

令和元年度環境省委託業務 成果報告書

令和元年度 脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環
システム構築実証事業

非可食バイオマスを活用した国産バイオマスプラスチック
製造実証事業

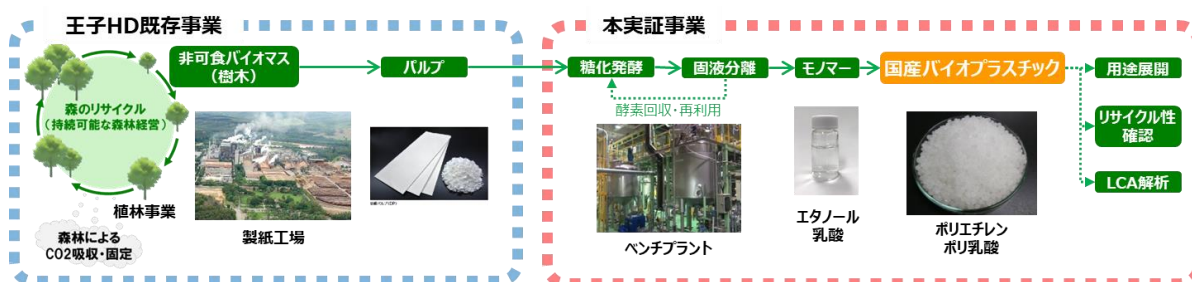
令和2年3月

(代表実施者) 王子ホールディングス株式会社

概要（日本語）

バイオマスプラスチック普及を目的として、国内で調達可能なパルプを原料としたポリエチレン、ポリ乳酸製造実証に着手した。製造方法としては、王子ホールディングスが有する平行糖化発酵や酵素回収技術の特徴としたパルプ由来燃料用エタノール製造技術を応用して得られるエタノールや乳酸をバイオマスプラスチック原料モノマーとして生産し、得られたモノマーを合成してバイオマスプラスチックに変換する計画とした。

今年度、ポリエチレンについてはエタノールからエチレンへと変換するラボ試験機の基本設計とエチレン製造用として要求品質を満たすエタノール精製方法について検討し、ポリ乳酸についてはパルプを原料とした乳酸生産および精製の検討と、得られたサンプルから実際にポリ乳酸の試作を行った。



LCA 解析では、ポリエチレンとポリ乳酸のそれぞれについて既存の石油由来ポリエチレンとトウモロコシ由来ポリ乳酸と比較し、CO2 削減効果の推計について評価条件や評価範囲を設定した。

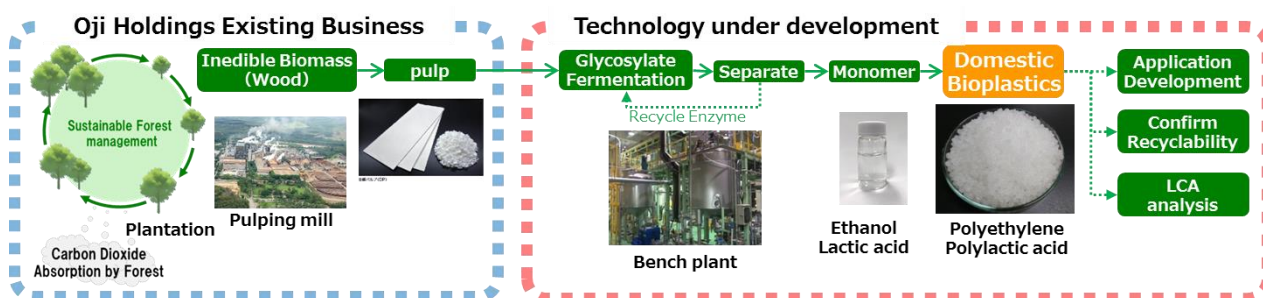
また、来年度以降に試作予定のバイオマスプラスチックサンプルのリサイクル性について評価方法の検討を開始し、あわせて本実証で得られるバイオマスプラスチックのマーケティング対象製品についても候補を設定した。

Summary

With the aim of increasing the use of biomass plastics, we have started a new project producing and demonstrating polyethylene and polylactic acid derived from pulp that is provided domestically.

In this project, ethanol and lactic acid are produced as raw material monomers for biomass plastics utilizing Oji Holdings' pulp-derived fuel ethanol production technology including parallel saccharification/fermentation and enzyme recovery. This technology allows us to produce biomass plastics by polymerizing the produced monomers and converting them into ethanol and lactic acid.

In this fiscal year, we demonstrated the basic design of a tester that converts ethanol into ethylene to make polyethylene and a method of ethanol purification that meets the quality standards for ethylene production. For polylactic acid, we demonstrated lactic acid production and purification using pulp as a raw material and actually produced a trial piece of polylactic acid from the obtained lactic acid.



In LCA analysis, polyethylene and polylactic acid were compared with existing petroleum-derived polyethylene and corn-derived polylactic acid, respectively. Then, evaluation conditions and ranges were set for estimating the CO₂ reduction effect.

We have also started to examine a method for evaluating the recyclability of our biomass plastic samples that are scheduled to be prototyped from next fiscal year onward and have also determined potential products for marketing our biomass plastics.

目次

概要（日本語）	2
概要（英語）	3
目次	4
1. 本文	6
1-1 非可食バイオマスを活用した国産バイオマスプラスチック製造実証事業	6
1-1-1 本事業の背景および目的	6
1-1-2 従来技術	7
1-1-2-1 並行糖化発酵	7
1-1-2-2 酵素回収再利用	8
1-1-3 本事業の解決すべき技術課題	9
1-1-3-1 非可食バイオマス由来 PE 樹脂	9
1-1-3-2 非可食バイオマス由来 PLA 樹脂	9
2. 研究開発項目ごとの成果	11
2-1 非可食バイオマス由来 PE 樹脂に関する技術開発（王子ホールディングス）	11
2-1-1 エチレン製造ベンチプラントの検討	11
2-1-2 エチレン用バイオエタノール精製検討	14
2-1-2-1 パルプ由来バイオエタノール製造	14
2-1-2-1-1 10L ジャーによる再確認試験	14
2-1-2-1-2 50L ジャーによるエタノールサンプル製造	16
2-1-2-2 パルプ由来バイオエタノール精製	17
2-1-2-2-1 2 段蒸留によるエタノールサンプル精製	18
2-1-2-2-2 1 段蒸留によるエタノールサンプル精製	28
2-1-2-2-2 蒸留検討まとめ	34
2-2 非可食バイオマス由来 PLA 樹脂に関する技術開発（王子ホールディングス）	35
2-2-1 乳酸発酵条件の検討	35
2-2-1-1 菌株スクリーニング	35
2-2-1-2 2L ジャーによる確認試験	36
2-2-1-3 2L ジャーによる攪拌条件検討	37
2-2-1-4 2L ジャーによる窒素量、温度条件検討	38
2-2-1-5 高温生産菌株のスクリーニング	40
2-2-2 乳酸精製条件の検討	41
2-2-2-1 30L ジャーによる乳酸培養液サンプル作成	41
2-2-2-2 乳酸培養液サンプル精製条件検討	42
2-2-3 ポリ乳酸合成検討	44
2-2-3-1 乳酸脱水ーオリゴマー合成ーラクチド化	44
2-2-3-2 ラクチド重合によるポリ乳酸化	46

2-3	LCA解析（双日プラネット）	49
2-3-1	C02 削減効果推計に関する評価条件・評価範囲の設定	49
2-3-1-1	評価単位の設定	49
2-3-1-1-1	評価対象製品	49
2-3-1-1-2	機能と機能単位	49
2-3-1-1-3	基準フロー	49
2-3-1-2	評価範囲の設定	50
2-3-1-3	評価対象とした環境影響範囲	51
2-3-1-4	ポリエチレンに関する評価条件（評価対象製品）	51
2-3-1-4-1	原材料調達	51
2-3-1-4-2	生産（セルロース～PE の生産）	51
2-3-1-5	ポリ乳酸に関する評価条件（評価対象製品）	53
2-3-1-5-1	原材料調達	53
2-3-1-5-2	生産（セルロース～PLA の生産）	53
2-3-2	C02 削減効果の推計	55
2-3-2-1	PE の C02 排出量削減効果推計	55
2-3-2-1-1	評価対象製品の C02 排出量	55
2-3-2-1-2	比較製品の C02 排出量	56
2-3-2-1-3	非可食セルロース由来ポリエチレンによる C02 排出量削減効果の推計結果	56
2-3-2-2	PLA の C02 排出量削減効果推計	58
2-3-2-2-1	評価対象製品の C02 排出量	58
2-3-2-2-2	比較製品の C02 排出量	58
2-3-2-2-3	非可食セルロース由来ポリ乳酸による C02 排出量削減効果の推計結果	59
2-3-3	普及段階における C02 削減効果の算定方法の検討	60
2-4	リサイクル性評価（双日プラネット）	61
2-4-1	リサイクル性評価手法	61
2-5	マーケティング（双日プラネット）	62
2-5-1	バイオマスプラスチック概観	62
2-5-1-1	バイオマスプラスチックの分類	62
2-5-1-2	バイオマスプラスチックの生産能力	63
2-5-2	バイオポリエチレン	66
2-5-2-1	製造企業及び実証・検討企業	66
2-5-2-2	用途	68
2-5-2-3	今後の見通し	68
2-5-3	ポリ乳酸	69
2-5-3-1	製造企業及び実証・検討企業	69
2-5-3-2	用途	74
2-5-3-3	今後の見通し	74
2-5-4	今後のマーケティング方針	74
2-5-4-1	バイオポリエチレンのマーケティング方針	74
2-5-4-2	ポリ乳酸のマーケティング方針	74
3.	研究発表・講演、文献、特許などの状況	75

1. 本文

1-1 非可食バイオマスを活用した国産バイオマスプラスチック製造実証事業

1-1-1 本事業の背景及び目的

日本政府が200万t/年のバイオマスプラスチックの普及を掲げている中、既存石化樹脂の国内流通量の24%がポリエチレンであり、バイオポリエチレンが日本におけるバイオマスプラスチック普及のキーアイテムであると言える。一方、バイオポリエチレンはBraskem社（ブラジル）、ポリ乳酸はNatureWorks（アメリカ）、海正生物材料（中国）などが生産して世界中の需要に対応しているが、その生産量は10～20万t/年と限定的であり、日本への供給量が不足していることも普及における問題点であると考えられる。

このような状況下でバイオマスプラスチック普及の目標量（200万t/年）を達成するためには、日本市場に特化した新たなバイオマスプラスチック供給システムが必要だが、十分な量を確保可能とするバイオマス資源が見当たらないことから、国産でのバイオマスプラスチックの製造の実現は困難とされてきた。

しかし、今回、国内で調達可能なバイオマス原料として、製紙会社が製造するパルプを原料としたバイオプラスチック製造に着目した。近年、国内パルプ製造はスマートフォンやタブレット普及が進む中、特に印刷用紙の需要が減少しており、日本国内で調達可能なバイオマスとしては、十分な量が確保可能と考えられる。そこで、本実証事業はパルプからのバイオプラスチック製造技術開発において、いくつかの技術的課題を克服することにより、日本市場向けに特化した、国産バイオマスプラスチック供給を実現することを目的とした。

1-1-2 従来技術

王子ホールディングスでは2015年4月から2018年3月までNEDO事業によるバイオ燃料開発「木本バイオマスを原料とする日本の持続可能性基準に適合するセルロース系エタノールの一貫生産技術開発及び事業性評価」を実施してきた¹。

1-1-2-1 並行糖化発酵

当該事業ではセルロースを酵素（セルラーゼ）によってグルコースに分解しつつ、同一の反応槽で酵母によってグルコースをエタノールに変換する並行糖化発酵工程（図1-1-2-1-1下）を構築した。

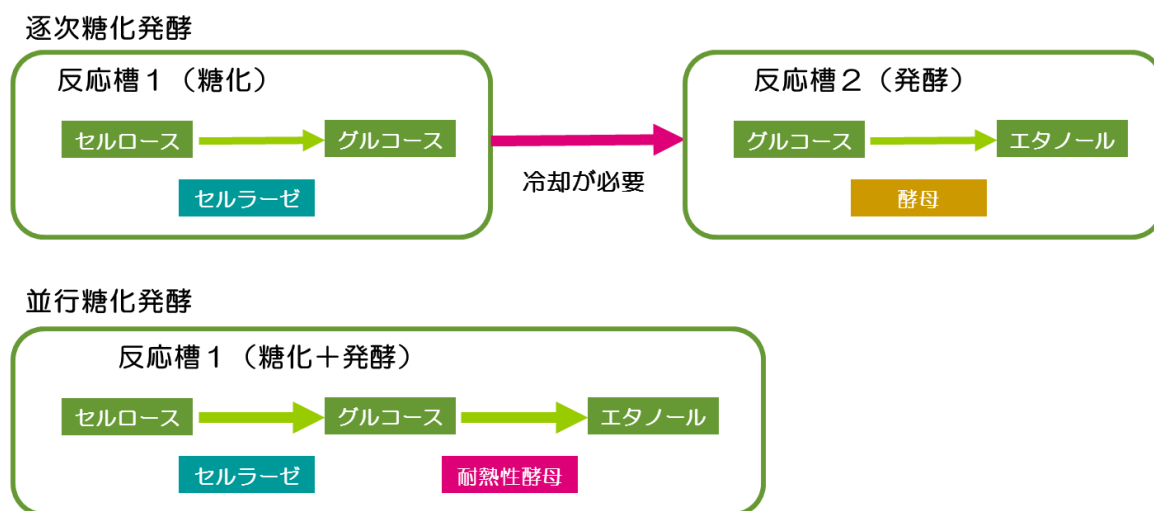


図1-1-2-1-1 セルロース由来エタノール製造方法

一般的にセルラーゼによるセルロースの分解では、生成するグルコースが酵素反応を阻害する生成物阻害（図1-1-2-1-2）が発生する為、従来の逐次糖化発酵では原料濃度を低く設定する必要があったが、王子HDで構築した並行糖化発酵法では生成したグルコースが速やかにエタノールに変換される為、生成物阻害が発生せず、反応時間の短縮と、原料濃度を高めることが可能となった。

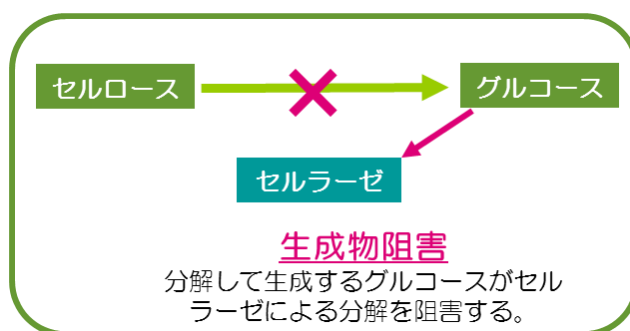


図1-1-2-1-2 セルラーゼにおける生成物阻害

¹ 出展：NEDO 成果報告書 https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201708/20170000000768.html

また、セルラーゼは通常の至適温度が 50℃であり、逐次糖化発酵では発酵反応時に移行する際、冷却が必要であった。さらに並行糖化発酵においても酵母が生育可能な 30℃以下の温度では反応時間が長くなる問題点があったが、30℃以上でも発酵が可能な耐熱性酵母をスクリーニングすることで、並行糖化発酵時の温度を 30℃以上で行うことを可能とした。これらにより、原料濃度や反応時間を改善することが可能となった。（表 1-1-2-1-3）。

表 1-1-2-1-3 逐次糖化発酵と並行糖化発酵の処理条件

	原料濃度	反応温度	反応時間
従来法 (逐次糖化発酵)	3～5%	糖化：50℃ 発酵：30℃以下	糖化：72 時間 発酵：24 時間
並行糖化発酵	10～15%まで可能	30～40℃	33～48 時間

1-1-2-2 酵素回収再利用

現在のバイオマスプラスチックは主にトウモロコシやサトウキビなど、可食性の植物から得られる糖（グルコースやシュクロース）を原料としている。セルロースもその構成単糖はデンプンと同じくグルコースだが、でん粉を分解する酵素（アミラーゼ）と比較して、大量の酵素が必要だった。

そこで、並行糖化発酵の反応液からエタノールだけを分離し、酵素と酵母を回収して再利用する工程を構築した（図 1-1-2-2-1）。図 1-1-2-2-2 に示すように酵素はほぼ完全に回収されており、この方法を採用することで、使用する酵素量を大幅に削減することが可能となった。

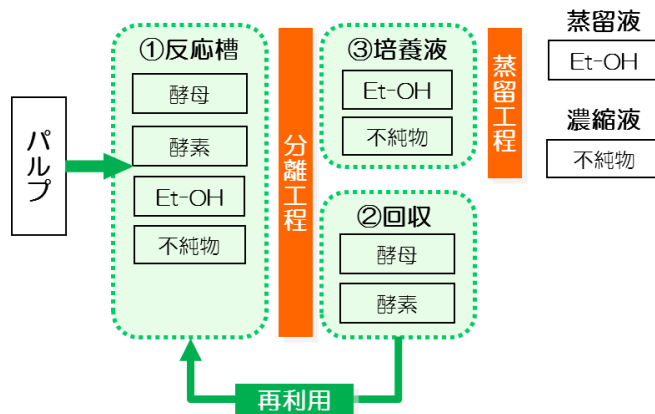


図 1-1-2-2-1 エタノール生産における酵素回収工程

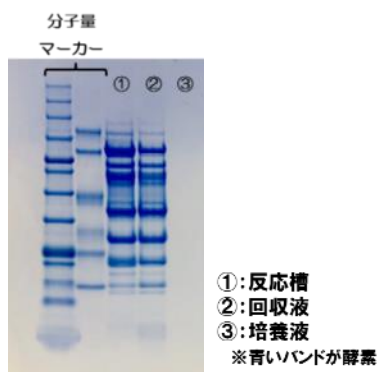


図 1-1-2-2-2 酵素回収性確認

1-1-3 本事業の解決すべき技術課題

前章に記載の従来技術を応用し、非可食バイオマスであるパルプから、ポリエチレン・ポリ乳酸を製造するために解決すべき技術課題を検討した。

1-1-3-1 非可食バイオマス由来 PE 樹脂

NEDO 事業ではセルロースから燃料用途としてのバイオエタノール製造を検討し、品質確認や製造コスト算出を行ってきたが、バイオエタノールからポリエチレン製造に関する知見はない。

技術的には図 1-1-3-1-1 に示すように、エタノールを脱水して得られるエチレンガスからポリエチレンは製造可能だが、バイオエタノールやエチレンに含まれる不純物が触媒反応に影響することが予想される。そこで、パルプから実際に得られたバイオエタノールを精製し、エチレンガスへと変換した後に、ポリエチレンを合成し、品質や収率などを確認することとした。今年度はエタノールからエチレンガスを製造するベンチプラントの基本設計と、ベンチプラントに供給するバイオエタノールをパルプから生産する培養条件を検討し、精製条件の検討も開始した。

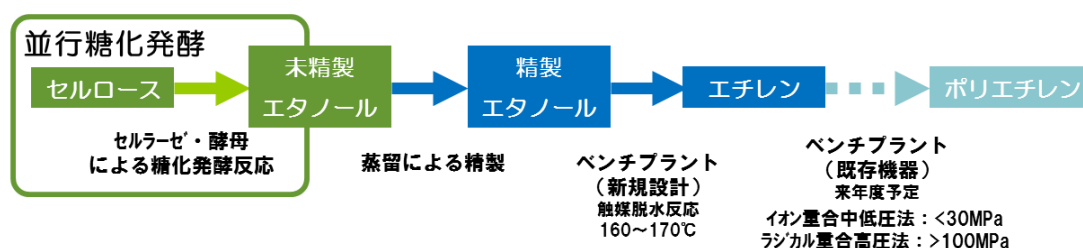


図 1-1-3-1-1 ポリエチレン製造フロー

1-1-3-2 非可食バイオマス由来 PLA 樹脂

NEDO 事業では反応槽にセルラーゼと酵母を添加することでエタノールを生産していたが、酵母の代わりに乳酸菌を添加することで、乳酸の生産が理論的には可能である（図 1-1-3-2-1）。事前検討にてラボレベル（250ml 三角フラスコ）ではパルプからの乳酸生産を確認しているが、生産性や光学純度などの品質を確認しつつ、収率などの生産性を確認することとした。

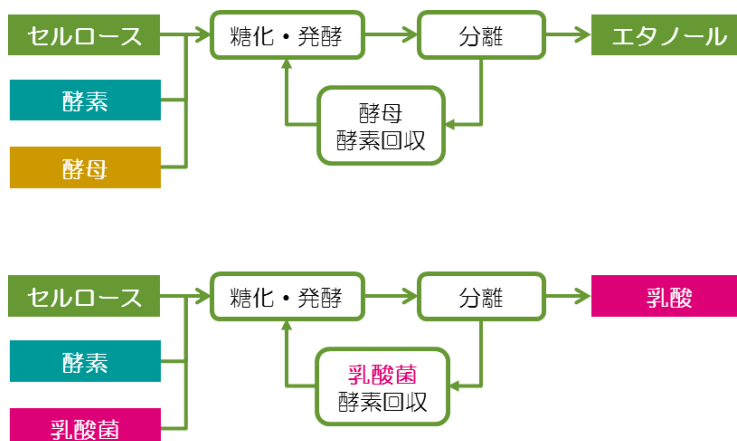


図 1-1-3-2-1 エタノール・乳酸生産フロー

得られた乳酸は図 1-1-3-2-2 に示すように、精製した後にラクチドを経由してポリ乳酸を合成することが可能だが、乳酸培養液に含まれる不純物が触媒反応に影響することが予想される。そこで、パルプから実際に得られた乳酸培養液を精製し、ラクチドへと変換した後に、ポリ乳酸を合成し、品質や収率などを確認することとした。今年度は数 L スケールにおける培養条件の検討を開始し、得られた培養液からの乳酸精製とラボレベルでのポリ乳酸試作を行った。

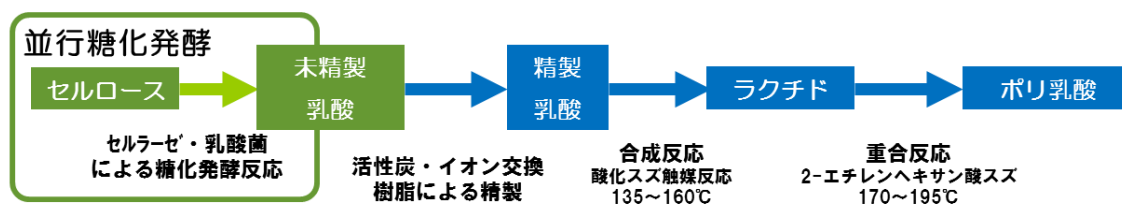


図 1-1-3-2-2 ポリ乳酸製造フロー

２．研究開発項目ごとの成果

２－１ 非可食バイオマス由来 PE 樹脂に関する技術開発

２－１－１ エチレン製造ベンチプラントの検討

エタノールからエチレンを製造するベンチプラントは、実証規模においてコスト試算を可能とし後段のポリエチレン合成ベンチプラントにおいても必要な量・品質を満たすように基本仕様を設定した（表２－１－１－１）。本機器は王子から第一実業社にリース契約にて発注を行う予定で、基本設計（図２－１－１－２）はペトロロン社（米）、製作は圧力容器や高圧ガス製造装置の製作が可能な日本鏡板工業社ベトナム工場にて行うこととした。

表２－１－１－１ ベンチプラント基本仕様

項目	条件
生産量	2.5kg/hr (30kg/バッチ)
運転条件	20 バッチ/年
要求品質	
エチレン純度 (%)	>99.95
露点 (°C)	-70°C
O ₂ (ppm)	<5.0
N ₂ (ppm)	<50
CO ₂ (ppm)	<10
CO (ppm)	<0.1
COS (ppm)	<0.1
C ₂ H ₂ (ppm)	<0.1
圧力 (MPa)	4-10

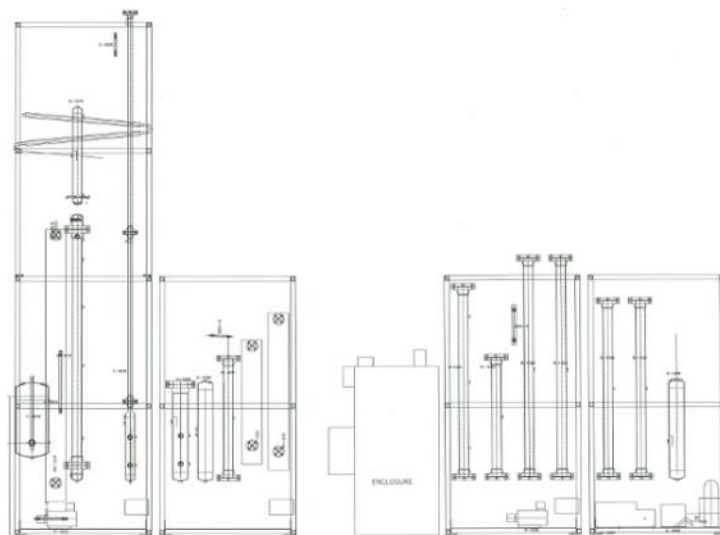


図２－１－１－２ エチレンラボ試験機基本設計図

本ベンチプラントは日本国内の関連法規として、消防法、高圧ガス製造法、圧力容器に該当する為、高圧ガス保安協会、県庁、消防署などへの届け出が必要となる。そこで、ガス製造の知見、諸手続の経験がある高圧ガス工業社事業所を設置場所候補地として選定中。

製作場所である日本鏡板ベトナム工場（写真２－１－１－４～７）にて詳細設計についての打合せを実施した（2/24-25）。



写真２－１－１－４ 工場概観

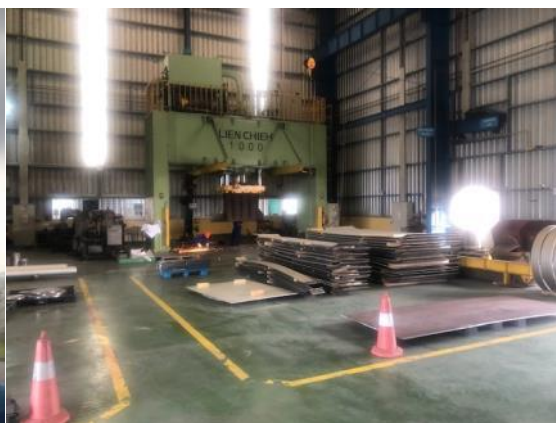


写真２－１－１－５ プレス機



写真２－１－１－６ 溶接作業状況



写真２－１－１－７ 圧力容器製造

打合せの結果、ユーティリティー使用量（表２－１－１－８）、供給エタノールタンク容量（150L）、防爆仕様（IECex Zone2）、制御プログラム、予備品（パッキン、ガスケット、ボルトナット類、触媒）などを確認した。

表２－１－１－８ ユーティリティー使用量

項目	使用量
蒸気	8.2～9bar x 2.7kg/hr
冷却水	5bar x 0.08m3/h、30℃以下
冷水	4bar x 0.04m3/h、10℃以下
純水	7bar x 216m3/h
窒素	6-7bar x 900kg/week
水素・窒素混合ガス	5-6bar x 15m3/5h/batch
電気	100/200V

今回の打合せ後、概算見積を算出予定。発注後、プロセス最終確認（1ヶ月、ペトロソ）、図面作成（1ヶ月、日本鏡板工業）、製作（5ヶ月、日本鏡板工業）、輸送（1ヶ月）、搬入据付（1ヶ月、王子）、試運転（1ヶ月、ペトロソ・王子）にて行う為、10ヶ月が必要（表２－１－１－９）

表 エチレンラボ試験機稼働スケジュール

20/3	4	5	6～10	11	12	21/1	2	3
見積	★発注							
	最終確認	図面作成	製作	輸送	据付	試運転	試験開始	

2-1-2 エチレン用バイオエタノール精製検討

エチレン製造用のエタノールは NEDO 事業にて開発した燃料用バイオエタノール製造法を用いることとした。今年度はパルプからのバイオエタノール製造条件の再確認と、得られたバイオエタノールサンプル精製条件を検討した。

2-1-2-1 パルプ由来バイオエタノール製造

パルプ由来バイオエタノール製造の検討は、パルプ種類や反応温度、時間、pH 酵素種類などの検討を来年度も継続して行う予定だが、本年度は NEDO 事業にて開発したバイオエタノール製造法を再確認するために、王子製紙 国内工場生産の広葉樹パルプを原料としたエタノール生産を試みた。

2-1-2-1-1 10L ジャーによる再確認試験

NEDO 事業ではラボスケールでの結果をパイロットプラント (20m³) の連続運転にて再現可能であることを確認している。このことから、10L ジャーを用い、パルプを原料とした再確認試験を実施した。

2-1-2-1-1 a 実施内容及び成果

(方法)

ジャーファメンター (容量: 10L) を用いた糖化発酵試験を行い、48 時間後の槽内エタノール濃度を計測した。試験条件は、基質: 広葉樹クラフトパルプ所定濃度、酵素: 所定量、初期酵母量: 60ml、pH: 4.5 (6N NaOH で調整)、温度: 30℃とし、酵母は *Issatchenkia orientalis* MF121 株を使用した。

(結果)

48 時間後の槽内エタノール、グルコース、キシロース濃度、菌数を表 2-1-2-1-1 a-1 に示す。パルプから酵素分解によって生成したグルコースは酵母によって完全に消費され、エタノールへと変換していることを確認した。Lot2 に比べ、Lot1 はエタノール濃度が低いが、培養中のトレンド (図 2-1-2-1-1 a-2、2-1-2-1-1 a-3) を確認したところ、pH 調整用の NaOH ラインが閉塞し、培養開始 10 時間付近から pH 調整が不十分であったことが確認された。この結果、溶存酸素も 18 時間付近から上昇しており、嫌気状態で行われる発酵反応が停止ししていたと考えられた。

表 2-1-2-1-1 a-1 再現性確認試験結果

	エタノール (%)	グルコース (%)	キシロース (%)	菌数 (cfu/ml)
121-Lot1	2.2	0.0	0.6	6.9 x 10 ⁸
121-Lot2	2.7	0.0	0.5	5.7 x 10 ⁸

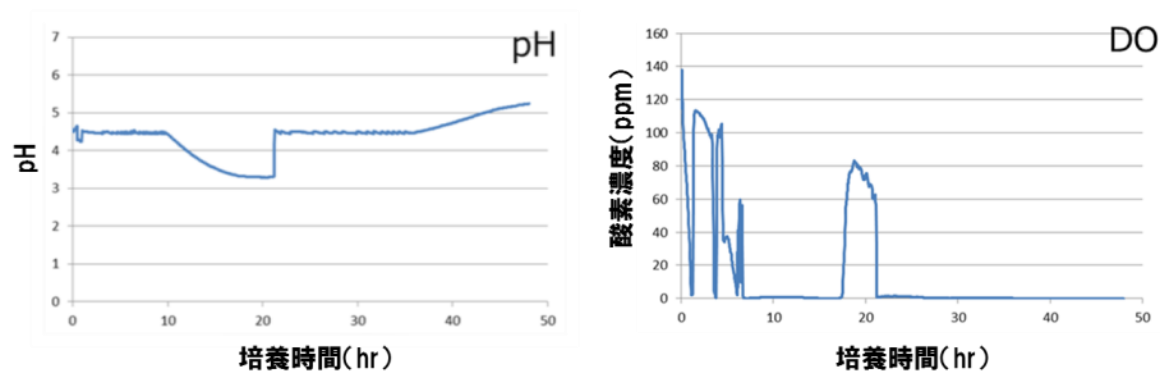


図 2 - 1 - 2 - 1 - 1 a - 2 121-Lot1 培養時の経時変化

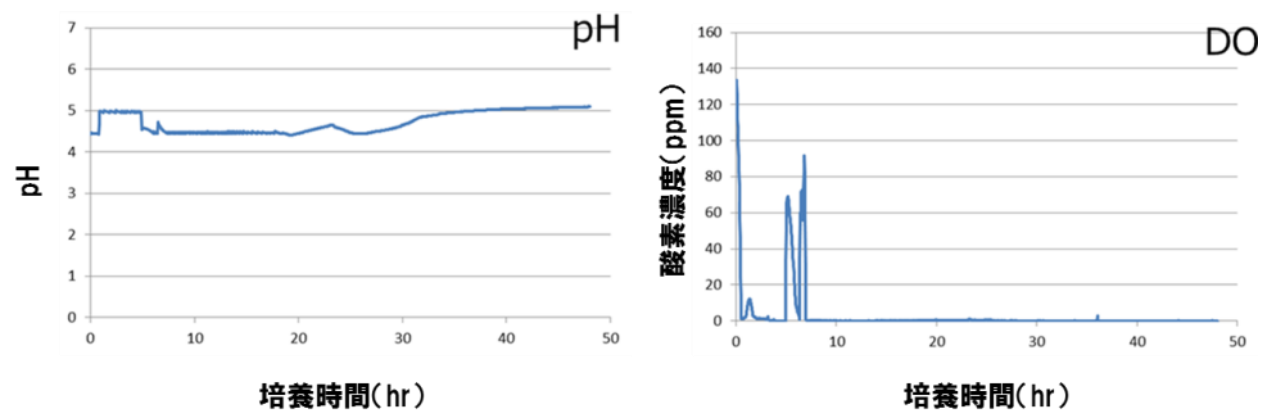


図 2 - 1 - 2 - 1 - 1 a - 3 121-Lot2 培養時の経時変化

2-1-2-1-2 50L ジャーによるエタノールサンプル製造

前章で、5L ジャーでのパルプ由来バイオエタノール製造が確認できたので、精製用のサンプル作成として 50L ジャーでのサンプル製造を実施した。

2-1-2-1-2 a 実施内容及び成果

(方法)

ジャーファメンター（容量：50L）を用いた糖化発酵試験を行い、所定時間後の槽内エタノール濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ所定濃度、酵素：所定量、初期酵母量：300ml、pH：4.5（6N NaOH で調整）、温度：30℃とし、酵母は *Issatchenkia Orientaris* MF121 株を使用した。

(結果)

所定時間後の槽内エタノール、グルコース、キシロース濃度、菌数を表 2-1-2-1-1 a-2 に示す。Lot3 ではグルコースが少量残存し、エタノール濃度も低かったが、Lot4, 5 ではパルプから酵素分解によって生成したグルコースは酵母によって完全に消費され、エタノールへと変換していることを確認した。

表 2-1-2-1-1 a-2 再現性確認試験結果

	エタノール (%)	グルコース (%)	キシロース (%)	菌数 (cfu/ml)
121-Lot3	2.2	0.1	1.0	4.7×10^8
121-Lot4	3.6	0.0	0.7	1.2×10^9
121-Lot5	4.3	0.0	1.0	4.7×10^8

2-1-2-2 パルプ由来バイオエタノール精製

エチレン製造ベンチプラントでは表2-1-2-2-1に示す様な品質のエタノールを投入する必要がある。前章で精製検討用のエタノール培養液サンプルが得られた為、精製・濃縮を行うための蒸留条件を検討した。

表2-1-2-2-1 ベンチプラント基本仕様

項目	条件
密度 (kg/m ³ 、20℃)	<811.0
アルコール濃度 (%V/V)	>95
酸度 (ppm)	<20
不揮発物 (ppm)	<30
アセトアルデヒド (ppm)	<30
メタノール (ppm)	<50
酢酸エチル (ppm)	<80
イソプロパノール (ppm)	<20
N-プロパノール (ppm)	<20
N-ブタノール (ppm)	<20
アセタール (ppm)	<50
高級アルコール (ppm)	<100
硫黄 (ppm)	<0.8

蒸留方法は図2-1-2-2-2に示すように、単蒸留後にて濃縮後、精製を行う2段蒸留と一度に濃縮と精製を行う1段蒸留を検討した

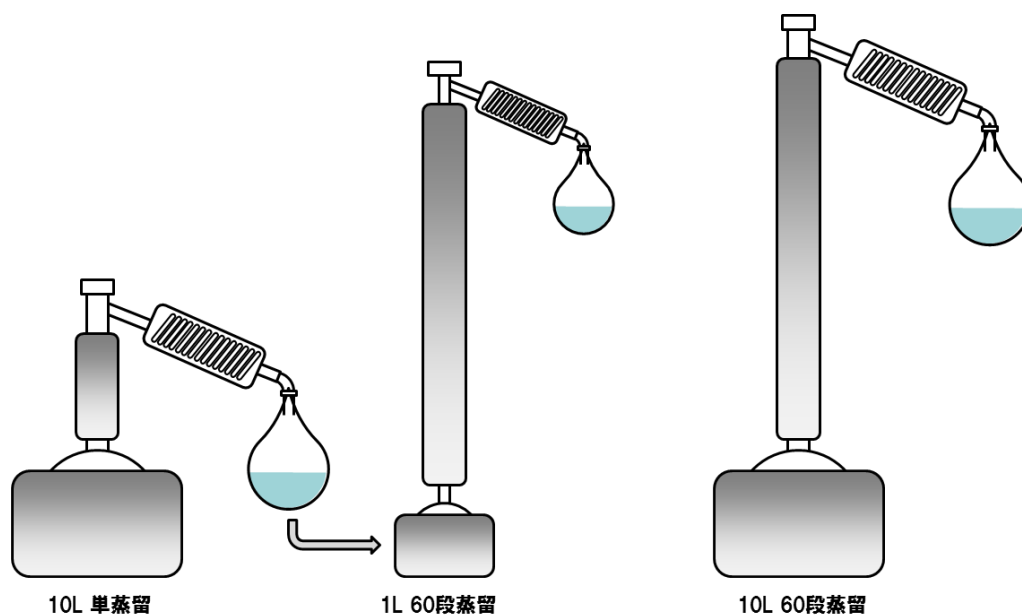


図2-1-2-2-2 蒸留方法
(左：2段蒸留、右：1段蒸留)

2-1-2-2-1 2段蒸留によるエタノールサンプル精製

エタノール中の沸点の近い不純物を取り除くためには、多段の蒸留塔が必要となる。大量のエタノールを一度に精製・濃縮を行う1段蒸留と比較して、2段蒸留では蒸留塔が2本必要になるが、後段の精密蒸留塔を小さくすることが可能となることから、2段蒸留での精製を確認した。

2-1-2-2-1-1 単蒸留

2-1-2-2-1-1 a 実施内容及び成果

(方法)

単蒸留装置（容量：20L）を用いた単蒸留試験を行い、所定時間後のエタノール濃度を計測した。試験条件は、元液：121-Lot1 サンプル 8kg、エタノールの沸点は78.3℃であることから、塔頂温度 80℃に設定する為、加熱温度 110℃とし、後段の60段蒸留の原料を作成した。

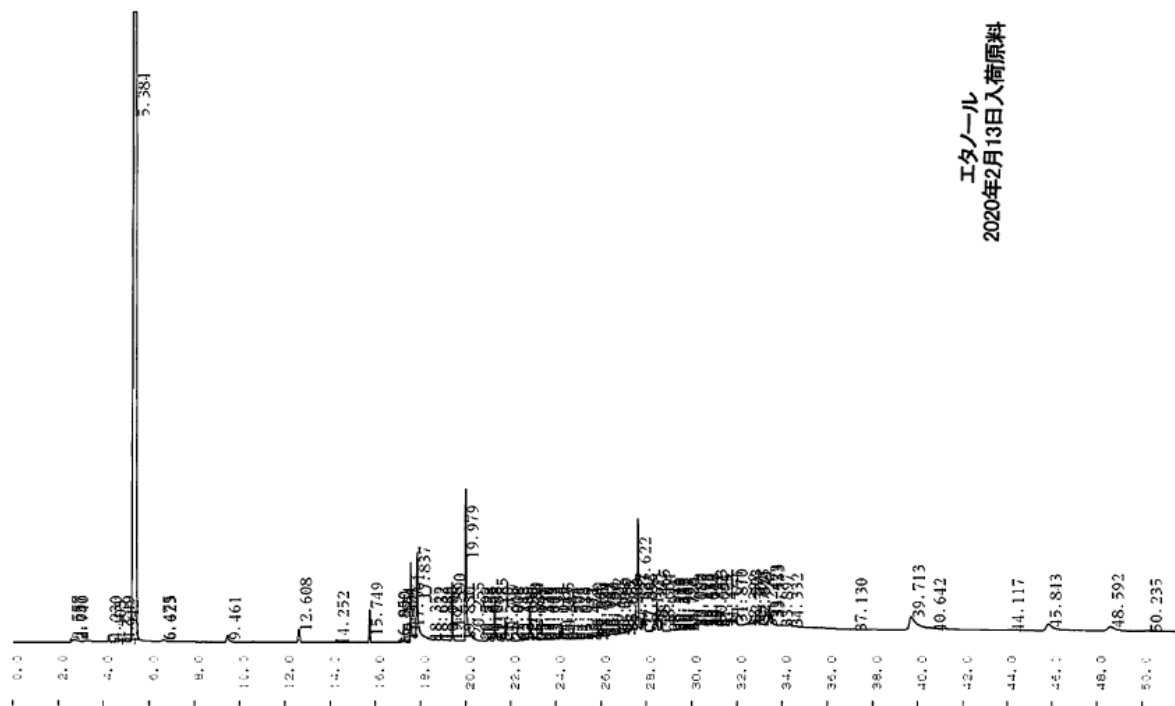
(結果)

所定時間後のエタノール濃度、サンプル収率を表2-1-2-2-1-1 a-1に示す。水分が多いため流出速度が安定せず、塔頂温度は79.7～100.1℃となった。Fr.4と蒸留残液ではエタノール濃度が0であり、Fr.1～3にエタノールは全て回収されたと考えられる。

表2-1-2-2-1-1 a-1 単蒸留試験結果

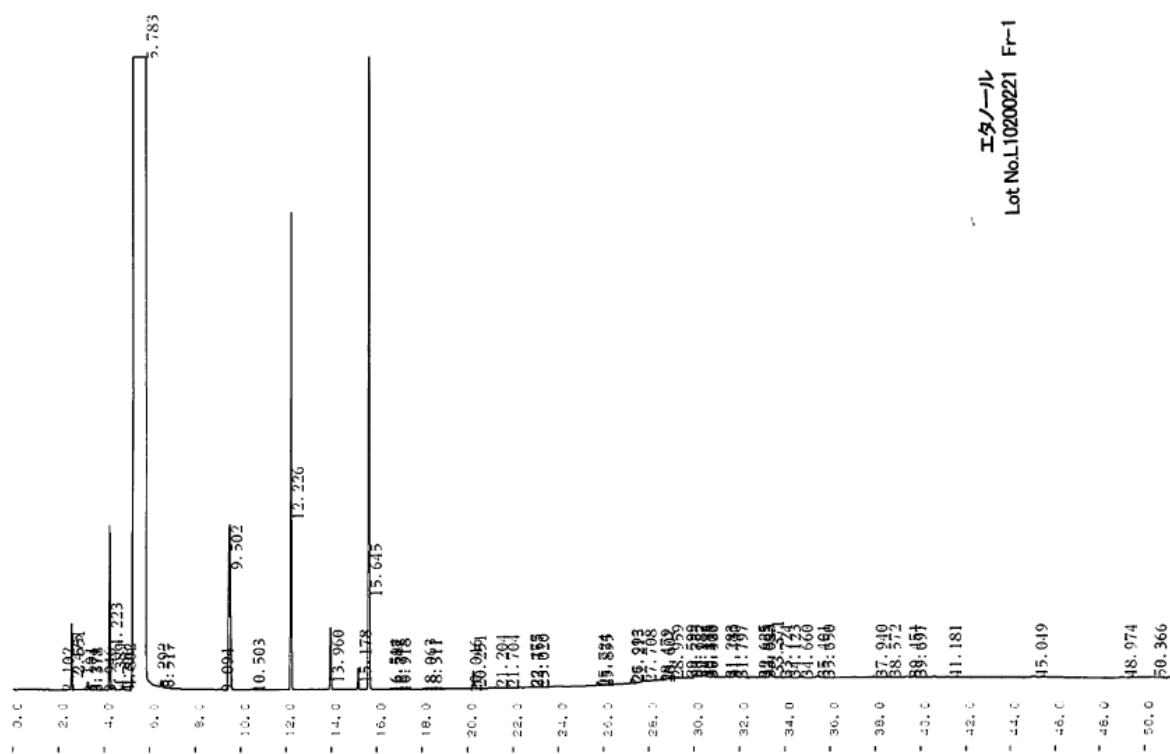
	エタノール(%)	サンプル量(g)	加熱温度	下部温度	塔頂温度
元液	4.9	8,010			
Fr.1	76.1	183	110℃	100.6℃	79.7℃
Fr.2	67.2	16	110℃	100.7℃	100.1℃
Fr-3	80.7	44	110℃	101.4℃	81.8℃
Fr-4	0.0	10	110℃	101.3℃	98.8℃
残液	0.0	7,699			

元液および単蒸留の各フラクションのGC分析結果を図2-1-2-2-1-1 a-2～7に示す。元液（図2-1-2-2-1-1 a-2）では多くの不純物ピークが観察されていたが、Fr.1～3では20分以降のピークが減少し、5.7分付近のエタノールを示すピークが増大している（図2-1-2-2-1-1 a-3～5）。Fr.4ではエタノールは少し残っているが、20分以降の高沸点不純物が多く、残液にはエタノールもなく、高沸点不純物だけが残存していた（図2-1-2-2-1-1 a-6～7）。2段目の蒸留処理はFr.1～3をまとめて処理することとした（図2-1-2-2-1-1 a-8）。



エタノール
2020年2月13日入荷原料

図 2-1-2-2-1-1 a-2 元液 GC チャート



エタノール
Lot No.L10200221 Fr-1

図 2-1-2-2-1-1 a-3 Fr.1 GC チャート

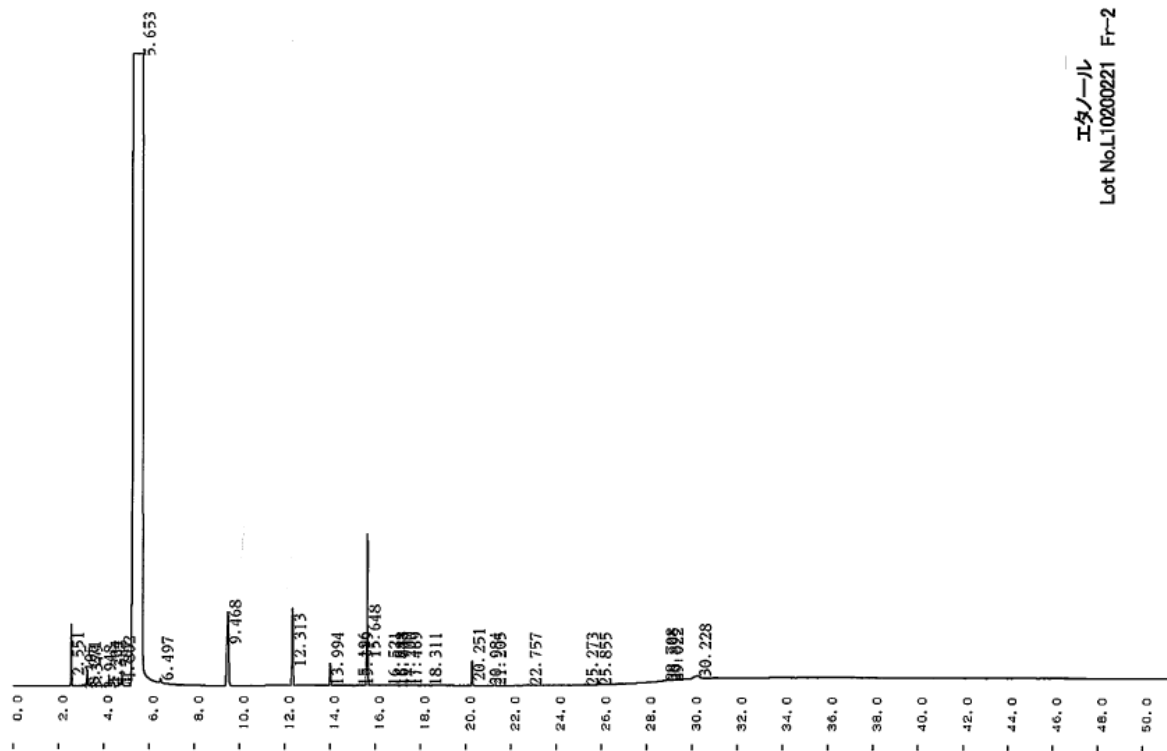


図 2-1-2-2-1-1 a-4 Fr. 2 GC チャート

エタノール
Lot No.L10200221 Fr-2

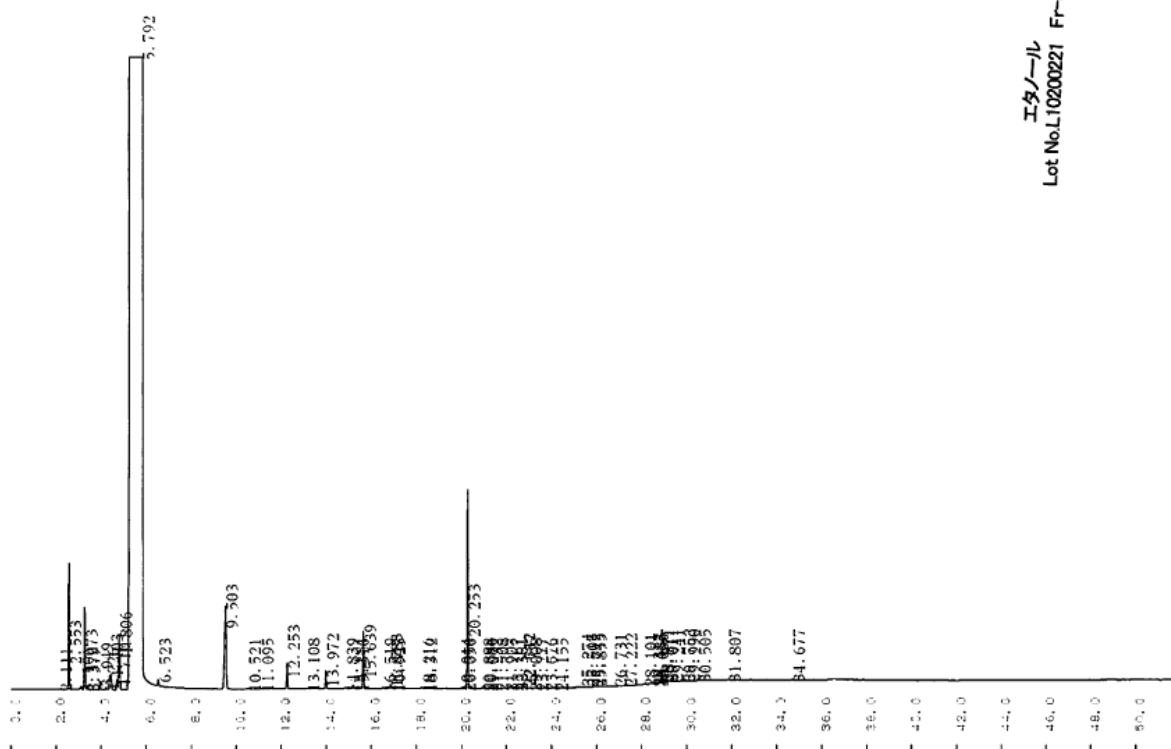
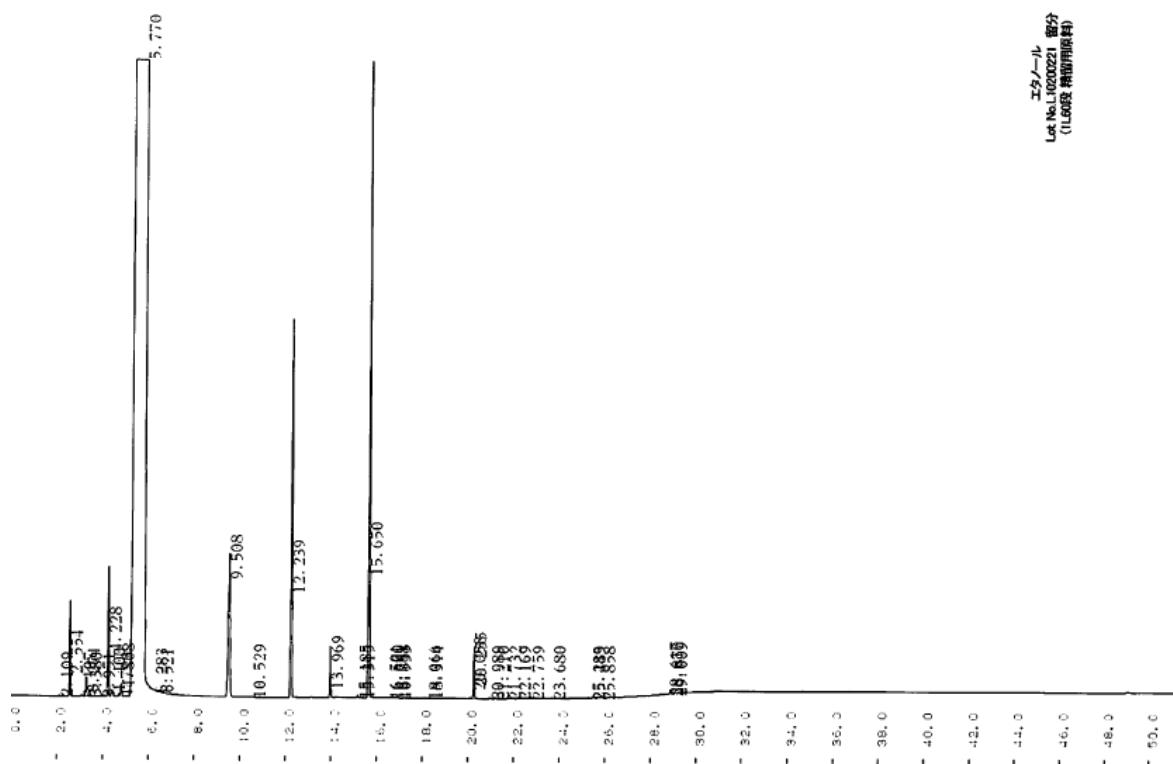


図 2-1-2-2-1-1 a-5 Fr. 3 GC チャート

エタノール
Lot No.L10200221 Fr-3



エタノール
Lot No. L10200221 密分
(1L6002 精製用原料)

図 2-1-2-2-1-1 a-8 Fr.1~3 GC チャート

2-1-2-2-1-2 1L 60 段蒸留

2-1-2-2-1-2 a 実施内容及び成果

(方法)

前章で得られた単蒸留サンプルを精製するため、1L 60 段蒸留による処理を行った。試験条件は、元液：Fr. 1～3、エタノール濃度 78.4%、232.9g、エタノールの沸点は 78.3℃であることから、塔頂温度 79℃に設定する為、加熱温度 100～115℃とした。

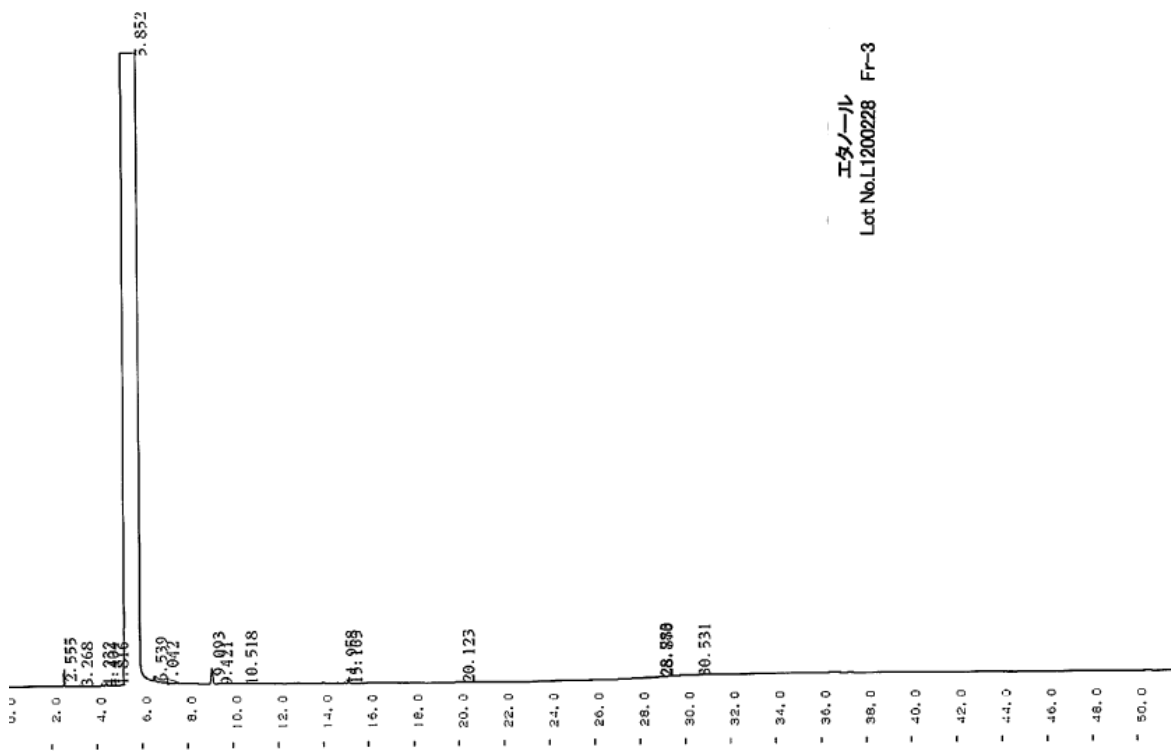
(結果)

所定時間後のエタノール濃度、サンプル収率を表 2-1-2-2-1-2 a-1 に示す。塔頂温度は 79℃付近で安定し、Fr. 2, 3, 6, 7 で目標である 95%以上のエタノール濃度を示すサンプルを得た。

表 2-1-2-2-1-2 a-1 1L 60 段蒸留試験結果

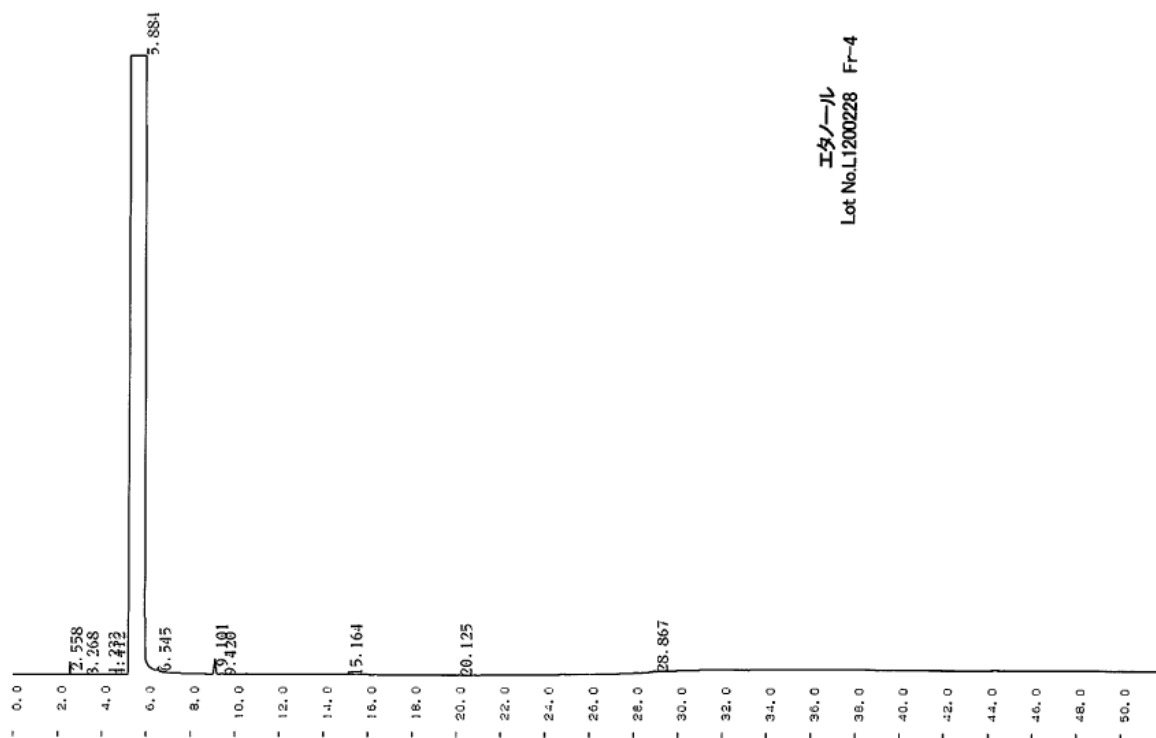
	エタノール(%)	サンプル量(g)	加熱温度	下部温度	塔頂温度
元液	78.4	232.9			
Fr. 1	94.5	21.7	100℃	81.8℃	79.2℃
Fr. 2	95.1	22.3	100℃	82.3℃	79.2℃
Fr. 3	95.3	23.5	100℃	83.1℃	79.1℃
Fr. 4	94.7	24.0	100℃	84.4℃	79.0℃
Fr. 5	92.8	22.6	100℃	86.0℃	79.0℃
Fr. 6	95.0	22.4	105℃	90.7℃	78.8℃
Fr. 7	95.1	20.5	115℃	114.9℃	77.3℃
残液	11.4	64.4			

60 段蒸留の各フラクションの GC 分析結果を図 2-1-2-2-1-1 a-2～9 に示す。元液（前章、図 2-1-2-2-1-1 a-8）ではいくつかの不純物ピークが観察されていたが、Fr. 2～7 では 5.7 分付近のエタノールを示すピーク以外の不純物は減少し、精製が進んでいることを確認した（図 2-1-2-2-1-1 a-3～8）。Fr. 1 ではエタノールよりも前にピークが観察され（図 2-1-2-2-1-1 a-2）、低沸点の不純物が含まれていることが判明した。残液には高沸点不純物が多く残存していた（図 2-1-2-2-1-1 a-9）。



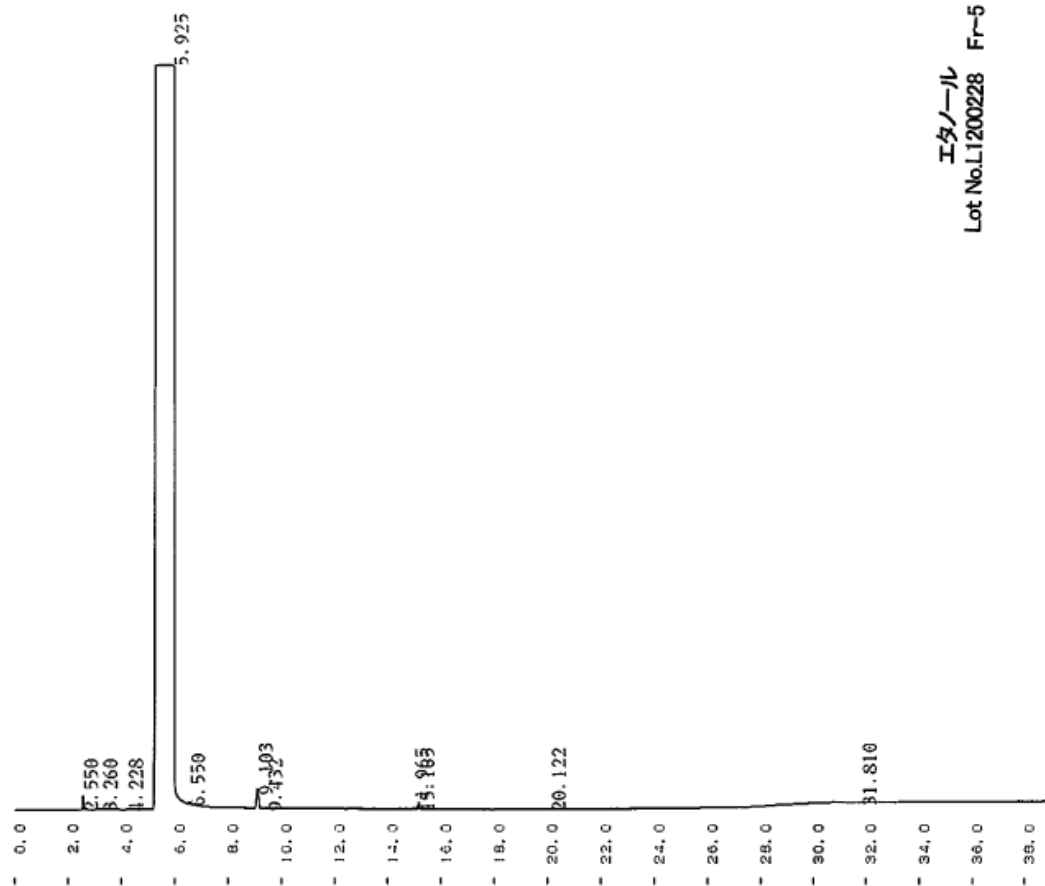
エタノール
Lot No.L1200228 Fr-3

図 2-1-2-2-1-2 a-4 Fr. 3 GC チャート



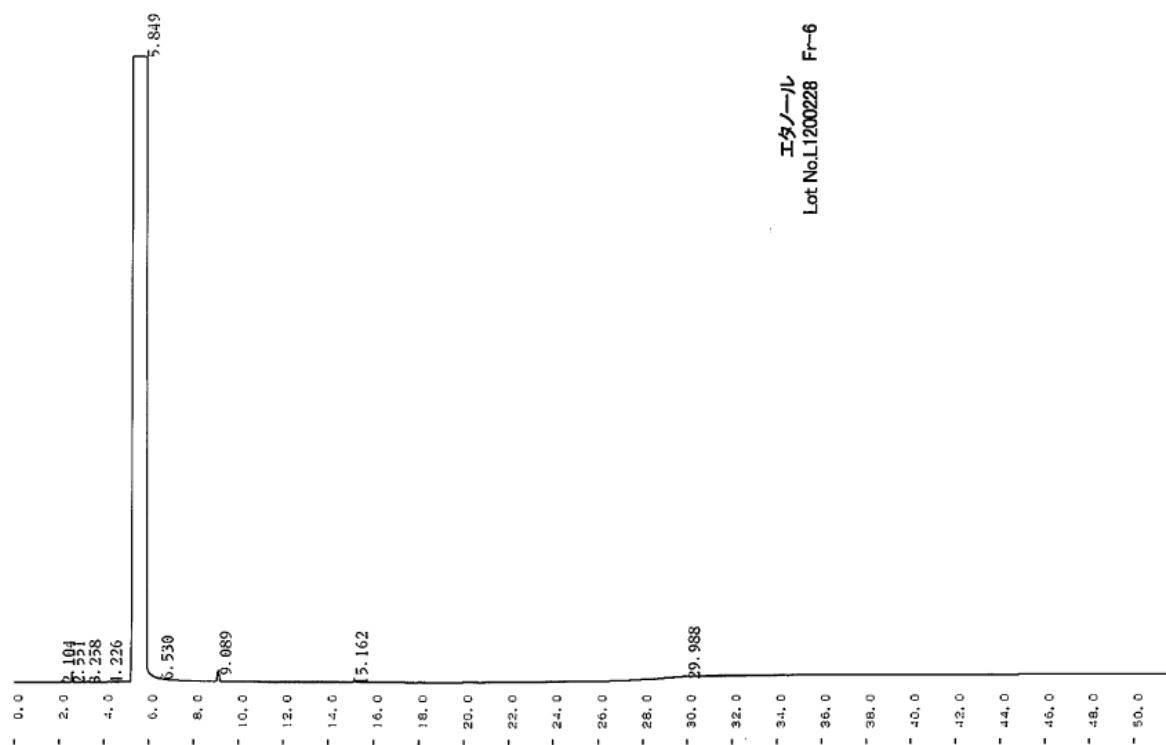
エタノール
Lot No.L1200228 Fr-4

図 2-1-2-2-1-2 a-5 Fr. 4 GC チャート



エタノール
Lot No.L1200228 Fr-5

図 2-1-2-2-1-2 a-6 Fr.5 GC チャート



エタノール
Lot No.L1200228 Fr-6

図 2-1-2-2-1-2 a-7 Fr.6 GC チャート

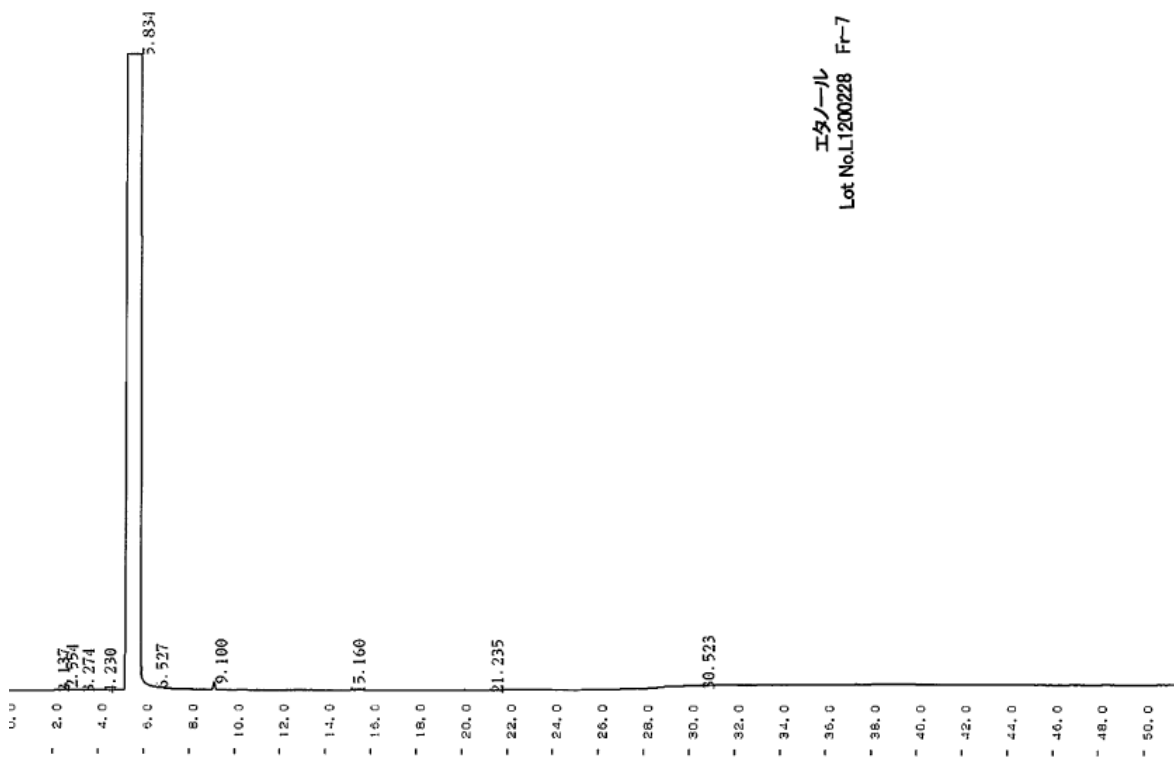


図 2-1-2-2-1-2 a-8 Fr.7 GC チャート

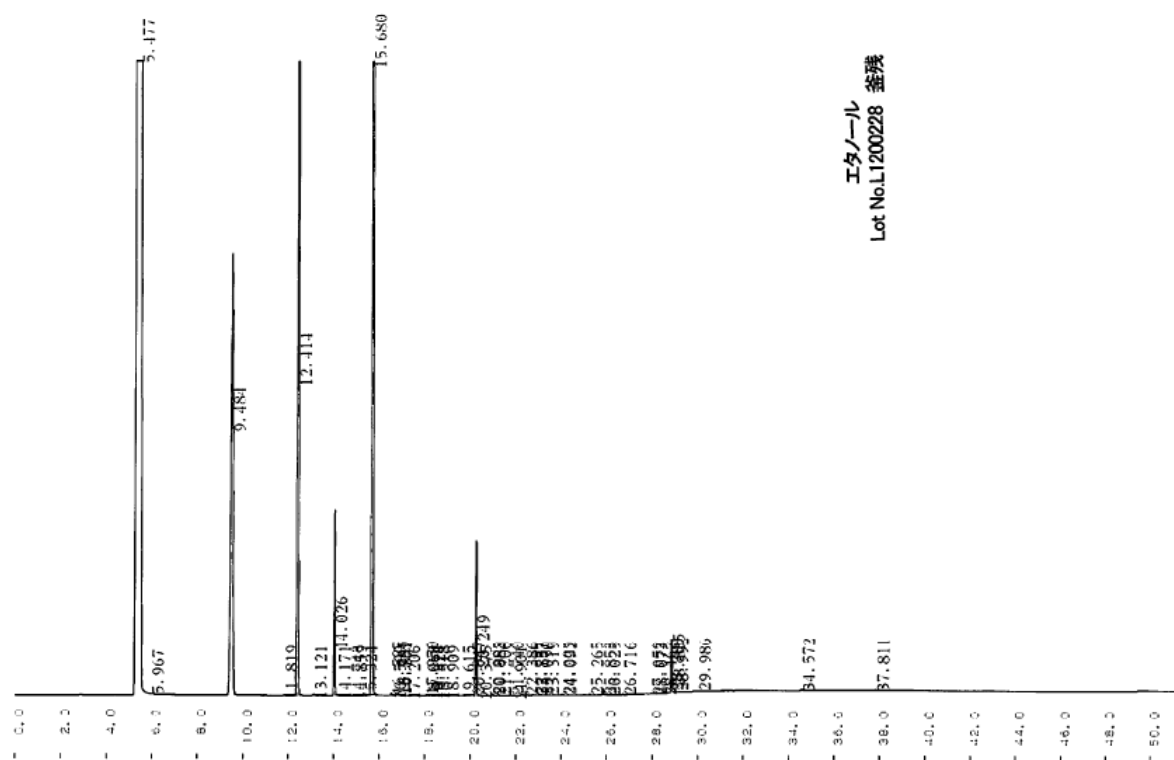


図 2-1-2-2-1-2 a-9 残液 GC チャート

2-1-2-2-2 1 段蒸留によるエタノールサンプル精製

2 段蒸留で不純物の分離が可能なことは確認できた為、1 段蒸留での精製が可能かを確認した。

2-1-2-2-2-1 10L 60 段蒸留

2-1-2-2-2-1 a 実施内容及び成果

(方法)

60 段蒸留装置（容量：20L）を用いた蒸留試験を行い、所定時間後のエタノール濃度を計測した。試験条件は、元液：121-Lot1 サンプル 9.9kg、エタノールの沸点は 78.3℃であることから、塔頂温度 79℃付近に設定する為、加熱温度 120℃とした。

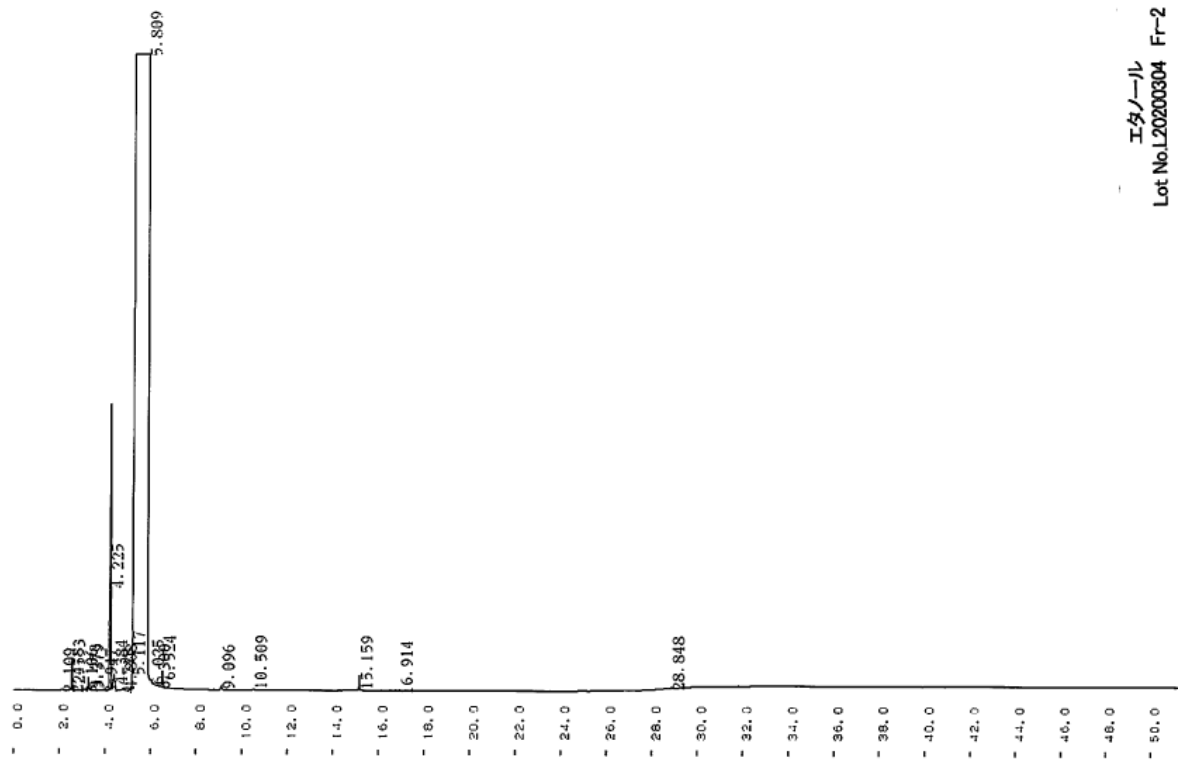
(結果)

所定時間後のエタノール濃度、サンプル収率を表 2-1-2-2-2-1 a-1 に示す。塔頂温度は 79℃付近で安定し、Fr. 2～7 で目標である 95%以上のエタノール濃度を示すサンプルを得た。

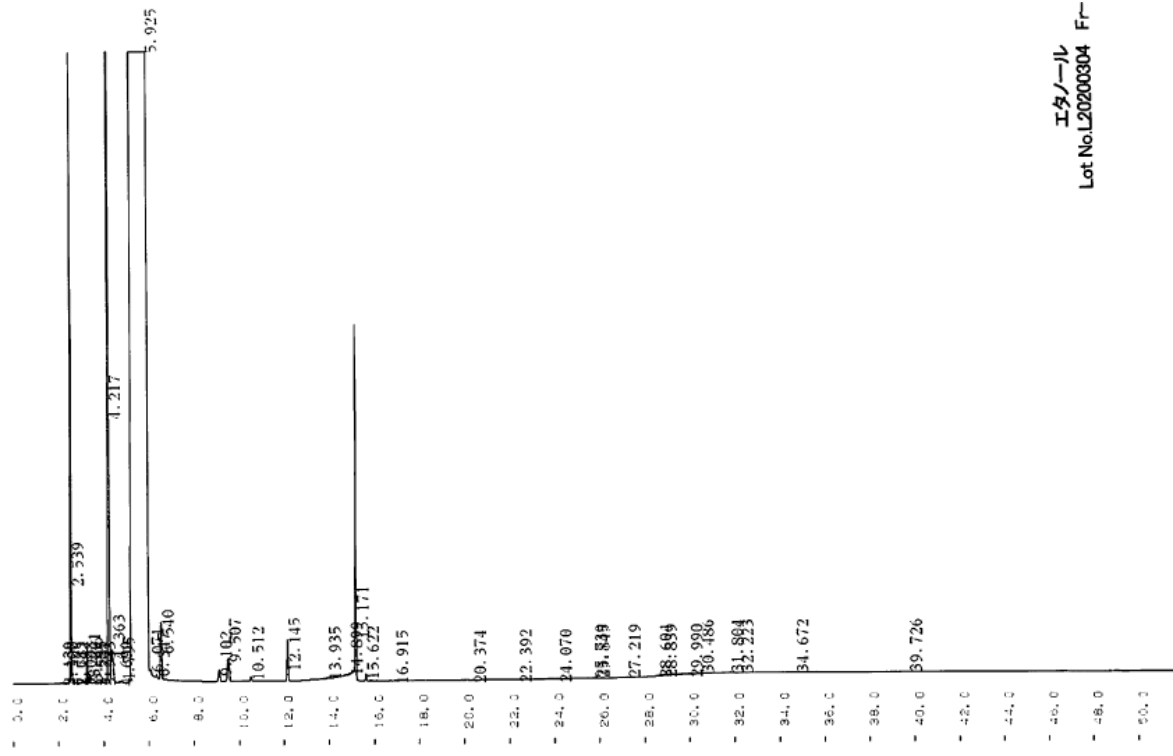
表 2-1-2-2-2-1 a-1 10L 60 段蒸留試験結果

	エタノール(%)	サンプル量(g)	加熱温度	下部温度	塔頂温度
元液	4.9	9,940			
Fr. 1	93.4	24.1	120℃	100.5℃	78.7℃
Fr. 2	95.1	23.1	120℃	100.8℃	78.7℃
Fr. 3	95.0	23.1	120℃	101.3℃	78.7℃
Fr. 4	95.7	24.7	120℃	101.4℃	78.9℃
Fr. 5	95.4	23.8	120℃	101.5℃	79.0℃
Fr. 6	95.4	23.4	120℃	101.5℃	78.9℃
Fr. 7	95.5	23.9	120℃	101.6℃	78.9℃
Fr. 8	94.4	24.2	120℃	101.6℃	78.9℃
Fr. 9	88.1	26.6	120℃	101.6℃	79.6℃
Fr. 10	83.2	22.4	120℃	101.8℃	80.0℃
残液	0.0	9,520			

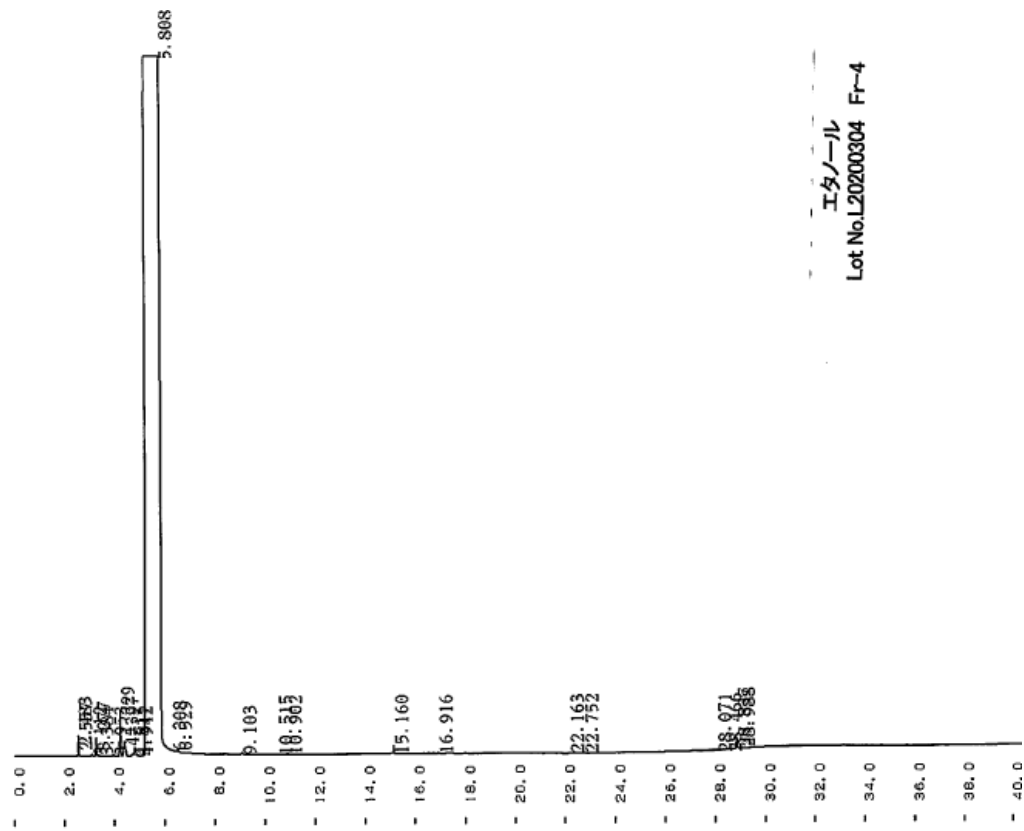
元液および単蒸留の各フラクションの GC 分析結果を図 2-1-2-2-2-1 a-2～12 に示す。Fr. 1～3（図 2-1-2-2-2-1 a-2～4）ではエタノールよりも前にピークが観察され、低沸点化合物が混入しており、Fr. 9～10（図 2-1-2-2-2-1 a-10～11）には 20 分以降の高沸点不純物が多く残存していた。Fr. 4～8（図 2-1-2-2-2-1 a-5～9）はエタノール以外のピークは小さく、精製が進んでいることが確認された。残液には大きなピークは観察されず、エタノールはおおよそ各フラクションに回収できていることが確認できた（図 2-1-2-2-2-1 a-12）。



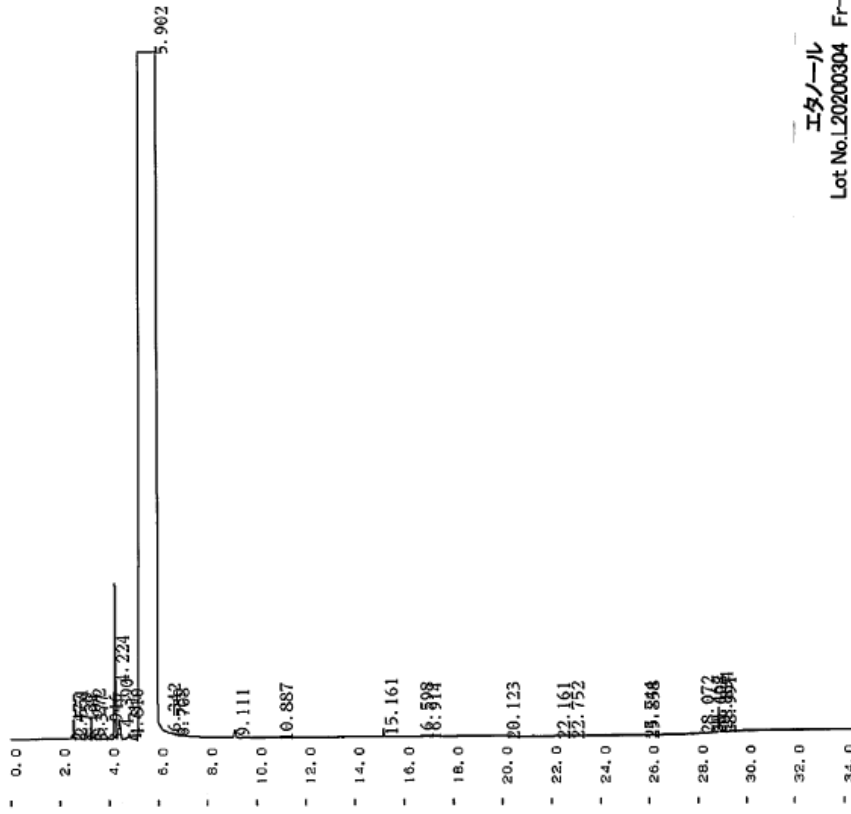
エタノール
Lot No. L20200304 Fr-2



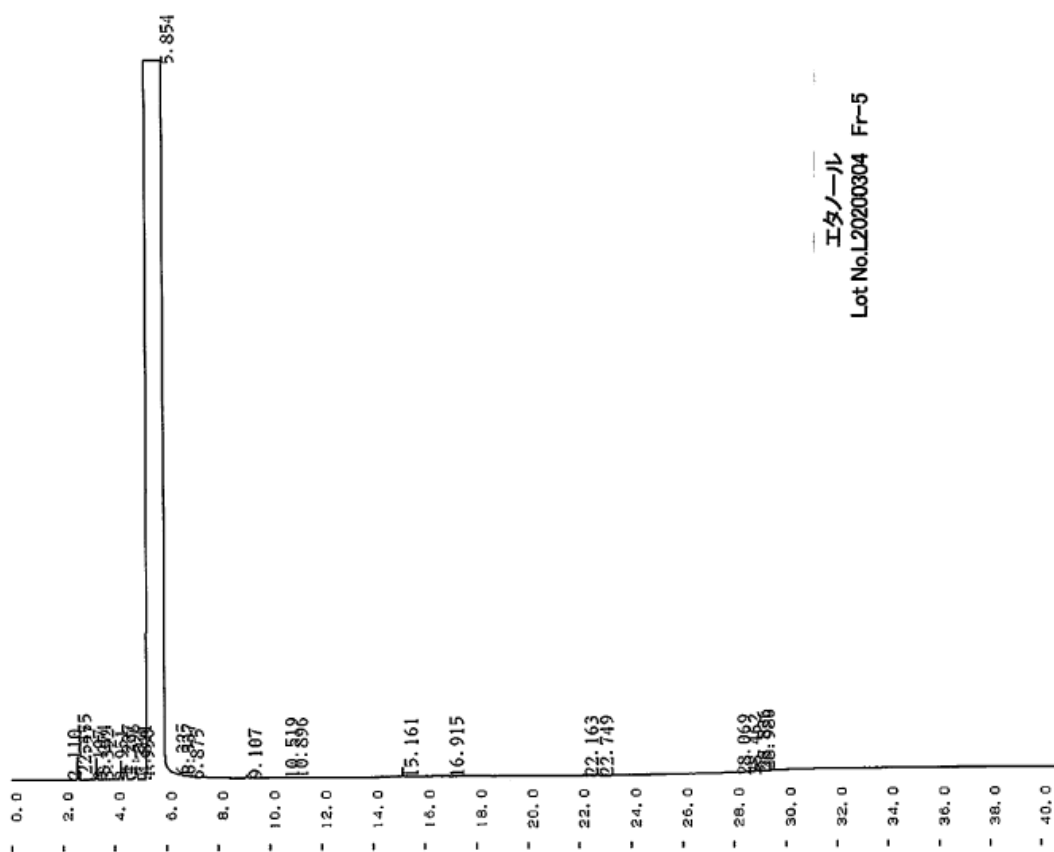
エタノール
Lot No. L20200304 Fr-



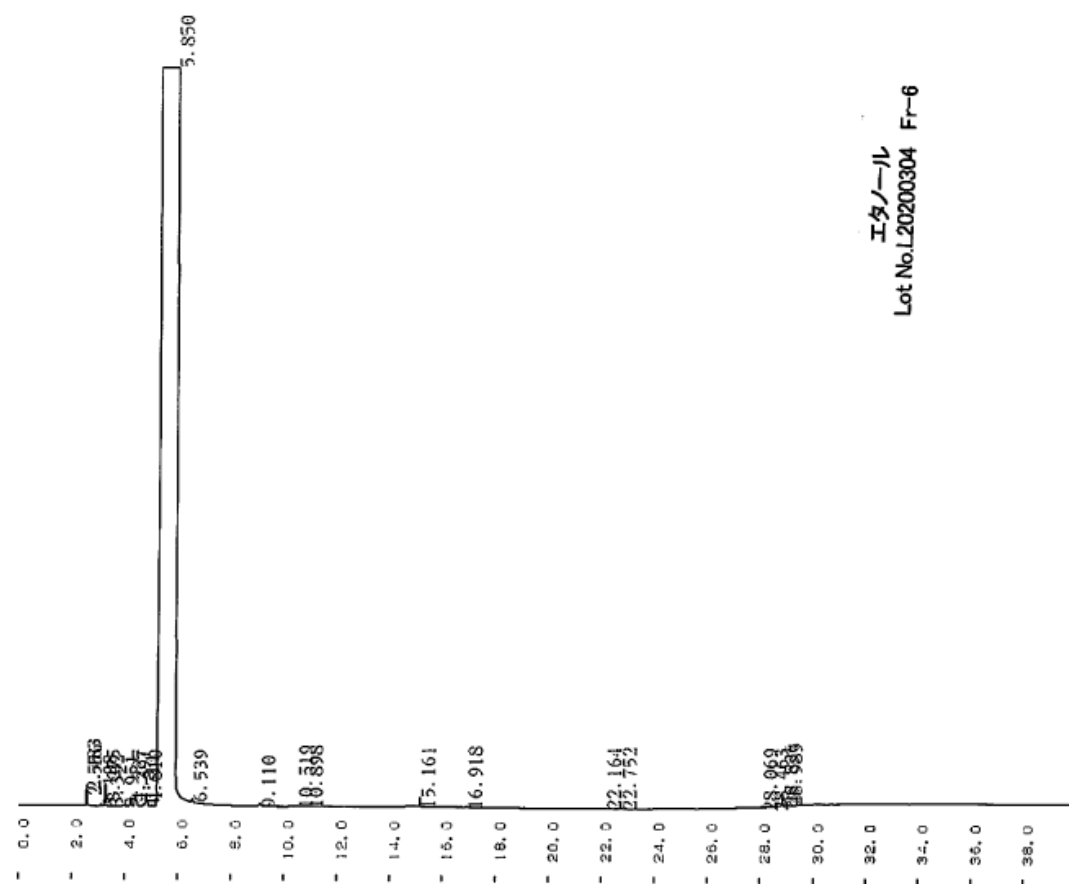
エタノール
Lot No.L20200304 Fr-4



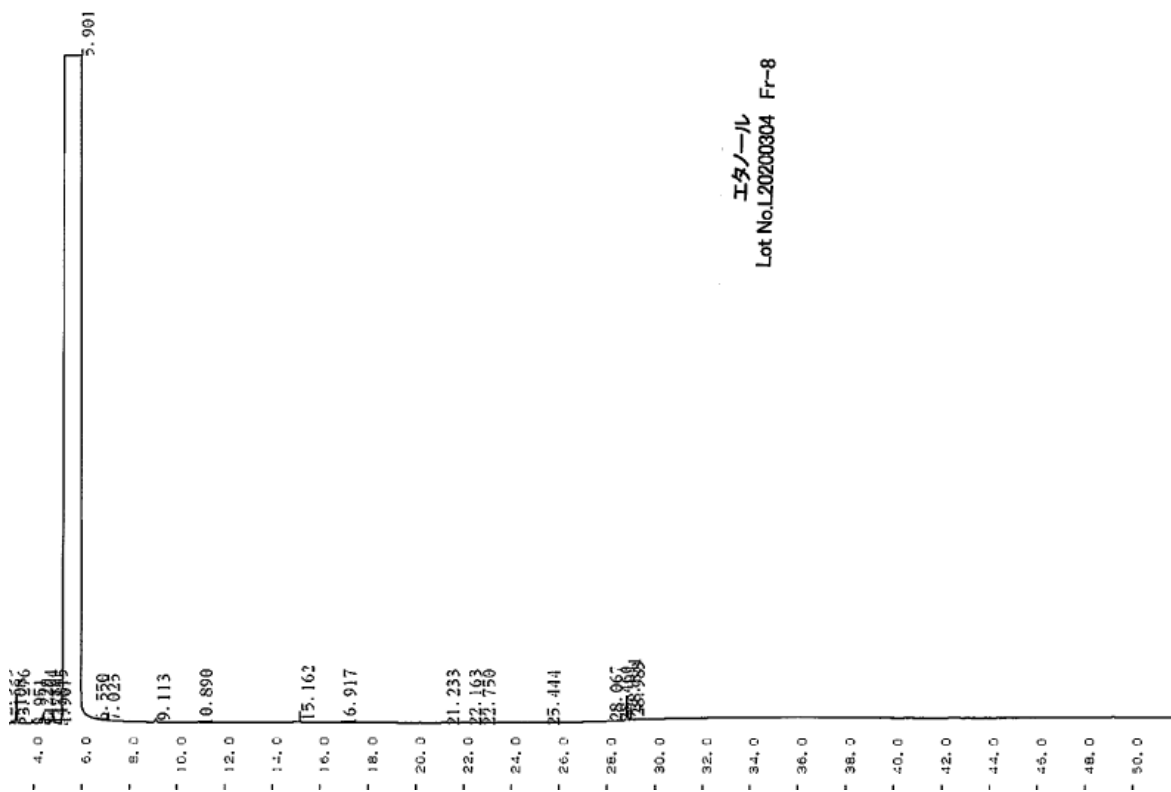
エタノール
Lot No.L20200304 Fr-3



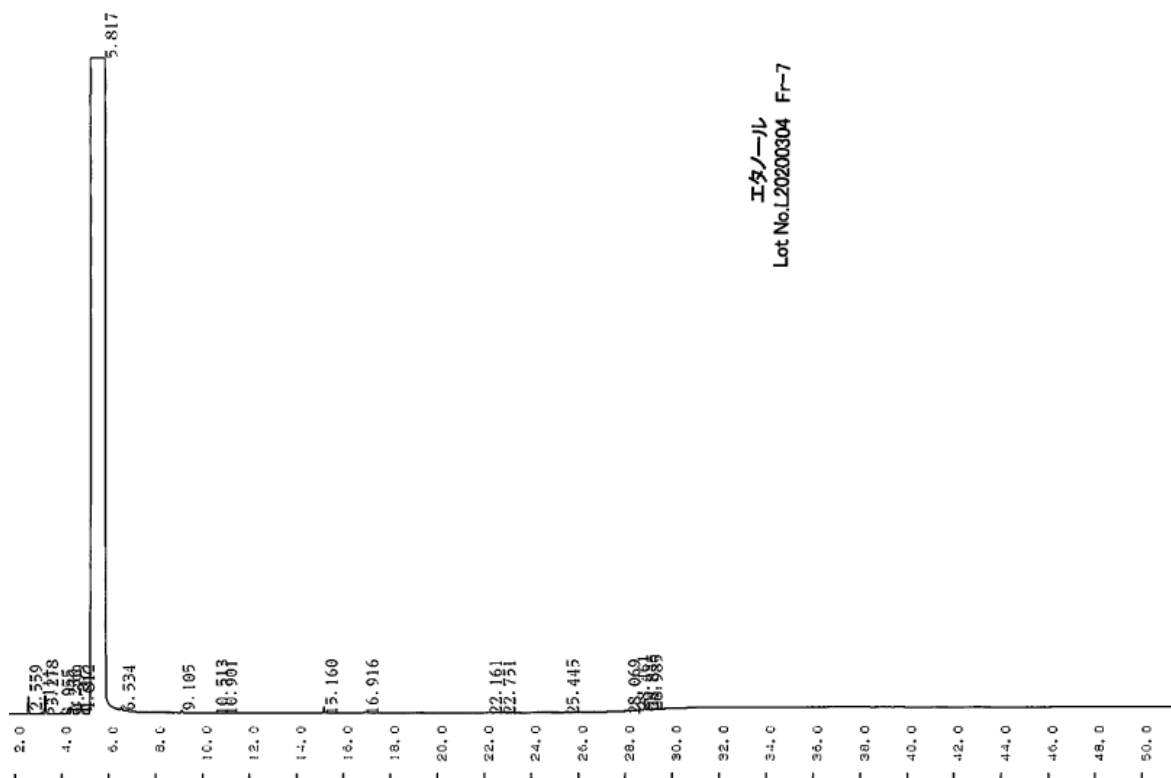
エタノール
Lot No.L20200304 Fr-5



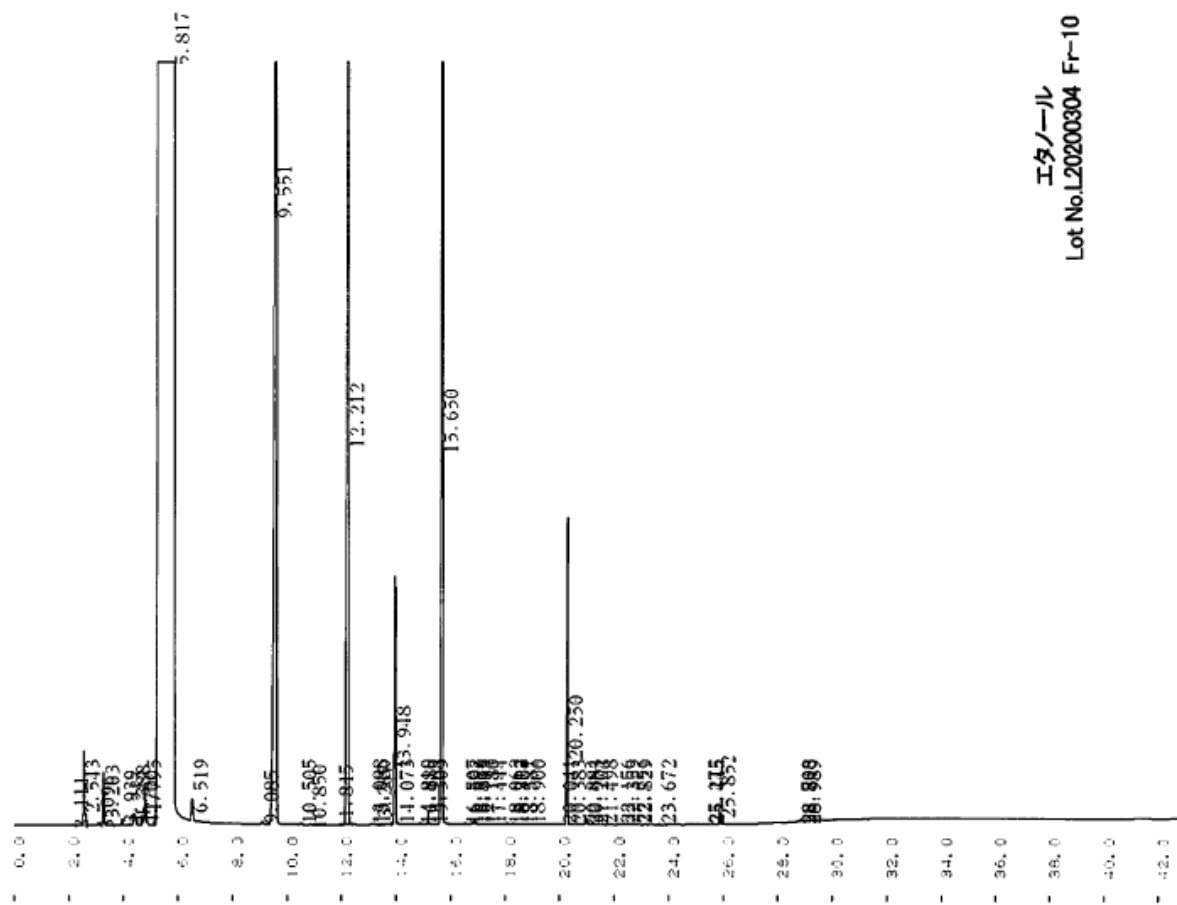
エタノール
Lot No.L20200304 Fr-6



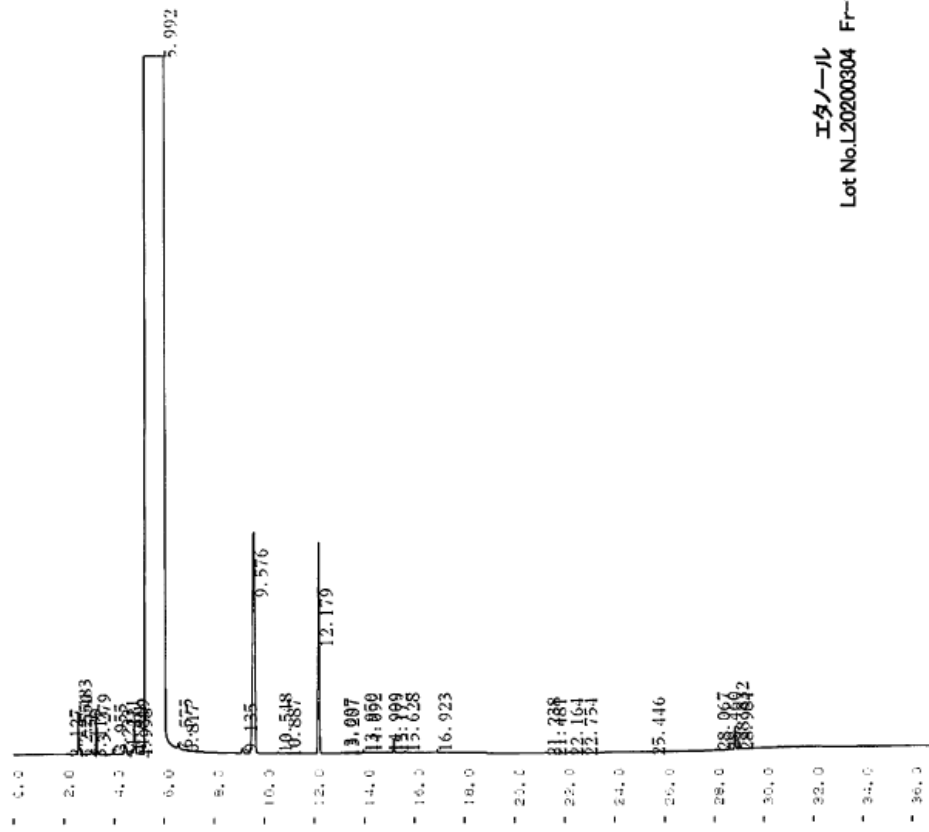
エタノール
Lot No.L20200304 Fr-8



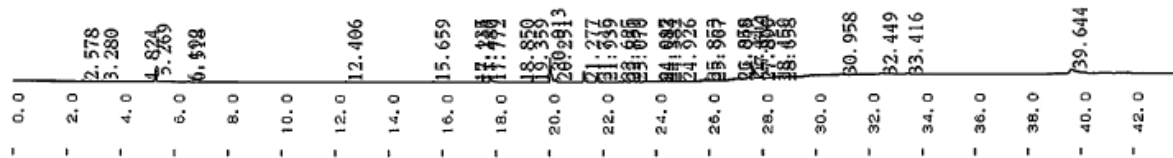
エタノール
Lot No.L20200304 Fr-7



エタノール
Lot No.L20200304 Fr-10



エタノール
Lot No.L20200304 Fr-9



2-1-2-2-3 蒸留検討まとめ

今回の検討で1段蒸留でも2段蒸留でも精製が可能だった。しかし、2段蒸留では単蒸留工程が安定せず、1段蒸留ではエタノール濃度が高いフラクションでも低沸点及び高沸点の不純物が混入することが判明した。今後は収率や設備費などを考慮しつつ、環流工程の検討など、さらに最適な工程について検討する必要がある。

2-2 非可食バイオマス由来 PLA 樹脂に関する技術開発

2-2-1 乳酸発酵条件の検討

事前検討にてラボレベル（250ml 三角フラスコ）ではパルプからの乳酸生産を確認しているが、高収率、高生産性を可能とする培養条件を検討した。

2-2-1-1 菌株スクリーニング

微生物によって生産される乳酸はL体とD体があり（図2-2-1-1-1）、ポリ乳酸製造ではL体純度が高いことが必要であることから、様々な菌株でパルプからの乳酸生産を行い、収率および光学純度、生産速度が高い株を取得するためのスクリーニングを行った。

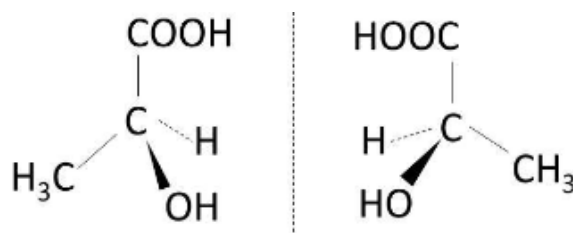


図2-2-1-1-1 乳酸の光学異性体（左：L体、右：D体）

2-2-1-1 a 実施内容及び成果

（方法）

三角フラスコ（容量：250mL）を用いた糖化発酵試験を行い、120 時間後の槽内乳酸濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ濃度 3%、酵素：所定量、初期乳酸菌量：5ml、3%CaCO₃（pH 調整剤）、温度：30℃とした。

（結果）

33 菌株について、スクリーニングを行い、120 時間後の乳酸収率およびL 乳酸光学純度を図2-2-1-1 a-1 に示す。27 菌株でエタノール生産と同様にパルプから酵素分解によって生成したグルコースは乳酸へと変換していることを確認した。特に菌株 No. 31 にて乳酸収率 93.2%、光学純度 91%の優良株が選抜された。

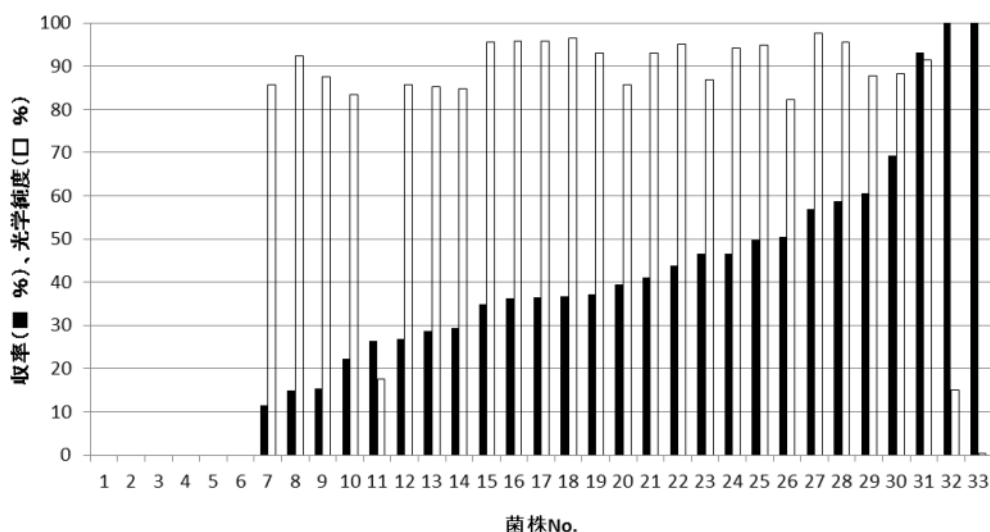


図2-2-1-1 a-1 乳酸生産菌スクリーニング結果

2-2-1-2 2L ジャーによる確認試験

フラスコでパルプから糖化発酵反応にて乳酸生産が確認できたので、2L ジャーを用いた確認試験を実施した。

2-2-1-2 a 実施内容及び成果

(方法)

ジャーファメンター（容量：2L）を用いた糖化発酵試験を行い、48 時間後の槽内乳酸濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ所定濃度、酵素：所定量、初期乳酸菌量：10ml、pH：5.0（6N NaOH で調整）、温度：30℃とし、乳酸菌は No. 31 を使用した。

(結果)

48 時間後の槽内乳酸、光学純度、グルコース、キシロース濃度、菌数を表 2-2-1-2 a-1 に示す。培養初期において攪拌速度が遅く（150rpm）、培養後期までパルプが不均一となり菌数の測定が不可能であったが、パルプから酵素分解によって生成したグルコースから乳酸へと変換していることを確認した。48 時間時点の乳酸収率は 30～35%と低く、グルコースも残存していた。培養中のトレンド（図 2-2-1-2 a-2、2-2-1-2 a-3）を確認したところ、培養初期において攪拌速度が遅かったため、pH 調整が不十分であったことが確認された。培養 24 時間から攪拌速度を 800rpm に変更したところ、pH 調整は改善されたが、溶存酸素も一時的に上昇し、収率および発酵速度が低下したと考えられた。

表 2-2-1-2 a-1 確認試験結果

	乳酸収率 (%)	光学純度 (%)	グルコース (%)	キシロース (%)	菌数 (cfu/ml)
31-Lot1	30	94.9	4.5	1.2	測定不可
31-Lot2	31	92.0	4.5	1.2	測定不可
31-Lot3	35	93.8	4.3	1.2	測定不可

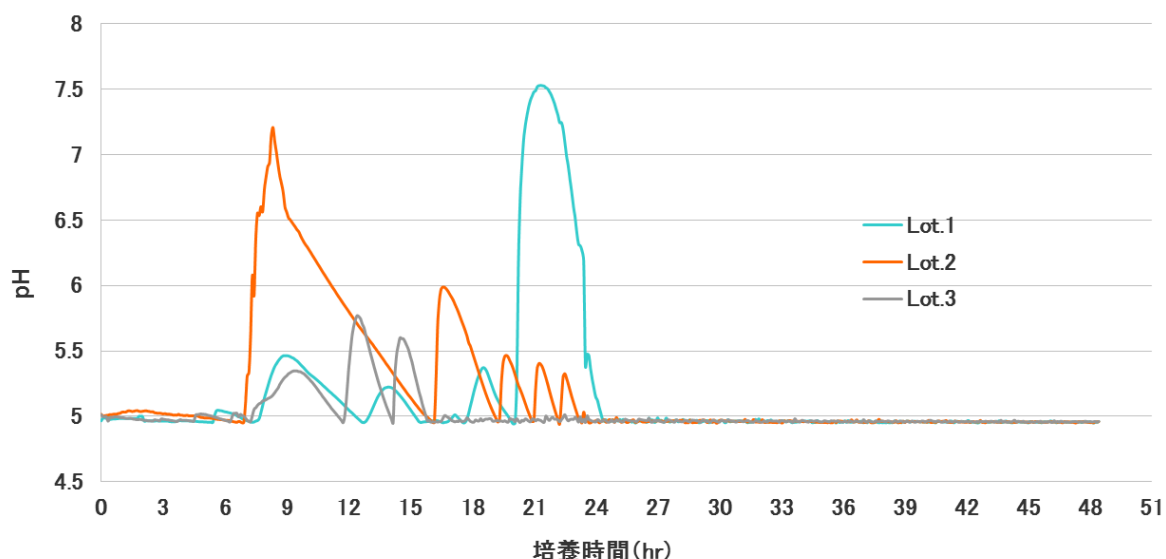


図 2-2-1-2 a-2 pH 経時変化

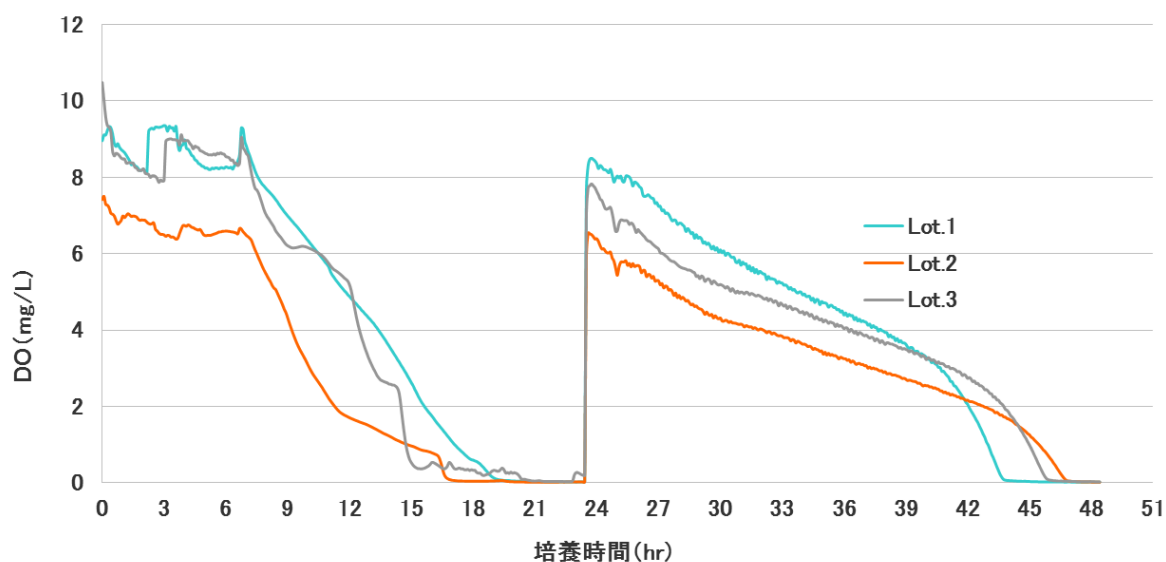


図 2-2-1-2 a-3 DO 経時変化

2-2-1-3 2L ジャーによる攪拌条件検討

前章で 2L ジャーにおけるパルプ不均一性が観察されたため、攪拌条件の検討を実施した。

2-2-1-3 a 実施内容及び成果

(方法)

ジャーファメンター（容量：2L）を用いた糖化発酵試験を行い、48 時間後の槽内乳酸濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ所定濃度、酵素：所定量、初期乳酸菌量：10ml、pH：5.0（6N NaOH で調整）、攪拌条件：400, 600, 800rpm、温度：30℃とし、乳酸菌は No. 31 を使用した。

(結果)

48 時間後の槽内乳酸、光学純度、グルコース、キシロース濃度、菌数を表 2-2-1-3 a-1 に示す。攪拌速度が遅く（150rpm）、培養後期までパルプが不均一となり菌数の測定が不可能であったが、パルプから酵素分解によって生成したグルコースから乳酸へと変換していることを確認した。48 時間時点の乳酸収率は 30～35%と低く、グルコースも残存していた。培養中のトレンド（図 2-2-1-3 a-2、2-2-1-3 a-3）を確認したところ、攪拌速度 400rpm でも pH 調整は十分であり、DO も培養後期に向けて減少していることから、乳酸発酵反応自体は進行していると考えられた。

表 2-2-1-3 a-1 攪拌条件検討結果

	乳酸収率 (%)	光学純度 (%)	グルコース (%)	キシロース (%)	菌数 (cfu/ml)
400rpm	35	93.5	3.0	1.3	1.19×10^{10}
600rpm	33	92.5	4.1	1.2	1.09×10^{10}
800rpm	30	95.7	4.7	1.2	8.40×10^9

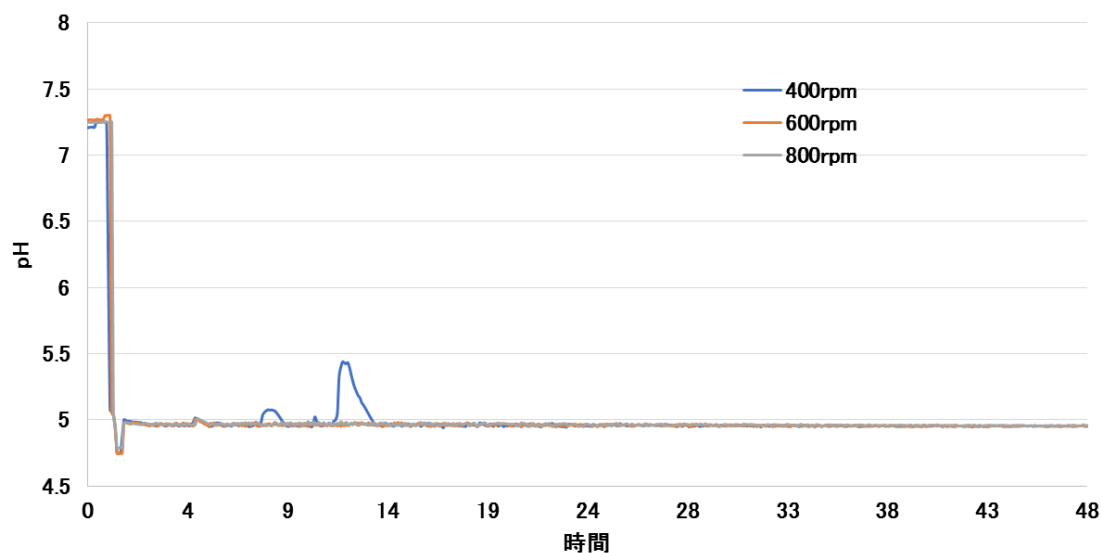


図 2-2-1-3 a-2 pH 経時変化

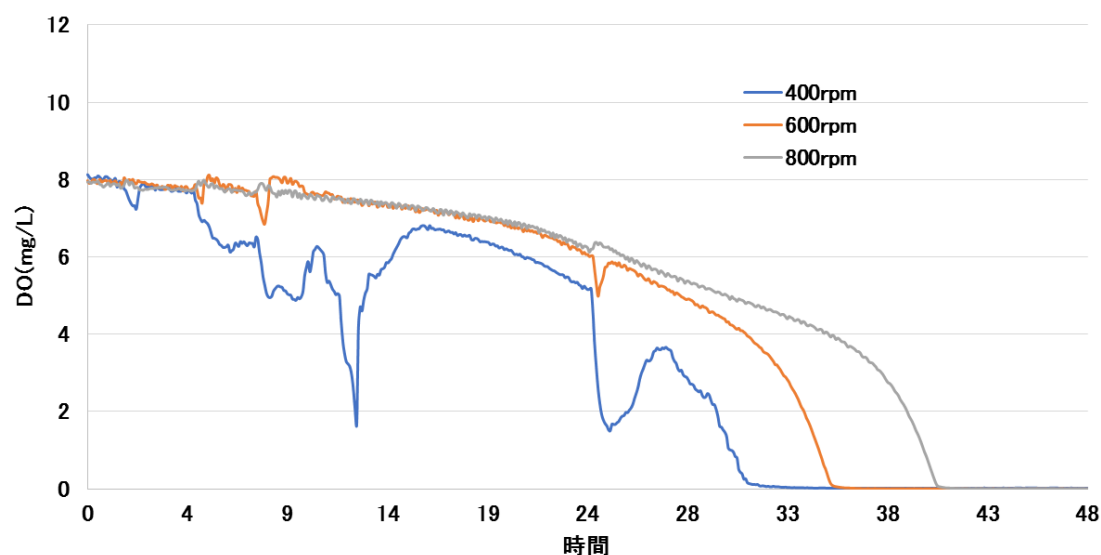


図 2-2-1-3 a-3 DO 経時変化

2-2-1-4 2L ジャーによる窒素量、温度条件検討

前章で 2L ジャーにおけるパルプ均一性は確認できたが、48 時間での収率が低く、生産性の向上が必要と考えられたため、窒素量、温度条件の検討を実施した。

2-2-1-4 a 実施内容及び成果

(方法)

ジャーファメンター（容量：2L）を用いた糖化発酵試験を行い、48 時間後の槽内乳酸濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ所定濃度、酵素：所定量、初期乳酸菌量：10ml、pH：5.0（6N NaOH で調整）、窒素量：所定量の 1/2 倍、1 倍、5 倍量、攪拌条件：400rpm、温度：30～40℃とし、乳酸菌は No. 31 を使用した。

(結果)

48 時間後の槽内乳酸、光学純度、グルコース、キシロース濃度、菌数を表 2-2-1-4 a-1 に示す。窒素量を増加させることで乳酸収率は向上したが、光学純度が低下し、温度を 40℃ にすることで、大幅な乳酸収率の増加が観察された。ただし、グルコースは残存しており、さらなる発酵速度が必要であると考えられた。培養中のトレンド（図 2-2-1-4 a-2～5）を確認したところ、pH 調整は十分であり、DO も培養後期に向けて減少していることから、乳酸発酵反応自体は進行していると考えられた。

表 2-2-1-4 a-1 攪拌条件検討結果

	乳酸収率 (%)	光学純度 (%)	グルコース (%)	キシロース (%)	菌数 (cfu/ml)
30℃、1/2 倍量	22	91.9	5.7	1.2	4.10×10^{10}
30℃、1 倍量	33	91.5	5.0	1.2	9.25×10^9
30℃、5 倍量	46	81.3	3.4	1.0	1.44×10^{10}
34℃、1 倍量	46	94.2	4.9	1.2	9.20×10^9
37℃、1 倍量	49	95.3	4.6	1.2	7.65×10^9
40℃、1 倍量	59	96.4	5.4	1.3	6.30×10^9

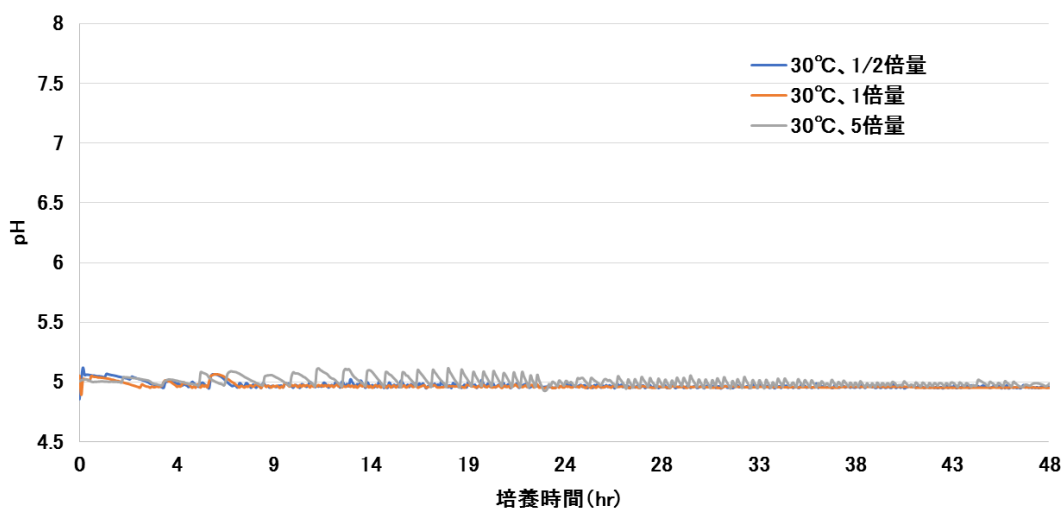


図 2-2-1-4 a-2 pH 経時変化

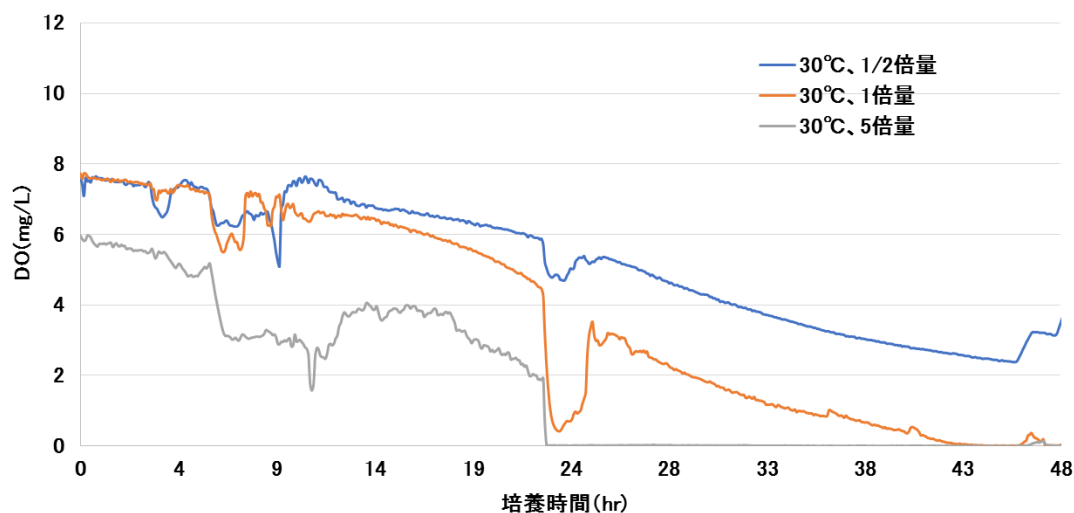


図 2-2-1-4 a-3 DO 経時変化

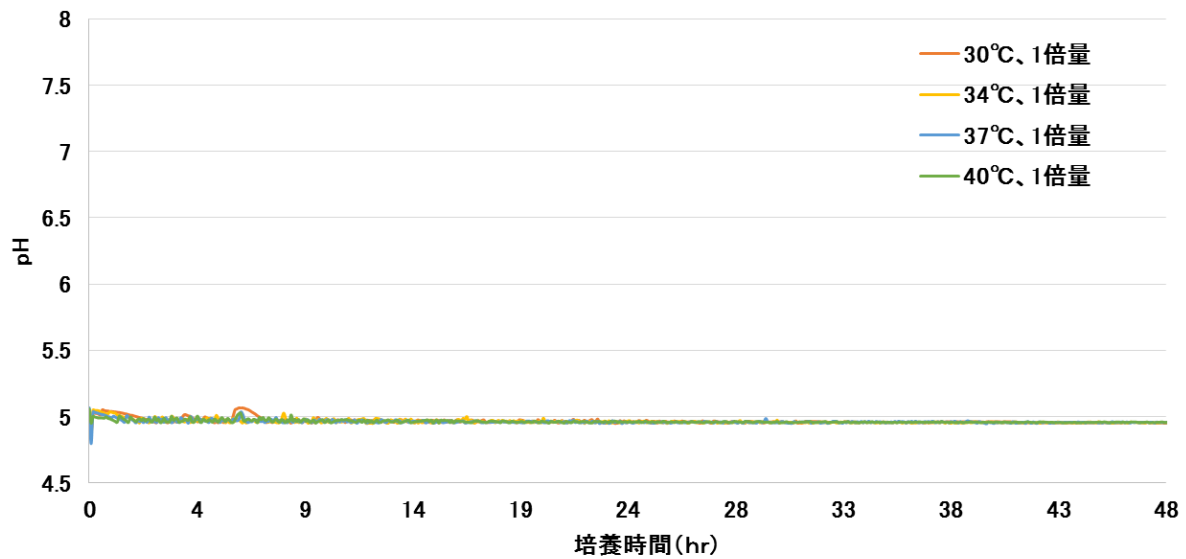


図 2-2-1-4 a-4 pH 経時変化

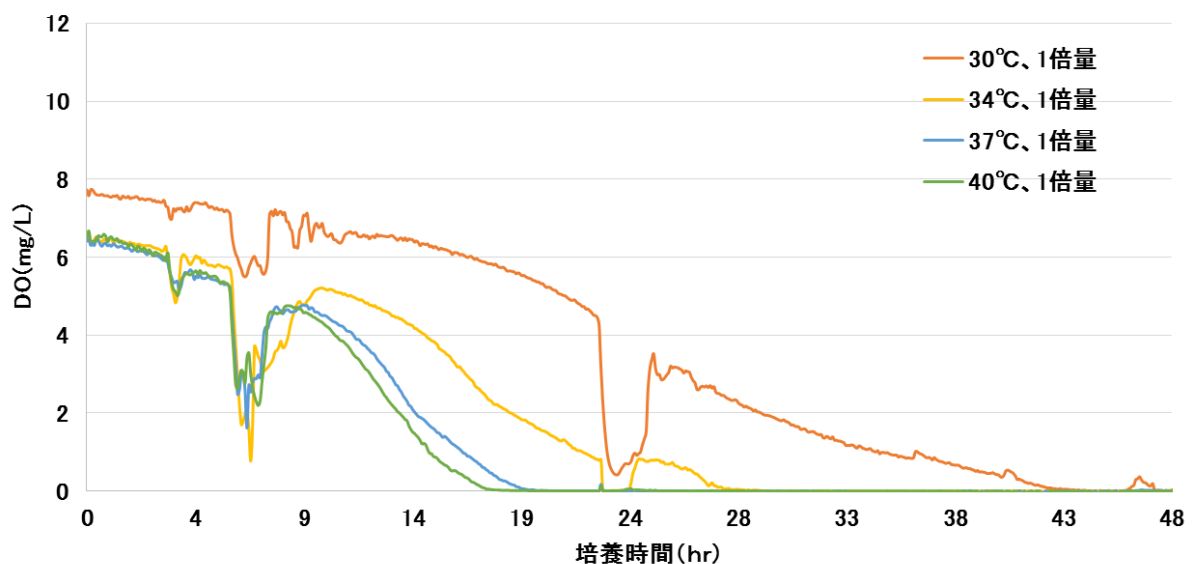


図 2-2-1-4 a-5 DO 経時変化

2-2-1-5 高温生産菌株のスクリーニング

前章にて、乳酸発酵は高温条件で反応速度が速いことが判明した為、高温生産菌株のスクリーニングを実施した。

2-2-1-5 a 実施内容及び成果 (方法)

三角フラスコ（容量：250mL）を用いた糖化発酵試験を行い、72 時間後の槽内乳酸濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ濃度 3%、酵素：所定量、初期乳酸菌量：5ml、3%CaCO₃（pH 調整剤）、温度：30, 40, 50℃とた。供試株は高温耐性と報告のある No. 3, 4, 8, 27 について評価を行い、比較として No. 31 も評価した。

(結果)

5 菌株について、スクリーニングを行い、72 時間後の乳酸収率および L 乳酸光学純度、生産速度を図 2-2-1-5 a-1 に示す。特に菌株 No. 27 では 50℃ で乳酸収率 100%、光学純度 96.5% を示し、乳酸生産速度も No. 31 と比較して 2 倍の生産速度であった。

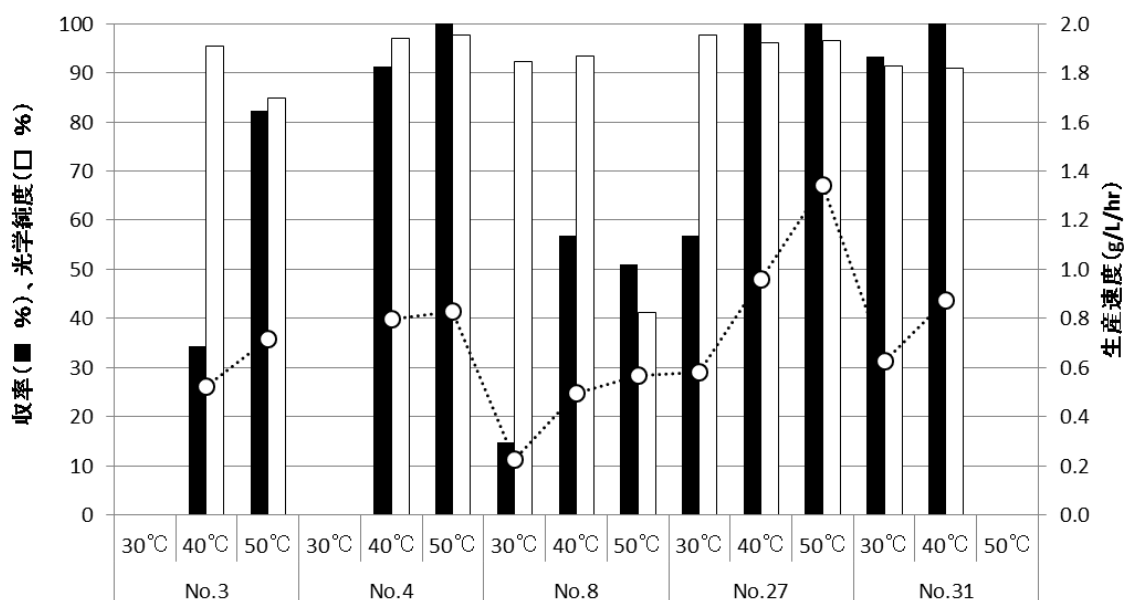


図 2-2-1-5 a-1 スクリーニング評価結果

2-2-2 乳酸精製条件の検討

前章までに 2L ジャーでのパルプ由来乳酸生産を確認した為、ポリ乳酸合成サンプル用としての精製条件を検討した。

2-2-2-1 30L ジャーによる乳酸培養液サンプル作成

精製検討用サンプルを得るため、30L ジャーによる培養液サンプルの作成を行った。

2-2-2-1 a 実施内容及び成果

(方法)

ジャーファメンター（容量：30L）を用いた糖化発酵試験を行い、経時的に槽内乳酸濃度とグルコース濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ所定濃度、酵素：所定量、初期乳酸菌量：200ml、pH：5.0（3% CaCO₃ で調整）、窒素量：所定量、攪拌条件：150rpm、温度：30℃とし、乳酸菌は No. 31 を使用した。

(結果)

経時的な乳酸収率および、グルコース残量を図 2-2-2-1 a-1 に示す。乳酸収率は 150 時間で 100% に達し、槽内のグルコース残量も枯渇した。

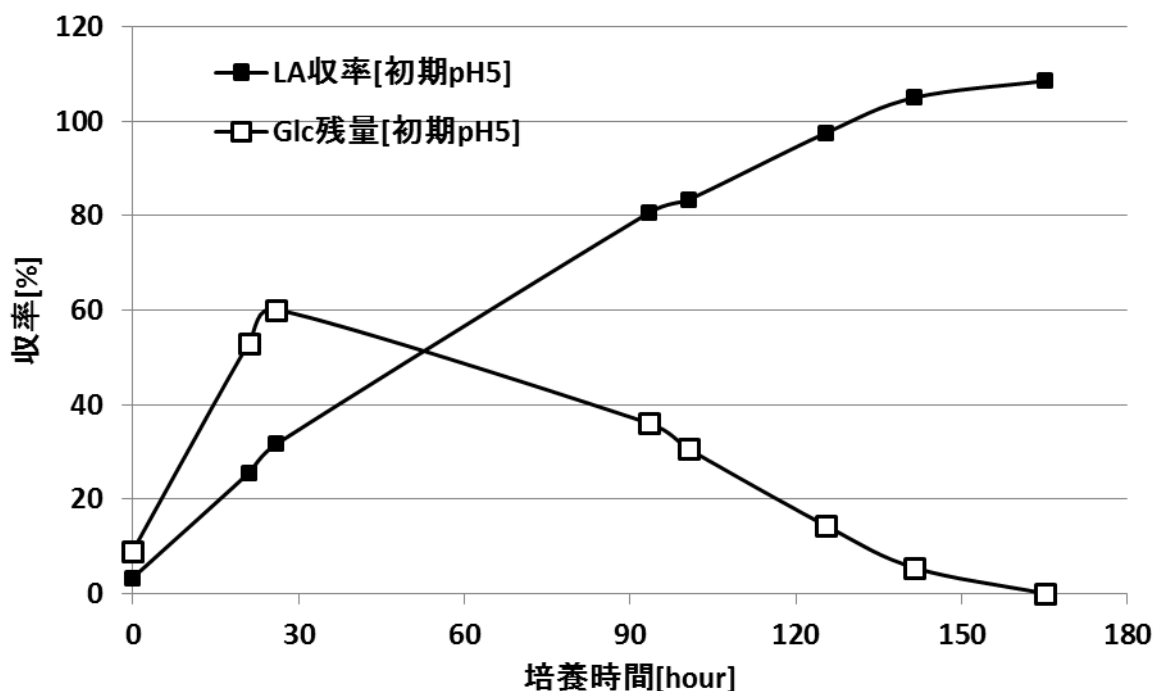


図 2-2-2-2 a-1 30L ジャー乳酸収率、グルコース残量経時変化

2-2-2-2 乳酸培養液サンプル精製条件検討

乳酸培養液からポリ乳酸を合成するためには、乳酸の精製が必要である。精製条件の検討としては樹脂種類や温度、通液速度などを来年度も継続して検討する予定だが、今年度はイオン交換樹脂の検討を行った。30L ジャーで得られた培養液中の乳酸は pH 調整剤である炭酸カルシウムによって乳酸カルシウムの状態で存在する。ポリ乳酸の合成には乳酸カルシウムから乳酸に変換する必要があるため、一般的には硫酸を添加してカルシウムを硫酸カルシウム（石膏）として、沈殿除去する必要があるため、更に上清に存在する金属塩を除去する必要があるため、イオン交換による精製を検討した。

2-2-2-1 a 実施内容及び成果

(方法)

前章で得られた 30L ジャー糖化発酵サンプルを用いて、精製を実施した。精製方法は図 2-2-2-1 a-1 に示す手順で行い、それぞれ 50%濃度になるよう、フラッシュエバポレーターにて濃縮した。

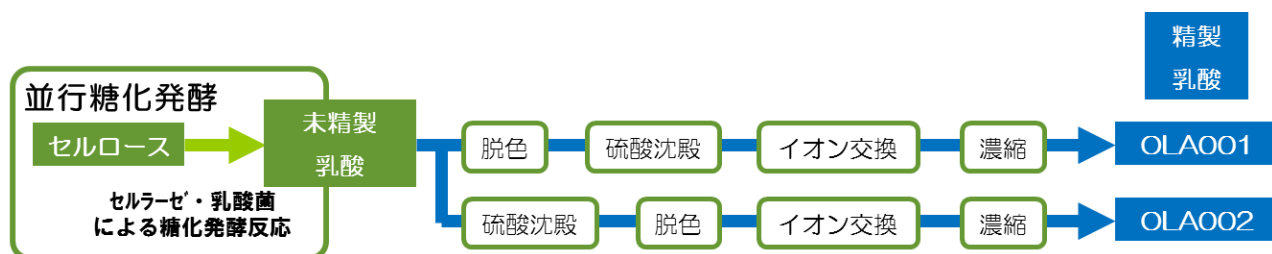


図 2-2-2-1 a-1 乳酸精製手順

(結果)

精製・濃縮後のサンプル品質を表 2-2-2-1 a-2 に、着色状況を写真 2-2-2-1 a-3 に示す。金属塩 (Na, Ca, K) は全て 2.0ppm 以下だったが、いずれも若干の着色が残存していた。硫酸沈殿処理を先に行う OLA002 の方がわずかに低着色性だった。

表 2-2-2-1 a-2

	濃度 (%)	光学純度 (%)	Na (ppm)	Ca (ppm)	K (ppm)
OLA001	57	95.6	<2.0	<2.0	<2.0
OLA002	53	95.3	<2.0	<2.0	<2.0



写真 2-2-2-1 a-3 精製サンプル

2-2-3 ポリ乳酸合成検討

前章までに乳酸水溶液の精製サンプルが得られたため、ポリ乳酸の合成試作を検討した。合成フローは図2-2-3-1に示すように①乳酸の脱水によるオリゴマー化、②オリゴマーの解重合によるラクチド化、③ラクチドの重合によるポリ乳酸化の順で行った。重合条件は触媒、反応温度などを来年度も継続して検討予定だが、今年度は基礎条件で合成を検討した。

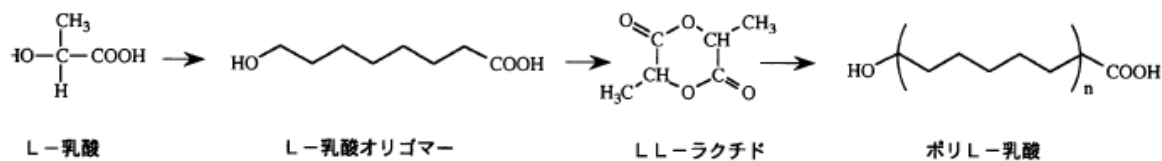


図2-2-3-1 ポリ乳酸合成フロー

2-2-3-1 乳酸脱水-オリゴマー合成-ラクチド化

ポリ乳酸の合成には直接脱水縮合法とラクチド開環重合法があるが、重合開始剤の種類や濃度を変えることで分子量を制御できることから広く用いられている。

2-2-3-1 a 実施内容及び成果

(方法)

乳酸水溶液 500g に酸化スズ 0.9g を添加し、135℃ x 60min → 150℃ x 30min → 160℃ x 180min でオリゴマーを合成し、195℃ x 300min でラクチドへの解重合を行った。精製は粗ラクチドにトルエン+酢酸ブチルを混合し、70℃まで加熱後、5℃まで冷却して発生する沈殿を濾過回収した。

得られたサンプルの純度を確認するため DSC (融点、ガラス転移点) 分析を行った。分析条件は温度：25～200℃、昇温速度：10℃/min、窒素気流：50ml/min で測定している。

(結果)

いずれのサンプルも脱水-オリゴマー合成において、褐色に着色し、解重合によって得られる粗ラクチドも黄色く着色していたが、精製後には白色の粉末ラクチドが得られた (写真2-2-3-1 a-1)



写真2-2-3-1 a-1 乳酸脱水-オリゴマー合成-ラクチド化状況
(左：オリゴマー、中：粗ラクチド、右：精製ラクチド)

DSC 分析結果を図 2-2-3-1 a-2～3 に示す。精製ラクチドの融点 (DSC 吸熱ピーク点) を測定したところ OLA001 では 93.6℃ に L ラクチド由来と思われる融点ピークが観察 (図 2-2-3-1 a-2) されたが、同条件の OLA002 では DL ラクチド由来と思われる 127.9℃ に融点ピークが観察された (図 2-2-3-1 a-3)。OLA001 も 002 も乳酸水溶液では L 乳酸純度が 95% 程度だったことから、ラクチド合成時に異性化が発生したと予想された。

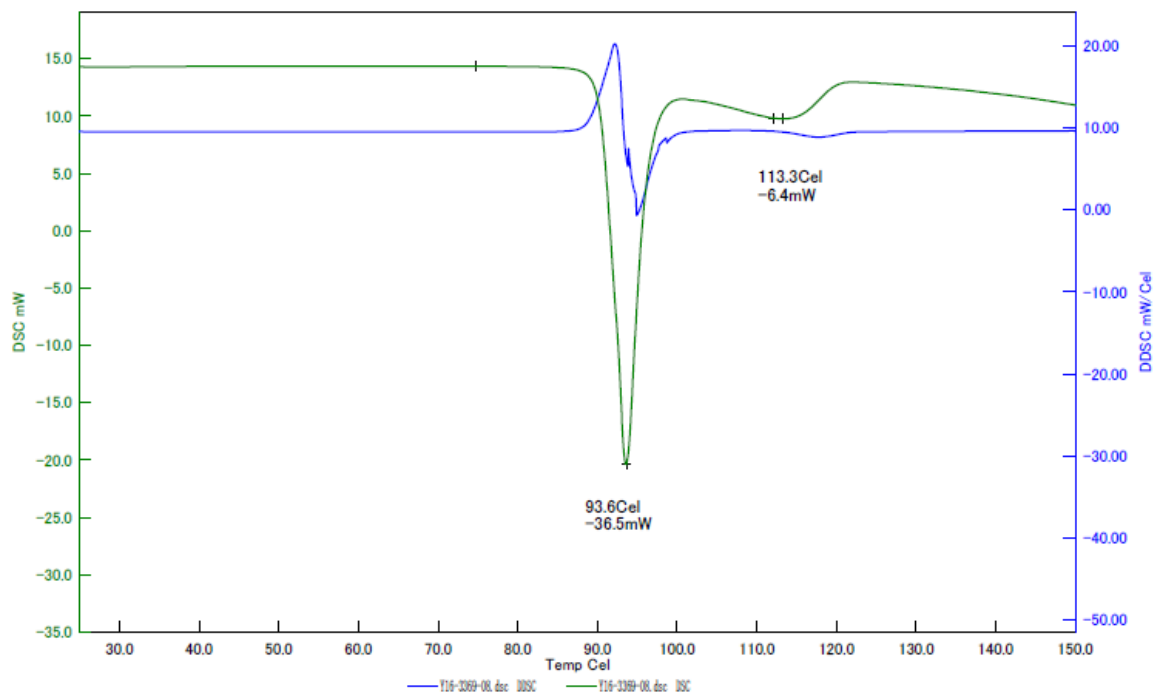


図 2-2-3-1 a-2 OLA001 由来ラクチドの融点

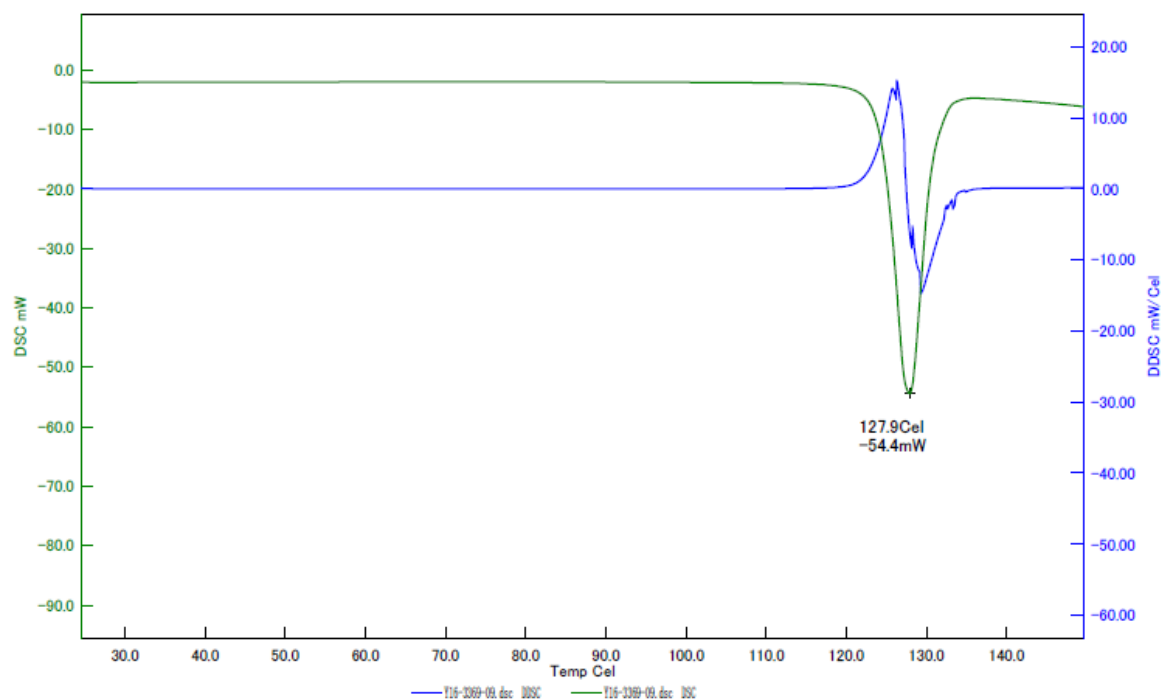


図 2-2-3-1 a-3 OLA002 由来ラクチドの融点

2-2-3-2 ラクチド重合によるポリ乳酸化

前章でL体純度は低い、比較的良好なラクチドが得られたことから、実際にポリ乳酸合成を実施した。

2-2-3-2 a 実施内容及び成果

(方法)

精製ラクチド10gに2-エチルヘキサン酸スズ4mgを添加し、170℃ x 480minで反応させた後、室温まで冷却し、重合物を得た。

得られたサンプルの純度、分子量を確認するためDSC（融点、ガラス転移点）、GPC（分子量）分析を行った。分析条件は以下の通り

DSC 分析

温度：25～200℃

昇温速度：10℃/min

窒素気流：50ml/min

GPC 分析

溶離液：THF

標準物質：ポリスチレン

カラム：Shodex GPC KF-806L x3

カラム温度：40℃

流速：1.0ml/min

検出器：RI

(結果)

ラクチドの熱溶解時に着色はほとんど見られなかった（写真2-2-3-2 a-1）が、重合反応後には着色が観察された（写真2-2-3-2 a-2）。

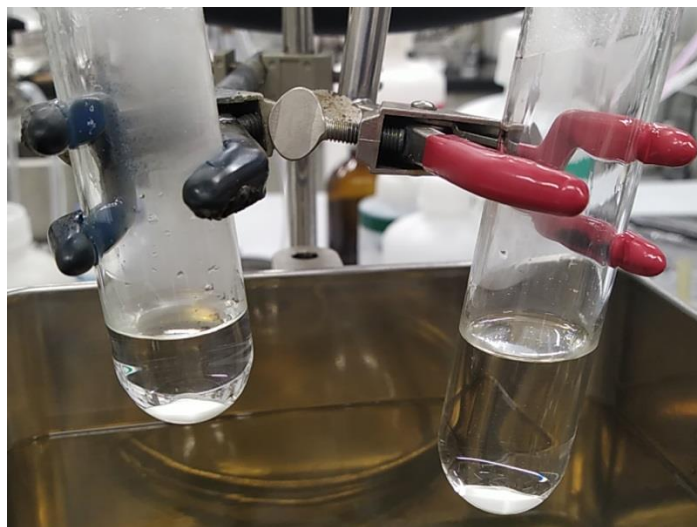


写真2-2-3-2 a-1 ラクチド溶解時の状況



写真 2-2-3-2 a-2 パルプ由来ポリ乳酸

DSCにて昇温過程で融点、降温過程で結晶化ピークを観察した結果を図 2-2-3-2 a-3 ～ 4 に示す。いずれも融点、結晶化ピークは観察されず、LL 体純度が低いと考えられた。

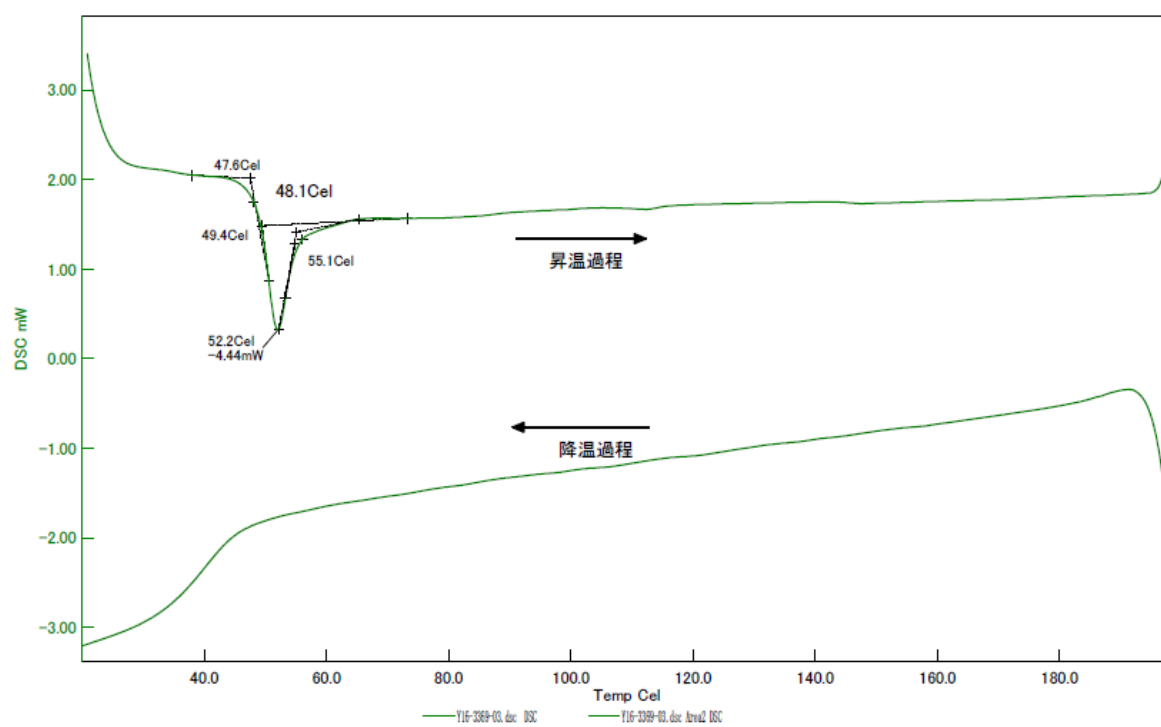


図 2-2-3-2 a-3

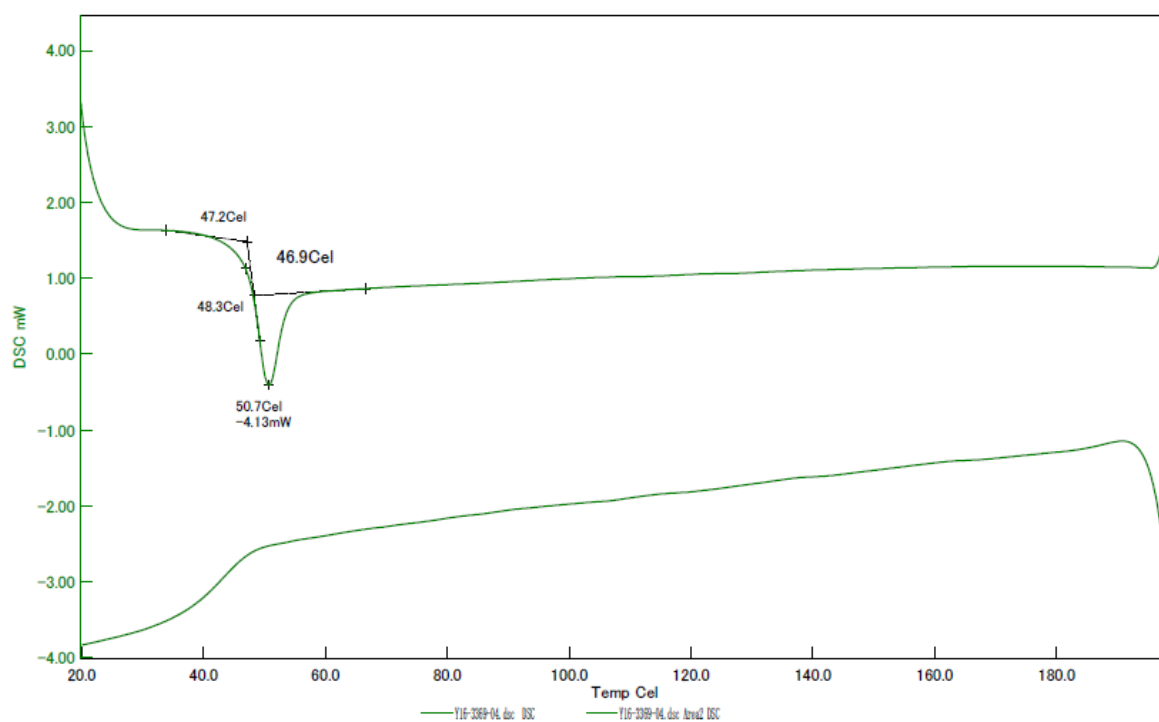


図 2-2-3-2 a-4

GPC 分析した結果を表 2-2-3-2 a-5 に示す。いずれも分子量 3 万以上の重合体を得られているが、目標（10 万以上）は達成しておらず、不純物などの影響を検討する必要があることが判明した。

表 2-2-3-2 a-5 GPC 分析結果

	重量平均分子量 MW	数平均分子量 Mn	分散度 Mw/Mn
OLA001	35,600	13,000	2.73
OLA002	75,500	15,500	4.86

2-3 LCA 解析

2-3-1 CO2 削減効果推計に関する評価条件・評価範囲の設定

2-3-1-1 評価単位の設定

2-3-1-1-1 評価対象製品

本評価では、非可食セルロース由来のバイオエタノール製造技術を用いたポリエチレン、そして同じく非可食セルロース由来のポリ乳酸を評価対象とした。具体的には、非可食セルロースであるパルプを原料としてエタノールを製造し、そこからエチレンを経由し、通常の重合プロセスを経てポリエチレンを製造する工程と、同じくパルプを原料として乳酸を製造し、通常の重合プロセスでポリ乳酸を製造する工程とした。

評価対象とする製品は、現在、流通している石油原料由来のポリエチレンとバイオ材料由来のポリ乳酸を代替することが期待される。現在、市場で使用されているポリエチレン、ポリ乳酸はポリエチレンが石油原料由来、ポリ乳酸はいくつかのバイオ原料のうちトウモロコシを原料とするものが主流であることから、比較の対象としては、石油原料由来のポリエチレンとトウモロコシ原料由来のポリ乳酸を選定した。

2-3-1-1-2 機能と機能単位

今回の開発技術におけるポリエチレン、ポリ乳酸は、ともに既存のポリエチレン、ポリ乳酸と同等の利用方法が期待されていることから、用途による差異は無いものとして、LCA の評価における機能は既存樹脂が持つ機能そのもの、機能単位は石油原料由来のポリエチレンとトウモロコシ原料由来のポリ乳酸のそれぞれの重量 1kg あたりとした。

2-3-1-1-3 基準フロー

表 2-3-1-1-3 に基準フロー（評価単位）を示す。本技術開発で製造されるポリエチレン、ポリ乳酸の性質、性状は、既存の原料と全く同じであると想定されている。このことから、基準フローは、評価対象製品についても重量 1kg とした。

表 2-3-1-1-3 本評価における基準フロー

	基準フロー	
	評価対象製品	比較製品
ポリエチレン (PE)	非可食セルロース由来 PE 重量 1kg	石油原料由来 PE 重量 1kg
ポリ乳酸 (PLA)	非可食セルロース由来 PLA 重量 1kg	トウモロコシ由来 PLA 重量 1kg

2-3-1-2 評価範囲の設定

評価範囲の考え方

図2-3-1-2-1，図2-3-1-2-2に評価対象製品と比較製品それぞれの評価範囲を示す。本評価の対象製品は、樹脂材料であるため、評価範囲に関しては、基本的には原材料の調達、原材料から樹脂材料（製品）の生産、生産された材料の輸送、材料から製品の製造、製品の流通、使用、製品の回収・廃棄とした。生産された材料の重量、性質は同一と想定されていることから、このうち、材料から製品の製造、製品の輸送、使用及び回収・廃棄については評価対象製品と比較製品の間で差が生じない。

なお、図2-3-1-2-1と図2-3-1-2-2において白抜き文字で表したプロセスは、今回の技術開発におけるデータ（フォアグラウンドデータ）の取得を行う箇所、そのほかは、データベース・文献等の数値（バックグラウンドデータ）をもとに算定を行う箇所である。

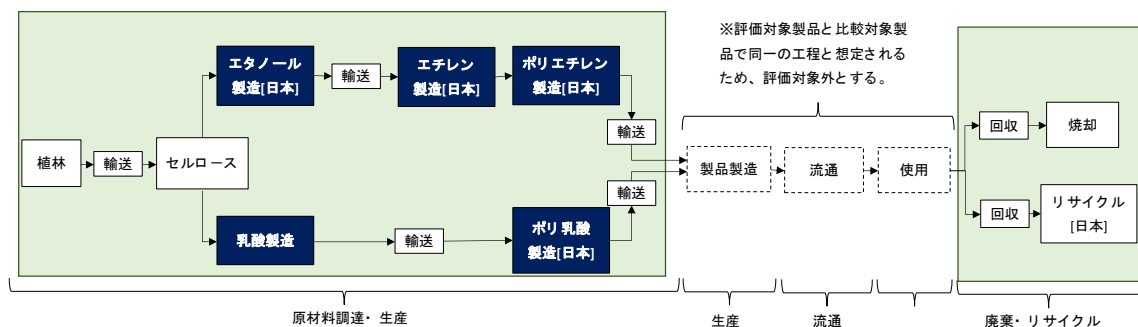


図2-3-1-2-1 評価対象製品の評価範囲

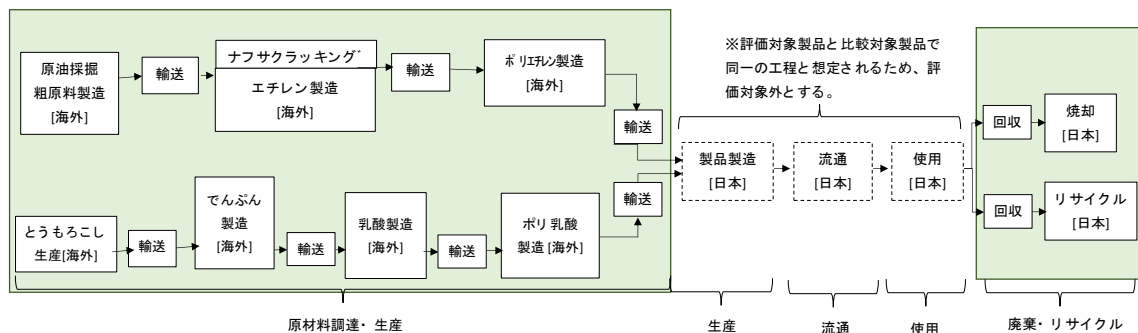


図2-3-1-2-2 比較製品の評価範囲

炭素吸収について

本研究開発で用いられるパルプの原料は、木材であることから、その製造時に炭素の吸収が生じる。ここでは、最終的にポリエチレンに含まれる炭素分が吸収されることとして、炭素吸収分を負の排出量として評価範囲に含めることとした。ただし、炭素吸収分はエネルギー起源ではないことから、分けて計上した。

2-3-1-3 評価対象とした環境影響範囲

本技術開発の目的は、エネルギー起源のCO₂排出量の削減に資する材料の開発にある。従って、評価の対象とした環境影響領域は、気候変動である。また、対象とした環境負荷項目は、温室効果ガス全般とし、特にエネルギー起源の排出量を特定した。

2-3-1-4 ポリエチレンに関する評価条件（評価対象製品）

以下に、ポリエチレンのCO₂排出量の算定に用いた評価条件を示す。以下に示す評価条件は、ことわりの無い限り、本研究開発の中で得られた情報である。

具体的にはセルロース～エタノール～エチレン～ポリエチレンの一部についてフォアグラウンドデータを収集した。

2-3-1-4-1 原材料調達

（1）セルロース使用量

表2-3-1-4-1にエタノール製造時のセルロース使用量を示す。エタノールの原料としては、セルロース（パルプ）が使用し、パルプからエタノールの収率は、1tのパルプで524L生産可能と設定した。これとエタノールの液密度（約0.8kg/L）を用いて1kgのエタノール製造に必要なパルプの量を推定した。

表2-3-1-4-1 エタノール製造時のセルロース使用量

	パルプ投入量 [kg/kg-エタノール]
原料消費量	2.39

（2）セルロース輸送

本研究開発では、製紙工場内で製造されたパルプを用いて同一の製紙工場内でエタノールを製造することとしているため、輸送は発生しない設定とした。

2-3-1-4-2 生産（セルロース～PEの生産）

（1）エタノール製造

表2-3-1-4-2-1にパルプからエタノールを製造するプロセスの入出力データを示す。パルプからエタノールを製造するプロセスは、製紙工場内で行われる設定とし、現時点ではパルプ製造時に得られる黒液をプロセスで投入される電力・蒸気に充てて製造するモデルとした。また、電力、蒸気以外に酵素、水が消費され、廃棄物として排水についても考慮することとした。

なお、本プロセスでは、パルプから糖化発酵を経てバイオエタノールが生成される。このとき、パルプから糖まではほぼ100%の収率であるが、エタノール発酵反応時のCO₂大気放出（バイオ起源であるため計上しない）は考慮している。

表 2-3-1-4-2-1 エタノール製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	セルロース（パルプ）	2.39	kg
	電力（黒液由来）	3.88	kWh
	蒸気（黒液由来）	0.011	kg
	酵素	0.0048	kg
	工業用水	0.024	m3
廃棄物	排水	0.024	m3
生産物	エタノール	1	kg

(2) エタノール輸送

表 2-3-1-4-2-2 にエタノールの輸送シナリオを示す。製紙工場で製造されたエタノールは、ポリエチレン製造を行う工場まで輸送され、ここでエチレンを経てポリエチレンとなる設定とした。エタノールの輸送経路としては、現時点では、以下の 24 ケースを想定した。輸送経路の出発地は王子製紙もしくは王子マテリアの 6 製紙工場、到着地は日本ポリエチレンの 4 工場を設定した。

表 2-3-1-4-2-2 エタノール輸送のシナリオ

シナリオ項目	シナリオ	
輸送経路・距離	1. 米子→鹿島	843km
	2. 米子→川崎	729km
	3. 米子→水島	156km
	4. 米子→大分	448km
	5. 日南→鹿島	1,501km
	6. 日南→川崎	1,387km
	7. 日南→水島	519km
	8. 日南→大分	714km
	9. 春日井→鹿島	454km
	10. 春日井→川崎	340km
	11. 春日井→水島	367km
	12. 春日井→大分	828km
	13. 苫小牧→鹿島	1,070km
	14. 苫小牧→川崎	1,116km
	15. 苫小牧→水島	1,648km
	16. 苫小牧→大分	2,124km
	17. 富岡→鹿島	774km
	18. 富岡→川崎	660km
	19. 富岡→水島	151km
	20. 富岡→大分	641km
	21. 王子マテリア呉→鹿島	916km
	22. 王子マテリア呉→川崎	803km
	23. 王子マテリア呉→	142km
	24. 王子マテリア呉→大分	365km
平均距離（単純平均）		779km

(3) エチレン製造

表2-3-1-4-2-3にエタノールからエチレンを製造するプロセスの入出力データを示す。エチレン製造プロセスに関しては、エタノール投入量以外は、ここでは文献よりエタノール→エチレン製造プロセスのバックグラウンドデータを用いて算定を行った。

表2-3-1-4-2-3 エチレン製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	エタノール	1.64	kg
生産物	エチレン	1	kg

エタノール以外の入出力データは文献に基づいて設定

(4) ポリエチレン製造

表2-3-1-4-2-4にエチレンからポリエチレンを製造するプロセスの入出力データを示す。ポリエチレン製造プロセスに関しては、エチレン投入量以外は、ここでは文献よりのエチレン→ポリエチレン製造プロセスのバックグラウンドデータを用いて算定を行った。

表2-3-1-4-2-4 ポリエチレン製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	エチレン	1.02	kg
生産物	ポリエチレン	1	kg

エチレン以外の入出力データは文献に基づいて設定

2-3-1-5 ポリ乳酸に関する評価条件（評価対象製品）

以下に、ポリ乳酸のCO₂排出量の算定に用いた評価条件を示す。以下に示す評価条件は、ことわりの無い限り、本研究開発の中で得られた情報である。

具体的にはセルロース～乳酸～ポリ乳酸の一部についてフォアグラウンドデータを王子ホールディングス株式会社より収集した。

2-3-1-5-1 原材料調達

(1) セルロース使用量

表2-3-1-5-1に乳酸製造時のセルロース使用量を示す。乳酸の原料としては、セルロース（パルプ）が使用し、パルプから乳酸の収率は、培養収率95%、精製収率90%より総合で85.5%となる設定とした。この収率から1kgの乳酸の製造に必要なパルプの量を推定した。

表2-3-1-5-1 エタノール製造時のセルロース使用量

	パルプ投入量 [kg/kg-乳酸]
原料消費量	1.17

(2) セルロース輸送

本研究開発では、製紙工場内で製造されたパルプを用いて同一の製紙工場内でエタノールを製造することとしているため、輸送は発生しない設定とした。

2-3-1-5-2 生産（セルロース～PLA の生産）

（1）乳酸製造

表2-3-1-5-2にパルプから乳酸を製造するプロセスの入出力データを示す。パルプから乳酸を製造するプロセスは、製紙工場内で行われるため、現時点ではパルプ製造時に得られる黒液をプロセスで投入される電力・蒸気に充てて製造するモデルとしている。また、電力、蒸気以外に酵素、炭酸カルシウムが消費され、石膏が排出される。この石膏はリサイクルされていることから、廃棄物としては扱わないこととした。

なお、現時点では、乳酸製造における電力、蒸気量は不明であるが、いずれも黒液を燃料として使用していることから、CO2 排出量の算定には影響しないこととした。（排出量は0）

表2-3-1-5-2 乳酸製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	セルロース（パルプ）	2.39	kg
	電力（黒液由来）	-	kWh
	蒸気（黒液由来）	-	kg
	酵素	0.0031	kg
	炭酸カルシウム	0.56	kg
排出物	石膏（リサイクル）	0.76	kg
生産物	乳酸	1	kg

（2）乳酸輸送

現時点では、製紙工場で製造された乳酸を、同じ製紙工場内でポリ乳酸化する設定とした。今後の検討においては、他の工場でのポリ乳酸製造も検討しているが、現時点では乳酸の輸送は発生しない設定とした。

（3）ポリ乳酸製造

表2-3-1-5-3に乳酸からポリ乳酸を製造するプロセスの入出力データを示す。ポリ乳酸製造プロセスに関しては、乳酸投入量以外は、ここでは文献よりの乳酸→ポリ乳酸製造プロセスのバックグラウンドデータを用いて算定を行った。

表2-3-1-5-3 ポリ乳酸製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	乳酸	1.25	kg
生産物	ポリ乳酸	1	kg

エチレン以外の入出力データは文献に基づいて設定

2-3-2 CO2削減効果の推計

サンプル精製プラントの仕様書をもとに、予測値としてフォアグラウンドデータを収集し、1章で設定した評価条件・評価範囲をもとに、CO2削減効果の推計を行った。なお、比較製品については、既存の文献値を整理して数値を引用した。

2.1節には、ポリエチレンのCO2排出量削減効果の推計結果、2.2節にはポリ乳酸のCO2排出量及び削減効果の推計結果を示す。

2-3-2-1 PEのCO2排出量削減効果推計

2-3-2-1-1 評価対象製品のCO2排出量

表2-3-2-1-1に評価対象である非可食セルロース由来のポリエチレンについて、1kgあたりのCO2排出量の算定結果を示す。また、表2-3-2-1-2に算定に用いた出典を示す。エタノールの輸送については、24のシナリオの平均値(779km輸送)を採用した。

炭素吸収分については、ポリエチレンの組成((C₂H₄)_n)から炭素が全てCO₂として吸収されているとすると、1kgあたり3.14kg-CO₂の吸収量となる。これは、非エネルギー起源となるが、製造時のCO₂排出量に比べても大きい数値となる。

結果として、エネルギー起源のCO₂排出量は1.6~1.9kg-CO₂e程度、炭素吸収等の非エネルギー起源まで含めた場合には、最終的な回収・廃棄を含めない今回の評価範囲だけでみると-1.1~-0.8 kg-CO₂e程度とネットでは負の排出量(ネットでは吸収)となる。

なお、出典3に関しては、全てのプロセスについて、改訂可能な箇所をIDEAデータベースに置き換えた結果となっている。

表2-3-2-1-1 非可食セルロース由来のポリエチレンのCO2排出量

		CO2排出量[kg-CO ₂ e/kg-PE]		
		出典1	出典2	出典3
プロセス別	炭素吸収	-3.14	-3.14	-3.14
	原材料調達～エタノール生産	0.424	0.424	0.405
	エタノール輸送	0.0905	0.0905	0.0865
	エタノール～エチレン生産	1.20	1.20	1.14
	エチレン～ポリエチレン生産	0.624	0.312	0.481
排出起源別	エネルギー起源	1.87	1.57	1.62
	非エネルギー起源	-2.68	-2.69	-2.64
合計		-0.81	-1.12	-1.02

表 2-3-2-1-2 非可食セルロース由来のポリエチレンの算定に用いた出典

プロセス等		出典名
エタノール→エチレン製造		Environmental Systems Analysis, Chalmers Univ. of Technology, “SPINE LCI dataset: Ethylene production from cane based ethanol. ESA-DBP” (2009)
ポリエチレン製造	出典 1	EUROPEAN COMMISSION, “Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers”
	出典 2	K.G. Harding, J.S. Dennis, H. von Blottnitz, S.T.L. Harrison, “Environmental analysis of plastic production processes: Comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly-3-hydroxybutyric acid using life cycle analysis” (2007)
	出典 3	The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) and Japan Environmental Management Association For Industry (JEMAI), “Inventory Database for Environmental Analysis (IDEA) v2.2” (2018)

2-3-2-1-2 比較製品の CO2 排出量

表 2-3-2-1-2 に比較相手となる石油原料由来のポリエチレン 1kg の製造時 CO2 排出量を示す。石油原料由来のポリエチレンについて、複数の文献を整理し、このうち欧州と日本のデータを整理した。なお、既存文献におけるポリエチレンは、大きく低密度ポリエチレン (LDPE)、高密度ポリエチレン (HDPE) に分かれている。今回の評価対象となる非可食セルロース由来ポリエチレンの性状により、妥当な比較相手を検討すべきであるが、現時点では、LDPE、HDPE の両方の結果を示す。

表 2-3-2-1-2 石油原料由来ポリエチレンの CO2 排出量 (製造時)

		1kg あたりの CO2 排出量 [kg-CO2e/kg]
欧州の事例 ¹⁾	LDPE	1.87
	HDPE	1.80
日本の事例 ²⁾	LDPE	1.52
	HDPE	1.33

出典：1) PlasticsEurope, “Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers” (2016)

2) 一般社団法人プラスチック循環利用協会, “LCA を考える「ライフサイクルアセスメント」考え方と分析事例” (2019)

2-3-2-1-3 非可食セルロース由来ポリエチレンによる CO2 排出量削減効果の推計結果

表 2-3-2-1-3-1 及び図 2-3-2-1-3 に評価対象製品と比較製品のそれぞれ 1kg あたりの製造時 CO2 排出量を示す。非可食セルロース由来 PE について最も CO2 排出量の多い出典 1 の結果で比較を示す。この場合、PE1kg あたりの排出量は 2.1~2.7kg-CO2e の削減となった。

表 2-3-2-1-3-1 CO2 排出量削減効果の推計結果

	評価対象製品	比較製品			
		LDPE (欧州)	HDPE (欧州)	LDPE (日本)	HDPE (日本)
CO2 排出量 [kg-CO2e/kg]	-0.81	1.87	1.80	1.52	1.33
削減効果 [kg-CO2e/kg]	-	2.68	2.61	2.33	2.12

削減効果は各比較製品の CO2 排出量と評価対象製品の CO2 排出量の差分

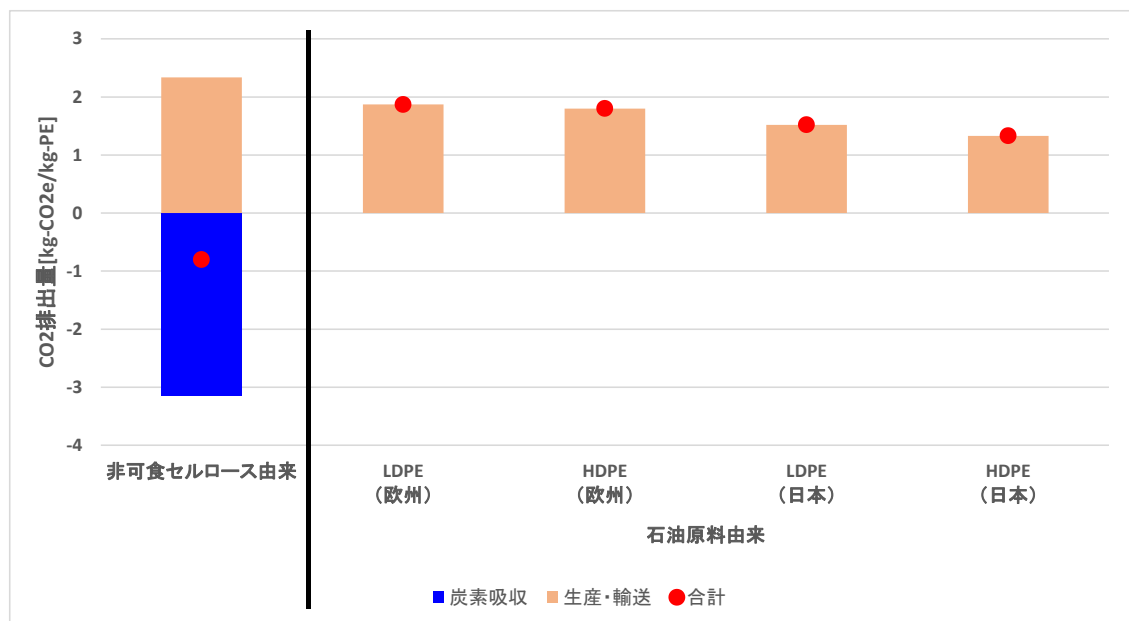


図 2-3-2-1-3 CO2 排出量削減効果の推計結果

表 2-3-2-1-3-2 にはエネルギー起源の排出量のみを比較した。非可食セルロース由来の PE について出典 1 でみると石油原料由来のデータが非エネルギー起源も含んでいるため、単純には比較できないが、おおよそ同程度の排出となった。なお、非可食セルロース由来の CO2 排出量では最も大きな排出源はエタノール～エチレン製造のプロセスとなった。

表 2-3-2-1-3-2 CO2 排出量の推計結果 (エネルギー起源のみ)

	評価対象製品	比較製品			
		LDPE (欧州)	HDPE (欧州)	LDPE (日本)	HDPE (日本)
CO2 排出量 [kg-CO2e/kg]	1.87	1.87	1.80	1.52	1.33

削減効果は各比較製品の CO2 排出量と評価対象製品の CO2 排出量の差分

2-3-2-2 PLA の CO2 排出量削減効果推計

2-3-2-2-1 評価対象製品の CO2 排出量

表 2-3-2-2-1 に評価対象である非可食セルロース由来のポリ乳酸について、1kg あたりの CO2 排出量の算定結果を示す。なお、材料の歩留以外の原材料からポリ乳酸までの製造プロセスにおける入出力データは、Erwin T.H. Vink, Steve Davies, “Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo Polylactide Production” (2014) を参照して算定を行った。

炭素吸収分については、ポリ乳酸の組成 (C₃H₄O₂) から炭素が全て CO₂ として吸収されているとすると、1kg あたり 1.83kg-CO₂ の吸収量となる。これは、非エネルギー起源となるが、製造時の CO₂ 排出量に比べても大きい数値となった。

結果として、エネルギー起源の CO₂ 排出量は 1.19kg-CO₂e 程度、炭素吸収等の非エネルギー起源まで含めた場合には、最終的な回収・廃棄を含めない今回の評価範囲だけでみると -0.31 kg-CO₂e 程度とネットでは負の排出量（ネットでは吸収）となった。

表 2-3-2-2-1 非可食セルロース由来のポリ乳酸の CO2 排出量

		CO2排出量[kg-CO2e/kg-PLA]
プロセス別	炭素吸収	-1.83
	原材料調達～乳酸生産	0.787
	乳酸～ポリ乳酸生産	0.740
排出起源別	エネルギー起源	1.19
	非エネルギー起源	-1.50
合計		-0.31

2-3-2-2-2 比較製品の CO2 排出量

表 2-3-2-2-2 に比較相手となるとうもろこし由来のポリ乳酸 1kg の製造時 CO₂ 排出量を示す。とうもろこし由来のポリ乳酸について、文献の数値から整理した。なお、この結果にでも炭素吸収分（文献値では吸収分は 1.83 ではなく、1.84 となっている）が含まれた数値とした。

表 2-3-2-2-2 とうもろこし由来ポリ乳酸の CO2 排出量（製造時）

	1kg あたりの CO2 排出量 [kg-CO2e/kg]
炭素吸収分	-1.84
生産	2.44
合計	0.60

出典：1) Erwin T.H. Vink, Steve Davies “Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo Polylactide Production” (2015)

2-3-2-2-3 非可食セルロース由来ポリ乳酸による CO2 排出量削減効果の推計結果

表 2-3-2-2-3 及び図 2-3-2-2-3 に評価対象製品と比較製品のそれぞれ 1kg あたりの製造時 CO2 排出量を示す。PLA1kg あたりの排出量では 0.91kg-CO2e の削減となった。

表 2-3-2-2-3 CO2 排出量削減効果の推計結果

	評価対象製品	比較製品
CO2 排出量 [kg-CO2e/kg]	-0.31	0.60
削減効果 [kg-CO2e/kg]	-	0.91

削減効果は各比較製品の CO2 排出量と評価対象製品の CO2 排出量の差分

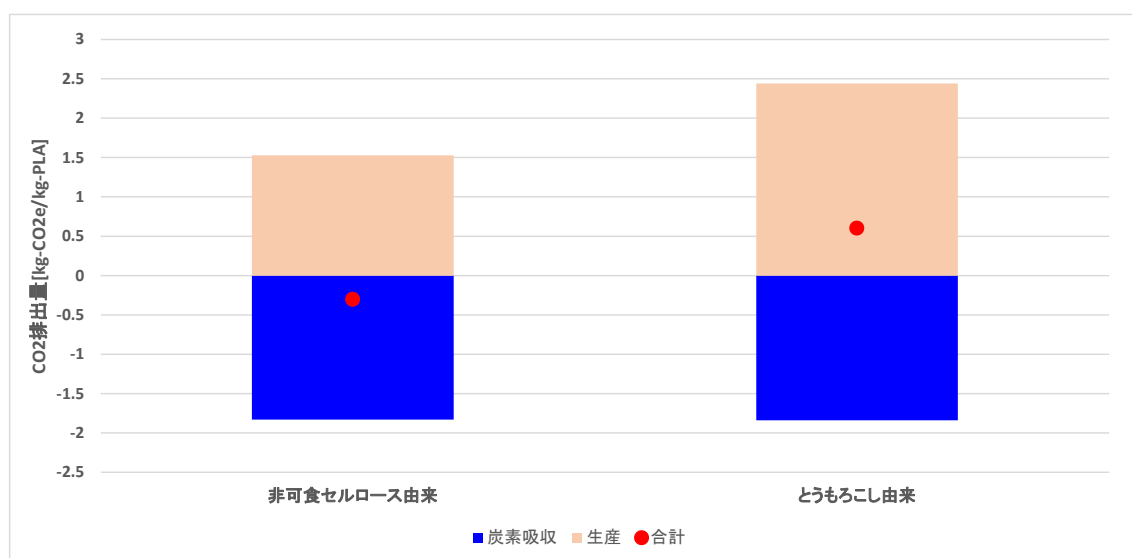


図 2-3-2-2-3 CO2 排出量削減効果の推計結果

なお、PLA ではエネルギー起源を今回の評価結果と比較した場合、非可食セルロース由来の PLA が PLA1kg あたり 1.19kg-CO2e であるのに対して、文献値で得られるとうもろこし由来の PLA では 1kg あたり 2.44kg-CO2e となった。

2-3-3 普及段階における CO2 削減効果の算定方法の検討

ここでは、実証スケールとして推計した CO2 削減効果の内容を基に、普及段階での CO2 削減効果の算定方法を検討した。表 2-3-3 にポリエチレン、ポリ乳酸に関する普及段階の削減効果算定時の課題を示す。

算定方法としては、現状から大きな変更は必要ないと考えられた。そのため、実証スケールにおける運用データ、また、その際の各種条件の設定の検討などが課題と考えられた。

表 2-3-3 普及段階における CO2 削減効果算定における課題

	算定時の課題
共通	✓ 製紙工場内におけるエタノール、乳酸製造プロセスにおけるエネルギーバランスの精査（黒液利用可能量の確認） ✓ 実証スケールプラントにおける収率、エネルギー効率等をもとにした再算定
ポリエチレン	✓ 実証スケールプラントにおけるエチレン製造プロセスにおける入出力データの確認（通常のエチレン製造プロセスの入出力データとの乖離について） ✓ 普及段階の輸送プロセスの検討 ✓ ポリエチレンの廃棄・リサイクルシナリオの検討（国内平均）
ポリ乳酸	✓ 比較対象となろうもろこし等の CO2 排出量の評価条件の分析と比較評価の精査（同等条件での算定についての検討） ✓ 普及段階の輸送プロセスの検討

2-4 リサイクル性評価

2-4-1 リサイクル性評価手法

2-4-1-1 バイオポリエチレンのリサイクル性評価

一般社団法人プラスチック循環利用協会の資料²によると、2017年にマテリアルリサイクルされた廃プラスチックは211万トンあり、内31万トン（14.7%）がポリエチレンである。今後、本実証事業にて施策を検討しているフィルム製品（レジ袋、ゴミ袋、ショッピングバック）にてリサイクル性の評価を行う予定である。具体的な実施回数、規模については、試作の目途が立った段階でリサイクル業者と再度協議する必要があるが、製品単体でのリサイクル性評価（単体評価）および、製品と通常の回収ルートで回収された樹脂との混合でのリサイクル評価（混合評価）の実施を検討することとした。

2-4-1-2 ポリ乳酸のリサイクル性評価

ポリエチレンと異なり、ポリ乳酸は一般的にはリサイクルが実施されておらず、リサイクル方法が確立されていないのが現状である。ポリ乳酸のリサイクル性評価手法は今後、検討することとした。

² 出所：プラスチックリサイクルの基礎知識（プラスチック循環利用協会、2019年7月23日、<https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf1.pdf>）

2-5. マーケティング

2-5-1 バイオプラスチック概観

2-5-1-1 バイオプラスチックの種類

バイオプラスチックとは、微生物によって生分解される「生分解性プラスチック」およびバイオマスを原料に製造される「バイオマスプラスチック」の総称である。

プラスチックを原料が化石由来かバイオマスか、製品が生分解性か非生分解性かを観点にプラスチックを分類すると、

- ①原料がすべて化石由来で生分解性のプラスチック
- ②原料がすべて化石由来で非生分解性のプラスチック
- ③原料が一部化石由来、一部バイオマスで、生分解性のプラスチック
- ④原料が一部化石由来、一部バイオマスで、非生分解性のプラスチック
- ⑤原料がすべてバイオマスで、生分解性のプラスチック
- ⑥原料がすべてバイオマスで、非生分解性のプラスチック

の6種類に分類される。

このうち、①、③、⑤が生分解性プラスチックで、⑤、⑥が100%バイオマスプラスチックである。⑤は生分解性であると同時に100%バイオマスプラスチックに分類されるプラスチックである。

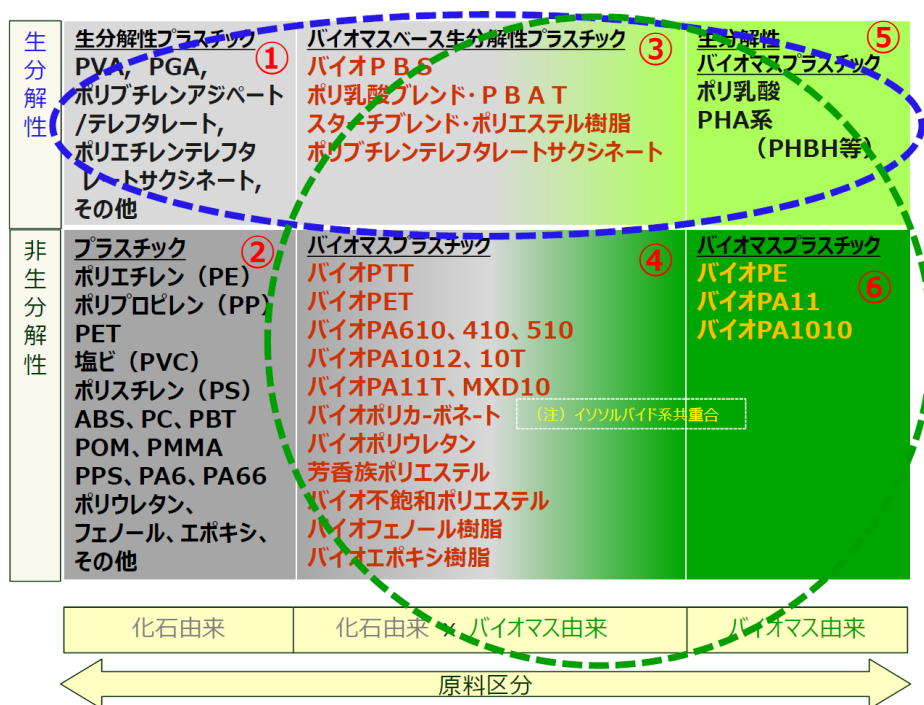


図 2-5-1-1-1 バイオプラスチックの種類³

³ 出所：バイオプラスチック概況（日本バイオプラスチック協会、2018年9月19日、<http://www.env.go.jp/council/03recycle/y0312-02/y031202-5r.pdf>）

①の代表例としては、PVA（ポリビニルアルコール）、PGA（ポリグリコール酸）、
 ②は従来から存在する通常のプラスチック、
 ③の代表例としては、PBS（ポリブチレンサクシネート）、PLA ブレンド PBAT（ポリ乳酸ブレンド・ポリブチレンアジペートテレフタレート）、
 ④の代表例としては、PTT（ポリトリメチレンテレフタレート）、PET（ポリエチレンテレフタレート）、
 ⑤の代表例としては、PLA（ポリ乳酸）、PHA（ポリヒドロキシアルカノエート）、
 ⑥の代表例としては、バイオ PE（バイオポリエチレン）、バイオ PA10（ポリアミド 10）、
 などである。

2-5-1-2 バイオプラスチックの生産能力

欧州バイオプラスチック協会の資料⁴によると、世界における全プラスチックの生産量は 3 億 6,000 万トンで、世界におけるバイオプラスチックの生産能力が約 211 万トン（2019 年）であることから、バイオプラスチックのシェアは 2019 年時点で約 0.6%程度と推計される。

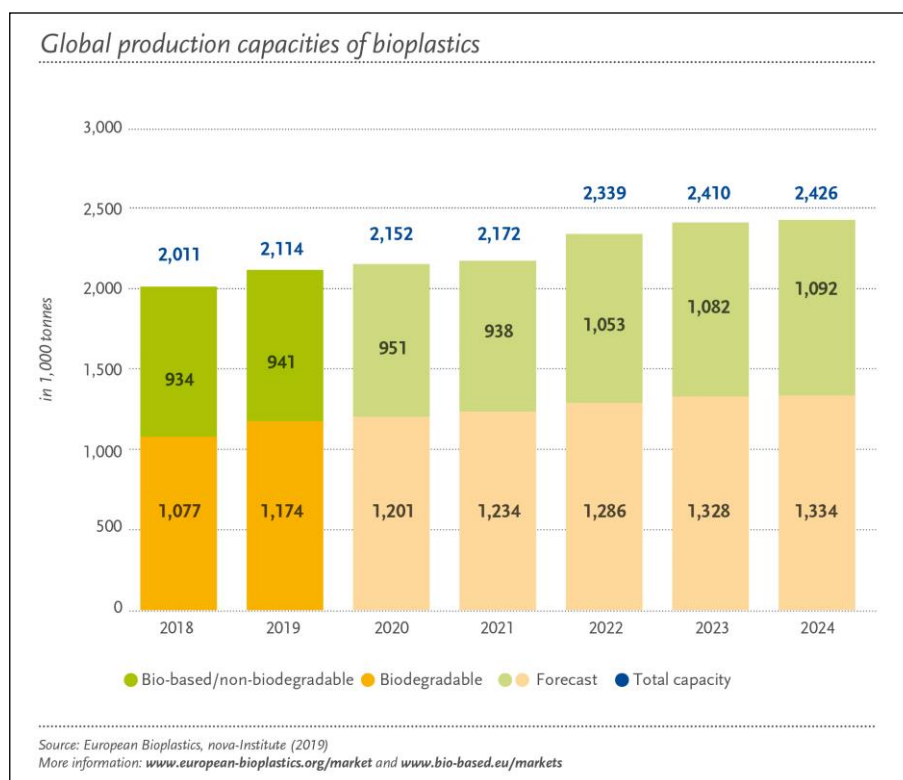


図 2-5-1-2-1 世界全体でのバイオプラスチック生産能力推移⁵

しかしながら、バイオベースで非生分解性のプラスチック（前節の④、⑥）の生産能力は、2019 年の 94.1 万トンから 2024 年には 109.2 万トンと、CAGR（年平均成長率）3.0%で伸び、生分解性（前節の①、③、⑤）の生産能力は、2019 年の 117.4 万トンから 2024 年には 133.4 万トンと、CAGR2.6%で伸びると予測されている。

⁴ 出所：Bioplastics market data 2019（European Bioplastics、
https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/Report_Bioplastics_Market_Data_2019.pdf）

⁵ 出所：Bioplastics market data 2019（European Bioplastics、
https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/Report_Bioplastics_Market_Data_2019.pdf）

プラスチックの種類別でみると、バイオ PP（ポリプロピレン）やバイオ PHA（ポリヒドロキシアルカノエート）などの新規開発バイオポリマーの成長率が最も大きい。2019 年、バイオ PP が商業規模で市場に投入された。PP は広範な分野の広範な用途で利用されていることから、力強い成長性があると考えられている。2024 年の PP の生産能力は 2019 年の約 6 倍になると予測されている。また、PHA 系プラスチックも 2024 年の生産能力は 2019 年の 5 倍以上になると予測されている。⁶

表 2-5-1-2-2 世界のバイオプラスチック生産能力推移⁷
(2019 年実績および 2024 年予測)

	2019年（実績）		2024年（予測）		伸び率
	数量 (千トン)	比率	数量 (千トン)	比率	
Starch blends	449	21.3%	448	18.5%	-0.4%
PLA	293	13.9%	317	13.1%	8.1%
PA	245	11.6%	303	12.5%	23.6%
PE	249	11.8%	290	12.0%	16.6%
PBAT	283	13.4%	281	11.6%	-0.7%
PTT	194	9.2%	194	8.0%	-0.3%
PHA	25	1.2%	160	6.6%	530.8%
PET	207	9.8%	145	6.0%	-29.8%
PP	19	0.9%	128	5.3%	575.4%
PBS	91	4.3%	92	3.8%	1.4%
PEF	0	0.0%	5	0.2%	-
Other (biodegradable)	30	1.4%	31	1.3%	6.5%
Other (bio-based/non-biodegradable)	23	1.1%	22	0.9%	-6.2%
合計	2,110	100.0%	2,420	100.0%	14.7%

Starch blends は、2019 年実績および 2024 年予測、いずれにおいてもトップシェアであるが、生産能力数量は現状維持で増加しないと予測されている。

バイオ PE の生産能力は、今後の数年で欧州において新設が計画されていることから、継続して増大すると予測されている。2019 年実績 24.9 万トンから 2024 年には 29.0 万トンと、4.1 万トン増大（16.5%増大）すると予測されている。

⁶ 出所：BIOPLASTICS MARKET DEVELOPMENT UPDATE 2019（European Bioplastics、https://www.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2019/11/Report_Bioplastics-Market-Data_2019_short_version.pdf）

⁷ 出所：BIOPLASTICS MARKET DEVELOPMENT UPDATE 2019（European Bioplastics、https://www.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2019/11/Report_Bioplastics-Market-Data_2019_short_version.pdf）

PLA の生産能力は 2019 年実績 29.3 万トンおよび 2024 年予測 31.7 万トンであり、いずれにおいてもセカンドシェアであるが、2019 年から 2024 年にかけて 2.4 万トン増大 (8.2%増大) すると予測されている。

一方、バイオ PET の生産能力は過去数年で予測されたほど増大していない。その代わり、2023 年に市場参入すると期待されている新規ポリマーである PEF (ポリエチレンフタレート) の開発に注目がシフトしてきている。PEF は PET に匹敵する特長を有しているが、それに加えて、100%バイオベースであり、遮断性と耐熱性に優れていることから 飲料、食品、非食品の理想的な包装材料と考えられている。⁸

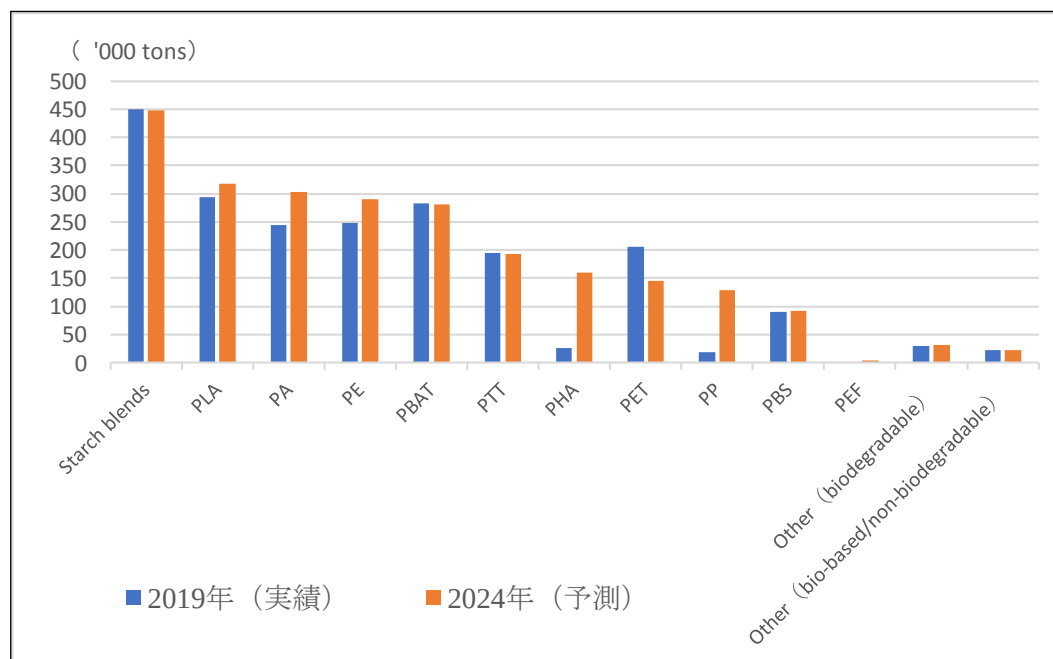


図 2-5-1-2-3 世界のバイオプラスチック生産能力推移⁹
(2019 年実績および 2024 年予測)

⁸ 出所：BIOPLASTICS MARKET DEVELOPMENT UPDATE 2019 (European Bioplastics、https://www.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2019/11/Report_Bioplastics-Market-Data_2019_short_version.pdf)

⁹ 出所：BIOPLASTICS MARKET DEVELOPMENT UPDATE 2019 (European Bioplastics、https://www.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2019/11/Report_Bioplastics-Market-Data_2019_short_version.pdf)

2-5-2. バイオポリエチレン

2-5-2-1 製造企業および実証・検討企業

世界における大手のバイオポリエチレン樹脂メーカーは下記のとおりである。

2-1-2-1-1 Braskem

ブランド名 : I' m Green™
製造拠点 : ブラジル
生産能力 : 20 万トン/年
原料 : サトウキビ

現時点でバイオ PE を生産しているメーカーはブラスケム社（ブラジル）のみである。同社のグリーンエチレンプラントは 2 億 9000 万米ドルの投資により建設された後、2010 年 9 月からバイオ PE の商業生産を開始している。バイオ PE の商標は「I' m green™」で、年間生産能力は 20 万トン。

従来の PE は石油や天然ガスなどの化石資源を原料として製造されているが、同社のバイオ PE は再生可能原料であるサトウキビから製造される。したがって、同社のバイオ PE は大気中の CO₂ を固定して、温室効果ガス排出を低減するとしている。

同社のバイオ PE には、高密度ポリエチレン（HDPE）、直鎖状低密度ポリエチレン（LLDPE）、低密度ポリエチレン（LDPE）がある。

2-5-2-1-2 Neste / LyondellBasell

ブランド名 : 『Circulen』および『Circulen Plus』
製造拠点 : ドイツ
生産能力 : 不詳
原料 : 廃棄物や残渣

廃棄物や残渣から再生可能軽油を製造する世界最大のメーカーであるネステ社の 2019 年 6 月 18 日のリリース¹⁰によると、同社は、プラスチック・化学品・石油精製の大手メーカーであるライオンデルバゼル社と共に、バイオ PP およびバイオ低密度ポリエチレン（LDPE）を並行生産する共同プロジェクトを実施した。生産拠点は Wesseling（ドイツ）。

共同プロジェクトでは、廃棄物や残渣などの持続可能なバイオ原料から生産されるネステ社の再生可能炭化水素を使用した。食品包装で認められたバイオプラスチック数千トンが生産され、ライオンデルバゼルのサーキュラーエコノミー製品の新ブランド『Circulen』および『Circulen Plus』として販売される予定である。独立した第三者がカーボントレーサーを使用してポリマー製品をテストしたが、30%以上の再生可能物質を含んでいることが確認されている。

¹⁰ 出所：ネステ社のホームページ（2019 年 6 月 18 日、
<https://www.neste.com/releases-and-news/neste-and-lyondellbasell-announce-commercial-scale-production-bio-based-plastic-renewable-materials>）

2-5-2-1-3 Dow¹¹

ブランド名 : 未定
製造拠点 : オランダ
生産能力 : 不詳
原料 : トール油（紙パルプ生産時の残渣）

2019年9月24日、世界における最大手化学会社のダウは、先進的なバイオ燃料製造企業である UPM Biofuels 社と提携して、バイオベースの再生可能原料から製造されるプラスチックを包装産業向けに販売すると発表した。

ダウは木材ベースの「UPM BioVerno」と呼ばれる再生可能ナフサ（今回のプラスチックの重要な原料）をプラスチック製造の代替原料とするもの。同社の Terneuzen（オランダ）プラントにおいて、この原料を利用してバイオ PE を製造する。

「UPM BioVerno」ナフサは Lappeenranta（フィンランド）にある UPM 社のバイオリファイナリーにおいて、紙パルプ生産時の残渣であるトール油から製造される。他の代替再生可能原料と異なり、原料生産のために別の土地を必要とせず、持続可能に管理された森林から得られるものである。

¹¹ 出所：Dow ホームページ（2019年9月24日、
<https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-and-upm-partner-to-produce-plastics-made-with-renewable-feedstock.html>）

2-5-2-2 用途

バイオPEは、再生可能なバイオマス資源を原料に、化学的または生物学的に合成することで得られるプラスチックであり、大気中のCO₂の濃度を上昇させないという特徴を有する。バイオPEの分子構造は石油由来ポリエチレンの分子構造と同じである。したがって、石油由来ポリエチレンの用途のすべてに代替可能であるが、代替の実現は、価格や供給能力などの物性以外の条件に依存することとなる。

バイオPEは、現在、レジ袋、シャンプーボトル、化粧品ボトル、ペットボトルのキャップ、ディスポーザブル手袋、エプロン、ゴミ袋、食品包装用各種フィルムなどで利用されている。

2-5-2-3 今後の見通し

現時点でバイオPEを生産しているメーカーはブラスケム社（ブラジル）のみで、その生産能力は20万トンである。2019年の世界的な環境問題への関心の高まりから、同社へのバイオPEの引き合いは大幅に増大しており、そのすべてに対応できていない状況である。

20万トンのうち、大部分は米国や欧州向け輸出、およびブラジル国内向けと推測される。日本国内へのバイオPE供給は、2019年で約3万トン/年程度の模様である。

今後も世界におけるバイオPEの需要は増大していくと考えられるが、ここ2～3年は需要が供給を大きく上回る状況で推移するであろう。Neste/LyondellBasell およびDowのバイオPE市場への参入が本格化することによって初めて需給がバランスしてくるのではないかと考えられる。

2-5-3. ポリ乳酸

2-5-3-1 製造企業および実証・検討企業

世界における大手の PLA（ポリ乳酸）樹脂メーカーは下記のとおりである。

2-5-3-1-1 NatureWorks LLC

ブランド名 : Ingeo
製造拠点 : 米国
生産能力 : 約 15 万トン/年
原料 : 主にトウモロコシ

穀物メジャーのカーギルおよびタイ最大の化学メーカーである PTT Global Chemical を出資者とする企業。Blair（米国ネブラスカ州）に生産能力が約 15 万トン/年の本社工場を有し、2002 年から稼働させている。貿易統計によると日本は同社から 2018 年に約 4,800 トン、2019 年に約 3,800 トンを輸入している。

PLA の米国からの輸入平均単価は下表のとおり推移している。変動はあるものの、直近 5 年間は、210 円/kg～270 円/kg の範囲で推移している。

表 2-1-3-1-1 PLA の米国からの輸入平均単価推移¹²

年	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
輸入平均単価（円/kg）	176	213	225	269	216	224	235	253

¹² 出所：財務省貿易統計

(<https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm?M=01&P=0,2,,,,,,,,,4,1,2019,0,0,0,2,390770,,,,,,,,,1,,,,,,,,,20>) なお、数値は CIF 価格（保険料・運賃込み価格）で輸入関税は含まれない。

表 2-1-3-1-2 PLA の輸入数量・金額推移¹³

	2012			2013			2014			2015		
	数量 (トン)	金額 (千円)	平均 単価 (円/kg)	数量 (トン)	金額 (千円)	平均 単価 (円/kg)	数量 (トン)	金額 (千円)	平均 単価 (円/kg)	数量 (トン)	金額 (千円)	平均 単価 (円/kg)
米国	5,705	1,006,802	176	5,277	1,125,738	213	5,393	1,215,588	225	3,338	897,642	269
中国	86	18,057	209	92	23,103	252	153	42,486	278	71	22,347	315
台湾	0	0		0	0		1	228	326	0	0	
タイ	0	0		0	0		0	0		0	0	
オランダ	1	6,000	4,950	0	754	2,148	0	1,045	8,636	2	17,030	9,073
ドイツ	0	1,800		0	274		0	733		0	35,403	7,080,600
イタリア	0	0		0	0		0	0		0	0	
フィリピン	0	0		1	241	438	0	0		0	0	
英国	0	1,163		0	0		0	0		0	0	
マレーシア	0	0		0	269	897	0	0		0	0	
合計	5,792	1,033,822	178	5,370	1,150,379	214	5,547	1,260,080	227	3,411	972,422	285

	2016			2017			2018			2019		
	数量 (トン)	金額 (千円)	平均 単価 (円/kg)	数量 (トン)	金額 (千円)	平均 単価 (円/kg)	数量 (トン)	金額 (千円)	平均 単価 (円/kg)	数量 (トン)	金額 (千円)	平均 単価 (円/kg)
米国	3,964	855,056	216	4,644	1,040,293	224	4,824	1,132,914	235	3,779	956,544	253
中国	37	8,745	238	53	12,572	239	98	23,160	236	272	67,204	247
台湾	0	0		0	0		1	316	602	1	362	453
タイ	0	0		0	0		3	737	238	466	141,176	303
オランダ	1	15,459	20,394	0	1,925	320,833	0	3,230	293,636	0	2,899	289,900
ドイツ	0	3,967	233,353	0	6,470	808,750	0	9,376	1,041,778	0	36,568	2,151,059
イタリア	0	0		0	0		0	0		1	502	793
フィリピン	0	300	2,500	0	0		0	0		0	0	
英国	0	0		0	0		0	0		0	0	
マレーシア	0	0		0	0		0	0		0	0	
合計	4,001	883,527	221	4,697	1,061,260	226	4,926	1,169,733	237	4,518	1,205,255	267

¹³ 出所：財務省貿易統計(<https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm?M=01&P=0,2,,,,,,,,,4,1,2019,0,0,0,2,390770,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,20>) なお、数値は CIF 価格（保険料・運賃込み価格）で輸入関税は含まれない。

2-5-3-1-2 Total Corbion PLA

ブランド名 : Luminy
製造拠点 : タイ
生産能力 : 7.5 万トン/年 (2018 年時点)
原料 : 主にサトウキビ

フランスの総合石油化学会社で、スーパー・メジャー¹⁴ (国際石油資本) 6 社のうちのひとつである Total 社と、オランダの乳酸大手メーカーであるコービオン社の折半出資により設立された企業。2018 年にタイのラヨン県に生産能力 7.5 万トン/年の工場を設立し、主にサトウキビを原料として PLA を製造している。

この新工場が稼働したことにより、2018 年に初めて、タイから日本へ PLA が輸入された。すなわち、タイから日本への PLA 輸入は、3 トン (2018 年)、466 トン (2019 年) となっている。輸入平均単価は、238 円/kg (2018 年)、303 円/kg (2019 年) となっている。

¹⁴ 石油の探鉱 (採掘)・生産・輸送・精製・販売までの全段階を垂直統合で行い、シェアの大部分を寡占する石油系巨大企業複合体

2-5-3-1-3 Zhejiang Hisun Biomaterials (浙江海正生物材料股份有限公司)

ブランド名 : REVODE
拠点 : 中国
生産能力 : 1.5 万トン/年 (2018 年時点)
原料 : トウモロコシ、キャッサバ

浙江海正グループ (Zhejiang Hisun Group Co., Ltd)、中国科学院長春応用化学研究所 (Changchun Institute of Applied Chemistry (CIAC) of Chinese Academy of Science (CAS))、台州市椒江区国有資産経営有限公司 (Taizhou Jiaojiang State-owned Assets Management Co., Ltd.) の 3 つの企業・機関により、2004 年に浙江省台州市に設立された企業。PLA を製造した中国で初の企業である。当初の生産能力は 5,000 トン/であったが、2018 年に 15,000 トン/年まで増強している。

中国には他にもメーカーがあるため、輸入通関統計では Zhejiang Hisun Biomaterials 製の数量は不明であるが、中国からの PLA 輸入量は、86 トン (2012 年)、92 トン (2013 年)、153 トン (2014 年)、71 トン (2015 年)、37 トン (2016 年)、53 トン (2017 年)、98 トン (2018 年)、272 トン (2019 年) となっている。2019 年の輸入が前年比 2.8 倍と急増している。

PLA の中国からの輸入平均単価は下表のとおりである。2016 年以降は、230 円/kg～250 円/kg の間で安定して推移している。

表 3-3 PLA の中国からの輸入平均単価推移¹⁵

年	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
輸入平均単価 (円/kg)	209	252	278	315	238	239	236	247

¹⁵ 出所：財務省貿易統計

(<https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm?M=01&P=0,2,,,,,,,,,4,1,2019,0,0,0,2,390770,,,,,,,,,1,,,,,,,,,20>) なお、数値は CIF 価格 (保険料・運賃込み価格) で輸入関税は含まれない。

2-5-3-1-4 Jiangsu Supla Bioplastics Co., Ltd.

ブランド名 : Pure PLA
拠点 : 中国・江蘇省宿遷市
生産能力 : 1 万トン/年
原料 : キャッサバ、サトウキビなど

バイオベースで完全生分解性の PLA 製品の研究・生産・販売を目的として 2012 年 4 月に中国・江蘇省宿遷市に設立された企業。非遺伝子組み換え植物（キャッサバ、サトウキビなど）を原料として、発酵法により PLA を生産している。生産能力 10,000 トン/年。同社の PLA は、光学純度 99.7%以上、耐熱温度 155 度以上という特長を有している。¹⁶

2-5-3-1-5 Synbra Technology bv

ブランド名 : Synterra
拠点 : オランダ
生産能力 : 5,000 トン/年
原料 : サトウキビ

欧州 6 カ国に計 30 箇所の製造拠点を有する EPS（ビーズ法発泡スチロール）メーカー。従来の PLA は熱変形温度が 50～60℃と低く、最終製品として使い捨ての包装資材、農業資材など用途が限られていたが、「Synterra」は約 120℃の熱変形温度を有し、機械強度と良好な加工適性を合わせ持っている。そのため、従来、自動車や家電・OA 機器などに使用されていたポリスチレンやポリカーボネート、ABS などの機能性樹脂を、植物由来に置き換えることが可能となっている。双日プラネットは、日本を含むアジア圏への販売を目的として提携している。¹⁷

2-5-3-1-6 Futerro

ブランド名 : Futerro PLA
拠点 : ベルギー
生産能力 : 1,500 トン/年（2010 年時点、パイロットプラントとして）
原料 : シュガービート（甜菜（てんさい））

大手乳酸メーカーである Galactic 社（ベルギー）と大手石油化学企業 Total（フランス）により、出資比率 50:50 で 2007 年に設立された合弁会社。Escanaffles（ベルギー）に PLA 生産能力 1,500 トン/年のプラントを有し、2009 年 11 月から稼働させている。

¹⁶ 出所 : Jiangsu Supla Bioplastics Co., Ltd. ホームページ
(<http://www.supla-bioplastics.cn/en/Channel/erjifenlei.html>)

¹⁷ 出所 : 双日プレスリリース（2012 年 11 月 26 日、<https://www.sojitz.com/jp/news/2012/11/20121126.php>）

2-5-3-2 用途

PLA は土中や水中では数年は安定だが、堆肥の中では約 1 週間で分解される。この生分解性を利用して農業用マルチシートなどに利用されている。また、微生物環境下以外では安定しており、PET、PE、PP、PS の代替として、食料包装容器、包装用フィルム、光ディスク、レジ袋、繊維製品など幅広い分野で応用されている。

2-5-3-3 今後の見通し

世界的な環境問題への関心の高まりから、PLA の需要は伸長していくと予測される。ただし、PLA はコンポスト環境下では生分解性を示すものの、土壌環境および水環境では分解されにくいという特性がある。したがって、PLA の生分解性よりもむしろバイオマス由来であることに焦点が当たった形での需要増加の方が大きいのではないかと推測される。

2-5-4 今後のマーケティング方針

2-5-4-1 バイオポリエチレンのマーケティング方針

2020 年 7 月より開始となる「プラスチック製買物袋有料化制度」に伴いレジ袋のバイオ化需要が拡大すると予想できる。また、京都市等の一部自治体では既に指定ゴミ袋のバイオ化が実施されており、今後も指定ゴミ袋のバイオ化が推進されていくと予想できる。また、空港で使用される免税袋（ファッションバック）もバイオ化が進んでいる。これらの昨今の状況から、本実証のバイオポリエチレンの主なマーケティング対象製品はゴミ袋、レジ袋、ファッションバックと設定した。今後、これらの製品の製造者、最終ユーザー（ブランドオーナー）に対し、本実証で製造する樹脂のサンプルを提供し、製品試作を検討することとした。

2-5-4-2 ポリ乳酸のマーケティング方針

ポリ乳酸の国内需要は約 4500MT であり、その大部分が透明容器に採用されている。また、一部ではあるが、ポリ乳酸繊維を使用した製品（タオル等）も販売されている。昨今の環境意識の高まりにより、ポリ乳酸の需要は伸びており、実態として供給が追い付いていない。本実証のポリ乳酸のマーケティング対象製品は、ポリ乳酸の普及が最も進んでいる透明容器、並びに一部ではあるが今後需要が伸びる可能性がある繊維製品とした。今後、これらの製品の製造者、最終ユーザー（ブランドオーナー）に対し、本実証で製造する樹脂のサンプルを提供し、製品試作を検討することとした。

3. 研究発表・講演、文献、特許などの状況

なし