能性がある、1：排水関連であるが下水道分野で活用の可能性が低い、0：分野違い) で割当て、関連性の強い (関連性 3、2) 文献を最終的な抽出結果として、各種分類・整理を行った。

② ホームページ調査

海外で既に実用化段階にある AI 活用手法を把握することを目的に、民間企業等のホームページを対象とした調査を実施した。海外の上下水道分野における主要な民間企業等*を対象とし、ホームページに掲載されている記事等から AI 活用手法に該当するものについて、技術分野（用途）、対象施設、活用事例等を整理した。

③ ヒアリング調査

国内における AI 活用手法の開発動向を把握するために、国内の民間企業を対象としたアンケート形式でのヒアリング調査を行った。各民間企業が保有する AI 活用手法（開発中のものを含む）のうち、下水道分野を対象としたものおよび下水道分野への展開の可能性があるものについて、技術の概要・実績・課題等に係る情報を収集すると共に、AI 活用手法の開発に係る今後の方向性・展望等の意識調査も加え、得られた情報を整理した。

(3) 検討結果

① 文献調査

一次抽出された文献 402 件から、下水道分野への関連性が強いと判定された文献 193 件が二次抽出され、これらを対象分野・施設、開発分野（機能、用途）に基づき分類・整理した。このうち本稿では、対象となる施設、AI が持つ機能、AI の用途に基づき整理した結果を掲載する。なお、以降の結果では、複数の分類に該当する文献は、複数の区分に振り分けている。

下水道における対象施設別（下水道施設全体、管路、ポンプ場、水処理、汚泥処理、その他）に文献数を整理した結果を図 2-1 に示す。水処理・汚泥処理に限らず文献抽出を行ったため、対象施設区分も下水道分野全体が対象となるように設定を行った。下水処理場内の処理プロセス（水処理、汚泥処理）を対象とするものが全体の 78%を占め、中でも水処理に関するものが全体の 64%と大きな割合を占めていた。一方、国内において複数の開発事例がある管路を対象としたものは全体の 7%と少なかった。下水処理プロセス、とりわけ水処理では、現象が複雑で処理状態の定量的な予測が難しく、運転管理の中で日常的に熟練技術者の判断を要する部分が多いことから、AI による予測や最適化による支援（図 2-2 も参照）が馴染む対象と言える。ただし、水処理・汚泥処理に係る文献の中には、新たなユニットプロセス等の開発の過程で運転条件を最適化する等の用途で AI を使用するものも含まれている（図 2-2 における「技術開発」が該当）。

次に、AI の機能（予測、最適化、異常検知、画像認識、その他）を切り口に、上述の対象施設区分毎に文献数を整理した結果を図 2-2 に示す。全対象施設で見ると、AI の機能として予測を扱った文献が全体の 57%と最多であり、次いで最適化に関する文献が 27%で、両者で全体の 84%を占めた。特に水処理を対象とした中では両者の割合が 88%と高かったが、その多くは曝気装置に関するものであった。管路では、画像認識を扱った文献が比較的多いのが特徴的であるが、これは管路調査等で使用する AI 活用手法が含まれるためである。

* 調査対象は、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」²⁾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を対象とした。その他、世界の水メジャー企業も対象とした。

最後に、AIの用途を切り口に、上と同様に対象施設区分毎に文献数を整理した結果を図2-3に示す。全対象施設で見ると、水量・水質予測に関する文献が全体の47%と半分程度を占めた。水量・水質予測、操作量ガイダンス、自動制御といった主に運転支援に関する文献が全体の65%であった。

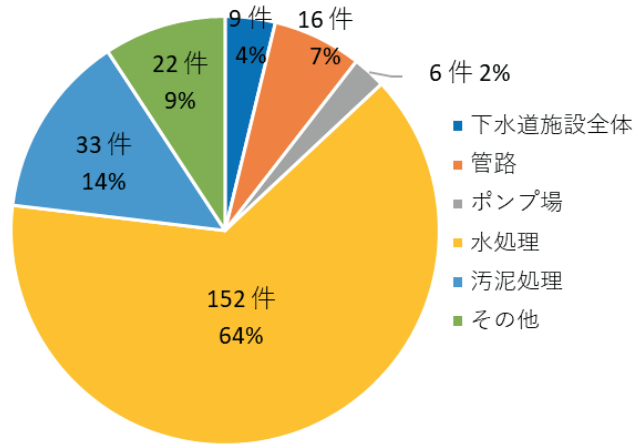


図2-1 対象施設別文献数の内訳

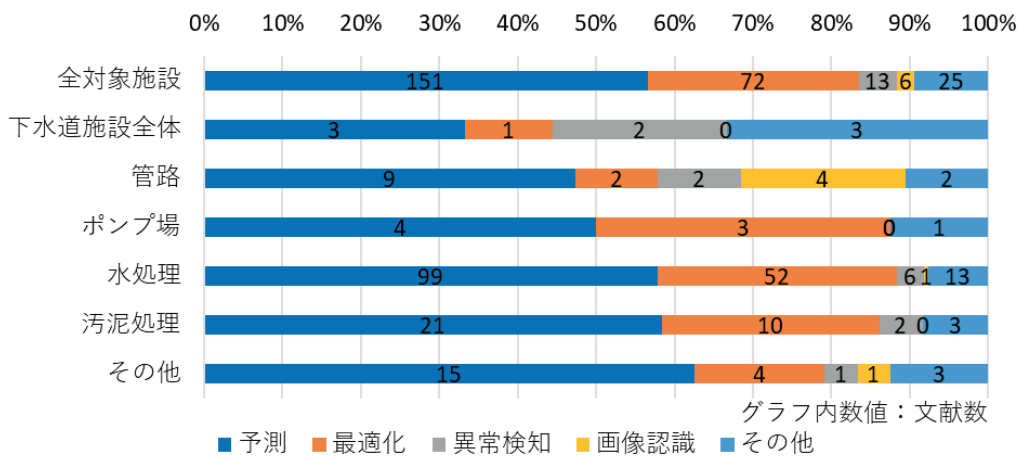


図2-2 対象施設毎のAI技術の機能に基づく文献数の内訳

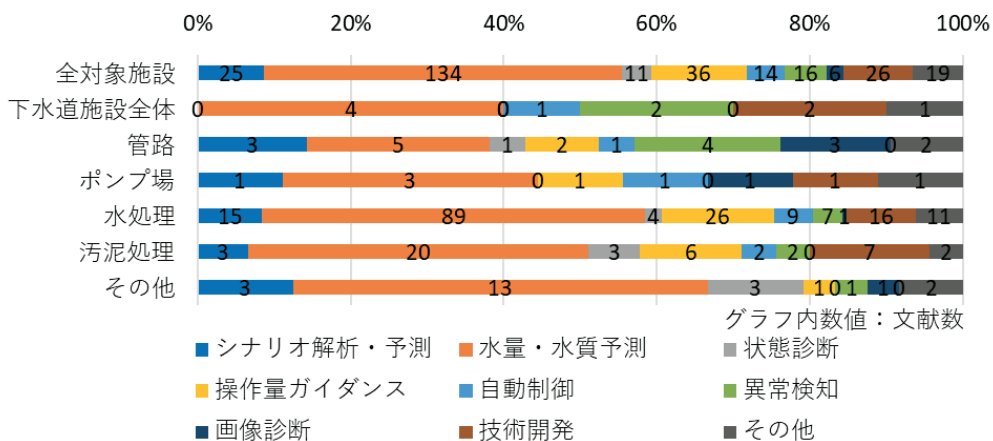


図2-3 対象施設毎のAI技術の用途に基づく文献数の内訳

② ホームページ調査

海外の民間企業等 42 団体のホームページより AI 技術関連の記事等を検索し、14 団体より上下水道分野に関する AI 活用手法 15 点を抽出した。このうち、実施設（上下水道施設）への導入事例がある 9 点の概要を表 2-1 に示す。運転最適化を行うものが 4 点、異常検知を行うものが 3 点、予測を行うものが 1 点、計画支援を行うものが 1 点であった。運転最適化を行う AI 活用手法が多い点は前項の文献調査結果と同様の傾向である。一方、文献調査ではヒット数が極めて少なかった異常検知を行う AI 活用技術についても、海外の上下水道分野において実務的には活用されつつあることがわかる。表 2-1 より、No.3 および No.4 は下水処理場の運転管理支援を行うものであり、履歴センサーデータを用いたプロセスのモデル化または、リアルタイム監視、プロセス制御による運転最適化を行うものである。

表 2-1 導入事例のある AI 活用手法の概要

| No. | 企業・団体 | 国 | 技術名称 | 技術概要 | 用途 | 対象施設 | 導入事例 | 導入場所 |
|-----|----------------------|--------|------------------------------|--|-------|------|---------|---------------------|
| 1 | Xylem | アメリカ | Xylem Vue | GoAigua社（アメリカ）のSSO/CSO予測および防止アプリケーションを搭載したXylemVueを通じて、ポンプ場や貯留、処理施設の運転を最適化しリアルタイム制御によってオーバーフローを削減する。 | 運転最適化 | 全体 | あり | バッファロー-アメリカ |
| 2 | Pentair | アメリカ | Dynamic Torque Controller | ダイナミックトルクコントローラーは、低電圧の電動ポンプ管理システムである。モーターの性能をリアルタイムで監視し、モーターの性能特性を把握することで機械学習による目詰まり防止機能を実現する。 | 運転最適化 | ポンプ | あり | モンタナ州グレートフォールズ-アメリカ |
| 3 | IBM | アメリカ | 不明 | 履歴センサーデータを用いて廃水処理プロセスをモデル化して運転を改善するための推奨事項を提供する。プラントの電気消費量、薬品量、汚泥生成量を削減する。 | 運転最適化 | 処理場 | あり（テスト） | リエイダ-スペイン |
| 4 | Kemira | フィンランド | KemConnect | Simense社（ドイツ）のリアルタイム監視、プロセス制御と最適化、予測分析技術により汚泥脱水やリン除去、消毒、腐食防止等を最適化する。 | 運転最適化 | 処理場 | あり | プラハ-チェコ |
| 5 | Veolia Environnement | フランス | Bob assistant | Bob assistant（人工知能を組み込んだセンサー）を設置した処理プラント施設を継続的に監視し、人工知能を使用して異常な振動を分析して異常を検知する。 | 異常検知 | 処理場 | あり | アンジェ-フランス |
| 6 | United Utilities | イギリス | 不明 | VAPAR社（オーストラリア）のAIを活用してCCTV映像から故障を検知するプロセスを半自動化することにより、パイプラインの修繕を迅速化する。 | 異常検知 | 管路 | あり | United Utilities 管内 |
| 7 | AECOM | アメリカ | PipeInsights | 高度な機械学習アルゴリズムを使用して従来のCCTV検査を加速し、自動欠陥検出することで最適なメンテナンス決定を提案する。 | 異常検知 | 管路 | あり | アメリカ、カナダ |
| 8 | fracta | アメリカ | Fracta LOF | 地理空間情報や過去の破断イベントから機械学習により本管の状態とリスクを評価する。本管の破損の回避や無収水の削減、漏れ検出を改善することで水道インフラのコストとリスクを低減する。 | 予測 | 管路 | あり | イーストベイ市-アメリカ |
| 9 | TaKaDu | イスラエル | dedicated Events View serves | 漏水、圧力、水質、水位、メータ障害等のイベントを機械学習により検知・分類し、KPIに基づいた優先順位付けを行う。 | 計画支援 | 管路 | あり | シドニー-ウオーター |

③ ヒアリング調査

国内の下水道関連企業 55 社、AI 関連企業 33 社の計 88 社に調査票を送付したところ、下水道関連企業 20 社、AI 関連企業 3 社から回答が得られ、各社が保有する（開発中のものを含む）AI 活用手法 43 点（下水道関連企業 37 点、AI 関連企業 6 点）について情報を得た。

下水道関連企業が保有する技術について、AI の用途を切り口として、対象施設区分毎に点数を整理した結果を図 2-4 に、また下水処理場を対象とする 25 点について処理工程毎に点数を整理した結果を図 2-5 に示す。処理場を対象とするものが全体の 68% を占め、その中でも水処理に関するものが 61% であった。用途別では、全対象施設の総計値において運転最適化が 30% と最も多いが、これらは全て処理場に関するものであり、水処理においては 50%、汚泥処理においては 100% が運転最適化に関するものであった。処理場を対象とするもののうち、運転支援に関するものが 84%、施設/設備保全に関する支援するものが 16% であり、画像検知や自動演算/制御といった AI の代表的な用途より運転支援技術の開発が多いと考えられた。

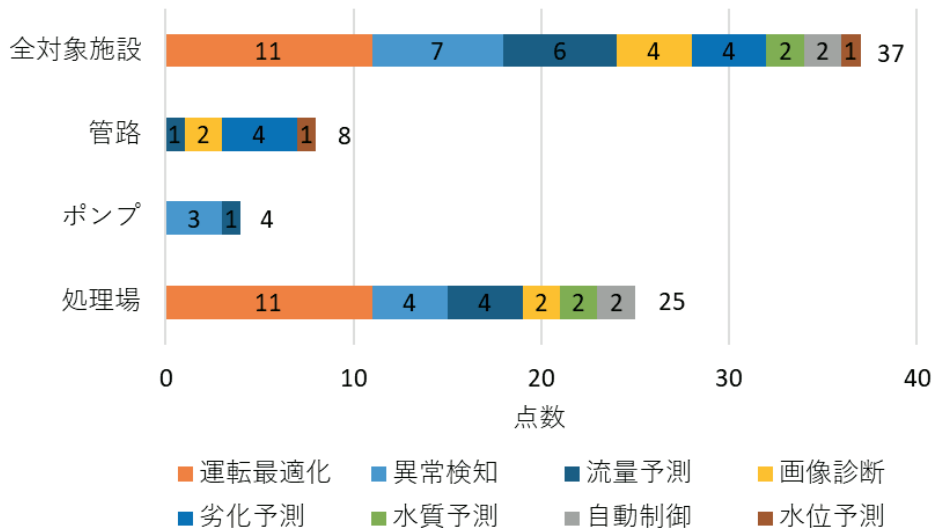


図 2-4 対象施設毎の用途別技術数の内訳(全 AI 活用手法)

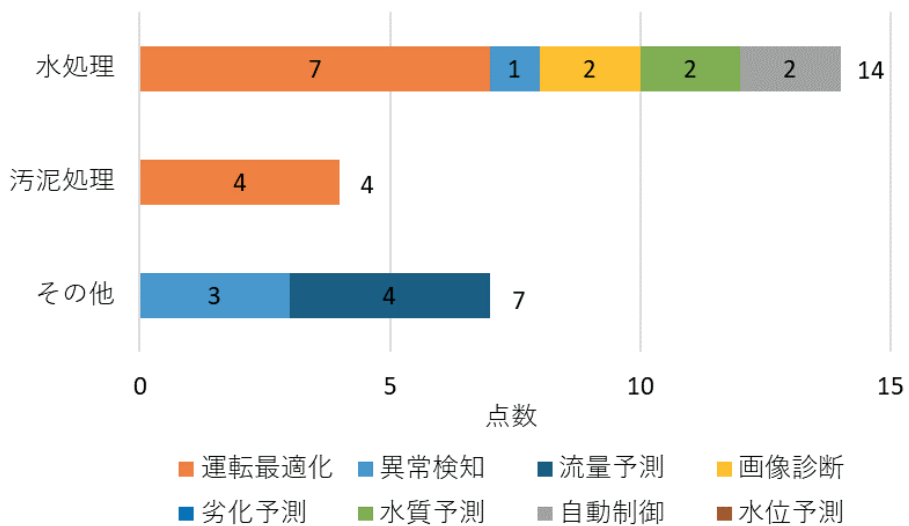


図 2-5 対象施設毎の用途別技術数の内訳
(処理場を対象とする AI 活用手法)

AI 関連企業が保有する技術については、異常検知に関するものが 3 点、画像診断が 2 点、水量・水質予測が 1 点で、これら全てが画像/映像に対して AI を使って解析を行い、異常検知・予測等を行う技術であった（データ非掲載）。

今後の5～10年間に注力するAI活用手法の用途について、各企業が上位3つまでを選択式で挙げた結果を図2-6に示す。下水道関連企業では、異常検知が10社、水量・水質予測7社と多かった。異常検知は、文献数は少ないが、開発・導入が比較的容易なことから国内企業が注目していると考えられた。また、水量・水質予測は文献数も多いことから国内外で注目されている技術と考えられた。AI関連企業では、異常検知が3社、状態診断が3社、画像診断が2社、自動制御が1社と回答が得られ、今後、保有している技術と併せて状態診断を行う技術についても注目されると考えられた。

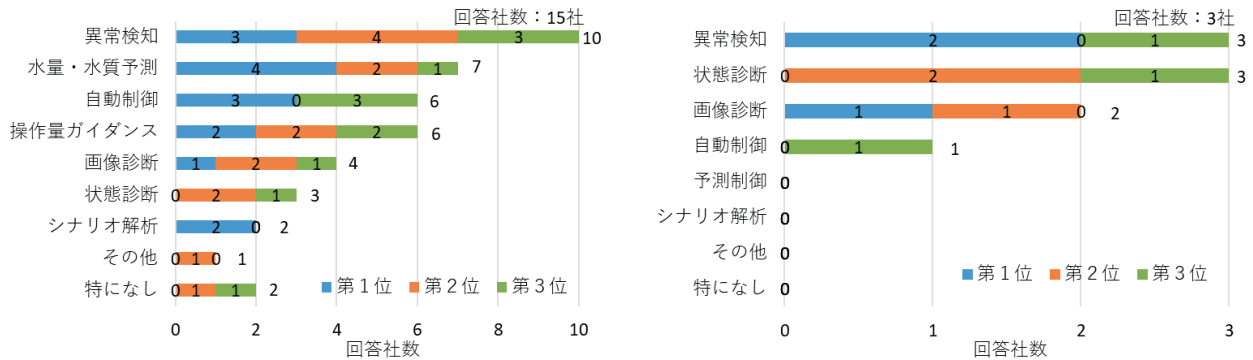


図2-6 今後、注力するAI活用手法の内訳(左:下水道関連企業、右:AI関連企業)

その他にも、AI技術の導入に係る課題についての設問（選択回答）では、責任分界点が不明確、導入コストが高い、という課題が比較的多く選択された（データ非掲載）。また、下水道関連企業とAI関連企業の両者から、異業種との企業間連携を希望するとの回答が多くあった。

(4) まとめ

下水道分野におけるAI活用手法について、文献調査、ホームページ調査、ヒアリング調査を実施し、国内外における開発動向を把握した。主たる結果は以下のとおりである。

- 研究段階の取り組みを含めた開発動向の把握を目的とした文献調査より、処理場、とりわけ水処理を対象とした文献が多く、その中ではAIの機能としては予測および最適化に関するもの、AIの用途としては水量・水質予測を扱うものが最多であった。
- 海外で既に実用化段階にあるAI活用手法の把握を目的としたホームページ調査より、下水処理場の運転管理支援を行うものが2点あり、履歴センサーデータを用いたプロセスのモデル化または、リアルタイム監視・プロセス制御による運転最適化を行うものであった。
- 国内におけるAI活用手法の開発動向の把握を目的としたヒアリング調査より、国内では処理場を対象とした運転最適化、異常検知、流量予測を行うものを主に保有していた。特に運転最適化は、水処理で50%、汚泥処理で100%と多くを占めた。

2.2 能動的運転管理の実態調査

(1) 検討の概要

下水処理場の水処理において高度な運転管理が求められる代表的なケースとして、「栄養塩類の能動的運転管理」（以下、「能動的運転管理」と略記）がある。これは、放流先の養殖業等に

配慮して放流水の栄養塩類（窒素、リン）濃度を年間の特定の期間もしくは通年で意図的に引き上げる運転を指し、瀬戸内海、有明海・八代海、伊勢湾を中心とした沿岸域の下水処理場で実施されるようになっているものである³⁾。そこでは、放流水の水質基準を順守しながら窒素・リン濃度を目標値に維持する高度な運転が必要とされることから、AI を活用した新たな運転管理支援技術の有効な活用先として期待できる。

そこで本検討では、能動的運転管理の実施状況・方法や課題に関する最新の情報を把握することを目的に、同運転管理を実施している全下水処理場を対象とした実態調査を実施する。

（2）検討方法

2022 年 3 月時点で能動的運転管理を導入していた 28 団体 47 処理場を対象に、アンケート形式の実態調査を実施した。調査項目は以下のとおりである。

- 処理場全体の状況：処理場全体の日最大処理水量・系列数・反応タンク池数・水処理方法・水質基準、消化槽の稼働状況
- 能動的運転管理の導入概要：導入時期、導入目的、実施時期、上位計画への位置づけ状況
- 能動的運転管理の実施方法：目標処理水質、反応タンク池数、実施期間、運転方針、増加運転期間の設定理由、運転切替方法、水処理運転方法、運転管理指標
- 能動的運転管理における課題等：運用における課題・改善点、運用に際して求められる新たな技術
- 運転データ：流入水量、流入水質、放流水質

（3）検討結果

調査対象とした 47 処理場のうち、45 箇所から回答が得られた（回収率 96%）。能動的運転管理の対象水質項目に関する回答によれば、このうち窒素を対象に含む処理場が 43 箇所（全体の 96%；以下同様）と大多数を占め、リンのみを対象とする処理場は 2 箇所（4%）のみである。窒素を対象とする処理場の中には併せてリンを対象とする処理場が 11 箇所（24%）含まれるため、リンを対象に含む処理場は計 13 箇所（29%）ということになる。また、窒素を対象とする 43 箇所の中では、水質項目として全窒素のみを対象とする処理場が 25 箇所（56%）、全窒素とアンモニア性窒素の両者を対象とする処理場が 7 箇所（16%）で、アンモニア性窒素または硝酸性窒素を単独で指標とする処理場は見られない。

以降、収集した情報・データのうち、能動的運転管理の実施状況や方法については国土交通省による近年の調査結果³⁾を再確認する内容に過ぎないため、能動的運転管理の運用における課題および求められる新技術に対する回答に限定して以下に紹介する。

① 運用における課題

能動的運転管理の運用における現状の課題について、選択式設問（複数回答可）に対する回答数を集計したものを図 2-7 に示す。

回答処理場数が多かったのは「処理水質が安定しない」、「N-BOD の管理が難しい」の 2 点で、各々 33 箇所（73%）、18 箇所（40%）が両項目を挙げた。これらはいずれも水質管理に係る課題であるが、前者についてはとりわけ運転切替時期の放流水質の不安定化を挙げる処理場が多

く、目標とする栄養塩濃度だけでなく、SS や COD 濃度の悪化、活性汚泥の固液分離性の悪化（沈降性の悪化、ピンフロックの増加等）が生じやすいとの回答を複数の処理場が挙げた。一方、放流水のアンモニア性窒素濃度を上げる運転を行う場合には、必然的に N-BOD による放流水 BOD 濃度の上昇リスクを伴うが、実際にこれが課題となっている処理場が多いことが確認された。

回答数が 3 番目に多い「汚泥処理への影響」（10 箇所、22%）について、具体的な内容が記載された処理場では、汚泥性状の変化や汚泥中の窒素・リン濃度の上昇に伴う消化への悪影響、脱水分離液等の返流水性状の悪化等が挙げられた。また、回答数の順位では上記以降に「高度な運転管理技術が必要」、「運転操作が煩雑である」が続くが、これらは能動的運転管理の運用において運転管理の高度化が必要とされる点を反映した結果と言える。

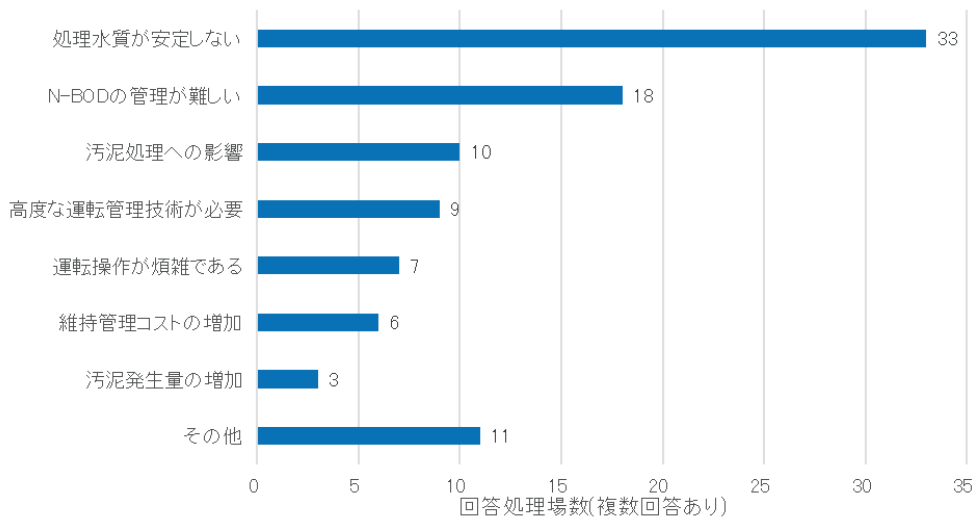


図2-7 能動的運転管理の運用における課題の回答集計結果（選択式；複数回答あり）

② 求められる新技術

能動的運転管理の運用に際して求められる新技術について、選択肢の中から優先度の上位 3 点までを提示する形式で得られた回答を集計した結果を図 2-8 に示す。

回答数が最も多かったのは「曝気風量の制御技術」で、総回答数および優先度 1 位の回答数のいずれにおいても最多であった。能動的運転管理の運用において、手動での曝気風量調整のみならず DO 一定制御等の従来の自動制御技術についても、機能的に十分ではないとの認識が伺える。一方、曝気風量以外の自動制御技術として「水処理全体の自動運転技術」および「曝気風量以外の運転操作量の自動制御技術」についても、ある程度の回答数が得られたものの曝気風量の制御に比べると明らかに少なく、アンモニア性窒素等の放流水質に対する直接的な影響度合いが大きい曝気風量の最適化に資する技術に対する要望が特異的に強いものと理解できる。

「処理水質の予測技術」は、優先度の 1 位に挙げた処理場は少なかったものの、2~3 位の回答数が多く、総回答数では全体の 2 番目となった。窒素・リンだけでなく有機物や SS についても、現状では処理水質を定量的に予測する技術・手法が乏しく、各種運転条件の変更の結果や影響度合いを事前に把握したいとの要望が反映されているものと解釈できる。同様に予測に係るものとして「流入負荷量（水量・水質）の予測技術」についても回答数が比較的多かったが（総回

答数で4番目)、これについては、能動的運転管理の運用において流入負荷量の変動に応じたきめ細かな運転が要求されていることの反映であろう。「処理状態や処理水質の診断/異常検知技術」は総回答数が3番目に多かったが、前項に示した処理水質の不安定さ等の水質管理に係る課題認識が反映されていると考えられる。

本結果から、水処理におけるAI活用の用途として有望な自動制御、予測、診断/異常検知は、いずれも能動的運転管理の実施処理場における新技術に対するニーズに合致するものと言える。一方、同様にAIの活用が期待されるガイダンス技術やデジタルツイン技術については、本調査においては回答数が少ない結果となったが、「ガイダンス」や「デジタルツイン」という用語が実務的に浸透していない点が負のバイアスとなった可能性もある。

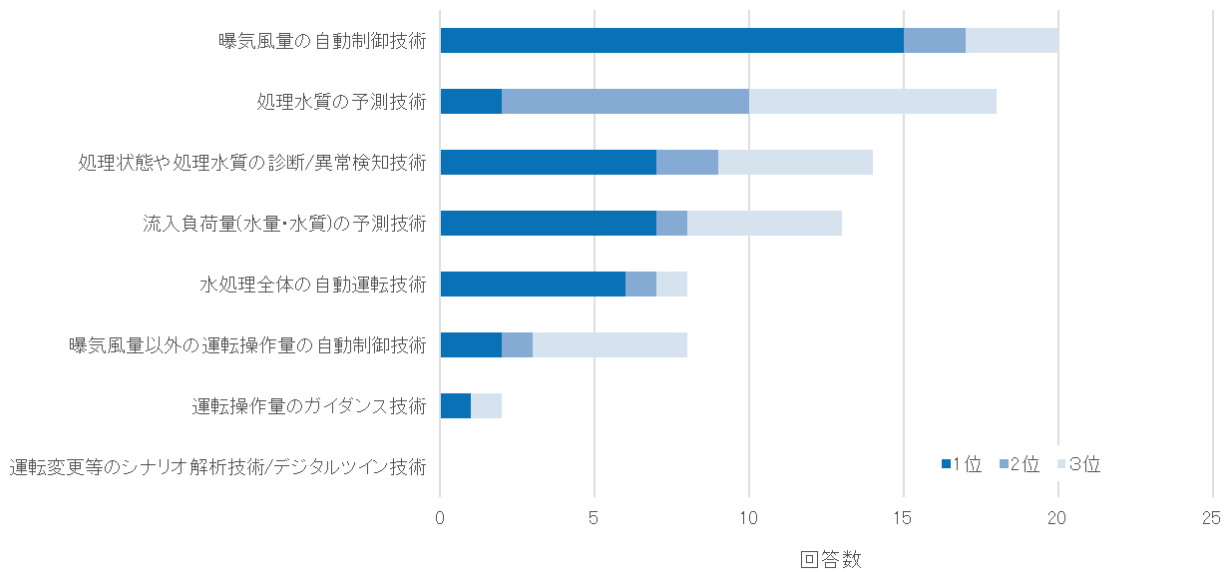


図2-8 能動的運転管理の運用に際して求められる新技術に関する回答集計結果（優先度1~3位について各々選択式）

(4) まとめ

栄養塩類の能動的運転管理を実施している下水処理場を対象にアンケート形式の実態調査を行い、同運転管理の実施状況・方法や課題等に関する情報・データを収集した。

能動的運転管理の運用に際して、処理水質の安定性やN-BODの管理といった水質管理上の課題を認識している処理場が多いことが示された。また、同運転管理の運用において求められる新技術として、「曝気風量の自動制御技術」、「処理水質の予測技術」、「処理状態や処理水質の診断/異常検知技術」、「流入負荷量（水量・水質）の予測技術」を挙げた処理場数が比較的多く、AIを活用した運転管理支援技術の用途が能動的運転管理におけるニーズに合致するものと考えられた。

2.3 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 を活用した水処理の運転支援および自動制御技術の開発を行う。過年度（前・基本計画*期間）に開始した共同研究等を継続すると共に、2023 年度には新たな共同研究を公募し更に多様な技術の開発を行う。

本年度は、過年度より継続している以下の 2 技術について、共同研究等による開発・実証を進めた。

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っている。本検討は、メタウォーター(株)、JS、町田市の 3 者で共同研究体を構成し、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、継続して長期間の実証実験を行っているものである。

② AI による水処理運転操作のガイダンス技術

水処理の運転操作で推奨される設定値を AI がガイダンスを行う運転管理支援技術で、技術者の操作判断に関する労力の低減等を図るものである。本技術は北米や欧州において実施への導入が進んでいるが、国内では未導入である。本検討では、JS、三菱商事(株)、日本工営(株)の共同研究として、国内の実下水処理場をフィールドに本技術の国内下水処理場への導入に向けた研究（2021 年度～2023 年度）を行っている。

(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 2-9）、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本技術の「導入ガイドライン（案）」⁴⁾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、各々統計的機械学習、最適化理論（進化計算法）という 2 つの AI 手法が使用されている。

* 「基礎・固有調査研究の中期計画」の計画期間（2017 年度～2021 年度）

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研究を行っている。2019年度、2年度のB-DASH実証研究の成果に基づき前述の「ガイドライン（案）」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、更なるコスト低減、窒素・リン除去率の向上、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等を図るための実証実験を継続している。

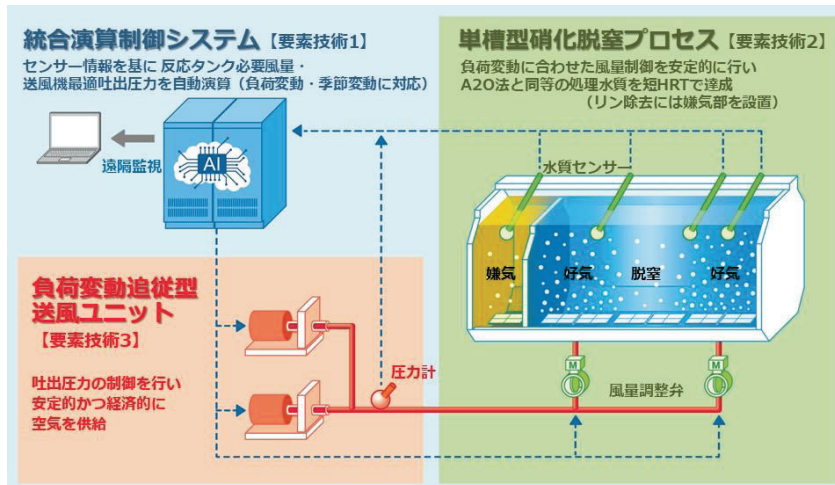


図2-9 単槽型硝化脱窒プロセス ICT・AI 制御による高度処理技術の概略

本年度は、同技術のコスト削減に向けた検討として反応タンクの限界 HRT の検証および複数池の一括制御方法の検討を進めると共に、N₂O 排出量の調査、反応タンクにおける処理メカニズム解明のための調査等を行った。

② AI による水処理運転操作のガイダンス技術

本技術は、下水処理場の運転データや、水質分析等のデータを収集し、これらを入力データとして AI が処理水質等の変化を予測して運転操作量の推奨値を提示するガイダンス技術（図2-10）である。本技術は海外で開発された技術で、北米や欧州では既に導入実績がある。

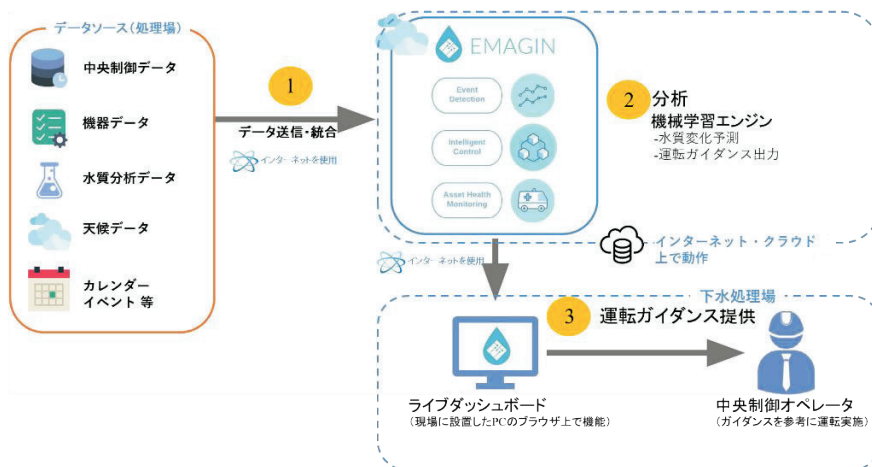


図2-10 技術の概略図

本技術では、AI 手法として機械学習の一種である「階層型強化学習」を採用している。これは、AI が出力した推奨値が適切であった場合に報酬を与え、逆の場合にペナルティを与える反復的な学習プロセスを介して AI が出力する推奨値が最適化される機械学習アルゴリズムである。本技術は、ガイダンスを行う下水処理場の仮想モデルをコンピュータ上に再現するデジタルツインを活用している。仮想モデル上で AI が処理水質等の変化を予測し、運転操作量の推奨値を出力する。この推奨値を参考に水処理運転を行うことで、運転管理技術者の操作判断に関する労力の低減、運転目標に適した運転操作の最適化により、水処理の運転管理の高度化、省エネ・低コスト化が図られる。

本検討では、本技術を国内の下水処理場（現有施設は 4 池/系列×3 系列）の 1 池（1-1 池）に実装して実際に運転管理を行うことで、本技術の国内下水処理場への適用可能性や AI の推奨値に基づく運転によって得られる省エネ等の導入効果について確認する。

本年度は、フィールドである下水処理場の施設情報や運転管理の実績データを用いて、コンピュータ上に仮想下水処理場（水処理プロセス）を構築した。加えて、水処理における曝気運転を対象に実証実験を行う事前検討として、AI が出力する曝気風量の推奨値と運転実績値を比較して、AI 出力値の妥当性や実証実験の実施可能性について検討した（デスクトップシミュレーション）。また、実施での実証実験を行うにあたり、中央監視システムからリアルタイムでデータを取得するデータ読み込みシステムの開発を行った。

(3) 検討結果

本年度における主要な検討結果は以下のとおりである。

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

- 限界 HRT の検証：本技術のコスト縮減に向けた検討として、反応タンクの HRT を実証研究時よりも更に引下げることが可能かどうか検証した。実証系列への水量分配比を上げる運転を 2021 年 6 月～2022 年 11 月の期間に実施し、処理水質等を確認した結果、実証研究時の平均 HRT（9.8hr）に対して平均 8.8hr と更に短縮された条件において、BOD、T-N、T-P の目標処理水質が達成されたことを確認した。
なお、本結果については独立した報告書として取り纏め、国土交通省国土技術政策総合研究所のホームページにおいて「令和 4 年度自主研究成果資料」⁵⁾として公表された。
- 複数池一括制御方法の検討：上と同様にコスト縮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 年度から引続き、展開池における曝気風量の補正方法等の検討を進めた。本年度は、複数の補正方法を用いて実際に複数池一括制御を試行し、展開池における制御特性等を把握した。
- N₂O 排出量の調査：本技術の反応タンクにおける N₂O 排出量を把握するために、実証施設において N₂O 排出量の調査を開始した。本年度は、2 通りの調査方法を用いて計 4 回の調査を行い、調査方法の比較を行うと共に、反応タンクの複数箇所からの排出量の相違や時間変動等に係る基礎的なデータを取得した⁶⁾。

- 処理メカニズムの追加検証：実証研究において明らかとなった本技術に特有の反応タンク内の条件形成や、その中での硝化・脱窒の進行状態について、本技術における窒素除去のメカニズムを正確に把握し設計諸元等に的確に反映させるための各種調査を 2021 年度から継続して実施し、知見を蓄積した。

② AI による水処理運転操作のガイダンス技術

a) デスクトップシミュレーション

実験フィールドである下水処理場 1-1 池の運転実績データ（2023 年 3 月 1 日～2023 年 3 月 27 日）を用いて、AI が出力する推奨値と曝気風量の実績値の比較を行った。その結果、AI が出力する推奨値は実際の曝気風量に概ね合致し、AI が出力する推奨値を用いて実施設で実証実験が可能であることを示す結果が得られた（図 2-11）。

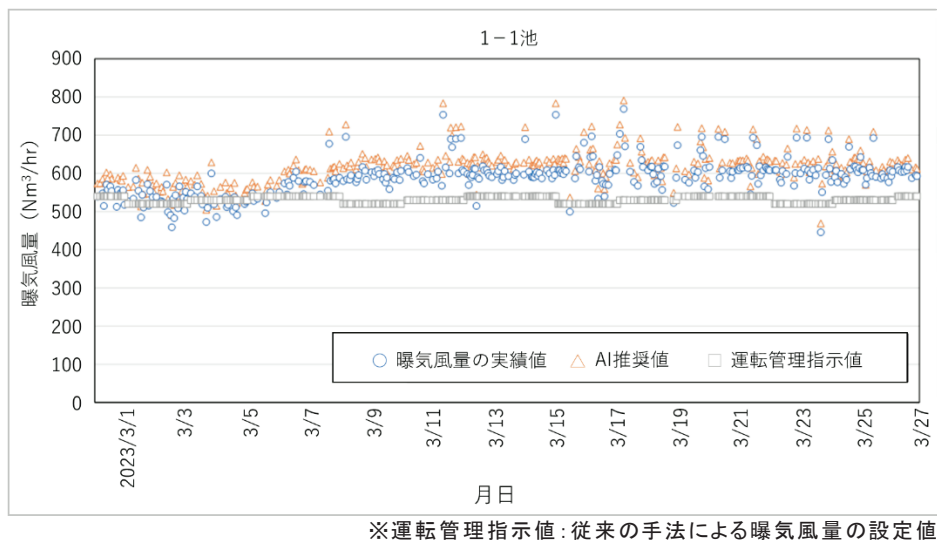


図 2-11 曝気風量の実績値と AI 推奨値の比較

b) データ読み込みシステムの開発

本技術の運用にあたり、計測・運転データの一定頻度（最低 15 分程度）でのリアルタイムの取得が必須であるが、これらデータは中央監視システムからデジタルデータとして直接取得する方法が望ましい。しかし、今回対象とした下水処理場では、システム内のデータがオープンソース化されておらず、データの取得が現実的に不可能であった。そこで、中央監視システムの画面上に表示されている運転数値を画像認識で読み取り、リアルタイムでデジタルデータ化する独立したデータ読み込みシステムの検討を行った（図 2-12）。

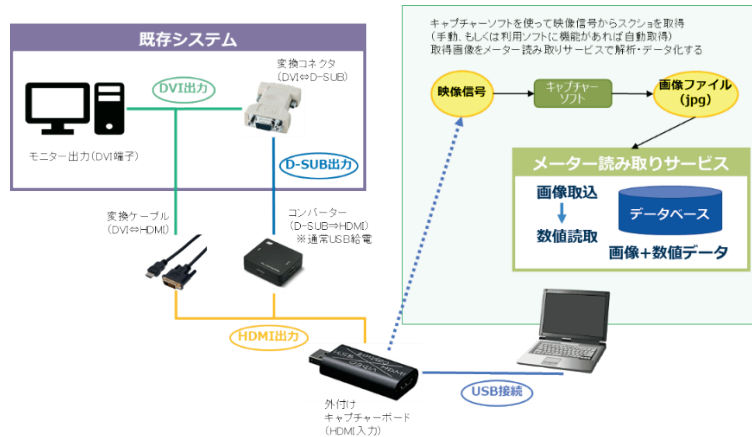


図2-12 データ読み込みシステムの仕組み

(4) 主たる成果

水処理の運転管理支援を行う 2 つの AI 活用技術について、共同研究等により以下の成果が得られた。

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

本技術のコスト縮減に向けた検討として、反応タンクの HRT を実証研究時よりも更に引下げることが可能であることを実証したほか、複数池一括制御に係る実証を進めた。加えて、反応タンクにおける N₂O 排出量や処理メカニズムに関するデータ取得を進めた。

2023 年度は、複数池一括制御の更なる実証を行うほか、N₂O 排出量や処理メカニズムに関するデータ蓄積を図る。

② AI による水処理運転操作のガイダンス技術

対象とする下水処理場の施設情報や過去の運転データを用いてコンピュータ上で仮想下水処理場を構築した。

デスクトップシミュレーションにおいて、本システムによる曝気風量推奨値の出力を実際の曝気風量の実績値と比較したところ、推奨値は運転実績と概ね合致し、本技術の推奨値に基づき曝気風量の設定運用を行う実証フェーズへの以降が可能との見通しを得た。また、中央監視システムからリアルタイムデータを取得する新規データ読み込みシステムを開発した。

2023 年度は、AI が出力する曝気風量の推奨値を用いて実施設の曝気運転を行い、水処理性能への影響、曝気風量や消費電力量の削減効果について検討する。

2.4 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

2.1 節に示したとおり、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、より運転操作に対する影響度が大きい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 の出力自体を直接的に自動制御に用いる試みは殆ど行われていない。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）運転を試行し、AI による自

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、2019・2020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）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。本結果に基づき、AIによる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出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いるものであり、2023年度まで実施予定である。過年度の検討において、AI自動制御が現実的であることを示す結果を得ており⁷⁾、本年度は、AIによる予測モデル（AIモデル）を生成するための教師データ量の違いがAI自動制御の性能へ与える影響など、更に詳細な事項の検討を実施した。

（2）検討方法

本検討では、実験プラントにおいて、DO一定制御による運転データを教師データとしてAIモデルを生成した上で、同モデルによるリアルタイムでの予測値を曝気風量の設定値とする自動制御運転を行う、というステップを繰り返し実施している。本年度の検討では、期間の長さや季節が異なる複数の運転データを教師データとして各々AIモデルを生成し、各モデルを用いて曝気風量の自動制御運転を行った。得られた運転結果から、教師データの量や期間の違いがAIモデルの出力値や制御性能に与える影響を解析すると共に、入力データの各項目が出力値に与える影響の寄与度合いについても考察を加えた。

① AI技術

前述のとおり、本検討で使用するAI技術は、2019・2020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、下水処理場の実データを用いて性能等を検証した水処理のガイダンス技術（水処理制御支援技術）である（図2-13）。本技術は、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に基づいて曝気風量や余剰汚泥引抜量等の操作因子の推奨値（ガイダンス値）をリアルタイムで出力するもので、これに基づく設定値の変更の判断自体は運転管理者に委ねられている。本技術ではAI手法として「ランダムフォレスト（RF）」⁸⁾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、各々の決定木による出力を統合（平均化等）して出力値とする手法で、機械学習の一種である。決定木の本数や階層数は、AIモデルを生成する際のパラメータとして設定する。

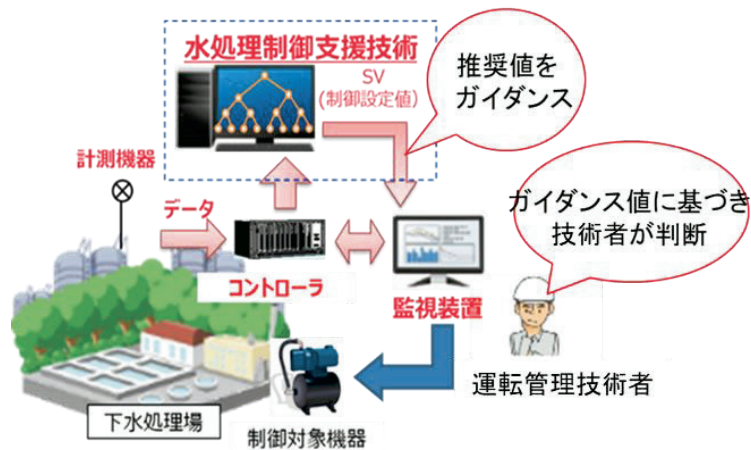


図 2-13 水処理制御支援技術の概要

② 実験プラント

本検討では、JS 技術開発実験センターにおいて、実下水（分流式、初沈越流水）を原水として連続運転中の活性汚泥法のパイロットプラント（処理能力 50m³/d）を使用した（図 2-14）。本検討の期間を通して標活性汚泥法として運転を行ったが、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-好気運転とした。運転期間を通して、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、電力使用量の 10 項目について計器による自動計測を行い、AI モデル生成の教師データおよび AI 自動制御における入力データとして使用した。

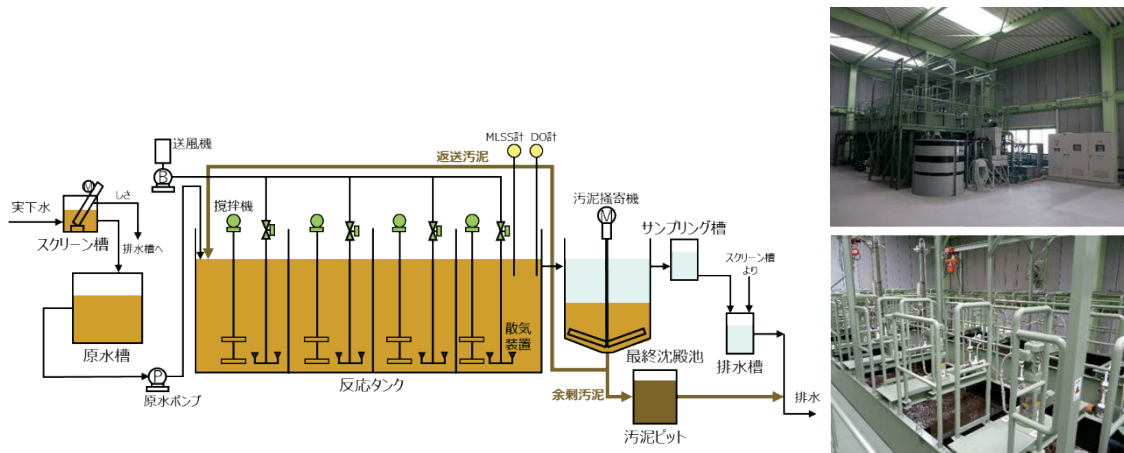


図 2-14 実験プラントのフローおよび外観

③ 実験プラントの運転条件

本検討期間における実験プラントの運転条件を表 2-2 に示す。流入水量は、日量として 43～62m³/d の範囲、時間変動比として 0.58～1.39（1 日平均流量に対して）の範囲で 4 通りのパターンを設定し、実験期間に応じてパターンを切替えた（次項参照）。全期間を通して汚泥返送率は 50%で固定し、MLSS 濃度が概ね 1,500～2,000mg/L の範囲となるよう引抜汚泥量を調整

した。曝気風量は、AI 自動制御による期間を除き、DO 一定制御（目標 DO 濃度：1mg/L）で運転した。好気条件である第 2～4 区画への曝気は等量配分とした。

表 2-2 実験プラントの運転条件

| 項目 | 条件 |
|---------|---|
| 流入流量 | 43～62m ³ /日 (HRT:6.5～9.3 時間) |
| 処理方式 | 標準活性汚泥法 (1 区画目を嫌気とした AOOO 運転) |
| 曝気風量制御 | DO 一定制御 (目標 DO 濃度:1mg/L) |
| MLSS 濃度 | 平均 1,600mg/L (最小 1,110mg/L～最大 2,230mg/L) |
| 返送汚泥率 | 50% |

④ 実験方法

本年度は、教師データの取得および AI 自動制御による運転の時期が異なる 4 回の実験を行った（実験 B～D；表 2-3）。なお、同表に示した実験 A は 2021 年度に実施したもので、教師データの期間が 133 日と長く、実験 B～D に対して教師データ量の違いを確認するためのレファレンス用として使用した。実験 B～D は、各々夏期、秋期、冬期に 14 日分の教師データを取得して実施したもので、主として季節による相違を確認する目的で実施した。実験 A では教師データに多様性を持たせるために 3 つの流入パターン、実験 B～D では季節による相違を明確にするため夏期、秋期、冬期のいずれも共通の流入パターンで運転した。教師データにおける曝気風量の制御は、DO 一定制御（目標 DO 濃度：1mg/L）で行った。

表 2-3 各実験の条件

| 項目 | | 期間 | 流入パターン(水量) |
|--------------|--------------------|----------------------------------|---|
| 実験 A | 教師データ (DO 一定制御) | 2021/6/1～2021/10/11 (133 日間) | 0.03m ³ /min (43m ³ /日) 0.02～0.05m ³ /min (52m ³ /日) 0.03～0.05m ³ /min (62m ³ /日) |
| | AI 自動制御 | 2021/10/12～2021/10/20 (9 日間) | 0.03～0.05m ³ /min (62m ³ /日) |
| 実験 B (夏期) | 教師データ | 2022/8/9～2022/8/22 (14 日間) | 0.03～0.04m ³ /min (48m ³ /日) |
| | AI 自動制御 | 2022/8/23～2022/8/29 (7 日間) | |
| 実験 C (秋期) | 教師データ | 2022/9/27～2022/10/10 (14 日間) | |
| | AI 自動制御 | 2022/10/11～2022/10/17 (7 日間) | |
| 実験 D (冬期) | 教師データ | 2022/11/29～2022/12/12 (14 日間) | |
| | AI 自動制御 | 2022/12/14～2022/12/22 (9 日間) | |

各 AI モデルは、前述の各教師データを用いて生成した。AI モデル生成におけるハイパーパラメータは、昨年度までの検討結果に基づき、決定木本数：100、決定木階層：10 で固定とした。AI 制御運転では、各 AI モデルによる曝気風量の出力値を送風機の目標風量として自動制御を行った。具体的には、5 分間隔で 10 項目の入力データをリアルタイムで取込み、AI モデ

ルがこの先 5 分間の曝気風量（固定値）を 5 分周期で出力し、これを送風機の目標風量とすることで、曝気風量の自動制御を行った。

（3）検討結果

① 各教師データ取得期間中の運転実績

実験 A～D における教師データ取得期間の曝気風量と DO 濃度の実績を表 2-4 に示す。教師データ取得時は DO 一定制御で運転を行ったが、実験 A・C では、送風機の運転可能範囲（0.25～0.50m³/min）の制約により、DO 一定制御による設定値が低い場合でも下限付近で運転される場合があり、DO 濃度の平均値は 1mg/L より高く値のばらつきが大きい。実験 B・D では送風機の運転可能範囲の中間域で制御され、DO 濃度の平均値は 1mg/L 付近でばらつきが小さい運転結果であった。

表 2-4 教師データにおける曝気風量と DO 濃度の実績

| 項目 | | 実験 A | 実験 B | 実験 C | 実験 D |
|-------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 曝気風量 | Nm ³ /min | 0.30 | 0.34 | 0.26 | 0.40 |
| | | 0.32±0.10 | 0.35±0.05 | 0.28±0.05 | 0.40±0.06 |
| DO 濃度 | mg/L | 1.04 | 1.00 | 1.04 | 1.00 |
| | | 1.46±1.05 | 1.00±0.08 | 1.36±0.75 | 0.99±0.11 |

上段：中央値、下段：平均値±標準偏差

② 教師データ量の違いによる影響

教師データの量が AI 自動制御の性能等に与える影響を確認するため、実験 A・C の運転結果を比較した（図 2-15、16）。まず、各 AI 自動制御期間における DO 濃度を教師データにおける DO 一定制御の性能と比較すると、実験 A では教師データの DO 濃度が 1.46±1.05mg/L（平均値±標準偏差；以下同様）であったのに対して AI 自動制御における DO 濃度は 0.95±0.20mg/L、実験 C では各々が 1.36±0.75mg/L、1.01±0.13mg/L であった（表 2-4、2-5）。いずれの実験においても平均値・標準偏差で比較すると教師データと AI 自動制御で差があるように見えるが、教師データには送風機が DO 一定制御の設定値と異なる運転が行われた期間が含まれている。DO 濃度の中央値で比較した場合、教師データと AI 自動制御に大きな差はなく、いずれも良好と言える制御結果であった。ただし短期的に見ると、AI 自動制御では、送風機の運転可能範囲よりもやや狭い範囲で運転される傾向が見られ、DO 濃度が 1mg/L より低いにも関わらず、曝気風量の設定値が運転上限の 0.5m³/min まで上がらない期間が複数回確認された。これは、各決定木の予測値を平均化して出力値とする RF に特有の挙動であると考えられた。

実験 A・C における AI 自動制御の結果を比較すると、教師データ量に 10 倍程度の違いがあるにも関わらず、DO 濃度の平均値や標準偏差には大きな違いが見られず、教師データ量の違いによる制御性能への明確な影響は確認されなかった。これは、AI による曝気風量の自動制御において、教師データ量を増やすことが必ずしも制御性能の向上には繋がらず、14 日間という短期間の教師データにおいても十分な制御性能が得られる可能性を示す結果と言える。ただし本結果は、外乱が比較的少なく、入力データの項目数も限定された実験プラントにおいて得られた実績であるため、より実施に近い条件での検証が必要である。

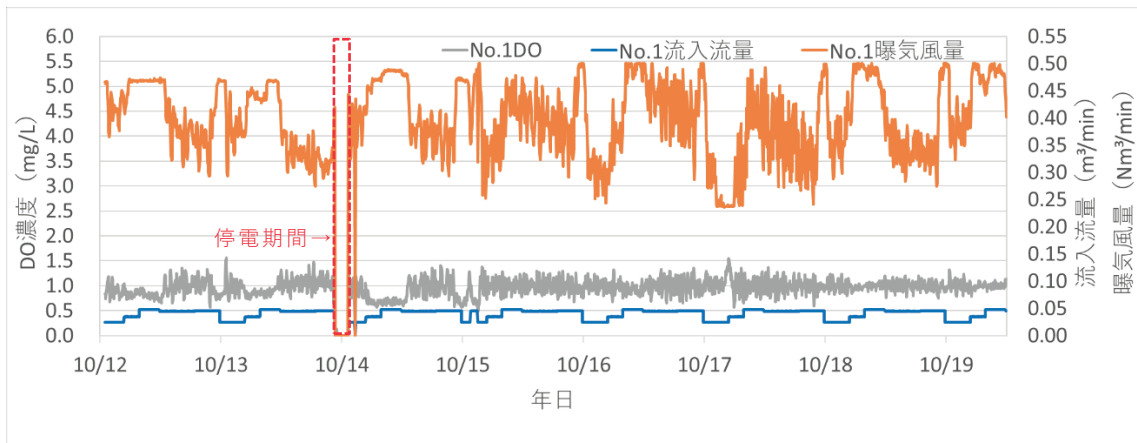


図2-15 AIによる曝気風量の自動制御運転結果(実験 A)

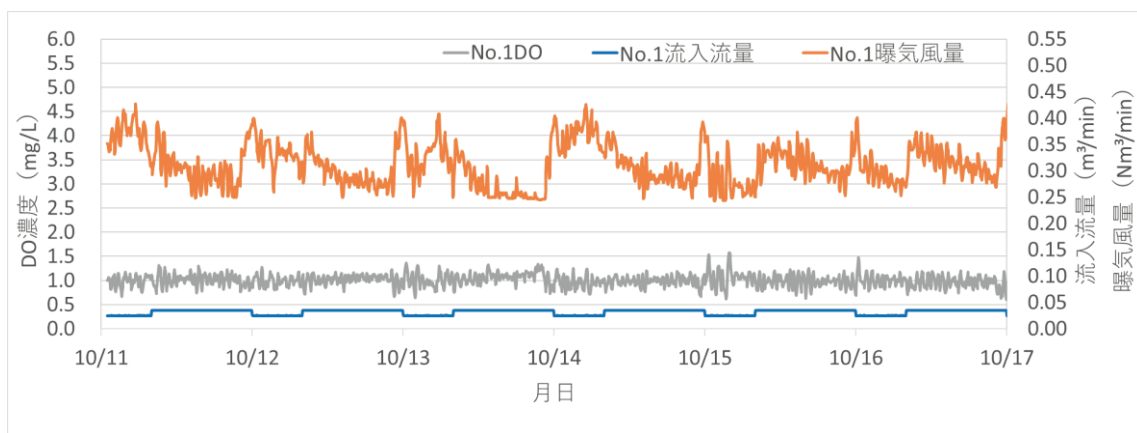


図2-16 AIによる曝気風量の自動制御運転結果(実験 C)

表2-5 曝気風量と DO 濃度の実績

| 項目 | | 実験 A | 実験 C |
|-------|----------------------|-----------|-----------|
| 曝気風量 | Nm ³ /min | 0.39 | 0.31 |
| | | 0.40±0.10 | 0.31±0.04 |
| DO 濃度 | mg/L | 0.96 | 1.01 |
| | | 0.95±0.20 | 1.01±0.13 |

上段：中央値、下段：平均値±標準偏差

③ 季節の違いによる影響

季節の違いが AI 自動制御の性能等に与える影響を確認するために、実験 B～D の運転結果を比較した（図 2-17、18、表 2-6）。AI 自動制御期間中の平均水温および MLSS 濃度は、実験 B が 26.7℃/1,700mg/L、実験 C が 23.5℃/1,700mg/L、実験 D が 17.8℃/2,200mg/L であった。DO 濃度は、実験 B・C ではそれぞれ 1.00±0.20mg/L、1.01±0.13mg/L であり、DO 一定制御の目標値前後で運転が行われたが、実験 D では 0.77±0.23mg/L と低い DO 濃度での運転となった。

各実験において AI が出力した曝気風量は、実験 C・D では教師データよりも大きくなる結果が得られた。DO 濃度で見ると実験 C の AI 自動制御は前述のとおり DO 濃度が 1mg/L 付近で運転され良好に送風機の運転が行われている。これに対して、実験 D の AI 自動制御は前述

のとおり低い DO 濃度での運転となっている。これは、送風機の運転可能範囲の上限が $0.5\text{Nm}^3/\text{min}$ にもかかわらず、DO 濃度が 1mg/L より低い状態でもこの上限まで上がっていないことが原因の一つであると考えられた。

実験 B・C は、教師データと AI 自動制御の結果に大きな違いは見られなかった。実験 D は、今回生成した AI モデルでは制御が十分に行えなかったことを示しており、AI モデルを運転条件に応じてそれぞれ生成するケースがあることを示唆する結果であり、AI モデルの生成において検討すべき重要な事項であると考えられた。

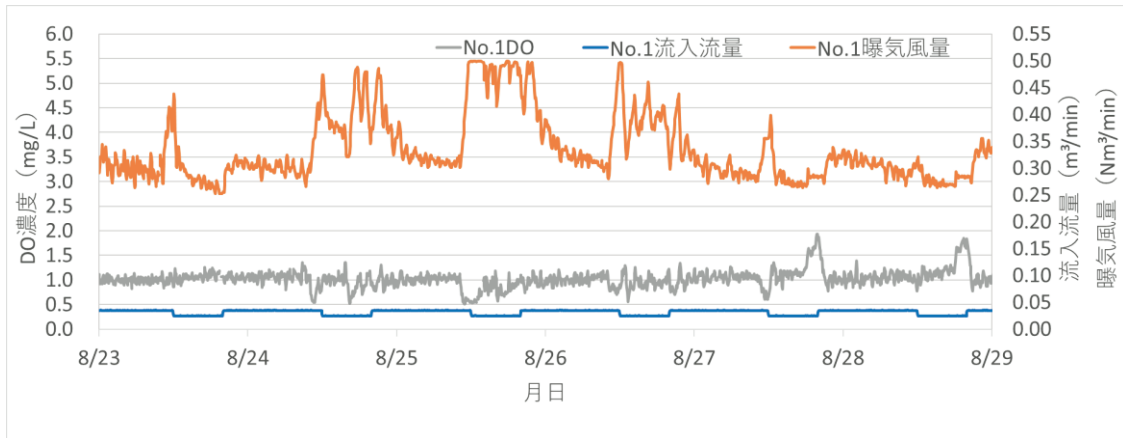


図 2-17 AI による曝気風量の自動制御運転結果(実験 B)

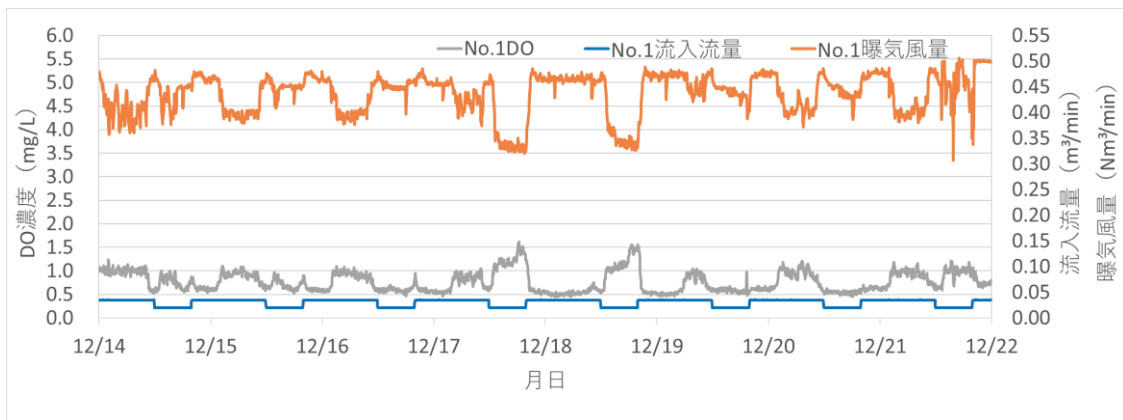


図 2-18 AI による曝気風量の自動制御運転結果(実験 D)

表 2-6 曝気風量と DO 濃度の実績

| 項目 | | 実験 B | 実験 C | 実験 D |
|-------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 曝気風量 | Nm ³ /min | 0.32 | 0.31 | 0.45 |
| | | 0.34 ± 0.06 | 0.31 ± 0.04 | 0.44 ± 0.04 |
| DO 濃度 | mg/L | 1.02 | 1.01 | 0.70 |
| | | 1.00 ± 0.20 | 1.01 ± 0.13 | 0.77 ± 0.23 |

上段：中央値、下段：平均値±標準偏差

④ AI の出力に対する各データ項目の重要度

RF では、生成した AI モデルにおいて、入力となる各データ項目が出力に対して寄与する程度を「重要度（variable importance）」というパラメータ値として計算することができる。そこで、実験 A・C で生成した AI モデルについて、各データ項目の重要度を算出した結果を図 2-19 に示す。いずれのモデルにおいても、AI の出力である曝気風量の重要度が他項目に比べて圧倒的に高くなっているが、これは曝気風量の予測結果に対して予測演算時点での曝気風量が大きく影響することを示すもので、RF が入力・出力を時系列データとして扱っていないことを考えると自然な結果である。これを除外したデータ項目の中では、DO 濃度の重要度が最も高く、教師データにおいて制御変数（制御の目標）であった DO 濃度が、それを模倣する AI モデルにおいても予測結果に対して比較的大きな影響を持つことが理解できる。それ以降では、MLSS 濃度、流入水量、返送汚泥量および濃度といった反応タンクでの酸素消費速度を変化させる項目が並んでおり、曝気風量の設定値に対して影響を持つ項目として、定性的にはメカニズム的知見と整合している。

同図は重要度の数値を並べたのみであるが、このような情報を上手く可視化することができれば、ブラックボックス化しやすい AI による出力に対して、人間が理解可能な根拠を与えることが可能になると期待できる。

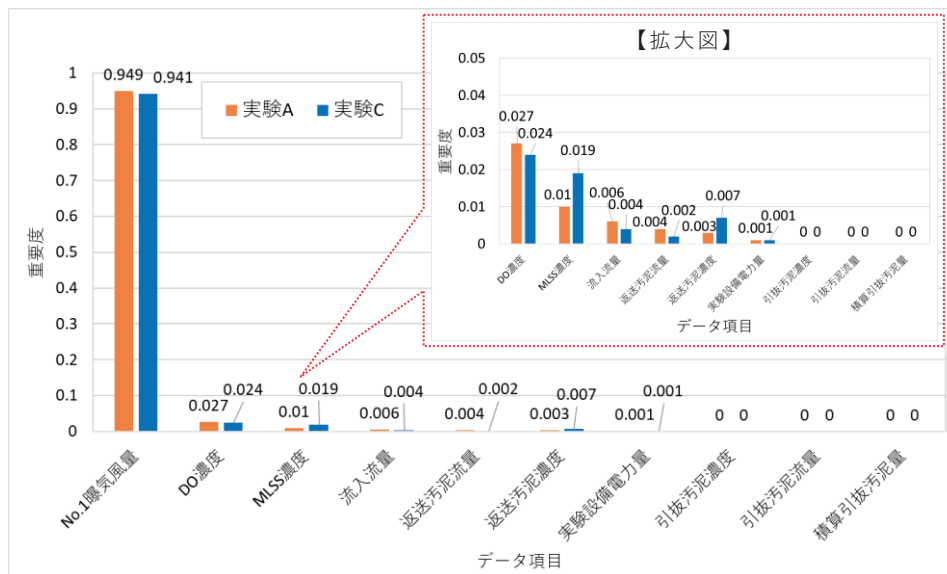


図 2-19 実験 A・C で生成した AI モデルにおける各データ項目の重要度

(4) まとめ

パイロット規模の実験プラントを用いて、曝気風量の AI 自動制御による運転を行い、教師データ量や期間の違いが制御性能へ与える影響等について検討した。主たる成果は以下のとおりである。

- 外乱要素が少ない実験プラントを使った検討ではあるものの、14 日間という比較的短期間の教師データを用いて生成した AI モデルにより、DO 一定制御を模した曝気風量の自動制御運転が可能であった。
- AI 自動制御では、送風機の運転上下限に達した期間を含む教師データに対して、上下限よりもやや狭い風量範囲で運転される傾向が見られ、RF に特有の挙動であると考えられた。

- AI モデルの生成において、運転条件に応じた AI モデル生成の必要性を検討することが重要である。
- 曝気風量以外のデータ項目の中では、教師データにおいて制御変数であった DO 濃度が、それを模倣する AI モデルにおいても重要度が最大であった。
- 重要度による可視化は、ブラックボックス化しやすい AI による出力に対して、人間が理解可能な根拠を与えることが可能な方法として期待できる。

今後は、未学習条件下での AI 自動制御実験等、実験プラントを使った実験の継続実施に加えて、これまでに得た実験データを用いてより短スパンでの DO 濃度の変化に対する AI 自動制御の挙動や AI モデルの決定木のデータ分割構造の詳細解析等の検討を行う。

3. ICTによる広域監視・制御システム

3.1 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」の実規模実証実験を行い、施設の監視・制御・帳票作成等を行う設備または装置（監視制御装置）等の通信の信頼性・安定性、建設費・改修費および維持管理費の削減効果等を検証するものである。本検討は2021年度の国土交通省 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研究とし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。これまでの検討では、模擬装置を用いた通信確認等により下水道施設における操作性・応答性が良好であることが確認できた。本年度は、工場間の試験および現地環境での通信により、下水道施設における通信の操作性・応答性等について確認を行った。

(2) 検討方法

① 技術の概要

本技術は、図3-1に示す「共通プロトコル方式」および「リモートデスクトップ（RDP）方式」により構成される。

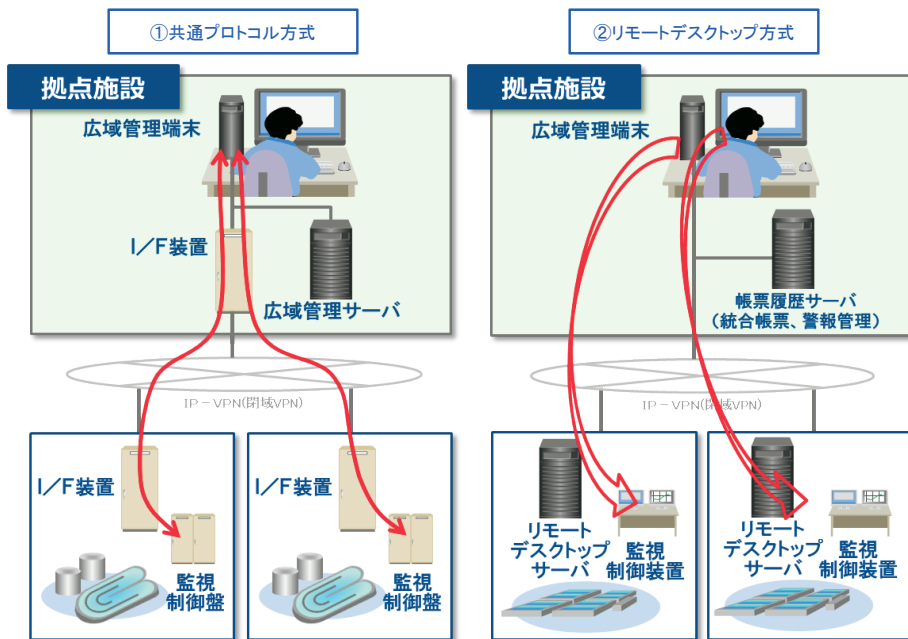


図3-1 共通プロトコル方式および RDP 方式の概要

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、製造業者が異なる監視制御装置間の通信接続を容易とする技術であり、その特徴は以下のとおりである。

- 製造業者が異なる監視制御装置および監視制御盤と広域管理拠点側の広域管理サーバが共通プロトコルを用いて信号の授受を行うことで監視・制御、帳票データの統合が可能
- 他社間を接続するための信号を授受する伝送装置（I/F 装置）の標準化が可能
- 製造業者ごとの伝送装置・データ変換装置の機能が、I/F 装置に集約可能

b) リモートデスクトップ(RDP)方式

監視制御装置が設置されている処理場等において、リモートでの監視制御、帳票印刷を可能とする技術であり、その特徴は以下のとおりである。

- 処理場・ポンプ場等の施設ごとの監視・制御、帳票印刷が可能
- 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建設費・改修費のコスト低減が可能
- 共通プロトコルを付加することにより、広域管理拠点で警報発報、帳票データの統合を行う場合においてコスト面のメリットを大きく損なうことなく、従来と遜色がない広域監視制御システムが構築可能

② 検証方法

本技術について通信の信頼性、安定性を確認するため、通信機能確認試験、項目確認試験および操作応答時間の検証を実施した。本年度における各方式の検証方法は以下のとおりである。

a) 共通プロトコル方式

広域管理端末と製造者の工場に設置した 3 つの I/F 装置（A～C）を閉域ネットワークで接続し、本方式の試験を行った。通信機能確認試験では目標とする応答時間内での表示や操作が行えるか、項目確認試験では各機場から送られた信号項目が正しく授受可能であるかの確認を行った。通信機能確認試験の目標値および項目確認試験の信号項目点数は表 3-1、2 のとおりである。

表 3-1 通信機能確認試験の目標値

| 項目 | 目標値 |
|--------|-------|
| 表示応答時間 | 2 秒程度 |
| 操作応答時間 | 6 秒程度 |

表 3-2 項目確認試験における信号項目点数

| I/F 装置 | デジタル信号 | |
|--------|--------|------|
| | 入力点数 | 出力点数 |
| A | 89 | 10 |
| B | 487 | 175 |
| C | 521 | 63 |

b) リモートデスクトップ(RDP)方式

操作応答時間の検証として、現地環境にて管理側端末からポンプ等現場機器への操作を行い、目標とする操作応答時間 3 秒程度の操作が行えるかの確認を行った。2022 年度のデジタル回線はビジネスイーサを用いた。

（3）検討結果

① 共通プロトコル方式

通信機能確認試験では、目標値に対し表 3-3 に示す測定結果となった。測定値が平均値、最大値共に目標以内となり、良好な結果が得られた。

表 3-3 通信機能確認試験の測定結果

| 項目 | 目標値 | 測定結果 | | |
|--------|-------|--------|-------|-------|
| | | I/F 装置 | 平均(秒) | 最大(秒) |
| 表示応答時間 | 2 秒程度 | A | 0.71 | 0.91 |
| | | B | 0.63 | 0.77 |
| | | C | 0.70 | 0.89 |
| 操作応答時間 | 6 秒程度 | A | 2.62 | 3.19 |
| | | B | 2.03 | 2.80 |
| | | C | 2.71 | 3.24 |

信号項目確認試験では、リアルタイムデータ（ポンプの運転/停止や流量・水質等瞬時に変化するデータ）について、表 3-2 に示す信号項目点数が伝送され、正しく画面に表示されることを確認した。

② リモートデスクトップ(RDP)方式

操作応答時間の測定結果を表 3-4 に示す。測定された操作応答時間は平均して目標値の 3 秒程度であった。ただし、既存のシステム性能により本方式を導入する以前から操作応答時間が 3 秒以上生じるケースが確認されたため、既存システムに起因する遅延が生じたものは性能評価から除いた。

表 3-4 RDP 方式による操作応答時間の測定結果

| 現場機器 | 測定値(秒) | |
|-----------|--------|-------|
| | 停止→運転 | 運転→停止 |
| 流入ゲート | 2.48 | 2.23 |
| 初沈汚泥掻寄機 | 3.53 | 3.00 |
| 終沈汚泥掻寄機 | 2.7 | 3.04 |
| 重力濃縮汚泥掻寄機 | 2.39 | 2.27 |

（4）まとめ

「ICT の活用による下水道施設広域監視制御システム」の実規模実証実験にて、下水道施設における通信信頼性、安定性が良好であることが確認された。2023 年度は、使用するデジタル通信回線の評価や現地環境における共通プロトコル方式、RDP 方式またはその組み合わせによる長期的な通信信頼性、安定性の検証を進める。

4. 検討結果の総括

4.1 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 活用手法の開発動向調査

下水道分野における AI 活用手法の開発動向を把握するため、国内外の文献調査、海外企業を対象としたホームページ調査、国内関連企業へのヒアリング調査を実施した。文献調査では、水処理を対象とした文献が多く、AI の機能としては予測および最適化に関するもの、用途としては水量や水質予測を行うものが最多であった。海外で実用段階にある AI 活用手法として、処理場の運転管理支援を行うもので、履歴センサーデータを用いたプロセスのモデル化または、リアルタイム監視・プロセス制御による運転最適化を行うものがあった。ヒアリング調査では、国内関連企業は処理場を対象とした運転最適化、異常検知、流量予測を行うものを主に保有していた。特に運転最適化は、水処理で 50%、汚泥処理で 100%と多くを占めた。

② 能動的運転管理の実態調査

能動的運転管理を実施している全下水道処理場を対象にアンケート形式の実態調査を実施し、同管理の実施状況・方法や課題に関する最新の情報を収集した。能動的運転管理の運用に際して、処理水質の安定性や N-BOD の管理といった水質管理上の課題を認識している処理場が多いことが示された。また、同運転管理の運用において求められる新技術として、「曝気風量の自動制御技術」、「処理水質の予測技術」、「処理状態や処理水質の診断/異常検知技術」、「流入負荷量（水量・水質）の予測技術」を挙げた処理場数が比較的多く、AI を活用した運転管理支援技術の用途が能動的運転管理におけるニーズに合致するものと考えられた。

③ AI を活用した水処理の支援・制御技術の開発

過年度から継続している AI 活用技術 2 件に関する共同研究等を進めた。

「単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術」について、更なるコスト縮減を目的に限界 HRT の確認や複数池一括制御方法の検討を進めた。また、本技術における N₂O 排出量や反応タンク内の処理メカニズムを把握するための調査を行った。

「AI による水処理運転操作のガイダンス技術」について、実処理場で実験を行うための AI ガイダンス技術の構築と、中央監視システムからリアルタイムデータを取得するためのシステム開発を行った。

④ パイロットプラントを用いた AI 水処理自動制御実験

活性汚泥法のパイロットプラントを用いて、AI による曝気風量の自動制御運転を行い、AI モデルの生成で用いる教師データの違いが制御性能へ与える影響等について検討し、AI 自動制御に特有の挙動や、AI モデル生成における重要事項、AI の出力を可視化する有効な手法についての知見を得た。

(2) 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

下水道施設の広域監視を可能とする制御システムの表示・操作の応答性や信号授受に関する

通信の信頼性や安定性について実規模での実証実験を行い、いずれも良好な結果が得られた。

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) AI による水処理・汚泥処理運転・制御・予測技術

- AI を活用した水処理の支援・制御技術の開発：引き続き 2 技術の実証実験を行う。加えて、新規の共同研究を公募し、水処理の運転管理支援や性能予測等を行う新たな AI 活用技術の開発に着手する。
- パイロットプラントを用いた AI 水処理自動制御実験：未学習条件下での AI 自動制御実験等、実験プラントを使った実験の継続実施に加えて、これまでに得た実験データを用いてより短スパンでの DO 濃度の変化に対する AI 自動制御の挙動や AI モデルの決定木のデータ分割構造の詳細解析等の検討を行う。

(2) ICT による広域監視・制御システムの開発

- 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・制御システムの技術確立を目指して、各方式個別または組み合わせによる長期的な通信信頼性、安定性の検証を進める。

謝辞

2.3 節の①および 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、それぞれの委託研究で構成した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。

2.1 節に掲載したヒアリング調査、2.2 節に掲載した実態調査にご協力いただいた民間企業および地方公共団体の関係者各位に感謝の意を表します。

2.4 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。

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) 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，経済産業省，2020.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：栄養塩類の能動的運転管理の効果的な実施に向けたガイドライン(案)，2023.
- 4) 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.
<https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn1190pdf/ks1190.pdf>
- 5) 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 4 年度自主研究成果資料，2023.
https://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/doc/h31_meta_jisyu.pdf
- 6) 堀野太郎，草野吏，武田茂樹，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 N₂O 排出量，第 60 回下水道研究発表会，pp.985-987，2023.
- 7) 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，pp.808-810，2022.
- 8) Breiman,L.: Random Forests, Machine Learning, 45, 1, pp.5-32, 2001.