「繊維技術を用いた分離技術」特集

分離膜技術の現状と今後

東 郷 育 郎

1. はじめに

1748年豚から得られた半透膜により液体の浸透現象が観察されたのが膜分離の最初と言われているが、膜分離技術が各種産業に幅広く用いられ始めたのは1960年LoebとSourirajanにより非対称膜が発明され、経済的透過流束をもつ分離膜の製造が可能となったからである。

膜分離技術が幅広く用いられるようになった理由は

- (1) 相変化を伴わない分離であるため、エネルギー効率が高いこと
- (2) 常温のまま対象物質を変質させることなく分離できること

など他の分離技術にない優れた特徴をもっていることによる。

膜は機能ごと、形態ごとに各種生産されているが、特に中空糸形状の分離膜は繊維製造技術を駆使して作られている。それゆえ、国内においての膜メーカーの多くは繊維会社であるということもうなずける。本稿では膜分離技術の概要とその工業的応用例について紹介する。

2. 各種分離膜の紹介

分離膜の機能は物を分離するということであるが、分離する物質の大きさ、分離方法などにより各種の膜がある。

精密濾過膜(MF)、電気透析膜(ED)、逆浸透膜(RO)、人工腎臓用透析膜、限外濾過膜(UF)が代表的な分離膜であり、それぞれは既に幅広い産業に用いられている。表1、図1にそれぞれの差異を示す。

図1 各種濾過法の濾過範囲と物質の大きさ

Current Situation and Future of Membrane Separation Technology

著者紹介 IKURO TOGO

Industrial Membranes Sales & Marketing Department, Asahi Chemical Industry Co., Ltd.

旭化成工業株式会社 機能膜事業部機能膜販売部 部長

著者は、有機合成を専門とされ、著者に「高純度化技術大系」(共著、フジテクノシステム、1997年)、「繊維便覧第2版」(共著、丸善、1994年)、「化学装置」(共著、工業調査会、1994年)、「クリーンテクノロジー」(共著、日本工業出版、1999年)がある。趣味は、ゴルフ、囲碁とのこと。

本稿では、膜技術の全般についてわかり易く解説していただいた。

表1 膜による分離方法

駆動力	化学的親和性差		孔径差		
	均質膜	多層膜		小孔径	大孔径
圧力差	RO ガス分離膜 パーパーパ レーション膜	RO ガス分離膜 パーパーパ レーション膜	ルーズRO タイトUF	UF	MF
濃度差	透析膜	透析膜	透析膜	透析膜	
電位差	イオン交換膜	イオン交換膜			隔膜 電池

3. 分離機構及び膜構造

膜に孔が存在するかどうかの観点より多孔質膜と非多孔質膜に分けられる。

同じ圧力差を駆動力とする3種の分離膜で比較するとMF膜とUF膜は孔が存在する多孔質膜であり、分離機構もふり分けであるが、RO膜には孔は存在しない。その分離機構は膜を構成している高分子鎖の間隙を水やイオンが溶解・拡散することで物質分離が達成される。図2にMF、UF、ROの分離の概念図を示す。

また、膜の構造面から

①膜全体が均質な構造をもつもの

②膜表面と内部構造が異なる不均質膜構造に分類される。

②はさらに膜表面の緻密層と内部の支持層(スポンジ層)が同一素材で同時製膜される非対称膜と異なる素材で製膜される複合膜に分類される。

分離膜の機能として重要なのは物質分離の選択性、透過流束(いかに早く分離するか)であるため、分離機能を受けもつ部分(表面の緻密層)をできる限り薄くし、内部

の強度支持層はできる限り流体の抵抗を少なくするかが重要となる。したがって、現在実用化されている膜は孔径が大きく膜内部の流路抵抗が問題にならないMF膜を除き、他のほとんどが非対象膜もしくは複合膜と言っても過言ではない。写真1に非対称膜の例としてUF膜の構造を写真2に均質構造を有するMF膜を示す。

写真1 限外濾過膜(UF)の断面写真
(旭化成マイクロザ®UF)

写真2 精密濾過膜(MF)の断面写真
(旭化成マイクロザ®MF)

各種分離膜の基本となる機能を一言で表せば
RO-水を作る(水だけを通過させる)。
UF-分子をふるいわけ。
MF-固体と液体をわけ。

図2 RO, UF, MFの概念

4. 各種分離膜の用途と特徴

表2に各種分離膜の用途例を示す。日常生活の中で使用している電子機器類は膜でろ過した超純水なくして製造できず、自動車の塗装(下塗り)にも不可欠である。酒、ビール、食塩等食品・飲料にも膜は欠かせない。

これらの幅広い用途に膜を適用するにあたり、図3に示すように要求される性能は数多くある。長期間メンテナンスフリーで自動運転できること、長期間ろ過性能が変化しないこと、充分なろ過量(Flux)が確保でき、単位ろ液量当たりのコストが工業レベルであることなどが、その目的とするところである。図3に示す要求性能を満たすために、膜及びモジュール構造(膜を組み込んだユニ

1. シャープな分離機能
2. 高いFlux
3. 耐汚染性(易洗浄性)
4. 耐熱性
5. 耐薬品性(pH、洗浄剤、有機溶剤)
6. 機械的強度
7. サニタリー性
8. メンテナンス性

それぞれ関与

- ・膜の物理構造、化学構造
- ・モジュール構造
- ・モジュールの運転技術

図3 膜に要求されるもの

ット)、膜材質などには多くの種類があり、またろ過方法にも各種の工夫がなされている。

(1)膜及びモジュール形状

MF, UF, RO膜共に図4に示すような形状のものが用いられている。それぞれ特徴を有しているが表3に示すように中空糸膜を用いたモジュールがすべての面で有利である。ただし、MF膜の場合後述する全ろ過方式で使用される用途も多くあり、平膜そのもので、また平膜をひだ折りしたプリーツタイプのモジュールも広く使用されている。

表3 各種膜タイプの特徴

タイプ	膜の充填密度	被処理水の適用性	経済性 (設備費、ランニングコスト)	メンテナンス
中空糸	◎	◎	◎	○～◎
管	△	◎	△	○
スパイラル	○	○	○	△
平膜	○～△	△	△	△

(2)膜材質

高分子素材と無機素材があるが、本稿では有機高分子素材について述べる。

表4にUF, MF膜に用いられる高分子素材の例を記載する。耐久性と膜への汚染性(ファウリング)が相反する場合が多く、ろ過対象液の性質などにより材質の選定が必要となる。

表2 各種分離膜の実用化例

市場分野 膜種	製薬工業	医療	酸酵工業	科学工業 食品工業	電子工業	造水	自動車工業
ガス分離膜		酵素吸入		H ₂ 分離膜 O ₂ 富化 N ₂ 富化			
逆浸透膜	超水製造	純粹製造	培地調整水	食品濃縮	超純水 排水再利用	海水淡水化 カン水淡水化	電着塗料 回収
限外ろ過膜	純水製造 ワクチン濃縮	純水製造 ろ過型 人工腎臓	酸酵液調整 酵素濃縮精製	コロイド・エマル ジョン濃縮 精製生酒 醤油 おりさげ	超純水	中水道	電着塗料 浴管理
精密ろ過膜	除菌 除粒子	血漿分離 無菌水	エアーペント 除菌	溶剤精製 生ビール 生酒	薬品除粒子 ガス除粒子	家庭用 浄水器	
透析膜	酵素精製	人工腎臓		化学品精製			
電気透析膜				苛性ソーダ 製塩		海水淡水化 カン水淡水化

図4 膜およびモジュールの形態

表4 膜の化学構造

		UF	MF
第1のタイプ	高耐久性	ポリスルホン 	ポリオレフィン (PE、PP、PVDF、PTFE)
	疎水性	ポリエーテルスルホン 	
第2のタイプ	低ファウリング	ポリアクリロニトリル 	セルロース系
	やや耐久性に欠く	セルロース系 	

よく使われる素材は2パターンにわかれる。

(3)ろ過方法

実験室で少量の液をろ過する、また比較的清澄な液をろ過する場合には図5(左図)に示すような全ろ過方式(DEAD-ENDろ過)が一般的であるが、UF、ROの対象分野においては多くの場合、図5(右図)に示すクロスフローろ過方式が用いられている。クロスフローろ過の特徴

は、膜面への汚染物質の堆積を防ぎ、長期にわたり安定したろ過流束を確保できる点にある。

また、中空糸膜タイプのモジュールにはろ過液を用いて逆圧洗浄を行うことも多い。図6に逆圧洗浄の原理を示す。逆圧洗浄はろ過対象液によっては極めて大きな効果を発揮するゆえ、この種のモジュールを使用される場

図5 クロスフロー濾過の原理

図6 逆圧洗浄法の原理

図8 繊維処理油剤回収フローダイアグラム

合はぜひ活用していただきたい。

5. 各種分離膜の適用事例紹介

(1) 繊維油剤処理工程への応用

レーヨンの油剤工程は図7に示す通り水洗工程よりもち込み水が多く、油洗タンクは希釈されると同時に油剤を含んだしぼり水が廃棄されている。

この工程に図8に示すようなUF膜を適用することによ

油洗タンク(油剤含油量 2000~5000ppm)

図7 繊維の油剤処理工程(改良前)

り油剤の消費量を減少できると同時に排水のCOD負荷を減少させることが可能となる。

(2) バイオプロセスへの膜適用事例

バイオプロセスには数多くの膜が用いられている。図9にその例を示すが、まず仕込み側の原料、用水の除菌、精製用途。次に発酵液の膜処理であるが、2通りの方法がある。一つは発酵プロセス中の菌体をMF膜で除去分離した後、ろ過液をさらにUF膜で濃縮し、有用な蛋白、酵素などを得る方法、2つ目は膜をバイオリアクターの用い、有用な生産物のみを連続的に系外に抜き出し、反応源である微生物、酵素などを培養タンクに封じ込め、より有効に生産を行う方法である。

未だ実用化例は少ないが、培養タンクに供給する空気の酸素富化への膜適用、酸素供給を効率的に行うための散気管への膜利用も今後期待できる分野である。

(3) 上水道への膜適用事例

近年の最も重要かつ大きなマーケットがある分野が上水道(飲料水)への膜利用である。

従来の水道における浄水処理は図10に示すように凝集沈殿-砂ろ過が一般的であった。しかし、最近では原水水質の悪化、用地確保の困難性、熟練技術者の不足などの問題があり、厚生省は1991年より3年間「膜利用型新浄水システムの開発研究(MAC21計画)」を実施した。そ

図9 バイオプロセスへの膜利用例

膜利用型浄水処理の一例

沈殿池不要 → 敷地面積約1/2

従来の一般的な浄水処理

図10 膜ろ過を応用した浄水システム

の結果、処理水質の改善、薬品使用量と処理コストの節減、運転の自動化、省スペース、浄水施設建設コストの節減などのメリットがあることが確認された。「MAC-21」の成果に基づき1994年水道にUF、MF膜を用いることが認められた。現在、100施設に近い簡易水道に膜が用いられている。図10に膜利用型浄水処理の一例を示す。

さらに、これらの技術を用いボイラー用水の除濁、UFまたはMFとROの併用による各種精製水及び海水淡水化への応用、各種排水処理など幅広く技術開発が行われている。当社ではオゾンに耐える中空糸膜の開発に成功し従来にない単位面積当たり高ろ液量を得ることが可能となった。

6. おわりに

今回膜技術を簡単ではあるが紹介した。膜の製造においては繊維技術が基盤となっており、また膜のアプリケーションにおいても繊維工業の中で多様に用いられている。特に、今後は繊維工業での「水」に注目すべきと考えている。一定水質の良質な水を得ること、工場より排出される水のリサイクルは環境問題と相まって必要不可

欠になろう。我々は膜メーカーであるゆえ、大学、官公庁の諸先生方、ユーザーの方々と一緒になって膜の発展に努めていきたいと切望している。

参考文献

膜処理技術体系：(株)フジテクノシステムクリーンテクノロジー；vol.9, No.4 1999

書評

「ハイテク繊維の世界」 本宮達也 著

(¥2,940税込) 日刊工業新聞社 ISBN4-526-04435-0

先日、ラジオから懐かしい「巨人の星」のテーマソングが流れてきて、時代の変遷に思いをはせた。当時、1960年代後半では、幼少のころから本人の能力も顧みずに「努力こそ成功への道」と教えられ、貧乏に甘んじて血のにじむ努力に努力を重ねて、ついには大リーグボールを完成させる「星飛雄馬」こそ最高の美德であった。それにひきかえ、大金持ちの息子であり、また有り余る天性の才能を持ってMVPとなる「花形満」は、やっかみはあるものの軽蔑すべき人間であった。最も単純化すると、「地味な努力家」は「目立つ天才」より美しかったのである。

「繊維」に「星飛雄馬」をグブらせてしまうのは私だけだろうか(そう言えば、「巨人の星」と並ぶ大ヒット作、「アタックナンバーワン」の女子バレーには当時「××紡」というチームが多かった)。時代が進んで1970年代以後は、いつしか「目立つ天才」が普通になり、「星飛雄馬」はダサダサの象徴になってしまうのである。ポータブルと言いつつ数kgもあったテープレコーダーをウォークマンにしまい、手回しタイガー計算機や計算尺を世から抹殺した「答一発カシオミニ」に大衆の目が移ってしまったのは致し方ないことであろう。そして、この勢いは止まるところを知らず、MP3の出現で今ではウォークマンが消え去ろうとしている。これは、繊維が悪いのではなく、大衆が繊維を見なくなったと思いたい。私の母がデパートの紳士服売り場で、スーツの生地を一つ一つじくっては「これはいい生地だよ」と言っていたのが懐かしい。ところが、私の息子の母がそんなことを言ったのを聞いたことがないのである。

さて、本書はそんな「繊維」の「花形満」的側面をクローズアップして、「繊維」もダサくないことを見事に伝えている。まず、大変に読みやすい。解りやすい図が巧みに配置されていて、読みやすいように研究されている。これなら大幅に学力の低下した大学生でも、レポートを書くときのアンチョコとなる。また、もう少しレベルの高い読者、例えばポリマーメーカーの開発担当の人にも大いに参考となる。これは、この本が単にハイテク繊維の羅列ではなく、その仕組みを化学と物理の原理を基に優しく解きほぐしてくれているからである。

繊維会社はハイテク繊維がどれほど優れものか、そしてどれほど生活に浸透しているか、もう少し宣伝してもよいのではないかと思う。例えば、インテルのように“HTF inside”(HTF: High Tech. Fiber)のシールをペタペタ貼ればよい。しかも可愛いデザインで。そうすれば若い女の子が毎年水着を買うたびに“HTF”は彼女らの話題となり、潜在意識にインプットされ、洋服はもちろん、生理用品や紙おむつ、化粧品、浄水器、テニスラケット、自動車タイヤ、最後には「赤い糸」にも“HTF”シールがないものは認められなくなるのである。そして、その時、本書は“HTF”のバイブルとなっているのである。

(東京工業大学 柿本 雅明)