

特集

環境バイオテクノロジー： 素材・エネルギー・保全へのアプローチ（Ⅱ）

微生物による水素生産

若山 樹

2008年7月、過去最高値である147 USD/bblを記録したNY-MEXのWTI原油価格は、急落後、現在70 USD/bblを超えるまでに続伸している¹⁾。このような、数年前の2～3倍の価格となる原油価格の高騰は、微生物による水素生産を含む新エネルギーの導入に現実味を帯びさせている。

BioHydrogen（バイオ水素）と称される微生物による水素生産技術は、エネルギー、バイオマス（廃棄物）や二酸化炭素を地産地消する水素社会システムの構築に資する技術である。特に、エネルギーの価格や廃棄物の処理費用が高額かつ環境を維持・保全することが必須な島嶼地域などに適している技術と考えている（図1）^{2,3)}。

バイオ水素は、生物機能によって直接製造した水素と分類されており、バイオマスを熱化学的に変換して得られた水素などに関しては現時点においてバイオ水素には分類されていない（図2）。

バイオ水素技術は歴史的にも古く、国内外で研究開発や実証研究が進んでいるため、すでに実用段階に達していると思われる。我が国のエネルギーセキュリティを維持する上でも一定の普及促進が必要である。本論において、IEA（国際エネルギー機関）-HIA（水素実施協定）における活動、国内外の技術開発動向やその普及可能性について概説する。

水素を生産する微生物

水素生産が可能な微生物は、光合成によって光に依存したエネルギー獲得を行う光合成微生物から、発酵や呼吸の際、有機物や無機物を酸化することによってエネルギーを得る嫌気性細菌などの非光合成微生物まで広範囲に分布している。さらに光合成微生物は、光エネルギーを用いた水分解によって水素を生産できる藻類や藍色細菌と、バイオマスに含まれる糖や有機酸を分解して水素を生産できる光合成細菌とに分類される。これらの光合成微生物は、無尽蔵な太陽光をエネルギー源に利用することが可能であるため、水やバイオマスからの水素製造システムの高効率化技術の開発や光エネルギーを効率的に供給可能なさまざまな形状のフォトバイオリクターの開発を目的とした研究が精力的に進められている⁴⁾。

嫌気性細菌を用いて水素を製造する場合、水素製造のエネルギーは使用するバイオマス中の有機物によって供給されるため、光エネルギーの供給は不要である。よって、製造する水素量は、設置面積ではなく設置される発酵槽の体積で決まるため、コンパクトなシステムの構築

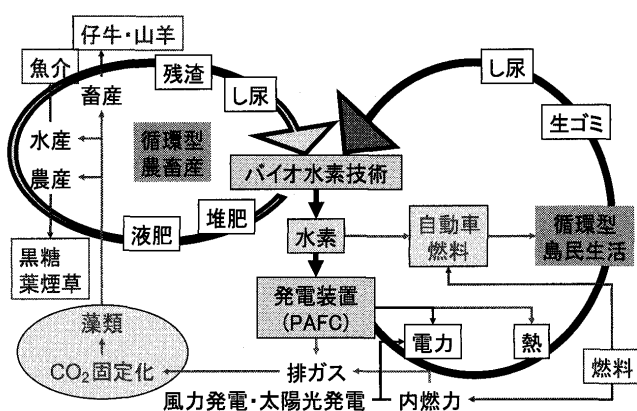


図1. バイオ水素による地産地消システム

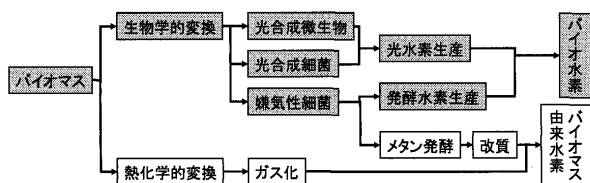


図2. バイオ水素に関する技術領域

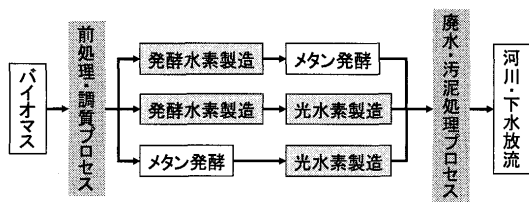


図3. バイオ水素多段階システム

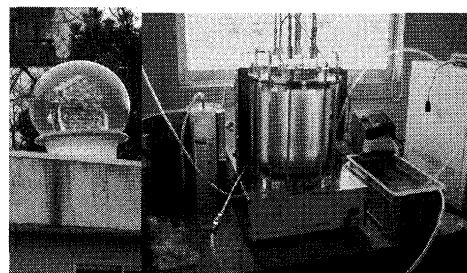


図4. 屋上に設置した太陽光集光装置と光ファイバーを用いた内部照射式リアクターによる光水素生産

が可能であることが最大の長所である。高収率な新規微生物の探索、二段発酵などの未分解有機物の有効利用が試みられている。また、さまざまな微生物から成る複合微生物群として、実廃水を用いた実施例も多く存在し、技術的にはすでに実用化が可能と思われる。

また、バイオ水素生産システムでは、各々長所・短所を有するさまざまな微生物を、混合もしくは多段階に利用することも可能であり、お互いの長所を生かし、短所を補完したシステムを構築することが可能である。原料となるバイオマスの特性に応じて、複数の微生物を多段階に用いることにより、対象となるバイオマスの幅を拡充できる（図3）。

さらに、微生物の代謝においては、化学エネルギーを電気エネルギーなどに高効率で変換できるため、微生物の機能（酵素や光電変換器官）を活用した水素発生用バイオ分子デバイスやバイオ・微生物燃料電池の開発も進んでいる⁵⁾。

バイオ水素生産システムの開発

バイオマスを原料に、嫌気性微生物や光合成細菌を用いたバイオ水素技術のシステム構築を目標とした開発・評価が政府予算など実施されている。

NEDO「水素安全利用等基盤技術開発/水素に関する共通基盤技術開発—国際共同研究/微生物を用いた有機性廃水からの実用的・高効率水素生産方法の研究開発（産総研、ワーゲニンゲン大、三重大生物資源、日大理工など）FY2007-2008」では、馬鈴薯デンプン廃液を原料に、前段に好熱菌（*Pyrococcus furiosus* DSM3638）を使った水素発酵生産、後段に光合成細菌（*Rhodobacter sphaeroides* RV）による光水素生産を設置したシステムを検討している⁶⁾。前段で $3.5 \text{ mol-H}_2/\text{mol-glucose}$ 、後段で $0.6 \text{ mol-H}_2/\text{mol-glucose}$ 、計 $4.1 \text{ mol-H}_2/\text{mol-glucose}$ が得られている（図4）。

環境省「地球温暖化対策技術開発事業/食品廃棄物のバイオ水素化・バイオガス化に関する技術開発（広島大学、島津製作所、サッポロビールなど）FY2007-2009」では、広島県北広島町のタカキベーカリー千代田工場から廃棄

されるパン、余剰パン生地や周辺地域の食品廃棄物などを原料に、前段に世界最大規模の水素発酵槽（ 5 m^3 ）、後段にメタン発酵を組み合わせた実証プラント規模のシステムを構築し、総合的なエネルギー回収効率を検討している⁷⁾。このシステムでは、 2.67 t/d の廃棄パンから $145 \text{ Nm}^3\text{-H}_2/\text{d}$ （ 30 m^3 の水素発酵槽）、 $514 \text{ Nm}^3\text{-CH}_4/\text{d}$ （ 60 m^3 のメタン発酵槽）が得られることが見積もられている。また、サッポロビールでは、当該プロジェクトや先行プロジェクトである農林水産省の農林水産バイオリサイクル研究で培われた技術を活用し、ブラジルのペトロプラス社とセルロース系バイオマスからのバイオ水素生産の実証試験を実施する⁸⁾。

科学技術振興機構「独創的シーズ展開事業/大学発ベンチャー創出推進/新規水素発生菌によるバイオマスからの高効率/高速水素生産（横浜国大など）FY2007-2009」では、 $2.5 \text{ mol-H}_2/\text{mol-glucose}$ のポテンシャルを持つHN001株を使用するバイオ水素生産システムの展開を目標とした実証プラント（ 1 t/d ）の検討が進められている⁹⁾。原料の生ゴミなどを 50°C の中温高速発酵させる。また、 100 t/d 規模のFSも実施する予定である。

日本大学「学術研究助成金（総合研究）/微生物コンソーシアを利用した環境改善に関する研究開発（日大理工、日大生産工、（株）KRI、ロシア科学アカデミー）FY2008」においても嫌気性微生物と光合成細菌の組み合わせによるグルコースからの光水素生産が検討されている¹⁰⁾。光合成細菌（*Rhodobacter sphaeroides* RV）とクモノスカビ（*Rhizopus oryzae* NBRC 4707）の混合培養によって $8 \text{ mol-H}_2/\text{mol-glucose}$ を超える収率が得られている（理論収率は $12 \text{ mol-H}_2/\text{mol-glucose}$ ）。

英国（グラモーガン大など）では、小麦デンプン廃液を原料に前段に水素発酵槽、後段にメタン発酵槽を設置したシステムを検討している。 1 t の小麦デンプン廃液（デンプン24%）から約 $60 \text{ m}^3\text{-H}_2$ と $240 \text{ m}^3\text{-CH}_4$ が得られることが試算され、現在パイロットプラントで実証中である¹¹⁾。

特 集

バイオ水素生産デバイスの開発

嫌気性微生物, 光合成微生物, 光合成細菌の水素生産酵素や光合成器官を用いる水素生産用のバイオ分子デバイスの構築を目標とした開発が政府予算など実施されている。

NEDO「水素安全利用等基盤技術開発/水素に関する共通基盤技術開発—国際共同助成研究/水素発生用バイオ分子デバイスの開発(ルール大ボッフム, 産総研, CNRS) FY2001-2003」では, 紅色硫黄性光合成細菌(*Thiocapsa roseopersinica*)などのヒドロゲナーゼと好熱性藍色細菌(*Thermosynechococcus elongatus*)などの光化学系を電極基盤上に三次元的に積層し, 光駆動型の水素生産反応を確認した。当該PJに参画した欧州の研究者は, 以下の欧州予算など獲得に成功し, 当該研究分野を牽引している。

The New and Emerging Science and Technology (NEST)-6th Framework Programme (FP6)「Solar-H(ルール大ボッフム, ウプサラ大, ワーゲニンゲン大など) 2005-2007」, NEST-FP7「Solar-H2(ウプサラ大, ルール大ボッフム, ワーゲニンゲン大など) 2008-2012」¹¹⁾では, 水素生産用デバイスの構築を目標とし, 高効率な光合成系の構築, 水分解系の高効率化, などの研究を実施している。なお, FPの予算元はEC(European Commission)傘下のCORDIS(the Community Research and Development Information Service for Science, Research and Development)となる。

IEA-HIAにおけるバイオ水素生産への取り組み

国際エネルギー機関(International Energy Agency, IEA)の水素実施協定(Hydrogen Implementing Agreement, HIA)では, 21番目となるタスク(Task 21, 2005-2010)において, バイオ水素生産技術に関する研究開発・技術交流を支援している^{12,13)}。Task 21(幹事長:三宅淳)では, バイオ水素生産に関する技術分野を4つのサブタスクに分類し, 年2回の会議を通して, 各加盟国の委員(日本側委員は筆者と三宅淳)による各国および自身の技術開発動向や技術情報の交換, 国際共同研究の提案などを行っている。さらに, バイオ水素技術をバイオマスの賦存量が多いアジア地域に普及させることを目的とし, 研究者ネットワークの構築を試みている。

サブタスクA(Biohydrogen Systems)では, バイオ水素生産システム構築やシステム全体の評価を目的としている。サブタスクB(Basic Studies for Photobiological Hydrogen Production)では, 光合成微生物(藻類や光

合成細菌)と光エネルギーを用いた水やバイオマスからの水素製造システムの高効率化技術の開発を目的としている。サブタスクC(Bio-inspired Systems)では, 微生物が有する酵素やタンパク質を利活用した生体模倣技術・分子ハンドリング技術による光水素生産デバイス・燃料電池システムの構築を目的としている。サブタスクD(Overall Analysis)では, 21世紀の水素社会にバイオ水素生産技術を導入する際の技術的課題, 経済的課題, 政治的課題に加え, テクノロジーベースの社会的課題について分析することを目的としている。

各国の技術開発動向については, IEA-HIAの年次報告にまとめられている¹³⁾。

バイオ水素生産技術の普及可能性

バイオ水素やバイオエネルギーを含む新エネルギーや再生可能エネルギーは, 化石燃料が高騰した場合に普及拡大と言われていたが, 化石燃料の高騰は, プラント資材の高騰にもつながり, 普及拡大は進んでいない。現時点のバイオ水素技術ポテンシャル, 建築資材価格, 想定導入サイトなどの情報に基づいた複数のエンジニアリング会社などによる実プラント規模のFSを実施し, バイオ水素技術を再評価することが普及の鍵だと考えている。

一方, エネルギーやバイオ水素に関係する研究者においても個々の仮定条件, 試算条件, 原単位を用いて, バイオ水素の生産コストが試算されている。これらの値は, 試算条件を加味せず一人歩きを始めがちなため, 取り扱いには注意が必要である。

ニューサンシャイン計画で実施された環境調和型水素製造技術開発では, 水素発酵と光合成水素を組み合わせたシステムなど, さまざまなフォトバイオリクターと設置方法についてFSが実施されている。当時の200 kWのリン酸形燃料電池(PAFC)を稼働させるのに必要な $1,000 \text{ Nm}^3\text{-H}_2/\text{d}$ 以上を前提条件としたプロセスは, 原料の調整から水素発生, 廃水処理までを含んでいる(現在上市されている変換効率48%の100 kW-PAFCでも $73 \text{ Nm}^3\text{-H}_2/\text{h}$ 必要なので, 実際には $3,504 \text{ Nm}^3\text{-H}_2/\text{d}$ の生産規模となる)。水素製造コストは, 固定費(償却費:残存簿価の10%, 20年償却, 金利:建設費の2%, 補修費:建設費の2.5%, 保険など:建設費の2%, 一般管理費:建設費の15%, 変動費(原料費, 運転費(動力費, 人件費, 諸経費:動力費の10%))とし, 人件費は8,000千円/人, 電力量は装置の使用動力, 原料費は薬品などの必要投入量から積算法によって算出している。原料として有機性廃液($\text{BOD}=6,000 \text{ mg/l}$)を用いたFSでは, *Rhodo-*

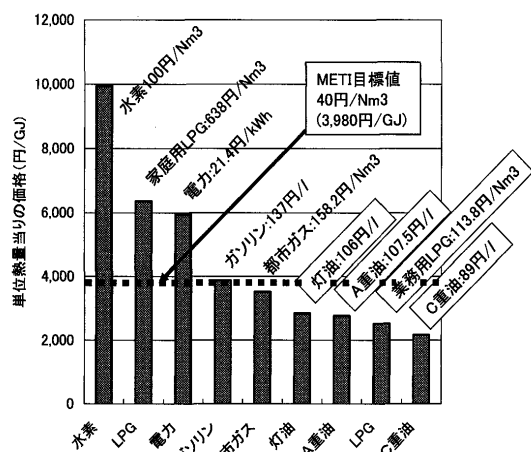


図5. バイオ水素の目標価格

bacter sphaeroides RV を用いた場合 (屋外における平均変換効率は1~2%), 約28 USD/GJ (約3,400 円/GJ) 以下と試算されている。なお、固定費が約70%, 変動費が約30%となっている。

当該モデルを CDM/JI プロジェクトとした場合, プロジェクトバウンダリーやベースラインの設定次第ではあるが, CERのコストを積算に加えられるばさらに安価になる可能性がある。一方で, バイオマスの収集コスト, 燃料電池など発電装置, 設備設置の土地収容費などは含まれていない。

オランダのワーゲニンゲン大 (2005年) では, 馬鈴薯デンプン廃液を原料として, 水素発酵によって 17 kg-H₂/h/450 m³ (70°C, 0.5 bar), 光合成水素によって 40 kg-H₂/h/12 ha (35°C, 2.5 bar) 生産 (8,000 h/y) した場合のコストを試算している。設備の償却, メンテナンス, 保険, 一般管理費などのいわゆる固定費がコストの約65%, 変動費に含まれる原料費 (バイオマス, 薬品) が約26%, 動力費 (電力)・人件費を含めた運搬費が約10%としている。日本の積算に比べて固定費が少なく, 原料費が多いが, 3.1 EUR/kg-H₂ (約370 円/GJ) と強気な試算がされている。また, オランダ主導で進めている欧州の HYVOLUTION プロジェクト (2006-2011年) では, 2004年までのパイロットスケールで 29 EUR/GJ (約4,060 円/GJ), 2020年の実証では 10 EUR/GJ (約1,400 円/GJ) を目標値としている。

来るべき水素社会における水素価格を 3,980 円/GJ (40 円/Nm³-H₂経済産業省目標値) だとすると, 試算ではあるもののバイオ水素技術も適用可能であることが解る (図5)。

おわりに

嫌気性微生物, 光合成微生物, 光合成細菌などを活用した生物学的水素製造技術は, 環境調和型かつ効率的なバイオマスに代表される再生可能資源のエネルギー変換技術である。技術的には実用段階に達していると思われるが, 発生した水素の用途が少ないなどから普及・導入が進んでいない。

一方, 豊富なバイオマス賦存量で知られる東南アジア諸国などでは, まだ電力グリッド網が隅々まで完備されていないため, 携帯電話が有線電話網の発達していない地域で先に普及したように, 分散電源用の燃料製造技術やエネルギー自立型の廃水処理設備が先に普及する可能性がある。もちろん, 国内より安価な設備コストなどが強く求められるため, 一層のコストダウン (生産効率の向上を含む) が必要である。また, 水素製造速度・収率, 効率など本来の技術課題を克服するとともに, コスト低減を可能とする新たな技術課題を克服することで, 生物学的水素製造技術が市場を拡大し, システムの導入が進捗すれば, バイオマスを原料とした高効率で小規模な分散型かつ化石燃料に依存しないエネルギーシステムを構築することが可能となると思われ, 来るべき水素社会の一翼を担うことが可能であると思われる。

文 献

- 1) <http://chartpark.com/wti.html>
- 2) 若山 樹ら: クリーンエネルギー, **18**(2), 24 (2009).
- 3) 若山 樹: 次世代バイオマスエネルギー最前線~藻類系バイオマスのエネルギー変換・利用技術/藻類系バイオマスからの水素製造技術とその利用, p.37, 技術情報センター (2008).
- 4) 若山 樹, 三宅 淳: 光合成微生物の機能と応用, p.247, シーエムシー出版 (2006).
- 5) 若山 樹ら: 日本化学会第 89 春季年会予稿集, 4S5-04 (2009).
- 6) <http://www.nedo.go.jp/informations/events/200623/23-24/kokusai5.pdf>
- 7) 中島田 豊, 西尾尚道: 燃料電池, **8**(4), 126 (2009).
- 8) <http://www.sapporobeer.jp/CGI/newsrelease/detail/00000133/>
- 9) 石川高広: 日本液体清澄化技術工業会, **45**, 5 (2008).
- 10) Asada, Y. et al.: *Int. J. Hydrogen*, Energy Special Issue: 2nd Asian Biohydrogen 07, in press.
- 11) http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP7_PROJ_EN&ACTION=D&DOC=91&CAT=PROJ&QUERY=011aa1a03e88:3444:4077d56a&RCN=85749
- 12) <http://www.ieahia.org/page.php?s=glance&p=tasks>
- 13) http://www.ieahia.org/pdfs/2007_annual_report.pdf