

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

概要版

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

概要版

編集責任者

筑波大学 生命環境系 教授 井上 熱

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、液体燃料を作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、基本的な問い合わせ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マップ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いって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ましたが、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が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リ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リ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たいと思います。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 篤

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.....	2
3. バイオマスエネルギーとしての藻類の意義.....	2
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.....	4
1. 本報告書の調査フレームワーク(図 1-1, 表 1-1).....	4
2. 藻類バイオマスの潜在的魅力(可能性)の把握.....	6
2.1. わが国における潜在的生産規模推計の試み.....	6
3. 現在の技術による LCA 分析からの示唆.....	6
第二章 わが国の現状と課題の整理.....	8
1. わが国の現状と課題	8
1.1. 理想の連携の仕方を目指して	9
2. 利害関係者共有の課題認識の促進における海外事例.....	10
3. 藻類バイオマス研究開発の現状	10
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	11
1. 藻類バイオマス関連技術	11
1.1. バイオエネルギー生産に活用されている藻類	11
1.1.1. 産業で活用されている微細藻類	11
2. 藻類大量生産関連技術.....	12
2.1. 主な培養システムの利点と課題.....	12
2.1.1. 光合成培養.....	13
2.1.1.1. オープンポンド	14
2.1.1.2. フォトバイオリアクター	14
2.1.2. 従属栄養培養.....	14
2.2. 主な論点の整理	14
2.2.1. 光合成培養	15
2.2.2. 従属栄養培養	16
2.2.3. 光合成培養と従属栄養培養に共通する論点	16
3. 藻類濃縮・収穫関連技術	16
3.1. 微細藻類の濃縮・収穫	16
3.1.1. 凝集沈殿	17
3.1.2. 遠心分離法	17

3.1.3.	濾過法.....	18
3.1.4.	濃縮・収穫のベストミックスシステム.....	18
3.1.5.	排熱を利用した濃縮・収穫.....	18
3.1.6.	基礎研究段階にある技術.....	18
3.2.	液分の処理.....	18
4.	藻類抽出・精製関連技術.....	19
4.1.	主な抽出技術.....	19
5.	藻類用途関連技術.....	19
5.1.	藻類オイルの燃料化.....	20
5.2.	工業原料としての藻類オイル.....	20
5.3.	健康食品および化粧品への利用.....	20
5.4.	藻類オイル以外の藻類の有用成分.....	21
5.5.	最終残渣の利用.....	21
6.	事業評価における論点.....	22
6.1.	優先順位.....	22
6.2.	資本集約性および経済評価指標の検討.....	22
6.3.	品質保証・標準化.....	22
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.....	23
7.	事業化へ向けた技術ロードマップ.....	23
7.1.	藻類バイオマスファーム産業発展の理想の姿.....	24
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.....	25
7.3.	技術ロードマップ.....	26
7.4.	技術ロードマップにおけるコスト目標の目安.....	27
第四章	農山漁村バイオマスファームの事業性について.....	28
1.	経済性からの検討.....	28
2.	関連規制からの検討.....	28
3.	バーゲニング・パワーの視点からの検討.....	28
4.	まとめ.....	28

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。その恵みを人間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みられている。
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、産官学の間の連携の仕方、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マ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

- 化石燃料を基盤とする人類の活動は、地球温暖化、気候変動問題を誘起している。
- 近い将来、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、エネルギー資源をめぐる争いが激化すると思われる。
- 人口大国の新興国の目覚ましい経済発展を背景に、21世紀は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なければならないが、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。
- 日本が繁栄を続けるためには、独自の化石燃料代替エネルギーの開発が喫緊の課題である。
- 原子力を含むさまざまなエネルギーのうち、長期的には、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、エネルギー資源の枯渇問題および地球温暖化問題の解決が可能になる。
- わが国独自の再生可能エネルギーを開発することは、国際交渉力のカードとなるバーゲニング・パワー (bargaining power) を獲得することにつながる。再生可能エネルギーは、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できる。
- 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。 再生可能エネルギーの開発は、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

- 再生可能エネルギーの中でバイオマス・エネルギーは、以下の優れた特徴を有する。
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
- ③の特徴については、液体として、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、水素、メタンガス、固体として、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可能である。
- ジェット機を飛ばすには高エネルギー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ない。

3. バイオマスエネルギーとしての藻類の意義

- 第三世代バイオマスとよばれる藻類は、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く、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

に達する。

- 海水、淡水、汽水、排水、下水など多様な水資源を利用して培養することが可能で、水資源の制約が他のバイオマスと比較して小さい。
- 土地と水があれば、基本的にどこでも培養可能であり、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には、特に重要な特性といえる。

以上をまとめると、図0-1のようになる。



図 0-1 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

- 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ため、エネルギー以外にも、健康食品原料、医薬品原料、化粧品原料、種苗用飼料、天然食品添加物等、幅広い用途に関連する事業化の可能性が想定できる。ただし、本報告書では、国家的見地から見て最も重要な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。

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(図 1-1, 表 1-1)

- 藻類がもつ理論的最大エネルギー生産量(図1-1中の1)を基準として、現状の技術によるエネルギー生産量(同2)、エネルギー投入量(同3)を把握し、既存の知見技術の応用(同5)、近未来の技術開発(同7)でエネルギー生産量を改善していくというフレームワークで検討を進める。
- 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レビューする。
- このとき、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: net energy ratio)や産出エネルギー熱量あたりの温室効果ガス排出量の削減効果を考慮に入れ、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もレビューする。
- フレームワークの論点を検討した結果をまとめたのが表1- 1である。

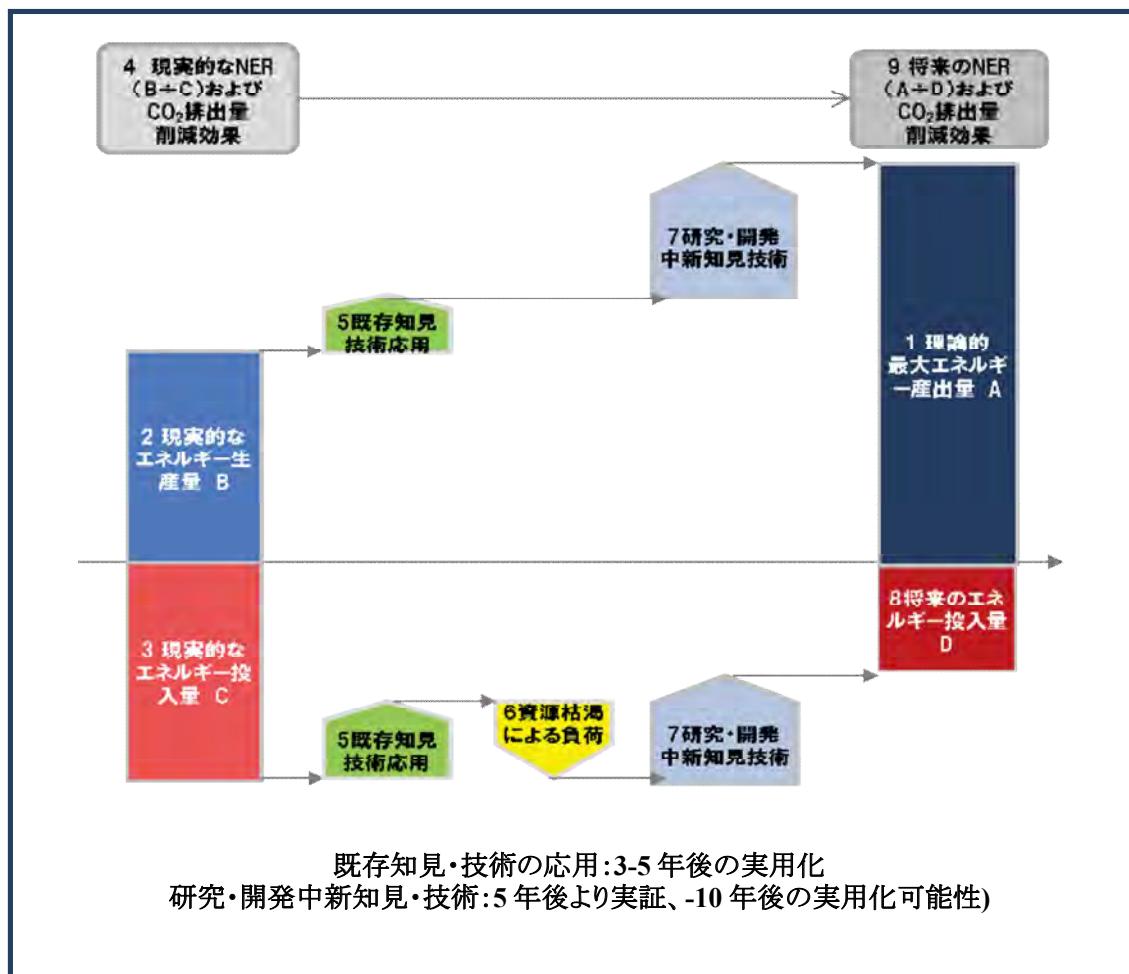


図 1- 1 本報告書の調査フレームワーク

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 ($NER=B \div C$)	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ガス排出量で計測。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 ($NER=A \div D$)	将来の改善可能性

- 表1-1で示した9つの論点は、図1-2の4つの視点に関連づけて整理できる。

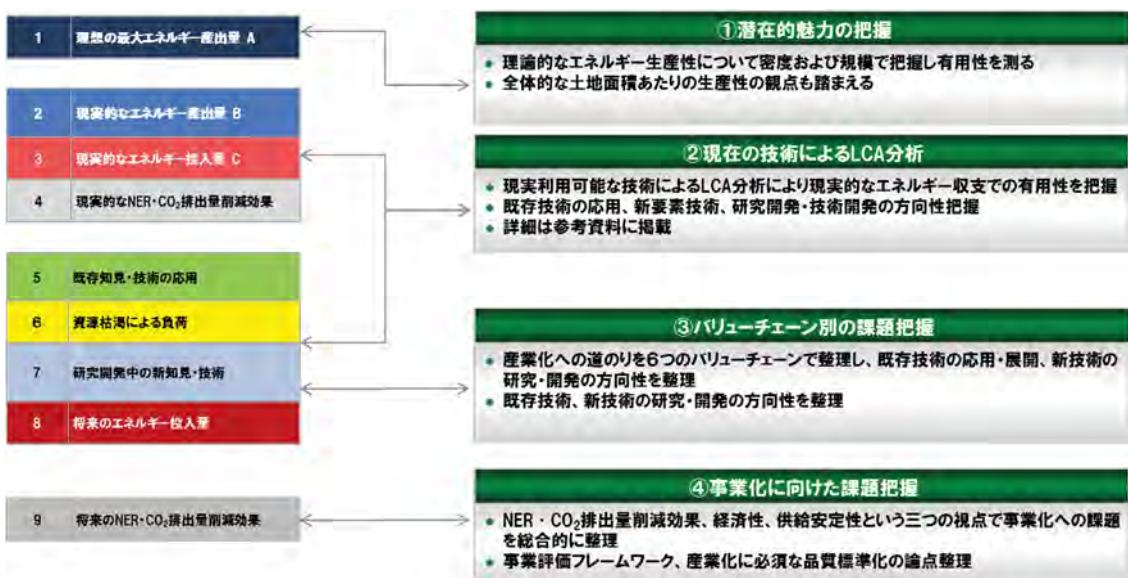


図 1-2 分析のフレームワークの論点の整理

- 4つの視点から、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。

2. 藻類バイオマスの潜在的魅有力(可能性)の把握

- Chisti (2007)ⁱとWeyer (2010)ⁱⁱ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明らかである。
- 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、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、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。

2.1. わが国における潜在的生産規模推計の試み

- Weyer (2010)を参考に、わが国の耕作放棄地ⁱⁱⁱ(約3,960km²=396,000ha)のすべてを利用する仮定し、推計を行ったところ、運輸部門のエネルギー需要の40%程度を賄う規模となった。
- これ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。
- 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。
- 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。
- 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。

3. 現在の技術によるLCA分析からの示唆

- 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をまとめた。
- 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つの論文のうち、Shiho et al. (2012)^{iv}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。

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

ⁱⁱ Weyer KM. et al. 2010. Theoretical maximum algal oil production. Bioenergy Research 3: 204–213.

ⁱⁱⁱ 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

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

- Shih 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、以下のようなになる。

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ペレット化して固体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、低成本の濃縮・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、嫌気消化とコジエ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。

- LCA分析から、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(藻類バイオマスマームの事業化)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。
- 藻類バイオマスマームの事業化は、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河川を中心平野が広がっているため利用可能な土地が比較的水平であること、である。これらの三つの要素は、藻類バイオマスマームの事業化に際して、注目すべき点である。
- 水田のために整備された水の供給インフラの活用は、藻類バイオマスマーム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。

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

- 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といえるが、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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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リング産業、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、技術が多岐にわたること、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。

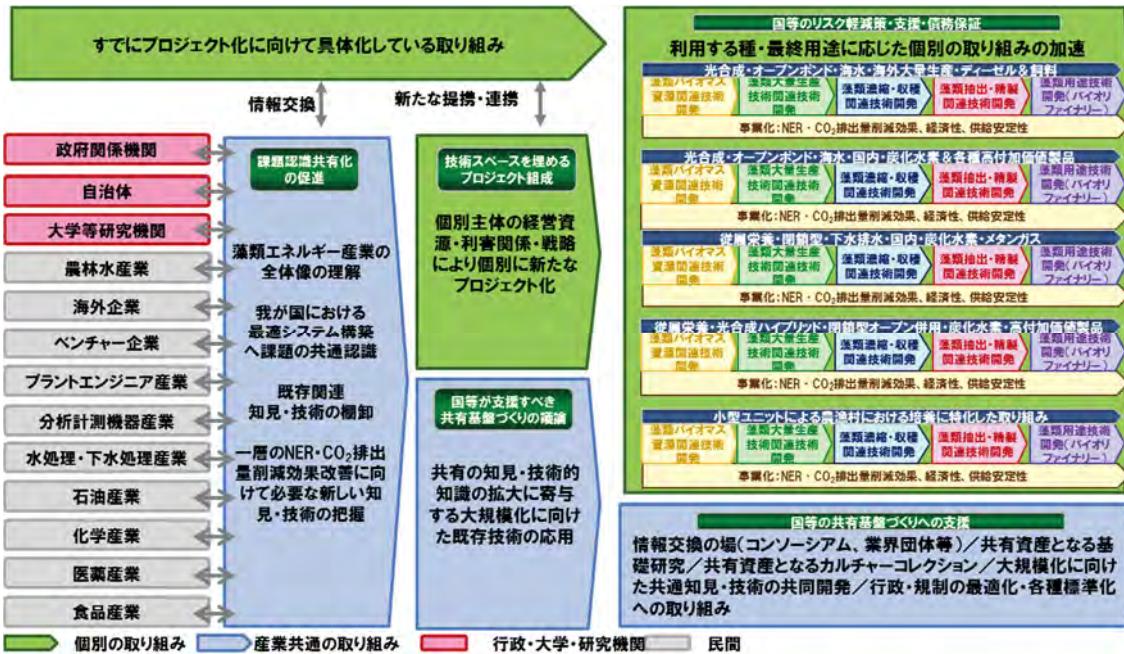


図 2-1 藻類エネルギー産業育成に向けた利害関係者の理想の連携の姿の例

1.1. 理想の連携の仕方を目指して

- 将来の新知見・新技術の開発を視野に入れ、関係者の情報共有を促進することが重要である。
- 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。
- 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、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不可欠であると考える。
- 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。
- わが国には、藻類バイマスエネルギーを産業化するための経営資源は十分にあり、関心も高いが、大規模な動きは限定的である。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。
- わが国の現状を整理すると図2-2になろう。課題について共有認識を確立し、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。
- 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

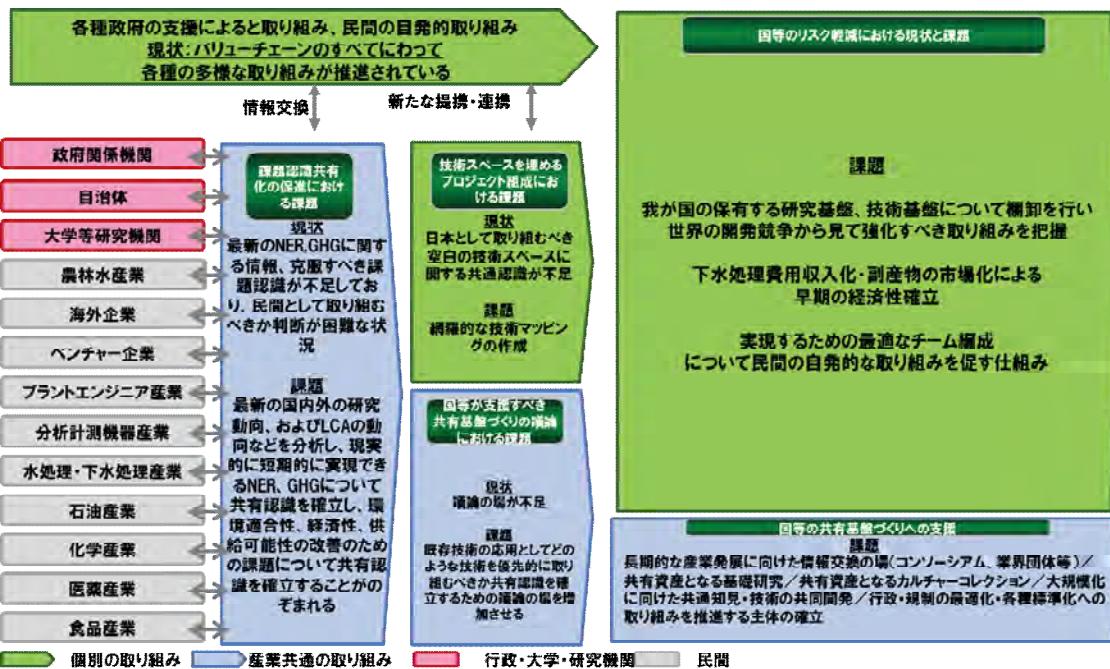


図 2-2 藻類バイオマスを利用した再生可能エネルギー開発におけるわが国の現状と課題

2. 利害関係者共有の課題認識の促進における海外事例

- 米国エネルギー省(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)の活動を紹介した。極めて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をしていることは、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。さらに注目されるのは、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。
- NAABBで基礎的な研究開発に資金を投じる一方で、DOEは2009年に三つのベンチャー企業、Sapphire Energy社、Solazyme社、Algenol社に助成を行っている。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。なかでもSolazyme社は、産業化のレベルに達しており、昨年5月には株式公開を果たした。わが国の藻類産業創成のモデルになり得る。
- このほか、フランス、韓国の最近の動きをレビューした。いずれも国家プロジェクトとして、総合的、網羅的な研究開発が急ピッチで進められていることが注目される。

3. 藻類バイオマス研究開発の現状

- わが国でも、政府関連の機構等において、さまざまなプロジェクトが進行している。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ている。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をまとめた(詳細は参考資料参照)。

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な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。

1.1 有用種の選定の研究・技術戦略	1.2 スクリーニング・コレクション	1.3 育種・改良
<ul style="list-style-type: none">1.1.1 選定基準の設定<ul style="list-style-type: none">1.1.1.1 想定する用途1.1.1.2 細胞構成の有用成分1.1.1.3 有用成分増殖率1.1.1.4 栄養源(N, K, P, その他)1.1.1.5 生育環境・生活環1.1.1.6 詳細培養条件(温度、pH、CO₂やO₂濃度、etc)1.1.1.7 耐性(塩分、酸、アルカリ性、温度)1.1.2 現状の有用種候補<ul style="list-style-type: none">1.1.2.1 光合成藻類の候補1.1.2.2 従属栄養藻類の候補1.1.2.3 混合栄養藻類の候補1.1.3 大量培養に向けた課題1.1.4 混合培養時の挙動1.1.5 環境への影響	<ul style="list-style-type: none">1.2.1 有用種スクリーニング技術1.2.2 純粹培養技術1.2.3 コレクション整備(藻類バイオリソースセンター)	<ul style="list-style-type: none">1.3.1 育種技術・突然変異体作成技術1.3.2 生物工学的改良<ul style="list-style-type: none">1.3.2.1 代謝工学1.3.2.2 遺伝子代謝工学1.3.2.3 酵素工学1.3.2.4 タンパク質工学1.3.3 光合成効率改善

図 3-1 藻類バイオマス関連の主な要素技術

- 藻類は進化過程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ために、藻類とその近縁生物は未開拓の生物資源と考えられる。したがって、有用種、優良株の探索とその活用を戦略的に推進する体制の構築が望まれる。

1.1. バイオエネルギー生産に活用されている藻類

- 生産物としてメタンとアルコール、水素、オイルに分類して、世界における研究開発の現状と課題をレビューした。

1.1.1. 産業で活用されている微細藻類

- すでに産業で活用されている、クロレラ、ドナリエラ、スピルリナ、ユーグレナ、ナンノクロロプシス、ヘマトコッカスについて、特徴をレビューした。
- これまでのところ、再生可能エネルギー資源として望まれる特徴のすべてを満たす藻類は存在しない。例えば、増殖率は高いが、オイル生産性が低いなど、各種トレードオフがある。
- 突然変異体創出や遺伝子改変等の技術で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、重イオンビームによる取り組みが注目される。
- 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ある。
- 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。

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 ● より光合成效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くみいれやすい。 ● 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。

- 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。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革新が望まれる。

2. 藻類大量生産関連技術

- 図3-2に、要素技術に関す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した。

2.1. 主な培養システムの利点と課題

- 微細藻類には、独立栄養性、従属栄養性、混合栄養性藻類があり、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、あるいはファーメンターが使われている。それぞれ利点と課題がある(表3-2)。

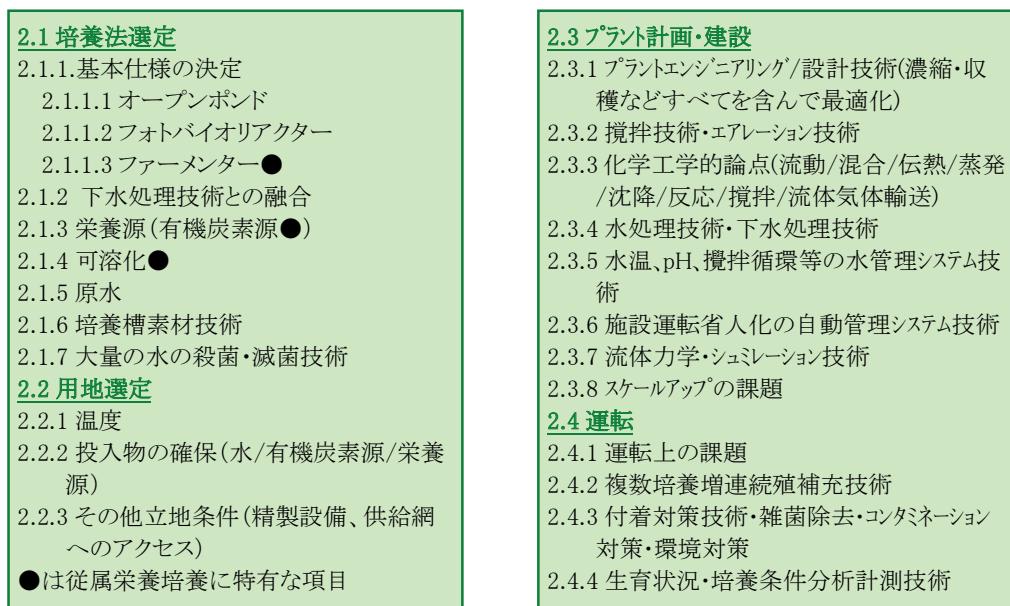


図 3- 2 藻類大量生産関連の要素技術

表3- 2 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 オープンボンド	<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 • バイオファ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

- 細胞濃度の変化に伴う培養中の光環境の変化、夜間における効率的な光合成について検討した。最適な光供給システムの開発が必要である。クロロフィル量を最適化した藻株の創出も検討すべき課題である。
- 冬期の培養のために、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である。
- CO₂・空気混合ガスの通気で、拡散とエネルギー消費の双方を踏まえた最適なバブルサイズを選定することが重要である。また、どのように高濃度のCO₂を確保するかが課題である。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が必要。

- 栄養塩となる肥料を低成本、省エネルギーで確保できるかが重要な課題。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、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。廃水中の病原菌や捕食者や増殖阻害を起こす重金属等の物質を除去する技術開発も必要。
- 搅拌・循環にかかる低成本化と省エネルギーのために、CO₂通気と搅拌・循環を統合する技術開発が望まれる。

2.1.1.1. オープンポンド

- 開放系では、コンタミネーションが問題となることから、特殊環境で生育する藻類に適した方法ともいえる。現時点では特殊環境で培養できる藻類は限定されている。最近は、ボトリオコッカスの除草剤耐性突然変異株が開発されており、現場での有効性の検証が待たれる。
- フォトバイオリアクターと比べて、藻類バイオマス生産性が低い。蒸発の問題は水分を供給するシステムの管理で解決できるが、光、温度、搅拌・循環に関する技術開発が必要となる。

2.1.1.2. フォトバイオリアクター

- 水分蒸発やコンタミネーションがほとんどない。高いバイオマスの生産性をもつが、コストが高い。夏場50°C以上の水温に上昇することから、冷却が必要。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を吊るすことで昇温を防ぐ方法は注目すべきシステムである。
- ガス交換が不十分だと、光合成で発生する酸素による阻害が問題になる。酸素ガスを効率よく排気、除去する技術・システムの開発が必要である。
- 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が必要である。殺菌効果のある塩素水を採用しているところが多いが、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。
- 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社はソフトプラスチックバックの使い捨てという方法で問題を解決しているが、大量の廃棄物を生む。これらの問題を克服する技術開発が必要とされる。

2.1.2. 従属栄養培養

- 日本では発酵工学分野で先端的な技術が蓄積されている。これらを生かして、ファーメンターの形状・構造およびシステムを低成本化、省エネルギー化する技術開発が必要である。
- 糖類等バイオマス生産に有用な有機物資源を低成本で、安定的に確保していくことが必要。

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- 3に示した。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。

表3-3 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・低成本の攪拌技術の開発 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 オープンボンドの風雨対策 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(素掘りのオープンボンド) 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 有機固体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

2.2.1. 光合成培養

- 生産性を高める培養設備の設計及び運転方法に関する論点:水温、pHなどの水質環境を適性な状態に制御したまま培養設備をスケールアップすることが必要。光合成効率の高い攪拌技術の開発、LEDや高効率集光システムによる光照射効率の向上も検討する必要がある。
- 低コスト化のための固定費削減に関する論点:未利用地の有効利用、低成本の攪拌技術、安価なライナーシート張り等による固定費削減が重要。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。格安で丈夫な素材の開発が待たれる。
- 低コスト化のための変動費削減に関する論点: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。排気ガスや下水排水等の利用、培養収穫後の培養液の再利用、藻体残渣からの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。
- コンタミネーション抑制に関する論点: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、小型フォトバイオリアクターを用いたコンタミネーションフリーの種藻の供給、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。

2.2.2. 従属栄養培養

- 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ないが、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。
- 下水中の有機固体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。

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オーカシング技術、食物連鎖によるオイル成分の生物学的濃縮収穫技術、固定化技術等新技術
- 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 3-3 藻類濃縮・収穫関連技術関連の主な要素技術

2.2.3. 光合成培養と従属栄養培養に共通する論点

- 効率的な大規模実証実験が望まれる。水処理産業のプラント・エンジニアリングが不可欠で、また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・収穫生産の主な要素技術を図に、今後開発すべき技術を表3-4に整理した。この領域は、工業用排水、下水処理などで長年の実績のある固液分離技術、水処理技術と密接に関わっている。実証の積み重ねで経験値を拡大していくことが重要と考えられる。

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、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を少なくとも10%以上の濃度に濃縮して収穫する必要がある。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。

表3-4 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
既存知見・技術の応用 (3-5年後の実用化)	<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搅拌技術 ➢ 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
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"> ● 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(imobilization) ● オイル成分の食物連鎖による生物学的濃縮技術

3.1.1. 凝集沈殿

- 净水処理で実用化されている方法。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調整も重要である。
- 微気泡を利用した浮上凝集法では、気泡サイズとその藻類培養懸濁体中の搅拌を最適化する技術の開発が必要とされる。
- 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、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である。

3.1.2. 遠心分離法

- 遠心分離法による回収は迅速で、エネルギー消費がやや大きい欠点はあるが、よく使われる。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。

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。フィルターサイズの最適化、フィルター材、濾過システムの設計、コスト・エネルギー収支の観点から検討した。

3.1.4. 濃縮・収穫のベストミックスシステム

- 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増加することができる。

3.1.5. 排熱を利用した濃縮・収穫

- 60°C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も利用できる。噴霧乾燥藻体は取り扱いやすく、利用価値が高い。

3.1.6. 基礎研究段階にある技術

- 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)やバクテリア等で活用されている固定化技術(immobilization)の適用が試みられているが、基礎研究段階であり、研究の発展が待たれる。また、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. 液分の処理

- 培養液分の再利用過程について、水質基準に適合した処理を行う必要性について検討した。

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/摩碎剤/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 3-4 藻類抽出・精製関連技術関連の主な要素技術

4. 藻類抽出・精製関連技術

- 藻類抽出・精製関連の主な要素技術および主な論点を整理すると図3-4のようになる。

4.1. 主な抽出技術

- 1)低エネルギー消費であること、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)低成本であること等が求められる。ヘキサン抽出、圧搾搾油、熱水抽出、超音波破碎、超臨界溶媒抽出などがあるが、これらの技術を組み合わせて使用する。
- 各抽出技術の長所と短所を整理し、課題を検討した。

表3-5 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、摩碎剤、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● 低成本クラッキング技術による改変● 低成本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、低成本化● 低成本・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

- 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あり、早急な検証プロセスの構築が望まれる。

5. 藻類用途関連技術

- 主な要素技術および主な論点を整理すると図3-5のようになる。

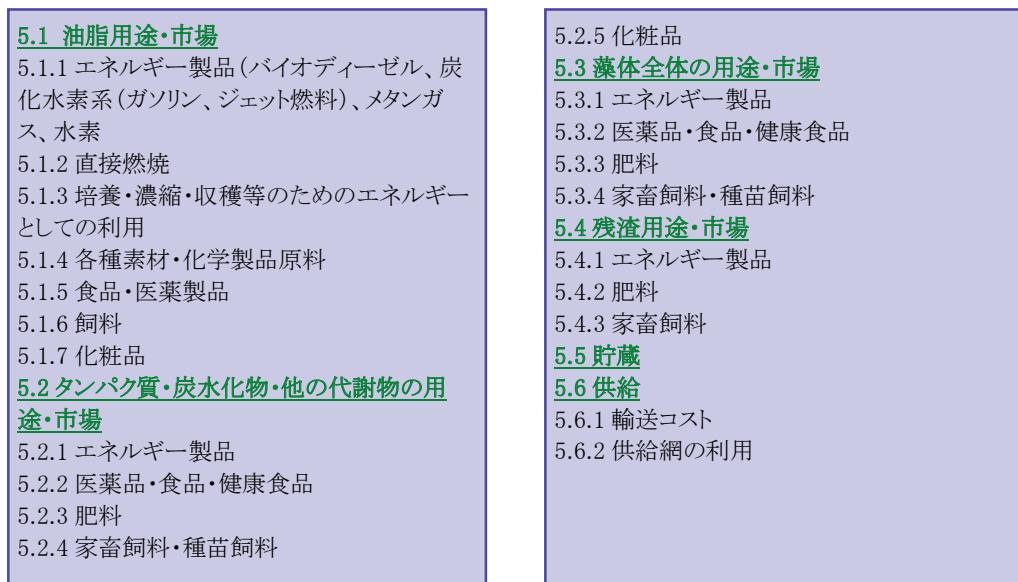


図 3-5 藻類用途関連技術関連の主な要素技術

5.1. 藻類オイルの燃料化

- 脂肪酸メチルエステルは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るが、包含する酸素原子がシリンダー内壁を損傷する原因となる。炭化水素に変換することも可能だが、直鎖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のスクワレンは、密度と表面張力は軽油とほぼ同程度で、動粘度は重油に近い。ディーゼル車の燃料として 70% 添加した走行時の燃費や排気ガス成分に変化はない。
- 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。

5.2. 工業原料としての藻類オイル

- 藻類の脂肪酸は高度不飽和脂肪酸が多く、高分子化が起きる。この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価値がある。
- 触媒クラッキングや熱分解によって、藻類炭化水素であるボトリオコッセンやスクワレンから石油化学産業で生産されるほとんどの化合物をつくることが可能である。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、代替できる。

5.3. 健康食品および化粧品への利用

- 藻類の ω (オメガ)-3脂肪酸のDHA(ドコサヘキサエン酸)やEPA(エイコサペンタエン酸)は、健康食品としての価値が高い。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。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。
- 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。天然色素や抗酸

化剤として活用できる。

- ラビリンチュ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・蓄積することから、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。
- ボトリオコッ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中の有用成分の活用について具体的に検討した。
- 抗酸化性の強いカロテノイドを大量に蓄積する緑藻や、新規構造の有機化合物の存在が明らかにされている。さまざまな有用成分が知られており活用が検討されるべきである。

5.5. 最終残渣の利用

- 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。
- 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。
- 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が想定される。

表3-6 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 資源枯渢問題への対応
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
資源枯渢問題 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渢問題への対応● リン回収システムによるリン枯渢問題への対応

- 以上の用途開発は、新規用途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。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。

6. 事業評価における論点

- 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国家安全保障上の方策の選択肢の一つになり得る。
- 微細藻類による产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。エネルギー収支の観点からは、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することに注意しておく必要がある。
- 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。残渣のエネルギーとしての利用で、NERは1.5～2倍になると思われる。
- 複数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、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、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。
- 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。
- 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、一步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、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、事業としてなりたつことが困難である。
- 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。また、資本集約性の特性を考慮した経済評価指標を導入することが重要である。

6.3. 品質保証・標準化

- 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、特に既存製品の代替の場合はその重要性が拡大する。
- 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、そのような仕組みを構築することも重要な課題である。

- 藻類オイルが、大量生産のラインに乗るには、原油としての品質保証が必要である。
- 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が、藻類オイルに適用できる手法は存在しない。
- 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、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。
- 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。よって、当コンソーシアムにおいても図3-6ⁱに示すように、今後の課題として取り組みを検討していくことも重要であると考える。

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、ハードルが低い。LCA分析から、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。

7. 事業化へ向けた技術ロードマップ

- 藻類の産業創成は、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。
- 単なる技術論ではなく、関係する利害関係者の間での情報共有化なども含めた姿について考察する必要がある。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考える。
- 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、の三つの視点を軸に、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。

ⁱ 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

① 原油の品質及び信頼の担保
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。
② 国内法への円滑な対応
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。
③ 国際的な流通への貢献
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。

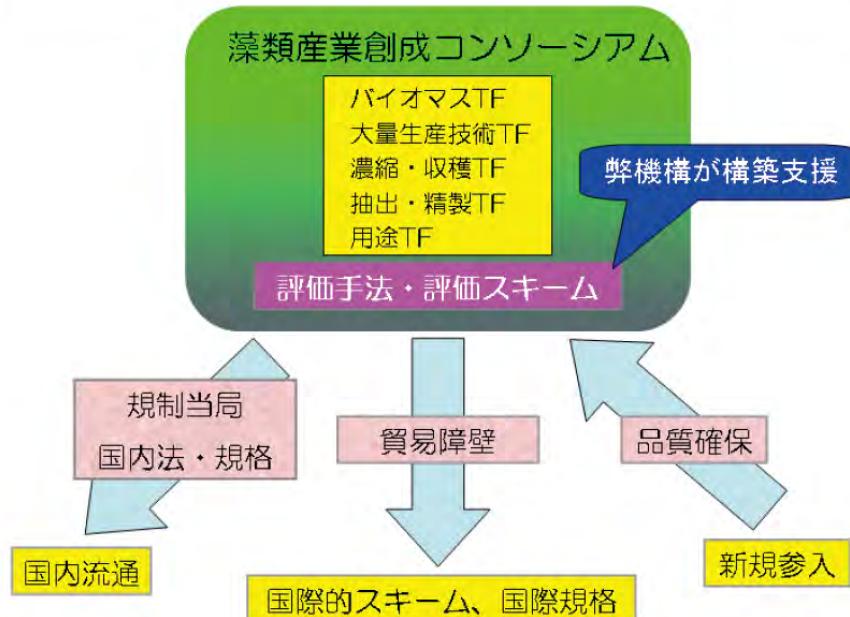


図 3-6 藻類バイオマス産業の品質保証・標準化への対応策の例

7.1. 藻類バイオマスマーケット開拓の理想の姿

- 図3-7が「藻類バイオマスマーケット開拓の理想の姿」である。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。
- 利害関係者が持っている知見・技術は多岐にわたるため、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。
- 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。
- 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、藻類バイオマスマーケットにおける事業戦略を適切に構築できるようになる。
- 共通認識を踏まえて、最終的に事業化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。

- 以上のような枠組みにより、各利害関係者が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、長期的な発展へつながっていくと考えられる。
- 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、わが国としても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、それらをなるべく活用し発展させることが重要である。

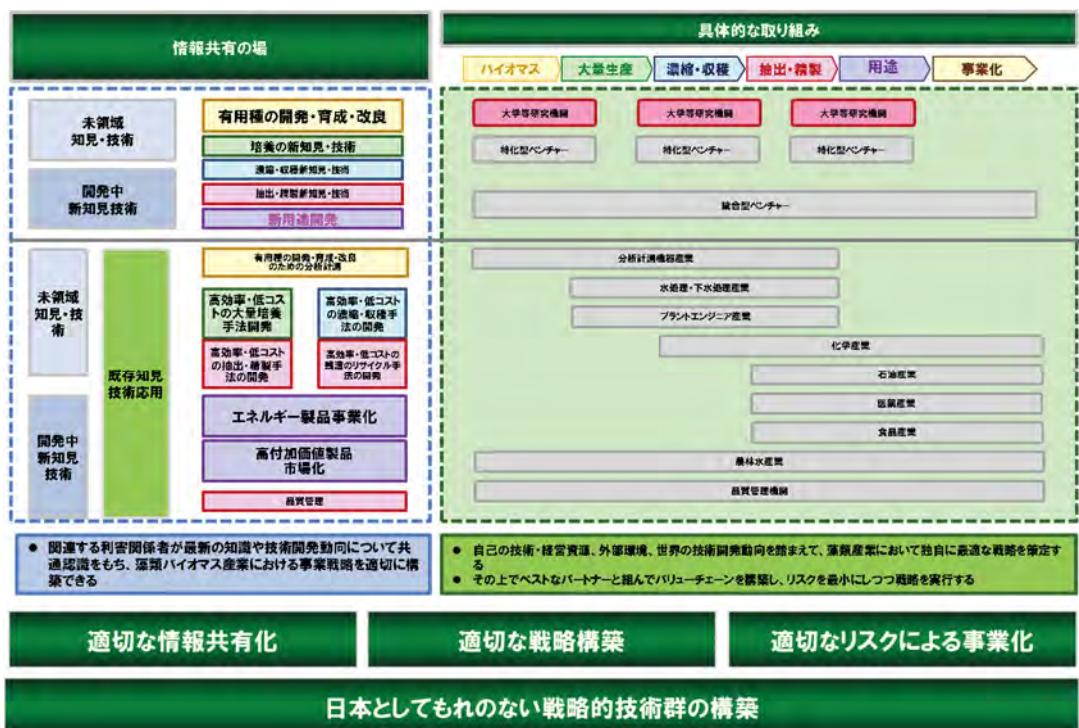


図 3-7 藻類バイオマスファーム産業発展の理想の姿

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の発展には、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日本としても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。
- 「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、情報

共有化の場として機能することができる。

- 「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
- 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的確な判断を行うことが可能になる。
- 「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。
- 「日本としても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に実施し、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。

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3-8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ワークを想定し、作成したものである。今後のさらなる新知見技術により、想定よりも大幅に早まることや、また、技術的障害の克服の遅れで大幅に遅れるることは十分にあり得る。
- 2012年度においては、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。また、最適な培養環境を実現するためには、大量の水を低成本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。
- 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。

- 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。

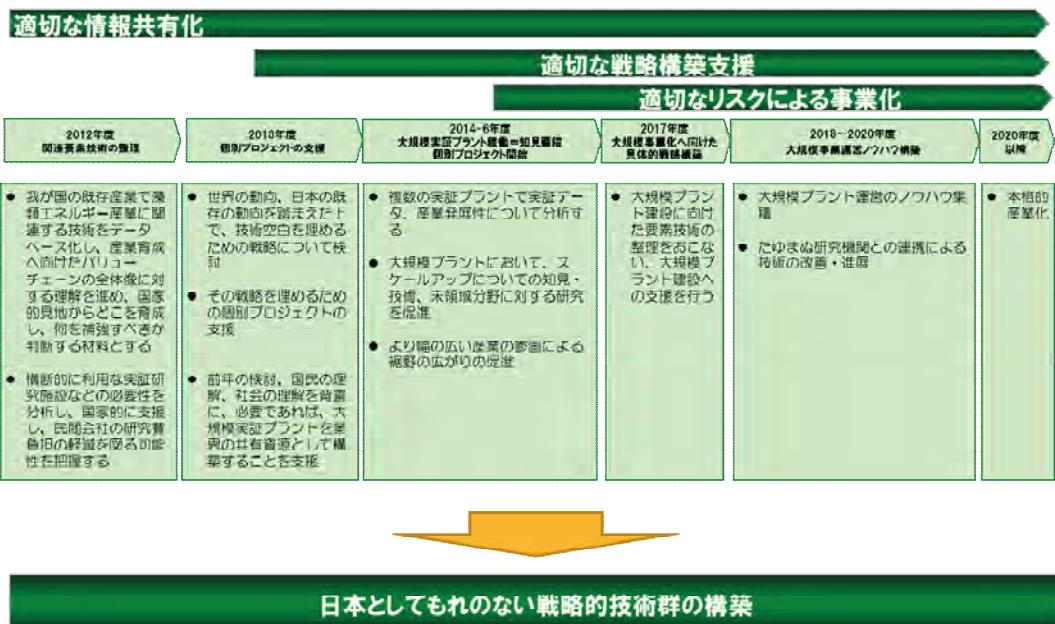


図 3- 8 藻類バイオマスファーム産業育成のための技術ロードマップ(産業発展ロードマップ)

個別の要素技術までに整理したロードマップについては、報告書正本を参照。

7.4. 技術ロードマップにおけるコスト目標の目安

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、1リットル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、新知見による改善が進めば、充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1リットル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妥当な判断であると考える。

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

- 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場合、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。
- 早期の産業育成には、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。
- 初期段階では、工場などCO₂や熱源の隣接地での開発が必要。長期的には、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が、広範囲の立地で培養を行う上で不可欠な論点となろう。

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。
- 藻類培養事業は新事業であるため、農地の位置付けが不明確になる恐れがあるが、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と考えられる。
- 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おそれがあり、事前の対策が必要である。
- 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。そのために農地を集約することが望ましい。
- 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。

3. パーゲニング・パワーの視点からの検討

- エネルギーの輸入価格の高騰や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の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。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、農地の転用に関する最適な規制体系を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、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、隨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、議論をかさ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 概要版

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