

新型回転膜分離装置の紹介

Introduction of New Rotary Membrane Separation System



(技)第2研究開発部第4研究室
谷 田 克 義
Katsuyoshi Tanida
杭 出 義 也
Yoshiya Kuide
高 田 一 貴
Kazutaka Takata

膜分離技術は、従来の分離技術と比較して省エネルギー、小設置面積等の利点を有するため、さまざまな工業的分離プロセスへ適用されている。しかしながら、膜分離には元来透過流束を低下させる濃度分極とファウリングという問題があるため、分離プロセスの中でも特に固形分の多い溶液の分離には適用が困難であるなど、適用範囲が制限されている。そこで膜分離技術の適用分野の拡大を目的として、当社ではこれら問題点を克服した新しい回転膜分離装置を開発した。この新しい装置は、高回転で膜円板を回転させて膜表面近傍の溶液にせん断力と遠心力を与えて濃度分極とファウリングの影響を低減させてろ過抵抗を小さくすることができるため、高透過流束、高濃度での操作が可能である。また、積層した膜円板間に独自形状のバツフルを挿入することにより、膜円板間での溶液の入れ替えを活発にして停滞を防ぐとともに乱流を発生させ膜表面せん断速度を大きくしている。本装置を使用することにより、砂ろ過などの前処理が不要となるため膜分離プロセスの簡略化や従来のクロスフロー方式では適用が困難な高濃度溶液濃縮などへの適用が可能となる。

Membrane separation technology is expected to apply to various industrial separation processes, because it has great advantage such as energy saving and small footprint for the equipment compared with another separation technologies. However, the original problems in membrane separation technology such as the concentration polarization and the fouling, which cause the decrease of permeate flux is still making difficult to separate the solutions which include a fairly amount of suspended solid. Therefore, Shinko Pantec has newly developed the rotary membrane separation machine, which can promote permeate flux by reducing and/or preventing the problems, for the purpose of expanding applicable fields of membrane separation technology. It is possible to operate with high permeate flux and high concentration using this machine, because it decreases the influences of the concentration polarization and the fouling by generating shear rate and centrifugal force in the solution near the membrane surface by rotating membrane disks at high speed. And functional baffles are installed between laminated membrane disks both to prevent the stagnation of solutions between membrane disks and to generate the turbulence. Using this system, it is possible to make separation process simple by reducing pre-treatment, and to apply where the conventional cross-flow system is difficult to use.

Key Words :

膜 分 離	Membrane separation (filtration)
回 転	Rotation
せん断速度	Shear rate
乱 流	Turbulence
バ ッ フ ル	Baffle

まえがき

膜分離技術は、近年さまざまな分離プロセスへの適用が検討され、発展を続けている。これは、膜分離技術が精密な分離が可能、省エネルギー、省スペースといった従来の分離技術よりも優れた特長を有しているためである。しかしながら、膜分離を行う際には、濃度分極現象により膜表面近傍の溶質濃度が上昇しケーキやゲルの発生が起こり、高濃縮操作ができない、ファウリングにより膜に目詰まりや汚れが発生するといった問題があるため、特に高濃縮操作を行うアプリケーションへの適用は困難と考えられている。

このような膜分離技術の問題を解決するために、当社では新型の回転膜分離装置を開発した。新型回転膜分離装置は、膜円板を高回転数で回転させることにより、膜表面の溶液にせん断力と遠心力を与えて膜表面において高いせん断速度を発生させ濃度分極とファウリングを低減することができる。また独自形状のバッフルを積層した膜円板間に挿入することにより、円板間での溶液の停滞を防止して膜の回転の効果を十分に引き出す。これらの効果により、従来の膜分離装置では適用が困難であった高透過流束、高濃縮アプリケーションでも膜性能を十分に発揮することができる。

本稿では、この新しく開発した回転膜分離装置の特長と性能について紹介する。

1. 装置の概要

1.1 装置の構造

新型回転膜分離装置の実機構造図を第1図に、外観写真を写真1にそれぞれ示す。本装置は、ろ過体である膜円板を回転軸に所定間隔で積層する形で取り付け、さらに膜円板間にバッフルを挿入して圧力容器内に納めた構造となっており、軸封部分のシールにメカニカルシールを使用している。以下にそれぞれの構成要素の特長について解説する。

膜円板は、ステンレス製の円板の両面に透過液の流路となるスパーサークロスを挟んで平膜を貼り付けた構造となっている。円板がステンレス製のため、

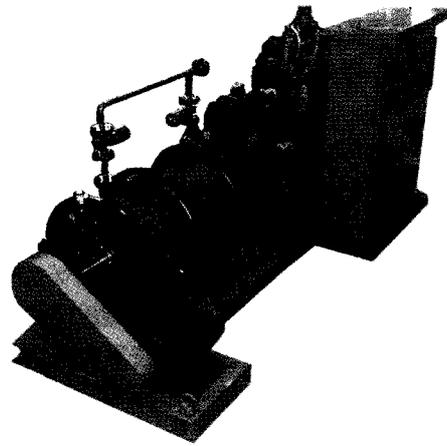
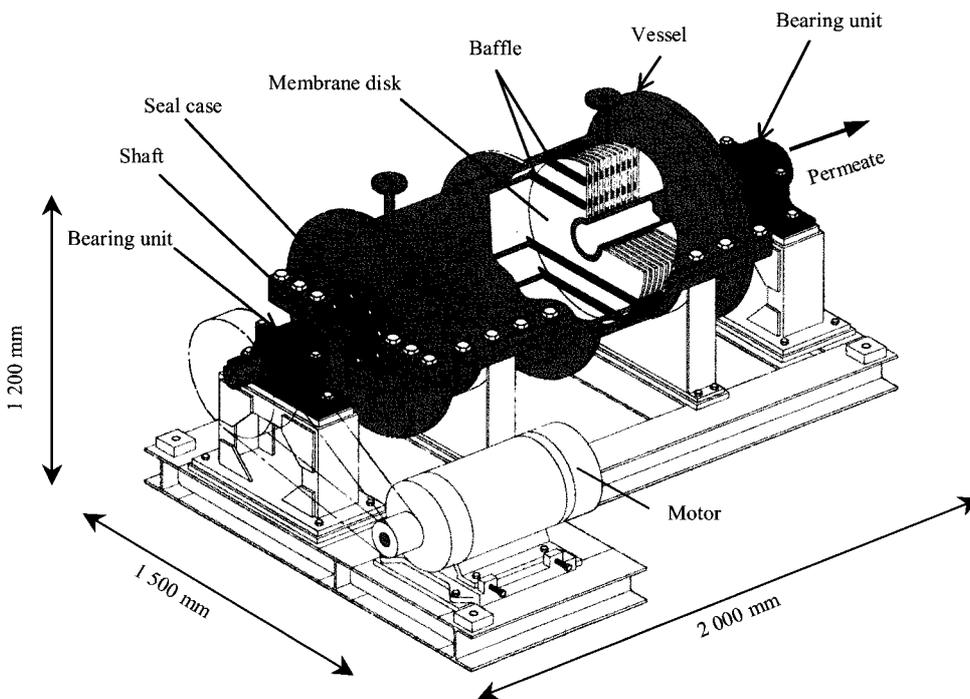


写真1 回転膜分離システム外観写真

Photo 1 Photograph of rotary membrane separation system



第1図 回転膜分離装置 実機構造図

Fig. 1 Schematic diagrams of rotary membrane separation system

従来の回転膜分離装置で多く用いられている樹脂製円板の数倍の強度を有し、高速回転下でも円板の変形等が発生することがなく、高い信頼性を発揮する。この膜円板を回転軸に取り付けて回転軸とともに高速で回転させて膜分離を行う。ここで、膜円板上の平膜を透過した透過液は膜と円板間のスペーサーを流路として回転軸への取り付け部分である膜円板内周部へ向かって流れ、回転軸に設けられた集水孔から回転軸内の中空部分を通して装置外に排出される。

回転軸はたわみ・変形等を極めて小さく抑えるべく高い剛性を有する機械軸となっており、重いステンレス製の円板を高速回転させても振動などは発生しない。また回転軸は前述したように膜円板上の平膜を透過した透過液を集水して移送するために中空となっている。

バッフルは、膜円板間で乱流を発生させ、また積層された膜円板が回転することによる溶液の供回りと停滞を防ぐため、膜円板間のクリアランスごとに数枚ずつ挿入される。このバッフルは、アプリケーションごとに最適な枚数を挿入可能である。また、このバッフルは挿入することにより装置内の圧力損失が大きくなる形状となっている。

膜円板が所定間隔で取り付けられた回転軸は圧力容器内に収められるが、この回転軸の軸封にはメカニカルシールを用いている。メカニカルシールの材質と構造は、取り扱う溶液に応じて変更が可能であり、さまざまなアプリケーションへの対応が可能となっている。

この新型回転膜分離装置のフローシートを第2図

に示す。原液タンクに溜められた溶液は、ストレーナーで夾雑物等が取り除かれた後、供給ポンプに送られる。供給ポンプで操作圧力に昇圧された溶液は回転膜分離装置の圧力容器内に供給され、膜円板で膜分離される。膜を透過した溶液は回転軸の中空部分を通して系外へ排出される。また、濃縮された溶液は圧力容器入口の反対側に設置された濃縮液出口から排出される。

本装置では取り扱う溶液の性状と処理目的に応じて、濃縮された溶液を容器出口から原液タンクへ返送する回分濃縮、ワンパスで系外に排出する連続濃縮、あるいは両者を組み合わせた半回分濃縮を選択して行うことが可能である。

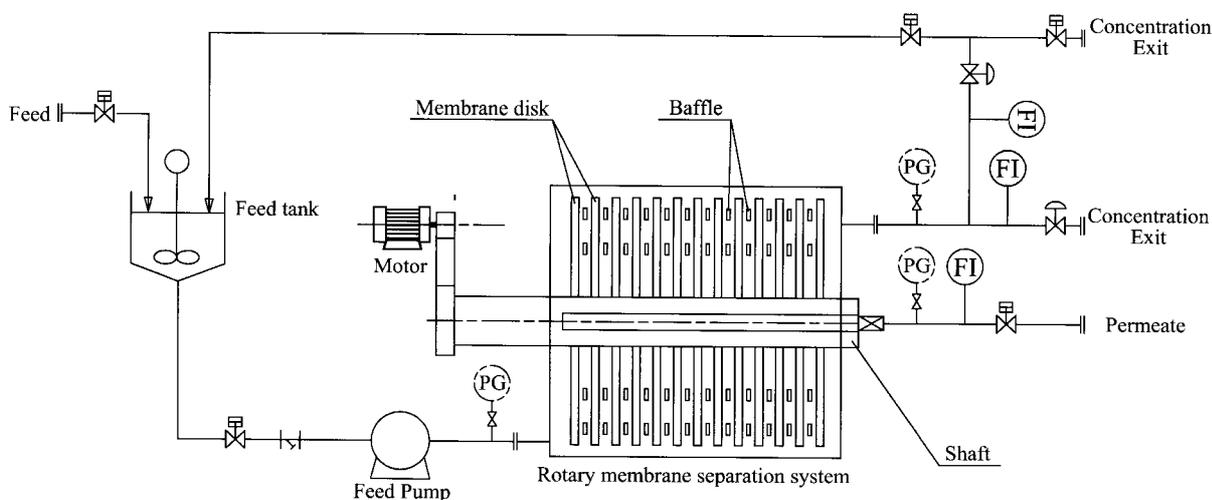
1.2 装置の特長

(1) 濃度分極とファウリングの低減

本装置では、直径600 mmの膜円板を400 rpmという高回転数で回転させることにより、膜分離を行う際に問題となる濃度分極とファウリングをクロスフロー方式と比較して大幅に低減することができる。これは、膜の高速回転により膜表面近傍の溶液に与えられるせん断力と遠心力の効果である。これらの相乗効果により下記に示すような特長が発揮される。

(2) 高透過流束

膜分離を行う際の透過流束は、膜の抵抗と濃度分極層の抵抗により決まるが、本装置では膜表面近傍の濃度分極層の形成が低減されるため、透過流束を低減する濃度分極層の抵抗が低下する。このため、クロスフロー方式と比較して特に高濃度で高透過流束を発揮する。またファウリングが低減されるため、透過流束の低下がクロスフロー方式と比較して緩や



第2図 回転膜分離装置 フローシート

Fig. 2 Flow sheet of rotary membrane separation system

かである。そのため、頻繁な膜の薬品洗浄の必要がなくなり膜の寿命をのばすこともできる。

(3) 高濃縮処理が可能

膜表面近傍の濃度分極層の形成が低減され膜表面でのケーキヤゲルの発生が起こり難くなるため、高濃縮が可能となる。また、膜の回転によりチキソトロピー性を有するスラリーの粘度が低下することも高濃縮処理が可能な要因である。

(4) 高阻止性能

膜の阻止性能は、膜が同じならば濃度分極層の濃度が低いほど高くなる。これは、膜を透過する溶質の濃度が膜表面濃度に比例するためである。本装置では上述したように膜表面近傍の濃度分極層の形成が低減され膜表面近傍での溶質濃度が低下するため、膜を透過する溶質の濃度が低下する。このため、本装置では膜が同じでも阻止性能がクロスフロー方式と比較して高くなる。

(5) デッドスペースがない

上述したように回転膜分離装置では膜円板を積層して膜の充填効率を上げるため、溶液が膜円板間に停滞する問題が発生する。この問題を解決するために本装置ではバッフルを膜円板間に挿入している。このバッフルの挿入により膜円板間の溶液の出入りが可能になるため溶液の停滞が防止され、さらに膜

表面の溶液が乱流状態となる。これにより、上述したような膜の高速回転の効果が十分に発揮される。また、バッフルの形状は、バッフルの挿入により圧力容器内の圧力損失が大きくなるように工夫されている。

(6) 容易なメンテナンス

本装置は膜を回転させてはいるが、通常の膜分離装置と同様に全自動運転が可能のため、維持管理が容易となっている。また、前述のようにファウリングが低減され透過流束の低下が緩やかであるので、膜の洗浄インターバルを長くすることができる。

装置の大きさは膜面積 25 m^2 の装置で $1500\text{ mm} \times 2000\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$ （設置面積 3 m^2 ）であり、非常にコンパクトな設計となっている。

2. 装置の性能と適用分野

2.1 装置の性能

(1) 透過流束と高濃縮

第3図に新型回転膜分離装置とクロスフロー方式を使用して測定したラテックス懸濁液の透過流束とラテックス濃度の関係を示す。測定は膜間差圧 400 kPa 、操作温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ でUF膜を使用しておこなった。図の縦軸は透過流束、横軸はラテックス濃度であり、図中の記号●は新型回転膜装置での透過流束、△はクロスフロー方式での透過流束である。

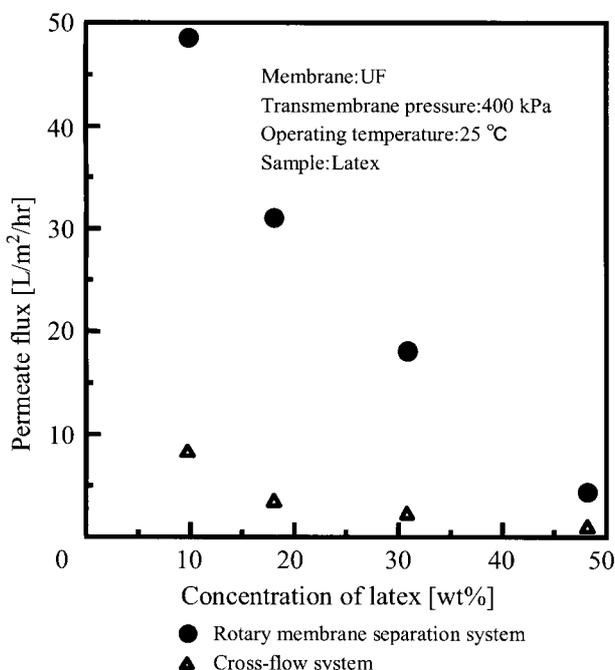
図からわかるように、回転膜分離装置ではクロスフロー方式と比較して透過流束が大きくなっている。またラテックス濃度約 $50\text{ wt}\%$ ではクロスフロー方式の透過流束がほぼ0となるのに対して、回転膜分離装置の透過流束は約 $5\text{ L/m}^2/\text{hr}$ であり、さらに高濃縮が可能であることがわかる。

第4図に同じく新型回転膜分離装置とクロスフロー方式を使用して測定したラテックス懸濁液の透過流束と運転時間の関係を示す。測定は膜間差圧 400 kPa 、操作温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ でUF膜を使用して行った。図の縦軸は透過流束、横軸は運転時間であり、図中の記号●は新型回転膜装置での透過流束、△はクロスフロー方式での透過流束である。

図から、運転時間約 120 時間ではあるが、ファウリングによる透過流束の低下は見られず透過流束が安定していることがわかる。また、クロスフロー方式と比較して透過流束が大きいことがわかる。以上の結果から、回転膜分離装置はクロスフロー方式と比較して高濃縮が可能であり、また安定した透過流束を得られることがわかる。

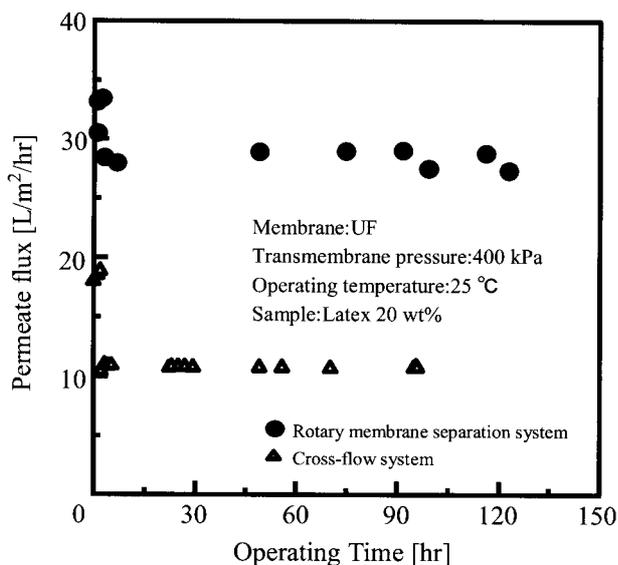
(2) 阻止性能

第5図にNaCl溶液を使用して測定したNaCl阻



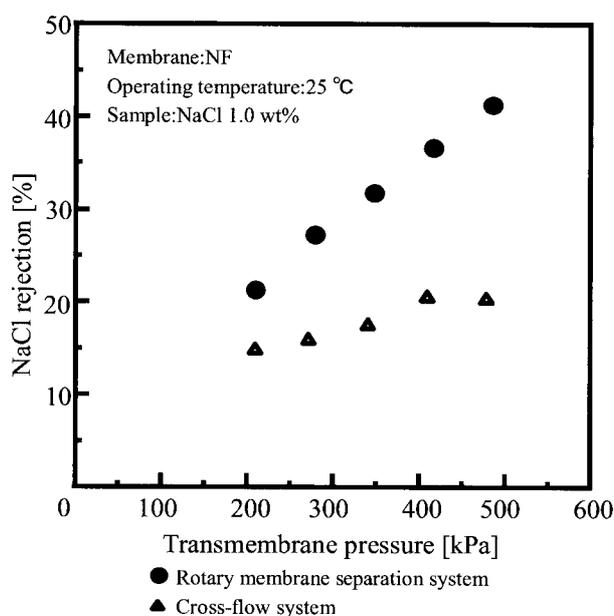
第3図 回転膜分離装置とクロスフロー方式の透過流束と濃度の関係

Fig. 3 Relationship between permeate flux and concentration of rotary membrane separation system and cross-flow system



第4図 回転膜分離装置とクロスフロー方式の透過流束と運転時間の関係

Fig. 4 Relationship between permeate flux and time of rotary membrane separation system and cross-flow system



第5図 回転膜分離装置とクロスフロー方式のNaCl阻止率と膜間差圧の関係

Fig. 5 Relationship between NaCl rejection and transmembrane pressure of rotary membrane separation system and cross-flow system

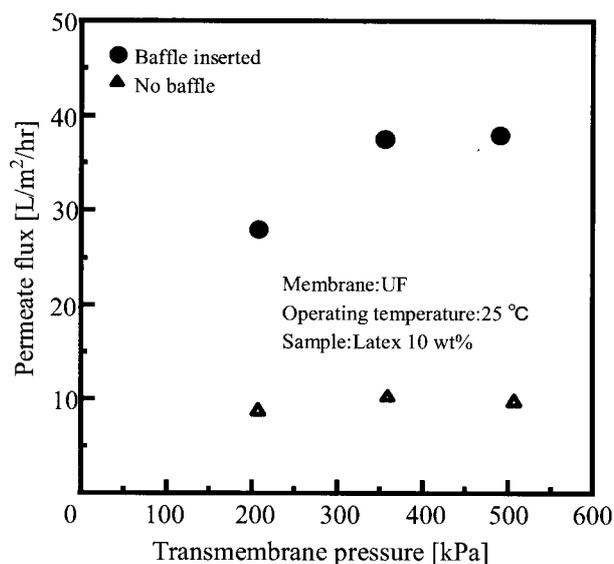
止率と膜間差圧の関係を示す。測定は操作温度25℃、NaCl濃度1.0 wt%でNF膜を使用して行った。図の縦軸はNaCl阻止率、横軸は膜間差圧であり、図中の記号●は回転膜装置でのNaCl阻止率、△はクロスフロー方式でのNaCl阻止率である。

図からわかるように、クロスフロー方式では膜間差圧を上昇させてもNaCl阻止率があまり上昇しないのに対して、回転膜分離装置では操作圧力の上昇とともに直線的にNaCl阻止率が上昇しており、膜が同じでも回転膜分離装置のNaCl阻止率はクロスフロー方式よりも大きいことがわかる。以上の結果から、同じ透過水質が求められる場合には回転膜分離装置ではクロスフロー方式よりも分画性能が低く透過流束の大きい膜を使用できるので、膜面積の低減が可能である。

(3) バッフルの膜分離性能に及ぼす影響

第6図にバッフルの挿入効果を比較した結果を示す。測定は操作温度25℃、ラテックス濃度10 wt%でUF膜を使用して行った。図の縦軸は透過流束、横軸は膜間差圧であり、図中の記号●は本装置のバッフルを使用した場合の透過流束、△はバッフルを挿入しない場合の透過流束である。

図からわかるように、バッフルを挿入しない場合は透過流束が小さく溶液の供回りと膜円板間での停滞のために膜の回転の効果が効率よく発揮されていないことがわかる。また、本装置にバッフルを挿入

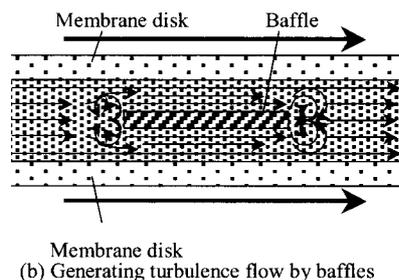
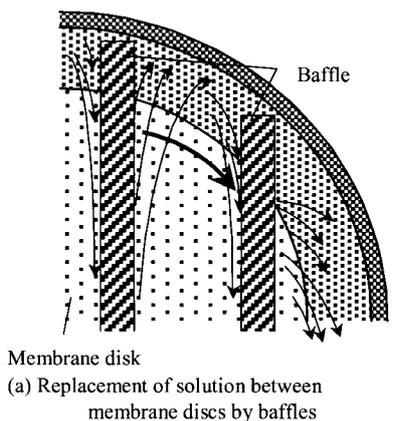


第6図 バッフル挿入効果

Fig. 6 Influence of inserting baffle

することにより透過流束が大幅に向上し回転効果が十分に発揮されていることがわかる。

このバッフル挿入効果の模式図を第7図に示す。図中の(a)はバッフルによる溶液の入れ替えの模式図である。バッフルが挿入されていない状態では膜円板間の溶液は粘性の影響により膜円板と供回りをし膜円板間に停滞してしまう。しかしながら、バッフルを挿入することにより、バッフルの膜円板回転



→ Rotating direction of membrane disk

→ Flow direction of solution

第7図 膜円板間へ挿入したバッフルの効果の模式図
Fig. 7 Schematic diagrams of influence of inserted baffle between membrane disks

方向上流側で膜円板間への溶液の吸い込みが起こり、下流側で膜円板間からの溶液の排出がおこなわれる。この作用により、膜円板間での溶液の停滞が防止される。また(b)はバッフルによる乱流発生の様式図である。粘性の影響により膜円板と併回りしようとする溶液がバッフルを通過する際、バッフルの前後で乱流が発生する。この効果により、膜表面の濃度分極層とバルク間の溶液の攪拌が起こる。また、バッフルを溶液が通過する際は流路が狭くなるために流速が上昇しせん断力が大きくなる。これらの相乗効果により、膜円板を積層した状態でも膜円板間での溶液の併回りと停滞が防止され、また膜の回転による濃度分極やファウリングの低減の効果が効率よく発揮される。

連絡先

谷田 克 義 技術開発本部
第2研究開発部
第4研究室
TEL 078-992-6525
FAX 078-992-6504
E-mail k.tanida@pantec.co.jp

第1表 回転膜分離装置の適用分野

Table 1 Application of rotary membrane separation system

Field	Application
Chemical Processing	<ul style="list-style-type: none"> • Latex concentration • Colloidal silica concentration • Valuables recovery
Pulp and Paper	<ul style="list-style-type: none"> • Process water treatment • Water recovery from waste water
Paint and Pigment	<ul style="list-style-type: none"> • Paint concentration • Paint recovery from waste water
Waste and Pollution	<ul style="list-style-type: none"> • Oil concentration in water • BOD and COD reduction
Minerals	<ul style="list-style-type: none"> • Calcium Carbonate concentration • All kinds of mineral concentration
Municipal Water	<ul style="list-style-type: none"> • Water purification • Sludge concentration

2.2 適用分野

第1表に本装置の適用分野の一例を示す。本装置は濃度分極とファウリングを低減し高濃縮が可能であるため、従来のクロスフロー方式が適用可能な分野のみではなく、濃度分極やファウリングのために従来のクロスフロー方式では適用が困難であり蒸発濃縮などの従来技術に頼らざるを得なかった難ろ過性物質や高濃度の製品の濃縮へも適用が可能となった。また、従来のクロスフロー方式では前処理が必要であった分野に対しても、前処理なしで膜分離をおこなうことが可能なため、プロセスの効率化をおこなうことができる。

むすび

新しく開発した回転膜分離装置は、膜の高速回転とバッフル挿入の効果により濃度分極とファウリングを低減することができるため、これまでのクロスフロー方式では処理が困難であった難ろ過性物質や高濃縮操作が可能である。また、上述の効果により透過流束の安定化、洗浄インターバルの延長、透過水質の向上等の利点も発揮される。新開発の回転膜分離装置を使用することにより、これまでクロスフロー方式の膜分離装置が適用されてきた技術分野での処理効率が向上するのみではなく、遠心分離や蒸発濃縮で行われていた高濃縮処理への膜分離技術の適用が可能となり、プロセスの改善と処理コストの低減が期待される。