

# 逆浸透（RO）法海水淡水化技術の上水道分野への適用

## Application of Reverse Osmosis Sea Water Desalination Technology on Service Water Treatment

永井正彦 岩橋英夫 田中賢次



RO（Reverse Osmosis, 逆浸透）海水淡水化は、膜を利用した脱塩による造水技術であり、弊社では中東地区に大型プラント3基の安定運転実績を有する。さらに現在、低コストで、汚濁の進んだ原水へも適用できる技術研究開発を進めている。これらの技術は海水淡水化だけでなく上水道、中水道分野でも水質向上対策として適用が進むと考えられる。本報では、RO海水淡水化の技術的な特徴とそこで開発された技術が上水道、中水道分野での生産水質改善の有効な手段であることを紹介する。

### 1. はじめに

世界的な水不足が懸念される中、一方では原水の水質悪化による飲料水の品質低下が進行している。我が国では、水道水は安心して飲めないという風潮が広がり、ミネラルウォーターの消費増加、浄水器の家庭への普及が進んでいる。また、これに加えて近年、クリプトスポリジウム等の原虫類、トリハロメタン、亜硝酸性窒素などの混入が懸念され始めており、厚生労働省を中心に膜を利用した分離技術やオゾンによる酸化分解技術の上水道への適用が進められている。

また、水資源有効活用の観点から中水の利用も注目されている。これは、下水に比べて汚染度の低い水源について、簡易的な処理を行い雑用水として使用するものである。特に都市部では今後の貴重な水源の一つとして、膜分離、有機物処理の適用による普及が期待されている。

一方、20世紀後半に開発された逆浸透（RO：Reverse Osmosis）法海水淡水化技術は、21世紀を迎え、省エネルギーという優位性をいかし本格普及の時代に入った。弊社では1980年代後半より大型RO海水淡水化プラントを中東で3基

建設し、その安定運転を実現してきた。近年、世界的な造水コストの低減、汚濁の進んだ海域への適用、環境負荷の低減の要請が増加し、弊社ではそれらに対する技術開発を進めている。ここでも中心となる技術は膜分離技術である。

### 2. RO海水淡水化の現状

#### 2.1 逆浸透海水淡水化の技術的特徴

図1にRO海水淡水化プロセスのフロー例を示す。海水は殺菌後、砂ろ過に代表される前処理設備で海水中の汚れを除去する。微生物がRO膜モジュール内で繁殖したり、濁質の多い海水がRO膜モジュールに供給されたりすると膜面に生物や濁質が蓄積し性能が低下する。したがって、プラントの安定運転には前処理設備の性能が大きな影響を与える。前処理により清澄になった海水は高圧ポンプで圧力を5～8MPaまで昇圧しRO膜に供給され、供給海水の30～60%が淡水として取り出される。残りは濃縮水として膜モジュールから排出されるが、圧力を有しており回収タービン等によりエネルギーを回収した後、放流される。

海水淡水化技術においてRO法は蒸発法と比べて、①使用

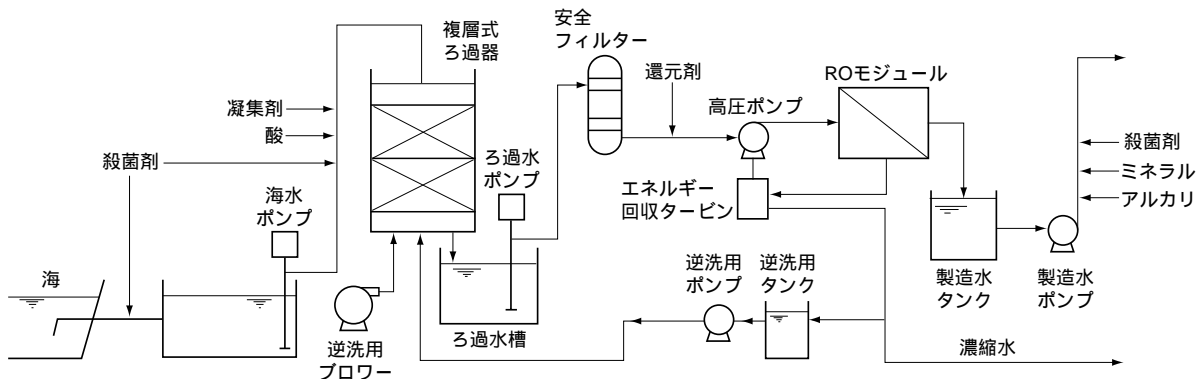


図1 RO海水淡水化プロセスフロー 代表的なRO海水淡水化プロセスフローを示す。前処理にはDMF（複層式ろ過器）を用いている。

表1 世界の陸上用海水淡水化プラント方式別一覧  
(1999年12月31日現在, 100m<sup>3</sup>/日以上)

| 方式    | 基数     | 容量 (m <sup>3</sup> /日) | 容量比率 (%) |
|-------|--------|------------------------|----------|
| 逆浸透法  | 8 924  | 11 591 025             | 44.7     |
| 蒸発法   | 2 931  | 12 826 076             | 49.5     |
| 電気透析法 | 1 558  | 1 371 699              | 5.3      |
| その他   | 185    | 120 597                | 0.5      |
| 合計    | 13 598 | 25 909 397             | 100.0    |

エネルギーが少ない, ② 生産水中に適度のミネラル分を含む, ③ 運転維持管理が容易, ④ 装置がコンパクトのような特徴を有する.

## 2.2 世界の普及状況と動向

表1に世界における陸上用海水淡水化プラントの方式別設備基数及び容量を示す<sup>(1)</sup>. RO法は前述の特徴により1990年代に急激に普及し, 既に容量の点では蒸発法とほぼ等しくなっている. また, 蒸発法に比べ小型のものが多く最近では10万m<sup>3</sup>/日規模以上のプラントも増加している.

これまで日本ではRO海水淡水化の造水コストは高いとされてきた. これは回収率40%, エネルギー回収無しの場合, エネルギー原単位が7~8 kWh/m<sup>3</sup>程度であり, 電気代が大きな割合を占めていたからである. しかし現在では, 回収率の増加(50~60%), エネルギー回収システムの適用により3 kWh/m<sup>3</sup>台の数値が得られており, 国内でも最新の造水コストは170円/m<sup>3</sup>以下と予想される. 海外では, プラント立地条件や設備仕様にもよるが, 既に65~130円/m<sup>3</sup>に到達している.

## 2.3 弊社の技術開発状況

現時点のRO海水淡水化の課題は, ① 造水コストの一層の低減, ② 汚染の進んだ原海水への対応, ③ 生産淡水の高品質化, 具体的には, トリハロメタン等塩素系有機化合物, ホウ素等水質基準の規定物質の除去である. 弊社では, これらに対応するため, 下記のような開発を実施している.

### ① 設備費及び運転費の低減による低コスト化

前処理ろ過装置のろ過速度の増加, ROシステム回収率増加により同一規模の設備でより多くの水を得るシステムの開発や, エネルギー回収システムの適用, プラント運転方法の適正化によるエネルギー原単位の低減を進めている.

### ② 砂ろ過システムの改善, 膜ろ過の導入による汚染の進んだ海水への対応

高濁質(SS10mg/L~), 有機物汚染の進んだ海域での前処理として, (a) 無機系凝集剤+高分子凝集助剤によるろ過水質の改善, (b) 薬品無添加除濁装置+通常ろ過の組合せで直接ろ過への負荷を低減する技術を開発している.

また, RO膜の化学洗浄間隔を延伸するとともにより良好な水質を得ることができる前処理としての限外ろ過(UF: Ultrafiltration)膜, 精密ろ過(MF: Microfiltration)膜の適用を進めている. 5種の膜について実海水による長時間試験を実施し, 膜の選定や逆洗, 化学洗浄の適正化を行い10万m<sup>3</sup>/日規模の試設計も終了している. 現状では設備費が砂ろ過に比べ2~3倍要するが, ろ過膜の大容量化や高フラックス化のほか, 運転条件の適正化により低減は可能である.

### ③ 水質高度化に対応する2段ROシステムの適正化

生産水水質向上のため, トリハロメタン, ホウ素については1段目透過水を再度ROで処理する2段法を確立している.

たとえばホウ素は, 海水中に4.5 ppm程度含まれ, 中性付近では分子状で存在するため, 現状の海水淡水化用RO膜の運転条件(pH 6.5~7.5)ではこの分子状ホウ素の除去率が低く, 1段ROでは国内の水質基準1 ppm達成が困難である. この場合, 2段目として低圧ROで処理し水質基準を達成する. また, 膜材質によってはトリハロメタンの除去率が悪いものがあるが, この場合も2段目にポリアミド系膜を使用すれば水質基準の達成が可能である.

## 3. 浄水処理技術の動向

### 3.1 原水中の除去対象

浄水技術の主たる目的は, 飲料水として不適当な物質の除去と殺菌である. 図2に高度浄水処理フローの一例を示す. 沈砂池で大きな砂や土を沈殿させた後, 凝集剤を注入しフロックを形成させ, 沈殿池でフロックを分離する. 処理水をオゾンに接触させ有機物を分解した後, 生物活性炭層で, 吸着作用と活性炭層で繁殖した微生物の分解作用で汚濁物質を除去する. さらに, 塩素を注入し, 急速ろ過池に供給し浄化する. 最後に消毒のため塩素を注入し配水する. 水質により構成は異なるが, 従来の浄水場ではオゾン処理及び生物活性炭層を除き同様な構成となっている.

表2に主たる除去対象を示す. 大きく不溶解性成分と溶解

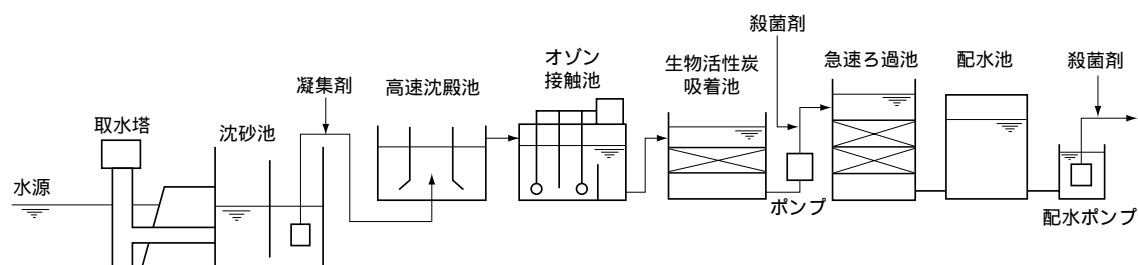


図2 高度浄水処理プロセスフロー 従来のプロセスに, オゾン接触池と生物活性炭吸着池を追加した, 高度浄水処理プロセスフロー例を示す.

表2 原水水質成分と対応技術

| 原水水質成分    |        | 除去対応単位プロセス                     |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
|-----------|--------|--------------------------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|-------|-----|-------|------|-------|------|--|
| 主たる除去対象成分 |        | 緩速ろ過                           | 凝集沈殿 | 浮上分離 | 急速ろ過 | 直接ろ過 | 接触ろ過 | 膜ろ過 | ナノろ過 | 生物処理 | 酸化処理 | 活性炭処理 | 脱ガス | イオン交換 | 電気透析 | 吸着/晶析 | 逆浸透膜 |  |
| 不溶解性成分    | 濁度     |                                |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
|           | 藻類     | 珪藻, 藍藻等                        |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
|           | 病原性微生物 | 一般細菌・大腸菌, クリプトスポリジウム等          |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
| 溶解性成分     | 異臭味    | 2-MIB, ジェオスミン等                 |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
|           | 有機物    | 色度(フミン酸, フルボ酸等), 農薬, THM 前駆物質等 |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
|           |        | 揮発性物質                          |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
|           | 消毒副生成物 | トリハロメタン, ハロ酢酸等                 |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
|           | 無機物    | 鉄・マンガン                         |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
|           |        | アンモニア性窒素                       |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
|           |        | 硝酸性・亜硝酸性窒素                     |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
| ヒ素        |        |                                |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
| フッ素       |        |                                |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |
| 硬度        |        |                                |      |      |      |      |      |     |      |      |      |       |     |       |      |       |      |  |

性成分に分けられる。病原性微生物であるクリプトスポリジウムやジアルディアは大きさ約5ミクロン程度原虫類で、激しい胃腸障害を生じ死に至る場合があり、米国内だけでなく日本でもすでに被害の報告もある。また、有機物としてはトリハロメタンやその前駆体だけでなく今後はフタル酸ジエチルヘキシル等環境ホルモンの疑いがあるものも除去の必要性が生じると考えられる。

無機物としては、水源の環境汚染特に農業、畜産系排水の混入により、乳幼児に有害な硝酸、亜硝酸性窒素の増加が懸念されており除去ニーズが増加している。さらに、重金属イオン（ヒ素、セレンなど）、ホウ素などの除去が必要なケースも出てきている。

### 3.2 分離・処理技術の動向

表2に除去対象成分及び対応する単位プロセスを示す。除去を効率的に行うために膜技術を中心に、次のような開発が実施されている。

#### ① 凝集沈殿、ろ過技術の改善

凝集剤として塩化第二鉄や高分子凝集助剤を用いて、不溶解性成分だけでなく有機成分も吸着して除去する。

#### ② 膜ろ過（MF/UF）

不溶解性成分特にクリプトスポリジウム等病原性微生物の除去を目的として膜ろ過の導入が進んでいる。ろ過水質は良好であるが、原水水質によっては膜差圧が上昇し頻繁な化学洗浄が必要な場合がある。また、コスト低減のため、膜面積当たりの透過水量を増加させる必要がある。

#### ③ ナノろ過（NF：Nanofiltration）

溶解性成分、特にトリハロメタン前駆体、色度、重金属イオンの除去が単一のプロセスで可能である。

#### ④ 酸化処理

酸化性物質としてオゾンを用い殺菌及び有機成分の低

減を図る。

#### ⑤ 活性炭処理

活性炭の吸着作用により有機性物質を吸着除去する。

#### ⑥ RO膜処理

RO膜では低分子量の有機化合物、硝酸、亜硝酸性窒素等も含めほぼすべての物質の除去が可能である。

### 3.3 膜処理技術

図3に水処理の対象になる物質の大きさと膜の分離孔径範囲を示す。平成12年現在で国内浄水場の処理水量のうち0.1%が膜による処理となっている。膜種は、UF膜、MF膜であり主として濁質及び病原性微生物の除去を目的とし、導入が進められている。米国では、色度成分除去のためにNF膜を導入している浄水場もある。

### 3.4 殺菌技術

国内では塩素殺菌が主流であるが、クリプトスポリジウムは塩素に対する耐性があり、物理的に除去する必要がある。現行の砂ろ過を中心とする急速ろ過では99%程度しか除去できないが、MF/UF膜では5N(99.999%)以上の除去が可能である。

また、有機物は塩素と反応してトリハロメタン類を生成するため、オゾンなどで有機物を分解することによりトリハロメタンの生成量を減らす方法が検討されている。

## 4. 弊社の開発技術の浄水処理への適用

図1及び図2を比較すると、RO海水淡水化プラントは浄水場と類似した構成を有することが分かる。これはRO膜の安定運転のために前処理として、除濁、有機物除去、殺菌が必要なためであり、RO海水淡水化プラントは脱塩装置を有する浄水プラントと考えることができる。また技術の動向として除濁、有機物除去の効率を上げるために砂ろ過の高度化や膜導入を進めている点も同じである。さらに、浄水処理で

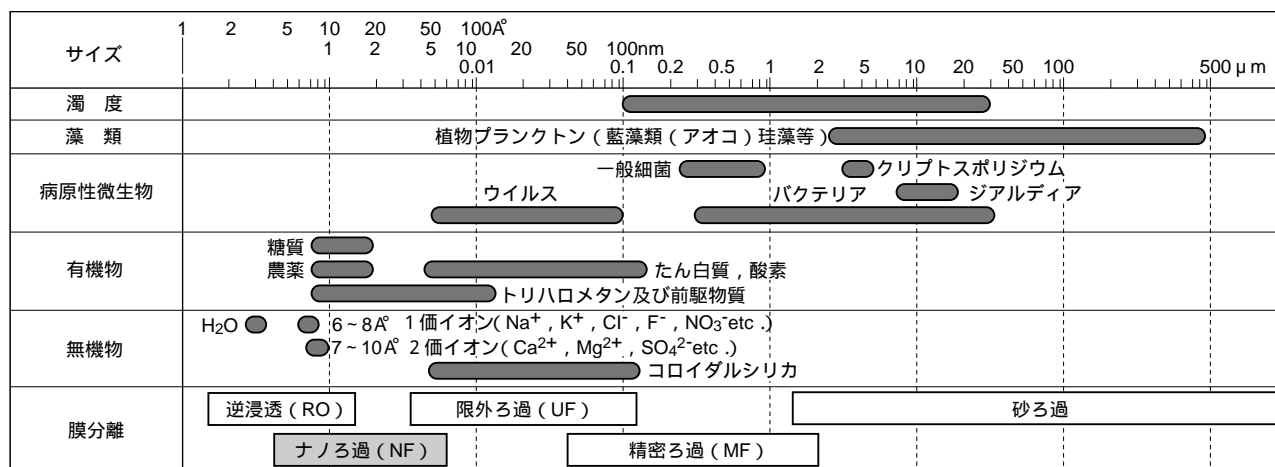


図3 物質のサイズと膜分離 水処理特に浄水処理で対象となる成分の大きさ及びそれに対応する膜分離技術を示す。

も分子量の小さな物質の除去を目的としてROやNFが適用されつつあるが、海水淡水化でも水質向上のため1段目の透過水を再度ROで処理する2段ROを用いる場合がある。

弊社は前述した技術開発を進めているが、これらは下記のように直接浄水処理に適用できる技術である。

#### ① 砂ろ過技術の改良（高分子凝集助剤，除濁装置）

弊社では海水を対象としており、塩濃度に起因する界面現象で多少の差異はあるがそのまま淡水処理へも適用できる。

#### ② MF/UF膜ろ過の前処理への適用

弊社が海水用として評価している膜はいずれも水道用膜であり、運転方法も浄水処理へ適用可能である。

#### ③ 2段ROシステムによる水質高度化

トリハロメタンなど水質規制の対象物質の除去には弊社が2段目として用いている低圧ROが利用できる。

## 5. 経 済 性

膜分離技術、特にRO海水淡水化は運転圧力が高く、造水コストが高いと考えられていた。しかし、膜の改良、エネルギー回収システムの導入、水処理分野での膜の市場拡大による膜コストの低減等により造水コストが大きく低減してきている。50,000 m<sup>3</sup>/日規模の試算例を表3に示す。プラント立地条件により変化するが、約150円/m<sup>3</sup>以下は十分可能である。平成11年度の上水道の給水原価は平均181円/m<sup>3</sup>であり、海水淡水化も水源として競争力のあるレベルに到達している。また、上水道や中水道へ適用する場合、これらは一般に海水に比べて塩分が低く、そのため運転圧力が低くなり電気代は5～10分の一程度となる。回収率も80%以上が可能であり設備費も低減できるので、上水道、中水道向け設備として十分なコスト競争力を有するものと想定される。

## 6. ま と め

21世紀の水問題に対して、膜処理技術を中心とする海水淡水化技術は、量の確保、質の向上双方の点で有効なツールとなる。さらに、膜分離技術は、海水だけでなく上水道、中

表3 海水淡水化プラント造水コスト試算例

| 試算条件 |                          | 試算結果        |                            |           |      |
|------|--------------------------|-------------|----------------------------|-----------|------|
| 項目   | 使用数値                     | 項目          | コスト<br>(円/m <sup>3</sup> ) | 割合<br>(%) |      |
| 生産水量 | 50,000 m <sup>3</sup> /日 | 運<br>転<br>費 | 電気代                        | 60.0      | 41.5 |
| 回収率  | 50%                      |             | 膜代                         | 4.6       | 3.2  |
| 稼働率  | 95%                      |             | 薬品代                        | 8.8       | 6.1  |
| 原単位  | 5 kWh/m <sup>3</sup>     |             | 補修費                        | 5.8       | 4.0  |
| 電気代  | 12円/kWh                  |             | 労務費                        | 9.8       | 6.8  |
| 膜交換率 | 年10%                     |             | 小計                         | 89.0      | 61.6 |
| 建設単価 | 20万円/(m <sup>3</sup> /日) | 設備償却費       | 55.6                       | 38.4      |      |
| 耐用年数 | 15年                      | 合計          | 144.6                      | 100       |      |
| 利子率  | 5%                       |             |                            |           |      |

水道の分野でも大きく展開していくものと期待される。

しかし、膜の性能を最大限発揮させるには、原水の水質を正確に把握して適切な前処理を選定することが肝要である。これまでに得られた知見を生かし、今後とも各種水問題に対する最適なソリューションの選定に注力していきたい。

#### 参考文献

- (1) Klaus Wangnick, "IDA Worldwide Desalting Plants Inventory Report No.16", Wangnick Consulting (2000)



永井正彦  
技術本部  
長崎研究所  
化学研究室主席



岩橋英夫  
長崎造船所  
火力プラント設計部  
プラント設計2課主  
席 工博



田中賢次  
長崎造船所  
火力プラント設計部  
プラント設計2課主  
席