

## 〈特集〉

# 海水淡水化・下廃水再利用を牽引する逆浸透膜技術

辺見昌弘<sup>1)</sup>, 小川貴史<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 東レ(株) 地球環境研究所 (〒520-0842 滋賀県大津市園山3-2-1 E-mail: Masahiro\_Henmi@nts.toray.co.jp)

<sup>2)</sup> 東レ(株) 地球環境研究所 (〒520-0842 滋賀県大津市園山3-2-1 E-mail: Takafumi\_Ogawa@nts.toray.co.jp)

### 概要

近年、世界人口の増加と経済発展に伴う水不足や水質悪化などのいわゆる「水問題」が地球規模で深刻化している。安全で安心かつ十分な水資源を確保するためには高度な水処理技術が必要であり、低コスト・高造水量・高水質の要求を満たすことが可能な逆浸透膜技術の果たす役割は非常に大きなものとなってきている。本稿では、海水淡水化および下廃水再利用の用途を中心に逆浸透膜技術について概説する。

キーワード：水処理、逆浸透膜、海水淡水化、下廃水再利用

原稿受付 2010.12.10

EICA: 15(4) 44-47

## 1. 水問題と水処理用分離膜

### 1.1 世界の水問題

地球は「水の惑星」と言われ豊富な「水」で覆われているが、その約97.5%は海水であり、河川・湖沼等の淡水はわずか0.01%程度である。産業革命以降の人口増加と急激な工業化によって、水資源の不足と水源水質の悪化が起これ、世界の人口65億人の内、アジア・アフリカを中心に約9億人が生活用水に困り、約25億人が衛生的な下水処理設備を持たないと言われている<sup>1)</sup>。日本は、水が豊富と思われているが、夏には四国・九州の一部で水不足に見舞われる。また、現在食料自給率は約40%であり、輸入食品量を水使用量に換算すると約400億トンに上り、実に日本の年間水使用量900億トンの半分近くになる。これは、穀物1トン生産するのに約1000トンの水を必要とするからである<sup>2)</sup>。

世界の人口は益々増加し、産業も発展するため、水資源不足と水質汚濁は進行する。今後十分な水源を確保しにくくなることは確実であるため、水源を河川や湖沼の表流水・地下水から、海水、さらには下廃水に求めることが必要となってくる。

### 1.2 水処理用分離膜

人類は古代より河川などの水辺近くに住居を構え、そこから生活に必要な水を得て文明を発展させてきた。自然水をそのまま使用し、排水処理は自然の浄化作用に任せていた。産業革命以降、水需要が増大するとともに排水による水源の汚染が発生するようになり、生物処理や凝集沈殿処理などの技術が開発され、人工

的な排水の浄化が行われるようになった。1990年代に入ると、水環境はさらに悪化し、従来の水処理技術では安全な飲料水を十分に供給することや、排水を安全な水質にまで浄化することが困難になってきた。このような背景のもと、高精度の水質制御と高速処理が可能な「膜利用水処理技術」が持続的な水資源の確保のための必須技術として注目されるようになった。

**Fig. 1**に水処理用分離膜の種類を示す<sup>3)</sup>。水処理用の分離膜は、分離機構と膜の構成から逆浸透(RO)膜、ナノろ過(NF)膜、限外ろ過(UF)膜および精密ろ過(MF)膜に分類され、それぞれ分離対象が異なり、用途に応じて単独または組み合わせて使用されている。UF膜とMF膜は、細孔の大きさによって対象物を分離する。現在は、除濁・除菌用途を中心に上水から下水まで幅広い分野で用いられている。RO膜とNF膜は逆浸透理論に基づいて分離を行うもので、原水に対して浸透圧より大きな圧力をかけることでイオンや溶解性有機物を分離除去することができる。特にRO膜ではこれらの物質を効率よく除去できるため、用途に合った水を低コストで得ることが可能であり、水資源確保のための技術として非常に有用なものである。

## 2. RO膜による海水淡水化

### 2.1 海水淡水化RO膜技術の進歩と進捗

従来、海水を水源として真水を得る海水淡水化分野では、中東地域を中心に海水を加熱蒸発後に凝縮・回収する方法(蒸発法)が主流であった。しかし、蒸発法では水(液体)から水蒸気(気体)への相変化を伴うために多大なエネルギーを必要とし、大量の化石燃

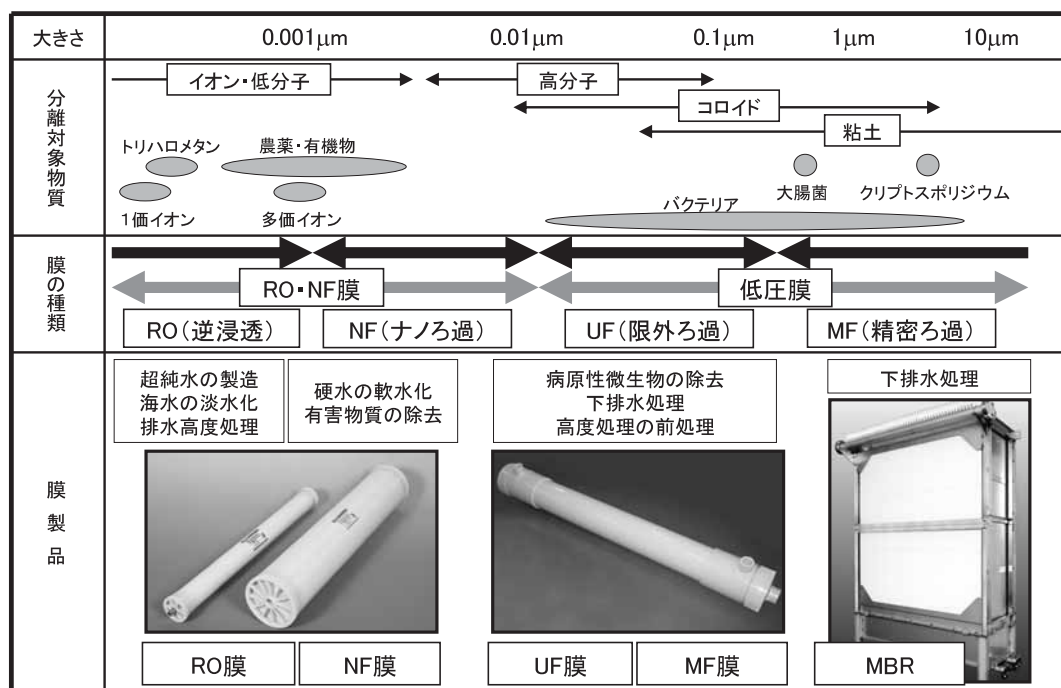


Fig. 1 Kind of separation membrane for water treatment

料を消費するために環境への負荷も大きかった。一方、RO膜による海水淡水化技術は機械的な圧力のみで運転可能であるために消費エネルギーが小さい。さらに、その値はこの30年間で3分の1に低下してきている。造水量当たりの炭酸ガス排出量でみた消費エネルギーは蒸発法の約5分の1以下であり、環境への負荷も小さい。

また、省エネ型のプロセスであるが故に造水コストも低く、蒸発法の4分の3となっている。このように省エネ化が進んだ要因としては、①RO膜価格の低下、②RO膜の性能向上、③エネルギー効率の向上等が挙げられる。

1969年に開発された中空糸ポリアミド膜エレメントの性能は、海水から真水を約15%回収する程度のものであった。すなわち、RO膜の造水量が低く、耐圧性が不十分であるため、残りの85%は濃縮水として海水に戻されていた。その後、脱塩率、造水量、耐圧性を向上させるRO膜研究により1980年前後には架橋芳香族ポリアミド複合膜のスパイラル型エレメントが開発され、真水の回収率は40%にまで向上した<sup>4)</sup>。回収率の向上は運転コストや消費エネルギーを低減し、環境負荷の軽減にもつながっている。

RO膜による海水淡水化技術は、このような技術進歩による消費エネルギーの低下に伴って1990年代から急激に普及するようになった。現在では、全世界でのRO法による海水淡水化の累計造水量は約1,000万m<sup>3</sup>/dayに達し、蒸発法に代わって海水淡水化技術の主流となっている<sup>5)</sup>。地域別では、中東、北アフリカ、

南欧を中心に10万m<sup>3</sup>/day以上の大型の海水淡水化プラントが建設または稼働中であり、最近では中国やシンガポール等のアジア地域においても導入が活発化している<sup>5)</sup>。

例えば、シンガポールのチュアスでは環太平洋地域最大の海水淡水化プラントが2005年より稼働を開始している。その規模は13.6万m<sup>3</sup>/dayで、当社のRO膜を採用した2段階プロセスにより、ホウ素規制値0.5mg/L以下を満足する高い水質を達成している。また、このプラントにおける生産水のトータルコストは、\$0.47/m<sup>3</sup>と非常に低いレベルにある。

## 2.2 海水淡水化RO膜の技術動向

海水淡水化におけるRO膜の課題は、①さらに高品位の透過水を、②省エネルギー・低コストで得ることである。これらの課題を克服する高性能RO膜を開発するために、我々は最先端の分析技術を駆使してRO膜の構造解析を進め、高性能RO膜の設計を行っている。

水質における課題の一つとしてホウ素除去がある。ホウ素は植物の生育への影響や不妊症の原因となることが指摘されている。2009年にWHOは飲料水ガイドラインを0.5mg/Lから2.4mg/Lに引き上げたが<sup>6)</sup>、ホウ素除去に対する水処理プラントの要求は依然として高い。その一方で、ホウ素はRO膜による除去が困難な物質として知られている。ホウ素は自然水中においてはホウ酸として存在し、中性付近では非解離型であるために分子径が約0.4nmと非常に小さく、塩化

ナトリウムなどの一価のイオン性物質よりもさらに除去が困難である。このホウ素を効率的に除去する高性能なRO膜を開発するためには、精密な膜設計が必要である。

当社では、陽電子消滅寿命測定法 (PALS) というナノレベルの非破壊分析技術によって、これまで測定することができなかったRO膜中の孔径解析を行った。PALSは、陽電子が物質中の電子に衝突すると $\gamma$ 線を発して消滅し、物質内の空孔が大きければその寿命が長くなる性質を利用した分析法である。

膜造水量が同等でホウ素除去率の異なるRO膜についてPALS測定を行った結果、Fig. 2に示すように、平均孔径とホウ素除去率との間に相関関係があることが明らかとなった。さらに固体 $^{13}\text{C}$ -NMR (核磁気共鳴)法によりポリアミド分子の単位構造モデルを推定してモデル分子を構築し、このモデル分子と水分子との関係を分子動力学 (MD) シミュレーションで最適化することでRO膜の孔径が0.6~0.8 nmであることを推算した。

このようなRO膜に関する基礎研究の知見を元に優れたホウ素除去性能を発現するための孔径を規定し、それを実現するためのナノレベルの分子設計を行うことで、ホウ素除去性能に優れたRO膜を開発した<sup>7)</sup>。近年における当社の海水淡水化RO膜は、詳細な構造解析に基づいた精密な分子設計によってホウ素除去率は90%から95%まで向上し、造水量は1.5倍に増加した。この高性能RO膜がこれからの世界の水問題解決に貢献するものと期待されている。例えば、アルジェリアでは地中海沿岸のマグタに超大型の海水淡水化プラントが建設され、当社の高ホウ素除去RO膜が採用された。本プラントで計画されている生産水量は50万 $\text{m}^3$ /日と世界最大規模であり、約200万人分の生活用水に相当し、環境に配慮した水資源確保に貢献する。

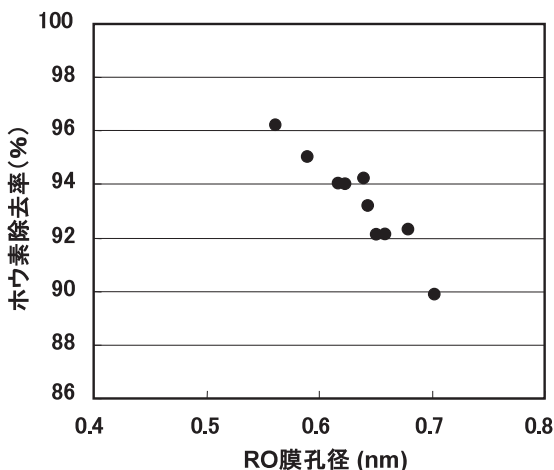


Fig. 2 Hole radius and boron rejection

Table 1 Large-scale RO membrane seawater desalination plant in the world

	国名	設置場所	造水量* ( $\text{m}^3$ /日)	稼動年
1	アルジェリア	マグタ	500,000	2011
2	イスラエル	アシュケロン	330,000	2005
3	イスラエル	ハデラ	274,000	2009
4	オーストラリア	シドニー	250,000	2010
5	スペイン	トレビシャ	240,000	2008
6	サウジアラビア	シュケイク	216,000	2010
7	アルジェリア	ハンマ	200,000	2008
7	アルジェリア	ベニ・サフ	200,000	2008
7	アルジェリア	ホネイン	200,000	2009
7	アルジェリア	モスタガネム	200,000	2009
7	アルジェリア	スーク・トレタ	200,000	2010
7	アルジェリア	テネス	200,000	2011
7	スペイン	ヴァルデレンティスコ	200,000	2008
14	UAE	フジャイラ	170,550	2003
15	サウジアラビア	ラービク	168,000	2009
16	サウジアラビア	シュアイバ	150,000	2009
17	オーストラリア	パース	144,000	2007
18	トリニダード・トバゴ	ポイント・リサ	136,380	2002
18	シンガポール	チュアス	136,380	2005
18	UAE	フジャイラII	136,380	2009
18	クウェート	シュウエイク	136,380	2010
22	オーストラリア	ゴールドコースト	132,500	2008
23	サウジアラビア	ヤンプ	128,000	1998
24	スペイン	カルボネラ	120,000	2001

\*造水量1万 $\text{m}^3$ /日は、4万人の生活用水に相当【東レ調査】

Table 1には、世界で現在稼動中または計画中の海水淡水化RO膜プラントをまとめた。海水淡水化RO膜プラントでは、20万 $\text{m}^3$ /day以上のプラントが今後も次々に稼動する予定である。

### 3. RO膜による下廃水再利用

#### 3.1 下廃水再利用の普及

最近では持続利用可能な水資源として下廃水処理水が注目を集めており、中東、シンガポール、米国、オーストラリアなどでは、すでに下廃水処理水の再利用が始まっている。下廃水処理水の再利用用途では分離膜を用いた膜分離法が採用されている。

米国においては、西海岸で下廃水再利用が早くから実用化されてきた<sup>8)</sup>。1976年から、カリフォルニア州のオレンジ郡で、約49万 $\text{m}^3$ /日の再利用水を生産する大型プロジェクトが進められ、一部運転を開始している。

オーストラリアのブリスベン市内のラゲージポイントで、6.6万 $\text{m}^3$ /日の下水再利用プラントが稼働しており、上水道や工業用水として再利用されている。下水二次処理水を、中空糸MF膜で前処理し、RO膜で浄化している。

シンガポールは水源をマレーシアに依存してきたた



Fig. 3 The world's largest municipal wastewater recycling plant (Kuwait)

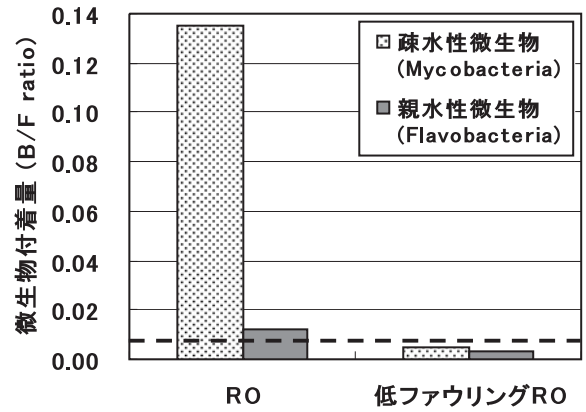


Fig. 4 Evaluation of bio-fouling

め、安価で安定した水供給を目的に NEWater プロジェクトを立ち上げ、海水淡水化・下廃水再利用を進めた<sup>9)</sup>。1970年代から、膜技術による下水二次処理水の浄化研究が行われ、再利用プラントの早期稼働に繋がった。その生産水質は、WHO 飲料水ガイドライン及び米国 EPA 飲料水基準に合致することが実証されている。2009年にはチャンギ地区に大型膜法下廃水リサイクルプラントが稼働し、再利用水は約 22.8 万 m<sup>3</sup>/日に達している。

クウェート近郊の下水処理場の処理水を 25 km 離れたスレビヤ下水処理場にパイプラインで運び、31.2 万 m<sup>3</sup>/日の再利用水を生産するプラントが建設され 2005年に稼働した<sup>10)</sup>。再利用水は灌漑用水等に使用され、これまで灌漑に使用されていた海水淡水化水やかん水は飲料水に廻される。このプラントには、当社低ファウリング RO 膜が使用されており、膜利用水処理プラントとしては世界最大のものになっている (Fig. 3)。

### 3.2 下廃水再利用における RO 膜

下水・廃水を再利用するには、MF 膜や UF 膜を用いて濁り成分や微生物、コロイドを除去し、さらに RO 膜を用いて溶存塩類や低分子量有機物を除去する。RO 膜の運転におけるトラブルの多くは、RO 膜の汚れによる透水性能の低下によるものであり、汚れの原因は微生物によるものが多く、次いで有機物の付着である。近年、Fig. 4 に示すような微生物が付着しにくい低ファウリング RO 膜が開発された。世界各地で使用されている。

## 4. おわりに

RO 膜を初めとした分離膜を使用した水処理プラントでは、膜性能やエレメント性能の向上に加え、エネルギー回収技術、前処理技術、洗浄・殺菌技術などの発達によって、より高品位の水を低コスト・低消費エネルギーで供給できるようになった。今後も水源水質は悪化し、水需要は拡大するため、さらなる①水質向上、②低消費エネルギーの実現が求められると考えられる。

当社は全ての膜を有する世界でも数少ない膜サプライヤーである。今後も、繊維・フィルム等で培ったナノテクノロジーを駆使して高性能の膜を開発し、市場に投入していく。

### 参考文献

- 1) WHO/UNICEF : Progress on Drinking Water and Sanitation : Special Focus on Sanitation (2008)
- 2) 第3回世界水フォーラム 国土交通省水資源局水資源部資料
- 3) 植村忠廣, 佐々木崇夫 : 水処理用分離膜 —— 素材, 形態による機能発現の視点から ——, 高分子, Vol. 56, No. 9, pp. 775-779 (2007)
- 4) 浄水膜編集委員会 (1 版), 浄水膜, 技報堂, pp. 140-143 (2003)
- 5) IDA Desalination Yearbook, 2006-2007 など参照
- 6) WHO ホームページ  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/boron/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/boron/en/)
- 7) 富岡他 : 日本膜学会第 28 年会予稿集, p. 33 (2006)
- 8) K. Alexander : Desalination & Water Reuse, 14(1) 27(2004)
- 9) H. Seah 他 : IWA Specified Conference on Water Environment — Membrane Technology, Seoul, W-3-4 (2003)
- 10) A. von Gottberg, M. Galloway : IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Bahamas (2003)