

勝浦ロータリークラブ講演
2019/04/26

地球温暖化を抑止する新しいエネルギーとその生産法 「水素」と「発酵水素生産」について

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



1

40万年前まで遡った二酸化炭素濃度と気温の相関

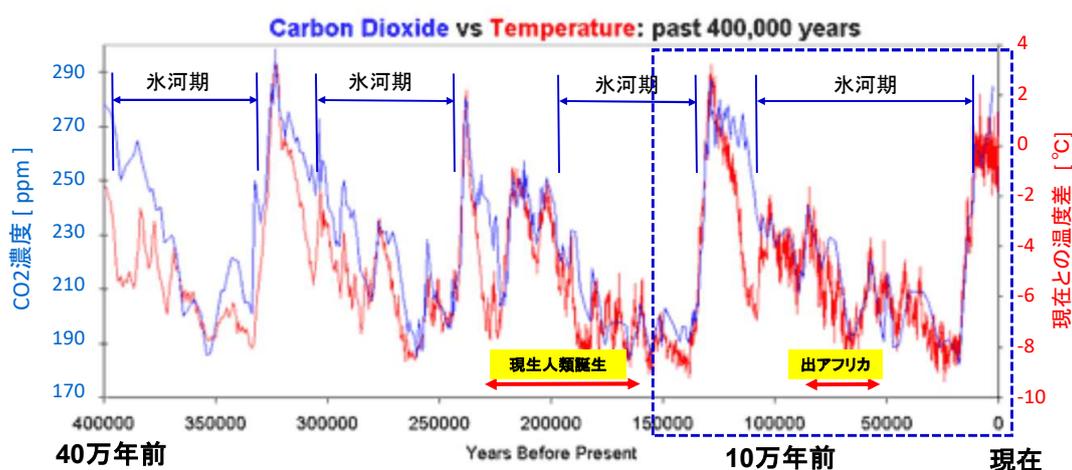
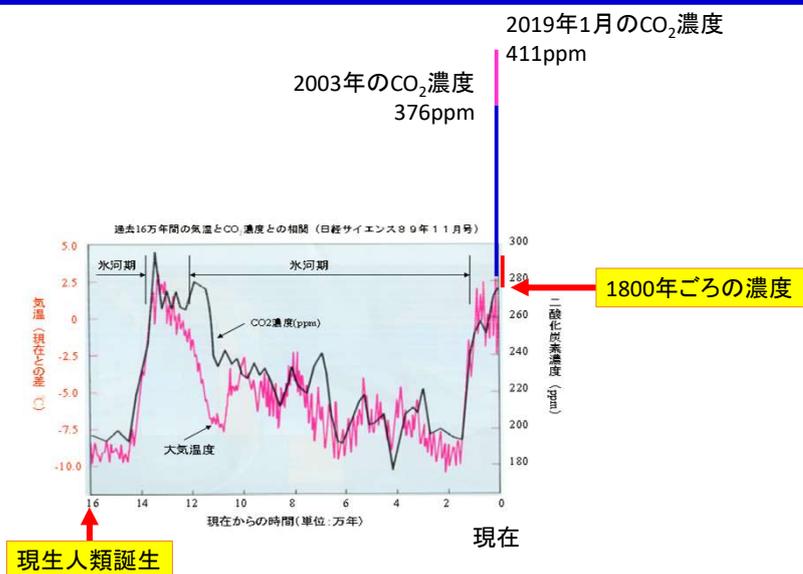


図1: 南極ポストーク基地の氷床コア記録からCO2濃度データ(Petit 2000)と気温変動(Barnola 2003)。

<https://skepticalscience.com/translation.php?a=7&l=11>, "CO2濃度の変動は気温変動に遅れている(ラグがある)"から採図

加速度的に増えるCO2濃度

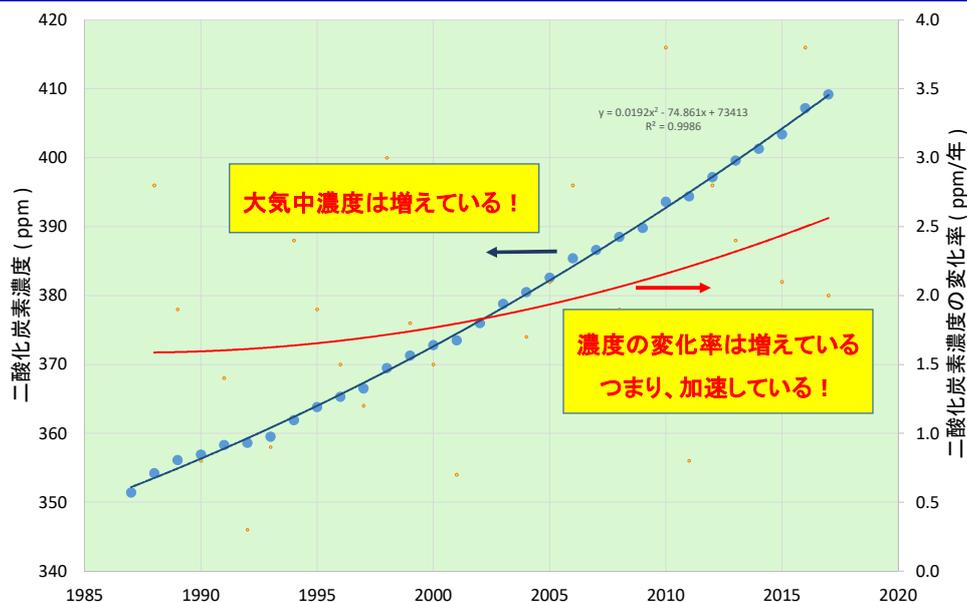


2020/10/28

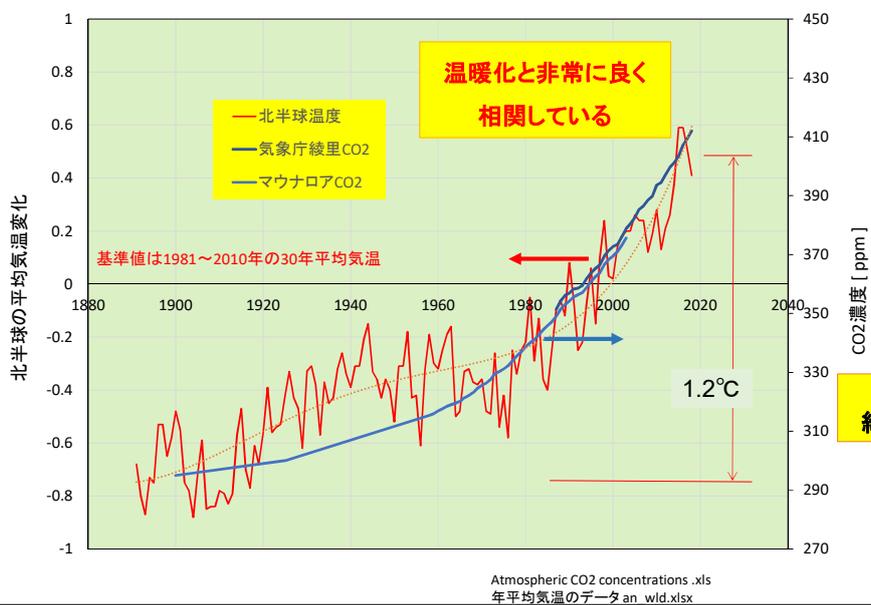
エネルギーと環境1.ppt

3

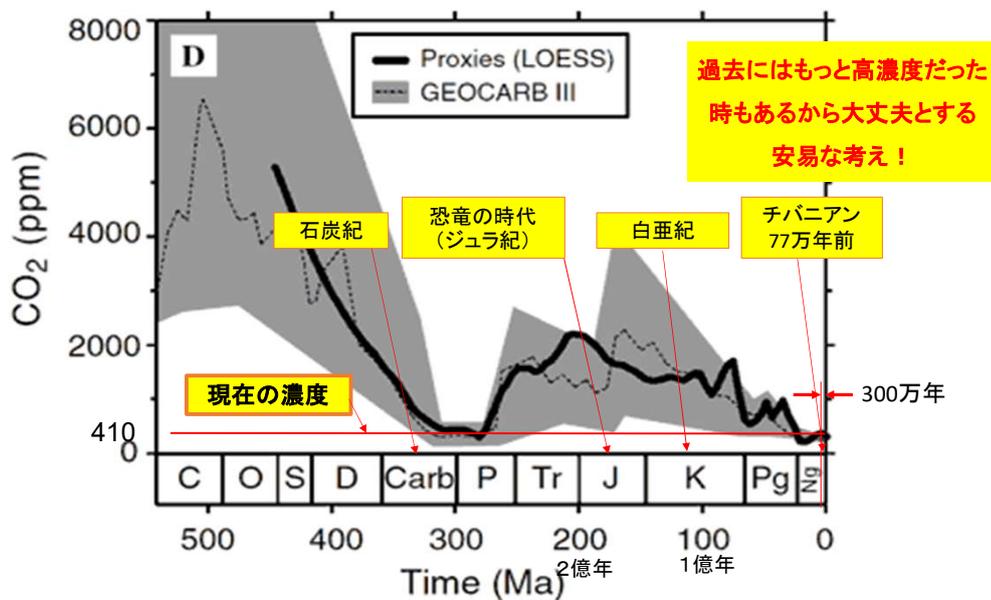
二酸化炭素濃度の年平均値変化(大船渡市綾里)



近100年の温暖化とCO2濃度との相関



過去の高濃度時代

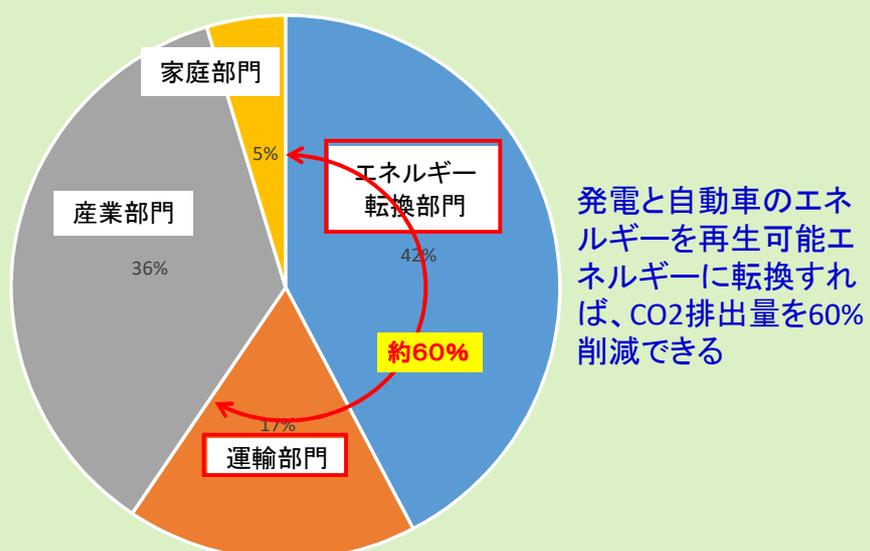


勝浦ロータリークラブ講演
2019/04/26

CO2を排出しない新しいエネルギー 「水素」 への転換政策



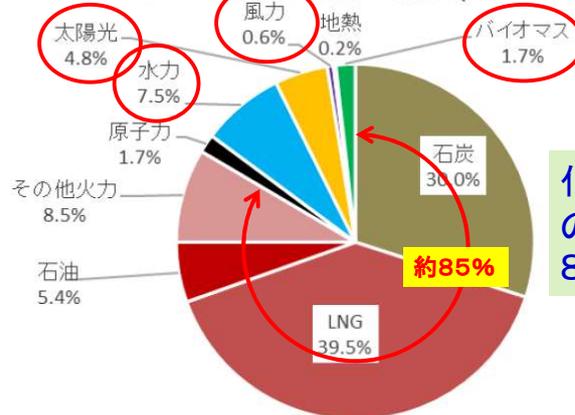
日本の部門別二酸化炭素排出率(2016年度)



日本の2016年度の電源構成

- 日本全体の2016年の自然エネルギー発電量の比率は**14.8%**に
- 太陽光が**4.8%**で、自然エネルギー発電量の約**3割**に。

日本の年間発電量の構成(2016年度)



化石燃料由来のエネルギーで約85%を発電

※自家発電の自家消費を含む



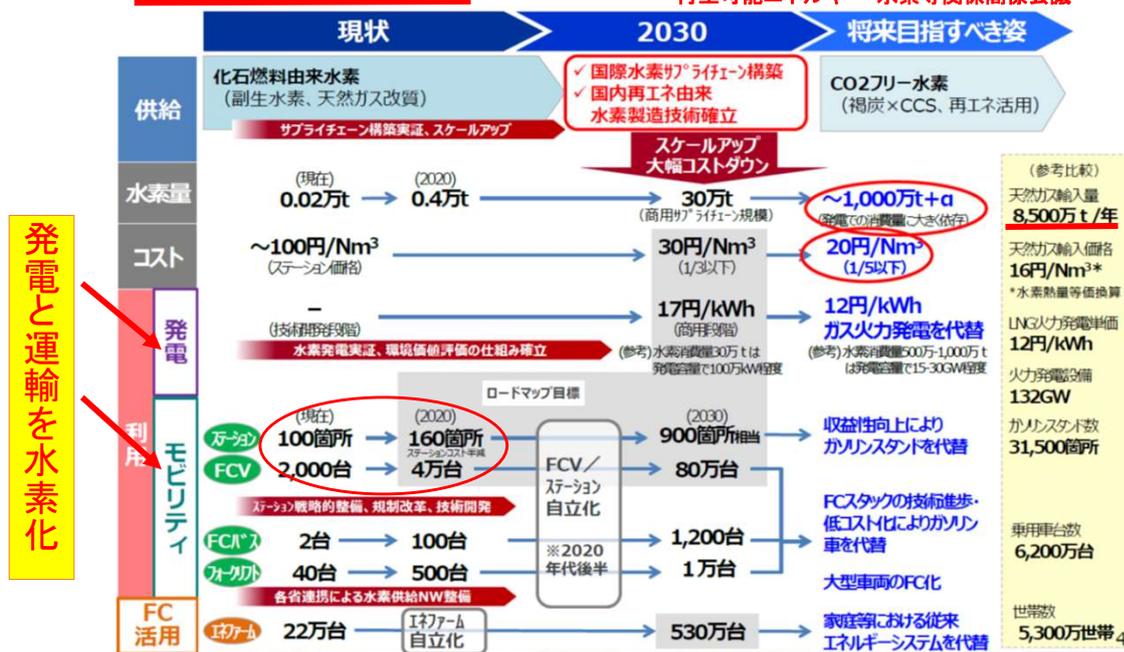
環境エネルギー政策研究所

出典：資源エネルギー庁「電力調査統計」等よりISEP作成

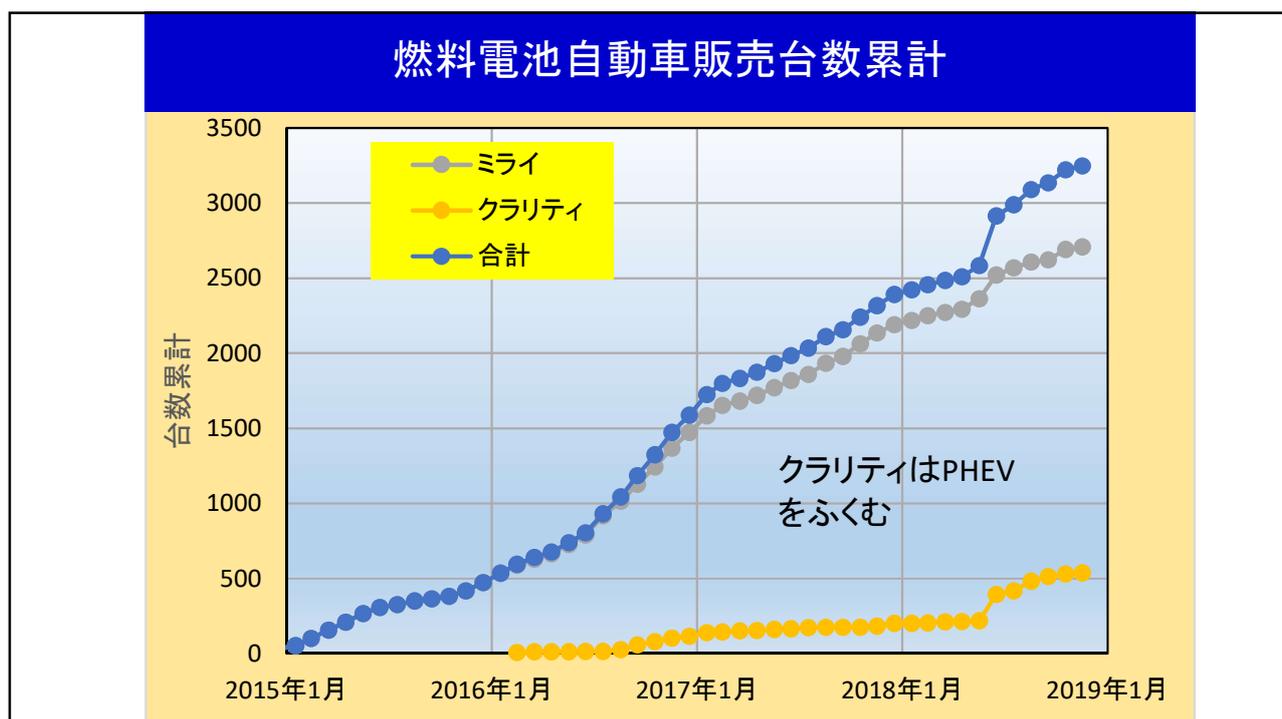
4

水素基本戦略のシナリオ

2017年12月26日
再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議



発電と運輸を水素化



勝浦ロータリークラブ講演
2019/04/26

日本が自前で供給できる水素エネルギー生産方法 「発酵水素生産」

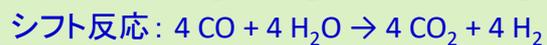
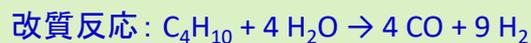
谷生が40年以上研究してきた
生産方法



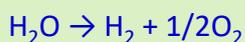
水素のいろいろな生産方法

- 化石燃料の分解(これまでの生産方法)

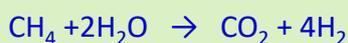
水蒸気改質法、部分酸化法



- 苛性ソーダ生産の副産物
- 太陽光発電・風力発電の電力による水の電気分解



- バイオマスのメタンへのガス化

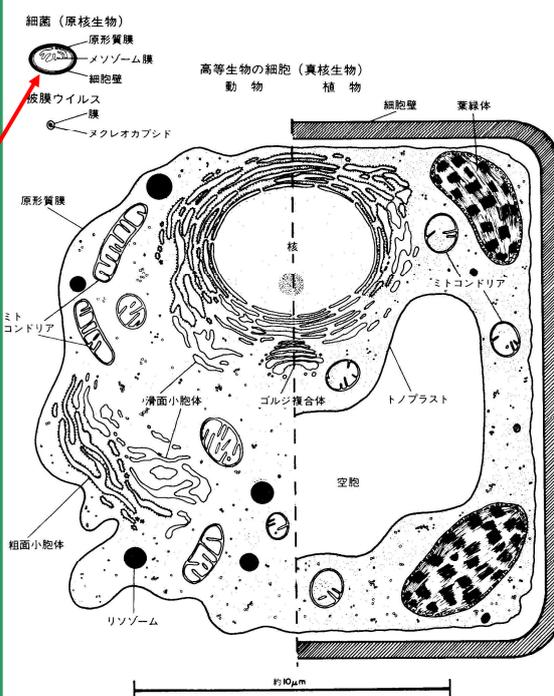


- バイオマスの発酵による水素化



原核生物と真核生物の細胞

バクテリア(細菌)は目に見えないほど小さいから、増殖速度が速く生産速度も速い



Enterobacter aerogenes

Free cultivation

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



| | 培養法 ^{*1)} | pH [-] | 温度 [°C] | 基質 | 収率 ^{*2)} | | 発生速度 | | 著者 |
|---|--------------------|-----------|------------|-------------|-------------------|------------|------------|--------------------------------------|----|
| | | | | | [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 Evyernie et al. ³⁾ | |
| Mesophilic bacterium HN001 | B | 6 | 47 | glucose | 2.4 | 147 | 44 | 2006 Nishiyama et al. ⁴⁾ | |
| <i>C. butyricum</i> LMG1213t1 | 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

| 絶対嫌気性細菌 | 培養法* | pH | 温度 [°C] | 基質 | 生産物 | 生産速度 [mmol/L·h] | 参考文献 |
|---|------|-----|------------|-------------|-----|-----------------------------|--------------------------------------|
| <i>Clostridium</i> sp. No 2 | | | 47 °C | | | 147 mmol/L·h = 3.3 L/L·h | |
| <i>C. paraputrificum</i> M-21 | B | 6 | 47 | GlcNAc | 2.9 | 31 | 1987 Zvyernie et al. ³⁾ |
| Mesophilic bacterium HND01 | B | 6 | 47 | glucose | 2.4 | 147 | 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 | 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 | 1987 Tanisho et al. ⁸⁾ |
| <i>E. cloacae</i> IIT-BT 08 | B | - | 36 | sucrose | 3 | 35 | 2000 Kumar et al. ⁹⁾ |
| <i>E. aerogenes</i> E.2005 | C | 6 | 38 | molasses | 0.7 | 36 | 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 | | | 65 ~ 80 °C | | | | |
| <i>Thermotoga n</i> | B | | 80 | glucose | 4 | 10 | 1994 Schröder et al. ¹²⁾ |
| <i>Thermotoga eim</i> | B | | 74 | glucose | 3.3 | 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 | 2006 Islam et al. ¹⁴⁾ |
| <i>Thermococcus kodakaraensis</i> KOD1 | C | 6.8 | 85 | pyruvate | 2.2 | 9 | 2000 Kanai et al. ¹⁵⁾ |
| 複合培養 | | | | | | | |
| sludge compost | C | 6.8 | 60 | waste water | 2.5 | 8 | |
| <i>C. butyricum</i> IFO13949 + <i>E. aerogenes</i> HO-39 | C | 5.2 | 36 | starch | 2.6 | 53 | |
| sewage sludge | C | 5.7 | 35 | glucose | 1.7 | 30 | |
| fermented soybean meal | C | 6 | 35 | glucose | 1.4 | 8 | 2000 Mizuno et al. ¹⁶⁾ |
| sewage sludge | C | - | 35 | sucrose | 1.5 | 298 | 2004 Lee et al. ²⁰⁾ |

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

17

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

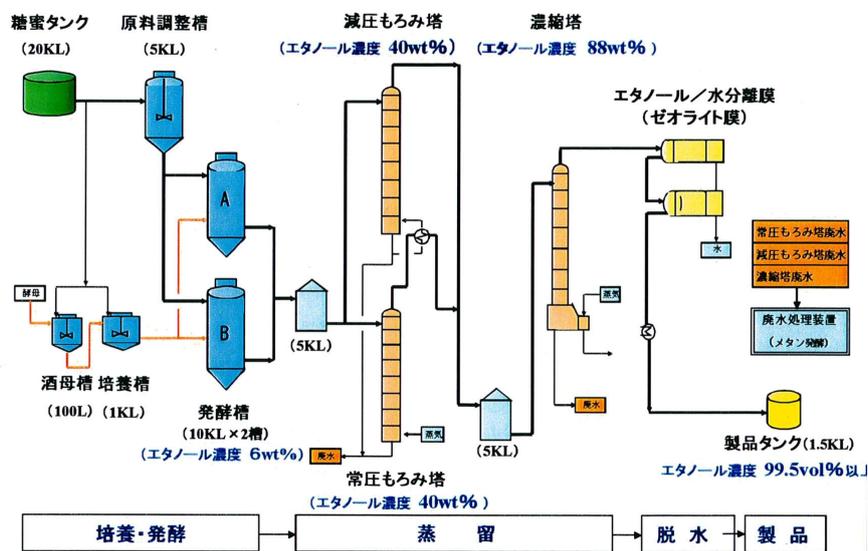
$$\text{総合効率} = (\text{理論効率} \times (1 - \text{処理エネルギー}) \times \text{発電効率}) \times 100$$

| | 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 |

18

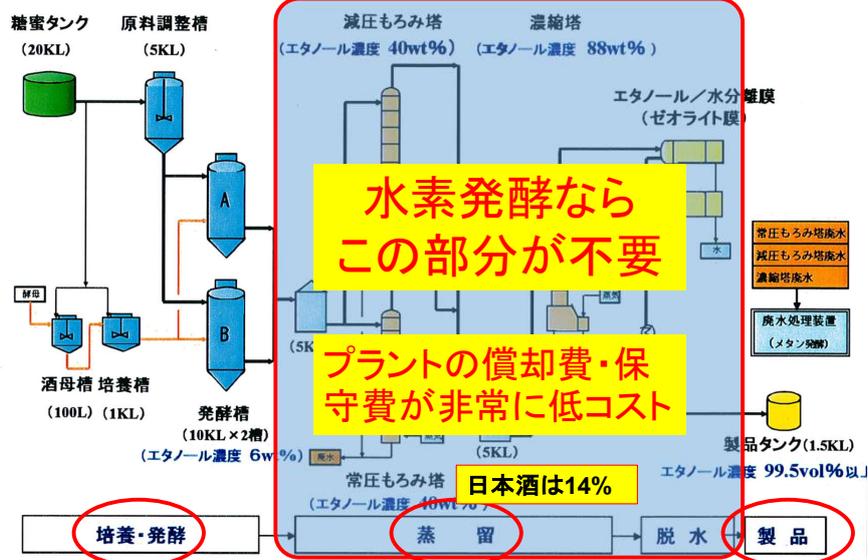
発酵によるエタノール生産と水素生産のフロー図の比較

バイオエタノール生産基本フロー図



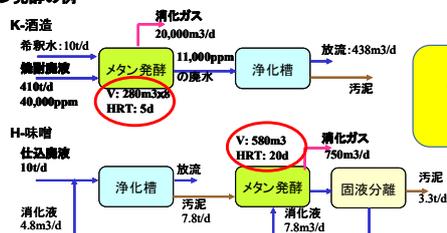
発酵によるエタノール生産と水素生産のフロー図の比較

バイオエタノール生産基本フロー図



水素発酵・メタン発酵の処理能力比較

メタン発酵の例



メタン発酵の分解時間は2日から1ヶ月
水素発酵は数時間で終了する

1/50以下の
発酵槽

ほぼ同等
の消化力

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} | 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

21

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低コストである。
- という理由で、水素生産に優位性がある。

日本に適した海藻を利用した水素生産で経済性を追求

22

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 |
| <u>サトウキビ</u> | 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 | 26.5 |
| キャッサバ | ジャ | | 41.0 |
| テンサイ | カリ | | 42.4 |
| テンサイ | 札幌 | | 22.9 |
| コンブ* | 北海道羅臼 | — | 149 |
| <u>マコンブ</u> | 鳥根県海士町 | — | 600~1,000 |

水分を含む重量

含水率70%
固形分約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

含水率80%
固形分約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

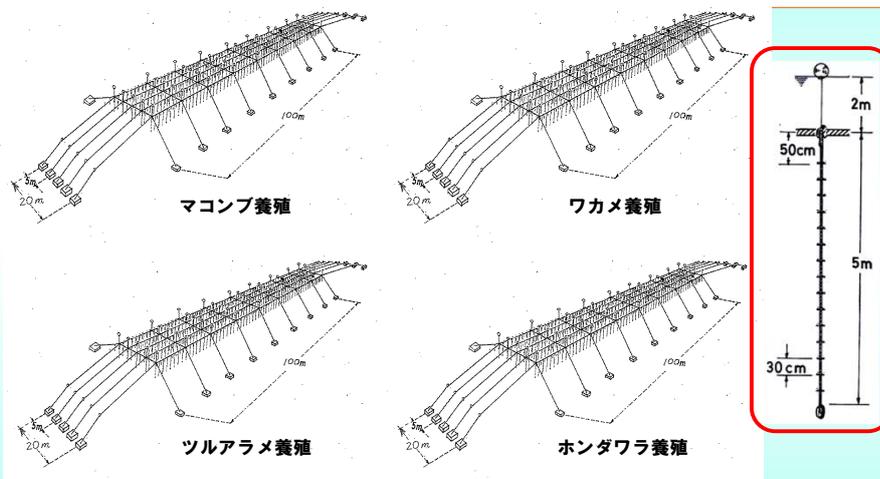
村田吉男、植物の生産性、「バイオマス」生産と変換（上）、柴田/木谷編、学会出版センター(1981)、p.20
*農水省農林水産技術会議事務局編、バイオマス変換計画、1991年、光琳

23

海藻バイオマス発電を活用した再生可能エネルギーの実証研究

② 海藻養殖試験施設の建設

- マコンブ、ワカメ、ツルアラメ、ホンダワラ類について、合計約1haの区画を建設
- 各種100mの幹網から1.5m間隔に5mの種苗養成ロープを垂下する暖簾式養殖施設とする
- この幹網5本のセット、4組(4海藻種)の養殖試験施設の建設



海藻養殖試験施設イメージ図

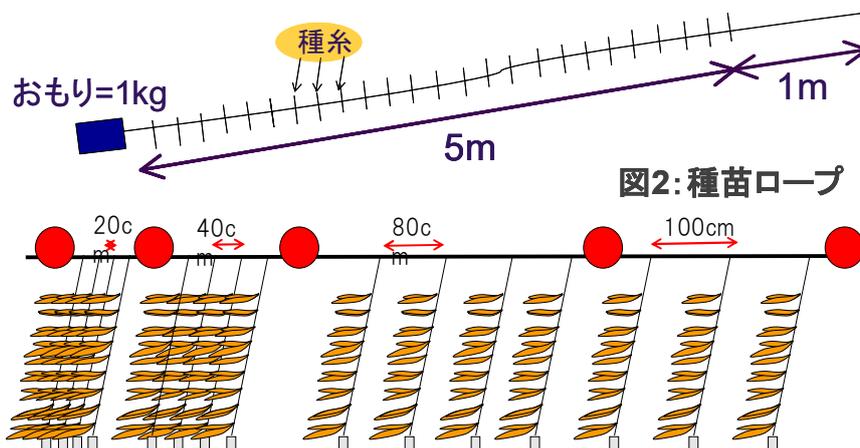
P 6

東京海洋大学 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。



25

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

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

26

糖蜜200kg/d処理が可能な水素発酵プラント完成写真



沖縄県産業振興公社
補助金で建設

プラント全体写真

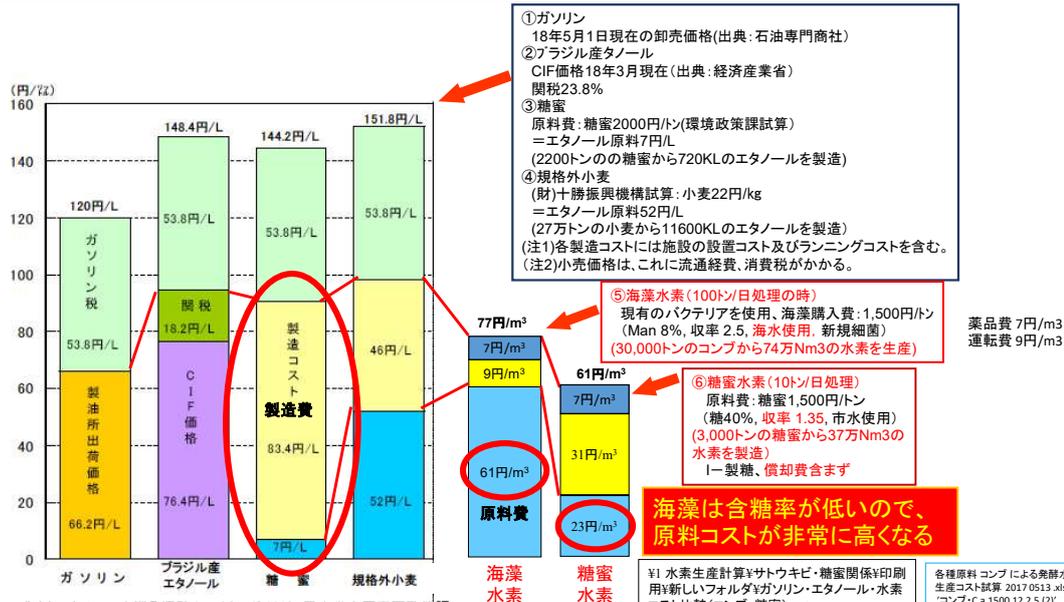


左: 抜気槽、右: 200L発酵槽

1日約25m³の水素生産が可能

ガソリン・エタノール・発酵水素の製造コスト比較

2017/05/15 NEDOプレゼン資料改変



バイオエタノールを巡る情勢data02.pdf, H18, 農水省大臣官房政策課

海藻バイオマスー水素生産の意義

- 日本の**自前のエネルギー**を確保できる
- 日本は海洋国家、専管水域は**国土の12倍**もある
- 海藻バイオマスを栽培する面積は十分ある
- 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**
- 当今の電気自動車のエネルギーに使用すれば、**本当の意味でCO₂排出削減**
- 小規模なら**離島のエネルギー**として最適

29

海藻からの水素生産における副生産物の意外な価値

- 水素生産の原料の**マンニトール**をコンブは約**8%**含有する
- コンブの主成分の一つの**アルギン酸**を約**7%**含有する
- 水素は**25m³/t-wet algae** (収率2.5mol/molの時) 生産可能で、
アルギン酸は**70kg/t-wet algae**も生産できる
- **アルギン酸**は食品、医薬品、化粧品、工業用品の原料である
- アルギン酸ナトリウムの**市場価格は非常に高い**
アルギン酸ソーダ : 90,000円/20kg、
苛性ソーダ : 5,730円/20kg (出荷額からは50円/kg)
- **商品価値**としては、
アルギン酸ソーダなら **31万円/t-wet algae**
水素ならわずか **480円/t-wet algae** (20円/m³として)

海藻からの水素生産は廃棄物利用で可能.pptx

水素生産はアルギン酸生産の廃棄物利用と位置付

- マンニトールはアルギン酸生産の粉碎コンブ・精製過程の排水に含まれる
- この排水処理として水素を生産すれば、水素の原料コストは不要になる
- エネルギー生産用には多量のコンブが必要

2016年生産量 日本:2.7万トン、中国:730万トン、韓国:45万トン

中国の栽培面積:四国の2.3倍(2000年の面積から推定)

- アルギン酸製造原料としても多量に生産される
- アルギン酸の需要は急拡大している
- 当社は非常に環境にやさしいアルギン酸製造法を開発済みである

以上のことから、今後、
海藻からの水素生産は有力なエネルギー生産法になる！

海藻からの水素生産は廃棄物利用で可能.pptx

2017 エネ環提出・専管水域での栽培・収穫・管理図.jpg



表6. コンブ栽培面積・水素生産量・供給可能FCV台数

| 栽培面積 km ² | 水素生産量 H ₂ -Nm ³ | FCV 台数 | 備考 |
|-------------------------|--|-----------|----------|
| 0.5 | 590,000 | 521 | 現状の最高収率 |
| 0.5 | 6,498,000 | 5,734 | 遺伝破壊・二毛作 |
| 4 | 51,984,000 | 45,868 | 遺伝破壊・二毛作 |
| 4x100 | 5,198,400,000 | 4,586,824 | 遺伝破壊・二毛作 |

以上、谷生が40年以上取り組んでいる発酵水素生産研究の
状況をお話しさせていただきました

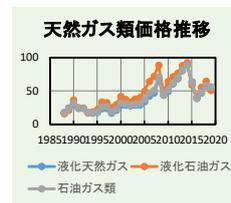
ご清聴ありがとうございました



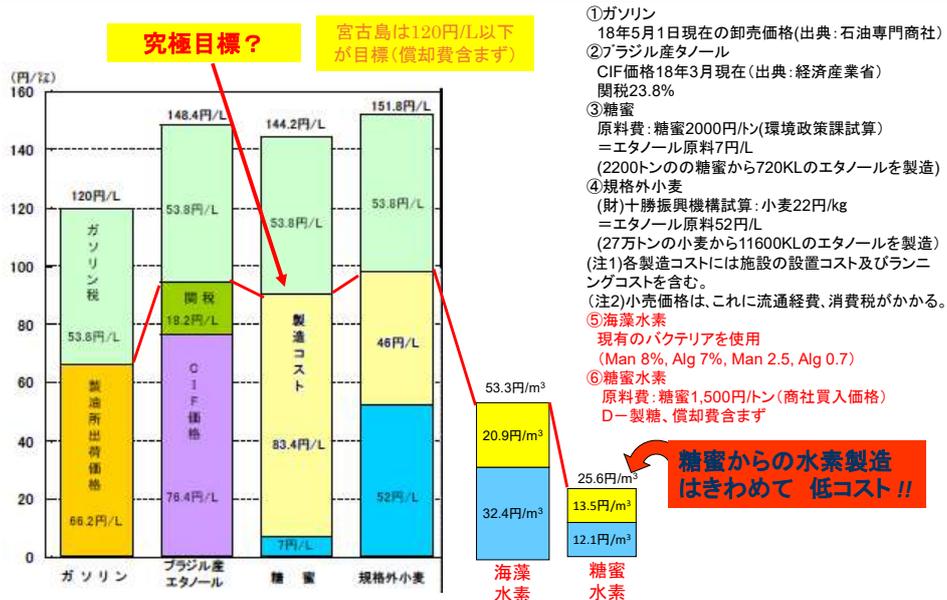
水素とLNGのエネルギー量比較

| | 発熱量 | | 価格 |
|------|-------|--------|-------------|
| | MJ/kg | MJ/Nm3 | 円/Nm3 |
| 水素 | 143 | 12.77 | 22 ~ 5 |
| メタン | 55 | 39.29 | 発熱量 等価価格 |
| 天然ガス | 51.4 | 42.16 | |

天然ガス通関価格 約90千円/MT(2014) — 20千円/MT(1999)



ガソリン・エタノール・発酵水素の製造コスト比較



バイオマスの生産性比較 コンブは陸生バイオマスより生産性が高い

| 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 | C3 | 34.0 |
| トウモロコシ | 塩尻 | C3 | 26.5 |
| キャッサバ | ジャワ | C3 | 41.0 |
| テンサイ | カリフォルニア | C3 | 42.4 |
| テンサイ | 札幌 | C3 | 22.9 |
| コンブ* | 北海道羅臼 | — | 149 |

水分を含む重量

70%含水率
約20t

栽培期間
12ヶ月

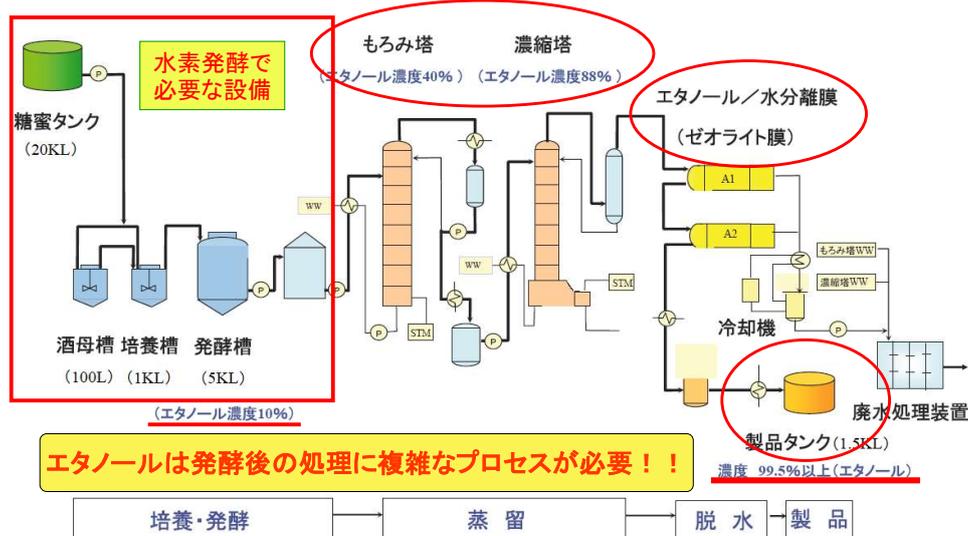
80%含水率
約30t

栽培期間
6~7ヶ月

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

37

宮古島のバイオエタノール生産設備の例



株式会社りゅうせき バイオエタノールプロジェクト推進室

38

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 | 26.5 |
| キャッサバ | ジャワ | C3 | 41.0 |
| テンサイ | カリフォルニア | | 42.4 |
| テンサイ | 札幌 | | 22.9 |
| 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

含水率70%
約20t

食用でなければ
10倍近い生産性
が期待できる

含水率80%
約150t

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

39