

テクノロジーマップの整備に向けた調査研究
(アナログ規制の見直しに向けた技術実証等) における技術実証

技術実証報告書

実証類型番号 10 :

センサー等を活用した環境（水質・大気）の定期検査の実証

環境計測株式会社

2024年2月16日

目次

1	技術実証の概要	1
1.1	目的	1
1.2	対象業務（法令）	1
1.3	全体像	2
1.3.1	施設の全体像	2
1.3.2	実証の全体像	3
1.4	実施体制・期間	8
1.4.1	実施体制	8
1.4.2	実施期間	8
2	技術実証内容の詳細	9
2.1	技術実証の方法	9
2.2	実施場所等	16
2.3	実施条件等	18
2.3.1	実施の前提条件及び技術に必要な機能等	18
2.3.2	各種手続	18
3	技術実証の結果	19
3.1	結果の評価ポイント・方法	19
3.2	結果及び評価・分析	19
3.2.1	技術実証の実施結果	19
3.2.2	技術実証の評価・分析	50
4	総括	55
	用語集	56

1 技術実証の概要

1.1 目的

本技術実証は、鉱山保安法施行規則第 26 条第 1 項第 1 号に規定されている「保安の確保上重要な鉱山等にある建設物、工作物その他施設並びに掘採箇所及び掘採跡」である「坑廃水処理施設」における水質検査について以下の 3 点を目的として実施した。

「目的 1」

IoT/5G を用いた遠隔監視により、廃水処理設備の水質検査のために常駐せざるをえないという、物理的制約からの解放を目指す

「目的 2」

機械学習を用いた水質検査の自動化により、廃水処理設備における運転管理のための人手の介在を最小化する

「目的 3」

産官学連携により社会課題を解決する

1.2 対象業務（法令）

本技術実証で対象とする業務(法令)及び実証の内容は以下のとおりである。

鉱山保安法施行規則第 18 条第 1 項第 17 号、第 21 条第 1 項第 3 号、第 26 条第 1 項第 1 号並びに第 29 条第 1 項第 16 号、第 17 号及び第 19 号に係る定期検査

1.3 全体像

1.3.1 施設の全体像

本技術実証の対象となる坑廃水処理場は図 1 に示す福知山坑廃水処理場であり、坑廃水処理の流れと現行業務の作業は図 2 に示すとおりである。対象業務の現状は 365 日 常駐する作業員の手作業により手分析を行うために水試料を採取するサンプリング及び水質検査を実施し、その結果並びに既存センサーの測定結果を紙の日報に記録している。



図 1 現地状況写真(福知山坑廃水処理場)

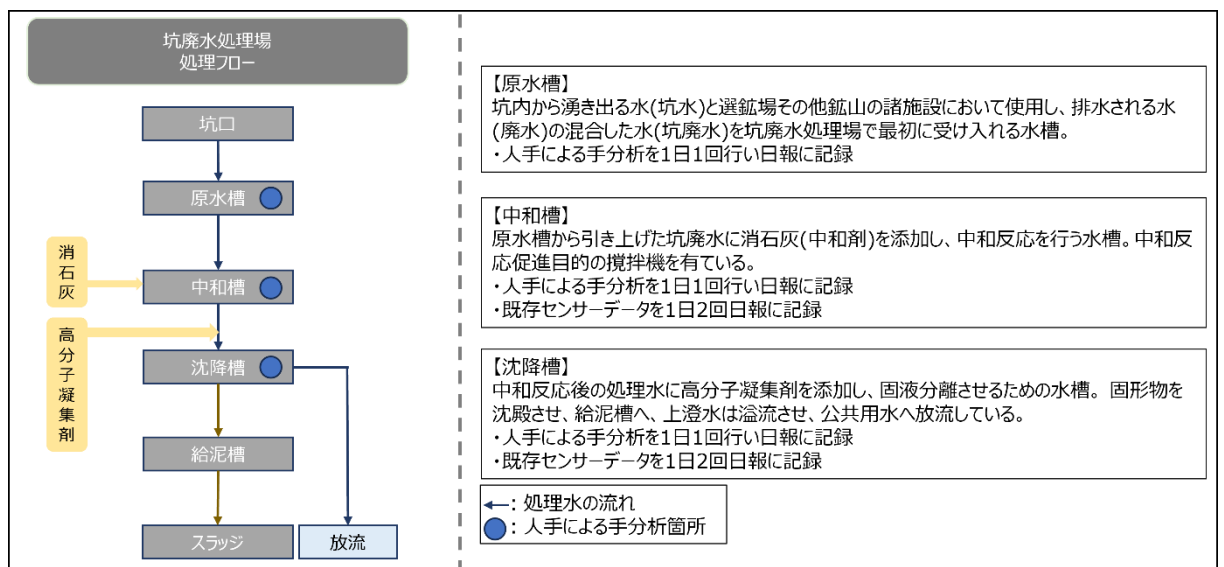


図 2 坑廃水処理の流れと現行業務の作業

1.3.2 実証の全体像

対象業務の現状は 365 日常駐している作業員の手作業により手分析を行うために水試料を採取するサンプリング及び水質検査が実施されている。また、中和槽及び沈降槽では既存センサー(連続監視用)を設置しているが、データの記録は記録紙によるものとなっており、電子データでの記録は行っていない。このことを踏まえ、本技術実証では 1.1 の目的達成に向けて、以下の 3 つの実証項目を実施する。

- (1) 現在人手により行われているサンプルの採取について、センサー等の常設や、採取・運搬の自動化等のデジタル技術を活用した合理化を行う。
- (2) 現行の法令等に定められた測定方法と同等以上の精度を維持し、センサー等を活用し、測定方法の合理化を行う。
- (3) 水質の測定と同時に異常値との比較を行い、異常値と定めた閾値を超える場合には遠隔地にいる検査実施者等への通知等を行う。

具体的には、図 3 に示す全体像の「(1)センサーによる連続監視」、「(2)測定結果の精度確認」、「(3)遠隔監視システムの構築」の 3 つの実証項目を実施する。

なお、本技術実証は、管理者である福知山市産業振興課の協力を得て、実際に稼働している福知山鉱山坑廃水処理場を実証フィールドとして借用し実施した。

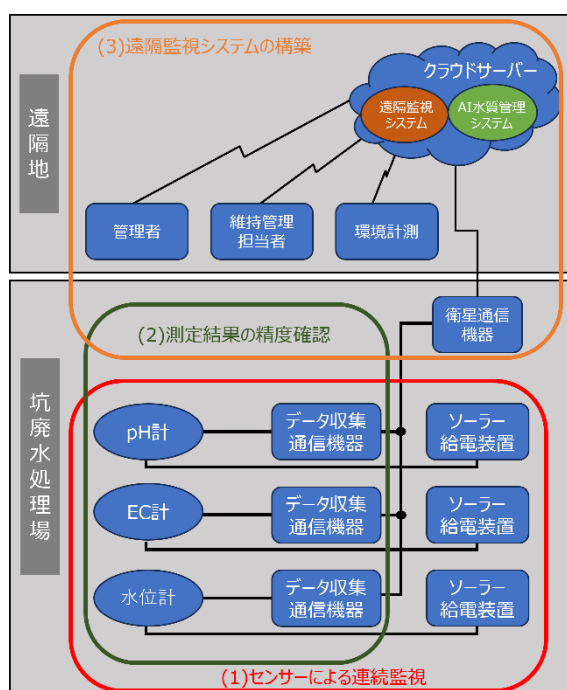


図 3 技術実証の全体像

(1) センサーによる連続監視

「現在人手により行われているサンプルの採取について、センサー等の常設や、採取・運搬の自動化等のデジタル技術を活用した合理化を行う」ことが求められており、現状では、365 日常駐している作業員の手作業によりサンプリング及び水質検査が実施されている。本技術実証では、抗廃水処理場の複数の場所に簡易センサーを常時設置し、連続監視体制を構築することによって毎日実施されている原水槽等における水質検査のデジタル化を図る。

抗廃水処理場の処理フローと簡易センサー設置位置は図 4 に、使用した簡易センサーの性能と設置目的は表 1 に示すとおりである。

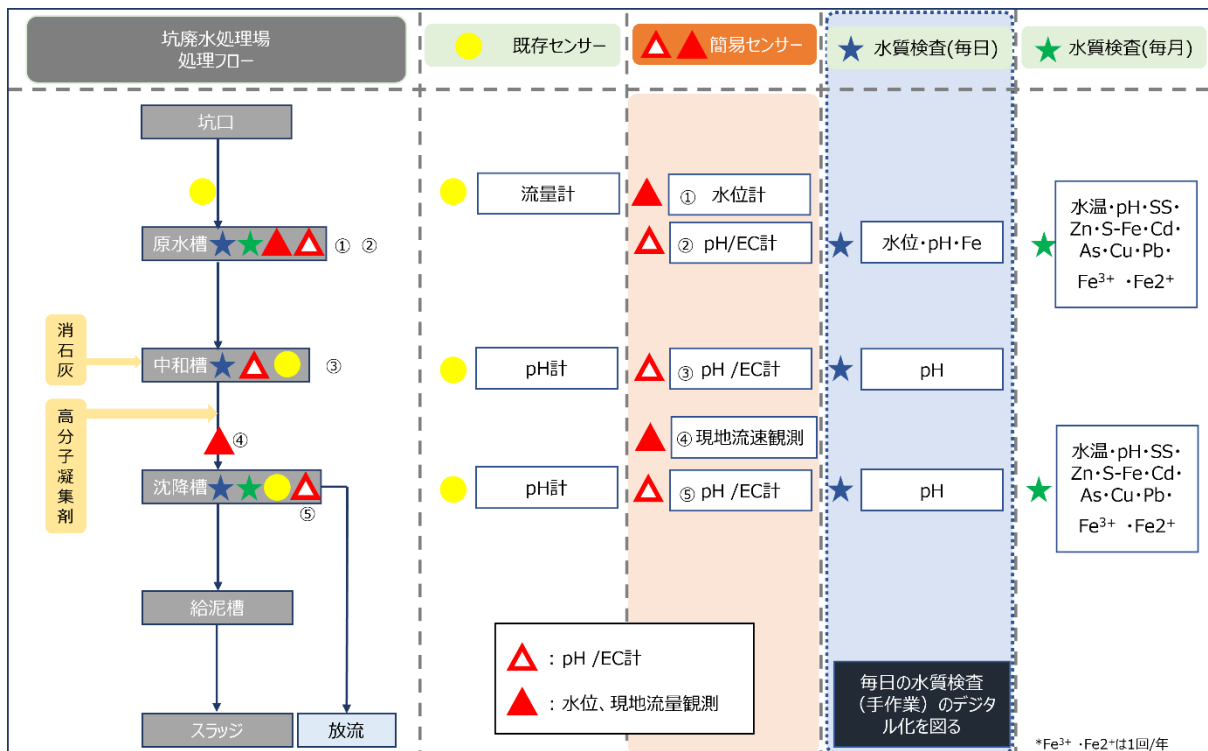


図 4 坑廃水処理場の処理フローと簡易センサー設置位置

表 1 使用した簡易センサーの性能と設置目的

項目	使用機器のメーカー・型式	使用機器の性能	各設置地点の目的
水位計	クリマテック CSTS- ATM.1ST/N-I	・防水構造(IP68) ・アナログ出力対応	①流入する原水の量を把握
pH/EC 計	東亜 DKK ポータブルマルチ 水質計 MM-42DP	・防水構造(IP67) ・アナログ出力対応 ・USB 給電対応	②流入する原水の pH/EC を把握 ③ 消石灰投入後の中和槽の pH/EC を把握 ⑤高分子凝集剤投入後の沈降槽 の pH/EC を把握
現地流速 観測※	JFE アドバンテック AEM1-D	・簡易防水(JIS4 等級)	④坑廃水処理量を把握

※坑廃水処理量を推定するため、点検時に流速データを取得した

(2) 測定結果の精度確認

「現行の法令等に定められた測定方法と同等以上の精度を維持し、センサー等を活用し、測定方法の合理化・高度化を行う」として定められている。現在、人手で行うサンプル採取・分析により実施している水質監視について、簡易センサーにより取得するデータの精度を確認するために実証を行った。

データの精度の確認は、「今回提案するデジタル化した手法による取得データ」と「坑廃水処理施設の手分析項目として挙げられている対象に対して従来手法で取得したデータ」を比較することにより行った。本技術実証で設置した簡易センサーと比較対象となる手分析項目は、表 2 に示すとおりである。

また、精度を担保するために必要な点検頻度並びに、センサーの清掃、校正(実機の値と基準値との差異を把握する一連の作業)後の値の挙動について検証を行った。

なお、初期の想定では、坑廃水処理量の把握は超音波式の流量計による常時測定を予定していたが、センサー設置予定場所での凍結防止用保護管が配管周囲に敷設されていたこと、配管内部の汚れや配管内流体に気泡が多く含まれていたことから超音波流量計ではデータが取得できなかったため、現地点検時に断面計測及び流速観測により坑廃水処理量を把握する手法とした。

表 2 簡易センサーと比較対象となる既存センサー、手分析項目

簡易センサー (設置位置は図 4 参照)	比較対象	確認内容
① 水位計	既存流量計	大きな現状改変なく設置でき、連続監視が可能な水位計の精度を確認する
② pH 計	原水槽手分析項目(pH)	簡易 pH 計と手分析との差を確認する
③ pH 計	中和槽手分析項目(pH) 中和槽既存センサー(pH)	簡易 pH 計と手分析、既存センサーとの差を確認する
④ 流速計	—	坑廃水処理量を推定するため、現地点検時に測定する
⑤ pH 計	沈降槽手分析項目(pH) 沈降槽既存センサー(pH)	簡易 pH 計と手分析、既存センサーとの差を確認する

(3) 遠隔監視システムの構築

水質監視においては、「成分測定と同時に基準値との比較を行い、基準値を超える場合には遠隔地にいる検査実施者等への通知等を行う」ことが求められる。このため本実証項目では、収集した測定データを管理主体である福知山市や福知山市から坑廃水処理場の管理業務を受託している事業者(以下「維持管理業者」)が遠隔地で監視できるシステムを構築した。また、異常が検知された場合等は関係者へメール発報を行う機能を付加し、即時検知が可能となる仕組みを構築した。遠隔監視システムのイメージは図 5 に示すとおりである。

なお、遠隔監視システムに用いる通信網は、衛星電波を用いた通信体制とし、僻地で携帯電話通信網を利用できない場合も対応できる通信体制の構築を行った。具体的な通信体制については衛星電波サービスである Starlink を用いて構築した。

また、設置した簡易センサーによって取得したデータ(連続監視データ)と手分析結果等を教師データとして AI 機械学習を行い、AI 水質管理システムの構築を行った。AI 水質管理システム構築のイメージは図 6 に示すとおりであり、pH の値等により、適正な水質管理が行われているか機械的に判断し、適正に異常値を検出できるシステムの構築を行った。

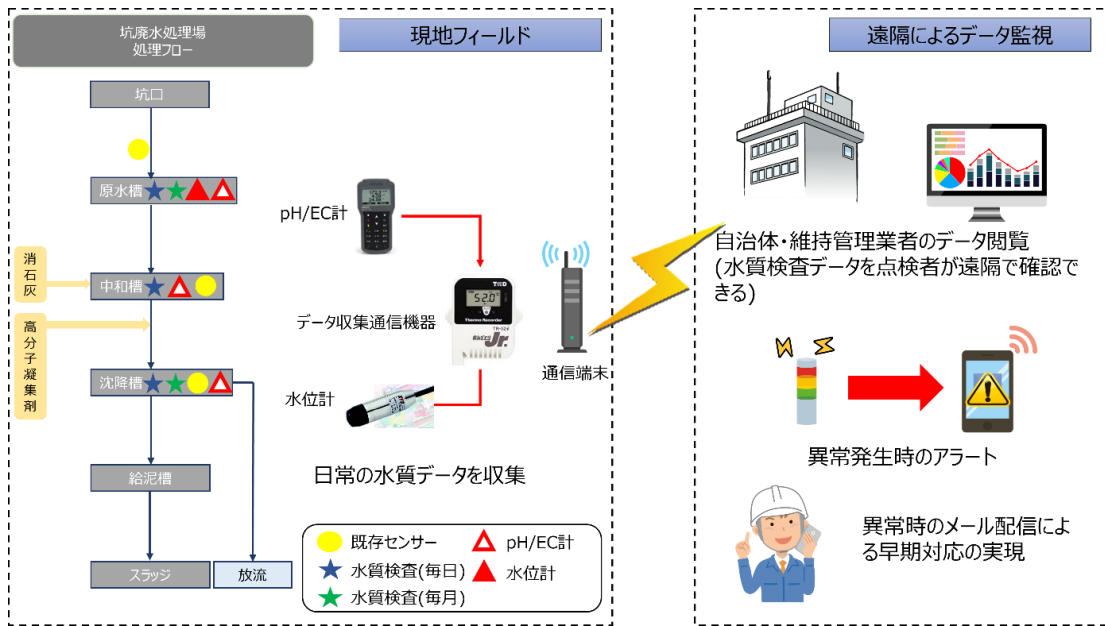


図 5 遠隔監視システムイメージ

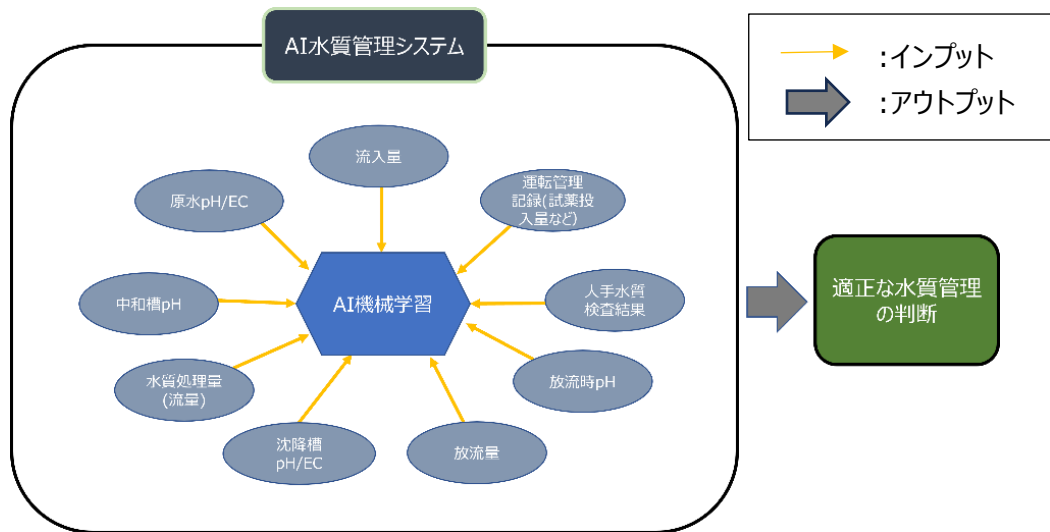


図 6 AI 水質管理システムイメージ

1.4 実施体制・期間

1.4.1 実施体制

本技術実証の実施体制は表 3 に示すとおりである。

表 3 実施体制

事業者名	実施業務・役割
環境計測株式会社	実証事業の運営、とりまとめ
公立大学法人・福知山公立大学 情報学部 教授 数理・データサイエンスセンター センター長 博士(情報科学)畠中 利治 (環境計測からの再委託先)	AI 水質管理システムのパラメータ検証、システム 評価及び構築補助

1.4.2 実施期間

令和 5 年 11 月 7 日から令和 6 年 2 月 16 日

2 技術実証内容の詳細

2.1 技術実証の方法

(1) センサーによる連続監視体制の構築

ア. センサーによるデータの取得

構築したセンサーによる連続監視体制の概要は図 7、現地設置状況は図 8 及び図 9 に示すとおりである。

センサーは、原水槽に pH/EC 計及び水位計を、中和槽に pH/EC 計を、沈降槽に pH/EC 計を設置した(計 3 か所、pH/EC 計:3 個、水位計:1 個)。

センサー部からの出力をデータ収集通信機器により 1 分間隔で記録した。各測定点において収集したデータは 30 分に 1 回の間隔でデータ収集通信機器(特定小電力無線通信)を用いて衛星通信機器を設置している基地局へ伝送した。収集データの特定小電力無線通信による伝送に失敗した場合は次のタイミング(30 分後)で伝送を行うこととした。データ収集通信機器によるデータの記録間隔及びデータ収集通信機器から衛星通信機器(基地局)への伝送間隔は、異常値を漏れなく感知し、速やかに異常検知結果を発報するため、機器仕様の中から最小となる間隔を採用した。

連続監視体制を構築した地点の詳細は表 4 に示すとおりである。

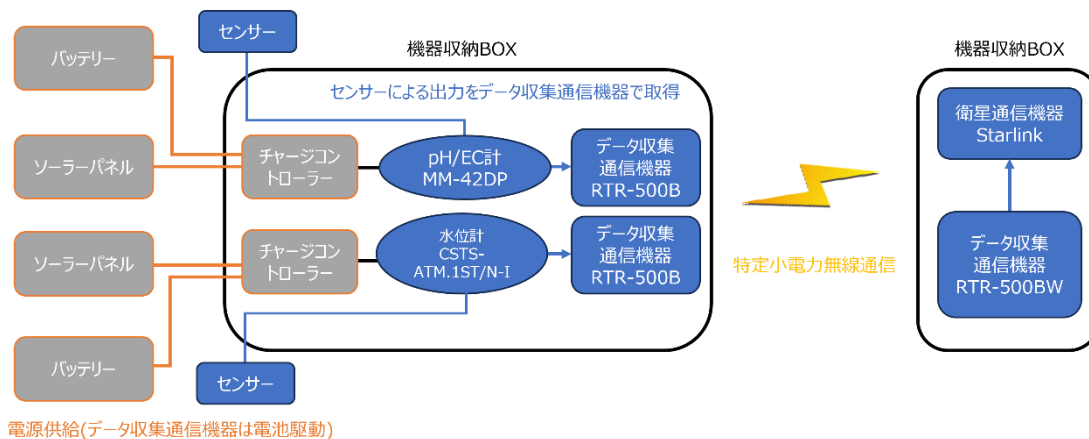


図 7 センサーによる連続監視体制概要

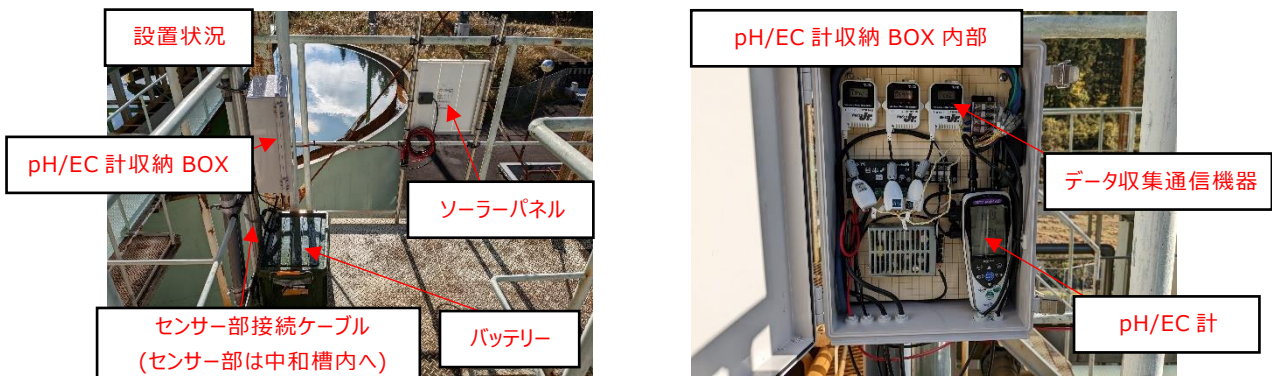


図 8 現地設置状況(左:pH/EC 計の設置状況、右:pH/EC 計収納 BOX 内部)

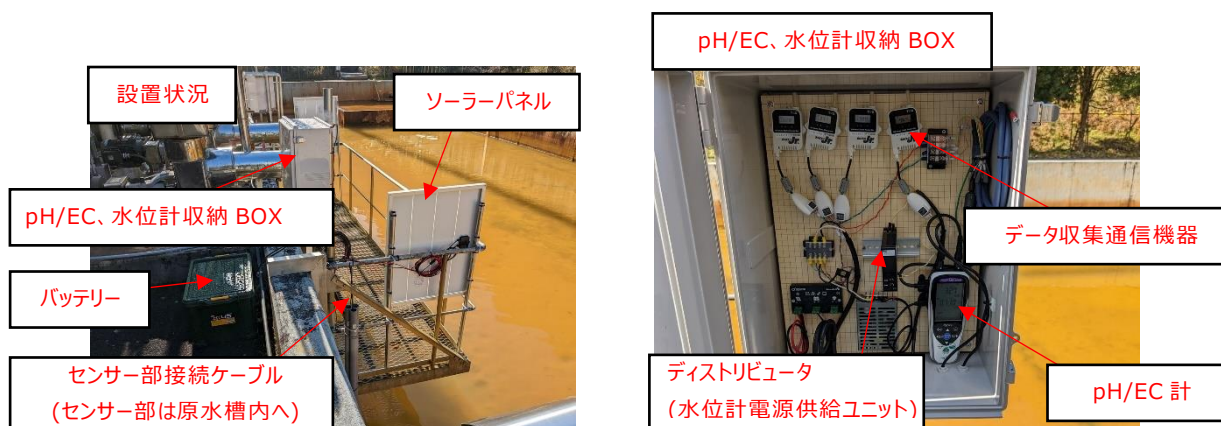


図 9 現地設置状況(左:pH/EC、水位計の設置状況、右:pH/EC、水位計収納 BOX 内部)

表 4 連続監視体制を構築した地点の詳細

地点名	測定項目	測定間隔	伝送間隔
原水槽	pH/EC、水位	1 分毎	30 分毎
中和槽	pH/EC	1 分毎	30 分毎
沈降槽	pH/EC	1 分毎	30 分毎

本実証項目で使用した pH/EC・水位計等センサー、データ収集通信機器は、全国の坑廃水処理施設への展開可能性を考慮し、入手が容易であり、かつ安価な製品を選定した。また、設置環境が屋外となるため、雨水やほこり等がある環境下で正常に稼働できる防水保護等級 IP65 以上の性能を持つ機種を選定し、収納 BOX に格納した。

本実証項目で選定した簡易センサー等の機器の詳細は、表 5～表 7 に示すとおりである。pH 計及び EC 計は、連続監視を目的として販売されている機種ではないが、デジタル化の現実的な普及を目指すという目的から安価なセンサーによる連続監視体制を構築することが可能かを実証するために選定した。

表 5 使用機器仕様(簡易センサー)

測定項目	使用機器	防水等級	メーカー	測定方法	測定範囲	消費電力	価格
pH	MM-42 DP	IP67	東亜 DKK	ガラス電 極法	0 ~ 14	0.9VA	¥130,000
EC	MM-42 DP	IP67	東亜 DKK	交流 2 電 極法	0.1~ 10S/m		
水位	CSTS- ATM.1 ST/N-I	IP68	クリマ テック	水圧式	0 ~ 10m	5.0VA ※ディストリビ ュータ含む	¥145,000

※交換用 pH 複合電極(¥18,000)

表 6 使用機器仕様(データ収集通信機器：特定小電力無線機器兼データロガー)

使用機器	メーカー	仕様	価格
RTR-500BW	株式会社 ティアンド デイ	特定小電力無線通信 ARIB STD-T67 周波数: 429MHz 帯 送信出力: 10mW 通信距離: 約 150m(見通しの良い直線において) 有線 LAN 通信: 100Base-Tx/10Base-T(RJ コネク タ)	¥39,000
RTR-500B	株式会社 ティアンド デイ	データロガー データ記録対象: 熱電対/Pt100/電圧/4-20mA/パルス いずれか 1ch データ記録範囲: 熱電対モジュール: -199~1760℃ Pt100/1000 モジュール: -199~600℃ 電圧モジュール: 0~22V 4-20mA モジュール: 0~20mA パルス: 0~61439 カウント	¥17,600 ※ 本体のみ (別途モジュールが必要)

表 7 収納 BOX 仕様

項目	仕様
メーカー	TAKACHI
型番	BCAP シリーズ
防水保護等級	IP65
ボディー材質	ABS 樹脂
防水パッキン材質	ポリウレタン
ラッチ材質	ステンレス

イ. 独立電源によるセンサー連続監視体制の構築

商用電源の確保が難しい僻地での利用を想定し、設置した簡易センサーやデータ収集通信機器等の機材はソーラーパネルを用いた独立電源により稼働させた。電源の確保にあたって本実証項目で選定した機材の詳細は表 8 に示すとおりである。

なお、使用したソーラーパネルやバッテリー、チャージコントローラ等は現地の状況(パネル設置スペースや安全性、パネル設置場所からの電源ケーブルの取り回し可否等)を確認した上で、サイズを選定した。

表 8 独立電源に使用した機材一覧

地点名	項目	メーカー	仕様	外形寸法(mm)
原水槽	ソーラー パネル	GWSOLAR	出力: 100W 出力動作電圧: 17.6V 出力動作電流: 5.69A 開放電圧: 21.5V 短絡電流: 6.0A 重量: 約 6.1kg	843×665×30
	バッテリー	LiTime	標準電圧: 12V 容量: 100Ah 重量: 約 11kg	329×172×214
	チャージ コントローラ	denryo	システム電圧: 12V 最大入力電圧: 25V 太陽電池入力電圧: 10A 自己消費電流: 2mA(平均 値)	29×90×55
中和槽 沈降槽	ソーラー パネル	GWSOLAR	出力: 20W 出力動作電圧: 18.3V 出力動作電流: 1.10A 開放電圧: 21.8V 短絡電流: 1.20A 重量: 約 1.5kg	843×665×30
	バッテリー	KAUSMEDIA	標準電圧: 12V 容量: 20Ah 重量: 約 2.5kg	151×100×65
	チャージ コントローラ	denryo	システム電圧: 12V 最大入力電圧: 25V 太陽電池入力電圧: 10A 自己消費電流: 2mA(平均 値)	29×90×55

(2) 測定結果の精度確認

本実証項目では、設置した簡易センサーにより取得したデータが手分析結果と同等以上の精度を確保できているかについて比較を行った。現在、手分析は pH のみが実施されていることから比較項目としては pH を対象とした。今回設置した簡易センサーは 1 分間隔で記録を行っており、それに対して手分析は原水槽、中和槽、沈降槽において 1 回/1 日実施されているため、比較は手分析データと同時間帯のデータを抽出することにより行った。

設置した簡易センサーと手分析結果の比較にあたっては、時系列データの可視化により、データの変化傾向やパターンを確認した。次に、設置された簡易センサーから得られたデータと手分析によるデータを並行して比較することにより、特定の条件下でのセンサーの挙動や、予期せぬ状況に対するセンサーの反応の有無を確認した。

また、本実証項目で使用した pH/EC 計は連続測定用に販売されているものではないことから、点検後の時間の経過に伴う値の挙動や、既存センサーとの濃度差が変動する恐れがある。このため、データの挙動や既存センサーによるデータとの差を比較するとともに、精度を担保できる適正な点検頻度の実証を行った。

本実証項目で実施したセンサーの点検内容の詳細は表 9 に示すとおりである。

点検頻度については、センサーの清掃、校正(実機の値と基準値との差異を把握する一連の作業)後の値の挙動、既存センサーとの濃度差を確認しながら検討した。校正の際に基準値とするために、pH は標準液を、EC はチェック液を使用した。

流速測定は、水位計データから算出した坑廃水処理量と現地観測を行った水位・流速のデータをもとに算出した坑廃水処理量を比較することで、水位計データから坑廃水処理量を推定することが可能かを確認するために行った。

表 9 点検作業内容

実施項目	実施内容	点検頻度
pH	・pH センサーの清掃 ・pH センサーの校正 ・既存 pH センサーとの目視比較	1 回/週
EC	・EC センサーの清掃 ・EC センサーの校正	1 回/週
水位	・水位センサーの清掃 ・現在水位とセンサー出力値の比較	1 回/週
流速	・坑廃水処理量を把握するため、中和槽から沈降槽への水路において水位・流速測定を行う	1 回/週

(3) 遠隔監視システムの構築

ア. リアルタイム監視の連続性、異常発生時のアラート発報

本実証項目で構築したリアルタイムデータを遠隔地で確認できる遠隔監視システムの構成図・処理フロー図は図 10 に、ユーザーインターフェース(以下「UI」)のサンプル画像は図 11 に示すとおりである。

遠隔監視システムにおける処理概要を以下に示す。

- 坑廃水処理場に設置したデータ収集通信機器にてセンサーより収集した測定データを衛星通信機器経由でクラウドサーバへ送信
(データ収集通信機器によるデータの記録は 1 分毎とし、各測定点における収集データを 30 分毎に各測定点から衛星通信機器へ送信)
- クラウドサーバは、内部のファイルサーバを常時チェックし、データファイルが届くとその内容を読み込み、データベースへ書き込み
- データベースのデータをもとに AI 水質管理モデルと連携し、異常が検知された場合にはアラートメール送信処理を実行
- アラートメール送信は、データが上下限值から外れた場合またはデータが欠損した場合に、予め登録したメールアドレスへメール発報
- クラウドサーバ上に構築した WEB アプリケーションでは、管理者である自治体等が遠隔地からデータベース上のデータ確認できる UI を提供。WEB アプリケーションは BASIC 認証によりアクセス制限を実施

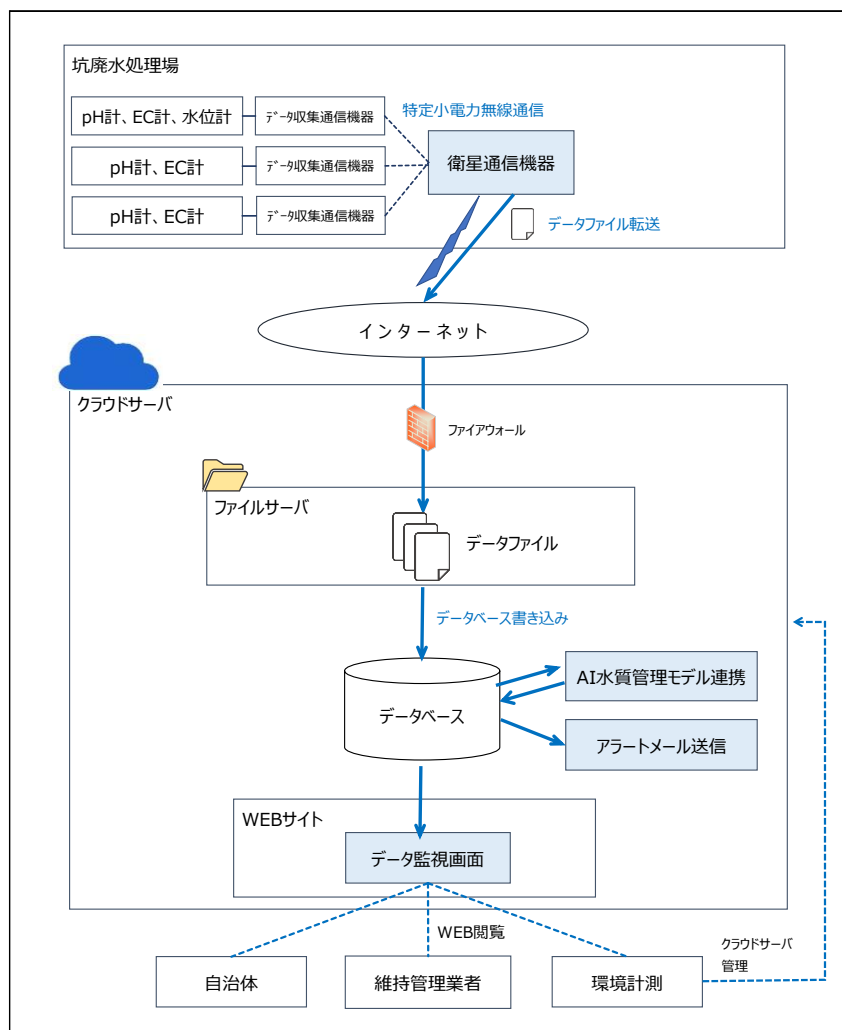


図 10 遠隔監視システムの構成、処理フロー図

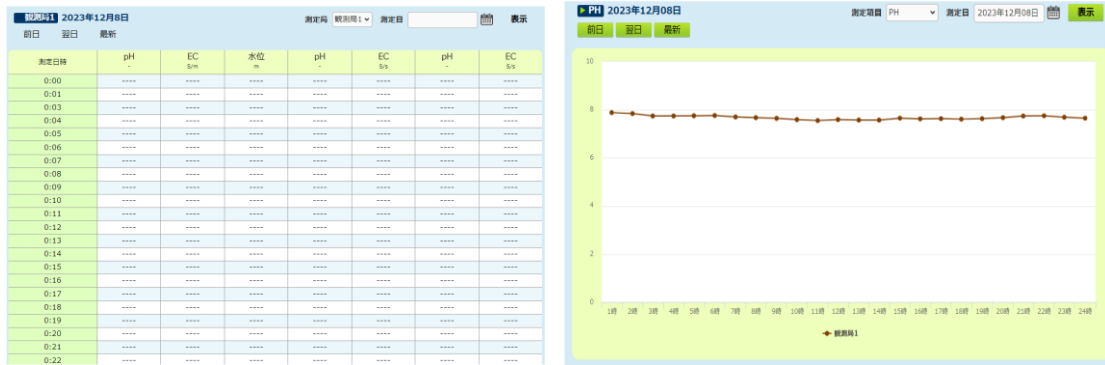


図 11 遠隔監視システムの画面設計(UI サンプル画像)

イ. AI 水質管理システム

遠隔監視システムにおいて、異常値の検出を行うにあたって、AI による測定データの判別を行うため、AI 水質管理システムの開発を行った。

AI の開発では、流入する坑廃水の状況(量及び水質)、水質処理の状況(中和槽での水質)、水質の処理結果(沈降槽での水質)が必要となるため、表 10 に示す項目を教師データとして機械学習を行った。これら教師データに基づき数値の変動メカニズムの理解、データ変動の挙動・原因を把握し、最終的な放流前の pH の予測、異常データの検出を行う水質管理モデルの構築を行った。

なお、入力した教師データは、点検による欠測をスキップしており、また、前処理として、水位、EC、pH はそれぞれ単位や、想定される変化量が異なることから、変動の幅に合わせたスケールの調整を行った。

表 10 AI 水質管理システムへ入力した教師データ

インプット項目	データ取得方法	取得期間	データ数
原水槽水位	本実証項目で 設置したセンサー データ	令和 5 年 12 月 2 日～ 令和 6 年 1 月 21 日	約 59,040 個 (1 データ/分×41 日分) ※ただし点検等による欠測あり
原水槽 pH			
中和槽 pH			
中和槽 EC			
沈降槽 pH			
沈降槽 EC			
中和槽 pH	維持管理業者による手分析値 及び既存センサー による観測値		41 個 (1 データ/日×41 日分)
沈降槽 pH			
気温			
雨量			

AI 水質管理モデルの構築は、統計的手法に基づく線形回帰モデルとし、機械学習による構築とした。線形回帰モデルの説明式は以下のとおりである。回帰モデルを選定した理由として、まずは、線形回帰での説明が可能であるかの検討が必要であると考えられたことから、本実証項目においては線形回帰での検証を行った。

$$\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_n | \hat{\alpha})$$

要因の値の組 X_1, X_2, \dots, X_n が与えられたとき、結果 y の説明式

ウ. 衛星通信を用いた遠隔監視システムの可否

携帯電話通信が使用できない僻地での利用を想定し、データ通信は衛星通信サービスを使用した。携帯電話通信網に比べカバー範囲が広いこと、利用可能なエリアに全国の坑廃水処理施設が位置していることから Starlink を使用することとした。Starlink の仕様は表 11 に示すとおりである。

表 11 衛星通信サービス Starlink の仕様

項目	仕様
アンテナ	電子フェーズドアレイ
方向調整	最新の自動方向調整
動作温度	-30℃~50℃
視野	100°
平均消費電力	50~70W
重量	約 5.1kg

2.2 実施場所等

本技術実証の実施場所は、管理者である福知山市産業振興課の協力を得て、実際に稼働している福知山鉾山坑廃水処理場を実証フィールドとして借用し実施した(図 12)。

名称：福知山市鉾山坑廃水処理場

住所：京都府福知山市大江町南山 709

センサーによる連続監視体制の構築に伴う現地作業は以下の日程で実施した。

設置：令和 5 年 11 月 29 日~12 月 1 日

測定：令和 5 年 12 月 2 日~令和 6 年 1 月 31 日

点検：1 回/週



図 12 実証フィールドの全景(福知山坑廃水処理場)

機器等の設置作業後の現地状況は図 13 に示すとおりである。

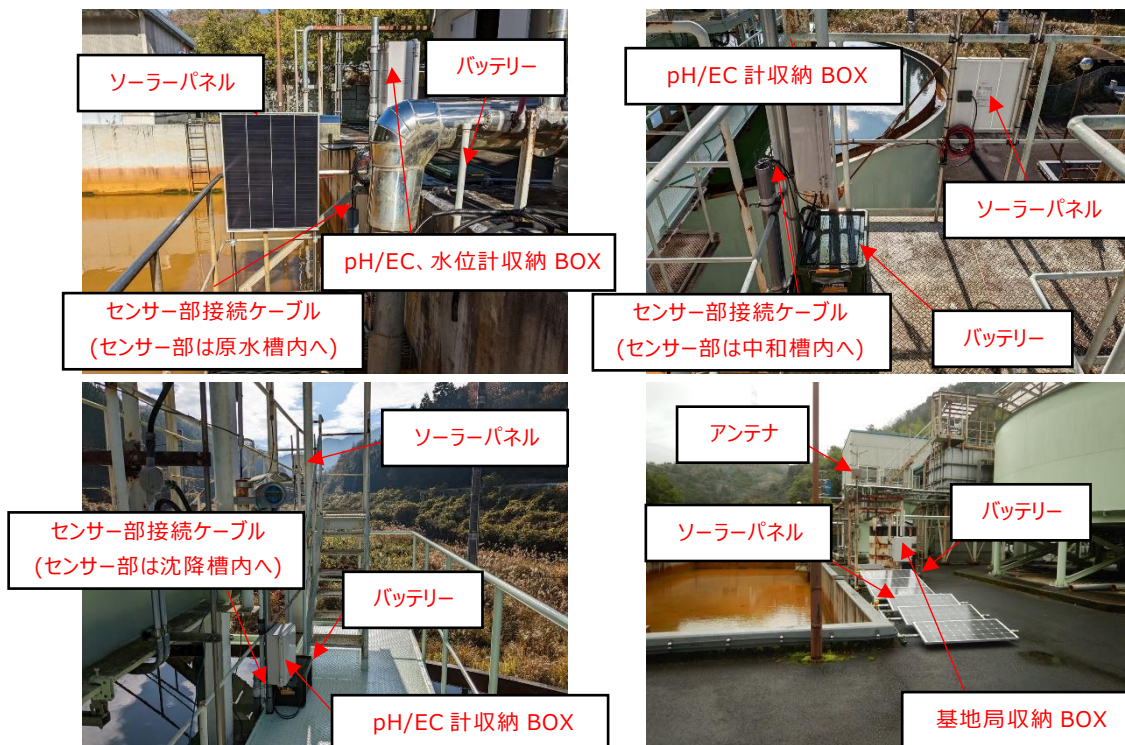


図 13 機器等の現地状況写真

(左上:原水槽、右上:中和槽、左下:沈降槽、右下:基地局)

2.3 実施条件等

2.3.1 実施の前提条件及び技術に必要な機能等

本技術実証において求められる条件と機能は以下の(1)～(4)である。

- (1) センサー等で取得した情報を、遠隔地や地上の施設・設備に送信し、検査実施者が確認できる技術であること。
- (2) 提案する測定方法で取得するデータが、現行の方法で取得するデータと同等以上の精度であること。
- (3) 検査実施者に対する技術導入が容易な、汎用性の高い技術であること。
- (4) 電波環境の悪い場所も想定して、電波増幅に係る技術、オフライン環境下でも利用可能な技術を活用する等、電波環境に関する必要な措置を講じること。

上記(1)～(4)に関して、本技術実証の各実証項目に、実証目的の実現のために求められた必要な機能等は以下のとおりである。

表 12 必要な技術的機能等

No	実証項目	必要な機能等
1	センサーによる連続監視	他の施設への展開が容易な機種を選定
2		独立電源によるセンサー連続監視体制
3		野外の劣悪な環境下における連続監視体制
4	測定結果の精度確認	手分析結果と同等以上の精度確保
5		簡易センサーによる連続監視における測定精度の確保
6		点検や校正前後の適正な稼働
7	遠隔監視システムの構築	携帯電話通信が使用できない環境での通信機能の確保
8		遠隔地での観測データの確認
9		異常検知時のメール発報
10		異常値の自動検知

2.3.2 各種手続

福知山市に実証内容を説明し、施設使用の承認を頂いた。

3 技術実証の結果

3.1 結果の評価ポイント・方法

前述の実証の目的や対象業務の内容、2.3.1 の必要な技術的機能等も踏まえ、本実証項目全体の評価方針を以下のとおり策定した。

表 13 評価方針

No	評価項目	評価ポイント
1	技術導入が容易で、汎用性があるか	入手が容易な機器であり、その操作も専門性を必要としないこと
2	給電が困難な場合にも対応可能	屋外に機器等を設置する場合、給電が困難な状況も想定されるため、そのような環境でも対応可能な技術であること 電池等を利用する場合、想定される使用期限が明確であること
3	劣悪な環境下で利用可能	坑外における天候(雪・雨等)や高温・低温、坑内における粉じんや騒音等のような様々な環境下でも利用可能な技術であること
4	従来と同等以上の精度で計測可能	簡易センサーで取得するデータが、手分析で取得するデータと同等以上の精度であること
5	遠隔監視が可能	センサー等で取得した情報を、遠隔地に送信し、福知山市や維持管理業者が確認できる技術であること
6	電波環境を考慮しているか	電波環境の悪い場所も想定して、電波増幅に係る技術、オフライン環境下でも利用可能な技術を活用する等、電波環境に関する必要な措置を講じること
7	従来手法と比較し、発生する費用は削減されているか	現行の方法と比べて、人員・費用が削減できること

3.2 結果及び評価・分析

3.2.1 技術実証の実施結果

3.1 で示した本実証項目全体の評価ポイント・方法を踏まえつつ、ここでは 3 つの実証項目である「(1)センサーによる連続監視」、「(2)測定結果の精度確認」、「(3)遠隔監視システムの構築」について、必要な技術的機能等を充足できているかどうか結果を評価する。

結果概要は表 14 に、その詳細は以降に示す。

表 14 必要な技術的機能等

No	実証項目	必要な機能等	結果
1	センサーによる連続監視	他の施設への展開が容易な機種を選定	○:入手が容易であり、その操作も専門性を必要としない機器を選定でき、必要な機能要件を満たしていた
2		独立電源によるセンサー連続監視体制	○:独立電源は安定して稼働しており、必要な機能要件を満たしていた
3		野外の劣悪な環境下における連続監視体制	○: IP65 相当の機器を活用した監視体制を構築しており、技術実証期間中に環境要因によるトラブルは見られず必要な要件を満たしていた
4	測定結果の精度確認	手分析結果と同等以上の精度確保	○:手分析結果と同等以上の精度を確保できており、必要な機能要件を満たしていた
5		簡易センサーによる連続監視における測定精度の確保	○:連続監視における測定精度を確保できており、必要な機能要件を満たしていた
6		点検や校正前後の適正な稼働	○:点検や校正前後に異常は見られず機能要件を満たしていた
7	遠隔監視システムの構築	携帯電話通信が使用できない環境での通信機能の確保	△:衛星通信サービスを使用することで通信機能を確保し、必要な機能要件を満たしていたが、独立電源による稼働には課題を残した
8		遠隔地での観測データの確認	○:遠隔地での観測データの確認ができ、必要な機能要件を満たしていた
9		異常検知時のメール発報	○:テストデータを使用し、異常検知時のメール発報を確認し、必要な機能要件を満たしていた
10		異常値の自動検知	△:教師データの数が少なかったため、精度に課題が残った

○: 必要な機能要件を満たす

△: カスタマイズや運用の工夫をすることで機能要件を満たす

×: 必要な機能要件を満たさない

(1) センサーによる連続監視

ア. 他の施設への展開が容易な機種を選定

本実証項目で使用したセンサー類は、他の施設への展開が容易な機種を想定して選定を行った。他の施設への展開が容易な機種として、「入手が容易であること」、「価格が安価であること」、「技術導入が容易で汎用的であること」を踏まえて選定した。

本実証項目で選定したセンサー類は、入手が容易であると考えられる一般に販売されている機種の中から選定した。価格が連続監視用センサーに比べて安価であり、取り扱いについても専門知識のない者であっても取扱説明書を読むことで問題なく設置・メンテナンス等が可能であるものから選定した。上記センサー類を使用したことがない当社作業員が取扱説明書記載の内容を確認の上、作業を行ったところ問題なくメンテナンスを行うことができた。

また、坑廃水処理場内のデータ通信で選定したデータ収集通信機器(特定小電力無線通信)は、一般に販売されており、取り扱いについてもセンサー類と同様に簡便である。

イ. 独立電源によるセンサー連続監視体制

センサーによる連続監視体制を実現するにあたって商用電源の確保が難しい僻地での利用を想定して、設置した簡易センサー等の機器は独立電源によるセンサー連続監視体制として構築を行った。

独立電源を用いる上で、連続監視体制の安定的な稼働を確保できるパネルやバッテリーサイズであるかを評価するために、バッテリー電圧の記録を行った。

具体的な基準及び確認方法は以下のとおりである。

【基準及び確認方法(バッテリー電圧の変動)】

・バッテリー電圧が 12V を下回らない等、安定的な稼働であるかどうかを確認する。

記録したバッテリー電圧の変動図は図 14～図 16 に示すとおりである。

本技術実証期間中に最大 5 日間程度、十分な日照が得られなかった際も測定に必要なバッテリー電圧は維持されていた。原水槽のバッテリー電圧において 1 月 5 日に最小 11.9V を記録していた。そのため、前後のデータを確認すると、13V 付近から急激に 11.9V 付近まで電圧が下降し、その後 13V 付近まで上昇する様子が見られた。使用電力量に大きな変化はないと考えられたことから、急激な電圧の下降・上昇は通常のデータとは考えにくく、ノイズ等によりデータに影響があったものと考えられた。

上記データ(1 月 5 日)を除き、独立電源によるセンサー連続監視体制の構築において、本技術実証期間中にバッテリー電圧が 12V を下回ることなく安定して稼働していたことから、選定したソーラーパネルのサイズ、バッテリー容量は適正であった。

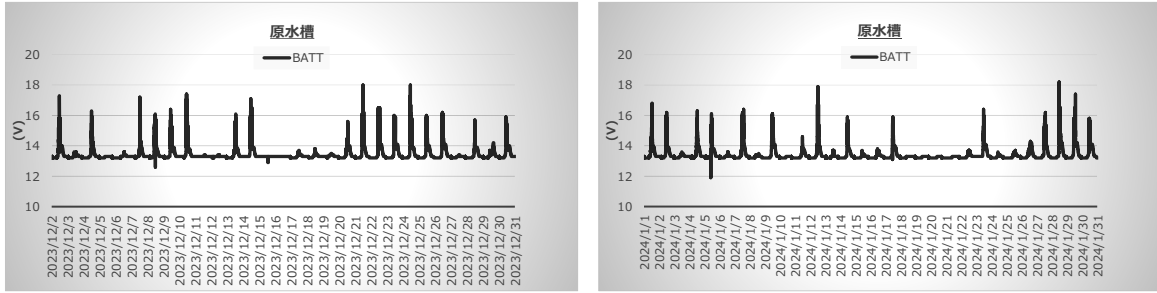


図 14 センサー連続監視体制のバッテリー電圧変動図(原水槽)

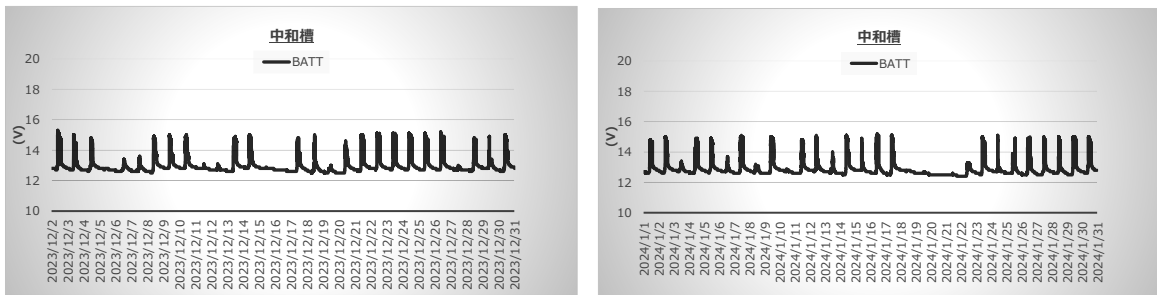


図 15 センサー連続監視体制のバッテリー電圧変動図(中和槽)

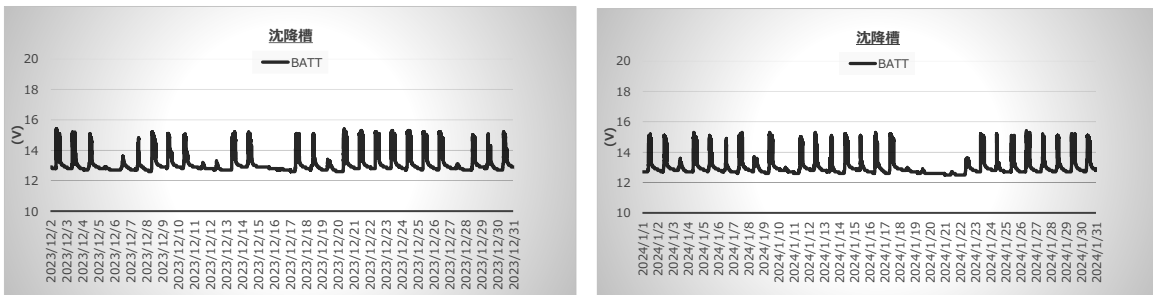


図 16 センサー連続監視体制のバッテリー電圧変動図(沈降槽)

ウ. 野外の劣悪な環境下における連続監視体制

本実証項目において使用した製品は可能な限り防水保護等級 IP65 以上の性能を持つ製品を選定している。しかし、防水保護等級を持たない製品(データ収集通信機器)も必要となることから、各製品を収納する BOX を IP65 対応とすることで、全体として IP65 相当の防塵・防水性能を持つシステムとして構築した。本技術実証期間中に、環境要因によるトラブルは発生していない。

(2) 測定結果の精度確認

ア. 手分析結果と同等以上の精度確保

センサーにより取得した値と手分析結果との比較を行った。

手分析は原水槽、中和槽、沈降槽にて1日1回実施されていることから、手分析との比較は各地点1回/1日とした。比較は、時系列データの可視化を行いデータの変動を確認することにより行った。

具体的な基準及び確認方法は以下のとおりである。

【基準及び確認方法(センサー部の連続測定精度)】

- ・時系列データの可視化による比較を行い、手分析結果と比較して異常な変動がないかを確認する。

手分析結果との比較結果は図17～図19、表15～表16に示すとおりである。比較した結果、両データには一定のオフセットがあることがわかった。原水槽にて最小0.26～最大1.12、中和槽にて最小0.19～最大1.75、沈降槽にて最小0.07～0.83の差が見られた。

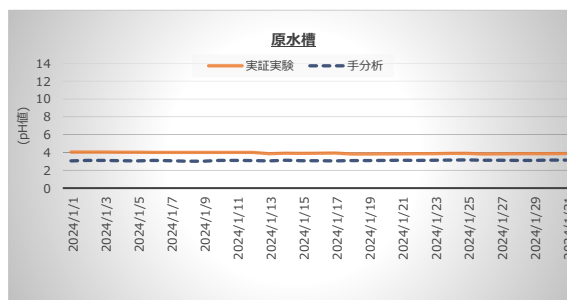
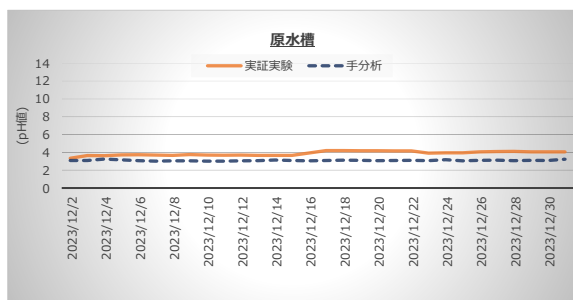


図17 経時変化図(原水槽)

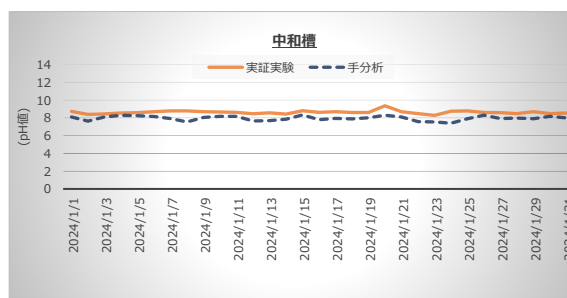
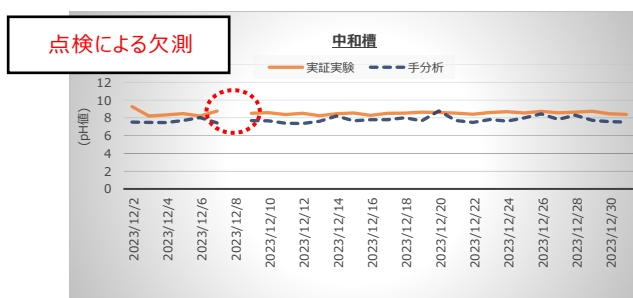


図18 経時変化図(中和槽)

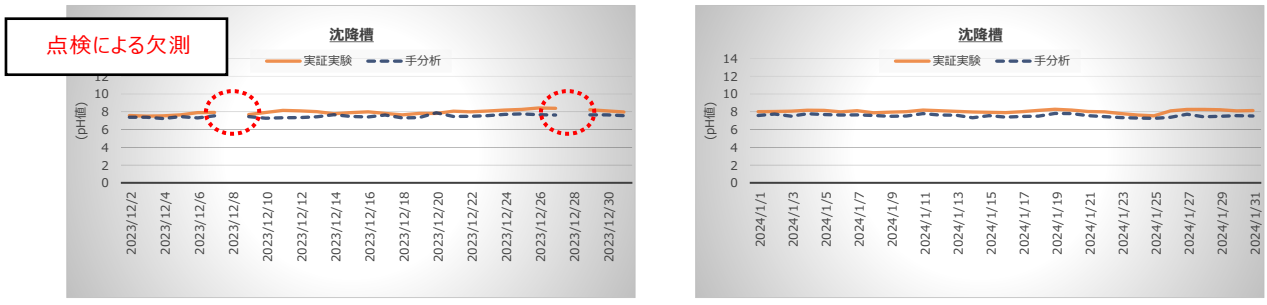


図 19 経時変化図(沈降槽)

この結果より、手分析結果との比較において、データに一定のオフセットがあることがわかった。この原因としては、pH 計の器差(メーカー・型式等によるもの)が考えられた。

手分析に使用している pH 計のメーカー・型式等は不明であるが、卓上型の pH 計であることはヒアリングからわかっており、今回設置した pH 計がポータブル型であることからメーカー・型式等の差によりオフセットが生じた可能性が考えられた。

原水槽では、一定程度のオフセットを保ちながらも手分析と同様の傾向にて推移していた。中和槽、沈降槽では、測定値が手分析と逆転する結果が見られた。手分析は、坑廃水の処理するタイミングで実施されている。坑廃水の処理中の中和槽では中和処理のために中和剤(消石灰等)を投入しており、中和反応促進のために攪拌機にて攪拌を行っている(図 20)。この攪拌作用で中和槽内の水質が均一ではなくなるにより、センサーで測定される水と手分析で測定される水の水質に差異が生じている可能性が考えられた。同様に沈降槽においても中和反応後の処理水が流入してくるため(図 20)、測定対象とする水質に差異が生じた結果だと考えられた。このため、中和槽、沈降槽における測定値の逆転はセンサーの測定精度によるものではなく、測定している水質の差異による影響が大きいと考えられた。

以上より、連続測定精度の観点からみると、時系列データは一定程度のオフセットを保ちながらも手分析と同様の傾向にて推移しており、測定している水質の差によって測定値の逆転がみられたものの、異常な変動とは言えず、水質の把握は十分できると考えられた。

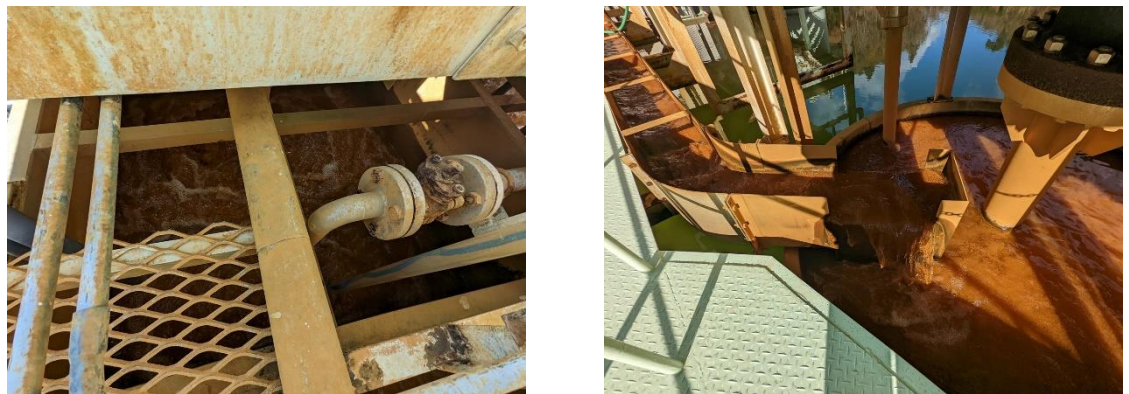


図 20 施設稼働時の状況(左:中和槽、右:沈降槽)

表 15 手分析結果との比較結果(12月)

測定日	原水槽(pH 値)		中和槽(pH 値)		沈降槽(pH 値)	
	センサー 取得値	手分析	センサー 取得値	手分析	センサー 取得値	手分析
令和 5 年 12 月 2 日	3.35	3.09	9.27	7.52	7.59	7.38
令和 5 年 12 月 3 日	3.65	3.09	8.22	7.49	7.51	7.39
令和 5 年 12 月 4 日	3.63	3.26	8.33	7.48	7.55	7.24
令和 5 年 12 月 5 日	3.72	3.16	8.49	7.70	7.65	7.46
令和 5 年 12 月 6 日	3.73	3.08	8.22	8.03	7.91	7.32
令和 5 年 12 月 7 日	3.70	3.02	8.77	7.43	7.92	7.54
令和 5 年 12 月 8 日	3.66	3.05	-	8.28	-	7.44
令和 5 年 12 月 9 日	3.75	3.06	8.51	7.69	7.69	7.46
令和 5 年 12 月 10 日	3.71	3.02	8.59	7.67	7.92	7.28
令和 5 年 12 月 11 日	3.69	3.03	8.38	7.40	8.15	7.33
令和 5 年 12 月 12 日	3.70	3.06	8.51	7.36	8.10	7.34
令和 5 年 12 月 13 日	3.67	3.07	8.25	7.62	8.02	7.43
令和 5 年 12 月 14 日	3.67	3.14	8.46	8.21	7.78	7.68
令和 5 年 12 月 15 日	3.66	3.09	8.55	7.67	7.90	7.48
令和 5 年 12 月 16 日	3.93	3.06	8.29	7.80	8.00	7.42
令和 5 年 12 月 17 日	4.21	3.09	8.51	7.79	7.81	7.63
令和 5 年 12 月 18 日	4.21	3.12	8.53	8.01	7.65	7.32
令和 5 年 12 月 19 日	4.19	3.11	8.64	7.67	7.82	7.35
令和 5 年 12 月 20 日	4.19	3.08	8.60	8.79	7.82	7.89
令和 5 年 12 月 21 日	4.17	3.09	8.53	7.71	8.06	7.48
令和 5 年 12 月 22 日	4.17	3.11	8.41	7.50	8.00	7.49
令和 5 年 12 月 23 日	3.91	3.08	8.60	7.82	8.08	7.56
令和 5 年 12 月 24 日	3.95	3.18	8.69	7.63	8.20	7.70
令和 5 年 12 月 25 日	3.95	3.05	8.55	8.00	8.27	7.77
令和 5 年 12 月 26 日	4.07	3.11	8.73	8.45	8.43	7.68
令和 5 年 12 月 27 日	4.09	3.13	8.57	7.83	8.39	7.63
令和 5 年 12 月 28 日	4.11	3.08	8.65	8.30	-	7.98
令和 5 年 12 月 29 日	4.06	3.11	8.75	7.72	8.23	7.65
令和 5 年 12 月 30 日	4.07	3.09	8.47	7.59	8.10	7.66
令和 5 年 12 月 31 日	4.06	3.23	8.39	7.53	7.97	7.57

※「-」は点検による欠測を示す。

表 16 手分析結果との比較結果(1月)

測定日	原水槽(pH 値)		中和槽(pH 値)		沈降槽(pH 値)	
	センサー 取得値	手分析	センサー 取得値	手分析	センサー 取得値	手分析
令和 6 年 1 月 1 日	4.05	3.06	8.74	8.10	8.01	7.59
令和 6 年 1 月 2 日	4.05	3.11	8.39	7.64	8.04	7.74
令和 6 年 1 月 3 日	4.04	3.10	8.44	8.11	8.06	7.51
令和 6 年 1 月 4 日	4.03	3.07	8.55	8.29	8.17	7.78
令和 6 年 1 月 5 日	4.03	3.06	8.59	8.24	8.15	7.69
令和 6 年 1 月 6 日	4.00	3.11	8.69	8.16	8.00	7.64
令和 6 年 1 月 7 日	4.01	3.08	8.78	7.92	8.12	7.66
令和 6 年 1 月 8 日	4.01	3.01	8.79	7.54	7.89	7.59
令和 6 年 1 月 9 日	4.01	3.02	8.70	8.05	7.96	7.49
令和 6 年 1 月 10 日	4.01	3.10	8.66	8.18	8.02	7.52
令和 6 年 1 月 11 日	4.00	3.10	8.62	8.17	8.20	7.80
令和 6 年 1 月 12 日	4.00	3.09	8.47	7.65	8.12	7.64
令和 6 年 1 月 13 日	3.87	3.06	8.57	7.69	8.05	7.62
令和 6 年 1 月 14 日	3.91	3.12	8.43	7.86	7.97	7.33
令和 6 年 1 月 15 日	3.90	3.08	8.80	8.34	7.94	7.56
令和 6 年 1 月 16 日	3.92	3.08	8.63	7.79	7.90	7.40
令和 6 年 1 月 17 日	3.93	3.06	8.69	7.95	8.02	7.47
令和 6 年 1 月 18 日	3.82	3.09	8.60	7.89	8.16	7.51
令和 6 年 1 月 19 日	3.83	3.09	8.60	8.02	8.28	7.81
令和 6 年 1 月 20 日	3.85	3.11	9.36	8.30	8.19	7.80
令和 6 年 1 月 21 日	3.85	3.12	8.69	8.10	8.03	7.57
令和 6 年 1 月 22 日	3.86	3.11	8.49	7.58	7.99	7.45
令和 6 年 1 月 23 日	3.87	3.12	8.28	7.55	7.79	7.34
令和 6 年 1 月 24 日	3.89	3.15	8.75	7.40	7.63	7.30
令和 6 年 1 月 25 日	3.90	3.17	8.79	7.90	7.55	7.26
令和 6 年 1 月 26 日	3.83	3.13	8.61	8.31	8.11	7.38
令和 6 年 1 月 27 日	3.85	3.12	8.59	7.92	8.27	7.73
令和 6 年 1 月 28 日	3.86	3.11	8.48	7.97	8.27	7.44
令和 6 年 1 月 29 日	3.87	3.11	8.70	7.91	8.23	7.50
令和 6 年 1 月 30 日	3.87	3.14	8.49	8.17	8.10	7.57
令和 6 年 1 月 31 日	3.88	3.15	8.55	8.00	8.14	7.53

※「-」は点検による欠測を示す。

イ. 簡易センサーによる連続監視における測定精度の確保

坑廃水での連続測定に必要な点検頻度及び措置が確保できているかを評価するために、データの挙動や既存センサーによるデータとの差を比較し、妥当性の確認を行った。なお、既存センサーは電子データが存在しないため、記録紙から読み取れる4時間毎のデータと比較を行った。

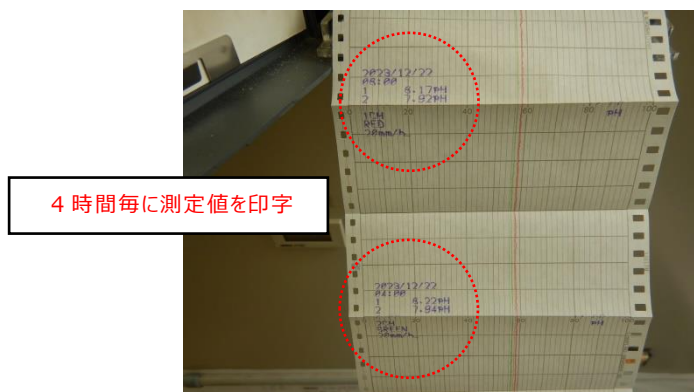


図 21 記録紙写真（既存センサーによる記録）

具体的な基準及び確認方法は以下のとおりである。

【基準及び確認方法(センサー部の連続測定精度)】

- ・既存センサーとの比較を行い、異常な変動(傾向の急激な変化、周期性の急激な変化、外れ値の出現等)がないかを確認する

pHの既存センサーデータとの比較結果は図 22～図 23 に示すとおりである。

可視化した時系列データのグラフから、既存センサーデータと同様の傾向で推移していることが確認できた。両データを元に算出した相関係数は表 17 に示すとおりであり、中程度～強い相関を確認することができた。一般的とされる相関係数の目安は表 18 に示すとおりである。相関係数の算出式は以下のとおりである。

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

n : データ(x, y)の個数

X_i, Y_i : x, y の数值

\bar{x} : x の平均

\bar{y} : y の平均

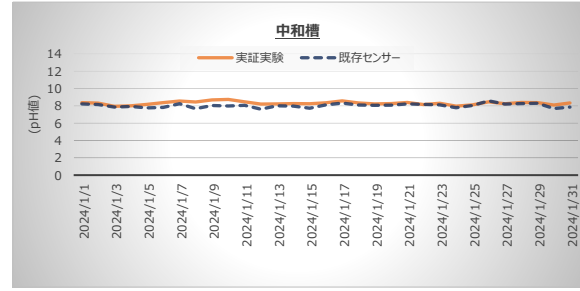
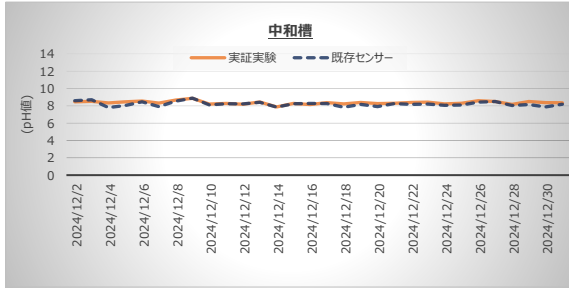


図 22 既存センサーデータとの比較(pH: 中和槽)

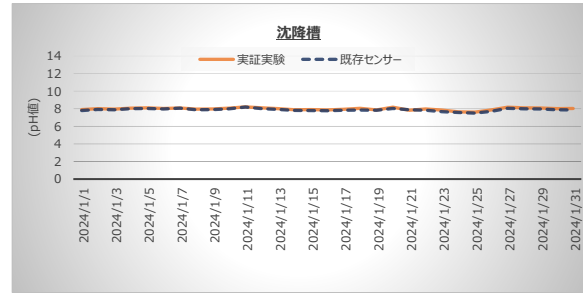
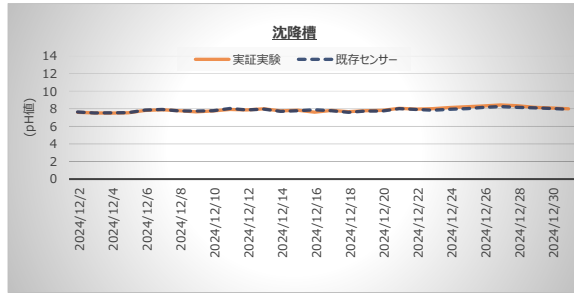


図 23 既存センサーデータとの比較(pH: 沈降槽)

表 17 相関係数

期間	地点	相関係数
12月	中和槽	0.6
	沈降槽	0.9
1月	中和槽	0.5
	沈降槽	0.9

表 18 相関係数の目安

相関係数の絶対値	相関の強さの目安
0.0~0.2	ほとんど相関関係がない
0.2~0.4	やや相関関係がある
0.4~0.7	かなり相関関係がある
0.7~1.0	強い相関関係がある

ウ. 点検や校正前後の適正な稼働

本実証項目で使用した pH/EC 計は連続測定用に販売されているものではないことから、点検後の時間の経過に伴う値の挙動や、既存センサーとの濃度差が変動する恐れがあるため、適正な稼働の確認を行った。

【基準及び確認方法(センサー部の連続測定精度)】

- ・点検時に校正エラー等がないこと及び JIS Z8802(pH 測定方法:日本産業規格)の繰り返し性 ± 0.1 と適合しているかを確認する(pH)。
- ・JIS K0130(電気伝導率測定方法通則:日本産業規格)の繰り返し性 $\pm 3\%$ と適合しているかを確認する(EC)。
- ・原水槽水位を実測し、センサー精度($\pm 0.2\%$ FS)と適合しているかを確認する(水位)。

※繰り返し性：基準となる値に対して繰り返し測定した場合に、安定して測定できるかを示す指標のこと。ここでは、校正毎に標準液(pH)・チェック液(EC)に対して比較を行うことで、安定した精度を確保できているかを確認するために確認を行った。

【基準及び確認方法(センサー部ならびにケーブル部の外観確認)】

- ・点検時にセンサー部ならびにケーブル部の外観に異常がないかの確認を行う。

pH の標準液比較結果から原水槽、中和槽、沈降槽の各地点で標準液との基準(±0.1)を超える差異は見られなかった(表 19)。pH の標準液比較結果は表 20 に、点検前後のデータ比較結果は図 25～図 27 に示すとおりである。

点検前後のデータを確認すると、点検後は点検前よりやや低い数値にて推移し、徐々に点検前の数値に近づいていくという傾向を示した。点検時にセンサーを坑廃水から引き上げ、清掃・校正することにより、温度変化が生じセンサーの応答が安定するまでに時間がかかっているためと考えられた。安定までに最大で 1 時間程度を要することもあった。安定した後は、点検前と同程度の数値で推移していた。

連続測定における精度を担保できる点検頻度を確認するために、点検回数を追加してデータ変動を確認したが、データの挙動は 1 回/週の点検時と比較して変化は見られなかった。

表 19 基準値との比較結果

項目	差の最大値※	基準	基準との比較
pH	+0.07	±0.1	適合

※差の最大値とは、標準液との差のうち、最大のものを示す。

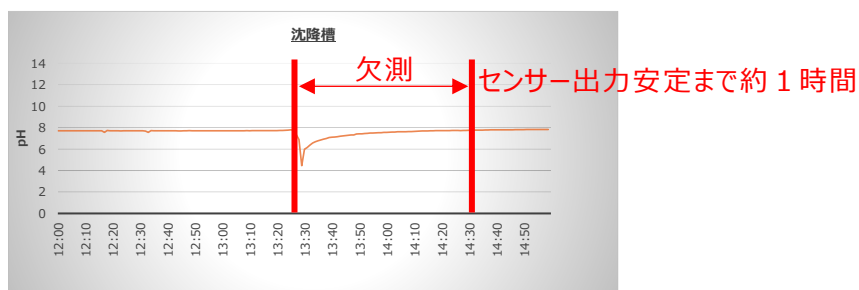


図 24 pH センサーの安定(12 月 8 日データ)

表 20 標準液比較結果(pH)

点検実施日	地点	標準液に対する測定値			
		標準液 (4.01)	差	標準液 (6.86)	差
令和 5 年 12 月 8 日	原水槽	4.01	0	6.85	-0.01
	中和槽	4.02	+0.01	6.89	+0.03
	沈降槽	4.02	+0.01	6.87	+0.01
令和 5 年 12 月 15 日	原水槽	4.04	+0.03	6.86	0
	中和槽	4.05	+0.04	6.89	+0.03
	沈降槽	4.05	+0.04	6.88	-0.02
令和 5 年 12 月 22 日	原水槽	4.01	0	6.86	0
	中和槽	4.06	+0.05	6.89	+0.03
	沈降槽	4.03	+0.02	6.84	-0.02
令和 5 年 12 月 25 日	原水槽	4.04	+0.03	6.88	+0.02
	中和槽	4.08	+0.07	6.86	0
	沈降槽	4.05	+0.04	6.88	+0.02
令和 5 年 12 月 28 日	原水槽	4.03	+0.02	6.87	+0.01
	中和槽	3.98	-0.03	6.87	+0.01
	沈降槽	4.03	+0.02	6.90	+0.04
令和 6 年 1 月 5 日	原水槽	4.03	+0.02	6.90	+0.04
	中和槽	4.01	0	6.86	0
	沈降槽	4.01	0	6.86	0
令和 6 年 1 月 12 日	原水槽	4.03	+0.02	6.89	+0.03
	中和槽	4.03	+0.02	6.90	+0.04
	沈降槽	4.04	+0.03	6.88	+0.02
令和 6 年 1 月 17 日	原水槽	4.03	+0.02	6.88	+0.02
	中和槽	4.02	+0.01	6.89	+0.03
	沈降槽	4.03	+0.02	6.87	+0.01
令和 6 年 1 月 25 日	原水槽	4.02	+0.01	6.89	+0.03
	中和槽	4.01	0	6.89	+0.03
	沈降槽	4.03	+0.02	6.86	0

※点検日は 1 週間を超えない範囲で設定していたが、令和 6 年 1 月 24 日は雪のため現地に向かうことが難しかったため、翌日の 1 月 25 日に実施した。

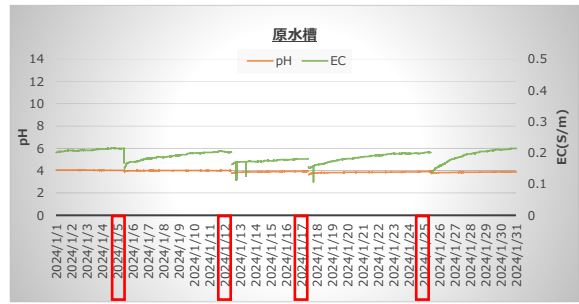
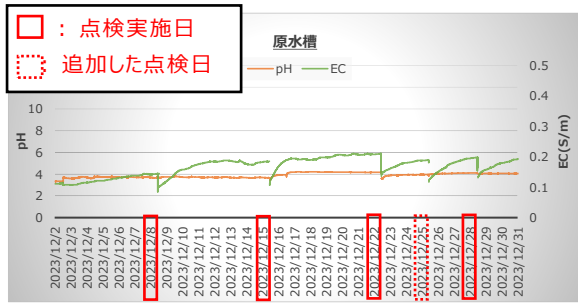


図 25 点検前後データ比較結果(原水槽)

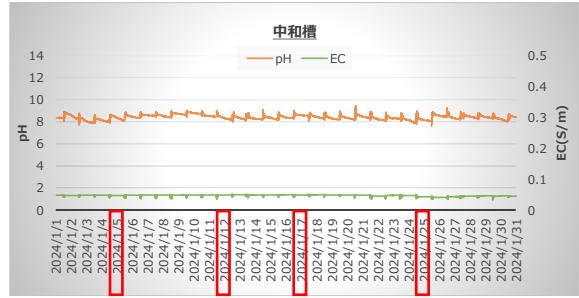
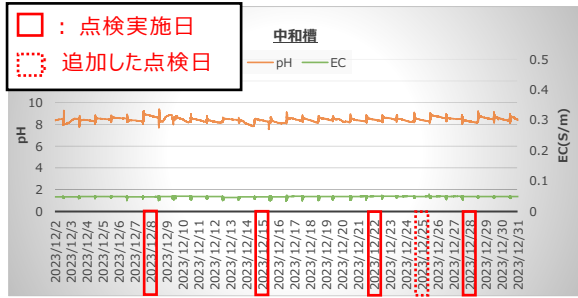


図 26 点検前後データ比較結果(中和槽)

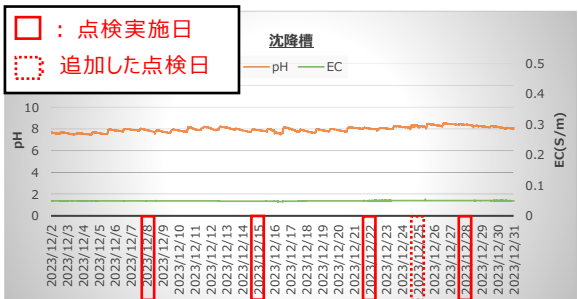


図 27 点検前後データ比較結果(沈降槽)

EC の点検前後のデータ比較結果は、前出の図 25～図 27 に示すとおりである。

EC の校正は液温を一定にする必要がありフィールドでの実施が難しいため、EC セル用チェック液(0.1mol/kg)を使用してチェック液との比較を行った。EC のチェック液比較結果から、原水槽、中和槽、沈降槽の各地点で基準(±0.038 S/m)を超える差異は見られなかった(表 21)。EC のチェック液比較結果は表 23 に示すとおりであり、点検前後の比較においては中和槽及び沈降槽で点検前後のデータに異常な変動は見られなかった。

しかし、原水槽は、点検前後のデータ変動が大きく数値が安定するまでに長時間を要した。チェック液との比較では良好な結果が得られていること及び中和槽・沈降槽では同様の傾向が見られないことから原水槽における水質(処理前の坑廃水)特有の現象であると考えられた。原水槽の水質は金属イオンを多く含んでおり電極への汚れが付着しやすいため、応答が悪くなっているものと考えられた。

表 21 基準値との比較結果

項目	差の最大値※	基準	基準との比較
EC	-0.025	±0.038S/m ※3%(1.282S/m に対して)	適合

※差の最大値とは、チェック液との差のうち、最大のものを示す。

EC について、原水槽では、点検後のデータ安定に時間がかかるなどの問題が見られたが、処理前の値となる原水槽と処理後の値となる中和槽、沈降槽の値では有意な差が確認された(表 22)。手分析や既存センサーでの測定が行われていないため、その精度について、詳細な確認はできないが、水質処理工程の前後で測定することで、処理が適正に実施されていることを確認する指標として使用することができると考えられた。

表 22 EC 測定結果

	EC 値 (S/m)		
	原水槽	中和槽	沈降槽
最大値	0.211	0.057	0.055
最小値	0.085	0.035	0.047
平均値	0.167	0.048	0.049

表 23 標準液比較結果(EC)

点検実施日	地点	チェック液に対する測定値	
		チェック液 1.282(S/m)	差(S/m)
令和5年12月8日	原水槽	1.261	-0.021
	中和槽	1.279	-0.003
	沈降槽	1.302	+0.020
令和5年12月15日	原水槽	1.257	-0.025
	中和槽	1.261	-0.021
	沈降槽	1.277	-0.005
令和5年12月22日	原水槽	1.300	+0.018
	中和槽	1.300	+0.018
	沈降槽	1.257	-0.025
令和5年12月25日	原水槽	1.289	+0.007
	中和槽	1.295	+0.013
	沈降槽	1.294	+0.012
令和5年12月28日	原水槽	1.277	-0.005
	中和槽	1.251	-0.021
	沈降槽	1.260	-0.022
令和6年1月5日	原水槽	1.284	+0.002
	中和槽	1.262	-0.020
	沈降槽	1.277	-0.005
令和6年1月12日	原水槽	1.265	-0.017
	中和槽	1.255	-0.027
	沈降槽	1.275	-0.007
令和6年1月17日	原水槽	1.269	-0.013
	中和槽	1.274	-0.008
	沈降槽	1.269	-0.013
令和6年1月25日	原水槽	1.296	+0.014
	中和槽	1.299	+0.017
	沈降槽	1.270	-0.012

水位の現地水位との比較を行った結果、基準(±0.02 m)を超える差異は見られず、点検前後のデータに異常な変動は見られなかった(表 24)。水位の現地水位との比較結果は表 25 に、点検前後のデータ比較は図 28 に示すとおりである。

表 24 基準値との比較結果

項目	差の最大値※	基準	基準との比較
水位	-0.02	±0.02m ※0.2%FS(10m に対して)	適合

※差の最大値とは、現地水位との差のうち、最大のものを示す。

表 25 現地水位比較結果(水位)

実施日	地点	水位(m)	現地水位(m)	差(m)
令和 5 年 12 月 8 日	原水槽	0.38	0.39	-0.01
令和 5 年 12 月 15 日	原水槽	0.37	0.39	-0.02
令和 5 年 12 月 22 日	原水槽	0.39	0.40	-0.01
令和 5 年 12 月 25 日	原水槽	0.40	0.40	0
令和 5 年 12 月 28 日	原水槽	0.39	0.40	-0.01
令和 6 年 1 月 5 日	原水槽	0.42	0.44	-0.02
令和 6 年 1 月 12 日	原水槽	0.44	0.43	-0.01
令和 6 年 1 月 17 日	原水槽	0.42	0.40	-0.02
令和 6 年 1 月 25 日	原水槽	0.59	0.59	0

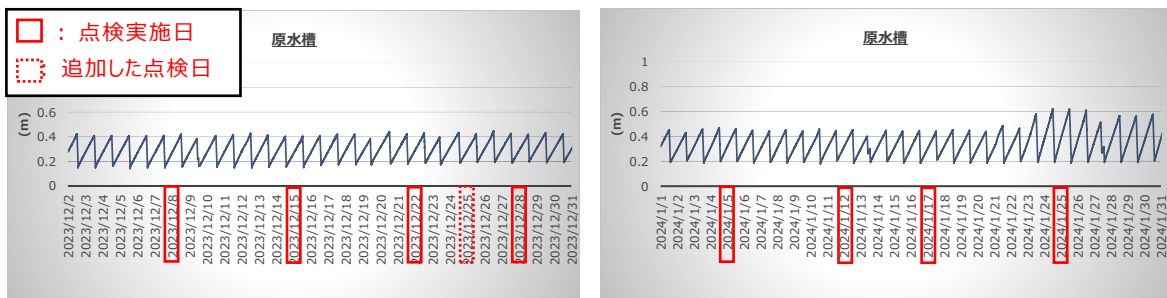


図 28 点検前後データ比較結果(水位: 原水槽)

水位計データと流速測定から算出した坑廃水処理量の比較結果は表 26 に示すとおりである。なお、流速の測定は中和槽から沈降槽に向かう流路で行った。

水位計データから算出した坑廃水処理量及び流速測定から算出した坑廃水処理量は、それぞれ 1 月 25 日を除き 60～70m³ 程度で推移していた。福知山鉱廃水処理場における処理能力に関して、詳細なデータがないため不明であるが、維持管理業者のヒアリングから 12 月の平均的な処理量は概ね 60～70m³ 程度であることが分かっている。このため、いずれの方法でも概ね平均的な処理量の範囲内にて推移しており、坑廃水処理量の推計に活用できると考えられた。

表 26 坑廃水処理量比較結果

実施日	水位計データから算出した坑廃水処理量(m ³)	流速測定から算出した坑廃水処理量(m ³)	差(m ³)
令和 5 年 12 月 8 日	74.0	70.2	-3.8
令和 5 年 12 月 15 日	65.2	64.8	-0.4
令和 5 年 12 月 22 日	65.2	64.8	-0.4
令和 5 年 12 月 25 日	61.9	63.2	+1.3
令和 5 年 12 月 28 日	58.6	60.7	+2.1
令和 6 年 1 月 5 日	70.4	67.5	-2.9
令和 6 年 1 月 12 日	72.1	68.6	-3.5
令和 6 年 1 月 17 日	61.9	64.3	+2.4
令和 6 年 1 月 25 日 [※]	116.9	113.3	-3.6

※1 月 25 日は前日の雪の影響により、通常を大きく上回る廃水処理を実施。

本実証項目で使用した pH 計、EC 計及び水位計は、対象となる坑廃水と直接接触する必要がある。そのため、センサーの据え付けは、塩化ビニル管を保護管とし、その内部にセンサーを配置することで測定を行った。

本技術実証期間中の各測定地点におけるセンサー及びケーブル部の状況は図 29～図 31 に示すとおりである。センサー部に変色は確認できるものの、腐食等は確認できなかった。標準液及びチェック液との比較、現地水位との比較においても大きな変動は見られなかったことから、内部の腐食等による影響もなかったと考えられた。

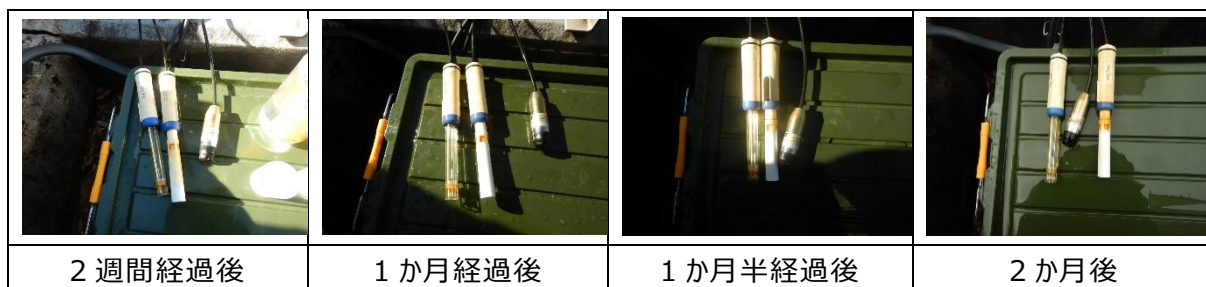


図 29 センサー及びケーブル部の経時写真(原水槽)

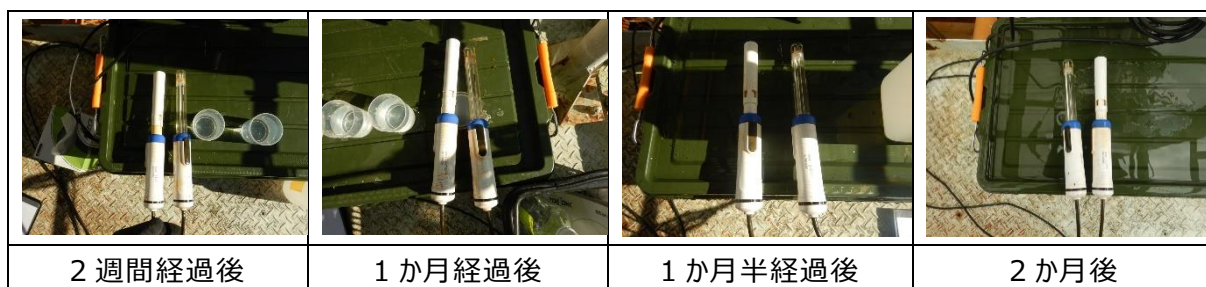


図 30 センサー及びケーブル部の経時写真(中和槽)

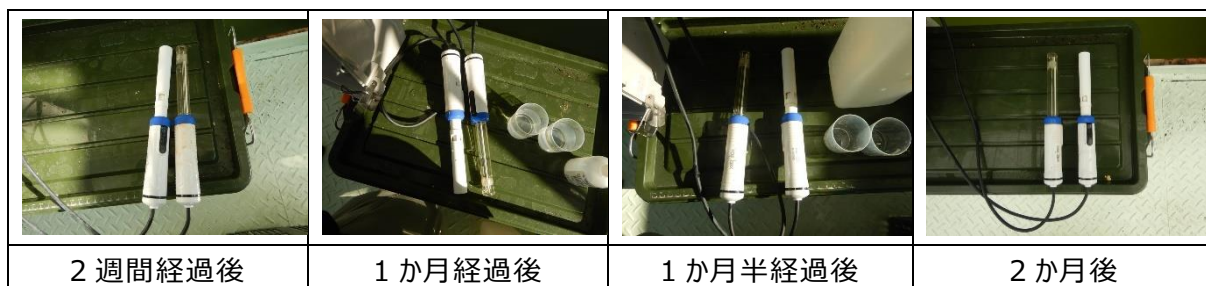


図 31 センサー及びケーブル部の経時写真(沈降槽)

(3) 遠隔監視システムの構築

ア. 携帯電話通信が使用できない環境での通信機能の確保

携帯電話通信が使用できない僻地での利用を想定し、衛星通信サービスを使用した通信機能により遠隔監視システムが適正に稼働するかの確認を行った。

具体的な基準及び確認方法は以下のとおりである。

【基準及び確認方法（衛星通信サービスの活用可否）】

- ・衛星通信サービスを使用した遠隔監視システムを構築し、通信状況を確認する。

本実証項目で構築した遠隔監視システムの開発状況は図 32 に示すとおりである。

初期画面から全地点のデータ及びグラフページに遷移できる。地点及び測定日を選択することで、対象の地点、測定日のデータを表示することができる。

上記で述べた遠隔監視システムは、衛星通信サービスを用いて構築した。本技術実証期間中、衛星通信サービスに起因するトラブル・不具合等は発生せず、使用することができた。このため、衛星通信サービスを利用した遠隔監視システムは、携帯電話通信が使用できない環境での通信機能の確保において活用できる事が確認できた。



図 32 遠隔監視開発状況(左:初期画面、右:グラフページ)

センサーによる連続監視の構築とは別に衛星通信を用いた遠隔監視システムを構築したが、この遠隔監視システムについて独立電源での稼働可否確認を行った。

実施場所である福知山坑廃水処理施設にはソーラーパネルの設置箇所に制約があるため、設置可能な範囲において独立電源を構築した。当初構築した独立電源装置では発電量が足りず安定した稼働が難しいことが判明したため、追加でソーラーパネル・バッテリーを増設した。

遠隔監視における独立電源に使用した機器は表 27～表 28 に、現地状況写真は図 33 に、バッテリー電圧の変動図は図 34 に示すとおりである。

本実証項目の実施場所である福知山坑廃水処理施設は谷筋に位置しており、日照時間が短い。現地では概ね 10 時～14 時頃まで日照が確認でき、その時間帯以外は周囲地形により日陰となっていることを確認した。また、ソーラーパネルは部分的な日陰によっても発電量に影響を与えることが知られており、施設の南側に存在した携帯電話基地局のアンテナの影による発電量への影響も見られた。加えて、技術実証期間は冬季であったため、日照量が小さいことも影響していた。よって、本実証項目の実施場所・期間は、ソーラーパネルによる独立電源の確保に厳しい条件となっていた。

また、今回使用した Starlink は、消費電力が 50～75W 程度と常時稼働する機器としては必要電力が大きい。上述した実施場所の厳しい日照条件から必要な発電量を得られず、徐々にバッテリー電圧が下がり、停電となった。このため Starlink を用いた独立電源の構築は難しいと判断し、増設後に発生した停電以降は商用電源を借用し遠隔監視を行った。

表 27 Starlink を用いた衛星監視地点における独立電源源使用機器(増設前)

項目	メーカー	仕様	外形寸法(mm)
ソーラーパネル	NAVIC	出力: 180W × 3 枚 重量: 11kg	1480×670
バッテリー	NAVIC	構成: バッテリー×1 台、インバータ BOX×1 台 容量: 200Ah 重量: 約 30kg	600×420×390

表 28 Starlink を用いた衛星監視地点における独立電源源使用機器(増設後)

項目	メーカー	仕様	外形寸法(mm)
ソーラーパネル	NAVIC	出力: 180W × 6 枚 重量: 11kg	1480×670
バッテリー	NAVIC	構成: バッテリー×2 台、インバータ BOX×1 台 容量: 200Ah×2 台 重量: 約 30kg(1 台当たり)	600×420×390

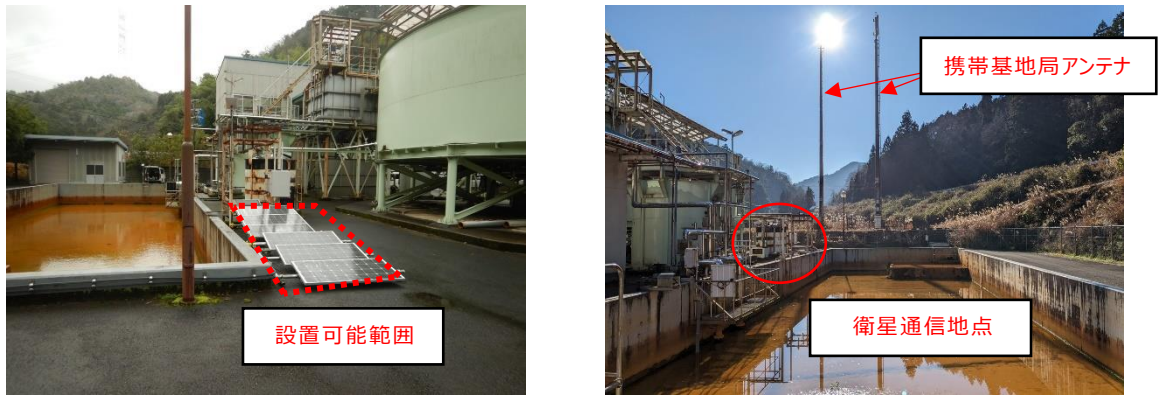


図 33 現地状況写真(左: 衛星通信地点、右: 周囲状況)

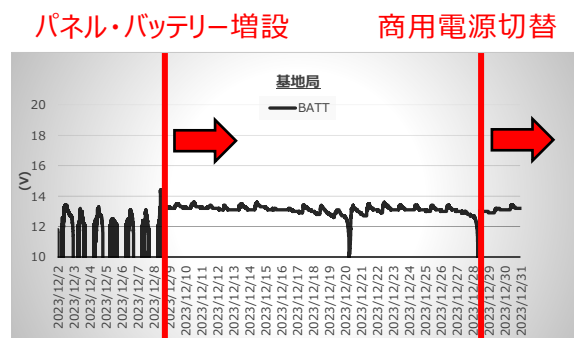


図 34 Starlink を用いた衛星通信地点におけるバッテリー電圧変動図

衛星通信を用いた監視システムにおける独立電源稼働可否確認においては発電量が足りず停電が生じた。理由としては、冬季であること及び周囲地形の影響により日照時間が短いことが考えられた。本実証項目は冬季に行っているが、夏季になると日照時間が延びること及び太陽高度が高くなるため発電量は増加すると考えられた。

当初設定では、無日射保証日数を3日、日照時間を4.5時間と想定していたが、想定以上に日照時間が短かったことより、パネル・バッテリーを設置可能範囲限界(約5m×2m)まで増設したが、発電量が足りないことは変わらず、増設前と同様に停電が生じた。

さらなるソーラーパネルの設置は、設置箇所の制約により難しかったため、商用電源に切り替えて実証を続ける結果となった。

構築した遠隔監視システムは衛星通信を用いていることから、衛星アンテナを設置した箇所の周囲環境により通信が断絶する回数が増加する可能性が考えられた。Starlinkは高度550km程度の低軌道に5000機以上を打ち上げている。これらの衛星は次々と移動しているため、どの程度通信に影響がでるかを把握することは難しい。しかし、Starlink公式アプリケーションを使用することで、障害物の確認や速度テストを行うことができるため、周囲環境を一定程度は確認できる。

本実証項目では、携帯電話通信が使用できない僻地での利用を想定して衛星通信サービスであるStarlinkを採用したが、携帯電話網が通じる地域であれば、Starlinkに比べて消費電力を1/10程度と大きく下げることができる。遠隔監視システムを構築する地域の通信キャリアサービスエリアマップ等を確認し、サービスエリア内であれば、携帯電話網を利用することが望ましい。

イ. 遠隔地での観測データの確認

本技術実証により構築した遠隔監視システムにおいて、遠隔地での観測データの確認ができるかを確認するため通信ログの記録を行った。遠隔監視システムはデータの欠損が見られた場合にアラートを発報する機能を実装しているため、アラートが生じていなければデータは正常に記録されているものとして考え、ここでは観測データの送信について実証を行った。

具体的な基準及び確認方法は以下のとおりである。

【基準及び確認方法（遠隔地での観測データの確認）】

- ・構築した遠隔監視システムで記録した通信ログからデータ送信の失敗率が 1%以内であることの確認を行う。

遠隔監視において記録した通信ログの集計結果は図 36 に、各時間帯における失敗回数は表 29～表 30 に、日別の失敗率は表 32 に示すとおりである。

集計結果から、1 日あたり 1～2 回程度データの送信に失敗していることがわかった。データ伝送失敗の理由としては、アンテナの視野内に衛星が存在しなかったことにより通信ネットワークが一時的に断絶した等の理由が考えられた。

また、1 月 24 日に 8 回のデータ伝送に失敗しており、そのほとんどは 17 時台に集中していた。1 月 24 日は、昼頃より雪が降り始め、夕方頃には 30～40cm 程度の積雪が見られたことから、アンテナ及び周辺に積もった雪の影響により、通信ネットワークに影響が出たものと考えられた。積雪量は、福知山気象観測所で雪の観測を行っていない又は欠測となっていたため、維持管理業者記載の日報から確認した。翌日 1 月 25 日の状況写真を以下に示す。



図 35 現地状況写真(1 月 25 日撮影)

Starlink には、融雪機能が搭載されている(最大 40mm/時)が、今回は消費電力の削減、降雪の頻度を考慮して機能を OFF としていた。

雪が降る地方で Starlink を使用する際に融雪機能限界を超えた降雪条件では、ネットワークに影響が生じる可能性があるため、注意が必要である。

また、融雪機能を ON にすることで消費電力が増加することが想定される。機器仕様に融雪機能による消費電力の増加量の記載がなく全体の消費電力量を把握することが難しいため、独立電源使用時に融雪機能を ON にすることで停電のリスクが高くなると考えられた。そのため、融雪機

能を ON にして使用する際には商用電源を利用することが望ましい。

通信ログの集計のほか、1分毎に ping コマンドを用いてネットワークの疎通状況を記録した。疎通状況の記録は 12 月 28 日に実装を行い、1 月より記録を開始した。疎通状況の確認結果は表 31 に、日別の失敗率は表 33 に示すとおりである。

結果としては、夜間(特に深夜)に通信断絶発生回数が多いことが分かる。夜間に通信の断絶が多い理由の詳細は不明であるが地形による影響が考えられた。衛星は 5000 機以上が打ち上げられており次々と移動しているため、影響を把握することは難しいが、特定の時間帯に特定の地形に遮られる等によりネットワークに影響が出ているものと考えられた。しかし、最も多い時間帯の回数で技術実証期間中の約 2 か月間で 20 回であること、その通信断絶も瞬間的なものであることから遠隔監視システムに与える影響は軽微であると考えられた。

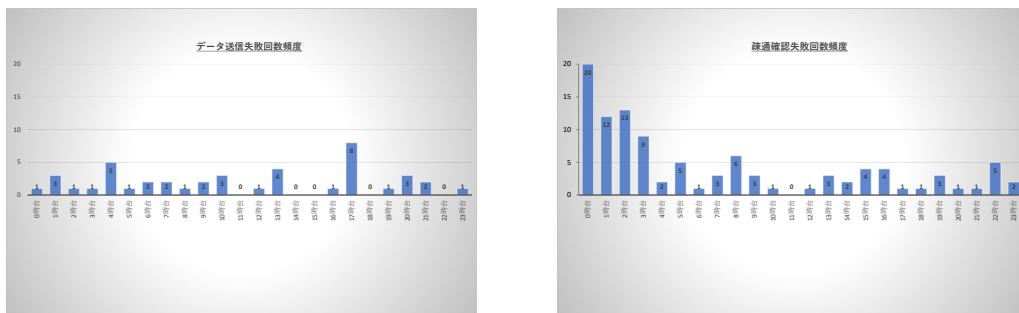


図 36 技術実証期間中における通信ログ集計結果
(左:データ送信失敗回数、右:疎通状況失敗回数)

表 29 通信ログ集計結果(12 月)

対象日	送信失敗回数合計	対象日	送信失敗回数合計
令和 5 年 12 月 2 日	-	令和 5 年 12 月 17 日	1 回(2 時台)
令和 5 年 12 月 3 日	-	令和 5 年 12 月 18 日	2 回(0 時台、10 時台)
令和 5 年 12 月 4 日	-	令和 5 年 12 月 19 日	1 回(20 時台)
令和 5 年 12 月 5 日	-	令和 5 年 12 月 20 日	1 回(23 時台)
令和 5 年 12 月 6 日	-	令和 5 年 12 月 21 日	-
令和 5 年 12 月 7 日	-	令和 5 年 12 月 22 日	1 回(4 時台)
令和 5 年 12 月 8 日	-	令和 5 年 12 月 23 日	-
令和 5 年 12 月 9 日	-	令和 5 年 12 月 24 日	-
令和 5 年 12 月 10 日	-	令和 5 年 12 月 25 日	-
令和 5 年 12 月 11 日	2 回(3 時台、20 時台)	令和 5 年 12 月 26 日	-
令和 5 年 12 月 12 日	2 回(7 時台、21 時台)	令和 5 年 12 月 27 日	-
令和 5 年 12 月 13 日	1 回(13 時台)	令和 5 年 12 月 28 日	1 回(6 時台)
令和 5 年 12 月 14 日	-	令和 5 年 12 月 29 日	1 回(20 時台)
令和 5 年 12 月 15 日	2 回(4 時台、12 時台)	令和 5 年 12 月 30 日	-
令和 5 年 12 月 16 日	1 回(9 時台)	令和 5 年 12 月 31 日	1 回(13 時台)

表 30 通信ログ集計結果(1月)

対象日	送信失敗回数合計	対象日	送信失敗回数合計
令和6年1月1日	-	令和6年1月17日	1回(17時台)
令和6年1月2日	2回(4時台、13時台)	令和6年1月18日	1回(18時台)
令和6年1月3日	1回(21時台)	令和6年1月19日	-
令和6年1月4日	1回(5時台)	令和6年1月20日	1回(13時台)
令和6年1月5日	-	令和6年1月21日	1回(1時台)
令和6年1月6日	1回(8時台)	令和6年1月22日	-
令和6年1月7日	-	令和6年1月23日	-
令和6年1月8日	-	令和6年1月24日	8回(1時台、17時台)
令和6年1月9日	-	令和6年1月25日	2回(10時台)
令和6年1月10日	-	令和6年1月26日	2回(4時台、6時台)
令和6年1月11日	-	令和6年1月27日	2回(4時台、9時台)
令和6年1月12日	1回(1時台)	令和6年1月28日	-
令和6年1月13日	1回(7時台)	令和6年1月29日	-
令和6年1月14日	-	令和6年1月30日	-
令和6年1月15日	-	令和6年1月31日	-
令和6年1月16日	-		

表 31 疎通状況集計結果(1月)

対象日	疎通失敗回数合計	対象日	疎通失敗回数合計
令和6年1月1日	2回	令和6年1月17日	5回
令和6年1月2日	4回	令和6年1月18日	1回
令和6年1月3日	2回	令和6年1月19日	5回
令和6年1月4日	2回	令和6年1月20日	7回
令和6年1月5日	4回	令和6年1月21日	3回
令和6年1月6日	×	令和6年1月22日	5回
令和6年1月7日	×	令和6年1月23日	1回
令和6年1月8日	×	令和6年1月24日	5回
令和6年1月9日	-	令和6年1月25日	2回
令和6年1月10日	7回	令和6年1月26日	3回
令和6年1月11日	6回	令和6年1月27日	3回
令和6年1月12日	8回	令和6年1月28日	2回
令和6年1月13日	4回	令和6年1月29日	3回
令和6年1月14日	-	令和6年1月30日	1回
令和6年1月15日	6回	令和6年1月31日	-
令和6年1月16日	6回		

※1月6日から8日までの間のログは電源断により消失。

表 32 通信ログ集計結果(日別失敗率)

対象日	送信 失敗 回数	失 敗 率 (%)	送信 回数	対象日	送信 失敗 回数	失 敗 率 (%)	送 信 回 数
令和 5 年 12 月 2 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 1 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 3 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 2 日	2	0.4	528
令和 5 年 12 月 4 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 3 日	1	0.2	528
令和 5 年 12 月 5 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 4 日	1	0.2	528
令和 5 年 12 月 6 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 5 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 7 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 6 日	1	0.2	528
令和 5 年 12 月 8 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 7 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 9 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 8 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 10 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 9 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 11 日	2	0.4	528	令和 6 年 1 月 10 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 12 日	2	0.4	528	令和 6 年 1 月 11 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 13 日	1	0.2	528	令和 6 年 1 月 12 日	1	0.2	528
令和 5 年 12 月 14 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 13 日	1	0.2	528
令和 5 年 12 月 15 日	2	0.4	528	令和 6 年 1 月 14 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 16 日	1	0.2	528	令和 6 年 1 月 15 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 17 日	1	0.2	528	令和 6 年 1 月 16 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 18 日	2	0.4	528	令和 6 年 1 月 17 日	1	0.2	528
令和 5 年 12 月 19 日	1	0.2	528	令和 6 年 1 月 18 日	1	0.2	528
令和 5 年 12 月 20 日	1	0.2	528	令和 6 年 1 月 19 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 21 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 20 日	1	0.2	528
令和 5 年 12 月 22 日	1	0.2	528	令和 6 年 1 月 21 日	1	0.2	528
令和 5 年 12 月 23 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 22 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 24 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 23 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 25 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 24 日	8	1.5	528
令和 5 年 12 月 26 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 25 日	2	0.4	528
令和 5 年 12 月 27 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 26 日	2	0.4	528
令和 5 年 12 月 28 日	1	0.2	528	令和 6 年 1 月 27 日	2	0.4	528
令和 5 年 12 月 29 日	1	0.2	528	令和 6 年 1 月 28 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 30 日	0	0	528	令和 6 年 1 月 29 日	0	0	528
令和 5 年 12 月 31 日	1	0.2	528	令和 6 年 1 月 30 日	0	0	528
				令和 6 年 1 月 31 日	0	0	528

※データ伝送の送信回数は(11 項目×時間数 * 2)にて算出した。

※項目は原水槽(pH、EC、水位、バッテリー)、中和槽(pH、EC、バッテリー)、沈降槽(pH、EC、バッテリー)、基地局(バッテリー)の計 11 項目。

表 33 疎通状況集計結果(日別失敗率)

対象日	送信 失敗 回数	失 敗 率 (%)	送信 回数	対象日	送信 失敗 回数	失 敗 率 (%)	送信 回数
令和6年1月1日	2	0.1	1,440	令和6年1月17日	5	0.3	1,440
令和6年1月2日	4	0.3	1,440	令和6年1月18日	1	0.1	1,440
令和6年1月3日	2	0.1	1,440	令和6年1月19日	5	0.3	1,440
令和6年1月4日	2	0.1	1,440	令和6年1月20日	7	0.5	1,440
令和6年1月5日	4	0.3	1,440	令和6年1月21日	3	0.2	1,440
令和6年1月6日	0	0	1,440	令和6年1月22日	5	0.3	1,440
令和6年1月7日	0	0	1,440	令和6年1月23日	1	0.1	1,440
令和6年1月8日	0	0	1,440	令和6年1月24日	5	0.3	1,440
令和6年1月9日	0	0	1,440	令和6年1月25日	2	0.1	1,440
令和6年1月10日	7	0.5	1,440	令和6年1月26日	3	0.2	1,440
令和6年1月11日	6	0.4	1,440	令和6年1月27日	3	0.2	1,440
令和6年1月12日	8	0.6	1,440	令和6年1月28日	2	0.1	1,440
令和6年1月13日	4	0.3	1,440	令和6年1月29日	3	0.2	1,440
令和6年1月14日	0	0	1,440	令和6年1月30日	1	0.1	1,440
令和6年1月15日	6	0.4	1,440	令和6年1月31日	0	0	1,440
令和6年1月16日	6	0.4	1,440				

※疎通状況の送信回数は(時間数 * 60)にて算出した。

通信記録のログから、1日に1~2回程度データ伝送に失敗していることがわかった。しかし、連続したデータ送信の失敗は技術実証期間中に1回のみであった。

本技術実証期間中におけるデータ伝送の失敗率は0.1%、疎通確認の失敗率は0.2%と基準に適合しており(失敗率1%以内)、連続した通信ネットワークが確立されていたことがわかった。

表 34 通信記録結果概要

項目	失敗カウント数	成功カウント数	カウント数合計	失敗率(%)
データ伝送	43	32,165	32,208	0.1
疎通状況確認	97	44,543	44,640	0.2

※データ伝送の集計期間: 令和5年12月2日~令和6年1月31日

※疎通状況の集計期間: 令和6年1月1日~31日

※データ伝送のカウント数合計は(11項目×時間数 * 2)にて算出した。

※項目は原水槽(pH、EC、水位、バッテリー)、中和槽(pH、EC、バッテリー)、沈降槽(pH、EC、バッテリー)、基地局(バッテリー)の計11項目。

ウ. 異常検知時のメール発報

遠隔監視システムの機能として追加するアラート発報機能について、実際の稼働状況において異常等の発生がない場合、アラート発報機能の動作が確認できないことから、異常値等のテストデータを入力し、適正に稼働するかを確認した。

具体的な基準及び確認方法は以下のとおりである。

【基準及び確認方法（異常値が検知された際、関係者へメールが確実に発報されているか）】

- ・テストデータによる異常値検出とメール発報テストの実施

遠隔監視システムの異常メール発報機能に関して、関係者として福知山市、維持管理業者、弊社担当者を関係者として登録し、異常値をテストデータとして入力し、メール発報テストを実施した。異常値の基準としては、福知山市との協議において、「原水槽の水深が最大で 2m であり、溢れ出すことを防ぐために、事前に状況を把握したい」、「pH の排水基準が 5.8 以上であるため、その基準値に到達する前に把握したい」との要望があったことから、それぞれ「原水槽の水位が 1.5m 以上となった場合」、「沈降槽の pH が 6.0 未満となった場合」の 2 点とした。メール発報テストの結果は表 35 に、発報されたメールは図 37 に示すとおりである。

表 35 異常値メール発報テスト結果

テスト実施日時	テスト入力値	メール発報結果		
		福知山市	維持管理業者	弊社担当者
令和 6 年 2 月 1 日 15 時	原水槽 水位 1.503m(14 時 55 分) 沈降槽 pH 5.99(14 時 47 分)	○	○	○



図 37 異常値メール発報テスト

工. 異常値の自動検知

遠隔監視システムにおいて異常値の検出を行うために、AI 水質管理システムを構築した。構築した AI はセンサーによる連続監視体制により取得したデータ及び維持管理業者による手分析及び観測値を教師データとして異常データの検出を行うモデルの構築を行った。

具体的な基準及び確認方法は以下のとおりである。

【基準及び確認方法（異常値の検出精度は実際環境で使用できるレベルにあるか）】

・テストデータによる異常値検出確認

構築した AI 水質管理システムの実環境での運用に際して異常値の検出が適正に行われるかについて社内テストを実施した。

テスト方法は、上記と同様の異常値（「原水槽の水位が 1.5m 以上となった場合」、「沈降槽の pH が 6.0 未満となった場合」の 2 点）について、それぞれの異常値前後の値を段階的にテストデータとして入力した際、設定した値が適切に異常値として検出されるかについて検証した。テスト結果は表 36 及び表 37 に示すとおりである。

原水槽水位のテスト結果では、0.9m 以上の値が異常値として検出されることとなった。今回のデータ取得を行った期間が、雨量の少ない冬季であったことから、実際の水位も 0.1m から 0.5m までの間で推移しており、平均が 0.3m 程度であった。このため、パラメータの設定が難しく、1.5m を下回る時点で異常値として検出される結果となった。今後、精度を上げていくためには、雨量の多い夏などで、実際に 1.5m を超える値も含めた教師データの確保が必要であると考えられた。

沈降槽 pH のテスト結果では、pH6.8 以下の値が異常値として検出されることとなった。今回のデータ取得期間における pH の変動は、最大が 8.5、最小が 7.4、平均で 7.9 と値の変動が少なく、教師データのパターンが非常に限られている状況であったため、少ない変動で異常値として検出する傾向が見られた。今後、精度を上げていくためには、多様な変動を含む多数の教師データの確保が必要であると考えられた。

表 36 AI 水質管理システムの異常値検出テスト結果(原水槽水位)

テストデータ値 (原水槽水位 m)	異常値検出の有無	
	検出	未検出
0.1		○
0.2		○
0.3		○
0.4		○
0.5		○
0.6		○
0.7		○
0.8		○
0.9	○	
1.0	○	
1.1	○	
1.2	○	
1.3	○	
1.4	○	
1.5	○	
1.6	○	

表 37 AI 水質管理システムの異常値検出テスト結果(沈降槽 pH)

テストデータ値 (沈降槽 pH)	異常値検出の有無	
	検出	未検出
8.0		○
7.9		○
7.8		○
7.7		○
7.6		○
7.5		○
7.4		○
7.3		○
7.2		○
7.1		○
7.0		○
6.9		○
6.8	○	
6.7	○	
6.6	○	
6.5	○	
6.4	○	
6.3	○	
6.2	○	
6.1	○	
6.0	○	
5.9	○	
5.8	○	
5.7	○	

3.2.2 技術実証の評価・分析

本証において検証した、(1)センサーによる連続体制の構築、(2)測定結果の精度確認、(3)遠隔監視システムの構築の3つの項目の実施結果を踏まえ、3.1での評価ポイント・方法に即し、実証全体に対して評価・分析を行った。

表 38 技術実証の評価・分析のまとめ

No	評価項目	評価ポイント	評価・分析結果
1	技術導入が容易で、汎用性があるか	入手が容易な機器であり、その操作も専門性を必要としないこと	○:入手が容易であり、その操作も専門性を必要としない機器を選定でき、必要な機能要件を満たした
2	給電が困難な場合にも対応可能	屋外に機器等を設置する場合、給電が困難な状況も想定されるため、そのような環境でも対応可能な技術であること 電池等を利用する場合、想定される使用期限が明確であること	○:センサー連続監視体制の独立電源は安定して稼働し、電池等の使用期限も明確であり機能要件を満たした
3	劣悪な環境下で利用可能	坑外における天候(雪・雨等)や高温・低温、坑内における粉じんや騒音等のような様々な環境下でも利用可能な技術であること	○:IP65相当の機器を活用した監視体制を構築しており、技術実証期間中に環境要因によるトラブルは見られず要件を満たしていた
4	従来と同等以上の精度で計測可能	簡易センサーで取得するデータが、現行の方法で取得するデータと同等以上の精度であること	○:手分析結果と同等以上の精度を確保できており、必要な機能要件を満たしていた
5	遠隔監視が可能	センサー等で取得した情報を、遠隔地に送信し、福知山市や維持管理者が確認できる技術であること	○:遠隔地での観測データの確認ができ、必要な機能要件を満たしていた
6	電波環境を考慮しているか	電波環境の悪い場所も想定して、電波増幅に係る技術、オフライン環境下でも利用可能な技術を活用する等、電波環境に関する必要な措置を講じること	△:衛星通信サービスを使用することで通信機能を確保し、必要な機能要件を満たしていたが、独立電源による稼働には課題を残した
7	省人化に資するか	従来の方法と比べて、時間・費用が削減できるか	○:水質管理の省人化、効率化が可能であり、これにより施設管理の省人化が図れる場合は、費用の削減が可能である。

○:実運用可能

△:カスタマイズや運用の工夫をすることで実運用可能

×:現時点では実運用が困難

(1) 技術導入が容易で、汎用性があるか

本技術実証で使用したセンサー類は、一般に販売されているスポット調査用の測定機であり、価格も連続監視用のセンサーに対し 1 割程度の費用である。また、その取り扱いについても専門技術が求められるものではないことから、坑廃水処理場のデータ取得方法としては、汎用的なものであると考えられた。また、処理場内のデータ通信で使用したデータ収集通信機器についても一般に販売されている機種であり、その使用も特別な技術が必要なものではないため、汎用的なものであると考えられた。

また、クラウドサーバ上に構築した Web アプリケーションにより現地で取得した情報を可視化・表示することができ、福知山市並びに維持管理業者がデータを容易に確認することができる。アプリケーションは WEB ブラウザからアクセスすることができるため、技術導入も容易であり汎用性も高いと言える。

以上より、他の坑廃水処理場においても技術導入が容易な、汎用性がある遠隔監視システムを構築したと評価できる。

(2) 給電が困難な場合にも対応可能

構築した独立電源は本技術実証期間中、安定的に稼働しておりデータの欠損は見られなかった。しかし、衛星通信サービスである Starlink を独立電源にて運用する際は消費電力が大きいことから、ソーラーパネル・バッテリーの選定及び周囲地形、日照条件に注意が必要であることがわかった。

また、特定小電力無線通信で使用しているデータ収集通信機器は電池を使用しているが、その使用期限は 10 か月程度と明確となっている。

以上より、給電が困難な場合にも対応可能であると評価できる。

(3) 劣悪な環境下で利用可能

使用した製品は可能な限り IP65 以上の性能を持つ製品を選定し、各製品を収納する BOX を IP65 対応とすることで、全体として IP65 相当の防塵・防水性能を持つシステムとして構築した。また、本技術実証期間中に、環境要因によるトラブルは発生していない。

以上より、劣悪な環境下で利用可能なシステムを構築していると評価できる。

(4) 従来と同等以上の精度で計測可能

本技術実証で活用した簡易センサーによって取得したデータが、現行の方法で取得するデータと同等以上の精度であることという評価ポイントに対して、手分析結果並びに既存センサーとの比較によりその精度を検証した。

その結果、手分析結果との間には一定のオフセットがあることがわかった。この原因としては、pH 計の器差(メーカー・型式等によるもの)が考えられた。手分析に使用している pH 計のメーカーは不明であるが、卓上型の pH 計であることはヒアリングからわかっている。今回設置した pH 計がポータブル型であることからメーカー・型式等の差によりオフセットが生じた可能性が考えられた。連続測定精度の観点からみると、時系列データは一定程度のオフセットを保ちながらも手分析と同様の傾向にて推移しており、期間の始めと終わりでもデータの推移傾向に変わりはなかったことから、異常な変動とは言えず、水質の把握は十分可能であると考えられた。

また、既存センサーに対しては概ね同様の値を示しており、算出した相関係数が 0.5～0.9 と 中程度～強い相関が確認できた。

以上から、従来の手法(手分析及び既存センサー)により実施していた水質の把握について、簡易センサーを用いた手法により行うことが可能であると考えられた。なお、本技術実証で活用した簡易センサー(pH/EC 計)は連続測定用に販売されているものではなかったことから、3.2.1(2)ウにおいて、点検や校正前後の適正な稼働や精度を担保できる適正な点検頻度について確認した結果、1週間に1回の頻度で点検を実施することで、連続測定にも活用できる可能性があることがわかった。

以上より、従来と同等以上の精度で計測可能であると評価できる。

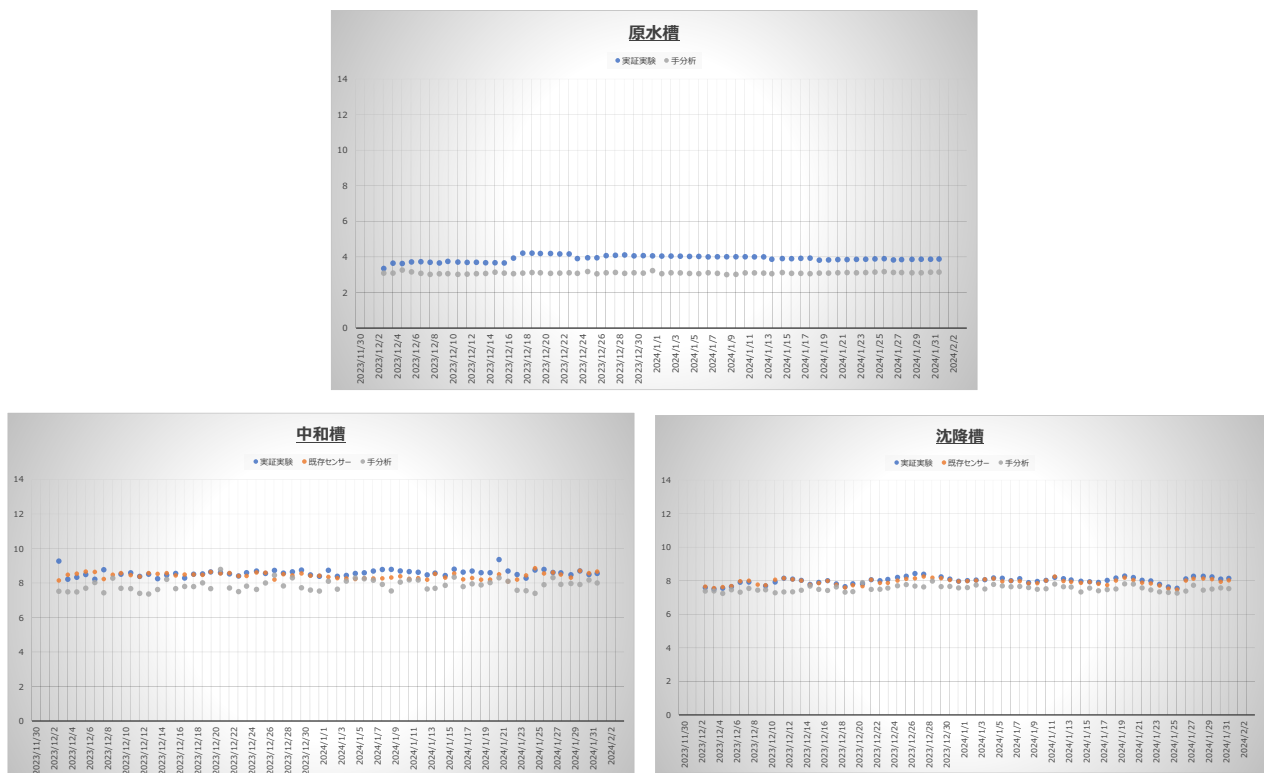


図 38 手分析・既存センサーとの比較

(5) 遠隔監視が可能

設置した簡易センサーから取得した情報を、クラウドサーバ上に実装したアプリケーションを使用することで、検査実施者が確認できる環境を構築した。

構築した環境の制約条件として、衛星通信のアンテナ周辺における障害物がないこと、特定小電力無線通信間の障害物がないことが挙げられる。本技術実証で使用した Starlink では、公式アプリケーションを用いることにより、障害物の影響を把握することができるため、影響が大きい場合はアンテナの設置場所を変更する、また、特定小電力無線通信では、中継器を利用する等の対応が考えられた。中継器を利用する場合には1台当たり27,000円程度のコスト増が想定される。

本技術実証期間中においては、遠隔監視に関するトラブル等は見られず、安定してシステムが稼働していた。

以上より、本技術実証で構築した遠隔監視システムを活用することによって、遠隔監視は可能であると評価できる。



図 39 構築した遠隔監視システムの UI

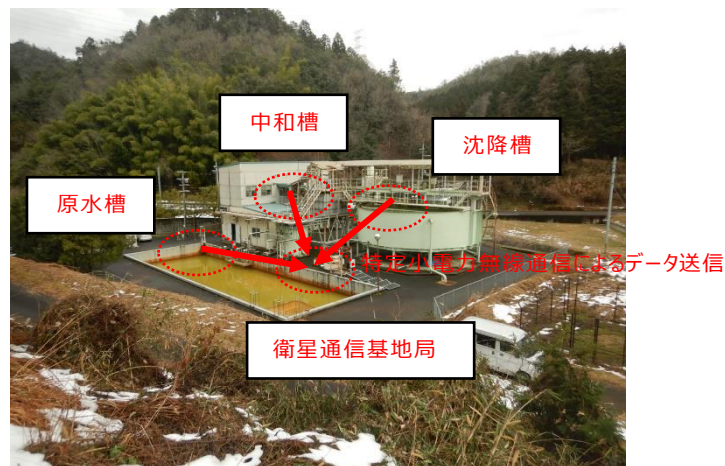


図 40 特定小電力無線通信間の状況

(6) 電波環境を考慮しているか

構築した遠隔監視システムは、衛星通信サービスの Starlink を活用し、構築している。Starlink は、令和 6 年 2 月現在のサービスマップによると、日本国内のほぼ全域をカバーしており、利用可能エリアは全国の坑廃水処理施設を全てカバーしている。また、Starlink の利用条件として、樹木等で覆われておらず、上空が開けていることが条件となるが、Starlink の公式アプリケーションを使用することで、障害物の確認や速度テストを行うことができるため、導入にあたっての利用可否のテストが容易に実施できる。

以上より、電波環境を考慮していると評価できる。

(7) 省人化効果(従来の方法と比べて、どの程度時間・費用が節約できるか)

本技術実証により、「センサーによる連続監視」と「遠隔監視システム」により従来と同等以上の精度で水質監視が可能であることが確認された。このため、水質監視に関しては、測定精度を担保するために必要な 1 回/週の点検を実施すること以外は、遠隔地でのデータ監視により実施することで、現地での手分析等の作業を削減することが可能であると考えられた。また、アラート発報機能により夜間など作業員が不在となる時間帯におけるトラブル(異常)の発見の迅速化が図られると考えられた。

これにより水質管理にかかる現地作業は、1 回/週の頻度となるため、従来の 1 日 1 回の頻度から 1/7 程度に削減できると考えられた。

また、これまで水質管理と施設管理の両面に対応する必要があったことから、365 日の対応が必要であったが、施設管理のみとなった場合、現地において従事する頻度を減少させることができる可能性がある。福知山市へのヒアリングでは、従事頻度の減少の可否、減少できる場合の従事頻度については不明との事であったため、本報告書では、施設管理の頻度を減少できると仮定し、その頻度が 1/2 及び 1/3 になった場合の維持管理費用について試算し、費用の削減効果について検討を行った。試算結果は下表に示すとおりである。

本実証技術の活用により施設管理の頻度が 1/2 に減らすことができた場合は、5 年間で約 8.6 百万円の削減、1/3 に減らすことができた場合は、5 年間で約 15.5 百万円の削減となった。

以上より、省人化効果はあると評価できる。

表 39 省人化効果の試算

(単位：千円)

	1 年目	2 年目	3 年目	4 年目	5 年目	合計
現状の維持管理費用 ^(※1)	8,113	8,113	8,113	8,113	8,113	40,560
本技術の活用により施設管理が 1/2 となった場合 ^(※2)	15,678	4,068	4,068	4,068	4,068	31,950
本技術の活用により施設管理が 1/3 となった場合 ^(※3)	14,322	2,712	2,712	2,712	2,712	25,169
施設管理が 1/2 となった場合との差	7,565	▲4,045	▲4,045	▲4,045	▲4,045	▲8,610
施設管理が 1/3 となった場合との差	6,186	▲5,444	▲5,444	▲5,444	▲5,444	▲15,505

※1 現状の維持管理費用が福知山市 HP において公表されていないため、国土交通省 2023 発表の公共工事設計労務単価の全国全職種加重平均値単価である、2 万 2,227 円を 1 日単価と設定し、1 名が 365 日従事するものとして積算した。(計算式：22,227 円×365 日＝8,112,855 円)

※2 人件費単価は上記と同様とし、1 名が 183 日従事するものとして積算。また、1 年目は、システム構築費用として本技術実証における実績に基づき算出した、11,610 千円を加算した。

計算式(1 年目)：22,227 円×183 日＋システム構築費＝4,067,541 円＋11,610,047 円

計算式(2 年目以降)：22,227 円×183 日＝4,067,541 円

※3 人件費単価は上記と同様とし、1 名が 122 日従事するものとして積算。また、1 年目は、システム構築費用として本技術実証における実績に基づき算出した、11,610 千円を加算した。

計算式(1 年目)：22,227 円×122 日＋システム構築費＝2,711,694 円＋11,610,047 円

計算式(2 年目以降)：22,227 円×122 日＝2,711,694 円

4 総括

(1)アナログ規制の見直しに資するか

- ・本技術実証により検証を行った「センサーによる連続監視」、「測定結果の精度確認」、「遠隔監視システムの構築」により、坑廃水処理場における水質監視へのセンサー等のデジタル技術の活用可能性が確認された。この導入により、従来の方法と同等以上の精度を担保した連続での水質監視が可能であると考えられ、かつ、水質管理のための現地作業は 1 回/週程度となり、従来の方法と比べ時間と費用が縮減できる。このため、簡易センサーによる測定で従来の人手による水質検査の代替が可能であり、遠隔監視の活用により日々の水質監視や緊急時の対応なども合理化できると考えられた。なお、現状では AI 水質管理システムによる異常値の自動検知では教師データの不足により精度に課題が残ったが、今後、教師データを蓄積することにより、異常値の自動検知の精度の向上が図れるとともに、データの変動傾向を把握することで異常値の出現予測が可能となると考えられる。

(2)現場での技術等の活用・導入に当たってのポイント

- ・本技術実証では福知山坑廃水処理場の処理フローをもとにセンサー類の設置場所を検討し、連続監視を実施した。全国の坑廃水処理場は、その坑廃水に含まれる成分や坑廃水の流出量に応じた処理方法やプラント構成が異なっている。このため、連続監視の測定項目や測定場所については、各施設の状況に応じて検討し、設定する必要がある。
- ・本技術実証では連続監視項目として、金属成分の含有量を把握する目的で EC の測定を行った。その結果、水質処理前である原水槽と処理後である中和槽、沈降槽の値では有意な差が確認された。手分析や既存センサーでは EC の測定を行っていないため、その精度について、詳細な確認はできないが、水質処理工程の前後で測定することで、処理が適正に実施されていることを確認する指標として使用することができると考えられた。

(3)実証を通じて明らかになった課題や改善の方向性

- ・本技術実証を実施した冬季は、降水量が少なく、水質も安定していた。異常値を適切に感知する AI 水質管理システム構築にあたっては、降水量や気温などの変化に伴う水質の変化について年間を通じて確認する必要があり、少なくとも 1 年間のデータの取得とそのデータを用いた AI 水質管理システム構築が必要であると考えられた。また、作成した AI 水質管理システムは福知山坑廃水処理場での使用を想定しているため、その他の坑廃水処理場で使用する場合は、入力項目やパラメータ設定は改めて検討が必要である。
- ・遠隔監視システムの構築において、Starlink を用いた衛星通信はサービスマップによると日本全国の坑廃水処理場を網羅していることから、その他の坑廃水処理場において活用できると考えられた。一方、Starlink を用いた衛星通信を独立電源で行うためには、日照時間・日照量にもよるが、ソーラーパネルの敷設には広い面積(10m² 以上)の占有が必要であると考えられた。特に山間部の谷間に位置することが多い坑廃水処理場においては、ソーラーパネルが設置できるスペースを有する施設は少ないと考えられることから、Starlink を用いた衛星通信を活用するには、施設が保有する商用電源の利用が望ましいと考えられた。

用語集

用語	定義・解説
坑水	坑内から湧き出る水。
廃水	選鉱場、製錬場その他鉱山の諸施設等において使用し、排水される水。
坑廃水	休廃止鉱山から排出される坑水と廃水の混合した水。
原水槽	処理施設で最初に坑廃水を受け入れる水槽。
中和槽	中和反応促進目的の攪拌機を有し、中和剤(消石灰等)と坑廃水の中和反応時間が十分確保されている大きさの槽。
沈降槽	中和反応後の処理水を固液分離(固形物を沈殿させ、上澄水を溢流させる)ための槽
pH	水中の水素イオン濃度指数であり、7が中性を、0に近いほど酸性が強く、14に近いほどアルカリ性が強いことを示す。
EC	水が電気を通す能力をいう。水中の電解質濃度(イオンになって溶ける塩類濃度)を一括して推定する指標。電気伝導率、電気伝導度ともいう。
IP	日本工業規格及び社団法人・日本電機工業会が IEC529 に準拠して区分された防塵・防水性能。前半の数字が固形物質からの保護レベル、後半の数字が水の侵入に対する保護レベルを示す。
特定小電力無線通信	近距離間での簡易データ送信に使用される免許を要しない小電力無線通信のこと。
衛星通信	宇宙空間にある衛星を介して行う通信。地上数百～3.6万 km の衛星を利用した世界のほぼ全域をカバーする通信サービスのこと。
クラウドサーバ	仮想化されたサーバをインターネット経由で利用できるサービスのこと。
校正	基準と比較して機器の指示値がどの程度ずれているかを確認する作業のこと。
BASIC 認証	ユーザー名及びパスワードの入力を求めることで特定のページへのアクセスに制限をかけること。
オフセット	基準となる位置からの差(距離、ズレ、相対位置)を表す値のこと。