

ISSN 1346 - 7328

国総研資料 第 1325 号

令和 7 年 6 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of

National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 1325

June 2025

B-DASH プロジェクト No.44

A I を活用した下水処理場運転操作の先進的支援技術 導入ガイドライン（案）

上下水道研究部 下水処理研究室

B-DASH Project No.44

Guideline for introducing advanced assistive technology
by controlling sewage treatment plant with AI

Wastewater and Sludge Management Division

Water Supply and Sewerage Department

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

B-DASH プロジェクト No.44

A I を活用した下水処理場運転操作の先進的支援技術
導入ガイドライン（案）

上下水道研究部 下水処理研究室

B-DASH Project No. 44

Guideline for introducing advanced assistive technology
by controlling sewage treatment plant with AI

Wastewater and Sludge Management Division
Water Supply and Sewerage Department

概要

本ガイドラインは、下水道事業における技術継承を達成するとともに、コスト縮減や省エネルギー・省薬品効果に寄与するため、下水道革新的技術の一つである「A I を活用した下水処理場運転操作の先進的支援技術」について、下水道事業者が導入検討する際に参考にできる資料として策定したものである。

キーワード： AI、風量制御、高度処理、技術継承

Synopsis

This guideline for introducing “advanced assistive technology by controlling sewage treatment plant with AI”, which is one of sewage high technologies, is designed to achieve technological succession and to contribute to cost reduction and energy and chemical saving effects.

Key Words： AI, Airflow control, Advanced treatment,
Technological succession

〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地

電話：029-864-3933 Fax：029-864-2817 E-mail：nil-gesuisyori@ki.mlit.go.jp

執筆担当者一覧

国土技術政策総合研究所上下水道研究部下水処理研究室 室長 ・ ・ ・ 重村 浩之

前 国土技術政策総合研究所上下水道研究部下水処理研究室 室長 ・ ・ ・ 田嶋 淳

国土技術政策総合研究所上下水道研究部下水処理研究室 研究官 ・ ・ ・ 石井 淑大

国土技術政策総合研究所上下水道研究部下水処理研究室 研究官 ・ ・ ・ 松橋 学

はじめに

我が国の下水道は、国民生活に不可欠な社会資本として 81.4 %（令和 5 年度末下水道処理人口普及率）まで普及が進んできており、水洗トイレが普及するとともに川や海の水質改善につながっている。その一方で、下水道事業に従事する職員の減少や高齢化が進んでおり、下水道サービスを維持していく上で大きな課題の一つとなっている。

下水処理場では、長年下水処理に従事してきた熟練の運転管理技術者により、良好な処理水質の維持や、電力および薬品の使用量の低減が行われてきている場合が多い。しかし、そのような熟練技術者の運転管理ノウハウはマニュアル等に明文化されていないことが多く、高齢な技術者の退職と職員減少が相まって高度な運転の維持と技術継承が大きな課題となっている。こうした課題解決手段の一つとして、AI による運転管理技術の再現と継承が考えられる。これまでに蓄積された高度な運転管理データを AI に学習させることで、運転ノウハウの継承や若手技術者の育成に寄与することが期待できる。

国土交通省下水道部（令和 6 年度以降は上下水道審議官グループ）では、優れた革新的技術の実証、普及により下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギーの創出を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、「下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト※）」を平成 23 年度から開始し、国土技術政策総合研究所上下水道研究部が実証研究の実施機関となっている。さらに、新技術の導入に慎重な地方公共団体も実証技術の導入検討を簡便に実施できるようにガイドライン化を実施している。

本ガイドラインで示す「AI を活用した下水処理場運転操作の先進的支援技術」は、下水処理場における熟練技術者による良好な処理水質と電力および薬品使用量の低減の両立を実現した運転管理を AI に学習させ、運転操作の支援を行う AI を作成することで、熟練技術者の運転管理を再現しノウハウを継承するとともに、若手技術者の育成を助ける技術である。実証研究の結果、AI による運転推論は、熟練技術者の運転判断と高い一致率を達成しており、下水処理場の運転管理において AI による支援が有効であると評価されている。

本ガイドラインは、国土技術政策総合研究所委託研究（AI を活用した下水処理場運転操作の先進的支援技術に関する実証研究 受託者：（株）明電舎・（株）NJS・広島市・船橋市共同研究体 実施期間：令和 3 年度～令和 5 年度）において実施した成果を踏まえ、下水道事業者が革新的技術の導入を検討する際に参考にできる資料として策定したものであり、この優れた技術が全国そして海外にも普及されることを強く願うものである。

技術選定から実証研究施設の設置、運転による実証を踏まえたガイドラインの策定までを 3 年間という短期間でまとめるにあたり、大変なご尽力を頂いた下水道革新的技術実証事業評価委員会の委員各位、及びガイドラインに対する意見聴取にご協力いただいた下水道事業者の各位をはじめ、実証研究に精力的に取り組まれた研究体各位等全ての関係者に深く感謝申し上げます。

※B-DASH プロジェクト：Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project

目 次

第 1 章 総則

第 1 節 目的

§ 1 目的	1
--------	---

第 2 節 ガイドラインの適用範囲

§ 2 ガイドラインの適用範囲	3
-----------------	---

第 3 節 ガイドラインの構成

§ 3 ガイドラインの構成	4
---------------	---

第 4 節 用語の定義

§ 4 用語の定義	6
-----------	---

第 2 章 技術の概要と評価

第 1 節 技術の概要

§ 5 技術の目的	8
§ 6 技術の構成と機能	9
§ 7 技術の特徴	18
§ 8 技術の適用条件	23
§ 9 導入シナリオ	28

第 2 節 実証研究に基づく評価の概要

§ 10 技術の評価項目	30
§ 11 技術の評価結果	36

第 3 章 導入検討

第 1 節 導入検討手法

§ 12 導入検討手順	41
§ 13 基礎調査	42
§ 14 導入効果の検討	43

§ 15 導入判断	47
-----------	----

第2節 導入効果の検討例	48
--------------	----

第4章 計画・設計

第1節 導入計画

§ 16 計画の手順	54
§ 17 基本事項の把握	55
§ 18 AI 推論対象	56
§ 19 AI 推論に必要な情報	57
§ 20 データの取り扱い	58
§ 21 AI アルゴリズム概説	59
§ 22 AI エンジンの学習	68
§ 23 AI 推論結果の評価	78
§ 24 導入効果の検証	79

第2節 設備設計

§ 25 設備設計の考え方	80
§ 26 システム構成	82
§ 27 AI 推論装置	84
§ 28 データ収集装置	85
§ 29 運転ガイダンス装置	86
§ 30 カメラシステム	90
§ 31 リモートアクセス	93

第5章 維持管理

第1節 システム全体としての管理

§ 32 システム全体としての管理の要点	94
----------------------	----

第2節 運転管理

§ 33 立ち上げ	95
§ 34 運転管理	96
§ 35 水質管理	97
§ 36 電力量管理	98
§ 37 薬品使用量管理	99

第3節 保守点検	
§ 38 保守点検	100
§ 39 AI の再学習	101
第4節 異常時の対応と対策	
§ 40 異常時の対応と対策	103
参考文献	105

資 料 編

1. 実証研究結果	107
2. 経費回収年の検討	175
3. 温室効果ガス排出量の削減	187
4. 問い合わせ先	189

第 1 章 総則

第 1 節 目的

§ 1 目的

本ガイドラインは、下水道事業における大幅なコスト縮減や省エネルギー化に寄与するため、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）の革新的技術の 1 つである「AI を活用した下水処理場運転操作の先進的支援技術」（以下、「本技術」という）について、実証研究の成果を踏まえて、技術の概要、導入検討、計画・設計および維持管理等に関する技術的事項について明らかにし、もって導入の促進に資することを目的とする。

【解 説】

下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）は、新技術の研究開発および実用化を加速することにより、下水道事業における大幅な省エネルギー・創エネルギーやコスト縮減を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、国土交通省が実施しているものである。

B-DASH プロジェクト全体の概要は、**図 1-1** に示すとおりである。各実証事業においては、国土技術政策総合研究所からの委託研究として、実証研究を実施している。

本技術は、従来熟練技術者が運転してきた下水処理場に対して、AI が運転判断の支援を行うことで、運転操作の技術継承を図り、水質やコストの悪化を防ぐとともに、長期的なデータ蓄積により効率化することを可能とする革新的技術である。実証研究のとりまとめにあたっては、専門的知識を有する有識者および実務に精通した地方公共団体の下水道事業者より意見を聴取したうえで、学識経験者で構成される「下水道革新的技術実証事業評価委員会」（以下、評価委員会という。詳細は <https://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm>）の評価を受け、十分な成果が得られたと評価された。本ガイドラインは、下水道事業における技術継承や省エネルギー化、コスト縮減を実現するため、評価委員会で評価された本技術の実証研究の成果を踏まえ、本技術の導入の促進に資することを目的として、国土技術政策総合研究所において策定するものである。このため、本ガイドラインでは、地方公共団体等の下水道事業者が本技術の導入を検討する際に参考にできるように、技術の機能等を明示し、技術の普及展開を図るための事項についてとりまとめている。

なお、本ガイドラインについても、実証研究の成果と同様に、専門的知識を有する有識者および実務に精通した地方公共団体の下水道事業者より意見を聴取のうえ、評価委員会の評価を受け、了承されたものである。

下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)一覧

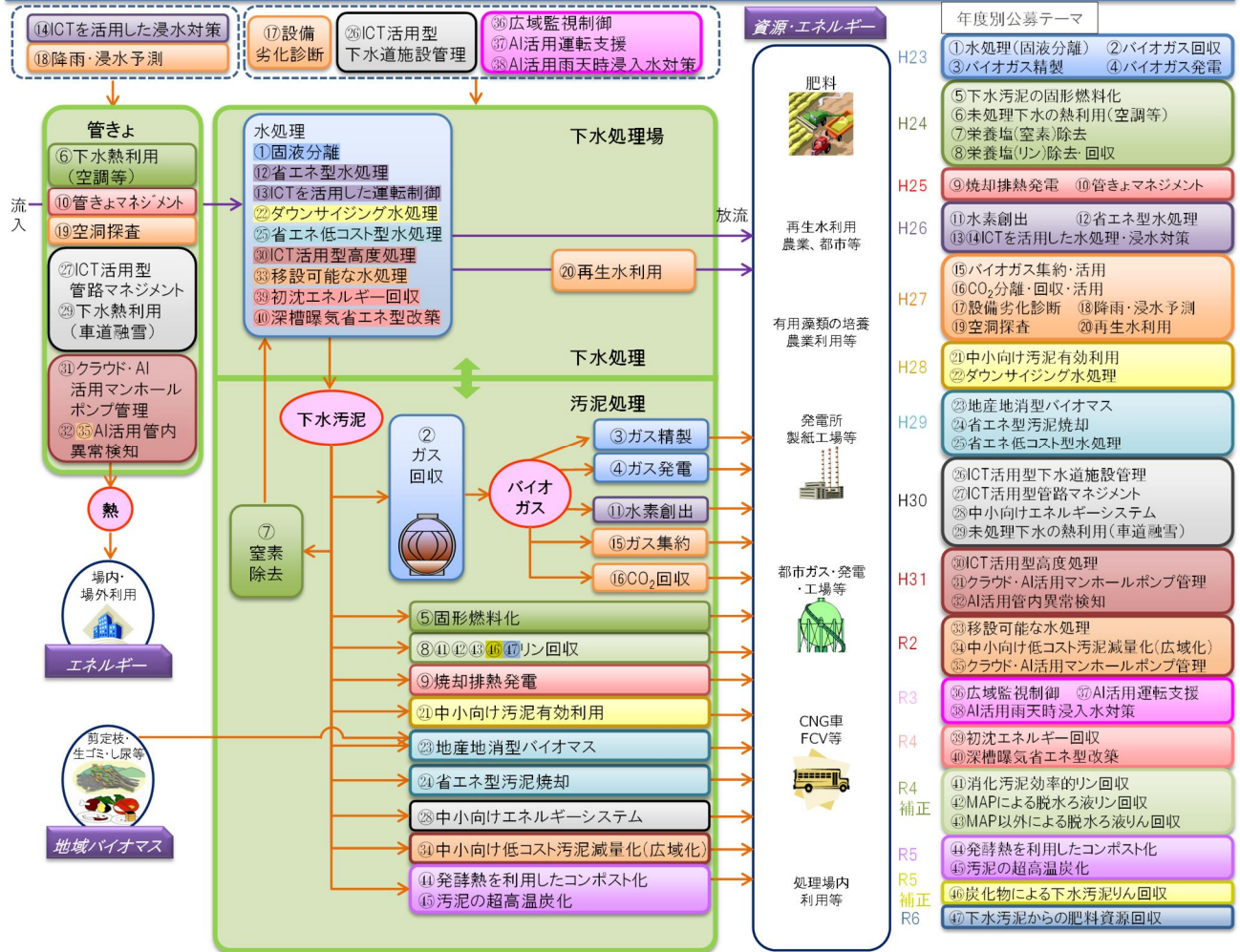


図 1-1 下水道革新的技術実証事業 (B-DASH プロジェクト) の概要 (全体)

第2節 ガイドラインの適用範囲

§2 ガイドラインの適用範囲

本ガイドラインは、下水道施設を対象とした本技術の導入検討、計画・設計および維持管理に適用する。

【解 説】

本ガイドラインは、主として既存の下水道運転管理施設・設備の更新に際して、本技術の導入を促進することを目的として、本技術の導入検討、計画・設計、維持管理の参考となるようにとりまとめたものである。

本ガイドラインは、地方公共団体等の下水道事業者および関連する民間企業等に利用されることを想定して策定している。

第3節 ガイドラインの構成

§3 ガイドラインの構成

本ガイドラインは、総則、技術の概要と評価、導入検討、計画・設計、維持管理および資料編から構成される。

【解説】

本ガイドラインの構成を図 1-2 に、各章の概要を以下に示す。

(1) 第1章 総則

ガイドラインの目的、ガイドラインの適用範囲、ガイドラインの構成、用語の定義について示す。

(2) 第2章 技術の概要と評価

本技術の目的、概要、特徴、適用条件について、一般的な技術者の運転との違いを踏まえて整理した上で、既設の下水処理施設への導入時のシナリオを記載している。第2節では、実証研究で得られた成果に基づく本技術の評価結果を掲載している。

(3) 第3章 導入検討

本技術の導入を検討する際に必要な手順、手法を示すとともに、第2節では、導入効果の検討例を記載している。

(4) 第4章 計画・設計

導入検討の結果として、本技術の導入効果が期待できると判断された場合に、導入に向けてより具体的に実施設計を進めるための検討手順、調査方法、施設設計の考え方および容量計算手法等について記載している。

(5) 第5章 維持管理

本技術を導入した場合において、下水道管理者等が実施すべき維持管理の具体的方法について記載している。

資料編では、本技術の実証研究結果、ケーススタディ結果、問い合わせ先等に関する資料を記載している。

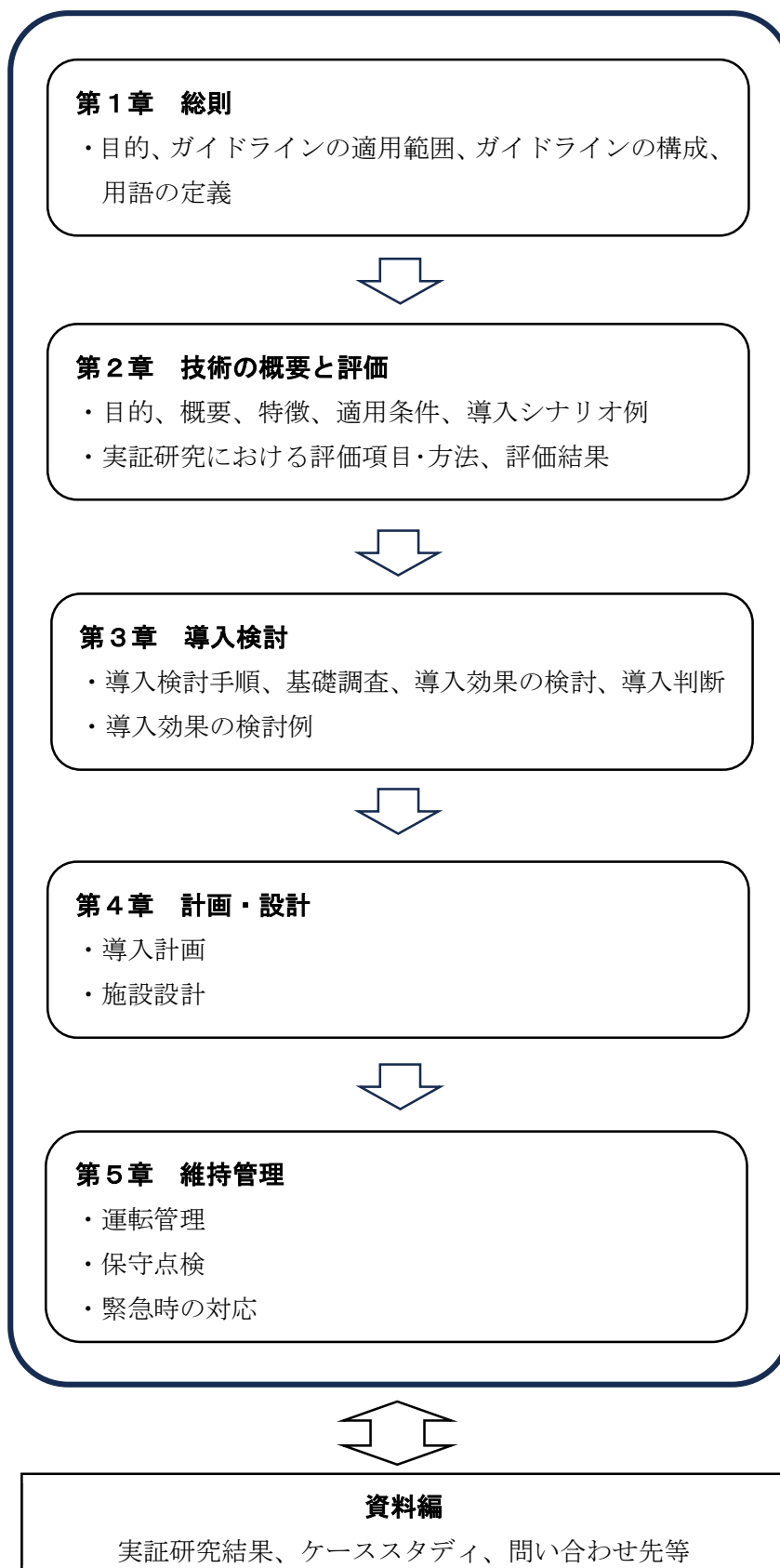


図 1-2 本ガイドラインの構成

第4節 用語の定義

§4 用語の定義

本ガイドラインの中で取り扱う用語は以下のとおり定義する。なお、下水道施設の基本的な用語に関しては「下水道施設計画・設計指針と解説 2019 年版」(公益社団法人日本下水道協会)¹⁾、「下水道用語集 2000 年版」(社団法人日本下水道協会)²⁾に準拠する。

(1) AI

人工知能 (Artificial Intelligence) の略称。ニューラルネットワークやその層構造を多層化した深層学習 (ディープラーニング) を代表とした機械学習の手法により、言語の理解や推論、問題解決等、人間の思考プロセスと同じように動作するプログラムや情報処理・技術の総称。明確に定義されていないが、セマンティックセグメンテーションやベイジアンネットワーク、決定木、Transformer のようなアルゴリズムも AI の一部と位置付けることができる。

(2) オンプレミス

監視制御装置や支援端末、ソフトウェア等の情報システムを下水処理施設の構内に設置して運用すること。

(3) クラウド

監視装置や支援用ソフトウェア等の情報システムを下水処理施設外に設置し、それから得られる情報を下水処理施設内等で得て運用すること。

(4) セマンティックセグメンテーション (Semantic Segmentation)

画像を画素単位で状態判定 (ラベル付け) することで画像認識を行う手法であり、ブロックのような画面上で小さく撮影される物体の検出に適している。

(5) ベイジアンネットワーク

データの因果関係の強さを確率で記述するモデルである。ここで、確率とは、ある事象が起こった場合に他の事象が起こる確率 (条件付き確率) を指す。多くの事象の因果関係をネットワーク図と確率で表現することで関係性の有無や強さを表現することができる。

(6) 決定木

ある値以上か否かで特定の特徴が表れるようなデータの集合を見つけて、その分類ルールを生成する機械学習の一手法である。木のような構造に整理し、データの分類や数値導出を行うことができる。

(7) Transformer (トランスフォーマー)

人間の神経細胞の仕組みを再現したニューラルネットワークが多層構造化した深層学習と呼ばれる機械学習の一手法である。Attention と呼ばれる注目する箇所を決める仕組みが含まれていることが特徴である。

(8) インハウス型

本来は自前で行うことを意味するが、ここでは自前で仕様を決めることを指す。

(9) アウトソース型

本来は自前で対応していた作業を外部に依頼することを意味するが、ここではある程度許容された範囲と責任の元で業務を外注することを指す。

(10) 真陽性率

実際の正解データに対して、AI が正解と正しく予測した割合である。1 に近づくほど良い。

(11) 偽陽性率

実際には不正解であるデータに対して、AI が正解と誤って予測した割合である。0 に近づくほど良い。

(12) RMSE (Root Mean Square Error : 平均二乗誤差平方根)

誤差の絶対値である。0 に近いほど誤差が小さいことを示す指標である。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad y_t, \hat{y}_t : \text{実際の操作値、推定操作値}$$

(13) 一致率

評価が一致した数を評価した総数で除した値であり、1 に近づくほど良い。正解率と同義である。

(14) 精度

一般的には正確さを示すが、ここでは、バラつきの程度を示す指標である。

第2章 技術の概要と評価

第1節 技術の概要

§5 技術の目的

本技術の目的は、熟練技術者が有する下水処理運転操作に関する技術ノウハウを、AIを用いて継承し、処理水質の安定化及び運転管理の効率化に資するものである。

【解説】

(1) 本技術の背景

少子高齢化が社会問題として叫ばれる中、全国の下水道担当職員は、平成9年度のピーク時から平成30年度の時点で60%まで減少している。特に、機械、電気、水質など高い専門性を要する業種においては職員減少の割合が大きい。下水道施設の運転管理は民間委託が進んできているものの、団塊世代の職員の退職に伴い、運転管理に関する技術継承や人材育成が大きな課題となっている。今後も技術職員の減少が見込まれる状況の中で下水処理設備の運用を持続していくためには、熟練技術者のノウハウを継承する技術、経験の浅い職員でも熟練技術者と同等の運転管理を行えるよう支援する技術が望まれる。

また、下水道事業の温室効果ガス排出量は、約600万t-CO₂と日本全体の排出量約12.4億t-CO₂の約0.7%に相当する量を占めており（平成30年度時点）、下水汚泥の有効利用等を通して下水道事業は2050年のカーボンニュートラル実現に貢献できうる高いポテンシャルを有している。

これらのことから、熟練技術者の運転技術を継承しつつ、カーボンニュートラルの実現に寄与すべく効率的な運用が可能な支援システムが求められる。

(2) 本技術の目的

本技術は、熟練技術者が日々の運転で確認するプロセス監視や水質、日報、目視点検等の各種データから運転操作方法やその操作理由を提示することで技術継承に役立てるとともに、長期間のデータ蓄積により効率的な運転を学習することでより省エネルギー、省資源な運用を実現することを目的としている。

また、本技術の導入により維持管理の効率化、限られた人材の有効活用に資する効果が期待できる。

§ 6 技術の構成と機能

本技術は、AI を活用した下水処理場の運転操作方法をガイダンスすることにより、これまで熟練技術者が達成した効率的な運転を AI が模擬し、若手技術者に技術継承するとともに、処理水質の安定化及び運転管理の効率化に資する運転支援技術である。

(1) 本技術の構成

本技術は以下の 4 つの AI 要素技術より構成される。なお、運転操作のガイダンスに必要な要素技術のみを導入し、省コストでの導入を実現することも可能である。

- 1) AI 要素技術 1 : 画像処理 AI
- 2) AI 要素技術 2 : 対応判断 AI
- 3) AI 要素技術 3 : 運転操作 AI
- 4) AI 要素技術 4 : 水質予測 AI
- 5) ハードウェア要素技術 1 : カメラシステム
- 6) ハードウェア要素技術 2 : データ収集装置
- 7) ハードウェア要素技術 3 : AI 推論装置
- 8) ハードウェア要素技術 4 : 運転ガイダンス装置

(2) 本技術の機能

運転操作に必要なデータを収集し、4 点の AI 要素技術を連動することで、運転操作をガイダンスすることが可能である。

1) AI 要素技術 1 : 画像処理 AI

熟練技術者の目の代わりとなり沈殿池の水面等の画像から処理の状況や異常を検知する。

2) AI 要素技術 2 : 対応判断 AI

水質や画像処理 AI の検知結果から原因と対応の関連を見える化し、状況に応じて対策を絞り込む。

3) AI 要素技術 3 : 運転操作 AI

対応判断 AI が示した対策を踏まえ、最適な運転操作量を数値で提示する。

4) AI 要素技術 4 : 水質予測 AI

現在の操作量及び AI が推定した操作量に基づいて将来の処理水質を予測する。

5) ハードウェア要素技術 1 : カメラシステム

沈殿池等に設置したカメラ画像を伝送し、AI 推論に必要な形式に加工する。

6) ハードウェア要素技術 2 : データ収集装置

沈殿池等に設置したカメラ画像、監視装置で収集したデータ、日報、水質分析結果を取り込み、AI 推論に必要な情報として加工する

7) ハードウェア要素技術 3 : AI 推論装置

AI 要素技術 1～4 により AI 推論を行う

8) ハードウェア要素技術 4 : 運転ガイダンス装置

AI 推論結果を表示する

【解 説】

(1) 本技術の構成

本技術の概念図を図 2-1 に示す。本技術は以下の 4 点の AI 要素技術により構成される。なお、必ずしも 4 点の AI 要素技術を全て導入する必要はなく、例えば、監視装置や日報、水質分析結果から得られるデータのみを用い、例えば AI 要素技術 2 及び要素技術 3 のみを導入し、省コストでの導入を実現することも可能である。

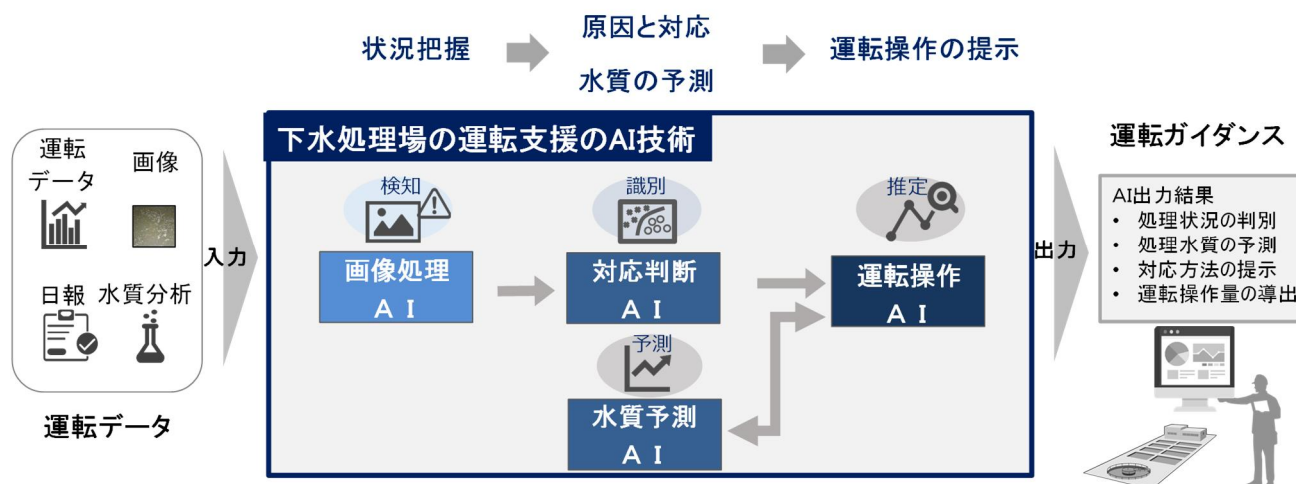


図 2-1 本技術の概念図

1) AI 要素技術 1 : 画像処理 AI

熟練技術者の目の代わりとなり沈殿池の水面等の画像から処理の状況や異常を検知する。具体的には、池上に設置したネットワークカメラが沈殿池に発生したスカムやフロックを撮影するとともに、撮影した画像を画像処理 AI で処理することで、スカムやフロックの個数を計数することが可能である。スカムやフロックの個数の異常値を設定することで、現状が異常な状態であるか否かを診断することが可能となり、運転員による維持管理業務の負担を軽減する。

2) AI 要素技術 2 : 対応判断 AI

水質や画像処理 AI の検知結果から原因と対応の関連が見える化し、状況に応じて対策を絞り込む。具体的には、画像処理 AI の結果、プロセス監視データ、水質分析結果、日報データ等と運転変更の理由（原因）、運転操作方法（対策）の関係をネットワーク図として見える化する AI アルゴリズムを採用し、過去の運転結果を現状に当てはめた場合に、適切な運転方法とその尤度（もっともらしさ）を表示することで、運転操作の対策を提示することが可能となる。

3) AI 要素技術 3 : 運転操作 AI

対応判断 AI が示した対策を踏まえ、最適な運転操作量を数値で提示する。具体的には、対応判断 AI が提示した運転方針の元、対応判断 AI と同じデータを機械学習アルゴリズムで処理することで、運転操

作量を数値として表示するものである。

4) AI 要素技術 4 : 水質予測 AI

現在の操作量及び AI が推定した操作量に基づいて将来の処理水質を予測する。具体的には運転操作 AI の運転結果で設定変更した場合、現状の運転操作量に対してどの程度水質が変化するかを数値予測アルゴリズムで推定し、比較表示するものである。また、水質データと現状の運転結果から将来の水質を予測し、運転操作 AI の説明変数にすることも可能である。水質予測 AI の対象は pH、T-P、T-N とする。

5) ハードウェア要素技術 1 : カメラシステム

沈殿池等に設置したカメラ画像を伝送し、AI 推論に必要な形式に加工するためのシステムである。

6) ハードウェア要素技術 2 : データ収集装置

沈殿池等に設置したカメラ画像、監視装置で収集したデータ、日報、水質分析結果を取り込み、AI 推論に必要な情報として加工する装置である。

7) ハードウェア要素技術 3 : AI 推論装置

AI 要素技術 1～4 により AI 推論を行うための装置である。

8) ハードウェア要素技術 4 : 運転ガイダンス装置

AI 推論結果を表示するための装置である。

(2) 本技術の機能

それぞれの AI 及びハードウェアの機能を以下に示す。

1) 画像処理 AI

カメラで撮影した画像を AI 推論用に加工し、AI 推論によりスカムやフロックの数を出力する。同時に検出したスカムやフロックを枠で囲むことで、AI が認識した対象を判別することができる。スカムやフロックの数がある値を超えた場合に異常と判断し、対応判断 AI に引き継ぐことができる。画像処理 AI の出力例を図 2-2 に示す。AI 推論アルゴリズムは、フロックのような小さいサイズを検出しやすいセマンティックセグメンテーション (Semantic Segmentation) を採用した。



図 2-2 画像処理 AI の出力例

2) 対応判断 AI

データ収集装置で加工したデータから、運転操作の変更の是非や、判断変更に至った理由を示す。対応判断 AI のアルゴリズムはベイジアンネットワークを採用した。これは、データ収集装置で加工したデータ、判断変更に至った理由、運転操作の変更の是非について、ネットワーク化し図示するとともに、各データの条件付き確率を数値で表現することで尤度（もっともらしさ）を把握することも可能であり、過去の状況を学習した対応判断 AI に現状のデータを与えると、過去に運転変更した割合が表示される。対応判断 AI の出力例を図 2-3 に示す。データ収集装置で加工したデータは「観測事象」、判断変更に至った理由は「判断根拠」、運転操作の変更の是非は「対応判断」欄に記載する。

データ収集装置で加工したデータは、数値そのものではなく閾値で分割した情報に変換する。例えば、目標値より高いか低いかで判断する場合には目標値を閾値として 2 値化する。判断変更に至った理由としては、目標水質より水質結果が高くなった、若しくは高くなりそうであれば、水質上昇懸念として高い確率を出力し、運転操作変更の判断材料とする、運転操作の変更の是非として、過去に 70% 程度の確率で運転変更する事例が多ければ、運転操作を変更すべきと解釈する。

なお、図 2-3 の画面の機能については、P87「§ 29 運転ガイダンス装置 （2）対応判断 AI」を参照すること。



図 2-3 対応判断 AI の出力例

3) 運転操作 AI

対応判断 AI が出力した運転操作の変更を引き継ぎ、運転操作の操作量を出力する。入力するデータとしては、対応判断 AI と同じ観測データを用いる。運転操作の変更の方針が対応判断 AI で決まっているため、その方針に沿った運転値を指示する。AI アルゴリズムは決定木ベースのアルゴリズム（ランダム・フォレストや XGBoost 等）を採用するが、数値変更の刻み幅や調整方法が定まっている（例えば DO 設定刻みを 0.5 mg/L ずつ上げ下げする等）場合には、必ずしも AI アルゴリズムで運転操作量を決定する必要はない。運転操作 AI の出力例を図 2-4 に示す。

TOP 対応判断AI 運転操作AI 水質予測AI 設備監視AI				広島市西部水資源再生センター【優先設定なし】 2023/08/28 09:15:22			
運転操作AI[東系]				推論日時決定 最新推論時刻 推論時刻：2023/08/28 09:00			
	現在値		変更値		現在値		変更値
DO設定[2系]	0.2	»»»	0.2 [mg/L]	DO設定[3系]	0.7	»»»	0.6 [mg/L]
返送汚泥量[2系]	220	»»»	220 [m3/h]	返送汚泥量[3系]	290	»»»	290 [m3/h]
次亜塩注入率	2	»»»	2 [mg/L]	PAC注入量[分配槽]	1	»»»	1 [m3/日]
PAC注入量[再曝気槽]	0	»»»	0 [m3/日]	揚水量[東系]	3200	»»»	3900 [m3/h]

図 2-4 運転操作 AI の出力例

4) 水質予測 AI

pH、T-N、T-P のような重要な水質を対象に、過去のデータ及び設定値から学習した水質変化を示し、期待した変化をするかどうかを確認する。水質予測 AI の出力例を図 2-5 に示す。AI アルゴリズムは Transformer と呼ばれる生成 AI に用いられている技術を採用している。

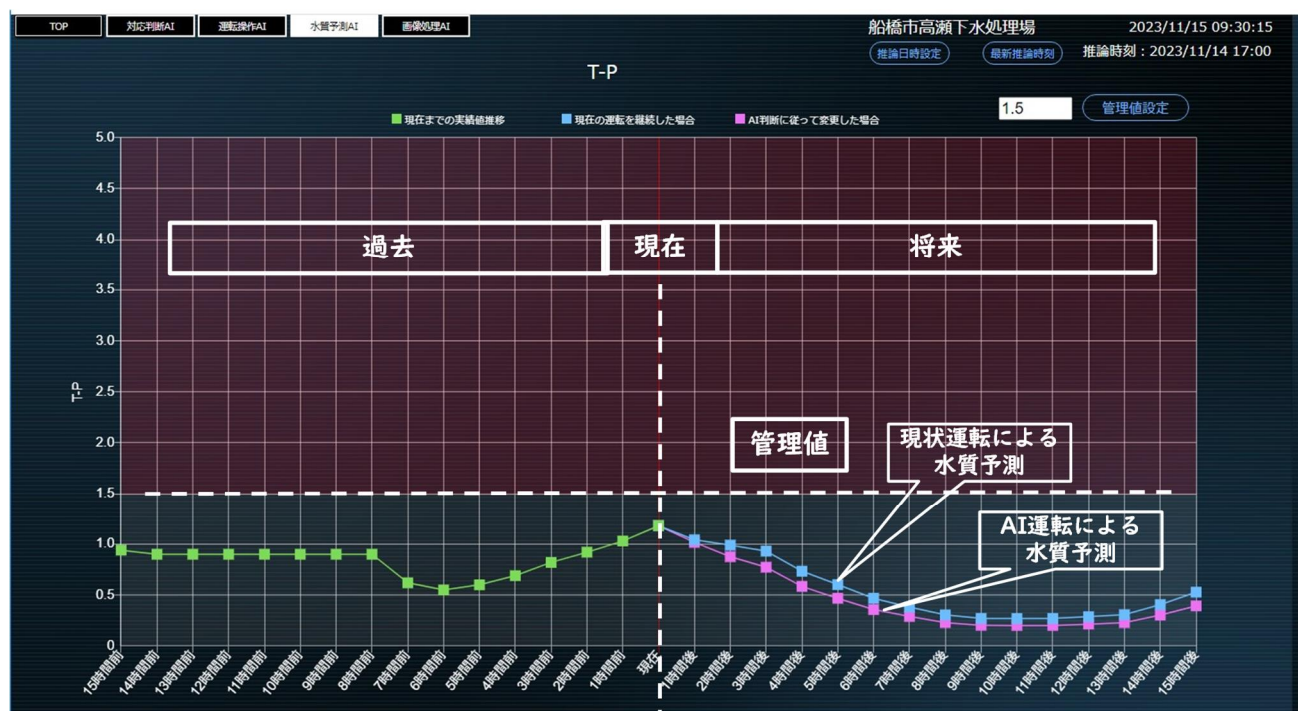


図 2-5 水質予測 AI の出力例

AI 推論を行うためのハードウェア構成を図 2-6 に示す。ここでは、AI 推論に関する全ての機能を該当する下水処理場に設置するオンプレミス構成を示す。AI 推論システムは、画像を撮影するための「カメラシステム」、画像だけでなく監視装置や日報、水質分析結果等のデータを収集する「データ収集装置」、AI 推論エンジンを搭載した「AI 推論装置」、運転結果を表示する「運転ガイダンス装置」で構成される。

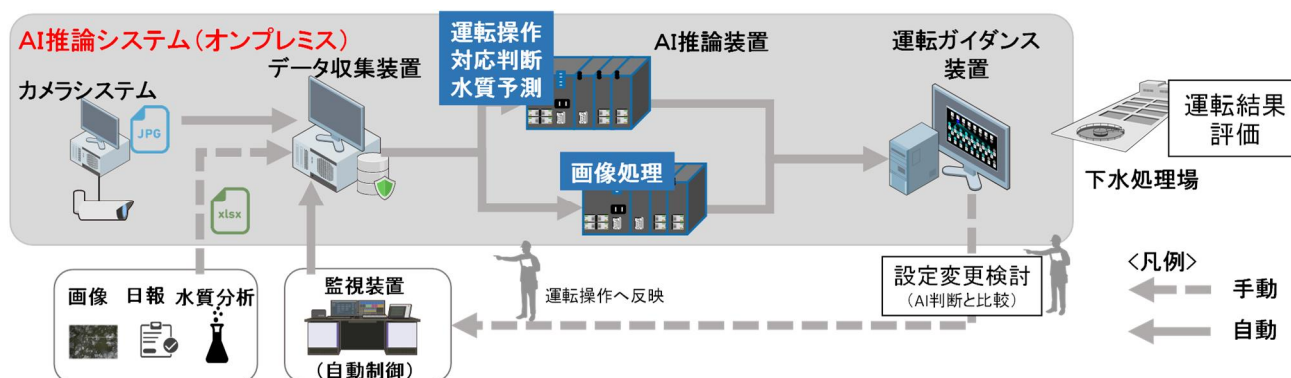


図 2-6 本技術「AI 推論システム」(オンプレミス型)の構成

一方で、全てのハードウェアを該当する下水処理場に設置する必要はなく、AI 推論機能はクラウド上にあってもよい。AI 推論システムのクラウド型を図 2-7 に示す。ただし、カメラシステムやデータ収集装置は、該当する下水処理場に設置する必要がある。

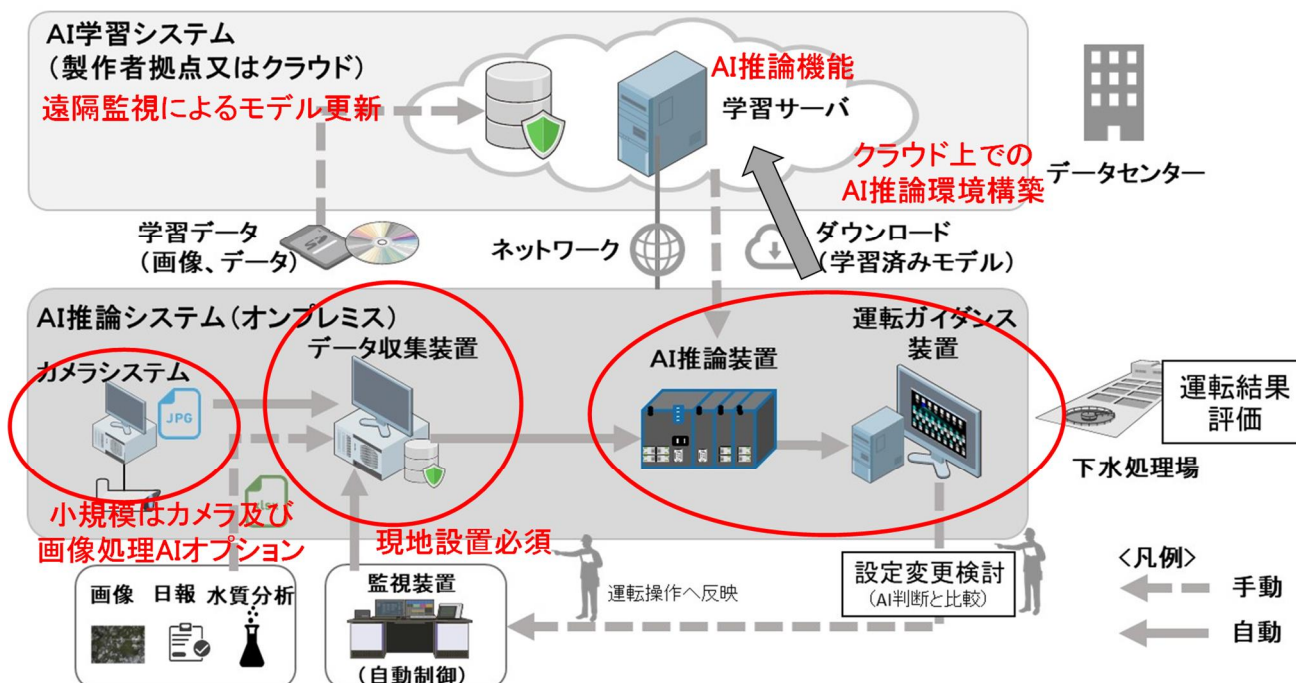


図 2-7 本技術「AI 推論システム」(クラウド型)の構成

5) ハードウェア要素技術 1 : カメラシステム

カメラシステムは 1 台を基本とし、100 万画素程度のネットワークカメラで撮影した画像を FTP (File Transfer Protocol) でカメラシステムに伝送し、AI 推論に必要な大きさに切り出す。伝送の頻度は下水処理の特性から 30 分に 1 回程度でよい。画像の撮影枚数については、1 枚ではなく複数撮影することで AI 推論により状態を判断できない画像を撮影するリスクを回避する。画像の伝送方法は光ファイバーや LAN、無線方式のいずれでもよいが、セキュリティの確保に留意する。

6) ハードウェア要素技術 2 : データ収集装置

データ収集装置は 1 台を基本とし、以下の機能を有する。

- ①カメラシステムで作成した画像情報を取り込む。
- ②監視装置内で観測したリアルタイムデータや設定値を 1 時間周期で取り込み、過去 24 時間平均値の算出等を行う。
- ③監視装置内の日報を取り込む。
- ④技術者が分析した水質結果を CD-ROM 等に取り込み、AI 推論に必要な情報として加工する。
- ⑤AI 推論した結果を保存する。

7) ハードウェア要素技術 3 : AI 推論装置

データ収集装置からのデータで各 AI 推論を行うハードウェアである。画像処理 AI の演算負荷が比較的高いため、必要に応じ AI 推論装置を複数台に分けることも可能である。

8) ハードウェア要素技術 4 : 運転ガイダンス装置

運転ガイダンス装置は 1 台を基本とし、AI 推論結果を表示するための装置である。

§7 技術の特徴

本技術は、下記（１）～（３）の機能的特徴と（４）～（５）の効果を有する。

- （１）４つのAIが連動する。
- （２）AI推論結果を見える化している。
- （３）過去の運用データを蓄積し、逐次AIエンジンを修正することが可能である。
- （４）熟練技術者の運用を模擬することで、技術継承に繋げることが可能である。
- （５）蓄積したデータから効率の良いデータを学習することで、より効率が良い運転が可能である。

【解説】

（１）４つのAIが連動する。

本技術の機能を図2-8に示す。§6（１）項で示した４つのAI技術を連動することが可能であることが大きな特徴である。本技術でAI運転を適用する前（現状維持の運転）とAI適用後の結果を比較する場合、以下の流れでAIによる処理を行い、運転員がガイダンスを確認することができる。

- ①画像処理AIにより検出された異常は、対応判断AIに入力される。
- ②対応判断AIの結果を運転操作AIに引き継ぎ、設定値変更の判断材料とする。
- ③水質予測AIは現状運転の延長、及び運転操作AIでの運転変更でそれぞれ予測し比較する。

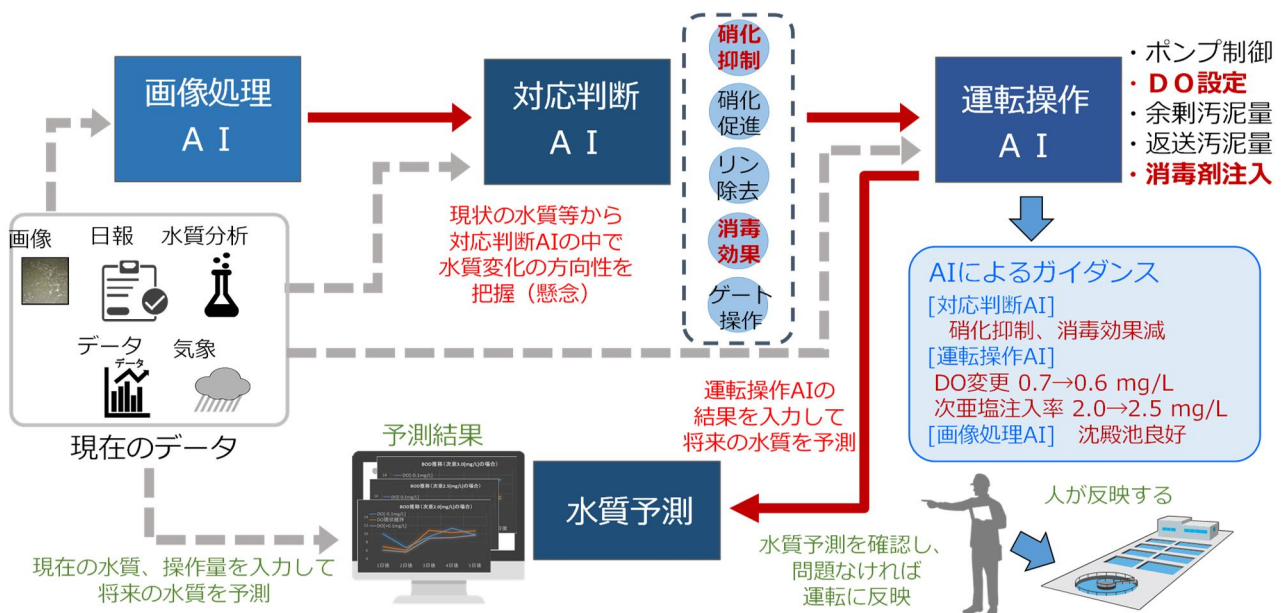


図2-8 データとAIを活用した運転操作ガイダンスの流れ

（２）AI推論結果を見える化している。

本技術の特徴の一つは、図2-3のようなAI推論結果の見える化であり、観測したデータと設定変更の要因、設定変更の是非を視認できることである。

(3) 過去の運用データを蓄積し、逐次 AI エンジンを修正することが可能である。

データ収集装置には過去の AI 推論結果を蓄積することが可能である。図 2-9 に示した画面で「推論日時設定」を変更することで、過去の推論を振り返ることができるとともに、データ収集装置に蓄積したデータを集めることで逐次 AI エンジンを修正することが可能である。



図 2-9 対応判断 AI での推論結果変更画面例

（４）熟練技術者の運用を模擬することで、技術継承に繋げることが可能である。

熟練技術者は、目標となる水質（BOD や T-N、T-P 等）の状況から今優先的に必要な操作を思考する。この技術では、対応判断 AI の結果を図 2-10 のようにまとめて表示することで、現状の水質リスクと操作対応の一覧を把握することができる。また、図 2-3 のような対応判断 AI の結果は、計測項目の詳細な値と原因、対応の相関性を熟練技術者の経験から摸擬したものであり、この表現を採用することにより、若手技術者が運転変更に至る要因や原因を視認することが可能である。



図 2-10 各水質から見た水質判断と対応一覧の例

さらに、図 2-11 のように対応判断の各項目の数値根拠だけでなく、数値根拠から操作対応の要否を簡潔な日本語で表記することで、若手技術者が対応判断の理解を促進することが望ましい。



図 2-11 数値根拠から操作対応の要否を簡潔な日本語で表記した例

(上) 対応判断 AI における判断根拠の意味を示した例

(下) 運転操作 AI における操作と判断根拠を日本語化した例

（５）蓄積したデータから効率の良いデータを学習することで、より効率が良い運転が可能である。

AI を導入した当初は過去の運転実績を模倣した運転となる。本技術では運転結果を蓄積することが可能であるため、水質負荷が高くなった場合や処理水量が増加し水質が維持できなくなりつつある場合には、直近の運転データの傾向から運転を見直すきっかけとなる。一方で、水質負荷や処理水量が低減する場合も生じる。現実の運転では、**図 2-12** に示したような電力量が低い（効率が良い）運転とそうでない運転に分けることができると思定している。処理水質が目標よりかなり低い状態が継続する場合には、日本下水道協会編「下水道施設設計指針と解説」による必要空気量の演算により、空気量がより少なくなるような効率が良い運転を教師データとして AI に学習することで、同じ状況が再現された場合、AI がより効率が良い運転を指示することが可能になる。

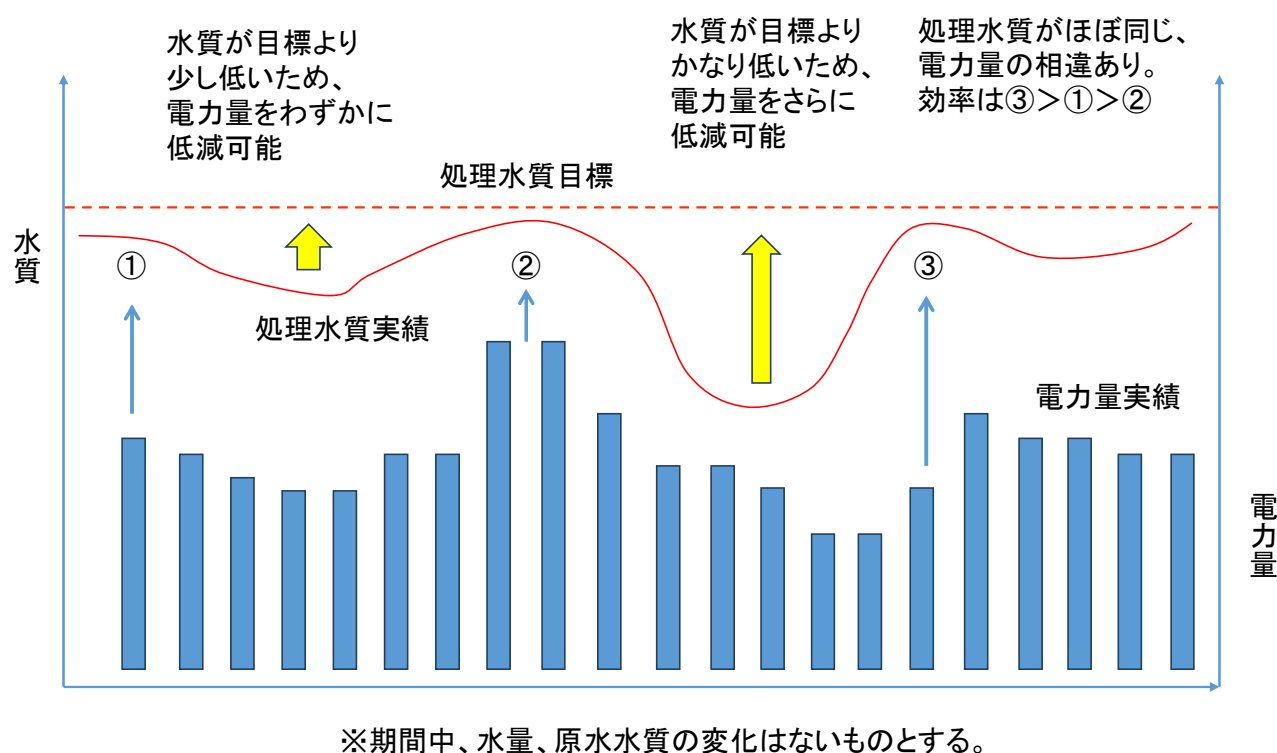


図 2-12 より効率が良い運転の考え方

§ 8 技術の適用条件

(1) 適用条件

本技術は、下水処理場の水処理運転における運転操作技術に適用する AI 技術であるため、一部合流式や分流式の下水処理場において、熟練技術者の運転技術を継承したい場合に適用する。

その他の適用条件は以下の通りである。

①**最低水温**：各処理場での経験値以上であること

②**水量**：各処理場での経験値以下であること

ただし、雨天時の一次処理放流等雨天時対応マニュアルが存在する操作においては、そちらを優先させる。

③**処理方法**：標準活性汚泥法、オキシデーションディッチ法、循環式硝化脱窒法、回分式活性汚泥法、嫌気無酸素好気法

④**運転操作の設定対象**：DO 設定、送風量設定、返送汚泥量設定、PAC 注入量設定、次亜塩注入率設定、攪拌機運転停止設定、曝気／高速攪拌時間設定

⑤**放流水質の要求水準**：各処理場の運転目標

⑥**水質分析データ**：日試験、週試験を定期的に取得していること

(2) 推奨条件

①**監視制御装置によるプロセス監視データによる意思決定を多用する場合、監視制御装置からのデータ取得が可能なこと。**

②**池の監視状態から運転変更する場合、監視カメラ設置と画像の記録が可能なこと。**

③**より長期間データを蓄積していること。**

④**電力使用量、薬品使用量を定期的に積算していること。**

【解 説】

(1) 適用条件

本技術は、カメラ以外には特段追加のセンサー等を付加せず、過去の運転データを AI 化する技術である。実証研究の結果、それぞれの下水処理場の熟練技術者の運転を模擬することを確認している（**§ 11 技術の評価結果**を参照）。

処理方法としては、標準活性汚泥法、オキシデーションディッチ法、循環式硝化脱窒法、回分式活性汚泥法、嫌気無酸素好気法を対象とする。これらの適用結果については、**§ 11 技術の評価結果**を参照とする。なお、前記の処理方式以外にも観測項目と対応の関係が確認できれば、本技術の導入を検討することが可能である。

運転操作の設定対象は、DO 設定、送風量設定、返送汚泥量設定、PAC 注入量設定、次亜塩注入率設定、攪拌機運転停止設定、攪拌機回転数設定等である。これらの対象全てを AI 化する必要はなく、それぞれの下水処理場で必要な操作量を AI 化の対象とする。これらの適用結果については、**§ 11 技術の評価結果**を参照とする。

①最低水温

過去に水質目標を達成した運転を模擬するため、経験した水温以上の対応は可能である。一方で、経験した水温以下となる場合には、AI による外挿が困難となるため、数値として導出されても設定適用には注意が必要である。

②水量

過去に水質目標を達成した運転を模擬するため、各処理場での経験した値以下とする。ただし、雨天時の一次処理放流等雨天時対応マニュアルが存在する操作においては、その活用を優先させる。

③処理方法

標準活性汚泥法、オキシデーションディッチ法、循環式硝化脱窒法、回分式活性汚泥法、嫌気無酸素好気法に対応する。

④運転操作の設定対象

DO 設定、送風量設定、返送汚泥量設定、PAC 注入量設定、次亜塩注入率設定、攪拌機運転停止設定、攪拌機回転数設定等である。なお、観測可能な項目と運転操作の方針、操作量の関係があれば、設定対象に特に制約はない。

⑤放流水質の要求水準

過去に水質目標を達成した運転を模擬するため、その範囲での対応は可能である。更に水質をよくしたい場合には、運転員による運転を経験後に水質を確認し、その結果を AI に学習させる必要がある。

⑥水質分析データ

多くの下水処理場では、熟練技術者は下水流入水、初沈流出水、処理水及び放流水の水質分析結果により運転方針を決定していることから、日試験や週試験のデータを最低 1 年間記録している必要がある。なお、下水流入水、初沈流出水、処理水及び放流水は必ずしもすべてが必要なわけではなく、運転操作の判断を行っている測定箇所があればよい。

表 2-1 AI 技術の適用条件

対象項目		適用条件
学習データ量	対応判断 AI 運転操作 AI 水質予測 AI	・季節変化に対応するため学習データとして最低 1 年分は必要。 ・学習して構築した推論モデルの検証期間として最低 1 ヶ月必要。
	画像処理 AI	・正常時の指標値に基づいて閾値を決定するため最低 1 ヶ月は学習期間が必要 (初期モデル構築時)
学習項目 (説明変数)	対応判断 AI 運転操作 AI 水質予測 AI	・運転員がリアルタイムに判断に使用している監視装置で収集しているリアルタイム値と週数回行われる日常試験成績など長期的な判断に使用している水質の手分析値が必要 ・説明変数の選定については、現場運転員のヒアリングとデータ駆動型の両面からのアプローチが必要。
	画像処理 AI	・正常時の水面画像
学習モデル 更新頻度	対応判断 AI 運転操作 AI 水質予測 AI	・運転方針の変更時には、その都度、再学習が必要。 ・運用後は正解データ(運転員による操作)が得られないため、学習モデルと運転状況の乖離は水質等により判断する。
	画像処理 AI	・正常データをピックアップして 1 ヶ月ごとに再学習。 (正常データは大量にあるため、その中から正常である確度が高い画像をピックアップして学習)

表 2-2 AI 技術の適用条件（頻度設定）

対象項目		データ取得間隔（入力）	出力間隔（判定）
画像処理 AI		画像 1 枚/10s (30 分おきに 5～10 枚撮影)	1 回/30 分
対応判断 AI 運転操作 AI 水質予測 AI	DO 設定値	リアルタイムデータ 1 回/h 手分析水質 1 回/数日	1 回/h
		リアルタイムデータ 1 回/h 手分析水質 1 回/数日	1 回/h
	送風量設定	リアルタイムデータ 1 回/h 手分析水質 1 回/数日	1 回/h
		リアルタイムデータ 1 回/h 手分析水質 1 回/数日	1 回/h
	返送汚泥量設定	リアルタイムデータ 1 回/h 手分析水質 1 回/数日	1 回/h
		リアルタイムデータ 1 回/h 手分析水質 1 回/数日	1 回/h
	次亜塩素酸ナトリウム注入率設定	リアルタイムデータ 1 回/h 手分析水質 1 回/数日	1 回/h
	PAC 注入量設定	リアルタイムデータ 1 回/h 手分析水質 1 回/数日 ～2 回/日	1 回/h～1 回/日

（２）推奨条件

AI 技術の推奨条件を表 2-3 に示す。学習データ量としては、過去の運転データとしては 2 年程度以上、画像処理 AI については 1 年程度以上使用することが望ましい。画像処理 AI については、より誤検知を防げるような頑健な AI を構築するため、異常発生時の画像が多くあることが望ましい。

①監視制御装置によるプロセス監視データによる意思決定を多用する場合、監視制御装置からのデータ取得

プロセス計測器による DO や pH、MLSS、T-N や T-P を運転操作に反映し、その寄与が大きい場合には、監視制御装置からのデータ取得を推奨する。

②池の監視状態から運転変更する場合、監視カメラ設置と画像の記録

適切な運転を継続していれば、送風量や汚泥引抜のような運転操作を変更するに至らない下水処理場が多い。一方で、沈殿池底層の嫌気化によるスカム浮上や過曝気によるフロック流出、それらを指標とした運転操作を行っている場合、AI 導入前にカメラを設置して画像を撮影し、運転操作と画像との相関を記録することが望ましい。

③より長期間データを蓄積していること

必要条件として季節変動を考慮し、最低 1 年間のデータ記録を必要条件とした。ただし、過去に経験した範囲をより広げ、AI 適用範囲を広げるためには、より長期間のデータを AI に学習させることが推奨される。なお、施設状況の変化（散気装置や薬品注入箇所の変更、増設による流況の変化）により、過去のデータでの運用が妥当でないことが明らかな場合、それらのデータは削除することが望ましい。

④電力使用量、薬品使用量を定期的に積算していること

多くの下水処理場では、日報、月報、年報として電力使用量や薬品使用量を記録している。熟練技術者の運転技術の AI 化による水質維持だけでなく、処理水量や流入水質当たり電力量原単位や薬品使用量を最適化する場合には、水質や水量だけでなく、電力量や薬品使用量データも定期的に記録する必要がある。

表 2-3 AI 技術の推奨条件

対象項目		推奨条件
学習 データ量	対応判断 AI 運転操作 AI 水質予測 AI	・学習用だけでなく、構築した AI の検証期間としても、季節変動への耐性を確認するため、1 年分（AI 構築用の 1 年分と合わせると計 2 年分）を確保することが望ましい。
	画像処理 AI	・季節変動への耐性を確認するため、1 年分を確保することが望ましい。
学習項目 (説明変数)	対応判断 AI 運転操作 AI 水質予測 AI	・適用条件と同じ
	画像処理 AI	・よりノイズに頑健な AI を構築するためには、異常発生時の画像が多くあることが望ましい。
学習モデル 更新頻度	対応判断 AI 運転操作 AI 水質予測 AI	・適用条件と同じ
	画像処理 AI	・より直近の異常等の傾向を反映させるためには、1 日単位で学習モデルを更新することが望ましい。

§9 導入シナリオ

本技術の導入が有効と考えられるシナリオは、熟練技術者の技術継承による現状の運転の維持である。

【解説】

本技術は、熟練技術者の運転を技術継承することを可能とする。本技術の導入前は、**図 2-13** に示す通り、熟練技術者による運転を実施しているが、本技術導入後は、**図 2-14** の通り、運転操作方針を AI 技術で決定する。熟練技術者は、下水道事業体職員の場合と、維持管理を下水道事業体から委託された業者の職員の場合が考えられる。そのため、本技術の導入方法としては、以下の方法が挙げられる。

- ①インハウス型（設備工事 仕様発注）
- ②インハウス型（DBO、包括的民間委託など条件付き性能発注）
- ③アウトソース型（DBO、包括的民間委託など性能発注）

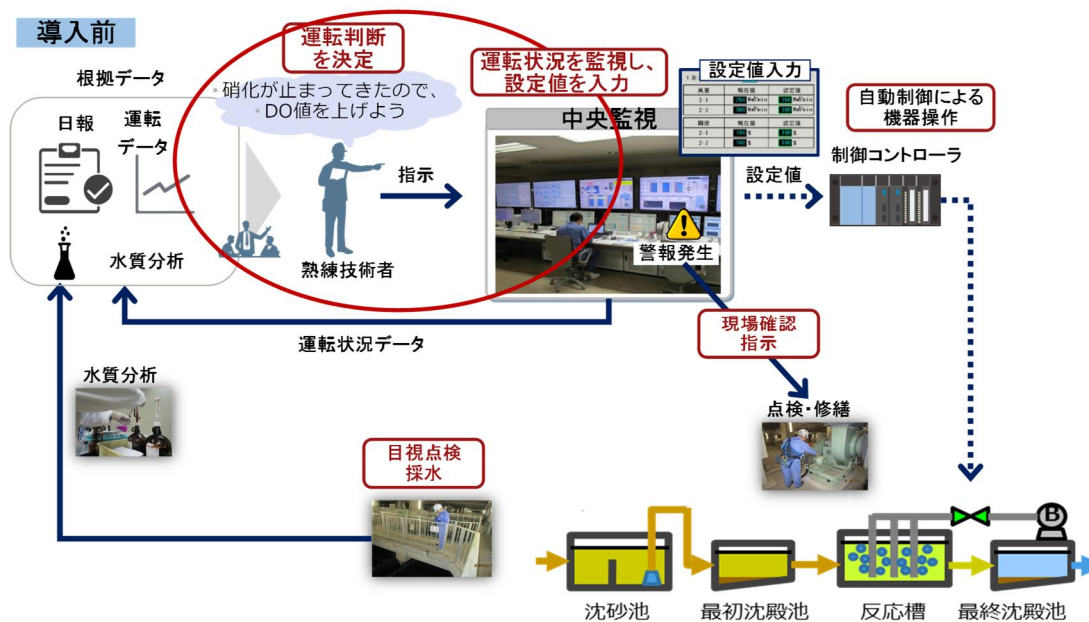


図 2-13 本技術の導入前の運転操作イメージ

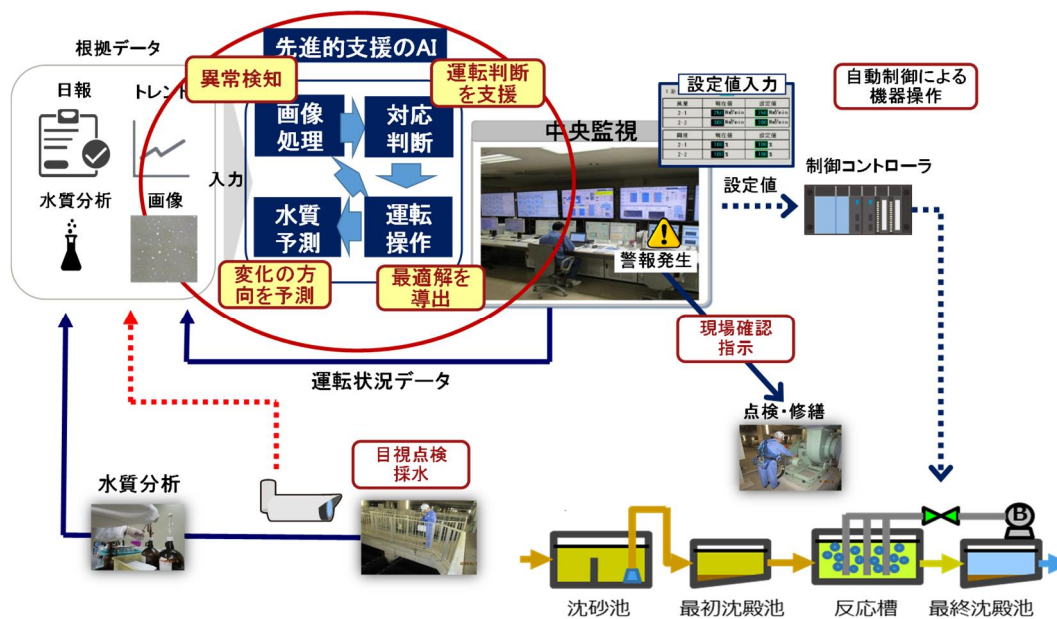


図 2-14 本技術の導入後の運転操作イメージ

第2節 実証研究に基づく評価の概要

§10 技術の評価項目

本技術の実証研究における評価項目および目標を以下に示す。

(1) 対応判断 AI、運転操作 AI における熟練技術者との判断一致率

80%以上

(2) 画像処理 AI における判断の正確性

スカム及びフロックの検出において、真陽性率 90%以上、偽陽性率 10%以下

(3) 水質予測 AI における推定精度

80%以上

(4) 維持管理費用

基準年と比較して 5%削減

(5) 省電力

基準年と比較して 4%削減

(6) 省 CO₂

基準年と比較して 5%削減

(7) 費用回収年

7 年以内

【解 説】

実証研究においては、実証場所として広島市西部水資源再生センター、船橋市高瀬下水処理場、A 処理場、B 処理場、C 処理場、D 処理場の 6 箇所を実施した。各処理場の処理方法、処理能力と AI 推論項目を表 2-4 に示す。また、実証期間中の流量変動を図 2-15～図 2-20 に示す。

表 2-4 各処理場の処理方法、処理能力と AI 推論項目

処理場	処理方法／処理能力	推定項目
広島市 西部水資源再生センター	標準活性汚泥法 (擬似嫌気好気法) 307,200 m ³ /日	DO 設定 (東系)・送風量設定 (西系) 返送汚泥率設定 次亜塩注入率設定 返流水 PAC 注入率設定 最終沈殿池画像異常
船橋市 高瀬下水処理場	嫌気無酸素好気法 102,000 m ³ /日	PAC 注入率設定 最終沈殿池画像異常
A 処理場	標準活性汚泥法 81,000 m ³ /日	次亜塩注入率設定
B 処理場	標準活性汚泥法 33,800 m ³ /日	反応タンク攪拌機制御 (運転停止)
C 処理場	回分式活性汚泥法 372 m ³ /日	高風量曝気時間設定
D 処理場	オキシデーションディッチ法 4,000 m ³ /日	高速攪拌運転曝気時間設定

広島市西部水資源再生センターでは、2 系、3 系を含む東系の流入流量は平均で 3,610 m³/h、最小で 0 m³/h、最大で 14,000 m³/h であり、4 系、5 系を含む西系の流入流量は平均で 6,560 m³/h、最小で 0 m³/h、最大で 22,400 m³/h であった。

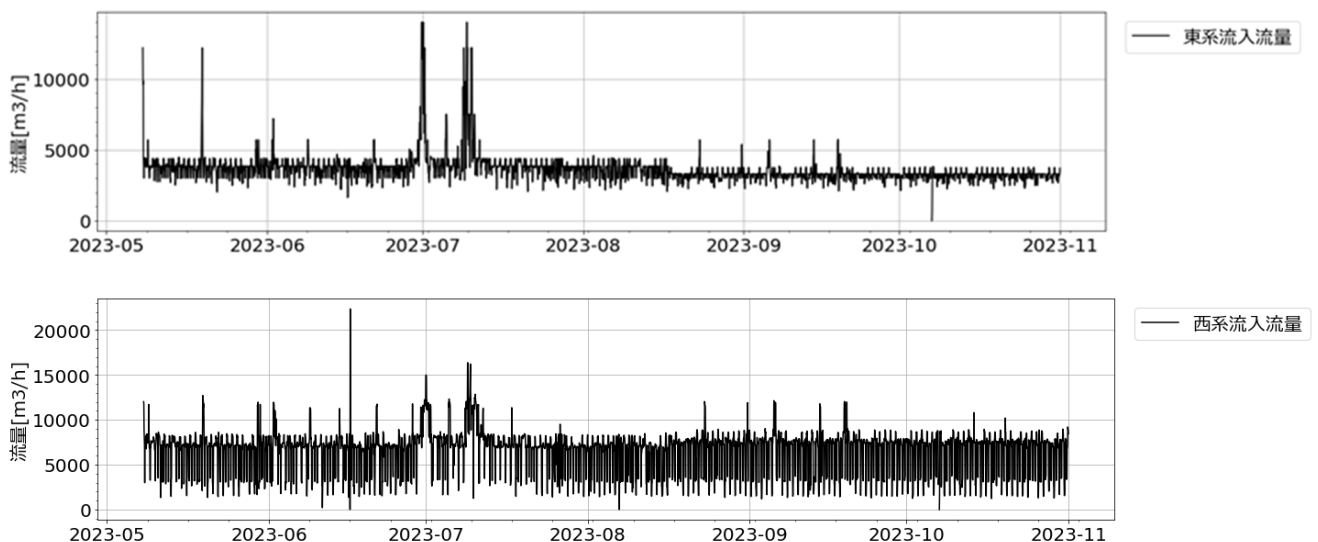


図 2-15 広島市西部水資源再生センター 流量変動
上段：東系 (2 系、3 系を含む)。下段：西系 (4 系、5 系を含む)

船橋市高瀬下水処理場では、処理場全体での流入流量は平均で 3,900 m³/h、最小で 0 m³/h、最大で 4,390 m³/h であった。5 系は大きな負荷を背負っているが、1～4 系は比較的流入変動が平準化されている様子であった。

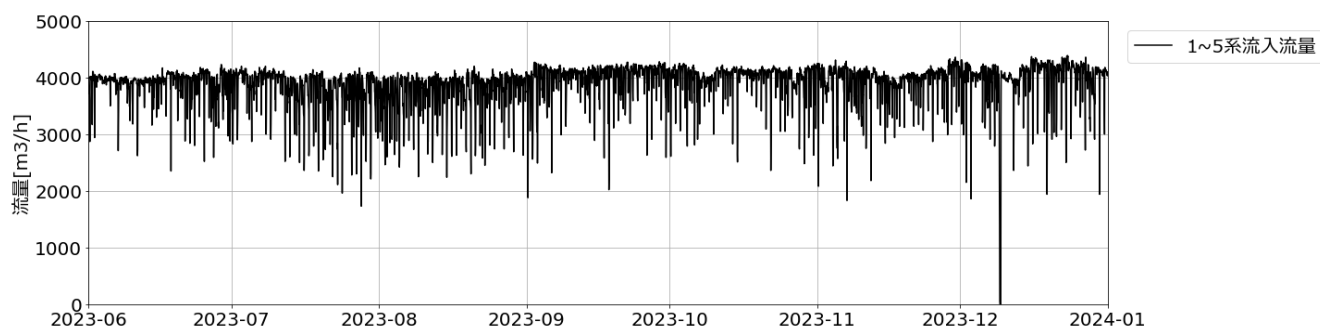


図 2-16 船橋市高瀬下水処理場 流量変動（各系の合計値）

A 処理場での現地実証期間の流入流量は、平均で 2,190 m³/h、最小で 1,470 m³/h、最大で 2,820 m³/h であった。

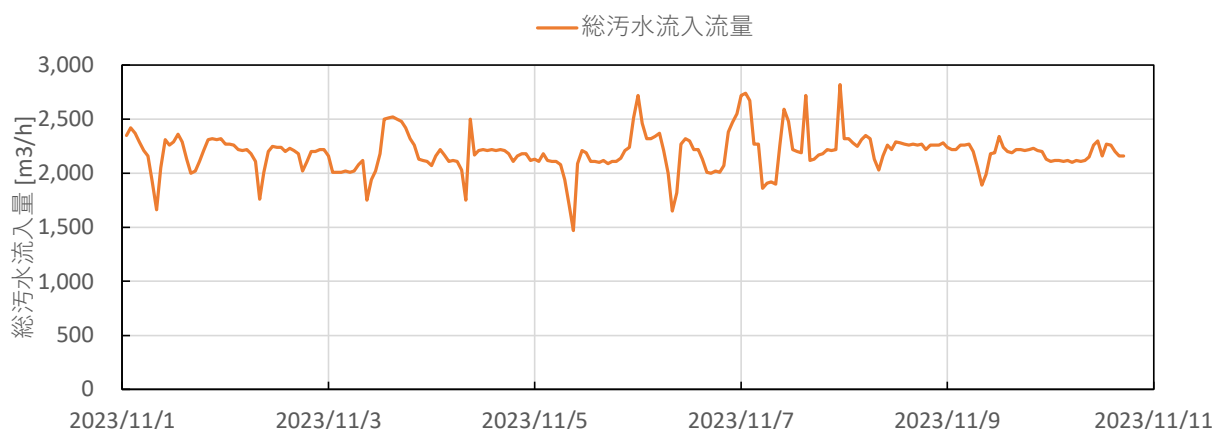


図 2-17 A 処理場 流量変動

B 処理場での現地実証期間の流入流量は、平均で 730 m³/h、最小で 210 m³/h、最大で 1,170 m³/h であった。

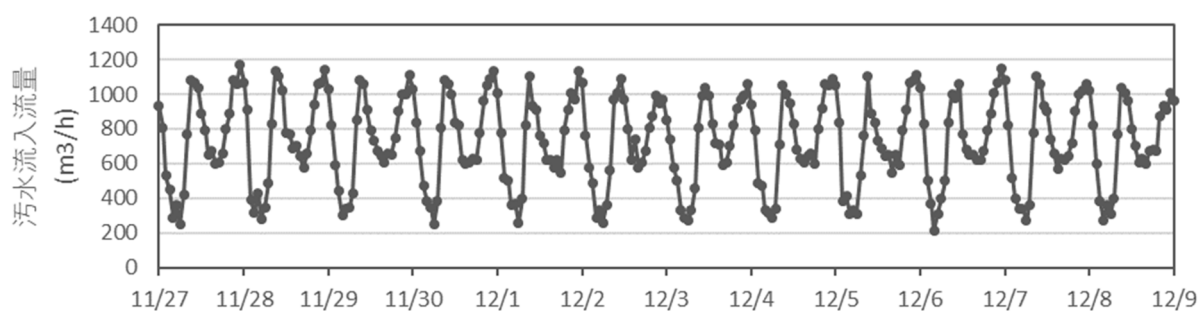


図 2-18 B 処理場 流量変動

C 処理場でのオフサイト実証期間の流入流量は、日間の流入水量変動のデータは無く、1 日当たりの流量のデータとなるが、流入流量は平均で 260 m³/日、最小で 230 m³/日、最大で 370 m³/日であった。

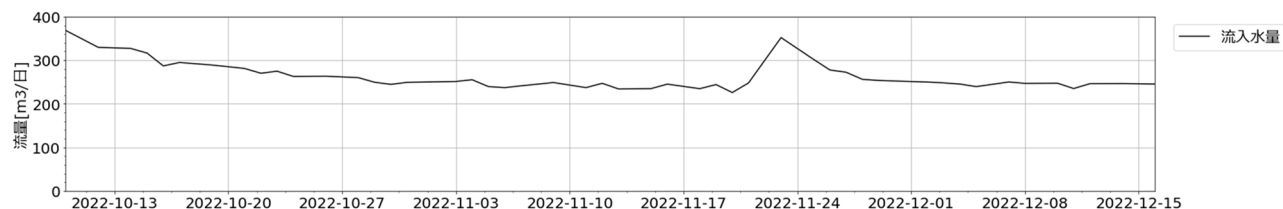


図 2-19 C 処理場 流量変動

D 処理場でのオフサイト実証期間の流入流量は、データが無く、放流水量の 1 日当たりの流量のデータとなるが、放流流量は平均で 1,590 m³/日、最小で 1,180 m³/日、最大で 1,940 m³/日であった。



図 2-20 D 処理場 流量変動

(1) 対応判断 AI、運転操作 AI における熟練技術者との判断一致率

- ①広島市西部水資源再生センターにおいて、1 日 2 回の運転判断タイミング（平日の 9 時及び 16 時、平日の前日の休日は 9 時のみ）での各判断項目の AI が示した運転操作判断を実運転に適用したか否かを判定し、実運転に適用した場合に判断を可とした。

表 2-5 広島市西部水資源再生センターにおける判断項目（12 項目）

送風量関連	返送汚泥量関連	次亜塩注入関連	返流水 PAC 注入量関連
2 系 DO 設定	2 系返送汚泥量設定	東系次亜塩注入率設定	分配槽 PAC 注入量設定
3 系 DO 設定	3 系返送汚泥量設定		
4 系送風量設定	4 系返送汚泥量設定	西系次亜塩注入率設定	再曝気槽 PAC 注入量設定
5 系送風量設定	5 系返送汚泥量設定		

- ②船橋市高瀬下水処理場において、1 時間/回の PAC 注入量の運転判断タイミングでの各判断項目の AI が示した運転操作判断が実運転と一致したか否かを判定し、一致した場合に判断を可とした。

判断項目：1 系 PAC 注入量～5 系 PAC 注入量（5 項目）

- ③A 処理場において、1 時間/回の運転判断タイミングで AI が示した次亜塩注入率設定の運転操作判断

が実運転と一致したか否かを判定し、一致した場合に判断を可とした。

判断項目：次亜塩注入率設定（1 項目）

④B 処理場において、1 時間/回の運転判断タイミングで AI が示した攪拌機運転停止の運転操作判断が実運転と一致したか否かを判定し、一致した場合に判断を可とした。

判断項目：1/2 系攪拌機運転、3/4 系攪拌機運転（2 項目）

⑤C 処理場において、1 日/回の運転判断タイミングで AI が示した攪拌機運転停止の運転操作判断が実運転と一致したか否かを判定し、実証期間中の RMSE が 5 分（設定変更の最小刻み）以内となった場合を可とした。

判断項目：No.1 曝気装置高曝気時間、No.2 曝気装置高曝気時間（2 項目）

RMSE（Root Mean Square Error：平均二乗誤差平方根）

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad y_t, \hat{y}_t : \text{実際の操作値、推定操作値}$$

⑥D 処理場において、1 日/回の運転判断タイミングで AI が示した曝気装置タイマー強攪拌時間の運転操作判断が実運転と一致したか否かを判定し、実証期間中の RMSE が 10 分（設定変更の最小刻み）以内となった場合を可とした。

判断項目：No.1 曝気装置タイマー強攪拌時間、No.2 曝気装置タイマー強攪拌時間（2 項目）

（2）画像処理 AI における判断の正確性

広島市西部水資源再生センター、船橋市高瀬下水処理場において、ブロックやスカムを含んだ画像で真陽性率 90%以上、偽陽性率 10%以下となる閾値が決定できれば可とした。

（3）水質予測 AI における推定精度

広島市西部水資源再生センターにおいて、処理水 pH 値、T-N、T-P の各項目の予測精度 80%以上で可とした。

$$\text{精度} = 1 - \frac{\text{RMSE}}{\max_{1 \leq t \leq N} (y_t) - \min_{1 \leq t \leq N} (y_t)} \geq 0.8$$

ここで $y_t (1 \leq t \leq N)$ は推定対象の水質である。

（4）維持管理費用

基準年度と比較して 5%削減することで可とした。基準年度は、広島市西部水資源再生センターにおいては現状と同じ処理方式となった平成 23 年度とした。

（5）省電力

基準年度（平成 23 年度）と比較して 4%削減することで可とした。

（６）省 CO₂

基準年度（平成 23 年度）と比較して 5%削減することで可とした。

（７）費用回収年

施設導入や維持管理費といった AI 技術に係る費用と AI 技術導入で削減できる人件費、電力使用量、薬品使用量とを比較し、7 年以内で費用回収できることで可とした。

§ 11 技術の評価結果

(1) 対応判断 AI、運転操作 AI における熟練技術者との判断一致率

広島市西部水資源再生センターにおいては、各項目の平均 97%であった。

船橋市高瀬下水処理場においては、各項目の平均 95%であった。

A 処理場においては、100%であった。

B 処理場においては、運転時 80%、停止時 100%であった。

C 処理場においては、80%であった。

D 処理場においては、82%であった。

(2) 画像処理 AI における判断の正確性

広島市西部水資源再生センターにおいてフロック検出の真陽性率 94%、偽陽性率 0.25%であった。

船橋市高瀬下水処理場においてスカム検出の真陽性率 100%、偽陽性率 0.03%であった。

(3) 水質予測 AI における推定精度

広島市西部水資源再生センターにおける、T-N、T-P、pH の 24 時間先予測、48 時間先予測では、精度 80%以上であった。

(4) 維持管理費用

広島市西部水資源再生センターにおいては、15.1%の削減であった。

(5) 省電力

広島市西部水資源再生センターにおいては、10.5%の削減であった。

(6) 省 CO₂

広島市西部水資源再生センターにおいては、15.1%の削減であった。

(7) 費用回収年

広島市西部水資源再生センターにおいては、電力・薬品削減費を考慮した場合、4.6 年であった。人件費のみを考慮した場合、22.2 年であった。人件費に加え電力・薬品削減費を考慮すると 3.3 年であった。

【解説】

(1) 対応判断 AI、運転操作 AI における熟練技術者との判断一致率

- ①広島市西部水資源再生センターにおける、令和 5 年度の実証期間（2023 年 5 月 8 日～10 月 31 日）の各項目の一致率を表 2-6 に示す。一致率 89%～100%であり、平均 97%であった。

表 2-6 広島市西部水資源再生センター 評価結果（令和 5 年度）

項目	一致率	評価	備考
2 系 DO 設定	89% (235/263)	○	
3 系 DO 設定	90% (236/263)	○	
2 系返送汚泥量設定	98% (259/263)	○	※1
3 系返送汚泥量設定	98% (259/263)	○	※1
東系次亜注入率設定	97% (256/263)	○	
分配槽 PAC 注入量設定	99% (261/263)	○	
再曝気槽 PAC 注入量設定	100% (263/263)	○	
4 系送風量設定	99% (261/263)	○	
5 系送風量設定	99% (260/263)	○	
4 系返送汚泥量設定	98% (257/263)	○	※1
5 系返送汚泥量設定	98% (257/263)	○	※1
西系次亜注入率設定	97% (255/263)	○	
合計	97% (3059/3156)	○	

※1：返送汚泥については、処理量が一定量以上で時刻に関係なく増量が行われ、水量減少後数時間で減量される。この事象については推論対象から除外する。

②船橋市高瀬下水処理場における、令和 5 年度の実証期間（2023 年 6 月～12 月）の一致率を表 2-7 に示す。一致率 93%～96%であり、平均 95%であった。

表 2-7 船橋市高瀬下水処理場 評価結果（令和 5 年度）

項目	一致率	評価	備考
1 系 PAC 注入量	94% (4,410/4,695)	○	
2 系 PAC 注入量	93% (4,365/4,695)	○	
3 系 PAC 注入量	95% (4,467/4,695)	○	
4 系 PAC 注入量	96% (4,528/4,695)	○	
5 系 PAC 注入量	95% (4,439/4,695)	○	

③A 処理場における、令和 5 年度の実証期間（2023 年 11 月 1 日～10 日）の運転比較結果を**図 2-21**に示す。この期間の一致率は 100%であった。

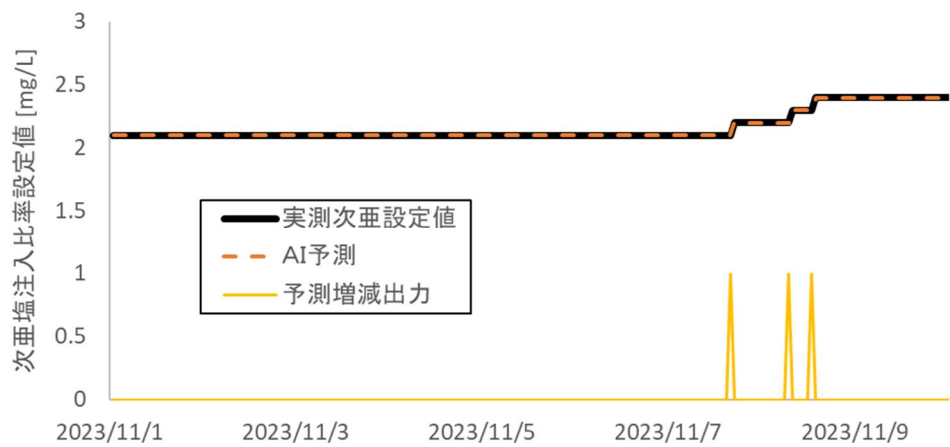


図 2-21 A 処理場 オンサイト・オフライン実証結果

④B 処理場における、令和 5 年度の実証期間（2023 年 11 月 27 日～12 月 8 日）の運転比較結果を**表 2-8**に示す。この期間の一致率は攪拌機運転時 80%、攪拌機停止時 100%であった。

表 2-8 B 処理場 評価結果（令和 5 年度）

系列	攪拌機運転推論	攪拌機停止推論
1/2 系	80%	100%
3/4 系	80%	100%

⑤C 処理場における、令和 4 年度の実証期間（2022 年 10 月～12 月）の運転一致率は 80%、RMSE が 4.0 分であり、設定変更の最小刻み 5 分以内となった。

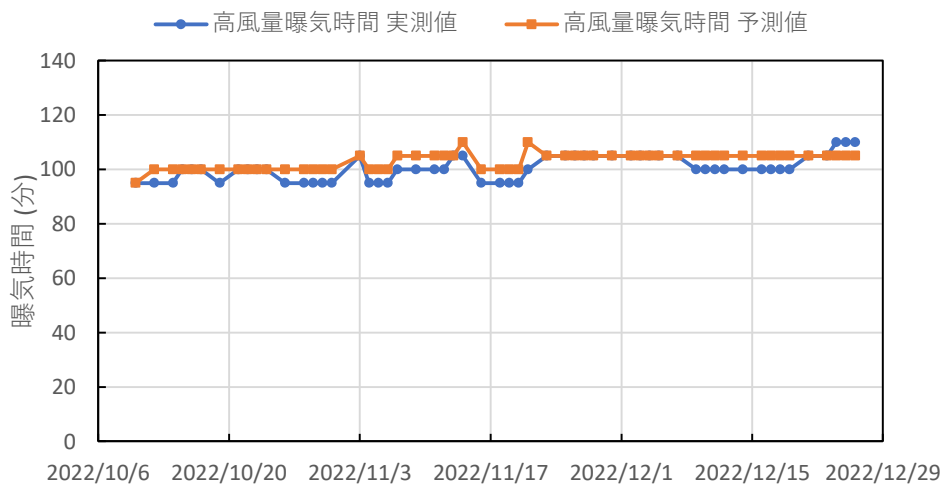


図 2-22 C 処理場 オフサイト実証結果

⑥D 処理場における、令和 4 年度の実証期間（2022 年 8 月～10 月）の運転一致率は 82%、RMSE が 4.25 分であり、設定変更の最小刻み 10 分以内となった。

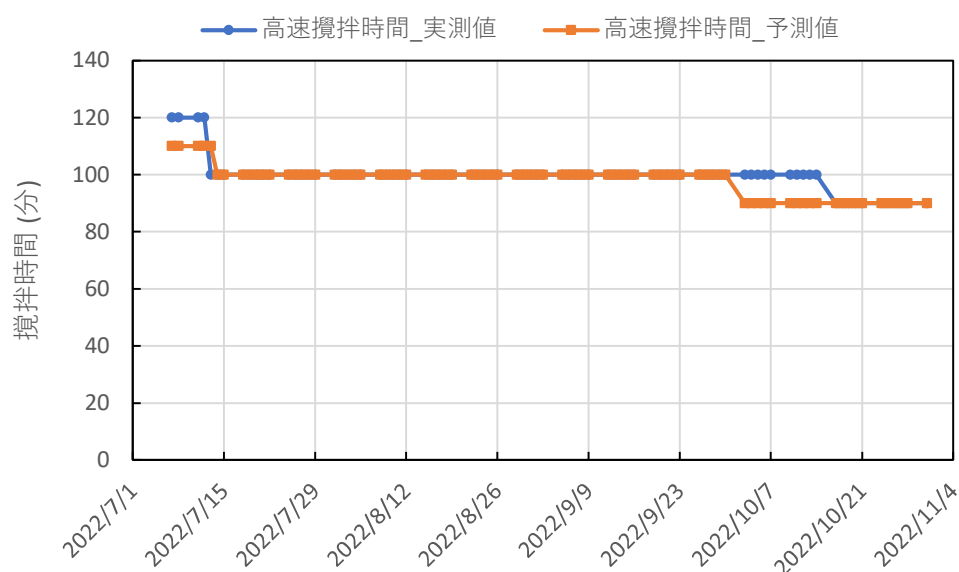


図 2-23 D 処理場 オフサイト実証結果

（２）画像処理 AI における判断の正確性

広島市西部水資源再生センターにおいては、表 2-9 の通り、フロック検出の真陽性率 94%（50 枚中 47 枚を正しく認識）、偽陽性率 0.25%（400 枚中 1 枚を誤検出）であった。

表 2-9 広島市西部水資源再生センターのフロック浮遊に関する検出性能

	フロック浮遊
真陽性率	94% (47/50)
偽陽性率	0.25% (1/400)

船橋市高瀬下水処理場においては、表 2-10 の通り、スカム検出の真陽性率 100%（50 枚全てを正しく認識）、偽陽性率 0.03%（1,000 枚中 30 枚を誤検出）であった。

表 2-10 船橋市高瀬下水処理場のスカム浮上に関する検出性能

	スカム浮上
真陽性率	100% (50/50)
偽陽性率	3.0% (30/1000)

（３）水質予測 AI における推定精度

広島市西部水資源再生センターにおいて、T-N（放流水）、T-P（放流水）、pH（東系処理水）の 24 時間先、48 時間先予測の精度は全て 80%以上であった。

表 2-11 広島市西部水資源再生センター 評価結果

No	予測対象	24 時間先		48 時間先		評価	値幅
		RMSE	精度	RMSE	精度		
1	放流水 T-N [mg/L]	2.06	88%	2.47	85%	○	7.27～24.2[mg/L]
2	放流水 T-P [mg/L]	0.80	82%	0.87	80%	○	0.47～4.80[mg/L]
3	東系処理水 pH	0.066	89%	0.056	91%	○	6.43～7.01

（４）維持管理費用

広島市西部水資源再生センターにおいては、15.1%の削減であった。

（５）省電力

広島市西部水資源再生センターにおいては、10.5%の削減であった。

（６）省 CO₂

広島市西部水資源再生センターにおいては、15.1%の削減であった。

（７）費用回収年

広島市西部水資源再生センターにおいては、電力・薬品削減費を考慮した場合、4.6 年であった。人件費のみを考慮した場合、22.2 年であった。人件費に加え電力・薬品削減費を考慮すると 3.3 年であった。

なお、人件費については、維持管理時の業務・作業内容を洗い出した後、AI 技術導入により人の作業が置き換わる時間を年額換算した。広島市西部水資源再生センターにおいては、7.1 百万円/年と算出した。

第3章 導入検討

第1節 導入検討手法

§ 12 導入検討手順

本技術の導入の検討にあたっては、対象とする下水処理場の現況および課題等を把握し、導入効果の検討を行い、適切に導入判断する。

【解説】

導入検討にあたっては、図 3-1 に示す導入検討フローにしたがって、必要な情報を収集し、導入効果の概略試算評価を行い、導入判断を行う。

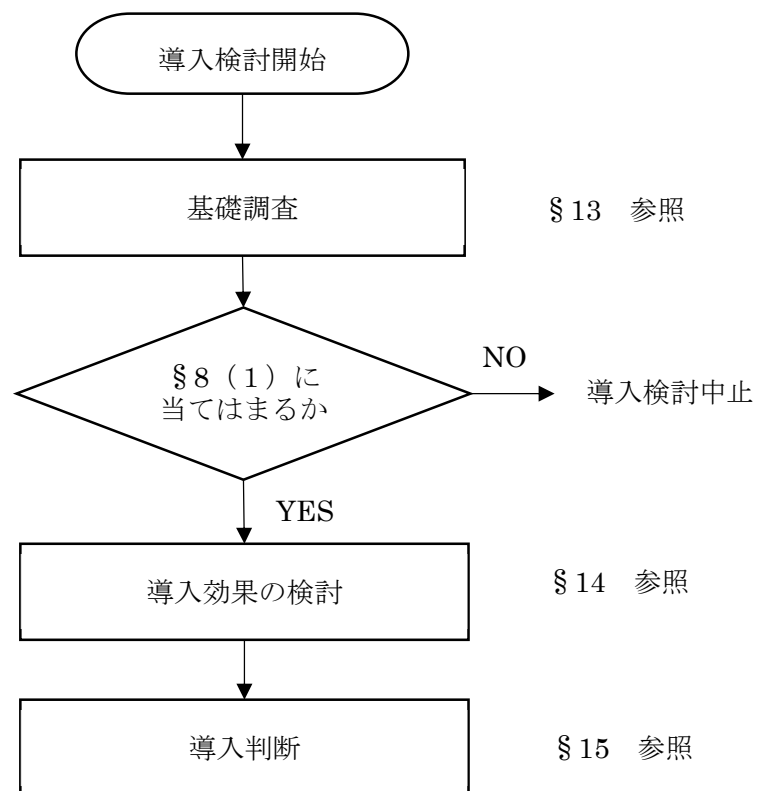


図 3-1 導入検討フロー

§ 13 基礎調査

導入検討に必要な、以下の情報を把握する。

- (1) 流入汚水量の現状把握と将来予測
- (2) 流入水質および放流水質、水温
- (3) 運転操作対象の選定
- (4) 既存施設の運用情報の確認
- (5) 既存施設情報の確認

【解 説】

概略の導入検討に必要な情報として、施設情報、流入水質、流入汚水量、更新計画を調査する。
なお、本格的な計画・設計のための情報収集は **§ 17 基本事項の把握** に詳述している。

(1) 流入汚水量の現状把握と将来予測

下水処理場の維持管理年報等により、日最大汚水量を含む年間の水量の傾向変動を確認する。さらに、人口増加あるいは減少に伴う流入汚水量の将来的な増減の予測を確認し、処理場統廃合等の計画がある場合は、それらを考慮した流入汚水量の予測も確認する。

(2) 流入水質および放流水質、水温

下水処理場の水質日報等から下水流入水質、最初沈殿池流出水質、処理水質、放流水質、水温の年間水質を調査する。また、流入水質、処理水質、放流水質の計画値および設計値も確認する。

(3) 運転操作対象の選定

設定変更の頻度が多く、技術継承を実施したい運転操作対象を選定する。活性汚泥法では、重要な運転設定項目として生汚泥引抜量設定、余剰汚泥引抜量設定、DO、送風量若しくは送気倍率設定、返送汚泥量若しくは返送率設定、消毒剤注入率が挙げられる。オキシデーションディッチ法では、攪拌機運転タイマー設定や返送汚泥量、余剰汚泥引抜量設定が挙げられる。

(4) 既存施設の運用情報の確認

処理目標水質の変更、工事等による通水停止履歴、散気装置の変更による風量の変化、薬品の注入点や攪拌方法の変更等は、運転操作内容に影響を及ぼすため、特に注意して確認する。

(5) 既存施設情報の確認

導入検討対象とする下水処理施設の既存施設情報（流入方式、反応タンク、最終沈殿池、送風機、風量、風量制御方法）を収集する。

§ 14 導入効果の検討

本技術の導入にあたっては、AIを導入しない場合と比較して、AI導入により削減できる電力量や薬品使用量と導入費用や維持管理費用を比較して得られるコスト効果の他、維持できる運転技術レベル、技術継承の内容等を勘案し、総合的に効果を検討する。

【解 説】

本技術の導入検討フローを図 3-2 に示す。ここでは、§ 6 技術の構成と機能に掲載した構成を全て導入した場合の導入効果について示す。

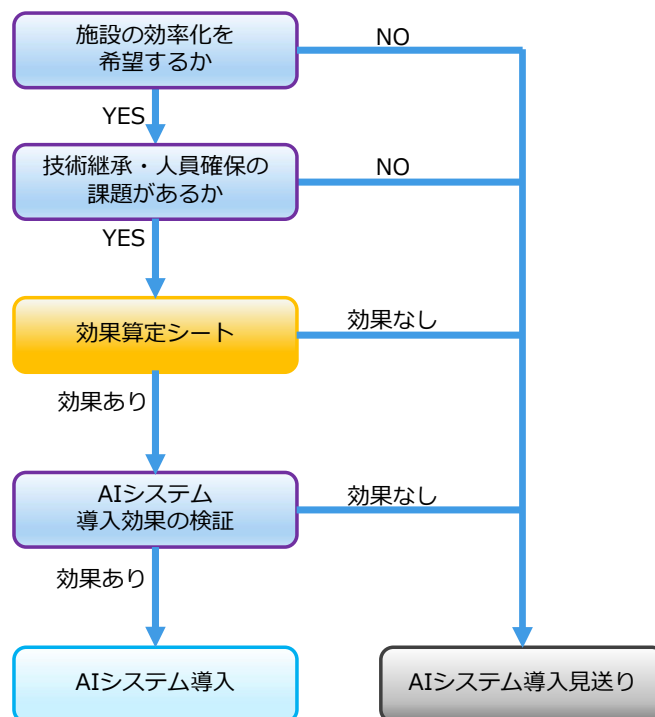


図 3-2 本技術の導入検討フロー

(1) 本技術の導入コストの算出

- ①AI 推論システムを全て現地に設置するオンプレミス型、AI 推論機能や結果表示をクラウド上で行うクラウド型を選定する。クラウド型の選定メリットとしては、初期導入費用を抑えることによる費用平準化、遠隔地からの運用状況確認や AI 推論エンジンの保守点検、複数の下水処理場に AI 技術を導入した場合でも一括管理できる点が挙げられる。一方、クラウド型の選定デメリットとして、クラウドサービス契約やデータ通信量の増加による費用増加が挙げられる。

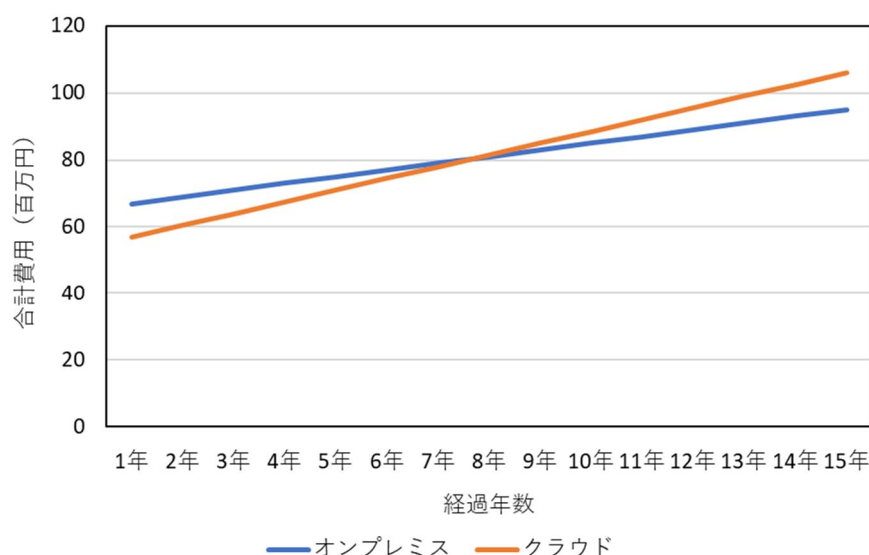


図 3-3 標準活性汚泥法における導入費用 (処理能力 100,000 m³/日以上)

表 3-1 標準活性汚泥法における導入費用及び維持管理費用 (単位：百万円)

		処理規模 (m³/日)				
		≦10,000	≦30,000	≦50,000	≦100,000	>100,000
初期費用	オンプレミス	26	37	47	57	67
	クラウド	15	27	37	47	57
維持管理費用	オンプレミス	1	1.5	1.5	2	2
	クラウド	2.5	3	3	3.5	3.5

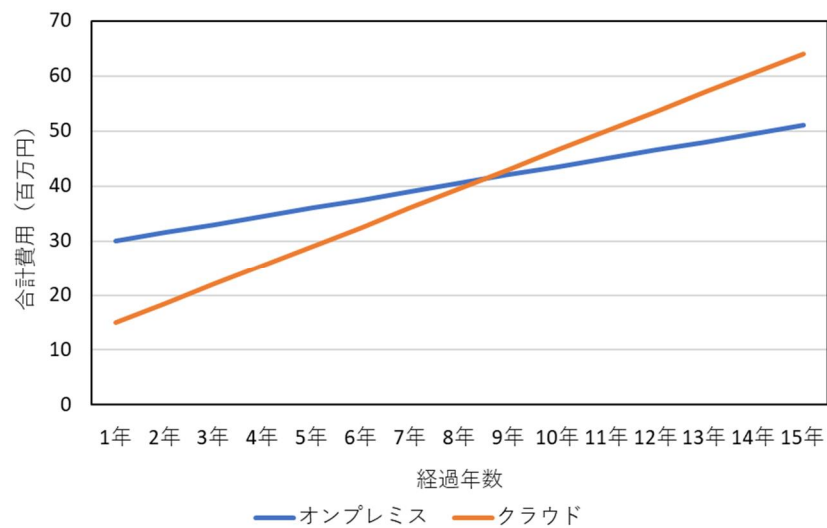


図 3-4 オキシデーションディッチ法における AI 導入費用 (処理能力 10,000 m³/日以上)

表 3-2 オキシデーションディッチ法における導入費用及び維持管理費用 (単位：百万円)

		処理能力 (m3/日)				
		≦1,000	≦3,000	≦5,000	≦10,000	>10,000
初期費用	オンプレミス	20	20	25	25	30
	クラウド	15	15	15	15	15
維持管理費用	オンプレミス	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5
	クラウド	2.5	2.5	3.0	3.5	3.5

②処理能力ではなく、導入したい水処理系列数を設定することも可能である。

(2) 本技術の維持管理コストの算出

- ①水処理に係る電力使用量や薬品使用量の変化を確認する。多くの場合、包括的民間委託レベル 2 以上に切り替わる前後で、維持管理業者の運用コストを削減する意図が働き、水処理電力使用量や薬品使用量減少の傾向が見られるため、熟練技術者による運転ができなくなった場合、包括的民間委託レベル 1 以下に戻ると想定して、その時の電力使用量や薬品使用量の原単位（処理水量又は水質当たり）の変化から削減可能な電力使用量や薬品使用量、それぞれの単価（電力使用量の場合、円/kWh、薬品使用量の場合、円/kg）を乗じて金額換算する。
- ②長期的に AI 導入で更に電力使用量や薬品使用量の削減が見込まれる場合、その効果を加算する。

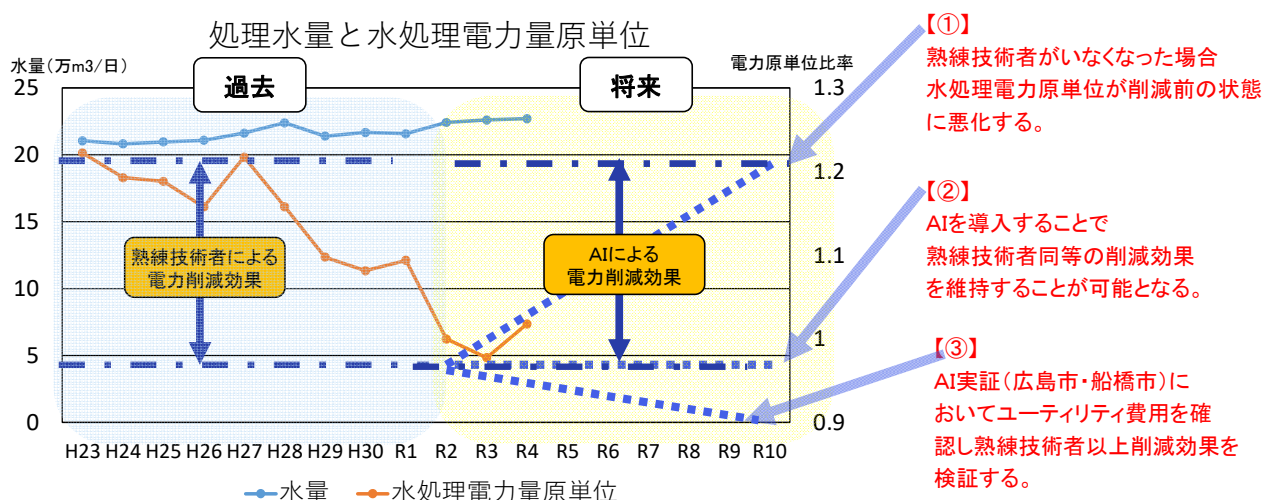


図 3-5 電力量削減効果のイメージ

- ③AI による人件費削減として、運転管理に関する検討作業の日数（工数）削減が挙げられる。具体的には、施設及び設備の運転、操作、制御及び監視、巡視点検等が挙げられる。また、降雨時においても施設及び設備の運転、操作、制御及び監視、巡視点検を行う必要がある。AI 導入で効率化された箇所と全ての操作量項目との割合、人件費単価から、削減可能な人件費を算出する。

$$\text{削減可能な人件費} = \text{検討作業日数} \times \frac{\text{AI 導入箇所}}{\text{全ての操作量}} \times \text{人件費単価}$$

(3) 経費回収年

- (1) による導入費用及び維持費用と (2) による削減費用から経費回収年を計算する。

$$\text{経費回収年} = \frac{\text{技術導入費用}}{\text{費用削減効果} - \text{技術維持費用}}$$

§ 15 導入判断

導入効果の検討結果に加えて、必要に応じて技術継承が可能であるという本技術の特徴を考慮し、導入の判断を行う。

【解 説】

基本的に導入効果の検討（§ 14 導入効果の検討）の結果に基づいてコスト的に有利であれば「導入」と判断する。これに加えて、必要に応じて、技術継承が可能であること、AI 技術導入で空いた作業時間を他に転用可能という本技術の特徴を勘案し、導入の判断を実施する。

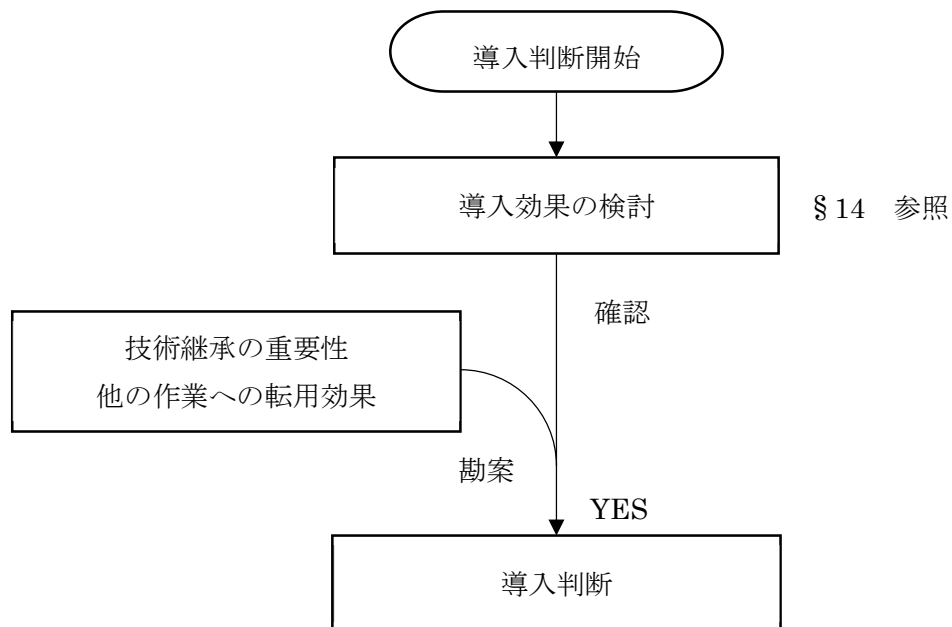


図 3-6 導入判断フロー

第2節 導入効果の検討例

広島市西部水資源再生センターにおける本技術の導入効果の検討例を示す。

（１）電力量や薬品使用量の経年変化の整理

価格については、費用の高騰に注意する。

（２）評価対象年度の設定

電力量の評価年度については、過去の増改築等のイベントはあるが電力原単位は減少傾向である。令和2年度にはメンブレン式散気装置が導入され水処理の効率に影響している。そのため、評価年度は平成23年度と令和元年度の原単位を用い評価した。

次亜塩素酸ナトリウム、ポリ塩化アルミニウム（PAC）の評価年度については、平成30年度から熟練技術者がより効率的な運転実施に向けた試験運転を行っている。増改築が安定している時期として平成23年度と平成29年度の原単位を用い評価した。

（３）削減効果の考え方

本技術による費用削減効果としては、基準年度、評価年度から熟練技術者によるユーティリティ費用削減を求めた。熟練技術者は本技術で代用可能で基準年度と評価年度の差分が削減効果として期待できるものとした。

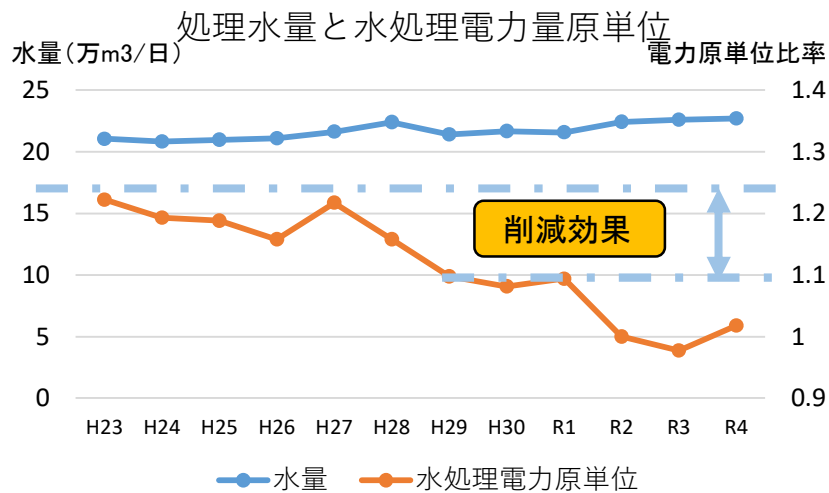


図 3-7 年度ごとの電力量の推移と削減効果

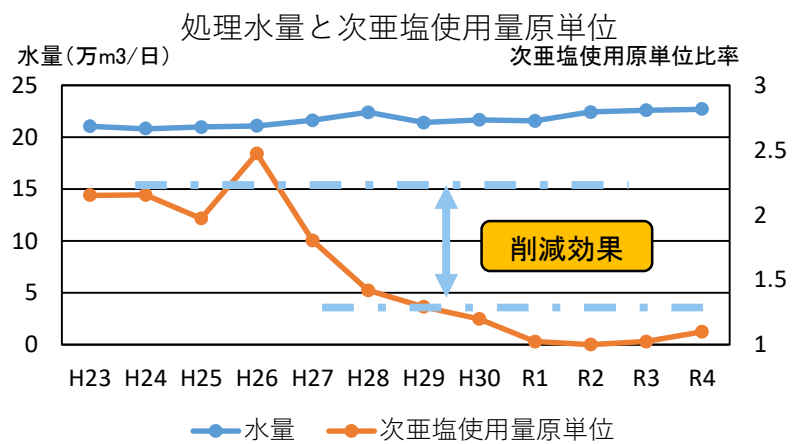


図 3-8 次亜塩素酸ナトリウム使用量の推移と削減効果

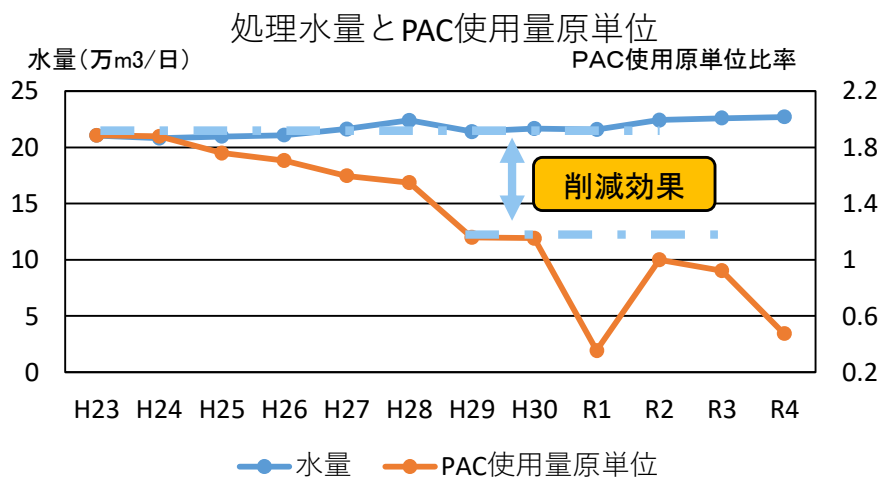


図 3-9 ポリ塩化アルミニウム使用量の推移と削減効果

（４）人件費削減の範囲と費用算出

本技術は、水処理の運転管理に関わる異常の把握、運転操作の方針の推定と提示、及び運用設定値を自動演算するものである。水処理の運転監視操作業務及び水質試験業務の副総括及び主任の活動日数のうち、本技術の導入で削減可能な作業日数を調査した。その結果、**図 3-11** に示す合計 85 日分が年間で削減可能とした。また、この作業日数を金額換算した結果、**図 3-12** に示す通り、約 7.1 百万円の人件費削減効果が期待できる。

職 種	職 種 の 基 準
業 務 総 括 責 任 者	業務全体の責任者で、下水道処理施設管理技士有資格者、又は下水道法施行令で定める有資格者、若しくは同等の能力を有し、総括の職務にあたり管理能力が有る者。
副 総 括	業務総括責任者を補佐及び代行ができ、管理及び高度な技術を有し、かつ各業務の責任者としての確な判断ができる者。
主 任	各業務の責任者で、高度な技術を有し、業務の専門職として主体的業務を行える者。
技 術 員	基礎的な技術を有し、保守点検業務、運転監視等の業務を遂行できる者。
技 能 員	運転操作、水質分析等の作業について必要とされる技能を伴った補助業務が行える者。

図 3-10 水処理に係る運転員の職種と役割

業務		活動日数						
業務分類	業務項目	現場作業		所内作業		その他作業		
		作業	情報収集	書類作成	検討	打合	移動	研修・学習
運転監視に関する業務	施設及び設備の運転、操作、制御及び監視、巡視点検（施設の運転状況確認、異常早期発見）	717日	215日	251日	72日	224日	0日	56日
	降雨時の施設等の運転、操作、制御及び監視	134日	40日	47日	13日			
	産業廃棄物を場外搬出する際の運転操作、立ち合い（沈砂、しき、スラム、脱水汚泥等）	45日	13日	16日	4日			
保守点検に関する業務	軽微な保守点検	56日	17日	20日	6日			
修繕に関する業務	軽微な修繕	56日	17日	20日	6日			
その他	薬品搬入立合、工事立合その他	112日	34日	39日	11日			
小計		1120日	336日	392日	112日	224日	0日	56日
合計		2240日						

※活動日数合計2240日は（水処理グループ9人＋（副総括責任者×1/3））×240日（年間推定就業日数）から算出した

図 3-11 本技術の導入で削減可能な作業日数

【水処理AI導入前の業務価格】

項目	業務総括責任者	副 総 括	主 任	技 術 員	技 能 員
① 運転操作監視業務費 水処理のみ	基準人数(人、日)	64	64	190	764
	労務単価(円/人)	29,300	25,900	22,600	20,300
	金額(円)	1,875,200	1,657,600	4,294,000	15,509,200
	計(円)			36,247,000	12,911,600
② 水質試験業務費 水処理のみ	基準人数(人、日)	0	216	433	-
	労務単価(円/人)	27,900	24,700	21,500	19,300
	金額(円)	0	5,335,200	9,309,500	-
	計(円)			25,802,000	11,157,300
				③直接業務費計(円)	[(1)+(2)]
				④直接経費(円)	[(3)×4%]
				⑤技術経費(円)	[(3)×25%]
				⑥間接業務費(円)	[(3)×23.5%]
				⑦業務原価計(円)	[(3)+(4)+(5)+(6)]
				⑧諸経費(円)	[(7)×15.5%]
				⑨業務価格計(円)	[(7)+(8)]

【水処理AI導入後の業務価格】 赤字に示す人工をAIに置き換えた

項目	業務総括責任者	副 総 括	主 任	技 術 員	技 能 員
① 運転操作監視業務費 水処理のみ	基準人数(人、日)	64	52	152	764
	労務単価(円/人)	29,300	25,900	22,600	20,300
	金額(円)	1,875,200	1,346,800	3,435,200	15,509,200
	計(円)			35,078,000	12,911,600
② 水質試験業務費 水処理のみ	基準人数(人、日)	0	173	348	-
	労務単価(円/人)	27,900	24,700	21,500	19,300
	金額(円)	0	4,273,100	7,482,000	-
	計(円)			22,912,000	11,157,300
				③直接業務費計(円)	[(1)+(2)]
				④直接経費(円)	[(3)×4%]
				⑤技術経費(円)	[(3)×25%]
				⑥間接業務費(円)	[(3)×23.5%]
				⑦業務原価計(円)	[(3)+(4)+(5)+(6)]
				⑧諸経費(円)	[(7)×15.5%]
				⑨業務価格計(円)	[(7)+(8)]

図 3-12 本技術の導入で削減可能な作業日数と費用

（５）電力量及び電力料金の削減

電力量については、大手電力会社の料金体系は、①電力量料金単価、②燃料費調整単価、③再生可能エネルギー発電促進賦課金単価に使用電力量を掛け合わせ算出される。そのため、各単価を設定し削減効果を算出した。なお、電力料金には、市場価格調整単価に電力使用量を掛け合わせた市場価格調整額が加算・減算されるが、本試算例では市場価格調整額については考慮していない。

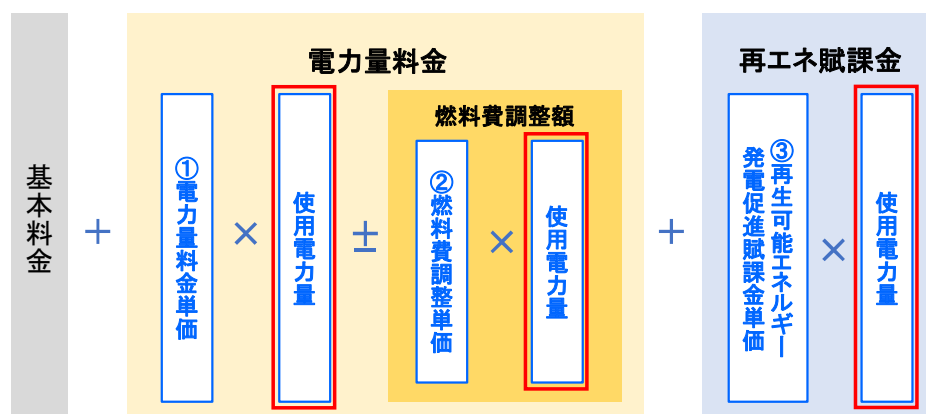


図 3-13 電力会社の料金体系概念。赤枠は効率的な運用で削減が見込まれる箇所

1) 単価

- ①電力量料金単価は、26.54 円/kWh（国総研調べ）とした。
- ②燃料費調整単価は、令和 5 年度の平均値（-0.01 円/kWh）とした
- ③再生可能エネルギー発電促進賦課金単価は近年上昇傾向であるため、直近かつ最高額の令和 4 年度の単価「3.45 円/kWh」とした。

2) 計算

電力量料金単価（26.54 円）×使用電力量（令和元年度：21,372,570 kWh）
 +（燃料費調整単価（-0.01 円/kWh）×使用電力量）
 +賦課金（3.45 円/kWh）×使用電力量）
 から、令和元年度電力料金＝600 百万であった。

令和元年度電力原単位＝水処理電力量（kWh）÷令和元年度流入水量(m³)
 ＝21,372,570（kWh）÷75,773,170(m³)＝0.2821（kWh/m³）

平成 23 年度電力原単位＝水処理電力量（kWh）÷平成 23 年度流入水量(m³)
 ＝23,304,150（kWh）÷73,291,270(m³)＝0.3180（kWh/m³）

平成 23 年度電力原単位÷令和元年度電力原単位
 ＝0.3180（kWh/m³）÷0.2821（kWh/m³）＝1.127

平成 23 年度電力原単位を用いた場合の電力料金
 ＝600 百万×1.127≒676 百万円

よって、電力削減費用は、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} & \text{平成 23 年度電力原単位を用いた場合の電力料金} - \text{令和元年度電力料金} \\ & = 676 \text{ 百万円} - 600 \text{ 百万円} \\ & = 76 \text{ 百万円} / 8 \text{ 年 (令和元年度 - 平成 23 年度の 8 年間の削減費)} \\ & = 9.5 \text{ 百万円} / \text{年} \end{aligned}$$

(6) 薬品料金の削減

1) 単価

国総研調べより、次亜塩素酸ナトリウム 40.8 円/kg、PAC29.9 円/kgとした。

2) 計算

薬品削減費用

$$\begin{aligned} & = \text{平成 23 年度薬品原単位を用いた場合の薬品料金} - \text{平成 29 年度薬品料金} \\ & = 158 \text{ 百万円} - 96 \text{ 百万円} \\ & = 62 \text{ 百万円} / 6 \text{ 年 (平成 29 年度 - 平成 23 年度の 6 年間の削減費)} \\ & = 10.3 \text{ 百万円} / \text{年} \end{aligned}$$

(7) 削減効果のまとめ

削減効果から、経費回収年は以下のように算出した。

$$\begin{aligned} \text{経費回収年} &= \frac{\text{技術導入費用}}{\text{費用削減効果} - \text{技術維持費用}} \\ &= \frac{\text{①イニシャルコスト}}{(\text{③人件費削減} + \text{④電力費削減} + \text{⑤薬品費削減}) - \text{②ランニングコスト}} \\ &= \frac{80.0}{(7.1 + 9.5 + 10.3) - 2.4} = 3.25 \text{ 年} \end{aligned}$$

なお、人件費のみ（電力量や薬品使用量の削減がない）の場合は、以下の通りとなる。

$$\text{経費回収年} = \frac{\text{技術導入費用}}{\text{費用削減効果} - \text{技術維持費用}} = \frac{\text{①イニシャルコスト}}{\text{③人件費削減} - \text{②ランニングコスト}} = \frac{80.0}{7.1 - 2.4} = 17.0 \text{ 年}$$

第4章 計画・設計

第1節 導入計画

§ 16 計画の手順

本技術の導入計画にあたっては、導入対象の下水処理場の現状および課題等を把握した上で、設計計算や設備計画の検討を行い、その結果に基づいた導入効果の検証を行う。

【解 説】

本手順は、既存施設への導入を前提としている。導入計画にあたっては、対象となる下水処理場の基本事項を検討した後、運転操作方法の対象を設定し必要なデータ量からハードウェア構成を定める。続いて設備計画の検討を実施し、導入効果の検証を行う。

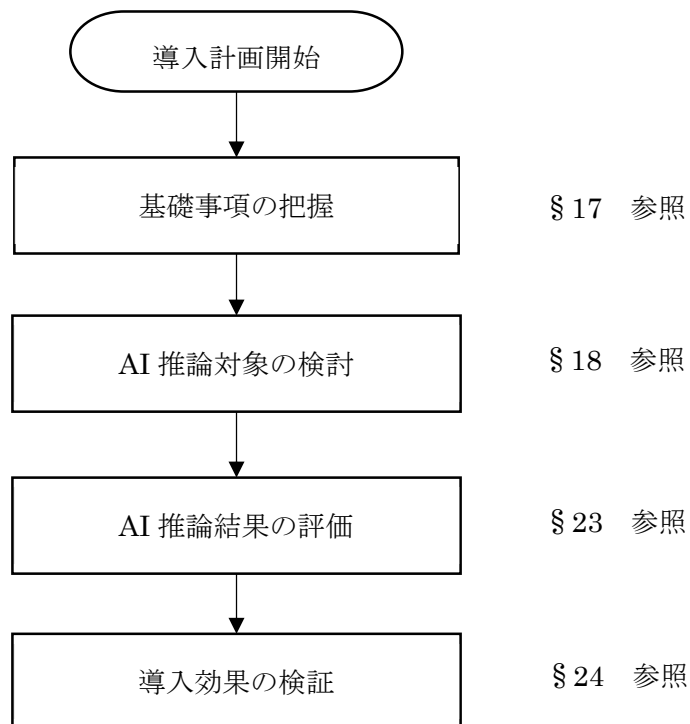


図 4-1 導入手順

§ 17 基本事項の把握

本技術の計画、設計に必要な情報を入手し、基本事項を定める。

(1) 水量（日最大、日平均、日間変動、年間変動）

現在の季節変動を含む流入汚水量と、各下水道計画に基づく将来予測

(2) 実績水質、水温

導入にあたって求められる水質

(3) 水質基準、規制値、目標値

法令に基づく規制値、総量規制値、運転管理目標、その他規制値

(4) 既存施設の仕様

水処理フローや系列数、制御方法、設定項目、その他の仕様

(5) 運用方法の確認

設定変更に対する考え方

【解 説】

(1) 水量（日最大、日平均、日間変動、年間変動）

運転範囲を明確にするため、過去の流入汚水量を把握する。日間変動は本システムの安定運転に必要な情報である。また、流入汚水量の将来予測は、AI 推論の維持管理計画に必要な情報である。

(2) 実績水質、水温

水質の対応範囲を明確にするため、水質制御目標である BOD、SS、T-N、T-P を中心に pH、NH₄-N、PO₄-P、SV 等も把握することが望ましい。生物処理は水温の影響を受けるため、年間の水温変化を把握し、最低水温となる月の運転状況には特に注意する。

(3) 水質基準、規制値、目標値

法令に基づく規制値、総量規制値、運転管理目標、その他規制値等を確認する。特に運転管理目標については、経年的に変更されている場合があるため、留意する。

(4) 既存施設の仕様

水処理フローや系列数、DO や送風量、返送汚泥量等の制御（自動又は手動調整を含む）方法、設定項目及びそれらの変更頻度に加え、既存水処理施設の寸法についても考慮する。省エネを指向する場合、ブロワ台数の運転停止となる条件（送風量等）や送風機制御方法についても把握し、実質的な電力量削減効果が得られるよう留意する。

画像を考慮した運転を実施する場合、カメラの設置箇所（既存設備がある場合には流用することを含め）について把握する。

(5) 運用方法の確認

水質の維持について目標値を達成すればよいか、季節毎に目標が変わるのかを把握する。法令順守は最優先事項として、水質目標達成の優先順位についても把握する。

§ 18 AI 推論対象

AI 推論の対象は、電力量や薬品使用量を削減し処理水質を維持するための熟練技術者のノウハウとして残したい項目を選定する。

【解 説】

本技術を適用する目的は、熟練技術者がノウハウとして有する水質の維持、電力量や薬品使用量の削減に関する運転技術を AI で提示することであるため、その目的を達成する中で重要と思われる項目を選定する。

例えば、AI 推論の対象としては、運転決定に多くの判断材料を必要とする DO 設定や送風量設定が代表的である。水質を維持するためには返送汚泥量や余剰汚泥量、次亜塩素酸ナトリウム注入率を操作する。リン除去については、生物学的リン除去を行うこともあれば凝集剤注入で対応する場合もあるため、必要に応じて選定する。

§ 19 AI 推論に必要な情報

AI 推論に必要な情報としては、通常の水処理運転判断で使用している観測データや過去の設定変更履歴、施設データ、運転目標を標準とする。

【解説】

AI 推論を実施するためには、当該処理場の運用状況を把握する必要がある。具体的には、以下の項目のデータを使用する。なお、対象とする下水処理場の運転判断時に使用しているデータが含まれていればよく、以下に示すデータが全て必要ということではない。既存のデータ及びそれらの取得頻度で安定して運用できていれば、AI 構築のためにデータ収集量や頻度を変更する必要はない。

(1) 水処理の運転判断で使用している観測データ

- ・水量関係：流入水量、処理水量、返送汚泥量、余剰汚泥量 等
- ・空気量関係：送風量
- ・流入水質関係：BOD、SS、pH、T-N、T-P 等
- ・処理水質：BOD、SS、透視度、COD、T-N、T-P、大腸菌群数、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-P 等
- ・その他：反応タンク SV、MLSS、終沈汚泥界面、画像 等
- ・オンラインデータは運転操作の迅速性や測定結果の安定性に寄与するため、ある方がよい。

(2) 過去の設定変更履歴

- ・AI 推論で導出したい項目の操作履歴として、DO 設定、送風量設定、返送汚泥量設定、余剰汚泥量設定、次亜塩素酸ナトリウム注入率設定、PAC 注入率設定、攪拌機運転設定 等
- ・上記以外の設定変更履歴

例えば、BOD を目標とした AI 運転では、空気量や送風量を AI 推論する場合、返送汚泥量や余剰汚泥量、消毒剤注入率も併せて変更する場合があるため、処理場の運転方針に応じて必要な項目を選定する。

(3) 施設データ

- ・HRT や SRT 等を参考にして運転する場合には、池の容量や施設の運用停止等の情報が必要。

(4) 運転目標

- ・法令で定められている BOD や SS 等の他、独自の運転目標を定めている場合には、それらの目標値
- ・AI 推論で設定可能な目標値は、AI が学習した過去の運転実績の範囲を原則とする。
- ・必要空気量や処理水質目標の余裕等から設定値の変更でも水質の維持が可能と見込まれる場合には、それらの値を目標値として設定する。

目標値は経年で変更する場合があるため、学習データ作成時には、特に留意する。

§ 20 データの取り扱い

データの取り扱いについては、次の点について留意する。

- (1) 監視装置からデータを取得する場合には、監視装置内のデータを破損しないこと**
- (2) 各種データが外部に漏れないよう必要な策を講じること**
- (3) AI 推論に適した前処理を行うこと**

【解 説】

AI 推論においては、収集したデータや運用データを大量に扱うことから、次の点に留意する必要がある。

(1) 監視装置からデータを取得する場合には、監視装置内のデータを破損しないこと

AI 推論システムでは、監視装置からデータを連続的に取得することが必須条件ではないが、運用上では監視装置で把握しているプロセスデータを扱うことが多くなると想定される。また、AI 推論システムに投入するためには、熟練技術者のデータの見方に合わせ適切に加工することになる。監視装置内のデータは日報や月報等各種報告資料の元データとなることから、AI 推論装置からデータを適切に取得（コピー、伝送等）し、AI 推論に適した加工は監視装置外で行うことが望ましい。

(2) 各種データが外部に漏れないよう必要な策を講じること

下水処理場で監視するデータは設備構成の詳細を含め安易に公開すべきではない性質である。オンプレミス型で下水処理場外部とのやり取りがない場合を除き、外部から AI 推論システムを監視する場合やクラウド型を採用する場合には、下水処理場外にデータが出ることになる。そのため、関係者以外が閲覧、アクセスできないようなセキュリティ対策を講じるべきである。

(3) AI 推論に適した前処理を行うこと

カメラで撮影したデータ、画像監視装置から取得したデータ、分析結果等のデータは、AI 推論アルゴリズムに応じた前処理を行う。対応判断 AI や運転操作 AI でデータを扱うため、24 時間平均処理、前時間との差分処理、数値データの二値化・三値化・四値化処理等を行っている。また、画像処理 AI に対応するため、画像のトリミング処理を行っている。

§ 21 AI アルゴリズム概説

熟練技術者の運用ノウハウを表現できるよう AI アルゴリズムを選定する。

【解 説】

画像処理 AI、対応判断 AI、運転操作 AI、水質予測 AI で採用したアルゴリズムについて以下に概説する。なお、AI アルゴリズムは日進月歩に進化し、精度が向上することがあることから、新たに提案されたアルゴリズムを用いてもよい。

（１）画像処理 AI

画像処理 AI では、ネットワークカメラで撮影した画像により、反応タンクや最終沈殿池の状態の判定を行う。判定モデルは 2019 年に Google より発表された DeeplabV3+ と呼ばれる深層学習モデルを用いる。判定モデルは 2018 年に Google が発表した、セマンティックセグメンテーションの分野で最も高い精度のアルゴリズムの一つである。DeeplabV3+ では、Atrous 畳み込みと呼ばれる通常の畳み込み処理とは異なった畳み込み処理を行う。セマンティックセグメンテーションは、画像をピクセル単位で分類し、各ピクセルに対してラベルを割り当てる技術であり、物体検出や画像処理などの分野で広く利用されている。DeeplabV3+ は、エンコーダとデコーダ二つの部分から構成される。エンコーダは、学習済みの深層畳み込みニューラルネットワーク（DCNN）を用いて、入力画像を多数の畳み込み層を通過させ、複数の空間的スケールでの特徴表現を組み合わせる。Atrous 畳み込みは、畳み込みを行う際に、フィルタの間隔を変えて処理を行うため、より広範囲の特徴を捉えることができるようになる。また、ASPP（Atrous Spatial Pyramid Pooling）と呼ばれる手法を用いて、異なる解像度での特徴表現を融合させ、より広範囲の特徴を捉えることができる同時に計算量も削減する。デコーダは、畳み込み層による特徴量マップを元に、画像のサイズに合わせてアップサンプリングする。DeeplabV3+ の概念図を図 4-2 に示す。

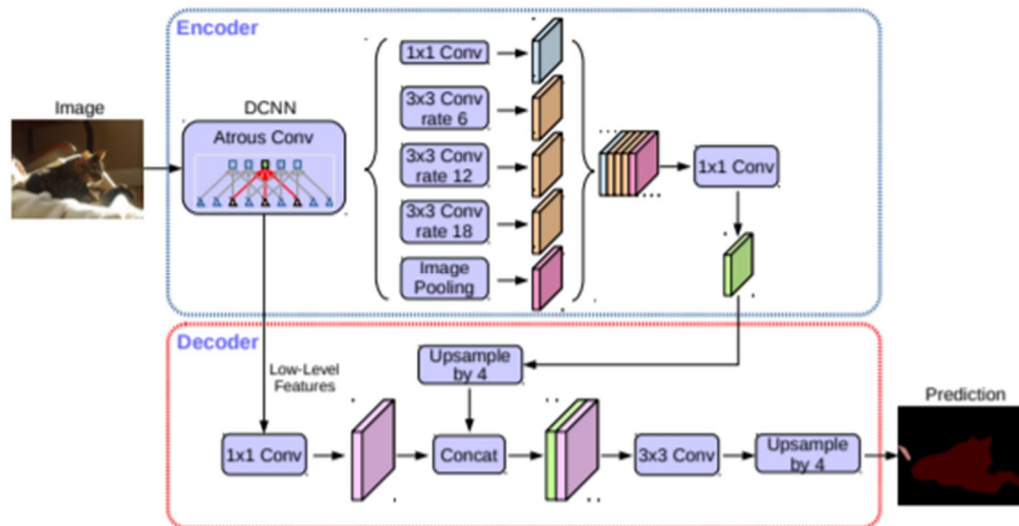


図 4-2 画像処理 AI の概念図

出典：Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image

DeeplabV3+は、セマンティックセグメンテーションの深層学習モデルである。過学習（統計学や機械学習において、訓練データに対して学習されているが、未知データ（テストデータ）に対しては適合できていない状態）を防止および汎化性能（訓練データ以外の未知データ（テストデータ）に対する性能や予測能力）を向上するために、学習データとして異常箇所をラベリングした大量の画像を用意する必要がある。しかし、最終沈殿池の異常発生が極めて稀であるため、学習処理に必要な量の異常画像を確保することは困難である。そこで、異常画像のフロク浮遊およびスカム浮上の異常部分を切り出してアフィン変換（2つの画像における座標の線形変換）を行い、正常時の画像とランダムに組み合わせることで大量な異常画像を生成した。学習データ生成の流れを表す概念図を図 4-3 に示す。このように異常画像を生成することで大量の学習データを確保する同時にデータセットのバランスも改善することができ、高い精度で異常を検出することが可能になる。

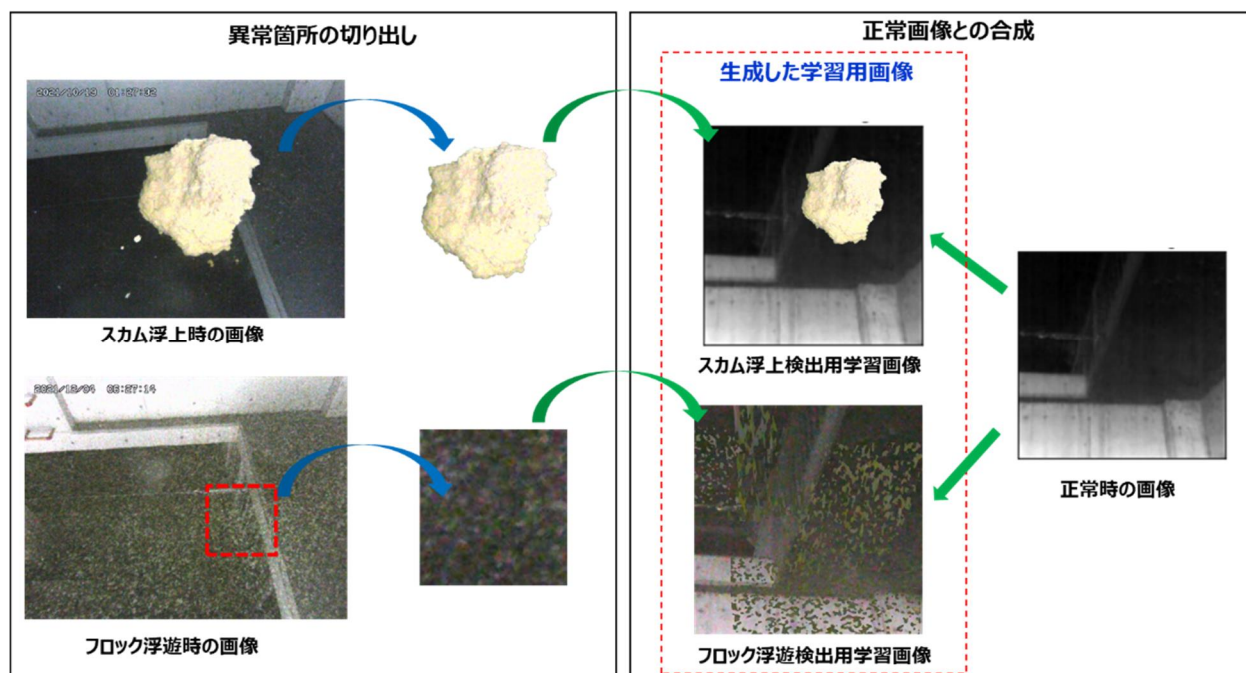


図 4-3 画像処理 AI における学習データ生成の流れ

(2) 対応判断 AI

対応判断 AI では、ベイジアンネットワークにより、状況に合わせた対応判断の導出とその判断根拠の見える化を行う。ベイジアンネットワークは、事象間の因果関係を有向グラフにより表現する確率モデルの 1 つである。

本実証研究では、広島市西部水資源再生センターの「DO・風量の増減」「返送汚泥量の増減」「次亜塩素酸ナトリウム注入率の増減」「返流水 PAC 注入率の増減」の 5 つの対応内容を導出候補とした因果関係モデルを構築した。船橋市高瀬下水処理場では、1～5 系の PAC 注入率を導出対象とした。

ベイジアンネットワークは、操作対応や原因と観測可能な現象（水質や池の状態変化）の関係を有向ネットワークで示したものである。操作対応と観測可能な現象がそれぞれ線でつながれた状態のことをネットワークと表現する。矢印の方向は「操作対応」から「観測可能な現象」へと向かっている。一つの対応を一つのノードに示す。ノードは、「事前確率」と「尤度」というパラメータを持っており、それぞれの内容は以下の通りである。

- ・事前確率 : 「経験上、おそらくこれくらいの確率で発生する」という情報
- ・尤度 : 「実際、観測されたデータから推測すると、これくらいの発生確率である可能性が高そう」という値

観測可能な事象についても、事象 1 つに対して 1 つのノードで表現する。観測可能な事象のノードも事前確率と尤度というパラメータを持つ。尤度は「条件付き確率」であり、原因層が発生した時（又は発生しなかった時）に、観測可能な事象が発生する（又は発生しない）確率という表現になる。

ベイズの定理では、原因が発生した時（A と示す）ことを事象が発生したこと（B と示す）を以下のように関連付ける。

$$B \text{ が起きた時に } A \text{ の起こる確率} = \frac{A \text{ が起きた時に } B \text{ の起こる確率} \times A \text{ の起こる確率}}{B \text{ の起こる確率}}$$

$$= \frac{\text{尤度} \times A \text{ の事前確率}}{B \text{ の事前確率}}$$

「B が起きたとき」は実際には水質がある範囲に収まったとき（水質データを分割する）とし、「A の起こる確率」は目的変数の操作方法とすれば、ある範囲の水質になったときに目的変数をどのように操作したかを、確率で計算することが出来る。

複数の事象が関係する場合も計算方法は同じである。

A の事前確率、B の事前確率はそれぞれのデータの発生頻度から計算することが出来る。尤度も同様である。目的変数と説明変数のつながりが変わらなければ、逐次データを溜めていくことで自動的に計算根拠のデータを更新することができる。

下水処理場における異常原因とその結果観測される事象について、簡易なモデルを図 4-4 に例示した。これは「散気管の目詰まり」という異常が発生すると、「ブロワの回転数」に変化が起きるとともに、「反応タンクの DO」が低下することを示している。また、「ブロワの吐出圧力」という異常が発生すると、「反応槽への送風量」が低下するとともに、やはり「反応タンクの DO」も低下するということを示したものである。ここでは簡易に示すため、5 つのノードの関係を示しているが、実際には、この原因と観測可能な事象が膨大かつ階層をもつものになることが想定される。

「反応タンクの DO が著しく減少した」という現象を観測できた時、このノードに紐付いている複数の条件付き確率表から、可能性のある原因が推測される。取得できた情報がこれだけであれば、単に最も条件付き確率の高いものが原因として高い可能性を持つということになるが、現実には観測できる複数の現象が確認できる。図 4-4 では、条件付き確率で言えば「ブロワの吐出圧力が減少」した原因による DO 減少の方が高い確率であるが、同時にブロワの回転数が増加したという現象も確認できていれば、散気管が目詰まりした原因である確率が高くなる。図 4-4 ではノードの数が少ないので非常に単純に思えるが、ノードが多数かつ階層的なつながりを持ち、かつ観測可能な現象も都度異なる時、その可能性の計算量は膨大に膨れ上がる。これを前記のように予め定められた事前確率と尤度から、最も可能性の高い原因とその確率（事後確率）を導くアルゴリズムがベイジアンネットワークである。

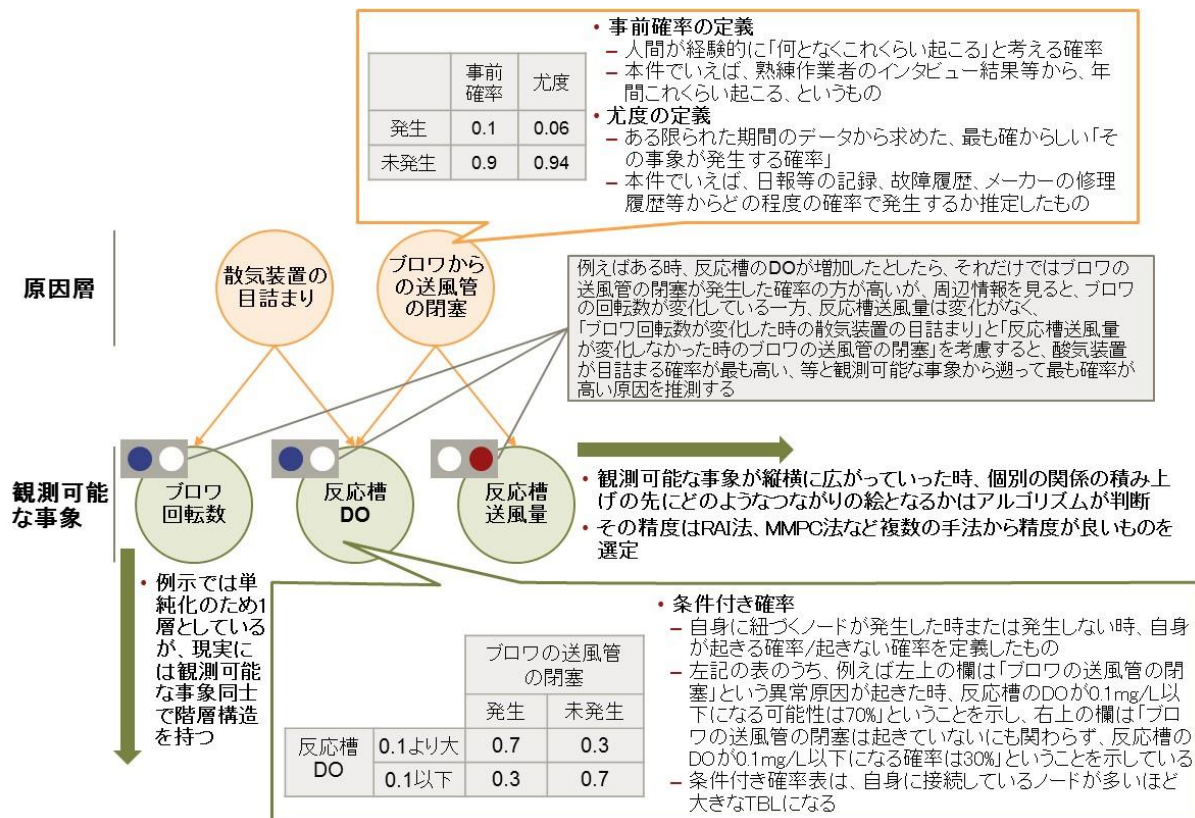


図 4-4 反応タンクに関する機器トラブルと観測可能な事象をベイジアンネットワークで示した例

本技術で用いたベイジアンネットワークで構成される各層の説明を図 4-5 に示す。ベイジアンネットワークは、①対応判断層、②判断根拠層、③観測可能事象層の3層より構成され、下記に示す機能を有している。

- ①対応判断層：判断根拠として想定される各要素の確率を用いて、目的とする操作対象について操作判断を示す層。
- ②判断根拠層：現在の環境から観測可能な事象を用いて操作判断に必要と想定される各根拠の確率推定を行う層。
- ③観測可能事象層：現在の下水処理場の環境や日時などから数値として表現可能な各事象の値を取得する層。判断根拠として使用するモデルの入力値として扱うためにモデルに適した形式に符号化する場合がある。

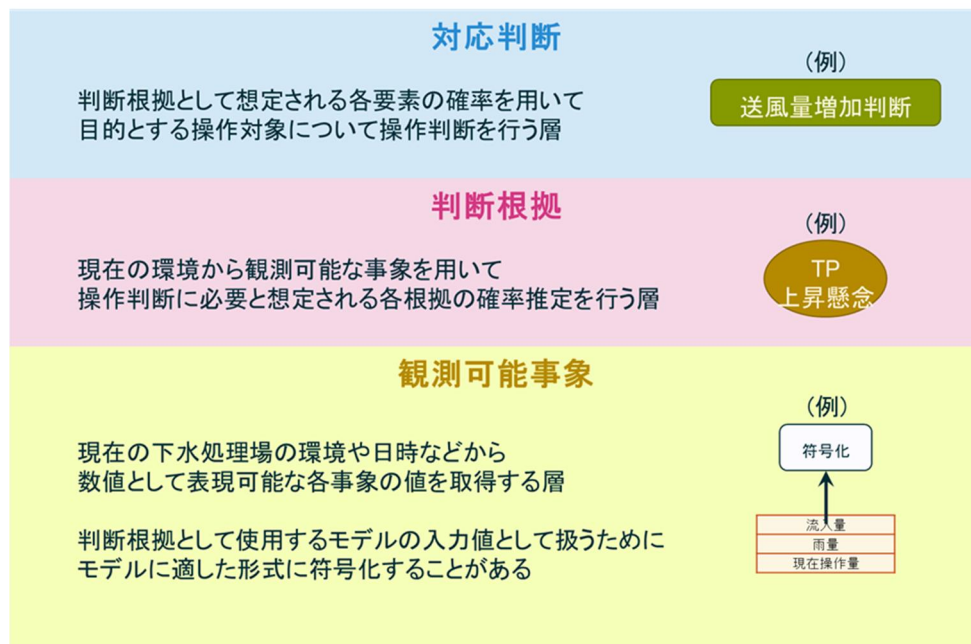


図 4-5 対応判断層、判断根拠層、観測可能事象層の考え方

(3) 運転操作 AI

運転操作 AI には機械学習手法として決定木ベースのアンサンブル手法（集団学習手法）を使用する。

決定木とは、水質等の各入力項目の一定水準（閾値）に対する大小関係の組み合わせにより結果を導く手法である。決定木のイメージを図 4-6 に示す。熟練技術者は運転操作量を変更する場合、水質等の注目すべき特定の項目が一定水準以上もしくは一定水準未満であることを判断根拠としている。したがって、入力した各項目の閾値に対する大小関係の繰り返しにより結論を導出する決定木を運転操作の導出に用いることは、熟練技術者の運転判断の思考経路を再現する上で適した手法であると言える。

またアンサンブル手法とは単純な複数の推論の多数決により結果を導出する手法である。アンサンブル手法のイメージを図 4-7 に示す。熟練技術者と同じように、状況に応じて複数の項目を総合的に判断しながらの結論を導出しようとした場合、1つのルールで表現することは原理的に不可能であり、複数の単純な推論結果の多数決として結論を導出するアンサンブル手法を用いることは合理的である。

決定木ベースの機械学習手法はいくつか提案されているが、中でも 2016 年に Tianqi Chen らにより提案された XGBoost（eXtreme Gradient Boost）は性能がよいことで知られており、データ分析のコンペティションにおいても頻繁に使用される。

XGBoost は、簡単にいうとランダムフォレストとブースティングを組合せたアンサンブル学習手法である。ランダムフォレストは少ない変数で構成した決定木を複数用意し、それらの結果の総和で結論を導出する機械学習手法である。ブースティングとは、推論の精度に合わせて、学習データに対する重み付けを変化させながら分類器の調整を進めていく手法である。

XGBoost の場合、決定木を徐々に増やして行きながら、各決定木に含まれる葉に対する重み係数を誤差が最小になるように更新していく。

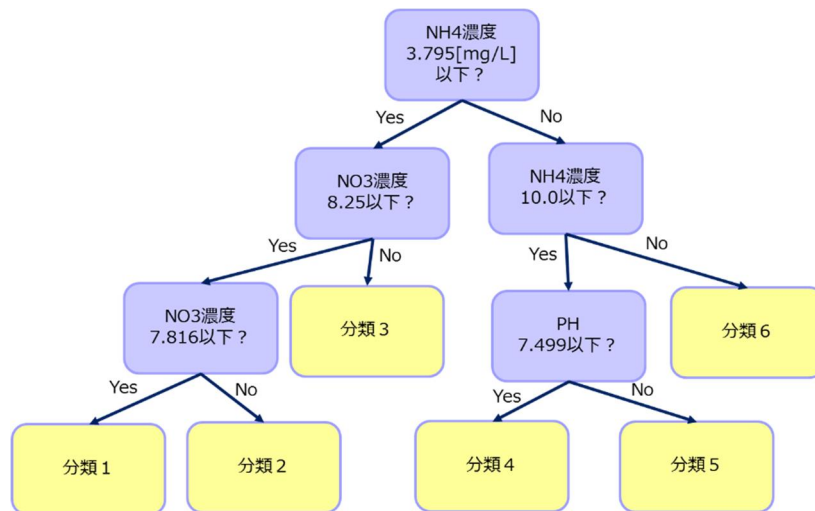


図 4-6 決定木による分類イメージ

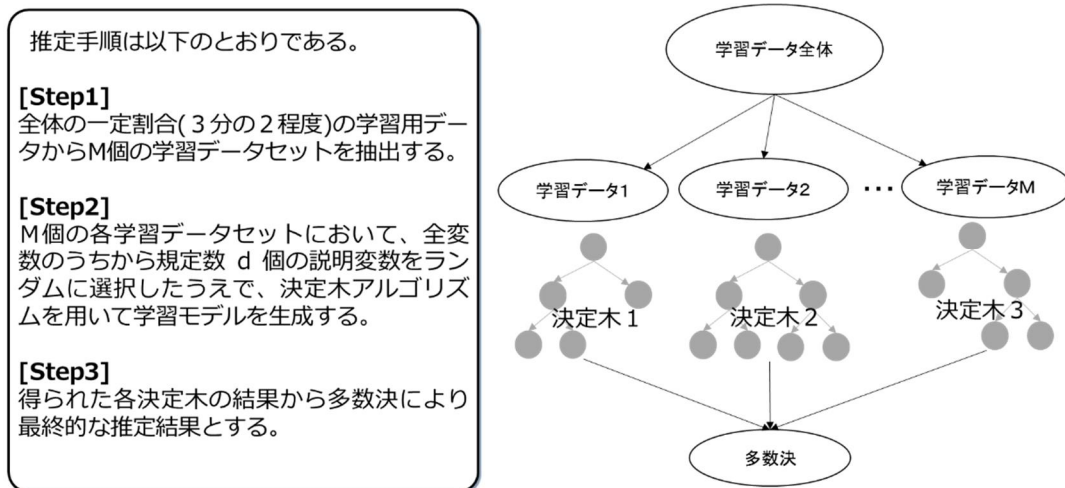


図 4-7 アンサンブル手法のイメージ図

(4) 水質予測 AI

水質予測 AI では、Transformer を使用する。Transformer は、もともとは言語処理分野で提案された手法で、Encoder と Decoder により構成される、いわゆる Encoder-Decoder モデルである。Attention と呼ばれる、予測する上で注視すべき箇所を特徴量化する機構を持つことが大きな特徴である。例えば、Transformer により、日本語から英語に翻訳する場合、

- ・ Encoder によって日本語文自身を Attention により特徴量化
(入力した日本語文自身の Attention という意味で Self-Attention と呼ぶ)
- ・ Decoder 内で英文を Attention で特徴量化(英文の Self-Attention)
- ・ 上記 2 つの日本語文および英文の Self-Attention の関係を、さらに Attention で特徴量化
(入力と予測対象間の Attention ということで Source-Target Attention と呼ぶ)

の手順により特徴量を学習結果として保持しておくことで、予測時に Encoder へ日本語が入力されると Decoder から 1 語ずつ日本語に対応する英単語が出力される。

Attention 以外に、Transformer のもう一つの大きな特徴は、Positional Encoding という機構を持つ点である。リカレントニューラルネットなどの従来の手法では、単語の並び順をネットワーク構造で表現していたが、Transformer では単語の位置情報を特徴量化しネットワーク構造の外に出して扱う。これにより、入力と予測対象の間の単語間の位置関係を柔軟に対応付けすることが可能となる。Attention のイメージと Transformer の概要を図 4-8 に示す。

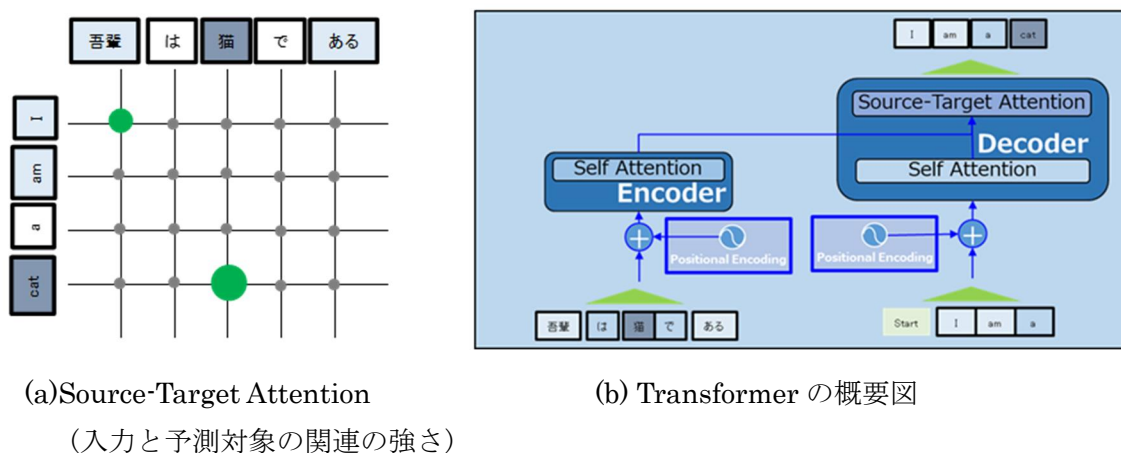


図 4-8 Attention のイメージと Transformer の概要

但し、運転操作量変更前後の水質の挙動の変化を予測結果に明確に反映できるよう、現在値からの相対値への変換し、さらに正規化処理を施してから Transformer モデルに入力する。予測処理の流れを図 4-9 に示す。



図 4-9 水質予測の処理の流れ

§ 22 AI エンジンの学習

AI エンジンの作成に必要なデータを準備し、AI に求める精度を達成するよう、AI エンジンを学習させる。

【解説】

画像処理 AI、対応判断 AI、運転操作 AI、水質予測 AI のそれぞれで学習方法が異なっている。それぞれの AI の学習方法について以下に概説する。

画像やプラント、日報、水質、運用結果等の過去データを準備し、教師データを構成する。教師データは目的変数（推論対象）と説明変数（推論対象との関係を説明する要素）で構成される。説明変数がある状態のときに目的変数がどのような値をとるかを推論するアルゴリズムが機械学習を含む AI と考えてよい。

教師データは、原則として以下のステージで分ける。学習及び運用に関する概念図を図 4-10 に示す。

- ・ 訓練 (training) …… 学習モデルを生成するためのデータ
- ・ 検証 (validation) …… 学習結果を評価するためのデータ
- ・ テスト (testing) …… 上記 2 つのデータで構築した最終的な推定モデルを評価するためのデータ

訓練期間のデータで AI エンジンを学習し、検証を行い、AI エンジンの学習を完了する。学習した AI エンジンをテスト期間のデータを与えて精度を確認する。目標精度を達成できれば、その AI エンジンを実運用に供し、AI 導入後の本格運用を開始する。

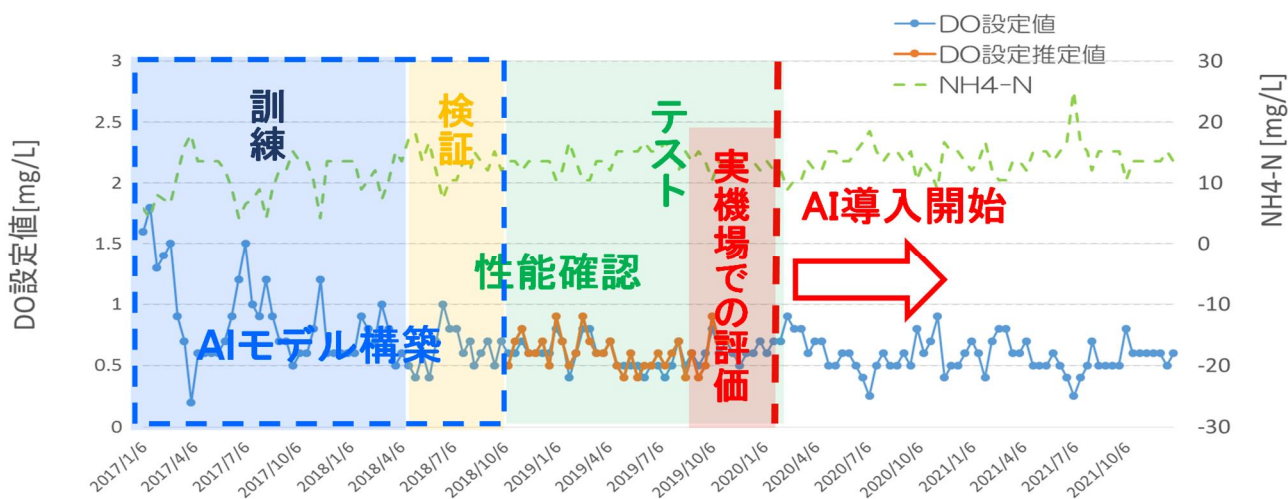


図 4-10 学習及び運用のイメージ

AI の学習時と実行時には異なるプログラムとなることから、実運用で使用する AI 推論装置とは別に学習用のシステムが必要となる。AI の学習を導入事業体側で実施する場合、学習環境の整備が追加が必要となることに留意する。

(1) 画像処理 AI

設置するカメラと同一画角で撮影した画像を教師データとすることが望ましい。

広島市西部水資源再生センターにおける教師データについて、表 4-1、表 4-2 に示す。

表 4-1 広島市西部水資源再生センター東系の画像構成（学習用データセット）

項目		2 系最終沈殿池	3 系最終沈殿池
期間		2022.3.1～2022.3.31	2022.2.1～2022.3.31
数量	正常画像（生データ）	128	90
	異常画像（生データ） （フロック浮遊/スカム浮上）	83	67
	学習用生成画像（加工データ）	850	400

表 4-2 広島市西部水資源再生センター東系の画像構成（評価用データセット）

項目			2 系最終沈殿池	3 系最終沈殿池
期間			2022.11.26～2023.1.25	2022.11.26～2023.1.25
数量	正常画像		913	90
	異常画像	フロック浮遊	326	1048
		スカム浮上	0	37
	合計		1239	1175

画像処理 AI の精度の目標となる真陽性率、偽陽性率は以下のように定義される。

- ・真陽性率（True Positive Rate）…異常を異常と判定
- ・偽陽性率（False Positive Rate）…異常なしを異常と判定

目標精度は真陽性率 90%以上、偽陽性率 10%未満を目安とする。関係式は図 4-11 のようになる。

実画像 \ AI 推定	正常と推定	異常と推定
	正常な実画像	異常な実画像
正常な実画像	A	B
異常な実画像	C	D

$$\text{真陽性率} = \frac{D}{C + D} \geq 0.9$$

$$\text{偽陽性率} = \frac{B}{A + B} < 0.1$$

図 4-11 真陽性率、偽陽性率の考え方

（２）対応判断 AI

プロセスデータや水質分析結果等から運転判断を実施しているため、これらのデータを収集する。

広島市西部水資源再生センターでは、教師データの元として、以下の項目が挙げられる。これらを精査し、処理状況、水質、設備の稼働状況を勘案し最終的に運転判断に必要な項目を選定して教師データとして用いる。

- ・ 水処理運転日報
- ・ 水処理引継簿
- ・ 汚泥処理運転日報
- ・ 汚泥処理引継簿
- ・ 返流水日報
- ・ 運転日報
- ・ 日常試験成績表
- ・ 平常試験成績表
- ・ 通日試験成績表
- ・ 機械設備フローシート
- ・ 電気・計装設備フローシート
- ・ 計装タグリスト
- ・ 監視制御装置トレンドデータ
- ・ 設備概略

船橋市からは以下のデータを提供頂き、精査することで最終的にモデルに組み込む項目を決定した。データ取得期間は、2017 年 4 月から 2023 年 12 月までの期間の内、処理状況、水質、設備の稼働状況から適宜判断した。

- ・ 水質日報
- ・ 帳票日報
- ・ 臨時分析データ
- ・ 機械設備フローシート
- ・ 電気・計装設備フローシート
- ・ 計装タグリスト
- ・ 監視制御装置トレンドデータ

なお、これらの名称は下水処理場毎に異なっていることがあるため、各機場の管理データを確認する。

トレンドデータは監視制御装置から 1 分間隔で取得可能であるが、日常・平常試験の水質データの取得頻度は週に数回の程度である。また、DO 設定などの操作量の変更も通常、数日に 1 回と、トレンドデータと比べて長周期で変更が行われる。したがって、運転員と同等の対応判断を導出するためには、平均化するなどによりトレンドデータの周期もそれに合わせた形に加工する必要がある。また、加工時には異常値（外れ値）を除外しておく必要もある。

一般に、ベイジアンネットワークにより因果関係ネットワークを構築する場合、ネットワーク内に現れる変数は離散化（連続した値を非連続な状態の値（離散値）に変換すること。二つの離散値に変換することを二値化という）して扱うことが多い。データ加工の一例を図 4-12 に示す。対応判断 AI における導

出対象である 5 つの対応内容のうち、「DO・風量の増減」「返送汚泥量の増減」「次亜塩素酸ナトリウム注入量の増減」「返流水 PAC 注入量の増減」の判断根拠となる水質等の説明変数に対しては、データの解析によって得られた閾値に対し観測値が以上か未満によって二値化を行う。「返送汚泥量の増減」「次亜塩素酸ナトリウム注入量の増減」においては、返送汚泥量および次亜塩素酸注入率の現在設定値に対し、増加相当時または減少相当時によって二値化を行う。「経過観察」については、水質変化の周期性を考慮して判断根拠層において現在の日時情報をもとに昼夜（昼：9 時～19 時、夜：20 時～8 時）および曜日（月～日）の複数の説明変数にて二値化を行う。また、AI 推論結果による過度な運転変更の防止を目的に、対応判断による変更操作からの経過時間から確率相当値の直接算出を行う。例として二値化処理の手法を示しているが、説明変数によっては四値化を行うこともある。

省エネルギー化等のため、過去に設定変更を行わず一定運転した実績そのものを学習するのではなく、以下の考えで過去の設定を変更しても問題がないと判断される場合には、その値を目的変数に設定することを検討する。例えば、DO 設定の変更に対する考え方を以下にまとめる。

①必要空気量の算出

「下水道施設設計指針と解説」に基づき、流量、水質、MLSS 等から必要空気量を算出する。送風量実績と必要空気量が最も近くなるパラメータ（S-BOD に対する汚泥転換率、除去 BOD あたりに必要な酸素量等）を評価指標 RMSE/値幅として決定する。

②決定したパラメータを用い、学習対象の年度の必要空気量を算出。

③送風量の余裕分の算出

送風量余裕分（必要空気量と送風量実績との差）、DO 管理値、放流水質の観点から、以下の 4 つの条件に当てはまる期間は送風量を下げられる可能性があるとして判断する。

- ・必要空気量に対し送風量実績が 2 日以上、上回っている
- ・DO の手分析値が DO 目標値を上回っている
- ・放流水 T-N 計の平均値が目標値を 2 日以上、下回っている
- ・処理水、放流水アンモニア性窒素が 1.5 mg/L 未満

④送風量低減可能性の判断

送風量を下げられる可能性があるとして判断された期間では、送風量は算出された必要空気量で運用できると仮定し、送風量実績－必要空気量を集計する。

観測値と閾値の比較により二値化

■ 例: 流入量



個別の観測値から二値化

■ 現在設定値 (返送汚泥量と次垂注入率のそれぞれについて)



現在日時の情報に応じて複数の説明変数群に二値化

■ 昼夜



■ 曜日



個別の観測値から確率相当値を直接計算

■ 送風量変更からの経過時間



図 4-12 データ加工方法

(3) 運転操作 AI

広島市西部水資源再生センターおよび船橋市高瀬下水処理場の運転操作 AI の学習・検証に使用したデータセットの概要を表 4-3、表 4-4 に示す。

運転操作 AI は過去の運転操作の履歴を教師データとし、機械学習手法により運転操作を導出できるよう AI を学習させる。教師データとは、AI を学習するときに目標となる数値のことである。熟練技術者は常に正しい運転をしていたとするなら、この方法で AI が学習した結果を使えば、熟練技術者の運転操作をトレースするよう AI が判断を導出することになる。運転操作履歴を確認したところ、広島市西部水資源再生センターの 2 系返送汚泥量設定や東系次亜注入率設定などの項目は、一日に複数回設定変更することはほとんどない。一方、船橋市高瀬下水処理場の各系 PAC 注入量設定は、一日に複数回周期的に設定変更する傾向があった。また、説明変数となる水質データについても、週 3 回程度の日常試験や平常試験による結果を用いるため、MLSS 等の連続計測データ等の説明変数も日平均処理して学習データとした。現地実証前の性能確認での評価指標としては、運転操作 AI による操作量導出の現地実証前の性能確認期間での評価は以下で定義される RMSE (Root Mean Square Error : 平均二乗誤差平方根) により行う。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2}$$

但し、ここで y_t , $\hat{y}_t$ はそれぞれ実際の操作量、推定操作量である。

目標精度としては、運転操作量の値幅に対して誤差 20% とする。すなわち、以下の数式で表される条件を目標精度とする。

$$\frac{\text{RMSE}}{\frac{\max_{1 \leq t \leq N}(y_t) - \min_{1 \leq t \leq N}(y_t)}{2}} < 0.2$$

但し、ここで $y_t (1 \leq t \leq N)$ は推定対象の操作量である。

運転操作 AI による操作量導出の現地での妥当性評価は、対応判断 AI と連動させて評価することとし、熟練技術者の対応判断と比較し一致率 80% 以上とした。評価は対応判断 AI とまとめて行った。

表 4-3 広島市西部水資源再生センターの対応判断 AI、運転操作 AI の学習・評価に使用したデータセット概要

No	導出項目	学習データ	評価データ
1	2 系 DO 設定	6 ヶ月 [2021/4/9～2021/10/29]	1 ヶ月 [2022/2/17～2022/3/22]
2	3 系 DO 設定	6 ヶ月 [2021/4/9～2021/10/29]	1 ヶ月 [2022/2/17～2022/3/22]
3	2 系返送汚泥量設定	6 ヶ月 [2021/4/9～2021/10/29]	1 ヶ月 [2022/2/17～2022/3/22]
4	3 系返送汚泥量設定	6 ヶ月 [2021/4/9～2021/10/29]	1 ヶ月 [2022/2/17～2022/3/22]
5	東系次亜注入率設定	6 ヶ月 [2021/4/9～2021/10/29]	1 ヶ月 [2022/2/17～2022/3/22]
6	分配槽 PAC 注入量設定	15 ヶ月 [2020/3/20～2021/12/19]	12 ヶ月 [2021/3/16～2022/3/16]
7	再曝気槽 PAC 注入量設定	15 ヶ月 [2020/3/20～2021/12/19]	7 ヶ月 [2021/3/16～2021/10/27]
8	4 系送風量設定	28 ヶ月 [2019/5/1～2021/9/1]	6 ヶ月 [2021/7/15～2022/1/10]
9	5 系送風量設定	28 ヶ月 [2019/5/1～2021/9/1]	6 ヶ月 [2021/7/15～2022/1/10]
10	4 系返送汚泥量設定	28 ヶ月 [2019/5/1～2021/9/1]	4 ヶ月 [2021/7/1～2022/10/31]
11	5 系返送汚泥量設定	28 ヶ月 [2019/5/1～2021/9/1]	4 ヶ月 [2021/7/1～2022/10/31]
12	西系次亜注入率設定	24 ヶ月 [2019/5/1～2021/5/1]	8 ヶ月 [2021/5/7～2022/12/31]

表 4-4 船橋市高瀬下水処理場の対応判断 AI、運転操作 AI の学習・評価に使用したデータセット概要

No	導出項目	学習データ	評価データ
1	1 系 PAC 注入量設定	3 ヶ月 [2023/1/1～2023/3/31]	2 ヶ月 [2023/4/1～2023/5/31]
2	2 系 PAC 注入量設定	3 ヶ月 [2023/1/1～2023/3/31]	2 ヶ月 [2023/4/1～2023/5/31]
3	3 系 PAC 注入量設定	3 ヶ月 [2023/1/1～2023/3/31]	2 ヶ月 [2023/4/1～2023/5/31]
4	4 系 PAC 注入量設定	3 ヶ月 [2023/1/1～2023/3/31]	2 ヶ月 [2023/4/1～2023/5/31]
5	5 系 PAC 注入量設定	3 ヶ月 [2023/1/1～2023/3/31]	2 ヶ月 [2023/4/1～2023/5/31]

A 処理場においては、次亜塩注入比率設定値を目的変数（予測対象）とした AI 構築を検討した。次亜塩注入比率設定値の変更の要否について、減少・維持・増加の 3 値に分けて出力する。モデルは上げ変化点・下げ変化点のみで学習させた。予測出力は 1 回/時間とした。モデル構築における学習期間と、評価に用いた期間を表 4-5 に示す。

表 4-5 A 処理場対応判断 AI、運転操作 AI の学習・評価に使用したデータセット概要

No	導出項目	学習データ	評価データ
1	次亜塩注入比率設定	22 ヶ月 [2020/6/27～2021/2/28、 2021/5/1～2022/7/1]	10 ヶ月 [2022/7/1～2023/5/19]

B 処理場では反応タンク曝気装置の運転が pH を基準に行われているが、その目標 pH は熟練技術者が経験に基づいて設定している。この pH の値を AI 推論することで、実際の曝気装置運転を再現することが可能であると考え。反応タンク曝気装置の運転操作 AI では、曝気装置を ON にする場合・OFF にする場合の判断基準となる反応タンク pH の値を入力データから推定する「操作判断時 pH 推論」を行い、pH のオンライントレンド値がその値に達したとき運転判断を行う。モデルの検証に使用した学習データおよび評価データを表 4-6 に示す。

表 4-6 pH 閾値推論のデータセット

導出項目	学習データ	評価データ
1/2 系 ON 時 pH 閾値	推論時が午前（3～14 時）の場合 3～14 時の 1 系 ON 判断時データ 推論時が午後（15～翌 2 時）の場合 15～翌 2 時の 1 系 ON 判断時データ [2020 年から 2022 年の 11、12 月]	11 ヶ月 [2021/7/1 – 2022/5/31]
3/4 系 ON 時 pH 閾値	3 系 ON 判断時データ [2020 年から 2022 年の 10～12 月]	
1/2 系 OFF 時 pH 閾値	1 系 OFF 判断時データ [2020 年から 2022 年の 11、12 月]	
3/4 系 OFF 時 pH 閾値	3 系 OFF 判断時データ [2020 年から 2022 年の 10～12 月]	

（４）水質予測 AI

運転方針を決定する上で重要な項目を目的変数に設定する。広島市西部水資源再生センターにおいて重要となるのは、以下の３つの水質である。

- ・ T-N [放流水]
- ・ T-P [放流水]
- ・ BOD[放流水]

但し、ここで BOD については採水してから 5 日後にしか結果が得られないため、運転判断時に参考にできるのは最新のものでも 5 日前の数値となる。また、T-N、T-P が監視装置よりリアルタイムに取得可能である一方で、BOD が得られるのは週に数回の採水による手分析値のみである。このことから、BOD の予測については、BOD の手分析値を直接予測対象として予測モデルを構築することはせず、まずは、BOD の挙動に大きな影響を与えかつ監視装置よりリアルタイムに取得可能である pH を対象に予測を行い、導出した pH 予測値に基づいて BOD 値を導出するという 2 段階の処理により BOD の予測値を導出する。

広島市西部水資源再生センターにおける T-N[放流水]、T-P[放流水]、pH[東系処理水]の予測について、入力項目をそれぞれ表 4-7、表 4-8、表 4-9 に示す。入力項目は監視装置より取得したトレンドデータであり、直近 48 時間分を入力とした。入力項目として使用する流入水量については、T-N[放流水]予測および T-P[放流水]予測については東系と西系の流入水量の合計値を使用するが、pH[東系処理水]予測の入力項目として使用する流入水量については、pH 計測器の実際の設置場所が東系終沈であることから、東系への流入水量のみを使用した。

表 4-7 T-N(放流水)予測の入力項目

No	項目
1	T-N[放流水]監視トレンド（直近 48 時間分）
2	T-N 変化量（3 時間前との差分）（直近 48 時間分）
3	流入水量監視トレンド（東系+西系）（直近 48 時間分）

表 4-8 T-P(放流水)予測の入力項目

No	項目
1	T-P[放流水]監視トレンド（直近 48 時間分）
2	T-P 変化量（3 時間前との差分）（直近 48 時間分）
3	流入水量監視トレンド（東系+西系）（直近 48 時間分）

表 4-9 pH(東系処理水)予測の入力項目

No	項目
1	pH[放流水]監視トレンド（直近 48 時間分）
2	pH 変化量（3 時間前との差分）（直近 48 時間分）
3	流入水量監視トレンド（東系）（直近 48 時間分）

水質予測に使用した検証データの概要を表 4-10 に示す。学習モデルは、操作量変更有無とその後の水質の挙動変化の違いを明確に表現するため、硝化促進時、硝化抑制時、現状維持時の 3 つに分けて生成した。また、評価についても同様に 3 つの場面に分けて行った。

表 4-10 広島市西部水資源再生センター 水質予測検証用データセット

項目	期間	数量			
		硝化促進	硝化抑制	現状維持	合計
学習データ	2017.1.11 ～2021.10.29	147	152	1490	1789
評価データ	2022.1.16 ～ 2023.1.22	39	31	277	347

評価指標は、実測値と予測値の間の RMSE が、各水質の変動幅に対してどの程度の割合かにより行った。すなわち、

$$\text{評価指標} = 100 \times (1 - \text{RMSE} \div \text{値幅}) [\%]$$

目標精度としては、上記評価指標 $\geq 80\%$ （誤差 $\leq 20\%$ ）と設定した。

§ 23 AI 推論結果の評価

学習した AI の精度を **§ 22 AI エンジンの学習**に従い評価し、実運転の適否について判断する。

【解 説】

画像処理 AI、対応判断 AI、運転操作 AI、水質予測 AI のそれぞれを学習した後、**§ 22 AI エンジンの学習**に従い評価し、実運転の適否について判断する。

目標となる精度が達成できれば、それぞれの AI を実運転に適用してよい。一方で、各 AI が目標となる精度を達成できない場合、以下の対策を講じる。

- 1) それぞれのアルゴリズムに応じたパラメータを調整する。
- 2) 教師データを見直す。対応判断 AI においては、二値化の処理を三値化に変更する、閾値を変更する等の対策がある。
- 3) 教師データの背景となる運用情報などを再確認する。
- 4) 目標を見直す。

§ 24 導入効果の検証

AI 技術に関する結果を評価実施後、導入検討段階に行った概略効果（事業性）に対し、想定通りの導入効果が得られるかどうかの検証を実施する。

【解 説】

導入検討段階では、設定した基準年度と評価年度を設定し、AI 推論の実現有無に依らず、**§ 14 導入効果の検討**において、概略の導入効果を算出した。

ここでは、**§ 23 AI 推論結果の評価**で得られたより精度の高い条件に基づいて導入効果を再検討する。本技術の導入における建設費、維持管理費を算出し、導入検討段階で期待していた効果が得られるか検証する。

第2節 設備設計

§ 25 設備設計の考え方

本設備設計にあたっては、AI 推論で導出したい操作項目や数、及びそれらの推定に必要なデータが収納されている装置又は資料から、データの取得から AI 推論した結果表示までできるだけ短時間、かつ少ない機器構成で表示できるよう構成する。

【解 説】

設備の設計時に考慮すべき事項は以下の通りである。

(1) AI 推論システムを現地に設置（オンプレミス型）する場合

既設監視設備の装置構成やデータ管理状況を考慮するとともに、監視設備近傍に AI 推論システムを設置する場合には、AI 推論を実施したい内容や項目数を元に、次の項目を考慮して AI 推論システムを構成する。

①監視装置データの伝送

既設の監視制御システムからリアルタイムにデータを伝送する場合、監視装置側からデータ収集装置側に一定周期でデータを直接伝送する。

なお、直接の伝送が困難な場合、必要に応じて監視装置からデータ収集装置の経路間にデータ変換装置を導入し、データ収集装置からデータ変換装置にデータ取得を可能とする。

②カメラ画像データの伝送

カメラと AI 推論システムとの伝送距離が離れている場合、ケーブル工事費用や通信費等を考慮し、有線での伝送又は無線での伝送を選定する。無線での伝送にあたっては、通信回線速度やセキュリティの確保に留意する。

③データ収集装置の構成

データの保存項目数や保存期間を考慮し、データ記録容量を選定する。運用開始後に AI を再学習する場合を考慮し、最低3年程度のデータを保存できることが望ましい。

④AI 推論装置の構成

AI 推論項目数や計算負荷の大きい画像処理 AI の有無、AI 推論頻度から、AI 推論装置の数を選定する。AI 推論装置は通常1台程度であるが、画像処理 AI の数が増え、AI 推論項目数が増える場合、2台程度に増やすことが望ましい。

⑤運転ガイダンス装置の構成

AI 推論装置の負荷が高い場合、ガイダンス装置を 1 台設置することが望ましい。一方で、AI 推論装置の負荷が低い場合には、AI 推論装置にガイダンス機能を統合することを考慮する。

⑥装置類の設置

監視室の運転員が AI 推論の結果を確認しやすいよう、通常の監視操作を行う画面のそばに設置した方がよい。また、各装置が瞬停等でシャットダウンしないよう、UPS（無停電電源装置）を経由して給電することが望ましい。通常は、既設の監視制御システム等と UPS を共用することになるため、事前の容量計算を行い、通常の監視業務の妨げにならないよう配慮する必要がある。

監視装置のデータを活用するには、データ収集装置と情報系 LAN で接続することが望ましい。AI 推論には多くのデータが必要であること、1 時間の頻度で 24 時間推論を繰り返すことから、データ取得のプロセスは極力自動化することが望ましい。

（２）クラウド上のデータ収集機能や AI 推論機能を構成（クラウド型）する場合

クラウド上へのデータをアップロード可能な通信環境を準備するとともに、クラウド上でのデータ加工や AI 推論、ガイダンス表示を可能とする。

§ 26 システム構成

本技術は、オンプレミス型においては、AI 推論装置を核とし、データを収集するデータ収集装置、画像を撮影し加工するカメラシステム、AI 推論結果を表示する運転ガイダンス装置で構成され、処理場内の配線で完結することが可能である。

クラウド型においてもオンプレミス型と同じ機能を有するが、AI 推論機能やクラウドや運転ガイダンス機能がクラウド上に搭載されるため、VPN 接続を前提とした Web 回線経由の構築が別途必要となる、

【解 説】

§ 6 技術の構成と機能で技術の構成として記したが、ハードウェア一覧として改めて記す。

1) ハードウェア要素技術 1 : カメラシステム

沈殿池等に設置したカメラ画像を伝送し、AI 推論に必要な形式に加工するためのシステムである。

2) ハードウェア要素技術 2 : データ収集装置

沈殿池等に設置したカメラ画像、監視装置で収集したデータ、日報、水質分析結果を取り込み、AI 推論に必要な情報として加工する装置である。

3) ハードウェア要素技術 3 : AI 推論装置

画像処理 AI、対応判断 AI、運転操作 AI、水質予測 AI を実行するための装置である。

4) ハードウェア要素技術 4 : 運転ガイダンス装置

AI 推論結果を表示するための装置である。

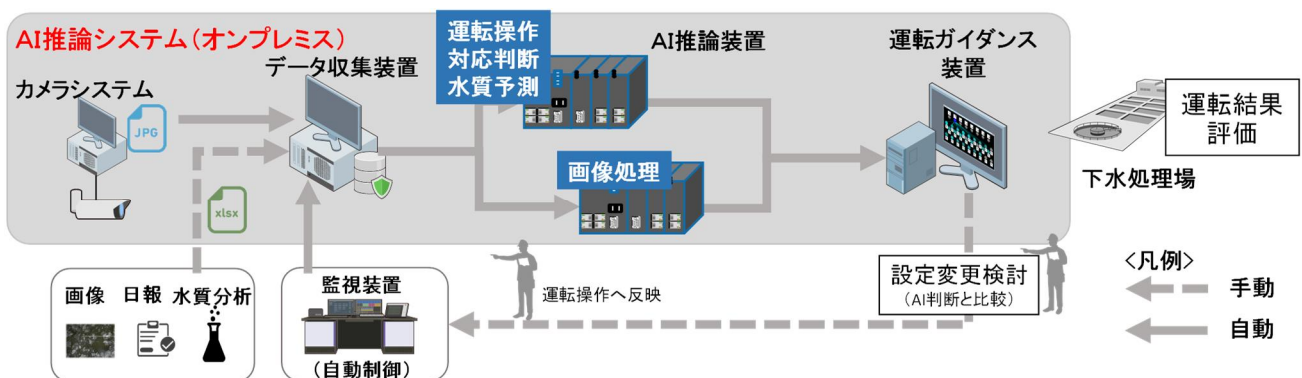


図 4-13 本技術「AI 推論システム」(オンプレミス型) の構成

クラウド型においては、**3) ハードウェア要素技術 3 : AI 推論装置**や**4) ハードウェア要素技術 4 : 運転ガイダンス装置**がクラウド上に搭載されるとともに、**2) ハードウェア要素技術 2 : データ収集装置**のデータ保存機能もクラウド上で行うこととなる。そのため、クラウド型では必要となるハードウェアが減少し、導入コストが安価となる。一方で、通信費用やクラウドサービス料が別途必要となる。

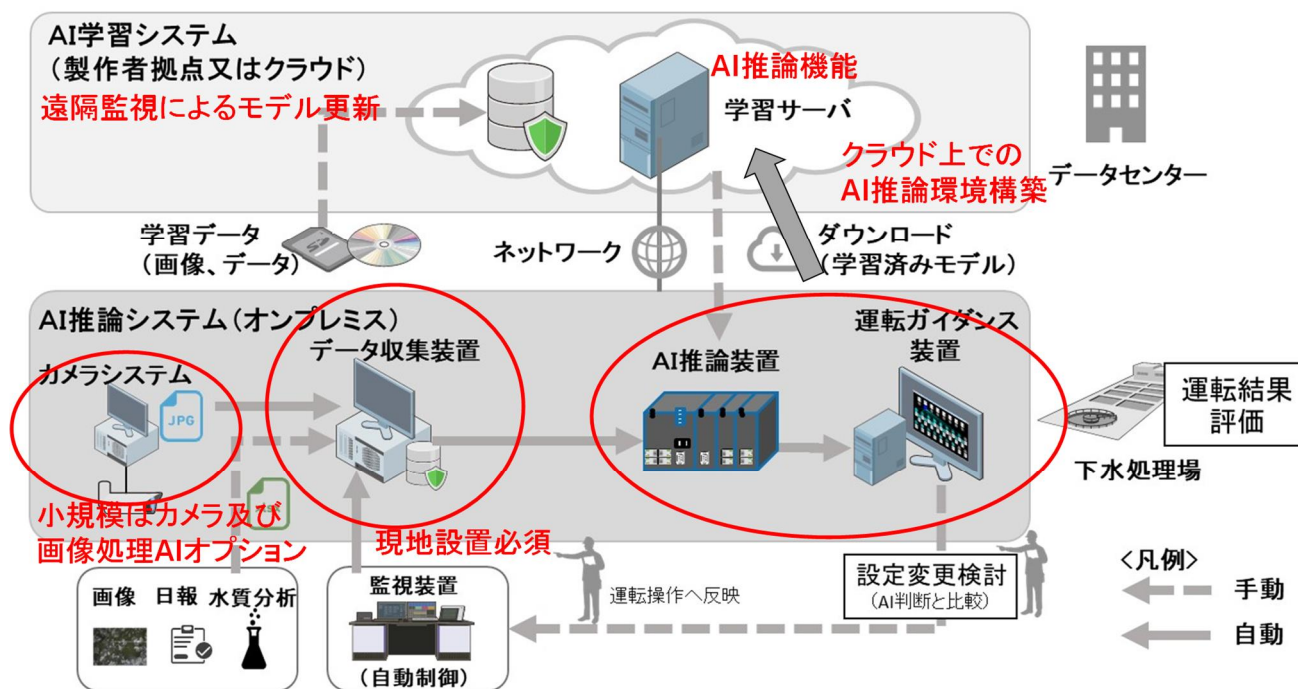


図 4-14 本技術「AI 推論システム」(クラウド型)の構成

§ 27 AI 推論装置

AI 推論装置は、データ収集装置で作成したデータから AI 推論を実行し、AI 推論結果を運転ガイダンス装置で表示するための機能を有する。これらの機能を実現するための演算装置、記録装置、OS、AI 実行環境ソフトウェア等で構成される。

【解 説】

水処理に関する運転判断は逐次行いが、判断の周期は雨水や揚水ポンプの運転判断を除きそれほど短くはない。最終沈殿池の状況判断は日に数回、運転判断は毎正時に 1 回程度である。このことから、AI 推論の周期は、画像処理 AI で最短 30 分、その他の AI で最短 1 時間に設定した。画像データの伝送は 100 kB の画像が 10 秒周期で 6 枚送付されるのが最大、最短である。監視データの収集は毎正時、手分析による水質データは日に数回実施する。

（１）演算装置

AI 推論を演算する装置としては、特別高速な CPU を必要としない。メモリは多くのデータを一度に扱うことから、8 GB 以上であることが望ましい。実証実験では、CPU として、Intel Xeon E3-1268L v3 2.3 GHz、メモリとして 16 GB を採用した。

（２）記録装置

AI 演算用のデータを一時保存するための装置であり、必ずしも大容量を必要としない。実証実験では、500 GB 容量のハードディスクをミラーリング形式で採用した。

（３）OS・AI 実行環境ソフトウェア

AI 推論が実行できる環境であれば特に制限はない。AI は Python 言語で開発したソースコードを用いた。実証実験では、AI 用の演算ライブラリが豊富な Linux 系 OS として Red Hat Enterprise Linux 7.3 を採用した。

§ 28 データ収集装置

データ収集装置は、AI 推論に必要なデータを集約し各 AI に入力データを与えると同時に、AI 推論結果を保存する機能を有する。これらの機能を実現するための入力装置、伝送装置、記録装置等で構成される。

【解 説】

データを収集、伝送、記録するためのハードウェアであるため、高いスペックは要求しない。

（１）入力装置

水質分析データを読み込むための DVD ドライブの設置を標準とする。

（２）伝送装置

プロセスデータを取得する場合には、伝送装置としてルータを設置し、監視装置からデータ読み込みに対応する。また、AI 推論装置にデータを送るためにもルータが必要となる。

（３）記録装置

プロセスデータ、水質分析結果、AI 推論結果等を一元的に保存するための装置である。データ保護のため、ハードディスクはミラーリング（二重化）されていることが望ましい。

また、画像や監視、水質等の多量のデータをバックアップするためのハードウェアとして、NAS（Network Attached Storage）を AI 推論システムと同一 LAN 上に接続し、画像や水質、AI 推論結果等のデータを 5 年分保存可能な容量を準備することも推奨する。

画像 1 枚は JPG 形式で約 120 kB、1 回の AI 推論で使用する数値データとして 100 kB を目安とし、ハードディスクや NAS の容量を選定する。

§ 29 運転ガイダンス装置

AI 推論結果の表示にあたっては、熟練技術者のノウハウをできるだけシンプルに表現できるように配慮する。

【解 説】

運転ガイダンス装置は AI 推論結果を表示する装置である。熟練技術者のノウハウ等や設定変更値をわかりやすく表現するよう留意する。

(1) 画像処理 AI

AI 推論結果の表示にあたっては、必要な情報を表示できるようにする。

実施例では、最終沈殿池のスカムやフロックの数や専有面積を AI 推論で導出した例を図 4-15 に示す。

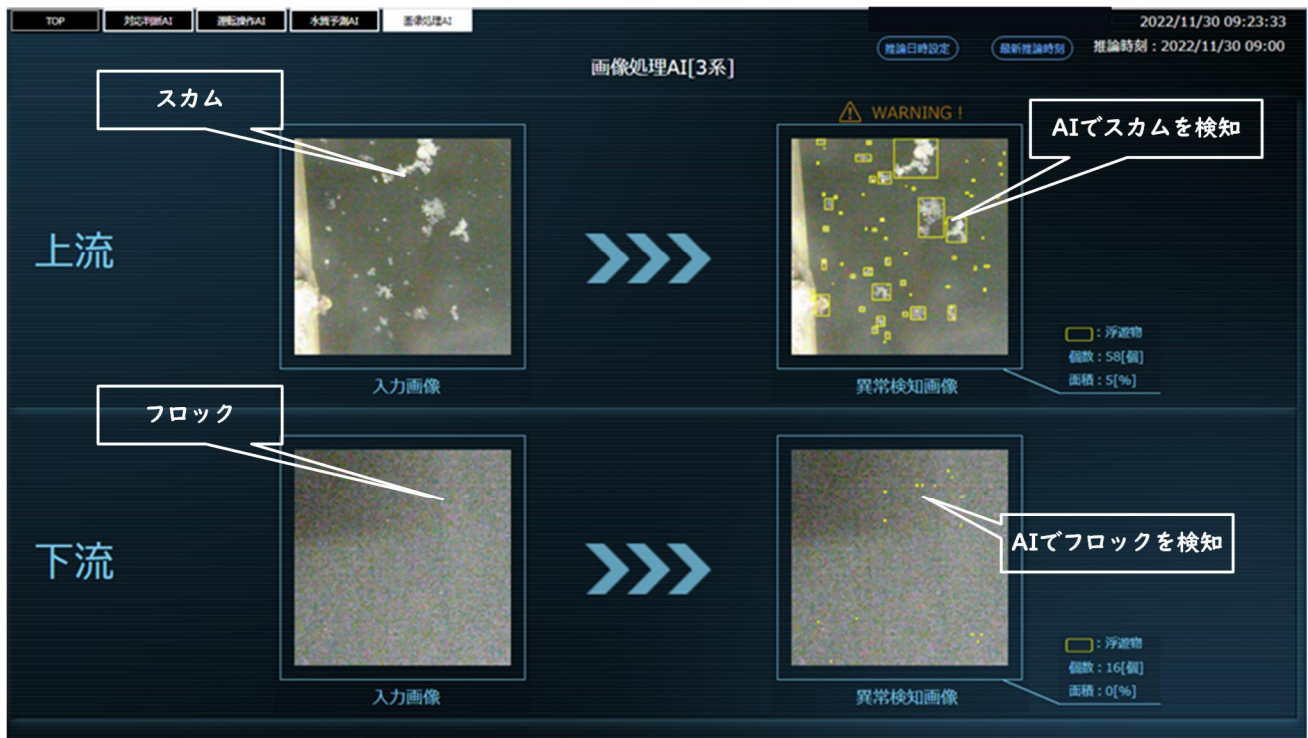


図 4-15 画像処理 AI の画面表示例

(2) 対応判断 AI

熟練技術者のノウハウを表現するため AI 推論結果、結果の導出に至った観測項目、観測項目と AI 推論結果の寄与について表現する。関係が複雑な場合には、観測項目と AI 推論結果を線で結ぶことが望ましい。また、観測項目から要因として整理して判断根拠としてまとめることも有効である。

対応判断 AI としてベイジアンネットワークを採用した場合には、観測値や計算結果、寄与が数値として表現できるため、観測項目からどのような判断根拠で AI 推論するに至ったかが尤度(もってもらしさ)とともに理解する手助けとなる。

観測事象に含まれる水質データについては、どの日時で得られた数値かわかるよう表現することが望ましい。例えば、計測値と併せて日時を画面表示する、マウスクリック若しくはマウスオーバー(マウスポイントを対象となる項目に重ねること)による日時がポップアップ表示する、等の機能を実装する。

一方で、観測項目と AI 推論項目をシンプルな関係で表現した場合、必ずしもこの表現にこだわる必要はない。



図 4-16 ベイジアンネットワークをアルゴリズムとした場合の対応判断 AI の画面表示例

(3) 運転操作 AI

運転操作 AI では、AI 推論結果による運転変更を数値として指示する。そのため、運転変更前（現状）の設定値、AI が推論した設定値（推奨値）を比較表示できることが望ましい。



図 4-17 運転操作 AI による運転操作の画面表示例

(4) 水質予測 AI

水質予測 AI では、現状の運転を継続した場合と、AI 推論結果による運転変更した場合の水質予測をそれぞれ示すことで、運転変更の効果を確認する。そのため、運転変更前（現状）の設定値、AI が推論した設定値（推奨値）による水質予測結果を比較表示できることが望ましい。

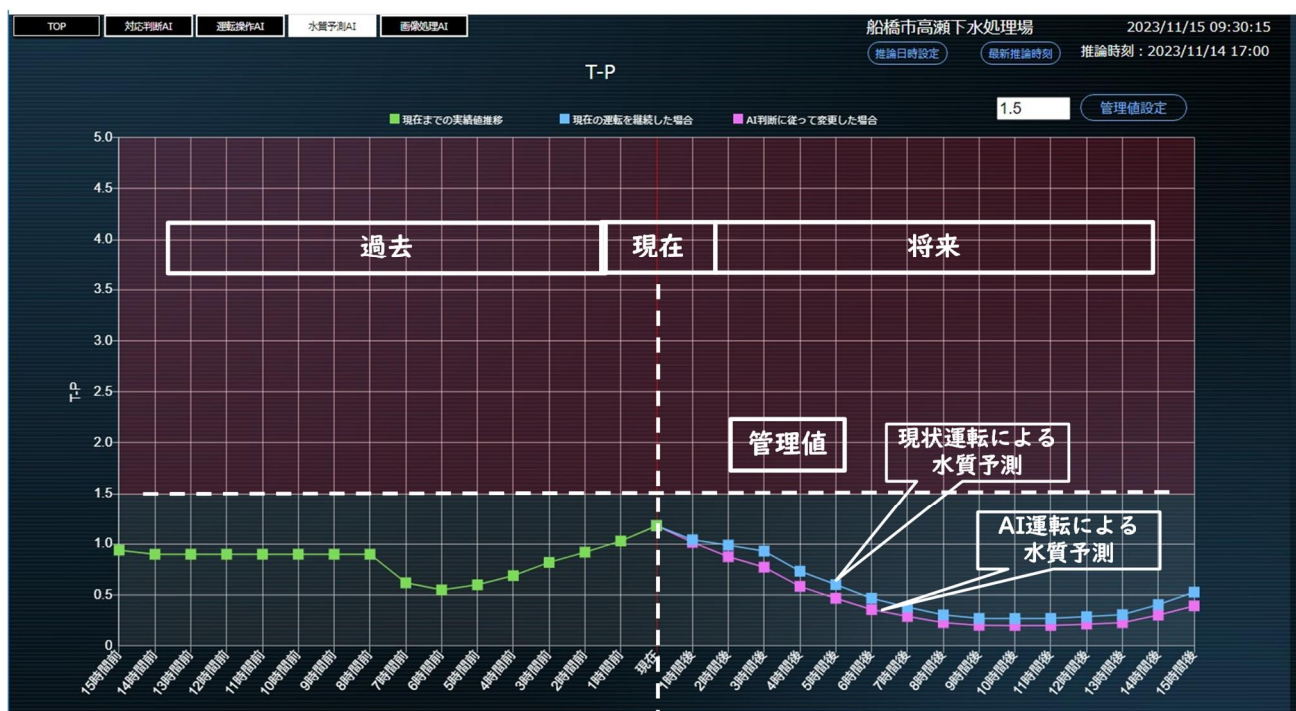


図 4-18 水質予測 AI の出力例

(5) ハードウェア

AI 推論結果を表示するためのハードウェアであるため、高いスペックは要求しない。対応判断 AI や運転操作 AI を同時に表示させるには、複数画面を表示できることが望ましい。

§ 30 カメラシステム

カメラシステムは、画像を撮影し、その画像を伝送し、画像処理 AI で異常診断するためのデータを準備するための装置である。以下の機器及び機能で構成される。

- (1) ネットワークカメラ
- (2) 照明
- (3) 制御機能
- (4) 画像データ保存機能
- (5) データトリミング機能

【解 説】

カメラシステムは、画像を撮影し、その画像を伝送し、画像処理 AI で異常診断するためのデータを準備するための装置である。

(1) ネットワークカメラ

ネットワークカメラは 100 万画素程度の静止画を撮影できる機種を選定する。下水処理場は屋内であっても湿気があるため、屋外型を選定する。定期的な撮影および情報取得が可能なよう、ネットワーク機能を有し FTP 等で遠隔のカメラシステムに画像を自動伝送できることが望ましい。

スカムやフロックを撮影するためには、池の水面にある程度近づけた方がよい。池上から支柱等でカメラを池の水面に近づける。ただしカメラの汚れや蜘蛛の巣を取り除く清掃を行う必要があるため、支柱はカメラを引き上げやすい構造とすることが望ましい。

カメラには LAN ケーブルを取り付けることができる。PoE 給電が可能なカメラを採用すれば、配線を減らすことが可能である。また、遠隔でカメラ設定の変更、撮影画像の伝送を LAN ケーブル経由で行うことができる。

カメラ設置場所と AI 推論システムが遠隔地である場合、有線方式を採用する場合には、LAN ケーブルと光ファイバーを接続するメディアコンバータが必要となる。無線方式を採用する場合には、VPN 接続としデータが不正に外部からアクセスされないよう留意する。

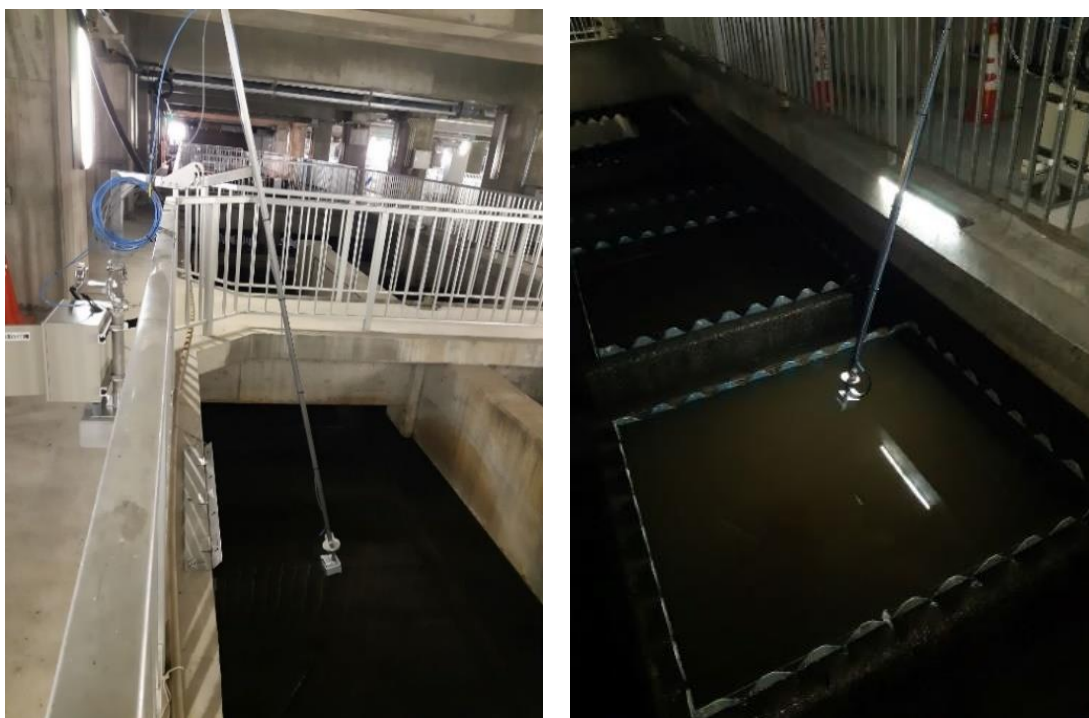


図 4-19 ネットワークカメラ（左）及び照明（右）の設置例

実証では、表 4-11 に示すネットワークカメラ及び光源を使用した。

表 4-11 ネットワークカメラ及び光源の仕様

機器	仕様	サイズ (mm)
ネットワークカメラ	機種：Panasonic BB-SW175A 撮影頻度：0.1-30 fps（設定 0.1 fps） 画素数：1280×960 dot 撮影画像：JPEG 圧縮 電源：AC アダプタ又は PoE 給電 記録方式：SD カード保存、LAN ケーブル経由の FTP 伝送等 消費電力：5 W	110×110×高さ 235
光源 【テープ型 LED】	型式：SunnyNight 5M ホワイト SMD5050 長さ（1 か所当たり）：1.6 m 消費電力：48W（AC アダプタ給電）	—

（２）照明

池面に十分な明るさを与える照明を準備する。実証では、50 W 程度のテープ型 LED 照明を池の水面から 1 m 程度の距離に設置し、テープ長として 1.6 m 程度を要した。照明光を水面に直射した場合、光散乱でフロックやスカムが見えにくくなるため、照明の当て方について注意する。照明は常時点灯する必要はなく、カメラシステム等から点灯及び消灯をタイマー等で自動的に指示することが望ましい。

(3) 制御機能

カメラや照明を制御する機能を有する。通常の Windows PC 等でよい。

(4) 画像データ保存機能

撮影した画像を保存する。データ保護のため、ハードディスクはミラーリング（二重化）されていることが望ましい。

(5) データトリミング機能

画像処理 AI により異常を診断するため、撮影した元画像を必要な大きさにトリミング（切り出す）する機能である。

§ 31 リモートアクセス

AI 推論システムの稼働状況や AI 推論結果の確認のため、遠隔地からの監視が有効である。

【解 説】

リモートアクセス機能を導入することで、AI 推論システムの稼働状況や AI 推論結果の確認、遠隔地からのリモートメンテナンスや AI エンジンの更新等の機能を付加することができる。そのため、オンプレミス型の装置であれば、それらに VPN 接続が可能なルータを設置することが有効である。

第5章 維持管理

第1節 システム全体としての管理

§ 32 システム全体としての管理の要点

本技術は、確実な計測情報を AI 推論システムに与え適切な設定値をガイダンスすることで、水質の安定化が図られ、電力量や薬品使用量の削減効果を得ることができる。その前提としては、既存の設備が適切に管理されていることは勿論のこと、各設備が適切に連動して機能しているか否かの視点で管理することが必要である。

第2節 運転管理

§ 33 立ち上げ

本技術の立ち上げにおいては、必要なデータが正しく取得できていること、AI 推論結果が概ね妥当であることを確認する。

【解 説】

本技術は、熟練技術者の適切な運転管理を模擬してガイダンスを行うシステムである。そのため、データ収集装置が適切なデータを取得し、AI 推論に使用されていること、**§ 22 AI エンジンの学習**の結果得られた AI 推論結果が概ね妥当であることを確認する。

画像データの取得については、目視点検によるスカムやフロックの有無が写真と整合していること、特に夜間で画像処理に必要な照度が確保されているかを確認する。

監視装置からのデータの取得では、データ収集装置が設定通りのデータを取得しているか、平均処理や二値化処理等が適切に処理されているか、欠落していないか等を運転ガイダンス装置で表示される画面等を通じて確認する。

AI 推論結果については、データが適切に取得されていることを前提に、画像以上や運転操作の指示が過去の運転と比較して異常な値を示していないことを確認する。

§ 34 運転管理

本技術の処理性能を維持するために、以下に示す項目について実施する必要がある。

- ①プロセス用センサーの維持管理
- ②画像、プロセス、水質データの更新
- ③カメラの清掃、点検
- ④AI 導入前から存在する既設設備の確認
- ⑤データ収集装置内のデータ空き容量の確認

【解 説】

①プロセス用センサーの維持管理

本技術では特段プロセス用センサーを設置する必要はなく、流量計や DO 計等既設のプロセスセンサーを利用することとなる。一方で既設のプロセスセンサーが適切に調整できていない場合、不正確なプロセス情報を元にした運転結果を AI が指示することとなる。そのため、AI 推論に利用するプロセス用センサーについては、既設の維持管理要領書やメーカーの取扱説明書に従い、適切に維持管理する。

②画像、プロセス、水質データの更新

§ 33 立ち上げで示したようにデータが適切に取得できていることを確認する。

③カメラの清掃、点検

最終沈殿池にカメラを設置した場合、蜘蛛の巣等で適切な画像を得られなくなることがある、そのため、週 1 回から 2 週間に 1 回程度の頻度でカメラ本体を中心に清掃する。また、照明が適切に点灯することも確認する。

④AI 導入前から存在する既設設備の確認

下水処理施設内の既設設備については、AI 導入前後で点検方法や頻度は変わらないことから、これら設備について従来通りの維持管理を実施する。

⑤データ収集装置内のデータ空き容量の確認

本技術の稼働が長期化するに従い、データ保存容量が大きくなる。本技術の導入時には保存年度を考慮した記録容量を設定するが、長期間の運用に従い、古い過去データが記録媒体の容量を圧迫することになる。これらのデータを DVD-R や増設した HDD 等の別媒体に移動することで、データ収集装置や AI 推論システムが新たに生成するデータ作成を妨げないよう留意する。

§ 35 水質管理

AI 推論導入後においても、AI 推論導入前と同様に水質をモニタリングし、規制値の順守や目標水質の達成状況を確認する。

【解 説】

AI 導入前後で下水処理を行う意義は変わらないため、AI 推論導入後も水質管理を継続する。

水質管理の結果は、AI 推論で使用するとともに、処理水質の良否判定にも使用する。

各処理場で定められた水質目標の達成については、その達成だけでなく、大きく水質が改善したかどうか、**§ 36 電力量管理**、**§ 37 薬品使用量管理**で調査する電力量や薬品量を AI 導入前と比較して増加したか否かを含めて確認する必要がある。

また、長期的には流入水質が変化することも予想され、場合によっては、過去の運転ノウハウが通用しなくなる恐れも生じることから、処理水質の動向により AI 推論エンジンの再学習にも適用する。

§ 36 電力量管理

AI 推論導入後においても、AI 推論導入前と同様に電力量をモニタリングし、状況を確認する。

【解 説】

AI 導入前後で下水処理を行う意義は変わらないため、AI 推論導入後も電力量のモニタリングを継続する。本技術で処理水質が維持できたとしても、AI 導入後に電力量が経年的に増加したと認められた場合、流入水量や水質を過去データと比較するとともに、水質が AI 導入前と比較して更に改善されたか否かも調査する。

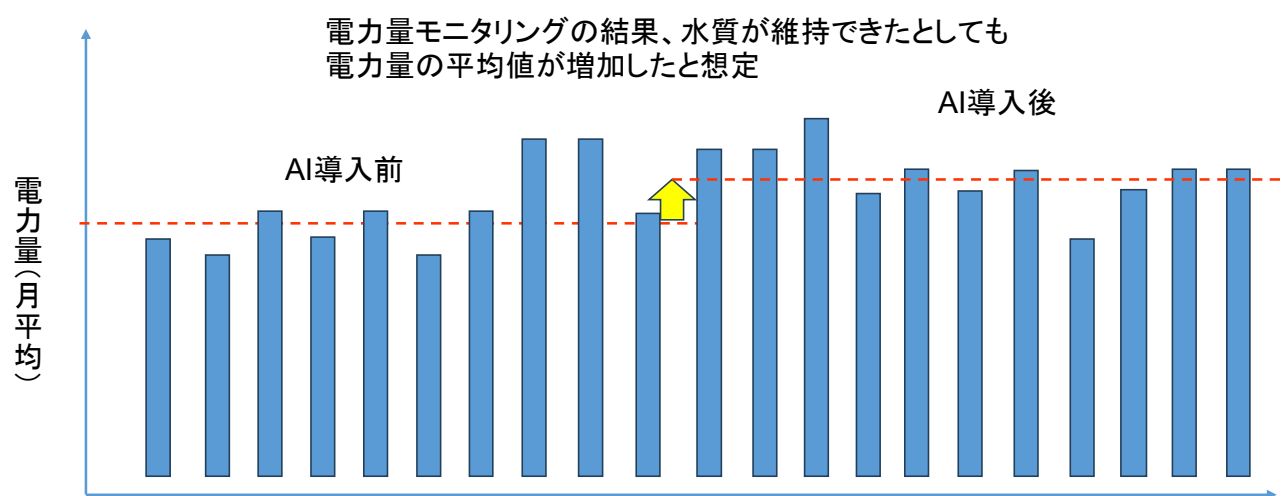


図 5-1 電力量モニタリングの経年比較のイメージ図

§ 37 薬品使用量管理

AI 推論導入後においても、AI 推論導入前と同様に薬品使用量をモニタリングし、状況を確認する。

【解 説】

AI 導入前後で下水処理を行う意義は変わらないため、AI 推論導入後も薬品使用量のモニタリングを継続する。本技術で処理水質が維持できたとしても、AI 導入後に薬品使用量が経年的に増加したと認められた場合、流入水量や水質を過去データと比較するとともに、水質が AI 導入前と比較して更に改善されたか否かも調査する。

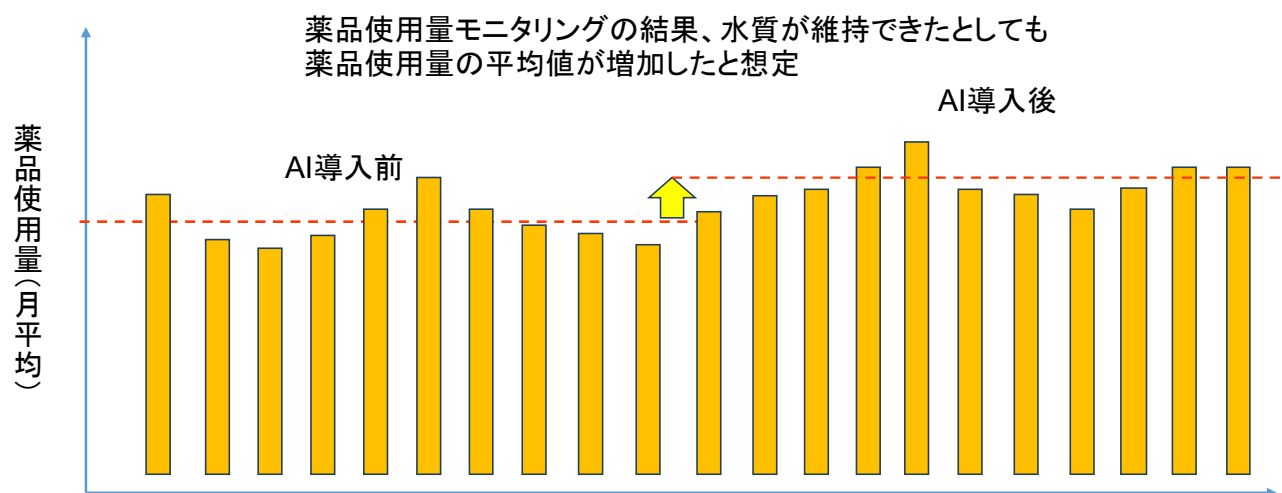


図 5-2 薬品使用量モニタリングの経年比較のイメージ図

第3節 保守点検

§38 保守点検

本技術における各機器について、その機能を良好・安全に維持するために、定期的に保守点検を行う。

【解 説】

本技術で導入する機器について、点検する項目と点検内容、頻度を表5-1にまとめる。

表5-1 点検項目と点検内容、頻度の例

機器名称	点検項目	日常点検	定期点検	頻度
カメラ	画像表示	○		
	外観確認	○		
	清掃		○	7日～14日/回
照明	点灯	○		
カメラシステム データ収集装置 AI 推論装置 運転ガイダンス 装置 共通	エアフィルタ交換		○	1年/回
	ミラーディスク装置交換		○	3年/回
	冷却ファン交換		○	10年/回
	電源ユニット交換		○	10年/回
	液晶モニタ交換		○	使用時間3万時間
	外付け型 DVD ドライブ交換		○	故障時
	リチウム電池		○	5～10年/回

§ 39 AI の再学習

AI 推論性能が悪化する兆候が見られた場合には、AI の再学習を検討する。

【解 説】

第 5 章第 2 節のモニタリング状況から、流入及び処理水質の悪化や電力量、薬品使用量の増加が見られ、結果として処理原単位が悪化してきている場合、水質目標の達成が困難な場合には、**図 5-3**に従い、AI の再学習を検討する。

流入水量の増加、流入水質の悪化等が原因で水質が維持出来づらくなった場合、AI が出力した設定値を見直した上で再学習を行う。経年的に処理水質が悪化してきた場合には、過去 1 年分もしくはそれ以上のデータ量を再学習の期間とする。

水質が維持されているが、電力量が増加した場合、水質の維持状況を確認する。水質が目標値付近にある場合等、必要空気量の観点で送風量に起因する電力量削減が困難な場合には、現状維持とする。一方で削減が可能であると判断された場合、その運転方法を教師データとして再学習する。

薬品使用量についても電力量と同様、水質の維持状況を確認し、削減が困難であれば現状維持、削減が可能と判断された場合、その運転方法を教師データとして再学習する。

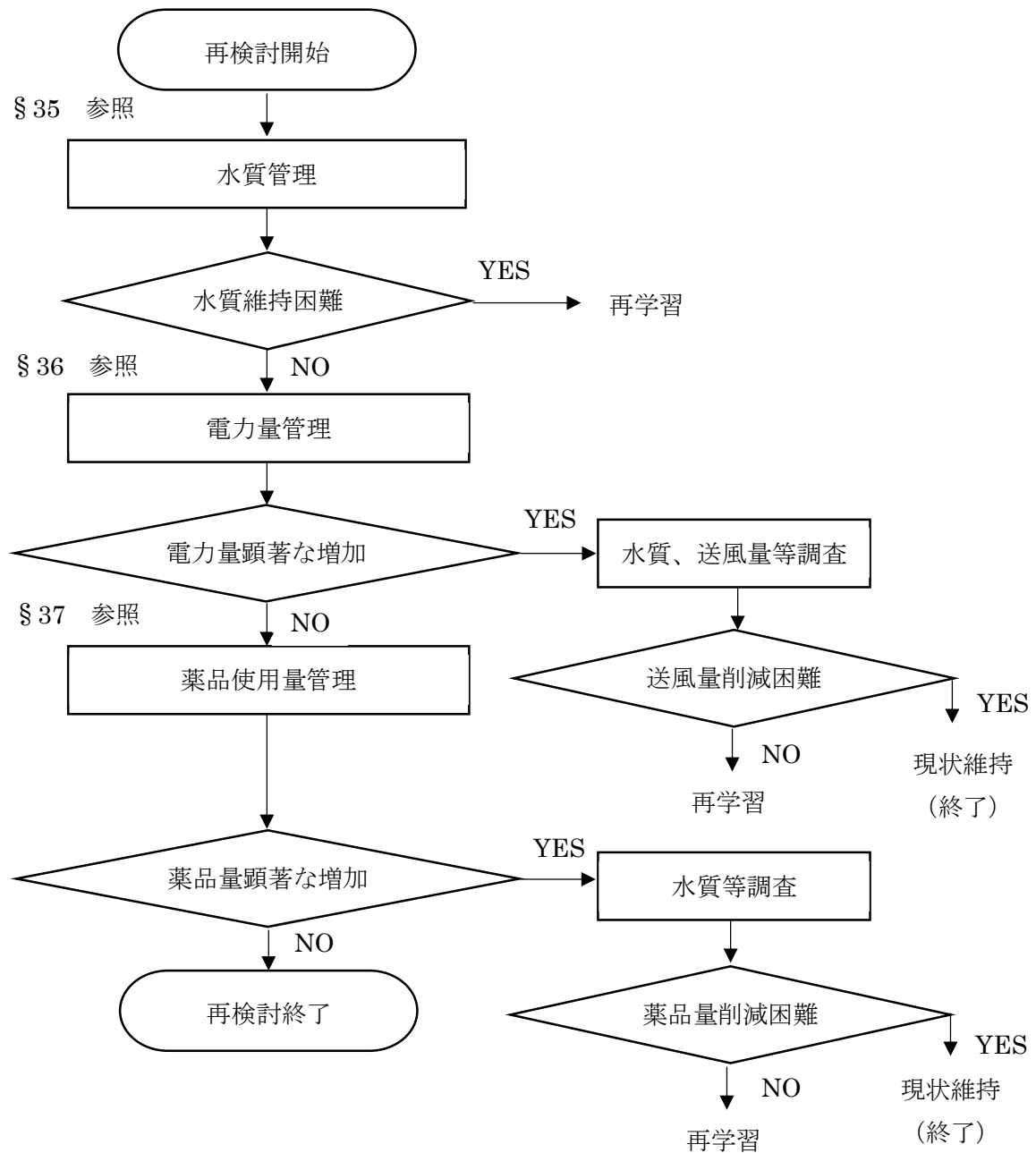


図 5-3 再学習の要否判断フロー

第4節 異常時の対応と対策

§ 40 異常時の対応と対策

本技術は、オンライン計測した値等をもとに、運転操作をガイダンスするシステムである。水質等が異常となった場合には、原則技術者による運転に切り替えるとともに、原因究明を行う。

①処理水質の悪化（BOD、窒素、リン、SS）

- ・水質センサーの確認
- ・流量計の確認
- ・次亜塩素酸ナトリウム注入量の確認

②送風量の異常

③推論結果の異常

- ・データが正しく取得されていることの確認

【解 説】

本技術は、オンライン計測した値等をもとに、運転操作をガイダンスするシステムである。水質等が異常となった場合には、一時的に技術者の判断による運転に切り替えるとともに、発生した事象から考えられる原因究明及び改善を行う。

①処理水質の悪化（BOD、窒素、リン、SS）

- ・水質センサーの確認

pH 計や DO 計、T-N 計や T-P 計の計測値が説明変数となっていることから、これらの計測器が異常値になった場合、正しく運転判断ができなくなる。そのため、水質センサーの計測値が手分析値と比較して正常であるかどうかを確認する。

DO 計の感度低下で DO 設定を増加させる推論が続き、反応タンクが過曝気となった場合、汚泥の解体が生じ、SS が流出するとともに、SS 由来の BOD や T-N、T-P についても増加する懸念がある。本技術では流入水質から必要空気量を算出する機能があり、必要以上に空気量の増減はないように設計されているが、特に DO 制御を行う場合、DO を説明変数とした AI 推論を行う場合には、推論への悪影響を排除するため、DO 計の状態を確認し、必要に応じて清掃や校正等メンテナンスを実施する。

pH 計については、硝化の状態から空気量の増減による硝化促進や硝化抑制につなげる判断を行い送風量増減の操作を行うことから、pH 計の状態を確認し、必要に応じて清掃や校正等メンテナンスを実施する。

- ・次亜塩素酸ナトリウム注入量の確認

BOD が高い場合、次亜塩素酸ナトリウム注入量が適正でない可能性があるため、次亜塩素酸ナトリウム注入量を確認する。

②送風量の異常

DO 計の感度低下で過曝気若しくは送風量不足になっている可能性があるため、DO 計の状態を確認する。

③推論結果の異常

- ・データが正しく取得されていることの確認

水質分析結果が最新値に更新されていること、監視装置から自動取得したデータが AI 推論に適切に反映されていることを確認する。

参考文献

- 1) 下水道施設計画・設計指針と解説 2019 年版、公益社団法人日本下水道協会
- 2) 下水道用語集 2000 年版、公益社団法人日本下水道協会

資料編

1. 実証研究結果

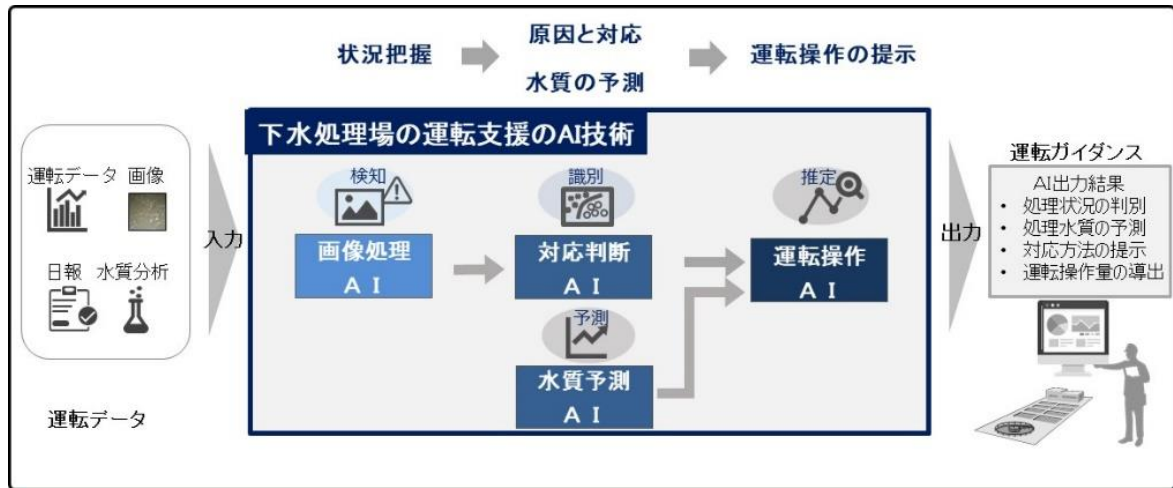
1 実証研究の概要

熟練技術者は、下水処理場のプロセスデータや水質分析結果、処理場の目視点検結果、運転結果をまとめた日誌等を確認することで、運用状況を把握し、現状の運転での放流水質を予測しながら、運転変更が必要と判断すればその対応策と操作量の決定を行っている。この判断過程を AI で表現するため、実証する AI 技術では、**図資 1-1** に示すように 4 つの AI 技術が連動することで、運転操作ガイダンスを行う。このような判断過程や根拠を見える化することで技術継承をすることができる。また、多くのデータを蓄積して効率の良いデータを選定した上で AI を学習することで、従来の運転操作と比較してコストの維持もしくは低減を図る先進的な運転操作支援の実現を目指す。

実証研究は、広島市西部水資源再生センター及び船橋市高瀬下水処理場を対象とし、令和 3 年度から令和 5 年度にかけて実施した。連続運転結果やオフライン評価結果を元に、自主的に実施した期間を含めて、**表資 1-1** に示した検証項目を評価した。

表資 1-1 実証研究概要

研究名称	A I を活用した下水処理場運転操作の先進的支援技術に関する実証研究
実施期間	令和 3 年度（令和 3 年 6 月 29 日～令和 4 年 3 月 31 日） 令和 4 年度（令和 4 年 7 月 15 日～令和 5 年 3 月 31 日） 令和 5 年度（令和 5 年 6 月 27 日～令和 6 年 3 月 31 日）
実施者	（株）明電舎・（株）NJS・広島市・船橋市共同研究体
実施場所	広島県広島市 西部水資源再生センター（データ収集機場、パイロット有り） 千葉県船橋市 高瀬下水処理場（データ収集機場、パイロット有り）
革新技術	①画像処理 AI：人の目の代わりとなり沈殿池の水面等の画像から状況や異常を検知する。 ②対応判断 AI：水質や画像から原因と対応の関連を見える化し、取るべき対策を絞込む。 ③運転操作 AI：数値データから、対策を踏まえた最適な運転操作量を推定する。 ④水質予測 AI：現在及び推定した運転操作量に対して処理水質を予測する。
検証項目	①AI により導出される操作量や状況判別の精度 ②AI による維持管理費の維持・削減の効果



図資 1-1 本技術の全体像

2 機場の説明

(1) 広島市西部水資源再生センター

①設備概要

広島市西部水資源再生センターは、広島市西部及び北部の汚水を処理するために作られた下水処理場である。概要を**表資 2-1**に示す。

昭和 56 年度から全体計画の 1/9 (57,300 m³/日) で処理開始され、平成 27 年度からは全体計画の 6/9 (307,200 m³/日) で運転している。

平成 23 年度から広島市内のし尿及び浄化槽汚泥を下水汚泥とともに処理し、汚泥処理から発生した返流水の高度処理を行っている。

表資 2-1 広島市西部水資源再生センター概要

所在地	広島市西区扇一丁目 1 番 1 号	
敷地面積	26.26 ha (全体計画)	
下水排除方式	分流式	
処理方式	汚水処理	活性汚泥法及び循環式硝化脱窒法による高級処理
	汚泥処理	濃縮・消化・洗浄・脱水
計画区域	11,761 ha (全体計画)	
計画人口	676,760 人 (全体計画)	
処理能力	334,670 m ³ /日 (全体計画)	

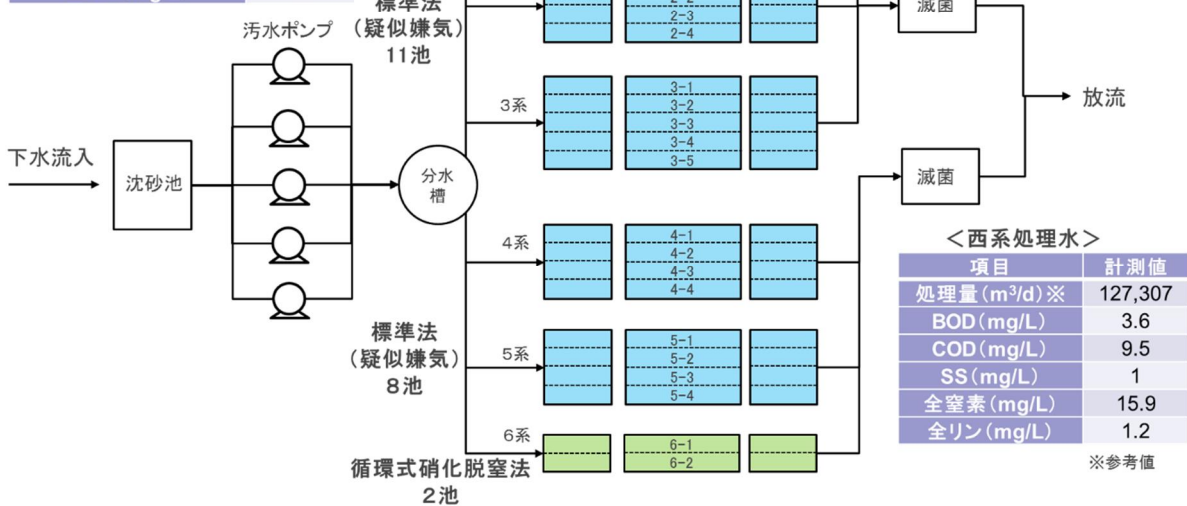
②処理方式

水処理系列の概略を**図資 2-1**に示す。1 系は 2 池が返流水処理、残り 2 池が標準活性汚泥法を採用している。2 系から 5 系は擬似嫌気標準活性汚泥法である。6 系は循環式硝化脱窒法を採用している。

汚水ポンプは最大 6 台が稼働し、1 系から 3 系 (東系)、4 系から 6 系 (西系) に分けて送水している。東系には揚程の関係で分水槽を介さないで送水する配管が設けられ、通常の水量ではこの経路で池に導水する。

＜流入 H29年度平均値＞

項目	計測値
流入量(処理量)m ³ /d	206,380
BOD(mg/L)	150
COD(mg/L)	87
SS(mg/L)	130
全窒素(mg/L)	29.9
全リン(mg/L)	4.0



図資 2-1 広島市西部水資源再生センター 水処理概要

水処理施設の能力を表資 2-2 に示す。

表資 2-2 広島市西部水資源再生センター 水処理施設能力

施設名	項目	能力
最初沈殿池	沈殿時間	東系：1.72 時間 4, 5 系：1.98 時間 6 系：1.44 時間
	水面積負荷	東系：46.1 m ³ /m ² ・日 4, 5 系：48.6 m ³ /m ² ・日 6 系：50.0 m ³ /m ² ・日
	越流負荷	250 m ³ /m ² ・日
反応タンク	処理方式	東系：標準活性汚泥法 4, 5 系：標準活性汚泥法 6 系：循環式硝化脱窒法
	エアレーション時間	東系：6.4 時間 4, 5 系：8.4 時間 6 系：11.3 時間
	汚泥日令	東系：5.36 日 西系：6.81 日
	BOD 負荷	東系：0.25 kgBOD/kgSS・日 西系：0.2 kgBOD/kgSS・日
	返送汚泥比	42.9%（最大 50%）
最終沈殿池	沈殿時間	東系：3.42 時間 4, 5 系：3.95 時間 6 系：上層 5.6 時間、下層 5.95 時間
	水面積負荷	東系：28.1 m ³ /m ² ・日 4, 5 系：24.3 m ³ /m ² ・日 6 系：上層 15.0 m ³ /m ² ・日 下層 14.1 m ³ /m ² ・日
	越流負荷	東系：150 m ³ /m ² ・日 西系：120 m ³ /m ² ・日

③制御方式

制御項目の一覧を**表資 2-3**に示す。

・沈殿池

最初沈殿池の生污泥引抜、最終沈殿池の余剰引抜制御は、プリセットによる設定流量又は引抜時間による切替制御を行っている。

・反応タンク

標準活性汚泥法の反応タンクは、東系は最終段で DO 一定制御、西系は送風量制御を採用することが多い。

・汚水ポンプ

沈砂池の水位やその変化傾向により、運転員がポンプ台数の増減を決める。東系と西系の水量の割合は、原則 35 : 65 であるが、40 : 60 または 30 : 70 に変更することもある。東系への導水は、分水槽を介さないため、東系バイパス電動弁を操作する。

・返流水処理系

送風量制御の他、無酸素槽へのメタノール注入制御、苛性ソーダや凝集剤（PAC）の注入制御を行っている。

・高度処理系

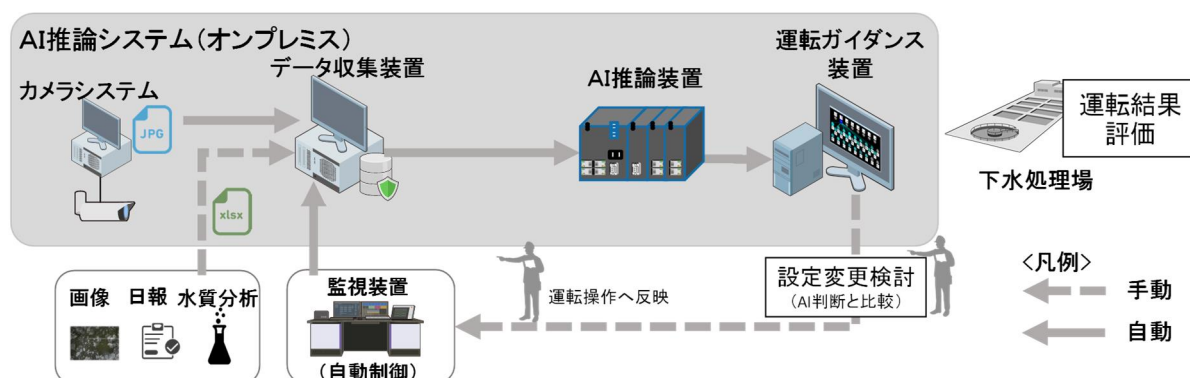
反応タンクは 3 段の無酸素槽と好気槽が直列でつながっており、各段にステップ流入が可能である。硝化液循環ポンプはなく、返送汚泥として 1 段目の無酸素槽に戻る。

表資 2-3 水処理制御項目一覧

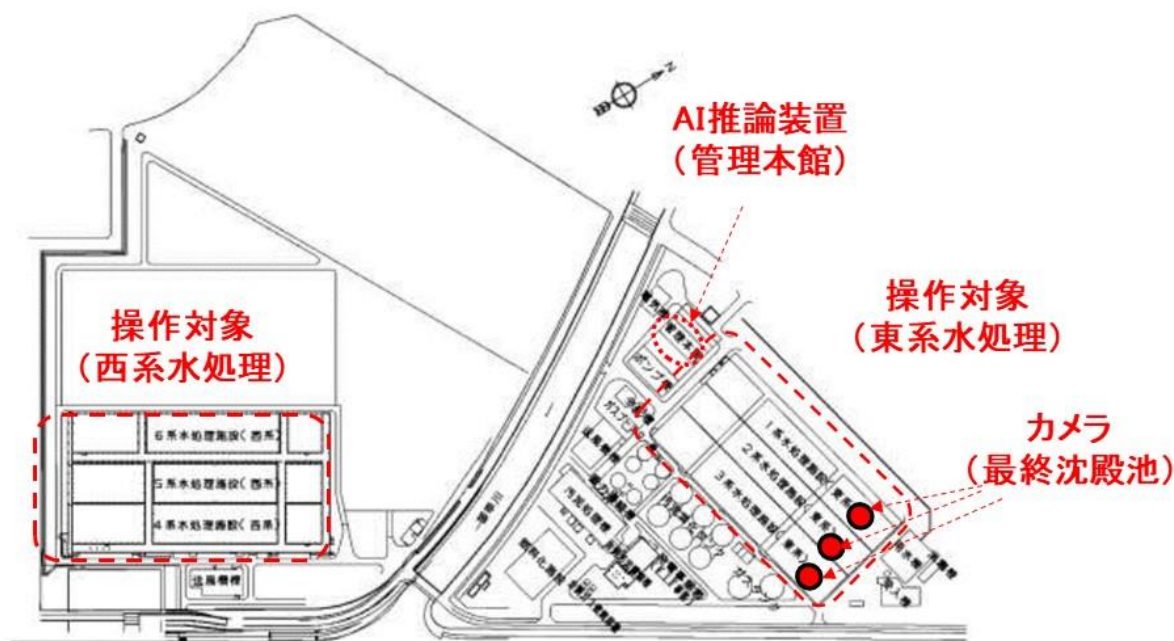
返流水好気槽 1 風量	1 系 DO／送風量	4 系 DO／送風量	返流水送水
返流水好気槽 2 風量	1 系返送汚泥流量	4 系返送汚泥流量	循環水流量
返流水返送汚泥流量	1 系余剰汚泥引抜	4 系余剰汚泥引抜	終沈処理水移送流量
第 1 無酸素槽 メタノール注入	2 系生污泥引抜	5 系生污泥引抜	し尿受入
第 2 無酸素槽 メタノール注入	2 系 DO／送風量	5 系 DO／送風量	西系高度処理送風機
苛性ソーダ注入量	2 系返送汚泥流量	5 系返送汚泥流量	西系標準法送風機
分配槽用凝集剤注入	2 系余剰汚泥引抜	5 系余剰汚泥引抜	東系バイパス電動弁
再曝気槽凝集剤注入	3 系生污泥引抜	6 系生污泥引抜	放流水次亜塩注入
返流水生污泥引抜	3 系 DO／送風量	6-1 系 DO／送風量	放流水量
返流水余剰汚泥引抜	3 系返送汚泥流量	6-2 系 DO／送風量	東系標準法送風機
汚水ポンプ台数制御	3 系余剰汚泥引抜	6 系返送汚泥流量	返流水系送風機
1 系生污泥引抜	4 系生污泥引抜	6 系余剰汚泥引抜	西系次亜塩注入

④設置した実証設備

広島市西部水資源再生センターの中央監視室には、**図資 2-2** に示す通り、カメラシステム、データ収集装置、AI 推論装置、運転ガイダンス装置、カメラシステムを設置した。配置図は**図資 2-3** の通りである。同センターの最終沈殿池にネットワークカメラを 6 台設置し、撮影した画像を LAN ケーブル経由で常時中央監視室に伝送し記録するとともに、AI で最終沈殿池の異常を 30 分周期で判定している。同時にこのシステムを用いて同センター水処理系の監視制御システムと連動しオンラインでデータを取得するとともに、手分析データを取り込むことで、1 日 2 回の頻度で連続的な水処理運転に関する AI 推論を実施している。



図資 2-2 広島市西部水資源再生センターに設置した AI 推論システム



図資 2-3 広島市西部水資源再生センター 施設概要と実証設備の配置

(2) 船橋市高瀬下水処理場

①設備概要

船橋市高瀬下水処理場は、計画面積 3,223 ha、計画人口 263,500 人の汚水を処理するための施設であり、全体処理能力 153,000 m³/日を計画している。

平成 5 年度より建設に着手し、平成 11 年度に標準活性汚泥法による水処理施設の供用を開始した。平成 14 年度から高度処理を行う水処理施設の供用を開始した。平成 17 年度に既設の水処理施設の改修を行い、全施設が高度処理対応となった。平成 28 年度に水処理施設第 5 系列の供用を開始した。現在 102,000 m³/日の処理能力を有している。

令和 2 年度より下水汚泥を発酵させ消化ガスを発生させる汚泥消化施設、民設民営で消化ガスを元に発電を行う消化ガス発電設備の工事に着手し、令和 4 年度より発電を開始した。

概要を表資 2-4 に示す。

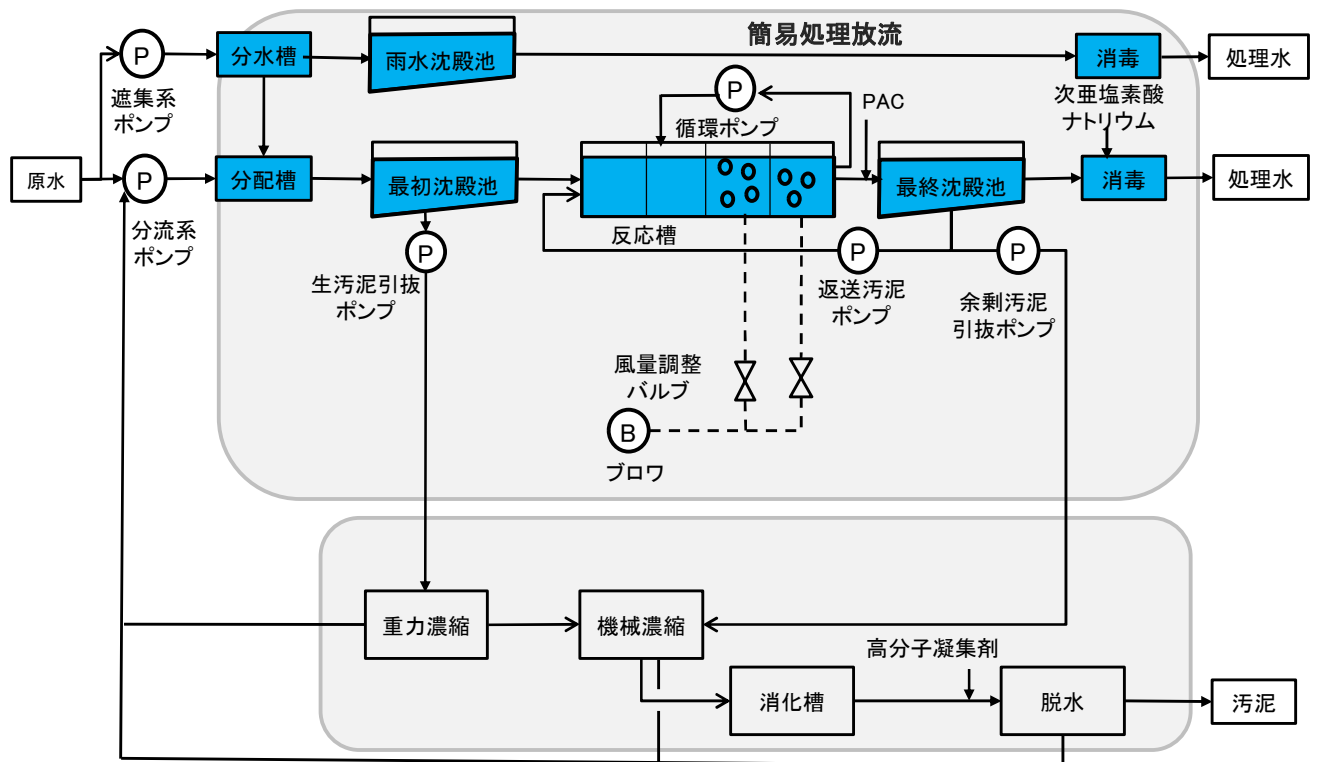
表資 2-4 高瀬下水処理場の計画概要

所在地	船橋市高瀬町 56 番地	
敷地面積	21.1 ha	
下水排除方式	分流式（一部合流式）	
処理方式	水処理	嫌気無酸素好気法 （凝集剤併用）＋急速ろ過法
	汚泥処理	濃縮・消化・脱水・焼却 ※消化は令和 4 年度稼働
計画人口	263,500 人（全体計画）	
処理能力	153,000 m ³ /日（全体計画）	

②処理方式

水処理及び汚泥処理方式の概略を図資 2-4 に示す。水処理方式は 1～5 系の全系列が嫌気無酸素好気法である。好気槽は DO 一定制御を採用している。返送汚泥率はほぼ一定で運用している。リン除去のため、最終沈殿池に PAC を注入する。

汚泥処理は令和 3 年度までは濃縮、脱水であるが、令和 4 年度から消化槽の運用が開始された。返流水のリンや窒素濃度が増加することで、水処理方法に影響が出ると予想される。



図資 2-4 船橋市高瀬下水処理場 水処理・汚泥処理概要

③制御方式

制御項目の一覧を**表資 2-5**に示す。

- ・沈殿池

最初沈殿池の生汚泥引抜、最終沈殿池の余剰引抜制御は、プリセットによる設定流量又は引抜時間による切替制御を行っている。

- ・反応タンク

嫌気無酸素好気法の反応タンクは、最終段で DO 一定制御、又は比率制御が設定可能であるが、通常は DO 一定制御を実施している。

- ・返送汚泥

MLSS 又は流入比率一定制御が選択できるが、通常は流入比率一定制御を実施している。

- ・循環水量

水量を一定にする制御を実施している。

- ・薬品

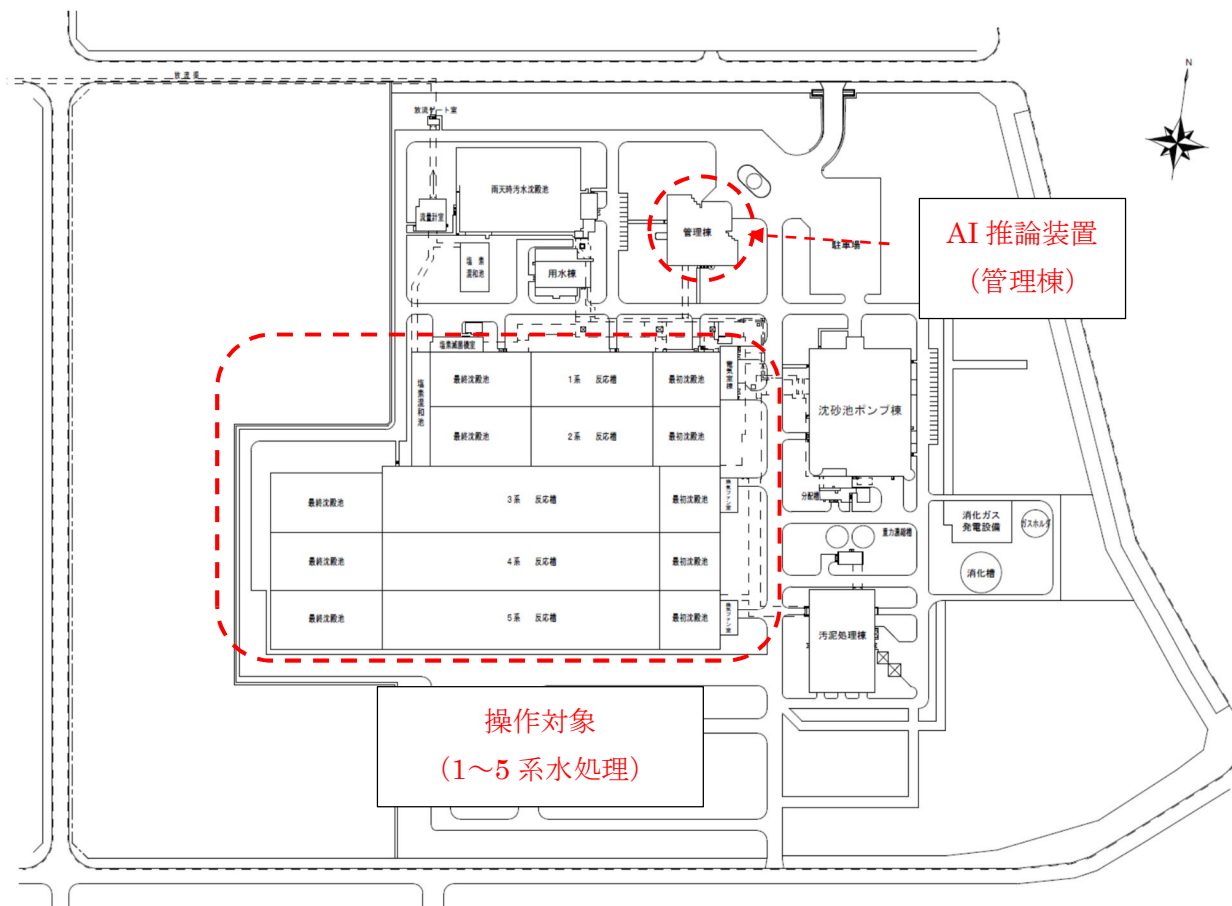
凝集剤（ポリ塩化アルミニウム：PAC）、次亜塩素酸ナトリウムの注入率制御を実施している。苛性ソーダ注入設備も存在しているが、未使用である。

表資 2-5 水処理制御項目一覧

汚水ポンプ 回転数制御	曝気風量 流入比率制御	凝集剤注入量 注入量一定制御
分流系ポンプ井 水位制御	曝気風量 DO 一定制御	凝集剤注入量 注入比率一定制御
遮集系ポンプ井 水位制御	返送汚泥流量 MLSS 一定制御	苛性ソーダ 注入量制御
汚水ポンプ 流量制御	返送汚泥流量 流入比率一定制御	循環水量制御
送風機 吸込風量制御	生汚泥流量 タイムスケジュール	高級処理系放流次亜塩 注入率制御
送風機 吐出圧力制御	余剰汚泥流量 タイムスケジュール	簡易処理系放流次亜塩 注入率制御

④設置した実証設備

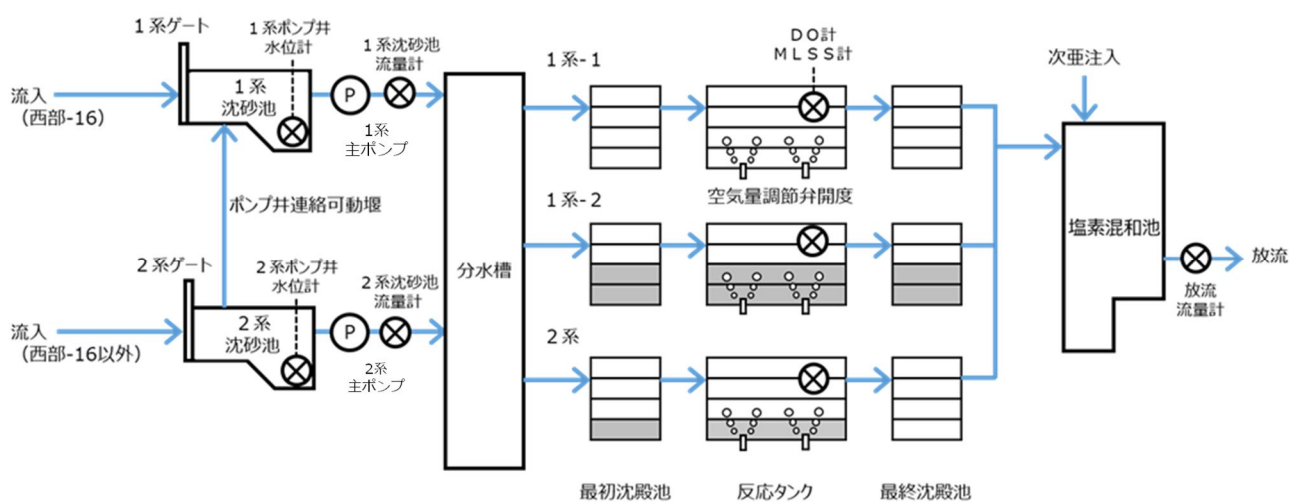
船橋市高瀬下水処理場の中央監視室には、データ収集装置、AI 推論装置、運転ガイダンス装置を設置した。配置図は図資 2-5 の通りである。同センターの最終沈殿池にネットワークカメラを 4 台設置し、撮影した画像は SD カードで回収し、画像処理 AI の元データとしていたが、令和 4 年度の 12 月にカメラとデータ収集装置間を無線で接続し、オンラインで画像処理を可能とした。同下水処理場の監視制御システムと連動しオンラインでデータを取得するとともに、手分析データを取り込むことで、PAC 注入量設定を 1 時間周期に AI 推論し運転員の判断と比較検証した。



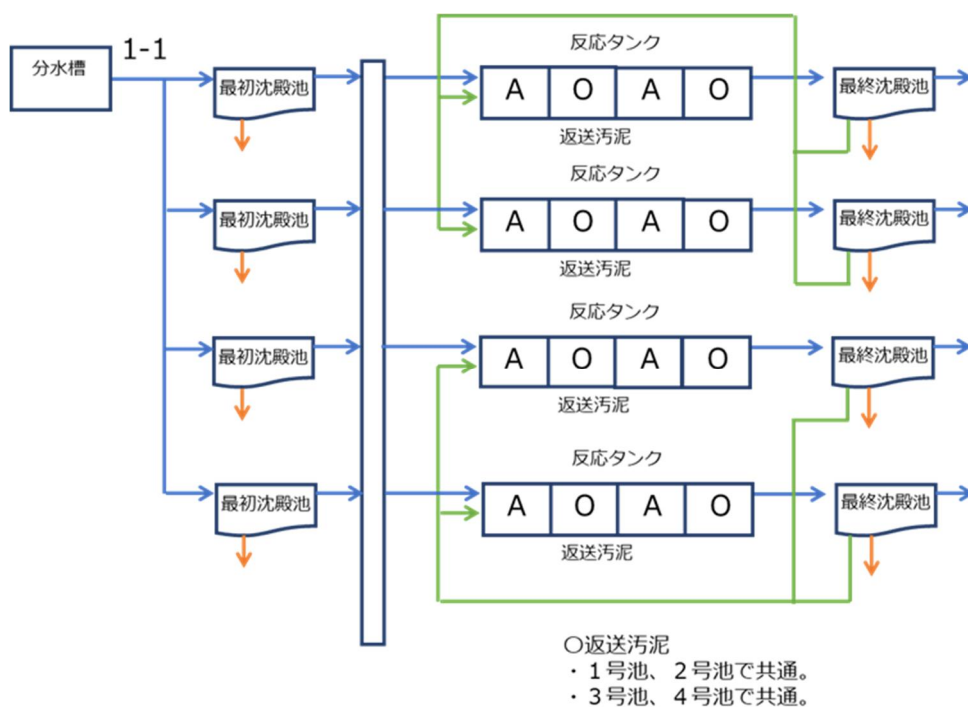
図資 2-5 船橋市高瀬下水処理場 施設概要と実証設備の配置

(3) A 処理場

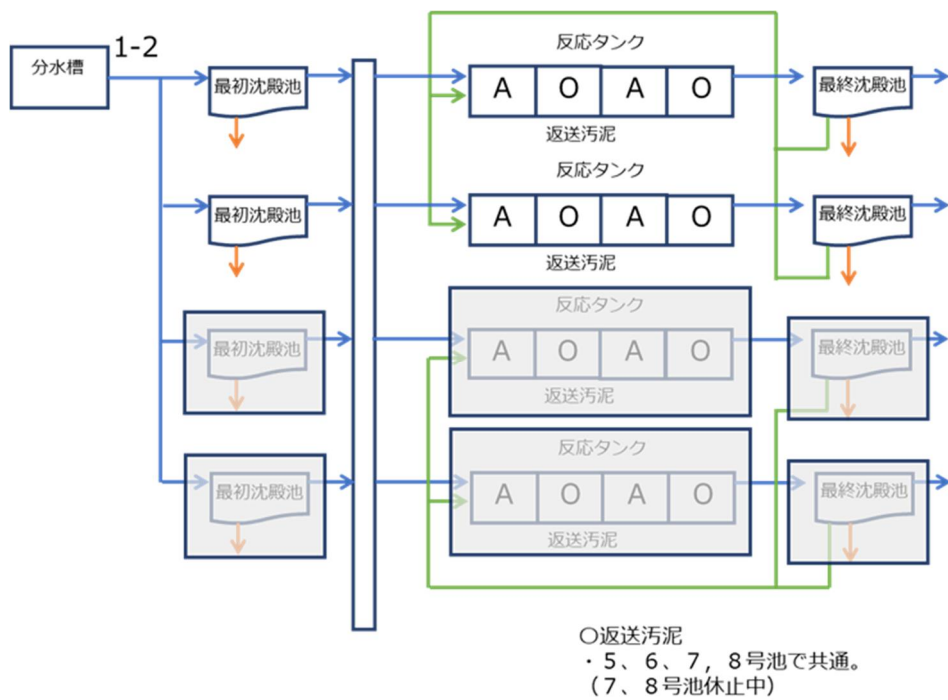
A 処理場の水処理系全景および、分配槽から各初沈、反応タンク、終沈までの簡易フロー図を図資 2-6～図資 2-9 に示す。



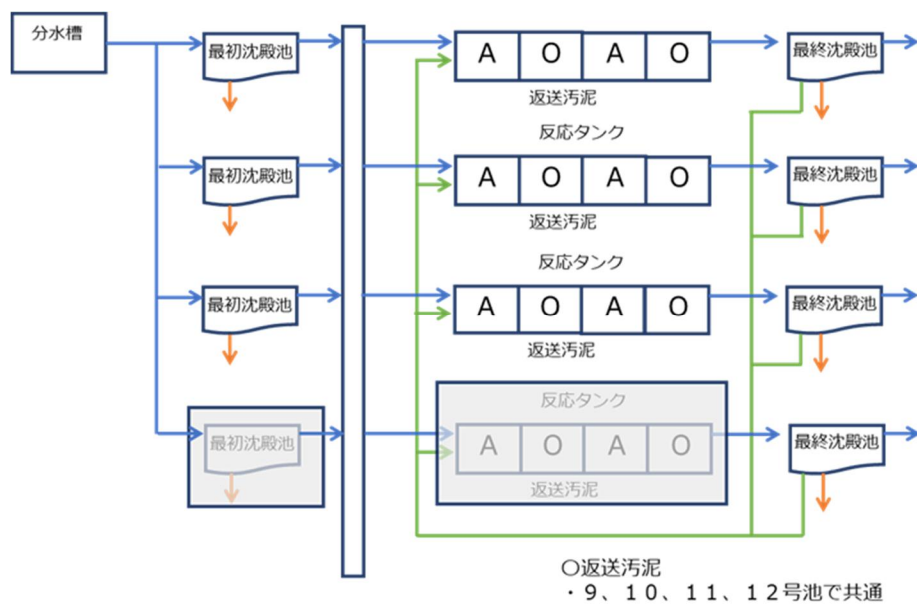
図資 2-6 水処理系フロー図全景



図資 2-7 1系-1 No1~No4 反応タンク フロー図



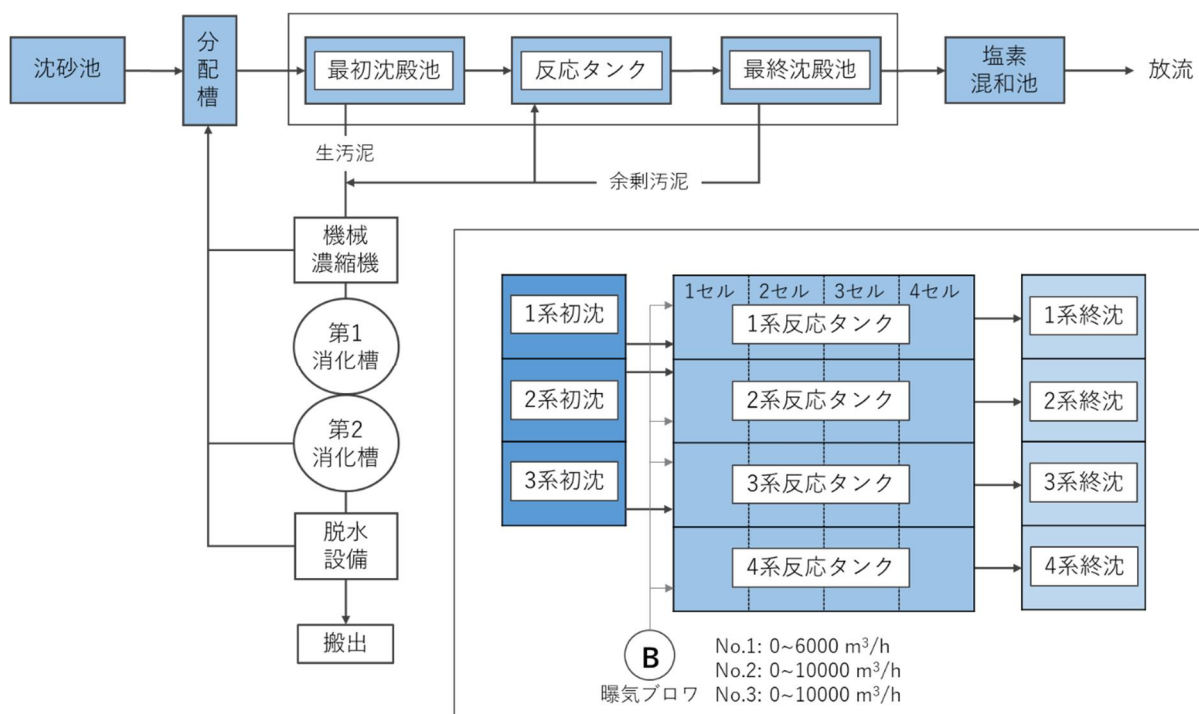
図資 2-8 1系-2 No5、No6 反応タンク フロー図



図資 2-9 2系-1 フロー図

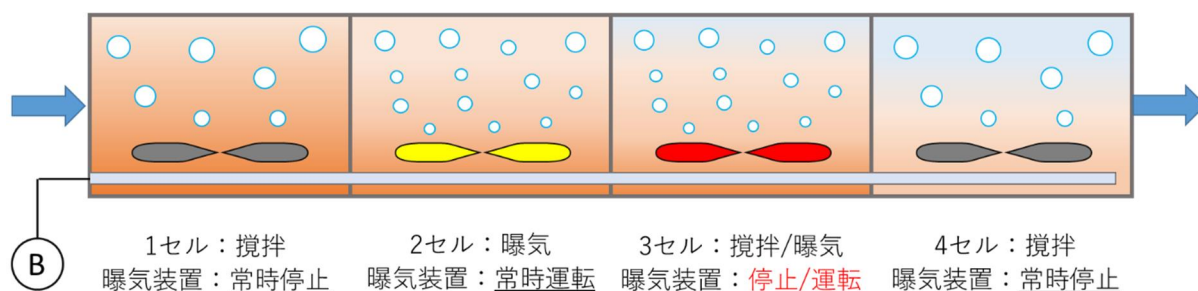
(4) B 処理場

B 処理場の処理フロー・構成図を図資 2-10 に示す。令和 3 年度における平均一日処理水量は 25,350 m³/日であった。



図資 2-10 B 処理場の処理フロー・構成図

反応タンクの各セルの運転状況を図資 2-11 に示す。B 処理場では、反応タンクの 1～4 セル目まで常にエアレータによる散気が行われており、各セルに設置された攪拌機を曝気装置として運転・停止の切替えによる曝気制御を行っている。B 処理場は硝化抑制運転の方針であり、曝気装置の運転は 1 セル目と 4 セル目が常時停止・2 セル目が常時運転でほぼ固定、3 セル目（第 3 曝気装置）の運転・停止により水質を管理している。

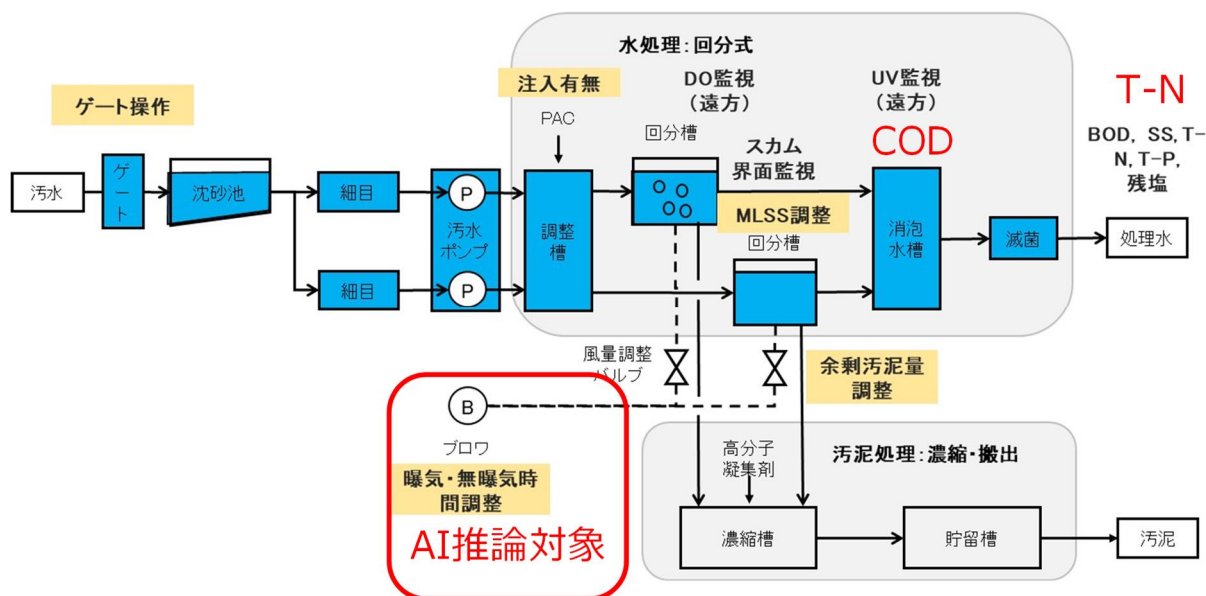


図資 2-11 反応タンク各セルの運転状況

3セル目の曝気装置の運転方法は、①反応タンクの目標 pH を定め、それを保つように曝気装置の運転・停止を操作する pH 基準の運転、②朝から夜まで運転し夜間は停止する長時間曝気運転の 2 パターンに分類できる。

(5) C 処理場

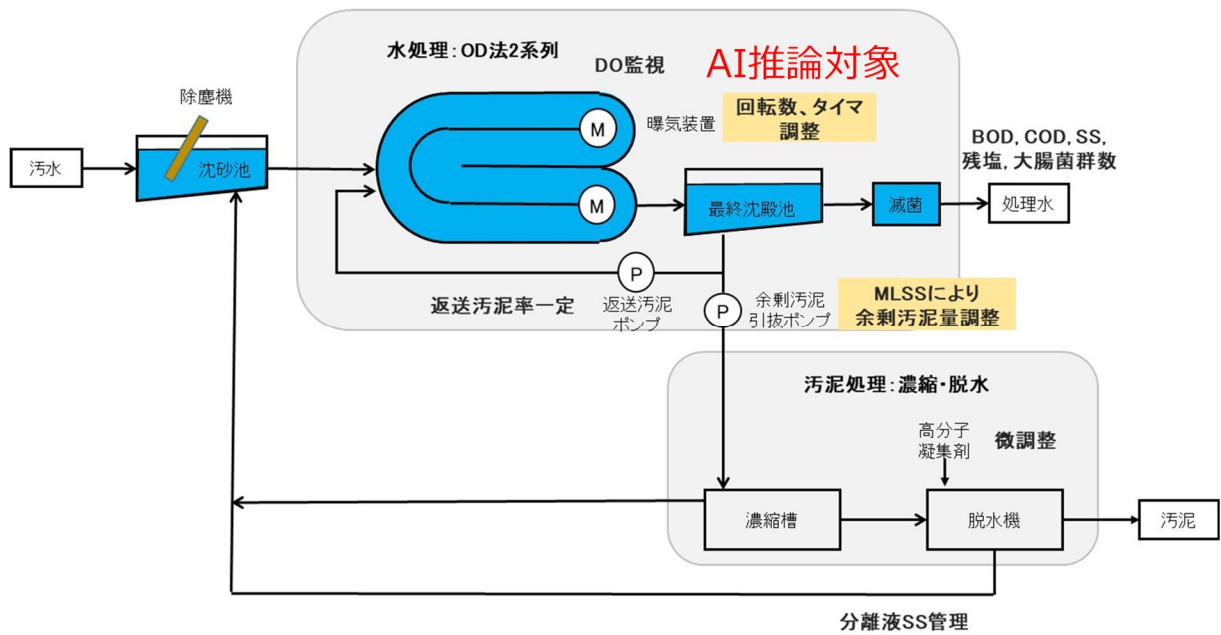
C 処理場の水処理及び汚泥処理方式の概略を図資 2-12 に示す。C 処理場は回分式処理法を採用した処理場であり、沈砂池、調整槽、2 系列の回分槽、消泡ポンプ槽、放流ポンプ槽、汚泥処理設備からなる。



図資 2-12 C 処理場 水処理・汚泥処理概要

(6) D 処理場

D 処理場の水処理及び汚泥処理方式の概略を図資 2-13 に示す。D 処理場はオキシデーショディッチ法を採用した処理場で、沈砂池、2 系列のオキシデーショディッチ、最終沈殿池、塩素混和池、および汚泥処理設備から成り立っている。特徴としては、自衛隊学校からの流入水が全体の約 3 割を占めており、正月や盆のような長期休暇期間中には流入水量が低下することが挙げられる。流入方式は分流式であり、管路が比較的短く、不明水も少ないため、雨天時の流量変動はほとんど見られない。



図資 2-13 D 処理場 水処理・汚泥処理概要

3 評価結果

3. 1 画像処理 AI

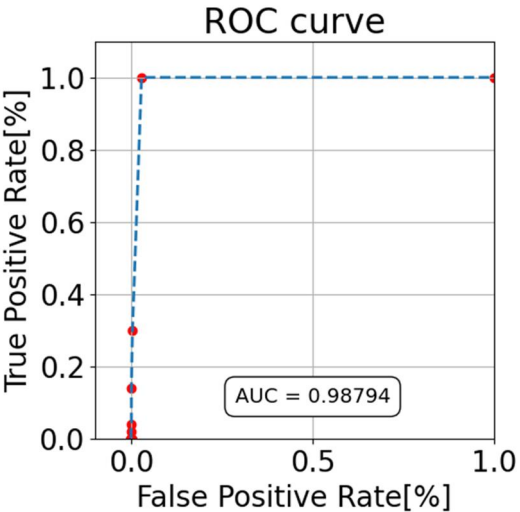
(1) 広島市西部水資源再生センター

広島市西部水資源再生センターにおいて、画像処理 AI が最終沈殿池異常としてフロック浮遊を判定した結果を**表資 3-1**に示す。フロック浮遊については目標精度真陽性率 90%以上、偽陽性率 10%未満を満たした。

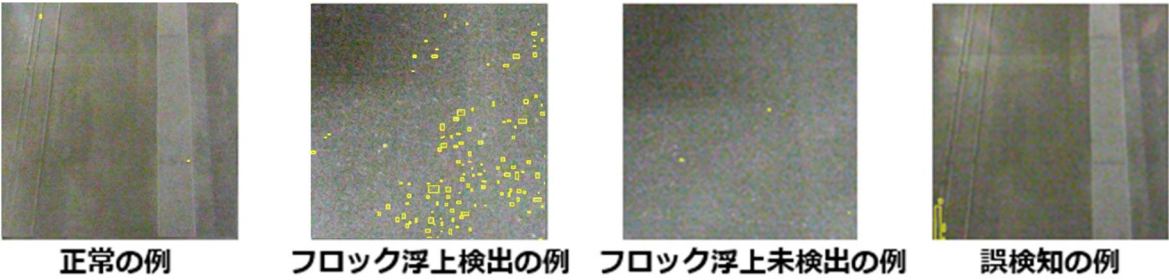
表資 3-1 広島市西部水資源再生センターのフロック浮遊に関する検出性能

	フロック浮遊
真陽性率	94% (47/50)
偽陽性率	0.25% (1/400)

ROC 曲線と検出結果の代表的な例をそれぞれ**図資 3-1**、**図資 3-2**に示す。

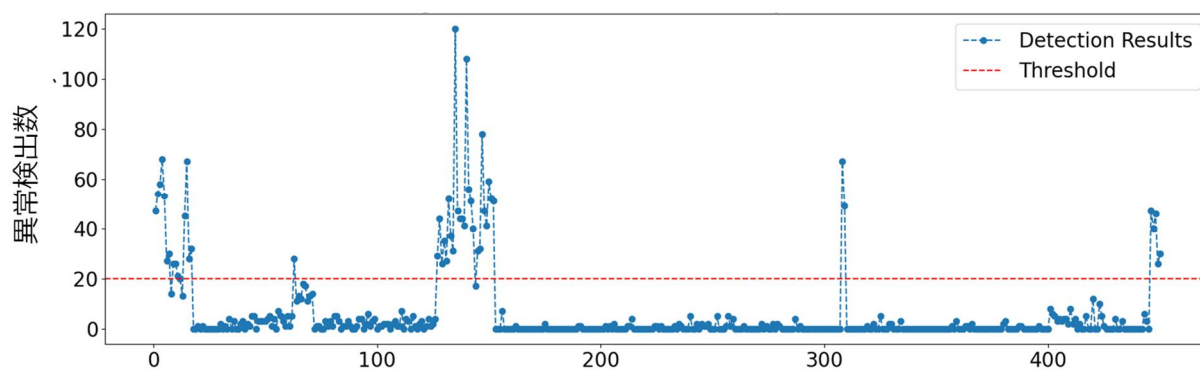


図資 3-1 フロック浮遊検出の ROC 曲線



図資 3-2 2 系最終沈殿池における検出結果の代表的な例

評価画像 450 枚について、異常検出箇所の個数を検出指標とした場合の指標の推移を図資 3-3 に示す。



図資 3-3 評価画像 450 枚に対する異常検出箇所の個数の推移

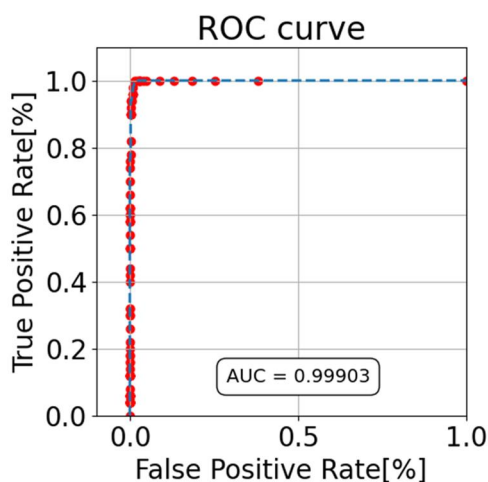
(2) 船橋市高瀬下水処理場

船橋市高瀬下水処理場において、画像処理 AI が最終沈殿池異常としてスカム浮上を判定した結果を表資 3-2 に示す。スカム浮上については目標精度真陽性率 $\geq 90\%$ 以上、偽陽性率 10%未満を満たした。

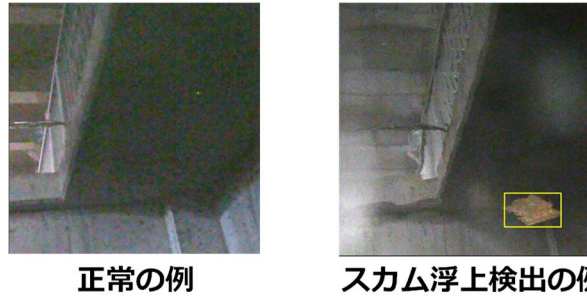
表資 3-2 船橋市高瀬下水処理場のスカム浮上に関する検出性能

	スカム浮上
真陽性率	100% (50/50)
偽陽性率	3.0% (30/1000)

ROC 曲線と検出結果の代表的な例をそれぞれ図資 3-4、図資 3-5 に示す。

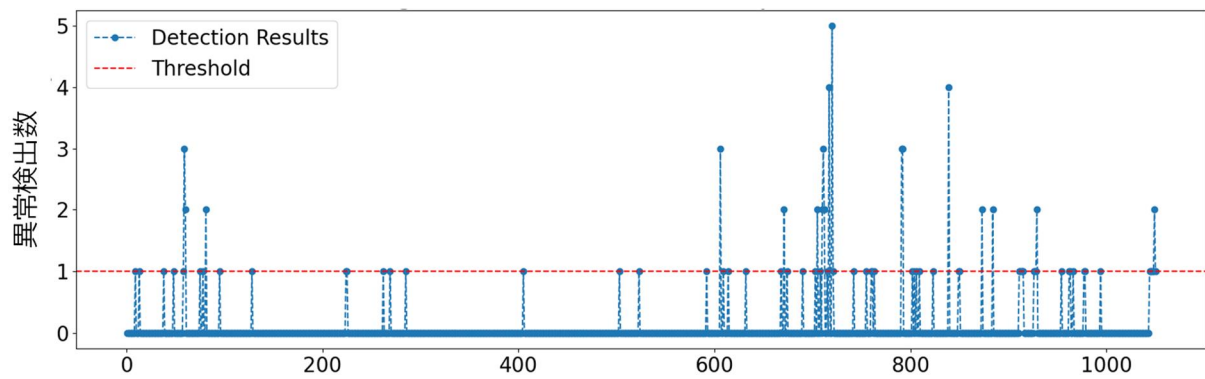


図資 3-4 スカム浮上検出の ROC 曲線



図資 3-5 5系最終沈殿池におけるスカム浮上検出結果の代表的な例

評価画像 1,050 枚について、異常検出箇所の個数を検出指標とした場合の指標の推移を図資 3-6 に示す。



図資 3-6 評価画像 1050 枚に対する異常検出箇所の個数の推移

3. 2 対応判断・運転操作 AI

(1) 広島市西部水資源再生センターでの対応判断・運転操作 AI の評価

AI の提示した対応判断と熟練技術者の判断の合否判定は○・△・×として、下記の根拠に基づき示す。

- : 熟練技術者の判断と一致
- △ : 熟練技術者の判断と異なるが許容可能で、実運転への適用可
- × : 熟練技術者の判断と異なり許容不可で、実運転へは適用できない

結果として、AI の判断結果は、12 項目の AI × 263 回の推論、計 3,156 点の試験のうち 3,059 点で実運転への適用「可」と判定され、運転適用率 97%となった。計 3,059 点の試験のうち、2,852 回 (90%) が AI の判断と運転員の判断が一致、207 回 (7%) が不一致であるが実運転適用可、97 回 (3%) が許容不可で実運転適用不可と判定された。一致率は△以上の判定のもので評価することとし、**表資 3-3** に示す通り、目標を達成した。

なお、不一致の内容の一例として、DO 制御の場合には、熟練技術者は現状変更する必要はないと考えたが、AI は運転変更したこと（ただし、AI の方も次の推論時に元に戻すと指示）等が挙げられた。また、実証期間中には、高風量におけるリン吐出し回避への対応、現状の水質から想定される送風量上下限設定機能の追加等、現地の運転のきめ細やかな考えを AI に取り入れることで、一致率を向上させた。

表資 3-3 対応判断・運転操作 AI の現地実証での検証結果（広島市）

評価	回数	割合
○	2,852	90%
△	207	7%
×	97	3%
合計	3,156	-

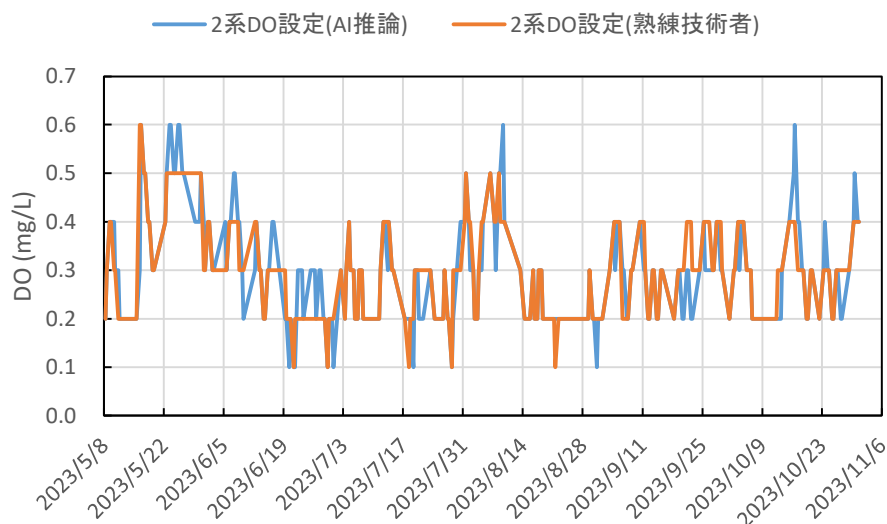
各推論項目での AI の判断と運転員の判断が一致した割合を**表資 3-4**に、不一致ではあるが実運転適用可も含めた割合（実際に AI 推論の結果で運転した割合）を**表資 3-5**に示す。評価指標として、一致率 60%未満は×、60%以上、80%未満は△、80%以上は○とした。また、各推論項目での AI の判断と熟練技術者の判断の推移を**図資 3-7**～**図資 3-18**に示す。

表資 3-4 各推論項目での AI の判断と運転員の判断が一致した割合

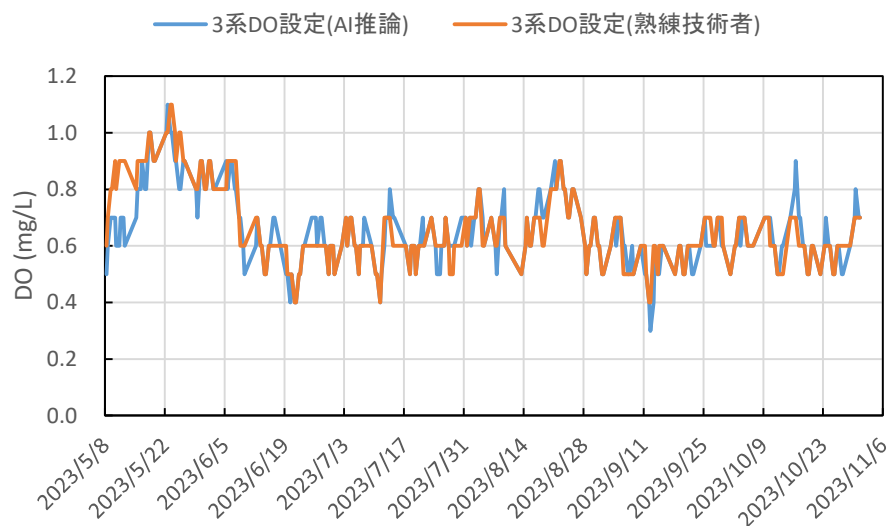
項目	一致率	評価	備考
2 系 DO	74% (195/263)	△	
3 系 DO	68% (180/263)	△	
2 系返送汚泥量	96% (253/263)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
3 系返送汚泥量	96% (253/263)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
東系次亜注入率	94% (247/263)	○	
分配槽 PAC 注入量	87% (228/263)	○	
再曝気槽 PAC 注入量	100% (263/263)	○	
4 系送風量	91% (240/263)	○	
5 系送風量	91% (240/263)	○	
4 系返送汚泥量	96% (253/263)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
5 系返送汚泥量	96% (253/263)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
西系次亜注入率	94% (247/263)	○	
合計	90% (2852/3156)	○	

表資 3-5 各推論項目での実際に AI 推論の結果で運転した割合

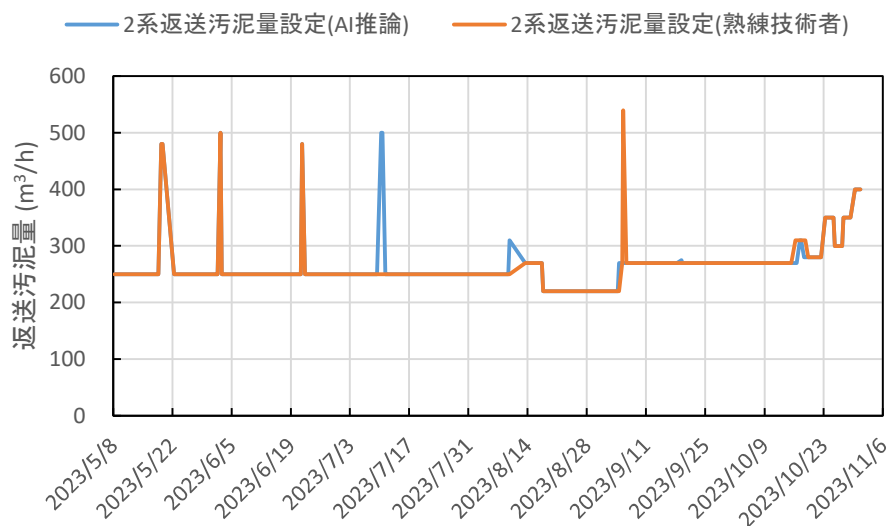
項目	一致率	評価	備考
2 系 DO	89% (235/263)	○	
3 系 DO	90% (236/263)	○	
2 系返送汚泥量	98% (259/263)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
3 系返送汚泥量	98% (259/263)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
東系次亜注入率	97% (256/263)	○	
分配槽 PAC 注入量	99% (261/263)	○	
再曝気槽 PAC 注入量	100% (263/263)	○	
4 系送風量	99% (261/263)	○	
5 系送風量	99% (260/263)	○	
4 系返送汚泥量	98% (257/263)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
5 系返送汚泥量	98% (257/263)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
西系次亜注入率	97% (255/263)	○	
合計	97% (3059/3156)	○	



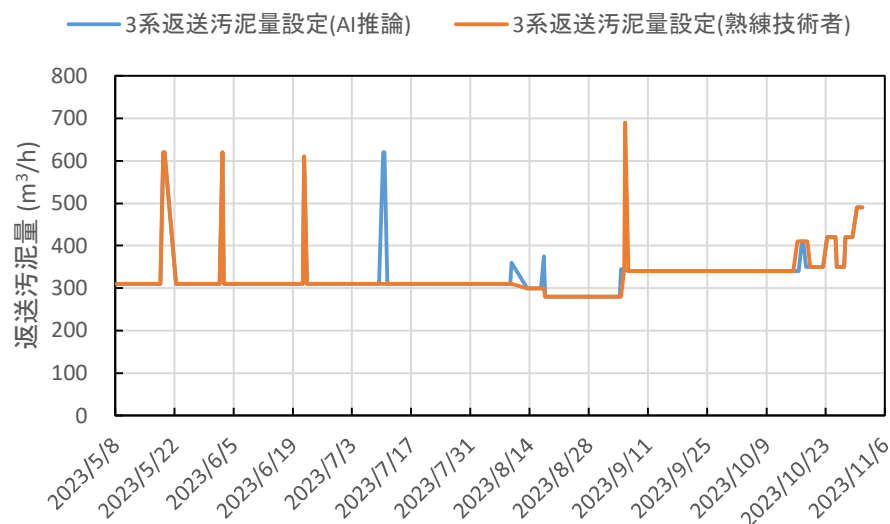
図資 3-7 広島市 2 系 DO 設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



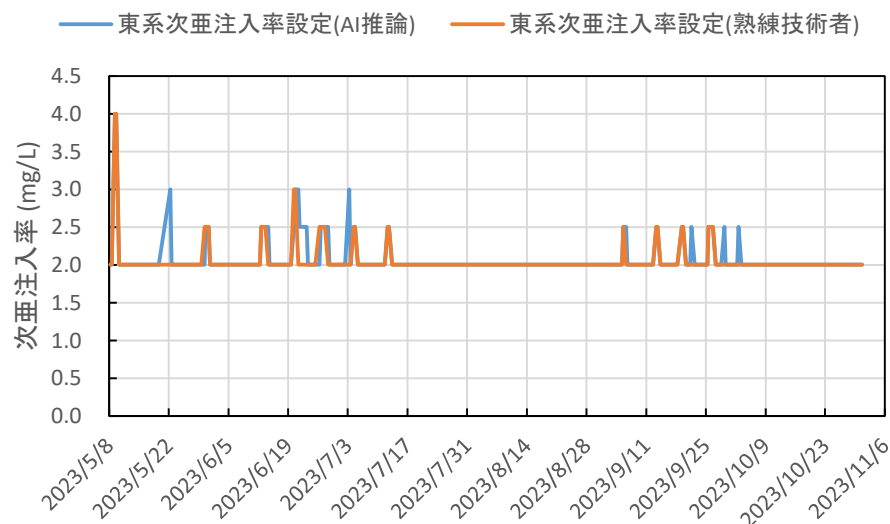
図資 3-8 広島市 3 系 DO 設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



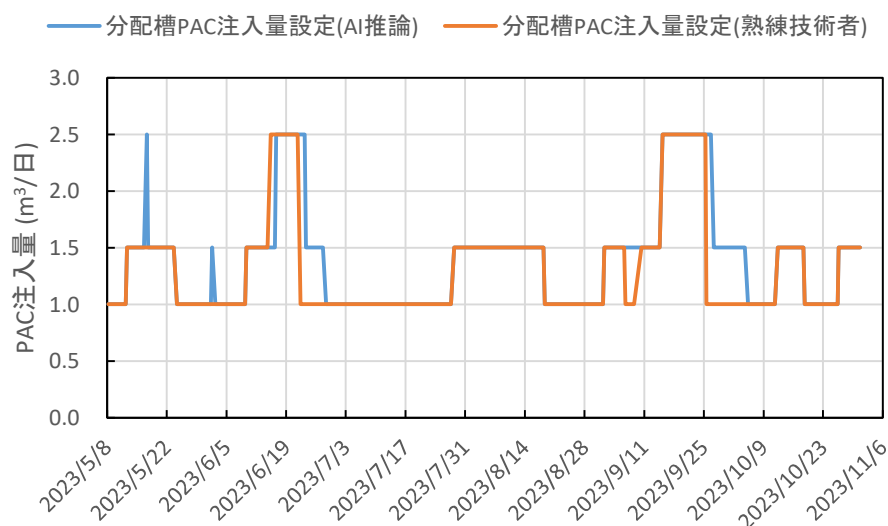
図資 3-9 広島市 2 系返送汚泥量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



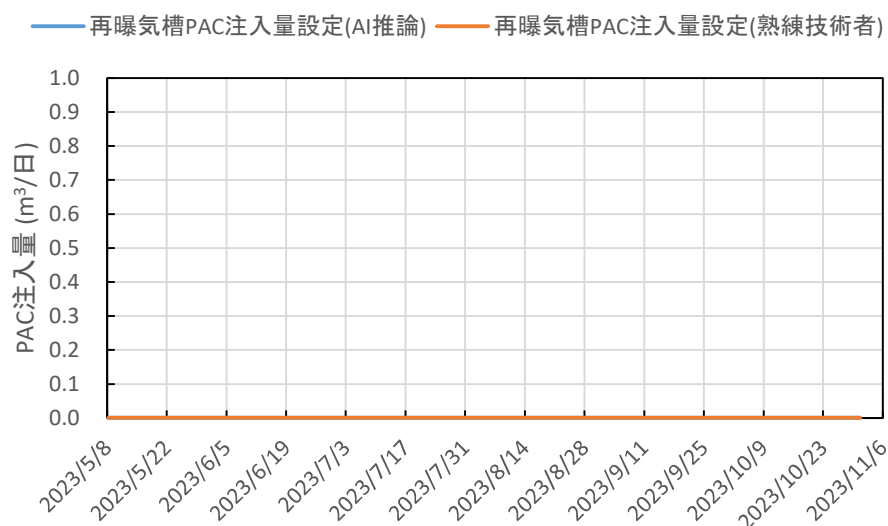
図資 3-10 広島市 3 系返送汚泥量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



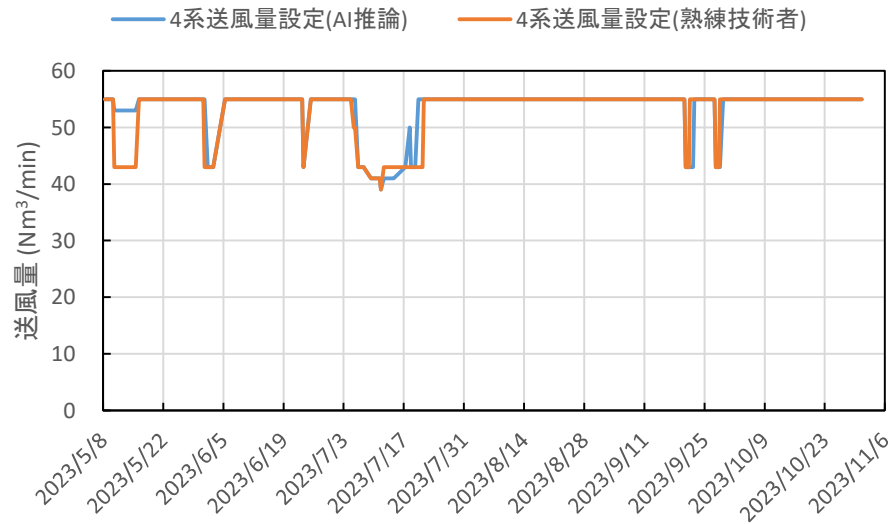
図資 3-11 広島市東系次亜注入率設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



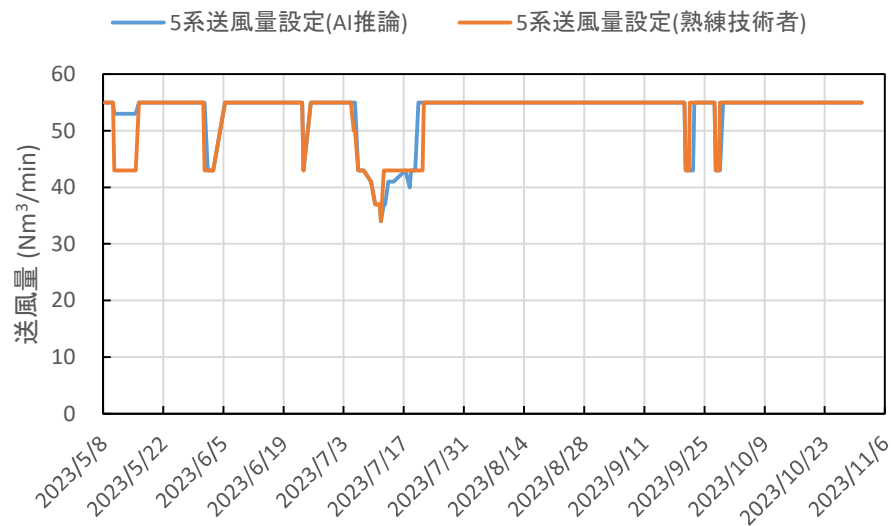
図資 3-12 広島市分配槽 PAC 注入量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



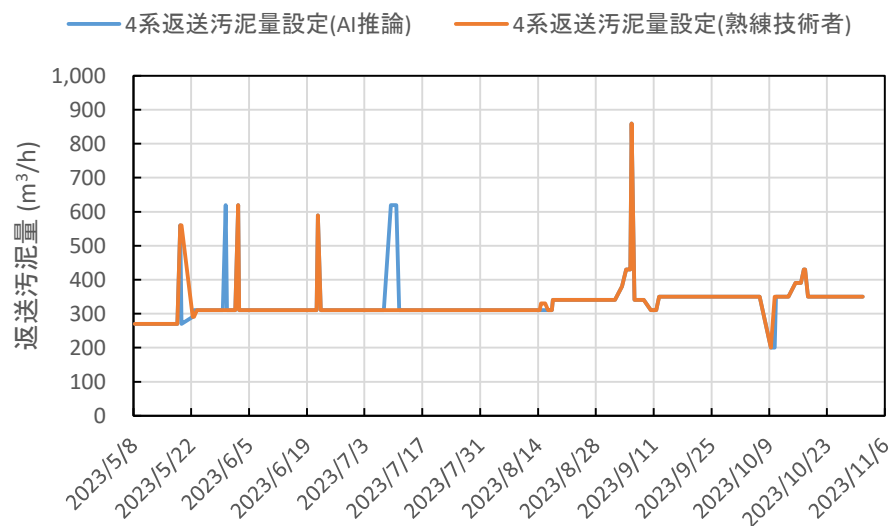
図資 3-13 広島市再曝気槽 PAC 注入量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



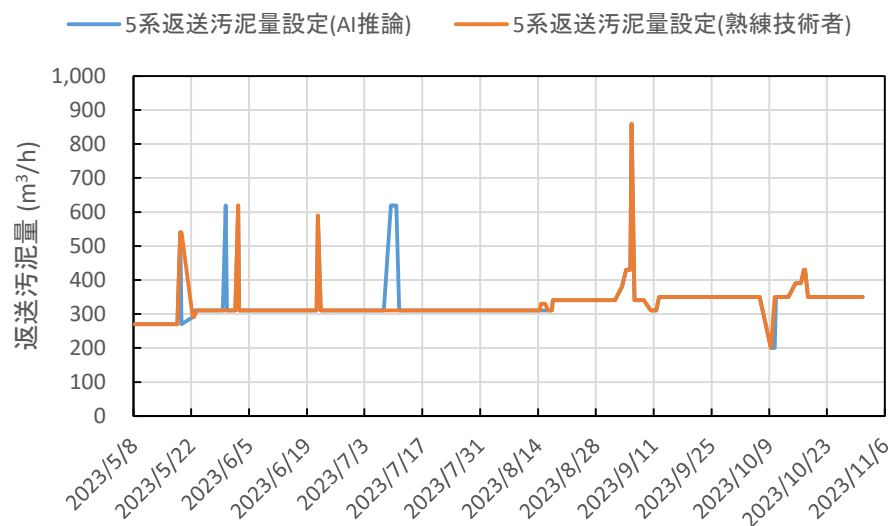
図資 3-14 広島市 4 系送風量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



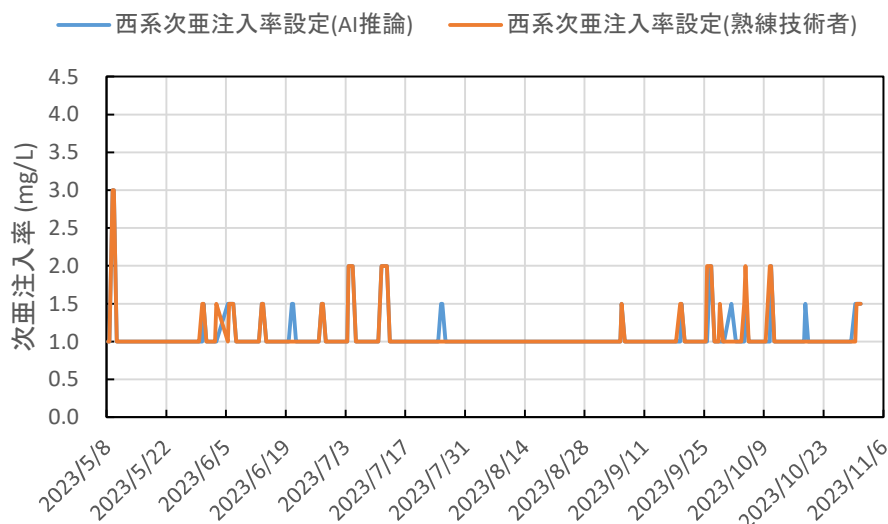
図資 3-15 広島市 5 系送風量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



図資 3-16 広島市 4 系返送汚泥量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



図資 3-17 広島市 5 系返送汚泥量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



図資 3-18 広島市西系次亜注入率設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断

熟練技術者の判断とは不一致ではあるが、実運転適用可と判断された場合も含めた、実際に AI 推論の結果で運転した割合は全ての推論項目で 80%以上となった。しかし、熟練技術者の判断と一致した割合のみとすると、東系 DO（2 系 DO、3 系 DO）設定の一致率は 80%未満となった。

東系 DO 設定は週数回運転変更を行う操作量であり、毎回判断が重要となってくる操作量である。熟練技術者は DO 設定値だけでなく、送風量の実測値も考慮し、硝化の度合いやリン蓄積細菌の活性を推定しながら、適切な DO 設定であるかどうかを判断している。令和 4 年度までの東系 DO 設定の AI モデルでは送風量の過不足に関する考え方が不足していたため、令和 5 年度の AI 実証期間では送風量に基づく DO 設定推論の調整要素を適宜改善していった。東系 DO 設定に関する主な調整内容を表資 3-6 に示す。2023 年 5 月 8 日の令和 5 年度 AI 実証開始時には、高風量におけるリン吐出し回避への対応を実装しており、送風量が過剰な状況でのリン蓄積細菌の活性低下度合いを推定できるように努めた。5 月 29 日には、送風量の過剰だけでなく過少も含めた送風量実測値 24 時間平均に基づく DO 設定出力の調整を、6 月 29 日には、送風量の増加・減少傾向を早く察知するため、送風量実測値 6 時間平均に基づく DO 設定出力の調整を実装した。8 月 2 日には、これまで固定値であった送風量の上下限を、大まかな水質（流入水全窒素、全リン、放流水 pH）や雨量、水質懸念に基づいて判断できるようにし、可変となるようにした。そして 8 月 30 日には、下水道施設計画・設計指針と解説に基づいた有機物酸化、硝化反応、内生呼吸、DO 維持に必要な酸素量をそれぞれ算出する必要空気量計算を行い、より柔軟に送風量上下限を設定できるようにした。

表資 3-6 東系 DO 設定に関する主な調整内容

日付け	内容
2023/5/8	高風量におけるリン吐出し回避への対応実装
2023/5/29	送風量実測値 24 時間平均に基づく DO 設定出力調整実装
2023/6/29	送風量実測値 6 時間平均に基づく DO 設定出力調整実装
2023/8/2	水質・懸念に基づく送風量上下限設定実装
2023/8/21	送風量上下限設定再調整
2023/8/25	変更指示書への送風量上下限設定の記載開始
2023/8/30	必要空気量計算に基づく送風量上下制限実装

これらの DO 設定に関する送風量に基づく調整を反映し安定化した 8 月 21 日から、DO 設定に関する別の検討（放流水 pH の離散化の試験的な調整）を始めた 9 月 20 日までの 1 か月間での、AI の判断と運転員の判断が一致した割合を**表資 3-7**に示す。令和 5 年度の AI 実証期間全期間では 2 系 DO 設定および 3 系 DO 設定の運転員との判断が一致した割合は 80%未満となっていたが、DO 設定に送風量に基づく調整を反映し安定化した**表資 3-7**の期間では、2 系 DO 設定、3 系 DO 設定の一致率はそれぞれ 83%、81%と 80%以上となった。その他推論項目も一致率が 80%以上となっている。これらの結果は、水質・懸念に基づく送風量上下限の調整、特に必要空気量計算に基づく送風量上下限調整が効いたものと考えられる。熟練技術者が普段参考にしているような水理モデルの要素を AI に導入することで、より熟練技術者の考え方に近く、納得して頂ける推論となる可能性が考えられた。

**表資 3-7 送風量に基づく調整を反映し安定化期間での、各推論項目での実際に AI の判断と
運転員の判断が一致した割合**

項目	一致率	評価	備考
2 系 DO	83% (40/48)	○	
3 系 DO	81% (39/48)	○	
2 系返送汚泥量	94% (45/48)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
3 系返送汚泥量	96% (46/48)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
東系次亜注入率	98% (47/48)	○	
分配槽 PAC 注入量	90% (43/48)	○	
再曝気槽 PAC 注入量	100% (48/48)	○	
4 系送風量	100% (48/48)	○	
5 系送風量	100% (48/48)	○	
4 系返送汚泥量	100% (48/48)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
5 系返送汚泥量	100% (48/48)	○	降雨時等の対応は AI 評価対象外
西系次亜注入率	98% (47/48)	○	
合計	95% (547/576)	○	

次亜注入率は、令和 4 年度の実証では運転員の判断と一致した割合が 80%未満であったが、令和 5 年度の実証では 80%以上となった。この一致率は令和 4 年度途中から改善されつつあり、令和 4 年度途中から説明変数を選別し、熟練技術者が参考にされるもので学習をしておいた結果改善されたものと考えられる。令和 5 年度は更に、降雨時の考え方や、N-BOD の考え方、過曝気時の SS 流出への対応の仕方などの修正も加え、適切に推論できるようになった。

西系返送汚泥量も、令和 4 年度の実証では運転員の判断と一致した割合が 80%未満であったが、令和 5 年度の実証では 80%以上となった。令和 4 年度は汚泥処理能力の制約に関する要素を適切に組み込めていなかったことが課題となっていたが、令和 5 年度では完全には汚泥処理能力の制約を組み込むことはできなかったものの、水処理側で観測できる MLSS の増加具合や、BOD、SS 負荷などから算出される汚泥発生量などを説明変数として導入し、制約条件を組み込んだ。その結果一致率が改善したものと考えられる。

(2) 船橋市高瀬下水処理場での対応判断・運転操作 AI の評価

船橋市高瀬下水処理場では消化槽の導入が令和 3 年度の 12 月頃より始まったこともあり、返流水負荷が 10 月以前より変化している。このような状況であるため、熟練技術者も PAC 注入の運転方針を検討している状況となっている。また、返流水負荷による放流水全リン濃度の変動のため、PAC 注入は夕方開始となり、深夜に停止となるパターンが多い。したがって、現地の状況と推論結果の反映し易さを考慮し、船橋市高瀬下水処理場での PAC 注入の対応判断・運転操作 AI の評価は AI の提示した判断結果の実運転への反映や熟練技術者へのアンケートを行わず、AI の出力と実運転を比較することとした。

PAC 注入の対応判断・運転操作 AI の推論は 1 時間に 1 回行っている。推論結果と熟練技術者の運転の比較で、熟練技術者にも許容可能な数時間の注入開始時間、停止時間のズレは生じる可能性があると考えられるが、今回熟練技術者へのアンケートは無く実運転との比較のみであった。そのため、合否判定は熟練技術者の注入状態の対応判断と一致するか否かを根拠として、下記の○・×として示した。合否判定を行う点数は熟練技術者の対応判断を行った点のみとした。

○ : 熟練技術者の注入状態の判断と一致

× : 熟練技術者の注入状態の判断と異なる

結果として、AI の判断結果は表資 3-8 に示す通り 5 項目の AI × 4,695 回の推論の計 23,475 点の試験のうち 22,209 点で熟練技術者の判断と一致しており、一致率 95%であった。よって、目標を達成した。

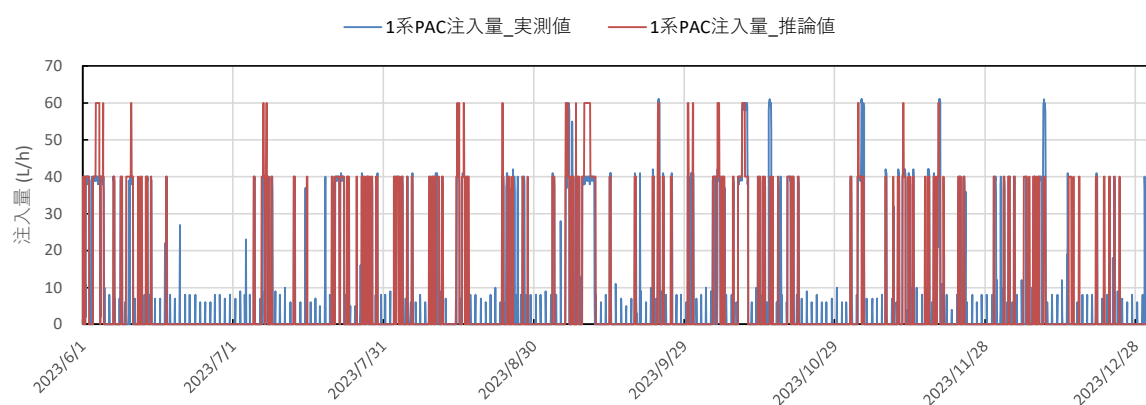
表資 3-8 対応判断・運転操作 AI の現地実証での検証結果（船橋市）

評価	回数	割合
○	22,209	95%
×	1,266	5%
合計	23,475	-

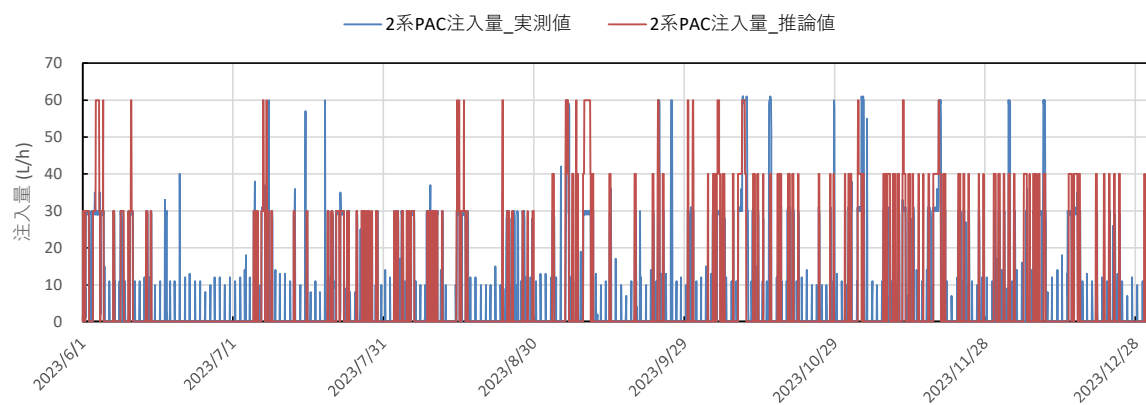
各推論項目での AI の判断と運転員の判断が一致した割合を表資 3-9 に示す。評価指標として、一致率 60%未満は×、60%以上、80%未満は△、80%以上は○とした。また、各推論項目での AI の判断と熟練技術者の判断の推移を図資 3-19～図資 3-23 に示す。図資 3-19～図資 3-23 で示している熟練技術者の判断である PAC 注入量実測値（青色）では、各系で 10 L/h 程度の注入が頻繁に行われているが、これは 1 日 1 回午前中に行われる配管閉塞防止用の注入であり、この注入は一致率の算出から除いた。

表資 3-9 各推論項目での AI の判断と運転員の判断が一致した割合

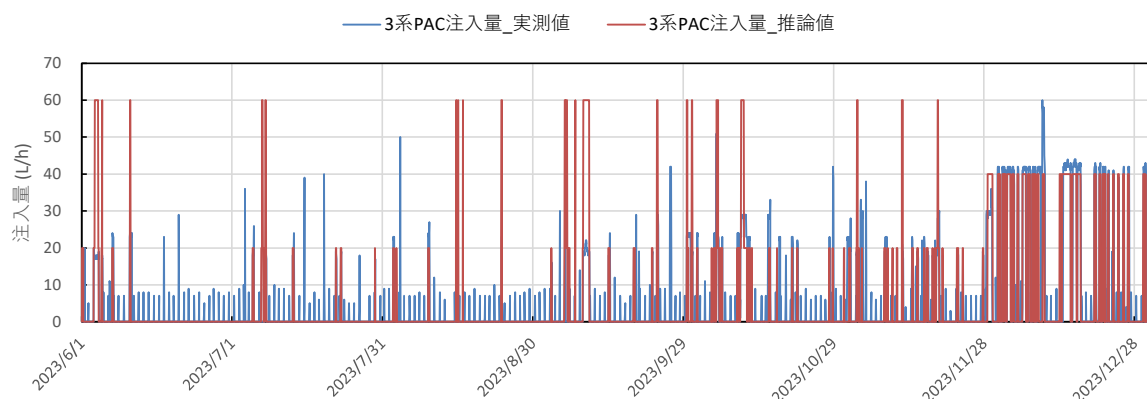
項目	一致率	評価	備考
1 系 PAC 注入量	94% (4,410/4,695)	○	
2 系 PAC 注入量	93% (4,365/4,695)	○	
3 系 PAC 注入量	95% (4,467/4,695)	○	
4 系 PAC 注入量	96% (4,528/4,695)	○	
5 系 PAC 注入量	95% (4,439/4,695)	○	



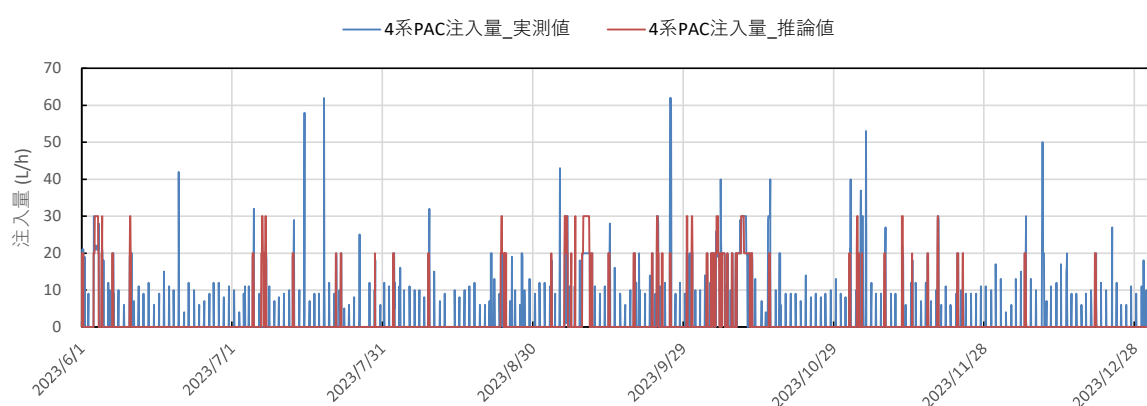
図資 3-19 船橋市 1 系 PAC 注入量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



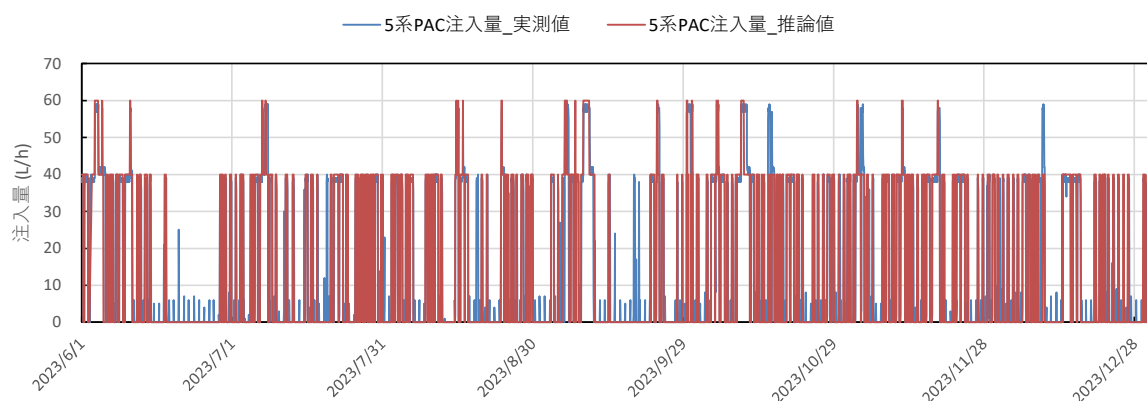
図資 3-20 船橋市 2 系 PAC 注入量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



図資 3-21 船橋市 3 系 PAC 注入量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



図資 3-22 船橋市 4 系 PAC 注入量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断



図資 3-23 船橋市 5 系 PAC 注入量設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断

令和 4 年度の船橋市の PAC 推論は 3 系で一致率が 80%未満となっていたが、令和 5 年度の船橋市の PAC 推論は全ての系で一致率が 80%以上となった。これは令和 4 年度に、3 系が 10 月中旬より点検整備を終えて運用を再開したこともあり、十分な学習データが無かったためであることが考えられている。令和 5 年度は 3 系の運用開始から十分期間が経っており、3 系の運転データの蓄積が進んだ。そのため令和 5 年度は 3 系の一致率が改善したものと考えられる。また、令和 5 年度は他の系の一致率も全体的

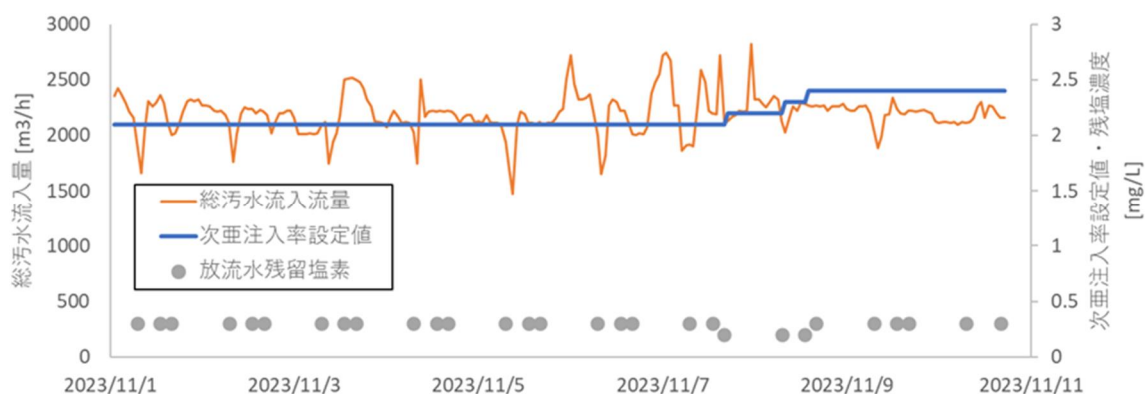
に改善した。令和 5 年度の PAC 推論モデルにはヒアリング結果に基づき、消化槽導入後に追加で分析するようになった臨時分析値の結果に基づく各系の優先度合いの判断を組み込んだ。熟練技術者の考える各系の処理の悪化具合に基づく判断を組み込むことで全体的に一致率が改善したものと考えられる。

(3)A 処理場での対応判断・運転操作 AI の評価

検証期間中の説明変数各値を図資 3-24 に示す。放流水残塩濃度は 7:00、13:00、16:00 の 3 回/日分析を行い、0.2 mg/L が 3 回、0.3 mg/L が 26 回であった。次亜塩注入比率設定値は 3 回変更させており、いずれも 0.1 mg/L の増加操作であった。

表資 3-10～表資 3-12 に、現地検証での減少操作・増加操作のスコア表およびスレットスコアと見逃し・空振り率を示す。現地検証期間中、次亜注入比率設定値の AI による減少操作予測出力は無く、実際の減少操作も行われなかった。増加操作は 3 回行われ、同タイミングで AI でも増加操作予測出力が行われた。その際の予測結果表示画面の例を図資 3-25 に示す。放流水残塩濃度が 0.2 mg/L と低い値であったことを主な要因として、増加操作を予測出力した。現地検証期間中増加操作を行った 3 回いずれも、放流水残塩濃度が低いことを主な要因として AI による増加操作予測が出力された。

検証結果のトレンドグラフを図資 3-26 に示す。増加操作を適切なタイミングで予測出力したことを確認した。アンケートでも、熟練技術者の判断と一致したことを確認した。



図資 3-24 現地実証期間中流入流量、次亜塩注入率設定値、放流水残留塩素濃度のトレンド

表資 3-10 現地実証での次亜塩注入率減少操作スコア

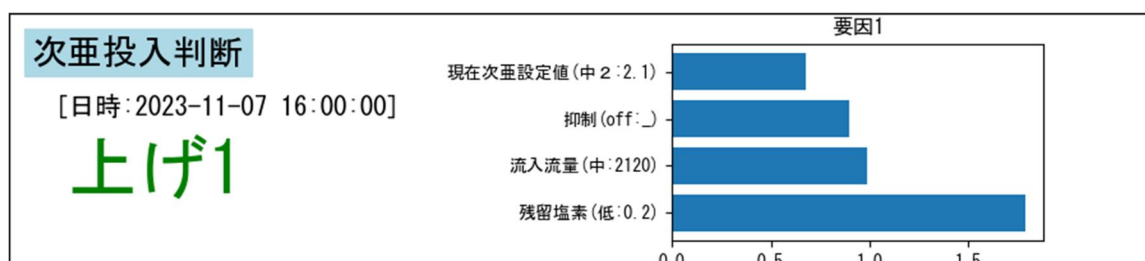
減少操作		実測	
		あり	なし
予測	あり	0	0
	なし	0	

表資 3-11 現地実証での次亜塩注入率増加操作スコア

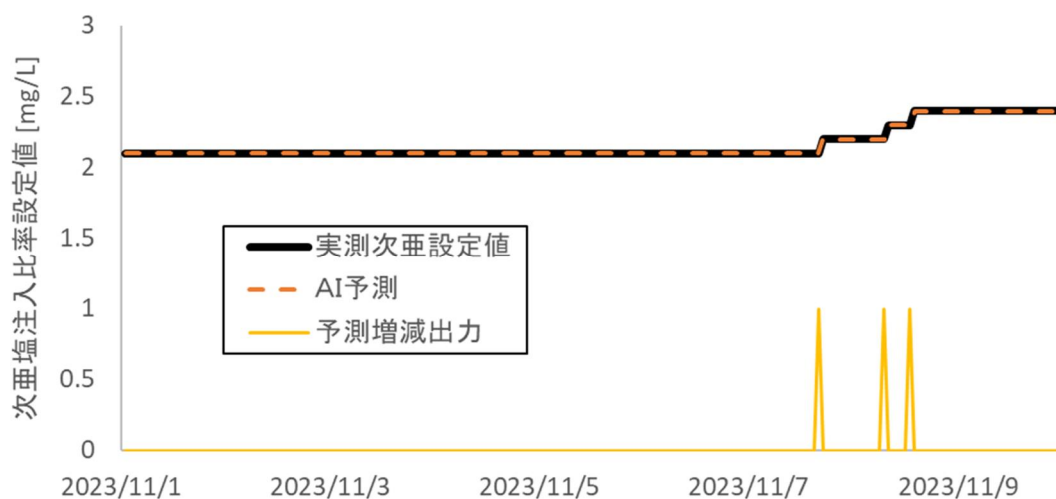
増加操作		実測	
		あり	なし
予測	あり	3	0
	なし	0	

表資 3-12 現地実証でのスレットスコアと見逃し・空振り率

	減少操作	増加操作
スレットスコア [-]	-	1
見逃し率 [%]	-	0
空振り率 [%]	-	0



図資 3-25 現地実証での AI 予測結果表示画面



図資 3-26 A 処理場次亜塩注入率設定の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断

(4)B 処理場での対応判断・運転操作 AI の評価

AI の提示した対応判断と熟練技術者の判断の合否判定は○・△・×として、下記の根拠に基づき示す。

- : 熟練技術者の判断と ON または OFF の判断の時間ずれが 1 時間以内であるとき。時間ずれが不明の場合は、推論値と pH トレンドの差が 0.03 以内であるとき。
- △ : 熟練技術者の判断と ON または OFF の判断の時間ずれが 2 時間以内であるとき。時間ずれが不明の場合は、推論値と pH トレンドの差が 0.05 以内であるとき。また、判断の一致しない理由が現場都合によるものであるとき。
- × : 熟練技術者の判断と ON または OFF の判断の時間ずれが 3 時間以上であるとき。時間ずれが不明の場合は、推論値と pH トレンドの差が 0.05 以上であるとき。

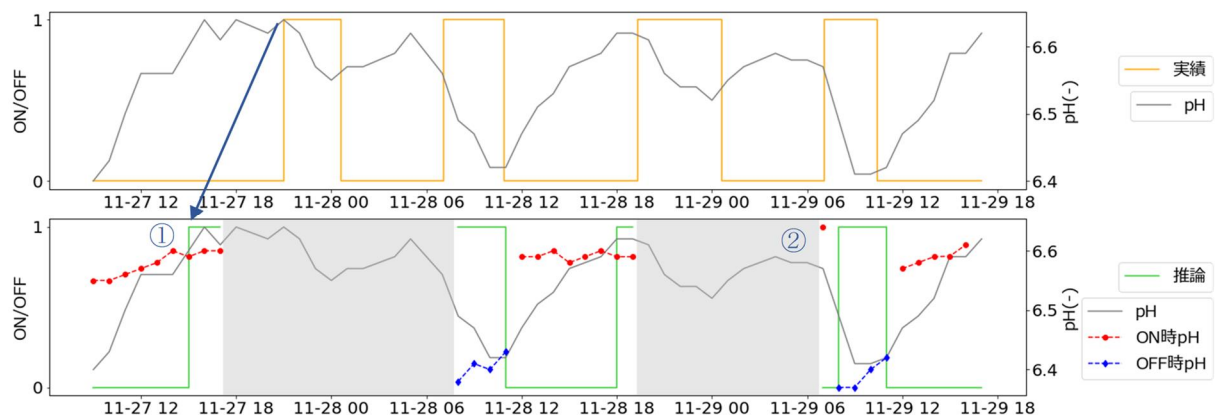
結果として AI の判断結果は、4 項目の AI ×10 日間の実証期間で熟練技術者による運転変更があった回数の計 29 点の試験のうち 26 点で○または△と判定され、一致率 90%となった。計 29 点の試験のうち、18 回 (62%) が AI の判断と運転員の判断が一致となる○と判定され、8 回 (28%) がほぼ一致の△、3 回 (10%) が許容不可の×と判定された。一致率は△以上の判定のもので評価することとし、**表資 3-13** に示す通り、90%と目標を達成した。

表資 3-13 対応判断・運転操作 AI の現地実証での検証結果 (B 処理場)

評価	回数	割合
○	18	62%
△	8	28%
×	3	10%
合計	29	-

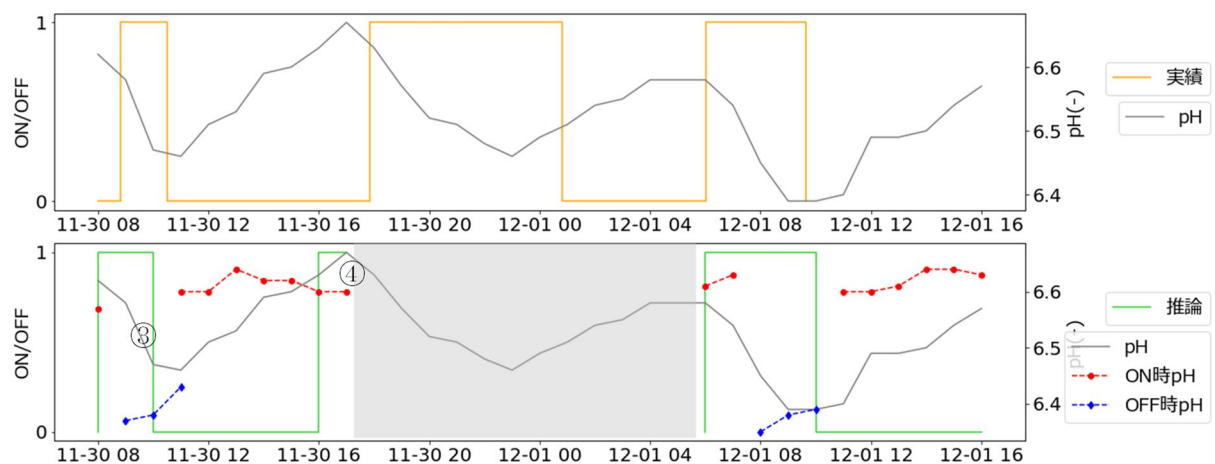
①1 系および 2 系の推論結果

実証期間の推論結果による曝気装置運転状況と運転実績を示す。グラフ上段は現場判断による運転実績 (橙線) を pH トレンドとともに示している。下段の緑線は推論結果による曝気装置の運転状況で、この動きが上段と近ければ AI は実際の運転を再現できているといえる。赤破線は ON 時 pH の推論値で、pH トレンドがこの値を上回ると ON の判断となる。**図資 3-27** の①では pH トレンドが ON 時 pH の推論値を上回ったため ON 判定が出たが、実際の運転は 6 時間後であり、評価としては×となっている。また、**図資 3-27** の②では ON 時 pH の推論値がトレンドより大きい、この時点で実際の運転が ON になったため pH が低下し始め、AI 判断の場合何時間後に ON 判定が出たかはわからない。このような場合は、推論値と pH トレンドの差によって評価した。青破線は OFF 時 pH の推論値で、pH トレンドがこの値を上回ると OFF の判断となる。**図資 3-27** の期間では OFF 判定のタイミングは実績とほぼ一致していた。



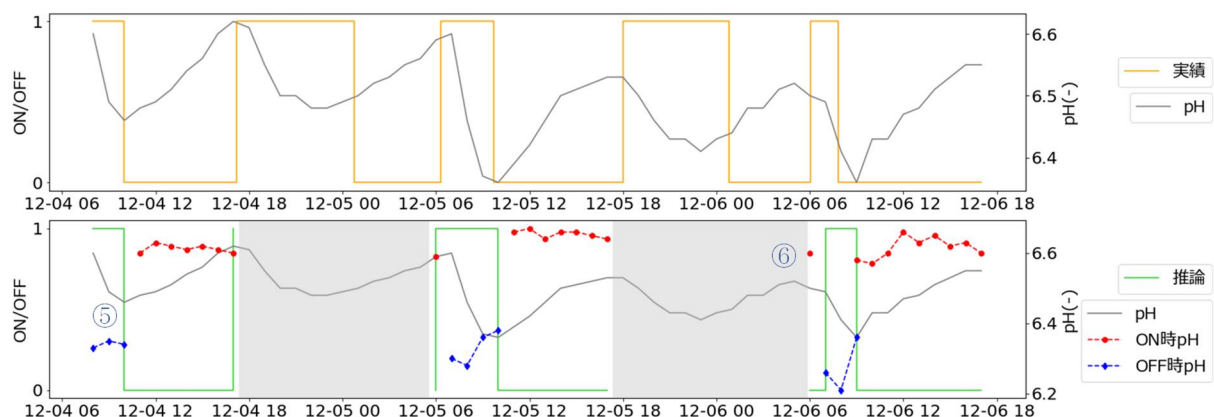
図資 3-27 B 処理場 1 系および 2 系の推論結果 1 [11/27-11/29]

図資 3-28 の③では、OFF 時推論値にトレンドが到達していないが、1 時間後の推論値を採用してトレンドとの差から△の評価とした。④では実績より約 2 時間早く ON の判定が出ており、△の評価とした。



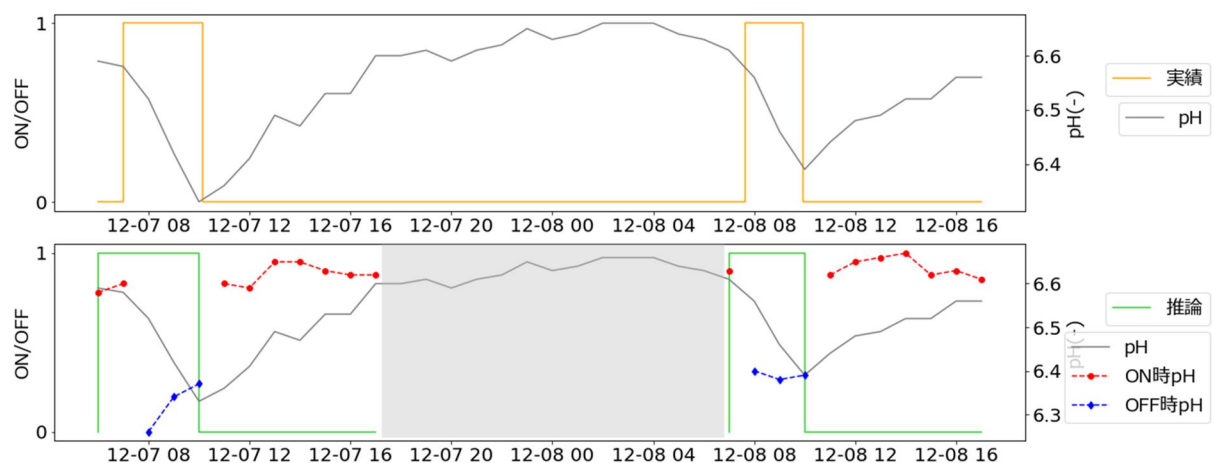
図資 3-28 B 処理場 1 系および 2 系の推論結果 2 [11/30-12/1]

図資 3-29 の⑤ではトレンド値が推論値に達していないが、このときの OFF 操作は現場都合で少しタイミングが早かったため△の評価とした。⑥ではトレンド値が推論値に達せず、またその差も大きいことから×評価とした。



図資 3-29 B 処理場 1 系および 2 系の推論結果 3 [12/4-12/6]

図資 3-30 の期間では概ね実績と推論が一致していた。



図資 3-30 B 処理場 1 系および 2 系の推論結果 4 [12/7-12/8]

B 処理場 1 系および 2 系の推論結果のまとめを表資 3-14、表資 3-15 に示す。時間ずれによる評価を優先し、時間ずれが不明な場合は pH の推論値との差による評価とした。ON 時推論は正解率 80%、OFF 時推論は正解率 100%となった。

表資 3-14 B 処理場 1 系および 2 系の ON 時推論結果

	日にち	実績の 判断時間	AIの 判断時間	時間ずれに よる評価	pH トレンド	推論値	推論値差に よる評価
1	11月27日	21:00	15:00	×			
2	11月28日	19:19	18:00	△			
3	11月29日	7:04	-	-	6.57	6.62	△
4	11月30日	8:48	8:00	○			
5	11月30日	17:51	16:00	△			
6	12月1日	6:01	-	-	6.58	6.61	○
7	12月5日	6:17	6:00	○			
8	12月6日	6:03	-	-	6.5	6.6	×
9	12月7日	7:00	6:00	○			
10	12月8日	7:39	-	-	6.61	6.63	○
						正解率	80%

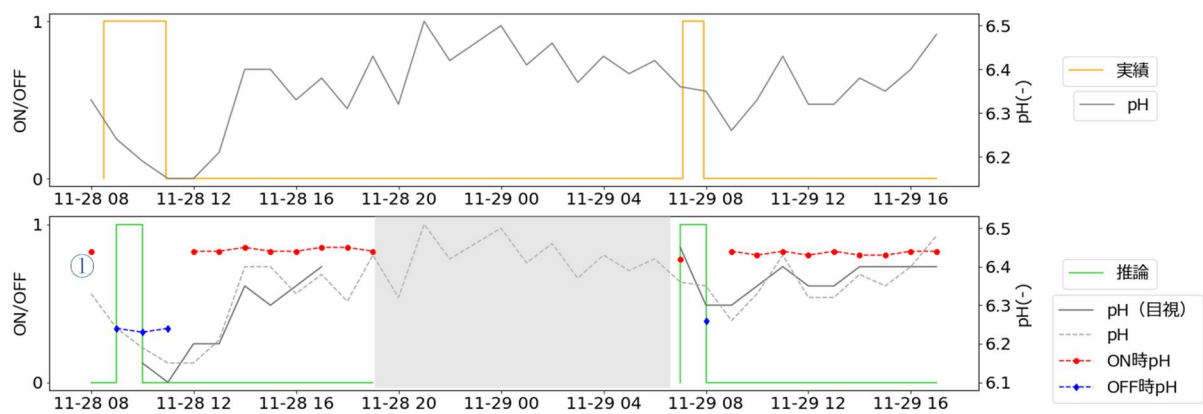
表資 3-15 B 処理場 1 系および 2 系の OFF 時推論結果

	日にち	実績の 判断時間	AIの 判断時間	時間ずれに よる評価	pH トレンド	推論値	推論値差に よる評価
1	11月28日	10:55	11:00	○			
2	11月29日	10:24	11:00	○			
3	11月30日	10:30	-	-	6.47	6.43	△
4	12月1日	9:38	10:00	○			
5	12月4日	10:00	-	-	6.46	6.35	△現場都合
6	12月5日	9:44	10:00	○			
7	12月6日	7:50	9:00	△			
8	12月7日	10:08	10:00	○			
9	12月8日	9:56	10:00	○			
						正解率	100%

②3 系および 4 系の推論結果

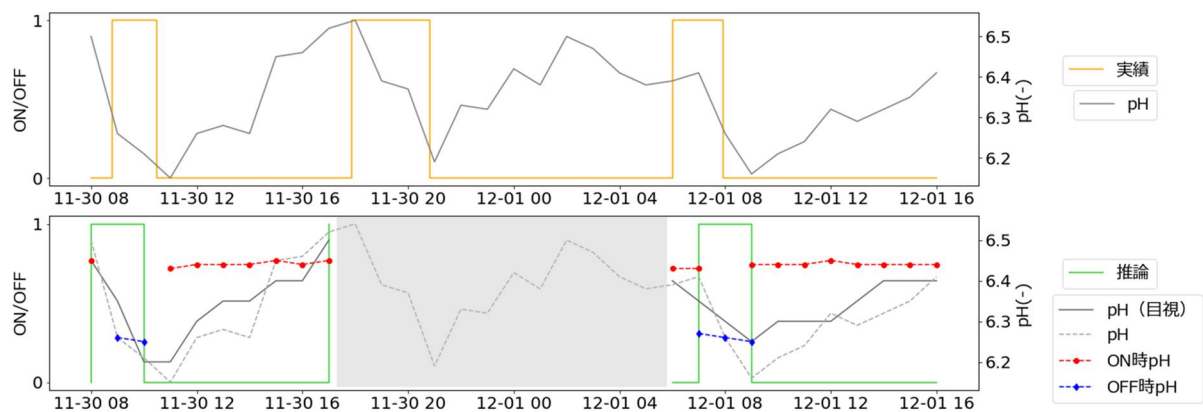
B 処理場 3 系および 4 系の推論結果を示す。3 系および 4 系はオンライン pH 計の性質上、pH トレンドの値が 0.2 程度上下に振れており、現場ではトレンドグラフを確認しておよその中央値を現在の値と考えているとのことであった。そこで、同様に現場にてトレンドグラフを確認した値を pH（目視）として下段グラフ上に黒実線で示した。

図資 3-31 の①では、トレンド pH が ON 時推論値に到達せず、またその差も大きいことから×評価とした。他の推論についてはほぼ実績と一致した。



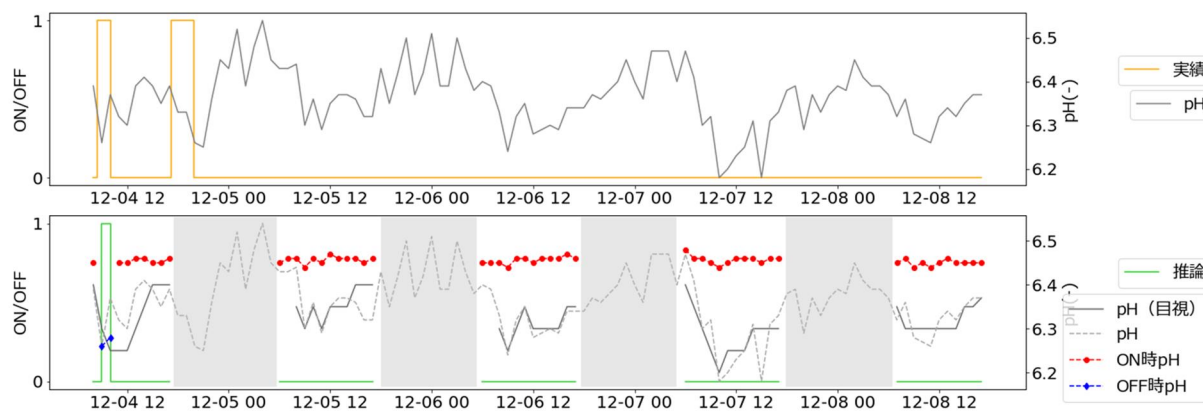
図資 3-31 B 処理場 3 系および 4 系の推論結果 1 [11/27-11/29]

図資 3-32 は、推論結果と実績に 1~2 時間以内のずれはあるものの、ほぼ一致した。



図資 3-32 B 処理場 3 系および 4 系の推論結果 2 [11/30-12/1]

図資 3-33 は 12 月 5 日以降曝気装置の運転がなかったが、12 月 4 日の現場滞在中の推論についてはほぼ実績と一致した。



図資 3-33 B 処理場 3 系および 4 系の推論結果 3 [12/4-12/6]

B 処理場 3 系および 4 系の推論結果のまとめを表資 3-16、表資 3-17 に示す。3 系および 4 系では、ON 時推論は 80%、OFF 時推論は 100%の正解率であった。

表資 3-16 B 処理場 3 系および 4 系の ON 時推論結果

	日にち	実績の 判断時間	AIの 判断時間	時間ずれに よる評価	pH トレンド	推論値	推論値差に よる評価
1	11月28日	8:29	-	-	6.33	6.44	×
2	11月29日	7:06	7:00	○			
3	11月30日	8:48	8:00	○			
4	12月1日	6:00	-	-	6.4	6.43	○
5	12月4日	8:26	-	-	6.4	6.45	△
						正解率	80%

表資 3-17 B 処理場 3 系および 4 系の OFF 時推論結果

	日にち	実績の 判断時間	AIの 判断時間	時間ずれに よる評価	pH トレンド	推論値	推論値差に よる評価
1	11月28日	10:55	10:00	○			
2	11月29日	7:56	8:00	○			
3	11月30日	10:30	10:00	○			
4	12月1日	7:55	9:00	△			
5	12月4日	10:00	10:00	○			
						正解率	100%

③現場における判断方法について

現場では、水質の状況、オンライン pH 計とポータブル pH 計の測定値ずれ、時間帯や系列による流入負荷の違いなどから 8 時と 15 時の pH 目標値（オンライン値）を設定している。令和 5 年度の実証を実施した 2023 年 11 月 27 日から 12 月 8 日の期間については表資 3-18 の目標値が設定されており、8 時と 15 時に pH がこの値になることを目安に曝気装置運転が行われていた。また、1 時から 6 時の深夜帯は曝気装置停止時間に設定されており、夜から曝気装置の運転を ON にした場合 1 時前に OFF にし、朝は 6 時を過ぎた頃に ON にするという運転が行われている場合が多かった。

表資 3-18 pH 目標値

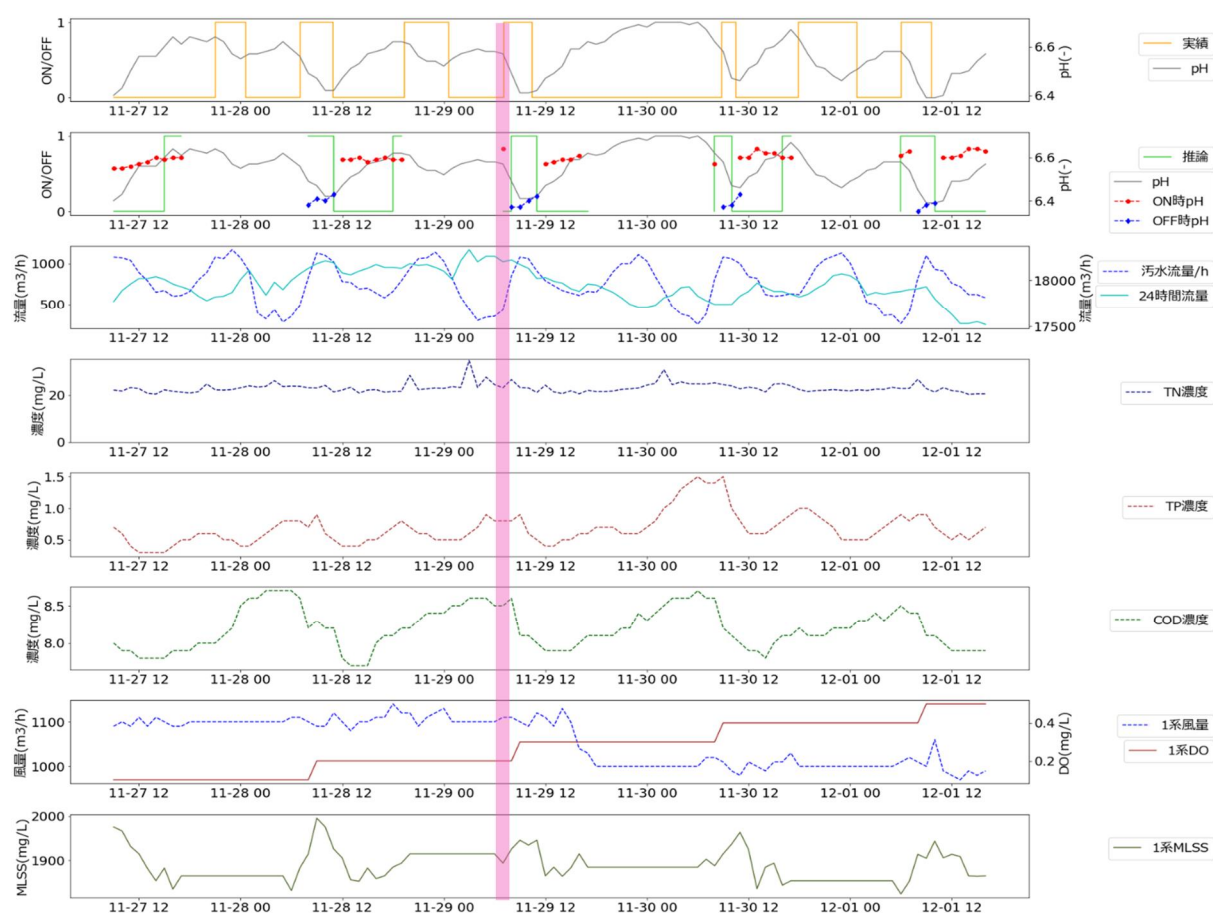
	1/2 系	3/4 系
8 時	6.4	6.3
15 時	6.5	6.4

また、朝夜の高負荷流入に合わせて曝気を行う場合が多く、pH が高くなっても高負荷流入のタイミングに合わせるため曝気開始を待つ場合がある。ただ、曝気装置の運転変更は現場での手作業であり、運転

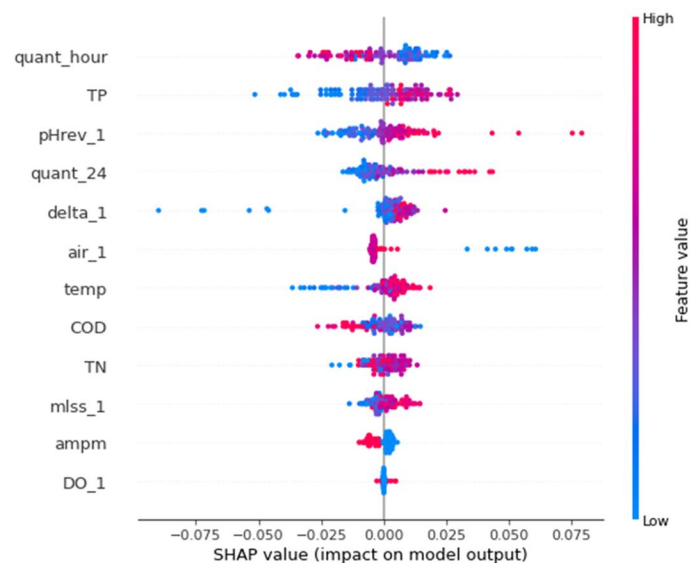
作業員の手が空いているときや場内巡回と一緒に行為れるため、1~2 時間程度のタイミングずれは許容範囲である。

④パラメータ比較

図資 3-34 は 1 系および 2 系の推論結果と説明変数となるパラメータのトレンドグラフである。11 月 29 日 7 時の推論では、推論値がトレンド値より少し高かった。このときの推論への各パラメータの寄与を参照すると図資 3-35 のようになっており、時間当たり汚水流量の小ささと 24 時間流量の大きさが推論値を上方に動かしたとみられた。



図資 3-34 B 処理場 1 系および 2 系の推論結果と各パラメータトレンド [11/27-12/1]



図資 3-35 寄与度確認 寄与度：上から時間当たり汚水流量、T-P、pH 補正值（オンラインとハンディの差）、24 時間流量、pH 変化量、送風量、水温、COD、T-N、MLSS、午前午後、DO

(5) C 処理場での対応判断・運転操作 AI の評価

AI の提示した対応判断と熟練技術者の判断の合否判定は○・×として、下記の根拠に基づき示す。

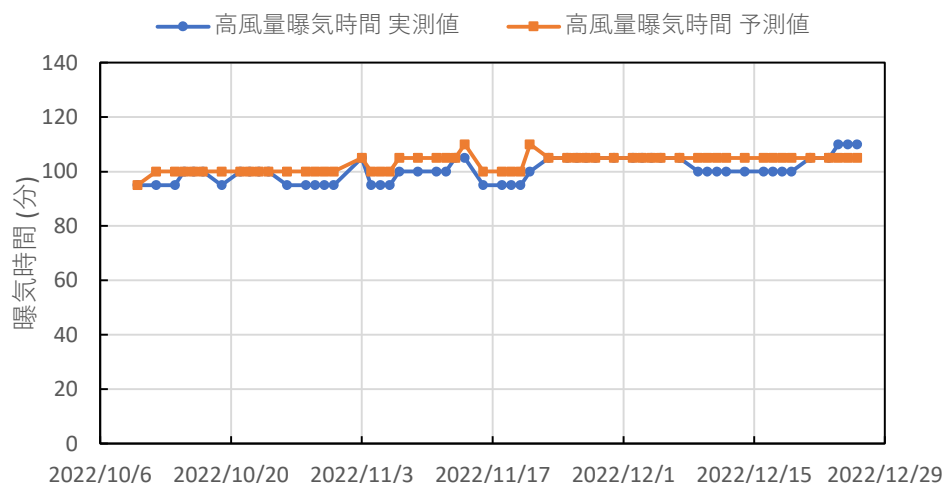
- ： 熟練技術者の判断と一致
- × ： 熟練技術者の判断と異なる

77 日間の実証期間で運転データがある日数の計 56 点に対し推論を行い、うち 45 点で熟練技術者の判断と一致していた。その結果、表資 3-19 に示す通り一致率は 80%となった。

表資 3-19 対応判断・運転操作 AI の現地実証での検証結果（C 処理場）

評価	回数	割合
○	45	80%
×	11	20%
合計	56	-

オフサイト実証期間の曝気装置高曝気時間の推論結果と運転実績を図資 3-36 に示す。高曝気時間の増加・維持・減少の傾向が実測値と予測値で概ね一致している。高曝気時間の実測値と予測値の RMSE は 4.0 分となり、曝気時間の変更幅の最小値である 5 分よりも短くなった。これらの結果より、モデルが良好であることが示された。



図資 3-36 C 処理場 No. 1 曝気装置高曝気時間の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断

目的変数（No.1 曝気装置高曝気時間）に対する各説明変数の相関係数を表資 3-20 に示す。UV 値や回分槽水位下限は比較的高い正の相関を示し、流入量、放流量は比較的高い負の相関を示した。UV 値は放流水の有機物量をモニタリングするもので、負荷が高まっている際に高曝気時間を増やすものと思われる。回分槽水位下限は処理水量を調整するものであり、こちらも負荷に伴う説明変数が現れているものと考えられる。これらの結果から、UV 値や回分槽水位、流量などの重要なパラメータに対して、曝気時間を増加/減少をすることで安定的な処理を達成していることが示唆された。

表資 3-20 目的変数に対する各説明変数の相関係数（G 処理場）

No.	説明変数	相関係数
1	流入量	-0.4594
2	放流量	-0.4758
3	流入水_水温	-0.2779
4	流入水_pH	0.3418
5	回分槽_pH	0.0903
6	回分槽_MLSS	-0.2149
7	回分槽_SV	-0.2332
8	回分槽汚泥界面	-0.1084
9	UV 値 %	0.5206
10	放流水_pH	0.1116
11	放流水_透視度	-0.0283
12	回分槽 水位上限	-0.1002
13	回分槽 水位下限	0.3854

(6) D 処理場での対応判断・運転操作 AI の評価

AI の提示した対応判断と熟練技術者の判断の合否判定は○・×として、下記の根拠に基づき示す。

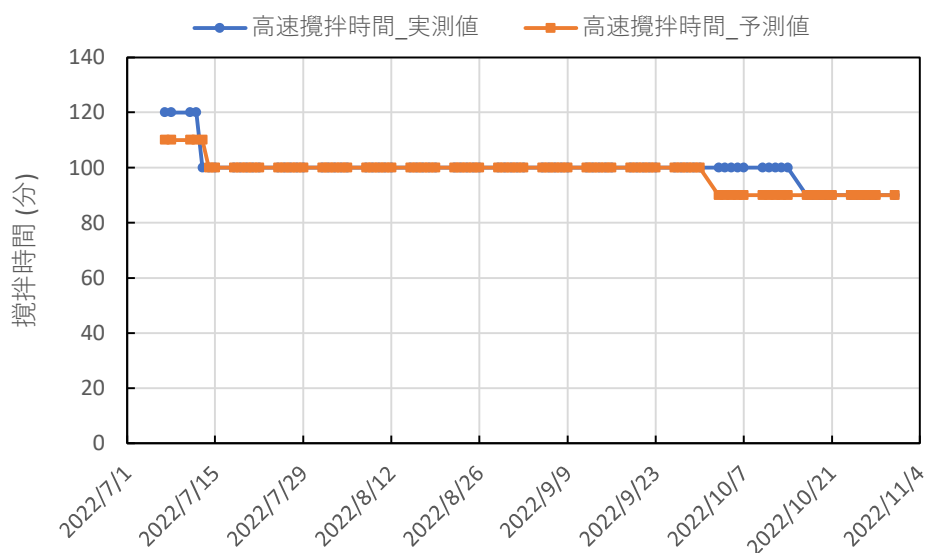
- : 熟練技術者の判断と一致
- × : 熟練技術者の判断と異なる

116 日間の実証期間で運転データがある平日の日数の計 83 点に対し推論を行い、うち 68 点で熟練技術者の判断と一致していた。その結果、表資 3-21 に示す通り一致率は 82%となった。

表資 3-21 対応判断・運転操作 AI の現地実証での検証結果 (D 処理場)

評価	回数	割合
○	68	82%
×	15	18%
合計	83	-

オフサイト実証期間の曝気装置高速撹拌時間の推論結果と運転実績を図資 3-37 に示す。高速撹拌時間の増加・維持・減少の傾向が実測値と予測値で概ね一致している。高速撹拌時間の実測値と予測値の RMSE は 4.25 分となり、高速撹拌時間の変更幅の最小値である 10 分よりも短くなった。これらの結果より、モデルが良好であることが示された。



図資 3-37 D 処理場 No. 1 曝気装置タイマー設定高速撹拌時間の対応判断 AI、運転操作 AI の推論結果と熟練技術者の判断

目的変数 (No.1 曝気装置高速撹拌時間) に対する各説明変数の相関係数を表資 3-22 に示す。流入水水温や放流水水温は比較的高い正の相関を示し、OD 槽 MLSS は比較的高い負の相関を示した。これらの結果から、水温や MLSS などの重要なパラメータに対して、高速撹拌時間を増加または減少をするこ

とで安定的な処理を達成していることが示唆された。

表資 3-22 目的変数に対する各説明変数の相関係数 (D 処理場)

No.	説明変数	相関係数
1	流入_水温	0.72
2	1 系 OD 槽_MLSS	-0.30
3	放流_水温	0.78
4	最終沈殿池_返送汚泥濃度	-0.16
5	放流_透視度	-0.06
6	最終沈殿池_返送汚泥率	-0.13

3. 3 水質予測 AI

広島市西部水資源再生センターにおける、T-N[放流水]、T-P[放流水]、pH[放流水]の3つの水質について、24 時間先、48 時間先を予測対象とした現地実証評価の結果は、**表資 3-23** に示す通り、RMSE に基づいた誤差比率の評価では $\geq 80\%$ （誤差 20%以下）の目標精度を満たしている。以下、水質ごとに予測結果の詳細を示す。

表資 3-23 水質予測 AI の現地実証評価での検証結果一覧

No	予測対象	24 時間先		48 時間先		評価	値幅
		RMSE	精度	RMSE	精度		
1	放流水 T-N [mg/L]	2.06	88%	2.47	85%	○	7.27～24.2[mg/L]
2	放流水 T-P [mg/L]	0.80	82%	0.87	80%	○	0.47～4.80[mg/L]
3	放流水 pH	0.066	89%	0.056	91%	○	6.43～7.01

※精度 $=100 \times (1 - \text{RMSE} / \text{値幅}) [\%]$

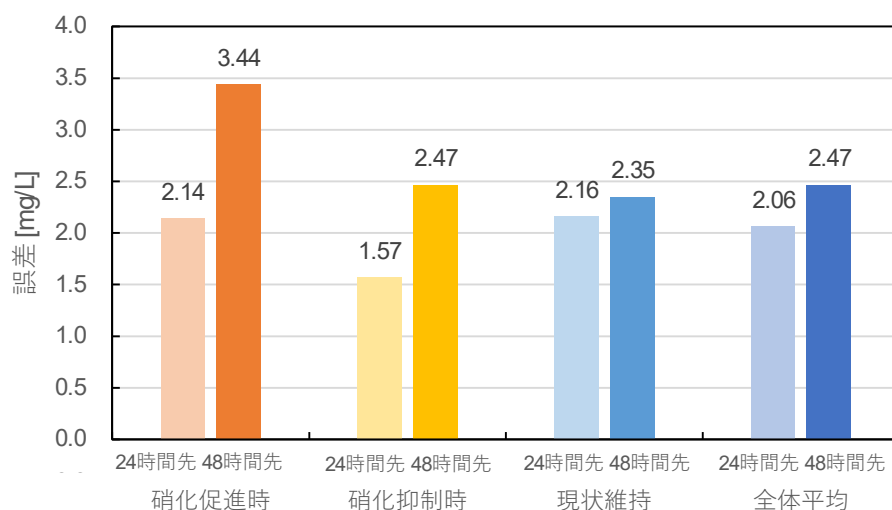
(1) T-N 予測

24 時間先、48 時間先の T-N 予測の結果を**表資 3-24**、**図資 3-38** に示す。どの項目も評価指標 $\geq 80\%$ を満たしている。また 24 時間先と比較して 48 時間先の予測精度が低いことから、予測対象時刻が予測時点から離れるにしたがって予測精度が低下する傾向が見て取れる。

表資 3-24 T-N 予測の検証結果

No	予測対象	24 時間先		48 時間先	
		RMSE	精度	RMSE	精度
1	硝化促進時	2.14	87%	3.44	80%
2	硝化抑制時	1.57	91%	2.47	85%
3	現状維持時	2.16	87%	2.35	86%
全体平均		1.89	88%	2.47	83%

T-N 変動幅 7.27~24.2 [mg/L]



図資 3-38 T-N 予測の予測誤差 (RMSE)

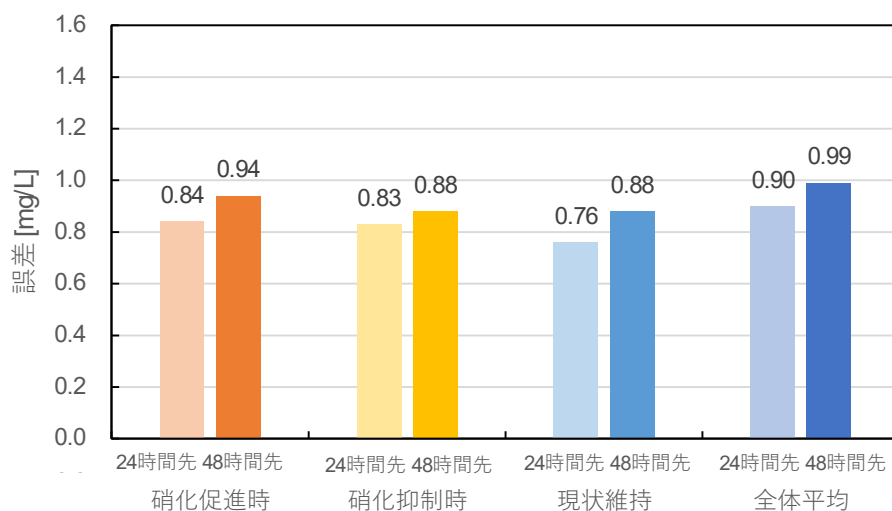
(2) T-P 予測

24 時間先、48 時間先の T-P 予測の結果を**表資 3-25**、**図資 3-39** に示す。48 時間先の現状維持時の推定精度が若干、8 割を下回っているが、それ以外のケースでは評価指標 $\geq 80\%$ を満たしている。

表資 3-25 T-P 予測の検証結果

No	予測対象	24 時間先		48 時間先	
		RMSE	精度	RMSE	精度
1	硝化促進時	0.84	81%	0.94	78%
2	硝化抑制時	0.83	81%	0.88	80%
3	現状維持時	0.76	82%	0.88	80%
全体平均		0.90	82%	0.99	80%

T-P 変動幅 0.47~4.80[mg/L]



図資 3-39 T-P 予測の予測誤差 (RMSE)

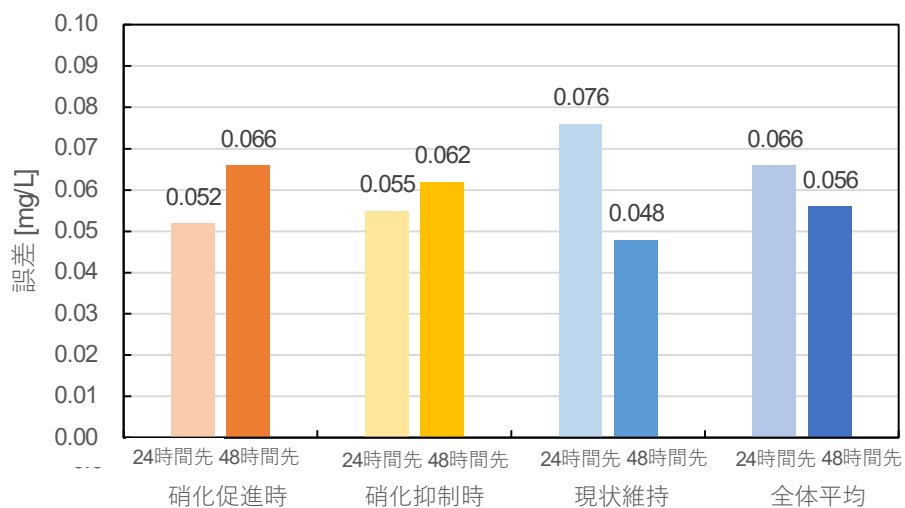
(3) pH 予測

24 時間先、48 時間先の pH 予測の結果を表資 3-26、図資 3-40 に示す。どの項目も評価指標 $\geq 80\%$ を満たしている。また、現状維持と全体平均については、48 時間先の予測結果がわずかながら上昇を示した。

表資 3-26 pH 予測の検証結果

No	予測対象	24 時間先		48 時間先	
		RMSE	精度	RMSE	精度
1	硝化促進時	0.052	91%	0.066	89%
2	硝化抑制時	0.055	91%	0.062	89%
3	現状維持時	0.076	87%	0.048	91%
全体平均		0.066	89%	0.056	91%

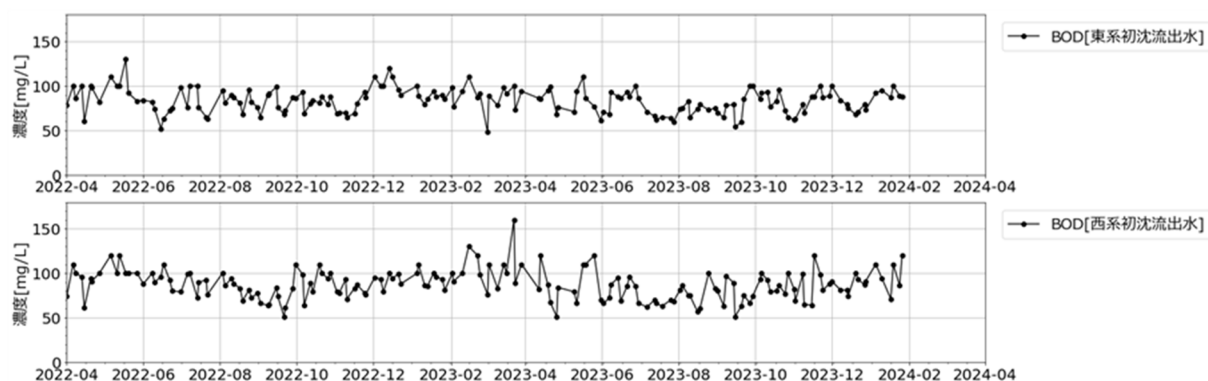
pH 変動幅 6.43~7.01



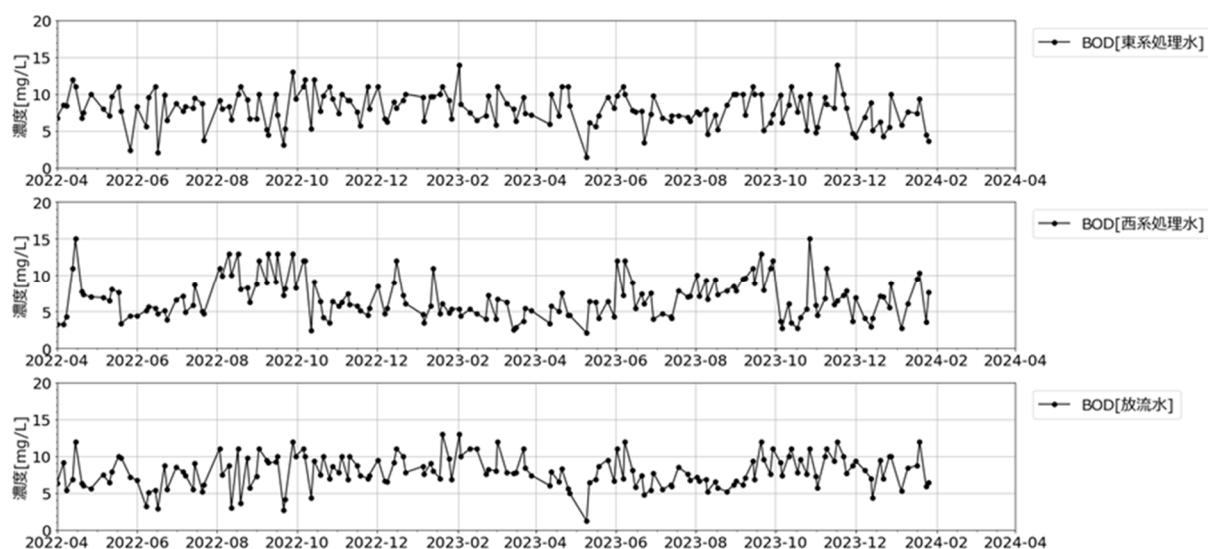
図資 3-40 pH 予測の予測誤差 (RMSE)

3. 4 処理の安定性

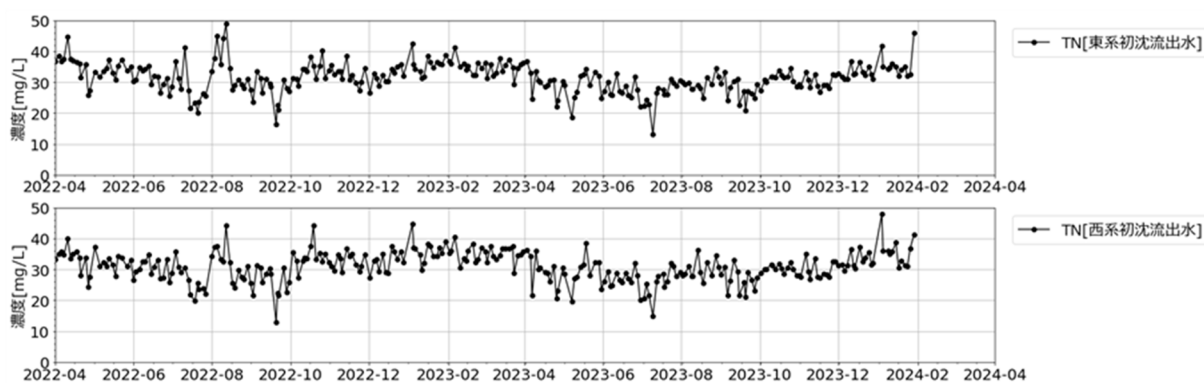
広島市西部水資源再生センターの令和4年度、令和5年度の流入水及び処理水・放流水のBOD、T-N、T-Pの推移をそれぞれ図資3-41～図資3-46に示す。令和5年度のAI実証運転は2023年5月8日～10月31日に実施した。AIによる運転期間でも熟練技術者による運転期間と比較して処理水質が悪化する傾向は見られず、AIによる運転での処理の安定性を確認した。



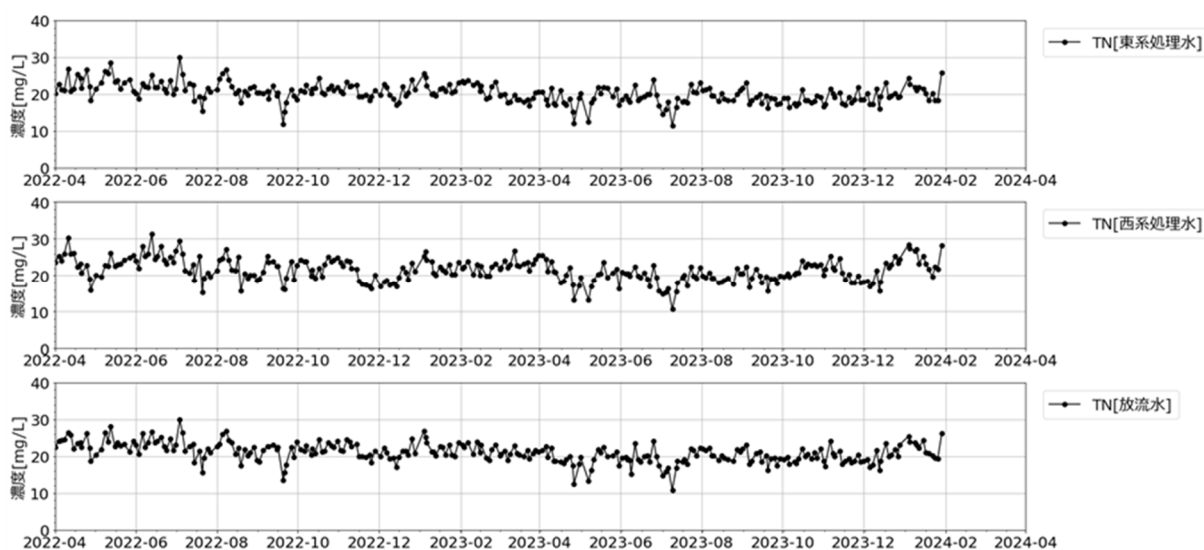
図資 3-41 広島市西部水資源再生センター流入 BOD の推移



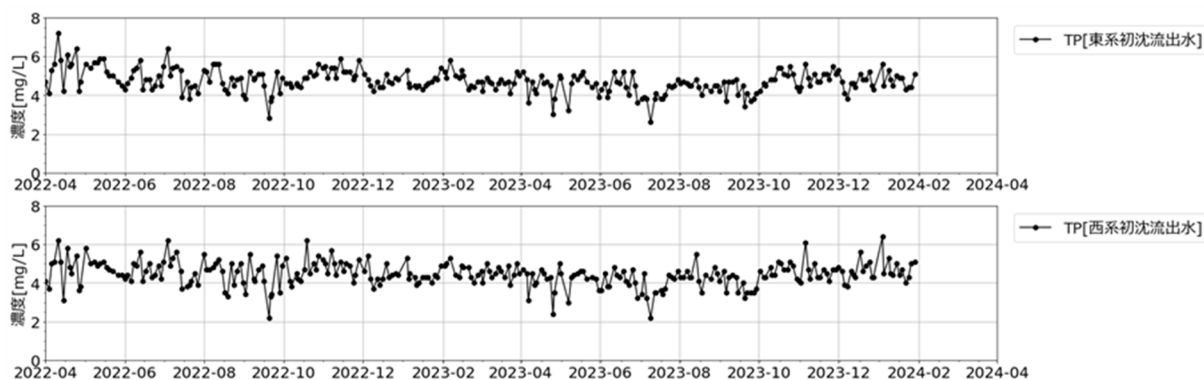
図資 3-42 広島市西部水資源再生センター処理水 BOD の推移



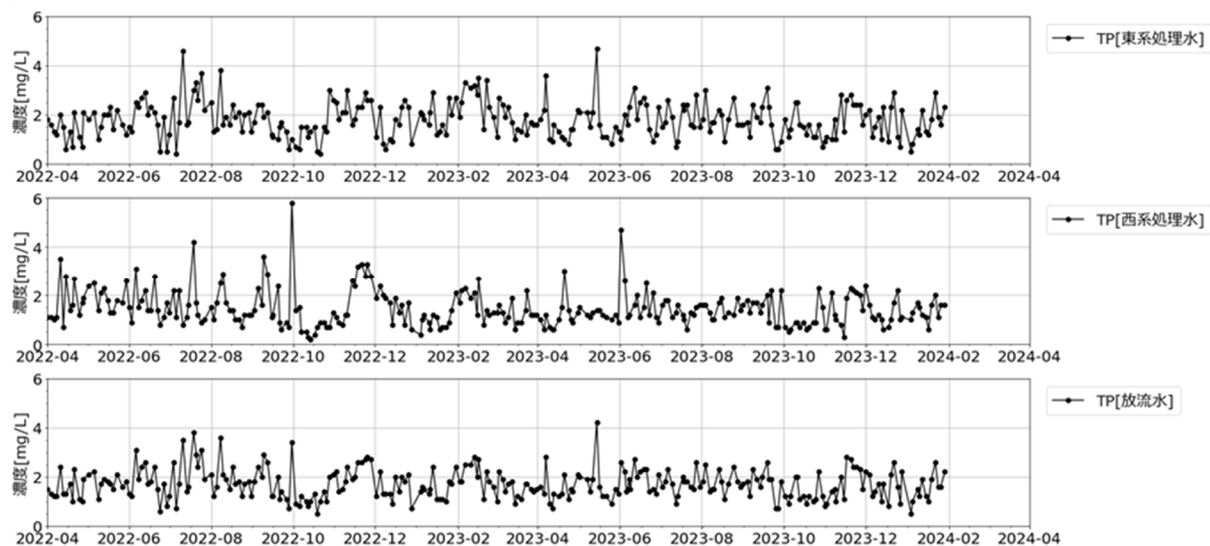
図資 3-43 広島市西部水資源再生センター流入 T-N の推移



図資 3-44 広島市西部水資源再生センター処理水 T-N の推移



図資 3-45 広島市西部水資源再生センター流入 T-P の推移



図資 3-46 広島市西部水資源再生センター処理水 T-P の推移

4 N₂O 発生量の把握

4. 1 背景

一酸化二窒素 (N₂O) は温室効果が CO₂ の約 300 倍と温室効果の高いガスとして知られており、2050 年のカーボンニュートラル達成に向けて排出量を削減していく必要がある。下水処理の過程では、水処理工程や汚泥焼却工程で発生することが知られており、水処理工程での N₂O による温室効果ガス発生量は下水道事業から発生する温室効果ガスの約 7.4%を、汚泥焼却工程では約 20.4%を占める。

水処理工程で発生する N₂O は、アンモニアの硝化過程や、脱窒過程で発生することが知られている。これまで N₂O 排出量に関して、様々な処理方式での調査や、反応槽間での違いの調査、季節変動の調査などが行われてきた。しかしながら、それらの調査はスポットでのサンプル採取による調査が多く、日中で数点、年間で数日のデータしか取れていない場合が多い。N₂O 排出量の日変動や季節変動、降雨の影響などを正確に評価していくためにも、N₂O を連続的にモニタリングしていくことが望ましいと考えられる。

下水処理工程の N₂O の連続測定は国内外でいくつかの調査の事例がある。それらの事例を参考に、今回 AI 運転期間と熟練技術者運転期間で N₂O を連続的に測定し、AI 適用により N₂O による温室効果ガス排出量が増加するかどうか調査することとした。

4. 2 実験方法

(1) 調査対象・調査期間

N₂O 排出量の連続測定は広島市西部水資源再生センターの 3 系水処理設備で実施した。N₂O の排出先としてガス態での発生ガスへの排出と、溶存態での処理水への排出がある。そのため、**図資 4-1** のように 3 系水処理設備の脱臭装置入口（脱臭ファン出口）でガス態 N₂O を、3 系水処理設備の最終沈殿池上向流部分で溶存態 N₂O を連続的に測定した。

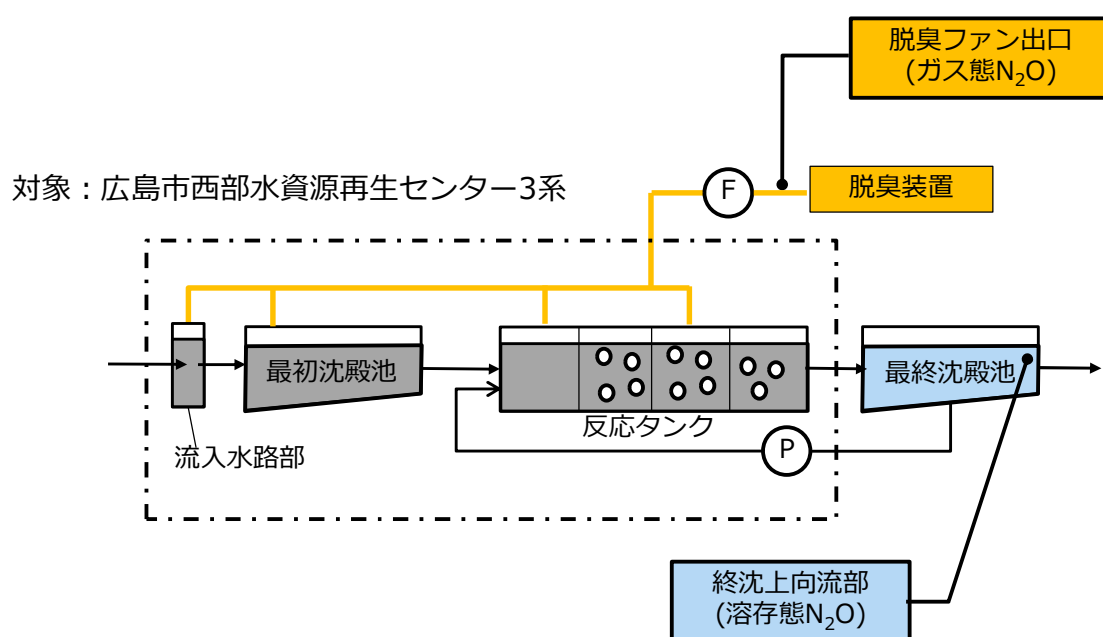
令和 5 年度の調査期間は**表資 4-1** のように、令和 4 年度末に発生したガス態 N₂O 計の故障を修理した後、2023 年 5 月 23 日～2024 年 2 月 7 日とした。N₂O 調査期間内での熟練技術者運転期間は 2023 年 11 月 1 日～2024 年 2 月 7 日、AI 運転期間は 2023 年 5 月 23 日～2023 年 10 月 31 日である。なお、2023 年 10 月 6 日～2023 年 10 月 10 日、2023 年 10 月 31 日～2023 年 11 月 7 日、2023 年 11 月 24 日～2023 年 11 月 28 日は停電によりガス態 N₂O 濃度および溶存態 N₂O 濃度データの欠損、2023 年 5 月 29 日～2023 年 6 月 7 日、2023 年 6 月 19 日～2023 年 6 月 26 日、2023 年 8 月 1 日～2023 年 8 月 8 日、2023 年 9 月 15 日～2023 年 9 月 21 日は溶存態 N₂O 測定装置のフリーズにより溶存態 N₂O 濃度データの欠損となった。

表資 4-1 N₂O 測定期間

2022年度	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
運転	熟練	熟練	熟練	AI	AI	AI	AI	熟練	AI	AI	熟練	熟練
N ₂ O測定								11/10			2/26	※1

2023年度	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
運転	熟練	AI	AI	AI	AI	AI	AI	熟練	熟練	熟練	熟練	熟練
N ₂ O測定	※1	5/23									2/7	

※1：2023/2/26にガス態N₂O計が故障 3月、4月で修理



図資 4-1 N₂O 測定箇所

(2) ガス態 N₂O 測定方法

ガス態 N₂O は 3 系水処理設備の脱臭装置入口（脱臭ファン出口）から測定した。図資 4-2 にガス態 N₂O の測定システムを示す。脱臭ファンにより吸引されている脱臭ガスは、流入水路部、最初沈殿池、反応タンクから発生したガスとなっている。脱臭ダクトは図資 4-2 に示すように、流入水路部、最初沈殿池、反応タンク前段、反応タンク中段に接続されており、各部分では（一部見学箇所を除いて）覆蓋がされている。

脱臭ファン出口と脱臭装置入口を繋ぐ脱臭配管にある既設サンプリングロを分岐し、脱臭ガスをガス態 N₂O 測定装置に供した。ガス態 N₂O 測定装置の前段にはミストトラップ、活性炭フィルターを設置し、脱臭ガスに含まれる水分や H₂S を除去した。ガス態 N₂O 測定装置本体を図資 4-3 に示す。ガス態 N₂O 測定装置はサンプリングユニットと分析ユニットに分けられる。サンプリングユニットでは試料ガスを一定の流量で採取し、分析ユニットでは試料ガスの対象物質の濃度を赤外線吸収方式にて測定する。

サンプリングユニットは堀場製作所製の VS-5001、分析ユニットは堀場製作所製の VA-5001 を使用した。サンプリングユニットの流量は 0.5 L/min とした。分析ユニットの N₂O 測定レンジは 0~100 ppm とした。分析ユニットの測定間隔は 1 分とした。ガス態 N₂O 測定装置による脱臭ガスの連続測定に加えて、月に 1 回ほどスポットで脱臭ガスのサンプリングを行い、ガスクロマトグラフでのクロスチェックを行った。直近のクロスチェック結果をもとに脱臭ガスのガス態 N₂O 濃度の補正を行った。

ガス態 N₂O 測定装置で測定した N₂O 濃度を標準状態での濃度に換算するため、ミストトラップと活性炭フィルターの間で、脱臭ガスの温度と圧力を測定した。脱臭ガスの温度は、ティアンドデイ製のサーミスタ式温度計 RTR-52A を用いて測定した。脱臭ガスのゲージ圧は、A-Gas Japan 製の圧力計 PS100-2BAR を用いて測定し、広島市西部水資源再生センター内で測定されている大気圧と合計して絶対圧とした。脱臭ガスの温度、ゲージ圧の測定間隔は 5 分とした。

N₂O 排出量の算出に用いる脱臭ガス流量は、令和 4 年度では 3 系曝気風量としていたが、曝気風量だけでは過小評価となる可能性があった。そのため、後述の脱臭ダクト内の風速測定を行いその結果に基づき、脱臭ガス流量は脱臭ファンの定格能力とした。過去の N₂O 排出量として参照している令和 4 年度のデータも今回のまとめでは、脱臭ガス流量を脱臭ガスの定格能力として用い、まとめ直した。

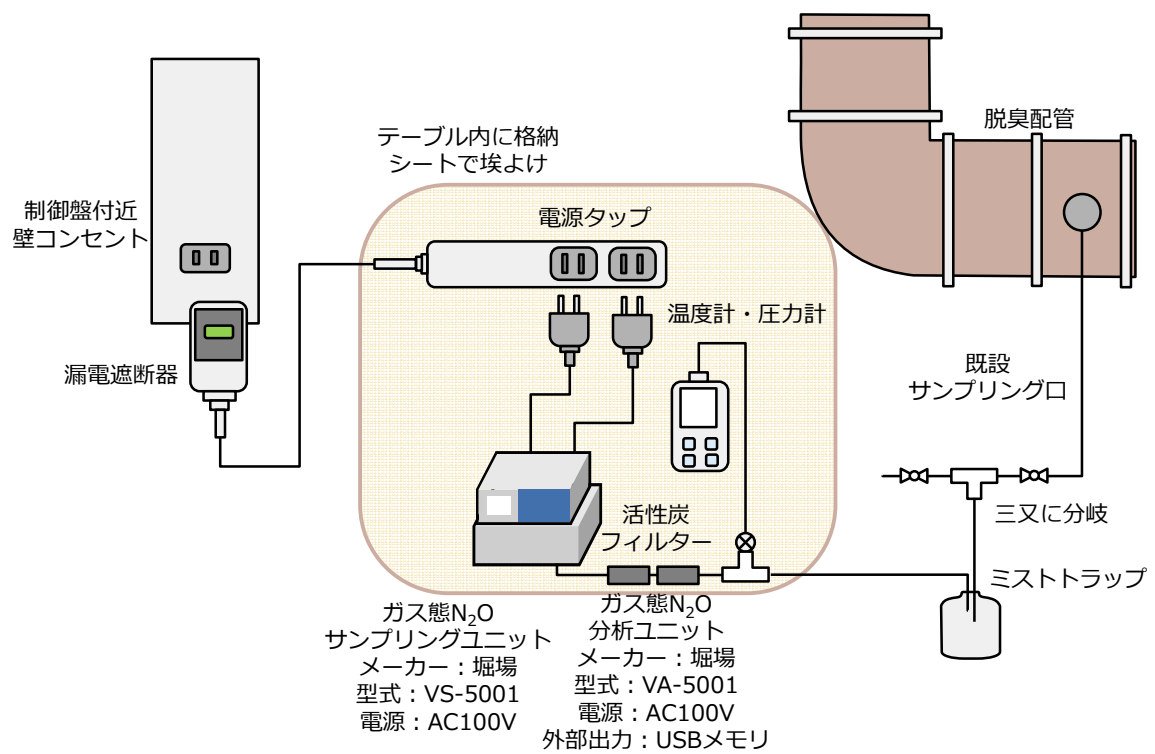
脱臭ガス流量は脱臭ダクト断面の複数点の風速を測定するスポット測定と、脱臭ダクト断面の 1 点を連続的に測定する連続測定の 2 種類で調査した。スポット測定は、JIS B 8330:2000 送風機の試験及び検査方法の解説部分を参考に、脱臭ダクト内の断面を等面積に分割し、その各中心点の風速の平均値に断面積を掛けることで算出した。脱臭ガス流量を測定する脱臭ダクトは脱臭設備後段の直管部とした。脱臭ダクトの断面は 700 mm×700 mm であったため、140 mm 四方の 25 個の正方形に分割し、サンプリング口から測定可能な 21 か所について風速測定を行った。このスポット測定を 3 回実施し、脱臭ファンの定格能力と比較した。連続測定は、ダクト内の代表点 1 点で 1 分間隔、24 時間風速を測定し、脱臭ファンの定格能力と比較した。ダクト内の代表点はダクト断面の中心とした。脱臭ダクト内風速測定の模式図を図資 4-4 に示す。風速はカノマックス製の熱式風速計 ANEMOMASTER 6036-A0 を用いて測定した（図資 4-5）。

脱臭ガスからの N₂O 排出量は、標準状態に換算した脱臭ガス N₂O 濃度に脱臭ガス流量（脱臭ファンの定格能力）を掛けて算出した。

水処理工程から発生するガス態 N₂O を評価するために、脱臭ガスの測定で算出された N₂O 排出量から、微量ではあるが、曝気空気中にもともと含まれている N₂O 濃度の影響を差し引いた。広島市西部水資源再生センター内の大気中の N₂O 濃度はスポット採取にて複数回（令和 5 年度は 2023 年 1 月末までで 6 回）測定した。大気中の N₂O 濃度は広島市西部水資源再生センター内で測定されている気温、大気圧を用いて標準状態での濃度に換算した。

曝気空気中にもともと含まれている、ブロウによって吸い込まれた N₂O 量は、標準状態に換算した大気中の N₂O 濃度に脱臭ガス流量（脱臭ファンの定格能力）を掛けて算出した。

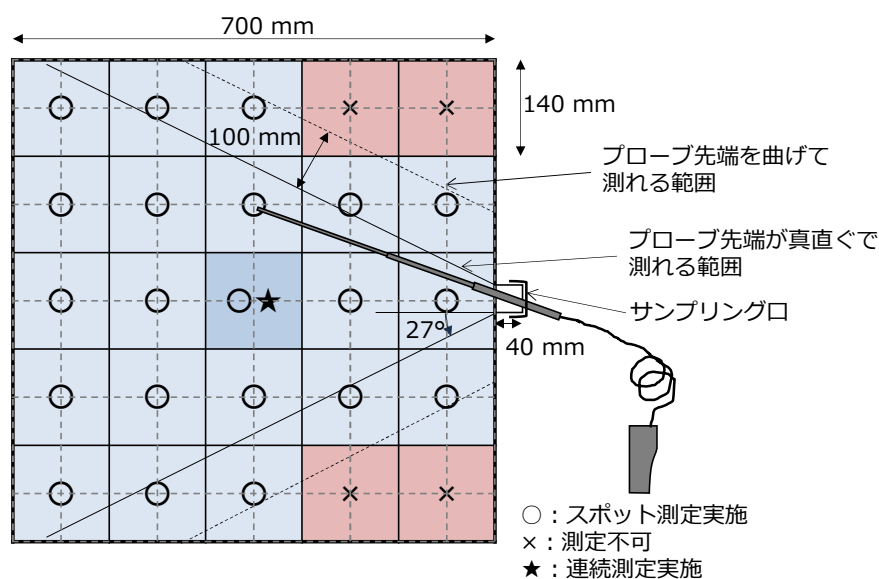
水処理工程から発生するガス態 N₂O は、発生量を通水量で除し、通水量当たりのガス態 N₂O 発生量として評価した。



図資 4-2 ガス態 N₂O 測定システム



図資 4-3 ガス態 N₂O 測定装置



図資 4-4 ダクト内風速測定の様式図



図資 4-5 ダクト内風速測定で用いた熱式風速計

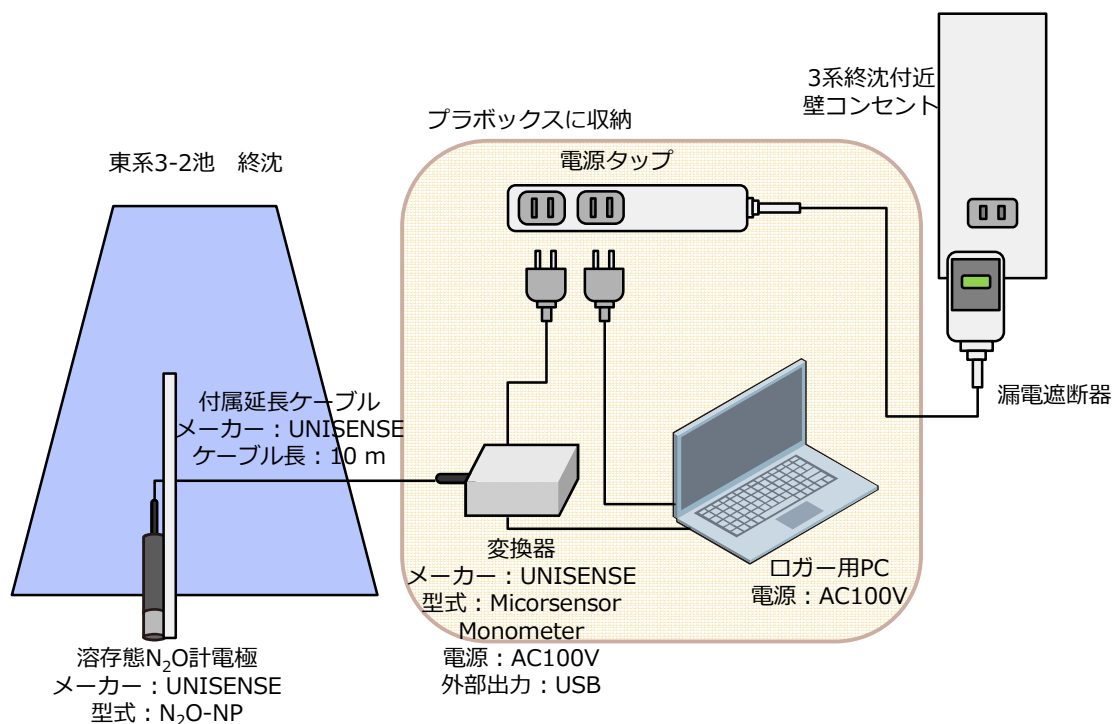
(3) 溶存態 N_2O 測定方法

溶存態 N_2O は 3 系水処理設備の最終沈殿池上向流部分で測定した。3 系水処理設備は 5 池で構成されているが、代表として 3-2 池に溶存態 N_2O 電極を設置した。図資 4-6 に溶存態 N_2O の測定システムを示す。

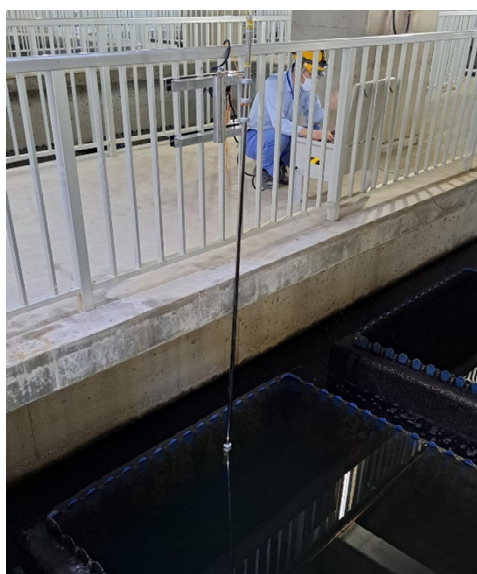
処理水の溶存態 N_2O 濃度は UNISENSE 製のクラーク電極 N_2O -NP を用いて測定した。溶存態 N_2O 電極本体を図資 4-7 に示す。電極の測定レンジは 4.4～22,000 $\mu\text{g/L}$ である。測定間隔は 1 分とした。溶存態 N_2O 電極による処理水の連続測定に加えて、月に 1 回ほどスポットで処理水のサンプリングを行

い、ガスクロマトグラフでのクロスチェックを行った。直近のクロスチェック結果をもとに処理水の溶存態 N_2O 濃度の補正を行った。

水処理工程から発生する溶存態 N_2O は、処理水の溶存態 N_2O 濃度に通水量を掛け合わせることで発生量とし、またこれを通水量で除すことで、通水量当たりの溶存態 N_2O 発生量として評価した（測定した濃度そのものが通水量当たりの溶存態 N_2O 発生量となる）。



図資 4-6 溶存態 N_2O 測定システム



図資 4-7 溶存態 N_2O 電極

4. 2 測定結果

(1) 脱臭ガス流量

脱臭ダクト内風速測定のスポット測定の風速分布の例を図資 4-8 に示す。概ねダクト内の端では風速が小さく、やや上部寄りの中心部では風速が大きいことが確認された。これらの結果を流量としてまとめ、3 回測定した結果を図資 4-9 に示す。3 回の測定結果はそれぞれ 377、346、349 m³/min となっており、概ね変動は無かった。脱臭ファン定格能力が 350 m³/min であったのに対して、3 回の測定結果の平均値は 344 m³/min となり、定格能力の 98%ほどであった。

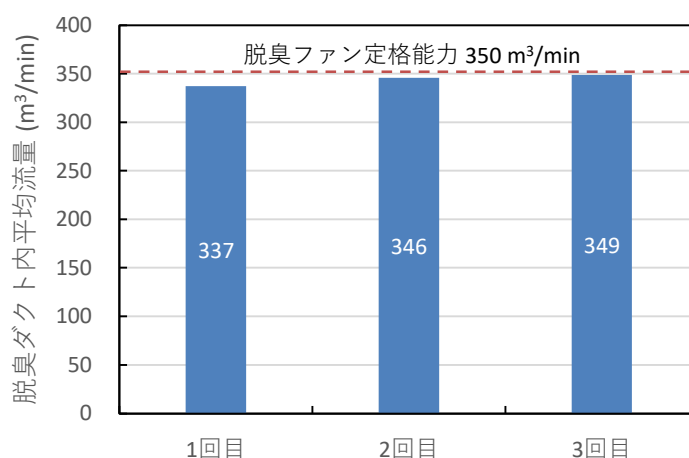
脱臭ダクト内風速測定の連続測定の結果を図資 4-10 に示す。連続測定は脱臭ダクト断面の中心で行ったが、中心部の風速から全体の平均流量への換算は、3 回のスポット測定での中心部の風速と全体の平均風速の比率から換算し、脱臭ダクトの断面積を掛けることで行った。24 時間の連続測定でも概ね流量に変動は無く、平均で 345 m³/min と、脱臭ファン定格能力の 99%ほどであった。

以上の結果から、脱臭ガスの流量は脱臭ファン定格能力とほぼ同等であることが分かり、以降のガス態 N₂O 排出量の算出で用いる脱臭ガス流量は、脱臭ファン定格能力 (350 m³/min) とした。

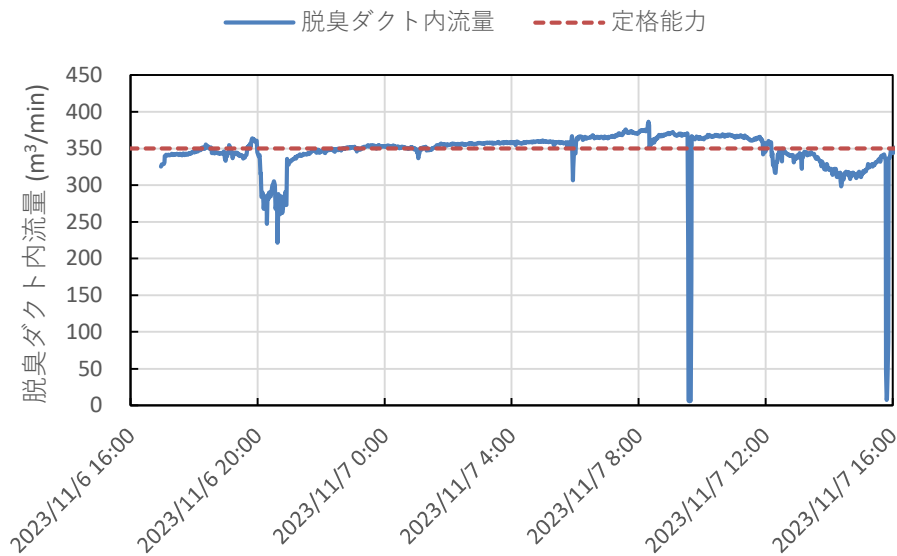
8.9	11.0	12.0		
13.3	14.1	13.1	14.2	12.1
10.2	11.0	13.7	11.3	12.4
10.3	11.6	11.8	11.3	9.7
9.3	9.9	9.6		

風速測定結果 (m/s)

図資 4-8 脱臭ダクト内風速測定 スポット測定での風速分布の例



図資 4-9 脱臭ダクト内風速測定 スポット測定結果

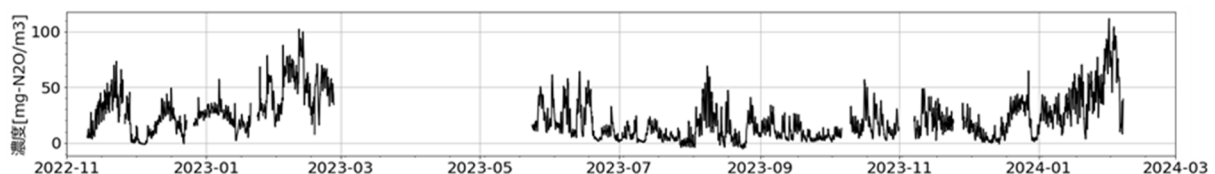


図資 4-10 脱臭ダクト内風速測定 連続測定結果

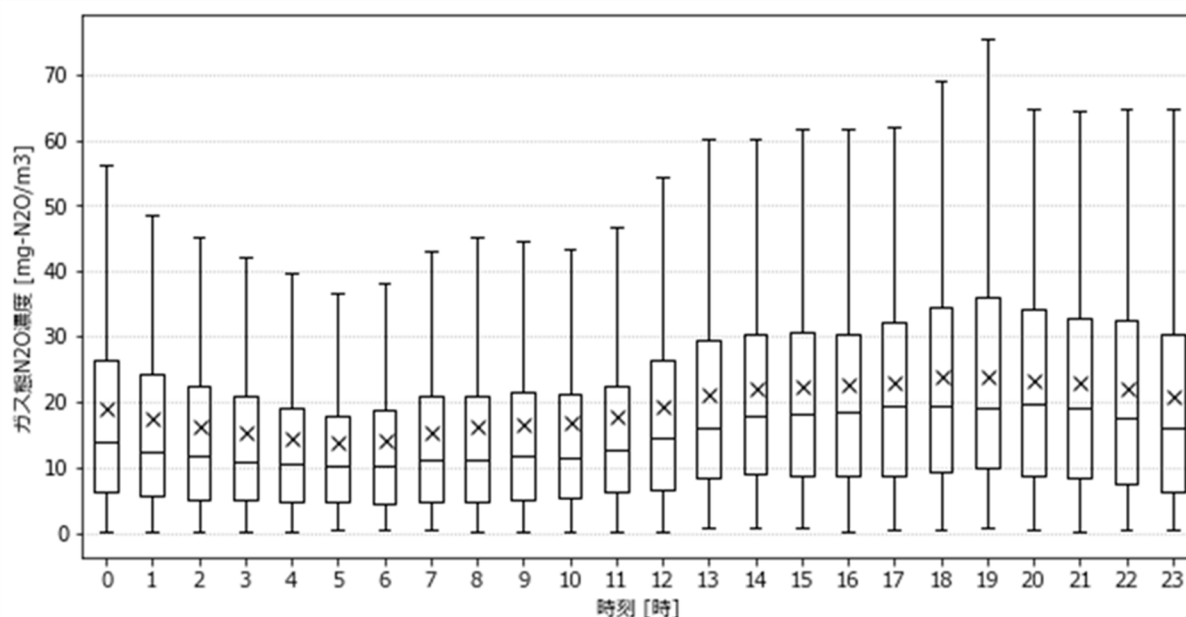
(2) ガス態 N_2O 測定結果

令和 4 年度も含めた調査期間全体でのガス態 N_2O 濃度（標準状態変換、クロスチェック補正後）の推移を図資 4-11 に、各時間帯におけるガス態 N_2O 濃度の箱ひげ図（外れ値を除く）を図資 4-12 に示す。ガス態 N_2O 濃度は $0 \sim 112 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ で推移し、図資 4-12 に示すように概ね夕方時間帯に高濃度（19 時に平均値が最大）に、明け方の時間帯に低濃度（5 時に平均値が最小）になっていた。連続的な N_2O の測定により、日間でもガス態 N_2O 濃度は大きく変動することがわかった。広島市西部水資源再生センターの東系では放流流量が 23 時頃に最大となり、7 時頃に最小となる傾向となっている。また、水量と N_2O 濃度の間には相関が見られた。

スポット採水でのガス態 N_2O 濃度のクロスチェックの結果、スポット採水での測定値とガス態 N_2O 装置での測定値の乖離は小さく、平均 5%（-39～+56%）であった。

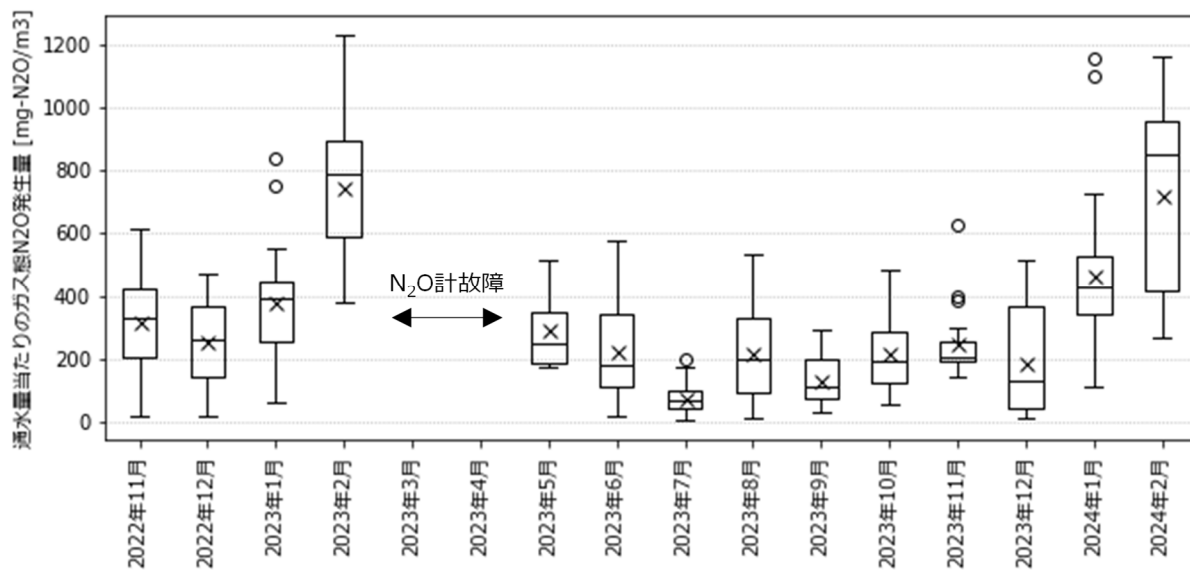


図資 4-11 ガス態 N_2O 濃度の推移

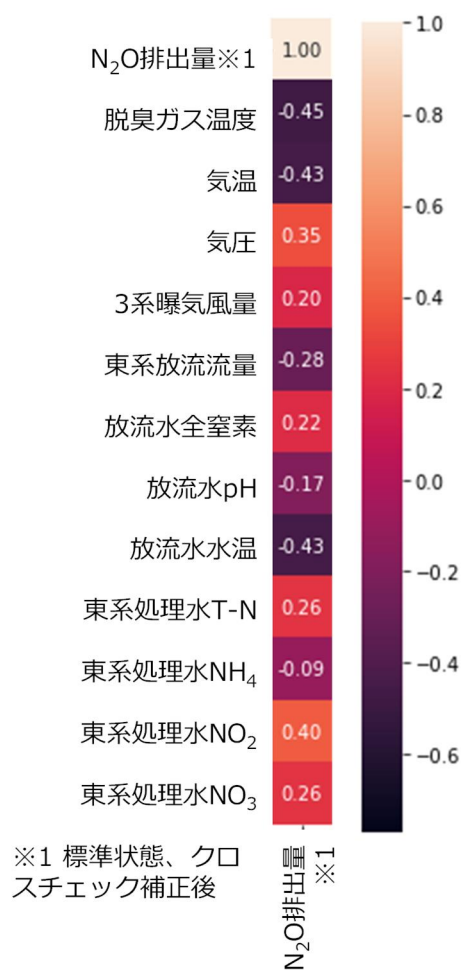


図資 4-12 各時間帯におけるガス態 N₂O 濃度の箱ひげ図（外れ値を除く）

月毎における通水量あたりのガス態 N₂O 排出量の箱ひげ図を図資 4-13 に示す。概ね 1 月から 2 月の冬季に N₂O 排出量が増加し、7 月から 8 月の夏季に N₂O 排出量が低減する傾向が確認された。通水量あたりのガス態 N₂O 排出量と気温や水質、曝気風量や水量などのデータとの相関を確認したところ、通水量あたりのガス N₂O 排出量は脱臭ガス温度、気温、放流水水温のような温度データと負の相関が大きくなっていた（図資 4-14）。これまで報告されている通り、水温の低下により N₂O 排出量が多くなるという傾向が確認できた。また、水質については処理水の亜硝酸性窒素濃度と比較的大きな正の相関関係が確認できた。反応タンクでの亜硝酸性窒素濃度は今回調査できていないが、広島市西部水資源再生センターの 3 系水処理設備は疑似嫌気好気法により運転されており、窒素処理に関しては完全硝化を行わず、アンモニア性窒素の形で窒素の多くを排出している。亜硝酸性窒素の蓄積が確認されるような硝化の不完全な運転では N₂O 排出量が増加し易いことが知られており、処理水の亜硝酸性窒素増加に伴い N₂O 排出量が増加したものと考えられる。



図資 4-13 通水量当たりのガス態 N₂O 排出量の推移

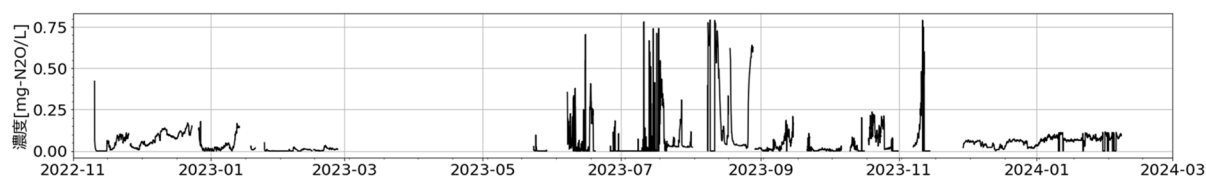


図資 4-14 通水量当たりのガス態 N₂O 排出量と気温、風量、水量、水質等との相関係数

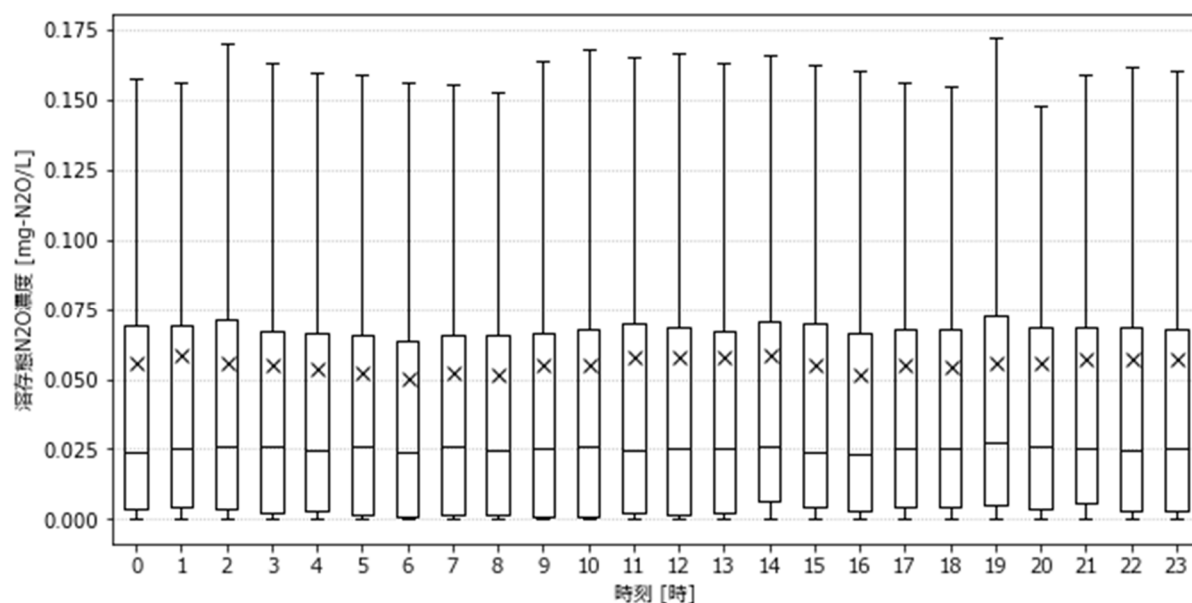
(3) 溶存態 N₂O 測定結果

令和 4 年度も含めた調査期間全体での溶存態 N₂O 濃度（クロスチェック補正後）の推移を図資 4-15 に、各時間帯における溶存態 N₂O 濃度の箱ひげ図（外れ値を除く）を図資 4-16 に示す。溶存態 N₂O 濃度は 0～0.79 mg-N₂O/L で推移していた。図資 4-16 に示すように溶存態 N₂O では、ガス態 N₂O でみられたような日間での大きな変動の傾向は確認されなかった。

N₂O 電極での溶存態 N₂O の測定値は、クロスチェックの結果、スポット採水での測定値との乖離が激しかった（誤差-1,500～192,000%）。

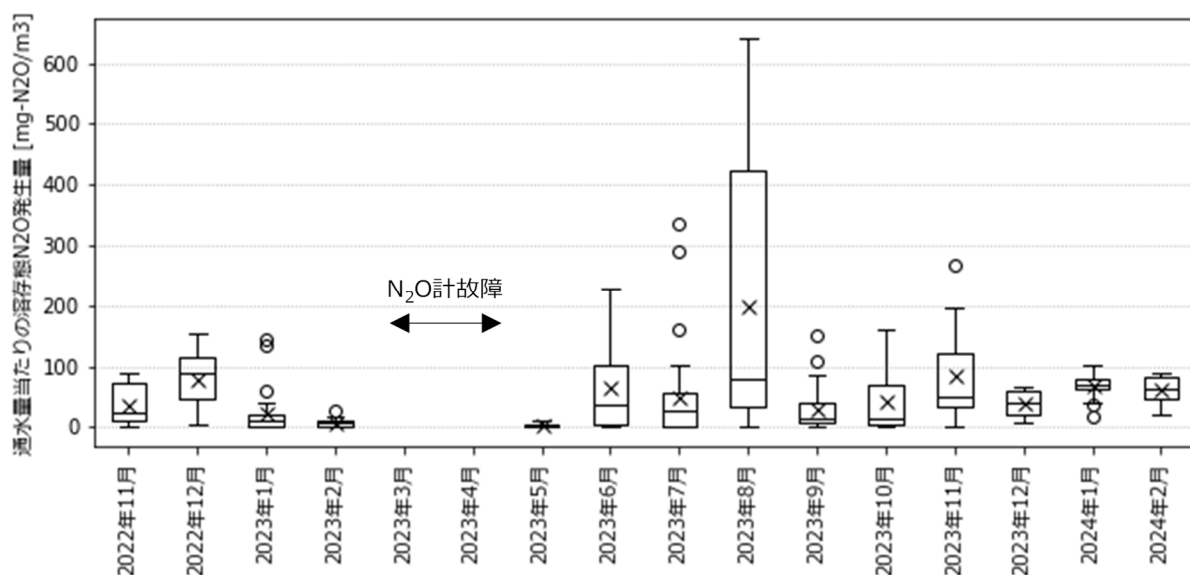


図資 4-15 溶存態 N₂O 濃度の推移



図資 4-16 各時間帯における溶存態 N₂O 濃度の箱ひげ図（外れ値を除く）

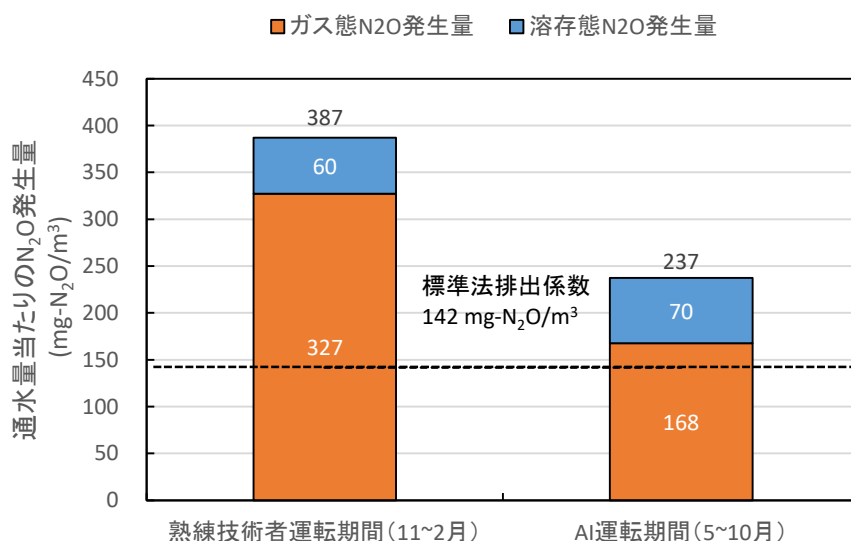
月毎における通水量あたりの溶存態 N₂O 排出量の箱ひげ図を図資 4-17 に示す。ガス態 N₂O 排出量で確認されたような冬季の N₂O 排出量増加は確認されなかったが、2023 年 8 月に比較的排出量が多くなっていた。2023 年 8 月下旬までは 3 系 DO 設定推論の AI に必要空気量による制限要素を組み込んでおらず、2023 年 8 月の曝気風量は熟練技術者の考える適正な風量より大きくなる機会が多かった。そのため、過曝気気味な機会が多かったと考えられ、溶存態 N₂O 排出量が増加したものと考えられる。



図資 4-17 通水量当たりの溶存態 N₂O 排出量の推移

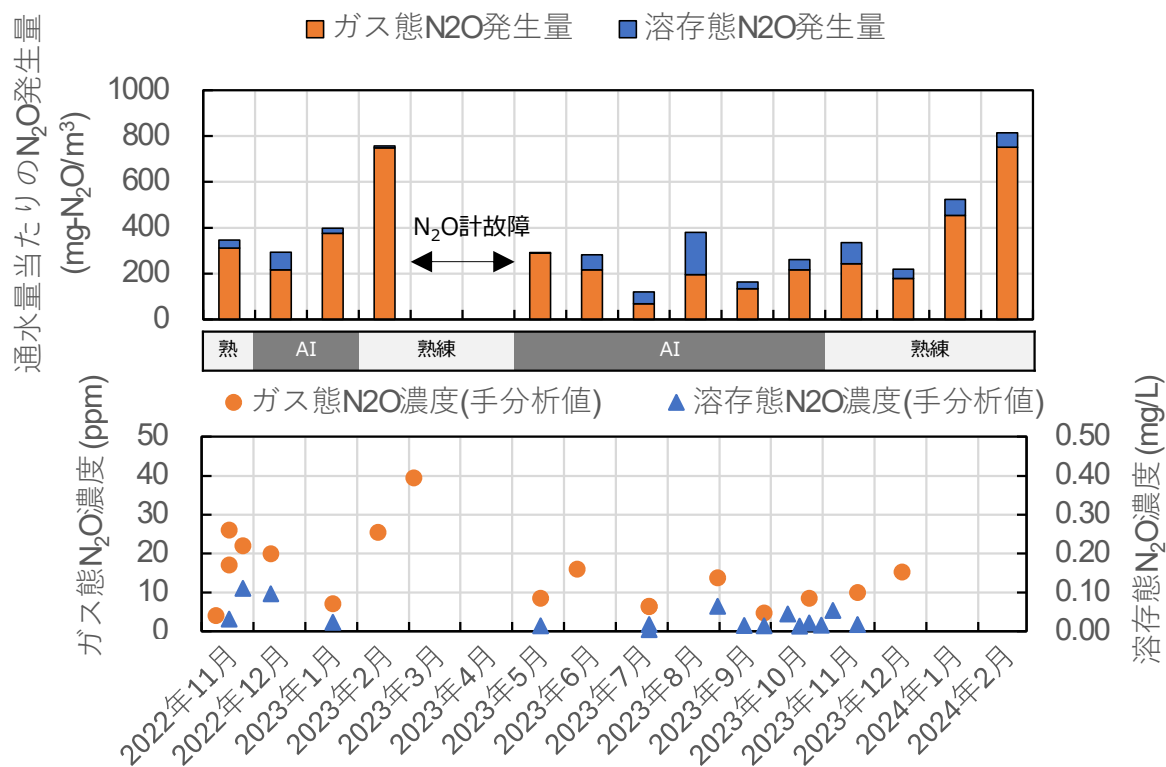
(4) 水処理工程での N₂O 排出量、N₂O 由来の温室効果ガス排出量

令和 5 年度の熟練技術者運転期間、AI 運転期間でのガス態、溶存態を合計した通水量当たりの N₂O 排出量の比較を図資 4-18 に示す。下水処理に伴う N₂O の排出係数のうち、標準法でのガス態 N₂O の排出係数は 142 mg-N₂O/m³ であるが、AI 運転期間においても、熟練技術者運転期間においても通水量当たりの N₂O 排出量は 142 mg-N₂O/m³ を超過しており、熟練技術者運転期間で 327 mg-N₂O/m³、AI 運転期間で 168 mg-N₂O/m³ であった。また、ガス態、溶存態の合計では熟練技術者運転期間で 387 mg-N₂O/m³、AI 運転期間で 237 mg-N₂O/m³ と AI 適用により N₂O 排出量は増加しないことが確認された。しかしながら、熟練技術者運転期間は AI 実証の都合冬季が多かったこともあり、水温低下により N₂O 排出量が多くなったものと考えられる。



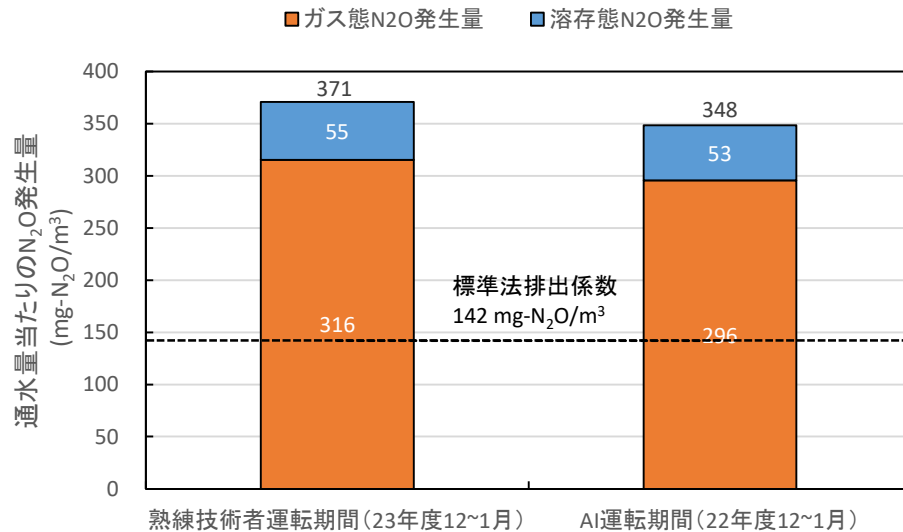
図資 4-18 令和 5 年度の熟練技術者運転期間、AI 運転期間での通水量当たりの N₂O 排出量の比較

令和 4～5 年度の月毎における熟練技術者運転期間、AI 運転期間のガス態、溶存態の通水量当たりの N_2O 排出量とクロスチェックで測定したガス態、溶存態 N_2O 濃度の推移を図資 4-19 に示す。冬季で N_2O 排出量は増加し、夏季で N_2O 排出量は減少する傾向が確認できる。溶存態 N_2O 排出量はガス態 N_2O 排出量に対し平均 26%ほどであった。



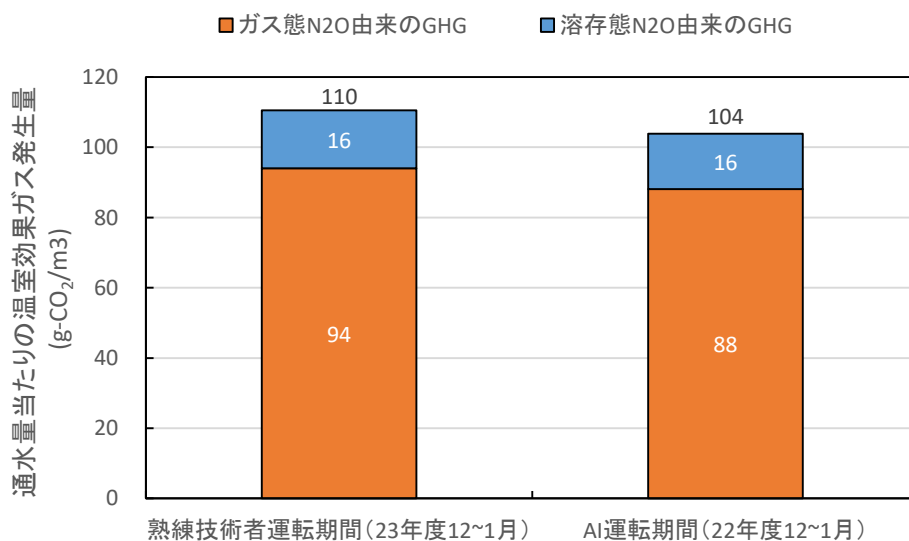
図資 4-19 令和 4～5 年度の通水量当たりの N_2O 排出量の推移（上）と
クロスチェックで測定したガス態、溶存態 N_2O 濃度の推移（下）

令和 4 年度と令和 5 年度の 12 月と 1 月は、令和 4 年度では AI 運転期間、令和 5 年度では熟練技術者運転期間と、同じ月で運転指示者が異なっていた（表資 4-1）。そのため、水温の影響を除いた比較ができると考え、令和 4 年度の 12 月～1 月と、令和 5 年度の 12 月～1 月の N_2O 排出量のデータを比較した（図資 4-20）。その結果、ガス態 N_2O 排出量は熟練技術者運転期間で $316 \text{ mg-}\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、AI 運転期間で $296 \text{ mg-}\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ とほぼ同等、ガス態、溶存態 N_2O 排出量の合計でも熟練技術者運転期間で $371 \text{ mg-}\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、AI 運転期間で $348 \text{ mg-}\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ とほぼ同等となった。以上の結果から、AI の適用により N_2O 排出量は増加しないと考えられる。



図資 4-20 令和4年度12～1月、令和5年度12～1月のみで比較した通水量当たりのN₂O排出量の比較

図資 4-20 のN₂O排出量の結果にN₂Oの地球温暖化係数298を乗じ、熟練技術者運転期間、AI運転期間でのN₂O由来の温室効果ガス排出量の比較を図資 4-21 に示す。AIの適用によりN₂O由来の温室効果ガス排出量は増えることが無いことが確認できた。



図資 4-21 熟練技術者運転期間、AI運転期間での通水量当たりのN₂O由来の温室効果ガス排出量の比較

2. 経費回収年の検討

1.1 革新的技術を用いた設置及び運転に係るコスト構造の把握及び縮減方策

(1) AI 設置及び運転に係るコスト構造の把握

AI 設置及び運転に係るコストは、イニシャルコスト、ランニングコストが挙げられる。

イニシャルコストの内訳は、産業用コンピュータ、AI プログラミング費用、カメラ、画像ソフト費用、工事費等である。なお、AI プログラミング費用はフィールドのデータ項目数（1,550 項目）からプラント運転状況を把握し、入力項目候補の選定および洗い出しの工数から算出した。

ランニングコストの内訳は、PC 消耗品交換、AI メンテナンスとしてイニシャルコストの 3%を見込むものとした。なお、AI メンテナンスでは定期的なパラメータ確認および調整（季節、運用の変化など）を行う。

以上より算出した AI 導入費用を表資 5-1 に示す。

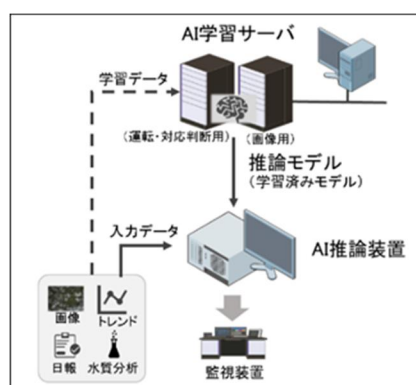
表資 5-1 AI 導入費用

項目	内訳	AI 導入費用 (水処理の運転操作に係る)
①イニシャルコスト (AI 設置費用)	・ AI 装置費用 ・ AI 用周辺装置費用 ・ AI 設定費用 ・ 工事費用	80 百万円
②ランニングコスト (AI 運用費用) (年価)	・ AI 装置保守費用 ・ AI 用周辺装置保守費用 ・ AI 再設定費用	2.4 百万円

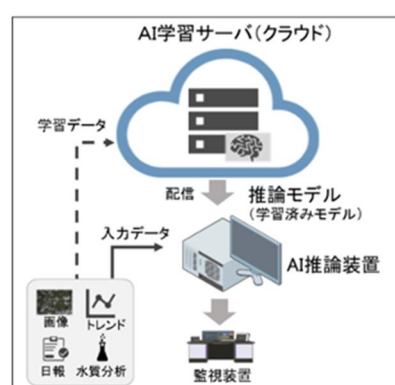
(2) AI コスト縮減方策

前項 AI は図資 5-1 左側に示すオンプレミス型システムを想定している。このシステム構成は、高性能な AI 学習サーバを処理場に個別に設置し、推論モデルを構築する手法である。この場合、AI 導入費用の大半を高性能な AI 学習サーバが占めることになり、イニシャルコストの増大を招いていた。

イニシャルコストの縮減を図るために、導入費用の大半を占める AI 学習サーバをクラウド型（図資 5-1 右側）のシステム構成を検討する。



オンプレミス型システム構成図



クラウド型システム構成図

図資 5-1 AI 装置システム構成図

クラウド型システムの場合の AI 導入費用を表資 5-2 に示す。クラウド型システムは、オンプレミス型システムと比べて下記の特徴があり、結果としてオンプレミス型の従来のシステムと比較して AI 導入費用を抑えることができる。

【クラウド型システムの特徴】

- ・高性能な AI 学習サーバを個別に設ける必要がなく設備投資費が抑えられる
- ・通信 (AI 推論モデルの配信) にかかる費用は現在様々な格安プランがあり低く抑えることが出来る。

表資 5-2 AI 導入費用 (クラウド型システム)

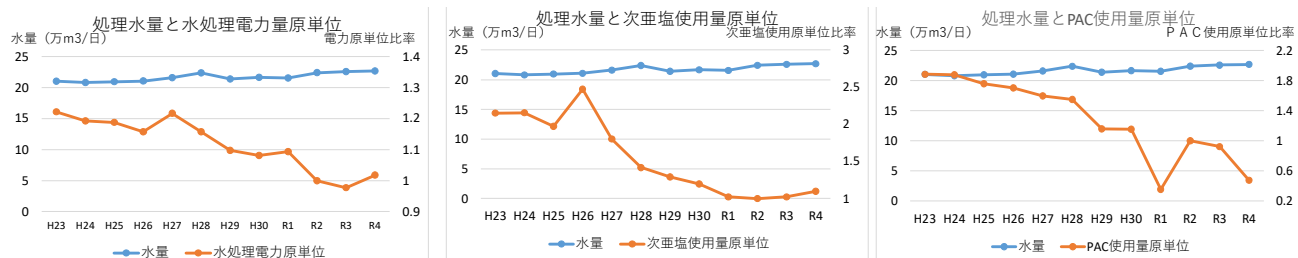
項目	内訳	AI 導入費用 (水処理の運転操作に係る)
①イニシャルコスト (AI 設置費用)	・AI 装置費用 ・ AI 用周辺装置費用 ・ AI 設定費用 ・ 工事費用	50 百万円
②ランニングコスト (AI 運用費用) (年価)	・ サーバ利用費用 ・ 通信費用 ・ AI 装置保守費用 ・ AI 用周辺装置保守費用 ・ AI 再設定費用	3.5 百万円

(オンプレミス型システムとの内訳の違いは赤字で示す)

1.2 電力消費量・薬品使用量の整理

(1) 広島市西部水資源再生センター

広島市西部水資源再生センターにおける流入水量・電力・薬品消費量について、平成23年度以降の整理結果を図資5-2に示す。グラフ中、水色の折れ線は処理水量を示しており、やや増加傾向である。橙色の折れ線は水処理電力・次亜塩・PACの処理原単位を示している。

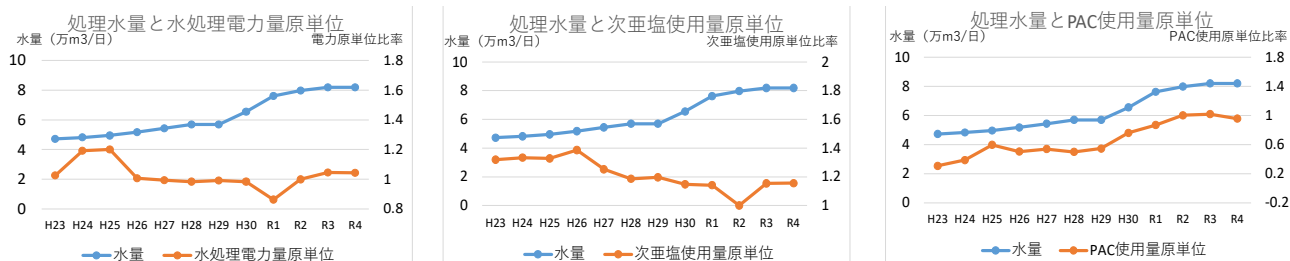


年度	流入水量 (m3)	流入水量 (m3/日)	電力量(kWh)				薬品(kg)		イベント
			ポンプ設備	フロア	水処理	汚泥処理	次亜塩 (水処理)	PAC (水処理)	
H23	76,847,460	210,541	7,871,560	14,578,210	8,725,940	6,647,100	2,183,371	2,156,646	し尿受入開始、返流水処理施設稼働
H24	76,025,490	208,289	7,652,890	14,201,600	8,294,750	6,762,200	2,183,523	2,145,782	燃料化施設稼働（排水を沈砂池に戻し始める）
H25	76,538,340	209,694	7,774,170	14,216,860	8,345,590	6,595,200	1,992,873	2,003,180	
H26	76,990,710	210,933	7,709,710	13,140,660	8,971,890	6,508,600	2,530,220	1,966,104	
H27	78,928,540	216,243	8,110,220	14,480,550	9,352,878	6,254,610	1,895,528	1,893,685	西系送風機1台追加、6系2池稼働（高度処理）
H28	81,761,870	224,005	8,465,090	14,846,420	8,644,067	6,165,070	1,531,243	1,885,075	
H29	78,145,430	214,097	7,989,310	13,461,570	7,820,466	5,463,960	1,346,861	1,361,681	
H30	79,107,790	216,734	8,013,180	14,033,180	7,188,797	5,513,860	1,254,731	1,361,681	H30 8月雨天時活性汚泥法を導入
R1	78,755,680	215,769	7,853,030	13,989,060	7,383,510	5,508,370	1,073,791	418,807	意図的にイレギュラーな運転（PAC注入停止）
R2	81,862,830	224,282	8,076,860	12,711,530	7,595,942	5,200,650	1,079,835	1,216,861	R2 8月から2系のメンブレンパネル本稼働
R3	82,502,250	226,034	8,248,910	12,541,160	7,464,536	5,217,380	1,098,938	1,116,373	
R4	55,416,830	227,118	5,468,770	9,103,550	4,889,412	3,444,540	814,991	396,348	6末-10末までAⅠ運転

図資5-2 流入水量・電力・薬品消費量を平成23年度以降の整理結果（広島市西部）

(2) 船橋市高瀬下水処理場

船橋市高瀬下水処理場における流入水量・電力・薬品消費量について、平成 23 年度以降の整理結果を図資 5-3 に示す。グラフ中、水色の折れ線は処理水量を示しており、増加傾向である。橙色の折れ線は水処理電力・次亜塩・PAC の処理原単位を示している。



年度	流入水量(m³)	汚水(m³)	雨水(m³)	電力量(kWh)				薬品(kg)			備 考
				ポンプ設備	ブローア	水処理	汚泥処理	次亜塩(塩酸)	次亜塩(簡易)	PAC(水処理)	
H23	19,074,054	17,219,148	1,854,906	5,702,250	2,362,190	2,319,750	1,361,770	90,262	13,214	51,920	
H24	19,426,155	17,596,153	1,830,002	3,621,880	2,682,960	2,871,310	1,489,030	93,251	13,889	67,131	
H25	20,173,732	18,090,753	2,082,979	3,692,950	2,880,610	2,869,210	1,442,920	95,479	18,491	106,128	薬力濃縮機増設
H26	21,195,845	18,887,555	2,308,290	3,779,470	2,288,060	2,746,260	1,509,410	104,036	19,035	93,808	No.6風機増設
H27	22,172,620	19,832,480	2,340,140	3,907,550	2,425,990	2,791,030	1,647,020	98,639	19,996	105,382	
H28	22,953,034	20,794,911	2,158,123	4,168,470	2,774,460	2,646,320	1,728,210	97,980	15,361	102,288	5系列水処理機増設(容量処理能力25,500m³/日)増設
H29	24,434,511	20,794,911	2,248,526	4,537,610	2,990,080	2,470,400	1,727,180	98,857	17,744	111,757	
H30	25,523,224	23,898,018	1,625,206	4,681,160	3,255,080	2,974,280	1,689,250	108,984	11,387	179,074	
H31	30,596,900	27,802,598	2,794,302	5,338,200	3,462,720	2,892,700	1,913,140	126,087	23,482	237,967	
R2	31,728,005	29,093,985	2,634,020	5,462,520	4,319,800	3,379,840	2,066,560	115,652	23,719	237,319	
R3	32,614,220	29,873,210	2,741,010	5,602,610	4,415,730	3,851,230	2,160,850	136,992	24,038	299,479	
R4	22,192,655	19,982,335	2,210,320	3,775,070	2,933,450	2,591,930	1,513,280	91,766	17,330	188,198	R4.4に消化タンク運転

図資 5-3 流入水量・電力・薬品消費量を平成 23 年度以降の整理結果（船橋市高瀬）

1.3 AI 導入によるユーティリティ削減

1.3.1 AI 導入によるユーティリティ削減評価年度の条件整理

現段階（基準年度）の運転管理が熟練技術者による運転で、それを AI が代行できるという前提とし、熟練技術者による運転ではない年度を評価年度と設定して、比較評価をする必要がある。評価年度は下記の条件を整理し決定する。

- ①熟練技術者が創意工夫してユーティリティ削減を行う前の年度
（例：ユーティリティ調達を含む包括的民間委託導入する前の年度）
- ②ユーティリティの削減に大きく影響するような改築更新が終わり、落ち着いている年度
（例：メンブレン導入等）
- ③施設の稼働率が落ち着いた年度
（例：統廃合・増設等による稼働率の大幅な変化が落ち着いている年度）

西部水資源再生センター及び高瀬下水処理場における評価年度の条件整理を下記に示す。

(1) 広島市西部水資源再生センターの評価年度条件整理

- ・包括委託は平成 18 年度から実施しており、現在第 5 期目である。委託にはユーティリティ（電力・薬品）調達を含む。
- ・平成 27 年度に送風機追加、6 系 2 池稼働。

表資 5-3 西部水資源再生センター 評価年度条件整理

年度	包括	イベント
平成 23 年度	第 2 期	し尿受入開始、返流水処理施設稼働
平成 24 年度	第 3 期	燃料化施設稼働（排水を沈砂池に戻し始める）
平成 25 年度		
平成 26 年度		
平成 27 年度		西系送風機 1 台追加、6 系 2 池稼働（高度処理）
平成 28 年度	第 4 期	
平成 29 年度		
平成 30 年度		
平成 31 年度		
令和 2 年度	第 5 期	8 月から 2 系のメンブレンパネル本稼働
令和 3 年度		
令和 4 年度		6 月末～AI 運転開始

(2) 船橋市高瀬下水処理場の評価年度条件整理

- ・ 包括委託は平成 17 年度から実施しており、現在第 7 期目である。委託には薬品調達を含み、電力調達は含まない(市の担当)。
- ・ 平成 26 年度に No.6 送風機増設、平成 28 年度に 5 系列水処理施設増設。

表資 5-4 船橋市高瀬下水処理場 評価年度条件整理

年度	包括	イベント
平成 23 年度	第 3 期	
平成 24 年度		
平成 25 年度		重力濃縮槽増設
平成 26 年度	第 4 期	No.6 送風機増設
平成 27 年度		
平成 28 年度		5 系列水処理施設増設
平成 29 年度	第 5 期	
平成 30 年度		
平成 31 年度		
令和 2 年度	第 6 期	
令和 3 年度		
令和 4 年度		消化槽運用開始

1.3.2 AI 導入によるユーティリティ削減評価年度の設定

前項までの評価年度の条件整理をもとに西部水資源再生センター及び高瀬下水処理場における評価年度を設定する。

(1) 広島市西部水資源再生センターの評価年度設定

電力量の評価年度

- ・増改築等イベントはあるが電力原単位は減少傾向である。令和 2 年度はメンブレンが導入され水処理の効率に影響している。評価年度は平成 23 年度と令和元年度の原単位を用い評価する。

次亜・PAC の評価年度

- ・直近では平成 30 年度の雨天時活性汚泥法導入や令和元年設備故障の影響が出ている。増改築が安定している時期として平成 23 年度と平成 29 年度の原単位を用い評価する。



図資 5-4 広島市西部水資源再生センター 評価年度設定

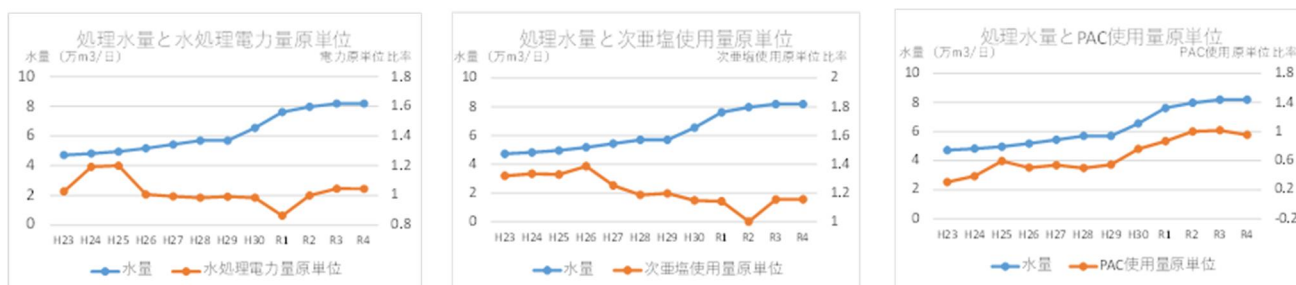
(2) 船橋市高瀬下水処理場の評価年度設定

電力量・次亜・PAC

- ・電力量：令和元年度を除き、直近の原単位はほぼ横ばいである。
- ・次亜：令和 2 年度を除き、直近の原単位はほぼ横ばいである。
- ・PAC：原単位が水量比例で増加している。

(平成 23 年度の使用量 5 t/年に対し令和 2 年度は 29 t/年)

以上より、データからユーティリティ原単位低減より水質を重視した運転を行っていることが読み取れる。そのため、高瀬下水処理場では今後 AI 導入による更なる省エネ運転の可能性について検証する。



図資 5-5 船橋市高瀬下水処理場 評価年度設定

1.4 AI 導入によるユーティリティ削減費用の算出

1.4.1 単価の設定

普及促進ではガイドラインをもとに削減費用算出できるようにするため、各ユーティリティの単価設定方法を検討する。単価の設定方法には下記2種類が考えられる。

単価設定方法①：実費の単価を設定する

実際に処理場で使用した電力・薬品費からユーティリティ単価を設定する

単価設定方法②：公開情報から概略単価を設定する

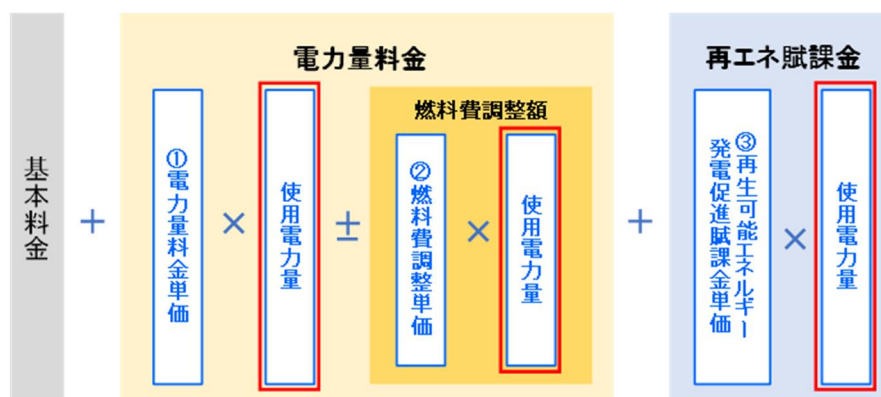
今回は公開情報から概略単価を設定し算出する方法について検討した。

なお、電力量料金単価及び薬品単価については国総研調べの単価を採用する。

■電力料金設定例

大手電力会社の料金体系は、①電力量料金単価、②燃料費調達単価、③再生可能エネルギー発電 促進 賦課金単価に使用電力量を掛け合わせ算出される。

電力会社 HP にてそれぞれの単価が公開されている。その単価と使用電力量を掛け合わせ算出する。電力料金単価については国総研調べを採用する。



図資 5-6 電力料金体系（赤枠はAI 導入により削減が見込める項目）

■薬品料金設定例

国総研調べの単価を採用する。

1.4.2 削減費の算出

前項で示した単価設定による削減費のユーティリティ単価設定・削減費計算例を下記に示す。

■電力：

[計算条件]

① 電力量料金単価の設定は下記に基づく。

国総研調べ (26.54 円) とする。

② 燃料費調整単価は令和 5 年度（基準年度）の平均値 (-0.01 円/kWh) とする。

③ 再生可能エネルギー発電促進賦課金単価は近年上昇傾向であるため、直近かつ最高額の令和 4 年度の単価「3.45 円/kWh」とする。

[計算]

電力量料金単価 (26.54 円) × 使用電力量 (令和元年度 21,372,570 kWh) +
(②燃料費調整単価 (-0.01 円/kWh) × 使用電力量) + ③賦課金 (3.45 円/kWh) × 使用電力量)

→ 令和元年度電力料金 = 600 百万円

令和元年度電力原単位 = 水処理電力量 (kWh) ÷ 令和元年度流入水量(m³) = 21,372,570 kWh ÷
75,773,170 m³ = 0.2821 kWh/m³

平成 23 年度電力原単位 = 水処理電力量 (kWh) ÷ 平成 23 年度流入水量(m³) = 23,304,150 kWh ÷
73,291,270 m³ = 0.3180 kWh/m³

平成 23 年度電力原単位 ÷ 令和元年度電力原単位 = 0.3180 kWh/m³ ÷ 0.2821 kWh/m³ = 1.127

平成 23 年度電力原単位を用いた場合の令和元年度電力料金 = 600 百万 × 1.127 ≒ 676 百万円

熟練技術者 (AI) による電力削減費用 = 平成 23 年度電力原単位を用いた場合の令和元年度電力料金
－ 令和元年度電力料金 = 676 百万円 － 600 百万円

= 76 百万円 / 8 年 (令和元年度－平成 23 年度の 8 年間の削減費)

≒ 9.5 百万円 / 年

■薬品：

価格は、国総研調べより次亜塩 40.8 円/kg、PAC 29.9 円/kg で推移しているため、本単価にて削減効果を算出する。電力同様に原単位から削減費を算出する。

AI による薬品削減費用 (次亜・PAC) = 平成 23 年度薬品原単位を用いた場合の平成 29 年度薬品料金
－ 平成 29 年度薬品料金 = 158 百万円 － 96 百万円

= 62 百万円 / 年 (平成 29 年度－平成 23 年度の 6 年間の削減費)

= 10.3 百万円 / 年

1.4.3 経費回収年

経費回収年は広島市西部水資源再生センターに限っては下記の通り処分制限期間内となった。他機場や水平展開については今後検討する必要がある。

(1) 電力・薬品削減費のみを対象とした場合

電力・薬品削減費を効果とした場合の経費回収年は 4.6 年と処分制限期間（7 年）以内となった。

表資 5-5 AI 導入によるユーティリティ削減効果の経費回収年

項目	内訳	水処理の運転操作に AI を導入した場合
①イニシャルコスト (AI 導入費用)	・ AI 用周辺装置費用 ・ AI 設定費用 ・ 工事費用	80 百万円
②ランニングコスト (AI 運用費用) (年価)	・ サーバ利用費用 ・ 通信費用 ・ AI 主変装置保守費用 ・ AI 再設定費用	2.4 百万円
③電力料金削減費 (年価)	AI 導入による電力費削減費用	9.5 百万円
④薬品料金削減費 (年価)	AI 導入による薬品費削減費用	10.3 百万円
経費回収年	①÷ (③+④-②)	4.6 年
検討結果	経費回収年が処分制限期間（7 年）以内 であるか	○

(2) 電力・薬品削減費に人件費削減費を加えた場合

表資 5-6 に示す通り、人件費削減費による経費回収年（22.2 年）に対し、電力・薬品削減費を加えた場合、経費回収年は 3.3 年と処分制限期間（7 年）以内まで改善できた。

表資 5-6 AI 導入による経費回収年

【効果は人件費削減費のみ】

項目	内訳	水処理の運転操作に AIを導入した場合
①イニシャルコスト (AI導入費用)	・AI用周辺装置費用 ・AI設定費用 ・工事費用	80百万円
②ランニングコスト (AI運用費用) (年価)	・サーバ利用費用 ・通信費用 ・AI主変装置保守費用 ・AI再設定費用	3.5百万円
③人件費削減費 (年価)	AI導入による人件費削減費用	7.1百万円
経費回収年	①÷(③-②)	22.2年
検討結果	経費回収年が目標耐用年数(15年)以内であるか	○

【効果は人件費削減費及び電力・薬品削減費】

項目	内訳	水処理の運転操作に AIを導入した場合
①イニシャルコスト (AI導入費用)	・AI用周辺装置費用 ・AI設定費用 ・工事費用	80百万円
②ランニングコスト (AI運用費用) (年価)	・サーバ利用費用 ・通信費用 ・AI主変装置保守費用 ・AI再設定費用	2.4百万円
③電力料金削減費 (年価)	AI導入による電力費削減費用	9.5百万円
④薬品料金削減費 (年価)	AI導入による薬品費削減費用	10.3百万円
⑤人件費削減費 (年価)	AI導入による人件費削減費用	7.1百万円
経費回収年	①÷(③+④+⑤-②)	3.3年
検討結果	経費回収年が処分制限期間(7年)以内であるか	○

1.4.4 維持管理費・電力削減率

導入効果について維持管理費率、電力削減率を検討する。

維持管理削減率は本実証で検証した広島市西部水資源再生センターの経費回収年検討における基準年度から評価年度までの電力・薬品削減原単位率により算出する。

なお、算出した削減率は広島市西部水資源再生センターのものであり、他の下水処理場では運転方法や履歴、処理規模等で変わる可能性がある。

〔電力削減計算〕

A 評価年度：令和元年度電力原単位 = 0.271 kWh/m³

B 基準年度：平成 23 年度電力原単位 = 0.303 kWh/m³

(計算式)

$$1 - (A \div B) = 0.105$$

$$= 10.5\% \text{ の削減率 (令和元年度 - 平成 23 年度の 8 年間での削減率)}$$

$$= 1.31\% / \text{年} \text{ の削減率}$$

〔次亜削減計算〕

A 評価年度：平成 29 年度電力原単位 = 0.0179 kg/m³

B 基準年度：平成 23 年度電力原単位 = 0.0298 kg/m³

(計算式)

$$1 - (A \div B) = 0.399$$

$$\begin{aligned}
 &= 40\% \text{の削減率（平成 29 年度－平成 23 年度の 6 年間での削減率）} \\
 &= 6.6\% \text{／年の削減率}
 \end{aligned}$$

[PAC 削減計算]

$$\text{A 評価年度：平成 29 年度電力原単位} = 1.08 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{B 基準年度：平成 23 年度電力原単位} = 1.63 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned}
 1 - (\text{A} \div \text{B}) &= 0.337 \\
 &= 33\% \text{の削減率（平成 29 年度－平成 23 年度の 6 年間での削減率）} \\
 &= 5.6\% \text{／年の削減率}
 \end{aligned}$$

3. 温室効果ガス排出量の削減

1.1 AI による温室効果ガス排出削減量の算出

(1) 革新的技術を用いた運転に係るエネルギー使用量の把握

前章では、現段階（基準年度）の運転管理が熟練技術者による運転で、それを AI が代行できるという前提とし、熟練技術者による運転ではない年度を評価年度と設定して、比較評価を検討し、AI 導入効果を検討した。

評価年度と比較し現段階（基準年度）において熟練技術者による運転がなされた場合（AI が導入された場合）の電力削減量は図資 6-1 となる。

項目	①電力・薬品使用量	②削減率	③削減量
電力	13,992,962 kWh/年	1.3%/年	181,908kWh/年
薬品（次亜）	814 t/年	6.6%/年	53 t/年
薬品（PAC）	396 t/年	5.6%/年	22 t/年

図資 6-1 電力・薬品削減量

(2) 革新的技術を用いた運転に係る温室効果ガス排出量の把握

温室効果ガス排出削減量は、「下水道における地球温暖化対策マニュアル（環境省・国土交通省、2016 年）」に基づき、下記の計算式から温室効果ガス（CO₂）排出削減量を算出する。

- ・電気の使用に伴う二酸化炭素の排出量（t-CO₂/年）

$$= \text{電気年間使用量（kWh/年）} \times \text{電気 1kWh あたりの二酸化炭素排出量（排出係数）}$$
- ・薬品の使用に伴う二酸化炭素の排出量（t-CO₂/年）

$$= \text{薬品年間使用量（kg/年）} \times \text{薬品 1kg あたりの二酸化炭素排出量（排出係数）}$$

	電力・薬品削減量	排出係数	CO ₂ 削減量
電力	181,908kWh/年	0.441 kg-CO ₂ /kWh ^{※1}	80 t-CO ₂ /年
薬品（次亜）	53 t/年	0.32 t-CO ₂ /t ^{※1}	16 t-CO ₂ /年
薬品（PAC）	22 t/年	0.41 t-CO ₂ /t ^{※1}	9 t-CO ₂ /年
合計	—	—	105t-CO ₂ /年

図資 6-2 温室効果ガス排出削減量の算出

上記計算より、105 t-CO₂ の温室効果ガス（CO₂）の削減効果が期待できる。

これは約 30 世帯^{※2}が 1 年間に排出する CO₂に相当し、約 12 ha のスギ植林^{※3}に相当する削減効果である。

※1 国総研調べ

※2 1世帯当たりのCO₂排出量（全国平均）2.91 t-CO₂を基にして算出

※3 36～40年生のスギ人工林1haが1年間に吸収するCO₂量約8.8tを基に算出

1.2 温室効果ガス排出量の削減方法

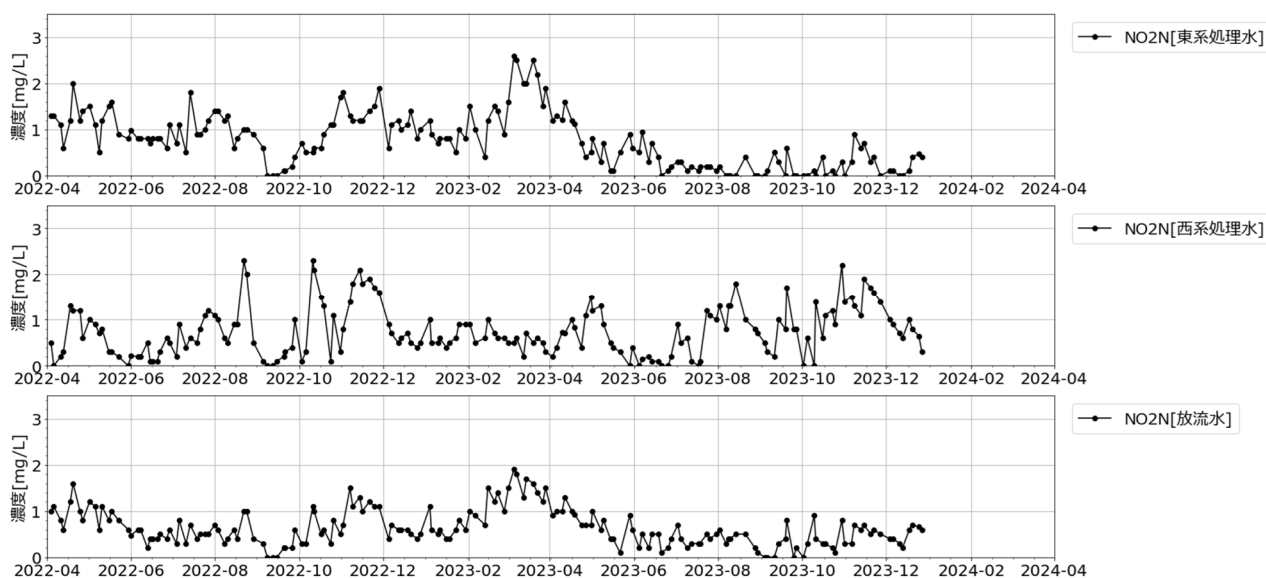
温室効果ガス排出量を削減するためには、以下の方法を実施することが重要である。

①熟練技術者が実施してきた電力量や薬品使用量削減のノウハウをAIで実現する。

②N₂Oの発生を抑制するため、処理水NO₂-Nが少なくなる運転を実施する。

①については、本研究が目指しているAIが熟練技術者の運転を真似る技術を構築することで、電力量や薬品量由来の温室効果ガス排出量が基準年度と比較して削減することが期待できる。

②については、**図資 6-3**で示した通りガス態N₂O排出量と処理水NO₂-Nが比較的相関が高かったため、処理水NO₂-Nが少なくなる運転を実施することで温室効果ガス排出量を削減することが期待できる。このため、水処理過程での硝化の状況をNO₂-NやpHでモニタリングしながらデータを継続的に蓄積することで、水処理過程で発生するN₂Oが削減可能な運転をAI化することが可能となる。



図資 6-3 令和4年度、令和5年度の処理水NO₂-Nの推移

4. 問い合わせ先

本技術ガイドライン案に対する問い合わせは、以下にお願いします。

国土交通省 国土技術政策総合研究所	国土交通省 国土技術政策総合研究所 上下水道研究部 下水処理研究室 〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地 TEL 029-864-3933 FAX 029-864-2817 URL http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/index.htm
----------------------	---

本書は、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）により国土交通省国土技術政策総合研究所が以下の企業・団体に研究委託を行い、その成果をとりまとめたものです。

<実証研究者 連絡先>

株式会社明電舎	水インフラ技術本部 技術部 企画開発部 〒141-6029 東京都品川区大崎二丁目1番1号 ThinkPark Tower TEL : 050-3664-2071 FAX : 03-5745-3047 URL : https://www.meidensha.co.jp
株式会社 NJS	東京総合事務所 〒105-0023 東京都港区芝浦一丁目1番1号 TEL : 03-6324-4307 FAX : 03-6324-4321 URL : https://www.njs.co.jp/
広島市	下水道局施設部計画調整課 〒730-8586 広島市中区国泰寺町一丁目6番34号 TEL : 082-504-2413 FAX : 082-504-2429 URL : https://www.city.hiroshima.lg.jp/shisei/gyosei/1003081/1027061/index.html
船橋市	建設局下水道部下水道施設課 〒273-0014 船橋市高瀬町56番地 TEL : 047-432-9040 FAX : 047-432-9073 URL : https://www.city.funabashi.lg.jp/soshiki/110000/110400/110411/index.html

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of N I L I M
No.1325 June 2025

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地
企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675