

発想転換で 2050 年目標コスト 20 円/Nm³-H₂ をクリアーする
栽培海藻による発酵水素生産技法

谷生 重晴

横浜国立大学名誉教授、バイオ水素株式会社

E-mail: tanisho@biohydrogen.co.jp

A Hydrogen Producing Method from Cultivated Sea Weed
that Satisfies the 2050 Hydrogen Target Cost ¥20/Nm³-H₂.

Shigeharu Tanisho

Professor Emeritus of Yokohama National University,

BioHydrogen Technologies, Inc.

Abstract

The biomass growing in the sea has not ever been listed as a candidate for a renewable energy source of Japan. The biomass so-called Japanese kelp contains mannitol and alginic acid both about 8% in wet weight. The mannitol is a very good substrate for the hydrogen production by fermentation and the alginate is a high-value-added material which is utilized over a wide field of industry. To achieve the cost target of hydrogen at 2050, this paper proposes a combined production technique of hydrogen and alginate from the extensively cultivated kelp. The technique satisfies also the demand of 100% Japanese energy.

1. はじめに

2050 年に CO₂ 排出量ゼロを EU に追隨して日本も宣言したことにより、化石燃料に代わる CO₂ を排出しないエネルギーとして、水素が揺るぎもない主力エネルギーとして表に現れるようになった。とりわけ 8,400 億 kWh にも上る火力発電の代替燃料として供給に期限を切られたことになり、どのような手段で水素製造を行うか非常に悩ましい状況になっている。現在、大量製造法としてオーストラリアの褐炭の水素化プロジェクトが進んでいるが、このプロジェクトだけではとても量的に満たすことができないだけでなく、エネルギー資源自立の観点からは、過大に期待すべき供給源にはなりがたい。

筆者は、1973 年の第一次オイルショックにおける政府の狼狽ぶりを目の当たりに見て以来、日本のエネルギー自立を研究課題に定めて、バイオマスから発酵法で安価に水素生産する技術を追い求めてきた。エネルギー自給に寄与するためには大量のバイオマスが必要になるが、日本の陸上には山地を除いて栽培余地はほとんどない。しかも欧米に比べて山は急峻で、山地から加工場への原料輸送には非常な困難が伴う。これらの理由で、必然的に国土の 12 倍もある排他的経済水域の利用を考え、海のバイオマス利用を目標にした。非常に幸いなことに、栽培もされているコンブが多量

に蓄積する糖質のマンニトールが、陸上バイオマスの蓄積するグルコースより発酵水素生産に適した糖質であることが判り¹⁾、さらに北海道のオニコンプの反当収量(145t/ha)²⁾の方が沖縄のサトウキビの反収(ca.70t/ha)³⁾より大きい事実が明らかになったことから、コンブが最良のエネルギー自給バイオマスになることを確信した。爾来『栽培コンブでエネルギー自給』を訴え続けているが、エネルギー生産だけで採算性を確保することを追求したため、コンブの品種改良や反収増大、バクテリアの水素収率の増大など、画期的な技術開発を主題に提案しなければならず、長年公的ファンドからはリジェクトされ続けてきた。

しかし、数年前、それまでの「エネルギー生産で採算性を求める」ことから**発想を転換**し、付加価値が非常に高いコンブ副成分のアルギン酸に着目、**並行生産して水素生産の原料費をゼロ**にすれば、現状の技術でも安価に生産が可能になるだけでなく、2030年目標水素価格 30 円/Nm³もわずかの技術開発で達成できることが判明した。以下にその技法を概説する。

2. 栽培コンブによるエネルギー自給の可能性

コンブの主成分マンニトールからの水素生産については、2010年 HESS 大会において「栽培海藻バイオマスを使用した発酵法による水素生産の可能性について」と題する発表を行っている⁴⁾。それによると、水素収率 2.5mol-H₂/mol-man で水素発生する菌叢が発見されており、アルギン酸からも水素を生産するとすれば1日当り 31Nm³/t-wet kelp の水素が生産できるとある。マンニトールからだけだと約 25Nm³/t-wet kelp 生産できる。

エネルギー生産のためにはコンブが非常に多量に必要なが、日本は食用にのみ使用しているので年間コンブ生産量はわずか 8 万 t-wet kelp (2019年)⁵⁾しかない。しかし、中国はヨウ素を生産するために、中国の海域がコンブの自然生育には暖かすぎる温暖海域であるにもかかわらず、苗代で稲の苗を育てるように、コンブをプールで適当な大きさまで育て、その後沖出しするという養殖技術を開発し、1958 ごろから急速に生産量を伸ばしていった⁶⁾。さらに栽培海域も、温暖海域の遼東半島海域から亜熱帯性海藻が育つ台湾北部にあたる北緯 25 度付近までの非常に広い海域で行うほどに広がっている。その生産量は、2019年には 1,100 万 t-wet kelp (FAO data) と日本の 140 倍にも達しており、これほどの生産量が得られれば、現状の発酵水素生産技術でも、表 1 に示すように FCV なら 24 万台に、また火力発電なら 4.8 億 kWh の電力量が供給できる水素を生産

表 1. 中国のコンブ生産量で生産可能な水素量

2019年中国の生産量 10,978,362 t-wet kelp	現状技術	技術開発後	
		2030年ごろ	2050年ごろ
マンニトール含有率	8	15	15
水素収率	2.5	3.0	10.0
マンニトール量 ton	878,269	1,646,754	
水素生産量 kmol	12,064,134	27,144,302	90,481,005
Nm ³	270,236,603	608,032,357	2,026,774,523
kg	24,128,268	54,288,603	180,962,011
FCV台数(100kg/台・年)	241,283	542,886	1,809,620
50%効率火力発電(億kWh)	4.8	10.8	35.9
日本が2000年の中国と同じ栽培面積でマコンブを栽培したときの予想			
発電 1.77kWh/Nm ³ -H ₂ (HHV 50%)	現状技術	技術開発後	
		2030年ごろ	2050年ごろ
コンブ生産量 (10 ⁶ t-wet)	1,100	1,100	1,100
マンニトール量 10 ⁶ ton	88	165	
水素生産量 10 ⁶ kmol	1,209	2,720	9,066
10 ⁶ Nm ³	27,024	60,923	203,077
10 ⁶ kg	2,413	5,440	18,132
FCV台数(100kg/台・年)	24,128,268	54,395,604	181,318,681
50%効率火力発電(億kWh)	4.78	1,078	3,594

コンブの生産量統計(FAO Data)を基に計算した水素量1.xlsx

できる。表 1 には 2030 年ごろおよび 2050 年ごろまでに達成可能と考えるコンブの品種改良と新規バクテリアの水素収率で計算した数値も記入している。

3. 日本のコンブの栽培技術

コンブは日本では縄文時代の昔から食用に供されており、それにもなう栽培技術も非常に優れている。それに対し中国は数十年の経験しかないので、栽培技術は日本に比べればかなり劣っているようだ。なぜなら、2000 年における中国の収穫量と栽培面積は 415 万 t-wet、248 万 ha と報告されている。それで、これから計算すると反当収量はわずか 1.7t/ha にしかない。一方北海道の羅臼では、反当収量の多くない品種のオニコブで 1986 年に 145 t/ha の実験値を得ており²⁾、2011 年の島根県海士町における垂下ロープ式（のれん式）栽培方法なら、100m 幹ロープを 3m 間隔で張れば 200 t/ha の収穫量になるそうだ³⁾。すなわち、日本の栽培技術なら、中国と同じ栽培面積でも 100 倍以上の収穫量を得るということである。表 1 の下段に示すように、もし、エネルギー生産用に日本が 2000 年の中国と同じ面積でコンブを栽培するなら 11 億 t-wet 以上の収穫を得、現状技術でも、2,400 万台以上の FCV に、あるいは 470 億 kWh 以上の電力量生産に水素を提供できる。この電力量は日本の年間発電量の約 5%にもなることから、エネルギー自立を目指すなら、真剣に検討すべき再生可能エネルギー生産手段ではなかるうか。

4. アルギン酸ソーダを並行生産して水素コストを 2050 年目標以下にする手法

2030 年 30 円/Nm³ の水素コスト目標は、水素生産単独で達成するのはとてもできない相談である。コンブ処理量が 10t-wet/d のプラントでわずか 1,500 円/t-wet と非常に安い原料コンブを購入しても、表 2(A)列に示すように、98 円/Nm³ のコストにもなる。しかし、原料を無料で入手できるなら、(B)列に示すように、現状技術でもかなり目標に近いコストで生産できることが分かる。そこ

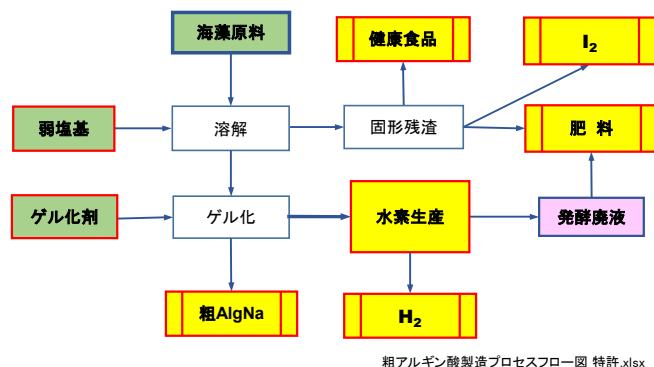


図 1. アルギン酸製造プロセスを組み込んだ水素生産法

で、この原料費を無料にする手段として、これまで水素発酵のシステムには組み込んでいなかったアルギン酸ソーダ (AlgNa) の新しい製造工程を、水素生産の一貫製造プロセスとして構成することで可能にする手法を開発した。新しい製造工程は、過疎化が進む海浜の高齢者社会でも安全に操作できること念頭に、家庭で使用している薬品を使用して安全性を高めている。図 1 はそのフロー図で、弱塩基で溶解した AlgNa をゲル化し、ゲルを分離した廃液を水素発酵の原料とすることで目的を達成した。AlgNa の製造コストは、原料コンブを 2 万円/t-wet で購入しても、採算がとれると思われる程度に収まることを実験により確かめている。

5. 今後の方針

新しい問題として、①コンブの収穫期間が 2～3 ヶ月しかないので冷蔵貯蔵庫が必要なこと、②

収穫期間を広げる栽培技術開発を進めること、③非常に多量に生産される AlgNa を利用するための新しい商品を開発、また、④大量栽培により海水の養分が不足するので、発酵廃液を肥料として海中に戻して利用する技術開発が必要である。さらに、労力を軽減するために、種苗糸を幹ロープに結節する機械、幹ロープを沖の施設に接続・切り離す装置など栽培・収穫作業を機械化・自動化する装置の開発も求められる。

表 2. 目標コストを達成するための改良パラメータ

操作条件の種類	(A)	(B)	(C)	(D)	
① 原料処理量	10	10	10	10	ton-raw kelp/d
② 糖質含有率	8	8	15	15	%-man.
③ 水素収率	2.48	2.48	3.00	10.00	mol-H ₂ /mol-man
④ 含水率	80	80	75	75	%
NaOH使用率(菌叢発酵HRT6h)	0.215	0.215	0.215	0.050	kg/Nm ³ -H ₂
⑤ 原料購入単価(コンブ)	1,600	0	0	0	¥/t-wet kelp
⑥ 平均滞留時間 HRT	3	3	3	3	h
⑦ 発酵糖濃度(wt%)	3	3	3	3	%
⑧ 消費動力	50	50	50	50	kWh/t-liq.d
⑨ 操業日数	300	300	300	300	day
⑩ 処理糖量	800	800	1500	1500	kg-man./d
⑪ 必要市水量	17.9	18	41	41	t/d
⑫ 全流動液量 ①+⑪	27.9	28	51	51	t/d
⑬ 発酵槽容積 ⑫/(24/⑥)	3.5	3.5	6.4	6.4	m ³
⑭ 消費動力 ⑧×⑫	174	174	319	319	kWh/d
⑮ 水素生産量 ③×⑩	244	244	554	1,846	Nm ³ /d
⑯ 水素生産量 ⑨×⑩	73,255	73,255	166,154	553,846	Nm ³ /yr
⑰ 水素製造 原料コスト ①×⑤/⑩	61.43	0.00	0.00	0.00	¥/Nm ³ -H ₂
⑱ 建設費	16,996	16,996	24,425	24,425	k¥
⑲ 償却費(10年均等)	1,700	1,700	2,443	2,443	k¥/yr
⑳ 保守費(建設費の3%)	510	510	733	733	k¥/yr
㉑ 動力費 ⑨×⑩×¥20	1,045	1,045	1,913	1,913	k¥/yr
㉒ 市水費 ⑪×¥60	322	322	738	738	k¥/yr
㉓ 薬品費 50 ¥/kg-NaOHの時	787	787	1,786	1,385	k¥/yr
㉔ プラント人件費	0	0	0	3,000	k¥/yr
㉕ 総支出 ⑱+⑲+⑳+㉑+㉒+㉓	4,364	4,364	7,612	10,210	k¥/yr
㉖ 水素製造 諸費コスト⑱/⑰	59.6	59.6	45.8	18.4	¥/m ³ -H ₂
㉗ 水素製造コスト ⑱+㉖	121.0	59.6	45.8	18.4	¥/m ³ -H ₂
㉘ 水素製造コスト 償却費含まず	97.8	36.4	31.1	14.0	¥/m ³ -H ₂

遺伝子破壊・市水費・薬品費・菌叢データ含む;コスト計算 2021 CMC 2018 0824.xlsx

また、2030 年コスト目標を達成するためには、(i)コンブの糖質含有率を 15%程度に改良、(ii)水素収率が 3.0 程度の新規細菌を探索、2050 年目標は(iii)水素収率が 10 程度の遺伝子欠損株を発見または作成する必要があるだろう。これらを実現するには、藻類研究、遺伝子研究、化学工学研究など多方面の研究者の方々のご協力を得て技術開発を行う必要がある。

参考文献

1. 谷生ら; *E. aerogenes* の発酵水素発生と利用基質について, 発酵工学会誌, Vol.67, p.29-34 (1989)
2. 農水省農林水産技術会議事務局編, バイオマス変換計画, p.325-327, 光琳 (1991)
3. 農林水産部糖業農産課, さとうきび及びび甘しや糖生産実績 (2021)
4. 谷生; 栽培海藻バイオマスからの水素生産可能性, HESS 大会 (2010)、 谷生ら; 海藻を基質に利用した発酵法による水素生産の可能性について, HESS 会誌, Vol24 No1 pp19-24 (1999)
5. e-Stat, 海面漁業生産統計調査
6. FAO statistics 2019 web_i9942t
7. 楊ら, コンブ養殖生産における中国の開発動向と台湾市場, 北大農経論叢, 64 p.41-51 (2009)
8. 依田ら, 海士町のマコンブの生長と生長量に及ぼす密度の影響, 応用藻類学会大会 (2011)