

次世代の高速気流直接加熱型乾燥機の開発について

On Development of New High-Speed Airflow Direct Heating Dryer

河原 正佳

ホソカワミクロン株式会社 粉体工学研究所 フェロー

Masayoshi KAWAHARA

Fellow, Powder Technology Research Institute, Hosokawa Micron Corporation, JAPAN

抄 録

乾燥機としての効率が高い代表機種として、2000年に開発された後、数々の改良および改造が行われて進化し続けている「ドライマイスタ® (DRYMEISTER®; 型式: DMR)」がある。この乾燥機は、高速分散・粉碎機構を有する乾燥機で、しかも分級機構も備えている。高速気流直接加熱型乾燥機に求められる乾燥効率向上、コンパクト化、分解洗浄の容易性、付着の低減に関してスポットを当て、実験した結果とその考察について報告する。

ABSTRACT

DRYMEISTER® (model: DMR), which continues to evolve through numerous improvements and modifications since its development in 2000, is a representative model with high efficiency as a dryer. This dryer has a high-speed dispersion/pulverization mechanism and is also equipped with a classification mechanism. Experimental results and considerations are reported, focusing on the improvement of drying efficiency, compactness, easy access cleaning, and reduction of adhesion, which are required for high-speed airflow direct heating dryers.

1 はじめに

当社では、種々の材料の基本構成要素となる粉体に対して求められる最新の粉体処理技術^[1]を各種装置および粉体システムとして様々な分野に提供し、時代の変化に対応して常に進化することを試みてきた^[2]。

その中で、乾燥機としての効率が高い代表機種として2000年に開発された後^[3]、数々の改良および改造が行われて進化し続けている「ドライマイスタ® (DRYMEISTER®; 型式: DMR)」がある。開発

当初は、それまでに直接加熱型乾燥機としてマイクロンドライヤ®という機種があり、この機種でしか粉碎・乾燥できない分野の粉体材料が多くあったが、さらにより多くの分野に適合し、またより安定した運転が可能となるように、粉碎・乾燥能力を向上させたドライマイスタ®が開発された。この乾燥機はその後、次の技術的課題であったより付着を低減させ、より乾燥能力を向上させるために乾燥用熱風入口温度を600°Cまで上昇させ、また摩耗対策が可能な構造を開発し、2013年に型式DMR-Hとして商品化された^[4]。以下にその概要を述べる。

この高速気流直接加熱型乾燥機は、高速分散・粉砕機構を有する乾燥機で、しかも分級機構も備えている (図 1)。

この装置の構成は、堅型円筒状で、下部には粉砕部、中間部にフィード口、上部に分級部を有する構造からなる。

フィード口から供給された原料は、粉砕部に落下し、粉砕ロータの回転によって分散・粉砕され、下部から流入する熱風と激しく接触することで効率的に乾燥される。

乾燥された粒子は、気流によって上部分級部へ運ばれ、微粉は気流と共に分級羽根を通過して外部に設置された乾燥品捕集機で回収され、粗粉は再び本体下部の粉砕部へ落下し、再び分散・粉砕・乾燥される。

乾燥品粒子径は、分級ロータの回転速度によって、また製品湿分値は乾燥機出口温度によって調整可能である^[5]。

市場にはこのような乾燥機が存在しないユニークな装置であり、高速回転体の安定駆動が困難な熱風入口温度を 600°C まで上昇させることを可能にした構造 (型式: DMR-H) を考案した結果、熱効率を格段に向上させることに成功した^[6]。

このドライマイスタ® (型式: DMR-H) を更に進化させて様々なニーズに対応させるために、新構造の探索はそれ以降も続けられ、数々の基礎的な研究

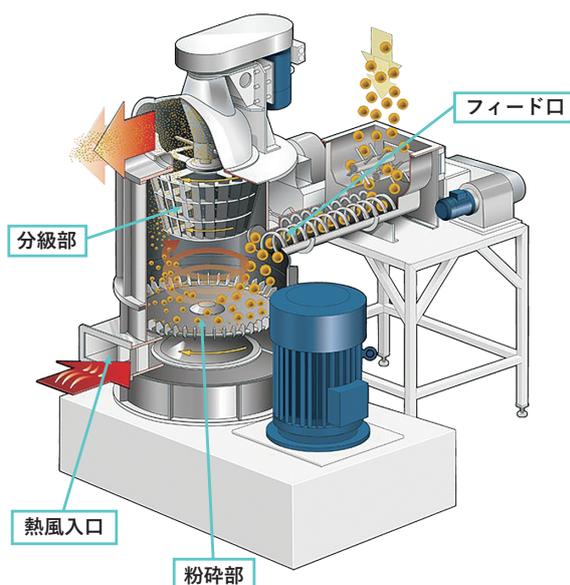


図 1 ドライマイスタ® DMR-H 型の構造図

Fig. 1 Structure of DRYMEISTER® type DMR-H.

開発が実施されてきた。本稿では DMR-H を進化させるために得られた将来実現性のある開発結果をその過程を含めて報告する。その項目は、高速気流直接加熱型乾燥機に求められる乾燥効率向上、コンパクト化、分解洗浄の容易性、付着の低減に関してスポットを当て、検討した事項を報告する。

2 乾燥効率

2.1 乾燥機構

一般的に呼ばれるスラリー状、ケーキ状、粘土状などの湿分を含有する粉体は、その存在状態が小さな塊であるほど乾燥速度は速くなる。つまり、スラリー液滴粒子、ケーキ状粒子、粘土状粒子の粒子径を小さくすることが乾燥速度を向上させる。

高速攪拌翼型乾燥機である DMR-H におけるスラリーの乾燥機構は次のようになる。スラリーなどは、高速で回転する分散・粉砕羽根によってその羽根とライナー (分散・粉砕羽根の外側に位置する衝突板) 間で液滴粒子にされて比表面積を増大させることにより乾燥速度を向上させている (図 1)。一方、湿分含有粒子は付着性を有するので、容器壁などに接すると付着し、その場で乾燥が進み固着状態になり、更にその上に湿分含有粒子が付着して積層されていき、最終的には機内が付着粉体で埋め尽くされて運転続行が不可能になる。そこで、DMR-H ではライナーを熱風入口温度と同じ温度に昇温する構造にした。高速回転する分散・粉砕羽根からの湿潤粉体をこのライナーに接触させてすぐに乾燥させ、付着成長した半乾燥物を高速回転する分散・粉砕羽根によりかきとり、さらにこの半乾燥物が再び分散・粉砕羽根とライナー間で分散・粉砕されながら乾燥されていくことが可能になった。これを単純化した操作で説明すると、金属板上にあるスラリーをドライヤで乾燥させながら、その半乾燥物を繰り返し葉さじでかきとりながら乾燥する操作と同じである。この操作を高速で行うためにほとんどの湿潤粉体は粉砕部で乾燥した粉体になる。これが DMR-H の最大の特徴である。

2.2 スラリー液滴乾燥速度

原料スラリーなどを DMR-H へ供給すると前述の高速回転する分散・粉砕羽根とライナーの間で粒子

になる。スラリーなどを水粒子として考えるとこの表面から水が蒸発して粒子径は時間と共に小さくなり最終的には0になる。

一つの湿潤粒子に着目すると、分散・粉碎羽根とライナーの間で旋回しながら乾燥が進行して乾燥された粒子になる。一方、原料スラリーなどは一定速度で供給されるので、分散・粉碎羽根とライナー間

には新たに未乾燥の湿潤粒子が存在することになる。この粒子は再び旋回しながら乾燥される。これが繰り返されるので、湿潤粒子の蒸発時間が分散・粉碎羽根とライナーの間で旋回して乾燥されるまでの時間（滞留時間）と等しい時が最大供給速度（最大乾燥速度）であると考えられる。湿分が水である場合、雰囲気温度が一定のガス温度下で水粒子径が0になるまでに要する蒸発時間を図2に示す。

600°Cの雰囲気下では直径0.1 mmの水粒子は約90 msで完全に蒸発する。分散・粉碎羽根とライナー間での滞留時間がこの時間以上ある場合は完全にこの水粒子は蒸発することになることを示す。

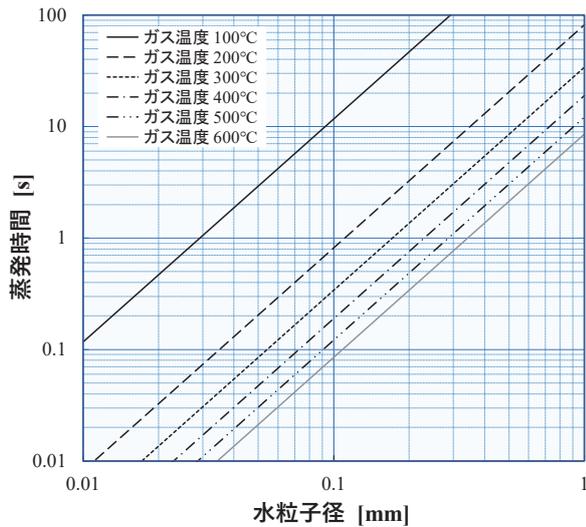


図2 水粒子径と蒸発時間の関係
Fig. 2 Relationship between water particle size and evaporation time.

2.3 温度分布

DMR-Hの入口熱風温度が250°Cである場合の垂直方向の温度分布を図3に示す。粉碎部から離れたるとほぼ一定になることから、主として乾燥は粉碎部近辺で行われており、粉碎部からの高さ100 mm以上の区間では乾燥がほとんど行われていないことを示唆している。この結果から、従来の乾燥機に対して化学工学で用いられてきた熱容量係数 [W/(m³・K)] がこのDMR-Hには適用できないのではと考え、高さをより低くしてコンパクト化することを検討した。

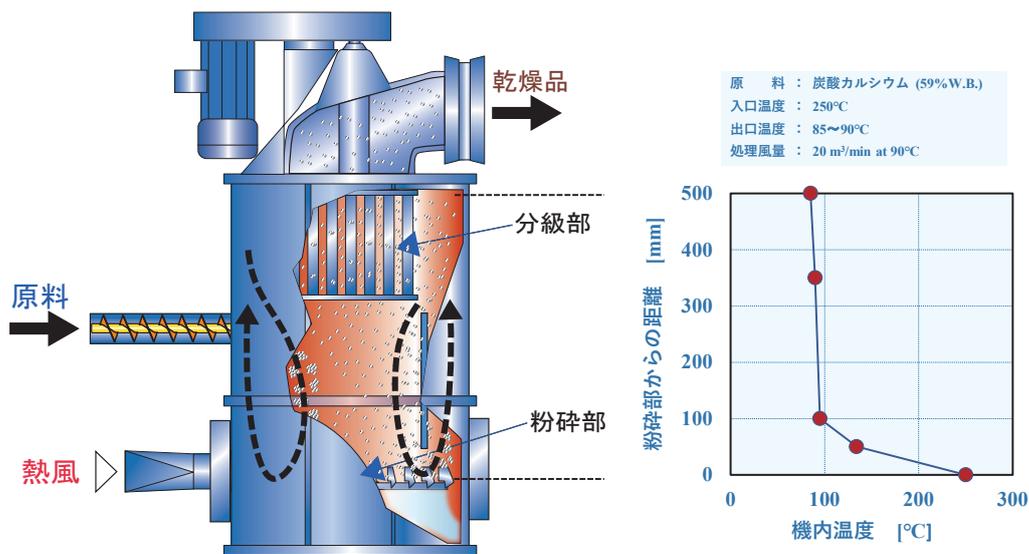


図3 垂直方向の温度分布
Fig. 3 Temperature distribution of vertical direction.

3 コンパクト化

DMR-Hと比較して高さ方向を短縮しても乾燥効率が低下しないことをプロトタイプを用いて実験的に検証し、その結果、高さ方向および空間体積としてコンパクト化可能なことを確認した(図4および図5)。従来のDMR-Hは粉碎部と分級部の高速回転駆動部はそれぞれ上下に位置したが、プロトタイプは更なるコンパクト化を考えてケーシング部の高さ方向の縮小だけでなく、高速回転駆動部を下部のみにした。つまり、粉碎部と分級部を同軸にしてさらに全高を低減した。その際の課題は同軸時の2軸シャフト構造が600°Cの入口乾燥ガス温度に耐えられる構造でなくてはならないことであった。数々の試行錯誤を経た後、高温下での使用に耐える2重シャフト構造を開発して解決した。これは特許化技術のうちの一つである。

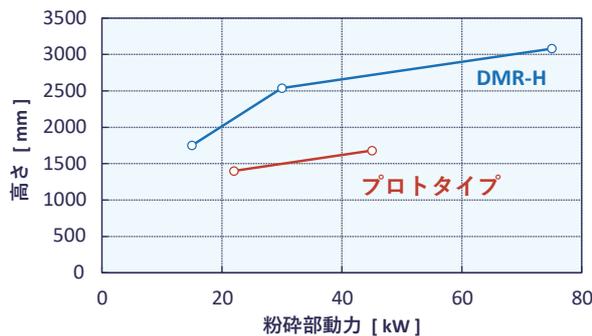


図4 プロトタイプとDMR-H型の高さの比較

Fig. 4 Comparison of height between prototype and type DMR-H.

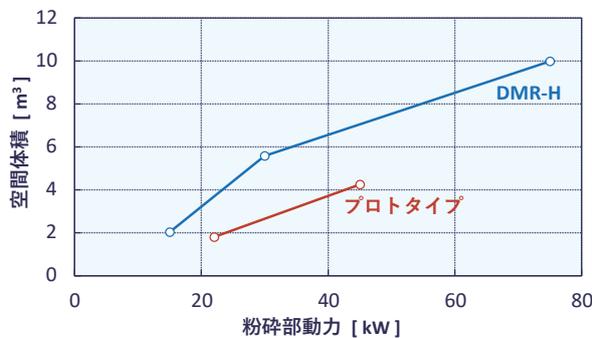


図5 プロトタイプとDMR-H型の空間体積の比較

Fig. 5 Comparison of space volume between prototype and type DMR-H.

図6にプロトタイプの構造図を示す。従来のDMR-Hに比較してコンパクト化されていることがわかる。原料は分散・粉碎ロータにより粒子化され、高温ガスにより乾燥されるが、この高温ガスは同時にライナーの昇温も行っており(図中の加熱ジャケット)、前述したようにこれが乾燥速度を向上させることに貢献している。乾燥された粒子は分級ロータへ向かうが、粗大粒子は未乾燥粒子として再び分散・粉碎ロータへ戻される。粒子の軌道は大きく分けると2つ存在する。一つは高速回転体(分散・粉碎ロータおよび分級ロータ)の回転方向と同一の軌道、もう一つは堅型円筒内の外側を上昇し、中心近傍で下降する回転軌道である。粗大粒子の軌道は未乾燥粒子の軌道であり、この軌道の飛行時間が滞留時間となり乾燥速度向上に寄与している。また、湿潤粉体粒子は静置乾燥の方法よりも高温ガス中を高速移動させて熱交換を早くする方法が乾燥速度を高めることができる。後者の方法を図6の構造で実現しているといえる。

4 分解洗浄性

コンパクト化により上下に分かれていた駆動部の従来構造は下側に統合されたため、上部から容易にケーシング内にアクセス可能な構造になり、分解洗浄性が大きく向上した。

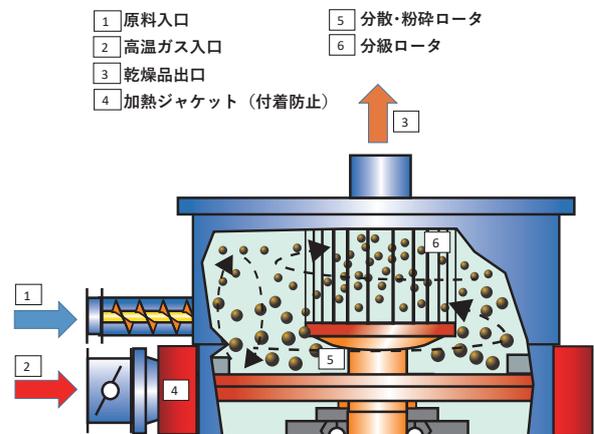


図6 ドライマイスタ®プロトタイプの構造図

Fig. 6 Structural of the DRYMEISTER® prototype.

5 付着低減

乾粉に水などの溶液を加えていくと粘度が増加していき、ある添加量を超えると今度は粘度が減少していく。この湿分と粘度（湿分粒子の粘性度合い）または付着力（特に容器壁への付着力）の関係は、概念図として図7のように表わせる。

この図では、湿分が0%W.B.では粉体のみ状態（乾粉）を示し、100%W.B.では溶液のみの状態を示す。物質の状態としては、図中の点Cが粘土状、点Bが粘土とスラリーの中間状態、点Aがスラリー状である。

湿分が100%W.B.から0%W.B.に減少するにつれて、粘度あるいは付着力は増加していき、ある湿分で粘度が最大値（図中点B）を示し、その後減少していく。この領域（A-C間）が乾燥機で最も付着しやすい区間である。

DMR-Hは乾燥速度を早くしてこの領域を瞬間的に通過して、付着を防いでいるといえる。

図8はDMR-Hで高湿分含有原料（炭酸カルシウム）を乾燥した場合で、機内で付着が生成して成長していることがわかる。図6で示した構造の乾燥機（プロトタイプ）によりDMR-Hと同条件の運転結果が図9で、機内には付着がほとんど生じなかった。コンパクト化により粗粉（未乾燥品）の機内循環気流流れが変化したため乾燥速度が高くなり、これが付着減少の大きな要因になったことが推測される。

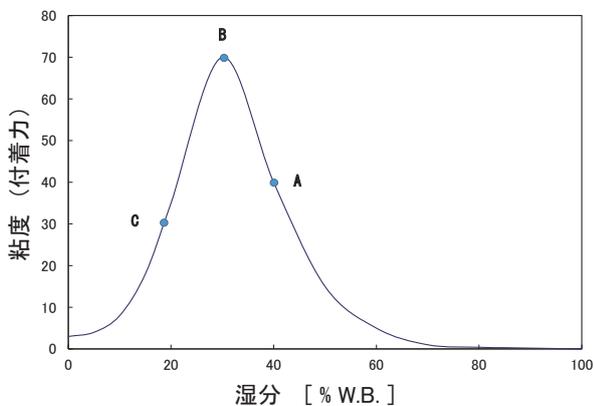


図7 湿潤粉体の湿分値と粘度（付着力）の関係“概念図”
Fig. 7 Relationship between wet powder moisture content and viscosity (adhesive force) “conceptual diagram”.

6 システムフロー図

システム化時のフローを図10に示す。図6の構造を有する本高速気流乾燥機（プロトタイプ）を用いた乾燥システムを構成する付帯設備は、熱風発生炉（ガスヒータ、オイルヒータ、スチームヒータ、電気ヒータなど）、原料フィーダ、パルスジェットコレクタ（乾燥品捕集機）、ブロウを基本とし、排ガス中の湿分回収が必要な場合は、コンデンサやスクラバーが追加される。

また、ガス循環フローも可能で、省エネルギー目的や排気ガスを極力系外へ放出したくない場合に適用される。ガス循環フローを応用し、過熱水蒸気乾燥システムとして使用することで、乾燥品の高品質化と共に省エネ効果（30~60%）も期待できるシステムである。

この乾燥システムの粉碎テスト例を図11に示す。本高速気流乾燥機は、高性能の分散・粉碎ロータを有し、乾燥および粉碎性能の向上に大きな役割を果



図8 DMR-Hの機内付着状況
Fig. 8 Adhesion state inside of type DMR-H.



図9 プロトタイプの機内付着状況
Fig. 9 Adhesion state inside of prototype.

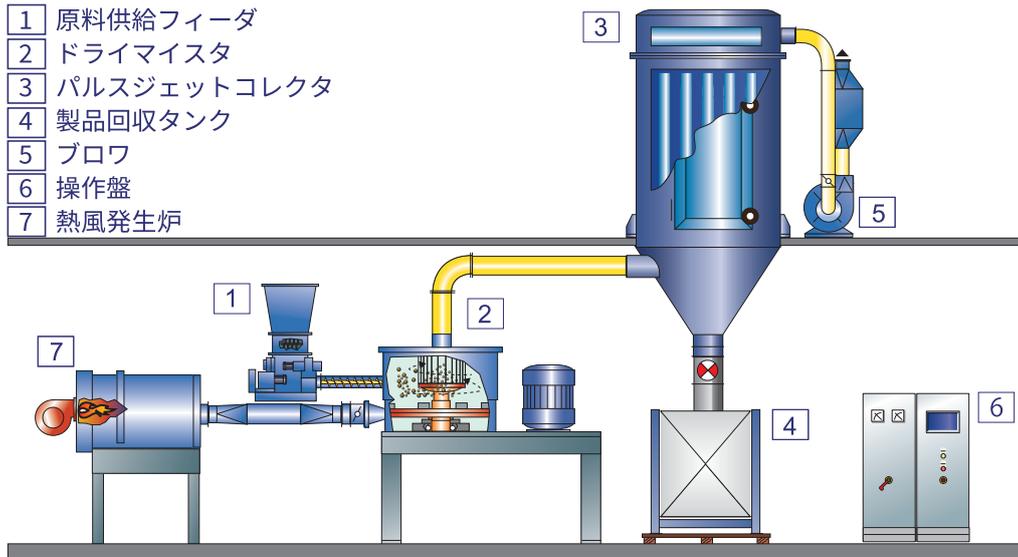


図 10 プロトタイプシステムのフロー図

Fig. 10 System flow of prototype.

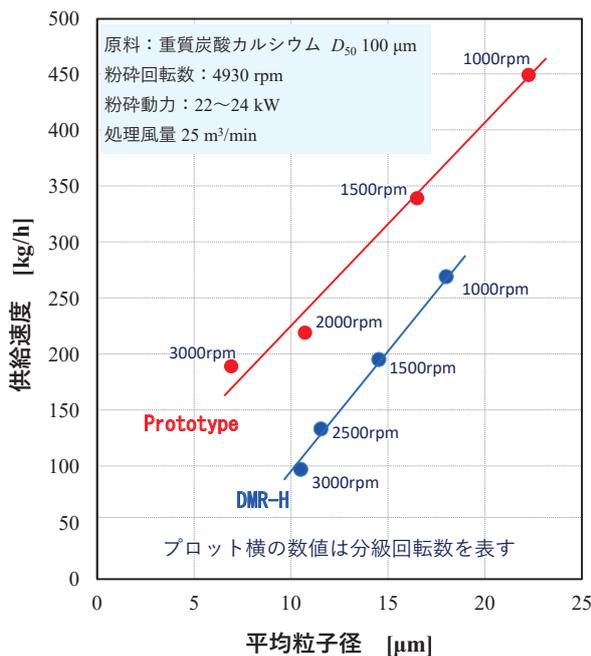


図 11 プロトタイプと DMR-H 型の粉砕性能の比較

Fig. 11 Comparison of space grinding capacity between prototype and type DMR-H.

たしている。図 11 は DMR-H と本プロトタイプの粉砕特性を示した図で、乾粉原料（重質炭酸カルシウム）を用いて分級ロータの回転数を変化させた場合のテスト結果である。この図より次の 2 点が見える。一つ目は、同じ処理品平均粒子径を得ようとした場

合、プロトタイプの方が DMR-H に比較して、供給速度が高い（粉砕性能が高い）。二つ目は、分級回転数の変化に対して、プロトタイプの方が DMR-H に比較して、大きく供給速度が変化する（スムーズな分級ができています）ということである。このことは、前述したコンパクト化により粗粉（未乾燥品）の機内循環気流の流れが変化したため乾燥速度が高くなり付着量が減少したことと同様に、機内循環気流流れが分級にとって効果的に作用していることに起因していると考えられる。

7 おわりに

本報告では、基礎的なことから直接加熱乾燥機を見直すことにより、さらなる進化の可能性があるテスト結果が得られたことを概念事項と共に紹介した。今後も継続して研究開発を進め、その中で生み出される新技術を活用した新商品の開発を推進していく所存である。

References

- [1] 猪ノ木 雅裕, “微粒子の高機能化に対応した最新の粉体技術”, 粉砕, 57 (2014) 66-73. Inoki M., The latest powder technology for enhancing the functional capability of fine particles, The Micromeritics, 57 (2014) 66-73.

<https://doi.org/10.24611/micromeritics.2014012>

[2] 猪ノ木 雅裕, “今世紀に進展した粉体処理技術の紹介”, 粉砕, 59 (2016) 60–68. Inoki M., The introduction of powder processing machines advanced in the 21st century, The Micromeritics, 59 (2016) 60–68.
<https://doi.org/10.24611/micromeritics.2016011>

[3] 猪ノ木 雅裕, “各種湿潤原料の乾燥・粉砕同時処理装置—ドライマイスタ®—”, 化学装置, 6 (2002) 33–36.

[4] 東 充延, “直接加熱型気流式乾燥機”, 産業機械, 8 (2013) 50–52.

<https://www.hosokawamicron.co.jp/jp/files/items/2576/File/201308sgk.pdf>

[5] 川島 岳朗, “直接加熱型気流乾燥機「ドライマイスタ」DMR-H型”, 化学装置, 5 (2020) 23–27.
https://www.hosokawamicron.co.jp/jp/files/items/2579/File/202005_kgs.pdf

[6] ホソカワミクロン (株) 編: ホソカワ製品ハンドブック, “ドライマイスタ® DMR-H”, pp. 320–323, 凸版印刷 (株), 大阪 (2013).

ミニ粉体技術

乾燥と乾燥機の選定 Drying and Dryer Selection

〔乾燥とは〕 乾燥とは、原料に熱を与えて湿分を蒸発させ、乾粉を取り出す操作である。様々な物質が、様々な目的で乾燥されている。原料を乾燥することで下記のような効果が期待できる。

- ハンドリング性・保管安定性の向上
- 腐敗および変質防止による利便性・品質・付加価値の向上
- 結晶水の除去による改質

当社の乾燥機は、直接加熱型（熱風を原料に直接接触させて熱を与える）と間接加熱型（原料に接触しているケーシングや攪拌ロータを加熱して間接的に原料に熱を与える）に分類できる。

〔直接加熱の特徴〕

- 乾燥速度が速く、乾燥時間が短い
- 高温熱風を使用しても低い製品温度の維持が可能

〔間接加熱の特徴〕

- 原料と熱媒体が接触しない
- 乾燥時間を長く取れ、最大数十から数百 ppm の低湿分まで乾燥可能
- 熱効率が低い
- 排ガス量が少ない
- 真空乾燥で低温乾燥が可能

〔乾燥機の選定〕 乾燥目的や乾燥する原料の性状を十分把握し、目的に適合する機種を選定することが重要である。

- ①原料の特性
乾燥機の選定の際には、まず原料の湿潤時の状態および乾燥後の特性を十分に把握する必要がある。この乾燥特性を数値化・グラフ化した乾燥曲線は乾燥方式最適化の情報になる。
- ②原料の状態
原料の湿潤状態と流動性、粘性、付着性を確認し、これらの要因を考慮して適切な乾燥機を選定する。原料の状態に基づいて、乾燥機内での移送、流れ、供給、排出、および付着について検討を行う。
- ③原料攪拌の影響
原料を攪拌分散しながら乾燥すると、速く乾燥できて限界湿分値が低くなる。攪拌の強さによって乾燥時間が短縮される。乾燥機によって限界湿分値が異なることもある。

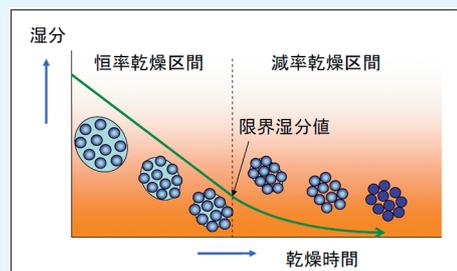


図1 乾燥曲線
Fig. 1 Drying curve.

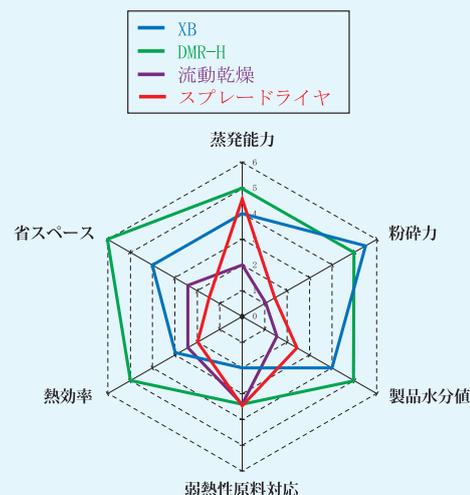


図2 乾燥機の機種選定
Fig. 2 Selection of dryer models.