

(解説)

食品・バイオ分野向け高圧処理装置

High Pressure Processing Equipment for Food and Biotechnology Fields



岸 新和*

Yoshikazu KISHI

Recently, interest in high pressure processing technology has been growing substantially because of diversification in high pressure food processing and active research and development in biotechnology fields including preparation of regenerative materials using high pressure. This paper describes WIP equipment technology adaptable for the above fields which is based on high pressure technology of Kobe Steel. In addition, this paper describes 400MPa units for production, 1GPa units for R&D and the future prospects of these technologies.

まえがき = 人類の歴史において食品の調理・加工・殺菌といえば加熱処理を意味してきた。その加熱処理に代わる新たな食品処理プロセスとして高圧処理に期待が寄せられ、研究開発が本格化してから久しい。その間、医療・バイオ分野への用途拡大も含めて世界中で数多くの成果が発表されて実用化が進み、現在も新たな商品化に向けた研究開発が地道に行われている。

これらの研究開発や成果の実用化を支えるべく、当社は、保有する高圧技術を生かして本分野に適した WIP (Warm Isostatic Pressing) 装置の技術開発を続けており、これまでに研究用から生産用まで多数の装置を供給している。

本稿では、食品・バイオ分野向け高圧処理について、装置技術および実用化開発の概要を紹介する。

1. 高圧処理の用途開発および実用化

国内食品業界では、1980年代半ばから高圧処理の実用化に向けて果敢な挑戦がなされ、まず、ジャムや果汁飲料の商品化で初めて実用化された。その後、生酒・不凍果実・機能性白米で実用化されたほか、1994年にはスペースシャトルに加圧処理食品が持込まれたことも話題になった。1990年代後半からは当初の華々しさはなくなったが、その反面、絞り込まれた対象で粘り強く研究開発が継続されており、現在では無菌パック米飯や加圧玄米、加圧ハムといった高機能食品が商品化・販売されるなど、高圧食品は着実に身近なものになってきている。また、高圧処理を加工手段としても利用し、生産性や品質の向上および機能付加などの高い効果をあげることが期待されている。

基礎研究に関しては、栄養細胞の殺菌、蛋白質やでんぷんの変性、高圧不凍域の利用(加圧急速解凍・圧力移動凍結や加圧不凍域保存)、酵素反応の制御(失活や活性

化)、生体膜に対する効果(抽出や浸透)などで豊富なデータが報告されている。最近では、健康志向の高まりや高齢化社会への配慮により食品に対する消費者ニーズが従来の価格重視から品質(栄養価含む)・安全性重視へと移行しつつあり、再び高圧食品が脚光を浴びる環境になるうとしている。また研究分野は内臓や皮膚などを対象とした再生医療などのバイオサイエンスへも拡大しつつあり、新たな高圧利用技術や商品の誕生が期待されている。

海外では、日本での活発な活動に刺激されて1980年代末頃から欧州を中心に基礎研究が行われ、1990年代には米国で急速に実用化が進展した。現在ではアジア・オセアニア諸国でも拡大の様相を見せている。海外での実用化の主な用途として殺菌・保存期間延長(食肉製品・水産製品・調理食品・果実加工品・ジュース)と貝や甲殻類の殻むきなどがあり、これらは近年、国内市場にも波及しつつある。保存期間の延長は食品廃棄物に関連する今日の環境・エネルギー問題にも寄与していくものと予想される¹⁾。

2. 基盤になる高圧技術

圧力は温度と並ぶ身近な熱力学上の物理量でありながら、温度に比べるとなじみは薄い。しかし、紀元前の「サイホンの原理」の発見から蒸気圧の利用を経て、今日では食品・バイオ以外の工業分野の生産手段として高圧技術は様々な形態で利用されており、決して特殊な技術ではない。特に1980年代には高圧技術を利用して粉末原料に数十から数百 MPa の圧力を加えて成形する CIP (Cold Isostatic Pressing) 装置、100MPa 以上の圧力と 1,000 以上の温度との相乗効果で加圧処理する HIP (Hot Isostatic Pressing) 装置が飛躍的に普及し、当社でも両装置で 700 台を越える販売実績がある。さらに、超

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 重機械部

臨界流体を溶媒として利用する超臨界抽出装置や、数百MPaの圧力下で生じる物質の凝固現象の特性を利用して結晶を生成・分離精製する圧力晶析装置がファインケミカル分野などで注目され、数多くの装置を供給している。

3. 高压技術の食品・バイオへの適用

食品・バイオ分野に最も近い高压装置としては、圧力媒体（以下、圧媒という）に液体を使用するCIP装置が挙げられ、例えば圧力については700MPa、容積については14.7m³(処理室寸法 2,500mm × 3,000mm)の装置が生産設備として稼動している。図1にCIP装置の一例を示す。

図2に示すように、昇圧機構の違いにより装置の基本構造はつぎの二種類に分類される。

1) 外部昇圧式(図2(a)): 高压容器に高压ポンプで圧媒を送り込んで昇圧するもので、主に処理圧力400MPa以下の装置で採用される。

2) ピストン直圧式(図2(b)): 高压容器にピストンを押し込み圧媒を直接圧縮加圧するもので、主に400MPa超の装置で採用される。

WIP装置はこれらCIP装置に最高80程度の加熱機能を付加したもので、高压と加熱との相乗作用が殺菌などに有効とされている研究成果に合致した装置である。温度制御は通常、高压容器の外部からの間接加熱により行う。

この装置技術を食品などの処理に適用させるためには以下に述べる配慮が必要である¹⁾。



図1 大形CIP装置(200MPa × 2,000 × 3,000mm)
Fig. 1 Large CIP equipment (200MPa × 2,000 × 3,000mm)

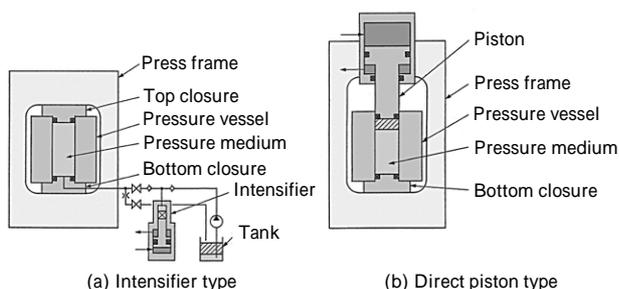


図2 昇圧機構の比較
Fig. 2 Comparison of pressurizing system

3.1 衛生への配慮

高压処理装置を食品加工に適用する場合は、衛生面への配慮を最も優先しなければならない。包装材にバックされた食品を処理する場合は、包装材の材質やシール方法で危険性の大部分は排除できるが、圧媒の混入を想定した配慮は重要である。

通常のCIPまたはWIP装置では水溶性油を添加した水などを圧媒として使用しているが、食品処理の場合は誤って食品に混入した場合でも衛生上の問題が生じないよう、圧媒は飲料水であることが望ましい。また錆の発生による安全上および衛生上の問題を回避するため、圧媒が接触する耐圧部分には高強度ステンレス鋼を使用している。あわせて、圧媒自体の清浄性を確保するために、圧媒の滞留しやすい凹部の最少化や洗浄が容易な構造にするなどの構造上の配慮が必要である。

CIP・WIPいずれの方式でも高圧力状態で摺動するシール部が存在するため、パッキンの摩耗粉が発生する可能性があり、特に液状食品などを直接処理する場合に問題になる。したがって、液状食品処理の場合、主に図3に示す二種類の処理方法が考えられる²⁾。

1) フリーピストン方式(図3(a)): 処理室がフリーピストンで二室に分割されており、一方に処理物が、他方に圧媒が充填される。圧媒側を高压ポンプで加圧するとピストンが押し込まれ、ピストンを介して処理物が加圧される³⁾。フリーピストン間の差圧がほとんど無いため、シール用パッキンの摩耗を大幅に低減できる。

2) 可撓隔壁方式(図3(b)): 処理室が可撓性の隔壁で二室に分室されており、内部室に処理物が、外部室に圧媒が充填される。圧媒側を高压ポンプで加圧していくと可撓隔壁が内側に押し込まれ、可撓隔壁を介して処理物が加圧される⁴⁾。この方式の場合には、摺動シール部がないため摩耗粉が混入する可能性はほとんどない。また、処理物と圧媒が接触しないため、圧媒に飲料水以外のものを使用しても混入する恐れがほとんどない。また、500MPa以上では強度上の問題からステンレス鋼が使用できず、圧媒に飲料水を使用することは難しい。この場合は人体に無害かつ防錆効果のある液体を圧媒として選択することになり、処理品は主に包装材にバックされたものになる。なお、この高压域は近年、再生医療への適用で注目を浴びている。

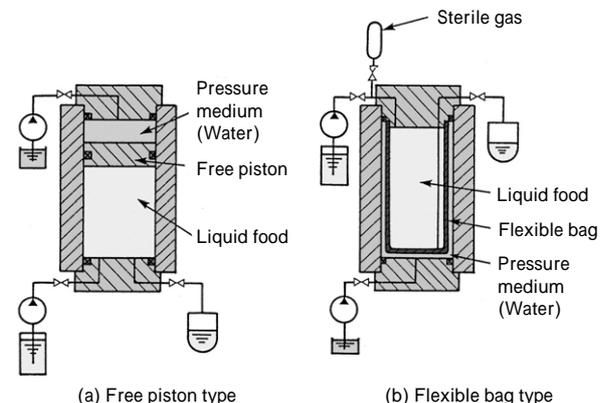


図3 液状食品高压処理システム
Fig. 3 High pressure processing system for liquid food

3.2 経済的なシステム構成

3.2.1 処理容積の最適化

生産コスト低減のためには、プロセス条件(処理圧力・圧力保持時間など)が最適化された後に、生産量に対する処理室容積の最適化を図る必要がある。

高圧装置は経済性に対するスケールメリットが大きく、処理室容積が増大するにつれて処理室単位容積あたりの設備費が急速に低下することが知られている⁵⁾。このことは、容積の小さな小型装置を複数台並べるよりも、一台の大型装置で処理の方が経済的であることを意味する。あわせて、圧力は温度とは異なって処理室内のどの場所でも瞬時に同じ効果が伝達されることから、処理室の大容量化により、処理物の充填効率を上げる効果も期待できる。

生産用装置の場合、さらにシステムの安定性についても充分評価する必要があると考える。高圧処理装置の構成要素のうち、最も厳しい使用条件にある(換言すると最もメンテナンスの頻度が高い)のは高圧ポンプである。ポンプが休止するとたちまち生産停止に陥ってしまうことを避けるため、複数台のポンプを配備して一台のポンプが停止しても操業が継続できるように安定性をもたせることが必要になる。

3.2.2 生産性の向上と省エネルギー

食品加工の場合は、処理物の原料供給や包装などの前後工程は連続的かつ自動的に行われるのが一般的であるが、高圧処理工程のみは高圧であるがゆえにバッチ処理にならざるを得ない。したがって、前後工程との連続性を保つためには、高圧処理工程で複数容器によるバッチ連続運転を行うことが必要になる。複数容器を使用する場合、各々の工程をずらすことによりサイクルタイムの短縮も可能である。一例を図4に示す。図4(a)は設備を通常システムで運転した場合のタイムチャート、(b)は差圧回収システム⁶⁾で運転した場合のもので、サイクルタイム短縮の効果がよく分かる。これを採用した生産装置を図5に示す。主に米飯パックの生産に利用されており、圧力400MPa、処理室容積130リットルの容器2個を1セットの昇圧装置と組合せ、加圧時間を通常システムの半分程度に短縮し、サイクルタイム4分を実現し

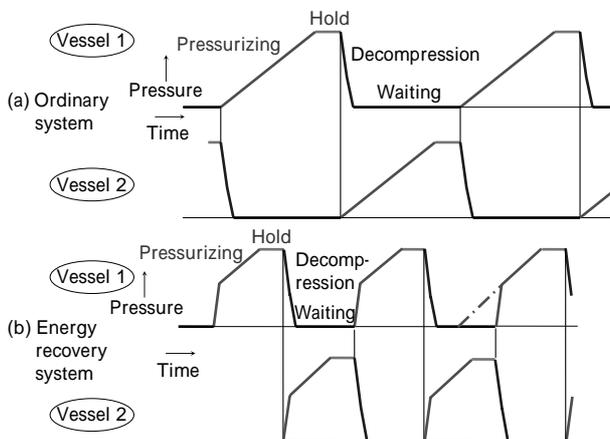


図4 高圧処理工程のタイムチャート比較

Fig. 4 Comparison of time-chart of high pressure processing

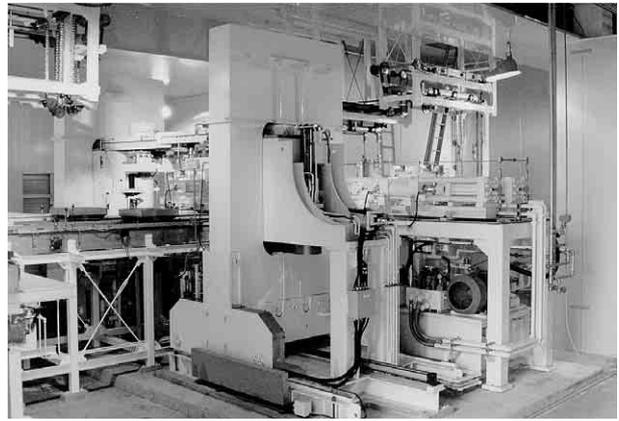


図5 差圧回収システム適用2筒装置

Fig. 5 Twin vessel equipment with energy recovery system

た。これは生産量に換算すると米飯パック1個/秒に相当する。

生産性を向上させる方策で忘れてはならないのが装置の稼働率の向上であり、メンテナンス時間の短縮も重要である。具体的には、メンテナンス頻度が比較的高い高圧ポンプ・高圧弁・フィルタなどに予備ラインを設置することも有効であり、各機器のメンテナンス時には予備ラインに切替えて生産運転を継続することで休止時間を最小にすることも重要である。

3.2.3 乾式処理システム

包装材にパックされた食品などを処理する場合、生産性の高い処理方法として図6に示す乾式法も有効な選択肢の一つとなる⁷⁾。

乾式法は、図示するように高圧容器内部に圧媒をシールするために組込まれた加圧ゴム型を介して、加圧ゴム型内に収納された処理物を加圧する方法であり、省力化・自動化が容易で連続処理に適している。処理工程は次の通りである。

パック製品を準備ステーションで可携性ホルダに収納する。このホルダを処理室に搬送して加圧処理する。加圧処理後、ホルダを処理室から取出して準備ステーションに搬送し、パック製品を可携性ホルダから取出す。加圧と準備工程とを同時に行うことができ、一連のハンドリングはロボットなどによる自動化が容易なことから、短時間サイクルでのバッチ連続生産が可能である。

さらにこの方式では、製品の外面が圧媒に触れることがないため、圧媒が製品中に混入する恐れがまったくな

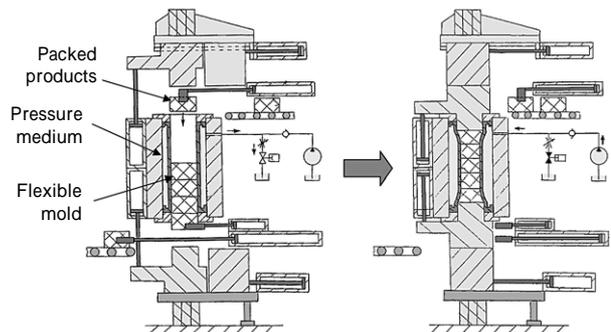


図6 パック製品用乾式処理システム

Fig. 6 Dry bag system for packed products

く、衛生上の安全性が高い。また、処理後の乾燥工程が不要となり、工程の簡略化にも有効である²⁾。

3.3 装置の安全性および軽量・コンパクト化

高压容器の構造としては、高压円筒とプレスフレームとでそれぞれの方向の荷重を分担して支持する枠形フレーム方式が、安全性と信頼性の面で小型装置から大型装置まで広く用いられている。

一般に、高压容器は高压ガス保安法や労働安全衛生法などで規定されているように静的設計される。しかし、高压処理装置の場合は一年間に数万回を越える繰返し圧力を受けることも少なくないため、高压容器は疲労強度を基準にして設計する必要がある。

高压円筒は、99.99%以上の非破壊確率を有する設計疲労曲線に従って設計されるのが一般的である。構造は単体円筒のほか、高压円筒の内面に圧縮残留応力を与えて平均応力を下げ疲労強度を向上させる複合円筒や自緊円筒がある。複合円筒には焼ばめ構造や線巻構造（芯になる円筒の外周に鋼の二倍の強度を持つピアノ線を巻付けて強化した構造）がある。プレスフレームも同様の疲労強度を基準に合理的で信頼性の高い構造に設計する必要があり、鋼板積層構造や線巻構造が用いられている。圧力条件によるが線巻構造では質量が焼ばめ（高压円筒）・鋼板積層（プレスフレーム）構造の約1/3~1/2程度で済み、大幅な省スペースと機械基礎の簡略化、ひいては建屋建設コストの低減も可能である。

このように高压容器の構造によって寸法・質量に大きな違いがあり、両者の差は装置が大型化・高压化するほど大きくなる。このため、装置仕様に最適な構造を選択することが重要である²⁾。

3.4 高压処理装置の最近の動向

線巻構造・差圧回収技術などを適用して、当社は食品用途での生産用高压処理装置を6台製作・納入している。この装置はユーザの工夫も加えられさらに生産性を向上させており、国内外で食品高压処理用生産装置の代表的な成功モデルとしての地位を確立している。このモデルは処理圧力が400MPa以下の領域を適用範囲としているが、一方で図7に示す、主に研究機関向けの試験機（Dr. CHEF）や生産機開発を念頭に置いた試験機も製作し400MPa超、さらには600MPa超の高压領域での用途開発を進めている。Dr. CHEFはオプションとして最高処理圧力1GPaにも適用することが可能であり、医療・バイオ分野の研究開発に貢献している。



図7 研究開発用高压処理装置（Dr. CHEF）
Fig. 7 High pressure processing equipment for R&D (Dr. CHEF)

むすび=より安全な食品の供給、従来にない価値や機能を持つ新食品の開発・生産に有効な技術として、高压処理技術への関心は国内外で高まっている。日本の食品高压処理技術は、いち早く応用商品を生み出したことで、最先端技術として世界の熱い視線を集めていたが、残念ながら近年では後発の海外勢に工業化の主導権を握られつつある状況である。

日本が再び世界をリードして食品高压処理技術を開発して行くには、ソフト（プロセス・包装材など）、ハード（高压装置・周辺装置、それらをつなぐシステムなど）両面の開発が必要であり、関連業界との連携はますます重要になると思われる。現在、新潟県が主体になり産・官・学による世界最大規模の連携研究体の活動がスタートしており、関連業界からも注目を浴びている。

当社は、これまでの領域に加え600MPa超の圧力域での高压処理の用途開発と生産装置開発が医療・バイオ分野での適用も含め今後重要になると認識している。超高压装置のトップメーカーとして長年蓄積した技術を生かし、食品・医療業界のニーズにおこたえすべく技術開発を継続している。今後もこの分野の一層の発展に微力ながら貢献して行きたい。

参考文献

- 1) 岸 新和：食品と容器，Vol.49, No.2 (2008) pp.76-81.
- 2) 直井利勝ほか：食品加工技術，Vol.20, No.3 (2000) pp.44-48.
- 3) 特許：第2871068号．
- 4) 特許：第2774683号．
- 5) 直井利勝：最近のHIPとCIP〔1991〕pp.23-40.
- 6) 公告特許：平6-22534．
- 7) 特許：第3088862号．