

振動型膜分離装置『VSEP®』の紹介

Membrane separation technology using Vibratory Shear Enhanced Processing (VSEP).



技術開発本部 研究開発部
高田 一 貴
Kazutaka Takata
小西 嘉 雄
Yoshio Konishi
谷田 克 義
Katsuyoshi Tanida

VSEP (Vibratory Shear Enhanced Processing) has been introduced from New Logic International Inc. of the U.S. to the Japanese market by Shinko Pantec Co., Ltd. It has a large fouling and plugging resistances on the membrane surface because of the movement in a vigorous vibratory motion tangential to the face of the membrane. VSEP can attain about ten times the flow rate obtainable in conventional crossflow membrane systems. It has been in use over 200 sites in the wide variety of industrial applications such as chemical, paper pulp, food, pharmaceutical, paint and pigment, municipal water supply, waste water treatment.

まえがき

膜による分離工程は、1950年代に入って海水の脱塩操作に用いられたのを皮切りに、1960年代の非対称膜製膜技術の発明によって逆浸透膜法と限外ろ過膜法が広く利用されるようになった。これら膜分離法が大幅に普及した背景には、次に示すように他の分離方法（たとえば、沈降分離法、浮上分離法、イオン交換法、蒸発法等）にはない大きな特長があることによる。

- (A) 完全分離の実現と清澄ろ過水を得ることが出来る。
- (B) 分離対象に応じて、ミクロンオーダーから分子サイズまで種々の孔径を有する膜を選定出来る。
- (C) 極めて広範囲の物質に対する適用性（膜の種類）

しかし、膜分離法は大きなイニシャルコストと低い処理量の問題もあって、高付加価値型プロセスに使用されているのが現状である。応用範囲の広い限外ろ過膜法には、通常クロスフロー方式に代表されるように膜表面に形成されるゲル層に起因するろ過流束の著しい低下の問題と、高濃縮後でも流動性を持たせなければならないという要求から低濃度スラリーを高濃縮出来ないという技術的限界がある。今でもこれら問題の解決が製造プロセスや廃液処理プロセス中の膜分離工程の効率を高める上で不可欠である。

当社は、このたび米国 NEW LOGIC INTERNATIONAL 社により発明された振動型膜分離装置 (Vibratory Shear Enhanced Processing=VSEP) を導入して販売を開始した。この装置はフィルターパック(膜モジュール)を振動させることにより膜表面に高せん断を与えるという特長ある駆動機構を有しており、被処理液のファウリング(膜の目詰まり)やプラグング(流路の閉そく)を大幅に抑制することが出来ることを特長としている。従って、代表的な従来型クロスフロー型膜分離装置に較べて、最大で10倍近くのろ過流束を実現している。また従来型クロスフローろ過装置では処理出来ない高濃度スラリーの処理が可能になっ

ている。次に VSEP の内容について詳述する。

1. 装置の概要

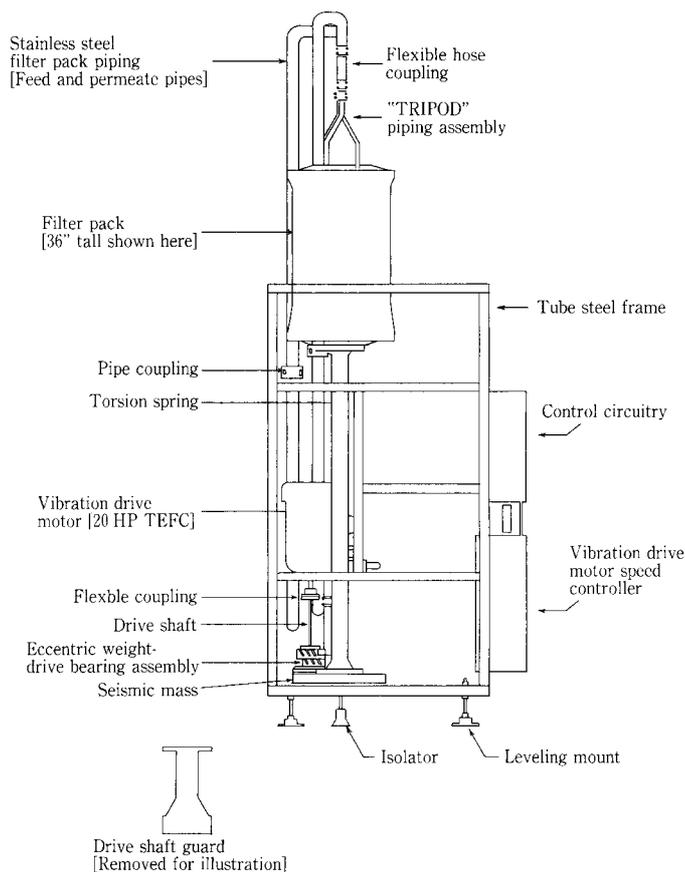
1.1 駆動機構及び装置のプロセスフロー

1.1.1 駆動機構

写真1に装置(VSEP Series i)の外観を、第1図にその模式図を示す。装置の構成要素はフレーム、振動荷重、トーションスプリング、フィルターパック、モーター(標準的には10HP)、偏心荷重ならびに制御装置である。モーターにより偏心ベアリングを回転させて振動荷重を60Hzで振動させ、トーションスプリングを介してフィルターパックに水平面内の円周方向に振幅5~10度の往復運動を与えるようになっている。フィルターパック内では平膜を装着したプレートが100段以上重ねられている。この駆動システムにより膜表面全体において極めて高いせん断力が作用しその値は $150\,000\text{sec}^{-1}$ に達する。膜表面におけるこの高せん断力は膜面近傍の境界層に流体のみを保持する役割を果たす。その結果流体中のスラリーは振動により生ずる境界層(膜表面)に接することなく濃縮側出口より流出する。従ってポンプにより適正な圧力を加えることで従来型クロスフローろ過装置にくらべて高いろ過流束を得ることが出来る。

VSEPの振動機構を考える上で装置を、構成する2つの荷重に分けることが出来る。1つは軽荷重のフィルターパックでありもう一方は重荷重の振動荷重である。これら2つがトーションスプリングにより固定されている。軽荷重の振幅は重荷重のそれよりも大きく、この振幅は両者の荷重比に比例して変化する。

振動は、モーター軸に取り付けてある偏心荷重を高速で回転させることにより振動荷重を振動させる。この振動のエネルギーがトーションスプリングを介してフィルターパックに伝達される。モーターの回転数が大きくなると振動数も大きくなりやがて装置の固有振動数に達するが、VSEP



第1図 VSEP Series i の模式図
Fig. 1 Schematic diagram of VSEP Series i.

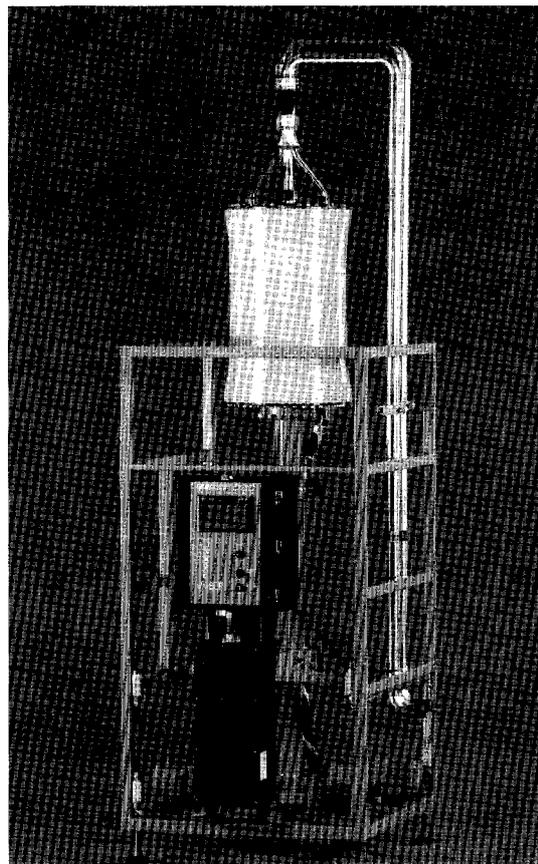


写真1 VSEP Series i (工業スケール)の外観
Photo 1 VSEP Series i unit, (industrial scale).

では装置の固有振動数を回避しこの周波数以上の振動周波数にすることで振幅を小さくしており、結果的にトーションスプリングの直径が小さくなっている。なおVSEPのトーションスプリングに関してはその寿命を無限回数の繰り返し振動に耐えるよう設計されている。

フィルターパックの振動制御を行うにはモーター回転数の精密なインバータ制御が必要である。そのためVSEPにはモーター回転数の制御装置が取り付けられており、モーター回転数を0.01 Hzで制御する。モーター回転数の適正な調整を行うことにより安全な運転と安定した性能の実現が可能になる。

1. 1. 2 装置のプロセスフロー

写真2はVSEPを用いた基本的な処理設備を示したものであり、第2図はその流れを示すブロックフロー図である。供給タンク内の被処理液をポンプでVSEPのフィルターパック上部から供給し、ろ過液をフィルターパック上部から、濃縮液を下部からそれぞれ取り出す。VSEPは基本的に1パス操作である。第3図にフィルターパック内の構造を示す。第3図に示すようにフィルターパック内では幾枚もの平膜が最大7mmの間隙を介して重ねられている。濃縮液は各段の間隙を流れて最終的にフィルターパック下部より排出される。また膜によりろ過された清澄液は

フィルターパック中心部へ流れその上部から排出される。

なお、フィルターパックの濃縮側配管出口には制御バルブが取り付けられている。濃縮率はこのバルブの閉鎖時間に比例するため、所望の濃縮率に達したときバルブが開くよう制御するようになっている。バルブ開閉の基本操作はフィルターパック内でスラリーが固まってプラグングを生じさせないようにすることにある。

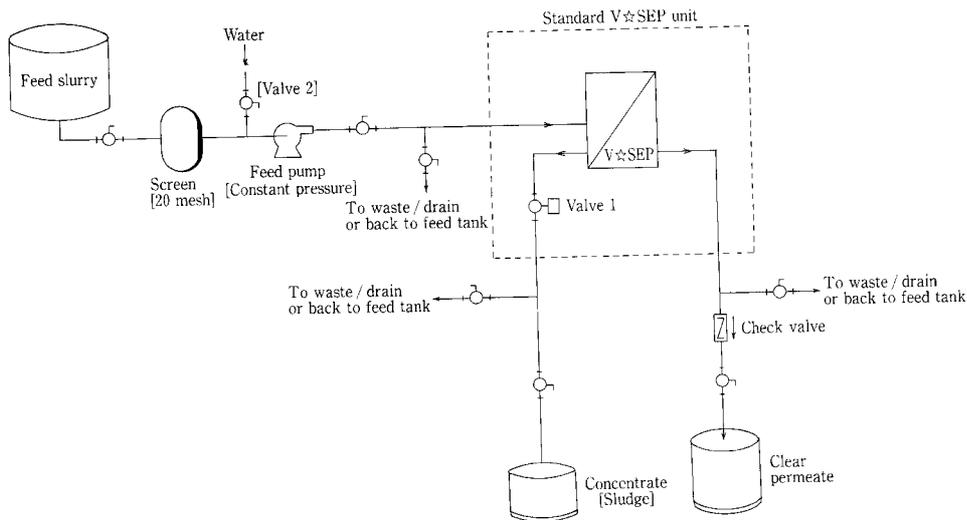
1. 2 装置の特長

(1) 高流束

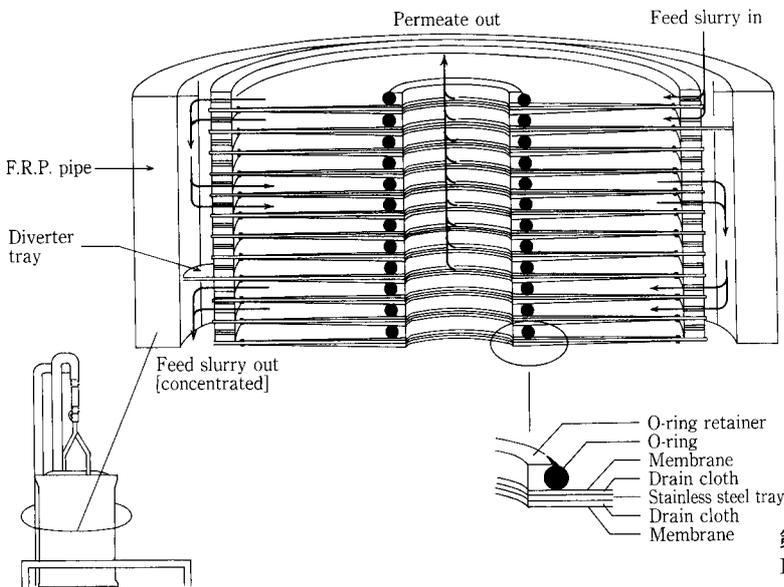
VSEPによる流束は、従来型クロスフローろ過装置の数倍～10倍になる。

(2) 膜面へのファウリング防止

VSEPではフィルターパックの振動によって膜面に液体のみの高せん断場が形成されるため膜面が常にクリーンな状態に保たれる。従って、VSEPでは従来型クロスフローろ過装置にみられる流束低下が少なく、長時間安定した流束の維持が可能になっている。第4図はこの振動がファウリングの要因となる流体中の微粒子に及ぼす効果を従来型クロスフロー式ろ過装置の場合と比較して模式的に示したものである。従来型クロスフローろ過装置では膜表面へのファウリングによって膜孔が塞がれるためろ過抵抗となりろ過流束が低下する。しかしVSEPでは膜表面が高せん



第2図 VSEP システムのブロックフローダイアグラム
Fig. 2 Block flow diagram of VSEP system.



第3図 VSEP-Series i の膜モジュール内模式図
Fig. 3 Cross sectional view of filter pack for VSEP Series i.

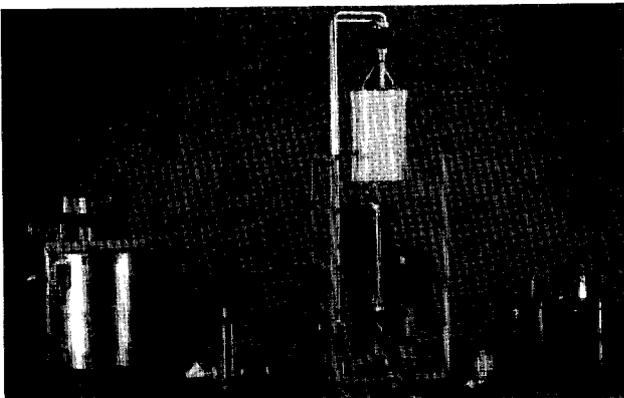


写真2 VSEP Series i の配置例
Photo 2 VSEP Series i unit (with feed tank, pump, and tanks).

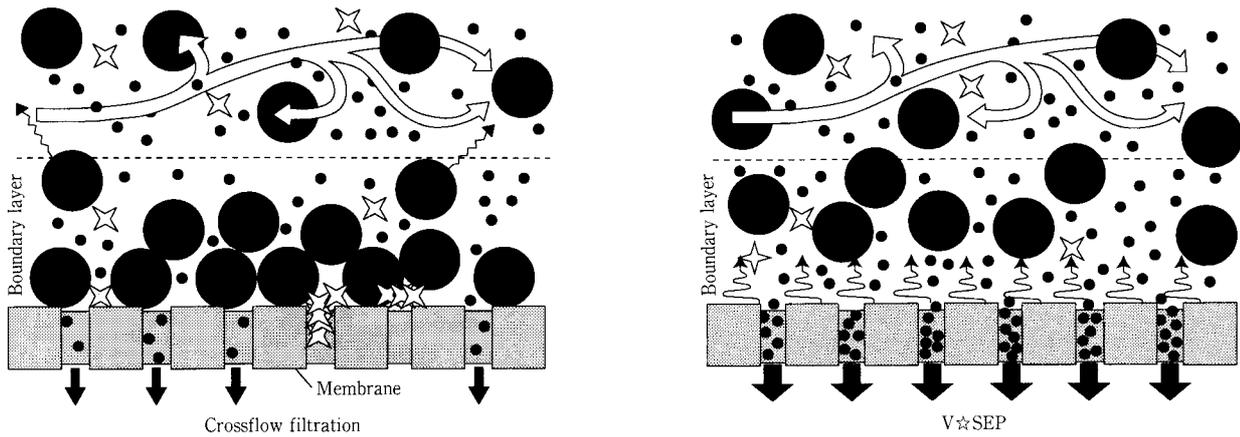
断場となっているためファウリングが防止される過流束が一定値に維持される。

(3) 高濃度スラリーの処理が可能

従来型クロスフローろ過装置では処理液粘性（スラリー濃度）が大きくなると膜面のせん断力が低下するため膜面にファウリングを生じる。VSEPでは膜面に振動を与えるためたとえ粘性の大きい液体やスラリーが流れても膜面に常にせん断場が形成されファウリングが防止される。またスラリーそのものに振動に基づくせん断力を与えることでスラリーの流動性を助長する。この挙動は被処理液に振動を加えることで粒子間に捕捉されている水分が自由水となって流動を開始する結果みかけの粘性係数が低下する現象を利用したものである。

(4) 高効率

VSEP では膜面を動かすエネルギーの大半が膜面近傍の



第4図 膜表面の流れを示す模式図(従来型クロスフロー濾過装置とVSEPとの比較)

Fig. 4 Motion of slurry on the membrane as compared with the motion in the crossflow filtration system.

流体にせん断力として変換される。従来型クロスフローろ過装置ではこのせん断力を発生させるために配管内を高流速で流さなければならない、スクリーンや曲がり管の圧力損失ならびに各種配管抵抗を考慮した場合、液体輸送のために投入されたエネルギーがファウリングを防止するせん断力へ変換される効率は10%程度と小さい。

(5) 機械的信頼性の保証

VSEPの駆動部分はトーションスプリングと偏心ベアリングの2箇所であり、前者はその繰り返し応力に対する寿命が半永久になるよう設計されている。後者には自動潤滑機構が採用されている。

(6) コンパクト設計

27 m²のフィルターパックをもつVSEPの設置面積は1.1 m²でよい。従来型クロスフローろ過装置で同じ膜面積を有する設備はこの10~50倍のスペースを必要とする。

(7) 簡単なテスト

顧客のサンプルを使ってVSEPの性能を実証することが出来る。VSEPでは逆浸透膜(RO, NF), 限外ろ過膜(UF), 精密ろ過膜(MF)等に代表されるあらゆる膜種を使ってろ過テストを行い、サンプルに合致した膜の選定を行うことが出来る。

(8) 低コストの実現

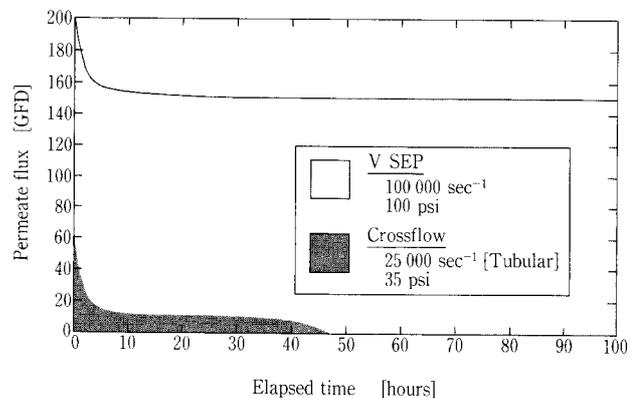
VSEPでは前述した特長のために省エネルギー、処理時間の短縮、膜面積の減少、膜の交換回数とクリーニング回数の低減、設置面積の減少、駆動部分のメンテナンスの減少を実現した。これら特長が膜分離システムに寄与する経済効果は大きい。

2. 実績紹介

VSEPはそのフレキシブルな適用性から、化学、食品・飲料、医薬、印刷塗料、紙パルプ、廃水処理、鉍石、浄水・下水処理、石油化学工業分野等極めて広範囲の産業分野に実績がある。次にVSEPの主要な実績例を紹介すると共に、第1表に実績をまとめた。

2.1 ラテックス濃縮

化学工業分野の代表的製品の1つであるラテックスはそ



第5図 ラテックス濃縮における濾過流束の変化(従来クロスフロー濾過装置との比較)

Fig. 5 Comparison of permeated flux between crossflow filtration and VSEP for Latex treatment (9.5 wt %).

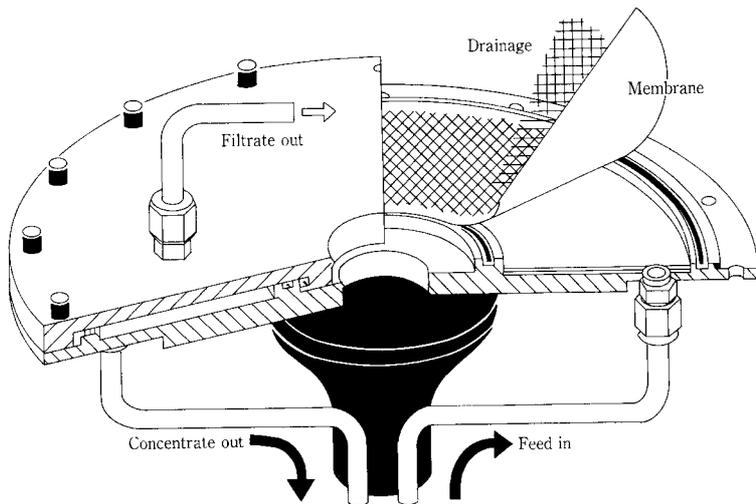
の濃縮にVSEPが適用出来る。膜分離法を適用することで、エネルギー使用量が大きい蒸発器を使用するよりも低コストで濃縮が可能になる。また、反応缶洗浄廃水からラテックスを回収することでこの洗浄廃水の廃棄コストを大幅に削減した実績がある。このような膜法は従来型クロスフローろ過装置でも適用可能であるが、ファウリングによって長時間安定した運転が出来ないのが現実である。ところがVSEPを用いると、振動によるファウリング防止機能により従来よりも高流速でしかも長時間安定して運転できることが立証された(第5図)。VSEPが適用されているラテックスにはPVC, ABS, SBラテックスなどがある。これらラテックスの濃縮実績は第1表中に示されている。

2.2 炭酸カルシウム濃縮

地下水からの炭酸カルシウム回収やフィルター用炭酸カルシウムの濃縮にVSEPが適用されている。その濃縮率も極めて高く、数%から60%までの濃縮が出来ている(第1表参照)。このような特長から米国で使用実績が高い適用

第 1 表 VSEP の実績
Table 1 Applications of VSEP

Application	Init. [wt%]	Final [wt%]	Rate [L/m ² /hr]	Membrane
Chemical Processing				
Latex A	23	63	296	UF
B	24	54	398	UF
C	16	43	124	UF
D	40	60	109	UF
Aluminium Oxide	3	15	213	MF
Colloidal Silica	5	40	175	UF
Phosphoric Acid	2	38	138	NF
Arsenic Acid	5	50	114	NF
Pulp and Paper				
Bleach Plant Effluent	PPM	5	107	NF
Black Liquor	7	41	111	NF
Clarifier Overflow	—	—	211	UF
White Water	1	43	128	UF
Paint and Pigment				
Chromium Yellow	20	45	425	NF
Cobalt Blue	7	35	294	NF
Electrolyte Paint	2	33	170	UF
Latex Paint	4	65	270	UF
Waste and Pollution				
Oil in Water	3	50	170	UF
Paint Plant Wash	1	32	155	UF
Scrubber Effluent	1	21	146	NF
BOD Reduction	0.3	3	145	NF
Silver Recovery	0.5	15	340	UF
Biosludge	2	46	153	NF
White Water	0.5	50	128	UF
Organic Dye	PPM	9	175	UF
Municipal water				
Well Water	—	—	510	UF
Activated Sludge	0.3	32	111	UF
Reclaimed Water	—	—	255	UF
Minerals				
Tri-metal Slurry	5	52	170	UF
Kaolin	20	50	340	UF
Bentonite	6	11	24	UF
Alumina	10	58	340	UF
Calcium Carbonate	10	60	85	UF



第6図 VSEP Series Lのフィルターパック模式図

Fig. 6 Schematic diagram of membrane module for VSEP Series i.

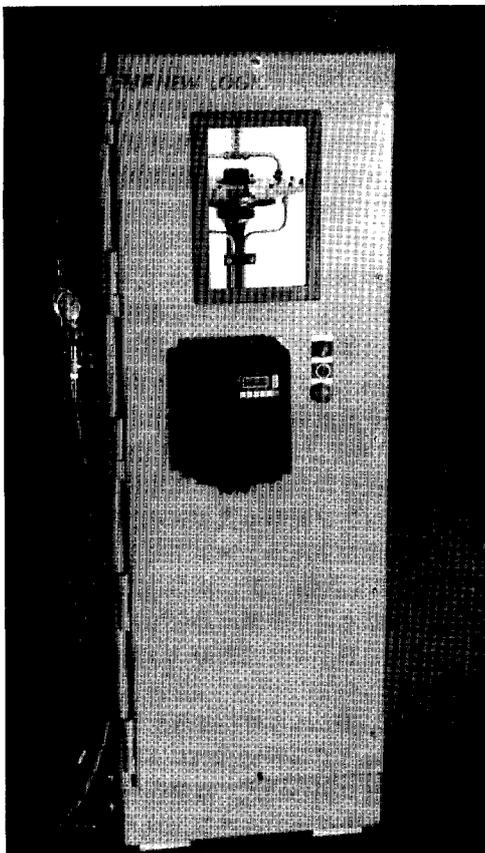


写真3 VSEP Series L (ラボスケール)の配置例
Photo 3 VSEP Series L unit, laboratory scale.

分野とされ、1社より約100機の受注を果たしている。また他のユーザーでは2年間無停止での運転実績から、今後10年間で全世界50プラントにVSEPを導入することになった。

2.3 抗生物質の濃縮

VSEPは抗生物質の濃縮と洗浄操作に使用されている。初期濃度2%の原料を36%にまで濃縮したものをスプレッドライヤにて乾燥後最終製品にする。既存の濃縮法をとらずにVSEPを採用した理由の1つはコンパクトであることと、最大の理由として分画分子量200の膜を用いてTOC, COD, BODの除去が出来たため、これら不純物処理のための工程が不要になったことである。

2.4 廃水処理

自動車製造設備からの廃水処理にVSEPが適用されている。廃水中には有害物質が含まれており、これら有害物質の除去に1週間で数百万円を要した。限外ろ過膜を装着したVSEPを用いることで廃水スラリーを濃度50%のスラッジに濃縮してこれをボイラーにより焼却している。この結果約4ヶ月でVSEPの原価償却を果たした。

2.5 顔料・色素

顔料・色素の濃縮や洗浄操作にVSEPが適用されている。従来からこれら操作にフィルタープレス機が使用されてきたが、この装置の操作には常にオペレータの配置を必要とし、しかもろ布のメンテナンスと交換回数にコストがかかっていた。VSEPでは常時オペレータを必要とせず、従来装置にくらべてはるかに少ないメンテナンスで運転が出来る。VSEPを用いて色素を約40%にまで濃縮出来ている。

2.6 飲料水ろ過

世界各国が飲料水に関する法規制を施行する中で、これまで対象外であった微粒子や微生物コンタミの除去が必要になってきた。これらを凝集沈殿法や活性炭吸着法等の従来技術で除去することになると多大の設備とコストが必要となる。これら処理に膜分離装置を適用することで規制値をクリアする水質の飲料水製造が低コストで可能になる。VSEPに代表される膜分離装置を用いることで薬品使用量、設置面積の減少が期待出来るばかりか、浄水汚泥の大幅削減が可能になる。

3. 適用性の検討

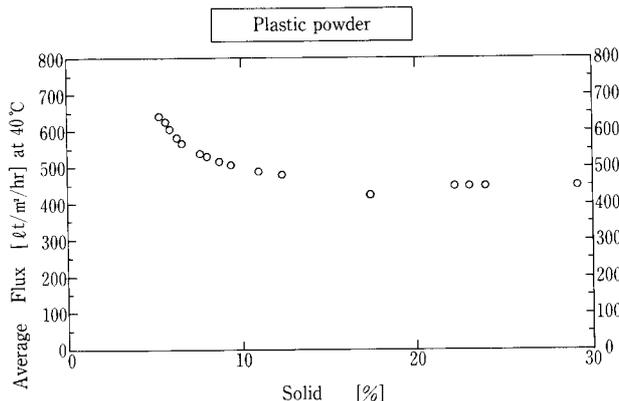
神鋼パンテックでは技術研究所にテスト用VSEP Series Lを配置した。写真3にVSEP Series Lを示す。膜面積0.045 m², 振動周波数約60 Hz, 振幅25~30 mmの範囲で操

作することが出来る。第6図にフィルターパック部の模式図を示す。この図に示すように、この装置には各種逆浸透膜(RO, NF), 限外ろ過膜(UF), 精密ろ過膜(MF)が簡単に取付可能であり、顧客のサンプルに応じて最適な膜の選定が可能である。またスラリー濃度を変化させてろ過テストを行うことにより、最適な操作条件の特定、必要膜面積の決定(スケールアップ)が出来るようにしている。

第7図にSeries Lを使って、ろ過流速に対するスラリー濃度依存性を測定した結果を示す。Series Lでは実際の濃縮テストは出来ないが、供給濃度を徐々に上げていく方法により任意濃度のろ過流速を得ることが出来る。ろ過流速はスラリー濃度の上昇と共に低下する傾向にある。本データに基づき実機(Series i)の計画を行う。Series iは1パス操作なので上流側ほどスラリー濃度が低いため透過流速が大きく、下流ほどスラリー濃度が高くなるため透過流速が小さくなる。この操作を1つのフィルターパック内で行うため高濃度スラリーまで処理が可能になる。

む す び

振動型膜分離装置VSEPはその優れた特長と幅広い適用性から、膜分離装置の適用領域を大幅に拡大した。従来型クロスフローろ過装置では適用困難であった高濃度スラリーの脱水、洗浄、濃縮操作が可能になったため、従来からこれら高濃度スラリーの処理に使用されてきた遠心分離機、蒸発機、フィルタープレス機や真空型回転ドラムフィルター等にくらべて低コストで処理が可能になった。VSEPによ



第7図 濾過流速のスラリー濃度依存性の一例
Fig. 7 Effect of permeated flux on slurry concentration.

る高度な膜分離技術によりプロセス改善と製造コストの削減が期待される。

なお、食品・医薬分野(製造プロセス、廃水処理プロセスを含む)への振動型膜分離装置の販売権は米国PALL社のライセンスになっている(商品名PALLSEP)。

神鋼パンテックは米国PALL社と業務提携契約を締結し、日本市場における食品・医薬分野への振動型膜分離装置の販売も行う。