

福島藻類プロジェクトから見えてきた燃料生産シナリオ

宮下 修

95円/Oil-L達成の道筋と課題

一般社団法人 藻類産業創成コンソーシアム（以下、AICC）は、2012–2015年度まで福島県から再生可能エネルギー次世代技術開発事業を受託し、「土着藻類によるバイオマス生産技術の開発」を福島県南相馬市の耕作放棄地において実施した。寒冷地の野外1000 m²の開放培養池における実証データに基づき、10 haにスケールアップした精製後の最終燃料のコストとして95円/Oil-Lという水準達成の道筋を示すことができた。筆者は、同事業において総合解析タスクフォースの幹事企業として参加し、エネルギー収支、コスト推計などに関与してきた。本事業における95円/Oil-Lを達成する燃料生産シナリオについて要点を示し、その実現の課題について論じる。なお、この成果を受けて、さらにAICCは、経済産業省資源エネルギー庁 平成28年度「微細藻類燃料生産実証事業費補助金」にて補助金事業者として採択を受けて事業を推進している（文献1参照）。

三つの特徴的な技術戦略

戦略1：土着藻類による高い生産性の実現 本事業では、特定の種ではなく、もともとその土地の気象と環境の中で適応して棲息している土着の藻類を何種類も増殖させ、大量培養する方法を採用した。通常は増殖が速く、オイルの生産性が高い特定の藻類を利用した戦略が採用される。しかし、この方法では、藻類の特性に合わせた環境条件を整える、他の藻類が増えないよう管理するなど、コストと手間がかかる。また、そのような藻類は、温暖な気候を好む場合が多く、特に日本では、気温の下がる冬は藻類の成長が止まるという課題もある。そこで発想を転換し寒冷地である南相馬において土着でもっとも成長の早い藻類を培養する手法を採用した。無機栄養塩（窒素やリンなど）に加え酢酸を添加すると、大幅なバイオマス生産性の向上が得られた。水深80 cmにすることで、研究者の間で実用化を目指す最低の条件とされている1 m²あたり1日20 gを軽く超え、南相馬の寒い冬でも土着の藻類は周年を通じて生産量は1 m²あたり1日30 gという非常に高い成長性を示した。これは100 t/ha/年を超える生産性となり燃料生産にとって

大きなプラスである。

戦略2：水熱液化の採用 藻類の増殖は達成したものの、抽出できるオイルは重量のわずか5–6%であった。通常、燃料生産の対象となっている各単一藻類種ではオイル成分が30%以上であることから、5–6%という数字は非常に少ない。そこで、藻類からオイルを抽出する工程で高温高压処理する「水熱液化」の技術を採用した。地殻において高温高压化で生物の有機物が何億年もかかり石油へと生成される条件をいわば人為的に再現する技術である。この技術によりもともと含まれているオイル成分以上のオイル生成が抽出工程でなされ、藻類中に含まれる有機物の30–40%をオイルとして回収することに成功した。水熱液化でできたオイルは原油と同質であることから通常原油の精製技術を利用することで最終製品となる。いわゆるdrop in fuelと呼ばれる燃料である。水熱液化を利用することで、オイル生産性が向上し、さらに、既存の燃料インフラを利用できるという二つのメリットを享受できることが確認できた。

戦略3：下水・水熱液化の廃液利用 戦略1ですすでに説明したが、無機栄養塩（窒素やリンなど）に加え酢酸を添加することで、通年で非常に高い生産性を実現できる。しかし、添加物を購入することで培養コストは跳ね上がる。そこで、下水や廃液の利用により培養コストが大幅に削減できる可能性を検討した。その結果、本事業の土着藻類は、下水で増殖し、また、水熱反応の副産物である廃液に含まれる廃有機酸が、酢酸代わりに利用できることも確認できた。これにより藻類の水熱液化の抽出過程で生まれる廃液のリサイクルに加え、麦わらなどの未利用バイオマスを利用することも可能となる。さらに、非常に重要なことであるが、そもそも下水で藻類を培養するという事は、窒素やリンなどを除去し下水を浄化していることになる。よって、下水処理の費用を、収入として得る可能性があり、それが実現すれば大幅なコスト削減となる。また、リンの除去技術は、リン回収技術に他ならないため、リン枯渇問題への対応というメリットも得られる。

スケールアップの前提と現時点でのコスト試算結果

培養・濃縮・抽出・精製の前提 実証実験の結果を

踏まえて1000 m²のデータを10 haにスケールアップした場合の前提を培養・濃縮・抽出・精製についてまとめたのが表1である。すべて南相馬の1000 m²培養施設のデータなど、本事業で得たデータをもとにしている。外部から培地、栄養塩などは購入している前提となっている。CO₂は、将来的には火力発電の排ガスを利用することでコストはゼロと仮定した。

設備投資，その他経費などの前提 実証実験でのコストをスケールアップして試算している。主な前提は表2にまとめている。

現時点での試算結果4137円/Oil-L 表1・表2を前提にしたコスト試算の結果を示したのが表3である。4375円/Oil-Lとなった。とても採算の得られるコストではないのが現状である。内訳は、栄養塩、残渣リサイクルが2573円、設備投資1130円と非常に大きなウエイ

表1. 培養・濃縮・抽出・精製の前提

培養槽	深さ1 m × 10 ha, 水量80 cm × 10 ha = 80,000 m ²
生産性	30.0Algae-DWg/m ² /d, 1 haあたり換算すれば110 t/y 5% CO ₂ を0.1 v/v/min. で日中のみ通気 毎日20,000 m ₂ 回収
栄養塩等	K1000培地, アンモニア, 酢酸を添加
攪拌	水車を利用した技術を前提にスケールアップする場合を想定し保守的に45 cm/sで試算
濃縮	一次濃縮：遠心分離機を使用して0.03%を100倍濃縮して、3%へ。 二次濃縮：ステンレススチール製ドラム式圧縮脱水機20%以上の濃縮達成。回収率80%
水熱液化	20%以上濃度のスラリーを投入、灰分24.2%前提。37.2% Oil/ash-free DW
精製	アセトン抽出を利用。精製コスト原油熱5%をエネルギーとして利用（産出バイオオイル熱量：34.12 MJ/kg）すると想定

表2. 設備投資，その他経費などの前提

培養層	コンクリート製。1 m ² あたり6万円、償却年数30年。
設備投資	機械設備投資は0.3 haで1億円程度のコストであるとの前提に0.8乗法則でスケールアップ：10 haで16億円程度と推計。減価償却年数15年
各種コスト	残渣処理：1 kgあたり35円, 電力コスト：25円/kWh, 重油単価：65.3円/L
経費	人件費：300万円/一人/年, 経費はほぼ人件費見合いとして4万円/日, 5名×300万円÷365 = 約4万円

トを占めている。この二つのコスト削減が大きな課題となる。培養槽はコンクリート製では非常にコストがかかることがわかる。培養槽の素材コストの引き下げが重要な課題となる。

コスト削減戦略と95円/Oil-Lの実現シナリオ

コスト削減戦略の概要 コスト削減戦略として五つを採用した。第一は、栄養塩コストの削減である。下水処理水を利用することで、培地、栄養塩などのコストが75%削減されるとした。第二が下水処理費用収入の計上である。現在の下水処理費用から見て50円/m³の収入があると試算した。第一と第二が、前述した「戦略3：下水・水熱液化の廃液利用」の効果である。第三が攪拌スピードの低下である。45 cm/sから15 cm/sに培養技術向上で低下させエネルギー消費を抑制するという前提にした。第四が水熱液化の回収率の向上である。これによりオイルの生産量が増大するため、按分計上される固定費が1リットル当たり削減される。第五が、培養槽コストの削減である。海外では、土にビニールライナーを張って培養槽にしているケースが多い。これらのケースの費用などを勘案して試算した。

95円/Oil-Lのシナリオ 五つの効果をまとめたのが表5である。すべて合計すると4042円の削減効果が見込め、結果として4137円/Oil-Lが95円/Oil-Lとなる。

表3. 4137円/Oil-Lの内訳

①培養・回収・濃縮・抽出・生成	326円
②栄養塩・残渣リサイクル・排水	2573円
③設備投資減価償却	1130円
④人件費・その他経費	108円
合計	4137円

表4. コスト削減戦略

1. 栄養塩等	培地の代わりに下水処理水を利用し、培地の費用を75%削減 水熱液化技術などで藻類バイオマスおよび未利用バイオマス資源で酢酸・アンモニアのコスト70%削減
2. 下水処理	毎日20,000 m ³ を処理、処理費用として下水処理収入単価が50円/m ³ が売上として計上
3. 攪拌	15 cm/sに改善
4. 水熱液化	44.8%まで最大で回収率が改善固定費削減効果に寄与
5. 培養層コスト	ビニールライナーを培養槽に採用

表5. コスト削減戦略の効果 (円/Oil-L)

1. 栄養塩等	1980円削減
2. 下水処理	1104円削減
3. 攪拌	173円削減
4. 水熱液化	19円削減
5. 培養層コスト	766円削減
合計	4042円削減

効果のうち戦略3の効果は1と2の合計で、3084円もの金額となる。

高付加価値商品の並列生産の効果分析

南相馬市で生産された藻類を遠心分離機で濃縮し、その後の藻類を含む培養液で実験を行った結果、作物の種子発芽および成長を促進することが判明した。植物成長調整剤として商品化できればこれらは1kgあたり1万円から1.5万円程度での販売が可能と見られている。仮にオイル生産量の10%が高付加価値製品(1.35万円/kg)となるとしてコスト削減効果を試算したのが以下の表である。1100-1200円ほどの削減効果がある。下水量収入に匹敵する効果があるといえる。

エネルギー収支の試算

水処理収入による総合的なコスト削減が重要な課題であるが、このことはエネルギー収支にも大きな影響を与える。国土交通省によると2010年度において下水処理に必要な電力は0.267 kWh/m³と試算されている。下水処理を完全に代替し、この電力エネルギーが削減されるという前提で簡易的にエネルギー収支を試算したのが表6である。エネルギー収支が1.4倍となった。なお、CO₂収支は、データ不足などもあり、今回は厳密には、計算は行っていない、2016年度からの事業における課題としたい。

事業規模 200 haで200億円の売上高

生産コストは1リットル100円を目指す、世界的にバイオマス由来の燃料は今後政策的に需要が高まることが期待されるため、簡便的に販売価格は1リットル200円をベースにたとえば、200 haで事業化する前提で、売上ベースで試算するとおよそ200億円程度の事業規模となる。10 haは中規模大学キャンパスの広さであり、日本でも十分に利用可能な大きさである。

表6. コスト削減戦略の効果 (円/Oil-L)

A. 一日当たりオイル生産量	815.0 Oil-kg/d
B. オイル熱量	34.12 MJ/Oil-kg
C. 下水処理電力削減量	0.267 kWh/m ³
D. 電力効率35%でのMJ/kWh	10.29
E. 下水処理量	20,000 m ³ /d
F. 算出エネルギー (F=A×B+C×D×E)	82,734 MJ/d
G. 培養~濃縮電力消費	5,279 kWh/d
H. 水熱液化・精製の消費熱量	3,849 MJ/d
I. 投入エネルギー (G×D+H)	58,146 MJ/d
J. エネルギー収支 (F/I)	1.42 倍

事業化に向けた技術開発・事業化シナリオ

今後3年程度のシナリオ これまでの実証成果を踏まえて、今後3年間の技術開発の重点課題は以下のよう
に列挙できよう。

- 1) 藻類増殖用肥料(栄養塩、酢酸など)のコストの軽減(下水の利用および残渣・栄養塩のリサイクル技術)
- 2) CO₂コストの軽減(排ガスの利用技術)
- 3) 厳寒期における温度調整および乾燥にかかる経費の軽減(排熱の利用技術)
- 4) 藻類バイオマス生産システムからの排水処理にかかるコストの軽減(下水利用技術の最適化)
- 5) 藻類バイオマス生産・燃料化にかかるコストの削減(攪拌技術・水熱液化技術の最適化)
- 6) 培養プラント建設経費の軽減(ビニールライナー性培養槽へ改良)
- 7) 人件費にかかる経費の軽減(IT技術導入)
- 8) 雑藻集団からの高付加価値製品の開発と市場導入(特に乾燥が必要なので、3)が重要となる)

1)~4)には、下水・排ガス・排熱利用システムを構築するとともに、残渣からの栄養塩リサイクル技術を開発することが必要である。5)は水熱液化・攪拌技術の最適化、6)は水田形状を活用した安価なビニールライナー性状の培養システムの適用が必要となる。7)はICT技術の導入が有望である。8)はすでに雑藻集団のアグロサイエンスなど高付加価値製品化技術開発が進みつつある。最終的にはアグロサイエンス製品の市場導入・販売状況を評価した藻類燃料のビジネスモデルを策定することとする。

長期的な事業化シナリオ：コロケーション 藻類バイオマス培養と下水処理の最適化、また、CO₂は火力発電所からの排ガスを利用することが事業化のためには非常に重要な前提となる。下水処理施設、火力発電所と隣接した総合的なエネルギー・リサイクルコロケーションを実現することが本事業の研究結果を産業化するためには重要となる。具体的には、コロケーション実現のための課題の社会的インフラ整備の視点での洗い出しを進め、そのうえでコロケーション実現のための各種規制課題への取組みを行い、社会的・地域的な取組みを進めるために関係者への理解の浸透を図っていくことが重要である。各種規制の課題のクリア、社会的・地域的な取組みの理解が醸成された時点で、コロケーション実現に向けた動きを本格化させていくことが想定されよう。

火力発電所・下水道施設の隣接 コロケーションの最適化の検討にあたっては、さまざまな主体との連携が想定される。南相馬の実証施設の近隣には、原町火力発電所が立地することから、可能であれば、同火力発電所の協力のもと排ガス利用、および排熱の利用システムによる温度コントロールの適正化を研究することは非常に有用である。一方、下水道施設利用モデル案の一例および参考データとして論点は以下のようにまとめられる。

- ①下水処理場の敷地内および近接空地に藻類培養施設を建設(住宅・農地の周辺環境、住民感情などへの要配慮)
- ②下水処理場の既存施設・装置の有効利用(沈殿池、汚泥濃縮・脱水機、汚泥消化・焼却施設、処理水消毒・放流監視など)
- ③地域基幹となる下水処理場に収穫した藻類を集約し、原油を生産。同時に各種バイオマスによるエネルギー生産拠点とする。
- ④水熱液化プラントは下水処理場内の空地进行を借用、建設(技術的・法的課題要調査)

下水道施設にとってのメリットは以下のようにまとめられよう。

- メリット1：藻残渣廃液を各種バイオマスとともに汚泥消化槽などで資源化でき、栄養素のリサイクルが容易
- メリット2：水熱液化装置の加熱源として、汚泥焼却炉排熱や消化ガスの活用
- メリット3：藻残渣汚泥を下水汚泥と共同処理・処分(廃棄物処分、放射能など)

世界的な類似研究

水熱液化と下水処理を組み合わせた実証研究は、本事業以外にも世界的に進められている。最新の事例として米国のパシフィック・ノースウエスト国立研究所の研究があげられる。研究成果は文献2)に詳細にまとめられている。下水処理水を利用して藻類を培養し、そのうえで水熱液化を利用して原油を抽出するという研究である。水熱液化によるオイル回収率は45%となっており、本事業のベストケースと同水準である。実際の自治体の下水処理施設からの汚泥を利用し実証研究した。コストの試算においては半径100マイルの地域の下水処理水を利用し、10か所の水熱液化プラントで原油を精製、その後1か所の原油精製所で最終的な燃料を精製することが前提となっている。下水処理費用を収入として試算した結果、原油はUS\$3.8/ガロン、最終製品はUS\$4.9/ガロンとなった。リットルおよび円換算(1\$ = 110円)に換算すると原油で110円/Oil-L、最終製品で142円/Oil-Lとなる。ほぼ本事業と同じ結果が得られていることは興味深いといえる。

結 論

本事業では、三つの特徴的な戦略により、95円/Oil-Lという事業化が可能なレベルにまで燃料生産コストを引き下げる道筋を示すことができた。ただし、この実現には、下水処理施設、火力発電施設などのCO₂排出、熱源の施設との連携が、すなわちコロケーションが必要となる。実現すれば、循環社会の実現、CO₂削減への寄与に貢献するだけでなく、寒冷地においても産油が事業化できるという意味で、エネルギー保障上の意義、また寒冷地における雇用創出の視点から意義がある。この成果を受けて、すでに述べたように、さらにAICCは、経済産業省資源エネルギー庁 平成28年度「微細藻類燃料生産実証事業費補助金」にて補助金事業者として採択を受けて事業を推進している。その成果が期待されよう。

文 献

- 1) 一般社団法人 藻類産業創成コンソーシアム：<https://algae-consortium.jp> (2017/2/15)
- 2) Snowden-Swan, L. J. et al.: *Hydrothermal Liquefaction and Upgrading of Municipal Wastewater Treatment Plant Sludge: A Preliminary Techno-Economic Analysis*, Pacific Northwest National Laboratory (2016).