

# 粉乳製造技術の基礎と最近の動向

佐竹由式\*・豊田 活

(株式会社明治 研究本部, 〒192-0919 東京都八王子市七国 1-29-1)

## Fundamentals and latest trends of milk powder production

Yoshinori SATAKE and Ikuru TOYODA

(Meiji Co., Ltd., R&D Division 1-29-1, Nanakuni, Hachioji, Tokyo 192-0919, Japan)

### 要旨

牛乳から水だけを除去して得られる粉乳は輸送性、保存性に優れ、必要な時に水を加えることで元の牛乳と同様に扱うことができる。このような利点から粉乳は多くの食品、またはその原料として古くから工業的に製造され、さらに製造の効率化と高品質化に向けた技術に関する研究や開発も盛んに行われてきた。本稿では、粉乳製造技術の概要を示し、次に粉乳製造工程の中心となる噴霧乾燥機と噴霧装置に関する基本的な情報を整理した。また、最近の技術動向として噴霧乾燥機の乾燥用空気の整流方法、水分の高精度な自動制御、噴霧乾燥機内や流動層内の観察技術などを紹介した。さらに新しい研究例として、多段膜濃縮を利用した効率化の技術、エクストルーダーを利用した泡沫乾燥技術、新しい造粒技術などに触れ、粉乳製造技術のこれからの姿を展望した。

### 1. はじめに<sup>1~3)</sup>

牛乳の87~88%は水であるため、輸送の効率化や保存性向上のためには、水を除去することが有効である。必要な時に水を加えること（還元）で、元の牛乳とほぼ同じように扱うことができる。このように乳、乳製品などを粉体化して粉乳とすることで、乳、乳製品の持つ栄養、風味などの品質を大きく変化させることなく、輸送性、保存性を向上させることが可能となる。

工業的な粉乳製造法が研究されるようになったのは1800年代からであり、1860年代に噴霧乾燥法が発明され、1900年代初頭には粉乳の工業的な製造方法が確立された。粉乳製造技術は乳業における重要な技術として定着し、粉乳の品質、設備の運

性、収率、エネルギー効率などの観点から噴霧乾燥する前の殺菌、濃縮などの技術とともに継続的な改良が行われてきた。

本報では、粉乳製造技術の概要、基本的な噴霧乾燥機の特徴、新しい粉乳製造技術や最近の技術動向などについて解説する。

### 2. 粉乳製造工程の概要

粉乳の製造工程は全粉乳、脱脂粉乳、育児用粉乳に代表される調製粉乳など製品の種類により詳細は異なるが、代表的な工程の流れ図は図1に示した通りである。本図は全粉乳の製造工程であるが、脱脂

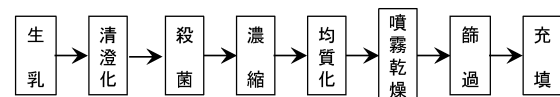


図1 代表的な粉乳製造工程の流れ図

\* E-mail: yoshinori.satake@meiji.com

粉乳製造の場合は生乳の代わりに脂肪を除いた脱脂乳を、また、調製粉乳製造では組成の調整と必要な栄養成分などを添加して作製された調合乳を用いる。

製造では、まず、遠心分離機またはフィルターなどで牛乳中に含まれる微細なゴミなどの異物除去（清澄化）を行った後、殺菌する。殺菌機としてはプレート式、チューブ式などの間接触型熱交換器、または牛乳中に蒸気を吹き込むスチームインジェクション型加熱機や蒸気雰囲気中に牛乳を吹き込むスチームインフュージョン型加熱機などの直接接触型熱交換器が用いられる。次に、噴霧乾燥のための予備濃縮として、殺菌乳を蒸発缶で固形分濃度を40～60％程度に濃縮する。ここでは蒸気により牛乳を加熱し、水を蒸発させて濃縮する。この際、熱による成分の変質を防ぐため、蒸発缶内を大気圧より低い圧力に保って、40～70℃程度の温度で蒸発操作を行う。蒸発濃縮の前にRO膜などの膜を用いて予備濃縮する場合もある。脂肪分を含む全粉乳、調製粉乳の製造では濃縮液を均質機に通液し、脂肪球を微細化して安定化する。次いで、噴霧乾燥機で濃縮乳中の水分を蒸発させて粉体を得る。噴霧された濃縮液の液滴は乾燥のための150～250℃程度の高温の熱風と接触するが、水の蒸発により液滴の表面は低い温度（露点）に保たれるため、成分への熱の影響は少ない。噴霧乾燥後、篩（ふるい）で粗大な粉や固まり粉などを除去、整粒した後に袋や缶などに充填する。

なお、調製粉乳の製造では、濃縮が不要、または小型で小能力の蒸発缶で処理可能な程度の高い固形分濃度に原材料を溶かした調合乳を用いることもある。この場合は殺菌時の濃度も高いため、たん白質などの凝集物や焦げが殺菌機内に付着したり、液に混入するなど、設備の運転性や製品品質を低下させることも多い。従って、設備仕様と処理条件は詳細に検討して決定する必要がある。

### 3. 噴霧乾燥機

#### 3-1 噴霧乾燥機の機器の構成

粉乳製造用の代表的な噴霧乾燥機の機器構成を図

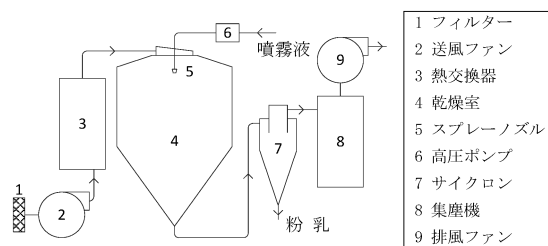


図2 代表的な噴霧乾燥機の機器構成

2に示した。乾燥用空気の送風機、液の供給・分散装置、乾燥室、粉体回収装置、排気装置などで構成される。日本国内においては乾燥用空気の加熱装置としては間接式熱交換器、液の分散装置としては後述する加圧ノズルが用いられることが多い。集塵装置にはベンチュリースクラバーが用いられることもあるが、最近は衛生性の高いバグフィルターが主流となっており、メンテナンス性に優れたCIP対応のバグフィルターが開発されている。

#### 3-2 噴霧乾燥機の型式と特徴

##### 3-2-1 1段式噴霧乾燥機（図2）

粉乳製造用噴霧乾燥機として最も基本的な型式である。乾燥用空気は乾燥室の上部から供給され、旋回しながら乾燥室内を下降する。一方、液はスプレーノズルで微粒化され、乾燥用空気とともに乾燥室の下方に至る。この間に水分が蒸発し、液滴中に40～60％程度存在した水分は粉乳中では2～5％程度となる。乾燥室内で生じた粉乳は乾燥用空気とともにサイクロンに至り、粉乳はここで乾燥用空気と分離される。なお、この型式の噴霧乾燥機を一般的な条件で運転した場合に得られる粉体の平均粒子径は50～150 μm程度の範囲である。

##### 3-2-2 多段式噴霧乾燥機

図3に多段式噴霧乾燥機の機器構成を示した。この形式の噴霧乾燥機は調製粉乳向けの噴霧乾燥機として一般的であるが、最近では全粉乳、脱脂粉乳、ホエイ粉などの生産にも用いられる例が増えており、粉乳製造用としての汎用機になりつつある。乾燥用空気は乾燥室の上方から供給され、下方に吹

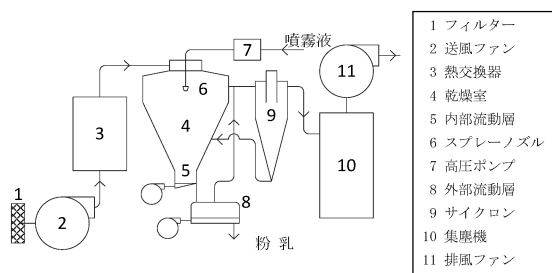


図3 多段式噴霧乾燥機の機器構成

き降ろされる。この熱風により噴霧された液滴は粉体化され、水分5~10%程度まで乾燥される(1次乾燥)。粒子径がある程度大きく重質な粉体は乾燥室下部から上方に向かって送風される気流により流動層(内部流動層)を形成し、ここで水分3~5%程度まで乾燥される(2次乾燥)。さらに乾燥室から排出された粉体は外部流動層(振動流動層が一般的)に供給され、ここで水分2~4%程度まで乾燥(3次乾燥)、冷却されて系外に排出される。一方、乾燥室からの空気出口(排風口)は乾燥室上部に設けられているため、乾燥室の上方から下方に向かって吹き出された1次乾燥用空気は乾燥室内で反転し、2次乾燥用空気とともに乾燥室上方に向かう。このように多段噴霧乾燥機では乾燥室内で下方から上方に向かう空気の流れが存在するため、乾燥室上方から噴霧された液滴が上方に向かう空気に同伴された粉体と衝突、合一して粒子径が増大した顆粒を形成する機構が働く。なお、粒子径が小さく軽質な微粉は乾燥用空気とともに乾燥室を出てサイクロンに至り、サイクロンで空気から分離されて乾燥室に戻される(ファインズリターン)。この型式の噴霧乾燥機を一般的な条件で運転した場合に得られる粉体の平均粒子径は150~300 $\mu\text{m}$ 程度の範囲である。

### 3-3 噴霧装置とその機構<sup>4~6)</sup>

液を噴霧する装置は得られる粉乳の品質(粒子径、溶解性など)などに影響する噴霧乾燥における最も重要な装置の1つであり、その代表的な形式を以下に紹介する。

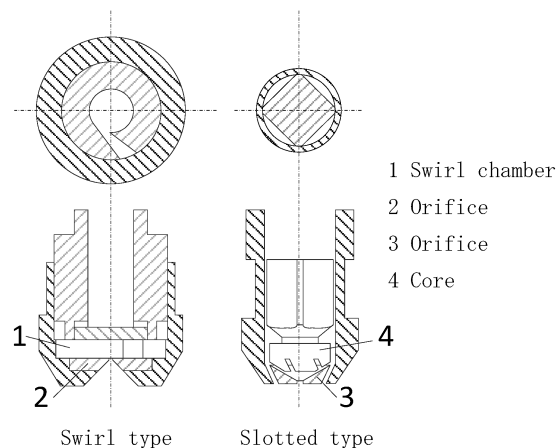


図4 加圧ノズルの概略図[引用文献6)中の図を改編]

#### 3-3-1 加圧ノズル

図4に加圧ノズルの概略図を示した。加圧ノズルは圧力エネルギーを液の運動エネルギーに変換することで液滴を生成する原理であり、渦巻き型(Swirl type)、スロット型(Slotted type)に大別される。液は図の上方から供給され、スワールチャンバーまたはオリフィスとコアで旋回流を形成し、オリフィスから噴射されて液滴となる。オリフィスとスワールチャンバーまたはコアの組み合わせを変更することで、液滴径や噴霧圧力を調整することができる。渦巻き型は液の粘度が微粒化の程度に影響を及ぼしやすく液滴径の制御がやや難しいが、流路が広く、閉塞のリスクが小さいことから、ホエイやホエイUF膜透過液などのように結晶乳糖を多く含む液の噴霧に多用される。一方、スロット型は粘度が微粒化に及ぼす影響が小さいため、液滴径を制御しやすい。調製粉乳、脱脂粉乳などの製造に使用される場合が多い。

加圧ノズルは大きな液量への対応、操作性、メンテナンス性に優れていることから、粉乳の製造において最も一般的に使用されている。

#### 3-3-2 ロータリーアトマイザー

図5にロータリーアトマイザーの概略図を示した。回転円板(Vaned wheel)の遠心力を利用して液を液滴化する方法である。ロータリーアトマイ

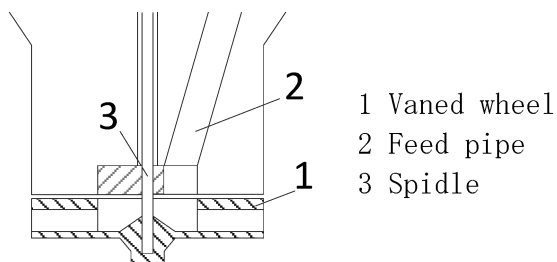


図5 ロータリーアトマイザーの概略図 [引用文献6) 中の図を改編]

ザーは回転数 (5,000~60,000 rpm 程度) と液の供給量をそれぞれ独立して調整することが可能である。このため幅広い液量に対応することができる。

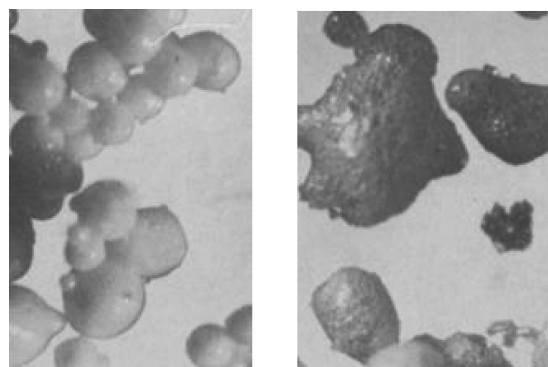
### 3-3-3 2 流体ノズル

2 流体ノズルは圧縮空気の旋回流に液を投入し、気体と液体のせん断力により噴霧する。上述の加圧ノズルやロータリーアトマイザーと比較して噴霧された液滴径が小さい、粘度の高い液への対応幅が大きいなどの特長がある。一方、圧縮空気の使用量が多い。実験室規模の小規模設備などで使用されることが多く、粉乳製造用の大規模生産機で使用される例はほとんどない。

### 3-4 泡沫乾燥法<sup>7)</sup>

次に噴霧乾燥に関連する基本技術の1つを紹介する。

泡沫乾燥法とは、液に窒素や二酸化炭素などの気体を混合して泡沫化し、これを噴霧乾燥する方法である。気体の混合にはスタティックミキサーやカーボネーターなどが用いられることが多い。液に微細な気泡が多数含まれるため、乾燥して得られた粉体には多数の微細な空胞が形成される。このため、通常の噴霧乾燥と比較して、乾燥速度が大きい、得られた粉体のかさ密度が低い、得られた粉体の表面積および粒子径が大きいなどの特徴がある。一方、全粉乳など油脂を含む製品にこの技術を適用した場合、保存中の油脂酸化が通常よりも早く、風味の劣化が顕著になるなどの傾向がある。図6に泡沫乾燥した粉体の顕微鏡写真を示した。乳業向けとして



通常の噴霧乾燥 泡沫乾燥  
図6 通常の噴霧乾燥と泡沫乾燥により得られた粉体の電子顕微鏡写真<sup>8)</sup>

この技術が使用されることは少ないが、粉末果汁やコーヒーホワイトナーなどでかさ密度の調整や溶解性の向上などの目的で利用されることがある。

### 3-5 最近の噴霧乾燥機の技術動向

噴霧乾燥機に関する最近の技術動向として、噴霧乾燥機の装置メーカー各社からのヒアリングやシンポジウムなどで得た情報を紹介する。

#### 3-5-1 乾燥用空気の整流<sup>9)</sup>

噴霧乾燥機の乾燥室内壁面への粉の付着は噴霧乾燥機の連続運転性を低下させる最も重要な原因の1つである。壁面に付着した粉体は高温下で着色粉、焦粉となって不定的に製品に混入し、品質を低下させる。

乾燥室内壁面への粉の付着は噴霧された液滴が水平方向に飛翔し、壁面に到達するために発生するが、これは液滴および乾燥用空気がともに水平方向の(壁面方向に向かう)速度成分を持つことによる。液滴は噴霧装置より下向きに噴霧されるが、ある程度の水平方向の速度成分を持って噴霧されるため乾燥室壁面に到達する。このことはロータリーアトマイザーで顕著である。また、乾燥用空気については、乾燥室内に旋回流として投入される場合は勿論のこと、下向きに吹き降ろされる場合も整流が不十分で水平方向の速度成分が生じることが多い。この場合、この流れに伴った液滴や未乾燥粉は壁面

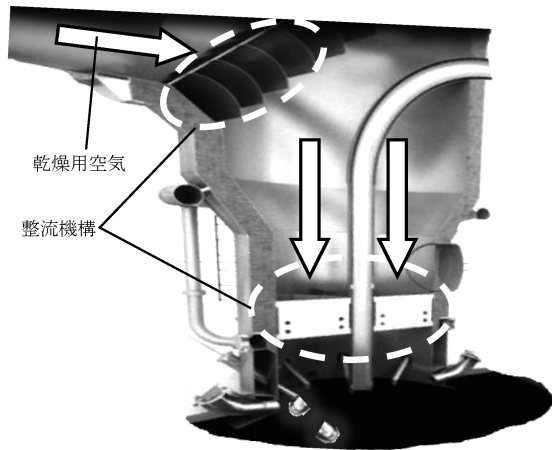


図7 乾燥用空気の整流機構の概要図〔引用文献9)中の図を改編〕

に至る。

このように噴霧装置の特性と乾燥用空気の流れから液滴または未乾燥粉が乾燥室内壁に付着することは噴霧乾燥機の運転上の大きな課題であり、この程度を軽減するために乾燥室の寸法を大きく設計する傾向にあった。すなわち乾燥室容積当たりの蒸発量が小さく、効率的ではなかった。

しかし、最新の噴霧乾燥機では乾燥用空気の整流の程度を高めて水平方向の速度成分を最小化し、壁面方向に向かう空気の流れを極力抑制して粉体付着を低減させている。これにより乾燥室の容積当たりの水分蒸発量を大きく設計することが可能となり、結果としてコンパクトな乾燥室となる。具体的には、従来は皿板やオリフィスなど抵抗体となる構造物を用いて空気を整流していたが、最近では図7に示した様な流れ方向に空気を切るように整流する格子状に区画化された構造物を用いる。これにより空気の渦や水平方向の速度成分の発生を最小化することが可能である。

### 3—5—2 水分制御の高精度化<sup>9)</sup>

噴霧乾燥によって得られる粉乳中の水分は乾燥用空気の温度と湿度、液の濃度と温度、排気の温度などの影響を受ける。乾燥用空気の湿度は噴霧乾燥機が設置された地域の気象条件や局所的な雰囲気条件などにより、また、液の温度と濃度は噴霧乾燥前

の濃縮工程の運転条件の変動や制御状態により変化する。これらの影響を受けて粉乳の水分も常に変動する。粉乳製品では過剰に高い水分は、色調、風味などの劣化、固結の発生などの品質低下を促進するため、特に製品規格として定めた水分の上限値を逸脱させないことが重要である。従って、粉乳製造時には、安全率を考慮して水分の設定値を低く目に設定することが一般的である。しかし、逆に過剰な乾燥による品質の低下や粉乳の重量減による経済的な損失も発生する。

このような問題を解決するため、噴霧乾燥機の運転条件を自動で高精度に制御して粉乳の水分の変動を最小化するシステムが開発された。水分の変動幅が小さいことから、結果として水分の設定値を引き上げることが可能となる。このシステムでは粉乳の水分と液の濃度とその変動をモニタリングして、液の流量、乾燥用空気の温度、内部流動層の送風温度などを精密に制御して排気の温度と湿度を安定化させ、水分の変動幅を最小化する。図8に従来の制御とこのシステムの制御による粉乳の水分の変動の比較を示した。図の横軸は時間、縦軸は粉乳の水分であり、図中破線左側の時間帯では従来の制御、右側では高精度自動制御により噴霧乾燥機を運転した結果である。図より両制御法による水分の変動の差異は明らかである。これにより、水分の設定値を規格上限に近づけた運転も可能となる。

### 3—5—3 ノズルカメラ<sup>9)</sup>

不適切な運転条件やスプレーノズルの組付け不良などにより、ノズル先端に過剰な粉体の付着が発生する可能性がある。この場合、付着した粉体は高温に晒されるため時間の経過とともに焦粉化して、これが製品に混入することで品質の低下を招いたり、まれに付着した粉体が発火して粉塵爆発を引き起すこともある。

このようなノズルへの粉体の付着の問題に対応するために、最近では乾燥室内のノズル近傍を観察するためのカメラ（ノズルカメラ）を導入する例が見られる。ノズルカメラの概略図およびその画像を図

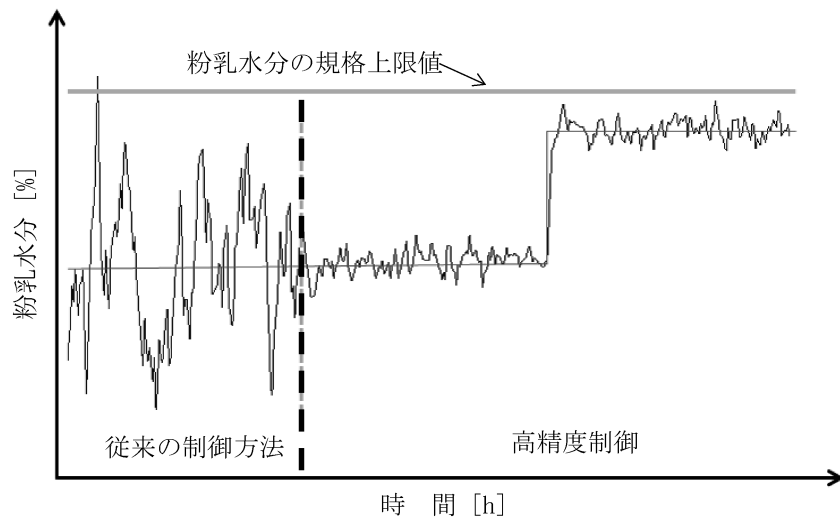


図8 従来の制御と精密自動制御による粉乳の水分の変動 [引用文献<sup>9)</sup>中の図を改編]

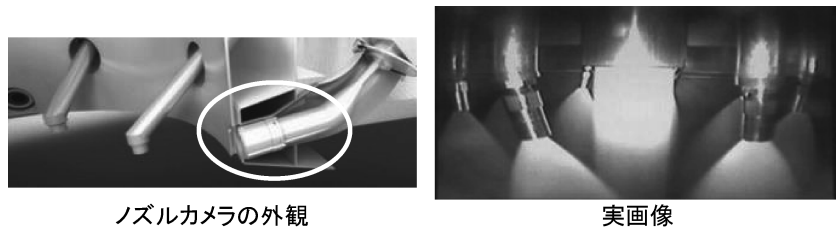


図9 ノズルカメラとその画像<sup>9)</sup>

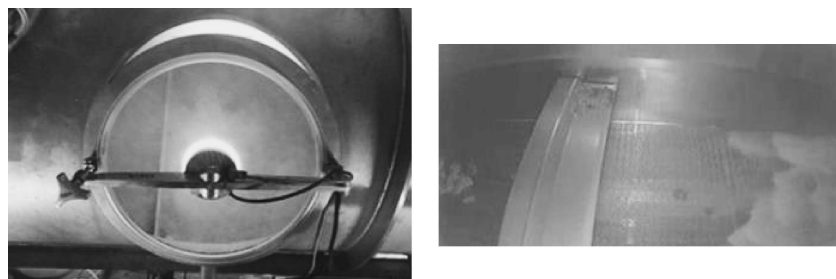


図10 外部流動層内の透明マンホール (左) とカメラ画像 (右)<sup>10)</sup>

9に示した。このカメラでは実画像と熱画像のモニタリングが可能である。オペレーターは実画像により目視で乾燥室内部の状況が確認でき、また、図には示していないが熱画像で火種の発生が疑われる350℃以上の温度を感知した場合は自動で噴霧乾燥機の運転を停止させるなどの処置が取られる。

#### 3-5-4 流動層内部の観察<sup>10)</sup>

多段式噴霧乾燥機では内部流動層や外部流動層での粉体層の高さや粉体の流動状態は造粒や乾燥の程度に影響し、これらを良好な状態に保つことは粉乳

の品質を制御するために重要である。しかし、従来は流動層上下の差圧や風量などの計測値から流動層内部の状態を推測するか、スリット型の小型の覗き窓から内部を観察するにとどまっており、得られる情報は限定的であった。最近では図10に示したようにステンレス製のマンホールを透明な樹脂製に変更し、流動層の状態を広範囲に直接観測可能とすることが多い。また、マンホール中央のLEDライト部にカメラを設置することで、制御室などから遠隔で流動層の状態を常時モニタリングすることも可能である。

#### 4. 最近の粉乳製造技術の動向

研究段階ではあるが興味深い粉乳製造技術のいくつかを紹介する。

##### 4-1 多段膜濃縮を利用した高効率な粉乳製造<sup>11,12)</sup>

粉乳製造では熱効率の低い噴霧乾燥機の負荷を下げるため蒸発濃縮を併用して、予め多くの水を蒸発させてから噴霧乾燥するのが常法である。しかし、蒸発は水の相変化を伴うため、蒸発潜熱を与える必要がある。このため、相変化を伴わずに水の除去が可能な膜（逆浸透（RO）膜，ナノ濾過（NF）膜）濃縮で蒸発濃縮前の予備濃縮を行って省エネルギー化を図ることが多い。しかし、膜濃縮においては、浸透圧の上昇，濃縮液の粘度の上昇および主にたん白質の膜表面への付着などのため濃縮濃度には限界がある。そこで，図11に示したような多段膜濃縮プロセスを利用して膜による高濃度濃縮を行い，蒸発濃縮機を用いることなく噴霧乾燥用の濃縮乳を得るための研究が報告されている<sup>13)</sup>。

- ①生乳などの原料となる液を伝統的なスパイラル型などの限外濾過（UF）膜を用いて濃縮する（たん白質画分の濃縮）。
- ②図12に示した回転型 UF 膜により，さらにたん白質画分を濃縮する。
- ③①スパイラル型および②回転型の両方より得られる UF 膜透過液を RO 膜または NF 膜で濃縮する。

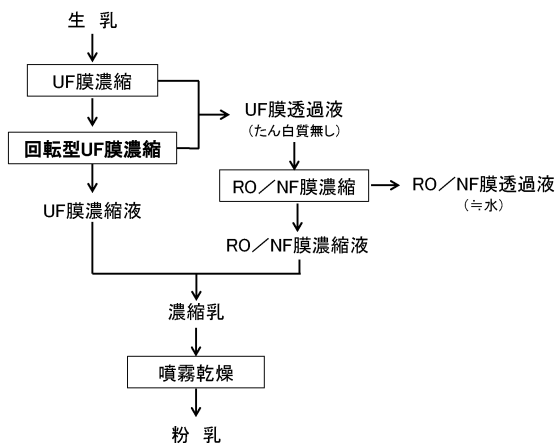


図11 多段膜濃縮を利用した新規な粉乳製造工程

①および②の UF 膜透過液はたん白質が含まれないため，RO 膜/NF 膜濃縮ではたん白質付着が発生せず，浸透圧に打ち勝つための十分な圧力を加えて高濃度まで脱水することが可能である。

④③の RO/NF 濃縮液と①および②の UF 膜濃縮液を混合して噴霧乾燥機に供給する濃縮乳とする。

この方法は蒸発濃縮工程がないためエネルギー効率が高い。

なお，回転型 UF 膜装置はドイツの ANDRITZ SEPARATION 社 から Dynamic CrossFlow Filter として発売されている装置である。図12に示したように円盤状の膜（セラミック膜）を多層に重ねた複数の軸を，円盤状の膜の一部が互いに重なるように組み合わせて，それぞれの軸を回転させる。これにより膜の表面に強制的な流れを形成して，膜面上への汚れの付着を抑制する仕組みの装置である<sup>14)</sup>。高濃度でも安定した透過流束が得られることが特徴である。

但し，この回転型 UF 膜装置は乳業分野での使用実績はなく，乳処理用設備としての衛生性，安定性などについては現時点で未知数であり，乳業分野での実用化に向けた今後の研究が待たれる。加えて，図11の流れ図には粉乳製造で必須である殺菌工程が含まれておらず，この点についても検討する必要がある。すなわち，殺菌後に膜濃縮する場合，殺菌での加熱により乳中に生ずるたん白質の凝集物などが膜の透過性能に影響を与える。また，膜装置自体

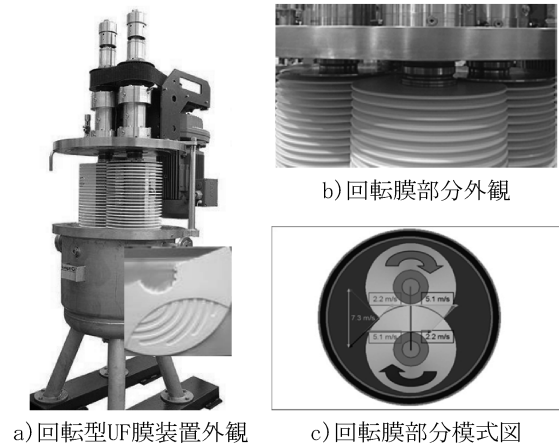


図12 回転型 UF 膜装置<sup>14)</sup>

の機器殺菌法や衛生性の維持など、膜装置の仕様、設計上の工夫などが必要となる。一方、膜濃縮後に殺菌する場合は、高濃度液の殺菌となることから、対応可能な殺菌機の型式の選定やその運転の安定性に関する検討が必要となる。このように、いずれの工程を採用するにしても多くの課題が挙げられ、図11の流れ図において、どの位置で殺菌するかは極めて重要な点である。しかし、この方法は従来法とは全く異なる画期的な粉乳製造法として今後の展開が期待される。

#### 4-2 エクストルーダーを利用した噴霧乾燥技術<sup>15,16)</sup>

先述した泡沫乾燥技術の1つとしてエクスト

ルーダーを用いた EPT (Extrusion Porosification Technology) が挙げられる。通常の泡沫乾燥では液の固形分濃度は45~50%程度以下の範囲である。一方、粉乳製造のエネルギー効率を高めるためには液の固形分濃度は高いことが望ましく、高濃度化が求められるが、高い濃度では粘度も上昇してスタティックミキサーによる気体の混合は困難となる。そこでエクストルーダーにより強制的に気体を混合分散させる技術として EPT が考案された。図13にその概略の流れ図を示した。エクストルーダーによる機械的な攪拌により、57%程度の高濃度にまで濃縮した液に気体を良好に分散することが可能である。また、一般に高濃度の液を噴霧乾燥する場合、蒸発する水の量が少ないため、得られる粉

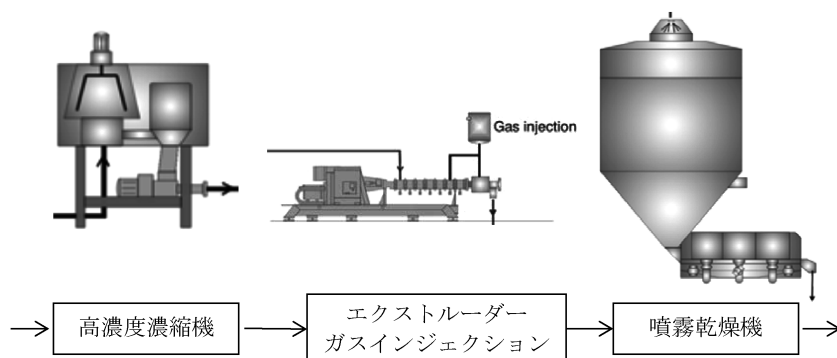


図13 EPTの概略流れ図 [引用文献15) 中の図を改編]

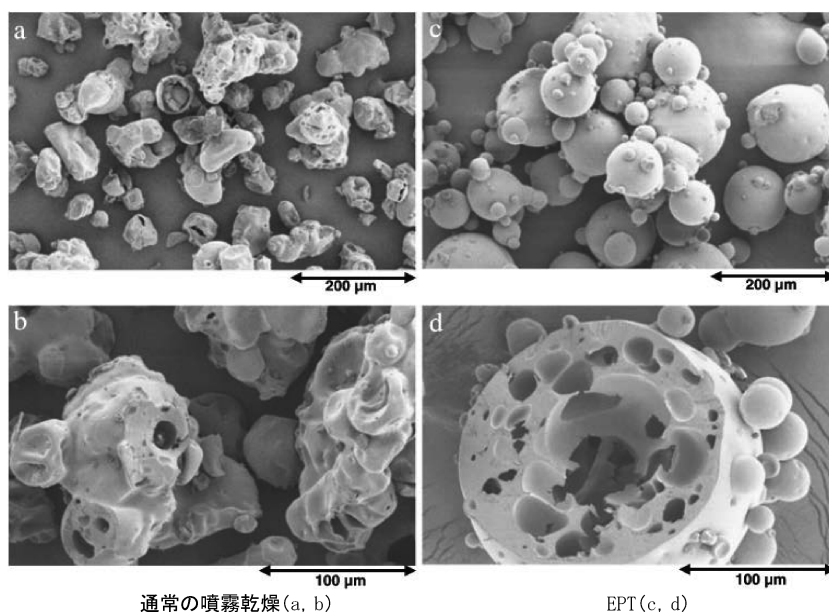


図14 通常の噴霧乾燥と EPT により得られる粉乳の電子顕微鏡写真<sup>16)</sup>



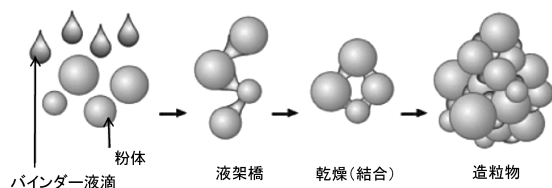


図15 一般的な造粒過程 [引用文献17) 中の図を改編]



図16 新しい造粒方法 [引用文献17) 中の図を改編]

乳の内部の空隙が小さく、溶解性が低下する傾向にある。しかし、EPTでは均一に分散された気体により粉乳中の空隙を十分に維持し、良好な溶解性を得ることが可能となる。図14に通常のスプレー乾燥とEPTにより得られた粉乳の電子顕微鏡写真を示した。内部の空隙の大きさなどの違いが観察される。

#### 4-3 新しい造粒技術<sup>17)</sup>

顆粒粉は溶解性や取扱い性に優れるが、先の図2に示したような1段式スプレー乾燥機では顆粒粉を得ることは困難で、スプレー乾燥後に造粒工程が必要となる。図15に顆粒粉を得るための従来の一般的な造粒過程の模式図を示した。粉体に水や糖液などのバインダー液をスプレーして粉体粒子同士を決着させ造粒する。

一方、効率的に顆粒粉を製造する新しい方法が検討されている。図16に新しい造粒方法を示した。粉体にバインダー液を大量に加えて、ペーストまたはスラリー状にする。ここにさらに粉体を添加、混合することで造粒された粉体を得る。その後、流動層乾燥機などで所定の水分まで乾燥する。粉乳原料類を還元、調整して殺菌、濃縮、スプレー乾燥（および造粒）する必要がないため、極めてエネルギー効率が低い顆粒粉の製造方法である。得られる顆粒乳の溶解性、保存性などの品質を精査する必要がある

が、今後の研究と技術開発の進展が待たれるユニークな技術である。

## 5. おわりに

100年以上の長い歴史を持つ粉乳製造技術は継続的に様々な乳製品やその原料類の製造に利用されており、高度に成熟した技術とも思われる。しかし、この拙稿にその一端を紹介したように現在でも技術の改良や研究開発が行われ、日々進化している。世界規模での人口増加とそれに伴う食糧増産の要求に応えるために乳製品の需要が高まることは必至である。人類の栄養供給減として重要な乳成分を高い品質で経済的、効率的に粉体化するための技術は今後も重要であり、更なる技術革新が求められている。本報が将来を担う粉乳技術者の業務の一助となれば幸いである。

## 引用文献

- 1) 木村進, 亀和田光男:「食品と乾燥」, 光琳選書 (2008)
- 2) 山内邦男, 横山健吉:「ミルク総合辞典」, 朝倉書店 (2004)
- 3) 桐栄良三, 水科篤郎:「化学工学概論」, 産業図書 (1999)
- 4) 松野隆一, 中村厚三, 古田武, 田門肇:「濃縮と乾燥」, 光琳 (1996)
- 5) 化学工学会:「改訂7版 化学工学便覧」, 丸善出版 (2011)
- 6) K. Masters:「SPRAY DRYING handbook」, Longman scientific & Technical (1991)
- 7) F. P. Hanrahan, A. Tamsma, K. K. Fox, M. J. Pallansch: J. Dairy Sci., 45, 27 (1961)
- 8) E. Berlin, P. G. Kliman, M. J. Pallansch: J. Dairy Sci., 50, 659 (1967)
- 9) J. Bonke: Post-drying Technologies, The IDF Symposium on Concentration and Drying Technologies of Dairy Products, Dublin (2016)
- 10) GEA プロセスエンジニアリング㈱からの情

- 報 (2014)
- 11) 豊田活 : MRC News, 56, 1 (2016)
  - 12) 豊田活 : MRC News, 58, 33 (2017)
  - 13) M. Marx, J. Dumpler, U. Kulozik, M. Grunow: Environment Conference, IDF World Dairy Summit 2015, Vilnius (2015)
  - 14) ANDRITZ Group: <https://www.andritz.com/> (2016)
  - 15) P. Schuck: Dairy Science Technology Conference, IDF World Dairy Summit 2015, Vilnius (2015)
  - 16) J. M. Bouvier, M. Collado, D. Gardiner, M. Scott, P. Schuck: Dairy Sci. Technol., 93, 387 (2013)
  - 17) B. Cuq: Post-drying Technologies, The IDF Symposium on Concentration and Drying Technologies of Dairy Products, Dublin (2016)