

**平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「攪拌機能付き高圧下発酵・熟成装置の開発」**

研究開発成果等報告書

平成22年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人にいがた産業創造機構

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	4
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 本論	9
2-1 高圧下での温度制御システムと攪拌技術の構築	9
2-1-1 容器内温度分布の検証及び総括熱伝達係数の算出	9
2-1-2 容器内の攪拌技術の構築	20
2-1-3 高圧下温度制御システムの構築	22
2-2 高圧下発酵・熟成装置の開発	28
2-2-1 高圧下発酵・熟成装置の開発	28
2-2-2 性能評価試験	32
第3章 全体総括	35

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

<研究開発の背景>

味噌、醤油等を製造する発酵産業においては、発酵及び熟成に多大な時間を費やし、大きなスペースを必要とすることから効率の悪い製造が行われている。このため、製造方法は日本の気象条件を活かした伝統的な製造方法に頼る一方で、アルコールなどの添加物による発酵期間の短縮化が行われているのが現状であり、無添加での発酵及び熟成の短縮化技術に対するニーズは高い。また、漬物などでは、乳酸菌や酵母などによる発酵漬物は市場流通することは少なく、ほとんどが味付けしたものか加熱殺菌した漬物であり、非加熱での乳酸菌や酵母の制御技術が熱望されている。



図1 高圧処理に関する利用方法の遷移

高圧処理を利用した食材の加工方法に関する研究が本格的に始まって20余年が経過した。高圧処理に関する利用方法の遷移を図1に示す。当初は圧力単独で食品を加工する研究（第一期）により、ジャムや蓬餅などの非加熱殺菌に圧力を利用した食品が市販化された。その後、圧力は熱と同じ状態変化因子であることから、熱との併用によるタンパク質やデンプンの変性に関する研究（第二期）が注目され、ハムや無菌包装米飯などが製品化された。

越後製菓㈱では、平成14年度の経済産業省の委託研究事業「地域新生コンソーシアム研究開発事業 高圧処理を利用した新機能性食材の開発と産業化（関東経済産業局 14S3009）」によって、第三期と称される高圧処理により誘引される変化を利用して食材を加工する方法（High-Pressure Induced Transformation（以下、Hi-Pitと略す））を確立した。すなわち、高圧処理により食材の形質転換を誘引し、その後に他の物理的、生物的、生化学的効果を組み合わせることにより、食材中に含まれる組成（薬理成分）を増加させるなど、新しい機能性食材を開発することが可能になった。コンソーシアム事業により、現在までに累計4品を市販化、約2億円の販売実績を有し、論文3報、特許2件など、予想を上回る成果を上げることができた。

微生物や酵素反応の制御因子としては、温度、水分活性、pH及び圧力などがあげられ、特に食品加工においては温度制御が重要となる。しかし、現在の技術では、100MPa程度の圧力でも容器内温度を完全に制御する技術は確立されておらず、特に実用化段階においては容器内の温度差が大きな課題となっている。図2に酵母の生育時間と耐圧性の関係を示す。高圧処理（160MPa×16時間×25℃）後の標準酵母の耐圧性に関するデータも、実施機関によってデータがばらついており、この要因の一つとして容器内の温度差が考えられる。

発酵技術に関する最新の研究動向として、発酵処理が抗酸化性など新たな機能性成分や既知の機能性成分を増加させる可能性を示す研究成果が報告されている¹⁾²⁾³⁾。

また、越後製菓によるこれまでの研究成果から、高圧下における発酵及び熟成のメリットとして、①酵素反応の制御による発酵及び熟成期間の短縮、②発酵及び熟成中での微生物の制御、③圧力を利用した選択的殺菌などが挙げられる。

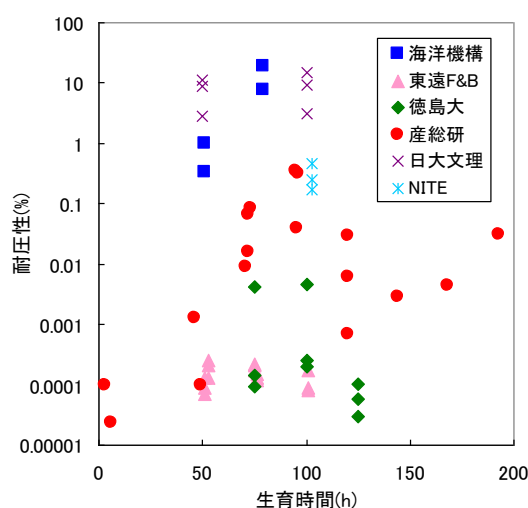


図2 酵母の生育時間と耐圧性の関係

食に対する最近の社会的ニーズは「安心」「安全」「健康」「高齢化」が主眼となっているが、利便性優先の消費型社会の反省から、5 つめのキーワードとして「環境」も踏まえた新しい食品加工技術が求められ、特に発酵食品は、これらのキーワードにマッチした食品として、我々の食生活を豊かにすることや長寿社会の日本にあって生活の質(QOL)の向上に貢献している。

これらのことから、本研究開発では、高圧処理技術を利用して、機能性を有する発酵食品や製造コストの削減を目指した「攪拌機能付き高圧下発酵・熟成装置」を開発する。

<研究開発目的及び目標>

発酵や醸造とは、微生物の力を借りて、原材料が嫌氣的分解、好氣的分解、資化、代謝、酵素的変換の作用等により、素材とは性状の異なる状態に経時的に変化していくことである。伝統的な従来の発酵工業は、大気圧下にて、これらの発酵や醸造のノウハウを構築してきたに過ぎず、高圧下のような「圧力」という次元、概念を取り込んだ発酵や醸造は試みられていない。圧力は「熱」とは異なり、容易に入手することが困難であったからに他ならない。

しかし、酵母や乳酸菌などの微生物が水深数千 m の深海でも生育していることから、水圧下でも発酵や醸造が可能であると考えられる。また、酵母菌体が生産する代謝産物には、アルコール以外にも、カロチノイドやビタミン、糖アルコールなどの生理活性物質がある。

コンソーシアム事業では、内臓を含む生イカを 60MPa(水深 6000m に相当)の水圧下で 22 時間保持するだけで内臓に含まれるプロテアーゼの作用が活性化され、その結果、原材料をアミノ酸に高速分解し、通常約 1 年の発酵期間を経て作られる、いわゆる魚醤油を 24 時間という短時間で得る技術を構築することができた。

また、心臓病・肝臓病・高血圧症といった生活習慣病が塩分の過剰摂取に起因することからも、減塩を表示した味噌、醤油等の発酵製品が注目されている。製造工程において、塩分の添加は、腐敗菌等の微生物の増殖を抑える働きもあり、製造過程にて単に塩分を減らす場合、製品劣化を招く恐れがある。これに対し、高圧下では製品劣化を引き起こす一般生菌は 50MPa~100MPa 程度にて増殖が抑制されるため、減塩あるいは塩分無添加でも腐敗することはない。また、発酵に有用な酵母は 300MPa、乳酸菌はそれ以上の圧力でないと影響を受けないため、高圧下での発酵が可能となり、塩分無添加の発酵製品の製造も可能になる。

上述したように、発酵や醸造は、大気圧に比べ高圧下(数十~数 MPa)で発酵・熟成期間の短縮、微生物の制御及び機能性物質の作出などの効果があることが広く知られているが、圧力に合わせた温度制御が難しく、実用化に至っていない。そこで、高圧下で発酵や醸造を行う装置の実用化に向け、高圧容器内を攪拌しながら容器内温度を均一に制御できる高圧発酵・熟成装置を試作する。本研究開発では、高圧下において容器内を効率よく攪拌する技術及び容器内温度を均一に制御する方法を検討し、これらの機能を有する高圧下発酵・熟成装置の開発を目指す。

<研究内容>

1 高圧下での温度制御システムと攪拌技術の構築

① 培養器内の温度分布の検証及び総括熱伝達係数の算出

従来法の容器外からの加温・冷却では容器外壁での熱伝達、金属容器を通しての熱伝導により容器内に熱が伝わり、容器内では温度変化に伴う圧力媒体の密度変化により自然対流熱伝達により、容器内の温度が均一になる。容器内の温度分布を正確に測定し、どの程度容器内温度を均一にすることが可能か検証する。伝熱効率の指標として、攪拌した場合の総括熱伝達係数を算出し、実測データから伝熱効率を検討する。

② 容器内の攪拌技術の構築

圧力容器内の温度分布を参考にし、圧力媒体が効率的に対流し、容器内温度を均一にする攪拌する技術を開発する。

③ 高圧下温度制御システムの構築

上記で確立した容器内への最適な熱伝達条件と内部攪拌技術をもとに、高圧下の容器内温度を維持・調整する温度制御システムを構築する。

2 高圧下発酵・熟成装置の開発

① 高圧下発酵・熟成装置の試作

上記①で確立した容器内攪拌技術と圧力、温度制御システムをもとに実用化を見据え、容器容量 300cc、容器内圧力 200MPa 及び容器内設定温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内の制御が可能な攪拌機能付き高圧下発酵・熟成装置を試作する。

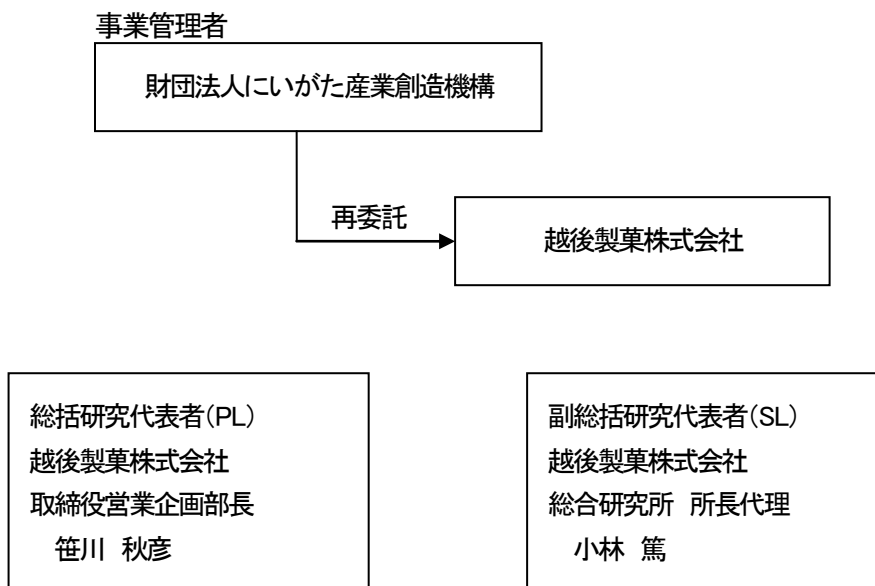
② 性能評価試験

試作した高圧装置を用い、実際の発酵、熟成を想定した性能評価試験を実施する。

1－2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

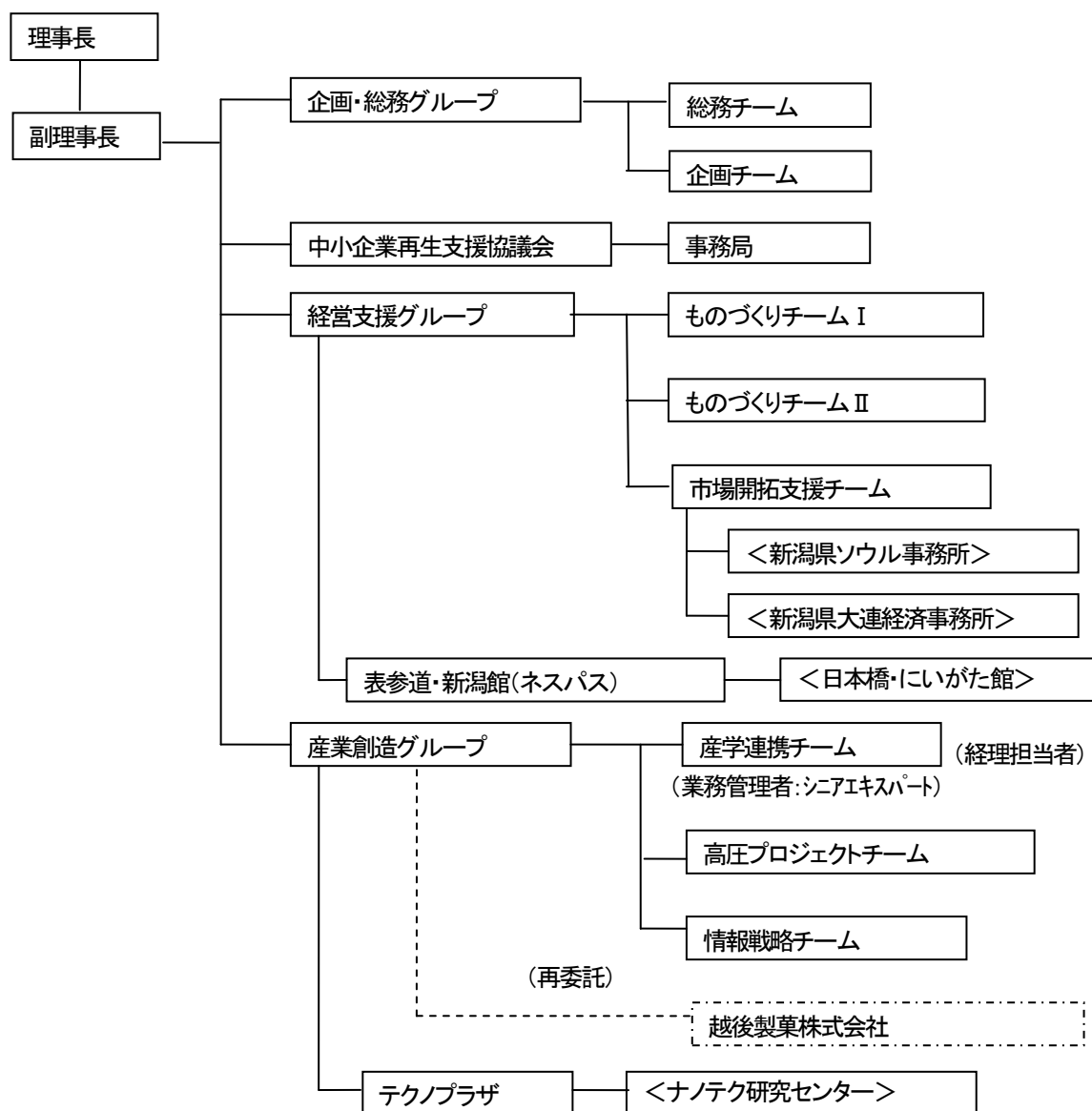
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）

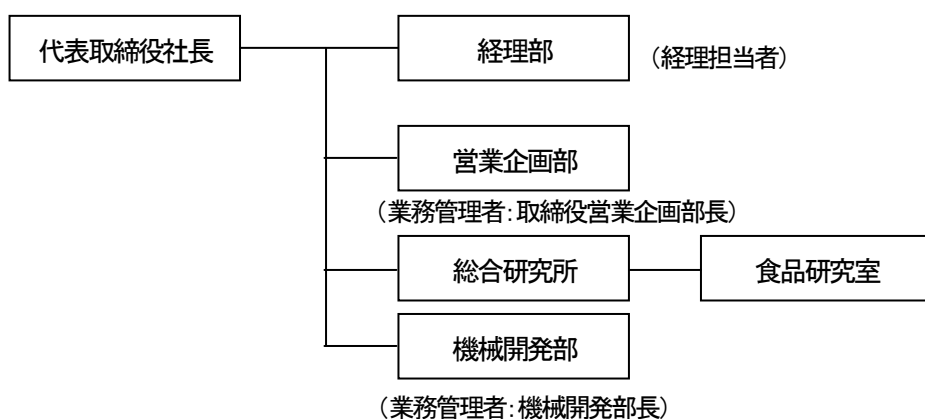


2) 管理体制

① 事業管理者【財団法人にいがた産業創造機構】



② 再委託先【越後製菓株式会社】



(2) 管理員及び研究員

1) 事業管理者

財団法人にいがた産業創造機構

氏名	所属・役職	実施内容
熊木 均	産業創造グループマネジャー	プロジェクトの管理・運営

2) 再委託先

越後製菓株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
笹川 秋彦	取締役営業企画部長	高圧下での温度制御システムと攪拌技術の構築 高圧下発酵・熟成装置の開発 (PL)
小林 篤	総合研究所 所長代理	高圧下での温度制御システムと攪拌技術の構築 高圧下発酵・熟成装置の開発 (SL)
小川 昌二	機械開発部 係長	高圧下での温度制御システムと攪拌技術の構築 高圧下発酵・熟成装置の開発
佐藤 直輝	機械開発部 研究員	高圧下での温度制御システムと攪拌技術の構築 高圧下発酵・熟成装置の開発

1-3 成果概要

1 高圧下での温度制御システムと攪拌技術の構築

① 培養器内の温度分布の検証及び総括熱伝達係数の算出

高圧下発酵・熟成装置の培養器(圧力容器)内の温度分布を測定し、そのバラつきを検証した。
また、熱伝達の計算式から、総括熱伝達係数を算出した。

② 容器内の攪拌技術の構築

圧力容器内の温度分布データを参考にし、攪拌技術を構築した。

攪拌方法としては、シリンダーを用いて圧媒を循環する方法とした。また、シリンダーで循環させるのみでは温度差が生じるため、圧力容器内に攪拌翼を用い、圧媒の輸送現象、特に乱流特性を調査できる、高圧下発酵・熟成装置に組み込める攪拌装置を製作した。

③ 高圧下温度制御システムの構築

容器内への最適な熱伝達条件と内部攪拌技術をもとに、高圧下の容器内温度を維持・調整する温度制御システムを構築した。

2 高圧下発酵・熟成装置の開発

① 高圧下発酵・熟成装置の試作

容器内容量が 300cc の試験用高圧下発酵・熟成装置を設計、製作した。

② 性能評価試験

製作した高圧下発酵・熟成装置の容器内温度分布の測定および、発酵・熟成試験を行い、装置の性能評価を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(1) 事業管理者

財団法人にいがた産業創造機構

電話 025-246-0068

FAX 025-246-0033

(経理担当者) 産業創造グループ スタッフ 齊藤 隆博

(業務管理者) 産業創造グループ シニアエキスパート 小林 和仁

(2) 再委託先

越後製菓株式会社

電話 0258-83-3288

FAX 0258-83-4479

(経理担当者) 取締役経理部長 中村 郁夫

(業務管理者) 取締役営業企画部長 笹川 秋彦
機械開発部長 小坂 忠雄

第2章 本論

2-1 高圧下での温度制御システムと攪拌技術の構築

高圧下で容器(培養器)内の温度を制御する方法及び圧力媒体(不凍液あるいは水)の攪拌技術の検討・検証を行った。

従来の容器内温度制御は、容器外からの加温・冷却ユニットにより、容器外壁の熱伝達及び金属容器を通した圧力媒体への熱伝達で行われ、容器内では、温度変化に伴う圧力媒体の密度変化による自然対流で行われている。本研究開発においては、容器内温度を効率よく均一にする方法として、容器内の圧力媒体を攪拌することが有効であることから、その方法と装置構成を検討するとともに、攪拌した際の総括熱伝達係数を算出することで、実測データから伝熱効率の指標を検討した。

2-1-1 容器内温度分布の検証及び総括熱伝達係数の算出

圧力容器を外部から冷却した際の、容器内温度分布を正確に分析し、総括熱伝達係数の算出等を行った。

(1) 容器内温度分布の検証

高圧予備試験機を用い、その容器内の温度分布を正確に測定した。

予備試験機の仕様を図3に示す。



【装置仕様】

最大圧力	: 200MPa
容量	: 300ml
内径	: φ 52mm
外径	: φ 38mm

図3 高圧予備試験機の仕様

容器内には、5つの熱電対を設置した。設置した熱電対の位置を図4に示す。

- 容器内位置①: 中心部より半径方向に 2.6mm の位置(壁面)
- 容器内位置②: 中心部より半径方向に 1.3mm の位置
- 容器内位置③: 中心部
- 容器内位置④: 中心部より半径方向に 1.3mm、深さ方向に 47.5mm の位置(底面)
- 容器内位置⑤: 中心部より半径方向に 2.6mm、深さ方向に 47.7mm の位置

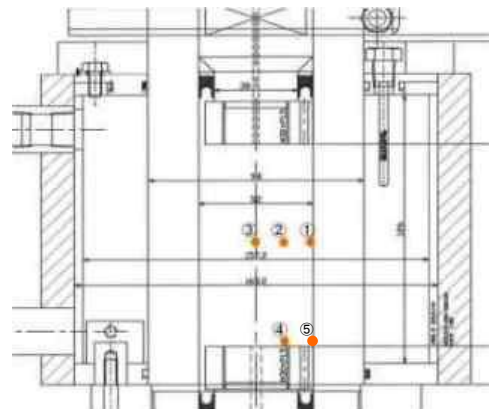


図4 高圧容器内の熱電対設置場所

容器内外の圧力媒体には、不凍液であるエチレングリコールを使用することとした。

まず、容器内温度分布を把握するため、高圧予備試験機を 25℃に設定した恒温槽内に入れ、容器内の各位置での中心温度③との温度差を、10 時間測定した。容器内温度の変化を図 5 に示す。

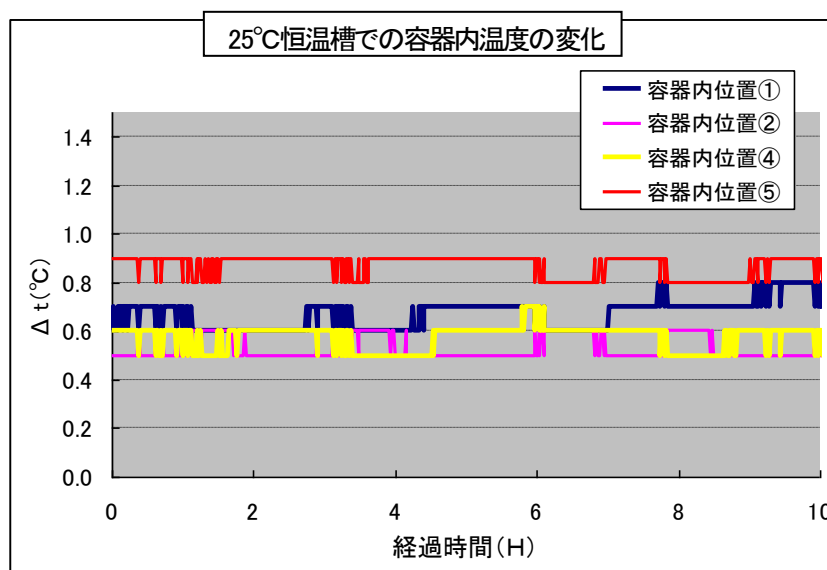


図5 25℃での高圧容器内温度分布

図より、容器の中心温度と周りの温度にはバラつきがあることがわかる。中心から最も離れた位置⑤では、0.8～0.9℃の差がある。このことから、高圧容器内の温度分布は 0.5～0.9℃で、その差は 10 時間たっても変化がないことがわかった。

さらに、冷却に伴う、高圧予備試験機容器内の温度分布を測定した。

室温になっている予備試験機を-30℃の恒温槽に入れ、その冷却に伴う容器内の温度を測定した。容器内の熱電対の位置は、前出と同様にした。

測定結果を図 6 に示す。

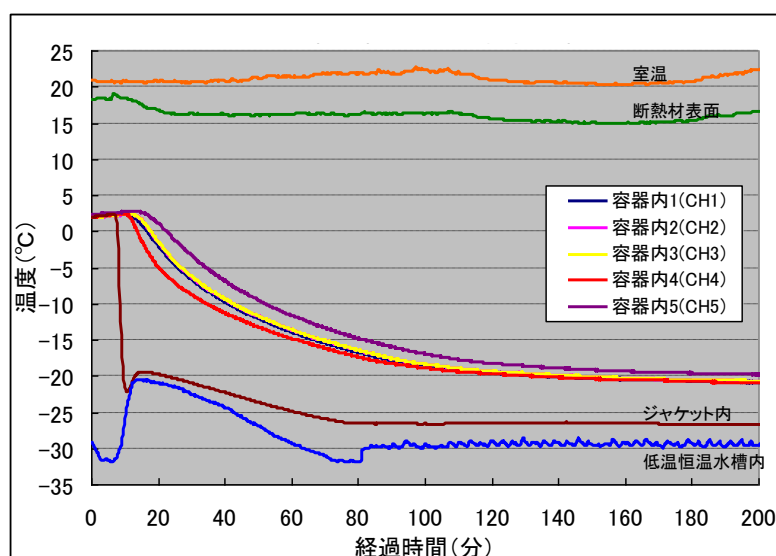


図6 冷却時の高圧容器内温度分布(室温から-30℃)

図より、容器内の場所によって、冷却時間にバラつきがあることがわかる。
さらに、容器内の中心温度からの各位置における温度差を図7に示す。

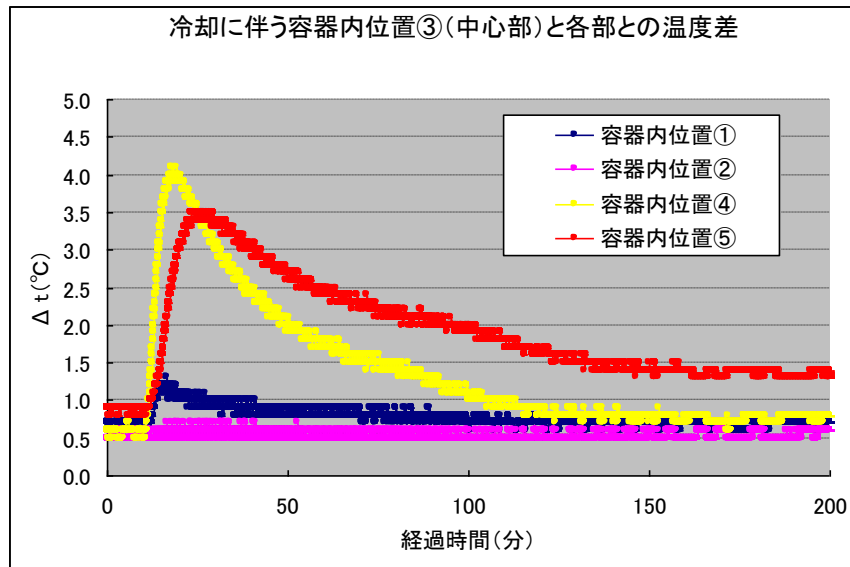


図7 冷却時の高圧容器内温度分布(室温から-30°C)

この図からも、容器内の位置によって、冷却速度にバラつきがあることが確認できた。

水や今回使用した「エチレングリコール」などの液体は、熱伝導率が悪く、熱が伝わりにくい。そのため、容器内での熱の伝わり方にバラつきが出たと考えられる。

そこで、熱伝導率の良い金属である銅を容器内に入れることで、容器内の熱伝導が早くなり、より早くに圧力容器内の位置による温度差が小さくなると考え、実験を行った。

まず、銅線(φ 1.6mm)を用いて、銅らせん、銅格子を作成した。それぞれの長さ、表面積は図8のとおりである。



【銅格子】
長さ : 4329mm
表面積: 21748.896mm²

【銅らせん】
長さ : 2256mm
表面積: 11334.144mm²

図8 銅格子(左)銅らせん(右)

作製した銅格子、および銅らせんを高圧予備試験機の容器内に入れ、固定した。容器内には、これまでの温度分布測定と同様に、5箇所に熱電対を設置し、その中心温度との温度差を測定した(図9)。恒温槽は -30°C 設定、圧媒は100%ナイブラインZ1、測定時間は3時間とした。

測定結果を以下に示す。

図10(control)は銅らせん・銅格子がない場合、図11は銅らせんを入れた場合、図12は銅格子を入れた場合の測定結果である。

Controlと比較し、銅らせん、銅格子を入れた方が、圧力容器内の温度差が小さくなっていることがわかる。

銅らせんよりも銅格子の方の表面積が大きいので、より効率的に熱伝達が行われたと推測される。

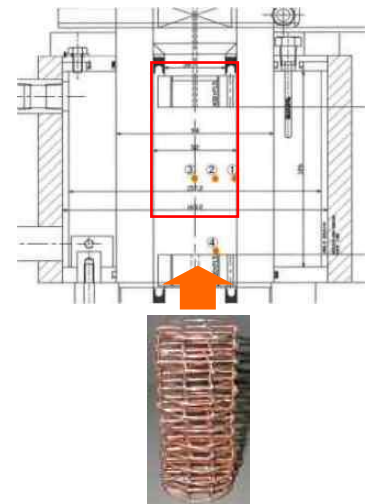


図9 測定装置図

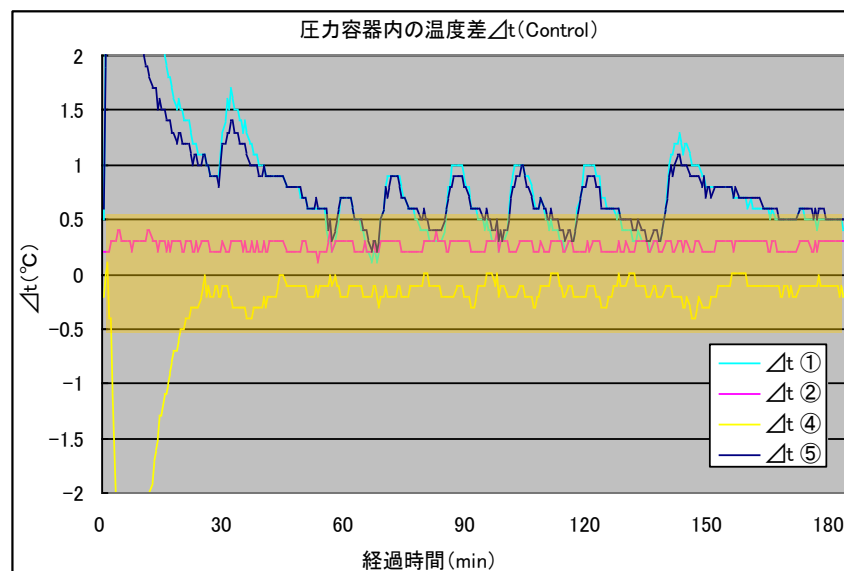


図10 圧力容器内の温度差(Control)

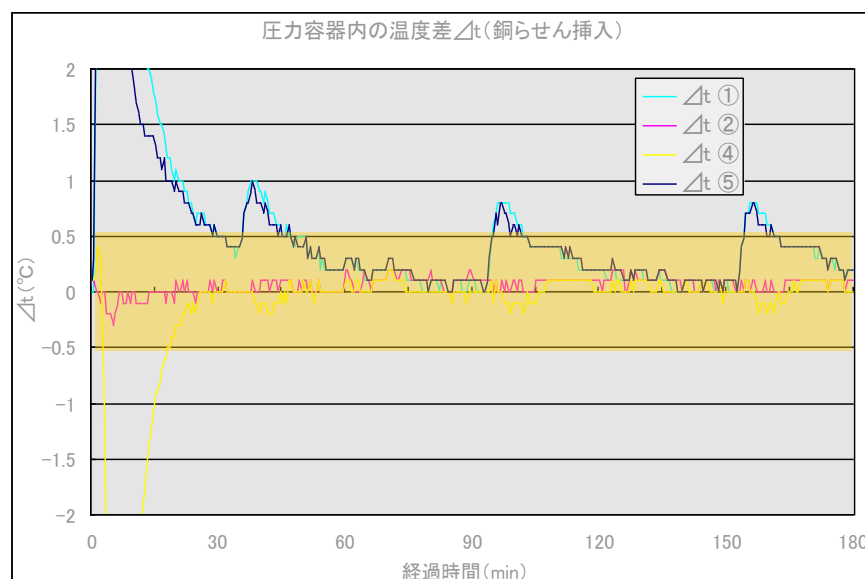


図11 圧力容器内の温度差(銅らせん)

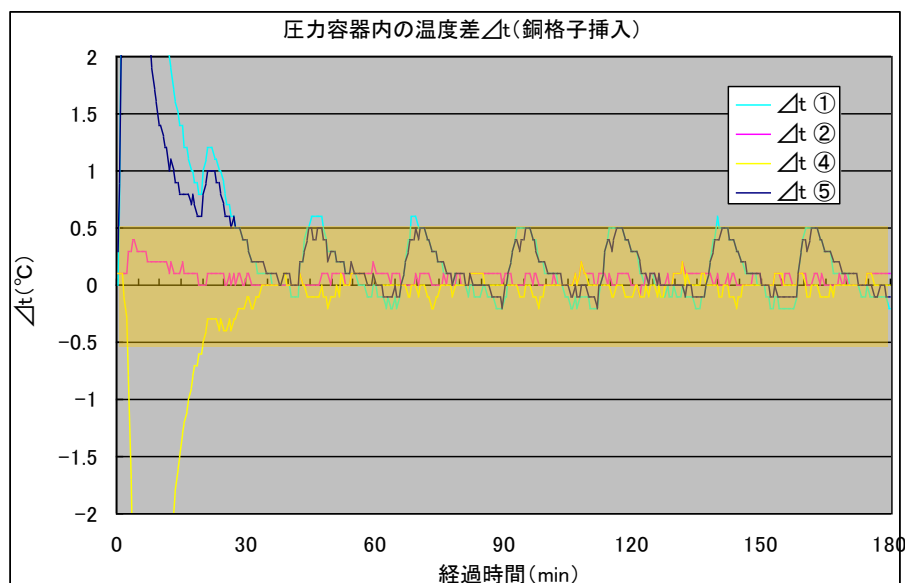


図 12 圧力容器内の温度差(銅格子)

図 12 より、銅らせんを入れたときより、銅格子を入れたときの方の時定数が上がっている。つまり反応が早いということであり、温度を変えたいときに、早く意図した温度に近づくということである。これは、見かけ上の熱伝達係数が上がっているためだと考えられる。

発酵・熟成に關与する酵素反応に必要な温度制御のスペックは、 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内で、より精密であれば精密であるほど良い。銅格子を容器内に用いることで、容器内の温度差を 0.5°C 以内に行き渡ることが確認できた。

(2) 総括熱伝達係数の算出

2 点間に温度差があれば、高温部から低温部に向かって熱が移動するが、その機構には伝導伝熱、対流伝熱、放射伝熱の 3 種の異なった機構がある。

伝導伝熱は、物質を構成する分子の熱振動または運動エネルギーが順次隣り合う分子に伝わることによって熱が移動する形式の伝熱機構で、その際物質自体は動かない。

これに対し、対流伝熱は、流体内だけで起こる伝熱の機構であって、この場合には流体自身の運動のために高温の流体塊と低温の流体塊とが混合されることによって熱が移動する。流体内での混合が温度差に基づく流体の密度差によって自然に起こる場合を自然対流、外部からの人為的な攪拌や流動によって強制的に起こされる場合を強制対流という。

圧力容器の冷却における熱伝達の模式図を図 13 に示す。圧力容器内は、温度差に伴う自然対流熱伝達であるのに対し、ジャケット内はポンプによる強制対流熱伝達である。

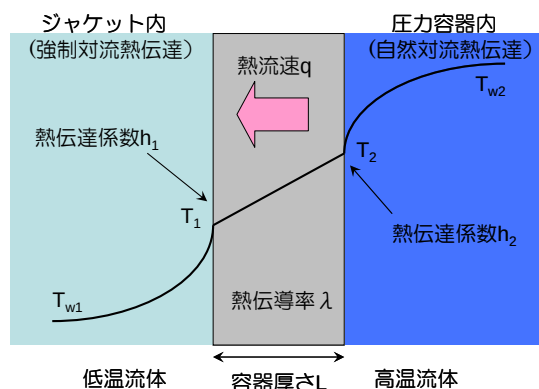


図 13 固体壁を通しての対流伝熱

流体が固体面に沿って流れている場合には、流体本体がどんなに激しい乱流で流れていても、固体との接触面付近に層流の「流体境膜」が存在する。この境膜の内部では、固体面に直角な方向の流体の対流混合は起こらないから、固体面と流体との間で伝熱が行われる場合には、熱はこの境膜を伝導によって通過しなければならない。従って、境膜は薄いにもかかわらず大きい伝熱抵抗を示し、その内部にはきわめて大きい温度差を生じる。

上記の熱伝達は、固体壁を通しての 2 流体の対流伝達である。定常状態(時間による変化がない状態)のもとでは、高温流体の境膜、固体壁、低温流体の境膜を通過する熱の移動速度は等しいから、その総括熱伝達係数 U 、熱流束 q は以下の式で表される。

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad \dots (1)$$

上式より、熱伝達係数 h_1 、 h_2 を算出することで、総括熱伝達係数 U が算出できることがわかる。

ここで、熱伝達係数 h に影響を及ぼす因子は、流体の種類、物性値、流動状態、伝熱面の形状、汚れ方など極めて多数であり、これを正確に推定することはかなり困難であって、一般には経験的に求められた値を採用している。

ジャケット内は強制対流熱伝達である。液体の沸騰や蒸気の濃縮のような状態の変化を伴わない場合の伝熱に対しては、熱伝達率の無次元数である Nu (ヌッセルト数)、流速の無次元数である Re (レイノルズ数)、流体の熱的性質を表す無次元数である Pr (プラントル数) の関数として表される。

レイノルズ数 Re は以下の式で表される。

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad \dots (2)$$

u : 平均流速(m/s)

d : 代表長さ(m)

ν : 動粘度(m^2/s)

また、プラントル数 Pr は以下の式で表される。

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad \dots (3)$$

ν : 動粘度(m^2/s)

α : 温度拡散率

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad \dots (4)$$

λ : 熱伝導率($J/m \cdot s \cdot K$)

ρ : 密度(kg/m^3)

C_p : 比熱($L/kg \cdot K$)

圧力容器を単管と仮定すると、単管外面でのヌッセルト数 Nu は以下の式で表される。⁴⁾

$$Nu = 1.11 \cdot c \cdot Re^m \cdot Pr^{0.31} \quad \dots (5)$$

ここで、定数 c 、 m は Re により規定される値である。

また、ヌッセルト数は以下のようにも定義される。

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} \quad \dots (6)$$

h : 熱伝達係数(W/m²・K)

d : 代表長さ(m)

λ : 熱伝導率(W/m・K)

以上の式から、冷媒から高圧容器への熱伝達係数 h_1 を算出した。今回の計算で使用した冷媒はエチレングリコールで、その仕様は表 1 の通りである。⁸⁾

表 1 エチレングリコールの物性

物性	値	単位
熱伝導率λ	0.356	W/m・K
密度ρ	1.140	g/cm ³
	1140	kg/m ³
粘度μ	0.500	kg/m・s
動粘度ν	4.386×10^{-4}	m ² /s
比熱 Cp	2406	J/kg・K
体積膨張率β	5.667×10^{-4}	K ⁻¹

また、実験で使用する高圧容器の仕様は表 2 のとおりである。

表 2 高圧容器仕様

高圧容器仕様	値	単位
容器内直径	5.200×10^{-2}	m
容器外直径	8.000×10^{-2}	m
肉厚 t	1.400×10^{-2}	m
有効長さ	0.146	m
内容積	3.101×10^{-4}	m ³
容器側面積	3.669×10^{-2}	m ³
ジャケット外径	0.165	m
ジャケット部縦長さ	0.166	m
ジャケット断面積	1.641×10^{-2}	m ³
ジャケット内容積	0.0391	m ³
ジャケット表面積	0.1368	m ²
圧力容器熱伝導率λ	17.00	W/m・K



以上の数値から、それぞれの無次元数の値を算出し、熱伝達率の式($h = Nu(\lambda / d)$)に代入すると、ジャケット内の冷媒から高圧容器への熱伝達係数 h_1 は、69.17(W/m²・K)ということがわかった。

同様に、高圧容器内壁から圧媒への熱伝達係数 h_2 を求めた。

高圧容器内は自然対流熱伝達である。自然対流伝熱が工業上問題になるのは、炉壁や水蒸気管の保温材表面からの熱損失を計算するような場合である。この場合、自然対流伝熱以外にも放射伝熱も考慮しなければならず、非常に煩雑である。そこで、自然対流を流体塊の負直によって生じるものとし、体膨張係数や温度差などを含む無次元数である Gr(グラスホフ数)と、Nu、Pr の関数とする。

グラスホフ数 Gr は、流体の浮力と粘性力の比で、自然対流熱伝達の駆動力であり、自然対流の場合の流速の無次元量である。

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta\theta}{\nu^2} \quad \dots (6)$$

g : 重力加速度(m/s²) Δθ : 温度変化(K)
L : 代表長さ(m) ν : 動粘度(m²/s)
β : 体積膨張率(K⁻¹)

また、圧力容器(密閉容器内)の自然対流において、圧力容器内の高さを H(m)、幅を W(m)とし、一方の壁面が高温で、他方の壁面が低温の場合の自然対流熱伝達についてのヌッセルト数 Nu は、次式が成り立つ⁴⁾。

$$Nu = 0.20(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{H}{W} \right)^{-\frac{1}{9}} \quad \dots (7)$$

以上の式から、温度変化を 0℃から-20℃までとし、高圧容器内壁から圧媒への熱伝達係数 h₂を算出した。
圧媒は、h₁を算出したときと同様に、エチレングリコール(ナイブライン Z1)とし、熱伝達率の式(h=Nu(λ /d))に代入したところ、圧力容器内壁から圧媒への熱伝達係数 h₂は、27.96(W/m²・K)ということがわかった。

算出した熱伝達係数を、(1)式に代入したところ、圧力容器内におけるエチレングリコールの総括熱伝達係数 U は、19.58(W/m²・K)となった。

次に、圧力容器を冷却する際の冷却時間を算出するため、その計算式を検討した。
ある物質を熱が伝導によって移動するときの伝熱速度、すなわち単位時間あたりの電熱量 Q(W)は、熱の流れる方向に直角な断面積 A(m²)と温度勾配(K/m)に比例し、以下のように表される。

$$Q = U \cdot A(T_1 - T_2) \quad \dots (8)$$

U : 総括熱伝達係数(W/m²・K)
T₁-T₂ : 圧力容器内外の温度勾配(K)
A : 伝熱面積(m²)

(8)式に、算出した総括熱伝達係数の値を代入すると、圧力容器内外の温度勾配に応じた伝熱量 Q は以下の表3のようになる。

表3 圧力容器内外の温度勾配に応じた伝熱量

温度勾配 ΔT(℃)	伝熱量(W)
40	28.74
35	25.15
30	21.55
25	17.96
20	14.37
15	10.78
10	7.18
5	3.59
0	0.00

ここで、断熱材を通して熱損失を考慮しなければならない。

絶対零度よりも温度の高い物体は、絶えず外界へ向かって熱放射線を発散している。この熱放射線は電磁波であるからいかなる媒体も必要とせず、他の物体によってさえぎられるまで空間を直進する。熱放射線が物体に到達すると、その一部は物体の表面で反射され、一部は物体を透過し、残部は物体に吸収されて熱に変わる。この熱放射線のうちの反射される分率、透過する分率、吸収される分率をそれぞれの物体の反射率、透過率、吸収率というが、これらを r 、 t 、 a で表せば、この3者間にはつぎの関係が成立する。

$$r + t + a = 1 \quad \dots (9)$$

一般に、気体では r はほとんど 0 で、 a も小さく、したがって t が 1 に近いが、液体や固体では a がかなり大きく、 t はほとんど 0 である。ただし、水、石英、岩塩などの透明な液体や固体では t はかなり大きい値を示す。

熱放射線の強さは、温度の上昇とともに急激に増大するから、高温では対流や伝導による伝熱よりもむしろ放射伝熱の方が支配的となる。

今回の装置の場合、発酵・熟成に使用するため、最高でも 50℃ 前後である。しかし、この熱放射線は、容器内外の熱損失の一因と考えられる。

外径 A (m)、温度 B (℃) の円筒物体が、厚さ D (m)、熱伝導率 E (W/m・K) の断熱材で保温されているとき、温度 C (℃) の待機への放熱は、円筒長さ 1m あたり H (W/m) である。

放射伝熱に関して、熱伝達量は以下で与えられる。

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \quad \dots (10)$$

ε : 放射率

σ : ボルツマン定数

T_1, T_2 : 高温及び低温側の物体の絶対温度 (K)

A : 伝熱面積 (m²)

放射率とは、固体の材質や表面状態、温度などによって異なる値であり、熱放射線をすべて吸収する、すなわち $\varepsilon = 1$ の物体を黒体という。完全な黒体は存在しないが、すすやすすを塗った固体面などは黒体に近い。今回の装置は、SUS306 を使用しているので、放射率は 0.5 とした。

以上から、熱損失を計算すると、5.66 (W) となった。

すべての温度下において同等の熱損失があったとし、算出した伝熱量から差し引いた値を表 4、図 14 に示す。

表 4 圧力容器内外の温度勾配に応じた伝熱量(熱損失あり)

温度勾配 ΔT (℃)	伝熱量 (W) 熱損失あり
40	23.08
35	19.49
30	15.89
25	12.30
20	8.710
15	5.118
10	1.525
5	-2.067
0	-5.659

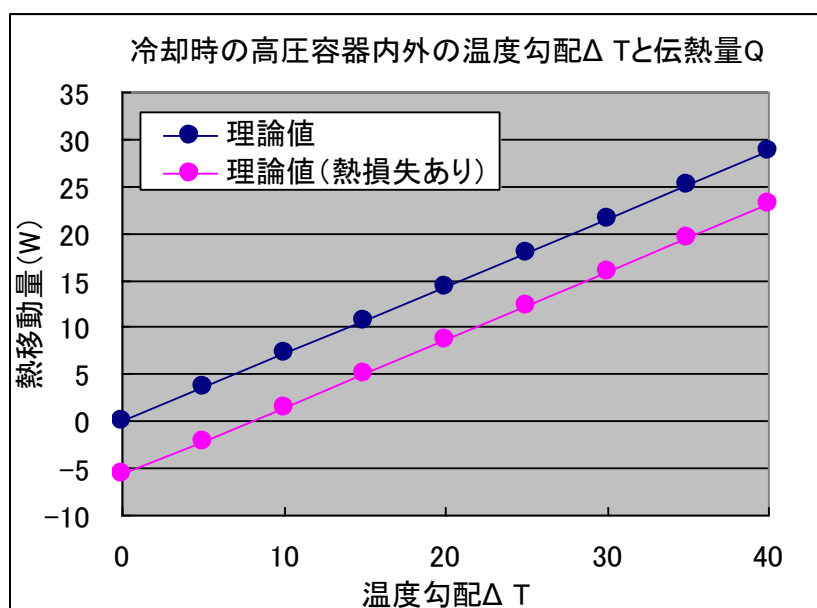


図 14 冷却時の圧力容器内外の伝熱量(理論値)

次に、圧力容器内の圧媒を 0°C から -20°C まで冷却するのに、奪う必要のある熱量を算出した。
熱量 Q は、フーリエの法則より、次式で表される。

$$Q = m \cdot c(T_2 - T_1) \quad \dots (11)$$

m : 容器内の液体の重量(g)
 c : 容器内の液体の比熱(J/g・K)
 T_1, T_2 : 高温及び低温側の物体の絶対温度(K)

容器内に満たす液体、すなわち圧媒(エチレングリコール)の -20°C における比重は、その物性値より⁸⁾、 $1.128 (\text{g}/\text{cm}^3)$ である。また、圧力容器の内容積は、 $3.099 \times 10^{-4} (\text{m}^3)$ であるので、圧媒の重量 m は、 $349.6 (\text{g})$ となる。
 圧媒の比熱 c は、 $2.552 (\text{J}/\text{g} \cdot \text{K})$ である。

以上のことから、圧力容器内の圧媒を 0°C から -20°C まで冷却するのに、奪う必要のある熱量を算出したところ、17844(J)となった。

以上の計算結果から、 0°C から -20°C まで冷却するのに要する冷却時間を算出した。また、同様にして、 0°C から -30°C 、 0°C から -40°C まで冷却するのに要する時間を算出した。結果を表 5 に示す。

表 5 圧力容器内の冷却時間(理論値)

※オレンジ色の部分が、容器内が -20°C に達する時間である。

① 0°C から -20°C まで冷却した場合

容器内温度($^{\circ}\text{C}$)	各温度範囲での冷却所要時間(分)		経過時間(分)	
	熱損失なし	熱損失あり	熱損失なし	熱損失あり
0	0	0	0	0
0 $\sim$ -5	5.916	10.76	5.916	10.76
-5 $\sim$ -10	8.283	22.40	14.20	33.16
-10 $\sim$ -15	13.80		28.00	
-15 $\sim$ -20	41.41		69.42	

② 0℃から-30℃まで冷却した場合

容器内温度(℃)	各温度範囲での冷却所要時間(分)		経過時間(分)	
	熱損失なし	熱損失あり	熱損失なし	熱損失あり
0	0	0	0	0
0~-5	3.765	5.276	3.765	5.28
-5~-10	4.602	7.08	8.366	12.36
-10~-15	5.916	10.76	14.28	23.12
-15~-20	8.283	22.40	22.57	45.51
-20~-25	13.80		36.37	
-25~-30	41.41		77.78	

③ 0℃から-40℃まで冷却した場合

容器内温度(℃)	各温度範囲での冷却所要時間(分)		経過時間(分)	
	熱損失なし	熱損失あり	熱損失なし	熱損失あり
0	0	0	0	0
0~-5	2.761	3.495	2.761	3.495
-5~-10	3.186	4.205	5.947	7.700
-10~-15	3.765	5.276	9.712	12.98
-15~-20	4.602	7.08	14.31	20.06
-20~-25	5.916	10.76	20.23	30.82
-25~-30	8.283	22.40	28.51	53.21
-30~-35	13.80		42.32	
-35~-40	41.41		83.73	

ここまでで算出した、圧力容器内の冷却時間を検証するため、高圧容器に熱電対を入れ、実際に冷却試験を行った。

圧力容器を冷却するためのジャケット内の温度を-30℃、-40℃に設定し、それぞれ既定の温度になったところで、圧力容器を入れ、室温からの冷却時間と容器内温度を測定した。(図 15)

測定結果を図 16、図 17 に示す。

-30℃での冷却の場合、放射伝熱からの熱損失を考慮した理論値とかなり近い値となったが、-40℃での冷却の場合、理論値よりも冷却速度が遅くなった。室温との温度差が大きくなればなるほど、熱伝達を阻害する要素が増え、算出した理論式との違いが大きくなるようだった。

製作する高圧下発酵・熟成装置では、酵素反応が最もよく進むといわれる 30～50℃の温度範囲で使用する。そのため、実際使用する際は、今回の実験よりも室温との温度差は小さい。従って、算出した理論式で十分に適用できると考えられる。

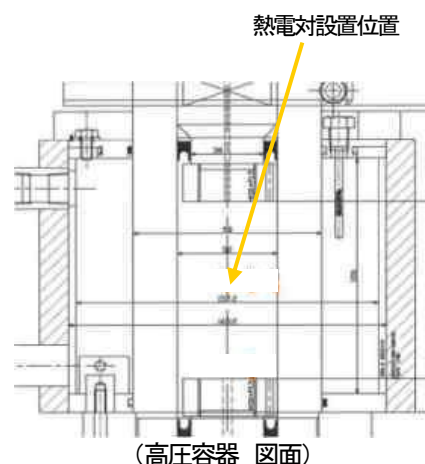
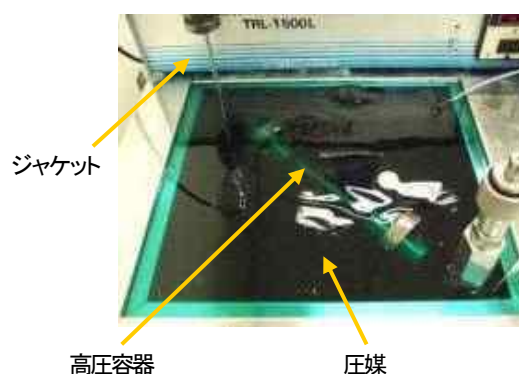


図 15 冷却実験(上: 装置図、下: 容器内図面)

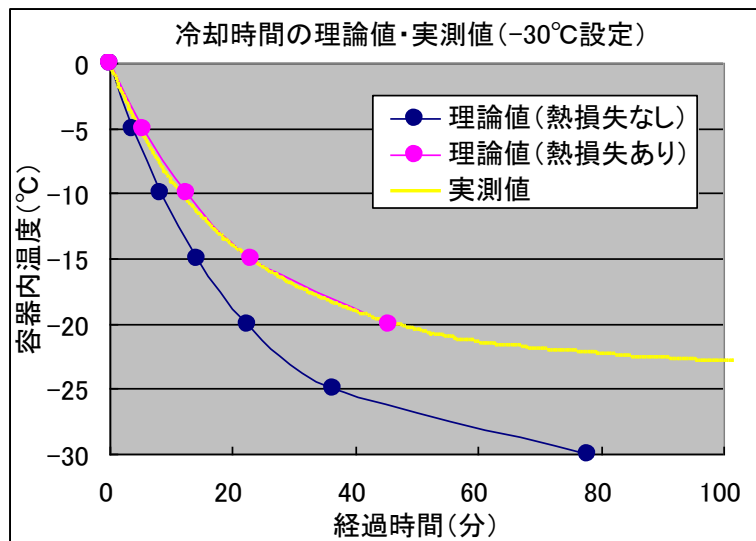


図 16 冷却時の圧力容器内外の温度(-30°C)

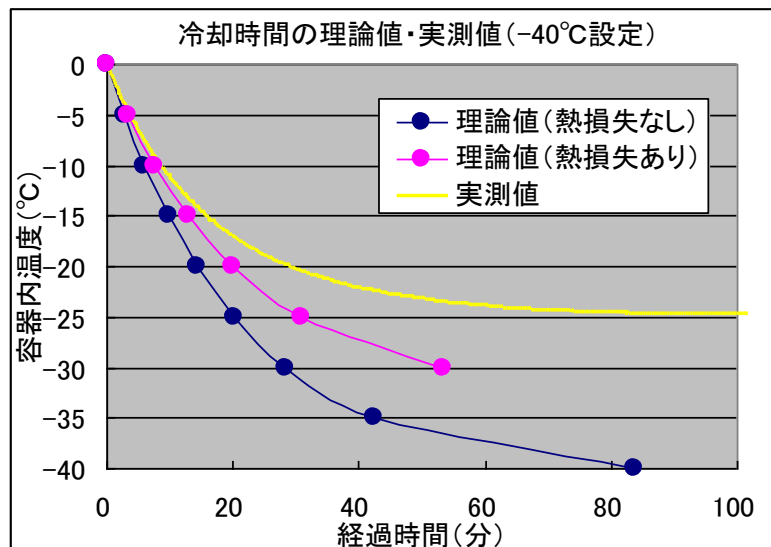


図 17 冷却時の圧力容器内外の温度(-40°C)

2-1-2 容器内の攪拌技術の構築

圧力容器内の温度分布を参考に圧力媒体が効果的に対流し、容器内温度を均一にする攪拌技術を検討した。

(1) 高圧下での水の粘度

前述のプラントル数 Pr は流れによる流体粒子の拡散に対する温度の拡散の比で、この値が小さいほど流体の動きに対して熱の伝わり方が大きいことを示す。水の Pr はおよそ 2 程度で、それに対して空気の Pr 数は 0.7 程度であるから、空気中での温度の拡散は水に比べて 3 倍程度早いといえる。

このプラントル数 Pr は、比熱と粘度そして熱伝導度の関数で、粘度が大きいほど Pr は大きくなる。例えば粘度が大きい代表的な物質として良く知られているのが硫酸で、常温で 20mPa·sec(cP) 以上になる。また、トルエンなどの溶剤の粘度は 1mPa·sec 前後と小さく、高分子物質や細かな粒子を含むスラリーでなければ粘度はそれほど大きくない。

以上のことから、熱伝達を目的とした容器内の攪拌は、圧媒(水)の粘度に大きく影響されるといえる。しかし、粘度は分子構造に敏感であるので、一般性のある理論式や経験的推算方法は存在しない。粘度の温度による変化は、温度変化の狭い場合には近似的に Andrade 式で表せる。

$$\log \eta = \frac{A+B}{T} \quad \cdots(12)$$

ここで、A、B は液体によって決まる定数、T は絶対温度である。

これらに基づいて、水の高圧下での粘度を調査したところ、図 18 のようなデータが得られた⁵⁾。

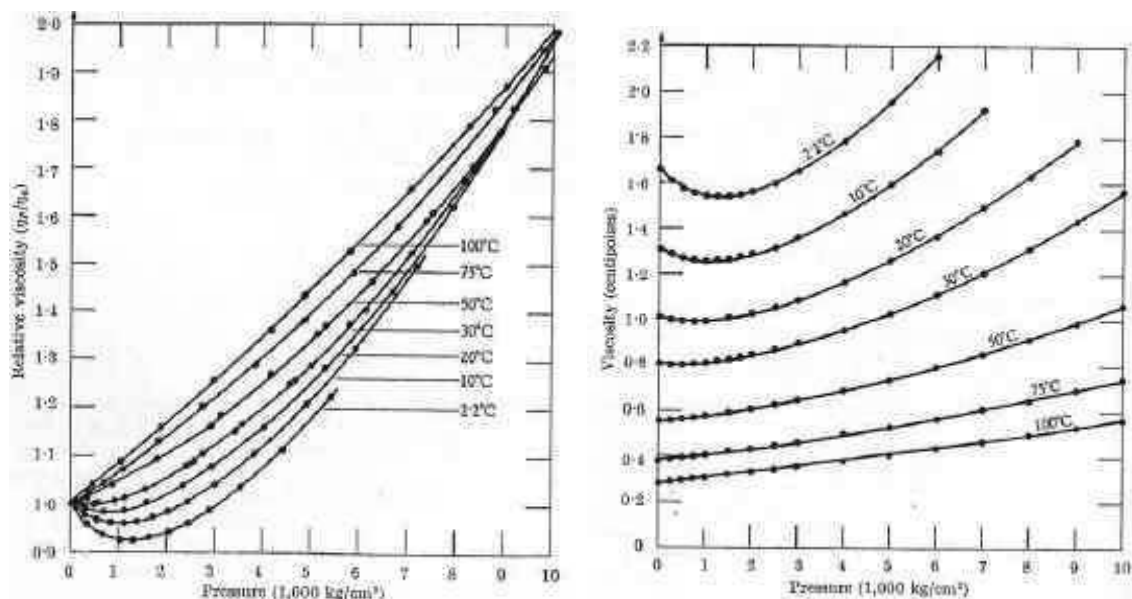


図 18 水の高圧下での粘度変化(左:比粘度、右:動粘度)

図より、水は圧力と温度によってその粘度が変化することがわかる。しかし、50°C、100MPa において、比粘度は 1.02~1.05 で大気圧下(0.1MPa)とほとんど変化がない。

よって、攪拌実験は大気圧下で行っても問題がないと考えられる。

(2) 高圧下での攪拌方法の検討

圧力容器内の温度を均一にするため、圧媒(水)攪拌方法を検討した。

攪拌方法について、圧力容器内にスクリューなどの回転部を設けることを検討したが、外部から容器内部に軸等を通すことは、圧力容器内部が 1000 気圧を超えるため、軸受けのシール方法等に問題があり、安全性の観点から難しい。

また、他社の動向について調べたところ、電動機を用いて攪拌実験を行っているが成功していないようだった。

そこで、攪拌方法としてシリンダーを用いて圧媒を循環する方法で実験を行うことにした。また、シリンダーで循環させるのみでは温度差が生じるため、圧力容器内に攪拌翼を用い、圧媒の輸送現象、特に乱流特性を調査できる、高圧下発酵・熟成装置に組み込む攪拌装置を製作することとした。装置の材質は透明なアクリル樹脂で、攪拌槽内の流動状態を観察可能である。

攪拌槽は、アクリル樹脂を使用して製作した。槽の内径は 50mm、全長は 400mm とし、その容量は $9.8 \times 10^{-4} \text{m}^3$ である。攪拌翼の材質は SUS304 を使用し、電動機等を使用せずに流体の分割、転換、反転を繰り返し行う。これらの作用により槽内は均一に攪拌することが可能である。

以上の設定に沿って、攪拌装置を製作し、製作した攪拌装置を用いて、容器内の圧媒の温度が均一になるかどうかを検討した。

実験では熱電対が取り付けられず、容器内温度の測定ができなかったため、色のついた水を流し (36cc/sec)、その水の状態を観察することで、容器内の均一性を検討した。

実験結果より、攪拌翼のある方が、わずかに容器内が均一になるまでの時間が早く、攪拌翼の効果が確認された。

2-1-3 高圧下温度制御システムの構築

前述で確立した容器内への最適な熱伝達条件と内部攪拌技術をもとに、高圧下の容器内温度を維持・調整する温度制御システムを構築した。

(1) 容器内での水の温度挙動の測定

高圧容器内で水を冷却していくとき、水はどのような温度挙動を取るのかを確認した。

高圧容器の圧媒には、氷点下でも凍らないように不凍液が入っているため、水を直接容器内に入れて温度を測定することができない。そのため、図 19 に示す

ように水をゴム風船に入れ、容器内に設置し、その水の温度と恒温槽内の温度の 2 箇所を測定した。

試験機を -10°C の恒温槽内に入れ、容器内の風船の中の水の温度、恒温槽の温度を 1 時間測定した結果を図 20 に示す。

図より、容器を -10°C の恒温槽に入れてから、5 分ほどで温度は 0°C になり、その後温度が少し上昇し、また徐々に低下している。さらに、その部分を拡大した図を図 21 に示す。

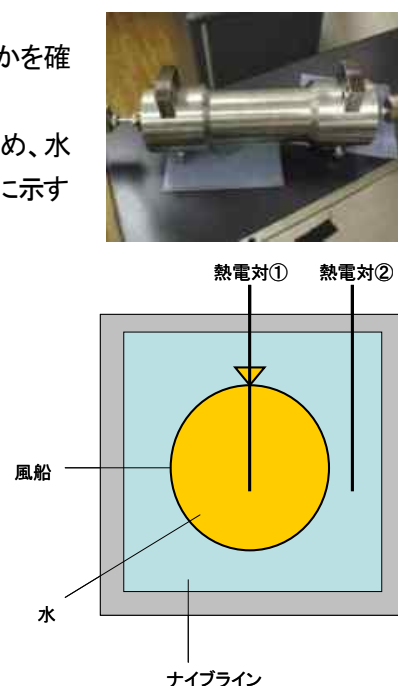


図 19 実験装置図(上; 装置写真、下; 概念図)

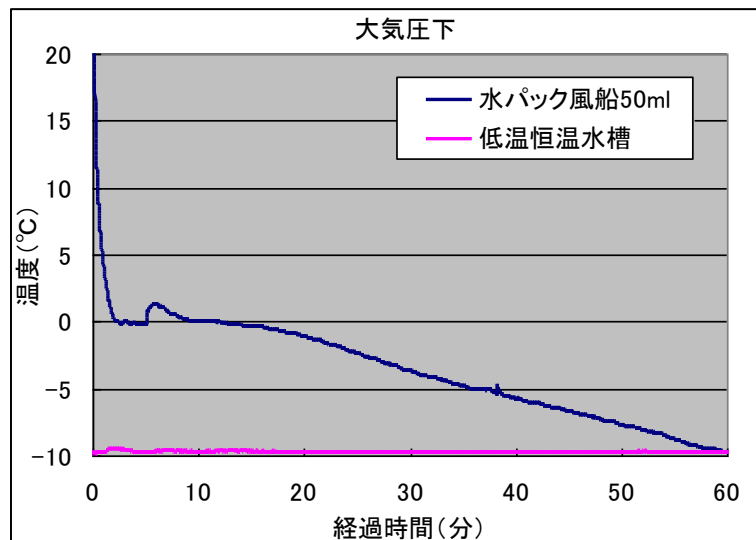


図 20 容器内の水の温度変化

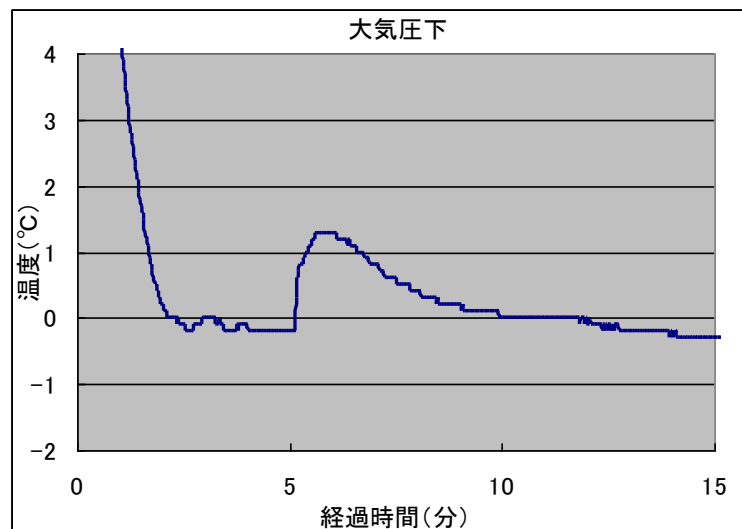


図 21 容器内の水の温度変化(拡大)

水分子が水面から大気中へと蒸発する場合(十分な量の液体の水があるとする)、水分子が熱を低温側となっている大気中に運び、その結果水面に接する大気は周囲の大気よりも高温となって多くの水蒸気を含む。水を水蒸気に変化させるためにはエネルギーが必要であるため、液体の水はそこから蒸発する水蒸気によって熱エネルギーを奪われている、つまり熱を放出しているのである。逆に水蒸気が水や氷に変化するときには、水蒸気を持っているエネルギーが顕熱として凝縮や凝固が起きる表面で放出される。この 0°C 付近の急な温度上昇は、物質の相が変化するときに必要なとされる熱エネルギー、つまり潜熱であると考えられる。

次に、 -10°C になっている試験機の保冷を止め、徐々に室温に戻していき、その温度変化を 15 時間測定した。測定結果を図 22 に示す。

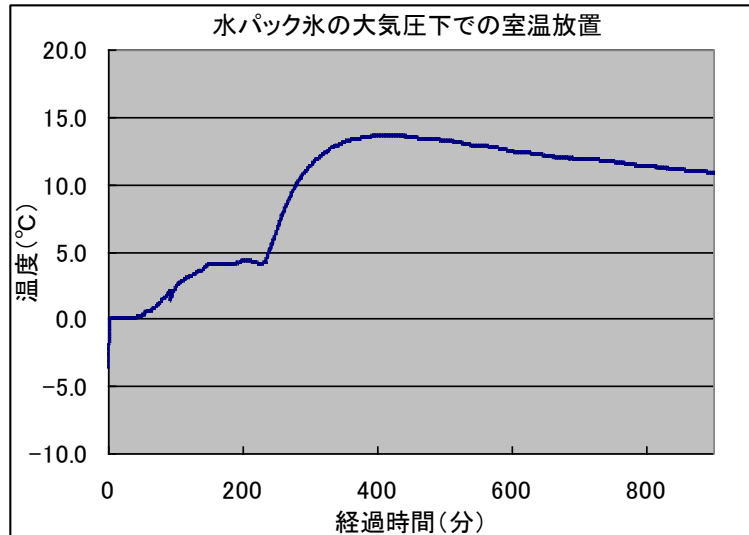


図 22 容器内の水の温度変化(-10℃から室温)

図より、緩やかに温度が上昇し、6 時間ほどで室温(12～14℃)に近づくことがわかる。0℃から少し上昇した 2℃付近を拡大した図を図 23 に示す。

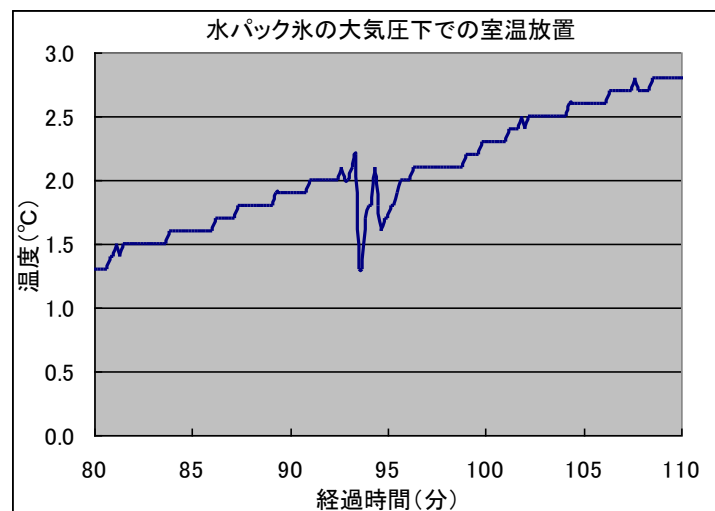


図 23 容器内の水の温度変化(-10℃から室温; 拡大)

図より、2℃を過ぎたあたりで、温度が急激に低下し、また徐々に上昇していることが分かる。これは、水の融解による吸熱であると考えられる。

熱量は同じでも、冷却時と温度上昇時で、相変化に伴うエネルギーの発生温度、時間が異なるということがわかった。

さらに、高圧予備試験機内での水の状態を見るため、水の圧力と温度による状態の変化を調査した。

まず、文献⁶⁾から、水の相平衡曲線(P-T 曲線)を調べ、計算、グラフ化した。(式(13)、(14))

水は、結晶相、つまり氷の中で温度と圧力に応じて何種類もの相転移があることが知られている。通常目にする氷は I 型の六方晶(hexagonal)なので、I_h 相と呼ばれている。常圧では準安定な構造である立方晶(cubic)の I_c は、低温の特殊な条件で実現する。I_c 相は時間が経つと I_h 相に転移してしまう。このように、圧力や温度を加えることによって、氷の構造は様々変化し、現在では準安定相も含めて 10 種類以上の氷の存在が確認されている。⁷⁾

温度が 273.16K から 251.165K のときの氷 (I h) では、その平衡曲線は、次式で表される。

$$\pi = 1 + \sum a_i (1 - \theta^{b_i}) \quad \dots(13)$$

但し、 Σ に関して、 $i=1\sim 3$ である。

$$\pi = p(\text{溶液}) / p^* \quad p^* = 611.657 (\text{Pa})$$

$$\theta = T / T^* \quad T^* = 273.16 (\text{K})$$

係数

$$a_1 = 1195393 \quad a_2 = 80818.32 \quad a_3 = 3338.269$$

$$b_1 = 3 \quad b_2 = 25.75 \quad b_3 = 103.75$$

次に、温度が 251.165K から 256.164K のときの氷 (III) では、その平衡曲線は、次式で表される。

$$\pi = 1 - 0.299948 (1 - \theta^{60}) \quad \dots(14)$$

$$\pi = p(\text{溶液}) / p^* \quad p^* = 208.566 (\text{Pa})$$

$$\theta = T / T^* \quad T^* = 251.165 (\text{K})$$

以上の式から算出した、水の平衡曲線を図 24 に示す。図より、200MPa で最も凝固点が低くなることがわかる。

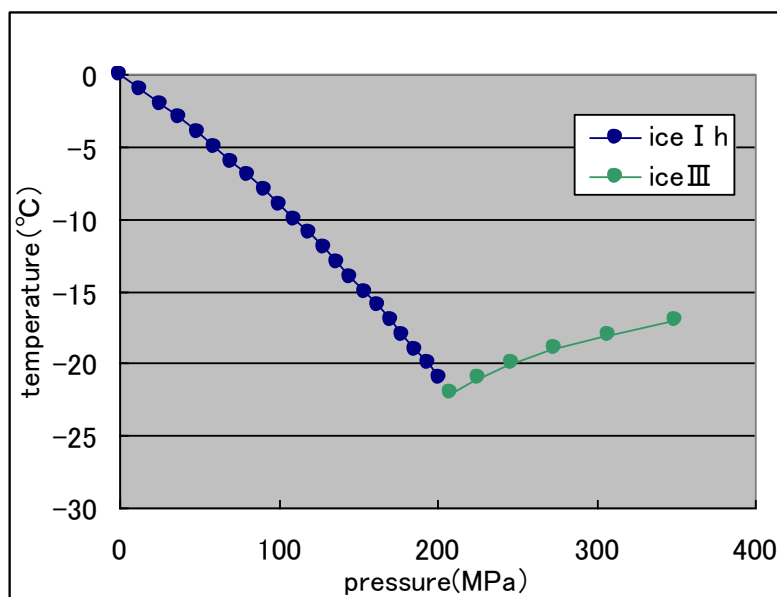


図 24 水の温度-圧力相図

この計算結果を確認するため、50MPa での冷却試験を行った。

試験機を恒温槽内に入れ、圧力を 50MPa かけた後、徐々に温度を下げ、容器内水の温度、圧力を 12 時間測定した。試験機はこれまで使用してきたものと同じである。

冷却試験結果を図 25 に示す。

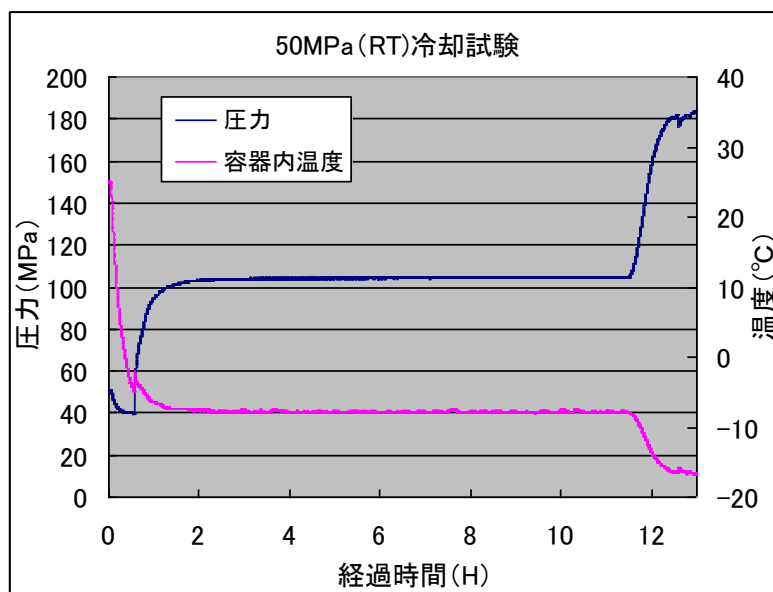


図 25 50MPa での冷却試験

平衡曲線に沿えば、50MPa で水を冷却させていけば、 $-4\sim-5^{\circ}\text{C}$ で凍結するはずである。容器内の圧力は、始めは 50MPa であったが、温度が低下するにつれて、いったん下がって 40MPa になった後、100MPa まで上がっている。温度が -10°C 以下になると、さらに圧力は上がっている。

この実験の結果より、水は密閉系で冷却していくだけで、圧力が上がり、圧力をかけながら氷点下まで冷却する際は、圧力制御を行わなければ一定の圧力にならないことがわかった。高圧下発酵・熟成装置を使用する上で、重要なポイントになると考えられる。

次に、水の温度による密度の変化を圧力ごとに計算した結果を図 26 に示す。図中の×は、圧力ごとの凝固点とその密度の実測値である。

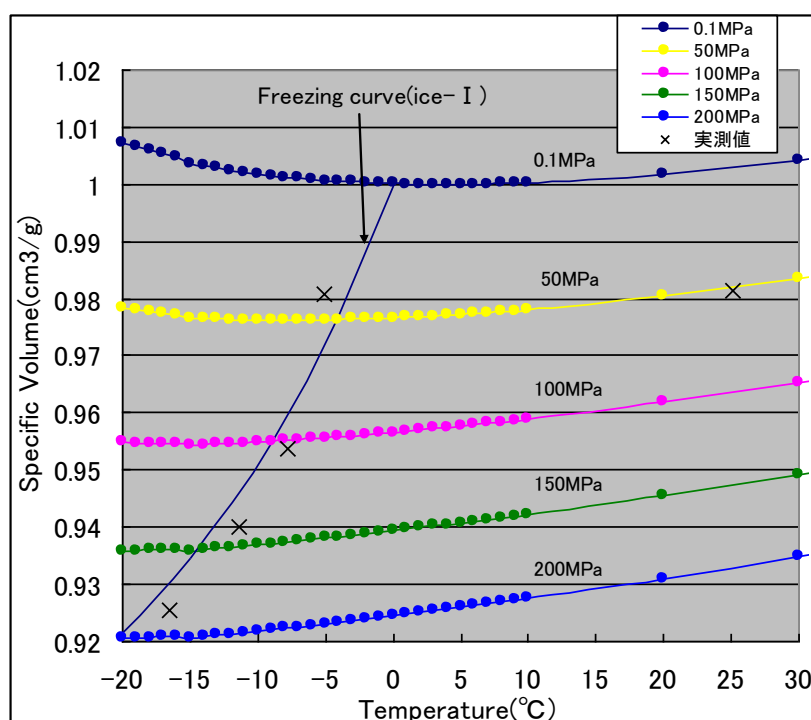


図 26 水の密度-温度図

図より、凝固点の計算値と実測値はほぼ近い値になることがわかった。

今回製作する装置では、発酵・熟成を主な使用用途とするため、氷点下での利用は少ないと思われるが、今後応用として行う予定である植物の培養試験、細胞保存等の医療試験を行う上で必要なデータになってくると思われる。

(2) 温度制御システムの構築

以上の実験により構築した、温度制御システムを含む、攪拌機能付き高圧下発酵・熟成装置を設計した。

温度の制御は、外部にある低温恒温水循環装置を用いて -40°C ～ 50°C の熱媒体を循環することによりベッセル本体部及び温調部を間接的に加温冷却している。

圧力容器内の温度を直接設定値とし、比例動作、積分動作、微分動作を組み合わせた PID 制御を行うため立ち上がりが速く、外乱に対する安定性も高くなっている。また、オーバーシュートを抑え、常に安定した温度制御を行うことができる。計測には白金測温抵抗体を使用し、 0°C の時 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ (クラス A)という精度で測定する。

また、循環ポンプの周波数をインバータにより可変させ、容器内を流れる圧媒の流量を増減して、容器内の温度を均一にしている。

2-2 高圧下発酵・熟成装置の開発

高圧下で容器(培養器)内の温度を制御する方法及び圧力媒体(不凍液あるいは水)の攪拌技術の検討・検証を行った結果を基に試作した高圧下攪拌装置を、高圧下攪拌装置を高圧容器に取り付けることで、容器外からの加温・冷却ユニットと連動させた一連の高圧下温度制御システムの検証を行い、攪拌機能を有する高圧下発酵・熟成装置を製作した。

2-2-1 高圧下発酵・熟成装置の開発

2-1で確立した容器内攪拌技術と圧力、温度制御システムを基に、実用化を見据え、容器容量 300cc、容器内圧力 200MPa、及び容器内設定温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内の制御が可能な攪拌機能付き高圧下発酵・熟成装置を製作した。

装置の外観を図 27～32 に示す。

(1) 増圧機

増圧機は、油圧ユニット、給水ユニット、制御盤で構成されており、吐出圧力は常用で 200MPa、吐出流量は最大で 0.2L/min である。

油圧ブースター方式で増圧し、比例電磁弁による油圧制御によって圧力の制御を行う。

(a)



(b)



(c)



(d)



図 27 増圧機((a);全体図、(b);油圧ユニット、(c);給水ユニット、(d)制御盤)

(2) 圧力容器

圧力容器は、単筒、熱処理強化型で、その容量は 300cc である。最高 200MPa まで使用できる。容器には、攪拌装置が付属しており、容器内の温度が設定温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ に保たれるようになっている。

(a)



(b)



(c)



(d)



図 28 圧力容器((a); 全体図、(b); 容器蓋、(c); 容器、(d)圧力計)

(3) 循環ポンプ

循環ポンプは、両頭シリンダ連続吐出型で、最高 200MPa まで使用できる。外筒端構造は、タイロッド締付方式で、駆動源は、減速機付電動機である。

(a)



(b)



(c)



(d)



図 29 循環ポンプ((a); 全体図、(b); 外筒部、(c); ポンプ、(d)シリンダ)

(4) 温調槽

温調槽に、熱媒体を循環することにより、容器本体部及び温調部を間接的に加温冷却する。最高 200MPa まで使用できる。調節温度範囲は、 $-20\sim 70^{\circ}\text{C}$ である。

循環に用いる熱媒体は、 10°C 以下での使用の場合、低温用熱媒体を使用しなければならない。

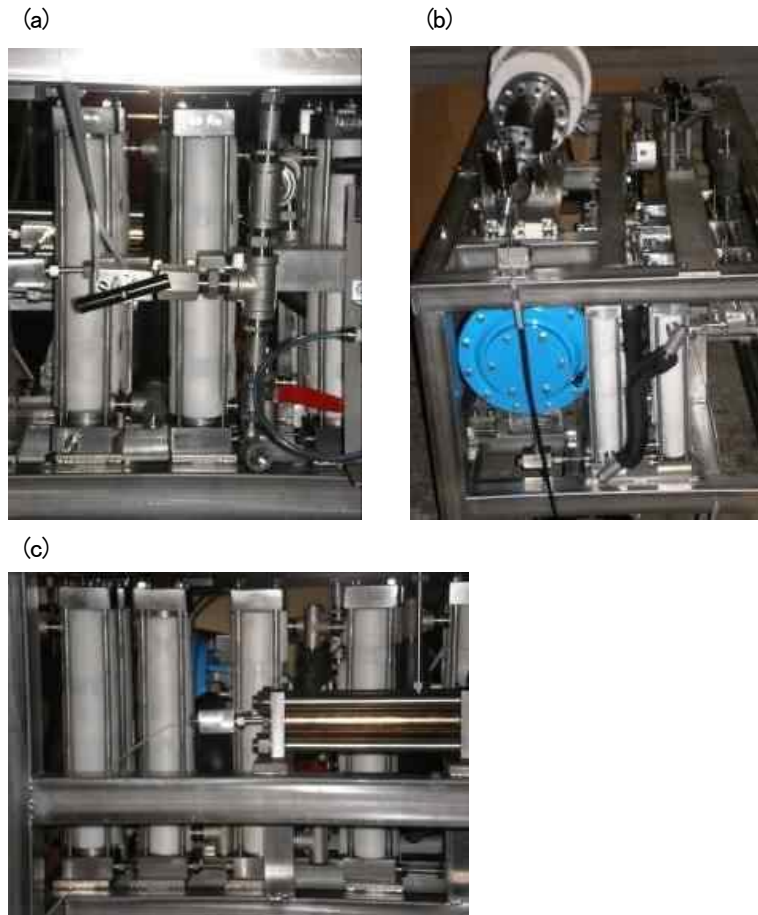


図 30 温調槽((a); 温調槽正面、(b); 温調槽横、(c); 熱交換部裏面)

(5) 熱伝達試験機

熱伝達試験機は、圧力容器内の温度分布を多点同時、時系列的に測定するのに用いる装置(圧力容器)で、温度測定箇所(熱電対(温度センサ))が配置され、装置の圧力容器と取り換えて使用できる。

使用圧力は、常用で 200MPa、調節温度範囲は $-20\sim 70^{\circ}\text{C}$ である。

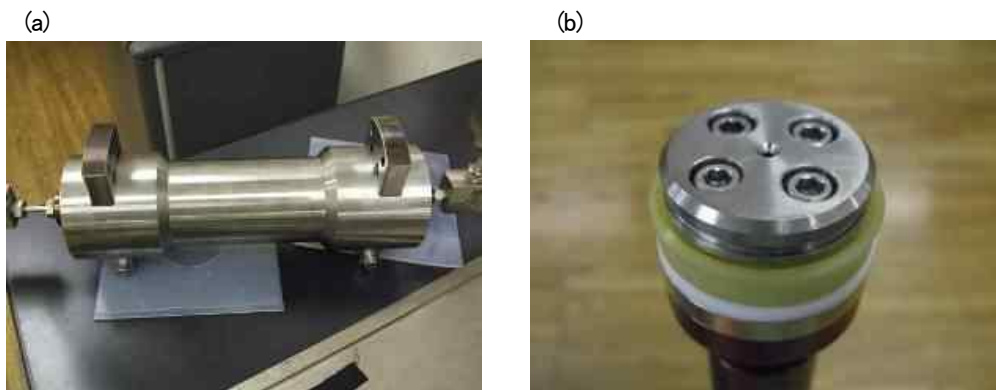


図 31 熱伝達試験機((a); 全体図、(b); 蓋部分)

(6) 手動ポンプ

手動ポンプは、圧力の増減に対する温度変化を測定するために使用し、容器内温度分布と攪拌量の関係を明らかにするのに用いる。装置に組み込むことができる。

油圧ジャッキ方式で、最高 200MPa まで使用できる。

(a)



(b)



図 32 手動ポンプ((a);全体図、(b);駆動部分)

2-2-2 性能評価試験

製作した高圧装置を用い、実際の発酵、熟成を想定した性能評価試験を実施した。

(1) 圧力容器内の温度分布の測定

装置の性能評価試験として、容器内の温度測定を行い、圧力容器内の温度分布を確認した。

容器内の温度は、図 33①～④に示すように、4 箇所に熱電対を設置し、測定を行った。温度は 25°C 設定とした。

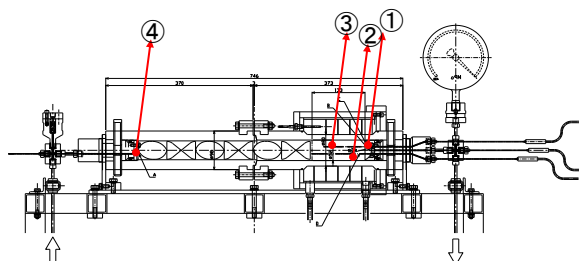


図 33 装置内の温度測定箇所

試験結果を図 34、図 35 に示す。図 34 が無加圧で、図 35 が 200MPa の圧力をかけた状態である。

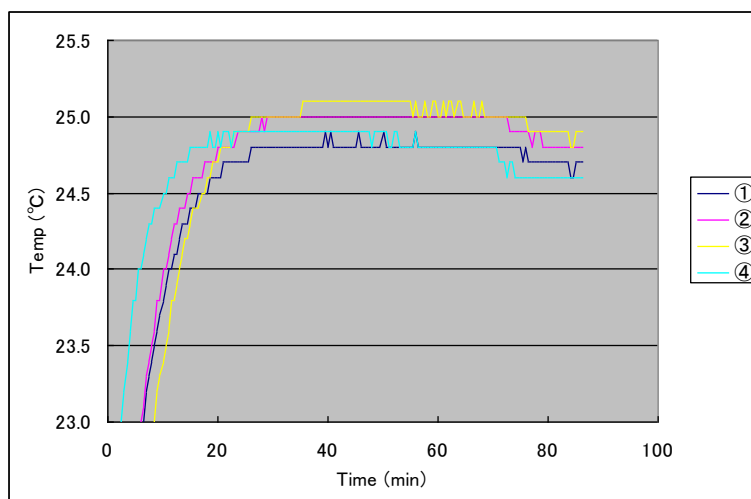


図 34 圧力容器内の温度分布(25°C;大気圧下)

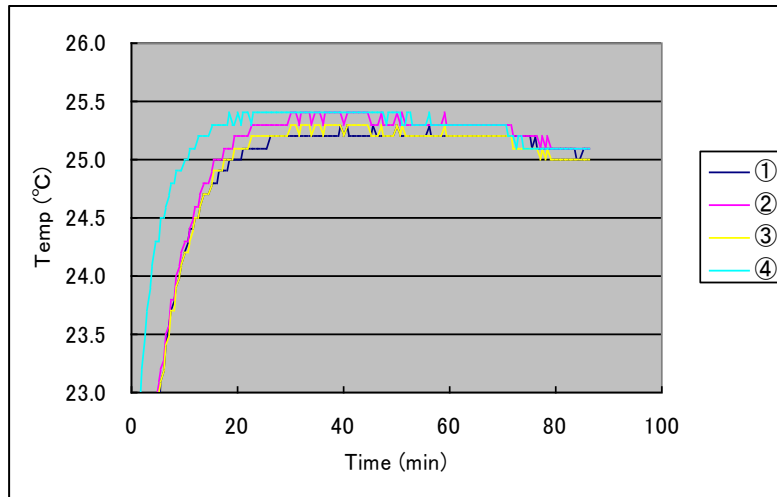


図 35 圧力容器内の温度分布(25°C;200MPa 圧力下)

図のように、全ての場所において、設定温度の $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ になることが確認できたため、大気圧～200MPa の圧力下で、設定温度 25°C に対して $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内に温度調節できると考えられる。

(2) 高圧下発酵・熟成装置を用いた発酵・熟成試験

高圧下発酵・熟成装置を利用し、醤油麴の発酵・熟成試験を行った。

醤油は、日本で発展し、大豆や小麦などの植物性原料を加熱調理し、これに麴菌を増殖させ、食塩水中にて発酵・熟成させた後、加熱やろ過を行って作る発酵調味料である。この製造工程において、最も重要な工程が発酵・熟成工程であり、麴菌が産出した酵素を利用してタンパク質がアミノ酸に、多糖類が単糖類に分解される。

以前、越後製菓(株)では、魚を利用した魚醤油で、低圧で長時間の加圧(50°C 、60MPa、22 時間)を施すことで、製造工程が短縮されるという実験結果を得ている。

そこで、醤油醸造の最も重要な発酵・熟成の初期工程が高圧処理でどのように変化するか試験を行った。試験は、新潟県醤油協業組合から提供していただいた醤油麴(蒸煮脱脂大豆と炒小麦を 1:1 の割合であわせたものに、麴菌(*Aspergillus oryzae*)を増殖させ、3 日間経過した濃口醤油麴)で行った。

試験方法としては、醤油麴に 2 倍量の 23% 食塩水を加えたサンプル(図 36 参照)を 2 つ用意し、サンプルを 2 つの条件で処理した。

①容器内温度; 40°C 、容器内圧力; 60MPa、処理時間; 18 時間

②容器内温度; 40°C 、容器内圧力; 0.1MPa、処理時間; 18 時間

条件①、②で処理したサンプルは、高速液体クロマトグラフ(HPLC)によって、遊離アミノ酸分析をし、アミノ酸含量を比較した。

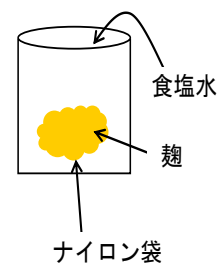


図 36 サンプル図

試験結果を図 37 に示す。

図より、圧力処理を行ったほうのアミノ酸含量が高くなることが分かった。

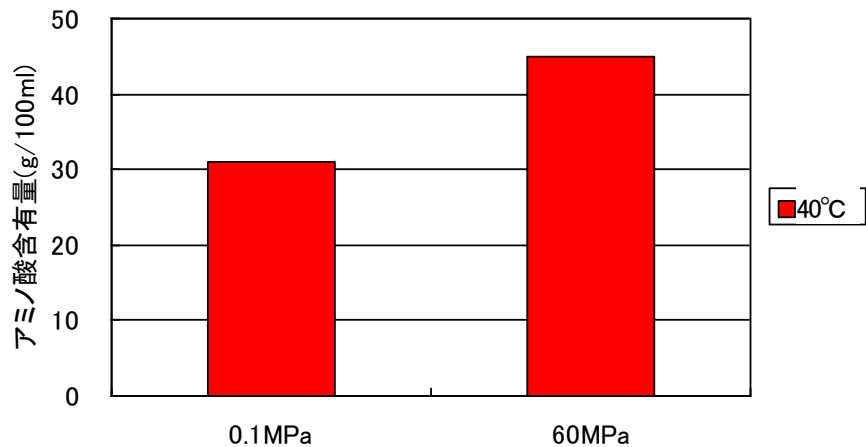


図 37 醤油麹のアミノ酸含有量(40°C、18 時間発酵後)

次に、発酵・熟成時間ごとのアミノ酸含量の変化を調べるため、同じ条件下で処理時間を 1、4、7、10、14、42 時間とし、発酵・熟成試験を行った。

測定結果を図 38 に示す。

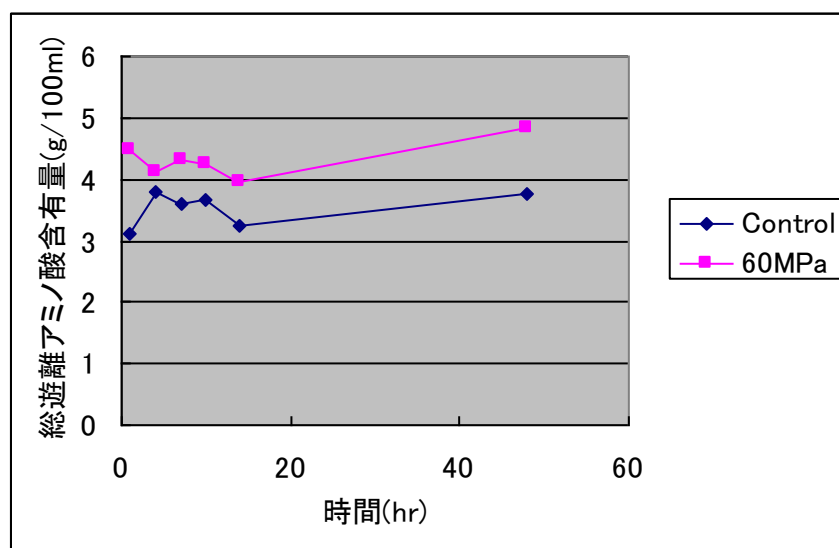


図 38 醤油麹のアミノ酸含有量(40°C、42 時間発酵後)

一般的な醤油醸造の発酵初期工程では、室温で 1 ヶ月間発酵処理を行う。この時点での遊離グルタミン酸含量は、約 0.7g/100ml であることが知られている。図より、グルタミン酸を含むアミノ酸含量が、発酵初期から 2 日目では約 1.5 倍増加していることがわかる。また、60MPa で処理したものは、Control と比べてアミノ酸含有量が約 1.3 倍高い傾向が見られ、グルタミン酸含量においては、42 時間で、一般的な醤油醸造の約 1 ヶ月目に相当することがわかった。

以上の試験から、高圧下発酵・熟成装置の性能を確認できたのと同時に、醤油麹は 60MPa の圧力下で 2 週間発酵・熟成させることで、アミノ酸生成量が 1 ヶ月発酵・熟成したものと同等となることがわかった。

今後、もう少し検討しなければならないが、温度 40°C、圧力 60MPa で発酵させることで、発酵時間を短縮させることが見出せた。

第3章 全体統括

発酵や醸造は、大気圧に比べ高圧下(数十～数百 MPa)で発酵・熟成期間の短縮、微生物の制御及び機能性物質の作出などの効果があることが広く知られているが、圧力に合わせた温度制御が難しく実用化に至っていない。本研究開発では、高圧下において容器内を効率よく攪拌する技術及び容器内温度を均一に制御する方法等を検討し、これらの機能を有する高圧下発酵・熟成装置の開発を目指し、研究開発を行い、次のような成果を得た。

● 高圧下での温度制御システムと攪拌技術の構築

① 培養器内の温度分布の検証及び総括熱伝達係数の算出

高圧下発酵・熟成装置の培養器(圧力容器)内の温度分布を測定し、そのバラつきを検証した。
また、熱伝達の計算式から、総括熱伝達係数を算出した。

② 容器内の攪拌技術の構築

圧力容器内の温度分布データを参考にし、攪拌技術を構築した。

攪拌方法としては、シリンダーを用いて圧媒を循環する方法とした。また、シリンダーで循環させるのみでは温度差が生じるため、圧力容器内に攪拌翼を用い、圧媒の輸送現象、特に乱流特性を調査できる、高圧下発酵・熟成装置に組み込める攪拌装置を製作した。

③ 高圧下温度制御システムの構築

容器内への最適な熱伝達条件と内部攪拌技術をもとに、高圧下の容器内温度を維持・調整する温度制御システムを構築した。

● 高圧下発酵・熟成装置の開発

① 高圧下発酵・熟成装置の試作

容器内容量が 300cc の試験用高圧下発酵・熟成装置を設計、製作した。

② 性能評価試験

製作した高圧下発酵・熟成装置の容器内温度分布の測定および、発酵・熟成試験を行い、装置の性能評価を行った。

以上の結果から、高圧下において容器内を効率よく攪拌する技術及び容器内温度を均一に制御する高圧下発酵・熟成装置を開発することができた。

今後は、この装置を用いて微生物による発酵・熟成試験を行い、醤油、発酵調味料、酵母代謝物(酵母エキス含む)などの発酵製品を得るための至適圧力、温度、時間、pH 等による影響を調査し、高圧下での発酵制御に関する知見を得る。

醤油、味噌等の製造工程において、塩分の添加は、腐敗菌等の微生物の増殖を抑える働きもあり、製造過程にて単に塩分を減らす場合、製品劣化を招く恐れがある。これに対し、高圧下では製品劣化を引き起こす一般生菌は 50MPa～100MPa 程度にて増殖が抑制されるため、減塩あるいは塩分無添加でも腐敗することはない。また、発酵に有用な酵母は 300MPa、乳酸菌はそれ以上の圧力でないと影響を受けないため、高圧下での発酵が可能となり、塩分無添加の発酵製品の製造も可能になるだろう。

※参考文献

- 1) 三宅義明ら 日本食品科学工学会誌, 51,181-184(2004)
- 2) Miyake Y.,et al : J. Agric. Food Chem., 53,22-27(2005)
- 3) Wang SL,et al. Yeast., 25,251-257(2008)
- 4) 伝熱工学 田坂英紀著(森北出版)
- 5) Nature, vol. 207 p.620-621 (1965)
- 6) Revised Release on the Pressure along the Melting and Sublimation Curves of Ordinary Water Substance p4
- 7) M. Chaplin <http://www.lsbu.ac.uk/water/ionis.html>.
- 8) 丸善石油化学株式会社 ナイブライン®技術資料