

「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」
平成 21 年度採択研究代表者

中尾 真一

工学院大学 工学部 環境エネルギー化学科・教授

地域水資源利用システムを構築するための
Integrated Intelligent Satellite System(IISS)の適用

§ 1. 研究実施の概要

平成 21 年度は、22 年度からの本研究の本格的な推進に必要な基礎資料の探索・収集、研究基礎基盤の構築、の予備的な検討を行い、以下の主要な知見を得た。

(1) MBR (Membrane Bioreactor) + NF(Nanofiltration Membrane)/RO(Reverse Osmosis Membrane)システムの検討

①NF/RO 膜ファウリング防止技術の検討

膜ファウリング抑制には自由水が多く結合水が少ない膜素材が重要であるため、文献調査からこのような要件を満たすポリマー素材を選定した。

②計算化学手法によるファウリング防止膜の素材ポリマーおよび表面構造設計

本年度は、文献調査を中心に、「水のマイクロな時間ステップでの運動性」とも概念が一致する自由水や中間水や結合水を評価可能な、計算化学手法を調査した。その結果、分子動力学法および量子分子動力学法シミュレーションを利用した構造相関解析によって、水の状態を判別できることが判明した。

③MBR+NF/RO システムの要素開発

H22 年度から運転を開始するラボスケール試験装置およびMBRとNF/RO ベンチスケール試験装置の設計を行った。また、これらの試験装置を設置する国内試験フィールドの調査を実施し、候補地を決定した。

MBR は MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids) の高濃度化による余剰汚泥の削減効果を検討するため既往研究の調査を実施し運転条件等を抽出した。さらに、排水処理 (MBR の後段) に適用可能な NF/RO 膜を選定し、実下水の MBR 処理水を原水とし

た際の NF/RO 膜の初期阻止性能を評価した。

④高機能化検討

MBR 余剰汚泥および NF/RO 濃縮液処理に関する従来技術の調査、および余剰汚泥と濃縮液の性状、水質の調査を行った。また、膜ろ過処理の圧力を利用した新しい水処理方式(オゾンマイクロバブル処理)を検討し、装置の基本ループを設計した。

(2) MBR 膜洗浄技術の検討

①電場利用型膜洗浄技術の検討

電場利用型膜洗浄要素試験装置を作製し、モデルとして帯電シリカ粒子分散液を用いた透過試験を行い、電場を印加することでコンセプト通り膜面が洗浄され、フラックスが回復することを確認した。

(3) 処理水の安全性評価

①簡易 DNA チップを用いた細菌およびウイルスの評価

生活排水の処理水を再利用する際に有効と考えられる指標細菌・ウイルスを調査し、大腸菌とノロウイルスを選定して検出プライマーセットを設計した。

②培養細胞を用いた処理水の安全性評価

ヒト正常細胞の増殖能を検討し、安全性評価適用細胞として、神経系グリア細胞(A-172)、肺線維芽細胞(TIG-1-40)、皮膚線維芽細胞(TIG-119)を候補選定した。

(4) 運転支援技術の確立

①無線を用いた遠隔監視技術

事前調査として、無線による広域監視事例調査と、海外での無線使用許可に関する情報処理を行った。

②膜運転支援モデルの構築

本年度は、文献や学会発表等からこれまでに報告されている MBR の運転データを広く収集した。また、共同研究機関の株式会社日立プラントテクノロジーが保有する既存の膜運転データを用いて解析を行い、ろ過圧力予測モデル構築を行った。目的変数をろ過圧力の時間差分としてモデル構築を行ったところ、線型回帰分析手法で予測精度の高いモデルが構築された。

(5) 自然エネルギーの活用及び蓄電技術との統合化

①本システムに適した自然エネルギーおよび蓄電技術の選定

地域水資源利用システムに適した自然エネルギーおよび蓄電技術を選定するため、自然エネルギー利用技術の調査、および技術評価(一次評価)を実施した。

以上のように全ての研究グループが当初の計画通りに研究が進捗しており、それぞれの基盤となる技術、知見ならびに研究環境の構築ができたことから、次年度からの本格的な研究が順調に進むために不可欠な研究基盤が確立できた。

§ 2. 研究実施体制

(1)「工学院大学」グループ

- ① 研究分担グループ長： 中尾 真一（工学院大学、教授）
- ② 研究項目：
 - ・NF/RO 膜ファウリング防止技術の検討
 - ・電場利用型膜洗浄技術の検討

(2)「日立プラントテクノロジー」グループ

- ① 研究分担グループ長： 大熊 那夫紀（㈱日立プラントテクノロジー、副事業部長）
- ② 研究項目
 - ・MBR+NF/RO システムの要素検討
 - ・簡易 DNA チップを用いた細菌およびウイルスの評価
 - ・無線を用いた遠隔監視技術
 - ・本システムに適した自然エネルギーおよび蓄電技術の選定

(3)「東京大学」グループ

- ① 研究分担グループ長： 船津 公人（東京大学、教授）
- ② 研究項目：
 - 膜運転支援モデルの構築

(4)「日立製作所」グループ

- ① 研究分担グループ長： 圓佛 伊智朗（㈱日立製作所、チーフプロジェクトリーダー）
- ② 研究項目：
 - ・高機能化検討
 - ・培養細胞を用いた処理水の安全性評価

(5)「東北大学」グループ

- ① 研究分担グループ長： 高羽 洋充（東北大学、准教授）
- ② 研究項目：
 - 計算化学手法によるファウリング防止膜の素材ポリマーおよび表面構造解析

§ 3. 研究実施内容

(1) MBR+NF/RO システムの検討

① NF/RO 膜ファウリング防止技術の検討

膜表面への有機物の吸着を抑制するためには、結合水が存在せず自由水で覆われた表面が重要であると考え、文献調査より zwitterionic 系ポリマー、正電荷・負電荷共重合ポリマー、ノニオン系ポリマーなど膜素材候補を選定した。一例を図 1 に示す。これらのモノマーは合成の必要はなく入手可能であることを確認した。また Differential Scanning Calorimeter (DSC) を購入し、ポリマーの水和状態を測定する準備が完了した。

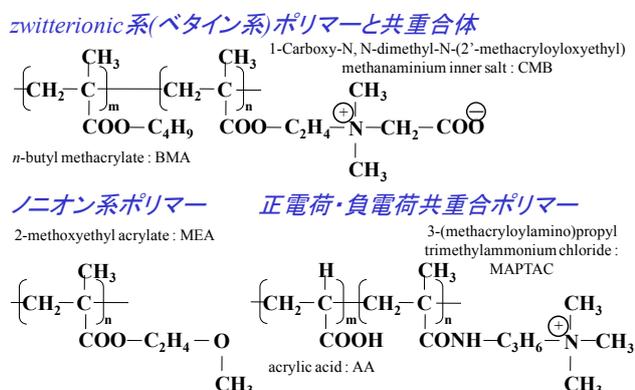


図 1 膜素材候補の一例

② 計算化学手法によるファウリング防止膜の素材ポリマーおよび表面構造設計

文献調査を中心に、「水のミクロな時間ステップでの運動性」とも概念が一致する自由水や中間水や結合水を評価可能な計算化学手法を調査した。その結果、分子動力学法シミュレーションの統計解析に基づく水の構造相関の算出(Zhang et al., Fluid Phase Equil., 231, 2005, 1.など)、分子動力学法の原子軌跡から計算される平均二乗変位解析(Pan et al., J. Membrane Sci., 325, 2008, 727.など)、を実施することで水の状態を判別できることが判明した。また芳香族ポリアミドNF膜への有機分子ファウリング過程のテスト計算から、分子動力学法の中でも平均場ポテンシャル分子動力学法を利用することで、素材ポリマーごとの膜ファウリング性の違いを評価できることがわかった。以上の結果に基づき、来年度は平均場ポテンシャル分子動力学法を利用して、ファウリング防止膜の素材ポリマーおよび表面構造設計を行う予定である。

③ MBR+NF/RO システムの要素開発

H22 年度から運転を開始する革新的な膜技術の検討を目的としたラボスケール試験装置の設計と、連続評価を目的とした MBR+NF/RO ベンチスケール試験装置の選定を行った。MBR+NF/ROベンチスケール試験装置は、研究の効率化の観点から(株)日立プラントテクノロジー所有装置を活用することとし、MBRは処理規模 12.5m³/d×2系、NF/ROは処理規模 10m³/d×1系列である。ラボスケール試験装置は「八王子水再生センター」、ベンチスケール試験装置は「日立・高萩広域下水道組合伊師浄化センター」を設置候補地として現在交渉中であり、それぞれの装置の運転データは、「膜運転支援モデル構築」にも活用される。

また、ベンチスケール試験装置では、高濃度型 MBR システムによる余剰汚泥の削減を検討するため、今年度は、既往研究の調査を実施し運転条件および運転管理項目を決定した。さらに、膜構造に起因するファウリングの観点から、排水処理(MBRの後段)に適用可能なNF/RO

膜を選定し、実下水の MBR 処理水を原水とした際の NF/RO 膜の初期阻止性能を評価した(表 1)。

④高機能化検討

MBR 余剰汚泥処理に関する従来技術として、オゾン法、超音波法、酸化剤法、ミル破碎法、高圧噴流法、他を調査し、余剰汚泥削減率が高く、且つランニングコストが従来と比較して低減されるオゾン法を選定した。NF/RO 濃縮液処理技術としてオゾン法、塩素法、生物活性炭法を取り上げ、トリハロメタン生成防止と返流水としての再利用の観点から、オゾン法を適用したシステムが有効であることを明確化した。オゾン処理後の返流水を利用するケースでは、生物処理に障害を与え難い、オゾンマイクロバブルの利用が効果的と考えられる。また、0.5 MPa 程度の残圧を有する RO 濃縮液にオゾンガスを混合して加压状態で溶解した後、ノズルで減圧発泡させ、オゾンマイクロバブルを生成するループを設計した。濃縮液処理ループでは、溶解タンク内で濃縮液が溶存オゾンと反応して一部が酸化分解され、その後接触槽に注入したオゾンマイクロバブルによって MBR 余剰汚泥を可溶化するとともに、浮上分離効果で汚泥の残留固体成分を分離する。

| | A社NF膜 排除率[%] | A社RO膜 排除率[%] |
|----------------------|-----------------|-----------------|
| BOD[mg/L] | >68.8 | >68.8 |
| TOC[mg/L] | >89.0 | >99.7 |
| Si[mg/L] | 15.8 | >97.3 |
| 総硬度 [CaCO3 mg/L] | 89.8 | >99.3 |
| CO3 [CaCO3 mg/L] | 91.5 | 100 |
| HCO3 [CaCO3 mg/L] | 76.5 | 77.8 |
| Ca硬度 [CaCO3 mg/L] | 87.4 | 99.2 |
| Cl[mg/L] | 31.4 | 99.6 |
| SO4[mg/L] | >99.8 | >99.8 |
| Fe[mg/L] | >75.0 | >84.4 |
| Mn[mg/L] | 89.0 | >94.1 |
| Br[mg/L] | 23.8 | >60.0 |
| Ca[mg/L] | 86.4 | >99.1 |
| Na[mg/L] | 42.0 | 98.3 |
| K[mg/L] | 48.7 | 98 |
| Mg[mg/L] | 94.2 | >99.2 |

表 1 NF/RO 膜の処理阻止性能一例

(2) MBR 膜洗浄技術の検討

①電場利用型膜洗浄技術の検討

電場利用型膜洗浄要素試験装置を作製した。また Total Organic Carbon analyzer (TOC) を購入し水中有機物濃度測定、Zeta-potential & Particle size Analyzer (ELS) を購入し水中懸濁物の粒径と電気的特性測定の、準備が完了した。さらにモデルとして帯電シリカ粒子分散液を用いた透過試験を行い、図 2 に示すように、電場を印加することでコンセプト通り膜面が洗浄され、フラックスが回復することを確認した。

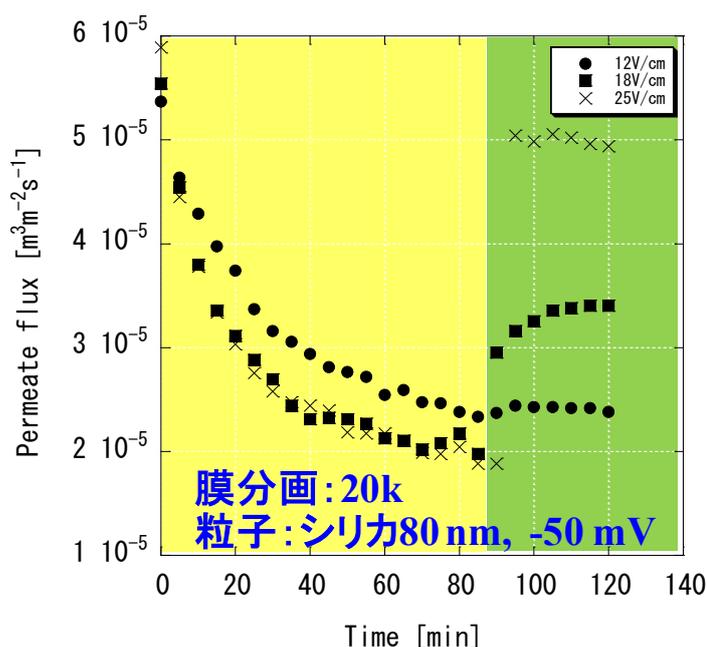


図 2 電場利用型膜洗浄実験結果一例

(3) 処理水の安全性評価

①簡易 DNA チップを用いた細菌およびウイルスの評価

生活排水の処理水を再利用する際に有効と考えられる指標細菌・ウイルスを調査し、衛生評価の代表的な指標である大腸菌と、近年水系の病原ウイルスとして着目されているノロウイルス(RNAウイルス)を選定した。これらの検出のために、LAMP (Loop-mediated Isothermal Amplification)法による核酸増幅用プライマーセットを設計した。

②培養細胞を用いた処理水の安全性評価

処理水を有効活用するためには、人への安全性を示すことが重要である。事前検討として、細胞バンクより5種類のヒト正常細胞株を入手し、培地に純水※を用いて継代培養し、増殖停止が認められるPDL (Population Doubling Level)を決定する作業を進めた。培養試験期間(3~6カ月)内に細胞増殖変化が検出可能な候補細胞として、神経系グリア細胞(A-172)、肺線維芽細胞(TIG-1-40)、皮膚線維芽細胞(TIG-119)の3種を選定した。

※イオン交換水をUV処理後0.22 μmのフィルタで処理

(4) 運転支援技術の確立

①無線を用いた遠隔監視技術

広域の無線利用に関する課題抽出のため事例調査を行った結果、海外では電力網監視として、スマートグリッド向けの実証試験が急拡大しており、米国では200万世帯、ヨーロッパでは30万世帯で実証試験が行われている。このスマートグリッド向けの無線ネットワークは、ZigNET(株式会社日立プラントテクノロジー社製、無線センサーネットワークシステムの商標)と同じ広域メッシュネットワークであり、今後も同方式が主流であると考えられる。また海外での無線使用許可に関する情報整理を行った結果、日米欧では無線モジュール(無線回路単体)での許可は取得できるが、中国では完成製品ごとに認証が必要であることが分かった。H21年11月に北京にある中国国家無線認証機関SRRC(State Radio Regulation Committee)を訪問し、自社製品の認証を通して認証のプロセスと提出書類を明らかにした。

②膜運転支援モデルの構築

本年度は、まず文献や学会発表等から、これまでに報告されているMBRの運転データを広く収集し、ファウリングによる膜差圧上昇と関連付けるデータの選定を行った。また、共同研究機関の株式会社日立プラントテクノロジーが保有する既存の膜運転データを用いて解析を行い、ろ過圧力予測モデル構築を行った。

モデル構築手法として、線型回帰分析手法の一つであるPLS(partial least squares)と非線型回帰分析手法の一つであるSVR(support vector regression)を用いた。どちらもモデル構築用データに対する精度は高かったが、予測用データの精度は低かった。そこで目的変数をろ過圧力の時間差分としてモデル構築を行ったところ、ある程度予測精度の高いモデルが構築された。差分を用いることで、一日後の膜差圧はある程度予測可能であることを確認した。

(5) 自然エネルギーの活用及び蓄電技術との統合化

① 本システムに適した自然エネルギーおよび蓄電技術の選定

本システムの構築に際し、温室効果ガス抑制や災害時のリスク低減を目的に自然エネルギーの活用を検討した。本システムは水資源不足の地域が対象であり、小水力発電は不適である。また、インフラ未整備地域では低周波公害や設置面積の問題は小さいため、風力発電と太陽光発電が適することを明確化した。これらの方式は出力変動が大きいため、双方を備えたうえで蓄電池を組み合わせ、平滑化すべきである。インフラ未整備地域では、蓄電池は劣化し難く、長寿命である必要があり、NaS 電池、あるいはリチウムイオン電池が最適と考えられた。