
注目される機械・装置 I

スパイラジュールとフリゴミックスによる
粉粒体連続熱処理冷却システム

日清エンジニアリング㈱ 上福岡事業所 テクニカルセンター

本多 肇

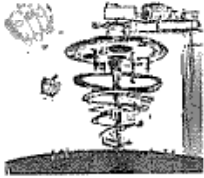
－ 「食品工業」 Vol.50、No.20 (2007)、pp20-29 －



日清エンジニアリング株式会社

注目される機械・装置 I

スパイラジュールとフリゴミックスによる 粉粒体連続熱処理冷却システム



本多 肇

FEATURES

はじめに

食品の熱加工処理は、生の原料を可食状態にすること、風味を良好にすること、保存しやすい状態にすることなどさまざまな目的があるが、その製品の合否判定は、色、香、味などの感覚的評価と密接な関係にあり、定量的に把握しにくい場合が多い。またその食品が粉粒体の状態にあると、粉粒体特有のハンドリングの難しさがある。個々の目標に対し最良な結果を得るには、多くの熱処理装置より、状況に応じ最適な装置を選定する必要がある。経済性、易洗浄性、安全性などに優れた装置であることも重要である。選択肢となる装置のひとつに当社が販売するスパイラジュールがある。スパイラジュールは、ステンレス鋼を流れる電流により発生するジュール熱を熱源とする、たいへんユニークな粉粒体連続熱処理装置である。またフリゴミックスという、熱処理した製品を結露なく冷却することができる粉粒体連続冷却装置があり、スパイラジュールとフリゴミックスを組み合わせた連続処理システムが蒸気殺菌システムになる。それぞれの装置の構造と特性を中心に、この粉粒体連続熱処理冷却システムを以下に紹介する。

ほんだ はじめ
日清エンジニアリング(株)

I. 粉粒体連続熱処理装置スパイラジュール

1. 概要

スパイラジュールはフランスの E T I A (Evaluation Technologique, Ingenierie et Application) 社が開発した装置である。

図1はスパイラジュールの外観である。機内にシャフトレススクリュー(軸無しスクリュー)を装備するスクリューコンベヤの形状をしている。スクリューフィーダーなどの定量供給装置を利用し、原料入口より機内に、原料を供給する。シャフトレススクリューが回転することにより、機内を原料が通過する。シャフトレススクリューの羽根は電気により加熱される。機内を原料が通過するあいだに、高温になったスクリューの羽根に原料が接触を繰り返し原料が加熱されることになる。図2は機内のスクリューのイラストである。スパイラジュールは電気エネルギーにより原料を加熱する。

(1) 発熱の原理

スパイラジュール付属の直流変換機が、交流電源を DC 100 V 以下の低い電圧に変換する。この直流電圧をスクリューの両端に加圧しスクリューの鋼材自体に電気を流しジュール熱を発生させる。このようにスクリュー羽根が発熱体となる。回転部分に電圧をかけるために、スクリューの両端にはブラシを使用している(図3、4)。スクリ

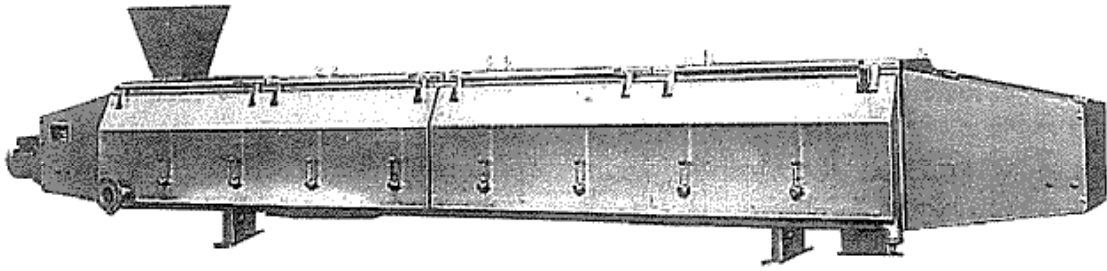


図1 スパイラジュール本体



シャフトレススクリーを流れる電流

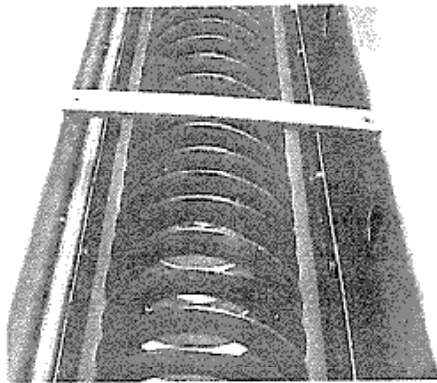


図2 シャフトレススクリー

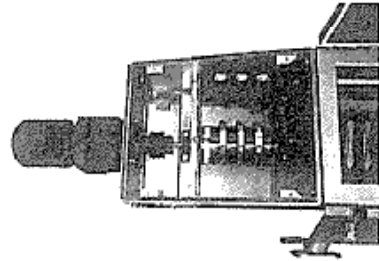


図3 モーターと原料入口側ブラシ

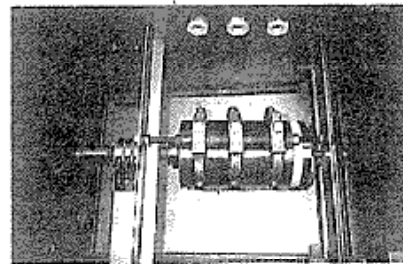


図4 製品出口側ブラシ

ューをシャフトレスとしている理由がここにある。軸があると、電流は電気抵抗の小さい軸を流れ、ジュール熱をほとんど発生しない。シャフトレスとすることにより、スクリーの羽根に電流を通し、発熱させ、ジュール熱を有効に原料に伝熱することができる。発熱体であるスクリー羽根が機内の原料の中にあるため熱効率が良く95%という高い数字を示している。スクリー

トラフは二重構造になっており、断熱材により機内の熱が逃げないようにしている。

(2) スクリューの材質

スクリーの材質は通常ステンレス鋼を使用する。表1の通り、ステンレス鋼は電気抵抗の大きい金属材料として知られている。鉄の7倍以上、銅の40倍以上という大きな値を示す。この大きい電気抵抗のために、ジュール熱を発生させるた

表1 各種金属の性質

材質	電気比抵抗 $\mu \Omega \text{ cm}$	比重	比熱	熱伝導率 $\text{kcal/h/m/}^\circ\text{C}$	線熱膨張係数 $\times 10^{-6}$	ヤング率 kgf/mm^2
18-8ステンレス鋼	72	8.03	0.12	14	17.3	19700
鉄	9.8	7.87	0.10	68	11.7	—
炭素鋼	16	7.87	0.12	50	11	21000
アルミニウム	2.75	2.70	0.21	168	23	7170
銅	1.72	8.93	0.091	320	16.7	13200
チタン	55	4.51	0.126	15	8.9	11420

めの電流値が小さくなり、効率よくスクリーを加熱させる。

(3) PTFE シートの役割

シャフトレススクリーは軸がないため、真直ぐのままの剛性がなく、スクリートラフの内面に接触している。従い、スクリートラフの内面には厚さ4mmのPTFE（四フッ化エチレン樹脂）のシートを敷き、スクリーとトラフの電気的な絶縁を確保している。またPTFEの低摩擦性により、スクリーはシートの表面を滑るように回転する。PTFEの電気絶縁性、低摩擦性、耐熱性などの優れた特性を利用している。PTFEの最高使用温度の制約により、製品温度は最高200℃前後となる。

(4) 運転条件

スパイラジュールの運転条件を決定する主要なパラメーターは次の通りである。

①スクリー羽根温度

スクリー羽根温度の制御には温度センサー（測温抵抗体など）を使用する。製品出口近くのスクリー羽根の表面に温度センサーが装備されている。この温度センサーにより測定された温度が設定温度になるように加熱電気の電圧を制御している。設定温度は制御盤の温度コントローラーにより簡単に変更できる。

②滞留時間（スクリー回転数）

原料が機内に滞留する時間である。滞留時間は、スクリー回転数を調整する（制御盤のインバーターを調整する）ことにより簡単に変更することができる。スクリーはギヤードモーターにより駆動するが、通常は10rpm以下の低い回転数に設定することが多い。

③原料供給速度（充填率）

スクリーフィーダーなどの定量供給装置を調整し、原料供給速度を調整する。スパイラジュールのスクリー回転数（原料搬送能力）との流量バランスをとり、充填率を安定させる（充填率は、スクリー断面積のどれだけが原料に埋まるかの割合を示す。粉面レベルのスクリー羽根径に対する比率を粉面レベル径比と呼ぶことにする。ただし正確に説明しなくとも誤解の恐れがない場合は、判りやすいように充填率と呼ぶ）。

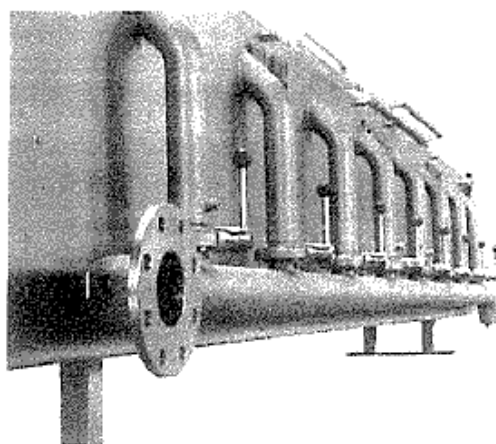


図5 排気管

機内において原料が加熱されると原料に含まれる水分が蒸発するため、スパイラジュールに装備された排気管（図5）に、集塵装置とブロワーを接続し機内の水分を排気することが必要である。（水分を排気しないと、機内が結露し、粉体がダマになる）。

2. 基本的な特性

(1) 試験に使用した装置（図6）

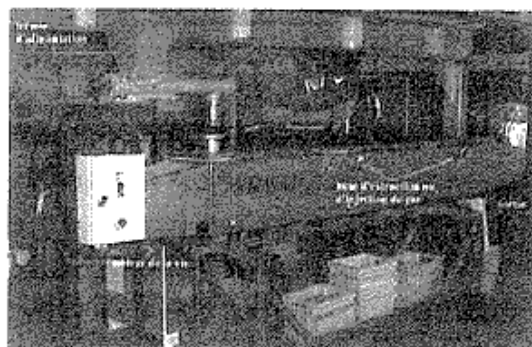


図6 試験設備

型式…スパイラジュール215 L3 V50

スクリー羽根径 215 [mm]

長さ3 [m]

羽根幅50 [mm]

攪拌パドル……14枚使用

原料……………小麦粉、米

乾燥タマネギ、砂、樹脂

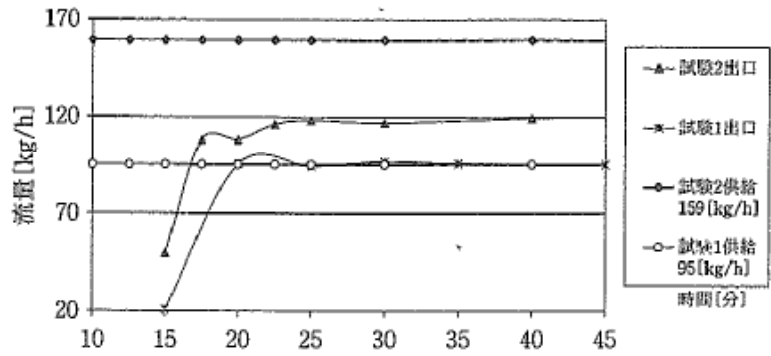
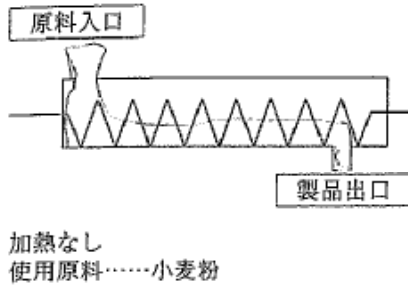


図7 原料供給速度と出口流量の経時変化

(2) 搬送能力に関する原料流量バランスの検討

原料供給速度と、スパイラジュール出口における製品排出速度との関係を調べた試験である(図7)。

スパイラジュールのスクリーウ回転数を4.3[rpm]に固定したまま、原料供給速度を変え、出口流量を調べた。試験1は原料を原料入口より95[kg/h]の供給速度により供給した試験である。出口流量は原料供給開始30分経過後に安定し、原料供給速度と同じ流量を示す。試験2は供給速度を159[kg/h]とより高い供給速度に設定した試験である。やはり出口流量は原料供給開始30分経過後に安定するが、原料供給速度より、はるかに低い流量を示す。これは原料供給速度と出口流量がバランスせず、機内に滞留する原料が増加している状態を示し、長時間運転することはできない。

このようにスクリーウ回転数に対し、原料の粉面レベルが適切なレベルになるように、原料供給速度を調整することが必要である。米を使用した

試験も同様の傾向を示した。この最大出口流量は原料の物性により影響を受ける。表2は、原料の物性の指標である安息角が、最大出口流量と相関関係があることを示すデータである。(流動性のよい原料の場合)

この試験の条件に「攪拌パドル」を14枚使用したとある。この攪拌パドルというのは図8の通り、試験装置であるスパイラジュールのスクリーウ羽根に取りつけた機内の原料を攪拌するための着脱式のパドルのことである。この攪拌パドルは、スパイラジュールの加熱性能にたいへん重要な役割を果たすが、原料の搬送には多少の抵抗になる。攪拌パドルを使用せず前出の試験と同じ試験をすると、米のような流動性のよい粒体ほど、前出の最大出口流量が大きく増加する。逆に、小麦粉のような粉体の場合は、最大出口流量の増加幅が比較的少ない。

(3) 伝熱効率に関する原料流量バランスの検討

原料供給速度を固定したまま、スクリーウ回転数を変え、原料に伝達された製品温度を調べた。

表2 安息角と最大出口流量との関係

原料	安息角 [°]	最大出口流量 [m ³ /h]	回転数設定 [HZ]
プラスチック球	24	0.265	10
米	31	0.261	10
小麦粒	34	0.233	10
砂	35	0.208	10
乾燥タマネギ	36	0.203	10
小麦粉	53	0.156	10

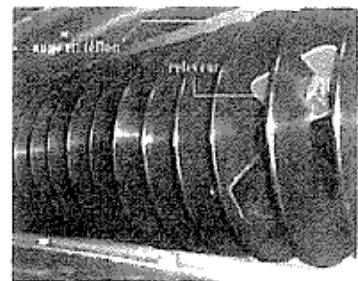


図8 攪拌パドル

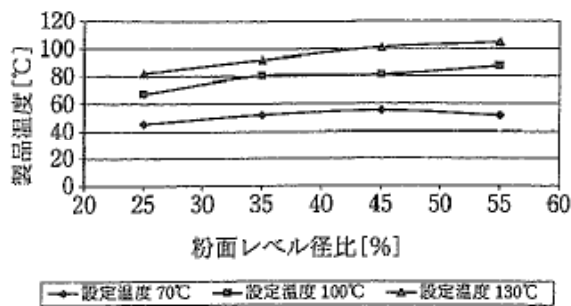


図9 充填率と製品温度との関係

試験はスクリー羽根設定温度 3水準 (70℃、100℃、130℃) と粉面レベル径比 4水準 (25%、35%、45%、55%) のデータを使った。原料供給速度を固定したため、スクリー回転数が高くなる (滞留時間が短くなる) と、充填率が低くなる。原料供給速度……………263 [kg/h]

使用原料……………米

図9は充填率とスパイラジュール出口における製品温度との関係を示す。充填率が高いと製品温度が高くなる傾向がある。(2)に説明した流量バランスが前提となる)原料供給速度を固定したため、充填率が高いということは、滞留時間が長い (スクリー回転数が低い) ということになる。これはスクリー羽根が原料に伝熱する面積と時間が稼げることになり、結果と傾向が一致するように見える。

伝熱効率を最高にするには、どのように運転条件を調整すればよいのだろうか。伝熱する装置の効率を示すパラメーターに総括伝熱係数があり、総括伝熱係数が高いことは、効率的に伝熱されること意味する。

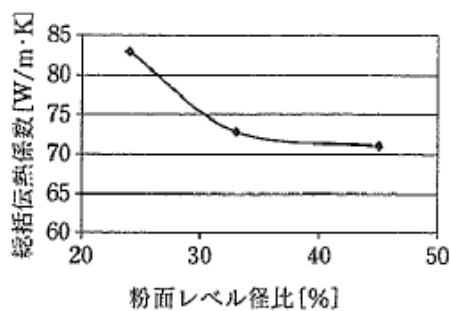


図10 総括伝熱係数と充填率との関係

以下に運転条件を調整することにより、どのように総括伝熱係数が変化するかを試験した結果を示す。

①充填率が総括伝熱係数に及ぼす影響

(スクリー回転数 (滞留時間) を固定したまま、原料供給速度を変化させた場合)

スクリー回転数を固定したまま、原料供給速度を変化させることにより、充填率を変化させた (図10)。

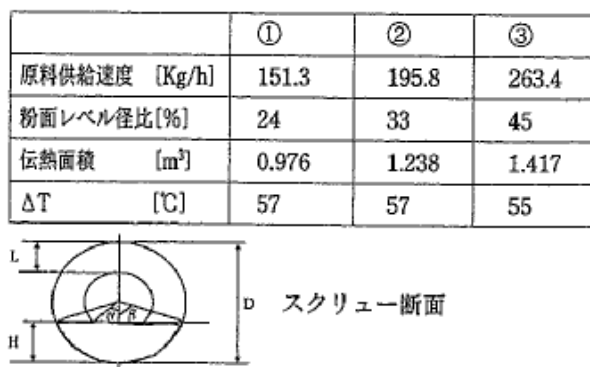
24%の粉面レベル径比は、スクリー羽根幅に一致する。24%以下の粉面レベル径比の場合は、原料がスクリー羽根とその隣のスクリー羽根に挟まれるが、粉面レベル径比が24%を越えると、原料の一部が、スクリー羽根の穴の高さとなり、加熱面と接触しない。つまり、粉面レベルがスクリー羽根幅を越えると、総括伝熱係数が低下することになり、試験結果のグラフと一致する。粉面レベルがスクリー羽根幅を大きく越えると、総括伝熱係数は、ほぼ同じ値を示すようになる。

②スクリー回転数 (滞留時間) が総括伝熱係数に及ぼす影響

(充填率が一定になるように、原料供給速度を変化させた場合)

充填率が一定になるように、スクリー回転数に応じ、原料供給速度を変化させ、スクリー回転数が総括伝熱係数に及ぼす影響を調べた。

図11は滞留時間が短くなるに従い、総括伝熱係数が向上することを示す。滞留時間が短い (スクリー回転数が高い) と原料が、より良く攪拌され、スクリー羽根表面に接触する原料が常に入れかわり、効率よくスクリー羽根の熱が原料



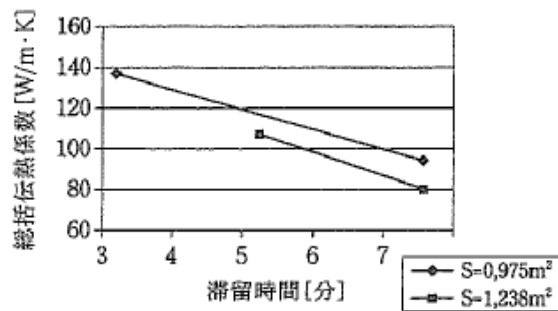


図11 滞留時間と総括伝熱係数との関係

に伝達される。

③ 攪拌パドルが総括伝熱係数に及ぼす影響

まったく同じ運転条件のときに、攪拌パドルがある場合とない場合を比較したのが図12である。実験は、スクリー羽根設定温度 3水準と充填率 4水準のデータを採用した。いずれの場合も、攪拌パドルにより伝熱効率が向上し、製品温度が高くなっているのが判る。またスクリー羽根の温度が高いほど、その効果は顕著に現れる。

図13は、まったく同じ運転条件のときに、攪拌パドルがない場合、14枚装着した場合、20枚装着した場合の総括伝熱係数を比較したものである。攪拌パドルの枚数が多いほど、攪拌効果も高く、総括伝熱係数が高いことが判る。

以上の通り、攪拌パドルは総括伝熱係数向上にたいへん有効である。総括伝熱係数が高いと、同じ運転条件の場合には、製品温度が高くなる。また製品温度が同じ場合には、滞留時間を短く、充填率を低く抑えることができる。あるいは設定温度を低く抑えることができる。

あるサイズの装置に対し、その原料の最大出口流量が存在し、原料供給速度に応じ、あるスクリー回転数以上に調整することが、まず前提である。また、原料の粉面レベルがスクリー羽根幅を越えないようにすると、総括伝熱係数を高く保つことができる。以上を踏まえ、滞留時間をなるべく長くすることが、製品を十分に加熱するのに必要なこととなる。滞留時間を長くするために、スクリー回転数を落とすと攪拌効果が低下することになるが、総括伝熱係数の低下を防止するには、攪拌パドルを多く装着することが有効である。

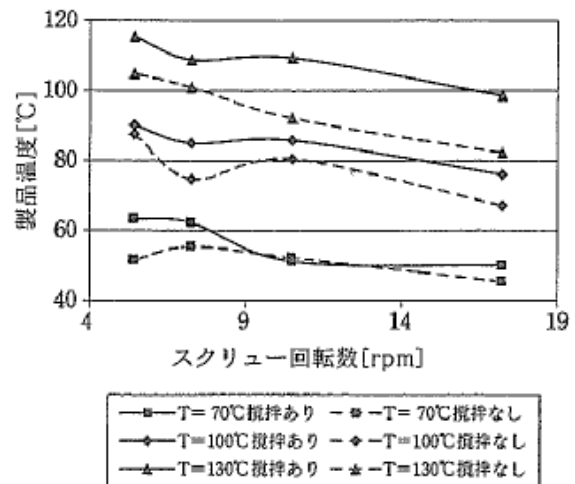


図12 製品温度に及ぼす攪拌パドルの影響

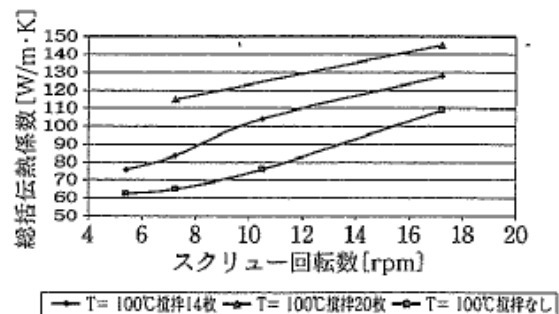


図13 総括伝熱係数に及ぼす攪拌パドル枚数の影響

3. スパイラジュールによる大豆の焙煎

スパイラジュールの用途は多様である。スパイラジュールはフランスのメーカーにより開発されたが、欧州をはじめとする諸外国では、ハーブやスパイスの殺菌に多くの実績がある。変わった用途としては、果実や肉など冷凍食品の解凍に使用されている。解凍の場合は、スクリー羽根設定温度を数十°Cの低温度、スクリーを低回転数に設定し、熱処理という言葉とは、ほど遠い運転条件に設定される。国内においては、穀物の焙煎に使用されることが多いが、ここにスパイラジュールを大豆の焙煎に使用する応用例を紹介する。

(1) 大豆の生理的有害物質

大豆は蛋白質と油を含む栄養価の高い食糧だ

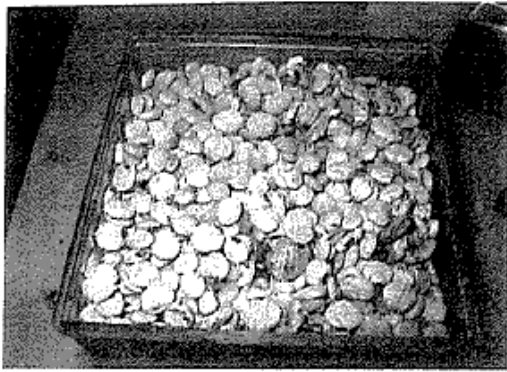


図14 前処理された大豆原料

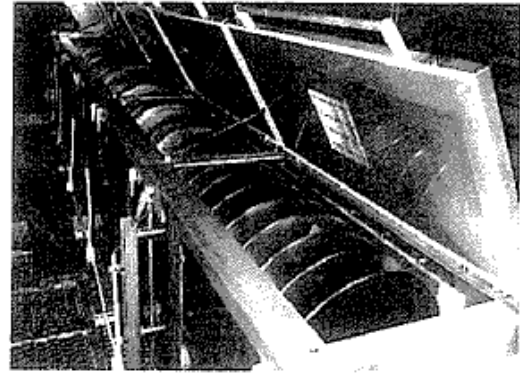


図15 大豆焙煎装置

が、大豆の組織は他の豆類に比べて非常に堅く、単に加熱だけでは消化率が低い。また、大豆中にはトリプシンインヒビターなど各種の生理的有害物質が含まれるため、食用にする場合は問題となる。大豆を消化しやすく、また生理的有害物質を不活性化することが必要になる。

(2) スパイラジュールによる大豆の熟処理

牛の配合飼料に使用される大豆の熟処理にスパイラジュールが使用されている。上流工程において、まず丸大豆に蒸気を噴霧し、加湿する。次に加湿された大豆を圧片し、堅い組織をつぶす。このように前処理された大豆(図14)をスパイラジュールにより加熱する。加湿された大豆が、熱により柔らかくなるとともに、前出の生理的有害物質が不活性化される。大豆がどの程度に加熱されたかを示す蛋白質の水溶性百分率は、低い数値(0.5%以下)を示し、消化しやすい状態に加工されている。

(3) スパイラジュール仕様と運転条件

この大豆の焙煎に使用されるスパイラジュール(図15)の仕様と運転条件の概要は以下の通りである。

①装置仕様

スパイラジュール600L6V200(納入台数 2台)
 能力…1500kg/h(1台あたり)
 スクリュー…羽根径600 [mm]
 長さ 6 [m]
 羽根幅200 [mm]

攪拌パドル枚数…80枚

②運転条件

スクリー羽根設定温度…240℃

滞留時間…11分(スクリー回転数4.23rpm)

粉面レベル…200mm程度

II. 粉粒体連続冷却装置フリゴミックス

1. 概要

フリゴミックスの外観を図16に示す。フリゴミックスはツインパドルスクリーを装備するパドルコンベヤの形状をしている。図17の通り、ツインパドルスクリーは二重管構造になっており、軸内部を冷却水が流れる。軸内部を円管状に流れる冷却水が軸を低温に保つ。スパイラジュールの製品のような高温の製品が、原料入口より機内に供給される。ツインパドルスクリー(図18)が回転することにより、機内を原料が通過し

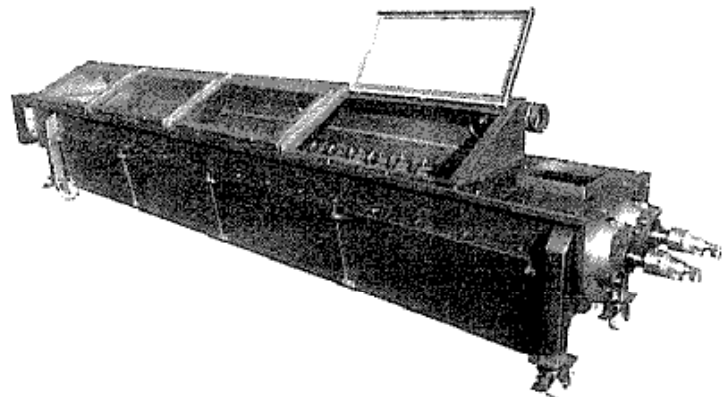


図16 フリゴミックス本体

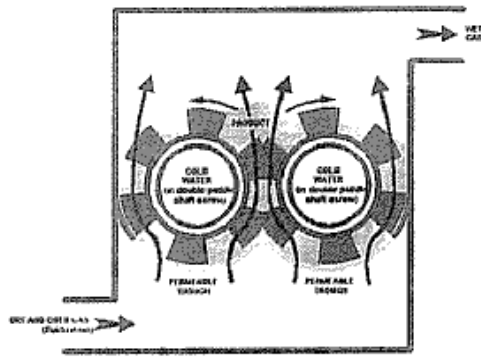


図17 フリゴミックス断面

入する。機内を原料が通過するあいだに、冷却水により低温に保たれた軸に原料が接触を繰り返し原料が冷却される。スクリーントラフ底面は焼結金属などの通気性のある材料により製作されている。この通気性のあるトラフより、原料に、少量のドライエアーが供給される。このドライエアーが、多く水分を含んだ高温の空気が原料とともに冷却されるときに伴う結露を防止する。原料が流動化され、伝熱が促進されるため、ドライエアーは総括伝熱係数の向上にも

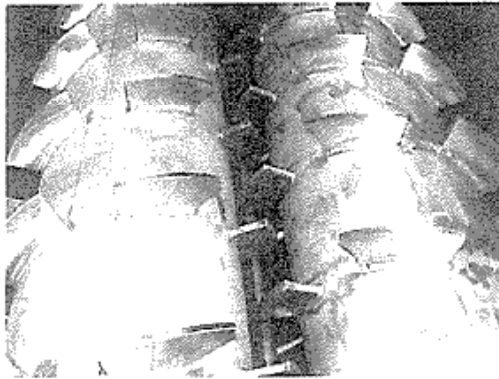


図18 ツインバドルスクルー

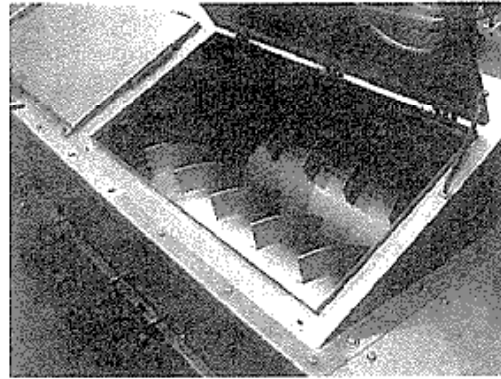


図19 上部点検扉

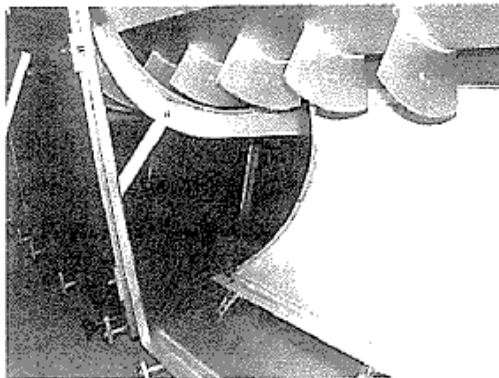


図20 下部点検扉

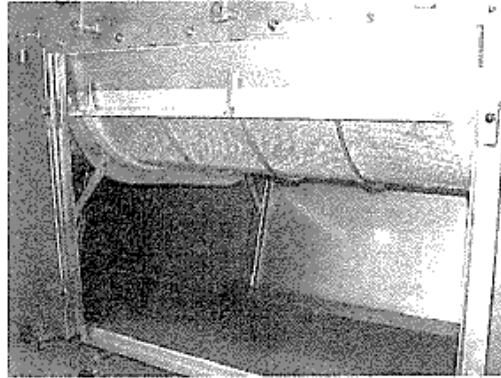


図21 通気性のある焼結金属製トラフ下部

寄与する。ドライエアーは、回転型乾式化学除湿ユニットなどを使用し、フリゴミックスに供給する。

スクリーントラフ底面は、容易に開閉し、内部を洗浄できる構造となっている(図20)。

III. セーフステリル蒸気殺菌システム

スパイラジールの熱処理の目的のひとつに殺

菌がある。国内においては、放射線の食品照射はジャガイモの発芽防止に認可されるにとどまるが、海外においては、香辛料殺菌などに放射線殺菌が使用される。しかし一般消費者の安全性に疑問が残るという声もあり、熱処理による殺菌を求める企業も多い。加熱殺菌を有効に利用するためには、目標とする有害微生物の熱特性を理解する必要がある。香辛料の原料は、土壌由来の耐熱性芽胞菌を多く含み、穀物の場合は真菌、畜産品の

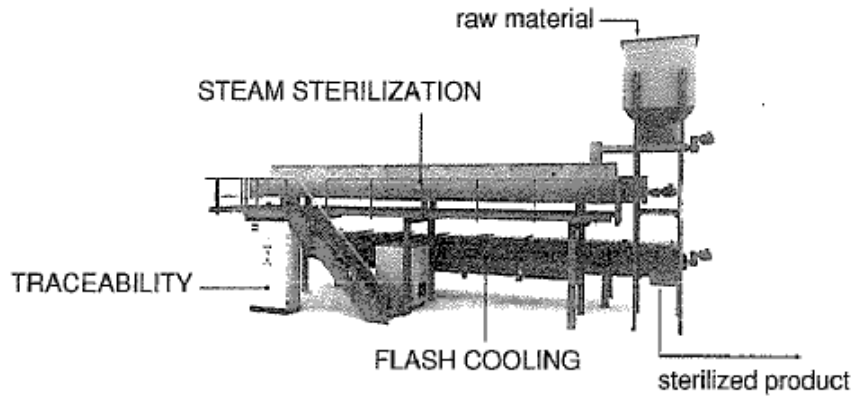


図22 セーフステイル蒸気殺菌システム

場合はサルモネラ菌のように、原料により注意すべき微生物は異なる。その微生物の種類により、熱抵抗性は異なり、特に耐熱性芽胞菌の場合は、非孢子菌の場合とは考えを異にする必要がある。一方、原料の菌数と、加熱後の残存菌数は相関関係がある。D値という微生物の特性値があり、ある与えられた温度において微生物が90%死滅する（菌数が一桁さがり）のに要する加熱時間と定義される。要するに、加熱条件が同じ場合は、原料菌数と加熱後の残存菌数は比例関係にあることになる。

このように対象となる微生物の種類、熱抵抗性、原料菌数により加熱殺菌の結果は大きく影響を受けるため、これらの要素を念頭におき、殺菌の目標レベルを論ずるべきである。殺菌すべき原料に対する加熱の影響も十分に検討する必要がある。加熱殺菌の理想とするところは、殺菌すべき原料に対し、加熱による損傷、劣化を最小限にとどめ、存在する有害微生物を迅速かつ効率よく目標レベルに死滅させることにある。セーフステイル蒸気殺菌システム（図22）は、スパイラジュールとフリゴミックスを使用した蒸気殺菌システムである。このシステムによる加熱殺菌が、多くの殺菌の目標レベルに達し、欧州をはじめとする諸外国に、納入実績を伸ばしている。

1. システム概要

セーフステイル蒸気殺菌システムはスパイラジ

ュールによる蒸気殺菌とフリゴミックスによる急速冷却を、定量供給設備、除湿機ユニット、管理システムなどとともに組む蒸気殺菌システムである。

図23は殺菌が目的の場合のスパイラジュールを模式的に示したものである。一般に微生物の湿熱に対する抵抗性が乾熱に対する抵抗性より小さいため、熱処理目的が殺菌の場合のほとんどは、スパイラジュールに蒸気を併用する。

機内に噴霧された蒸気は、スクリー羽根が発生するジュール熱により高温になった機内の雰囲気と接し、過熱水蒸気状態となり、原料は、水分が変化することなく殺菌される。この後、製品はフリゴミックスに供給される。高温の製品が、常温に冷却されるとき、微生物が増殖しやすい温度帯を通過することになるが、水分条件がそろって微生物に最適な環境となってしまう。機内のデッドスペースがカビの温床になりかねない。製品が再汚染されないために、すばやく常温に冷却すること、製品や機内に結露がないことが、冷却装置に要求される。ツインパドルスクリーによる冷却とドライエアーの使用により、フリゴミックスはこの要求に応える仕様となっている。

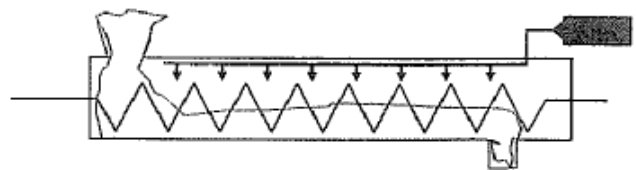


図23 スパイラジュールの蒸気ノズル

おわりに

粉粒体連続熱処理装置スパイラジュールと粉粒体連続冷却装置フリゴミックスは日清エンジニアリング㈱が輸入販売する装置である。スパイラジュールは①構造がシンプルなため清掃やメンテナンスが容易であり、また大掛かりな付帯設備も必要とせず設備コストを抑えることができる。②熱源が電気のため、高い安全性と作業環境を確保する。③正確に運転条件を管理できる。④スクリーナー羽根が発熱体となるため、高い熱効率を確保す

る。といった優れた特長がある。またフリゴミックスは、ドライエアーの使用により結露なく、スパイラジュールの製品を再汚染することなく、急速に冷却することができる。粉粒体の熱処理の検討にこれらの装置を加えていただきたい。

参考文献

M. Philippe Sajat "Etude hydrodynamique et thermique du Spirajoule"

<食品工学基礎講座>⑤加熱と冷却 (㈱光琳)

「大豆食品」(㈱光琳)

芝崎勲「改訂新版・新・殺菌工学」(㈱光琳)