

# バイオ燃料技術革新計画（案）

平成 2 0 年 3 月

バイオ燃料技術革新協議会

## 「バイオ燃料技術革新計画」

### 目次

|      |   |
|------|---|
| はじめに | 1 |
|------|---|

### 第1章 バイオ燃料

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1. 1 バイオマス・ニッポンケース（100円／Lケース）     |    |
| 1. 1. 1 具体的なモデルケース                | 4  |
| (1) モデルケースの考え方                    |    |
| (2) バイオマスの生産地                     |    |
| (3) バイオマス原料の考え方                   |    |
| (4) ベンチマークの考え方                    |    |
| (5) 製造プロセスの例示                     |    |
| 1. 1. 2 バイオマス原料に関する技術マップ、ロードマップ   | 8  |
| 1. 1. 3 エタノール製造技術に関する技術マップ、ロードマップ | 10 |
| 1. 1. 4 LCA上の留意事項について             | 10 |
| (1) 稲わらを原料とするケース                  |    |
| (2) 林地残材等未利用材を原料とするケース            |    |
| (3) 未利用古紙を原料とするケース                |    |
| 1. 2 技術革新ケース（40円／Lケース）            |    |
| 1. 2. 1 具体的なモデルケース                | 14 |
| (1) モデルケースの考え方                    |    |
| (2) バイオマスの生産地                     |    |
| (3) バイオマス原料の考え方                   |    |
| (4) ベンチマークの考え方                    |    |
| (5) 製造プロセスの例示                     |    |
| 1. 2. 2 バイオマス原料に関する技術マップ、ロードマップ   | 25 |
| (1) 草本系目的生産バイオマス                  |    |
| (2) 木質系目的生産バイオマス                  |    |
| (3) 検討の進め方                        |    |
| (4) 共通基盤技術                        |    |
| 1. 2. 3 エタノール製造技術に関する技術マップ、ロードマップ | 30 |
| (1) 重点項目の開発方針                     |    |
| (2) 各要素技術の開発方針                    |    |
| 1. 2. 4 LCA上の留意事項について             | 43 |

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| (1) 草本系目的生産バイオマスを原料とするケース                    |    |
| (2) 木質系目的生産バイオマスを原料とするケース                    |    |
| (3) その他作物の可能性                                |    |
| 1. 3 LCA評価の考え方とバイオ燃料に関わる環境問題の整理など            |    |
| 1. 3. 1 技術革新ケースとバイオマス・ニッポンケースの共通部分に<br>関する考察 | 47 |
| (1) 経済性の視点から                                 |    |
| (2) LCAの視点から                                 |    |
| (3) ゼロエミッションの視点から                            |    |
| (4) その他の検討課題                                 |    |
| 1. 3. 2 温室効果ガスのLCAについて                       | 51 |
| (1) ライフサイクル温室効果ガス排出評価                        |    |
| (2) エネルギー収支                                  |    |
| 1. 3. 3 バイオ燃料に関わる環境・社会評価                     | 54 |
| 提言：バイオ燃料の開発において配慮すべき点について                    |    |
| 1. 3. 4 今後の課題について（まとめ）                       | 58 |
| 1. 4 各技術開発段階における実施体制について                     | 59 |
| 1. 5 2015年以降の技術について                          | 62 |
| 1. 6 その他のバイオ燃料生産用の原料について                     | 64 |
| <br>第2章 バイオリファイナリー連携分野                       |    |
| 2. 1 バイオリファイナリー連携分野検討の意義                     | 66 |
| 2. 2 バイオリファイナリー連携分野の技術マップ、ロードマップ             |    |
| 2. 2. 1 バイオリファイナリー技術の整理                      | 66 |
| 2. 2. 2 プロピレンに関するロードマップ                      | 71 |
| 2. 2. 3 ブタノールのバイオ燃料としての可能性                   | 75 |
| 2. 3 バイオリファイナリーの全体像のイメージ                     | 78 |
| <br>おわりに                                     | 80 |
| <br>委員名簿                                     | 81 |
| <br>審議経緯                                     | 87 |

## はじめに

２００５年５月に公表された「新・国家エネルギー戦略」においては、化石資源への依存度の高い運輸部門において、二酸化炭素の排出削減及び過度の化石資源への依存脱却の観点から、現在ほぼ全量が化石資源となっている運輸部門における石油依存度を、２０３０年に約８割程度にすることを旨とするとしている。

２００７年５月には、経済産業大臣、自動車工業会会長及び石油連盟会長により、「次世代自動車・燃料イニシアティブ」がとりまとめられた。この「イニシアティブ」は、エネルギー安全保障、環境保全、産業競争力強化の「一石三鳥」を狙って、我が国のエネルギー源の多様化及びエネルギー効率の向上に向けた諸手段の総動員を呼びかけるものである。石油資源の確保・有効利用に加え、中長期的に運輸部門の石油依存度を低減するとともに、エネルギー効率の向上を図っていくという目標の実現に向け、自動車産業、石油産業、政府の三者が緊密に意思疎通しながら整合的に協力し、バイオ燃料を含め、自動車の電力化に向けた次世代バッテリーの開発、燃料電池・水素の活用といった様々な技術・政策を、我が国の「強み」である技術を活かす形で組み合わせ、複合的に展開していくことを旨とするものである。

具体的には、２０３０年に向けて電気自動車、水素・燃料電池自動車、クリーンディーゼル、バイオ燃料、ＩＴＳ等の社会インフラの５つの分野について、各々の分野に可能性があり、どれか一つのみを選ぶことができない現状において、各分野に技術開発等のベンチマークを置いて、その実現を目指しつつ、そのベンチマークの到達度合を見て、施策の重点化を図ることとしている。しかし、現時点では電気自動車等の次世代自動車は２０３０年に向け研究開発途上にあり、次世代自動車に比べ、液体燃料であるバイオ燃料は即効性があるという点において、他の手段と比べて利点がある。

バイオ燃料は、京都議定書上、カーボンニュートラル（生育過程において二酸化炭素を吸収している植物等を原料としているため、燃料過程において排出される二酸化炭素量は、生育過程において吸収した二酸化炭素量と相殺されるという考え方）と扱われているため、地球温暖化対策の一手段として重要である。我が国においても、２００５年に閣議決定された京都議定書目標達成計画において、２０１０年度までにバイオエタノールを含む輸送用バイオマス燃料を原油換算で５０万ｋＬ導入することを目指している。一方で、バイオ燃料は、二酸化炭素対策の手段の一つではあるが、そのようになるか否かは、①ＬＣＡ上の二酸化炭素削減効果・エネルギー収支等の政策効果、②バイオ燃料の供給安定性の確保、さらには食料との競合や森林破壊等の生態系を含めた問題、③

バイオ燃料の価格・価格安定性といった経済性といった課題を今後克服していけるかが重要な要素となる。

それぞれ課題の克服の糸口としては、食料と競合しないセルロース系原料を活用し、安定供給、経済性等を実現できるよう技術革新を実現していくことが必要である。

こうしたことから、バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議が昨年2月に取りまとめた「国産バイオ燃料の生産拡大工程表（総理報告）」との整合性を図りつつ、経済的かつ多量、安定的にセルロース系原料からバイオ燃料等を効率的に生産する画期的な技術革新の実現を目指すため、2007年11月に経済産業省と農林水産省が連携して、石油業界や自動車業界など国内大手十六社及び大学等・独立行政法人の研究機関からなる「バイオ燃料技術革新協議会」を設置し、具体的な目標、技術開発、ロードマップ等を内容とする「バイオ燃料技術革新計画」の策定を行なうこととした。

## 【2つの政策シナリオ】

「次世代・自動車イニシアティブ」では、2030年に向けた石油依存度の低減等の目標実現のため、バイオ燃料をはじめとした各技術項目毎にベンチマーク（指標）を定めている。エタノール生産コストについて2015年に「バイオマス・ニッポンケース<sup>1)</sup>」として、バイオ由来燃料に係るガソリン税を免税したガソリンの価格競争力を勘案し、製造コストを100円/L、さらに、「技術革新ケース」として、ガソリンとの価格競争力や米国等の開発計画を勘案し、経済的かつ多量、安定的に生産が可能なバイオマスを利用し抜本的な技術革新を目指し、製造コストを40円/Lと設定されている。

バイオ燃料技術革新協議会では、この2つのケースを検討するにあたり、バイオマス・ニッポンケースについては、国内の未利用バイオマスを原料とし、具体的な事業化を念頭に置きエタノールの生産規模は1.5万kL/年とした。技術革新ケースについては、目的生産バイオマスを原料とし、国内外を問わずエネルギー産業として取り組む規模として10万～20万kL/年とした。

## 【検討の体制について】

バイオ燃料技術革新計画の策定にあたり、バイオ燃料技術革新協議会の下にバイオマス原料WG、エタノール製造技術WG、システム・LCAGWG、バイオリファイナリー連携WGからなる4つのWGと、WGのリーダーからなる幹

---

<sup>1)</sup> バイオマスニッポン総合戦略会議「国産バイオ燃料の生産拡大工程表（2007年3月）」では短期的には規格外の農産物を対象とするが、中長期的には稲わらや木材等のセルロース系原料や資源作物全体を利用する事としている。

事会を設置した。

バイオマス原料 WG では、国内の未利用バイオマスや目的生産バイオマスの確保に係るポテンシャルや育種等の技術について検討を行なった。エタノール製造 WG では、前処理・糖化・発酵・蒸留等のエタノール製造に係る一連の技術について検討を行なった。システム・LCAWGでは、経済性やLCAの視点から留意すべき事項の整理や社会科学的な課題について整理を行なった。バイオリファイナリー連携WGでは、バイオエタノール以外の、バイオマスからの燃料製造や化学品等としての利用について検討を行なった。

### 【計画の構成について】

本計画では、第1章において、バイオ燃料についてバイオマス・ニッポンケースと技術革新ケースについて、具体的な生産モデルの例示や具体的な技術開発の方向性を技術ロードマップとしてまとめた。また、LCA上の留意すべき点や食料との競合や生態系への影響等、環境・経済・社会的な課題についても整理を行なっている。加えて、技術課題や開発段階に応じた具体的な研究開発体制について検討を行ない、具体的な進め方について整理を行なった。

第2章は、バイオリファイナリーについて、バイオエタノール以外のバイオマスの燃料製造や化成品等として活用するための可能性についてとりまとめた。

## 第1章 バイオ燃料

バイオマス・ニッポンケースと技術革新ケースの2つの政策シナリオを実現するために、原料と製造技術は一貫のものとして捉え、ベンチマーク達成を目指す。

### 1. 1 バイオマス・ニッポンケース（100円／Lケース）

#### 1. 1. 1 具体的なモデルケース

##### （1）モデルケースの考え方

バイオマス原料の種類と生産規模に合ったプロセスを組み立て、それを最小にすることで、ベンチマークコストを目指す。バイオマス・ニッポンケースについては、国内でのバイオマス収集範囲から、年産1.5万kL規模の工場を一単位として考える。

##### （2）バイオマスの生産地

バイオマス・ニッポンケースでは、国内資源の有効活用という観点で、国内の農産残渣、森林資源などの未利用資源を中心に考える。

海外においても、稲わら・バガスなど未利用資源は相当量賦存しているが、各国の事情により、有効活用も既に検討されていることもあり、我が国においてそのエタノール変換に有効な革新的な技術が完成した時点で、国際協力の観点で貢献してゆくことを考えるべきである。

##### （3）バイオマス原料の考え方

未利用バイオマスは、国内の賦存ポテンシャルの大きさ（表1.1）から、稲わら、スギ等の造林樹種（間伐材等林地残材）、古紙などを候補とする（表1.2）。

表 1. 1 国内未利用バイオマスの賦存ポテンシャル

|     |            | 賦存量<br>(発生量)<br>(万トン/年) | 集約性<br>(発生場所)  | 既利用率              | 利用可能量<br>(万トン/年) |
|-----|------------|-------------------------|----------------|-------------------|------------------|
| 草本  | 稲わら、籾殻、麦わら | 1,400                   | 農地、<br>ライスセンター | 30%               | 980<br>(70%)     |
| 木質  | 林地残材       | 340                     | 林地             | 2%                | 330<br>(98%)     |
| 木質  | 製材工場等残材    | 430                     | 工場             | 95%               | 20<br>(5%)       |
| 木質  | 建設発生木材     | 470                     | 工場             | 70%               | 140<br>(30%)     |
| その他 | 古紙         | 3,063                   | 都市部            | 91% <sup>※※</sup> | 279<br>(9%)      |

データ出所：賦存量 農水省「バイオマスニッポン総合戦略推進会議資料（07年2月）」  
古紙 坂ほか、アイピーシー「バイオマス・エネルギー・環境」（01年7月）

※稲わらは堆肥利用、木質系であればチップ化等の利用が考えられることから、利用可能量について、すべてエタノール仕向けが可能ではない。

※※現在、56%の紙が古紙として回収されて活用されている。35%の紙は、蔵書、壁紙、衛生用品として利用されていると考えられており回収は困難。

表 1. 2 バイオマス候補のグループ化

|          |     |         |
|----------|-----|---------|
| 未利用バイオマス | 草本系 | 稲わら     |
|          | 木質系 | スギ等造林樹種 |
|          | その他 | 古紙      |

#### （４）ベンチマークの考え方について

##### 収集・運搬コストベンチマーク

稲わらは国内での生産量が多く、有望なバイオマス資源であるが、湿った水田での乾燥に困難が伴うこと、圃場からの搬出や収集の能率が悪いこと、乾物重量当たりのかさが大きいために貯蔵・保管が容易でない等の問題がある。そこで、わらの切断や圧砕が可能な簡易な構造の排わら処理装置の開発（自脱コンバイン）や スクリュー型脱穀機構の活用（汎用コンバイン）による圧砕等により稲わらの乾燥を促進し、自走ロールベールを用いて効率的に搬出・収集する技術を開発する。また、運搬距離 30 km以内を想定した輸送システム、減容化、貯蔵法等に関する技術を開発し、これらをシステム化して稲わらを収集する低コスト体系を確立することにより、100円/L のバイオエタノール製造コストのベンチマークを達成できるものと考え



られる（図1. 1）<sup>2),3)</sup>。

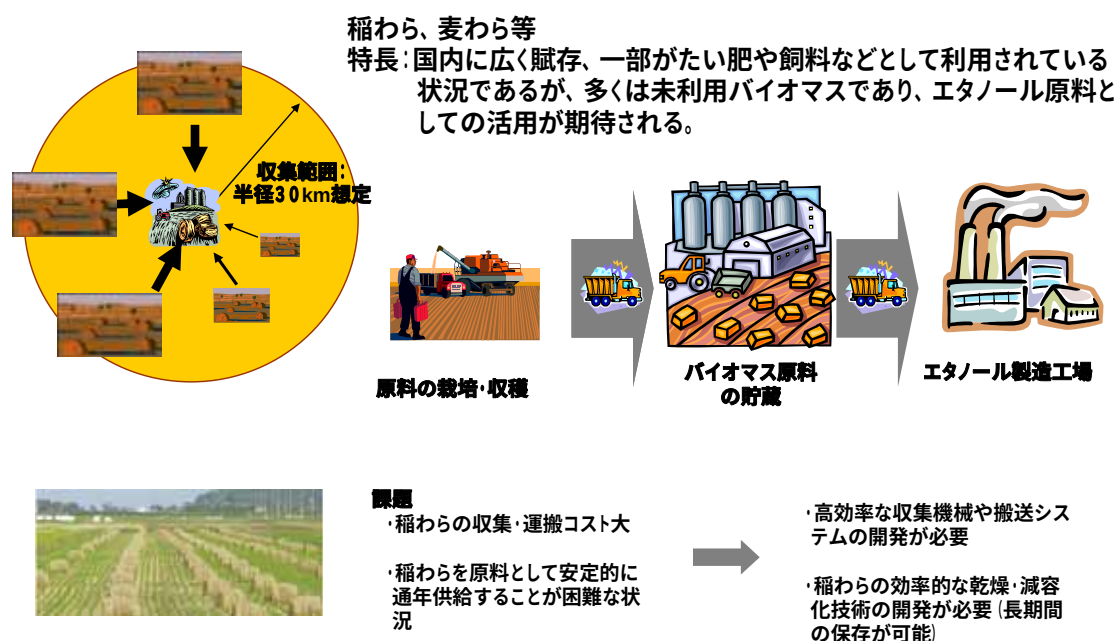


図1. 1 稲わら、麦わら等の高効率収集運搬システムの例

未利用の木質系バイオマスは、製材工場等残材、建設発生木材、林地残材などの種類に分類することができる。しかしながら、製材工場等残材、建築廃材などの建設発生木材は既に熱利用などの利用が進み、2009年にはその需給がバランスするとの報告<sup>4)</sup>もある。一方、間伐材等林地残材に代表される未利用の森林バイオマスは、その収集の困難さ、コストの高さからほとんど利用されない状況にある。

コストの中で大きな部分を占める伐倒・収集・運搬のコストの削減は重要な課題であり、我が国では林地残材の調達に要する総コストは、トンあたり約15,000円～30,000円とも言われている。伐採コストのみでもトンあたり4,000円～15,000円と言われているが、林道網の整備や高性能林業機械の普及が進んだオーストリアの山間地では2,000円～3,500円で可能とのデータもある<sup>5)</sup>。

我が国においても、先進的な林業機械を取り入れた研究事例がなされており、森林バイオマスの高効率収集運搬システムの例として、図1. 2のよ

<sup>2)</sup>農林水産省農林水産技術会議事務局 生物系特定産業技術研究支援センタープレスリリース

<sup>3)</sup>農林水産省農林水産技術会議事務局 地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発

<sup>4)</sup>＜特別調査報告書＞資源獲得競争時代を迎えた燃料・エネルギー用途における原料バイオマス流通・利用の最新状況と将来の方向 2007年10月 富士経済

<sup>5)</sup>農林環境課：調査と情報510号 木質バイオマスのエネルギー利用—その動向と課題—

うな機械、装置を用い、システム化することにより、素材生産で6,500円／乾燥トン、林地残材で12,000円／乾燥トンとの試算もなされている<sup>6)</sup>。

また、枝や曲りなど、材として利用できず、林地残材となっているものの利用を推進するためには、チップ化などによる減容化技術及び減容化した木質バイオマスを効率的に運搬するシステムを開発することが必要である。

このように、今後の林道網などのインフラの整備、効率的な減容化、輸送システム等に関する技術を開発し低コストで効率的な収集・運搬システムの確立など総合的な取り組みを行なうことにより、ベンチマークを達成できるものと考えられる。

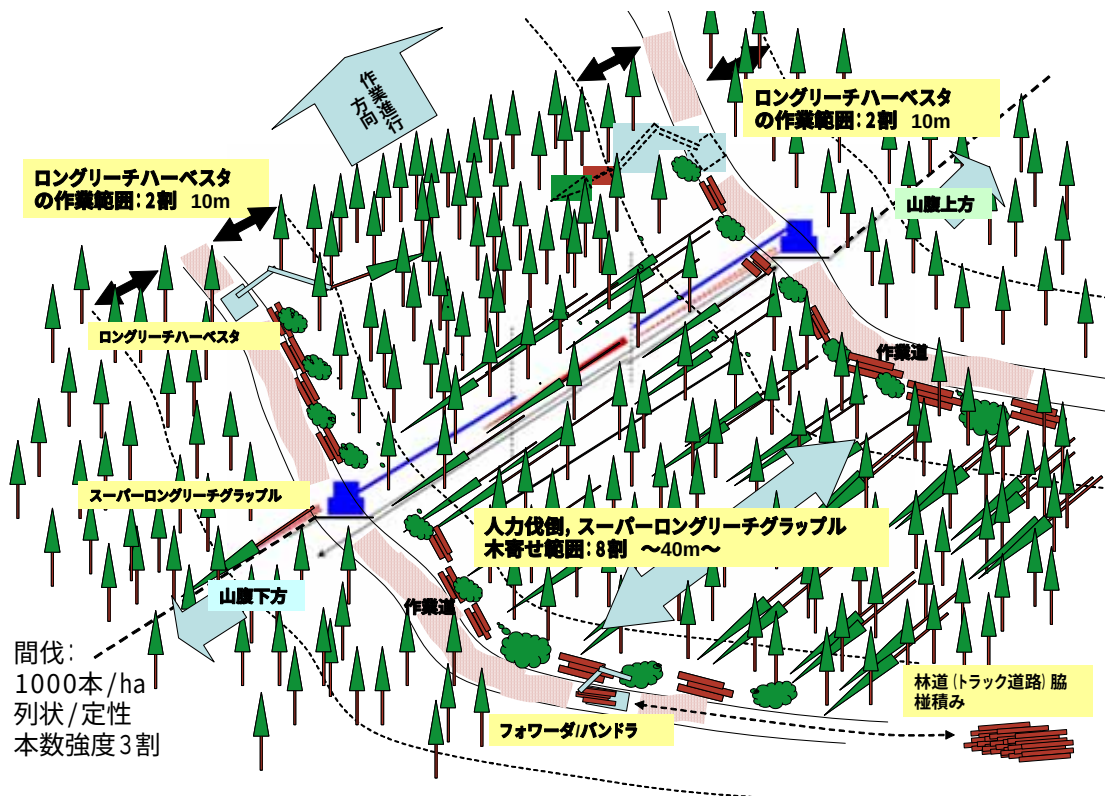


図1. 2 森林バイオマスの高効率収集運搬システムの例

<sup>6)</sup>日本森林学会 119 回大会講演集, F20, (2008)に基づき試算

## (5) 製造プロセスの例示

前項に示したベンチマーク達成のための考え方に則って、バイオマス原料毎に一貫プロセスを例示する（図1. 3）。

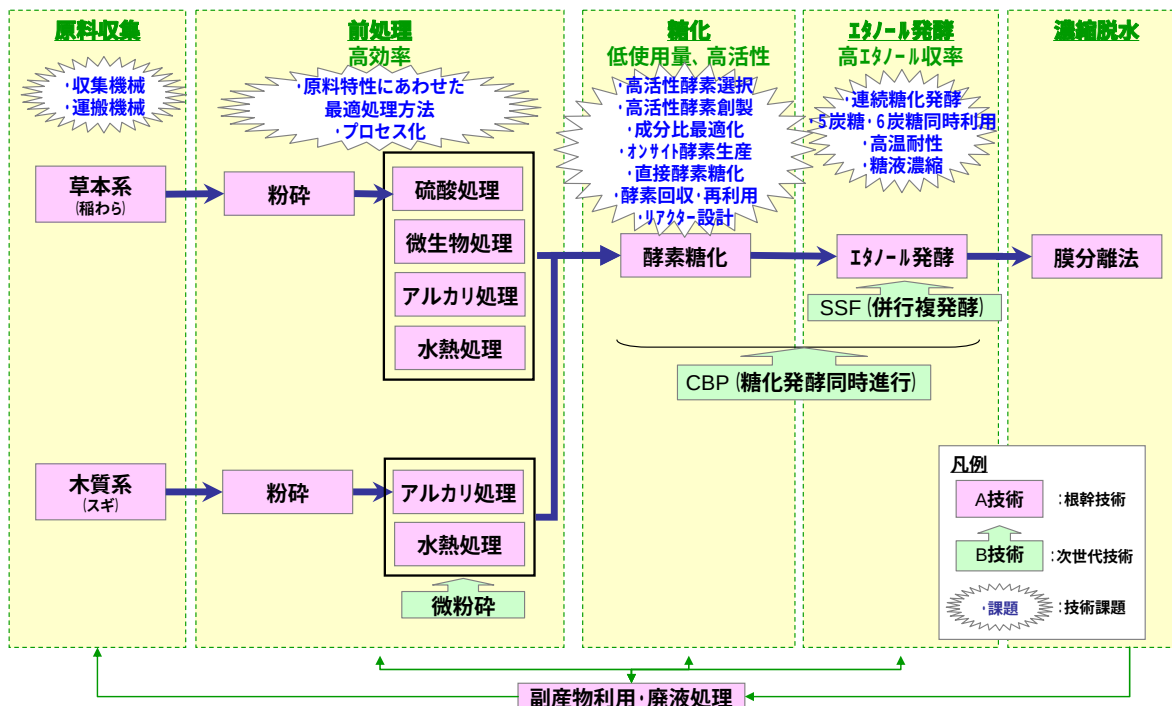


図1. 3 バイオマス・ニッポンケース（100円/L）実現に向けた具体例

### 1. 1. 2 バイオマス原料に関する技術マップ、ロードマップ

未利用バイオマス原料は、原料生産に関する技術開発はないが、薄く広く賦存するこれらのバイオマスを如何に効率よく低エネルギーで収集運搬するための収集機械の開発や収集輸送システムの開発が重要である（図1. 4）。

| 候補作物 (資材) |     |       | (選抜理由)                                                                                         | 育種 | 栽培 | 収穫<br>(収穫・細断・梱包)                                                                                                                                                  | 収集・運搬<br>(圃場 (森林) 内、外)                     | 貯蔵                                                                                   |
|-----------|-----|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 未利用バイオマス  | 木質  | 林地残材  | ・国内での資源賦存量が多く、<br>エタノール生産ポテンシャルが高い。<br>全国 利用可能量330万トン/年                                        | —  | —  | <div>収集・輸送効率向上<br/>(チップ化、バンドリング等による減容化)</div> <div>装置、作業車両の<br/>出力向上、小型化、走行性改善</div> <div>急傾斜森林における作業の高効率化</div> <div>丸太と林地残材の同時収集</div> <div>小径木の抜倒、収集効率向上</div> |                                            | 劣化低減技術<br>(チップ化、乾燥、<br>バンドラー)                                                        |
|           | 草本  | 稲わら   | ・国内での資源賦存量が多く、<br>エタノール生産ポテンシャルが高い。<br>全国 利用可能量690万トン/年                                        | —  | —  | <div>収穫機械の開発<br/>(コンバイン、ロールバレー、<br/>ロールキャリア)</div> <div>効率的な裁断・<br/>粉碎技術</div> <div>効率的な乾燥技術</div> <div>高密度圧縮技術</div>                                             | <div>効率的な運搬技術<br/>(圃場内運搬、<br/>圃場外運搬)</div> | <div>ロールの貯蔵性</div> <div>原料の周年供給</div> <div>貯蔵期間を利用した<br/>脱リグニン処理<br/>(アンモニア封入)</div> |
|           | ササ竹 | ササ、タケ | ・賦存量多く、多様な生育環境に<br>適し、再生力が高い。<br>全国利用可能量 <sup>1)</sup><br>ササ300万乾燥トン/年<br>タケ330万乾燥トン/年         | —  | —  |                                                                                                                                                                   |                                            |                                                                                      |
|           | その他 | 古紙    | ・古紙回収システムは確立して<br>おり、収集・保管に特段の技術<br>課題は無い。<br>・既に脱リグニンされているため、<br>酵素糖化が比較的容易であり、<br>エタノール収率も高い | —  | —  | <div>・収集・保管に技術課題は無い。<br/>・エタノール製造時の課題<br/>＝発酵へのインクの影響、廃棄物 (粘土等) の処理</div>                                                                                         |                                            |                                                                                      |

1) 坂ほか、アイビーシー「バイオマス・エネルギー・環境」(01年7月)

図1.4 バイオマス原料技術マップ (未利用バイオマス)

### 1. 1. 3 エタノール製造技術に関する技術マップ、ロードマップ

ベンチマークを達成する一貫プロセスを確立するために、バイオマス原料の特性を考慮した①前処理技術、②酵素糖化技術が重要であり、集中的に、オールジャパンとして取り組むことが必要である。また、要素技術をつないだシステムについて③一貫プロセスとしての最適化も重要である(図1.5)。具体的な開発項目は、後述する技術革新ケースに示すものと共通である。

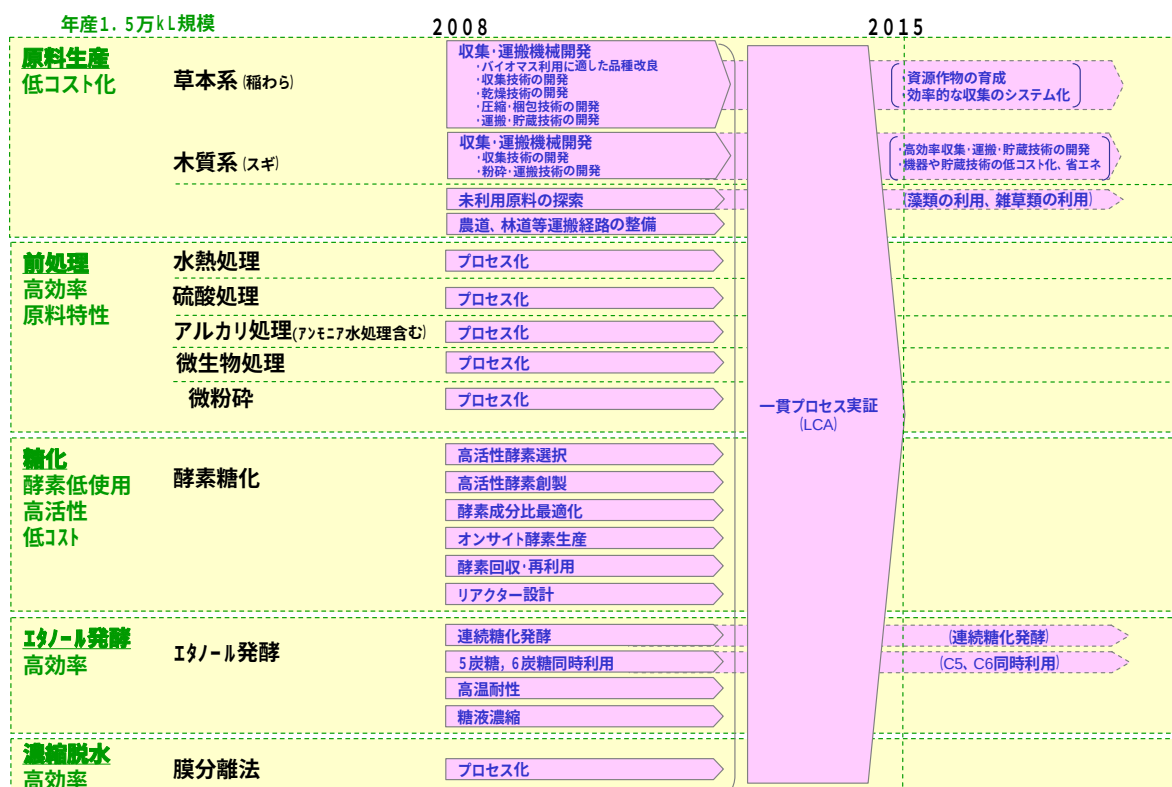


図1.5 バイオマス・ニッポンケース実現に向けた技術ロードマップ

### 1. 1. 4 LCA上の留意事項について

バイオマス・ニッポンケースでは、代表的な農産残渣である稲わらと森林国である日本で賦存量の大きな林地残材などが代表的な原料と考えられる。また、現在、未利用古紙の利用可能量は280万トン程度と推定されるので、エタノール原料とすることは有望であり、これら3種の原料に絞ってLCAなどの観点から考察した。

#### (1) 稲わらを原料とするケース

エタノール工場の通年生産(1.3.1(1)参照)ができるかどうかは、コストに大きく寄与する重要なポイントである。2期作を殆ど行っていない日本においては、稲わらの収穫期は年1回、秋季が通常である。エタノー

ル工場を通年稼働させるためには、通年使用できるように、梅雨を含めて稲わらに腐敗やカビを発生させないように貯蔵する方法を確立することが重要である。もし貯蔵に問題がある場合には、稲わら以外に利用できる原料を見出すことが重要になる。種類の異なる原料を利用する場合には、酵素糖化法ではなるべく組成の近いバイオマスを選定するのが望ましく、困難な場合には、濃硫酸法のようなバイオマスの種類に対する選択性の低い製造方法を選択するのが望ましい。

また、太平洋側と日本海側では、一般に稲わらの乾燥度が異なるようであるが、ウエットな日本海側の稲わらは水分を多く含む可能性が高い。この日本海側のような場合には、水熱処理のような、原料に乾燥度を要求しないプロセスが適すると思われる。

他方、稲わらは通常鋤き込まれているが、水田中で腐敗して温室効果の高いメタンを放出するとも言われており、稲わらを利用するに当っては、メタン排出の程度や肥料効果を明確にしておくことが重要である。

稲わらの収集輸送は原料として利用する場合の最大の課題である。日本では、1農家当たりの農業規模が小さい。ある程度大きい作付面積を持っている農家でも、耕作地が点在している場合が多い。日本における米作のLCAを行なった報告<sup>7)</sup>によると、規模が小さくなるほど農機具からのCO<sub>2</sub>の排出量が増加するとの報告がある。従って、海外の報告に比べると原料の収集運搬時のCO<sub>2</sub>排出量は国内の方が多いことが予想され、国内の稲わらを収集する際には、効率的なシステムと運営が重要になる。

## (2) 林地残材等未利用材を原料とするケース

国内森林資源を利用する際には、森林の水源涵養や土砂災害防止などの公益的機能の発揮に配慮するとともに、林地残材や用材など長期間木材として活用される利用価値の高いものから利用し、他に利用できない未利用残材を燃料の原料に充てることが、カスケード利用可能な木材の有効活用という点からも、地球温暖化対策上からも重要である。

木質バイオマスのうち林地残材等を使用して、エタノールを経済的に生産できるようにするためには、林業の活性化も重要である。日本は森林資源が豊富にあるので、林業が活性化し効率的な収集・運搬システムが整備できれば、林地残材等を大量に集められる可能性がある。

間伐材等の林地残材などを利用する上での最大の課題は、如何に安価に効率よく収集・運搬するかである。このため、日本の急峻な林地から、低コストで効率よく伐採・収集・運搬する技術を開発することが重要である。

---

<sup>7)</sup> 「米作のライフサイクルアセスメント」 松橋隆治他 学振未来WG2-17



エタノール原料という観点で捉えると、国内の造林樹種は針葉樹が多く、その代表であるスギやヒノキは広葉樹と異なり、バイオマス中に5炭糖が少ない特長がある。5炭糖を発酵するには遺伝子組換えの微生物を使用する必要があるが、スギやヒノキを原料とすることにより、現在エタノール発酵に使用されているサッカロマイセス属酵母のみを利用してエタノールを生産することができる。

他方、建築発生木材や製材工場等残材は現在、年間900万トン程度発生しているが、そのうちの8割は既にエネルギー等として利用されている。今後2009年までに、エネルギー利用などでその殆どが利用される見込みであり<sup>8)</sup>、今後エタノール製造に木材を利用する場合の原料ソースは未利用となっている主に間伐材等の林地残材を対象と考えるべきである(図1.6)。

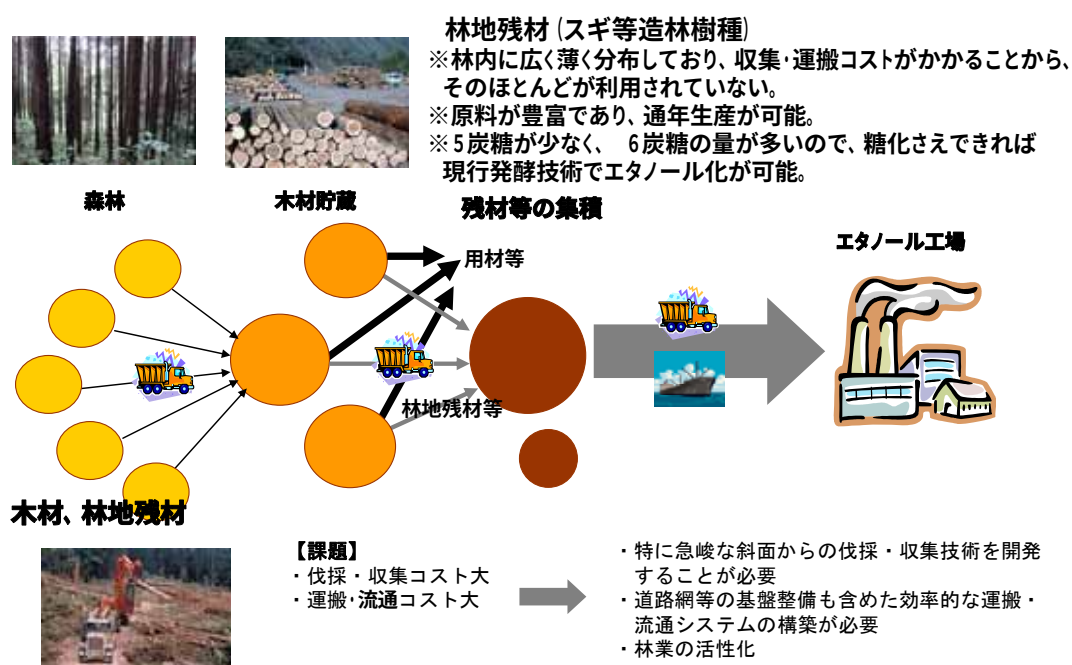


図1.6 林地残材等未利用材からのエタノール生産モデル

### (3) 未利用古紙を原料とするケース

古紙は回収ルートも確立され、古紙の回収率は73.8%に達している<sup>9)</sup>。回収されていない古紙の中で、製紙原料として利用困難なものが推定で約

<sup>8)</sup>＜特別調査報告書＞資源獲得競争時代を迎えた燃料・エネルギー用における原料バイオマス流通・利用の最新状況と将来の方向 2007年10月 富士経済

<sup>9)</sup>古紙回収センターHP 古紙回収率推移 2007年のデータから

280万トン<sup>10)</sup>存在し、バイオエタノールの原料に利用できる可能性がある。古紙の回収量は大都市に多いので、自動車燃料の需要地である大都市あるいは大都市近郊にエタノール工場を立地できる。あるいは、古紙が集まる製紙工場内や近隣にエタノール工場を立地できる場合は、設備の融通などの点で、低コスト化が図れる可能性がある。古紙の回収は既存のインフラが利用可能であるが、未利用古紙の回収には、自治体などの協力が必要である。

なお、古紙は酵素糖化に際して、リグノセルロース系原料に対して一般的に行なわれる前処理が不要であり、ゴミの除去や簡単な破碎で済む。また、製紙用に適さない古紙でもエタノール原料に使用可能である（図1．7）。

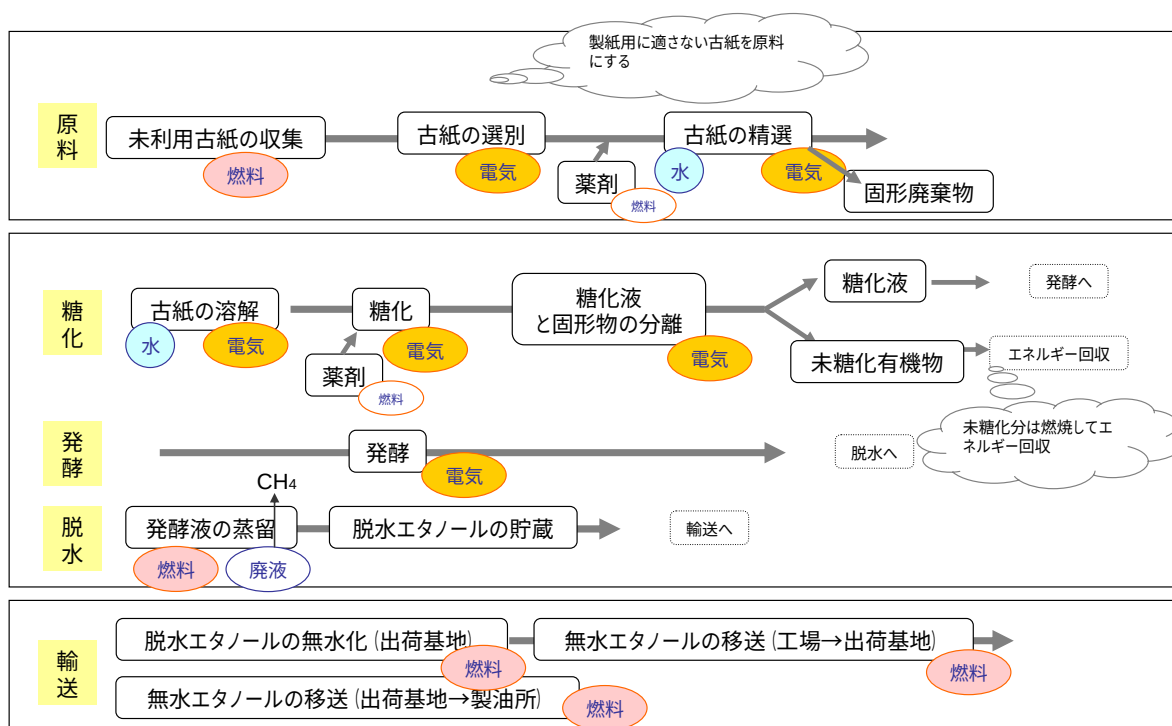


図1．7 未利用古紙からエタノールを製造、出荷するフロー図

<sup>10)</sup> 実際の賦存量については実態調査を行なう必要がある。



## 1. 2 技術革新ケース（40円／Lケース）

### 1. 2. 1 具体的なモデルケース

#### （1）モデルケースの考え方

バイオエタノールの生産コストは原料コストと変換コストの合計となる。原料コストは収集範囲が広くなるにつれ、収集運搬にかかるコストが大きくなるが、一方ではエタノールの生産コストは規模の効果で小さくなる。原料コストと変換コストの合計が最小となってくる点は、米国DOEの再生可能エネルギー研究所（NREL）の報告によれば年産20万kL以上と見積もることができる（図1.8）。また、エネルギー産業としてバイオエタノールの生産に取り組む規模としても、ある程度の規模感が重要となる。このような考え方から、技術革新ケースでは、年産10～20万kL規模の工場を一単位として考えることとする。

この規模に見合うバイオマス原料の生産方法を検討し、生産規模に合ったプロセスを組み立て、それを最小コストにすることで、ベンチマークコストを目指すこととする。

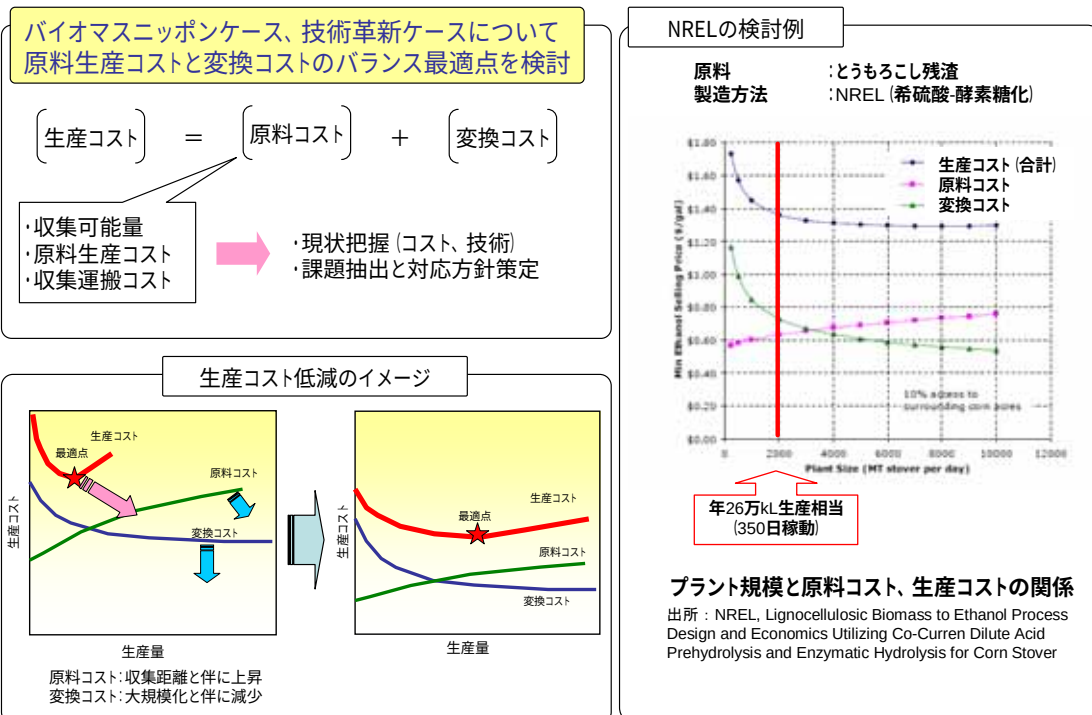


図1. 8 エタノール生産コストの考え方

#### （2）バイオマスの生産地

原料となるバイオマスは、国内外を問わず、気候帯（冷帯～温帯～亜熱帯～熱帯）と環境（降水量、土壌、地形）を広く想定して選択するものとする。

### (3) バイオマス原料の考え方

年産10～20万kLの規模は、バイオマス1t（乾燥重量）から0.3kLのバイオエタノールが得られると仮定すると、乾燥重量で年産約30～60万tに、原料によって異なるが5割程度の水分を有するバイオマスが多いので、原料の総重量は約2倍の60～120万tに相当する。農産残渣などの未利用資源は、薄く広く存在するため、収集範囲が広くなり運送にコストがかかる。また、残渣の発生量は、主目的物の生産計画に依存するため供給の安定性の確保が困難である。

このため、技術革新ケースでは、目的生産したセルロース系バイオマスを基本として考える。

セルロース系目的生産バイオマスに求められる特性としては

- ①単位面積あたりの収穫量が多い
- ②粗放栽培が可能で、エネルギー投入量が少ない
- ③短周期（3～4年程度）で収穫が可能である

などの観点が重要であり、多収量の草本植物、短周期で収穫できる木質系植物が候補となる。

バイオマス原料のモデルとして、2つのケースを考える（図1.9）。第1のケースは多収量の草本植物を原料としたケースで、乾物収量を1ヘクタール当たり50トンと想定すると、半径6.5kmの土地で効率的にバイオマスを生産することができ、収集・運搬に関わるコストを低減できる可能性がある。第2のケースは、短周期で収穫できる早生広葉樹であるヤナギ、ユーカリなどの木質系バイオマスを原料としたケースで、草本系バイオマスの例よりも相対的に大きな面積は必要となるが、一般に草本系バイオマスよりも木質系バイオマスは貯蔵安定性が高い利点がある。また、木質系バイオマスは、通年伐採が可能となるので、生産の安定性が高い。

草本系目的生産バイオマスとしては、単位面積当たりの年間収穫量（表1.3）から、エリアンサス、ミスカンサス（ススキを含む）、ソルガム、サトウキビ、ネピアグラス等が候補となる。ミスカンサスは、欧米ですでに燃焼エネルギー用に検討が進められている。エリアンサスは、熊本県の（独）農業・食品産業技術総合研究機構九州沖縄農業研究センターにおいて、高収量で効率よく収集できる牧草系の高収量多年生植物として特性調査が進められている。



図1. 9 技術革新ケース エタノール生産モデル

表1. 3 草本系目的生産バイオマス候補の収量ポテンシャル

| 植生地域           | 種類  |        |      | 乾物収量 (トン/ha・年) | データ取得地域 |
|----------------|-----|--------|------|----------------|---------|
| 熱帯             | イネ科 | ネビアグラス | 多年生  | 84.7           | プエルトリコ  |
|                |     | サトウキビ  | 多年生  | 64.1           | ハワイ     |
| ギニアグラス1)       |     | 多年生    | 51.1 | 沖縄県 (石垣島)      |         |
| サトウキビ          |     | 多年生    | 49.5 | 沖縄県 (本島)       |         |
| バミューダグラス       |     | 多年生    | 30.1 | 米 テキサス州        |         |
| ペレニアルライグラス     |     | 多年生    | 26.6 | ニュージーランド       |         |
| ソルガム           |     | 一年生    | 46.6 | 米 カリフォルニア州     |         |
| とうもろこし         |     | 一年生    | 34.0 | イタリア           |         |
| イネ2)           |     | 一年生    | 19.7 | 岩手県            |         |
| エンバク3)         |     | 一年生    | 16.4 | 兵庫県            |         |
| スイッチグラス4)      |     | 多年生    | 16   | 米国             |         |
| ジャイアントミスカンサス5) |     | 多年生    | 60   | 米国 イリノイ州       |         |
| エリアンサス6)       |     | 多年生    | 86   | 熊本県            |         |

データ出所)

注釈なし J.P.Cooper:Productivity in different environments, pp.621, Cambridge Univ.Press(1975)

1) Nakagawa and Momonoki

2) 農林水産技術会議事務局 (1987)

3) 農林水産技術会議事務局 (1986)

4) P.K.Vogel : Energy Production from forages, Journal of Soil and Water Conservation, Vol.51, No.2, pp.137-139 (1996)

<上記: 日本エネルギー学会「バイオマスハンドブック」, P31. から抜粋>

5) NEDO「海外レポートNo.969」(2005.12.14)

6) 九州沖縄農業試験研究推進会議 畜産・草地推進部会資料(2004)

また、草本系バイオマスよりも、単位面積当たりの年間生産ポテンシャルは劣るものの、ヤナギ、ポプラ、ユーカリ、アカシア等の短周期で収穫可能な木質系バイオマスも有望である（表1. 4）。草本類は単年であるのに対し、木質では、複数年のストックを持って事業計画を立てられるメリットがある。

表1. 4 木質系目的生産バイオマス候補のポテンシャル

| 植生地域 | 種類                 | 収穫サイクル | 収量 (乾燥ト/ha・年) | データ取得地域 |
|------|--------------------|--------|---------------|---------|
| 熱帯   | ユーカリ <sup>1)</sup> | 6～8年   | 32～33         | オーストラリア |
| 亜熱帯  | ユーカリ               | 2年     | 32            | ギリシャ    |
| 温帯   | ポプラ                | 3～4年   | 12～14         | ドイツ     |
|      | ユーカリ               | 3年     | 11～14         | オーストラリア |
|      | ヤナギ                | 3年     | 8～20          | イギリス    |
|      | アカシア <sup>2)</sup> | 4年     | 18            | 九州      |

データ出所

注釈なし エネルギー作物の事典

1) バイオマスハンドブック

2) 農水省「バイオマス変換計画」(1991)

なお、目的生産バイオマスではないが、国内に多く賦存する針葉樹（スギなど）も、大幅なシステム革新があれば、技術革新ケースの原料として活用できる可能性はある。

本計画では、特性が類似したバイオマス原料について、例示（表1. 5）するが、実際には、事業主体が生産候補地の気候や環境に適合した植物を選択することとなる。

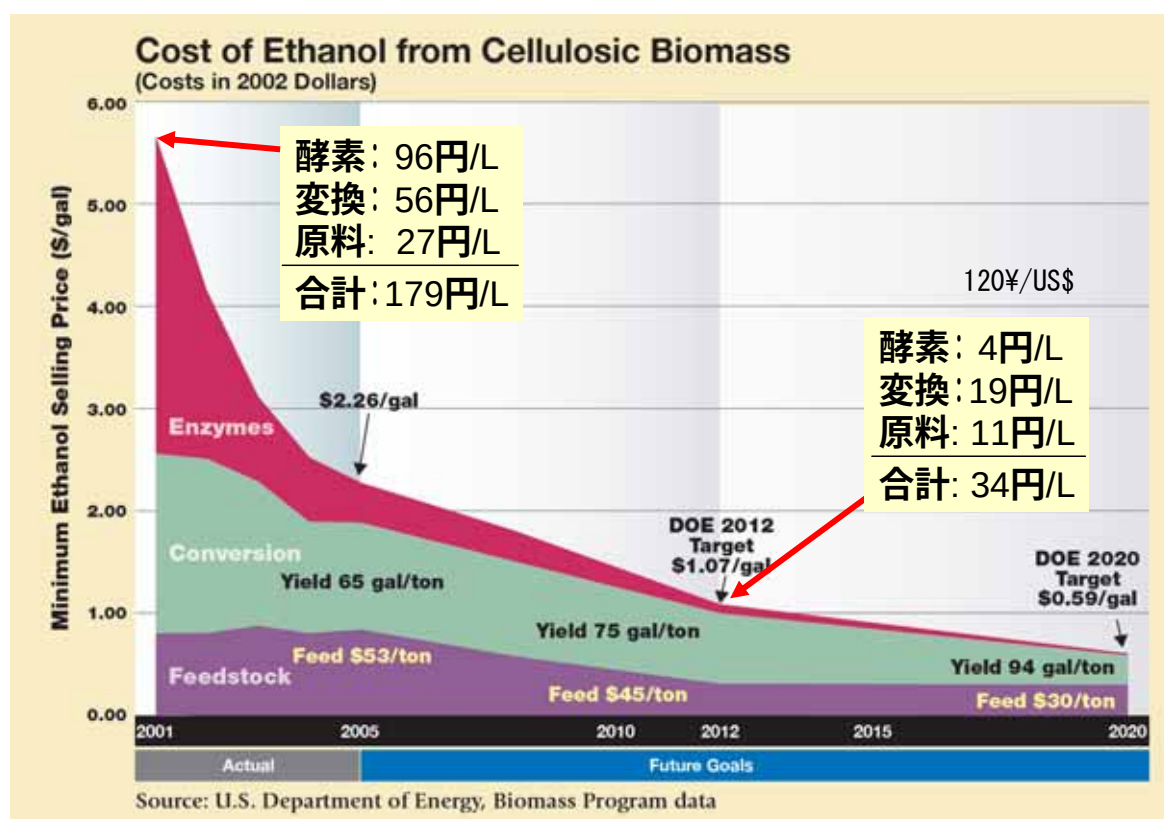
表1. 5 バイオマス原料の例示

|                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>（目的生産バイオマス）</p> <p>多収量草本植物（エリアンサス、ミスカンサス、ソルガム、サトウキビ、ススキ、ネピアグラスなど）</p> <p>早生広葉樹（ヤナギ、ポプラ、ユーカリなど）</p> <p>※大幅なシステム革新があれば針葉樹（スギなど）も活用できる可能性はある。</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### (4) ベンチマークの考え方

##### 生産コストベンチマーク

米国再生可能エネルギー研究所が提示している生産コストの低減目標は、コーンストーバ（トウモロコシの実以外の部分）を原料とし硫酸前処理と酵素によるセルロース糖化を組み合わせた技術を想定し、2012年で34円/Lとしており、原料コストは、その約1/3の11円/Lとしている（図1.10）。



出所：米国 NREL On the Road to Future Fuels

図1.10 米国のエタノール生産コストの目標

技術革新ケースのベンチマークコストの40円/Lは、目的生産バイオマスの栽培生産技術と革新的なエタノール変換技術を組み合わせることで目指して行くものとする。なお、原料の生産にかかるコストは、その種類や栽培条件によって大きく異なること、さらに、変換技術は選択される原料によって変わるため、原料と変換のコストの内訳は決めず行なう。

目的生産バイオマスの参考例として、米国のスイッチグラス、ミスカンサスの栽培コスト試算の事例を表1.6に示す。

表1. 6 米国イリノイでの目的生産バイオマスのコスト試算例

米国イリノイ州

ミスカンサス：約6円/kg=18円/ L

スイッチグラス：約7.8円/kg=23.4円/ L 注) 120¥/\$、土地代は除く

| コストアイテム         | Switchgrass | Miscanthus   |
|-----------------|-------------|--------------|
|                 | \ /kg       | \ /kg        |
| 肥料              | 1.19        | 0.24         |
| 除草剤             | 0.09        | 0.01         |
| 種苗              | 0.33        | 0.14         |
| 金利              | 0.11        | 0.03         |
| 開墾機械費用          | 0.45        | 0.15         |
| 収穫・貯蔵           | 4.67        | 4.42         |
| 農園出しコスト         | 6.83        | 5.00         |
| 輸送コスト           | 0.95        | 0.95         |
| <b>輸送費込みコスト</b> | <b>7.78</b> | <b>5.95</b>  |
| 収量 (t ha-1)     | <b>5.78</b> | <b>19.95</b> |

Bioenergy Crops in Illinois: Madhu Khanna et al より試算  
<http://giannini.ucop.edu/presentations/kkannaMay%2007.pdf>

#### ①設備費、減価償却費の低減

- ・ 反応の連続化、高速化（滞留時間の短縮）、高濃度化（反応液量の減少）により、装置サイズを小さくする。
- ・ 酵素糖化とエタノール発酵を同時に行なうなど、統合プロセスとする。

#### ②人件費の低減

- ・ 自動運転が可能なシンプルなプロセスとする。

#### ③酵素・薬品、ユーティリティ費の低減

- ・ 酵素の使用量を低減する（活性向上、回収再利用など）。
- ・ 酵素の生産コストを低減する（オンサイト生産、生産性向上など）。
- ・ 外部からのエネルギー投入を低減する（バイオマスのみで自立する）。

#### ④廃液処理費の低減

- ・ 水使用量を低減し、再生処理しリサイクル利用する（膜分離など）。
- ・ 発酵残渣を有効利用する（肥料、飼料としての利用）。

- ・灰分を有効利用する（ミネラル分を肥料として利用）。
- ・処理エネルギーを低減する（生物処理プロセスの利用など）。

## （５）製造プロセスの例示

前項に示したベンチマーク達成のための考え方に則って、エタノール製造プロセスを例示する。

### ①原料生産

バイオマス原料としては、２．１．１（３）に記載した通り、年間３０～６０万トンのバイオマスを生産することを目標とする。

このバイオマス生産量に相当する栽培面積（草本系の場合６，０００～１３，０００ヘクタール、木質系の場合２０，０００～４０，０００ヘクタール）が確保できる候補地を国内外で想定し、その土地の気候や環境に適した植物を選択する。

選択した植物について、省エネルギーで高収量を達成するための栽培法（多年生植物の再生、イネ科植物とマメ科植物などの混作、不耕起栽培など）や生育した植物体を効率よく収穫するための機械の開発を検討する。

さらに、生産量の向上や気候・土壌・環境への適応性の強化を目指して、選択した植物の育種改良（耐乾性、耐塩性、耐アルカリ性、耐酸性など）も行なう。

### ②エタノール製造プロセス

４０円／Ｌを達成するベンチマークとして、外部からのエネルギー投入が無くてもバイオマスの持つエネルギーのみで自立すること、バイオマス１ｋｇ当たりのエタノール収率が０．３Ｌ以上であること、エネルギー回収率が３５％以上であることを設定する。

このために、リグニンなどバイオマス成分を熱源として利用することにより、外部からの投入エネルギーが無くても稼動する「バイオマス自立型」のプロセスの可能性を検討する。

## 木質系バイオマスのモデルケース

木質系バイオマス 1 kg から前処理、糖化工程で副生する約 0.3 kg のリグニンが持つ熱エネルギーは約 6 MJ と計算される。一方、草本系バイオマスの場合、リグニンの含有量が少なく、約 4 MJ と計算できる。このリグニンを熱源、動力源として、前処理、糖化、発酵、濃縮脱水にかかるエネルギーを賄うことができれば、「バイオマス自立型」のプロセスとできる。

また、糖化効率 80%、エタノール収率 90% と仮定すると、1 kg のバイオマス (= 約 20 MJ) から 0.3 L のエタノール (= 約 7 MJ) が得られ、約 35% のエネルギー回収率となる (図 1.11)。

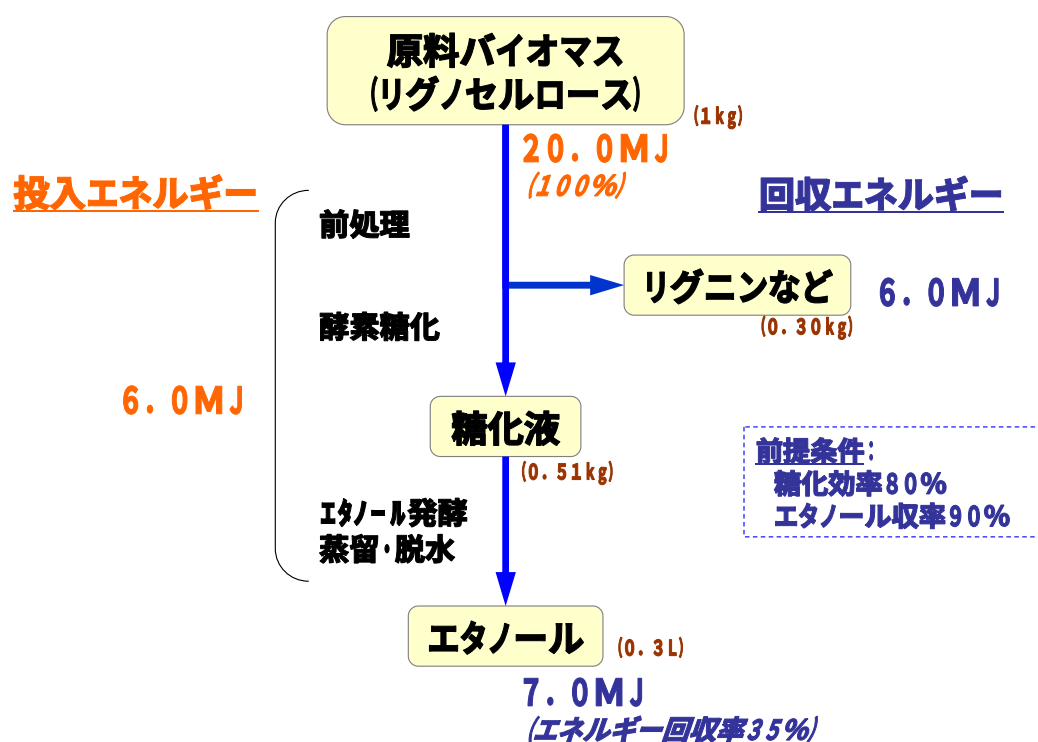


図 1. 11 バイオマス自立型プロセスの考え方  
(木質系バイオマスモデルケース)<sup>11)</sup>

<sup>11)</sup> モデル想定的前提条件：木質バイオマス熱量：20.0MJ/kg（マツ 21.2、ユーカリ 18.7、ポプラ 19.5、アメリカスギ 21.0、スズカケ 19.4 などから設定。）、ホロセルロース（セルロースとヘミセルロースの合計）含量：65%（マツ 65.3%、ポプラ 74.2%、スズカケ 74.1% などから設定。）、リグニン含量：30%（マツ 34.5%、ポプラ 25.6%、スズカケ 25.5% などから想定。）、リグニン熱量：25.1MJ/kg、リグニンボイラー効率：80%、糖化効率（ホロセルロース→C5 糖+C6 糖）：80%、エタノール収率（C5 糖+C6 糖→エタノール）：90%、エタノール熱量：23.4MJ/L、エタノール比重：0.79（熱量と成分組成の数値は、「バイオマスハンドブック」（社）日本エネルギー学会編(2002)などによる。）



## 前処理

前処理は、エネルギー消費量が少なく、後段の酵素糖化の効率を高めるものを選択する。

「自立型プロセス」のためには、バイオマス中のリグニンの持つ熱量で、前処理、糖化、エタノール発酵および蒸留・脱水に要するエネルギーを賄う必要がある。また、エネルギー回収率35%以上を想定すると、後段の酵素糖化の効率を80%以上とするような前処理である必要がある。

以上の条件を満たす前処理の候補技術として、微粉碎処理と水熱処理、ソルボリシス（加溶媒分解）処理、アンモニア処理、アルカリ処理、微生物処理の組み合わせが有力である。これらの技術に共通した課題として、添加する水量の低減、プロセス化などがある。

## 酵素糖化

糖化工程において、最大の課題は、糖化に用いる酵素のコストである。コストを下げる方策として、(A)酵素の使用量を減らすことと、(B)酵素の単価を安くすることの2つがある。

(A)酵素の使用量を減らす方策として、酵素の活性を上げること、酵素の反応条件（酵素成分組成、反応リアクター設計など）を最適化すること、反応後の酵素を回収して再利用することなどがある。(B)酵素の単価を安くする方策としては、酵素生産性を上げること、エタノール製造プラント敷地内で酵素を生産し精製費や輸送費を削減すること（オンサイト酵素生産）などがある。

これらのベンチマークとして、1kgのグルコース等のエタノール発酵可能な単糖を得るための酵素量を1g以下にすること、1kgのバイオマスから、0.5kg以上の糖収量が得られること、さらに、1Lのエタノールを得るために使用する酵素のコストを4円以下とすることと設定する。

## エタノール発酵

エタノール発酵工程のベンチマークとしては、エタノール収率（対理論収率）95%以上を設定する。

エタノール発酵工程における課題は、6炭糖と5炭糖の同時利用と、発酵菌の高温耐性である。

バイオマスには、ヘミセルロース由来の5炭糖が、全糖分の数%から、多い場合30%存在し、醸造用の酵母など通常のエタノール発酵菌では利用できないが、これを利用できる発酵菌を得ることが一つ目の課題である。

また、酵素糖化の至適温度が50℃前後であるのに対し、エタノール発酵の上限温度が40℃程度であり、また発酵時に熱を発生するため、冷却にエネルギーを要する問題がある。このため、高温に耐性のあるエタノール発酵菌を取得することが二つ目の課題となる。後段のエタノール濃縮脱水にかかるエネルギーを低減するために、エタノール濃度を高めることが重要となるが、このためには、発酵菌のエタノール耐性が重要となる。特に高温での発酵を行なう場合、より顕著にエタノールへの耐性が問題となる。

さらに、エタノール発酵の速度を高めるために、連続発酵も課題となる。

また、全体プロセスの統合化、簡素化による低コスト化、また酵素反応の効率向上を目的として、酵素糖化とエタノール発酵を同時に行なう「併行複発酵（SSF<sup>12)</sup>）」も開発課題となる。さらにこれを一歩進めて、同一の菌により酵素生産とエタノール発酵を行なう「糖化発酵同時進行（CBP<sup>13)</sup>）」も次世代のプロセスとして開発を進める。なお、SSFにおいて、酵素反応温度とエタノール発酵温度を合わせる必要性から、高温耐性発酵菌の取得は重要な課題となる。

## 濃縮脱水

糖からのエタノール生産において、エタノールの蒸留・脱水工程でかかるエネルギーは非常に大きい。開発ベンチマークとして、10%エタノール水溶液から無水エタノールへの濃縮脱水にかかるエネルギーを現状の4.6 MJ/Lエタノールから約半分の2.5 MJ/Lエタノール以下とすることと設定する。

可能性のある技術として、膜分離法や溶媒抽出法がある。膜分離法については、膜の選択性能や透過性能の向上（モジュールとしての性能向上）が課題である。溶媒抽出法については、基本原理は実証済みであるので、プロセス試設計による経済性評価と、実培養液を用いたプロセス検証が課題となる。

## プロセス全体

エタノールの濃縮脱水にかかるエネルギーの削減のために、糖液の高濃度化が重要である。このためには、糖化液を膜などで濃縮するアプローチと糖化反応自体を高濃度バイオマスの条件で行なうアプローチがある。反応液を減らすことにより、廃液を減らす効果も期待できる。

---

<sup>12)</sup> Simultaneous Saccharification and Fermentation

<sup>13)</sup> Consolidated BioProcessing

技術革新ケース実現に向けた一貫プロセスの具体例を図1．12に示す。  
それぞれの要素技術には、開発フェーズの異なる代替技術も示した。

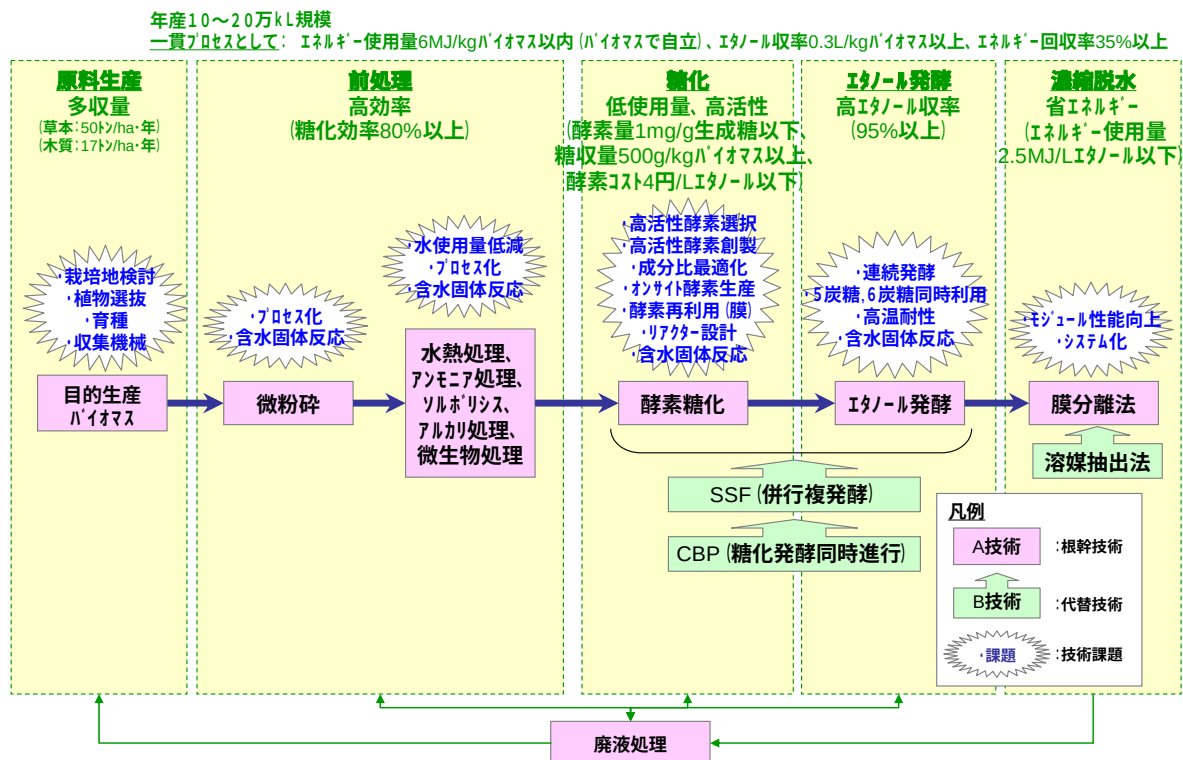


図1．12 技術革新ケース（40円/L）実現に向けた具体例

## 1. 2. 2 バイオマス原料に関する技術マップ、ロードマップ

草本系目的生産バイオマスでは、先ずは、最大の生産量を得られる栽培技術(施肥や水遣り条件や植え付けの最適間隔など)を開発する必要があるが、具体的には、栽培する土地における土壌条件や気候との相性などを考慮して栽培方法を確立する必要がある。また、家畜飼料用の牧草のように比較的若くて茎などが柔らかい間に伐採し、年に複数回収穫するのがよいのか、年間を通じて最大収量になるよう栽培するのがよいのかといった点についても、製造技術とのマッチングや貯蔵性も考慮した上で、検討する必要がある。更に、低エネルギーで効率よく収穫できる機械の開発も必要になる。木質系目的生産バイオマスでも同様に、栽培技術及び収穫機械の開発が必要となる。

また、草本系ならびに木質系の目的生産バイオマスの収量を向上させ、変換効率を高めるためには、遺伝子組み換え技術による改変は有効な手段となりうる。

これらを達成するためには、農林業のノウハウや工業の技術力を活用すべきであり、農一工連携は目標達成のためには重要な手段である。

### (1) 草本系目的生産バイオマス

海外においては、欧州、米国でスイッチグラス、ミスカンサスなど多収量のイネ科植物がエネルギー目的で栽培され、一部では既に発電用途などに利用が始まっている。しかしながら、我が国においては、牧草研究の一部としての視点で、研究が進められているに過ぎず、目的生産バイオマスとしての栽培データの取得が十分なされていないのが現状である。

我が国における牧草研究の事例として、エリアンサス、ミスカンサス（ススキを含む）、ネピアグラスなどの多年生イネ科植物は、その収穫量の多さ、粗放栽培でもある程度の収穫量が期待できることから候補となる。また、ソルガムは収穫量の多さと同時に糖の利用も期待でき、我が国においても各地で栽培事例があることから、候補として考える。

### (2) 木質系目的生産バイオマス

木質系の目的生産バイオマスを考えた時、植林してから収穫するまでの生育が早いパルプ用のユーカリのケースであっても、10年程度の年月がかかるのが現状である。欧米では、ヤナギなどの比較的生長の早い樹木をショートローテーション（短周期）で育成し、エネルギー用途への適用が既に実施されている。我が国でも、ヤナギのエネルギー利用という視点で検討されている事例もある。

植林後2～4年程度で刈り取り、萌芽により再度植え付けすることなく育

成するショートローテーション栽培作物の考え方で、目的生産バイオマスを生産することは重要な視点である。木質系目的生産バイオマスは、草本系に比べ単位面積当たりの収穫量は劣るが、生産の安定性、周年収穫が可能で貯蔵スペースの確保の点で有利となる。

このような考え方で、生長が早い樹木としてヤナギ、ポプラ、ユーカリ、アカシアなどが候補となる。

なお、木質系目的生産バイオマスをショートローテーションで育成する場合は、森林の公益的機能の維持を考え、山間部でなく平地で育成するなど適地の選定が重要である。

### (3) 検討の進め方

我が国における目的生産バイオマスに関する研究は存在するが、定量的な生産性、肥料の必要量、土地条件の影響などのデータが極めて少なく、コスト試算、LCA評価などを行なうことは困難な状況である。まず初めに取り組むべきは、現状利用可能な多収性草本系植物の栽培研究による各種データの整備が喫緊の課題となる。

栽培技術に関しては、これまで培ってきた既存技術（多回収穫、多期作、多毛作）の組合せによる収量の増大を検討する。また、投入エネルギーを低減する上で不耕起栽培、直播栽培、多年生種の利用等を組み合わせてゆく。また、マメ科植物の混作による窒素固定による肥料削減などの手法も有効と考えられる。

また、稲わら、林地残材などについてはその収集・運搬の効率化の検討が進められてはいるが、ここで取り上げているような多収性目的生産バイオマスを広範囲に栽培したときに必要な収穫・運搬システムについても検討を進める必要がある。特に草本系植物においては、運搬時にかさ密度が運搬コストに大きく影響を与えることから、高密度に圧縮し運搬できる機械開発が重要となってくる。

さらに、土地と植物種とは密接な関係にあり、その収穫量は大きく土地条件に依存する。また、現状森林である土地を開墾する、あるいは農地を転用して目的生産バイオマスを栽培するなどの方法は、いずれも生態系への影響、森林の公益的機能の維持や土地を介した食料との競合と言う点で、配慮が必要である。理想的には、現状耕作に適さない土地（塩類集積土壌、乾燥地、貧栄養土壌、酸性・アルカリ性土壌など）を有効に活用し、そこに適した多収性の植物を選定、栽培することが最も好ましい形態である。したがって、そのような条件の土地の調査、選定を行なうことも重要な検討項目である。

海外を栽培地として対象とする場合には、一般に植物の国境を越える移動を禁止する国が多く、日本で開発された植物を外国に輸出できない可能性が高いので、注意する必要がある。輸出ができない場合には、栽培を行なう対象国に生息する植物を選定し、現地国の研究機関や政府、地域の自治体などとの協力や合意を得ながら、開発を進める必要がある。

#### **(4) 基盤技術**

現状の選択される植物のみでは、生産の効率の点で十分ではない。植物自体を改変することで、生産性を高める検討も重要である。

DNAマーカー、ゲノム解読などのゲノム情報を整理したうえで、光合成効率が高い植物を創出すること、植物のストレス耐性を高めることにより、従来は生産性が低かった不良土壌も有効に活用することが理想的である。また、酵素による植物細胞壁の直接的な糖化は現状では困難であり、そのための前処理等に大きなエネルギーを投入せざるを得ない状況である。植物の細胞壁を改変することで糖化を容易にすること、また、植物自体に酵素を生産させるなどの手法も重要な検討項目である。

さらに、我が国にとって、リンなどの肥料成分に含まれるミネラル資源は希少なものであり、その回収、再利用技術の開発も重要な課題となってくる。

バイオマス原料に関する技術マップを図1. 13に、ロードマップを図1. 14に示す。

| 候補作物      |    |                                               | (選抜理由)                                                                         | 育種                                                     |                                                | 栽培                                                                                                       |                             | 収穫<br>(収穫・細断・梱包)                                                        | 収集・運搬                                                        | 貯蔵 |  |
|-----------|----|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----|--|
|           |    |                                               |                                                                                | ゲノム                                                    | 表現形                                            | 閉鎖系                                                                                                      | 野外試験                        |                                                                         |                                                              |    |  |
| 目的生産バイオマス | 木質 | ヤナギ                                           | ・早生樹であり、短いローテーションで収穫可能                                                         | 作業性向上のための樹形制御                                          |                                                |                                                                                                          | 短伐期施業                       | 未利用バイオマス収集・運搬・貯蔵技術<br><br>+<br><br>革新的技術<br>大型化、高速化(海外事例参考に)            |                                                              |    |  |
|           |    | ポプラ                                           | ・基礎研究の蓄積あり(ゲノム情報、品種改良)                                                         | 有用物質生産、木質改変                                            |                                                |                                                                                                          | 植林技術                        |                                                                         |                                                              |    |  |
|           |    | ユーカリ                                          |                                                                                |                                                        |                                                | 荒漠地、乾燥地での栽培技術                                                                                            |                             |                                                                         |                                                              |    |  |
|           |    | ※目的生産ではないが大幅なシステム革新があれば針葉樹(スギなど)も活用できる可能性はある。 |                                                                                |                                                        |                                                |                                                                                                          | コンテナ苗育成                     |                                                                         |                                                              |    |  |
|           | 草本 | イネ科                                           | イネ科全般                                                                          | ・基礎研究の蓄積あり(ゲノム情報、品種改良)                                 | 発酵阻害成分低減<br>少肥料、高生産品種選抜(DNAマーカー選抜育種)           |                                                                                                          |                             | 施肥法改善(N <sub>2</sub> O,メタン発生削減)<br><br>低投入エネルギー・持続的栽培システム<br>不耕起栽培、直播栽培 | 未利用バイオマス収集・運搬・貯蔵技術<br><br>+<br><br>革新的技術<br>大型化、高速化(海外事例参考に) |    |  |
|           |    |                                               | 多収量飼料作物<br>ネピアグラス<br>ギニアグラス<br>ソルガム(ソルゴー)<br>サトウキビ属交雑種(エリアンサス等)<br>ミスカンサス(ススキ) | ・多収ポテンシャルあり(海外での研究例)<br>・栽培ノウハウあり(牧草として)<br>・品種ライブラリあり | リグニン生成の抑制                                      |                                                                                                          | 特性把握と利用法<br><br>多収量品種の評価・選抜 |                                                                         |                                                              |    |  |
|           |    |                                               |                                                                                |                                                        | 育種                                             |                                                                                                          | 荒漠地での栽培技術                   |                                                                         |                                                              |    |  |
|           |    | マメ科                                           | アカシア<br>セスバニア<br>ミヤコグサ                                                         | ・少肥料で多収、持続的(窒素固定能)                                     | 少肥料、高生産品種選抜(DNAマーカー選抜育種)<br>根粒成熟機構の解明<br>ゲノム解読 |                                                                                                          |                             | 低投入エネルギー・持続的栽培システム<br>不耕起栽培、直播栽培                                        |                                                              |    |  |
|           |    |                                               | 基盤技術                                                                           |                                                        |                                                | セルロース高含量、高比重GM樹木<br>セルラーゼ導入植物<br>環境ストレス・病害虫耐性<br>不良環境(乾燥、塩性、寒冷)耐性作物の開発<br>木質組成改変による糖化効率向上(高セルロース、低リグニン化) |                             | ミネラル再利用(フラックス解析)                                                        |                                                              |    |  |
|           |    |                                               |                                                                                |                                                        |                                                |                                                                                                          |                             |                                                                         |                                                              |    |  |

図1. 13 バイオマス原料技術マップ (目的生産バイオマス)



図1. 14 バイオマス原料に関する技術ロードマップ



## 1. 2. 3 エタノール製造技術に関する技術マップ、ロードマップ

### (1) 重点項目の開発方針

ベンチマークを達成する製造プロセスを確立するために、前処理、糖化、エタノール発酵、濃縮脱水の各工程の要素技術について、それぞれの目標を設定して開発を進めることが重要である。その中でも、前処理と酵素糖化の2工程はハードルが高く、我が国として重点的に開発を進める必要がある。

なお、具体的開発項目についてはバイオマス・ニッポンケースとの共通事項も多いことからまとめて記述した。

まず、①前処理工程については、種々の技術が検討されているが、効果とコスト（エネルギー消費）のバランスで最適な技術の開発が重要である。これまでは、バイオマス原料の種類や前処理能力の評価軸が統一されていなかったため、各技術の横並びでの評価が出来ていなかった。これらの評価軸を揃えることにより、有望な技術を絞り込み、重点的に資源を投じ、開発を加速することが望まれる。さらに、前処理工程において、種々の技術で共通に使える技術として、微粉碎法があるが、これについては、共通技術として、重点的に開発を行なうことが望まれる。

また、②酵素処理工程についても、各研究機関で基礎研究がなされているが、一概には評価できない。これは、評価の前提となるバイオマス原料や前処理法が統一されていないため、その組合せによって状況が大きく異なるためである。このため一定の評価軸や迅速かつ安定なハイスループットな評価系を揃えることにより、既存酵素群あるいは新規な遺伝子源からの高活性な酵素を広く選抜することが可能となる。

また、酵素の反応メカニズムを分子レベルで理解することにより、高活性酵素の創製や酵素混合組成の最適化、反応条件の最適化が加速できる。同時に、酵素の生産コストの低減や回収再利用方法の確立により、コストを低減する検討も必要である。

さらに、各工程を一貫してつなげた上での③全体プロセスの最適化も重要な課題である。各工程、各要素技術の部分最適化は、消費エネルギーや廃液発生、コストの観点から、必ずしも全体最適とはならない可能性がある。このため、早い段階からのプロセス一貫での評価、最適化が必要である。

これらの個別のプロセスの課題の解決のために、対象となるバイオマスの分析技術や酵素の改変のためのゲノム利用技術などが、④基盤技術として、

充実強化する必要がある。

以下、各重点課題のベンチマーク、技術開発の進め方を提言する。

### ①前処理技術

後段に続く酵素糖化の効率を80%以上とするもので、消費エネルギーが極力低い前処理技術の開発を目指す。

前処理技術としての微粉碎法は、酵素糖化効率を高める効果が大いだが、一般的に消費エネルギーが大きい問題がある。しかし、他の手法との組み合わせにより、エネルギー投入量が少なく、酵素糖化効率を高める効果が大い条件が得られる可能性がある。このため、微粉碎法を共通技術として省エネルギー化を図るとともに、相乗効果のある前処理法を検索することを目指す。前処理法の評価法として、評価軸をエネルギー投入量と糖化収量に置き、処理対象バイオマス原料ならびに後段につながる酵素反応条件（酵素組成・濃度、反応温度・時間、評価方法）を統一して、各種前処理法を横並びで評価することが重要である。有望技術については、更なる高性能化（省エネ化、高効率化）、スケールアップについても検討することが重要である。

### ②酵素糖化技術

40円/Lを達成するためのベンチマークとして、1kgのグルコース等のエタノール発酵可能な単糖を得るための酵素量を1g以下とすること、1kgのバイオマスから0.5kg以上の糖を得ること、1Lのエタノールを得るための酵素コストが4円以下であることを目指す。

このために、(1)高活性酵素創製（新規取得、改良）の加速化、(2)酵素反応条件の最適化、(3)酵素生産性の向上、(4)酵素の回収・再利用を検討する。

まず、(1)高活性酵素創製の加速化のために、対象バイオマスと前処理法を確定する。酵素の反応性は、対象となるバイオマスの種類（成分、高次構造など）と前処理法によって異なるため、酵素開発の標準となる系を設定し、共有する必要がある。その際、酵素活性は、測定法によっては操作手順によるばらつきが大きく、また測定に手間がかかる問題がある。このため、評価法の標準化のために、酵素活性測定法の手順共通化、装置化、さらに迅速化、多検体処理への対応（ハイスループット化）を行なう必要がある。選択されたバイオマス原料と前処理の組み合わせに適した酵素を新規に（あるいは既存のライブラリーから）取得する。さらに、選択された酵素について、遺伝子工学的手法を用いて耐熱性、高安定性、比活性向上などの観点で改良する。その際、反応メカニズムを分子レベルで解明し、高活性酵素を取得する確率を高めることが重要である。

新規に取得した酵素あるいは取得済みの酵素について、(2)酵素反応条件の最適化を行なう。セルラーゼは、役割の異なる酵素の混合系であるが、バイオマス原料や前処理法の選択によって、その最適成分比は異なる。それぞれの酵素成分の役割、反応機構を解明するとともに、選択されたバイオマス原料と前処理の組み合わせに最適なセルラーゼ成分比を検索する。

さらに、選択した酵素について、(3)酵素生産性の向上の検討を行なう。酵素コスト削減のためには、大量に効率よく、高活性の酵素を生産できる宿主菌の選択が重要である。宿主菌については、生産性を向上させるための更なる改良を加える。大量に酵素を生産させるためには、目的遺伝子発現機構を分子レベルで理解し強化改良する。選択した酵素、生産宿主について、低コスト生産、大量生産、オンサイト生産のための培養条件・装置の最適化を行なう。

また、(4)反応後の酵素を回収し、再利用することができれば、酵素使用量を減らし、コスト低減効果が期待できる。

以上の検討を効果的に進めるために、対象バイオマスと前処理法の選定した後に、独立行政法人などの研究機関により酵素活性測定法の標準化について、検討・確定し共有化することが重要である。その上で、高活性酵素のスクリーニング、改良は、標準化した手法に則り、大学、独立行政法人、民間企業等の各研究機関のアイディアで競争的に加速することが重要である。なお、反応メカニズムの解明は、基礎科学技術領域の検討であり、高性能な測定装置が必要である。そのため、共通の研究機関で集中的に検討を行ない、情報を公開・共有化し、大学、独立行政法人、民間企業等の研究機関での個別検討に利用できることが望ましい。反応リアクターの最適化や酵素回収・再利用法の検討には、化学工学的知識も必要であり、酵素研究者との協同が重要である。酵素ならびに宿主の改良には、バイオ関連企業の蓄積、ノウハウ、技術が重要である。

### **③一貫プロセス技術**

前処理～糖化～発酵～濃縮・脱水まで、一貫プロセスとして最適化を行ない、1 kg バイオマス当たりのエネルギー使用量をバイオマス中のリグニンの熱量以内に抑え（バイオマスで自立）、1 kg のバイオマスからのエタノール収量 0.3 L 以上、エネルギー回収率 35% 以上を目指し、プロセス全体としてのコストを最小化する。また、コストと環境負荷低減の両面から廃棄物、廃水の最少化も重要である。

まず、各工程は、前後工程とのつながりを重視しながら選定・最適化を行なう。具体的には、まず、バイオマス原料に適した前処理・糖化法を選択

し最適化し、生成糖液に適した発酵法を選択・最適化する。つぎに、発酵液に適した濃縮・脱水法を選択・最適化する。最も大きい変動要因はバイオマス原料であり、この確定は全ての基本となる。さらに、前処理～糖化～発酵～濃縮・脱水までの全工程をつないだ上で、エネルギー収支、エタノール収率、コストを評価し、全体を最適化する。各工程の部分最適化は、必ずしも全体最適ではないことに注意が必要である。各工程の開発目標は、全体のコストミニマム化の観点から、過剰な設定とならないように注意が必要である。

また、糖化工程と発酵工程の同時進行（SSF）によるワンポット化や糖化酵素のオンサイト生産も一貫プロセスの最適化で検討する。

廃水処理コストを低減するためには、廃水発生量を減らすことが重要である。また、濃縮脱水にかかるエネルギー・コストの低減のためにも、糖液濃度、さらにエタノール濃度を高めることが重要である。このため、前処理、糖化、発酵の各工程を必要最少量の水分で行なうことが重要であり、このためのリアクター開発・設計が重要である。バイオマスは、比重が小さく、かさ高いため、等重量の水を加えても、液状（スラリー状）にはならない。しかし、濃縮脱水のエネルギー効率向上のためには、発酵液のエタノール濃度は、10%以上であることが望ましい（図1. 15）。

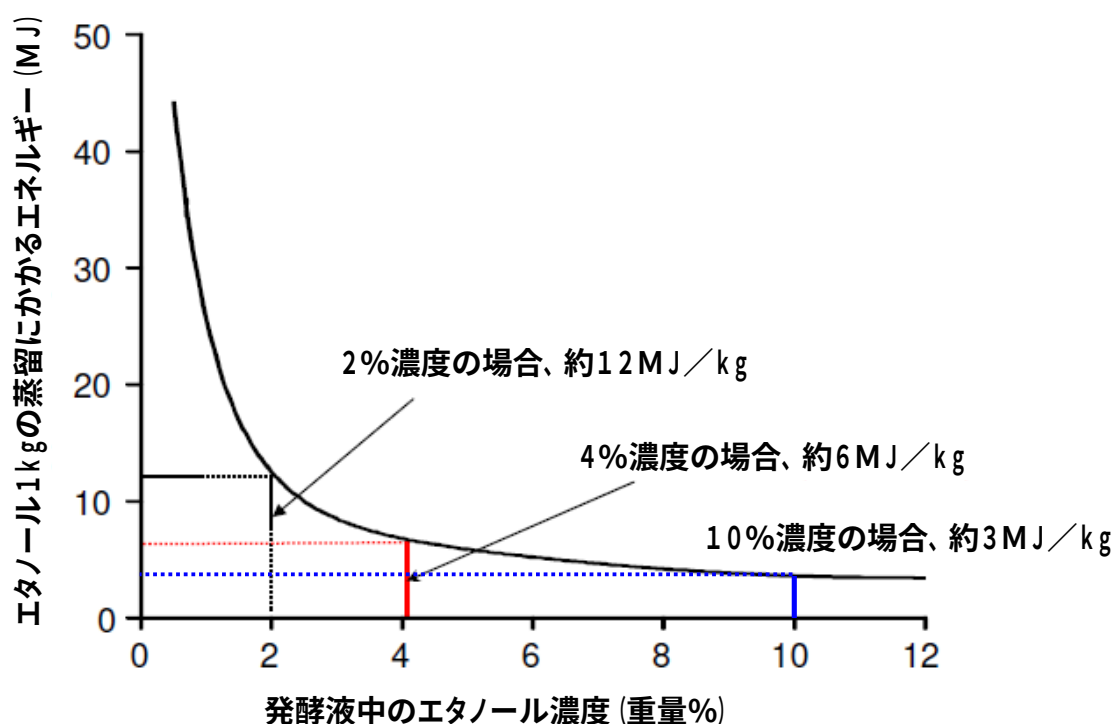


図 1. 15 発酵液中のエタノール濃度と蒸留にかかるエネルギー<sup>14)</sup>

<sup>14)</sup> G. Zacchi (2005) “Hydrolysis of Biomass for Fuel Ethanol Production”, Baltic Biorefinery Symposium

このため、可能な限り添加する水の量を減らした条件（固体含有率が30%程度の「含水固体」条件）で、前処理、糖化、発酵を行なうための反応装置を開発することが重要である。この検討には、酵素反応、発酵反応条件（温度、pH、水分量など）を最適化するための生化学的知識と、低エネルギーで均一な混合を行なうための化学工学的知識の融合が重要である。

さらに、廃液処理（膜分離）―再利用や、発酵残渣や灰分の有効利用（肥料、飼料）もプロセス全体の最適化に重要な検討項目である。

以上の検討は、各要素技術開発の比較的早い段階から、全工程をつないでベンチ評価を行ない、全体最適化を行なうことが望ましい。

#### **④基盤技術**

酵素糖化、発酵の高効率化、低コスト化のために、ゲノム技術を駆使して、酵素や微生物の強化・改変を行なう。用いる手法は、新たな遺伝子源を広範囲で探索するための手法（メタゲノム手法、メタトランスクリプトーム手法）、ゲノム情報を利用するためのバイオインフォマティクス手法、既存酵素を改変・強化するためのタンパク質工学的手法、進化分子工学的手法、既存微生物を改変・強化するためのゲノム工学手法などがある。タンパク質工学、進化分子工学に用いられる要素技術はもともと海外で開発されたものが多く、実用化の面でも海外勢が先行している。多くの大学、ベンチャー、研究機関がメタゲノム解析を行なっているが、遺伝子利用についてはまだ黎明期にある。開発目標を定めることにより、基盤技術としての充実と、実用化の両面での推進が必要である。

また、前処理、糖化、発酵の各工程の最適化には、バイオマス成分の迅速、確実な分析技術が必要である。特に、リグニンや糖分析のハイスループット化（装置化、標準化）、さらにバイオマスの表面解析（表面積、電子顕微鏡観察など）や固体構造解析（X線解析、結晶解析など）が重要である。

### **（２）各要素技術の開発方針**

エタノール製造技術の要素技術について、開発方針をまとめて記載する。製造プロセスは、糖を得る方法で、2つ（熱化学的、生物的）に分類でき、さらに後者はプロセス統合度で分けられる。また、先導的な研究テーマとしてエタノール発酵を経ないプロセスも想定されるため、結果、4つに分類できる（図1. 16）。

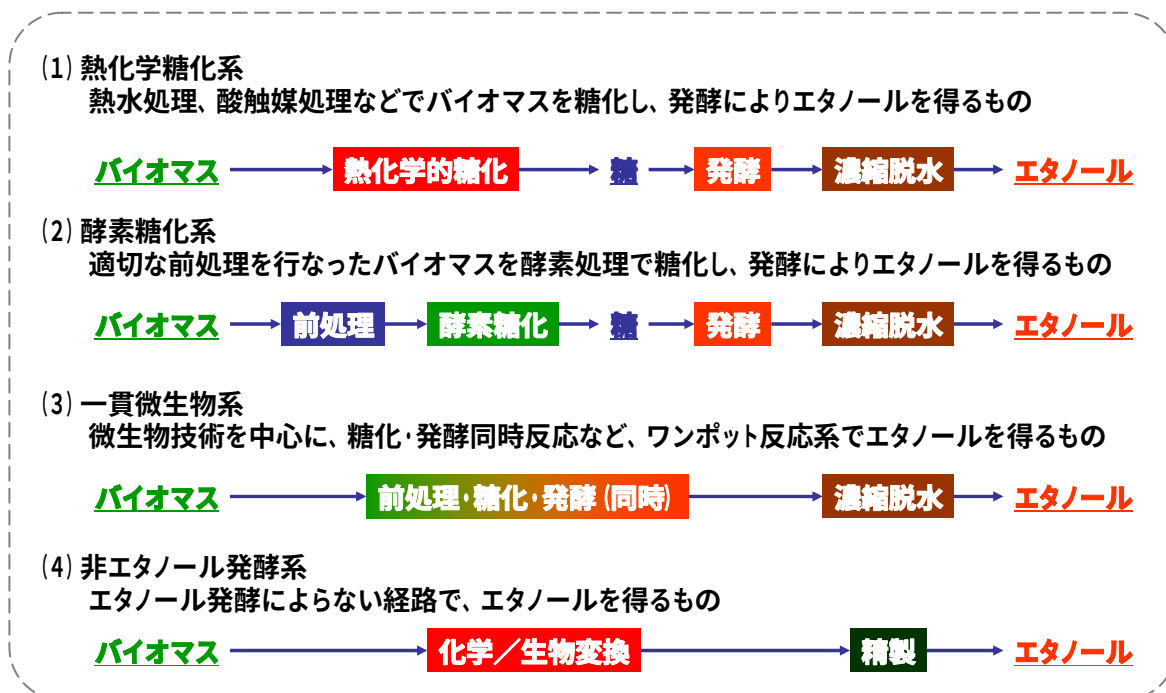


図1. 16 製造プロセスの4つの分類

## 熱化学糖化系—糖化技術

(技術課題の必要性・特徴)

超臨界水・加圧熱水あるいは酸により、バイオマス成分を加水分解し糖を得る。

(期待する効果)

高効率な糖化

(開発目標)

糖化率85%以上

(解決すべき課題)

【加圧熱水処理、超（亜）臨界水処理】

加水分解の選択性の向上（糖類のフルフラール類への熱分解の回避）。  
大規模スケールへの対応（連続化、過分解を避けるための反応速度の制御などリアクター設計）。

【酸加水分解】

装置の腐食対策。

中和による石膏の大量発生、硫酸の回収。

硫酸処理によるリグニンの縮合（ケミカル原料としては利用できない）。

（我が国として強力に推進すべき技術）

### 【加圧熱水処理、超（亜）臨界水処理】

無触媒であるため、処理後の扱いが容易。環境への付加が小さい。

国産技術が主流であり、国際的なイニシアティブを獲得しうる可能性が高い。

（スケールアップ適合性）

1. 5万、10万～20万kL／年

（技術完成時期）

2015年： 1万kL／年規模実証

### 酵素糖化系—前処理技術

（技術課題の必要性・特徴）

ヘミセルロース、リグニンの分離あるいは除去、バイオマス表面積の増大、結晶型の変換などにより、酵素の基質（セルロース）への接近容易性（アクセシビリティ）を高め、酵素反応を起こりやすくする。

（期待する効果）

ヘミセルロースの低分子化・・・水熱処理、蒸気爆砕法および変法<sup>15)</sup>

脱リグニン・・・ソルボリシス、塩基触媒処理、アルカリ処理、微生物処理

バイオマス表面積の増大・・・微粉碎処理

セルロース結晶型の変換・・・アンモニア処理

（開発目標）

略（前項に記載の通り）

（解決すべき課題）

投入エネルギーの削減・・・微粉碎処理、爆砕法（および変法）

発酵阻害物生成の回避、水使用量の削減・・・水熱処理

複数の処理技術の組合せによる相乗効果・・・微粉碎＋アンモニア処理など同一条件（バイオマス、酵素）で前処理法を横並び評価（エネルギー効率 v s 糖化効率軸にて）

（我が国として強力に推進すべき技術）

微粉碎処理法の開発（高性能化、大容量化、省エネ化）

高固液比での含水固体状態での処理に対応するリアクターの開発・設計  
水熱処理

（スケールアップ適合性）

数千、1. 5万、10万～20万kL／年

（技術完成時期）

---

<sup>15)</sup> 針葉樹材では、亜硫酸ガスや硫酸アルミ等のルイス酸存在下での爆砕により、酵素糖化率が向上する。

2015年： 1万kL／年規模実証

### 酵素糖化系－酵素糖化技術

(技術課題の必要性・特徴)

酵素を用いたプロセスによる環境適合型糖化技術の実用化。

(期待する効果)

スクリーニング、改良による酵素活性の向上と、反応条件の最適化による使用酵素量の低減、さらに酵素生産性の向上により酵素糖化にかかるコストを大幅に削減する。

(開発目標)

略（前項に記載の通り）

(解決すべき課題)

高活性酵素のスクリーニング・・・ハイスループット酵素活性測定系の構築、対象バイオマスの確定

酵素の改良・・・進化分子工学的改変、ハイスループット酵素活性測定系の構築

セルラーゼ成分量比の最適化による糖化効率向上・・・反応機構解明、評価系の構築

酵素生産性の向上（低コスト、大量生産、オンサイト生産）・・・大量発現する生産宿主の開発、発現制御機構の解明

(我が国として強力に推進すべき技術)

リアクター設計・・・高濃度バイオマスで効率的に反応させるリアクターの設計、化学工学的な検討

知財戦略・・・欧米の特許に対し、開発技術を権利化し、実用化するための戦略策定（生産宿主の選択など）

(スケールアップ適合性)

数千、1.5万、10万～20万kL／年

(技術完成時期)

2015年： 1万kL／年規模実証

### 熱化学糖化系・酵素糖化系－糖化後処理技術

(技術課題の必要性・特徴)

前処理・糖化工程で生成した発酵阻害物質をエタノール発酵の前段で除去し、希薄な糖化液をエタノール生産に適した濃度まで濃縮する。

セルラーゼ使用量が非常に多いことが課題であり、糖化後に酵素を回収・



再利用できれば、使用量を減らせる。なお、前項に記載した高濃度バイオマス反応による糖化液の高濃度化が可能となれば、濃縮操作は回避できる可能性がある。

(期待する効果)

阻害物質を除去することにより、理論収率に近いエタノール発酵を得る。  
使用する酵素の量を減らし、酵素にかかるコストを低減する。

(開発目標)

低濃度糖化液から、150～200 g/Lまで濃縮できる技術の開発。  
酵素回収については、前項に記載の通り。

(解決すべき課題)

発酵阻害物の除去・・・液液抽出、吸着除去など候補技術からの比較選抜  
(エネルギー投入量の観点で)  
糖化液の濃縮・・・液液抽出、減圧・常圧濃縮、膜式濃縮法などからの  
比較選抜 (エネルギー投入量の観点で)  
酵素の回収・再利用・・・回収装置のコスト。リグニンなどへの非特異的  
かつ不可逆的吸着の解消。

(我が国として強力に推進すべき技術)

膜式濃縮法 (投入エネルギーが小さいことが期待できる)  
酵素の回収再利用装置 (リアクター) 開発

(スケールアップ適合性)

数千、1.5万、10万～20万 kL/年

(技術完成時期)

2015年： 1万 kL/年規模実証

## **熱化学糖化系・酵素糖化系－エタノール発酵技術**

(技術課題の必要性・特徴)

エタノール発酵微生物の資化性、耐熱性などを改良し、効率的なプロセスを構築する。

(期待する効果)

バイオマスを構成する糖のほぼ全てを利用する。

(開発目標)

生産速度 50 g/L/h r 以上、生産物終濃度 100 g/L 以上、  
収率 95% 以上

(解決すべき課題)

・微生物の改良

資化性の拡大 (5炭糖、有機物)・・・改良する微生物の選択、

### 5 炭糖と 6 炭糖の完全同時利用

高温発酵微生物の開発（冷却コスト低減、コンタミ防止、エタノール回収容易化、SSF 対応）・・・エタノール発酵微生物の高温化、高温微生物へのエタノール発酵能付与のどちらが近道か。

また、高温発酵時のエタノール耐性も課題となる。

阻害物耐性微生物の選択、開発・・・阻害物の特定、微生物による阻害感受性の明確化。阻害物に対する高度耐性。

対糖収率向上・・・具体的な研究戦略の検討。

#### ・微生物の効率的利用

連続発酵（固定化、凝集性）

高密度充填プロセス

#### ・廃棄物処理、残渣利用（有価物、肥料・飼料としての利用、ガス化利用）

（我が国として強力に推進すべき技術）

5 炭糖の利用（菌体改良とリアクター設計）

高温発酵

（スケールアップ適合性）

数千、1. 5 万、1 0 万～2 0 万 k L／年可能

（技術完成時期）

2 0 1 5 年： 1 万 k L／年規模実証

## 一貫微生物系

（技術課題の必要性・特徴）

### 【同一微生物による糖化酵素生産と発酵の同時進行（C B P）】

微生物に酵素を生産させることにより、糖化に要する酵素量を大幅に低減できる。

### 【微生物による前処理－糖化－発酵】

全てのプロセスを微生物で行なえば、極めて環境適応型、省エネ型プロセスとなる。

（期待する効果）

### 【糖化酵素生産と発酵の同時進行】

従来使用される酵素量を少なくとも数十分の一に低減する。

### 【微生物による前処理－糖化－発酵】

酸、アルカリ、高温などの前処理が不要となるため、大幅な省エネが期待される。

（解決すべき課題）

エタノール発酵微生物の耐熱性向上による酵素反応性の向上。

セルラーゼ生産微生物のエタノール耐性向上、発酵収率向上、5炭糖の利用性付与。

リグニン分解とともに、セルロース、ヘミセルロース糖化のできる糸状菌の開発、担子菌の利用。

(我が国として強力に推進すべき技術)

酵母、ザイモバクターを使つてのアーミング微生物の育種(日本が先行)。

リグニン分解、糖化同時処理微生物(担子菌、糸状菌、酵母)の育種(世界に開発例無し)。

(スケールアップ適合性)

数千、1. 5万kL/年

(技術完成時期)

2015年: ベンチスケール。

## **濃縮・脱水技術**

(技術課題の必要性・特徴)

従来法(共沸蒸留)に替わる新規技術の導入により、エタノール濃縮・脱水にかかるエネルギーを低減する。

(開発目標)

濃縮・・・投入エネルギー従来法の60%以下。

脱水・・・従来法の10%以下。

(解決すべき課題)

膜による選択的分離、脱水

膜モジュールの性能向上・・・膜の選択性能、透過性能、耐久性の向上。

膜技術を中心としたシステム化・・・不純物(有機物、固形物)の影響  
評価、除去方法(プレフィルタ)の確立。

省エネ蒸留法、濃縮法

溶媒抽出法(基本原理は実証済み)・・・プロセス経済性評価、実証  
検証、プロセスの最適化。

超音波霧化分離法・・・メカニズムの解明と再現性の確認。大量処理の  
手法の開発。

(我が国として強力に推進すべき技術)

膜による選択的分離、脱水(日本独自の技術であり、優位性が実証できれば国際的なイニシアティブを獲得できる)

溶媒抽出法(現在研究開発事例は海外では見当たらない。日本独自の技術)

(スケールアップ適合性)

【膜による選択的分離、脱水法】数千、1. 5万、10~20万kL/年

【溶媒抽出法】数万 k L／年以上  
(技術完成時期)

【膜による選択的分離、脱水法】

2015年：1万 k L／年規模実証。

【溶媒抽出法】

2015年：1万 k L／年規模実証。

【超音波霧化分離法】

2015年：ベンチスケール

### 非エタノール発酵系

(技術課題の必要性・特徴)

エタノールと等モルの  $\text{CO}_2$  を発生するエタノール発酵を経ない、バイオマスのエタノール化技術。

(期待する効果)

硫酸処理－発酵法に比べて、単糖あたりのエタノール変換効率、 $\text{CO}_2$  削減効果が高いことが期待される。

可能性のある技術として、酢酸発酵－水素化分解法、ガス化－嫌気発酵法について、後述する(1. 5)。

各プロセスを構成する要素技術の技術マップを図1. 16に示す。また、技術革新ケース実現に向けた一貫プロセスの技術ロードマップを図1. 17に示す。

| 分類                   | 工程              | 研究開発フェーズ                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                              |                                                  |
|----------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                      |                 | 先導的研究、基礎研究                                                                                                                                                                        | プロセス技術の確立                                                                                                                                                                                                    | システムの確立                                          |
| (1)<br>熱化学<br>糖化系    | 糖化              |                                                                                                                                                                                   | 加圧熱水処理、超(亜)臨界水処理<br>・加水分解選択性向上、大規模スケールへの対応                                                                                                                                                                   | 酸加水分解<br>・装置の腐食対策、硫酸の回収                          |
| (2)<br>酵素<br>糖化系     | 前処理             |                                                                                                                                                                                   | リグニン、ヘミセルロースの分解・溶出(水熱処理★、ソルボリシス★、蒸気爆砕)<br>・発酵阻害物生成の回避、水使用量削減、投入エネルギー削減<br>ヘミセルロースの低分子化(酸触媒)<br>脱リグニン(塩基触媒処理、アルカリ処理★、微生物処理)<br>バイオマス表面積の増大(微粉碎処理★)<br>・投入エネルギー削減、高性能化、大容量化<br>セルロース結晶型の変換(アンモニア処理★) 残渣・副産物の利用 | システム設計★<br>・含水固体反応への対応                           |
|                      | 糖化              | 高活性酵素のスクリーニング<br>・ハイスループット酵素活性測定系の構築<br>セルラーゼ成分量比の最適化による糖化効率向上<br>・反応機構解明、評価系の構築<br>酵素の改良<br>・進化分子工学的改造、ハイスループット酵素活性測定系の構築<br>酵素生産性の向上(低コスト、大量、オンサイト)<br>・大量発現する生産宿主の開発、発現制御機構の解明 | セルラーゼ成分量比の最適化による糖化効率向上★<br>・重要セルラーゼ成分のカクテル化<br>酵素生産性の向上(低コスト、大量、オンサイト)★<br>・培養条件の最適化、オンサイト培養条件の最適化<br>SSF(併行複発酵)処理条件の最適化                                                                                     | 酵素反応リアクター設計★<br>・含水固体反応リアクター設計<br>・化学工学的検討       |
|                      | 糖化<br>後処理       |                                                                                                                                                                                   | 酵素の回収・再利用<br>・リアクター開発、リグニンへの非特異的・不可逆的吸着の解消<br>発酵阻害物の除去(液液抽出、吸着) 糖化液の濃縮(液液抽出、減圧・常圧、膜式★)                                                                                                                       |                                                  |
|                      | エタノール<br>発酵     | 微生物の改良<br>資化性の拡大(5炭糖★、種々の有機物)<br>・微生物の選択<br>高温発酵微生物の開発★(冷却コスト低減、コンタミ防止、SSF等)<br>・微生物の選択<br>阻害物耐性微生物の開発<br>・阻害物の特定<br>対糖収率向上<br>・具体的な研究戦略の検討                                       | 微生物の効率的利用<br>連続発酵(固定化、凝集性)<br>高密度充填プロセス<br>プロセス適合性向上<br>残渣・副産物の処理・利用(有機物、肥料・飼料としての利用、ガス化利用)                                                                                                                  | 固体発酵リアクター設計★<br>・化学工学的検討                         |
|                      | 濃縮・<br>脱水       | 省エネ蒸留法(超音波霧化分離)<br>・メカニズムの解明と再現性の確認                                                                                                                                               | 省エネ濃縮法(溶媒抽出★)<br>・プロセス経済性評価、実証検証、プロセスの最適化                                                                                                                                                                    | 膜による選択的分離、脱水★<br>・膜モジュールの性能向上<br>・膜技術を中心としたシステム化 |
| (3)<br>一貫<br>微生物系    | 前処理<br>糖化<br>発酵 | 糖化・発酵同時進行(CBP)微生物の開発(7-リング微生物)<br>・微生物の耐熱性向上、発酵収率向上、5炭糖利用性付与<br>前処理・糖化・発酵同時進行微生物の開発<br>・リグニン分解、糖化同時処理微生物(担子菌、糸状菌、酵母)                                                              | 糖化・発酵同時進行リアクター設計                                                                                                                                                                                             |                                                  |
| (4)<br>非エタノール<br>発酵系 | エタノール<br>変換     | 酢酸発酵と水素化分解によるエタノール変換<br>・酢酸発酵の高性能化(発酵速度、収率の向上)                                                                                                                                    | 水蒸気ガス化と嫌気性細菌によるエタノール生産<br>・水蒸気ガス化時のCO変換率の向上                                                                                                                                                                  |                                                  |
| (5)<br>共通基盤<br>技術    | 全工程             | 新規遺伝子源探索(メタゲノム、メタトランスクリプトーム)<br>ゲノム情報活用(バイオインフォマティクス)<br>酵素の改造・強化(タンパク質工学、進化分子工学的手法)<br>微生物の改造・強化(ゲノム工学、ミニマムゲノム手法)                                                                | 知財戦略<br>・欧米の特許に対し開発技術を権利化・実用化する戦略策定<br>バイオマス分析のハイスループット化<br>・リグニン・糖分析の装置化、標準化、固体性状分析(結晶型、微細構造)                                                                                                               | 凡例<br>★: 我が国として強力に推進すべき技術<br>(WGでの議論を受けた案)       |

図1. 17 エタノール製造技術マップ

一貫プロセスとして：エネルギー使用量6MJ/kgバイオマス以内（バイオマスで自立）、エタノール収率0.3L/kgバイオマス以上、エネルギー回収率35%以上  
年産10～20万kL規模 2008 2015

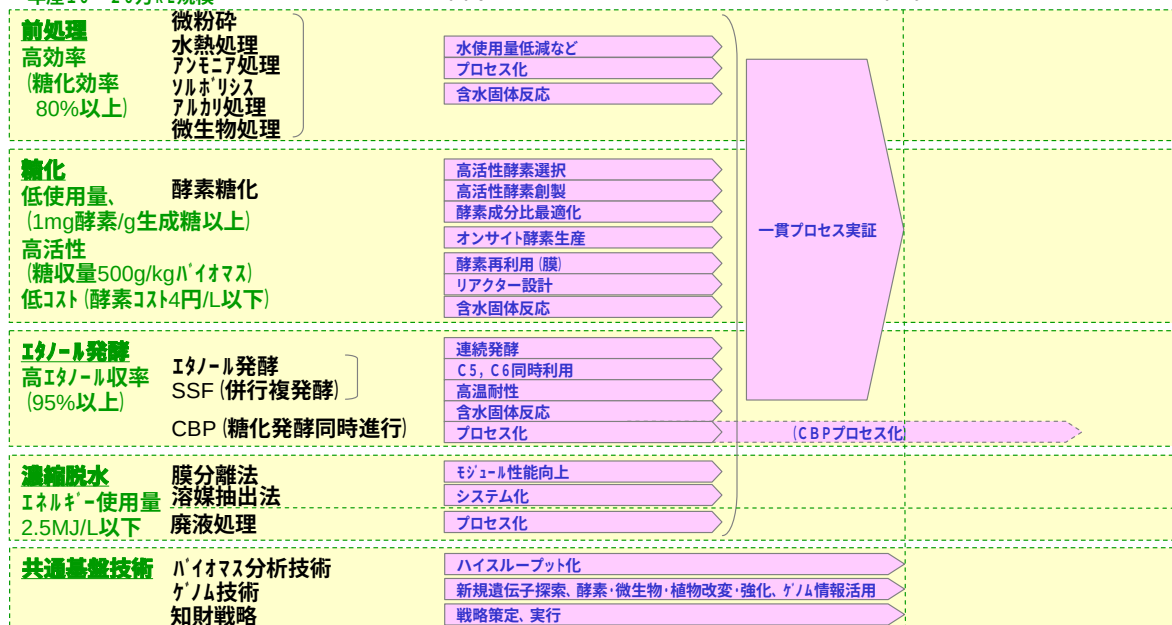


図1. 18 技術革新ケース実現に向けた技術ロードマップ

## 1. 2. 4 LCA上の考察および留意事項について

### (1) CO<sub>2</sub>削減目安と化石エネルギー収支について

米国でのトウモロコシからのエタノール生産とブラジルでのサトウキビからのエタノール生産では、化石エネルギーの使用量が全く異なる。米国では、その必要エネルギーの殆どを天然ガスや系統電力などによって賄っている一方、ブラジルでは、副産物として得られる余剰バガスから必要なエネルギーを賄っているために、化石エネルギー収支(1. 3. 2 (2) 参照)は、米国のエタノールでは1. 5程度に対して、ブラジルのエタノールでは約8と数字には大きな差がある。しかし、化石エネルギーではないバイオマスエネルギーを含めた総合エネルギー収支では、米国では1. 5程度に対して、ブラジルでは0. 6程度と純粋なエネルギー収支でみると、ブラジルは生成エネルギー以上にエネルギーを投入してエタノールを生産していることが分かる。これは、まさしく、米国の方がブラジルに比べて効率のよい生産を行なっていることを示している。一方、ブラジル産のエタノールのライフサイクルの温室効果ガス(GHG)発生量は、圧倒的に米国産のエタノールよりも小さい。<sup>16), 17), 18)</sup>

<sup>16)</sup> Green Dreams J.K. Bourne JR, R. Clark National Geographic Magazine October 2007 p. 41

本協議会では、自動車燃料の石油依存度低減と地球温暖化対策という2つの観点が重要であり、前者は大量生産に対する技術開発に対して、後者はGHGの削減に対して応える必要がある。特に地球温暖化対策に対して技術開発に対するベンチマークを設ける必要があるとのことから、化石エネルギーの使用を制限する意味での化石エネルギー収支について、2以上という数値目安とGHG削減の目安として「CO<sub>2</sub>削減5割以上(対ガソリン)」を示す。化石エネルギー収支2において、化石燃料として天然ガスを使用すれば、6～7割程度の削減になることから、無理のある数値ではないと思われる。また、トウモロコシや糖からエタノールを製造した場合のCO<sub>2</sub>削減率に比べ、セルロースを原料とした場合の削減率は大きく、5割以上の削減も可能であるとの報告<sup>19)</sup>もある。

安倍前首相が提案した戦略「美しい星50」にあるように、GHGを5割低減することが大きな目標となっており、「CO<sub>2</sub>削減5割以上(対ガソリン)」は政府方針とも合致する数字である。GHGの排出は化石エネルギーからだけではないので、「化石エネルギー収支2以上」と「CO<sub>2</sub>削減5割以上(対ガソリン)」には矛盾はないものと思われる。

## (2) 技術革新ケースにおけるLCA上の留意点

目的生産バイオマスを原料とする場合には、土地開墾により発生するGHGに留意する必要がある。現在、土地開墾に関するGHG排出データは整備されていないので、実際の影響は不明であるが、2008年2月7日の米国サイエンス誌の発表論文<sup>20)</sup>では熱帯雨林や泥炭地などの地中に炭素を大量に蓄積している土地を開墾すると大量のGHGを排出することになるので、これらの土地は温室効果ガス削減を目的としたバイオ燃料の生産には適さないと提言している。

また、セルロースからエタノールを製造する技術は世界的にみても、未だ実証研究段階にあり、目安を求めるためにラフな評価が行なわれ発表されているが、信頼できるデータは未だない。バイオ燃料のライフサイクルに亘る環境影響について、様々な議論が行なわれており、国連ではバイオ燃料のL

---

<sup>17)</sup> Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context WELL-TO-TANK Report Version 2c, March 2007

<sup>18)</sup> THE 2001 NET ENERGY BALANCE OF CORN-ETHANOL:

<http://www.ncga.com/ethanol/pdfs/netEnergyBalanceUpdate2004.pdf>

<sup>19)</sup> Cellulosic Biomass for Bioenergy: Economic and Analytical Issues

<http://www.farmfoundation.org/projects/documents/ElbehriCellulosic.pdf>

<sup>20)</sup> “Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land Use Change”, 7 February 28, 2008 Science DOI: 10.1126/science.1151861

CA評価手法を確立するべく活動が始まっているが、上述のような今まで議論されてこなかった要素も含めて、正確に評価できることが、環境評価に対する正しい判断をもたらすことから、評価法を確立することは重要である。本協議会では、GHGのみに的を絞らず、1. 3. 3に示すように総合的な環境評価に関して議論を行ない、取りまとめた。

以下には、エタノールの原料となる目的生産バイオマスについての考察を示す。

#### ①草本系目的生産バイオマスを原料とするケース

草本系目的生産バイオマスを大規模に栽培するケースを想定すると、低コスト、低エネルギーで生産できること、食料との競合の問題がないこと、地域環境への影響がないことが重要な留意事項となる。

栽培時の投入エネルギーを減らすためには、肥料や殺虫剤などの使用量が少なく、粗放栽培が可能な草本系目的生産バイオマスを選択する必要がある。また、作物の収穫・運搬にかかるエネルギーが大きいため、多収量の作物を選択することで収集範囲を小さくでき、エネルギーおよびコストを低減することが可能となる。

対象とする土地は、食料との競合を考慮して、耕作不適地や生物の多様性が低い土地を選択すべきである。例えば、土壌劣化を起こした土地や土地開発によって酸性硫酸塩土壌となってしまった土地などが対象と考えられるが、土地開墾によるCO<sub>2</sub>の発生や土壌改良処理によるCO<sub>2</sub>の発生、生態系への影響などを考慮して、土地の選定や規模を決定することは重要である。

地域環境への影響と言う視点では、多年草で穂がつかないような品種を選択することで、花粉による栽培地周辺の生態系への影響を防ぐことも可能になる。植物の成育は施肥などの条件を同じとすれば、太陽光の照射量に比例するので、熱帯、亜熱帯地域が作物の生育という観点で有利であるものの、他の環境要素や規模、物流インフラなどを考慮して、栽培地を選定すべきである。また、たとえ降雨量が少ない土地で生育できる作物を選定したとしても、ある程度の散水は必要であり、工場を運営するに当たっても、水が必要であるので、取水や排水に対して、厳しい条件がつく地域は対象とするのが困難である。

#### ②木質系目的生産バイオマスを原料とするケース

ヤナギやポプラは比較的寒冷地でも成長し、3～4年程度で短周期収穫できるので、欧州では既に目的生産バイオマスとして育成されており、実績が



ある。一方、これらの木は一般の農業作物に比べて生育への水への依存性が高いので、水の豊富な土地が好適で、乾燥地を避ける必要がある点が問題である。

他方、欧州での燃焼用に生産した実績によると、成長の止まる冬季に収穫して平地に山積みして貯蔵しても、夏場を越えて貯蔵することには問題はないようであるので、貯蔵安定性は高いようである。但し、エタノール原料とする場合には、腐敗やカビなどの製造プロセスへの影響が明らかになっていないので、採用するプロセス毎に検証する必要がある。

### 1. 3 LCA評価の考え方とバイオ燃料に関わる環境問題の整理など

#### 1. 3. 1 技術革新ケースとバイオマス・ニッポンケースの共通部分に関する考察

原料および製造における共通課題について、経済性、LCA、ゼロエミッションの可能性の各視点から考察した。

#### (1) 経済性の視点から

原料の経済性を左右するのは、収集輸送のコストとよく言われる。一般に、輸送コストを計算する際には、標準的な輸送費をベースに計算されるが、これでは経済性の改善には限界がある。実際の現場、例えば製紙会社や北海道の大規模農業では、輸送費をミニマムに抑えるために、輸送業者と専属契約してトラックをチャーターする、あるいは、トラックを自社所有するなど、経済性の高い方法を選ぶことにより、一般の輸送費に比べ格段のコストダウンを図っている。

製造面で経済性を最も左右する要素は、設備費である。製糖工場のように稼動時期が限定される場合には、通年で生産する場合に比べて大きな設備を建設する必要がある。通年生産することは、過剰な設備を建設しないという意味で非常に重要である。通年生産しない場合には、設備費のみならず、非稼動時の人件費、光熱費などの無駄が生じる。通年生産するためには、下記の点に留意する必要がある。

- 通年生産できるよう季節性のある原料の貯蔵方法を工夫する、あるいは、原料作物を多期作や多毛作するなどによって、通年生産する。また、原料を多様化する場合には、地域特有で供給性の高い竹などのバイオマスを利用する。
- 通年稼動するために多種の原料を利用する場合には、原料によって前処理条件や酵素の種類、添加量が異なる酵素糖化法によるエタノール製造では、原料の貯蔵性の悪いものを先に処理し、貯蔵性の良いものは後で処理するように、時期によって使い分ける。あるいは、原料として比較的似た物性や組成を有する原料を選定する。

エタノール工場の立地も重要な要素であり、下記の点を留意することが望ましい。

- エタノール工場は原料発生地域にできる限り近い立地が望ましく、海上輸送してブレンド地点に輸送する場合には、臨海地の立地が望ましい。臨海地に立地が不可能な場合には、エタノール工場から港までのエタノールの

輸送については、パイプラインによる輸送を検討すべきである。

- エタノール工場が熱エネルギー的に自立できない場合には、余剰の熱エネルギーを発生している工場に隣接して、エネルギー供給を受けるのが望ましい。余剰エネルギーが大量に発生している工場は稀有と思われることから、比較的小規模の場合に適用できる可能性がある。
- 工場の近隣に発酵残渣などを飼料や肥料などとして利用できる需要があることや工場の規模に合った需要があることが更に望ましい、
- 排水処理能力に余裕のある工場に隣接立地するか、排水処理を他工場と共用化できる立地が望ましい。余剰の能力が大きな工場は稀有と思われることから、比較的小規模の場合に適用できるであろう。逆に、排水処理能力を大きくし、隣接する工場と共用で排水を処理することも考えられる。

## (2) LCAの視点から

肥料として使用されるリン(P)系肥料はリン鉱石から生産されるが、リン鉱石の枯渇が21世紀の中頃には訪れると予想されている。日本の最大輸入国であった米国では輸出をストップしており、貴重なリンを再利用することは重要である。発酵残渣などには原料中に含まれるミネラル(Mg、Ca、P、Nなど)が含まれているので、これを循環利用することが望ましい。

他方、窒素肥料に起因して土壌から発生する亜酸化窒素( $N_2O$ )は温暖化係数が310と非常に高いので、LCA上注目されている。窒素施肥管理によって $N_2O$ を抑制する研究報告もあり<sup>21)</sup>、 $N_2O$ の発生をミニマムにする方法を検討することが望ましい。

$CO_2$ 削減の観点から、バイオマスや太陽光、風力などの自然エネルギーをできる限り利用して、工場などの関連する設備にエネルギーを供給することが望ましい。特に、エタノール工場ではリグニンなどの廃棄物を熱源として利用し、エネルギー自立することが望ましい。しかし、地域で発生するバイオマス廃棄物を熱源として利用する、あるいは、バイオマス原料をエネルギー源として利用する場合には、バイオマスの熱量が低く効率が悪いので、 $CO_2$ の排出を考慮しながら、化石燃料との混焼など柔軟に判断すべきである。

他方、酵素糖化や発酵は比較的低温で行なわれ、エネルギー消費は少ないが、前処理や濃縮脱水は全体のエネルギー使用量の大半を消費するので、特に前処理や濃縮脱水については、低エネルギー化を検討することが重要であ

---

<sup>21)</sup>平成7～11年度「環境保全から見た普通畑における $N_2O$ 発生量の軽減対策」中央農試環境科学部環境保全科による研究

る。一般に、低エネルギー化することはコスト低減にも繋がる。

貯蔵の立地場所や設備、方法については、例えば、ウェットな稲わらに如何に腐敗やカビを発生させないよう稲わらの特性に合わせた低エネルギーの方法を選択し、悪臭やダストを抑えるなどの環境面の配慮を行なって、地域住民に理解される適切な方法を選択するのが望ましい。

### (3) ゼロエミッションの視点から

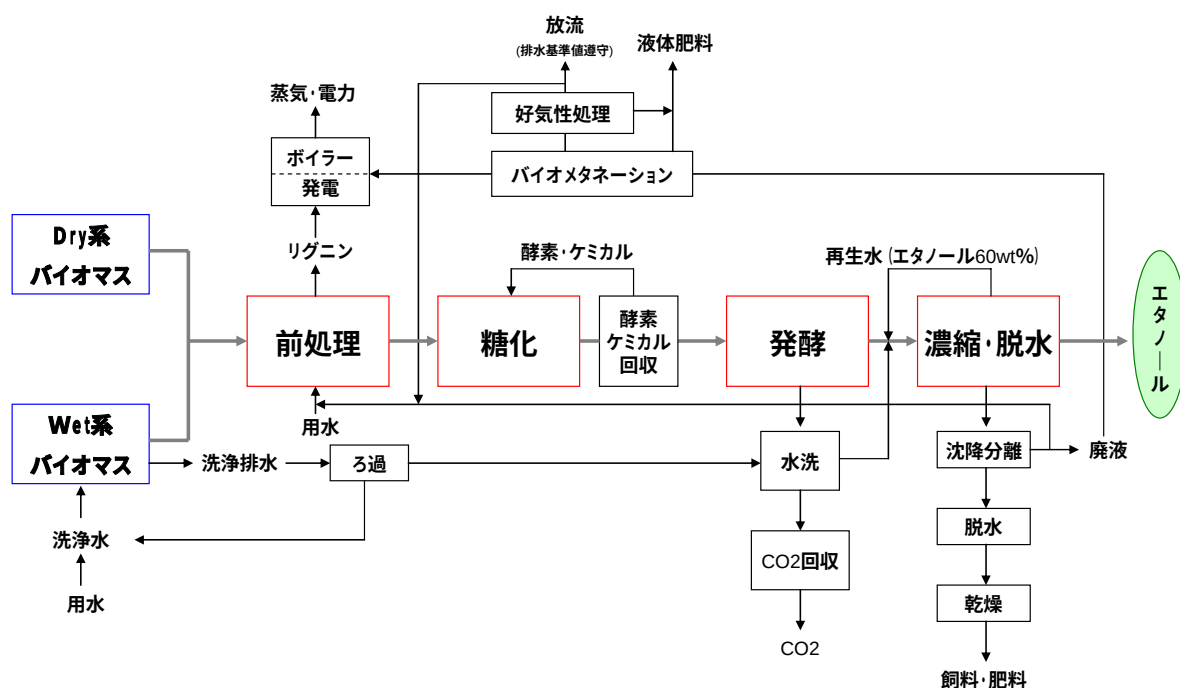


図1. 19 エタノール製造におけるゼロエミッション化フロー

図1. 19はエタノール製造のフロー(例)における、ゼロエミッション化を示したものである。実際には、原料や製造プロセスによって、廃液や発酵残渣などの組成が異なるので、利用方法や処理方法が異なる。原理的には、廃液や廃棄物をゼロエミッションにできる可能性はある。しかし、実際の事業では、設備の立地場所での規制に適合するように廃液や廃棄物を効率的且つ経済的に処理する方法を選択することになるだろう。下記には、一般論としてのゼロエミッション化に関する一例について考察を行なった。

○前処理工程の前にバイオマスの洗浄が必要な場合には、洗浄水のリサイクルを極力行なうと共に、プロセス内での冷却水としての有効利用を図る事が望ましい。

○使用する水や薬品は、できる限りリサイクルして使用するが、これらの使

用を最小に抑えるための技術開発が重要である。

- 凝集性酵母が使用される場合には、沈降分離で酵母を分離できるが、パウダリー酵母の場合には、固液分離により分離することになる。
- 酵母として醸造に使用される酵母が使用される場合には、食用酵母であるので安全なので、配合飼料のタンパク源として利用できる。
- 蒸留廃水は沈降分離や固液分離したあとに、飼料として利用できるようであれば、軽液を濃縮し、濃縮物と分離重液を混合して乾燥後、飼料化するが、濃縮工程で出てくる凝縮水はメタン発酵処理するのが望ましい。
- 放流する場合には、窒素やリンを除去する必要があるが、その時のプロセスは

メタン発酵→MAP法<sup>22)</sup>→◎生物学的脱窒→好気性処理→生物学的硝化→◎へ

が望ましい。

- 発酵過程で大量に発生するCO<sub>2</sub>の有効利用も検討するのが望ましい。

#### (4) その他の検討課題

- バイオマス原料は一般に、大量の水分を含むので有効成分の容積当たりの重量が小さく、輸送時のエネルギー効率が悪い。そこで、中継地点で糖化することによって、より輸送効率が高いと思われる糖液に変換してエタノール工場に輸送することも一つの方法として考えられる。糖化液(液体化)にすることにより輸送効率は高くなるので、大規模では成り立つ可能性もあるが、多方面からの検討を行ない、糖液化しないケースと比較することが必要である。また、規模が小さな場合には、下記のデメリットが考えられる。

- ・トラックより高価なタンクローリーが必要になる。
- ・糖化プロセスとその後の発酵・脱水プロセスが分離されることによる熱エネルギーや水などの有効利用が制限される。
- ・5炭糖液と6炭糖液とを分離すると、輸送効率が悪くなる。
- ・工場に糖液貯蔵のためのタンクが必要になる。
- ・糖液工場のための労働力や付帯設備が重複して必要になる。

- 廃棄物を飼料や肥料として利用する場合には、廃棄物に含まれる成分を把握し、実証を行なった上で、その安全性を十分に確認することが必要である。

<sup>22)</sup> リン酸マグネシウムアンモニウム法 (処理対象水中のリン酸イオンに、マグネシウム剤を添加しアンモニウムイオンの存在下でリン酸マグネシウムアンモニウムの結晶を生成する方法。回収したリンは、肥料として再利用できる。)

### 1. 3. 2 ライフサイクル温室効果ガスのLCAについて

バイオ燃料の温室効果ガス（GHG）には、様々な評価結果があり、評価の方法論が未だ確立されていない状況である。日本におけるバイオ燃料導入の一つの目的は地球温暖化対策であり、生産されるバイオ燃料のライフサイクルに亘るGHGの発生が、化石燃料であるガソリンや軽油に対して、十分に低いことが必要である。

バイオ燃料のLCAを行なう上で、精度の高い評価ができるよう方法論を確立することは重要である。国連においても、GBEP (Global Bioenergy Partnership)において、バイオ燃料に特化したLCA方法論の確立に向けたタスクフォースが結成され、2009年には成果が公表される予定がある。当協議会として、LCAに対する考え方を取りまとめておく。

#### （１）ライフサイクル温室効果ガス排出評価

##### ① 目的

この評価は、バイオマス起源のエネルギーを製造、利用する際に排出される温室効果ガス（GHG）を定量し、排出削減に向けた技術開発の方向を明らかにするものである。

また、新たに技術開発された耕作技術、変換技術等のGHG排出を評価することも対象とする。

##### ② 機能単位

機能単位は、製造されたバイオ燃料の単位エネルギー（例1MJ）とする。バイオ燃料の種類により利用時の効率が異なることに十分配慮し、それを明記する。

##### ③ システム境界

システム境界とは、システムの内側と外側を分けることを指す。原則として、そのバイオ燃料のライフサイクル、すなわち図1. 20のとおり、点線で囲った部分をシステム境界とする。稲わらのような廃棄物の場合には、土地開墾や耕作は含まれないが、このように一部分を除外する際は、その理由を明らかにして明示する。

- ・この一部分を除外する際は、その理由を明らかにして明示する。
- ・部分的な技術開発評価の場合は、図中に示されているようなフローの中の特定の部分に境界を設定することも可能である。

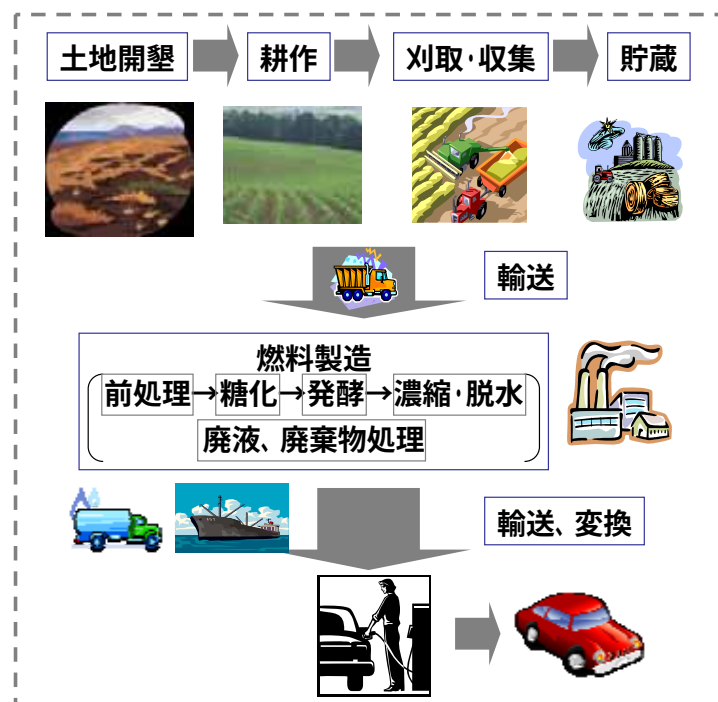


図1. 20 システム境界とフロー

#### ④ データ品質

フローへの電力や熱エネルギー、肥料、薬品などの入出力は直接計量されたものを基準とし、それら入出力に関わる負荷データについては、文献等のデータを利用できるが、信頼あるデータを使用し、出来る限り透明性を確保するとともに、その適用範囲に十分注意する。

時間、地理、技術的有效範囲が限定される場合は、必要な要件を明記する。

- ・評価対象が地球温暖化への影響であることから、 $\text{CO}_2$ のみならず少なくとも、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{HFCs}$ 、 $\text{PFCs}$ 、 $\text{SF}_6$ の5種類のガスについては、最大限の努力を払って排出データを収集する。
- ・施設、設備にかかわる負荷データは極力含めるが、省略することも可能である。省略する際は「30年以上の長期に亘り使用されることが予想され、その影響が非常に小さいと判断される」などその旨を明記する。

#### ⑤ 副産物

副産物へ機械的に環境負荷を配分することを極力回避するため、プロセスを細分化して副産物の環境負荷を個別に評価出来るように心がける。機械的な配分が不可避な場合、出来る限り合理的に説明できる方法を採用し、その方法と理由を明記する。

#### ⑥ 廃棄物

廃棄物の環境負荷は基本的にゼロであるが、原料として供給される場合に、その供給のために付加的な負荷が伴う場合は、適切にその負荷が評価される

よう留意する必要がある。

#### ⑦ インパクト評価

ここではGHGを対象とすることから、地球温暖化に関する排出の特性化を行なう。特性化係数は、IPCC報告書のGWP（100年）<sup>23)</sup>を原則として利用する。

#### ⑧ 解釈の実施

個々のプロセスについて感度分析を実施し、大きな影響のあるプロセスについてはデータを一層入念に見直し、確認する。

データの入出力の不確実性に伴う結果への影響についても可能な範囲で評価を加える。例えば、サトウキビの場合、エタノール製造段階で余るバガスの量は生産工程の熱管理の程度でも余剰量が異なるが、この不確実性(変動)に伴う発電量の増減は最終のGHG排出量結果に影響を与えることがあり、その影響を定量的に評価し、必要に応じてデータの再調査等を実施する。

### (2) エネルギー収支評価

バイオ燃料のエネルギー収支は、通常、ライフサイクルで使用される化石エネルギーによる収支(化石エネルギー収支)を示すケースが多い。例えば、ブラジルのサトウキビによるエタノール製造のように、バガスをエタノール製造のエネルギー源として使用する場合には、化石エネルギー収支は極めて高く示される。しかし、バイオマスエネルギーも含めた総合エネルギー効率となると、米国のトウモロコシを原料とするエタノールよりも低くなるといった計算例(IEAやConcaweなど)がある。総合エネルギー収支を示すことにより、製造面の改善点などがわかってくるといった利点がある。

ここでは、総合エネルギー収支と化石エネルギー収支を示すことにより、GHG排出への寄与度をみるだけでなく、技術の省エネ度も測るという観点で、2つの指標を採用する。

#### ① 方法

**総合エネルギー収支  $\eta_t$**  は下の基本式により算出する

$\eta_t = (\text{生産されたエネルギー量：MJ}) / (\text{ライフサイクルで投入された総エネルギー量：MJ}_t)$

**化石エネルギー効率  $\eta_f$**  は下の基本式により算出する

$\eta_f = (\text{生産されたエネルギー量：MJ}) / (\text{ライフサイクルで投入された化石エネルギー量：MJ}_f)$

---

<sup>23)</sup> GWP：Global warming Potential, 参考：IPCC 第4次報告書（CO<sub>2</sub>=1、CH<sub>4</sub>=25、N<sub>2</sub>O=298、SF<sub>6</sub>=22,800）



② データの入手

ライフサイクル温室効果ガス排出評価のデータ収集の際、CO<sub>2</sub>量や物質質量ではなくエネルギー量として収集される。

③ 区分

自然エネルギー、化石エネルギーを分けて計上し、双方で評価を行なう。

肥料や薬品などの材料が有するエネルギー(Feedstock Energy)は対象外とする。

### 1. 3. 3 バイオ燃料に関わる環境・社会影響

地球温暖化対策が全世界の共通認識となっており、二酸化炭素の排出抑制は喫緊の課題である。これを背景に、カーボンニュートラルの観点から、再生可能、持続可能な輸送用エネルギーの一つとして、バイオ燃料の開発、利用が世界的規模で促進されている。また、バイオ燃料の利用を通じて、エネルギー源の多様化、エネルギー自給率の向上などによるエネルギー安全保障、および、食料生産環境の整備、食料自給力の向上による食糧安全保障の向上、一次産業や地域の活性化などが期待されている。

一方、バイオ燃料の生産、利用拡大に伴い、生態系などの自然環境への影響、食料、既存産業、社会、文化との競合、発展途上国問題など、環境および社会への影響が顕在化してきている。

ここでは、バイオ燃料の生産拡大に伴い、現状および将来予想される環境および社会への影響、課題を網羅的に調査し、抽出された事象が内包する項目およびそれらの関連を整理する。それに基づき、今後、持続的にバイオ燃料を生産、利用するための技術開発や事業展開に際して配慮すべき点について、問題提起および提言を行なう。

なお、図1. 20において、バイオ燃料のライフサイクルを、原料調達、燃料製造、利用の三段階に分類し、原料を、廃棄物系、未利用系、目的生産系バイオマスに分類した。

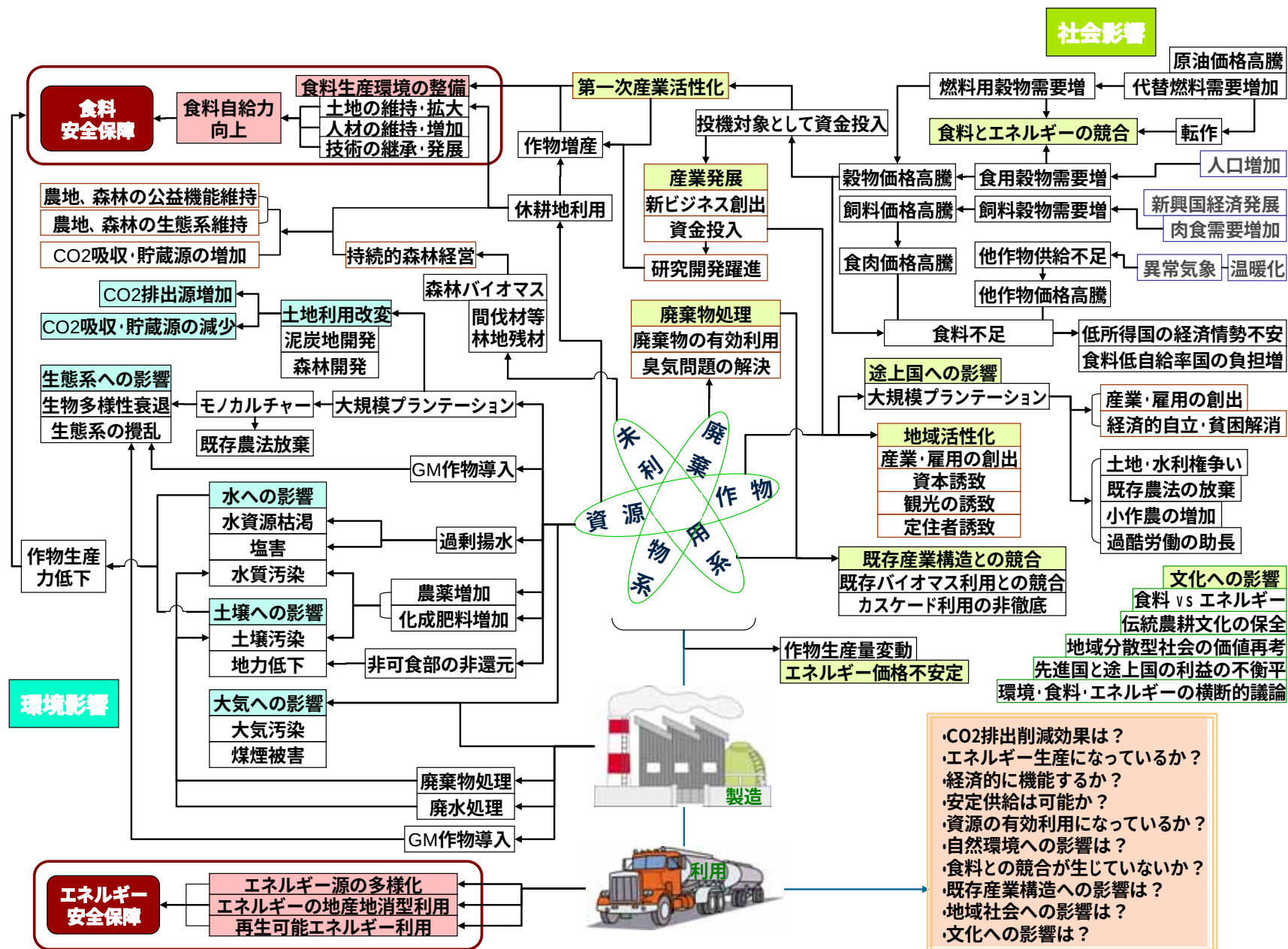


図1. 21 バイオ燃料による環境および社会への影響関係図

## 提言：バイオ燃料の開発において配慮すべき点について

### ① CO<sub>2</sub>排出削減効果

バイオ燃料導入の第一目的は、地球温暖化対策として二酸化炭素排出量を削減することである。バイオ燃料は、燃焼時のCO<sub>2</sub>排出はカウントされないカーボンニュートラルなエネルギーと位置づけられるが、その製造時には化石エネルギーの使用による相当量のCO<sub>2</sub>排出が懸念される。従って、バイオ燃料の利用においては、原料の生産、収穫、運搬工程を含む「原料調達」、前処理、糖化、発酵、蒸留、脱水、廃棄物処理工程を含む「燃料製造」、流通等を含む「利用」の全工程における二酸化炭素排出量を正確に把握し、これらの総計が化石燃料のライフサイクルのCO<sub>2</sub>排出量を越えてはならない。

### ② エネルギー生産

バイオ燃料は、化石燃料の代替としてエネルギーを提供するものであり、生産されるバイオ燃料の熱量が、全生産工程で投入された化石エネルギーの熱量よりも大きくなければ、エネルギー生産としての意味が無い。従って、①と同様、「原料調達」「燃料製造」「利用」の全工程を通じて、エネルギーの収支がポジティブでなければならない。

### ③ 経済的機能

バイオ燃料の導入初期においては、補助金や減税措置など政策的インセンティブは重要である。しかし、バイオ燃料を持続的に利用するためには、施設費や事業立上げのイニシャルコスト、原料調達、燃料製造にかかるランニングコストを総合して、経済的に機能しなければならない。すなわち、バイオ燃料が経済的に化石燃料と競合しうるものでなければならない。そのため、製造における要素技術の革新的な発展とそれらの最適システムの確立が期待されるとともに、周辺事業との複合を図るなど、全体的なコスト削減を目指す必要がある。

### ④ 安定供給

バイオ燃料の利用によってエネルギー安全保障を期待する場合、安定価格での安定供給が不可欠である。そのため、原料の全体量の確保、季節や年次ごとの変動に対する対策が必須とある。また、我が国においては、製品あるいは原料を輸入することも想定され、相手国および世界情勢によっては必ずしも安定供給が保障されない。そのため、国産原料の確保が第一義となるが、国内外にシフト可能な安定供給に資する原料の確保を確立する等の措置が重要である。

#### ⑤ 資源の有効利用

バイオマス資源は再生可能であるが、その生産には、土地、水などが必要であるため決して無尽蔵ではない。従って、適切な優先順位を考慮した有効利用が必須となる。可食作物における用途の優先順位は、原則として食用、飼料用、エネルギー生産用とすべきであり、また、木質等の場合には、マテリアルとしてのカスケード利用が徹底されること、リユース、リサイクルによるサブサイクルが妨げられないことが重要である。

#### ⑥ 自然環境との共生

原料調達において、特に、プランテーションによる大規模な単一作物生産が実施される場合、土地利用の改変や肥料、農薬の大量投入によって、生態系、水、土壌など、自然環境に負荷を与える事例およびその可能性が指摘されている。従って、入念な事前調査による未然防止、試用期間の設定、継続的なモニタリング等の慎重な対応が必要である。

#### ⑦ 食料との競合

世界の人口増加、新興国の経済発展に伴う食物需要の増加と需要形態の変化が予想されるなか、さらにバイオ燃料という作物需要の出現によって、直接あるいは間接的に、食料の安定供給に影響が生じている。この影響は、特に低所得国、低食糧自給率国に経済的負担や政情不安の形で顕著に現れ、国家の安全保障問題に波及する可能性が懸念される。従って、原料には、食料、飼料との競合が生じない作物を選定することが望ましく、間接的な競合が予想される場合には、それを最小限に留める対策を講じる必要がある。さらに、廃棄物および未利用系バイオマスの利用を推進するとともに、耕作放棄地などの未利用地での目的生産バイオマスの目的生産によって、食料生産、供給を逼迫することのないバイオ燃料の開発が期待される。

#### ⑧ 既存産業構造との競合

バイオ燃料の利用促進は廃棄物処理の合理化を担う可能性が期待される。一方、建築解体材など、特定の廃棄物については、マテリアルリサイクル利用が確立している場合もある。ここでは、原料の争奪が予想されるため、既存の産業構造、すなわち既存事業や業者の原料調達に配慮し、不必要な競合は避けるべきである。すなわち、バイオ燃料生産を新規導入する際には、既存産業、インフラ分布、物流状態、需要の可能性等とともに、原料のポテンシャルについても、定量的な調査によって地域の実態を把握した上で、既存産業と調整、合意を得ることが重要である。

#### ⑨ 地域社会での受容性

バイオ燃料の製造においては、全行程において、当該地域の法令および国際法規を遵守しなければならない。目的生産バイオマスの農園開発やエタノール工場の建設に際しては、地域住民の合意が不可欠であり、地域の開発計画と協調した土地利用、取水、排水などを設計する必要がある。さらに、当該地域における新規産業、雇用の創出、エネルギー供給など、地域社会への積極的な貢献を図り、地域社会との信頼を構築することが望ましい。

#### ⑩ 文化の尊重

広くは国際世論や国民感情、限定的には地域の事情や伝統に関して、政治情勢から宗教上の価値観に至るまで、地域ごとに確立された文化と対立する利用は避けるべきである。供給と同様、安定的な需要喚起が課題となるときに、当該バイオ燃料の利用形態が、文化と対立せず、市民合意を得たものであることが必須の条件になると考えられる。

### 1. 3. 4 今後の課題について（まとめ）

マレーシアやインドネシアにおけるパーム農園開発やブラジルのアマゾンにおける大豆農園開発がバイオ燃料生産に関係している点が重視され、バイオ燃料は地球環境からみて本当に意味があるのかとの疑問が投げかけられている。既に欧州では持続可能なバイオ燃料に対する基準作りや貿易体制作りについての議論が進められているが、2008年2月20日、21日にはG8国に中国、インド、ブラジル、メキシコ、南アフリカの5カ国を加えた13カ国の国会議員の代表が話し合う「G8+5気候変動フォーラム」が開催され、バイオ燃料の開発としての持続可能性や、基準値を測定する認証システム構築の必要性などについて議論された。このように、持続可能な生産ができるバイオ燃料のみを取引できるような国際的なシステム作りへの議論が進んでいる。

本計画においても、前述のとおり、未だ確立されていないLCA評価手法について議論し、地球温暖化だけではない環境・社会影響についても整理した。これらは非常に広範多義にわたり、更なる議論が必要な課題や評価方法が未確立の課題も多くあり、また国際社会に発信できる研究成果や未確立の評価手法を確立することは重要である。このための体制作りも必要である。

#### 1. 4 各技術開発段階における実施体制について

我が国においては、過去にもバイオ燃料生産プロジェクト<sup>24)</sup>を行なってきたが実用には至らなかった。その背景には、原料の安定的な確保に加え、コスト要求に技術的に対応できなかったことがある<sup>25)</sup>。こうした課題を克服するためにも、原料生産から変換技術に渡って堅牢な研究開発体制を構築し、確実に開発を進めて行くことが必要である。

バイオ燃料に関する技術の領域は非常に広く、農学（作物や樹木の品種改良ならびに分子育種、栽培法、植物栄養・肥料学、かんがい、農業・林業機械、森林経営など）、生物学（植物ならびに微生物の遺伝子工学、細胞工学、代謝工学、酵素学など）、化学工学（プロセス設計、リアクタ設計など）、社会科学（LCA、社会・環境影響評価など）の幅広い領域に渡る。それらの技術の総合力が、効率的かつ低コストなエタノール製造につながる。このため、個々の技術はもとより、各開発段階において、産学の連携や異分野の連携により、課題を克服し、開発を進めていくことが重要である。以下、各開発段階の実施体制について整理を行なう。

#### 基礎科学技術領域での課題と実施体制

新規の高収量植物や糖化に適した植物の創製、高活性酵素の創製、高性能発酵微生物の創製などは、新規遺伝子を効率よく探索し機能を同定する技術（メタゲノム、メタトランスクリプトーム技術）、ゲノム情報の効率的活用技術（バイオインフォマティクス）、酵素を改変・強化する技術（タンパク質工学、進化分子工学的手法）、微生物の改変・強化技術（ゲノム工学、ミニマムゲノム手法）など基盤技術となる遺伝子工学に基づいた検討が重要になる。このような共通の基盤となる技術は、大学や独立行政法人などの公的な研究機関で集中的、加速的に検討し、ライブラリーの構築など、共通のツールや評価指標を設定することが重要である。この共通基盤技術を、企業や大学、独立行政法人の各研究機関が利用し、共通の指標（ベンチマーク）や評価軸で、競争的に研究を進めることが重要である。なお、評価軸はひとつである必要は無く、複数の視点が並列で存在しても良い（例えば、想定するバイオマス原料や

<sup>24)</sup> 1937年開始の発酵法によるブタノール生産とそれを原料としたイソオクタン合成プロジェクトと、1980年から10年間行なわれた未利用セルロース系資源からのエタノール生産プロジェクトがある。

<sup>25)</sup> 鮫島正浩ほか：バイオ液体燃料、エヌ・ティー・エス、pp.3-18(2007)

酵素の選択によって、前処理の評価軸は異なってよい)。

特に、酵素糖化においては、その反応機構の解明、セルロース結晶構造、細胞壁の組織構造、セルロースとセルラーゼの分子間相互作用など、非常にベーシックな科学技術の理解が、飛躍的な活性向上につながる可能性が高く、技術革新を進めるためには、大学や独立行政法人などの研究機関における基礎科学の推進が重要である。また、その際、実際に用いるバイオマスに関する情報や実用化の観点からのニーズが、産業界から提供されることが、基礎科学から技術開発フェーズにつなげるために重要である。

#### **技術開発領域での課題と実施体制**

前処理工程、プロセス設計など、技術の複合的な要素の開発については、個々の企業が得意とする技術を競い合って開発を進めて行くことが重要である。開発にあたっては、技術の根底にある科学技術への理解や、将来事業化・プロセス化する上でのプロセス間の影響やスケールアップ化についても見越して進める必要がある。

一方、それぞれの技術開発投資を効果的に進めるために、具体的な開発の方向性については、公的研究機関などで共通の指標（ベンチマーク）を検討して、その視点に沿ってそれぞれに開発を進めて行くことが重要である。

#### **事業化段階での課題と実施体制**

事業化を進める過程においては、バイオ燃料のLCA評価、社会・環境への影響の評価を研究開発と併行して行い、国民にバイオ燃料を正しく理解してもらいながら、LCAでのCO<sub>2</sub>削減効果、エネルギー収支的に意味のある技術を社会・環境と調和しながら開発を進めることが重要である。このためには、国家・地域の行政機関や市民との連携や、社会科学的な調査を綿密に行なうことが必要となる。

また、事業化主体はエタノール製造技術の取りまとめ役として、科学技術や技術のステークホルダーであり、それぞれの技術の推進役でもあるため、共通指標について検討を行なうなど、関係する産業界や研究機関の協調的な開発や競争環境の整備を図ることが重要である。

こうした各開発段階であっても、それぞれの段階において相互に見通すことが必要であり、基礎科学技術領域においては科学技術の事業化への展開を、事業化段階においてはそれぞれの技術の背景にある科学技術を理解した

上で技術の統合化によりプロセスの完成に取り組むことが重要である。このため、どの開発段階においても、産官学の緊密な連携が欠かせない。

また、海外の技術開発動向を調査し、我が国の研究開発方針を定期的に修正するとともに、知財戦略を作成する専門の組織を置き、我が国の知財権を確保すべく戦略に基づいた研究を推進することも重要である。

本開発対象技術は、2015年をターゲットとした比較的短期で実用化を目指す研究開発であるため、早い段階から事業化を意識した研究開発体制を取ることが望ましい。事業化を目指した民間を主体として、大学、独立行政法人の研究機関が連携した組織が実施主体となり、原料生産から変換まで、一貫したプロセスとして開発を進めることが重要である（図1. 22）。

産業界と研究機関、農業と工業（異分野、異業種）の連携であると同時に、行政においてもその所管省庁が内閣府、農林水産省、経済産業省、環境省など多岐に渡る。このため開発を進めるためには、それぞれの行政機関の連携も重要であり、バイオ燃料技術革新協議会を継続して実施するなど、相互の政策連携や産学の連携促進の機会を継続していくことが望まれる。

また、開発段階に応じた政策インセンティブの付与を、産業競争力の確保、エネルギー源の多様化、農業振興、地球温暖化問題など様々な視点から、経済的なエタノール製造につながることを前提として行なうことが必要である。

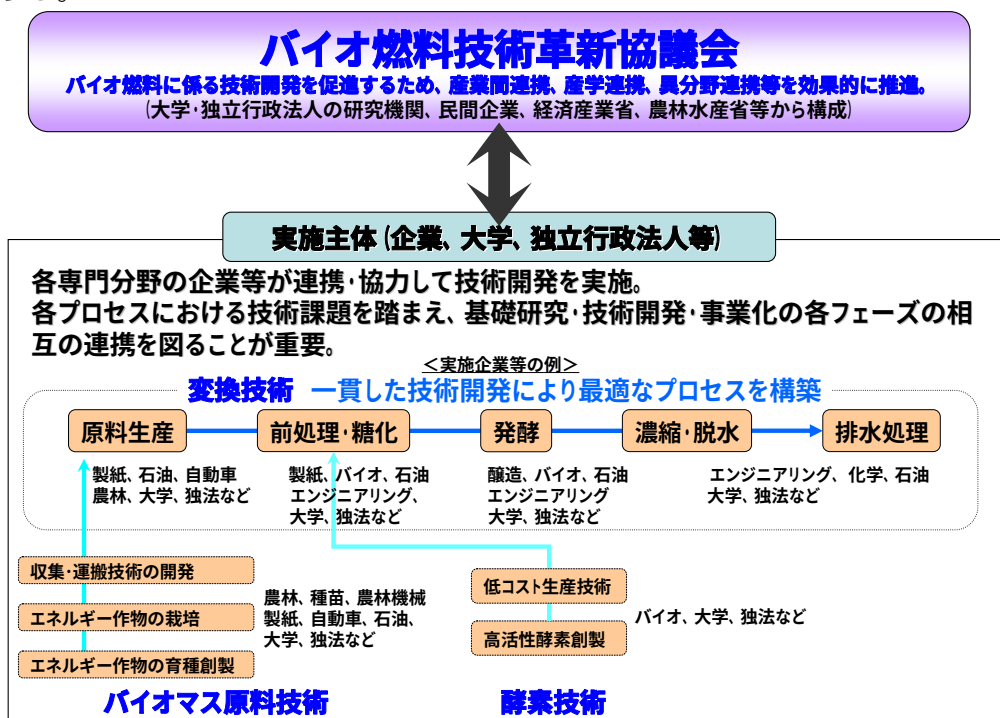


図1. 22 バイオ燃料技術革新計画の実行体制



## 1. 5 2015年以降の技術について

2015年以降は、環境面とともに事業としても持続性のある技術へのブラッシュアップを行なう。

そのためには、本技術開発の延長上での効率化と高性能化に加え、基礎的な研究の積み重ねで2015年以降に実用化できるようなフェーズにある研究課題にもしっかりと取り組む必要がある。その候補として、バイオマス原料分野では、①ゲノム改変による高生産・高糖化性植物の開発、製造技術分野では、②エタノール発酵法によらない新規な経路でのエタノール化技術がある。

### ①ゲノム改変による高生産・高糖化性植物の開発

現状利用可能な早生樹、高収量の草本系植物を利用したとしても、使用されていない耕作不適地のような土地で十分な収穫量を得ることは簡単ではない。また、収穫量の安定化を図るため、病気や害虫に対して耐性を持つことも重要である。このような視点で、過酷な土地条件（乾燥、塩類集積、酸性、アルカリ性土壌など）で良好に生育する植物をゲノム育種技術によって創出することは、2015年以降の技術として重要となってくる。

また、リグノセルロースを酵素によって糖化することは、現在の前処理・糖化技術では、効率化・低コスト化に課題が多い。植物自体を改変することで、糖化しやすい植物構造を創出したり、植物自体に酵素生産能を持たせるなどの研究課題に長期的な視点で取り組むことは重要である。

以下に主な課題を列記した。

#### ○糖化性の改善に関わる課題

- ・セルロース含有量の増加
- ・リグニン量の低減
- ・セルラーゼの植物による生産

#### ○植物の生産性向上に関わる課題

- ・不良環境耐性（耐乾、耐塩、耐寒、耐酸、耐アルカリなど）の向上
- ・大気中の窒素固定能の付与
- ・病害虫に対する耐性の向上

### ②エタノール発酵法によらないエタノール化技術

現在、国内外で開発が進められているエタノール製造技術は、いずれも、糖からの発酵によりエタノールを得るものである。このため、バイオマス原

料中のセルロースとヘミセルロース（重量で6～7割）しか利用できない、発酵時にエタノールと等モルの $\text{CO}_2$ を発生するなど、原理的に超えられない制約が生じる。

生物学的変換と化学的変換手法を組み合わせ、エタノール発酵によらず、バイオマス原料からエタノールを生産する技術が国内でも検討されている。現状、先導的な研究フェーズであり、2015年の実用化には間に合わないが、開発に成功すれば、エタノールの収率を格段に向上させる可能性があるため、併行して研究を進めることが重要である。

（技術の例）

#### 酢酸発酵－水素化分解法

広範な糖類（オリゴ糖、単糖、ウロン酸など）を基質とし、酢酸発酵により酢酸を生成させ、エステル化を経て酢酸エステルを水素化分解でエタノールへと変換することで、 $\text{CO}_2$ を排出しない効率的なエタノール生産を行う。従来の硫酸処理－発酵法に比べて、単糖あたりのエタノール変換効率、 $\text{CO}_2$ 削減効果が高いことが期待できる。単糖以外のオリゴ糖や酸性糖、さらにはリグニン構成フェニルプロパンユニットの側鎖をも基質とし得る。酢酸発酵における発酵時間の短縮と高収率な酢酸生産が課題である。加圧熱水・酢酸発酵・水素化分解など多段階処理となるため、プロセスを簡略化することが望まれる<sup>26)</sup>。

#### ガス化－嫌気発酵法

バイオマスの水蒸気ガス化によりバイオガス（ $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ ）を生成させ、得られた $\text{CO}$ と $\text{H}_2$ から嫌気性細菌 *Clostridium ljungdahlii* を用いて発酵によりエタノールを生産する。通常のエタノール発酵では糖類しかエタノールへと変換することができないが、一旦、ガス化させるため、糖成分だけでなくリグニンもエタノール生産に利用できるのも効率的である。ガス化プロセスにおいて、 $\text{CO}_2$ へのガス化を抑え、より多くの炭素源を $\text{CO}$ に変換し、エタノールへの変換効率を高めることが課題である<sup>27)</sup>。

<sup>26)</sup>坂志朗：「バイオエタノール燃料の最新技術と課題」化学 Vol.61 No.11 pp.12-16(2006)

<sup>27)</sup>Klasson, K.T. et al., Enzyme microb. Technol., 14, 602-608 (1992)

## 1. 6 その他のバイオ燃料生産用の原料について

### (1) 藻類について

我が国は、四方を海に囲まれ、豊富な海洋資源を有している。これを有効に活用してゆくことは、重要な視点である。

従来利用されてこなかった藻類は、一般的には水分含量が高い、塩分を含む、腐敗しやすいなどの性質のため、利用が困難であった。その特性に適した収集・運搬貯蔵・前処理技術を開発することが出来れば、バイオマス資源としての利用が可能となってくる。

一方、藻類を目的生産する考え方をとると、多種多様な藻類から適切な種類を選択、育種することで、淡水での養殖が可能、周年収穫が可能などの特性を生かした工業的生産の可能性がある。

また、最近の事例では、微細藻類（藍藻等）の中で、油分を生成するものを利用して、バイオディーゼルを生産しようと言う試み、さらに水産庁では海藻中の有機酸などを酵母でアルコール発酵させる技術の開発も検討されており、新たなバイオ燃料の生産方法として注目を集めている。

### (2) 油糧作物について

バイオディーゼルの原料となる油糧作物は、パーム油、大豆油、ナタネ油などの現在食料として利用されているものが大部分であり、食料との競合と言う点で課題が多い。これに対して作物栽培に適さない場所でも生育するヤトロファ（ナンヨウアブラギリ）が注目されており、生産性の高い品種の選抜・育種の検討が重要である。

その他の原料に関する技術マップを図1. 23に示す。

## 海藻(草)類

| 候補作物(資材) |                                                | (選抜理由)                                                        | 育種                      | 栽培                       | 収穫<br>(収穫・細断・梱包)                                                     | 収集・運搬<br>(圃場(森林)内、外) | 貯蔵 |
|----------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------|----|
| 未利用バイオマス | 外洋型藻類<br>沿岸型藻類<br>アオサ                          |                                                               | —                       | —                        | 水産バイオマスの特性(※)に適した収集・運搬・貯蔵・前処理技術<br>(※水分含量高い、塩分含む、腐敗しやすい)<br>・洋上での前処理 |                      |    |
|          | 海草、海藻(コンブ類、アオサ類など)<br>ラン藻、クラミドモナス<br>微細藻類(藍藻等) | ・淡水、肥料不要(環境による)<br>・周年収穫可能(環境による)<br>・リグニン低含量<br>・油生成率が高い(藻類) | ゲノム解析 育種<br>油脂生成機構解明、GM | 養殖種の選定 養殖技術<br>養殖海域の評価選定 | 水産バイオマスの特性に適した収集・運搬・貯蔵・前処理技術                                         |                      |    |

## バイオディーゼル用原料

| 候補作物 |                          | (選抜理由)                                 | 育種                                           | 栽培       | 収穫<br>(収穫・細断・梱包) | 収集・運搬 | 貯蔵 |
|------|--------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------|------------------|-------|----|
|      |                          |                                        | ゲノム 表現形                                      | 閉鎖系 野外試験 |                  |       |    |
| 油糧作物 | ヤトロファ<br>西洋ナタネ<br>油脂作物全般 | ・作物栽培不適地でも栽培可能(ヤトロファ)<br>・ゲノム研究蓄積(ナタネ) | 高資質含量<br>(軽質転換、マーカー育種)<br>ゲノム解析 品種収集、選抜育種・交配 |          | 高性能収穫機           |       |    |
|      |                          |                                        |                                              |          |                  |       |    |

図1. 23 その他原料の技術マップ

## 第2章 バイオリファイナリー連携分野

### 2. 1 バイオリファイナリー連携分野検討の意義

バイオリファイナリーは、幅広い技術分野を包含するものであり、バイオ燃料製造の関連分野として検討するには検討範囲が多岐にわたるものとなる。したがって、個々の技術についてのベンチマーク等の詳細を議論することは難しく、広く技術分野全体を俯瞰することに重点を置き検討する。重要性、緊急性の高いものについては、技術完成に至るまでのロードマップ化を図ってゆくこととする。

本報告書においては、次のような観点でバイオリファイナリー連携分野を検討するものとする。

#### ① バイオ燃料のコスト競争力強化のための連携

バイオ燃料製造工程で発生する副産物、中間体等の高度な変換（化学、バイオ）による付加価値品の製造を検討する。

#### ② バイオ燃料の技術競争力強化のための連携

バイオ燃料製造技術とバイオリファイナリー技術のパッケージ化による技術的優位性の確保するための検討を行なう。

#### ③ バイオ燃料としての連携

エタノール以外のバイオ燃料の可能性として、ブタノールの可能性を検討する。

#### ④ バイオ由来性の評価手法（バイオマス度）

バイオ由来性を定量的に評価する手法を検討する。

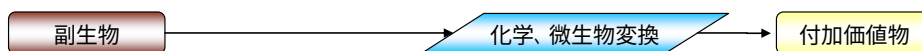
### 2. 2 バイオリファイナリー連携分野の技術マップ・ローマップ

#### 2. 2. 1 バイオリファイナリー技術の整理

技術を整理する上で、上記①、②の観点で図2. 1のような4つの技術分類を行ない、それぞれについてマップ化を図った。また、日本が先行している課題、重要だが欠落している課題、緊急性の高い課題について整理を行なった。

#### バイオエタノール製造工程の副生物の有効利用法

バイオ燃料製造工程で得られる副生物（リグニンなど）を化学変換し付加価値物を得る。



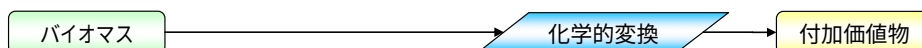
#### バイオマスからの有用化学品の直接生産（発酵法）

バイオマスから得られる糖を出発原料として、発酵法により、付加価値物を得る。



#### バイオマスの化学的変換法

バイオマスから化学的変換法で、ダイレクトに付加価値物を得る。



#### バイオエタノールの燃料以外への適用可能性

エタノールを出発原料として、化学的変換により付加価値物を得る。

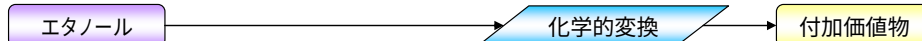


図 2. 1 バイオリファイナリー連携分野 4つの技術分類

### (1) バイオマスからの有用化学品の直接生産（発酵法）

生産方法としては、糖の発酵による方法とバイオマスを直接発酵する2つのケースに大きく分かれるが、ここでは発酵生産菌の育種、効率的培養法、精製方法が課題となっている。

主な目的物はプロパノール、ブタノール、ジオール類、有機酸が上げられる。緊急性が高い課題として、ブタノール、プロパノールの発酵生産技術が上げられている。特にプロパノールについては、現状欠落した技術課題と位置づけられている。

必要であるが欠落している課題として、上記以外にジオール類（1，2－プロパンジオール、1，4－ブタンジオール）、アクリル酸、アジピン酸、芳香族化合物の生産技術が、その化学品としての重要性から上げられている。

また、コハク酸については、日本が先行している技術と位置づけられる。

### (2) バイオマスからの化学変換法

この分類では、原料は、糖、セルロース、バイオディーゼル生産過程の副生物であるグリセリン、油脂、フルフラールなどがあり、これら原料から触媒を用いた効率的、安価な生産技術が課題となっている。

緊急性の高い課題としてオリゴ糖変換技術、芳香族化合物の生産技術、プロパノール生産技術が上げられており、特にオリゴ糖変換、プロパノール生

産技術については、欠落課題と位置づけられている。

フルフラール誘導体は、多種の有用化合物の中間体であるが、現状では効率的な生産技術が無く、欠落課題と位置づけられる。

### (3) エタノール製造工程の副生物の有効利用法

リグニンおよびリグニン誘導体、リグノフェノールに関するもので、回収方法、エネルギー低減、効率的低分子化技術に課題がある。

リグノフェノール生産技術、リグニンの微生物による低分子化技術は、日本が先行する技術である。微生物処理は、エタノール製造工程の前処理としての役割と、残渣の利用の両面に応用可能である。

リグノフェノールについては、ポリマーの構造を変換するなどして汎用性のあるポリマーを作ることができれば、新しい考え方であり広範囲な展開が期待される。

エタノール製造工程における副生物の利用については、単に燃焼により熱回収してバイオ燃料のエネルギー収支の改善を優先するのか、付加価値品への転換によりシステム全体の経済性を優先するのかについては、事業全体の得失を考慮して最適な組合せを選択することとなる。

### (4) エタノールの燃料以外への適用性

エタノールを出発原料としたプロピレンおよびその他の化学品生産において、触媒選択率、触媒寿命、不純物影響などが課題となっている。

プロピレンはバイオプラスチックとしての広がりが大きいことから産業界からの要請も強く、緊急に取り組むべき課題であり、ロードマップの作成を検討する。

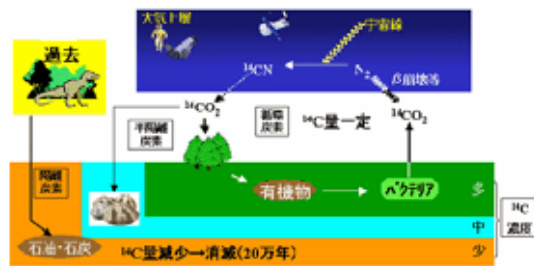
### (5) バイオ由来性の評価手法

バイオ燃料、バイオプラスチックの普及とともに、バイオ由来の炭素量を正確に測定することが求められており、高精度の測定技術の確立、測定の標準化が課題となっている。また、産地も含めたトレーサビリティが今後要求されてくる可能性があり、その測定手段、証明するシステムも含めた検討が重要となってくる（図2. 2）。

[課題]

- ✓複合コンパウンド中での正確な測定方法の確立
- ✓標準化が必要な項目
  - ✓前処理条件
  - ✓複合材料や混合物の判定
  - ✓添加剤の影響の排除
  - ✓測定再現性

バイオマス度測定の原理



バイオマス由来の炭素の割合は、炭素14の含有量から推計することができる。炭素には3種類(炭素12、13、14)の同位体があり、炭素14は高層大気中で窒素に中性子が衝突して生成されるため、大気中の $\text{CO}_2$ や、それを吸収したバイオマス原料には、炭素14が一定割合含まれている。一方、化石燃料には炭素14はほとんど含まれない。これは、炭素14が放射線を出しながら窒素に変わっていく物質で、5,730年で半減する性質を持つため。したがって、炭素14の濃度の違いを測定することで、化石燃料と現在生育するバイオマスからの寄与を定量的に識別できることから、バイオマス由来の炭素の割合が分かる。

出典：(社)有機資源協会「バイオマスプラスチックQ&A」より

図2. 2 バイオマス度の測定

バイオリファイナリー連携分野の技術マップを図2. 3に示す。



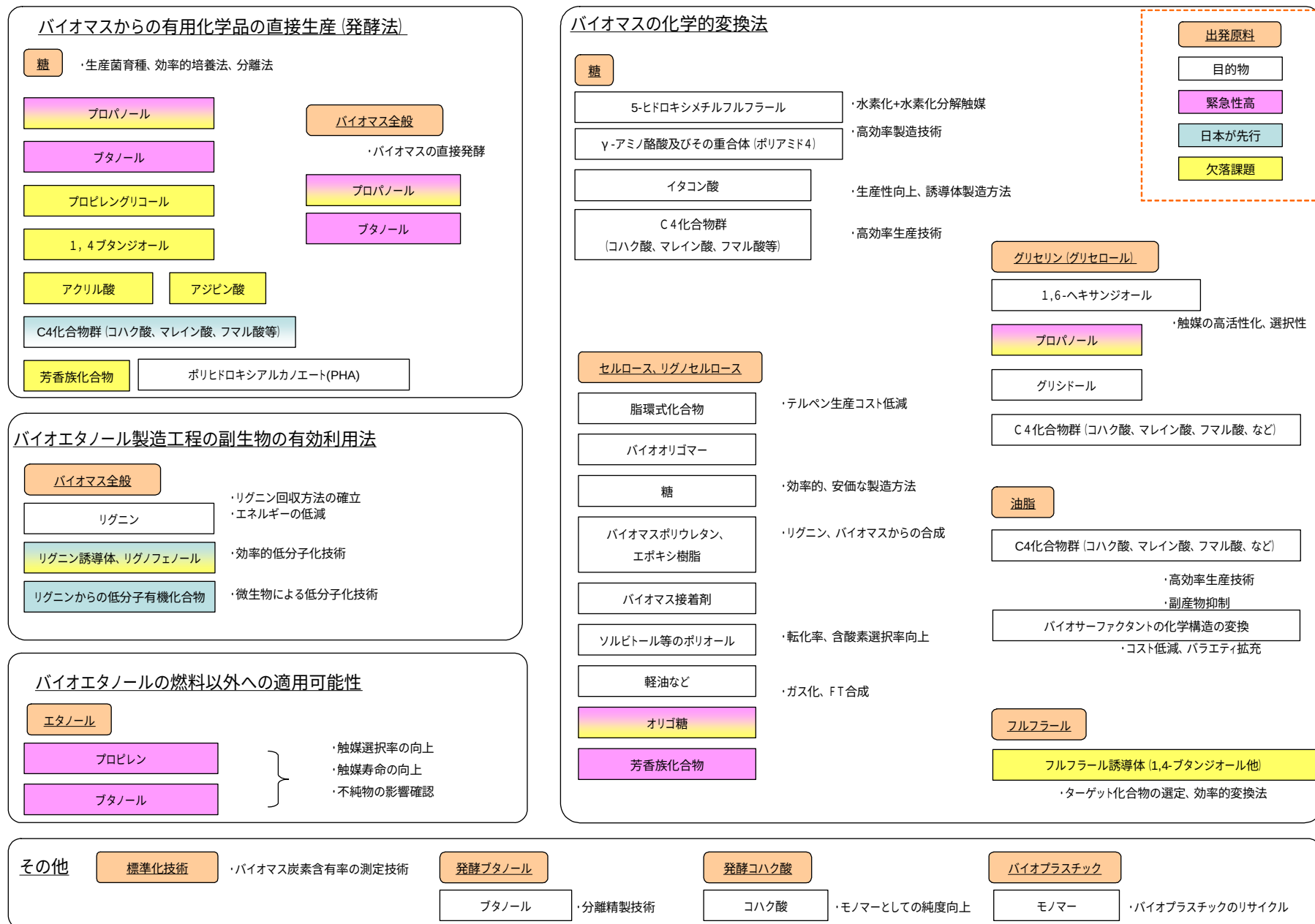


図2. 3 バイオリファイナリー連携分野の技術マップ

## 2. 2. 2 プロピレンに関するロードマップ

技術の整理の結果、バイオプラスチックとしてのポリプロピレンが特に産業界からの要請が強く、また、世界的にもイニシアティブを取りうる技術と考えられる。これは従来、バイオ由来のポリマーとして適用検討されてきたポリ乳酸はその特性から必ずしも工業部材などに適用が容易ではなかったこともあり、バイオ由来のプロピレンが合成できれば、これを重合することにより従来のポリプロピレンと同等の品質性能のバイオプラスチックとして、置き換えることが可能となるためである。ポリプロピレンは、汎用樹脂の中ではその強度、耐熱性などの点で優れており、各種フィラー、ゴム成分などとの複合化により、高機能を付与できる。自動車用の材料をはじめ広く使用されていて、バイオ由来のポリプロピレン製造技術を有することは、国際競争力の観点でも重要である（図2. 4）。

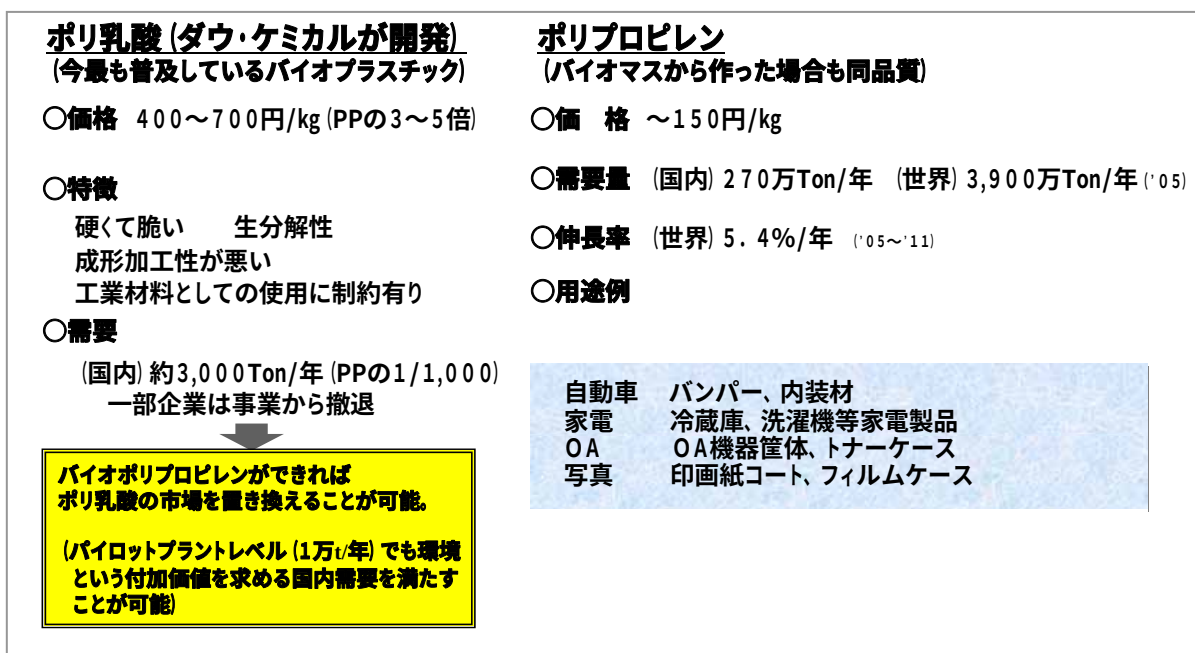
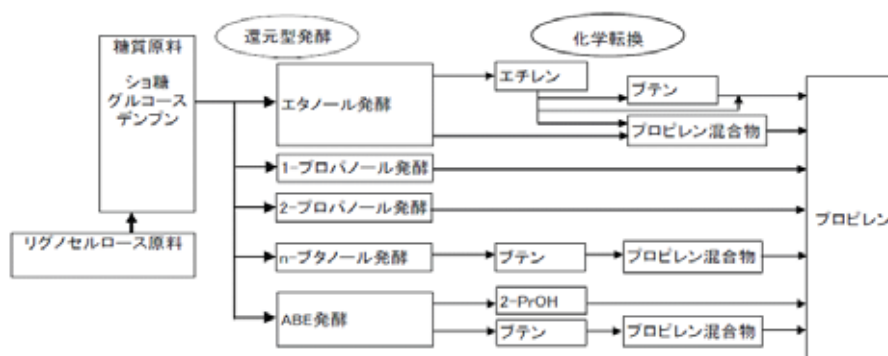


図 2. 4 既存のバイオプラスチックとの比較

バイオマスからのプロピレンの製造ルートは複数考えられるが、大きく分けてエタノール、プロパノール、ブタノールなどのアルコール類を出発原料とするケースに分けられる。これらのアルコール類は、リグノセルロース原料から得られる糖を原料とすることが、好ましい。

エタノールを出発原料に、二量化－不均化を経る方法、エタノールから一段法で直接プロピレンリッチな低級オレフィン化合物を得る方法、プロパノールを出発原料として、脱水反応によりプロピレンを得る方法、ブタノール

を出発原料として脱水―不均化を経る方法、クラッキングにより直接プロピレンリッチの低級オレフィン化合物を得る方法などが経済的に有利とされている（図2. 5および表2. 1）。



出典：NEDO報告書

図2. 5 バイオマスからのプロピレン製造ルート

表2. 1 バイオマス中間体からプロピレンへの化学転換法

| No. | 中間体                 | 化学転換プロセス                                     | 技術内容                                                                                              |
|-----|---------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | エタノール<br>(発酵法)      | EtOH → ETY → BTE<br>→ ETY/BTE 不均化 → PPY      | ETY → BTE 二量化では Ni/MCM-41触媒を用いる。不均化ではChevron OCUの反応成績を採用、ETY and/or BTEは循環。                       |
| 2   |                     | EtOH → (ETY →) PPY                           | ETY 一段法で、プロピレンリッチの低級オレフィン混合物を得る。SAPO-34触媒、気相、反応は一段階。                                              |
| 3   | iso-プロパノール<br>(発酵法) | iso-PrOH → PPY                               | iso-PrOH の脱水で PPY のみを製造、 $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 触媒、気相、反応は一段階。                   |
| 4   | n-プロパノール<br>(発酵法)   | n-PrOH → PPY                                 | iso-PrOH の脱水で PPY のみを製造、Zeolite触媒、気相、反応は一段階。                                                      |
| 5   | アセトン<br>(ABE発酵)     | Acetone + H <sub>2</sub> →<br>iso-PrOH → PPY | Acetoneを水素化 (Raney Ni)、蒸留精製、脱水工程は3.iso-PrOHと同じ。                                                   |
| 6   | n-ブタノール<br>(ABE発酵)  | n-BuOH → BTE →<br>ETY/BTE 不均化 → PPY          | n-BuOHを脱水 (Zeolite触媒、気相)、不均化以降は1.に同じ。EtOH発酵とABE発酵。                                                |
| 7   |                     | n-BuOH → (BTE →) PPY                         | オレフィンクラッキング (ZSM-5触媒) によるBTE一段法で、プロピレンリッチの低級オレフィン化合物を得る。                                          |
| 8   | メタノール<br>(部分酸化ガス化)  | MeOH → PPY                                   | MeOH → PPY 工程ではMTO (UOP/Hydro, SAPO-34触媒)、MTP (Lurgi, ZSM-5触媒) などのプロセスを想定、プロピレンリッチの低級オレフィン混合物を得る。 |

注) MeOH: Methanol, EtOH: Ethanol, PrOH: Propanol, BuOH: Butanol, ETY: Ethylene, PPY: Propylene, BTE: Butene

出典：NEDO報告書

プロピレンの、技術確立時期はバイオ燃料としてのエタノールがセルロースから大量に生産できる技術が確立される2015年とする。この時期には、

40円/Lで相当量のエタノールが供給できる技術が現実的なものになり、これを原料とした20～30万トン/年規模のプラントを想定する。プロピレンの変換コストは、原油価格50～60ドル/バレルのときのプロピレンモノマー価格120～132円/kgと競合できる変換コストとして、35～47円/kg程度をベンチマークとなる（表2. 2）。

また、プロパノールを出発原料とした場合、脱水反応のみでプロピレンが生産できることから、プロパノールがエタノールと同等のコストで供給できると仮定すれば、プロピレンコストは85円/kg程度とエタノールに比べ経済的に有利となる（表2. 3）。しかしながら、プロパノール生産の技術的ハードルの高さを勘案すれば、プロパノールコストはエタノールよりも余裕を持った設定とすることは可能と考えられる。

バイオマスを原料とするプロピレン製造のロードマップを図2. 6に示す。

表2. 2 エタノールを出発原料としたベンチマークの考え方の例

|                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 技術確立時期: 2015年                                                                                                                                                                                                     |
| 2. バイオエタノール : 2015年において40円/L (50円/kg) ※1<br>※1出典「次世代自動車・燃料イニシアティブ」(平成19年5月28日 経済産業省資源エネルギー庁)<br>原油価格: 50ドル/バレル、円レート: 120円/ドル                                                                                         |
| 3. プラント規模: プロピレン・エチレン含めて20～30万トン/年                                                                                                                                                                                   |
| 4. エタノール変換原単位: 1.7 ※2、※3<br>※2 プロピレン1kgを得るのに必要なエタノール重量<br>※3 理論値1.64を用いるとプロピレン1kgに占める原料費のエタノール費は82円(50×1.64)                                                                                                         |
| 5. プラントコスト<br>プラントコストは現状想定が困難であるため、除外する。                                                                                                                                                                             |
| 6. プロピレン変換コストのベンチマーク<br>原油価格50～60ドル/バレルの想定プロピレン価格と競争力のあること<br>原油: 50～60ドル/バレル→プロピレンモノマー価格→約1,000～1,100US\$/t<br>(120円/\$とした場合120～132円/kg)<br><br>$(132 \sim 120) - (50 \times 1.7) = \text{35} \sim \text{47円/Kg程度}$ |

表 2. 3 プロパノールを出発原料としたベンチマークの考え方の例

1. 技術確立時期：2015年年以降
  2. バイオプロパノール：40円/L (50円/kg) (バイオエタノールと同等と仮定)
  3. プラント規模：プロピレン・エチレン含めて20～30万トン/年
  4. プロパノールの原単位1.42 (=プロパノール60/プロピレン42) ※  
※ プロピレン1kgを得るのに必要なプロパノール重量
  5. プラントコスト及び償却  
プラントコストは現状想定が困難であるため、除外する。
  6. プロピレン変換コスト(脱水)のコスト  
エチレンの脱水と同等と仮定すれば10円/kg程度
  7. プロピレンのコスト  
原油価格50～60ドル/バレルの想定プロピレン価格と競争力のあること  
原油：50～60ドル/バレル→プロピレンモノマー価格→約1,000～1,100US\$/t  
(120円/\$とした場合120～132円/kg)
- 上記仮定のもとでは  $10 + (50 \times 1.5) = 85\text{円/kg}$  となるが、技術的なハードルを考慮すれば、原料プロパノールのコストに余裕を持たせることは可能である。

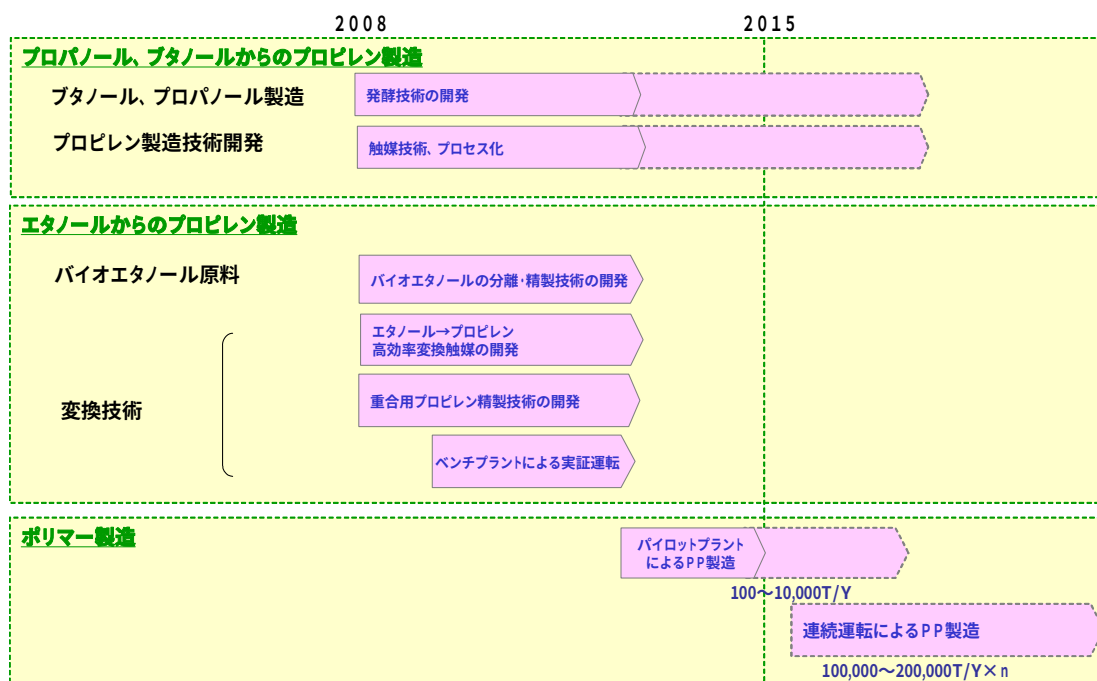


図 2. 6 バイオマスを原料とするプロピレン製造のロードマップ

## 2. 2. 3 ブタノールのバイオ燃料としての可能性

### (1) これまでのブタノールの研究・検討

日本では、ブタノールの燃料油利用は、1930年代のプロジェクト以降あまり検討されていなかったため、データ蓄積が少ない。自動車業界と石油業界との共同研究である1997年から始まったJCAP (Japan Clean Air Program) において、主な含酸素化合物としてMTBE、ETBE、メタノール、エタノールがガソリン用基材として検討されてきたが、ブタノール燃料は検討対象外であった。

一方、海外では、2006年にDuPontとBP (英国石油メジャー) が市場導入に向けた開発をすると発表した。DuPontがバイオプロセス、BPが燃料ノウハウを提供するとしており、中国工場のバイオブタノールを使い、英国内で混合ガソリン(11.5%混合)の実証試験を実施している。(2007年～) 英国内のBP工場にBP/DuPont半額出資でパイロットプラント建設予定(2009年稼働予定) しており、海外においては、バイオブタノールの燃料利用に注目が集まっている。本報告書において、バイオブタノールの燃料として位置付けを整理しておく(表2.4)。

#### ① オクタン価、セタン価

n-ブタノールのオクタン価は他含酸素基材に比べてあまり高くないため、オクタン価向上効果は大きくはない。低セタン価、低引火点のため、軽油との混合利用する際には、対策が必要である。

#### ② 沸点(蒸留)、蒸気圧

蒸気圧(RVP)は低く、ブレンドによる蒸気圧の上昇懸念はないため、エタノール、ETBEに対して有利である。ガソリン利用の場合、その沸点の高さから、50%留出温度を押し上げる方向となる。

#### ③ 密度、発熱量、含酸素量

エタノールに比べ、密度、発熱量が大きいこと、燃費の点で有利である。含酸素比率がエタノールより低く、エタノールより多く混合(現行規制では5～6%)できる可能性がある。

#### ④ 水分離性

水との相溶性が低いこと、ETBEと同様にガソリン基材として利用し易く、既存インフラの利用が可能である。但し、米国において地下水汚染で問題となったMTBEと同程度以上に溶解性はある。

表 2. 4 バイオブタノールの性状

|            | 密度<br>g/cm <sup>3</sup> | 沸点<br>°C | 融点<br>°C | 引火点<br>°C | 蒸気圧*1)<br>kPa | 発熱量<br>MJ/Kg | オクタン価<br>RON*3) | セタン価  | 含酸素量<br>質量% | 水への溶解<br>*4) |
|------------|-------------------------|----------|----------|-----------|---------------|--------------|-----------------|-------|-------------|--------------|
| n-ブタノール    | 0.810                   | 118      | -90      | 37        | 2             | 33.2         | 92~94           | 10以下? | 21.6        | 可溶 (77g)     |
| イソブタノール    | 0.802                   | 108      | -108     |           | 3             | 33           | 104             |       | 21.6        | 可溶 (87g)     |
| sec-ブタノール  | 0.806                   | 100      | -114     |           |               |              |                 |       | 21.6        |              |
| tert-ブタノール | 0.789                   | 82       | 26       |           | 12            | 32.7         | 109             |       | 21.6        | 相溶           |
| (以下参考)     |                         |          |          |           |               |              |                 |       |             |              |
| エタノール      | 0.789                   | 78       | -117     |           | 16*2)         | 26.7         | 120             |       | 34.8        | 相溶           |
| MTBE       | 0.745                   | 55       | -109     |           |               | 36           | 116             |       | 18.2        | 微溶 (42g)     |
| ETBE       | 0.749                   | 72       | -97      |           | 28            | 37.8         | 118             |       | 15.7        | 微溶 (12g)     |
| ガソリン (RG)  | 0.72~0.76               | 30~220   |          | -40>      | 54~65 (夏季)    | 43           | 90~91           | 10~15 | 0~1.3       | 難溶           |
| 軽油         | 0.81~0.85               | 150~380  |          | 50~80     |               |              |                 | 50~63 |             | 難溶           |

\*1) 100 ° F、\*2) ガソリンとの共沸で7 kPa上昇、\*3) RGとの混合時のRONから計算したものも含む  
\*4) 溶解性: 1Lあたり(20°C)

## (2) バイオブタノールの混合使用する際の各国の規制

バイオブタノールを燃料に混合して利用する際の、各国の規制を以下に纏めた。

### ○日本 (J I S、品確法)

含酸素量; 1. 3 質量%max (ブタノール約 5. 5 %相当)

ブタノール利用に対する規定はないが、安全性、健康リスク、排ガス特性等問題ないことの確認が求められる。

### ○米国 (U S Reformulated Gasoline)

含酸素量; 2. 0 ~ 2. 7 % (ほとんどがエタノール)

新規含酸素物質を利用する場合には、E P Aの承認が必要。

### ○欧州 (E U Directive 2 0 0 3 / 1 7 / E C )

含酸素量; 2. 7 質量%max

tert-ブタノール 7 %max、iso-ブタノール 1 0 %max、

他の含酸素基材 1 0 %max

### ○WWF C (日米欧の自動車会社が提案した燃料品質)

含酸素量; 2. 7 質量%max

エーテル類が望ましい。

高級アルコール (炭素数 2 を超える) 混合比 0. 1 % max

## (3) 安全性、排ガス特性等の影響検討

エタノールやE T B Eを導入した時と同様に、実際市場に導入する場合、以下の検討が必要となってくる。

### ○混合燃料性状

・特に貯蔵安定性、混合安定性、酸化安定性等の調査

○燃料系統、計量器等部材（金属、ゴム、樹脂等）への影響調査

- ・金属材料に対してはn-ブタノール5%程度の混合では問題ない。

（エタノール許容値検証試験結果より推定）

- ・エタノールよりは安定と考えられる。アルコールの場合、炭素数が高くなるほど影響は小さくなる傾向である。含酸素量に相関する。

○排出ガス調査（NO<sub>x</sub>、CO、THC、アルデヒド等の排出影響）

一般に、含酸素基材混合ガソリンを既存車（三元触媒）に使用した場合は、空燃比が希薄方向となり、CO、THCは減少、NO<sub>x</sub>、アルデヒド類は増加方向となるため、含酸素量の上限が設定される。

○エバポエミッション調査（燃料蒸発ガスへの排出影響）

○運転性調査（加速性、始動性等運転性に問題がないことの確認）

○安全性、健康リスク調査 ほか

まだ、データは少ないが、今までの知見や類似物質からみて、現行規制範囲（含酸素量1.3%）までであれば、ガソリンに混合利用としても影響が少ないと推定される。但し、エタノール、アセトン等の不純物量によっては、その影響の確認が必要と考えられる。

#### （４）燃料としてのまとめ

ブタノールの燃料油利用は、現状ではデータが少なく今後の検討によるところが大きい。英国においては、今年度から実証化実験を開始するとしており、我が国においても、今後産学官協力して検討していくことが重要である。

ある範囲での混合であれば、貯油・給油設備、燃料系統に与える影響や、排ガスシステム等への影響が少ないと考えられ、既存インフラをすぐ活用できるなど利点がある。

n-ブタノールはオクタン価がそれ程高くなく、オクタン価向上剤として効果は無い。また、軽油への混合利用でも、セタン価（着火性）、引火点が低い。ため、現状では利用に制約がある。iso-ブタノール、tert-ブタノール等への異性化によるオクタン価の向上対策、ガソリン利用、軽油利用含めて、専用エンジンや将来型エンジン（例えば予混合圧縮着火等）での利用可能性については今後の検討課題となる。

燃料油利用の場合は、ブタノールが広く流通することになり、安全面、健康面でのリスク把握は重要な検討課題である。



## 2. 3 バイオリファイナリーの全体像のイメージ

バイオ燃料との連携を考えるうえで、バイオリファイナリーの全体像を俯瞰するための下記の5つ前提を考慮して、化学法および発酵法を統合して考えたいいわゆる統合バイオリファイナリー概念を図に示した。

＜バイオリファイナリーを考察する前提＞

- (1) リグニン含量により草本系バイオマスと木質系バイオマスに分類する考えもあり、経済的課題、達成すべき技術の困難さ等から妥当な考え方ではあるが、ここでは分類せず統合して考える。
- (2) 取り扱う対象によって化学法、発酵法のいずれが妥当か現時点では判別できないものも多い。例えば、セルロースの糖化で酸加水分解法、熱化学法、発酵法のいずれが最良か現状では不明であるので、ここでは併記することとする。
- (3) バイオリファイナリーはグルコース単位の化学系になるので、(C 2)、C 3、C 4を中心とするケミストリーが中心になる。一方、これまでのペトロケミカルはC 2、(C 3)を中心とするケミストリーである。
- (4) これまでの石油化学は還元されている炭化水素を酸化あるいは重合によって有用品に転換する大系。一方、バイオリファイナリーは酸化および重合が進んだ原料を解重合および還元によって有用品に転換する大系。
- (5) 従来の石油化学プロセスの上流を置換する役割と新規化合物群の生産プロセスとしての役割に大別できる。

統合バイオリファイナリー概念図(図2. 7)には、多方面にわたる技術開発を含むものとなっている。この中で、これまでの技術蓄積を基盤として早急な達成が望まれるものとしては、エタノール生産技術開発があげられる。また、これら技術開発に伴い合成ガスを経た有用物質の生産技術、燃焼による熱回収技術の開発が望まれる。さらに多様な化学品ならびにプロパノール、ブタノールの生産技術の開発が期待される。

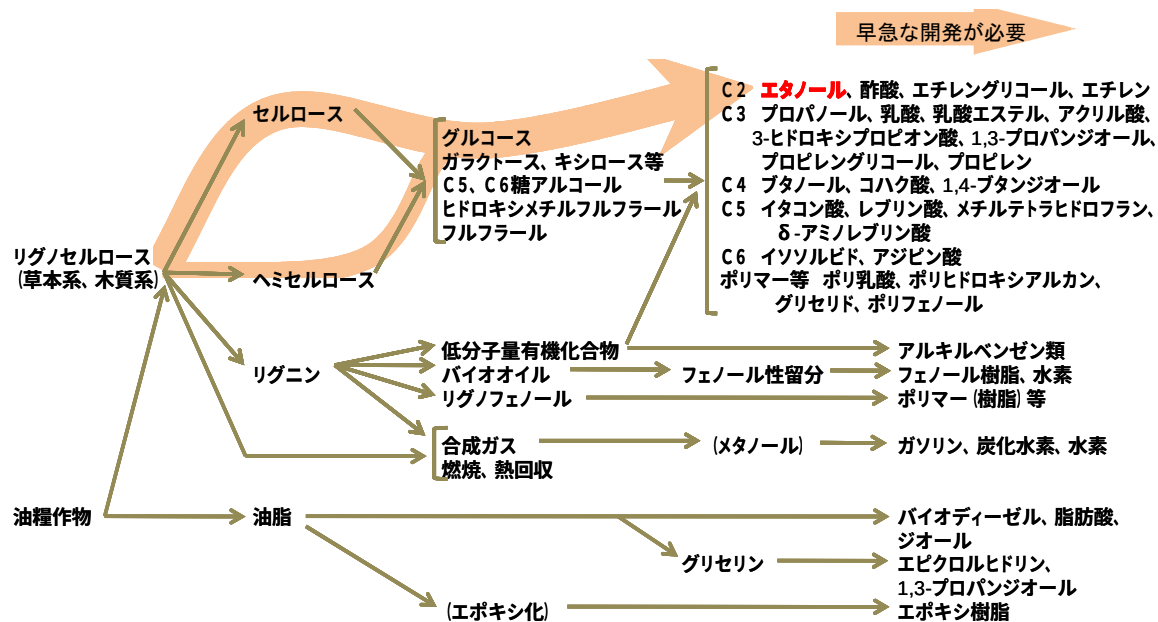


図2. 7 統合バイオリファインリーの概念図

## おわりに

バイオ燃料は、地球温暖化問題、エネルギー源の多様化、農業振興など多様な観点から、現在、多くの注目を集めている。一方で、その利用に当たっては、二酸化炭素の削減効果、安定供給性、食料との競合、生態系、水や土壌への影響、経済性、労働環境や大規模プランテーション化による地域社会へ影響など様々な課題があり、このような課題の解決無くして、持続的にバイオ燃料を活用していくことは困難と考えられる。

バイオ燃料について持続可能な導入を進めていくためには、経済的かつ多量・安定的にセルロース系のバイオマスからバイオ燃料を効率的に製造する技術革新を実現することが不可欠である。

本計画では、原料技術・変換技術の各技術について、具体的な例示や個々の技術のベンチマークを設定し、セルロース由来のバイオ燃料の技術革新を進める筋道を示した。また、それを実現するため、業界横断・省庁横断により効果的に開発を進める体制についても検討を行なった。

「バイオ燃料技術革新協議会」は、バイオ燃料に関する有意義な業界横断・省庁横断の場であり、引き続き技術開発の動向を検証していく。今後、企業、大学、独立行政法人等が実施主体となって技術革新が実現し、バイオ燃料の課題が克服されることにより、バイオ燃料の持続可能な導入拡大が実現されることを期待したい。

バイオ燃料技術革新協議会  
委員名簿

## バイオ燃料技術革新協議会 名簿

|        |                                                    |
|--------|----------------------------------------------------|
| 鮫島 正浩  | 東京大学大学院農学生命科学研究科副研究科長 教授<br>(委員長、エタノール製造技術WGリーダー)  |
| 松村 幾敏  | 新日本石油(株) 常務取締役執行役員 (副委員長)                          |
| 片山 秀策  | (独)農業・食品産業技術総合研究機構<br>バイオマス研究センター長 (バイオマス原料WGリーダー) |
| 坂西 欣也  | (独)産業技術総合研究所<br>バイオマス研究センター長 (システム・LCA WGリーダー)     |
| 岩本 正和  | 東京工業大学 資源化学研究所副所長 教授<br>(リファイナリー連携WGリーダー)          |
| 飯山 賢治  | (独)国際農林水産業研究センター 理事長                               |
| 五十嵐 泰夫 | 東京大学大学院農学生命科学研究科 教授                                |
| 伊藤 譲   | 出光興産(株) 執行役員 研究開発部長                                |
| 今井 伸治  | (社)日本有機資源協会 専務理事                                   |
| 熊崎 實   | 岐阜県立森林文化アカデミー 学長                                   |
| 倉橋 修   | 味の素(株) 執行役員 アミノ酸カンパニー発酵技術研究所長                      |
| 小池 一平  | 全国農業協同組合連合会 営農総合対策部長                               |
| 坂 志朗   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科 教授                               |
| 篠崎 一雄  | (独)理化学研究所 植物科学研究センター長                              |
| 中川 隆   | (財)化学技術戦略推進機構 戦略推進部 部長研究員                          |
| 宮永 俊一  | 三菱重工業(株) 機械・鉄構事業本部 執行役員 副事業本部長                     |
| 元杉 昭男  | (社)地域資源循環技術センター 専務理事                               |
| 森口 祐一  | (独)国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター長                        |
| 森光 信孝  | トヨタ自動車(株) B Rエネルギー調査企画室<br>シニアスタッフエンジニア            |
| 湯川 英明  | (財)地球環境産業技術研究機構微生物研究グループリーダー                       |

## バイオマス原料WG名簿

|        |                                                                 |
|--------|-----------------------------------------------------------------|
| 片山 秀策  | (独)農業・食品産業技術総合研究機構<br>バイオマス研究センター長 (WGリーダー)                     |
| 杉山 隆夫  | (独)農業・食品産業技術総合研究機構<br>生物系特定産業技術研究支援センター 生産システム研究部長<br>(WG副リーダー) |
| 飯山 賢治  | (独)国際農林水産業研究センター 理事長                                            |
| 伊藤 哲志  | トヨタ自動車(株) BRエネルギー調査企画室 主幹                                       |
| 川村 芳弘  | 三菱農機(株) 開発設計二部長兼研究部長                                            |
| 篠崎 一雄  | (独)理化学研究所 植物科学研究センター長                                           |
| 柴田 大輔  | (財)かずさディー・エヌ・エー研究所 ゲノムバイテク研究室長                                  |
| 高木 優   | (独)産業技術総合研究所 ゲノムファクトリー研究部門<br>主幹研究員 兼 遺伝子転写制御研究グループ長            |
| 仁多見 俊夫 | 東京大学大学院農学生命科学研究科 准教授                                            |
| 松里 寿彦  | (独)水産総合研究センター 理事                                                |
| 森田 茂紀  | 東京大学大学院農学生命科学研究科 附属農場 教授                                        |

## エタノール製造技術WG名簿

|        |                                             |
|--------|---------------------------------------------|
| 鮫島 正浩  | 東京大学大学院農学生命科学研究科副研究科長 教授<br>(委員長、WGリーダー)    |
| 坂 志朗   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科 教授 (WG副リーダー)              |
| 五十嵐 泰夫 | 東京大学大学院農学生命科学研究科 教授                         |
| 大原 誠資  | (独)森林総合研究所 バイオマス化学研究領域長                     |
| 鎌形 洋一  | (独)産業技術総合研究所 ゲノムファクトリー研究部門 部門長              |
| 近藤 昭彦  | 神戸大学大学院工学研究科 教授                             |
| 澤山 茂樹  | (独)産業技術総合研究所 バイオマス研究センター<br>エタノール・バイオ変換チーム長 |
| 中尾 真一  | 東京大学大学院工学系研究科 教授                            |
| 永里 敏秋  | 明治製菓(株) バイオサイエンス研究所 副所長                     |
| 長島 實   | (独)農業・食品産業技術総合研究機構 食品総合研究所<br>研究総括          |
| 藤田 信之  | (独)製品評価技術基盤機構 バイオテクノロジー本部<br>ゲノム解析部門長       |
| 松本 正文  | 三井造船(株) 技術本部 企画グループ長                        |
| 森川 康   | 長岡技術科学大学工学部 生物系 教授                          |
| 吉田 正寛  | 新日本石油(株) 執行役員 研究開発本部 研究開発企画部長               |
| 渡辺 隆司  | 京都大学 生存圏研究所バイオマス変換分野 教授                     |

## システム・LCA WG名簿

|        |                                            |
|--------|--------------------------------------------|
| 坂西 欣也  | (独)産業技術総合研究所 バイオマス研究センター長<br>(WGリーダー)      |
| 井上 雅文  | 東京大学アジア生物資源循環環境研究センター 准教授<br>(WG副リーダー)     |
| 岡庭 良安  | (社)地域資源循環技術センター 上席研究員                      |
| 木田 建次  | 熊本大学大学院自然科学研究科 教授                          |
| 佐藤 正則  | 月島機械(株) 産業事業部 砂糖・バイオ事業推進部                  |
| 斉藤 雅典  | (独)農業環境技術研究所 研究コーディネータ                     |
| 匂坂 正幸  | (独)産業技術総合研究所<br>ライフサイクルアセスメント研究センター 副センター長 |
| 曾根 三郎  | 東レ(株) 研究開発企画部 CR 企画室 主任部員                  |
| 種田 大介  | 日揮(株) 技術研究所バイオグループ 主任研究員                   |
| 富山 俊男  | 出光興産(株) 環境安全室地球環境室 室長付                     |
| 中嶋 慶八郎 | 王子製紙(株) 研究開発本部 研究開発推進部<br>グループマネージャー       |
| 濱田 健二  | ヤンマー農機(株) 農機開発部長                           |
| 福田 秀樹  | 神戸大学自然科学系先端融合研究環長 教授                       |
| 山田 富明  | (社)アルコール協会 研究開発部長                          |
| 山本 博巳  | (財)電力中央研究所 社会経済研究所 主任研究員                   |



## バイオリファイナリー連携WG名簿

|       |                                            |
|-------|--------------------------------------------|
| 岩本 正和 | 東京工業大学 資源化学研究所副所長 教授 (WGリーダー)              |
| 鎌田 明  | 三菱化学株式会社 イノベーションセンター<br>M&R フェロー (WG副リーダー) |
| 植田 充美 | 京都大学大学院農学研究科 教授                            |
| 木村 繁  | (株)ジャパンエナジー 精製部 品質グループ 上席技師                |
| 澤村 宣志 | (独)農業・食品産業技術総合研究機構<br>九州沖縄農業研究センター研究管理監    |
| 島田 広道 | (独)産業技術総合研究所 環境化学技術研究部門長                   |
| 清水 昌  | 京都大学大学院農学研究科 教授                            |
| 中川 隆  | (財)化学技術戦略推進機構 戦略推進部 部長研究員                  |
| 湯川 英明 | (財)地球環境産業技術研究機構 微生物研究グループリーダー              |

## バイオ燃料技術革新協議会 審議経緯

### ○バイオ燃料技術革新協議会

第1回 平成19年11月21日（水）15：00～16：00

議題 （1）バイオ燃料技術革新協議会について

第2回 平成20年3月26日（水）7：50～8：40

議題 （1）バイオ燃料技術革新計画（案）について

### ○バイオ燃料技術革新協議会幹事会

第1回 平成19年11月21日（水）16：30～17：30

議題 （1）ベンチマークの合意

（2）WGのアウトプットイメージの摺り合せ

（3）技術調査シート案について

第2回 平成19年12月26日（水）13：30～15：30

議題 （1）各WG（原料、製造、システム、リファイナリー）での  
討議内容報告

（2）次回WGの検討の方向性について

（3）技術開発シナリオについて

（4）最終報告書の作成方針について

第3回 平成20年 2月 6日（水）15：00～17：00

議題 （1）第2回WGの討議結果報告

（2）第3回WG（最終回）の討議方針について

第4回 平成20年 3月12日（水）14：00～16：00

議題 （1）バイオ燃料技術革新計画（案）について

### ○バイオマス原料ワーキンググループ

第1回 平成19年12月10日（月）15：00～17：00

議題 （1）バイオ燃料技術革新協議会・幹事会における検討結果の報告

（2）バイオマス原料分野技術マップの作成について

第2回 平成20年 1月11日（金）14：00～16：00

議題 （1）バイオ燃料技術革新協議会・第2回幹事会における検討結果の報告

（2）バイオマス原料分野技術マップの作成について

第3回 平成20年 2月 8日（金）15：00～17：00

議題 （1）バイオ燃料技術革新協議会・第3回幹事会における検討結果の報告

（2）バイオマス原料分野技術マップ、ロードマップの作成について

○エタノール製造技術ワーキンググループ

第1回 平成19年12月 7日(金) 15:00~17:30

- 議題 (1) バイオ燃料技術革新協議会・幹事会における検討結果の報告  
(2) エタノール製造技術分野 技術マップの作成について

第2回 平成20年 1月31日(木) 15:00~17:00

- 議題 (1) バイオ燃料技術革新協議会・第2回幹事会における検討結果の報告  
(2) エタノール製造技術分野技術マップ、ロードマップの作成について

第3回 平成20年 2月13日(水) 15:00~17:00

- 議題 (1) 第3回幹事会における検討結果の報告  
(2) エタノール製造技術分野技術マップ、ロードマップの作成について

○システム・LCAワーキンググループ

第1回 平成19年12月18日(火) 13:00~15:00

- 議題 (1) バイオ燃料技術革新協議会・幹事会における検討結果の報告  
(2) システム・LCA WGの検討項目について

第2回 平成20年 1月18日(金) 10:00~12:00

- 議題 (1) バイオ燃料技術革新協議会・第2回幹事会における検討結果の報告  
(2) LCAについて  
(3) エタノール生産モデルについて  
(経済性の視点、LCAの視点、ゼロエミッションの可能性)  
(4) 環境・社会評価について

第3回 平成20年 2月 8日(水) 10:00~12:00

- 議題 (1) バイオ燃料技術革新協議会・第3回幹事会における検討結果の報告  
(2) 報告書案についての議論  
・エタノール生産モデルについて  
(経済性の視点、LCAの視点、ゼロエミッションの可能性)  
・温室効果ガスのLCAについて  
・環境・社会影響について

○バイオリファイナリー連携ワーキンググループ

第1回 平成19年12月13日(木) 10:00～12:00

- 議題 (1) バイオ燃料技術革新協議会・幹事会における検討結果の報告  
(2) バイオリファイナリー連携分野 技術マップの作成について

第2回 平成20年 1月30日(木) 10:00～12:00

- 議題 (1) バイオ燃料技術革新協議会・第2回幹事会における検討結果の報告  
(2) バイオリファイナリー連携分野技術マップの作成について

第3回 平成20年 2月20日(木) 14:00～16:00

- 議題 (1) 第3回幹事会における検討結果の報告  
(2) バイオリファイナリー連携分野技術マップ、ロードマップの作成について