

乾式造粒 — 圧片造粒法

圧片造粒法（Roller compaction dry granulation）は、ローラーコンパクター法とも呼ばれ、垂直または水平配置された 2 本ロールを相反する回転方向で回転させ、そのロール間にスクリーフィーダーを用いて造粒原料を供給して、ロールから高い圧力を加えて、シート状に圧縮成形する。成形されたシートをさらに破碎装置で細かく破碎して、篩分けを経て粒状物を得る造粒方法である。水などの造粒液体を使わないため、乾式造粒に属する。

圧片造粒法は前節に紹介したブリケット造粒法と同じように 2 本のロール間に造粒原料を投入し、圧力で成形する手法である。異なるところは、

- ① 圧片造粒ではロール表面にダイキャビティ（鑄型）がなく、成形されたものはシート状で、さらに破碎して粒子にする必要がある。
- ② ロールサイズとモーター出力が同じ場合は、圧片造粒の圧縮率が高いため、成形された粒子の密度が高く、硬度が高い。
- ③ 粒子の形状が不規則で、粒度分布も広い。

しかし、肥料造粒の分野では、不規則状の粒子は機械施肥には向かないため、化成肥料ではブリケット造粒法を使うことは主流である。但し、塩化加里だけはその物性が圧片造粒法に非常に合うため、ロシアやカナダ産粒状（1～4mm）塩化加里がほとんど圧片造粒法で生産されたものである。一方、動物飼料、特に養鶏と養豚用の飼料加工には圧片造粒法が多用される。

圧片造粒の基本は圧力による圧縮成形である。投入した造粒原料は相反に回転する圧片ロールの隙間を通る際に、高い圧力により粉粒体に塑性変形と脆性破壊を起こさせ、緻密化して分子間力、原子拡散または化学結合の作用で微粒子をシート状に牢固に結合させる。成形されたシートは圧片ロールを離れて下へ落ち、回転する破碎ロールまたは破碎ブレードで所定のサイズに破碎してからスクリーンを通す。破碎した粒子を篩分け機に送り、規格値に合う粒子が出荷するが、篩下の粉粒体を原料ホッパーに戻して再び造粒に供する。圧片造粒基本原理は図 1 に示す。

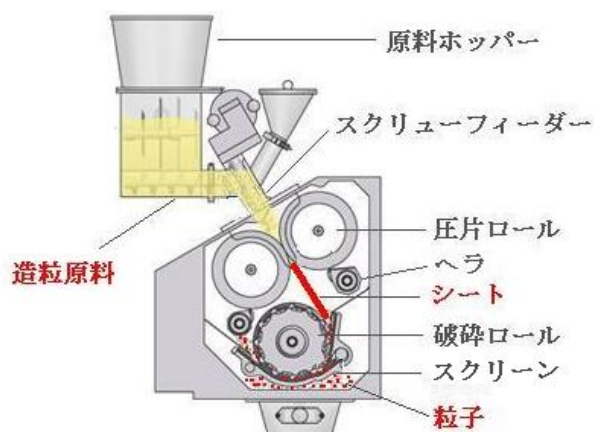


図 1. 圧片造粒の基本原理

圧片造粒は乾式造粒に属し、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、流動層造粒等に比べ、下記のような特徴がある。

- ① 原料粉粒体はロールからの圧力によりシート状物に成形されたため、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。
- ③ 原料の適用範囲が広く、湿式造粒では配合できない原料も使用できる。また、粒子硬度もロールの圧力を変えることで調整することができる。
- ④ 粒径が破碎装置とスクリーン穴のサイズに支配される。造粒した粒子が不規則状で、粒度分布が広い。また、粒子の硬度が高く、嵩比重も重い。
- ⑤ ロール間の距離が成形したシートの厚さを決定するため、距離が離れると、造粒原料の散逸係数が高くなり、20mm 以上の粒子造粒が非常に困難である。粒子サイズが 1~10mm の粒子造粒に最適である。
- ⑥ 造粒機本体が小さく、据付に必要な面積が小さくて済む。操作が簡単で、故障が少なく、メンテナンスが容易である。

一、 圧片造粒のメカニズム

1. 圧片造粒原理

圧片造粒は造粒原料を 2 本の相反に回転する圧片ロールに投入し、ロール回転の圧力により緻密なシートに成形されてから破碎して顆粒にする。その造粒は次のように行う。

まず、投入された造粒原料は流動性があり、圧片ロールの回転に沿って流動するが、ある地点に到着して、造粒原料がロール表面での移動ができなくなる。この地点は噛み込みポイントと呼ばれる。造粒原料が噛み込みポイントから 2 本ロールの圧力を受けて圧縮される。2 本ロール表面の接近につれて圧力が高くなり、造粒原料がその圧力によりシート状に圧縮される。成形されたシートが圧片ロール表面から離れて下に設置されてある破碎装置に導入される。圧片ロールに付着しているシート残片はヘラで取り除く。

シートは破碎装置の刃で細かく切断され、粒子状となってスクリーンを通して下へ落下する。篩分け機で分級して、規格に合う粒子が製品となるが、篩下の小粒子が原料ホッパーに戻され、造粒原料として再利用される。

圧片造粒法で造粒された粒子は主に分子間のファンデルワールス力、化学結合の固架橋、粉粒子間の摩擦力によって結合されるものである。特にファンデルワールス力は重要な役割を果たす。ファンデルワールス力は電荷を持たない中性の原子、分子間などで働く凝集力の総称。その作用力の大きさは、

$$F = \frac{Hr_1 r_2}{6(r_1+r_2)a^2}$$

F：ファンデルワールス力、 r_1 、 r_2 ：粒子の半径、 a ：粒子間の距離、

上記の式からファンデルワールス力は粒子の粒径に比例して、粒子間距離の二乗に反比例することが明らかになる。すなわちその力の有効作用距離は短く且つ非常に弱い。従って、強い圧力で造粒原料の粉粒体を至近距離に圧縮してはじめて、ファンデルワールス力が成形された粒子の形態を維持できるようになる。また、圧縮された粉粒体間の摩擦力も粒子の形態維持に役立つ。

2. 造粒過程における造粒原料の挙動

圧片造粒過程は単純に圧力を受けた造粒原料の密度変化の過程である。図 2 に示すように造粒原料が圧片ロールの回転に沿って圧縮される過程が次の 3 つ区域に分けられる。

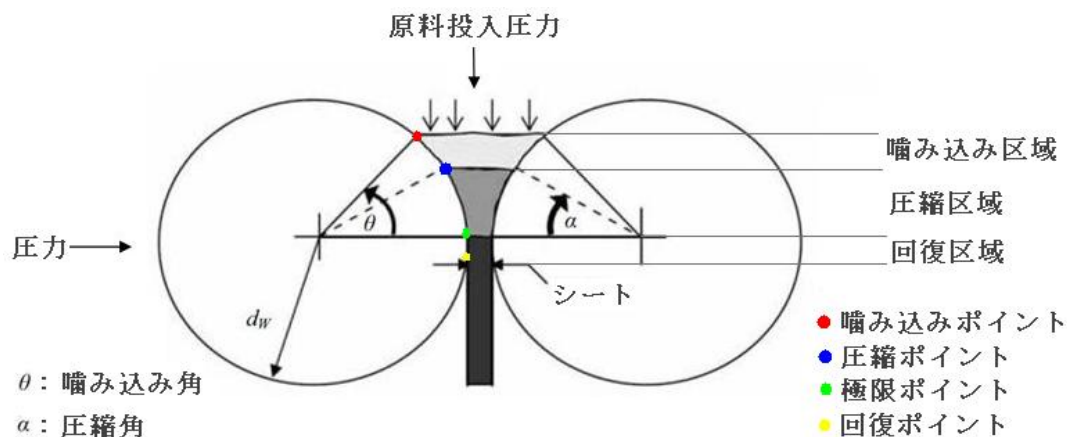


図 2. ロール回転に伴う造粒過程と圧力の変化

2-1. 噛み込み区域

ロール表面に流動する造粒原料が噛み込みポイントに到着してからその流動性が失い、ロールに挟み込まれる。噛み込みポイントから圧縮ポイントまでの区域が噛み込み区域、噛み込みポイントとロール円心との角度 θ が噛み込み角と呼ばれる。噛み込み区域には造粒原料がロールからの圧力を受け、粉粒体は整列または集合し始めて、一部の弾力変形が起き、空洞率が減るが、粒子の塑性変形と脆性破砕がまだ起きていない。

2-2. 圧縮区域

造粒原料が圧縮ポイントに到達してからロールからの圧力により圧縮され始める。ロールの回転により 2 本ロールの隙間が次第に狭くなり、造粒原料に与える圧力も次第に高くなる。造粒原料は圧縮され、内部空洞率がさらに減少する。2 本ロールの隙間が一番狭い時点では、造粒原料に与える圧力が一番高い。従って、この地点は極限ポイントと呼ばれる。圧縮ポイントから極限ポイントまでの区域が圧縮区域と呼ばれる。圧縮区域に於いて、造粒原料が圧力を耐えなくなり、弾性変形 → 塑性変形 → 脆性破砕の順で変形と破壊が起き、シート状に結合していく。弾性変形では外部からの圧力が消えたら元の形態に戻

されるが、塑性変形と脆性破砕では圧力が消えても元の形態に戻れない。塑性変形と脆性破壊の概略は図 3 に示す。

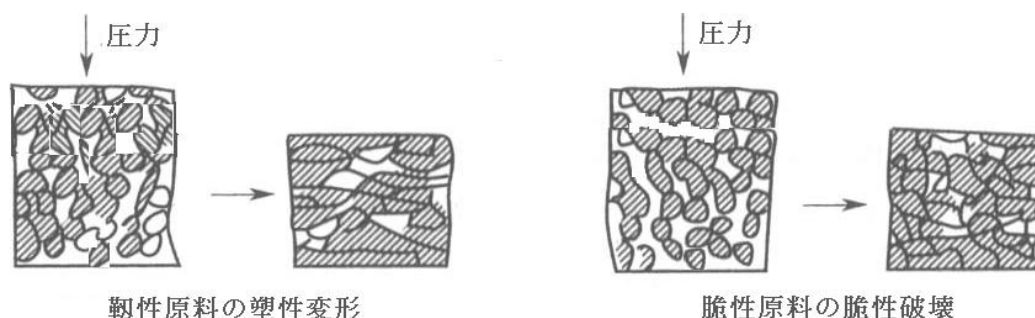


図 3. 造粒原料の塑性変形と脆性破壊

2-3. 回復区域

ロールがさらに回転し、極限ポイントを越えてから 2 本ロールの隙間が次第に広げて、圧力も順次釈放され、回復ポイントを超えた時点では、圧力が完全に解消される。極限ポイントから回復ポイントまでの区域が回復区域と呼ばれる。成形されたシートが圧力の釈放に伴い、弾性回復が起き、若干膨らむことがあるが、分子間力及び内部摩擦力の作用で、元のばらばら状態に戻れない。

3. 造粒原料の圧縮率

造粒原料が圧片ロールの回転に沿って、ロール表面を移動する。噛み込みポイントを通した後、流動性が失い、ロールからの圧力を受け、圧縮されるようになる。圧縮形成されたシートの重さが原料粉粒体の時と変わらないが、密度だけが高くなる。従って、造粒原料の体積と密度の積が形成されたシートの体積と密度の積が同じである。

$$V_1 \rho_{m1} = V_2 \rho_{m2}$$

V_1 : 圧縮前の造粒原料体積 (m^3)、 V_2 : 造粒後シートの体積 (m^3)、 ρ_{m1} : 圧縮前の造粒原料嵩密度 (kg/m^3)、 ρ_{m2} : 造粒後シートの嵩密度 (kg/m^3)

実験では、ロールからの圧力 σ_1 と造粒原料がその圧力に反発する抵抗力 σ_2 が圧縮前後の嵩密度との間に次の指数関係がある。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}} \right)^K$$

K : 造粒原料の圧縮性係数

上の式を y に対して微分すれば、噛み込み区域に入った後の造粒原料が受けた圧力の勾配 (gradient) は、

$$\frac{d\sigma}{dy} = f\left(\sigma, \alpha, \frac{hA}{D}, K\right)$$

である。

h_A : 2 本ロール間の最小距離、 σ : ロールの圧力から造粒原料の抵抗力を引いた圧縮力
 $\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ 、 K : 圧縮性係数

通常、造粒原料の圧縮率が 1.5～3.0 である。すなわち、圧片されたシートの密度が造粒原料 1.5～3.0 倍となる。

二、 圧片造粒機の構造

圧片造粒機は原料ホッパーとスクリーフィーダー、圧片機、破碎・整粒機、モータと減速機等から構成される。付属設備は原料を運ぶバケットエレベーター、破碎した粒子を分級する篩分け機、篩下の粉粒子等を返送するスクリーコンベア等である。圧片造粒設備の構造概略は図 6、塩化加里圧片造粒機の実物写真は図 7、医薬品用小型圧片造粒機の実物写真は図 8 に示す。

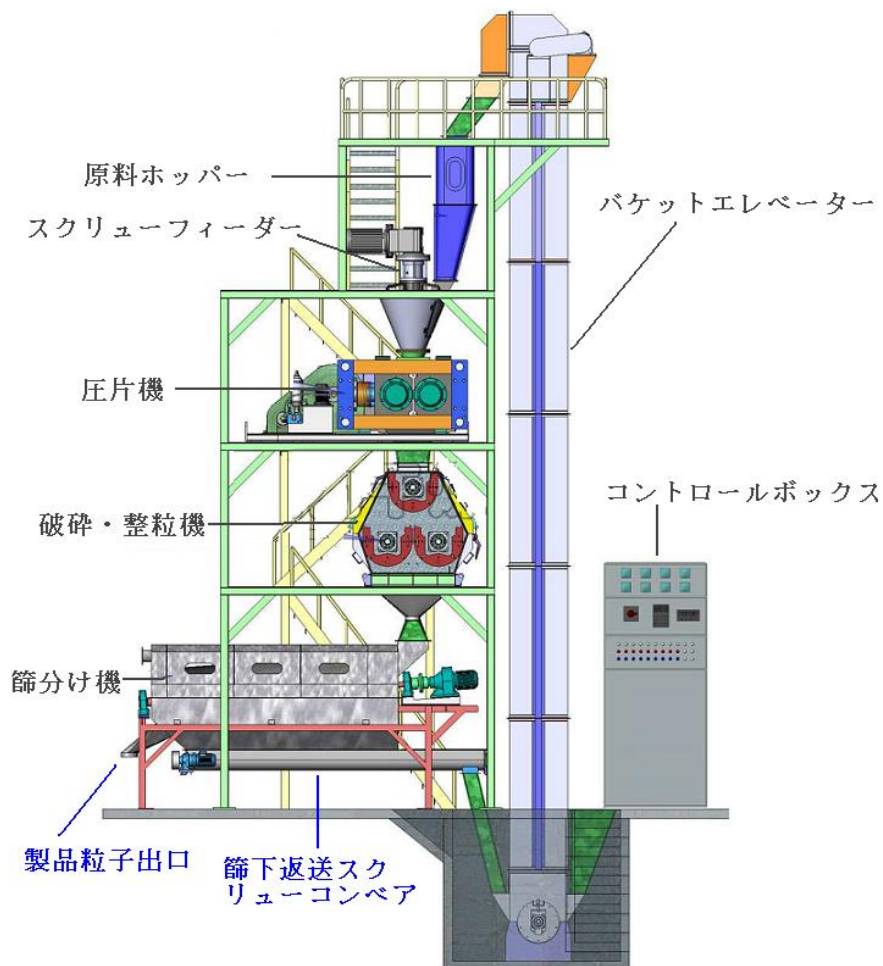


図 6. 圧片造粒設備の構造概略



図 7. 塩化加里造粒用圧片造粒機の写真（左：内部、 右：外形）



図 8. 医薬品用圧片造粒機の写真（破砕ロール 1 本）

圧片造粒機に最も重要な部品は圧片ロールである。

1. 圧片ロールの構造

圧片ロールはロール半径方向圧力が数 100MPa に達することもあり、回転軸とロール表面には高い硬度と靱性が要求される。ロールの構造は、一体成型式のものと内軸に外筒スリーブを取付ける分離式のものに分けられる。一体成型のロールは製造しやすいが、廉価の鋼材では摩耗しやすく、耐摩耗の高硬度合金では製造コストが高く、用途が制限される。一方、分離式のロールは、内軸が普通の鋼材、外筒スリーブは高硬度、耐摩耗、耐腐蝕性

の合金等の材料を使い、焼き嵌めなどの手法で結合させるもので、コストとメンテナンスの点では有利であるため、広く使用される。

圧片ロールは表面が平滑ではなく、必ず溝を彫ってある。溝の役割は、

- ① 噛み込み角を大きくする。これにより、圧縮する前に造粒原料の空洞率を減らして、原料投入圧力を大きくすることができる。
- ② 造粒原料の散逸を減らす。ロール間の距離を広げても、溝の噛み合う部分が造粒原料の漏洩を防ぎ、成形したシートの厚さを増し、生産効率を上げる。
- ③ 破碎時に顆粒のサイズを制限する。成形した連続波状のシートが山折りや谷折りの部分に応力が集中して、破碎する際にそこから断裂することになり、破碎した顆粒のサイズを一定範囲に制限することができる。

溝の形状と幅、深さが造粒目的、粒子サイズなどを考慮して決定する。よく見られるロール表面の溝は直紋、斜紋、山型紋、円弧紋である。図 8 には圧片ロール表面の溝を示す。また、図 9 は圧片造粒機に装着している圧片ロールの写真である。

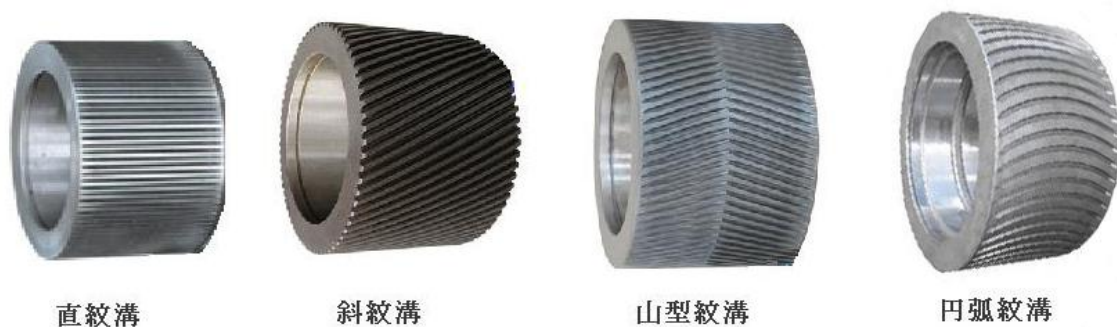


図 8. 圧片ロール表面にある溝の形状



図 9. 圧片ロールの写真

2. ロールの設計パラメーター

圧片造粒機の圧片ロール設計に使うパラメーターは前篇「ブリケット造粒法」に記載したものとほぼ同様であるため、本篇は重複しない。必要の場合は、そこを参考ください。但し、圧片ロールにダイキャビティがないため、ロールの摩耗と変形は成形されたシートへの影響が少ないので、ロール長さがブリケット造粒機より長くすることができる。

また、圧片ロール間の距離が油圧装置で調整する機種が多い。ロール間距離が短いほど

造粒原料に与える圧力が大きくなり、成形された粒子の硬度が高くなる。しかし、ロール間距離が短い場合は、成形されたシートの厚みが薄くなり、単位時間当たりの生産量が減る。原料種類、造粒要求、生産効率を総合に考慮して、圧片ロール間の距離を設定する。

3. 破碎装置

破碎装置は圧片ロールで成形したシートを切断して、顆粒状にする装置である。よく使う破碎装置は破碎ロールである。ほかに破碎ブレードもあるが、破碎能力、効率等が劣るため、一部小型の機種しか使われていない。

破碎ロールはロール表面に破碎用の刃が付いて、シートを切断し、顆粒にする。刃の形や配列は造粒原料、造粒目的により異なる。破碎ロールの写真は図 10 に示す。



図 10. 破碎ロールの写真

また、破碎ロールの構造概略および圧片造粒機に設置する位置も図 11 に示す。

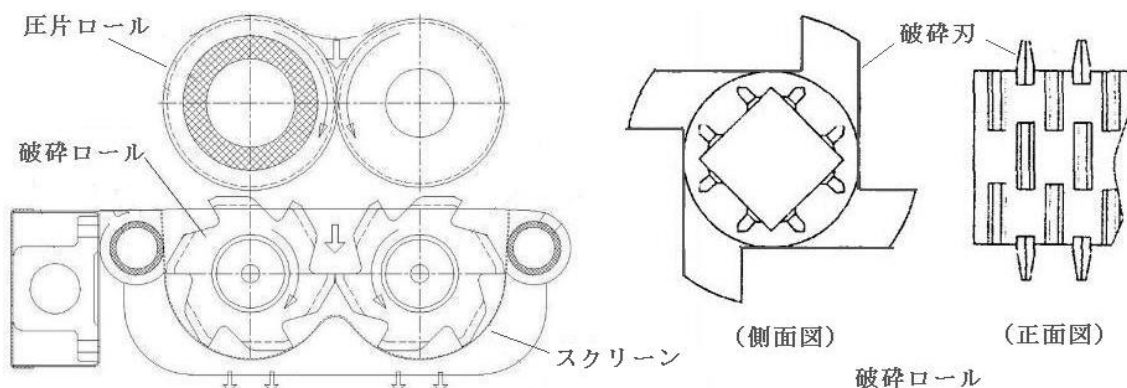


図 11. 圧片造粒機に於ける破碎ロールの構造概略図

通常、破碎ロールは 2 本 1 セットで、相反に回転して、成形したシートを噛み崩して、顆粒にするが、小型の圧片造粒機は機械サイズの制限があり、1 本破碎ロールの機種もある。破碎ロール 1 本しか設置しない場合は、厚みのあるスクリーンとのセットでシートを破碎する。

4. スクリーン

スクリーン（篩網）は、破碎ロールで破碎した顆粒を仕分けする部品で、大体円弧状で、

破碎した顆粒を通すための穴が多数開けてある。破碎ロールからの圧力を耐えるため、鉄製で、一定の厚みがある。特に 1 本破碎ロールの機種では、スクリーンの厚さが 10~20mm もある。

破碎ロールで破碎した顆粒はスクリーンの穴を通して、下へ落ちるが、スクリーンの上に残った大きい顆粒は、破碎ロールの回転によりさらに破碎される。

図 12 に示すのはスクリーンの写真である。左側と中央は 2 本破碎ロール用のもので、右側は 1 本破碎ロール用のものである。

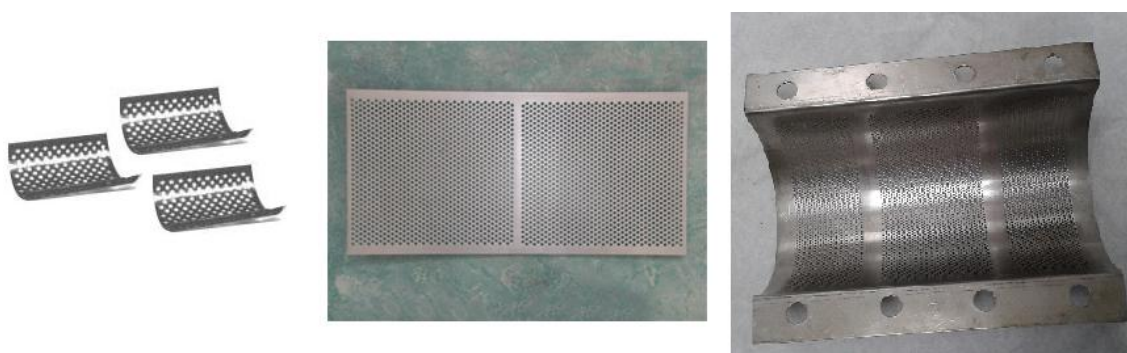


図 12. スクリーンの写真

5. 整粒機

破碎装置で破碎した粒子は不規則状であるため、一部の圧片造粒機にはそれをさらに粒子表面に残った鋭い突起部分を削り、形状を整えるように整粒機を付設する。特に小型の圧片機は破碎ロールの代わりに破碎と整粒を一つの装置で行うことが多い。

整粒機の構造は垂直回転軸に取り付ける特殊な形状をしたブレード（インペラ）と多数の穴を有するスクリーンから構成される。スクリーンの形は円筒形と円錐形に大別される。円筒形スクリーンは処理能力が大きい、下部に粉粒体が集中しがちである。円錐形スクリーンは処理能力がやや小さいが、スクリーン全体に粒子が行き渡るので、処理効率が良い。現在、円錐形スクリーンが主流である。

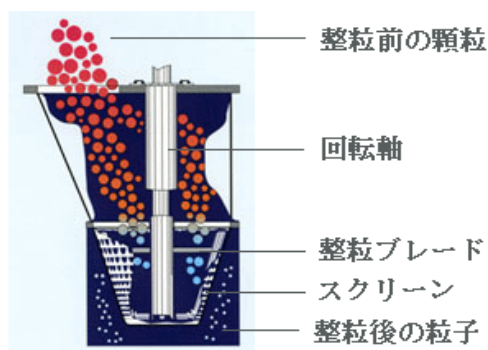


図 13. 整粒機の構造概略

整粒のメカニズムは、投入したシート又は顆粒は高速回転しているブレードによって起こされた渦巻流と遠心力で切断され、互いに衝突したり、ブレードやスクリーンとぶつかったりして、突起部分を削って、スクリーンの穴から排出される。整粒機の構造概略は図13に示す。また、図14は整粒機のブレードとスクリーン写真である。

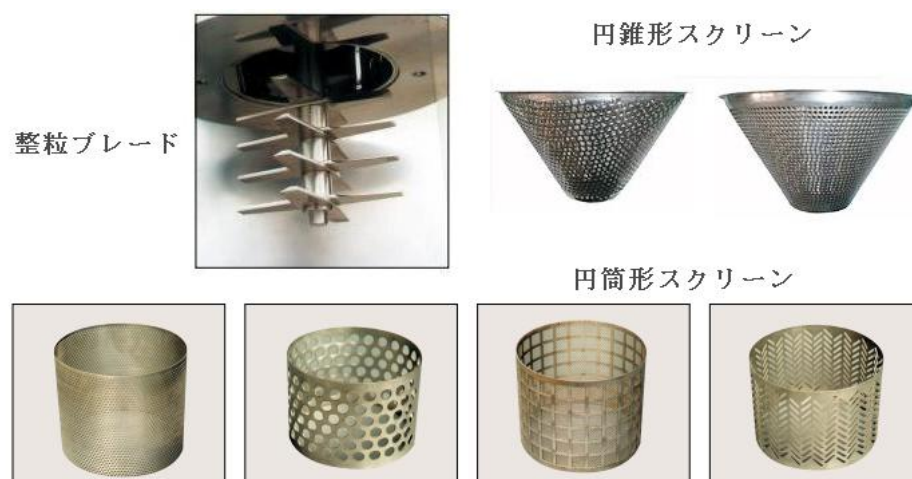


図 14. 整粒機のブレードとスクリーン写真

圧片造粒機のロールサイズ、成形圧力、生産能力等について、あるメーカーのカタログから抜粋したものを表1に纏める。

表 1. 圧片造粒機の型番と生産能力

型 番	GZL100	GZL120	GZL160	GZL200	GZL260
ロール直径(mm)	240	280	360	450	640
ロール長さ(mm)	100	120	160	200	260
最大成形圧力(t)	50	60	80	100	130
ロール回転数(rpm)	16～30	16～30	16～30	16～24	16～24
シート最大厚さ(mm)	4	5	6	8	8
シート生産量(kg/h)	250～500	500～900	700～2000	1000～4000	2000～7400
粒子生産量(kg/h)	125～250	250～450	350～1000	500～2000	1000～3700
粒子粒度(mm)	0.2～5	0.2～5	0.2～8	0.2～8	0.2～8
ロールモーター出力(kW)	7.5	15	30	45	75
総出力(kW)	15	22	40	55	90
外形寸法(W x D x H)	1500x1500 x2500	1800x1600 x3000	2000x2000 x4000	2400x2400 x5200	2800x2600 x6000
設備総重量(t)	7	8	10	14	20

三、 圧片造粒機の操作

圧片造粒機の操作が簡単であるため、下記の事項を注意すれば、ほぼ問題なく造粒することができる。

1. ロール間の距離調整

2 本ロール間の距離は主に造粒原料の散逸係数と成形圧力に関連する。ロール間の距離が小さいほど、噛み込み角が小さくなり、成形圧力が大きくなるが、単位時間当たりの生産量が落ちる。造粒原料の物性と所要圧力、造粒目的を考えて適宜の距離を設定すべきである。

通常、塩化加里造粒の場合は、ロール間の距離は 2～5mm に設定することが多い。

2. ロール表面の溝の対合調整

圧片ロールは非常に高い圧力を発生し、ロール半径方向の圧力が数 100kN に達することもある。両ロール表面にある溝を必ず互いに凸と凹に合わせなければならない。ずれる場合は、成形したシートの形状と次工程の破碎に影響を及ぼすだけでなく、造粒効率が低下し、ロールの摩耗が増え、定額以上の負荷を与え、ひどい場合はモーターを焼損することもある。

3. ロール回転速度の設定

ロール回転速度はロールの周速度を制御し、造粒原料に与える圧縮時間を通して、成形したシートの重量と密度、特に硬度に影響を及ぼす。実生産の経験では、ロール回転数に限界値があり、その限界値を超えた回転する場合はロールが小さく振動して、成形したシートの形状が悪く、粒子の結合が不十分で、硬度が低下するだけに留まらず、モーターを痛めて、寿命を縮めることになる。その原因はロール回転数が速すぎると、噛み込み区域で造粒原料内部にある空気の排出速度と排出量が間に合わず、多量の空気が造粒原料に残り、圧縮区域で一気に噴出し、圧縮中のシートを破壊し、ロールを振動させる。

ロール回転数は造粒原料物性、ロール直径等を考慮し、試運転の段階で確認すべきである。造粒過程で気泡の破裂音またはロールの振動音を聞こえた場合は、ロール回転速度を再調整する必要がある。

4. 起動と停止

必ず造粒原料を投入しない状態で起動する。ロールに造粒原料が溜まる状態で起動する場合は、始動に必要なトルクが大きく、モーターに過大な負荷を与え、焼損する恐れがある。通常、起動後、2 分間空運転して、異音や異常振動がないことを確認してから造粒原料を投入する。

停止がその逆である。まず、造粒原料の投入を停止してから約 2 分間空運転して、造粒した粒子を排出してからモーターを停止する。

4. 造粒原料水分の調整

圧片造粒は乾式造粒に属し、粒子の内部結合力は主に分子間のファンデルワールス力と微粒子間摩擦力である。造粒原料の物性により、造粒した粒子はファンデルワールス力と摩擦力だけの結合力が不十分で、粉化しやすい場合もある。特に造粒原料が非常に乾燥している時にこの現象が起きやすい。粒子の硬度を高める手法として、少量の水を添加することが有効である。特に塩化加里造粒の場合には非常に有効である。

その手法は、造粒原料を造粒機に投入する直前に少量の水分を霧状にして造粒原料に噴霧し、表面をやや湿潤させることにより液架橋を形成する。ロールで成形される際に原料粉粒子の内部摩擦で温度が 100℃以上に上昇して、水分が蒸発し、液架橋が固架橋に変化して内部が強固に結合することができる。

経験では、造粒原料の水分率が 2～5%が最適である。水分率が 10%以上になると、造粒原料がロール表面の溝に粘着して、造粒効率が低下し、成形したシートも湿度が高く、破碎しにくい恐れがある。