

## 膜分離法による汚水処理とその問題点

陳 岩\*・吉田 勲\*\*・猪迫 耕二\*\*

平成8年6月24日受付

### A Study on Treatment of Wastewater by Membrane

Yan CHEN\*, Isao YOSHIDA\*\* and Koji INOSAKO\*\*

The technical innovation is necessary for the treatment of wastewater because the phosphorus and nitrogen are so much contained in secondary treated wastewater that eutrophication could not be suppressed even if the water purity in the treated wastewater satisfied the standard of effluent water. Membrane filtration on treatment of wastewater is recently attracting the attention to purify the wastewater to a higher degree.

In this paper we describe the concept, history, theory and use of the technology on membrane filtration through the microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), reverse osmosis (RO). The membrane filtration has a lot of advantages in treatment of wastewater, but it has some defects as the fouling, plugging, scaling, etc.

This new technology on treatment of wastewater is very important not only in an arid area, but also in the country which is abundant in water resources as Japan or China. So we can foretell that this technology on treatment of wastewater will be used more widely as those problems are being solved.

#### はじめに

地球上に存在する生物にとって水は、生きて行くために貴重な資源である。人間社会においては、水を中心に文明が発生し、また水が原因でそれが消滅している。社会は発展し複雑化しても、水の重要度は全く変わっていない。

ところで水は、地球上において一定量しか存在せず、それが循環・再利用することで保たれている。当然、水

が循環・再利用されれば、水も汚れるはずであるが、地球規模での循環では自然のメカニズムにより、見事に浄化され元の純粋なものとなる。しかし、人間社会の小規模な水の循環を見ると水の自浄化は難しい。その原因として社会の複雑化や多様化といったものが挙げられる。一方、社会の複雑化や多様化により水処理技術の発達も同時に進んできている。

過去、数多くの水処理技術が考案され、開発され、商品として売られてきた。この半世紀に商品になった浄水

\*鳥取大学大学院連合農学研究科

*\*The United Graduate School of Agricultural Science, Tottori University*

\*\*鳥取大学農学部農林総合科学科生存環境科学講座

*\*\*Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture, Tottori University*

処理装置に限っても、凝集沈澱池、様々な高速凝集沈澱池、傾斜板沈澱池、各種の自動ろ過池、汚泥処理装置などがある。

これらのうちのあるものは今なお現役の主力商品であり、あるものは役目を終えて引退しつつある。性能や販売力の差から同種の商品に敗退して早々に姿を消したのものもある。開発初期のプラントが付属装置の不備から不調におちいり、営業担当の販売意欲をそいだ結果、以後売られることなく多額の開発費用が回収できなかった技術もある。逆に、売れ足の純かった技術を世に受け入れられやすい外観にすることによって、成功商品に変えた例もある。

この数年、膜分離がにわかに脚光を浴びている。膜分離技術は海水の淡水化に始まり、純水製造、し尿処理を経て、いま上水道に適用されようとしている。膜のように逆浸透、限外ろ過、精密ろ過へと、緻密なものから粗なものへ技術が拡散している例は他分野にはない珍しいことではあるが、このことによって、膜は固液分離のすべての分野に適用可能になりつつあり、水処理技術の選択の幅を増やしていることは間違いない。

### 膜分離法の発達史

#### 1. 膜の出現<sup>8)</sup>

膜を用いて物質の分離を行う方法はまず、1854年にGrahamによる透析現象(dialysis)の発見から始まるとしてもよい。以来、多くの生理学者たちは、天然膜などを使ってタンパク質溶液から無機塩などを除くために利用してきた。その後、セロファン膜や各種高分子樹脂膜が開発されたが、物質の透過速度が遅かったために、研究用に利用されたのが主で、工業的にはビスコース浸漬液またはマーセル加工液から水酸化ナトリウムの回収と、耐酸性のビニル膜が酸および金属塩の回収に使われたにすぎない。医療用としては、腎不全患者の治療用人工腎臓の透析膜にセロファンまたはキュプロファン膜が広く使われている。このような透析法は膜の両側に存在する濃度差に基づく拡散現象を利用して分離を行っている。

一方、膜に接している溶液を加圧して膜の両側に圧力差を生ぜしめて、膜を透過するものとしめないものに分離する方法がある。ろ過がこれに相当し、濾紙を用いた固形物の分離法は広く研究室で行われている。濾紙の目をさらに小さくして、コロジオン膜やセロファン膜のような膜を用いるとコロイドを分離することが可能となる。このような分離法の最初の報告はSchmidtによって

1861年になされている。通常の粒子より、さらに細かい細菌、タンパク質、コロイドのような微小体をろ過できるというので、このような膜を用いるろ過を限外ろ過法(ultra-filtration)と呼ぶようになった。その発達の状況は1930年に出たfurryのレビューに詳しく述べられている。しかし限外ろ過の発達は1935年頃を境として一時停滞した。

このように足踏みをしていた膜分離法が大きく発展するきっかけとなったのは、1952年7月3日にアメリカで制定された塩水法(Saline Water Act)であった。海水から安価な淡水を得る方法を研究するために、内務省に塩水局(Office of Saline Water,略してOSW)が設置された。逆浸透法はその方法の一つとして1953年始めにフロリダ大学のReidによって提案されたものである。

#### 2. 逆浸透法の発展

逆浸透法が実際に可能であるかどうかは、溶媒である水を通して、溶質である塩を通さないような性質をもつ半透膜があるかどうかにかかっている。フロリダ大学では、種々の市販の高分子膜を用いて、このような性質をもつ膜の探索を行った。1957年に発表されたその研究結果では、酢酸セルロース膜が食塩の96%以上を分離する能力をもっており最良の膜であることがわかった。しかしながら、水の透過流束(透過速度)は極めて小さく、 $6\mu\text{m}$ 程度の非常に薄い膜を用いて100気圧で $3\times 10^{-5}\text{cm/sec}$ 程度、つまり $1\text{m}^2$ の半透膜を用いて、1日に得られる淡水の量はわずかに25ℓであった。実験室でよく用いられる膜面積が $10\text{cm}^2$ 程度の装置では、1日25ml程度のサンプルが得られるにすぎなかった。

一方カリフォルニア州では、水不足の対策から、州独立で水資源の問題、特に海水淡水化の研究開発に取り組んできた。その一つとしてロスアンジェルスのカリフォルニア大学(UCLA)では、Sourirajanらが独立に逆浸透法の研究を進めていた。半透膜として、酢酸セルロース膜および酢酸セルロース膜を用いるとき、食塩の分離率が94.4~99.2%となることを見出した。しかし透過流束は、前者で85気圧で $0.14\times 10^{-5}\text{cm/sec}$ 、後者では272気圧で $0.04\times 10^{-5}\text{cm/sec}$ とごくわずかであった。そこで、市販の酢酸セルロース製の限外ろ過膜(Schleicher & Schuell社製)を80~90℃で熱処理して、分離率96%で透過流束を約10~5cm/sec(100気圧)まで上げることに成功したが、それ以上増加させることはできなかった。そこで、市販の膜をあきらめて、自分たちで膜を作ることを試みた。Dobryの仕事にヒントを得て、LoebとSourirajanは1960年に新しい非対称膜の製膜法の開発

に成功した。この製膜法によって得られた膜は、100気圧で食塩の分離率98.6%、透過流束は $0.3 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{sec}$ であり、その膜厚は約 $100 \mu\text{m}$ もあり、フロリダ大学の $6 \mu\text{m}$ の膜に比べてはるかに丈夫でありながら、流束は約10倍にも増大している。1 $\text{m}^2$ の膜を用いれば、1日に290 $\text{l}$ の水を得ることができる。また100 $\text{cm}^3$ 程度の実験装置でも1時間で120 $\text{ml}$ もの試料を得ることができるようになった。

こうして、逆浸透法は有名になり、経済性のある分離方法として注目を集めるようになった。そして方々で研究が開始されると共に、実用向けの装置も開発されることになった<sup>8)</sup>。

現在、海水の淡水化において、世界最大のプラントは1989年竣工のサウジアラビア・ジェッダ市にある処理能力56,000 $\text{t}/\text{d}$ のもので、中空糸系逆浸透膜により海水中の溶解正塩類43,300 $\text{mg}/\text{l}$ を2,500 $\text{mg}/\text{l}$ 以下にし、蒸発法で得られた水と混合して飲料水とする<sup>5)</sup>。

灌漑水のための淡水化においては、アメリカのアリゾナ州ユマのコロラド川流域塩水管理計画(ユマ計画)が有名で、コロラド川流域の塩分の高い河川水を逆浸透膜で脱塩して農業に利用している。完成時の処理水量は280,000 $\text{t}/\text{d}$ の世界最大の逆浸透膜処理施設になる<sup>10)</sup>。

### 3. 限外ろ過膜の出現

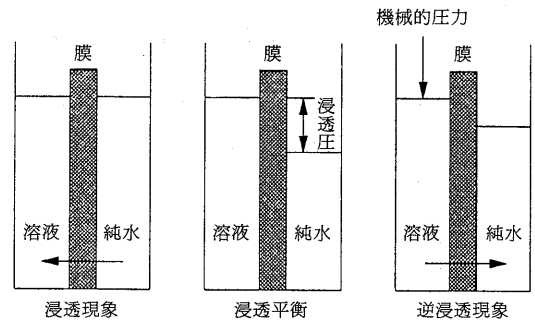
マサチューセッツ工科大学のMichaelsはコロイドの研究から、酸性高分子電解質と塩基性高分子電解質を種々の比で混ぜて、水-アセトン-臭化ナトリウム系の溶剤を用いて膜をつくり、それぞれの目的に合致した高い透過流束をもつ限外ろ過膜を作った<sup>8)</sup>。

1987年にコロラド州のキーストンで外圧式のポリプロピレン中空糸MF膜(公称孔径 $0.2 \mu\text{m}$ )を用いた給水量105 $\text{m}^3/\text{d}$ の膜ろ過型浄水場が建設された。

1988年フランスのアモンコートで内圧式のセルロース系中空糸UF膜(公称孔径 $0.01 \mu\text{m}$ , 排除分子量100,000)を用いた給水量240 $\text{m}^3/\text{d}$ の浄水場が建設され、1989年にはフランスのセントモーリスでセラミック製マルチルメンMF膜(公称孔径 $0.2 \mu\text{m}$ )を用いた給水量2,000 $\text{m}^3/\text{d}$ の浄水場が建設されている<sup>14)</sup>。

### 膜分離法の原理

第1図に膜による浸透および逆浸透の概要を示す。この場合、膜を介して存在する濃度勾配に基づいて「拡散」(diffusion)が、水については純水側から溶液側へ、溶質については純水側へと起こる。もし膜に存在する細孔の直径が、溶質の有効直径と比較して充分大きければ、



第1図 分離膜による浸透及び逆浸透

自由拡散と同一の現象となる。膜の存在は単に拡散に対する有効面積の減少にはかならない。もし細孔径が溶質の大きさ程度となるならば、溶質に対してのみ選択的に働く抵抗が発生するようになる。「透析」はこのような選択的抵抗に基づく拡散速度の差を利用している。例えば、コロイドは通さないが、小さな溶質は通すというような膜を用いれば、塩のような溶質は純水側へ、水は溶液側へと移動して、コロイドの精製が可能となる。「加圧透析」においては、溶液側に充分な圧力を加えて、溶液側から水側へ水力学的な流れを生ぜしめ、水側よりの分子拡散流れの量と補償に合うようにする。

このようにすれば、コロイドなどを希釈することなく精製することが可能となる。もし膜がすべての溶質に対して不透過であるならば、水の溶液側への拡散のみが生じる。これが「浸透現象」(osmosis)である。浸透平衡においては、溶液側に浸透圧に相当する圧力と加えることによって、水の分子拡散流れに見合う量だけの水の流れを生ぜしめ、動的平衡を達成している。

このときの圧力は「浸透圧」(osmotic pressure)と呼ばれる。もし圧力を浸透圧以上にすると、溶液側から純水の流出が起り、溶質が濃縮される。これを古くは限外ろ過と呼んでいたが、現在では浸透圧の関与が著しい低分子が溶質の場合には逆浸透(reverse osmosisまたはhyperfiltration)、高分子、コロイドのように浸透圧をほとんど示さない物質を溶質とする場合に限外ろ過と呼ぶようになっていく。

ここでみたように透析の場合には濃度差によって、主として溶質が膜を透過し、逆浸透、限外ろ過の場合には圧力差を推進力として溶媒(ここでは水)が膜を透過して、分離が行われている。つまり、膜は単に選択透過性を有した隔壁にすぎず、膜を利用して分離を行うためには何らかのエネルギーを投入してやらねばならない。

膜分離の目的には、化学的、力学的、電気的エネルギーが用いられる。その各々に対応して膜分離法の名称が付されている。透析法（Donnan 透析法も含む）では濃度差が、電気透析法（イオン交換透析法も含む）では電圧が、逆浸透法、限外ろ過法、精密ろ過法（ガス透析法も含む）では圧力差（水力学の力でそのほか、遠心力、重力も可）が推進力として用いられる。

エネルギーを投入するための駆動力と、それに対応する透析および浸透現象の名称を第1表に示す<sup>3)</sup>。

### 分離膜の種類

膜ろ過は圧力差を駆動力とする膜分離であり、大別して精密ろ過（microfiltration, MF）、限外ろ過（ultrafiltration, UF）、逆浸透（reverse osmosis, RO）に分けられる。

分離膜の種類によって、それぞれが操作圧力、分離対象、分画分子量などについて、第2表のように異なっている<sup>4)</sup>。

第1表 駆動力及び透析と浸透

駆動力	透析	浸透
電位差	電気透析 (electro dialysis)	電気浸透 (electro osmosis)
圧力差	圧透析 (piezo dialysis)	逆浸透 (reverse osmosis)
濃度差	透析 (dialysis)	浸透 (osmosis)
温度差	熱透析 (thermo dialysis)	熱浸透 (thermo osmosis)

第2表 分離膜の操作圧力、分離対象、分画分子量

名称	分離媒体、膜	分離粒径 分画分子量	操作圧力 (Kgf/cm <sup>2</sup> )
ろ過 (Filtration)	ろ紙、ろ布、ろ過助剤	> 1 μm	0.1~2
精密ろ過 (Microfiltration)	精密ろ過膜 (マイクロフィルタ)	0.025 μm ~10 μm	1~5
限外ろ過 (Ultrafiltration)	限外ろ過膜 セルロース系、各種の合成高分子、高分子電解質など	分画分子 1,000~300,000 (コロイド、高分子)	1~10
逆浸透 (Reverse Osmosis)	逆浸透膜 非対称性膜、酢酸セルロース、芳香族ポリアミドなど	分画分子量 350 (無機塩類~シロ糖)	5~100

### 1. 精密ろ過膜（microfiltration : MF）

高分子膜のMFモジュールは、平膜を用いるカートリッジタイプのもが工業的に用いられてきたが、最近ではポリスルホンやポリプロピレン、ポリエチレンの中空系MF膜（MFや限外ろ過では径が1~2mm程度のものはキャピラリー膜と呼ぶ場合も多い）が実用化されている。家庭用浄水器に使用されているMF膜はすべて中空系膜である。

無機MF膜はアルミナの管状膜、マルチチャネル膜が実用化されており、すでにフランスでは10年以上の実績を有している。高分子MF膜は比較的耐熱性を有しており、蒸気滅菌も可能なため、無機MF膜の耐熱性は必ずしも利点にはならないが、強度や耐久性は大きなメリットである。最近ではMF膜もクロスフロー方式で使われることが多く、この場合にはスケーリングによる膜透過流束の低下を防ぐため、原液流速を高く保つことが大切である。しかしMFでは懸濁液を処理する場合が多く、高分子膜は懸濁粒子により膜表面がダメージを受けやすく高流速での運転が困難であった。これに対し無機膜はこのようなダメージの心配がなく、5~7m/sといった高い原液流速が採用され、高い膜透過流束が得られている。

### 2. 限外ろ過膜（ultrafiltration : UF）

最初に開発された高分子電解質UF膜は、工業的には大規模に使用されず、代わって酢酸セルロース（CA）膜が実用化された。UFの応用では膜の汚れ（ファウリング）による膜透過流束の低下が大きく、1日に1回といった頻繁な膜洗浄が必要な場合が多い。また食品やバイオ分野では衛生性維持のために熱湯や、蒸気による洗浄、殺菌も必要となる。しかしCA膜は耐熱性、耐pH性が低いためこのような洗浄、殺菌ができず、実用対象が限られていた。

耐熱性、耐pH性の向上を目的に新しい膜素材の探索が行われ、ポリスルホン（PS）膜が実用化された。この膜はpHのほぼ全域で使用可能であるが、最高使用温度は70~80℃程度で、現在では最高使用温度90℃とされに耐熱性の高いポリエーテルスルホン（PES）膜が実用化されている。ポリフッ化ビニリデン（PVDF）膜も同様の目的で開発されたものである。

一般に親水性の素材ほどファウリングは生じにくい。現在最も広く用いられているPS膜は疎水性のため、ファウリングの面からは不利である。PVDF膜も同様である。これに対し親水性のポリビニルアルコール系膜（ポリオレフィン系膜）は耐熱性や耐pH性では疎水性膜に劣る

ものの、ファウリングが生じにくいという点では優れており、用途によっては広く用いられている。ポリアクリロニトリル膜はUFの最初の工業的実用化例である電着塗装廃液処理用に開発されたもので、ほとんどがこの用途で使用されている。

耐熱性が上がったとはいえ高分子UF膜ははまだ蒸気滅菌には耐性がない。そこで蒸気滅菌が可能な無機素材のUF膜の実用化が急速に進んできている。現状では高分子膜に比べ高価であること、中空系膜がないのでモジュール当たりの膜面積が小さく大量処理に向かないなどの問題から、その用途は医薬品原料のバイオ生産などが主になっている。

3. 逆浸透膜 (reverse osmosis : RO)

最初に実用化されたRO膜のCA膜は、塩阻止能力をもつ薄い緻密な層が表面にあり、それを多孔質の支持層が支える非対称構造を有していた。高い阻止性には緻密構造が必要で、これが薄いことで透過抵抗が小さく高い透過流束が実現できる。膜の強度は支持層が発現するが、これは多孔質であるため透過抵抗にはならない。

このような構造により、アメリカのノーススター研究所では阻止率の高い緻密薄膜と耐圧性に優れた多孔質支持層とを別々の素材でつくり、これを張り合わせることで高塩阻止率と高透過流束とを示す膜をつくる方法を1964年に提案した。この種の膜は現在では複合膜と呼ばれている。

最初の海水淡水化用の実用複合膜は1976年、UOP社からPA-300という膜が市販され、その後1980年にFilm Tech社がFT-30膜を、1981年に東レがPEC-1000膜を開発した。現在では3.5wt%NaClの海水を一回これらの膜を透すのみで、200ppm以下の淡水を50気圧の圧力で得ることができる。

これらの複合膜は支持層がポリスルホンで、表面の緻密層はポリアミドを素材として界面重合法で極めて薄くつくられている。モジュールはスパイラルが一般的である。現在ではFilm Tech社、東レ、日東電工が世界の三大複合膜メーカーとなっている<sup>6)</sup>。

4. 膜モジュールの形状による分類

精密ろ過膜、限外ろ過膜、逆浸透膜は、膜そのものだけでは実用化できない。工業的な規模で実用化できるようにした形状のものを、膜モジュールと呼んでいる。代表的な膜モジュールは、その形状から四つに分類されている。

- ①平膜型
- ②スパイラル型

- ③チューブラー型
  - ④中空系型 (キャピラリー ホロー ファイバー)
- 各モジュールにはそれぞれ長所、短所があり、それらの長所が十分に発揮できる分野ごとに使い分けている。第3表に各モジュールの特徴を示す。

①平膜型モジュール

平膜型モジュールは、その名前のとおり、原液が通る断面はスリット状の四角形である。流路の隙間高さは、0.1~3mm程度であり流路の中は空洞である。第2図に平膜型モジュールの概要を示す

②スパイラル型モジュール

スパイラル型モジュールは平膜流路の中にネット状のスペーサーを挿入して、のり巻き状にしたものである。単位当たりの透過水量は比較的大きく、また、目づまりに対しても比較的強いため用水処理などに最も一般に用いられている。第3図にスパイラル型モジュールの概要を示す。

③チューブラー型、中空系型モジュール

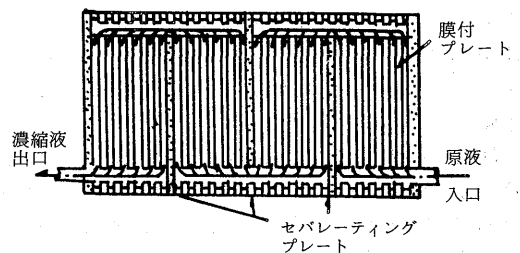
チューブラー型と中空系型の膜の形状は、文字どおり円筒で、その太さ、すなわす直径の違いで、次の三つに分類している。

- A. チューブラー : 直径5.5~25mm
- B. キャピラリー : 直径1~5mm

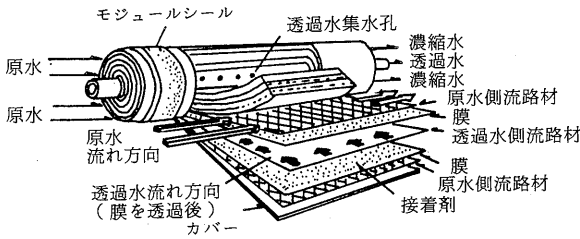
第3表 各種膜モジュールの特徴

項目	平膜型	スパイラル型	チューブラー型	中空系型
対SS許容性	◎	○	◎	△
膜の洗浄性	◎	○	◎	○
膜充填性	○	○	△	◎
膜交換の容易さ	○	◎	△	◎
用途例	高濃度SS含有水	海水脱塩	高濃度SS含有水	高濃度SS含有水

(◎:最良 ○:良 △:普通)



第2図 平膜型モジュールの一例



第3図 スパイラル型モジュールの一例

## C. ホロー ファイバー：直径0.1～1 mm

当然のことながら管形の細いものほど単位容積当たりの表面積（比表面積）を大きくとれる。管形の太いチューブラー型では比表面積は小さいが、管が太く空洞であるため、SSを含む液体を通水することができる。主として、チューブラー型は限外ろ過膜のモジュールに用いられている。

第4図に中空糸型モジュールの例を示す。第5図にチューブラー型モジュールの例を示す。

また、円筒の内側からろ過するか、外側からろ過するかの違いで異なる分類ができる。円という形状は、内圧に耐えることができ、また管形の細いものは高い外圧にも耐えることができる。従って、管形の細いもの（キャピラリーホローファイバー）は、膜素材そのもので圧力に耐えるモジュールを構成することができる。しかし、管形の太いチューブラーの場合には、内圧（または外圧）に耐える保護管が必要である。

## 膜分離法の汚水処理への適用

## 1. 膜分離法の水処理への適用

## (1) 水処理・水製造に

水処理・水製造分野において膜分離法は海水、かん水の淡水化を中心に発展し、1991年末のデータでは世界の淡水化量1,612万 $\text{m}^3/\text{d}$ のうち逆浸透法によるものが33.1%を占め、この割合は年々増加してきている。また、日本国における飲料水用と工業用を合わせた淡水化プラント設置状況では、逆浸透法の占める割合がさらに高く、造水能力の56.9%となっている<sup>9)</sup>。

湖水、農業用タメ池の水、河川水の水の3種類の水に無機凝集剤PAC（ポリ塩化アルミニウム）と高分子凝集剤を用いて凝集化し、得られた混合液を分画分子量10万と100万のUF膜を用いて限外ろ過し、その浄化能力を検討した。この場合に、初期操作圧力は0.6 $\text{kg}/\text{cm}^2$ 、循環流

量は約250 $\text{ml}/\text{min}$ である。

湖水：直接に限外ろ過膜で処理できる。

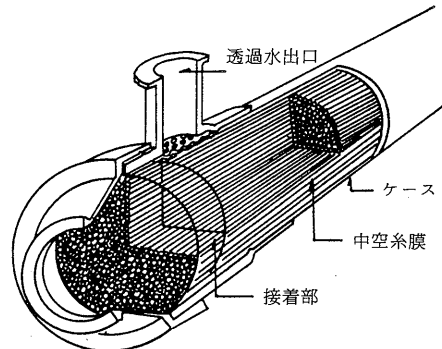
農業用タメ池の水：PACで凝集し、限外ろ過膜で処理できる。

河川水：PACまたはPACとPA-365で凝集し、限外ろ過膜で処理できる<sup>1)</sup>。

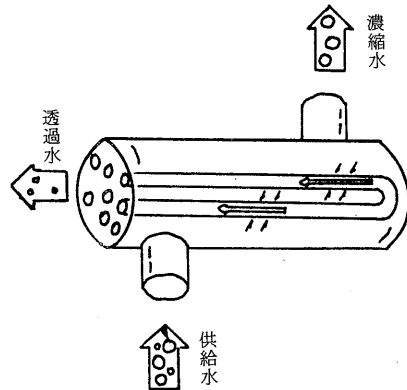
(2) 工場排水に 工場排水の膜分離処理は、鍍金排水や食品工場排水などでみられるように物質回収を主な目的として行われてきた。タンパク質、糖類、油、塗料など、回収物質は多岐にわたり、この点からは、膜分離はむしろ物質回収としての製造プロセスの一つとして位置づけられる。もちろん多量の水を消費する場合は水の再利用の観点から水回収も行われ、総合的に水処理へとつながってきた。

## (3) 水道における浄水処理に

水道における浄水処理にも限外ろ過や精密ろ過が適用されようとしている。例えば、湖水を上水道源とするために、富栄養化した湖水を利用した場合には、ラン藻類



第4図 中空糸型モジュールの一例



第5図 チューブラー型モジュールの一例

を除去しなければならない。ラン藻類の *microcystis* はトリハロメタンや放線菌によるカビ臭の生成の全駆物質となる有機物を生産する。また、*microcystis* の中には毒性物質を生産する種が確認され、毒性物質の分子構造も明らかになっている<sup>11,7)</sup>。

膜ろ過設備の維持管理の容易さが、特に小規模水道への適用に際し魅力となっている。また、微細粒子やコロイドを化学薬品の添加なしで除去できることや、細菌、ウイルスの除去も期待できることも膜ろ過の利点である。

#### (4) ビル中水道に

ビル中水道（ビル排水再生利用システム）への適用は特に盛んで、諸外国に類例を見ない実績が積み重ねられてきている。日本国では、都市部の再開発などによる局所的な水需要の増大に対し、水資源の節約や既存の下水道は負荷の増大に対する基本的対策として、中水道が位置づけられているからである。

膜処理は大体数十トンの処理施設、言いかえると小規模に適用している。分画分子量が20,000と100,000の二種類の膜を、それぞれ第1段膜と第2段膜に用いてし尿を処理している<sup>12)</sup>。

例えば、東京都の場合、指導指針により一定規模のビル（延べ床面積30,000㎡以上または再生循環計画水量100㎡/d以上の建築物）における中水道設置を推進してきている。また、上下水道料金の通増性により、大口の利用者ほど節水による経費節減の効果は大きく、中水道設備へのインセンティブは高い。

## 2. 膜分離法の汚水処理への適用

### (1) 下水処理に

下水処理として、活性汚泥法と限外ろ過の組み合わせプロセスは、アメリカですでに1960年代に検討されていた。膜分離により汚泥濃度を高めることができること、それにより装置がコンパクトにできること、余剰汚泥の生成量が少ないことなどが、当時より膜分離の有利な点として指摘されていた。特に膜分離であるため汚泥の沈降性に処理水質が全く依存しない点が大きな特長である。最近では、好気性処理だけでなく嫌気性処理との組み合わせや、精密ろ過膜の適用など、様々な角度からの検討が進められている<sup>13)</sup>。

### (2) し尿処理に

日本国ではし尿処理への膜ろ過の適用も進んでいる。下水道未整備地区の汲み取りし尿と浄化槽汚泥はし尿処理場に運搬され処理されている。し尿処理は諸外国にもあまり例を見ない日本国に特徴的な処理システムである。し尿処理施設の処理水準に対する要求は厳しく、窒素、

リンの除去や色の除去など、いわゆる高度処理の導入がなされるようになってきている。後段の高度処理への水量負荷を軽減させることと効率的な脱窒を達成するため、前段の生物処理法には無希釈あるいは低希釈の高負荷脱窒処理がされている<sup>2)</sup>。

しかし高負荷での運転のため生物濃度が高くなり、従来の重力式沈澱池では、十分な固液分離を安定して行えないという問題点があった。このような問題点を克服する一つの方法として、膜ろ過の導入が図られたわけである。膜分離技術が排水の高度処理システムの構成要素として適用され実用に供されている好例といえる<sup>9)</sup>。

### 膜分離法の特長と問題点

膜分離法の特長をまとめて、次のように挙げられる<sup>1)</sup>。

- ①水中の多種成分の当時除去が可能である。
- ②処理水質が安定している。
- ③設置面積が少なく、コンパクトな施設になる。
- ④操作が簡単で、全自動化ができる。
- ⑤凝集剤を使用せずに水中の微粒子が除去できる。
- ⑥汚泥の発生量が少ない。
- ⑦臭気など居住快適性を損なわない。
- ⑧負荷変動への対応性が強い。

しかし、用途ごとに様々な問題点が挙げられるが、多くの用途に共通する最大の問題点は、膜透過流束が小さいことである。膜透過流束の大小は直接膜面積に影響し、膜処理コストを決定する大きな要因となる。平均的な膜透過流束が現在の2倍になれば膜分離技術の応用は現在の2倍以上に広がることは確実である<sup>3)</sup>。

直接的な膜性能ではないが実用上重要な膜特性の一つとして、その耐熱性を挙げることでよい。膜装置の滅菌のための耐熱性以外でも、プロセス中で膜を使用する際には高温液をそのままの温度で処理することが望ましく、ここでも膜の耐熱性が重要となる。

膜分離法では、膜面汚れや膜の閉塞の問題は避けて通れない。膜性能低下の要因には、膜高分子の変性と劣化、膜の汚れ（Fouling）が挙げられる。浸出水処理では、膜面汚れの原因物質の一つとしてケイ素が挙げられている。また、し尿処理の凝集行程における限外ろ過膜の膜面汚れ物質として鉄系物質の存在を指摘する報告もある。

対処法として、膜の酸やアルカリ、界面活性剤などによる洗浄が行われているが、膜面汚れの機構と関与物質については不明な点が多く、適切な前処理法や膜の選定、洗浄法の開発などによる同問題の克服は、膜分離法を主とする水処理プロセスを確立するための重要な課題となっ

ている<sup>3)</sup>。

膜分離法におけるもう一つの問題点としては、濃縮液の処理・処分がある。全体的な水回収が低率であれば予定量の処理水が得られないばかりでなく多量の濃縮水の処理・処分を余儀なくされる。まず水回収率を高めることが必要であることはいうまでもないが、その上で、残った濃縮水の効率的かつ安全な処理・処分法の確立が課題として残されている<sup>9)</sup>。

膜分離法は他種処理法と比較してコストが高くなるとの指摘がある。膜の製造はかなり機械化が進められているものの人手を必要とする工程が多いため、コストが高くなっており、全体的なコストを引き上げる原因の一つになっている。

膜の利用用途がさらに拡大し、薬品の減量や機械化・量産化による膜のコストダウンが図れば、コスト的に今より有利となり、処理プロセスへの採用がより進むという好循環になるものと考えられる。

#### 膜分離法の今後の汚水処理への適用

工場内ではすでに排水回収、再利用が進められているが、水利用のクローズド化の流れの中で、各方面でますます膜分離法の導入が進められるものと考えられる。下水の二次処理水を膜分離法を用いて大規模に高度処理を行っている例については報告がほとんどなかった。しかし、水需給が緊迫化する中で、下水処理水をかなりの割合で含む水を工業用水のみでなく生活用水に積極的に再利用しなければならない時期が到来しつつある。

また、有害性物質を含む多成分系排水への逆浸透法の適用例として、廃棄物埋立地浸出水への適用も検討されている。埋立地浸出水中には、有機、無機を問わず種類の物質が含まれ、各種の化学物質、変異原物質などの有害物質が検出されている。また内陸埋立では、高濃度に含まれる塩類の除去が望まれている。

このほか、膜分離法を試験的に適用しようとする例としては、染料工場排水の処理や、有機溶剤回収法であるパーペーパレーション法（液体混合物中の成分が膜中を移動、膜の裏側より蒸気で分別）による有機汚染地下水の処理がある<sup>9)</sup>。

#### おわりに

近年の全国的な渇水は、水道の給水制限をもたらし、一部の工場では川・湖からの取水制限が行われ操業に少なからずの影響を生じた。この出来事は、日本国における水供給の不安定さを示し、水の重要性を改めて認める

契機となった。水の豊かな国においても、水再利用システムの再構築が必要であろう。

膜分離法はこのような状況の中でますます大きな役割を果たすものと考えられる。今後、膜分離法に存在する問題点が順次解決され、より利用しやすい高機能の膜の開発とその利用システムの構成がなされることを期待している。

#### 引用文献

- 1) 金山彦喜：ビル中水道における膜ろ過技術。水質汚濁研究, 13 85-88 (1990)
- 2) 川島博之：食糧の生産と水質汚濁。用水と廃水, 37 881-885 (1995)
- 3) 木曾祥秋, 北尾高嶺：逆浸透法における膜汚れについて。水処理技術, 25 81-94 (1984)
- 4) 栗田テクニカルサービス(株)：生物処理装置高度処理向膜分離テスト実施に対する調査報告書。p.3 (1994)
- 5) 森本泉：逆浸透膜法による世界最大(56,000トン/日)の海水淡水化プラントの紹介。造水技術, 15 (3) 34-37 (1989)
- 6) 中尾真一：膜分離技術による水処理。水環境学会誌, 18 66-73 (1995)
- 7) 梨田実, 下原悦子, 杉嶋伸祿, 宮崎昭夫：限外ろ過による下水および河川水中ウイルスの検出について。水処理技術, 29 697-701 (1988)
- 8) 大矢晴彦：逆浸透法・限外ろ過法「I理論」。幸書房, 東京(1990) pp.1-70
- 9) 尾崎博明：膜分離法の下・排水処理への適用。水環境学会誌, 18 79-84 (1995)
- 10) 鈴木義明：膜分離技術。下水道協会誌, 28 (335) 11-15 (1991)
- 11) 田井慎吾, 松重一夫：限外ろ過法による富栄養化湖水の浄化に関する実験的研究。水処理技術, 29 285-293 (1988)
- 12) 山本和夫：し尿処理と膜。水道協会雑誌, 61 (11) 13-15 (1992)
- 13) 山本和夫：膜濾過急速濾過・生物濾過・膜濾過。藤田賢二編, 技報堂出版, 東京(1994), pp.238-254
- 14) 湯浅晶：海外における膜ろ過型浄水処理の現状。水環境学会誌, 18 74-78 (1995)