

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。

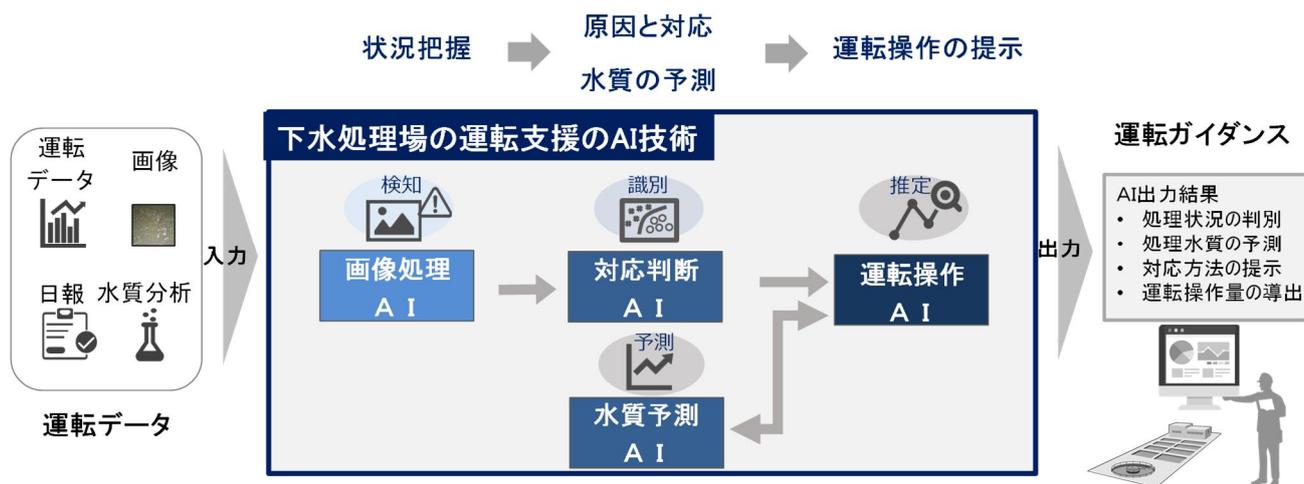


図 2-1 本技術の概念図

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。

	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。

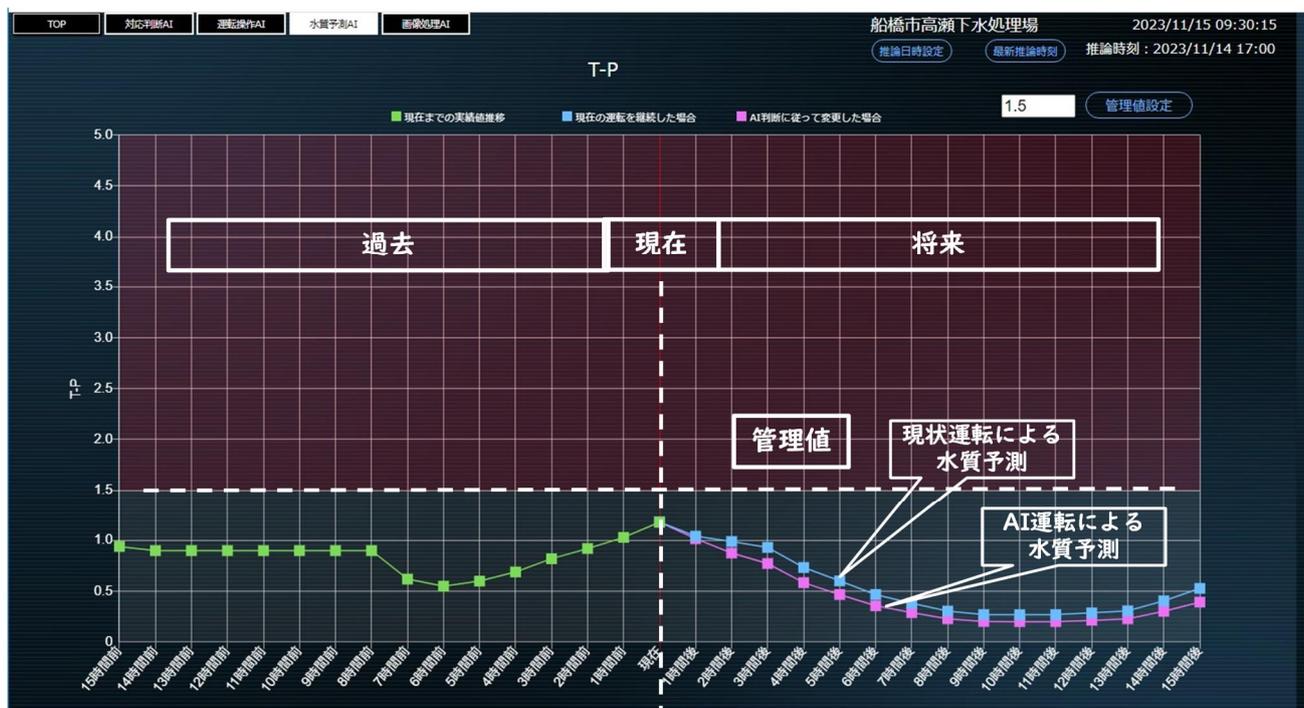


図 2-5 水質予測 AI の出力例

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。

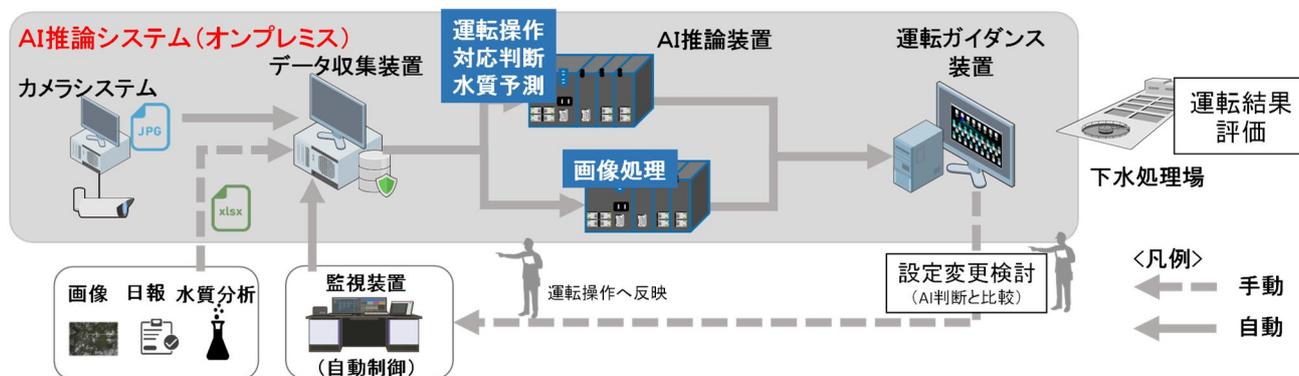


図 2-6 本技術「AI 推論システム」(オンプレミス型)の構成

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。

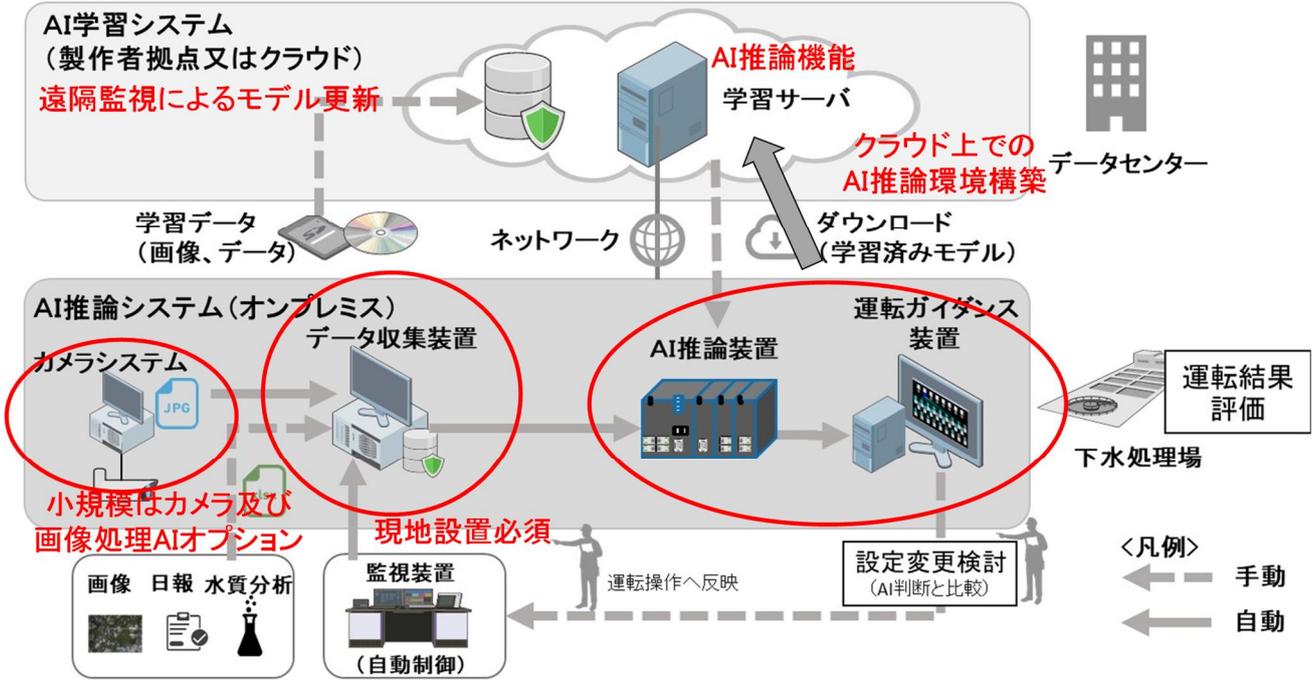


図 2-7 本技術「AI 推論システム」(クラウド型)の構成

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 等で取り込み、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。

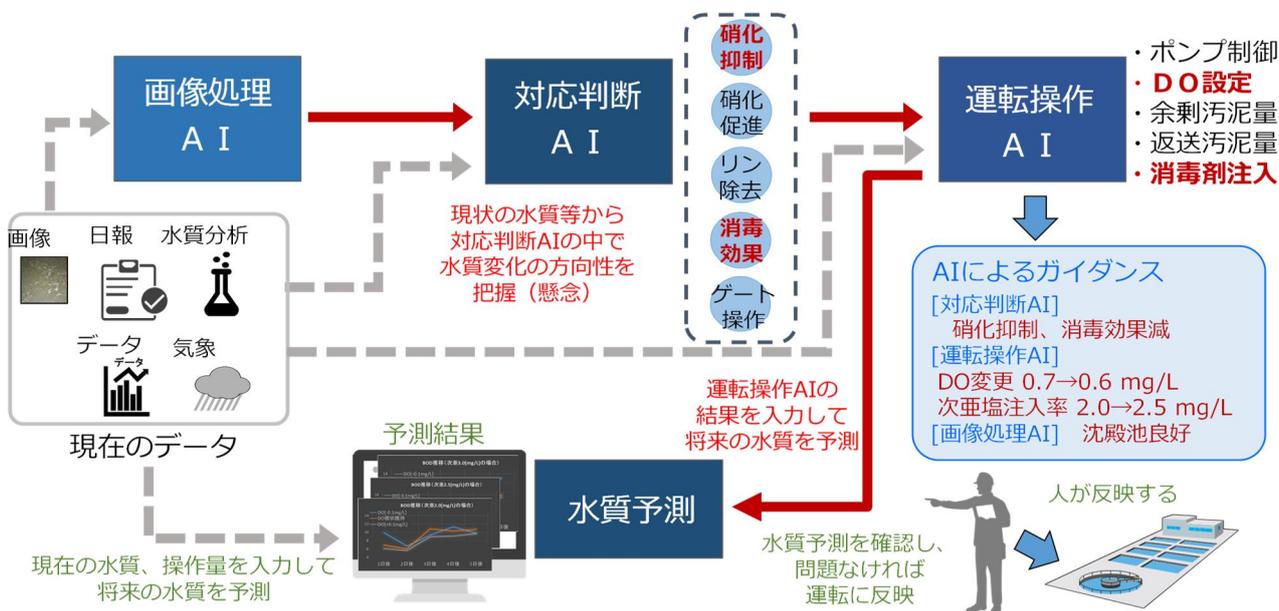


図2-8 データとAIを活用した運転操作ガイダンスの流れ

（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 エンジン进行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 エンジン进行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模擬したものであり、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。

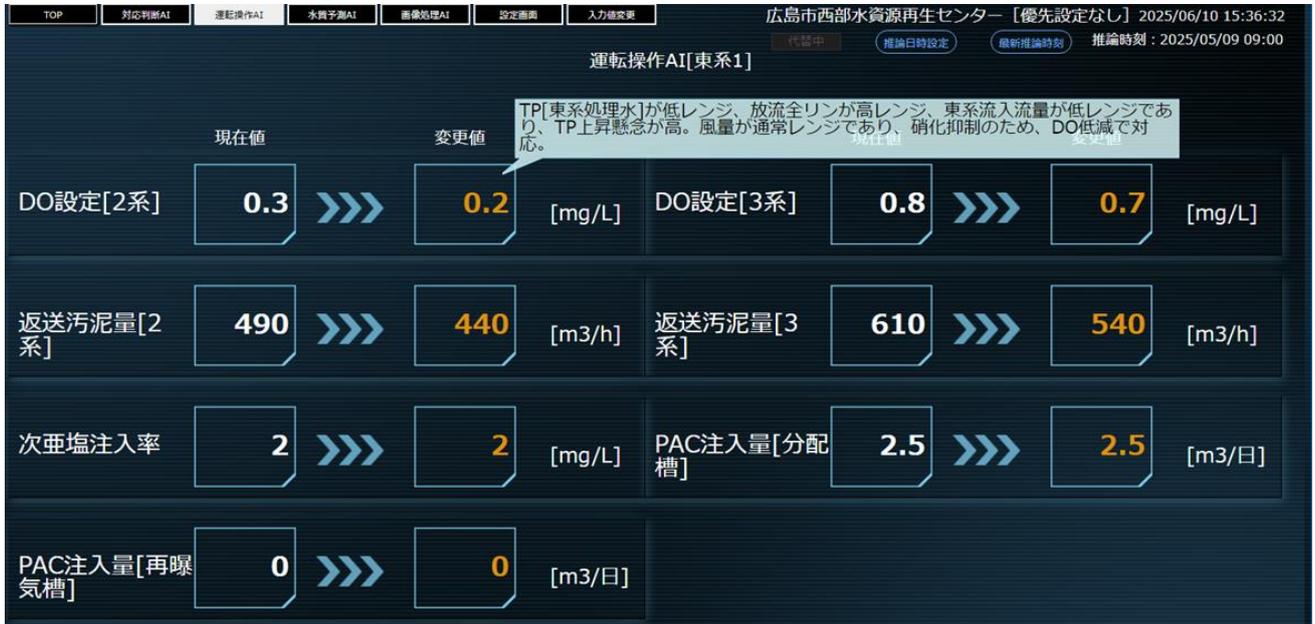
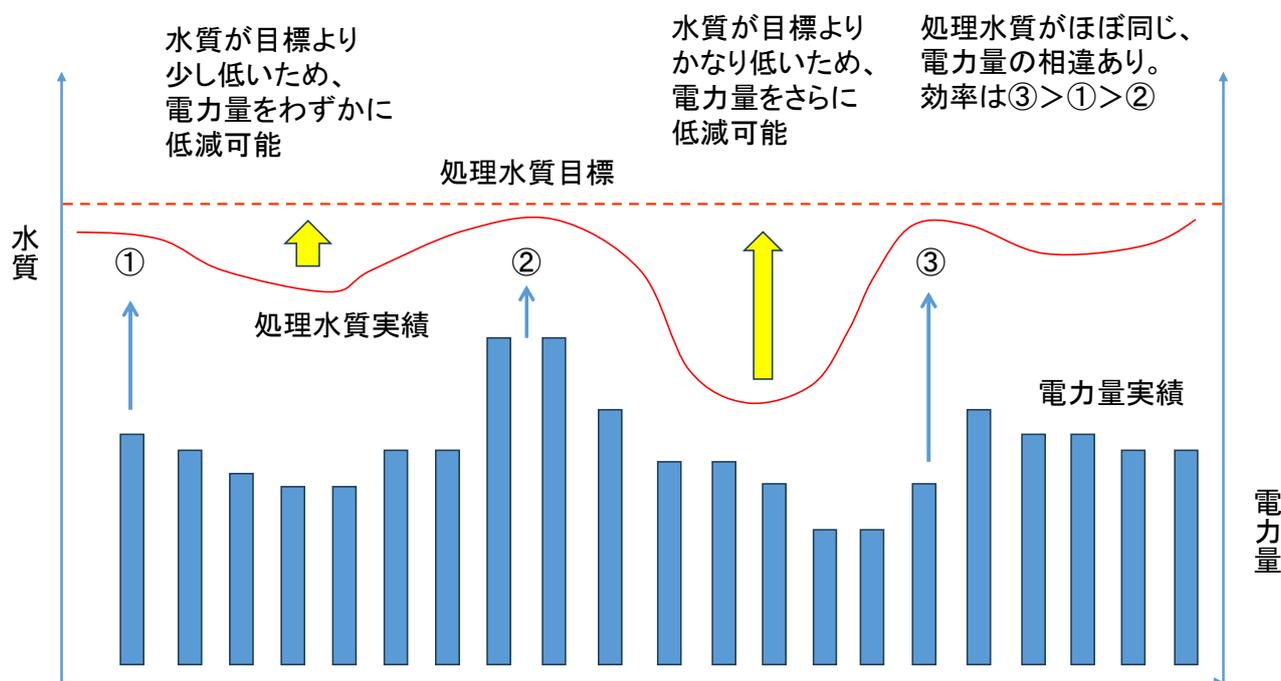


図 2-11 数値根拠から操作対応の要否を簡潔な日本語で表記した例
 (上) 対応判断 AI における判断根拠の意味を示した例
 (下) 運転操作 AI における操作と判断根拠を日本語化した例

(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。処理水質が目標よりも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の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 がより効率の良い運転を指示することが可能になる。



※期間中、水量、原水水質の変化はないものとする。

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ondi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、次亜塩素酸塩注入率設定、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、週試験を定期的を取得していること

(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ondi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、次亜塩素酸塩注入率設定、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ondi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、送风量設定、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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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
	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
	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
	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ブロック流出、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）

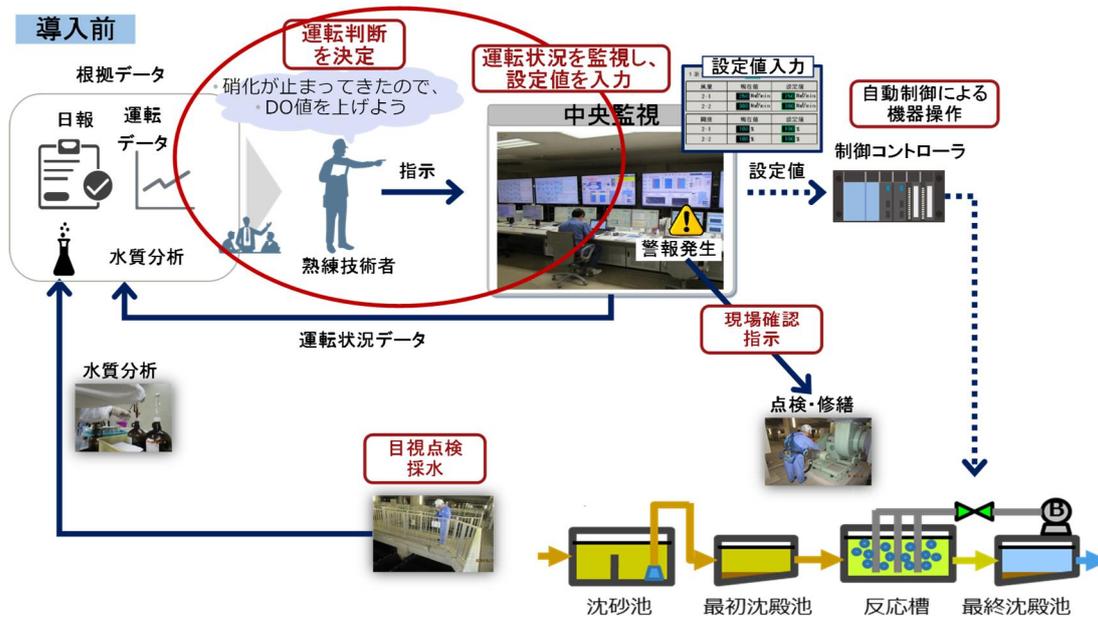
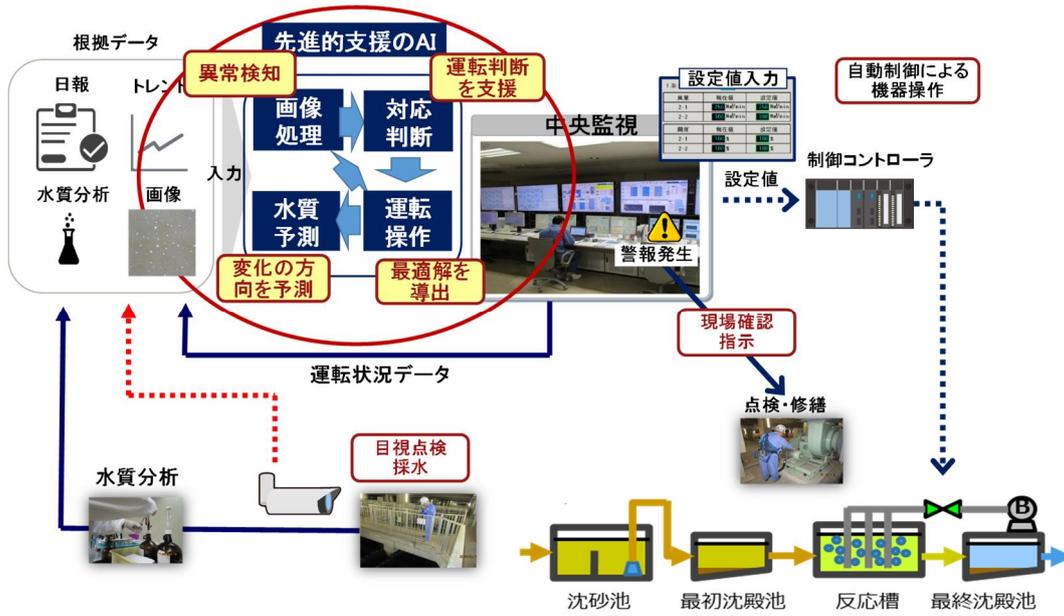


図 2-13 本技術の導入前の運転操作イメージ



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	オキシレ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。

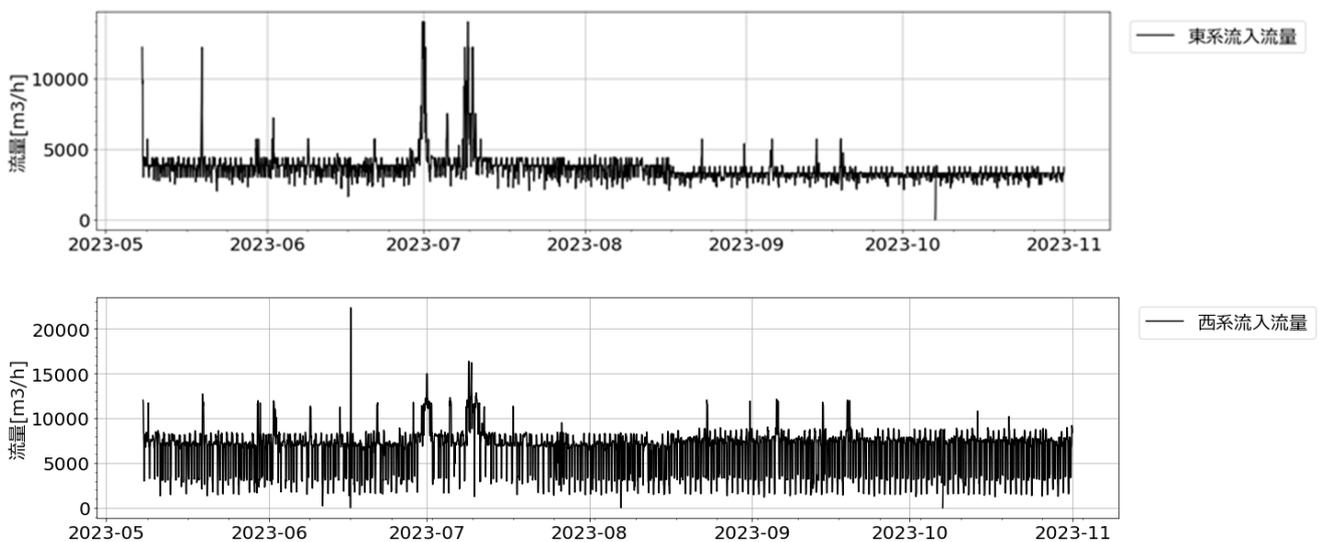


図 2-15 広島市西部水資源再生センター 流量変動
上段：東系 (2系、3系を含む)。下段：西系 (4系、5系を含む)

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。

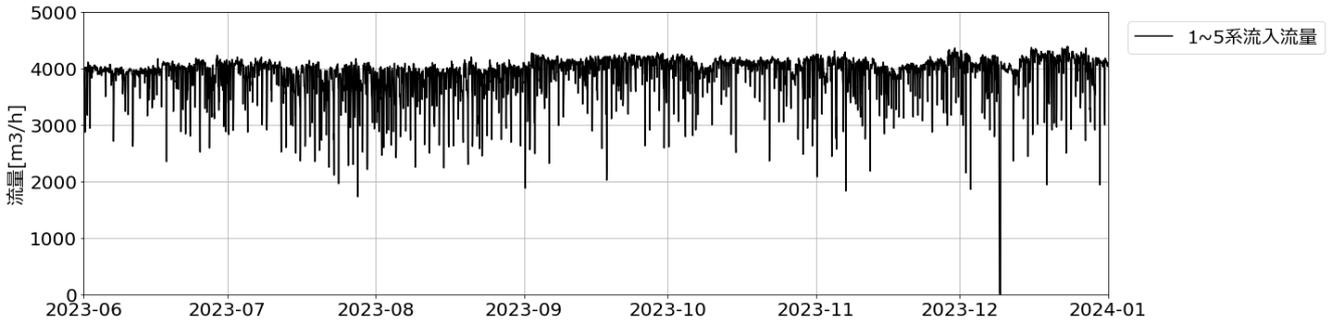


図 2-16 船橋市高瀬下水処理場 流量変動（各系の合計値）

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。

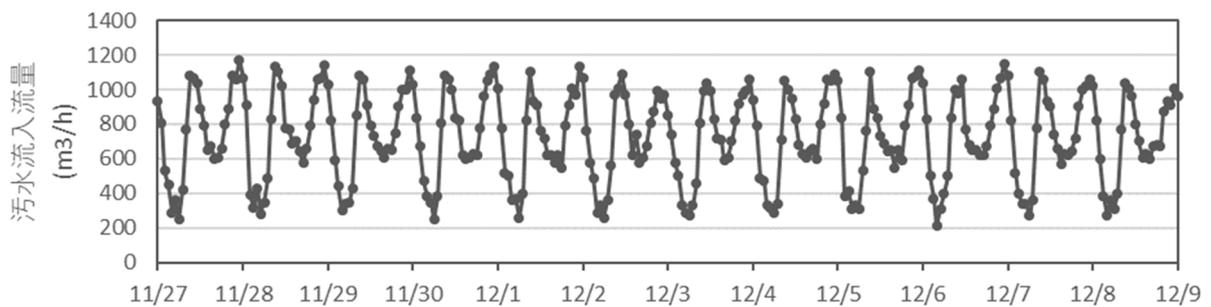


図 2-18 B 処理場 流量変動

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。

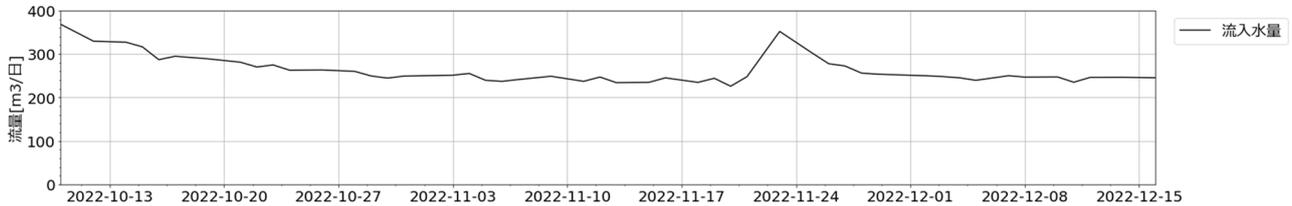


図 2-19 C 処理場 流量変動

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。

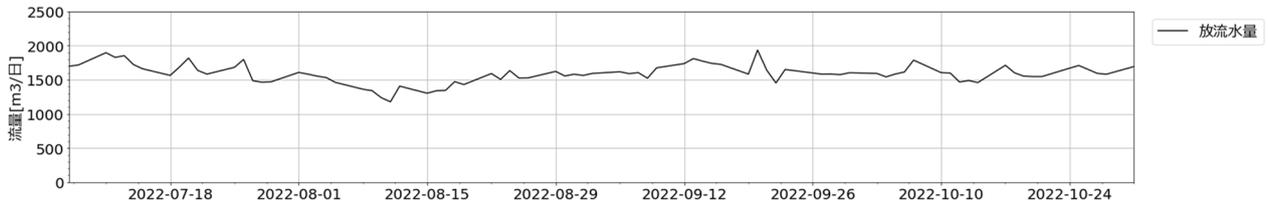


図 2-20 D 処理場 流量変動

(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
3 系 DO 設定	3 系返送汚泥量設定		PAC 注入量設定
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
5 系送風量設定	5 系返送汚泥量設定		PAC 注入量設定

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、フ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。

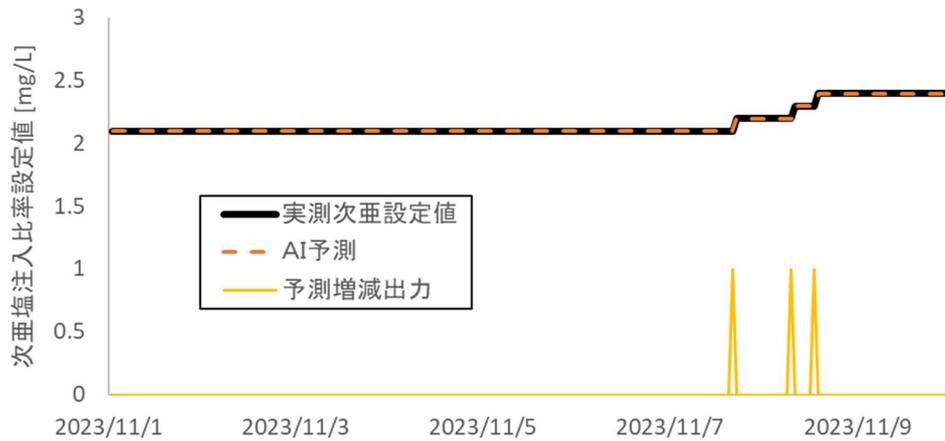


図 2-21 A 処理場 オンサイト・オフライン実証結果

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。

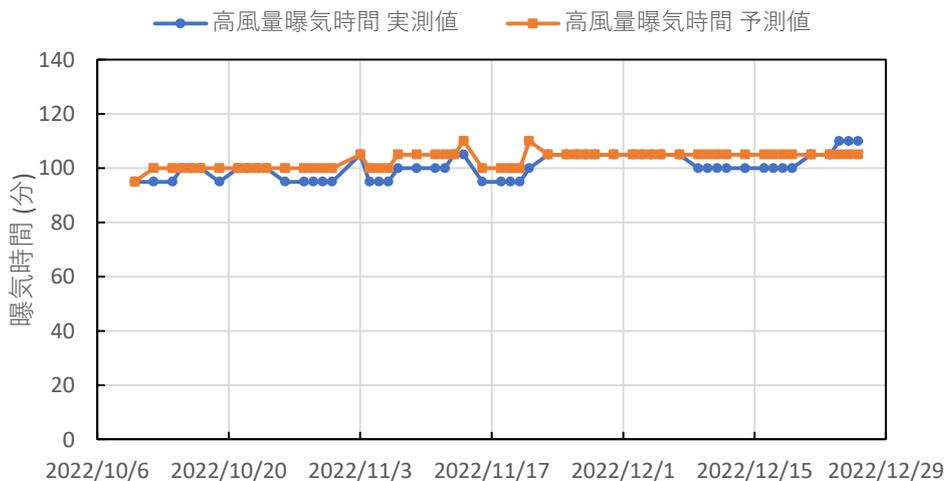


図 2-22 C 処理場 オフサイト実証結果

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。

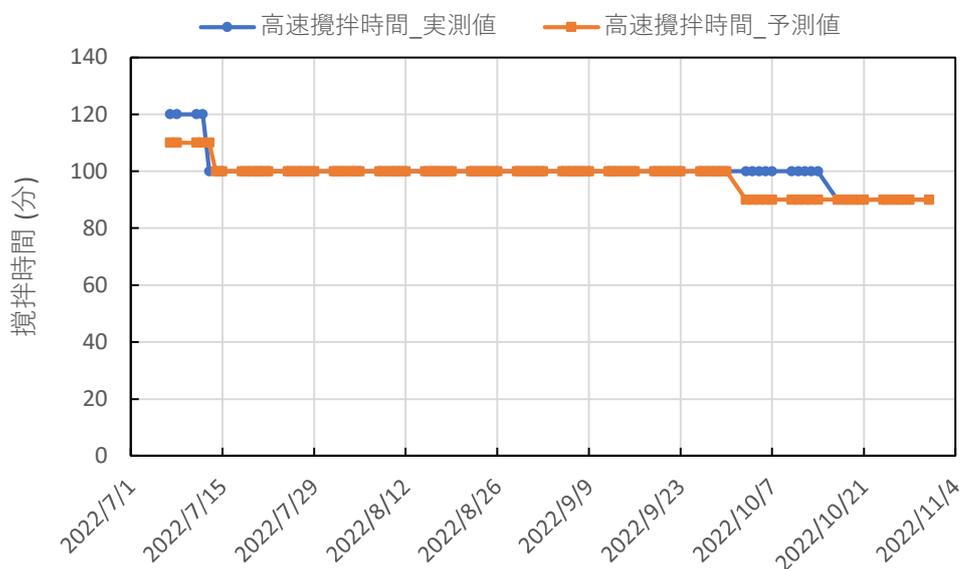


図 2-23 D 処理場 オフサイト実証結果

(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。