

平成23年度農山漁村6次産業化対策事業

農山漁村における藻類バイオマスファームの
事業化可能性調査報告書

平成23年度農山漁村6次産業化対策事業に係る
緑と水の環境技術革命プロジェクト事業

2012年3月

藻類産業創成コンソーシアム

農山漁村における藻類バイオマスファームの 事業化可能性調査報告書

平成23年度農山漁村6次産業化対策事業に係る
緑と水の環境技術革命プロジェクト事業

編集責任者

筑波大学 生命環境系 教授 井上 勲

筑波大学 生命環境系 教授 渡邊 信

筑波大学 生命環境系 教授 彼谷 邦光

ジェイ・フェニックス・リサーチ株式会社 代表取締役 宮下 修

はじめに

再生可能エネルギーの開発に関する議論が盛んですが、液体燃料確保の視点が欠けていると感じています。電気は、太陽電池や風力など、さまざまな方法で作ることができますが、液体燃料を作れるのはバイオマスだけです。バイオマスエネルギー開発には、液体燃料の確保と石油化学産業の原料の確保という二つの面があり、他のエネルギー資源とは異なる視点で議論することが必要だと思います。オイル生産能力が陸上植物に比べて数十倍から数百倍にも達すること、そして食料生産との競合が少ないことから、第三世代のバイオマス資源として藻類が注目されています。しかし、エネルギー資源としての藻類の可能性については、依然として意見が分かれています。まずは、藻類をエネルギー資源として活用できるのか、基本的な問いへの解答が必要です。そして、もし産業化の可能性が論理的に明らかになれば、技術とコストの両面から克服すべき課題を明らかにし、実用化までの技術開発ロードマップを策定することが必要になります。

ここに、農林水産省、平成 23 年度農山漁村 6 次産業化対策事業「農山漁村 6 次産業化対策に係る緑と水の環境技術革命プロジェクト事業」の助成を受けて実施した「農山漁村における藻類バイオマスファームの事業化可能性調査」の報告書をお届けできることを、大変幸せに思っています。内外の研究開発の動向を調査し、今後とるべき研究開発の方向や国の施策、民間の取り組みのあり方を論じ、藻類エネルギー開発の方向性を提案する、わが国ではじめてとよい資料ができたと思っています。調査目的は、農山漁村で藻類を活用する第 6 次産業の可能性を考えることでしたが、基盤的情報データベースが存在しないことから、実際には、内外における研究開発の歴史と現状に関する資料収集から始まりました。資料の分析と課題の抽出、ロードマップの提示に至る過程では、専門や立場の異なる多くの方々に参加して議論が進みました。

本事業の過程で改めて強く感じたことは、藻類産業の実現には、あらゆる研究、産業分野の知識と技術の結集が不可欠ということでした。藻類産業の創出は、有用な藻類種の探索、培養株の確立、育種にはじまり、大量培養、濃縮、回収、エネルギー物質、有用物質の抽出、精製、それらの産業用途の開発まで、生物学、化学、工学と経済学の基礎から応用までの知識と技術をシステムに統合していくプロセスに他ならないと思います。藻類産業という新たな産業の創出には、これまでにない包括的、網羅的な視野と視点、そして、多様な知識や技術の統合を制御、管理することが求められます。本報告書は、そのような包括的、網羅的な視野と視点をもって作成することができたと思自負しています。それを可能にしたのは、藻類産業創成コンソーシアムが極めて多様な組織と個人で構成されていることによります。タスクフォース (TF) では、それまで接する機会さえなかった多くの研究、技術分野の研究者、技術者が会し、議論が進みました。異なる分野の考え方や視点に接することは新鮮な驚きで、互いに多くを学ぶことができたと思っています。この体験は、将来、藻類産業化のプロセスを進める上で確実に役に立つと信じています。

調査、分析が多岐にわたり、当初の予想より進捗が大きく遅れました。そのために、関係省庁に参加を依頼したアドバイザーボードの開催が不可能になり、報告書最終案へコメントをいただくことで、ボード開催に代えることでお許しいただくことにいたしました。お詫びを申し上げるとともに、コメントをいただいたアドバイザー様に感謝を表します。

最後に、本事業をご支援いただき、事業の遂行にご指導をいただいた農林水産省食料産業局新事業創出課の皆様、調査と分析の中心を担っていただいたジェイ・フェニックス・リサーチ社の宮下様、TF 座長の皆様、そして、TF にご参加いただいた多くの会員の皆様、パブリックコメントに代わるアンケートにご協力いただいたすべての会員の皆様に感謝を申し上げます。藻類産業創成コンソーシアムの多様性を抜きには、本事業の遂行はできませんでした。

本報告書が、わが国における藻類産業創成の一助になることを願ってやみません。

藻類産業創成コンソーシアム
理事長 井上 勲

目次

要約と結論.....	1
序章: 本報告書の趣旨と構成.....	2
1. 再生可能エネルギーの重要性.....	2
2. 再生可能エネルギーにおけるバイオマスエネルギーの意義.....	6
3. バイオマスエネルギーとしての藻類の意義.....	7
4. 本調査の構成とゴール.....	11
5. 藻類エネルギー産業文献調査における留意点.....	14
第一章 技術バリューチェーン調査と事業化への論点整理.....	17
1. 本報告書の調査フレームワーク.....	17
2. 藻類バイオマスの潜在的魅力(可能性)の把握.....	20
2.1. 概要.....	20
2.2. わが国における潜在的生産規模推計の試み.....	23
3. 現在の技術による LCA 分析からの示唆.....	24
3.1. 概要.....	24
3.2. 結論.....	33
4. バリューチェーン別の課題把握.....	37
4.1. 6つのバリューチェーンの事業化へのつながり.....	37
第二章 わが国の現状と課題の整理.....	39
1. わが国の現状と課題.....	39
1.1. 産業競争力懇談会の取り組みについて.....	40
1.2. 理想の連携の仕方を目指して.....	43
2. 利害関係者共有の課題認識の促進における海外事例.....	46
2.1. 米国における先進事例: 米国エネルギー省を中心とする取り組み.....	46
2.1.1. 研究段階の動き.....	47
2.1.2. 実証段階の動き.....	50
2.1.3. 多種多様な利害関係者との連携での事業化を実践する Solazyme 社の最新の動き.....	51
2.2. 欧州における先進事例: フランス.....	55
2.3. アジアにおける先進事例: 韓国 KAIST.....	55
3. わが国の研究・技術蓄積の個別事例.....	56
3.1. 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」.....	56
3.2. 藻類バイオマス研究開発の現状.....	58

第三章 事業化への技術ロードマップと当コンソーシアムの貢献の可能性	62
1. 藻類バイオマス関連技術	62
1.1. 概要	63
1.2. バイオエネルギー生産に活用されている藻類	64
1.2.1. メタンとアルコール	64
1.2.2. 水素生産	65
1.2.3. 藻類オイル	66
1.2.4. 産業で活用されている微細藻類	68
2. 藻類大量生産関連技術	72
2.1. 主な培養システムの利点と課題	73
2.1.1. 光合成培養	73
2.1.1.1. オープンポンド	75
2.1.1.2. フォトバイオリアクター	76
2.1.2. 従属栄養培養	77
2.2. 主な論点の整理	77
2.2.1. 光合成培養	78
2.2.2. 従属栄養培養	79
2.2.3. 光合成培養と従属栄養培養に共通する論点	79
3. 藻類濃縮・収穫関連技術	79
3.1. 微細藻類の濃縮・収穫	80
3.1.1. 凝集沈殿	81
3.1.2. 遠心分離法	81
3.1.3. 濾過法	82
3.1.4. 濃縮・収穫のベストミックスシステム	83
3.1.5. 排熱を利用した濃縮・収穫	83
3.1.6. 基礎研究段階にある技術	83
3.2. 大型海藻類	83
3.3. 液分の処理	83
4. 藻類抽出・精製関連技術	84
4.1. 主な抽出技術	84
4.2. 藻類からのオイル抽出に適した方法例	85
4.3. 乾燥と脱水	85
4.4. 用途によるオイルの精製法の違い	85
5. 藻類用途関連技術	87
5.1. 藻類オイルの燃料化	88
5.2. 工業原料としての藻類オイル	88

5.3.	健康食品および化粧品への利用.....	89
5.4.	藻類オイル以外の藻類の有用成分	89
5.5.	最終残渣の利用.....	90
6.	事業評価における論点.....	92
6.1.	優先順位.....	93
6.2.	資本集約性および経済評価指標の検討.....	93
6.2.1.	一般的な経済性評価のフレームワーク	93
6.2.2.	藻類バイオマスファームの特徴を踏まえた経済性評価:EVA の利用の意義.....	102
6.3.	品質保証・標準化.....	106
6.4.	NER・二酸化炭素排出量削減効果・経済性・供給安定性からの藻類バイオマス産業の 事業化への評価.....	108
7.	事業化へ向けた技術ロードマップ	108
7.1.	藻類バイオマスファーム産業発展の理想の姿.....	109
7.2.	藻類バイオマスファーム産業発展に向けた当コンソーシアムの貢献の可能性.....	110
7.3.	技術ロードマップ	111
7.4.	技術ロードマップにおけるコスト目標の目安	115
第四章	農山漁村バイオマスファームの事業性について.....	116
1.	経済性からの検討.....	116
2.	関連規制からの検討.....	118
3.	バーゲニング・パワーの視点からの検討.....	119
4.	まとめ.....	119

要約と結論

1. 産業革命以来の人類の繁栄を支えてきた豊富な化石燃料は、藻類をはじめとする植物が生み出したバイオマスが地下に埋没し、数千万年～数億年をかけて炭化水素に変成し蓄積されたものである。その恵みを人類はわずか数百年で枯渇させる勢いで消費し、同時に地下に固定されていた炭素をCO₂として大量に放出し、地球温暖化と異常気象を引き起こしていると考えられている。
2. 21世紀において、石油資源のピークアウトはすでに現実化し、人口大国の新興国の目覚ましい経済発展を背景に全世界が資源獲得を巡って争う資源獲得競争時代が来ることは避けられない。国内のエネルギー資源の自立が特に遅れている日本が繁栄を続けるためには、化石燃料代替エネルギーの開発が喫緊の課題である。また、持続可能な社会を築くには大気中の炭素を固定しエネルギー資源の中に取り込んでいくことが必要であり、地球規模の炭素循環に中立的なエネルギー資源の開発が重要な課題となっている。
3. 全エネルギー需要を国内生産で賄えなくとも、狭い土地で資源に乏しい日本国内において、炭素循環に中立的な化石燃料代替エネルギーの生産技術を確立することは、新産業育成・雇用創出に寄与するだけでなく、日本の世界的な地位向上に寄与し、国際的な資源獲得競争において取引条件交渉力(バーゲニング・パワー)の向上に大きく寄与すると考えられる。
4. 以上の視点から、オイル生産性が高く、気体、液体、固体と多様な形態の燃料やエネルギー密度が高い燃料を生産できる藻類バイオマスによる再生可能エネルギーの事業化が、世界的に注目されている。本報告書では、藻類バイオマスについて、最新の文献調査にもとづき、①産出されるエネルギー量が投入されるエネルギー量を上回る見通し、②「炭素を循環させる仕組み」の確立への寄与、③産業規模のエネルギー生産の可能性、④経済性を伴う事業化の見通しについて整理し、日本が事業化・産業化に本格的に取り組むべきか、評価を行った。
5. ①については、現在の技術でも産出されるエネルギー量が投入されるエネルギー量を上回る見通しが高いこと、②については、CO₂排出量削減効果から、「炭素を循環させる仕組み」の確立に寄与することが確認された。また、③については、藻類の高いバイオマス生産性から、日本でも相当量の燃料生産が可能であることが確認された。④については、短期的に下水処理への応用や高付加価値副産物の生産によって達成できる可能性が確認された。
6. 以上を踏まえ、本格的産業化への技術的課題について、既存知見・技術の応用(3-5年後の実用化)、研究・開発中の新知見・技術(5年後より実証、-10年後の実用化可能性)として整理し、関連する利害関係者の共通の課題認識を築くために、多種多様な利害関係者の関わり方、産官学間の連携の仕方、今後10年にわたる技術ロードマップのアウトラインを提示した。
7. それらの論点を踏まえ、最後に農山漁村における藻類バイオマスファームの事業化に向けた経済性の評価、および事業化に必要な最適な規制体系の在り方について見解を提示した。
8. 本報告書が藻類バイオマスに関心のあるすべての関係者において、より建設的な議論形成に寄与するための基盤となることで産業発展を促進する推進力となれば幸いである。

序章:本報告書の趣旨と構成

1. 再生可能エネルギーの重要性

産業革命以来の人類の繁栄は石油、石炭、天然ガスなどの豊富な化石燃料資源の活用によって支えられてきたといっても過言ではない。図0-1は、化石燃料消費量と人口の関係を示している。人類は、採掘が容易で安価なエネルギーを手にすることで、かつてない発展をとげ、急速な経済の発展は人口の急激な増加(人口爆発)をもたらした。この図は、経済の発展と人口爆発が化石燃料の大量消費によってもたらされたことを明白に示している。

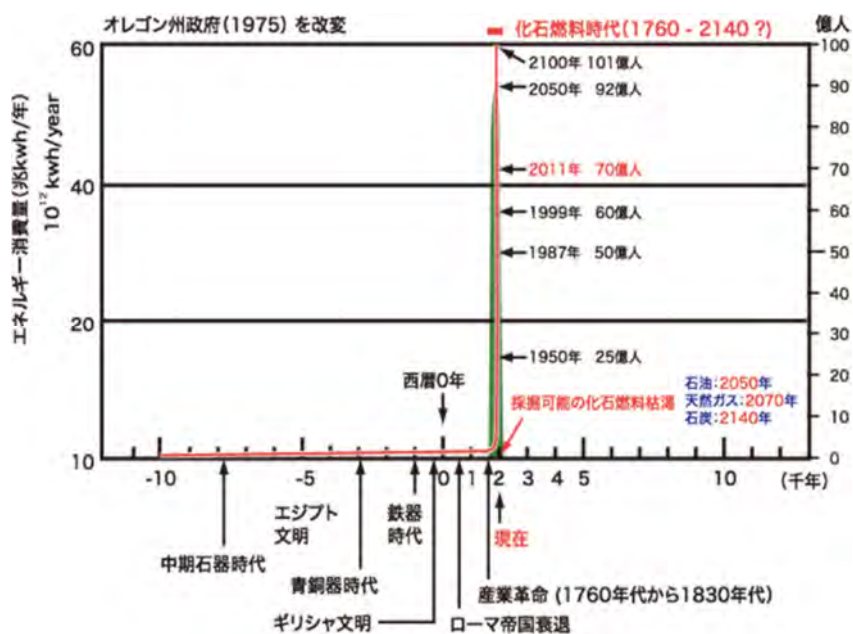


図 0-1 化石燃料の消費量と人口爆発の関係

豊富な化石燃料は、藻類をはじめとする植物が生み出したバイオマスが地下に埋没し、数千万年～数億年をかけて炭化水素に変成し蓄積されたものである。地球と生物が数億年をかけて蓄積してきた恵みを人類はわずか数百年で枯渇させる勢いで消費しているのである。

逆に考えれば、採掘可能な化石燃料が枯渇すれば、経済と人口の維持が直ちに破綻することを意味している。今後在来型の石油の生産量がピークアウトして石油の価格が高騰していくことが予想される。このような状況の変化は資源保有国における資源ナショナリズムの台頭とエネルギー資源をめぐる国家間の争いの増加をもたらすと思われる。採掘可能な石油の枯渇まで40年という試算もある。中国やインドをはじめとする人口大国、新興国において経済発展が進む中で、エネルギー資源をめぐる争いはますます激化することが予想される。

石油資源のピークアウトは、すでに現実化している。IEA(国際エネルギー機関)は、図0-2で示したように2010年11月に「すでに発見された油田による石油生産は2006年に“ピークアウト”した」ことを認めているⁱ。リーマンショック以降の景気減速により、世界の経済成長が減速したために、この問題は一般社会で顕在化することはなかったが、すでに在来型の石油資源の生産がピークアウトしたのであれば、石油資源をめぐる争いが激化していくと認識しなければならない。日米欧の先進国が地下資源を独占的に利用していた20世紀と異なり、21世紀は人口大国の新興国の目覚ましい経済発展を背景に、全世界が資源獲得を巡って争う資源獲得競争時代となることを想定しておかなければならない。主要先進国の中で、わが国は国内のエネルギー資源の自立が特に遅れている。日本が21世紀に繁栄を続けるためには、化石燃料代替エネルギーの開発は喫緊の課題である。

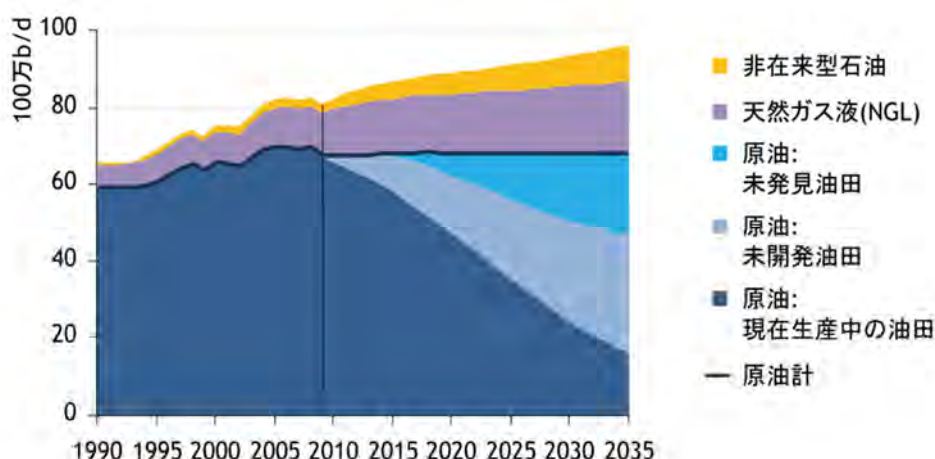


図 0-2 石油生産のピークアウト

在来型の石油生産がピークアウトを迎えた後の資源獲得競争として、3つのシナリオを想定することができる。第一は、従来の方針を踏襲し原子力発電を継続的に活用することである。しかし、昨年3月の福島第一原子力発電所事故によって危険性が広く認識され、世界有数の地震国であるわが国では、国民の多くが原子力の継続的利用に不安を訴えている現実がある。同時に、使用済燃料棒の処理と数千年～数万年という保管にかかる時間と膨大な費用の問題も、原発事故をきっかけに環境問題と関連して議論されるようになった。福島原発事故の当事者であるわが国では、現在、原子力発電のほとんどが停止する状態に陥っており、今後のエネルギー供給の主力を原子力に求めることは極めて困難な状況にあるといえる。

第二は、従来の油田やガス田ではない場所から採取される、いわゆる非在来型の化石資源の

ⁱ http://www.jbic.go.jp/ja/about/topics/2010/1217-02/101116_weo_ia.pdf

開発である。特に石油に比べて、分子組成において炭素の割合が半分程度でCO₂削減効果も期待できる天然ガス資源の開発が注目されている。代表的なものは、頁岩(シェール)層から採掘されるシェールガスや、永久凍土の地下や海底500メートルの低温高圧環境の中で、メタン分子が水和し、結晶の形で存在するメタンハイドレートであるⁱ。資源エネルギー庁(2012)ⁱⁱによれば、「推定される既発見油ガス田の埋蔵量成長や今後発見が予想される在来型の石油・天然ガスの資源量、超重質油やシェールガス等の非在来型の石油・天然ガスの期待可採量を含めれば、石油・天然ガスともに可採年数は約4倍となる」とされる。

しかし、シェールガスもメタンハイドレートも地下資源であることに変わりはなく、長期的に見れば枯渇していく。また、新興国の経済発展に伴って、可採年数は想定以上に減少するリスクも否定できない。さらに、二酸化炭素放出量が石油よりも少ないとはいえ、天然ガス資源を燃焼させることは、地下に貯蔵されていた炭素をCO₂として大気に放出する点で石油と何ら変わらない。ここで認識しておかなければならないことは、エネルギー問題は、同時に地球温暖化、気候変動問題でもあるということである。2007年IPCC(気候変動に関する政府間パネル)は第4次評価報告書ⁱⁱⁱで、進行している地球温暖化は人類の活動に起因することをほぼ確か (most likely) であると認めた。さらに、今年3月、IPCCは「気候変動への適応推進に向けた極端現象と災害のリスク管理に関する特別報告書^{iv}」を正式に発表した。地球温暖化と異常気象の関連が明確に指摘され、今後異常気象の深刻化が予想されるというものである。こうした異常気象への適応が求められている。持続可能な社会を将来の世代に残すという大きな目標から考えれば、エネルギー問題には大気中の炭素を固定しエネルギー資源の中に取り込んでいく「炭素を循環させる仕組み」の確立が重要な視点となる。すなわち、地球規模の炭素循環に中立的なエネルギー資源を開発することは、将来に渡って持続可能な社会の構築を目指す人類にとって避けて通れない重要な課題である。

以上のように、非在来型の化石資源の開発では、人類が直面しているエネルギー危機と環境保全や地球温暖化防止という複合的な課題の解決につながらないことは明白である。これらの諸課題を解決するためには、第三の取り組み、再生可能エネルギーの開発を推進することが不可欠である。

再生可能エネルギーとは、エネルギー供給構造高度化法^vで「エネルギー源として永続的に利用することができる」と認められるもの」と定義されている。また資源エネルギー庁は、再生資源エネ

ⁱ 化石燃料の現状と課題、平成24年2月、資源エネルギー庁:

<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/13th/13-8.pdf>

ⁱⁱ 同上

ⁱⁱⁱ <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html>

^{iv} Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: <http://www.ipcc.ch/>

^v エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律

ルギーを「資源が枯渇せず繰り返し使え、発電時や熱利用時に温室効果ガス削減への寄与の原因となる二酸化炭素をほとんど排出しない優れたエネルギーⁱ」としている。再生可能エネルギーで化石エネルギーを代替することでのみ、エネルギー資源枯渇問題及び地球温暖化問題の解決が可能になる。

ここで、独自の再生可能エネルギーを開発することが、わが国にとって国際交渉力のカードとなるバーゲニング・パワー (bargaining power) の獲得という意味を持つことを指摘しておきたい。再生可能エネルギーは、地下資源に左右されることなく、基本的に適切な自然エネルギーと必要な技術と土地があれば、わが国でも自立した形で生産することができる。

資源のないわが国が、独自のエネルギーを生産する能力を持つことは、資源獲得競争時代において外交交渉力を向上させるために極めて重要である。単純な比較は困難であるが、あえてわかりやすく例えるならば、財務体質に脆弱性のある企業が、生命線である資金力についていざというときに銀行から優先的に緊急融資してもらうことを担保する契約、いわゆるバックアップラインを設定し、いつでも必要最低限の資金を確保できるようにすることに類似している。その場合、多少手数料が高くても企業の生命線を確保できるのであれば、バックアップラインを設定することは経営判断として十分に考えられる。特に金融引き締め等により、資金獲得競争が激化するのが予測されるのであればなおさらであろう。国家の生命線であるエネルギーについても類似の状況が想定できる。災害や戦争など、国が不測の事態に遭遇した場合、石油備蓄がなければ国家の生命線を資源保有国に握られることは想像に難くない。通常時においてさえ、十分な石油備蓄を持たないことが、国際交渉力の低下をもたらす一因になっている可能性は否定できない。国際的な資源獲得競争が加速している現在、そのリスクは益々高まっており、幅広い視点で自立したエネルギー資源の開発に取り組むことは重要な国家的課題といえる。

バーゲニング・パワーを持つという視点に立てば、国内のエネルギー消費量の一定の比率を国内で生産できるということは、経済性以上の重要な意義を持つといえる。

エネルギー資源の大半を海外に依存し、エネルギー自立の有力な政策であった原子力政策の見直しが迫られているわが国が、長期的な視野で再生可能エネルギーの技術を蓄積し、いざというときに国内でエネルギー生産を拡大できる能力を諸外国に対して明確に示すことは、長期的な国家間のパワーバランスを考える上で非常に重要である。開発コストが短期的には高くついても、長期的な技術開発で改善できる可能性があれば、国内で生産できるエネルギー資源の開発投資を行うことは十分に妥当な判断となりうる。財務体質に脆弱性のある企業が長期的な視点でバックアップライン設定に手数料を支払うことと類似の判断といえる。再生可能エネルギーの開発は、エ

ⁱ 経済産業省 資源エネルギー庁ホームページ:
<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/renewable/index.html>

エネルギー安全保障とバーゲニング・パワーの観点から検討すべき課題といえる。

2. 再生可能エネルギーにおけるバイオマスエネルギーの意義

エネルギー供給構造高度化法では、太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱、その他の自然界に存する熱、そしてバイオマスが再生可能エネルギーと規定されている。産出されるエネルギーは、物理的エネルギー、化学的エネルギーとさまざまである。また、安定性、効率性、蓄積可能性、エネルギー密度、輸送の容易さなどの点でもそれぞれ特徴を持ち、相互補完的な役割をもつ可能性もあることから、それぞれの特徴を生かした研究開発、事業化の推進が望まれる。

この中でバイオマスによる再生可能エネルギーは、①二酸化炭素を固定する、②化学エネルギーとして備蓄・運搬が可能、③液体、気体、固体のすべての形態で利用可能、④液体燃料として利用する場合の既存液体燃料の施設および技術を適用可能、⑤高いエネルギー密度の資源が生産可能、などの優れた特徴を持つ。

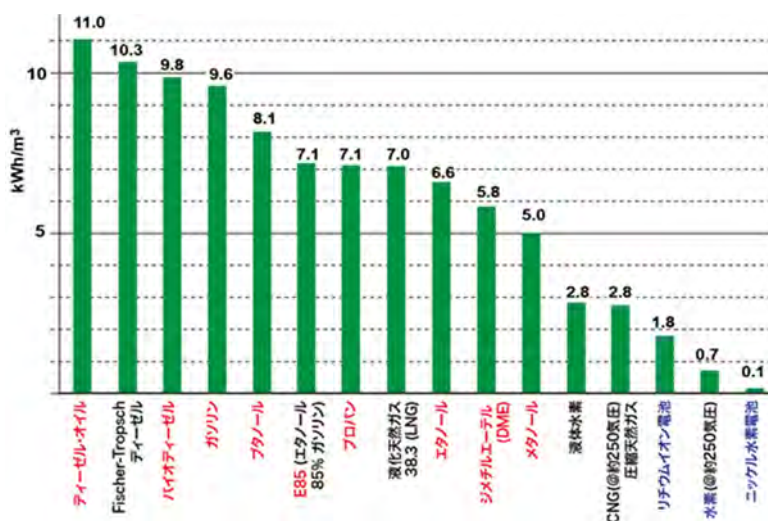


図 0-3 各種蓄積可能な化学エネルギーのエネルギー密度

5つの特徴の中、③の特徴について具体的に述べると、液体としては、バイオディーゼル(脂肪酸とアルコールのエステル)、炭化水素系液体燃料(重油、軽油、ガソリン、ジェット燃料)、バイオエタノール、気体としては、水素、メタンガス、固体としては、バイオマスそのものの燃焼、ペレット化による燃焼による利用が技術的には可能である。

⑤のエネルギー密度に関して、既存の化石エネルギーや蓄電池のエネルギー密度を示したのが、図0-3ⁱである。液体燃料のエネルギー密度が高いことがわかる。この中で、赤字で示したもの

ⁱ ISAF XV International Symposia on Alcohol Fuels 2005, Future Fuel Feedstocks and Properties – Utilization Issues, <http://www.eri.ucr.edu/ISAFXVCD/ISAFXVPP/FFFPUI.pdf>

はバイオマスから生産可能なエネルギーである。ディーゼルオイル、バイオディーゼルやガソリンなどはこれらの資源の中でも高密度のエネルギー資源であることがわかる。

例えば、ジェット機を飛ばすには高密度のジェット燃料が必要であり、そのような高密度のエネルギーを再生可能エネルギーで生産できるのは、現状ではバイオマスエネルギー以外には想定できないⁱ。

EUは、EU諸国で離着する飛行機に2020年までにバイオマス由来の燃料を10%含む燃料を使用することを求めているⁱⁱ。わが国から欧州へと飛行するジェット機は、2020年までにバイオ燃料10%を含むジェット燃料を恒常的に確保する必要がある。資源獲得競争が激しくなる中で、海外からの購入や生産に頼るだけでなく、国内の経営資源で大規模に生産できるバイオ燃料を開発することは極めて重要な意義をもつといえる。

冒頭に述べたように化石燃料は、過去数億年かけて藻類をはじめとする植物が数億年かけて蓄積してきたストック資源である。このことから、バイオマスエネルギーを再生可能エネルギーとして利用することは、数億年かけてきた積み重ねられたバイオマスから化石燃料への動きを人類が自らの手で再生させるという意義をもつといえる。

3. バイオマスエネルギーとしての藻類の意義

再生可能エネルギーとしてのバイオマス資源は、大きく第一世代から第三世代に分類される。第一世代バイオマスはトウモロコシやサトウキビ、大豆など食用植物で、2000年あたりからアメリカやブラジルでバイオマスエネルギーとして利用されている。2004年から2008年にかけて、アジア諸国を中心にエネルギーの需要が大幅に増えたことで、原油価格が高騰し、穀物や食用油脂植物の燃料への利用が進んだ。その結果、トウモロコシや大豆の価格が上がり、食糧価格の高騰を招いた。この動きは国際的な批判を受けて、農産物と競合しないバイオマス資源の開発が求められるようになった。

こうした動きを受けて開発されたのが、第二世代バイオマスである。第二世代では、食料と競合せず、また農産物と土地の使用で競合しないバイオマスが重視された。そこで、原材料に木材、草丈の長い草本や森林・作物残渣を使うものが開発された。具体的には、麦わらなどの農業廃棄物、農作物が育たない土地でも育成可能なスイッチグラスやアブラヤシである。しかし、一部の植物については広大な土地が必要であるため、森林伐採、農地変換が進み、さらには農作物との水資源

ⁱ Fischer-Tropsch法により、H₂とCOからディーゼルオイルを合成できる。ただし、天然ガス等化石エネルギーから合成することが多いのでCO₂削減にはつながらない。

ⁱⁱ Japan Petroleum Energy Center News 2011.11:
<http://www.pecj.or.jp/japanese/jpecnews/pdf/jpecnews201111.pdf>

の競合などの問題が顕在化した。

そこで、土地や水資源の制約の少ない第三世代のバイオマス資源として近年注目を浴びているのが、藻類バイオマスである。藻類は、オイル生産効率の高さ等から土地の制約が他のバイオマスよりもはるかに低い。詳細は後述するが、単位面積あたりのオイル生産性では、トウモロコシや大豆の100倍以上、アブラヤシの10-20倍に達する。

また、藻類は、海水、淡水、汽水、排水、下水などきわめて多様な水資源を利用して培養することが可能であり、水資源の制約が他のバイオマスと比較して非常に小さい。平らな土地と水があれば、基本的にどこでも培養可能である。オイル生産性の高さは潜在的には単位面積あたりの生産性の高さに寄与する。したがって、国土の狭いわが国においてエネルギー安全保障上の視点で事業化する場合は特に重要な特性といえよう。藻類には、光合成と同時に有機物を利用する混合栄養性の種や、有機物のみを利用する従属栄養性の種も存在する。排水などの廃棄有機化合物を利用してエネルギー化することは炭素のみならず、窒素やリンなどの地球規模の循環に貢献するという意味でも極めて重要であり、エネルギー資源としてのみならず、資源循環利用における藻類バイオマスの高い潜在力を示している。

なお、本事業の対象を超えた議論になるが、リンの回収循環過程を構築することは、食糧生産と関連して極めて大きな意義を持つ。現在、リン鉱山から採掘したリンから作られるリン肥料で農業が成り立っているが、農作物に取り込まれたリンは人間や家畜に消費され、最終的に排水に移動する。排水中のリンが環境に出ると湖沼、沿岸海域の富栄養化をもたらシアオコや赤潮発生の原因になることから、下水処理場において除去され、最終的に余剰汚泥に蓄積されて焼却処分される。つまり、現在、リンは循環することなく廃棄されている。2060年には経済的に採掘できるリンが枯渇するという試算もあるⁱ。細菌などの微生物を用いて余剰汚泥からリンを回収する研究開発が進められているⁱⁱ。リン鉱山枯渇問題は、石油枯渇問題と並ぶ極めて重要な問題であり、一般にリンを過剰に蓄積する性質をもつ藻類は、エネルギー資源としてのみならず、リンの回収・リユースにも利用することができることから、リン枯渇問題への対応という意味でも極めて重要な役割を果たすといえる。

以上の議論をまとめると、図0-4のようになろう。

ⁱ Valsami-Jones, E. 2004. Phosphorus availability in the 21st century:
<http://www.nhm.ac.uk/mineralogy/phos/p&k217/steen.htm>

ⁱⁱ 黒田ほか Journal of Environmental Biotechnology Vol. 4, No. 2, 87-94, 2005



図 0-4 再生エネルギー資源の重要性と藻類バイオマス資源の意義

バイオマスエネルギー生産の流れとして藻類バイオマス資源の位置づけを示したのが、図0-5 バイオマスエネルギー生産の比較と藻類バイオマス資源の意義である。すべての出発点は、太陽光である。陸上植物、藻類は、太陽光のエネルギーを利用して、光合成により二酸化炭素を固定し、窒素、リンなどの栄養塩を利用しながら、脂質(炭化水素を含む)、炭水化物、炭化水素、タンパク質等の有機化合物および高分子の代謝物を産出していく。

光合成に由来するさまざまな有機物を人間が使いやすいように、メタン、アルコール、炭化水素、バイオディーゼルに変換していくのがバイオマスを利用した再生可能エネルギーの生産過程である。バイオマスには、人間を含む動植物に一旦食用として利用されたり、各種産業プロセスで利用された後、廃棄される有機物も含まれる。有機廃棄物をバイオエネルギーに変換するためには、従属栄養の細菌や酵母、微細藻類、原生動物などの微生物が利用されるが、これも元をたどれば、光合成で生み出された有機物を利用しているという点で、光合成植物や光合成藻類をバイオエネルギー生産に利用することと本質的に変わらない。したがって、未利用の有機炭素源、有機廃棄物を利用することは、太陽からのエネルギー転流の一部である。自然界では、これらの有機物は、

細菌などの微生物によって最終的に水と二酸化炭素に分解されて物質循環に組み込まれていき、エネルギーの転流は集結する。大気中に戻された二酸化炭素は、光合成によって新たに化学エネルギーを蓄積した有機物になり、エネルギーの転流と物質循環に組み込まれていく。アルコール発酵やメタン発酵によるエネルギー生産は、こうした自然の過程の一部を活用することである。

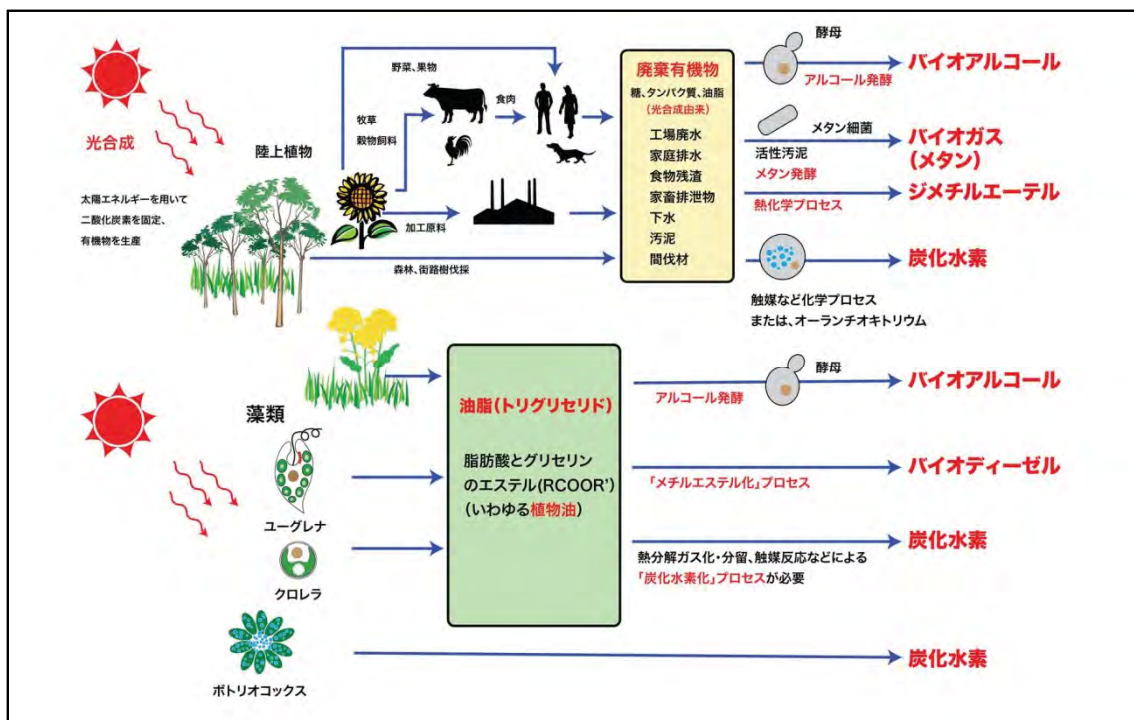


図 0-5 バイオマスエネルギー生産の比較と藻類バイオマス資源の意義

他の論点としては、藻類には大型藻類と微細藻類がある。大型藻類(主として海藻)については、日本には品種改良や養殖の長い伝統があり、世界トップの技術を有する。これまで藻類由来の有用物質の大部分は海藻から取られていることから、エネルギー以外にもバイオマス資源として活用できる可能性が高い。エネルギー資源としては、褐藻のホンダワラ類を大量に養殖してバイオマスエネルギーとして活用する提案がなされてきたⁱ。日本の領海と排他的経済水域(EEZ)を合わせた海域約447万平方キロの1-2%を使って年間1.5億トンの海藻を養殖すれば、現在のガソリン使用量の1割弱に当たる約500万kLのエタノール生産も可能という試算もあるⁱⁱ。今後、有用物質生産を含めて検討する必要があるが、本報告書では対象を主として微細藻類に絞る。

なお、極めて多様性に富む藻類は多種多様な機能を持ち、生成する有用成分も多岐にわたる

ⁱ 新生アポロ&ポセイドン構想: http://www.mri.co.jp/PLAN/2005/20050224_stu01.pdf
海洋バイオマスコンソーシアム:

<http://www.shirakami.or.jp/~nakatajun/html/akitannotameni/noshiro-kaiyoubaio-siryous.html>

ⁱⁱ 平成19年度 水産バイオマス経済水域総合活用事業可能性の検討:

http://www.suisan-shinkou.or.jp/promotion/report/report_2008_1.html

ため、エネルギー以外にも幅広い用途に関連する事業化の可能性が想定できる。事実、すでにわが国の企業において事業化されているものとして、健康食品原料ⁱ、医薬品原料ⁱⁱ、化粧品原料ⁱⁱⁱ、種苗用飼料^{iv}、天然食品添加物^v等がある。ただし、本報告書では、国家的見地から見て最も重要な再生可能エネルギー資源としての藻類技術の事業化に焦点をあてて検討する。高付加価値用途の存在は、経済性の視点から再生可能エネルギーとしての事業化を進める上でのコスト補完的要素として論じる。

4. 本調査の構成とゴール

藻類バイオマスの再生可能エネルギーとしての事業化は、産業として成立する規模を実現するには技術的に未確立な状況にあり、関連する知見・技術はなお開発中のものが多い。農山漁村における藻類バイオマスファームの事業化可能性を分析する上では、藻類バイオマス産業全体に対して俯瞰的に調査し、現在の技術による事業化の可能性および長期的な産業の確立に向けた課題を総合的に整理することが重要だと考える。

本報告書では、藻類エネルギー産業に関心のある利害関係者に対して共有の知識を確立し、建設的な議論をはぐくむために、課題整理を図0-6に示したフレームワークにより実施する。その上で、政策による事業化支援の動きを進展させるための技術ロードマップを提示する。また、その実現に向けて藻類産業創成コンソーシアムが果たすべき役割について論じる。

第一章では、先ず本報告書における調査フレームワークを提示する。その上で、藻類バイオマスの潜在的魅力(可能性)を把握するために、長期的な視野で再生可能エネルギー評価の基本となる理論的なエネルギー効率について文献をレビューする。また、地球環境の保全と温暖化対策の面から見た藻類エネルギー産業の適合性についても簡単にレビューする。

次に、藻類エネルギーのエネルギー生産効率および温室効果ガス削減効果についてより詳細に評価するために、現在の技術に基づいて実施されたLCA(ライフサイクルアセスメント)分析をレビューする。中でも、再生可能エネルギーとして重要な、①エネルギー産出量と投入量を比較するネット・エネルギー・レシオ(NER)^{vi}、②産出エネルギー熱量あたりの温室効果ガス(Greenhouse

ⁱ クロレラ工業株式会社：<http://www.chlorella.co.jp/>、サンクロレラ販売会社：
<http://www.sun-han.com/shop/Top>、DICライフテック株式会社：<http://www.dlt-spl.co.jp/>、
株式会社日建総本社：http://www.chlostanin.co.jp/05kaisya/kaisya01_index.html

ⁱⁱ クロレラ工業株式会社：<http://www.chlorella.co.jp/>

ⁱⁱⁱ 株式会社ユーグレナ：<http://www.euglena.jp/business/cosmetics.html>

^{iv} クロレラ工業株式会社：<http://www.chlorella.co.jp/products/suisan.html>

^v DICライフテック株式会社：<http://www.dlt-spl.co.jp/business/spirulina/linablue.html>

^{vi} ネット・エネルギー・レシオ：NER。NERに用いるエネルギーの概念は通常ジュールが用いられる。ジュールは1kgの質量の物質を1秒で1メートル動かすエネルギーである。すなわち1ワット×1秒と

gass: GHG) 排出量(CO₂ eq.kg・MJ⁻¹)ⁱの削減効果(二酸化炭素に換算されるので、以後、二酸化炭素排出量削減効果(もしくはCO₂排出量削減効果)と呼ぶ)を中心にレビューを行う。その上で、分析に利用された技術体系を概観しエネルギー収支改善にかかわる技術・研究開発の方向性を把握する。



図 0-6 本調査の構成とゴール

以上のLCA分析の内容を踏まえた上で、バリューチェーン別に課題を把握して、再生可能エネルギーの事業の産業化のために必要な要素技術およびそれらの技術的ハードル等について論点を整理する。

等しい。1kgあたり藻類バイオマスの熱量はおおよそ30メガジュール(MJ)である。よって1kgの藻類を産出するために必要な投入エネルギーの合計値が、資本設備の生産や廃棄のエネルギー消費量も含めて30MJ以下となることが求められる。ただし、資本設備のエネルギー投入量の推計は、藻類の場合、エネルギー産業として必要とされる大規模施設に関するデータが乏しいため推計が困難である。よって、目安として培養・収穫・濃縮・抽出・精製のプロセス稼働に利用されるエネルギーだけに着目して計算されることもある。

ⁱ MJあたり二酸化炭素換算グリーンガス排出量。MJ⁻¹はMJあたりの数学的表現である。-1とはMJあたりという意味である。

再生エネルギー資源として、長期的なエネルギー需要へ持続的に対応できるかどうかは、①NERと二酸化炭素排出量削減効果、②経済性、③藻類オイルの供給安定性、の三つの基準で評価することができるⁱ。

藻類をエネルギー資源として利用できるか否かはバリューチェーンの中で;

- 1) 藻類種と藻類バイオマスの生産性(藻類バイオマス資源関連技術)
- 2) 藻類種とバイオマスの構成成分(藻類バイオマス資源関連技術)
- 3) 各種培養・生産プロセス(藻類大量培養、濃縮・収縮、抽出・精製関連技術)
- 4) 各種利用プロセス(藻類用途関連技術)

を分析、検討することで初めて論ずることができる。

- 1) については、代表的な藻類種とそのバイオマスの生産性についてレビューする。ここでは微細藻類、コンブなどの海藻の特徴を分析する。
- 2) については、産生バイオマスの構成成分として、バイオディーゼル、アルコール、トリグリセリド、炭化水素などの違いを考察する。
- 3) については、藻類種により、培養プロセス、生産プロセスが全く異なることに留意し、典型的な培養プロセスを検討する。
- 4) については、直接液体燃料として利用できる産生物、発酵プロセスなどを経てメタンなどへ転換して利用できる産生物、バイオマスそのものを固体燃料として利用できる産生物など、各種藻類バイオマス进行分析をする。

ここで、エネルギー資源生産を考える場合、生産に要したエネルギー量と、生産したエネルギー量の比を、すでに述べたように、ネット・エネルギー・レシオ(NER)と定義する。この量が1を超えるときは純粋にエネルギー生産が可能であるとみなす。

二酸化炭素排出量削減効果(CO₂排出量削減効果)は、①再生可能エネルギーの産出エネルギー熱量を分母にして、②従来の化石燃料の生産活動で排出される量と燃焼時に排出される熱量あたりの量の合計から、③再生可能エネルギーの生産に要した二酸化炭素排出量を差し引いた値を分子にして計算を行う。例えば、ガソリンは掘削から精製活動および燃焼時に1MJあたり80gCO₂を排出する。これに対して、バイオマスによる再生可能エネルギーの生産に要したCO₂排出量のMJの熱量あたりの値が40gであれば、50%のCO₂排出量削減効果があったと定義する。なお、再生可能エネルギーの燃焼において発生するCO₂は炭素循環上ニュートラルであるとされており、この計算には含まれない。

ⁱ 産業競争力懇談会 2011:産業競争力懇談会2011年度 プロジェクト 最終報告～【微細藻類を利用した燃料の開発】: <http://cocn.jp/common/pdf/thema38-L.pdf>

バイオマスを燃焼すると二酸化炭素が大気中に放出されるが、すべての有機物の炭素は光合成によって大気中から捕獲、固定(炭酸固定)されたもので、自然の物質循環の一部とみなすことができる。一方生産のために使用されるエネルギーは現在の社会では多くが化石燃料の燃焼に由来するもので、これは炭素循環に新たな炭素を加えることであり、大気中の二酸化炭素の増加をもたらす。本報告書では常にNER、二酸化炭素削減効果(%)という指標で、エネルギー産業としての藻類技術の評価を行っていく。

最後に微細藻類の再生可能エネルギーとして、①NER・二酸化炭素削減効果、②経済性、③藻類オイルの供給安定性、の三つの基準で評価し、藻類エネルギー産業創成の意義およびその実現可能性について総合的にまとめ、わが国がどう取り組むべきか論点を整理する。

以上の、①潜在的魅力(可能性)の把握、②現在の技術によるLCA分析、③バリューチェーン別の課題把握、④事業化に向けた課題把握、という四つの視点で論点を整理することでより明確に議論を行うことが可能になると考える。

第二章では、図0-6で示したように、再生可能エネルギーとしての藻類バイオマス産業の発展について概観するフレームワークを提示した上で、わが国における主な研究・事業化の動き、わが国の藻類バイオマス関連技術について、藻類産業創成コンソーシアム参加企業の技術や、公開されている日本における特許関連情報から整理する。

第三章では、第一章、第二章の議論を踏まえて、本調査のゴールである藻類エネルギー産業育成のための技術ロードマップを提示し、最後にゴール達成のための藻類産業創成コンソーシアムの役割のあり方について論じる。

第四章では、第一章～第三章までの論点を踏まえて農山漁村における藻類バイオマスファームを事業展開する上での経済性および最適な規制の在り方について論点をレビューする。

5. 藻類エネルギー産業文献調査における留意点

すでに述べたように、藻類エネルギー産業は未確立であり、関連する技術も開発中のものが多い。事業化に関する文献も依拠しているデータの多くが推計に基づくものであり、その解釈には留意が必要である。

表 0-1 藻類エネルギー産業の文献調査における留意点

細胞レベルの潜在力の再現性	<ul style="list-style-type: none"> ● 微細藻類の増殖率は非常に高く、大豆やトウモロコシ等の既存のバイオマス資源に比較すると、潜在的なエネルギーの生産力は細胞レベルでは数十倍から数百倍とみられている。 ● ただし、細胞同士での光の奪い合いなど空間的秩序の欠如等により、理想の増殖率を大規模培養で再現することは容易ではない。 ● また、コンタミネーションの問題も野外で大量培養する場合には増殖率の低下を招く。 ● 野外環境は変動するので、藻類増殖にとっていつも良好な条件が確保されているわけではない。 ● 以上の理由から、実験室で得られる理想の状態の増殖率と現実の増殖率にはしばしば乖離がみられる。
存在しない大規模産業化の実例	<ul style="list-style-type: none"> ● 大量の水の中に存在している藻類を効率よく濃縮・収穫し、細胞壁に囲まれている細胞から油脂などエネルギー資源の原料を最終的に取り出すことは、現在の技術においては多大なエネルギーを消費する。 ● より低エネルギーの大量生産技術の開発には、大規模な実証施設での培養や、濃縮、収穫、抽出、精製、およびリサイクル技術の確立が必要だが、エネルギー産業が理想とするスケールの藻類バイオマス生産施設はほとんど存在しない。 ● したがって、現時点では大規模化した場合のエネルギー収支は理論的な推測に頼るしかなく、その妥当性の検証は容易ではない。
最新の情報に基づかない結論形成の危険性	<ul style="list-style-type: none"> ● 藻類は一次共生、二次共生ⁱなどで多様化した膨大な量の種が存在し、毎年新しい有用な種が発見されている。 ● 陸上植物よりもはるかに多様性で、門や綱レベルの分類さえも変動的である。 ● 代謝メカニズムや、エネルギーの原料となる脂肪や生合成メカニズムについて科学的知見が十分に整備されていない。 ● したがって、最新動向に基づかない調査、分析は誤った結論を導く可能性がある。
困難な前提把握と再現性	<ul style="list-style-type: none"> ● すでに説明したように、実験室レベルのデータを実証レベルで再現することは極めて困難である。よって、実証レベルのデータの評価には、どのような条件で分析したものなのか、前提を正確に把握することが不可欠である。しかし、現実には、そのようなデータの欠如により、実験室レベルの理想の状態に依拠した結論なのか見極めが困難な場合がある。
民間研究の成果の非公開性	<ul style="list-style-type: none"> ● 米国をはじめとする諸外国では、ベンチャー企業が多額の資金により大規模な実証実験を行い、実用化を進めている ● それらの知見は未公開である場合が多く、最新の商業化に向けた知見は共有化されていないのが現実である ● よって、藻類エネルギー産業の育成においては、現状得られるデータよりも現実に進んでいる可能性について留意しながら判断していく姿勢が重要である。
ライフサイクルアセスメントの困難さ	<ul style="list-style-type: none"> ● 大規模な実証データがないため、ライフサイクルアセスメントは、古いデータや各種論文の前提等に基づいて実施しなければならず、最新の効率性等を配慮した分析は困難である。 ● また、関連技術に関する設備投資についても実際のコスト推計は極めて困難であり、他のプラントの情報等から推測しなければならない。 ● コスト計算については、最新製品の価格変動や今後の技術改善等を見込むと正確な結論を導き出すことは困難である。
海外文献の調査上の留意点	<ul style="list-style-type: none"> ● 海外のLCA調査では前提となる電気エネルギー消費量が、発電源のミックスによって左右されるため、単純にわが国の例には当てはめることはできない。

ⁱ 一次共生とは従属栄養性真核生物が藍藻(シアノバクテリア)を取り込んで葉緑体を獲得した共生のこと。その結果、紅藻類や緑藻類が生まれた。二次共生は、従属栄養性真核生物が緑藻や紅藻を取り込んで葉緑体を獲得した共生のこと。褐藻類やミドリムシなど多くの藻類はこうして生まれた(第三章を参照)。

表0- 1で示したように、その他にも非常に多くの論点に留意しながら調査することが重要である。特に実験室レベルのバイオマス生産性と野外の実規模レベルでのバイオマス生産性には大きな乖離があること、その乖離を埋めるための最新技術については、米国を中心に未公開企業が開発に多額の資金を投入しているが、その内容については未公開のことが多いことは留意すべきである。

ブレークスルー的技術により、理論的なバイオマス生産性の高さを現実化する可能性について慎重に見極めることが藻類エネルギー産業としての潜在性を評価する上で重要である。

第一章 技術バリューチェーン調査と事業化への論点整理

1. 本報告書の調査フレームワーク

本報告書の調査のフレームワークを、図1-1を参照しながら説明する。再生可能エネルギーを長期的な視野から評価するために、まず1の番号で示した論点、「理論的な最大エネルギー産出量（論点1）」について検討する。これは、理論的な最大エネルギー産出量が大きいくほど、再生可能エネルギーとしての潜在力大きいからである。次に、現在の技術によるエネルギー生産効率（論点2）と生産に必要なエネルギー投入量（論点3）を推測し、現実的なNERやCO₂排出量削減効果を分析する（論点4）。その上で、藻類と他のバイオマスと比較することで、NERとCO₂排出量削減効果の改善の可能性と藻類バイオマス燃料の事業化可能性について論点を整理する。

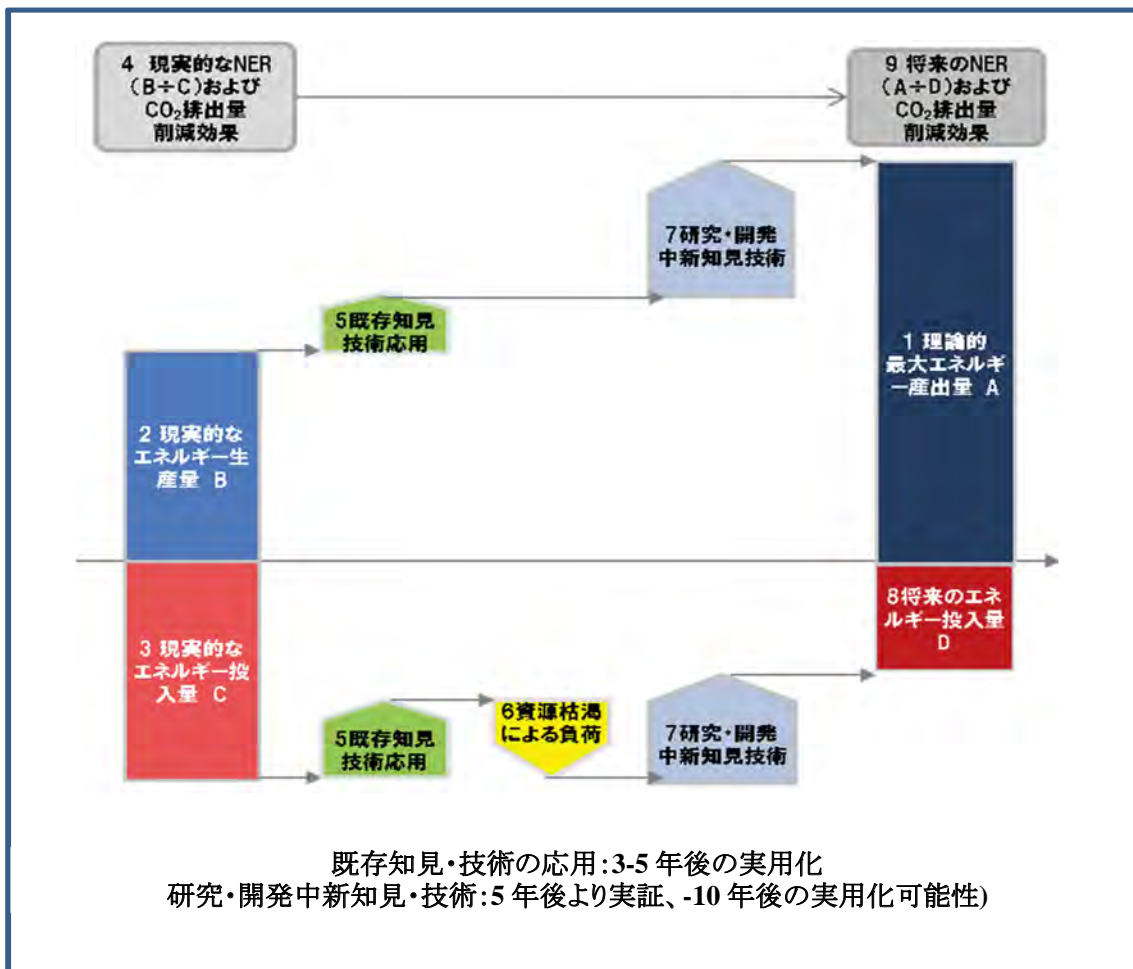


図 1-1 本報告書の調査フレームワーク

将来のバイオマス燃料の生産でNERを増加させるためには、① 3-5年後の実用化を見込む、既存の知見・技術の応用によるエネルギー産出プロセスの最適化(論点5)、② 資源枯渇による負荷の増加(エネルギー投入量の増加)(論点6)、③ 5年後より実証し、10年後程度での実用化を見込む、新知見・技術の導入によるエネルギー産出プロセスの改善(論点7)、が必要である。既存知見・技術とは、他の産業ですでに事業化されている技術である。例えば大豆からのオイル抽出には、ヘキサンによる抽出法が利用されているが、この技術は藻類からのオイル抽出にも利用できる。実験室レベルでは既に使用されているが、産業規模の実用化はまだ行われていない。このような技術が実証実験に導入される過程で、各種経験値の積み上げや技術改良によって、エネルギー産出量が改善され、また、エネルギー産出に要するエネルギー投入量が抑制される。結果として、将来のNERやCO₂排出量削減効果(論点9)が改善されることが期待できる。理論的最大エネルギー産出量(論点1)が大きいほど、NERの改善可能性の余地は大きくなるといえる。

以上をまとめたのが表1-1である。

表1-1 調査フレームワークの論点および分析の視点のまとめ

論点		分析の視点
1	理想の最大エネルギー産出量 A	単位面積あたり・単位時間あたりの理論的なエネルギー産生量および培養可能な土地面積から見た生産規模
2	現実的なエネルギー産出量 B	現在の技術で実現可能なレベルの単位面積あたり・単位時間あたりのエネルギーおよび培養可能な土地から見た生産規模
3	現実的なエネルギー投入量 C	単位あたり熱量を得るために必要な現在の技術におけるエネルギー投入量
4	現実的なNER・CO ₂ 排出量削減効果 (NER=B÷C)	NER(ネット・エネルギー・レシオ)=エネルギー産出量/エネルギー投入量は1以上になることが見込まれることが重要な条件 CO ₂ 排出量削減効果:グリーンハウスガス=熱量あたりのCO ₂ 換算のグリーンハウス排出量で計測。単位はgCO ₂ ・eq・MJ ⁻¹ 。既存のガソリンやディーゼル燃料との比較で削減量が増加することが重要な条件
5	既存知見・技術の応用(3-5年後の実用化が想定)	水処理技術・流体力学・各種リサイクル技術など既存技術の応用による改善可能性(生産量の増大・エネルギー投入量の減少)
6	資源枯渇による負荷	土地競合問題、水競合問題、肥料競合問題(リン枯渇問題)による将来のエネルギー投入量の増加可能性
7	研究開発中の新知見・技術(5年後より実証し、10年後程度で実用化可能性)	開発が着手されているが、実用化されていない研究・開発による改善可能性(例:遺伝子改良・育種・脂肪成分増大因子・油分細胞外分泌機能・各種濃縮・収穫・抽出・精製技術)
8	将来のエネルギー投入量 D	合理的に推計することは困難だが、各種知見・技術の応用可能性の余地を検討することで方向性を議論
9	将来のNER・CO ₂ 排出量削減効果 (NER=A÷D)	将来の改善可能性

9つの論点の内容は、図1- 2で示すように、図0- 6で示した4つの視点に関連づけて整理することができる。このような整理をふまえ、藻類エネルギー産業創成の意義およびその実現可能性について総合的にまとめ、取り組むべき技術課題を抽出し、藻類エネルギーの研究開発のわが国の現状と課題を明らかにしていくことで、共通の基盤に根差した議論が可能になると考える。

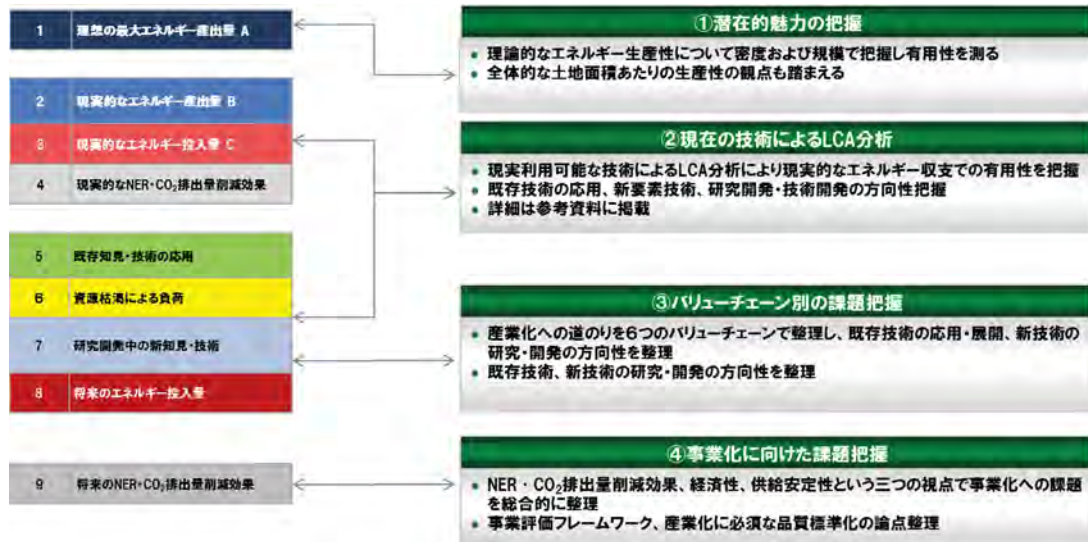


図 1- 2 分析のフレームワークの論点の整理

なお、技術の改善可能性(論点5,7)については、第三章において、次の6つの視点で事業化を視野に入れたバリューチェーン(図1-3)の中でさらに整理する。①藻類バイオマス資源関連技術、②藻類大量生産関連技術、③藻類濃縮・収穫関連技術、④藻類抽出・精製関連技術、および⑤藻類用途関連技術、⑥事業化、の6つである。

①藻類バイオマス資源関連技術では、オイル生産性の高い有用種や事業化が進んでいる種のレビュー、有用性が高い種の特長、種のスクリーニングおよびオイル生産の代謝メカニズムの解明、有用種への形質転換技術、育種、改良等について整理する。②藻類大量生産関連技術においては、オープンポンド、フォトバイリアクター、ジャーファーマンター(微生物培養装置)による大量培養で想定される技術および課題について論点を整理する。③藻類濃縮・収穫関連技術においては、大量の培養ブロスから効率的にバイオマスを濃縮して収穫する技術について論点を整理する。④藻類抽出・精製関連技術においては、固体、液体、ガスなどの最終エネルギーの形態を踏まえた各種技術について総合的にレビューする。⑤藻類用途関連技術については、エネルギー用途に加えて、有用物質など他の用途の商業化可能性について整理する。⑥事業性評価においては、技術の応用による将来のNER、CO₂排出量削減効果の改善可能性について論点を整理した上で、経済性、エネルギー産業として事業化するために必要な藻類オイルの供給可能性について論点を整理する。ここでは、実際の事業化に不可欠な品質基準の設定についても議論する。

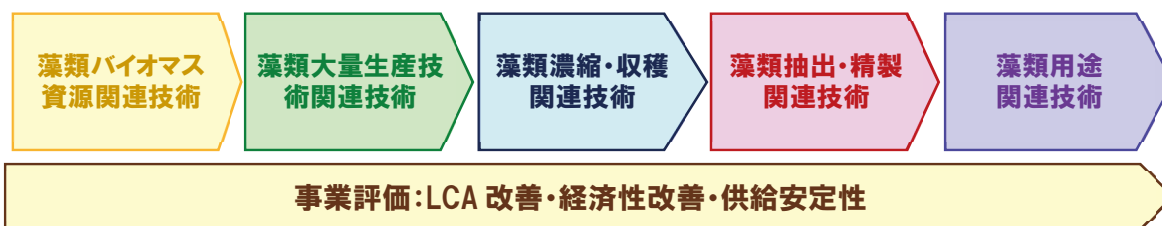


図 1-3 藻類バイオマスのバリューチェーン

以上をまとめると、技術体系については表1- 2で示すように3×5の15のマトリックスで整理することができます。NERは、既存知見・技術の応用や開発の確度が高い技術の中で、過去に実証データがあるものや、すでに他の産業で大規模に利用されているものなど、現実的なデータを基に推計される。

表1- 2 3×5のマトリックスによる技術体系の整理

①藻類バイオマス資源関連技術			
②藻類大量生産関連技術	既存	資源枯渇	研究・開発
③藻類濃縮・収穫関連技術	知見・技術	問題	発中の新
④藻類抽出・精製関連技術	の応用	の抑制	知見・技術
⑤藻類用途関連技術			

3×5のマトリックスの論点を整理した上で、技術の応用による将来のNERと温室効果ガス削減効果(論点9)の改善可能性を評価し、さらに経済性、藻類オイルの供給可能性について検討することで、将来的な事業化の可能性を検討する。

2. 藻類バイオマスの潜在的魅力(可能性)の把握

2.1. 概要

表1- 3は、藻類バイオマスの理論的なエネルギー生産可能性の最大値を示したChisti (2007)ⁱの論文からの抜粋である。また、表1- 4は、藻類バイオエネルギーベンチャー、ソリックス社、米国エネルギー省(DOE)のナショナル・リニューアブル・エネルギー・ラボラトリー(NREL)の研究者の試算結果(Weyer et al. 2010)ⁱⁱからの抜粋である。

ⁱ Chisti, Y., *Biotechnol. Adv.*, 25, 294–306 (2007). Biodiesel from microalgae.

ⁱⁱ Weyer KM, Bush DR, Darzins A, Willson BD. 2010. Theoretical maximum algal oil production. *Bioenergy Research* 3: 204–213.

Chisti (2007)によれば、オイルの成分が乾燥重量比で70%の場合、1haあたり年間オイル生産量は136kLであり、その生産性で、全米の運輸に利用されているエネルギーの50%を賄うために必要な耕作面積は、米国の全耕作面積の1.1%と推計している。また、30%の場合は、1haあたり年間オイル生産量は58kL、必要な耕作面積は全耕作面積の2.5%と推計している。これに対して、トウモロコシでは、全耕作面積の8倍、大豆では3倍以上、オイルパームでも24%を必要とする。以上から、藻類由来のバイオマス燃料は、潜在的には大豆やトウモロコシの数十倍、百倍の生産性、オイルパームと比較しても10倍から20倍の生産性を持つことになる。

Weyer (2010)の研究では、日射量、光合成効率、オイル含有率などを用いて、ホノルル、クアラルンプールなど日射量の強い地域におけるオイル生産量を理論的に推計している。標準値は年間1haあたり40kLから53kLであり、Chisti (2007) のオイル含有率30%のときの値とほぼ同じ水準となっている。Weyer (2010)の研究では、光合成のエネルギー変換効率の理論的な最大値と、実際の日照時間などを勘案して各地域の最善値を試算している。

表1-3 バイオマスごとのバイオディーゼルの理論的生产性ⁱ

バイオマス	1haあたり 年間オイル生産量 (L)	アメリカの運輸で利用される燃料のすべてをまかなうために必要な耕作面積 (百万ha)	アメリカの穀物生産耕作地に占める割合 (%)
トウモロコシ	172	1,540	845
大豆	446	594	326
セイヨウアブラナ	1,190	223	122
ジャトロファ	1,892	140	77
ココナッツ	2,689	99	54
オイルパーム	5,950	45	24
微細藻類 ⁱⁱ	136,900	2	1.1
微細藻類 ⁱⁱⁱ	58,700	4.5	2.5

ⁱ Chisti, Y., *Biotechnol. Adv.*, 25, 294–306 (2007). Biodiesel from microalgae

ⁱⁱ バイオマス乾燥重量比で70%がオイル

ⁱⁱⁱ バイオマス乾燥重量比で30%がオイル

表 1-4 理論上の微細藻類のオイル生産性

項目	理論値	標準値	単位
全て太陽光エネルギー	11,616	5,623~7,349	MJm ⁻² ・year ⁻¹
光合成として利用される割合	45.8%	45.8%	-
光子エネルギー	225.3 x 10 ³	225.3 x 10 ³	MJm ⁻² ・mol ⁻¹
光子運搬効率性	100%	95%	-
光子利用効率性	100%	50%	-
必要光子量	8	8	-
炭水化物エネルギー	482.5	482.5	kJ・mol ⁻¹
バイオマス蓄積効率性	100%	50%	-
オイル成分	50%	50%	-
オイル比重	918	918	kg・m ⁻³
1日あたり最大バイオマス増加量	196	33-42	g・m ⁻² ・day ⁻¹
年間オイル生産量	354,000	40,700(クアラルンプール) 44,000(デンバー) 46,000(マラガ) 48,800(テルアビブ) 51,700(ホノルル) 53,200(フェニックス)	L・ha ⁻¹ ・Year ⁻¹

2つの論文から、微細藻類のオイル生産量は、トウモロコシや大豆に比較して、理論的には桁違いに高いことがわかる。また比較的生産性が高いオイルパームと比較しても藻類ははるかに高いオイル生産性をもつといえる。分析フレームワークでいえば、9つの論点のうち論点1の「理想の最大エネルギー産出量」は、大幅に他のバイオエネルギーを上回っていることをこの二つの論文は示している。

産出量を一層引き上げる技術革新としては、現在光合成で吸収されていない波長を吸収する色素をもつ新種の発見、オイル増殖率の高い新種の発見、新たなオイル増殖因子の発見、葉緑体の光合成効率の改善、脂質以外の炭水化物やタンパク質の燃料化、などが想定される。これらに関する基礎研究は、第二章で詳細に説明するように、わが国でも盛んに行われている。

このような技術革新が進めば、9つの論点のうち、論点1の「理想の最大エネルギー産出量」から見た、他のバイオマスに対する微細藻類の再生可能エネルギーとしての優位性が今後拡大してい

く可能性は十分にあると考えることができる。

陸上植物においても、生産性の向上、粗放的栽培の可能性、周年供給、循環型農業などの観点から優良品種作出の研究が進められている。また、光合成機能の向上に関する基礎研究や二酸化炭素の固定・資源によるバイオマスの量的利活用を促進する研究、バイオマス生産から効率的分解・原料化、バイオプラスチック生産を一気通貫で進める革新的バイオプロセス研究などの先端的な研究が進められており、生産量の向上やバイオリファイナリーの面での進展が期待されているⁱ。しかし、論点1の「理想の最大エネルギー産出量」から見た、微細藻類の他のバイオマスに対する優位性を覆すほどの改良が実現できるか、明らかでない。可能性のあるバイオマス燃料に関する研究開発は、並行して進められるべきであろう。

2.2. わが国における潜在的生産規模推計の試み

Weyer (2010)は、日照時間の長い熱帯地方において、表1- 4で見たように、実現可能性のあるオイル生産量を1haあたり最大50kL～40kLと推計した。これをわが国に当てはめるために、乾燥重量あたりオイル成分50%をもつ藻類によるオイルの年間生産量を30kL/ha程度として、わが国の耕作放棄地ⁱⁱ(約3,960km²=396,000ha)のすべてを利用すると仮定し、便宜上1L=1kgとすると、オイル生産量は約12,000千トンになる。

$$30 \text{ kL/ha} \times 396,000 \text{ ha} = 11,880,000 \text{ kL} \approx 12,000 \text{ 千トン}$$

WWFジャパンの最終用途エネルギー需要ⁱⁱⁱで見ると、わが国の運輸部門の需要は、2020年の石油換算で58,271千トンである。上の12,000千トンはその約20%に相当する。2050年の予想では、省エネルギーが進む前提で運輸部門のエネルギー需要は石油換算で25,820千トンとなる。そのとき、12,000千トンは運輸部門のエネルギー需要の40%程度を賄う規模となる。

以上はあくまでも机上の計算であり、実現には越えなければならない技術的ハードルが多い。また、耕作放棄地の活用には法規制の改正など数々の課題があり、すべてをオイル生産に充てることは困難である。ただし、藻類種によっては実用レベルのオイル生産が決して不可能ではないことを示唆している。藻類のオイルの生産の向上が見込めるなら、わが国において藻類を産業化して

ⁱ 農業生物資源研究所「バイオマス植物研究のビジョン」:

http://www.nias.affrc.go.jp/newsletter/biomass/chukan_houkoku.pdf、文部科学省「バイオマス利活用施策の取組状況」:http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_kenntou/01/pdf/4.pdf など。

ⁱⁱ 農林水産省 (2011)、「耕作放棄地の現状について平成23年3月」:

http://www.maff.go.jp/j/nousin/tikei/houkiti/pdf/genjou_1103r.pdf

ⁱⁱⁱ WWFジャパン2011「脱炭素社会に向けたエネルギーシナリオ提案」:

http://www.wwf.or.jp/activities/upfiles/110721EnergyScenario01_Ver.pdf

いくことの意義は十分にあるといえる。

なお、50円/Lで精製前のオイルを生産できると仮定すると、30kL/haでは、1haの売上は年間150万円となる。また、オイル抽出後の残渣(30kL)は、窒素やリン、タンパク質などを含むため、飼料や肥料としての価値がある。仮にそれらが50円/kgで売却できれば、大まかに見て1haあたりの売上は300万円となる。一方で、例えば、農林水産省(2011)ⁱによる平成23年度の新潟県の1haあたりの平均的な米の生産量は年間5,390kgであり、米の生産者価格は、平成17～23年の平均値で10 kgあたり3,095円ⁱⁱである。その値段で売れたとすると、1haあたりの米の生産者の収入は1,668,205円となる。以上の単純な計算に基づけば、藻類オイルを農業として生産すると、米の倍程度の収入が得られることになる。ただし、培養施設などの投資を考えると、現状の生産性では経済的に採算をとることは容易ではないと推察される。例えば、仮に1haの土地で1平米あたりの投資が1万円だとすると、初期投資は1億円となる。30年償却としても年間300万円ほどのコストがかかることとなる。

事業として経済性を実現するには、より高い生産性をもつ藻類種の開発、低コストの培養技術・システムの確立、高付加価値の副産物の同時生産等が必要であることに留意しなければならない。

3. 現在の技術による LCA 分析からの示唆

3.1. 概要

過去の開示されたデータおよびすでに産業化されている技術のデータにもとづき、LCA分析を行っている6つの論文の概要及び定量的結果について、後述の表1- 5～表1- 10にまとめた。このうち、表1- 5～表1- 8については、別途詳細な技術的な前提を「参考資料」で示した。

すべての論文が、技術情報の詳細が開示されているオープンポンドを利用し、架空の培養施設を前提に、過去の実証分析等のデータをベースにLCA分析を行っている。6つの論文の内、表1- 9のShiho et al. (2012)ⁱⁱⁱは日本での培養を前提にしている。他は海外での培養を前提とした論文である。なお、Shiho et al.(2012)の前提では、オープンポンドの中にプラスチックの薄い膜のチュー

ⁱ 農林水産省(2011)「米をめぐる関係資料」平成23年度産米の都道府県別生産数量目標の設定
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kikaku/pdf/111130_meguji_part2.pdf

ⁱⁱ 社団法人米穀安定供給確保支援機構: <http://www.komenet.jp/komedata/kakaku/2004/data15.html>
原典資料: 年別価格については「農林水産統計月報」及び「平成22年農業物価指数」(農林水産省)、月別価格は「農業物価指数」(農林水産省)

ⁱⁱⁱ M.Shiho, M.Kawachi, K.Horioka, Y.Nishita, K.Ohashi, K.Kaya and M. Watanabe (2012),
“ Business evaluation of a green microalga *Bortryococcus braunii* oil production system, ” *Procedia Environmental Sciences*, in press.

ブ状のリアクターを設置して、その中で藻類を培養するという新規性のある技術を利用する。したがって厳密には「セミオープンポンド」と呼ぶべきである。その他は、純粋なオープンポンドである。

6つの論文の要点をまとめると、以下のようになる。

1. **NER**は、エネルギー投入量を培養にかかる分だけとみた場合は、大半のケースで1以上である。ただし、オイル以外の残渣を活用することが前提。残渣の活用には、①嫌気消化による熱や電気エネルギーとして利用する、②窒素、リン等の栄養塩リサイクルによって、窒素、リン肥料の外部購入の抑制し、肥料生産分のエネルギーを減少する、③ペレット化して固形燃料化するなどが含まれる。
2. 建設コスト等に係るエネルギーを勘案しても1以上の**NER**となるケースが複数見られる。二酸化炭素排出量削減効果については、石油との比較で30-50%近く削減効果がある。
3. **NER**、二酸化炭素排出量削減効果は、他のバイオマスと比較して、同程度かやや下回っている。
4. 下水処理を主目的にして燃料生産を副次目的とすれば、早期黒字化の可能性がある。
5. 技術的には、水処理技術全般、窒素欠乏と増殖率の最適コントロール、低コストの濃縮・収穫技術、乾燥コストの軽減、水分を含んだ藻類からの油分抽出する技術、嫌気消化とコジェネを利用した残渣のエネルギー利用、残渣栄養塩の培養へのリサイクル、CO₂のリサイクル、下水の利用が重要である。

土地生産性は高いものの藻類バイオマスの培養には大量の水を必要とする。また、濃縮、収穫、油脂の抽出などの工程で他のバイオマスと比較するとより多くのエネルギーを利用する。したがって、現在の技術を前提とすれば、**NER**や二酸化炭素排出量削減効果の観点で、藻類バイオマスは他のバイオマスと比較して同程度かやや下回っている。

ただし、2.1概要で論じたように、潜在的な生産性が高いという前提に立てば、今後の技術革新や、技術の組み合わせ、大規模培養のためのノウハウの蓄積によって、藻類バイオマスが他のバイオマスよりもより有力な再生可能エネルギーとなる可能性は十分にある。

例えば、Shiho et al. (2012)では、オープンポンドの中に薄いプラスチック膜を利用したチューブを設置する新規性のあるセミ閉鎖型リアクターの技術を利用している。コストが安いというメリットを持つオープンポンドと、コンタミネーションが少ない閉鎖型リアクター双方の良いところを合わせもつ技術を前提にしていることが注目される。その結果、以下に示すように1haあたりの年間オイル生産量では、Weyer et al. (2010)によって試算された50kLの2倍強の120kLという高い値を提示している。

Shiho et al. (2012)の前提(表1-9参照)

- 最終培養オープンポンドの濃度:3.5 kg/m³
- 最終培養オープンポンドの深さ:0.3m
- 1日あたり成長率:7%
- オイル成分の割合:45%
- 稼働日:年365日

以上の前提から推計される1haあたり年間オイル生産量は、以下の通り。

$3.5 \text{ kg/m}^3 \times 0.3 \text{ m} \times 10,000 \text{ m}^2 \times 0.07 \times 365 \text{ 日} \times 0.45 \div 120 \text{ kL}$ (簡便的にオイル1L=1kgとして試算)
(ボトリオコッカスで培養。トリテンペル系(C₃₄H₅₈)炭化水素を生成)

なお、Shiho et al. (2012)では、オイルの売価が1L 130円と仮定し、高い生産性を前提として、短期的にも経済性が確保できるとしている。資本調達にかかる理論的なリスクを勘案しても、培養施設から生み出されるトータルのキャッシュフローの現在価値は、投資に費やしたキャッシュフローを上回る、すなわち正味現在価値がプラスとなるとの試算も行っている(表1-9参照)。

一方、Lundquist et al. (2010) は、表1-7で示すように、下水処理を主目的にしてエネルギー生産を副次的目的にすれば、既存のオープンポンドの技術でも経済性確保が可能という結論を導いている。経済性を早期に確立するには、まずは下水処理を主目的にして事業化し、その過程で藻類バイオマス培養の知見と技術を蓄積していくことも選択肢として検討している。この点は、参考資料中の(社)日本下水道管路管理業協会専務理事の田中修司氏のレポートⁱにおいても、国内を事例にした試算で同様に経済性が確保できるとの結論が導かれており、興味深い。

以上の最新のLCA分析の内容から、藻類バイオマスを利用した再生可能エネルギーの事業化(藻類バイオマスファームの事業化)は、①高い土地生産性、②1を上回るNER、③CO₂排出量削減効果、④新規性のある技術の利用または下水処理の併用により経済性確保が可能という4つの点で十分検討の価値がある取り組みといえる。特に、①の高い土地生産性は、国土の狭いわが国においては優先的に考慮すべき特徴といえる。

藻類バイオマス産業の展開に関して、わが国には特筆すべき利点がある。①豊富な水資源が存在する、②水田のための充実した水供給のインフラがすでに整備されている、③河川を中心に平野が広がっているため利用可能な土地が比較的レベルであること、である。これらの3つの要素は、藻類バイオマスファームの事業化に際して注目すべき点であると思われる。すでに述べたように、藻類は海水、淡水、汽水、下水などさまざまな水資源の利用が可能であり、また食糧生産との競合が少ないという点で他のバイオマスに対して有利であるが、穀物の栽培と同様、大量の水を供給す

ⁱ 『月刊下水道』新年号記事 田中修司、藻油と藻瓦斯が生み出す未来～下水処理場が藻類で満ちるとき。: http://www1.accsnet.ne.jp/~kyoukota/23algae_oil.pdf

るインフラが必要である。そのためには、水を効率よく提供するシステムが必要である。水田のために整備された水の供給インフラの活用は、藻類バイオマスの事業化のコスト削減に資することになると考えられる。加えて、水田が水平であることはオープンポンドを設置するときに、土地を水平にするための土木作業に伴うコスト軽減に寄与すると考えられる。

資源獲得競争時代における国のバーゲニング・パワー(交渉力)を向上させる点からみると、藻類バイオマスファームの事業化には二つの点で意義がある。第一に、「2.2わが国における潜在的生産規模推計の試み」で見たように、藻類エネルギーの土地生産性の高さから、狭い国土でも、ある程度の規模の生産が確保できることである。第二は、不測の事態が生じたときに、国内で生産を速やかに拡大できることである。これは、水資源が豊富で、水田のための水の供給インフラが充実し、平らな土地が多いわが国にとって、藻類バイオマスファームの建設は比較的短期間に実現できる可能性があると考えられるからである。平地でなくとも、山間の棚田なども小規模の藻類バイオマスファームとして使用できる可能性もある。以上のことから、短期間で立ち上げることができる再生可能エネルギーの生産ノウハウを蓄積しておくことは、いざという時の供給可能性を高めることができるという意味で意義が大きい。また、平地、山村の水田を活用した第6次産業としての藻類バイオマスファームは、バーゲニング・パワーの問題はともかく、検討に値する課題である。

日本は海洋国であり、世界有数の排他的な利用可能水域をもっている。本事業では、残念ながら、藻類エネルギー生産に海洋と沿岸海域を利用することについては十分な議論をすることができなかったが、別の機会に集中的に議論していかなければならない重要な課題である。この議論にあたっては、沿岸漁業との共生と相互活用の視点が重要である。特に魚介類の養殖や魚市場から出る有機廃棄物をどのように活用するかという、投入エネルギーの軽減という視点が不可欠である。逆に、藻類の培養から、オイル抽出後の残渣を利用した養殖魚介類への飼料供給というサイクルも想定できる。藻類には、海水で極めて高い増殖特性を示す種が多く知られている。また、混合栄養や従属栄養で増殖する種類も多い。藻類に近縁の微生物も含めて、微生物資源は未開拓のまま残されている。海洋バイオマス産業をエネルギー産業として再構築、あるいは漁業とのハイブリッド産業としての可能性を追求していく選択肢は真剣に検討するべき時期に来ているといえる。

表1- 5 LCA分析事例1

論文名	Lardon et al. (2009) : 詳細前提は参考資料で掲載)
主な想定	<ul style="list-style-type: none"> ● クロレラを利用。オープンポンド・100ha・残渣はリサイクル ● 培養条件は、窒素欠乏・通常培養の2つのケースを分析。抽出の技術は、ヘキサンをを用いて乾式抽出・湿式抽出の2つケースを分析。合計で2×2の4ケースについて分析。
重要な数量的分析結果	<ul style="list-style-type: none"> ● インフラ投資のエネルギーを勘案せずに、生産活動におけるエネルギー収支を分析したケースでは、NERは4ケースのうち、通常培養で乾式抽出のケースを除いて3ケースで1以上(1.24~4.34) ● インフラ建設エネルギーおよび廃棄に必要なエネルギーを勘案したNERは、窒素欠乏状態かつ湿式抽出法では1.34。ただし、オイル以外の藻類バイオマスも熱量として換算。
技術的な示唆、バリューチェーンへの示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● 窒素欠乏状況により、総合的なオイル生産性は低下するが、窒素購入量が減ることは、総合的なエネルギー収支を改善する。 ● 湿式抽出ではヘキサンを大量に利用するが、乾燥コストによるエネルギーが減少したため、総合的NERを改善した。 ● 窒素欠乏状態でのオイル生産性の高い種の発見が重要。 ● 窒素欠乏と成長率のコントロールが重要。 ● 窒素など肥料分の効率的なリサイクルシステムの確立が重要。 ● 水分を含んだ状態での低コスト抽出技術の確立が重要。
当調査に対する示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● インフラコストを入れても現実的な想定される技術においてNERが1以上であったケースが見られたことは極めて意義が深い。

表1- 6 LCA分析事例2

論文名	Vasudevan et al. (2012): (詳細前提は参考資料で掲載)
主な想定	<ul style="list-style-type: none"> ● 本研究は、近い将来、および長期的な視野で選択可能となる幅広い技術をもとに、二酸化炭素排出量削減効果ライフサイクルおよび現地での淡水の需要をモデル化し、培養に影響を与えるエンジニアリング的、生物学的、用地選定、土地利用方法について検討。 ● 400 haを想定。 ● 火力発電の排気ガスをCO₂源として利用。
重要な数量的分析結果	<ul style="list-style-type: none"> ● 湿式抽出で、残渣は嫌気消化によるバイオガス(メタン)による発電で培養エネルギーとして利用、消化残渣は可溶化し培養液として再利用したケースでNERが2.5(施設建設に係るエネルギーは勘案せず)。 ● 二酸化炭素排出量削減効果は、上記のケースおよび体外に油分を分泌する種を用いた培養のケースで:53 gCO₂eq·MJ⁻¹。 ● これは国内産菜種バイオディーゼル燃料を少し上回る水準。
技術的な示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● 湿式抽出が重要であることが確認。 ● 嫌気発酵が重要。 ● 各種リサイクル技術の重要性。 ● 高効率、低コスト嫌気発酵技術の確立が重要。 ● CO₂のリサイクル技術確立が重要。 ● 高効率、低コストバイオガス発電の確立が重要。 ● 水分を含んだ状態での低コスト抽出技術の確立が重要。
当調査に対する示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● インフラコストを入れても現実的に想定される技術においてNERが1以上であったことは極めて意義が深い。

表 1-7 LCA 分析事例 3

論文名	Lundquist et al. (2010): (詳細前提は参考資料で掲載)
主な想定	<ul style="list-style-type: none"> ● 2つの目的を分析: ①エネルギー生産、②汚水処理。 ● エネルギー生産について2つのケースを分析: ①バイオガスによる発電のみ、②バイオガスによる発電とオイル生産の双方 ● 規模について2つのケースを分析: ①100ha、②400ha ● 低コストの凝集技術が前提。 ● 抽出は乾式のみ。
重要な数量的分析結果	<ul style="list-style-type: none"> ● 汚水処理を主目的にしたケースにおいて、経済収支がプラスになると推計。
技術的な示唆、バリューチェーンへの示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● 下水利用の重要性。 ● バイオガスの経済性の高さ。 ● 乾式抽出のコスト高がバイオ燃料生産ケースにおいてコストを拡大し経済収支がマイナスになった要因。 ● 湿式での低コスト、低エネルギーの抽出方法が重要。 ● 低コストの濃縮技術。 ● 低コストのレースウェー建設方法(土を全面に土手として利用することでコスト削減したことが経済収支にプラスへ寄与)。
当調査に対する示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● 汚水処理コストの費用をまかなえば経済的には、現在の技術でも収支がプラスとなる可能性が確認。 ● 別途田中(2010)においても日本の下水処理コストを勘案すると藻類を利用した下水処理の有用性が示唆されていることを勘案すると、下水処理、汚水処理、工業排水などでの藻類培養は有力な選択肢として検討することが重要であるといえる。

表1-8 LCA分析事例4

論文名	Liu et al. (2012) ⁱ : (詳細前提は参考資料で掲載)
主な想定	<ul style="list-style-type: none"> ● 過去2年で公表されたLCAに関する有力な6つの論文(Lardon et al. 2009, Clarens et al. 2010, Campbell et al. 2010, Jorquera et al. 2010, Sander et al. 2010, Stephenson et al. 2010)は、すべてオープンポンドを利用し、濃縮、収穫、精製に関する技術もほぼ同様なものを利用しているが、NERや二酸化炭素排出量削減効果についての見解は大きく異なっている。その違いはCO₂供給・栄養塩に関する前提と、副産物および残渣リサイクルに関する前提がことなっているためと推測される。それらの前提を統一し推計している。残渣リサイクルに関しては、他の副産物は考慮せず、すべて嫌気消化による熱およびメタンガスによる発電により培養エネルギーに利用し、栄養塩はリサイクルして培養のために利用すると統一している。 ● 以上の前提を標準化し結論を再計算し比較。 ● 施設に対する設備投資は考慮せず。
重要な数量的分析結果	<ul style="list-style-type: none"> ● 標準化したNERはLardon 0.95, Stephenson 1.91, Clarens 1.36, Campbell 1.04, Sander 1.67, Jorquera 0.52となった。これは、Hill et al. 2006で推計された大豆のバイオディーゼルのNER1.93およびFarrell et al. 2006で推計されたトウモロコシのバイオエタノールのNER1.20とほぼ同程度の水準。 ● 標準化したCO₂排出量を、車の走行1kmあたりでみると、Lardon 264g, Stephenson 152g, Clarens 160g, Campbell 178g, Sander 101gとなった。これは、Hill et al. 2006で推計された大豆のバイオディーゼルの102gおよびFarrell et al. 2006で推計されたトウモロコシのバイオエタノールの236gとほぼ同程度の水準。
技術的な示唆、バリューチェーンへの示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● 低コスト、低エネルギー、高効率の残渣の嫌気消化によるエネルギー生成プロセス、残渣の栄養塩リサイクル技術の確立が重要。
当調査に対する示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● 総合的にみて大豆やトウモロコシベースのバイオ燃料と比較して、遜色のないレベルであることを確認。

ⁱ X. Liu, A.F. Claren and L.M. Colosi (2012) Algae biodiesel has potential despite inconclusive results to date. Bioresource Technology 104, 803-806

表 1-9 LCA 分析事例 5

論文名	Shiho et al. (2012) ¹
主な想定	<ul style="list-style-type: none"> ● 分析対象: <i>Botryococcus braunii</i>、トリテンペル(C₃₄H₅₈など)生成に着目 <ul style="list-style-type: none"> ➢ トリテンペル(C₃₄H₅₈など)生成に着目。 ● 19ha、セミオープンポンド(深さ30cm、オープンポンドの中に膜で作ったチューブを設置)、プラスチック製の被覆。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 水田の耕作放棄地の利用を想定、水供給システムは水田の施設を活用、火力発電や製鉄所などに隣接。 ➢ 三つの施設を想定: ①準備施設、②セミオープンポンド(小7.6×10³ ha、中0.38ha、大19ha)各培養槽には、薄い膜のチューブ状のリアクターを水中に設置し、その中で培養することでコンタミネーションを防止、③フィルタリング・固液分離施設。 ➢ ヘキサン抽出(69°Cで気体)を利用、残渣のエネルギー利用で温度調整。 ➢ 培養の濃度は中の培養槽で1.5~2 kg・m⁻³で維持、大で3.5 kg・m⁻³で維持。 ➢ 1日あたり平均収穫水量は4×10³×m³・day⁻¹。 ➢ オイル量: 乾燥重量あたり45%。 ➢ 年収穫量は5,100,000kg (=面積190,000m²×0.3m×365日稼働×1日あたり成長率7%×m³あたりバイオマス濃度3.5 kg・m⁻³)。 ➢ 残渣はペレット化して固形燃料を生産。 ● 建設コスト2億円と推計。内訳(単位100万円): 土地改良9、土木工事4.5、プール整備58.5、エアレーション設備18、水供給・排水設備4.5、オイル抽出設備13.5、フィルタリング設備13.5、水清浄設備6.8、栄養塩保管設備4.5、栄養塩供給設備9、培地攪拌設備6.8、管理システム8.6、培養準備棟31.5、培養槽間の輸送システム2.3、その他配管9)。 ● オペレーションコストは年2億円の前提(1haあたり1,050万円)、内訳(単位100万円): 攪拌38.5、培地15.5、エアレーション25.3、フィルタリング3.3、オイル抽出10.6、棟内環境コントロール2.3、土地賃料14.5、メンテナンス22、管理コスト20.5、労働コスト47.5)。
重要な数量的分析結果	<ul style="list-style-type: none"> ● LCAの計算結果: 建設コスト: 6,580,000MJ: 年間運転エネルギー60,000,000MJ、年間オイル生産エネルギー103,000,000MJ、年間ペレット生産エネルギー65,300,000MJ: 運転ベースのNER = (103,000,000MJ + 65,300,000) ÷ 60,000,000 = 2.8。 ● 1L 130円のオイルの売価で計算すると、年間の営業利益は5,220万円、当期利益が3,130万円、資本調達に係るコストが年間9%としてもプラントの正味現在価値が3.95億円と試算。
技術的な示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● オープンポンドと閉鎖型のリアクターの長所の組み合わせ。 ● 1haあたりの年間オイル生産量は、3.5kg・m⁻³×0.3m×10,000×0.07(一日あたり成長率)×365×0.45 = 120kLとなる。(Weyer et al. 2010)の50kLの2倍以上の生産性を前提としている。
当調査に対する示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● 1haあたりのオイル生産量はかなり高い前提で試算しているが、仮に半分となってもNERは1.4程度であり1を超えるので、エネルギー収支的には意義のある結果であると評価できる。 ● また、営業利益ベース、正味現在価値ベースでプラスとなる前提が示されたことは有用な試算であるといえる。

¹ M.Shiho, M.Kawachi, K.Horioka, Y.Nishita, K.Ohashi, K.Kaya and M. Watanabe (2012), "Business evaluation of a green microalga *Botryococcus braunii* oil production system," *Procedia Environmental Sciences*, in press.

表 1-10 LCA 分析事例 6

論文名	Frank et al. (2011) ⁱ
主な想定	<ul style="list-style-type: none"> ● 数多くの実証データのあるオープンポンド、ペダリングシステムで培養すると仮定。光合成藻類を想定。 ● バイオマス増殖スピードは乾物量換算で$25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$、油脂比率は25%。 ● 窒素、リンは残渣分リサイクルで足りない分について農業用肥料を利用。CO₂は火力発電所の排ガスを利用。 ● 藻類の分子構造として、C(炭素):N(窒素):P(リン)については窒素欠乏による培養を前提に103:10:1を想定。 ● 濃縮はバイオ凝集、溶解空気浮上法、遠心分離機を段階的に利用してエネルギー消費を抑制。油脂の抽出は水分を80%含んだ状態で、オープンポンドの隣接施設で実施(乾燥するエネルギーを省き、かつ水分を多量に含んだ状態での輸送コストを軽減するため)。ホモジナイザーで細胞壁を破壊し、ヘキサンにより油分を抽出。抽出した油脂の精製は離れた場所で集中的に実施し、そこから最終消費地へ輸送。 ● 濃縮、収穫、抽出で発生する残渣は、嫌気消化およびコジェネシステムにより発電および熱源として利用。また、嫌気消化の残渣より固液分離し、液体に含まれる窒素、リンは栄養塩として培養に利用。固体に含まれる窒素、リンは肥料として土壌改良に利用。 ● 嫌気消化で発生したガスについてはそのまま燃焼すると有毒成分となる成分があるため除去。除去のためのエネルギーも勘案。 ● 二酸化炭素排出量削減効果については嫌気消化で大気中に放出されるメタンガスの効果、および残渣を肥料として利用した時に残存窒素から発生するN₂Oも考慮。 ● エネルギー収支においては、培養システムの投資に関するものは含まない。
重要な数量的分析結果	<ul style="list-style-type: none"> ● 百万BTUⁱⁱのバイオディーゼルを生産するために必要な石油換算エネルギー投入量は548,329BTU。NERで見れば1.8程度。エネルギーの消費内訳は、図1-4を参照。 ● 二酸化炭素排出量削減効果は、百万BTUのエネルギー生産においてCO₂換算で55,440gであり、通常利用される低硫黄ディーゼル百万BTUのエネルギー量の燃焼で排出される値101,234gと比較すると45%削減。 ● なお、他のバイオマス(大豆からのバイオディーゼル、木材、草、トウモロコシ、森林間伐材からのエタノール)と比較しているが、NER、CO₂排出量削減効果については、いずれも他の5つが藻類よりも優れている。
技術的な示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● 水分を多量に含んだ藻類から、培養施設に隣接する施設で、連続で、低コスト低エネルギーで油分を抽出する技術の確立が重要。 ● バイオマスリサイクル技術を利用することが前提。 ● 本調査では各種センシティブティ分析を実施。
当調査に対する示唆	<ul style="list-style-type: none"> ● NER、CO₂排出量削減効果で藻類は他のバイオマスより劣っているが、NERで1.8、CO₂排出量削減効果で45%であることは、十分に再生可能エネルギーとして魅力があるといえる。

ⁱ E.D. Frank, J.Han, I.Palau-Rivera, A. Elgowainy and M.Q. Wang, (2011), Energy System Division, Argonne National Laboratory, "Life -Cycle Analysis of Algal Lipid Fuels with GREET Model"

ⁱⁱ BTU: British thermal unit 英熱量。1ポンドの水の温度を華氏で1度上げるのに必要な熱量。1英熱量はおよそ250 cal, 1,050 ジュールに相当する。

なお、Shiho et al. (2012)では、表1- 11でみたように海外の先行文献との比較を行っている。報告された計算事例は、1haあたり建設コストは平均194,500USドル、運転コスト一年分は114,975USドルである。Shiho et al. (2012) では、1haあたりの建設コストと年間運転コストはともに124,000USドルとしているので、平均と比較すると、建設コストは割安な前提、年間運転コストは若干の割高な前提となっている。

表1- 11 藻類バイオマスファームの建設コスト・運転コストの試算事例

	培養槽	広さ (ha)	1haあたり建設 コスト (USドル)	年間1haあたり 運転コスト (USドル)
Shiho et al. (2012)	プラスチック製の 薄膜	19	124,000	124,000
Bennemann et al. ⁱ (1987)	プラスチック製の 覆工事	10	330,000 ⁱⁱ	245,000 ⁱⁱⁱ
同上	土による覆工	100	75,000 ^{iv}	61,300
Lundquist et al. (2010) ^v	ハイレートボン ドレースウェー	100	249,000	29,600
平均値			194,500	114,975

Frank et al. (2011) では、以下の図のように培養プロセスにおけるエネルギー投入量の割合を示している。これによると栄養塩として利用する肥料の生産、油分抽出、燃料への精製で、合計で半分以上を占めている。よって、このプロセスにおける技術革新がエネルギー収支の改善に大きな影響を与えるといえる。

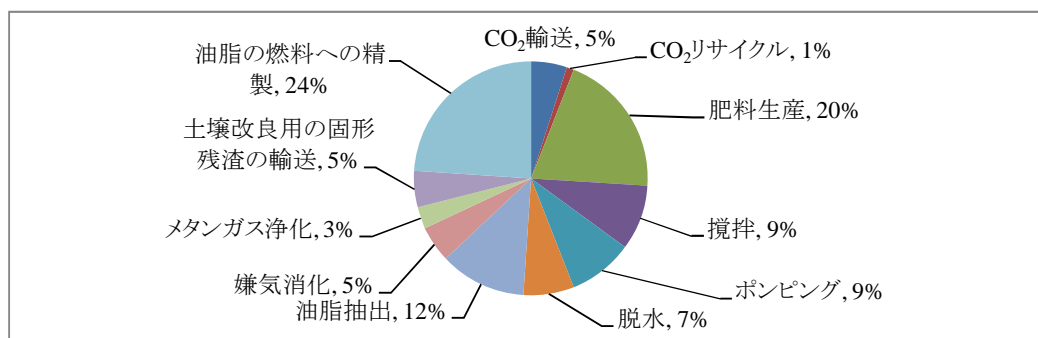


図 1-4 LCA 分析事例 6 におけるエネルギー消費割合

ⁱ J.R. Benemann, D.M. Tilletm and J.C. Weissman, (1987), “Microalgae biotechnonology”, Trend Biotechnol 1987; 5(2):47-53

ⁱⁱ 予備的資本、運転資本を含む。

ⁱⁱⁱ 減価償却費および調達した資本に対して負担する理論的コストを含む。

^{iv} 予備的資本、運転資本を含む。

^v T.J. Lundquist, I.C. Woertz, N.W.T. Quinn, and J.R. Benemann (2010), A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production

また、Frank et al. (2011) は、二酸化炭素排出量削減効果に関してセンシティブティ分析を行っており、特に効果が大きかったのは、①培養の際の攪拌・ポンピングエネルギーの低減、②嫌気消化におけるメタン生産効率向上、③コジェネレーションのエネルギー効率性向上、④嫌気消化の際のメタンガスの大気中への拡散量の低下、としている。

3.2. 結論

6つの藻類バイオマスエネルギーのLCAに関するレビュー結果を調査のフレームワークの論点2から9、および事業化の観点から整理すると、表1- 12のようにまとめることができる。

表1- 12現在の技術による藻類バイオマスの再生可能エネルギーに関するLCA分析のまとめ

関連論点		論点への示唆
2	現実的なエネルギー産出量	<ul style="list-style-type: none"> 過去の培養データ、短期的に実現可能とされる技術をベースに算出されたNERは1以上になるケースが見込まれることが確認 二酸化炭素排出量削減効果はほぼ、他のバイオ燃料なみの水準かやや下回る水準。ただし石油と比較すると削減効果あり
3	現実的なエネルギー投入量	
4	現実的なNER・二酸化炭素排出量削減効果	
5	既存知見・技術の応用（3-5年後の実用化が想定）	
6	資源枯渇による負荷	<ul style="list-style-type: none"> 溶媒を大量に利用すること、培養のための電気代が多いことはマイナス 少ない土地・水競合問題、肥料競合問題(リン枯渇問題回避)はプラス
7	研究開発中の新知見・技術（5年後より実証し、10年後程度で実用化可能性）	<ul style="list-style-type: none"> 開発が望まれる技術としては、オイル分の高い種の育成、低コスト濃縮・抽出・収穫高効率メタン発酵発電・熱利用システム、オイル成分の体外分泌など
8	将来のエネルギー投入量	<ul style="list-style-type: none"> 合理的に推計することは困難だが、各種知見・技術の応用可能性を検討することで方向性を議論
9	将来のNER・二酸化炭素排出量削減効果	<ul style="list-style-type: none"> 合理的に推計することは困難だが、各種知見・技術の応用可能性を検討することで方向性を議論
追加論点 <事業化>		<ul style="list-style-type: none"> 下水処理を主目的にすると短期的に採算がとれる可能性を示唆 生産性が2倍程度になれば、下水処理など併用しなくても採算が取れる可能性を示唆

論点1の潜在的魅力(理論的最大エネルギー産出量)の把握で論じた点と合わせると図1- 5のようにまとめることが可能である。

すでにふれてきたように、藻類は他のバイオマスと比較して高いエネルギー生産効率を示す。また、LCA分析から、現在の技術でも藻類バイオマスによる再生可能エネルギーの生産は、NERが1以上であり、二酸化炭素排出量削減効果の観点から見ても、他のバイオマスと遜色のないレベルを達成できる可能性が高い。さらに、下水を利用すれば経済収支も早期に黒字化する可能性も示

されている。

藻類燃料の土地生産性の高さは、狭い国土での生産に適していることを示唆している。技術の開発が十分に進めば、例えば、耕作放棄地を利用することでわが国でもエネルギー生産が可能になる可能性が高い。しかも、わが国の水田には伝統的に世界一ともいえる水供給のインフラが整備されており、必要に応じて、迅速に食料からエネルギー生産の場に転換できるポテンシャルをもっている。わが国の水田は、エネルギー政策に柔軟に適応できる特性をもっている可能性が高く、土地の有効活用の面から国家的視点から包括的に検討することが必要である。

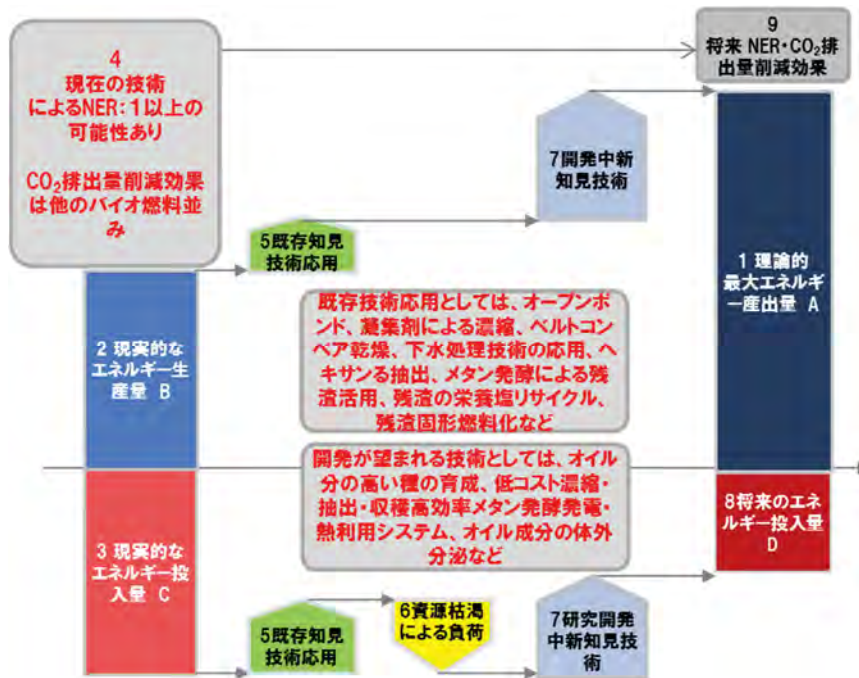


図 1-5 現在の技術による LCA 分析の示唆のまとめの図示

現在は、化石燃料の枯渇に起因するエネルギー危機の時代である。本報告書の作成過程で藻類オイルの生産を進めることはエネルギー安全保障の観点から検討に値することが議論された。日本では、エネルギーのほとんどを海外に依存しているが、これまで安全保障の観点から独自のエネルギー生産を論じることはほとんどなされてこなかった。対照的に米国では1970年代の第一次石油ショックと米国産の石油がピークアウトを迎えたという状況に直面したとき、エネルギー安全保障の観点からバイオマスエネルギーの研究開発を開始した。これが、現在の米国の藻類エネルギーの研究開発、産業化の牽引力になっていることは忘れてはならない点であり、ここであえて指摘しておきたい。藻類オイルの生産が、わが国の国際交渉力としてのバーゲニング・パワーになり得るという視点は、本事業の検討の過程ではじめて出てきたものであり、今後広範な視点からの議論が必要であると思われる。エネルギーの専門家、安全保障の専門家を交えて議論を深化させていく必要があるであろう。

以上の論点から、技術革新の可能性を前提としながらも、さまざまな再生可能エネルギーの中で藻類バイオマスエネルギーの事業化は、わが国にとって取り組むべき重要な課題であると結論できる。

表1- 13では、第三世代である藻類バイオマスと第二世代のバイオマスの技術革新の可能性について論点の整理を示している。断定はできないが、藻類は分類群や種の多様性が極めて大きく、未開拓の膨大な藻類種が存在すると考えられており、今後新たな優良種、優良株の発見、開発によって、エネルギー生産効率が向上することが期待できる。また、さまざまな水資源を利用できることからリンの枯渇をはじめとする資源枯渇問題による負荷は、陸上バイオマスと比べて小さいと推測される。総合的に考えれば、藻類バイオマス燃料の事業化を検討することは極めて合理的な判断であるといえる。

適切な研究開発による技術の改善が伴えば、藻類バイオマスの再生可能エネルギーの資源としての可能性が拡大すると考えられる。特に、国土の狭いわが国にとっては魅力ある選択肢であり、産学官をあげた取り組みが望まれる。

表1- 13 分析のフレームワークで見た藻類バイオマスと穀物ベースのバイオマス

分析のフレームワーク		第三世代のバイオマス 藻類バイオマス		NER改善 可能性	第二世代のバイオマス	
		改善可 可能性	詳細内容		改善可 可能性	詳細内容
5	既存知見・技術 の応用(3-5年 後の実用化が想 定)	あり	<ul style="list-style-type: none"> 固液分離コストの軽減(凝集・沈殿・嫌気消化・ベルトコンベア式乾燥、膜処理)、低コスト抽出精製技術(超臨界、亜臨界、超音波、マイクロウェーブ、パラスタ水処理の応用など) 	=	あり	<ul style="list-style-type: none"> 生産性の向上、粗放的栽培の可能性、周年供給、循環型農業などの観点から優良品種作出の研究が進められている
6	資源枯渇による 負荷	負荷は 比較的 少ない	<ul style="list-style-type: none"> 土地競合問題、水資源競合問題、窒素、リン枯渇問題、肥料の効率的利用、土壌汚染問題の少なさ 	>	負荷は 今後ますます 増大	<ul style="list-style-type: none"> 土地の食糧との競合問題、水資源問題、肥料による土壌汚染、肥料からのアンモニア、メタン発生
7	研究開発中の新 知見・技術(5年 後より実証し、 10年後程度で 実用化可能性)	潜在的 な改善 可能性 は大き い	<ul style="list-style-type: none"> 種の多様性は藻類バイオマスから見た新知見の発展可能性 遺伝子工学・育種による亜臨界・臨界技術の応用・LED利用の夜間培養・太陽光集光による照射によるより効率的な光合成(フォトバイリアクターの改善) 	>=	ある	<ul style="list-style-type: none"> 光合成機能の向上に関する基礎研究や二酸化炭素の固定・資源によるバイオマスの量的利活用を促進する研究も進められている
8	将来のエネルギ ー投入量	大幅な減少の可能性大が見込める		>	ある程度減少の可能性はある	

以上のまとめを、あえて分かりやすさを追求して図示すると、図 1-6 のようになる。

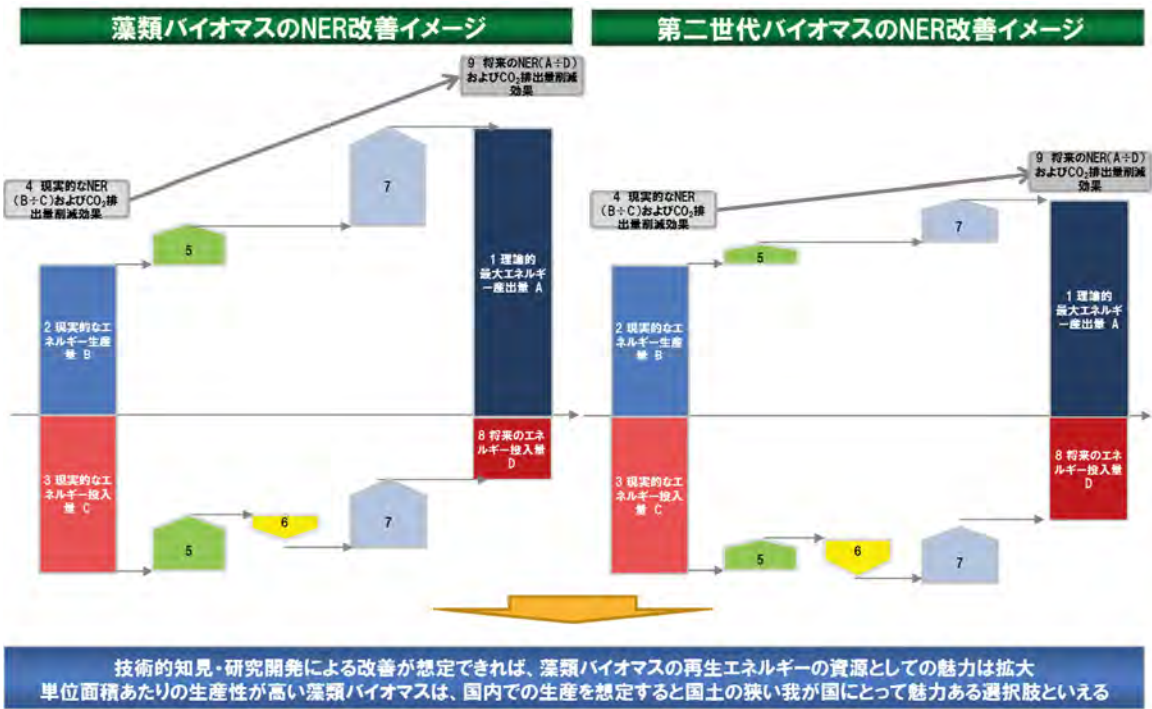


図 1-6 NER 改善イメージの比較

4. バリューチェーン別の課題把握

4.1. 6つのバリューチェーンの事業化へのつながり

藻類バイオマスの再生可能エネルギーとして有用な主要な特徴をまとめると図1-7のようになる。それぞれの有用性は、生産性の向上やその後の工程の潜在的なコスト軽減につながる要素である。各要素の関連性を念頭においてチェーンを分析することが重要である。

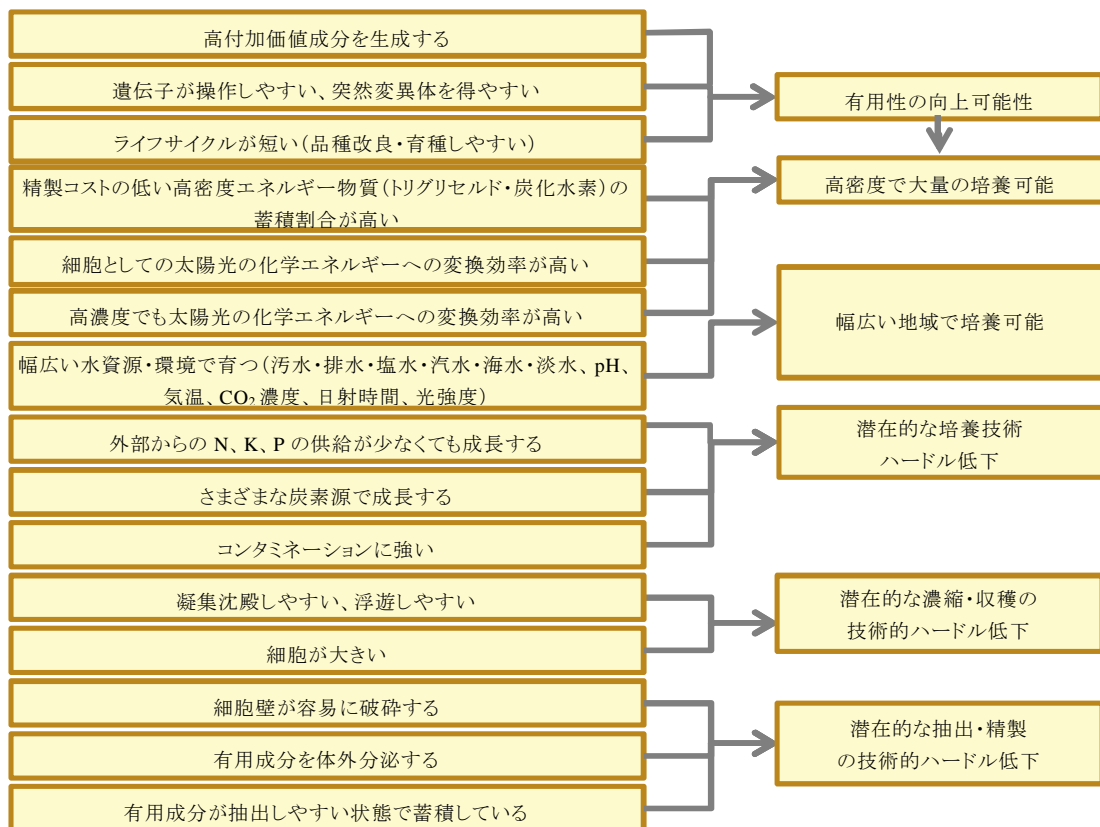


図 1-7 藻類に求められる再生可能エネルギーとして有用な特性の例

以上の特性は、藻類バイオマス産業の全体のバリューチェーンに密接に関連している。その関連性を俯瞰したのが図1-8である。藻類の特徴とバリューチェーンは、図で示したように最終的な事業化に密接に関連している。以降の章で、個別の要素技術の体系としてまとめていく。技術体系としては、図1-9のようにまとめられる。

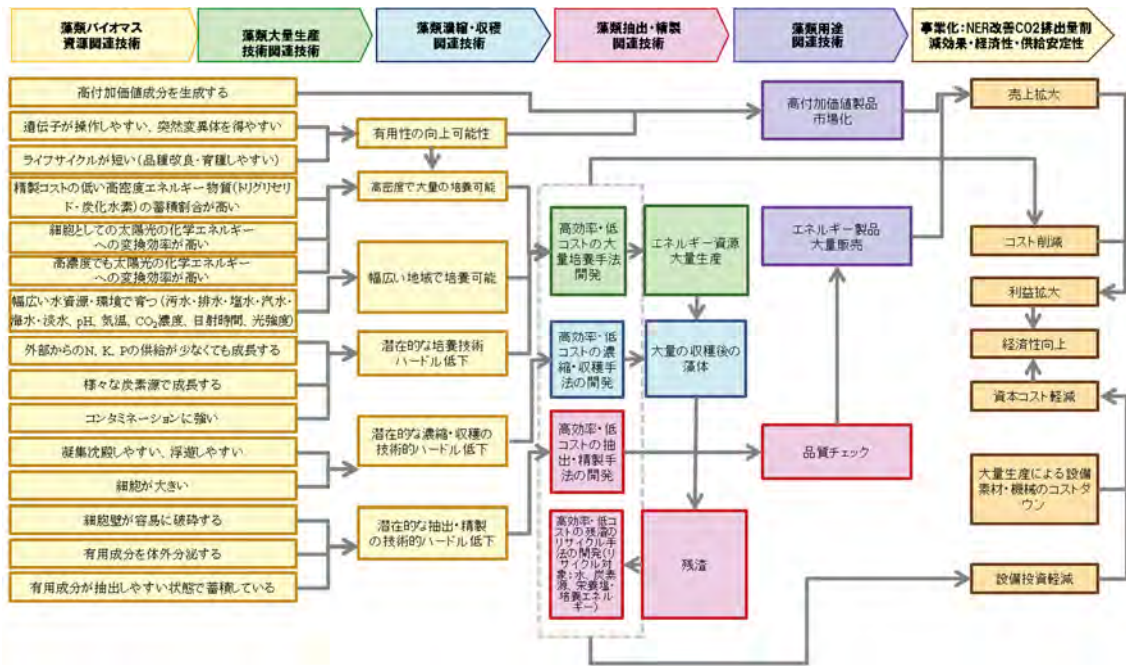


図 1-8 藻類の特徴とバリューチェーンで見た事業化へのつながり

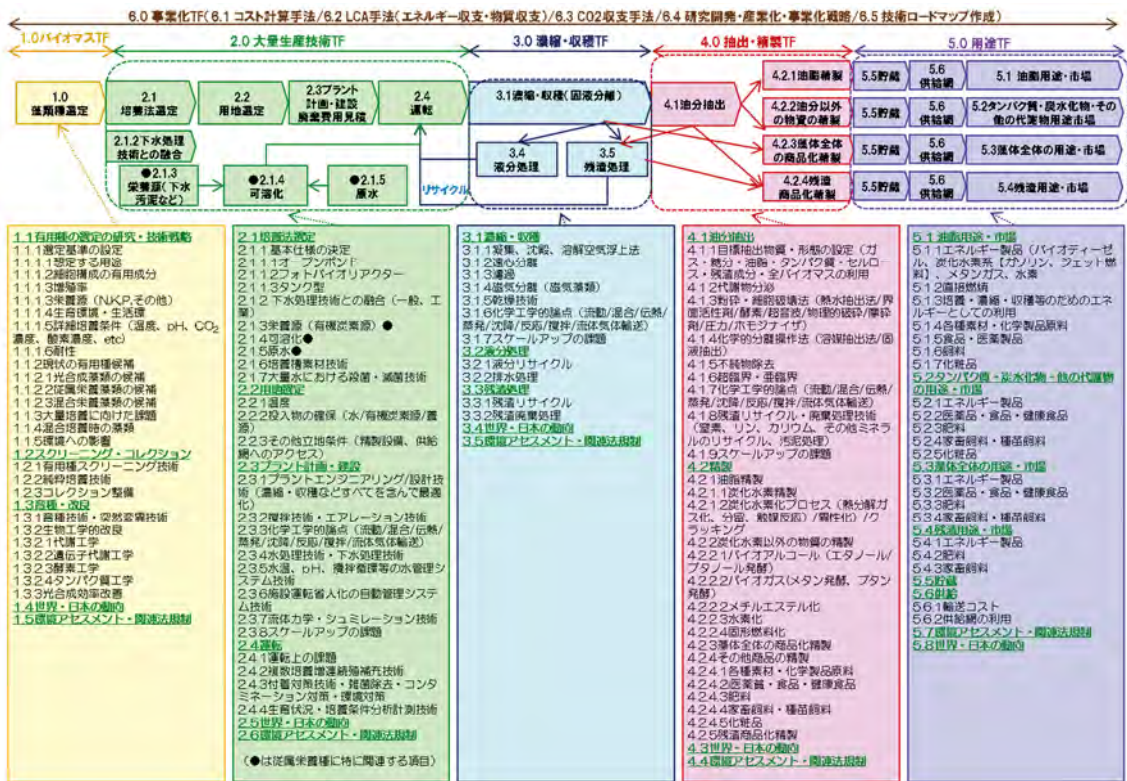


図 1-9 6つのバリューチェーンの技術体系としてのつながり

第二章 わが国の現状と課題の整理

1. わが国の現状と課題

これまで見てきたように、さまざまな再生可能エネルギーの中で藻類バイオマスエネルギーの事業化は、わが国にとって取り組むべき重要な課題であるといえる。しかし、まだ確立していない要素技術が多く、また関連分野が多岐にわたるために連携がとられていないなど、事業化の達成には数多くの不確実性が存在していることは間違いない。わが国では、現在、民間企業における藻類バイオマスエネルギーの事業化に関心が高まっているものの、事業化へのリスクの大きさから、大規模な取り組みは極めて限定的である。このような状況から脱却し、事業化を促進するためには、民間が負担可能な事業リスクの範囲を過度に超えた部分について国が関与し、長期的な民間の自発的な取り組みを支援する政策が重要である。

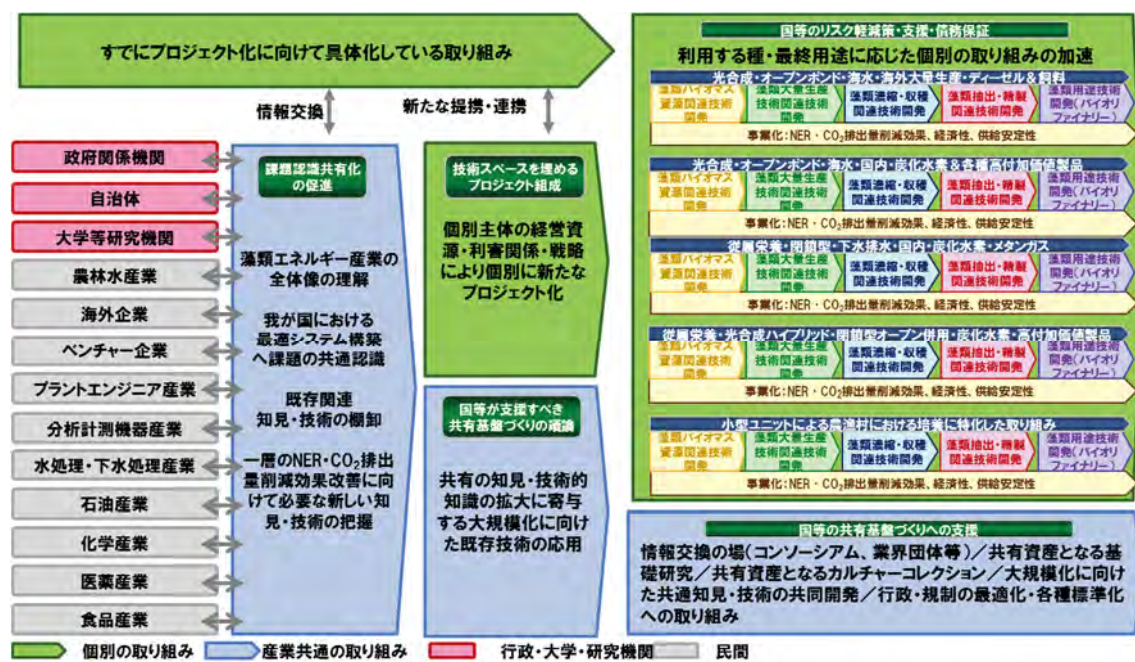


図 2- 1 藻類エネルギー産業育成に向けた利害関係者の理想の連携の姿の例

具体的には利害関係者が図2- 1に示したフレームワークで、最適な産業発展の在り方を意識しながら事業化に取り組むことが重要であるといえる。出発点として重要なことは、関連する官公庁やベンチャー企業、すでに重要な要素技術を開発している海外企業、農林水産業関係者、分析計測機器産業、プラントエンジニア産業、水処理・下水処理産業、石油・化学・医薬・食品産業などさまざまな利害関係者の間で、事業化に向けた課題に関して情報の共有化を進めることである。藻類エネルギー産業は、利用する技術が多岐にわたることと、また、エネルギー以外の副産物が極

めて多様であることから、多くの産業の連携が不可欠であり、幅広い利害関係者が、事業化の可能性と事業化を阻む障害に関する正しい情報を共有することが第一義的に重要であるといえる。

1.1. 産業競争力懇談会の取り組みについて

藻類エネルギーの産業化に向けた取り組みの在り方を示した先例として、産業競争力懇談会が本年3月6日に提示した「微細藻類を利用した燃料の開発2012年3月6日ⁱ」が注目される。同報告書(以下、懇談会報告書)の作成には、エネルギー産業、水処理産業、商社、エンジニアリング会社、自動車産業など幅広い産業の企業がメンバーとして参画し、また、アドバイザーとして経済産業省、農林水産省、研究機関として名古屋大学が参加するなど、産官学が関わっている。同報告書では、微細藻類燃料は、①持続可能な輸送用燃料としてグリーンハウスガス(GHG)排出量削減(本報告書では、CO₂に換算して議論している)に寄与できる、②エネルギー資源の多様化や自主開発エネルギー源の獲得に貢献できる、③既存石油系燃料と同様に扱え、輸送機器や燃料供給インフラへの新規投資が不要、④抽出残渣は飼料等としての利用が期待でき、食料生産にも貢献できる可能性があるとして、特にエネルギー資源に乏しい日本は、この開発に総力を結集して取り組むべきと論じている。

また、懇談会報告書では、「事業環境整備の課題では、持続可能性基準を達成するためには、従属栄養ではなく、独立栄養培養(光合成を行う藻類の培養)を用いた開発を前提としている。また、国内における土地の不足から海外で培養することを想定して、国内株の海外持込や海外現地株の利用、事業地における規制、環境影響評価等を調査している。このような前提に立って、懇談会報告書で提示された技術開発ロードマップでは、光合成藻類のオープンポンドでの培養で、燃料生産規模10万kL/年、培養面積3,000ha、CO₂排出量50%削減を実現する技術完成目標を2020年と設定し、コスト目標として120円/L以下を目指している。

その実現のために、要素技術として、培養、分離・抽出、燃料化、抽出残渣の有効利用、基盤技術として燃料生産に適した株の獲得・改良、および株の長期・安定的な保管について技術課題を列挙し、具体的な解決方法の方向性を提示している。同時に、最適な一貫システムの開発を効率化する目標のために、オールジャパンの協議会体制として「微細藻類燃料開発協議会(仮称)」を設立することを提唱している。この協議会で、関与する企業グループの要素技術開発と一貫生産システム開発、および基盤技術強化を連携させ、開発推進に必要な共通課題の抽出と関係者間のフィードバックを図ることを目指すとしている。そして、協議会の活動の推進のために国の支援を求めている。また、現在の技術をベースにNERやCO₂排出量削減効果も試算しており、光合成藻類については、NERは1.5程度でCO₂排出量削減効果があるとし、一方で、従属栄養については、NERは1未満で、CO₂排出量削減効果は期待できないとしている。

ⁱ <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema38-L.pdf>

以上を踏まえて、懇談会報告書では、「微細藻類・光合成培養・海外での培養」を前提として、2020年までの各年度における、技術ロードマップを全体工程、および培養・分離技術工程、抽出・燃料化工程、残渣有効活用、基盤技術にわけて、生産性や克服すべき技術課題について一般的な論点を列挙し、また具体的に海外での培養を行うために豪州およびタイにおける生態影響調査、製造工場規制における詳細な分析を行っている。

懇談会報告書は、① わが国における藻類のエネルギー資源としての重要性について言及していること、② オールジャパンとして取り組むことの重要性について言及していること、③ 藻類燃料のNERが1を超え、GHG排出量削減に効果があること、④ オールジャパンで取り組む体制を提唱していること、⑤ 培養システムの実現のための技術ロードマップを示したことなど、藻類エネルギー産業発展の道筋を具体的に示したものと高く評価できる。

しかし一方で、産業競争力懇談会の報告書には、本事業で進めてきた議論と異なる点も多くみられる。懇談会報告書では、「微細藻類・光合成・海外での培養」というシステムに限定して検討しているが、本報告書でこれまで論じてきたように、藻類に対するわれわれの知見は未開拓の部分が多く、今後さらに新知見の発見が期待できる。その観点から、藻類バイオマスのより広範な活用の可能性に取り組む体制づくりが重要であると考えられる。現在の技術や知見をベースとすると、同報告書が結論づけた「微細藻類・光合成・海外での培養」というシステムに限定することは、リスクを最小限にして事業化を最優先するという立場からすれば有力な選択肢の一つといえる。しかし、今後前提が大きく変わる可能性があるとするれば、複数の培養システムの可能性について取り組むことも極めて重要であるといえる。

例えば、懇談会報告書では、従属栄養藻類は投入する糖の生産にかかるエネルギーが大きいことから、CO₂排出量削減には寄与しないとして、持続可能性基準へ適合しないと結論している。従属栄養培養で使われる有機物はもともと植物の光合成によって作られたものであるから、それ自体はカーボンニュートラルである。使用される有機物は食物残渣や汚泥などが想定される。GHG排出量の試算で加算しなければならないエネルギーとしては、これらの有機物を従属栄養生物が利用できる形態の糖に変換することに要するエネルギーがある。これは考え方としては、廃材や麦わらからバイオエタノールを生産することと似ている。従来焼却処分されていた有機物からエネルギーを生産することであり、焼却に使用されていたエネルギー分の削減に寄与する。従属栄養性藻類の培養で糖化に費やされたエネルギーを上回るエネルギーを生産できれば、十分開発の対象になり得る。また、食品系有機排水には糖化の必要がなく、そのまま有機物源として従属栄養藻類培養に利用できるものがあることから、今後の技術開発によりエネルギー収支が大きく改善される可能性が高い。懇談会報告書では、光合成藻類、従属栄養藻類とも成長速度(バイオマス生産速度)を一律に $31\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ としているが、生長速度を一律にすると、外部から有機炭素源を必要としない光合成藻類の方がCO₂排出量削減効果はよくなる。しかし、従属栄養性藻類は成長速度

が光合成藻類の5～10倍もあり、光合成藻類に比べて時間あたりの生産エネルギー量が大きいことが予測される。すなわちまとめると以下の表2-1のようになる。

表2-1 光合成藻類と従属栄養藻類のCO₂排出量削減効果の比較における論点

		従属栄養藻類におけるエネルギー生産に利用するCO ₂	光合成藻類エネルギー生産に利用するCO ₂
①	利用する炭素源に関する論点	光合成由来の有機炭素源や未利用で廃棄される有機炭素源を利用するのであれば、カーボンニュートラル。 ただし、有機炭素源を回収し培養システムへの輸送に伴うCO ₂ 排出量は考慮しなければならない。	火力発電などから排気ガスとして大気に排出されるCO ₂ を利用するのであれば、カーボンニュートラル。 ただし、排気源からCO ₂ を培養システムにまで輸送する際に排出されるCO ₂ や排気ガス再利用に伴う処理プロセスで排出されるCO ₂ を考慮しなければならない。 また、周辺にCO ₂ 排出源のないところでは、CO ₂ の濃縮と輸送にともなうCO ₂ 排出量は考慮しなくてはならない。
②	培養・濃縮・収穫・抽出・精製に関する論点	エネルギー単位あたりのCO ₂ 排出量は、A)藻類バイオマスの成長スピード、B)油分比率、C)濃縮・収穫・抽出・精製にともなうエネルギー消費量、によって左右される。 一般にバイオマス成長速度は光合成藻類に比べて速いが、閉鎖系培養に限定される。	同左であるが、一般に従属栄養性藻類と比べて増殖速度は遅いが、開放系での培養が可能。
③	総合効果	①に関しては、従属栄養藻類には大量の有機物資源が、光合成藻類には大量の濃縮CO ₂ ができるだけ簡単に、かつ省エネで確保できる立地条件が必要とされる。②に関しては、A)～C)の総合的な要因によって左右される。したがって、総合的にみれば、従属栄養藻類が光合成藻類よりもCO ₂ 排出量削減効果が高い場合もあれば低い場合もあり、一概にどちらになるか断定することはできない。立地条件と培養株の特性に基づいて、どちらにするか、あるいは両者のハイブリッドにするか、決めることが必要とされる。	

従属栄養藻類が他の植物が固定したCO₂を利用してエネルギーを生産すると考えれば、光合成、従属栄養の別を問わず、一連のプロセスで消費される化石燃料由来のエネルギーを除けば、CO₂の地球規模の炭素循環の範囲内で、再生可能エネルギーを生産していることになる。

以上は一例にすぎず、第三章において詳細に論じるが、研究開発中の数多くの新知見があることを考えると、微細藻類に限らず、「大型藻類」、光合成に限らず、「従属栄養」や「混合栄養」、また海外培養に限定せずに「国内培養システム」についても事業化の可能性を幅広く検討することが重要であると考えられる。

後に詳細に述べるが、米国エネルギー省 (DOE) の主導により発足された研究コンソーシアムにおいても、極めて幅広い技術体系の培養システムに関する基礎研究が国の支援でなされている。特に、エネルギー自立の観点からいえば、国内での事業化の可能性については、営利目的を超えた国家安全保障の視点から十分な検討を行うことが極めて重要といえる。

なお、懇談会報告書においては、一貫システムの開発に関して国の支援の重要性は論じているものの、開発に関するさまざまなステージにおける具体的な関与の度合いについては、さほど言及がなされていない。わが国の国家財政の厳しさを考えると、① 基礎研究や共有基盤技術の確立には国が重点的に関与し、② より具体的な事業化については、事業化リスクの軽減のための債務保証などに限定する、など国の負担についてメリハリをつけた論点整理も必要であるといえる。民間企業にとって、特に成果が不透明な①については、事業リスクが大きいので、取り組むことが困難であるが、基礎研究であり、大規模な設備投資は必要としないことから、実際に必要な資金は小さい。したがって、①は、国家の大胆な支援により、民間主導よりも効率的に成果をあげる可能性が高いと考えることができる。一方で、②については、大規模な設備投資が必要になるものの、①の成果に基づけばある程度不確実性は低下するので、国の関与を軽減し民間活力を導入することが、貴重な資金を効率的に活用する上で重要な視点といえる。

すでに述べたようにDOEは、基礎技術の開発については研究コンソーシアムを支援しているが、個別の具体的な事業化については、ベンチャー企業主体による開発の支援という形をとっている。また、より具体的な事業化については、米国農業省が藻類ベンチャーの事業化に対して債務保証を行うなど、厳しい財政制約の中で資金的負担を軽減した形で支援が行われている。

事業化という視点では、藻類バイオベンチャーの最先端のSolazyme社は昨年株式を公開した。売上高が50億円に満たず、資産も100億円に満たないが、株式市場では時価総額が800億円程度(2012年3月現在)となっている。Solazyme社もDOEの支援によって基礎技術開発を進めてきたが、現状では、最新の投資家説明会において極めて具体的にエネルギー化、各種副産物の事業化について言及することが可能になっており、その結果が高く評価されているといえる。株式市場からも100億円近くの資金調達に成功しており、国家に依存せずに民間のリスクによって事業化が進む仕組みの確立が実現しつつあるといえる。

なお、Solazyme社は従属栄養藻類を主体とした事業化を進めていることから、従属栄養を利用した再生可能エネルギーの可能性の重要性があらためて認識される。

1.2. 理想の連携の仕方を目指して

以上を踏まえると、選択可能性を狭めることなく、将来の新知見・新技術の開発まで視野に入れ

て、図2- 1で示したように幅広い関係者において情報共有を促進することが重要であると考え。情報共有化によって、① 関連する知見・技術を保有する研究機関、② 具体的に事業化に関与すると想定される農林水産業関係者、③ 事業化に関連する要素技術をすでに保有している幅広い産業、において藻類バイオマスエネルギーの事業化への関心が喚起され、長期的な視野から最適な一貫性培養システムが構築されていくと考えられる。具体性のある個別の課題への関心の高まりが、すでにプロジェクト化されている取り組みと既存企業の連携を促し、研究開発が必要な要素技術の技術スペースを埋める動きを加速していくと考えられる。

産業創成においては、個別の利害関係等にもとづいて、事業化に不可欠な要素技術の研究開発が自発的かつ網羅的に推進されることが重要である。技術的ハードルの高さを考えると、民間のリスクを国が支援すると同時に、各種事業化の取り組みに共通する要素、すなわち技術ロードマップの作成や、事業化への技術ハードルの整理、世界の技術動向の調査等について、共有基盤づくりを国が積極的に支援することが持続的な産業発展には不可欠であると考え。

また、情報共有化により、民間だけで負担した場合の事業リスクの限界が明確になることも重要である。そうした限界を踏まえた上で、国が大規模化に向けた既存技術の応用を促進するための事業リスクの軽減策を具体的に策定することが産業発展を促進する上で望まれる。このようなフレームワークによる知見・技術の蓄積によって、最終的に国内における事業化の動きが促進され、最終的には国内農山漁村における藻類バイオマスファームの事業化にも繋がっていくと想定される。

後述するように、大規模なプロジェクトは限定的であるものの、わが国においても藻類バイオマスエネルギーの事業化へ向けた民間の自発的取り組み、政府支援による各種プロジェクトにより、事業化に必要なバリューチェーンの多岐にわたって、さまざまな取り組みがなされている。また、同様に後に詳細を示すが、当コンソーシアムの参加企業の技術や、公開されている、わが国の企業、研究機関等の特許関連情報も、藻類バイオマス資源に関連するものはバリューチェーンの全般にわたっており、産業化に必要な個々の技術ベースとしては、バリューチェーンのすべてに関連して、基礎的な蓄積がなされているといえる。

ただし、定性的な判断になってしまうが、NERやCO₂排出量削減効果に関する情報や、全体最適システム構築のために克服すべき技術的課題についての認識を共有化する取り組みは、後述する海外の先進事例に比較すると不足していると言わざるを得ない。

最新の国内外の研究動向、およびLCAの動向などを分析し、現実的に短期的に実現できるNER、CO₂排出量削減効果について共有認識を確立し、NER・CO₂排出量削減効果、経済性、エネルギー産業として事業化するために必要な量の供給可能性の改善のための課題について共有認識を確立することが望まれる。

以上をまとめると、わが国には、藻類バイオマス資源を再生可能エネルギーとして産業化するための経営資源は十分にあり、関心も高まっている。また、政府の支援などで多様な取り組みが推進されているが、大規模な動きは限定的であり、大規模な事業化に向けたさらなる産業発展には、利害関係者共有の課題認識の促進および過度の事業リスクの軽減策が課題であると考えられる。

すでに示したフレームワークを利用して、わが国の現状を整理すると図2-2になる。まず、最新の国内外の研究動向、およびLCAの動向などを分析し、現実的に短期で実現できるNER、CO₂排出量削減効果について共有認識を確立し、NER、CO₂排出量削減効果、経済性、藻類オイルの供給可能性を改善するための課題について共有認識を確立することが望まれる。次に、網羅的な技術マッピングを作成することで、事業化に必要な要素技術で空白のスペースを埋める動きを促進することが重要である。その上で、国がリードして既存技術の応用としてどのような技術を優先的に取り組むべきか共有認識を確立するための議論の場を確立し、民間の事業リスク負担の限界を踏まえた事業リスク軽減策を策定していくことが理想の姿といえる。



図 2-2 藻類バイオマスを利用した再生可能エネルギー開発におけるわが国の現状と課題

以上のような取り組みにより、わが国の保有する研究基盤、技術基盤について網羅的な棚卸が可能になり、世界の開発競争から見て強化すべき取り組みが把握される。また、下水処理費用収入化・副産物の市場化による早期の経済性確立も促進されるであろう。さらに、以上の産業発展を具体的に実現するための最適なチーム編成について、民間の自発的な取り組みを促す仕組みが政策的に整えば、産業発展が加速していくと考えられる。

こうした藻類産業の事業化を促進する共有基盤づくりのために必要な要素としては、以下があげられよう。

- 長期的な産業発展に向けた情報交換の場(コンソーシアム、業界団体等)の形成
- 共有資産となる基礎研究の支援
- 共有資産となる藻類の有用種のカルチャーコレクションの整備や有用成分に関する情報
- 大規模化に向けた共通知見・技術の共同開発への支援
- 農林水産業、エネルギー・化学・食糧エンジニアリング産業などの業界横断的な産業発展を促す網羅的な行政・規制の最適化
- 各種標準化への取り組みを推進する主体の確立への支援

以上の取り組みにおいて、次節以降、利害関係者の課題認識の共有を促進する上で、参考となる先進的な海外の事例として、米国、フランス、韓国の動きを取り上げてわが国への示唆を整理する。第一章でふれた、化石資源枯渇問題および温室効果ガス排出量拡大問題に対する長期的な解決手段としての藻類バイオマスエネルギーの事業化の動きが、米国をはじめ世界各地で広がっており、その中で、上の議論と類似の取り組みがなされている。先例を参考にしつつ、狭い国土、豊富な水資源、水田に付随する水供給インフラ、広大な経済海域など、わが国独自の特色に合わせた形で最適な産業発展の在り方について検討することが重要である。

以下、藻類エネルギー産業創成で最も幅広く活発な動きを見せている米国について、利害関係者の共有の課題認識の取り組みを中心に整理し、その上で、他の地域で注目されるフランスと韓国の動きについてレビューする。いずれもわが国にとって参考になる事例である。

2. 利害関係者共有の課題認識の促進における海外事例

2.1. 米国における先進事例：米国エネルギー省を中心とする取り組み

米国では、1970年代の第四次中東戦争の勃発がもたらした第一次石油ショックや、同時期に国産の石油がピークアウトを迎えたことによって、石油輸入依存度を抑制することが、エネルギー安全保障上重要であると認識されるようになった。その中で、1978年から米国エネルギー省(Department of Energy, 以下DOE)は、藻類バイオマス資源を輸送用燃料として事業化することを目的とするプログラムであるAquatic Species Program(以下、ASP)を開始して、国立再生可能エネルギー研究所(National Renewable Energy Laboratory: NREL)において、基礎研究や実証研究を進めた。ただし石油価格は1980年をピークに低下し、藻類バイオマスによる再生可能エネルギーは採算が取れる見込みが立たなくなり、事業化の動きが本格化するにいたらず、1996年にASP

の活動は幕を閉じたⁱ。事業化は達成されなかったものの、ASPの成果は、1998年に「Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program—Biodiesel from Algae July 1998」としてまとめられ、今日に至る米国の藻類エネルギー研究の発展の基礎となっている。ASPにおいては、オイルを蓄積する有用種のコレクションや、それらの代謝メカニズムの解明、およびオープンポンドによる大量培養に向けた実証研究など、藻類バイオマスの再生エネルギー資源としての事業化に向けた有用な研究結果が蓄積された。

その後、21世紀になって資源枯渇や温室効果ガス増大の問題や、新興国経済の発展によるエネルギー需要の拡大を背景に政治的に不安定な中東への石油依存度を軽減し、エネルギー自給率を上げるために食用穀物を利用したバイオマスエネルギーの産業化が進んだ。しかし、食用穀物のエネルギーへの利用が増え、食用に回る穀物の供給が不足した結果、食品価格増加の問題を招いた。そのような問題を回避するために、食糧と競合しない第二世代のバイオマスの開発を経て、耕作地を必要としないことや多様な水資源が活用できること、そしてオイル生産性が陸生植物にくらべて高いことなどから、第三世代としてバイオマスとして藻類が注目されるようになった。米国では、再生可能エネルギーによるエネルギー自立について、2007年エネルギー自給安全保証法 (Energy Independence and Security Act of 2007) によって、2022年までに再生可能エネルギーとして360億ガロンの生産を達成することを目指している。そのうち、210億ガロンは非トウモロコシ系のバイオマス燃料とするとされており、藻類によるエネルギー生産の貢献が期待されている。

DOEは、2008年に200名近くの産官学の関係者を集め、藻類バイオマスの再生エネルギー事業化を目指した技術ロードマップに関する議論を行い、その結果を2010年5月に「National Algal Biofuels Technology Roadmap 2010 MAY」として公表した。現在、技術ロードマップの実現のために、DOEを中心にさまざまな総合的取り組みが行われ、①研究段階、②実証・事業化段階のそれぞれにおいて、産官学の総合的な連携が進められている。

2.1.1. 研究段階の動き

DOEの資金によって2008年に設立された研究コンソーシアムであるNational Alliance For Advanced Biofuels and Bio-products (以下NAABB)が注目される。NAABB「An Algal Biofuels Consortium Algae R&D Activities Peer Review April 7-8, 2011」からの抜粋資料(図2- 3)によれば、国立研究所として2団体、大学として15大学、産業界からは、12企業が参画している。極めて広範囲な団体の研究成果を管理し、限られた予算と短期間で成果を示すために、物理的に距離の離れた関係者の情報共有化や共同研究を推進するために最新の情報プラットフォームを導入し

ⁱ J. Sheehan, T. Dunahay, J. Benneemann and P. Roessler, (1998), “A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program- Biodiesel from Algae

ている。ⁱ

NAABBのミッションは、あくまで大規模で拡張可能性のある再生可能エネルギーの基礎的な技術の確立である。多種多様な団体の間の利害関係を調整し、基礎的技術の確立のための活動していることは、法的な知的財産の管理の視点から見ても極めて注目される動きである。

国立研究所	大学	民間企業
<ul style="list-style-type: none"> ・ Los Alamos National Laboratory* ・ Pacific Northwest National Laboratory* ・ USDA - ARS 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Brooklyn College ・ Clarkson University ・ Colorado State University* ・ Iowa State University ・ Michigan State University ・ New Mexico State University* ・ North Carolina State University ・ Texas AgriLife Research /Texas A&M University System* ・ University of Arizona* ・ University of California Los Angeles ・ University of Pennsylvania ・ University of Texas (sub) ・ University of Washington ・ Washington University St. Louis 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Catilin ・ Diversified Energy ・ Eldorado Biofuels ・ Genifuel ・ HR Biopetroleum / Cellana ・ Inventure ・ Kai BioEnergy ・ Palmer Labs ・ Solix Biofuels* ・ Targeted Growth ・ Terrabon ・ UOP a Honeywell Company

図 2-3 NAABB への参加団体一覧

さらに注目されるのは、図2- 4で示したように極めて膨大な論点を網羅する研究を総合的に行っていることである。特定の培養システムに限った研究ではなく、オープン、閉鎖型、微細藻類、大型藻類、光合成、従属栄養、混合栄養と、多岐にわたる培養システムに関する基礎研究を行っている。さまざまな利害関係に加えて、極めて多岐にわたる要素技術を対象としていることは注目に値する。この図は、DOEが2010年5月に公表した「National Algal Biofuels Technology Roadmap」の93ページに記載されているものとほぼ同じであり、DOEとしては、技術ロードマップで作成した複合的な内容をNAABBにおいて実現を図っているといえる。

ⁱ <http://rescentris.com/clients/naabb-case-study-introduction/>

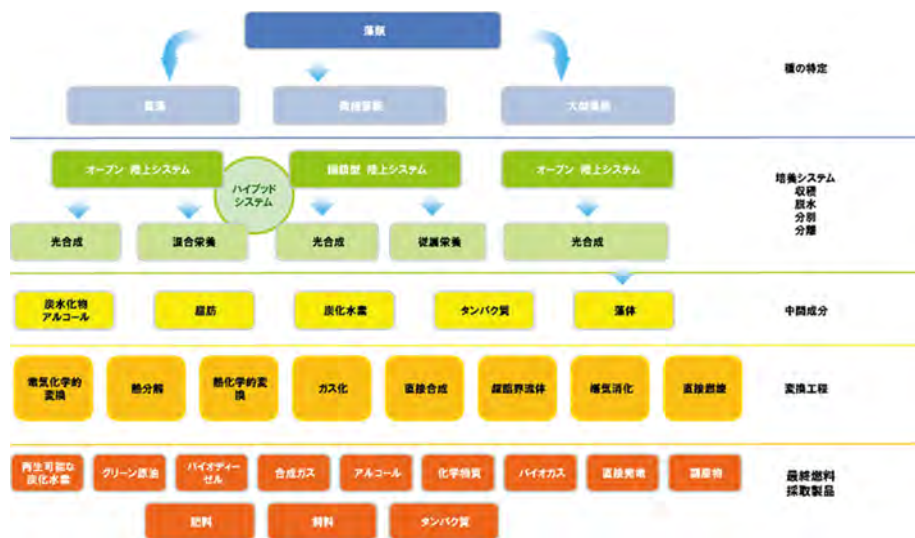


図 2-4 NAABB の研究対象範囲

2010年はじめには、DOEより4,400万ドルの予算がNAABBの活動の助成されることになり、2013年4月までに、以下を達成するための要素技術の開発を目標として、研究開発プロジェクトが推進されている。なお、そのほか、企業などからの追加資金を加えて、3年で総額67.7百万ドルの予算で研究開発を推進している。

経済性指標

- ・1ガロン2.1ドル未満のオイル (lipid) の生産
- ・運転コスト1ガロンオイルあたり0.4ドル以下
- ・資本コスト・年間1ドル、バイオディーゼル1ガロンあたり

以上を技術的に実現するための生産性指標 (例: 脂肪分の割合が50%以上、1日あたり1m²あたりの収穫量20g以上、など) や収穫量の指標 (1投資施設単位あたりの収穫量)、および残渣経済価値の開発 (残渣1トンあたり250ドルから1,000ドル) など具体的に定めて、その達成のための技術的障害を把握し、その克服に対して英知を結集して研究開発にあたっている。また当然ながらNERは大幅に1を超えることを目指している。

プロジェクトマネジメントのためのコミュニケーション体系が明確化され、①藻類バイオマス、②大量生産、③濃縮・収穫、④抽出・精製、⑤副産物、⑥事業継続性の精製のチェーンで、重複がないように効率よく多様な人材が各プロジェクトに従事している。さまざまな利害関係者が多岐にわたる要素技術に関して一体として活動していることは、利害関係の管理手法、知的財産の管理方法のあり方の観点から、わが国も参考にすべきであろう。

2.1.2. 実証段階の動き

NAABBで基礎的な研究開発に資金を投じる一方で、DOEは2009年には3つの藻類のベンチャー企業、Sapphire Energy社、Solazyme社、Algenol社にそれぞれに助成を行っている。Sapphire Energy社は、光合成でオープンポンドの培養システム、Solazyme社は閉鎖型で、従属栄養を利用した培養システム、Algenol社は直接エタノールを体外に分泌する種を利用した閉鎖型培養システムと、それぞれ特徴がある。特定の培養システムに限定することなく、光合成、従属栄養、オープン、閉鎖型と非常に多様なシステムを支援している点が注目される。

3社の概要と助成内容は、「JPEC 海外石油情報(ミニレポート)平成23年2月2日ミニレポート～米国DOEのバイオリファイナリー・プロジェクト(下)～バイオケミカル等によるバイオ燃料生産技術ⁱ」に示されている。以下は、同レポートの抜粋(Solazyme社のところは一部修正)をバリューチェーンとして整理したものである。

表2-2 Sapphire Energy, Inc.の概要とDOEの助成

概要	本社：カリフォルニア州 San Diego 事業内容：デモ段階プロジェクト 事業場所：ニューメキシコ州 Columbus 採用技術：Algae／二酸化炭素 投入原料：二酸化炭素、海水 製造規模：製品 年産100万ガロン（ジェット燃料、ディーゼル油 100BPD） DOEの補助金：5,000万ドル
①藻類バイオマス資源関連技術	光合成
②藻類大量生産関連技術	耕作に適さない土地に300エーカーの培養池を設け、藻類を育てて日量約56トンの二酸化炭素を吸収。 塩分を含む水で栄養剤を用いながら油分を多く含む藻類の栽培と収穫を行う。 培養池は10エーカーごとに仕切られた100エーカーを1区画とし、3区画から構成。 残留固形バイオマスはバイオリファイナリーのエネルギー源として嫌気性消化プロセスによりメタンガスの製造に用いられ、一部は栄養剤としての栽培池。
③藻類濃縮・収穫関連技術	明確な言及なし。
④藻類抽出・精製関連技術	収穫した藻類油を精製してジェット燃料とディーゼル油を製造。藻類からの油は共同事業者のDynamic Fuels, LLC（本社：ルイジアナ州）により精製。
⑤藻類用途関連技術	2008年にオクタン価91のガソリンの製造に成功しており、更に2009年1月には藻類由来のジェット燃料を用いてBoeing 737-800で2時間の試験飛行を成功させている。
⑥事業性	本プロジェクトの目的は藻類ベースのバイオリファイナリーに関して経済的に望ましい規模でのデモを行うことと、採取されるデータで2015年稼働計画の商業規模でのバイオリファイナリー（藻類油で年産1億5,000万ガロン）の経済性を検討 本プロジェクトは、2012年までにデモ・スケールの達成、2018年までに商業規模での操業、2025年までに年産100万ガロンの藻類油の製造を目標。
備考	DOEから5,000万ドルの助成金を得るとともに、米国農業省から5,450万ドルの債務保証を得ている。資金的にはBill Gates のCascade Investment やロックフェラー家の設立したVenrock などの有力な投資会社の支援も受けている。

ⁱ http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H21_2010/2010-031.pdf

表 2- 3 Algenol Biofuels, Inc.の概要と DOE の助成内容

概要	<p>Website : http://www.algenolbiofuels.com/ 本社：フロリダ州 Bonita Springs 事業ステージ：パイロット段階プロジェクト 事業場所：テキサス州 Freeport フロリダ州 Fort Myers (Back-up site) 目的製品：エタノール 採用技術：Algae／二酸化炭素 投入原料：二酸化炭素／藻類／海水 製造規模：エタノール 年産10万ガロン以上 (6.5BPD) DOEの補助金：2,500万ドル</p>
①藻類バイオマス資源関連技術	<p>天然に広く存在する酵素の遺伝子を藍藻(シアノバクテリア) に持たせることで、藻類の細胞内に光合成により出来た糖類を同一細胞内でエタノールに転換させ、過剰のエタノールを細胞壁から培養液である海水中に溶解させて回収する技術。</p>
②藻類大量生産関連技術	<p>テキサス州のメインサイトでは、Dow Chemical Company (本社:ミシガン州) のFreeport Complex (樹脂・化学品の製造工場)の敷地内26エーカーにパイロットスケールの設備(面積17エーカー、容積1,200ガロン)を設置し、Dowの工場から送られる工業的に排出された日量2トンの二酸化炭素を藻類(藍藻)に消費させ、年間10万ガロン以上のエタノールを生産するプロジェクトである。運転はDowが行うことになっており、プロジェクトの主体もDowと考えられる。工場は2010年8月に完成の計画である。 透明なプラスチックフィルムで密閉された温室状のバイオリクターの中で藻類の光合成を行う。</p>
③藻類濃縮・収穫関連技術	<p>体外分泌されるので、抽出収穫が容易:生成したエタノールは細胞壁から培養液中に分散され、更に培養液からの蒸発によりリアクター表面で結露したものが回収される</p>
④藻類抽出・精製関連技術	
⑤藻類用途関連技術	<p>回収されたエタノール水溶液は蒸留により燃料用エタノールへ。</p>
⑥事業性	<p>Algenol社は、藻類の品種改良により1エーカー当たり年産6,000ガロンのエタノール製造を目標にしている。</p>

表 2- 4 Solazyme,Inc.の概要と DOE の助成内容

概要	<p>Website : http://www.solazyme.com/ 本社：カリフォルニア州 South San Francisco 事業内容：パイロット段階プロジェクト 事業場所：ペンシルベニア州 Riverside 採用技術：従属栄養性藻類／有機物 投入原料：植物由来有機物・有機排水、培養液 製造規模：精製藻類油 年産300 kg DOEの補助金：2,180万ドル</p>
①藻類バイオマス資源関連技術	<p>一般の藻類は光合成で成長するが、Solazyme社の技術は特殊な株種を使用してファーメンターで藻類を増殖させる。藻類は乾燥時の重量比で80%以上もの油分を含んでおり、Solazyme社のプロセスでは太陽光が無く暗い工業用培養槽の中でも非常に高い油分濃度が得られる。</p>
②藻類大量生産関連技術	<p>この技術で商業規模へのスケールアップが可能であれば、非現実的とも言える広大な藻類の培養池を確保する必要がなくなる。</p>
③藻類濃縮・収穫関連技術	<p>藻類で生成したトリグリセライドは植物油に性状が似ている。一日当りの生成油量は培養槽の容積と同程度である。藻類から高収率で回収された油分はエステル転移反応によりバイオディーゼル油へ、水素化処理により再生可能ディーゼル油やジェット燃料となる。</p>
④藻類抽出・精製関連技術	
⑤藻類用途関連技術	<p>製品油を燃料用だけでなく食用などの高付加価値用途へも展開している。</p>
⑥事業性	<p>この技術で商業規模へのスケールアップが可能であれば、広大な藻類の培養池を確保する必要がなくなる</p>

2.1.3. 多種多様な利害関係者との連携での事業化を実践する Solazyme 社の最新の動き

表2- 4で示したように、Solazyme社は、油分比率の高い種を用いて閉鎖型で従属栄養の藻類で

の再生可能エネルギーの事業化を目指し、DOEから支援を得ている。同時に、バイオリファイナリーとして再生可能エネルギーのみならず、バイオ化学、栄養素、化粧品の3分野について事業化を同時に進めることにより早期に経済的な自立を図る戦略を追求している。Solazyme社の動きは、まさに多種多様な利害関係者と事業化について連携し、その上で着実な成果を出している事例として、藻類産業発展の縮図として注目される。ⁱそうした経営力および事業化に対する成果が評価され、昨年5月には株式公開を果たした。

Solazyme社は、公開時には表2- 5で示したように各事業のコスト構造及び販売価格の予測を開示している。燃料は1L 1ドル(80円)程度のコストでの生産を目指していることがわかる。また販売価格は1.8ドルから2ドル(144円から160円)を想定している。一方で、化学製品や栄養品は、より高い価格での販売を想定し、特にアンチエイジングの化粧品は1トンで200百万ドル(1.8億円、1kgあたり、18万円と極めて高額な販売価格を想定していることがわかる。これらの付加価値商品を同時に生産することで、早期の事業化を目指していることがわかる。

表2- 5 Solazyme社の各事業のコスト構造及び販売価格の予測ⁱⁱ

	コスト1トンあたり	販売価格1トンあたり
燃料	1,000ドル	1,800-2,000ドル
化学製品	1,000ドル	1,800-5,000ドル
栄養品	1,000ドル	2,500-20,000ドル
スキンケア商品	2,000ドル～1,000Kドル	20,000ドル～2,000Kドル ⁱⁱⁱ

燃料事業においては、石油大手のChevron社との共同開発により、2010年に、100%微生物によって生産された非エタノール系の燃料を米国海軍に船舶及びジェット機の利用を前提として80,000L生産し、提供した。米国国防省からは、さらに550,000Lの供給契約を結んでいる。昨年11月には、石油由来のジェット燃料60%、同社のバイオ燃料「Solajet」40%から成る燃料を使った飛行がボーイング737-800で行われた^{iv}。また、4月にはブラジルでサトウキビの精製糖工場を運営している米農業コングロマリット大手Bunge社からサトウキビの供給を受け、両社共同でバイオ燃料のトリグリセリド油を生産することで合意した。両社はブラジル国内にバイオ燃料の生産工場を建設するため、合弁会社を折半出資で設立する。新工場の生産能力は年間10万トンで、Bunge社がブラジル・サンパウロのモエマで運営するサトウキビ精製糖工場に隣接して建設され、建設費用は9,000万-1億1,000万ドル(約75億-91億円)。操業開始は13年下期(7-12月)を予定している。生産したバイオ燃料はブラジル国内の燃料メーカーや化学メーカーに販売される。^v

ⁱ <http://solazyme.com/market-areas>

ⁱⁱ <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2011/03/15/solazyme-files-100m-ipo/>

ⁱⁱⁱ アンチエイジングの商品としてはSolazymeが開発したAlguronic acidの価格

^{iv} http://jp.reuters.com/article/3rd_jp_jiji_EnvNews/idJPjiji2011110700165

^v http://www.emeye.jp/disp/BRA/2012/0405/stockname_0405_010/0/

バイオ化学においては、ユニリーバ社と藻類由来物質から石鹸や各種パーソナルケア商品の研究開発を行い、ダウケミカル社とは変圧器に利用されている「誘導性流体 (dielectric fluids)」を藻類由来成分から精製する研究開発を行っている。誘導性流体の市場規模は500百万ガロンあり、2015年度にはSolazyme社は60百万ガロンを生産する予定である。

栄養分野においては、フランスのRoquette社と微細藻類由来の健康食品成分の製造および商業化、市場開発のための合弁事業 (JV) 契約を締結し、藻類由来の小麦粉 (Algal Flour) の開発を推進している。低脂肪植物の健康食品としてマーケティング活動を行っている。2012年2月に実施された株式アナリスト向けWEB説明会では、年間300トンの生産施設をフランスに建設中であると説明した。

化粧品においては、AIGENISTという独自ブランドを開発しアンチエイジングのスキンケア商品の商品化に成功しウェブサイト販売を行っている。

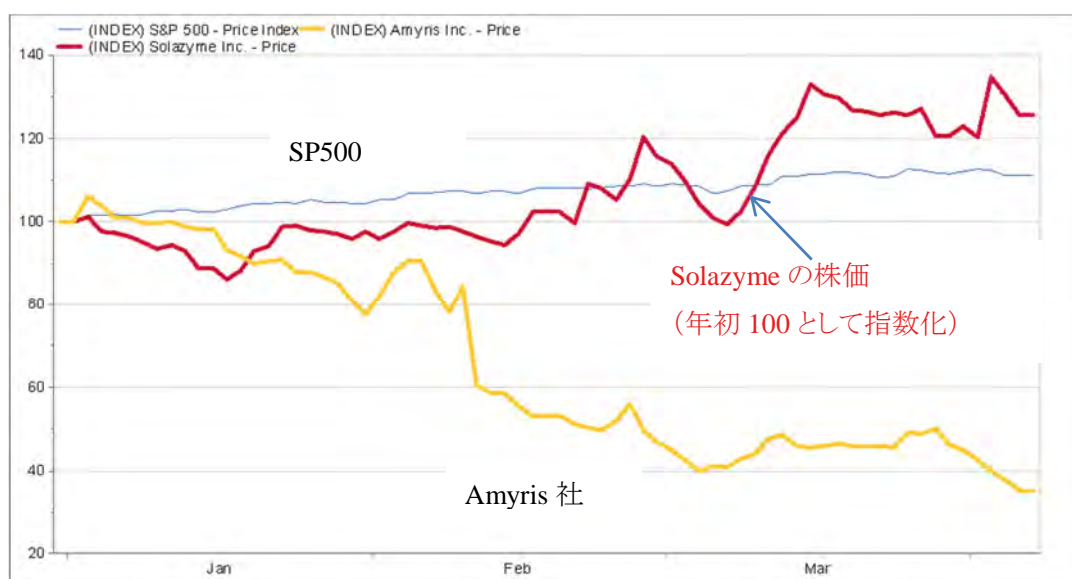


図 2-5 年初来の Solazyme 社の株価パフォーマンス

以上、すべての事業化において着実に実績を達成しているSolazyme社の株価は、図2- 5ⁱに示すように年初来で見ると、米国の代表的な株式指標であるSP500を上回る上昇を見せている。また、比較のために第二世代のバイオエネルギーとして上場しているAmyris社の株価も参考として載せているが、年初来で見ればSolazyme社の株価上昇傾向が際立つ。Amyris社は糖分の多いトウモロコシであるSweet sorghumから発酵処理して得られた糖類を、変成酵母で処理することでディーゼル油などと性状が同様な炭化水素に変換する技術の事業化をめざしている。Solazyme社と同様にDOEから2,500万ドルの助成金を受けており、Solazyme社より一足先に2010年9月に株式公開した。

ⁱ 金融情報サービスFactSetのデータより作成

また、Amyris社、Solazyme社の財務指標を比較したのが以下の図2- 6ⁱである。これで見ると、両社とも本年度は大幅な赤字の見通しとなっているので、通常の黒字の利益をベースにした株価の分析は困難である。そこで売上高や資産で比較すると、Solazyme社は、Amyris社の5分の1～3分の1程度とはるかに小さいが、時価総額は逆に4倍以上の900百万ドル(約700億円)程度ある。株価は「みずもの」であり変動が激しいので、この数字だけで評価することは困難であるが、少なくとも現状を見る限り米国の投資家はSolazyme社の戦略を高く評価しているといえる。



図 2- 6 Solazyme と Amyris の財務比較(単位: 100 万ドル)

なお表2- 6でSolazyme社へ投資額において上位の機関投資家社を示しているが、そのうちの8社はChevron社への投資額において上位20社の機関投資家でもある。このことからエネルギー企業としてSolazyme社が評価されていることを示唆していると考えられる。

表 2- 6 Solazyme 社への投資額上位 20 の機関投資家名ⁱⁱ

	機関投資家名	Chevron の上位 20 社に該当する場合は○
1	Fidelity Management & Research Co.	○
2	T. Rowe Price Associates, Inc.	○
3	S.A.C. Capital Advisors LP	
4	DNB Asset Management AS	
5	TIAA-CREF Asset Management LLC	○
6	The Vanguard Group, Inc.	○
7	Alyeska Investment Group LP	
8	Invesco PowerShares Capital Management LLC	
9	BlackRock Fund Advisors	○
10	BlueCrest Capital Management UK LLP	
11	Tygh Capital Management, Inc.	
12	Kingdon Capital Management LLC	
13	Peregrine Capital Management, Inc.	
14	State Street Global Advisors	○
15	Northern Trust Investments	○
16	Driehaus Capital Management LLC	
17	Credit Suisse (United States)	
18	Morgan Stanley Smith Barney LLC (Securities)	○
19	Savitr Capital LLC	
20	Deutsche Bank Investment Management, Inc.	

ⁱ 金融情報サービスFactSetのデータより作成

ⁱⁱ 金融情報サービスFactSetのデータより作成

Solazyme社は多種多様な大企業との連携を実現し、複雑な利害関係を調整してそれぞれの事業化において確実に実績を上げ、幅広い投資家からの支持を得ている例として今後も注目されようである。

2.2. 欧州における先進事例：フランス

フランスでは、政府が主導し、地方自治体、産業界が協力して藻類資源の活用をめざした研究開発が進められている。注目すべきは、フランスにおける藻類バイオマスに関する一連の動向は数名の大学研究者の提案に始まり、次第に参加者が拡大していったボトムアップ型というべきものであったことである。提案を政府と産業界が受け入れ、EUの方針にまで波及する大きな流れに成長させたことは、わが国も学ぶべき点が多い。2009年からEU、フランス、地方自治体の出資によって、藻類バイオマスのクラスターとネットワーク形成を目的としたコンソーシアムAlgaSudⁱが始動した。同時に海藻と微細藻類バイオマスの産業化に関する研究開発のロードマップづくりが進められた。現在、海藻については6社が参加して外洋での養殖実験が行われており、メタン、アルギン酸、ポリフェノール、肥料生産など多角的な市場開発を目標として開発が進んでいる。これは海洋風力発電を組み合わせた取り組みでもある。一方で、微細藻類の潜在力に注目して、13社が参加するバイオディーゼル、メタンおよびバイオリファイナリーの研究開発が進行している。7.5百万€(約8億2,000万円)の資金で、2016-17年の産業化を目指している。現在、国立農学研究所 (Institut National de la Recherche Agronomique, France: INRA)やMRE (Marine Renewable Energy)社の主導で、フランス全土の45の公的研究所、企業研究所が参加する10年間で160百万€(約175億円)の大型研究開発プロジェクトGreenStarsⁱⁱが進行している。これは、海藻と微細藻類の優良株の探索から、環境要因の解析、養殖プラントのスケールアップ、抽出技術開発、エネルギー生産から飼料や高付加価値の化学製品の生産、さらに人材育成までをカバーするものである。

2.3. アジアにおける先進事例：韓国KAISTⁱⁱⁱ

韓国では、グリーン・グロース(緑の成長)が国家戦略として位置づけられたことから、韓国文部科学省のファンドで2010-2019年の9年間、政府関連研究機関であるKAISTが中心となって、国内のバイオマスの活用に関わる分野、機関を集結したコンソーシアムAdvanced Biomass R&D Center (ABC) を設立した。バリューチェーンのすべてにわたって組織的、体系的に技術的課題克服に取り組んでいる。予算は9年で160億円(1ドル=80円換算)である。NAABBと同様にバリューチェーンのすべてに渡る論点を、藻類学者、プラントエンジニア、化学工学関係者、など関連する研究者が一同に会し、知恵を出して実証実験を繰り返している。開始からまだ2年目でしかないが、関連する

ⁱ <http://www.algasud.fr/>

ⁱⁱ <http://www.international.inra.fr/press/greenstars>

ⁱⁱⁱ KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

すべての分野で急速に研究が進められており、驚くべき速さで成果を出している。プロジェクトが極めて組織的、体系的に運営されていることがわかる。繰り返しになるが、わが国において、このような総合的・網羅的な取り組みⁱを行っている事例は見当たらない。

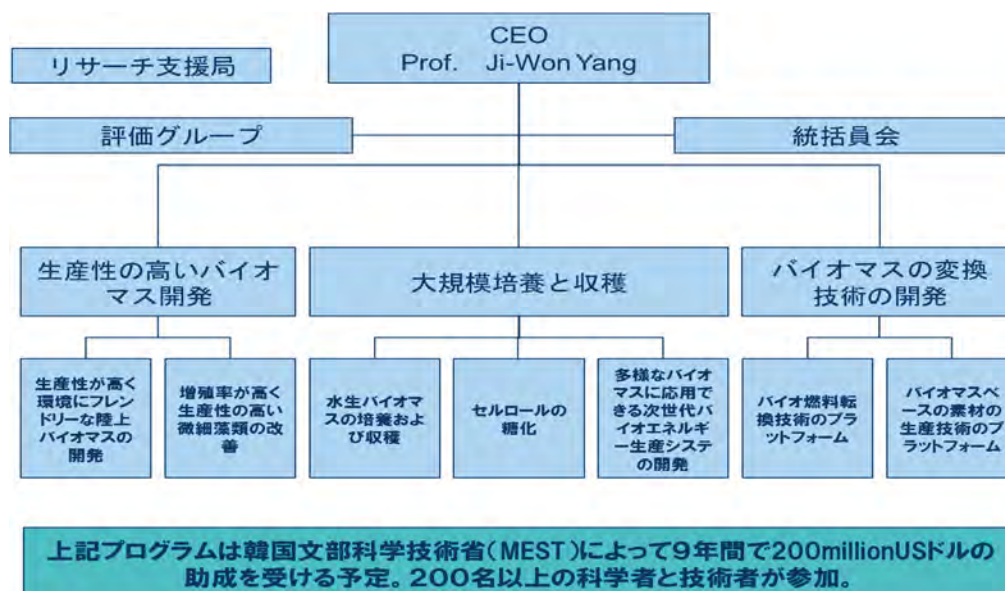


図 2-7 韓国 KAIST の総合的・網羅的取り組み

3. わが国の研究・技術蓄積の個別事例

3.1. 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」ⁱⁱ

本プロジェクトは1990年度～1999年度の10年間にわたり実施された。開発経費の総額は約133億円にのぼり、米国のASP以上の経費であり、当時の世界最大規模のプロジェクトであったといえよう。本プロジェクトは大きく下記の3テーマからなっていた。

- ① 高効率光合成細菌・微細藻類等の研究開発
- ② 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(当初計画の二酸化炭素固定化高密度大量光培養システムの研究開発、太陽光高効率集光・利用技術の研究開発、光合成生物からの有用物質等生産技術の研究開発、トータルシステム化技術の研究開発を統合)
- ③ 研究支援調査 (技術文献調査、光合成微生物等DNA解析・情報処理技術の調査研究)

ⁱ <http://www.sakura.cc.tsukuba.ac.jp/~eeeforum/AOAIS/slides/r5-3ADPCA52.pdf>

ⁱⁱ 産業技術審議会評価部会・二酸化炭素固定化等技術評価委員会 (2000) 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」最終評価報告書。

本プログラムにおいて定めた $50\text{g}\cdot\text{CO}_2/\text{m}^2/\text{日}$ の吸収量を達成するという目標については、200L規模のパネル方式フォトバイリアクターで年間を通じて達成した。ここで生産される大量の藻体の有効利用の可能性も検討されている。この結果をもとに100万kW級のLNG火力発電所を例に、排出される CO_2 の固定から有用物質の生産までのトータルシステム概念を構築し、全プロセスでのエネルギー収支、 CO_2 収支を計算したところ、獲得エネルギー量、 CO_2 吸収量が消費量よりも多く、両収支が成立することを確認している。特に CO_2 固定量は、日本の代表的な発電所、製鉄所、セメント工場等の敷地 110km^2 を想定すると年間200万トンが見込まれ、代替効果を考慮した値は270万トン-Cとなり、太陽電池500万kWや風力発電30万kWの導入での代替効果100万トン-C、10万トン-Cを大幅に上回る効果があることが推定された。このように藻類のもつ CO_2 吸収の潜在力をわが国ではじめて示したという点において、本プログラムはそれなりの成果をあげたといえる。

にもかかわらず、最終評価はかなり厳しいものであった。最終評価では、プロジェクトの過程で開発された個別技術や知的体系には価値があるとしつつも、現実性、市場性、経済性、影響の大きさに関する当初の分析が不十分で、トータルシステムとしての説得力に全く欠けるプロジェクトであったとされ、さらに、実用化の観点から、ブレークスルーすべき技術とその限界・目標を明確に設定し、より合理的な計画に反映できなかった政策当局にも責任があるとされた。

米国のASPの報告書においても日本の本プログラムについての批評がなされた。そこでは、日本は限られた土地面積で効率よく生産するため、閉鎖系のフォトバイリアクターと光ファイバーを採用したことから、コストがかかるとされ、燃料のみならず高価値の生産物を獲得することを目的とするプロジェクトであろうとされた。

閉鎖系のバイリアクターを採用すると、トータルシステムでのコストは開放系のその10倍程度となる。低価値の燃料(当時バレル12~20ドル程度)の生産を目的とする限り、開放系ですら経済的に成立することはできない。その点で、日本の戦略が燃料のみならず、高価値の生産物も含めて全体として経済的に成立する道筋をさぐるという方向性を採用したのは非常に正しい戦略であったといえる。この戦略は、現在欧米でもバイオリファイナリーという概念で復活しており、もう少し評価に携わった方の見識と先見性があり、プログラムが継続されていれば、現在間違いなく日本が世界をリードする立場になっていたはずである。

最終評価がかなり厳しいものであったことで、2000年以降、日本における藻類バイオマス研究はほとんど死滅期に近い状態となってしまう、蓄積されたはずの知見・技術も残らず、10年の研究開発歴史が完全に失われてしまった。ニューサンシャイン計画プロジェクトを再度整理し、評価し直す必要がある。しかし、評価報告書のみが公開され、成果報告書が未公開のままにある。

3.2. 藻類バイオマス研究開発の現状

詳細は参考資料2を参照していただくが、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究プロジェクト等において、わが国でも国の支援のもとで、さまざまな藻類バイオマスの再生可能エネルギー事業化に向けた取り組みが進められている。内容を見るとバリューチェーンのすべてにおいて極めて網羅的な取り組みがなされており、既存技術の応用にとどまらず、未開拓の領域を含めて非常に多様な取り組みがなされている。

NEDOの委託研究プロジェクトの例は、以下の通りである。

- 共生を利用した微細藻類からのバイオマス燃料製造プロセスの研究開発
 - 委託先: JFEエンジニアリング株式会社、国立大学法人筑波大学、再委託: 中部大学、神奈川工科大学
- 微細藻類による高効率炭化水素生産プロセスの研究開発
 - 国立大学法人東京大学、東京瓦斯株式会社
- 微細藻由来のバイオジェット燃料製造に関する要素技術の開発
 - JX日鉱日石エネルギー株式会社、株式会社ユーグレナ、株式会社日立プラントテクノロジー、慶応義塾大学
- 油分生産性の優れた微細藻類の育種・改良技術の研究開発
 - 中央大学、株式会社デンソー

農林水産省においては、本報告書の助成金事業の前年度の取り組みで、スメーブジャパン社を実証機関とする以下の調査がおこなわれた。同事業においては、海洋性藻類のナンクロロプシスについてオープンポンドの培養槽を用いて沿岸部における海水を利用した藻類バイオマスファームの事業化について検討がなされた。高付加価値のワムシのエサや、EPAなどのサプリメントを同時に生産することで早期の事業化について検討がなされている。なお、新聞報道によれば、スメーブジャパン社は、本年6月には石巻市の私有地において培養・加工する工場の建設を決め3月23日に石巻市と立地協定を提携しているとされている。ⁱ

- 緑と水の環境技術革命プロジェクト事業: 題名: 耕作放棄地での微細藻培養技術の確立と事業化～藻から石油とオメガ3～
 - 実証機関 スメーブジャパン株式会社、
 - 連携機関 株式会社循環社会研究所、ジェイ・フェニックス・リサーチ株式会社

独立行政法人科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (CREST) プロジェクトでは、2つの研究領域で藻類バイオマスの研究開発が進められている。

ⁱ http://www.sanriku-kahoku.com/news/2012_03/i/120324i-baio.html

研究領域「持続可能な社会に向けた温暖化抑制に関する革新的技術の創出」の取り組みとして、以下の研究がなされている。

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

海洋性藻類からのバイオエタノール生産技術の開発

海洋微細藻類の高層化培養によるバイオディーゼル生産

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」の取り組みとして以下の研究がなされている。

自己溶菌藻と発現ベクターを組み合わせた有用物質生産・回収による排気CO₂ガス再利用資源化のための基盤技術創成

バイオ燃料高生産のための炭素固定能を強化したスーパーシアノバクテリアの創成

藻類由来光合成器官の電極デバイス化とバイオ燃料変換系への展開

糖代謝ダイナミクス改変によるラン藻バイオプラスチックの増産

乾燥・細胞壁破壊・有毒抽剤使用を不要にする藻類からの燃料抽出技術の創出

真核藻類のトリグリセリド代謝工学に関する基盤技術の開発

高増殖性微細藻の合成を目指した微細藻代謝フラックス制御機構の解明

グリコーゲンから油脂へ:シアノバクテリア変異株の代謝改変

バイオマス高度利活用を志向した人工代謝システムの創出

ラン藻の窒素固定酵素ニトロゲナーゼを利用した水素生産の高効率化・高速化

ラン藻由来アルカン合成関連酵素の高活性化

微細藻におけるオイル産生代謝機構の解明

水圏生物のマイクロミラーによるエネルギー変換伝達機能の獲得

超高効率でイソプレノイド燃料をつくる藻類の創製

糸状性シアノバクテリアを用いた細胞間分業による効率的バイオアルコール生産

好気条件下で水素(H₂)製造反応を触媒する[NiFeSe]型ヒドロゲナーゼの分子構築

生物界最速シャジクモミオンを利用した植物成長促進システムの開発

微細藻類ユーグレナの新規形質転換法の開発と応用

多様な光スイッチの開発による細胞外多糖生産の光制御

循環型エネルギーを利用した硫酸性温泉紅藻によるレアメタル回収システムの開発

また、産業競争力懇談会においても技術ロードマップが示され、海外での事業展開を視野に網羅的な取り組みの重要性について論じた報告書が開示されている。内容を見る限り、産官学で極めて多様な取り組みがなされている。

技術的蓄積として、当コンソーシアム会員企業の関連技術・知見および国内特許情報からの関連技術の分布図をまとめたのが以下である(詳細は参考資料参照)。

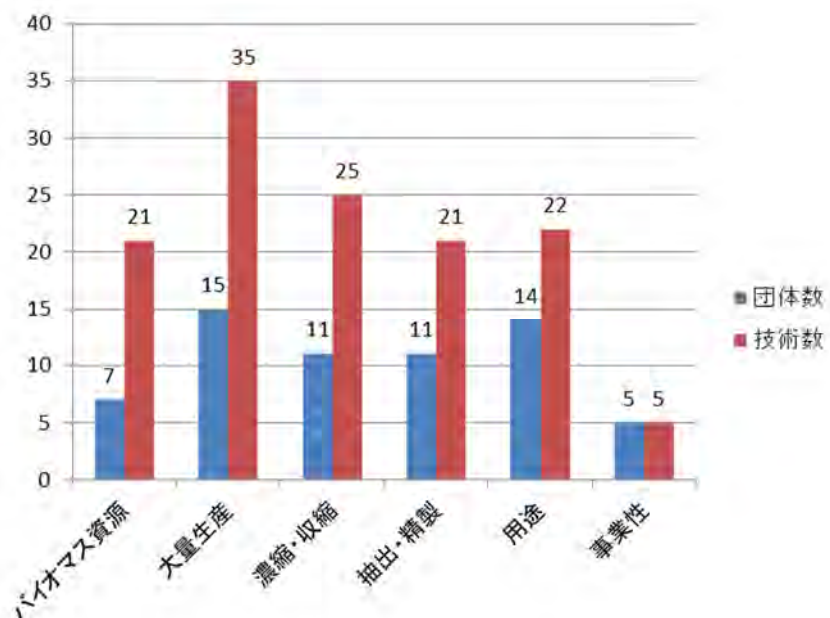


図 2-8 当コンソーシアム会員企業の関連技術・知見の分布図

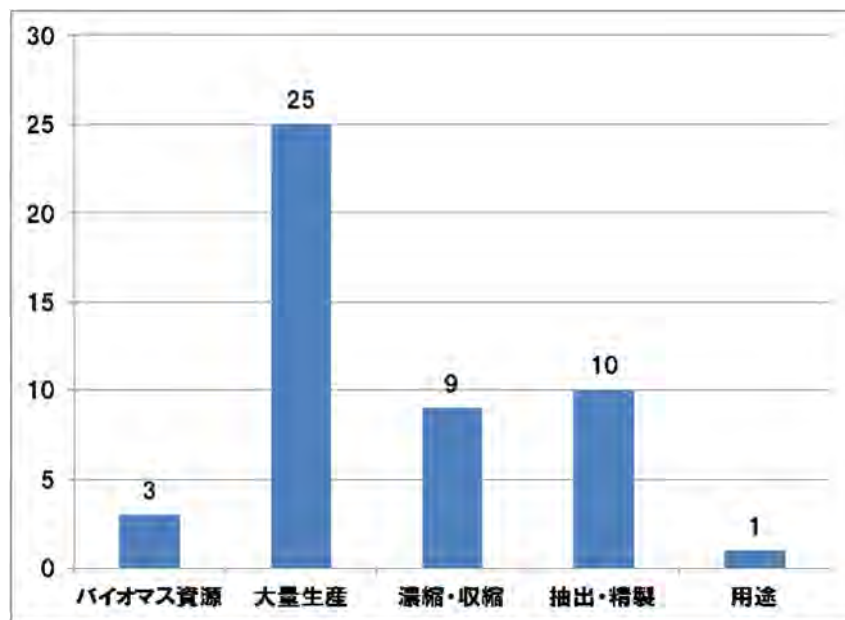


図 2-9 国内特許情報からの関連技術

これらを見ると、一般的な既存技術も含めたものが図2- 8の分布を、新規性に関しては図2- 9の分布図が示していると考えられる。2つを合わせれば、かなり網羅的に既存および新規性のある技術で、すべてのバリューチェーンに渡って技術・知見が蓄積しているとみることができる。

また、バリューチェーンのすべてにわたり、個別プロジェクトや個別企業の技術蓄積を集結すれば、わが国は、藻類バイオマスの再生可能エネルギーへの事業化に関して、網羅的な経営資源を有しているといえる。

ただし、残念ながら、海外の先進事例のような1つの主体が極めて網羅的にすべての論点を整理して、実証していくような取組みは見られない。ニューサンシャイン計画プロジェクトの研究開発体制と成果報告書の分析にもとづき、日本における藻類バイオマスの研究開発体制の在り方を再検討することが必要とされる。

第三章 事業化への技術ロードマップと当コンソーシアムの貢献の可能性

1. 藻類バイオマス関連技術

図3-1に示した藻類大量生産に関連する要素技術の中で、藻類バイオマス資源関連の主要要素技術および主な論点を整理すると表3-1のようになる。

<p>1.1 有用種の選定の研究・技術戦略</p> <p>1.1.1 選定基準の設定</p> <p>1.1.1.1 想定する用途</p> <p>1.1.1.2 細胞構成の有用成分</p> <p>1.1.1.3 有用成分増殖率</p> <p>1.1.1.4 栄養源 (N、K、P、その他)</p> <p>1.1.1.5 生育環境・生活環</p> <p>1.1.1.6 詳細培養条件 (温度、pH、CO₂やO₂濃度、etc)</p> <p>1.1.1.7 耐性 (塩分、酸、アルカリ性、温度)</p> <p>1.1.2 現状の有用種候補</p> <p>1.1.2.1 光合成藻類の候補</p> <p>1.1.2.2 従属栄養藻類の候補</p> <p>1.1.2.3 混合栄養藻類の候補</p> <p>1.1.3 大量培養に向けた課題</p> <p>1.1.4 混合培養時の挙動</p> <p>1.1.5 環境への影響</p>	<p>1.2 スクリーニング・コレクション</p> <p>1.2.1 有用種スクリーニング技術</p> <p>1.2.2 純粋培養技術</p> <p>1.2.3 コレクション整備 (藻類バイオリソースセンター)</p> <p>1.3 育種・改良</p> <p>1.3.1 育種技術・突然変異体作成技術</p> <p>1.3.2 生物工学的改良</p> <p>1.3.2.1 代謝工学</p> <p>1.3.2.2 遺伝子代謝工学</p> <p>1.3.2.3 酵素工学</p> <p>1.3.2.4 タンパク質工学</p> <p>1.3.3 光合成効率改善</p>
---	--

図 3-1 藻類バイオマス関連の主要要素技術

表3-1 藻類バイオマス資源関連技術の主な論点

目標	全体的な単位面積当たり増殖率が高く燃料原料成分が高い種の開発
既存知見・技術の応用 (5年後で実用化可能性)	<ul style="list-style-type: none"> ● 既存のカルチャーコレクション保有の藻類培養株の分析・スクリーニング ● 炭化水素を高含量に産生する藻類の探索・スクリーニング ● 純粋培養 (無菌化) 技術の効率化 ● 窒素等栄養素欠乏状態とオイル含有率の関係、増殖率の各種環境における変化の把握 ● カルチャーコレクションの充実 (藻類バイオリソースセンターの整備) ● 効率的なスクリーニングシステムの構築 ● コンタミネーション耐性度の分析・評価 ● 植物品種改良・育種ノウハウの応用 ● 重イオンビーム等効率的な突然変異誘起技術の適用
研究・開発中新知見・技術 (5年後より実証、10年後に実用化の可能性)	<ul style="list-style-type: none"> ● より高速なスクリーニング技術・代謝メカニズム分析技術 ● 各種代謝促進メカニズムの把握 ● 燃料原料成分への配分・蓄積促進メカニズムの把握 ● 増殖速度を制御する内的因子の把握 ● 遺伝子導入法の確立 ● より光合成効率の高い能力への形質転換 ● 高いオイル蓄積率と高い増殖率、高いコンタミネーション耐性などを兼ね備えた有用種と発見、育種、遺伝子操作による形質転換 ● 有用物質分泌機能に関連する遺伝子の同定と同遺伝子組み換え体の開発 ● 淡水生育種の有用能力の海水生育種への形質転換 (海水は豊富な水資源) ● 特殊環境生育種 (特殊なpH、水温、塩分、etc) の探索・発展、形質転換
資源枯渇へ対応する藻類	<ul style="list-style-type: none"> ● より過酷な環境での生育が可能な種: コンタミネーションの最小化 ● 増殖に必要なリンなどの肥料が少ないと資源枯渇問題においてプラスの影響 ● 広い塩分耐性を持つ藻類: 水資源枯渇問題から独立し、かつ下水処理システムや水田等農地システムに組み入れやすい。 ● 広範な有機物を利用する従属栄養藻類: 有機物資源の制約が少ない。

1.1. 概要

藻類は酸素発生型光合成を行う生物の総称で、藍藻(シアノバクテリア)が共生(一次共生)することで葉緑体を獲得した真核生物の一群である植物(緑色植物、紅色植物、灰色植物)と緑色藻類や紅藻類が共生(二次共生)することで葉緑体を獲得し光合成能を獲得した生物群(二次植物)からなる。コンブやワカメなどの褐藻類、ユーグレナ(ミドリムシ)は二次植物である。このような進化的背景を持つために、藻類は性質の異なるさまざまな生物群を含んでおり、未知の分類群や種が多数存在すると考えられている。すなわち、藻類とその近縁生物は未開拓の生物資源と考えた方がよい。そのため、有用種、優良株の探索は今後長期にわたって続ける必要があると考えられる。

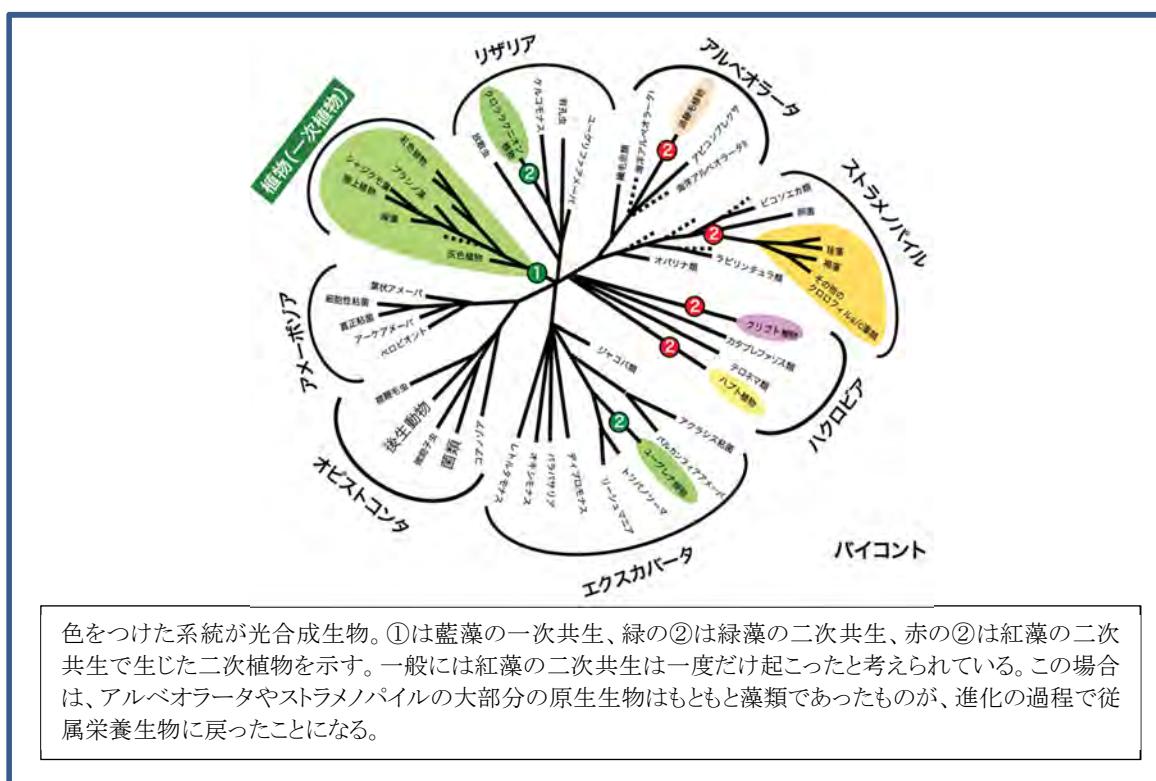


図 3- 2 真核生物の系統関係

図3- 2真核生物の系統関係ⁱは、各種藻類の系統関係を、図3- 3は藻類の分類体系を示している。それぞれの分類群について、まだ十分理解が得られているとはいえない状況にあり、基礎科学の分野でインベントリーの調査研究が進められている。しかし、技術の進歩で研究は急速に進展しており、最近では、毎年のように門や綱レベルの藻類の新規分類群が発表されている。図に示した複雑な進化を背景に、極めて多種多様な未知の種類が存在していることは間違いない。今後、さまざまな有用種の発見が十分に期待できると考えることができる。前述のように、藻類とその近縁生

ⁱ Baldauf, S. Journal of Systematics and Evolution 46 (3): 263–273 (2008)

物は未開拓の生物資源であり、その活用を戦略的に推進する体制の構築が望まれる。

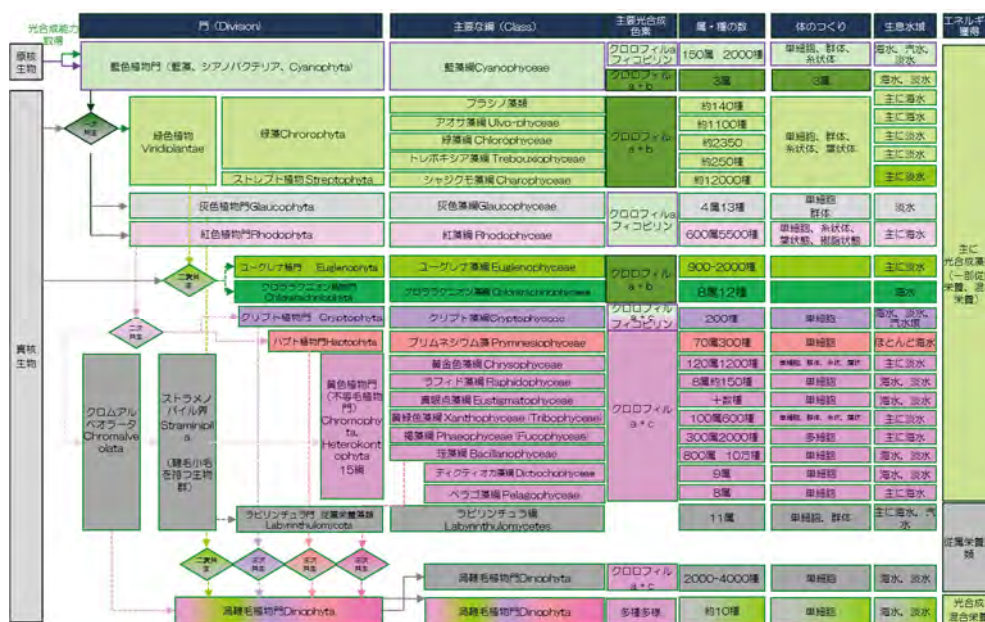


図 3-3 藻類の分類体系と特性

1.2. バイオエネルギー生産に活用されている藻類

1.2.1. メタンとアルコール

藻類には多細胞で大型の海藻類と顕微鏡サイズの微細藻類が含まれている。アオサなどの緑色海藻と海苔などの紅藻は一次植物、コンブ、ワカメなどの褐藻はストラメノパイルに属する二次植物である(図3-2を参照)。海藻は食料として利用されるほか、アルギン酸工業、寒天工業、カラゲナン工業など各種の海藻工業の原料として広く活用されているⁱ。バイオエネルギーとしては、メタンガスの生成にジャイアントケルプⁱⁱ、アオサ(*Ulva*) + シオグサ(*Cladophora*) + *Chaetomorpha*の混合集団ⁱⁱⁱ、コンブ(*Laminaria*)ⁱⁱⁱなどが使われる。国内でもコンブを用いた実証試験がおこなわれ

ⁱ 平岡雅規、鳥田智、吉田吾郎 「グリーンタイド」『21世紀初頭の藻学の現況』、日本藻類学会創立50周年記念事業実行委員会、藻類工業 123-125頁、2002年:

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jsp/pdf-files/38SeaweedIndustry.pdf>

ⁱⁱ G. Roesijadi, A.E. Copping, N.H. Huesemann, J. Forster and J.R. Bennemann: Independent Research and Development Report IR Number: PNWD-3931, pp.114.
(<http://www.scribd.com/doc/16595766/Seaweed-Feasibility-Final-Report> より)

J. Sheehan, T. Dunahay, Js. Bennemann and P. Roessler: A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory, NERL/TP-580-24190, pp 294 (1998)

VDI: Verein Deutscher Ingenieure Guidelines 2004, Guideline VDI 4630, Düsseldorf, Germany (2004)

ⁱⁱⁱ V.N. Gunaseelan: Biomass and Bioenergy 13, 83-114 (1997)

ており、コンブ湿重量1トンあたり約22kLのメタンが生成されたと報告されているⁱ。また、NEDOの事業としてメタン発酵ガス化技術によってメタンの生成と発電の実証実験が行われているⁱⁱ。海藻だけでなく微細藻類もメタン発酵の原料として有力視されている^{iii, iv}。脂質からのバイオガス変換効率は1kg脂質量あたり1,390Lで、そのうち72%がメタンガスであることから^v、脂質含量に富んだ種が最適である。しかし、リアクターでの生産コストが高いことから、商業化には一層の技術開発が必要と考えられる。メタン発酵自体は食物残渣などの有機廃棄物を使ってすでに各地で実用化が進んでいる技術であり、今後、海藻、微細藻類への応用が期待できる。

バイオエタノールの生産についても同様で、クロレラ(*Chlorella vulgaris*)^{vi}、クロロコクム(*Chlorococcum littorale*)^{vii}、遺伝子改変シアノバクテリアのシネココッカス(*Synechococcus*)^{viii}などで研究が行われている。特に遺伝子改変シネココッカスは、光合成による糖の生産と糖のアルコール発酵双方の機能をもったものであり、高いアルコール生産効率をもつことが知られている。微細藻類の増殖速度は陸上植物と比べて数十倍と考えられており、また、リグニンなどの難分解多糖をもたないこと、さらに、細胞壁の薄い種も多く存在していることから、バイオエタノール生産のための資源として十分考慮の対象になり得ると考えられる。必要な栄養塩が供給されれば、各地の湖沼環境に適した微細藻類が増殖してくるが、こうした微細藻類は、エタノール生産の原料として有効に活用できる可能性がある。栄養塩の供給を家庭、産業排水でまかなうことができれば、水浄化とエタノール生産の双方に産業的に活用できる可能性が高く、検討していく必要がある。

1.2.2. 水素生産

藻類がつくるエネルギーの可能性の一つに水素生産があり、米国をはじめ世界各地で研究が進められている。藍藻(シアノバクテリア)と緑藻類が酸素発生型光合成と水素生産を同時に行う藻類として知られている^{ix}。藍藻類では13属20種(種名が不明のものを除く)37株が水素を生産することが確認されている^x。また、米国エネルギー省国立再生エネルギー研究所(NREL)では

ⁱ 松井 徹:クリーンエネルギー 16 (4)、 31-35 (2007)

ⁱⁱ <http://www.nedo.go.jp/content/100110072.pdf>

ⁱⁱⁱ J. Sheehan, T. Dunahay, Js. Bennemann and P. Roessler: A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory, NERL/TP-580-24190, pp 294 (1998)

^{iv} Y. Chisti: Biotech. Advances 25, 294-306 (2007)

^v VDI: Verein Deutscher Ingenieure Guidelines 2004, Guideline VDI 4630, Düsseldorf, Germany (2004)

^{vi} A. Hirano, R. Ueda and Y. Ogushi: Energy 22 (2-3), 137-142 (1997)

^{vii} Y. Ueno, N. Kurano and S. Miyachi: J. Frement. Bioeng., 86 (1),38-43 (1998)

^{viii} Y. Ueno, N. Kurano and S. Miyachi: J. Frement. Bioeng., 86 (1), 38-43 (1998), R.P. Woods, J.R. Coleman and M. De Deng: U.S. Patent 6699696 (2004)

^{ix} D. Dotta, D. De, S. Chaudhuri and S.K. Bhattacharya: Microbial Cell Factories, 4, 36 doi:10.1186/1475-2859-4-36 (2005)

^x A. Hemschemeier, A. Melis and T. Happe: Photosynth. Res., 102, 523-540 (2009)

*Chlamydomonas reinhardtii*による水素生産コストの解析をおこなっているⁱ。わが国でも、藍藻からの水素生産の可能性が研究されているⁱⁱ。

藻類による水素生産については、コスト解析から下記の4つの開発すべき重要な技術課題が抽出されており、研究の進展が望まれる。

1. 実験による水素生産コストの検証
2. フォトバイオリアクターのコストの最小化
3. 圧縮と貯蔵の低コスト化
4. 水素生産潜在力の向上:
 - (ア) 光集光アンテナのサイズ縮小変異体の作成
 - (イ) 酸素耐性ヒドロゲナーゼの作出
 - (ウ) 電子伝達率の最大化

1.2.3. 藻類オイル

藻類バイオマスの活用に関する近年の傾向は、藻類が産生するオイルを直接あるいは改変して発電や、自動車や航空機の燃料として活用しようというものである。オイル含有量が多い種が注目を集めている。これらの藻類に関する研究は、大量培養の実績のある種の育種、遺伝子改良による形質転換、オイル含有率の高い種の増殖率の増強などが研究の中心となっている。対象となる微細藻類の多くはグリセリンに脂肪酸が結合したトリグリセリドを蓄積する。トリグリセリドはメチルエステル化処理を経て脂肪酸メチルエステル、すなわちバイオディーゼルとして活用することができる。生化学的な性質は異なるがトリグリセリドは、菜種、ひまわり、パーム、ココナツ、魚油など、多様な生物が産生しているオイルである。有用な燃料ではあるが、原料の10%程度がグリセリンとして残されるため、その処理が問題となっている。さらにトリグリセリドをメチルエステル化したFAMsがバイオディーゼルとして運輸燃料へ利用されているが、内燃機関の腐食、NOxの発生、低温での凝固・固化などの問題が起こる。一方で、石油成分と同様の酸素を含まない炭化水素を生産する藻類が注目を集めている。緑色藻類のボトリオコックスと不等毛植物に近縁のオーランチオキトリウムは重油相当の炭化水素を産生する。いずれも実証に向けた研究が進められている。ただし、現時点では、炭化水素含量が高い藻類種は*Botryococcus*と*Aurantichytrium*の一部の培養株に限られていることから、今後炭化水素含量の高い藻類種の探索・スクリーニングが必要である。

ⁱ W.A. Amos: Milestone Completion Report for the U.S. Department of Energy's HCFIT Program Analysis Task, NREL/MP-560-35593, pp.28 (2004)

ⁱⁱ 神奈川大学プロジェクト研究所、光合成水素生産研究所ホームページ
<http://bio-hydrogen.kanagawa-u.ac.jp/index.html>

イカダモ (*Scenedesmus*)

緑藻綱ヨコワミドロ目イカダモ科の藻類で、4、8、16細胞の群体を形成する。技術系人材派遣会社のWDB傘下の環境バイオ研究所と徳島大学、四国大学短期大学部、ベンチャーのアムテック(徳島県石井町)が開発を進めている。真冬でも、40°Cを超える真夏の高温下でも、1日で約2倍に増える。

ボトリオコッカス (*Botryococcus braunii*)

緑色藻類、トレボキシア藻綱、ボトリオコッカス科に属する群体性の藻類で、淡水湖沼に生息する。細胞内でアルカジエン、アルカトリエン等の直鎖型炭化水素、ボトリオコッセン(C₃₄H₅₈など)と呼ばれるトリテルペノイド炭化水素、あるいはリコパディエンとよばれるテトラテルペノイド炭化水素を乾燥重量の20-75%生産し、細胞外へ分泌して群体の細胞間に蓄積する。筑波大学で単離されたボトリオコッカスは高アルカリ性の環境でも生育できるため、他の微生物などのコンタミを防ぐことができる可能性がある。細胞の生育速度が遅いため、増殖率の高い株のスクリーニングも精力的に実施されている。神戸大学で開発された「榎本藻」もボトリオコッカスで、(株)IHI、(有)ジーン・アンド・ジーンテクノロジー、(株)ネオ・モルガン研究所によって設立されたIHI NeoG Algae合同会社で実用化に向けた開発が進められている。

シュードコリスティス (*Pseudochoricystis ellipsoidea*)

5μm程度の緑色単細胞植物で、デンソーの藏野博士らが(株)海洋バイオテクノロジー研究所時代に温泉地から単離した。光合成によりCO₂を吸収して増殖し、トリグリセリドを蓄積するが、少量の軽油相当の炭化水素も含有する。窒素飢餓条件でトリグリセリドを細胞内に蓄積する。現在、窒素欠乏下で油が溜まるメカニズムを分子レベルで解明中。デンソー、慶応大学、中央大学などで研究が進められている。

オーランチオキトリウム (*Aurantiochytrium limacinum*)

葉緑体を持たず光合成をしない従属栄養生物で、有機物を吸収して生育する。従属栄養性藻類とよばれることも多い。褐藻や珪藻などの不等毛植物とともに、ストラメノパイルに属する。熱帯や亜熱帯地域のマングローブ林や汽水域を好む。細胞は球形で直径5-数10μm程度。他の藻類に比べると分裂速度が速く、培養温度によっては倍加時間が2時間という場合もある。多くの株は高度不飽和脂肪酸のドコサヘキサエン酸(DHA)やエイコサペンタエン酸(EPA)を高濃度で生産するが、筑波大学渡邊教授の研究グループは炭化水素の一種であるスクワレン(C₃₀H₅₀)を大量に生産する株を分離。1Lあたり1g以上のスクワレンを3日で作り出すことが可能で、1haあたり年間約1,000トン以上の炭化水素を生産できると試算された。生活排水や産業排水中の有機物を栄養素として活用できるので、排水処理としての側面からも注目されている。

New Strain X (筑波バイオテック研究所)

公開されていないために、どのような分類群に属する藻類か明らかでないが、淡水産で増殖速度が大きく、含油率が、70~80%に達するとされる。航空燃料の生成に適する新種の微細藻類とされているⁱ。

1.2.4. 産業で活用されている微細藻類

微細藻類の産業への活用は、これまでエネルギー資源以外の用途を目的としてきたものが大部分である。各国で情報が十分公開されていない現状はあるが、大量培養によって産業として成立した微細藻類は藍藻(シアノバクテリア)のスピルリナ、緑藻植物のクロレラ、ドナリエラ、ヘマトコッカス、不等毛植物門のナンノクロロプシス、ユーグレナ植物のユーグレナ(ミドリムシ)など数種に限られている。スピルリナは高アルカリ、ドナリエラは高塩分環境で生育するためにコンタミネーションが発生しにくい。また、クロレラは高濃度の栄養塩で増殖する、ナンノクロロプシスは増殖率が高いなどの特徴によって野外での大量培養が可能になっている。また、増殖の早いユーグレナは、2018年を目標として燃料としての研究開発が進められているが、本報告書作成の時点では食品として販売されているⁱⁱ。これらのほか、表3-2および参考資料2に示したようにさまざまな分類群の微細藻類が基礎から大量培養の実証研究の対象として研究されている。

現時点で産業の点で注目される主な藻類は以下のようである。

クロレラ (*Chlorella*)

緑藻植物、トレボキシア藻綱、クロレラ目、クロレラ科の一種で直径2-10 μ mの球形細胞を有する。繁殖は自生孢子で無性的に増殖をくり返すだけであり、高い増殖能、光合成能を有する。乾物としての成分は、タンパク質45%、脂質20%、糖質20%でその他ビタミン類やミネラル類を含む。大量培養が可能になった1960年代以降は、健康食品として市場が確立している。窒素欠乏条件下でオイル含量が増加するが、細胞の増殖も低下するのが欠点。2010年には、フランスの国立科学研究センター(CNRS)が中心となって全ゲノムが解明されたⁱⁱⁱ。このゲノム解析結果により、クロレラが健康補助食品から工業原料としての用途が拡大されることが期待されている。

ドナリエラ (*Dunaliella*)

緑藻植物、緑藻綱、ドナリエラ目、ドナリエラ科の一種。細胞は単細胞でやや細長い楕円形、先端に2本の鞭毛を有する。細胞壁を持たず、生育条件によって細胞内に β -カロテンなどのカロテノ

ⁱ 株式会社 筑波バイオテック研究所Website 会社情報 プレスリリース 2011年4月18日「バイオ航空燃料に適した新種微細藻類の選抜と製造コスト低減に成功」:

<http://www.maekawabio.org/press.pdf>

ⁱⁱ <http://www.euglena.jp/research/system.html>

ⁱⁱⁱ The Plant Cell September 2010 vol. 22 no. 9

イドを蓄積する。*D. salina*は塩分濃度の高い場所で生育し、塩田や死海、塩湖で見られる。ドナリエラから生産されるカロテノイドは細胞の再生を助ける抗酸化作用に優れるといわれ、老化防止の化粧品に利用されるだけでなく、健康食品として市販されている。

スピルリナ (*Arthrospira*)

藍色植物門、ユレモ目の藍藻。スピルリナの名前で呼ばれているが、現在では*Spirulina*属から*Arthrospira*属に移されている。大量培養に使用されているのは *A. platensis*で、現在でも*Spirulina platensis*の名前で呼ばれることもある。幅5-8 μm 、長さ300-500 μm ほどの螺旋形をした糸状の藍藻(シアノバクテリア)。古来アフリカや中南米の湖に自生する熱帯性の藻類で、現地の人々の貴重なタンパク源として利用されてきた。水温30 $^{\circ}\text{C}$ ~35 $^{\circ}\text{C}$ の無機塩類濃度の高いアルカリ性 (pH9-11)の水を好む。細胞壁が薄いことが特長で、成分抽出が比較的容易である。また、細胞が大きいためにフィルターろ過で脱水濃縮ができる。乾燥したスピルリナは、タンパク質を60%含み、ビタミン、ミネラル、多糖類、クロロフィルなどを含む。天然着色原料として冷菓・乳製品・飲料・ガムなどに利用されている。

ユーグレナ (*Euglena*)

ユーグレナ植物門の藻類で、鞭毛を有し運動性がありミドリムシという和名で一般的に知られている。主に富栄養条件の淡水域に分布する。光合成を行って独立栄養生活を営むが、従属栄養での増殖も可能である。油脂は炭素数14を中心とした脂肪酸やアルコールで構成されている。光合成の産物は β -1,3-グルカンの高分子であるパラミロンであるが、嫌気的条件下で培養されるとワックスに変換する。成長速度も速い。(株)ユーグレナによって、化粧品や食品添加物だけでなくジェット燃料への応用のための技術開発がなされている。

ナンノクロロプシス (*Nannochloropsis*)

真正眼点藻綱に属する海産性単細胞藻類。ナンノクロロプシスは、大きさが約5 μm 、球形で、海水で生育できるために、豊富な海水の利用が可能。脂肪酸含量は約30%、脂肪酸中EPAの割合が約35%含まれており、低窒素培養条件で脂質量が増加する。EPAは、 ω -3タイプの高度不飽和脂肪酸の生理活性として、分化誘導能、抗腫瘍作用、学習機能の向上、血糖値低下作用、抗リウマチ作用、発毛・育毛作用等々種々の生理活性が報告されている。ワムシやヒラメなどの魚類、甲殻類の種苗生産に効果があり、注目されている。

ヘマトコッカス (*Haematococcus*)

緑藻綱、クラミドモナス目、ヘマトコッカス科の単細胞藻類。高い抗酸化作用をもつカロテノイドであるアスタキサンチン(エビや蟹、鮭がもつ赤い色素)を大量に含有することで知られ、これを抽出したものが健康食品や化粧品に広く利用されている。ヘマトコッカスは、強光、乾燥による塩濃度の上昇、栄養塩の欠乏など、急激な環境の変化があると休眠細胞を形成する。アスタキサンチン

の含有量は休眠細胞で特に多く、そのために、細胞は赤色を呈する。自然界では、しばしば乾燥した岩のくぼみや墓地の水鉢で赤色のマットとして見られる。

藻類についてこれまでエネルギー生産の観点から研究された事例は少ないが、近年、基礎から応用までさまざまな研究が実施されている(参考資料2)。これまでのところ、再生可能エネルギー資源として、図1-7で示した有用種としての特徴をすべて満たすものは発見されていない。例えば、オイル生産性が高い場合、コンタミネーションに弱い、増殖率が高いがオイル生産性が低いなど、各種トレードオフが存在している。この状況を克服するためには、突然変異体創出や遺伝子改変等の技術を駆使して既存培養株の改良を進める必要がある。突然変異体の効果的創出には、ナデシコなどの被子植物の変異体を大量かつ効果的に創出する技術として注目されている重イオンビームによる取り組みが注目されるⁱ。優良株の作出には、ゲノム解析を基盤とする代謝系の改変を進めることも重要で、多くの取り組みが進行している(参考資料2)。しかし、微細藻類の遺伝子改変株の取り扱いについては、野外での利用が困難になると予想されることから、活用の将来像を明確にしながら取り組む必要がある。このような既存藻類株の改良や改変の試みと並行して、自然界から新規藻類や微生物の探索を続けることが重要と考えられる。前述したように微細藻類の系統は多岐に渡っていることと、まだインベントリーレベルの研究が十分なされていないために、今後、未知の有用藻類や原生生物が発見される可能性は極めて大きい。新しい藻類、原生動物株の探索と培養株の確立を効果的に進めるために、セルソーターを用いた自動的単離培養技術、またオイル生産能、オイル分子種の迅速な同定を可能にする技術開発を進める必要がある。このような生物代謝の動向を迅速に測定する方法として核磁気共鳴法等を活用した技術の革新が望まれるⁱⁱ。

ⁱ <http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/pls/crest.html>

ⁱⁱ <http://labs.psc.riken.jp/anmru/>

表3-2 エネルギー資源として注目される主な藻類

名前 門/綱	特徴	バリューチェーンへの示唆	課題	課題克服の可能性
<i>Chlorella vulgaris</i> 緑藻植物門/トレボキシア綱	<ul style="list-style-type: none"> 独立・混合栄養 閉鎖型・開放型の双方で大量培養の実績 窒素制限下で大幅にオイル含有率増加 	<ul style="list-style-type: none"> 多様な炭素源の有効利用 大量培養の実績 健康食品として市場確立 	<ul style="list-style-type: none"> 窒素欠乏状態だと増殖率が低下する 	<ul style="list-style-type: none"> 最適条件の把握 育種、遺伝子改良等によるオイル含有率
<i>Dunaliella tertiolecta</i> 緑藻植物門/緑藻綱	<ul style="list-style-type: none"> 好塩性(高濃度のカロテノイド蓄積)(高塩濃度による高浸透圧環境から守られていると考えられる) 	<ul style="list-style-type: none"> 同じ属の<i>D.salina</i>で大量培養実績あり、そのノウハウが応用可能 カロテノイドは抗酸化活性をもつことが古くから健康食品として利用価値が認められている(バイオリアファイナリーへの貢献) 淡水資源の乏しい地域での展開 	<ul style="list-style-type: none"> オイル含有率は培養株により、16.7~71.0と異なるので、増殖がよく、オイル含有率の多い培養株を確保することが必要。 バイオマス生産効率が0.12g/L/dayと<i>Chlorella</i>や<i>Nannochloropsis</i>と比較して低い。 	<ul style="list-style-type: none"> 育種、遺伝子改良等によるバイオマス生産性の向上
<i>Phaeodactylum tricoratum</i> 不等毛植物門/珪藻綱	<ul style="list-style-type: none"> 海産、 25-30℃ EPAを豊富に含む、全脂肪の30% 	<ul style="list-style-type: none"> 遺伝子導入技術が1996年に確立 全ゲノム配列の解読が終了 形質転換に成功 	<ul style="list-style-type: none"> 野外大量培養の実績がない 	<ul style="list-style-type: none"> 遺伝子改良による形質転換
<i>Arthrospira platensis</i> 藍藻綱	<ul style="list-style-type: none"> 強アルカリ性、強い太陽光、水温30-35℃で生育 細胞壁が薄い 	<ul style="list-style-type: none"> 豊富な野外培養実績あり 健康食品、天然着色料原料として市場確立 コンタミネーションに強い 細胞壁が薄いため成分抽出が容易 	<ul style="list-style-type: none"> 成育可能地域限定 	<ul style="list-style-type: none"> 遺伝子改良による形質転換 光合成機能と代謝能力の強化
<i>Euglena gracilis</i> ユーグレナ植物 ユーグレナ藻綱	<ul style="list-style-type: none"> 有機物存在下で成長速度が速い。 ユーグレナ油脂は炭素数14を中心とした脂肪酸及びアルコールで構成 	<ul style="list-style-type: none"> 野外大量培養の実績をもつ。 健康食品として市場確立 	<ul style="list-style-type: none"> 高密度培養には有機物が必要 蓄積するオイルは炭化水素ではないため、ジェット燃料化には水素添加および異性化が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> オイルの効率的な異性化技術 光合成能力の向上
<i>Nannochloropsis</i> 不等毛植物門/ 真眼点藻綱	<ul style="list-style-type: none"> ほとんどが海産、EPAを含む 低窒素培養化下で脂質量が増加する 乾燥重量で脂質量が68%以上になることがある。成分的にはバイオディーゼルに適している 	<ul style="list-style-type: none"> 海水で生育可能であるため水資源問題に貢献 高単価のEPA、DHA、種苗用飼料などで高付加価値副産物による早期経済性の確立の可能性 イスラエルにて野外培養方法が確立 寒冷地での育成可能 	<ul style="list-style-type: none"> 海から遠いと海水を運ぶコストがかかる可能性 	<ul style="list-style-type: none"> 淡水での培養ノウハウ確立 淡水の類似種の探索
<i>Botryococcus braunii</i> 緑藻門/トレボキシア綱	<ul style="list-style-type: none"> 重油相当のオイルを産生し細胞外へ分泌 オイル含量は場合によっては、乾燥重量の75% 	<ul style="list-style-type: none"> 炭化水素を細胞外にだすため、濃縮・収穫・抽出・精製コストの削減に貢献の可能性 炭素数から重油相当の炭化水素であるため、既存のクッキング技術で軽油、ジェット燃料、ガソリンへの転換ができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 増殖率が低い コンタミネーション問題 	<ul style="list-style-type: none"> 増殖率が高く、コンタミネーションが制御できる種の発見あるいは品種改良 野外大量培養実証システムの構築による実証研究の積み重ね
<i>Aurantiochytrium</i> ストロメバイル門 ラビリンチュラ綱	<ul style="list-style-type: none"> 従属栄養 高度不飽和脂肪酸を高濃度に蓄積 高増殖速度、脂質蓄積機能 高効率で炭化水素(スクアレン)を産生し細胞内に溜め込む 	<ul style="list-style-type: none"> 炭化水素を生成するため精製コストが軽減 下水処理への応用可能性 化粧品・医薬品への可能性 	<ul style="list-style-type: none"> 低コストで未利用の有機炭素源を確保すること 光合成種との併用も想定 	<ul style="list-style-type: none"> 実証研究の積み重ね 光合成藻類との組み合わせによる培養
<i>Pseudochorocystis ellipsoidea</i> 緑藻植物門/トレボキシア綱	<ul style="list-style-type: none"> 炭化水素生成、分類学的情報や炭化水素生産性について国際特許として公開 窒素欠乏下で細胞内油滴が著しく増加 	<ul style="list-style-type: none"> 増殖が速いことから、オイル生産効率は高い 少量ではあるが軽油相当の炭化水素を産生する。 	<ul style="list-style-type: none"> 大量培養システムの構築 軽油相当の炭化水素は低含量 	<ul style="list-style-type: none"> 軽油相当の炭化水素の代謝メカニズムの解明とその含量を増加させる技術開発 実証研究の積み重ね
<i>Haematococcus pluvialis</i> 緑藻植物門/緑藻綱	<ul style="list-style-type: none"> 淡水産 対乾性 耐熱性 	<ul style="list-style-type: none"> アスタキサンチンを蓄積 閉鎖系で大量培養可能 	<ul style="list-style-type: none"> 低コスト化 	<ul style="list-style-type: none"> 実証研究の積み重ね

出所等は次ページ詳細

<表3-2 エネルギー資源として注目される主な藻類の参考文献一覧>

- i. 渡邊 信 編集 (2010) 「新しいエネルギー藻類バイオマス」
- ii. スメーブジャパン株式会社、株式会社循環社会研究所、ジェイ・フェニックス・リサーチ株式会社、2011「耕作放棄地における微細藻培養技術の確立と事業化方策の検討に係る事業化可能性調査報告」 www.j-phoenix.com/pages/65/file20110625.pdf
- iii. DIC株式会社ウェブサイト: <http://www.dlt-spl.co.jp/>
- iv. 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 2012「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発」、「バイオマスエネルギー技術研究開発／戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業(次世代技術開発)」
- v. 遺伝子改良型海産珪藻による有用バイオ燃料生産技術開発」平成22年度～平成23年度の内平成22年度分中間年報
- vi. 近藤明彦(2009)「海洋性藻類からのバイオエタノール生産技術の開発」
<http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/report/heisei21/pdf/pdf09/09-008.pdf>

2. 藻類大量生産関連技術

図3-1に示した藻類バイオマス関連の主要要素技術の中で、微細藻類の大量培養には、図3-4に示した要素技術が関連する。ここでは、まず主な培養システムについて利点と課題を述べ、次に各種LCAで取り上げられている主な論点を整理する。各種LCA等で取り上げられている主な論点を独立栄養培養と従属栄養培養とに分けて整理すると、以下のようになる。

<p>2.1 培養法選定</p> <p>2.1.1.基本仕様の決定</p> <p>2.1.1.1 オープンポンド</p> <p>2.1.1.2 フォトバイオリアクター</p> <p>2.1.1.3 ファーメンター●</p> <p>2.1.2 下水処理技術との融合</p> <p>2.1.3 栄養源(有機炭素源●)</p> <p>2.1.4 可溶化●</p> <p>2.1.5 原水</p> <p>2.1.6 培養槽素材技術</p> <p>2.1.7 大量の水の殺菌・滅菌技術</p> <p>2.2 用地選定</p> <p>2.2.1 温度</p> <p>2.2.2 投入物の確保(水/有機炭素源/養源)</p> <p>2.2.3 その他立地条件(精製設備、供給網へのアクセス)</p> <p>●は従属栄養培養に特有な項目</p>	<p>2.3 プラント計画・建設</p> <p>2.3.1 プラントエンジニアリング/設計技術(濃縮・収穫などすべてを含んで最適化)</p> <p>2.3.2 攪拌技術・エアレーション技術</p> <p>2.3.3 化学工学的論点(流動/混合/伝熱/蒸発/沈降/反応/攪拌/流体気体輸送)</p> <p>2.3.4 水処理技術・下水処理技術</p> <p>2.3.5 水温、pH、攪拌循環等の水管理システム技術</p> <p>2.3.6 施設運転省人化の自動管理システム技術</p> <p>2.3.7 流体力学・シミュレーション技術</p> <p>2.3.8 スケールアップの課題</p> <p>2.4 運転</p> <p>2.4.1 運転上の課題</p> <p>2.4.2 複数培養増連続殖補充技術</p> <p>2.4.3 付着対策技術・雑菌除去・コンタミネーション対策・環境対策</p> <p>2.4.4 生育状況・培養条件分析計測技術</p>
--	---

図 3-4 藻類大量生産関連の要素技術

2.1. 主な培養システムの利点と課題

微細藻類には、光合成により増殖する独立栄養性藻類と有機炭素源を資化することにより増殖する従属栄養性藻類、さらには両方を同時に行う混合栄養性藻類があり、光合成により大量培養する場合には、開放系のオープンポンドあるいは閉鎖系のフォトバイオリアクターが、従属栄養により大量培養する場合にはファーメンターが使われている。これらにはそれぞれ利点と課題があり、表3- 3、それぞれの内、あるいはそれらのハイブリッドのどれを産業に普及させるべきか、現時点で決めつけることは時期尚早であろう。藻類の種類、目的とするところ、気象条件の違い、土地や水のコストの違いにより、適切なシステムが開発・選定され、使われていくべきである。

表3- 3 各種培養システムの比較

栄養 要求性	培養法	利点	課題
光合成 培養	開放系 オープンポンド	<ul style="list-style-type: none"> 蒸発冷却により水温維持が容易 資本コストが低い 	<ul style="list-style-type: none"> 水蒸発量への対応 環境変化への対応 コンタミネーションの制御 生産性が低い 最大露光条件の設定
	閉鎖系 フォトバイオリアクター	<ul style="list-style-type: none"> 水蒸発量が少ない 生産性が高い コンタミネーションの制御が比較的容易 	<ul style="list-style-type: none"> 資本コストが高い 温度制御への対応 バイオフィウリングによる洗浄の必要性 最大露光条件の設定
従属栄養 培養	ファーメンター	<ul style="list-style-type: none"> 生産性が非常に高い 最適条件維持が容易 コンタミネーションの防止が容易 低価格あるいは廃棄された有機物資源が利用可能 	<ul style="list-style-type: none"> 低価格の糖類等適切な有機物資源のコストと利用性 他のバイオ燃料との有機物資源をめぐる競合

2.1.1. 光合成培養

オープンポンド、フォトバイオリアクターのどちらにせよ、バイオマス生産に最適な光と温度条件の設定、CO₂の確保、窒素・リン等の栄養塩類の確保が必要となる。

実験室と違って、野外では昼(明期)と夜(暗期)が存在する。細胞濃度の変化に伴って、培養中の光環境も変化する。少なくとも光合成藻類は光合成が呼吸を上回る補償点以上の光を受ける必要がある。パラボリック集光装置、光ファイバーなど高度な装置を使用することも検討されてはいるが^{i, ii, iii}、コストがかかる。夜間でも効率よく光合成をおこない増殖させるために、植物工場で用いられているような補助光システムの最適化技術を開発することが有用である。どの藻類も基本的に

ⁱ R.J. Radmer; Photobioreactor、 U.S. Patent 4, 952, 511 (1999)

ⁱⁱ J.C. Ogbonna, T. Soejima and H. tanaka; J. biotechnol., 70, 289-297 (1999)

ⁱⁱⁱ M. Janssen, T. tramper, L.R. Mur and P.H. Wijffels; biotechnol. Bioengin., 81, 193-210 (2002)

はクロロフィルaを有しているが、クロロフィルaは非常に高い吸光係数を有する。藻類が増殖しているオープンポンドあるいはフォトバイオリアクターでは、表面での光強度は深度あるいはフォトバイオリアクター容器中で急激に減少していく。したがって、効率的な光合成に導くクロロフィル量を持つ品種の改良・育種とともに、一般に20cm以下のライトパスをもつように設計・作製されるオープンポンドやフォトバイオリアクターについては、光合成の効率性、コスト・エネルギー収支、運転・管理の容易性を加味した最適な光供給システムを開発することが必要とされる。

通常、藻類は20°C~35°Cの温度で高いバイオマス生産を示すものが多い。そのため、日本のような温帯域では温度が低い冬期は、屋外での藻類の効率的な大量培養はできないため、年間気温変動が少ない熱帯・亜熱帯地域で藻類の野外培養がなされている。しかし、このような温帯域でも大量に出る排熱を利用することで、冬期にも生産は可能となることが考えられる。例えば、大規模な水処理場では50°Cの温排水が一日7,000トン生じている。このような大量の排熱がある場所では、排熱を利用した野外培養システムを構築することが可能であり、排熱利用最適培養生産システム構築のための研究開発が必要とされる。

光合成藻類の大量生産には、0.2%~5%に濃縮されたCO₂・空気混合ガスが通気される^{i, ii, iii}。その際、バブルのサイズが小さいほど培養液中への拡散がよくなるが、小さすぎるとバブルに要するエネルギー消費が大きくなるため、拡散とエネルギー消費の双方を踏まえた最適なサイズを選定することが重要である。もう一つの大きな問題は、いかに高濃度のCO₂を確保するかである。火力発電所等大量のCO₂の排気ガスを排出する場所の近傍で藻類培養を実施することが最も効率的であるが、そのような場所は限定的である。また、市販のCO₂を購入した場合には、運転経費が2~3倍に増加する可能性が示唆されている^{iv}。CO₂排気ガスの長距離輸送システムや濃縮貯蔵技術の開発、空気中のCO₂濃縮技術の開発が必要とされる。

窒素・リン・カリウム等の栄養塩類は藻類増殖に不可欠な栄養素である。肥料生産にかかるエネルギー消費が藻類オイル生産プロセスでかかるエネルギー全体の20%を占めると算定されているケースもあることから、いかに栄養塩となる肥料を低コスト、省エネルギーで確保できるかが重要な課題となる。これら栄養塩は、安価な植物栽培用肥料を利用することで確保することが可能であるが^v、リンやカリウム等は希少資源となりつつあり、今後、長期的、安定的に確保することはできなくなることが懸念される。したがって、農業廃水、都市排水、産業排水として大量に廃棄されているこ

ⁱ O. Pilz; Appl. Microbiol. Biotechnol., 57, 287-293 (2001)

ⁱⁱ Y.K. Lee and S.J. Pirt; J. Chem. Technol. Biotechnol., 34B, 28-32 (1984)

ⁱⁱⁱ R.W. Bobcock, J. Malda and J.C. Radway; J. Aool. Phycol., 14, 169-184 (2002)

^{iv} M.Shoiho, M.Kawachi, K.Horioka, Y.Nishita, K.Ohashi, K.Kaya and M. Watanabe (2012), "Business evaluation of a green microalge *Bortryococcus braunii* oil production system, Procedia Environmental Sciences, in press.

^v R. Shimamura, S. Watanabe, Y. sakakura, M. Shiho, K. Kaya and M.M. Watanabe; Procedia Environ. Sci., in press. (2012)

これらの栄養塩資源の循環利用が必要となる。水処理プロセスと藻類バイオマス生産を統合する技術開発が喫緊の課題である。その際、廃水に藻類の病原菌や捕食者、藻類増殖の阻害となる重金属等の物質が含まれている場合、これらを除去する技術開発も必要となる。

攪拌・循環は、藻類の培養に最適な光照射、適切なガス交換、温度やpHの制御をするために重要である。攪拌・循環にかかる低コスト化と省エネルギーのためには、CO₂通気と攪拌・循環を統合する技術開発が望まれる。

以下にオープンポンド、フォトバイリアクターそれぞれについて必要となる技術開発課題について記述する。

2.1.1.1. オープンポンド

レースウェイ形オープンポンドは、通常は、0.3m程度の深さのループ循環式水路である。混合と循環は、パドル式回転羽根で行われる。パドル式回転羽根は、沈殿を防止するために常時稼働される。光合成藻類が必要とするCO₂は水表面の大气から供給されるが、必要に応じて濃縮されたCO₂が通気されるⁱ。

微細藻類の大量培養用のレースウェイ形オープンポンドは、1950年代から使用されてきたことからⁱⁱ、膨大な経験が蓄積されている。レースウェイ形オープンポンドは、建設と操業が容易なために、フォトバイリアクターよりもずっとコストがかからないと考えられている。また、その設置に必ずしも農地を必要とせずⁱⁱⁱ、運転に消費するエネルギーも後述するフォトバイリアクターより少なく^{iv}、管理・洗浄も容易であるため^v、純エネルギー生産性が高いと考えられている^{iv}。レースウェイ形のほかに、円形のオープンポンドもクロレラ(*Chlorella*)やユーグレナ(*Euglena*)の野外培養に使われている。しかしながら、開放系であるため、他の藻類のコンタミネーションが問題となることから、特殊な環境で生育する藻類に適した方法ともいえる。例えば、栄養塩が豊富な培地で生育するクロレラ(*Chlorella*)、高塩分環境で生育するドウナリエラ(*Dunaliella*)、高アルカリ度の環境で生育するスピルリナ(*Spirulina*=*Arthrospira*)などがそうである。しかし、現時点では特殊環境で培養できる藻類は限定されており、また、廃液の処理に特別の方法が必要となる。最近では、ボトリオコッカス(*Botryococcus*)の除草剤耐性突然変異株が開発されており^{vi}、実際の現場での有効性の検証が待たれる。

ⁱ K.L. Terry and L.P. Richmond; *Enzyme Microb Technol.*, 7, 474-487 (1985)

ⁱⁱ M.A. Borowitzka; In "Chemicals from microalgae" Taylor & Francis, 313-352 (1999)

ⁱⁱⁱ Y. Chisti; *Trends in Biotechnol.*, 26, 126-131 (2008)

^{iv} L. Rodolfi, G.C. Zittelli, N. Bassi, G. Padovani, N. Biondi, G. Bonin et al.; *Biotechnol. Bioengin.*, 102, 100-112 (2008)

^v C.U. Ugwu, H. Aoyagi and H. Uchiyama; *Bioresource Technol.*, 99, 4021-4028 (2008)

^{vi} O. Pilz; *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 57, 287-293 (2001)

オープンポンドはフォトバイリアクターと比べて、藻類バイオマス生産性が低いとされているⁱⁱⁱ。これは、水分蒸発による培地のイオン構成の変化^{vi}、不十分な攪拌によるCO₂の拡散率の減少^{iv}、温度の季節変動とそのコントロールの困難性^{iv}、光環境の変動^{iii, v, i}が原因であると考えられている。最初の問題は水分を供給するシステムをしっかりと管理することで解決できるが、他の問題については、前述の光、温度、攪拌・循環に関する技術開発が必要となる。

2.1.1.2. フォトバイリアクター

さまざまな形状のフォトバイリアクターが工夫され、製作されているが、大きくチューブ型、フラットパネル型、円錐型(ドーム型)、プラスチックバック型に分けることができる。

フォトバイリアクターは閉鎖系であることから、水分蒸発や他の藻類のコンタミネーションがほとんどないこと、高い藻類バイオマスの生産性をもつ、という利点がある。しかし、資本コストが高い。さらにどのフォトバイリアクターも光効率の点から表面積と体積の比が高いため、野外では夏場の太陽光により50℃以上の水温に上昇してくることから、フォトバイリアクターを適切な温度を保つための冷却が必要となるため、開放系と比べるとエネルギー消費が大きい。Solix社の水の入ったプールに多数のソフトプラスチック培養器ⁱⁱを吊るすことで、異常な昇温を防ぐという経済的な方法は注目すべきシステムである。

フォトバイリアクターは閉鎖系であるが故に、ガス交換が不十分であると、光合成により発生する酸素による阻害が問題になる。過剰な酸素は活性酸素となって藻類に阻害をもたらす、さらには光呼吸を増進させ、全体としての生産を著しく減少させる。フォトバイリアクターでは酸素ガスを効率よく排気する技術・システムの開発が必要である。

閉鎖系であるとしても、他の微細藻類のコンタミネーションを防ぐために、リアクター容器の滅菌は必要である。スケールが大きくなるとオートクレーブ滅菌はできないことから、オゾン殺菌が試みられることがあるが、この方法はコストがかかるとともに、使用したオゾンが残らないようにきれいに除去する必要がある。したがって、完全な滅菌はできないが、殺菌効果のある塩素水をつかうほうが実用的であることから、この方法を採用しているところが多い。しかし、他の藻類のコンタミネーションを完全に回避することが困難となる。さらにバイオフィウリングのようなリアクター壁面への付着物は光の透過を減少させることから、一定期間ごとの洗浄が必要となる。Solix社のソフトプラスチックバックシステムは使い捨てという方法でこれらの問題を解決しているが、大量な使い捨てとなると廃棄物環境問題となってくる。今後これらの問題を克服する技術開発が必要とされる。

ⁱ M. Ioki, M. Ohkoshi, N. Nakajima and M.M. Watanabe; *Bioresource Technology* 109: (2012)

ⁱⁱ B. Wilson; "Large Scale Production of Microalgae for biofuels" PDF file in International Symposium on Algal Fuel Research, Tsukuba, Japan, July 27 2009

2.1.2. 従属栄養培養

光合成増殖と従属栄養増殖を行う藻類としてクロレラが代表的であるが、フォトバイオリアクターによる光合成藻類の生産効率 ($0.02-3.8\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$) よりもファーメンターによる従属栄養増殖の生産効率は $17.5-50.0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$ ⁱ とはるかに高い。ファーメンターには1L~500,000Lの規模までさまざまなスケールのものがある。日本では発酵工学分野で先端的な技術が開発され、蓄積されている。したがって、これまで蓄積された知見・技術・ノウハウを生かして、ファーメンターの形状・構造およびシステムを低コスト化、省エネルギー化する技術開発が必要である。また、糖類等バイオマス生産に有用な有機物資源を低コストで、安定的に確保していくことが必要となる。

2.2. 主な論点の整理

藻類大量生産関連技術における論点を表3-4に列挙した。光合成培養と従属栄養培養のそれぞれに特有の論点と両者に共通の論点があるため、以下にそれぞれの論点を整理した。

表3-4 藻類大量生産関連技術の主な論点

目標	低コストで安定的に大量培養ができる培養ノウハウの開発
既存知見・技術の応用:3-5年後の実用化	<ul style="list-style-type: none"> ● 事業化されている藻類のエネルギー生産規模での大量培養化 ● 光合成効率が高く、省エネルギー・低コストの攪拌技術の開発 ● 大量培養時の最適培養環境、培養液濃度の維持 ● CO₂排気ガス利用による光合成藻類培養システムの構築 ● CO₂通気法の最適化 ● 光合成により発生する酸素の除去システムの構築 ● フォトバイオリアクター等の利用による種藻の生産・供給システムの構築 ● オープンポンドの風雨対策 ● 大量の培養液やリアクターの滅菌・殺菌方法 ● 培養条件の最適化によるコンタミネーション制御 ● 水処理産業等のプラント・エンジニアリングの応用 ● 排熱を利用した培養温度制御システムの構築 ● 補助光としてのLEDの利用
研究・開発中新知見・技術:5年後より実証、-10年後の実用化可能性)	<ul style="list-style-type: none"> ● 効率的な光合成に導くクロロフィル量を持つ品種の作製 ● 安価な高効率集光システムの開発による太陽光照射の効率性向上 ● 格安な素材の開発(素掘りのオープンポンド) ● 格安で丈夫な素材でスケールアップが可能なフォトバイオリアクターの開発 ● 各種下水・排水の炭素源、栄養塩を利用した最適生産システムの開発 ● CO₂濃縮・貯蔵技術の開発 ● 嫌気消化メタンガス燃焼後のCO₂および廃液の再利用技術の開発 ● 窒素固定藻類・バクテリアとの共生培養システムの構築 ● 培養設備のクリーニング ● 従属栄養の未利用炭素源の安定供給体制の構築 ● 従属栄養藻類からのオイル生産に最適なファーメンターの開発 ● 有機固形炭素源の低分子化と可溶化並びに再利用化を可能とする微細藻類と微生物との共生培養システムの構築 ● 独立栄養藻類と従属栄養藻類のハイブリッド培養システムの構築 ● 各種シミュレーション技術による迅速なプラント設計、培養エンジニアリング
資源枯渇への対応	<ul style="list-style-type: none"> ● 培養排液、残渣、下水処理水等の再利用による水資源及び栄養物質の有効利用 ● 大量生産を可能とする場所(農地、海域等)の確保と規制(漁業権、農地法等)の緩和

ⁱ O. Graverholt and N. Eriksen; Appl. Microbiol. Biotechnol., 77, 69-75 (2007)

2.2.1. 光合成培養

光合成培養における論点は、次の4つに分類・整理することができる。

第1は、生産性を高めるための培養設備の設計及び運転方法に関する論点である。オープンポンドでは、培養設備は非常に浅く広大な面積を有するため、水温、pH、藻体濃度、栄養塩や溶存ガスの濃度、及びその他の水質等の環境を好適かつ均一な状態にコントロールするのは簡単ではない。すでに事業化されているクロレラ、スピルリナ、ドナリエラ等を参考にして、環境を十分にコントロールしたまま培養設備を格段にスケールアップしなければならない。光合成効率の高い攪拌技術の開発応用も同時に考える必要がある。さらに将来的には、LED等の人工光源や高効率集光システムによる太陽光照射効率の向上についても検討する必要がある。この論点は、フォトバイオリアクターにおいても同様であり、解決に向けた研究が必要である。

第2は、低コスト化のための固定費削減に関する論点である。元来、藻類産業は資本集約的、設備投資型であるが、未利用地の有効利用や、低コストの攪拌技術、安価なライナーシート張りあるいは素堀りの池、等による固定費削減が重要である。ところで、フォトバイオリアクターは設備コストが高いためオープンポンドの方が有望との意見が多いが、最近ではフォトバイオリアクターの高効率性や水蒸発量の少なさに再注目する動きがある。フォトバイオリアクターの実用化に向けては、格安で丈夫な素材の開発が待たれる。

第3は、低コスト化のための変動費削減に関する論点である。いずれのLCAも、炭酸ガスや栄養塩の原料として廃棄物の利用や培養後の再利用が重要であることを示している。排気ガスや下水排水等の利用や培養収穫後の培養液の再利用に加えて、燃料抽出後の藻体残渣も嫌気消化しメタンガスを燃焼利用した後の排気ガス利用や消化残渣中の栄養塩の利用等、多くの技術的な課題がある。培養液等の再利用は、栄養塩の節約だけでなく水資源の節約にもなり、資源枯渇の観点から重要である。窒素固定藻類との共生培養等も、検討されている。

第4は、安定生産のためのコンタミネーション抑制に関する論点である。外部からの他生物や異物のコンタミネーションは、藻類の生育を阻害しあるいは捕食、寄生したりして悪影響を及ぼすため、抑制しなければならない。そのため、他生物が生活しにくい環境で増殖する藻類の探索や、藻類が他生物に勝てる培養環境の維持に加えて、小型のフォトバイオリアクターを利用したコンタミネーションフリーの種藻の供給や培養設備のクリーニング、除菌・殺菌等の技術を確立する必要がある。クリーニングし易い平滑な培養設備の表面は単にコンタミネーションを抑制するだけでなく、攪拌エネルギー損失を低減することにより生産性の改善やユーティリティコストの低減も期待できる。

2.2.2. 従属栄養培養

次に、従属栄養培養であるが、独立栄養培養に比べると利用可能な従来技術の蓄積が多く、実用化に関する論点はさほど多くはない。その中で、安定的な栄養源(未利用炭素源を含む)及び熱源の確保と、それに合わせた培養設備の設計は重要な技術課題である。大量の水の滅菌・殺菌方法は、変動費(ユーティリティ)削減に直結する。下水中の有機固形炭素源を低分子化するため、微生物との共生培養について検討されている。近い将来には、独立栄養藻類と従属栄養藻類の同時並行培養等も検討されるであろう。

2.2.3. 光合成培養と従属栄養培養に共通する論点

最後に、独立栄養培養と従属栄養培養に共通する論点であるが、大量培養の実績が乏しい現状では最適なエンジニアリングを推進するため、バイオマス領域との連携とともに効率的な大規模実証実験が望まれる。そのためには水処理産業のプラント・エンジニアリングが必要不可欠であり、また最近進展著しい各種シミュレーション技術による迅速なプラント設計や培養エンジニアリングが有用と考えられる。

3. 藻類濃縮・収穫関連技術

藻類濃縮・収穫生産技術の主な要素技術を図3- 5に示した。また、今後開発すべき濃縮・収穫技術の論点を表3- 5に整理した。この領域は、すでに工業用排水、下水処理などで長年の実用化の実績のある固液分離技術、各種水処理技術と密接にかかわっている。実証の積み重ねにより、経験値を拡大していくことが大量培養において重要と考えられる。以下それぞれの論点について説明する。

3.1 濃縮・収穫

3.1.1 凝集、沈殿、溶解空気浮上法

3.1.2 遠心分離

3.1.3 濾過

3.1.4 ベストミックスシステム

3.1.5 排熱利用乾燥技術

3.1.6 生物凝集技術、電子凝集技術の開発、付着藻類の活用、磁気分離濃縮技術、アコースティックフォーカシング技術、食物連鎖によるオイル成分の生物学的濃縮収穫技術、固定化技術等新技术

3.1.7 スケールアップの課題

3.2 液分処理

3.2.1 液分リサイクル

3.2.2 排水処理

図 3- 5 藻類濃縮・収穫関連技術関連の主な要素技術

表3-5 藻類濃縮・収穫関連技術開発課題

目標	低コスト、低エネルギー、高効率でNER・温室効果ガス削減効果のある濃縮・収穫技術の確立
<p>既存知見・技術の応用 (3-5年後の実用化)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 凝集濃縮システムの最適化 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 化学凝集剤による凝集沈殿法の最適システム開発 <ul style="list-style-type: none"> ◇ 化学凝集剤の回収と再利用 ◇ 培養に使用する水をリサイクルで藻類培養に使う場合に、残余凝集剤あるいはpH操作の藻類への影響評価 ◇ オイル抽出・変換プロセスへの凝集剤の影響評価 ◇ 凝集剤添加あるいはpH操作をほどこした廃水の環境影響評価 ◇ 最適浮上凝集をもたらす気泡サイズとその攪拌技術 ➢ 自然沈降法の最適システムの開発 ➢ 抽出精製等下流域での処理と効率的連結した沈殿あるいは浮上タンクシステムの設計 ➢ 凝集～収穫におけるコスト・エネルギー収支の算定 ● 低コスト・省エネルギーの遠心分離機の開発 ● 最適濾過濃縮・収穫システムの開発 <ul style="list-style-type: none"> ➢ フィルターサイズの最適化 ➢ 最適なフィルター素材の開発 ➢ 効率的な藻類回収をもたらす濾過システムの設計 ➢ コスト・エネルギー収支の観点からの最適濾過システムの評価 ● 濃縮・収穫のベストミックスシステム ● 排熱を利用した濃縮・収穫 ● 伝統的な海藻収穫技術・ノウハウを活用した最適収穫システムの開発 ● 分離液分のリサイクル利用法の最適化
<p>研究・開発中新知見・技術 (5年後より実証、-10年後の実用化可能性)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 生物凝集技術、電子凝集技術の開発 ● 付着藻類の活用 ● 磁気分離濃縮技術 ● アコースティックフォーカシング(音波凝集)技術 ● オイル成分の生物学的濃縮収穫技術 ● 固定化技術(immobilization) ● オイル成分の食物連鎖による生物学的濃縮技術

3.1. 微細藻類の濃縮・収穫

微細藻類の濃縮・収穫はバイオマス生産コストの20-30%を占めるという報告もありⁱ、適切な方法を選択することは極めて重要である。

大量に培養した微細藻類の濃度は通常0.05-0.5%程度であるため、少なくとも10%以上の濃度に濃縮して収穫する必要がある。濃縮には主として遠心分離法、ろ過法、凝集沈殿法が使われる。どの手法にせよ、コスト・エネルギー収支とNERと二酸化炭素排出量削減効果を加味したスケールアップ技術の開発が必要である。以下それぞれについての開発状況と問題点を述べる。

ⁱ J.Q. Jiang, N.J.D. Graham and C. Harward: Water Sci Technol, 27, 221-230 (1993)

3.1.1. 凝集沈殿

大量の培養藻体懸濁液から、藻体を効果的な粒子サイズにして沈殿あるいは浮上、遠心分離回収、ろ過をし易くするために、さまざまな凝集法が使われている。この方法は浄水処理で実用化されている方法である。微細藻類の細胞はマイナスにチャージしていることから、多価陽イオン(塩化鉄:FeCl₃、硫酸アルミニウム:Al₂(SO₄)₃、硫酸鉄:Fe(SO₄)₃、ポリ硫酸鉄(PFS)等)や陽イオンのポリマーが凝集剤として加えられる。凝集剤により効果的な濃度と効率が異なるが、安くて、毒性がなく、低濃度で効果を発揮する凝集剤を使う必要がある。pH調整も重要であり、広範囲のpHで作用する凝集剤もあるが、海産微細藻類ではNaOHでpHを10~10.6に調整し、ポリマー電解質Magnafloc LT-25を0.5mg/Lとなるように添加すると、80%以上の効率で凝集することができるという報告もあるⁱ。また、微気泡を利用した浮上凝集法については、気泡サイズとその藻類培養懸濁液中での攪拌を最適化する技術の開発が必要とされる。浄水処理と違って、利用するのは浄化水だけでなく凝集した藻類であることから、pH調整や化学凝集剤使用に際して下記の技術・手法開発が必要とされる。

- ・化学凝集剤の回収と再利用
- ・培養に使用する水をリサイクルで藻類培養に使う場合に、残余凝集剤あるいはpH操作の藻類への影響評価
- ・オイル抽出・変換プロセスへの凝集剤の影響評価
- ・凝集剤添加あるいはpH操作をほどこした廃水の環境影響評価
- ・最適浮上凝集をもたらす気泡サイズとその攪拌技術
- ・凝集～収穫におけるコスト・エネルギー収支の算定
- ・抽出精製等下流域での処理と効率的連結した沈殿タンクシステムの設計

糸状菌等を活用した生物凝集、電子凝集等があるが、コストやエネルギー収支を加味したスケールアップ技術開発が必要とされる。また、最近では自然沈降法による濃縮・収穫が検討されているが、時空間的な効率性を評価することが必要とされる。

3.1.2. 遠心分離法

ほとんどの藻類が遠心分離法で収穫することができる。遠心分離法による回収は他の方法と比較すると迅速であることから、エネルギー消費がやや大きい欠点はあるが、よく使われている。遠心分離法においては、適切な遠心加速度を選択することが重要であるが、9種類の主要な藻類について3種類の遠心加速度(1,300g、6,000g、13,000g)の生存率と収穫率への影響を調べたところ、生存率では大きな差がないが、収穫率は13,000gで平均97.7%ともっとも効率的であり、6,000gだと

ⁱ R.M.Knuckey, M.R. Brown, R. Robert and D.M.F. Frampton: Aquacul. Eng. 35, 300-313 (2006)

収穫率が平均で64.3%、1,300gだと平均で45%と減少することがわかっている。ただし、現在における遠心分離法のレベルでは、大規模の藻類バイオマス生産に対してはコストが高いことから、低コストで省エネルギーでの方法の確立が必要とされているⁱ。

3.1.3. 濾過法

加圧濾過や真空濾過による藻類の収穫・回収も多くなされている。ロータリードラムプリコート濾過、吸引漏斗、ベルトフィルター等による濾過法は特にサイズの大きい微細藻類には有効であり、例えば緑藻*Coelastrum proboscideum*では濃縮液中に22-27%の藻類懸濁体を得ることができる。メンブレンろ過法も使われており、特に壊れやすい藻類には有効であるが、大規模な培養下で藻類の収穫には遠心分離法と比較してコストがかかることから一般に利用されることは少ないⁱⁱ。濾布式遠心分離法も一種の濾過であるが、粒子サイズによる選択的分離を行う方法として中空糸膜がある。これも濾過もしくは透析の一種である。中空糸膜には低圧処理ができ、目詰まりのしにくいタイプのものがあることから、細孔サイズの異なる中空糸膜を組み合わせることで効率よく濃縮することができる。また、逆洗浄ができることから、容易に目詰まりを解消することもできる。この方法の利点は培養液の再使用と除菌ができることである。フィルター濾過法はシンプルではあるが、一般に高価である。下記に示す課題を留意した最適なシステムを開発することが求められているⁱⁱⁱ。

- ・フィルターサイズの最適化: 少なくとも対象となる藻類のサイズよりも小さくしなければならないが、あまりにも小さすぎると目詰まりをおこし、濾過速度を減少させるため、最適なサイズを選定する必要がある。
- ・最適なフィルター材: 濾過を最適化し、のちに藻類をはがしやすい材料。例えば特定の疎水性や藻類親和性をもつ材料。
- ・効率的な藻類回収をもたらす濾過システムの設計: 一般に藻類を濃縮したフィルターより、洗浄によって藻類バイオマスを回収するが、せっかく濃縮した藻類バイオマスを再び希釈することとなる。最小の洗浄あるいは無洗浄で藻類バイオマスを回収できる濾過システムの設計が求められる。
- ・コスト・エネルギー収支の観点からの最適濾過システムの評価。

ⁱ E. Molina Grima, E-H. Belarbi, F.G. Acien Fernández, A. Robles Medina and Y. Chisti: J. Biotech. Advances 20, 491-515 (2003)

ⁱⁱ F.H. Mohn: In: Shelef G, Soeder CJ, editors. Algae biomass. Amsterdam: Elsevier, p. 547– 71 (1980)

ⁱⁱⁱ D. Fishman, R. Majumdar, J. Morello, R. Pate and J. Yang: National Algal Biofuels Technology Roadmap, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Biomass Program, pp.124 (2010)

3.1.4. 濃縮・収穫のベストミックスシステム

例えば、藻体を中空糸膜で予備濃縮し、フレンチプレスなどで細胞を破壊することで、遠心分離や濾過をし易くすることができる。つまり、既存の濃縮法を複数組み合わせることで、藻類の乾燥固体含量を20%程度までにすることができる。

3.1.5. 排熱を利用した濃縮・収穫

製鉄所、火力発電所、ごみ焼却場などから出される廃熱は利用価値がある。60℃程度の廃熱が利用できれば、予備濃縮の後、粉乳製造等で使われている噴霧乾燥なども利用できる。噴霧乾燥藻体は取り扱い易く、利用価値が高い。

3.1.6. 基礎研究段階にある技術

上記のほかに、オイル産生付着藻類の利用、音波を用いて電極に細胞を集塊するアコースティックフォーカシング(acoustic focusing)、バクテリア等で活用されている固定化技術(immobilization)の藻類への適用が試みられているが、いずれも基礎研究段階であり、今後の研究発展が待たれる。また、高次の捕食生物とともに藻類を生育させて、捕食生物よりオイル前駆体を取り出す、食物連鎖を利用した生物学的濃縮技術法も未領域の研究開発課題として、検討されるべきである。

3.2. 大型海藻類

海藻の収穫技術については、日本で長年蓄積されている伝統的な技術とノウハウを十分に生かした効率的なシステム開発が必要とされる。

3.3. 液分の処理

藻類濃縮・収穫過程で分離される培養液分については、基本的には培養液として再利用することとなる。これまでも自然食品等で藻類の大量生産施設で分離された液分は培養液として再利用されてきたが、増殖した藻類からの分泌物質(粘液多糖類等)の量、栄養塩の残量などを適確に把握し、培養液として再利用する手法の最適化を行う必要がある。再利用過程での最終廃液は、その水質を適確に把握して、必要に応じて水質基準に適合した処理を行い、排出することが必要である。

4. 藻類抽出・精製関連技術

藻類抽出・精製関連の主要要素技術および主要論点を整理すると図3-6のようになる。

4.1 油分抽出 4.1.1 目標抽出物質・形態の設定(ガス・糖分・油脂・タンパク質・セルロース・残渣成分・全バイオマス)の利用 4.1.2 代謝物分泌 4.1.3 粉碎・細胞破壊法(熱水抽出法/界面活性剤/酵素/超音波/物理的破碎/摩砕剤/圧力/ホモジナイザ) 4.1.4 化学的分離操作法(溶媒抽出法/固液抽出) 4.1.5 不純物除去 4.1.6 超臨界・亜臨界 4.1.7 化学工学的論点(流動/混合/伝熱/蒸発/沈降/反応/攪拌/流体気体輸送) 4.1.8 残渣リサイクル・廃棄処理技術(窒素、リン、カリウム、その他ミネラルのリサイクル、汚泥処理) 4.1.9 スケールアップの課題	4.2 精製 4.2.1 油脂精製 4.2.1.1 炭化水素精製 4.2.1.2 炭化水素化プロセス(熱分解ガス化、分留、触媒反応)/異性化)/クラッキング 4.2.2 炭化水素以外の物質の精製 4.2.2.1 バイオアルコール(エタノール/ブタノール発酵) 4.2.2.2 バイオガス(メタン発酵、ブタン発酵) 4.2.2.3 メチルエステル化 4.2.2.4 水素化 4.2.2.5 固形燃料化 4.2.3 藻体全体の商品化精製 4.2.4 その他商品の精製 4.2.4.1 各種素材・化学製品原料 4.2.4.2 医薬品・食品・健康食品 4.2.4.3 肥料 4.2.4.4 家畜飼料・種苗飼料 4.2.4.5 化粧品 4.2.5 残渣商品化精製
--	--

図 3-6 藻類抽出・精製関連技術関連の主要要素技術

4.1. 主な抽出技術

藻類からのオイルの抽出では、1) 低エネルギーであること、2) 抽出効率が良いこと、3) 選択性が高いこと、4) 環境負荷が小さいこと、5) 低コストであること等が求められる。これらの条件に比較的合致する既存の技術としてA)ヘキサン抽出、B)圧搾搾油、C)熱水抽出、D)超音波破碎、E)超臨界溶媒抽出などがあるが、実際にはこれらの技術を組み合わせて使用している。

大豆やトウモロコシなど油脂植物からの食用油の抽出にはヘキサンによる溶媒抽出が用いられているが、抽出前の乾燥と破碎が必要なこと、ヘキサンの完全除去が必要なことなどがエネルギー使用を多くしている。無極性溶媒(例えばヘキサン)と極性溶媒(例えばアルコール)との混合溶媒によるオイルの抽出の場合は藻体の乾燥が必要ないという長所があるが、極性溶媒の回収に多くのエネルギーが必要である。最近話題のジメチルエーテル(中極性溶媒)によるバイオマスからのオイルの抽出の場合でも抽出効率は乾燥したバイオマスの方が良い。

また、応用例が増えてきた超臨界溶媒抽出は二酸化炭素を溶媒としたもの、あるいは二酸化炭素にアルコールなどのモディファイヤーを混合した溶媒が用いられている。藻類オイルに対しては二酸化炭素溶媒が適しており、炭化水素の選択的抽出が可能である。欠点として二酸化炭素の回

収方法が完全に確立していないこと、乾燥藻体が必要なこと、連続超臨界抽出装置が高価であること等が挙げられる。

4.2. 藻類からのオイル抽出に適した方法例

藻類のオイルは脂肪酸と炭化水素に大別される。それぞれの特徴に適した抽出精製法は既存の技術の中にもある。例えば、脂肪酸は高度不飽和脂肪酸を多く含み、低融点である。細胞内ではトリグリセリドなどの脂質として存在している。藻体の水分含量が10%以下ならば、ヘキサン-メタノールの混合溶媒で脂質を抽出し、抽出液に直接水素イオン供与樹脂や塩酸や硫酸などの鉱酸を触媒として100℃程度の温度でのエステル交換反応を経て脂肪酸メチルエステルのヘキサン溶液を得ることができる。ヘキサンを蒸留除去すればバイオディーゼル燃料である脂肪酸メチルエステルが得られる。欠点は、ある程度の乾燥が必要な点である。

一方、炭化水素、例えばボトリオコッカスの炭化水素はボトリオコッセンと呼ばれるが、株ごとに単一の分子構造をもつ炭化水素を90%以上の高純度で生成する。ボトリオコッセンの抽出は上記のヘキサン-アルコールなどの混合溶媒による抽出が現実的であるが、精製にはいくつかの工程が必要になること、アルコールの回収にエネルギーが必要となる。利点として藻体の乾燥を必要としない点が挙げられる、二酸化炭素を超臨界溶媒とした二酸化炭素回収型の連続超臨界抽出も精製工程の省略という利点がある。しかし、ここでも藻体の乾燥が必要である。

4.3. 乾燥と脱水

オイルの抽出に際して、藻類の乾燥に占めるエネルギーコストが大きいことが「乾燥を避けるオイル抽出法の開発」という課題を生み出しているが、藻類オイルはリン脂質やリポたんぱく質などの界面活性剤物質に包まれ、水中に安定に分散している。このような状態のオイルを効率良く抽出するには、やはり「乾燥」か「脱水」が最も有効な方法である。その他に、水とオイルとの間に働く水素結合力を低減させるための高温熱処理も併用される場合がある。乾燥には熱源が必要である。太陽熱や廃熱の利用や廃熱を利用した効率のよい乾燥装置が開発できれば、エネルギーコストの増大には繋がらないことになる。例えば、前記したように、廃熱を利用した噴霧乾燥などが候補技術になる。また、アルコール使用の場合も廃熱を利用したアルコールの回収法の開発や含水アルコールを回収しないで、50%程度の水を含むアルコールの利用法を開発することで、藻類オイルの生産に占める乾燥と脱水のエネルギーコストの削減が可能である。

4.4. 用途によるオイルの精製法の違い

オイルは燃料としての利用が最も重要と考えられている。藻類の場合、脂肪酸メチルエステル製

造に混入してくる不純物はカロテノイドやステロール、高級アルコールや直鎖状炭化水素などであり、上記のヘキサン-アルコールによる抽出液の直接メチルエステル化の場合では、窒素や硫黄を含む化合物の混入は少ない。カロテノイドなどの炭素と水素および少量の酸素を含む混入物は可燃性であり、ディーゼル用燃料としての品質に問題はないと思われる。さらにカロテノイドは抗酸化性物質であり、不飽和脂肪酸の多い藻類脂肪酸の酸化・重合の防止剤としての機能を担うことになる。

一方炭化水素の場合、燃料用炭化水素へのカロテノイドの混入は抗酸化物質としての機能をもつことから許容される。藻類炭化水素は燃料以外の用途も想定されることから、用途によって精製の度合いが異なってくる。高分子材料等の工業原料としての純度と健康食品としての純度とは大きく異なり、純度が高くなるにつれて精製コストも指数的に増加する。用途に適した精製に留め、過度の精製は避けるべきである。例えば、化粧品用スクワレンの純度は99.9%以上必要であると云われている。

オイルの精製法には選択的溶媒抽出法、活性炭や粘土鉱物による不純物吸着法、クロマトグラフィー、減圧分溜法などがある。通常はこれらの分画・精製法を組み合わせで使用している。藻類オイルの大量精製には既存技術で十分対応可能と思われる。

表3-6 藻類抽出・精製関連技術の主な論点

目標	低コスト、低エネルギー、高効率でNER・二酸化炭素排出量削減効果のある抽出・精製技術の確立および 残渣の効率的リサイクルシステムとの連携
既存知見・技術の応用： 3-5年後の実用化	<ul style="list-style-type: none"> ● ヘキサンによる大量抽出 ● 既存技術の大量抽出への応用：熱水抽出法、界面活性剤、酵素、触媒、超音波、物理的破碎、摩砕剤、圧力、ホモジナイザー、超臨界、亜臨界、各種技術の組み合わせ ● 実験施設による既存技術の回収率向上 ● エンジニアリング・化学工学技術者との改善点の洗い出し ● その他既存石油精製技術への応用可能性の検討 ● 低コストクラッキング技術による改変 ● 低コストエステル交換技術の開発
研究・開発中 新知見・技術 (3-5年後の実証段階、10年後の実用化可能性)	<ul style="list-style-type: none"> ● ジメチルエーテルなど環境負荷の低い溶媒による技術の開発 ● 各種技術の組み合わせによる効率化、低エネルギー化 ● 低コスト・省エネルギーの乾燥技術の開発 ● マイクロ波の応用 ● タンパク質のエネルギー資源化 ● 乾燥工程を経ずとも藻体スラリーを加熱処理することで炭化水素を効率的に抽出する技術 ● 各種シミュレーション技術による仮説検証サイクルの高速化 ● 有用物質分泌機能を持つ種の開発 ● 有用物質分泌種の育成における有用物質の効率的回収技術
資源枯渇問題への対応	<ul style="list-style-type: none"> ● 溶媒不要の抽出プロセスによる資源枯渇問題への貢献

この領域は、化学工学、石油精製技術の応用分野と考えられる。エネルギーコストとしては乾燥工程を省くこと、複数ステップをまとめ、工程数を省くことが重要な視点である。溶媒不要の技術開発もコスト、環境面の双方から重要である。また、残渣のリサイクル(エネルギー、栄養塩)もコスト削減、エネルギー収支改善、二酸化炭素排出量削減効果において極めて重要な論点である。

なお、米国エネルギー省(DOE)は、2010年に開示した技術ロードマップにおいて、図3-7のような総合的な抽出・精製体系を示している。後述するNAABBは、この体系的な技術について随時分析を行っている。抽出・精製技術の多くは既存技術の応用である。実際に大量のオペレーションを想定した実証実験の繰り返しによる蓄積が極めて重要で、早急な検証プロセスの構築が望まれる。

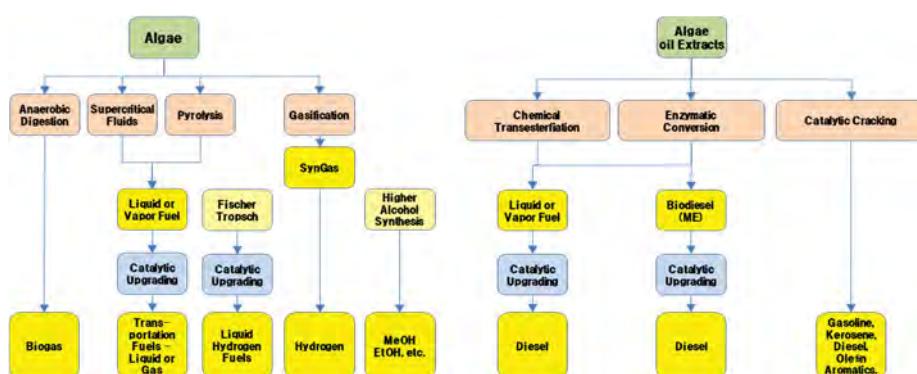


図 3-7 米国エネルギー省(DOE)2010からの抽出・精製関連技術の抜粋

5. 藻類用途関連技術

藻類用途関連の主要要素技術および主要論点を整理すると以下のようになる。

<p>5.1 油脂用途・市場</p> <p>5.1.1 エネルギー製品 (バイオディーゼル、炭化水素系【ガソリン、ジェット燃料】、メタンガス、水素)</p> <p>5.1.2 直接燃焼</p> <p>5.1.3 培養・濃縮・収穫等のためのエネルギーとしての利用</p> <p>5.1.4 各種素材・化学製品原料</p> <p>5.1.5 食品・医薬製品</p> <p>5.1.6 飼料</p> <p>5.1.7 化粧品</p> <p>5.2 タンパク質・炭水化物・他の代謝物の用途・市場</p> <p>5.2.1 エネルギー製品</p> <p>5.2.2 医薬品・食品・健康食品</p> <p>5.2.3 肥料</p> <p>5.2.4 家畜飼料・種苗飼料</p>	<p>5.2.5 化粧品</p> <p>5.3 藻体全体の用途・市場</p> <p>5.3.1 エネルギー製品</p> <p>5.3.2 医薬品・食品・健康食品</p> <p>5.3.3 肥料</p> <p>5.3.4 家畜飼料・種苗飼料</p> <p>5.4 残渣用途・市場</p> <p>5.4.1 エネルギー製品</p> <p>5.4.2 肥料</p> <p>5.4.3 家畜飼料</p> <p>5.5 貯蔵</p> <p>5.6 供給</p> <p>5.6.1 輸送コスト</p> <p>5.6.2 供給網の利用</p>
--	--

図 3-8 藻類用途関連技術関連の主要要素技術

ⁱ John Ferrell et al. (2010), National Algal Biofuels Technology Roadmap

石油は燃料からプラスチック、医薬品に至る巨大な化学産業を支えており、石油のない生活は考えられない状況にある。それ故、石油は戦略物質であり、膨大な石油化学産業の代替原料の探索は重要かつ緊急の課題である。代替原料は石油と同じ炭化水素もしくは同等の性質を持つ物質で、枯渇しない資源が望ましい。この観点から、再生可能資源であるバイオオイルが候補に挙げられる。

5.1. 藻類オイルの燃料化

ガソリン、ケロシン、重油は石油由来燃料の中でもっとも重要な物質である。ガソリンは炭素数6～9、ジェット燃料であるケロシンは炭素数14～17であり、重油はそれ以上の炭素数を持つ物質である。重油は炭素と水素の他、不純物として窒素や硫黄化合物を含む。バイオディーゼルと呼ばれる脂肪酸メチルエステルは平均炭素数19であり、分子内に2原子の酸素を持つ。ディーゼル燃料としてディーゼルやガソリンエンジンの燃料に少量混合して使用されている。燃料としては分子内の酸素原子がシリンダー内壁を損傷する原因となっている。脂肪酸エステルから触媒によって炭化水素に変換することも可能であるが、直鎖の飽和炭化水素は融点が高く、昇華しやすいという欠点がある。

オーランチオキトリウム (*Aurantiochytrium* sp) の作るスクワレンはトリテルペンであり、分子内にメチル基と二重結合を持つ炭化水素である。炭素数は30で、密度と表面張力は軽油とほぼ同程度であるが、動粘度は軽油よりも高く、重油に近い物性を持つ。実際ディーゼル車の燃料として70%添加した場合の低負荷走行時の燃費や排気ガス成分に変化は認められていない。一方、水素化熱分解によってガソリンやケロシン溜分が効率良く得られることも小規模実験で確認されている。つまり、藻類炭化水素は石油系燃料に完全に置き換えることが可能であるといえる。

5.2. 工業原料としての藻類オイル

藻類脂肪酸は高度不飽和脂肪酸が多く、ラジカル重合によって高分子化が容易に起きる。このラジカル重合の利用や酸化分解で生成するジアルデヒドの高分子材料への利用は新規物性を持つ高分子としての価値がある。

藻類炭化水素であるボトリオコッセンやスクワレンは、触媒クラッキングによって、化学産業の基礎原料であるキシレンなどの芳香族炭化水素を効率良く生産することができる。これら芳香族炭化水素は、化学工業や医薬品工業にとって重要な原料である。さらに、熱分解によって、石油化学産業で生産されるほとんどの化合物をつくるのが可能である。つまり、石油精製プラントを改変することなく原料を石油から藻類炭化水素に変えるだけで、石油枯渇の危機から脱却できることになる。

5.3. 健康食品および化粧品への利用

藻類の脂肪酸は ω (オメガ)-3脂肪酸と呼ばれ、陸上動物の ω -6脂肪酸とは区別される。 ω -3脂肪酸にはDHA(ドコサヘキサエン酸)やEPA(エイコサペンタエン酸)などが含まれ、健康食品としての価値が高い。現在はイワシやサンマなどの青魚から抽出精製されたものが市販されている。藻類の種類によって、EPAが多いものとDHAが多いものがある。微細藻類の場合は、魚と異なり抽出・精製するよりは、藻体丸ごとの製品化の方が、抗酸化剤であるカロテノイドが共存するので比較的酸化しにくいことになる。

アスタキサンチンやエキネノン等のカロテノイドを大量に生産する藻類がある。オイル生産株でも β -カロテンやその他のカロテノイドを相当量蓄積している。これらはそれ自身天然色素として食品や化粧品の着色剤として利用されている。また、分子内の共役二重結合が多いことから、抗酸化剤としての機能もある。

スクワレンはこれまで深海鮫の肝油から分離・精製され、健康食品、化粧品、免疫賦活剤などとして利用されてきたが、深海鮫は乱獲によって個体が激減し、絶滅の危惧に陥っている。深海鮫の収穫量の激減により、価格が高騰するとともに、利用分野が激減している。一方、ラビリンツラに属するオーランチオキトリウムのある株はスクワレンを大量に生合成・蓄積することが、昨年わが国で発見され、培養によるスクワレンの供給体制の構築が期待されている。現在、オーランチオキトリウムの大量培養における最適条件の検討が行われているところである。

ボトリオコクセンについてはこれまで健康食品や化粧品への利用例はないが、スクワレンと同様の効果が期待されている。

5.4. 藻類オイル以外の藻類の有用成分

藻類からオイルを抽出した残渣は乾燥藻体重量の50~80%に相当する。この中にはたんぱく質、核酸、糖類、極性脂質(リン脂質や糖脂質)などの成分が含まれているが、細胞内成分などの可溶性の物質と細胞壁やコロニーマトリックス等のような不溶性の物質とに分けられる。家畜や従属栄養生物の餌として可溶性物質は利用価値があるが、加熱や亜臨界水処理による加水分解で不溶性物質は可溶され、高分子物質は低分子化や単分子化され、さらに消化吸収しやすい形態に変換することができる。

オイル以外の成分として、抗酸化性の強いカロテノイドの一種であるエキネノンを大量に蓄積する緑藻や、機能はまだ不明であるが、新規構造の有機化合物の存在が明らかにされている。また、ボトリオコクカスが分泌する粘質多糖には、成分として抗ガン活性を示すフコースを多量に含むこと

も明らかにされている。細胞外分泌多糖類や、ユーグレナのグリコーゲン用物質であるパラミロン等からのバイオエタノールの生産、たんぱく質の食糧化、極性脂質のバイオサーファクタント化、核酸とその関連物質や生理活性物質の医薬品化、などが検討されるべき課題である。ボトリオコッカスやオーランチオキトリウムの成分研究はまだ始まったばかりであり、詳細な研究の進展と有用物質の探索・構造解析・機能解明等が必要である。

5.5. 最終残渣の利用

オイル抽出残渣から有用物質を分離した最終残渣には依然として炭素、水素、窒素、リン、カリウムなどの重要元素が含まれている。最終残渣中の炭素と水素は嫌気発酵によるメタン生産や燃料電池用水素として取り出すことができる。また、最終残渣は窒素やカリウムやリンといった栄養素を含むことから肥料として利用することも可能である。最終残渣によるメタン生産によるエネルギーや、肥料をその場で培養に再利用することで、培養コストの軽減を図ることができる。また、固形燃料として利用した場合、後に残る灰にはリン酸、カリウム、カルシウム、マグネシウム、三価鉄等が濃縮されていることから、肥料や藻類培養液成分として高い利用価値を持つ。

その他には、脂質抽出後のアミノ酸等のタンパク質を配合飼料の家畜飼料への利用することが想定される。リジン、スレオニン、トリプトファン、メチオニン、といったアミノ酸が家畜の飼料としては不可欠であるが、例えば、ナンノクロロプシスはそれらを含んでおり、飼料として利用されている大豆粕の代替としての利用が想定されるⁱ。

表3-7 藻類用途関連技術の主な論点

目標	既存製品なみの品質・安定供給体制の確立 高付加価値副産物の開発 資源枯渇問題への対応
既存知見・技術の応用	<ul style="list-style-type: none"> ● 各種既存石油製品との品質の整合性 ● 医薬・サプリメントへの展開 ● 種苗用飼料への展開
研究・開発中新知見・技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 高効率、省エネルギーの残渣のメタン発酵システムの開発(嫌気消化、メタン発電システム、熱の培養槽への利用) ● 残渣の培養液への可溶化、栄養塩の培養液へのリサイクル ● 飼料の開発 ● バイオプラスチックの開発 ● 化粧品の開発・医薬の開発 ● 藻類バイオマスの成分の分析による未利用用途の探索 ● 藻類を持った金属回収技術
資源枯渇問題への対応	<ul style="list-style-type: none"> ● すべての藻体を有効活用する手法の開発による資源枯渇問題への対応 ● リン回収システムによるリン枯渇問題への対応

ⁱ 平成23年度農林水産省緑と水の環境技術革命プロジェクト事業、耕作放棄地における微細藻培養技術の確立と、事業化方策の検討に係る事業化可能性調査報告、～藻から石油とオメガ3～平成23年4月、微細藻培養技術事業化可能性調査共同事業体、(スメーブジャパン株式会社)(株式会社循環社会研究所)、(ジェイ・フェニックス・リサーチ株式会社)

以上、述べてきた用途開発は、どちらかというと新規用途というよりも代替用途が多い。したがって、既存技術との親和性、品質、そして大量安定供給の可能性が問われることになる。最終用途メーカーが利用可能な量の藻類バイオマスの生産を国の支援で実施することで、最終用途メーカーが用途開発に積極的になり、総合的な経済性の改善を促進していくことが重要である。

高付加価値用途の開発は早期の経済性確保に寄与する。その観点から、幅広い視点での用途開拓が求められる。例えば、2,000円/kgの製品を藻類成分の10%でも確立できれば、他の成分の単価が50円/kgだとしても合計で200円以上の単価となる。前述「2.2わが国における潜在的生産規模推計の試み」で示したように1haあたり30kL計算（オイル比率50%で想定すると60トン程度の1haあたり年間のバイオマス量の生産）で、200円/kgとなれば、1haあたりの収入は1,200万円となるため、経済性の確立はより容易になる。

DOEも2010年に開示した技術ロードマップにおいて、下記のような総合的な用途を網羅するバイオリファインリーを示している。ⁱ

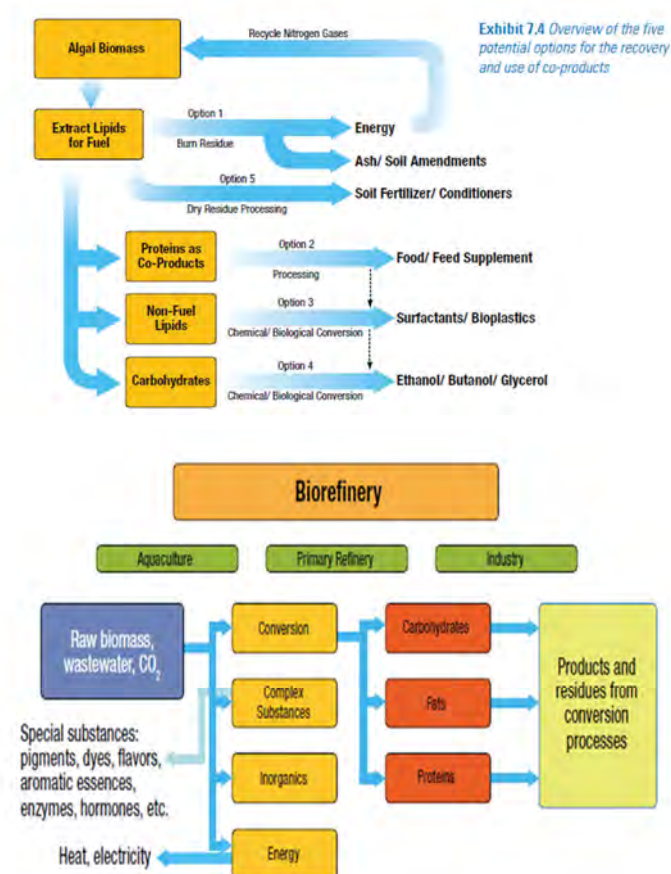


図 3-9 米国エネルギー省(DOE)の技術ロードマップが示す総合的な付加価値戦略

ⁱ John Ferrell et al. (2010), National Algal Biofuels Technology Roadmap

6. 事業評価における論点

これまで見てきたとおり、藻類エネルギーは将来のエネルギー供給源の一つとして極めて有望な選択肢といえる。

本論からはずれるが、ここで議論しておきたいことは、第一章で述べたNERが仮に1以上にならなくても、藻類エネルギー技術開発の重要性は変わらないという事である。技術の現段階ではNERは必ずしも1以上にはならない場合が想定される。しかし、例えば、藻類から石油を完全に代替する液体燃料を生産できることを考えると、石油価格の急騰や将来の化石燃料の枯渇に対応する方策の一つとして、選択肢の一つになり得る。石油が枯渇して燃料価格が高騰し、石油産業への原料供給が止まる事態を想定すると、独自に必要な量の液体燃料を生産できる態勢を整えておくことは必然の方向だといえる。藻類は潜在的にその要求に応える可能性を有しており、また、このような大規模液体燃料などを産生できる技術は、藻類以外では実現できないと考えられる。国家安全保障のためにどれだけの液体燃料の生産力を有するべきかは、本報告書の範囲を超える問題ではあるが、災害救援などの為の航空機、物資輸送用の船舶などのエンジンを可動させるにはここ50年以上は液体燃料が必要であろうことを考えると、国家として藻類による燃料生産能力を有することは、国家安全保障上重要であるといえる。

参考資料にはこれまでに行われた事業性評価及び環境インパクトの分析(LCA分析)の例を挙げたが、世界的にも大量培養が本格的にスタートしていない現時点においてさえ、藻類によるエネルギー生産量は、その生産に必要な投入エネルギーを概ね上回ることが示されている。これらの分析では;

- 1) エネルギー生産量は産生される液体燃料などのエネルギー量
- 2) エネルギー投入量としてはプラント運転に必要なエネルギー量

を用いて解析が行われている。

ここで留意すべき点は、一般的に微細藻類による産生エネルギー量は大きく見積もっても、微細藻類総体の有するバイオマスエネルギーの約5割程度であることである。事業性評価と言う点では、市場で売れる液体燃料の量が重要であることは言うまでもないが、エネルギー収支という観点からは、液体燃料を取り出した後の藻類の残渣が相当のエネルギーを有していることに注意しておく必要がある。

現在、藻類残渣の利用法については、あまり研究開発が行われていない。しかし、本調査の過程で行われた議論を通じて残渣の有効利用を技術的に確立することは、藻類エネルギーの産業化を考える上で最も重要な課題であるとの意見が多く挙げたことを特に強調しておきたい。すなわち、この残渣のエネルギーとしての利用により、本報告書で用いているエネルギー生産効率

NERは1.5～2倍になる。

これらのことも勘案し、参考資料で示している幾つかの事業性評価の事例を見るかぎり、エネルギー収穫物質としての藻類は、これまでにない強力なポテンシャルを有していると言えそうである。

6.1. 優先順位

事業評価においては、順番からいえば、エネルギーNERおよび二酸化炭素排出量削減効果が問われるため、まずはその部分を安定的にクリアすることが初期の技術的な課題になる。次に、わが国の厳しい財政状況を考慮すると、国からの支援を最小化するという観点から、下水処理や高付加価値副産物による経済性の確保の追求が現実的な選択肢であるといえる。産業規模のエネルギー供給の可能性は、大規模生産の実績がない藻類バイオマス産業においては高いハードルである。一気にそれを達成することを目指すよりも、新たな知見・技術の蓄積をおこなった上で、一歩ずつゴールを目指すことが現実的な選択肢と思われる。

6.2. 資本集約性および経済評価指標の検討

藻類産業は土地面積あたりの生産性は高いものの、他のバイオマスと比較すると大量の水を取り扱うこと、大量の水から藻類を濃縮して収穫するための設備投資が必要なことから、資本集約的である。技術的に未確立な部分が多い上に、資本集約的である事業は初期投資がかさみ投資回収に時間がかかることや、そもそも回収の見通しを行うことが困難であることから、民間投資だけではリスクが高く、そのリスクに見合った非常に高い金利など、高いリターンが要求される可能性が高く、事業として成り立つことが困難となりやすい。早期の産業化を実現するためには、政府の債務保証や安定買い取りなど、事業リスク軽減のための方策が行われることが望まれる。

6.2.1. 一般的な経済性評価のフレームワーク

経済性評価については、再生可能エネルギーとしての藻類バイオマスファームの事業的特徴を踏まえた検討が重要である。藻類バイオマスファームの事業的特徴は、①設備投資額が大きいこと、②エネルギー需要は確実に存在するので安定した売上高が見込めること、の二つが想定される。②については政府の安定買い取り制度などがあれば、より確実に実現することができる。以下、事業投資に関する一般的な経済性評価の考え方をレビューした上で、①と②の特徴を持つ藻類バイオマスファームに対する適切な経済評価の在り方を検討する。

経済性評価を厳密に論じるためには、誰にとつての経済性評価なのかという視点をまずは定める必要がある。事業を取り巻く利害関係者は様々おり、地元自治体、従業員、取引業者、政府、事

業に融資する銀行や事業に株主として出資するベンチャーファンや既存大企業などがある。これらの利害関係者の中で誰の視点で経済性評価をするのかを考える場合、まず誰かがリスクを負って出資者(株式会社では株主)として最初にお金を提供することがなければ、事業がそもそもスタートしないということを重視すべきだろう。その視点に立てば、資金の最初の出し手であるベンチャーファンドなどの出資者(事業が株式会社で運営されるのであれば株主)の視点が経済性評価において特に重要となる。また通常は当初から借入なども利用することを考えると銀行などのローンを提供する金融機関も事業をスタートするためには出資者と並んで重要な役割を担うと考えることができる。藻類バイオマスファームのように全く新たな事業であれば、なおさら当初に資金を提供する出資者や金融機関の視点が重要になろう。もちろん、地元経済への波及効果や雇用創出、大企業が出資者となる場合には、大企業が持つ他の事業への波及効果、エネルギー自立の視点からの国家への利益なども極めて重要であるが、様々な利害関係を同時に分析することや定量的な評価は極めて困難であることから、ここでは、最初に藻類バイオマスファーム事業を起す上で必要な資金を提供する出資者および金融機関の視点、すなわち最初の資金提供者の視点で経済性評価を論じることとする。

特定の事業において、出資者や金融機関などの資金の出し手が、藻類バイオマスファームを含めて特定の新たな事業への出資について判断を行う上で、その事業が営まれることで発生する売上高から、取引業者や従業員への支払および税金などを支払った後で、資金の出し手に対して配分可能となる現金(当期利益、利息や減価償却費、および配当など)、すなわちキャッシュフローが将来的に毎期どの程度生まれるのかということが極めて重要になる。

ここでキャッシュフローとは、資金の出し手の視点から考えると、税金や取引業者や従業員に支払って、なおかつ、資金の出し手に配分可能な金額と定義できる。この金額が大きければ大きいほど資金の出し手としての投資先事業としての魅力が大きくなる。この定義に従えば、キャッシュフローの主な構成要素は、①当期利益、②税引後支払利息(支払利息の損金効果を考慮し税引後とする)、③純投資額(追加投資－減価償却費)であり、①＋②－③で計算することができる。

①と②がキャッシュフローにとってプラス要素で、③はプラスにもマイナスにもなる。減価償却費は、現金支出を伴わない費用であるため、特定の事業年度の追加投資がその事業年度の減価償却費以下になれば、純投資額はマイナスとなる。すなわち、減価償却費が追加投資を上回っているのであれば、追加投資を上回った減価償却費の金額だけキャッシュフローはプラスとなり、その分は資金の出し手に対して配分することが可能である。

追加投資としては運転資本の増加や追加設備投資が考えられる。運転資本とは事業を運営するための必要な資金であり、売上債権＋棚卸資産－支払債務で計算される。売上債権は代金を回収していない売上であり、その分は外部からの資金調達が必要となる。月末締め翌月払いとす

ると売上高の1~1.5か月分は必要となる。棚卸資産は売上前の在庫であり、その分は売上債権と同様に外部からの資金調達が必要となる。需要変動に対応して、すぐに出荷するために必要な量の在庫や、操業を安定化するために必要な肥料などの在庫が含まれる。売上高の1か月分程度は通常は棚卸資産として必要となる。支払債務はまだ支払をおこなっていない各種コスト(例:電気代、肥料代、人件費など)である。支払債務はすでに便益は得ているが支払をすませしていない費用であるため、支払債務が増えると現金調達と同様に資金繰りは楽になる。月末締め翌月払いとすると各種費用の1.5か月分がおおよそその支払債務となる。通常は、売上債権+棚卸資産-支払債務の値はプラスとなり、操業規模、売上高に比例して大きくなる。エネルギー産業は規模が大きいことを想定すると、運転資本の増加を考慮してキャッシュフローを推測し経済性評価の分析を行うことは極めて重要な視点である。

そのほか厳密に言えば、将来の出費に備えた各種引当金(貸し倒れ引当金など)や税効果(実際に払っていない税金)、余ったお金を運用することによって生じる受取利子なども資金の出し手に配分可能な現金となるので、キャッシュフローに含めるべきであるが、①から③はどのような事業からも大抵は生じる概念であり、通常は①から③がキャッシュフローの本源的かつ主要な要素であることから、議論を簡単にするために①から③をキャッシュフローとして経済性評価を論じることとする。

次に、①の当期利益と②の税引後支払利息についてさらに詳細に論じたい。①は法的にはすべて株主に帰属する額でありキャッシュフローの定義に当然当てはまる。②については、支払利息は資金の出し手である金融機関に帰属するものであるため当然キャッシュフローの定義に当てはまる。しかし、利払いは損金算入できるため、金融機関へのキャッシュフローとしては利益が出ている企業から見れば、税引後支払利息が該当することになる。例えば、税率40%が当てはまっている事業において、25億円を金利4%で借りて運営したとすると、年に支払利息は $25億円 \times 4\% = 1億円$ となる。ただし、利益が出ている企業にとっては、1億円を損金算入できるので、 $税率 \times 1億円 = 40\% \times 1億円 = 4,000万円$ だけの税金の支払い額が減少する。税金が減少した分は、出資者に配分できるため、キャッシュフローの定義から見れば、減った分は自動的に①に加算されていることになるので、その分を指し引いた分だけをキャッシュフローとして勘案すべきである。①と②はトレードオフの関係にあり①と②の合計額は常に等しくなる。①と②の合計額が常に等しくなることを示したのが次の表である。

表3-8 税引後営業利益の計算

	借入有	借入無
売上高	100億円	100億円
－ 減価償却費	2億円	2億円
－ その他費用 ⁱ	88億円	88億円
＝ 営業利益	10億円	10億円
－ 支払利息	2億円	0円
＝ 税引前利益	8億円	10億円
× 税率	40%	40%
－ 税金	3.2億円	4億円
＝ ①当期利益	4.8億円	6億円
＋ ②税引後支払利息＝支払利息×(1－税率)	1.2億円	0円
＝ ①＋②＝税引後営業利益	6億円	6億円

上記の表3-8でいえば、借入がある場合で支払利息が2億円だとすると、営業利益10億円の場合、税引前利益は8億円、税率が40%だとすると税金は3.2億円、当期利益は4.8億円となる。税引後支払利息と当期利益の合計は6億円となる。一方で借入がなく、営業利益が税引前利益と同じ場合には、当期利益は6億円となる。以上のように、税効果を考えると借入があってもなくても、支払利息がある場合とない場合で、当期利益と税引後支払利息を足した値(表でいえば①＋②)は常に一定となる。これは、すでに述べたように、支払利息が2億円増えても損金効果があるため当期利益は2億円減らずに、1.2億円しか減らないためである。支払金額をどう変えようが①＋②の値は6億円となる。資金の出し手に対するトータルなキャッシュフローという視点で見れば、当期利益と税引後支払利息の合計額で事業を評価するほうが借入の違いによって左右される当期利益よりもより事業のキャッシュフロー創出力を適切に計測しているといえる。なお単純に営業利益で把握すればよいとの考えもあるが、税金は資金の出し手から見れば自分たちに配分することができないので、資金の出し手から見た経済性評価においては税引後の概念を導入する必要がある。藻類バイオマスファームの場合は、初期は損失がかさむと予測されるが、その場合は単に税金をゼロにすれば良いわけであり、①＋②の値は借入の有無によってやはり変化しない。

以上のような論点から、当期利益と税引後支払利息の合計は、資金の出し手にリターンとして配分されるため一つの概念としてまとめることができる。当期利益と税引後支払利息の合計は、ファイナンスの理論で「税引後営業利益」と呼ばれる概念とはほぼ同様の概念である。すでに見たように税引後営業利益は借入の値に左右されない一定額となるので、事業が生み出した資金の出し手に対するキャッシュフロー創出力を図る上で便利な指標である。

ⁱ 減価償却費以外の売上原価、販売管理費など

税引後営業利益は、英語では、Net Operating Profit After Taxes (NOPAT、ノーパット)と呼ばれる。ファイナンスの理論によって資金の出し手の立場から、事業の経済性を評価する上では、世界中で利用されている一般的な概念である。藻類バイオマスファームの事業化においても、国内からの資金だけでなく一部海外からの投資も呼び込むことを想定するのであれば、このような世界で利用される概念で経済性評価を行うことは極めて重要である。税引前営業利益、すなわちNOPATは、株主やローンの出し手である金融機関など、資金の出し手に帰属する企業が生み出した付加価値を簡便的に計算したものと言い換えることができる。通常は、営業利益は税引前営業利益のことをいうので、ファイナンスの理論ではあえて区別を明確にするために「税引後」という言葉をつけて表現される。計算式は、一般的には $NOPAT = \text{営業利益} \times (1 - \text{実効税率})$ 、もしくは $NOPAT = EBIT \times (1 - \text{実効税率})$ 、 $EBIT$ (Earning before interest and tax) = 経常利益 + 支払利息 - 受取利息である。

以上を総合すると、キャッシュフローは「税引後営業利益 - 純投資」と定義される。ここで特別利益がなく、売上以外の収入が全くなければ、NOPATは当期利益 + 税引後支払利息となる。ここでは簡便的に議論するために、すでに簡便的に論じたように当期利益 + 税引後支払利息を税引後営業利益、NOPATとみなして議論する。

資金の出し手から見て重要なキャッシュフローが定義できたが、投資判断する上では、現在手元にある現金と将来得られるだろうと予測されるキャッシュフローの値は通常は等価ではないことを考慮して検討することが必要となる。資金の出し手から見れば、当然、将来予測されるキャッシュフローの合計が手元にある現金よりも上回ること、すなわちリターンが期待されるからこそ投資しようと思うからである。この場合、1年で最低限満たすべきリターンで将来のキャッシュフロー割引いた値を現在価値と呼ぶことができる。なぜならばそのリターンが最低満たされることで、資金の出し手は、現在の投資額と将来のキャッシュフローは少なくとも等価であると判断していると理論的には考えられるからである。すなわちある投資家が特定の事業において最低10%のリターンがないと投資しないということは、現在持っている10,000円をとある事業に投資して1年後に得られ金額が $10,000 \text{円} \times 1.1 = 11,000 \text{円}$ と等価であると感じていると考えることができる。従って、その事業が生み出す1年後の11,000円の現在価値は $(1 + \text{割引率} 10\%)$ で割り引いた、 $11,000 \div 1.1 = 10,000 \text{円}$ となる。この投資家にとって、割引率10%を特定の事業に適用するということは、現在ある価値10,000円と1年後の将来のキャッシュフロー11,000円が同じ、すなわち1年後の11,000円の「現在価値」は $11,000 \div 1.1 = 10,000 \text{円}$ となる。2年後であれば、 $1.1^2 = 1.21$ で割り引くことになるので2年後の12,100円の現在価値は10,000円となる。以下、3年後、4年後のキャッシュフローは、それぞれ4割引率を複利で計算すれば、現在価値が求めることができる。

日本国債のように安全確実であれば、年1%のリターンしかなくても投資する投資家がいる。この場合は投資家にとって1年後の10,100円が現在の10,000円と等価になる。すなわちこの投資家にと

って日本国債に投資して1年後に得られる10,100円の現在価値は、 $10,100 \div (1.01) = 10,000$ と計算され、投資前の10,000円と等価であると判断していることになる。もし1年後に得られると期待される金額が10,050円であれば国債に投資しないで現金のままで保有したほうが良いと思い、逆に10,200円ならば喜んで投資するということになる。

以上のように投資家は、投資リスクに応じた割引率を用いて投資判断を下していると理論的には考えられるが、実際には既に簡単に触れたように複数年事業が営まれるので、各年度に生じるキャッシュフローを複利計算で割り引いて、現在価値をそれぞれ求めて、合計額を算出し、その合計額が初期の投資額を上回るかどうかで投資判断がなされるといえる。以上の投資判断の関係を式で示すと以下のようなになる。

<p style="text-align: center;">事業から生み出されるキャッシュフローの現在価値の合計 A</p> $= \frac{1\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+\text{割引率})^1} + \frac{2\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+\text{割引率})^2} + \frac{3\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+\text{割引率})^3} + \dots + \frac{n\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+\text{割引率})^n}$ $= \sum_{i=1}^n \frac{i\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+\text{割引率})^i}$ <p style="text-align: center;">事業から生み出されるキャッシュフローの現在価値の合計 A－初期投資額 B > 0 : 経済性判断の式①</p>

以上をまとめると、資金の出し手の視点から経済性を評価するためには、将来生み出されると予想される各年度のキャッシュフローから、資金の出し手から見て最低限満たしてもらいたいリターンを勘案した割引率を用いて現在価値を求め、その合計額(A)が初期投資額(B)を上回ること、すなわちA-Bがゼロ以上となることが重要な判断要素になるといえる。以上を便宜的に「経済性判断の式①」と呼ぶ。

次に、キャッシュフローを現在価値に割り引くための割引率について議論したい。この場合、理論的には、すでに説明したように資金の出し手が事業に見合った投資リスクに応じて要求するリターンが割引率として利用される。割引率は事業主体から見れば、資金の出し手に対して最低限満たすべきコストとしてとらえることができるため、ファイナンスの理論では資本コストとも呼ばれる。資金提供者の立場から見れば割引率は最低限満たしてもらい必要があるリターンであるが、資金調達者、すなわち藻類バイオマスファームの事業体のような事業運営者にとっては、調達した資本に対

して認識すべきコストなので資本コストという言葉が利用される。国債への投資リスクならば割引率が1%台でも投資する投資家はいるが、藻類バイオマスファームへの投資には常識的には大きなリターンを期待するので、割引率、すなわち資本コストも大きくなろう。逆に言えば、事業リスクを軽減することで資本コストは小さくなる。資本コストが小さくなることで、必然的に事業から生み出されるキャッシュフローの現在価値の合計は大きくなり、より多くの投資家の投資を誘発することが可能となる。

資本コストの藻類バイオマスファームの技術的な視点における意義を考えると、技術の成熟化により安定して操業コストが低下し、安定して生産量が見込めると事業リスクは低下し、藻類バイオマスファームが生み出すキャッシュフローを資金の出し手の視点で現在の価値に割り引くために用いられる資本コストが低下するといえる。その結果、事業から生み出されるキャッシュフローの現在価値の合計Aは大きくなる。技術革新や新知見およびそれらの知見の技術的な成熟化によって、生産性の向上や生産性の安定によりキャッシュフローが拡大すると同時に、割引率(資本コスト)の低下により、経済性はより高く評価されるという正の好循環が成立されることになる。

具体的に割引率(資本コスト)を計算するには、資金の供給者である銀行やベンチャーキャピタルなどが要求する平均的年次リターンを、資金の調達割合で加重平均した値(以下、その値を加重平均資本コストと呼ぶ、英語のWeighted Average Cost of Capitalを省略してWACC、ワックとも呼ぶ、単に資本コストと呼ぶこともある)として求めることが必要となる。割引率すなわち資本コストは、資金提供者から見れば、現在の現金と等価と感じる将来の現金の額の割合なので、資本コストを把握することは、資金調達を考える上で極めて重要な概念である。その概念を知らないで事業を行うことは、事業運営者としては極めて重要な利害関係者である資金調達者に対して責任を負っていないことと同義であり、許されないことである。特に全く新しい再生可能エネルギーを事業化する藻類バイオマスファーム事業の運営者は、資金調達者に対して技術的な見通しについて詳細に説明し、事業リスクについてよく理解してもらうことが極めて重要といえよう。

すでに述べたように、上場を果たしているSolazyme社の投資額上位機関投資家20社のうち8社は石油大手のChevron社にも投資している。少なくともそれらの機関投資家に対してSolazyme社は事業リスクについて詳細に説明し、その結果、投資を受けることに成功したと考えることができる。なお、理論的な因果関係を正確に証明することは困難であるが、事業リスクについて詳細に説明することで、投資家の不安感を低くすることも、直感的には割引率の低下を促すことにつながると考えることができる。

加重平均資本コストを具体的に計算するには、銀行などの債権者が提供する借入と、株主が提供する株主資本に分けて考えることが必要である。まず、銀行などの債権者が要求するリターン、すなわち支払利息については、すでに述べているが損金算入できるので、その点を考慮した値が

事業体にとっての実質的な負担率となる。キャッシュフローは事業体に残った上で銀行やベンチャーキャピタルに配分される資金なので、税金を除いた値で計算する必要がある。よって、利払に関しては、実質的な負担率、すなわち支払利息の金利から損金効果を勘案した値、借入金利×(1-税率)を加重平均資本コストの計算のために用いる。つまり金利4%、税率40%であれば、実質的には、 $4 \times (1 - 40\%) = 4 \times 60\% = 2.4\%$ となる。なお、藻類バイオマスファームにおいて、4%という低い金利を享受することは通常は困難と想定されるが、すでに述べたように政府保証などがあれば実現可能である。実際、米国農業省はこれまでに論じたように、有力な藻類バイオマスファームに対して債務保証を行っている。債務保証を行うことで割引率が低下し、事業性の評価がより容易になり、投資が促進されることになるわけである。

借入に対する利息は損金算入が可能であるが、ベンチャーキャピタルなどが提供する株式による資金(株主資本)への配当などは損金算入できないので、要求するリターンをそのまま加重平均資本コストの計算に用いる。ベンチャーキャピタルなどは上場時の値上がりで一気に投資回収を図ることを想定する。よって、一見、毎年のキャッシュとして支払う必要がないため認識されにくいだが、ベンチャーキャピタルとしてはハイリスク投資なので、そのリスクに見合った高いリターン、例えば年率20%程度は最低限期待していると考えべきである。ベンチャーキャピタルは法的には株主なので、このような株主が年次平均で最低満たしてもらいたいと考えるリターンを「株主資本コスト」と呼ぶ。例えば藻類バイオマスファームのリスクから見て、20%の株主資本コストを想定しているベンチャーキャピタルが5年後の上場で投資回収を図るとして10億円投資したとすると、上場時には最低、 $10 \times 1.2^5 = 24.8$ 億円を得られるかどうかを分析して投資判断することになる。なお、株主資本コストは、例えばトヨタ自動車のように事業がすでに成立して過去の実績も明確で大規模に安定的に運営されている企業の場合は、通常は10%下回る水準となる。

仮に、税引後の金利が2.4%、ベンチャーキャピタルが、提供した株式に対して年次平均で20%のリターンを想定しているとして、借入を80%、株式を20%で調達した場合、加重平均資本コスト(WACC)は以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \text{加重平均資本コスト(WACC)} &= \\ & \text{税引後借入金利} \times \text{借入調達割合} + \text{株主資本コスト} \times \text{株主資本調達割合} \\ & 2.4\% \times 80\% + 20\% \times 20\% = 1.92\% + 4.00\% = 5.92\% \end{aligned}$$

リスクの高い事業で調達額の80%もの割合を借金でまかなうことは通常は想定しにくいだが、これも政府保証があれば可能と考えられる。

以上を踏まえると、事業から生み出されるキャッシュフローの現在価値の合計Aは、具体的には、稼働年数がn年だとすると、以下のような式で計算される(WACC=加重平均資本コスト、割引率)。

事業から生み出されるキャッシュフローの現在価値の合計 A

$$\begin{aligned} &= \frac{1\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+WACC)^1} + \frac{2\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+WACC)^2} + \frac{3\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+WACC)^3} \\ &\quad \dots + \frac{n\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+WACC)^n} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{i\text{年目のキャッシュフロー}}{(1+WACC)^i} \end{aligned}$$

以上の式で計算される事業から生み出されるキャッシュフローの現在価値の合計Aに影響を与えるのは、各年のキャッシュフローと、割引率である加重平均資本コストである。計算式を見れば自明であるが、各年の分子であるキャッシュフローが大きくなるか、分母である割引率、すなわち加重平均資本コストが小さくなると、Aは大きくなる。キャッシュフローは売上高の拡大や、技術革新による運転コスト削減や追加設備投資費用の削減などによって拡大する。また、効率よく経営して売上債権の回収を早め、在庫を少なくするなどの経営努力によってもキャッシュフローは改善する。

以上のように求めた加重平均資本コストによって将来のキャッシュフローを割引いて求めた現在価値の合計が、初期の投資額の金額を上回ること、すなわち経済性判断の式①で $A - B > 0$ が成り立つかどうか、特定の事業において経済性を判断する上で重要な判断基準となる。経済性だけを考えるならば、藻類バイオマスファームへの投資判断においても同様に $A - B > 0$ となることが、意思決定においては重要な要素となる。ただし、すでに述べたように化石燃料の枯渇問題を背景に、国際的に資源を獲得する競争の激化が予想される中で、国内における再生可能エネルギー自立という観点から見れば、藻類バイオマスファームについては、 $A - B < 0$ としても取り組むべきだと判断することも想定される。しかしその場合でも $A - B$ のマイナス幅を縮小することが経済的な負担を減少させことになるため極めて重要になる、よって、 $A < B$ であり $A - B$ がマイナスであったとしても、その数字を縮小するという視点で考えれば、このフレームワークはやはり重要な視点である。

例えば、二つの培養システム検討する場合、それぞれのAとBを計算してみて、 $A - B$ が双方においてマイナスだった場合はマイナス幅が小さいほうを選ぶことが望まれよう。また、技術開発においてはいかにそのマイナス幅が小さくなるのかが重要な目標となろう。さらに $A - B$ のマイナス幅が小さい場合のほうが、産業化に必要な政府の助成金支給の額も少なくなることが想定されるためやはり重要な判断となろう。

6.2.2. 藻類バイオマスファームの特徴を踏まえた経済性評価：EVAⁱの利用の意義

以上のようなフレームワークは、計画当初において意思決定する際には極めて有用であるが、実際に運転しているときに年次で経済性を評価し、管理していくためには別のフレームワークが必要となる。詳細を証明することは本報告書の範囲を超えているためにファイナンスの専門書ⁱⁱを参考にさせていただきたいが、経済性判断の式①は以下のような式に変換することができる。

事業から生み出されるキャッシュフローの現在価値の合計A - 事業へ当初投資した金額B = (各年度の税引後営業利益 - 加重平均資本コスト × 各年度の期首の資本)の現在価値の合計 > 0 : 経済性判断の式②

◇ 期首の資本とは、年度の初めに調達した資本の簿価、当期利益のうち配当されないで社内内部に留保されたものがあれば、株主が再投資したもものとして資本として勘案する。

経済性判断の式②と経済性判断の式①が等価であることを直観的に示すために、仮想の事業モデルで試算したのが表3-9である。

表 3-9 経済性判断の式①と経済性判断の式②の関係

加重平均資本コスト、割引率(WACC)=		6.0%									(単位:百万円)
年度	n年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
①	NOPAT (税引後営業利益)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
②	減価償却費	200	200	400	400	600	400	400	200	200	
③	追加設備投資: 2年目と4年目の期末に投資		1,000		1,000						
④	キャッシュフロー=①+②-③	300	-700	500	-500	700	500	500	300	300	
⑤	=1/(1+WACC) ⁿ : WACCとは加重平均資本コスト、複利計算	0.943	0.890	0.840	0.792	0.747	0.705	0.665	0.627	0.592	
⑥=④×⑤	キャッシュフローの現在価値	283	-623	420	-396	523	352	333	188	178	
⑦	キャッシュフローの現在価値の合計	1,258 (←経済性判断の式①におけるA)									
⑧	初期投資額	1,000 (←経済性判断の式①におけるB)									
⑨=⑦-⑧	初期投資額を上回るキャッシュフローの現在価値	258 (←経済性判断の式①におけるA-Bの値)									
⑩	各年度の期首資本(設備投資計画参照)	1,000	800	1,600	1,200	1,800	1,200	800	400	200	
⑪	加重平均資本コスト(WACC)	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	
⑫=⑩×⑪	WACC×各年度の期首資本	60	48	96	72	108	72	48	24	12	
⑬=①-⑫	(NOPAT-WACC×各年度の期首資本)	40	52	4	28	-8	28	52	76	88	
⑭=⑬×⑤	(NOPAT-WACC×各年度の期首資本)の現在価値	38	46	3	22	-6	20	35	48	52	
⑮	(NOPAT-WACC×各年度の期首資本)の現在価値の合計	258 (←経済性判断の式②において算出される値)									
(設備投資計画)											
年度	n年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
設備投資A	期首資本	1,000	800	600	400	200					
	減価償却費(5年均等償却、残存価値ゼロ)	200	200	200	200	200					
	期末資本	800	600	400	200	0					
設備投資B	期首資本		1,000	800	600	400	200				
	減価償却費(5年均等償却、残存価値ゼロ)			200	200	200	200	200			
	期末資本		1,000	800	600	400	200	0			
設備投資C	期首資本				1,000	800	600	400	200	200	
	減価償却費(5年均等償却、残存価値ゼロ)					200	200	200	200	200	
	期末資本				1,000	800	600	400	200	0	
全設備投資	期首資本	1,000	800	1,600	1,200	1,800	1,200	800	400	200	
	減価償却費(5年均等償却、残存価値ゼロ)	200	200	400	400	600	400	400	200	200	
	期末資本	800	1,600	1,200	1,800	1,200	800	400	200	0	

(注) 運転資本は、計算を簡易にするために、ゼロと仮定。また、簡便的に事業は9年度末で解散し、解散時にキャッシュフローは生じないとする

ⁱ EVAはスターンズチュワート社の登録商標

ⁱⁱ G.ベネット, 3 スチュワート (著), G.Bennett, 3 Stewart (原著), 河田 剛(翻訳), 須藤 亜里(翻訳), 長掛 良介(翻訳), 日興リサーチセンター(翻訳), (1998)「EVA(経済付加価値)創造の経営」

前提として、NOPAT が毎年1億円、初期に設備投資 10 億円、2 年目と 4 年目に 10 億円の追加投資を行い、減価償却は簡便的に 5 年で均等償却、加重平均資本コストは 6%とした。この表で経済性判断の式①で定義される、「事業から生み出されるキャッシュフローの現在価値の合計 A－事業へ当初投資した金額 B」の中で A は 12.58 億円となり、初期投資 B が 10 億円であるため、A－B は⑨の行で示したように 2.58 億円となる。

一方で、経済性評価②で示された「各年度の税引後営業利益－加重平均資本コスト×各年度の期首資本の合計」も2.58億円となる。(表3- 9の⑮の行参照)

以上のように、経済性判断の式②で得られる結果と、経済性判断の式①で得られるA－Bの値は全く同じになる。後者においては、各年度において「各年度の税引後営業利益－加重平均資本コスト×各年度の期首の資本」を計算することに特徴がある。この数値は、この値で事業を管理する経営コンサルティング体系を構築したことで知られている米国のコンサルタント会社スターン・シュワート社ⁱ によってEVA (Economic Value Added、経済付加価値)と名付けられた概念である。別名SVA (Shareholder Value Addedⁱⁱ)とも呼ばれる。

各年度に生み出された、税引後営業利益に対して、各年度の期首に調達した資本に対する資金の出し手が最低満足するリターンを上回っていれば、すなわちEVAがプラスであれば、その事業年度において、経済的に資金の出し手が最低限求めるリターンを上回って付加価値を生み出したと判断できる。例えば資金調達額が10億円、加重平均資本コストが6%だとすると、10億円×6%＝6,000万円を上回る税引後営業利益を生み出せば、その期のEVAはプラスであり、経済的に評価できることになる。毎期のEVAの現在価値の合計がプラスであれば、トータルに見て経済的に評価できる投資活動であったと判断することができる。また、その値がマイナスであった場合には、その値をいかに少なくするのかという視点が技術開発戦略として重要な要素となる。それに対してキャッシュフローは単に投資した金額の回収に過ぎない減価償却なども含まれるため、その年に限ってみれば、経済性が良かったのか悪かったのかを判断することが困難である。また追加投資があれば大幅にマイナスになることも年次における判断を困難にさせる。一方、EVAであれば毎年、資本を提供した資金提供者の求めている最低リターンを上回った成果を出しているのかという視点で経済性を評価できる。表3- 9で見ると、多額の投資がかさんだ直後の5年度においてはEVA (NOPAT－WACC×各年度の期首資本)がマイナスになるが、それ以外ではプラスであるため、一見して、経済性評価から見て投資判断すべきであると現在価値を合計するまでもなく判断できる。一方で、キャッシュフローでは、追加設備投資によって大きく変動するので、すべて合計するまでは経済性

ⁱ <http://www.sternstewart.com/>

ⁱⁱ ロジャー・W. ミルズ (著), Roger W. Mills (原著), 前田 俊一(翻訳), グローバルアライアンス社 (2002)「SVA—戦略価値分析による企業価値評価法」

の評価が困難である。キャッシュフローの枠組みでは初期の投資判断において投資すべきかどうかを判断する場合には有効であるが、その後の技術的な改善による効果を測っていく上ではEVAが相対的には使いやすいといえる。既存技術の応用や、研究開発中の新知見の応用によってコストダウンを図っていくことが特に重要な、再生可能エネルギーとしての藻類バイオマスの事業化を想定する場合は、各年度の技術的成果と資金の出し手から見た経済性評価が結びついていることは非常に重要といえる。

年次の経済性を評価する上で、会計利益をそのまま利用すればよいのではないかと考えもあるが、通常の会計利益では株主が満足するリターン、すなわち株主資本コストをコストとして認識することを想定してない。会計利益では借入に対する支払はコストとして認識するが、ベンチャーキャピタルなどが期待しているリターンを明示的にコストとして年次で把握することができない。したがって資金調達額が大きい藻類バイオマスファームにおいては、株主に対してどの程度年次で満足すべきなのかを明示的に把握することができるEVAの枠組みは非常に有用性が高いと考えることができる。または、少なくとも、年度ごとの経済性評価を出資者の視点も含めて評価することができる指標の導入が望ましいといえる。

なお、藻類バイオマスファームの場合、初期に大規模な投資が行われた後は、追加投資はさほど想定されないため、期首の資本も減価償却費分だけ緩やかに低下していくと予測される。したがって、EVAの計算要素である「加重平均資本コスト×各年度の期首の資本」は予測しやすい。半導体のように売値が激しく変動し追加設備投資も激しい場合ではEVAが毎年大きく変動するため、EVAによる管理には工夫が必要となるが、藻類バイオマスファームにおいては、売上高が政府買い取り保証などで予測可能で、初期投資後の追加投資がさほど想定されないのであれば、EVAの計算は容易である。多額の資金調達に対する経済的なコストを認識することが重要な藻類バイオマスファームにとって、EVAのような株主のような視点も取り入れた指標を利用して経済性の年次評価を行うことは非常に意義のあることといえる。また、EVAを導入することで、技術革新によってコストを毎年引き下げることで税引後営業利益を少しずつ拡大し、結果としてEVAのマイナス幅を毎年少しずつ下げるといった形でわかりやすく目標設定を行うことが可能となり、技術的な成果と経済的成果を連動した形で年次で把握することが可能となる。

さらに政府の支援を考える上でも、EVAは有用な概念である。例えば、助成を考える場合は、EVAが改善していく過程で、マイナスの分だけ助成するという考えを導入すれば、民間が負担できるリスクを超えた分だけを政府が助成するという方針を理論的な整合性をもって、体系的に実施することが可能になる。また、政府助成金を毎年どの程度にすればよいのか、年次で予算編成を行う上でもEVAがその年度でどの程度マイナスになるのかを把握し、マイナス分だけ助成するということを毎年行うことが可能となる。結果として、技術的变化によって生産性の向上に応じて機動的に助成金を毎年変化させることが可能となる。また、EVAが将来的にプラスになりうるのかどうか、という

視点も政府助成がどの程度必要なのかを見極めることや、複数の培養システムについて評価を行うことにおいて有用な情報を提供する。EVAがマイナスとなっている時期だけに限定して政府が助成し、EVAがプラスになれば、買取保証や債務保証のみに政府支援を限定し、トータルで見て政府の必要な負担額を軽減するということが可能となろう。

なお、EVA、もしくはEVAに類似した概念はわが国でも広く利用されているⁱ。例えば、藻類産業創成コンソーシアムの参加企業である花王株式会社や、三菱商事株式会社などが代表的例として挙げられる。また世界的に見ても、コココーラⁱⁱやシーメンスⁱⁱⁱなど世界を代表するような企業も導入しているため、EVAを用いて経済性評価を行えば国内での理解に加え、海外からの理解も深化する上でも有用と考えられる。海外からの理解を深化させることで、海外ベンチャー企業との技術連携や、海外投資家からの資金調達などの選択肢も広げることができる。再生可能エネルギーの早期確立が人類共通の目標となっていると考えれば、そうした海外との連携を促進することができる概念で経済性を評価することは非常に重要な視点といえよう。

以上のような観点から見て、資本集約的かつ安定的なキャッシュフローが見込まれる事業形態である藻類バイオマスファームにおいてはEVA^{iv}の概念を利用することは様々な視点で有用であると考えられる。なお、以下の図で示すように、現実的な生産性を前提とすると、加重平均資本コストは4-5%程度に抑制しなければEVAは黒字化しないと推計される。4-5%は極めて低い水準であり、国内で事業化するためには、エネルギー政策のもとで安定的な買い取り保証や借入の債務保証を進めることによって、加重平均資本コストの軽減を図ることが必要になるとことが確認される。繰り返しになるが、そうした方策を打ち出さないと、すべて高いリターンを要求する株主資本の調達に頼ざるを得なくなり加重平均コストが大幅に増大することが予想され、そうなる事業性が成立することが困難になると推測できる。

ⁱ 花王株式会社:

http://opac.kanto-gakuin.ac.jp/cgi-bin/retrieve/sr_bookview.cgi/U_CHARSET.utf-8/NI10000023/Body/208fukuda.html

三菱商事株式会社:<http://www.kier.kyoto-u.ac.jp/fe-nomura/katou/05.07.05.pdf>

ⁱⁱ <http://www.jri.co.jp/page.jsp?id=16464>

ⁱⁱⁱ http://www.diamond.co.jp/_itempdf/0201_biz/47053-7.pdf

^{iv} EVA、Economic Value Added、経済付加価値は、スターンズチュワート社の登録商標。簡易的に示すと営業利益×(1-法人税)-投下した資本額×資本コストで計算できる。理論的には、投下資本+EVAの現在価値=キャッシュフローの現在価値となるので、真の経済価値の創造力を表している指標といえる。資本集約的な事業で、売上が安定的な場合に簡易的に経済価値を期間損益的に計測する上で有用である。

図3- 10は藻類バイオマス産業のEVA計算の事例である。ⁱ



図 3- 10 藻類バイオマス産業の EVA 計算の事例

6.3. 品質保証・標準化ⁱⁱ

すでに述べたように、藻類バイオマスの用途では既存製品の代替というケースが多いと想定される。産業化には品質保証が必須であるが、特に既存製品の代替の場合はその重要性が拡大するといえる。新しい産業では、業界団体やコンソーシアムのような団体が品質保証について整備するのが通常であり、わが国における産業発展には、そのような仕組みを構築することも重要な課題である。

例えば、藻類から生成されるオイルが現在の研究開発段階から今後大量生産のラインに乗るためには、原油としての品質保証が必要となる。原油の品質評価手法にはJIS規格やASTM規格、JASO規格等があり、世の中の信頼を得つつ流通させるためには、国際的あるいは国家的スキームに整合した試験・評価方法が必須になる。しかしながら、これらの規格は既存の原油に対する試験・評価方法であり、現時点では、藻類から生成されたオイルに適用できる手法は存在しない。

さらに化粧品や医薬品など化学加工製品に対して藻類由来のオイルが用いられる場合について

ⁱ 政府保証や政府買取制度などが存在し、資本コストが低位(例:4%程度)に抑制されているとの前提。数字はあくまで利益を確保するのに必要な数値として架空に計算したものであり、利益ありきで計算したもの。

ⁱⁱ 一般財団法人日本品質保証機構 2012年2月 提供資料より引用、抜粋。

でも、現在では法律の根拠となるJIS規格がない。藻類から生成されたオイルや加工品の品質確保、ひいては発展・流通のために、新しい評価手法や認証制度が必要になる。例えば、藻類産業創成コンソーシアムのような利害関係者のつくる団体が検討を進めていくことが望まれる。

また、国内で流通させるためには「揮発油等の品質の確保等に関する法律(略称:品確法)」を遵守する必要がある。先行しているバイオマス燃料(脂肪酸メチルエステル、エタノール等)をガソリンや軽油に混和して流通させる場合、混和する事業者に対し特定加工業者の登録と品質確認の義務付けの2点が課される。

過去の事例を見るとJIS規格等の国家規格においても、ISO等の国際規格においても、その原案は工業会やコンソーシアム等の業界団体から生まれている。したがって、当コンソーシアムにおいても図3- 11¹⁾に示すように、今後の課題として以上の取り組みを検討していくことも重要であると考えられる。

- | |
|---|
| <p>① 原油の品質及び信頼の担保</p> <p>新たな藻類由来の原油の登場に対しても、コンソーシアムがイニシアチブを取って品質保証をすることができます。また粗悪品が流通することを防止することができます。</p> <p>② 国内法への円滑な対応</p> <p>品確法への対応等、国内で流通させるために規制当局や関係各所を納得させることのできる根拠(妥当な試験方法)を担保することができます。</p> <p>③ 国際的な流通への貢献</p> <p>藻類由来の原油が海外に流通することとなった場合、国際規格や国際的なスキームに整合した手法で品質評価することにより、輸出及び輸入においてスムーズな運用が可能となる効果が期待できます。また貿易においても、国際競争の中で日本が優位に進めるための武器になることが見込まれます。</p> |
|---|

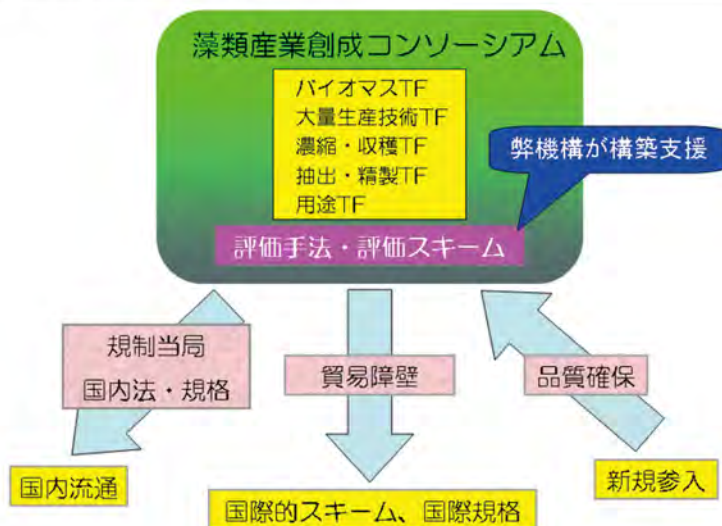


図 3- 11 藻類バイオマス産業の品質保証・標準化への対応策の例

¹⁾ 一般財団法人日本品質保証機構 2012年2月提供資料より引用、抜粋

6.4. NER・二酸化炭素排出量削減効果・経済性・供給安定性からの藻類バイオマス産業の事業化への評価

NERと二酸化炭素排出量削減効果は、最もハードルが低い。現実的なLCA分析を見る限り、事業化へ向けて最低限の水準をクリアすることは比較的容易であると結論することができる。より高いNERと二酸化炭素排出量削減効果削減を実現するためには、より有用性の高い新種の発見や、育種、品種改良、遺伝子操作による形質転換、および実証培養施設による大量培養に関するノウハウの蓄積、既存の水処理、エンジニアリング、化学工学等の既存技術との融合が不可欠である。

経済性については、短期的には下水処理を組み合わせることである程度目途をつけることが可能となる。より裾野の広い産業化を図る上で、長期的には高付加価値の副産物の開発が必要であろう。

供給安定性については、国内の耕作放棄地をある程度活用できれば理論的には可能である。ただし、より現実的にはある程度国内での大量生産のノウハウを築くことができれば、海外においてより広い土地での生産を想定することも重要な検討課題となるⁱ。

7. 事業化へ向けた技術ロードマップ

第一章において藻類バイオマスの再生可能エネルギーとしての潜在性について文献調査を行い、産官学が連携して取り組むべきとの結論を導いた。第二章においては、わが国では藻類バイオマスの再生可能エネルギーへの産業化に関連する技術は網羅的に蓄積されていることを確認した。そして、第三章で、各バリューチェーンの技術動向についてレビューした。以後、まとめとして藻類バイオマスファームの産業発展創成に向けた技術ロードマップを提示したい。

まず、再生可能エネルギー資源を生産する藻類バイオマスファームの産業発展の理想的な姿を論じたい。藻類の産業創成は、人類の歴史の中で全く新たな産業を興していくことであり、実現には、膨大な量の新たな知見・技術の開発が必要である。そのために、単なる技術論でなく、関係する利害関係者間での情報共有化なども含めた姿について考察する。その上で、藻類産業創成コンソーシアムとして、理想の産業発展を促進するためにどのような貢献ができるのかを論じる。

次に、これまで論じてきた技術体系について、既存知見・技術の応用(5年後で実用化可能性)、研究・開発中新知見・技術(5年後より実証、10年後に実用化の可能性)、資源枯渇へ対応、の三

ⁱ 産業競争力懇談会 2011、産業競争力懇談会2011年度 プロジェクト 中間報告～【微細藻類を利用した燃料の開発】においては、国内では適切な土地がなく供給安定性を確保することが困難であり、海外での生産を現実的な選択肢として想定している。

つの視点を軸に、今後の事業化までの道のりをどう築いていくのかを技術ロードマップとして論じる。

7.1. 藻類バイオマスファーム産業発展の理想の姿

図3-12が「藻類バイオマスファーム産業発展の理想の姿」である。図に詳細に示したように、藻類産業の発展においては、それぞれのバリューチェーンで極めて多くの利害関係者が関わることをまず認識すべきである。それぞれの利害関係者が持っている知見・技術は多岐にわたるため、これまで論じてきた各バリューチェーンの技術的論点の概要を理解し、それぞれが得意とする分野でどのような貢献ができるのかを理解することが重要である。そのためには、情報共有の場を構築し、利害関係者の間で適切な情報共有化がなされることが必要である。こうした情報共有によって、関連する利害関係者が最新の知識や技術開発動向について共通認識をもち、藻類バイオマス産業における事業戦略を適切に構築できるようになる。

また、技術論点・課題の共通認識を踏まえて、最終的に事業化するまでにどのようなリスクが存在するのかが明らかになり、民間で負担できるリスクは何か、国が支援すべきリスクは何かが明確になり、適切な事業支援の枠組みに関する政策形成が可能になる。

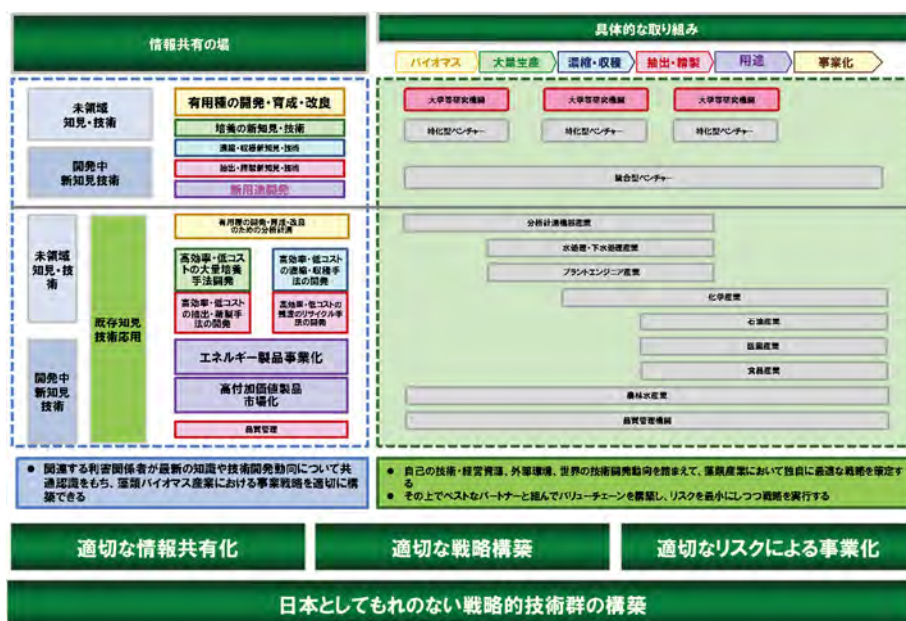


図 3-12 藻類バイオマスファーム産業発展の理想の姿

例えば、藻類バイオマスファームは、資本集約的な産業となる可能性が高いために固定費が大きくなり、売上変動により収益が急速に悪化するリスクが想定される。技術的に不安定な発展段階においては、そのリスクがさらに大きくなる可能性がある。国の政策としてリスクを適切に軽減し、民間が負担できるレベルにまで事業リスクを引き下げて投資を促進することが極めて重要である。具体的な対応策として、国における買い取り制度や補助金などで売上の安定性を図ることで民間の

投資の促進を図ることが考えられる。

以上のような枠組みにより、各利害関係者が情報共有化を踏まえた適切な戦略構築を行い、さらに国の支援の内容も踏まえて財務力に応じて自分が負担すべきリスクを適正化し、ベストなパートナーと組んでバリューチェーンを構築し、リスクを最小にしつつ戦略を具体的に実行することが可能となる。こうした動きが多数出てくる中で、技術的に優れた取り組みが競争原理の中で形成され、長期的な発展へとつながっていくと考えられる。

また、以上のような総合的な取り組みにより、世界の技術競争の中で、わが国として漏れのない戦略的な技術発展群を構築することが可能となる。早期の産業化を目指すのであれば、世界の技術動向を踏まえて情報共有化を進め開発が進んでいるものはそれらになるべく活用し発展させることが重要である。

7.2. 藻類バイオマスファーム産業発展に向けた当コンソーシアムの貢献の可能性

藻類バイオマスファーム産業発展に向けて当コンソーシアムが貢献できる可能性について論じたい。すでに述べたように、発展のためには、①適切な情報共有化、②適切な戦略構築、③適切なリスクのもとでの事業化、④日本として漏れのない戦略的技術群の構築の4つの視点が重要と考える。それぞれについて論じていく。

まず、「適切な情報共有化」については、会員間の情報共有化をより積極的に推進し、技術内容をデータベース化することで貢献できる。当コンソーシアムには、すべてのバリューチェーンにわたる多種多様な産業に係る会員企業が参画している。世界と比較して進んでいる技術、今後育成していくべき技術などについて議論を深めるための技術データベースを作成することにより、当コンソーシアムは情報共有化の場として機能することができる。

第二の「適切な戦略構築」については、会員の事業戦略構築を支援するためにバリューチェーン全体をつなげて、特定の藻類の培養に関する最適な技術体系構築のための知見の共有を図っていくことが重要である。光合成なのか、従属栄養なのか、混合栄養なのか、また最終的な用途がどのようなエネルギー形態となるのか、といった論点により最適なバリューチェーンは大きく異なっていく可能性がある。そうした個別事業の事情に合わせ、バリューチェーンの最適化に向けて最新の知見・技術を当コンソーシアムのデータベースより情報を提供することで貢献できる。会員は、事業化のための要素技術の組み合わせについてよりの確な判断を行うことが可能になる。

第三の「適切なリスクによる事業化」については、総合的にリスクを把握して体系化することで貢献できる。リスク把握体系を標準化することで、各事業体内外の利害関係者の理解を促進し、国の

政策作りにも貢献することができると考えられる。

第四の「日本として漏れのない戦略的技術群の構築」については、内外の研究機関の動向や企業の動向調査を定期的実施し、情報発信していくことが考えられる。その上で、世界をリードする藻類産業の発展に必要な要素技術体系を整理することで産業の発展に寄与できる。

今後、当コンソーシアムが藻類産業創成のために具体的にどんな貢献が可能か議論を深めていきたい。

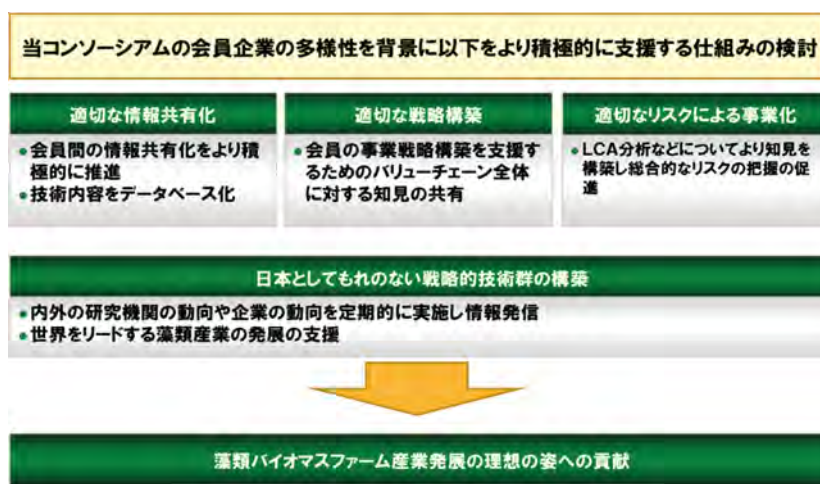


図 3- 13 当コンソーシアムの貢献可能性

7.3. 技術ロードマップ

前節で論じた4つの視点を、技術ロードマップとして時間軸で展開したのが図3- 14である。より適切には産業発展ロードマップと呼ぶべきものである。藻類産業に関する技術において、なお不確実性が高い中で意味のある技術ロードマップを作成することは困難であるが、標準的な事業化タイムフレームを想定し、あえて作成したものである。今後の更なる新知見技術により、想定よりも大幅に早まることや、技術的障害の克服の遅れで大幅に遅れることは十分にあり得る。

2012年度においては、まずは、わが国として藻類バイオマスファームの発展に寄与する関連要素技術の整理を進めることが重要である。例えば、下水処理技術は藻類バイオマスファームの発展に不可欠であるが、わが国における下水技術関係者の藻類バイオマスファームに対する理解は必ずしも十分とはいえない。理解促進の余地は大きい。また、最適な培養環境を実現するためには、大量の水を低コストで殺菌処理する技術が重要であり、それらの技術を保有する企業や研究者との情報共有化は大量培養技術の最適化のために不可欠である。

既存の技術と藻類バイオマスファームのつながりを整理し、より幅広い産業界の参加を呼びかけ

ていくことが重要である。本報告書で進めてきた議論と課題の提示が、その契機になることを願っている。

2013年度には、2012年度の情報共有化をもとに、複数の事業化プロジェクトが検討されていることが理想である。個別プロジェクトとなると守秘性もあり、すべての利害関係者の知見の共有は困難になっていくが、共通基盤となる知見や技術については、当コンソーシアムが引き続き共有を図っていくことでより適切な事業化が図られると考える。

2014年度～2016年度は、それまでの動きの中で将来の大規模事業化をにらんだ実証プラントが具体的に建設され、既存技術の大規模化、および研究・開発中の新知見・技術の実証がなされていることが理想である。

明治の維新の時代に、わが国に製鉄産業の育成を図るために国家的見地から八幡製鉄所が建設されたことと同様に、国家的見地から各種要素技術を分析し実証していくような施設を建設することもこのステージでは重要な検討課題になると思われる。

2017年度あたりからは実証データをもとに、いよいよ大規模事業化へ向けて事業化に最適なスケールでのバイオマスファームを建設することが想定される。そこで大規模培養のための最適化ノウハウの知見を蓄積し技術を磨く。その成果を踏まえ、2020年度頃には本格的な事業化を全国的に、または海外へ向けて展開していくことを想定している。



図 3-14 藻類バイオマスファーム産業育成のための技術ロードマップ(産業発展ロードマップ)

より個別の要素技術まで整理したのが、表3- 10から表3- 12である。

表3- 10 個別技術ロードマップ(既存技術の応用)

テーマ	2017年まで	2022年まで	2022年以降
内容	既存技術の大規模プラントへ向けたスケールアップ実証研究	実際に大型プラントでの実証研究	複数大規模事業化
藻類バイオマス資源	<ul style="list-style-type: none"> ● 既存のカルチャーコレクション保有の藻類培養株の分析 ● 炭化水素を高含量に産生する藻類の探索・スクリーニング ● 純粋培養(無菌化)技術の効率化 ● 窒素等栄養素欠乏状態とオイル含有率の関係、増殖率の各種環境における変化の把握 ● カルチャーコレクションの充実(藻類バイオリソースセンターの整備) ● 効率的なスクリーニングシステムの構築 ● コンタミネーション耐性度の分析・評価 ● 植物品種改良・育種ノウハウの応用 ● 重イオンビーム等効率的な突然変異誘起技術の適用 	2017年までの実証分析をもとに複数の組み合わせで大規模プラントを建設して大規模培養の実証研究を実施	<p>具体的に複数事業を本格的に事業展開、事業展開の途上で政府が支援するが、基本的には独立採算性を目指す。</p> <p>オープン光合成</p> <p>従属培養ファーマンター</p> <p>オープン&フォトバイオ</p> <p>セミオープンポンド</p>
藻類大量生産関連技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 事業化されている藻類のエネルギー生産規模での大量培養化 ● 光合成効率が高く、省エネルギー・低コストの攪拌技術の開発 ● 大量培養時の最適培養環境、培養液濃度の維持 ● CO₂排気ガス利用による光合成藻類培養システムの構築 ● CO₂通気法の最適化 ● 光合成により発生する酸素の除去システムの構築 ● フォトバイオリアクター等の利用による種藻の供給システムの構築 ● オープンポンドの風雨対策 ● 大量の培養液やリアクターの滅菌・殺菌方法 ● 培養条件の最適化によるコンタミネーション制御 ● 水処理産業等のプラント・エンジニアリングの応用 ● 排熱を利用した培養温度制御システムの構築 ● 補助光としてのLEDの利用 		<p>淡水・海水</p> <p>など</p>
既存知見技術の応用	<ul style="list-style-type: none"> ● 凝集濃縮システムの最適化 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 化学凝集剤による凝集沈殿法の最適システム開発 ◇ 化学凝集剤の回収と再利用 ◇ 培養に使用する水をリサイクルで藻類培養に使う場合に、残余凝集剤あるいはpH操作の藻類への影響評価 ◇ オイル抽出・変換プロセスへの凝集剤の影響評価 ◇ 凝集剤添加あるいはpH操作をほどこした廃水の環境影響評価 ◇ 最適浮上凝集をもたらす気泡サイズとその攪拌技術 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 自然沈降法の最適システムの開発 ➢ 抽出精製等下流域での処理と効率の連結した沈殿あるいは浮上タンクシステムの設計 ➢ 凝集→収穫におけるコスト・エネルギー収支の算定 ● 低コスト・省エネルギーの遠心分離機の開発 ● 最適濾過濃縮・収穫システムの開発 <ul style="list-style-type: none"> ➢ フィルターサイズの最適化 ➢ 最適なフィルター素材の開発 ➢ 効率的な藻類回収をもたらす濾過システムの設計 ➢ コスト・エネルギー収支の観点からの最適濾過システムの評価 ● 濃縮・収穫のベストミックスシステム ● 排熱を利用した濃縮・収穫 ● 伝統的な海藻収穫技術・ノウハウを活用した最適収穫システムの開発 ● 分離液分のリサイクル利用法の最適化 		
藻類抽出・精製技術	<ul style="list-style-type: none"> ● ヘキサン的大量抽出 ● 既存技術の大量抽出への応用: 熱水抽出法、界面活性剤、酵素、触媒、超音波、物理的破碎、摩砕剤、圧力、ホモジナイザー、超臨界、亜臨界、各種技術の組み合わせ ● 実験施設による既存技術の回収率向上 ● エンジニアリング・化学工学技術者との改善点の洗い出し ● その他既存石油精製技術への応用可能性の検討 ● 低コストクラッキング技術による改変 ● 低コストエステル交換技術の開発 		
藻類用途関連技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 各種既存石油製品との品質の整合性 ● 医薬・サプリメントへの展開 ● 種苗用飼料への展開 		

表3- 11 個別技術ロードマップ(新発見技術の実証・応用)

テーマ		2017年まで	2022年まで	2022年以降
研究・開発中 新発見技術	内容	新発見技術の研究開発	実際に大型プラントでの実証研究	複数大規模事業化
	藻類バイオマス資源	<ul style="list-style-type: none"> ● より高速なスクリーニング技術・代謝メカニズム分析技術。 ● 各種代謝促進メカニズムの把握。 ● 燃料原料成分への配分・蓄積促進メカニズムの把握。 ● 増殖速度を制御する内的因子の把握。 ● 遺伝子導入法の確立。 ● より光合成効率の高い能力への形質転換。 ● 高いオイル蓄積率と高い増殖率、高いコンタミネーション耐性などを兼ね備えた有用種と発見、育種、遺伝子操作による形質転換。 ● 有用物質分泌機能に関連する遺伝子の同定と同遺伝子組み換え体の開発。 ● 淡水成育種の有用能力の海水成育種への形質転換(海水は豊富な水資源)。 ● 特殊環境成育種(特殊なpH水温、塩分、etc)の探索・発展、形質転換。 	<p>2017年までの実証分析をもとに複数の組み合わせで大規模プラントを建設して大規模培養の実証研究を実施。</p> <p>新発見技術について有望なもの大規模プラントで実証。</p>	<p>具体的に複数事業を本格的に事業展開、事業展開の途上で政府が支援するが、基本的には独立採算性を目指す。</p> <p>オープン光合成</p> <p>従属栄養ファーマンター</p> <p>オープン&フォトバイオ</p> <p>セミオープンポンド</p> <p>淡水・海水</p> <p>など</p>
	藻類大量生産関連技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 効率的な光合成に導くクロロフィル量を持つ品種の作製。 ● 安価な高効率集光システムの開発による太陽光照射の効率性向上。 ● 格安素材の開発(素掘りのオープンポンド)。 ● 格安で丈夫な素材でスケールアップが可能なフォトバイリアクターの開発。 ● 各種下水・排水の炭素源、栄養塩の利用した最適生産システムの開発。 ● CO₂濃縮・貯蔵技術の開発。 ● 嫌気消化メタンガス燃焼後のCO₂および廃液の再利用技術の開発 ● 窒素固定藻類・バクテリアとの共生培養システムの構築。 ● 培養設備のクリーニング。 ● 従属栄養の未利用炭素源の安定供給体制の構築。 ● 従属栄養藻類からのオイル生産に最適なファーマンターの開発。 ● 有機固形炭素源の低分子化と可溶化並びに再利用化を可能とする微細藻類と微生物との共生培養システムの構築。 ● 独立栄養藻類と従属栄養藻類のハイブリッド培養システムの構築。 ● 各種シミュレーション技術による迅速なプラント設計、培養エンジニアリング。 		
	藻類濃縮・収穫関連技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 生物凝集技術、電子凝集技術の開発。 ● 付着藻類の活用。 ● 磁気分離濃縮技術。 ● アコースティックフォーカシング(音波凝集)技術。 ● オイル成分の生物学的濃縮収穫技術。 ● 固定化技術(immobilization)。 ● オイル成分の食物連鎖による生物学的濃縮技術。 		
	藻類抽出・精製技術	<ul style="list-style-type: none"> ● ジメチルエーテルなど環境負荷の低い溶媒による技術の開発。 ● 各種技術の組み合わせによる効率化、低エネルギー化。 ● 低コスト・省エネルギーの乾燥技術の開発。 ● マイクロ波の応用。 ● タンパク質のエネルギー資源化。 ● 乾燥工程を経ずとも藻体スラリーを加熱処理することで炭化水素を効率的に抽出する技術。 ● 各種シミュレーション技術による仮説検証サイクルの高速化。 ● 有用物質分泌機能を持つ種の開発。 ● 有用物質分泌種の育成における有用物質の効率的回収技術。 		
藻類用途関連技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 高効率、省エネルギーの残渣のメタン発酵システムの開発(嫌気消化、メタン発電システム、熱の培養槽への利用)。 ● 残渣の培養液への可溶化、栄養塩の培養液へのリサイクル。 ● 飼料の開発。 ● バイオプラスチックの開発。 ● 化粧品の開発・医薬の開発。 ● 藻類バイオマスの成分の分析による未利用用途の探索。 ● 藻類を有った金属回収技術。 			

表3-12 個別技術ロードマップ(資源枯渇への対応)

テーマ		2017年まで	2022年まで	2022年以降
研究・開発中 新発見 技術 資源枯渇への 対応	内容	新発見技術の研究開発		具体的に複数事業を本格的に事業展開、事業展開の途上で政府が支援するが、基本的には独立採算性を目指す。 オープン光合成 従属栄養ファーマンター オープン&フォトバイオ セミオープンポンド 淡水・海水 など。
	藻類バイオマス資源	<ul style="list-style-type: none"> ● より過酷な環境での生育が可能な種:コンタミネーションの最小化。 ● 増殖に必要なリンなどの肥料が少ないと資源枯渇問題においてプラスの影響。 ● 広い塩分耐性を持つ藻類:水資源枯渇問題から独立し、かつ下水処理システムや水田等農地システムに組み入れ易い。 ● 広範な有機物を利用する従属栄養藻類:有機物資源の制約が少ない。 		
	藻類大量生産関連技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 培養排液、残渣、下水処理水等の再利用による水資源及び栄養物質の節有効利用。 ● 大量生産を可能とする場所(農地、海域等)の確保と規制(漁業権、農地法等)の緩和。 		
	藻類抽出・精製技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 溶媒不要の抽出プロセスによる資源枯渇問題への貢献。 		
	藻類用途関連技術	<ul style="list-style-type: none"> ● すべての藻体を有効活用する手法の開発による資源枯渇問題への対応 ● リン回収システムによるリン枯渇問題への対応。 		

7.4. 技術ロードマップにおけるコスト目標の目安

現状において、コストを試算することは極めて困難であるが、液体燃料を例にこれまで見てきた事例からコスト計算に言及したのを見ると、以下のようになろう。

- NAABB:原油状態でコストは1L 44円
 - 1ガロン2.1ドル未満のオイル(Lipid)の生産=1Lあたり0.55ドル=44円
(1ドル=80円換算)
- Shiho et al.(2012);最終製品状態でコストは106円
 - 1L 130円のオイルの売価で計算すると、年間の売上高は2億9,220万円、営業利益は5,220万円であるため営業利益率は17.8%、コストは販売管理費と売上原価で82%であるため、1L 130円×82%=106円
- Solazyme社のターゲットコスト構造:燃料製品で1kg 80円
- 産業競争力懇談会のターゲット:1L 120円以下のコスト

以上のように、大よそコスト構造は最終製品なのか、原油状態なのかで異なる可能性があるが、最適な一貫システムの構築により、1L 100円程度の燃料を生産することは十分に現実的な目標として設定可能であるといえる。また、新発見による改善が進めば、十分にこの数字の達成を可能にするシナリオを描くことは可能といえる。

高い目標を前提に克服すべき問題点を数多く洗い出し、それらに総合的に取り組んでいく上でも、少なくとも原油状態で1L 100円未満のターゲットを設定することは、世界の動向を鑑みても妥当な判断であると考えられる。

第四章 農山漁村バイオマスファームの事業性について

1. 経済性からの検討

本章では、これまでの調査研究の結果をもとに、農山漁村バイオマスファームの事業性について検討する。閉鎖型、下水処理目的、オープンポンド型などさまざまなシステムが検討可能だが、まずは直観的に最も農業と類似性があるオープン型の培養システムについて検討する。

光合成藻類を用いたオープン型の培養システムを採用したケースのLCA分析による推計がなされているが、第一章、第二章での検討、第三章で議論した新知見による改善の可能性を想定すれば、オペレーションだけでみれば国内において採算が取れる可能性はある。第一章で試算したが、1L 50円で精製前のオイルを生産できると仮定すると、現在の技術により、乾燥重量当たり50%のオイル含量を持つ藻類から生産されるオイル量は30kL/ha、残渣30トンとして1kg 50円で販売すると、大まかに見て1haあたりの売上は300万円となる。米の生産者売上高が1haあたり150万円なので、その水準を上回っている。ただし、売上300万円では、仮に設備投資の償却負担を売上げの50%としても、1haあたり150万円であり、20年償却を前提とすると3,000万円、1m²あたりにすると3,000円の投資額となる。仮に、新知見により生産性が2倍に拡大し、売上が600万円となると6,000万円の投資となり、1m²あたりの投資可能額は6,000円となる。ビニールハウスの投資額が1m²あたり3,000円程度¹なので、ビニールハウスに準じた程度の施設が大半を占める培養システムへの投資が前提となる。

海外の事例と比較すると、この水準はさほど現実から乖離した投資額ではない。海外の事例なのであくまで参考だが、表2-2「Sapphire Energy, Inc.の概要とDOEの助成」で示したように、光合成でオープンポンドの培養システムについて、Sapphire Energy社は300エーカーのシステムをDOEから5,000万ドルの助成金、農業省から5,400万ドルの債務保証によって建設することを想定していた。1エーカーは約0.4haなので、120haの培養システムを約1億ドル(80億円)で建設することになる。1haあたりの投資額にすれば日本円で80億円÷120ha=1haあたり6,000万円となり、1m²あたりのコストは6,000円となる。20年償却であれば年間1haあたりの減価償却費負担額は300万円となるので、売上が1haあたり年間600万円だとすれば、売上の半分の負担で投資が可能となる。もちろん、実際の事業評価においては人件費等を考慮しなければならないが、投資額だけみれば、事業性が極めて困難であるとは言えない水準であるといえる。

ⁱ <http://www.miyata-bussan.jp/shop/house/index.html> によれば、間口3.6m×奥行18.0mのビニールハウス基本セット(パイプ、組立用部品、天井/腰巻ビニール各1枚、ハウスバンドなど必要部材一式(全て入口トビラ1箇所))が206,500円で購入可能。面積は64.8m²なので、206,500円÷64.8m²=3,186円/m²となる。

なお、Sapphire Energy社は「農作に適さない土地」での培養を想定しているため、水供給システムの導入や、土地の平坦化に伴う土木工事なども不可欠であると想定される。一方、わが国においては、耕作放棄地を利用すれば水の供給システムは完備されており、土地の平坦化の土木工事も必要がないので、Sapphire Energy社の事例と比較して大幅なコスト削減の要素も想定できる。したがって、米国の事例とはいえ、投資額の目安としては一定の意義を持つといえる。

より現実性のある事業評価を行うためにはSolazyme社のようにより高い付加価値の製品を同時に生産するか、より高い価格での買取制度を導入することが、国内の農山漁村での事業性を評価する上では重要になる。すなわち第6次産業化を進めることが重要である。

仮に、かなり高い生産性60kL/ha/年で、燃料の原料の売価が1L 100円、化学製品の原料の売価がSolazyme社のターゲットの上限である1L 400円として燃料と化学製品のそれぞれを30kLずつ販売すると、

30,000 L×100円/L=300万円 30,000 L×400円/L=1,200万円
合計で1,500万円の売上高となる。

売上高の3分の1を減価償却費負担として想定すると、500万円の負担が可能となる。20年償却で1haあたり1億円の投資が可能となる。その上で変動費や人件費を年間1haあたり1,000万円まで賄うことができる。よって、バイオリファイナリーによる高付加価値製品の同時生産ができれば、事業性はかなり現実的になる。

なお、米国の事例では120haという広大な土地を前提として試算されている。よって各種施設においては規模の経済が働いていると想定すべきであり、より小さい単位での生産はコスト高になる可能性が想定される。わが国の事情に合わせた最適投資単位についてより正確に把握するためには、実証実験等を進めていくことが不可欠といえよう。

これまでの試算には一切補助金が検討されていない。現状の補助金制度の適用可能性なども踏まえて、早期の産業育成を想定するのであれば、総合的な農業政策の中で振興策を検討していくことが重要であるといえる。

立地の検討には、工場や火力発電などのCO₂源や熱源の有効利用の視点が極めて重要である。初期の段階における実証培養システムは、CO₂や熱源の隣接地での開発が検討されよう。そうした立地で培養ノウハウを確立するとともに、CO₂源や熱源は残渣リサイクルなどによって独立的に循環させるシステムを確立することで、立地制約のハードルを引き下げることが、広範囲の立地で培養を行う上で不可欠な論点となる。

2. 関連規制からの検討

農地を転用した藻類培養事業を想定する場合、植物工場の事例が参考になろう。農林水産省によればⁱ、植物工場とは、「高度な環境制御を行うことにより、野菜等の周年・計画生産が可能な施設園芸農業の一形態であり、(ア)温室等で太陽光の利用を基本とし、人工光による補光や夏季の高温抑制技術等を用いて栽培する「太陽光利用型」、(イ)閉鎖環境で太陽光を用いずに栽培する「完全人工光型」の2つがあります。」としている。

藻類培養事業は、国内で実施されていない新たな事業であるため、農地の位置付けが不明確になる恐れがあるが、植物工場と同様に、オープン型、閉鎖型の双方の藻類培養事業を植物工場とすれば、農業生産の一環として取り扱うことは可能であると考えられる。培養法に土を使わず培養槽による培養を行うため、農業形態としては水耕栽培に近いものと考えられる。

ただし、効率性の観点から燃料や化学製品の原料の抽出を培養システムの現場で行うことの法的扱いについては不明確になる恐れがある。農地法では、耕作者主義にもとづき、農業を行うものに限って農地の利用(耕作)ができることとし、それ以外の者は例外を除き、農地を利用することができないことになっている。藻類の培養自体は農業であり、生産物が栄養食品などであれば問題は比較的少ないと考えられるが、藻類から燃料や化学製品の原料を抽出することが農業にあたるのか、その主体が農作者なのか、抽出施設を農地に立地させてよいのかという点が規制の整備上の論点になろう。

さらに、欠かせない論点として、農地の集約がある。米国での例では120haという広大な土地での培養が前提となっていた。濃縮・収穫、残渣リサイクルなどのシステムは、利用する容器などの規模が大きくなれば投資額あたりの処理量が大きくなるので、規模の拡大によるメリットが大きい。したがって、1haおきに濃縮・収穫、残渣リサイクルの施設を建設するよりも、かなりまとまった面積を対象に集中的に処理する大規模施設を建設したほうが経済性が向上する可能性が高い。したがって、そのような共有施設を利用する場合の利害調整や、共有施設の運用主体を誰が担うのか、権利義務関係を整理するために農地集約や農地の貸借を行うべきか、などについて最適なあり方を議論することが必要になろう。

そのほかの論点としては、海水を利用した場合の漁業補償、水質汚濁防止法に関して、内陸部に培養槽を設置し、コンタミネーション等の影響で一時的に海水を河川に放流する場合の取り扱いなどが重要な項目となろう。

ⁱ http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/plant_factory/index.html 農林水産省植物工場の普及・拡大に向けて

3. バーゲニング・パワーの視点からの検討

バーゲニング・パワーの視点から考えると、エネルギーの海外からの輸入価格の高騰やエネルギーの輸入そのものが困難になると予測されたときに、短期的に水田を藻類バイオマスファームへ変換するノウハウや、どの程度の変換がどの程度の期間で可能なのかを把握することが重要である。したがって、実際に生産するときの論点に加えて、いざというときに生産を拡大する体制の整備、および増産の規模の把握、そのような増産政策を推進するときの利害関係者の協力や同意の仕方についても論点を整理することが重要と考えられる。

4. まとめ

経済性の点では、事業化に長期的に取り組むことは十分に意義があると考えられる。したがって、事業化を想定して、農地の転用に関する最適な規制体系をさまざまな論点で検討しておくことが望ましい。実際に農地を藻類培養に利用する場合、これらの論点について、技術ロードマップの時間軸で、最終製品までのバリューチェーンの中身や必要とされる技術を鑑みながら、随時適切な判断をしていくことが重要である。そのためには、農業関係者が広く技術ロードマップ作りに参画し、議論を重ねていく仕組みが必要であろう。

平成 23 年度農山漁村 6 次産業化対策事業

平成 23 年度農山漁村 6 次産業化対策事業に係る緑と水の環境技術革命プロジェクト事業
農山漁村における藻類バイオマスファームの事業化可能性調査報告書

発 行 日：2012 年 3 月

編集責任者：筑波大学 生命環境系 教授 井上 勲

筑波大学 生命環境系 教授 渡邊 信

筑波大学 生命環境系 教授 彼谷 邦光

ジェイ・フェニックス・リサーチ株式会社 代表取締役 宮下 修

発 行 者：藻類産業創成コンソーシアム 理事長 井上 勲

印 刷：株式会社イセブ