

論文名：逆浸透膜法による海水淡水化のための統計学的
プロセスコントロール法の開発

長崎大学大学院生産科学研究科
中村 耕三

1. 研究目的

世界的な水不足に対応するため、海水淡水化の技術は不可欠なものであり、且つ現状維持の技術ではなく高効率、省エネルギー化された技術が要求されている。中でも、海水淡水化プラントにおける RO 膜劣化の予測と制御は技術上の重要な問題であり、多くの基礎的研究がなされているが、未だ実用上の問題が多々残されている。RO 膜の劣化は主に懸濁粒子、無機物、有機物などによる閉塞によって起り、適切な時期に膜交換を行う必要があるそのなかで、通常 RO 膜のメーカーは、膜に通水する海水の懸濁物質の基準値を定めているが、基準値を満たしている場合でも RO 膜の劣化の進行が異常に早い場合もあり、予測と制御は困難である。すなわち、メーカーの指定する基準値と RO 膜の性能劣化の程度に明確な相関が見られない。また有機物が多く含まれている海水では、基準値を決定する自体が困難、などの実際上の問題を経験した。そこで、従来の懸濁度指標より信頼できる懸濁度指標を探索し、さらに長年の懸案とされている連続監視による淡水化プラントの運転に関する提案を行うことを研究の目的とする。

2. 研究手法

場所、時期などの条件が異なる 187 の海水をサンプリングし、懸濁物質指標を ASTM D4189[4]に準じた手法にて計測すると同時に、5 秒毎(T)の累積透過水量(V)、並びに、計測時海水温度(°C)、EC、pH、E260、濁度を計測する実験を行った。実験結果の統計解析評価は、累積透過水量 (V_{15}) を予測する能力の高い指標と定義し、これに基づいて従来指標と新指標間での V_{15} の予測能力を比較し評価を行った。

3. 研究結果

・ 新懸濁度物質指標

実験結果から累積透過水量の対数($\log V$)と経過時間の対数($\log T$)の関係は、 $T \geq 15$ 秒において近似的に線形関係であった。そこで $T \leq 15$ 秒を Phase1、それ以降を Phase2 とし、Phase2 のデータを線形回帰分析することで得られる回帰係数は海水の懸濁度を反映していることを検証した。また、回帰係数推定値と懸濁度との関連の解析の過程で、回帰係数が小さいほど推定誤差(SE)値が大きく、線形関係から逸脱する傾向が見られた。そこで Phase2 の期間を色々変えて適合度を分析した結果、Phase2 を $T=15$ 秒から $T=825$ 秒までと設定した場合、 V_{15} を予測する精度が最大となることを突き止めた。この結果に基づき、Phase2 に単回帰分析をして得られた回帰係数値を透過指数 β と定義し、新たな懸濁度指標として提案した。

- SDI_{15} との比較

現在殆どのプラントで用いられている SDI_{15} と β の V_{15} を予測する能力を比較すると単回帰決定係数 (R^2), 残差誤差 (SE) とともに β の方が良い成績を示したことから、 β の方が海水の懸濁度をより適切に反映していると評価した。また V_{15} がかなり小さい (すなわち懸濁度がかかなり高いためメーカーが指定する基準値に達していない) 水に対しても、 β は V_{15} の減少とともに単調に減少する傾向にあったが、 SDI_{15} はほぼ定数に留まる傾向にあった。懸濁度が高い水に対しても、 β の方が SDI_{15} よりも適切に懸濁度を評価できることを検証した。

- 連続監視の検討

前節までの結果は、 β がかなり広い範囲の水質の懸濁度指標として適用可能なことを示唆している。この特性を活かして、プラントで常時継続的に計測される項目から β の予測式を構成し、懸濁度を連続的に監視する方法を開発した。ステップワイズ変数選択法により、 β の予測式として EC, $\log E260$, 濁度の 3 変数を用いた線形重回帰式が選択された。その式による、 β の予測値を β^* とする。 β^* を用いたコントロールチャートによるプラント運転の連続的管理法を提案する。

具体的には、まず β^* の安全領域を設定し、安全領域以外の領域を危険領域と設定し、瞬間的な変動に対応した運転管理を行うことで、運転プロセスを常時モニターリングすることが可能である。これにより、海水除濁処理の運転条件 (ろ過流速, 逆洗間隔, 薬品添加量) の最適化制御が可能となり、プラント管理のためのランニングコストと環境負荷低減を可能にすると考えられる。

4. 統括

本研究では懸濁度指標として従来用いられている方法の問題点を指摘し、新たな懸濁度指標として β を考案した。 β は目的変数を $\log V$, 説明変数を $\log T$ とした線形回帰モデルの回帰係数値であり、実験開始 15 秒から 825 秒までのデータを用いて計算される。理論的考察と実験により、 β は測定装置に依存しないことを確認した。また、従来法より懸濁度予測の精度が高いので、従来法よりも懸濁度指標として優れていると結論した。さらに、プラントでは通常常時継続的に計測されている水質項目から β の予測値 β^* を求めるための予測式を構成することにより、懸濁度を連続的に監視することを提案した。懸濁度の連続監視による管理方法で急激な環境変化を瞬時に検出できるだけでなく、不必要な運転操作を省くことができる。

今後の課題として、様々な環境の基でのプラント運転時における β の物理化学的観点からの性能評価、および β^* の精度を高めるための統計学的研究が期待される。