

特集 微細藻類によるバイオ燃料生産*

Biofuel Production Using Microalgae

藏野 憲 秀

Norihide KURANO

福田 裕 章

Hiroaki FUKUDA

永 久 保 雅 夫

Masao NAGAKUBO

渥 美 欣 也

Kinya ATSUMI

Microalgae belong to the plant family, carry out photosynthesis, convert inorganic substances into organic substances, and produce hydrocarbons and neutral lipids. The resulting products can be directly or indirectly used as biofuels. Compared with biofuel production by terrestrial higher plants, microalgae cultivation does not compete with food production. Furthermore, the biofuel productivity and CO₂ fixation ability of microalgae are much greater than those of higher plants. As a result of these benefits, numerous start-up companies in the US have attracted the attention of venture capitalists. Currently, microalgal biofuels are less cost competitive than fossil fuels. Therefore, cost cutting efforts, for example, the development of biorefineries, the optimization of culturing methods, the genetic improvement of oil productivity, etc. are indispensable to the practical realization of microalgal CO₂ fixation and biofuel production systems.

Key words: Microalgae, Biofuel, CO₂ fixation

1. はじめに

米国エネルギー情報局の報告書 International Energy Outlook 2009 に将来における原油価格の予測値が掲載されている¹⁾。さまざまな仮定をおいてではあるが、バレル当たりの価格が 2030 年には高位推定で 200 \$, 中位推定 130 \$, 低位推定で 50 \$ と記されている。また、国際エネルギー機関のチーフエコノミストはピークオイル（世界の石油産出量が減少に転じる時点）が 2020 年であるという予測を発表している²⁾。液体の化石資源の有限性と高騰が確実に視野に入ってきたと言えよう。化石資源代替となるバイオ燃料生産がブームになるのもこのような状況の反映である。また、近年身にしみて実感される地球温暖化の問題だが、その主要原因とされる CO₂ 排出の点でも化石燃料よりもバイオ燃料の方が有利であり、食糧生産と競合しない材料に基づくバイオ燃料生産は増大の一途をたどると予想される。

本論文ではバイオ燃料の中でも、特に最近注目が集まっている微細藻類を用いたケースについて概説する。後に詳述するが微細藻類は高等植物の 10 倍以上の CO₂ 固定能力を有しており、工場の煙道ガス中の CO₂ 排出を削減しながらバイオ燃料を生産できるシステムの構築が可能である。本 R&D テーマは昨年スタートしたばかりで技術的に高い水準に達したとは言い難いが、微細藻類の優位性、課題も含めて報告する。

2. 微細藻類

2.1 藻類とは

藻類と一口に言うがその実体は複雑多岐に渡る。千原は「藻類とは、酸素を発生する光合成を行う生物の中からコケ植物、シダ植物、および種子植物を除いた残りの全て」と定義した³⁾。なぜこのように消極的にしか定義できないのか。そこに、藻類が持つ多様性とおもしろさが表れている。リンネの時代には藻類はひどく大ざっぱに「水中や水気の多いところに生育する体制の簡単な植物」と認識されていたが、1950 年代以降の電子顕微鏡技術の発達による微細構造の詳細な観察、1980 年代以降の分子生物学の興隆に伴った分子系統解析技術の進展という二つの強力な道具のおかげで、藻類の概念は大きく進歩した。

2.2 真核光合成生物の誕生

藻類の多様性を理解するキーワードは「細胞内共生」である。1960 年代後半にリン・マーギュリスが提唱した細胞内共生説＝ミトコンドリアや葉緑体等のオルガネラは原核生物起源であるとする仮説⁴⁾は、今では十分な証拠と共に定説となっている。ミトコンドリアの起源は alpha proteobacteria, 葉緑体の起源は酸素発生型光合成を営む原核生物 cyanobacteria（ラン藻）であることが示されている。原始的な cyanobacteria が真核従属栄養生物に取り込まれやがて葉緑体へと変化するイベント（一次共生）の結果、光合成を行う真核生物 3 系統（灰

* 2009 年 9 月 28 日 原稿受理

色・紅色・緑色植物)が誕生した。これらは、誕生当初は単細胞(微細藻類)であったが、多細胞体制を獲得し(大型藻類)、また緑色植物の内の1系統は陸に上がって現在の陸上植物の繁栄を築いた。

2.3 二次共生

一次共生によって誕生した単細胞の真核光合成生物を別の真核従属栄養生物が細胞内に取り込むイベントが発生した(二次共生)。光合成というのは真核従属栄養生物にとって実に魅力的な栄養形式だったのであろう。紅色植物を獲得して、ハプト植物・不等毛植物・クリプト植物が、緑色植物を獲得してユーグレナ植物・クロララクニオン植物が成立した。渦鞭毛植物も二次共生によって葉緑体を獲得しているが、その葉緑体の起源はさまざまである。「藻類」という場合、原核のcyanobacteria, 真核の一次共生3系統および二次共生6系統の全てを含んでいる。かくも多様な生物の系統を含むグループに対しては上述の消極的定義も仕方ない。Fig. 1 に以上の過程をまとめた。

2.4 微細藻類の特長

微細藻類という名前は、その細胞サイズからつけられており、顕微鏡サイズの藻類の総称である。その生息範囲は広大で、水中(海水、淡水中のいわゆる植物プランクトン)はもちろんのこと、雪上、木肌、ガードレール

表面、極域、温泉、空中などから採取可能である。有名な生態学の教科書である Communities and Ecosystems には陸上生態系の一次生産(光合成による有機物生産)は海洋生態系のその約2倍と書かれているが⁵⁾、近年の衛星からのクロロフィル観測によって、陸上と海洋はほぼ同じ一次生産力を有することが明らかになった。この海洋の一次生産はほとんどが沿岸域の植物プランクトンに起因するものであり、微細藻類の持つ活発な光合成能力を示していると言えよう。

2.5 微細藻類によるCO₂固定

では、実際の光合成能力、言い換えればCO₂固定能力は如何ほどか? (財)地球環境産業技術研究機構(RITE)が主体となって、平成2年度から10年間継続した研究開発プロジェクト「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」においてその能力が実証された。このプロジェクトの目的はCO₂の集中発生源から排出される煙道ガス中のCO₂を、光合成微生物、特に微細藻類を用いて有機物に変換し有効利用することであり、そのために適した微細藻類の探索、培養条件の最適化、微細藻類培養用のフォトバイリアクターの開発、生産された藻体の有効利用法の開発、全体システムのエネルギー収支、CO₂収支(LC-CO₂)、経済収支の解明などが行われた。その過程で、太陽光利用の(=屋外培養の)フォトバイリアクターを用いるとリア

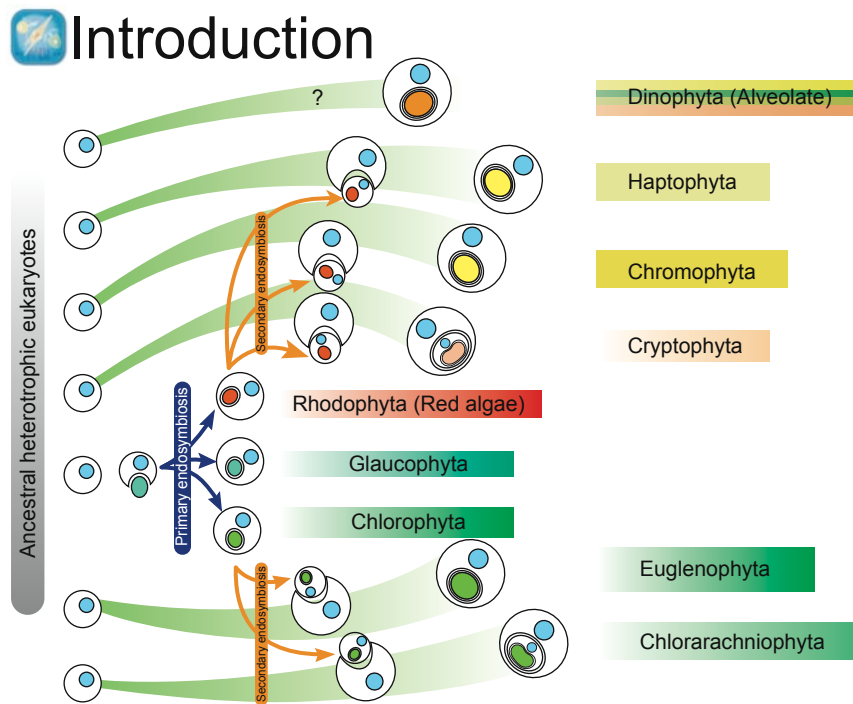


Fig. 1 Introduction to evolutionary history of algae

クター設置面積1平米当たり、1日あたり、50gのCO₂が微細藻類の藻体に変換されるデータが示された。冬、春、夏のいずれの季節でもこの速度を上回ったので、通年でこの能力が発揮できると考えられる。温帯域の森林の通年のCO₂固定能力は5g-CO₂ m² d⁻¹なので、微細藻類は森林の10倍の能力を示したと言える。これはひとえに高等植物と微細藻類の成長速度の違いに原因がある。温泉から単離された微細藻類は最適条件では2時間に一度細胞分裂を起こす⁶⁾つまり世代時間は2時間である。一方、有用作物であり成長も速いトウモロコシと言えども重量が2倍になるには5、6日は必要である (Table 1)。もちろん、ほとんどの微細藻類がこのように速く増殖するわけではないが、種類を選べば非常に高い能力を示すものも存在すると言える。実際にこのプロジェクトで使用された微細藻類は一万株以上の中から選りすぐられたものである。

3. 微細藻類によるバイオ燃料生産

3.1 微細藻類によるバイオ燃料生産のこれまで

バイオ燃料はほとんどの場合植物由来である。つまり、光合成が燃料生産の原動力と言える。反応性が乏しいCO₂という分子を太陽光のエネルギーを使って水を分解しながら有機物へ変換していく光合成。人工光合成が古くから研究テーマとして追求されているが、実用に達しているとは言いがたい。一方、葉緑体という細胞内小器官を使って植物はいともたやすく太陽エネルギーを利用している。我々動物も含む地球上のほとんどの従属栄養型生物はその生存のためのエネルギー源を植物の一次生産に依存している。

光合成の主要産物はデンプンだが、植物の種類によっては特徴的に脂質を蓄積するものもある。バイオエタノールはデンプンあるいはセルロースを出発原料として酵母等の発酵能力によって作られるが、脂質蓄積植物をターゲットにした場合得られるのは脂質をメ

チルエステル化したバイオディーゼル燃料 (BDF) である。従来のバイオ燃料はトウモロコシからバイオエタノール、ダイズからBDFなど食料と競合しながら生産されていたが、世界的な食料価格の高騰を受けて非食料植物からの生産へと舵を切りつつある。注目されているのは、ヤトロファ、パームだが、新たな脂質源としての微細藻類が次の世代の主役として現在北米で熱い開発競争が繰り広げられている。

そもそも、微細藻類を大量培養してエネルギーを生産するアイデアは40年以上前にカリフォルニア大学オズワルド教授が提案し⁷⁾、1970年代終わりには太陽エネルギー研究所 (SERI, 現在のNREL National Renewable Energy laboratory) に引き継がれ、エネルギー省 (DOE) が資金を出したプロジェクト Aquatic Species Program-Biodeisel from Algae (略してAPS) で大々的な脂質蓄積候補株の探索や、屋外のraceway pondでの培養なども実施されたが⁸⁾、当時の原油価格の低さが原因でR&Dは一時中断していた。日本においては同時期に前述のRITEプロジェクトが走っていたが、10年継続の後やはり経済的な理由からR&Dは下火になった。

事情が変化したのは2007年初頭のことである。当時のジョージ・W・ブッシュ大統領が年頭教書演説で「2017年までに年間350億ガロンの再生可能燃料・代替燃料の使用の義務化」をうたって以来、数ヶ月のうちに北米の複数のベンチャー企業が微細藻類によるエネルギー生産の構想を派手にうちあげだした。現在では、DOEだけではなくバイオ燃料企業、石油元売、ベンチャーキャピタルなどが藻類燃料ベンチャーに数百億円規模の投資を行っている (Sonora Fields → Algenol 850M \$, ExxonMobil → Synthetic Genomics 600M \$, venture captals → Sapphire Energy 100M \$など)。一方、国内においても (独) 科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」研究領域で筑波大学大学院生命環境科学研究科渡邊信教授の研究テーマ「オイル産生緑藻類 *Botryococcus* (ボトリオコッカス) 高アルカリ株の高度利用技術」が2008年度の研究テーマとして採択され、5年間で約3.5億円の予算で実施されている。弊社もCREST採択以前から渡邊研と *Botryococcus* に関する共同研究を行っており、国内においては *Botryococcus* に関するR&Dが進行中である。

Table 1 Growth characteristics of typical photoautotrophs

	Doubling (h)	CO ₂ fixation (g-CO ₂ m ⁻² d ⁻¹)	PE (%)
Cyanobacteria artificial light solar irradiation	1.8 8.0	— 5.0	15 6.8
Higher plants (crops)	120 (maize)	5 (average forest)	1~2

PE: Conversion efficiency from photosynthetically active radiation to chemical energy
Cyanobacteria: *Cyanobacterium* sp. MBIC10216

3.2 高等植物由来バイオ燃料との比較

なぜ、高等植物ではなく微細藻類を利用した燃料生産なのか？理由はいくつか挙げられる。①前述の通り増殖速度が速い。②脂質のみならず炭化水素を生産する株もある。③食料と競合しない。④単位面積あたりのバイオ燃料生産性が高等植物の数倍になる (Fig. 2)。⑤高等植物の栽培に適さない土地も利用できる。⑥CO₂ 固定への寄与が高い。⑦農業生産というよりは工業生産に近い。などはよく列挙される点だが、更に、⑧蒸散が無い点を指摘したい。高等植物が安定に生命を維持するためには植物体の隅々まで水を供給しなければならないが、根で吸収した水を地上部に送るための driving force は気孔からの蒸散に依存する。つまり、高等植物は淡水を空中に放出することで光合成及び生命活動を可能としている。対して、微細藻類の場合、開放系の培養なら培養池の表面からの蒸発はあるものの積極的な蒸散を行う必要は無い。つまり、今後不足が懸念される淡水資源の有効利用という点からも高等植物以上に微細藻類が適していると判断される。

3.3 候補株の選択

緑藻 *Botryococcus braunii*⁹⁾ は水中で数十から数百の細胞が塊を作り、その塊の中つまり細胞と細胞の間に重油相当 (炭素鎖数 30 以上) の直鎖状炭化水素をはじめとする種々のオイルを最大で細胞乾燥重量の 70% も作るユニークな特質を有するが、実はその存在は普遍的であり弊社基礎研究所に面した愛知池からの採取実績もある。世界中でも研究されている有名な生物だが、増殖速度が遅く屋外培養が難しい点が指摘されている。この生物の場合には、増殖と同時並行でのオイル生産ではなく、あらかじめ屋内等の条件の良い環境で細胞濃度を高めておき、屋外では太陽光を使ってオイル生産のみを行う形式が適していると思われる。そのためには細胞にダメージを与えないオイル回収技術が必要となる。

Pseudochoricystis ellipsoidea (Fig. 3) は海洋バイオテクノロジー研究所が 2003 年に温泉という特殊

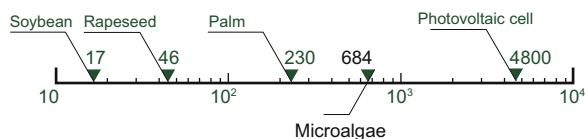


Fig. 2 Comparison of energy production by biodiesel producing plants (GJ ha⁻¹ year⁻¹)

環境から発見した新属新種 (記載論文準備中) の炭化水素生産性を有する単細胞緑藻である。クロレラの仲間のトレボキシア藻綱に属しており系統的には *Botryococcus* と近縁だが蓄積している直鎖状炭化水素の炭素鎖数が 17-20 と軽油相当である点が異なる。培養液中の窒素成分を枯渇させると細胞内に乾燥重量の 30% 程度の総脂質 (溶媒抽出可能画分) を蓄積することができ、その 2/3 は中性脂質 (BDF 変換可能)、残りが色素や炭化水素であると考えている。株自身に関する特許を出願しており (WO2006/109588)、コンペティターがこの株を利用することはできない。種々の培養条件を追究した結果屋外でも安定して培養できることを確認しており、その条件を普遍化すれば海外を含むさまざまなロケーションでの培養が可能であると予測している。

これら二つの株はそれぞれ利点、欠点を有しており、現時点ではいずれの株が有利かはまだ判断できないが、今後の屋外培養試験の成果が判断材料を提供してくれるであろう。

3.4 培養装置の選択

RITE プロジェクトの際には、達成すべき CO₂ 固定速度の目標値として 50 g-CO₂ m⁻² d⁻¹ が設定されそれをクリアするためのフォトバイオリアクタの製作がターゲットとなっていた。しかし、DOE の APS プロジェクトでは当初から raceway タイプの open pond 型の培養装置が使われた。どちらが、CO₂ 固定と燃料生産に適しているのか？ Table 2 にその比較を示す。フォトバイオリアクタとしては、垂直パネル型とチューブ型を選

- a) Micrograph of *P. ellipsoidea*, bar = 5µm.
- b) Fluorescence micrograph, yellow particles indicate oil droplets, and red color indicates chlorophyll autofluorescence.

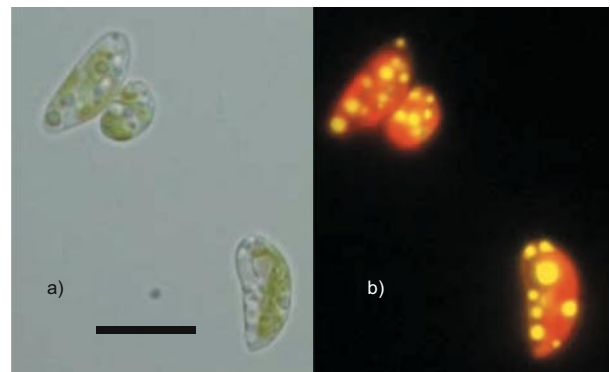


Fig. 3 A unicellular green alga, *Pseudochoricystis ellipsoidea* MBIC11204

Table 2 Energy productivity and easiness of maintenance of three different culture facilities

Facility		Open-type	Closed-type	
		Raceway	Tubular	Flat panel
Productivity	Biomass (t/ha-year)	~50	57~60	~70
	Energy (GJ/ha-year)	1150	1350	1600
Energy loss	Mixing (GJ/ha-year) (%)	6.6 (0.5%)	?	670 (42%)
	Total (GJ/ha-year) (%)	110~120 (10%)	180 (14%)	1214 (75%)
Energy production (GJ/ha-year)		1035	1170	386
Maintenance		○	×	×

んで raceway 型と比較した (参考: 11th International Conference on Applied Phycology). まず, バイオマス生産量は垂直パネル型が最も良い. 獲得できるバイオマスエネルギー量も垂直パネル型が最も良い. ところが装置運転に要する動力 (エネルギー損失) は垂直パネル型の消費が最も多い. このリアクタの場合細胞の沈降を通気攪拌で防いでいるので攪拌動力を多く要するのが特徴である. また, 攪拌以外の要因でもエネルギー損失が多く, ネットのエネルギー獲得量は垂直パネル型が一番低い. チューブ型と raceway 型ではエネルギー獲得量はチューブ型が上なのでチューブ型の選択が視野に入るが, 実は屋外大量培養を考えるとメンテナンス性, 即ち一つの培養から次の培養までに要する手間, 簡単に言えば洗浄の手間が重要な問題であり, 簡単な想像で明らかのようにチューブ型は洗浄が難しい. 結局, オズワルド教授の時代から使われている raceway 型が選択肢としては優れていると評価できる. この評価に基づき現在室内ではあるが raceway 型培養装置での試験を実施している.

4. 課題

もちろん解決すべき課題は多岐にわたっている. 大きな項目を数え上げると技術課題だけでも6, その他の課題が5に上り, とても本稿で詳述できない. ここでは重要度の高い項目について触れる.

4.1 コスト

Fig. 4 に示すように, 現状では 1 kg の藻体の生産コストが 285 円であり, 油分が 30% 含まれるとすると油分のコストは 950 円/kg になる. 高コストの主な原因は低い生産性, 培養施設の償却費, 油分抽出に係る電力消費, 細胞の回収費用などであり, これらをつつ

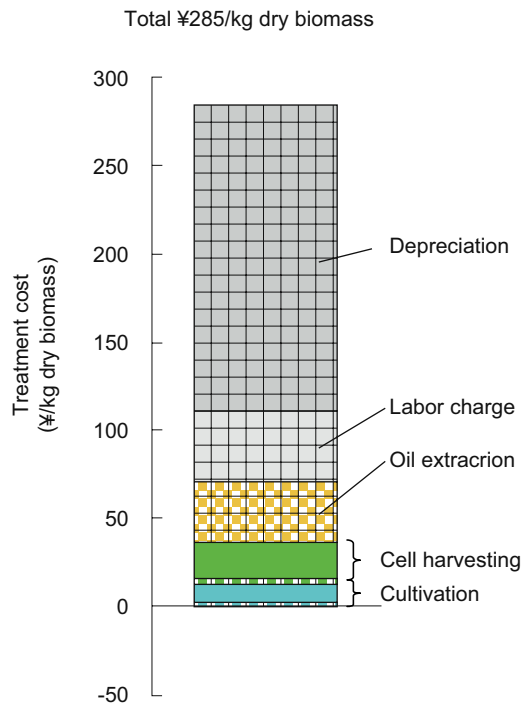


Fig. 4 Process analysis for cost of microalgal biodiesel production

解消していく努力が必要とされる. 培養工学的最適化や代謝解析と遺伝的改変による生産性の向上, 安価な培養施設の構築, 低消費電力型油分抽出法の開発, 新規固液分離法の開発といった解決策を積み重ねることで, 一定のコスト削減は達成できる. 更に追加対策として, 油分抽出残渣の高度利用, いわゆるバイオリファイナリーを推進する必要がある. 高付加価値の, 例えば生理活性物質などが藻体に含まれていればそれを採り出し利用することにより経済性は改善されるであろう. また, 残渣をコモディティケミカルあるいは肥料, 飼料, 餌料に変換して価値を付与する方策も検討されなければならない.

4.2 新規技術開発

油分生産性の改善策としては, 培養手法の検討の効果は大きい. 中でも微細藻類の増殖に必要な各種栄養源の種類と濃度の選択により屋外培養の安定化が図られたばかりか, 培地コストの削減にもつながった.

油分蓄積の出発物質は光合成で蓄えられたデンプンである. デンプンからの種々の二次代謝産物 (油分も含む) への代謝経路がわかれば, 代謝の方向を特に油分へ向けることが可能になると期待できる. 種々の代謝産物の網羅的一斉解析をメタボローム解析と呼ぶが, この分野で世界的に有名な慶応大学先端生命科学研究所に属する伊藤研究員と共同研究をおこない, 少して

も油分生産性を向上させる試みに取り組んでいる。

現状では1週間細胞を増殖させて窒素を消費させその後の1週間は窒素飢餓の状態でお金を蓄積させるというステップを設けており、一つの生産サイクルで2週間は要しているが、この期間を短縮させれば直接の生産性の向上につながる。そこで、窒素が十分にある条件でも細胞を窒素飢餓と誤認させるような遺伝的改変を行い生産サイクルを短縮化する試みを中央大学理工学部原山教授と共同で開始した。

5. おわりに

1990年に比べて25%のCO₂排出削減を国際社会に約束した現在、本R&Dは弊社のCSRの観点から重要度を増しているが、順調に発展させていけばピークオイル後の化石資源に代わる有機物資源供給を可能にするという意味で、弊社のみならず、日本社会、更には国際社会への貢献も可能である。これまでの経験から、あるR&Dのテーマが時代の脚光を浴びた後にはその反動で長く沈滞期間が続くことが予想される。北米での狂騒ぶり、わが国での注目度を見るとその懸念がぬぐいきれない。しかし、沈滞期間が訪れようともうまずたゆまず技術を磨いたものだけが次の大きな一歩を踏み出せる。継続的に本R&Dを発展させるのが最大の課題である。

<参考文献>

- 1) http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/liquid_fuels.html
Fig. 29.
- 2) <http://www.independent.co.uk/news/science/warning-oil-supplies-are-running-out-fast-1766585.html>
- 3) 藻類の多様性と系統, 裳華房, (1999), p.2.
- 4) L. Sagan, J. Theoretic. Biol., 14 (3) (1967), p.225.
- 5) R. H. Whittaker (1975) Macmillan.
- 6) 藏野憲秀, 生物工学会誌, 79 (10) (2001), p.400.
- 7) CO₂固定化・隔離技術, シーエムシー出版 (2006), p.38.
- 8) <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf>
- 9) <http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/report/heisei20/pdf/pdf04/04-006.pdf> p.2, Fig. 1.



<著者>



藏野 憲秀
(くらの のりひで)
基礎研究所 第8研究室 博士(薬学)
微細藻類によるCO₂固定とバイオ燃料生産研究開発に従事



福田 裕章
(ふくだ ひろあき)
基礎研究所 第8研究室
微細藻類によるCO₂固定とバイオ燃料生産研究開発に従事



永久保 雅夫
(ながくぼ まさお)
基礎研究所 第8研究室 博士(工学)
微細藻類によるCO₂固定とバイオ燃料生産研究開発に従事



渥美 欣也
(あつみ きんや)
基礎研究所 第8研究室
微細藻類によるCO₂固定とバイオ燃料生産研究開発に従事