

乳の加熱処理と「おいしさ」

神谷 哲*

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

Heating process and deliciousness of milk and milk products

Tetsu Kamiya, Ph.D.

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

要約

乳および乳製品の製造において、加熱処理は重要かつ中心的な加工プロセスの一つである。加熱処理の装置や方法は複数種類あるが、それぞれの方法により最終製品の風味、物性は異なり、これが製品の「おいしさ」の評価に影響を及ぼす。本稿では、加熱方式の異なる装置の概要（間接加熱方式、直接加熱方式、通電加熱方式、摩擦熱方式）を説明するとともに、それぞれの装置で処理した製品の香り成分の特徴について紹介する。また、加熱操作単体のみならず、加熱前後の工程を適宜変えることで、最終製品の風味発現のバランスを制御する方法（脱酸素処理、熱履歴制御、低温および非加熱処理）について、工程の概要ならびに風味発現の特徴に関する情報を紹介した。それぞれの装置、工程にはメリット・デメリットが存在するので、要求される商品特性を考慮した設備および工程設計が重要である。

1. はじめに

栄養価が高く、必須栄養素を多く含む乳・乳製品の加工において、加熱操作は極めて重要なプロセスである。ヒトにとって有用な栄養素は、腐敗や劣化を引き起こす微生物にとってもまた有用であることから、微生物の働きを制御しながら、風味の良い乳・乳製品を製造するために、乳業技術者は常に既存の技術を改善し、新しい技術に挑戦している。

本稿では、一般的な加熱処理装置の概要を振り返るとともに、乳業ではまだあまり使われていないが効果的と思われる最新の加熱技術についての情報を紹介する。また、加熱処理の前後工程を工夫するこ

とによって風味の制御を行っている実例や、低温・非加熱処理による乳風味の維持に関する最新情報についても紹介する。

2. 各種加熱処理方式について

乳・乳製品の加熱方式として一般的に用いられる方法は、①間接加熱方式、②直接加熱方式である。これらの方式は比較的古くから使われているため、多くの理論的・実験的研究がなされ、また多くの知見が各社に蓄積されている。

一方、最近では用途によっては③通電加熱方式の導入も増えてきた。この方式は古くはフルーツ・ブレパレーションなど固形物を多く含む製品や、かまぼこなどの粘度が高い食品用途で使われることが多かった。昨今の技術革新によりいくつかの課題が解

* Tel: 042-632-5803, Fax: 042-637-3011
E-mail: tetsu.kamiya@meiji.com

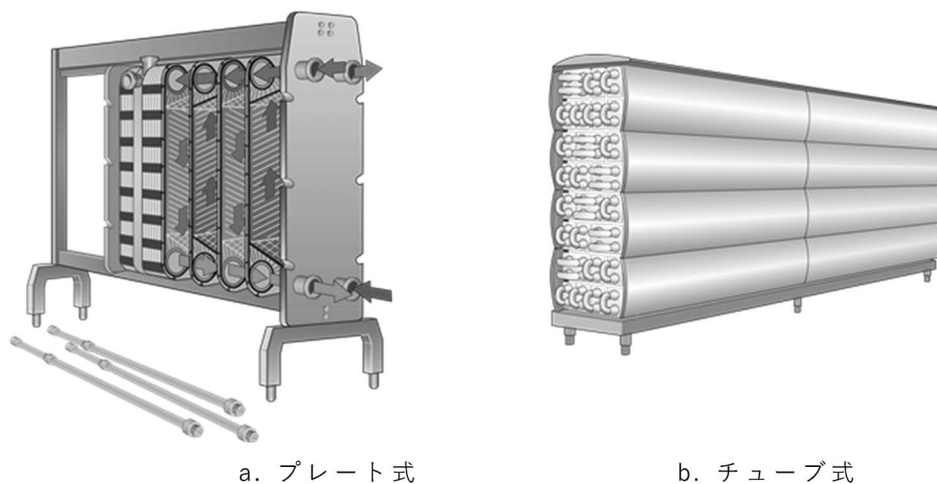
決され、通電加熱方式も低粘度の液体（卵黄液やライスミルク、ゼリー飲料、高たんぱく製品）での導入が国内外で進んできた。

また、新しい加熱方式としては、④摩擦熱方式の加熱装置なども近年開発が進んでいる。この方式は、微小間隙を有する回転体の隙間に液体を通液させ、液体が微小間隙を通過する際の摩擦熱で、液体自身を加熱する方式である。この方式の加熱装置では熱媒を用いることがないので、スケールフリーの加熱が可能であると言われており、熱変性しやすく、汚れが付着しやすい高たんぱくの製品加工用途での導入が見込まれている。本章では、それぞれの加熱方式の概要、構造ならびに工程上重要な情報について述べる。

2.1 間接加熱方式

間接加熱方式は、古くから乳業プロセスに用いられている。一般的な装置の外観¹⁾を図1に示す。大別して、多数のプレートを組み合わせる「プレート式」(図1a)ならびに、2重管(図1b)もしくは3重管の構造を持つ「チューブ式」の構造がある。チューブ式に関しては単管型(図2a)と多管型(図2b)がある。

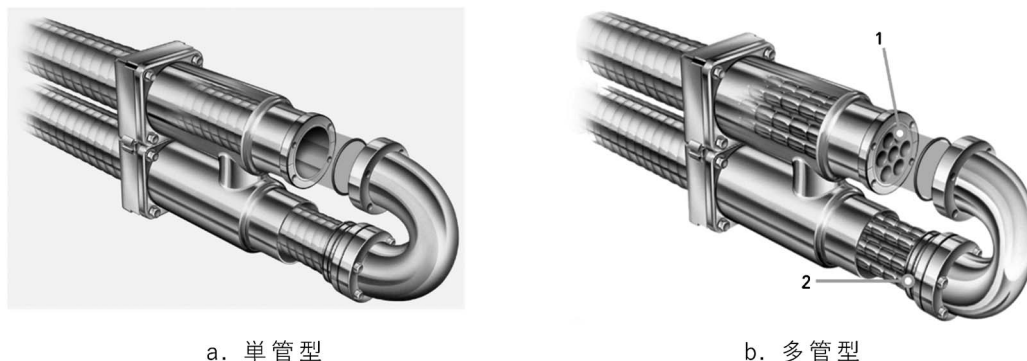
加熱の仕組みは図3aに示したように、中央に設置された金属の板の左に高温の媒体、右側に低温の媒体があり、板を介して間接的に熱を伝える方式である。図3b, 図3cそれぞれプレート式、チューブ式の伝熱の模式図を示す。一般的にプレート式は単位設置面積あたりの伝熱面積が大きいいため設置面積が小さく、またプレート編成の変更により比較的容易に熱履歴を調整できる。一方、チューブ式はプ



a. プレート式

b. チューブ式

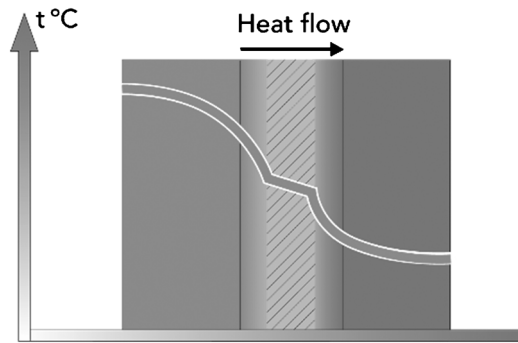
図1 間接加熱式熱交換器の外観¹⁾



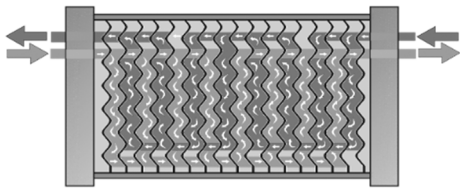
a. 単管型

b. 多管型

図2 チューブ式の型¹⁾



a. 間接加熱 伝熱概念図

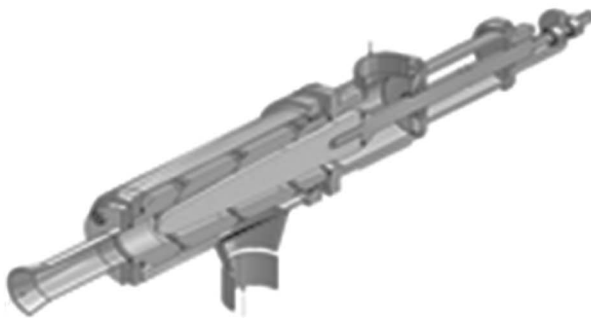


b. プレート式模式図



c. チューブ式伝熱模式図

図3 間接加熱方式 伝熱の概念図¹⁾



a. インジェクション方式²⁾



b. インフュージョン方式³⁾

図4 直接加熱方式概略図

プレート式と比較して耐圧が高く、より高い線速度での運転が可能であるため、汚れの付着の成長を抑制でき、長時間運転に向いている。またチューブ式はプレート式と比較してガスケット等が少なく、交換も容易なため、現場でのメンテナンス性が良い。双方の構造ともメリットとデメリットがあるため、要求されるプロセスに応じて方式を選定する必要がある。

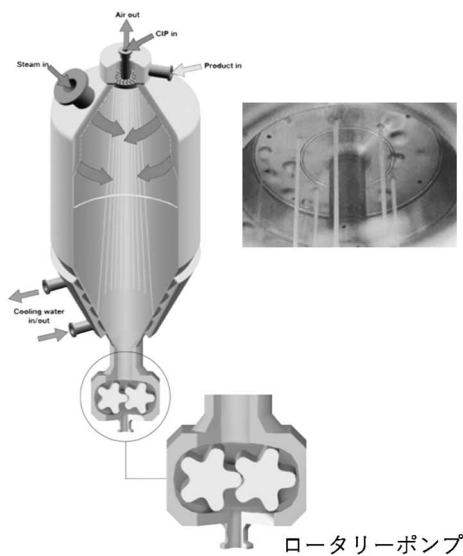
2.2 直接加熱方式

直接加熱方式は、加熱用の蒸気が製品と**直接接触**して、**蒸気が凝縮する際の凝縮潜熱の放出によって処理液を加熱**する方式である。製品の中に蒸気を注入する「インジェクション方式」(図4a)と蒸気雰囲気の中に製品を流下させる「インフュージョン方式」(図4b)の2つの方式がある。

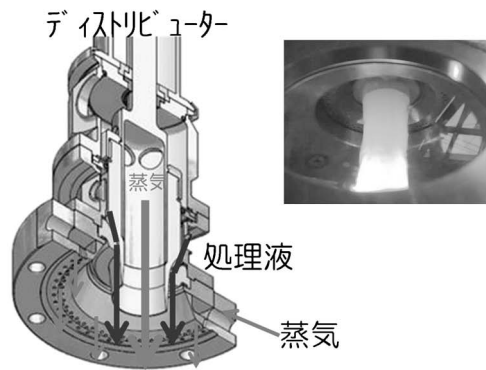
インジェクション方式はインフュージョン方式と比較してコンパクトかつ構造がシンプルでメンテナ

ンス性が良い。またノズルでの汚れの付着を軽減するための材質の最適化や、より高いエゼクター効果を発揮するための構造設計など、運転中のノズルの開度を調整して凝縮時の音や振動を低減させることが可能なノズルもある²⁾。

インフュージョン方式は、インジェクション方式と比較すると、蒸気—処理液の温度差 (ΔT) が小さい条件での昇温が可能で、また保持時間の開始点が明確であり、処理液を過度の加熱状態にすることなく加熱できる。蒸気雰囲気中に製品を供給する方法や蒸気の投入の方向（並流、対向流）、付着抑制のための壁面冷却の方法など、インジェクション方式の装置同様、各社とも様々な工夫を行っている。図5に特徴的な構造の一例を示す。図5aは中実の液柱として蒸気と処理液を接触させているが、図5bでは薄膜円筒の内側と外側から蒸気で製品を挟み込む形で処理液と蒸気を接触させている。チャンバーからの液の排出方法もいくつかの方法があり、図4bに示した方法では遠心ポンプを利用し、液の先入れ先出しによる液の滞留抑制を可能にしている。図5aは、チャンバー下部にロータリーポンプを設置して、極短時間（0.5秒～）の保持時間を可能にする「ホールディングセル」の機構を有する。



a. 中実液柱方式⁴⁾



b. 薄膜円筒方式²⁾

図5 インフュージョン方式 液供給方法

また、ポンプを用いず、差圧だけで液を排出する方式の装置もある。

2.3 通電加熱方式

通電加熱方式は、導電性の処理物に通電し、処理物自身の電気抵抗によって自己発熱する現象を利用して加熱する方式である。古くは果肉などを含む液体や高粘度の食品の処理などに利用されてきた。低粘度の液体の場合、配管内の流れの速度分布（壁面が遅く、中心が早い）ならびに、電流密度の分布により、配管内で温度ムラが発生する。結果として局部的に沸騰が起り、運転中に配管や電極近傍に汚れが付着する課題も散見されていたため、通電加熱方式が低粘度の液体である乳・乳製品に用いられることはあまりなかった。

昨今の技術革新により、より早い線速度で完全な乱流状態で処理液を通液させる新しい通電加熱装置も国内外での導入が始まっている。通電加熱装置の概略図について、従来の層流方式（図6a）と新しい乱流方式（図6b）を対比して示す。

乱流方式の装置の設計指針⁵⁾は図7に示した通り、①確実に乱流状態（レイノルズ数： $Re = 3000 \sim 4000$ 以上）となる配管径にすること、ならびに②

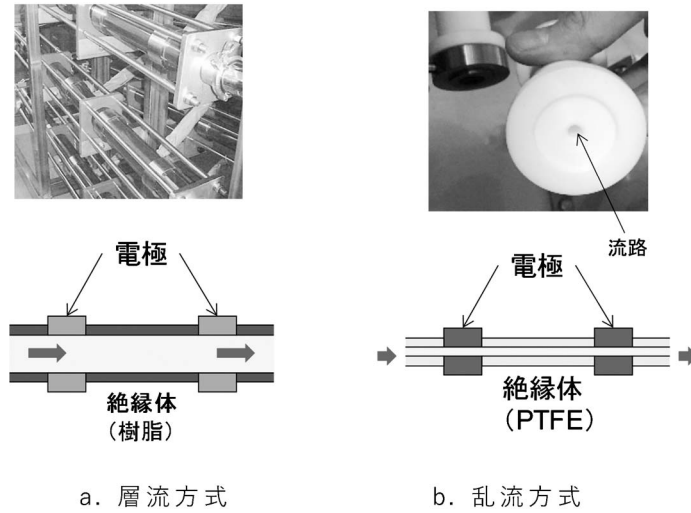


図6 通電加熱方式

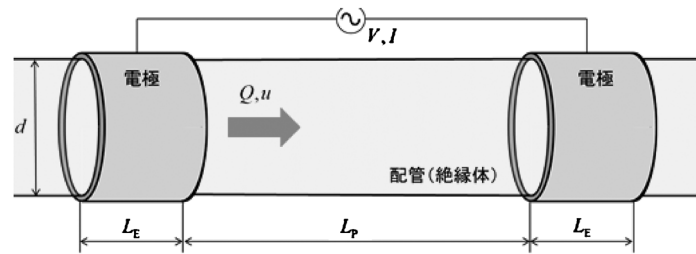


図7 乱流方式の設計指針説明図

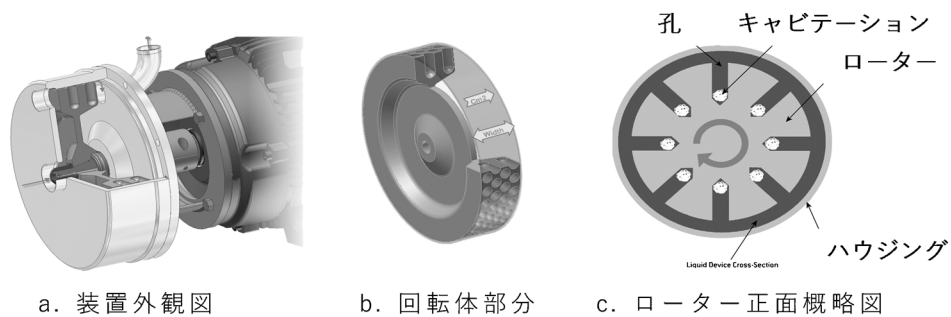


図8 摩擦熱方式の概略図⁶⁾

より低い電流密度になるように電極を配置・設計すること，以上2点が重要である。どちらも従来の通電加熱方式の課題であった，電極での汚れの付着，系内の温度ムラの抑制に寄与する。

2.4 摩擦熱方式

加熱処理方式の技術情報整理の最後に，今後導入の可能性がある「摩擦熱方式」の装置について紹介する。この方式は，微小間隙を有する回転体の隙間

に液体を通液させ，液体が微小間隙を通過する際の摩擦熱で，液体自身を加熱する方式である。装置の概略図を図8に示す。

図8aに示した通り，本装置はポンプのような形状をしており，コンパクトなのでインラインで既存プロセスに導入することが可能である。回転体部分は図8bに示したとおり，回転体の外周部分に円形の孔が空いており，この穴の中で図8cに示したようなキャビテーションが発生し，孔表面近傍で激し

く液が動きながら摩擦熱で発熱し、均一かつ壁面への汚れの付着を抑制した「スケールフリーの加熱」が可能になる。

本機構の装置は、回転数と滞留時間で昇温時間が制御できるが、摩擦熱だけで大幅に昇温することはできない。よって既存の加熱方式で予熱を行い、最終加熱部だけ本機構の装置を使うなどすることで、異なる加熱方式のデメリットを解消した、新しい加熱プロセスの開発も可能になると考えられる。

2.5 殺菌方法の違いによる加熱生成物と香り成分の比較⁵⁾

これまで紹介した加熱装置において（摩擦熱方式を除く）、同一の殺菌条件（130℃ 5秒）で処理した際の代表的な香り成分と加熱生成物の分析結果を図9に示す。加熱の熱履歴の多寡と相関する Furosine 濃度を図9aに、また乳の代表的な香り成分の指標となる Acetone の濃度を図9bに示した。間接加熱、ならびに層流式の通電加熱は、熱履歴の値が大きいので Furosine 濃度が高いことが分かる。一

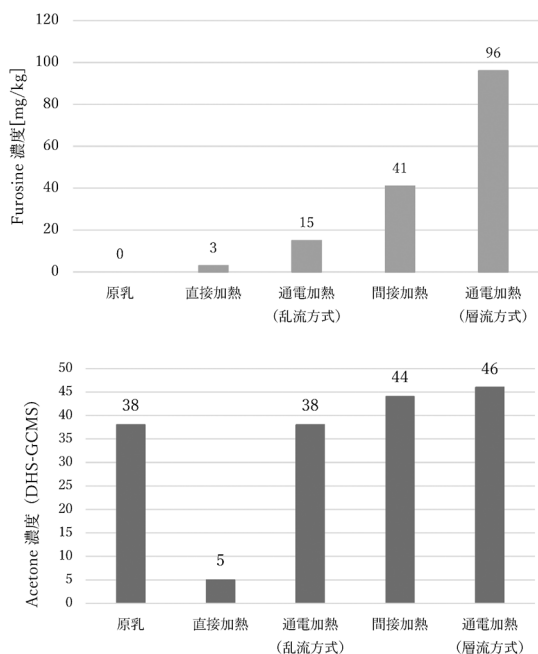


図9 殺菌方法の違いによる乳の香り成分ならびに加熱生成物の比較⁵⁾
 (上：a. Furosine 濃度下：b. Acetone 濃度)

方、直接加熱方式は熱履歴の値が小さいので Furosine 濃度は低いものの、真空脱気による冷却工程があるため、Acetone 濃度は大幅に減少することが確認できる。また乱流式の通電加熱は、小さい熱履歴の値で乳風味を維持しながら加熱処理できることが確認できる。それぞれの加熱方法により特徴的な風味バランスの製品ができることが分かる。

3. 加熱時の風味変化を抑制・制御する技術

前章では、加熱装置単体の特徴や構造、および加熱のメカニズム由来のメリット・デメリットについて述べた。本章では、加熱前後の工程の違いによる、加熱時の風味変化を抑制・制御する技術について述べる。

同一の処理装置を用いた場合でも、加熱前後のプロセスを変えることで乳・乳製品の風味発現の傾向を制御できるため、各社が様々なノウハウを駆使して、製品に反映し、顧客の多様な嗜好に対応している。代表的なプロセスの種類は、①脱酸素処理、②熱履歴制御、③低温および非加熱処理に大別される。以下ではそれぞれのプロセスの特徴について述べる。

3.1 脱酸素処理

加熱処理前の液中の溶存酸素を低下することで、処理液の加熱時の酸化を抑制し、風味の良い製品を製造できることが果汁や飲料分野では広く知られていた。乳・乳製品に関しても同様の効果が得られることが分かり、加熱前に溶存酸素を低減するプロセスが開発された。脱酸素は以下の2つの操作、a. 窒素による放散操作⁷⁾、b. 真空による脱気操作⁸⁾に大別される。脱酸素工程の概略図を図10に示した。

3.1.1 窒素による放散操作

液体中に溶解している成分を他の気体を投入することで追い出す操作を、「放散」または「ストリップング」という。図10aに示した窒素による放散操作では、処理液中にインラインで窒素を投入し、液

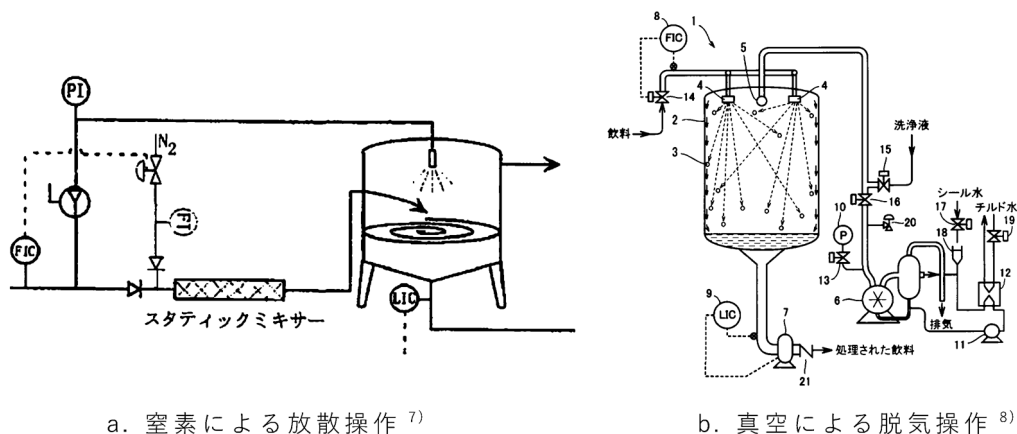


図10 脱酸素工程の概略図

中から酸素を放散させる脱酸素工程の他、さらにタンクの最適設計により液中気泡を分離する気泡分離(脱泡)工程、タンク内のシャワーリングでの消泡工程が一つのプロセスとして設計されている。このプロセスは、真空操作を用いないため低沸点の香り成分が脱臭されることなく、乳の香り成分の量やバランスを維持したまま加熱時の酸化を抑制し、自然な風味を維持したままの商品を製造することが可能である。一方、このプロセスは複数の工程を組み合わせた独自のプロセスであり、市販装置があるわけではないため、処理量に合わせた装置設計、ならびに運転条件の最適化が必要となる。

3.1.2 真空による脱気操作

図10bに示した真空による脱気操作では、処理液は真空状態のタンク内に供給され、様々な方法(例えばノズル、回転円盤、薄膜流下)で微粒化・薄膜化され、気液の接触面積を増大させた状態で効果的に真空による脱酸素、脱気、脱臭される。真空での脱気・脱臭により酸素以外の低沸点の香り成分の散逸はあるものの、加熱前の溶存酸素を低減させることが可能であり、装置メーカーから多くの真空による脱気・脱臭装置が販売されているため、これらの装置を導入することで本方法を実施することが可能である。

3.2 熱履歴制御

加熱時の酸化抑制ではなく、殺菌後の酸化抑制に着目した製造プロセスも提案されている⁹⁾。具体的には、直接加熱方式と高温からの急減圧冷却による低熱履歴化、ならびに窒素雰囲気下で貯液ならびに充填による酸化抑制を組み合わせた方法が提案されている。この方式は、市販の直接加熱システム(急速減圧冷却槽を含む)と無菌タンクならびに無菌充填システムの組み合わせで実現することが可能である。

一方、牛乳の処理に直接加熱方式を使う場合、牛乳は加熱のために使われた蒸気の凝縮水が投入されて、一旦希釈されてしまう。よって、この凝縮水を真空脱気によって取り除き、元の濃度に戻す必要がある。この凝縮水による希釈水分の除去は、高温状態からの真空脱気操作によって行われるが、この際、水分とともに高沸点の乳特有の香り成分(加熱臭を含む)も取り除かれてしまう点に注意が必要である。このことは、「高温での真空脱気により、乳の香り成分のバランスを制御し、不快な加熱臭を除去する」と考えれば、有用な風味調整技術の一つであるとも解釈できる。

牛乳以外の乳製品の場合は、直接加熱方式で希釈される水分量をあらかじめ考慮し、高濃度で調合した処理液を使うことで、殺菌後の真空冷却工程を不要とし、低熱履歴ながら香り成分を維持するプロセスも考えられる。

3.3 低温および非加熱処理

非加熱処理というと、電気穿孔によって菌を破壊する「電気パルス殺菌法」や、静水圧での菌破壊、もしくは高圧からの急減圧時の菌体と液体の膨張速度の違いを利用して菌を破壊する「高圧殺菌法」、さらに超臨界二酸化炭素の特性を利用した「超臨界殺菌法」などの方法が古くから報告されているが、乳業の生産規模の処理量では未だ実現できていない。

よって乳・乳製品の殺菌工程は、今後も加熱操作が技術の中心であることは変わらないと思われるが、製造工程全体では、低温処理および非加熱処理による風味維持ならびに改善の検討が進んでいる。本節では、特に乳・乳製品製造時の濃縮工程に着目し、一般的な加熱を伴う **a. 蒸発濃縮技術** の説明を行い、その後、低温もしくは加熱を伴わない **b. 膜処理技術**、ならびに **c. 凍結濃縮技術** の最新情報について述べる。

3.3.1 蒸発濃縮技術

蒸発濃縮は濃縮乳の製造で広く用いられている。蒸気を熱源として原料乳を加熱し、水分を蒸発させて濃縮を行う方法である。乳業でも使われる代表的

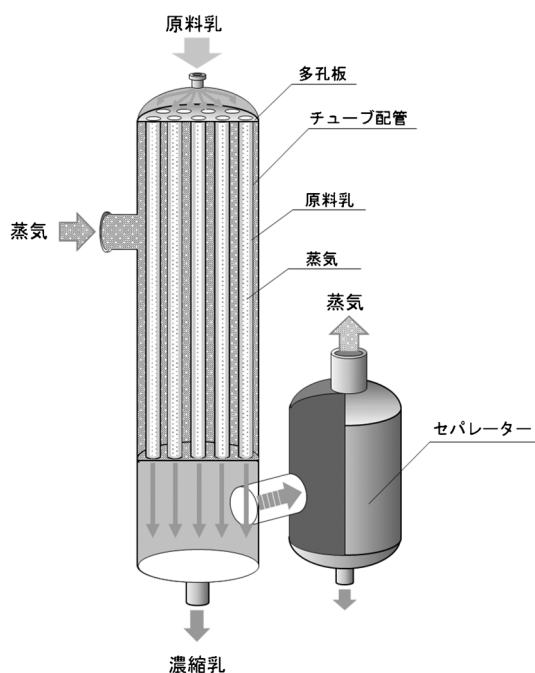


図11 薄膜降下式濃縮装置の概略図

な装置として、薄膜下降式濃縮装置がある。図11に示す多管式薄膜降下型濃縮機は、加熱部が複数本のチューブ配管からなり、原料乳は上部にある分散板で均一に分散し、配管内壁を伝って降下する。配管の外側から蒸気で加熱することで原料乳に含まれる水分は蒸発し、濃縮される。通常は熱変性の抑制のため装置内を真空状態にし、沸点を下げて濃縮を行う。出口に設置されたセパレーターで濃縮乳から蒸気を分離し、得られた濃縮乳は装置底部より次工程に送液される。

一般的によく利用されている濃縮システムとして、サーモコンプレッサーで一部の低压蒸気を再利用する熱圧縮方式 (TVR: thermal vapor recompression), 排出される低压蒸気を全量回収し、機械的に圧縮して再利用する機械圧縮方式 (MVR: mechanical vapor recompression) などがある (図12)。

蒸発濃縮技術は、大流量での処理が可能であり、また他の濃縮方法では到達できない高い濃度まで濃縮可能であるが、加熱によって乳たんぱくが変性し風味変化を生じること、また運転温度がいくつかの細菌の至適温度帯であることから、細菌増殖リスクを考慮した運用が必要である。また、減圧によって沸点を下げて熱変性を極力低減するため、減圧操作による香気成分が揮発・減少するデメリットもある。

3.3.2 膜処理技術

膜濃縮は、原料乳を膜の入ったハウジング内に供給し、ハウジングに圧力を加えて乳中から特定の成分を分離・ろ過、精製する方法である。乳業で広く使用される膜には、精密ろ過 (MF) 膜、限外ろ過 (UF) 膜、ナノろ過 (NF) 膜、逆浸透 (RO) 膜の4種類があり、目的に応じて使い分ける (図13)。原料乳中の水分を除去・分離し濃縮する場合には、RO膜を使用する。代表的な膜であるスパイラル膜の構造の詳細を図14に、膜のプラントの概略図を図15に示す。

膜濃縮は、原料乳を低温で操作するため、熱による風味変化は少ないが、香気成分は膜への吸着や透

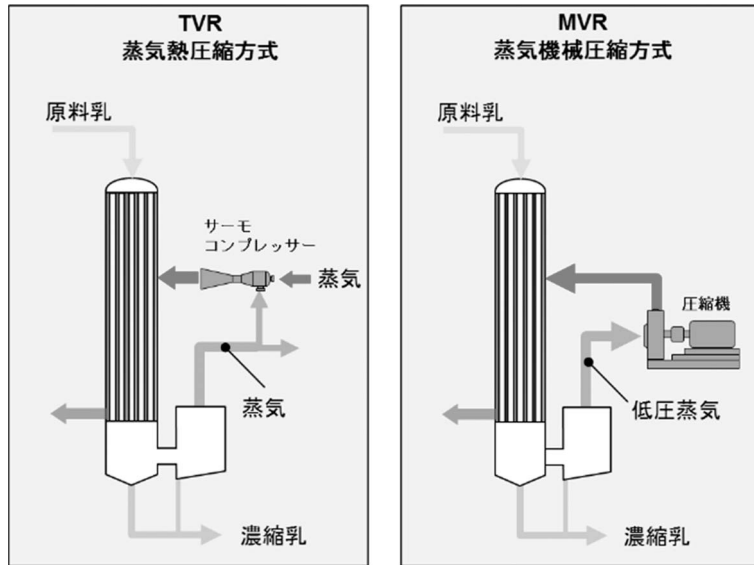


図12 蒸気の効果的な再利用方法

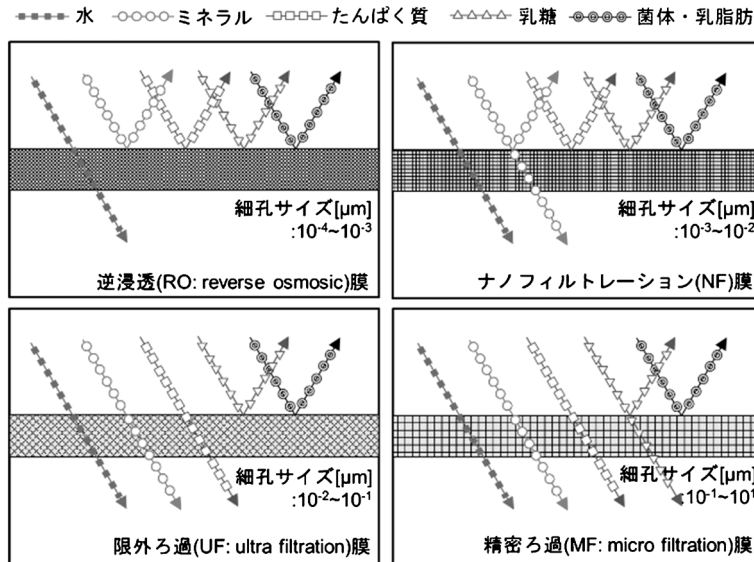


図13 膜の分画特性

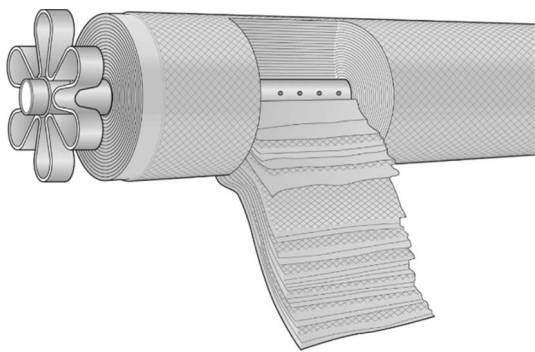


図14 スパイラル膜の構造¹⁰⁾

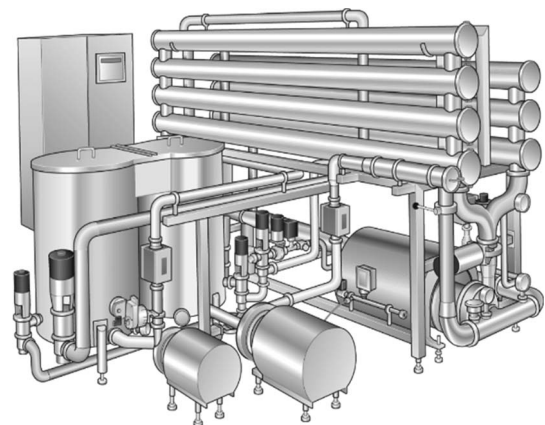


図15 膜のプラント概略図¹⁰⁾

過により一部失われてしまう。また、長時間にわたって運転した場合、膜表面への乳たんぱくなどの目詰まりや堆積（ファウリング）によって分離性能が変化するため、運転条件や膜の洗浄方法が重要となる。

具体例として脱脂乳の濃縮の例を挙げると、商用規模で固形分値34%程度まで濃縮可能なプラントも海外では操業しているが、処理前の加熱条件（72°C15 sec, $\Delta T \leq 2^\circ\text{C}$ 以下）や運転温度（6°C以下もしくは15°C以下）、操作圧力（2~4 MPa）によって、連続運転時間や到達濃度が大きく影響を受ける。また膜の透過液には若干の固形分が流出し、透過液の香り成分分析では、新鮮な乳香の指標物質である Acetone 類や Butanone 類が流出していることが分かっている。特に高濃度領域まで膜で濃縮する場合は透過液への固形分、香り成分の流出が多くなる。

膜は他の濃縮方法と比較すると、設置面積が小さく、導入コストが低いというメリットがある。一方で、洗浄コスト（コストの高い特殊な洗剤を複数種類組み合わせる）、膜の交換コスト（2~3年に一度交換）など、ランニングコストが大きいというデメリットがある。よって、各濃縮方法と組み合わせ、低濃度領域の予備濃縮の用途で使うことで効果を最大化できる場合が多い。

3.3.3 凍結濃縮技術

凍結濃縮は、原液中の成分の凝固点の違いを利用して、最も凝固点の高い水のみ凝固させ、氷を分離することで濃縮を行う方法である（図16）。凍結濃縮

は、化学製品や果汁、コーヒー、清酒等で応用されている技術であるが、乳業においては微生物制御の問題や設備コストの観点から、これまでに商業規模での導入実績はなかった。しかし、昨今の冷凍機性能の向上、ならびにサニタリー性と装置コストを改善した設備開発が進み、乳業においてもこれらの技術の応用¹¹⁾ならびに膜濃縮方法との組み合わせによる工程開発¹²⁾が進んでいる。その結果、商用規模で運転が開始され、非加熱濃縮原料を用いた商品も上市されている¹³⁾。

凍結濃縮は、大きく分けて原料乳を冷却して氷結晶を生成・成長させる工程、氷と濃縮液を分離する工程がある。図17に凍結濃縮システムの概要を示す。設備は、冷凍機、結晶生成タンク、結晶分離コラムで構成されている。結晶生成タンクに送られた原料乳は、冷凍機から供給される冷媒によって過冷却状態まで冷却され、原料乳中の水の氷結晶が生成・成長することによって、原料乳は濃縮される。氷結晶と濃縮された原料乳の混合物（以下、スラリーとする）は、結晶分離コラムに送液され、スラリー中から濃縮乳のみ次工程に送液し、氷結晶はコラム内で層を形成する。氷結晶層の間に含まれる濃縮乳は氷を融かした水（分離水）を利用して結晶表面を洗浄しながら回収され、系内に押し戻される。安定した運転状態で排出される水は、固形分や香り成分の流出は検出されず、ほぼ純水に近い水である。

このように、凍結濃縮は加熱部がなく、原料乳を氷点下で操作するため、熱による風味劣化が極めて少ない。また、蒸発濃縮のような減圧操作もなく、さらに膜のように分離する水側への固形分や香り成

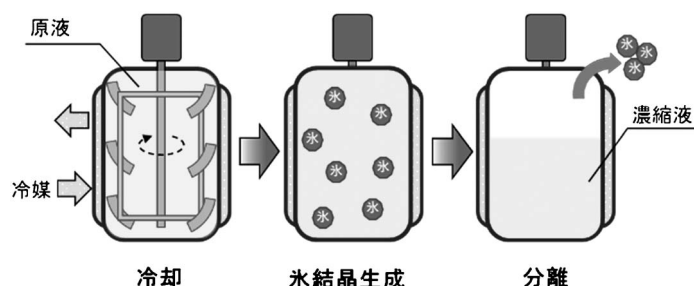


図16 凍結濃縮 概念図

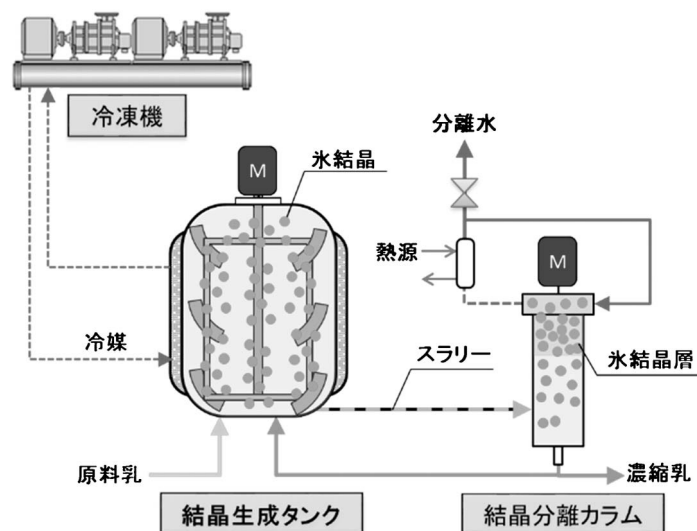


図17 凍結濃縮システムの概要

分の流出がないため、乳そのものの香気成分を維持したまま原料を濃縮することが可能な濃縮方法である。

一方で、蒸発濃縮のような高濃度までの濃縮が困難であること、また装置が安定状態になるまで1日程度かかるため、1週間単位での連続生産ができるような原料でないと生産効率が上がらないというデメリットもある。

以上のように、各種濃縮方法は殺菌方法と同様に、それぞれメリット・デメリットが存在し、用途に応じて適切なプロセスを選定する必要がある。例えば、蒸発濃縮は、工業的に大量に原料を濃縮する場合に適した方法であり、凍結濃縮は乳を極力自然な状態(加熱変性をさせずに、かつ香気成分を保持)で濃縮する目的に適している。一方、膜濃縮は、それぞれの濃縮方法の前処理(低濃度領域の予備濃縮)のプロセスとして利用することで、低コストで処理能力の向上を実現できる。

4. 製造プロセスの違いによる香気成分、生成物の特徴比較

前章において、加熱時の風味変化を抑制する技術について紹介したが、それぞれの方法の特徴を、香気成分や生成物の量の比較によって説明する。

4.1 加熱処理における「酸化抑制」「香気成分バランス制御」の効果

一般的な殺菌条件で処理された牛乳(130℃2秒:通常処理と表記)を標準サンプルとし、放散操作による脱酸素処理した牛乳(130℃2秒:脱酸素と表記)、低温真空減圧により脱酸素、脱気、脱臭処理した牛乳(130℃2秒:真空脱気と表記)、そして熱履歴制御(直接加熱方式と高温からの急減圧冷却の組み合わせ)で処理された牛乳(135℃2秒:直接加熱と表記)について、それぞれの特徴を比較した結果を以下に示す。グラフの値はすべて標準サンプルを基準に正規化した「相対検出量」で示す。

4.1.1 熱変性の程度の比較

熱変性の程度を比較するために、各サンプルのFurosine量を比較した結果を図18に示す。図9でも述べたように、Furosine量はメイラード反応の多寡を評価する指標物質であり、量が多いほどメイラード反応が進んでいると解釈できる。図から分かるように、直接加熱を用いた殺菌方法は、短時間で昇温・冷却によって他の製法と比較して熱変性の程度が少ない特徴があることが分かる。真空脱気方法が通常処理よりも若干高い値を示している理由は、予熱保持工程の有無や加熱冷却の熱履歴の違いの影響(熱交換器の編成の違い)と考えられる。

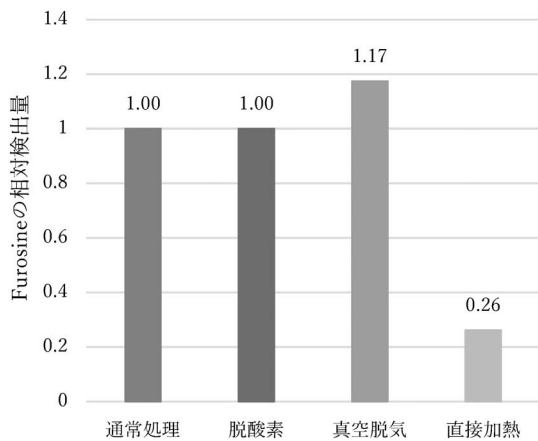


図18 熱変性程度の比較

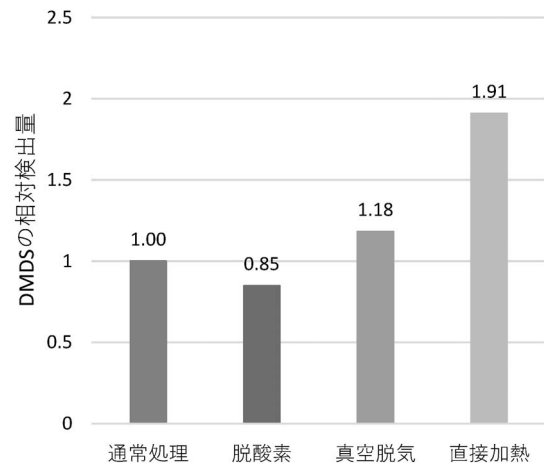


図19 たんぱく質の加熱劣化の比較

4.1.2 脱酸素が加熱劣化に及ぼす影響の比較

加熱前の脱酸素がたんぱく質の加熱劣化に及ぼす影響を比較するために、各サンプルの Dimethyl disulfide (DMDS) 量を比較した結果を図19に示す。DMDS は含硫アミノ酸等が加熱により分解して生ずる硫黄化合物であり、硫黄臭の原因の一つである。図から分かるように加熱前に脱酸素したサンプルは標準品よりも15%程度低い。一方、真空脱気ならびに直接加熱では標準品よりも高い量を示した。DMDS は硫黄臭の原因の一つである。加熱前の脱酸素処理は、製品中のたんぱく質の加熱劣化が少ないことが分かる。

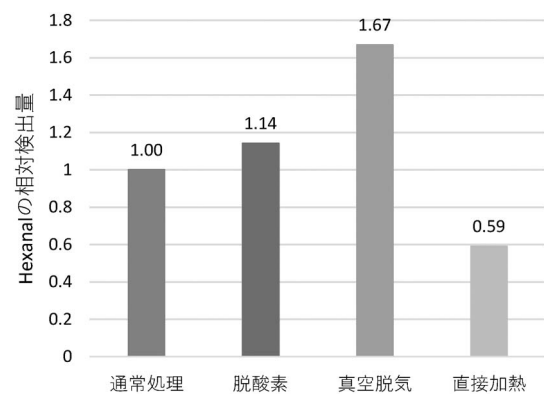


図20 脂肪の酸化程度の比較

4.1.3 脂肪の酸化程度の比較

脂肪の酸化程度を比較するために、各サンプルの Hexanal 検出量を比較した結果を図20に示す。図から分かるように、真空脱気のサンプルの Hexanal 検出量は高く、直接加熱のサンプルの Hexanal 検出量は低くなった。脱酸素処理や真空脱気処理では、液中の溶存酸素量が少ないことから、Hexanal 検出量は通常処理よりも少ないと考えていたが、実際の測定では Hexanal 検出量が増えている。特に真空脱気処理品では差が顕著であった。これは製法の差もさることながら、使用した原乳の特徴、工程の熱履歴なども影響した可能性がある。今回使用したサンプルは市販の製品を比較しているため、原乳の質や工程における熱処理の影響について

は考察できていない。

4.1.4 新鮮な乳香の程度の比較

新鮮な乳香の程度を比較するために、各サンプルのケトン化合物の検出量を比較した結果を図21に示す。図21aは Acetone 検出量、図21bは 2-butanone 検出量の比較結果である。図から分かるように、直接加熱のサンプルでは、Acetone 検出量ならびに 2-butanone 検出量は大幅に低くなった。直接加熱のサンプルの検出量が低い理由は、高い温度からの急激な真空冷却によってこれらの香気成分が除去されたと考えられる。

4.1.4 加熱生成物、香気成分バランス制御

前節までに、製造方法の異なるサンプルについて、代表的な香気成分や加熱生成物の多寡の傾向に

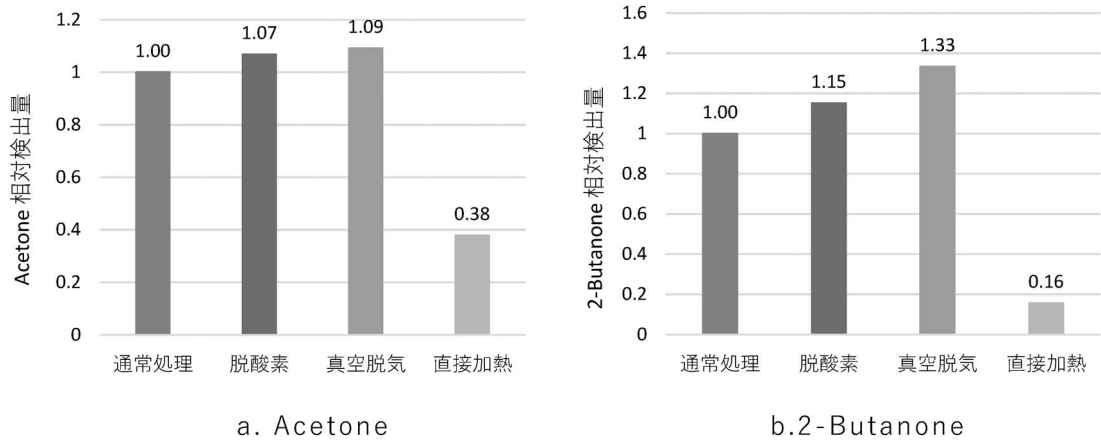


図21 新鮮な乳香の検出量の比較

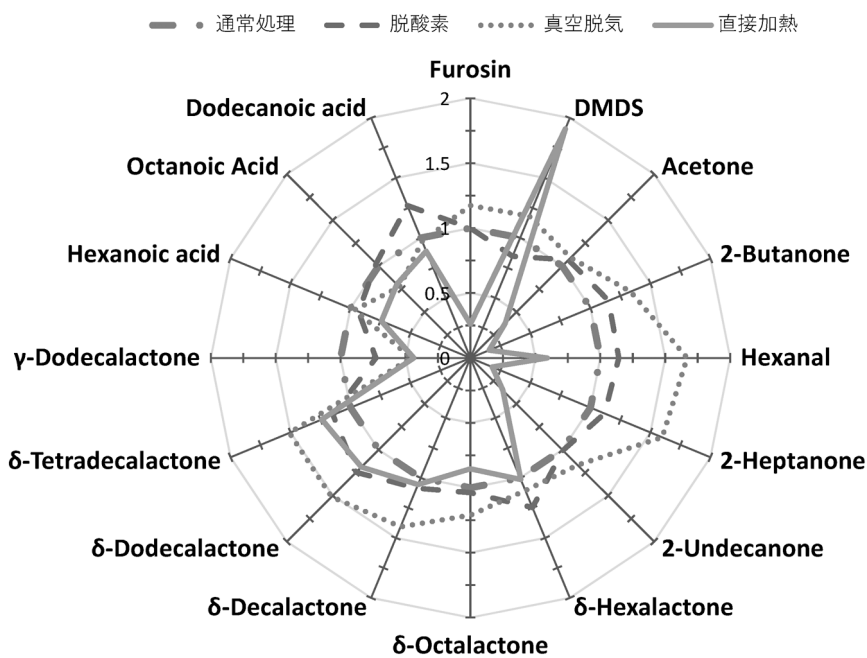


図22 加熱生成物，香氣成分バランス制御

ついて考察してきたが、乳の「おいしさ」、「風味」は単一の成分の多寡で評価できるものではなく、全体の香氣成分のバランスや物性なども「おいしさ」、「風味」に大きく影響を及ぼす。

ここでは、代表的な香氣成分や加熱生成物の多寡を俯瞰的に確認するためのレーダーチャートを図22に示す。通常処理のサンプルの値を1としているので、レーダーチャート上で標準処理のサンプルのバランスは円形となる。よって異なる方法で作成されたサンプルの香氣成分のバランスは、通常処理サンプルの値である円形からどれくらい違いがある

か確認することで、俯瞰的に理解することができる。図から分かるように、それぞれの製法は特徴的な形のチャートになっていることが確認できる。

この比較の目的は、それぞれの製法の「優劣」や「おいしさ」、「風味の良さ」などを議論することではなく、製造工程を適宜調整することで、香氣成分のバランスを制御できる事実を説明することである。特に牛乳の風味に関しては、乳等省令で決められた基準のもとで製造を行うため、これまでは殺菌温度や乳化程度以外で差別化することは困難であると言われてきた。今回紹介した方法によって、牛乳

の風味発現制御に新しい道が開けたと言えるだろう。

4.2 低温処理における風味の特徴^{13,14)}

前章では、一般的な蒸発濃縮法の課題を解決する、低温・非加熱濃縮法についての概要について述べた。ここでは、蒸発濃縮法と低温・非加熱濃縮法で製造されたサンプルの風味の特徴について述べる。

4.2.1 加熱変性程度の比較

蒸発濃縮法と凍結濃縮法の加熱変性程度を比較するために、それぞれのサンプルの Whey Protein Nitrogen Index : (WPNI) を測定し、凍結濃縮法の値を基準として正規化した結果を図23に示す。WPNI の数値は、たんぱく質 1g あたりに含まれる未変性ホエイたんぱく質の量であり、加熱変性の程度を表す指標として用いられる。図から分かるように、凍結濃縮法の WPNI を 1 としたときに、蒸発濃縮法では約半分程度の値となった。つまり蒸発濃縮法では未変性ホエイの量が凍結濃縮法の半分程度まで減少してしまう、つまり熱変性の程度が大きいことが分かる。

4.2.2 新鮮な乳香の比較

蒸発濃縮法と凍結濃縮法の新鮮な乳香の指標として、それぞれのサンプルの Acetone, ならびに 2-Butanone の検出量を測定し、蒸発濃縮法の検出量を基準として正規化した結果を図24に示す。図から分かるように、凍結濃縮法の Acetone 検出量は蒸発濃縮法に対して約6.4倍、2-Butanone 検出量は約25倍維持していることが分かる。つまり凍結濃縮法は新鮮な乳香を維持した状態で濃縮できることが分かる。

4.2.3 たんぱく質の加熱劣化程度の比較

蒸発濃縮法と凍結濃縮法のたんぱく質の加熱劣化程度を比較するために、それぞれのサンプルの Methanthiol, ならびに DMDS の検出量を測定し、蒸発濃縮法の検出量を基準として正規化した結果を図25に示す。図から分かるように、凍結濃縮

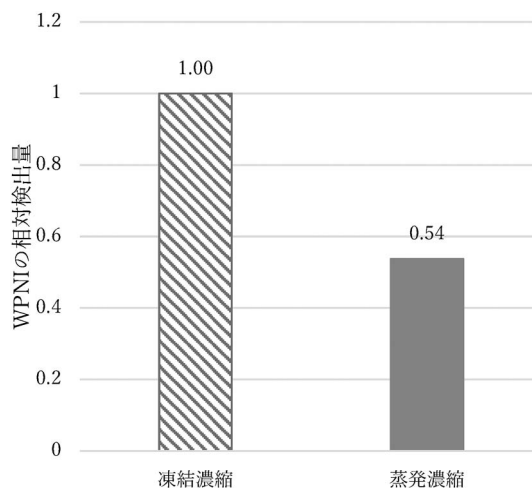


図23 加熱変性程度の比較

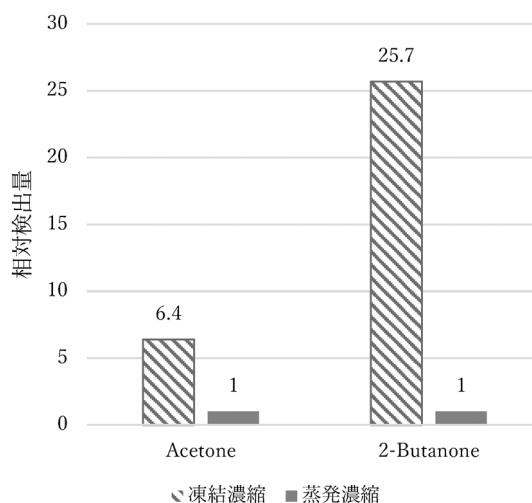


図24 新鮮な乳香の比較

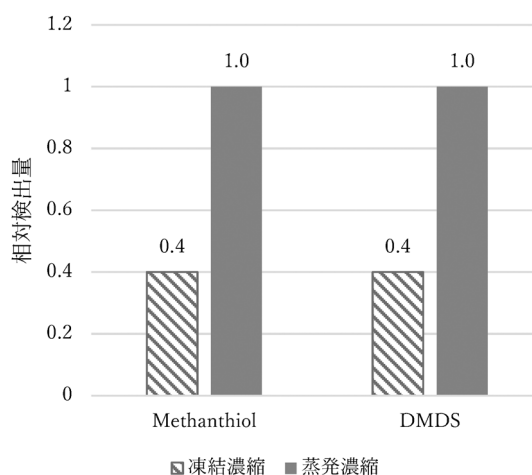


図25 たんぱく質の加熱劣化程度の比較

法の Methanthiol 検出量ならびに DMDS 検出量は、蒸発濃縮法の約40%程度である。つまり凍結

濃縮法はたんぱく質の加熱劣化の程度を抑制しながら濃縮できる技術であることが分かる。

5. ま と め

本稿では、乳業で一般的に用いられている加熱装置、および今後導入が加速する可能性のある新しい加熱技術について言及するとともに、加熱による風味変化を制御・抑制する技術について、設備面、香气分析などの観点から客観的に特徴を説明した。それぞれの方法には、メリット・デメリットがあり、各方法を組み合わせることで、競争力あるコストおよび品質での乳・乳製品の製造が可能であると考えられる。

日本の人口は減少の一途を辿っているが、ひとたび世界に目を向けると、世界人口は年々増加している。今後の世界的な食糧供給事情はますます逼迫してくると考えられる。その中でも乳・乳製品は、栄養面、機能面、風味面、そして情緒の面でも重要な「ショクリョウ」になると言えよう。

食品市場のみならず、社会は「量」の時代から「質」の時代へ変化してきた。これからは「質」の時代から「心」の時代、さらには個人、社会、環境とつながることで価値が出る「結」の時代に変化していくと考える。言い換えると、「ショクリョウ」という言葉は、食糧（量）から食料（質）へ、そして食良（心）へ、さらにはこれまでの食を凌駕する食凌（結）へ変化すると考える。

これまでの概念を凌駕する「食」を実現するためには、イノベーションが必要である。イノベーションは「技術革新」と訳されることが多いが、本来の意味は、「経済活動の中で、生産手段や資源、労働力などをそれまでとは異なる仕方で新結合すること」定義されている。また、プロダクト・イノベーションは、①素材、②加工、③評価のイノベーションによって成立すると考えられている。今後も貴重な乳原料という素材を、いかに価値あるモノとして加工し、いかに価値あるコトになるよう評価し、そして生活者のココロや地球環境に寄り添うために、いかに価値あるカンケイを想像/創造する文脈設計

をしていくかが重要である。そのためには、乳業に関係する関係各所が、個人の壁、会社の壁、業界/業種の壁、そして国の壁を越えて協業しながら技術と経験と知見を新結合させて新しいことにチャレンジし、そして価値ある商品を市場に、世界に提供していく必要があると考える。

本稿は著者の約23年間の乳業技術研究を総括した内容となった。本稿で記述したすべての装置やプロセスに関して研究という形で直接携わることができ、乳業技術の研究者/エンジニアとしてとても良い経験をすることができたと考えている。国内外また会社の枠を超え、装置やプロセスを開発したエンジニアやメーカーとの技術的なやり取りが、自分自身の成長や開発研究の着想につながったと考えている。本稿執筆にあたり、これまで一緒に検討を進めてきた関係各社から、装置に関する図や情報を快く提供していただいたことに感謝いたします。

本稿が今後の乳業技術の発展のために、また乳業関係者や装置メーカーの皆様にも少しでも役に立つ内容になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Tetra Pak, “Dairy processing handbook”, 6-1 Heat exchanger (2015)
- 2) GEA Process Engineering, “Aseptic Process Technology 2011”, p26
- 3) Tetra Pak, “Dairy processing handbook”, 9 Long-Life Milk (2015)
- 4) SPX Flow, “Long Life Dairy, Food and Beverage Products”, White paper, p23 (2013)
- 5) 羽生圭吾, “加熱乳含有加工品の製造方法”, 特開2019-54732, 出願2017年9月19日
- 6) SPX Flow, “The APV Cavittor”, カタログ, p3 (2013)
- 7) 神谷哲他, “牛乳等の溶存酸素を窒素ガスと置換して殺菌する方法及び窒素ガス置換装置”, 特許第3091752号, 登録2000年7月21日
- 8) 別惣俊二他, “飲料中の溶存酸素濃度を低下さ

- せる方法”，特許第4015134号，登録2007年9月21日
- 9) 岩附慧二他，“牛乳類の製造方法および製造装置”特許第3490428号，登録2003年11月7日
- 10) Tetra Pak, “Dairy processing handbook”, 6-4 Membrane technology (2015)
- 11) 柏木和典他，“凍結濃縮法による濃縮製品の製造方法”，特許第6529131，登録2019年5月24日
- 12) 柏木和典他，“膜濃縮法及び凍結濃縮法による濃縮製品の製造方法”，特許第6529132，登録2019年5月24日
- 13) 宮内淳他，“氷点濃縮製法による「明治おいしい低脂肪乳」の開発”，JATAFF journal：農林水産技術，8(3)，30-35 (2020)
- 14) 神谷哲，“氷点濃縮製法が拓く国内乳原料の高付加価値化と競争力向上”，酪農科学シンポジウム2020講演要旨集，p23-26 (2020)