

水分野でのAI活用 運転履歴データを価値に変えた事例

圓佛 伊智朗
Embutsu Ichiro

陰山 晃治
Kageyama Kouji

辻 聡美
Tsuji Satomi

森脇 紀彦
Moriwaki Norihiko

市毛 由希子
Ichige Yukiko

都市経済活動の活発化に伴い、世界的に水需要が増加傾向にある。清澄な水を得るための水処理には相応のエネルギーが必要であり、その低減は水事業者にとって大きな関心事の一つである。水処理システムは原水性状が大きく変動するものであり、これに対応する複数のユニットプロセスの組み合わせであることが特徴である。このため、適正な運転制御の遂行にあたっては、明示的な物理化学

現象モデルだけでは対応できないケースも多く、運転履歴データに内在する暗黙知の活用が期待されてきた。

日立グループは、AI技術「Hitachi AI Technology/H」の社会インフラへの展開を推進しており、今後、水処理システムへの適用も積極的に進め、安全・安心な水供給に貢献していく。

1. はじめに

世界の水環境市場は、2007年の36.2兆円が2025年に86.5兆円まで増大すると予想される有望市場である¹⁾。その9割弱は上下水道で、うち4~5割が管理・運営と見込まれる。残る1割強は海水淡水化・工業・再利用であり、市場の大きな成長が期待されている。

日立グループは、ICT (Information and Communication Technology) を最大限に活用することで社会インフラを革新していく、「社会イノベーション事業」を推進しており、水環境分野へのソリューション提供もその一翼を担っている。具体的には水源保全、治水、上下水道、水資源確保 (造水や水再生)、排水処理などの課題に対し、製品・システムやサービスによる顧客課題の解決に取り組んでいる。

こうしたソリューションを導入する水事業者の最大の関心事は、所定の水質レベルを維持したうえで事業費用を最小化することにある。とりわけ、水処理システム運用に関する効率化・省人化とともに、省エネルギーソリューションに対する期待は大きいため、研究開発の中でも主要なテーマと位置づけて取り組みを進めている。

近年、新たな進展が見られるAI (Artificial Intelligence : 人工知能) 技術は、水処理システムへの適用にも有効と期待されており、本稿ではその取り組みについて紹介する。

2. 水分野でのAI活用の試み

上下水道、海水淡水化などの水処理システムは、処理の対象となる原水 (河川水、下水、海水など) 性状の変動が避けられないことが、一般的な産業システムとの大きな違いの一つである。原水性状の変動に対応するために、水処理システムは沈殿、生物処理、膜ろ過など、複数のユニットプロセスで構成される。ユニットプロセス内での物理化学現象は、既往知見により体系化、定式化が行われ、多くの範囲で自動制御が実現されているものの、運転操作員のノウハウやスキルに依存して臨機応変な対応を求められるケースも皆無ではなく、こうしたケースに対応できるソリューション提供が重要である。

水分野でのAI活用の試みは比較的歴史が古く、日立グループでも1990年代に水処理システムに携わる運転操作員のノウハウや運転履歴データに内在する因果関係を運転制御に活用する試みが行われている。例えば、浄水場の薬品注入操作を対象に、広義AIの一形態であるファジィエキスパートシステムやニューラルネットワークの適用が行われ、原水高濁度時などの非定常時運転への対応が可能になることが実プラントレベルで実証された^{2), 3)}。

昨今のAI技術進展やマシンパワー向上により、従来よりも超大量の運転履歴データ活用の環境が整っており、次章で詳述するように、日立グループが今後注力する海水淡

水化分野への適用検討も進められている。

3. 海水淡水化システム運転制御での検討事例

3.1 対象システム：「RemixWater」

対象とした海水淡水化・下水等再利用統合システム「RemixWater」の代表的な処理フロー例を図1に示す。このシステムは、下水処理水などを再利用すると同時に、その最終ろ過工程で発生する濃縮水を海水淡水化システムの希釈水として活用し、省エネルギー、低コスト、低環境負荷な造水を可能にしている。システムは大別すると下水・産業排水再利用系と海水淡水化系から構成される。下水・産業排水再利用系では、下水を膜分離活性汚泥法（MBR：Membrane Bioreactor）で生物処理した後、さらに下水系逆浸透（RO：Reverse Osmosis）膜装置でろ過することで生産水を得る。ここでの生産水は飲料水や工業用水レベルの水質とすることができる。

また、海水淡水化系では、海水を限外ろ過（UF：Ultra Filtration）膜装置でろ過した水と下水系RO膜装置の濃縮水を混合した後、海水系RO膜装置でろ過し、生産水を得ることができる。海水系RO膜装置の濃縮水は、排水として海に放流される。このシステムを一般的な海水淡水化システムと比較した場合の利点として、以下の4点が挙げられる。

- (1) 下水再利用系から排出される下水系RO膜装置の濃縮水を有効活用することができ、排水量を低減できる。
- (2) 所定量の生産水（淡水）を得るために必要な海水取水量を低減することができ、取水設備の小型化、および取水動力費の低減が図れる。
- (3) 海水と下水系RO膜装置の濃縮水の混合により、海水系RO膜装置の被処理水の浸透圧が低減されるため、淡水

化に必要なろ過ポンプの動力費が低減できる。

(4) 海水系RO膜装置の濃縮水の塩濃度が海水並みに低減される。

他方、RO膜装置による海水淡水化システムに共通の課題として、膜目詰まり（ファウリング）による、ろ過動力費の増加や装置稼働率の低下などが広く知られている。ファウリング発生機構についての既往知見⁴⁾などもあるが、効果的な抑制策は試行錯誤に依存する部分も残されているのが現状である。そこで、過去の運転履歴データを活用し、ファウリングを抑制できる運転制御方法に関する知見をAI技術で獲得することを試みた。

3.2 適用したAI技術：Hitachi AI Technology/H

ここでは、ファウリング抑制に関する新たな知見を獲得する手段として、日立が開発したAI技術のHitachi AI Technology/Hを（以下、Hと記す。）適用した。この技術⁵⁾は、膨大なデータを組み合わせることで生成される大量の数値（指標）の中から相関を網羅的に導出し、可視化する機能を有している。これにより、多種類の指標の中から目的変数と相関する有用な指標を抽出し、目的変数に対して効果の高い施策を具体化できるなどの特徴を有する。

RemixWaterシステムの運転履歴データを入力として解析することで、従来の知見では見過ごされてきた新たな因果関係、例えば、ファウリング発生時に増加する海水系RO膜装置の入り口圧力と有意な相関関係を有するプロセスデータ項目の候補を抽出できることが期待され、これに基づいた制御方式の考案を試みている。

3.3 使用データと解析方法

今回の解析には、海外水循環ソリューション技術研究組

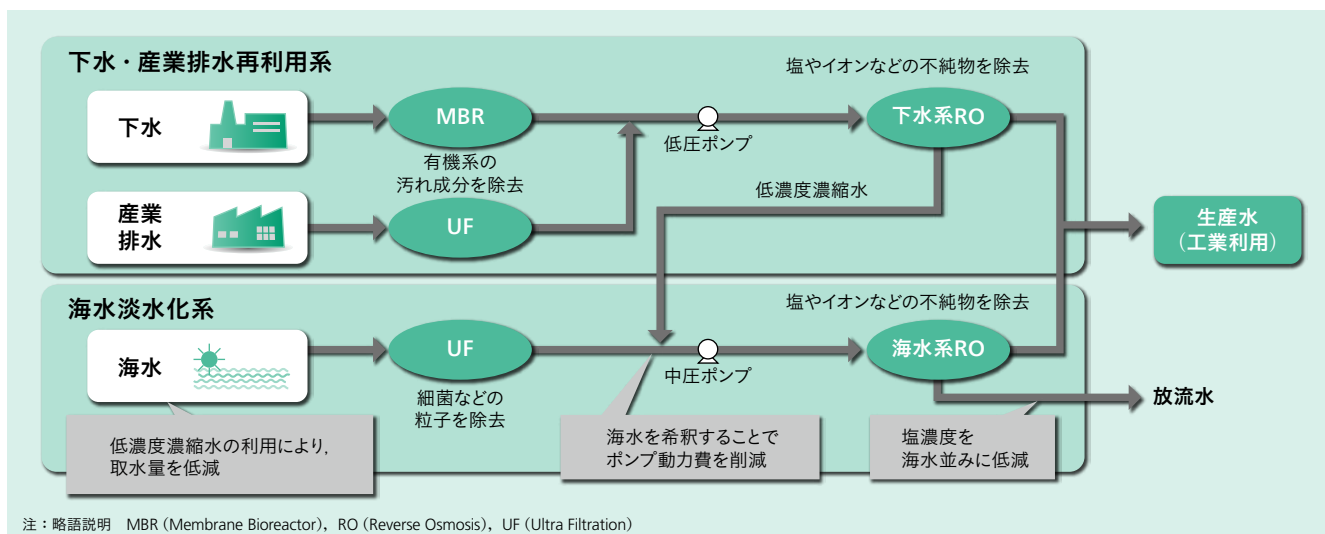


図1 | RemixWaterシステムの処理フロー例

海水淡水化と下水などの再利用を統合した造水システムの代表的な構成例を示す。

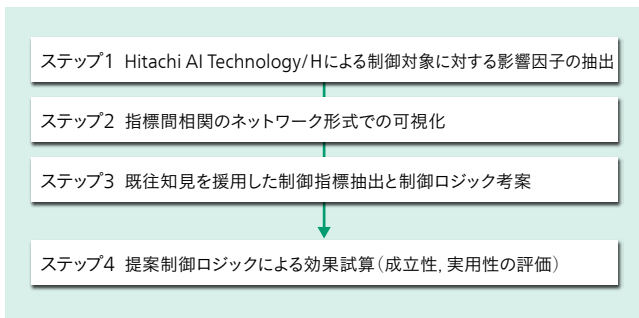


図2 | 制御ロジック検討のための解析フロー

Hを適用した4ステップで解析した。

合 (GWSTA : Global Water Recycling and Reuse Solution Technology Research Association) が NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 事業として受託した「ウォータープラザ北九州」にて取得した運転履歴データを使用した。入手したデータを用いて、イレギュラーな操作がない期間で1時間間隔データを選定し、目的変数1, 説明変数43項目から構成される解析用データセットを作成した。

今回の解析方法は図2のフローに示すような4ステップで実施した。解析の目的は、ファウリング発生度合いの目安となる海水系RO膜入り口圧力への影響因子を抽出し、これに基づいたファウリング抑制制御方式を検討することである。このため、海水系RO膜入り口圧力を目的変数とした解析を実施した。

まず、Hを用いて当該データセットから影響因子の抽出を行った。この結果を用いて、目的変数と有意な相関関係を持つ説明変数(影響因子)を抽出した。抽出した影響因子に対して、目的変数と影響因子間の関係をネットワーク形式で可視化した。さらに、ファウリングに関する現象論的な既往知見を援用して、制御指標の抽出と制御ロジックを考案した。最後に、考案した制御ロジックを用いた際に期待されるファウリング抑制効果を試算し、成立性と実用性を評価している。

3.4 解析結果と制御方式の検討

Hでの解析の結果、目的変数を海水系RO膜入り口圧力とした場合における、43項目の説明変数との相関係数が算出された。この中で特に、海水系RO膜への供給水の約半分を占める下水系RO膜濃縮水の水質に関する変数に着目した。図3の散布図のように、目的変数に対して正相関を有していることが分かる。導電率上昇は塩濃度などの上昇に伴うものと考えられ、海水系RO膜入り口圧力増加につながるのは、現象論にも符合する。

さらに、図4には指標間ネットワーク分析機能により、下水系RO膜濃縮水導電率と他変数との関係を可視化した

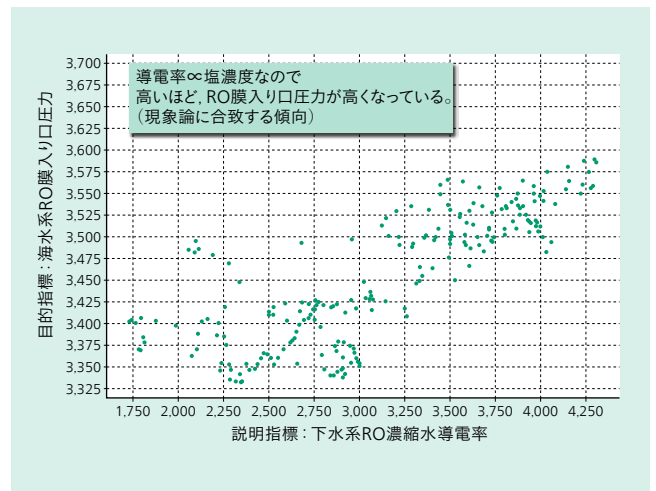


図3 | Hで抽出された水質項目と目的変数との相関図

導電率が高いほどRO膜入り口圧力が高くなる傾向が読み取れる。

結果を示す。導電率を変動させる原因→結果という観点で見た場合、変動要因として下水系処理水流量が抽出された。これらに関する運転履歴データからも、導電率の特異的な上昇変動は処理水流量の変化によって引き起こされることが分かった。

上述の解析で得られた知見のうち、目的変数である海水系RO膜入り口圧力の上昇を抑制するために有効と考えられる知見(変数間の因果関係)は、「下水系RO膜濃縮水導電率を抑制」→「下水系RO膜濃縮水と海水の混合水導電率が抑制される」→「混合水の浸透圧が抑制される」→「海水系RO膜の入り口圧力(絶対値)、および/または入り口圧力の経時上昇が抑制される」という因果関係が成り立つものと推測される。これに基づく制御方案としては、(1)

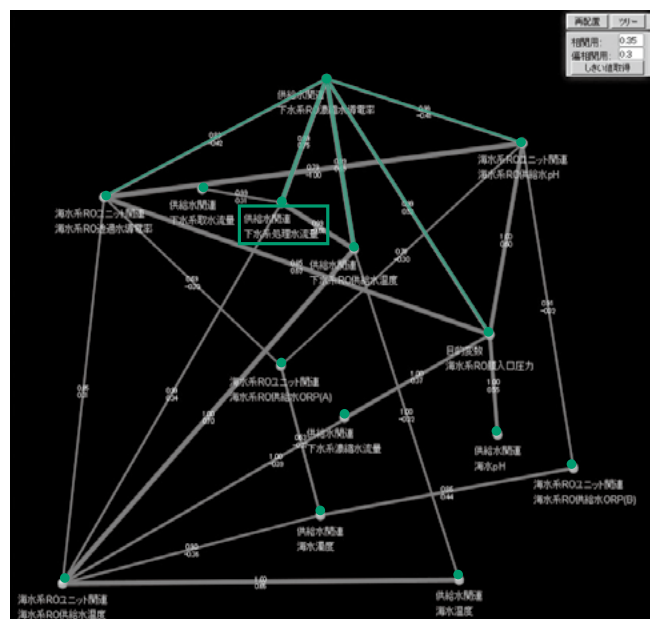


図4 | Hの分析結果に基づく下水系RO膜濃縮水導電率に関する指標間相関のネットワーク形式での可視化例

相関関係の可視化により制御可能因子を抽出できる。

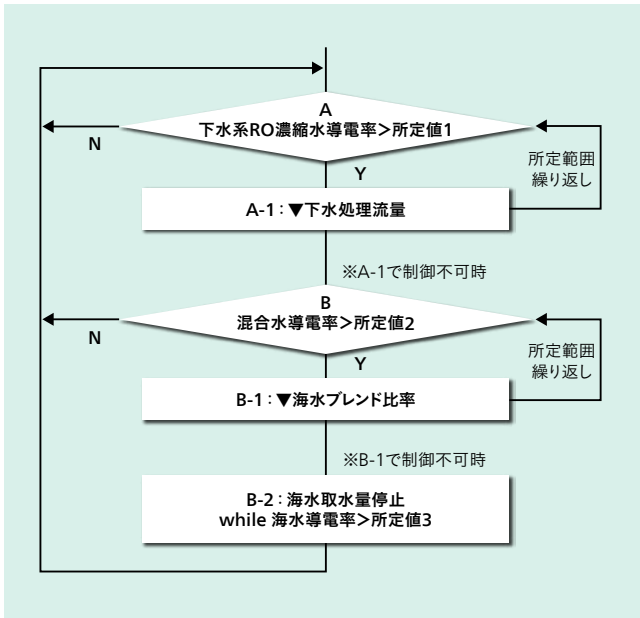


図5 | ファウリング抑制のための制御方式フロー

Hで抽出された知見に基づいて導出された制御方式である。

混合水導電率制御が考えられる。また、このための下位制御として、(2) 下水系RO膜濃縮水導電率制御、(3) ブレンド比率制御、および(4) 海水取水制御が考えられる。これらの制御の具体的なフローとして、図5に示す制御方式を導出した。

この制御方式に基づく海水系RO膜入り口圧力の上昇抑制効果を試算した。試算方法などの詳細は割愛するが、下水系処理流量の変動を抑えた運転制御により、評価対象期間約10日間の圧力上昇量の総和(積分値)が、制御しない場合の1.47 MPaに対して、この約6%に相当する0.09 MPaが抑制されると試算された。この効果の内訳を分析すると、導電率低下に伴う浸透圧降下による直接的な効果分が約3%、また、ろ過圧力の不可逆上昇の抑制(すなわち、ファウリング抑制)による効果分が約3%であることが分かった。

高圧ポンプ動力費はろ過圧に比例すると見なせるため、約6%の動力費削減が期待できることになる。海水淡水化プラントの運用においては、現場のさまざまな取り組みにより、コンマ数パーセントレベルでの地道な運転費低減努力の積み上げがなされているのが現状である。今回提案した制御方式は、新たな装置や薬剤を使用するものではなく、追加コストの発生なしで運転費の削減が見込め、その効果レベルも有意なものであると判断している。

4. おわりに

RemixWaterシステムは、下水再生と海水淡水化を統合したプロセスであり、今後の国内外での導入拡大をめざしている。ろ過膜を用いる水処理システムに共通の課題であ

るファウリングに対して、Hitachi AI Technology/Hを適用することにより、制御方法の検討に必要な知見を抽出することができた。

この技術は、海水淡水化プラント以外にも、過去の運転履歴データを入手可能なプラントであれば適用可能であり、今後、上下水道をはじめとした他の水処理プラントなどへの適用展開も図っていく。

なお、今回の評価に用いた運転履歴データの活用にあたっては、前述のとおり、海外水循環ソリューション技術研究組合(GWSTA)の協力と許可を得たものであることを記して感謝を表す。

参考文献

- 1) 経済産業省：水ビジネスの国際展開に向けた課題と具体的方策(2010.4)
- 2) 圓佛，外：ニューラルネットを用いたプラント運転ルールの抽出に関する研究，電気学会論文誌D，Vol.111，No.1(1991.1)
- 3) I.Enbutsu, et al.: Integration of Multi AI Paradigms for Intelligent Operation Support Systems, Water Science & Technology, Vol.28, No.11(1993.12)
- 4) J.S.Vrouwenvelder, et al.: Biofouling of spiral wound membrane systems, Journal of Membrane Science, Vol.346, Issue.1(2010.1)
- 5) 森脇，外：AIのテクノロジー 自ら学習し判断する汎用AIの実現，日立評論，98，4，241～244(2016.4)

執筆者紹介



圓佛 伊智朗

日立製作所 研究開発グループ 材料イノベーションセンター
プロセスエンジニアリング研究部 所属
現在、上下水・水環境システムの研究開発に従事
博士(工学)
環境システム計測制御学会会員、日本水環境学会会員、電気学会会員



陰山 晃治

日立製作所 研究開発グループ 材料イノベーションセンター
プロセスエンジニアリング研究部 所属
現在、水環境システムの研究開発に従事
博士(工学)
環境システム計測制御学会会員



辻 聡美

日立製作所 研究開発グループ 東京社会イノベーション協創センター
サービスデザイン研究部 所属
現在、経営・マネジメントへのビッグデータ活用の研究に従事
プロジェクトマネジメント学会会員



森脇 紀彦

日立製作所 研究開発グループ システムイノベーションセンター
知能情報研究部 所属
現在、人間情報システム、AIの研究開発に従事
博士(工学)
電子情報通信学会会員、経営情報学会会員、AIS会員



市毛 由希子

日立製作所 水ビジネスユニット 水事業部
グローバル水ソリューション本部 ビジネス開発部 所属
現在、グローバル水ビジネスの発掘・推進業務に従事
日本ロボット学会会員