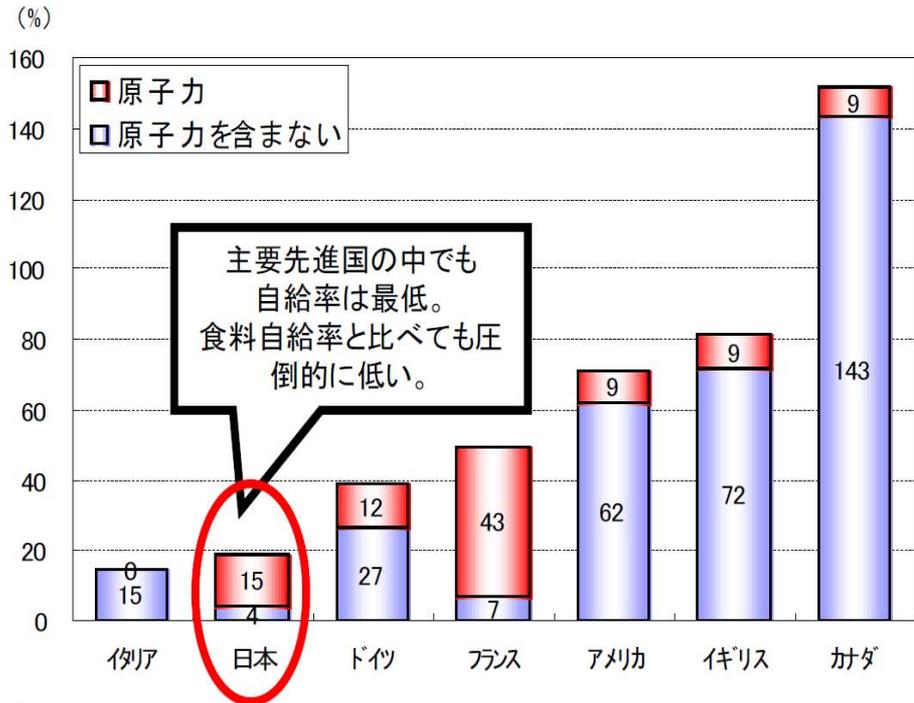


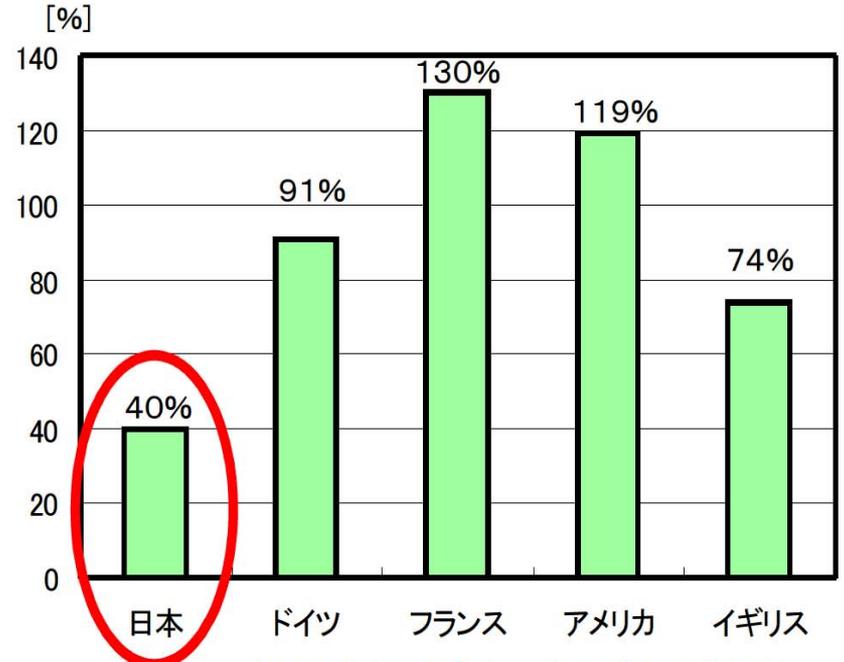
# 人類の未来を拓く 藻類エネルギー



筑波大学大学院生命環境科学研究科  
渡邊 信



【出典】 OECD/IEA, 「Energy Balances of OECD Countries, 2008 Edition」

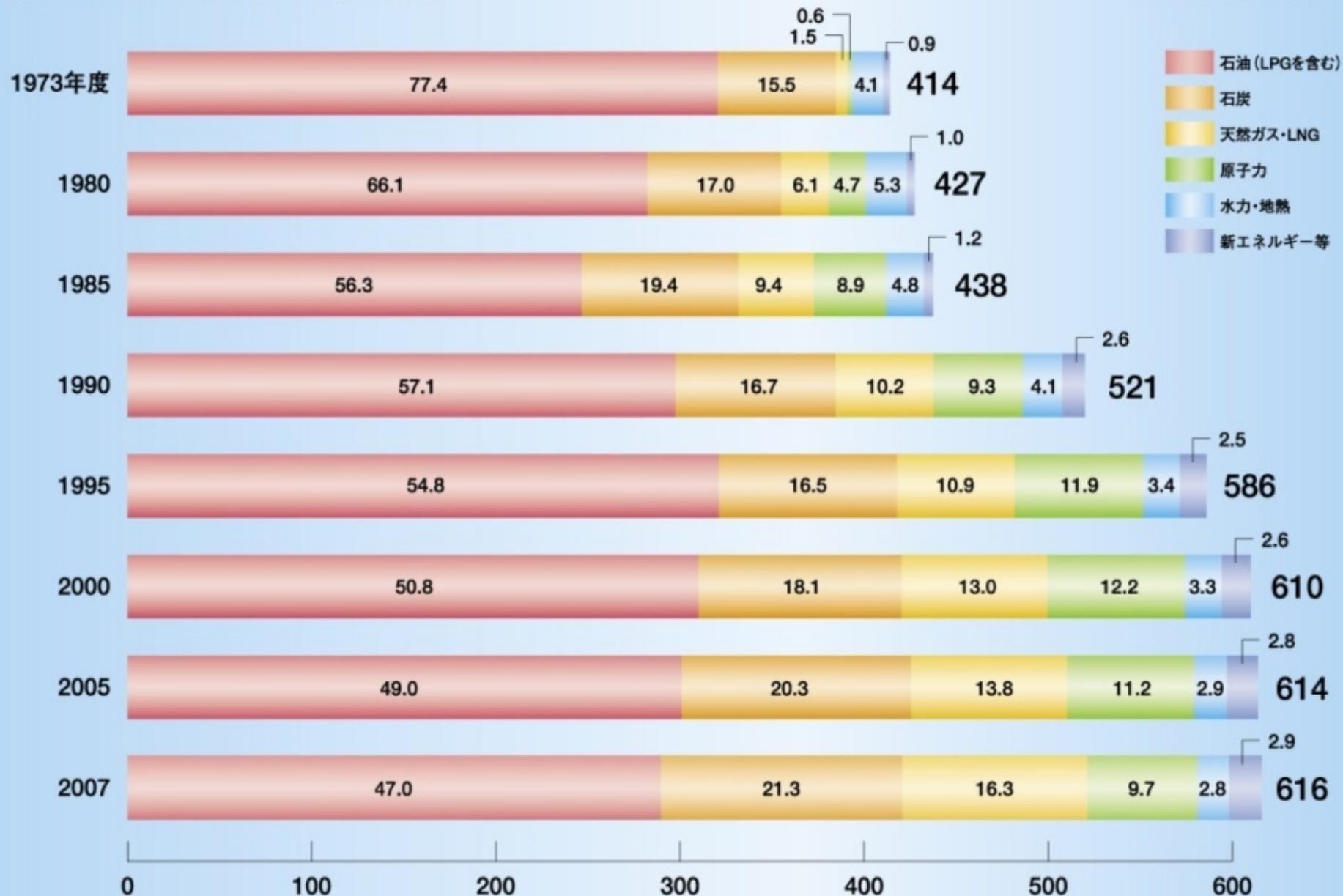


【出典: 平成15年度食料自給率レポート(農林水産省)】

## 主要国のエネルギー(左)と食糧(右)の自給率

# 一次エネルギー供給（総供給）の推移

単位:原油換算百万kl、%



注1) 経済産業省は、製造部門の重油補正に係わる見直しを1990年に遡及して修正を行ったため、1990年以降のデータは前年までの資料から変更されている。

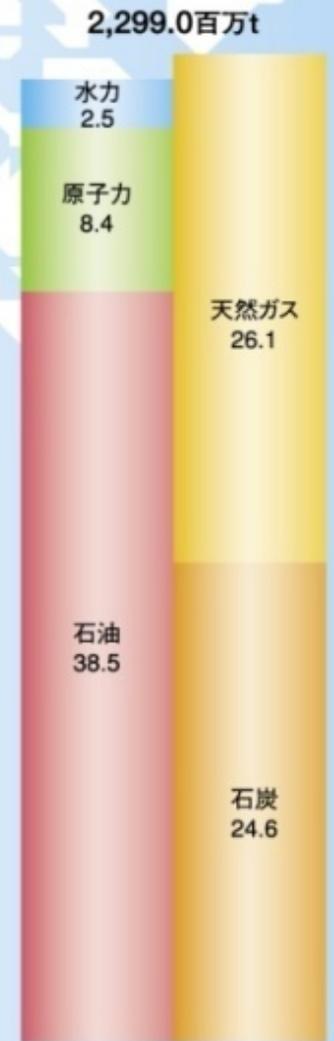
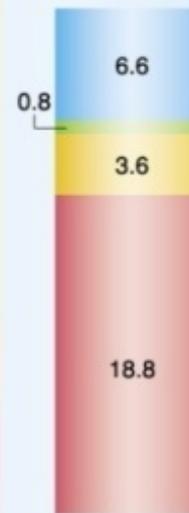
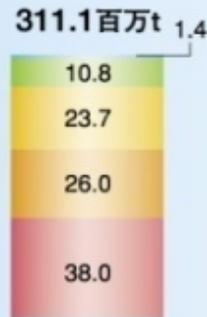
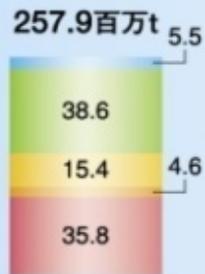
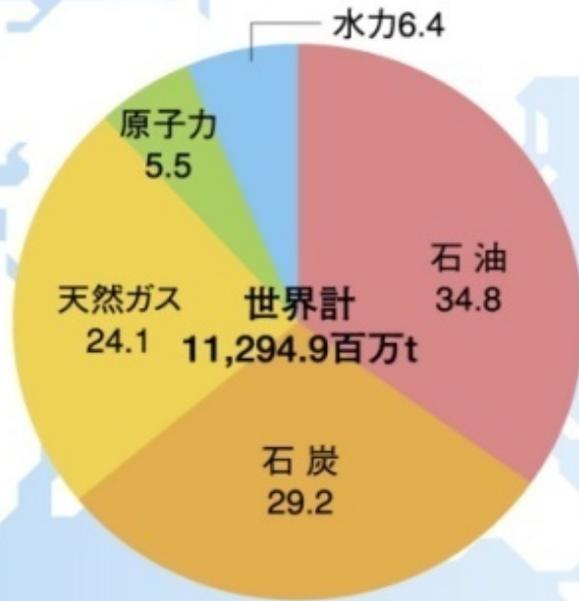
注2) 四捨五入の関係により100%にならない場合がある

出所:経済産業省「総合エネルギー統計」

# ■主要消費国の一次エネルギー消費構成比(2008年)

2,002.5百万t

単位:原油換算百万t、%



日本

イギリス

フランス

ドイツ

ロシア

中国

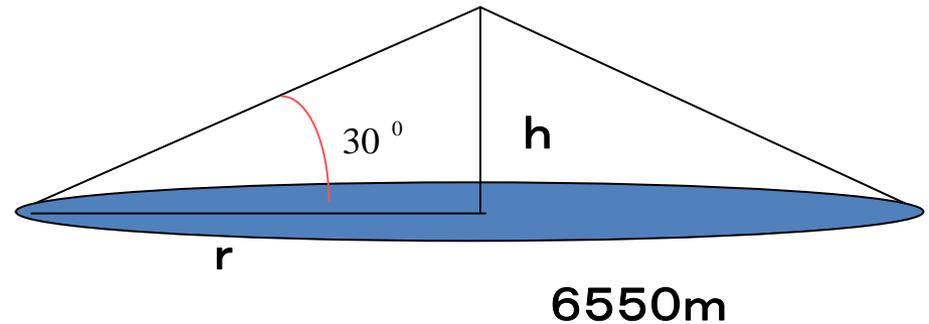
アメリカ

# 石油埋蔵量は富士山の体積と同じ

3776m



3776m



$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h = \frac{1}{3} \times 3.14 \times (6.55 \times 10^3)^2 \times 3.78 \times 10^3 \\ = 1.50 \times 10^{11} m^3 = 1500 \text{億立米}$$

石油可採埋蔵量 = 1000billion barel = 1590億立米

# バイオ資源の燃料への変換プロセス

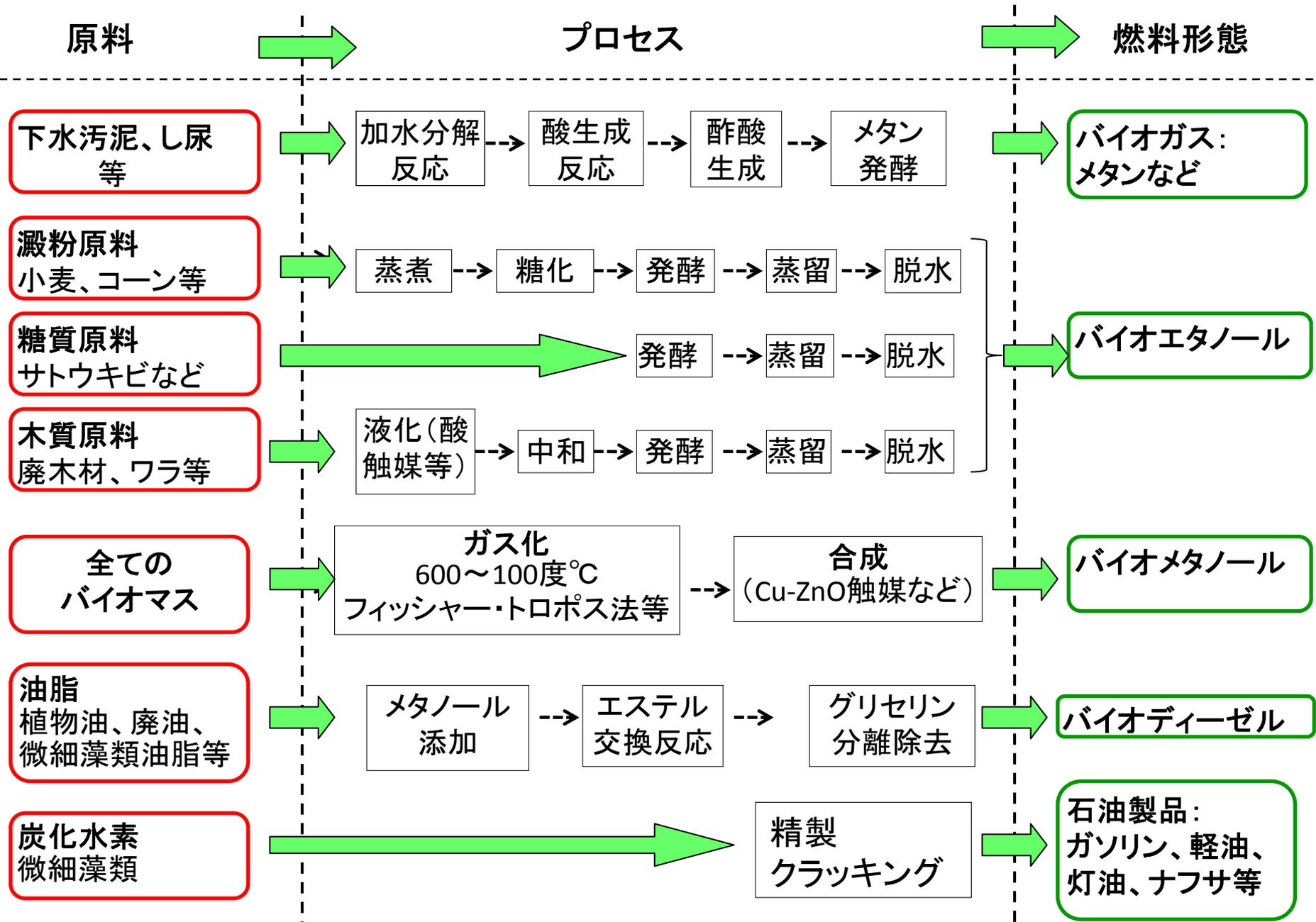


表 1. 各種作物・微細藻類のオイル生産能の比較(Chisti 2007<sup>(1)</sup>を改変)

作物・藻類	オイル生産量 L/ha/年	世界の石油需 要を満たすの に必要な面積 (100万ha)	地球上の耕作 面積に対する 割合 (%)
とうもろこし	172	28,343	1430.0
綿花	325	15,002	756.9
大豆	446	10,932	551.6
カノーラ	1190	4,097	206.7
ヤトロファ	1892	2,577	130.0
ココナッツ	2689	1,813	91.4
パーム	5950	819	41.3
微細藻類(1)	136,900	36	1.8
微細藻類(2)	58,700	83	4.2

注意：微小藻類(1)はバイオマス（乾燥重量）の70%がオイルの種あるいは培養株  
 微小藻類(2)はバイオマス（乾燥重量）の30%がオイルの種あるいは培養株

# 藻類の利用研究

1970年～2000年：石油ショック時代から地球温暖化対策

- ✿ 米国エネルギー省ASPプログラム「藻類バイオディーゼル生産(国立再生エネルギー研究所等)」

1978年～1996年までの約20年間で総額2500万ドルの予算で実施。微細藻類の収集・スクリーニング、脂質合成誘導と品種改良、屋外大量のための基盤技術開発、培養とリソース解析、経済性評価がなされた。

- ✿ 日本国通産省ニューサンシャイン計画「細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化・有効利用技術研究開発」

1990年～1999年までの10年間で総額約133億円で実施。高効率光合成細菌・微細藻類等の研究開発、二酸化炭素固定化・有用物質生産等高密度大量光培養システムの研究開発、研究支援調査(がなされた。

# ～藻類ブルーム再来～

- ✚ **オバマ政権**でのグリーンニューディール政策により2025年までに再生可能エネルギーの比率を現在の1%未満から25%まで引き上げる
- ✚ **鳩山政権**のもとで2020年までに90年比で二酸化炭素排出25%削減
- ✚ 特に食糧と競合せず、自然を殆ど破壊せず、オイル生産効率が非常に高い**藻類**が再び注目

## ✚ **DOE**

2022年までには藻類を含む革新的バイオマス燃料の供給を210億ガロン（＝約0.8億トン）とする。藻類燃料開発は重要として、2009年には藻類燃料コンソーシアム構築に約50億円を投資。

- ✚ **オランダ**: Royal Dutch社・米国HRBiopetroleum社: 微細藻類による脂質生産を検証するパイロットプラントをハワイに建設。

# Oil content of some microalgae

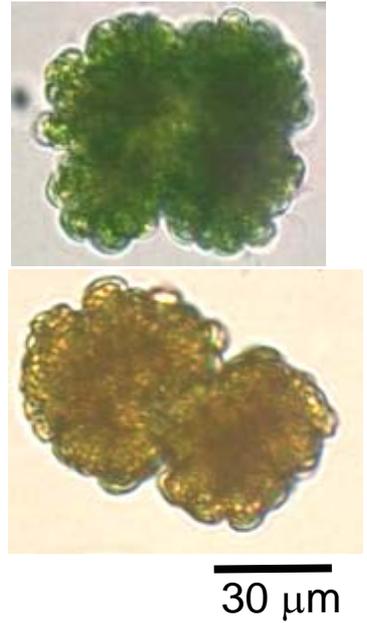
---

Microalga	Oil content (% dry wt)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella</i> sp.	28-32
<i>Cryptothecodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp.	16-37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp.	25-33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris</i> sp.	20-35
<i>Nannochloropsis</i> sp.	31-68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54
<i>Nitzschia</i> sp.	45-47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20-30
<i>Schizochytrium</i> sp.	50-77
<i>Tetraselmis sueia</i>	15-23

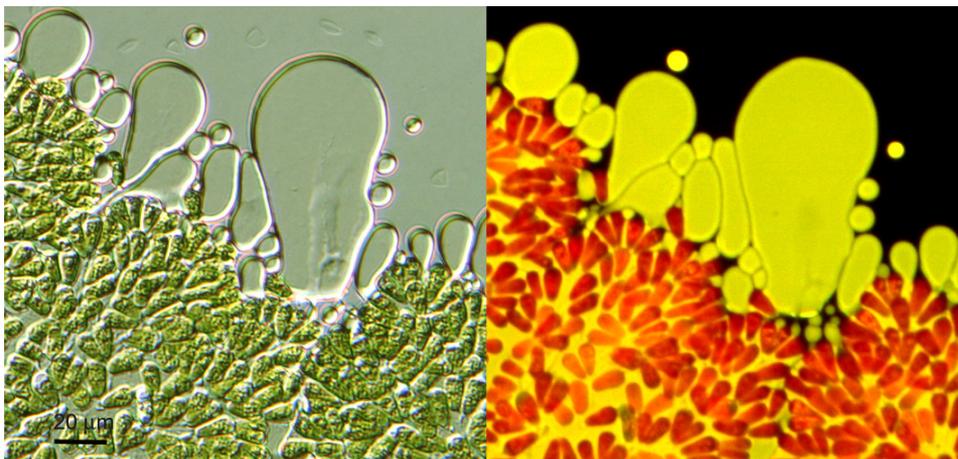
---

# Botryococcusとは

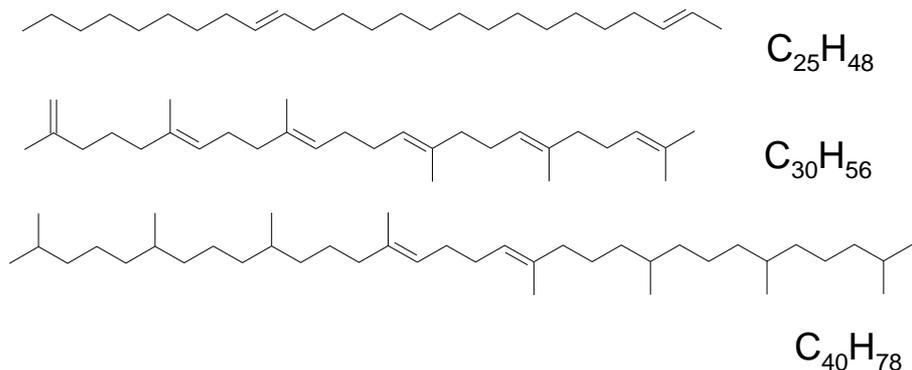
- ・淡水に生息する藻類
- ・緑～赤色で30-500 μmのコロニーを形成
- ・二酸化炭素を固定し、炭化水素を生産
- ・炭化水素は石油の代替となり得る
- ・細胞内及び、コロニー内部に炭化水素を蓄積  
(乾燥重量の20-75%)



Botryococcusの顕微鏡写真



Botryococcusの生産する  
炭化水素の例(重油の一種)



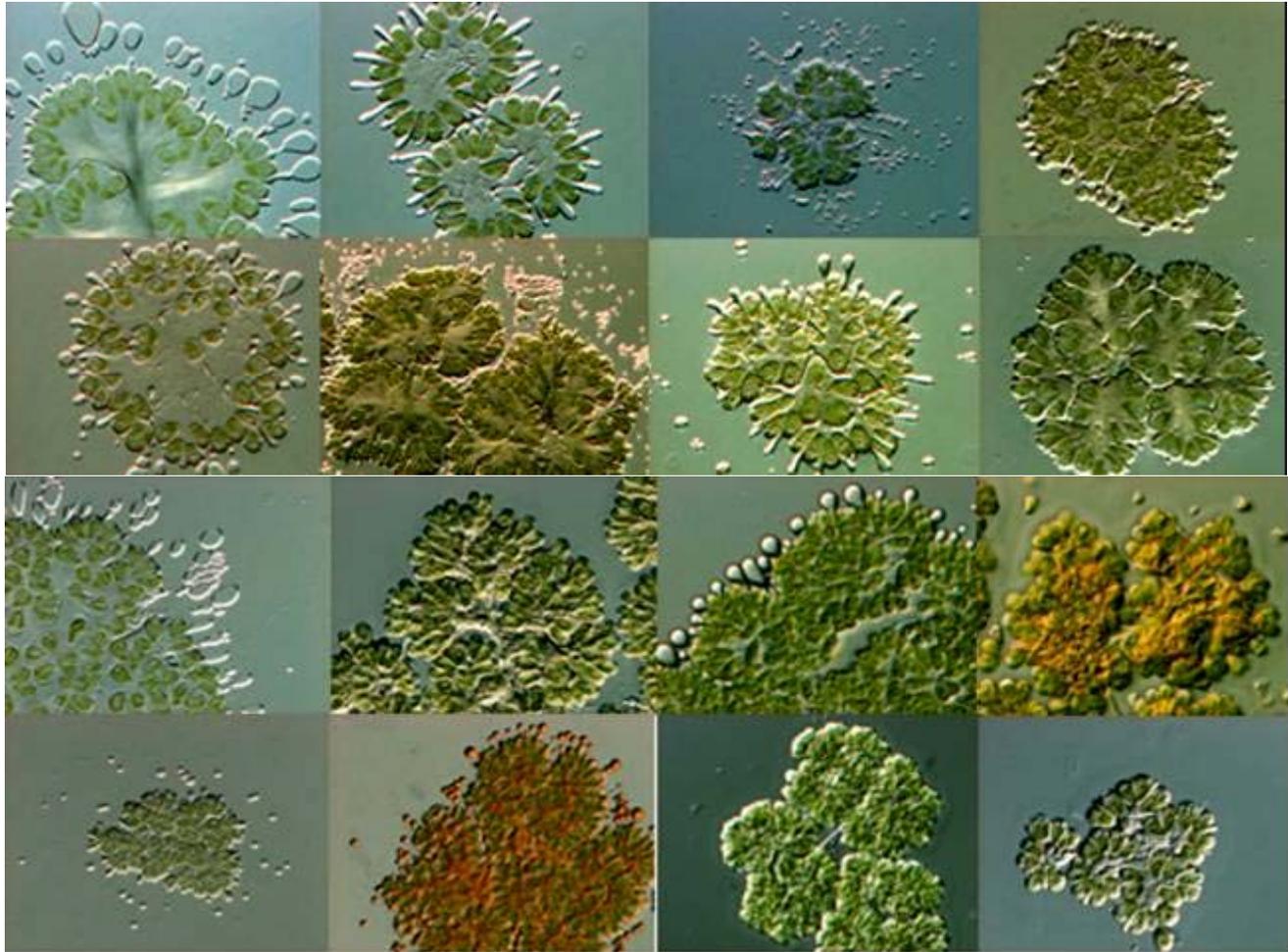
## 開発のポイント

- 増殖及び炭化水素産生にすぐれた培養株の確保
- 高アルカリ領域で増殖する培養株(CO<sub>2</sub>の溶存)
- 光制約を解除できる培養株
- 純度の高いオイルを生産する株
- LCA評価: 試験管培養から大規模野外プール培養(19ha x 30cmを想定)そして収穫までいたる過程のLCA評価

# 実験に使用した*Botryococcus*株

日本各地、諸外国で*Botryococcus*を採取、現在144株の無菌株を確立

採集日	採集場所	株No.
2004.3.24	沖縄本島 辺野喜ダム	BOT11
2004.4.10	東京 東大三四郎池	BOT12
2004.4.21	石垣島 底原ダム	BOT14
	石垣島 底原ダム	BOT15
	石垣島 真栄理ダム	BOT16
	石垣島 真栄理ダム	BOT16-2
	石垣島 名蔵ダム	BOT17
	石垣島 名蔵ダム	BOT18
	石垣島 羽地ダム	BOT20
	石垣島 福地ダム	BOT21
	石垣島 漢那ダム	BOT22
	石垣島 漢那ダム	BOT23
2004.4	福島 れんげ池	BOT24
2004.6.1	千葉 軍荼利ダム	BOT25
2004.6.2	千葉 館山 池	BOT27
	千葉 館山 池	BOT28
	千葉 佐久間ダム	BOT29
2004.6.11	広島 光林寺池	BOT30-1
	広島 光林寺池	BOT30-2
2004.6.15	香川 ハツ池の上	BOT32
	香川 青池	BOT33
	香川 日原	BOT34
	香川 倉掛山近くの池	BOT36
	香川 倉掛山近くの池	BOT36-2
	香川 倉掛山近くの池	BOT37
	香川 逆様池	BOT38
	香川 奈良谷	BOT40
	香川 羽間駅横 大池	BOT45
	香川 日原2	BOT47
2004.7.7-8	大分 志高湖	BOT51
	大分 神楽女湖	BOT52
	大分 御池	BOT54
	大分 大坪池	BOT55
2004.7.26	群馬 古沼	BOT60
	群馬 大峰沼	BOT61
	群馬 見晴荘の沼A	BOT62

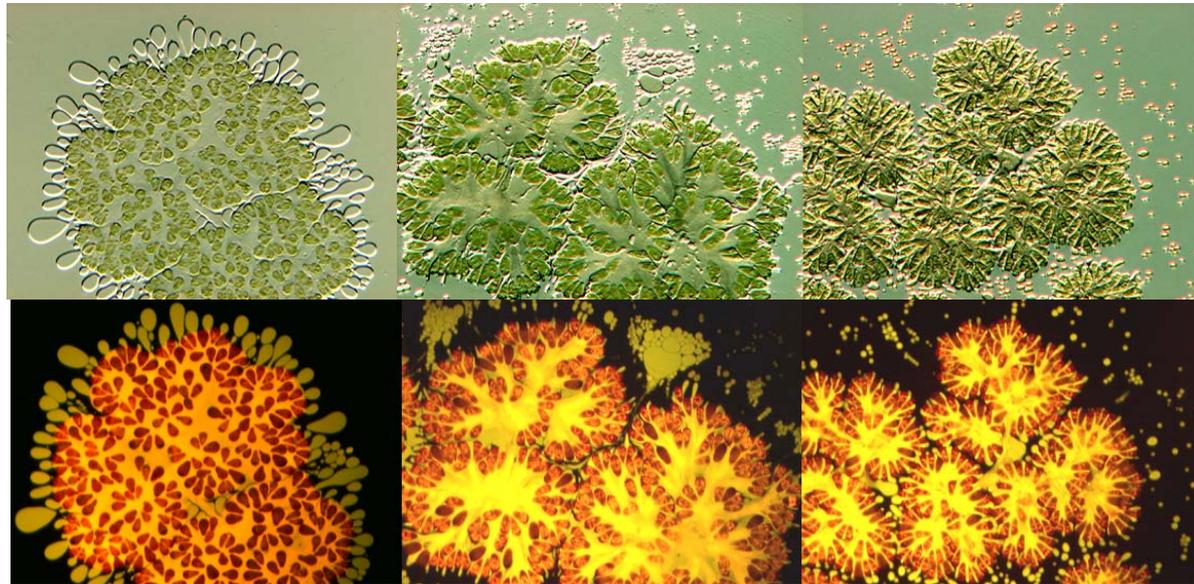


# Selection of strains

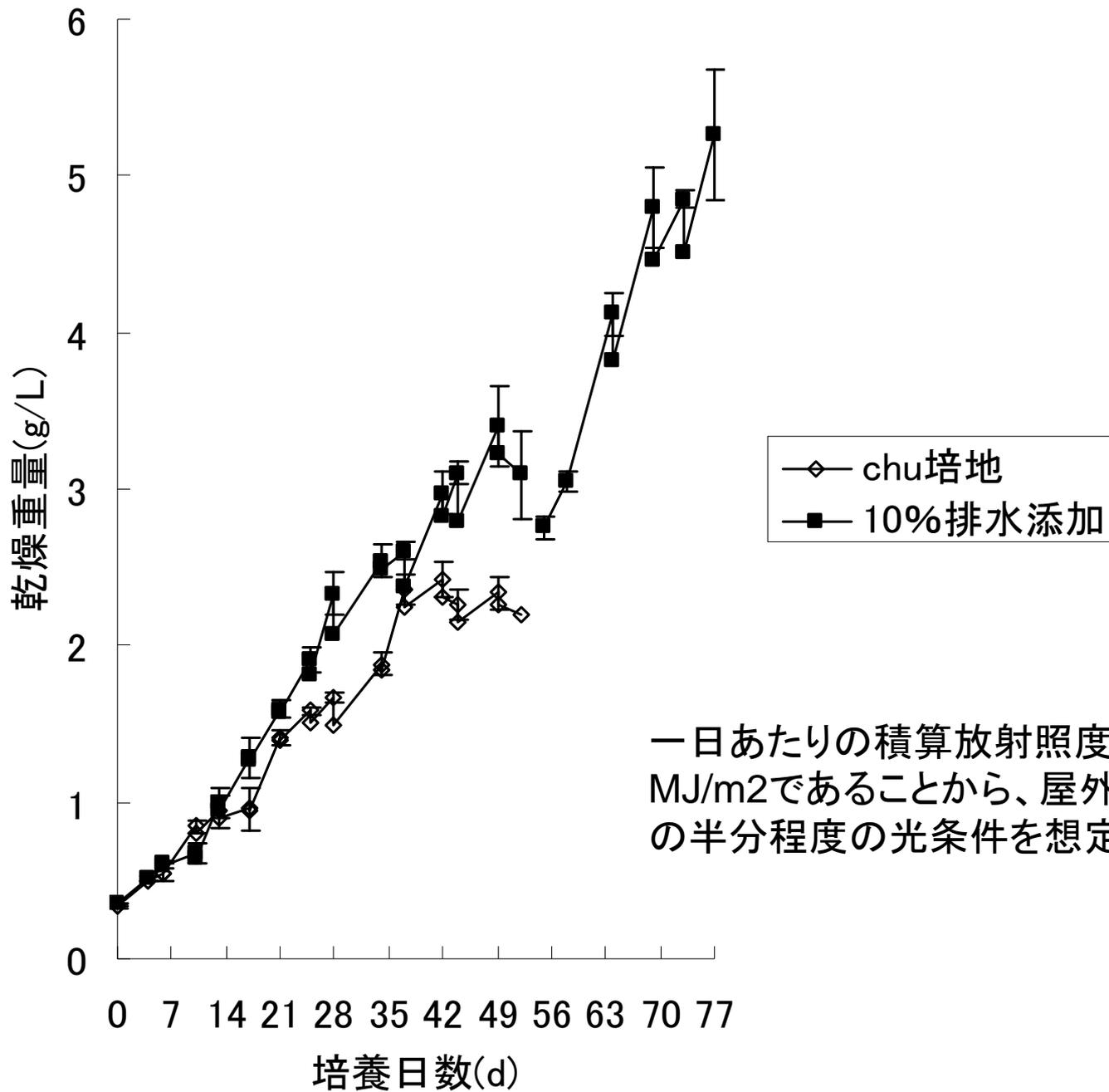
**BOT-88-2**

**BOT-124**

**BOT-144**



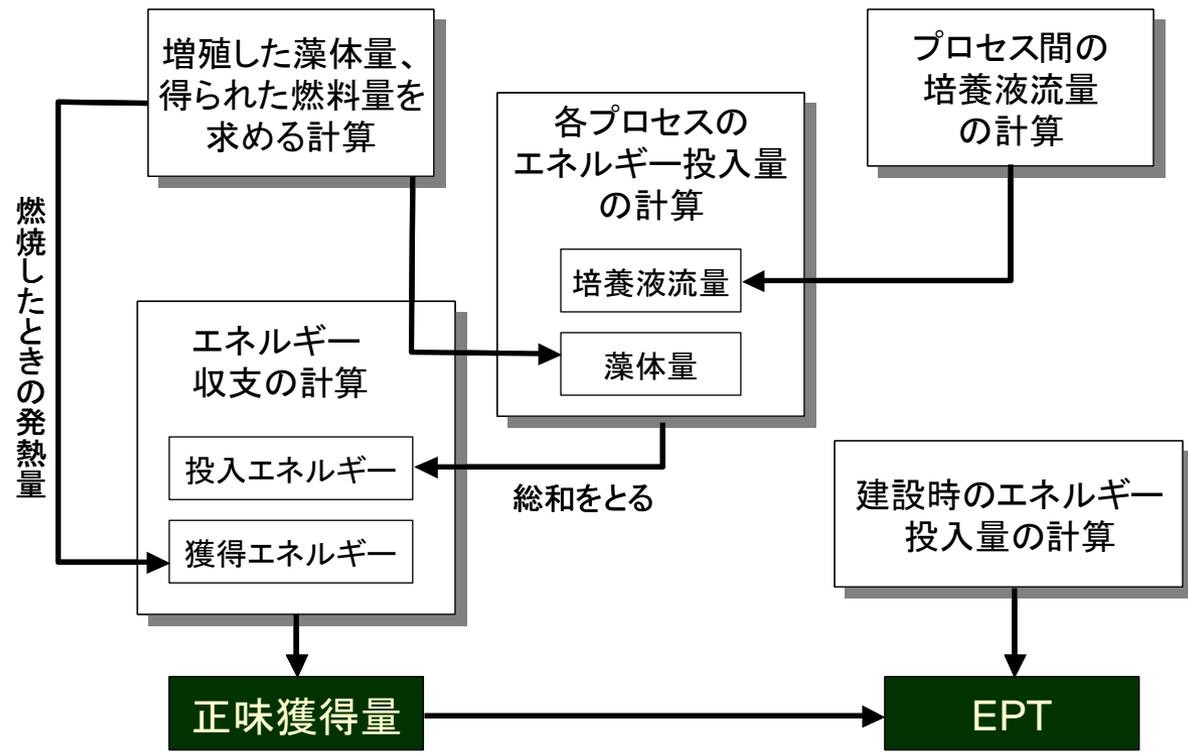
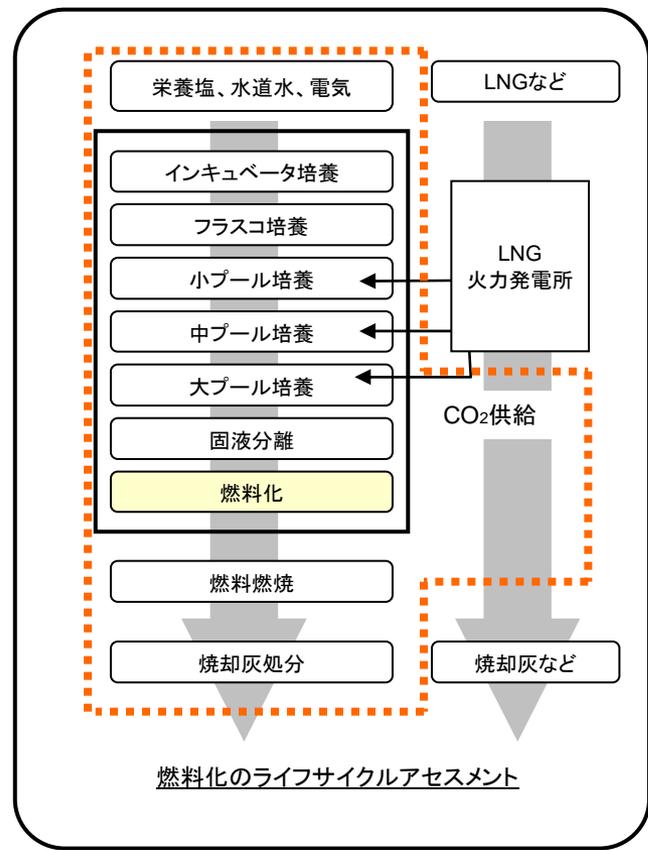
Strains	Hydrocarbon (% dry weight)	Growth rate ( $\mu$ /day)	pH type
<b>BOT 17</b>	<b>40.8</b>	<b>0.078</b>	<b>Broad (4-10)</b>
<b>BOT 45</b>	<b>21.1</b>	<b>0.187</b>	<b>Alkaline (9-11)</b>
<b>BOT 71</b>	<b>42.3</b>	<b>0.066</b>	<b>Broad (6-11)</b>
<b>BOT 88-2</b>	<b>45.3</b>	<b>0.158</b>	<b>Broad (5-10)</b>
<b>BOT 124</b>	<b>25.1</b>	<b>0.330</b>	<b>Alkaline (8-10)</b>
<b>BOT 144</b>	<b>45.7</b>	<b>0.200</b>	<b>Alkaline (8-11)</b>
<b>SI 30</b>	<b>15.9</b>	<b>0.150</b>	<b>Alkaline (8-10)</b>



一日あたりの積算放射照度は6~7 MJ/m<sup>2</sup>であることから、屋外平均値の半分程度の光条件を想定

# Botryococcusを利用した大規模エネルギー生産システムのモデル化と評価

屋外大規模培養でのエネルギー生産システム全体をモデル化することで、エネルギー収支、二酸化炭素収支、コスト、エネルギーペイバックタイム、安定供給量を算出



## 計算の手順

## 年間エネルギー収支のシミュレーション結果(19ha当り)

	獲得量	投入量	収支
エネルギー[MJ/yr]	$10.3 \times 10^7$	$3.48 \times 10^7$	$+6.82 \times 10^7$
CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /yr]	$7.45 \times 10^6$	$2.49 \times 10^6$	$+4.96 \times 10^6$
コスト[百万円/yr]	100.1	373.6 (インドネシア60.0)	-273.5

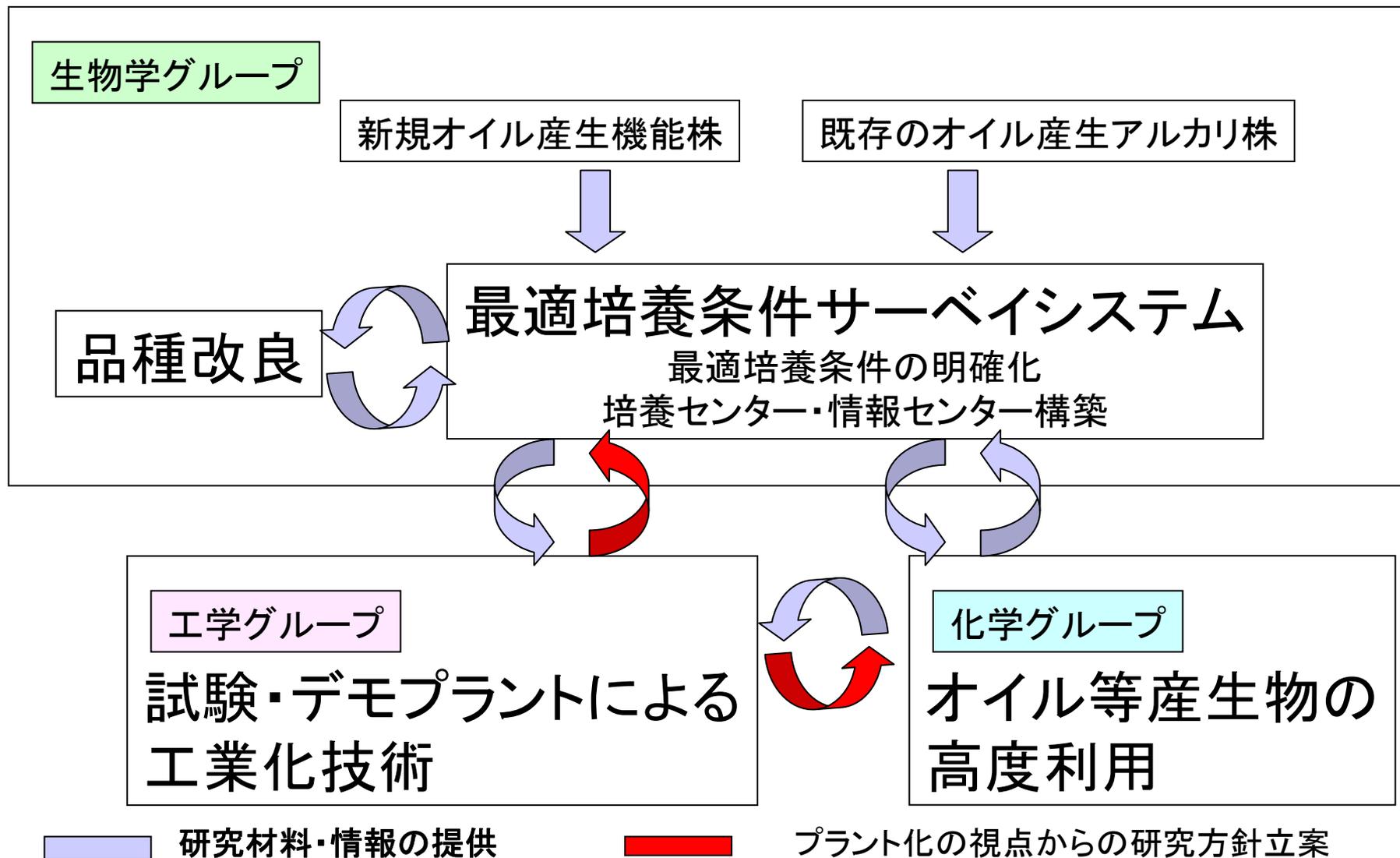
**オイル生産コスト**  
**373.6百万円／約2280～2380トン**  
**=155～167円／L(閉鎖系リアク**  
**ターの場合は800円／L)**

### 期待されるCO<sub>2</sub>削減効果

- ・革新技术によるCO<sub>2</sub>削減目標値  
744万 t CO<sub>2</sub>／年
- ・30万haある不作地と耕作放棄  
地のすべてに本システムを稼働  
約7800万t-CO<sub>2</sub>／年

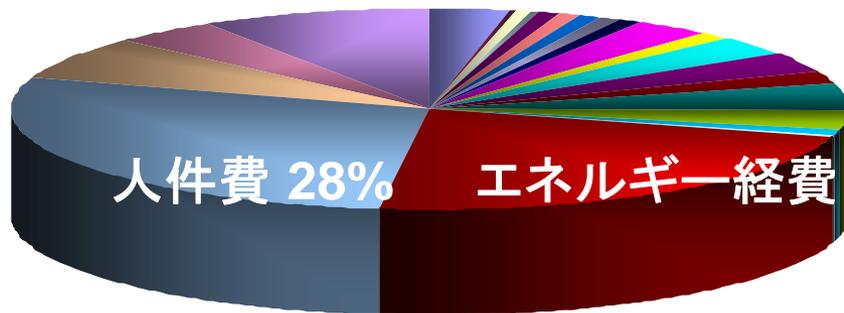
**オイル生産効率を一桁向上**

目標: オイル生産効率を一桁向上する。



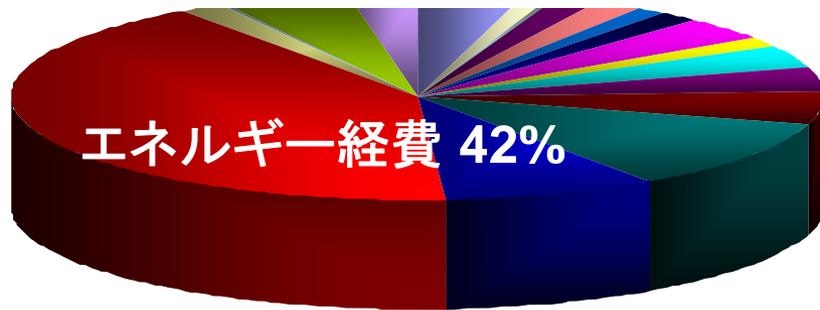
# 藻類バイオマス生産コスト(Wijfels 2009)

1 ha



1,300円 / kg バイマス

100 ha



492円 / kg バイオマス

潜在力



89% 減少

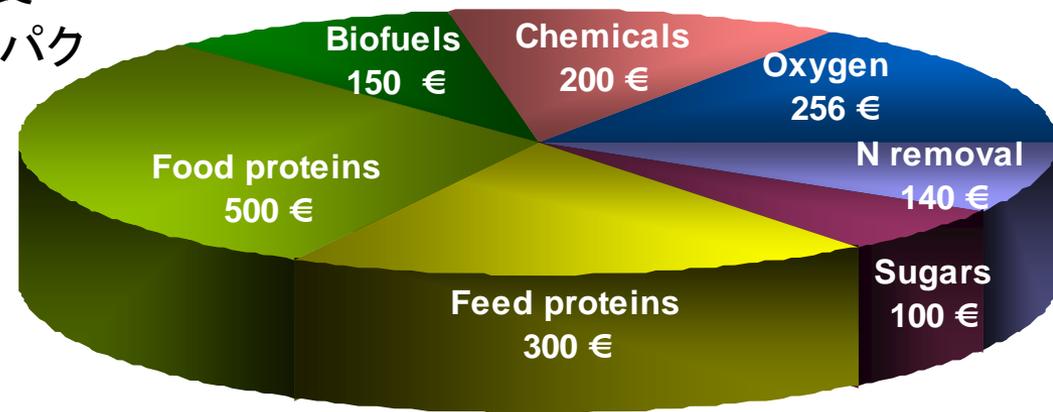
49円 / kg バイオマス

- Centrifuge w estfalia separator AG
- Centrifuge Feed Pump
- Medium Filter Unit
- Medium Feed pump
- Medium preparation tank
- Harvest broth storage tank
- Seawater pump station
- Automatic Weighing Station with Silos
- Culture circulation pump
- Installations costs
- Instrumentation and control
- Piping
- Buildings
- Polyethylene tubes Photobioreactor
- Culture medium
- Carbon dioxide
- Media Filters
- Air filters
- Power
- Labor
- Payroll charges
- Maintenance
- General plant overheads

# 経済性評価 (Wijfels 2009)

## 微細藻類 1,000 kg での化学品および燃料

- 400 kg 脂質
  - 化学工業の原料 100 kg : 245円 /kg 脂質
  - 運輸燃料 300 kg : 61円/kg 脂質
- 500 kg タンパク質
  - 食糧 100 kg : 612円/kg タンパク質
  - 飼料・餌料 400 kg : 92円/kg タンパク質)
- 100 kg 多糖類
  - 122円/kg 多糖類
- 除去された窒素 70 kg
  - 245円/kg 窒素
- 生産された酸素 1,600 kg : 20円/kg 酸素
- 生産コスト: 49円€/kg 藻類バイオマス
- 価値: 202円/kg 藻類バイオマス



# 一桁増進を可能とする技術開発課題の例

## 1. 優れたオイル産生能をもつ微細藻類の探索

- 増殖、オイル産生能にすぐれた藻類培養株の確保

## 2. 野外大量培養技術の確立

- 室内実験で得られた増殖およびオイル生産の潜在力を野外でも引き出す技術
- 安価な大量培養システムの開発

## 3. 微細藻類のもつ潜在力を強化する技術

- 突然変異や遺伝子組み換えによる品種改良技術

# 一桁増進が成功し、 実用化された時の社会

- ❖ オイル生産：1,000トン／ha／年
- ❖ 耕作放棄地・休耕田約62万ha(2005農林業センサスより)
- ❖ 石油・石炭の輸入量：石油2.37億kL(2.2億トン)、石炭(1.8億トン)。石炭を熱量から原油換算して、合計すると3.35億トン
- ❖ 耕作放棄地・休耕田の56%にあたる33.5万haの土地で藻類オイルを生産すると石油・石炭の輸入量はすべてまかなえる
- ❖ その時の二酸化炭素削減量は50%を越える

# 謝辞

## ■筑波大学

山田信博 学長  
赤平昌文 副学長  
田中 敏 副学長  
井上 勲 教授  
白岩善博 教授  
彼谷邦光 教授  
志甫 諒 研究員  
石田健一郎 准教授  
中山 剛 講師  
田辺雄彦 助教  
研究室一同  
研究推進部一同

## ■文部科学省

泉 紳一郎 局長(前筑波大  
学副学長)

## ■科学技術振興機構

安井 至 研究総括G

## ■国立環境研究所

河地正伸 主任研究員  
中嶋信美 室長  
田野井孝子 研究員  
出村幹英 研究員  
笠井文絵 室長

## ■京都大学

宮下英明 准教授

## ■東京工業大学

堀岡一彦 教授

## ■お茶の水大学

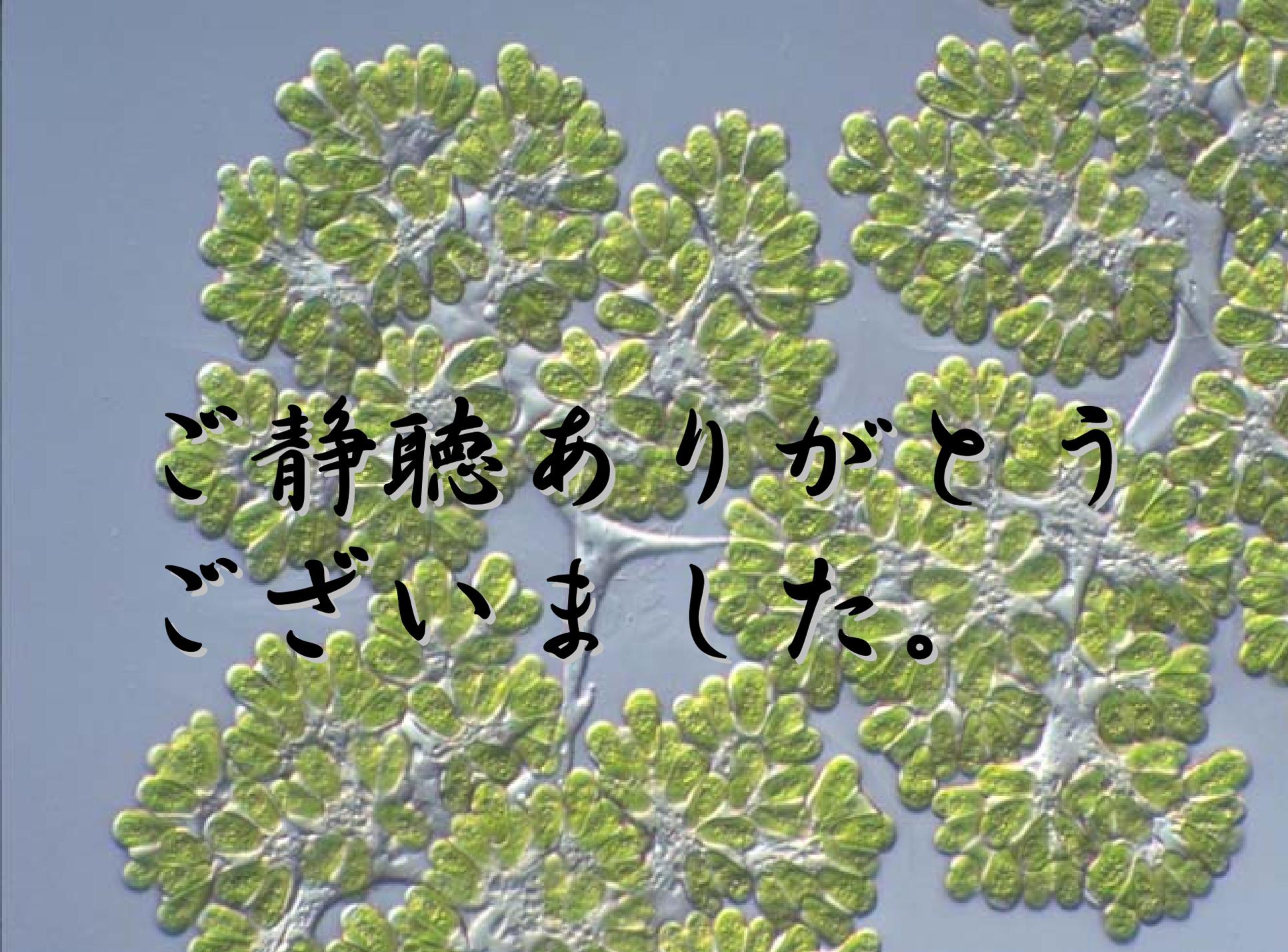
加藤美砂子 准教授

## ■総合地球環境学研究所

井上 元 教授

## ■文部科学省

科学技術政策研究所



ご静聴ありがとうございました。