

バクテリアによる海藻バイオマスの 高速水素変換

島根県海士町の電力供給として

横浜国立大学 名誉教授
バイオ水素株式会社 取締役
谷生 重晴



水素の石油換算エネルギー量



ガソリンエンジンの利用効率: 20% (16%)

FCVのエネルギー利用効率: 60% (45%)

= 3 倍の効率

ガソリンの燃焼熱: 38.7 MJ/L

水素の燃焼熱: 285.9 kJ/mol

= 12.8MJ/Nm³

= 1/3 ガソリンの燃焼熱

依って

1 Nm³-H₂ = 1 L-Gasoline

バイオマスの燃料化技術

原料バイオマス	燃料化技術
木質系・草本系	高温ガス化
	液化 (BTL Biomass to Liquid)
資源系作物	バイオディーゼル (BDF Biodiesel Fuel)
ウェット系 (食品・農海産物・尿尿)	バイオエタノール (エタノール発酵)
	バイオメタン (メタン発酵)
	バイオ水素 (水素発酵)

バイオマス/エネルギー変換の効率比較

最終エネルギー利用形態を電力とした場合

エタノール

原料 → 発酵 → 濃縮分離 → 火力発電 → 総合効率

メタン

原料 → 発酵 → 脱硫 → ディーゼル発電 → 総合効率

水素

原料 → 発酵 → 脱硫 → 燃料電池発電 → 総合効率

総合効率は次の式で評価する。

$$\text{総合効率} = \text{理論発酵効率} \times (1 - \text{処理エネルギー}) \times \text{実効発電効率}$$

バイオマス-発酵のエネルギー変換効率比較

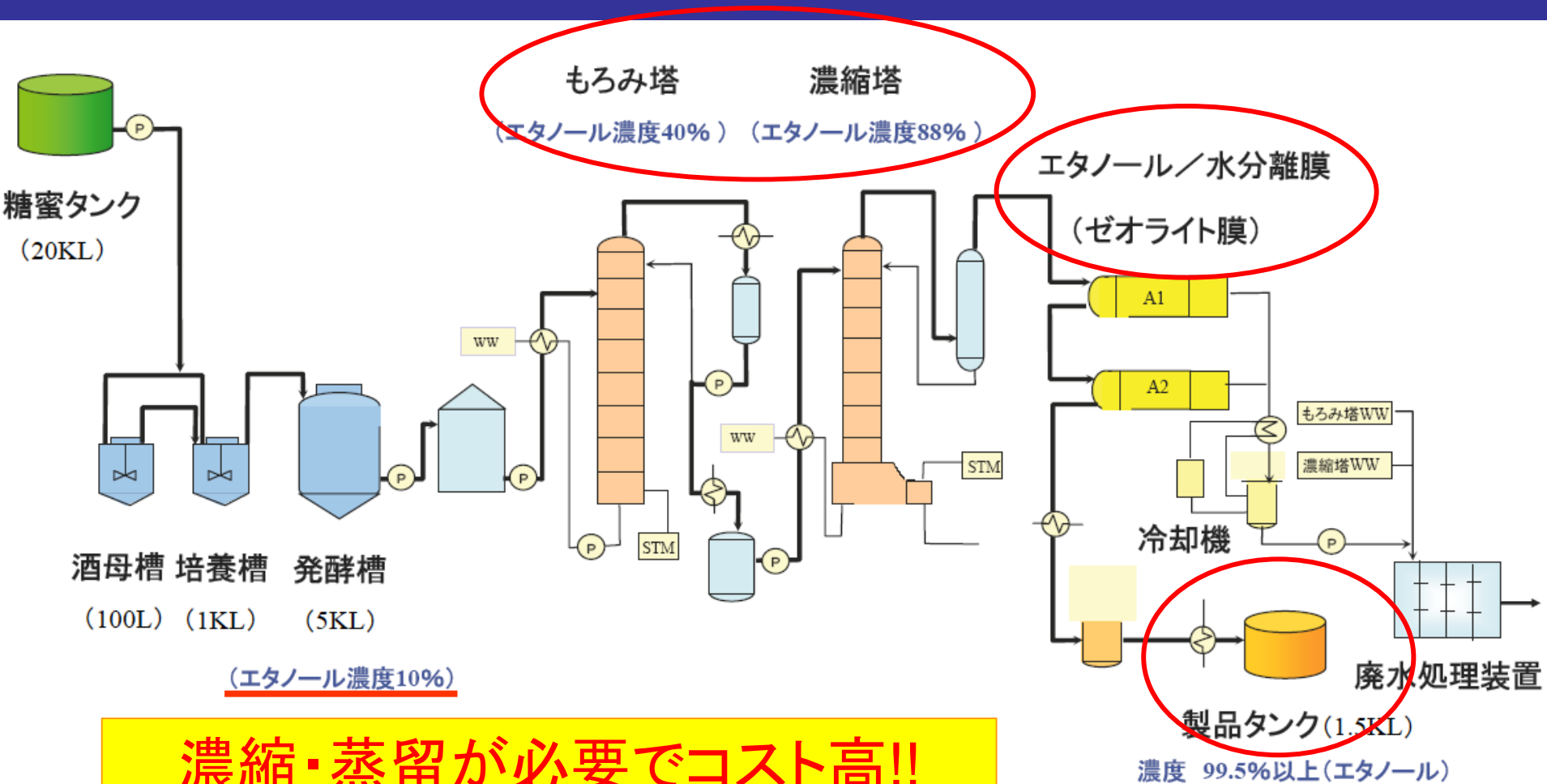
同じ原料から燃料を製造して同じ利用形態にしたときの効率の比較

	理論変換効率 [%]	処理エネルギー [%]	発電効率 [%]	総合効率 [%]	発電方法
エタノール発酵	97.4	25	30	21.9	火力発電
メタン発酵	94.0	10	30	25.4	ディーゼル発電
水素発酵	40.6	10	60	21.9	燃料電池発電

バイオマスからのエネルギー変換効率は
どの方法でもほぼ同じ

→ 製造コストが実用性の要になる！

宮古島のバイオエタノール生産設備概要



濃縮・蒸留が必要でコスト高!!



宮古島バイオエタノールプロジェクトの製造コスト

バイオエタノール燃料製造事業の評価と目標値

1. バイオエタノール燃料製造の熱収支評価

蒸留・脱水プロセスの熱収支

⇒エタノール1L当たりの消費熱量5,000KJ / L以下

現設備で海外先進国比約20%省エネが見えた。⇒将来30%を目指す。

2.

バイオエタノールに経済性を持たせるのは難しい

3. バイオエタノール燃料製造コスト評価

150円 / L (全島E3対応設備規模) ⇒ 将来100円 / L以下を目指す。

バイオエタノール生産設備の減価償却費は含まれていない

二段発酵規模 10t/d ケースに必要な設備仕様

食品残飯 10[t/d]、希釈水 10[t/d]

可溶化水素醗酵タンク(R1)

- ・ 全容量: 120 [m³]
- ・ 運転容量: 81 [m³]
- ・ L/D: 1.1 (5.5) / (5.0 [m])
- ・ 翼径: 25
- ・ 翼形状: 45° 傾斜タービン翼
- ・ 翼板サイズ: W625 [mm] x H500 [mm]
- ・ 翼先端速度: 3.92 [m/s]
- ・ 攪拌回転数: 3-30 [rpm]
- ・ 攪拌動力: 34.29 [kW] (37 [kW])
(溶液を水相当とし、永田式による)

可溶化発酵で
4日滞留

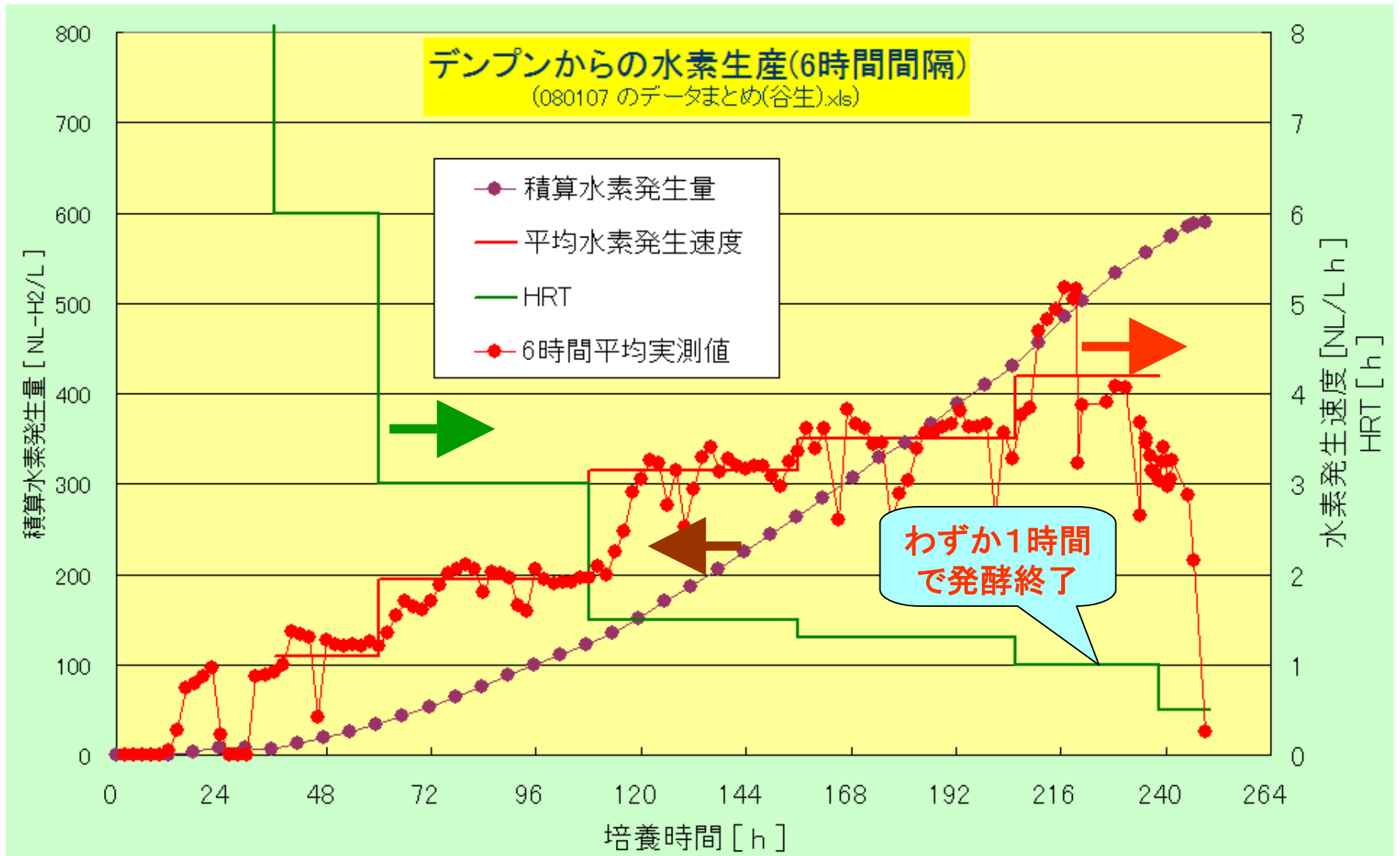
主メタン醗酵タンク(R2)

- ・ 全容量: 320 [m³]
- ・ 運転容量: 222 [m³]

メタンをメインにすると
二段発酵でも
11日必要

$$\begin{aligned} \text{容量比} &= \text{メタン槽} / \text{水素槽} \\ &= 222 / 81 \\ &= 2.7 \end{aligned}$$

HN001株の水素発生とHRTの関係



水素発酵・メタン発酵の処理能力比較

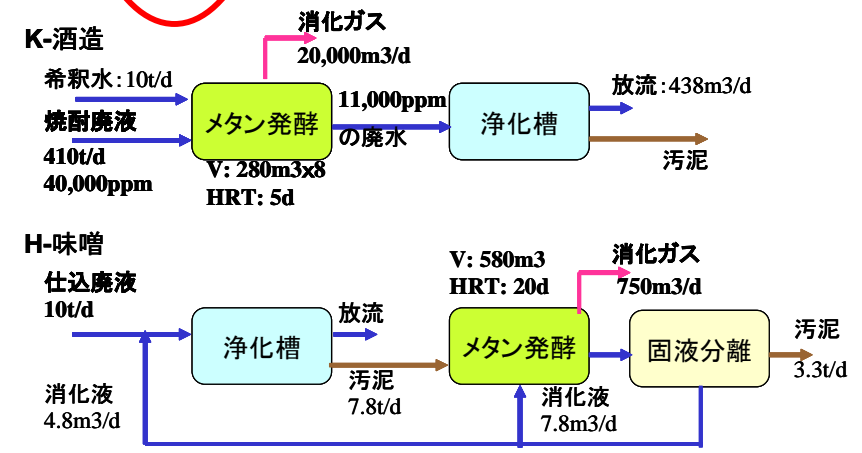
	廃液 処理量 ton/day	発酵槽規模			発生 ガス量		BOD 改善度 入口/出口
		m ³	m ³ /t・d* ¹	比容積* ²	m ³ /t・d* ³	n ³ /m ³ -槽・d* ⁴	
メタン発酵 K-酒造	410	2240	5.5	55	48.0	8.8	40,000 11,000
メタン発酵 H-味噌	10	580	58.0	580	75.0	1.3	-
水素発酵 T-味噌	1	0.1	0.1	1	3.3	33.0	30,000 11,000

メタン発酵の目的の一つは廃液処理の負荷を減らすこと

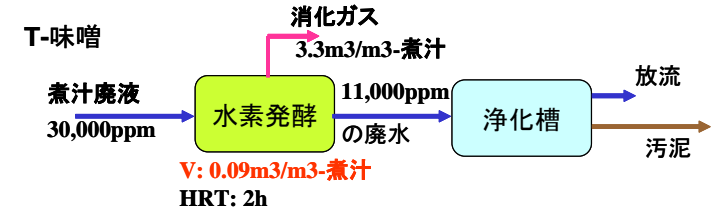
- *1 処理量1トン/日あたりの発酵槽容積
- *2 水素発酵のトンあたり容積を1としたときの比容積
- *3 処理量1トン/日あたり発生する消化ガスの量
- *4 発酵槽容積あたり1日に発生する消化ガス発生量

1/50容水素発酵でも
同程度の負荷減が可能

メタン発酵の例



水素発酵の例



霧島酒造のメタン発酵設備諸元と写真

項目	条件・実績
処理対象物	芋焼酎粕 400t/日 芋くず 10t/日
メタン発酵リアクタ設備	TDAPR方式 リアクタ容量：280m ³ × 8槽 HRT：5日
バイオガス発生量	20,000 Nm ³ /日 (CH ₄ 60%, CO ₂ 40%)
排水処理設備	浸漬膜活性汚泥方式
脱臭設備	下部散水式生物脱臭方式
飼料化設備	気流乾燥方式 脱水ケーキ 60t/日 処理 乾燥製品量 10t/日

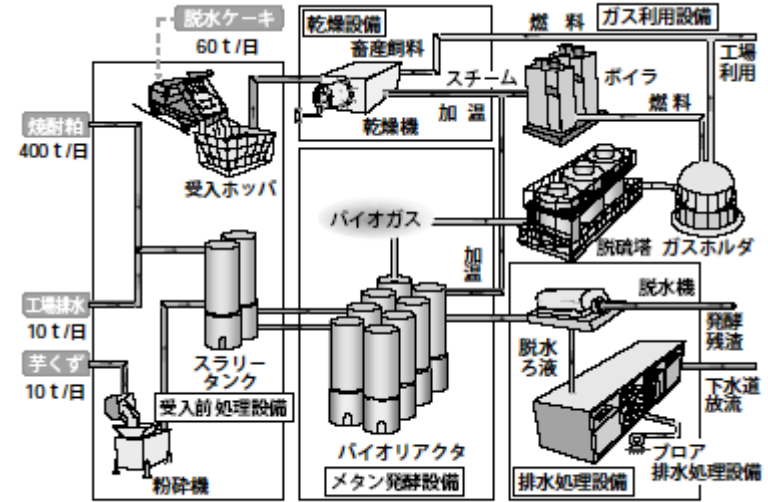


図-4 システムフロー図

このタンク群が
1/50の規模になる



写真-1 霧島酒造焼酎粕リサイクル施設全景

発酵エネルギー生産の優劣

バイオマスの三種の発酵エネルギー生産法は、
変換効率はほぼ同じであるが、

1. エタノール生産は装置が複雑でコストがかさむ。
 2. メタン生産は水素生産より装置が巨大になる。
 3. 水素生産はコンパクトな装置で可能である。
- という理由で、水素生産に優位性がある。

水素生産で経済性が見込めるか？

発酵で水素を発生する代表的なバクテリア

Section 5. Facultatively anaerobic gram-negative rods 通性嫌気性グラム陰性桿菌

Family I. Enterobacteriaceae 腸内細菌科

Genus 属 Species 種

Escherichia,

E. coli (大腸菌)

Salmonella,

Citrobacter,

C. freundii

Klebsiella,

K. mobilis

Enterobacter,

E. aerogenes

E82005 (1982年に発見)

Serratia,

Hafnia,

Proteus

Section 13. Endospore-forming gram-positive rods and cocci 内生孢子形成グラム陽性桿菌と球菌

Genus Species

Bacillus

Clostridium (クロストリディウム属)

C. acetobutylicum

C. beijerinckii

C. butyricum

C. pasteurianum

C. perfringens

C. thermocellum

HN001 (2004年に発見)



代表的水素発酵菌の一覧

	培養法*1)	pH	温度 [°C]	基質	収率*2) [mol/mol]	発生速度		著者
						[mmol/L·h]	[mmol/g·h]	
絶対嫌気性細菌								
<i>Clostridium</i> sp. No 2	B	6	36	glucose	2	24	—	1994 Taguchi et al. ²⁾
<i>C. paraputrificum</i> M-21	B	—	37	GlcNAc	2.5	31	—	2000 Evvyernie et al. ³⁾
Mesophilic bacterium HN001	B	6	47	glucose	2.4	147	44	2006 Nishiyama et al. ⁴⁾
<i>C. butyricum</i> LMG1213tI	C	5.8	36	glucose	1.5	22	—	1986 Heindrichx et al. ⁵⁾
<i>Clostridium</i> sp. No 2	C	6	36	glucose	2.4	21	—	1990 Taguchi et al. ⁶⁾
<i>C. pasteurianum</i>	C	6.6	40	sucrose	1.6	612	17	2006 Shu-Yii Wu et al. ⁷⁾
通性嫌気性細菌								
<i>Enterobacter aerogenes</i> E.82005	B	6	38	glucose	1	21	17	1987 Tanisho et al. ⁸⁾
<i>E. cloacae</i> IIT-BT 08	B	—	36	sucrose	3	35	29	2000 Kumar et al. ⁹⁾
<i>E. aerogenes</i> E.2005	C	6	38	molasses	0.7	36	17	1993 Tanisho et al. ¹⁰⁾
<i>E. aerogenes</i> HU-101 m AY-2	C	—	37	glucose	1.1	58	—	1998 Rachman et al. ¹¹⁾
高温細菌								
<i>Thermotoga maritima</i>	B	—	80	glucose	4	10	—	1994 Schröder et al. ¹²⁾
<i>Thermotoga elfii</i>	B	7.4	65	glucose	3.3	3	5	2002 van Niel et al. ¹³⁾
<i>Caldicellulosiruptor</i> <i>saccharolyticus</i>	B	7	70	sucrose	3.3	8	12	ibid. ¹³⁾
<i>Clostridium thermocellum</i>	B	—	60	cellobiose	1	7	14	2006 Islam et al. ¹⁴⁾
<i>Thermococcus</i> <i>kodakaraensis</i> KOD1	C	6.8	85	pyruvate	2.2	9	59	2004 Kanai et al. ¹⁵⁾
複合培養								
sludge compost	C	6.8	60	waste water	2.5	8	—	1996 Ueno et al. ¹⁶⁾
<i>C. butyricum</i> IFO13949 + <i>E. aerogenes</i> HO-39	C	5.2	36	starch	2.6	53	—	1998 Yokoi et al. ¹⁷⁾
sewage sludge	C	5.7	35	glucose	1.7	30	—	1999 Lin et al. ¹⁸⁾
fermented soybean meal	C	6	35	glucose	1.4	8	—	2000 Mizuno et al. ¹⁹⁾
sewage sludge	C	—	35	sucrose	1.5	298	—	2004 Lee et al. ²⁰⁾

*1) B: batch, C: continuous *2)[mol/mol-monosaccharide]

IPHE (International Partnership for the Hydrogen Economy)で発表 代表的水素発酵菌の一覧

	培養法*1)	pH	温度 [°C]	基質	速度 [mmol/L·h]	速度 [L/L·h]	速度 [mmol/g·h]	速度 [L/g·h]	参考文献
絶対嫌気性細菌									
<i>Clostridium</i> sp. No 2			36						
<i>C. paraputrificum</i> M-21			37	GlcNAc	2.5	31			1997 Vyvernie et al. ³⁾
Mesophilic bacterium HN001	B	6	47	glucose	2.4	147	44		2006 Nishiyama et al. ⁴⁾
<i>C. butyricum</i> LMG1213tl	C	5.8	36	glucose	1.5	22			1986 Heindrichx et al. ⁵⁾
<i>Clostridium</i> sp. No 2	C	6	36	glucose	2.4	21			1990 Taguchi et al. ⁶⁾
<i>C. pasteurianum</i>	C	6.6	40	sucrose	1.6	612	17		2006 Shu-Yii Wu et al. ⁷⁾
通性嫌気性細菌									
<i>Enterobacter aerogenes</i> E.82005	B	6	38	glucose		21	17		1997 Tanisho et al. ⁸⁾
<i>E. cloacae</i> IIT-BT 08	B	-	36	sucrose	3	35	20		1997 Tanisho et al. ⁹⁾
<i>E. aerogenes</i> E.2005	C	6				36			
<i>E. aerogenes</i> HU-101 m AY-2	C	-				58			
高温細菌									
<i>Thermotoga</i> sp.			70			10			1994 Schröder et al. ¹²⁾
<i>Thermotoga elfii</i>	B	7				3	5		2002 van Niel et al. ¹³⁾
<i>Caldicellulosiruptor saccharolyticus</i>	B	7			3.3	8			ibid. ¹³⁾
<i>Clostridium thermocellum</i>	B	-			1	7	14		2006 Islam et al. ¹⁴⁾
<i>Thermococcus kodakaraensis</i> KOD1	C	6.8	85	pyruvate	2.2	0	50		Kanai et al. ¹⁵⁾
複合培養									
sludge compost									
<i>C. butyricum</i> IF									
<i>E. a</i>									
sewage sludge	C	5.7	35	glucose	1.7	30			
fermented soybean meal	C	6	35	glucose	1.4	8			2000 Mizuno et al. ¹⁹⁾
sewage sludge	C	-	35	sucrose	1.5	298			2004 Lee et al. ²⁰⁾

147 mmol/L·h
= 3.3 L/L·h

44 mmol/g·h
= 1.0 L/g·h

47 °C

612 mmol/L·h
= 13.7 L/L·h

17 mmol/g·h

65 ~ 80 °C

4 mol/mol

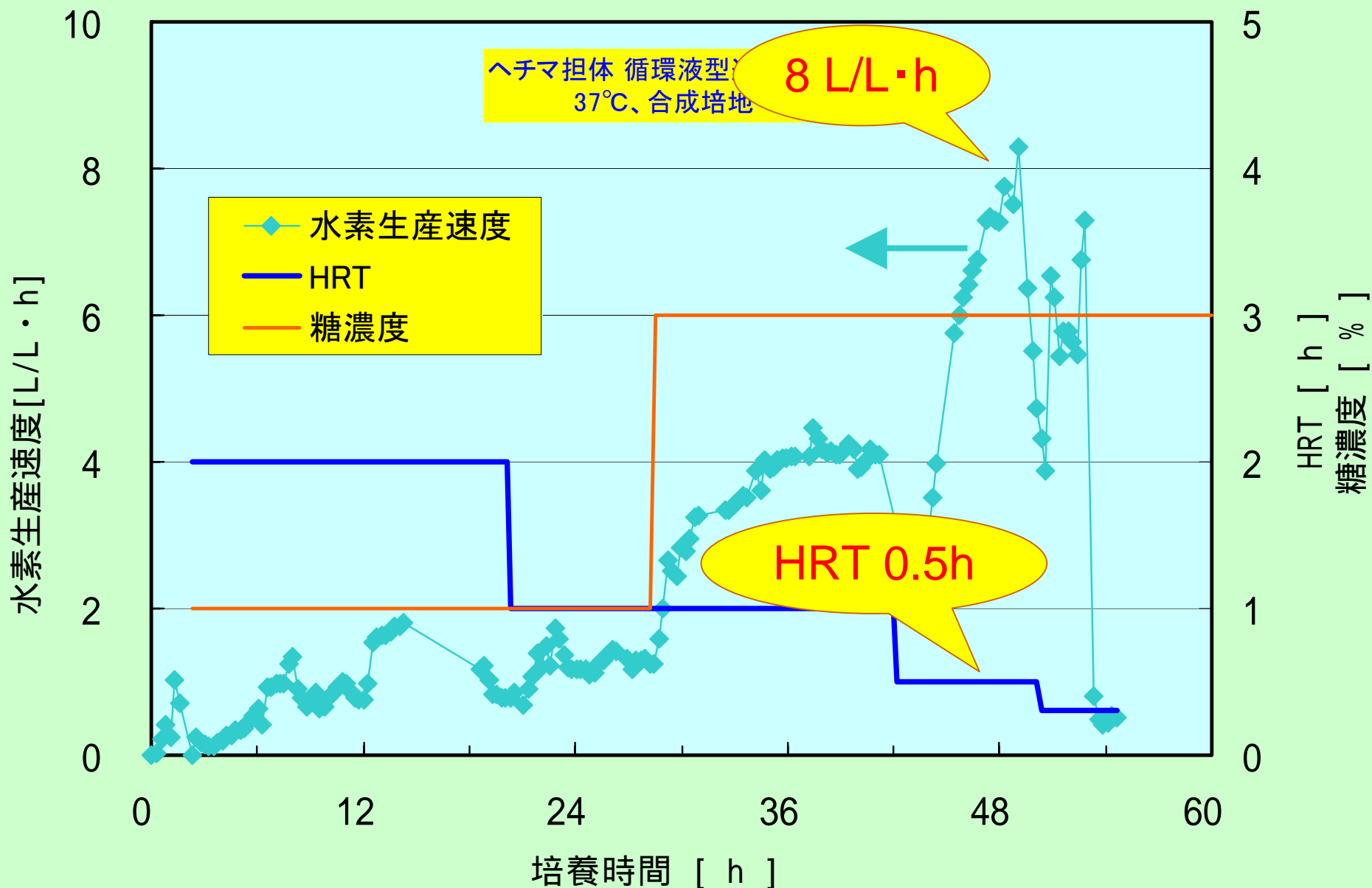
同じ菌でも連続培養すると菌体濃度が濃くなるので水素発生速度は速くなる。

mol/L·h
L/L·h

*1) B: batch, C: continuous *2) [mol/mol-monosaccharide]

担体を用いた循環液型連続発酵

(37°C、合成培地、2008/04/17)



発酵水素製造に利用できるバイオマス

グルコース、スクロース、デンプン、セルロースの構造

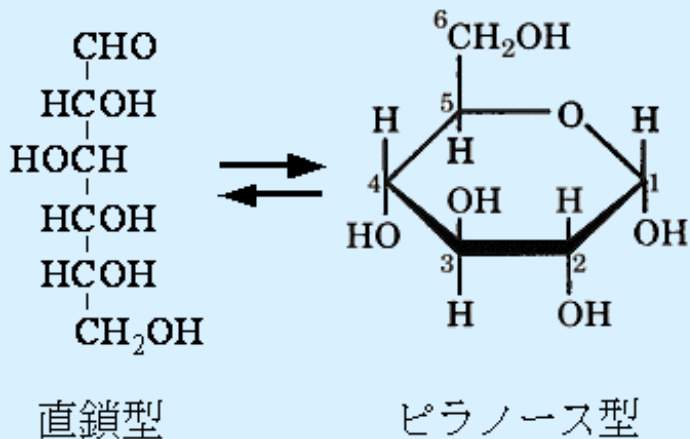


図1. グルコースの構造

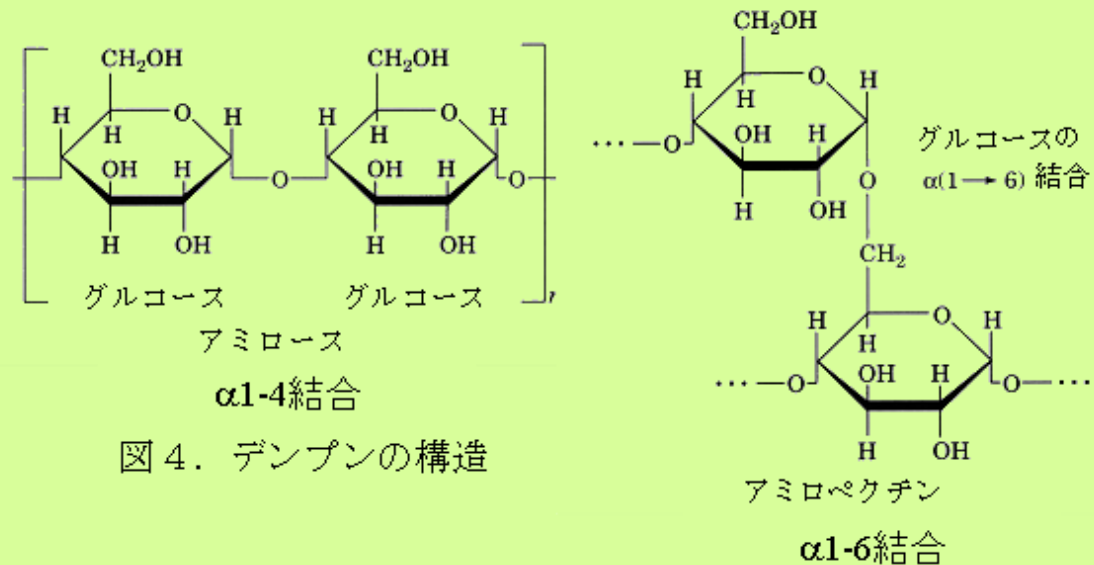
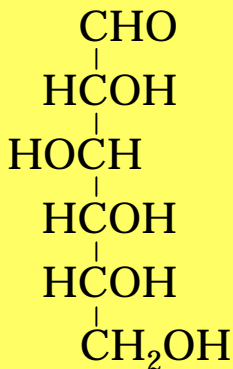
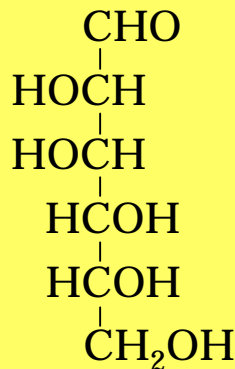


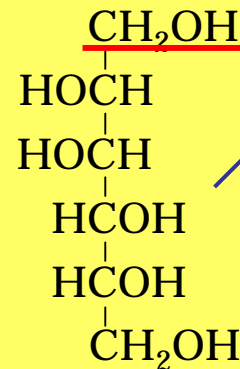
図4. デンプンの構造



D-グルコース



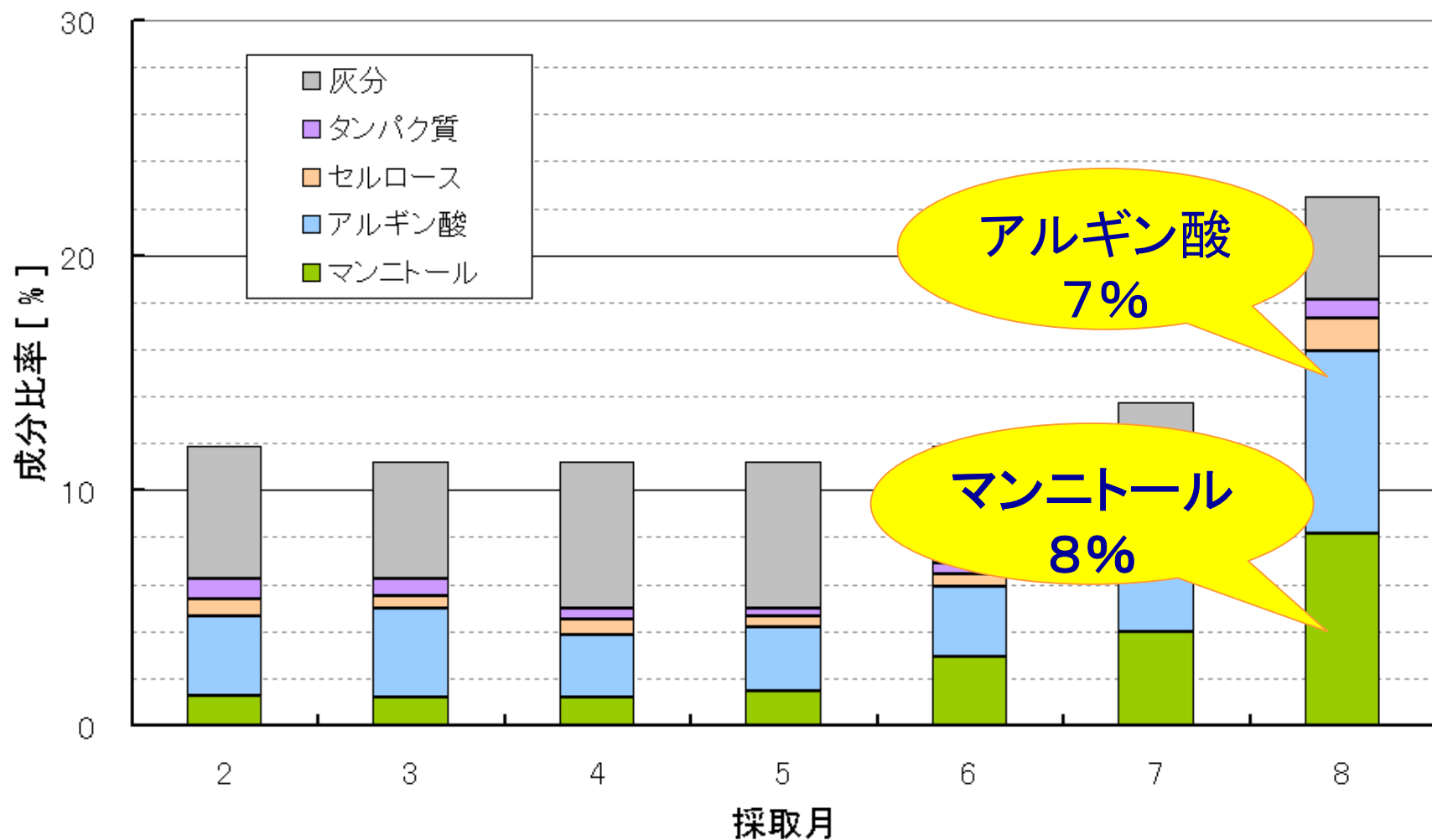
D-マンノース



D-マンニトール

コンブの主成分

北海道でのコンブの月別マンニトール含有率



水素プラント、海藻栽培の経済性評価

コンブを100ton/dayで処理するバッチ発酵装置での試算

建設費と減価償却

処理規模	10	100	t/d
発酵装置(10t/d)	30,000	119,432	k¥
脱硫、粗精製装置	2,000	7,962	k¥
燃料電池(60kW)	4,000	15,924	k¥
建設費*	36,000	143,319	k¥
稼働日数	300	300	day
償却費(10年)	3,600	14,332	k¥/yr

*建設費の増加は基準建設費(10t/d)の0.6乗に比例すると仮定

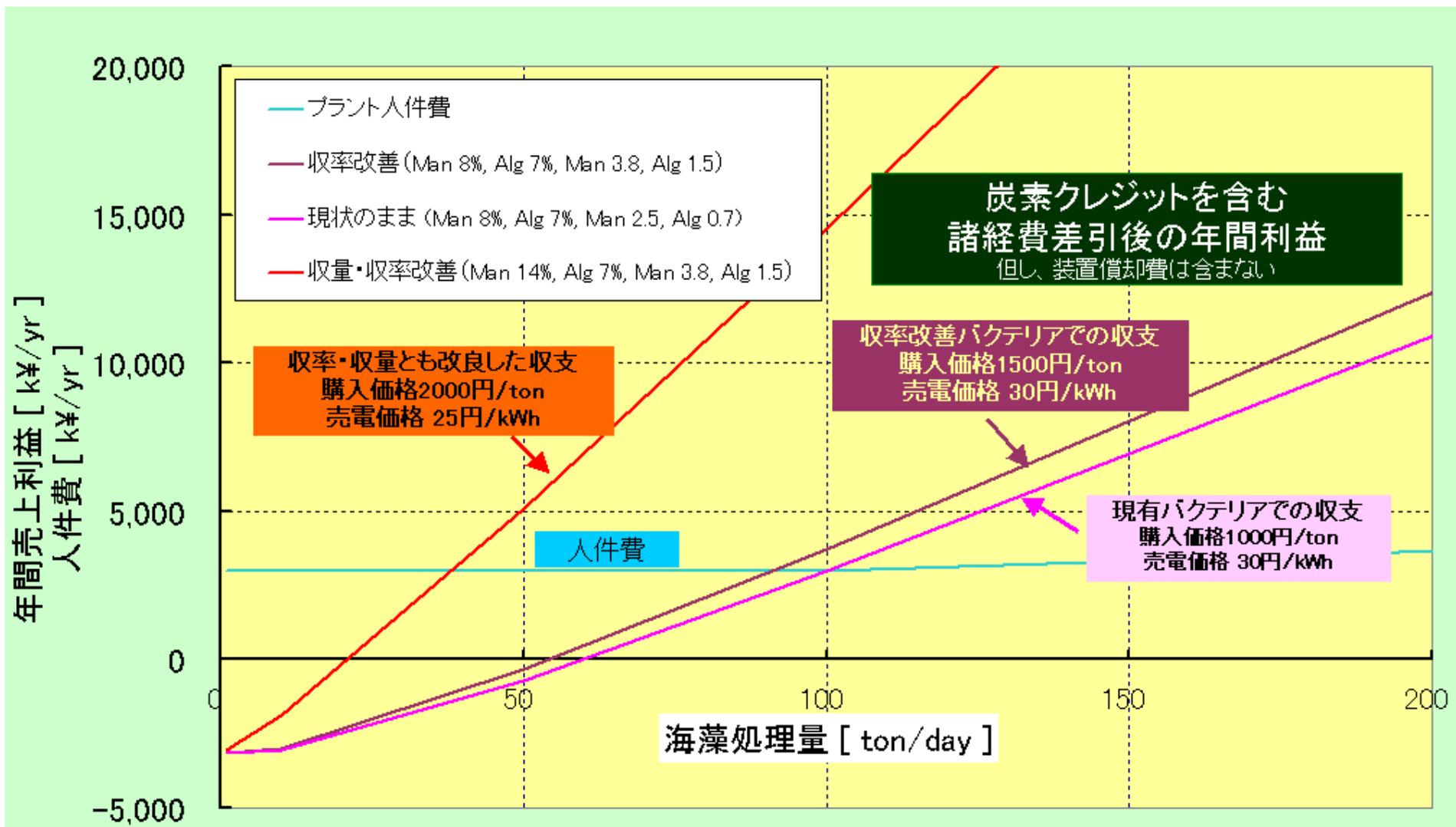
海藻栽培の経費と栽培者利益(100t/d)

アンカー・ロープ	140	k¥/km
ロープ間隔	2	m
ロープ総延長	5,100	m
アンカー・ロープ	700	k¥/ha
償却費(10年)	70	k¥/ha・yr
海藻生産量(コンブ)	600	ton/ha
海藻生産量(ワカメ)	-	ton/ha
海藻生産量(その他)	-	ton/ha
必要栽培面積	50	ha/yr
海藻単価	1.5	k¥/ton
海藻売価	45,000	k¥/yr
海藻栽培純益	41,500	k¥/yr

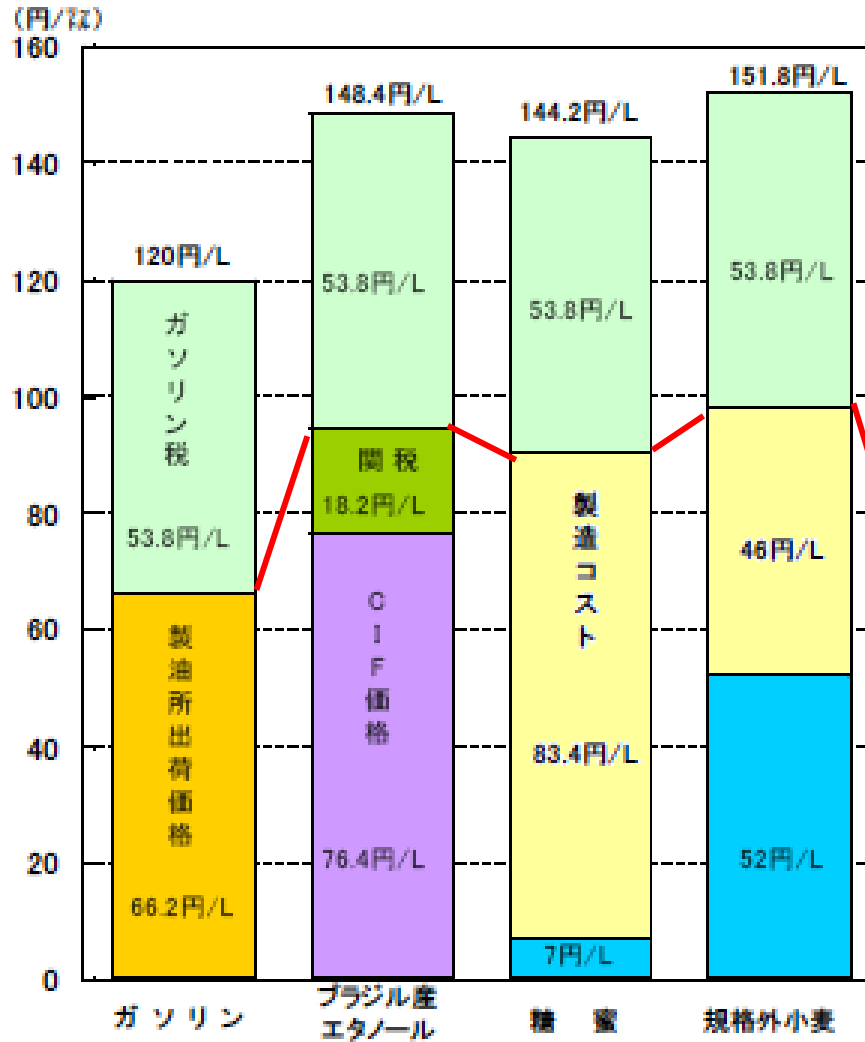
(鳴門漁協のデータを参考にした)

コンブの場合	現状の収率	収率改善	収率・収量改善	
海藻処理量	100	100	100	ton-algae/d
マンニトール含率	8	8	14	%-mannitol
アルギン酸含率	7	7	7	%-alginate
水素収率(Mannitol)	2.5	3.5	3.5	mol/mol
水素収率(Alginate)	0.7	0.7	0.7	mol/mol
燃料電池出力	1.7	1.7	1.7	kWh/m ³ -H ₂
自家消費動力	10	10	10	kWh/ton-algae
水素価格	51	51	43	¥/m ³ -H ₂
売電価格	30	30	25	¥/kWh
操業日数	300	300	300	day
水素生産量	925,552	1,220,937	1,996,322	m ³ /yr
発電量	1,573,439	2,075,593	3,393,747	kWh/yr
消費動力	1,000	1,000	1,000	kWh/d
売電可能量	1,273,439	1,775,593	3,093,747	kWh/yr
売電収入	38,203	53,268	77,344	k¥/yr
保守費(3%)	4,300	4,300	4,300	k¥/yr
プラント人件費	3,000	3,000	3,000	k¥/yr
海藻単価	1,000	1,500	2,000	¥/ton
海藻購入費	30,000	45,000	60,000	k¥/yr
総支出	37,300	52,300	67,300	k¥/yr
CO ₂ 削減量	1,396	1,833	2,998	ton-CO ₂ /yr
クレジット収入	2,085	2,750	4,497	k¥/yr
年間売上利益	2,988	3,718	14,541	k¥/yr

1日あたりの海藻処理規模と経済性の関係



ガソリン・エタノール・発酵水素の製造コスト比較



①ガソリン

18年5月1日現在の卸売価格(出典:石油専門商社)

②ブラジル産エタノール

CIF価格18年3月現在(出典:経済産業省)

関税23.8%

③糖蜜

原料費:糖蜜2000円/トン(環境政策課試算)

=エタノール原料7円/ℓ

(2200トンの糖蜜から720KLのエタノールを製造)

④規格外小麦

(財)十勝振興機構試算:小麦22円/kg

=エタノール原料52円/ℓ

(27万トンの小麦から11600KLのエタノールを製造)

(注1)各製造コストには施設の設置コスト及びランニングコストを含む。

(注2)小売価格は、これに流通経費、消費税がかかる。

⑤海藻水素

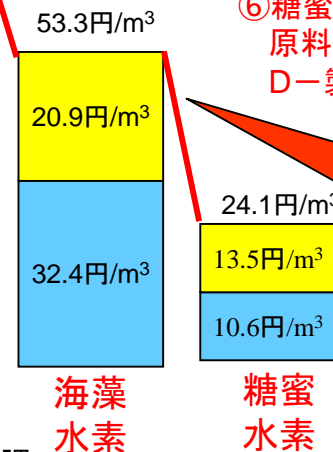
現有のバクテリアを使用

(Man 8%, Alg 7%, Man 2.5, Alg 0.7)

⑥糖蜜水素

原料費:糖蜜1,500円/トン(商社買入価格)

D-製糖、償却費含まず



海藻からでも
水素製造はきわめて
低コスト!!

海藻を原料にした発酵水素製造 パイロットプラントの仕様

- 栽培海藻や漁港近辺に自生する海藻などを原料
- 発酵で製造した水素による燃料電池発電の規模・構造・経済性等を検証

コンブの場合	現状の収率	海士町の海藻	
海藻	0.1	0.1	ton-algae/d
マンニトール含率	8	4	%-mannitol
アルギン酸含率	0	0	%-alginate
燃料電池出力	0.7	0.7	m ³ -H ₂ /kWh
自家消費動力	10	10	kWh/ton-algae
水素収率(Mannitol)	2.5	2.5	mol/mol
水素収率(Alginate)	0.0	0.0	mol/mol
水素生産量	2.5	1.2	m ³ /d
発電量	3.5	1.8	kWh/d

- 漁港サイドに海藻水素発電所を建設、
- 発電量の実測値を収集して可能性を実証する。
- 電気自動車等の導入を進めるにあたっての課題を検討する。

なぜ海藻バイオマスー水素利用か！

- 日本の自前のエネルギーを確保する
- 日本は海洋国家、専管水域は国土の12倍
- 海藻バイオマスを栽培する面積が十分ある
- バイオマスは大気中のCO₂を集めて太陽エネルギーを蓄積
- バイオマスはCO₂ニュートラルエネルギー
- 水素変換時にCO₂を分離回収・貯留(CCS)すれば、大気中のCO₂濃度を減ずることも可能
- CO₂濃度減量は太陽発電、風力発電には無い強力な利点
- 水素は燃料電池の原料、近未来のエネルギー源
- 当今の電気自動車のエネルギーに使えば、本当の意味でCO₂排出削減
- 離島のエネルギーとして最適

微細藻類の培養とバイオディーゼルの生産の課題

- 太陽エネルギー
- 栄養塩類
- 多量の水
- 適した温度
- 広大な土地
- 攪拌動力
- CO₂ の供給
- 他の微生物の侵入防止
- 細胞の回収
- 油分の抽出
- 抽出油の改質(メタノール)
- 抽出残渣さの処理
- 投入栄養類の回収と再利用など

多岐にわたるコスト上昇要因が絡み合って、
現状では微細藻類の栽培は経済性が見込めない。

施設作成作業風景（海上・海中設置作業）



外枠の設置



養成枠の設置



ダイバーによる設置作業



施設の全景

能登谷先生の栽培試験

実験用種苗ロープ (2011/07/09発表 依田欣文らのデータから)

海面栽培期間: 2月~7月

5mのロープにコンブの種糸を20cm間隔で25カ所差し込み種苗ロープとし、結びしろに1mを追加した。

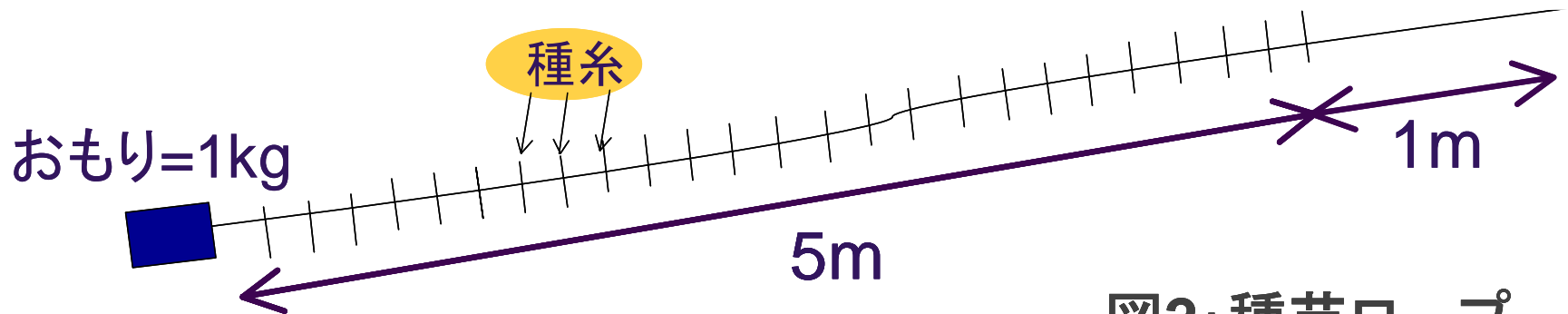
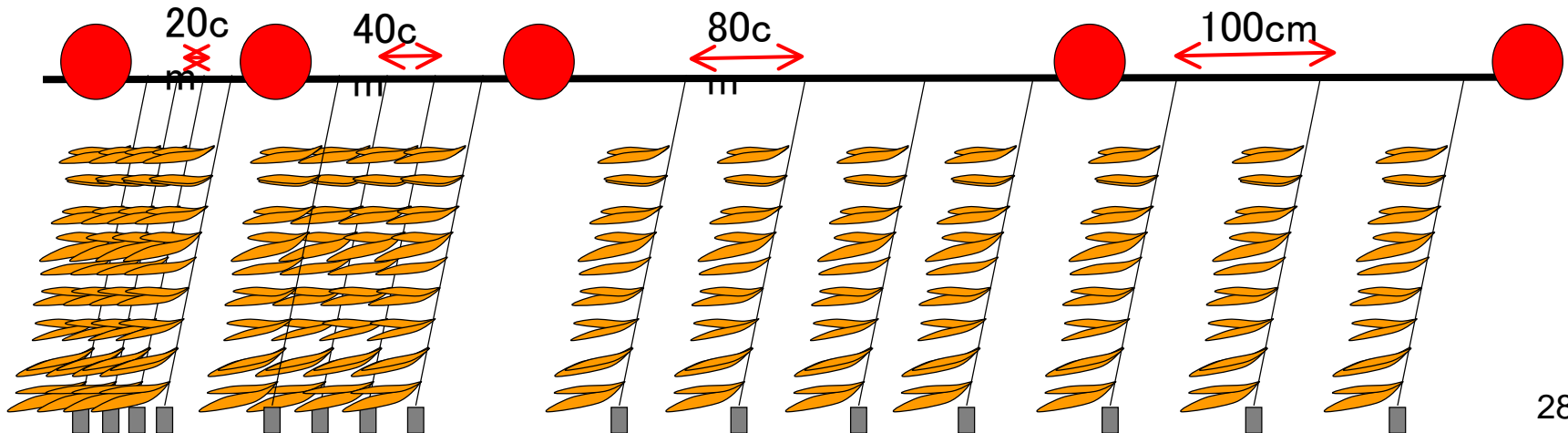


図2: 種苗ロープ



能登谷先生の栽培試験

種苗ロープで成長したマコンブ (2011/07/09発表 依田欣文らのデータから)



1m

一節の種糸から成長したマコンブ



1m

海士町潮早にて養殖したマコンブ
沖出しから133日経過した状態2011年6月9日撮影

コンブは陸生バイオマスより遙かに生産性が高い！

植物名	測定地	固定系	純生産量 [t/ha/yr]
ネピアグラス	プエルトリコ	C4	85.9
サトウキビ	ハワイ	C4	67.3
ソルガム	カリフォルニア	C4	46.6
トウモロコシ	イタリア	C4	34.0
トウモロコシ	塩尻	C4	26.0
キャッサバ	ジャマカ	C4	41.0
テンサイ	カリフォルニア	C4	42.4
テンサイ	札幌	C4	22.9
コンブ*	北海道羅臼	-	149
マコンブ	島根県海士町	-	600~1,000

水分を含む重量

70%
約20t

栽培期間
12ヶ月

食用でなければ
10倍近い生産性が期待できる

80%
約150t

栽培期間
6~7ヶ月

2011年7月9日
応用藻類学会春季大会
発表者: 依田、能登谷
から計算

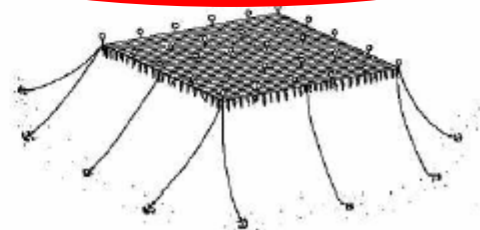
● 鳴門わかめの養殖ロープ 全部つなげると四国一周

鳴門わかめが養殖されている養殖ロープを全部つなげると1,048km！
なんと、四国をぐるり一周してしまうくらい長いんです！



マコンブとは
重ならない

海面栽培期間：10月～3月



徳島県水産課

鳴門わかめ養殖風景

養殖セット

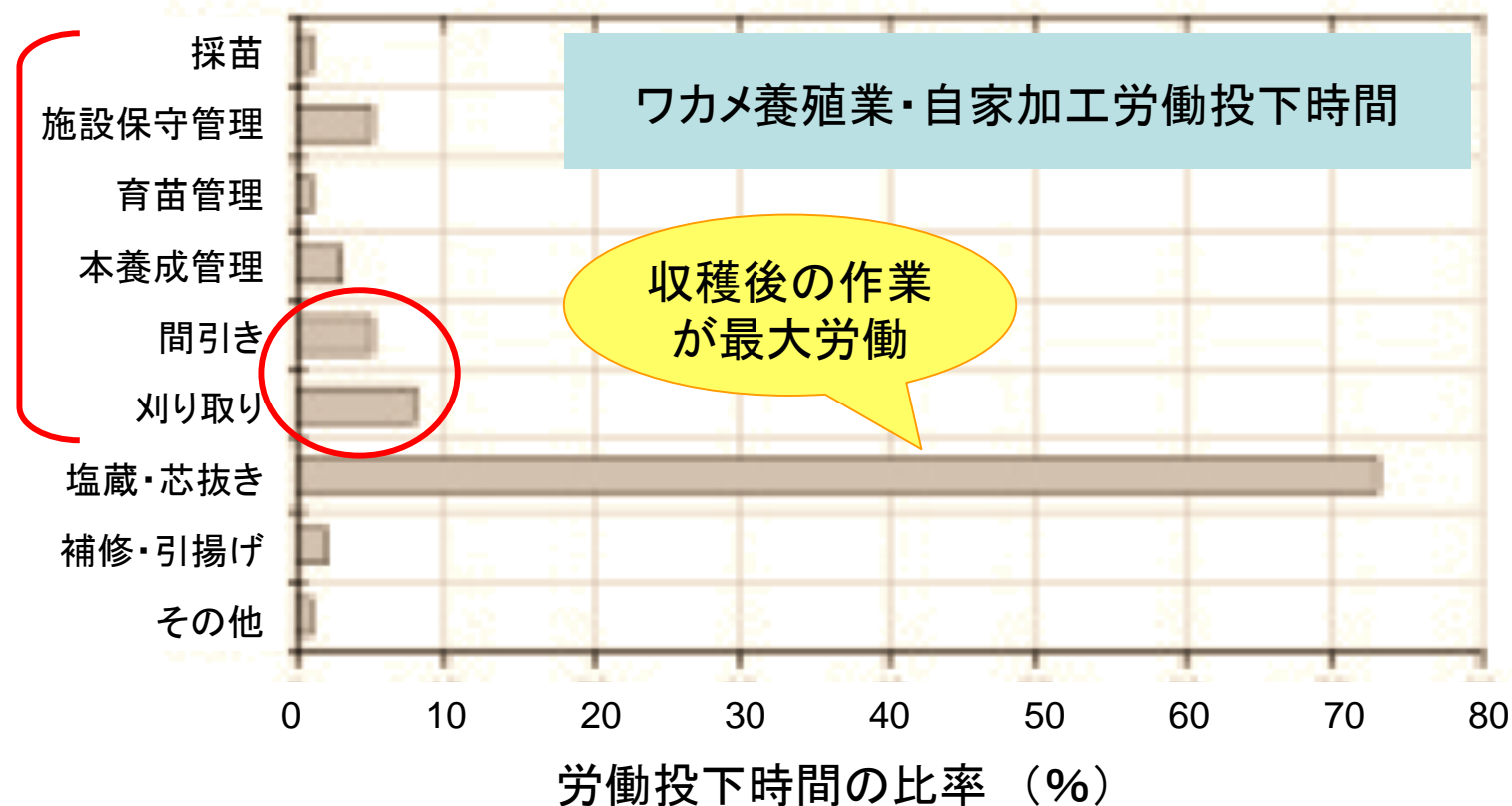
徳島県水産研究所

平成17年の統計による

船上のワカメの状態と陸揚げ作業、切り落とし、 刮ぎ落とし作業



ワカメ栽培と自家加工における労働投下比率

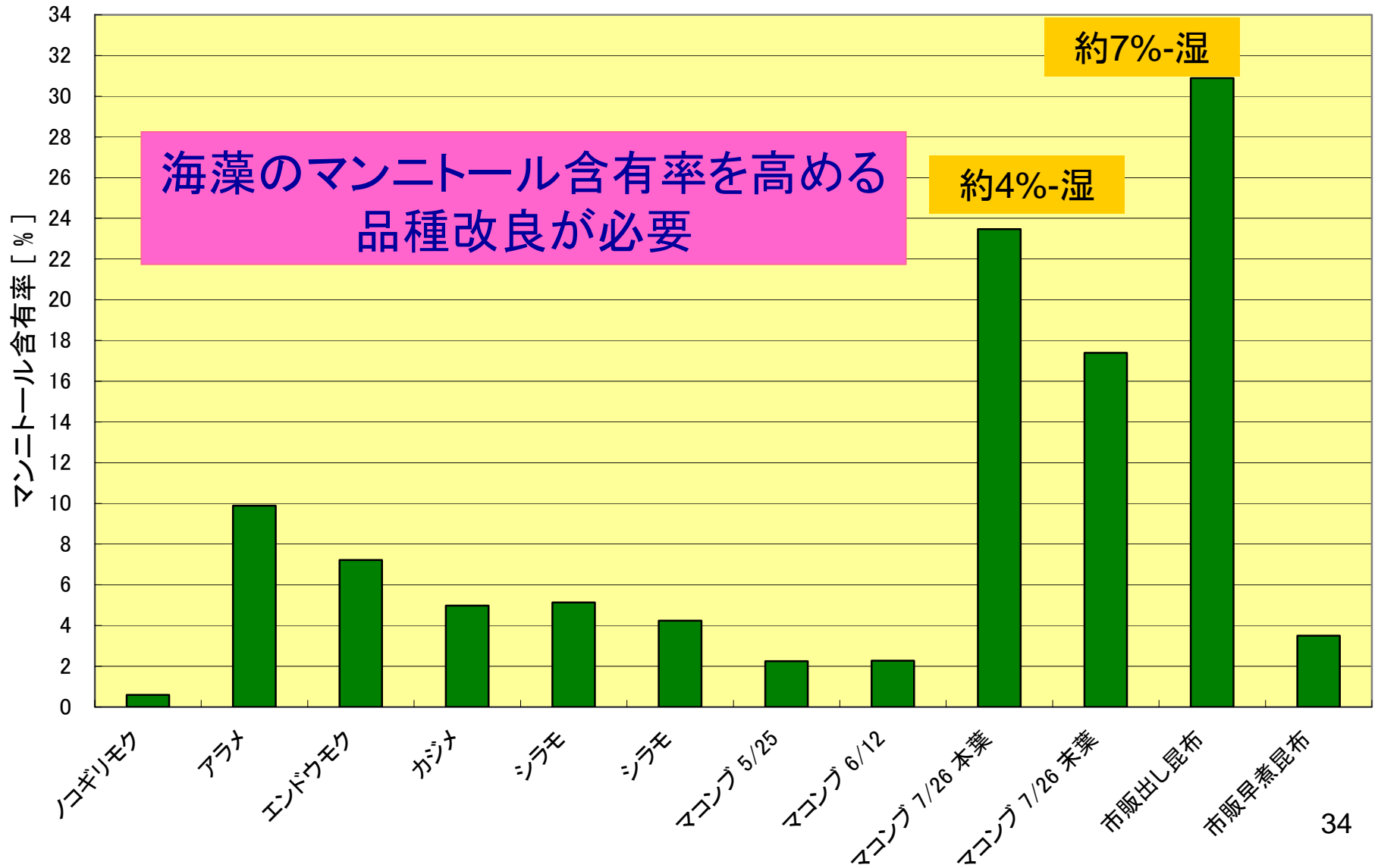


自家加工では、養殖管理、摘菜にかかる時間より、加工にかかる時間の方が極めて大きい。

→ 刈り取りを機械化すれば、栽培作業は非常に楽になる！

1,500円/tonの買い取り価格でも労働意欲を殺ぐことはない。

各種海藻のマンニトール含有率 (乾燥重量当たり)



海士町で必要な栽培面積

隠岐海士町水素エネルギー町構想

人口	2,500	
世帯	1,000	
必要電力	3,650,000	kWh
必要栽培面積	1.0	km ²

* マンニトールのみ基質に使用



発酵水素生産のまとめ

- 発酵槽体積はメタン発酵の1/50～1/500
- 製造コストはエタノール発酵の1/4～1/7
- 浄化槽のBOD負荷を1/3以下に減らせる
- 糖蜜なら売電価格が20円/kWhでも採算性がある
- マコンブの収穫量はサトウキビの5～10倍
- 栽培海藻が原料でも採算性が見込める
- 離島のエネルギー生産として最適
- 日本の自前のエネルギーを確保できる
- CCSの活用で大気中のCO₂濃度を減らせる
- CCSが活用できることは太陽発電、風力発電には無い強力な利点

今後の課題

共通課題

- 100L規模のパイロットプラントで諸問題を調査。
- 計算通りの水素が生産できることを確かめる。
- 収率の高い新規バクテリアの探索を続ける。

海藻－水素生産の課題

- コンブ・ワカメを糖質の含有率が高い品種に改良。
- 簡単に種苗ロープが作れる装置を開発する。
- 収穫作業の労働負担を軽減する装置を開発する。
- 将来は離島の全電力を栽培海藻－水素で賄う。