

CMC 出版バイオテクノロジーシリーズ
書籍『微生物をもちいた発電および水素生産技術』
渡辺一哉 監修, pp.225-236 (2021)

第II編 水素生産

第12章 発想転換で2050年目標コストをクリアする栽培海藻による発酵水素生産技法

1. はじめに

気候変動に関連する異常現象が世界中いたる所で発生し、もはや待った無しの状況を受けて2020年10月、欧州連合は、温室効果ガス排出量を2050年実質ゼロとする目標に法的拘束力を持たせることで合意した。日本は2018年7月「第5次エネルギー基本計画」を閣議決定し、2050年80%削減を目標とした計画を進めていたところであったが、欧州のこの決意を込めたメッセージを菅義偉首相は無視することができず、2日後、日本も2050年実質ゼロとすることを宣言した。さらに2021年4月、菅首相は2030年削減目標も26%から46%削減へと大幅に引き上げることを地球温暖化対策推進本部の会合で表明し、気候変動への対応を経済成長への原動力として達成するよう期待した。第5次計画は資源エネルギー庁が数年をかけて積み上げた目標値であり、新しい削減値を達成するためにはこれまでの計画の延長では到底達成できないと考えられることから、本章で提案するようなドラスチックな推進策を見つける必要が発生すると思われる。

日本の一次エネルギー源は、図1からわかるように、およそ85%を化石燃料が占めており、その化石燃料の約80%のエネルギーが、発電、石油精製などの変換加工で電気、運輸燃料、生活燃料など二次エネルギーに変換利用されている(2021年エネルギー白書)¹⁾。これらは、変換加工時あるいは使用時に温暖化ガスを大量に排出するので、第5次計画においては、再エネ(再生可能エネルギー)の主力電源化、火力発電の水素火力化、運輸燃料の電気・水素化など、水素を二次エネルギーの中心とすることで温暖化ガス排出ゼロの達成を目指している。このため大量に必要な水素を、CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)を組み込んだオーストラリアの褐炭の水素化により調達する計画を立て「日豪褐炭水素プロジェクト」を進めているところである。また、LNGに代わる火力燃料としての水素は燃焼熱がLNGの1/3以下だから、LNGとエネルギーが等価な水素のコスト目標価格を、技術革新なども考慮して2030年に30円/Nm³、2050年ごろに20円/Nm³程度と設定した。ただ、この水素生産計画は、従来と変わらず外国依存度が高いので、エネルギー資源自立の観点からは、褐炭水素化は日本にとって本質的な解決策とはならない計画といえる。

筆者は、これまでエネルギー計画では取り上げられなかった海のバイオマスを、水素と付加価値の高い産業資材の原料として栽培し、産業資材の製造廃液を水素生産の原料として利用することで、100%国産で、2050年目標水素コストを満たし、エネルギー自立に十分寄与するほど大量生産が可能な「栽培海藻による発酵水素生産技法」を本章で提案する。

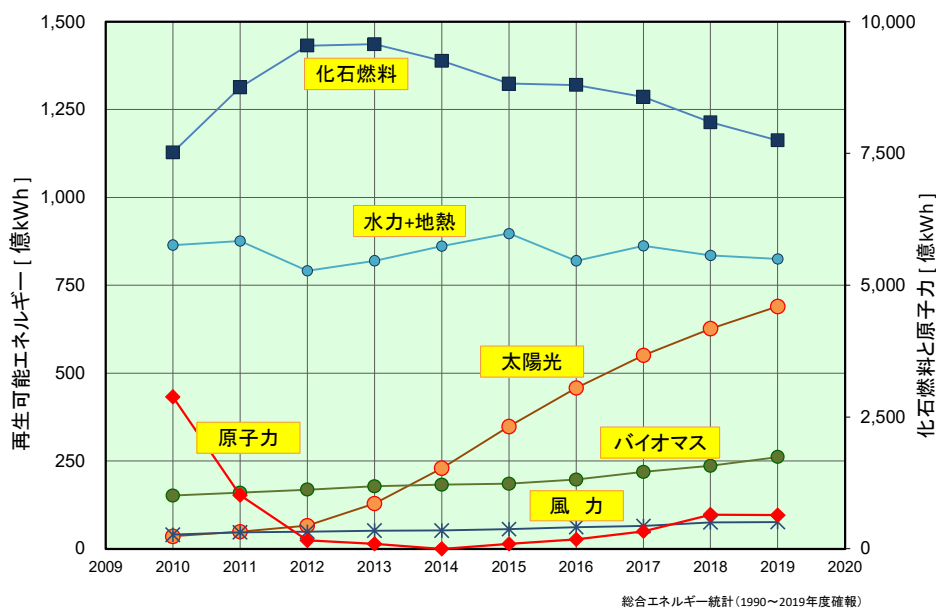


図1. 日本の一次エネルギー供給源の推移²⁾。2019年の供給割合は、化石燃料が85%、原子力が3%、再エネ・その他が12%である。

2. 栽培による収穫可能量・世界のコンブ生産量と日本の生産量

エネルギー自給率の向上は、日本では原子力に頼れなくなった現在、太陽光、風力、バイオマスなど再エネにたよることではしか向上できないが、図1の2019年度における再エネ源の一次エネルギー供給割合はわずかに12%ほどであり²⁾、太陽光発電を中心に発電設備容量は年18%ほども増加している³⁾にもかかわらず、このままの設備増加率では発電量に占める割合が50%に達するのに30年を要す。しかし、再エネ源である海のバイオマスを、国土の12倍もある専管水域で栽培できるなら、新たな巨大エネルギー源として自給率向上に寄与する可能性が十分にある。その海のバイオマスとは褐藻のコンブである。

筆者らはバイオマスの糖質を発酵で水素に変換する研究を長年行っており、2015年にシーエムシー社が出版した「バイオ水素とキャリアー開発の最前線」でも「海藻バイオマスを使用した水素生産とCO₂排出量削減評価」と題して生産能力と課題について詳述している³⁾が、コンブが収穫時期に8%も内蔵するマンニトールは非常に良質の水素生産基質で、筆者が所有していた水素収率2.5mol-H₂/mol-manで水素発生するバクテリアなら、1トン(湿)のコンブから約25Nm³の水素を生産できる⁴⁾。コンブの品種改良によるマンニトール蓄積量の増大化、バクテリアの遺伝子操作による高水素収率化など技術開発を行なうなら、将来は200Nm³/t-wet kelp程度をも期待できるようになるだろう。また、第3節で詳述するように、コンブの主成分の一つであるアルギン酸を主生産物とし、水素生産をその廃液処理と位置づけるなら、原料コストは無料になるので、現状のマンニトール含有率と水素収率でも、生産コストを35円/Nm³-H₂ほどの安価なものにすることが可能であり、2050年頃までに藻類研究者、遺伝子研究者、化学工学研究者など多方面の研究者の力を糾合して必要な技術開発を行うなら、14円/Nm³-H₂という究極目標のコストも視野に入ってくる。

古くから日本はコンブやワカメを食用に供していたので、その栽培技術は非常に進んでいる。ただ、日本は需要を食用にのみ求めているので、現在の生産量は採取と栽培を合わせても約 10 万トン(湿重量)と非常に少ない⁵⁾ (図 2 右目盛り)。しかし、中国では医薬品としてのヨードの必要性から、戦後、大連での日本人の研究を引き継いで栽培研究に力をそそいだ結果、1950 年ごろから培養技術が急速に進歩して養殖生産量を伸ばし、1960 年以降は日本の全収穫量よりも生産量をはるかに多くなった。1990 年ごろからはヨード・アルギン酸原料など医薬・工業用だけでなく、食用としての需要も増えて栽培量が急速に増加し (図 2 左目盛り)、その生産量は 2019 年には 1,100 万トン(湿)にも上っている⁶⁾。もしこのコンブ全量を発酵水素生産に使用すれば、表 1 に示すように、現状データのマンニトール含有率 8%、水素収率 $2.5\text{mol-H}_2/\text{mol-man}$ の条件⁴⁾で 2.7 億 Nm^3 の水素が生産できる。この水素を変換効率 50%(HHV)の水素火力発電で使用するなら 4.8 億 kWh のエネルギーが生産でき、燃料電池自動車 (FCV) の燃料として使用するなら、平均使用量 $100\text{kg-H}_2/\text{年}\cdot\text{台}$ として 24 万台に供給することができる水素量である。表 1 には、技術開発で 2030 年ごろあるいは 2050 年ごろに達するであろうマンニトール含有率、水素収率での生産量も、エネルギー自給規模を実感するために記載した。

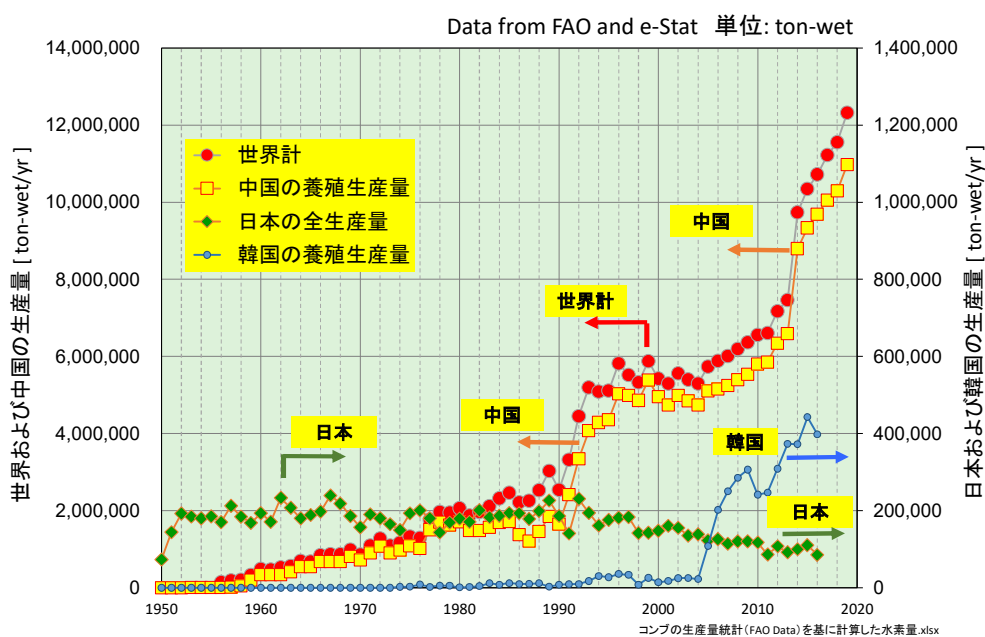


図 2. 日本⁵⁾、中国、韓国のコブ生産量の経年推移 (FAO 2021 のデータ⁶⁾から)

このように中国は現在世界最大の養殖コンブ生産国であるが、元々コンブは日本でも北海道・三陸など海水温 $14\sim 15^\circ\text{C}$ 以下の冷海水温域でのみ増殖可能なので、海水温の高い中国の海域では自生していなかった。しかし、品種改良や温度管理したプールで受精を誘導し、種苗採取糸の上で成長した葉体を時期を見て沖出し栽培するなどの栽培法の改革を行うことなどによって、今でははるか南方の北緯 25 度 (台湾北部あたり) 付近の中国沿岸でも栽培・収穫できるようになっている⁷⁾。日本でも養殖技法を開発して長崎県五島列島や鹿児島県東町、熊本県八代海などで栽培しており、農水省の 2019 年養殖魚種別収穫量統計では、神奈川県で 68t、長崎県で 17t 収穫されたこと

が記載されている。これらのことから、現在では沿岸なら九州以北の日本全国で収穫できるだろう。ただ、日本近海は黒潮暖流のせいで黄海や東シナ海より年間をとおして海水温が高いので、専管水域を広く使用するには孢子体（葉体）をさらなる高温対応品種に改良する必要があるだろう。さらに、図3にプロットされた北海道太平洋側の函館市南茅部町⁸⁾と石狩湾に面した余市町⁹⁾の間引きが施された食品用マコンブ栽培、それに日本海に浮かぶ島根県隠岐郡海士町⁹⁾の間引きのない垂下ロープ式（のれん式）栽培のマコンブ成長曲線にみられるように、栽培地によっても、栽培方法によっても、葉長・葉幅・葉重に顕著な成長差異が認められるので、原料の品質をできるだけ一様にするために、理由の解明と栽培技術の開発が必要である。注目すべきは、海士町の垂下ロープ式栽培では、葉重が南茅部町の1/10しかないにもかかわらず、100mの幹ロープ当り6tの収穫が期待できるとの結果を得ている⁹⁾ことで、成長差の理由が判明すれば極めて有意な増産情報となる。

このような栽培技術開発を行うなら、一平面でしか栽培できない陸上のバイオマスと異なり多層培養が可能な海洋では、少ない栽培面積で効率よく収穫物を得ることができるので、自給率を大きく高めるために必要なバイオマス量は十分収穫可能である。

表 1. 現状および技術開発後に 2019 年の中国のコンブ生産量から生産できる水素量と FCV 供給台数または火力発電の発電可能量。

2019年中国生産量 10,978,362 t-wet kelp	現状	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

コンブの生産量統計(FAO Data)を基に計算した水素量.xlsx

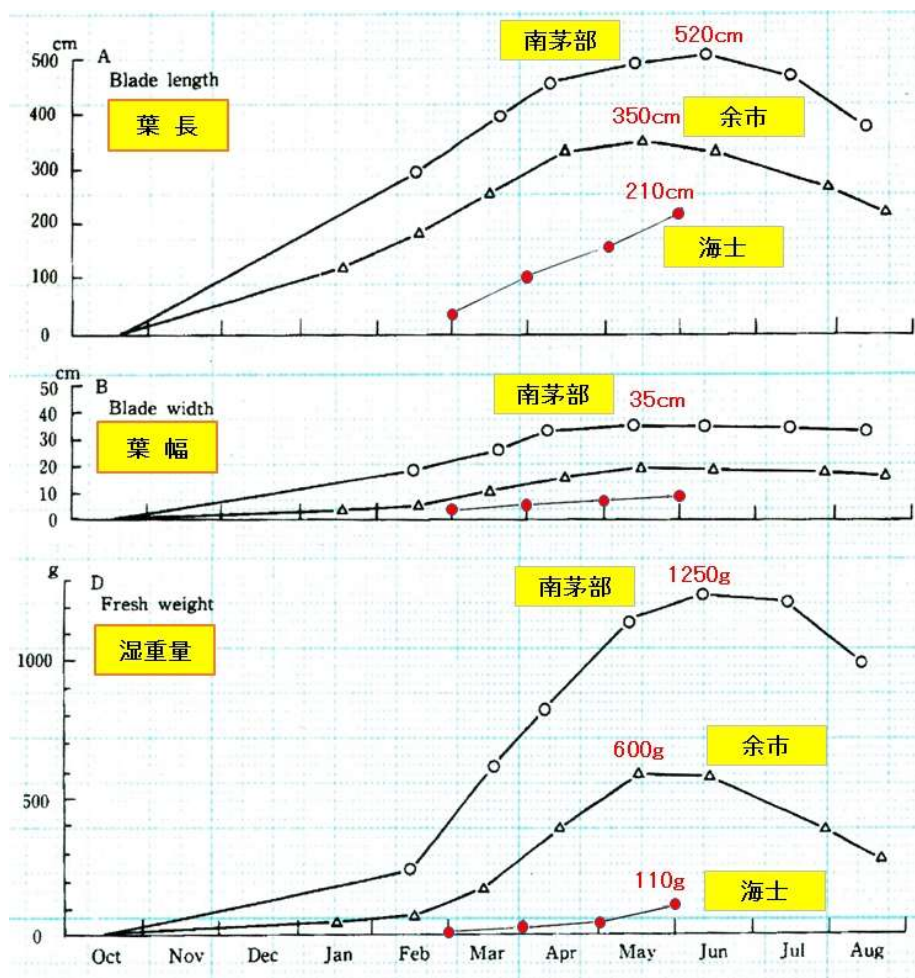


図3. 異なる栽培地(南茅部、余市、海士)でのマコンブ葉体(孢子体)の成長状況^{8,9)}

3. コンブバイオマスを原料とした水素生産のコスト試算と開発課題

コンブは収穫時期には8%強のマニトールと8%弱のアルギン酸、それに7%弱のその他の成分と80%弱の水分で構成されている⁴⁾。1トンの湿コンブから現在の水素収率なら25Nm³の水素と70kgのアルギン酸が生産できるが、2030年目標コスト値の30円/Nm³-H₂で水素を出荷したのではわずか750円の収入にしかない。このようにわずかの収入では栽培者が満足する原料購入価格を設定できないので、原料コストは長い間負荷の大きい課題であった。しかし、発想を転換して、市場価値で32万円になる付加価値の非常に高いアルギン酸ソーダを主産品に据え、水素生産はその廃液処理と位置づけるなら、目標コストを達成できることに筆者は気がついた。

表2はコスト計算において原料費を無料としたとき、コストに関するコンブのマニトール含有率・バクテリアの水素収率の開発目標値をパラメータとして、その引き下げ効果を計算したものである。(A)列は過疎地での地産地消を念頭に、1日わずか1tの原料コンブを処理する小型アルギン酸プラントの廃液を発酵原料としたとき、現状のマニトール含有率と現有バクテリアの発酵水素収率で運転したときの水素製造コストである。処理量が少ないので46.9円/Nm³-H₂とかなり高コ

ストである。(B)列は原料処理量が 10 倍の 10t/d のプラントで製造したとき、規模の効果がどれほどになるかを計算している。建設費は、基になる 10m³の発酵槽プラントの建設費を 3,200 万円と見積もり、発酵槽の比の 0.6 乗に比例して増加すると仮定して計算している。水素生産量は原料処理量に比例して 10 倍になるが、建設コストは 0.6 乗則により 4 倍弱増加するだけだから生産性が高くなり、製造コストは 36.4 円/Nm³-H₂と効果的に安くなる。(C)列は 2030 年を目標に、コンブのマンニトール含有率を 15%に品種改良し、同時に水素収率が 3.0mol-H₂/mol-man の新規バクテリアを探索・確保したときに到達するコストで、31.1 円/Nm³-H₂と 30 年目標を達成できることがわかる。(D)列は 2050 年を目標に、バクテリアの遺伝子操作で水素収率を 10mol-H₂/mol-man まで高められた時の理想コストである。ただし、このように高い水素収率なら酸の代謝量は非常に少なくなるので、NaOH 使用量を約 1/4 の 0.05kg/Nm³-H₂と仮定した。また、沖縄のパイロットプラント運転の経験¹⁰⁾から、小さいプラントの操作では操作員の労働は朝夕の機器チェック程度で済むことを体験したので、(A)、(B)、(C)では併設のアルギン酸製造プラント操作員にショートチェックを委ねることとして人件費は計上しなかったが、(D)ではアルバイト費を試みに計上して計算した。それでも、遺伝子改良が成功すると、14 円/Nm³-H₂と 50 年目標をたやすく達成できることがわかる。

なお、遺伝子操作による収率改善については、2000 年、筆者らは通性嫌気性バクテリア *Enterobacter aerogenes* の電子伝達鎖に着目し、Complex I (複合酵素 I) をラウリルガレイトで阻害することで収率を 1mol/mol から 3mol/mol に高めることに成功¹¹⁾し、遺伝子操作でも改良を試みていたが、未だ結果を得ていなかった¹²⁾。しかし 2017 年、中国清華大学の Yuan Lu と Yan Wu らが、*E. aerogenes* の Complex I のいくつかのサブユニットを遺伝子操作で同時に破壊することで、収率を 2.28mol/mol に改善できたことを発表した¹³⁾ことから、最近の遺伝子操作技術で改良を試みれば、10mol/mol に改善することは可能と考えている。

また、主産物としてのアルギン酸ソーダについては、8%含有とすれば表 1 のマンニトールと等量生産できるから、市場価値 4 兆円規模の巨大な産業が育つことになる。

以上のことから、2030 年、2050 年目標コストを達成する課題をまとめると、

2030 年目標コストを可能にする改良課題

- i) コンブのマンニトール含有率を湿重量の 15%以上に高める
- ii) 水素収率が 3mol-H₂/mol-man 以上の新規バクテリアを探索・獲得する

2050 年目標コストを可能にする改良課題

iii) 遺伝子操作で水素収率が 10mol-H₂/mol-man になるようバクテリアを改良するであり、人的資源を投入すれば目標を達成するのはそれほど難しくはない課題である。

表 2. 原料購入費はアルギン酸製造の廃液処理と位置付けて 0 円とする水素製造コスト計算。

(a) 発酵の諸条件。原料処理量、糖質含有率、水素収率をパラメータとする

操作条件の種類	(A)	(B)	(C)	(D)	
① 原料処理量	1	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)	0	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

(b) パラメータの変化に連動する処理関係諸量(発酵槽の体積)

⑩ 処理糖量 ①×②	80	800	1500	1500	kg-man./d
⑪ 必要市水量 (⑩-⑩×⑦)/⑦-①×④	1.8	18	41	41	t/d
⑫ 全流動液量 ①+⑪	2.8	28	51	51	t/d
⑬ 発酵槽容積 ⑫/(24/⑥)	0.35	3.5	6.4	6.4	m ³
⑭ 消費動力 ⑧×⑫	17	174	319	319	kWh/d

(c) パラメータの変化に連動する水素収量と原料コスト

⑮ 水素生産量 ③×⑩	24	244	554	1,846	Nm ³ /d
⑯ 水素生産量 ⑨×⑮	7,326	73,255	166,154	553,846	Nm ³ /yr
⑰ 水素製造 原料コスト ①×⑤/⑮	0.00	0.00	0.00	0.00	¥/Nm ³ -H ₂

(d) パラメータの変動に連動するプラント運転各種経費

建設費	4,269	16,996	24,425	24,425	k¥
⑱ 償却費(10年均等)	427	1,700	2,443	2,443	k¥/yr
⑲ 保守費(建設費の3%)	128	510	733	733	k¥/yr
⑳ 動力費 ⑨×⑩×¥20	105	1,045	1,913	1,913	k¥/yr
㉑ 市水費 ⑪×¥60	32	322	738	738	k¥/yr
㉒ 薬品費 50¥/kg-NaOHの時	79	787	1,786	1,385	k¥/yr
㉓ プラント人件費	0	0	0	3,000	k¥/yr
㉔ 総支出 ⑱+⑲+⑳+㉑+㉒+㉓	770	4,364	7,612	10,210	k¥/yr

(e) 建設費を除く製造コスト(10年均等プラント償却費を含む)

㉕ 水素製造 諸費コスト⑱/⑮	105.2	59.6	45.8	18.4	¥/m ³ -H ₂
㉖ 水素製造コスト ⑰+㉕	105.2	59.6	45.8	18.4	¥/m ³ -H ₂
㉗ 水素製造コスト 償却費含まず	46.9	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

4. 現状の発酵水素生産で 2030 年目標水素価格を可能にする並行産業

前節で、コンブのマニトール以外の成分から付加価値の高い商品を並行して生産し、水素生産の原料費を不要にするなら、小規模プラントでも 2030 年水素コスト目標を達成することが可能になることを示した。コンブの用途は図 4 のように食品用と工業用に大別でき、食品用は工業用に比べると付加価値は極めて高い。出汁昆布は乾物 10 kg で市場価格は 3 万円を上回っている。1 t の湿コンブから 200 kg の乾物が生産されるとすると、60 万円の価値が生まれる。しかし、食品用の栽培では、収穫前も後も非常に多くの労力を注入し、品質管理・収穫加工を行わなければならないので労働者離れが起き、図 2 に見られるように日本の生産量は長期微減の状況である。一方、工業用に栽培するなら、原料藻の見栄えは全く要求されないで粗放栽培でよく、収穫・工場搬入も機械化が可能だから軽労働・短時間労働になる。さらに、余った時間は従来の漁業を行うことも併設する安全・軽労働のアルギン酸ソーダ製造工場でも働くことも可能だから、若者にも高齢化した漁村でも

受け入れやすい新しい海面産業になるだろう。

食用品	}	葉体商品	: 出汁昆布・野菜昆布・土産商品・贈答商品
		加工食品	: 佃煮・とろろ昆布・刻み昆布・昆布茶・酢昆布など
工業品	}	食品	: 食品添加剤加工・エキス抽出品・粉末加工エキス
		医薬品	: ヨード・マンニトール
		産業用品	: アルギン酸・フコイダン
		その他	: 肥料・土壌改良材

図 4. コンブの多彩な商品の概要。

表 3. アルギン酸の用途分野と使用例

食品分野		
食品添加物として		
	既存添加物	アルギン酸
	指定添加物	アルギン酸ナトリウム、アルギン酸カリウム、アルギン酸カルシウム、アルギン酸アンモニウム、アルギン酸プロピレングリコールエステル <small>の5種類</small>
個別用途別使用例		
粘性	増粘剤	即席麺、ラーメン、うどん、そば、パンなどの生地に添加 ジャム、ソース、スープ、ケチャップ、蒲鉾、佃煮等
	安定剤	サラダドレッシングの乳化安定剤、乳酸菌飲料の分散安定剤、ビールの泡沫安定剤、アイスクリームの滑らかさなど
キヒセドロロゲゲル	ゲル化剤	ベーカリーフィリングの耐熱性付与、オニオンリング等の再成形食品のバインダー、人エイクラ、人エフカヒレ等の成形など
	被膜加工剤	チーズ、ソーセージ、ハム等
	食物繊維素材	食物繊維飲料など。コレステロールの対外排泄作用を用いた特定保健用食品として
医療分野		
	アルギン酸塩類	歯科材料(歯科印象剤)として
	アルギン酸	アルギン酸の繊維状ゲルが手術糸に
吸湿性	アルギン酸塩	アルギン酸塩は創傷被覆材に(カルトスタットCDやソープサンなど)
	アルギン酸ナトリウム粉末	アルギン酸ナトリウム粉末(アルト®)は皮膚での出血や消化管での内視鏡止血に
	アルギン酸ナトリウム水溶液	5%アルギン酸ナトリウム水溶液(アルロイドG®)は胃炎・胃潰瘍・消化管出血に
工業分野		
アルギン酸塩類	アルギン酸塩類	アルギン酸塩類が繊維、製紙、鉄鋼、水産、農業などに広く使われている
	染色業	捺染の糊料
	製紙業	製紙業 - 辞書などの特殊紙の表面処理、ノンカーボン複写紙のインクコート剤
	鉄鋼業	鉄鋼業 - 被覆溶接棒の加工の際、フラックスのバインダー
	水産業	水産業 - 養殖魚に与える餌料(モイストベレット)のバインダー
	農業	農業 - 栽培用培土を固化させ、機械耐性を付与するバインダー
	アルギン酸カルシウム	細胞や酵素などの固定化・カプセル化に

表 アルギン酸の用途.xlsx

工業製品では、表 3 に示すように、アルギン酸ソーダが食品分野、医薬品分野、工業分野など広い用途に提供され、無害、生分解性、吸湿性などの性質から、非常に多彩な新しい商業商品が多数開発されている。2010 年の食品情報誌¹⁴⁾によると、中国や新興国においてアルギン酸ソーダを使用したコピー食品(疑似フカヒレ、疑似アワビなど)の需要が爆発的に拡大し、そのため毎年価格が上昇しているとのことであった。その予想が図 2 の 2011 年から急増する中国のコンブ生産量に現れている。また市場調査会社の 2019 年レポート¹⁵⁾によれば、2019 年からの 9 年間で市場規模は 2 倍以上に増加すると予想しているため、同様の生産量増加が見られることであろう。市場価格も 9 万

円/20kg-alginate ほどで、32 万円/t-wet kelp の価値になるから、1t/d 処理プラントでも約 1 億円の市場製品を生産できる。ただ、日本最大手のアルギン酸製造会社キミカの社長は 2011 年に開かれた海の森づくり第 8 回シンポジウムで、温海域でのコンブ栽培は海のゴミづくりになりかねないと警告し、また、アルギン酸製造で採算がとれる原料コンブの価格は 840 \$/t-dry (≒168\$/t-wet kelp) 以下でなければならないから、栽培者が希望するほど高くはないとも言挙げた。筆者はこれらを認識した上で、とりあえず、水素生産に接続できる小規模で地産地消が可能な、かつ高齢者でも安全に操業可能な、粗アルギン酸ソーダ生産工法を開発した。

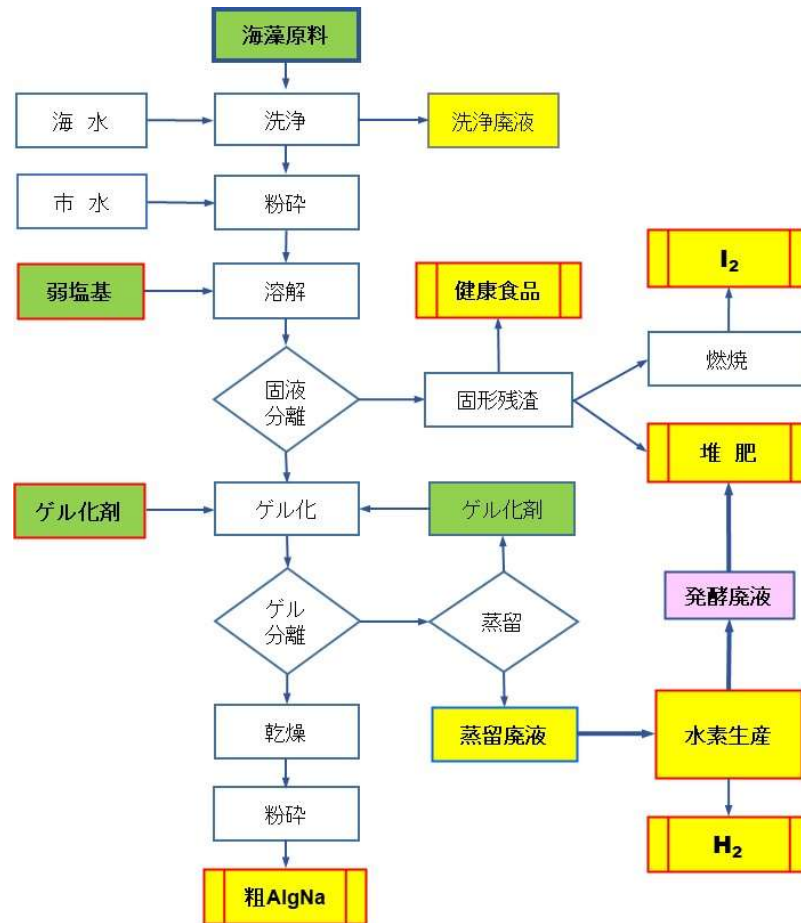


図 5. 弱塩基を使用しゲル化剤を蒸留回収するアルギン酸ソーダ製造フロー図

図 5 にそのフロー図を示すように、可溶化、ゲル化に強酸・強塩基を使用する従来法と異なり、家庭で使用している弱アルカリと安全なゲル化剤（エタノール）を使用した製造方法で、実験をもとに製造コストを検討した結果、コンブ購入費をアルギン酸製造で負担しても経済性が成り立つ可能性がある」と結論できた。コンブの収穫時期は北海道で 6 月から 10 月、岩手で 4 月半ばから 8 月半ば、横浜では 3 月から 4 月半ばと栽培地で異なるが、海士町データに基づく幹ロープ 100 m で 6 t の生産量が確保できるなら、1 t/d の処理を 300 日近く行うには 50 本の幹ロープを 1~2 ha の海域で栽培すれば十分である。200 t ほどの貯蔵設備と水素製造プラントを併設すれば、廃棄物の極めて少ない生産設備が建設できるので、2030 年までにモデル地区を設定して実証試験を行う価値はある

だろう。

5. おわりに

中国の非常に大量のマコンブ生産は日本列島と同じくらい長大な海岸線に沿って行われているが、文献には 2000 年の栽培面積は 248 万 ha で 415 万 t-wet の収穫であった¹⁶⁾とある。このデータによれば、わずか 2 t/ha という非常に悪い反当収量で栽培しているということである。一方、北海道の羅臼では 1986 年にマコンブより反当収量の少ないオニコンブで 145 t/ha の実験値を得ており¹⁷⁾、海士町の実験方法で 100m 幹ロープを 3m 間隔で張れば 200 t/ha の収穫が推測されるので、日本の技術なら同じ栽培面積で 70~100 倍の収穫量が得られることになる。表 1 において、2019 年の収穫量が栽培面積は変わらず 100 倍になるなら、2030 年目標パラメータ値でも FCV 5 千 4 百万台分の燃料あるいは 1,000 億 kWh の電力量を得る計算になる。この計算値は、中国が現に栽培している面積で日本の電力量の 10% を供給できることを意味し、2050 年目標パラメータ値なら優に 35% の電力量を供給できることを意味する。この大きな供給率は、コンブ栽培でエネルギー自立を目指そうとする者にとっては、非常に勇気づけられる論証データである。

2014 年のエネルギー関係ロードマップには、バイオマスエネルギーの導入普及にあたっては原料収集、運搬に多額の費用を要するので、①スケールメリット、②原料の安定的な調達、③需要地近傍での消費（地産地消）、の確立が課題とある。陸上バイオマスは資源が広い地域に分散しているため非効率な収集・運搬を必要とするが、コンブバイオマスについては、処理プラントに近接する海域で、処理規模に応じて栽培することになるから、効率よく収集できるであろう。大規模栽培時には、収穫時期が地域で異なることを考慮すると、工場船のような移動式処理プラントで生産ということも考えられる。このように栽培は工場への輸送を考慮して行われるから、ロードマップでの憂慮は他のバイオマスエネルギーに比べれば解決しやすい問題と思われる。しかし、これらの問題を検討するために、やはり自治体などの協力を仰ぎながら 1 ha 程度の海面を確保してコンブの栽培を行い、糖蜜水素発酵プラント¹⁰⁾と同じ規模の 0.5~1 t-wet kelp/d 処理プラントを港湾に隣接して建設する必要がある。弊社は、大学での研究成果を、経験のある担当役員が聴取してプラント設計を行ってきたが、本提案では、水素発酵だけでなくアルギン酸ソーダ生産も加わったので、興味を覚える方々のご協力を頂くことを期待している。

以上のことから、我々が開発しなければならない課題をまとめると、

- i) 2030 年、2050 年目標コスト達成に必要なコンブのマニトール含有率と発酵水素収率の向上目標を克服する。
- ii) 少ない栽培面積で効率的に収穫するために、コンブの反当収率を高める栽培技術を開発する。
- iii) 収穫期間を長くして貯蔵期間を短くするために、栽培法・品種を改良する。
- iv) 水素発酵の廃液を栽培の栄養として利用する施肥方法を開発する。

また、本文で話題にしなかった課題としては、以下のようなことが挙げられる。

- v) 蒸留の熱、乾燥の熱の獲得をどうするか。
- vi) 収穫期間が短く、収穫期が栽培地で異なる問題を工場船など新しい技術で解決する。
- vii) 栽培地で収穫量が異なる原因を明らかにする。

viii) アルギン酸ソーダの生産量が膨大になるので、新規商品の開発を精力的に行う。

ix) ワカメの品種改良でマンニトール含有率を 8%以上に高める。なぜなら、ワカメはマンニトール含有率が低いので現在は水素生産の原料バイオマスにならないが、収穫時期が例えば岩手なら 2 月半ばから 3 月半ばとコンブとは異なるので、マンニトール含有率が 8%以上に高まれば、コンブに代わるアルギン酸ソーダ製造と水素製造の原料になる。したがって、二毛作を行えば、効率よく養殖場とプラントを稼働できるだけでなく貯蔵用冷蔵庫の容積も小さくできる。

以上述べたように、コンブをエネルギー資源として利用するにはまだ多くの課題がのこっているが、既にエネルギー自立に十分寄与するほどの大量栽培が外国では行われているので、現状の水素生産のコスト試算を検証すれば、国策に値するプロジェクト提案であるかどうか、明らかになるのではなからうか。

文献

- 1) 資源エネルギー庁, エネルギー白書 2021, p.81
- 2) 総合エネルギー統計(1990~2019 年度確報), stte_jikeiretu2019b_kakuhour
- 3) 資源エネルギー庁, 2020—日本が抱えているエネルギー問題 (前),
www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2020_1.html
- 4) 谷生重晴, バイオ水素とキャリア開発の最前線, p.33-42, シーエムシー出版 (2015)
- 5) e-Stat, 海面漁業生産統計調査
- 6) FAO, Fishery and Aquaculture Statistics (FishstatJ) (2021)
- 7) FAO, Training Manual 89/5, Laminaria Seafarming in China, Chap.1 (1989)
- 8) 三本菅善昭, 水産庁北海道区水産研究所研究報告, 49 号, p.1-78 (1984)
- 9) 依田欣文ら, 応用藻類学会春季大会, (2011)
- 10) 谷生ら, 水素エネルギー協会, 第 33, 34, 35, 36 回大会 (2013~2016)
- 11) Tanisho, S., BIOHYDROGEN II, p.131-140, Pergamon (2001). Tanisho, S. and T. Suganuma, Proc. 14th WHEC, Montreal, in CD #1802 (2002)
- 12) Harada, M and S. Tanisho, Proc. 16th WHEC, Lyon, in CD III-329 (2006)
- 13) Yan Wu et al., Biotechnol Biofuels, 10:248, p.1-15 (2017)
- 14) 岩元勝昭, 月刊フードケミカル, 2009 -10, p.29-32 (2009)
- 15) Global Information, Inc. 市場調査資料 (2019)
- 16) 楊ら, 北海道大学農経論叢, 64, p.41-51 (2009)
- 17) 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)

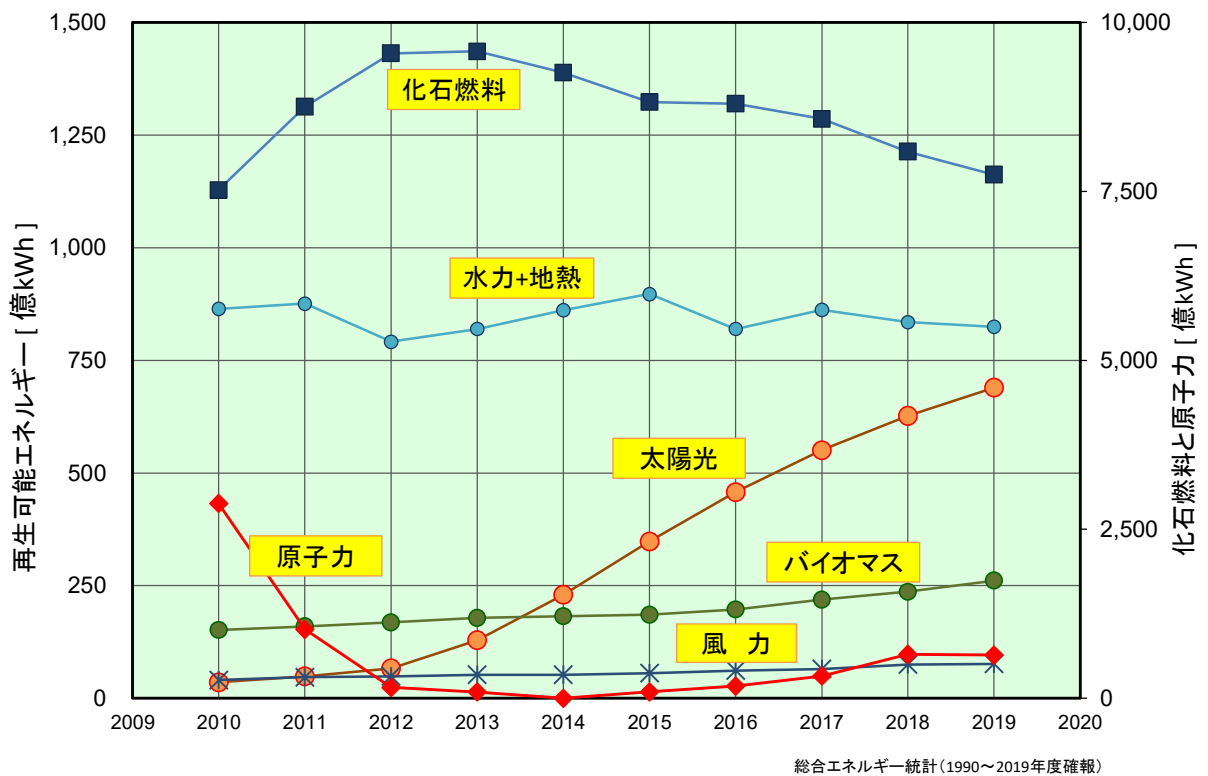


図1. 日本の一次エネルギー供給源の推移²⁾。2019年の供給割合は、化石燃料が85%、原子力が3%、再エネ・その他が12%である。

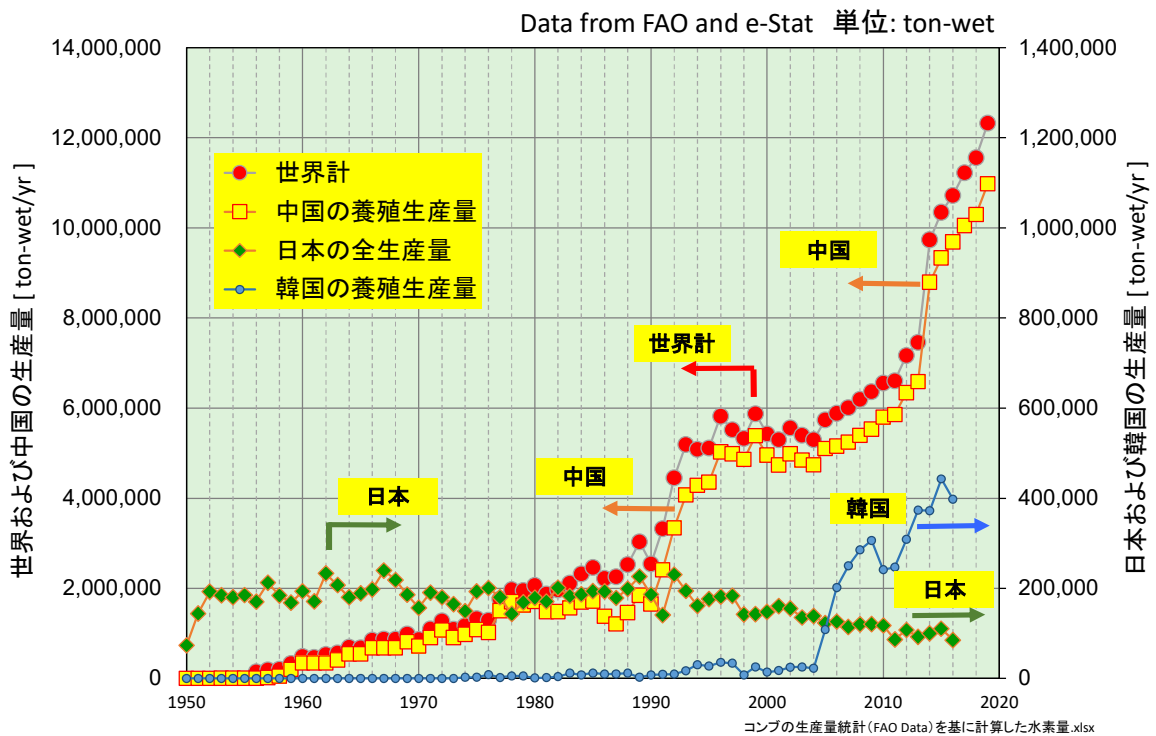


図2. 日本⁵⁾、中国、韓国のコンブ生産量の経年推移 (FAO 2021 のデータ⁶⁾ から)

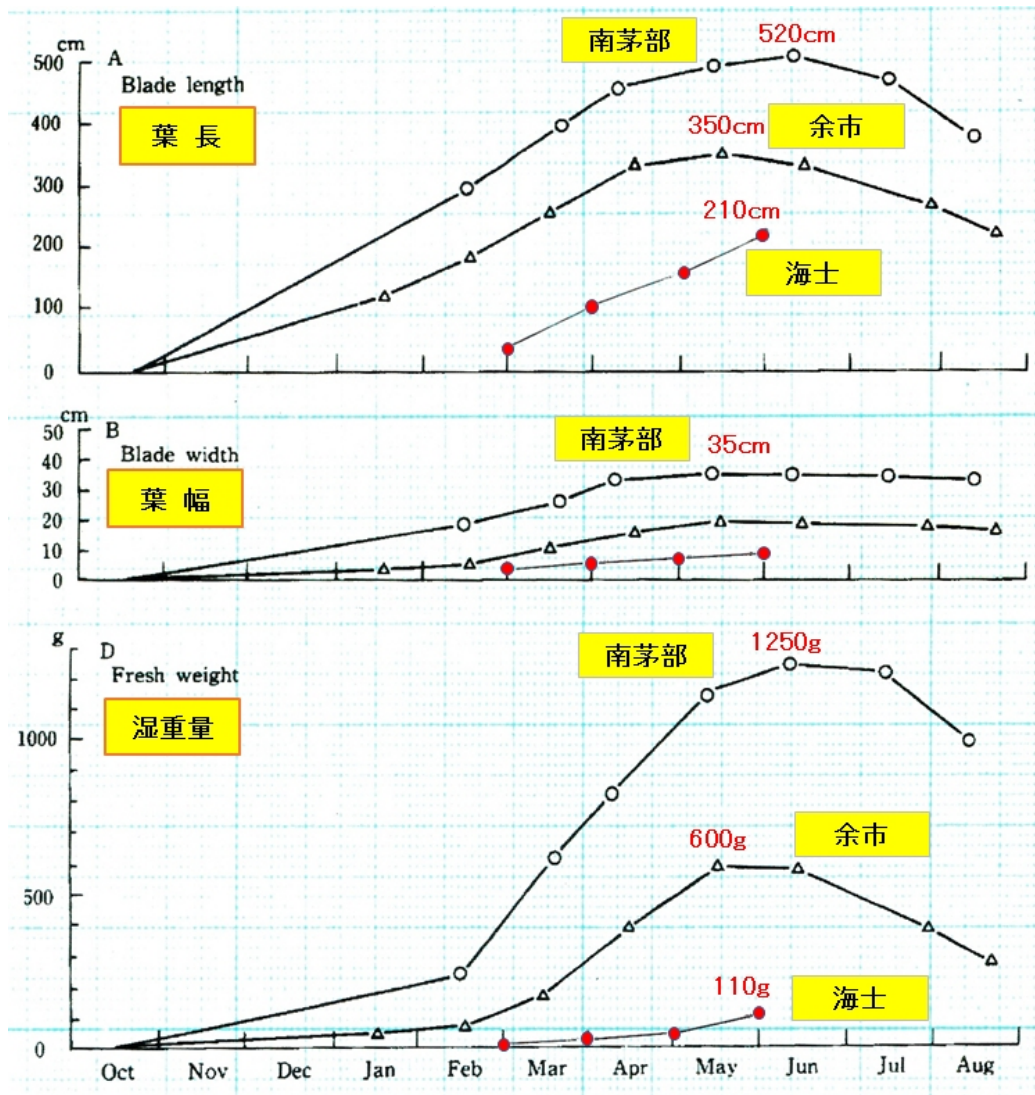


図3. 異なる栽培地(南茅部、余市、海士)でのマコンブ葉体(孢子体)の成長状況 (8, 9)

- | | | | |
|-----|---|------|---------------------------|
| 食用品 | } | 葉体商品 | : 出汁昆布・野菜昆布・土産商品・贈答商品 |
| | | 加工食品 | : 佃煮・とろろ昆布・刻み昆布・昆布茶・酢昆布など |
| 工業品 | } | 食品 | : 食品添加剤加工・エキス抽出品・粉末加工エキス |
| | | 医薬品 | : ヨード・マンニトール |
| | | 産業用品 | : アルギン酸・フコイダン |
| | | その他 | : 肥料・土壌改良材 |

図4. コブの多彩な商品の概要。

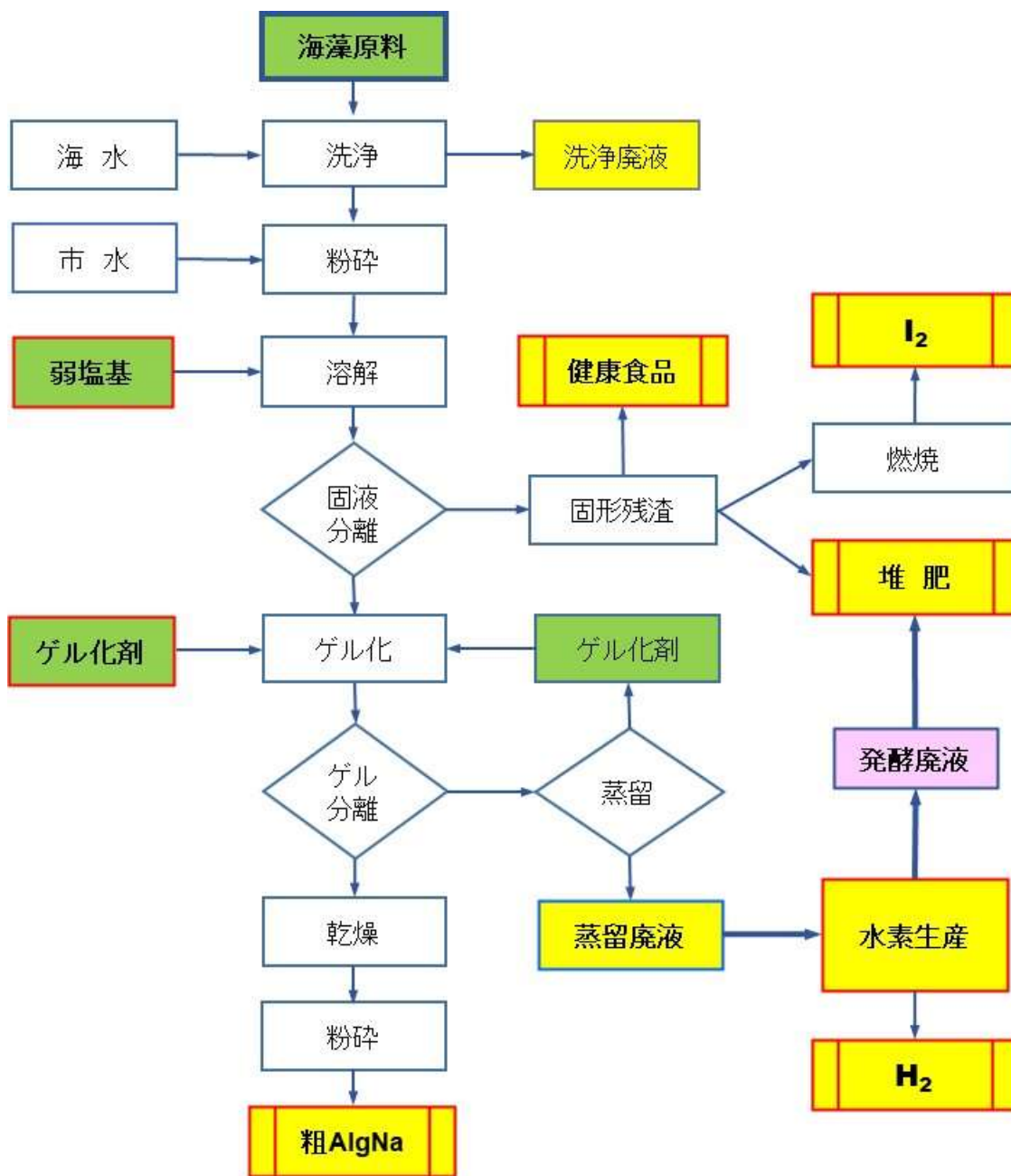


図 5. 弱塩基を使用しゲル化剤を蒸留回収するアルギン酸ソーダ製造フロー図

表 1. 現状および技術開発後に 2019 年の中国のコンブ生産量から生産できる水素量と FCV 供給台数または火力発電の発電可能量。

2019年中国生産量 10,978,362 t-wet kelp	現状	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
Nm3	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

コンブの生産量統計(FAO Data)を基に計算した水素量.xlsx

表 2. 原料購入費はアルギン酸製造の廃液処理と位置付けて 0 円とする水素製造コスト計算。

(a) 発酵の諸条件。原料処理量、糖質含有率、水素収率をパラメータとする

操作条件の種類	(A)	(B)	(C)	(D)	
① 原料処理量	1	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)	0	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

(b) パラメータの変化に連動する処理関係諸量(発酵槽の体積)

⑩ 処理糖量 ①×②	80	800	1500	1500	kg-man./d
⑪ 必要市水量 (⑩-⑩×⑦)/⑦-①×④	1.8	18	41	41	t/d
⑫ 全流動液量 ①+⑪	2.8	28	51	51	t/d
⑬ 発酵槽容積 ⑫/(24/⑥)	0.35	3.5	6.4	6.4	m ³
⑭ 消費動力 ⑧×⑫	17	174	319	319	kWh/d

(c) パラメータの変化に連動する水素収量と原料コスト

⑮ 水素生産量 ③×⑩	24	244	554	1,846	Nm ³ /d
⑯ 水素生産量 ⑨×⑮	7,326	73,255	166,154	553,846	Nm ³ /yr
⑰ 水素製造 原料コスト ①×⑤/⑮	0.00	0.00	0.00	0.00	¥/Nm ³ -H ₂

(d) パラメータの変動に連動するプラント運転各種経費

建設費	4,269	16,996	24,425	24,425	k¥
⑱ 償却費(10年均等)	427	1,700	2,443	2,443	k¥/yr
⑲ 保守費(建設費の3%)	128	510	733	733	k¥/yr
⑳ 動力費 ⑨×⑩×¥20	105	1,045	1,913	1,913	k¥/yr
㉑ 市水費 ⑪×¥60	32	322	738	738	k¥/yr
㉒ 薬品費 50¥/kg-NaOHの時	79	787	1,786	1,385	k¥/yr
㉓ プラント人件費	0	0	0	3,000	k¥/yr
㉔ 総支出 ⑱+⑲+⑳+㉑+㉒+㉓	770	4,364	7,612	10,210	k¥/yr

(e) 建設費を除く製造コスト(10年均等プラント償却費を含む)

㉕ 水素製造 諸費コスト㉔/⑰	105.2	59.6	45.8	18.4	¥/m ³ -H ₂
㉖ 水素製造コスト 原料費含む ⑰+㉕	105.2	59.6	45.8	18.4	¥/m ³ -H ₂
㉗ 水素製造コスト 償却費含まず	46.9	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

表 3. アルギン酸の用途分野と使用例

食品分野		
食品添加物として		
	既存添加物	アルギン酸
	指定添加物	アルギン酸ナトリウム、アルギン酸カリウム、アルギン酸カルシウム、アルギン酸アンモニウム、アルギン酸プロピレングリコールエステル ¹⁾ の5種類
個別用途別使用例		
粘性	増粘剤	即席麺、ラーメン、うどん、そば、パンなどの生地 ²⁾ に添加 ジャム、ソース、スープ、ケチャップ、蒲鉾、佃煮等
	安定剤	サラダドレッシングの乳化安定剤、乳酸菌飲料の分散安定剤、ビールの泡沫安定剤、アイスクリームの滑らかさなど
キヒセドロロゲゲル	ゲル化剤	ベーカリーフィリングの耐熱性付与、オニオンリング等の再成形食品のバインダー、人工イクラ、人工フカヒレ等の成形など
	被膜加工剤	チーズ、ソーセージ、ハム等
	食物繊維素材	食物繊維飲料など。コレステロールの対外排泄作用を用いた特定保健用食品として
医療分野		
	アルギン酸塩類	歯科材料(歯科印象剤)として
	アルギン酸	アルギン酸の繊維状ゲルが手術糸に
吸湿性	アルギン酸塩	アルギン酸塩は創傷被覆材に(カルトスタットCDやソープサンなど)
	アルギン酸ナトリウム粉末	アルギン酸ナトリウム粉末(アルト®)は皮膚での出血や消化管での内視鏡止血に
	アルギン酸ナトリウム水溶液	5%アルギン酸ナトリウム水溶液(アルロイドG®)は胃炎・胃潰瘍・消化管出血に
工業分野		
アルギン酸塩類	アルギン酸塩類	アルギン酸塩類が繊維、製紙、鉄鋼、水産、農業などに広く使われている
	染色業	捺染の糊料
	製紙業	製紙業 - 辞書などの特殊紙の表面処理、ノンカーボン複写紙のインクコート剤
	鉄鋼業	鉄鋼業 - 被覆溶接棒の加工の際、フラックスのバインダー
	水産業	水産業 - 養殖魚に与える餌料(モイストペレット)のバインダー
	農業	農業 - 栽培用培土を固化させ、機械耐性を付与するバインダー
	アルギン酸カルシウム	細胞や酵素などの固定化・カプセル化に

表 アルギン酸の用途.xlsx

2019 年中国生産量 10,978,362 t-wet kelp	現状	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
Nm3	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

コンブの生産量統計 (FAO Data) を基に計算した水素量.xlsx

(a) 発酵の諸条件。原料処理量、糖質含有率、水素収率をパラメータとする

操作条件の種類	(A)	(B)	(C)	(D)	
① 原料処理量	1	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)	0	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

(b) パラメータの変化に連動する処理関係諸量(発酵槽の体積)

⑩ 処理糖量 ①×②	80	800	1500	1500	kg-man./d
⑪ 必要市水量 (⑩-⑩×⑦)/⑦-①×④	1.8	18	41	41	t/d
⑫ 全流動液量 ①+⑪	2.8	28	51	51	t/d
⑬ 発酵槽容積 ⑫/(24/⑥)	0.35	3.5	6.4	6.4	m ³
⑭ 消費動力 ⑧×⑫	17	174	319	319	kWh/d

(c) パラメータの変化に連動する水素収量と原料コスト

⑮ 水素生産量 ③×⑩	24	244	554	1,846	Nm ³ /d
⑯ 水素生産量 ⑨×⑮	7,326	73,255	166,154	553,846	Nm ³ /yr
⑰ 水素製造 原料コスト ①×⑤/⑮	0.00	0.00	0.00	0.00	¥/Nm ³ -H ₂

(d) パラメータの変動に連動するプラント運転各種経費

建設費	4,269	16,996	24,425	24,425	k¥
⑱ 償却費(10年均等)	427	1,700	2,443	2,443	k¥/yr
⑲ 保守費(建設費の3%)	128	510	733	733	k¥/yr
⑳ 動力費 ⑨×⑩×¥20	105	1,045	1,913	1,913	k¥/yr
㉑ 市水費 ⑪×¥60	32	322	738	738	k¥/yr
㉒ 薬品費 50¥/kg-NaOHの時	79	787	1,786	1,385	k¥/yr
㉓ プラント人件費	0	0	0	3,000	k¥/yr
㉔ 総支出 ⑱+⑲+⑳+㉑+㉒+㉓	770	4,364	7,612	10,210	k¥/yr

(e) 建設費を除く製造コスト(10年均等プラント償却費を含む)

㉕ 水素製造 諸費コスト㉔/⑰	105.2	59.6	45.8	18.4	¥/m ³ -H ₂
㉖ 水素製造コスト 原料費含む ⑰+㉕	105.2	59.6	45.8	18.4	¥/m ³ -H ₂
㉗ 水素製造コスト 償却費含まず	46.9	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

食品分野		
食品添加物として		
	既存添加物	アルギン酸
	指定添加物	アルギン酸ナトリウム、アルギン酸カリウム、アルギン酸カルシウム、アルギン酸アンモニウム、アルギン酸プロピレングリコールエステル <small>の 5 種類</small>
個別用途別使用例		
粘性	増粘剤	即席麺、ラーメン、うどん、そば、パンなどの生地に添加 ジャム、ソース、スープ、ケチャップ、蒲鉾、佃煮等
	安定剤	サラダドレッシングの乳化安定剤、乳酸菌飲料の分散安定剤、ビールの 泡沫安定剤、 アイスクリームの滑らかさなど
キセロゲル ヒドロゲル	ゲル化剤	ベーカリーフィリングの耐熱性付与、オニオンリング等の再成形食品のバ インダー、 人工イクラ、人工フカヒレ等の成形など
	被膜加工剤	チーズ、ソーセージ、ハム等
	食物繊維素材	食物繊維飲料など。コレステロールの対外排泄作用を用いた特定保健用 食品として
医療分野		
	アルギン酸塩類	歯科材料(歯科印象剤)として
	アルギン酸	アルギン酸の繊維状ゲルが手術糸に
吸湿性	アルギン酸塩	アルギン酸塩は創傷被覆材に(カルトスタット CD やソープサンなど)
	アルギン酸ナトリウム粉末	アルギン酸ナトリウム粉末(アルト®)は皮膚での出血や消化管での内視 鏡止血に
	アルギン酸ナトリウム水溶液	5%アルギン酸ナトリウム水溶液(アルロイド G®)は胃炎・胃潰瘍・消化管 出血に
工業分野		
アルギン酸塩類	アルギン酸塩類	アルギン酸塩類が繊維、製紙、鉄鋼、水産、農業などに広く使われている
	染色業	捺染の糊料
	製紙業	製紙業 - 辞書などの特殊紙の表面処理、ノンカーボン複写紙のインクコー ト剤
	鉄鋼業	鉄鋼業 - 被覆溶接棒の加工の際、フラックスのバインダー
	水産業	水産業 - 養殖魚に与える餌料(モイストペレット)のバインダー
	農業	農業 - 栽培用培土を固化させ、機械耐性を付与するバインダー
	アルギン酸カルシウム	細胞や酵素などの固定化・カプセル化に

表 アルギン酸の用途.xlsx