健全な水循環の維持と膜分離の役割

前 田 恭 志

ダウ・ケミカル日本株式会社 御殿場研究所 ☎412-0013 御殿場市小倉野92-2

1. はじめに

我が国の水行政においては「健全な水循環系の構築」あるいは「健全な水循環の維持・確保」の観点から諸施策が立案、実施されてきている。地下水を含む流域管理のキーワードとして用いられる、「健全な水循環系」とは「流域を中心とした一連の水の流れの過程において、人間社会の営みと環境の保全に果たす水の機能が、適切なバランスの下にともに確保されている状態」と定義されている¹⁾。昨年、中央環境審議会水質部会および地盤沈下部会は「環境保全上健全な水循環に関する基本認識及び施策の展開について」の最終報告²⁾をとりまとめ、意見具申を行った。この中で、水の大消費地である都市地域においては、雨水の有効利用、節水、下水処理水の再利用、高度下水処理の推進、工業用水の循環利用、有害物質の水域への排出・地下浸透規制等が推進すべき施策例

として取り上げられた。本稿では健全な水循環を維持する上で膜分離の果たすべき役割について概説する。

2. 膜分離の役割

現在、圧力駆動型の各種膜分離法が実用化されており、様々な分野で健全な水循環の維持に貢献している³⁻⁸⁾。Fig. 1は各種膜分離法を分離対象物のサイズと比較して示したものである。精密ろ過膜 (MF) は主に固液分離が対象で、限外ろ過膜 (UF) ではフミン酸等の中・高分子量の溶解物質の分離が可能になる。逆浸透膜 (RO) は溶解イオン類を阻止することができ、脱塩や重金属イオンの除去などに用いられる。ナノろ過膜 (NF) はROとUFの中間の膜分離プロセスとして位置付けられ、硬度成分、消毒副生成物前駆体や農薬類などの除去に使用されている。Table. 1は最終報告²⁾で示された種々の施策例のうち膜分離法の適用が可能な分野を地域ごとにまとめたものである。MFやUF膜を用いる膜分離活性汚泥法は近年、合併浄化槽等に適用され、農村や都市地域での水質汚濁防止に対する役割が期待されている⁹⁾。RO/NFは一番緻密な膜であり、水道水質基準をクリアーする水質が得られることから、各種産業排水を処理し、循環再利用することに用いられている。また、下水をROで高度処理し、再生水を親水や修景用などに用いたり、河川の水量を維持するために上流還元なども検討されている。沿岸域では地下水の過剰汲み上げによる、塩分濃度上昇が問題になることがあるが、ROによる海水淡

Membrane Roles in Maintaining Healthy Water Cycle and Watershed Management

Yasushi Maeda

Dow Chemical Japan Limited, Gotemba Laboratory,
92-2, Ogurano, Gotemba-shi, 412-0013

Membrane technologies have been playing important roles in solving various environmental problems. In this article, the roles of pressure driven membranes will be reviewed from the standpoint of maintaining healthy water cycle and watershed management.

Key words : Membrane Separation / Reverse Osmosis / Nanofiltration / Ultrafiltration / Microfiltration / Watershed Management / Healthy Water Cycle

Fig. 1 Pressure driven membrane classification.

Table. 1 Membrane roles in maintaining healthy cycle.

水循環悪化による障害	環境保全上健全な水循環を確保するための施策例と膜法の適用		適用可能な膜分離法	
森林地域 人工林の手入れ不足 森林地の減少 涵養機能などの低下 農村地域 農地の減少 過剰施肥や農薬 地下水過剰汲み上げ 涵養機能の低下 浄化機能の低下 都市地域 不透透域の拡大 非特定汚染源 地下水過剰汲み上げ 涵養量の減少 汚濁負荷の増大	農村地域		RO/NF/PV	MF/UF
	水質汚濁の防止	膜分離活性汚泥法に基づいた合併浄化槽		○
		高度集落排水施設等の整備、畜産排水の高度処理	○	○
	水の有効利用の促進	循環灌漑水、農業用水の再利用	○	○
		養液の殺菌、リサイクル（養液栽培）	○	○
	都市地域			
	雨水利用、節水	プール浄化、浴槽水処理、非常用浄水機		○
		雨水の用水化、地下水涵養		○
	ビル内再生水利用	膜分離活性汚泥法、中水道	○	○
	下水処理水の再利用	膜分離活性汚泥法とROのハイブリッドプロセス	○	○
		河川維持用水、親水用水、水辺空間の創設	○	○
		地下水塩化防止、地下水涵養（主に米国）	○	○
	高度下水処理	BOD、COD、窒素、リン、微量有機物汚染	○	○
	有害物質の排出規制	各種工業排水処理 — 洗浄排水、シリコン研磨排水、メッキ排水、染色废水、食品工場排水（BOD）	○	○
		埋め立て処分場浸出水処理（重金属、ダイオキシン）	○	
	工業用水の循環利用	冷却水、半導体工場洗浄水処理、洗濯排水処理	○	○
	地下水の保全・回復	地下水浄化、揮発性有機物除去（VOC、MTBE）	○ PV	
	沿岸域、河川流域 など			
	地下水汲み上げ規制	地下水に依存しない水源確保、海水、かん水淡水化	○	
	水質汚濁の防止	油田随伴水の処理、鉱山排水処理	○

Fig. 2 Membrane based hybrid wastewater treatment process.

Table. 2 Recent water reuse activities.

Terminology	用語
Recycle	半導体工場等で排水、工程水を処理し、リサイクルすることで、節水や環境基準の達成を図る。
Reuse	再利用，リサイクルと同義
Reclamation	排水，下水を処理し，再使用する (Reclaimed Water：再利用水)
Recharge	都市下水等を高度処理し，処理水を地下に注入することで沿岸域で地下水に塩分が浸入するのを防止し，また地下水涵養を行おうというもの。(Water Factory 21など)
Replenishment	オレンジカウンティでは下水を膜で高度処理した後，処理水で地下涵養を行うことを計画している。40万m ³ /日のプロジェクトが進行中
Repurification	サンディエゴ市で都市下水を高度処理し，非直接的な飲料用途に供しようと計画した時に使用した。(Indirect Potable Reuse)
Regeneration	半導体産業における排水再利用の試み，「水の回生」

水化は地下水に依存しない用水確保の手段として，また渇水対策としても今後普及が見込まれている。浸透気化法は，トリクロロエチレンやMTBEなどの地下水汚染浄化にその役割が期待されており，活発に検討されている^{4,5,10)}。

近年，農薬やダイオキシン類などの微量有機物

汚染が問題となっているが，確実にこれらの有害物質を除去するために，「粉末活性炭とUF」や「NFと繊維状活性炭」などを組み合わせた，ハイブリッド型処理法も提案されている¹¹⁾。

3. 水再利用の取り組み

次の四半世紀においては人口の急増や産業の著しい発展によって，世界人口の約3割もの人々が厳しい水不足に直面するであろうという報告がある¹²⁾。また，それは食料生産や人の健康を脅かす最も大きな要因となるであろうとも指摘されている¹³⁾。そのため，20世紀の石油紛争に代わり，21世紀は水紛争の時代になると言われている¹⁴⁾。このような地球レベルでの水循環障害を避けるため，様々な取り組みをして行かねばならないが，その解決策として，まず水の有効利用や再利用をあげることができよう。

我が国でも渇水時の用水確保や環境負荷の低減ならびに地下水源保護等の必要性から，下水や産業排水を高度に処理し，再利用しようとする動きが急速に広がっており^{15~18)}。Table. 2はこのような再利用の取り組みを，「再利用」を表す用語

とともに整理したものである。このような高度処理分野では膜分離活性汚泥法（メンブレンバイオリアクター）を初めとする、各種膜分離技術が重要な役割を果たしているが、水道水以上の水質を得るために、MF/UFをRO/NFと組合せたプロセスが主流となりつつある。カリフォルニア州、オレンジカウンティーでは40万m³/日規模の処理施設の建設が計画されており、地下水涵養を行うことになっている¹⁹⁾。また、サンディエゴ市では高度処理水を非直接的な飲料水用途（Indirect Potable Reuse）として用いるための大規模なパイロット試験が実施された²⁰⁾。

4. 膜分離濃縮物の処理

膜分離では浄化、再生された透過水が得られる一方、汚染物質が濃縮されてしまうという問題がある。系全体の処理として完結するためには濃縮水の無害化、無毒化技術の開発も合わせて必要である。Fig. 2には膜濃縮液の処理法として今後期待できそうな超臨界水酸化や光触媒による酸化などを膜分離活性汚泥法と組み合わせた例を示す^{10, 21)}。

5. おわりに

種々の分画特性や形状を有する分離膜が安価に入手できるようになって、より自在に排水ならびに浄水処理プロセスをデザインすることが可能になってきた。今後、微生物処理やオゾン処理など、その他の浄水、排水処理技術の進展と合わせ、膜分離技術が世界の水環境、水循環を維持する上で一層重要な役割を担うようになることを期待したい。

文 献

- 1) 健全な水循環系構築に向けて（中間とりまとめ）、健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議、平成11年10月6日
- 2) 中央環境審議会、水質部会・地盤沈下部会、最終報告「環境保全上健全な水循環に関する基本認識及び施策の展開について」、平成11年4月
- 3) 属富夫, 化学装置, **39** (6), 59 (1997)
- 4) 山口猛央, 中尾真一, 化学工業, **47** (1), 51 (1996)
- 5) 中尾真一, 科学と工業, **69** (2), 43 (1995)
- 6) 大熊那夫紀, ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム '99 講演要旨集, 5-3-1 (1999)
- 7) 上村忠廣, 加藤博恭, クリーンテクノロジー, No. 10, 23 (1994)
- 8) A. G. Fane and M. Hlavacek, 膜, **19** (2), 271 (1994)
- 9) ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム '00 講演要旨集, 5-3-8 (2000)
- 10) 三島聡子, 日本膜学会第22年会 講演要旨集, pp. 10 (2000)
- 11) 前田恭志, 膜, **23** (5), 235 (1998)
- 12) D. Seckler, R. Barker, U. Amarasinghe, *Int. J. Water Resources Development*, **15** (1/2), 29 (1999)
- 13) 1998. 11. 23, Associated Press, "Study cites water shortages in parts of world"
- 14) 世界水ビジョン「川と水」委員会, <http://www.moc.go.jp/www.htm>
- 15) 三木正博, ウルトラクリーンテクノロジー, **11** (2), 60 (1999)
- 16) 福原知子, 科学と工業, **72** (8), 356 (1998)
- 17) 西田高治, 月刊 地球環境, **29** (5), 26 (1998)
- 18) 山本聡, 佐藤研三, 五藤久貴, 下水道協会誌, **35** (434), 57 (1998)
- 19) G. L. Leslie, et al., ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム '00 講演要旨集, 3-3-1 (2000)
- 20) S. Adham et al., 1999 IDA Conference Proceedings, San Diego Vol. I, pp.205 (1999)
- 21) R. Rautenbach and R. Mellis, *Desalination*, **95**, 171 (1994),