

【産業技術】**ナノテク**

水素生産の太陽エネルギーと風力エネルギー技術 その6 光バイオ水素生産(米国)

5.0 光バイオ水素生産

微生物は、有機化合物や水から水素を生産するために光合成の経路を使用することができる。太陽資源からの水素の効率的な生産を促進するためには、これらの経路は単細胞の緑藻類やシアノバクテリアの合理的な設計、菌株開発、さらに菌株の最適化などを必要とする。光合成微生物はもう一つの興味ある経路を提供する。しかし、この技術は非常に初期の研究段階にあるので、この報告書ではその詳細は検討しない。

5.1 光バイオ技術の現状

光バイオ水素生産は研究の初期段階にあるため、現在の水素コストを正確には評価できない。この経路は、高速で高変換効率で水素を生産できる微生物を、識別しあるいは設計することから始まるいくつかの技術的な挑戦を示す。

光バイオ水素生産は、高純度の水を必要とせず、有毒な副産物や汚染副産物を生成しない。¹ 光バイオ水素生産は、バイオマス生産に関係する生化学ステップでの非効率性を回避できるので、バイオマスを育てるために太陽エネルギーを使用し、その後バイオマスから水素を生産するよりも、理論上より効率的である。しかしながら、そのような効率的な生物学的能力は、これまで知られているどのような自然に発生する生物でも起きていない。太陽光の下での連続水素生産のためのこのアプローチを十分に評価するために、制限因子を識別し改善するために基礎的な分子研究が必要である。²

光バイオ水素生産は、将来の水素経済に大きく貢献する可能性を持つが、試験規模の光バイオシステムを評価する前に主要な問題を克服しなければならない。水素への光エネルギーの変換における水素生産および効率の向上した動力学を含んで、強健な代謝経路を持つ微生物を識別し開発するための、実質的な生物学への取り組みが実施されている。³

¹ Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program: Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan - Planned program activities for 2003-2010, DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, March 2005, p. 3-9.

² The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs, Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Research Council and National Academy of Engineering, 2004, p. 233.

³ Ibid.

"水素プログラム"の目標は、システム持続可能性のための下記の技術的目標の達成により、2015年までに、他の技術に対して長期的にかつ競争的である水素の生物学的生産の実現可能性を確認することである。

表 5.1 : 水からの光分解バイオ水素生産の技術目標⁴

特 性	単 位	2003 年 の 状 況	2010 年 目 標	2015 年目標 (継続/中止の決定)
入射太陽光エネルギーの 利用効率 (E0*E1)	%	10	15	20
水から水素への入射光 エネルギー効率(E0*E1*E2)	%	0.1	1	5
連続光生成の持続時間	時間単位	利用不可	30 min	4 h
酸素耐性 (空気中での半減寿命)	時間単位	1 s	10 min	2 h

注：効率は下記の変換ステップに関係している： E0 E1 E2

太陽光→吸収光→電子→H₂

表中の E0 は、光反応器の光収集効率ならびに太陽入射光の一部分のみが光合成で活性であるという事実を反映している。理論的な最大値は 45%である。

E1 は、藻類が吸収した光子のエネルギーを化学エネルギーに変換する効率である。つまり、化学ポテンシャルで、理論的な最大値は 71%である。

E0*E1 は、化学ポテンシャルに入射太陽光の変換効率を表す。理論的な最大値は 32%である。

E2 は、吸収された光子によって生成された化学ポテンシャルが水素に変換される効率を反映する。理論的な最大値は 41%である。

E0*E1*E2 は、入射太陽光の水素への転換効率を表す。水が基材である場合の理論的な最大値は 13%となる。数字はすべて最大効率である。

水素のコストは、将来の資金提供を保証するかどうか判断するために、2015年の研究開発プロジェクトの継続/中止の決定の一部として評価される。この表の目標は研究の進み具合を確認するためのものである。この技術の最終目標は、将来の自動車や燃料技術と競合し得るコストに達することである。

⁴ Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program: Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan - Planned program activities for 2003-2010, DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, March 2005, p. 3-16.

光バイオ水素生産において、連続的水素生産を達成するという主要な研究の挑戦は、酸素耐性ヒドロゲナーゼによるかあるいは付随酸素の発生による活性培養操作によって、好気状態の下で作動する生物システムを開発することである。光合成微生物の場合には、主要な研究の挑戦は、より多くの水素をより少ない副産物で生産するために、ヒドロゲナーゼと競合し得る生物学的メカニズムに減らすことである。

水素の生成に触媒作用を及ぼすヒドロゲナーゼ生物酵素に特有の4つの障壁が、現在生物学基盤光合成水素生産の難問として存在する。

- (1)プロトン勾配の集積による光合成水素生産の制限、
- (2)二酸化炭素による光合成水素生産の拮抗的阻害、
- (3)効率的な光合成活性のための炭酸水素イオン結合の必要性、そして、
- (4)藻の水素生産での酸素による電子の競合的排出、である。

これらの難問に取り組むために生物システムでこれらの変更を設計可能とする一方で、生物システムによって行われる分子レベルプロセスの理解が、非バイオ基盤光合成プロセスを設計するためのドアを開くであろう、それによりこれらの難問を回避することが可能かもしれない。バイオ模倣材料やシステムにおける自然プロセスの利用は、代替エネルギー戦略においてこれらのプロセスをより広く応用可能にする効率および頑健性への必要な改良をもたらすであろう。

5.2 光バイオ技術の障壁

バイオ水素生産の多くの技術は利用可能である。しかし、現在はまだ開発の非常に初期段階にある。個々の技術と関係する技術障壁は克服されなければならないし、統合モデルが開発されなければならない。また、システムを設計する前に、集積システムに関する障壁が識別されなければならない。より詳細な議論は、"水素経済のための基礎研究の必要性"、DOE 科学局、2003年5月、pp.89-94、ならびに、"太陽エネルギー利用のための基礎研究の必要性"、DOE 科学局、2005年4月、pp.121-133に掲載されている。

表 5.2 : 水素のバイオ生産への障害⁵

- 光利用効率

光バイオ水素生産に使用される微生物は、光を捕捉するアンテナ色素分子の大きな配列を持っている。明るい太陽光の下では、アンテナ色素、光合成電子装置によって利用することが可能な量よりも、さらに多くの光を吸収する。その結果として、吸収した太陽光の80%以上が熱放散や損失ということになる。水素生産のためのより良いまたは改良した光合成生物の同定を含み、光変換効率を増加させるための方法を識別するための研究が必要である。

- 水素生産速度

光合成微生物による現在の水素生産速度は商用化には低すぎる。低い生産速度は、
 (a) 光合成膜を横切るプロトン勾配の非散逸性。この勾配は嫌気条件の下で水からヒドロゲナーゼ(水素を生産する酵素)への電子伝達中に作られる。また、
 (b) 還元体のための競合する代謝フラックス経路の存在、による。
 水素生産の速度を大きく増加させるために、チラコイド膜を横切るプロトンチャンネルの挿入のような、抑制代謝経路に打ち勝つ遺伝子的手段を使用しなければならない。水素生産に触媒作用を及ぼす酸素耐性ヒドロゲナーゼを持つ好気条件の下で、炭酸固定とヒドロゲナーゼの競合が取り組まれなければならない。

- 光生産の連続性

水素を生産する藻類は酸素を同時に生産する。それはヒドロゲナーゼ酵素活性を抑制する。可能性としては、(a)それほど酸素に敏感でない酵素を識別したり設計することにより、または、(b) 酸素と水素の生産サイクルの分離により、あるいは、(c) 様々な手段によって呼吸(P/R)に対する光合成の比に影響を与えることにより、酸素を媒質に蓄積させないで、光合成の量子収量を維持し、また、十分なヒドロゲナーゼ活性を達成させることにより、この抑制を緩和する必要がある。

- システム工学

光分解水素生産技術のコスト効率の高い実証のための動作環境は、十分に評価されていない。水素格納用の安価な透明材料、水素収集システム、水素/酸素混合ガスの蓄積阻止、同時生産される水素と酸素ガスの分離、連続バイオリクター運転、単一培養の維持、必要な土地面積および資本費用などに関する解析と研究が必要である。

- 日周期性運転の限界

光分解プロセスは、太陽光に依存するので不連続であり、夜間は利用不可能で、曇りの日の低い強度でのみ利用可能である。高い短期生産率および大きな水素貯蔵の必要性を提供するためには、大型施設用の資本費用増大ということになる。必要資本量を最小化するために設計オプションを注意深く解析する必要がある。

⁵ Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program: Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan - Planned program activities for 2003-2010, DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, March 2005, pp. 3-22 and 3-23.

5.3 光バイオ研究集中領域

DOE は、多くの研究機関で水素光バイオ経路に関する研究に資金提供している。研究は、連続生産プロセス効率および持続時間を含む非常に重要な問題を目指している。

表 5.3 : 光バイオ研究集中領域

研究集中領域	DOE 設立プロジェクト(a)
光利用効率	カリフォルニア大学バークレー校
水素生産速度	オークリッジ国立研究所 モンタナ州立大学(b)
光生産の連続性	国立再生可能エネルギー研究所 J. クレイグ・ベンター研究所
システム工学	アドバンストバイオニュートリション社(b) 国立再生可能エネルギー研究所
バイオ着想生産の基礎研究	ワシントン大学 ジョージア大学 ペンシルベニア州立大学 ペンシルバニア大学 オクラホマ大学 国立再生可能エネルギー研究所
日周期性の運転限界	無し

a) このプロジェクトは DOE によって立ち上げられ、研究集中領域を支援する議会指示プロジェクトを含んでいる。すべてのプロジェクトは付録で見つけることができる。

b) このプロジェクト実施者は競争的に選ばれている。しかし、プログラムの目標に寄与しない議会指示プロジェクトのために現在プロジェクトに資金提供されていない。

5.4 光バイオ技術への提言

光バイオ分野の最近の業績は、太陽光吸収エネルギーの光バイオ効率を 2003 年の 5% に比較しておよそ 15% までに増加させた。また、酸素耐性は 40%-50% の増加を達成したことを含む。

DOE の提言(歳出予算が前提) :

1. 科学的基礎を改善し、バイオ経路が直面する技術的な問題を克服するために、基礎および応用研究と開発の連結を継続すること。
これらの経路は、将来の持続可能な水素生産ルートの見込みを提供する。
2. 2010 年の中間技術目標を目指しに際して、太陽スペクトルの利用を最大限にするために、異なるバイオ水素生産プロセスを統合するための実現可能性を調査し、バイオマスと発酵製品を効率的に再利用し、日周期性の運転限界に打ち勝つことを含んでプロセスの経済性を改善する。

以上

翻訳 : NEDO 情報・システム部

(出典: Solar and Wind Technologies For Hydrogen Production - Report to Congress, December 2005 (ESECS EE-3060), pp28-31,

http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/solar_wind_for_hydrogen_dec2005.pdf)