

B-38 小型ナノろ過実験によるナノろ過実装置設計手法の開発

国立保健医療科学院水道工学部 伊藤雅喜
株式会社西原環境テクノロジー ○太田直輝

1. はじめに

ナノろ過 (Nanofiltration: NF) はオゾン・活性炭吸着処理に代表される高度浄水処理に替わる次世代の処理プロセスとして海外では実施設が稼働している。日本ではごく小規模の施設を除きほとんど実施例はなく、実施設の計画に当たっては実施設と同等のフローを用いた実証実験を行わなければならない。しかし、実験装置は構成上の制約から数百 m³/d 規模の大規模実験となり、高コスト化は避けられない。

一方、ナノろ過法におけるろ過機能は膜エレメントの大小による差はほとんど無く、従来から行われてきた小型実験装置による機能試験の結果を実施設計画へ反映できる手法を確立できれば、大規模実証実験が不要となり、経営資源投資の低減化や設計時の過剰設備計画の防止等を実現できる。しかしながら、これまで行われてきた実験の多くが回分式や小型の実験装置を用いた、主としてナノろ過そのものの除去性を評価するものがほとんどであり、実装置の総合的性能評価を目的としたものはほとんど見られなかった。

本論では、小型実験装置の機能試験結果をもとにしたナノろ過実装置の設計手法を提案し、小型実験装置及び実装置と同等のフローを有する大型実験装置を同時並行運転することにより、その妥当性を検討した。

2. 多段型システムの機能予測手法

実施設のナノろ過装置では、エレメントを複数個直列に装填したモジュール 1 本あたりの水回収率は 50% 程度と低いことから、モジュールを多段に配置し、前段の濃縮水を後段の供給水とする多段型システムを構築することでシステムの水回収率を向上させている。多段型システムの一例を図 2-1 に示す。

多段型システムの機能を予測するにあたり、システム内における任意のエレメントの水回収率を(2.1)式、物質除去率を(2.2)式で定義すると、n 番目エレメントのまわりの水量と濃度は、エレメント水回収率及び物質除去率の関数として(2.3)～(2.6)式で示される。つまり、n=1～n までのエレメントについて、(2.3)～(2.6)式を適用することにより、システム全体の水量と濃度を計算することができる。

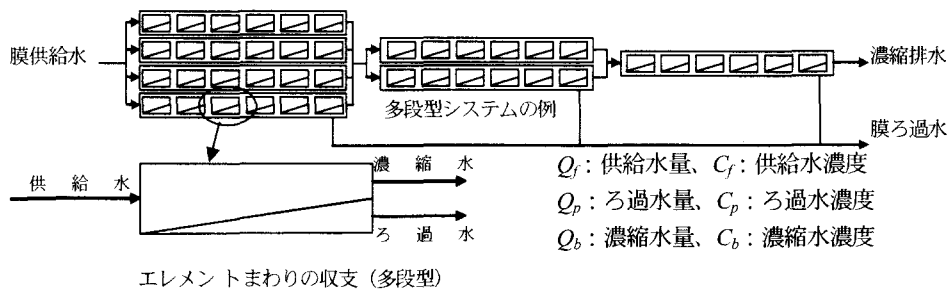


図 2-1 多段型システムの配置例とエレメントまわりの収支

$$r_n = \frac{Q_{pn}}{Q_{fn}} \quad : n \text{ 番目エレメントにおける水回収率} \quad \cdots \cdots (2.1)$$

$$R_n = 1 - \frac{C_{pn}}{(C_{fn} + C_{bn})/2} \quad : n \text{ 番目エレメントにおける物質除去率} \quad \cdots \cdots (2.2)$$

水量計算式

$$Q_{pn} = Q_{fn} \times r_n \quad : n \text{ 番目エレメントにおけるろ過水量} \quad \cdots \cdots (2.3)$$

$$Q_{bn} = Q_{fn} \times (1 - r_n) \quad : n \text{ 番目エレメントにおける濃縮水量} \quad \cdots \cdots (2.4)$$

濃度計算式

$$C_{bn} = C_{fn} \times \frac{\{r_n(1 - R_n) - 2\}}{r_n(1 + R_n) - 2} \quad : n \text{ 番目エレメントにおける濃縮水濃度} \quad \cdots \cdots (2.5)$$

$$C_{pn} = C_{fn} \times \frac{(r_n - 2)(1 - R_n)}{r_n(1 + R_n) - 2} \quad : n \text{ 番目エレメントにおけるろ過水濃度} \quad \cdots \cdots (2.6)$$

(ただし、 $n \geq 2$ のとき、 $Q_{fn} = Q_{bn-1}$ 及び $C_{fn} = C_{bn-1}$)

実際には、個々のエレメントについて水回収率や物質除去率を知ることは不可能であることから、本論では、個々のエレメント水回収率はシステムを構成するバンク毎の平均値であると仮定し、物質除去率を循環型システムである小型実験装置で実測し、これらを(2.3)～(2.6)式に適用することにより、多段型システムの水量及び濃度の予測を行った。また、並行して多段型システム（大型実験装置）を実際に運転して得られる水量及び濃度を実測し、予測値と比較することにより、一連の多段型システム性能予測手法の検証を行った。

3. 実験方法

実験は予測手法の妥当性を確認する短期実験、及び予測手法が長期間にわたり適用可能かどうかを確認する長期試験の2種類を実施した。各実験時の運転条件を表3-1に、実験方法の概念図を図3-1に示す。

大型実験装置では、第1バンクの上流側2エレメント（以降1st/1-2エレメントと表記）、第2から第4バンクの下流側2エレメント（2nd/4-5、3rd/4-5、4th/4-5エレメント）を小型実験装置との比較対象箇所とした。小型実験装置では、1st/1-2～4th/4-5エレメントにおける水量収支と水回収率を再現した運転を行い、運転時のシステム水回収率に対する物質除去率の関係を求めた。得られたシステム回収率と物質除去率の関係を大型装置の濃度予測式に適用した予測値と実測値を比較し、予測手法の妥当性を検討した。

表3-1 実験時の運転条件

項目	短期実験		長期実験	
			Run1	Run2
大型実験装置	システム構成	直列4バンク構成		
	ろ過流速(m/d)	0.6		
	エレメント水回収率	1st / 2nd / 3rd / 4th 0.13/0.13/0.14/0.15		
	システム水回収率	0.95		
小型実験装置	比較対象箇所	1st/1-2 2nd/4-5 3rd/4-5 4th/4-5	1st/1-2	4th/4-5
	2エレメントろ過流速(m/d)	0.73 0.48 0.47 0.46	0.73	0.46
	2エレメント水回収率	0.25 0.25 0.26 0.28	0.25	0.28
	システム水回収率	0.25 0.76 0.89 0.95	0.25	0.95

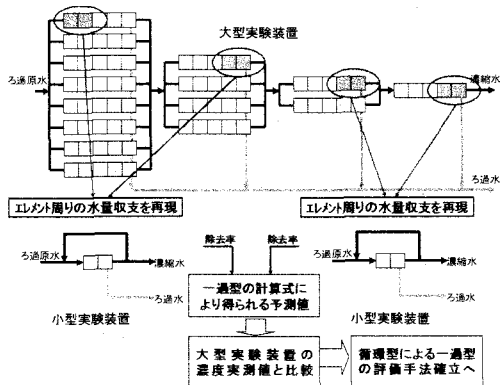


図3-1 実験方法概念図

4. 結果と考察

4. 1 短期実験結果

個々のエレメント水回収率をバンク毎の平均値であると仮定して得られたろ過水量予測値と、1st/1-2～3rd/4-5エレメントの実測値を比較した結果を図4-1に示す。実際にはエレメントの圧力損失によりエレメント毎にろ過圧力が異なるため、同一バンク内においてもエレメント水回収率は異なり、上流側でエレメント水回収率は高く下流側で低くなる。しかしながら、同一バンク内でエレメント水回収率は一定と仮定する本

方法においても、予測値と実測値はほぼ同等であり、実用上問題なく多段型ナノろ過装置のろ過水量予測が可能であることが確認された。

小型実験装置の結果から算出した大型実験装置濃度予測値と実測値について、有機成分の例として TOC、無機成分の例として電気伝導率 (EC) における比較結果を図 4-2 及び図 4-3 に示す。いずれの水質項目も予測値と実測値は極めて良く一致しており、本方法における性能予測が十分に実用可能であることが示された。

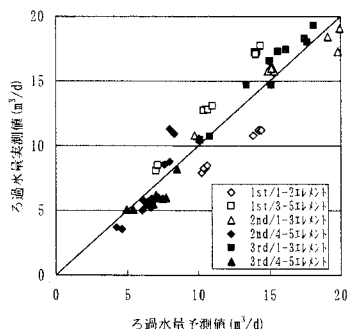


図 4-1 ろ過水量予測値と実測値

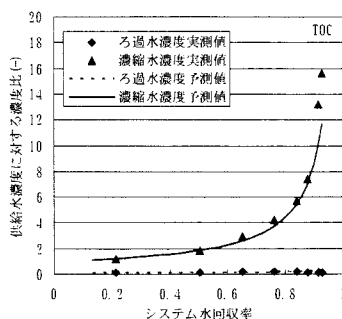


図 4-2 大型濃度予測値と実測値 (TOC)

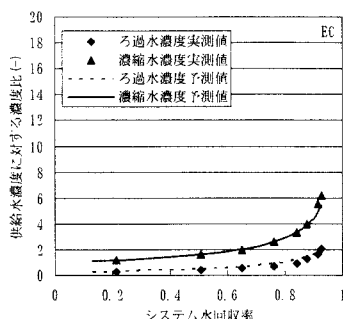


図 4-3 大型濃度予測値と実測値 (EC)

4. 2 長期実験結果

長期実験における大型実験装置濃縮水及びシステムろ過水の TOC 予測値と実測値の比較を図 4-4 に、EC における予測値と実測値の比較を図 4-5 に示す。TOC では Run1 中旬の 1 点を除き濃縮水濃度の予測値と実測値は同等の傾向を示し、ろ過水濃度は実験期間を通じてほぼ一致した。EC についても同様であり、ろ過水濃度はほぼ一致した。以上の結果から、本予測手法が短期的のみならず、小型実験装置により膜の安定運転の実証としても適用可能であることが明らかとなった。

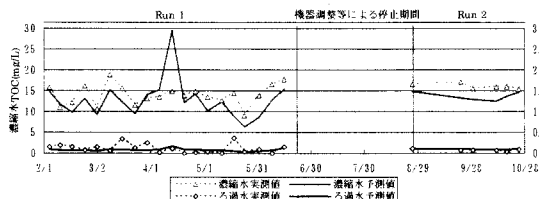


図 4-4 中期試験における TOC 濃度予測値と実測値の比較

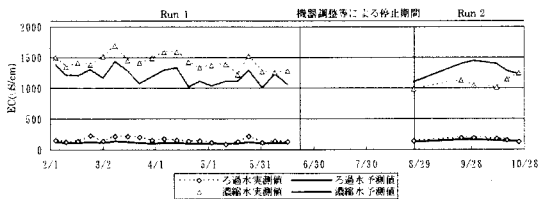


図 4-5 中期試験における EC 濃度予測値と実測値の比較

5. まとめ

短期実験では、多段型システムのエレメント水回収率を一定と仮定して得られるろ過水量予測値と実測値は実用上問題ない程度に一致し、エレメント圧力損失等によるろ過圧力の変化を考慮することなく、多段型システムのエレメント毎のろ過水量を計算で求めることができた。また、多段型システムの濃度計算において必要な物質除去率を循環型システムを用いた実験で求めることにより得られた濃度予測値と、濃度実測値はほぼ一致した。また、この一致は長期的にも成り立つことを実験的に示し、ナノろ過装置の性能シミュレーションが循環型システムの実験だけで可能であることを示した。

以上の結果から、ナノろ過実装置を設計するにあたり、設計時のシステム水量収支から平均エレメント水回収率を算出すると共に小型循環型実験装置で物質除去率を求め、多段型システムの濃度計算式を適用することで、多段型システムによる実証実験を行うことなく実装置の性能予測が可能であることを明らかにした。

最後に、本研究は e-Water の持込研究の一部として行ったものであり、共同研究者である北海道大学大学院、沖縄県企業局、(株)荏原製作所、(株)クボタ、水道機工(株)、東レ(株)、(株)日水コンの関係各位に謝意を表する。