

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

当グループは、世界中で顕在化する水問題を解決するためには、地域規模で生活排水を適切に処理し、かつ処理水を有効活用(①水不足対策のために生活用水として活用 ②地球温暖化対策のために河川流量維持水や親水利用として活用)することが、大きな効力を発揮すると考えた。そこで、複数の膜技術を統合した革新的な水処理システムを開発して地域内に分散配置し、処理水を有効活用しやすい環境を作るだけでなく、これに成熟度の高い自然エネルギー活用技術や、個々の施設を有機的につなぐ情報管理技術を融合し、全く新しい独創的な地域水資源利用システム「Integrated Intelligent Satellite System (IISS)=水・エネルギー・情報を融合したサテライトシステム」の構築を目指している。

本システムは、実社会への適用性を強く意識し「迅速性」「安心安全」を十分考慮しているだけでなく、日本や世界が抱える様々な水問題に対応可能になるように「柔軟性」を兼ね備えており、「下水道の整備された都市部」だけでなく、「途上国等下水道の未整備の地域」へも適用可能となる。

現在、本システムを構成する要素技術の検討を行っており、H23 年度には現時点で適用可能な技術を組み込み、中国で IISS の実証試験を開始する。

## §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 (工学院大学工学部 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 MBR 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 部長)

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

##### ①NF/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、H21 年度に文献調査より膜素材候補として選定した zwitterionic ポリマー、ノニオン系ポリマーを実際に合成し、これを用いてキャスト法製膜を実施した。ただし機械的強度に課題があることが明らかとなった。またグラフト法製膜も実施し、重合時間により表面修飾グラフトポリマー重合量を制御できることを明らかにした。更にこれらの膜は今年度一部購入した顕微 FT-IR システムなどで評価を行った。また zwitterionic ポリマーを用いて Dynamically forming 法による製膜を実施した。この膜は未処理の膜と比較して、フィード溶液として用いた 1000ppm の BSA 水溶液に対して高いファウリング抑制能が認められた。後述の予期しなかった理由により高濃度 MBR 運転の達成に至っておらず、可溶化汚泥により生じる有機物の同定と水の状態の解析については、引き続き検討課題とする。

##### 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

H22 年度は、MBR 後段に設置する NF/RO 膜として最適な素材ポリマーをスクリーニングすることを目標に、膜素材とファウラント、水分子の相互作用を計算化学手法によって定量評価する方法論を開発した。検証対象には、代表的な細胞外ポリマーであるタンパク質をファウラントに定め、素材ポリマーには工学院大学グループとの連携により、両性イオン性の高分子マテリアルを選定した。手法開発のベンチマーク計算には、タンパク質を構成するアミノ酸残基、ならびに素材ポリマーの繰り返し単位であるモノマー分子を用いた。すなわち素材ポリマー表面のファウリング現象をモノマー同士の相互作用によって表現することで、高速なスクリーニング手法を開発した。この手法は、H22 年度の研究計画において主課題である「①素材ポリマーと水分子の相互作用の検討」を実施しながら、素材ポリマーの耐ファウリング性を理論予測できる。当初の研究計画では、「②素材ポリマーと水分子の相互作用を表現できる量子論ポテンシャルの構築」を念頭に入れたが、本手法の方がスクリーニング速度の観点から優れている。また、水による溶媒効果の影響を定量評価できるという利点もあり、「③自由水や中間水、結合水を評価可能な水分子構造解析シミュレータの開発」の目標も達成した。

##### ③MBR+NF/RO システムの要素検討

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を設計・製作し、「八王子市北野下水処理場」に設置した。汚泥の馴致方法の検討および MBR 基本性能の取得を行った。また、MBR+NF/RO 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」に設置した。今年度は、高濃度型 MBR システムによる余剰汚泥減容を目的に運転を行っているが、流入原水が予想以上に薄く MLSS の高濃度化が困難な状況である為、同規模実験の社内データも活用し解析を行っている。更に、排水処理(MBR の後段)に適用可能な NF/RO 膜のファウリングの状況調査と洗浄回復性について、調査を継続中である。

##### ④高機能化検討

オゾンマイクロバブルを用いた MBR 余剰汚泥, および NF/RO 濃縮液処理に関して, 膜ろ過処理の残留圧力を利用した新しいマイクロバブル生成方式の性能評価のため, パイロット実験装置を製作した。本実験装置を用い, 有効オゾン注入率と排オゾン量を指標に適正な運転条件(溶解タンク圧力)を評価し, 新しいマイクロバブル生成方式を用いた場合の定量的比較を完了した。また, オゾンマイクロバブルによる模擬 RO 濃縮水処理実験により, 処理後も溶存オゾンが残留し, さらに余剰汚泥を処理できる見通しを得たことから, モデル液を対象とした場合の運転条件を確立できた。

## 2) MBR 膜洗浄技術の検討

### ①電場利用型膜洗浄技術の検討

H21 年度に作製した電場利用型膜洗浄要素試験装置は電場印加のために白金電極を用いたが, 大規模装置を考えると現実的ではないため, 安価なカーボンクロス電極とした装置に改良した。カーボンクロス電極を用いても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。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, 電場強度や電場印加時間, 設計フラックスなどがファウリング抑制能に与える影響を把握した。これらは活性汚泥を用いても有効であり, 過剰曝気洗浄による膜面洗浄と同等のファウリング抑制を達成できた。現状は電場強度がやや強すぎると判断しており, これを低減する点を引き続き検討する。また H22 年 8 月 17 日に今年度研究計画の変更を行い, 次年度の実施を予定していた 0.75 m<sup>3</sup>/d クラスの MBR 装置の設置, および電場洗浄の検討について, 前倒しで実施を始めることとしたが, 東京都八王子市北野下水処理場へ当該クラスの MBR 装置の設置が完了し, ラボスケールの電場利用型膜洗浄技術検討の準備を整えた。

## 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

前年度に選定した, 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)のチップを試作と模擬液での評価検出準備を開始した。チップの検出感度の調査および処理水中の菌類およびウイルスの濃縮回収技術は検討継続中である。

### ②培養細胞を用いた処理水の安全性評価

H21 年度, 3~6 カ月内に細胞増殖変化(停止)が検出可能な細胞として 2 種の正常細胞を選定した(肺線維芽細胞(TIG-1-40), 皮膚線維芽細胞(TIG-119))。長期継代培養試験において, 上記の細胞の浸透圧耐性・処理水の濃縮法・処理水の培地調製プロトコル・評価指標の検討を行い, 試験のプロトタイプを構築した。培地調製法は, 処理水を 10 倍に濃縮して MEM 粉末培地を溶解し, pH を調整後に 0.22 $\mu$ m のフィルタでろ過し, ウシ胎児血清と抗生物質を添加する方法とした。本プロトタイプ試験の有効性確認は, 純水<sup>\*</sup>から調製した培地にニクロム酸カリウム・ $\beta$ -エストラジオールを添加した培地を用い, 実施した。また来年度検討を予定している, 増殖能以外に細胞活

性を評価する指標として、文献調査から老化と細胞傷害に関連する p53・p16・p21 の遺伝子発現量の変動を候補選定した。※イオン交換水を UV 処理後 0.22 $\mu$ m 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

無線通信システムの仕様検討(通信仕様,センサ選定)の為ベンチスケール試験装置をモデルとし,膜処理設備の重要監視項目である圧力センサを対象としたデータ監視適用可能性に関し外部環境使用検討を実施した。また,当該試験実施先の中国における無線仕様許可に必要な詳細手続き調査し,認定を取得できる目処をつけた。

##### ②膜運転支援モデルの構築

論文を中心にして,ラボスケールのみでなくベンチスケールの定速ろ過や定圧ろ過の MBR 運転データを収集した。続いて,膜差圧を各種 MBR パラメータから予測するモデルの構築について,膜差圧の上昇の要因として膜閉塞等の膜状態の変化と排水や汚泥等の水質の変化が考えられる中で,本年度はまず長期的に予測可能と考えられる膜状態の変化に着目した。そして膜状態についての物理モデルを考慮することで,膜差圧予測に重要と思われるパラメータとして現在の膜差圧,時間,処理流量を確定した。これらを入力パラメータとすることで,膜差圧の急上昇が起きる時間とその時の膜差圧を出力するモデルの構築を試みた。収集データを用いて,PCA(principal component analysis)によりこれら 3 パラメータのデータ分布のばらつきを最も表現するよう各パラメータの重みを決定した。即ち膜差圧,時間,流量の線型結合で表わされる新しいパラメータが得られ,このパラメータのモニタリングにより,急激な膜差圧上昇の将来予測をできることが示唆された。つまり,部分的な膜差圧予測モデルの構築を達成したといえる。

#### 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,災害時のリスク低減等を目的に自然エネルギー活用を検討継続中である。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り,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為,風力発電と太陽光発電について,自然条件に対する発電電力量の関係および出力変動の平滑化に向けた蓄電方法についても検討中である。

#### 6) IISS の構築及び実証

##### ①IISS の構築

IISS の実証試験を行うモデル地域の調査を行い,地域性等を検討した結果,中国四川省の成都近郊等を候補地に選定した。試験の効率的実施の為,次年度は,四川大学 陳文清 副教授グループを研究グループに加え,当該実証試験装置の設計を開始する。

研究内容と成果概要と達成度の一覧表

研究内容	研究成果	達成度
<b>1. MBR+NF/RO システムの検討</b> (1)MBR+NF/RO システムの要素検討  (2)NF/RO 膜ファウリング防止技術の検討  (3)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  (4)高機能化検討	(1)ラボスケール装置とベンチ装置の運転開始  (2)「可溶化汚泥により生じる有機物の同定と水の状態の解析」以外の 3 つのマイルストーンは達成. (3)高速なスクリーニング手法を開発  (4)オゾンマイクロバブルの運転条件確立 パイロット装置製作	(1)達成見通し (H23 年 12 月) (2)達成 (3)達成 (4)達成
<b>2. MBR 膜洗浄技術の検討</b> (1)電場利用型膜洗浄技術の検討	(1)3 つのマイルストーンのうち前半の 2 つはほぼ達成. 後半の 1 つはその検討準備ができた段階	(1)達成見通し (H23 年 10 月)
<b>3. 処理水安全性評価</b> (1)簡易 DNA チップを用いた細菌およびウイルスの評価  (2)培養細胞を用いた処理水の安全性評価	(1)評価検出準備完了  (2)プロトタイプ構築完了	(1)継続項目 (2)継続項目
<b>4. 運転支援技術の確立</b> (1)無線を用いた遠隔監視技術  (2)運転支援モデルの構築  (3)水運用最適化システムの検討  (4)本システム導入効果シミュレーション	(1)監視技術については H22 年度に要素試験確認達成  (2)データの収集を達成. 重要な 3 つのパラメータを確定. 膜差圧予測モデルについては部分的な構築を達成  (3)検討継続中  (4)検討継続中	(1)達成 (2)達成 (3)継続項目 (4)継続項目
<b>5. 自然エネルギーの活用及び蓄電技術との統合</b> (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	(1)データ収集と検討継続中	(1)継続項目
<b>6. IISS の構築及び実証</b> (1)IISS の構築	(1)検討継続中	(1)継続項目

## §4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

(4-2) 知的財産

① 平成22年度特許出願件数(国内 1 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)