

実用化間近の高性能バクテリアによる バイオマスの高速水素変換

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



バイオマスエネルギー変換における 水素変換の優位性

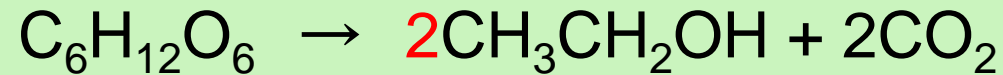
エタノール・メタン・水素変換の 比較

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)

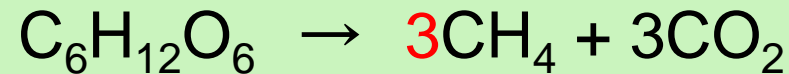
各種発酵エネルギー生産の理論変換効率

エタノール発酵



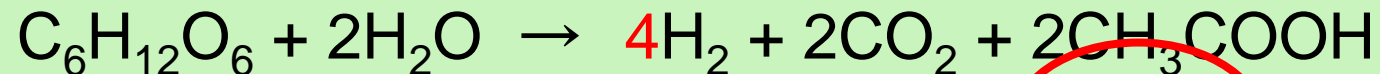
$$\eta_{\max} = (2 \times 1371.3) / 2817 \times 100 = 97.4 \%$$

メタン発酵



$$\eta_{\max} = (3 \times 882.4) / 2817 \times 100 = 94.0 \%$$

水素発酵



$$\eta_{\max} = (4 \times 285.9) / 2817 \times 100 = 40.6 \%$$

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

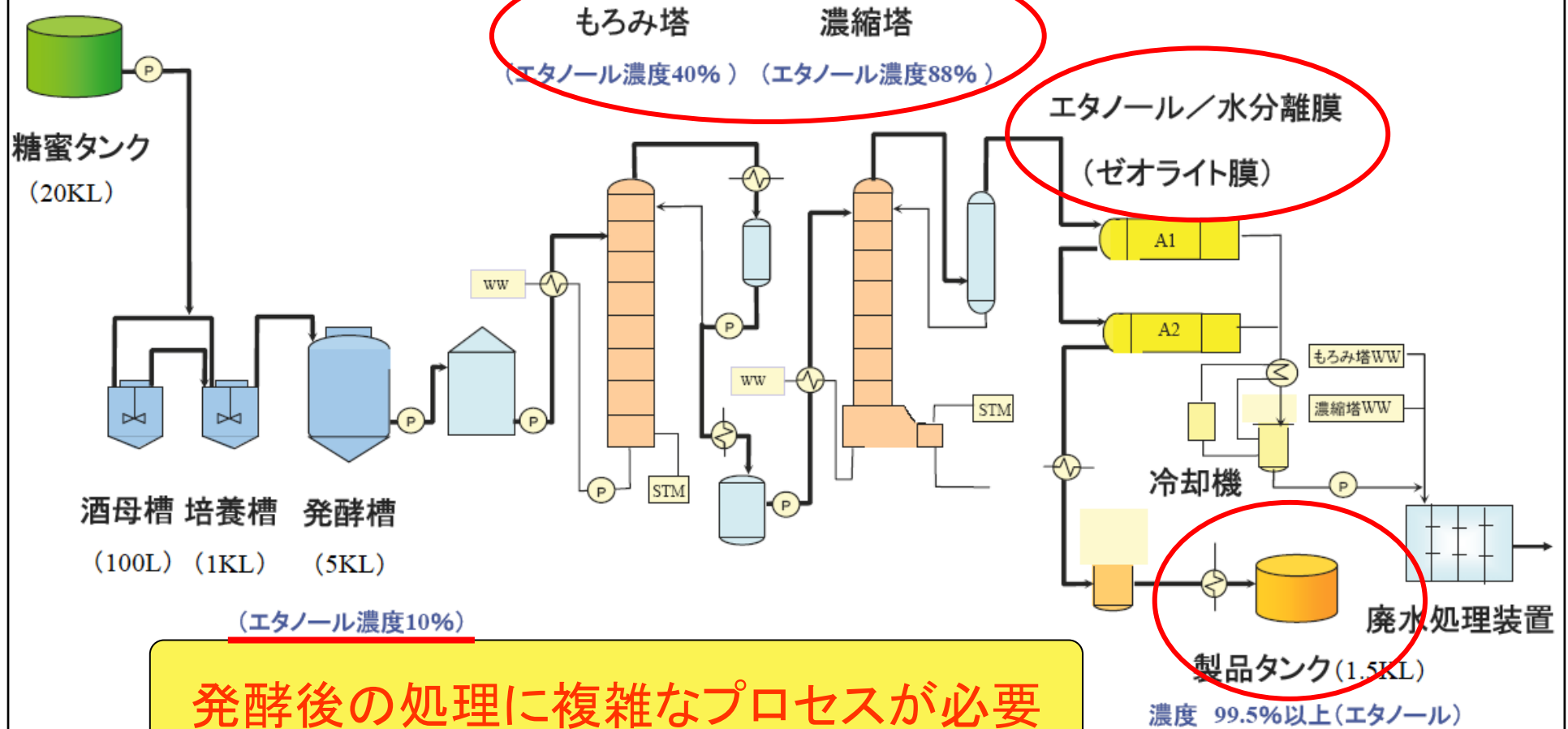
同じ原料から燃料を製造して同じ利用形態にしたときの効率の比較

- 理論効率： 発酵における目的物質のグルコースからの理論収率
- 処理エネルギー： 使用状態に加工するために必要なエネルギーの生産物が持つエネルギー量に対する割合
- 発電効率： それぞれに適した発電方法で使用した時のエネルギー変換効率

総合効率 = (理論効率 × (1 - 処理エネルギー) × 発電効率) × 100

	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

宮古島のバイオエタノール生産設備概要



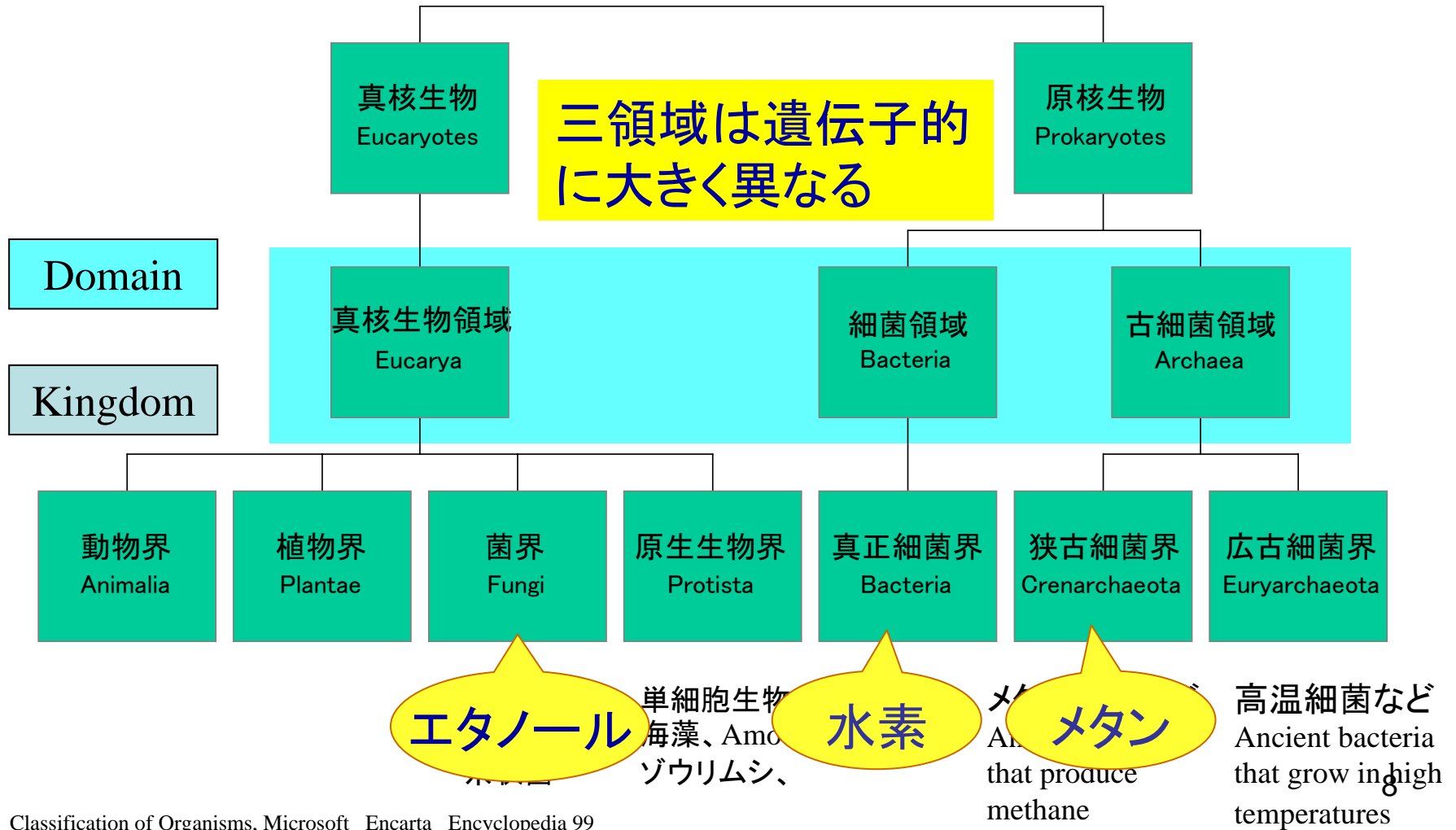
発酵後の処理に複雑なプロセスが必要



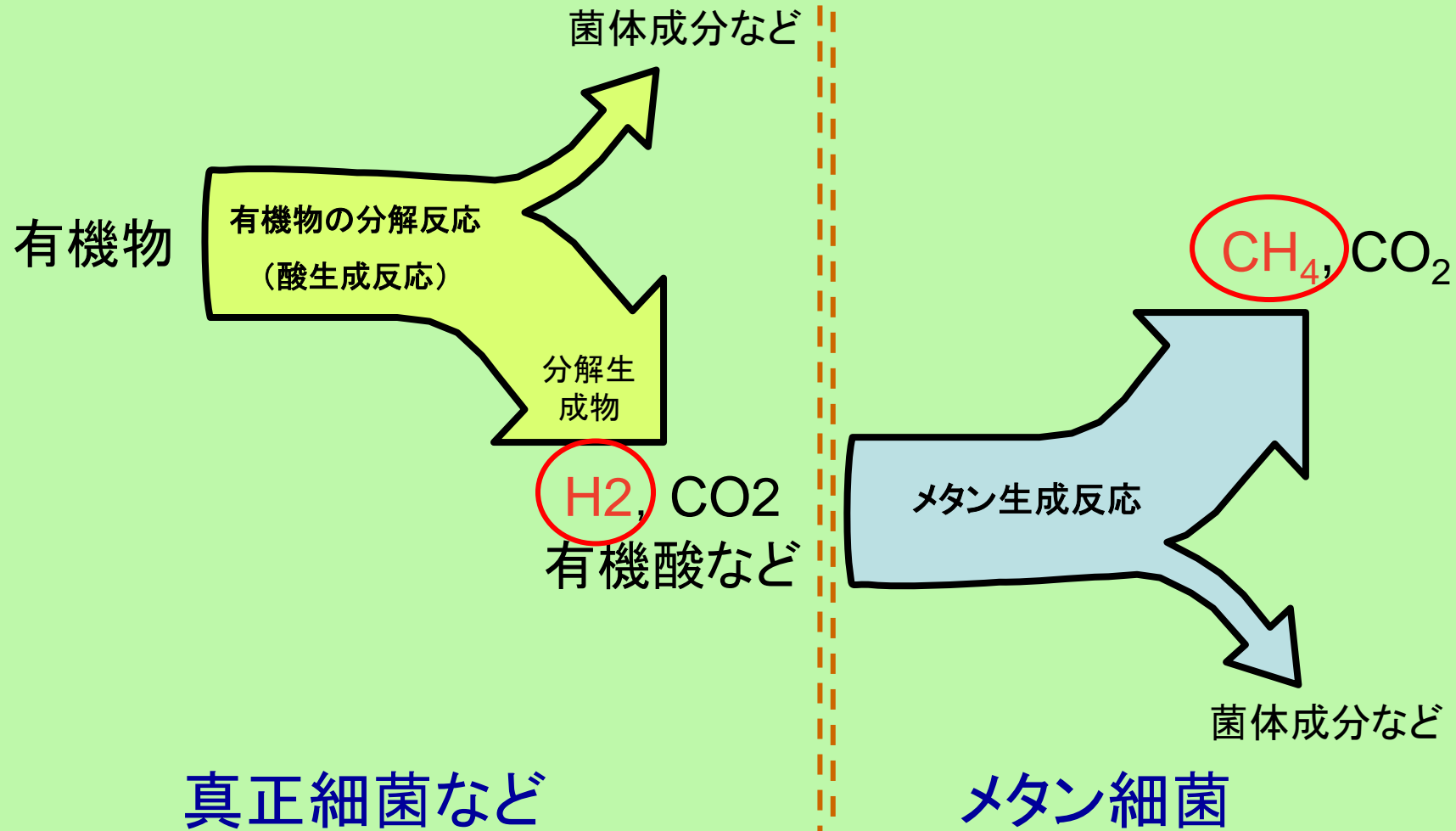
最近のリンネの分類(1990)

Up-to-date Classification proposed by Carl Woese

生物



メタン発酵と水素発酵の関係



メタン二段発酵に必要な設備仕様

食品残飯 10[t/d]、希釈水 10[t/d]のケース (NEDO報告書)

可溶化水素醗酵タンク(R1)

- ・ 全容量: 120 [m³]
- ・ 運転容量: 81 [m³]
- ・ L/D: 4.0 [m] (5.0 [m])

水素発酵に
4日使用

私の持つHN001菌なら
HRT 2時間で十分

二段発酵でも
11日必要

- ・ 翼形状: 45° 傾斜タービン翼
- ・ 翼板サイズ: 1000 [mm] × 1000 [mm]
- ・ 翼先端速度: 10 [m/s]
- ・ 攪拌回転数: 10 [rpm]
- ・ 攪拌動力: 34.29 [kW] (37 [kW])
(溶液を水相当とし、永田式による)

水素発酵だけならメタン発酵に比べ、
装置をきわめて小型化できる

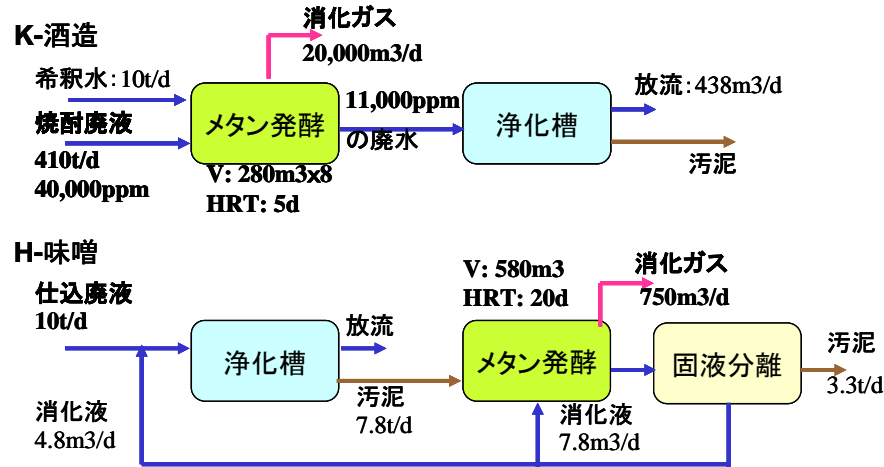
主メタン醗酵タンク(R2)

- ・ 全容量: 320 [m³]
- ・ 運転容量: 222 [m³]

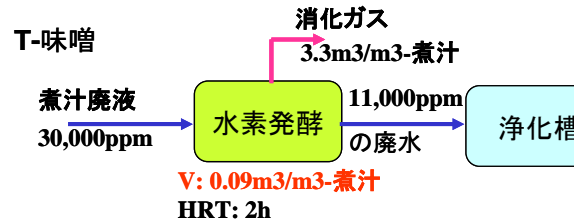
槽/水素槽

水素発酵・メタン発酵の処理能力比較

メタン発酵の例



水素発酵の例



	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}		m 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

*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

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？

おわり



メカ説明



細菌による 高速水素変換技術

発酵で水素を発生する微生物

発酵で水素を発生する代表的なバクテリアと 谷生が発見した菌株

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*

Serratia, **E82005 (1982年に発見)**

Hafnia,

Proteus

発酵で水素を発生する代表的なバクテリアと 谷生が発見した菌株

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)

各種微生物の増殖速度

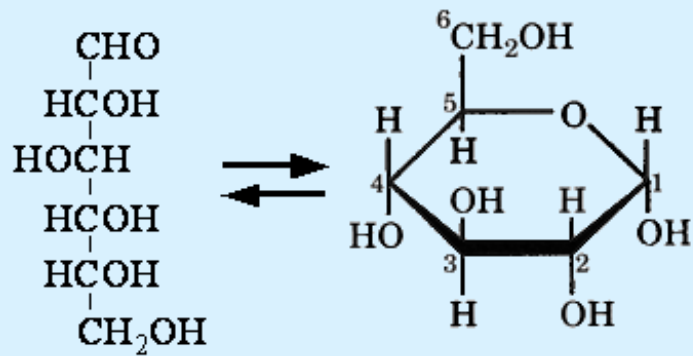


微生物		世代時間	非増殖速度	温度
		[h]	[h ⁻¹]	[°C]
従属栄養細菌	<i>Pseudomonas natriegens</i>	0.16	4.3	37
	<i>Escherichia coli</i>	0.28	2.5	37
	<i>Vibrio marinus</i>			
光合成細菌	<i>Rhodospseudomonas spheroides</i>			
	<i>Nitrobacter agilis</i>	20	0.035	27
酵母	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	2	0.35	30
緑藻	<i>Chlorella ellipsoidea</i>	7	0.10	25
珪藻	<i>Tabellaria blocculosa</i>	17	0.41	20
藍藻	<i>Anabaena cylindrica</i>	25	0.028	25

水素発生細菌は非常に増殖が速い

発酵水素製造に利用できるバイオマス

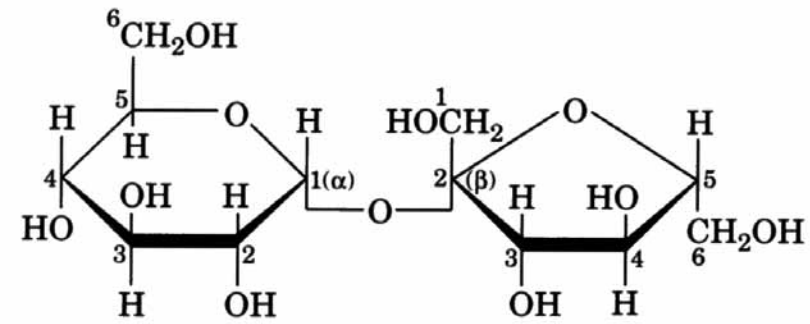
グルコース、スクロース、デンプン、セルロースの構造



直鎖型

ピラノース型

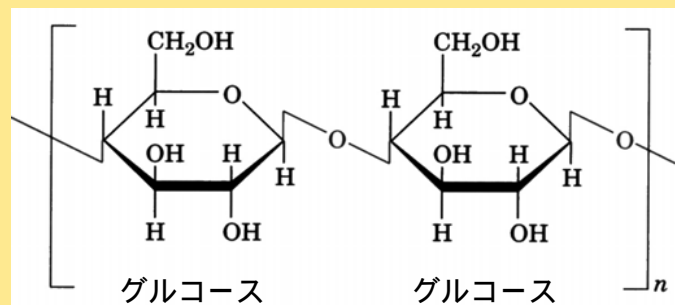
図1. グルコースの構造



グルコース

フルクトース

図2. スクロースの構造



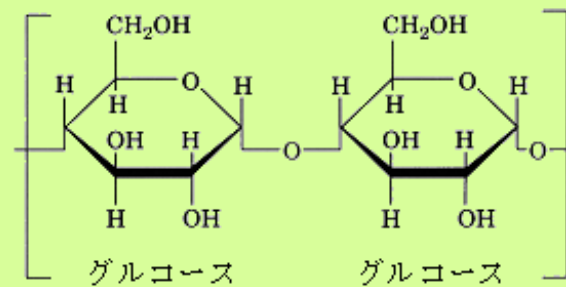
グルコース

グルコース

β 1-4結合

図3. セルロースの構造

セルロースの利用は難しい



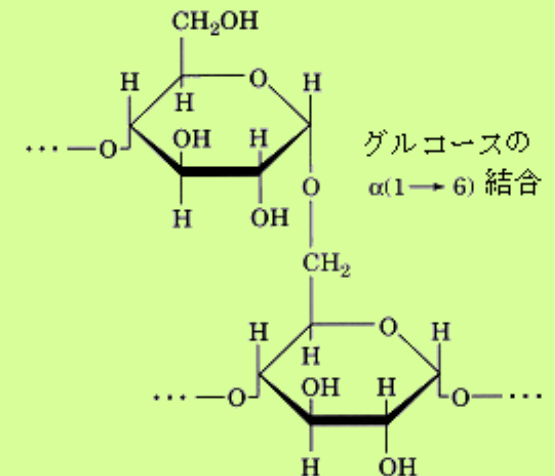
グルコース

グルコース

アミロース

α 1-4結合

図4. デンプンの構造



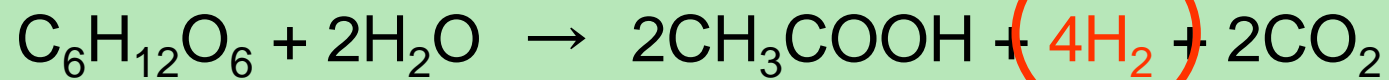
グルコースの
 α 1-6結合

アミロペクチン

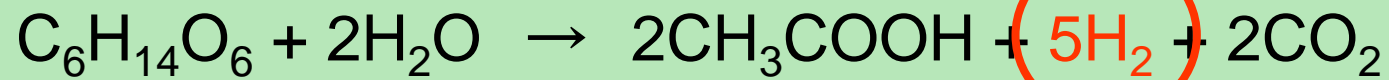
α 1-6結合

グルコース・マンニトール・アルギン酸からの 理論最大水素収率

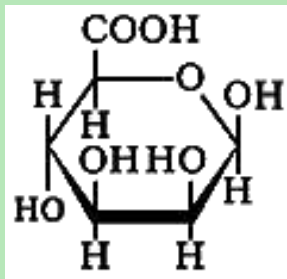
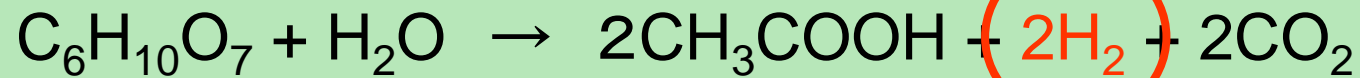
Glucose



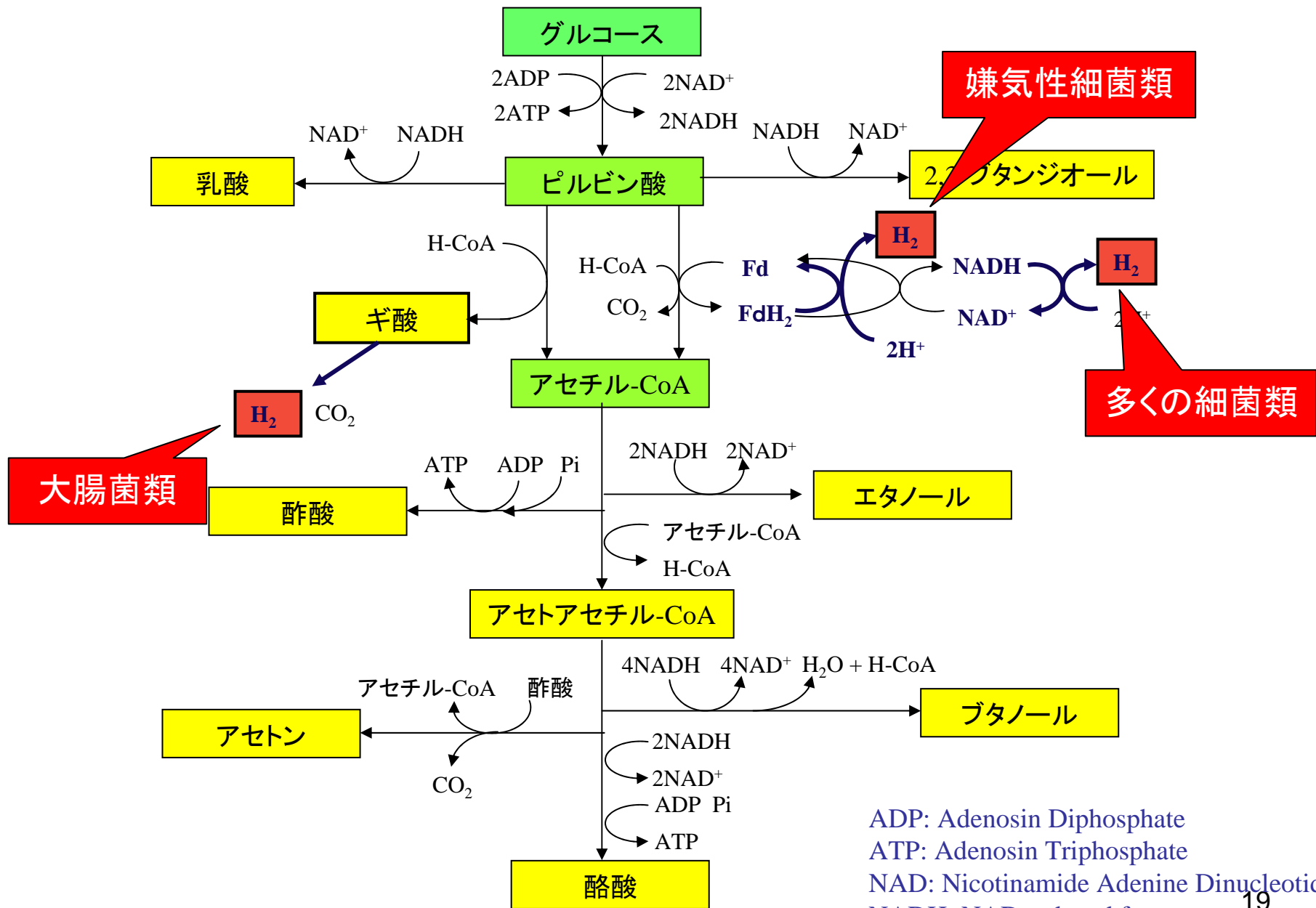
Mannitol



Alginic acid



発酵の代謝産物経路



ADP: Adenosin Diphosphate
 ATP: Adenosin Triphosphate
 NAD: Nicotinamide Adenine Dinucleotide
 NADH: NAD reduced form
 FAD: Flavin Adenine Dinucleotide

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	基質	収率*2)	発生速度		著者
		[-]	[°C]		[mol/mol]	[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> 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	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]

現有バクテリアの実用性

発酵水素生産の経済性試算

沖縄の糖蜜による水素生産の採算性

2001/02年期糖蜜	K-製糖	D-製糖	O-製糖	M-製糖	
糖蜜生産量	1,608	2,415	3,257	4,049	ton/yr
糖蜜処理量	5	8	11	13	ton/d
含糖率	40	45	36	37	%
希釈倍率	8	9	8	8	times
発酵液体積	43	72	87	108	m3/d
平均滞留時間	2	2	2	2	hr
発酵槽体積	4	7	8	9	m3
水素収率(グルコース)	2.5	2.5	2.5	2.5	mol/mol
燃料電池効率(42%)	1.5	1.5	1.5	1.5	kWh/m3-H2
自家消費動力	10	10	10	10	kWh/m3-tank
水素価格	38	38	38	38	¥/m3-H2
売電価格	25	25	25	25	¥/kWh
操業日数	300	300	300	300	day
水素生産量	198,606	341,556	365,392	463,566	m3/yr
発電量	297,909	512,334	548,088	695,348	kWh/yr
消費動力	12,000	21,000	24,000	27,000	kWh/d
売電可能量	285,909	491,334	524,088	668,348	kWh/yr
売電収入	7,148	12,283	13,102	16,709	k¥/yr
償却費(10m3装置)	3,600	3,600	3,600	3,600	k¥/yr
保守費(3%)	1,080	1,080	1,080	1,080	k¥/yr
プラント人件費	3,000	3,000	3,000	3,000	k¥/yr
総支出	7,680	7,680	7,680	7,680	k¥/yr
CO2削減量	263	453	484	614	ton-CO2/yr
クレジット収入	395	679	726	921	k¥/yr
利益(償却費含まず)	3,462	8,882	9,748	13,550	k¥/yr

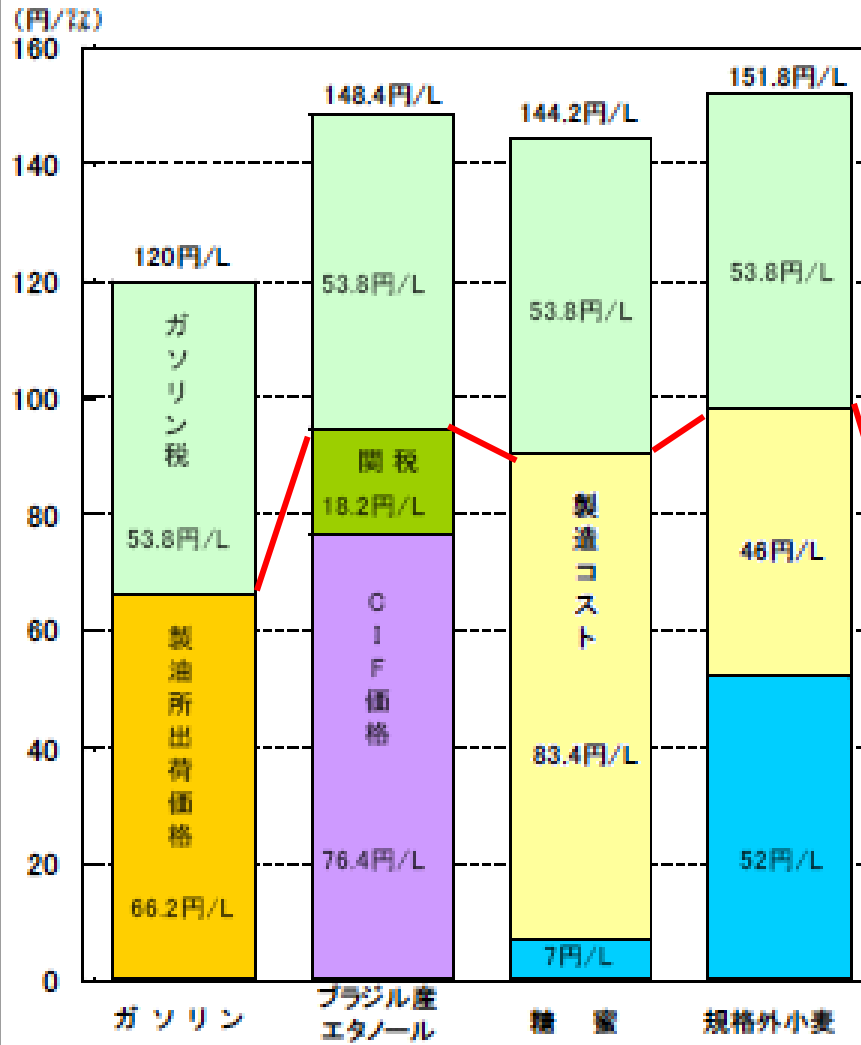
糖蜜での売却と売電との損益比較

糖蜜として売却したときと比べた売電価格の損益分岐点(ただしプラント償却費含まず)

売電価格[¥/kWh]	K-製糖	D-製糖	O-製糖	M-製糖	
20	2,033	6,426	7,128	10,208	k¥/yr
25	3,462	8,882	9,748	13,550	k¥/yr
30	4,892	11,339	12,369	16,892	k¥/yr
糖蜜売却益	2,412	3,623	4,886	6,074	k¥/yr

- 糖蜜は菓子、醸造用アルコールなどの原料になる。
- 糖蜜の価格は商社が決めている。
- 輸送費がかかるので1,500円/トンが買取価格？
- 糖濃度40%程度が引き取り条件？
- 沖縄の電気料金は25円/kWh(300kWh消費の時)

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

糖蜜からの水素製造はきわめて低コスト!!

大型海藻を原料にして 水素生産する可能性

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**
- CCSができることは**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**

C4植物の生産性

植物名	測定地	固定系	純生産量 [t/ha/yr]	栽培日数 [d]	平均CGR [g/m ² /d]	maxCGR [g/m ² /d]
ネピアグラス	フエルトリコ	C4	85.9	365	23.5	60
サトウキビ	ハワイ	C4	67.3	365	18.4	38
ソルガム(トウキビ)	カリフォルニア	C4	46.6	210	22.2	-
テンサイ	札幌	C3	22.9	175	13.1	28
	カリフォルニア		42.4	290	14.6	-
	イギリス		-	-	-	31
キャッサバ	ジャワ	C3	41.0	365	11.2	-
トウモロコシ	イタリア	C4	34.0	140	24.3	-
	塩尻		26.5	128	20.7	52
	福岡		-	-	-	55
	カリフォルニア		-	-	-	52
	ニューヨーク		-	-	-	52
アルファルファ	カリフォルニア	C3	29.7	250	14.1	-
イネ	フィリピン	C3	20.0	125	16.0	55
	福井		19.7	161	12.2	-
	筑後		-	-	-	36
ハレシヨ	カリフォルニア	C3	22.0	-	-	37
ハートニレット	A. C. T オーストラリア	C4	21.7	117	18.5	-

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。

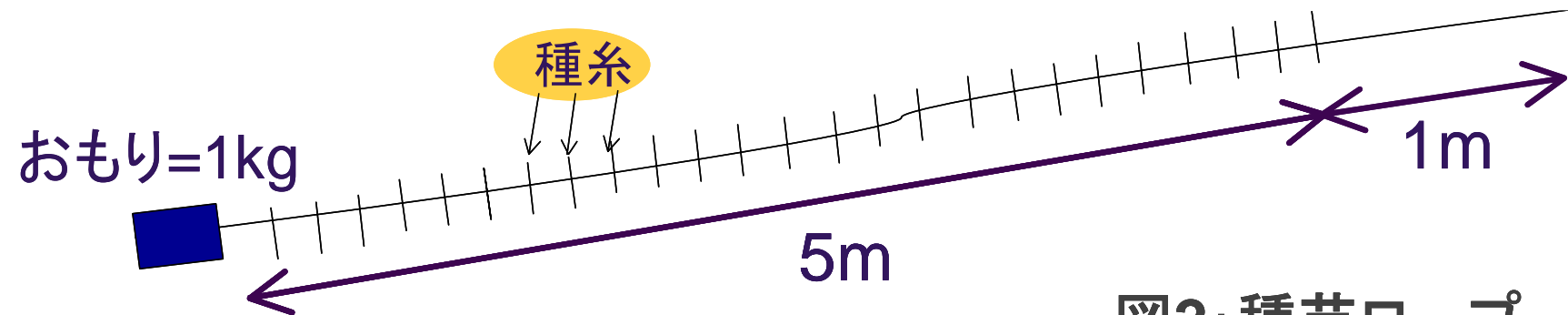
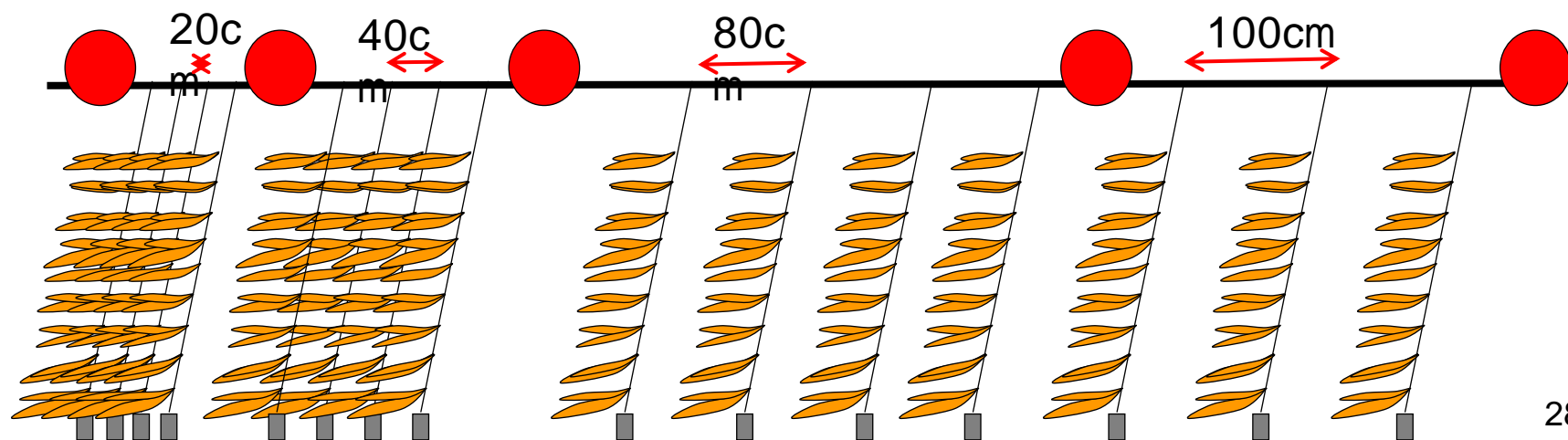


図2: 種苗ロープ



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)



一節の種糸から成長したマコンブ

100mの栽培ロープに
換算すると6ton収穫
できた！



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！

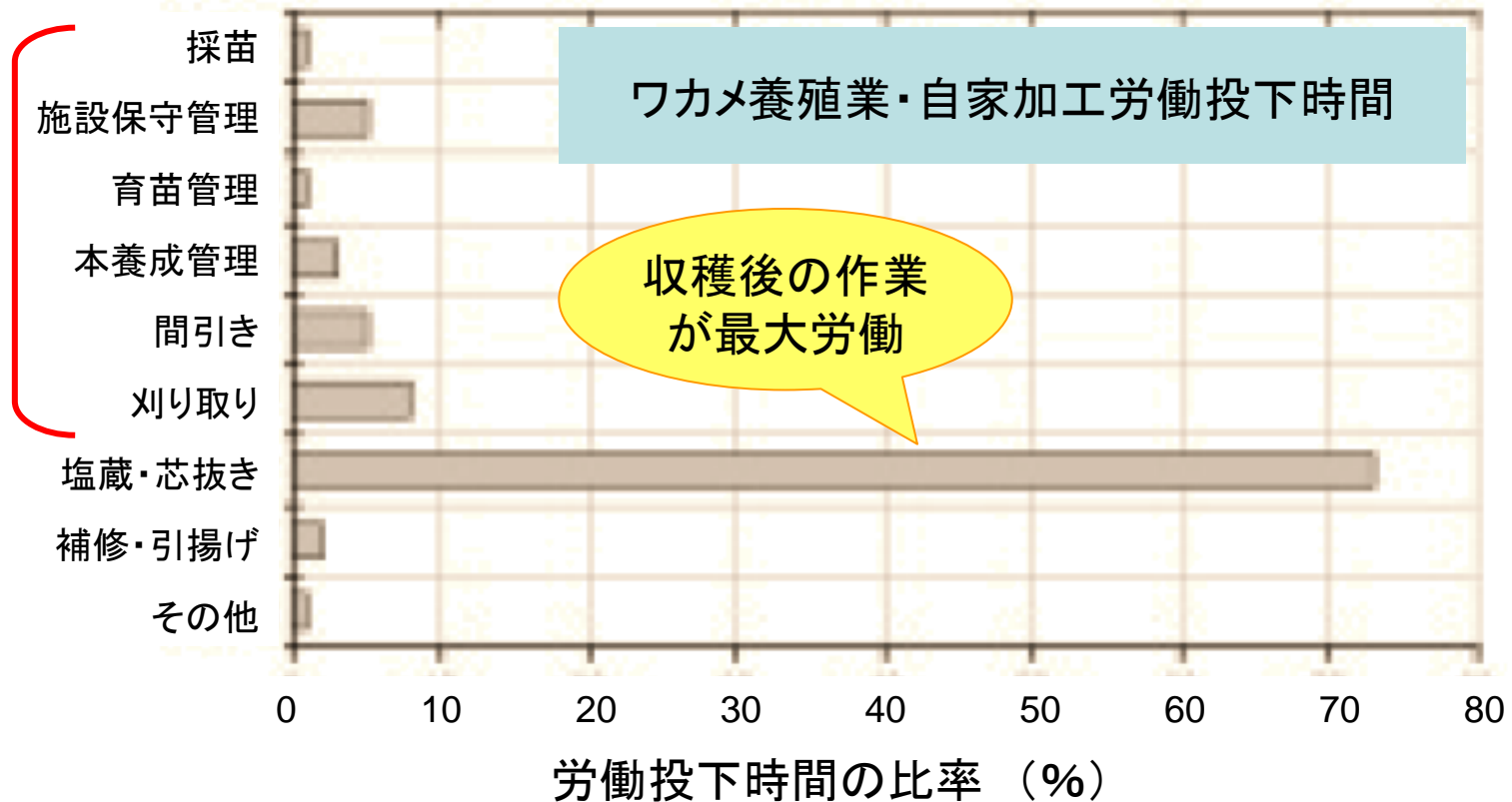
植物名	測定地	固定系	純生産量 [t/ha/yr]
ネピアグラス	プエルトリコ	C4	85.9
サトウキビ	ハワイ	C4	67.3
ソルガム	カリフォルニア	C4	46.6
トウモロコシ	イタリア	C4	34.0
トウモロコシ	塩尻	C4	
キャッサバ	ジャワ	C3	
テンサイ	カリフォル		17
テンサイ	札幌		22
コンブ*	北海道羅臼		149
マコンブ	島根県海士町	—	600~1,000

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

食用でなければ
 10倍近い生産性
 が期待できる

村田吉男、植物の生産性、「バイオマス」生産と変換（上）、柴田/木谷編、学会出版センター(1981)、p.20
 * 農水省農林水産技術会議事務局編、バイオマス変換計画、1991年、光琳

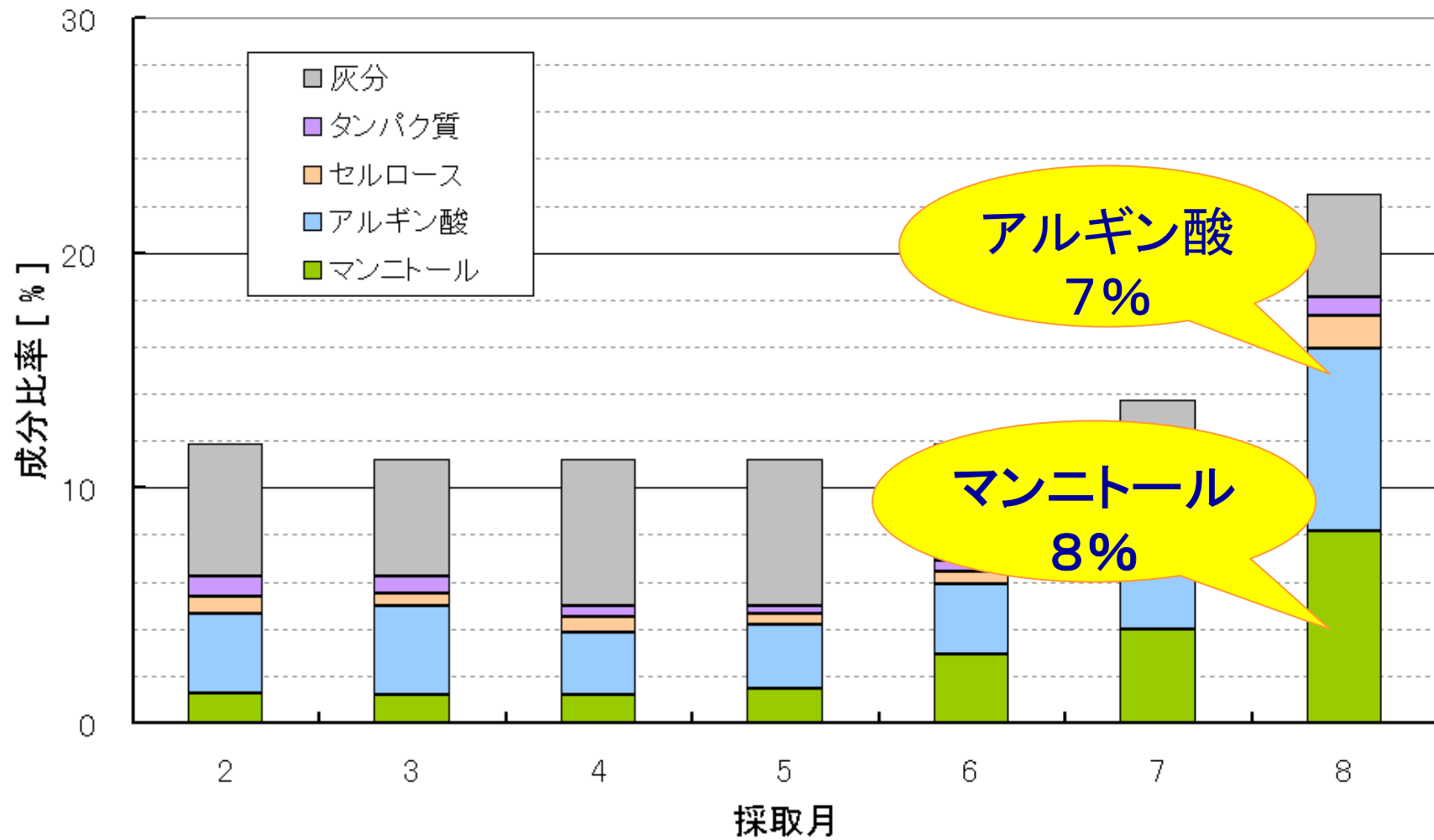
ワカメ栽培と自家加工における労働投下比率



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！

北海道でのコンブの月別マンニトール含有率



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

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、租精製装置	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

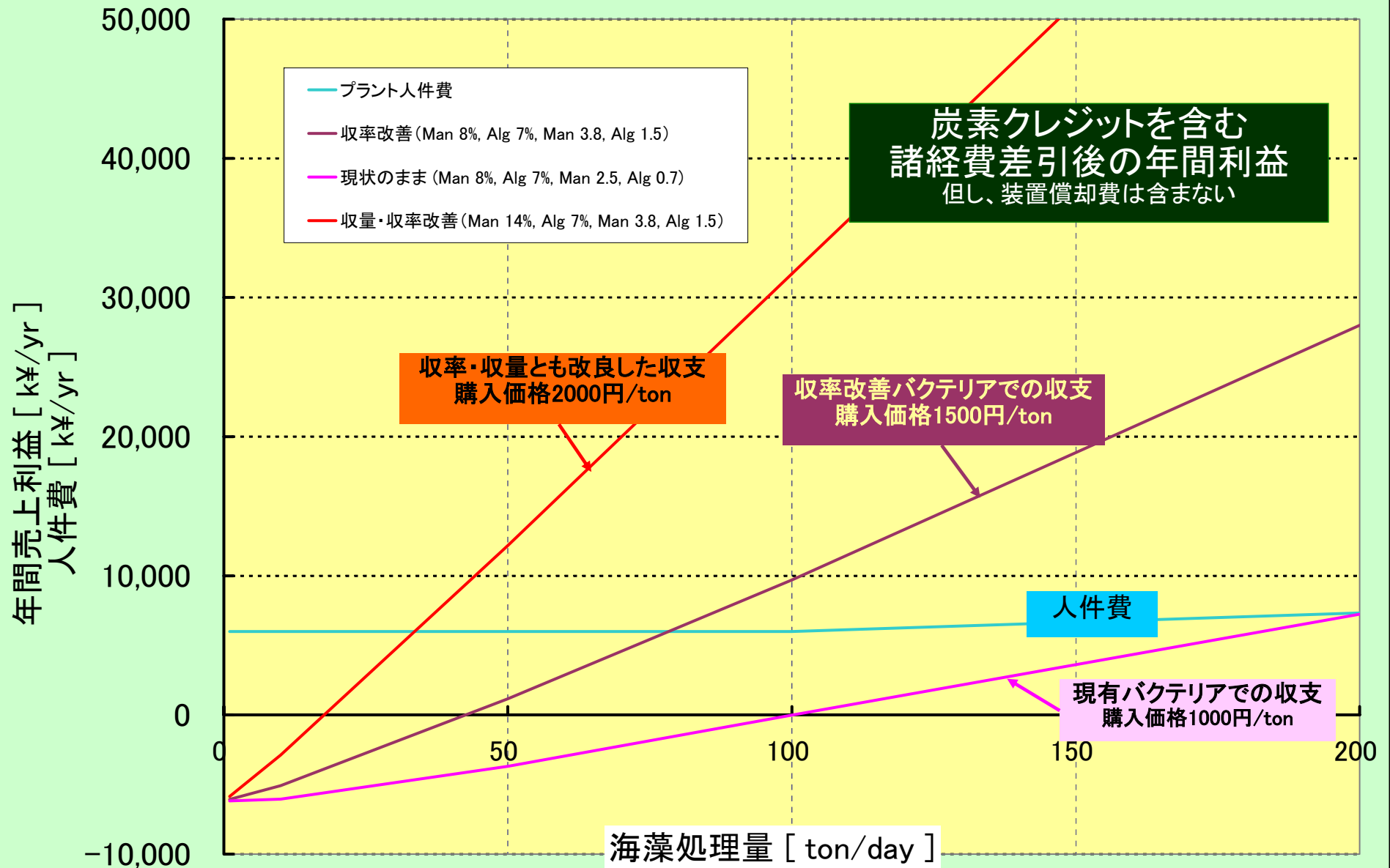
(鳴門漁協のデータを参考にした)

保守費を建設費の3%として計上、ただし償却費は計上しない。

コンブの場合	現状の収率	収率改善	収量も改善	
海藻処理量	100	100	100	ton-algae/d
マンニトール含率	8	8	12	%-mannitol
アルギン酸含率	7	7	7	%-alginate
水素収率(Mannitol)	2.5	3.8	3.8	mol/mol
水素収率(Alginate)	0.7	1.0	1.5	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	51	¥/m ³ -H ₂
売電価格	30	30	30	¥/kWh
操業日数	300	300	300	day
水素生産量	925,552	1,389,734	2,084,601	m ³ /yr
発電量	1,573,439	2,362,548	3,543,822	kWh/yr
消費動力	1,000	1,000	1,000	kWh/d
売電可能量	1,273,439	2,062,548	3,243,822	kWh/yr
売電収入	38,203	61,876	97,315	k¥/yr
保守費(3%)	4,300	4,300	4,300	k¥/yr
プラント人件費	6,000	6,000	6,000	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	40,300	55,300	70,300	k¥/yr
CO ₂ 削減量	1,300	2,087	3,130	ton-CO ₂ /yr
クレジット収入	2,085	3,130	4,696	k¥/yr
年間売上利益	-12	9,707	31,711	k¥/yr

改良目標が明らかになった!

1日あたりの海藻処理規模と経済性の関係



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
- 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。
- 将来は日本の全電力を栽培海藻－水素で賄う。

学童・生徒を対象としたバクテリア探索キット

ピストンの上昇
度合いで優良
菌を見つける



全国の学童・
生徒を新規水
素発生菌探索
の協力者にす
る！

ご静聴ありがとうございました

