

【産業競争力懇談会2010年度 研究会 最終報告】

## 農林水産業と工業の連携研究会

～微細藻燃料分科会～

2011年3月4日

産業競争力懇談会 **COCN**

## 【エクゼクティブサマリー】

現在、我が国はエネルギー・セキュリティ確保や地球温暖化対策といった大きな課題に直面している。原油価格が一時的ではあっても 140 ドル/バレルを越えたことや昨年閣議決定された「地球温暖化対策基本法案」に、2020 年の温室効果ガス排出量を 1990 年比で 25%削減することが盛り込まれたことは、記憶に新しい。

このような状況の下、化石燃料需要の一部を補完する再生可能エネルギーとしてバイオ燃料への期待が高まっているが、環境適合性 (Environmental Harmony) ・経済性 (Economic Efficiency) ・供給安定性 (Energy Security) の 3E を満たすことが重要である。

輸送用燃料において CO2 削減に寄与できる液体のバイオ燃料は何らかの処理を行うことで既存液体燃料との混合利用が可能であり、かつ既存機関・既存インフラでそのまま活用できる利点がある。

自動車用燃料としてはバイオエタノールが注目されているが、ジェット燃料、灯油の留分としては、微細藻類を利用したバイオ燃料が性状的に好ましく、単位面積当たりの油の生産量も陸生植物を原料にした場合に比べて 1 桁程度高いこと、特にジェット燃料では CO2 の削減策が限定されており、代替液体燃料への期待度が高いこともあり、着目されている。

従来のバイオ燃料は食料との競合が問題視されており、今後は、食料との競合を緩和でき、持続可能性に優れた燃料が求められている。微細藻類を利用したバイオ燃料は、農地を必要としないことから食料との競合も緩和できる。

我が国では過去サンシャイン計画等において CO2 固定を軸に微細藻類に関する研究開発が行われており、培養等の根幹となる技術を有しているが、バイオ燃料として利用するまでには、未だ至っていない。

「微細藻燃料分科会」においては、今後我が国が 3E を満たす微細藻類を利用したバイオ燃料を開発・事業化するための課題を抽出・整理すると共に、その課題を解決するために必要な取組みを取り纏めた。

### 1. 微細藻類を利用したバイオ燃料の開発の意義

- ・我が国として 2020 年の温室効果ガス排出量を 1990 年比で 25%削減することへの貢献と、以降の削減量の拡大
- ・価格の安定した自主開発エネルギー源の開発による我が国のエネルギー・セキュリティの向上
- ・以上を、ジェット燃料、灯油留分等の液体燃料生産において、陸生植物を原料にした場合に比べて単位面積あたり 1 桁程度高い生産量を持ち、食料との競合が緩和できる微細藻類の原料利用により達成する。

## 2. 微細藻類を利用したバイオ燃料に求められる条件

必要条件は燃料に求められる 3E を満たすことであり、特に「経済性」と「供給安定性」を確保するために、微細藻類を原料生産から燃料製造まで一貫した最適生産システムを構築する必要がある。

## 3. 一貫生産システム開発が必要な理由と現状の問題

微細藻類を利用したバイオ燃料の製造は、培養、回収、乾燥、微細藻類からの油分の抽出、抽出した油分の燃料化（改質）等といった種々の工程を経る。培養から燃料製造まで一貫した生産システムとしての最適化が必要である。

現在、国内では民間、大学等各方面にて微細藻類を利用したバイオ燃料に関する技術開発が個別に進められているが、実用レベルの一貫生産システム開発は未だ十分になされていない。

また各工程には数多くの課題が存在しており、例えば培養においては、生産性の高い微細藻類の株の確保、培養設備のコストダウン、使用エネルギーの低減、培養管理手法の確立等の課題が挙げられる。

本技術開発は多岐にわたる数多くの課題を抱えた状態であり、一機関、あるいは機関間の小規模なアライアンスにおける開発では、実用化迄に非常に長い時間を要する。

## 4. 一貫生産システム開発に必要な取組み

一貫した生産システムの開発には、各工程、各要素技術の開発を得意とした開発機関の連携による取組みが必要である。

微細藻類の優良株の確保や各種基盤技術研究は大学や国の研究機関、培養技術や油分の抽出技術等の実用化研究はエンジニアリング会社や水処理会社、燃料化は石油会社、そして油分を抽出した後の微細藻類残渣の有効利用は飼料・肥料会社等が主として得意とする分野であることから、それぞれが連携することにより開発・事業化の効率化が図れる。

技術力を保有する機関が連携・開発するためには、各機関の連携・開発メリットを明確にする必要がある。例えば、大学は国や民間から有意義な研究への取組みを支援され、成果をあげることであり、民間は研究開発成果を直接的あるいは間接的に、可能な限り短期間で自社の事業に繋げることである。

しかし、微細藻類を利用したバイオ燃料製造は種々の工程からなっており、その開発には長期間かつ多額の費用を要することから、民間だけで費用の負担を負うことには限界がある。よって我が国の地球温暖化対策、エネルギー・セキュリティ確保の大義のもと、政府の支援の継続・強化が必要である。

## 5. 一貫生産システム開発の連携体制

一貫生産システムを開発する連携体制としては、各工程に関連した基盤技術開発の知見を有する産学の研究開発機関が集まり技術研究組合等を構成し、一体運営・推進できる体制が必要である。

また事業化までに必要な制度設計等も考慮すると研究組合等の活動を推進・支援する政府の役割が重要である。

つまり研究開発においては、主として基盤研究を大学・政府系研究機関が、また実用化研究を民間、研究開発支援を政府といった役割分担した連携体制が必要である。

## 6. 開発・事業化支援の継続・強化

現在、農林水産省、経済産業省、環境省、文部科学省等において、バイオマス利用の導入支援事業が行われている。微細藻類バイオマスについても行政による同様な支援の継続・強化が必要である。具体的には、①開発と②事業化・普及の二段階における施策が求められる。

### 6. 1 開発段階における支援

現在、国内における微細藻類を利用した燃料技術開発は、基礎的な要素研究を中心に支援が行われている。今後は夫々の要素研究の進捗に応じ、多種・他業種にわたる技術を組合せ、最適化するための一貫生産システム開発等、実用化に向けた支援の継続・強化が必要である。

### 6. 2 事業化・普及段階における支援

技術が確立し事業化段階に移行しても当初は、生産規模が小さくスケールメリット等が得られないことから、コスト高が続くものと想定される。その状況を乗り越えて、本格普及につなげるためには、事業者に対する政府からの支援策が必要であり、例えば、原料微細藻類培養設備導入に対する設備補助・税制優遇、燃料諸税減免（航空燃料税・軽油税等）、RPS制度のような買取り制度、燃料製造設備建設費への補助や各種インセンティブあるいはフィードインタリフ制度等の創設が挙げられる。太陽光発電のように、普及・事業の自立までは、息の長い事業支援制度が必要である。

製造工場等に対する各種の規制見直しも必要である。例えば、安全を十分担保した上での、危険物製造設備における空地の取扱の緩和、微細藻類から燃料油を搾り取った残渣活用における安全審査ルールの確立、遺伝子組換え株の利用に関する安全審査ルールの見直し等があげられる。

一方、海外からの開発輸入を実施する際の土地利用等に対する現地政府との折衝や、現地企業との提携・技術移転に対する支援等、国対国のバックアップも、我が国の自主エネルギー比率向上といった観点からも必須である。

## 7. 海外事業化展開と事業の発展

技術実証、小規模事業は日本国内での実施が想定されるが、普及期の本格的な大規模燃料生産事業については広大な土地を要することから、海外での事業化が想定される。

海外で事業化できれば、新たな輸出入産業形成に繋がり、また、国際協力、資源獲得手段のひとつとして生かすこともできる。

一方、事業の発展型として燃料以外にも抽出残渣の肥料・飼料等への利活用による食料不足の緩和、残渣からの有用品・高機能物質の生産、将来のバイオリファイナリー等への展開にも繋がる。

## 【目次】

はじめに	P1
微細藻燃料分科会 参加者リスト	P2
本 文	
1. 微細藻類を利用したバイオ燃料開発・導入の意義	P3
2. 微細藻類を利用したバイオ燃料製造技術の概要	P4
3. 微細藻類を利用したバイオ燃料の開発動向	P6
4. 米国政府の微細藻類燃料開発・導入に関する支援政策等	P8
5. 微細藻類を利用したバイオ燃料の技術的開発課題	P11
6. 技術課題解決の為の取り組み	P13
7. 事業モデルに考慮すべき事項	P15
8. 開発・事業化支援の継続と強化	P16
9. 海外事業化展開と事業の発展	P19
おわりに	P20
(参考) 分科会での活動概要	P21

## 【はじめに】

「農林水産業と工業との連携研究会」は地域活性のための農工連携に限らず、農林水産業と工業における産業・技術の接点をもとにした我が国の経済成長に資する提言・連携提案を目指している。

今年度の本研究会は昨年度に引き続き2年目となる。昨年度は、我が国の農林水産業における現状の課題を認識し、これらの課題の解決や緩和に向けた技術開発の状況を洗い出し、今後の発展に必要と思われるグローバル化や産業連携に関する課題を整理した。そして農林水産業と工業の現状から総合的にみて、我が国においては農林水産業共通の次のような課題・問題点があると考えた。

- ①農林水産業と工業との本格的・大規模連携が不足している。
- ②新規産業創出には開発・事業化戦略が重要である。
- ③国際競争力強化、海外進出・国際協力の観点からの検討も重要である。
- ④国際競争力のある産業とするためには、規制緩和は必要である。

また、農林水産業及び工業の現状と課題等を本研究会において議論した結果、次に述べるような産業連携が必要であると結論づけている。

- ・高生産性・低コスト植物工場の開発及び国内での大規模実証と輸出産業の創出
- ・バイオマス(セルロース系、微細藻類)を原料とする燃料・化学品複合変換システム(バイオマスリファイナリー)の開発及び海外展開
- ・大規模養殖システムの開発及び輸出産業の創出

今年度は昨年度の結論を、よりCO2削減らしく具現化していくために、LEDの普及に伴い着目されている「植物工場」(「植物工場」分科会にて研究)と「バイオマスリファイナリー」の原料のうち、欧米に比較し開発・事業化が遅れている「微細藻類を利用したバイオ燃料」(「微細藻燃料分科会」にて研究)に特に着目し研究を進めてきた。

「微細藻類を利用したバイオ燃料」の研究では本バイオ燃料を開発・事業化するための課題の整理と解決するために必要な事項を取り纏めている。

「微細藻燃料事業」の実現は、我が国の地球温暖化対策、エネルギー・セキュリティ向上への貢献はもちろんのこと、将来のバイオマスリファイナリーに向けての大きな足がかりとなり、新しい産業の創出に資すると考えられる。今回の研究成果を契機に、産官学の垣根を越えた強固な開発協力体制づくりに繋がると共に、今後の農水政策やエネルギー政策に反映され、産業の発展ひいては我が国の成長に結実することを願うものである。

産業競争力懇談会  
会長(代表幹事)  
勝 俣 恒 久

## 【農工連携研究会 微細藻燃料分科会参加者リスト】

プロジェクトリーダー：

吉田 正寛 (JX 日鉱日石エネルギー)

メンバー機関：

味の素株式会社

花王株式会社

大日本印刷株式会社

清水建設株式会社

新日鉄エンジニアリング株式会社

新日鐵化学株式会社

住友商事株式会社

株式会社住友商事総合研究所

住友電気工業株式会社

株式会社デンソー

株式会社ニコン

日立化成工業株式会社

株式会社日立プラントテクノロジー

三菱商事株式会社

独立行政法人産業総合技術研究所

アドバイザー：

農林水産省 農林水産技術会議事務局

経済産業省 資源エネルギー庁

オブザーバー：

CO2N事務局

事務局：

JX 日鉱日石エネルギー株式会社



## 【本文】

### 1. 微細藻類を利用したバイオ燃料開発・導入の意義

主な意義として以下の3点が挙げられる。

#### ① 我が国として2020年の温室効果ガス排出量を1990年比で25%削減することへの貢献と、以降の削減量の拡大

正確なLGI（ライフサイクルインベントリ）での評価の値は今後精査する必要があるにせよ、エネルギー供給構造高度化法における持続可能性基準を鑑みた上で、貢献できると考えて良い。

#### ② 価格の安定した自主開発エネルギー源の開発による我が国のエネルギー・セキュリティの向上

微細藻類を利用したバイオ燃料は、原油価格とは基本的に独立しており、農地の利用も必要としないことから、食料価格から独立している。

#### ③ 以上を、ジェット燃料、灯油留分等の液体燃料生産において、陸生植物を原料にした場合に比べて単位面積あたり1桁程度高い生産量を持ち、食料との競合が緩和できる微細藻類の利用で達成する。中でも航空機から発生されるCO<sub>2</sub>削減策が限られることから液体燃料の重要性が高い代替ジェット燃料として重要である。

例えば、2009年度のジェット燃料の国内需要のうち、仮に10%をバイオ燃料に置換すると想定した場合の原料栽培に必要な面積を、ある仮定を置いて計算すると、コーンで204万ha、オイル・パームでも7万ha必要なところが、微細藻類では1万ha以下ですむ可能性があると共に、農地を使用しなくともよいので、食料生産との競合も緩和できる可能性がある。

他にも微細藻類を利用したバイオ燃料のポテンシャルとしては、バイオマス生産では、しばしば問題となる連作障害がなく、脂質や炭化水素を生産する株の連産が可能であること、大量培養時には工業品に近い生産工程が選択でき、改質精製した燃料成分は既存インフラ等をそのまま利用可能（Drop-in fuel）である点も魅力である。

また、微細藻類培養では、排ガス吹込等によるCO<sub>2</sub>の現位置直接固定が可能であり、さらには排水処理と組み合わせることにより、排水中の有機分を利用した従属栄養との混合培養系としての利用も可能で、処理水中の窒素やリンを栄養塩として利用することで除去が可能であり、かつ栄養塩類の添加量を抑えられることから、低コストで培養できる可能性がある。

## 2. 微細藻類を利用したバイオ燃料製造技術の概要

- ・ 陸生植物に対して単位面積あたりの油分の生産性が1桁程度高い。
- ・ 食糧生産との競合が緩和できる。
- ・ 製造工程は、培養→濃縮・乾燥→油脂分抽出→燃料化。工程は、他のバイオマスからの燃料製造工程に比較しシンプル。

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。生命活動により得られた脂質を細胞内に多く蓄積することで浮力を得て、海水の表面近くを漂い太陽の光を吸収すると考えられている。微細藻類は植物プランクトンとして食物連鎖の最初を司る重要な食糧源であり、また太古に蓄積されたものは石油へと変化したとも考えられている。その生息範囲は広大で、水中はもちろんのこと、雪上、木肌、ガードレール表面、極域、温泉、空中等から採取可能である。

微細藻類は、陸生植物に対して単位面積あたりの油分の生産性が1桁程度高く、燃料生産のポテンシャルが高いことが知られている。微細藻類の中には、体内で炭化水素もしくは油脂類を生産する株があり、高いものでは藻体重量の60%以上の炭化水素類を蓄積するものも報告されている。また、水棲生物のため、農地を使用しなくともよいので、食糧生産との競合が緩和できる可能性があり注目されている。例えば、2009年度のジェット燃料の国内需要509万kLのうち、仮にジェット燃料の10%、50.9万kLをバイオ燃料に置換すると想定した場合の原料栽培に必要な面積を概算すると、表1のようになる（ジェット燃料の比重を0.8、植物中の油脂分は全てジェット燃料に転換可能と想定）。

表1. ジェット燃料の国内需要の10%をバイオ燃料で置換するために必要な栽培面積概算

原料	油脂生産能力 [Ton-Oil /ha/y]	必要栽培面積 [万 ha]
Corn	0.2	203.6
Soybeans	0.5	81.4
Safflower	0.8	50.9
Sunflower	1.0	40.7
Rapeseed	1.2	33.9
Oil Palm	6.0	6.8
Micro Algae	47-140	0.8-0.29

微細藻類を原料とする燃料の代表的な製造工程は図1に示される。具体的には、油分の生産性の高い微細藻類を選択、これを培養により大量生産し、生産された藻類を濃縮・乾燥して、乾燥体より炭化水素・油脂分を抽出、これを改質して燃料とするものである。製造工程は、他のバイオマスからの燃料製造工程に比較しシンプルである。

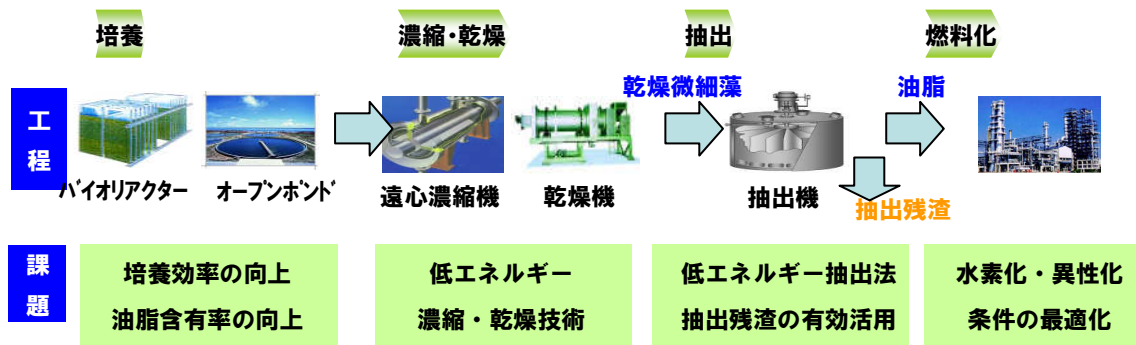


図 1. 微細藻類を原料とする燃料の代表的な製造工程

### 3. 微細藻類を利用したバイオ燃料の開発動向

- ・国内外において、急激な油価上昇や、気候変動リスクの高まりから、2000年代になって、微細藻類燃料開発が急進展している。
- ・特に米国は微細藻類ベンチャー企業とエネルギー関連企業が組む等して、政府から多額の資金援助を受けながら実証レベルの開発段階に至っている。

微細藻類燃料開発の歴史は1950年代に遡ることができるが、注目すべきは、オイルショックを受けて代替エネルギー開発が盛んに行なわれた1970-90年代のDOE（米国エネルギー省）での研究開発及び1980-90年代の国内でのNEDO（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）-RITE（（財）地球環境産業技術研究機構）のサンシャイン・ニューサンシャイン計画における一連の開発であろう。その後、油価が落ち着いたため、研究も下火となっていたが、近年の急激な油価上昇や、気候変動リスクの高まりから、2000年代になって、国内外共に微細藻類燃料が見直されている。

#### <国 内>

国内においては、筑波大渡邊教授が発起人となり、藻類産業創成コンソーシアムを立ち上げると共に学内に実証用試験設備を建設している。

またナショナルプロジェクトにおいても、微細藻類燃料に関するプロジェクトの採択が相次いでいる。NEDOでは、デンソーが中央大原山教授らとの共同により窒素飢餓状態で炭化水素及び油脂生成する *Pseudochoricystis ellipsoidea* の研究を実施しており、日立プラントテクノロジー-ユウグレナ-慶応大-JX日鉱日石エネルギーチームが *Euglena* の研究を実施、JFE エンジニアリング-筑波大学チームも研究を開始している。デンソーは農水省プロジェクトでもマイクロアルジェヤトヨタ自動車らと共同でプロジェクトを推進している。

さらには JST CREST（（独）科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業、研究総括：製品評価技術基盤機構（NITE）安井理事長）では、神戸大近藤教授が *Spirulina* の研究、東京農工大田中准教授が海洋珪藻の研究を実施中であり、2010年度からCREST/さきがけにて、東京農工大松永副学長を研究総括とする研究領域「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」が新たに立ち上がった。筑波大渡邊教授は、環境省や JST CREST で *Botryococcus* の研究を実施している。

#### <海 外>

海外においては、米国を中心に開発熱が再燃している。詳細には後述するが、2007年の Energy Independence and Security Act 制定（米国のエネルギーの独立性、安全保障の向上を目指した法律）等も後押しし、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）が、10年ぶりに基礎研究に回帰した微細藻類研究に乗り出した。また DOE は2008年に5000万\$で藻類由来バイオ燃料コンソーシアムを創設し、競争的公募を通じて藻類由来バイオ燃料の実用化を促進しており、同年に Algal Biofuels Technology Roadmap Workshop を開催、その総括として、2010年5月に Algal Biofuels Technology Roadmap を公表した。また、米国国防省は軍用ジェット燃料研究に350万\$の出資を決めている。

NASA では海上での大規模生産を想定した OMEGA 計画を発表している。

また民間でも

- ・ Exxon Mobil は 2009 年に Synthetic Genomics と共同で微細藻類由来のバイオ燃料生産・バイオリファイナリー系に 6 億\$を投資すると発表。
- ・ BP は 2007 年から UC Barkley 等にバイオ燃料の研究開発投資（5 億\$）を実施中であり、藻類培養で実績のある Martek（食品、添加剤、燃料用途検討）との共同研究契約を発表（第 1 フェーズ 1,000 万\$）。
- ・ Shell は HR Biopetroleum と共同出資の研究開発会社（Cellana）を設立（2007 年）、ハワイで実証試験を開始。
- ・ Chevron は 2007 年に NREL との藻類燃料化技術開発を発表している他、2008 年には Solazyme との研究開発提携を発表。
- ・ Sapphire Energy は、微細藻類からバイオ燃料を生産するプラントを建設するため、米国エネルギー省から補助金 5,000 万\$、農務省から 5,450 万\$の融資保証を受けると発表。またビル・ゲイツが所有する Cascade Investment 等ベンチャーキャピタルから 1,000 万ドルの支援を受けている。2010 年度には商業用プラントを開発し、将来的には日産 1 万ガロンを目指すとしている。
- ・ UOP は、工場排出 CO<sub>2</sub> を回収し、これを藻類の栽培システムへと運ぶ実証システムの設計を行う。UOP と Ensyn との JV である Envergent Technologies の高速熱処理技術の利用を独自に評価、藻類残渣を熱分解油へと変換、燃焼して再生可能電力を生産。DOE より 15,000 万\$の支援。
- ・ Boeing は、Sustainable Aviation Fuel Users Group Consortium 活動として、燃料実証の他に UOP 等と共同でのジェット燃料生産を検討している。

オーストラリアでは、the Gen 2 programにおいて、微細藻類由来バイオ燃料を第 2 世代バイオ燃料と位置づけており、2009 年に国立自然科学産業研究機関（CSIRO）が中心となって微細藻類由来のバイオディーゼルを念頭に置いた Algal Fuels Consortium を組織化することを決定。パイロットプラントの建設を予定している。

イスラエルでは Seambiotic 社がレースウェイ方式の Open Pond における Dunaliella の事業化スケールでの培養試験を実施している。また NASA と組むと共に、中国の発電所から出る排ガスを利用して微細藻を栽培している China Goudian 社とベンチャーを作る。

中国科学院と Boeing らは、微細藻類を利用したバイオジェット燃料開発協力を強化。

インドやインドネシア、韓国等でも米国との協同研究も含め、研究開発・実証が盛んに行なわれている。

また、燃料としての実証例としては、Continental Airways や JAL 等が Boeing、UOP らと共に、微細藻類バイオ燃料を混合したジェット燃料にてテストフライトを実施している。

更に EADS 社（エアバス社の親会社）は、世界の公的なフライト（小型機）で初めて 100% 微細藻類燃料を使用。

等多数。

#### 4. 米国政府の微細藻類燃料開発・導入に関する支援政策等

- ・微細藻類燃料開発・導入について国がリーダーシップを取って推進中。
- ・DOE は藻類を先進的バイオ燃料生産のための重要な原料と位置づけ、商業化に結びつけるためには、今後も大規模な研究開発と実証が必要との認識を示している。
- ・更に規制や基準、官民パートナーシップでの支援が必要であり、産業の育成に向け、研究者やエンジニア、政策立案者、連邦機関、民間部門を指導して、国家レベルの組織的な取り組みを実施することを目標にしている。

3項で示すように、欧米を中心に開発が再燃しつつあり、特に米国においては2007年の、Energy Independence and Security Act 制定等も後押しし、年頭の教書演説で当時のブッシュ大統領が「2017年までに年間350億ガロンの再生可能燃料・代替燃料の使用義務化」と謳ったことをきっかけに、微細藻類を利用した燃料開発も再度脚光を浴びてきている。NRELが、10年ぶりに基礎研究に回帰した微細藻類研究に乗り出し、DOEが藻類由来バイオ燃料コンソーシアムを創設、Algal Biofuels Technology Roadmapを公表する等、国家事業として位置づけ政策支援・事業支援策を積極的に実施している。

海外の政府の支援例として、以下に米国政府の取り組み概要を記す。

#### 4. 1 バイオ燃料の導入拡大に向けた取り組み

2007年RFS（再生可能燃料基準 現在はRFS2）の元に各種バイオ燃料の導入目標値を定めた（以下表2）。この中では微細藻類燃料は明示されていないが、今後先進バイオ燃料に含まれるものと思われる。セルロース燃料には現行のコーンエタノールの倍のインセンティブ（1\$/Gallon）が与えられていることから、今後微細藻類燃料が実用化された際には同様のボーナスが期待される。

表2 RFSの量的要件（単位：10億gallon）

年	セルロース燃料	バイオディーゼル	先進バイオ燃料	全再生可能燃料
2009	N/A	0.5	0.6	11.1
2010	0.1	0.65	0.95	12.95
2015	3.0	a*	5.5	20.5
2020	10.5	a*	15.0	30.0

注) 先進バイオ燃料にはセルロース系バイオ燃料とバイオマス由来ディーゼルが含まれる。

a\* 後日、規則制定を通じて環境保護庁が決定。

#### 4. 2 微細藻類燃料に対する研究開発支援

2009年オバマ大統領は、DOEが先進バイオ燃料の研究開発とバイオリファイナリー実証PJの追加投資のためにAmerican Reinvestment and Recovery Act（米国再生復興投資法（再生可能エネルギー技術開発と雇用の拡大を促進する。2009年制定）からの786百万\$の開発費の拠出を計画、そのうち、藻類原料バイオ燃料に50百万\$投入することを発表している。

これを受けて 2010 年、DOE は「National Algal Biofuels Technology Roadmap」を発表した。この中では、藻類を先進的バイオ燃料生産のための重要な原料と位置づけ、藻類からバイオ燃料への変換プロセスに伴うリスクや不確実性のレベルを下げて商業化に結びつけるためには、今後も大規模な研究開発と実証（Research, Development and Demonstration：RD&D）が必要との認識を示している。さらに、こうした活動には、非技術的な分野（規制や基準、官民パートナーシップ）での支援が必要であり、技術のギャップや分野横断的なニーズの見直しを基に、藻類系バイオ燃料産業の育成に向け、研究者やエンジニア、政策立案者、連邦機関、民間部門を指導して、国家レベルの組織的な取り組みを実施することを目標に掲げている。

#### **4. 3 大学先導先進バイオ燃料 PJ (DOE：2008/09～)：\$4.4 million (+20%の Matching Fund 負担つき)**

DOE は大学における研究開発を促進するため、先進バイオ燃料 PJ を立ち上げている。そのうち微細藻類関連は以下の 2 つである。

- ①the University of Georgia：the use of poultry litter to produce low-cost nutrients for algae
- ②Montana State University with Utah State University：the oil content, growth, and oil production of algae cultures in open ponds

#### **4. 4 先進バイオ燃料開発/燃料インフラ支援 (DOE：2010/01～) 約 80 百万\$**

さらに DOE は、the American Recovery and Reinvestment Act の元に先進バイオ燃料の実用化に向けた開発/燃料インフラに資金を供出することを発表した。2 つのコンソーシアムが 78 百万\$を獲得。うち藻類コンソーシアムの概要を示す。

○National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts (NAABB) (\$44 million)：the Donald Danforth Plant Science Center がリーダー。コストや原料の利用及び効率、GHG 排出等に関する Critical 障壁を乗り越えるための産官学リソースを統合。藻類及び産出脂質の驚異的な増産、効率的な栽培、藻類及び製品の抽出、残渣の価値創出等について複数の実証サイトで開発・実証。

#### **4. 5 藻類バイオ燃料商業化研究コンソーシアム (DOE：2010/06～)**

加えて DOE は 2010 年に、三つの研究コンソーシアムを発表した。最大 2,400 万\$の助成、3 年間継続を予定している。各コンソーシアムの概要を述べる。

- ①アリゾナ州立大学率いる Sustainable Algal Biofuels Consortium、最大 600 万\$  
石油由来燃料の代替として藻類系バイオ燃料がどの程度受け入れられるかの検討、藻類燃料や燃料中間生成物の物理的、化学的特性分析に加え、藻類から燃料や製品を生産する際のバイオ化学的変換研究。
- ②カリフォルニア大学率いる Consortium for Algal Biofuels Commercialization、最大 900 万\$  
バイオ燃料の確実な原料として藻類を使用するための開発に集中、藻類の保護、藻類の栄養素の利用、遺伝的手段を模索する新たなアプローチ研究。

③Cellana (Hawaii の LLC) 率いる Cellana, LLC consortium、最大 900 万\$

海水培養微細藻類から燃料や飼料を大規模に生産する方法について研究、パイロット規模の試験藻場で新たな藻類収穫技術を導入する研究や、養殖業向け飼料としての海洋性微細藻類の開発。

#### 4. 6 事業化借入保証 (USDA (米国農務省、2008~) : 最大 2.5 億\$/PJ の融資保証

USDA は、The Food, Conservation, and Energy Act of 2008 で認定したバイオリファイナリー支援プログラムをベースとした商業先進バイオ燃料を生産する新規バイオリファイナリー建設、あるいは既存バイオリファイナリーの先進的バイオ燃料生産設備への変換に必要な開発や建設に対する支援プログラムを創設。総投資額 13 億\$程度で、第一次融資保証 (2009 年 3 月)、第二次融資保証 (2009 年 9 月) はすでに実施済である。うち、藻類関連の支援実績を表 3 に示す。

表 3. USDA の融資保証プログラムによる藻類関連支援実績

Company	FUND	Process	Remarks
Solix Biofuels	10.5 百万\$		
Sapphire Energy	54.5 百万\$	Open Pond	Gasoline 910N

#### 4. 7 国立再生可能エネルギー研究所 (NREL) の動き

1978~1996 年、水棲生物種プログラムで実施後中断していた藻類由来燃料プログラムを再開。今回は基礎生物学の理解により大きな比重を置いている。Chevron と連携し、脂質生成の仕組解明、脂質生産や藻類成長を規定する要因の探索を通じて微細藻類の生産性向上プログラムに取り組む。



## 5. 微細藻類を利用したバイオ燃料の技術的開発課題

- ・微細藻類を利用したバイオ燃料の製造は、微細藻類の培養から燃料化までの各工程において技術的課題が山積している。
- ・我が国においては、培養から燃料化までの実用化レベルの一貫したシステム開発も行われていない。

旧サンシャイン計画等において CO2 固定を軸に微細藻類の研究開発が行われており、国内に培養等の根幹となる技術は一部保有しているが十分ではなく、バイオ燃料として利用するためのスケールアップ、コストダウンを中心とする技術開発が大きな課題となっている。

微細藻類を利用したバイオ燃料の製造は、微細藻類の培養・回収・乾燥、微細藻類からの油分の抽出、抽出した油分の燃料化（改質）といった種々の工程を経る。特に微細藻類を原料生産から燃料製造まで一貫した最適生産システムを確立することが重要なキーとなる。そのための技術課題は枚挙に暇がないが、代表的なものとしては以下が挙げられる。

### 1) 株の探索

当然のことながら、生産性の高い株の探索が重要である。培養地の環境に合った、高油脂生産、高付加価値物質生産株の確保は言うに及ばず、高濃度での培養が可能な株や、増殖速度の速い株、粗放培養が可能な株、収穫の容易な株、通年培養が可能な株等が魅力的である。通年培養できる株が見つからない場合には、季節による株の使い分けを検討する必要がある。

場合によっては、育種や遺伝子組換え等の手法を用い、より生産性の高い株、自己凝集性があり培養後の回収が容易な株、細胞壁欠損株等の開発が必要となる。機能向上をもたらすための遺伝子組換え技術、DNA 分析・ゲノム解析、クローン技術等の開発、及び、遺伝資源の収集・保存・情報化、及びゲノム情報の活用による農産物改良技術の開発等が進められている。現地採取株以外の株あるいは組換え株等を利用する場合には、当然ながら拡散防止等の安全対策が必須となる。

### 2) 株の培養

培養においては、その効率の向上が最重要課題である。先にも示した通り、まずは培養方式の選択がなされる。Open Pondでの培養か、もしくはPhoto Bio Reactor (PBR) を選択するかで、その課題は大きく異なるが、いずれのケースでもメンテナンス性の確保と低エネルギー化、コンタミ対策、水資源確保は必須の課題となる。CO2や水供給形態が重要であると共に、培養後の水処理も低エネルギーで行なう必要がある。

また、通年培養を考えると、Open Pond の場合は環境変動対応が必須となるし、PBR の場合は低エネルギーの閉鎖系培養システムを構築する必要がある。

さらには、培地組成の適正化・低コスト化が求められることとなる。

研究開発段階で高い培養時生産性が確認された場合、スケールアップ時においてもその高い生産性が効率よく再現できるかが、一つのポイントとなる。微細藻類の大量培養については、実用例がまだまだ少なく、ウィルス混入防止や捕食者対策等の培養管理手法が確立されていない点も課題である。

加えて、体内脂質蓄積株では、呼吸による夜間等のロスの低減も重要となる。

組換え株や、他地域からの持込み株を利用する場合においては、株の系外リーク等を想定した管理体制、安全性評価、生態影響評価等が必要となる。

### 3) 株の回収・燃料化

大量培養法が確立できた場合、微細藻類を低エネルギーで回収・油脂抽出する方法の開発が求められる。例えば、回収法としては、自然沈降法や沈殿凝集剤の使用、遠心分離等の手法が考えられるが、低エネルギーでの回収法は確立されていない。

また、回収した後には大量の廃水が発生することから、その処理も課題となる。

さらには回収した藻類からの脂質・炭化水素の低エネルギー抽出法の確立が急務である。

得られた脂質や炭化水素は水素化・異性化等の技術を用いて燃料化されることとなるが、その改質反応条件を低エネルギーで最適化することが重要である。スケールアップコスト低減の観点から、原料バイオマスの混合処理や、既存石油精製設備の転用の可能性も探る必要がある。

### 4) 残渣利用

持続可能な微細藻類燃料の製造においては、油脂抽出後の大量の残渣の有効利用が求められる。用途としては、化粧品・健康食品原料や畜産・養魚飼料、肥料等が考えられており、固形燃料化、メタン発酵等の利用も視野に入る。

水産業においては、水産物の加工残滓、未利用資源等に含まれる有用物質の探索、利用技術の開発が進められており、同様の開発が必要となろう。

残渣の食品等への利用に関しては、販売地での国内法における安全審査等への対応が必要である。仮に日本国内での販売を想定した場合、国内法下での安全審査対応、食品安全衛生法上の取り扱い（Guideline化、規制緩和）等が必要となる。

### 5) 一貫生産システムの開発

現在、国内では民間、大学等各方面にて微細藻を利用したバイオ燃料に関する技術開発が個別に進められているが、実用レベルの一貫生産システム開発は未だなされていない。多岐にわたる数多くの課題を抱えた状態であり、一機関、あるいは機関間の小規模なアライアンスにおける研究開発では、実用化迄に非常に長い時間を要する。

## 6. 技術課題解決の為の取り組み

- ・課題解決の為には、各工程、各要素技術の開発を得意とした開発機関の連携による一貫生産システム開発が必要である。
- ・連携体制としては、技術研究組合等の一体運営・推進できる体制が必要であり、活動を強力に推進・支援する政府の役割が重要となる。

我が国では各研究機関が工程ごとに多岐にわたる数多くの課題を抱えた状態であり、実用レベルの一貫生産システム開発も未だなされていない。こうした状況から、早急に実用化に向けた一貫生産システムの開発が必要である。

一貫した生産システムの開発には、各工程、各要素技術の開発を得意とした開発機関の連携による取り組みが必要である。

微細藻類の優良株の確保や各種基盤技術研究は大学や国の研究機関、培養技術や油分の抽出技術、水処理技術等の実用化研究はエンジニアリング会社、燃料化は石油会社、そして油分を抽出した後の微細藻類の有効利用は肥料・飼料会社等が主として得意とする分野であることから、それぞれが連携することにより開発・事業化の効率化が図れる。

技術力を保有する機関が連携・開発するためには、各機関の連携・開発メリットを明確にする必要がある。例えば、大学は国や民間から有意義な研究を支援され、成果をあげることであり、民間は研究開発成果が直接的あるいは間接的に、可能な限り短期間で自社の事業に繋げることである。

しかし、微細藻類を利用したバイオ燃料製造は種々の工程からなっており、その開発には長期間かつ多額の費用を要することから、民間だけで費用の負担を負うことには限界がある。よって我が国の地球温暖化対策、エネルギー・セキュリティ確保の大義のもと、政府支援の継続・強化が必要である。

また、一貫生産システムを開発する連携体制としては、各工程に関連した基盤技術開発の知見を有する研究開発機関が集まり技術研究組合等の一体運営・推進できる体制が必要である。さらに、事業化までに必要な制度設計等も考慮すると研究組合活動等を推進・支援する政府の役割が重要である。

つまり研究開発においては、主として基盤研究を大学・政府系研究機関が、また実用化研究を民間、研究開発支援を政府といった役割分担した連携体制が必要である。

以上のように産官学が強固な連携をはかりながら技術開発を推進し、我が国の地球温暖化対策、エネルギー・セキュリティ確保、欧米との開発競争を考慮して、想定すべき今後の計画の一例を以下に示す。

2011 年度より各工程の要素基盤技術の確立強化。スケールアップ検討。

(段階を踏んでスケールアップ、基盤技術の高度化)

2015 年度に一貫生産基本技術確立。

(更なる低コスト化技術開発)

2020 年度頃 生産開始

## 7. 事業モデルに考慮すべき事項

- ・事業モデルには、立地条件として、微細藻類の栽培面積確保、安価な用役の確保、水の有効利用等を考慮した環境である必要がある。
- ・微細藻類の株を選択する場合に、現地の生態系への影響を考慮する必要がある。
- ・販売国における燃料品質への適合化及び品質保証は当然必要となる。

事業モデルを構築する際に特に考慮すべき事項を列記する。

微細藻類の培養に関しては、培養面積の確保が最重要となる。

まずは海水培養株もしくは淡水培養株を選択し、その後、培養形態として開放系の Open Pond 方式を選択する場合には、食糧供給と競合せず、日照等の十分な気象条件が得られ、整地等の手間の少ない土地の確保が必要となるし、閉鎖系の PBR 方式では、安価な用役の確保と工場立地が重要となる。いずれの場合も必要十分な面積が確保できるかが大きな課題となる。また、水の有効利用という点では、天然湖沼・海域等の利用が考えられるが、天然湖沼利用に関しては湖沼法との抵触に注意が必要であるし、沿岸海域の利用時には既得漁業権等との関係に注意が必要である。

次に重要なのは株の選択となる。現地で採取もしくは繁殖している天然株を選択した場合には、大量培養により該地での優勢種となった場合の対策が必要となる可能性がある。また現地採取もしくは繁殖株ではない株の開放系での培養を選択するケースにおいて現地の生態系への影響が懸念される場合は、環境アセス等の必要性が生じる場合もある。

また日本国内株を海外事業地へ持ち出す場合、生物多様性条約（拡散防止等）、植物検疫に対する対応等必要となる場合がある。現地天然株を確保し培養する場合には、特に大きな問題がないと考えられるが、現地法を確認する必要がある。

販売国における燃料品質への適合化及び品質保証は当然必要となる。

## 8. 開発・事業化支援の継続と強化

- ・ 事業化に必要な技術開発及び事業化後も更なる技術の高度化を産学が連携して進める必要があり、これには、国の支援が重要となる。
- ・ 事業が自立するまでの事業者に対するインセンティブ等に関して検討が必要である。
- ・ 各種規制緩和・安全審査のルール等の見直しについて検討が必要である。
- ・ 広大な土地を必要とすることから、海外土地利用等も視野に入れるべきであり、現地政府との折衝、現地企業との提携・技術移転に対しては、産官が協力する必要がある。
- ・ 継続的な技術の高度化を図る為には、技術人材育成について産官学が協力する必要がある。

### 8. 1 研究開発・事業化支援

現時点でも複数の研究開発支援・実証化支援策が存在しているが、上記にも述べたように、開発期間が長期にわたると考えられることから、息の長い研究開発、事業化検討を継続する為、官の支援や産官学の協力が必要である。現在のバイオ燃料に対する支援制度としては、以下のようなものが挙げられる。

農林水産省予算による支援策として、研究開発フェーズにおいては、「地球規模課題対応研究」中で「バイオマス利活用」の一環として位置付け、5年後には「藻類の効率的培養技術の開発と、培養した藻類を燃料又はマテリアルとして利用する技術の開発」、10年後には「更に高度に管理された条件化での培養システム開発と、燃料及び高付加価値化マテリアルへの多段階利用技術の開発」を達成目標として設定している。また、委託プロジェクトとして「藻類バイオマス利用技術の開発」を開始したところである。

また実証以降のフェーズにおいては、「農林漁業バイオ燃料法」に基づく次世代バイオマス利活用推進対策として、農林漁業者等とバイオ燃料製造業者による生産製造連携事業計画を推進し、非食料原料を用いた国産バイオ燃料の生産拡大に向けて、地域バイオマス利活用交付金、製造設備補助等の支援策がある。

経済産業省予算による支援策として、研究開発フェーズにおいては、NEDO「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用開発事業」中での研究開発の実施が行なわれている。

また、実証以降のフェーズにおいては、①バイオマス等未活用エネルギー事業調査事業（調査費補助）、②新エネルギー等事業者支援対策事業（事業費、設備費の一部補助）、③地域新エネルギー等導入促進事業（設備費の一部補助）、④バイオマス等高効率転換技術開発事業（研究開発費の補助）等がある。

更には環境省予算による支援策として、①エコ燃料利用促進補助事業、②循環型社会形成推進科学研究費補助金（競争的資金）等がある。

### 8. 2 事業者支援の在り方

技術が確立し事業化段階に移行して当初は、生産規模が小さくスケールメリット等が得られないことから、コスト高が続くものと想定される。その状況を乗り越えて、本格

普及につなげるためには、事業者に対する政府からの支援策が必要である。

例えば、原料微細藻類培養に対する設備補助・税制優遇、燃料諸税減免（航空燃料税・軽油税等）、RPS制度のような買取り制度、燃料油製造設備建設費への補助や各種インセンティブ、フィードインタリフ制度等の創設が挙げられる。太陽光発電のように、普及・事業の自立までは、息の長い事業支援制度が必要である。

### 8. 3 製造工場に関する規制緩和

多くの場合、輸送コスト等の低減を考慮すると、原料となる微細藻類の培養地とその後の収穫・油脂抽出工場とは隣接した方が有利である。その場合、製造工場に対する各種規制緩和等が必要になると考えられる。例えば、安全を十分担保した上での、危険物製造設備における空地の取り扱いの緩和等が考えられる。

また、微細藻類の大規模培養用の土地の収用に対する補助及び規制緩和が必要である。

更には、例えば富栄養化湖沼における水浄化との組合せ等の野心的な取組みも、産官学で検討する必要がある。

### 8. 4 残渣利用に関する安全審査対応協力等

微細藻類から燃料油を搾り取った残渣は、今回調査を実施した養魚飼料等への適用等、各種飼料や肥料等に有効利用することが考えられる。しかし、残渣製品化国内販売においては、国内法下での安全審査、食品安全衛生法（Guideline化/規制緩和）等のルールの確立が必要となる。早期に対応できるよう協力が必要である。

### 8. 5 遺伝子組換えに関する課題解決協力

米国等では、すでに大豆等では遺伝子組換え株の商業栽培が盛んに行なわれている。しかしながら国内ではまだまだPublic Acceptanceが得られておらず、その取組みについては細心の注意が必要である。安全対策措置確保、生態系維持を前提とした拡散防止対策は当然のものとして確保した上で、食品以外への用途としての組換え株の取り扱いに関するGuideline制定、Public Acceptance獲得についての協力が必要である。

### 8. 6 海外事業化に関する協力

海外での製造を視野に入れた場合においては、上記に加えて、海外事業化に対する国際交渉における政府の協力が重要となる。

例えば、微細藻類のようなバイオマスを利用した燃料分野については広大な土地を要することから、海外での事業化を想定した技術開発を進めていくことが肝要である。海外土地利用等に対する現地政府との折衝に対する政府協力や、現地企業との提携・技術移転に対する協力が挙げられる。

我が国で技術を確立し海外で事業化できれば、新たな輸出入産業が形成でき、また、国際協力、資源獲得手段の一つとして生かすこともできる。

他方、国内燃料として利用する場合における開発輸入燃料としての位置づけの明確化が必要となる。

さらには、現地での燃料としての利用導入促進支援についても、政府間交渉におけるサポ

ートは必須であろうと考えられ、気候変動対策に資する取組みとして現行の京都議定書におけるCDMのような枠組の継続、拡大、創設が求められる。

## **8. 7 人材育成**

本技術開発領域においては、基礎研究から実用化に至る全般において、専門家が非常に少なく、人材育成が急務である。人材育成は一朝一夕では実現しないことから、産官学が協力して育成施策を構築、実行する必要がある。



## 9. 海外事業化展開と事業の発展

- ・ 微細藻類燃料の国内実証により技術確立した上で、海外での大規模生産を検討する必要がある。
- ・ 海外での事業化は、新たな輸出入産業形成に繋がり、また、国際協力、資源獲得手段のひとつとして生かすこともできる。
- ・ 燃料製造において発生する大量の残渣は飼料・肥料等への利活用により、食料不足の緩和にも貢献することもできる。
- ・ 更には残渣からの有用品・高機能物質生産、将来のバイオリファイナリー等への展開にもつながる。

我が国のバイオマス資源量（利用面積）は限られた一定量の確保は可能であるが、多量のバイオマス燃料を製造する大規模プラントの想定において経済性に見合うバイオマス資源量、生育条件には制約がある。そのため、微細藻類燃料の実証化を国内で実施して技術確立を行った上で、開発した微細藻類燃料化技術を基に、海外での大規模生産を検討するという段階を踏むことも視野に入れる必要がある。プラント立地環境、日照・気温等の自然環境、我が国との関係等からみて東南アジア・オセアニア等が好適であると考えられる。

海外での事業化は、新たな輸出入産業形成につながり、また、国際協力、資源獲得手段のひとつとして生かすこともできる。

また、微細藻類を原料とする燃料製造を事業化した場合、当然ながら大量の残渣の発生が想定されることから、その有効利用が必須となる。抽出残渣の飼料・肥料等への利活用により、食料不足の緩和にも貢献することもできる。

更には残渣からの有用品・高機能物質の生産、将来のバイオリファイナリー等への展開にもつながる。

## おわりに

「新成長戦略」が昨年6月に閣議決定された。7つの戦略分野の筆頭である「グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略」では、2020年までの目標として『50兆円超の環境関連新規市場』、『140万人の環境分野の新規雇用』、『日本の民間ベースの技術を活かした世界の温室効果ガス削減量を13億トン以上とすること（日本全体の総排出量に相当）を目標とする』が掲げられている。セルロース系のバイオエタノールと同様に微細藻類を利用したバイオ燃料も本目標達成に寄与できるものと考えられる。しかし、本書で述べたように、製造法の開発・事業化は、ともに必ずしも容易ではなく、日本の産官学の本格的な連携なしでは成し遂げられないものである。民間、大学等の研究機関の力を最大限に発揮できるよう政府のご支援が必要である。

本検討は、産業競争力懇談会（COCN）メンバーの中からの有志と外部から微細藻類燃料に関心のある企業・機関により分科会を構成し、アドバイザーとして、農林水産省、経済産業省のご指導を受け、また、本分野の高度な知識を有する専門家の先生方のお話をもとにメンバーとの討論をベースに取り纏めたものである。本分科会の提言や連携提案についてご協力いただいた関係者の方々にはこの場をお借りして感謝申し上げます。最後に、COCNの来年度の活動として、次のステップへ向かうよう鋭意検討したい。

農工連携研究会 微細藻燃料分科会  
リーダー  
吉田 正寛

## (参考) 分科会での活動概要

### 第一回 7月16日

- ・研究会(分科会)の概要説明 事務局
- ・「新たな「農林水産研究基本計画」及び研究会への期待」
- ・「農林水産省における微細藻類のバイオマス利用研究の取組みについて」  
農林水産省 農林水産技術会議事務局
- ・「バイオマスエネルギーをめぐる動向」  
経済産業省 資源エネルギー庁 新エネルギー対策課

### 第二回 8月2日

- ・「微細藻類探索のポイントと課題」、「デンソーの取組み」 (株)デンソー
- ・「微細藻類研究企業からみる微細藻類研究開発の課題」 (株)ユーグレナ

### 第三回 9月3日

- ・「微細藻利用における技術課題とビジネスモデル構築」 東京海洋大学
- ・「石油を作る微細藻—*Botryococcus braunii*による炭化水素生産—」 東京大学

### 第四回 9月29日

- ・「燃料製造に副生する残渣の利用に関する課題」 伊藤忠飼料(株)
- ・提言検討・概略取り纏め、報告書作成に関する検討。

### 第五回 11月11日

- ・各分科会中間取り纏め結果報告
- ・研究会としての提言案討議、取り纏め

## 【研究会での講演】

### 第1回微細藻燃料分科会 講演会概要

7月16日 15:00~17:30

JX日鉱日石エネルギー（株）本社ビル

#### ○新たな「農林水産研究基本計画」及び研究会への期待

農林水産省農林水産技術会議事務局 技術政策課長 横田敏恭様

- ・2009年3月に農林水産研究基本計画を改定し、新たに今後5年間の目標を設定した。可能な限り定量的な目標を掲げた。これらの実現に向けて、本研究会では意見交換の中から共同事業まで方向性を出せればと考える。また、農水省研究機関のこれまでの研究成果には工業、医薬の世界でも活用できるものが多数あるのでできるだけ利用して欲しい。具体的な利用・事業化相談については、個別に対応することも可能である。

#### ○農林水産省における微細藻類のバイオマス利用研究の取組みについて

農林水産省農林水産技術会議事務局研究開発官（環境）室研究調整官 齋藤昌義様

- ・微細藻類の利用は、農林水産研究においては「地球規模課題対応研究」の研究領域の中で「バイオマスの利活用」の一環として位置付けており、5年後、10年後の達成目標を設定している。
- ・委託プロジェクトして「藻類バイオマス利用技術の開発」を開始したところである。
- ・バイオマス利用研究は、農村の活性化、地域での物質循環に役立てることを想定しており、その中で微細藻類の活用を進めることを目指している。

#### ○バイオマスエネルギーについて

経済産業省資源エネルギー庁新エネルギー対策課課長補佐 向野陽一郎様

- ・代表的なバイオマスエネルギー開発であるセルロース系バイオエタノール燃料の製造については、前処理、酵素糖化、発酵、濃縮脱水の要素技術の開発を進めると共に、一貫生産システムの開発を目指している。バイオマスニッポン総合戦略以来各種の施策を進めているが、2020年のCO225%削減（90年比）の達成にも必要不可欠な技術である。
- ・資源作物の利活用は食糧と競合しない点に特徴があるが、藻類由来のバイオ燃料は、さらに、単位面積当たりの生産量が多いことに特徴がある。
- ・藻類由来バイオ燃料の研究開発はすでに日本でも開始されており、世界でも米国、オランダを中心に進んでいるが、生産性向上、製造コスト削減が重要である。マテリアルとしての藻類は注目に値すると考えられる。NEDO事業として「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用開発事業」が平成22年度から始まったが、この中で藻類に関する研究開発も進めていきたい。

## 第2回微細藻燃料分科会 講演会概要

8月2日 15:00~17:00

JX日鉱日石エネルギー(株)本社ビル

### ○微細藻類探索のポイントと課題

株式会社デンソー 基礎研究所 先端材料研究4室 主幹 蔵野憲秀様

#### 1. 微細藻類研究の歴史

- ・1978~1996 Aquatic Species Program (米国) DOE \$25million

3000以上の株を米国内の内陸塩水環境から収集。

油生産を目標にナイルレッドを用いたスクリーニングで有望株300(緑藻、珪藻)を選抜。

培養条件の最適化実施。

種々の気候条件や水質に適したオールマイティな株は得られず。

1995年当時、藻類の油は\$40~60/バレルと評価、原油は\$20/バレル。

- ・1990~2000 NEDO-RITE 生物的CO<sub>2</sub>固定プロジェクト(日本)

目標: 1gCO<sub>2</sub>/L/day の高効率光合成微生物・微細藻類の開発とそれを用いた50g-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day の高密度大量光培養システムの開発。

10000以上の株のスクリーニング→有望株7株を選抜(Botryococcus brauniiを含む)。

有用物質生産株も視野に(多糖類、高度不飽和脂肪酸、生理活性物質)。

鶏の飼料としてFS、¥300~400/kg、トウモロコシは¥30~40/kg。

#### 2. 探索・収集の実際の方法の紹介

#### 3. 課題

(藻類)

油分生産性が高い株の選択。

屋外の粗放的環境での培養(ストレス耐性、コンタミ耐性)株の選択。

収穫の容易な株の選択(藻体濃度が低いのでハンドリングすべき液量が莫大、自己凝集性等)。

通年培養可能性(培養可能温度等)の確保。

高付加価値産物(副生物)の評価。

(全体)

培養条件(安価培地、光供給、ガス交換、温度、pH、河川水利用、排水利用、夜間のバイオロス制御、コンタミコントロール)の最適化・低コスト化。

培養設備(材質、動力、廃水処理)の最適化・低コスト化。

回収、精製(安価収穫法、抽出、精製)の最適化・低コスト化。

## ○デンソーの取組みと農水プロジェクトの課題

株式会社デンソー 基礎研究所 先端材料研究4室 室長 渥美欣也様

### 1. デンソーの取組み

目的 CO2 を吸収しバイオ燃料化するシステムの構築  
短期的には社内燃料化、長期的には自動車燃料。

藻類 下記の2種類を選択、新株の探索も実施中。

	Pseudochoricystis ellipsoidea	Botryococcus braunii
特徴	軽油相当のオイル (C17、20) 体内に蓄積 30~40% MBI から権利譲渡	重油相当のオイル 体外に排出 60~70%
課題	殻が固く抽出難しい	生育速度遅い 大量培養難しい

リアクター評価 レースウェイ方式を選択。

	レースウェイ	チューブラー	パネル
藻体生産量 (t/ha/y)	~50	57~60	~70
エネルギー生産量 (GJ/ha/y) ①	1150	1350	1600
投入エネルギー量 (GJ/ha/y) ②	110~120	180	1214
エネルギー獲得量 (GJ/ha/y) ①-②	1035	1170	386
メンテナンス性	○	×	×

培養技術と分離回収技術が鍵。

### 2. 農水プロジェクトへの参画

- 革新的な CO2 高吸収バイオマスの利用技術の開発 (H22~23)

非組換え藻類を開放系で増殖、有用物質を回収利用。

中央大、京都大、中部大、お茶の水大、佐賀大、デンソー、トヨタ、豊田中研、マイクロアルジェ

愛知県西尾市（デンソー）、宮古島（マイクロアルジェ）でパイロット試験を実施中。

## ○NEDO プロジェクトについて

株式会社デンソー 基礎研究所 先端材料研究4室 主幹 蔵野憲秀様

### 1. Pseudochooricystis ellipsoidea について

- ・蔵野氏が MBI（海洋バイオテクノロジー研究所時代（2005年））に温泉から発見。
- ・至適温度 25℃、油分含量 20～30%（体内）、窒素（硫黄、りん）飢餓で油脂分生産。
- ・炭素数 17 と 20 Triacylglycerol:Hydrocarbon=2:1。

### 2. NEDO プロジェクト

- ・軽油生産能を有する単細胞緑藻の転写因子大量発現による生産性向上（H21～22）。

デンソー、中央大

窒素飢餓により油分生産が始まる機構でキーとなる NSR-TF（Nitrogen Starvation Responsive Transcription Factor）が平常時にも構成的に働くように遺伝子組換えにより改良する（通常の培養で油生産できる）。

## ○微細藻類研究企業から見る微細藻類研究開発の課題

株式会社ユーグレナ 代表取締役社長 出雲 充様

### 1. 藻類燃料化—パラメータ分析

- ・藻類燃料化に関しては経済合理性、CO<sub>2</sub> 収支、エネルギー収支のバランスの達成が必要。  
経済性 = 製造コスト × 生成油脂の質・種類 × 付加価値 （3パラメータ）。  
これらパラメータは、藻類の種・株、培養環境条件、培地、培養手法、培養設備、製品化手法の6因子より成り立つ。
- ・CO<sub>2</sub> 収支、エネルギー収支は LCA 評価を行う。

### 2. 藻類の燃料化—新株の獲得

- ・株の育種には遺伝子組換えが有用な手法だが、法規制とイメージの壁がある。
- ・しかし、経済合理性、CO<sub>2</sub> 収支、エネルギー収支のバランスの達成には必須。

### 3. 海外動向

- ・石油化学メジャーを中心に多数の企業が微細藻類バイオジェット燃料生産に参入しており、2010年代前半には商業生産への移行を目指している。
- ・米政府（DOE）は2008年に Argal Biofuel Consortium を結成し2020年までに藻類バイオ燃料の持続的商業生産体制の構築を目指している。
- ・それ以外にも他省庁と連携し予算拠出を行い、研究開発を助成している。

### 第3回微細藻燃料分科会 講演会概要

平成22年9月3日 15:30~17:45

JX 日鉱日石エネルギー(株)本社ビル

#### ○微細藻利用における技術課題とビジネスモデル構築

東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科 中村宏先生

##### 1. 微細藻類バイオマス利用の特長

- ・利点として、陸上植物に比較しての生産性の高さ、荒廃地の利用、穀物生産に競合することなく大量生産可能、堆肥は必要なものの連作障害がないこと、残渣の有効利用が図れること等が挙げられるが、反面、課題も多く、研究開発が容易ではない。
- ・CO<sub>2</sub>固定の対価は固まっておらず、エネルギー利用は安価。しかし微細藻類は、生理活性物質、色素等高付加価値の副産物が提供できる。ここが事業化のポイントではないか。

##### 2. 過去の経緯

- ・第一次ブームの2000年頃までの国内の研究は、CO<sub>2</sub>削減の観点を中心に高増殖微細藻類・微生物獲得、炭化水素の生産、水素の生産等についてなされた。
- ・1980年から2000年までにかけられた研究費は膨大だが、論文は少ない(ノウハウの多くは民間企業内に留まっている)。現時点では事業化されたものがないので、問題になっていないが、過去の特許等知的財産権の侵害に注意する必要有り。

##### 3. 技術的な課題

- ・大量培養の実用化面での難点として、屋外の培養は雑菌や雑藻による汚染が致命的であり十分な注意が必要。閉鎖系のバイオリクターも考える必要がある。
- ・細菌や酵母に比べ増殖速度が速いが、早くても弱いものは利用できない。
- ・藻体濃度が低いため分離回収に多量の液量処理が必要。
- ・技術のサプライチェーン上で大量培養、回収、抽出のキー技術を握ることが重要。
- ・全工程のエネルギーとCO<sub>2</sub>とコスト面からの解析が必要。そこから技術開発の課題に落とし込むべき。

##### 4. 海外動向

- ・米国ではエクソンモービルは6億\$投資を決定。
- ・サファイアエナジーは、DOEから補助金5,000万\$、農務省から5,500ドルの政府保証を受ける予定。現在300エーカーの培養サイトの建設に入り、9月には完成予定。  
一方、グリーンフューエルテクノロジー社が倒産、ペテロアルジェ社は売上げ無しで、株価が1,500億円に達している等一部投資案件化している等、若干の危惧がある。



○「石油」を作る微細藻類 -*Botryococcus braunii* による炭化水素生産-  
東京大学大学院農学生命科学科水圏天然物化学研究室 岡田茂先生

1. *Botryococcus braunii* の特徴

- ・長所として、炭化水素含量が非常に高い、炭化水素の質が原油に近い、炭化水素を細胞外に蓄積することが挙げられるが、反面、増殖速度が非常に遅く、また屋外培養においては、他生物による汚染が問題となる。
- ・蓄積する炭化水素のタイプにより、A 品種 (Alkadienes, Alkatrienes 系)、B 品種 (Botryocossen, Tetramethylsqualene 系)、L 品種 (Lycopadiene 系) に分類できる。
- ・A 品種は細胞内外で生成される炭化水素の組成は変わらない。B 品種は同じ株でも成長段階により炭化水素組成が異なり、更には細胞内外で生成される炭化水素の組成も異なる。これは、炭素数 30 の前駆体が細胞内で作られメチル化等の修飾を受けながら外へ出される為と考えている。

2. 炭化水素回収

- ・炭化水素の大部分を細胞外マトリックスに蓄積しているが、回収は容易ではない。細胞に有害でなく抽出効率の良い有機溶媒の選定が必要。n-ヘキサンや超臨界 CO<sub>2</sub> による抽出が検討されている。
- ・特に最近行われた抽出法として、電中研の DME、筑波大学渡邊先生の低沸点 (32°C) 有機溶媒によるミルクキング、また重力を利用したネットろ過による脱水と風乾および油圧プレスによる搾り出し等がある。

3. 今後の展望

- ・優れた増殖特性を持つ株の確保、遺伝子組換え等のバイオテクノロジーの利用、低コスト炭化水素回収法の生化学分野外の技術との連携による開発が期待される。

## 第4回微細藻燃料分科会 講演会概要

9月29日 15:00~17:30

JX日鉱日石エネルギー(株)本社ビル

### ○微細藻類の飼料利用に関する期待と課題

伊藤忠飼料株式会社 原料部 配合・管理チーム兼水産食品部 郭 鋒様

#### 1. 水産用飼料市場の概要

- ・世界の水産養殖生産量は6670万トン(魚種約220)で8.5%の成長率が1985年から続く。
- ・水産物生産量全体に占める割合も4%(1970)から36%(2006)に増加。
- ・アジア、特に中国の淡水魚養殖が増加中。
- ・世界の水産用飼料の生産量は5700~7200万トン/年(推定)。
- ・欧州210万トン、日本60万トン、他は統計データなし。
- ・欧州は市場成長率が高く、専門メーカーが多く、海外への販売も多い。
- ・日本は市場成長率低く、複合メーカーが多く、それぞれの生産量は少なく国内向け中心。

#### 2. 水産飼料の概要

- ・水産飼料は、魚種特異性があり、種類形態が豊富で、製品レベルが千差万別。  
栄養性、高い利用性、安全性、機能性、物性、イメージが求められる。
- ・淡水魚の飼料は安価なものが多く、海水魚は高価。
- ・肉食魚の主要な飼料原料である魚粉の生産量は減少し、価格は上昇。
- ・魚粉代替品の多くは問題点も多いが、トウモロコシ残渣(DDGS)と微細藻類は期待できる。

#### 3. 微細藻類の利用

- ・微細藻類はすでに色揚げ用、稚魚のえさのワムシ生育用に用いられている。
- ・クロレラ、ユーグレナが高度不飽和脂肪酸含量が多い。
- ・魚粉(蛋白源)の代替、高度不飽和脂肪酸供給源、色素原料としての利用は期待できる。
- ・価格と安定供給、細胞壁による利用性の悪さの克服、目的と用途に応じた生産が課題。

#### 4. 法規制について

- ・国内 飼料需給安定法、飼料の安全性の確保及び品質の改善に関する法律。
- ・欧州 欧州食品安全機関(EFSA)が食品や飼料に関するリスク評価を行い、安全性について欧州委員会等に科学的助言を行う 飼料添加物=食品添加物、という考え。  
審査請求→EFSA 審査→各国法律制定→使用、天然もので食経験があれば基本的にOK。
- ・米国 食品医薬品局(FDA)が法律施行 飼料添加物=食品添加物、という考え。
- ・遺伝子組換え飼料については、日本>欧州>米国で規制は厳しい。

以上

産業競争力懇談会（COCN）

東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 6 号 〒100-8280

日本生命丸の内ビル（株式会社日立製作所内）

Tel : 03-4564-2382 Fax : 03-4564-2159

E-mail : cocn.office.aj@hitachi.com

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 中塚隆雄