

日本の水素社会はコンブから！

2023/2/6

コンブのバイオマス生産性は極めて高い

- 実験では145t-wet/ha(羅臼)¹⁾、6t-wet/100m(海士町)を収穫²⁾
- 中国では248.6万haの海域で栽培(四国の1.3倍)(2000年)³⁾ 収穫量は1,100万t-wet(2019年)⁴⁾に達す
- 九州以北の海域で栽培収穫が可能

- 主成分は8%強含蓄するマンニトール
- マンニトールは発酵水素生産の**最良の原料**
- 副成分(8%弱占有)のアルギン酸は **高価な産業資材**(17万円/20kg)
- その他、ヨウ素、グルタミン酸などを多量に含む

コンブの主成分は発酵水素生産に最も適した炭水化物である

- 水素発酵はメタン発酵より生産速度は**50倍以上**速くプラントの規模は**数100分の1**でも生産可能⁵⁾
- **コンブ**の主成分マンニトールから3Nm³/m³-槽・hの**高速**で水素を発生⁵⁾

- 品種改良・収率改善で180Nm³-H₂/t-wet kelpの水素生産が可能⁶⁾
- 薄い水溶液で産物が得られるエタノール発酵と異なり**気体**で産物発生するので、**利用可能エネルギー**が多い⁷⁾

原料費を無料にすれば現在でも30円/Nm³が指呼の間にある

- 副成分の産業資材化でコンブ栽培費を負担すれば、水素生産は廃水处理と位置付けできる
- エネルギー生産が目標なら多量の加工用原料が必要
- コンブ栽培域を拡げて原料確保の要求を満たす
- **海を多層利用**する栽培技術の確立で目的を達成できる

- 水素発酵は原料の滞留時間**1~3時間**で水素生産が可能(メタン発酵は2日~20日の滞留が必要)
- 原料費が**無料**なら水素製造コストは**32円/Nm³前後**⁸⁾
- CO₂削減効果は**85%**⁹⁾に上る(化石燃料電気による電解水素生産に比べて)

エネルギー自給も視野に入る技術開発！

2023/2/6

コンブの開発目標

- ◆ 高密度多層栽培技術の確立で**300t/ha**以上を収穫
- ◆ 品種改良でマンニトール蓄積率を**15%**に向上
- ◆ 栽培・収穫作業の**機械化**による労力軽減
- ◆ 大量に生産されるコンブの**新規利用方法**の開発

水素発酵の開発目標

- ◆ 遺伝子操作による水素収率の**改善技術**開発
E.a. の10倍が目標、現在1.5~3倍に向上した報告あり
- ◆ 薬品使用量減量のための**菌叢培養技術**の確立
- ◆ 発酵廃液の**循環使用技術**の開発

CCUSと並行操作すれば大気中CO2も大幅に削減可能！

- ◆ 水素発酵ではH₂とCO₂が 1:1 の混合ガスとして生産され分離される
- ◆ CO₂は**コンブバイオマス由来**だから排出削減と同時に大気中の濃度をも**低減！！**

開発の達成で自己消費は少なくなり、利用可能エネルギー量は生産量の**90%** を越える¹⁰⁾

栽培面積を中国の2000年面積まで広げれば**3,500億kWh/年の発電**が可能¹¹⁾

CO₂削減量は**3,600億kg-CO₂/年**に上る（発電削減とH₂生産時CCUSの和）¹²⁾

数百兆円規模にも上るアルギン酸ソーダなどを利用する**多くの新産業が興隆**する

コンブ栽培に関連する巨大な**海洋産業**と水素利用に関連する**新しい産業**が隆盛する

“日本の水素社会はコンブから”の参考文献

- 1) 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.326, 光琳 (1991)
- 2) 第10回応用藻類学会ポスター(2011)、依田欣文、隠岐海士町沿岸におけるマコンブ2種苗の生長と生長量
- 3) コンブ生産における中国の動向と台湾市場、楊ら、農経論叢、Vol.64, p.44, 2009. 北大
- 4) FAO Data、FAO. 2021. Fishery and Aquaculture Statistics.
- 5) 資料3-p.4, 図2, p.4, t-5t
- 6) 資料3-p.8, 表7 行(4) x 列(2050年目標)
- 7) 資料3-p.8, 表7 行(8) x 列(2050年目標)
- 8) 資料2-p.7, 表2 列(B) x 行(7)
- 9) 2023 0112 コンブ原料水素製造におけるCO2削減率.pptx. 2022 菌叢によるCO2削減率計算.xlsx
- 10) 資料3-p.8, 表7 行(8) x列(2050年目標)
- 11) 新 2022 1126 栽培面積・発酵水素生産量・供給可能台数・燃料電池自動車・普及・必要.xlsx
- 12) 資料1-p.2, 表1, コンブの生産量統計 (FAO Data) を基に計算した水素量 1 .xlsx, sheet “FCV・発電量”

資料1) 2021年HESS大会予稿集、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

資料2) 2021年CMC出版 第12章 発想転換で2050年目標コストをクリアーする栽培海藻による発酵水素生産技法

資料3) 2022年 技術情報協会 第2章第14節 バクテリアを用いた海藻バイオマスを原料とする水素製造技術と総合システム

メタン発酵と水素発酵のエネルギー生産速度・装置容積効率比較.xlsx

コンブの生産量統計 (FAO Data) を基に計算した水素量 1 .xlsx、sheet “FCV・発電量”

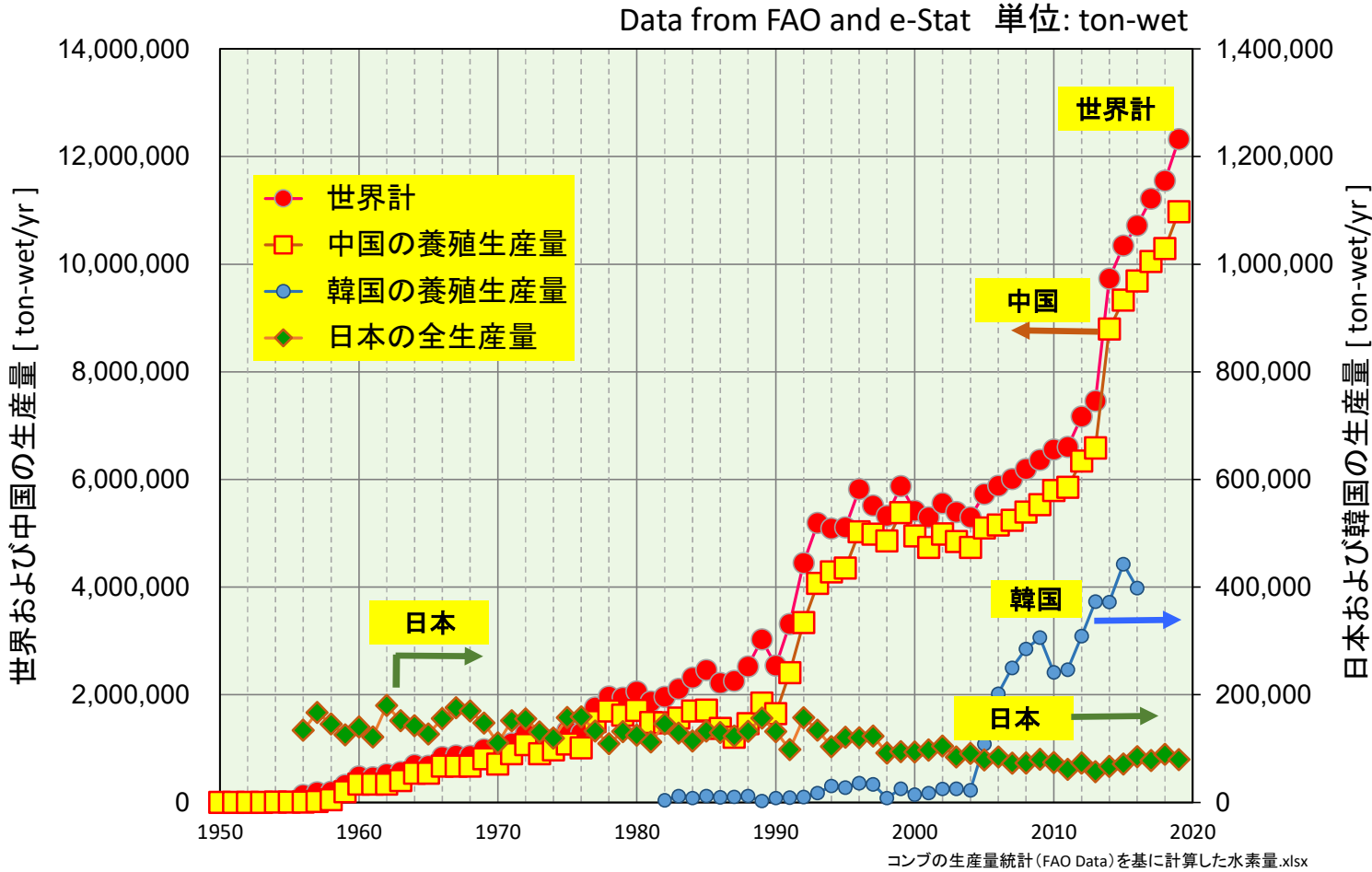
コンブのバイオマス生産性は極めて高い

- 実験では**145t-wet/ha(羅臼)**¹⁾、
6t-wet/100m(海士町)を収穫²⁾
- 中国では**248.6万haの海域で栽培**(四国の1.3倍)(2000年)³⁾
収穫量は 1,100万t-wet (2019年)⁴⁾に達す
- **九州以北の海域**で栽培収穫が可能

- **主成分は8%強含蓄するマンニトール**
- **マンニトールは発酵水素生産の最良の原料**
- **副成分(8%弱占有)のアルギン酸は**
高価な産業資材(17万円/20kg)
- その他、ヨウ素、グルタミン酸などを多量に含む

圧倒的に大量生産する中国のコンブ産業

コンブの生産量統計 (Data from FAO) 単位: ton-wet



2019年のコンブ生産量

中国：1,098万トン

日本： 10万トン

反当収量 (t/ha) 比較

中国：1.7 t/ha¹⁾(2000年)

日本：145 t/ha²⁾(1986年)

200~300t/ha³⁾(2011年)



写真3 果てしなく続くコンブ養殖場風景 (山東省威海地方)

中国と日本のコンブ栽培技術比較

2023/01/18

2019 中国と日本のコンブ生産性比較.pptx

中国の栽培技術

- ◆ 2000年の栽培面積と収穫量*1) **248万ha、415万t-wet**
- ◆ 反当収量 **1.7 t-wet/ha**

日本の栽培技術

- ◆ 1986年羅臼の実験反当収量*2) **145 t-wet/ha**
- ◆ 2011年海士町での実験反当収量*3) **200~300 t-wet/ha**

日本の栽培技術の方が100倍以上勝る！！

ただし、日本の2019年収穫量は**7.9万t-wet**（農水省 e-Stat）

➤ 2019年の中国の収穫量は **1,098万t-wet** (FAO data)

➤ 2000年栽培面積で、
日本なら**10億ton以上の収穫量**が期待できる！

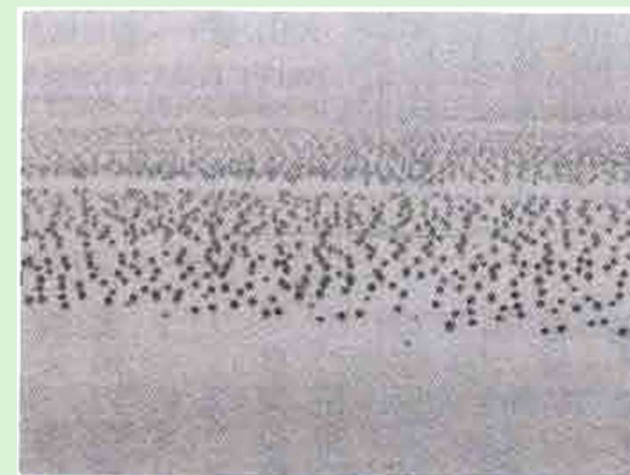
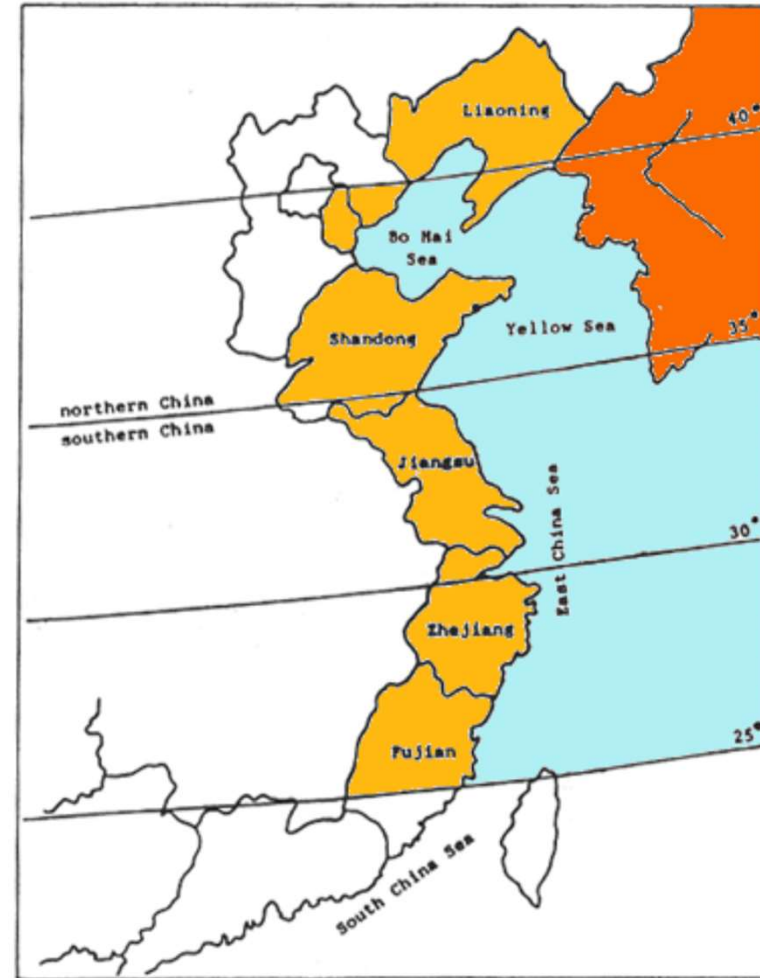


写真3 果てしなく続くコンブ養殖場風景（山東省威海地方）

*1)楊清関ら, 北海道大学農経論叢, **64**, p.41-51 (2009).

*2)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). *3)依田欣文ら, 応用藻類学会春季大会, (2011)

マコンブの自生海域と中国の栽培海域



マコンブ (*Laminaria japonica*) の自生は青森県以北で、中国には自生していなかったが、戦中日本から運んだ港湾建設用の岩に付着していた葉体を、日本の研究者が栽培したのが始まりである。

中国の栽培海域 ..
N 25 度以北の茶色の行政区域で栽培している！

folder:中国のコブ栽培技術 FAO文献 Culture of Kelp in China 1989

コブの生産量統計.pptx file:Culture of Kelp (Laminaria japonica) in Chinax-1.htm

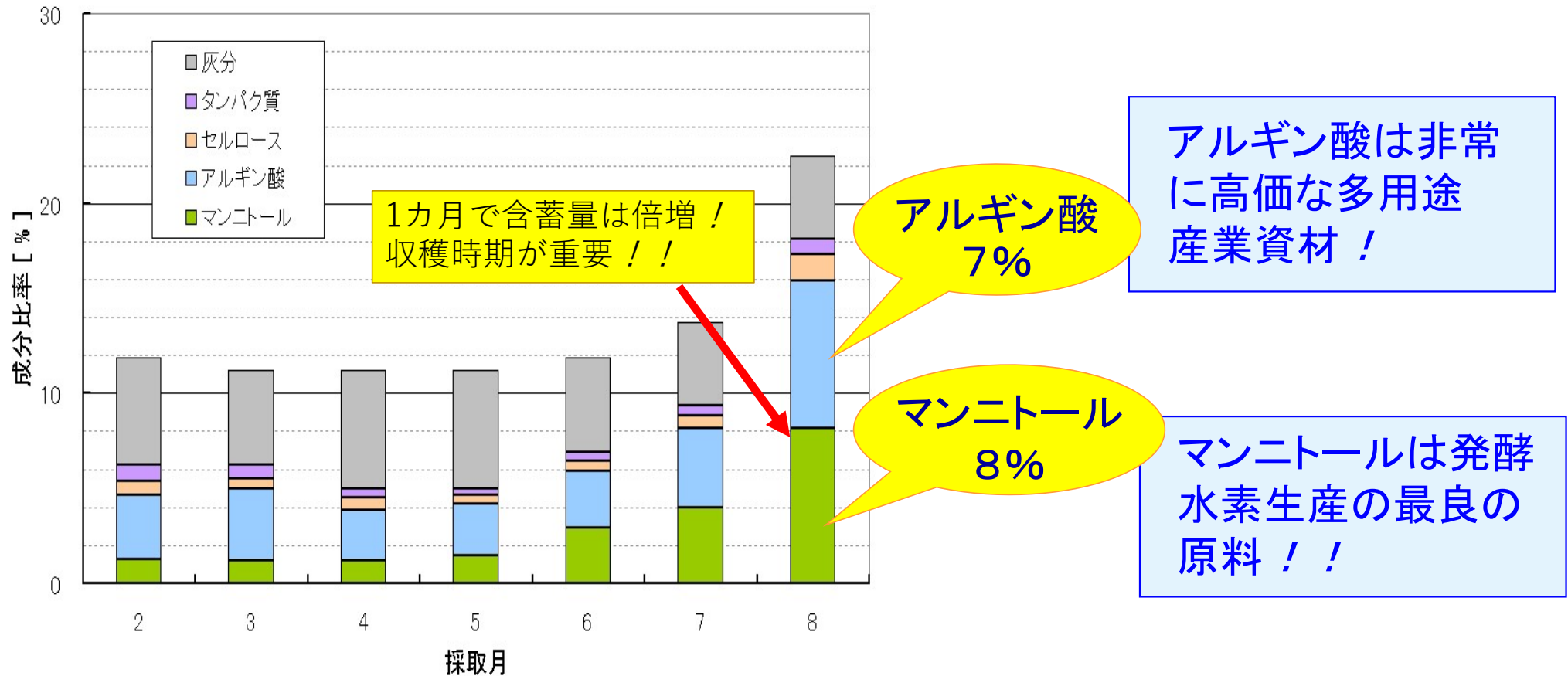
中国のコブ生産海域.pptx

コンブのバイオマス生産性は極めて高い

- 実験では145t-wet/ha(羅臼)¹⁾、
6t-wet/100m(海士町)を収穫²⁾
- 中国では248.6万haの海域で栽培(四国の1.3倍)(2000年)³⁾
収穫量は1,100万t-wet(2019年)⁴⁾に達す
- 九州以北の海域で栽培収穫が可能

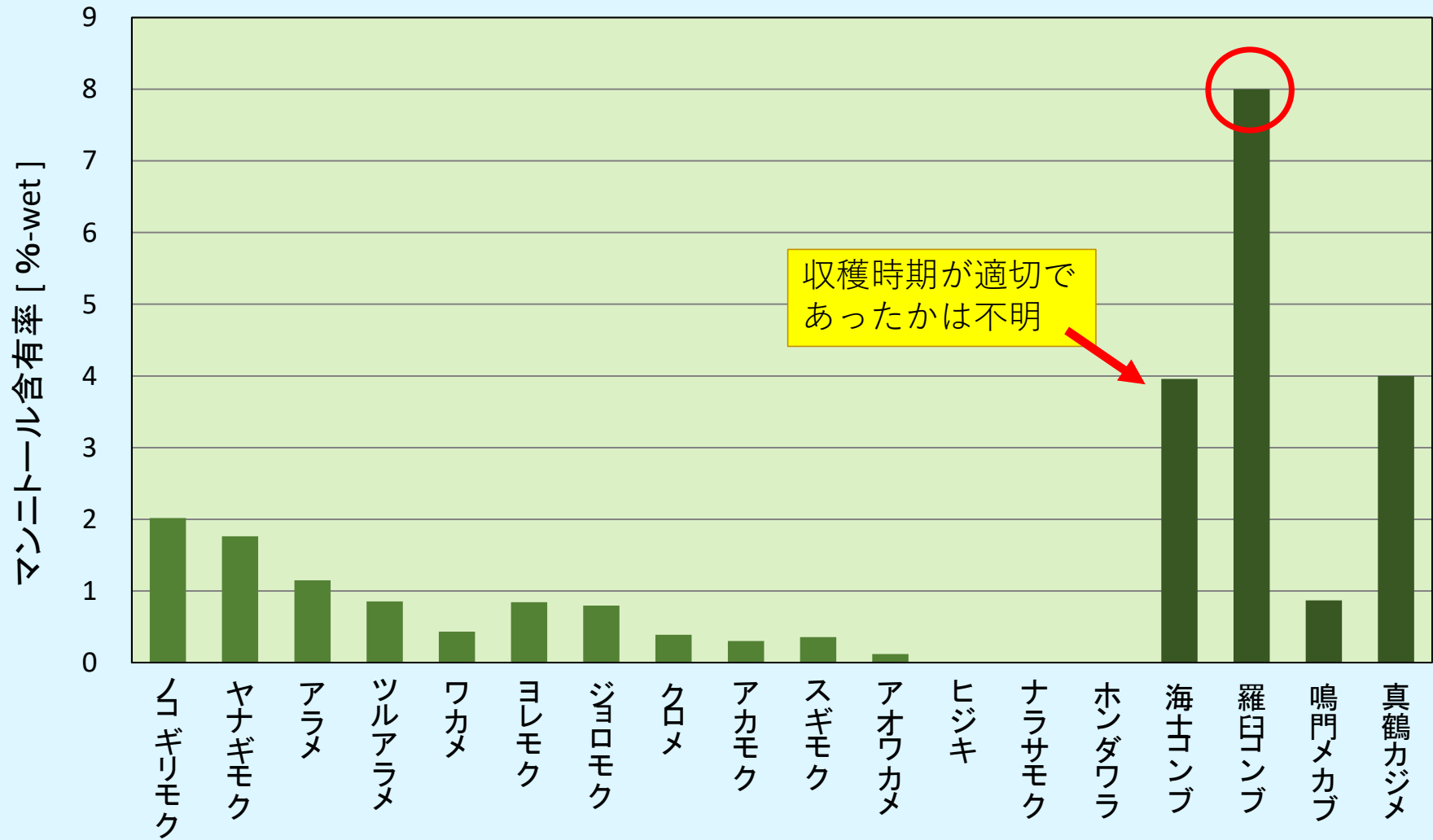
- 主成分は8%強含蓄するマンニトール
- マンニトールは発酵水素生産の最良の原料
- 副成分(8%弱占有)のアルギン酸は
高価な産業資材(17万円/20kg)
- その他、ヨウ素、グルタミン酸などを多量に含む

マコンブの月別マンニトール・アルギン酸含有率有変化



Arranged from data "Yoshiaki SANBONSUGA, Bull.Hokkaido Reg. Fish. Res. Lab., 49, 1-76(1984)"

海士町で採取した各種海藻と他所の海藻のマンニトール含有率（湿重量当たり）



アルギン酸の現在の用途一覧

2023/01/18

2023/2/6

食品分野	
食品添加物として	薬品名
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 コールエステルの5種類

食品分野		
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

粘性、吸湿性、安定性、食品安全性などの性質を利用して非常に幅広い分野で利用が進んでいる。

しかし、アルギン酸の生産量が増加すれば、新しい利用方法の開発など需要の拡大を図る必要がある！！

2023年1月18日 アルギン酸Naの Amazon ネット価格

170,000円/20kg = 8,500円/kg

コンブの主成分は発酵水素生産に最も適した炭水化物である

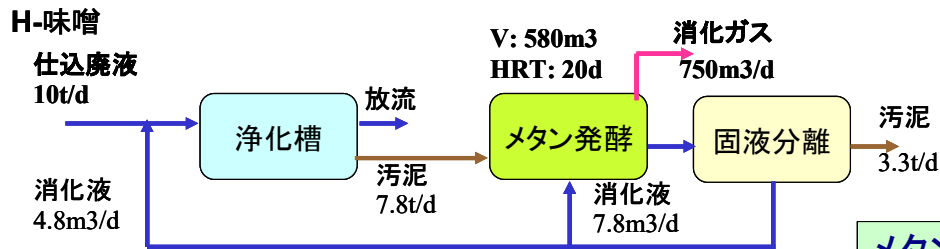
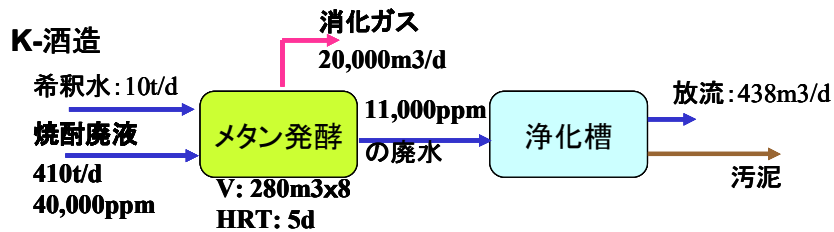
- ▶水素発酵はメタン発酵より生産速度は**50倍以上**速く、
プラントの規模は**数100分の1**でも生産可能⁵⁾
- ▶**コンブ**の主成分マンニトールから
3Nm³/m³-槽・hの**高速**で水素を発生⁵⁾

- ▶品種改良・収率改善で **180Nm³-H₂/t-wet kelp**の水素生産が可能⁶⁾
- ▶薄い水溶液で産物が得られるエタノール発酵と異なり
気体で産物発生するので、**利用可能エネルギー**が多い⁷⁾

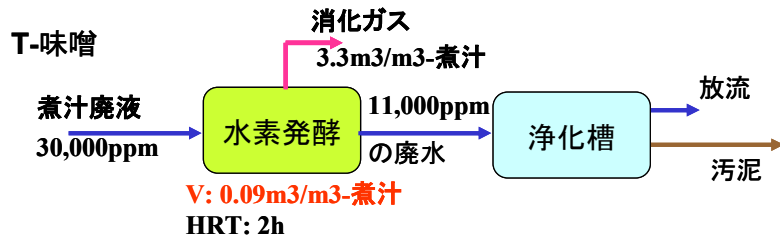
水素発酵の利点

メタン発酵との処理能力比較

メタン発酵の例



水素発酵の例



水素発酵は
装置が極めて小型になる

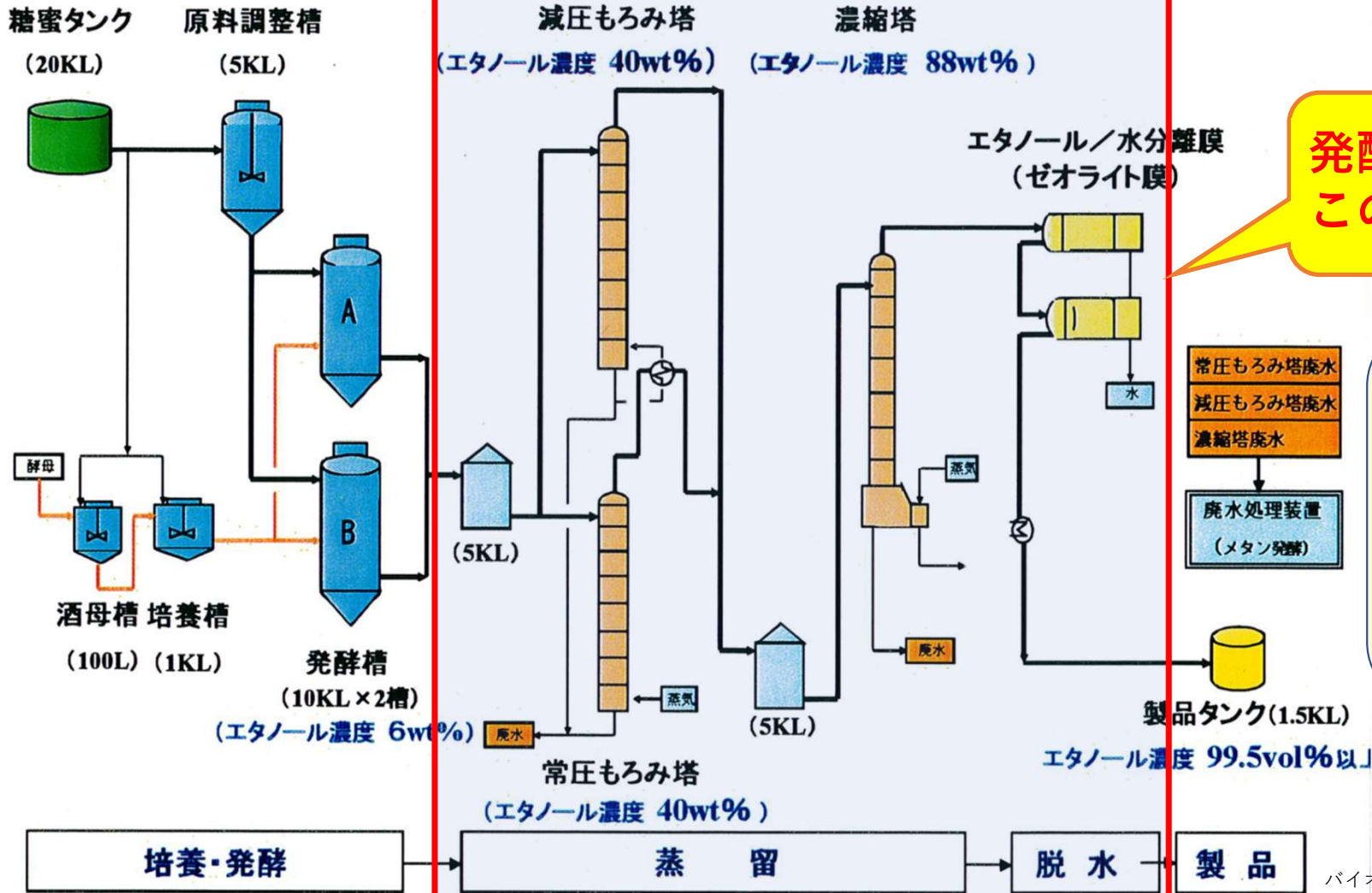
	廃液 処理量 ton/day	発酵槽規模		BOD 改善度 入口/出口
		m ³	m ³ /t・d*1 比容積*2	
メタン発酵 K-酒造	410	2240	5.5	40,000 11,000
メタン発酵 H-味噌	10	580	58.0	-
水素発酵 T-味噌	1	0.1	0.1	30,000 11,000

*1 処理量1トン/日あたりの発酵槽容積

*2 水素発酵のトンあたり容積を1としたときの比容積

水素発酵の利点

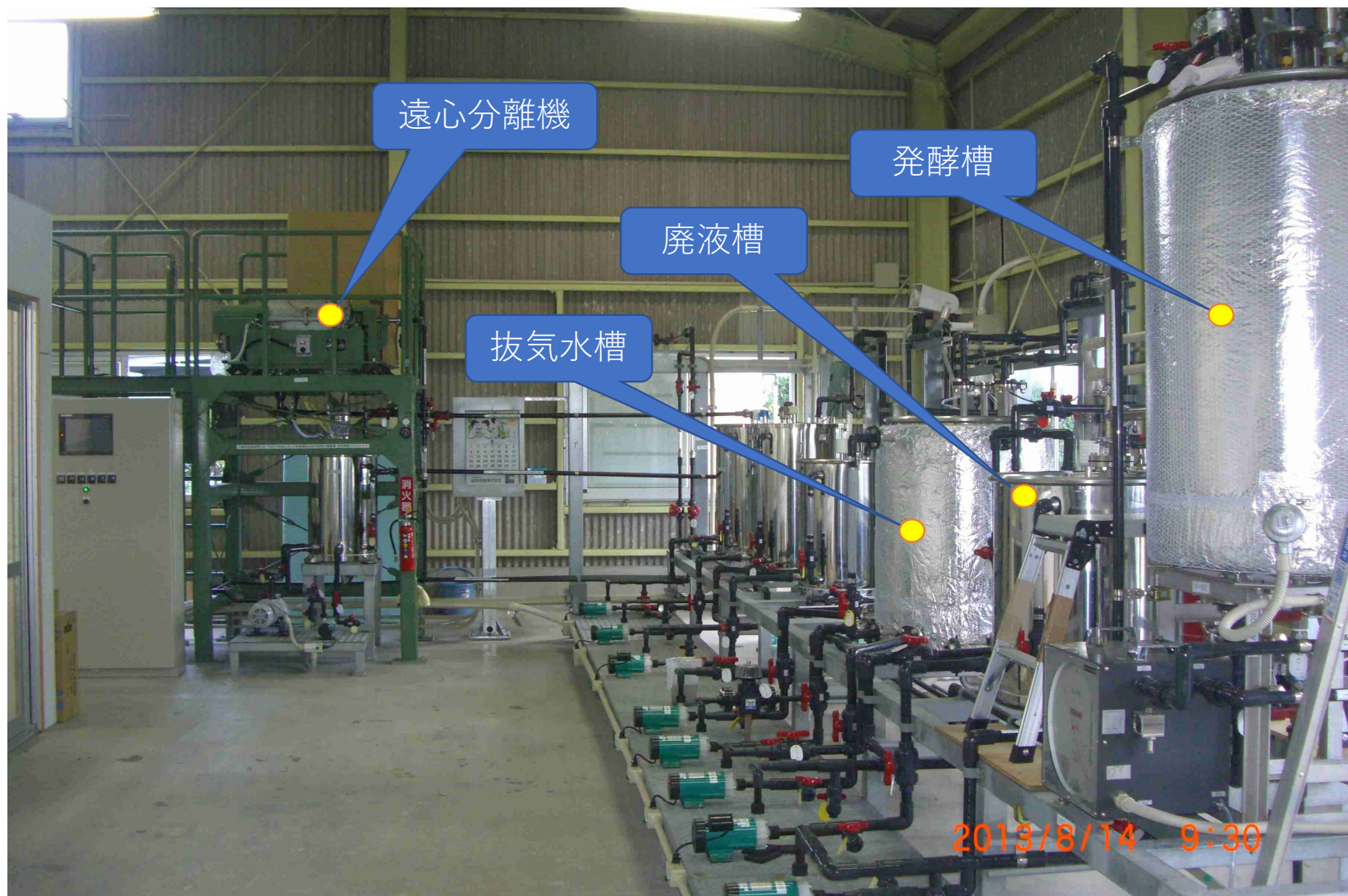
バイオエタノール生産とのフロー比較



発酵水素生産ではこの部分が不要!

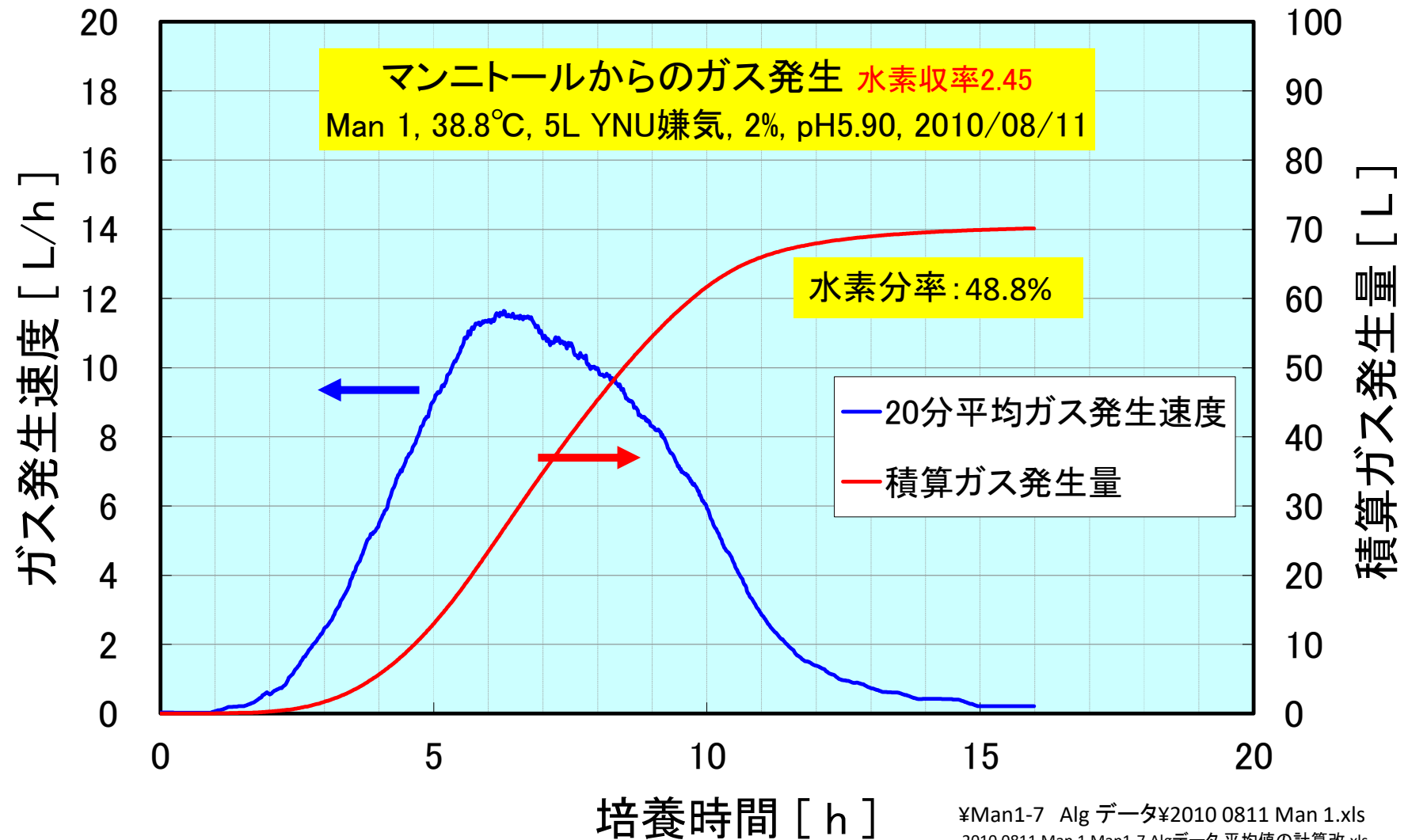
利用可能な濃度までエタノール濃度を濃縮する蒸留塔などエネルギー多消費装置を水素発酵では必要としない

糖蜜を原料とする沖縄パイロットプラントの全体写真



現有菌によるマンニトールからの水素発生

Man1株の場合



コンブの主成分は発酵水素生産に最も適した炭水化物である

- ▶ 水素発酵はメタン発酵より生産速度は50倍以上速く、
プラントの規模は数100分の1でも生産可能⁵⁾
- ▶ コンブの主成分マンニトールから
3Nm³/m³-槽・hの高速で水素を発生⁵⁾

- ▶ 品種改良・収率改善で 180Nm³-H₂/t-wet kelpの水素生産が可能⁶⁾
- ▶ 薄い水溶液で産物が得られるエタノール発酵と異なり
気体で産物発生するので、利用可能エネルギーが多い⁷⁾

100t-wet/dのコンブを発酵処理して得られる 水素量と利用可能エネルギー量

		現 状	2030年目標	2050年目標	単 位
改良	マンニトール含有率	8	15	15	%
	水素収率	2.5	3.0	10.0	mol-H ₂ /mol-Man
改良値による推算	薬品使用量 ^{*1)}	0.185	0.148	0.060	kg-NaOH/m ³ -H ₂
	水素生産量	2,462	5,538	18,461	m ³ /(100t-wet/d)
	生産エネルギー量	4,185	9,415	31,385	kWh/d
	自家消費エネルギー量 ^{*2)}	1,980	2,258	2,334	kWh/d
	利用可能エネルギー量	2,205	7,157	29,050	kWh/d
	利用可能率	52.7	76.0	92.6	%

*1) 2030年の薬品使用量減量は菌叢発酵の効果による。2050年推定値は酸代謝が無くなるため。

*2) NaOH使用量が著しく減るため、自家消費エネルギー量が大きく減じる。

*2) AlgNa製造廃液を使用するので予備加工までの消費エネは含んでいない

2022 0802 改 コンブを原料にした水素生産の正味エネルギー生産量.xlsx

この利用可能エネルギー量については今後検証する必要がある

原料費を無料にすれば現在でも30円/Nm³が指呼の間にある

- 副成分の産業資材化でコンブ栽培費を負担すれば、
水素生産は廃水処理と位置付けできる
- エネルギー生産が目標なら多量の加工用原料が必要
- コンブ栽培域を拡げて原料確保の要求を満たす
- 海を多層利用する栽培技術の確立で目的を達成できる

- 水素発酵は原料の滞留時間が1～3時間で水素生産が可能
(メタン発酵は2日～20日の滞留が必要)
- 原料費が無料なら水素製造コストは32円/Nm³前後⁸⁾
- CO₂削減効果は85%⁹⁾に上る
(化石燃料電気による電解水素生産に比べて)

実験値を基に概算した粗アルギン酸製造コスト

経済性の試算	2023/1/10
市販精製AlgNaの価格は 90,000円/20kg	
78%エタノール 5130円/18L=285円/L= 336円/kg-EtOH 溶液	
長谷川さん交渉	
4000円/15kg = 222円/L-EtOH溶液 = 267円/kg-EtOH 溶液	
エタノールの大量購入減価率=4000/5130=0.78	
過炭酸ソーダの推定購入価格=5400*0.78=4200円/ 25kg か？	
実験値 75.2g-EtOH/3.10g-AlgNa= 24.3g-EtOH/g-AlgNa (60°C可溶)	

諸元	
使用EtOH量	54 kg-EtOH/kg-AlgNa
	79 kg-EtOH(68wt%-EtOH20°C)
	24.3 kg-EtOH/kg-AlgNa(60°C)
蒸留電力	0.80 kWh/kg-EtOH(97%回収率)
蒸留電力	19.3 kWh/kg-AlgNa
蒸留電力コスト	387 円/kg-AlgNa(20円/kWhと仮定)
可溶化薬品費	390 円/kg-AlgNa
ゲル化薬品費	570 円/kg-AlgNa(97%蒸留液3%新液)
AlgNa収穫量	60 g-AlgNa/kg-wet Kelp
目標製造量	1 t-AlgNa/月(20日)

原料処理量			
必要コンブ量	16,667	kg-wet Kelp/月(20日)	17 t-wet Kelp/月(20日)
1日処理量	833	kg-wet Kelp/日	0.8 t-wet Kelp/日
主要経費			
コンブ購入費	510,000	円/月	@ 30,000円/ton-wet kelp
人件費	500,000	円/月	*法定福利費等を含む
可溶化薬品費	390,000	円/月	
ゲル化薬品費	569,738	円/月	
コスト小計	1,970,000	円/月	
その他経費			
輸送費			} ?
事務費			
光熱水費			
経済目標			
想定売価	3,000	円/kg-AlgNa(精製AlgNaの市販価格は 4,500円/kg-AlgNa)	
売上額	3,000,000	円/月	
概算利益	1,030,000	円/月	

**トン3万円という
高値買取りで計算**

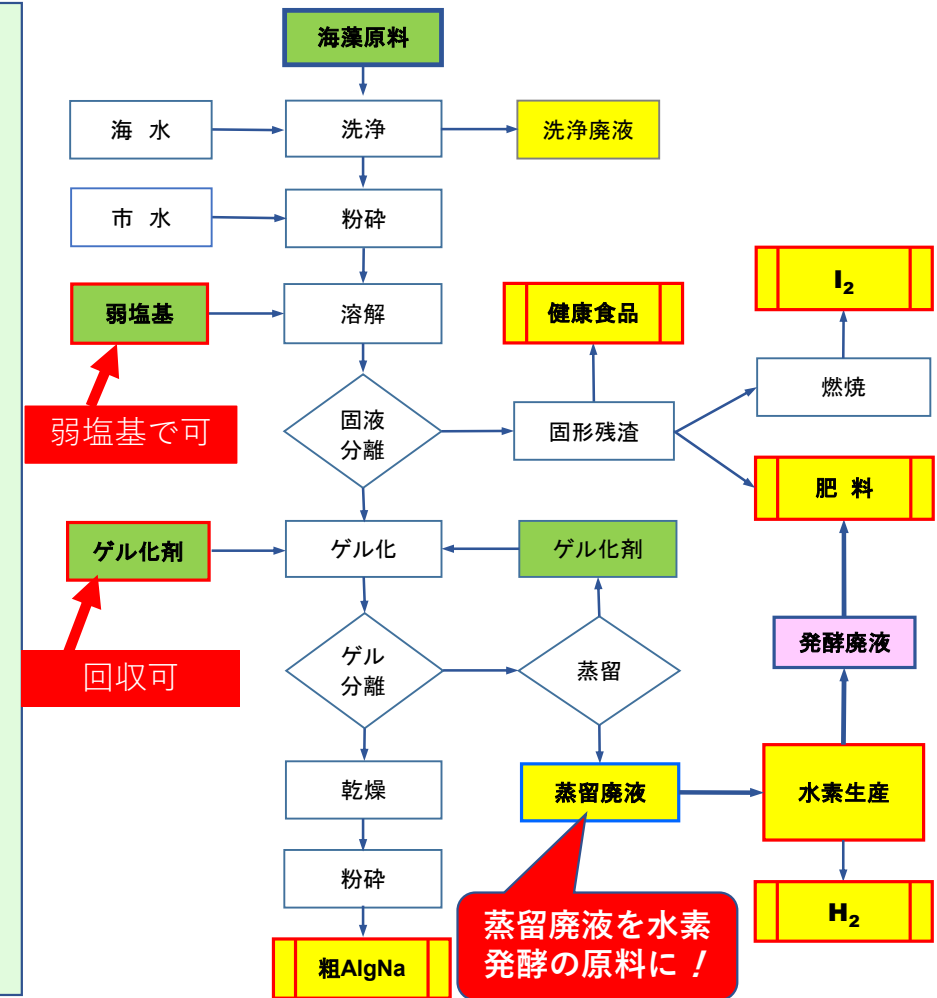
実験室での粗アルギン酸ソーダ製造実験から推定した概算コスト計算でも、**利潤の発生する可能性が見えた!**

改定版4・林さんに・アルギン酸ナトリウム生成量と炭酸ナトリウム使用量の関係.xlsx,
“経済性試算”

水素生産はアルギン酸製造の廃液を原料に利用して行う!
水素生産単独ではコンブ単価を非常に安価に設定しなければならなかったが、
アルギン酸製造を並行して行へば、栽培者が満足する高い購入価格でも採算が取れる!

コンブから水素とアルギン酸を製造する ベンチスケール装置による検証計画

- コンブから水素とアルギン酸ソーダを生産する **ベンチスケール装置の組立**
アルギン酸ソーダ生産プロセスに、その廃液を原料とする水素生産プロセスを接続、**トータルシステム**を構築
- アルギン酸ソーダの**新生産方法確立**と**経済性**の検討
粉碎時の加水量、粉碎度、溶解薬品使用量、溶解温度、ゲル化剤使用量の最適関係と経済性の検討
- 蒸留廃液を原料および熱源とする**水素生産のプロセス化**
固液分離による水素発酵原料の損失率最小化技術検討
- 固形残渣の**新食品化**など利用法の**開発・検討**
固形残渣の減量化技術と残渣の健康食品等への有効利用方法の開発・検討
- ゲル化剤の蒸留回収**最適操作検討**
本システムの熱入力は蒸留加熱のみで構成することを検討する

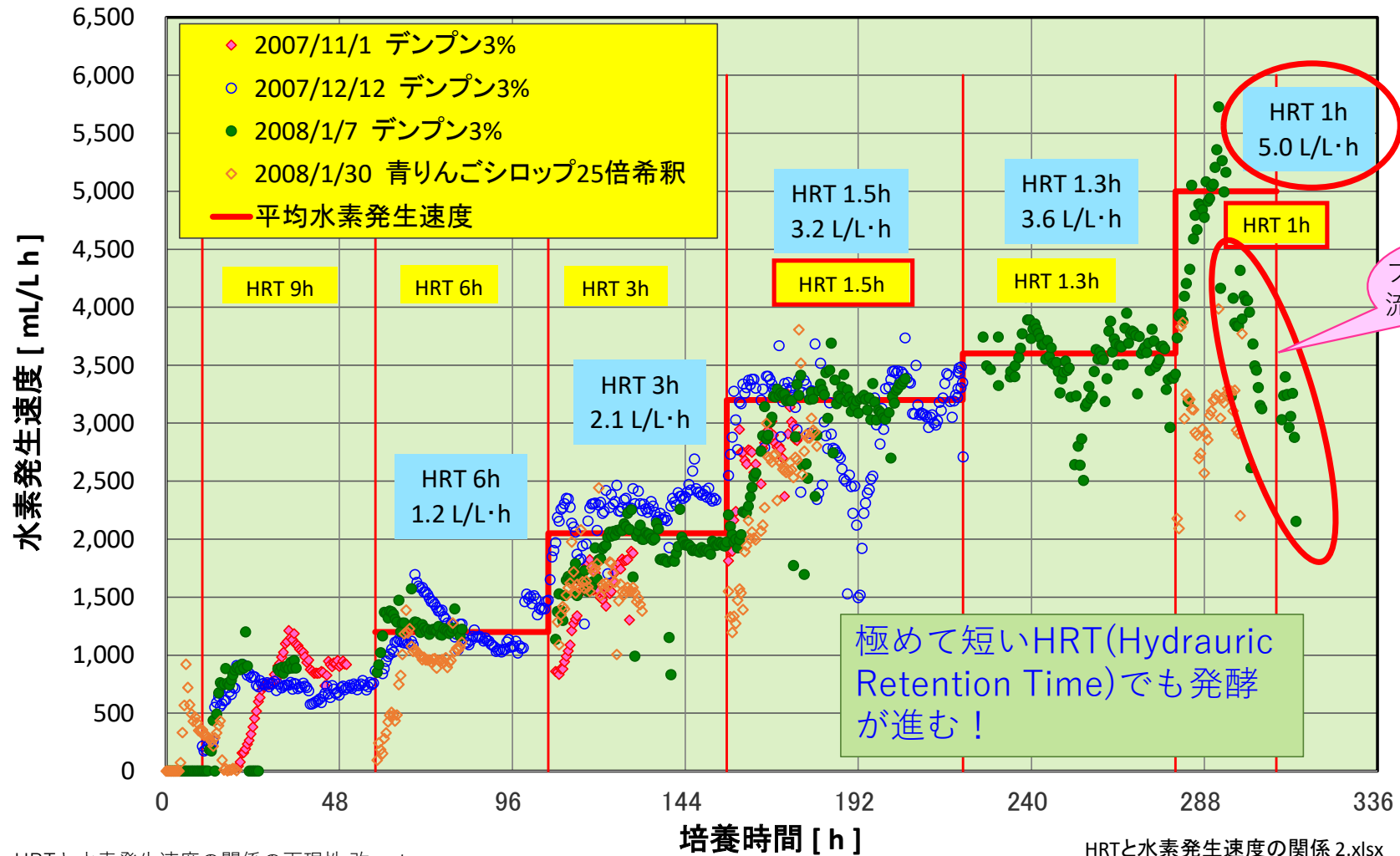


原料費を無料にすれば現在でも30円/Nm³が指呼の間にある

- 副成分の産業資材化でコンブ栽培費を負担すれば、
水素生産は廃水処理と位置付けできる
- エネルギー生産が目標なら多量の加工用原料が必要
- コンブ栽培域を拡げて原料確保の要求を満たす
- 海を多層利用する栽培技術の確立で目的を達成できる

- 水素発酵は原料の滞留時間が1～3時間で水素生産が可能
(メタン発酵は2日～20日の滞留が必要)
- 原料費が無料なら水素製造コストは32円/Nm³前後⁸⁾
- CO₂削減効果は85%⁹⁾に上る
(化石燃料電気による電解水素生産に比べて)

HRTと水素発生速度の関係とその再現性



原料処理量、糖質含有率、 水素収率を変数とする 水素製造コスト試算

- ① 一日あたり原料処理量を1t-wetから10tonに増やすと10円低減
- ② 品種改良でコンブのマンニトール含有率を15%に増やし、新規バクテリアを探索して水素収率を3に増やすと5円低減
- ③ 遺伝子改良で水素収率を10に高めると17円源

水素製造コストを低減するために必要な開発効果を試算した結果を右表に示す

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
⑩ 処理糖量	80	80	150	1500	kg-man./d
⑪ 必要市水量	1.8	1.8	1.8	41	t/d
⑫ 全流動液量 ⑩+⑪	2.8	28	28	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
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 ①×⑤/⑰	0.00	0.00	0.00	0.00	¥/Nm ³ -H ₂
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
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 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

コンブからの水素製造コストまとめ

菌叢発酵技術向上後

(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	現在の技術		2030年目標	2050年目標	
① 原料処理量	10	10	10	100	ton-wet kelp/d
② 糖質含有率	8	8	8	15	%-man.
③ 水素収率	2.48	2.48	3.00	10	mol-H ₂ /mol-man
NaOH使用率(菌叢発酵HRT6h)	0.215	0.215	0.148	0.050	kg/Nm ³ -H ₂
⑤ 原料購入単価(コンブ)	1,500	0	0	0	¥/t-wet kelp
⑥ 平均滞留時間 HRT	3	3	3	3	h
⑬ 発酵槽容積 ⑫/(24/⑥)	3.5	3.5	3.5	63.8	m ³
⑭ 消費動力 ⑧×⑫	174	174	174	3,188	kWh/d
⑮ 水素生産量 ③×⑩	244	244	295	18,462	Nm ³ /d
⑯ 水素生産量 ⑨×⑮	73,255	73,255	88,615	5,538,462	Nm ³ /yr
⑰ 水素製造原料コスト ①×⑤/⑯	61.43	0.00	0.00	0.00	¥/Nm ³ -H ₂
⑳ プラント人件費	0	0	0	30,000	k¥/yr
㉑ 総支出 ⑱+⑲+⑳+㉒	4,364	4,364	4,232	82,992	k¥/yr
㉓ 水素製造コスト 原料費 ⑰+㉑	121.0	59.6	47.8	15.0	¥/m ³ -H ₂
㉔ 水素製造コスト 原料費含まず	97.8	36.4	28.6	13.2	¥/m ³ -H ₂

遺伝子破壊・市水... 含むコスト計算 2021 CMC 2018 0823.xlsx, "2021 HESS大会OHP用"

菌叢発酵で収率を高める技術開発で、30年目標は達成できる

原料購入費がわずか1,500円/tでも、製造コストは非常に高くなる

アルギン酸など高付加価値産物をコンブから生産した製造廃液を発酵原料とすれば、購入費は不要となり、政府目標コストが視野に入る

発酵に使用するエネルギーを外部エネルギーで賄ったときの 発酵水素生産と電解水素生産のCO2排出量比較

表1. 使用原単位および物性値

天然ガス	65.4	g-CO2/MJ
軽油	2.623	kg-CO2/L
電力 ^{*1)}	0.635	kg-CO2/kWh
水	0.05	kg-CO2/m ³ -水
NaOH*	1.4605	kg-CO2/kg-NaOH
1/3負担とする	0.487	kg-CO2/kg-NaOH
電解水素生産	4.5	kWh/m ³ -H ₂
水素LHV	10.8	MJ/m ³ -H ₂

表2. 計算に用いた仮定物性値

水素収率	2.5	mol-H ₂ /mol-Man.
Man.含有率	8	% (北海道)
正味昇温	5	°C
海藻輸送 ^{*2)}	5	km-往復
漁船 ^{*3)}	0.06	L-軽油/t·km
薬品 ^{*4)}	0.185	kg-NaOH/m ³ -H ₂
トラック ^{*5)}	0.174	kg-CO2/tkm

*1) 2013年度の電力会社10社のCO2排出係数(環境省)の平均値

*2) 沖合2kmに栽培網を設置現場で作業に1km、往復4kmとする。

*3) 鳴門漁協のワカメ収穫時期における資材・燃料費6万円から仮定

*4) C.acetobutylicumの代謝産物から計算。

*5) 国交省H16.4 営業用普通トラック

海藻バイオマスから生産される水素量と生産にかかわる処理のCO2排出量計算

段階	小プロセス	入出	品名	収穫量1tあたり		数量	単位	CO2排出量	単位	
				数値	単位					
原料調達	種系		ロープ	0.025	t/t	2.5	t/d	-		
	種付・保存	入力	軽油	0.060	L/t·km	5	km	0.045	kg-CO2/d	
	沖出し	入力	軽油	0.060	L/t·km	5	km	0.045	kg-CO2/d	
	原料収穫	入力	海藻	1	t-海藻	100	t/d	-		
	運搬・陸揚	入力	軽油	0.060	L/t·km	5	km/d	78.7	kg-CO2/d	
予備加工	粉碎	入力	水	2.000	m ³ /t	200	m ³ -水/d	10.0	kg-CO2/d	
		入力	電力	2.000	kWh/t	200	kWh/d	127.0	kg-CO2/d	
	ろ過分離	入力	電力	0.200	kWh/t	20	kWh/d	12.7	kg-CO2/d	
製造	発酵	入力	薬品	0.185	kg/m ³ -H ₂	460	kg-NaOH/d	224.2	kg-CO2/d	
		出力	水素	24.889	m ³ -H ₂ /t	2,489	m ³ -H ₂ /d	-		
		入力	動力	2.000	kWh/t	200	kWh/d	127.0	kg-CO2/d	
		入力	熱	58.520	MJ/t	5,852	MJ/d	382.7	kg-CO2/d	
	運搬	入力	トラック	5.000	km	900	tkm/d	156.6	kg-CO2/d	
		出力	液肥	1.800	m ³ -液/t	180	m ³ -液/d	-		
分離	加・減圧	入力	電力	0.200	kWh/m ³ -H ₂	498	kWh/d	316.1	kg-CO2/d	
	PSA分離	入力	回収率	80.000	%	80	%			
	オフガス	出力	熱	53.760	MJ/t	5,376	MJ/d	-351.6	kg-CO2/d	
使用	水素	出力	水素	19.911	m ³ /t	1,991	m ³ /d	0.0		
原料調達・予備加工のCO2排出量はAlgNa製造が負担した時								排出量合計	855.0	kg-CO2/d
				電解水素	4.5	kWh/m ³ -H ₂	8960	kWh/d	5,689.6	kg-CO2/d
				削減率				85.0	%	

2022 菌叢によるCO2削減率計算.xlsx

発酵に使用するエネルギーを外部エネルギーで賄ったときのFC発電と電解水素生産.pptx

エネルギー自給も視野に入る技術開発！

コンブの開発目標

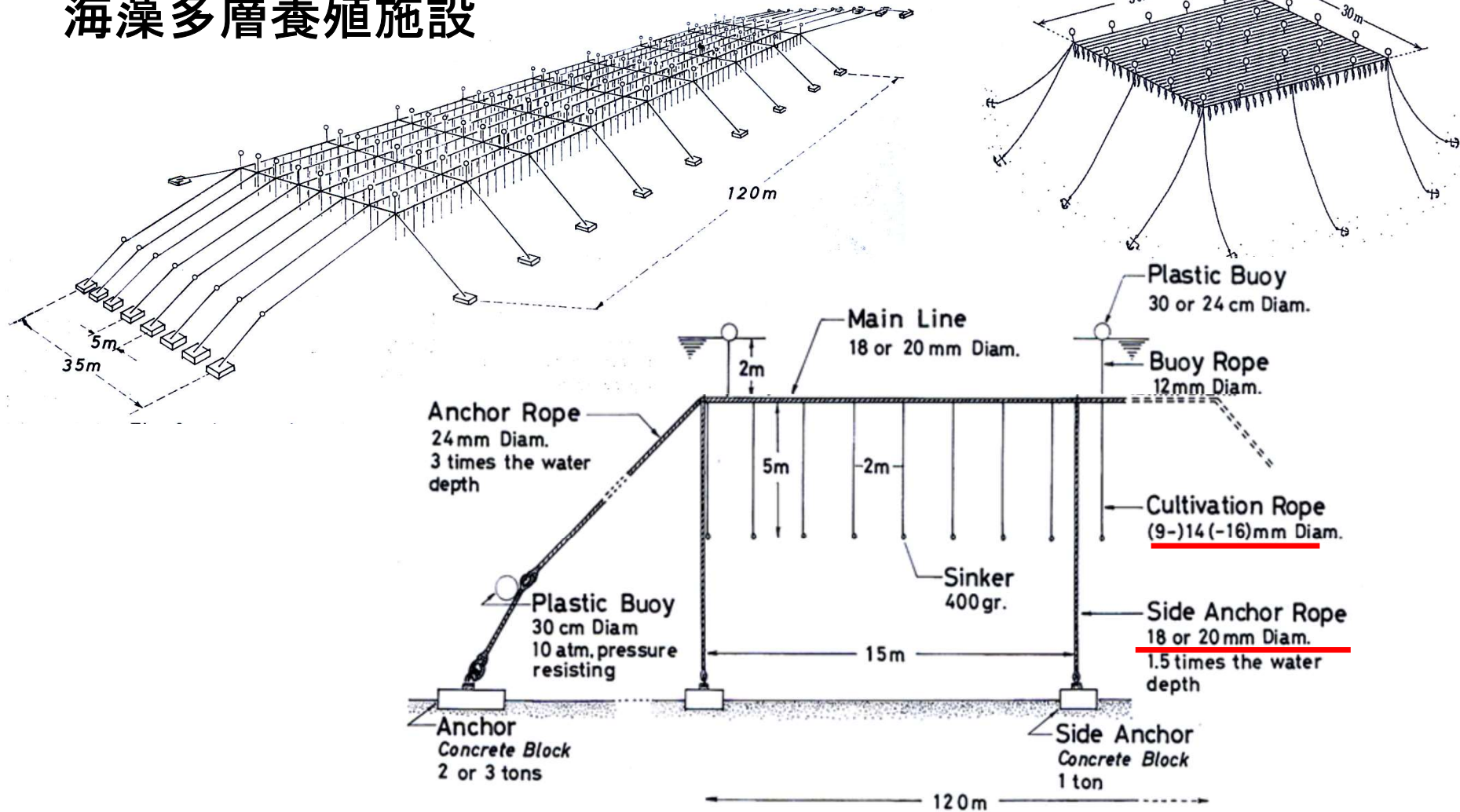
- ◆高密度多層・多期栽培技術の確立で300t/ha以上を収穫
- ◆品種改良でマンニトール蓄積率を15%に向上
- ◆栽培・収穫作業の機械化による労力軽減
- ◆大量に生産されるコンブの新規利用方法の開発

水素発酵の開発目標

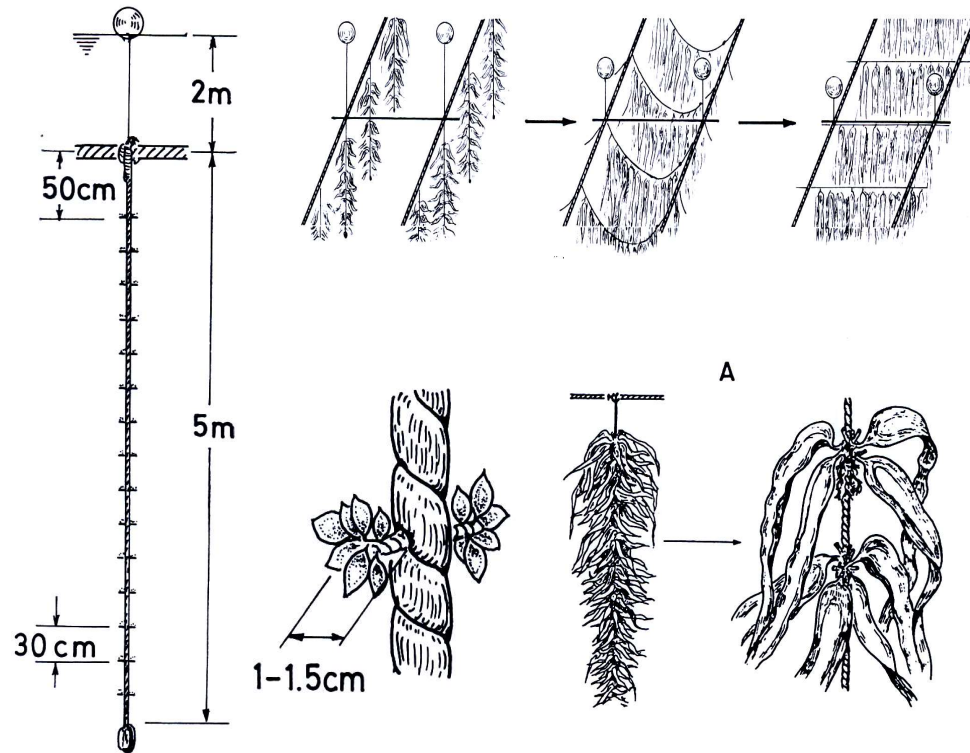
- ◆遺伝子操作による水素収率の改善技術開発
E.a. の10倍が目標、現在1.5～3倍に向上した報告あり
- ◆薬品使用量減量のための菌叢培養技術の確立
- ◆発酵廃液の循環使用技術の開発

海藻栽培方法の例 I

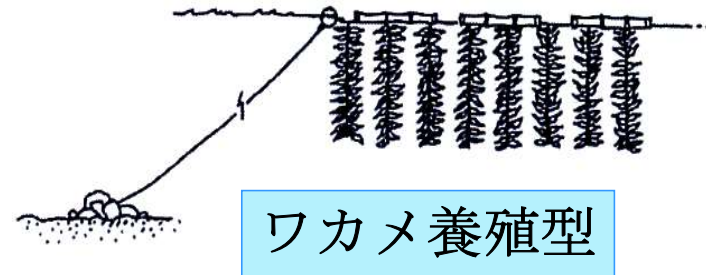
海藻多層養殖施設



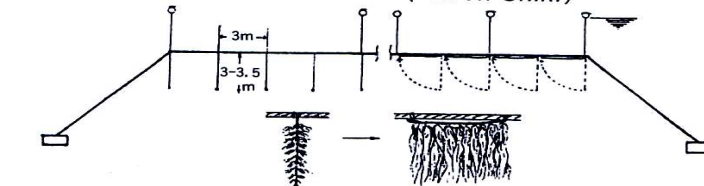
海藻栽培方法の例Ⅱ



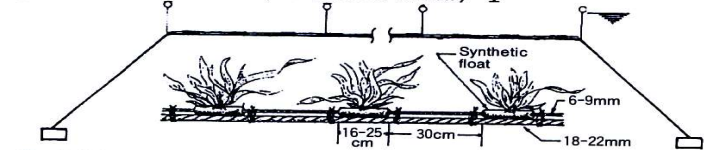
コンブ養殖型



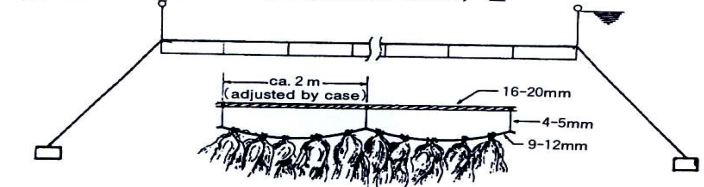
A. VERTICAL HANGING TYPE (*Noren Shiki*)



B. LONGLINE TYPE (*Haenawa Shiki*)-I



C. LONGLINE TYPE (*Haenawa Shiki*)-II



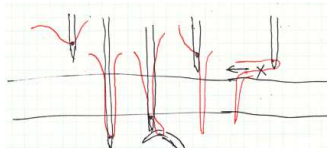
ワカメの収穫刈り取り方法とコンブ栽培での改良案



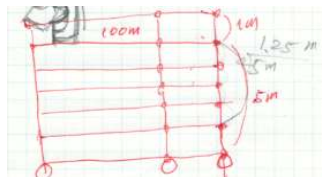
① 前屈みで茎を持つ
岩手県大槌地区



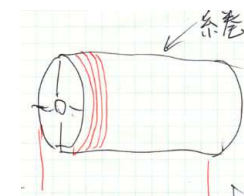
② 桁ロープを吊り上げて刈り取り
岩手県広田地区



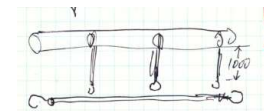
巻きかけか差し込みか



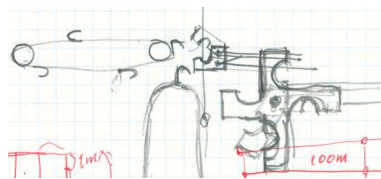
幹ロープ積層方法



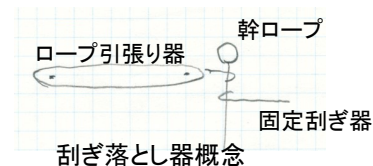
丸形糸巻きに直接か



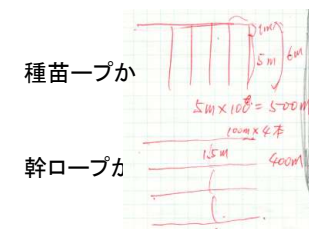
ロープの繰り返し使用は



刮ぎ落とし器

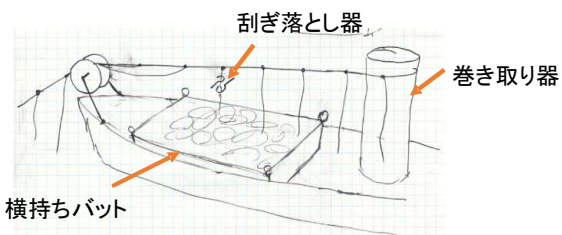


刮ぎ落とし器概念



種苗一ブか

幹ロープか



収穫舟の概念

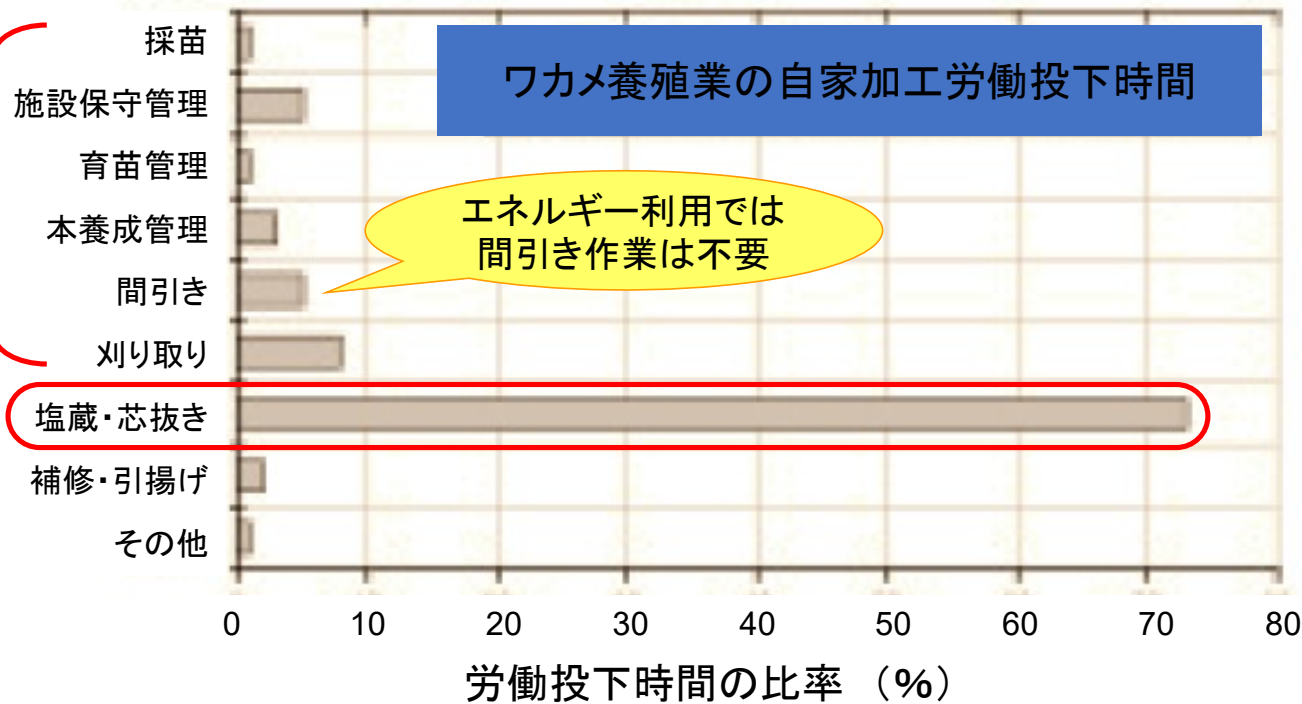
作業舟上で自動刮ぎ落とし、
横持ちバットに受けて
クレーンで陸揚げ、



③ ワカメ陸揚げ・刈取り
徳島県鳴門地区

ワカメの商品化における労働投下は約75%が収穫後に発生する

労働対価はいかほどに？



商品化では、養殖管理、摘菜にかかる時間より、加工にかける時間の方が極めて大きい。(コンブの場合は洗浄・乾燥)

→ 刈り取りを機械化すれば、栽培作業は非常に楽になる！

長谷川・鈴木;水工研技報 27 61~80, 平17
<https://www.hakodate.ne.jp/kamada/growth.html>
<https://www.rakuten.ne.jp/gold/kaisotonya/konbu/hanashi.html>

エネルギー自給も視野に入る技術開発！

コンブの開発目標

- ◆高密度多層・多期栽培技術の確立で300t/ha以上を収穫
- ◆品種改良でマンニトール蓄積率を15%に向上
- ◆栽培・収穫作業の機械化による労力軽減
- ◆大量に生産されるコンブの新規利用方法の開発

水素発酵の開発目標

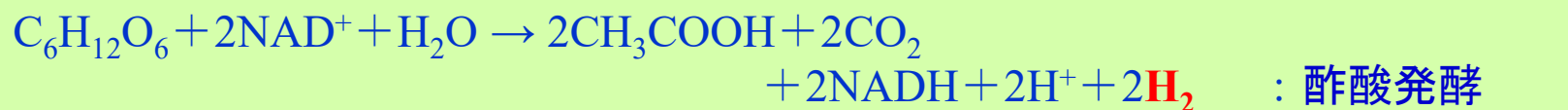
- ◆遺伝子操作による水素収率の改善技術開発
E.a. の10倍が目標、現在1.5～3倍に向上した報告あり
- ◆薬品使用量減量のための菌叢培養技術の確立
- ◆発酵廃液の循環使用技術の開発

グルコースから画期的に水素収率を改善する方法

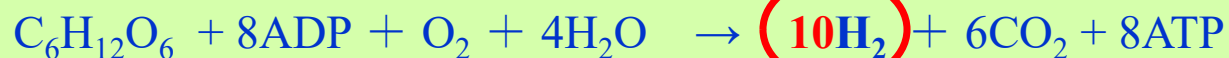
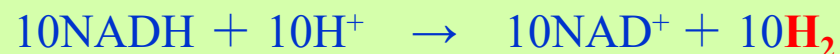
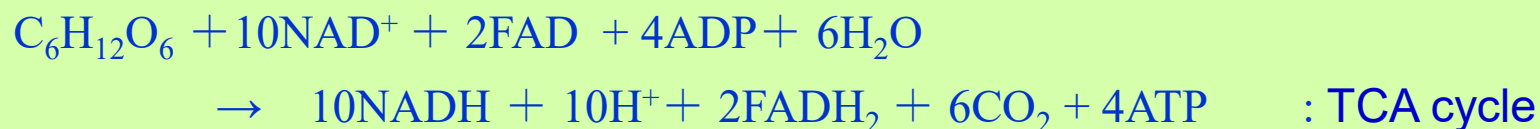
バクテリアはNADHの酸化でH₂を発生する

- Overall reaction equation of Butyrate fermentation.ppt -

A) 発酵の最大水素収率は**4**



B) 電子伝達鎖のComplex I を阻すると理論的には水素収率**10**が可能！



Tanisho, S.(2001) A scheme for developing the yield of hydrogen by fermentation, in BIOHYDROGEN II, ed. Jun Miyake et. Al., pp.131-140, PERGAMON

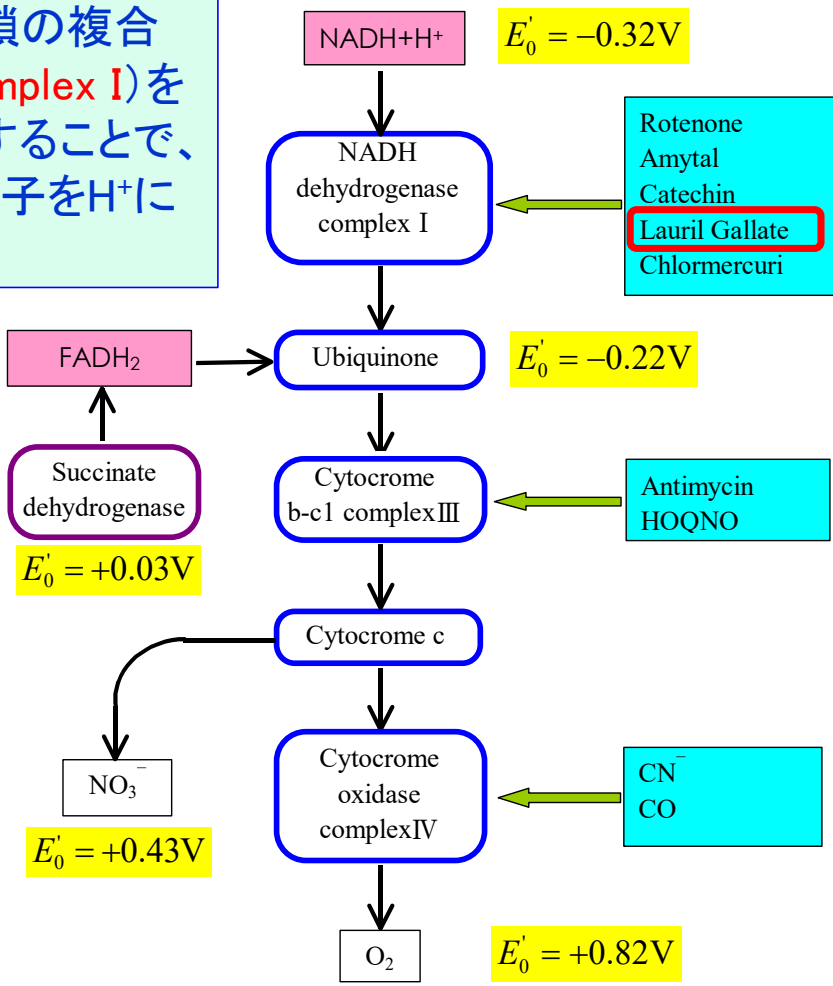
グルコースから画期的に水素収率を改善する方法.pptx

2050年目標の水素収率10への改善も見通しは非常に明るい！

既に電子伝達鎖の破壊で収率を高めた論文が発表されている



電子伝達鎖の複合酵素 I (Complex I) を機能阻害することで、NADHの電子をH⁺に向ける！



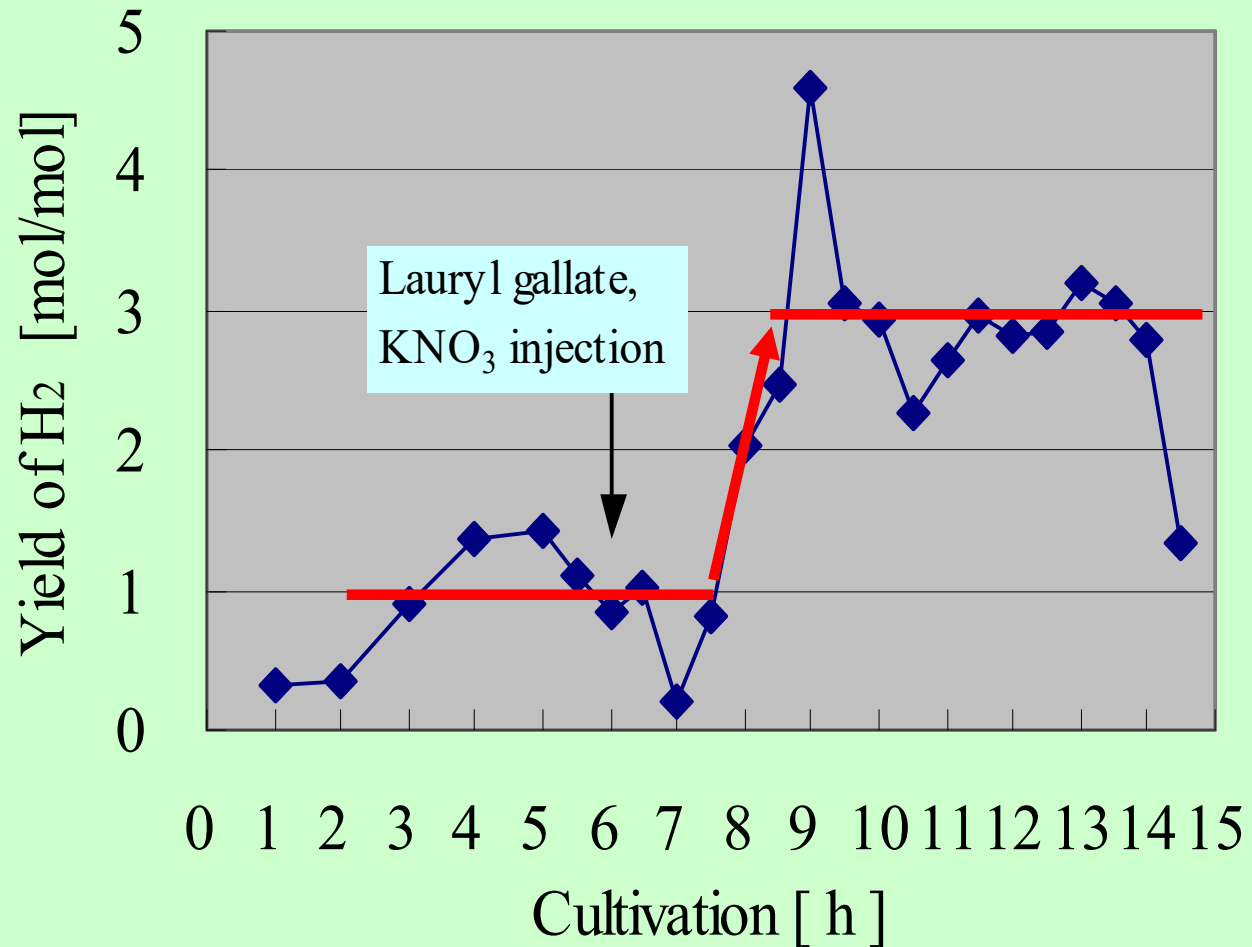
関連発表論文：

- ✓ Tanisho, S., N. Kamiya and N. Wakao; Hydrogen evolution of *Enterobacter aerogenes* depending on culture pH, *Biochim. Biophys. Acta* (1989), Vol.973, pp.1-6
- ✓ Tanisho et al.; Hydrogen production by Fermentation and a Trial for Improvement on the Yield of Hydrogen (1992), *Proc. 9th WHEC, Paris, France* pp.583-590.
- ✓ 谷生、佐々木；水素製造をともなう廃水処理システムのための *Enterobacter aerogenes* による好気的水素発生 (1997)、水素エネルギーシステム、Vol.22, No.1 pp.2-7.
- ✓ Tanisho, S.; A strategy for improving the yield of hydrogen by fermentation, *Hydrogen Energy Progress XIII, 2000, Proc. 13th World Hydro. Ener. Conf. Beijing*, pp.370-375 .
- ✓ Tanisho, S.(2001) A scheme for developing the yield of hydrogen by fermentation, in *BIOHYDROGEN II*, ed. Jun Miyake et. Al., pp.131-140, PERGAMON.
- ✓ Tanisho, Suganuma; Aerobic hydrogen production aimed at the improvement in the yield of hydrogen (2002), *Proc. 14th World Hydrogen Energy Conference, Montreal, Canada, #1802 in CD-ROM.*
- ✓ Harada, Kaneko and Tanisho; Improvement of H₂ yield of Fermentative Bacteria by Gene Manipulation (2006), *Proc. 16th WHEC, Lyon, France, III-329, in CD-ROM.*
- ✓ 谷生重晴；遺伝子操作による通性嫌気性水素発生バクテリアの水素収率の改善.ppt, 公益信託ENEOS水素基金成果報告 (2007/10/15)

Complex I 遺伝子破壊で収率改善に成功した文献

Yan Wu, Yaqiao Hao, Xuan Wei, Qi Shen, Xuanwei Ding, Liyan Wang, Hongxin Zhao and Yuan Lu;
Impairment of NADH dehydrogenase and regulation of anaerobic metabolism by the small RNA RyhB and NadE **for improved biohydrogen production** in *Enterobacter aerogenes*, *Biotechnology for Biofuels*, 10:248, pp.1-15, **2017**

Complex I を阻害して水素収率を高めることに2002年成功

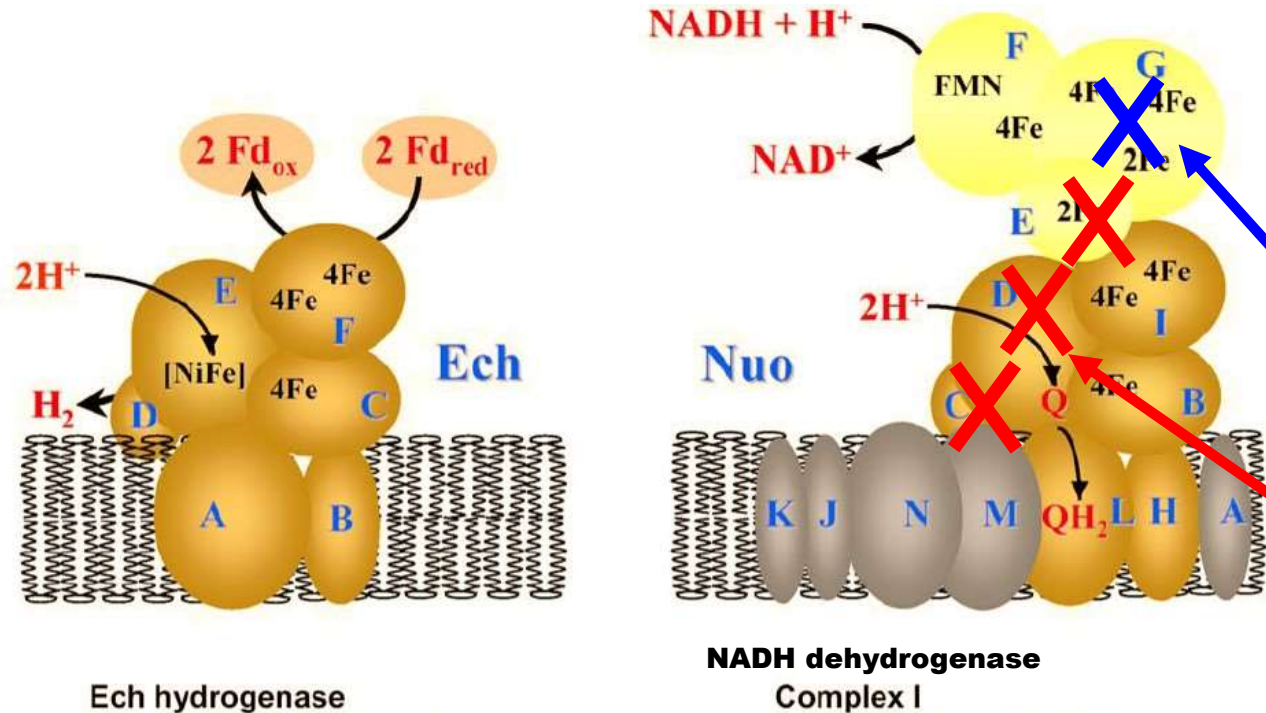


E. aerogenes のComplex I を Lauryl Gallate で阻害したところ、水素収率が 1 → 3 mol-H₂/mol-glu に上昇することを確認した！

Tanisho, Sasaki and Suganuma;
Aerobic hydrogen production aimed at the improvement in the yield of hydrogen, (2002),
Proc. 14th World Hydrogen Energy Conference,
Montreal, Canada, #1802 in CD-ROM.

阻害では薬品の効果を長くは維持できないので、Complex I の遺伝子破壊で長期維持を計画。

Complex I 遺伝子破壊の原田ら、Yan Wu らによる実験



Complex I は、AからNまでの14個の補酵素群で構成されている！
どこを破壊するかが問題！

原田, 谷生らは“ENEOS水素基金”を得てGを破壊したが
失敗！（2006）

Yan Wu らは C,D,E を破壊して
成功！（2017）
E. aerogenesの水素収率が
1→2.28 mol-H₂/molに向上！

障害、遺伝子破壊のこれまでの結果から、
**2050年頃までに適切な場所を発見し破壊すれば、
理論通り** グルコースから**収率10**で
水素を発生できるだろう！
そうなれば、**13円/Nm³**で水素生産できる！

Yan Wu, Yaqiao Hao, Xuan Wei, Qi Shen, Xuanwei Ding, Liyan Wang, Hongxin Zhao and Yuan Lu; Impairment of NADH dehydrogenase and regulation of anaerobic metabolism by the small RNA RyhB and NadE for improved biohydrogen production in *Enterobacter aerogenes*, *Biotechnology for Biofuels*, 10:248, pp.1-15, 2017

Complex I と Ech サブユニットの機能と相同性に関するまとめ.pptx
グルコースからの画期的水素収率改善の方策・TCA・遺伝子破壊.pptx

Fig. 3
hydro
Scheid
color.
hydrog
mononucleotide; Q: ubiquinone or menaquinone.

2019年の中国のコンブ生産量1千万トンから生産できる 水素エネルギー規模とアルギン酸生産規模

日本の栽培技術なら同じ栽培面積で100倍生産できる^{1,2,3)}!

2019年中国生産量 10,978,362 t-wet kelp	現状	技術開発後		アルギン酸 生産規模	
		2030年ごろ	2050年ごろ		
マンニトール含有率	8	15	15	8	%
水素収率	2.5	3.0	10.0	9	万円/20kg
マンニトール量 ton	878,000	1,646,000		878,000	t-アルギン酸
水素生産量 kmol	12,060,000	27,131,000	90,481,000		
Nm3	270,144,000	607,734,000	2,026,774,000		
kg	24,120,000	54,262,000	180,962,000		
FCV台数(100kg/台・年)	241,000	542,000	1,809,000	39,000	億円
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 改 xlsx

1千万トンのコンブでは水素生産規模は
まだまだ小さいが、日本の栽培技術なら
10億トン生産できるので、3,500億kWhの
発電量になり、有力な再エネ源になる!!

アルギン酸製造産業の規模は
4~400兆円!!
水素の生産規模は
180~18,000億円

*1)楊清関ら, 北海道大学農経論叢, 64, p.41-51 (2009).

*2)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).

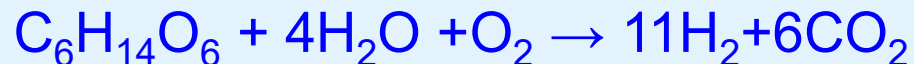
*3)依田欣文ら, 応用藻類学会春季大会, (2011)

CCUSと並行操作すれば大気中CO2も大幅に削減可能！

◆水素発酵ではH₂とCO₂がほぼ 1:1 の混合ガスとして生産される

◆遺伝子改良後は次の反応式でH₂とCO₂を発生するので、

CO₂はH₂の 6/11 容量発生する



◆CO₂はコンブバイオマス由来だから、排出削減と同時にCCUSと並行操作すれば、大気中の濃度をも低減できる !!

◆SOFCなどで発電すると3,500億kWhの電力と1,500億kgのCO₂を削減できる

◆H₂のFCV利用とCCUSで、2050年ごろにはCO₂を4,800億kg削減できる

技術開発により到達可能なH2生産量とCO2削減量

日本が2000年の中国と同じ栽培面積でマコンブを栽培し、
100倍(400t/ha)の収穫量があるとしたときの予想

日本の仮定生産量 11 億t-wet kelp	現状技術	技術開発後		単位
		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	mol/mol
水素生産量	12.0	27.1	90.6	億kmol
発酵CO2発生量	12.0	27.1	49.4	億kmol
FCV台数(100kg/台・年)	24	54	181	100万台
FC発電(1.77kWh/Nm3)	478	1,078	3,500	億kWh
CCUSによるCO2削減量	528	1,190	2,100	億kg
FCV使用によるCO2削減量	360	820	2,700	億kg
FC発電によるCO2削減量	210	470	1,500	億kg
CCUSとFCVの合計削減量	888	2,010	4,800	億kg
CCUSと発電の合計削減量	738	1,660	3,600	億kg

生産した水素をFCVで利用すると、CO2削減量は発電利用より多い4,800億kgに上る！

地球温暖化阻止と自前エネルギー供給を可能にする コンブバイオマスイー水素生産 まとめ

- 開発の達成で自己消費は少なくなり、利用可能エネルギー量は生産量の**90%**を越える¹⁰⁾
- 栽培面積を中国の2000年面積まで広げれば**3,500億kWh/年の発電**が可能¹¹⁾
- CO2削減量は**3,600億kg-CO2/年**に上る（発電削減とH2生産時CCUSの和）¹²⁾
- 数百兆円規模にも上るアルギン酸ソーダなどを利用する**多くの新産業が興隆**する
- コンブ栽培に関連する巨大な**海洋産業**と水素利用に関連する**新しい産業**が隆盛する

今後の希望 ベンチスケール実験で各種推定値の検証を行いたい

2023/2/6

コンブ利用の検証実験

- コンブから水素とアルギン酸を製造する 1～5Lベンチスケール装置を構築
- アルギン酸ソーダを生産する新手法による生産コストと消費エネルギー算定データ収集

水素発酵の検証実験

- アルギン酸ソーダ製造実験廃液を原料に、滞留時間 1～3時間での水素生産を実行
- 水素製造コストを算定するデータ および CO₂ 削減量を算定するデータの収集

検証目標

1. 利用可能エネルギー量など計算値の確度評価
2. 水素製造コストの確度評価
3. アルギン酸ソーダ製造コストの算定精度評価
4. アルギン酸ソーダと水素の並列生産プランの実現性評価