

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「飼料の価値向上を目指した前処理・減圧発酵蒸留技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成 24 年 3 月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人名古屋産業科学研究所

目 次

第1章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・目的及び目標	1
1-2	研究体制	2
1-3	成果概要	5
1-4	当該研究開発の連絡窓口	7
第2章	本論	8
2-1	減圧発酵によるエタノール発酵条件の検討	8
2-2	発酵槽の攪拌効果	9
2-3	エタノールの蒸留及び精留条件の設定とエタノールの高次利用の検討	12
2-3-1	エタノールの蒸留及び精留条件の設定	12
2-3-2	エタノールの高次利用に関する調査	12
2-4	減圧発酵による連続化システムの確立	13
2-5	発酵残渣の高品質化の検討	13
2-6	高品質飼料の成分分析と給餌試験	13
第3章	総合評価	14
3-1	減圧発酵工程のエネルギー収支	14
3-2	コストバランスによる採算性の評価	15
第4章	全体総括	18
4-1	成果の総括	18
4-2	工業所有権の取得状況及び対外発表などの状況	20
4-3	今後の事業化に向けた取組み	20

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景、目的及び目標

原料の大半を輸入に頼っている飼料メーカー及び畜産農家にとって、安価に、しかも安定して入手でき、国際相場の影響を受けない国産の高品質飼料が求められている。さらに、環境問題への対応やエコブランド化に対する今後の戦略もあり、食品残渣や多収量米など未利用バイオマス原料から製造した飼料（エコフィード）への期待も膨らんでいる。しかし、これらの原料は腐敗しやすい、栄養価が一定しない、安定入手が難しい等の理由から、ほとんど利用されていないのが現状である。エコフィードの利用促進を図るためには、これらの問題を解決し、エコフィードを高品質化することが必須の課題である。そのため、飼料原料の長期保存性があること、栄養成分が一定していること、飼料の価値を高める主成分である可消化性タンパク質を多く含んでいることなどが要求される。近年、バイオエタノール製造用原料として多収量米などの穀物や食品残渣などの未利用バイオマスが用いられている。これらを発酵させ、バイオエタノールを得た後の残渣は、タンパク質濃度が高くなるため、高品質飼料としての利活用が期待される。このように、国内で栽培された資源作物や食品残渣を利用することにより、国際相場に影響されない国産の高品質飼料を低コストで安定して供給することが期待され、本研究開発はこれらのニーズに対応するため、実施したものである。

減圧下におけるエタノール発酵という新しい手法を取り入れて、未利用バイオマスを高品位な飼料原料として利用するシステムを開発することにより、国内自給率増大へと繋げていくことが出来る。

そのことにより、食糧自給率の改善を図るとともに、畜産分野の国際競争力、さらには食糧安全問題を改善できると考えられる。

また、畜産生産技術においても、大手配合飼料メーカーと協調することにより、従来の配合飼料（乾燥飼料）や限定された農家しか利用できないリキッドフィードではなく、全国の農家に波及しうる環境負荷の低い飼料製造法及び給餌法を開発し、国内生産力の強化に貢献できる。さらに、基本的な栄養バランスは配合飼料で賄い、発酵飼料で消化吸収性に富んだタンパク質、ビタミン類、エネルギー及びカロリーを補充した設計に基づいた発酵混合飼料は、吸収率が高いと考えられるため、輸入に頼らない飼料の自給率アップに大きく貢献できると期待される。

現在、養豚農家における飼料費は、経費の約2/3を占めており、経営を非常に圧迫している。本技術の成果により、飼料を安価で安定して供給できれば、畜産農家の経営安定化に大きく貢献できる。

また、本技術開発により飼料自給率や給餌法効率の向上が期待できることから、輸入飼料に頼っているわが国の食糧自給率向上の一助ともなる。さらに、国の政策であるエコフィードの活用も促進され、地域の食品メーカー等の排出側と食品廃

棄物受入側の異分野交流も行われ、さらなる市場を作り出すことも期待される。

エタノール発酵により製造されるエタノールは、重油の代替としても利用可能であり、自社において発酵や蒸留、乾燥工程のエネルギー源としても活用でき、エネルギーコスト削減とともに、二酸化炭素排出を抑制するカーボンオフセット制度へも貢献できると考えられる。図 1.1 に多収量米におけるエタノール発酵及び発酵残渣からの飼料製造フローを示した。

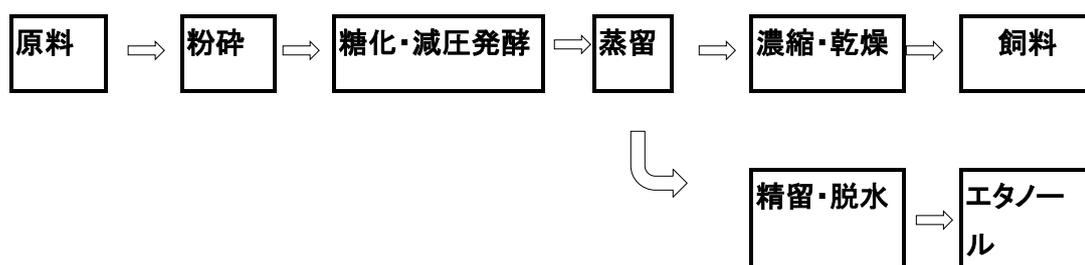


図 1.1 エタノール発酵飼料の製造フロー

これらの結果に基づき、今年度は1 t 規模における未利用バイオマス原料のさらなる発酵効率向上を図り、消化吸収性に富んだタンパク質濃度の高い飼料の製造条件を確立するとともに、エネルギー効率最適化及びコストバランスによる事業採算性の検証を行った。

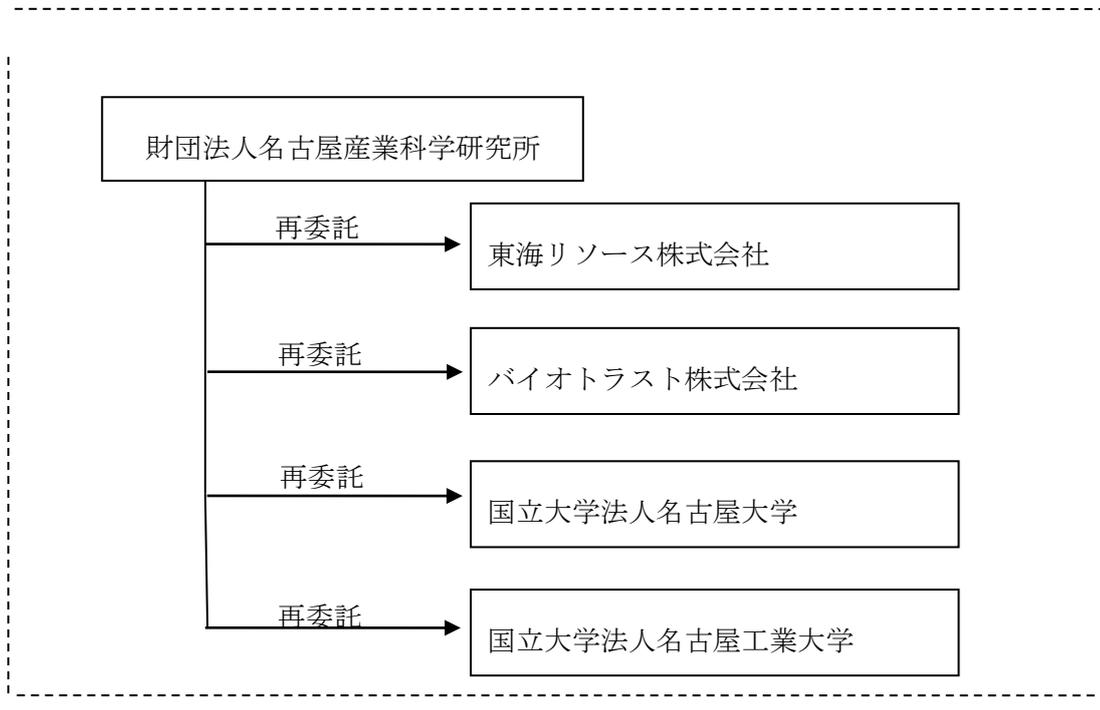
具体的には、食品残渣や多収量米などの未利用バイオマスを原料として、長期保存性があり、栄養成分が一定、かつ可消化性タンパク質を多く含む高品質飼料を製造するため、発酵効率の良い未利用バイオマス原料の前処理・減圧発酵蒸留技術を開発し、高タンパク質飼料を得ることを目的とする。

具体的数値目標としては、1 t 規模において発酵時間 48時間(現状72時間)、発酵効率 83±2%(現状維持)、飼料中のタンパク質濃度 25%(現状 20%) を目標とし、そのための最適製造条件を確立する。

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

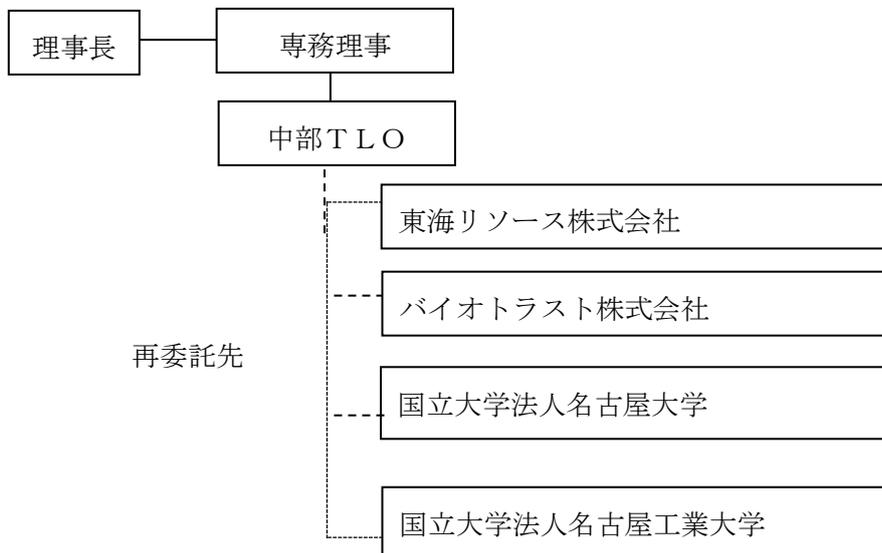
1) 研究組織



2) 管理体制

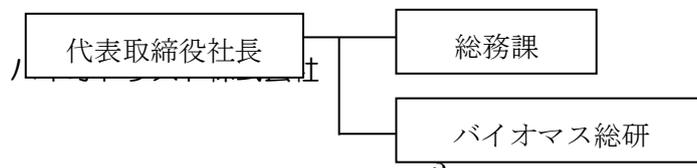
① 事業管理者

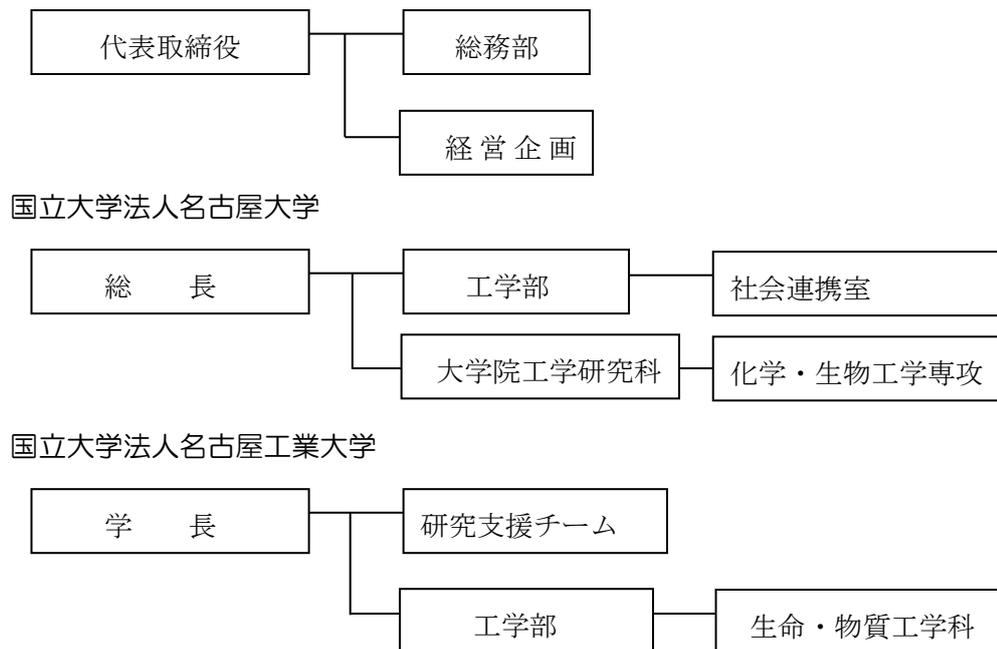
財団法人名古屋産業科学研究所



② 再委託先

東海リソース株式会社





③ 業務管理者及び経理担当者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人名古屋産業科学研究所

(業務管理者)	中部TLO産学連携支援担当部長	金野 正幸
(経理担当者)	中部TLO	三浦 眞

(再委託先)

東海リソース株式会社

(業務管理者)	バイオマス総研 統括研究員	本多 宏明
(経理担当者)	総務課	新村 昌子

バイオトラスト株式会社

(業務管理者)	経営企画室 主任調査員	櫻井 さやか
(経理担当者)	総務部	大田 圭子

名古屋大学

(業務管理者)	大学院工学研究科 准教授	小林 敬幸
(経理担当者)	工学部 社会連携室	山川 明美

名古屋工業大学

(業務管理者)	工学部 准教授	加藤 禎人
(経理担当者)	研究支援チーム	山口 裕史

3) 研究者氏名

研究者

総括研究代表者

東海リソース株式会社 総括研究員 本多 宏明

副総括研究代表者

バイオトラスト株式会社 主任調査員 櫻井 さやか

研究分担者

名古屋大学工学研究科 准教授 小林 敬幸

名古屋工業大学工学部 准教授 加藤 禎人

東海リソース株式会社 代表取締役 大田 克己

4) 協力者

日本農産工業株式会社 中部支店副支店長 村田 政和

NPOバイオものづくり中部 アドバイザ 藤沢 寿郎

日本ガイシ株式会社 マネージャー 脇田 昌宏

1-3 成果の概要

本事業は、多収量米、食品残渣など未利用バイオマス原料を減圧発酵・蒸留させ、減圧により発酵効率を上げることによって、発酵残渣中のタンパク質濃度を高め、そのことにより高付加価値飼料を製造することを目的としたものである。

昨年度までの成果として、未利用バイオマス原料として馬鈴薯残渣を用いて 100g、100kg および 1t 規模の減圧発酵およびそれに続く蒸留・精留工程により、高タンパク質濃度の飼料を得る製造条件を設定し、さらに 100g および 100kg 規模においては発酵工程の半連続化の可能性も検証した。今年度は、事業化を想定して未利用バイオマス原料として多収量米を用いて 1t 規模の連続発酵試験を行い、その結果、同様な高品質飼料が得られることを確認した。事業化時に用いることが期待される多収量米の場合も、連続減圧発酵により発酵効率が高まり、エタノール収率が高くなるにつれて、タンパク質濃度も高くなり、その結果、飼料の付加価値がさらに高まったことが実証された。試験結果の具体的な内容は次の通りである。

・ 1t 規模における発酵条件の設定

多収量米の場合は、1t 規模における最適発酵条件は、発酵温度 35℃、発酵時間 48～72 時間、減圧度 0 未満～-0.05MPa であり、馬鈴薯残渣と同様な傾向であった。

・ 1t 規模における多収量米における攪拌効率の向上

昨年度馬鈴薯残渣の攪拌実験で混合・攪拌効果が実証されたヘリカルリボン翼は、多収量米の場合も同様に混合の均質化に効果の大きいことが実証され、発酵効率向上に貢献の

大きいことが判明した。理由はどちらもビンガム流体の挙動を示すためである。

- エタノールの蒸留条件の設定

発酵エタノールを高度利用するためには、エタノール濃度をさらに高める必要がある。そのため発酵残渣からもさらにエタノールを回収する目的で、 $-0.08\sim 0.1\text{MPa}$ の減圧下、温度 50°C で蒸留することにより、エタノール回収率 85%を達成した。エタノール回収とともに、残渣中のタンパク質濃度も高まり、飼料のさらなる付加価値が向上する。

- エタノールの高次利用調査

減圧発酵により得られるエタノールの高次利用に関して、各種文献などにより調査した。その結果、ガソリンを代替するエンジン用燃料としての用途が大半であり、わずかに土壌汚染対策の用途が検討中であった。いずれの用途も法規制の問題があり、慎重に進める必要がある。

- 1t規模の減圧発酵による連続化システムの確立

多収量米を原料として、最適発酵温度の 35°C で発酵させて粗タンパク質濃度（CP値）12.8の残渣を得、引き続き同様の条件で72時間連続発酵させた結果、最終残渣中のCP値31.5の飼料を得た。従来品の2倍以上のCP値であり、連続発酵の効果が顕著である。

- 発酵残渣の濃縮試験

発酵残渣のタンパク質を濃縮する目的で、多収量米の発酵残渣を、 0.1μ 以下の細孔を持つセラミック膜でタンパク質を分離・濃縮させたところ、タンパク阻止率が平均60%を達成し、タンパクの濃縮に極めて効果の大きいことが判明した。

- 高品質飼料の評価試験

飼料の評価法として、雛鳥に対する給餌試験を行った結果、従来の基礎飼料に発酵残渣飼料を10%添加した場合、雛鳥の死滅や病気もなく、安全性が確認され、さらに体重も10%増加していることが判明し、高品質飼料優位性が確認された。

- エネルギー収支

減圧発酵工程の消費エネルギーを計測した結果、蒸留工程、乾燥工程で大半のエネルギーが消費されていることが判明したため、蒸留工程の加熱方式を従来のジャケット式からマイクロ波方式に変更した結果、蒸留工程の74%、プロセス全体の32%削減が可能となった。

- 事業採算性の評価

このように未利用バイオマス原料から高付加価値飼料を得る基盤技術は、ほぼ確立されており、今後は初期投資額、運転費とも低コストで、高品質の飼料、さらに高付加価値製品である高タンパク質原料を得る条件を探索し、事業化を促進する。また得られた高タンパク質飼料の濃縮工程ではセラミック膜を用いた膜分離による濃縮が極めて有効なことが実証された。また、本事業で開発された未利用バイオマス原料の前処理・減圧発酵、蒸留、濃縮により得られたエタノール、発酵残渣からの高品質飼料製造の事業化採算性は、未利用バイオマス原料の価格、高品質飼料などの販売価格によって大きく左右されることが実

証された。

これらの結果を総合して、戦略的基盤技術高度化支援事業「飼料の価値向上を目指した前処理・減圧発酵蒸留技術の開発」は、ほぼ当初の目標を達成できたと評価でき、今後補完研究により、できるだけ早期の事業化に結びつける。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

東海リソース株式会社 代表取締役

大田 克己

電話番号 052-961-3531 FAX 052-961-3501

E-mail ohta@tokai-resource.jp

第2章 本論

2-1 減圧発酵によるエタノール発酵条件の検討

昨年度多収量米 100g を用いての発酵条件の検討で、発酵温度 30-35℃の範囲では、発酵温度が高いほど、また発酵時間は 48 時間以上で、急激に発酵が促進されることが判明した。

そこで、今年度は事業化を想定した規模の原料として多収量米（玄米）150Kg(水を同量加える)を用いて、発酵温度：30~40℃、発酵時間：24~72時間、減圧度：0未満~-0.05MPaの範囲で最適発酵条件を検討した。

原料の多収量米（玄米）を、粉砕機により粉砕し、酵母として *Saccharomyces cerevisiae* (T-8 株) を 10L 前培養したものを加えて、発酵試験に供した。減圧発酵条件は、減圧度 0~-0.05MPa で、発酵温度は 30~40℃の範囲で 72 時間行った。エタノール濃度はエタノール濃度計にて、粗タンパク質（CP）の測定は、NCH コーダを用いた。

発酵温度、時間の違いによるエタノール生産量の比較を表 2.1 に示した。表 2.1 によると、エタノール生産量は 35℃、72 時間で最も高いことが判明した。糖化率は 30℃で 82%、32℃で 85%、35℃で 88%、37℃で 90%、40℃で 92%と、いずれも高い糖化率を示し、目標値 85%を達成していた。この結果より、総エタノール生成量および発酵効率から判断して、最適な発酵温度として 35℃を設定した。

表 2.1 発酵時間とエタノール生成量の関係

経過時間	0時間	24時間	48時間	72時間	96時間
30℃	0.0	3.5	8.5	10.0	12.0
32℃	0.0	3.5	8.5	12.0	13.0
35℃	0.0	4.5	8.5	18.0	15.0
37℃	0.0	4.0	7.0	12.0	13.0

また、発酵温度の違いによる 72 時間後のエタノール濃度、総エタノール量、残渣 CP を表 2.2 に示した。この結果からも、35℃の場合にエタノール濃度、エタノール量、残渣 CP 値の全てが最も高い値を示しており、この温度が最適な発酵温度であることが確認できた。さらに、表 2.2 の結果により、残渣 CP 値も目標の 25%を達成していることが確認された。

表 2.2 発酵温度の違いによるエタノール濃度と
総エタノール生産量と残渣の CP の比較

発酵温度 (°C)	72時間後のエタノール濃度 (%)	総エタノール量 (L)	残渣 CP (%)
30	10.0	31.8	27.2
32	12.0	40.2	27.8
35	18.0	63.6	31.5
37	12.0	47.3	30.2
40	12.0	47.2	29.6

原料 CP:12.8

2-2 発酵槽の攪拌効果

今年度は多収量米の発酵効率向上を目的に、発酵槽内の攪拌翼による混合、攪拌効果を検討した。前年度検討したジャガイモ残渣は降伏応力を持つ塑性流体もしくはビンガム流体と見なせるため、シャフトに逆らせんを切ったスクリューをもつヘリカルリボン翼を開発し、混合・攪拌効果の有効性を実証した。この攪拌槽の実機の改造図面を図 2.1 に、ほぼ相似形状で約 1/10 にスケールダウンした実験用リボン翼を図 2.2 に示す。実験槽の内径は $D=185\text{mm}$ とした。本攪拌翼はジャガイモ残渣の攪拌に非常に有効だったため、同じビンガム流体と見做せる多収量米原料の攪拌にも有効であると予測し、引き続き使用することとした。

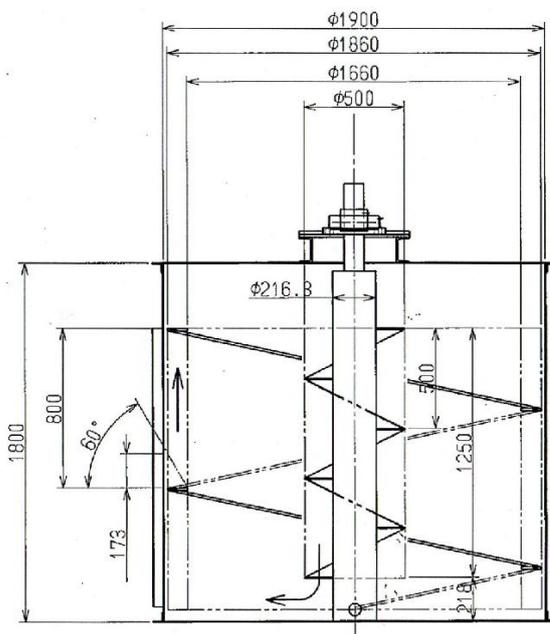


図 2.1 前年度使用した実機

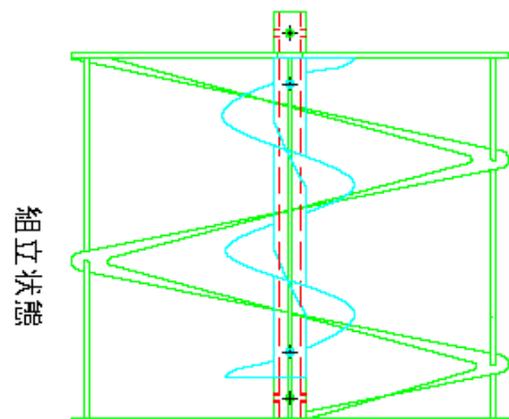


図 2.2 ラボ機の概形

使用した原料は粉末状の多収量米を水に分散させたものである。混合が十分な場合はジャガイモ残渣と同様なビンガム流体と見なすことができるが、静置して時間をおくと沈殿してしまう性質を持つ。したがって、前年度使用した回転式粘度計ではレオロジー特性を測定することは不可能だった。また、発酵が進むと発泡し混合物の均質化は進むが、原料性状に経時変化が著しいという特徴がある。

実験結果によると、原料投入直後に関しては、データにバラツキが見られたものの、多収量米原料は、ほぼビンガム流体ということがわかり、また発酵が進むにつれ、液物性が安定することがわかった。同様の条件でもう一度測定することで再現性があることを確認した。

図3に模擬試験として、インク(試料約5リットルに対し、インク5ml)を用いた着色法による混合過程の経時変化を示した。

混合には、昨年度のジャガイモ資料を混合したときのモーター負荷と同じとするために、単位体積当たりの攪拌所要動力が一定となるように回転数を変化させた。再現性を確認するため、同様の実験を2回行った。ただし原料投入直後に関しては、バラつきが大きかったため、更なる確認のためにもう一度実験を追加した。

初回に行った原料投入直後の混合の過程を図2.3に示した。それぞれの混合時間をまとめたグラフを図2.4に示した。

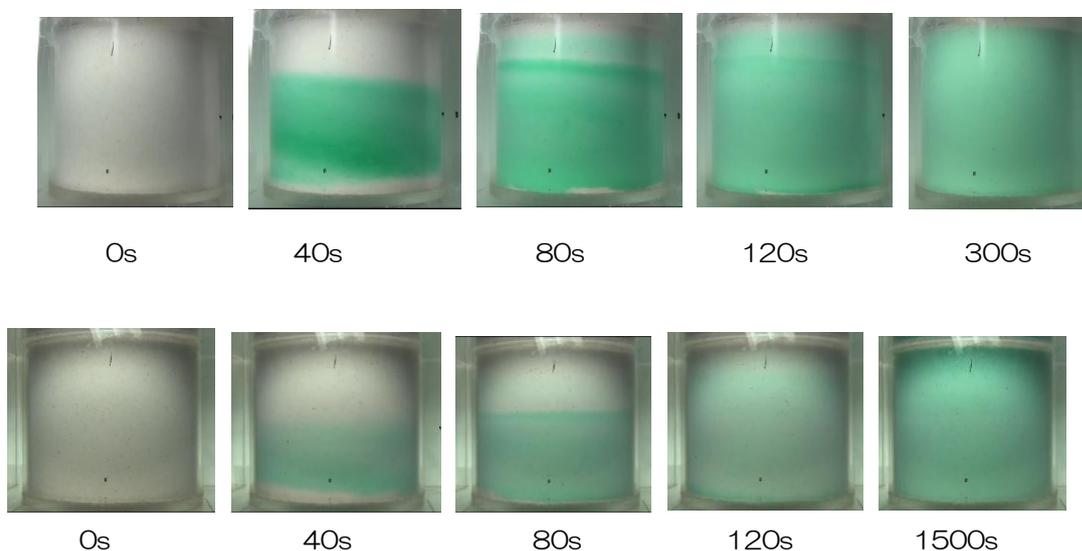


図 2.3 初回に行った原料投入直後の試料の混合過程

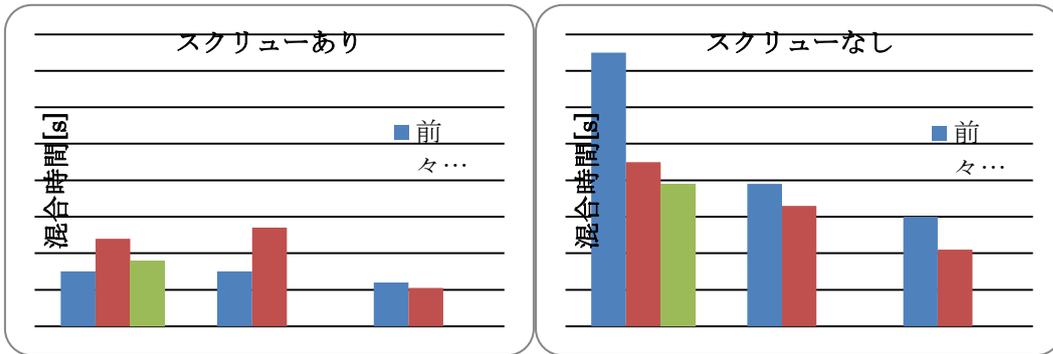


図 2.4 経時変化による混合時間

これらの結果より、本実験装置のヘリカルリボン翼で多収量米発酵原料は比較的容易に混合・攪拌が進行していくことが判明した。また、原料投入直後が最も混合時間が大きく、日を経るに従って、混合時間が短くなる傾向はいずれも同様であった。ビンガム流体のため、スクリューありの場合が混合時間は短かった。

また翼形状の検討として、量産化や、装置の増設を考えた場合、製造コスト削減のため初期投資の安価な簡単形状の攪拌翼を検討することも考えられる。そのため、広い粘度範囲で混合性能が高いマックスブレンド翼およびフルゾーン翼、安価なアンカー翼で混合を試み、それぞれを比較した。

その結果、マックスブレンド翼、フルゾーンでは、攪拌翼からの吐出流の影響が及びにくい攪拌槽の下部隅に試料が沈殿してしまい、完全混合に至らなかった。またアンカー翼に関しては、ヘリカルリボン翼で使ったスクリューをシャフトに取り付けた場合と、取り付けしていない場合の 2 通りで混合を試みたが、どちらの場合も、攪拌翼に掛かる負荷が大きすぎたため、既存の攪拌モーターでは混合不可能であり、発酵槽内の攪拌翼としてはヘリカルリボン翼による混合・攪拌は最も適切であることが実証された。

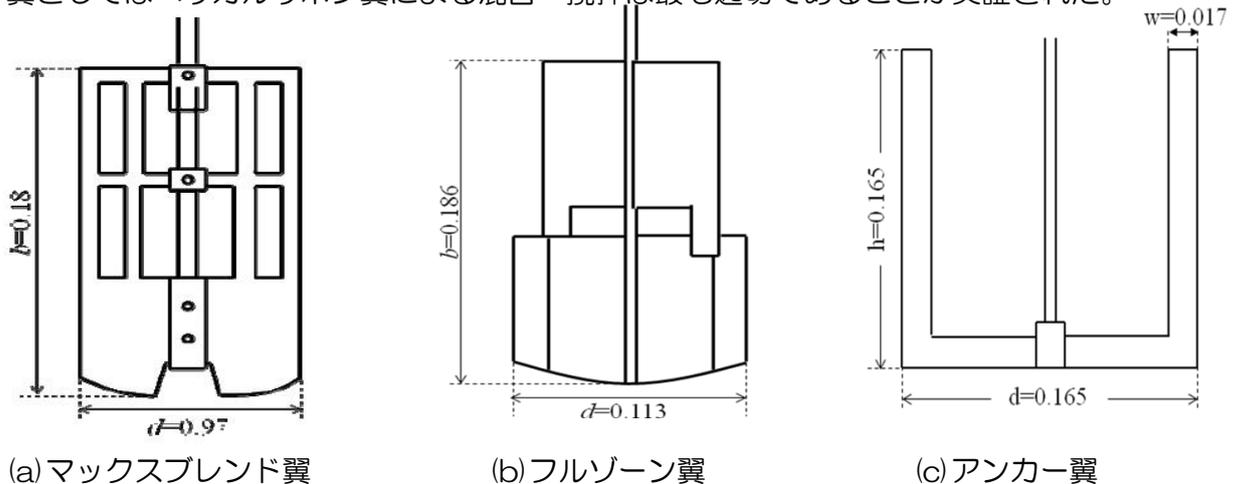


図 2.5 混合特性比較に使用した攪拌翼形状

2-3 エタノールの蒸留及び精留条件の設定とエタノールの高次利用

2-3-1 エタノールの蒸留および精留条件の設定

エタノールを高度利用するためには、エタノール濃度を高める必要がある。減圧発酵で直接回収されたエタノールと、発酵残渣を蒸留・回収して得られたエタノールを、混合し精留することにより、エタノール濃度を高め、高度利用が期待される。そこで、蒸留条件の検討を行い、高効率のエタノール回収を試みた。発酵後の残渣を減圧蒸留装置に投入し、-0.08~0.1 MPa、4 時間蒸留を行い、蒸留温度を 40~60℃の間の 5℃毎で検討した。エタノール濃度はエタノール濃度計にて分析した。回収効率は蒸留されたエタノール量/投入したエタノール×100 にて算出した。

結果及び考察

蒸留温度の違いによる投入エタノール量と蒸留されたエタノール量と回収率の比較を表 2.3 に示した。蒸留温度 50℃において回収効率が最も高く 85%であった。40℃付近では、蒸留されたエタノールの濃度は最も高いものの回収率は低かった。50℃より温度が高いエタノールの回収効率の低下は、減圧ポンプからのエタノール流出によるものと考えられる。よってより高効率にエタノールを回収できた 50℃を最適な蒸留条件とした。

表 2.3 蒸留温度の違いによる投入エタノール量と蒸留されたエタノール量と回収率の比較

蒸留温度 (℃)	投入したエタノール量 (L)	蒸留されたエタノール量 (L)	回収効率 (%)
40	25.5	14.0	54.9
45	27.3	23.1	84.6
50	20.4	17.5	85.8
55	23.8	19.8	83.4
60	25.0	19.5	78.0

上記結果に基づいて、発酵後に粗蒸留（減圧発酵装置による）へのプロセスを省略させ、省エネ効果とプロセス簡略化への可能性として、減圧発酵槽での発酵終了後に同じ条件下での減圧蒸留を行う事が出来、次のエタノール精留へのプロセス移行が可能となり、減圧発酵と減圧（粗）蒸留のハイブリッド化が同一の減圧発酵（蒸留）装置にて達成できることが判明した。

2-3-2 エタノールの高次利用に関する調査

バイオエタノールの高次利用に関する調査結果では、（1）エタノールを改質して水素エネルギーとする方法、（2）ガソリンへ添加してガソリンの一部を代替する方法、（3）エンジンそのものを改良して、エタノール 100%を従来ガソリンの代替とする方法、（4）エタノールの殺菌作用を活用して土壌汚染除去に用いる方法、などが提案された。（1）、（2）、（3）のいずれもガソリン代替燃料としての利活用であり、すでに政策的に一部で実用化されているが、技術的に完成されているとは言いがたく、現在も研究開発継続中である。この応用分野は将来のガソリン（石油）不足対策として、各国で政策的にも進められるこ

とが予想され、注目する必要がある。（４）土壌汚染消毒への活用は、可能性はあるといわれているものの、科学的な検証は未確認であり、実際の効果、コストパフォーマンスなど今後のさらなる調査・検証が必要である。

これらエタノールの高次利用に関して、いずれも法整備の問題があり、科学的にその効果を検証するとともに、コストパフォーマンスの観点からも評価する必要がある。

2-4 減圧発酵による連続化システムの確立

事業化の際に必須の減圧発酵による連続化システムの確立では、実用化レベル(1 t 規模)における原料粉砕、前処理、糖化・減圧発酵、乾燥、混合など一連の高品質飼料製造工程の連続化を検討した結果、昨年度及び今年度導入した搬送設備などにより、各工程が連結された結果、原料投入から製品取出しまで、ほとんど半自動化が可能となり、事業化実現性に向けた大きな前進といえる。

2-5 発酵残渣飼料の高品質化の検討

発酵残渣飼料の高品質化を図る対策として、酵素添加の効果及び残渣の分離・濃縮効果を検討した。プロテアーゼ、セルラーゼ等の糖化及び液化酵素を組み合わせることで、溶解性タンパク質が増加することが判明した。また残渣の濃縮試験では、セラミック膜分離装置を用いて、タンパク質濃縮技術の有効性を検討した。その結果、セラミック膜を用いた分離操作により、短時間に発行残渣中の不純物の除去、タンパク質の濃縮が可能となり、高タンパク質飼料、高プロテイン原料の高効率製造に極めて有効なことが実証された。今後は、発酵残渣の特性に適應したセラミック膜の膜径、前処理条件など、最適な膜分離条件の探索が必要である。

2-6 高品質飼料の成分分析と給餌試験

発酵残渣からの高品質飼料の評価法として、雛鳥に対して給餌試験を行った。従来の基礎飼料に減圧発酵残渣の高品質飼料を 10% 添加した場合、雛鳥（チャンキーオス）の死滅や病気等もなく、安全性が確認され、また体重も約 10% 優位に増加していることが判明した。

第3章 総合評価

3-1 減圧発酵工程のエネルギー収支

減圧発酵プロセスのエネルギー収支の評価を行う目的で、ベンチプラントを用いた消費エネルギー測定を実施した。多収量米（玄米）の減圧発酵プロセスのフロー図と消費エネルギーの測定点を図 3.1 に示す。測定結果により、蒸留工程の消費エネルギーがプロセス全体の 43%、乾燥工程は 52%を占めることが判明した。そこで最も効果の大きい蒸留工程の消費エネルギー削減を目標とし、加熱を従来のスチーム加熱からマイクロ波加熱に変更して、エネルギー消費量を実測、評価した。一方、乾燥工程は発酵・蒸留残渣の物性から既存のドラムドライヤー式が適していると考えられるため、乾燥工程の前段にセラミック膜による膜ろ過工程を組み込むことにより、粗タンパク質（CP 値）すなわち飼料の価値を高め、プロセスの採算性を向上させる検討を行った。

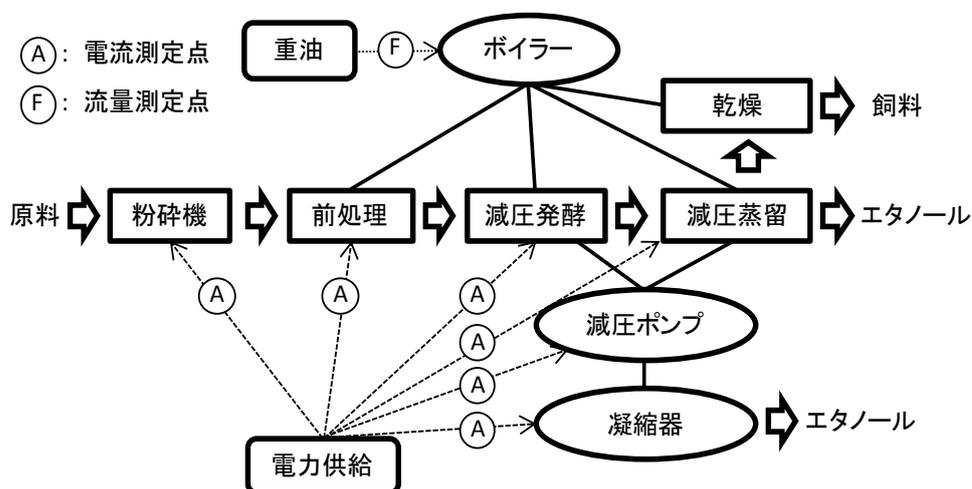


図 3.1 減圧発酵プロセスフローと消費量エネルギー測定点

1) マイクロ波加熱を用いた蒸留工程の消費エネルギー評価

従来の蒸留工程における発酵残渣の加熱方法はジャケット式熱交換器を用いたスチーム加熱である。この加熱方法は発酵残渣の外表面からの加熱となるため、発酵残渣の量が多くなると加熱効率が悪化する。そこで、発酵残渣全体を均一に加熱可能なマイクロ波加熱に変更し、蒸留工程の消費エネルギー評価を行った。

① 実験概要及び条件

蒸留工程でのエネルギー消費工程は、発酵残渣の加熱（マイクロ波）、攪拌（攪拌機）、系内の減圧（真空ポンプ）、留出液の冷却（チラー）の 4 点である。今回は環境温度が低く、チラー運転が不要であったため、チラーを除く 3 点の消費エネルギーをクランプメータにより計測した。実験条件を表 3.1 に示した。

表 3.1 蒸留操作の実験条件

試料	蒸留時間	加熱温度	系内圧力	還流比	段数
玄米 150kg	7hr	60℃	1kPa	0.45	5

② 実験結果及び考察

図 3.2 にマイクロ波加熱を用いた蒸留工程の単位投入原料当たりの消費エネルギー実験値を、比較対象としてスチーム加熱を用いた場合及び蒸留工程の単位投入原料当たりの消費エネルギーの理論値を示した。この図より、マイクロ波加熱を用いた蒸留工程は、スチーム加熱を用いた場合に比べ、消費エネルギーが74%削減されている。これはプロセス全体の32%エネルギー削減に相当する。このことから、蒸留工程にマイクロ波加熱を用いることにより、発酵残渣の加熱効率が著しく上昇することが示された。

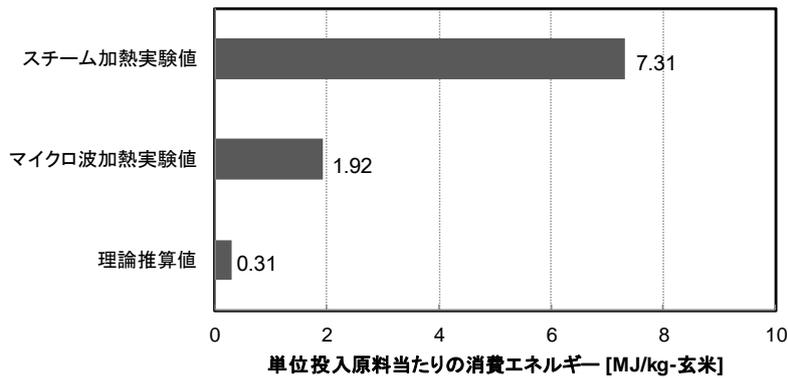


図 3.2 蒸留工程の単位投入原料当たりの消費エネルギー比較

3-2 コストバランスによる採算性の評価

未利用バイオマス原料の減圧発酵により得られるバイオエタノール及び高品質飼料についてコスト試算を行い、事業採算性を評価した。

① 投入原料について

未利用バイオマス原料として、多収量米と馬鈴薯残渣を中心に検討した。多収量米の場合は、農家、JA などから購入するため、購入単価は事業採算性に直結し、原料価格に見合った高付加価値製品を生み出すことが要求される。一方、馬鈴薯残渣の場合は、逆有償として委託処理料が入るため、一般的には採算性に有利である。ただし、多収量米に比べてエタノール生産量が約半分と少なく、発酵残渣後のタンパク質の濃度も低い（多収量米 27.3%、馬鈴薯残渣 15.6%）など、得られる製品の付加価値も

収入：6.405 億円

支出：6.245 億円

利益：0.16 億円

上記の試算では、収益はわずかであり、利益率が低く、さらに利益率を向上させる対策をとる必要がある。

まとめ：

- ① 多収量米を原料とした発酵効率の良い減圧発酵技術の開発により、高いエタノール収率および高付加価値の高タンパク質飼料生産が可能となり、20 円の米 1kg から生まれる付加価値が 42.7 円/kg と、常圧発酵の場合（30 円/kg）に比べて、40%以上向上したため、資源作物（多収量米など）を原料とした事業化可能性を検証した。なお、食品廃棄物などの食品残渣を原料として用いる場合は、委託処理量の収入があるため、さらに収益改善の可能性もある。
- ② 多収量米の単価 20 円/kg は未耕作地に栽培する場合でも、現状では厳しい価格であり、栽培に関する総合的な対策が必要である。（広域栽培、裏作など栽培効率、流通などの面で抜本的な改善が必要）
- ③ 事業を安定に運営するためには、初期設備投資額の低減が必要である。今回の試算でも投資回転率は 64%と良いが、行政からの補助金 50%があれば、投資回転率が 100%を超え、極めて良い事業となりうる。

第4章 全体総括

4-1 成果の総括

サポイン事業2年間の成果の総括として、技術的な面からの研究開発の成果及びその成果を用いた事業化実現性について考察した。概要は下記の通りである。

未利用バイオマス原料の減圧発酵によるエタノール生成及びその残渣を飼料として用いる技術開発では、発酵効率の向上が直接飼料の高付加価値化につながるため、発酵条件の最適化が極めて重要となる。はじめに100g、100kgにおける最適発酵条件を検討し、その結果を事業化規模が予測可能な1t規模に適用し、スケールアップによる効果や影響を検証した。発酵条件としては、発酵温度、発酵槽の減圧度、発酵時間などを検討した。

未利用バイオマス原料として馬鈴薯残渣と多収量米を用いて、発酵条件を検討した結果、100g、100kg、1t規模のいずれにおいても、発酵温度は30℃、発酵時間は48時間でエタノール発酵はほぼ飽和に達し、それ以上発酵を続けても、発酵エタノールの増加は見られなかった。また、減圧発酵における減圧度の影響を検討した結果、常圧に比べ減圧下であれば、減圧度の相違によるエタノール濃度には大きな差異はないため、設備コスト、運転操作のしやすさなどを考慮して、0～-0.05MPaに設定した。

なお、馬鈴薯残渣の場合には、発酵槽投入前の前処理として、粉砕機により10mm以下に微粉砕することが有効であった。

発酵をより促進させるため、発酵槽の攪拌効率の向上実験では、馬鈴薯残渣、多収量米ともに、ビンガム流体と見做すことができ、今回開発したヘリカルリボン翼を用いた攪拌が他の形状の攪拌翼に比べて、混合・攪拌効果に優れ、それが発酵効率の向上に大きな効果を与え、翼形状が発酵効率に影響の大きいことが判明した。これはヘリカルリボン翼が発酵槽内の底部までを含め、全編にくまなく流動を与えることができるため、発酵が均一に効率よく行われるためである。なお、投入原料の規模、発酵槽の大きさにより、混合・攪拌が均一に行われるようヘリカルリボン翼形状の工夫は若干必要と思われるが、事業化時においても、発酵槽内のヘリカルリボン翼による攪拌操作は必須である。

さらに、減圧発酵により得られるエタノールの蒸留・精留条件の検討を行った。その結果、エタノール収率の高い最適蒸留温度50℃が設定され、またこれらの温度における保持時間も一定時間行えばそれ以上の保持は不要なことも判明した。

バイオエタノールの高次利用に関する調査では、(1)エタノールを改質して水素エネルギーとする方法、(2)ガソリンへ添加してガソリンの一部を代替する方法、(3)エンジンそのものを改良して、エタノール100%を従来ガソリンの代替とする方法、(4)エタノールの殺菌作用を活用して土壤汚染除去に用いる方法、などが提案された。(1)、

(2)、(3)のいずれもガソリン代替燃料としての利活用であり、すでに政策的に一部で実用化されているが、技術的に完成されているとは言いがたく、現在も研究開発継続中であることが判明した。この応用分野は将来のガソリン（石油）不足対策として、各国で政策的にも進められることが予想され、注目する必要がある。(4) 土壌汚染消毒への活用は、可能性はあるものの、科学的な検証は未確認であり、実際の効果、コストパフォーマンスなど今後のさらなる調査・検証が必要である。

これらエタノールの高次利用に関して、いずれも法整備の問題があり、科学的にその効果を検証するとともに、コストパフォーマンスの観点からも評価する必要がある。

事業化の際に必須の減圧発酵による連続化システムの確立では、実用化レベル(1 t 規模)における原料粉砕、前処理、糖化・減圧発酵、乾燥、混合など一連の高品質飼料製造工程の連続化を検討した結果、昨年度及び今年度導入した搬送設備などにより、各工程が連結された結果、原料投入から製品取出しまで、ほとんど半自動化が可能となり、事業化実現性に向けた大きな前進といえる。

飼料原料の発酵・蒸留残渣の高品質化の検討では、酵素等の添加及びセラミック膜によるタンパク質分離・濃縮による飼料の高付加価値化を検討した。発酵残渣に種々の酵素を0.1%加えた結果、プロテアーゼとセルラーゼの組み合わせが、飼料の高品質化に寄与する溶解性のタンパク質増加に最も効果のあることが判明した。

発酵残渣の濃縮試験では、セラミック膜分離装置を用いて、タンパク質濃縮技術の有効性を検討した。その結果、セラミック膜を用いた分離操作により、短時間に発酵残渣中の不純物の除去、タンパク質の濃縮が可能となり、高タンパク質飼料、高プロテイン原料の高効率製造に極めて有効なことが実証された。今後は、発酵残渣の特性に適應したセラミック膜の膜径、前処理条件など、最適な膜分離条件の探索が必要である。

得られた高品質飼料の評価法として、雛鳥に対して給餌試験を行った。従来の基礎飼料に減圧発酵残渣の高品質飼料を10%添加した場合、雛鳥（チャンキーオス）の死滅や病気等もなく、安全性が確認され、また体重も約10%優位に増加していることが判明した。

エネルギー収支の評価に関しては、1 t 規模の工程毎に消費されるエネルギー量として、電力量、重油量を測定し、各工程のエネルギー収支を検討した結果、前処理工程、減圧発酵工程における理論的な計算値と実験値はほぼ同等で、良い一致を示したが、蒸留、乾燥などエネルギーを多量に消費する工程においては、実験値が推測値を大きく上回った。エネルギーを多量に使うこれらの工程では、わずかな条件の変動がエネルギー消費量に大きな変動をもたらすため、製造条件の厳密な管理が必要となる。今後これらエネ

ルギーを多量に消費する工程に関して更なるデータの蓄積を重ね、製造条件とエネルギー消費量の関係、再現性などに関して、より一層正確な検証を必要とする。

コストバランスによる採算性の評価に関しては、各種のケーススタディの結果、発酵原料である未利用バイオマスを受け入れる際の多収量米などの購入価格、または食品残渣など委託処理手数料として受け取る価格、及び製品である飼料の付加価値により決定される販売価格が事業収支を大きく左右することが明確になっている。従って、今後事業化に際しては、原料価格（購入価格または委託処理手数料）と飼料の販売価格との相対的な比較により、コストパフォーマンスの良い組合せを選択することが重要となる。なお、未利用バイオマス原料の発酵残渣からは、高品質飼料よりもっと付加価値の高い製品として、プロテイン含有量がより一層多い製品が考えられ、例えば化粧品原料としての可能性がある。これら更なる高付加価値製品が実用化できれば、事業化可能性はより一層高まることが期待される。

結論として、本研究開発の成果を早期に事業化に移行するためには、低コストで高品質飼料を得やすい原料確保のため、幅広く未利用バイオマス原料に関する調査を行い、その結果を実験により検証すること及び得られた高付加価値飼料の客先における評価試験を迅速に行い確認することによって、より採算性の良い原料と製品の組み合わせ（ベストミックス）を探索し、選択することが必須である。そして更なるプロテイン含有量の多い高付加価値製品の可能性を探索・検証し、より早期の実用化に繋げることが期待される。

4-2 工業所有権の取得状況及び对外発表の状況

今年度は特許出願など工業所有権の取得はなかった。

对外発表に関しては、平成23年9月28日（水）に愛知県半田市で開催された「第3回知多地区バイオマス利活用推進プロジェクト会議」において、「未利用バイオマスを利用したアルコール発酵技術の取組み」をテーマに、本多PLから本事業成果の一部を報告、さらに、平成23年10月19日（水）には、独立行政法人国際協力機構（JICA）中部国際センター主催のスリランカ国別研修「行政官のための廃棄物管理」の一環として、本事業の主たる研究実施場所である東海リソース株式会社飛島工場をスリランカの市職員、インターン生が見学し、本多PLからその成果をPRした。今後とも、本研究開発成果を基にして、サポイン事業終了後に実施予定の補完研究などにより、早期事業化を図るとともに、对外発表等を積極的に行ってゆく方針である。

4-3 今後の事業化に向けた取組み

本サポインの研究・開発は、今後国が推進する循環型社会形成に大きく関わるもので、持続可能なオペレーションにより、新たな地域循環型システムの創造を目的として、産官学と地域社会の連携にて、未利用バイオマスを利用したバイオマス・エネルギーと循環資源のマテリアル創出を目指すものである。本サポイン事業の成果を活用した今後

の事業化構想を下記に記述する。

1) 減圧発酵により飼料の価値向上とバイオマス・エネルギー製造のカスケード利用を図り、経済性と生産性の向上が望めるカスケード利用生産システムの実用化へのスキーム

① 非食用の資源作物の有効利用

地域の耕作放棄農地を活用して、多用途米、麦等の糖糠類、イモ類の根菜等を新規に作付けし、食料と競合しない新たな資源作物からバイオエタノールと高機能性タンパク飼料及び高エネルギー飼料原料を製造して、地域内循環資源のループを形成する。

② 食品廃棄物の有効利用

食品廃棄物の分類の内、次に挙げる有効かつ再生可能な循環資源を活用する。

- ・食品製造事業者から排出されるトレースされた原料残渣、成分が安定した規格外品及び廃棄品
- ・食品製造業以外（例：製薬、香料、添加剤等のメーカー）の事業者から排出される安全性の担保が取れた原料残さ
- ・事業系一般廃棄物で、特に流通業から排出される安定的に供給可能な植物性残さ
- ・国が管理する穀類の内、食用に適さない性状となった物、又は廃棄処分になる物等で、毒物等の危険性が無く、工業用としての価値が著しく劣化した物

以上のような新たな未利用バイオマスから①の有効利用と同等なループ形成を行う。

③ 未利用バイオマスからエネルギー化とマテリアル化のカスケード利用

未利用バイオマス原料に乾燥、破砕、分別等の再生処理技術を導入し、より付加価値の向上が望める新技術のエタノール減圧発酵法を利用して、マテリアル（飼料化等）化の機能性向上と高品位な原料化（例：プロテイン）を図り、一方減圧発酵法にて、バイオエタノールの精製も可能となる。すなわち、新しい生産プロセスでエネルギーと飼料等のマテリアルが創出されるカスケード利用が可能となり、より経済性に富んだ新システムの構築ができる。

④ バイオエタノールの有効利用

未利用バイオマスから得られるバイオエタノールはガソリン代替エネルギーとして利用されるが様々な法規制があり、現行の製造コスト増に大きく影響している。従って、本事業としては化石燃料の代替として、カーボンオフセットを目的としたエネルギー利用を推進するため持続可能な循環型エネルギーとして、変性アルコール（飲用に転用できない変性された工業用アルコール）を製造し、公道走行をしない工場内リフト車、農耕作業車、ハウス温風機器、ボイラー等へのエネルギー源として有効利用する。

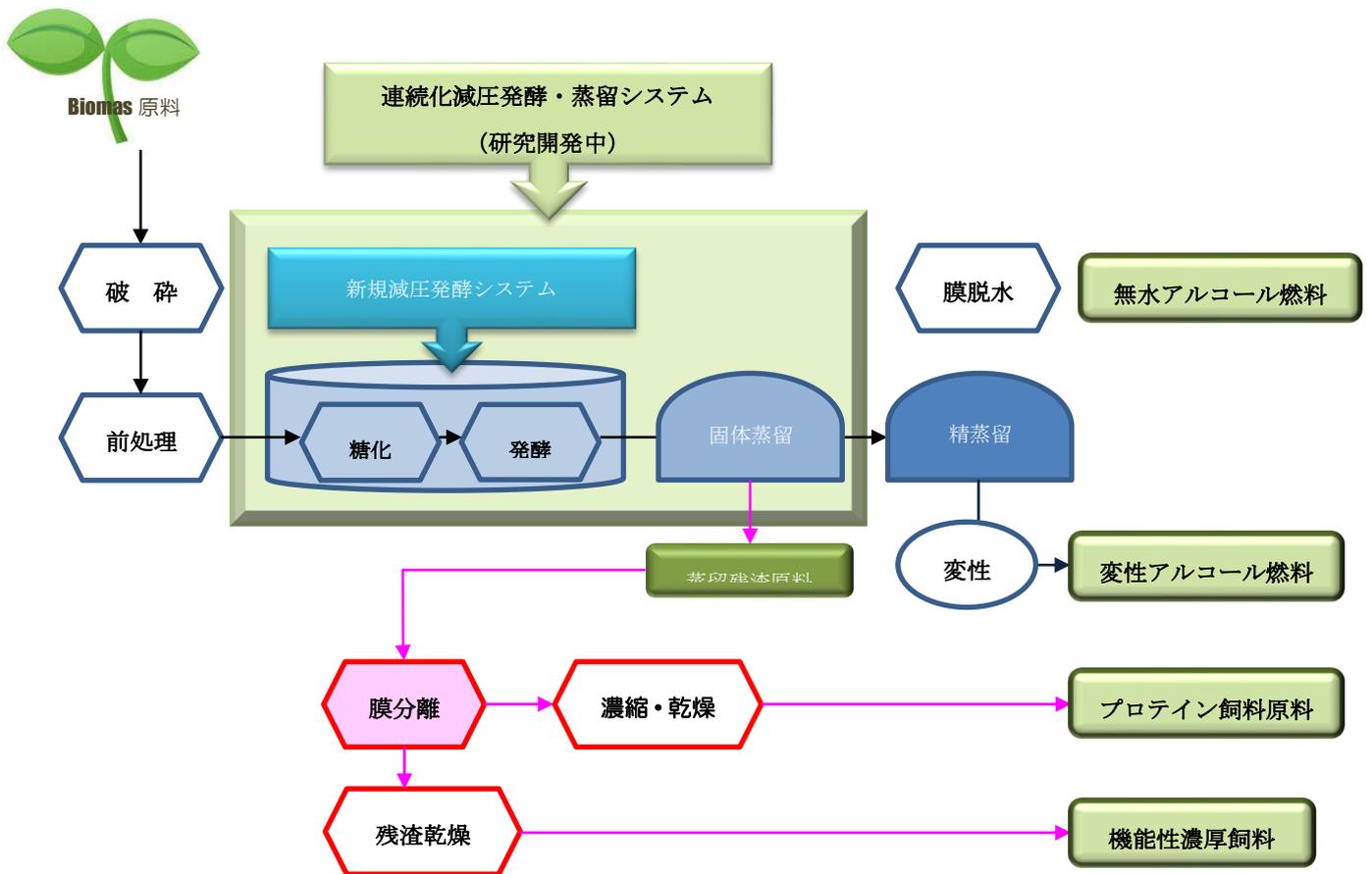


図 4.1 減圧発酵による製造工程

2) 実用化への発展を目的とした今後の展開

① 知多地域バイオマス・ネットワーク事業

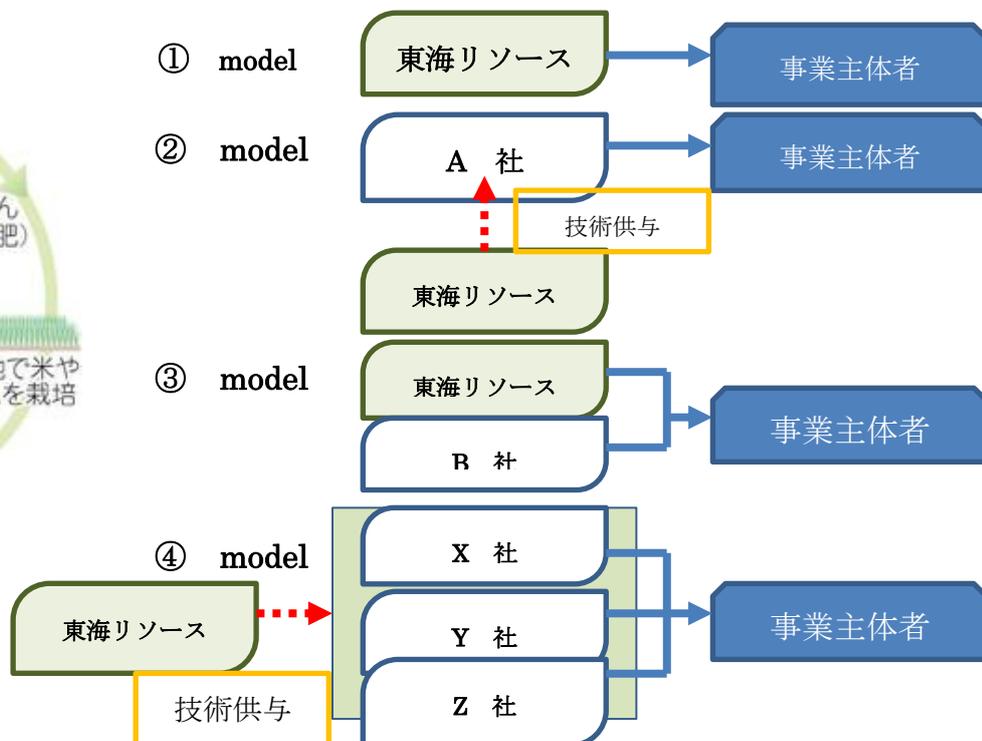
愛知県が推進する上記事業について、本サポイン事業の成果を活用して、東海リソースが単独事業者としてマスタープランを策定したが、初期投資が巨額なことが判明し、現在事業の見直しを行っている。原因は計画予定地が更地のため、新たに施設建屋の建築と環境負荷防止対策費等がかなりのウエイトを占め、事業の継続性・採算性の点で、初期投資の償却期間の延長を余儀なくされている。また、必要な資金調達額も膨大となる。

そこで、次に掲げる対応策を検討中である。

- 第三者の対象地域内事業者を主体者として事業を推進し、事業規模の縮小を含めた代替プランを考えた上で、縮小プランと利用可能な既存建屋が現存し、初期投資予算の圧縮化が可能となる物件をもって事業とし、東海リソースの役割の明確化と事業参画有無も含めた事業プランを早急に作成する。
- 事業主体者を単独とせず、企業連携で各セクションの役割を個々の主体者とし、全体事業の統括を連合にて行う。

- 東海リソースと第三者との合弁事業として事業を推進する。
- 実用化におけるカスケード利用事業を細分化させ、その細分化されたアウトプット側の関係者の分担請負（アウトソーシング）を行い、事業採算性を検証した上で、実行プランを行う。

知多地域バイオマスネットワーク



②東海リソース単独で行う実用化事業

本サポインでの研究開発における将来への可能性分野として、少量生産で高付加価値が望めるプロテイン製造が挙げられる。現在プロテイン供給は海外輸入に頼っているため、非常に高価であり、輸入品として為替リスク、原料由来の商品相場変動リスク等があり、是非とも自給資源に置き換えるべき材料である。

また、プロテインは食料品や化粧品、薬品、栄養補助品等にも幅広く利用されており、安全・安心・安定が最も要求されるため、自国農産物を主原料とした製品として、少量生産でもその高付加価値から収益への貢献も大きく、事業採算性が優位になる。

従って、アウトプット側の需要にもよるが、小規模プラントでも実用化が可能となる場合を考慮して、単独事業しての実用化を行う。

③ 新規減圧発酵システムの技術供与とシステム・コンサルティング

自ら事業主体者として実用化を行うのではなく、第三者への本技術の供与、若しくは使用権及び販売権を譲渡し、実用化事業の推進を図る。また様々な地域未利用バイオマスをフィード対象物とするカスケード利用を本技術に適用させるべく、全体システムの各オペレーションを地域事情に合わせた事業モデルとしてコンサルティング業務を行う。