



21世紀の液体清澄化技術を考える・・・・・

1. 液体清澄化技術の過去・現在・未来 —遠心分離機—

Hans Axelsson *・青木 裕**

まず遠心分離機と称される化学装置を2分する遠心沈降機と遠心汎過機(脱水機)の開発史を踏まえながら各機種の紹介をする。統いて簡単に両者の原理的背景に触れたあと、「液/液分離」と「固/液分離」という液体清澄化における遠心分離機の使い分けについて述べる。最後に最新の開発動向、将来展望に言及する。

1. 主要遠心分離機の開発史とその種類

1-1. 遠心沈降機(表1)

1-1-1. バケット、テストチューブ式

遠心力を利用する分離技術は2000年以上の歴史を有する。古代の文献にはバケットをぐるぐる回して蜂蜜やオリーブ油を清澄していたという記述が見える²⁾。初期の回転体は木製だったが、13世紀頃から鉄製に変わり、食品や染料の製造に使用されていた¹⁾。1852年動物血液中の血球の沈降速度に関する研究は、ウイーンのMoser教授の開発した手回しのテストチューブ式遠心分離器を利用したもので、これが現代のボトル、テストチューブ式の原型になつた。Moserの約20年後、ドイツの企業家Wilhelm Lefeldtはバケット式を開発し見本市に出品したが、バケットの留め金がはずれ垂直方向に動いた²⁾。

1-1-2. ソリッドーボウル (バッチ式と連続式)

1877年、Lefeldtはドラムを高速で回転させる画期的な遠心機によって牛乳を分離することに成功した。同じ年、スウェーデンの技術者Gustaf de Lavalはバッチ式ではあるが、クリームを各バッチ毎に回収できるよ

うにした(図1)³⁾。

De Lavalはバッチ式に満足できず、翌年の1878年に連続式(図2)を開発したが、ボウルが4 MPaの内圧に耐えず亀裂が走り液漏れを生じた³⁾。そこで1881年同じ構造ではあるがボウルを280 mm径の一体型鍛造品とし9,000 rpmの回転に耐えるようにした。これが全世界で好評をもって迎えられたDe Laval型として知られる遠心分離機である(図3)。さらにスチームタービン駆動を採用することで大量分離に対応できるようになった。また氏は1889年に垂直円筒型を発明するが、翌年Alph特許を買収した関係で商業化を断念した。これは26年後USAでコピーされた(図4)⁴⁾。

1-1-3. ディスク型(1)連続式ソリッドーボウル

1888年ドイツのClemens von Bechtolsheimは円錐の上部を切り落とした形状の「ディスク」を何枚も積み重ねたAlpha discを発明した。ディスクはボウルの中で非常に狭い間隙をもつて重なっているので、それまで100 mm以上はあった沈降距離が一挙に1 mm程度

表1 遠心沈降機

タイプ	固形分排出方法	通液量 [l/h]	固形分含有量 [% by vol]	固形分処理量 [l/h]	Σ value, [m ²]	最大G	分離 固形分 状態
ディスク	マニュアル	20 - 100,000	<1	0	1,000 - 300,000	10,000	硬いペースト
ソリッド エジェクティング 円周方向	間欠自動	20 - 100,000	<25	<3,000	1,000 - 400,000	14,500	濃いスラリー 流動性
ソリッド エジェクティング 垂直方向	間欠自動	1,000 - 150,000	<15	<1,000	110,000 - 500,000	15,000	濃いスラリー 流動性
ノズル 圧送タイプ	連続	1,000 - 180,000	4-30	>150 <40,000	69,000 - 180,000	15,000	濃いスラリー 流動性
ノズル 外周排出	連続	300 - 400,000	2-30	>3000 <60,000	35,000 - 250,000	11,000	薄いスラリー
デカンタ	スクリュー により連続	300 - 200,000	5-50	<50,000	400 - 25,000	10,000	濃いスラリー 半固形
円筒型	マニュアル	20 - 7,000	<1	0	1400 - 4500	31,000	硬いペースト
かき取り付 ソリッドボウル	間欠 かき取り	10 - 6,000	1-30	<-1000	800 - ~20,000	20,000	硬いペースト

* Alfa Laval Separation AB, Tumba, Sweden

** Yutaka AOKI ; アルファ・ラバル(株)

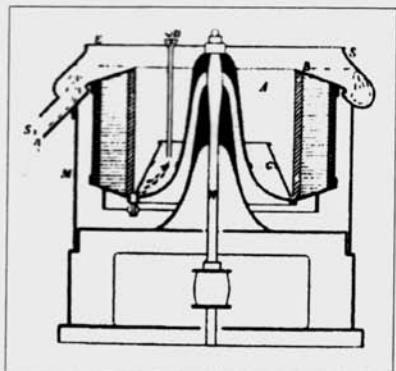


図1 ソリッドボウル バッチ式 (1877年)

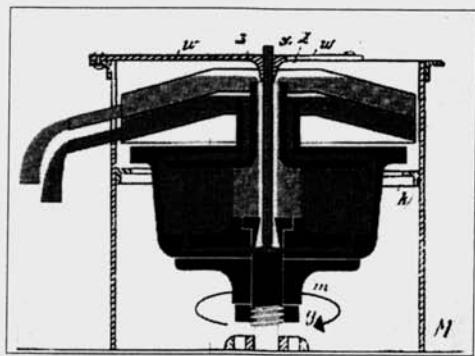


図2 ソリッドボウル 連続式 (1878年)

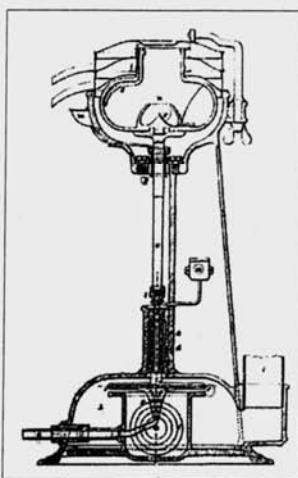


図3 De Laval型 (1886年)

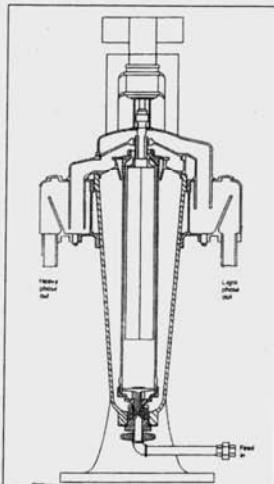


図4 円筒型

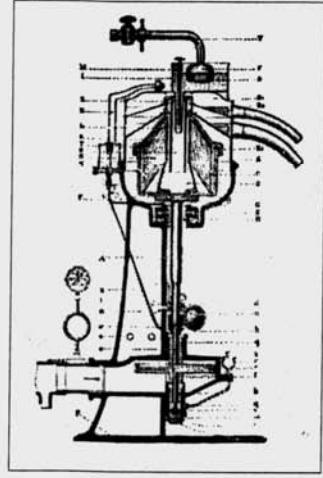


図5 最初期のディスク型遠心分離機 (1895年)

度まで縮まった。これにより分離処理量が飛躍的に増大するとともに、ロータや駆動系をきわめて小さくできるようになった。De Laval の会社がこの特許を買って最初のディスク型遠心分離機を発表した 1890 年、一夜にしてすべての競合のソリッドボウル型は時代遅れになり、その後数年でミルクセパレータの販売台数は 100,000 台を越えた (図 5)³⁾。

第一次大戦中に船舶内の巨大なディーゼルエンジン用潤滑油や燃料油を効率的に清澄する需要が沸騰し、ミルク用を改造してオイルピューリファイヤ、クラリファイヤが誕生した。今も船舶用遠心分離機はディスク型の主要用途である。

1933 年に登場したボウルに液が完全に満たされた状態で下部から液が供給される密閉型は製品に衝撃を与える、泡立ちやエア接触もないので、乳業をはじめ、醸造、油脂で使われている⁵⁾。

1-1-4. ディスク型(2)ノズル型

ノズルから連続的に分離した固形分を排出する最初のタイプは 1896 年イーストセパレータとして登場し

た⁶⁾。その他の固形分の分離に関してはさまざまな問題点が浮上し開発が遅れ、本格的なノズル型は 1920 年代になってからで、今でも多用されているスター用の上部駆動ノズル型は 1930 年 USA で発売された。

1-1-6. ディスク型(3)ソリッドエJECTイング型

1905 年ドイツで全速運転中に固形分を排出する機構を持った排水処理用遠心分離機が発明されたが、この機構で商業的に最初に成功したのは 1927 年に発表されたデンマークの Titan 社製である。その後 1950 年代に現在主流になっているスライディングボウルボトム内蔵式が誕生している (図 6)。

1-1-7. 無孔壁バスケット式 (図 7)

1880 年頃単純無孔壁バスケット式が開発されたが、静止型のフィルタに取って代わられた⁷⁾。その後石炭脱水や工業用油剤関係で重用される。20 世紀初頭から主に化学工業の液/液分離で使われるようになる。1990 年頃低速で固形分をかき取るスクリーパ付が発表される。

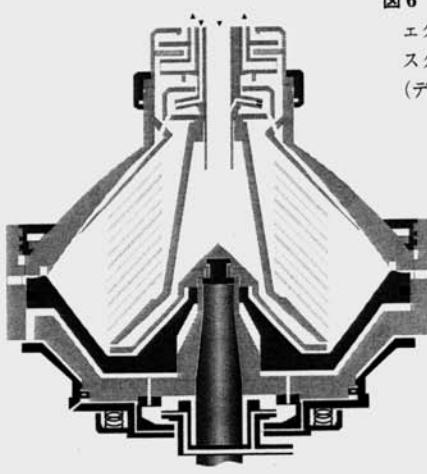


図6 ソリッドエジ
エクティングディ
スク型遠心分離機
(ディスク型)

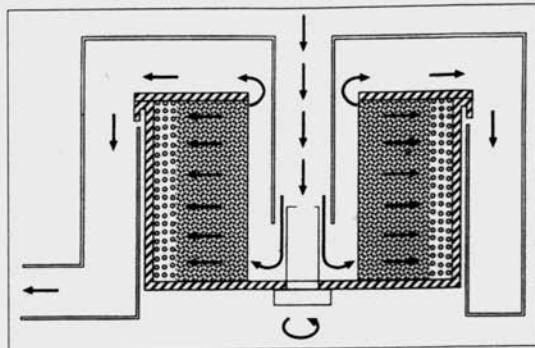


図7 無孔壁バスケット式

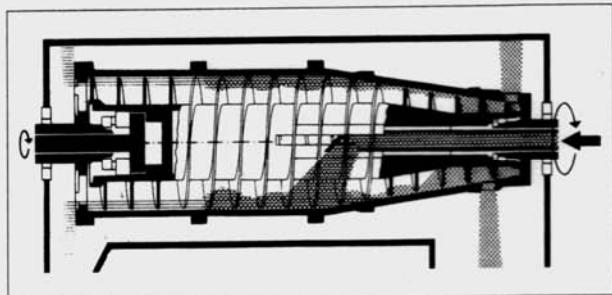


図8 デカンタ

1-2-2. ピーラー式 (図10)

バッチ式でふつう水平型でボウルの外周壁に泥液を排出する穴があり、ボウルより大きな径の環状の部屋

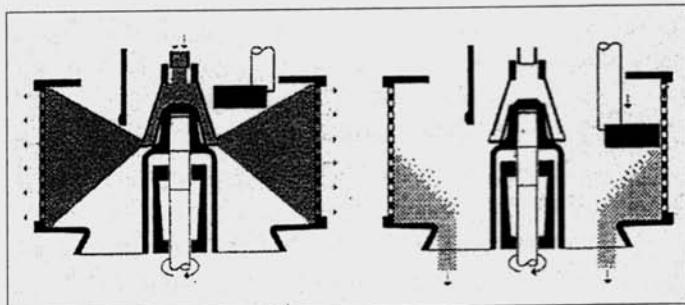


図9 バスケット式

1-2-1. バスケット式 (図9)

最初期に登場した機種で、バッグを挿入して分離した固形分を引き出すマニュアルタイプとナイフでかきとて下部に落下させる自動タイプがある。大型機では振動を抑制するために上部駆動になっている。

全自動バスケット型は高付加価値の薬品、化学品で多用されるが、シュガー、スターの製造工程でも多く見られる。また排煙脱硫工程における石膏の脱水でも使われている。

表2 遠心汎過機

タイプ	最大G	最小固形分量, [% w/w]	最大粒子サイズ [μm]	汎過フラックス [m/s·10 ⁶]	最大ボウル径 [mm]
スリップ排出コニカルスクリーン					850
振動コニカルスクリーン	30-120	50	300	700	1,500
タンブリングコニカルスクリーン	50-300	50	200	350	
スクロールコニカルスクリーン	500-1,500	35	75	210	1,000
ブッシャー	600-2,000	40	75	140	1,270
スクリーンボウルデカンタ	500-2,000	20	20	70	1,000
ピーラー	300-1,600	10	10	3.5-35	2,000
バスケット	200-1,200	10	5-10	3.5-7	1,520
転回遠心汎過機	700-1,500				1,300

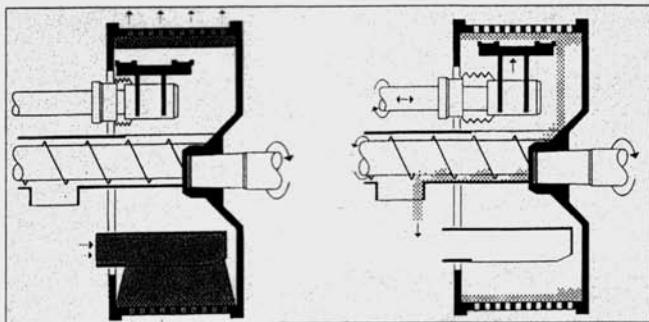


図 10 ビーラー式

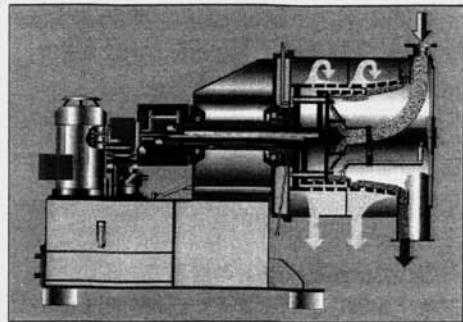


図 12 ブッシャー式

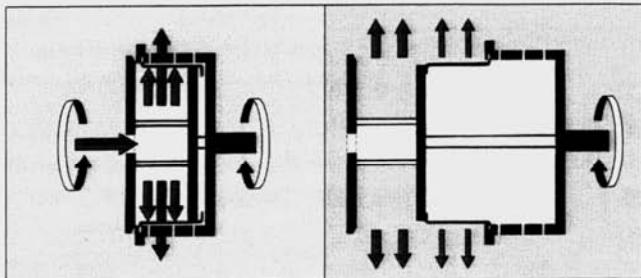


図 11 転回式遠心汎過機

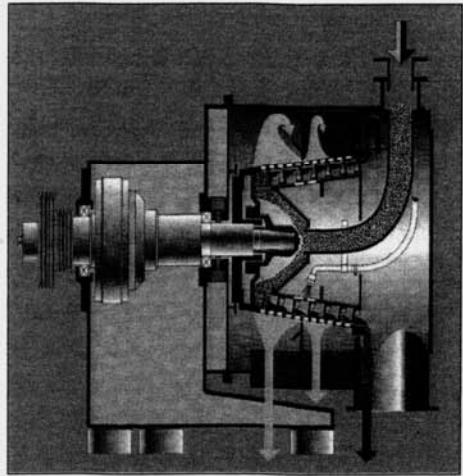


図 13 スクロールスクリーン式

に汎液を吸い出すチューブがある（いわゆるサイフォンタイプ）⁷⁾。

用途は全自动バスケット型と重なる。

1-2-3. 転回式遠心汎過機（図 11）

1970 年に開発された本機はドラムに巻かれた汎布をバッチごとに裏返すことで固形分を排出する。改良が続けられ、1990 年ドラム内の内圧を 5～6 bar にできるものが、それから数年後に乾燥ガス（エアまたは窒素）でさらにケーキを脱水できるものが開発された。

用途は全自动バスケット型と重なる。

1-2-4. ブッシャー式（図 12）

1930 年代に開発され⁸⁾、1951 年に 2 ステージ式が紹介される。円錐型のスリップが 1 分間に 30～60 回の往復して固形分を押し出す。

100 μm 以上の化学品結晶の脱水に使用される。

1-2-5. スクリーン式

回転差や振動によってスクリーンに捕捉された固形分を吐き出す種々のタイプがある。

振動を利用するコニカルスクリーン式は石炭の脱水で、スクロールスクリーン式（図 13）は石炭前処理工程でそれぞれ使われている。

2. 遠心分離の原理

2-1. 遠心沈降

遠心力というのは回転体が生み出す擬似力であり、

最初に円周運動である遠心力の法則をまとめたのはオランダの科学者ホイヘンス（1629～1695）である。遠心力は角速度の 2 乗、粒子の質量、回転軸からの距離にそれぞれ比例する。一般的な表現としては相対遠心力 G-値または Z-値が常用されている。

$$Z = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} \quad (1)$$

ただし、

ω : 角速度 [s⁻¹]

r : 回転軸からの距離 [m]

g : 重力加速度 [9.81 m/s²]

遠心分離が適用される場合の沈降速度 V_c は、ストークス則を組み合わせて次のように表現される。

$$V_c = \frac{\rho_p \cdot \rho_l}{18 \cdot \eta} \cdot d_p^2 \cdot \omega^2 \cdot r \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

ただし、

ρ_p : 粒子の比重 [kg/m³]

ρ_l : 液体の比重 [kg/m³]

d_p : 粒子径 [m]

η : 液体の粘度 [mPa·s]

V_c は $Z \cdot V_g$, と等しい。ここで V_g は $1 \cdot g$ の場合の沈降速度、すなわち重力沈降速度である。

遠心沈降機の分離能力を比較する場合、能力(通液量)が Q である沈降タンクを想定する。

$$Q = V_g \cdot A \quad (3)$$

ここで、 A はタンクの面積である。この面積に相当するのが遠心沈降機の能力で、次の 3 つの数値が提案されている。

- ・ Σ (シグマ) 値
- ・ L_f (Leistungsfaktor) 値
- ・ KQ 値

この中でもっとも広く用いられているのが Σ 値である。この値は粒子および流体力学に関し、かなり単純化した前提に基づいており、また L_f 値についてもその傾向が強い。一方、 KQ 値はディスク型遠心分離機による乳脂肪の分離実験から経験的に導かれたものである。実務上は Σ 値によるスケールアップでも不具合は生じない。

$$\Sigma = \frac{V \cdot \omega^2 \cdot r_e}{g \cdot s_e} \quad [m^2] \quad (4)$$

ただし、

V : ボウル容量 [m^3]

r_e : 回転軸からの距離 [m]

s_e : 沈降距離 [m]

表 3 に種々の遠心沈降機における Σ 値の計算方法を示した。

2-2. 遠心沪過

通常遠心沪過機における固形分の沈降は、ふつうの沪過に比べて早くなる。よって沪過速度が遠心沪過機の能力を決定する。円筒型の沪過機におけるケーキの沪過速度は Q は⁷⁾,

$$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot W \cdot \rho \cdot \omega^2}{\ln(r_B \cdot r_s)} \cdot (r_B^2 \cdot r_s^2) \quad [m^3/s] \quad (5)$$

ただし、

k : 固有透水係数 [m^4/Ns]

W : ケーキの厚み [m]

ρ : 液比重 [kg/m^3]

r_B : バスケットの半径 [m]

r_s : ケーキの半径 [m]

r_o : 液の内半径 [m]

3. 液体清澄化における遠心分離機

3-1. 液 / 液分離

この分野ではできるだけ早い沈降が好まれるため、

表 3 遠心沈降機における Σ 値の計算方法

タイプ	Σ 値の計算式	凡例
ディスク型	$\frac{\pi \cdot \omega^2}{g} \cdot \frac{2}{3} \cdot N \cdot (r_2^3 - r_1^3) \cdot \cot \alpha$	r_2 : ディスク外径 r_1 : ディスク内径 N : ディスク枚数 α : ディスク半頂角
デカンタ	$\frac{\pi \cdot \omega^2}{g} \left[L_1 \left(\frac{3}{2} \cdot r_2^2 + \frac{1}{2} \cdot r_1^2 \right) + L_2 \left(\frac{r_2^2 + 3r_2r_1 + 4r_1^2}{4} \right) \right]$	L_1 : シリンダ部の長さ L_2 : コニカル部の長さ r_1 : 液の内半径 r_2 : ボウルの内半径
円筒型	$\frac{\pi \cdot \omega^2}{g} \cdot L \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \left(\frac{2r_1^2}{r_2^2 + r_1^2} \right)}$	r_1 : 液の内半径 r_2 : ボウルの内半径 L : ボウルの内部長さ

静止分離よりもさまざまな遠心沈降機が広く使われている。特に食品工業のように製品が劣化しやすく衛生的な処理が必要な場合、すばやい沈降という点は有利になる。また静止分離に比べ遠心沈降機はかなりコンパクトなので狭い船舶内で使用されている潤滑油、燃料油の洗浄には最適である。さらに化学・製薬工業における溶剤と水の分離のように爆発の危険を伴う液 / 液分離では小さな容量によって液の保持が少ないので安全であり、窒素などの不活性ガスのシールにも好都合である。

液 / 液分離は遠心沈降機のもとも一般的な用途であり、中でもディスク型の場合は固形分の含有量によって、ソリッドボウル、ノズル、ソリッドエジェクティングの各タイプを使い分けている。食品工業ではデカンタの 3 相分離型がよく見られる。すべての遠心沈降機の 90 ~ 95% が液 / 液分離に適用されている。

3-2. 固 / 液分離

この分野には液 / 液分離に比べて圧倒的な種類の装置がある⁸⁾。例えば遠心力を利用するもの以外に「沈降」に属するのは、静電気、磁力、重力で分離する装置など 19 種類。「沪過」に属するのは、重力、真空、油圧、機械的圧力で分離する装置など 38 種類。

式 (5) で明らかなように、フィルタケーキの透水率が遠心沪過機の能力を決める重要なパラメータである。Zeitsch は、固有透水係数 k は遠心力と圧縮時間を正しく設定したうえで測定すべきであると言っている。氏は表 4 のように遠心沪過機と遠心沈降機の使い分けを示した⁷⁾。

遠心沈降機の使い分けは、式 (3) に示す固形分の重力沈降速度を測定することで行う。すなわち、 10^{-4} m/s レベルはデカンタ型、 10^{-9} m/s はディスク型、そして 4×10^{-12} m/s は超遠心機となる。

ちなみに微細で小スケールの固 / 液分離に適したタ

表4

固有透水俗数 k [m ⁴ /Ns] · 10 ¹⁰	機種
> 20	ブッシャー
20 ~ 10	ビーラー
10 ~ 0.02	バスケット
< 0.02	遠心沈降機

ンジエンシャルフロー汎過器(TFF)が、バイオテクノロジー分野でディスク型遠心分離機の代替として使われている。

表5⁹⁾で固/液分離における遠心分離機の比較を行った。固/液分離の最適機種の選定において便利な公式は存在しない。以上述べた各機種の特性の事前把握を行いあらかじめ機種を絞ってから無駄のないパイロットテストを行って独自に選定する必要がある。もちろん併せて機器のサービスやスペアパーツの供給状況、運転コスト、そして購入コストを考慮するのは当然である。

4. ディスク型遠心分離機の開発動向

4-1. 幅広い流量レンジ

1999年450 m³/hという世界最大のコーンスター用ディスク型遠心分離機が開発された。また切削油や油圧作動油などの分野にフィルタ代わりとしてプラスチックのディスク、アルミのボウルという軽量、超小型の遠心分離機が登場した。

4-2. 脆い製品の処理

剪断力に対して脆い牛乳、熟成ビールなどは長年下部供給の完全密閉型のディスク型遠心分離機で処理されてきたが、それに代わる上部供給のディスクインレットが開発された。入口部で十分な液保持することでエネルギーを分散させ、しかも製品に必要な加速を促し、従来の上部供給型に比べ剪断力を抑えた供給を可能にした¹⁰⁾。また出口ポンプの機能をもつペアリングディスクでは、エアの巻き込みを減らし製品劣化を防ぐ目的で「はりねずみ」形を採用した。

4-3. インターフェイスコントロール

液/液分離でもっとも重要な操作は、重液と軽液の間のインターフェイスを最適な位置にすることである。製品である軽液から重液を除去したい場合、できるだけ効率的に軽液から重液の液滴をディスク間で分離するために、インターフェイスはディスクの外周部近くにあることが必要である。その位置は2相の比重差と回転軸からの半径で決まる。これまでには比重板によっ

表5 固/液分離における遠心分離機の比較

タイプ	運転	処理能力	粒径	最小固形分含有量	残留水分	固形分の洗浄	最大G
バスケット	バッチ	中	中	0	極少	無制限	3,000
ビーラー	バッチ	大	中	0	極少	無制限	3,000
コニカルスクリーン	連続	大	大	5~10重量%	少	ふつう	2,800
ブッシャー	連続	大	大~中	15重量%	やや多	良好	1,600
円筒型	バッチ	小	極小	0	極少	不可	20,000
ディスク、ソリッドエフェクティング	半連続	大	小	0	多	制限あり	8,000
ディスクノズル	連続	大	小	0	多	制限あり	9,000
デカンタ(スクリーンボウル)	連続	大	中	0	少	不可(良好)	7,000

て重液出口に背圧をかけることで位置をコントロールしていた。インターフェイスを変えたい場合は、遠心分離機を止めて、比重板を交換しなくてはならなかった。そこで運転中に、その位置をコントロールできる機構が開発された。これは2相の比重差が小さいか、または変化する場合に有効である。

4-4. プロセスバリデーション

GMPやGAMPなどがバイオ、製薬、食品で重要視されるようになり、遠心分離機は単体ではなく顧客の品質基準にあったバリデーションを済ませたモジュール(遠心分離機+周辺機器一体ユニット)として供給されるようになった(図14)。

5. 将来展望

5-1. コストパフォーマンスの向上

分離性能を向上させる技術改良が製造コストを下げる。沈降性能、汎過性能を上げる試みは日々各社で行われている。

5-2. メンテナンス思想の改善

遠心分離機が製造工程の核として使用されている場合、突発的な故障は莫大な損失を与える。従来からベアリング寿命などからメンテナンス周期を決定していたが、今後はより綿密で積極的なメンテナンスを意識的に推進することが求められる。同時に故障を未然に防ぐために機械的、性能的に機械を連続監視できるシステムを構築する必要がある。

5-3. ライフサイクルコストの分析

現在、遠心分離機を使用しているほとんどの産業でライフサイクルコスト分析に興味をもっているところは少ないようである。今後は製造コストをライフサイクルという考え方を含んだ幅広い観点から見直す動きが出てくるであろう。

5-4. 環境対策

環境に対する考慮がより重要になるであろう。すな

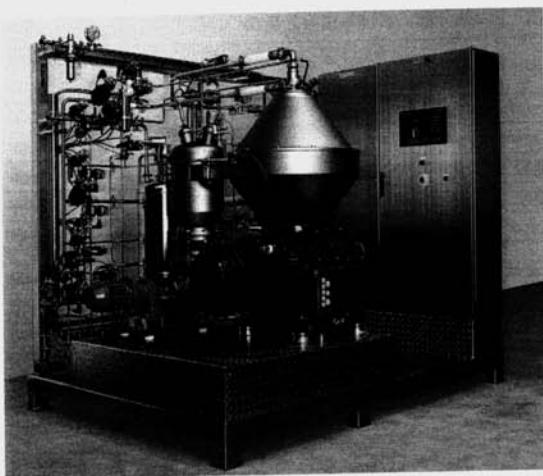


図 14 減菌・完全密閉仕様 BTPX 710 モジュール

わち、省エネルギー（より少ない動力で同じ分離性能）、騒音（防音に関する装備、工夫）、排気（回転によって生じる排気、製品ペーパーをできるだけ外部に漏らさない構造）などについての改善が求められる。

5-5. モジュール納入

単体ではなく徹底的にテストされバリデーションが済み、性能保証されたモジュールとしての納入が増えるであろう。これによりユーザーは設備計画や運転条件の設定に煩わされることなく製造に専念できる。現代のアウトソーシングの流れにも合致している。

参考文献

- 1) C. Alt, "Centrifugal Separation" in H.S. Muralidhara ed., *Adv. Solids-Liq. Sep.*, Battelle Press, Columbus, Ohio 1986, pp. 107-139
- 2) C.-G. Nilson, *Proceedings from Symposium no 1, 1977*. Tekniska museet, Stockholm 1979, 169-181
- 3) B. Magnusson, From Gustaf de Laval's cream skimmer to industrial processing, Alfa-Laval AB, Stockholm 1988
- 4) D.M. Landis, *Chem Eng Progr* 61, 5 (Oct), 58-63 (1965)
- 5) H. Axelsson, B. Madsen, "Sedimenting Centrifuges" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim 2000 (in press)
- 6) H. Axelsson, "Centrifugation" in C.L. Cooney, A.E. Humphrey eds, *Comprehensive Biotechnology Vol. 2: The Principles of Biotechnology: Engineering considerations*, Pergamon Press, Oxford 1985, Chapter 21, 325-346.
- 7) K. Zeitsch, "Centrifugal Filtration" in L. Svarovsky ed, *Solid-Liquid Separation*, 3rd ed, Butterworths, London 1990, pp. 476-532
- 8) D.B. Purchas, "An Experimental Approach to Solid/Liquid Separation" in D.B. Purchas, R.J. Wakeman eds, *Solid/Liquid Separation Equipment Scale-Up*, 2nd ed, Uplands Press, London 1986, pp. 1-15
- 9) C. Ambler, *Chem Eng* 76:23, 96-103 (1969)
- 10) L. Borgström, C.-G. Carlsson, C. Inge, T. Lagerstedt, H. Moberg, *Appl. Sci. Res.* 53, 35-50 (1994)

初步から学ぶ水処理技術

—微生物のはたらきできれいな水をつくる—

福田 文治 著

B6・200頁 定価（本体1,800円+税）￥310

豊富な水に恵まれ稲作文化を築いてきた「瑞穂の国」も、近年、急激な産業の発達と都市化が進んだ結果、水の汚染が大きな社会問題を引き起こすこととなった。いまや「水」は、「ごみ」と同様、生活に密着した関心度の高い環境問題である。本書は、もっとも普及している活性汚泥法から超臨界水を利用した最新の処理法まで、排水処理に関する特殊な用語説明を織りまぜながら、初心者でも十分理解できるようにわかりやすく解説。

主要目次

1. 水処理へのアプローチ
—専門用語に慣れ親しむために—
2. さまざまな排水利用技術
3. 汚泥処理
4. 新しい生物処理
5. 近代処理法—超臨界水酸化法—



7693-7083-0



工業調査会

〒113-8466 東京都文京区本郷2-14-7 TEL 03-3817-4706・FAX 03-3817-4709
工業調査会ホームページ URL : <http://www.iijnet.or.jp/kocho/>