

【ライフサイエンス特集】

エネルギー科学技術の指標と基準 革新的バイオテクノロジー(EU)

欧州委員会「エネルギー科学技術の指標と基準」より

1. 導入

バイオテクノロジーを用いたプロセスは、様々な原材料や資源からエネルギー源を生産することに応用できる。水素、エタノール、メタノール、ブタノールおよびエタノール混入アセトン (ABE) を生産するために、既成のプロセスでバイオマスが用いられる。以降では、エタノールやABEなどのプロセスについて、将来の産業的な商品化を行うために必要な革新的な進歩についての重要事項を明らかにする。

革新的な最適化プロセスは安価な炭素源の使用に焦点を当て、遺伝子工学による菌株の改良と菌株の代謝を目指す。革新の3番目の領域は生産物の回収の効率性の改善である。

バイオテクノロジーは、エネルギー生産のために用いられるバイオガスおよびバイオマスにも利用できる。しかしながら現在、ハイテク化を目指した改善にはほとんど努力が払われていない。

革新的バイオテクノロジーの将来の潮流は、エネルギー生産を目指した光合成への応用である。現在このプロセスは純粋な基礎研究段階である。専門家達によると、産業的な利用を行うためには、商業化をめざした長期的な視点を持つことが求められている。ここでは、基本的な原理と産業利用に向けての動向について概要を記述する。

2. 革新的バイオテクノロジーの評価のための指標

エネルギー生産のための革新的バイオ・プロセス (例えば人工光合成による水素製造や光の利用) は、エタノール製造などの既に確立しているバイオ・プロセスについても、多くのボトルネックがある。将来、産業利用を行うためには以下の点が改善されなければならない。

- ・プロセスの安定性 (例、生物学的汚染、菌株の劣化)。
- ・代謝経路における最終生産物および副生産物の阻害。
- ・希望する最終生産物の全代謝生産物中の割合、および/もしくは副生産物の高度な利用。
- ・石油化学生産物と比較しての、バイオ生産物の生産コスト。特に必要な炭素源 (例: グルコース、糖蜜、スターチ、リグノセルロース、液体廃棄物、固体廃棄物) に最も影響される生産物の生産コスト。
- ・製造プラントの運転コスト (例: 水、蒸気、電気、添加剤 (ビタミン、追跡元素))。
- ・石油化学プロセスと比較しての、後処理プロセス / 生産物回収のコストおよび実用性。
- ・バイオ・プロセスを実施することに対する人的資源の意欲と可能人員。

・バイオ・プロセスのためのフレーム条件（例：大気および水質汚濁の閾値、CO₂ 排出量）。

表1は選ばれたプロセスのボトルネックを要約したものである。このレポートのこの後の項ではこれらのプロセスについて、技術の現状、将来展望および改善のための重要事項についてさらに詳細に記述している。

表 1 革新的なバイオテクノロジープロセスの産業的商品化のための最も重要なボトルネック

技術要素	ボトルネック	今後の進展の手段と重要指標			計画期間
水素製造	主要酵素であるヒドロゲナーゼ、ニトロゲナーゼの低活性	1.生産菌株の遺伝子工学 ・主要酵素の特定の活動の増加 ・競合的な代謝経路の不活性化 2.無細胞系の開発			長期
			現在	目標	中期
		プロセス効率	5%	10%	
	十分な量の有機化合物の供給	様々な基質に対するプロセスの開発（例、廃水の有効利用のためのプロセスの調節）			中期
	発酵副産物の処理	1.CO ₂ 及び H ₂ へ完全な転換を行うための混合培養を含むプロセスの開発			中期
2.遺伝子工学による一つの有機体基質特異性の拡大			長期		
エタノール製造	高価な炭素源	1.リグノセルロースで成長させる生産菌株の遺伝子工学 ・エタノール生産バクテリア（例、E.col）へのセルロース遺伝子の統合 ・植物病原微生物（例、エルウィニアへのエタノール代謝の統合			長期
			現在	目標	
		リグノセルロースのエタノール回収率	> 90% （基質に依存）	90-95%	
		2.発酵が行われるセルロースの余分な細胞加水分解を伴う 2 段階プロセスの開発			短期
		現在	目標		
	酵素のコスト	0.18US\$/ $\frac{kg}{L}$ - エタノール	0.018US\$/ $\frac{kg}{L}$ - エタノール		
	副産物による抑制	1.解毒のための生物学的、物理的、化学的プロセスの開発			短期
2.遺伝子工学による副産物の耐性生産菌株開発			長期		
		現在	2007 年	目標	
エタノール生産コスト	0.32US\$/ $\frac{kg}{L}$ EtOH	0.262US\$/ $\frac{kg}{L}$ EtOH	> 0.21US\$/ $\frac{kg}{L}$ EtOH		

ABE 製造	菌株の劣化	遺伝子局在性の決定と、任意遺伝子をゲノムに固定して組み入れる		中期
	高価な炭素源	1.リグノセルロースで成長させる生産菌株の遺伝子工学		長期
		2.発酵培養液の再利用		
			現在	
	ブタノール生産コスト	0.55US\$/kg ブタノール	> 0.44US\$/kg ブタノール	
	高価な生産物の回収	ナノろ過のように生産物をより効率的に回収する方法の開発		中期
光合成	耐久性不足	新鮮なタンパク溶液を使って細胞洗浄をするプロセスの開発		長期
	低効率	より厚いタンパク質層の開発		長期
			現在	
	効率	1%	20%	
全てのバイオ・プロセス	伝統的な化学産業の人的資源はバイオ・プロセスの導入に対する能力を欠いている	1.技術者向けの特別上級者コース		短期
		2.バイオテクを既存カリキュラムに組み入れる		中期
	規則やフレーム・コンディションはしばしば石油化学への代替を好む	1.環境効果を含む原価計算の義務化		短期
		2.環境にやさしく、保持され/もしくは、拡大できるエネルギー源への助成金		短中期

3. 水素

技術の現状

生物学的に水素を製造するためには、3つの異なる代謝原理が利用できる。この全ては基礎研究の段階である。産業的な利用は2030-2040年頃に期待される。

表2 3種類の生物学的な水素製造の特徴

種類	代謝	生物体	光の必要性	電子の供与体	生産物
生物光分解水素製造	好氣的光合成	緑藻類、シアノバクテリア	必要	水	水素、酸素
水素の光生成	嫌氣的光合成	光合成バクテリア	必要	有機化合物 または還元硫黄物	水素、CO ₂ 、酸化硫黄物
バイオマスからの発酵による水素製造	発酵	発酵バクテリア	不要	有機化合物	水素、CO ₂ 、有機物

(出典 : Reiß and Hüsing 1993)

将来展望

- ・生物光分解による水素製造は、生物学的水素製造の理想的な方法である。しかしながら、主要な酵素であるヒドロゲナーゼとニトロゲナーゼの複雑な調節機能¹のため効率が悪い。遺伝子工学（例えば、水素製造酵素の特定活動を強化する、競合する代謝経路を不活性化する）を用いたり、無細胞系²を開発することにより生産菌株は最適化されるであろう。
- ・電子供給源として有機化合物が求められるので、光生成と廃水処理で用いられる発酵とのカップリング。
- ・基質と発酵生産物の統合的な利用のための戦略の整備。
- ・生体電子的燃料電池の開発。

水素のための重要事項

- ・理論的最大値を目指したプロセスの効率の向上（現在の効率は5%、経済的競争力として望ましい効率は10%）。
- ・プロセスの長期的な安定性の向上。
- ・環境に優しい基質、水、栄養物の供給。および最終的に生じるバイオマスの使用を含む商業的な製造プラントのコンセプトの開発。これまでの経験は、実験室規模の研究からしか得られていない。

4. エタノール

技術の現状

- ・世界では年間3,100万m³のエタノールが生産されている。その90%以上が発酵によって生産されている。国別では、米国が世界の65%を生産している。
- ・バイオエタノールプログラムや特定の規制（例、EUのガソリン混合に関する指令）の拡大により、（2001年に比べ）2006年までに40%以上の増加が見込まれる（図1参照）。
- ・世界の生産量の3分の2が燃料部門で用いられている（図2参照）。

¹ シアノバクテリア（別名ラン色細菌、ラン(藍)藻）の水素代謝に関係する酵素はヒドロゲナーゼとニトロゲナーゼである。ラン色細菌や緑藻を利用する場合、ヒドロゲナーゼは水素発生だけでなく水素の再吸収にも働く。また、ラン色細菌は、ニトロゲナーゼによって生じる水素をヒドロゲナーゼにより再吸収、再利用している。ヒドロゲナーゼはニトロゲナーゼ反応により生成する水素の再吸収に働くので水素生産の妨害となっている可能性が高く、その活性抑制が水素生産性向上につながると考えられている。

² Cell-free system(s)：細胞から取り出した細胞質と/もしくは核成分のことを指す。試験管内での蛋白質合成や転写、DNA複製および他の目的で使用されている。

図1 世界のエタノール生産量(2001年、2006年)

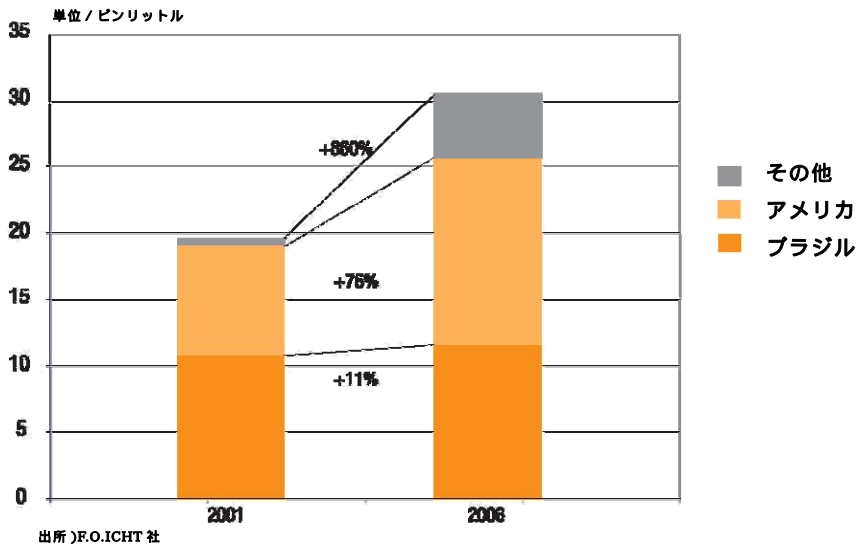
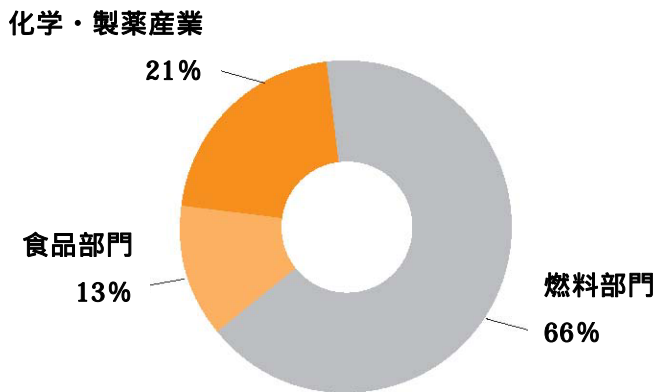


図2 エタノールのセクター別使用割合



- ・サトウキビ、テンサイ、トウモロコシ、ジャガイモを原料とするプロセスは確立している。発酵は一般的には、大規模発酵槽で酵母発酵が行われ、その後、生産物を取り出すために蒸留が行われる。製造コストは生産物ベースでリットルあたり0.85-1.20ユーロ、原料ベースでリットルあたり0.24-0.32ユーロである。
- ・現在、安価な生原料としてリグノセルロースを用いる発酵の基礎研究が行われている。これにより、エタノールの製造コストが15セント/リットルまで低下するだろう。このプロセスでは、炭水化物を単糖類へ変換するために、セルロースの機械的破砕、硫酸加水分解、酵素加水分解の統合が必要である。

将来展望

- ・新たな（遺伝子を導入した）生産生物により、リグノセルロースを原料とするエタノール発酵が可能になるだろう（例、大腸菌類、クレブシエラ属オキシトカ、ザイモナス属モビリス）。経済的に安定したプロセスでは、砂糖からエタノールへの変換率は90～95%が求められる。
- ・1.5g/l・時間の体積生産性を持った植物病原性細菌（エルウィニア）へのエタノールの生合成機能の統合、またはエタノール生産性大腸菌類へのセルロース遺伝子の統合による、エタノール生産段階でのセルロース加水分解の統合。
- ・ラッカーゼ（酵素の一種）や菌類を用いる生物学的処理、化学処理（沈殿）、物理的処理（抽出、イオン交換）の（フェノール系）副産物の解毒方法の開発、または副産物耐性生産菌株の開発。

エタノールのための重要事項

- ・抑制物質を形成せず、コスト効率の高い、リグノセルロースから発酵性糖への加水分解（バイオエタノールの現在の製造コストは、約0.3ユーロ/l（エタノール）であり、原油由来の燃料と競争するためには、0.18ユーロ/l以下に下げることが必要である。）
- ・副産物（例えば、グリセリンやコハク酸塩）を生成せずに、全ての糖分（ヘキソースとペントース）を完全にエタノールへ発酵させる。
- ・汚染の回避。
- ・プロセスの段階数を最小化する。
- ・副産物の利用。
- ・年間を通じた生産プロセスを維持するための基質の多様化。

5. ブタノールおよびエタノール混入アセトン(ABE)

技術の現状

- ・発酵によるブタノールおよびエタノール混入アセトン(ABE)の製造は、20世紀前半においては産業的に重要であった。しかし現在では、石油化学プロセスに対し、経済的な競争力を失っている。
- ・ある程度の経済的なニッチ（すき間）戦略の下では、国家的な重要性は存在するかもしれない（例えば中国）。
- ・規則的なプロセスを明らかにするための、微生物クリストリジウム・アセトブチリカムに関する基礎的研究。
- ・伝統的なABE発酵は、炭素源として糖蜜、トウモロコシ、マッシュポテトを用いる厳密な嫌気性バッチ・プロセスである。このプロセスは汚染しやすいので、殺菌する必要がある。初期の成長期の後、静止期に繋がる過渡期でソルベント生成が起きる。最終生産物濃度は、ブタノールを最大12g/l含んだ20 g/lである。アセトン、ブタノール、エタノールの比率は3:16:1である。

- ・最終生産物濃度は、クリストリジウム・ベイジェリンキの特異な変異菌によって、33 g/lのABE（比3:16:1）まで増加する可能性がある。
- ・後処理プロセスおよび生産物の回収は蒸留によって行われる。

将来展望

- ・無限（または非常に多くの）の培養経路のため、溶剤生成能力を維持する生産菌株の開発。生物体に関する知識と溶剤生成に含まれる遺伝子の配置が、遺伝子工学による安定的な菌株の生産を可能とする。
- ・改善された発酵技術またはファージ抵抗性菌株（ファージ免疫性）の開発による、ファージ汚染回避のための効率的な方法の開発。
- ・蒸留やナノろ過による生産物回収の最適化。
- ・例えばバイオテクノロジーを用いたポリヒドロキシアルカノエート（PHA）の製造のような、将来の発酵の基質として用いるために、残存発酵培養液（酪酸塩、酢酸塩、非回収ブタノール、バイオマス、蟻酸塩、乳酸塩を含む）のリサイクル。濃度が低いので、培養液を濃縮する方法の開発が必要。

ABEの重要事項

- ・より安価で利用が容易な原材料の産業的開発による生産コストの低減。
- ・コストを抑えた生産物回収のための、エネルギー効率の高い後処理プロセスの開発。
- ・長期プロセスの安定性と再生産性の改善（例、ファージ汚染および生産菌株劣化の回避）。
- ・産出量および最終製品濃度の理論限界値への実用プロセス値の接近。
- ・全ての発酵生産物の完全かつ高度な利用。

6. 光合成

技術の現状

- ・原理：ほうれん草から取り出した光合成タンパク質（約20億個）と細菌ロドバクター・スフェロイデスが集められ、ガラスサポート（支持台）の上に置かれる。ガラス基板は透明な電極であるインジウム・スズ酸化物でコーティングされている。タンパク質は合成膜に内包され、有機半導体の柔らかな層で覆われる。そして、この上を銀電極で覆う。
- ・寿命：3週間
- ・効率：1%（従来型のシリコン電池は20%）、期待される効率：20-30%
- ・主な課題：タンパク質層が非常に薄いため、光がデバイスを通り抜けてしまう。

将来展望

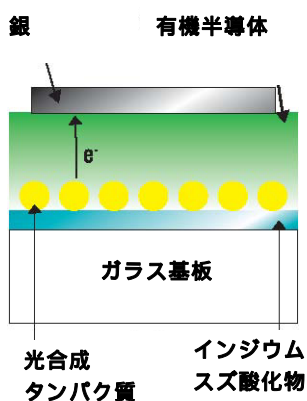
- ・自己修復タンパク質から作られ、かつ新鮮なタンパク溶液で満たされた、より耐久性の長い光電池。

- ・より安価で環境に優しい生物電池の製造。

光合成のための重要技術

- ・発電量を増加させるためにはデバイス中に多くのタンパク質を密封する必要がある
生物太陽電池の効率は、従来型のシリコン太陽電池に比べ非常に小さい。
- ・生物太陽電池の寿命は、現在のところ従来型のシリコン太陽電池に比べ非常に短い。

図3ー人工光合成太陽電池



グリーンマシーン。このプロトタイプの太陽電池では、光合成タンパク質（黄色のペプチドに組み込まれた球）は光を吸収し、電子（ e^- ）を銀電極へ供給する。

(出所：M. Baldo)

以上

翻訳・編集：NEDO情報・システム部

(出典：EUROPEAN COMMISSION：Energy Scientific and Technological Indicators and References, http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/estirbd_en.pdf, pp.91-97.

この報告書の完全版は以下で利用可能である：

http://www.eu.fraunhofer.de/estir/ESTIR_summary.pdf)