

## 乾燥

乾燥とは、外部から物質に熱を与えて、その熱エネルギーで物質に含まれている水分または溶媒を蒸発させ、物質から分離・除去することである。熱の加え方は加熱昇温だけではなく、減圧により水分または溶媒の飽和蒸気圧を減らして、蒸発を加速させることも乾燥の範疇に入る。

化成肥料の生産、特に造粒工程では、乾式造粒を除き、多量の造粒液体を使い、造粒された粒子が水分を多く含んでいる。水分の多い肥料粒子は強度が弱く、すぐ崩れて、保管と施用には向かない。従って、湿式造粒後に必ず乾燥を行い、余分の水分を除去してから製品として出荷する。

肥料の伝統的な乾燥方法は、古代から太陽の熱を利用する天日干しであったが、天候や場所の制限があり、工業化された肥料製造業には向けない。現在、化成肥料の加工にはほとんど石炭や重油、天然ガスを燃やした熱による強制加熱乾燥を利用している。また、尿素、硫酸、りん安、塩化加里等の肥料製造には熱風を利用する流動層乾燥法、噴霧乾燥法、減圧乾燥法も広く利用される。本書の目的は化成肥料等の加工技術を紹介するので、肥料加工によく利用されるロータリキルン乾燥機、ベルトコンベア型乾燥機、流動層乾燥機を詳しく述べるが、医薬、食品および化学工業に使う箱型乾燥機、トンネル乾燥装置、噴霧乾燥機、攪拌乾燥機、冷凍真空乾燥機、マイクロ波乾燥機等を最後に簡単に紹介することに留まる。

### 一、乾燥原理

肥料生産の乾燥工程は、加熱された空気を使って、肥料にその熱量を与え、肥料に含まれる水分を蒸発させ、肥料から除去する過程である。肥料に含まれている水分は自由水と結合水に分けられる。自由水とは肥料粒子の表面や内部に存在して、他の分子と結びつかず、何の束縛を受けていないで、環境や温度湿度の変化で容易に移動や蒸発が起こる水。これに対して肥料の構成分子との間に水素結合などにより結びついている水は結合水と呼ばれ、水和水・結晶水・吸着水・親水コロイドなどがある。通常の乾燥過程に於いて、自由水は熱により気化され、水蒸気になり、外部へ排出されるが、結合水はそのまま肥料に残されることが多い。

#### 1. 水の三態変化

温度により水は固体・液体・気体の3つの状態を変化する。これらの状態間の変化は図1に示す。状態の変化には外部からの熱エネルギーの供給が必要で、例えば、0℃の氷を0℃の水に変えるには必要な融解熱が335J/gであり、100℃の水を100℃の水蒸気に変えても2250J/gの気化熱が必要である。

水分を含む物体は密閉空間に置かれている際に物体の水分が水蒸気となって蒸散することと空気中の水蒸気から水に凝縮することが平衡状態を形成して、空気の飽和水蒸気圧以

上に水分が蒸散できず、継続的に乾燥が進まない。乾燥を進行させるための手段として次の2つしかない。

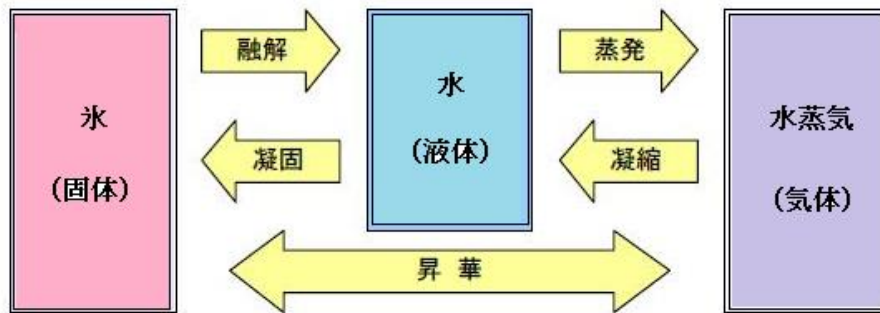


図1. 水の三態の変化

一つは物体とその周囲空気の温度を上昇させることにより空気の飽和水蒸気圧を上げ、物体からの水蒸気の発散量を増やし、空気中の水蒸気を凝縮しにくくする。もう一つは物体周囲空気中の水蒸気を除去することにより水蒸気が発散を促進する。乾燥はこの2つ方法の組合せで行う。

飽和水蒸気圧、飽和水蒸気量と温度との関係は図2、図3に示す。

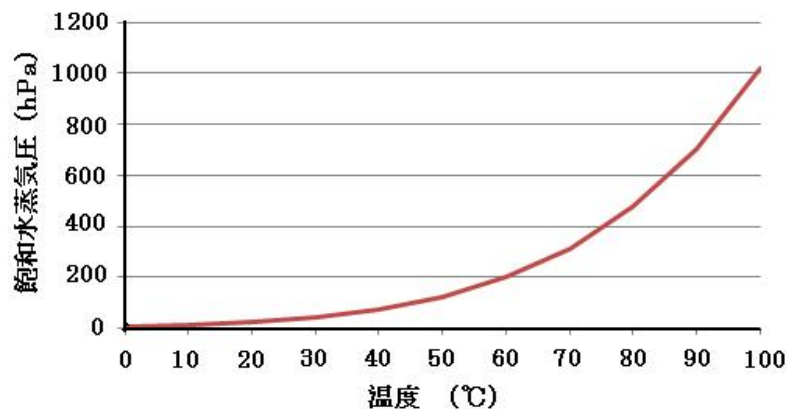


図2. 飽和水蒸気圧と温度との関係

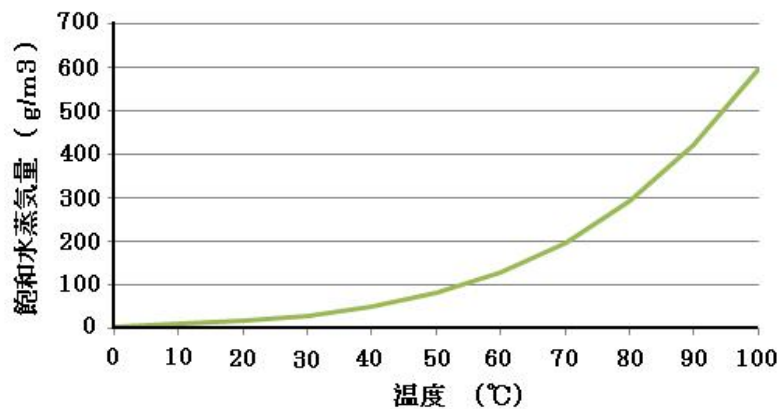


図3. 飽和水蒸気量と温度との関係

## 2. 熱の伝え方

加熱の際に熱の伝え方向は高温の物体から低温の物体へ伝わるが、その経路は対流、放射と伝導の3つである。

対流は、流体（気体または液体）に於いて温度や表面張力などが原因により不均質性が生じ、その内部で重力によって引き起こされる流体の流動現象である。流体内の密度差（温度差に起因）により自然に生じる自然対流と、人為的に流体を流すことにより生じる強制対流に分けられる。流体が対流で移動することにより、熱の流れの速さに当たる熱流束（単位時間・単位面積あたりの通過熱量）は非常に大きくなっている。

放射は、ある物体から熱が電磁波の形で放射されて他の物体に伝わる現象である。輻射伝熱ともいう。放射による伝熱は真空中でも可能である。電磁波は赤外線領域が主体で、伝熱量は低温物体の反射・通過・吸収の比率により異なり、概して反射率と通過率が低く、吸収率の高い物体ほど伝熱量が大きくなる。

伝導は、物体の内部で高温側から低温側へ熱が伝わる現象である。熱伝導ともいう。固体中では、熱伝導は分子や原子の振動が担う。特に、金属においては、原子の振動と自由電子の運動の両方により熱伝導が起きるため、熱伝導性が良い。固体金属以外では、熱伝導性はその他の固体、液体、気体の順に悪くなる。

肥料の乾燥は、肥料粒子への熱の伝え方、肥料粒子が受けた熱エネルギーの自由水への伝え方がその乾燥効率を支配する。

## 3. 乾燥の基本原則

### 3-1. 乾燥の過程

湿った多孔質の材料に熱風を当て続けると、材料の含水率と表面温度の変化は図4に示すように3つの期間に分けられる。

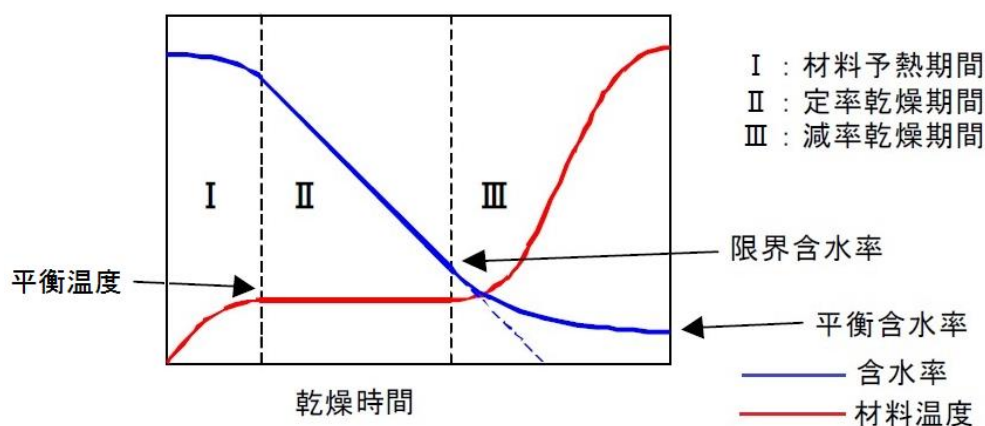


図4. 材料乾燥過程の3つの期間

期間Iは予熱期間で、材料の温度が初期温度から平衡温度に達するまでの加熱期間である。予熱期間には一部の水分、特に表面にある自由水が熱により蒸発するが、加えた熱が

主に材料の温度上昇に費やされる。

期間Ⅱは定率乾燥期間で、材料温度が平衡温度に達し、伝えてきた熱がすべて水分の蒸発に費やされる。この期間に乾燥の進行とともに表面の自由水が蒸発に伴い、材料内部にある自由水が毛細管等に沿って表面に向かって移動し、表面の水分を補充する。表面に自由水が存在して蒸発している限り、乾燥速度が一定値を維持し、材料の温度が平衡温度に保たれる。

期間Ⅲは減率乾燥期間で、材料表面に自由水が無くなり、水分の蒸発が表面から内部に移動する。伝えてきた熱は一部が水分の蒸発に、残りが材料の温度上昇に費やされる。材料の表面温度が次第に熱風温度に近づき、伝熱量が減少し、乾燥速度が低下する。期間Ⅱから期間Ⅲに移動するときの平均含水率を限界含水率という。最終的に材料の温度が熱風温度に達し、水分の蒸発が停止する。この時点で材料の含水率を平衡含水率という。なお、平衡含水率は空気の湿度により変化するが、同じ湿度でも材料の種類や温度により異なる。

### 3-2. 乾燥特性曲線

材料の乾燥速度は材料の含水率のほか、材料の物性にも大きく影響される。乾燥速度は熱風温度、材料との接触により熱を伝える方式と蒸発した水蒸気の除去方式という外部条件のほか、材料自身の組成、形状、含水率と平衡含水率等の内部条件にも大きく影響される。物体の乾燥速度は  $R[\text{kg 水}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)]$  または  $R_G[\text{kg 水}/(\text{h} \cdot \text{kg 乾燥材料})]$  で表す。R と  $R_G$  の関係は

$$R = R_G G / A$$

G : 乾燥材料の質量 (kg)、 A : 乾燥面積 ( $\text{m}^2$ )

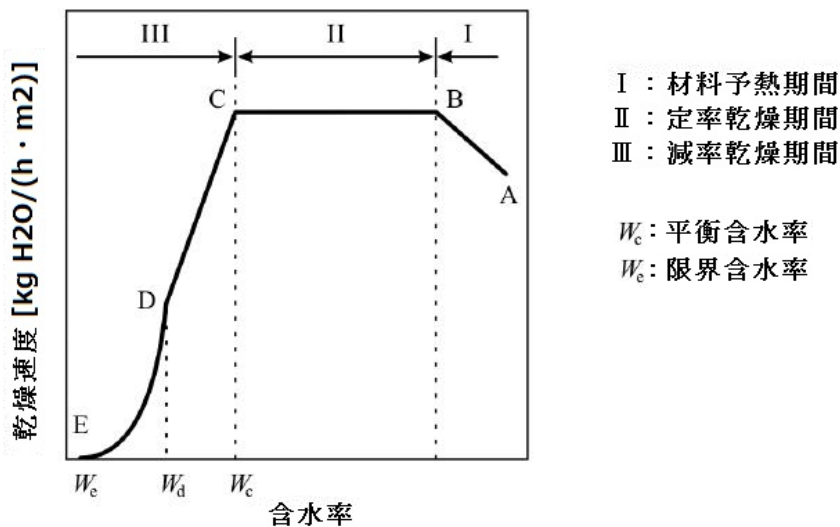


図 5. 乾燥特性曲線

図 5 に示す乾燥特性曲線は、材料の含水率に対する乾燥速度の変化を示す曲線であり、材料の乾燥特性を把握・検討するには最重要なデータである。この乾燥特性曲線を元に乾

乾燥方式の選択、熱風温度、乾燥時間等を決定する。

材料予熱期間が短くて、蒸発量も少ないため、その期間の水分蒸発速度、蒸発量を無視することができる。乾燥特性曲線に最も重要なのは定率乾燥速度および減速乾燥速度である。

### 3-3. 定率乾燥速度

定率乾燥期間で水分の蒸発速度がほぼ一定であるため、その定率乾燥速度は熱風温度、材料との接触により熱を伝える方式と蒸発した水蒸気の除去方式という外部条件だけに決める。

熱風加熱の場合は、材料の単位面積の伝熱量が  $hc(t - t_w)[\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)]$  であり、定率乾燥速度  $R_c[\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)]$  は、

$$R_c = \frac{Q}{\gamma_w} = \frac{\alpha(t - t_w)}{\gamma_w}$$

である。

$\alpha$  : 熱伝達係数 ( $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ )、 $t$  : 熱風温度 (乾球温度、 $^\circ\text{C}$ )、 $t_w$  : 湿球温度 ( $^\circ\text{C}$ )、 $\gamma_w$  :  $t_w$  時の水蒸発潜熱 ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )

伝導と放射伝熱を無視して、熱風—水蒸気の対流伝熱乾燥システムでは、定率乾燥速度  $R_c$  は次の式で表すことができる。

$$R_c = \frac{\alpha(x_w - x)}{C_H}$$

$x$  : 熱風湿度 ( $\text{kg}$  水/ $\text{kg}$  空気)、 $x_w$  : 熱風温度時の飽和湿度 ( $\text{kg}$  水/ $\text{kg}$  空気)、 $C_H$  : 熱風の湿り比熱容量 ( $\text{kJ}/(\text{kg}$  空気 $\cdot^\circ\text{C}$ )

定率乾燥期間の所要時間は次の計算式で計算することができる。

$$\theta_c = \frac{w}{ARc} (F_1 - F_c) = \frac{w}{ARc} (w_1 - w_c)$$

$\theta_c$  : 定率乾燥時間 (h)、 $F_1$  : 定率乾燥期間に入った時の材料自由含水率、 $F_c$  : 限界含水率に於ける材料の自由含水率、 $w$  : 材料の含水率、 $w_1$  : 定率乾燥期間に入った時の材料含水率 (材料含水率での代替可)、 $w_c$  : 材料の限界含水率、 $A$  : 乾燥面積 ( $\text{m}^2$ )、 $R_c$  : 定率乾燥速度

### 3-4. 減速乾燥速度

減速乾燥期間は、材料の表面に自由水がすべて蒸発され、水分の蒸発が表面から内部に移動し、発生した水蒸気が材料の空隙中を移動して、表面に出て散逸するため、発散抵抗が高くなり、乾燥速度が次第に低下していく。従って、減速乾燥速度は内部の水分の蒸発

速度に依存し、材料の物性と乾燥方法に大きく影響され、統一的な数式で表現することができない。

材料の物性は吸湿性と非吸湿性、水分の存在状態も材料に均一分布と特定部位に多く分布、材料の形態も粉粒状、球状、円柱状、板状、不規則状などがある。乾燥方法も熱風対流加熱、熱伝導、放射加熱、真空乾燥等によりそれぞれの減率乾燥速度が異なる。図 6 は砂（粒径 0.4～0.6mm）と球状活性酸化アルミニウム粒子（粒径 0.1～0.25mm）の乾燥特性曲線を示す。

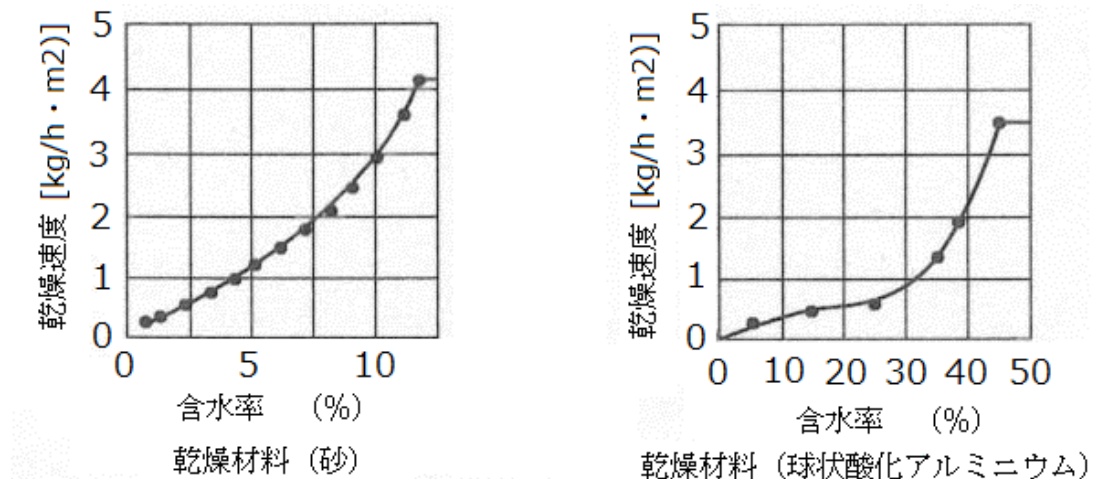


図 6. 砂と球状活性酸化アルミニウムの乾燥特性曲線

図 6 の乾燥特性曲線から、砂は定率乾燥期間が非常に短く、減率乾燥期間に減率乾燥速度が綺麗な下降曲線を描いている。一方、球状活性酸化アルミニウム粒子は定率乾燥期間がやや長く、減率乾燥期間に最初に減率乾燥速度が急に低下するが、次第に低下曲線が緩やかになる。これは、砂が内部に自由水がなく、非吸湿性で、粒子表面に付着している水分が蒸発されれば、乾燥が終了する。球状活性酸化アルミニウム粒子は多数の孔があり、減率乾燥期間に粒子内部水蒸気の発散抵抗が高く、乾燥終了まで時間がかかる。

ある時点における材料の含水率  $w$  と平衡含水率  $w_c$  との差

$$F = w - w_e$$

を自由含水率[kg 水/kg 乾燥材料]という。減率乾燥速度  $R_d$  はこの自由含水率  $F$  に比例し、ある含水率  $w_d$  までの乾燥速度が直線的に減少する場合は、含水率  $w$  における乾燥速度  $R_f$  は

$$R_f = R_c \left( \frac{w - w_d}{w_c - w_d} \right)$$

と表すことができる。

肥料粒子を含む粒径の小さい粉粒体粒子を乾燥する場合に回転乾燥（ロータリーキルン乾燥）と薄い層の接触乾燥（ベルトコンベア乾燥）では、減速乾燥速度と粒子含水率の減少に比例して下降する。実験結果も図 7 に示すようにほぼ直線を呈する。



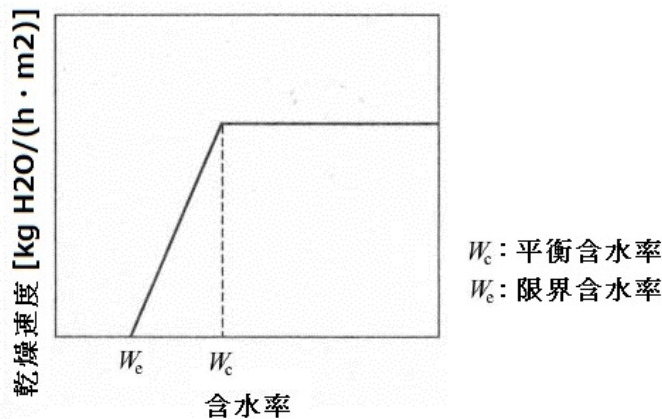


図 7. 粒径の小さな粉粒体の乾燥特性曲線

粉粒状材料はその減速乾燥速度が含水率の減少に比例する場合の計算式は次に示す。

$$R_d = \left[ \frac{w(-dw)}{A d\theta} \right]_d = R_c \frac{F}{F_c}$$

$$F_c = w_c - w_e$$

$R_d$ : 減速乾燥速度[kg/(h·m²)]、 $w_c$ : 限界含水率、 $w_e$ : 平衡含水率、 $F$ : 材料の自由含水率、 $F_c$ : 限界含水率に於ける材料の自由含水率

上記式の  $dF = dw$  であるため、限界含水率  $w_c$  から平衡含水率  $w_e$  までの乾燥時間  $\theta_d$  が次の式から計算できる。

$$\theta_d = \frac{w}{A} \times \frac{F_c}{R_c} \int_{F_c}^{F_e} - \frac{dF}{F} = \frac{w}{A} \times \frac{F_c}{R_c} \ln \frac{F_c}{F_e}$$

$\theta_d$ : 減速乾燥時間 (h)、 $A$ : 乾燥面積 (m²)、 $w$ : 含水率、 $F_c$ : 限界含水率に於ける材料の自由含水率、 $F_e$ : 平衡含水率に於ける材料の自由含水率

材料の必要な乾燥時間は、

$$\theta = \theta_c + \theta_d = \frac{w}{AR_c} \left[ (F_l - F_c) + F_c \ln \frac{F_c}{F_e} \right]$$

#### 4. 乾燥効率

乾燥効率は乾燥機の性能を評価する重要なパラメーターである。乾燥機の乾燥室が熱絶縁で、熱量がすべて水分の蒸発に供し、排気中の水蒸気量はその温度の飽和水蒸気量に等しい場合は、乾燥効率が 100% に達する。実際に熱風を使う通風型乾燥機では乾燥室が完全に熱絶縁に置かれることが不可能で、排気中の水蒸気量も飽和水蒸気量より低いいため、乾燥効率が常に 100% の理想状態より低い。

通常、乾燥効率は次の 2 つの方法で表示する。

#### 4-1. 総熱効率

総熱効率は、蒸発過程に使用された熱量が乾燥機に供した熱量に占める比率である。そのおよその値は下記の式で計算できる。

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0} \times 100\%$$

$\eta$ ：総熱効率、 $t_0$ ：加熱器に導入した外気の温度、 $t_1$ ：加熱した熱風温度、 $t_2$ ：乾燥機からの排気温度

大気温度  $t_0$  が不変の場合は、熱風温度  $t_1$  を高め、排気温度  $t_2$  を低くすれば、総熱効率がよくなる。しかし、熱風温度が高すぎると、乾燥材料の熱による変質の危険、加熱器の設備投資が嵩む等問題が起きる場合もある。また、排気温度が乾燥後の材料の含水率にも関係するため、総合的に検討すべきである。

#### 4-2. 蒸発熱効率

蒸発熱効率は、実際の水分蒸発量が排気温度の理論飽和水蒸気量に占める比率である。およその値は下記の式で計算できる。

$$\eta_s = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_s} \times 100\%$$

$\eta_s$ ：蒸発熱効率、 $t_0$ ：加熱器に導入した外気の温度、 $t_1$ ：加熱した熱風温度、 $t_2$ ：乾燥機からの排気温度、 $t_s$ ：熱風の空気状態 ( $t_1$ 、 $x_1$ ) に於ける水蒸気の飽和温度

総熱効率と同じく、大気温度  $t_0$  と水蒸気の飽和温度  $t_s$  が不変の場合は、熱風温度  $t_1$  を高め、排気温度  $t_2$  を低くすれば、蒸発熱効率がよくなる。問題点も同じである。

## 二、乾燥機の分類と特徴

市販、特注に問わず、乾燥機の種類が多いが、その分類方法は以下のものがある。乾燥室の気圧状態による分類では、常圧乾燥機と真空乾燥機に分けられる。伝熱方式による分類では、伝導型加熱乾燥機、対流型加熱乾燥機、放射型加熱乾燥機、非加熱乾燥機に分けられる。一般的な分類方法は、乾燥室に於ける乾燥材料の挙動によるものである。本書も乾燥時における乾燥材料の挙動による分類方法を採用する。

### 1. 材料静止または搬送型乾燥機

乾燥期間中に乾燥材料がほとんど運動せず、特別の容器に載せて乾燥室に置くか乾燥室内を移動するだけの乾燥機である。箱型乾燥機、棚式乾燥機、トンネル乾燥機、ベルトコンベア型乾燥機、赤外線乾燥機、マイクロ波乾燥機、真空乾燥機等がある。

特徴は、操作が非常に簡単で、乾燥材料が運動しないため、乾燥による材料の破壊を最小限に抑えられる。乾燥にかかる時間が長いが、総熱効率が 40～50% 位。構造がシンプル



で、設備投資が少なく済む。

## 2. 攪拌型乾燥機

材料が乾燥する際に、絶えずまたは間歇に攪拌される乾燥機である。攪拌乾燥機、流動層乾燥機などがある。

特徴は、乾燥材料が攪拌されているため、乾燥にかかる時間が短く、均一に乾燥することができる。攪拌により、材料の衝突が避けず、一部粉化する可能性がある。設備投資がかかる。総熱効率が 30～70% で、乾燥機の設計と操作により大きく異なる。

## 3. 回転型乾燥機

材料が回転している乾燥室内に絶えずに転動しながら乾燥していく乾燥機である。ドラム回転乾燥機、ロータリーキルン等がある。

特徴は、乾燥材料が絶えずに転動しているため、乾燥にかかる時間が短く、均一に乾燥することができる。大量乾燥に適する。総熱効率が 40～70% で、乾燥機の設計と操作により大きく異なる。

## 4. 熱風輸送型乾燥機

乾燥室に投入された材料が熱風に曝され、気流に運ばれながら乾燥していく乾燥機である。噴霧乾燥機、気流乾燥機、粉碎装置付気流乾燥機等がある。

排気方式により、開放式（排気が清浄してから大気に排出する）、半循環式（一部の高温排気を再利用する）、循環式（排気が清浄してから再利用する。有機溶媒の場合に使う）に分けられる。

特徴は、構造がシンプルで、乾燥にかかる時間が非常に短い。粉末状の材料しか処理できない。総熱効率が 20～50% で、他の乾燥方式より劣る。操作が複雑、排気ガスの処理が煩雑である。設備の据付面積が小さくて済むが、設備投資が嵩む。

## 5. その他の乾燥機

これは、外部からの加熱に依存せず、真空の状態で材料中の水分の沸点を低下させることにより蒸発または昇華させる乾燥機である。真空乾燥機、真空凍結乾燥機などがある。

特徴は、低温乾燥であるため、熱に敏感な物質または風味等の品質要求される物質の乾燥に適する。乾燥に時間がかかり、総熱効率が悪く、設備投資が嵩む。食品や医薬に多用される。常用乾燥機の特徴と総熱効率等のパラメーターは表 1 に示す。

乾燥機の選択は下記のルールに従って行う。

- ① 乾燥材料の形状： 原形のまま、塊、粉、粒子形状など
- ② 乾燥材料の物性： 親水性、多孔性、熱反応性、粘着性、融点など
- ③ 乾燥効率： 材料の含水率、乾燥後の含水率、乾燥量、乾燥速度など

## ④ 乾燥装置： 乾燥量、据付面積、操作性、加熱方式、投資可能金額など

表 1. 常用乾燥機のパラメーター

名 称	伝熱方式	材料の運 動方式	操作方式	乾 燥 材 料種類	総 熱 効 率 (%)	その他
箱型乾燥機	対流、伝 導	静止	常圧、真空、 バッチ	原形	10～30	
ベルトコンベ ア乾燥機	対流、伝 導	移動	常圧、連続	原形、粒 子	20～40	大量乾燥
トンネル乾燥 機	対流、伝 導、放射	静止、移 動	常圧	原形	40～50	大量乾燥
固定タンク攪 拌乾燥機	対流、伝 導	攪拌	常圧、真空、 バッチ、連続	粉、粒子	50～70	
ドラム回転乾 燥機	対流、伝 導	転動	常圧、バッチ	粉、粒子	50～70	
ロータリーキ ルン	対流、伝 導、 放射	転動	常圧、連続	粉、粒子	40～50	大量乾燥
流動層乾燥機	対流	転動	常圧、連続、 バッチ	粉、粒子	40～70	乾燥時間短 い
噴霧乾燥機	対流	熱風輸送	常圧、連続	粉、微粒 子	20～50	乾燥時間非 常に短い
攪拌熱風乾燥 機	対流、伝 導	熱風輸送	常圧、連続、 バッチ	粉、粒子	50～70	乾燥時間短 い
気流乾燥機	対流、伝 導	熱風輸送	常圧、連続、 バッチ	粉、微粒 子	30～50	乾燥時間非 常に短い
赤外線乾燥機	放射	静止、移 動	常圧、連続、 バッチ	原形	40～50	
マイクロ波乾 燥機	放射	静止、移 動	常圧、真空、 バッチ	原形	<40	
真空乾燥機	伝導	静止	真空、バッチ	原形		乾燥時間長 い
真空凍結乾燥 装置	伝導	静止	真空、バッチ	粉	<40	乾燥時間長 い

化成肥料の生産工程では、造粒された粒子は 2～4mm の小粒子がほとんどで、大量連続

乾燥が必要である。従って、乾燥にはロータリーキルン、ベルトコンベア乾燥機、流動層乾燥機が多用される。

### 三、ロータリーキルン

ロータリーキルン (rotary kiln) は、図 8 に示すように一定の傾斜角度に設置される直径 1~4m、長さ 10~30m の円筒で構成される乾燥機である。乾燥材料が高い側から投入され、円筒の回転により筒壁に沿って転動しながら低い側へ移動する。この移動の過程に筒内の熱風および筒壁に接触して、対流と伝導で加熱され、水分を蒸発する。主に粉・粒状物の乾燥に使われる。図 9 はロータリーキルンの実物写真である。

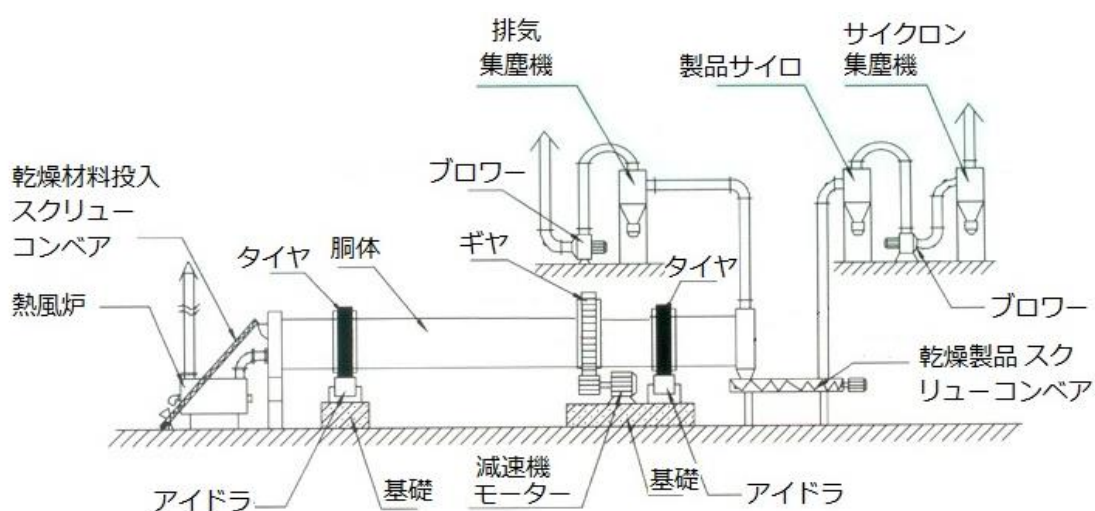


図 8. ロータリーキルン構造概略図



図 9. ロータリーキルン写真

ロータリーキルンの特徴は、円筒内の乾燥空間が大きく、乾燥材料の転動抵抗が小さく、乾燥量が多く、投入量、温度、風量等運転条件の許容範囲が広く、連続作業で大量乾燥に適する。構造簡単、操作便利、運転コストが低い。但し、設備の据付面積が広く、伝動部品が多く、メンテナンスが煩雑である。また、粘着性の高い材料は乾燥中に胴壁やプレートに粘着して、乾燥効率を下げ、品質に影響する恐れもあり、不適である。

ロータリーキルンは加熱方式により次の2種類がある。

### 1. 直接加熱式（内熱式）ロータリーキルン

材料は円筒内に導入した熱風の対流による加熱乾燥である。総熱効率がやや高い。熱風の流れにより次の4つに分けられる。

**1-1. 併流式ロータリーキルン：** 熱風の流れは乾燥材料の流れと同方向である。キルンの入り口付近で、材料の含水率が最大で、熱風温度も最高で、水の蒸発量が多い。排出口付近では材料の含水率が最少で、熱風温度も低くなり、蒸発能力が次第に低くなった。乾燥材料が排出口に到着する前に平衡含水率に達した場合は、排気温度が100℃未満に設定することも可能であるが、材料の出口温度より10～20℃高いに設定されるべきである。

**1-2. 向流式ロータリーキルン：** 熱風の流れは乾燥材料の流れと反対方向である。キルンの入り口では含水率の最も高い材料が温度の低い熱風と接触して、排出口付近では含水率の低い材料は温度の高い熱風に出会う。乾燥過程における蒸発能力が次第に高くなり、一定の蒸発量を維持できる。水の沸点を考慮して、排気温度が100℃以上に設定されることが多い。乾燥効率が併流式より高い。

併流式と向流式ロータリーキルンの概略は図10に示す。

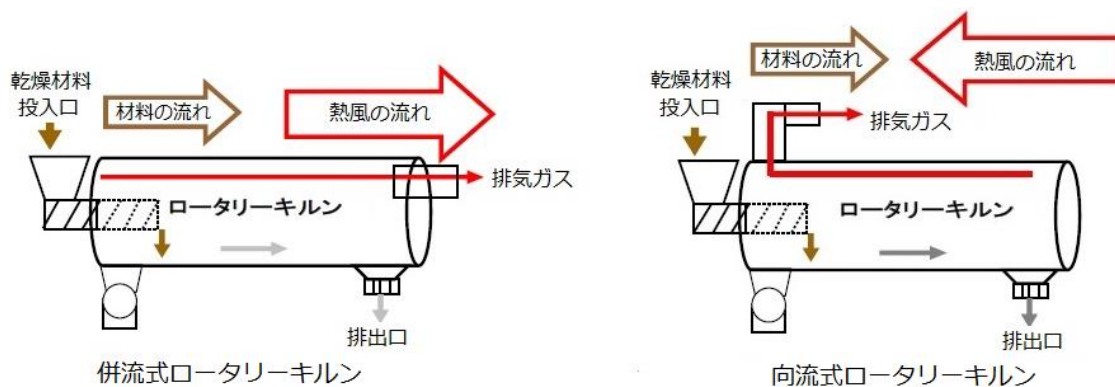


図10. 併流式と向流式ロータリーキルンの構造概略

**1-3. シャッター式ロータリーキルン：** 円筒は内外の2重胴体で、内筒の壁に多数のシャッターまたは穴を設けて、熱風が外筒に導入して、シャッターまたは穴から内筒に吹き込まれ、材料の乾燥を行う。粒状、シート状、塊状の脆い材料や熱に敏感な材料、例えばコークス、砂糖、圧片大豆、押し麦等の乾燥に使用される。その構造概略は図11に示す。



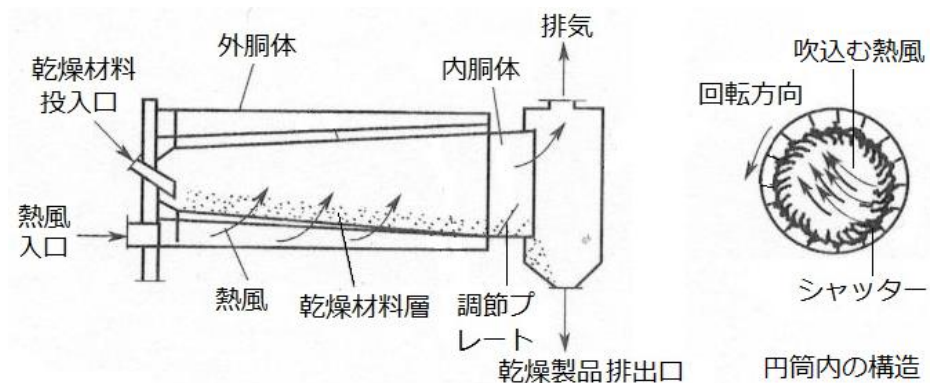


図 11. シャッター式ロータリーキルン構造概略

**1-4. 通気管式ロータリーキルン：** 円筒の中央に熱風管が設置され、一定の距離毎に分岐管を出し、先端に数個の穴を開き、乾燥材料層に差し込む。胴体が回転するが、熱風管とその分岐管が回転しない。導入された熱風が分岐管を通して材料層に吹き込み、材料と接触して乾燥を行う。

通気管式ロータリーキルンは通常のロータリーキルンに比べ、熱伝導係数が高いため、同様の乾燥能力の場合、円筒の直径と長さを小さくすることができる。その構造概略は図 12 に示す。

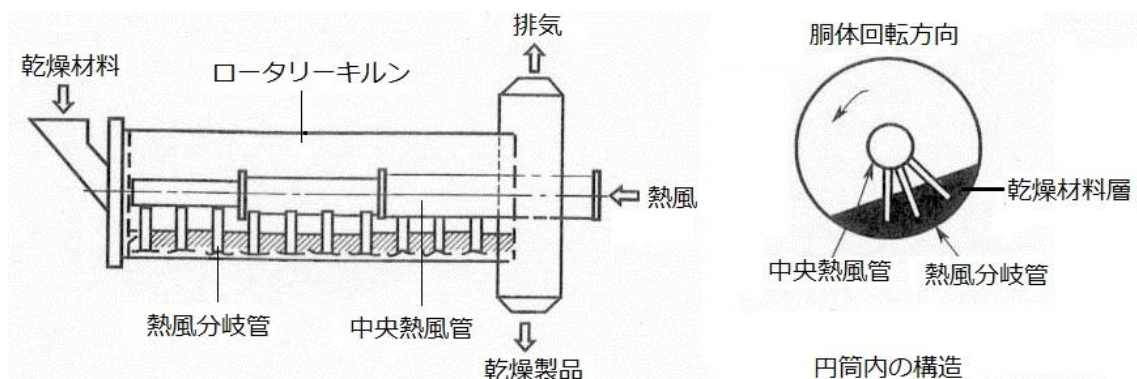


図 12. 通気管式ロータリーキルン構造概略

## 2. 間接加熱式（外熱式）ロータリーキルン

胴体が内外の 2 重円筒状で、内筒に熱風、蒸気等の熱媒体を流し、内筒を加熱する。乾燥材料は外筒に投入され、内筒壁との接触による熱伝導および内筒壁からの放射熱を受け乾燥される。熱媒体（熱風等）が乾燥材料に直接に接触しない。乾燥過程が穏やかで、異物混入を許さない、熱敏感性、減速乾燥期間の長い材料の乾燥に適する。また、乾燥材料からの排気ガスが少なく、処理が簡単で、汚泥、廃棄物の乾燥にもよく使われる。総熱効率が劣るが、熱媒体に対する要求が緩く、熱風、蒸気のほか、ボイラ、焼却炉等の排熱も利用できる。回収された熱媒体を再加熱して、繰り返し使用することもできる。その構造概略は図 13 に示す。

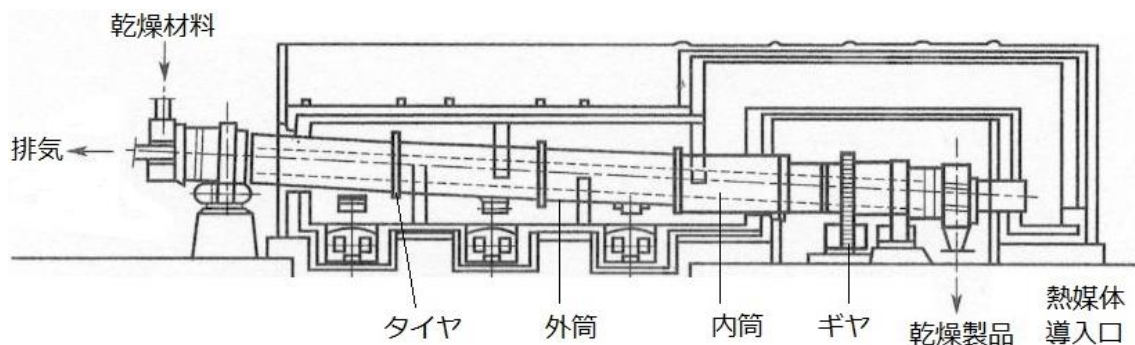


図 13. 間接加熱式ロータリーキルン構造概略

なお、熱効率を高めるため、3重円筒状の胴体を有し、内筒を通した熱媒体を外筒に還流させ、乾燥材料を内筒と外筒の間に投入して、内筒と外筒両方からの熱で乾燥するロータリーキルンもある。

ロータリーキルンは構造簡単、操作便利、連続作業で大量乾燥に適し、運転コストが低いため、大手化成肥料メーカーは製品の乾燥にはほとんど直接加熱式ロータリーキルンを使用する。

### 3. ロータリーキルンのパラメーター

#### 3-1. 胴体

円筒はロータリーキルンのもっとも重要な部品である。胴体に一定の剛性と強度、耐腐食性を要するため、鋼鉄製である。その設計のパラメーターは次に示す。

##### 3-1-1. 胴体直径

胴体内部空間の直径は次の式で計算する。

$$D = \sqrt{\frac{4L(1+x_2)}{v\pi}}$$

$D$  : 胴体内径 (m)、 $L$  : 熱風消費量 (kg/s)、 $x_2$  : 排気の湿度 (kg/kg 空気)、 $v$  : 熱風流量 (kg/(m<sup>2</sup>・s))

##### 3-1-2. 胴壁の厚さ

胴壁の厚さが直径にある程度比例してある。直接加熱式ロータリーキルンは胴体から熱の散逸を防ぎ、熱効率を上げるため、通常、内壁または外壁に断熱材でコーティングしてある。間接加熱式ロータリーキルンは内側の円筒壁面の伝熱性をよくするため、断熱材のコーティングがない。また、仕様によりコーティングしない胴体もある。表 2 は断熱材のある胴壁の厚さ（断熱材の厚さを除外）と直径との関係、表 3 は断熱材のない胴壁の厚さと直径との関係を示す。但し、タイヤ部位とギヤ部位が胴体の重量を支えるため、その厚さが 2 倍にする。



表 2. 断熱材のあるロータリーキルンの胴壁厚さと直径との関係（断熱材の厚さを除外）

胴体内径(m)	1.4～1.8	1.8～2.4	2.4～2.6	2.6～3.0	3.0～3.6	3.6～4.0
胴体厚さ(mm)	14	16	18	20	22	24

表 3. ロータリーキルンの胴壁厚さと直径との関係（断熱材なし）

胴体内径(m)	<1	1.2～1.4	1.4～2	2～2.6	2.6～3	3～3.6	3.6～4
胴体厚さ(mm)	8	10	12	14	16	18	20
タイヤ部位厚さ(mm)	16	20	24	28	32	36	40

### 3-1-3. 胴体の長さ

胴体の長さは乾燥材料の物性、加熱条件、乾燥能力、胴体の直径に関係する。通常、胴体の長さは直径の 4～12 倍にするように設計する。胴体の直径が大きいほど、乾燥材料が円筒内の転動距離が長く、通過にかかる時間が長くなり、胴体の長さが小さな倍率を選択する傾向がある。

### 3-1-4. 胴体の傾斜度

一部の大型ロータリーキルンを除き、胴体の傾斜度は 1～8° の範囲で調節可能に設計されている。通常、傾斜度を 1.5～3.0° に設定することが多く、6° を超えることを稀である。

### 3-1-4. 胴体の回転数

円筒の回転数は 1～8r/min の範囲で調節可能である。通常、胴体外周の線速度を 1m/s を超えないように回転数を 1～3r/min に設定する。概して、直径の大きいロータリーキルンはその回転数を小さくする。

### 3-1-5. 胴体の回転動力

ロータリーキルンの回転に必要なパワーは円筒自身の回転にかかる動力、乾燥材料の転動にかかる動力、回転ギヤの摩擦を克服する必要な動力、減速機と回転装置の動力損失の合計である。

#### ① 胴体回転の動力 P1

$$P1 = 1.37 m_T^2 D_m^2 n^2 \quad (\text{kw})$$

$m_T$ : 胴体重量 (付属品を含む) (kg)、 $D_m$ : 胴体平均外径 (m)、 $n$ : 胴体回転数 (r/min)

#### ② 乾燥材料の転動に必要な動力 P2

$$P2 = 9.8 \times 10^{-3} D^3 L \rho_s n (c_1 \sin \varphi + c_2 D n^2) \quad (\text{kw})$$

$D$ : 胴体内径 (m)、 $L$ : 胴体の有効長さ (m)、 $\rho_s$ : 乾燥材料の堆積密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $c_1$ : 乾燥材料の充填係数  $c_1 = 4.57 \times 10^{-3} \sin \theta^2$ 、 $c_2$ : 乾燥材料の充填係数  $c_2 = 9.61 \times 10^{-7} (1$

$-\cos \theta^4$ 、 $\theta$ ：円筒中心と乾燥材料堆積面の角度（°）、 $\varphi$ ：乾燥材料の安息角（°）

### ③ 回転ギヤの摩擦力を打ち消す動力 P3

$$P3 = 0.51 \times 10^{-3} D_T n (m_T + q_m) \left( \mu \frac{DB}{DR} \right) \cos \gamma_d / \cos \alpha_z \quad (\text{kw})$$

$D_T$ ：タイヤ直径（m）、 $DB$ ：ギヤ軸直径（m）、 $DR$ ：ギヤ直径（m）、 $q_m$ ：円筒内の材料重量（kg）、 $\mu$ ：軸受の摩擦係数（油潤滑は 0.018、グリース潤滑は 0.06）、 $\gamma_d$ ：胴体傾斜角（°）、 $\alpha_z$ ：タイヤとギヤの接触角（通常 30°）

### ④ 減速機と回転装置の動力損失 P4

ロータリーキルンの回転に必要な動力  $P = P1 + P2 + P3 + P4$

## 3-2. 攪拌プレート

乾燥効果を強化するため、一部のロータリーキルンの胴体内に攪拌プレートを設けてある。攪拌プレートの役割は乾燥材料を均一に円筒内に分散して、熱風との接触を強化し、熱効率を上げる。

常用のプレート形状は次の種類がある。

- ① フラット型プレート： 真っ直ぐの板状プレートが内壁と直角を形成しているため、材料を持ち上げる高さが低く、衝撃が少ない。密度が高く、脆い塊に適する。
- ② ヘ字型プレート： プレートがへ形の形を呈するため、フラット型より材料を高く掬い上げ、円筒内に均一に分散させる。粉粒状と分散しやすい小さな塊に適する。間接加熱式ロータリーキルンに多用される。
- ③ 』字型プレート： プレートが中央で 90° に折り、』の形を呈する。乾燥材料を高く掬い上げて、最高点を超えてから落下分散させる。大きな塊と粘結性材料に適する。但し、充填率が低く、10～20%しかない。
- ④ 格子桁型プレート： 互いに隔離している格子の形をしているプレートで、乾燥材料を格子桁の高さしか落下できず、落下の衝撃を最小限に抑える。粉じんの生じやすい材料に適する。
- ⑤ 転動型プレート： プレートが蝶番で内壁に固定され、胴体の回転により片方向に揺れることができる。乾燥材料の落下衝撃を抑え、粉じんの生じやすい材料に適する。
- ⑥ 組み合わせ式プレート： 乾燥材料の物性、乾燥要求に合わせて、円筒内に 2 種類以上のプレートを組み合わせて設置する。例えば、粘結性材料の乾燥には投入口に近い前半部に 』字型プレート、後半部に粉じんの発生と飛散を抑えるために格子桁式プレートを設置するなどである。

常用の攪拌プレートの形状は図 14 に示す。プレートを装着してある胴体の写真は図 15 に示す。



図 14. ロータリーキルンによく使われる攪拌プレートの形状



図 15. J字型プレートを有するロータリーキルン写真

### 3-3. 乾燥材料の充填率

ロータリーキルン内の乾燥材料充填率は胴体内の材料体積が円筒の有効体積空間を占める比率である。通常、乾燥材料の充填率が 25%以下で、大体 8~13%である。充填率は直接加熱式が高く、間接加熱式がやや低く設定される。

胴体内に熱風を流さない間接加熱式ではその適宜充填率が次の式から計算する。

$$\phi = \frac{k_0 F}{n S_d D}$$

$\phi$  : 充填率 (%)、 $F$  : 単位断面積の乾燥材料供給速度 ( $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、 $n$  : 胴体回転速度 ( $\text{r/min}$ )、 $S_d$  : 胴体の傾斜度 ( $\text{m/m}$ )、 $D$  : 胴体内径 ( $\text{m}$ )、 $k_0$  : 係数 (プレートの形状、プレート数、プレート持上げ量、材料の安息角、胴体回転速度等に関係する。 $k_0$  の計算式 :  $k_0 = 0.14(1+3.4Z_a^{1/2})(1+5.4F_r^{2/3}) / (1+0.33G_a^{1/2})$

$$Z_a = N_F A\phi / (\pi D^2 / 4)$$

$$F_r = (\pi D n)^2 / Dg$$

$$G_a = d_p^3 \rho_g^2 g / \eta_g^2$$

$D_p$  : 材料の平均粒径 ( $\text{m}$ )、 $\rho_g$  : 気体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $\eta_g$  : 気体粘度 ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ )、 $N_F$  : プレート枚数、 $A\phi$  : プレートの材料持上げ量

一方、胴体内に熱風を流す直接加熱式では、その適宜充填率は

$$\phi = 18.9 Z_a^{0.4} = \pi/4$$

である。

#### 4. ロータリーキルンの選択

ロータリーキルンを使う乾燥工程には、その乾燥材料に適合するロータリーキルンの選択が重要である。その選択条件は下記の2つである。

##### 4-1. 乾燥材料の異物混入に対する許容値

乾燥材料は乾燥過程に微量の異物混入を許容する場合は、総熱効率の良い直接加熱式ロータリーキルンを選択すべきである。異物混入を厳しく制限する場合は、間接加熱式ロータリーキルンしかない。

##### 4-2. 乾燥材料の物性

水分が多く、乾燥速度が速くても問題せず、熱敏感性の材料を乾燥するには、並流式ロータリーキルンを選択する。並流式ロータリーキルンは初期蒸発量が大いだが、次第に乾燥温度が下がり、蒸発量も減るため、乾燥による材料の亀裂発生や焦げが少なく、熱による変質も抑えられる。但し、乾燥後の含水率がやや高い。一方、向流式ロータリーキルンは蒸発速度の遅い多孔質で、耐高温の材料に適する。

ロータリーキルンは連続乾燥作業に最適である。また、円筒内の操作圧力は負圧と正圧に分けられるが、負圧の場合は、乾燥材料の水分蒸発が速く、粉じん発生量も少ないため、乾燥効果が正圧より優れている。

### 四、 ベルトコンベア乾燥機

ベルトコンベア乾燥機 (belt conveyor dryer) は、乾燥室にベルトコンベアを設置して、乾燥材料を一定の厚さでベルトに敷いて、乾燥室を通る間に加熱し、乾燥させる設備である。その特徴は、乾燥材料がほぼ静止状態で乾燥されるため、衝撃による破碎・粉化が抑えられ、粉じんの発生量が少ない。乾燥率はベルトの運行速度と乾燥室の温度調整により制御され、均一に乾燥することができる。構造が簡単で、据付面積が少なく、メンテナンスが楽である。肥料粒子の乾燥にも多く使用される。ただし、粉末状材料の乾燥には不適である。

ベルトはステンレス製のパンチパネル (多孔板)、金属網、薄板で、一定の強度と耐熱性を有する。

#### 1. 乾燥原理

乾燥材料はフィーダーでベルトに均一の薄い層になるように撒き、乾燥室に送る。乾燥室には熱風等の熱媒体を流して、材料を加熱し、水分を蒸発させる。熱の伝え方は熱風の対流と加熱されたベルトから材料への熱伝導によるものである。熱風の流動方向により吹上げ式、吹き下ろし式、水平流動式に分けられる。それぞれの概略を図 16 に示す。

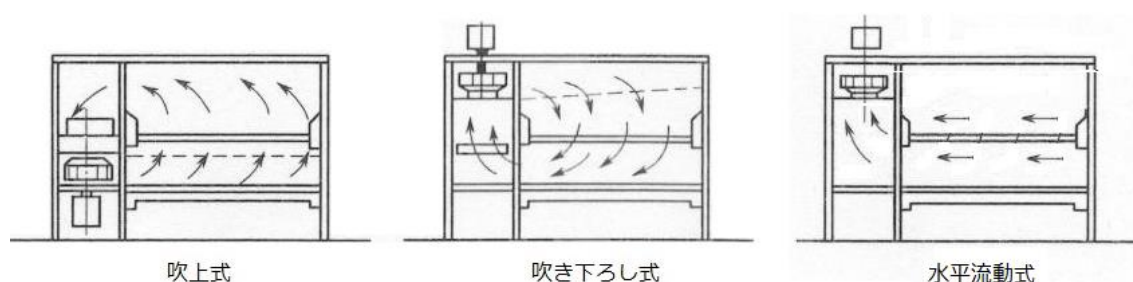


図 16. ベルトに載せている乾燥材料に対する熱風の流動方向

ベルトコンベア乾燥機は乾燥ベルトの段数により単段、多段、乾燥室の数により単室と多室、排気方式により並流排気、向流排気、単独排気に分けられる。肥料乾燥は多段、単室、向流排気型のベルトコンベア乾燥機が多用される。

### 1. 単段ベルトコンベア乾燥機

単段ベルトコンベア乾燥機はベルトが一段で、乾燥室が幾つかに仕切られる多室、単独排気型のものが多い。乾燥材料はベルトに投入してから数個の乾燥室を通して乾燥される。各乾燥室が熱風の加熱装置と循環システムを有し、独自に熱風温度と風量を調節することができる。ベルトが通る際に熱風が上昇、降下の形で材料を通し、熱を伝え、水分を蒸発させる。乾燥機の後端に冷却室を設けて、外気を導入して乾燥した材料を冷却するところが多い。

特徴は、乾燥材料の特性に合わせて乾燥室ごとに熱風温度と流量、吹き方向を調節することができる。ベルト走行距離の制限で、大粒や塊の材料乾燥に適しない。DW 型単段ベルトコンベア乾燥機の構造概略は図 17 に示す。

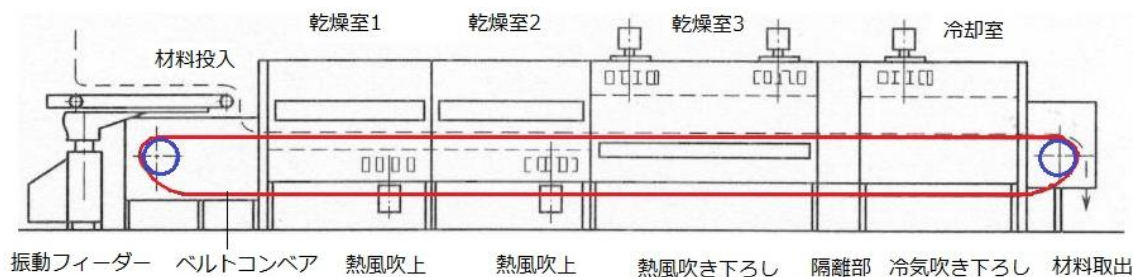


図 17. DW 型単段ベルトコンベア乾燥機の構造概略

### 2. 多段ベルトコンベア乾燥機

多段ベルトコンベア乾燥機はベルトが 3～10 段で、乾燥室が単室のものが多い。乾燥材料は投入口から 1 段目のベルトに均一に投入して、ベルトの走行に伴い、乾燥室の端に到着してから次の段のベルトに落下して、逆走行して乾燥室の反対端に到着してからまた次の段のベルトに落下する。数回の繰り返りで、材料が乾燥される。通常、肥料乾燥の場合にはベルトの幅が 1200～2600mm、3～5 段で、総延長が 15～50m のものが多用される。



特徴は、各段のベルトが短いが、数段構成で総合走行距離が長く、乾燥時間が確保できる。各段のベルトの走行速度をそれぞれ制御しているため、材料の乾燥要求に応じて乾燥時間を設定できる。総熱効率が低い。立体構造のため、乾燥室を小さくすることができる。乾燥速度が遅く、乾燥に時間がかかる材料に適する。多段ベルトコンベア乾燥機の構造概略は図 18 に示す。

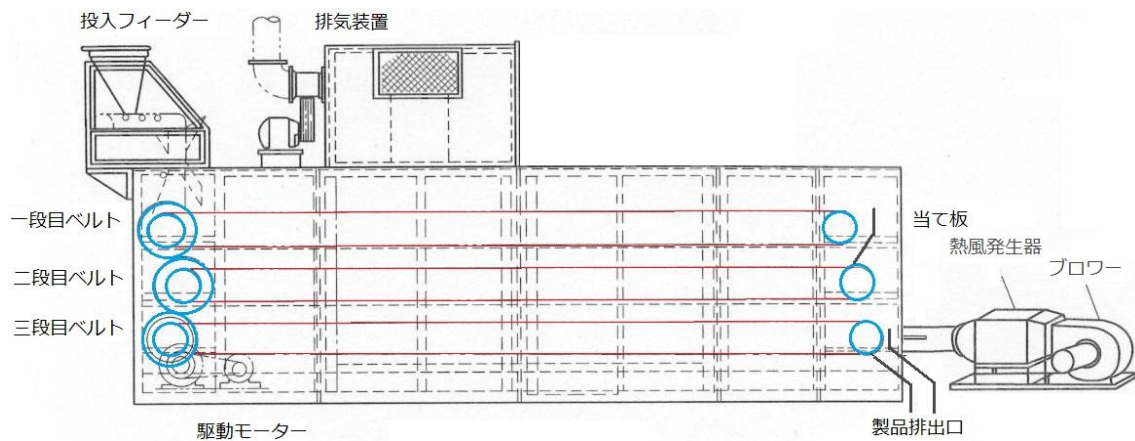


図 18. 三段式ベルトコンベア乾燥機

中小化成肥料メーカーは製品乾燥に 3～5 段のベルトコンベア乾燥機を多用している。

## 五、流動層乾燥機

流動層乾燥機（fluidized bed dryer）は、円柱型、円錐型または箱型の乾燥室の下部から熱風を送り込み、乾燥材料を空中に巻き上げるにより流動層を形成し、熱風の熱が伝導と対流で材料に伝え、水分を蒸発させる。

流動層乾燥機の基本構造は図 19 に示す。

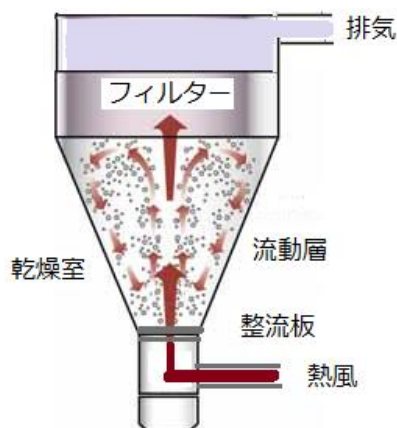


図 19. 流動層乾燥機の基本構造

流動層乾燥機の動作原理、構造と流体力学計算、パラメーター等は、本書の「造粒」章



の「5. 湿式造粒—流動層造粒法」節を参照ください。

流動層乾燥機の特徴は、

- ① 伝熱率が高い。乾燥室内に熱媒体と材料と激しく混合し、接触面積が非常に高い。熱伝導係数が  $8000 \sim 25000 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$  に達し、乾燥時間が短い。
- ② 乾燥室の密閉性能が非常に高い。乾燥材料は熱媒体以外のものに接触しないため、異物の混入を防ぐことができる。食品、医薬品等の品質要求が厳しい材料の乾燥に最適する。
- ③ 乾燥材料が絶えずに運動して、層内温度を均一に保持しやすく、かつ任意に調節できるので、品質の劣化、乾燥ムラが少ない。
- ④ 乾燥材料の物性と要求に応じて、乾燥時間、熱風温度を簡単に調節することができる。
- ⑤ 構造がシンプルで、可動部分がほとんどなく、安定運転が容易で、メンテナンスが楽である。

欠点としては、

- ① 乾燥材料の粒度に制限があり、大体  $30 \mu\text{m} \sim 6\text{mm}$  の粒度を要求する。 $30 \mu\text{m}$  以下の粒子は排気と一緒に排出されやすい。 $6\text{mm}$  以上の粒子は流動しにくい。
- ② 含水率が高く、粘着性の強い材料の乾燥に適しない。乾燥中に乾燥室の壁に付着して、乾燥機の運転に支障が出る。
- ③ 粉化しやすい材料に適しない。乾燥中に材料粒子が互いに衝突による粉化し、粉じんが排気ガスと一緒に排出され、配管の摩耗、集塵装置に負荷をかけ、故障が発生しやすい。

りん安、硝酸化成肥料、大粒尿素は流動層乾燥機を使うことが多い。

流動層乾燥機は用途に応じて種類が多いが、その操作方式により連続式とバッチ式に大別され、構造により単層式、多層式、攪拌式、横型多室式、噴霧式、振動式、パルス式、密閉循環式、回転式等に分けられる。以下は肥料生産に使用される流動層乾燥機だけを述べる。

### 1. 単層式流動層乾燥機

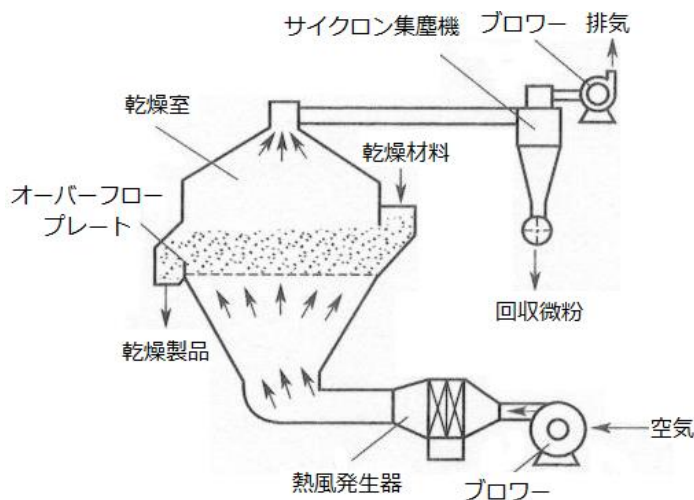


図 20. 単層流動層乾燥機構造概略

単層流動層乾燥機は、乾燥室が円柱形または円錐形を呈し、熱風が乾燥室の下部から導入して、上へ吹上ることにより乾燥材料を巻き上げ、流動層を形成する。流動層が 1 層だけで、層の高さが 300~400mm に設定されることが多い。通常、整流板面積当りに熱風導入口 3~12kg/h、水分蒸発量 500~1000kg/h に設計されている。硫安、塩安等の微細結晶の乾燥に多用される。その構造概略は図 20 に示す。

## 2. 攪拌装置付き単層式流動層乾燥機

単層流動層乾燥機の乾燥室に攪拌装置を取付ける。乾燥材料の種類により攪拌プレートの段数は 1 段と 2 段がある。特徴は乾燥材料がプレートの攪拌作用により分散されながら熱風の吹上を受け、乾燥を加速する。水分が多く、粘結性の高い材料の乾燥に適する。りん酸一安、塩安等の乾燥に使用される。その構造概略は図 21 に示す。

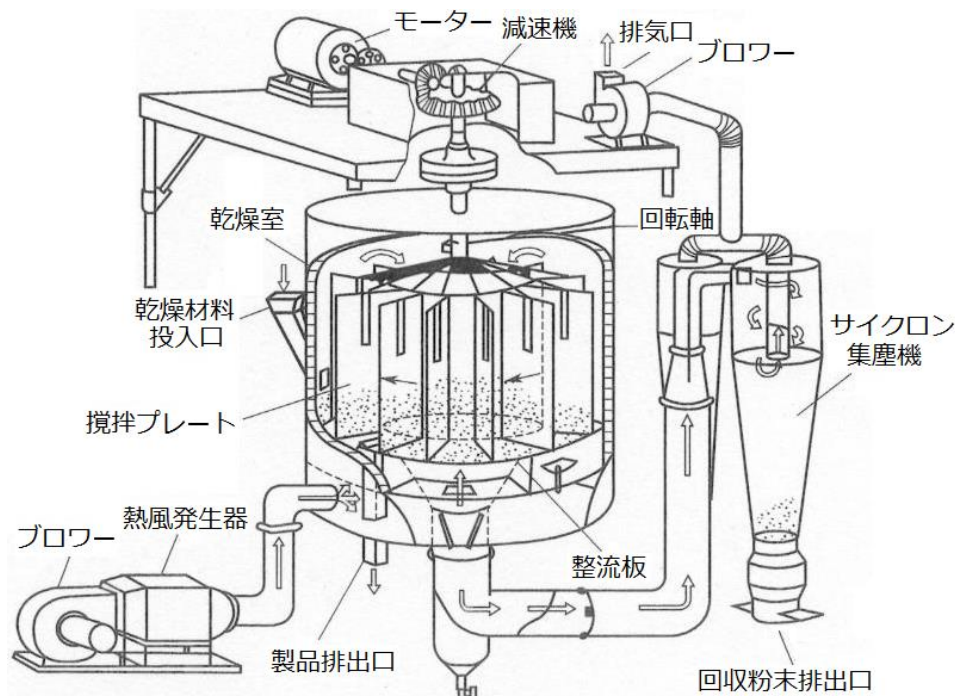


図 21. 攪拌式単層流動層乾燥機構造概略

## 3. 横型流動層乾燥機

乾燥室が矩形で、底には長方形の整流板を有し、多数の $\phi 1.5 \sim 2.0 \text{mm}$  孔を開けて、開口率が 4~13%である。整流板の上方に一定間隔で垂直の中仕切りを設け、数個の小部屋に分割する。通常、各小部屋の下にそれぞれ熱風管を設置し、最後の小部屋に外気を導入して、乾燥した材料を冷却するいわゆる冷却室にする。特徴は、乾燥材料の特性により各小部屋の熱風温度と流量を制御することができ、乾燥効率がよい。化成肥料、特に吸湿性が強く、固結しやすい尿素／りん安系化成肥料の乾燥に使用される。その構造概略は図 22、実物写真は図 23 に示す。

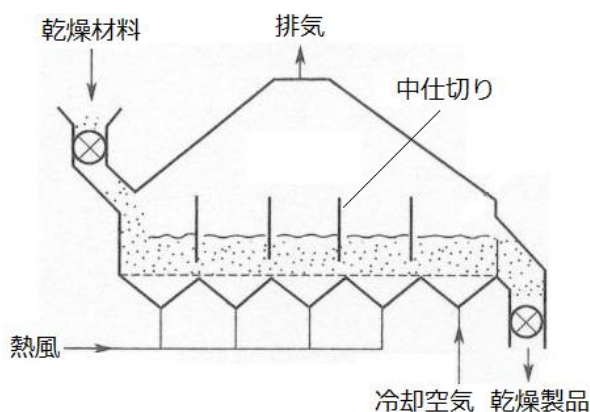


図 22. 横型流動層乾燥機構造概略



図 23. 横型流動層乾燥機写真

#### 4. 多層式流動層乾燥機

多層式流動層乾燥機は、乾燥室が上下に 2 層以上に分けて、それぞれ熱風を導入する。上の乾燥室に投入した材料が一定程度乾燥されてから軽くなって、オーバーフローパイプを通して下の乾燥室に落ち、さらに熱風により乾燥される。特徴は、設備据付面積が小さく、各乾燥室の熱風温度が調節でき、材料のサイズに問わず均一に乾燥される。その構造概略は図 24 に示す。

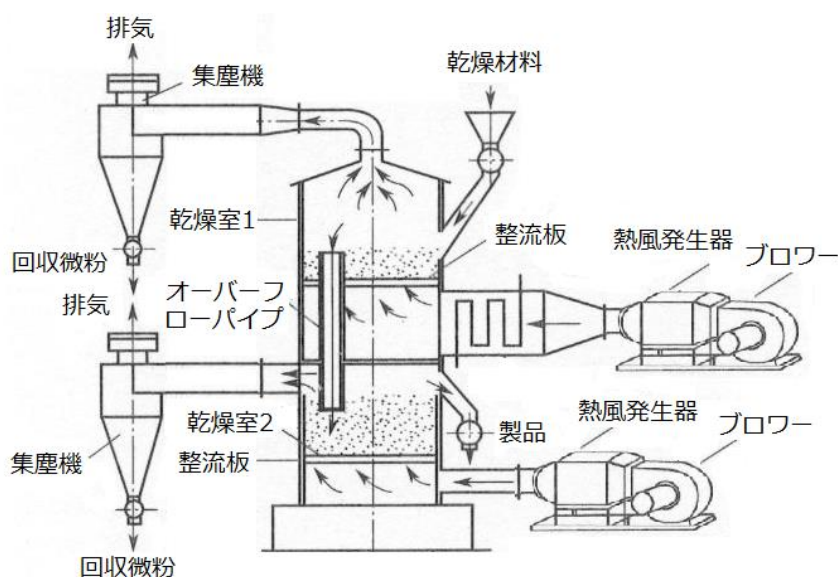


図 24. オーバーフローパイプ式 2 層流動層乾燥機構造概略

### 六、 その他の乾燥機

上述ロータリーキルン、ベルトコンベア乾燥機、流動層乾燥機のほか、構造や乾燥メカニズムの異なる乾燥機も多数ある。肥料製造にほとんど使用されていないため、簡単の紹介に留める。詳細はほかの成書を参考ください。

#### 1. 箱型乾燥機 (cabinet dryer)

箱型の乾燥室に棚を設け、乾燥材料をトレーに敷いてから棚に載せ、熱風と接触して乾燥する。バッチ式で、熱風温度と乾燥時間が容易に調整する。乾燥能力と総熱効率が低い。乾燥過程に材料の移動がなく、粉化しやすい材料、魚介類、野菜等姿の保持が必要な材料の乾燥に使われる。

## 2. トンネル式乾燥機 (tunnel dryer)

乾燥室が長いトンネル状にしている乾燥機である。乾燥材料を台車の棚に載せて、トンネルを通過する間に熱風と接触して乾燥する。連続乾燥式で、トンネル内に熱風の流動方向は並流式、向流式、混合流式に分けられる。セラミック原料と製品の乾燥に多用される。

## 3. 攪拌式乾燥機 (agitated trough dryer)

横にした矩形または円筒形の乾燥室に攪拌装置を設けている乾燥機である。乾燥材料を乾燥室に投入し、攪拌ブレードの回転により排出口へ移動する過程に熱風による乾燥される。農業分野では飼料や堆肥の乾燥に使用される。

## 4. 気流乾燥機 (pneumatic conveying dryer)

乾燥室がパイプ状のドライングチェンバーで、ブロワーにより発生した圧縮空気はヒーター等により所定の温度まで加熱され、ドライングチェンバーに導入される。ケーキ・スラリー状の水分を多く含む乾燥材料がノズルよりドライングチェンバーに超音速で噴射され、高速・高温の気流中で瞬間的に分散・乾燥を行う乾燥機である。わずか2〜3秒の高速乾燥が可能で、フラッシュジェットドライヤーとも呼ばれる。乾燥された粉体は空気輸送され、ドライヤー上部に取り付けられた分級部で乾燥品と未乾燥品に分離され、乾燥品のみ製品としてサイクロン、バグフィルターで回収される。でん粉、塩などの粉末状材料の乾燥に使われる。

## 5. 噴霧乾燥機 (spray dryer)

噴霧乾燥機は、円筒状または円錐状の乾燥室に熱風を導入して、液体またはペースト、スラリーのような微粒子懸濁液を熱風中に噴霧して分散させ、熱風との接触で水分を急速に蒸発させて、乾燥粉体を得る乾燥機である。噴霧器は回転円板式、加圧ノズル式が常用される。乾燥室に熱風の流動方向は併流式、向流式、複合流式がある。乾燥した粉体粒子は粒径30〜500 $\mu\text{m}$ のもので、サイクロン集粉機で回収する。乾燥時間が数秒間の短い時間で終わるため、熱変性が少なく、コーヒー、ミルク、調味料等の食品のほか、洗剤、化学薬品、合成樹脂等の乾燥にも広く使用される。

## 6. 赤外線乾燥機 (Infrared ray dryer)

赤外線乾燥機は、赤外線で暖められた物質が内部の水分が加熱され、蒸気となって外部



へ散逸する現象を利用して乾燥を行う装置である。乾燥室にある材料に赤外線を照射させ、吸収された赤外線が材料内部の水分を蒸発させ、負圧吸引で水蒸気を外部に放出し、乾燥を行う。農業分野では、収穫されたもみ、小麦、トウモロコシなど穀物の乾燥に使われる。

#### 7. 真空乾燥機 (vacuum cabinet dryer)

真空乾燥とは、高い山頂など気圧の低いところでは、水が 100℃以下でも沸騰し、蒸発するという現象を利用して、密閉容器を減圧して水分を蒸発させ、乾燥する。真空乾燥機は、真空ポンプで乾燥室内の気圧を下げて、真空に近い状態にして、中にある乾燥材料の水分を蒸発させ乾燥を促進している。加熱が必要であるが、通常 100℃以下の低い温度で乾燥を行うため、乾燥しにくい多孔質体、熱に弱い材料、食品類の乾燥に使用される。

#### 8. 真空凍結乾燥装置 (vacuum freeze drying equipment)

真空凍結乾燥とは、凍結させた乾燥材料を真空状態にして、氷となった水分を昇華させて、乾燥を行う。真空凍結乾燥装置は、まず乾燥材料を凍結させてから気密性の乾燥室に入れ、真空ポンプで排気して真空状態（気圧 13～100Pa、この気圧では水の沸点が-20～-50℃に低下する）にする。材料中の水分を氷の状態から直接水蒸気に昇華させる。水蒸気をバキュームして取り除き、材料を乾燥する。真空凍結乾燥装置は熱に変質しやすい医薬品、食品、生体の乾燥に利用される。

#### 9. マイクロ波乾燥機 (microwave dryer)

マイクロ波加熱乾燥とは、家庭で日常に使われている電子レンジとして親しまれている加熱装置を利用する乾燥である。マイクロ波加熱は誘電加熱の一種で、水分子はマイクロ波により振動し発熱する。これは、放射伝熱による内部加熱であり、水分子に直接働きかけるため、加熱にかかる時間が大幅に短縮されること、熱伝導や対流の影響がほとんど無視できること、特定物質を選択的かつ急速・均一に加熱できることなどの特徴があり、特に水分を多く含む材料の加熱に有効である。

マイクロ波乾燥機は、波長 2.45GHz のマイクロ波を利用して、被乾燥物を加熱し、水分を蒸発させ、減圧で水蒸気を取り除き、乾燥を行う装置である。