

粉粒体機器の紹介とその応用技術の解説

椎名 啓

日本コークス工業(株) 栃木工場 〒328-8503 栃木県栃木市国府町1番地

Introduction of Powder and Grain Equipment and Explanation of Its Applied Technologies

Satoshi SHIINA

Tochigi Engineering Factory, NIPPON COKE & ENGINEERING CO., LTD., 1 Ko-machi, Tochigi City, Tochigi 328-8503, Japan

1 はじめに

粉粒体を扱う技術は、粉碎、混合、混練、乾燥、造粒、分級など歴史は古く、さまざまな産業分野で利用されており、現代の工業を支える主要な技術の一つである。粉粒体を扱う操作は一見単純そうに見えるが意外と奥深く、ノウハウを必要とする場合が多い。また、最近では粉粒体操作に対する市場の要求が高度化してきており、新たな装置や処理技術が求められている。ここでは当社が扱う粉粒体機器の紹介とその応用技術について解説する。

2 粉碎機の種類

粉碎操作を大きく分けると乾式と湿式の二つに分けられる。乾式と湿式にはそれぞれメリットとデメリットがあるが、耐火物原料の粉碎には主に乾式の粉碎機が用いられている。一般的に乾式粉碎の限界最小粒子径は数ミクロン程度が限界と言われ、近年では粉碎機の進化によりサブミクロンまで粉碎できるケースもあるが、数十ミクロン付近からは常に付着や凝集との戦いになる。このように乾式粉碎は微粉碎領域をあまり得意としないが、乾式ゆえに乾燥工程を省けるメリットがある。乾燥には多大なエネルギーコストを要するため、前後工程で湿式操作が含まれない場合、粉碎工程はできる限り乾式が望ましい。一方で、湿式のメリットは、より微細で高精度な粉碎が可能であることがあげられる。最近ではナノサイズまで均一に粉碎・分散できる機器もあり、それらの機器は電子部品材料や電池材料、医薬品、化粧品、インキ、ファインセラミックスなどの分野で活躍している。

乾式、湿式いずれの粉碎においても、原料の性質（大きさ、硬度、強度、摩耗性など）や求める処理（生成粒度、粒度分布など）に応じて粉碎機の実選も異なるため、複数の粉碎機を組み合わせ、多段的に使う場合もある。

2・1 乾式粉碎機

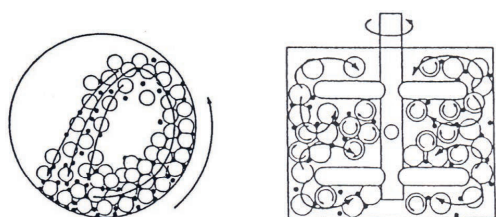
当社では主に微粉碎領域の乾式粉碎機を販売しており、大きく分けると、メディア攪拌型とメディアレス型（粉碎メディアを使用しないタイプ）に分別される。粉碎ボール

などのメディアを用いる粉碎機（ボールミルやアトライタ）は、耐火物原料の微粉碎機として古くから用いられており、大きな粉碎エネルギーを破砕物に投入できるため大量処理が可能であり、さらにはセラミックスや金属酸化物などの硬い材料の粉碎もできる。ただし、メディアを用いる粉碎機の場合、部材の摩耗と、その摩耗分の製品への混入が課題となり、鉄分の混入を嫌うものにはセラミックス製のボールや部材を使用して摩耗を軽減させる。一方で、メディアレス型には圧縮せん断式（ロールミル、ジョークラッシャーなど）、衝突式（ハンマーミルなど）、摩砕式（石臼など）、材料同士を衝突させる自生粉碎方式（ジェットミルや気流式粉碎機など）の機構があり、特に自生粉碎方式は摩耗分の混入が少ない。しかし、微粉碎領域に限ればメディア型と比べると破砕物に投入できるエネルギーが低く、生産効率で劣る場合がある。

それでは当社で扱う乾式粉碎機について以下紹介する。

1) アトライタ

アトライタは、アメリカのUnion Process社のDr. Szegvarによって1940年代に開発され、日本では当社（当時の三井三池製作所）が1960年に技術導入し販売を開始、さらに1978年に同じくUnion Process社から乾式アトライタを技術導入した。アトライタはその構造と機能から、従来のボールミルやロールミルの操作性と安全性の問題を改善したとされており、さらにメディアを強制的に攪拌する機構による遠心力の効果によってボールミルや振動ミルと比べて高エネルギーを印加できることから粉碎速度が非常に速く、ボールミルの約10倍程度の粉碎能力がある（図1）。タンクは水冷ジャケット付きで粉碎時に発生する熱を下げる事ができるほか、密閉構造にも対応できるため、不活性ガス雰囲気下や真空・減圧下で粉碎処理を行うことができる。材料は万遍なくボール間に噛み込まれ、均一に粉碎するためにタンク内に滞留する箇所がないように攪拌アームの形状、寸法および配置に工夫がなされている。



重力に依存 強制攪拌による遠心力効果
図1 ボールミル（左）とアトライタ（右）の構造

2) アルケミ

アルケミは独自開発の機器で、アトライタが重力方向に対して縦型であるのに対し、アルケミは横型となっている（図2）。攪拌アームの構造はアトライタに類似しているが、横置きでもメディアを均一に攪拌できるよう設計されている。アトライタの場合、金属粉などの比重の重い処理物を粉碎すると、粉碎室の槽底部に処理物が偏りやすく、不均一な粉碎になることがあった。さらに、ボールの自重が影響して粉碎室内の上下方向でエネルギー分布に偏りが生じていた。これは粉碎効率の低下に繋がり、さらには大型化することでますます顕著になることからスケールアップリスクと考えられた。一方で、アルケミは横型とすることで、縦型のアトライタの問題点であるボールと処理物の動きを改善し、粉碎能力はアトライタ比で約3倍、スケールアップリスクも半分以下に抑えることができる。そのことから、アルケミは後述するメカノケミカル反応やメカニカルアロウイング処理に向けた機器であるともいえる。

3) ダイナミックミル

ダイナミックミルは連続式の粉碎機（図3）で販売開始から30年以上の実績をもつ。バッチ式であるボールミルの10~20倍の粉碎能力で連続粉碎（自動運転）でき、かつ、少ない設置面積で大量粉碎することを可能にした。このシステムに必要なのは原料供給装置のみで、気流式粉碎機やジェットミルと比べ、付帯設備が大幅に少なく、コストや設置スペースの削減だけでなく、整備や洗浄に掛かる時間も大幅に削減できる。内部材質もセラミックスに対応しているので、鉄分の混入を嫌う粉碎用途にも適している。こ

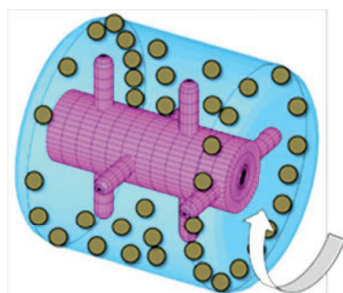


図2 アルケミの内部構造

れまでの実績ではアルミナやフェライト、窒化けい素や炭化けい素などの無機物質の粉碎用途が大部分を占めていたが、最近では抹茶の製造機としての販売も伸ばしている。以前は百数十台の茶臼で茶葉を挽いていた製造工程を、1台のダイナミックミルで製造できるようになり、また、処理条件の工夫によって風味や舌触りも茶臼と同等の品質で大量生産できるようになり、最近の抹茶ブームの下支えをしている。

4) ファインミル

ファインミルは粉碎部分が「アトライタ」で、上部に分級機を内蔵させることで高効率な乾式超微粉碎を実現した連続型の粉碎機である。下部のアトライタで高効率に粉碎し、粉碎された粒子をキャリアガスで上部の分級機に搬送し、遠心ロータ式分級機によって所望の粒度に到達した粒子のみを分級して系外に排出、サイクロンとバグフィルタで回収する（図4）。生成した粒子は速やかに系外に排出されるので、微粉による粉碎への悪影響（付着や凝集）を抑えられ、粉碎効率が飛躍的に向上した。また、分級機の効果で粉碎粒子の粒度分布は非常にシャープで、シングルミクロン~サブミクロンの超微粉碎を可能としており、分級ロータの回転速度と風量で粒度を容易にコントロールすることができる。金属コンタミを嫌う処理には、セラミックスなどの耐汚染仕様にも対応している。ファインミルの

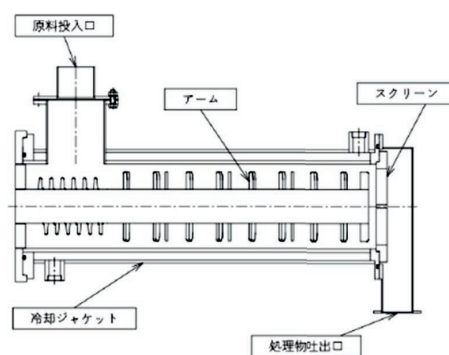


図3 ダイナミックミルの内部構造

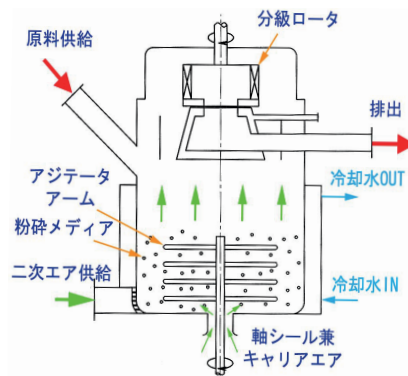


図4 ファインミルの構造

システム構成は一般的な乾式粉碎機と同じで、サイクロン、バグフィルタ、ブロワの構成になっており、ジェットミルのように多くの圧縮エアを使用しないため、ランニングコストを大幅に削減でき、省エネルギーなシステムとなっている。

5) ストリームミル

ストリームミルは気流式のメディアレス粉碎機で、粉碎室内部に搭載されたインペラを高速回転させることで発生する強力な旋回気流に乗せて材料同士を衝突させて自生粉碎させる機構となっている（図5）。自生粉碎によって、発熱やコンタミを最小限に抑制できるほか、内部構造やシステム構成がシンプルなため、ジェットミルと比べランニングコストの低減や省エネルギー運転に貢献できる。

2・2 湿式粉碎機

耐火物原料においては、主に乾式粉碎が用いられることが多いが、先述したとおり湿式粉碎のメリットはより微細で、かつ、精密な粉碎・分散が行えることである。近年ではサブミクロン～ナノサイズの均一な粉碎分散処理を可能とする機器が多く販売されている。湿式粉碎の応用例として、例えば、微量の固形添加成分を基材となる粉体粒子の表面に万遍なく均一にコーティングしたい場合、まず、固形添加成分をバインダ入りの溶媒中でサブミクロン～ナノサイズまで均一に湿式粉碎する。その分散スラリを、後述するFMミキサ（高速流動ミキサ）で基材粉末を流動攪拌しているところにスプレー噴霧すれば、添加材入りのスラリが基材粒子の表面に万遍なく綺麗にコートされる。さらに、そのままFMミキサで減圧乾燥することで、余分な溶媒成分を飛ばし、基材粒子表面に添加成分を固着させることができる。

それでは当社の代表的な湿式粉碎機を以下紹介する。

1) アトライタ

乾式で紹介した通り、アトライタは当初湿式の粉碎機として開発された。メディアを強制的に攪拌することでボールミルの約10倍の粉碎能力を有する。湿式アトライタは標

準バッチ式その他、連続式や循環式などの派生機種も開発された。 $\phi 10$ mm程度の比較的大きな粉碎メディアを使用できるため、数ミリ程度の原料をミクロンサイズまで粉碎できる。販売開始から60年以上経つが、今でもその需要は多い。

2) SCミル

SCミルは独自開発のビーズミルで、 $\phi 0.2 \sim 2$ mmの粉碎メディアを使用し、ミクロンサイズ～サブミクロンサイズまでの粉碎を可能とする。一般的なビーズミルは粉碎タンク部のL/D比（タンク長さ/タンク径）が大きい設計となっているが、SCミルはL/D比が1/3と小さく、それに加えユニークな内部構造によって理想的なビーズの動きを実現し、無駄のない省エネルギーな粉碎・分散が行える（図6）。粉碎室の材質もセラミックスやウレタンライニング、樹脂部品等にも対応しており、摩耗、コンタミ対策も可能とする。

3) MSCミル

MSCミルはSCミルと同じく独自開発のビーズミルで、 $\phi 0.015 \sim 0.2$ mmの粉碎メディアを使用し、サブミクロンサイズ～ナノサイズまでの粉碎・分散を可能にする。SCミルと同様に、L/D比が小さい設計となっており、さらにユニークな内部構造によって、攪拌されている粉碎メディア層を処理物が確実に通過することでショートパスを防ぎ、さらに独自開発の遠心分離機構で小径メディアと処理物とを確実に分級することができる（図7）。スマートフォンやIoT機器の発展に伴い、部品の小型化と高品質化が進む電子部品分野で主に活躍している。

3 粉碎機を用いた応用技術

粉碎機の応用技術として、例えば、粉碎過程で起こる現象を利用したメカノケミカル効果やメカニカルドーピング、粉碎の衝突・せん断エネルギーを利用したメカニカルアローイングなどの技術が挙げられる。これらの技術は最新の技術ではなく、あまり表舞台に登場することはないが、各産業で最近その活用が広まりつつあるようなので以下紹介したい。

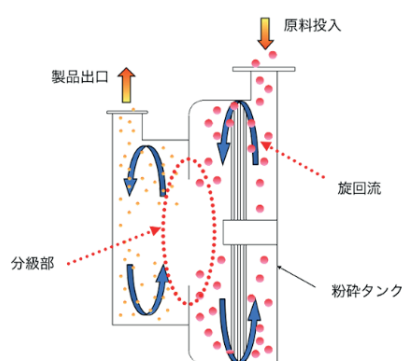


図5 ストリームミルの内部構造

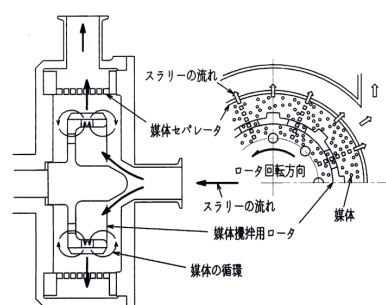


図6 SCミルの内部構造

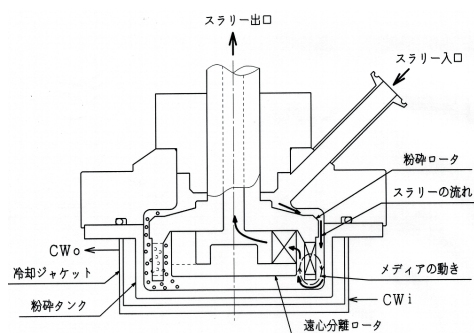


図7 MSCミルの内部構造

3・1 粉砕によるメカノケミカル効果

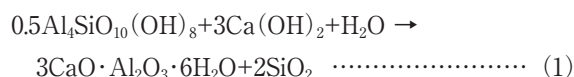
粉砕処理に於いて、粉砕初期段階では粉砕時間に比例して比表面積が増加（粉砕）していくが、そのまま粉砕を進めていくと段々と比表面積の増加速度（粉砕速度）が低下していき、そして比表面積が最大値（粉砕限界）に達した後は表面積増加速度よりも微粒子凝集速度の方が増し、今度は凝集してゆく現象が起こる。つまり、同じ粉砕エネルギーを投入し続けているのに、そのエネルギーが表面積増加（粉砕）に使われるだけでなく、微粒子凝集にも消費されているのである。これは破砕物に加えられたエネルギーが固体の結合を切断することによって不安定化（活性化）し、より安定な方向へ進もうとして周囲の物質（微粒子など）と凝集するからである。この時、微粒子の凝集だけでなく、固体の結晶構造の変化やそれに伴う物性変化、固体粒子表面へのガス吸着、固体表面でのラジカル（活性種）の発生や、固体の分解反応、交換反応、合成反応等も起こる。この現象を利用した研究事例を以下簡単に紹介する。

3・1・1 セメント系物質の非加熱合成

ポルトランドセメントの原料は1000℃以上の高温焼成過程を必要とするが、昨今のカーボンニュートラルの観点から、焼成過程を無くす、もしくはより低温で焼結することができればその意義は大きい。その可能性の一つとしてメカノケミカル法によるセメント系物質の非加熱合成の研究事例を紹介する。

1) 乾式粉砕によるトライ・カルシウム・アルミネート (C₃A) の合成¹⁾

生石灰 (CaO) と消石灰 (Ca(OH)₂) にカオリナイト (Al₂Si₄O₁₀(OH)₈) またはギブサイト (Al(OH)₃) の合計3種の原料をモル比でCa:Al=3:1となるように秤量混合し、遊星ボールミルにφ15 mmのステンレススチールボールとともに装填して所定時間粉砕する。反応式は以下のようになる。



合成までの粉砕時間は(1)式のギブサイト系の方が短く、XRDパターンから30分の粉砕でC3A水和物が合成できていることが確認されている。(2)式のカオリナイト系は60分以降)。ギブサイト系の場合、60分の粉砕時間が最も硬化体の強度が高く、60分以上の粉砕では逆に低下してしまう。また、粉砕で合成したC3A水和物は粉砕後も活性であり、水を添加すると過水和物 (C3A (8-12) H₂O) ができ硬化する。これは焼成法によって合成されるC3Aとは大きく異なる。

2) 乾式粉砕によるカルシウム・スルホ・アルミネート (CSA) 水和物の合成²⁾

消石灰 (Ca(OH)₂)、二水石膏 (CaSO₄・2H₂O)、水酸化アルミニウム (Al(OH)₃) の3種を、エトリンガイト (3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O) 組成になるようにモル比でCa(OH)₂:Al(OH)₃:CaSO₄:2H₂O=3:2:3に秤量混合し、遊星ボールミルにφ15 mmのステンレススチール製ボールとともに装填し粉砕する。120分の粉砕産物がCSAであることが確認され、また、水を添加した硬化体のビッカース硬度は、粉砕時間と共に増加して6時間粉砕が市販CSAと同程度であった。

3) フライアッシュからの水硬性粉体の製造³⁾

石炭火力発電所から排出されるフライアッシュを乾式粉砕してメカノケミカル効果によって焼成工程を経ずに水硬性粉体を製造する方法が研究されている。この研究ではフライアッシュに40 mass%の生石灰を添加し、φ15 mmのステンレススチールボールとともに遊星ボールミルに装填し、所定時間粉砕している。1時間粉砕した粉体に水を添加して得られた硬化体は、セメントクリンカー硬化体の硬度値と同等であり、さらに2時間の粉砕品ではセメントクリンカー硬化体硬度を上回る結果が得られている。

3・1・2 メカノケミカル反応を利用した水素製造技術

アルカリを加えた水の中で、けい素や鉄、アルミニウムなどの無機物質をボールミルやビーズミルで粉砕すると、無機物質が粉砕されるのと同時に常温・常圧下で水と反応して大量の水素ガスが発生する。水と無機物質が反応する際に、酸素は無機物質との酸化反応によってほとんど全て消費されてしまうため、高純度な水素ガスが発生する。無機物質の中でも取り分け、けい素が効率良く水素ガスを発生する。太陽光発電パネルや半導体の製造工程で排出され廃棄されているシリコンの切削屑や、寿命を迎え廃棄される太陽光発電パネルを原料に、再生可能電力を使って粉砕機でグリーン水素を製造することが期待されている。ここで重要なのが効率の良い粉砕機である。先述したL/Dの小

さいSCミルなどはエネルギー効率に優れるため、再生可能電力を利用した水素ガス製造に貢献できるものと期待したい。

3・1・3 酸化物への非金属元素ドーピング（メカニカルドーブ）

機能性酸化物の結晶格子に不純物原子をドーピング、あるいは酸素サイトを他の原子に置き換えることで新たな機能が発現することが報告されている。例えば、光触媒である酸化亜鉛の酸素サイトを窒素原子に置換することで、バンドギャップが小さくなり、通常は紫外線にしか応答しないものが可視光領域で応答するようになり、室内光でも光触媒効果を発揮できるようになる（可視光応答型光触媒）。このドーピング処理を当社のアトライタ（乾式粉碎機）で行った。アトライタに酸化亜鉛と窒素源となる尿素を混合装填し、1時間粉碎することで可視光応答型酸化亜鉛粉末が得られた。さらに、連続式の粉碎機で同様の処理が可能か、ダイナミックミルで実験を行ったところ、同等の可視光応答型酸化亜鉛が得られたことからメカニカルドーピング処理の工業化の可能性も示唆される結果が得られている。

4 混合・混練機の種類

混合・混練機には様々なタイプの機械が存在するが、大きく分けると二つのタイプに分別できる。容器が固定されていて攪拌羽根やローラで攪拌するものと、もう一つは容器自体を回転させるタイプである。二つのタイプを組み合わせた機器（容器を回転させながら羽根で攪拌）も存在する。

混合操作は乾式と湿式に分けられるが、耐火物の混合操作はほとんどが乾式であるため、今回は湿式の紹介を割愛したい。また、混合機と混練機はそれぞれ専用の機械があるが、耐火物においては二種類以上の粉粒体を混合しながらバインダ等の液体を加えて「練り」の効果を持たせ、混合と同時に混練操作が行われるケースが多いことから、混合・混練機として当社で扱う機器について以下紹介する。

4・1 混合・混練機

1) FMミキサ

FMミキサは1962年にドイツのヘンシェル社から技術導入し、当社が国内販売を開始した機器で、これまで12,000台以上の販売実績を誇るミキサの代名詞的な存在である。現在はFMミキサに名称が変更されたものの、「ヘンシェルミキサー」といえば皆さんご存知かと思う。FMミキサの特徴は大容量モータの搭載と強固な軸設計により、高速流動攪拌による短時間での精密混合を可能にし、高トルク攪拌によって強力なせん断力を加えられるほか、様々な処理に対応出来るよう攪拌羽根の種類は数十種類にもおよぶ。混合槽はジャケット構造になっており、処理物の加熱や冷却が可能である（図8）。また、オプションとして真空・

減圧仕様やチョッパ・掻き落とし装置の追加、耐摩耗仕様、250℃の耐高温仕様、不活性ガス雰囲気仕様などが選択でき、混合・混練操作にとどまらず、乾燥、造粒、コーティング、表面改質、複合化、粉碎など十種類以上の操作が行える多機能ミキサである。スケールアップも混合槽容量で最大8,000 Lの実績がある。

2) コンピックス

FMミキサの混合性能をそのままに、連続処理に対応した機器がコンピックスである。独自開発の混合槽構造により、粉体の混合槽内滞留時間をコントロールしながらショートパスを防止し、連続処理においても精密混合・分散を可能にする。同等処理のFMミキサと比較すると、半分以上のスペースに設置可能で、モータ容量も半分以上となり、省エネ、省スペースを可能とする（図9）。

3) ニーデックス

ニーデックスはオープン型2本ロール式の連続混練機で、粉体の混合機能はないが他の混練機にはないユニークな特徴を持っているので紹介したい。ニーデックスはロール表面にスパイラル状の溝があり2本ロールに速度差と温度差を持たせ、片方のロールに処理物を巻き付け混練しながら排出側に搬送する連続型の2本ロール機で、ロール間で発生する強力な圧縮・せん断作用により高濃度のフィラー配合比でも均一に混練することができる。通常のロール機ではバンクでの混合作用がないため、手作業での繰り返し作業を必要とするほか、繰り返し何度もロール機を通す必要がある。繰り返し作業にはある程度の経験が必要で、また安全性にも課題がある。一方で、ニーデックスはロー

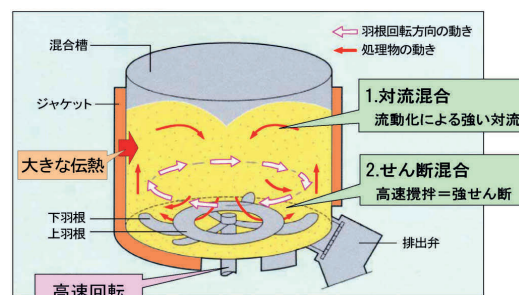


図8 FMミキサの構造

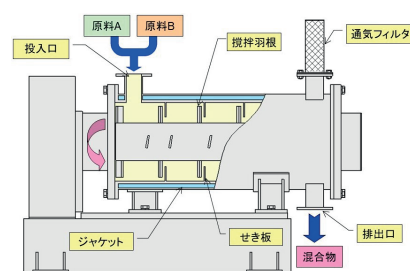


図9 コンピックスの構造

ル表面のスパイラル状の溝の効果によって、バンクでの混合作用が生じ、原料が精密に混練される。また、通常の押出機では難しい粘度差のある材料の混練も行え、スパイラル状の溝による搬送効果も相乗して連続式での混練処理が可能となり、自動運転も可能となり安全性も確保される(図10)。ニーデックスでの処理例を以下紹介する。

- ・PP樹脂にタルクを85 mass%の高配合で混練しペレット化。
- ・フェノール樹脂にシリカやアルミナ粉末を70~90 vol%の高配合で混練。
- ・アルミナジルコニア粉末にワックス等のバインダを15 mass%添加し混練。従来の混練機と比べ混練後の粘度が半分以上に低下し、成形性が向上。インジェクション成形が可能。
- ・セルロースナノファイバーやグラスファイバー、カーボンファイバーなど繊維状のフィラーを解繊しながら樹脂中へ均一に混練。

5 混合・混練機を用いた応用技術

先に紹介したFMミキサは、混合混練用途以外にも様々な操作が行える多機能混合機であり、その派生機種もあるので以下紹介したい。

5・1 乾燥処理

FMミキサの混合槽はジャケット構造となっており、スチームや温水、オイル等の熱媒を流すことで加熱しながら攪拌できるため、スラリの乾燥や粉体の余分な水分、溶媒を除去することができる。混合槽は減圧にも対応しており、真空・減圧下で流動攪拌しながら乾燥させることで効率良く乾燥することができる。さらに揮発させた溶媒分はコンデンサで凝縮し回収することで、有機溶剤を系外に漏洩させずに安全に乾燥・回収ができる(図11)。

図12に含水率50 mass%のセラミックスラリー100 kgを容積150 LのFM150型ミキサで減圧乾燥した処理例を示す。減圧による水の沸点低下により約50℃の低温で乾燥処理

が進行しており、90分弱の運転で含水率コンマ数mass%まで乾燥できている。乾燥途中では、含水率の低下とともに処理物の粘性が上昇し、ある含水率のところでスラリーがもち状から団子状になる過程を経過する。図12で60分頃から所要動力が急上昇している様に、この段階では多大な動力を必要とするため、一般的なミキサではトルク不足による過負荷停止や軸・羽根の強度不足によって団子状の処理物を攪拌することができず乾燥処理が進まない。一方で、FMミキサは強力なモータと強固な設計により、この状況を攪拌しながら乗り越えることができる。団子状から乾燥がさらに進むと大粒状態になる。この時、顆粒内部の水分が抜けにくく減率乾燥に陥りやすいが、FMミキサの強力なせん断力で大粒を解砕し、短時間で乾燥が進み、顆粒状から粉末状になると動力が低下するとともに乾燥終了時点で処理物の温度が一気に昇温する。このように、ミキサ動力と処理品温度をモニタリングすることで乾燥処理を自動制御することもできる。FMミキサの乾燥処理はスプレードライヤなどの熱風式乾燥機と違い、排気ガスの熱ロスもほとんどなく、真空乾燥であれば低温で乾燥できるので放熱も少なく、さらに強い対流で大きな伝熱係数が得られ、ダマを解砕しながら処理するので恒率乾燥を維持し、効率的で省エネな乾燥を可能とする。

上記乾燥処理では、処理物の加熱原理は主にジャケットからの伝熱と攪拌熱になるが、真空・減圧下では混合槽内の気体を介した伝熱もなくなり、さらに減圧下では粉体の流動状態が悪化するため、ジャケットからの伝熱係数がどうしても低下してしまう。そこで、マイクロ波をFMミキサ

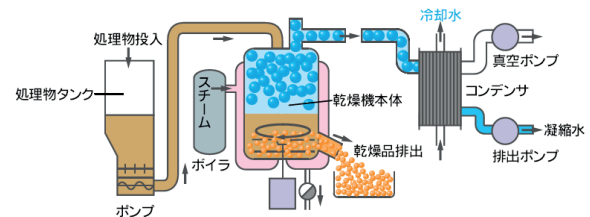


図11 FMミキサの真空・減圧乾燥システム

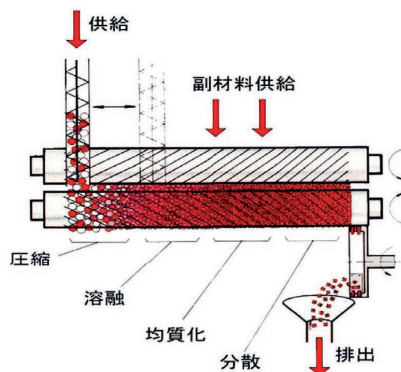


図10 ニーデックスの混練フロー

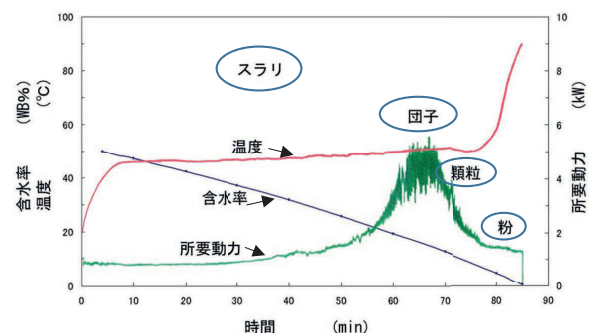


図12 FMミキサによるセラミックスの乾燥

サの混合槽内に照射することで、処理物を内部から直接加熱し、効率良く乾燥することができる。当社のFMミキサマイクロウェーブは、ジャケット加熱による乾燥処理と比べ、マイクロ波を照射することで乾燥速度が約2倍に、さらにジャケット加熱とマイクロ波を併用することで乾燥速度を約4倍にできるほか、大きなエネルギーを要する吸着水の乾燥や水和物の脱水も効率的に行うことができる。

5・2 コーティング・表面改質・複合化処理

混練処理では化学的に粒子表面を濡れ易くする必要がある。その方法として、界面活性剤などの第三物質を加える場合もあれば、粉体粒子表面をコーティング、もしくは表面改質して濡れ性を改善する方法がある。FMミキサを利用したコーティング、表面改質方法を図13に示すが、主に4つの方法がある。

方法①は粉体を流動攪拌しながら溶液状の界面活性剤や表面改質剤を造粒しないように少しずつ噴霧または滴下してゆくと、粒子表面に液剤が万遍なく均一に塗布される。その後、そのままFMミキサで乾燥させて溶媒分を揮発させると、粒子表面に改質剤が固定化される。また、シランカップリング処理のように表面改質剤を加熱しながら加水分解させるような処理も、FMミキサでの恒温攪拌と、反応後の冷却・乾燥、および溶媒の凝縮回収によって可能とする。

方法②は、常温では固体、高温で融解するようなコート剤をコーティングする方法で、粉体と固体のコート剤と一緒に混合攪拌しながらFMミキサを加熱し、コート剤を溶解させながら粒子表面に万遍なく均一にコーティングする。この時、流動性を持たせながら攪拌するような条件や羽根を選択しないと、造粒や付着、コート剤の偏析が起きてしまう。コート後はジャケットを冷却することでコーティング剤を固化させる。

方法③は固体コート剤を物理的に粒子表面に打ち込み、コーティングする方法である。この方法では高速で粒子表面にコート剤を打ち付け、さらに強力なせん断力で擦り込み固定化する。FMミキサは標準でも羽根の先端速度 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ での

高速攪拌が可能であり、さらに特殊仕様では $80\sim 100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の超高速回転も可能であるためこのような物理的なコーティング（複合化）を可能とする。また、このような複合化処理に特化したミキサ「コンポジ」を開発し、複合化だけでなく、バインダーレスでの造粒も可能としている。

方法④は母材となる粒子表面に液状バインダを介して別の子粒子を母粒子表面にコーティングする方法である。方法③では基本的に母粒子が樹脂や有機物、金属などの様に塑性のあるものに限定されるが、方法④であればセラミックスや鉱物、金属酸化物などの硬い粒子の周りにもコーティングできる。まずはFMミキサで母粒子の周りにバインダを均一に塗布し、コートする粉体を後から添加して母粒子の周りに付着させコーティングする。コーティング層を厚くしたい場合はこの操作を繰り返すことでコーティング層の厚みを制御できる。

6 おわりに

「アトライタ」や「FMミキサ」は販売開始から既に半世紀以上経つが、今でも当社の主力商品として幅広い産業分野で活躍している。基本的な技術は変わらなくとも、市場の要望に応えながら製品のブラッシュアップと用途開発を続け、「アルケミ」や「コンポジ」などの新たな派生機種も開発してきた。粉粒体を扱う技術は実に奥深く、今回ここでは紹介できなかった機器や応用技術が他にもたくさんある。今後、耐火物原料の発展にも貢献できる様、今回の様な情報交流と継続した開発を進めていきたい。

文献

- 1) J. M. Filio, R. V. Perucho, F. Saito, M. Hanada and Y. Ito: Materials Sci. Forum, Vols.225-227 (1996) pp.503-508.
- 2) G. Misaka, F. Saito, M. Hamada, H. Ito: Inorganic Materials, 3 115-120 (1996).
- 3) 米 国民, 齋藤文良, 早稲田嘉夫, 成田 健: 粉体工学会誌, 35 [9] 639-645 (1998).

略歴



椎名 啓 (しいな さとし)

日本コークス工業株式会社

化工機事業部 栃木工場 粉体技術センター
開発グループ マネージャー

2005年 三井鉱山株式会社 (旧社名) 入社

栃木事業所 開発部配属

2012年 化工機事業部 営業部 東日本営業グループ

2020年 化工機事業部 栃木工場 粉体技術センター

開発グループ マネージャー

現在に至る

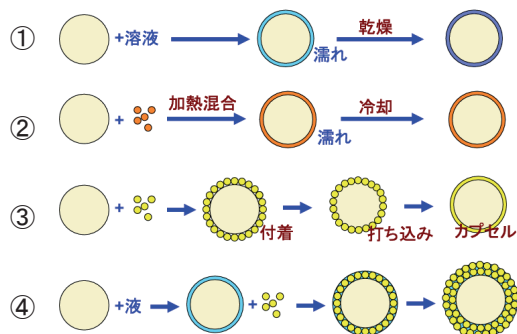


図13 FMミキサによるコーティング処理