

湿式造粒 — 流動層造粒法

流動層造粒法は、造粒室の下部から熱風を送り込み、原料粉粒体を空中に巻き上げることにより粒子が流動する状態になる層を形成してから、造粒液体を噴霧して、凝集または被覆により粒状物に成長させる方法である。湿式造粒に属する。

流動層造粒の基本は熱風である。導入した熱風は粉粒体を空中に浮遊して流動的な状態に保ち、噴霧された造粒液体を粉粒体に均一に付着させる役割を果たす。また、熱風は造粒した粒子を素早く乾燥させる役割もある。流動層造粒装置の基本構造は図 1 に示す。

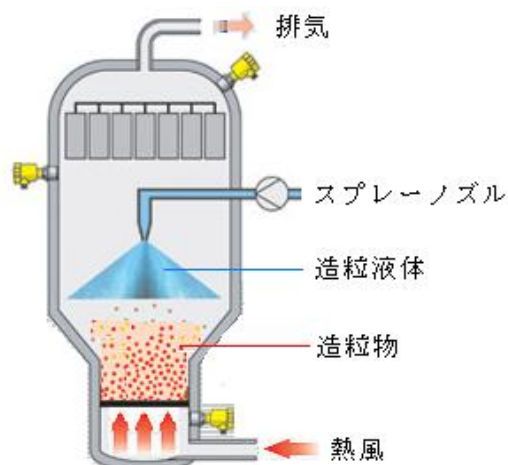


図 1. 流動層造粒装置の基本構造

また、流動層造粒装置に於けるスプレーノズルの取付位置により図 2 に示すように 3 種類に大別される。

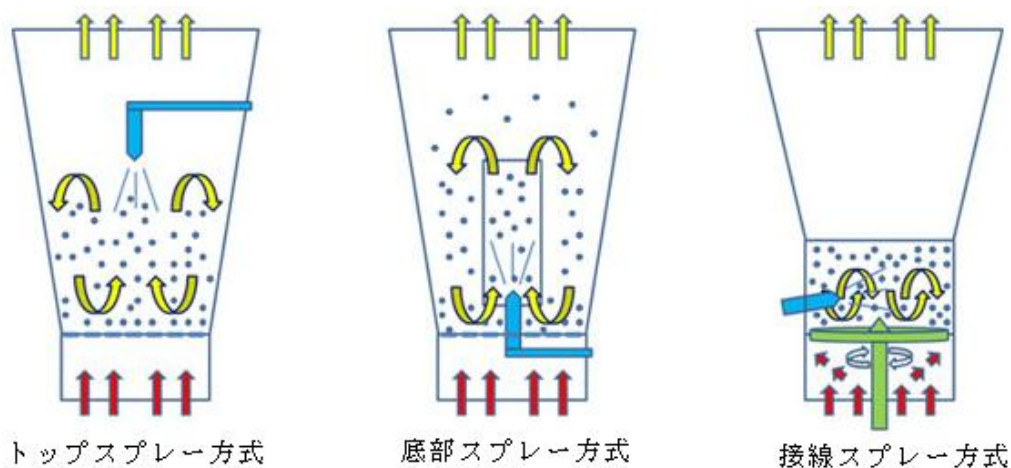


図 2. スプレーノズル位置の異なる流動層造粒装置

流動層造粒法は、粒子の成長方式により次の 2 つに大別される。

1. 凝集造粒

造粒液体が水かでんぷんや CMC（カルボキシメチルセルロース）、ゼラチンのような粘着作用を有する物質の溶液で、バインダー（粘着剤）の役割を果たす。噴霧された造粒液体が幾つかの粉粒体に付着して互いに粘着し合い、その間に液架橋を形成することにより、大きな粒子に凝集する。この方式は造粒した粒子の粒度分布が広く、硬度が低く、ポーラス状のことが多い。

スープ、清涼飲料、サプリメント等速溶性を要求する粒子の製造に使われる。

2. 被覆造粒（噴霧造粒）

造粒液体は粒子の原料を溶かしたもので、粒子核に噴霧することにより多数の小さな液滴が粒子核に付着して、熱風乾燥を経て固化し、粒子核の一部となる。その過程を連続的に繰り返すことにより粒子が次第に大きく成長する。この方式は造粒した粒子が球状でその粒度分布が狭く、硬度が高い。なお、被覆造粒の過程に於いても、いくつかの粒子核が造粒液体により大きな粒子に凝集されることもあり、はっきり区別することができない場合がある。

大粒尿素、りん安系、硝安系化成肥料の流動層造粒には主にこの方式を利用する。本章の主旨は化学肥料、特に化成肥料の造粒技術を紹介・解説するものであるため、被覆造粒に重点を置き、凝集造粒については簡単な説明に留まる。

凝集造粒と被覆造粒の違いは図 3 に示す。



図 3. 凝集造粒と被覆造粒の造粒メカニズム

流動層造粒法は湿式造粒法に属するが、同じ湿式造粒法の転動造粒法、押出造粒法等との比較は表 1 に示す。ここで例を挙げた流動層造粒法は大粒尿素やりん安系、硝安系化成肥料の造粒に使う被覆造粒を限定するものである。

表 1. 流動層造粒法とその他の湿式造粒法との比較

造粒法種類	粒子形状	粒子緻密度	粒度分布	安定性	生産コスト
流動層被覆造粒法	球状	高い	狭い	良い	高い
パン造粒法	球状	低い	広い	良い	安い
ドラム造粒法	球状	低い	非常に広い	悪い	安い
スクリー押出造粒法	円柱状	高い	狭い	良い	高い
攪拌造粒法	卵状または不規則状	高い	非常に広い	良い	高い

流動層造粒法の特徴は、

- ① 造粒と乾燥を 1 台の設備に同時に行うことができる。
- ② 造粒設備が小さく、据付に必要な面積が少なく、生産効率が高い。例えば、直径 500mm の造粒室を有する流動層造粒設備の時間当たりの生産能力は直径 4000mm のパン造粒機に相当する。
- ③ 製品の品質がよい。流動層造粒の被覆造粒で得た粒子が丸くて、硬度が高い。粒子の粒度分布も狭く、均一の粒子が得られやすい。
- ④ 乾燥効率が高い。造粒しながら乾燥を行うので、熱エネルギーの効率が 70%以上に達する。
- ⑤ 流動層を形成する熱風の温度を制御することができ、熱で分解しやすい物質の造粒もできる。
- ⑥ 造粒に影響する要素が多く、操作が複雑で、事前に実験や調査を通して、最適な操作パラメーターを確認する必要がある、技術力が要求される。

一、 流動層造粒のメカニズム

1. 造粒メカニズム

流動層造粒に於いて粒子の成長過程は上記のように凝集と被覆に大別されるが、湿式造粒に共通している液—固体の界面張力とその粒子形成に最重要な役割を果たす。

凝集造粒に於いて、造粒液体が原料粉粒体に付着する際に粒子間に液架橋が形成され、その液—固体の界面張力により粒子が凝集して大きな粒子に形成する。形成した粒子が熱風により水分が蒸発され、液架橋が固架橋に変え、牢固な粒子になる。

一方、被覆造粒に於いても、造粒液体が粒子核の表面に付着して、熱風により水分が蒸発していく過程に造粒液体に溶けてある溶質が析出して、粒子核との間に液架橋を形成し、さらに固架橋に変え、粒子の一部となる。被覆による粒子成長の場合は粒子内部に空洞がなく、緻密性が高く、機械的強度も高い。粒子を真ん中で切り、その断面を顕微鏡で観察しては、年輪のような層状構造が見える。これは粒子の成長が被覆による層状で行う証拠である。

流動層造粒はその理論は気—固体の流体動力学特性、粒子への造粒液体の付着、熱風気流による粒子の浮上流動、液体の霧化、液滴の蒸発と媒質の析出、熱量と蒸発量とのバランス関係等に関連しているため、まだ完全に究明されない所がある。

1-1. 被覆造粒のモデル

次の条件を仮設して、バッチ式流動層造粒機に於ける粒子の被覆成長モデルを樹立して、その造粒メカニズムを検討する。

- ① 粒子の成長はすべて被覆成長によること。
- ② 最初の粒子核が丸い球状とすること。
- ③ すべての粒子が噴霧区域を通る確率が同じで、造粒液体が粒子表面に均一に吹き付ける

こと。粒子が噴霧区域を通るたびに形成された被覆層が同じ厚さであること。

- ④ 粒子表面に形成された被覆層が摩耗等により破損しないこと。
- ⑤ 造粒過程に粒子が破碎しないで、流動層に粒子の数が全く変化しないこと。
- ⑥ 粒子表面に付着した被覆層が均一に乾燥されること。

この仮定条件に従い、粒度 d_0 の粒子を粒子核として流動層造粒機に投入して、一定時間後に粒子核に厚さ b の被覆層が形成される。成長した粒子の粒度が d_p になる。

$$d_p = d_0 + 2b$$

これにより、各粒子に増加した被覆層の体積 (V_p) は次の式で計算できる。

$$V_p = \frac{\pi}{6} (d_p^3 - d_0^3)$$

開始時に造粒室に投入した粒子核の数は n_0 、造粒物質の密度が ρm_0 とすれば、最初の粒子核総重量(M_0) は、

$$M_0 = n_0 \times \frac{\pi}{6} d_0^3 \times \rho m_0$$

一定時間後、成長した粒子の重量(M_p)は、

$$M_p = M_0 + V_p \times \rho m_0 \times n_0$$

粒子の成長重量(M)が噴霧された造粒液体が付着してきた造粒物質である。

$$M = V_p \times \rho m_0 \times n_0$$

単位時間の成長速度(G)は、

$$G = M/t = (V_p \times \rho m_0 \times n_0)/t$$

成長速度(G)は、単位時間にノズルから噴霧され、粒子に付着した造粒物質の重量に相当する。

造粒液体に溶かした造粒物質の濃度 $C(\%)$ が一定を保つ場合は、単位時間にノズルから噴霧された造粒液体の量(G_L)は、

$$G_L = G / C$$

造粒溶液の溶媒を水とする場合は、単位時間に溶媒の蒸発量(W)は噴霧された造粒液体の量(G_L)から造粒物質 (溶質) を除く溶媒量と同等である。

$$W = G_L \times (1 - C)$$

造粒溶液の温度を 25°C に仮定して、溶媒 1kg を蒸発するには必要な熱エネルギーは、

$$3.14 \times 10^2 + 2.259 \times 10^3 = 2.573 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$$

である。単位時間に必要な熱エネルギーは、

$$q = W \times 2.573 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$$

蒸発に使う熱は造粒室に導入した熱風温度から排気温度を引いた熱エネルギーであるため、単位時間の熱風導入量 m^3 は、

$$Q = q \times (\text{熱風入口温度}^\circ\text{C} - \text{排気口温度}^\circ\text{C}) / 1.2 \text{ kJ/m}^3$$

である。但し、熱風の熱エネルギーは造粒室壁から伝導放熱や放射散熱の発散経路もあ

り、熱エネルギー利用率が大体 70～75%である。

実験結果から次の大粒尿素の球状粒子の成長計算式が導出された。

$$d_p = d_0 + \frac{2GL(1-W_1)k}{\sum S \rho_L} t$$

d_p : t 時間現在の粒子平均粒度(m)、 d_0 : 粒子核の平均粒度(m)、 G_L : 造粒液体の単位時間噴霧量(kg/s)、 w_1 : 造粒液体の水分率(%)、 k : 粒子に被覆している造粒物質の含有率(%)、 $\sum S$: 流動層にある粒子の総面積(m²)、 ρ_L : 造粒液体の密度(kg/m³)、 t : 噴霧時間(s)

1-2. 凝集造粒のモデル

凝集造粒の特徴は、流動層に運動している粒子が噴霧された造粒液体により表面が湿潤され、周辺にある粒子同士との衝突接触で互いに付着し、液架橋が形成される。粒子同士が界面張力と毛細管負圧の吸引力で大きな粒子に凝集されて、熱風の乾燥作用を受け、溶媒が次第に蒸発され、残った造粒促進材が牢固な固架橋に変化して、粒子を定型させる。1～数回の凝集を通して、必要な粒径の粒子に成長する。凝集造粒は造粒物が粘着性を有するものを除き、大体でん粉、CMC、ゼラチン等粘着性のある物質を造粒促進材として造粒液体に溶かしてから使う必要がある。使う造粒促進剤の粘着性、造粒液体の濃度、原料粉粒体の粒度等によって、粒子の凝集成長速度が大きく異なる。従って、被覆造粒のようにその成長モデルを数式で表示することがほとんど不可能である。しかし、実験結果から次のことが判明した。

① 噴霧された液滴が細かい場合は、原料粉粒体（粒径 0.1mm 以下の粒子）が湿潤により、微粒子（粒径 0.3mm 未満の粒子）に凝集するが、一部の微粒子がさらに粉粒と凝集して細粒（粒径 0.3～0.6mm の粒子）になる。大部分が微粒子のままである。

その原因は、液滴が小さく、粒子の表面に付着した際に湿潤できる範囲が小さいためである。小さな粒子同士ならば液架橋を形成して、微粒子に凝集することができるが、大きな粒子ではその表面を湿潤した範囲が小さく、他の粒子との間に液架橋を形成できない。また、液滴が小さいため、スプレーされた途端に熱風的作用で蒸発され、粒子に到着した量がさらに少なくなり、到着してもすぐ蒸発してしまう。従って、微粒子以上の粒子に対しては、凝集作用がほとんど発揮できない。

② 噴霧された液滴が適切な大きさがある場合は、原料粉粒体（粒径 0.1mm 以下の粒子）が湿潤により、まず、微粒子（粒径 0.3mm 未満の粒子）に凝集して、さらに微粒子と微粒子または微粒子と粉粒体が凝集して、細粒になる。また、細粒同士、細粒と微粒子がさらに凝集して、顆粒（1～2mm またはそれ以上）になることもできる。

その理由は、微粒子や細粒にスプレーされた液滴が丁度粒子の表面をほぼ全面に湿潤して、細粒以上の粒子に凝集することができる。この場合は、粒子の成長速度が速く、得た

製品には細粒及び顆粒が主で、粉粒体と微粒子がほとんどない。

③ 噴霧された液滴がさらに大きくなる場合は、粒子の成長速度が非常に速く、微粒子、細粒、顆粒、粗い粒子（表面が平滑ではない、粒径 2mm 以上の粒子）の粒度分布の広い製品になる。

その理由は、液滴が大きく、微粒子または細粒に付着した場合は粒子全体を完全に包み、周辺にある粒子を凝集して粗い粒子になる。また、液滴の完全蒸発に時間がかかり、凝集した粗い粒子が衝突により再び崩壊することもある。

スプレーされた造粒液体の液滴のサイズはスプレー圧力以外に、造粒液体に溶かしてある造粒促進材の種類と濃度により大きく変動する。

凝集造粒では、造粒した粒子の成長と最終粒径は噴霧された造粒液体の液滴に影響されるほか、造粒液体の濃度と粘度、造粒液体に溶かしてある造粒促進材の粘着能力、表面張力も大きく影響を及ぼす。概して、造粒促進材の粘着能力が高い場合は、形成された液架橋の結合力が強く、微粒子、細粒、顆粒をさらに二次、三次凝集して大きな粒子になる。また、造粒液体における造粒促進材の濃度が高いほど、造粒した粒子の粒径が大きくなる傾向がある。

一方、熱風も凝集造粒の粒子粒径に大きな影響を及ぼす。概して、熱風の温度が高く、風量が多いほど、造粒液体の溶媒の蒸発速度が速くなり、液滴が小さくなり、できた液架橋の範囲も制限され、造粒した粒子の粒径が小さくなる。

また、造粒した粒子の粒径は造粒過程における凝集と破壊速度のバランスに制御される。噴霧された造粒液体の作用で、原料粉粒体が微粒子→細粒→顆粒に凝集して成長していくが、熱風による浮上流動により粒子が互いに衝突して、バラバラに破壊することもある。噴霧された造粒液体の量と濃度、粘度、熱風温度と流量、造粒室の構造、流動化時間などが粒子の凝集と破壊の速度に影響を与える。製品粒子品質と造粒効率の向上にはその操作パラメーターを適宜に制御することが非常に重要である。

2. 流動層造粒機の流体力学計算

流動層とは熱風などの気体の下から上へ流れて、固体粒子が構成した層を通る際に粒子を吹き上げて空中に流動する層を形成することである。気体の流速により固体粒子層を通る際に次の 3 つ異なる状況が発生する。

- ① 気体の流速が低く、固体粒子を吹き上げることができず、固体粒子が床に静止している状態で、気体が粒子の間を通過するだけである。この状態は固定層と呼ばれる。
- ② 気体の流速が増大して、固体粒子が気体により吹き上げられ、粒子層が空中に浮き上がる状態になる。これは流動層と呼ばれる。
- ③ 気体の流速がさらに増大して、流動層の上限界面が消え、一部または全部の固体粒子が気流に巻き込んで排気と一緒に流れていく。この状態は気体輸送と呼ばれる。

実験で得た気体の流速と固体粒子の状態との関係を図 4 に示す。

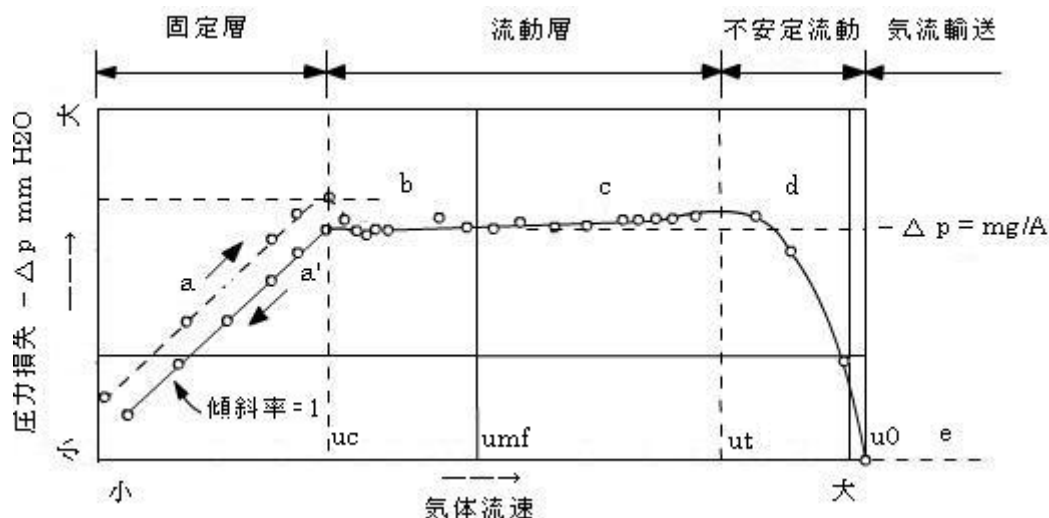


図 4. 気体流速と固体粒子の状態との関係

気体が下から上へ粒子で構成した層を通すと、粒子の抵抗を受け、層を通った気体の圧力が低下する。この圧力の低下は圧力損失と呼ばれる。粒子の浮上がない固定層段階に於いて、気体流速 (u) と層を通した際の圧力損失 ($-\Delta p$) との関係は正の比例関係 (a の点線) を示し、その傾斜率が 1 である。すなわち、気体の流速が高いほど、固定層を通した際に発生した圧力損失が高くなる。

気体流速 (u) が増大して、臨界流動速度 (u_c) に達したとき、粒子が気流に巻き上げられ、流動状態を呈する。圧力損失が最大値に達してからやや低下して、b に示すように流動層を形成する。これは、粒子が浮上したため、気体が粒子層を通す際の抵抗がやや減少したのである。

また、b の段階から気体流速を減らして、粒子を流動層から固定層に戻す過程に於いて、圧力損失がそのまま $b \rightarrow a$ に戻るのではなく、 $b \rightarrow a'$ の実線を追った。b $\rightarrow$ a' の実線に示す圧力損失が $b \rightarrow a$ 点線より低いことは、粒子が気流から落下した際に形成した固定層に空洞率が高く、気流に対する抵抗が減るからである。

流動層の状態になってから、気体流速がある程度まで増大しても、すべての粒子が浮遊しているため、圧力損失がほとんど変わらず、c の段階に示すように安定している状態を保つ。圧力損失が安定状態に入った時点の気体流速は最小流動速度 (u_{mf}) と呼ばれる。

気体流速がさらに増大して一定値を超えたとき、一部小さな粒子が排気と一緒に排出され、造粒室内の粒子量が減り始めた。気体の通過に対する抵抗が減少して、d の段階に示すように圧力損失も減少し始めた。この段階は不安定流動と呼ばれる。不安定流動が発生する気体流速は終端速度 (u_t) と呼ばれる。

気体流速がさらに増大して、 u_0 に達する時、すべての粒子が気流に巻き込まれて、排出される。気体の受けた抵抗が無くなり、圧力損失がほぼ 0 になる。この段階は気流輸送段階と呼ばれ、気体流速 u_0 は運搬速度と呼ばれる。

流動層造粒は流動層における粒子の流動状態が造粒の成否及び製品粒子の品質を支配する。その流動層を形成したのは造粒室下部から導入した熱風の流速である。流動層造粒に必要な流体力学計算は臨界流動速度、最小流動速度、実際の操作流動速度、終端速度、粉粒体平穩流動条件、整流板（多孔板）の開口率などである。

2-1. 臨界流動速度 (u_c)

臨界流動速度は、固体粒子を吹き上げて、流動層にする必要な最小気体流速である。臨界流動速度は次の3つ計算方法を選択することができる。

$$\textcircled{1} \quad u_c = 4.08 \frac{dp^{1.28} (\rho_m - \rho_a)^{0.94}}{\mu_a^{0.88} \rho_a^{0.06}}$$

u_c : 臨界流動速度(m/s)、 d_p : 固体粒子の粒径(m)、 ρ_m : 固体粒子の密度(kg/m³)、 ρ_a : 空気密度(kg/m³)、 μ_a : 空気粘度(mPa・s)

この計算式の応用条件は $\frac{dp}{D} < \frac{1}{20}$ (D は流動層造粒室の直径(m))。

② 次の公式でアルキメデス定数 Ar を計算して、

$$Ar = \frac{dp^3 \rho_m g}{\nu_a^2 \rho_a}$$

$Ly = f(Ar)$ の関連図から臨界流動状態に於ける Lysenko 定数 Ly を調べて、次の計算式に代入して臨界流動速度を求める。

$$u_c = \sqrt[3]{\frac{Ly \nu_a g \rho_m}{\rho_a}}$$

ν_a : 気体運動粘度 (m²/s)

③ まず、固定層の抵抗力を算出して、

$$Re_c = \frac{Ar}{150 \frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} + \sqrt{\frac{1.75}{\varepsilon_0^3}} Ar}$$

Re_c : 固定層抵抗力、 ε_0 : 固定層の空洞率、粒度が同じの球形粒子は任意充填状態における空洞率が 0.4 とする

固定層抵抗力 Re_c から次の計算式から臨界流動速度を算出する。

$$u_c = \frac{Re_c \nu_a}{dp}$$

d_p : 固体粒子の粒径(m)、 ν_a : 気体運動粘度 (m²/s)

2-2. 最小流動速度 (u_{mf})

最小流動速度 (u_{mf}) は流動層が安定な状態を維持するには必要な最低な気流速である。通常、円柱状または円錐状流動室を有する流動層造粒機にとって、次の式から最小流動速度 (u_{mf}) を計算する。

$$u_{mf} = \frac{\mu_a^2}{d p \rho_a} \left(43 (1 - \varepsilon_0) \frac{D}{d} + \left((21.5 (1 - \varepsilon_0) \frac{D}{d})^2 + 0.19 \varepsilon_0^2 \frac{D(D^2 + Dd + d^2)}{d^3} Ar \right)^{1/2} \right)$$

d_p : 粒子の粒径、 ρ_a : 空気密度、 μ_a : 空気粘度、 ε_0 : 空洞率、 D : 造粒室の直径、
 d : 整流板の直径、 Ar : 定数

2-3. 終端速度 (u_t)

終端速度 (u_t) は、造粒室内の粒子が気流により排気と一緒に排出され始めた際の気体流速である。気体流速が終端速度に達すると、流動層の安定が破壊され、不安定な状態になる。終端速度 (u_t) は次の 2 つ計算式から算出することができる。

$$\textcircled{1} \quad \frac{uc}{u_t} = 0.1175 - \frac{0.1046}{1 + 0.00373 Ar^{0.6}}$$

$$\textcircled{2} \quad u_t = 0.26 d_p \sqrt[3]{\frac{(\rho_m - \rho_a)g}{\rho_a \mu_a}}$$

2-4. 実際操作速度 (u_a)

実際操作速度 (u_a) は流動層造粒時に使う気体流速である。その速度に於いて流動層が安定な状態を保ち、噴霧された造粒液体は途中で蒸発されることが少なく、粒子に付着して凝集または被覆が起きてから早く乾燥するには最適な気体流速である。経験則では、実際操作速度 (u_a) は臨界流動速度 (u_c) の 3～6 倍で、終端速度 (u_t) の 0.2～0.6 である。その計算式は次の 2 つがある。

$$\textcircled{1} \quad u_a = 3 \sim 6 u_c \quad \text{または} \quad u_a = 0.2 \sim 0.6 u_t$$

$$\textcircled{2} \quad u_a = \frac{Re \, v_a}{d_p}$$

流動層の空間率 (ε) が 0.55～0.75 の場合は、

$$Re = \frac{Ar \, \varepsilon^{4.75}}{18 + 0.6 \sqrt{Ar \, \varepsilon^{4.75}}}$$

2-5. 整流板の開孔率

整流板とは造粒室の下部に設置している多孔性板である。その役割は固体粒子が造粒室の下へ落ちることを防ぎ、導入した熱風の流れを均一にすることである。整流板の開孔率が気体の流れ、粒子の流動化状態に密接に関連する。整流板の開孔率 (ϕ) は次の 4 つ方法で計算する。

$$\textcircled{1} \quad \phi = u_a / u_d \text{ により開孔率を算出する。}$$

$$u_d = C \sqrt{\frac{2g \Delta p}{\rho a}}$$

u_d : 整流板の孔を通す気流速度 (m/s)、 C : 定数、通常 0.33~0.75 にする。 Δp : 圧力損失 (kg/m²) 計算式: $\Delta p = h(1-\varepsilon)(\rho_m - \rho_a)$ 、 h : 固定層の高さ (m)

② 固定層から流動層に変わった際に臨界流動速度 (u_c) 時の圧力損失から計算する。

$$u_d = C_D \sqrt{\frac{2g \Delta p_{min}}{\rho a}}$$

C_D : 孔定数、 $CD-Re$ 図から求める、 Δp_{min} : 整流板最小圧力損失 計算式: $\Delta p_{min} = (0.1 \sim 0.4) \Delta p$

③ 導入口の気体流速 (u_{in}) から計算する。

$$u_d = \frac{10}{\sqrt{\varepsilon}} u_{in}$$

u_{in} : 導入口の気体流速 (m/s)、 ε : 整流板の抵抗係数、通常 1.5~2.5 にする

④ 臨界開孔率 (φ_c) を求めて、そこから整流板の開孔率 (φ) を算出する。

$$\varphi_c = f \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_a u_c^2 n \left(\frac{273+t_2}{273+t_1} \right)^2}{g (\rho_m - \rho_a) h_0 (\varepsilon_0)^{\frac{1}{n}}}}$$

φ_c : 臨界開孔率、 f : 校正係数、約 1.5、 ε : 整流板の抵抗係数、約 2.5、 n : 係数、 $n = \frac{\lg \frac{u_c}{u_{out}}}{\lg \varepsilon_0}$ 、 ε_0 : 固定層空洞率、 h_0 : 固定層高さ (m)、 t_1 、 t_2 : 気体導入口温度および排気口温度 (°C)

上記各パラメーターの流体力学の計算式で計算した流動層造粒に必要な気体流速、整流板開孔率等の数値がそれぞれ違うこともあるが、大事なのは実際の状況に合わせて、試験を通し、データを収集分析して、正確な数値を予測することである。

二、 流動層造粒設備の種類

流動層造粒設備は、その生産方式によりバッチ式と連続式に大別される。

1. バッチ式流動層造粒機

バッチ式流動層造粒機は、原料粉粒体または粒子核とする微粒子を投入した後、下部から熱風を送風して、粒子を流動化してから造粒液体を噴霧して造粒する。造粒した後、送風を一旦止め、製品粒子を取り出す方式である。

送風方式により、バッチ式流動層造粒機は通常流動層、強制循環型流動層、噴流層に分

けられる。それぞれの構造概略と特徴を紹介する。

1-1. 通常流動層型造粒機

通常流動層型造粒機は導入した熱風が流動層を形成した後、バグクロス、集塵機等を通して、外部に排出するタイプである。その特徴は構造が簡単で、粒子の流動状態を制御しやすいため、スプレーされる造粒液体に制限がなく、凝集造粒と被覆造粒とも適して、一回投入できる原料粉粒体の量が多く、生産効率が高く、造粒した粒子の品質も良く、消費エネルギーが少ないなどの特徴があり、一番多く採用されるタイプである。

典型的な通常流動層型造粒機の構造概略と動作原理は図 5 に示す。図 6 はオランダ SCHUGI 社が開発した底部スプレー方式の流動層造粒機の構造図である。

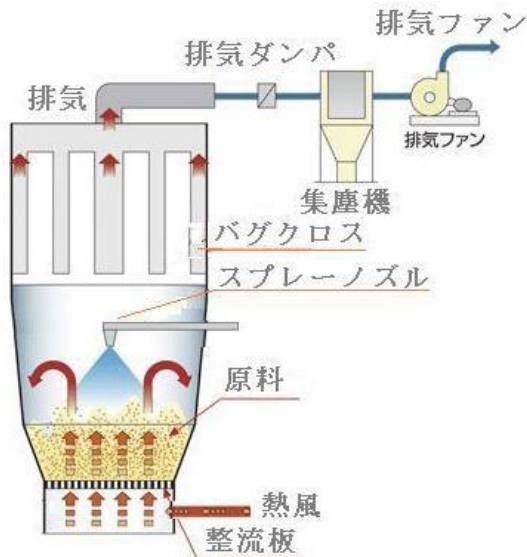


図 5. 通常流動層型造粒機の構造概略

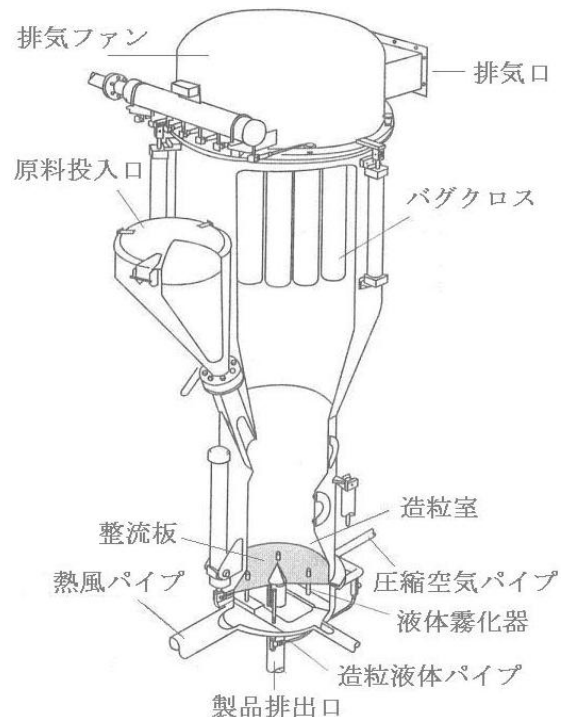


図 6. SCHUGI 型底部スプレー方式造粒機

操作上、気流のばらつきを防ぐため、気体流速を高めを設定することが多い。通常、流動層内の気体流速が 1.5m/s 以上に保つ必要がある。

1-2. 強制循環型流動層造粒機

強制循環型流動層造粒機は、気体の強制循環設備を追加して、造粒器から排出された気体を集塵、清浄してから再度加熱して造粒機に戻す構造である。流動層造粒室の部分は通常流動層型造粒機とほぼ同様であるが、バグクロスを通った排気は集塵器と清浄装置を通して、粉じん等を取除いてから、空調機で加熱と加圧され、再び流動層造粒機に導入される。

強制循環型流動層造粒機の特徴は、排気ガスを外部に出さないため、大気汚染が少ない。

但し、強制循環設備が必要で、据付面積も大きくなり、設備コストが高くなる。有機溶媒を使う場合や、造粒時に揮発性物質が発生する恐れのある場合に利用されるが、その用途が制限される。

強制循環型流動層造粒機の構造概略と動作原理は図 7 に示す。

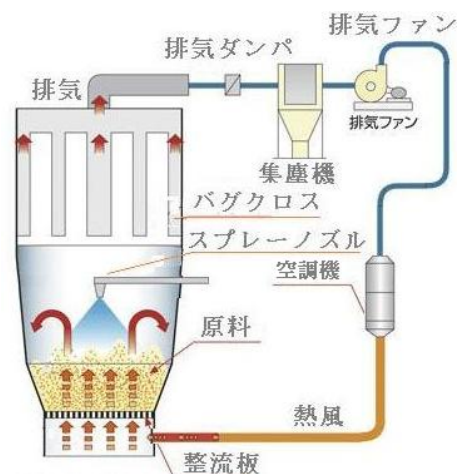


図 7. 強制循環型流動層造粒機の構造概略と動作原理

1-3. 噴流層型造粒機

噴流層型造粒機が通常流動層型造粒機と異なるところは、造粒室の中央に円筒状のドラフトチューブを設置して、ドラフトチューブと整流板との間に隙間を設けてある。ドラフトチューブは下部が円錐状を呈することが多い。熱風または空気がドラフトチューブの下方から高速に噴出して、原料粉粒体を吹き上げて流動層を形成する。流動層は高速気流が通る造粒室の中央にあるドラフトチューブ内とその上方に限られるため、噴流層と呼ばれる。吹き上げた粉粒体が噴流層の上部から離れて、周辺へ流動し、気体と分離して、チューブと造粒室内壁の間に下降していく。造粒室の整流板に落下した粉流体が高速気流の流れに吸引され、再びチューブに巻き込まれて、チューブ内外を循環する。

噴流層型造粒は造粒液体を使用するか否かにより 2 つのタイプに分けられる。造粒液体を使うタイプはドラフトチューブの底部にスプレーノズルを設置して、高速熱風と同時に造粒液体もスプレーされ、粉粒体を凝集または被覆して粒子にする。その造粒メカニズムは通常流動層型造粒と同様である。

一方、造粒液体を使わないタイプは、気体により形成された噴流層に粉体同士の衝突接触作用およびチューブと造粒室内壁に落下した粉粒体の転動作用等により粉体同士が結合される。その過程が繰り返し行われ、一定粒径の粒子が形成される。その造粒メカニズムは湿式造粒ではなく、乾式造粒である。なお、この方式で造粒できるのは原料粉体が一定の付着性（粘着性）のある物質に限られる。この方法では、不純物となるバインダ（造粒促進材）を使用せず、付着性粉体の相互の付着力のみを利用するもので、不純物の混入が問題となる医薬・食品分野に於いてその応用が期待される。但し、本書は肥料加工技術を

紹介するもので、乾式噴流層造粒を詳しく知りたい方はほかの専門書をご参照願う。

噴流層型造粒機の構造概略と動作原理は図 8 に示す。

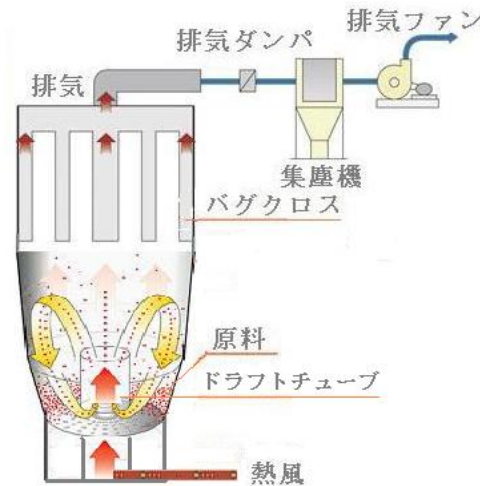


図 8. 噴流層型造粒機の構造概略と動作原理

噴流層型造粒機は、ドラフトチューブ内の気体流速、原料粉粒体の噴流量、造粒室内面での粉粒体の転動効果とのバランスで造粒した粒子の粒径や造粒能力が決定される。

2. 連続式流動層造粒機

連続式流動層造粒機はその構造により長方形の箱型と円筒型に分け、また、スプレーノズルの本数により1本ノズル式と2本以上の複数本ノズル式に分けられる。肥料造粒に使われる連続式流動層造粒機はほとんど複数本のスプレーノズルを有する長方形の箱型流動層造粒機である。造粒した粒子を無差別に逐次排出して、篩分け装置を通して製品粒子を除いた小粒子を粒子核として再び造粒機に戻す方式を採用するものがほとんどであるが、粒子の粒径（重量）により、製品粒子と原料粉粒体を分別して、流動できなくなる粒子だけを排出する方式を利用するものもある。

バッチ式流動層造粒機に比べ、連続式流動層造粒機は単位時間の生産量が多く、生産効率が高いが、変動的な要因が多く、原料投入や製品排出等により造粒室内の作業環境の変動が激しく、造粒工程の制御が難しい。造粒機の適切な設計と最適な操作条件の設定が要求される。

2-1. 箱型連続式流動層造粒機

箱型連続式流動層造粒機は造粒室が長方形で、底部に整流板が設置され、整流板の孔分布状態と気体温度により、幾つかの区域に分けられる。送風機から送ってきた熱風は整流板を通して、造粒室に入り、固体粒子を吹き上げ、流動層を形成する。気体が流動層を通した後、上部の分離空間で粒子と分離して、バグクロスを通して、集塵器等で粉じんを取除いてから大気に放出する。

流動層の厚さが大体200～500mmに設定して、スプレーノズルが複数本で、流動層の上部または整流板の下に設置される。原料粒子核が造粒室に投入されると、まず第1区域でスプレーノズルから造粒液体の噴霧を受け、液滴の被覆を受け、熱風で溶媒を蒸発することにより粒子が成長する。次いで粒子が立って続けて第2、第3の造粒区域の順を通過して、それぞれの区域でさらに造粒液体の液滴の被覆を受けて大きくなる。最後にスプレーノズルのない乾燥冷却区域を通過して、粒子表面に付着した液体を完全に乾燥してから排出する。箱型連続式流動層造粒機の構造概略は図9、実物写真は図10に示す。

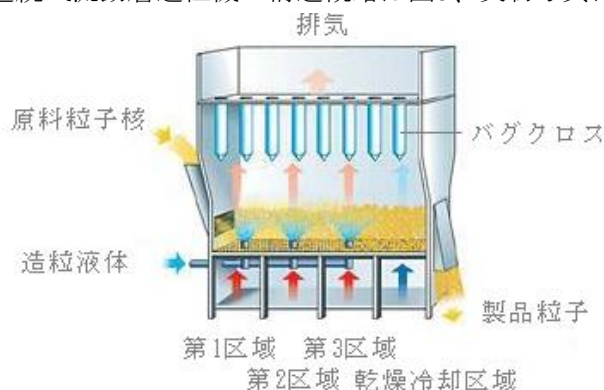


図9. 箱型連続式流動層造粒機の構造概略



図10. 箱型連続式流動層造粒機の実物写真（左：外観、 右：内部）

大粒尿素はほとんどの箱型連続式流動層造粒機で作られる。大粒尿素は1980年代までに噴流式（Spout Bed Type）造粒技術しかなかったが、1980年代には、噴流層と流動層を組み合わせ、エネルギー消費と設備費を削減できる噴流流動層式（Spout-Fluid Bed Type）造粒技術が確立され、現在が主流となった。

大粒尿素の造粒工程は、まず、ブリリング法で造粒した粒径0.8～1.5mmの小粒尿素を尿素核として、流動層造粒機の後方から投入し、造粒機の底部から吹込んだ110～120℃の熱風により高さ200～500mmの流動層を形成する。尿素製造工程で得た尿素濃度約96%の濃縮液を造粒液体として、整流板の下に設置されているスプレーノズルから流動している核粒子の表面にスプレーして、液滴が粒子表面に付着・乾燥の繰り返しにより、粒子を成

長させる。被覆しやすく、できた粒子の強度を高めて、耐固結性の改善をするため、尿素濃縮液に造粒促進材として MMU（モノメチロール尿素）を添加することが多い。被覆により成長した粒子は、造粒器の出口付近にある乾燥冷却区域で冷され、造粒器から排出される。排出された粒子は、篩分け機で製品規格サイズに従って分級される。規格以上の大粒子が破碎して規格未満の小粒子と一緒に造粒器に戻され、核粒子として利用される。規格サイズに合う粒子はクーラーで冷却され、製品として出荷する。

図 11 は本邦東洋エンジニアニングが開発した噴流流動層造粒機の概略図である。

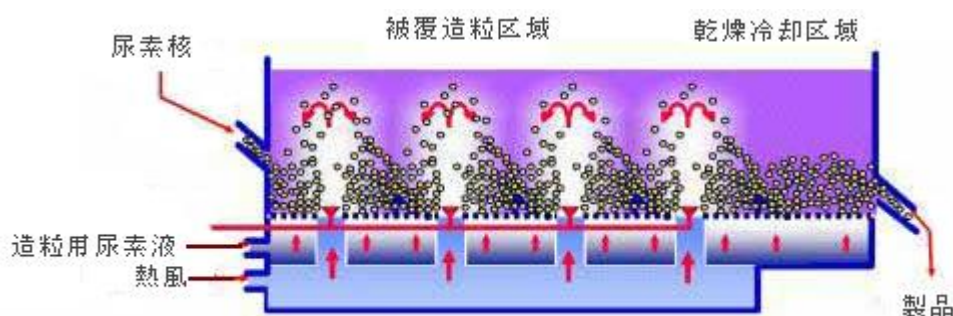


図 11. 大粒尿素の噴流流動層造粒機の構造概略

尿素的噴流流動層式造粒法は、次のような特長がある。

- ① 省エネルギー： 造粒器内での尿素溶液の微細液滴のスプレーに高圧の空気が不要。最適化された循環粒子温度。流動層高が低く、流動層形成のための必要な熱風流速が小さい。ダストを含む空気の洗浄設備の圧力損失が小さい。
- ② 高い製品品質： 造粒器内でスプレーされた尿素溶液の急冷により、ビウレットの生成を抑制する。乾燥効果が高く、製品中の水分を低く抑え、製品硬度を改善。噴流層、流動層の組み合わせにより、丸く均一な製品形状。
- ③ 環境にやさしい： 造粒器内でのダスト発生が少ない。高効率の排気洗浄塔を使用できる。

一方、高度化成肥料の流動層造粒には箱型連続式流動層造粒機を使うことができる。造粒液体はりん酸一安または硝安を使うことが特徴である。

りん酸一安（MAP）を造粒液体として使う場合は、りん鉱石を硫酸で分解した湿式りん酸を精製してから、予備中和槽または管式反応装置にアンモニアと反応して高濃度のりん酸一安液を生成する。硫酸加里または塩化加里の小粒子を核粒子として流動層造粒機に投入し、120～150℃の熱風を吹き込んで流動層を形成する。スプレーノズルからりん酸一安液を核粒子にスプレーして、被覆させる。被覆・乾燥の繰り返しにより、核が加里、外周がりん酸一安の高度化成肥料粒子を形成する。窒素含有量を高めるには、一定量の尿素粒子を硫酸加里または塩化加里に代わって、核粒子として添加して、りん酸一安に被覆造粒することもできる。

硝安を造粒液体として使う場合は、硝酸とアンモニアを管式反応装置に反応させ、硝安

液を生成する。硫酸加里や塩化加里、りん酸一安（MAP）やりん酸二安（DAP）の小粒子を核粒子として流動層造粒機に投入して、100～140℃の熱風を吹き込んで流動層を形成する。スプレーノズルから高温の硝安溶液を核粒子にスプレーして、被覆させる。被覆・乾燥の繰り返しにより、核が加里とりん酸、外周が硝安の高度化成肥料粒子を形成する。造粒された粒子は、篩分け機で製品規格サイズに従って分級される。規格以上の大粒子が破碎して規格未満の小粒子と一緒に造粒器に戻され、核粒子として利用される。規格サイズに合う粒子はクーラーで冷却され、製品として出荷する。

図 12 は高度化成肥料の連続流動層造粒工程の概略を示す。図 13 は流動層造粒機で造粒された硝安系高度化成肥料粒子の画像である。

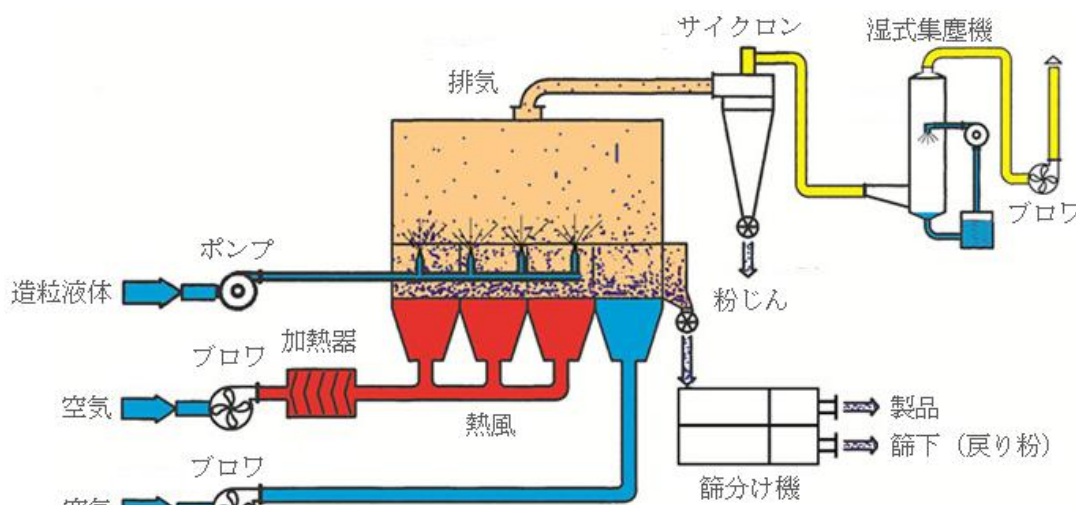


図12. 高度化成の連続流動層造粒機の構造概略

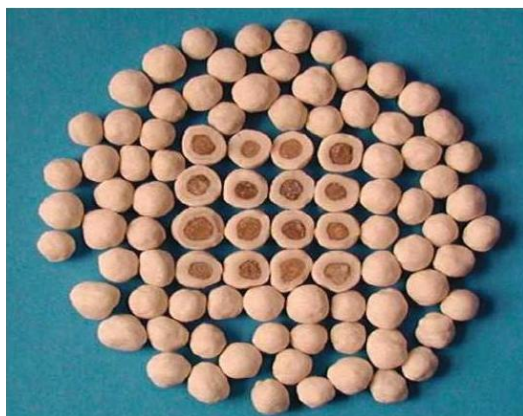


図 13. 硝安系高度化成粒子

核はりん酸一安と硫酸加里、外周被覆層は硝安である。

2-2. 円筒型連続式流動層造粒機

円筒型連続式流動層造粒機はその構造がバッチ式通常型流動層造粒機とほぼ同様であるが、造粒室の熱風が原料投入口や製品排出口からの漏洩を防ぐため、気密性を保つ原料投入装置と製品排出装置を取り付けてある。スプレーノズルの数は機種により1本のものと複

数本のものがあり、底部スプレー方式とトップスプレー方式が多用される。整流板に攪拌ブレードを取付けて、回転攪拌して大粒子の沈着を防ぎ、造粒室内の粒子の均一流動を補助するものもある。製品の排出は造粒した粒子無差別に逐次排出して、空気で粒子の重さにより分級して、小粒子を再び造粒機に戻す方法と、造粒した粒子がその重さで整流板上落下して、攪拌ブレードで掻き集め、排出装置に再度空気で分級する方法がある。

円筒型連続式流動層造粒機は造粒した粒子の粒径が小さく、生産能力も低いため、医薬品や食品の造粒に供されるが、肥料造粒に全く利用されていない。

図14は大川原製作所の円筒型連続式流動層造粒機の構造概略である。

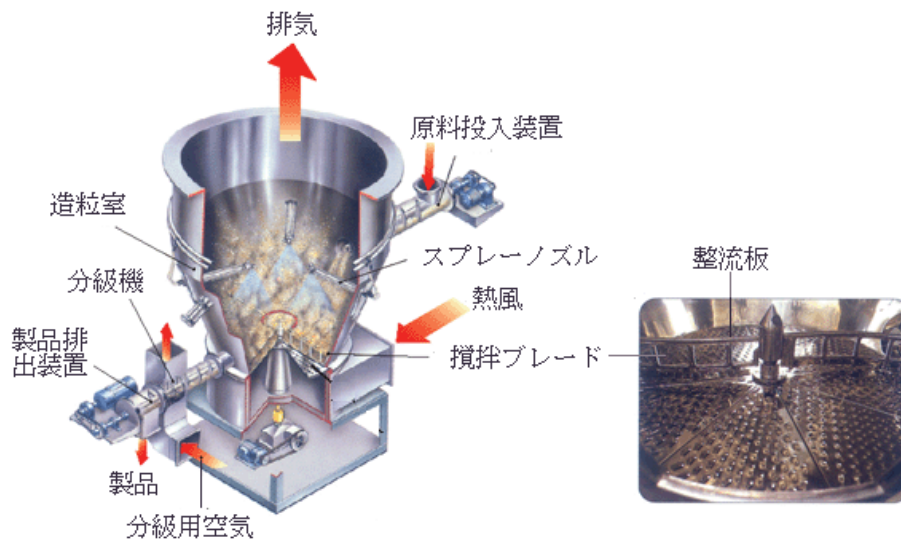


図14. 円筒型連続式流動層造粒機の構造概略

ほかに数～10数枚の羽根を有するタービン型連続式流動層造粒機、噴流式連続造粒機、核粒子を使用しない流動層熱噴霧造粒機もあるが、特殊な用途に限られているため、ここには紹介しない。詳細を知りたい方はその分野の専門書を参照ください。

三、 流動層造粒の影響要素

ほかの造粒法に比べ、流動層造粒は気体による流動層を形成してから、造粒液体を噴霧して、凝集または被覆による粒子を成長させるため、造粒に与える影響要素が多い。流動層造粒機の構造が割に簡単であるが、操作がほかの造粒法より複雑で、難しいと感じるところが多い。本節は流動層造粒の主な影響要素について述べる。

1. 気体流速

気体流速は流動層の形成と安定を支配する。流速が不足の場合は、流動層が形成できないか、形成しても安定維持できない。流速が速すぎると、流動層の厚さが高く、スプレーノズルからの造粒液体の噴霧範囲を超え、造粒効率が下がるだけでなく、一部の微細粒子が排気に混ぜて排出される恐れがある。バッチ式流動層造粒機では造粒が進んで、粒子

の成長に合わせて、気体流速を調整する必要がある場合もある。

経験上、安定な流動層を維持する気体流速は、臨界流動速度 (u_c) の3~6倍で、終端速度 (u_t) の0.2~0.6に設定すれば、ほぼ問題ない。

2. 気体温度

気体の温度が流速と共に造粒液体の蒸発速度に影響し、造粒した粒子の品質を支配する。特に被覆造粒の場合は、流動層の中にスプレーノズルの噴霧区域が温度敏感区域とも呼ばれ、その区域の温度が被覆した液滴の蒸発速度に影響する。温度が低すぎる場合は、付着した液滴の蒸発が遅すぎて、多数の粒子が凝集して塊となり、落下して整流板に沈着し、気体の吹き上げを妨害して、流動層を破壊し、操業停止に至るいわゆるクエンチング現象が起きる。一方、温度が高すぎる場合は、スプレーされた液滴が途中で乾燥してしまい、微細な粉じんとなって排出され、造粒効率が下がるか所要粒径の粒子を造粒できない。気体温度の調整は加熱器の温度を調整するほか、投入される核粒子の量を調整することもできる。概して、核粒子の投入量が多いほど、温度敏感区域の温度が下がり、逆に核粒子の投入量が減らすと、温度敏感区域の温度が上がる。

医薬品や染料、食品のような熱に敏感な物質を造粒する場合は、気体温度の制御が非常に重要である。気体温度が高すぎると、造粒した製品の光沢、強度、分散性、溶解性、活性と含有量、風味を損なう。温度が低すぎる場合は、熱効率や造粒効率が下がるだけではなく、造粒した粒子の水分含有量が高く、品質に問題が発生する恐れもある。事前に試験を行い、適切な気体温度を設定することが大切である。

3. 造粒液体の濃度

造粒液体の濃度が流動層造粒の粒子成長速度に影響する。被覆造粒には造粒液体が霧化できるか否かが最重要である。濃度が高すぎて、霧化できないか、できても途中で乾燥され、微小な粉じんが多数発生する。濃度が低すぎると、乾燥に必要な熱エネルギーが増え、粒子の成長速度が遅く、生産効率が下がる。

凝集造粒にも造粒液体の濃度が重要である。通常、造粒促進材を水に溶解して造粒液体とする。造粒液体の濃度が低いと、凝集能力が低下し、生産効率が下がるだけではなく、凝集した粒子の強度が低く、再び破壊される確率が高くなる。造粒液体の濃度が高すぎると、スプレーした液滴が大きく、凝集した粒子が粗く、強度も低くなる。また、塊を形成しやすく、流動層の安定性を損ない、ひどい場合は操業停止に至る。適切な造粒液体の濃度は、造粒促進材の種類と表面張力により異なり、試験で確認する必要がある。

数種類化学肥料の被覆造粒実験結果は表2に示す。

概して、被覆造粒では、造粒液体の濃度が一定の範囲を超えない場合は、濃度が高いほど単位時間内に粒子表面に付着する固体量が増え、粒子の成長速度が速くなる。

表2. 大粒尿素、炭酸加里、りん安系化成肥料の流動層造粒実験結果

造粒物質	造粒液体濃度 (%)	熱風入口温度 (℃)	流動層温度 (℃)	製品粒径 (mm)	製品水分率 (%)
尿素	85～93	105	70～80	2～4	<1
りん酸一安	30～40	250	70	2～4	3
炭酸加里	38～45	200～350	800～100	0.4～0.8	1

註： りん安系化成肥料の核粒子が硫酸加里である。

また、凝集造粒でも、一定範囲に於いて造粒液体の粘度が高いほど粒子の凝集率が高くなり、衝突による粒子の再崩壊が減り、粒子の成長速度が速くなる。これは高粘度の液滴により粒子間の凝集力が強くなり、再崩壊する確率が減るためである。

4. スプレーノズルの位置

流動層造粒装置に於けるスプレーノズルの取付位置は上記の図2に示すように3つある。

① 底部スプレー方式： スプレーノズルは整流板に設置して、下から流動層にスプレーする。この方式では噴霧した造粒液体が気流に乗って、ほとんど流動層に浮遊している粒子に付着し、未付着のままで乾燥する液滴が少ない。また、流動層の下部にある粒径の大きい粒子が優先的に付着するため、造粒した粒子は粒径が大きく、嵩密度も高い。欠点としては、自身が発生した核粒子が少なく、外部から核粒子の投入が必要である。

大粒尿素、りん安系、硝安系高度化成肥料の造粒はこの方式を採用する。

② トップスプレー方式： スプレーノズルは流動層の上限よりさらに高い位置に設置して、上から流動層にスプレーする。この方式では、噴霧した造粒液体が気流に逆らう方向で進行するため、粒子に到着する前に乾燥してしまう比率が多くなる。但し、造粒液体が流動層上部にある粒径の小さな粒子に優先的に付着して、これらの小粒子を凝集して大きな粒子に成長することに有利である。造粒した粒子の粒度分布が狭い。

トップスプレー方式は1本スプレーノズルのものが多く、構造と操作が簡単で、凝集造粒を目的とする円筒状造粒室を有する中小型バッチ式流動層造粒装置に多用される。

③ 接線スプレー方式： スプレーノズルは造粒室の側面に設置して、形成した流動層の中間に向けてスプレーする。側面スプレー方式とも呼ばれる。この方式では、噴霧した造粒液体が気流と接線の方向で進行するため、粒子に到着する前に乾燥してしまう液滴がトップスプレー方式より少ないが、底部スプレー方式より多いので、乾燥した液滴の微粒子が核粒子となり、造粒途中で外部から核粒子の投入が不要か減らすことができる。大型の円

筒状造粒室を有する連続式流動層造粒装置に複数本を装着する形で使用することが多い。単位時間の造粒液体噴霧量が多く、粒子の成長速度が速いが、影響要因が多く、操作が複雑である。

5. スプレーノズルの設置高さ

トップスプレー方式はスプレーノズルの設置高さが生成した粒子の粒径と強度をある程度影響する。概して、スプレーノズルの設置高さが流動層に近いほど、粒子の凝集速度が速く、形成した粒子の粒径が大きく、強度が強くなる。その理由は噴霧された造粒液体が熱風による乾燥損失が少なく、粉粒体への湿潤と浸透がよくなり、凝集力が強くなる。しかし、流動層に近すぎると、流動している粒子がノズルを接触して、造粒液体の液滴を妨害し、設定されている噴霧モデルを変更させるなどの弊害が発生する。酷い場合は噴霧を阻害し、ノズルに損傷をもたらす恐れがある。

底部スプレー方式と接線スプレー方式はノズルの設置高さの影響をほとんど受けない。

6. ノズルの噴霧圧力と噴霧量

一定範囲に於いて、スプレーノズルの噴霧圧力が高いほど、噴霧した液滴の速度が速く、液滴のサイズが小さくなる。また、単位時間の噴霧量も増える。従って、造粒速度が上がり、形成した粒子の粒径が大きくなり、強度も高くなる。これは、単位時間に噴霧した造粒液体の量が増え、核粒子や原料粉粒体への湿潤浸透範囲が広くなり、被覆量または凝集能力が増えるためである。但し、熱風の蒸発能力を超えた噴霧量では、粒子に付着した液滴が乾燥されままたさらに新たな液滴が付着して、過湿の状態となり、大きな塊を形成し、整流板に落下して流動層を破壊するクエンチングが発生する恐れがある。噴霧圧力と噴霧量は熱風の温度、流量、流速に合わせて適切に調節する必要がある。

7. 核粒子の粒度

被覆造粒と凝集造粒は核粒子に対する要求が正反対である。被覆造粒に於いて、粒子の核となるものであるため、粒径が大きいほど、所要造粒時間が短くなり、造粒効率が高くなる。

一方、凝集造粒に於いて、原料粉粒体の粒径が大きいほど、衝突による凝集の確率が小さくなり、造粒速度が落ちる。また、造粒した粒子の強度が低く、再び崩壊する確率も高くなる。逆に、小さな粒径の粒子が凝集により大きな粒子を形成する確率が高く、造粒効率が低い。但し、粒径が小さすぎると、気流に巻き込まれて、排出する可能性が高くなる。従って、凝集造粒の場合は実験で原料粉粒体の適切な粒径を確認する必要がある。

8. 造粒促進材

流動層造粒、特に凝集造粒に於いて、適切な造粒促進材の選択が非常に重要である。造

粒操作については、造粒液体の造粒促進材濃度および液温が造粒液体の粘度を支配し、スプレーした液滴の大きさと粉粒体の湿潤範囲を影響する。造粒性能についても、造粒促進材の粘着力と濃度が粒子の凝集、生成した粒子の粒径と強度を支配して、造粒時間、造粒速度を影響する。それらを条件にして適切な造粒促進材を選択する。

通常流動層型造粒機では、造粒液体の粘度が噴霧ポンプの性能制限を受け、 $300 \sim 500 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ に収まることが多い。この範囲に於いて、図 15 に示すように造粒液体に溶ける造粒促進材の濃度が高いほど、造粒液体の粘度が高く、造粒した粒子の粒径が大きくなり、強度も高くなり、圧迫による粒子の破壊率が低下する。

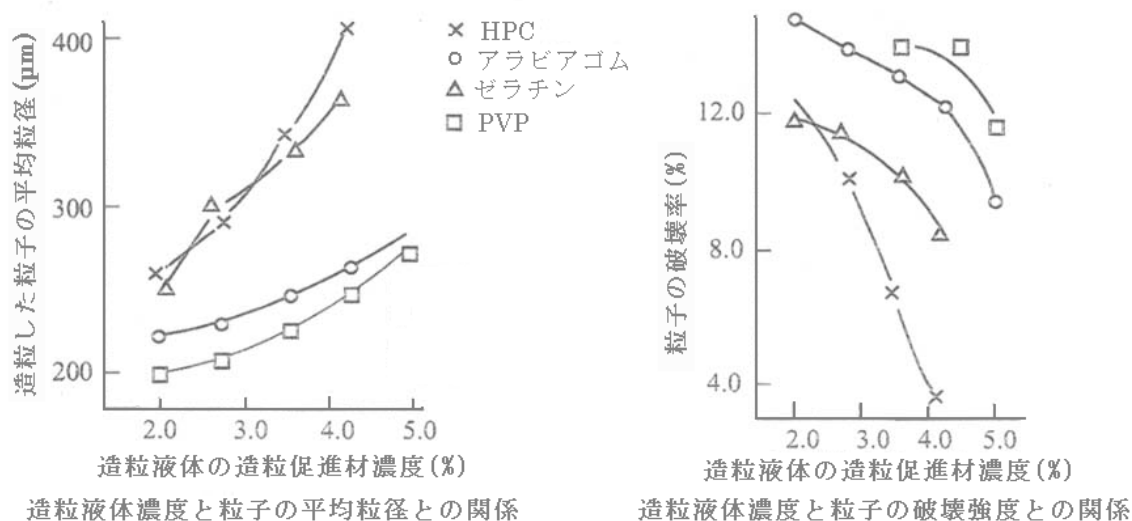


図 15. 造粒液体に溶けた造粒促進材の濃度と造粒した粒子の粒径、強度との関係

四、 流動層のクエンチングと発生原因及び解決方法

流動層造粒過程に突然に発生した異常により操作条件が破壊され、流動層が消失して、造粒が急遽できなくなる現象は流動層のクエンチング (Quenching) と呼ばれる。クエンチングはウェットクエンチング (Wet quenching) とドライクエンチング (Dry quenching) に分けられるが、流動層の噴霧造粒に発生するクエンチングは主にウェットクエンチングで、造粒を中断させるほど致命的な障害であるため、回避しなければならない。

ウェットクエンチングとは造粒中の粒子が急速に多数の塊に凝集して、整流板に落下し、熱風の吹き上げを妨害して、流動層を破壊する現象である。ウェットクエンチングの発生原因は主に次の2つである。

- ① 流動層を形成した熱風から供給される有効な熱エネルギーが造粒液体の蒸発に必要な熱エネルギーを下回るため、粒子に付着している造粒液体が迅速に乾燥できなくて、互いに凝集して、広範囲に塊を形成して落下し、整流板を塞ぎ、熱風の流量が急に低下して、一瞬にして流動層を破壊する。
- ② 熱風からの熱エネルギーが充分であるが、局部範囲に蒸発量とノズルから噴射された液

滴量に不均衡が発生し、その局部に塊が形成される。形成した塊が整流板に落下して、熱風の吹き上げを妨害し、熱風の流量が減り、不均衡が次第に拡大して、しきい値を超えると一瞬にして流動層を破壊する。

造粒液体の溶媒蒸発速度と造粒液体噴霧量の不均衡が発生する要因について下記のことが考えられる。

1. 造粒液体の噴霧速度が速すぎる

ノズルからスプレーされた造粒液体の噴霧速度が速すぎる場合は、液滴が大きくなる傾向があり、粒子表面を湿潤する能力が高く、湿潤面積が広がる。被覆した粒子の表面または凝集した粒子と粒子間の液架橋が乾燥されないままで新たに液滴が付着して、周辺にある粒子が互いに凝集して塊を形成し、ウェットクエンチングを誘発する。

原因は造粒液体の圧送ポンプに圧力脈動が起き、安定しない。又は設定される噴霧速度が高すぎる。解決方法は圧力安定性の良いポンプを交換して、造粒液体の配管を見直して、噴霧速度を適切値に設定する等である。

2. 噴霧空気圧が低すぎる

高圧空気を使用して造粒液体を霧化する気流式ノズルを使用する場合は、高圧空気の圧力が一定値以下に低下すると、霧化した液滴が大きくなり、噴霧角度が小さくなり、噴霧距離も短くなる。それによって局部区域に過剰の液滴が集中して、塊の凝集が発生し、次第に拡大してウェットクエンチングを誘発する。

解決方法はコンプレッサーと配管を見直して、霧化の空気圧を安定させる。また、スプレーノズルの構造と種類を改良して、空気圧の低下を防ぐ。

3. 造粒液体の量が多すぎる

単位時間にスプレーされた造粒液体の量が多すぎるまたはスプレー時間が長すぎると、液体蒸発に必要な熱エネルギーが熱風の熱エネルギーを超えた場合は、粒子に付着している造粒液体が乾燥せず、粒子同士が凝集して、広範囲に塊を形成して落下し、整流板を塞ぎ、ウェットクエンチングを誘発する。

解決方法は単位時間にスプレーされる造粒液体の量とスプレー時間を適切に設定する。

4. 造粒促進剤の濃度が高すぎる

凝集造粒の場合には、造粒液体に含む造粒促進剤の濃度が高すぎると、次第に大粒子に凝集して重さが熱風の吹き上げ揚力を超えて整流板に落下する。落下した大粒子が熱風の吹き上げを妨げ、局部区域の流動不良現象を誘発する。流動不良現象が次第に拡大して、しきい値を超えると瞬時にウェットクエンチングが発生する。

解決方法は造粒促進材の濃度を適切値に設定する。

5. 熱風温度が低く、流量が足りない

熱風温度が高い場合は、造粒液体の液滴が粒子に届く前に乾燥されてしまい、造粒効率が下がるが、熱風温度が低いまたは流量が不足の場合は、流動層の乾燥能力が低下して、造粒液体の蒸発がうまく行けず、粒子が過湿の状態に陥り、粗い大粒子や塊に凝集して、ウェットクエンチングを誘発する。

解決方法は造粒液滴の蒸発速度に合わせて、熱風温度と流量を適宜に調節する。

実際に、流動層にクエンチングが発生する原因は上記幾つかの要素が同時に作用することが多い。クエンチングを防ぐには、各操作パラメーターを事前に確認・確定して、実際の生産に於いて厳格に制御することが大事である。