

# 発酵法によるバイオマス水素生産パイロットプラントの運転報告

Test Running of a Pilot Plant for Hydrogen Production  
from Biomass by Fermentation

横浜国立大学名誉教授 谷生 重晴  
Shigeharu TANISHO

## 1. はじめに

2014年4月、この原稿を書いている最中に、安倍政権は、民主党政権が掲げた「原発ゼロ」方針を変更し、原発を主要電源とするエネルギー基本方針を閣議決定した。しかし、2011年の東日本大震災による原発事故は、原子力によるエネルギー供給が非常に危険性を孕んだ選択であることを世界に知らしめた。その結果、地球温暖化を防ぎつつ安全性に信頼の置ける再生可能エネルギー利用が、強い関心を集めるようになった。なかでもバイオマスのエネルギー利用は、CCS (Carbon Capture and Storage、二酸化炭素の回収・貯蔵) 技術との併用で、大気中の二酸化炭素濃度を減らすこともできるという他の再生可能エネルギーにはない効果を併せ持つことから、期待が膨らんでいる。

とりわけ沖縄県は、島嶼地域であるがゆえに、ほぼ100%化石燃料に依存していることから、「沖縄県エネルギービジョン」、「沖縄県地球温暖化対策実行計画」など化石燃料依存度の低減、エネルギー供給源の多様化、エネルギー自給率の向上を基本政策に掲げ、再生可能エネルギーの開発に注力している。なかでも、沖縄県の基幹産業の一つである砂糖製造は、副産物として製糖量の25%にも上る廃糖蜜(糖蜜とも言う)を産出し、古くからエタノール発酵の原料に使用されていたので、バイオマスエネルギー源として発酵エタノール製造技術開発が大々的に行われた。しかし、低濃度の液体として生産されるエタノールの濃縮に、複雑で多くのエネルギーを消費する装置を必要とするため、製造コストを下げることができず、経済性を未だ持たせることができないでいる。

一方、筆者らは高速で発酵水素生産する新規バ

クテリア HN001株<sup>1)</sup>を2004年に発見し、基礎研究を重ねた結果<sup>2)</sup>、水素は気体で発生するので分離装置を必要とせず、糖-水素の変換速度が極めて速いこのバクテリアを使用すれば、小型で簡素なプラントで、廃糖蜜から経済性を持つ水素生産が可能であるという試算を得ることができた。そこで、2012年10月から2014年3月まで沖縄県の補助を受けて、糸満市にパイロットプラントを建設し検証を試みたので、その試運転結果を報告する。

## 2. パイロットプラントの建設

### 2-1 糖蜜から生産される水素のコスト計算

製糖工場の廃糖蜜を使用した発酵水素生産のコスト計算は、2012、2013年の水素エネルギー協会大会、2013年の第140回水素エネルギー協会定例研究会の予稿集<sup>3), 4), 5)</sup>で詳しく述べている。ここでは次のようないくつかの仮定の下で計算をしている。

①1Nm<sup>3</sup>の水素で得られる燃料電池の出力を1.5 kWh/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub> (LHVで50%、HHVで42%の変換効率)とする、②使用するバクテリア HN001株が1molのグルコースから生産する水素の収率を2.5mol-H<sub>2</sub>/mol-Glu.とする、③10m<sup>3</sup>の発酵プラントを燃料電池の購入費を含めて5,700万円と見積る、④プラントは10年間の均等償却、保守費は建設費の3%などである。

このような仮定の下に計算した水素生産のコストは、プラント償却費を含んでも30円/m<sup>3</sup>を切っており、償却費を含まないエタノールの期待生産コスト90円/Lより遙かに安く、十分経済性を持つと考えられた。



## 2-2 糖蜜-発酵水素生産パイロットプラントの仕様

写真-1に示した最大200kg/dの糖蜜処理能力を持つパイロットプラントを、沖縄県産業振興公社による「おきなわ新産業創出研究開発支援事業」の補助金を得て糸満市西崎町5-3-7に建設した。発酵槽は200Lの容積を持ち、培養液量160Lと80Lのいずれかで発酵操作が行える。廃糖蜜は、結晶化できなかった蔗糖とグルコース、フラクトースを約40%という高濃度で含むので、この処理能力で1日当たり最大24m<sup>3</sup>の水素生産が見込まれる。糖蜜の希釈には、カルキを抜き酸化還元電位を下げた市水を使用した。バイオガスは、数十Paの低圧力で発生することと、使用に合わせて一時的にガスを保留する必要があるため、簡便な1m<sup>3</sup>の貯留バルーンを備えている。

水素は燃料電池で発電すると非常に高効率でエ

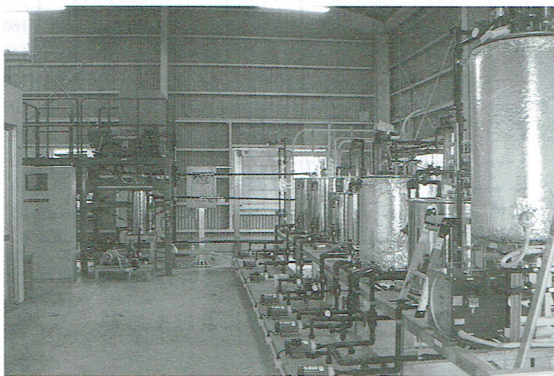


写真-1 発酵水素生産パイロットプラントの完成写真

ネルギー変換できることが知られているが、それは高純度水素を使用した結果であり、水素発酵ガスのように水素と二酸化炭素がほぼ等量混在する混合ガスを直接燃料電池で使用した研究はまだ世界の誰も行っていない。経済性を高めるため水素発酵ガスを直接1kWの燃料電池に供給して、安定的に発電出力を得るための制御技術開発を行いエネルギー変換コストの低減を試みた。

## 2-3 パイロットプラントの試運転結果

図-1は、完成したパイロットプラント(写真-1)の試運転結果である。24時間培養した160Lの発酵液から80Lの発酵液を抜き取り、新たに新鮮な培養液を80L加えて160Lの培養液にして24時間培養する半回分操作で運転したところ、糖蜜8kgからほぼ計算通り1.5m<sup>3</sup>のバイオガスが発生し、最大バイオガス発生速度は200L/hを超えた。バイオガスの水素濃度は53%であったので、水素は毎日約0.8m<sup>3</sup>発生し、最大水素発生速度は100L/h以上という非常に良い結果が得られた。発電は行っていないが、1kWh/d以上の電力が供給できる発生量である。この運転により、制御系および構造系の問題点が明らかになって、改良に必要な多くの知見を得ることができた。

## 2-4 パイロットプラントの長期運転結果

装置の不備な所を改良した後、バイオガスを連続的に生産するために、パイロットプラントでの

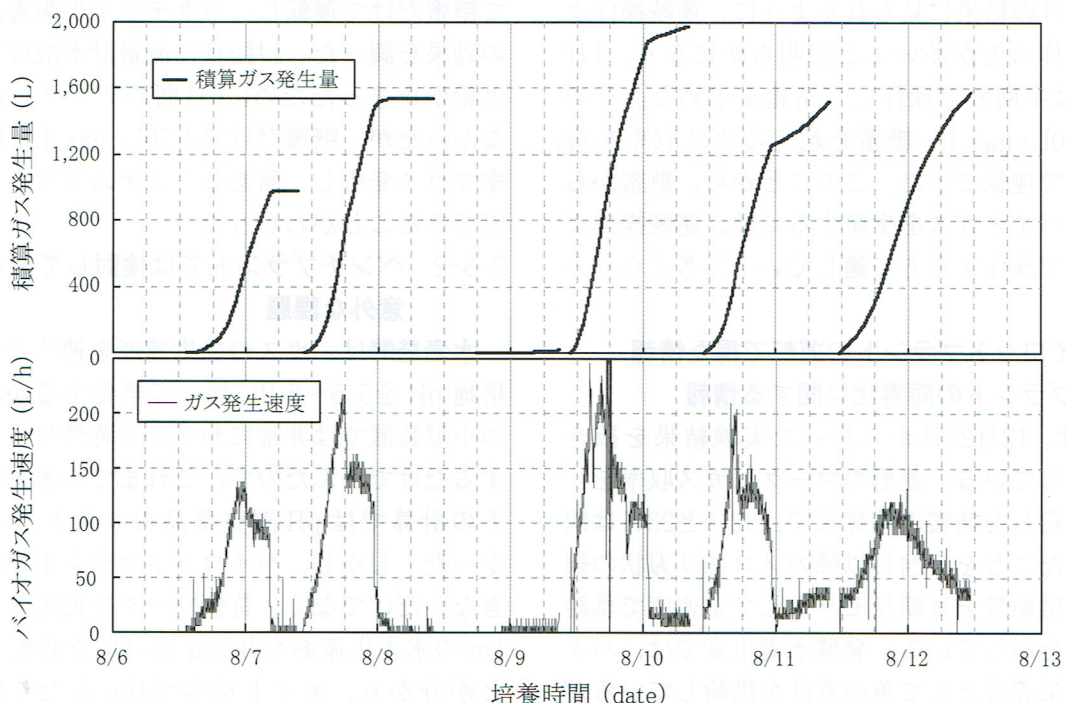


図-1 パイロットプラント試運転におけるバイオガス発生状況とガス発生速度



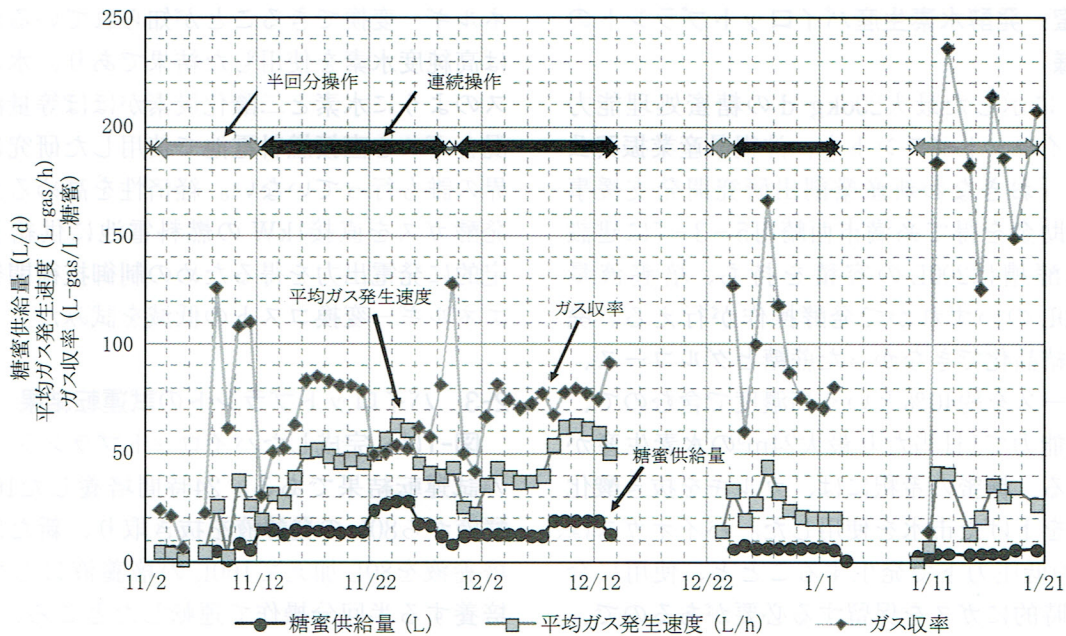


図-2 長期連続運転による効果的な発酵操作技術の修得

長期運転で操作技術の修得を試みた。図-2はその結果を示す。不連続な線になっているのは、ポンプや流量計の故障で修理のため運転を中止したからである。四角は1日に発生したバイオガスの平均発生速度を示しており、ガス発生速度は糖蜜供給量を増やすと速くなった。11月2日から12月13日までの41日間の運転では、糖蜜供給量を変動させて50L/hでガス発生するための条件を探したが、菱形で示した発生ガス量を1Lの糖蜜供給量あたりで表したガス収率は、発生速度とは逆に減る傾向として現れた。また、ガス収率は、11月28日・29日の結果に見られるように、連続操作より回分操作の方が多くことが明らかになり、1月9日からは半回分で操作して情報を求めた。その結果、200L-gas/L-糖蜜を超えるガス収率を得、高い収率で運転できた。このことから、糖蜜から高効率でバイオガスを生産するには、連続操作より半回分で操作する方が適していると考えられる。

## 2-5 パイロットプラントの運転で得た情報

### 2-5-1 プラントの簡素化に関する情報

図-3は、12月22日から行った実験結果を抜き出して示している。菱形のマークはガス収率を、実線は供給した糖蜜の積算量で、22日と23日は回分供給したことを、24日以降のノコギリ刃状の線は、積算供給量を毎朝リセットして定速度で供給したことを示している。発酵水素生産では、バクテリアの栄養源として魚の煮汁を供給しているが、糖蜜にはサトウキビのミネラルなどが含まれてい

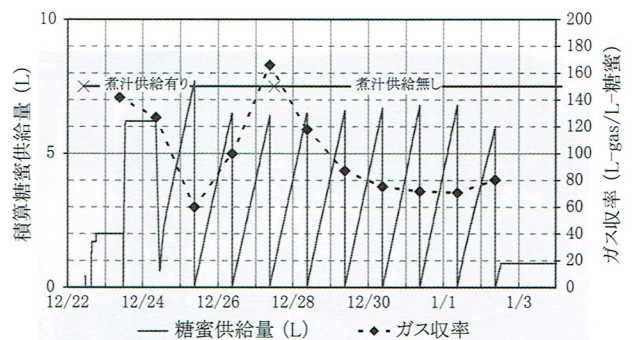


図-3 栄養源の収率に及ぼす影響

るので、12月27日からは、魚の煮汁の供給を止めて糖蜜だけで運転し、バクテリアの栄養源としての効果を調べた。1月2日に流量計が故障し糖蜜の供給が止まったために6日間のデータしか得られなかったが、糖蜜だけでも70L-gas/L-糖蜜の収率でガス発生し、簡素なシステムでプラントを構成できることがわかった。

### 2-5-2 ベンチプラントでは検討していなかった意外な課題

水素発酵は、ガスの発生速度を速めるために、培地 pH を 5.5~6.0 に保って培養するが、実験室の小型装置では非常にわずかの苛性ソーダを使用するだけで済んだので、これまでの水素製造コストの計算では pH 調整薬品のコストは考慮しなかった。しかし、パイロットプラントでは無視できないだけでなく、苛性ソーダを使用するなら、1m<sup>3</sup>の水素生産あたり1kg 近い量を必要とすることが分かり、ネット検索で1kg あたり40円から3,000円と最もコストを上げる要素であることが



分かった。商用プラントでは、低価格苛性ソーダまたは pH 緩衝作用のある低価格有機物の入手、あるいは pH 制御のいらぬ例えば *Enterobacter aerogenes* のような新規バクテリアの探索などが最大の課題になることが明らかになった。

また、バクテリアの代謝活性を高めるため、魚のアラの煮汁を使用した。アラの収集、煮汁採取後の残渣の始末という課題が発生したので、今後、実証プラントで水素生産するときには、アラの入手・煮汁の生産や残渣の肥料利用を含めたトータルなシステムを確立してから行う必要がある。

パイロットプラントの運転では、雑菌汚染によってデータの信頼性が著しく落ちることを防ぐため、糖蜜を発酵槽に導く直前で約70℃程度に暖めて滅菌操作を行っているが、まだ実験室で得たいろいろな結果と比較できるほどのデータが得られていないので、今後しばらく検証に努めて必要なデータがそろえば、滅菌操作なしで長期運転が可能かどうか、試みる予定である。

以上のように、パイロットプラントの建設で、改良すべき配管情報、性能を備えるべき計測機器

情報など多くの情報を得ることができた。これらの貴重な情報・知見は、今後の商用プラント建設に役立つ。

表-1 使用原単位と物性値

天然ガス	65.4	g-CO <sub>2</sub> /MJ
軽油	2623	kg-CO <sub>2</sub> /kL
電力(沖縄)	0.946	kg-CO <sub>2</sub> /kWh
トラック輸送	0.174	kg-CO <sub>2</sub> /t·km
水	0.492	kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> -水
NaOH	0.917	kg-CO <sub>2</sub> /kg-NaOH
水素 LHV	10.8	MJ/m <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>

表-2 計算に用いた仮定物性値

水素収率	2.5	mol-H <sub>2</sub> /mol-Glu.
正味昇温	5	℃
燃料電池	1.7	kWh/m <sup>3</sup> -H <sub>2</sub> (57%LHV)
糖含有率	40	%
サトウキビ輸送	2	km-片道
薬品	0.85	kg-NaOH/m <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>

表-3 LCA 計算による発酵水素生産における CO<sub>2</sub>発生量と削減率

段階	小プロセス	入出	品名	数値	原単位	数量	単位	CO <sub>2</sub> 排出量	単位
原料調達	原料調達	入力	糖蜜			1.0	t/d	-	
	運搬	入力	トラック輸送			4.0	km/d	0.7	kg-CO <sub>2</sub> /d
予備加工	脱気	入力	水	9.0	m <sup>3</sup> /t	9.0	m <sup>3</sup> -水/d	4.4	kg-CO <sub>2</sub> /d
		入力	電力	0.5	kWh/t	0.5	kWh/d	0.5	kg-CO <sub>2</sub> /d
	煮汁	入力	電力	1.0	kWh/t	1.0	kWh/d	0.9	kg-CO <sub>2</sub> /d
		出力	機能製品	0.1	kg/t	0.1	kg/d	-	
		出力	堆肥	0.1	t/t	0.1	t/d	-	
製造	発酵	入力	薬品	0.85	kg/m <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>	105.7	kg-NaOH/d	97.0	kg-CO <sub>2</sub> /d
		出力	水素	124.4	m <sup>3</sup> /t	124.4	m <sup>3</sup> /d	-	
		入力	動力	10.0	kWh/t	10.0	kWh/d	9.5	kg-CO <sub>2</sub> /d
		入力	熱	20.9	MJ/t	20.9	MJ/d	1.4	kg-CO <sub>2</sub> /d
	分離	入力	水	3.4	kg/t	3.4	kg/d	1.7	kg-CO <sub>2</sub> /d
		入力	電力	1.0	kWh/t	1.0	kWh/d	0.9	kg-CO <sub>2</sub> /d
		出力	液肥	1.8	m <sup>3</sup> /t	1.8	m <sup>3</sup> /d	-	
発電	ブローアー	入力	電力	0.3	kWh/t	0.3	kWh/d	0.2	kg-CO <sub>2</sub> /d
使用	燃料電池	出力	電力	211.5	kWh/m <sup>3</sup>	211.5	kWh/d	0.0	
糖蜜水素発電による CO <sub>2</sub> 発生量								117.2	kg-CO <sub>2</sub> /d
化石燃料発電による CO <sub>2</sub> 発生量								200.1	kg-CO <sub>2</sub> /d
糖蜜水素発電の CO <sub>2</sub> 削減率								41.4	%



### 3. おわりに

この2月、環境省の「CO<sub>2</sub>排出削減対策強化誘導型…」という事業公募に応募したところ、バイオマス利用技術開発では、ライフサイクル温室効果ガス削減率が50%以上であることを求められた。その計算で、発酵水素生産のライフサイクルで最もCO<sub>2</sub>を排出するのは、発酵のpH調節で使用するNaOHであることを初めて認識した。表-1~3はその時に使用した原単位、仮定値と計算結果である。表-3で網掛けで示したように、NaOHのLCA発生量が非常に大きいので、HN001株で水素生産すると、発酵水素生産で発生するCO<sub>2</sub>の83%がNaOHの使用によって生じることになる。しかし、*E. aerogenes*を使用するとNaOHの使用量が1/2以下になるので、削減率は非常に大きくなる。このことから、発酵水素生産でバイオマスエネルギー利用を効果的に行うには、至適pHを保つために使用するアルカリ量が少ない新規バクテリアを探す必要があると考える。

### 引用文献

- 1) 谷生重晴、西山大樹、PCT出願、公開番号WO 2008111608、米国特許登録番号、US8241882
- 2) H. Nishiyama and S. Tanisho, "Proceedings of the 16th World Hydrogen Energy Conference", Lyon, France, in CD-ROM, (2006)
- 3) 谷生重晴ら：“第32回水素エネルギー協会大会予稿集” (2012)
- 4) 谷生重晴ら：“第33回水素エネルギー協会大会予稿集” (2013)
- 5) 谷生重晴：“第140回水素エネルギー協会定例研究会予稿集” (2013)



たにしょう しげはる  
谷生 重晴  
バイオ水素株  
横浜国立大学名誉教授

〒253-0006 神奈川県茅ヶ崎市堤1-1-7-207  
TEL: 0467-52-2745 FAX: 0467-52-2745  
E-mail: tanisho@ynu.ac.jp

## 粉 惚 最新

学校を卒業して以降、母校を訪れる機会になかなか恵まれなかった。もちろん、全く足を踏み入れなかったわけではなかったのだが、このところごぶさた状態にあった。そんな中、先日、仕事からみではあったが久方ぶりに母校を訪れた。ただ、卒業後30数年が経過していたこともあり、様変わりぶりに目を見張るばかりであった。

▼湖山人が勉学に励んでいた（ということにしておく）時代そのままの建物がある一方で、真新しい建物も増え、キャンパスのイメージが大きく変ぼうを遂げていたことに戸惑いは隠せなかった。建物の外観には統一感があったが、教室内の椅子も座り心地が良さそうであり、プロジェクターなども配備され、恵まれた環境にあるんだなと実感した次第。ただ、現役時代にこうした環境下におかれたとして、果たして勉学に励んだかという自信はないが。

▼さらに、どこを探しても灰皿が見当たらなかったことも、時代を反映していた。街中でも禁煙エリアが大幅に増え、愛煙家は肩身の狭い思いをさせられているが、キャンパス内も同様だ。当時はキャンパスのベンチの側に灰皿が置

かれているのは当たり前であったし、建物内の各フロアでも、授業の合間にたばこを吹かしながら同級生と談笑できたことも今は昔。世知辛い世の中になったなと思うのは、いまま愛煙家である湖山人だけか。

▼キャンパス内もそうだが、その周りも新しい街に生まれ変わったようだ。授業の合間や授業を抜け出して入り浸っていた飲食店はほとんどなくなり、コンビニエンスストアに替わったりコインパーキングになったりと、当時の面影を見つけれなくなっていたのには寂しさを覚えた。その中で唯一、当時と同じ店名と看板で頑張っているコーヒーショップを見つけた時は懐かしさがこみ上げてきた。残念ながら今回は時間がなく素通りするしかなかったが、次回は店を訪れて学生時代にタイムスリップしたいものだ。

▼今の学生はどんな人生設計を描いているのであろうか。その設計図を完成形に持ち込むまでには時間がかかるが、学生時代の過ごし方が大きく影響すると湖山人は思っている。限られた時だからこそ、有意義に使ってほしいものだ。

(湖山人)