

## 乾式造粒 — 熔融造粒法

熔融造粒法 (Melt granulation) は、低融点の原料を熱で融かし、その熔融液をノズル等で液滴にしてから冷却凝固させ、粒状にする方法である。熔融凝固造粒とも呼ばれる。水などの造粒液体を使わないため、乾式造粒に属する。

熔融造粒は造粒設備と液滴の冷却凝固方法により主に次の 5 つに分けられる。それぞれの特徴は表 1 に示す。

表 1. 主な熔融造粒の方法とその特徴

造粒方法	造粒液の冷却凝固方式	製品形態
ドラムフレーク造粒法	造粒液を回転するドラム表面に塗布して、冷却凝固する。	フレーク状
鋳造法	造粒液を鋳型に注入して、冷却凝固する。	鋳型の形による
スチールベルト造粒法	造粒液を水平に移動する鉄製ベルトの表面にドロップして、冷却凝固する。	半球状
プリリングタワー造粒法	ノズルから造粒液を冷却タワー内に噴射して、落下する過程に冷風と接触して冷却凝固する。	粒径 0.1～3mm の球状
スクリー押出造粒法	スクリーで流動性または半流動性の造粒液をスクリーンダイから押出し、冷却凝固してから切断する。	球状、円柱状

また、熔融造粒法は原料の種類により 2 つに大別される。一つは低融点の原料だけを溶融してから粒状に冷却凝固させる。この場合は、造粒液は低融点の物質だけの液体である。もう一つは低融点の原料を溶融してからほかの高融点原料の粉を投入し、混合してスラリー状にしてから粒状に冷却凝固させる。低融点原料の熔融液が粘着剤として他の原料を纏めて粒状にするため、高融点の物質も配合して造粒することができる。従って、熔融造粒法は化学工業にはよく使われる造粒法の一つである。

肥料分野では、粒子の形状と粒径、低コストで大量生産の要求から小粒尿素、粒状硝安をプリリングタワー造粒法 (Prilling tower granulation) で製造してきたが、20 世紀 80 年代以降、尿素または硝安の熔融液にりん酸や加里系の高融点肥料原料の粉を攪拌混合し、スラリー状にして造粒する技術も開発されたので、現在、高窒素系の化成肥料もプリリングタワー造粒法で製造するようになった。

肥料の熔融造粒法は、ほとんどプリリングタワー造粒法を使用する。前の節に紹介された湿式造粒の転動造粒、押出造粒、攪拌造粒、流動層造粒等と比べ、下記のような特徴がある。

① 原料は加熱熔融されてから成形されたため、造粒促進材の添加が不要で、製品の純度と有効成分含有量が原料と同じである。

- ② 造粒過程に水や造粒液体の添加がなく、乾燥が不要で、生産工程の短縮と生産コストの削減に役立つ。大量生産に適する。
- ③ 粒径がノズルの種類とノズルのオリフィスのサイズに支配される。液滴が冷却凝固の際に内部液体と気泡が噴き出す可能性があり、粒径 5mm 以上の大きな粒子の造粒に適しない。
- ④ 低融点原料が必要で、高温で分解や化学反応が起きる原料は使えない。
- ⑤ 造粒用冷却タワーが大きく、据付に必要な面積が広く、初期投資が嵩む。

本書の趣旨は、肥料、特に化成肥料の造粒に関する知識と技術を紹介する目的であるため、熔融造粒法ではプリリングタワー造粒法について詳しく紹介するが、参考のために他の熔融造粒法も最後に簡単に説明する。なお、鑄造法は、熔融した原料を鑄型に注入して、冷却凝固してから取出す方法で、生産効率が非常に悪く、生産コストも割高のため、現在ほとんど使われていない。本節では取り上げないことにする。

## 一、 プリリングタワー造粒のメカニズム

### 1. プリリングタワー造粒法の原理

プリリングタワー造粒法の基本原理は、熔融した造粒液を冷却タワー上部から噴射して、液滴となって、タワー内部に重力で落下する過程で、冷風と接触して冷却して固体粒子に凝固し、タワーの底部で受取り、篩分けして製品にする。造粒した粒子が球状で、表面状態が非常に平滑である。その造粒原理の概略図は図 1 に示す。

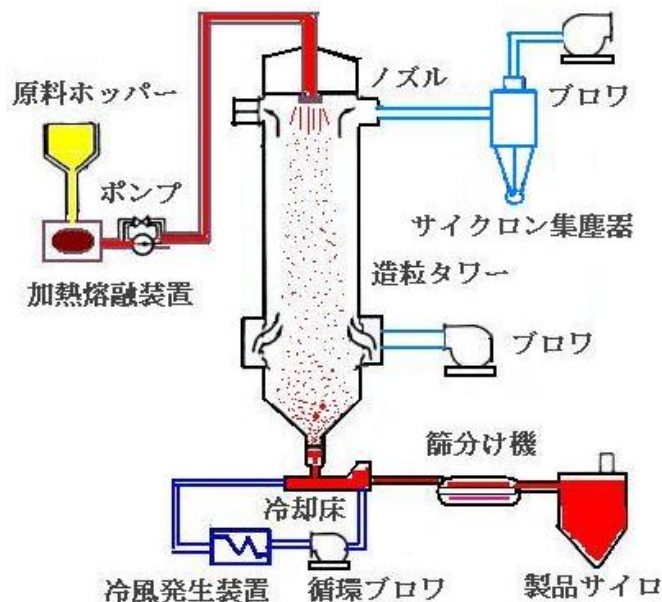


図 1. プリリングタワー造粒の基本原理

### 2. プリリングタワー造粒法の種類

プリリングタワー造粒は、冷却タワーが必須であるため、設備の据え付けに広い場所が必要である。また、造粒原料、目的粒径、所要生産能力等も異なるので、ほとんど単体受

注製造で、定型製品がない。しかし、冷却タワーに於けるノズルの設置位置と冷風の導入位置、流れの方向により、プリリングタワー造粒法は図 2 に示すように 4 種類に分けられる。

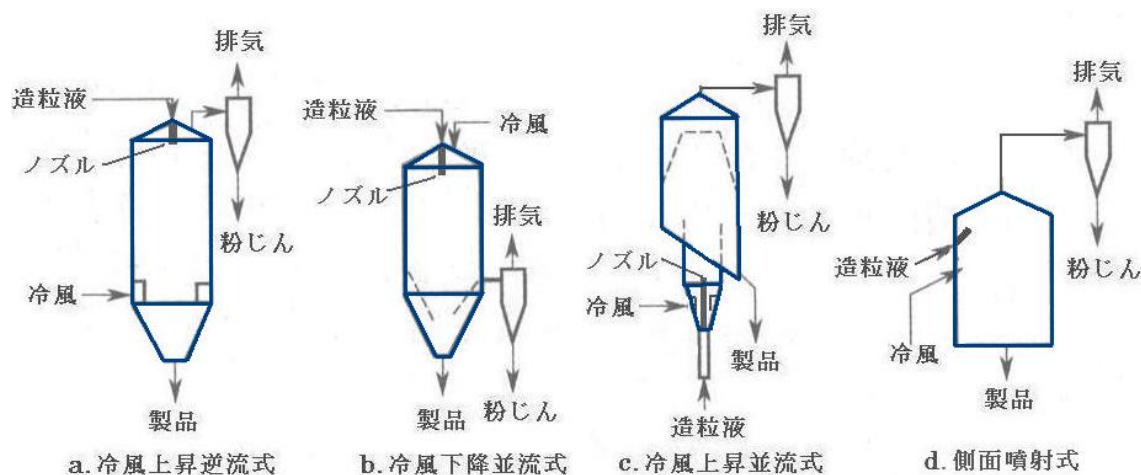


図 2. プリリングタワー造粒法の種類

**a. 冷風上昇逆流式：** 溶融した造粒液がタワーの頂部からノズルで噴射され、液滴となって下へ落下することに対して、冷風がタワーの下部から導入して上へ流れ、造粒液の液滴と接触して冷却凝固させる。圧力式または遠心式ノズルを使い、造粒した粒子の粒径がノズルから噴射された液滴の大きさに支配され、0.5～3mm の大粒粒子の造粒に適する。尿素、硝安、化成肥料の造粒に主にこのタイプのプリリングタワー造粒法を使用する。

**b. 冷風下降並流式：** 溶融した造粒液がタワー頂部からノズルで噴射され、冷風もタワー頂部から導入して、造粒液の液滴を取り巻き、一緒にタワー底部へ下降していく過程で冷却凝固させる。ノズルは二流体ノズルを使い、低圧または中圧の圧縮空気と造粒液を混合してから噴射させる。異物の詰まりが少なく、液流量の調整範囲が広く、気体の割合が高いほど液滴の粒径が小さくなるなどの特徴を有し、高粘度の造粒液の造粒に適する。造粒された粒子の粒径が大体 100～200  $\mu\text{m}$  で、空気圧力と気体／液体の比率を調節すれば、10  $\mu\text{m}$  の粒子も造粒できる。脂肪酸、ろう等の造粒に多用される。

**c. 冷風上昇並流式：** 溶融した造粒液がタワーの底部からノズルで噴射され、冷風もタワーの底部側面から導入して、造粒液の液滴を取り巻き、一緒にタワー上部へ上昇する。タワー上部に上昇した気流は流速が低下し、冷却凝固した粒子が気流から分離して、タワーの壁面に沿って落下して回収する。ノズルは圧力ノズルまたは二流体ノズルを使い、冷風も 10℃前後に予冷してからタワーに導入される。造粒した粒子の粒径がノズルから噴射された液滴の大きさに支配され、100～300  $\mu\text{m}$  粒子の造粒に適するが、1～2mm 程度の粒子も造粒可能である。他の方式に比べ、造粒に使うプリリングタワーの高さが低いことは特

徴である。硝酸加里、硝酸ソーダ、脂肪酸、ろう等の造粒に使われる。

**d. 側面噴射式：** 熔融した造粒液がタワー上部の側面から斜め上方へ噴射され、冷風もタワー側面から導入して、上へ流れ、造粒液の液滴と接触して冷却凝固させる。圧力式ノズルを使い、造粒した粒子の粒径がノズルから噴射された液滴の大きさに支配され、1～5mmの大粒粒子の造粒に適する。特徴は造粒液の噴射角度が大きく、液滴の落下速度が遅く、冷風との接触時間が長く、冷却効率が良い。尿素、硝安、化成肥料の造粒に適する。

この4種類プリリングタワー造粒法の特徴と操作性について表2に纏めた。

表2. プリリングタワー造粒法の特徴と操作性

	上昇逆流式	下降並流式	上昇並流式	側面噴射式
タワー高さ(m)	40～100	10～20	10～20	30～60、直径太い
ノズル種類	加圧式、遠心式	二流体式	加圧式、二流体式	加圧式
粒子形状	球状	球状	球状	球状、不規則状
粒子粒径(mm)	0.3～3	0.1～0.2	0.1～1.0	1～5
生産能力(t/h)	5～20	0.04～0.5	0.1～0.5	1～20
長所	生産能力大	小型	小型	生産能力大
短所	設備投資嵩む	生産能力小、 大粒子不可	生産能力小	不規則状粒子ある
操作性	簡単	やや複雑	複雑	簡単

## 二、 プリリングタワー造粒装置

プリリングタワー造粒装置は、加熱溶融と混合装置、ノズル、冷却タワー、外部冷却流動床、集塵装置等から構成される。

### 1. 冷却タワー

冷却タワーはプリリングタワー造粒の最も重要な装置である。噴射された液滴の冷却・凝固、固体粒子の冷却はすべてこの冷却タワー内に行う。冷却タワーの建設費用だけでもプリリングタワー造粒設備コストの50～60%を占め、建設工期も長い。造粒原料の融点、液滴の粒径（凝固した粒子の粒径）、ノズルの位置、冷風温度と流れ等により、タワーの構造、高さが異なる。肥料造粒によく使われる冷風上昇逆流式の冷却タワーの概略は図3に示す。

冷却タワーの高さと横断面の直径に関する設計は下記の2つパラメーターにより行う。

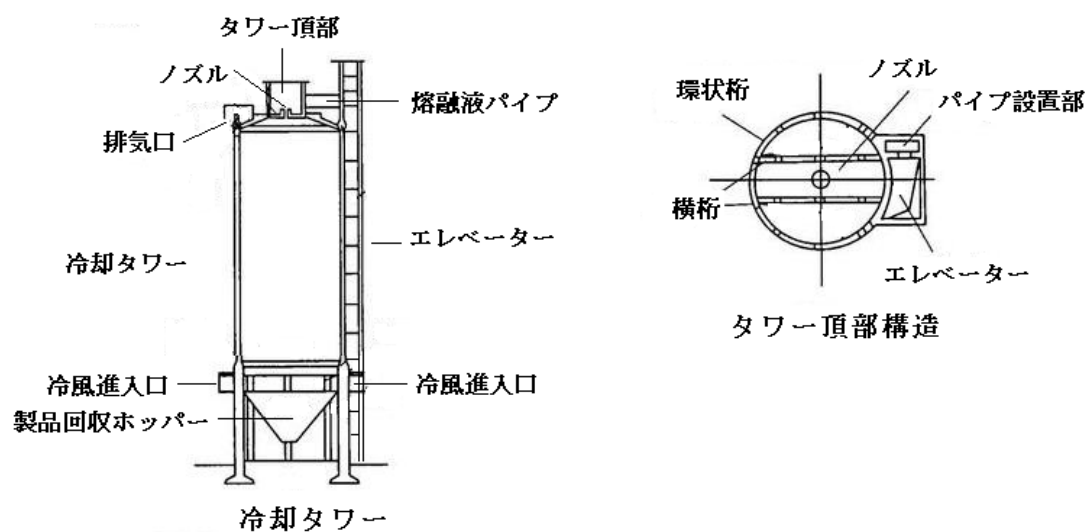


図 3. 冷却タワーの構造概略図

### 1-1. 液滴の凝固時間

図 4 に示しているのは尿素のプリリングタワー造粒時の凝固曲線である。噴射された液滴が自由落下開始から計測した粒子内部の温度と冷却時間との関係を示す。A～B が予冷期で、噴射された熔融液滴が冷風との接触で温度が急速に低下する。B～C が過冷却期で、液滴の表面温度がすでに融点を下回るが、また凝固していない。C～D が凝固期で、液滴が表面から内部へ凝固が進み、結晶を形成する。この期間に凝固熱が放出されるため、粒子内部温度がほとんど変化しない。D～E が冷却期で、凝固した粒子が冷風との接触で温度がさらに低下し、冷却タワーから排出する。E～F が外部冷却期で、排出された尿素粒子がさらに外部冷却流動床に冷風で晒して、冷却される。

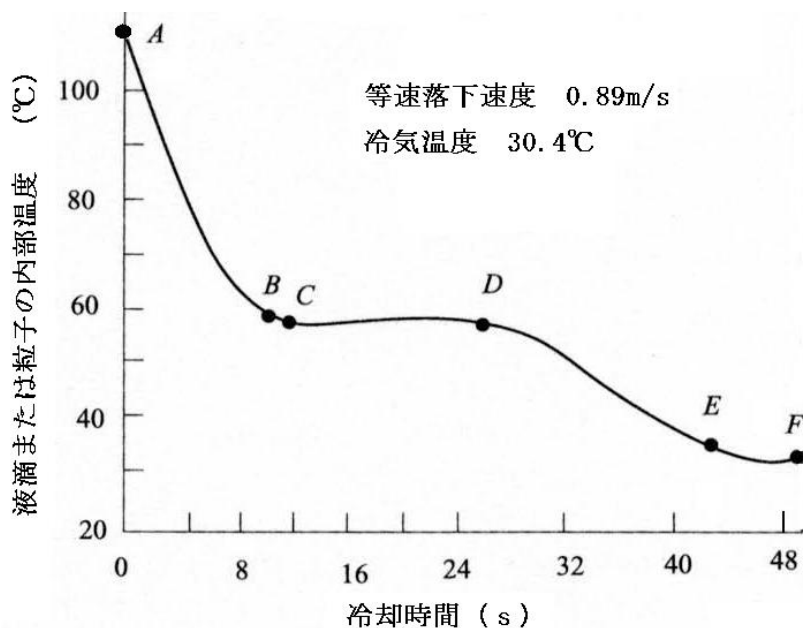


図 4. 尿素熔融液の冷却凝固に必要な冷却時間



液滴から凝固した粒子の冷却に必要な時間は下記の式で計算することができる。

#### a. 液滴冷却期の必要時間

液滴の予冷と過冷却との区別が難しく、また、過冷却期が非常に短いため、液滴予冷と過冷却を合わせて液滴冷却期とする。液滴の冷却に必要な時間 $\tau_l$ は、

$$\tau_l = \frac{t_{pl} - T_a}{t_{pc} - T_a} = \exp \frac{6a\tau_l}{D_{pl} \rho_{pl} C_{pl}}$$

#### b. 凝固期の必要時間

液滴が融点以下に冷却され、表面から内部へ凝固が進み、液滴が完全に凝固し、固体粒子になる必要な時間 $\tau_c$ は、

$$\tau_c = \frac{D_{pc} \rho_{pc} L_f}{6a(t_{pc} - T_a)}$$

#### c. 粒子冷却期の必要時間

固体粒子がさらに冷却して、冷却タワーから排出できる温度（60℃未満）までに必要な時間 $\tau_a$ は、

$$\tau_a = \frac{t_{pa} - T_a}{t_{pa} - T_a} = \exp \frac{6a\tau_a}{D_{pa} \rho_{pa} C_{pa}}$$

従って、冷却タワー内に液滴の冷却凝固に必要な時間は、

$$\tau = \tau_l + \tau_c + \tau_a$$

である。

a：界面の熱伝導係数（kW/(m<sup>2</sup>・K)）、 $D_{pl}$ 、 $D_{pc}$ 、 $D_{pa}$ ：液滴が冷却期と凝固期、粒子が冷却期のそれぞれの粒径（m）、 $C_{pl}$ 、 $C_{pa}$ ：熔融液および固体定圧比熱容量（kJ/(kg・K)）、 $L_f$ ：凝固潜熱（kJ/kg）、 $t_{pl}$ ：熔融液の液滴温度（℃）、 $t_{pc}$ ：凝固温度（℃）、 $t_{pa}$ ：固体粒子の排出温度（℃）、 $T_a$ ：冷風温度（℃）、exp：exponential function（指数関数）

外部冷却は冷却タワーから排出した後に行う工程で、タワー内の粒子滞在時間と無関係である。

上記の計算式から噴射された液滴の凝固冷却に必要な時間は液滴の直径、熔融液の温度と凝固温度、冷風温度に支配されることが明らかになった。一方、固体粒子の排出温度は外部冷却装置を取付ける場合には、60℃以下に設定される。

### 1-2. 噴射された液滴の落下速度

ノズルから噴射された液滴はノズルの設置位置、噴射方向によりその初期速度が異なるが、やがて自由落下となる。例えば、尿素や硝安、化成肥料の熔融造粒によく使う冷風逆流式と側面噴射式では熔融液が水平方向、やや上向きまたは下向きに噴射され、一定の距離を飛んだ後、空気抵抗により、垂直の自由落下運動に入る。液滴の自由落下運動には最

初にその落下加速度が最大であるが、その落下速度が一定値に達した時、液滴または固体粒子自身の重力と空気抵抗、上昇気流、浮力が平衡状態となり、落下加速度がゼロになり、粒子が一定の速度を保ったまま落下する。即ち、粒子の落下は最初の加速運動区間と後の等速運動区間に分けられる。図 5 は粒子の落下運動に於ける諸影響要因の関係を示す。

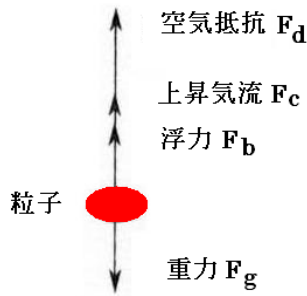


図 5. 粒子落下運動に関する諸力

関連する諸力の計算式は、

$$\text{重力} \quad F_g = mg = \left(\frac{\pi}{6}\right) d^3 \rho_m g$$

$$\text{浮力} \quad F_b = \left(\frac{m}{\rho_m}\right) \rho g$$

$$\text{空気抵抗} \quad F_d = \varepsilon A \left(\frac{\rho_a u^2}{2}\right)$$

$$\text{上昇気流} \quad F_c = A \left(\frac{u_c^2 \rho_a}{2}\right)$$

$d$ : 液滴直径 (m)、 $\rho_m$ : 液滴または粒子の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $\rho_a$ : 空気密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $\varepsilon$ : 抵抗係数 (球状物体の抵抗係数が約 0.44)、 $A$ : 粒子面積 ( $\text{m}^2$ 、 $A = \frac{\pi d^2}{4}$ )、 $u$ : 粒子の水平移動速度 (m/s)、 $u_c$ : 上昇気流の速度 (m/s、 $u_c = \frac{u_s}{A_c}$ )、 $u_s$ : タワー通気量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $A_c$ : タワー横断面積 ( $\text{m}^2$ )、 $g$ : 重力加速度 ( $0.98\text{m/s}^2$ )、 $m$ : 粒子の質量

ニュートンの運動第 2 法則によれば、重力から浮力、空気抵抗、上昇気流の力を引いて残った力は粒子の降下速度を制御する。即ち、

$$ma = F_g - F_b - F_c - F_d = mg - \left(\frac{m}{\rho_m}\right) \rho g - \varepsilon A \left(\frac{\rho_a u^2}{2}\right) - A \left(\frac{u_c^2 \rho_a}{2}\right)$$

$m$ : 粒子質量、 $a$ : 重力加速度

等速落下運動区間に於いて、重力加速度  $a$  がゼロとなり、 $ma=0$ 、粒子の落下が一定の速度を保つ。球状物体が静止流体中にその落下速度を下記の式から計算することができる。

$$u_1 = 1.74 \frac{(4gd(\rho_s - \rho))^{1/2}}{\rho}$$

上昇気流がある場合は、粒子の実際落下速度は上昇気流の速度を引いたものである。

$$u = u_1 - u_c$$

即ち、最初の加速運動区間を無視して、冷却タワーに於ける粒子の実際落下速度 ( $u$ ) は、

$$u = 1.74 \frac{(4gd(\rho_s - \rho_a))^{1/2}}{\rho_a} - u_c$$

$u_c$  : 上昇気流速度 (m/s)、 $g$  : 重力加速度 (0.98m/s<sup>2</sup>)、 $d$  : 粒子直径 (m)、 $\rho_s$  : 粒子密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho_a$  : 空気の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

この計算式から粒子の落下速度は粒子の直径、粒子密度、上昇気流速度に支配されることが明らかになる。その落下速度を制御するには、最適な手段は上昇気流速度を変えることである。

熔融液の液滴と凝固した粒子の直径と密度が変わらないと仮定すれば、粒子の落下速度と凝固に必要な時間から冷却タワーの最小限の高さを求めることができる。

冷却タワーの横断面の形状は円形と角形があるが、通常、建設コストと構造物の安定性、メンテナンスを考えると、円柱形タワーが多く採用される。一方、冷却タワーの横断面の面積は、ノズルの噴射量、噴射距離、タワー通気量、タワー内壁への液滴付着防止等を考慮して決定する。尿素造粒の場合は、通常、表 3 に示すように 1 日当りの生産能力から円柱形タワーの内径を選択する。

表 3. 尿素のプリリングタワー造粒のタワー内径と生産能力との関係

造粒能力 (t/Day)	冷却タワー内径 (m)
<300	9~11
370~440	12~13
440~560	14
600~900	16
1000~1500	18
1600~1900	20~22
2000~2400	24
2500~3000	26~28

## 2. 加熱熔融設備

加熱熔融設備は、原料を加熱して熔融液にする装置である。化成肥料造粒の場合は、熔融液に粉状の高融点原料を投入し、攪拌してスラリーにする攪拌装置も含まれる。

原料の加熱熔融は精密な温度制御が必要であるため、直接加熱方式を採用せず、加熱した熱媒を利用する間接加熱を使う。脂肪酸、ろう等低融点原料では、熱水または蒸気を熱



媒とすることが多い。一方、尿素、硝安、硝酸加里等融点が 130℃を超えた原料では、熱水や蒸気を熱媒にすることが無理で、電気ヒーターか加熱した鉱物油、熔融塩を熱媒として利用する。

蒸気と電気ヒーターによる間接加熱溶融の概略は図 6 に示す。

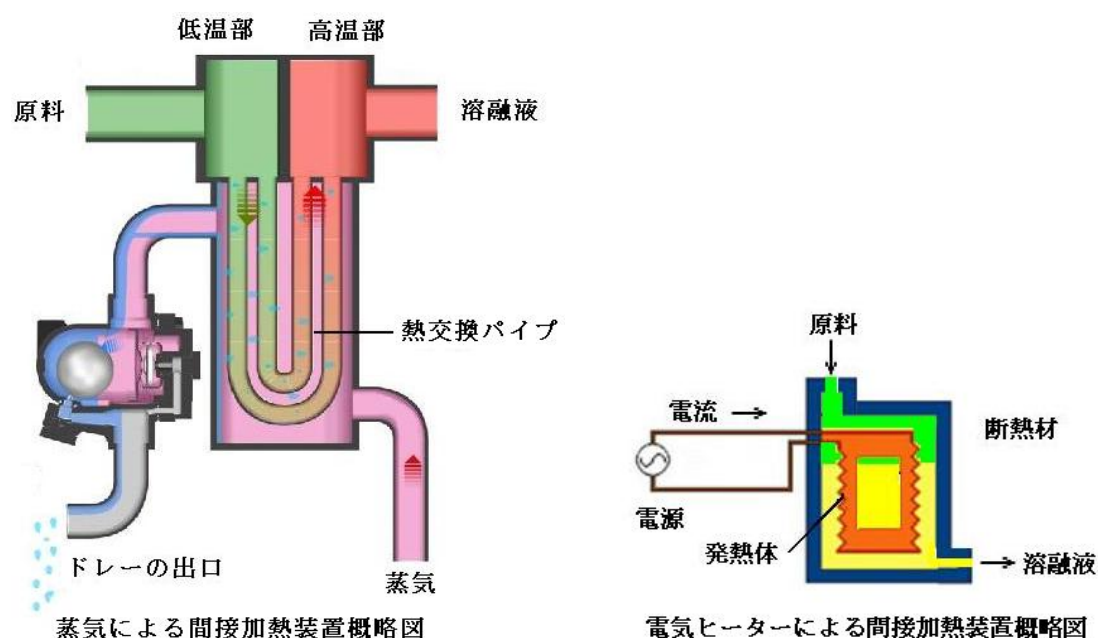


図 6. 間接加熱装置の構造概略図

尿素、硝安等低融点肥料原料の融点とプリリングタワー造粒に使用するこれらの溶融液の適宜な温度範囲を表 4 に示す。

表 4. 肥料原料の融点と溶融液の温度範囲

原料名	融点 (℃)	溶融液の温度範囲 (℃)	備 考
尿素	132.7	133～136	融点以上になると、ビウレットが生成し、160℃以上で分解する
硝安	169.6	175～190	210℃以上で分解する
硝酸加里	334	335～339	340℃以上で亜硝酸カリウムが生成する
硝酸カルシウム (4 水塩)	42	45～60	42℃以上で自身の結晶水で溶解する。130℃で無水塩になる。
硝酸ソーダ	308	310～320	380℃以上で分解する

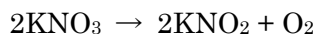
尿素は融点以上になった溶融状態では、尿素が縮合して、アンモニアが分子間脱離し、有害成分のビウレットを生成する。ビウレット含有量の高い肥料は、販売・使用すること

ができない。



従って、尿素を熔融する場合は、加熱温度を 136℃以下に制御して、熔融した尿素液を早く造粒に供することがビウレット生成を抑える重要な条件である。

また、硝酸加里を熔融造粒にする場合は、熔融した硝酸加里が分解して、酸素を放出して亜硝酸加里になる。



加熱温度を 340℃以下に制御して、熔融した硝酸加里を素早く造粒に供することが硝酸加里から亜硝酸加里に変化することを抑える有効手段である。

化成肥料のプリリングタワー造粒に使う冷却タワーおよび原料の加熱熔融装置と熔融液ポンプの写真は図 7、図 8 に示す。



図 7. プリリングタワー写真



図 8. 加熱熔融装置と熔融液ポンプ写真

### 3. ノズル

プリリングタワー造粒に使うノズルは主に二流体式、圧力式、遠心式の 3 種類である。また、熔融温度が 200～400℃の高い原料には振動式ノズルもよく使われる。

#### 3-1. 二流体式ノズル

二流体式ノズルは、液体と気体を混合させ、オリフィス（噴口）から噴射するノズルである。熔融液の噴射に使う動力はコンプレッサーから供給される圧縮空気である。圧縮空気の圧力により、低压空気（圧力<0.02MPa）と中圧空気（圧力 0.015～0.5MPa）に分けられる。構造がシンプルで、圧縮空気の流量と熔融液の流量との比率を調整することで、噴霧された液滴のサイズを調整することができる。また、可動部品がなく、故障しにくい。

しかし、圧力式や遠心式ノズルに比べ、噴射に使うエネルギーが多く、噴射量も少なく、形成された液滴の粒径が小さいため、実験装置や小型の冷却タワーにしか使えない。二流体式ノズルの構造は図 9 に示す。

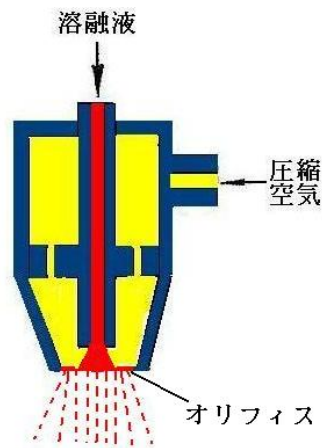


図 9. 二流体式ノズル構造概略

二流体ノズルから噴射液滴の粒径は下記の経験式により計算することができる。

$$D_m = 2600 \left( \frac{m_L}{m_a} \times \frac{\mu_a}{G_a L} \right)^{0.4}$$

$D_m$ : 液滴の平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )、 $m_L$ : 液体の質量流量 ( $\text{g/s}$ )、 $m_a$ : 気体の質量流量 ( $\text{g/s}$ )、 $\mu_a$ : ノズル混合面での気体粘度 ( $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ )、 $G_a$ : ノズル噴射口での気体の質量流量率 ( $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ )、 $L$ : 気液間の湿潤周辺の直径 ( $\text{cm}$ )

### 3-2. 圧力式ノズル

圧力式ノズルは、液体自身の圧力だけで噴射するノズルである。噴射に使う圧力は液体の加圧ポンプから来たもので、ノズル内部における液体の流れにより加圧式と渦巻式に分けられる。圧力式ノズルの構造概略は図 10 に示す。

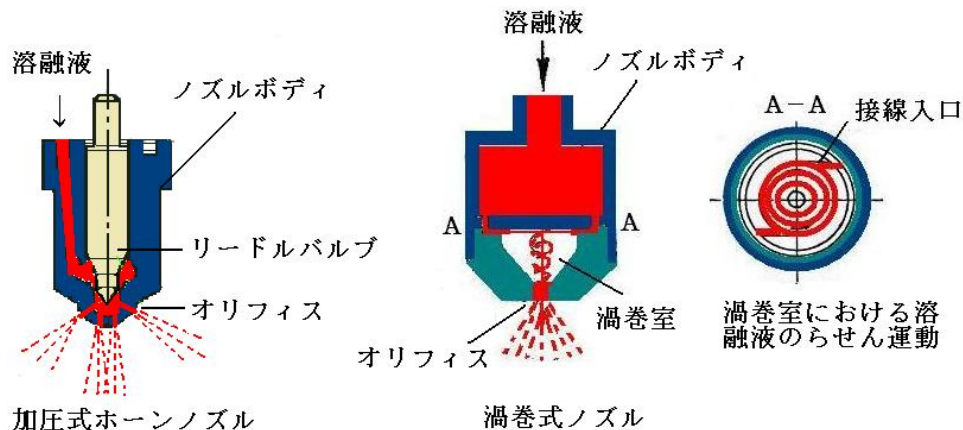


図 10. 圧力式ノズル（加圧式ホーンノズルと渦巻式ノズル）の構造概略

加圧式ホーンノズルはノズルボディに円錐状のニードルバルブがあり、ノズルの先端がやや膨らんでいて、数個のオリフィスが設けられている。液体の圧力が規定の噴射開始圧力に達すると、ニードルバルブを押上げ、オリフィスから液体を噴射する。また、ニードルバルブがなく、目詰まりしにくい加圧式ノズルもある。

渦巻式はノズルボディに渦巻室（旋回室）があり、加圧された液体が渦巻室の接線方向で両側から進入し、その遠心力で渦巻室内に渦巻きを形成して、オリフィスから噴射される。渦巻式ノズルの特徴は円周方向の流量分布がほぼ均等で、ノズル内部に障害物がなく、オリフィスの開口部が大きく、目詰まりの心配がほとんどない。

圧力式ノズルは液体の圧力を調整するだけで噴射された液滴の粒径を調節することができる。大きな粒径の液滴が容易に得られる。

圧力式ノズルから噴射される液滴の粒径計算についていくつかの実験結果から経験式を導出されるが、ノズルの構造、寸法、実験条件等によりそれぞれ異なり、現状ではその計算式が統一されていない。例として 2 種類の粒径計算式を提示する。

$$(1) \quad d_p = 16.56 d_0^{1.52} G_L^{-0.44} \sigma^{0.71} \mu_L^{-0.16} \quad (\text{加圧式ノズル})$$

$$(2) \quad d_p = 98.4 d_0^{1.35} S_i^{-1.0} Q_L^{-1.0} \sigma^{0.62} \mu_L^{-0.26} \quad (\text{渦巻式ノズル})$$

$d_p$ : 液滴の平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )、 $d_0$ : オリフィス直径 (mm)、 $G_L$ : 液体の質量流量 (g/s)、 $Q_L$ : 液体の体積流量 (L/s)、 $\sigma$ : 表面張力 (dyn/cm,  $1\text{dyn/cm} = 10^{-3}\text{N/m}$ )、 $\mu_L$ : 粘度 (cp,  $1\text{cp} = 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ )、 $S_i$ : 渦巻室入口の断面積 ( $\text{mm}^2$ )

### 3-3. 遠心式ノズル

遠心式ノズルは、ノズルボディには回転軸を設けて、回転軸の先端に回転円盤または回転ノズルヘッドを取付けてある。液体が遠心力で投げ出され、液滴となる。遠心式ノズルの構造概略は図 11 に示す。

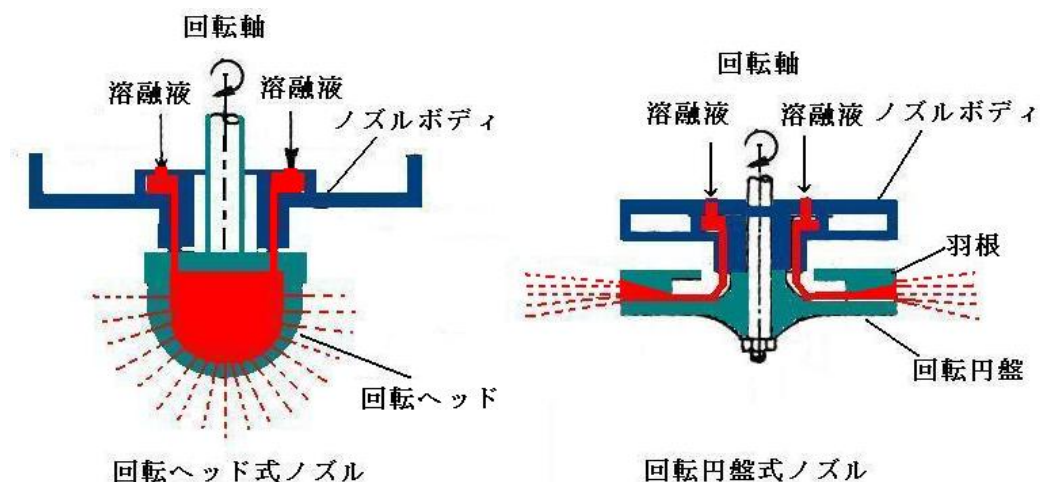


図 11. 遠心式ノズル（回転ヘッド式ノズルと回転円盤式ノズル）の構造概略

回転ヘッド式ノズルは、回転軸の先端に多数のオリフィス（噴口）を有するノズルヘッ



ドを装着して、ノズルヘッドの回転により、液体が遠心力によりオリフィスから噴射される。噴射された液柱は空気とぶつかることにより断裂、破碎して多数の液滴となる。

一方、回転円盤式ノズルは、回転軸の先端に縁のない円盤を装着して、オリフィスの代わりに、円盤には液体を仕分けするように複数枚の羽根を有する。液体が回転している円盤の表面中央に流下して、遠心力により羽根表面に沿って周辺へ投げ出され、液滴となる。

遠心式ノズルは液体の圧力または流量、ヘッドまたは円盤の回転数を調整して、噴射された液滴の粒径を調節することができる。大きな粒径の液滴が容易に得られる。また、単位時間に噴射される量も多く、粘度の高い液体も噴射することができるので、肥料造粒によく使われる。尿素造粒に使う回転ヘッド式ノズルの写真は図 12、化成肥料造粒に使う回転ヘッド式ノズルの構造概略は図 13 に示す。



図 12. 尿素造粒に使う遠心式ノズルの回転ヘッド写真

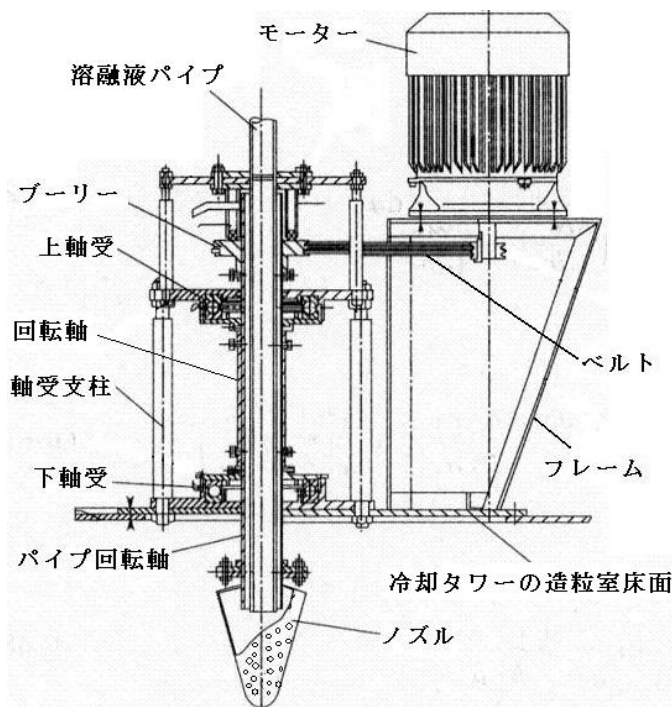


図 13. 化成肥料造粒に使う回転ヘッド式ノズルの構造概略

回転ヘッド式ノズルから噴射された液滴の粒径は主にノズルのオリフィス直径に支配されるため、熔融液の圧力、回転ヘッドの回転数が一定の場合は、得た粒子の粒径がほぼ同一で、粒度分布が非常に狭い。従って、尿素や化成肥料のプリリングタワー造粒によく使われる。

一方、回転円盤式ノズルは流下した液体量、粘度、円盤サイズ、回転数等の影響要因が多く、その液滴の粒径を下記の Friedman 氏が提唱した式で計算することができる。

$$\frac{D_{vs}}{r} = 0.4 \left( \frac{M_p}{\rho_L N r^2} \right)^{0.6} \times \left( \frac{\mu_L g}{M_p} \right)^{0.2} \times \left( \frac{\sigma_L \rho_L n h g}{M_p^2} \right)^{0.1}$$

$D_{vs}$  : 液滴の体積一面積平均直径 (m)、 $r$  : 回転円盤の半径 (m)、 $M_p$  : 回転円盤の羽根 1 枚当たりの液体質量流量 (kg/(s・m))、 $\rho_L$  : 液体の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $N$  : 回転円盤の回転数 (r/s)、 $\mu_L$  : 液体の粘度 ((kg・s)/m<sup>2</sup>)、 $\sigma_L$  : 液体の表面張力 (kg/m)、 $n$  : 回転円盤の羽根枚数、 $h$  : 羽根の高さ (m)

### 3-4. 振動ノズル

振動ノズルはノズルボディに液体室があり、その底部に多数の穴を開けてあるオリフィスプレートを設けている。液体室にある液体が重力または圧力で、オリフィスプレートの穴を通して、下へ流出する。オリフィスプレートを一定の頻度で左右振動させることにより、流出した液柱が振動と表面張力の影響で絶えずに寸断され、液滴となり、落下する。その構造概略は図 14 に示す。

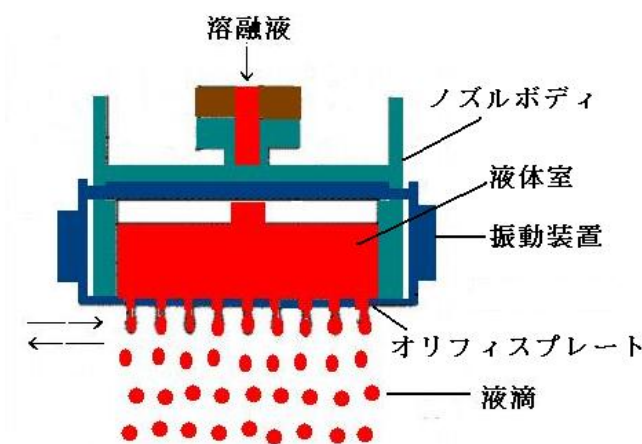


図 14. 振動ノズルの構造概略

他のノズルに比べ、振動ノズルは次の特徴がある。

- ① 振動ノズルから生成した液滴の粒径は主にオリフィスプレートの穴直径に支配され、造粒した粒子の粒度分布が非常に狭く、均一の粒子を得ることができる。場合により、篩分けも必要せず、そのまま出荷することもできる。
- ② 液滴の形成は振動分裂によることで、微粒子がほとんど生成せず、製品収得率が高く、



排ガス処理が容易である。

③オリフィスプレートからの液体流出は高い圧力を必要せず、自身の重力だけで行うこともできるので、冷却タワーの高度が抑えることができ、高価の加圧ポンプが不要の場合もあり、操作简单、メンテナンスしやすい。

④ 液体の粘度と表面張力に対する要求が厳しい。

粘度の低い熔融液は、流出速度が速く、液滴が形成された後に上昇気流の抵抗を受けて、変形した際に粒径の異なる複数の液滴に再分裂され、多数の微粒子が生成しやすい。逆に熔融液の粘度が大きすぎると、液柱の切断時に液滴が尾を引きやすくなり、尾の部分が切れて粒径の異なる複数の液滴を多く生じ、生成した粒子の粒度分布が広がる。粘度が  $3 \sim 15 \text{mPa}\cdot\text{s}$  の液体が一番適していると言われる。

熔融液の表面張力も同様である。表面張力が小さすぎると、液滴が形成された後に外力を受けて変形した際に再分裂して、多数の微粒子が生成しやすい。表面張力が大きい過ぎる場合は、液滴も再分裂し、粒径の異なる複数の小さい液滴を形成しやすい傾向がある。表面張力が  $35 \sim 85 \text{mN/m}$  の液体が振動ノズルに適すると言われる。

振動ノズルのオリフィスプレート振動数は液体の粘度と表面張力により  $150 \sim 600 \text{Hz}$  の範囲に調整する。概して振動が速くなると、形成した液滴の粒径が小さくなる傾向がある。

振動ノズルは融点  $200 \sim 400^\circ\text{C}$  の原料、特に硝酸加里や硝酸ソーダ（チリ硝石）の造粒に一番適すると言われる。

ノズルの種類とその噴射した液滴、造粒した粒子の粒径、所要冷却タワーの高さとの関係は表 5 に示す。

表 5. ノズルの種類と造粒した粒子との関係

ノズル	構造	操作条件	熔融液粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	液滴平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	粒度分布	タワー高さ	タワー直径
二流体式	低圧空気	$0.015 \sim 0.017 \text{MPa}$	30~500	30~500	中	低い	中
	中圧空気	$0.015 \sim 0.5 \text{MPa}$					
圧力式	加圧型	$2 \sim 8.5 \text{MPa}$	0.01~1	100~600	広い	中	中
	渦巻型	$0.25 \sim 0.7 \text{MPa}$					
遠心式	回転円盤型	$u=30 \sim 180 \text{m/s}$	0.01~20	200~3000	狭い	高い	大
	回転ヘッド型	$u=6 \sim 30 \text{m/s}$					
振動滴下式		振動数 $150 \sim 600 \text{Hz}$	0.001~0.05	500~5000	狭い	中	中

#### 4. 冷風装置

熔融液の液滴を冷却・凝固して固体粒子にする冷却装置は特殊の場合を除き、冷風を使う。冷却に使う冷風は開放式と内部循環式に分ける。

開放式は冷却タワーの下部から外気を導入して、冷却後の排ガスを集塵処理してから外部に放出する。肥料造粒に使うプリリングタワーでは、設備投資と運転コストを抑えるため、この方式をよく使う。また、排気ブロワだけを設置して、冷却タワーへの外気導入には自然通風式を使うところも多い。冷却効率と製品粒子の品質が外気温度、湿度の影響を大きく受ける。

一方、内部循環式は、冷却に使った排気は集塵処理してから冷却器を通して、温度を下げてから再び冷風として冷却タワーの戻し、冷却に供する。内部循環式は外気環境と無関係で、造粒物の酸化、湿度の増加を引き起こさず、製品品質を一定に保つことができる。また、冷風の温度が低く、冷却効率がよく、冷却タワーの高度を抑えることもできる。脂肪酸、ろうなど化学品の造粒にはこの方式を採用する。

#### 5. 外部冷却流動床（オプション）

冷却タワーの建設費用がプリリングタワー造粒装置に大きな比重を占める。従って、冷却タワーの高さを抑えることは初期投資を抑えるには一番手取り早い方法である。また、凝固した粒子を早く取り出すことも生産効率を上げるには有効である。従って、プリリングタワー造粒では、粒子を外気温度に下げるまで待たず、大体 60℃またはそれ以上の温度で取り出す。

しかし、尿素または尿素を主原料とする化成肥料の造粒では、60℃では、粒子がまだ軟らかく、変形や破碎しやすい。夏季多湿の季節では製品の水分が多く、保管中に固結する危険性が高い。その問題を解決するため、オプションとして外部冷却流動床を利用して、製品粒子を 40～45℃に冷却することが有効である。内部循環式冷却流動床の構造概略は図 15 に示す。

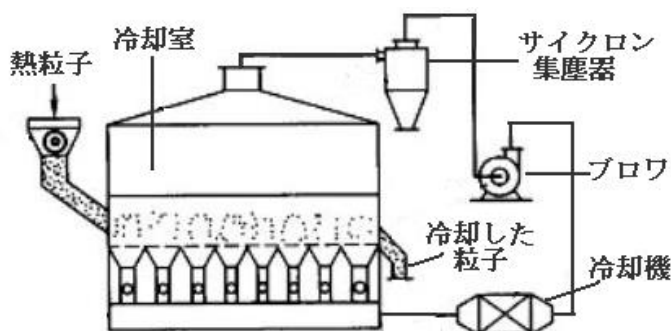


図 15. 内部循環式冷却流動床の構造概略

外部冷却流動床は、冷却タワーから取出した粒子を冷却室に投入し、床下から冷気を吹上げることにより、粒子を空中に巻き上げ、流動状態になる層を形成して熱交換を行い、

冷却される仕組みである。冷却に外気を使う開放冷却式もあるが、排ガスはサイクロン等を通して、集塵処理してから冷却機で約 10～20℃に冷却し、除湿してから再び冷却室に導入する内部循環式を採用することは冷却効率が良く、製品品質が保証される。

### 三、 プリリングタワー造粒の工程と注意事項

#### 1. プリリングタワー造粒工程

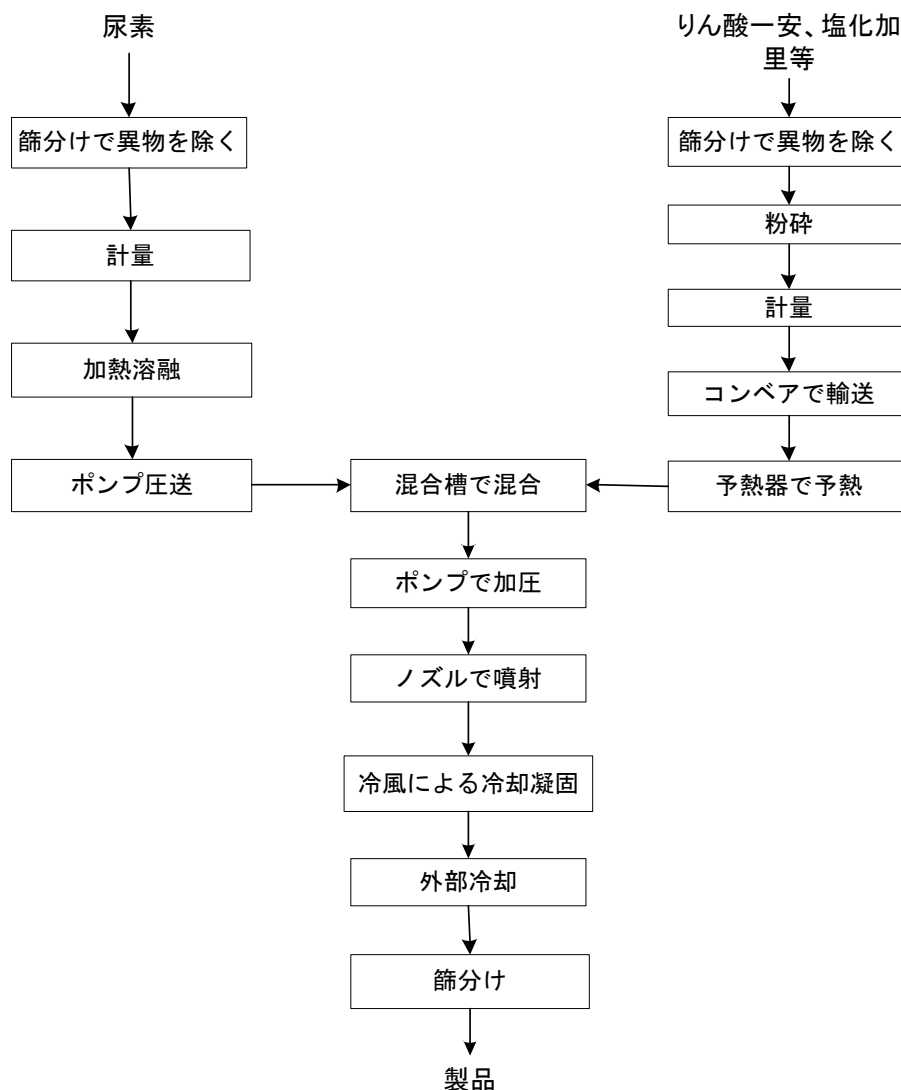


図 16. 尿素ベースの化成肥料のプリリングタワー造粒工程概略図

プリリングタワー造粒の操作について、尿素をベースに、りん酸一安（MAP）と塩化加里を原料とする化成肥料の造粒を例に説明する。尿素粒子を倉庫からベルトコンベアで振動篩に運び、異物と塊を取り除いてから計量して加熱溶融器に送り、電気ヒーターまたは鉍物油の間接加熱で溶融させる。溶融した尿素液はバッファータンクに流れ込み、ポンプ

で冷却タワー頂部にある混合槽に圧送する。一方、りん酸一安と塩化加里を振動篩で異物と塊を取り除き、0.1～1mm に粉砕して計量し、スクリーコンベアまたはパケットエレベーターで冷却タワー頂部に運び、予熱器で蒸気を使って約 80～90℃に予熱してから混合槽に投入し、尿素溶融液と掻き混ぜてスラリーにする。混合後のスラリーをポンプでノズルに送り、遠心式ノズルで冷却タワー内に噴射する。形成した液滴が落下する過程に冷却・凝固して固体粒子となる。冷却タワーの底部にある製品ホッパーで受け取った粒子を外部冷却流動床でさらに冷却してから篩分けして製品とする。その工程概略図は図 16 に示す。

## 2. プリリングタワー造粒工程の注意事項

ほかの造粒法に比べ、プリリングタワー造粒が複雑で、熔融温度、原料配合、スラリーの粘度と温度、溶融液圧力、ノズル回転速度、冷風通風量、冷却温度などの影響要因が多く、互いに絡み合っている。これらの影響要因が一つでも不適であれば、ノズルの目詰まり、冷却タワー内壁への付着、造粒した粒子の吸湿固結等の問題が発生して、生産効率と製品品質に大きく影響を及ぼす。酷い場合は、設備にダメージを与え、生産停止となる。従って、造粒操作に下記の事項を注意しなければならない。

### 2-1. 処方の設計

化成肥料のプリリングタワー造粒は低融点の原料（尿素、硝安）を溶融して高融点の固体原料を混合してスラリーにしてから噴射造粒するため、スラリーの粘度と造粒性を考えて、尿素や硝安の配合比率が 40%以上にしなければならない。できれば、高融点固体原料の配合比率を 40%以下にした方は、混合槽での混合、ノズル噴射、タワーの冷却凝固効果、製品粒子の品質、機械設備のメンテナンスと使用寿命には有利である。表 6 は尿素ベースの化成肥料処方の 1 例を示す。

表 6. 尿素ベースの 26-10-15 化成肥料処方

原料	重量 (kg)	比率 (%)	備考
尿素	520	51.0	N>46%、水分 1.0%
りん酸一安 (MAP)	230	22.6	P>44%、N>11%、水分 1.5%
塩化加里	253	24.9	K>60%、水分 1.5%
フィラ (充填材)	15	1.5	ドロマイト、炭酸カルシウムなど
合計	1018	100	製品水分 0.5%

註：造粒工程に尿素的分解と損失率 2%、りん酸一安と塩化加里の損失率 1%と計算して、最終製品重量 1000kg である。

処方設計には原料間の化学反応も考慮しなければならない。例えば、尿素とりん酸一安が高温で縮合反応を起こし、二酸化炭素とアンモニアガスを放出することがある。この反応により、混合槽にスラリーの発泡や溢れ出し、粘度の急激上昇等の現象が発生すること

もある。また、硝安は塩素イオンの存在により分解して亜酸化窒素を発生する。従って、塩化加里は高温の環境に於いて硝安に対して触媒作用があり、混合したスラリーが発熱して、火災や爆発を誘起することもある。硝安をベースとする化成肥料の処方には塩化加里を避けるべきである。

## 2-2. 原料の粒度と水分

尿素や硝安以外の原料は、熔融した熔融液に添加・混合してからスラリーの状態で作粒に供するため、その粒子の粒度と水分含有量が混合後のスラリー物性に影響を及ぼす。粉の粒度が 1mm 以上の場合は、生成したスラリーに固体粒子が沈殿し、ポンプや配管、ノズルの摩耗を加速したり、ノズルのオリフィスを目詰まりしたりする可能性が高い。一方、粉の粒度が細かすぎると、熔融液に投入する際に粉玉を形成しやすく、不均質のスラリーになる。従って、高融点原料の粒度を 0.1~1mm の範囲に制御すれば、必要な混合時間が短縮でき、均質で再現性のあるスラリーになる。

原料の水分が高い場合は、熔融液に投入して混合攪拌する際に水蒸気となって、スラリーの流動性が悪くなる。特に高い水分のりん酸一安が混合する際にスラリーの粘度が急速に上昇し、混合槽の正常な稼働を妨害し、不均質のスラリーとなる。原料の予熱等を通して、水分率を 1.5%以下、できれば 1.0%以下に抑えるべきである。

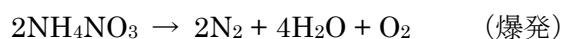
## 2-3. 原料の熔融温度と熔融時間

尿素は融点以上になった熔融状態に於いて、分子が縮合して、アンモニアが分子間脱離し、植物生育に有害なビウレットを生成する。ビウレット含有量の高い肥料は、販売・使用することができない。



従って、尿素をベースとする化成肥料を作粒する場合は、尿素的熔融温度を 136℃以下に制御して、熔融した尿素液を 5 分間以内にほかの原料と混合して、配合時の攪拌時間を 4 分間以内に制御すべきである。

また、硝安は 142℃から亜酸化窒素と水に分解する。分解速度は温度が高いほど、塩素イオンが存在する環境では速くなる。熔融して 200℃辺りから分解が急速に進行し、210℃に加熱すると爆発する。従って、硝安をベースとする化成肥料を作粒する場合も加熱熔融温度と熔融時間を注意すべきである。



## 2-4. 高融点固体原料の予熱温度

流動性の良い造粒用スラリーを作るため、高融点の固体原料は 80~90℃に予熱してから尿素または硝安の熔融液に投入すべきである。予熱温度が足りない場合は、混合する際に

熔融液の温度が急に下がり、混合には時間がかかり、作ったスラリーの温度が低く、ノズルの目詰まりを引き起こしやすい。一方、予熱温度が高すぎると、りん酸一安が分解して、アンモニアを放出することもある。

## 2-5. スラリーの温度と噴射圧力制御

スラリーの温度は粘度と密接な関係を有し、ノズルの噴射量を安定に維持するため、スラリーの温度を一定範囲に保たなければならない。また、ノズルから噴射された液滴の粒度を一定範囲内に抑えるため、スラリーポンプの圧力を適宜に設定して、安定に維持すべきである。

## 2-6. 粒子の粒径制御

プリリングタワー造粒は噴射した液滴が冷風との接触で表面から冷却され、収縮するが、内部の熱い液体や気泡がその収縮圧力で表面の殻を破って噴出して、粒子に空洞を形成し、多数の微小粒子を生成する。特に液滴の粒径が大きいほど、この現象が起きやすい。尿素単体では 3mm 以上、尿素ベースの化成肥料では 4mm 以上、硝安に至って、単体では 2mm 以上、硝安ベースの化成肥料では 2.5mm 以上の粒径では、粒子の空洞がほぼ 100%発生し、造粒した粒子の硬度が低下し、粉化しやすい。従って、プリリングタワー造粒は生産効率、回収率、製品粒子の品質等を考慮して、粒子の粒径を適宜の範囲に制御すべきである。表 7 はプリリングタワー造粒の最適粒径範囲を示す。

表 7. プリリングタワー造粒法の最適粒径範囲

原 料	粒子の粒径 (mm)
尿素	1.0～2.8
尿素ベースの化成肥料	1.5～4.0
硝安	0.5～2.0
硝安ベースの化成肥料	1.5～2.5
硝酸加里	1.0～3.0
硝酸ソーダ	0.5～2.0

## 2-7. 冷却タワー内壁および製品ホッパーへの付着防止

プリリングタワー造粒は、熔融した原料液をノズルで噴射して、液滴となって冷却凝固して粒子にする造粒法であるため、冷却タワー内壁および製品ホッパーへの造粒物の付着を避けられない。造粒物付着の主な原因は、

① 稼働が不安定で、製品の切り換えが多く、頻繁に停止、再開する。再開する前に蒸気でノズルを予熱する必要があるため、水蒸気の結露による噴射された粒子が凝固しても表面に水分が残り、タワー内壁や製品ホッパーに付着する。



- ② 粒子の粒径が大きすぎる。冷却不十分でタワー内壁や製品ホッパーに付着する。
- ③ 冷却タワーの通風量不足。粒子の冷却不十分でタワー内壁や製品ホッパーに付着する。
- ④ ノズル回転数が安定しない。回転が遅くなると、噴射された液滴の粒径が大きくなり、冷却不十分で、製品ホッパーに付着する。回転が速すぎると、遠心力が大きくなり、噴射された液滴の粒径が小さく、遠く飛ばされ、タワー内壁に付着する。

気温と湿度の高い夏秋期にはタワー内壁および製品ホッパーへの造粒原料の付着現象は多発する。通常、3~4 回/月で運転停止して、付着物を取り除くなどメンテナンスの必要がある。冬季の気温が低い季節では、稼働に注意すれば、この作業は行わなくても問題ない。

## 2-8. 製品の固結防止

プリリングタワー造粒に使う尿素や硝安は吸湿性が高く、造粒した製品も固結しやすい。固結防止の有効策として、

- ① 製品の水分率を下げる。特に尿素ベースの化成肥料が硝酸ベースの化成肥料より水分に対する敏感性が高く、固結しやすいため、製品の水分を 1%以下に制御する。
- ② 製品の温度を下げる。冷却タワーでは粒子の温度を 60℃以下に冷却して、外部冷却装置でさらに 40~45℃以下に冷却してから包装する。硝酸ベースの化成肥料は硝安が 32.3℃に結晶の相転移が起き、粒子の固化温度が尿素ベースの化成肥料より低いいため、40 度以下にしてから包装することを勧めたい。
- ③ 固結防止剤を添加する。界面活性剤、非晶質二酸化けい素（ホワイトカーボン）、タルクなどを添加することにより、粒子表面に特殊の膜を形成し、粒子間の滑りをよくして、粒子間に粘着を防ぐ。

## 四、 スチールベルト造粒法

スチールベルト造粒法（Steel belt granulation）は、熔融した液状材料が回転ドラム等のドロップ装置により絶えずに回転するスチールベルトに滴下し、冷却凝固して固体の粒子にする手法である。

スチールベルト造粒法の特徴は

- ① 熔融液はドロップ装置により規則的に液滴としてスチールベルトに滴下し、熔融液の粘性と表面張力により滴下液滴が半球状の均一な粒状物となる。粒子の粒径はドロップ装置の回転速度および熔融液の流量調整により一定範囲に調節することができ、製品粒子の粒度分布が非常にシャープで、篩分け等が不要である。
- ② 熱伝導性の良いスチールベルトと冷却水ノズルの間接冷却により滴下熔融液が素早く冷却凝固し、大きな設備を必要せず、初期投資が少なくて済む。
- ③ 回転するスチールベルトが角に曲がる時、凝固した粒子が自然にベルトから剥離して製品ホッパーに落下する。粒子の衝突破壊がなく、粉じんもないため、製品の品質保証と作

業環境の改善に有利である。

④ 全工程が自動化され、労働生産性が高い。

従って、スチールベルト造粒は医薬原料、水酸化ナトリウム、水酸化カリウム等の品質に厳しい化学品の造粒に利用される。

スチールベルト造粒は、使用されるドロップ装置によりアキュドロップ式とロールドロップ式に分けられる。

### 1. アキュドロップ式

アキュドロップ式の滴下装置は加熱熔融装置の入った内筒（ステーター）と回転する外筒から構成される。ステーターには原料を加熱熔融する熱媒ジャケット、熔融液タンク、特殊なノズルを装着して、回転しない。外筒は規則正しく配列している多数の棘状突起のシェルを有し、シェルにオリフィスが開口している。熔融した原料はノズルを通して、下に通っているシェルに注入し、オリフィスからベルトに滴下する。滴下した液滴はスチールベルトに熱を奪われ、凝固して半球状の粒子となる。スチールベルトの下に冷却水を噴射するノズルがあり、絶えずベルトを冷却する。その構造概略は図 17 に示す。

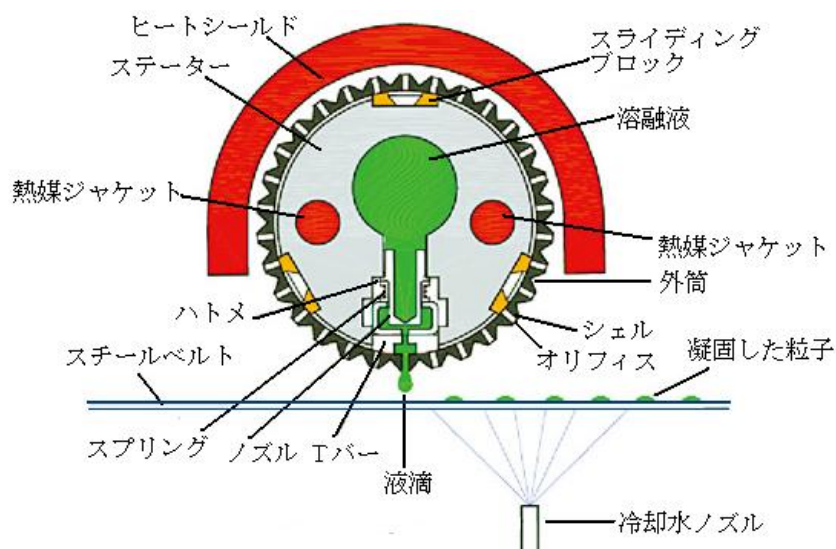


図 17. アキュドロップ式スチールベルト造粒装置の概略

アキュドロップ式スチールベルト造粒装置は、造粒した粒子のサイズが外筒のオリフィス直径、外筒回転速度、熔融液供給ノズル圧力により制御される。製品の粒径はほぼ同じで、粒度分布が非常にシャープである。ステーターのサイズと重量に制限があり、生産能力が大体 50～300kg/時間で、大きな造粒装置には向いていない。

### 2. ロールドロップ式

ロールドロップ式の滴下装置は多数の櫛歯状突起のあるドラムと凹状のコームプレートから構成される。外部に設置してある加熱熔融装置と熔融液タンクから熔融液が定量ポン

プによりコームプレートに流れ、回転ドラムの櫛歯状突起がコームプレートに通過する際に熔融液を付着する。ドラムの回転につれて櫛歯状突起が下に向いているとき、熔融液が遠心力と重力によりスチールベルトの上に滴下し、冷却を受けて半球状に凝固する。スチールベルトの下に冷却水を噴射するノズルがあり、絶えずベルトを冷却する。その構造概略は図 18 に示す。

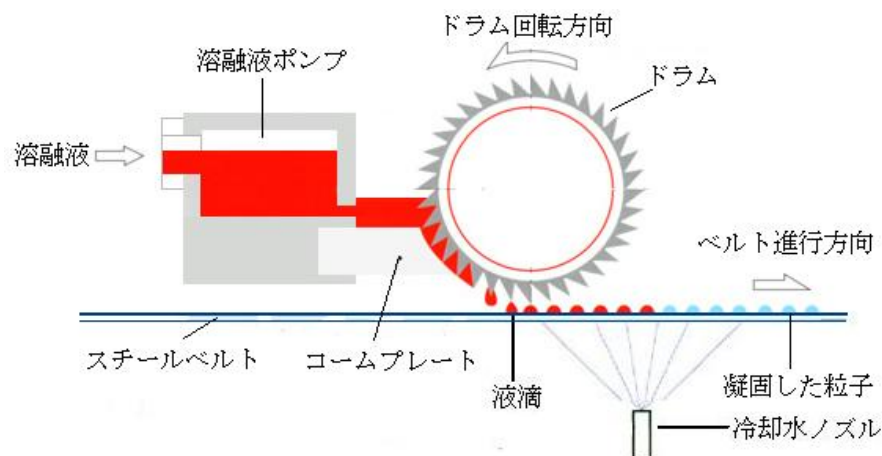
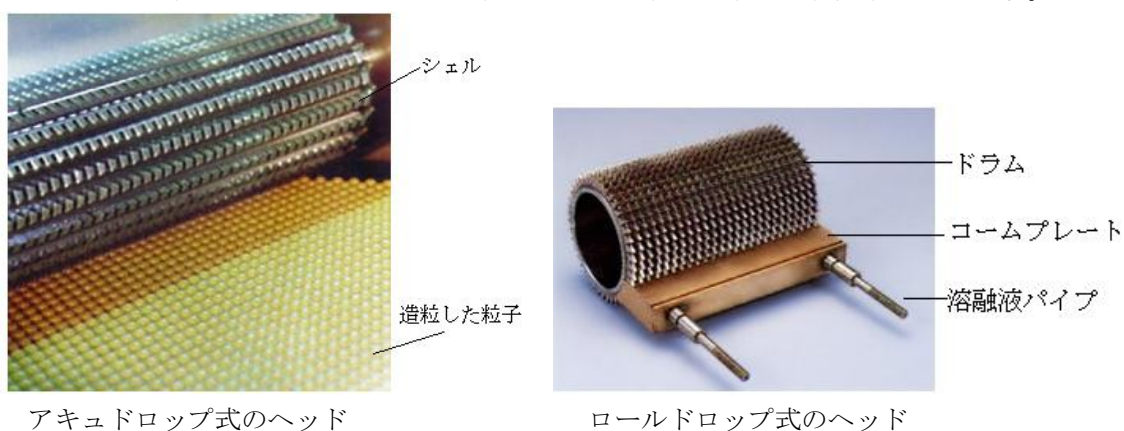


図 18. ロールドロップ式スチールベルト造粒装置の概略

ロールドロップ式スチールベルト造粒装置は、液滴のサイズがドラムの櫛歯状突起の大きさとピッチにより制御される。液滴はドラムの遠心力と液滴の重力を受けて自然落下するため、熔融液の温度と粘度、櫛歯状突起に付着している量に影響を受ける。粒度分布がアキュドロップ式よりやや広い。

但し、アキュドロップ式に比べて、ロールドロップ式は加熱熔融装置と熔融液タンクを外部に設置してあるため、ドラムのサイズ、特にその長さを大きくすることができる。また、回転速度も速くすることができるため、1～3 トン／時間の大量生産も可能である。

アキュドロップ式およびロールドロップ式のドロップヘッド写真は図 19 に示す。



アキュドロップ式のヘッド

ロールドロップ式のヘッド

図 19. アキュドロップ式およびロールドロップ式のドロップヘッドの写真

## 五、 スクリュー押出造粒法

スクリュー押出造粒法 (Screw granulation) は、明確な融点のない塑性原料を加熱して、柔らかくした原料をスクリューで押出して、カッターで粒状に切断する方法である。湿式造粒の押出造粒法に似ているが、水などの造粒液を添加しないため、乾式造粒に属する。スクリュー押出造粒は肥料分野には全く使用しないが、プラスチック、特に汎用ポリオレフィン系樹脂（ポリエチレン、ポリプロピレン等）の造粒によく利用される。造粒原理や造粒機械の構造について、前の節に述べた湿式造粒―押出造粒法をご参考ください。

合成された樹脂は大体粉末状で、そのまま成形して製品にするには不適である。通常、樹脂原料に用途に応じた各種添加材（無機鉱物フィラー、紫外線吸収剤、酸化防止剤、難燃剤、安定剤等）を加える必要がある。また、成形時に粒状原料の方も取り扱いやすいため、樹脂原料は大体コンパウンドして造粒し、ペレットの形で成形に供する。スクリュー押出造粒法はその造粒に適しているため、混練機とセットで多用される。

樹脂の押出造粒は、以下の 7 つのステップから成る。

- ① コンパウンド： 樹脂原料に各種添加材を加えて、混合調製する。
- ② 投入： コンパウンドした原料をスクリュー押出機に投入する。
- ③ 加熱熔融混練： 加熱装置で樹脂原料を加熱して、塑性流動の状態でスクリューの撹拌で混練し、各成分を均一にする。
- ④ 押出成形： スクリューの圧力で混練した塑性状態の樹脂をスクリーンダイから押出する。
- ⑤ 冷却及びインラインアニリング： 押出された樹脂を冷却して、押出した際に熱や機械的な応力でできた内部の残留歪みを除去し、形態を安定させる。
- ⑥ 切断整粒： カッターで樹脂を規定長さに切断して、粒子にする。
- ⑦ アニリング： 樹脂粒子に残った内部残留歪みを除去する。

樹脂のスクリュー押出造粒は加熱した樹脂原料の粘度により次の 2 つがある。

### 1. カット冷却凝固法

低粘度の樹脂を加熱して塑性流動となった時点で、スクリューで圧力を加え、スクリーンダイから押出す。押出された樹脂はスクリーンダイの前面で回転するカッターにより一定の大きさに切断され、水中へ落下し、冷却凝固する。切断した粒子は低粘度であるため、水中でその表面張力により丸くなり、球状に近い粒子となる。

### 2. 冷却凝固カット法

高粘度の樹脂を加熱して塑性流動となった時点で、スクリューで圧力を加え、スクリーンダイから押出す。粘度が高いため、押出された樹脂はうどんのように細長い棒状となる。それを水中または冷却装置を通して冷却凝固してから回転カッターで短く切断して、円柱状の粒子になる。



スクリーユ押出造粒機はシリンダーにあるスクリーユの本数により、単軸スクリーユ押出機と二軸スクリーユ押出機及び多数軸スクリーユ押出機に分けられる。単軸スクリーユ押出造粒機の構造概略は図 20、二軸スクリーユ押出造粒機の構造概略は図 21 に示す。

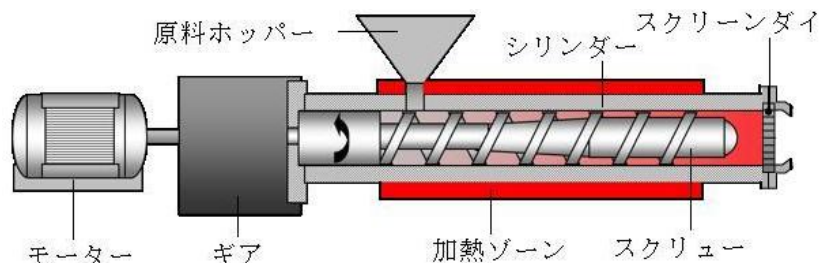


図 20. 単軸スクリーユ押出造粒機の構造概略

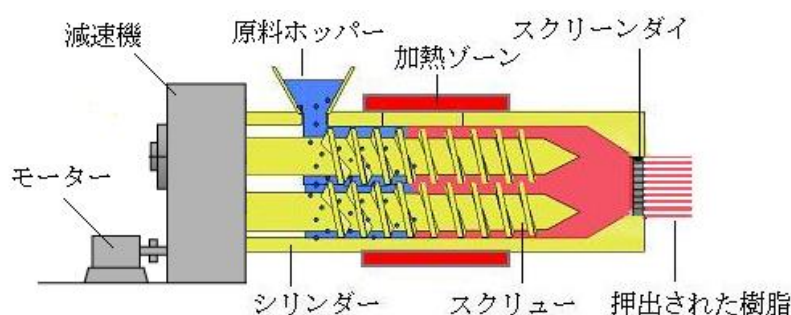


図 21. 二軸スクリーユ押出造粒機の構造概略

スクリーユ押出造粒のポイントは樹脂の供給量を安定することである。また、品質の面では塑性流動となった樹脂の状態が均一であることも重要である。従って、スクリーユの回転速度、シリンダーの加熱温度と安定化に多大の注意を払わなければならない。

## 六、 ドラムフレーク造粒法

ドラムフレーク造粒法 (Drum flaker granulation) は、加熱溶融した原料を冷却ドラムの表面に滴下または塗布して、ドラムの回転により液滴がドラムの表面に沿ってフィルム状に付着し、冷却凝固して厚さ 0.1～3mm のフレーク状の薄片を形成する。形成されたフレークはスクレーパーで掻き落され、製品となる。カプロラクタム、PET 樹脂、ポリエチレングリコール、エポキシ樹脂等の高粘度プラスチック、ナフタリン、ろう等の有機化合物の造粒によく利用される。

造粒に使う回転ドラムの数によりシングルドラムフレーカーとダブルドラムフレーカーに分けられる。それぞれの構造概略は図 22、図 23 に示す。なお、生産効率と製品品質の面ではダブルドラムフレーカーの方が優れている。

また、熔融液の塗布方法は原料の物性、特に粘度と製品の品質要求によりロールフィーード式 (上部滴下方式) とディップフィーード式 (下部塗布方式) に分けられる。

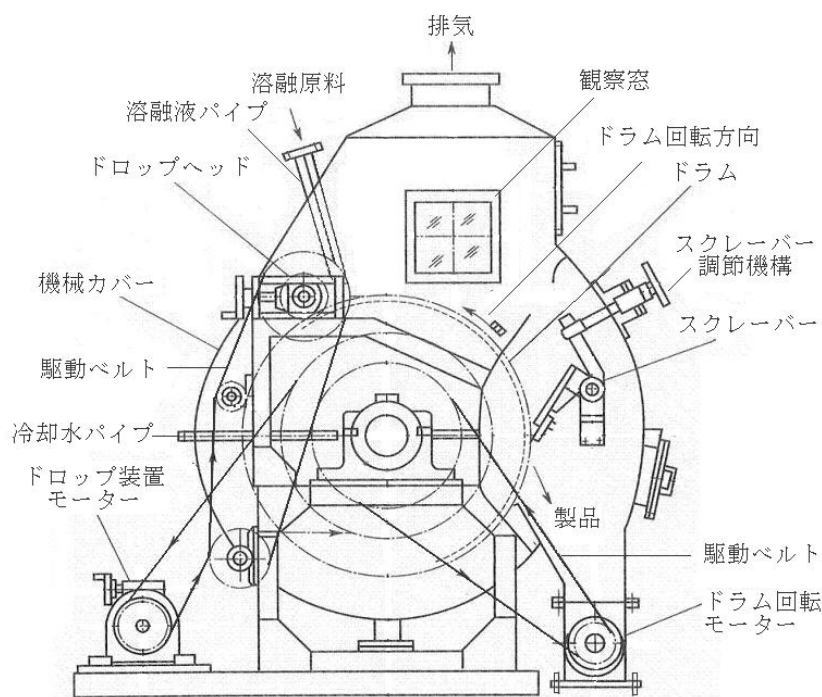


図 22. シングルドラムフレーターの構造概略

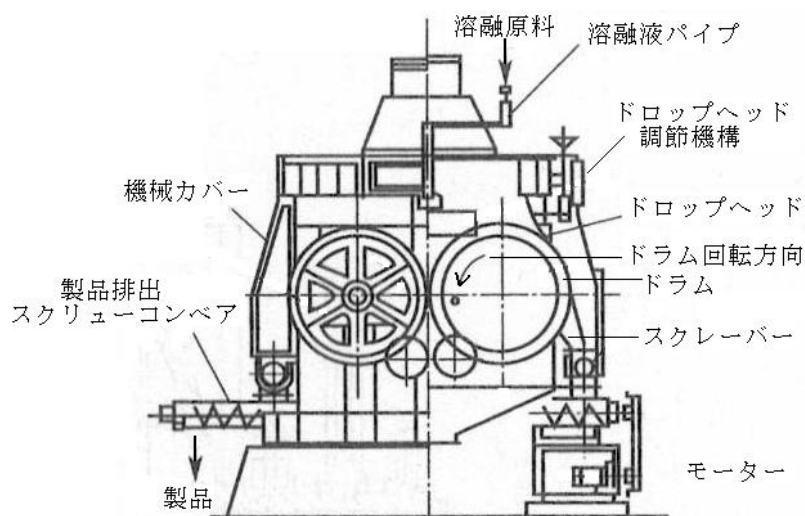


図 23. ダブルドラムフレーターの構造概略

### 1. ロールフィード式

ドラムの上にドロップヘッドを設置して、加熱溶融した原料液をドラム表面に滴下する。シングルドラムフレーターの場合は、滴下した溶融液が重力によりドラムの表面に広げながら冷却凝固する。ダブルドラムフレーターの場合は、両ドラムの接触面を密着させて、滴下した溶融液がドラムの表面に付着して、相反に回転するドラムにより薄いフレークに引き伸ばしながら冷却凝固する。凝固したフレークはドラムの下方に設置してあるス



クレーバーに掻き落とされる。粘度の低い原料の造粒に適する。ダブルドラムフレイカーのロールフィード式塗布方式の概略は図 24 に示す。

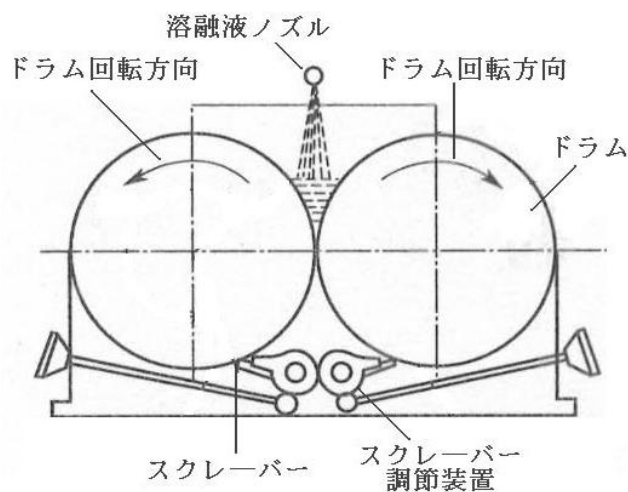


図 24. ロールフィード式塗布方式の概略

## 2. ディップフィード式

ドラムの下に加熱保温装置付の湯船状の溶融液槽が設置され、溶融した原料液を溜めている。回転するドラムは溶融液槽を通過する際に、溶融液がドラムの表面に付着して膜状に引き上げられ、ドラムの回転につれて冷却凝固され、フィルム状となり、スクレーパーに掻き落される。粘度の高い原料の造粒に適する。ダブルドラムフレイカーのディップフィード式塗布方式の概略は図 25 に示す。

ディップフィード式では、ドラムが溶融液槽を通過する際に漬けている深さは引上げられる液体の量と密接に関係して、形成されたフレークの厚さを直接影響する。また、溶融液の粘度も引き上げられた液体の量と関係しているため、溶融液槽の液面、温度を一定に維持することは製品の品質維持に非常に重要である。

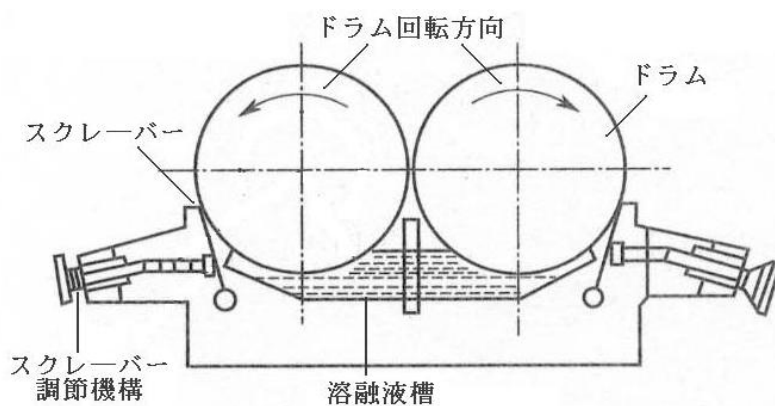


図 25. ディップフィード式塗布方式の概略

ドラムフレーク造粒法は、熔融液の冷却凝固時間が非常に短いため、原料の比熱によりドラムの回転数、塗布した熔融液の厚さを設定する。比熱が大きい原料を造粒する場合は、ドラムの回転を遅くして、塗布した熔融液の厚さも薄くしなければならない。しかし、ドラムの回転速度が極端に遅くなると、塗布した熔融液の拡散を妨げ、逆に熔融液の凝固時間が長くなる。通常、ドラムの回転数を  $0.5 \sim 6 \text{ r/min}$  に設定して、内部冷却用の冷水温度と熔融液の塗布厚さで調整する。