

一般財団法人 油脂工業会館

第48回表彰

油脂産業優秀論文

最優秀賞

油脂産業と持続可能な社会づくり

「カーボンポジティブ」を達成する油脂製造システムの構築

日油株式会社

はせがわ たけし

長谷川 健

もりかわ としゆき

森川 稔之

平成29年2月21日

〒103-0027 東京都中央区日本橋3-13-11

一般財団法人 **油脂工業会館**

☎東京03(3271)4307 (代表)

<http://www.yushikaikan.or.jp>

目 次

はじめに	1
第 1 章 持続可能な社会の実現	
1-1 持続可能な社会と技術の進歩	1
1-2 二酸化炭素と地球温暖化	1
1-3 カーボンポジティブとカーボンネガティブ	2
第 2 章 油脂産業の実状	
2-1 油脂産業と低炭素社会のこれまで	3
2-2 カーボンポジティブな油脂製造に向けた課題	3
第 3 章 新規の油脂製造理念と実現のための技術	
3-1 新規の油脂製造理念	4
3-2 二酸化炭素を利用したエネルギーの創出	4
3-3 E C O F F 実現のための油脂製造法	5
3-4 E C O F F 実現のための油脂製造システムの概要	6
第 4 章 E C O F F 実現のための油脂製造システムの全容	
4-1 藻類による油脂製造	6
4-2 コージェネー燃料電池発電システムによる エネルギー生産と副産物	7
4-3 季節を加味したシステム運用	8
4-4 E C O F F 実現のための油脂製造システムの全容	9
第 5 章 油脂製造工場の生産能力	
5-1 油脂生産量	9
5-2 エネルギー収支	10
5-3 事業性	11
5-4 本工場による二酸化炭素の排出量削減への貢献	11
おわりに	12
参考文献	13

はじめに

日本をはじめとして、科学技術の目覚ましい進歩は人々の生活レベルの向上を実現した。しかしその発展の裏で、使用するエネルギーは増加の一途を辿り、石油や石炭などの化石燃料は100年以内に枯渇すると言われて¹⁾。更に、エネルギー生産に伴う温室効果ガス、特に二酸化炭素の大気中への排出が年々増加し、地球温暖化が深刻な問題となっている(図0-1)²⁾。

このように、これまでの技術進歩は生活を豊かにする反面、その代償として地球環境を変化させ、オゾン層の破壊や動植物の絶滅など、宇宙船地球号に深刻なダメージを与えてきた。我々が生きる上で、もはや地球環境を無視することはできず、問題解決に向けてその技術を発揮する必要がある。本論文では持続可能な社会、特に低炭素社会の実現に向けた油脂産業としての新たな施策を提案する。

第1章 持続可能な社会の実現

1-1 持続可能な社会と技術の進歩

資源・環境問題の深刻化を受け、世の中では「持続可能な社会」が注目されている。持続可能な社会とは、将来の世代の生活を充実したものにするばかりではなく、現在の世代の生活も充実させるための開発を行い、社会に持続性を持たせることを言う。その主だった活動は環境保全である。ただし、保全のために人々に我慢を強いるのではなく、質の高い生活も保障する。すなわち、これまでの技術の進歩が地球環境に配慮されていない部分もあったことに対し、持続可能な社会においては、環境を考慮しつつ技術を進歩させることが要求されており、高い技術力が必要となる。その目指す社会体系としては、低炭素社会、循環型社会、自然共生社会の3つがあり(図1-1)、これらの達成に向けて数々の検討が行われている。

1-2 二酸化炭素と地球温暖化

検討項目の代表例として、地球温暖化の原因である二酸化炭素の削減が挙げられる。

二酸化炭素の排出がこのまま増加すると、地球温暖化の加速による異常気象や

海面上昇が原因で、農業・漁業への打撃、水不足などの問題が生じ、世界的に年間3,000億ドル（約35兆円）以上の損害が生じると予測されている³⁾。その中で、年平均気温は100年の間に世界全体で0.85℃、日本で1.15℃上昇している³⁾。2℃の温度上昇で作物の生育高が減少し、3℃で利用可能な水が減り、4℃で多くの種の絶滅が起こると言われている（図1-2）⁴⁾。

このように平均気温の上昇は、大きな経済損失をもたらすのみならず、地球を生物の住めない環境とする危険性を孕んでおり、大気中の二酸化炭素の削減は急務である。

その中で、2015年12月にパリ協定が締結され、産業革命以前からの平均気温上昇を1.5℃に抑えることが世界共通の努力目標として定められた⁵⁾。これに対して日本は、二酸化炭素の排出量を2030年までに2005年度比で25%削減することを掲げている（2005年度：約13億600万t）⁶⁾。2014年度の二酸化炭素総排出量が約12億6,500万tであり⁷⁾、残り16年余りで約2億9,000万tもの追加削減を実施することは容易なことではない。

本目標を達成するためには、あらゆる産業で積極的に二酸化炭素を削減し、低炭素社会の実現に向けて取り組む必要がある。

1-3 カーボンポジティブとカーボンネガティブ

二酸化炭素の排出量として高い割合を占めるのは、産業部門、すなわち製造工場由来の二酸化炭素である（図1-3）⁷⁾。多くの場合、工場を運用するためのエネルギー源として化石燃料が利用され、その燃焼によって二酸化炭素の排出が起こる。このように、工場として二酸化炭素を大気中に排出している状態を「カーボンネガティブ」と言う。これは大気中に二酸化炭素（カーボン）を排出する＝環境が悪い方向（ネガティブ）に進むことを表している。

このように、二酸化炭素を排出する化石燃料などのエネルギー源を使い続けている限り、低炭素社会の実現は困難である。

一方で、二酸化炭素を排出しないエネルギー源で工場を運用できれば、工場から大気中に二酸化炭素（カーボン）を排出しない＝環境が良い方向（ポジティブ）に進む「カーボンポジティブ」の状態となる。

二酸化炭素を排出しないエネルギー源としては太陽光や水力、風力といった自然エネルギーが挙げられる。これらのエネルギーを用いたカーボンポジティブの取り組みは、いくつかの企業で謳われ始めており⁸⁾、今後カーボンポジティブを

目指す企業は増加すると考えられる。

第2章 油脂産業の実状

2-1 油脂産業と低炭素社会のこれまで

パーム油、大豆油、菜種油に代表される植物油の供給量は、日本および世界において年々増加している（図2-1、2-2）⁹⁾。しかし、油糧植物から油脂を製造するためには大量のエネルギーを必要とすることが課題である。パーム油を例にすると、1 tのパーム油製造に5 tのパーム果房と5 tの蒸気（エネルギー換算で3,700 kWh）、90 kWhの電力が必要となる^{10, 11)}。これは二酸化炭素換算で2 tに相当する¹²⁾。このようにパーム油製造は、二酸化炭素を大量に排出するため、カーボンネガティブであり、低炭素社会からは程遠い。

一方、低炭素社会に向けた油脂産業のこれまでの取り組みとしてはバイオマス燃料が挙げられる。これは光合成で二酸化炭素を取り込んだ植物を液体燃料に変換したものであり、燃焼時に発生する二酸化炭素は元々大気中に存在したものとなる。すなわち、液体燃料に焦点を当てて二酸化炭素総排出量を増やさない「カーボンニュートラル」を実現したものである（図2-3）¹³⁾。

しかし製造工場に焦点を当てると、植物を液体燃料に変換する際に別途エネルギーが必要であり（図2-4）、これにはバイオマス燃料ではなく、化石燃料が使用されている^{14, 15)}。そのため、バイオマス燃料製造工場としては二酸化炭素を排出しており、カーボンネガティブである。このように、液体燃料に焦点を当てるとカーボンニュートラルと言われるバイオマス燃料も、製造工場に焦点を当てると二酸化炭素の排出が見られ、低炭素社会の実現にはもう一步踏み込んだ施策が必要である。

2-2 カーボンポジティブな油脂製造に向けた課題

油脂製造工場におけるカーボンポジティブの達成には、先述したように、二酸化炭素を排出しないエネルギーの確保が必要となる。その代表例が太陽光などの自然エネルギーであるが、高い発電コストが問題となる^{16, 17)}。油脂製造においては大量にエネルギーを消費するため、全てを自然エネルギーで賄うとコスト高により事業継続が困難である（図2-5、2-6）¹⁷⁾。低炭素社会の実現には、

カーボンポジティブを達成した工場を事業として継続的に運用する必要がある。

また、油脂製造工場におけるもう一つの課題として油脂抽出後の残渣が挙げられる。パーム油製造を例とすると、1 t 製造時に 4 t の抽出残渣が発生する¹⁰⁾、¹¹⁾。その上、アブラヤシの木は約 25 年間隔で植え替えられ、伐採されたパーム古木が大量に発生する¹⁸⁾。これらの処理法として、ただ焼却処分するのではなく、燃料として再利用したコージェネレーション（コージェネ）による発電・発熱が行われている¹⁹⁾。しかし、燃料としての再利用では燃焼していることに変わりはないため、工場からは二酸化炭素を排出しており、カーボンネガティブである。

以上のように、現状の油脂製造工場ではカーボンポジティブの達成は困難であり、二酸化炭素を排出せずにエネルギーの確保と残渣の再利用を成し遂げる新たな施策が必要である。

第 3 章 新規の油脂製造理念と実現のための技術

3-1 新規の油脂製造理念

筆者らは今後達成が急務になってくる低炭素社会を油脂産業においても実現するために、“E C O F F (= Expense of carbon dioxide in the oil and fat factory、エコフ)”と名付けた油脂製造理念を提案する。これは油脂製造工場全体でカーボンポジティブを達成するために二酸化炭素を積極的に利用（消費）することであり、「E C O（エコ）」と、「炭素（C）O F F」をかけた理念である。

また筆者らは、E C O F F を実現するための新たな油脂製造システムを提案する。

3-2 二酸化炭素を利用したエネルギーの創出

E C O F F 実現に向けた最大の障壁が二酸化炭素を排出しないエネルギーの確保である。しかし先述したように自然エネルギーだけでは事業継続は難しい。では二酸化炭素を排出しないのではなく、「原料」とするエネルギー生産方法はないだろうか。

そこで筆者らが注目したのは、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が長岡技術

科学大学の梅田らと共同で開発を行っている「二酸化炭素を利用した燃料電池」である。

一般的な燃料電池は、酸素と水素から電気を発生しており、自動車産業において注目を集めているエネルギー源である²⁰⁾。

これに対して本技術は、二酸化炭素と水素から電気を発生する(図3-1)^{21, 22)}。

原理は二酸化炭素の還元を利用しており、理論上は発電する。しかし実際には二酸化炭素の炭素-酸素結合が安定であり、結合解離には外部からのエネルギー供給が必要となるため、二酸化炭素を原料とする発電はこれまで困難であった(図3-2)。

梅田らは触媒を利用することでこの結合解離に必要なエネルギーを小さくし、これまで実現できなかった二酸化炭素還元による発電を世界で初めて達成した。

ECOFF実現における本技術のポイントは、油脂抽出残渣の再利用によるコージェネと組み合わせることにある。すなわち、残渣を再利用してコージェネで発電し、発生する二酸化炭素は更なる発電の原料とすることで、工場からの二酸化炭素排出をゼロにする(図3-3)。更に本技術をコージェネと組み合わせる利点は、高濃度の二酸化炭素を安定的に供給できることにある。本技術に空気中の二酸化炭素を原料とする場合、濃度が約0.04%と低いため効率が悪い。一方コージェネから発生するガスの二酸化炭素濃度は約10%と空気中の250倍高い^{23, 24)}。そのため、コージェネと組み合わせることで、本技術による発電を効率的に運用できる。

これにより、低コストで二酸化炭素を排出しないエネルギーを確保できる。

3-3 ECOFF実現のための油脂製造法

先述したコージェネと二酸化炭素を用いた燃料電池を組み合わせた発電システム(コージェネ-燃料電池発電システム)は、菜種や大豆、パーム果房などからの油脂製造においてもエネルギー収支の観点からは利用できるが(図3-4、3-5、3-6)、著者らは、より効率の良い油脂製造法を提案する。

コージェネ用燃料である油脂抽出残渣は、燃焼効率を高めるために細かいチップ状とする必要がある²⁵⁾、水分が残っていると燃焼不良が起こるため、乾燥させる必要もある²⁶⁾。パーム油製造においては、この残渣の微細化と乾燥に別途工程が必要な上、古木などの大量の廃棄物が出るために処理量も多く、作業効率

が悪い。

そこで筆者らは「藻類」を用いた油脂製造法に注目した。藻類は単位面積当たりに生産できるオイル量がパームの数十倍と多い点で近年注目されている（図3-7）²⁷⁾。その中で筆者らは、他の油糧植物には見られない藻類の新たな利点として抽出残渣に着目した。

藻類の残渣はパーム果房などと異なり、初めから細かく、抽出と同時に乾燥させる方法も開発されている²⁸⁾。また、藻類の油脂含有率は50%と高く²⁹⁾、抽出率も90%と高い水準を達成している²⁸⁾、残渣の量も少ない。そのため、1tの油脂製造時の抽出残渣は僅か1.2tと、パーム油製造時の3分の1以下となる（図3-8）。更に、パーム油製造に見られる古木にあたるものは藻類には存在しないため、廃棄物の量はパーム油製造に対して更に少なくなる。

このように藻類を用いることで、微細化と乾燥の追加工程を必要とせず、処理量も少ないため、残渣を再利用しつつ、効率的に本発電システムを運用できる。

3-4 E C O F F 実現のための油脂製造システムの概要

これまで述べてきたE C O F Fを実現するための油脂製造システムの概要は図3-9に示すように、①大気中の二酸化炭素を原料とする藻類による油脂製造、②藻類の油脂抽出残渣を再利用したコージェネー燃料電池発電システムによるエネルギー生産の2つの構成から成り立っている。

本製造システムでは、油脂製造の全ての工程を通して二酸化炭素の大気中への排出を徹底して排除し、工場全体としてカーボンポジティブ、すなわち二酸化炭素の排出量ゼロを達成している。本製造システムを導入することで、低炭素社会、ひいては持続可能な社会の実現に油脂産業が貢献できると考える。

第4章 E C O F F 実現のための油脂製造システムの全容

4-1 藻類による油脂製造

提案する油脂製造システムの具体的な運用について本章で述べる。

まず本製造システムに使用する藻類として、筆者らはナンノクロロプシスに注目した。藻類にはジェット燃料用のユーグレナや、バイオ燃料用のシュードコリスティスなど既に実用化が進められているものもある。しかしこれらは生育環

境が限られており汎用性に乏しい(図4-1)^{27, 30, 31)}。一方ナンノクロロプシスは油脂含有率が50%と高く、藻類の生育を阻害しないリン欠乏条件で油脂を生産する特長を持つ³²⁾。また、生成する油脂の脂肪酸組成はパルミトレイン酸やエイコサペンタエン酸(EPA)などの高付加価値品を多く含んでいることも特長である(図4-2)^{29, 33)}。

更に生育環境に関しては、海水で生育可能であり、5~30℃と広い温度範囲で培養できることから、日本などの島国を含めた広い地域で利用可能である。また、塩素に耐性があるため、海水を塩素殺菌することで、藻類を死滅させる他の微生物などのコンタミを解消でき、安定な生育環境を作ることができる²⁹⁾。

次に藻類からの油脂抽出に目を向けると、一般的に溶媒としてはヘキサンなどが挙げられる。しかしこれらを用いた場合、乾燥・抽出に消費するエネルギーが非常に多く²⁸⁾、ECOFF実現は困難となる。そこで筆者らはヘキサンなどの代替として、ジメチルエーテル(DME=D*im*e*t*h*y*l*_e*t*h*e*r*)を用いた抽出に着目した。

DMEは常温で気体、0.5MPa程度の加圧で液化し、水と油の双方に溶解する特性を持つ。このため、湿潤状態のままの藻類に対してDMEは細胞内まで浸透し、油脂と水の両方を同時に抽出する。抽出後はDMEを留去することで、溶解していた油脂と水が分離し、容易に油脂を回収できる(図4-3)²⁸⁾。藻類からの油脂抽出率が80~100%と非常に高いこともDMEを用いた抽出法の特長である。また、藻類から水も抽出するので、乾燥工程を挟むことなく脱水され、残渣を乾燥状態で回収できる。そのため、本方法を用いることで残渣の再利用によるコージェネー燃料電池発電システムの効率的運用を可能とする。

4-2 コージェネー燃料電池発電システムによるエネルギー生産と副産物

エネルギー面に関しては、先述したコージェネー燃料電池発電システムを用いる。エネルギー生産の第1段階として、油脂抽出により乾燥まで完了している藻類残渣を用いてコージェネによる発電・発熱を行う。続いて第2段階として、生じた二酸化炭素を水素と共に燃料電池(CO₂-H₂燃料電池)に投入することで発電する。

なお、CO₂-H₂燃料電池に用いる水素供給については、集光型太陽電池と水の電気分解を組み合わせた装置を利用する。一般的な光触媒を用いた太陽光のエネルギー変換効率が10%未満に対し、本装置は変換効率が24.4%と高い水

準を示す³⁴⁾。後述するが、本製造システムを導入する工場の規模は1工場当たり20haを想定しており、本水素発生装置はそのうち僅か1.1ha（東京ドーム約0.2個分）で必要な水素量を供給できる（図4-4）。

また、CO₂-H₂燃料電池発電の副産物としてメタノールが生成する²¹⁾。一般的にメタノールは化石燃料を原料とし、その製造時に莫大なエネルギーを必要とするため、二酸化炭素を大量に排出するカーボンネガティブな製造法で造られている（図4-5）³⁵⁾。これに対して本製造システム生産品は、カーボンポジティブ下で製造できる。

また、バイオマス燃料に焦点を当てると、メタノールを用いたメチルエステル化で製造するバイオディーゼルは、化石燃料由来のメタノールをこれまで用いていたため、完全なカーボンニュートラルではなかった（図4-6）³⁵⁾。一方、本製造システム生産品のメタノールは光合成で二酸化炭素を吸収した藻類が原料であり、このメタノールを用いることで完全なカーボンニュートラルと言えるバイオディーゼルとなる。そのため本製造システムは油脂製造のみならず、バイオディーゼル分野にも貢献できる。

4-3 季節を加味したシステム運用

今回用いる藻類は30℃を超える夏場の生育には適していない。そこで、その期間の培養池を有効利用するため、藻類による油脂製造だけでなく、高度不飽和脂肪酸（PUFA=Polyunsaturated fatty acid）の製造も本製造システムでは導入する。PUFAは人々の健康志向の高まりに併せて医療や食品の分野で注目されている脂肪酸であり、ナンノクロロプシスからも生産されるEPAや、アラキドン酸などが該当する。その中で筆者らはPUFAを効率良く生産できる「カビ」に注目した³⁶⁾。具体的にはMortierella属カビを用いる。

本カビの油脂含有率は50～60%と高く、その全脂肪酸中のPUFA量は30～70%に達する³⁷⁾。また、本カビは菌外に油脂を分泌する特性も有しており³⁷⁾、油脂抽出にエネルギーを必要としない。更に本カビ最大の特長は、グルコースなどの糖質を培地とすることで培養できる点である。すなわち、藻類の油脂抽出残渣を培地として利用できるため、本製造システムに組み込むことで、新たな培地を準備することなくPUFAを製造できる。

4-4 E C O F F 実現のための油脂製造システムの全容

筆者らが提案する E C O F F を実現する油脂製造システムは、これまでに述べた①藻類による油脂製造、②コージェネー燃料電池発電システムによるエネルギー生産、を体系的に結び付け、工場全体として二酸化炭素の排出をゼロとするカーボンポジティブを達成したシステムである。以下に全容を示す（図 4-7）。

(1) ナンノクロロプシスをオープンポンド式培養池で培養し、油脂を製造する。

培養には塩素殺菌した海水を使用し、効率良く光合成を行うため、培養池には攪拌装置を設置する。

(2) 藻類を 0.1% から 1% まで濃縮し、DME 抽出法で油脂を抽出する。水と分離後、再度油脂を DME に溶解し、吸着剤処理を行い、再び DME を留去することで油脂の精製品を得る。使用した DME は回収して再利用する。ただし工場運用初期の DME は、 $\text{CO}_2\text{-H}_2$ 燃料電池から生成するメタノールを原料として製造する。

(3) 抽出後の残渣を燃料としてコージェネで発電する。電力は培養や抽出、熱は DME の留去に利用する。

(4) コージェネで発生した高濃度二酸化炭素は $\text{CO}_2\text{-H}_2$ 燃料電池による発電に利用する。生成したメタノールはバイオディーゼル燃料の原料として販売する。

(5) 残渣の一部を利用して、*Mortierella* 属カビを培養し、PUFA を製造する。30℃ を超える夏場はナンノクロロプシスの生育に適していないため、この期間の培養池を PUFA 製造に利用する。本品は 50% PUFA 含有油脂として販売する。

本製造システムは、外部からは太陽光と二酸化炭素、水のみを取り込み、油脂、PUFA、メタノールを製造する「カーボンポジティブ」な油脂製造システムである。

第 5 章 油脂製造工場の生産能力

5-1 油脂生産量

提案する油脂製造システムを導入した油脂製造工場について、一年間の油脂生産量、エネルギー収支、利益性の試算を行った。はじめに油脂生産量について述

べる。

藻類の培養池の規模は面積10ha（東京ドーム約2.1個分）、深さ0.3mでオープンポンド式とした。ナンノクロロプシスの油脂含有率を50%、生産能力を97,800L/ha・年²⁷⁾、抽出率90%、製造期間を夏期の7~9月を除いた9ヶ月間と仮定すると、油脂生産量は601t（664kL）となり、油脂抽出後の残渣は734t発生する（図5-1）²⁹⁾。

カビによるPUFA製造は、製造期間を7~9月の3ヶ月間とし、藻類培養池の一部を用いて1週間サイクルで製造する。培養液濃度が2%残渣液の際、生産能力を5kg/m³³⁸⁾、油脂のうち50%がPUFAと仮定すると³⁷⁾、50%PUFA含有油脂の生産量は75tとなる（図5-2）。また、カビの培養のために使用する油脂抽出残渣は300tとなる。

残りの残渣434tはコージェネの燃料とする。残渣をセルロース相当として換算すると、電気、熱、および二酸化炭素707tが発生する（図5-3）。

発生した二酸化炭素を96tの水素と共にCO₂-H₂燃料電池に添加することで、電気とメタノール514tができる（図5-3）。

5-2 エネルギー収支

本工場におけるエネルギー生産は、まずコージェネ装置として電力1MWh+熱量2MWh/バイオマス1tの設備を用い³⁹⁾、残渣434tから電力434MWh、熱量868MWhを生産する。また、CO₂-H₂燃料電池は707tの二酸化炭素と96tの水素から、変換効率60%と仮定して、電力343MWhを生産する。従って、エネルギー生産は合計で電力777MWh、熱量868MWhとなる（図5-4）。

一方、消費エネルギーに関しては以下の通りとなる（図5-5）。まず、藻類培養時の培養池では水の入れ替えと攪拌に電力が必要である。水の入れ替えは海水取水ポンプ（送液能力：50m³/min、消費電力：300kW）を利用し⁴⁰⁾、年間45回の入れ替え（取水と排水）を行うので、消費電力量は270MWhとなる。また、攪拌は光合成の効率向上を目的とするため、太陽光の当たる昼間のみ行い、攪拌のエネルギーを0.1W/m²とすると²⁸⁾、消費電力量は33MWhとなる。

藻類の濃縮では、0.1%から1%への濃縮エネルギーが0.1kWh/m³であることから⁴¹⁾、消費電力量は134MWhとなる。

続いて抽出では、DME抽出法のコンプレッサー加圧負荷が36 kWh/乾燥藻類1 tと試算されていることから²⁸⁾、消費電力量は48 MWhとなる。消費熱量は、228 kWh/乾燥藻類1 tより²⁸⁾、304 MWhとなる。

更に精製では、抽出した油脂を再度DMEに溶解、留去するため、DME抽出法の試算を適用すると、消費電力量は22 MWh、消費熱量は137 MWhとなる。

一方、カビ培養時においては、藻類と同様の設備を用いた場合、水の入れ替えに3 MWh、攪拌に1 MWh消費する(図5-6)。

これより本工場の消費総電力量は511 MWh、消費総熱量は441 MWhである。

以上の試算から、本工場では生産電力量777 MWh、消費総電力量511 MWhとなり、266 MWhの余剰電力が生じる(図5-7)。また、生産熱量868 MWh、消費総熱量441 MWhから、必要な熱量も工場内で全て賄える。

5-3 事業性

藻類による油脂製造のコストは、オープンポンド式で現状は250円/kgとされている⁴²⁾。また、カビによるPUFA製造のコストも同程度と仮定すると、本工場で一年間に製造する676 tの油脂の総コストは、設備の減価償却費や人件費などを含めると²⁹⁾、541百万円となる(図5-8)。

一方、一年間の売上は、販売単価を油脂：2,000円/kg(マカデミアナッツオイルを参考に設定)³³⁾、メタノール：50円/kg、PUFA：15,000円/kg(40~45%DHAを参考に設定)と仮定すると⁴³⁾、2,353百万円、余剰電力を24円/kWhで販売すると6百万円⁴⁴⁾、合計で2,359百万円となる。

以上の試算から、本工場の利益は一年間で1,818百万円となる(図5-9)。

このようにエネルギー、利益ともにプラス収支となる。従って本油脂製造システムは、ECOFFを実現することでカーボンポジティブを達成し、かつ事業の継続性も備えたシステムと言える。

5-4 本工場による二酸化炭素の排出量削減への貢献

提案する油脂製造システムを導入した油脂製造工場では、僅か20haの規模

(培養池10haの2倍を工場敷地と仮定)で一年間に676tの油脂、514tのメタノール、266MWhの余剰電力を生産可能である(図5-10)。本工場で製造する油脂などは藻類が大気中の二酸化炭素を吸収して造られる。すなわち、大気中の二酸化炭素を油脂などの形に固定化しているとも言える。その固定量は、20haの規模で一年間当たり、油脂で1,857t、メタノールで707t、余剰電力で159t、合計2,723tとなる(図5-11)^{45, 46)}。

本工場を日本国内に設置することを想定すると、国内で法人が所有している土地のうち、57,300haの未利用地(空き地、原野など)が存在する⁴⁷⁾。これらのうち、藻類培養に用いる海水の獲得に有利な海岸に比較的近く、油脂の輸送に適した土地が全体の4割と仮定すると、ここに本工場を建てた際の全工場による二酸化炭素の固定量は、一年間で3,237千tと試算される(図5-12)。これは2005年度の日本国内二酸化炭素総排出量の0.25%に相当し、25%削減目標の100分の1を担うことができる。このように本工場の設立は、未利用地も再利用しつつ、油脂産業における低炭素社会実現に向けた社会貢献を可能とする。

おわりに

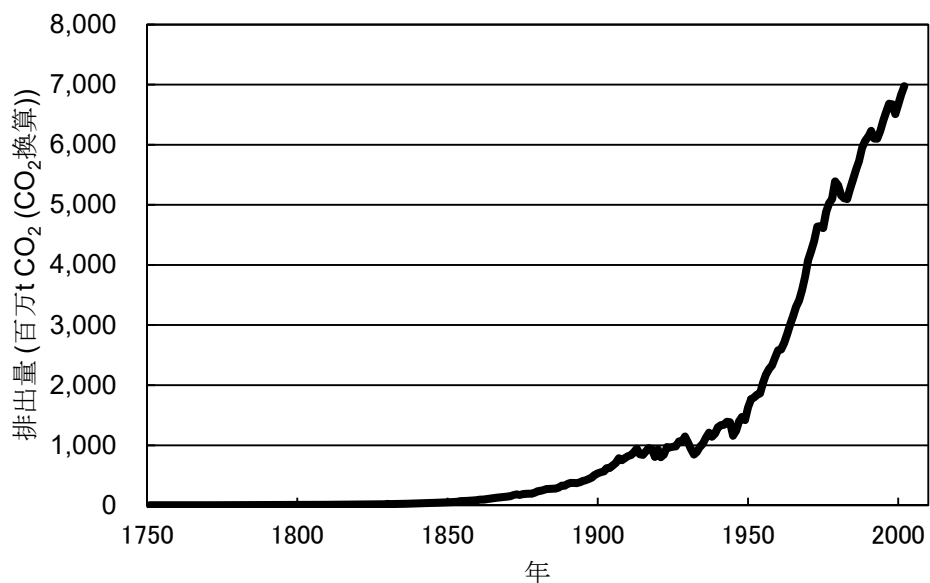
本論文では「カーボンポジティブ」を達成するために2つの技術を体系的に結びつけた油脂製造システムの構築を提案した。これまで世の中で行われてきた数々の検討は、各々のプロセスに対して別々の企業や研究機関で検討されてきたケースが多かった。現実として運用するためには産学官が連携して全てのプロセスを一貫したシステム構築が必要となる。現在の世代および将来の世代の生活、ひいては宇宙船地球号のための持続可能な社会の実現には、あらゆる機関の連携が要となっている。今回の筆者らの提案がその先駆けとなれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 関西電力株式会社「世界のエネルギー事情」
- 2) 全国地球温暖化防止活動推進センター（JCCCA）「燃料別に見る世界の二酸化炭素排出量の推移」
- 3) 全国地球温暖化防止活動推進センター「地球温暖化の影響予測」
- 4) WWF「地球温暖化が進むとどうなる」
- 5) 環境省「国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）及び京都議定書第11回締約国会合（COP/MOP11）の結果について」
- 6) 環境省「地球温暖化対策推進法と地球温暖化対策計画」
- 7) 国立研究開発法人 国立環境研究所 温室効果ガスイベントリオフィス「日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2014年度）」
- 8) Sustainable Japan, News「ユニリーバ、2030年までに「カーボン・ポジティブ」を実現へ」2015年12月22日
- 9) 一般社団法人 日本植物油協会「植物油の道」
- 10) 白井ら，環境バイオテクノロジー学会誌，Vol. 9，No. 1，3-10（2009）
- 11) 第87回バイオマス利用研究会「生物多様性保全のためのパームオイル産業とのグリーン経済の推進」平成28年5月11日
- 12) 地方独立行政法人 大阪府立環境農林水産総合研究所「省エネ・省CO₂相談窓口」
- 13) 三重バイオ燃料普及地域協議会「バイオディーゼル燃料とは」
- 14) 総合資源エネルギー調査会石油分科会 次世代燃料・石油政策に関する小委員会「バイオ燃料の評価」
- 15) 財団法人 電力中央研究所「バイオ燃料生産に向けたジャトロファプランテーションの成立性評価」平成23年5月
- 16) 経済産業省資源エネルギー庁「再生可能エネルギーの種類と特徴 総論」
- 17) 総合資源エネルギー調査会「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告（案）」
- 18) アジアバイオマスオフィス「パーム油産業からの廃棄物利用が進むマレーシア」
- 19) アジアバイオマスオフィス「インドネシアにおけるヤシ殻と籾殻による発電ポテンシャル」

- 20) 一般社団法人 日本ガス協会「燃料電池」
- 21) 宇宙科学研究所 (I S A S), レポート&コラム, 宇宙科学の最前線「燃料電池を使ってCO₂を除去する」2014年10月22日
- 22) 特開2015-56315「固体高分子形発電方法およびシステム」
- 23) 北村ら, 東芝レビュー, V o l . 6 5, N o . 8, 31-34 (2010)
- 24) 大阪ガス株式会社, プレスリリース「二酸化炭素を利用する工業用トリジェネレーションシステムの技術確立について」2005年9月1日
- 25) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構「N E D O再生可能エネルギー技術白書」
- 26) 福島・国際研究産業都市 (イノベーション・コースト) 構想「バイオマスを活用した発電技術」平成27年2月23日
- 27) 一般社団法人 藻類産業創成コンソーシアム「藻類バイオマスとは」
- 28) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構「炭化水素系オイル産生微細藻類からの“D r o p - i n F u e l”製造技術に関する研究開発」
- 29) 微細藻培養技術事業化可能性調査共同事業体「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」
- 30) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構「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」
- 31) デンソーテクニカルレビュー, V o l . 1 9「微細藻類を使ったCO₂吸収・バイオ燃料化の研究と期待」2014年
- 32) 東京工業大学プレスリリース「油脂高生産藻の脂質量と組成を改変する技術を開発」
- 33) 株式会社エコロジーコミュニケーションズ「美容と健康に マカデミアナッツオイル」
- 34) 東京大学プレスリリース「実際の太陽光下で世界最高効率の水素製造に成功」
- 35) W e b版化学プロセス集成 化学工学会「メタノールプロセス」
- 36) 京都大学 全学寄附研究部門 微生物科学寄附研究部門「微生物油脂の大量生産系の開発」
- 37) 小川順, 生物工学会誌, V o l . 9 0, N o . 1 1, 723-727 (2012)
- 38) 特開2014-45740「外来不飽和化酵素遺伝子導入による脂質生産微生物での高度不飽和脂肪酸の生産」
- 39) S p a n n e r R e²社「乾燥木質チップ用コージェネ」

- 40) 株式会社横田製作所「HD型ポンプ」
- 41) 産業競争力懇談会「微細藻類を利用した燃料の開発」
- 42) 三井物産戦略研究所 戦略研レポート「バイオマス資源としての微細藻類」
- 43) 原料・受託バンク「40～45%DHAの価格相場」
- 44) 経済産業省「再生可能エネルギーの平成28年度の買取価格・賦課金単価を決定しました」
- 45) 中央環境審議会総合政策・地球環境合同部会 第4回グリーン税制とその経済分析等に関する専門委員会資料「燃料別の二酸化炭素排出量の例」
- 46) 関西電力株式会社「原子力発電について 原子力発電の位置づけ」
- 47) 国土交通省「平成25年土地基本調査（確報集計）」



出典：燃料別に見る世界の二酸化炭素排出量の推移（全国地球温暖化防止活動推進センターHP）をもとに作成

図 0 - 1 世界の二酸化炭素排出量の推移

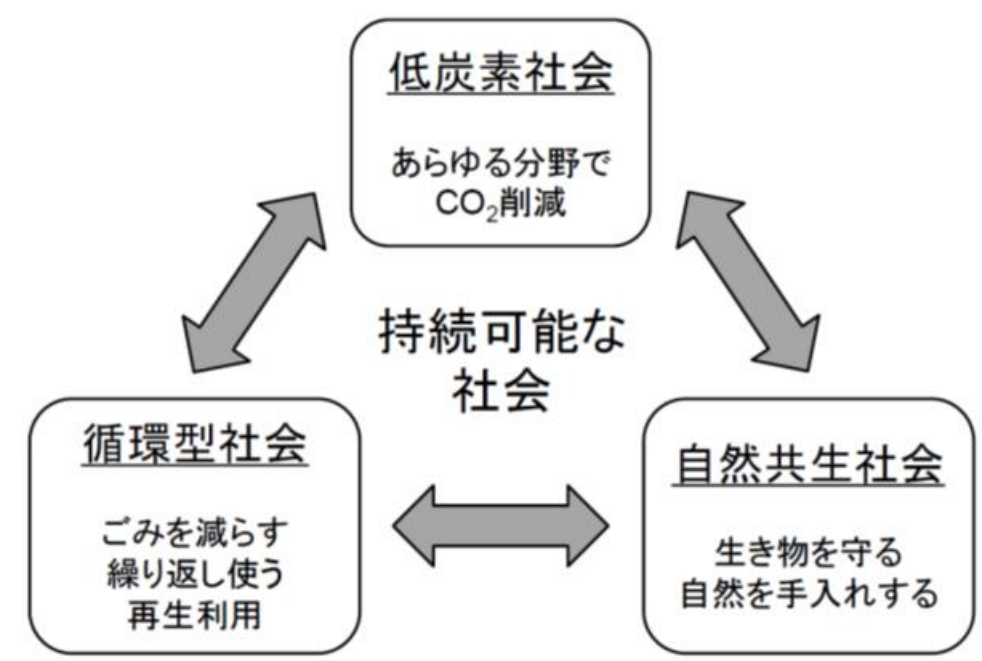
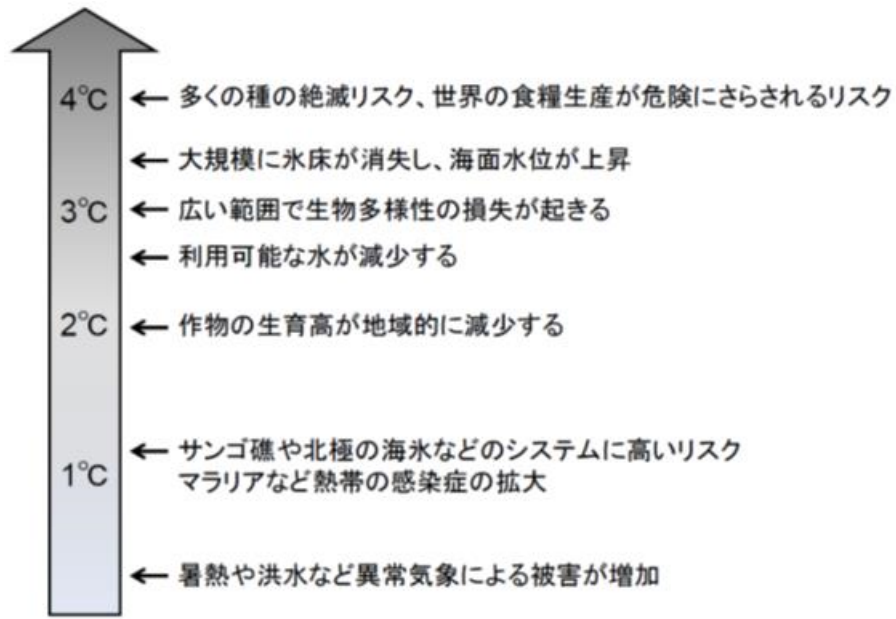
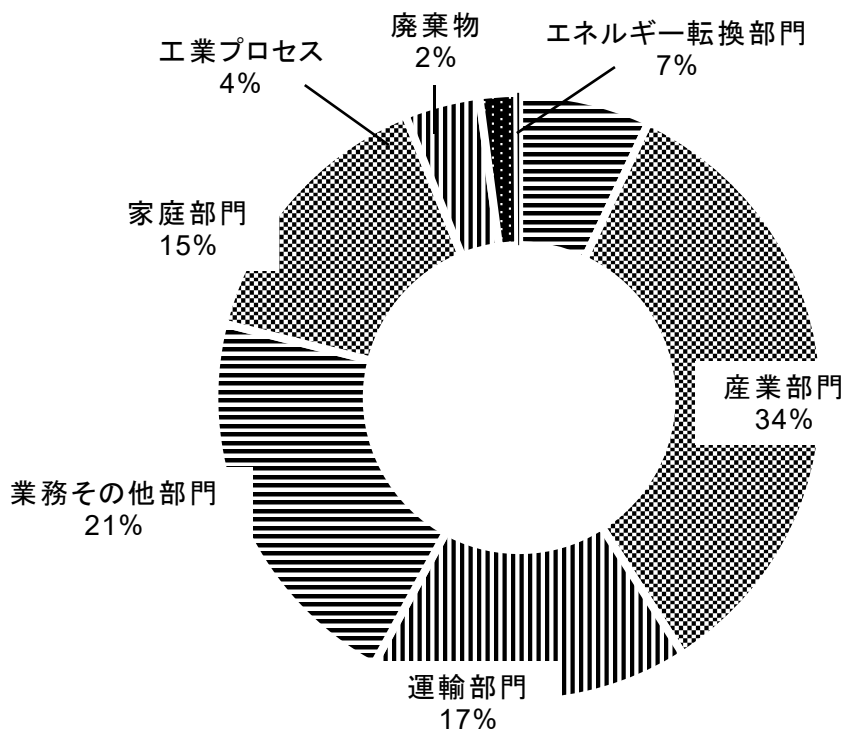


図 1 - 1 持続可能な社会の目指す社会体系



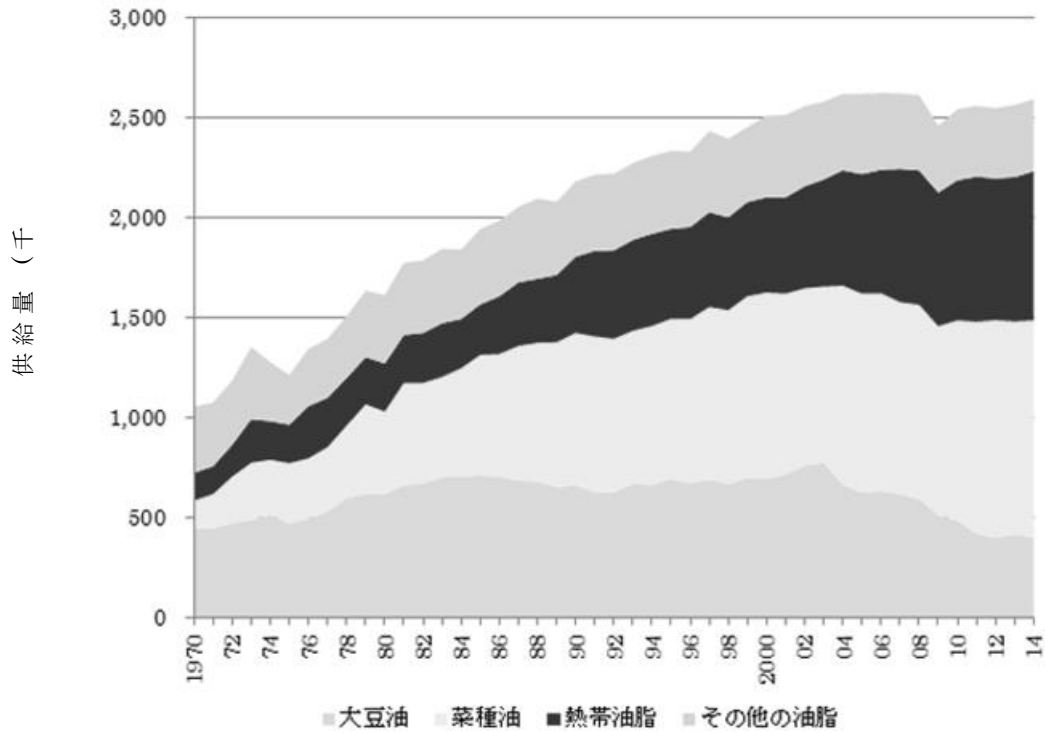
出典：地球温暖化が進むとどうなる（WWFのHP）をもとに作成

図 1 - 2 平均気温上昇とリスク



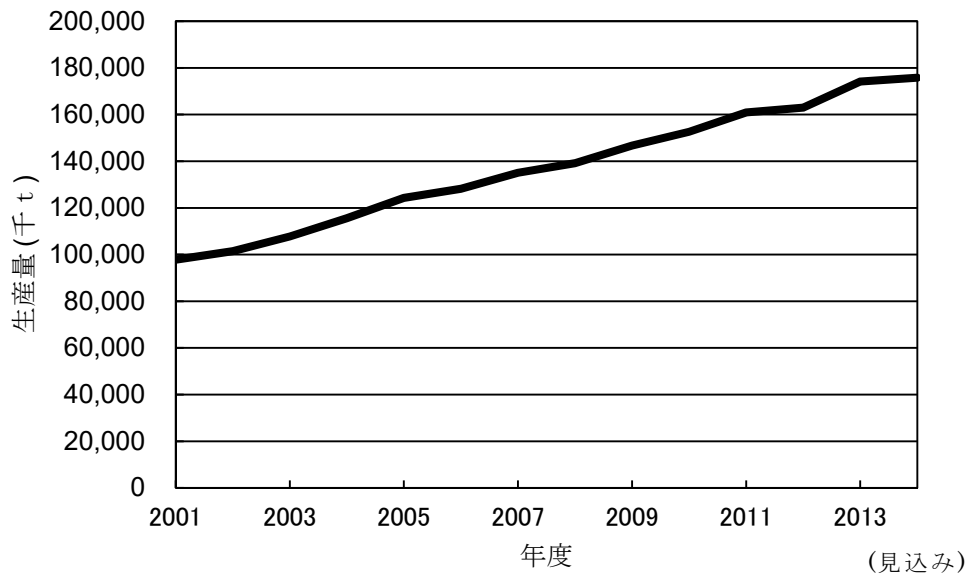
出典：日本の部門別二酸化炭素排出量（2014年度）（全国地球温暖化防止活動推進センターHP）をもとに作成

図 1 - 3 日本の部門別二酸化炭素排出量の割合（2014年度）



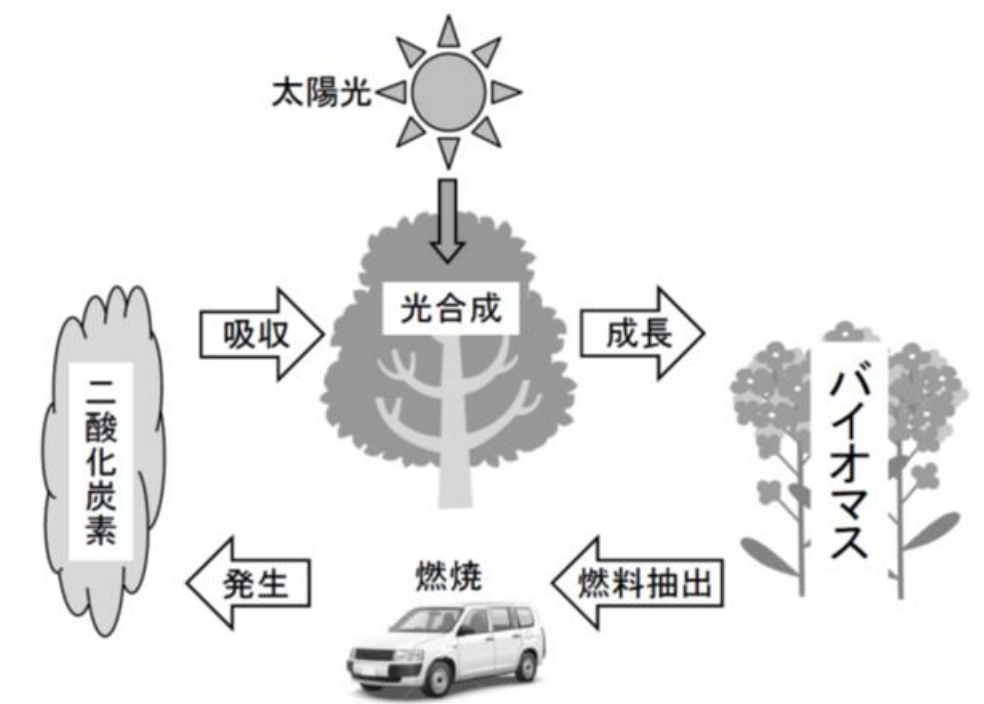
出典：植物油の道 日本の植物油供給量の推移（日本植物油協会HP）より引用

図 2 - 1 日本の植物油供給量の推移



出典：主な植物油の生産量の推移（日本植物油協会HP）をもとに作成

図 2 - 2 世界の主な植物油の総生産量の推移



出典：カーボンニュートラルのイメージ（三重バイオ燃料普及地域協議会HP）
をもとに作成

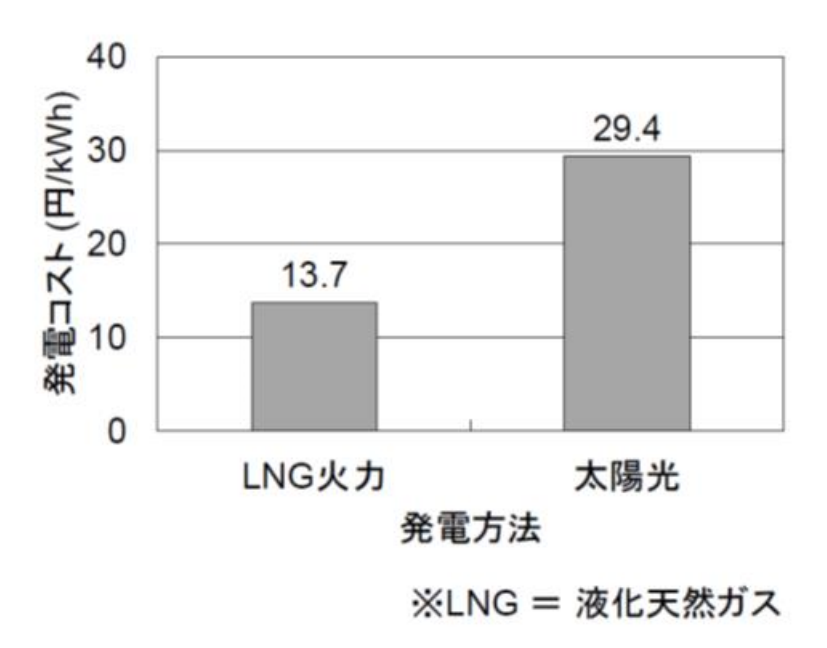
図 2 - 3 バイオマス燃料のカーボンニュートラル

作物	液体燃料の種類	EPR
トウモロコシ	バイオエタノール	1.3
てんさい	バイオエタノール	2.0
ダイズ	バイオディーゼル	2.0

※EPR = 生産エネルギー / 投資エネルギー

出典：バイオ燃料の評価（次世代燃料・石油政策に関する小委員会まとめ）、バイオ燃料生産に向けたジャトロファプランテーションの
成立性評価（電力中央研究所レポート）をもとに作成

図 2 - 4 主なバイオマス燃料のエネルギー収支

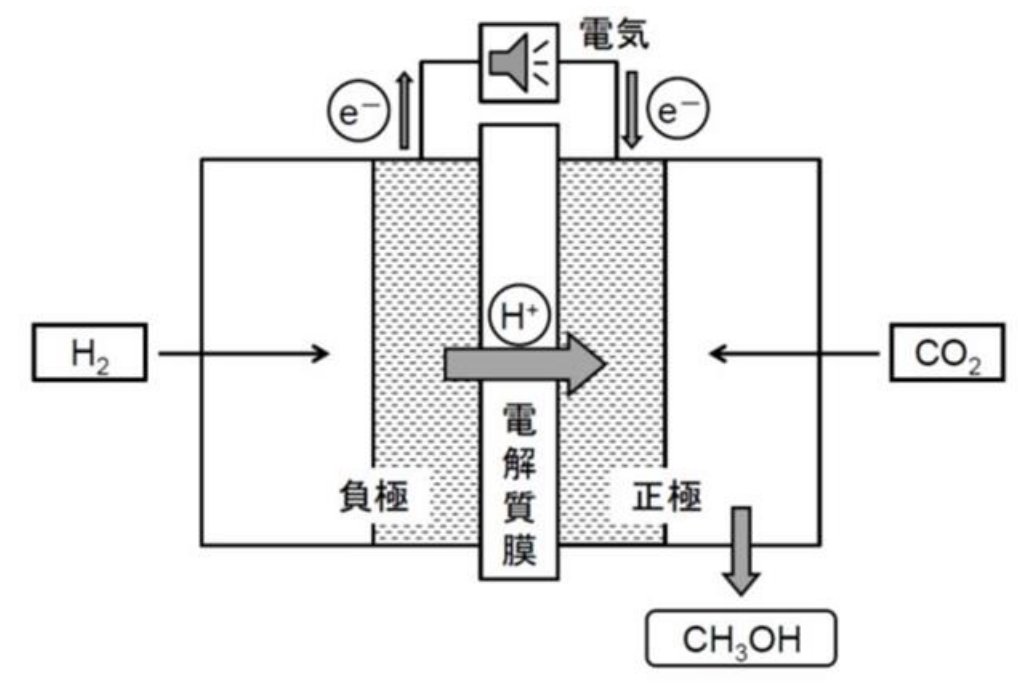


出典：長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告（案）（総合資源エネルギー調査会レポート）をもとに作成

図 2 - 5 発電方法と発電コスト

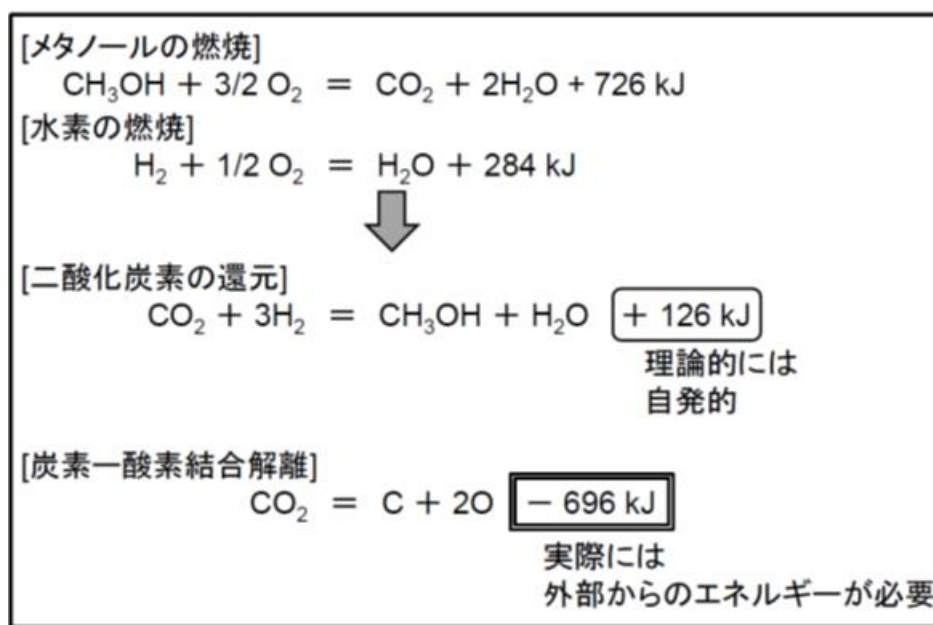
売り上げ	一般油脂：100 円/kg、製造量：1 t ⇒ $1 \text{ t} \times 100 \text{ 円/kg} \times 10^{-1} = \underline{10.0\text{万円}}$	
発電方法	LNG発電 	太陽電池 
コスト 必要エネルギー 3,790 kWh	$3,790 \text{ kWh} \times 13.7 \text{ 円/kWh} \times 10^{-4} = \underline{5.2\text{万円}}$	$3,790 \text{ kWh} \times 29.4 \text{ 円/kWh} \times 10^{-4} = \underline{11.1\text{万円}}$
収支	+4.8万円	-1.1万円

図 2 - 6 発電方法と収支



出典：水素-二酸化炭素燃料電池（宇宙科学研究所（I S A S）レポート&コラム）をもとに作成

図 3 - 1 二酸化炭素を利用した燃料電池の概要



出典：燃料電池を使ってCO₂を除去する（宇宙科学研究所（I S A S）レポート&コラム）をもとに作成

図 3 - 2 二酸化炭素還元熱化学方程式

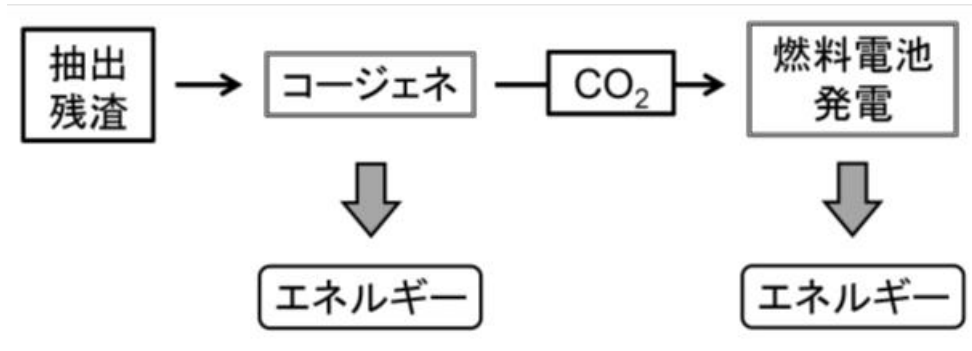


図 3-3 コージェネー燃料電池発電システム

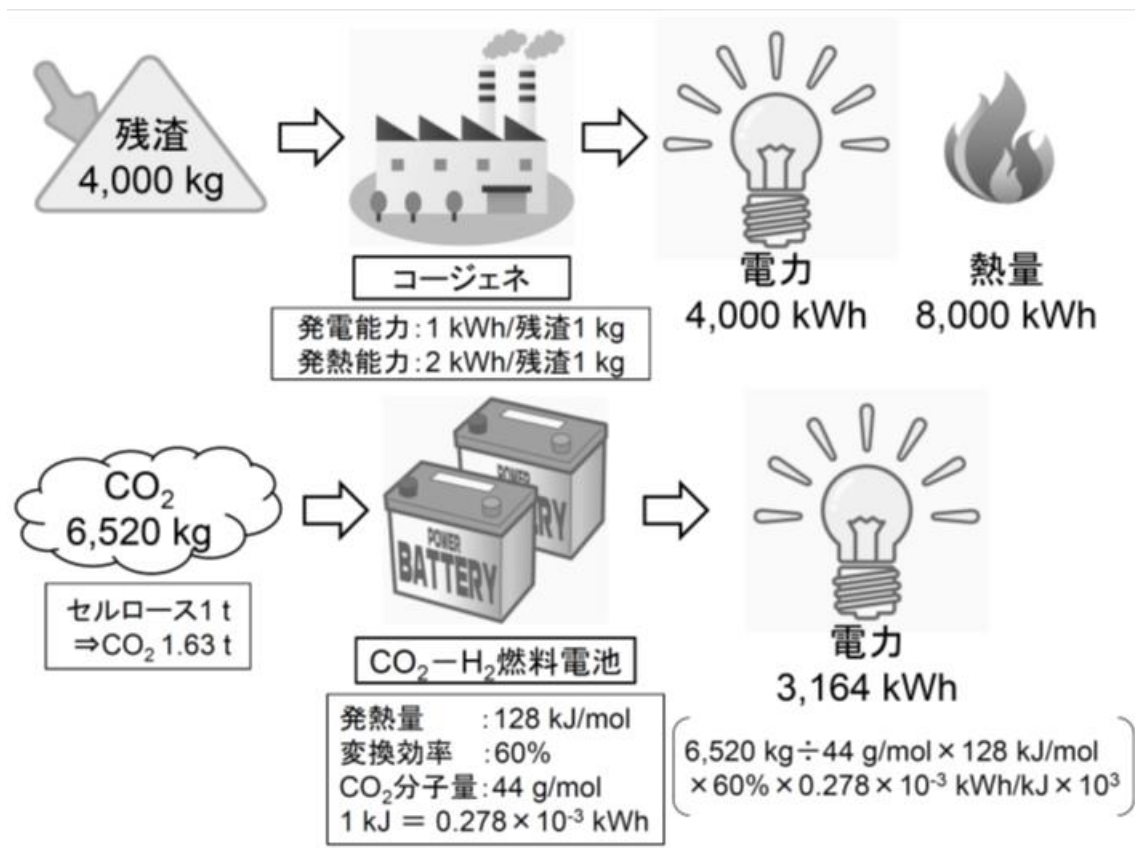


図 3-4 コージェネー燃料電池発電システムを用いたパーム油製造におけるエネルギー生産（油脂 1 t 製造時）



○製造油脂:1 t ○残渣:4 t	
工程	必要エネルギー
油脂製造	電力:90 kWh 熱量:3,700 kWh
微細化 	電力 581 Mcal/t = 674 kWh/t (1 Mcal = 1.16 kWh) ⇒4 t × 674 kWh/t = 2,696 kWh
乾燥 	熱量 204 Mcal/t = 237 kWh/t ⇒4 t × 237 kWh/t = 948 kWh

図 3 - 5 パーム油製造におけるエネルギー消費（油脂 1 t 製造時）

	工程	エネルギー量	
		電力	熱量
エネルギー 生産	コージェネ	4,000 kWh	8,000 kWh
	CO ₂ -H ₂ 燃料電池	3,164 kWh	—
エネルギー 消費	油脂製造	90 kWh	3,700 kWh
	微細化	2,696 kWh	—
	乾燥	—	948 kWh
エネルギー収支		+4,378 kWh	+3,352 kWh

図 3 - 6 パーム油製造におけるエネルギー収支（油脂 1 t 製造時）

作物・藻類	オイル生産量 L/ha/年	世界の石油需要を 満たすのに必要な面積 (100万 ha)	地球上の耕作面積 に 対する割合 (%)
とうもろこし	172	28,343	1430.0
綿実	325	15,002	756.9
大豆	446	10,932	551.6
菜種	1,190	4,097	206.7
ヤトロファ	1,892	2,577	130.0
ココナッツ	2,689	1,813	91.4
パーム	5,950	819	41.3
微細藻類(70%オイル含有)	136,900	36	1.8
微細藻類(30%オイル含有)	58,700	83	4.2

出典：各種作物・微細藻類のオイル生産能の比較（藻類産業創成コンソーシアムHP）をもとに作成

図 3 - 7 各種作物・微細藻類のオイル生産能の比較

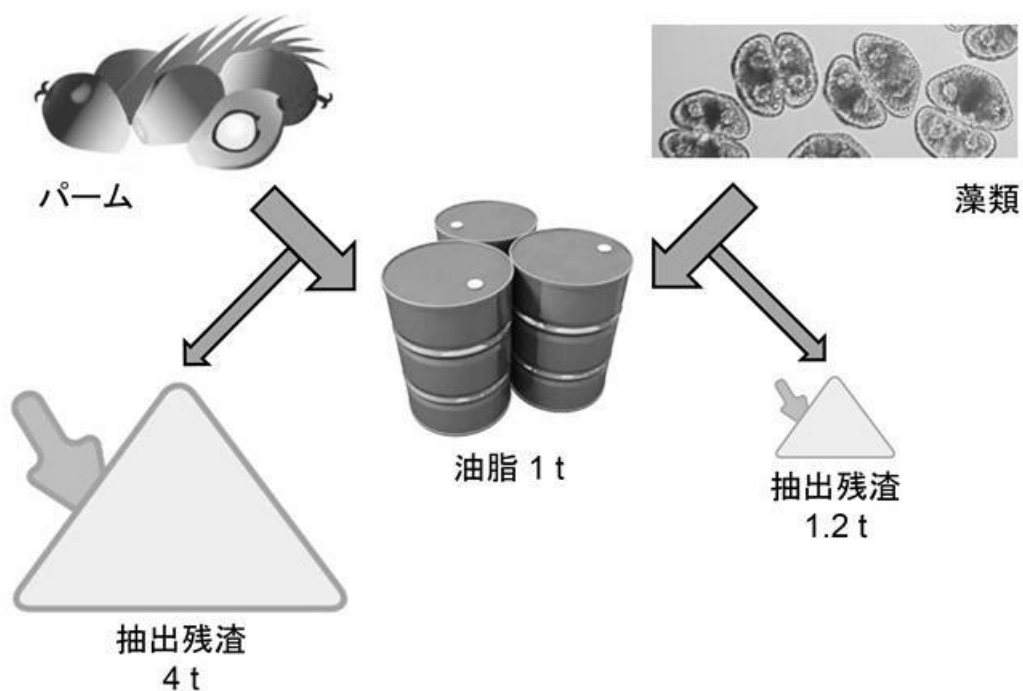


図 3 - 8 パームと藻類の抽出残渣量

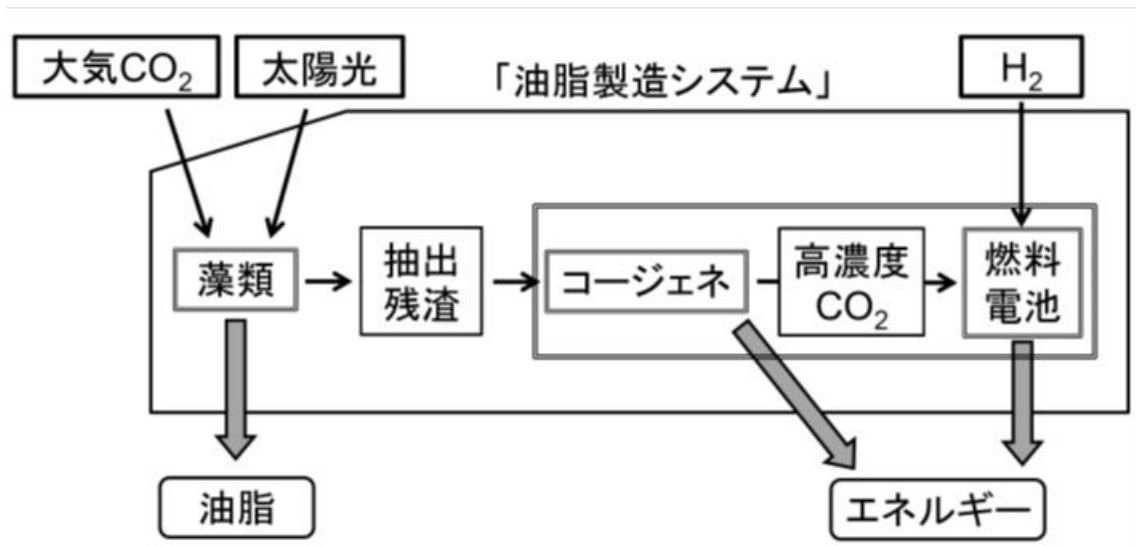


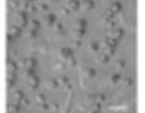


図 3 - 9 E C O F F 実現のための油脂製造システムの概要

藻類種	ユーグレナ  出典:藻類産業創成コンソーシアム	シュードコリスティス  出典:日経テクノロジーonline	ナンノクロロプシス  出典:藻類産業創成コンソーシアム
油脂含有率	33%	50%	50%
主な産出物	ワックスエステル	TAG、炭化水素	TAG、脂肪酸
生育環境	淡水	淡水	海水
生育温度	20~30℃	10~30℃	5~30℃
その他	—	酸に耐性	塩素に耐性

※TAG:トリアシルグリセロール

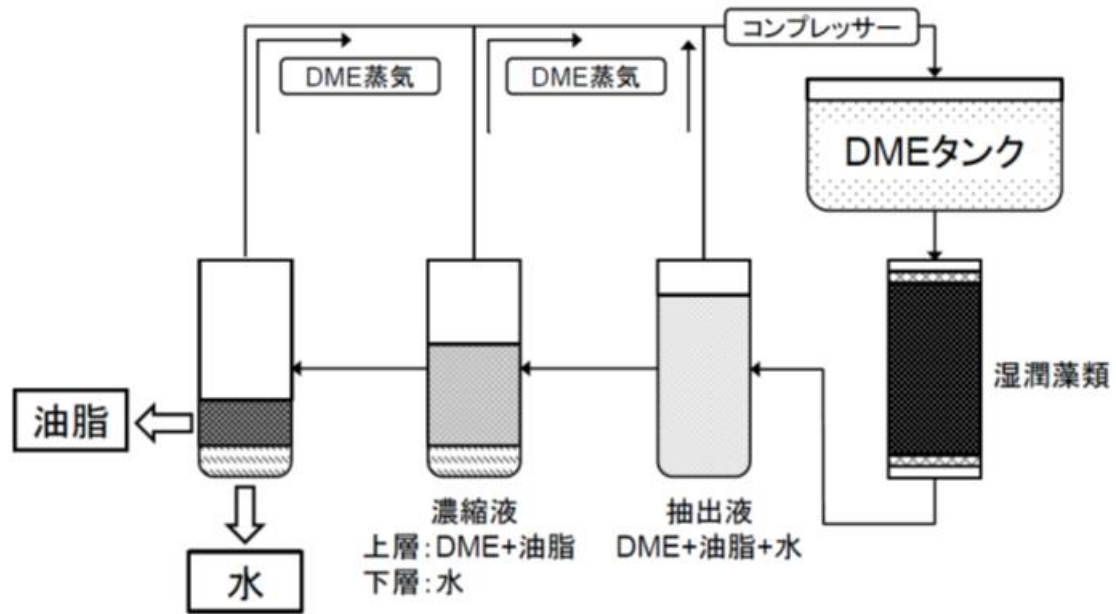
出典:各種作物・微細藻類のオイル生産能の比較(藻類産業創成コンソーシアムHP)をもとに作成

図4-1 油脂を産出する主な藻類

脂肪酸	脂肪酸名	割合(%)	
		ナンノクロロプシス 生産油脂	マカデミア ナッツ オイル
C14:0	ミリスチン酸	5.0	0.6
C14:1	ミリストレイン酸	1.0	—
C16:0	パルミチン酸	20.3	8.0
C16:1	パルミトレイン酸	23.9	22.0
C18:0	ステアリン酸	0.6	3.0
C18:1	オレイン酸	7.9	54.6
C18:2	リノール酸	3.2	2.7
C18:3	リノレン酸	—	2.4
C20:0	アラキジン酸	—	2.5
C20:1	エイコセン酸	—	2.3
C20:4n-6	アラキドン酸	3.9	—
C20:5n-3	EPA	21.0	—
C22:0	ベヘン酸	—	0.8
C22:1	エルシン酸	—	0.3
C24:0	リグノセリン酸	—	0.3
その他		13.2	0.5

出典:抽出物の脂肪酸組成(微細藻培養技術事業化可能性調査共同事業体の平成23年4月調査報告)
マカデミアナッツの脂肪酸組成(株式会社エコロジーコミュニケーションズHP)をもとに作成

図4-2 ナンノクロロプシス生産油脂およびマカデミアナッツオイルの脂肪酸組成



出典：DME抽出プロセスモデル（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の平成23～24年度成果報告書）をもとに作成

図4-3 DME抽出法

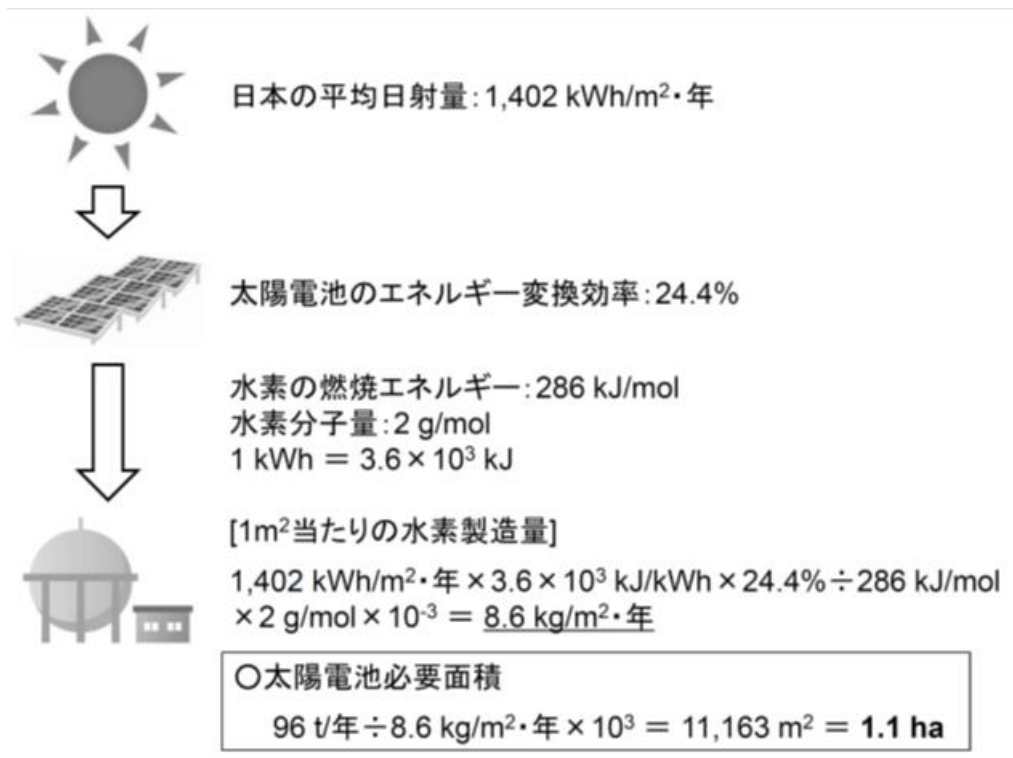
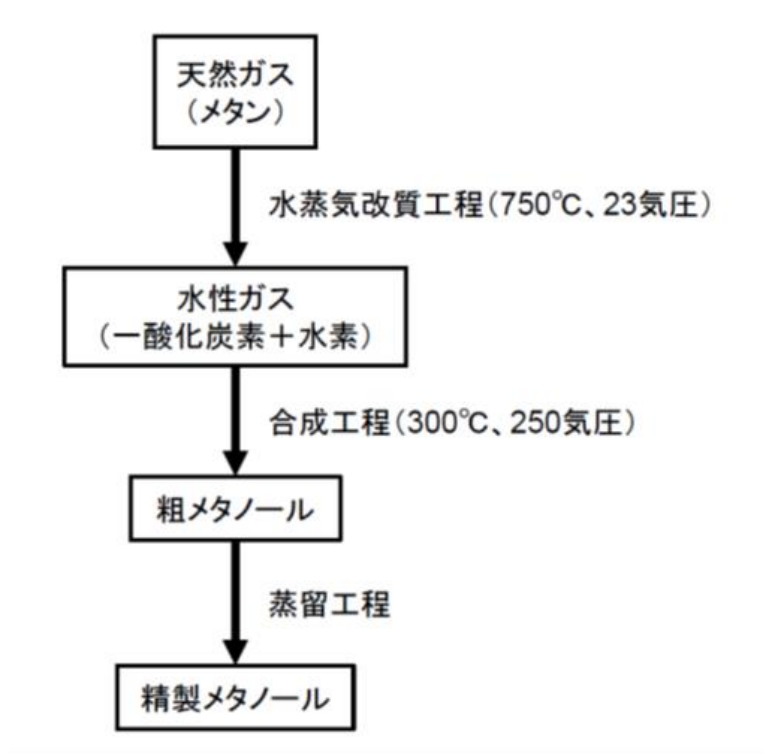


図4-4 水素供給に必要な太陽電池面積



出典：Web版化学プロセス集成「メタノールプロセス」（化学工学会HP）をもとに作成

図4-5 化石燃料由来のメタノール製造プロセス

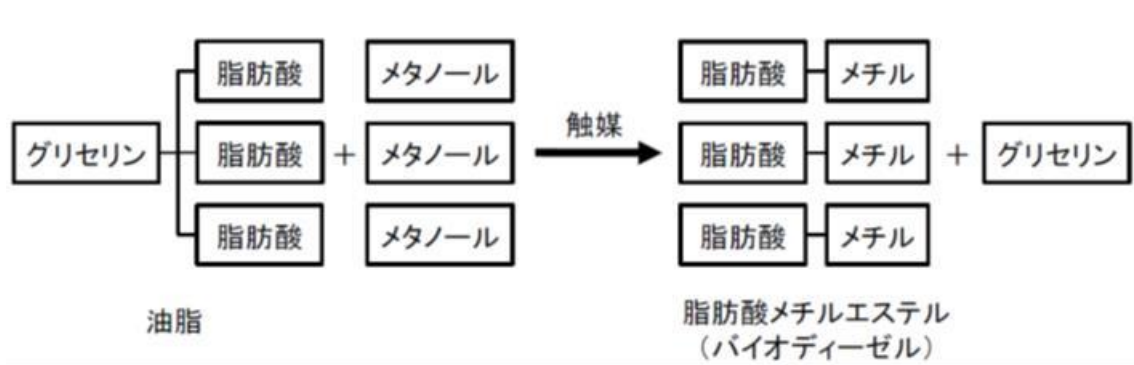


図4-6 バイオディーゼル製造法

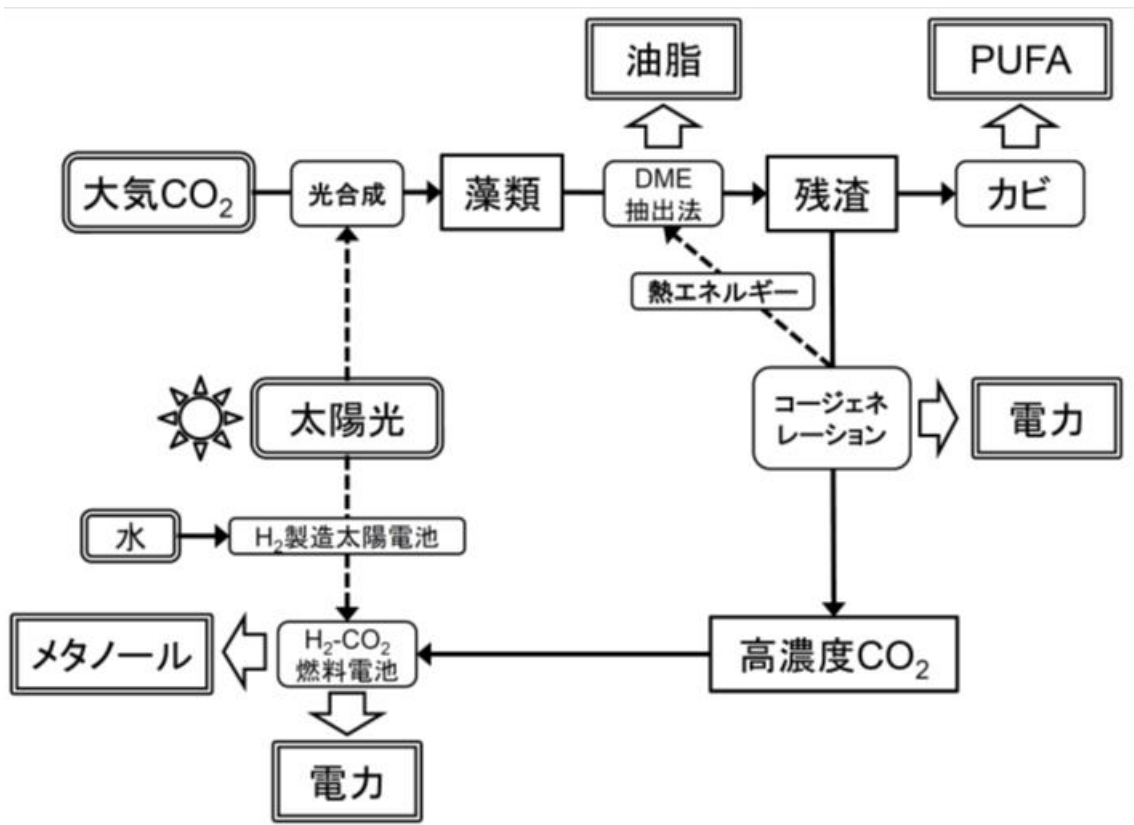


図 4 - 7 E C O F F 実現のための油脂製造システムの全容

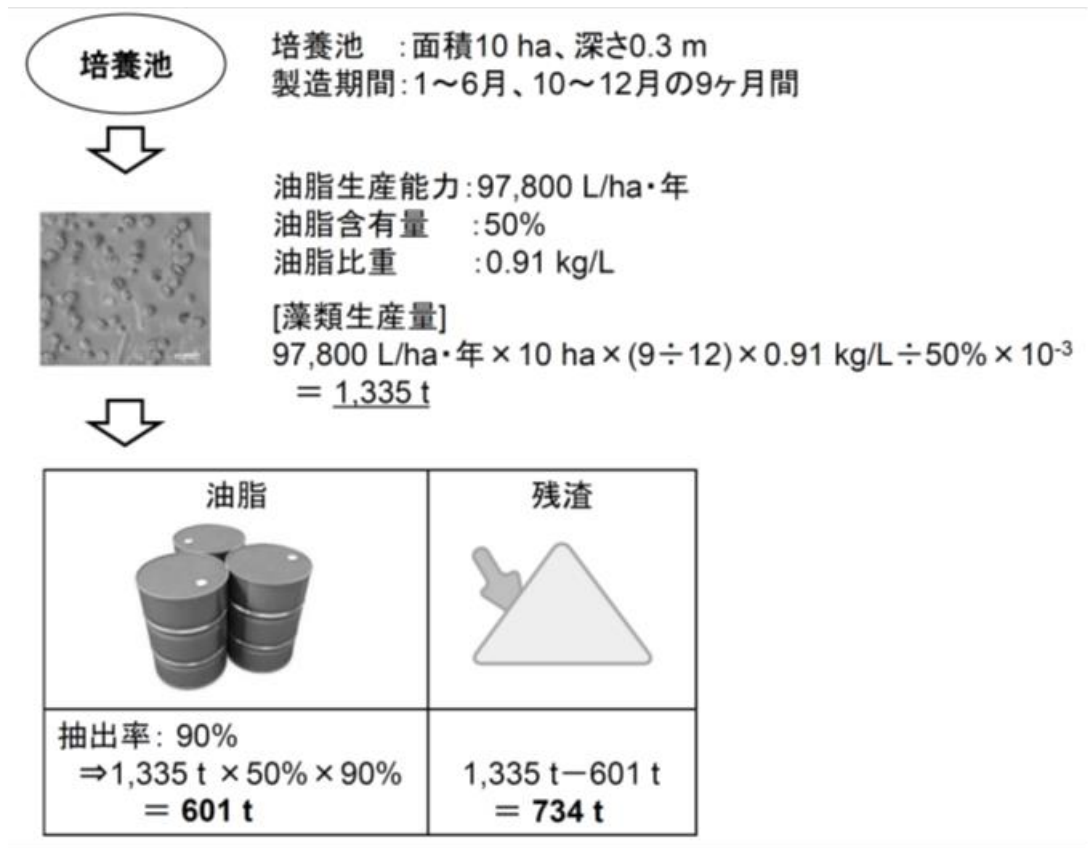


図5-1 本工場における油脂の生産量（一年間）

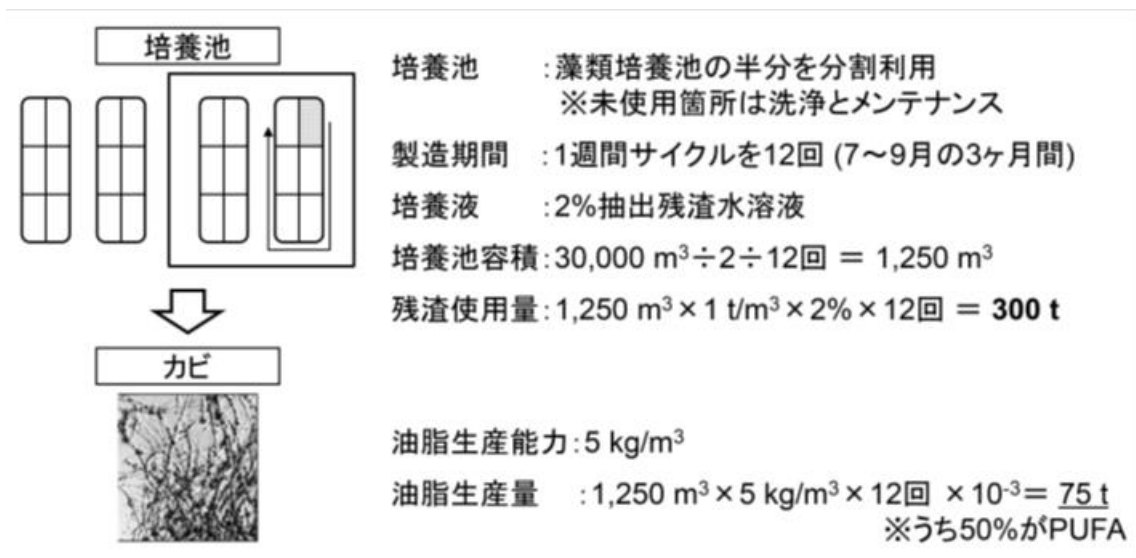


図5-2 本工場における50%PUFA含有油脂の生産量（一年間）

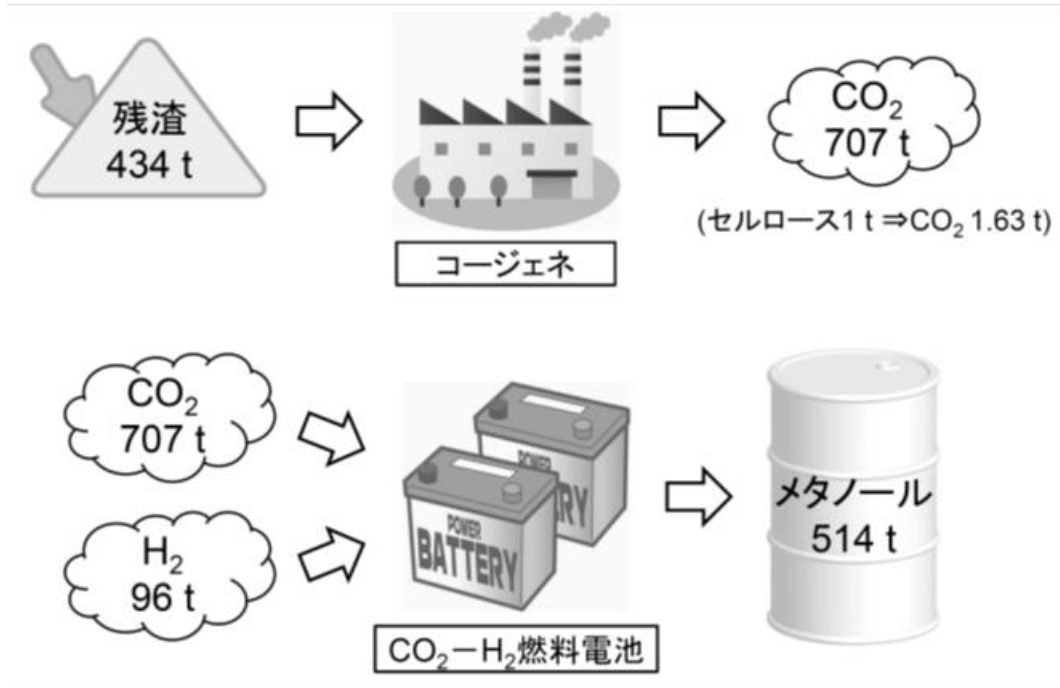


図 5 - 3 本工場におけるコージェネー燃料電池発電システムの生産物(一年間)

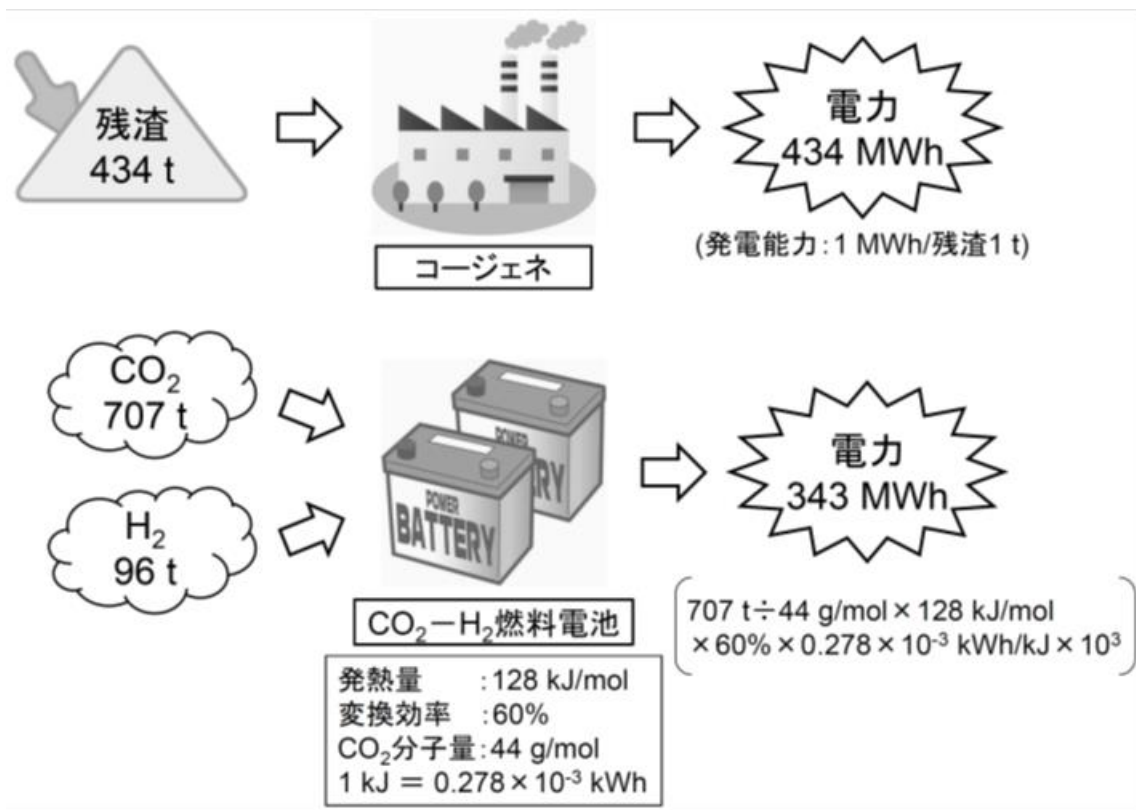


図 5 - 4 本工場における電力生産 (一年間)

工程	試算	消費電力
攪拌	攪拌エネルギー: 0.1 W/m^2 $\Rightarrow 100,000 \text{ m}^2 \times 12 \text{ h} \times 365 \text{ 日} \times (9 \div 12) \times 0.1 \text{ W/m}^2 \times 10^{-6}$	33 MWh
水の 入れ替え	<1回分の電力> ポンプ流量: $50 \text{ m}^3/\text{min}$ 、ポンプ電力: 300 kW $\Rightarrow 30,000 \text{ m}^3 \div 50 \text{ m}^3/\text{min} \times 300 \text{ kW} \div 60 \text{ min/h} \times 10^{-3}$ $= \underline{3 \text{ MWh}}$ <入れ替え回数> 藻類濃度: $1 \text{ g/L} = 0.001 \text{ t/m}^3$ $\Rightarrow 1,335 \text{ t} \div 0.001 \text{ t/m}^3 \div 30,000 \text{ m}^3 = \underline{45 \text{ 回}}$ <取水・排水の合計> $\Rightarrow 3 \text{ MWh} \times 45 \text{ 回} \times 2$	270 MWh
濃縮	濃縮エネルギー: 0.1 kWh/m^3 $\Rightarrow 1,335 \text{ t} \div 0.001 \text{ t/m}^3 \times 0.1 \text{ kWh/m}^3 \times 10^{-3}$	134 MWh
抽出	抽出エネルギー: 36 kWh/t $\Rightarrow 1,335 \text{ t} \times 36 \text{ kWh/t} \times 10^{-3}$	48 MWh
精製	DME液化エネルギー: 36 kWh/t $\Rightarrow 601 \text{ t} \times 36 \text{ kWh/t} \times 10^{-3}$	22 MWh

図 5 - 5 本工場における藻類からの油脂製造時の消費電力（一年間）

工程	試算	消費電力
攪拌	攪拌エネルギー: 0.1 W/m^2 培養池の面積 : $100,000 \text{ m}^2 \div 2 \div 12 \text{ 回} = 4,167 \text{ m}^2$ $\Rightarrow 4,167 \text{ m}^2 \times 24 \text{ h} \times 7 \text{ 日} \times 12 \text{ 回} \times 0.1 \text{ W/m}^2 \times 10^{-6}$	1 MWh
水の 入れ替え	<1回分の電力> ポンプ流量: $50 \text{ m}^3/\text{min}$ 、ポンプ電力: 300 kW $\Rightarrow 1,250 \text{ m}^3 \div 50 \text{ m}^3/\text{min} \times 300 \text{ kW} \div 60 \text{ min/h} \times 10^{-3}$ $= \underline{0.13 \text{ MWh}}$ <取水・排水の合計> $\Rightarrow 0.13 \text{ MWh} \times 12 \text{ 回} \times 2$	3 MWh

図 5 - 6 本工場におけるカビからの P U F A 製造時の消費電力（一年間）

<電力生産>	
コージェネ	434 MWh
CO ₂ -H ₂ 燃料電池	343 MWh
計	777 MWh
<電力消費>	
・藻類	
攪拌	33 MWh
水の入れ替え	270 MWh
濃縮	134 MWh
抽出	48 MWh
精製	22 MWh
・カビ	
攪拌	1 MWh
水の入れ替え	3 MWh
計	511 MWh
<電力収支>	+266 MWh

図5-7 本工場におけるエネルギー（電力）収支（一年間）

項目	品目	条件	単価	数量/人	金額
製造コスト	油脂類	—	250 円/kg	676 t	169百万円
減価償却費	建設費	償却年数 20年	2,506百万円	—	125百万円
ランニング コスト	メンテナンス	対総工費 4.5%	113百万円/年	—	113百万円
運転人件費	バイオロジスト	—	4,200千円/年・人	2人	8.4百万円
	エンジニア	—	3,600千円/年・人	4人	14.4百万円
	雑役者	—	3,000千円/年・人	15人	45.0百万円
	現場作業者	—	2,640千円/年・人	25人	66.0百万円
	小計				
総コスト					541百万円

図5-8 本工場におけるコスト（一年間）

項目	品目	単価	数	金額
コスト	製造コスト	250 円/kg	676 t	169百万円
	減価償却費	2,506百万円	償却20年	125百万円
	ランニングコスト	113百万円/年	—	113百万円
	運転人件費	2,640~4,200千円/年・人	46人	134百万円
	合計			541百万円
売り上げ	油脂	2,000 円/kg	601 t	1,202百万円
	50%PUFA含有油脂	15,000 円/kg	75 t	1,125百万円
	メタノール	50 円/kg	514 t	26百万円
	余剰電力	24 円/kWh*	266 MWh	6百万円
	合計			2,359百万円
工場収支	2,359百万円 - 541百万円 = 1,818百万円			

※平成28年度 非住宅用太陽光

図 5 - 9 本工場における工場収支（一年間）

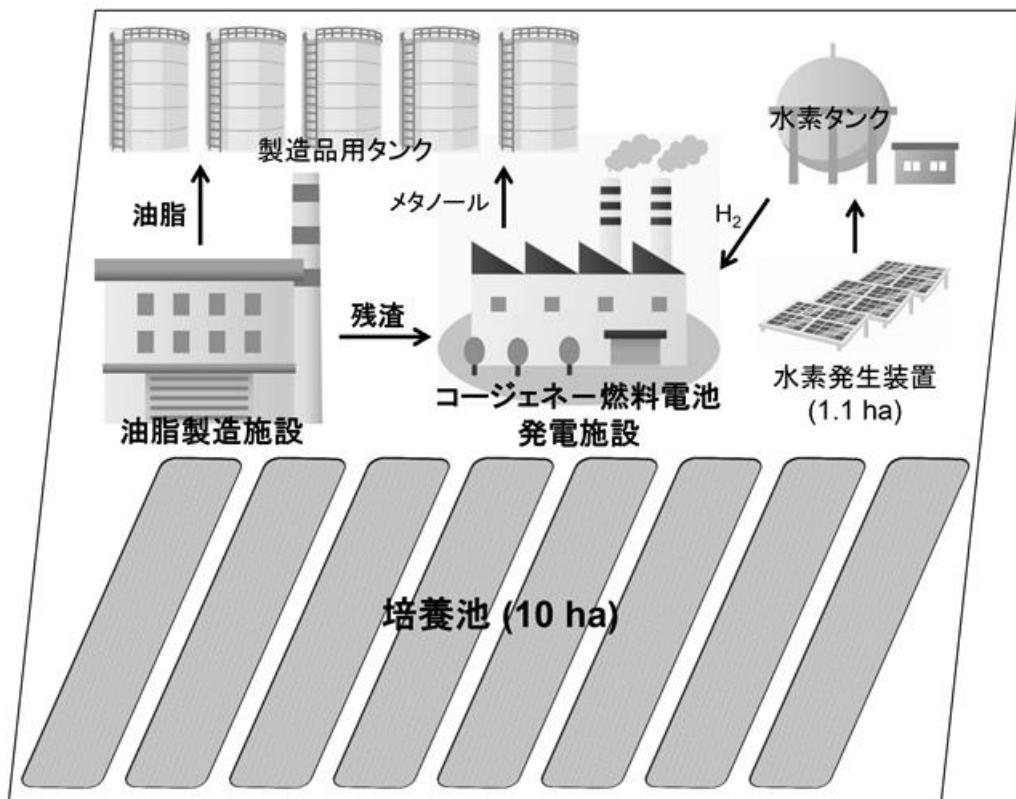


図 5 - 10 本工場の全体図

品目	単位量当たりのCO ₂ 固定量	数量	CO ₂ 固定量
油脂	2.747 kg/kg (2.5 kg/L)	676 t	1,857 t
メタノール	1.375 kg/kg	514 t	707 t
余剰電力	599 g/kWh*	266 MWh	159 t
合計			2,723 t

※天然ガス火力発電換算

図 5 - 1 1 本工場による二酸化炭素固定量（一年間）

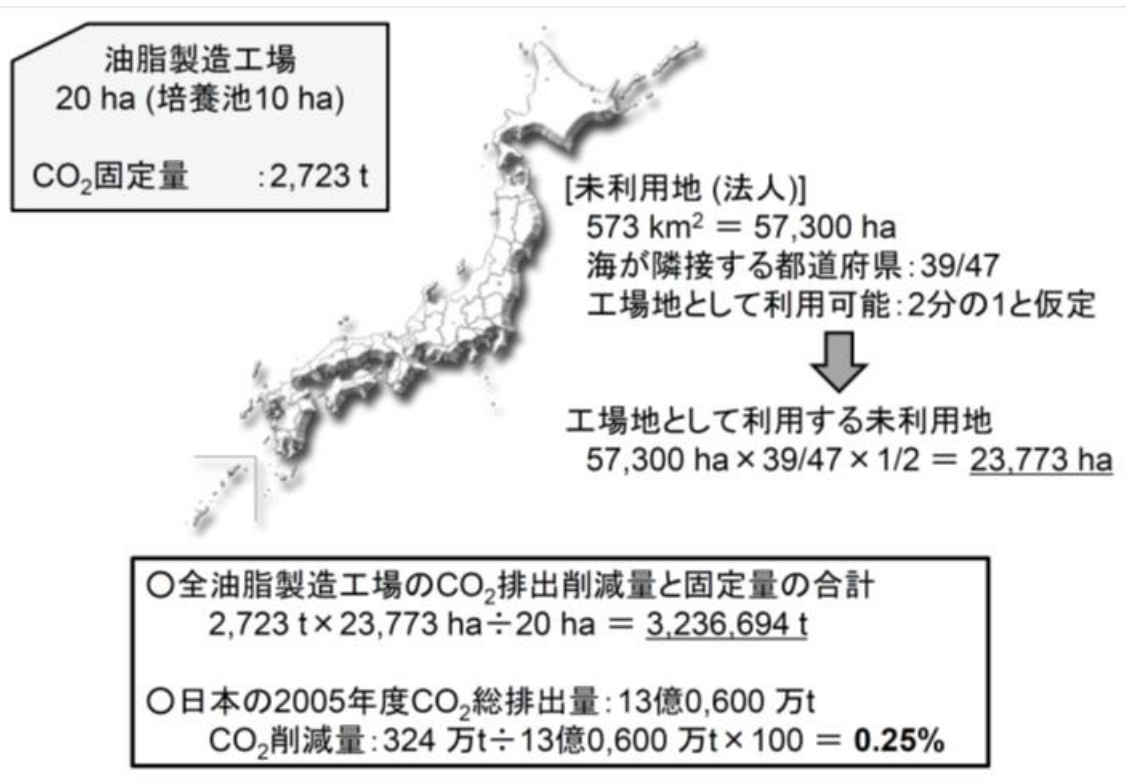


図 5 - 1 2 未利用地を利用した際の本油脂製造システムによる二酸化炭素総固定量（一年間）