

【バイオマステ集】 バイオエタノール バイオリファイナリー

## セルロース性エタノール利用に向けての障壁の解決（米国）

米 DOE によるセルロース性エタノール研究のロードマップ

米国エネルギー省（DOE）は、「セルロース性エタノールの利用に向けての障壁の解決」と題したバイオ燃料研究の報告書<sup>1</sup>を本年7月に発表した。この報告書ではセルロース性エタノール研究の詳細なロードマップを提供し、科学的ブレイクスルーが必要である重要な障壁（課題）と領域を提示している。

以下ではこの報告書の概要を紹介する。

### 1. 要旨（Executive Summary）

「最先端のエタノール製造技術の研究に対しても政府は資金を供給する。この技術は、トウモロコシだけでなく、木くずと茎やスイッチグラス（訳注：牧草の一種）も原料として利用するものである。」<sup>2</sup> ブッシュ大統領（2006年1月 一般教書演説）<sup>3</sup>

農業・工業バイオテクノロジーとエネルギー産業の強力な融合を背景に、米国は、エネルギー自給率および気候保護の向上につながる新しい戦略的な能力を持つようとしている。2006年の年頭一般教書演説の中で、ブッシュ大統領は、先進エネルギーイニシアティブ（Advanced Energy Initiative）の概要を述べた。ガソリンやディーゼルなどの燃料に代わる、国内で生産できる再生可能なエネルギー源の開発を進めて、米国の石油輸入への依存度を低減するのがこのイニシアティブの目的である。大統領は、よりクリーンで低価格、かつより信頼性の高い、石油に代わるエネルギー源を、今後数年のうちに開発することを国家目標として掲げた。従来の燃料に代わるものとして期待される新しいエネルギー源の一つに、セルロース性バイオマス（繊維性バイオマス、木質性バイオマス、一般的に食用に適さない植物に由来する材料など）がある。セルロース性バイオマスが実用化されると、米国の経済成長、エネルギーの安全性、および環境目標の達成などに大きな影響を与えることが予想される。セルロース性バイオマスは、原料が豊富かつ国内で生産可能、また再生可能であり、液体輸送燃料化して利用することのできる魅力的なエネルギー材料である。このような燃料であれば、現世代の自動車でも使用できる上、流通面でも既存の輸送燃料用基幹設備をそのまま利用することが可能である。

<sup>1</sup> Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol: A Joint Research Agenda,  
<http://www.doegenomestolive.org/biofuels/b2bworkshop.shtml>

<sup>2</sup> “ We'll also fund additional research in cutting-edge methods of producing ethanol, not just from corn, but from wood chips and stalks or switchgrass. ”

<sup>3</sup> [www.whitehouse.gov/stateoftheunion/2006/](http://www.whitehouse.gov/stateoftheunion/2006/)

2005年12月7日～9日、エネルギー省（DOE）科学局の生物科学研究（OBER）と、DOE エネルギー効率化・再生エネルギー（EERE）のバイオマスプログラムによって、「Biomass to Biofuels Workshop(ワークショップ バイオマスからのバイオ燃料生産)」が開催された。このワークショップの目的は、セルロース性エタノール製造の急速な発展を妨げる障壁や問題を明らかにすることと、共同研究課題の一環として、生物学の最新ツールを共同で利用し、それらの問題の解決方法を見出すことであった。ワークショップのテーマの中心はエタノールであったが、その内容は、バイオディーゼル燃料やその他のバイオ製品、副産物など、様々なバイオマス展開の枠組みの中で重要な役割を果たす他の燃料にも応用が可能である。

障壁の中核となるのは、セルロース性バイオマスからエタノールを生成する処理の困難さである。バイオマスは、自然界でもっとも準備の整った（すぐに利用できる）エネルギー源である「糖」によって構成されるが、糖は、生物学および化学的な分解を防ぐために、複雑な高分子複合体の中に固定されている。セルロースおよびヘミセルロースのエタノールへの変換を基盤とする新しいバイオ燃料産業を活性化するためには、植物の細胞壁の化学的構造および物理的構造について、どのように合成されているのか、またどのように分解できるのかを理解する必要がある。これらを知って初めて、エネルギー作物（バイオ燃料の資源として利用する目的で作成された植物）の開発と、それと同時に生物学的な処理および変換方法の開発が可能になる。近年の科学技術力の進歩、中でも新しい学問分野であるシステム生物学の成果は、このような開発の促進強化に大きく貢献しており、従来とは根本的に異なるプロセスの開発や、バイオマスを原料として効率的かつ経済的に液体燃料を製造するためのバイオリファイナリーのパラダイムの創造が期待されている。このレポートでは、これらの主要な障壁と、障壁に対処するための研究戦略について記述している。（訳注：セルロース性バイオマスをエタノールへ変換する従来の方法、および新しいバイオリファイナリー概念については、それぞれ **2.添付資料(1)(2)**を参照、システム生物学の考え方については **2.添付資料(3)**を参照）

技術的な戦略は、課題の達成度に合わせて、3つの段階を経て進められる（訳注：**2.添付資料(4)(5)**参照）。まず、5年以内に研究段階が実施される。ここでは、高効率かつ経済的に収穫、分解、エタノールへの変換を行う持続可能な方法を開発するために、既存の原料に関する理解を深める。研究の中心となるのは、セルロース性バイオマスの酵素分解である。まず、熱化学プロセスと生物学プロセスを組み合わせることでセルロース性バイオマスを5炭素糖、6炭素糖、リグニンに分解してから、糖を共発酵させることでエタノールなどの最終生成物を作成する。また、コストを削減しつつ効率効果を向上させ、阻害物質の生成および阻害物質に対する感受性を抑制し、かつバイオリファイナリー環境の全体的なエネルギー産出量を増やすためには、各プロセスを連結し、統合する必要がある。

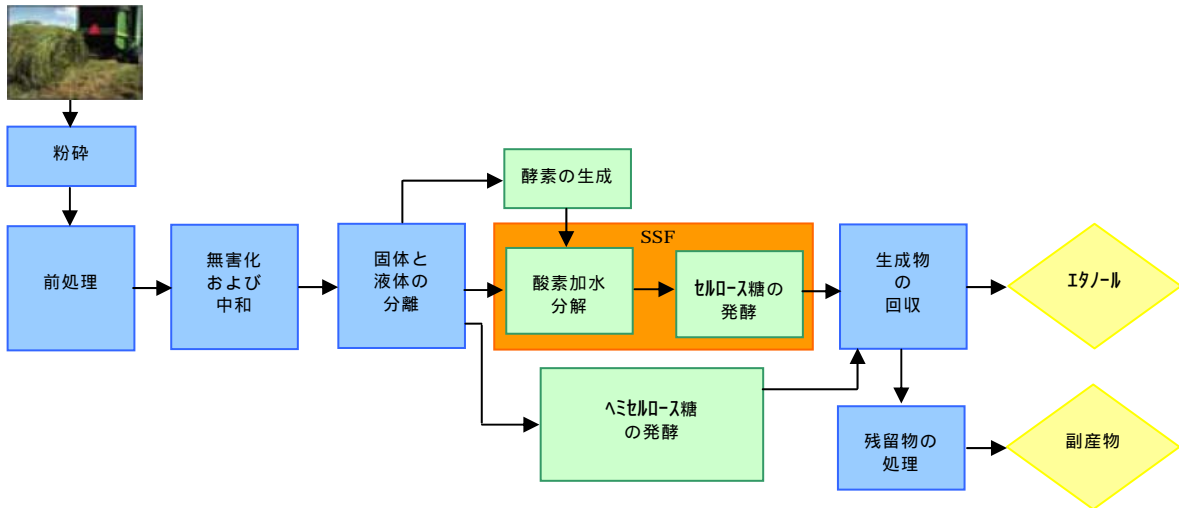
次に、技術開発段階が 10 年以内に実施される。ここでは、持続可能性、収穫量、および組成の強化された次世代のエネルギー作物の開発とともに、新しい生物学体系を介したバイオマスの同時糖化・糖の共発酵プロセスの開発を行う。これらのプロセスは、適用可能な基質範囲や温度、阻害物質耐性などが改善されて、複雑なバイオリファイナリー環境で、また採算性の高いタイムスケールで利用できるものとなる。

その後、システム統合段階が 15 年以内に実施され、並行的に開発された 2 つの成果（エネルギー作物と、特定の農業生態系向けのバイオリファイナリー）がここで統合される。この高度に統合されたシステムでは、新しい酵素や改良された酵素を用いてバイオマスを糖化し、複数の安定した発酵プロセスを組み合わせることで植物や微生物に適用することにより、燃料エタノール生産全工程の加速化および簡素化を実現する。これらの最終段階の技術は、さまざまな意味で、バイオマス変換技術の理論的な限界に近づく取り組みとなる。次世代のバイオテクノロジーでは、国内外の多様な農業地域で利用できる、柔軟性のあるバイオリファイナリー技術の発展を積極的に促進してゆく。

このプログラムを成功させて、セルロース性バイオマスからエタノールを効率よく生産するには、高度な工業技術と生物学の基礎研究の連結が不可欠である。ゲノミクスに対する政府の投資をもとに誕生した、次世代の生物学研究分野が「システム生物学」だ。システム生物学では、詳細化の進むハイスループット分析や、生物学の複雑さを明快にする計算などの技術を利用して、予測的な研究および合理的な設計に役立てる。また学際的なチームで行う研究アプローチにより、科学の進歩が加速され、それらの新しいバイオプロセスへの応用も加速される。研究室内の技術や、設備に組み込まれる技術など、一連の技術を統合的に展開することにより、技術性能の強化や生産性の向上、コスト削減などが実現され、目標達成に向けた無理のない適時な開発が可能となる。そして、このような新しい研究能力や研究施設は、基礎研究、技術開発、および実用化を進めるうえでの原動力となってゆく。

## 2. 添付資料

### (1) セルロース性バイオマスを変換する従来の方法 (濃酸前処理・加水分解・発酵)

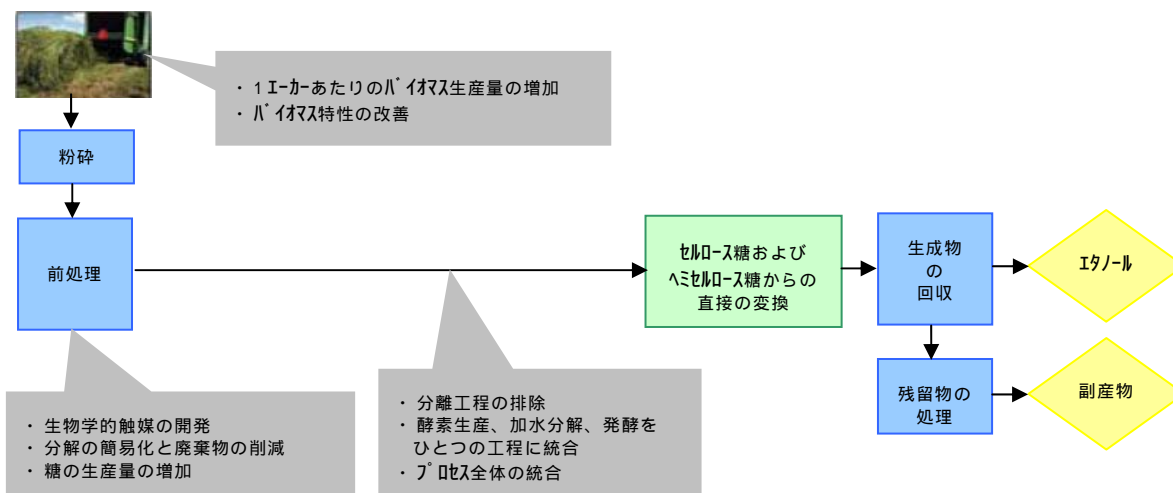


手順:

- (1) セルロース性バイオマス原料を粉砕して、熱化学的な前処理を施し、セルロース系ポリマーを酵素分解しやすい状態にする。ヘミセルロース糖を利用可能な状態にする（左側の青色のボックス）。
- (2) 植物細胞壁多糖を複数の単糖に加水分解する特殊な酵素製剤セルラーゼを製造し、セルラーゼによって加水分解処理を行う（緑色のボックス）。
- (3) バクテリアまたは酵母を触媒として糖を発酵させ、エタノールとその他の副産物を生成する（黄色の菱形）。

最近の研究開発により酵素の価格が大幅に低下した。また発酵プロセスが簡易化され、糖化と発酵を同時に行えるようになった（SSF；同時糖化発酵）（橙色のボックスで囲まれている緑色のボックス）。SSFでは、セルロースの加水分解とブドウ糖の発酵を同時に行うことが可能である。セルロース性バイオマスの研究では、これらの手順をより単純化することによって、バイオマスの生産量および処理量の増加を目指している。

## (2) 高度な前処理方式および統合されたセルロース-エタノール変換工程を取り入れたバイオリファイナリーの概念



エネルギー効率がより高く化学的に害のない、酵素を利用した前処理を実現するための技術が現在開発中である。このロードマップでは、それらの技術に基づいて戦略が立てられている。糖化と発酵をひとつの工程に統合し、最終的には単一の有機的システムあるいは密接に統合された混合培養システムを開発する（バイオプロセスの統合）。つまり、バイオマス-エタノールの変換はひとつの工程に統合される。

**(3)システム生物学でセルロース性バイオマスを研究するために役立つあらゆるレベルでの生物学的研究能力の理解**

生物学の新しい基盤、そして21世紀の工業バイオテクノロジーは、生物学、物理学、計算科学、およびエンジニアリング科学など各分野の研究内容を組み合わせた上に創造される。この図は、ゲノムの相互作用からエコシステムの変化まで、あらゆるレベルの知識の統合体を構築するという、GTL ( Genomes to Life ) プログラム ( 微生物を利用して国内のエネルギー需要に画期的な解決法の開発を目指す ) の取り組みを表している。バイオ燃料問題のさまざまな側面に関連する複数の体系を同時に研究することで、相乗的な効果を得ることが可能になる。なぜならば、生物学の永続的なテーマや、生物の反応・構造・機能を支配する原則は、どのレベルの体系にも共通して当てはまるものだからだ。GTLのナレッジベース

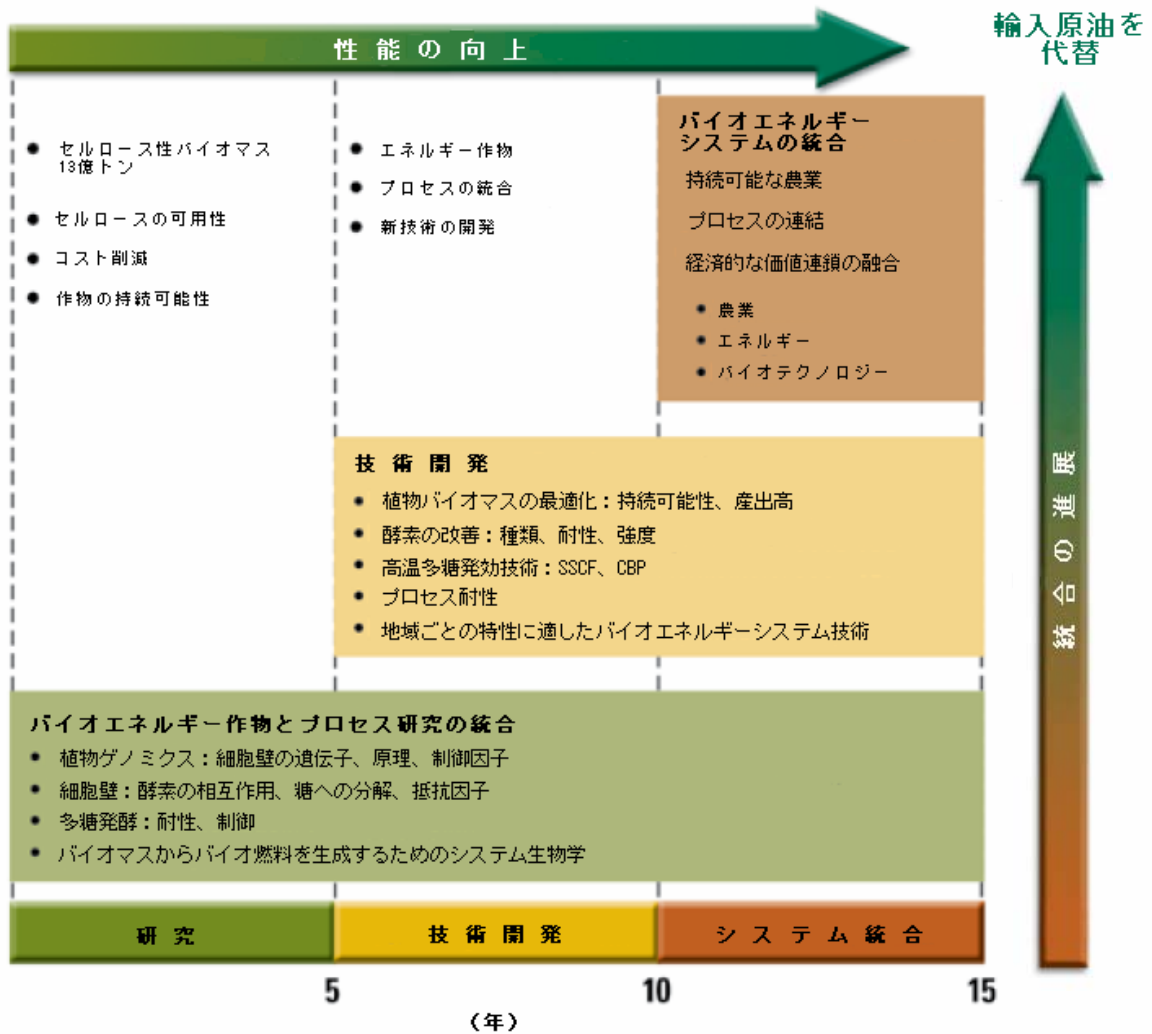
およびGTLのコンピュータ環境では、作成されたデータはすぐに蓄積され、さまざまな研究の取組みと相互にリンクされる。このように情報が統合されることにより、予測的に研究を行うことが可能となる。

エネルギー省 ( DOE ) のテクノロジープログラムでは、産業界と協力してこのような研究能力や知識を応用し、新しいプロセス、製品、産業の創出を実現する。





(4) バイオエネルギーシステム開発の段階的な実施



研究と技術開発は、今後5年から15年の間に、大きく3段階に分けて実施される。研究段階では、ゲノムを基盤とするシステム生物学によって、次の技術開発段階における実用化の基礎となる知識基盤、概念、およびツールが準備される。システム統合段階では、同時に開発されてきた米国各地の農業生態系に適した作物とバイオリファイナリープロセスを介して、基盤研究技術と応用研究技術の両方が複数のバイオエネルギーシステムに利用される。

(5) 技術戦略スケジュール

研究段階 (0 - 5年)	技術開発段階 (5 - 10年)	システム統合段階 (10 - 15年)
<p><b>従来の資源と初期エネルギー作物</b></p> <p>目的 / 要因:</p> <p>バイオマス資源基盤の拡大と利用の促進</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 初期エネルギー作物</li> <li>・ セルロース処理の可用性</li> <li>・ コストの削減</li> </ul>	<p><b>移行: モジュラー技術の開発</b></p> <p>目的 / 要因:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 十億トン以上のバイオマス生産を可能にする新しいエネルギー作物の必要性</li> <li>・ プロセスの簡素化およびモジュールの改善</li> <li>・ システム生物学と化学の活用</li> <li>・ バイオプロセス技術</li> <li>・ 合理的なシステム設計</li> </ul>	<p><b>統合と連結</b></p> <p>経済価値連鎖の融合</p> <p>目的 / 要因:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ バイオエネルギーシステムの統合</li> <li>・ 地域ごとの特性に合わせた技術</li> </ul>
<p><b>原材料</b></p> <p>エネルギー作物の持続可能性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 土壌の生態系および養分に対する影響</li> <li>・ エネルギー作物モデルの開発</li> <li>・ 遺伝子、原理、エネルギー作物サブシステムの制御             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 細胞壁の構造および構成</li> <li>- 分解・発酵との結びつき</li> </ul> </li> </ul>	<p><b>原材料</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 植物をシステムとして理解</li> <li>・ エネルギー作物の栽培品種化</li> <li>・ 糖の強化、リグニンおよび毒性阻害物質の最少化</li> <li>・ 生産高の増加と土壌持続性の向上</li> </ul>	<p><b>全工程がひとつになったバイオ燃料システム (生体-エネルギー作物プロセス)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地域ごとの特性に合わせたシステムと完全に統合されたプロセス</li> <li>・ 組成物の強化されたエネルギー作物の利用</li> <li>・ プラント設備管理のためのツールキット</li> <li>・ 統合されたプロセスとバイオ燃料システムの連結             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 個々の必要に応じた混合分解酵素</li> <li>- 微生物代謝系の操作</li> <li>- ストレス耐性およびプロセス耐性</li> <li>- システムの完全な制御</li> </ul> </li> <li>・ 操作、解析を素早く行うためのツールキット</li> </ul>
<p><b>原材料の分解</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 酵素の価格低減</li> <li>・ 酵素とリグノセルロースの相互作用についての理解             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 細胞壁の扱いにくさ</li> </ul> </li> <li>・ 天然酵素の多様性についての調査</li> <li>・ 根本的な酵素の限界の立証</li> <li>・ リグニナーゼとヘミセルロースの開発</li> <li>・ セルロース分解機構およびすべての経路で利用できる遺伝子変換システムの開発</li> </ul>	<p><b>分解</b></p> <p>展開:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 酵素の改善 (変化率、特異性)             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 基質範囲の拡大</li> <li>- 阻害作用の減少</li> <li>- エネルギー作物の概念</li> </ul> </li> <li>・ 酵素-基質相互作用の解析および操作のためのツール</li> <li>・ 酵素の設計および改善のためのツール</li> </ul>	
<p><b>発酵によるエタノールの生成および回収</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ あらゆる糖の利用についての研究 (セルロースの直接の利用も含む)</li> <li>・ ストレス応答と阻害物質の研究             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 高濃度のアルコールおよび糖</li> </ul> </li> <li>・ 規則と制御の理解</li> <li>・ 自然多様性についての調査</li> </ul>	<p><b>発酵と回収</b></p> <p>展開:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ C-5糖とC-6糖の共発酵</li> <li>・ 新しい取り組み (複数)             <ul style="list-style-type: none"> <li>- ストレス耐性</li> <li>- 高温</li> </ul> </li> <li>・ 完全な調節管理を実現するツール</li> <li>・ 素早く分析と操作を行うためのツール</li> <li>・ セルロースの加水分解およびエタノールの生産に利用する統合された有機物のテスト</li> </ul>	

以上

翻訳・編集: NEDO 情報・システム部

( 出典: <http://www.doegenomestolive.org/biofuels/b2bworkshop.shtml> )