

## 第1節 各種分級の操作法とその条件最適化

トリプルエーマシン（株） 石戸 克典

### はじめに

濃縮操作を行った後乾燥し、乾燥粉体から粒径のそろった粉体製品を取り出す工程を乾式分級操作といい、スラリーのまま粒度をそろえる工程を湿式分級操作という。一般に、湿式分級は、乾式に比べ分散性に優れ、凝集による分級性能劣化を受けにくいとされる。遠心分離装置を用いることでサブミクロン分級も可能であるが、液中で遠心分離ローターを高速回転させているため、軸受の損傷・メンテの問題が指摘されている。遠心方式以外では、水平や垂直方向に液体を流し、粉体の沈降速度との差により必要な粒度の粉体を取り出す装置（水篩分級装置）があるが、サブミクロン分級を行うには、沈降速度が遅いため装置が大型化するのが難点である。最近、電場を印加した直立筒状湿式方式の水篩分級装置（連続式重力利用型オーバーフロー方式）を利用して、メンテ性に優れた連続湿式サブミクロン分級を小型の装置で実現したことが吉田<sup>1)</sup>らにより報告されている。一方、濃縮乾燥したバルクを分散し、粉体を一次粒子の状態にして粒度調整する操作を乾式分級と呼ぶ。乾式分散には、ハンマーミルなどの解砕機を使う方法や、インライン・ラウンドシブ（回転式篩）などで空気輸送中篩いながら解砕する方法などが工場によく利用されている。粉体がミクロン領域からサブミクロン領域に入った時に分散しにくくなり、凝集粒子の粗粉への流入で分級性能が落ち込む問題を解決する高性能な乾式分級機が多くの機器メーカーから発表されているので、今回、筆者も多く扱ってきたこの乾式分級技術を中心に解説する。

### 1. 分級についての概論

サブミクロン粒子製造という場合には、粉砕機に対しては1  $\mu\text{m}$ 以下の粒子を可能な限り多く、短時間に、なおかつエネルギーコストがかからぬよう製造するという技術が要求される。また、分級機に対しては、粉砕後でも残留する数 $\mu\text{m}$ 以上の粗大粒子を正確に収率良く除去するという厳しい条件が要求される。微粉体の粒径を調整するためには、粉砕工程とともに分級工程が重要である。高性能の粉砕機と高性能の分級機を組合せる閉回路粉砕分級システムにより粗粉をクリーンにカットした高効率なシステムを作り上げるためにも、分級機の選定は大変重要となる。放射性物質が粉砕時微粉領域に比較的多く集まるケースでは、粉砕時に微粉をできるだけ発生しないように粉砕する、もしくは、微粉を発生しにくい粉砕機を選ぶ対策を行った上で、分級機を使い目標粒度の製品をとりだす（微粉を除去する）ことが必要になる。このとき、高効率の分級機を使えば、除去する微粉を最低レベルに抑えることができ収率増・能力アップにつながる。

微粉を除去するには分級を行えばよく、それには、乾式・湿式分級機による分級、遠心分離機による湿式分離、水系の媒体で粒子表面の微粉を洗い除去する方法、高圧ガスを粒子に吹きつける方法などが報告されているが、比較的扱いが容易で、多くの種類が報告されている分級機についてこれから紹介する。

#### 1.1 各種の分級機の種類と選定

粉体の粒度を揃えることを目的に、粒子径によって粉体を分ける操作を粒度分級という。この粒度分級の操作は、篩い分けと流体分級に大別することができ、さらに流体分級は乾式分級と湿式分級に分類することができる。この乾式分級は気流中粒子の力学的挙動の差を利用して粒径により粒子を分ける操作で、現在は工業的な微粒子分級の主流になっている。一般に乾式分級は特殊な環境を除き、空気流を用いて行うので風力分級と呼び、その装置を空気分級機と呼んでいる。空気分級機を原理的に分類すると、重力分級機、慣性分級機、遠心分級機に大別することができる。重力分級機は重力場における粒子の落下速度あるいは落下位置の差により分級する装置で、比較的粗い粒子の大量処理ができるが精密分級には適していない。慣性分級機は気流の方向を急激に変化させ粒子の慣性力を利用して分級する装置で、こ

れも比較的大容量に適するが精密分級に不適であるとされていた。しかし、最近ではサブミクロン分級も可能となったコアンダ効果利用の微粉用多段型の分級機も販売されている。遠心分級機は自由渦型と強制渦型があり、自由渦型は構造が比較的簡単で、5～50 μmでの分級に適しているといわれている。また、ジェットミルとの相性の良い分級機も開発・販売されている。強制渦型は構造が比較的複雑で、動力費もかさむ欠点があるが、微粉領域（1 μm前後）まで分級が可能で、精密分級に適していることを、筆者が以前<sup>2)</sup>に報告した。

最近、新たな分級機が発表され、分級機の種類は多く報告されているが、代表的なものを以下の、表1にまとめる。

表1 分級機の種類

原理	大分類	小分類	代表的な分級機名・種類
重力場分級	水平流		沈降槽
	垂直上昇流	湿式	直立筒状湿式分級器、ハイドロセパレータ
		空管型	風篩器
		流動層型	多段流動層型分級器
		多段屈曲型	ジグザグ分級機
慣性力場分級	直線型		テーブル式、ベルトコンベア式
	曲線型	インパクト型	カスケードインパクト、バリアブルインパクト
	傾斜型	ルーバ型	エディクラシファイヤ、エアロファインクラシファイヤ
コアンダ効果利用型		エルボージェット、K型分級器	
遠心力場分級	渦状流（自由渦型）	湿式	液体サイクロン
		渦状気流（案内羽根なし）	サイクロン、ファントムゲレン、ジェットセパレータ
		渦状気流（案内羽根あり）	ディスパーションセパレータ、マイクロスピンの、マイクロプレックス、マルチサイクロン
	渦状流（強制渦型）	湿式	ナノカット、ハイドロプレックス
		気流式分級室回転型	ターボクラシファイヤ、アキュカット
	気流式回転羽根型	O-SEPA、ミクロンセパレータ、ターボプレックス、TSP/TTSP	

最近では、とりわけミクロンオーダーの微粉を目標とする分級機の開発がきわめて活発であり、すぐれた機種が多く市場に登場している。そして、現在サブミクロン域へと分級の微細化を展開中の段階である。以下、各種乾式分級機の説明を行う（図1に代表的な分級機の構造<sup>3)</sup>を示す）。

### (1) 篩

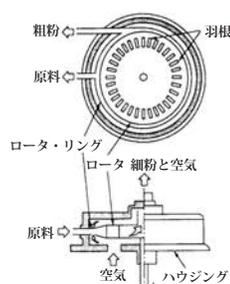
一般には工業生産レベルでは100 μm以上の分級に適するといわれているが、半田粉などの金属球状粉の37-44 μmカット程度までであれば、分級機同等以上の性能を発揮することが知られている。篩については、次の項で詳しく説明する。

### (2) 重力分級

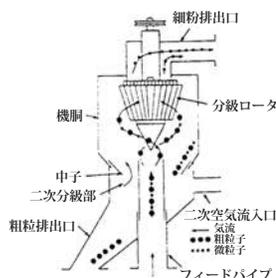
粒子の落下速度の違いによって分けるものであり、乾式では精密分級には適さないとされている。しかし、湿式では大きな生産量は期待できないものの、直立筒状湿式分級機（水篩分級装置）を使って、0.1 μm単位で球形粒子をそろえるという精密技術もある。この技術は、たとえば、3 μm直径の粒子のみを回収するというので、液晶用のスペーサ材として広く使われているポリマーやシリカの製造に利用されている。また、篩の初めにも触れたが、電圧を印加することでサブミクロン連続分級可能な小型の装置も発表されている。

### (3) 慣性分級

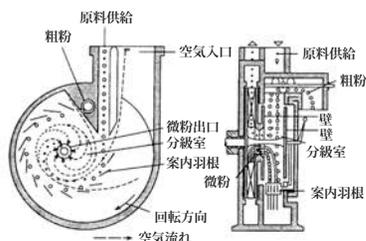
粒子の慣性力を利用して分級するというもので、一般には粒度の粗い（10～50 μm）ところでの分級に適するとかつては言われたが、最近、粉体の分散に工夫してミクロンオーダーの高性能分級が可能という実績、納入例が多く報告されている。回転ローター式では、ある程度発生してしまう粗粉の飛び込みが、特に、ミクロンオーダーの分級時に慣性分級では少ないという大きな利点がある。この強みは、プラスチック、粉体塗料、トナーなどの軽い粉体の時に顕著となるが、金属粉のような重い粉体や針状物質でも粗粉の微粉への飛び込みの少なさは目を見張るものがある（代表例：エルボージェット、K型分級機、バリアブルインパクト）。また、慣性分級と遠心分級の間に位置づけられるような、ルーバ設計を工夫したサブミクロン分級も対応可能な分散分級機も登場している（代表例：マイクロスピンの、エアロファインクラシファイヤ）。



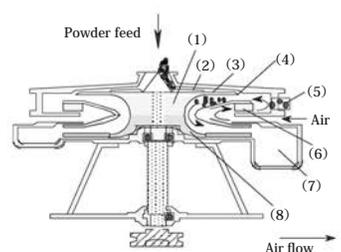
強制渦型遠心分級の例 (晃栄産業社  
ドナセレック (旧名アキュカット))



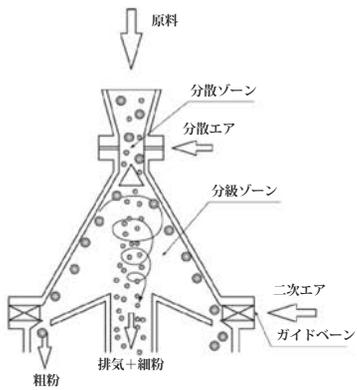
強制渦型遠心分級の例 (ホソカワミ  
クロン社ミクロンセパレーター)



半自由渦型遠心分級の例 (ユーラステクノ社  
マイクロカット (旧名マイクロプレックス))

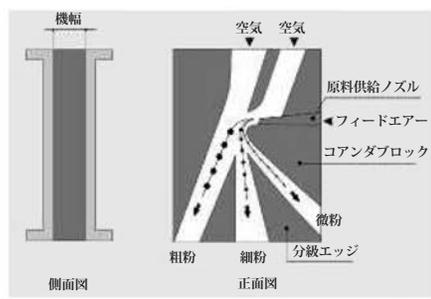


(1) Classification rotor (2) Dispersion blades  
(3) Dispersion disc (4) Classification blades  
(5) Coarse fraction outlet (6) Auxiliary blades  
(7) Scroll casing (8) Balance rotor



半自由渦型遠心分級の例 (日本ニューマ  
チック工業社マイクロスピ)

強制渦型遠心分級の例 (日清エンジニア  
リング社ターボクラシファイア)



慣性分級の例 (マツボー社エル  
ボージェット)

図1 代表的な分級機の構造

(4) 遠心分級

大きく分けてサイクロンに代表される自由渦型と、回転部分をもつ強制渦型の2種類がある。どちらも遠心力と空気の抗力のつりあいで分級するものであるが、自由渦型は自由渦で、強制渦型はローターなどの回転体で遠心力を得る。自由渦型は一般には5～50 μmの分級に適するが、精密分級には適さないと言われる。しかし、ジェット粉碎機と直結しやすいのでそのことによる性能向上が全体性能を押し上げるケースも多く報告されている。中でもトナーのような軽い粉体はジェットミル直後に分級し、粗粉を機内で戻す仕組みを持つ自由渦式分級機付きジェット粉碎機は、強制渦型のそれと同等もしくはそれ以上の結果が報告されており、注目に値する(自由渦型の代表例: ディスパーションセパレーター, ミクロプレックス)。強制渦型は構造が複雑で動力もかかるが、前者に比べ分級点が幅広くとれ(ミクロンオーダーから100 μmまで)、くり返し分級による精密分級が可能と言われている(強制渦型の代表例: ターボプレックス,

スーパーセパレーター)。特に、強制渦の中の分級室回転型はサブミクロン分級のデータも発表<sup>2)</sup>されている(分級室回転型の代表例：ターボクラシファイア、ドナセレック)。

## 1.2 分級機を選定するにあたり考慮すべき事柄

慣性分級機のエルボージェットはコアンダ効果を利用した装置で、この装置の大きな特長は非常に簡単な構造(ローターなし)で同時に多段分級が可能でかつスケールアップが容易なことである。エルボージェットは機械式粉碎機(ターボミル)と連結することで、微粉の発生を抑えつつ、粗粉もクリーンカットできるという、一見矛盾する要求を1台の分級機で達成できるシステムである。この特徴は特にトナー・粉体塗料で威力を発揮する。また、一般に軽い、粒子に遠心力のかかりにくい粉体(シリカゲル、微粉シリカなど)の微粉分級にも優れた特性を発揮するといわれている。自由渦型遠心分級機のディスパージョンセパレータは、微粉カット用のマイクロスピンの同様に自由渦型の分級機で、衝突板式ジェット粉碎機と直結して粉碎に用いる圧縮空気を効率的に利用できることと、回転体などの可動部分がない特長を生かしトナーの分級機として古くから広く利用され、現在も多くのトナーメーカーなどで利用されている。マイクロカットも自由渦型の分級機で、分級点の調整を主としてガイドベーンの角度の変更により行うこと、分級場における空気の整流のため壁面を回転させているのが特長である。ドナセレックは強制渦型の分級機で、圧縮空気をを用いて分散状態で原料粉体を供給していることと、高速回転ローターを内蔵しているのが特長である。ターボプレックス、TSP、TTSPも同様に強制渦型の分級機であるが、TTSPでは2個のローターを利用するなど高性能分級に対応しており、特にトナー分野で最近よく利用されるようになった。ターボクラシファイアも強制渦型の遠心分級機で、機内に供給粉体の分散機構を有していることと、分級場の空気整流機構を有しているのが特長で、サブミクロン領域の微粉分級が可能である。スーパーセパレーターも強制渦型で、前身のミクロンセパレーターの改良型である。ジェットエアーによる分散機や、繰り返し分級機構を有しているのが特長である。以上、最近の新素材などの原料粉体のサイズコントロール用として進歩の著しい代表的な空気分級機について述べたが、これらの空気分級機を選定するにあたり考慮すべき項目を次に挙げる。

- 性能面：処理量、分級点および分級範囲と分級効率などと、その安定性、再現性に優れていることが重要である。
- 操作面：分級径の調整法、遠隔操作、クリーニングの容易さなどがポイントになる。
- 運転コスト：消費動力費と消耗部品などのメンテナンス費を抑える必要がある。
- 設備コスト：空気分級機本体だけでなく、空気源、集じん機など周辺機器を含めたプラント一式で比較検討する必要がある。
- 安全性：発火性、爆発性粉体は空気の代わりに不活性ガスを使用する。
- コンタミネーション：異物混入を嫌う高純度分級は接粉部に耐磨耗材料を使用するほか、クリーンルーム内での作業が必要である。

空気分級機では取り扱う粒子径が小さくなるほど分級径も小さくなり、分級は困難になる。総合的に判断をして適切な空気分級機を選定する必要がある。

## 1.3 サブミクロン分級のスケールアップ上の問題点

### (1) 微粉領域での分散

サブミクロン高精度分級は、今後セラミックスを中心とした分野でたいへん重要な技術になることが想定される。サブミクロン領域の分級で最大の問題となるのが凝集粒子の分散である。セラミックス原料1 μmアンダーの粒子の割合が30%を越すあたりから急激に凝集性が強くなる。このため、分級機も内部に分散機構を持つものが良いとされているが、サブミクロン領域となると、さらに強力な分散手段の付加が望まれる。この補助分散の方法として、物理的手法と化学的手法とがあげられる。前者の例として、高速エアー方式(オリフィス型、リングノズル型)があるが、いずれも高速流によるエジェクター効果を利用して粉体を吸い込み、高速流中で強制分散させる方式である。このほか高速インペラを用いて分散する手法もある。後者の例として最も多く用いられているのは、分級前に分散助剤を添加する手法である。これら方法を使っても、スケールアップ時に、粉体の分級部通過面積の増加以上に通過面積当たりの供給能

力を増やすと、小型機と同様の分散性を得ることは難しくなり、分級性能に影響を与えてしまう。これは、一般に遠心式分級機で提起されている問題である。

## (2) コンタミネーション

細かい粒度を持つ粉体を得るために、粉碎機・分級機を使うと、装置からの不純物（主として摩耗による）がコンタミネーションとして製品に混入する。ファインセラミックスでは、とくに、この混入を極力抑える必要があり、厳しいものでは ppm オーダーが問題になってくる。これら微量のコンタミネーションを防ぐために、接粉部の摩耗箇所にセラミックス焼結体を利用したり、耐摩耗コーティング（例：セラミックス溶射、ウレタンライニング）を施したりしている。しかし、これらの方法は万能ではなく、扱う粉体の種類、粒度等により適・不適があるようである。また、コンタミ防止は、一般に耐摩耗より上位の概念としてとらえられる。コンタミ防止は、装置内で粉体と接触するすべての部分に対策が必要であるが、耐摩耗は摩耗度の高い部分への対策だけでよいことが多い。

コンタミネーションは、小型機ほど、機内を通過する粉体単位重量当たりの接する壁面が広がるため、コンタミが顕著に表れることが多い。スケールアップ時には、まず、小型機で万全の対策を取った上で、大型機へスケールアップする必要がある。

## 2. 分級機のスケールアップ

スケールアップ時に起しやすい問題とその対策について説明する。小型機で試験をしたらほぼ仕様が満足できたので、大型機にスケールアップし実ラインを組んだところ、期待した性能が得られなかったというトラブルはしばしば聞かれる。分級機では一般にスケールアップするに当っては分離性能を多少割引いて考える必要がある。その程度は粉体の種類あるいは分級点によってさまざまで、各メーカーの経験値に頼るところが多い。そこでスケールアップ誤差を生じることになる。このようなトラブルを避けるため実ラインに設置しようとする機種で、短時間でもよいから一度は運転をして性能の確認をすることが望ましい。数 10 t/hr という大容量の機種では無理かも知れないが、可能な限り目的仕様に近い機種でチェックしておくことが大切である。

スケールアップ時に考慮すべきこととして、分級機の種類によって若干考え方が異なる。

### 2.1 強制渦型遠心分級機の場合

#### (1) 混合比の差

分級機のスケールアップは通常の場合、混合比を一定値として行う。しかし、実例を調べてみると、小型試験機は比較的low混合比で運転されていることが多い。例えば、強制渦型分級機の例で言うと、ターボクラシファイアのカタログからもっとも小型機である TC-15 型（フィード量 10kg/hr 以下）と、大型機 TC-100 型（フィード量 4,000 kg/hr 程度）では混合比を比較すると  $0.05\text{kg/m}^3$  と  $0.5\text{kg/m}^3$  で、大型機は小型機の約 10 倍の混合比になっている。これは、もともと小型機はフィード量が絶対条件でなく、分級精度の面を主としているためと考えられる。

#### (2) 粒子の分散および空気の整流の差

回転するローター内では、小型機の方が粉体の通過する部分のギャップが小さいなど、粒子の分散が効果的である条件が揃っており、分級室内での空気の整流が行いやすいなど、分級性能向上の条件を整えやすい。

### 2.2 自由渦型遠心分級機の場合

代表例である、日本ニューマチック工業の DS（ディスパーションセパレータ）の場合、寸法相似形のスケールアップとなっており、細かいところは気流速度を合わせ、一番大きな要素としては、分級機内部の固気混合比を一定に保つことが重要な点と言われている。この機種の具体的なスケールアップの例は、後に述べるハイブリッド化についての考察のところでもジェットミルとの関連で触れる。同社のマイクロスピンのミクロンオーダーの分級におけるスケールアップ例としては、金属粉の分級例で、トップサイズ  $3.89\ \mu\text{m}$ 、平均径  $1.72\ \mu\text{m}$  の微粉が、供給速度  $20\text{kg/hr} \Rightarrow 50\text{kg/hr}$  のスケールアップ（寸法相似形のスケールアップ）で実現できている例が最近報告<sup>4)</sup>されている。この例では、

微粉収率（12.5 → 26.6%）も改善された。

## 2.3 慣性分級機の場合

### 2.3.1 分級原理

慣性分級機の代表である、エルボージェット分級機<sup>5)</sup>を例に説明する。エルボージェットは、0.5～50 μmの微粉を対象とした乾式の精密分級機である。慣性力を利用した分級機としては、日鉄鉱業（株）／（株）マツボー社により最も早く工業化された分級機であるが、「噴流はその一方の側にだけ壁面を置くと、その壁面に沿って流れる」という物理現象（コアンダ効果）を利用していることに特徴がある。即ち、原料供給ノズルより噴出された噴流は、コアンダブロックに沿って急激に流れの方向を変える。噴流中の原料粒子の飛行軌跡は、各粒子の持つ慣性（粒径に依存）と気流から受ける流体抵抗によって定まり、微細な粒子は気流と共にコアンダブロック近傍を流れ、より粗い粒子はその慣性により分級気流を横断するようにして遠くまで飛行する。分級場には上方より下方へエアークラスが形成されており、下流側に任意に先端位置を変更できる分級エッジを設けることにより、所望の粒度ごとに分級することが可能となる。

### 2.3.2 構造および分級フロー

エルボージェット分級機本体は図1に示すとおり、2枚の側板で原料供給ノズル、コアンダブロック、分級エッジなどの部品を挟み込んだ構造となっている。原料吹出し開口部（機幅）の両側には境界層の影響を排除するためのスペースを設けている。分級エッジの位置は外部より簡単に調整できるが、オプションとしてエッジ位置を自動検知・遠隔操作することも可能である。また、本体側板には、小型機から大型機までサイトガラスが設けられ、運転中の粒子の流れが目で確認できるようになっている。

また、分級機本体の2次元（正面）寸法は小型機から大型機まで全く同一（パッケージ型小型機LABO／PUROを除く）であり、処理能力に応じて機幅だけが異なる構造となっている。分級精度を支配する流れのパターンに差異がないため、小型機から大型機まで全く同じ分級性能が発揮され、生産機のスケールアップが設計通りに実現できるのがこの機械の大きな特徴である（図2）。フィードレート（粉体濃度）が低いほど高い分級精度が得られるが、実際にはあるフィードレートまではほとんど同じ分級精度が維持され、ある点を越えると徐々に分級精度が低下する、若しくは物理的に供給不能となるケースが多い。

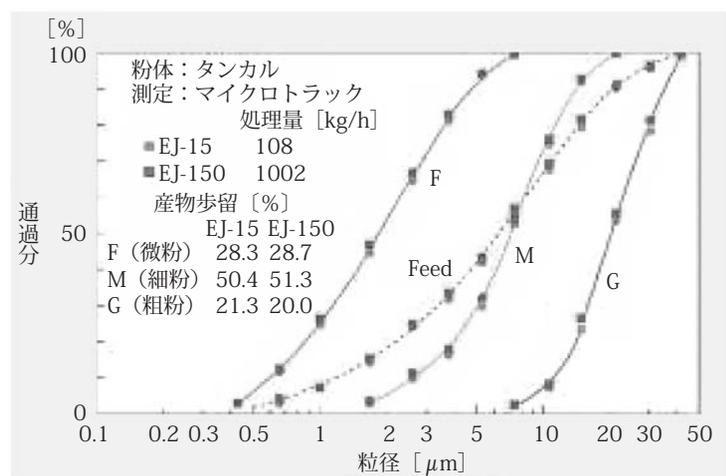


図2 大型機と小型機に分級性能比較

また、慣性力分級方式エルボージェットならではの特徴として、粗粉および微粉を同時にカットすることができる（同時3産物分級、フローを図3に示す）。微粉または粗粉のみ1点カットする場合は、片方のエッジを閉じることで可能となる。本体内部に駆動部分がないため、清掃および耐摩耗処理が簡単である。分級エッジの位置と風量を変えるだけで分級点を決めることができ、分級ポイント直前で原料粉体が一次粒子まで分散されていればサブミクロン分級も可能である。一点で分級するこの慣性力分級方式の最大の特徴は粗粉の微粉への飛び込みが少ないことである。整流中で粉体が整列して運ばれるため、針状粉体でも精密な分級が可能である。遠心力の力より風の力の影響を受けやすい真比重の比較的軽い粉体（トナー、粉体塗料、ふわふわのシリカ、ポリマー、グラファイトなど）で顕著にこの機械の特長が発揮される。

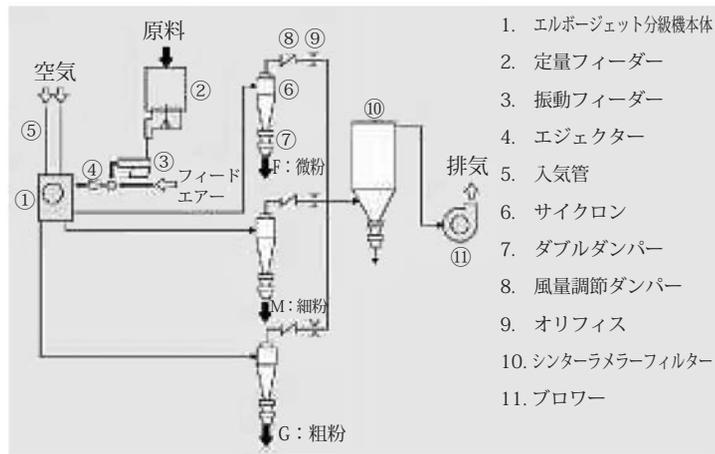


図3 エルボージェットによる3産物分級標準フロー

### 3. ハイブリッド化についての考察

サブミクロンの細かい粒子を効率良く製造するために、通常は粉碎・分級システムを用いることが多い。乾式粉碎機では、平均粒径  $0.8 \sim 1 \mu\text{m}$  ぐらいが限界で、そのあと分級機で  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$  のサブミクロン粒子を得ることができるとされている。これに対し湿式法では、乾燥時に発生する凝集粒子の解砕あるいは除去することがポイントになり、この用途には、ジェットミルが多く用いられる。また、ジェットミルと分級機のカップリングシステムにより、再凝集する前に分級することができ、効率の良いサブミクロン微粉製造が可能となる。閉回路粉碎分級システムのフロー例を図4に示す。

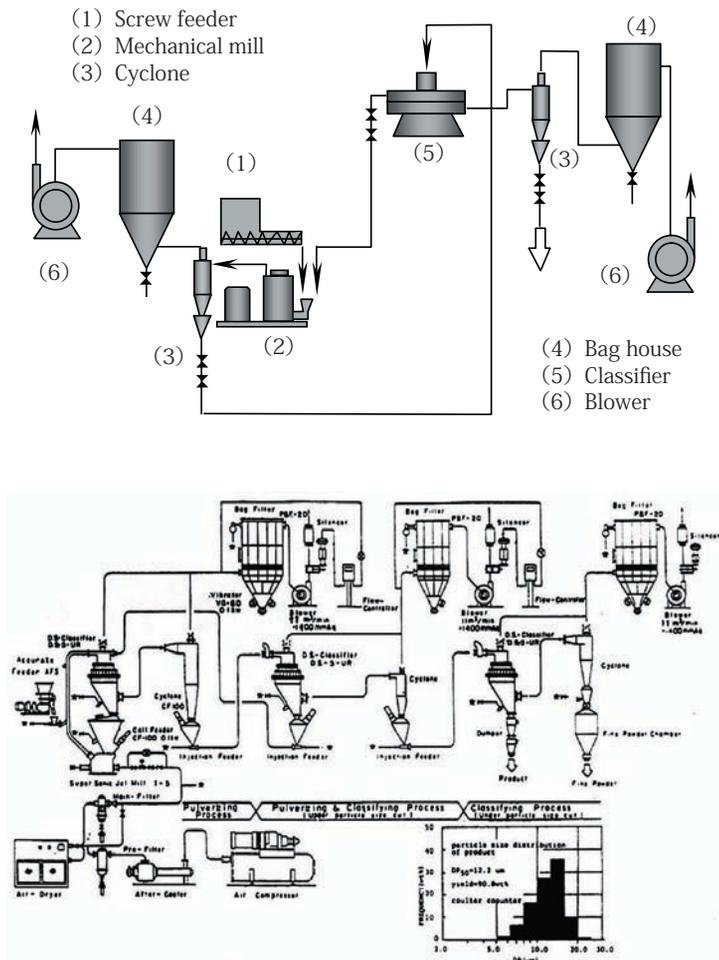


図4 閉回路粉碎分級のフロー例  
(上は機械式粉碎分級、下はジェット粉碎分級の例)

近年多くの工業で粉体の微粉化傾向は進んでおり、サブミクロンの領域まで注目されるようになってきた。乾式で扱われる粉体のニーズは高く、また大がかりな水処理設備を必要としない簡便さから乾式によるサブミクロンオーダーの粉砕機の出現が強く熱望されている。しかも、超微粉を大量に連続で効率良く製造できる粉砕機は、特に、セメント、ファインセラミックス、炭酸カルシウム、タルク、金属粉、ガラス粉などの業界で要求が高まっている。

サブミクロン粉砕する上で重要なことは、粉砕された微粉だけを効率的に取り出し、粗粉は粉砕部に何度でも戻り粉砕されるまで系から出られないようにすることがポイントになる。これを実現するために、一般には、閉回路で粉砕機と分級機を連続させ、粉砕直後の製品を分級機に投入し、分級後の粗粉を粉砕機に戻すことが多い。閉回路粉砕分級で、粉砕機と分級機を使うとそれぞれ単独で使うよりもより効率化が図れるといわれており、トナーやセラミックスの粉砕では実際に多く使われている方法である。

### 3.1 ハイブリッドシステムの機種と選定

従来から、堅型ミルには、粉砕と分級が1つにまとまった機種はあったが、10  $\mu\text{m}$  より粗いところで使われることが多かった。近年、10  $\mu\text{m}$  以下の微粉砕を目的に多くのハイブリッドシステムが紹介されている。まず取り上げたいのは、日本ニューマチック工業（株）のIDS分級粉砕機（分級機付き衝撃式ジェットミル）である。ジェットミルに分級機を閉回路で組み分級粗粉を連続的に経路外から戻す閉回路粉砕分級システムは他にもあるが、それを機内で連続して行えるようにしたのが、IDSである。また、流動層式カウンタージェットミルを最初に紹介したドイツHosokawa-Alpine社製AFG/TFG型のほかにもドイツNETZSCH-CONDUX Mahltechnik社製CGS型、米国CCE Technologies社製Fluid Bed Jet Mill等が紹介されている。一方、堅型ロールミルに分級機をドッキングした形も簡易分級機を使った内部循環式のものは古くからあったが、分級後の粗粉を粉砕機内部で戻さず経路外に一度出した後粉砕機に戻す方式は、製品として排出されるべき粉砕微粉と粉砕機にもう一度戻すべき粉体を分離しやすいことから、従来方式に比較し性能面での向上が報告されている。この代表例として、石川島播磨重工業（株）(IHI)と日清エンジニアリング（株）の共同開発により紹介されたスーパーハイブリッドミル<sup>6)</sup>があげられる。この粉砕機は、従来比較的粗い領域で粉砕効率の良い装置である堅型ローラーミルと微粉領域で効率的に分級可能な分級機をカップリングさせた高効率粉砕機である。

### 3.2 IDS分級粉砕機の構造<sup>7,8)</sup>とスケールアップ

図5に本装置の概要を示す。本分級機は可動部分を持たない高性能分級機DS分級機と衝撃式ジェット粉砕機Iミルを組み合わせた粉砕機である。供給分散室に供給された分級原料粉は、この室内の旋回気流によって分散され、室下部のリング状スリット部より分級室の旋回気流中に落下する。分級室では周辺ルーバー部より均等に流入する二次空気流により半自由渦が形成されている。分級原料粉は粗粉と微粉に分級室内で遠心力によって分離され、微粉は中央部より排気とともに排出される。一方粗粉は分級室の周辺部から外部へ排出され、ジェットミル部に戻る。1次空気は原料供給ノズルから圧縮空気とともに分級室の周辺の案内羽根を通して分級室内へ吸引され、理想的な半自由渦を分級室内に形成する。また回転部分がないためメンテナンスあるいは安全性にも優れている。

サブミクロンの分級に進むためには、粒子のブラウン運動による単位時間当たりの拡散変位が沈降速度より大きくなり大気中で容易に浮遊分散がおこると考えられるため、この壁を克服しなければならない。DS分級機による乾式気流分級のみで製品の目的を達成することは少なく、ミクロンあるいはサブミクロンの微粉を製造する粉砕機とカップリングすることで、相乗効果が生まれ、超微粉分級粉砕が可能となる。目的とする粒度や用途により最適なプロセスを選択することにより装置の性能を最大限に引き出すことができる。

DS（ディスパーションセパレータ）の場合、寸法相似形のスケールアップをしており、細かいところは気流速度を合わせ、分級機内部の固気混合比を一定に保っているが、それに加え、IDSでは、ジェットミルと組み合わせているので、粗粉のリサイクル量も一定に保つ必要がある。

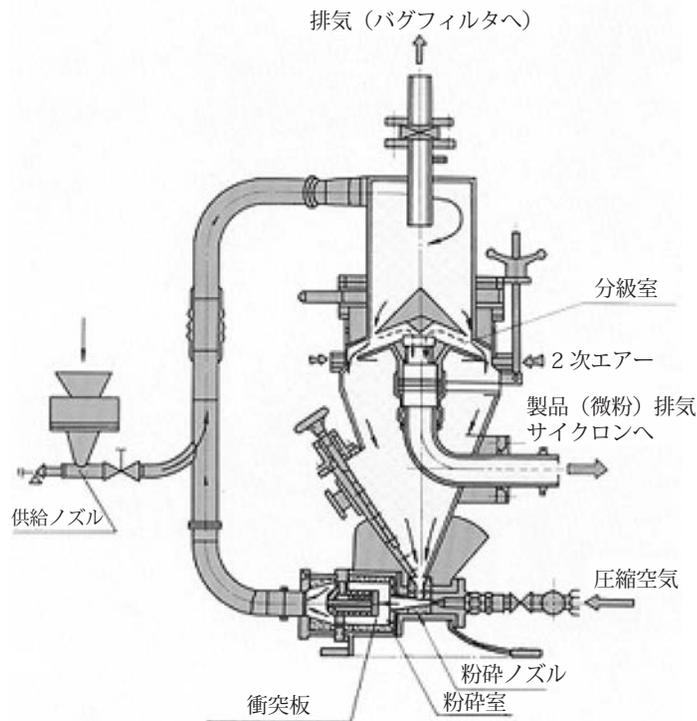


図5 IDSの構造

### 3.3 スーパーハイブリッドミルの技術のコンセプト

特に微粉（10  $\mu\text{m}$  以下の領域）乾式分級における技術的なポイントは、分級機の設計面からは、分級場の流体（空気）流れの整流化や分級粗粉の再分級機構などがあげられる。しかし、乾式微粉分級では粉体の分級、すなわち分級機に供給された粉体が分級場で分級作用を受ける段階でいかに単粒子化されているかが、分級性能向上にとって重要な事項となる。このため、各種の分散性向上の努力が成されてきた。

例えば、分級機の手前で分級粉体に分級助剤を添加して分散性を高める努力もその一つである。これは、分級粉体としてガラス質高炉スラグを用いて、分級前に DEG（ジエチレングリコール）、エタノール、トリエタノールアミンなどを添加混合することで、粉体の分散性を改善し、良い分級性能を得られることが報告されている。

一方、物理的な解砕により分散を行う手法も多く報告されている。この場合は、分級機前に分散装置を設置することとなる。分散装置の種類としては、高速回転インペラによる機械方式分散器や高速空気流によるエア方式分散器がある。ここでは、エア方式分散器による分散性能と分級性能に及ぼす影響について簡単に紹介しておく。平均粒径 1  $\mu\text{m}$  の微粉アルミナを高速エア一流で分散させると、みかけのエア流速が 250 m/sec 以上になるとほぼ完全分散の状況が得られていることがわかる。粉体は異なり重質炭酸カルシウムでは、分級機前に分散装置を設置することで、特に微粉部分の分級性能が改善されていることも報告<sup>9)</sup>されている。

分級機は単独で運転されるばかりでなく、粉砕機とカップリングで利用されることが多い。この場合、粉砕機は、粗い粒子を粉砕する役割のほかに、凝集粒子の解砕の役割も同時に担うことが多い。すなわち、粉砕機により単粒子化された微粉は、分級機でより効率的に分級が可能であるという訳である。分級機単体の試験で得られた製品収率は、ボールミルなどの粉砕機のあとに設置され、システムとして運転されると、5%程度向上するようである（重質炭酸カルシウムなどの例）。この考え方をさらに推し進めて、粉砕直後、非常に短時間の間に、解砕された微粒子が再凝集する前に分級すれば、さらに効率が上がり、より微粉領域での分級が可能になることが想定される。スーパーハイブリッドミルは、基本的にはこの考えを具現したものである。

## 4. 結言

これまで述べたように、IDS やスーパーハイブリッドミルのように高性能分級機と超微粉碎機の直接カップリング方式をとると、粉碎粉は粉碎直後の分散性のよい状態で分級機に供給され、分級後の粗粉は分離され機外から粉碎部に戻されるなどの効率的に微粉を生成する特徴を有し、またサブミクロン領域分級への期待を高めるものであるが、装置として今後検討すべき課題も残っている。例えば、解砕や粉碎後の空気流量と分級用空気流量とのマッチングの問題がある。解砕機・粉碎機および分級機は各々最適な性能を出すための空気流量があり、両者が満足できるような解砕機・粉碎機および分級機の型式あるいは運転条件を求める必要がある。この問題に対処するために、マッチング用の空気制御をおこなわなければいけないケースがある。また、粉碎の限界に近い領域での議論であるため、スケールアップに伴うファクターの確認なども重要な課題であり、各社で、今後より正確な数値として検証していく必要がある。

分級機を開発・設計する場合、必要な粉体流量が設定され、それに必要な空気流量（粉体濃度で規定されることもある）を予測した上で分級部の具体的な設計に入るのが通常である。そこで、分級部の代表寸法と粉体濃度の関係を知る必要がある。慣性分級では、スケールアップが理論通りに可能なモデルもある。強制渦型遠心分級機では、従来の設計では、粉体濃度を一定にしてスケールアップを行う設計がなされることが多かったが、小型から大型すべての装置の性能を比較実験し、大型になるほど分級精度が若干下がってくるものの、大きな分級機ほど粉体濃度を高くできる結果も報告<sup>10)</sup>されている。

分級精度が落ちる弱点を克服する一つの手法が、粉碎機と分級機の直接カップリングであり、自由渦型、強制渦型ともに、大きな効果が認められている。従来はトライアンドエラーでカップリングの最適条件を見つけていたが、最近では、シミュレーションの手法を取り入れ最適化設計のスピードが上がってきたことで、装置の開発期間短縮につながっている。以下に、分級装置を選定する際のポイントを箇条書きでまとめた。

- ① 原料によって適する分級機がある。軽い粉体は遠心力の影響を受けにくいので、慣性力分級機が遠心力分級機より一般に分級精度が高い。重い粉体は逆の傾向がある。強制渦型遠心力分級機は一般に付着性の高い粉体の付着を抑える使い方が可能。
- ② 粉碎機との組み合わせで分級機の性能が決まることがあるので、単独性能だけで判断してはいけない。ジェットミル／分級機の場合、風量のバランスが重要なので同じメーカーの機械を選定する方がよい。機械式粉碎機／分級機の場合、異なったメーカーの組み合わせも可能だが、生産ラインとしての全体性能を考えると、できるだけ同じメーカーの機械に揃えたい。
- ③ 分級機を選定時に注意することは、目的粒度（10  $\mu\text{m}$  以下、50  $\mu\text{m}$  以上の場合）、分級機前（内）分散方法（凝集粒子の解砕）、粉体付着性（接粉部の材質、表面粗さ、付着防止機能～気流式、機械かき取りなど）、粉体粒子形状（針状、鱗片状など）、スケールアップ、摩耗性・コンタミ、雰囲気湿度・温度などである。

### おわりに

湿式媒体攪拌型粉碎機や湿式ジェットミル（高圧プランジャーポンプ内蔵）は、現状では最もサブミクロン粉碎を可能にしている粉碎機や解砕機である。湿式媒体攪拌型粉碎機では、媒体サイズが小さくなっており、15  $\mu\text{m}$  直径のビーズも市場に出ている。コンタミを防ぐために、スクリーンレスや媒体を製品中に混入させない技術が最近紹介されているが、性能向上と開発を続けていくことが大変重要である。また、サブミクロン粉碎を目的として、乾式で閉回路粉碎分級を実施した場合、分散性の確保が重要である。1～1.5  $\mu\text{m}$  トップサイズの微粉を製品にする場合、粉碎・分級ともに分散性確保が難しく、小型機では実現できても大型機では難しい。サブミクロン分級のスケールアップは解決すべき課題が多く、今後の開発が期待される分野である。また、分級の限界を知っておくことは重要で、目的粒度幅に注意すること（経験上、3倍で十分に狭い。3-9  $\mu\text{m}$ 、10-30  $\mu\text{m}$  など）、分級は確率であること（トップサイズを議論するとき、どうしても粗粉の飛び込みがあるので粒度で通常 100%は 99.9999%程度であり、完璧な 100%ではないこと）などに注意を要する。粗粉の飛び込みをどのレベルまで抑える必要があるのかを見極めることが、分級機を選定時に重要となる。

コンタミ防止の面からは、乾式のジェット粉砕機が優れており、最近では、サブミクロン粉砕が可能なジェットミルも市場に出てきている。乾式粉砕機でサブミクロンレベルまで開発が進んできているのは、サブミクロンにも対応する分級技術の向上が大いに貢献していると言える。また、10  $\mu\text{m}$  以下の微粉領域での精密分級のニーズが最近高まってきているので、ミクロンオーダーにおける篩技術と分級技術の切磋琢磨により、今後の、乾式・湿式、粉砕・分級技術のさらなる向上に期待したい。分級装置は、単独では、原料粉体から必要な粒度だけを取り出すための粒度調整目的で使われるが、粉砕機と上手に組み合わせることで、粉砕機の性能をも向上しうる非常に重要な要素技術であることを最後に、もう一度明記しておきたい。

## 文 献

- 1) 吉田 英人, 福井 国博: 最近の乾式及び湿式における粒子分級技術, 第 21 回ホソカワ粉体工学シンポジウム, 2014 年 11 月 4 日, (2014), pp. 39 ~ 50
- 2) 石戸 克典: ファインセラミックス原料の粒度調整, FC レポート, Vol. 5, No. 8, (1987), pp. 354 ~ 356
- 3) 粉体機器・装置ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1995 年 5 月 30 日初版, (1995), p. 74
- 4) 社河内敏彦, 大山知之, 森本洋史, 奥本昌宏: 超微粒子製造のための気流分級に関する研究, (2008.8.21)
- 5) 松井 敏行: エルボージェット分級機, 分離技術ハンドブック, 分離技術会, 第二節 乾式分級の実際と設計例 (実施例) の [4] 慣性力分級機, (2010)
- 6) 山田幸良: スーパーハイブリッドミルの機能と応用, 粉体と工業, Vol. 22, No. 4, (1990), pp. 54 ~ 58
- 7) 中山 仁朗, 杉山 浩之: ディスパーションセパレータによる微粉分級技術, 産業機械, 438 号, (1987.03), pp. 26 ~ 30
- 8) 森本 洋史, 社河内 敏彦: 気流式超微粉分級機内の流動と分級性能に関する研究, 日本機械学会論文集, 68 巻 668 号, (2002.4), pp. 140 ~ 146
- 9) 山田幸良, 安口正之: 分級技術 “Q & A”, 化学装置, Vol. 27, No. 7, (1985), pp. 50 ~ 59
- 10) 石戸克典, 秋山聡, 田中善之助: 閉回路粉砕分級システムによる粉砕性能向上, 粉体工学会秋季研究発表会, A-10, (2001), pp. 52 ~ 53