

## 湿式造粒 ー 搅拌造粒法

搅拌造粒法は、原料粉粒体を造粒容器に投入して、回転するブレードで搅拌しながら水または造粒液体を添加して、原料粉粒体を球形の粒子に凝集させる方法である。湿式造粒に属する。

搅拌造粒は原料粉粒体が回転するブレードの搅拌作用により強いせん断力と圧縮力を受けて、混合、切返し、分散を行い、遠心力により造粒容器の内壁に衝突運動等で転動しながら粒子に凝集する過程である。その粒子核の形成、粒子の成長メカニズムが転動造粒とほぼ同じであるが、転動造粒は粒子が重力と遠心力の影響により規則的に転動しながら一次粒子を粘着・結合して次第に大きくなることに対して、搅拌造粒はブレードの回転により粒子が不規則的に転動しながら互いに衝突し凝集して大きくなる。凝集力の弱い粒子がブレードとの衝突または互いに衝突して崩壊するが、碎片が再び凝集して成長するところが異なる。

搅拌造粒法の特徴は

- ① 造粒時間が短く、ワンロットの造粒時間が原料の投入、混合、液体の添加を入れても大体 30~45 分である。
- ② 造粒した粒子の密度が高い。
- ③ 造粒した粒子の粒度分布が広い。
- ④ 搅拌ブレードの回転抵抗及び造粒室内の造粒物の重量による造粒した粒子の崩壊を防ぐため、造粒室のサイズと原料投入量が制限され、一回造粒できる量が少なく、造粒能力が低い。
- ⑤ 連続造粒に向けず、バッチ式がほとんどである。生産効率が劣る。
- ⑥ 強制搅拌に使うエネルギーが多く、生産コストが高い。

同じく湿式造粒法の転動造粒法、押出造粒法に比べて、それぞれの特徴を表 1 に示す。

表 1. 湿式造粒法で造粒した粒子の特徴比較

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
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
スクリュー押出造粒法	円柱状	高い	狭い	良い	高い
搅拌造粒法	卵状または不規則状	高い	非常に広い	良い	高い

従って、搅拌造粒法は生産効率と生産コストの面では劣るため、主に食品調味料、医薬品や農薬の造粒に使用されるが、化成肥料の造粒にはあまり使われていない。

## 一、 搅拌造粒法の造粒原理

搅拌造粒法は、原料粉粒体が回転するブレードの搅拌により不規則的に転動しながら互いに衝突し凝集して粒子を形成するが、凝集力の弱い粒子が衝突によりまた崩壊し、碎片が粒子核として再び凝集して成長するという過程を繰り返して、最終的に密度の高い緻密な粒子になる。図1はその過程を示す。

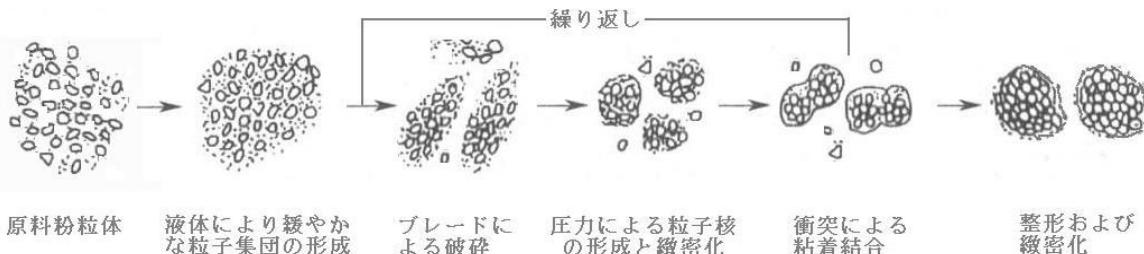


図1. 搅拌造粒法の粒子形成過程

### 1. 搅拌造粒の条件とパラメーター

搅拌造粒法は搅拌ブレードの回転により湿潤した粉粒体が転動と混合の作用を受け、凝集して粒子になる方法である。搅拌造粒法は湿式造粒法に属するため、その粒子の結合メカニズムは主に粒子と液体との相互作用で液架橋を形成することにより界面張力と毛細管負圧が発生し、一次粒子を凝集させる仕組みである。但し、転動造粒や押出造粒と異なり、その凝集の仕組みはまだ完全に解明されていない。今まで実験で得たデータ等の解析により下記の条件とパラメーターが必要とされる。

#### 1-1. 原料の水分率

搅拌により粒子の凝集作用が原料粉粒体の水分率により大きく変動する。これは、一次粒子を湿潤して、液架橋を形成するに必要な液体量、液架橋の界面張力と搅拌ブレードのせん断力と圧縮力に由来する破壊力とのバランスに関連する。

Newitt 氏は凝集造粒における粒子の凝集に関わる負圧と粒子の押し潰される負荷との関係を下記の式を提示した。

$$k = \frac{L}{dn} = KSP_s$$

$k$  : 凝集強度係数 (kPa) ;  $L$  : 押し潰す負荷 (N) ;  $d$  : 造粒した粒子の粒径 (m) ;  
 $n$  : 係数 ( $n=2$ ) ;  $K$  : 造粒した粒子の破壊に関わる常数 ( $K \approx 0.7$ ) ;  $S$  : 水分飽和度 (%) ;  
 $P_s$  : 液体から引き起こす吸引負圧 (kPa)

この計算式から粒子の凝集力が原料の水分飽和度  $S$  と液一固体の界面張力および毛細管負圧に由来する吸引負圧  $kPa$  に支配される。液一固体の界面張力および毛細管負圧も原料の水分飽和度と密接な関係があるため、粒子の凝集力が主に原料の水分飽和度に依存すると考えられる。Michael 氏は実験で湿潤粉体の水分飽和度と搅拌で発生する粒子の凝集力と

の関係を図 2 に纏めた。

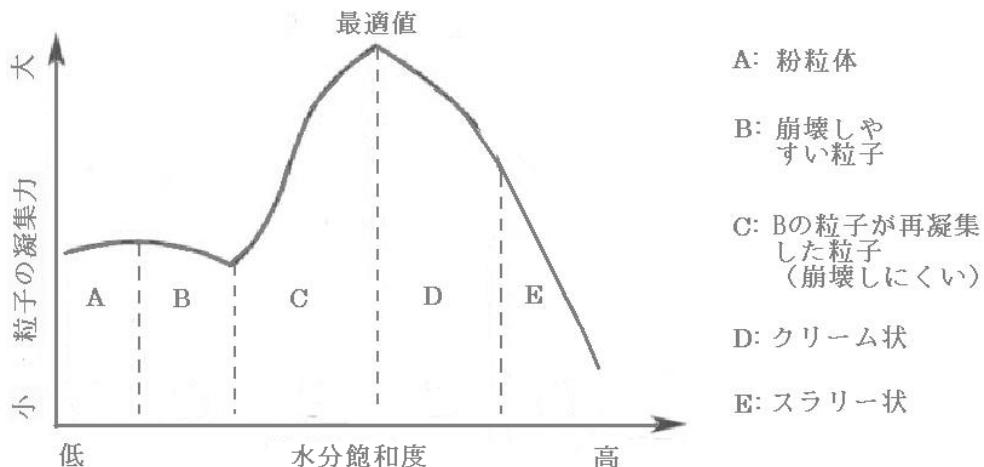


図 2. 湿潤粉体の水分飽和度と搅拌で発生する粒子の凝集力との関係

図 2 に示すように、水分飽和度が低い場合 (A 区域) は原料が乾燥の状態で、いくら搅拌しても凝集せず、粉粒体のままである。水の添加により原料の水分飽和度が若干上がつて B 区域にある場合は、粒子の凝集現象が発生するが、液架橋および毛細管負圧から発生する吸引負圧が弱く、形成した粒子が崩壊しやすく、製品にならない。原料の水分飽和度が適宜の場合 (C 区域) は、液体の吸引負圧が搅拌ブレードの衝撃圧力を超えたので、安定した密度の高い粒子に凝集する。原料水分がさらに増えて、D 区域に入った場合は、搅拌により原料が個々の粒子に凝集せず、固まってクリーム状となる。水分飽和度をさらに高くして E 区域になった場合は、原料が塊に形成できず、流動性のあるスラリーを呈する。

粉体の最適水分飽和度は原料種類により異なるので、その最適の水分飽和度の値がテストで確認しなければならない。また、搅拌による発生する衝撃力もブレードの形状、回転数等により異なるので、これもテストで確認すべきである。

## 1-2. 毛細管吸引負圧

搅拌造粒の粒子凝集力、すなわち液体から引き起こす吸引負圧は、毛細管作用に由来する部分が大半である。毛細管作用による吸引負圧は下記の式で計算することができる。

$$P = \frac{ps}{\sigma L \cos\theta} \times \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \times \frac{d_{vs}}{\phi}$$

$P$ : 吸引負圧 ;  $ps$ : 液体から引き起こす吸引負圧 (kPa) ;  $\sigma L$ : 液体の表面張力 (N/m) ;  $\theta$ : 接触角 (完全湿潤時に  $\cos\theta = 1$ ) ;  $\varepsilon$ : 造粒物の空間率 (%) ;  $d_{vs}$ : 体積当たりの表面積平均値 (mm) ;  $\phi$ : 形態係数

上の式から毛細管吸引負圧は造粒物の空間率と体積当たりの表面積に比例することが判明される。

### 1-3. 造粒効率指数

搅拌造粒は、最適の造粒条件にするために原料粉粒体、造粒促進材、水の比率を調整しなければならない。その調整条件は最適の造粒効率指数と造粒した粒子の安定性で確定する。通常、原料の水分飽和度  $S$  が 1 に近づいた時に湿潤した粉粒体の凝集性が最大であるが、造粒物の空間率  $\epsilon$  が小さい場合は、個々の粒子に凝集せず、クリーム状になることが多い。従って、最適の水分飽和度  $S$  が造粒物の空間率  $\epsilon$  により変化する。通常、造粒物の空間率が確認しにくく、最適造粒効率指数に当る水分飽和度  $S$  がなかなか確定できない。

パン造粒機など転動造粒の場合は、造粒した粒子の密度が低いため、最終造粒物の空間率がその原料粉粒体の乾燥時の空間率と近似する。原料の空間率  $\epsilon$  を利用して最適の水分飽和度  $S$  を確定することができる。その場合は、造粒効率指数 (AID) は次の式で示すことができる。

$$AID = \text{造粒時の液体量} / S=1 \text{ 時の液体量}$$

転動造粒の場合は水分飽和度  $S=1$  に近づくと、粒子表面が湿潤して、一次粒子を効率的に粘着し、結合して成長する。しかし、搅拌造粒では、造粒した粒子の密度が高く、最終造粒物の空間率がその原料粉粒体の乾燥時の空間率と大分離れる。原料の水分飽和度  $S=1$  時の液体量がすでに造粒物がクリーム状になる可能性が高いため、水分飽和度  $S < 1$  の時に造粒効率指数が最大である場合が多い。

### 1-4. 原料の混合度

転動造粒や押出造粒と違って、搅拌造粒は搅拌機能があるため、通常、搅拌造粒機に各種原料をそれぞれ投入して、搅拌混合してから水や造粒液体を添加して造粒する。従って、各原料の均一混合が品質の良い粒子を造粒する条件の一つである。混合度の統計分析方法は次の式で計算する。

$$M = \frac{\sigma^2_0 - \sigma^2}{\sigma^2_0 - \sigma^2_r}$$

$M$  : 混合度 ;  $\sigma^2_0$  : 混合前の分散値 ;  $\sigma^2$  : 混合物サンプルの分散値 ;  $\sigma^2_r$  : 完全混合の分散値

原料等の混合度は搅拌ブレードの回転数、混合時間に関連する。その関係式は

$$M = K N^{a_1} N^{b_2} T^c$$

$M$  : 混合度 (%) ;  $K, a, b, c$  : 係数 ;  $N_1$  : 主搅拌ブレードの回転数 (r/min) ;  $N_2$  : 補助搅拌ブレードの回転数 (r/min) ;  $T$  : 混合時間 (min)

通常、混合度は主搅拌および補助搅拌ブレードの回転数の増加、混合時間の延長により高くなるが、一定のしきい値を超えた後、回転数の増加や混合時間の延長が混合度に影響

を及ぼさなくなる。

実際の生産には、事前に主搅拌および補助搅拌ブレードの回転数と混合時間が原料混合度の影響を調べ、最適な回転数と混合時間を決めるることは生産効率の向上および造粒した粒子の品質保証に大事である。

## 2. 搅拌造粒の過程と造粒速度

搅拌造粒は搅拌により湿潤粉粒体が衝突等により粘着し合い、凝集して粒子になる過程である。

搅拌造粒機に投入し、混合した原料粉粒体が次に添加した液体により湿潤となり、搅拌ブレードの回転で大きな荒目の粒子または塊を形成する。粒子や塊の形成は液体の表面張力、原料粒子表面の自由エネルギーの低下及び気一液界面の減少、固一液界面の増加による結果である。

粒子が形成した後、粒子の成長速度と最終粒度は原料粉粒体の粒度と固体特性、液体の表面張力、粘度および生産工程（バッチ式か連続式）に影響される。粒子の成長は主に次の2つ要素によるものである。

① 凝集： 2つまたは2つ以上の粒子が液体状の粘着物質により凝集し、その液体が凝集した粒子の間に液架橋を形成し、界面張力で粒子を結合し大きな粒子を形成する。凝集で形成した粒子はその成長速度が速く、機械的な物性が良いが、粒度分布が広く、密度が低く、粒子の形状が丸くない。

② 被覆： 粒子の表面に付着している液体が小さな粒子を粘着して結合させる。これも液架橋の界面張力によるものであるが、凝集との違いは、粒子表面に付着したのは小さな粒子で、粒子を被覆して層になっている。その繰り返して粒子が次第に大きく成長する。被覆で形成した粒子は成長速度が遅いが、内部構造が緻密で、粒子の形状も丸い。

搅拌造粒はブレードの回転により、成長した粒子が崩壊され、再び凝集または被覆により成長する。従って、搅拌造粒の粒子成長メカニズムはまだ完全に解明されていないが、その成長の過程は次のようにある。

### 2-1. 搅拌造粒の指向三角形

図3の指向三角形は搅拌造粒過程に原料粉粒体（F）および造粒時間（T）が造粒した粒子（G）との関係を示すものである。

原料粉末（F）から起点とする搅拌造粒は、造粒に必要な諸条件が揃った場合には、造粒時間（T）が長いほど造粒した粒子（G）の強度が高くなり、粒径が大きくなる。一方、原料の物性、搅拌による造粒物の運動などが粒子の凝集状況を影響し、必要な造粒時間を支配する。従って、原料、造粒時間、造粒物の品質の間に図3のような指向的三角関係を構成する。この三角関係には所要造粒物の重要な条件（原料の水分飽和度、造粒促進材の有無、搅拌強度等）が造粒速度を支配するため、造粒時間の短縮、造粒物の品質向上にはこれら

重要条件を最適にすることが大事である。

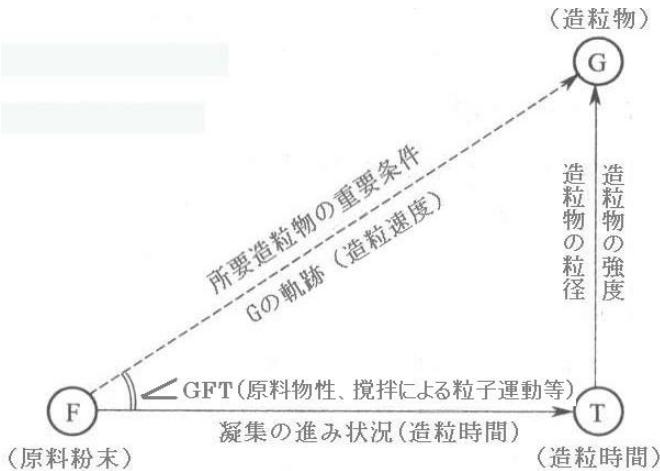


図 3. 搅拌造粒の指向三角関係

## 2-2. 凝集造粒の速度

湿潤した原料粉粒体はその固一液の状態により既に凝集可能となった。造粒速度は搅拌による粒子の凝集速度に依存する。バッチ式の搅拌造粒では、原料は造粒容器に一斉で凝集を始めて、その凝集過程も同様であると仮定し、図 3 の搅拌造粒指向三角関係に従い、造粒時間  $t$  に於ける造粒物個数  $n$  の変化は次の微分式で表示することができる。

$$\frac{dn}{dt} = -\mu_a n^k$$

$\mu_a$  : 凝集造粒速度常数、 $\mu_a = 3 \angle GFT/d_{vs}$  ;  $d_{vs}$  : 造粒物体積当たりの表面積平均値 (mm) ;  $k$  : 指数

自由空間凝集原理により、上の式に造粒物  $n$  の指数  $k=2$  であるが、制御されている空間では凝集する際に造粒物  $n$  の指数  $k=1$  になる。搅拌造粒は制御されている造粒容器に行うため、 $k=1$  が多用される。

上の式から凝集造粒の速度は造粒物の個数 ( $n$ ) に正の相関関係、造粒物体積当たりの表面積平均値に負の相関関係を有することが明らかになる。

## 2-3. 被覆造粒の速度

一方、造粒物の粘着作用による被覆造粒の速度はその粒子の表面状態、造粒物直径と表面積に関係する。図 3 の搅拌造粒指向三角関係に従い、造粒時間  $t$  に於けるある造粒物質量  $m$  の増加量は次の微分式で表示することができる。

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{2} \phi_s d^2 \left( \frac{dd}{dt} \right) \rho_m (1-\varepsilon) = \mu_c \phi_s d^2$$

$\mu_c$  : 被覆造粒速度常数、 $\mu_c = 3 \rho_m (1-\varepsilon) \angle GFT/\phi$  ;  $\phi_s$  : 造粒物の表面形状係数 ;  $\varepsilon$  :

造粒物の空間率（%）；  $\rho_m$ ：粒子密度（g/cm<sup>3</sup>）；  $\phi$ ：比表面形状係数；  $d$ ：造粒物の粒径（mm）

上の式から被覆造粒の速度は造粒物の表面形状係数および造粒物の粒径（正確に言えば、表面積）に正の相関関係を有することが明らかになる。

#### 2-4. 造粒物粒子強度の影響

粒子の強度は搅拌過程に粒子が受ける搅拌や衝突の破壊力を超えた時だけに粒子の成長が可能である。また、粒子の強度が搅拌過程の一次粒子への吸着力と衝突時の凝集力にも影響を与える。従って、造粒物粒子の強度が造粒速度と造粒した粒子の品質に大きく影響を与える。

造粒時に造粒物の粒子強度は粒子内部にある液架橋の界面張力と毛細管負圧に制御される。また、被覆造粒の過程では液体の表面張力と一次粒子の粒径との比が一定の値を超えた場合にはじめて丸い球状粒子に造粒することができる。次の式は液体の表面張力と一次粒子の粒径との関係を示す。

$$\frac{\sigma_L}{d} \geq 460$$

$\sigma_L$ ：液体の表面張力（N/m）；  $d$ ：一次粒子の粒径（m）

上の式から造粒液体が水の場合は、原料粉粒体の粒径が $\leq 150 \mu m$ に抑えるべきである。表面張力が水より低いその他の液体を使う場合は、原料粉粒体の粒径がさらに細かくしなければならない。造粒液体の表面張力を上げるために、可溶性造粒促進材の使用は造粒時間の短縮、造粒した粒子の品質向上に非常に有効である。

#### 2-5. 液体含有量

搅拌造粒は原料粉粒体から凝集してきた造粒物の内部が毛細状態となり、その内部空間に造粒液体が入っていると考える。この際に造粒物内部の液体含有量が

$$S = \frac{\epsilon \rho_L}{\epsilon \rho_L + (1-\epsilon) \rho_m}$$

とされる。

$S$ ：液体含有量（%）；  $\epsilon$ ：造粒物の空間率（%）；  $\rho_L$ ：液体の密度（g/cm<sup>3</sup>）；  $\rho_m$ ：原料粉粒体の密度（g/cm<sup>3</sup>）

実際に造粒物の液体含有量  $S$  を影響する要因が多数あり、例えば、固一液結合体の性質、原料固体の可溶性と平衡に達した際に溶解度、搅拌条件と混合時間、液体の性質（粘度、表面張力等）、固体の性質（形状、粒度、吸水能力等）、造粒物内部空間に液体の実際占領

率（通常30～40%、さらに少ない場合もある）などである。

適宜の液体含有量が固一液体の界面張力と毛細管負圧を最大にして、造粒物の強度を高め、搅拌や衝突の破壊力を超えて、造粒時間の短縮と造粒した粒子の強度、形状を良くするには非常に重要である。通常、液体含有量を30%前後に制御して、よい造粒結果が得られるが、原料の物性と造粒液体の性質により大きく変わる可能性もあり、事前にテストをして確認した方がよい。

## 二、バッチ式搅拌造粒機

搅拌造粒に使う造粒機はその生産方式によりバッチ式と連続式に大別される。通常、バッチ式搅拌造粒機が造粒過程の制御が容易で、造粒した粒子の品質が良いため、多用される。

バッチ式搅拌造粒機は造粒室、搅拌ブレード、モーターと減速機に構成される。搅拌ブレードは造粒室の中央にある主搅拌ブレードのほか、造粒室の側面に小さな補助搅拌ブレードを設置している。バッチ式搅拌造粒機の基本構造概略は図4に示す。

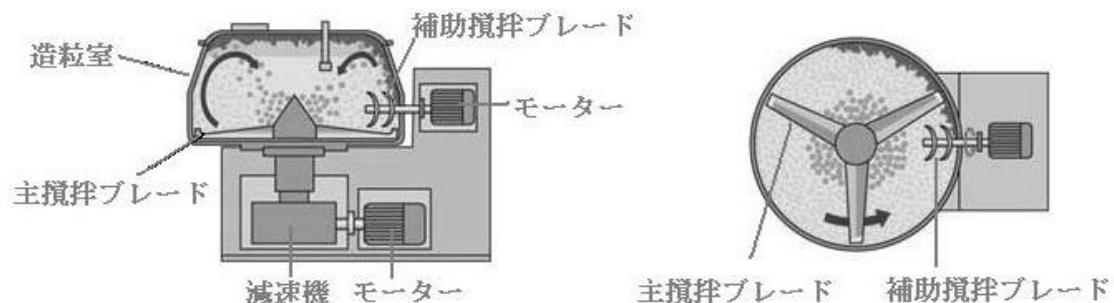


図4. バッチ式搅拌造粒機の構造概略図

バッチ式搅拌造粒機は通用型搅拌造粒機が基本機種である。特殊な原料や造粒液体に対応するまたは造粒速度を上げるために、構造上に若干変更を加え、付加機能を追加したものもある。基本構造の違いにより下記の数種類がある。

### 1. 通用型搅拌造粒機

通用型搅拌造粒機で、図4に示すような基本的な構造しか持たない。造粒室は基本的に太鼓状容器であり、上部がやや内側に収束してくる。造粒室の底には垂直の回転軸を設置して、回転軸には2～数枚の主搅拌ブレードを装着し、モーターと減速機からなる駆動機構により水平に回転する。主搅拌ブレードが造粒室の底に低速回転し、原料粉粒体を搅拌して渦流を形成する。補助搅拌ブレードは造粒室の側面に装着して、水平回転する主搅拌ブレードと相対して垂直に回転する。補助搅拌ブレードは形成した造粒物を搅拌解体する役割を果たす。

搅拌造粒は次のように行う。まず原料を造粒室に投入して、主搅拌ブレードの回転により混合する。混合した原料を搅拌しながら、形成した原料の渦流に造粒液体を添加して、

原料粉粒体を湿潤させる。湿潤した原料がすぐ荒めの塊を形成し、回転する主搅拌ブレードの遠心力により造粒室の内壁に投げられる。造粒室内壁に付着した塊が造粒室側面にある補助搅拌ブレードにより再び解体され、小さな粒子核となる。その粒子核がブレードのせん断力と圧縮応力により密度が高くなり、ほかの粒子核との衝突または小さな粒子を粘着することにより次第に成長し、大きくなる。条件がそろった場合は、造粒液体を入れてから 5~15 分間だけで密度の高い粒子を完成することができる。造粒後、ブレードの回転を停止して、造粒した粒子を取り出す。

通用型搅拌造粒機は図 5、造粒室内に於ける搅拌ブレードの写真は図 6 に示す。



図 5. 通用型搅拌造粒機



図 6. 造粒室内部にある搅拌ブレード  
主搅拌ブレード 補助搅拌ブレード

## 2. 真空搅拌造粒機

真空搅拌造粒機は構造が通用型搅拌造粒機と同じであるが、造粒室が 2 重ジャケット構造となり、ジャケットに蒸気や熱水を通して造粒室を加熱させることができる。また、造粒室に真空装置を取り付け、必要に応じて容器内を真空にすることもできる。なお、造粒室が固定されず、最大 90° に回転することができる。

真空搅拌造粒機の写真は図 7 に示す。



図 7. 真空搅拌造粒機

真空搅拌造粒機の造粒は次のように行う。まず、造粒室に原料等を投入して、搅拌で混合することは通用型搅拌造粒機と同じである。混合した原料の渦流に造粒液体をスプレー噴霧またはノズルを使って点滴のようにゆっくり加える。湿潤した部分の原料が回転ブレードの搅拌により球状の粒子に造粒しながら加熱と真空により粒子内部に形成した液架橋の液体を蒸発させ、堅牢な固架橋に変える。造粒完了後、ブレードの回転を止めても造粒室が±90°に回転できるので、乾燥し続けることもできる。

真空搅拌造粒機の特徴は、完全密閉な真空環境で作業するため、水だけではなく、有機溶媒を造粒液体として使用することもできる。また、原料をすべて湿潤して造粒するではなく、先に一部の原料を湿潤して粒子核を形成してから造粒液体を継続的に添加するため、被覆造粒が主な要因で、液体の浸透効果が優れ、できた粒子が球状で、その密度が非常に高い。従って、普通に造粒しにくい原料でも真空搅拌造粒機で造粒することができる。

### 3. 高速搅拌造粒機

高速搅拌造粒機は主搅拌ブレードが高速に回転して、混合造粒効果を高めたものである。補助搅拌ブレードもカッター状に変化して、造粒物の塊を解体する能力を高める。

造粒過程は通常型搅拌造粒機とほぼ同様であるが、主搅拌ブレードの回転速度が速いため、造粒速度が速い。通常、原料を投入し、混合してから造粒液体を添加して造粒を行う。造粒にかかる時間は通常型搅拌造粒機より短く、生産効率が高いが、回転ブレードのせん断力が強いため、粘着力の高い造粒促進材（でん粉、PVA、CMC等）を含有する造粒液体が不可欠である。

高速搅拌造粒機の構造を図8、写真は図9に示す。

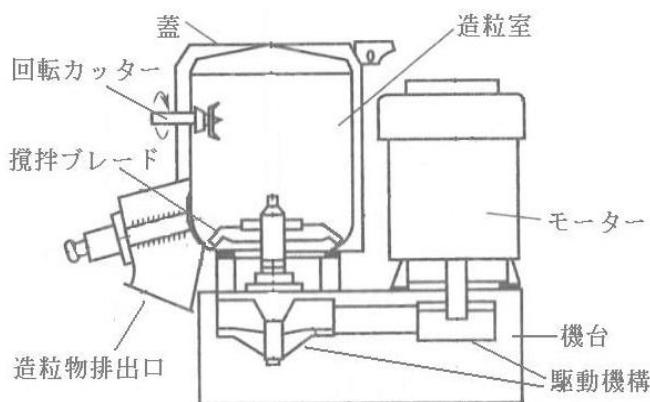


図8. 高速搅拌造粒機の構造概略図



図9. 高速搅拌造粒機

### 4. 双軸高速搅拌造粒機

双軸高速搅拌造粒機は造粒室の底部が鍋のように凹型を呈し、搅拌ブレードの回転軸は造粒室の底ではなく、頂部から垂直に下りて設置し、それに並行して傍にもう1軸の小さい造粒ブレードを設ける。造粒室の側面に補助搅拌ブレードがない。搅拌ブレードが3枚

偏心式構造で、回転軸の先端が円錐状を呈する。搅拌死角をなくすため、搅拌ブレードは造粒室の底部との間に僅か2mmの隙間しか離れていない。また、ブレードの直径も造粒室の直径とほぼ同じである。造粒ブレードが逆ツリー型構造を呈し、その段数は造粒室の容積と高さにより決められ、通常3～6段にすることが多く、最上段は搅拌ブレードより巻き上げた造粒物の高さとほぼ同一の高度に設定される。

造粒過程は通常型搅拌造粒機とほぼ同様であるが、搅拌ブレードの回転速度が速いため、造粒速度が速い。通常、原料を投入し、混合してから液体を添加して造粒を行う。回転する搅拌ブレードの搅拌により湿潤した原料が荒めの塊を形成し、遠心力により造粒室の上部へ持ち上げられる。上がった塊が造粒室上部にある造粒ブレードによりせん断、圧縮され、密度が高くなる。落下して粒子核は搅拌ブレードの搅拌により、ほかの粒子核との衝突または小さな粒子を粘着することで次第に成長し、大きくなる。造粒にかかる時間は通常型搅拌造粒機より短く、生産効率が高い。また、高速搅拌造粒機に比べて、造粒ブレードを別途に設けているため、造粒液体（でん粉、PVA、CMC等の溶液）添加量を減らすことができる。

双軸高速搅拌造粒機の構造概略は図10、搅拌ブレードの写真は図11に示す。

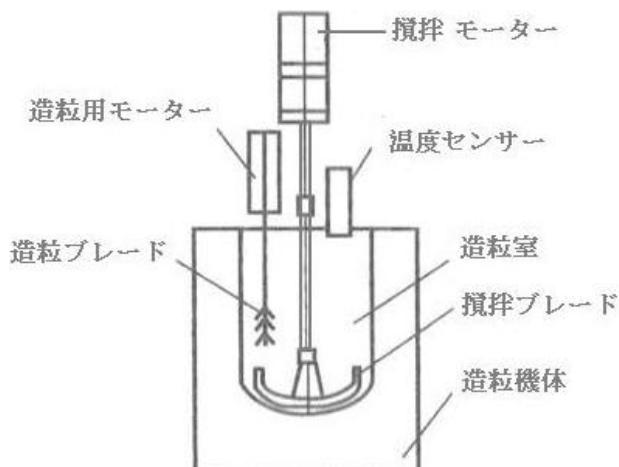


図10. 双軸高速搅拌造粒機の構造概略図



図11. 双軸高速搅拌造粒機のブレード

## 5. 強化混合造粒機

強化混合造粒機は双軸高速搅拌造粒機と似ているが、造粒室中央に1軸の混合ブレードがあり、上部には混合ブレードに並行して、もう1軸の小さな回転カッターを設ける。混合ブレードとカッターの回転数がそれぞれ制御される。また、造粒室は上下昇降可能である。

強化混合造粒機の造粒過程は次の通りである。混合ブレードが低速に回転して、湿潤した原料の塊を三次元的に転動させて、粒子を形成させる。形成した不規則の大粒子は高速回転するカッターにより切断される。造粒室が上下に昇降して、混合ブレードおよびカッターとの相対位置を変えることにより粒子の転動を促進し、均一の粒子を形成する。

強化混合造粒機の構造概略は図 12 に示す。

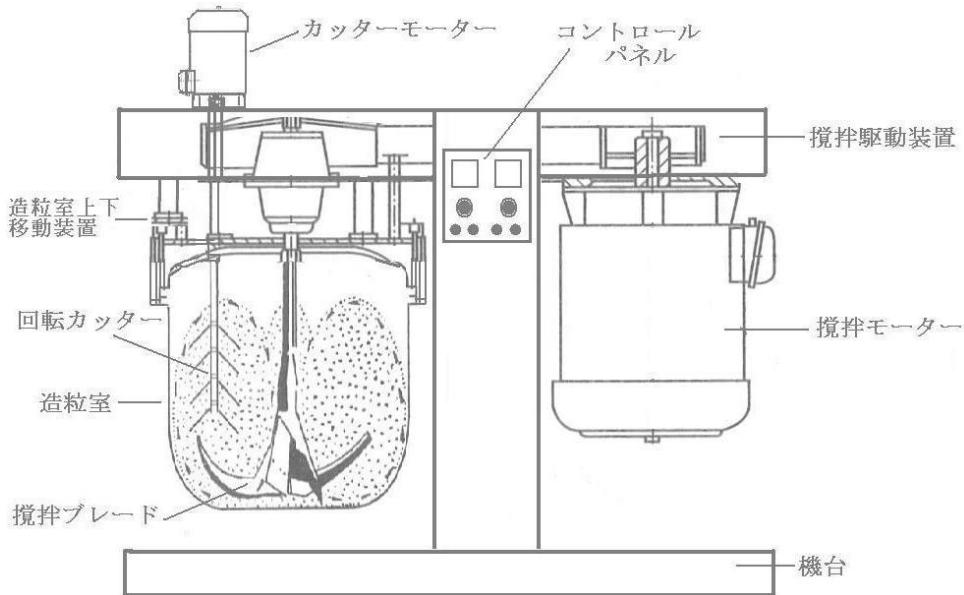


図 12. 強化混合造粒機の構造概略図

## 6. 横型搅拌造粒機

横型搅拌造粒機は、造粒室が横になるドラム状で、内部に搅拌用のリボン形ブレードを設けている。回転軸を中心回転するリボン形ブレードが回転し、搅拌力で原料粉粒体を前後に移動しながら混合・造粒させる。造粒室の中部あたりにノズルが設置され、造粒液体を霧状、点滴状または蒸気の形で供給する。混合と造粒を一体化した造粒機である。

横型搅拌造粒機の構造概略は図 13 に示す。

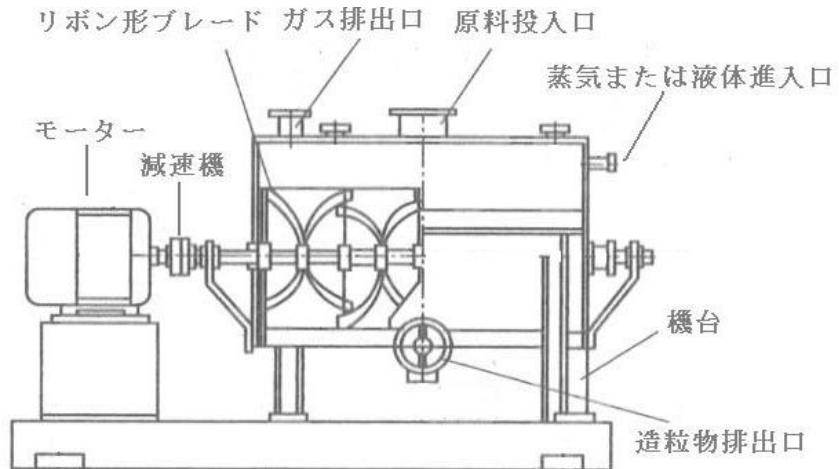


図 13. 横型搅拌造粒機の構造概略図

造粒過程は次の通りである。原料粉粒体を造粒室の中部から投入して、造粒液体も造粒室の中部から霧状、点滴状で原料に少量ずつ吹き付ける。造粒室中部にある原料粉粒体は

その表面が液体に湿潤して固まり、粒子核となる。粒子核はリボン形ブレードの回転により前後へ移動されながら未湿潤の一次粒子を粘着して成長する。造粒室の両端に到着した粒子と一次粒子がブレードの回転により中央に戻され、再び液体に濡れて一次粒子を粘着する。この過程を繰り返すことで最終的に大きな粒子に成長する。

横型搅拌造粒機の特徴は、造粒に必要な液体が少なく、造粒物の湿潤程度は表面に微湿の程度で、転動造粒のほぼ完湿状態または押出造粒の硬いクリーム状態にするまで液体を添加し続ける必要がない。後続の乾燥工程に加熱乾燥にかかる熱エネルギーを節約することができる。他の搅拌造粒機に比べ、生産能力と効率が高い。欠点は、粒子の密度が低く、大きな粒子を作れず、大体 0.5~2.0mm の粒径が限界である。また、造粒率が 70~80% しかなかった。洗剤、調味料等溶解性を要求するポーラスの細粒物造粒に適する。

### 三、連続式搅拌造粒機

連続式搅拌造粒機はバッチ式搅拌造粒機と違って、乾燥装置を付着することが多い。原料を上部の造粒室に連続的に投入して、下部の乾燥室から乾燥した造粒物が排出されるため、生産効率が高くなるが、造粒条件の設定、操作が煩雑で、造粒した粒子の品質も良くないため、速溶性だけを要求し、粒子の粒度と形態、硬度に拘らない場合を除き、使われているところが少ない。

#### 1. 連続式搅拌造粒機構造

連続式搅拌造粒機は、造粒室、2~数セットの搅拌ブレード、造粒液体ノズル、モーターと減速機などから構成される。

造粒室は垂直の円筒状で、上部の側面には原料投入口を設け、底部には造粒した粒子を直接に排出できるように開口している。造粒室の垂直中心線に回転軸を設置され、回転軸には 2~数組構造の異なる搅拌ブレードを装着している。それぞれの搅拌ブレードはその角度と回転数が造粒要求に応じて調整することができる。ノズルは造粒室の上部、原料投入口の出口に向けて設置される。なお、造粒した粒子は強度が低く、崩壊しやすいため、造粒室の下方に乾燥室を付設し、すぐ乾燥を行い、製品にすることが多い。

連続式搅拌造粒機の構造概略は図 14 に示す。

#### 2. 連続搅拌造粒過程

混合した原料を原料投入口から造粒室に投入し、造粒室に入る途端にノズルから霧状で吹き付けてくる造粒液体に全面湿潤させる。液体が原料粉粒体の表面をまんべんなく濡らした場合は、原料がすぐ凝集して小さな粒子になる。液体をさらに増やして、小粒子の内部まで浸透した場合は、小粒子が重力で造粒室の下へ落ちる途中に回転するブレードの搅拌により互いに衝突してさらに大きな粒子に凝集する。搅拌ブレードの角度と回転数を変えることにより、造粒室に於ける造粒物の滞在時間を調節することができる。造粒した粒子は造粒室の底部から排出され、乾燥室を通り、乾燥され、製品となる。通常、原料投入

から造粒した粒子を排出するまで造粒室における造粒物の滞在時間が数秒しかなかった。

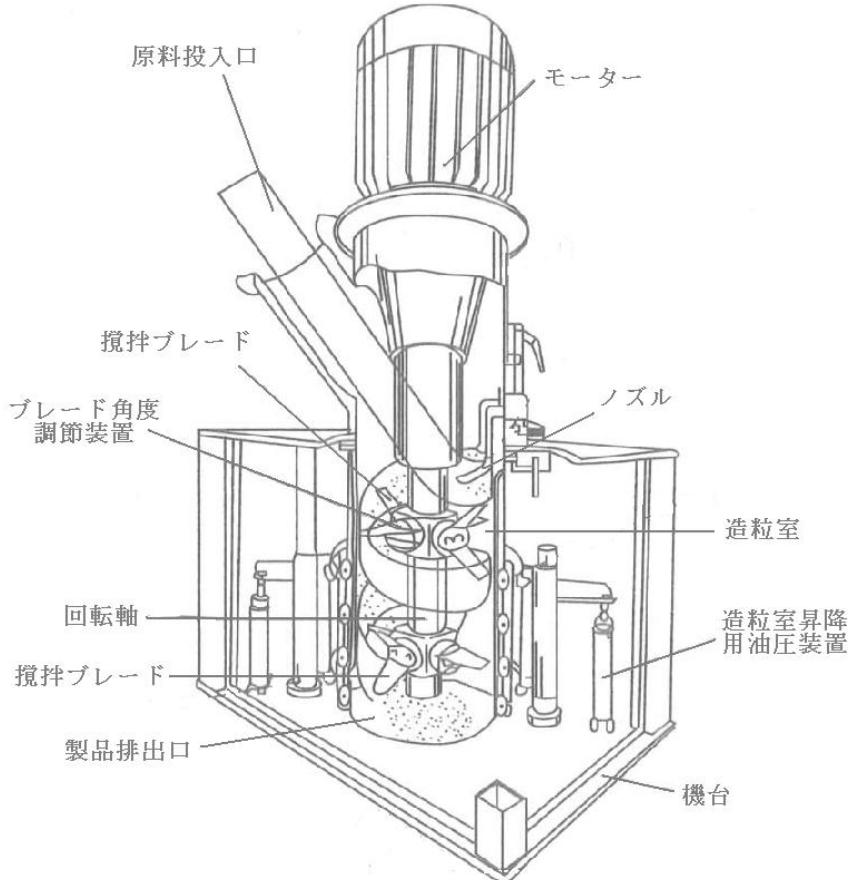


図 14. 連続式搅拌造粒機の構造概略図

造粒物が造粒室に上から下通るだけで、滞在時間が非常に短いため、搅拌ブレードから受けたせん断力と圧縮力が弱く、できた粒子の硬度が低く、形状も無定形のものが多く、空洞の多いポーラス状を呈する。

粒子の粒度と硬度は造粒液体の種類および噴霧量、搅拌ブレードの角度と回転数を変えることにより制御することができる。大体、造粒液体の粘度が高く、噴霧量が多く、造粒室に滞在時間が長くなるほど、できた粒子の粒度が大きく、硬度も若干高くなる。

### 3. 連続式搅拌造粒機とバッチ式搅拌造粒機の比較

バッチ式搅拌造粒機に比べて、連続式搅拌造粒機は次の特徴がある。造粒時間が短く、生産効率が高い。粒度が造粒液体の種類と添加量で簡単に制御できる。造粒した粒子が空洞の多いポーラス状、溶解しやすい。

欠点は粒子が無定形のものが多く、硬度が低い。造粒液体の噴霧量が多すぎると、造粒室の内壁に濡れた粒子の付着が多く、定期的に運転を停止して除去清掃する必要がある。

連続式搅拌造粒機の主な用途は、食品調味料や洗剤の造粒である。

#### 四、 搅拌造粒の注意事項

搅拌造粒、特にバッチ式高速搅拌造粒機を使用して、品質の良い粒子を得るために、下記の事項を留意しなければならない。

##### 1. 造粒液体の選択

原料粉粒体の物性、粒度、造粒目的および造粒した粒子の品質に合わせて、適宜の造粒液体を選択することが非常に重要である。造粒メカニズム上、転動造粒や押出造粒と異なり、固体造粒促進材をそのまま使わず、水または造粒促進材の液体を使う場合がほとんどである。造粒液体が不適の場合は、造粒効率が低く、できた粒子の品質が悪く、造粒さえできない場合もある。

通常、造粒液体の必要な選択基準の一つは原料粉粒体との表面親和性である。例えば、水との親和性の低い有機物を造粒する場合は、水だけではほとんど造粒できないが、界面活性剤を添加した溶液では容易に造粒することができる。また、金属粉末を造粒する場合は、水は金属の酸化を促進するおそれがあり、造粒した粒子の品質が保証できない。この場合は、有機溶媒を造粒液体として使用すれば、品質の良い粒子をできる可能性が高い。

肥料を造粒する場合は、原料にもよるが、水だけでも上手く造粒できことが多い。品質を要求する場合は、廃糖蜜やリグニンスルホン酸塩の水溶液を使う方が良い。なお、少量の界面活性剤を造粒液体に添加した場合は、原料粉粒体の湿潤を加速し、造粒速度を上げ、造粒効率を向上させる効果がある。

##### 2. 造粒液体の添加量と添加方法

原料粉粒体の空間率、溶解性、湿潤性および造粒液体との表面親和性、造粒した粒子の粒度と硬度を考慮して、造粒液体の添加量を決めるべきである。概して、造粒液体の添加量が多くなると、粒子の粒度が大きくなるが、しきい値を超えると、大きな塊に凝集して、造粒できない可能性もある。

添加方法については、通常型搅拌造粒機は造粒室に全量を1回添加する方法を採用する。但し、溶解度の高く原料を使う場合は、多量の液体を1回添加すると、局所に原料が溶解して粘度の高いスラリー状の玉を形成し、搅拌しても分散しにくく、造粒に障害を引き起こすことがある。この場合は、噴霧または点滴して添加する手法を採用することにより、弊害を避けることに非常に有効である。

真空搅拌造粒機や横型搅拌造粒機、連続式搅拌造粒機は、造粒液体は必ず霧状や点滴状にして逐次に添加する。

##### 3. 搅拌ブレードの構造、形状と角度

搅拌ブレードは湿潤した原料に必要なせん断力と圧縮力、遠心力を与え、粒子を形成するだけでなく、投入した原料の混合にも使用される。搅拌ブレードの構造と形状は混合・造粒作業の効率に影響する重要な要因である。

搅拌ブレードは、搅拌造粒機の種類、原料、造粒要求によりその構造と形状が異なる。常用の数種類搅拌ブレードの形状は図 15、一部の実物写真は図 16 に示す。

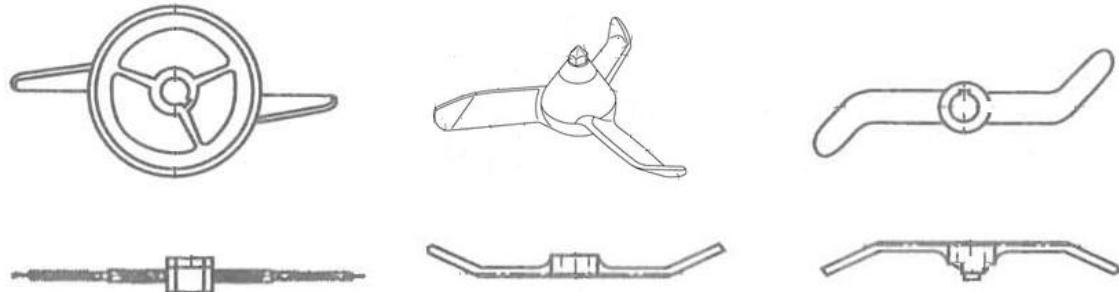


図 15. 常用搅拌ブレードの形状



図 16. 搅拌ブレードの写真

一方、搅拌ブレードと回転軸との傾斜角度も造粒物へのせん断力と圧縮力を支配する重要なパラメーターで、造粒した粒子の品質等に影響を及ぼす。バッチ式造粒機では、回転軸に対する搅拌ブレードの傾斜角度は  $30\sim40^\circ$  の場合が多い。傾斜角度が小さいほど、造粒物に対するブレードの接触面が大きくなり、混合搅拌効果が高いが、造粒物へのせん断力と圧縮力も強く、造粒した粒子の密度が高い。しかし、強いせん断力と圧縮力により、強度不足で破壊される粒子が多く、造粒効率が下がる。また、回転搅拌の抵抗も大きいため、モーターに大きな負荷をかかる恐れがある。傾斜角度が大きいほど、造粒した粒子の密度が低いが、造粒効率が高くなり、できた粒子も丸くなる。但し、搅拌ブレードの傾斜角度は  $<90^\circ$  にすべきである。

#### 4. 搅拌の回転速度

搅拌造粒は搅拌ブレードの回転が原料と造粒物を渦流状に流動させ、圧縮応力や衝突で粒状に形成し、次第に成長するメカニズムであるため、搅拌ブレードの回転速度は造粒物へのせん断力と圧縮力、遠心力を支配する。通常型搅拌造粒機は、標準の搅拌ブレード先端速度を  $4\sim8\text{m/s}$  に設定することが多い。一方、高速搅拌造粒機はその先端速度を  $8\sim20\text{m/s}$  に引き上げる。回転速度が高すぎると、造粒した粒子を破壊するだけでなく、強い遠心力により原料粉粒体または造粒物を造粒室の内壁に固く粘着させることがあり、造粒効率が逆に悪くなる。搅拌ブレードの最適な回転速度は原料種類、造粒液体、造粒物の品質要求

等により異なり、事前にテストを経て決めるべきである。

一方、補助搅拌ブレードや回転カッターは破碎、圧縮を通して、大きな塊を分割し、必要な粒度の粒子を造成して、密度を高める役割を果たす。また、ブレードのサイズも小さいため、その回転速度を回転軸の回転数で表示する。通常、補助搅拌ブレードや回転カッターの回転数は 1750～3500 r/min に設定して、主搅拌ブレードより速いことが多い。但し、補助搅拌ブレードや回転カッターの破碎、圧縮により形成した粒子がほとんど卵状や丸みの少ない平滑さの乏しいジャガイモ状のもので、形状がよくない。形のよい粒子を希望する場合は、造粒完了直前に、主搅拌ブレードだけを回転させ、補助搅拌ブレードや回転カッターを 2～5min 停止することが粒子の球状化に一定の効果がある。

連続式搅拌造粒機の場合はバッチ式搅拌造粒機と異なり、回転速度が高い。通常、2000～3500 r/min に設定することが多い。また、回転軸に装着している数組のブレードもそれぞれの回転数設定が異なる場合もある。通常、回転数が多い場合は、遠心力が強く、造粒物の重力による落下が阻害し、造粒室に滞留時間が長く、粒子の粒度がやや大きく、粒度分布が狭い。逆に回転数を落とすと、造粒物の滞留時間が短く、粒度分布が広いが、造粒量が増え、造粒効率が上がる。

## 5. 造粒室の形状

搅拌造粒機の造粒室は大体円筒型を呈する。横型搅拌造粒機と連続式搅拌造粒機はほぼ完全な円筒型に対して、バッチ式搅拌造粒機は上部が内側に収束する太鼓型の造粒室が多い。ブレードの回転により発生した遠心力が造粒物を外側へ移動し、造粒機の内壁を沿って上昇してから再び中央に落ちるという循環に流れさせる。湿潤した造粒物が造粒室の側面内壁上段に付着して、中央に落ちて来ない現象を予防するため、造粒室の側面上部を内側に収束する形にすることが有効である。

造粒室の上部収束程度は、造粒室の材質、造粒原料種類、造粒液体種類、搅拌ブレードの回転速度等により異なる。

一方、連続式搅拌造粒機は、造粒物が数組の搅拌ブレードから受けた遠心力により、造粒室の内壁に沿ってらせん運動を行うため、内壁に付着することが多い。造粒物の付着を防ぐ手法として、造粒室はその内壁に弾性体の内張りを取り付け、内張りの外側と造粒室の内壁の間に上下に移動するローラを設ける構造を有するものが多い。造粒時に、ローラが上下に移動して、内張りを絶えず緊迫・弛緩させることを繰り返し、造粒室に付着している造粒物を振り落す。