

# 解 説

## 1. はじめに

農研機構 食品総合研究所では、食糧と競合しない未利用バイオマスであるリグノセルロース系原料（稲わらやサトウキビ搾汁残渣等）を用いたバイオエタノール製造技術にかかわる研究開発、及び廃棄物系バイオマスを利用したバイオディーゼル製造技術の研究を推進しています。また、農林水産省では、国産バイオマスエネルギーの利用促進を図り地域の活性化に貢献するためには、食料供給と両立する低コスト・高効率なバイオマス利用技術の開発が必要であるとの視点から、農林水産省委託プロジェクト「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発（2007-2011年）」を推進してきました。このプロジェクトでは、国産の稲わらや麦わら、また様々な資源作物等を原料として、独立行政法人、大学、公設試験機関など様々な研究機関が連携協力することにより研究を推進して来ています。食品総合研究所の研究者も本プロジェクトに参画してきましたが、本書では、当研究所の成果の中から特にバイオエネルギーに関連した成果について御報告します。これらの成果をより良く理解していただけるよう、ここでは、研究の背景についてできるだけわかりやすく解説したいと思います。

## 2. バイオマスエネルギーとは

バイオマス (biomass) は生物 (bio-) の量 (mass) を示し、化石燃料以外の生物に由来する資源を意味する言葉として使われています。特に、地球上では資源としての植物量が圧倒的に多く、また動物等植物以外の生物も植物に依存して生存していることから、多くの場合、バイオマスとは植物体を指します。植物は大気中の二酸化炭素を取り込み、太陽エネルギーを利用した光合成を行うことによって植物体を構築しています。二酸化炭素は地球上に広く存在し、また太陽光は地球に無尽蔵に降り注いでいることから、植物を利用して得るエネルギーは「再生可能エネルギー」と言えます。また、二酸化炭素は地球温暖化の原因である温室効果ガスの主要な一つであるため、植物の栽培は温暖化を抑制するためにも有用と考えられています。さらに、たとえ電気などのエネルギーを獲得するために植物体を燃やして二酸化炭素が発生したとしても、その二酸化炭素はかつて植物が成長するために大気中から吸収したものであることから、全体として大気中の二酸化炭素濃度には影響を与えません。このように、植物を利用したバイオマスエネルギーは環境に優しい「循環型エネルギー」と言えます。

一方、現在使われている石油、石炭、天然ガスなどは、地球誕生から有史以前の数十億年にわたる地質時代に存在した生物などの死骸が地中に堆積し、長い年月をかけて地圧・地熱などによって変成されてできたもので、「化石燃料」と呼

ばれています。18世紀の産業革命以降、化石燃料の使用量は飛躍的に増大し続けていますが、埋蔵量には限りがあり、現在わかっている埋蔵量を基に計算した場合、石油は40年程度、石炭は170年程度、天然ガスは60年程度で無くなると予測する研究者もいます。

さらに、太古の昔から時間をかけて大気中の二酸化炭素を固定して作られてきた化石燃料を人類は極めて短期間で大量に消費しているため、化石燃料の利用は大気中の二酸化炭素濃度の上昇を引き起こし、その温室効果によって気候変動が引き起こされることで、地球環境に大きな負の影響を与えていると言われていています。しかし、大気中の二酸化炭素から化石燃料を再生させることは現実的には不可能であるため、「化石燃料」に頼らないエネルギー資源の開発が地球規模で求められています。原子力発電は、二酸化炭素を出さないクリーンなエネルギーと考えられてきましたが、施設の維持管理、廃棄物の処理など課題が多く、また原発事故で明らかになったように、一旦事故が起きれば地球環境に大きな負の影響があることが顕在化してきています。

従って、地球の持続的繁栄のためには、地球環境に悪い影響を与えず、再生産が可能な新たなエネルギー資源が必要です。2008年に施行された「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」（新エネ法）において、再生可能エネルギーは新エネルギーとして位置付けられ、従来からの水力、太陽熱、風力などの利用とともに、バイオマス、太陽光、地熱、波力、雪氷熱、温度差熱などの利用が進められています（「わかる新エネ」経済産業省資源エネルギー庁）。中でも、バイオマスは、燃料やガス生産などのエネルギー資源であるばかりでなく、近年は化学品やプラスチック原料など高付加価値物質の原料の資源として、ますます注目されてきています。

### 3. バイオマスエネルギーのコストについて

バイオマスエネルギーには、従来からの薪や動物の糞などを燃料として利用することも含まれますが、現在、大量に必要とされているエネルギー形態は、電気、ガス、輸送用液体燃料です。これらは、現在、石油等の化石燃料を用いて極めて安価に供給されているため、化学燃料の代替としてバイオマスエネルギーを社会に受け入れてもらうためには、少なくともこれまでと同程度の価格での供給が期待されます。また、バイオマスから得られる輸送用液体燃料を、自動車など輸送機器を大幅に改良することなく利用できれば、導入コストを下げることで、消費者も受け入れやすいと言えます。このように、バイオマスエネルギーの実用化を図るためには、その製造技術の開発だけでなく、いかに低コストで製造し、無理なく使ってもらえるかという視点が極めて重要です。そのため、実用化に繋がるバイオマスエネルギー開発には、様々な分野の連携協力が必要です。

#### 4. 我が国の取り組みについて

エネルギー問題はどの国においても重要な課題ですが、我が国は、第4次中東戦争を契機に発生したオイルショック（1973年）によって石油供給不足の脅威を経験し、さらに、1979年には、前年からのイラン政変をきっかけに第2次オイルショックを経験しました。これらの経験から、石油への過度な依存から脱却することの重要性を痛感して、1980年には「石油代替エネルギーの開発及び導入の促進に関する法律」（代エネ法）を制定しました。これに基づいて省エネルギーの促進を図ることで、現在では、日本は世界でも最高水準のエネルギー使用効率を達成しています。さらに、深刻な気候変動問題の顕在化やエネルギーの安定供給の必要性に基づき、2001年の新エネルギー部会（経済産業省資源エネルギー庁）において、バイオマスエネルギーは「積極的に導入を図っていくことが適当な新エネルギー」として位置付けられました。2002年6月には「エネルギー政策基本法」が、翌年3月には「エネルギー基本計画」が閣議決定されるとともに、バイオマス利用については、2009年に「バイオマス活用推進基本法」が制定され、それに基づき2010年12月に「バイオマス活用推進基本計画」が閣議決定されました（「エネルギー白書」経済産業省資源エネルギー庁）。また、バイオマスの利活用推進に関する具体的取組や行動計画が「バイオマス・ニッポン総合戦略」として2002年12月に閣議決定され、2008年3月には、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」が示されました。

このような状況に即して、本文の始めに記載したように、2007年から5カ年計画で農林水産省委託プロジェクト「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発」が開始されました。現在は、その後継プロジェクトである農林水産省委託プロジェクト「農山漁村におけるバイオ燃料等生産基地創造のための技術開発」（2012-2015年）が推進されています。

#### 5. バイオエタノールについて

バイオエタノールは輸送用液体燃料の一つで、一般的にガソリンと混合されて自動車の燃料として利用されます。日本では、通常のガソリン自動車の場合、混合率3%までの混合ガソリン（E3燃料）であれば安全であると認められており、既にE3燃料の一部実用化が始まっています。混合比率が高くなると車の十分な性能が得られなくなるため、混合ガソリンに対応した内燃機関の調整、もしくは混合ガソリンに特化した自動車が必要となります。実際、大規模エタノール製造を実用化させているバイオマス大国ブラジルでは、いかなる混合比でも利用可能な特別な自動車が販売されています。日本においては、ブラジルのようにバイオエタノール生産のために大量の穀物を収穫・利用できる環境にはありませんので、まずはE3燃料の普及に向けた技術開発が進められているところです。

世界においてバイオエタノールの生産量は、米国とブラジルが世界1位、2位

を占めています。アメリカでは主にトウモロコシ、ブラジルではサトウキビを原料として、これらに含まれるデンプンや廃糖蜜から糖液を調製し、酵母を利用してエタノール発酵しています。基本的に酒造りと同じやり方ですが、デンプンや糖を利用して作られるエタノールは、最初に実用化されたことから「第一世代のバイオエタノール」と呼ばれています（図1，左図）。第一世代は効率的なエタノール生産が可能ですが、原料となる作物は食糧としても利用されることから、バイオマス燃料生産への利用が穀物価格の高騰を引き起こしたり、作物生産を目的として大規模な森林伐採が起り自然環境の破壊につながるなど、深刻な問題が生じています。このような状況から、現在は、食糧と競合しない植物細胞壁を主成分とするリグノセルロース系原料の利用に関心が集まっており、地球の持続的発展に適した、いわゆる「第二世代バイオエタノール」の製造技術として期待されています（図1，右図）。

## 6. 第二世代バイオエタノールの製造工程について

リグノセルロース系原料を用いたエタノール製造では、原料に含まれる多糖（セルロースやヘミセルロース）を酵素糖化することで、グルコースやキシロースなどの単糖を得ます。しかし、リグノセルロース系原料中ではセルロース、ヘミセルロース、リグニン等が互いに強固に結合した構造をしているため、外から分解酵素を添加しただけでは糖化は起こりません。そのため、「前処理工程」が

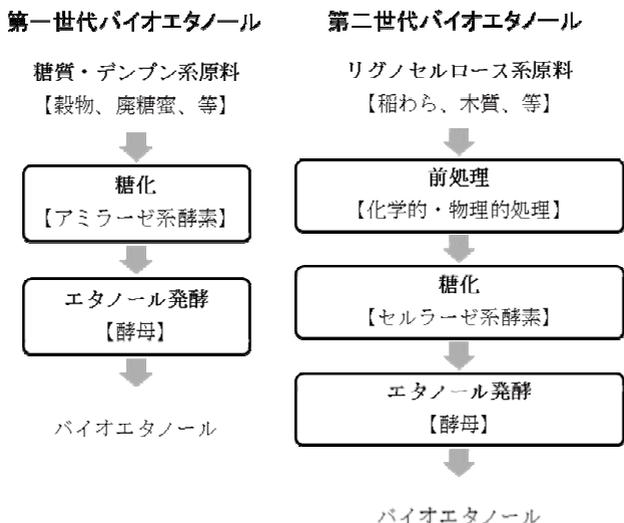


図1 第一世代（左）及び第二世代バイオエタノール（右）の製造工程

必要で、破碎や粉碎など物理的処理を原料に加えることでその構造をほぐし、さらにアンモニア処理、希硫酸処理、または煮沸処理などによってセルロースやヘミセルロースを表面に露出させ、糖化酵素が作用できる状態に持って行く必要があります。用いるバイオマス原料によって多糖成分の組成や量比、また構造等が大きく異なるため、原料毎に適した前処理条件を見出す必要があり、実際、同じリグノセルロース系原料であっても、稲わらと木質では必要な前処理条件は大きく異なります。また、「前処理工程」では多糖以外に多くの物質が生成され、それ以降の「糖化工程」や「発酵工程」の効率に大きく影響する可能性があります。従って、全体として高いエタノール変換効率を達成するのに適した前処理技術であることが望ましく、少なくとも、それ以降の工程を阻害しないことが必要です。そのため、多くの研究者が、用いるリグノセルロース系原料に最適な「前処理工程」の構築を目指して研究に取り組んでいます。

次の「糖化工程」では、前処理済みバイオマスにセルラーゼやヘミセルラーゼなどの糖化酵素を添加し作用させることで、セルロースやヘミセルロースをグルコースやキシロースなど単糖に変換します。ここで用いる糖化酵素は、基質特異性や酵素活性など性質が異なる多様な糖化酵素の混合物であり、これらが共同して作用することで効率的な糖化ができると考えられています。しかし、バイオマス原料によって、含まれる多糖の構造も量も大きく異なることから、「糖化工程」においても、バイオマス原料毎に、最適な反応条件を見出すことが必要です。従来、この工程では市販の糖化酵素を使用してきましたが、原料バイオマスの組成や濃度によって糖化効率が大きく異なるため、通常、十分な活性を得るためには比較的高濃度の酵素が必要でした。しかし、市販酵素が高価であるため、「糖化工程」が低コストエタノール生産を達成する際のボトルネックとなっていました。そのため、糖化酵素の低コスト生産技術の構築は重要な研究課題であり、新規糖化酵素の開発やオンサイト生産（エタノール生産現場における糖化酵素の生産）技術の開発などが精力的に研究されてきています。

「発酵工程」では、「糖化工程」を経て生じたグルコースやキシロースなどの単糖を、酵母を用いてエタノールに変換します。六炭糖であるグルコースは、第一世代エタノールの生産と同様、サッカロマイセスセレビシエという酵母によって容易にエタノールに変換されます。しかし、リグノセルロース系原料の糖化液には、ヘミセルロースから生じるキシロースなどの五炭糖が含まれ、サッカロマイセスセレビシエは五炭糖を発酵できないため、五炭糖は利用されず発酵残渣に残ることになります。稲わらなど多くのリグノセルロース系原料は比較的高濃度（25-30%）のヘミセルロースを含むため、バイオマスが有する糖の多くの部分が無駄にされることになります。従って、キシロースなど五炭糖を利用するには新たな酵母の開発が必要であり、多くの研究が進められています。また、エタノール変換効率の向上を目的として、「糖化工程」と「発酵工程」を、ワンポツ

トで同時に進行出来れば、工程間のロスもなく、また反応時間の短縮も可能です。しかし、「糖化工程」の最適温度は50℃程度であるのに対して、「発酵工程」は通常30℃程度です。そこで、もし、高温の40℃で高いエタノール発酵活性を示す酵母が得られれば、40℃での同時糖化発酵が可能になると期待されます。そこで、高温耐性の新たな酵母の開発も重要な研究課題となっています。

以上、第二世代のバイオエタノールの製造では、各工程で解決すべき多くの課題が存在しますが、実用化を目指した技術開発においては、さらに、生産コストや二酸化炭素発生量などの多様な視点からの環境影響評価（ライフサイクルアセスメント、LCA）の研究が必須です。たとえば、原料からエタノール生産までのLCA解析では、上記の各工程のコスト計算に加えて、バイオマス原料の価格、輸送費用、バイオエタノールの濃縮費用など、システムに関わるすべての工程のコスト計算が必要です。また、高効率のエタノール生産を実現するためには、原料からエタノール変換までの一貫システムの構築が求められていますが、構築されるシステムの有効性を証明するためにも、実験結果に基づいた精度の高いLCA評価が必要であり、そのための研究も行われています。

## 7. バイオディーゼルについて

輸送用液体燃料のもう一つの形態として、バイオディーゼルがあり、これはディーゼル車の燃料として利用されます。バイオディーゼル製造には、原料として廃棄物系バイオマスである様々な油脂が利用され、繰り返し利用された汚れた食用油であっても、精製することによりディーゼル燃料としての利用が可能です。従来廃棄されていたこのようなバイオマス原料を有効に活用できることから、バイオディーゼルは環境に優しいバイオ燃料として注目を集めています。特に欧州諸国ではディーゼル車に力を入れており、バイオディーゼル燃料を扱うスタンドが増えているほか、税金の面でも優遇されています。日本においてもバイオディーゼル燃料の効率的製造技術の研究開発とともに、導入に向けた様々な取り組みが行われています。

## 8. 本書の内容について

本書の「I 国産草本系原料を用いた4種類のバイオエタノール製造プロセス開発」では、4種類のバイオエタノール製造プロセスについて報告します。上述したように、バイオマス原料によって適する「前処理工程」が異なり、この工程がその後の工程のありようにも影響します。いろいろな草本系原料を利用する際、4種類のプロセスから最も適当なものを選び利用することによって、高効率かつ低価格なエタノール生産が可能になると期待されます。

「II 多様なエタノール変換プロセスに対応可能な糖化酵素生産基盤技術の開発」においては、酵素糖化にかかるコストの軽減を目的として、安価で効率的な

酵素生産に関する研究成果を報告します。微生物が生産する様々な糖化酵素はセルロースなどの基質の添加によって生産誘導され、グルコース添加によって抑制されます。そこで、酵素誘導の条件検討や微生物変異株を利用することで、糖化酵素の高生産条件を解明しました。

「Ⅲ バイオエタノール生産用ストレス耐性酵母の開発と特性評価」及び「Ⅳ バイオエタノール生産に適した五炭糖発酵性酵母の開発」では、酵母によるエタノール発酵に関する成果について報告します。酒造りに利用するサッカロマイセスセレビシエは高いエタノール発酵能及びエタノール耐性など優れた性質を有していますが、リグノセルロース系バイオマスを原料とした場合、その利用にはいくつかの問題点があります。そこで、酵母の改変や新たな有用酵母の選抜、また酵母の利用方法の検討を行うことで、問題点の解決に取り組みました。

「Ⅴ バイオエタノール生産に関する LCA 解析」では、バイオエタノール製造技術の評価を目的として、製造コスト及び環境負荷の視点で LCA 解析を行っています。

「Ⅵ エタノール製造コスト低減に向けて（連結バイオプロセスとヘミセルロースの利用）」では、食用担子菌にバイオエタノール生産の全工程を行わせる「連結バイオプロセス」構築への試みについて報告します。さらに、ヘミセルロース成分のエタノール生産以外の利用可能性についても言及します。

「Ⅶ 真に意義のあるバイオディーゼル燃料の製造・利用を目指して」では、廃食用油を原料としたバイオディーゼル燃料の製造技術に関して、研究成果及びその開発の動向について紹介します。

## 9. おわりに

バイオマスエネルギーは、これまで利用できずにいたものから産業に利用可能なエネルギーを獲得するという点で画期的なエネルギーであり、世界中でますます注目されています。世界ではバイオマスエネルギーの導入は既に始まっていますが、補助金に頼ることのない、独り立ちできるバイオマスエネルギー産業を実現するには、より一層の高効率、低コスト、環境負荷低減が達成できる技術の開発が必要です。未だ道半ばではありますが、本書により、この目標に向かって当研究所が推進している研究について御理解いただければ幸いです。

(食品バイオテクノロジー研究領域 矢部 希見子)