

# 生物学的水素製造技術の開発動向と可能性

若山 樹

(株) KRI, 環境・エネルギー技術コンサルティング部  
102-0085東京都千代田区六番町3, 六番町SKビル5F

## The Activity and the Potential of Biological Hydrogen Production in the World

Tatsuki WAKAYAMA

KRI Inc., Environment and Energy Technology Consulting Department,  
Rokuban-cho SK Bldg. 5F, 3, Rokuban-cho, Chiyoda, Tokyo 102-0085, JAPAN

‘BioHydrogen’, the production of H<sub>2</sub> by biological system, has been a massive stage of basic and applied R&D in the world. Even NEDO has begun to a funding to this research area again from end of last fiscal year. Also, the International Energy Agency (IEA)-Hydrogen Implementing Agreement (HIA) supported the BioHydrogen field and IEA-HIA approved Annex 21 (Biohydrogen) in 7/Oct./2005 to 5 years. Dark (Fermentative) H<sub>2</sub> production from waste and unused biomass has to be considered because this H<sub>2</sub> production method is, near future, first bridge to the actual use. Realization of practical processes for photo-biological H<sub>2</sub> production from water and organic wastewater using solar energy would result in a major. Finally, the social acceptance of BioHydrogen should be put on emphasis as a new research field. As the rise of energy prices, new energy like BioHydrogen came up to the stage of realistic method. We have to evaluate the feasibility of the technology taking every factor into consideration.

**Key words:** BioHydrogen, Fermentative H<sub>2</sub> production, Photo H<sub>2</sub> Production, Feasibility Study, Biomass

### 1. はじめに

BioHydrogen (バイオ水素) と称される生物学的水素製造技術は、近未来におけるエネルギーの地産地消に資する技術である[1]。バイオ水素は、生物機能によって製造した水素と定義しており、現時点では、バイオマスを熱化学的に変換して得られた水素はバイオ水素としていない[2]。

バイオ水素は、技術的には実用段階に到達していると言っても過言ではないが、実用段階の普及には至っていない。技術の普及に際しての向かい風として、原料となるバイオマスの確保(後述)、水素価格の比較対象が依然として化石燃料、発生させた水素の用途が無いなどが挙げられ、追い風として、化石燃料の高騰、CO<sub>2</sub>排出権など環境意識の向上(バイオ技術に対するアレルギーの減少)、小規模分

散電源の認識向上などが挙げられる。

バイオ水素は、世界各国で研究開発や実証実験が進んでいるため[3](図1)、本論において、技術開発動向やその普及可能性について概説する。

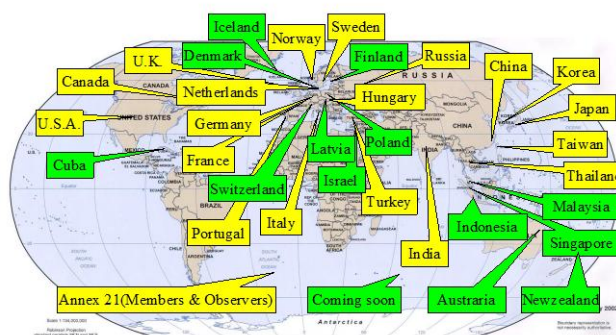


図1. バイオ水素の研究を行っている国々

## 2. 微生物によるバイオ水素生産とは

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が可能であることが最大の長所である。しかし、収率が低い、有機物を完全に分解できないなどの技術課題が有り、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、様々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、技術的には実用化が可能と思われる[4]。

一方、光エネルギーにより、水を分解して水素に変換できる光合成微生物（藻類や藍色細菌）や、廃水中などに含まれる有機酸を分解して水素を製造できる光合成細菌は、太陽光をエネルギー源に利用することが可能であり、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た研究開発が行われている。しかし、光エネルギーから水素への変換効率が低いことが技術課題となっている。原因としてそこで、律速因子の解明、遺伝子工学的改変、代謝制御などを検討するだけでなく、最適な培養工学的検討も行い、高効率な光水素生産を試みる。また、光エネルギーを効率的に供給可能な様々な形状のフォトバイオリアクターが研究に供されており、実用化レベルのPBRでは、太陽光の特性に応じたデザインとなっている[1]。

## 3. 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・評価が行われている（図2）。

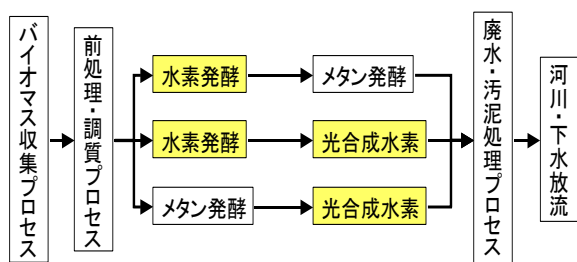


図2. バイオ水素多段階システム

英国（グラモーガン大など）では、小麦澱粉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の小麦澱粉廃液（澱粉24%）から約60 m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>と 240 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>を得られる事が試算され、現在パイロットプラントで実証中である。

オランダ（ワーゲニンゲン大など）では、馬鈴薯澱粉廃液を原料に、前段に好熱性の水素発酵、後段に光合成細菌による水素生産を設置したシステムを検討している（現在NEDO「水素安全利用等基盤技術開発事業の国際共同研究：微生物を用いた有機性廃水からの実用・高効率水素生産方法の研究開発」において産総研と共同研究中）。

日本では、NEDOのプロジェクト「高効率バイオマスエネルギー転換技術開発—水素・メタン2段発酵技術の開発—」では、産総研つくばセンターにおいて、産総研・鹿島建設らが、実廃水を用いた天然のマイクロフローラ（複合微生物群）による水素・メタン2段発酵のパイロットスケール槽を実証研究した。生ゴミ残飯（産総研食堂由来）と紙ゴミ（シュレッター済）から成る実廃棄物（50 kg/d）は、水素発酵槽（1.0 m<sup>3</sup>）に投入され天然のマイクロフローラ（0.4 m<sup>3</sup>）によって水素に変換される（1.0 Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/d）。水素発酵槽から排出される発酵残渣は、続く高速メタン発酵槽（0.5 m<sup>3</sup>）においてメタンに変換され（3.0 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/d）、有機物の分解率を高めている（いずれのデータも試験運転段階）。2段の発酵槽を合わせた変換効率（バイオマス→水素+メタン）は、55%を目標としていた。

農林水産省のプロジェクト（農林水産バイオリサイクル研究-微生物によるバイオ燃料電池交換技術の開発）では、静岡県焼津市にあるサッポロビール価値創造フロンティア研究所において水素・メタン2段発酵のパイロットプラント規模の実験が行われている（島津製作所、サッポロビール、広島大学ら）。廃棄パン、余剰パン生地などは、水素発酵槽に投入され水素生成細菌によって水素に変換される（1 m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/0.5 m<sup>3</sup>reactor/6 kg-solid/d）。水素発酵槽から排出される発酵残渣は、つづくメタン発酵槽においてメタンに変換され、有機物の分解を高効率にしている。両技術は、実用に足るバイオ技術を用いた水素製造技術として位置づけられる。

横浜国大では、システム販売会社の確保を目標とした実証プラント（1 t/d）による検討が進められている。原料の生ゴミなどを50℃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[4]。

4. バイオ水素生産の普及可能性

現時点のバイオ水素技術を用いた実プラント規模の詳細FSは実施されておらず、各々の研究者が各々の仮定、試算条件、原単位を用いてコストを試算している。よって、平準化も行えないため各研究者が発表している単位で普及可能性として紹介する。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、慎重に取り扱って頂きたい。既に一般的な技術となったと言えるメタン発酵装置においても、導入先や原料、処理規模によって、原料の単位重量あたりの設備コストは大きく異なる(図3)。

日本(1998年)では、RITEの環境調和型水素製造技術開発時に、水素発酵と光合成水素を組み合わせたシステム

など様々なフォトバイリアクターと設置方法についてFSが実施されている(表1、図4)。

表1. 試算の前提条件

項目	単位	値	その他
原料廃水量	m <sup>3</sup> /d	1,000.0	8 hr.
BOD	mg/L	6,000.0	
光合成反応槽			
増殖用	m <sup>3</sup>	2,080.0	
水素発生用	m <sup>3</sup>	198,000.0	
CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> ガス発生量	Nm <sup>3</sup> /d	880.0	嫌気
H <sub>2</sub> ガス発生量	Nm <sup>3</sup> /d	1,100.0	光合成
処理排水量	m <sup>3</sup> /d	1,000.0	24 hr.
BOD	mg/L	20.0	目標
SS	mg/L	30.0	目標
排出汚泥量	m <sup>3</sup> /d	4.3	
排出汚泥SS	mg/l	20,000.0	
年間施設稼働率	%	70.0	

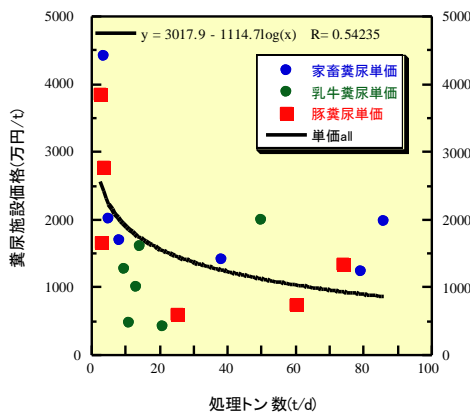


図3. メタン発酵装置の価格

200 kWの燃料電池を稼働させるのに必要な1,000 Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/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。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%)と変動費(原料費、運転費(動力費、人件費、諸経費: 動力費の10%))し、人件費8,000千円/人とし、電力量は装置の使用動力から、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(BOD=6,000 mg/L)を用

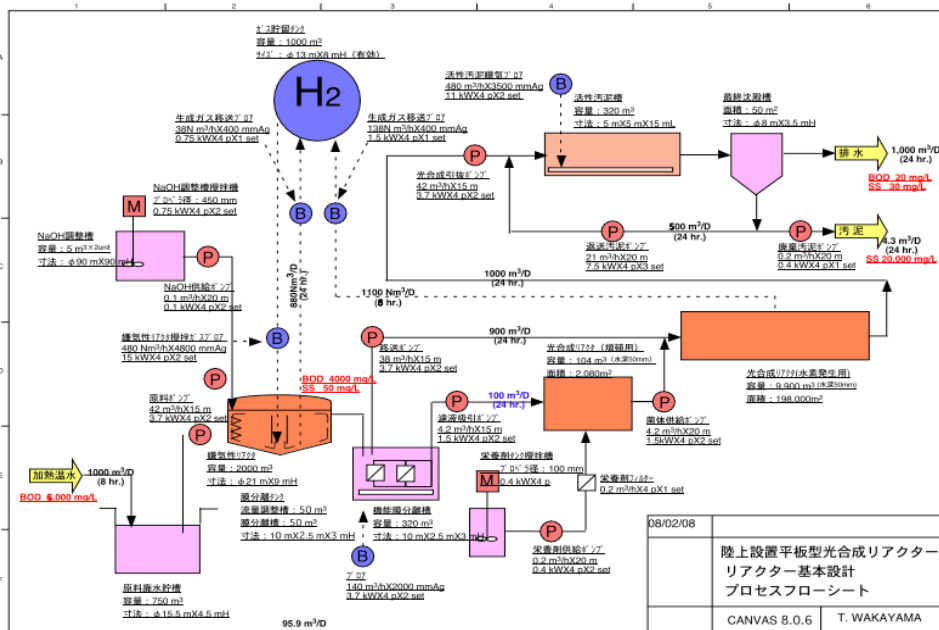


図4. バイオ水素システムのプロセスフロー

いたFSでは、*Rhodobacter 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(1 USD=120JPY)以下と試算されている（図5）。なお、固定費が約70%、変動費が約30%となっている。

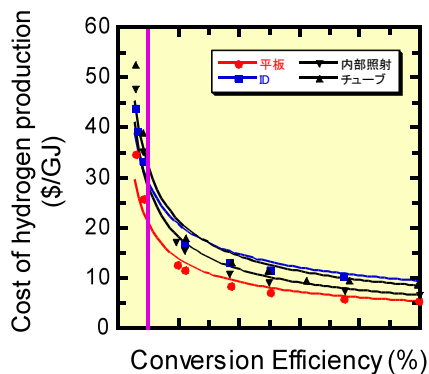


図5. バイオ水素のコスト試算（日本）

ベースライン如何ではあるが、CERなどを積算に加えられれば更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（2005年）では、前述の原料を用い水素発酵によって17 kg-H<sub>2</sub>/h/450 m<sup>2</sup>(70°C, 0.5 bar)、光合成水素によって40 kg-H<sub>2</sub>/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）・人件費を含めた運転費が約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、3.10 EUR/kg-H<sub>2</sub>と試算されている。オランダ主導で進めている欧州のHYVOLUTIONプロジェクト（2006-2011）では、2004までのパイロットスケールで29 EUR/GJ、2020年の実証では10 EUR/GJを目標値としている（図6）。

究極の分散電源として、バイオ水素（光合成水素）を一

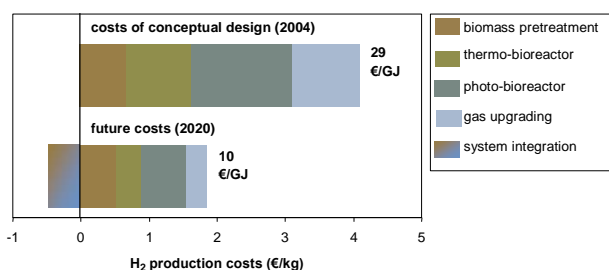


図6. バイオ水素のコスト試算（オランダ）

戸建て住宅に導入する際には、以下の変換効率が求められる。NEDOが公開している最適傾斜における国内の平均年間日射量を1,400 kWh/m<sup>2</sup>とすると1日平均日射量は3.8 kWh/m<sup>2</sup>となる。一方で、一戸建て住宅の屋根平均面積は、77 m<sup>2</sup>(国土交通省)とされていることから、一戸当たりの屋根が受けている太陽エネルギーは293 kWhとなる。一般家庭の1日の消費電力は10-15 kWhと言われているので、全ての電力エネルギーを光合成で賄う約3.5%以上の変換効率が必要となる。

来るべき水素社会における水素価格を3,700円/GJ（40円/Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>）だとすると、いずれの試算結果でもクリアしている事になる。もちろん詳細なFSの実施が不可欠であるが、バイオ水素=夢物語では既に無い事を理解頂きたい。

### 5. まとめ

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、環境調和型且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実証・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、分散電源の燃料製造技術としての可能性がある。しかし、より安価な設備コストなどが求められるため、一層のコストダウン（生産効率の向上）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01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且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事が可能であると思われる。

### 参考文献

1. 若山 樹：水素エネルギーシステム Vol.32, No.1 (2007) 22-26頁
2. 若山 樹：2007年度光合成微生物研究部会講演会資料
3. <http://ieahia.org/page.php?s=d&p=annual>
4. Abstract of The 2007 Asian Bio-Hydrogen Symposium/Asia Bio-Hylinks Meeting, Nov.9-11, 2007, Deajeon Korea
5. 化学工業日報1月25日10面（2008）