

第 55 回油脂産業論文

油脂産業における脱炭素社会への貢献

「水素細菌を活用した新しい油脂生産と  
水素社会実現に向けた需要創出」

日油株式会社  
機能食品事業部 食品研究所  
た や だいすけ  
田谷 大輔

## 目次

はじめに.....	1
<b>第1章 油脂産業と脱炭素社会.....</b>	<b>2</b>
1-1 油脂産業の現状 .....	2
1-2 パーム油代替油脂の現状 .....	4
<b>第2章 水素細菌による油脂生産.....</b>	<b>5</b>
2-1 水素細菌について .....	5
2-2 水素細菌による油脂生産 .....	6
<b>第3章 構想実現に向けた施策と課題.....</b>	<b>8</b>
3-1 石油化学コンビナートからの水素供給 .....	8
3-2 アブラヤシ廃棄物からの水素供給 .....	11
3-3 スマートセルを活用した水素細菌の生産性向上 .....	14
3-4 本施策によるコスト試算 .....	16
おわりに.....	20
参考文献.....	21

はじめに

海面の上昇や降水量の変化、異常気象の頻発、砂漠の拡大など地球温暖化による異常気象が世界的に深刻な問題となっている。地球温暖化の主な原因は二酸化炭素やメタン、フロンなどの温室効果ガスである。温室効果ガスの排出量は化石燃料の使用が増えた産業革命以降増加しており、地球温暖化の最大の原因である二酸化炭素濃度は、産業革命前 1750 年の 278.3ppm から 2021 年には 415.7ppm となり、最高値を更新している<sup>1)</sup> (図 1)。2015 年に採択されたパリ協定では、「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保つとともに、1.5°C に抑える努力をする」という世界共通の目標が掲げられている<sup>2)</sup>。このパリ協定を境に、二酸化炭素排出量を従来より抑えることを目標とする低炭素社会から、排出量を実質的にゼロにする脱炭素社会へと、国際社会の目標が明確に変化した。日本では、2019 年に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を策定し、「2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言している。一方、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は、温室効果ガスの排出をこのまま継続すると、「短期のうちに世界の平均気温の上昇は 1.5°C に達することが推定される」と指摘しており、脱炭素社会実現に向けて更なる取り組みが求められている<sup>3)</sup>。

油脂産業においては、世界の人口増加に伴い油脂の需要が増加している。需要増加により油脂の生産量は増え続けている一方、例えば、植物油の生産量増加に伴う農園開発は大量の温室効果ガスを排出し、地球温暖化の原因となる。そのため、増え続ける植物油の需要に応えるためには、植物油に代わる温室効果ガスを排出しない新しい油脂生産システムが必要である。このような状況を鑑み、解決策として「水素細菌」の活用を提案する。

水素細菌は水素をエネルギー源として二酸化炭素を利用しながら有機物を産生する微生物である。水素細菌は有機物の生産過程において二酸化炭素を吸収することで、二酸化炭素の排出量よりも吸収量が多いカーボンネガティブが可能となることから、脱炭素社会の実現に向けて有用な手段の一つとして期待される。また、水素細菌がエネルギー源とする水素は二酸化炭素を排出しないことから脱炭素社会実現に向けた次世代エネルギーとして期待されている。日本政府は 2023 年に「水素基本戦略」をとりまとめ、今後 15 年間で 15 兆円を超える投資を行い、2040 年の水素の利用量を今の 6

倍の 1,200 万トン程度まで引き上げたいとしている<sup>4)</sup>。本論文では、「水素細菌」を最大限活用することで、脱炭素社会実現に向けた温室効果ガスを排出しない新たな油脂生産システムの構築と次世代エネルギーである水素需要を創出し、水素社会実現にもつながる施策について提案する。

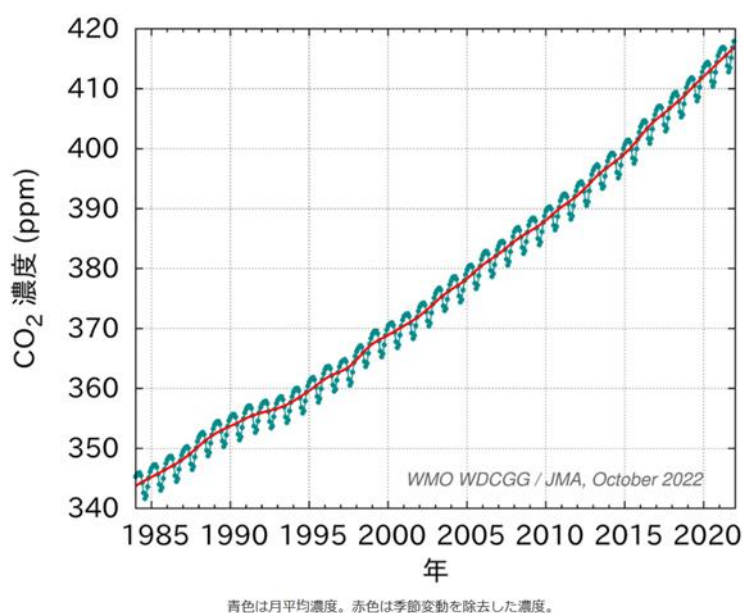


図 1 大気中二酸化炭素の世界平均濃度の経年変化  
(世界気象機関 (WMO) 温室効果ガス年報より)

## 第 1 章 油脂産業と脱炭素社会

### 1-1 油脂産業の現状

2020/21 年の植物油の生産量は 2 億 1,094 万トンで、2000/01 年比の 2 倍以上となっており、世界の人口増加とバイオ燃料需要増加から今後も植物油の生産量は増加していくことが予想されている<sup>5)</sup> (図 2)。この内、世界で最も生産量が多いのはアブラヤシの果実から得られるパーム油であり、毎年約 7,000 万トンが生産されている。パーム油は他の植物油と比べて生産効率が高いため価格面で優位であり、また幅広い用途に使うことができるため、需要が拡大してきた。需要が拡大する一方で、アブラヤ

シ農園をつくるための熱帯林破壊や泥炭地破壊が地球温暖化の問題になっている。世界のパーム油生産量の約 85%を占めているインドネシアやマレーシアでは、1990 年から 2010 年までの 20 年間に約 360 万 ha の熱帯林がアブラヤシ農園になっている。さらに、2050 年には世界の人口が 98 億人になると予想されており、今後も生産量が増え続けることが見込まれていることから、アブラヤシ農園開発のための熱帯林破壊や泥炭地破壊が加速することが予想されている。泥炭地は、炭素を含んだ有機物が堆積してできた土壌のことである。泥炭地は地球の陸地面積のわずか 3%にすぎないが、世界中の森林を合わせたよりも多くの炭素が蓄えられている。そのため、泥炭地が燃えると膨大な二酸化炭素を排出し、地球温暖化の大きな原因となる。インドネシアでは、2015 年の熱帯林・泥炭地の火災により、二酸化炭素換算で約 17.50 億トンの温室効果ガスが排出されており、これは、日本の年間総排出量の約 14.08 億トンを大きく上回っている。このように、パーム油生産増加によるアブラヤシ農園開発は、大量の温室効果ガスの排出を伴うことから地球温暖化の大きな原因となっている。

また、パーム油を生産する際に生じるアブラヤシ廃棄物も地球温暖化の大きな問題になっている。25～30 年の収穫期間を終えて伐採されたアブラヤシ廃棄物の多くは農園内に放置され、腐敗時にメタンガスを含む温室効果ガスを発生する。メタンガスの温室効果は二酸化炭素の約 25 倍と言われており、地球温暖化を加速させる。

以上のことから、油脂産業において、パーム油需要増加に伴うアブラヤシ農園開発とアブラヤシ廃棄物増加が地球温暖化の大きな原因となっている。このような状況から、本論文ではパーム油に着目し、パーム油に代わる温室効果ガスを排出しない油脂生産システムについて提案する。

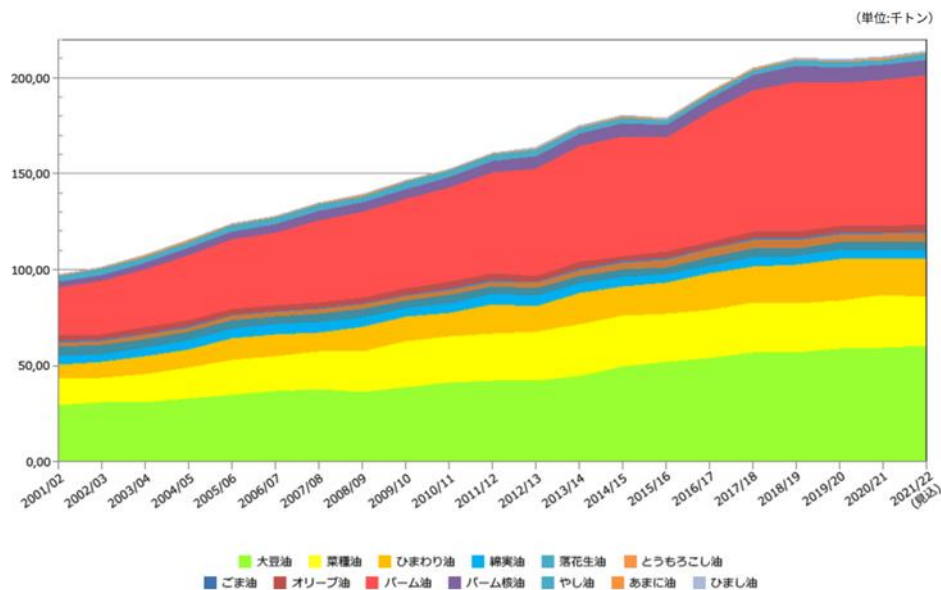


図2 主な植物油の生産量の推移

(ISTA Mielke 社「Oil World」2021/22 年報ほか各年報より)

## 1-2 パーム油代替油脂の現状

パーム油代替油脂として、微生物油に注目が集まっている。微生物油は広大な土地を必要とせずタンク培養で油脂を生産でき、気候の影響も受けずに安定供給することが可能である。世界的には、アメリカの「C16 Biosciences<sup>6)</sup>」、イギリスの「Clean Food Group<sup>7)</sup>」などがパーム油に代わる油脂酵母由来の代替油脂を開発している。日本においても、NEDO や不二製油<sup>8)</sup>、新潟薬科大学などが油脂酵母によるパーム油代替油脂の開発を行っている。微生物からパーム油代替油脂を大量生産できるようになれば、森林破壊防止や二酸化炭素の排出削減につながる。その一方、油脂生産効率向上や生産スケールアップ、コスト面など実用化に向けて様々な課題があるのが現状である。

## 第2章 水素細菌による油脂生産

### 2-1 水素細菌について

水素細菌とは、水素を酸化することで得たエネルギーを使って二酸化炭素を固定することで増殖する微生物の総称である。水素細菌は土壌や海洋、温泉地帯と自然界に広く分布し、多様な分類群に属する細菌が分離されている。水素細菌の培養に関して、培地に含まれるのは無機塩類のみであり、水素を酸化してエネルギーを得る際に生じるのは水、かつ副産物の生産も少ないため、雑菌汚染の虞が少なく、排水処理も簡易的なもので十分であることから大きな設備を必要としない。加えて、水素細菌は増殖速度が速く、他の独立栄養微生物であるらん藻と比較しても優れた二酸化炭素固定速度を有している。

水素細菌を食料・飼料とする取り組みは1960年代に盛んに行われてきたが、大量の水素調達、コストの問題などから実用化には至らなかった。しかし、近年、水素エネルギーへのシフトが国内外で進められており、将来的な大量生産、安定供給、インフラの拡充が見込まれるため、水素細菌が再注目されている。また、ここ10年間でDNA合成、ゲノム編集などの合成生物学と、ゲノム解析、AI・IT技術がそれぞれ発展し、より物質生産性を高めた微生物を作れるようになりつつある。海外では食料・飼料の蛋白質成分代替として供給することを掲げるスタートアップ企業が続々登場しており、ここ数年以内の商業化を目標に掲げている企業もある。国内においては、2015年に設立したCO<sub>2</sub>資源化研究所は、プロテイン事業、バイオフィーズ事業、化学品事業、バイオ燃料事業の4つの事業を柱に展開している<sup>9)</sup>。

水素細菌は有機物の生産過程において二酸化炭素を吸収することで、二酸化炭素の排出量よりも吸収量の多いカーボンネガティブが可能になること、培養に大きな設備を必要としないこと、非常に優れた増殖速度を有していること、水素需要を創出し、水素社会実現の一助となる可能性を秘めていることから、脱炭素社会につながる温室効果ガスを排出しないパーム油代替油脂生産の非常に有用な手段の一つとして期待される。

## 2-2 水素細菌による油脂生産

微生物の培養には、バイオリアクターやインキュベーター、ジャーファーメンターなどの装置が用いられる。バイオリアクターは、振とう器等で単純に液混合するフラスコ培養に対して、より高度な制御操作が可能な設備が付帯され、効率的培養が可能とされている。温調を目的とした温度センサーとヒーター、冷却設備に加え、液中のpHや溶存酸素濃度を計測するためのオンラインセンサーが装備されており、高い増殖速度や生産速度をフラスコ環境よりも長期間にわたり維持できるため、水素細菌の培養にはバイオリアクターが適切であると考えられる。水素細菌の培養には、 $H_2$ 、 $O_2$ 、 $CO_2$ が必要であり、培養条件は菌によってその最適量がやや異なるが、 $H_2:O_2:CO_2=7:1:2$ の容量比の混合ガス、 $50\sim 52^\circ C$ 、pH 6.8~7.2の条件が好ましい。水素細菌は増殖能力に優れており、水素細菌の中でも増殖速度の速い *H. thermoluteolus* TH-1 株は、倍加時間が約1時間であり、独立栄養生成物としては異例の速さで増殖する。水素細菌の生体成分の多くはたんぱく質である<sup>10)</sup> (図3)。

水素細菌の培養には多くの水素を必要とするため、水素細菌生産コストの6割は水素コストと言われている。水素はその製造方法によって、色分けする考え方が広がっており、2020年にドイツ政府による国家水素戦略に基づいて色分けが定義されている(図4)。現在は、供給される水素の多くがグレー水素であり、供給価格は100円/Nm<sup>3</sup>程度と、かなり高価であることから水素細菌の培養には高額のコストが必要になる。また、タンパク質に富んでいる一方、脂質は10%程度である。これらを考慮すると、コストや生産性などの面から水素細菌による油脂生産を実用化するには様々な課題がある。水素細菌を用いた油脂生産システム構築のためには、①水素コスト低下と安定供給、②油脂生産性の向上が必要である。次章では、水素細菌を用いた油脂生産システムの実用化に向けた施策を提案する。



分析項目	単 位	
タンパク質	乾物当り%	80.6
脂質（粗脂肪）	"	8.9
繊維質	"	0
灰分	"	3.6
全糖	"	6.7
デンプン	"	0.2
塩分	mg / 100g 乾物	49.7
ペプシン消化率	%	98.7
ポンプカロリー	(Kcal / g 乾物)	6.44

図3 水素細菌 3H-1 株の生態基礎成分分析値（参考文献 10 より）



図4 製造方法による水素の分類

### 第3章 構想実現に向けた施策と課題

#### 3-1 石油化学コンビナートからの水素供給

水素細菌による油脂生産を実用化するためには、水素のコスト低下と安定供給が必要不可欠である。そこで、石油化学コンビナートからの水素供給について提案する。

石油化学コンビナートとは、効率的な工業生産を行うために石油精製や化学合成などの事業所が集まった工業地帯のことである。石油・化学業界では、様々な用途で水素が使用されている。石油化学コンビナートからの水素の生産方法として、①製油所に既に存在する水素製造装置を使用する方法、②エチレン装置、ソーダ電解装置から発生している副生水素を使用する方法、③アンモニア製造に用いている水素製造装置の余力を使用する方法、④コークス炉から副生する鉄鋼 COG（副生水素）を使用する方法、⑤新規に水素製造装置を建設し、製造する方法などが挙げられる。石油業界、石油化学業界、ソーダ業界、アンモニア業界では、多くの水素を製造しているが、各業界の設備能力をベースに水素需給を試算した結果が表1である<sup>11)</sup>（表1）。今後、石油業界では、ガソリン需要減少、石油化学業界では、エチレン生産量の減少することにより水素供給が減少することが予想される（図5、6）。また、アンモニア業界でも、生産量が減少していくことが予想される（図7）。アンモニア合成用の水素需要が低下した分だけ水素生産能力に余裕が出てくることから、水素製造装置が廃棄されないとすれば水素供給能力は増加していくと考えられる。一方、石油・化学業界における水素純度は70～98%の範囲であり、水素細菌の生産を想定すると99.99%程度まで純度を高める必要がある。高純度精製装置として一般的なPSA(Pressure Swing Absorption)装置を用いると、およそ25～30%の水素回収ロスが発生する。この回収ロスと各業界の将来の見通しから、各業界別の高純度水素供給可能量の見通しを試算した結果が表2である。この水素は燃料電池自動車などの用途にも利用されるため全てを利用することはできないが、他用途での利用を考慮しても水素細菌を培養するには十分量的水素を供給できると考える。また、各水素源別の水素精製回収コストを比較したのが表3である。水素はメタンを原料とし、水蒸気を使用し製造する水蒸気改質法が最も工業化された製造方法である。本施策のように天然ガスなどの化石資源から製造される

水素は「グレー水素」であるが、水蒸気改質法により水素を製造し、天然ガスを 64.8 円/Nm<sup>3</sup> とすると、水素 1Nm<sup>3</sup> 製造するのに必要な原料コストは 17.2 円と試算される。水素精製回収コストを各水素源別の平均値を用いるとすると、水素製造コストは 22.3 円/Nm<sup>3</sup> と見積もられる。日本では、2030 年に水素価格を 30 円/Nm<sup>3</sup> 以下にすることを目標としていることから、本施策による水素製造コストは現実的な数値であると考えられる。

一方で、効率的で経済的な水素の輸送・貯蔵方法を確立する必要がある。現時点では、圧縮水素あるいは液体水素にして輸送・貯蔵する方法が最有力と考えられているものの、圧縮水素では、エネルギー密度が小さく一度に運べる量が限られること、貯蔵場所を広くとる必要があること、液体水素では、エネルギーが大きく、非常に揮発しやすいためボイルオフによるロスが避けられないことなどの課題がある。石油、石油化学、ソーダ、アンモニアの各工場はコンビナート内の近接した場所に位置しており、相互にパイプラインで結ばれているなど緊密な関係にあるため、石油コンビナート内で水素を統合し、連携して水素を供給していく仕組みが有効と考えられる。各業界の副生水素を 1 か所に集約し、必要に応じて水素製造装置を用いて水素を製造し水素細菌の培養に用いる。このように一括して水素を製造することで安定的な供給が可能になる。脱炭素社会実現に向けて、油脂業界が各業界と協力し、一体となって水需要創出のための取り組みを行っていく必要があると考える。

表 1 石油・化学業界の水素需給の現状（参考文献 11 より）

（単位：億 Nm<sup>3</sup>/年）

業界	供給	需要	バランス
石油	189	140	49
石油化学	31	18	13
ソーダ	12	1	11
アンモニア	42	32	10
合計	273	190	83

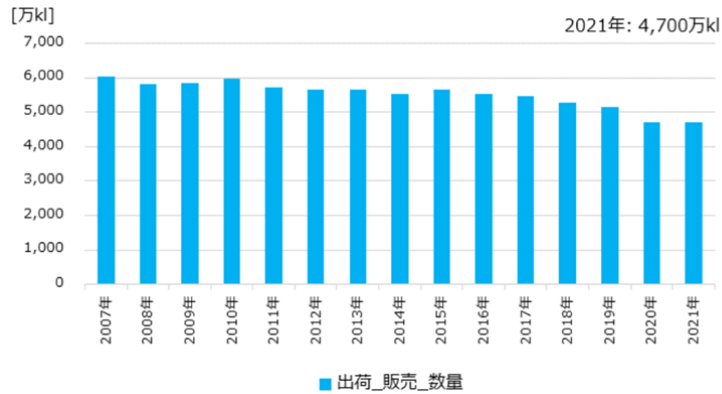


図5 ガソリンの出荷販売数量の推移  
(経済産業省 資源・エネルギー統計より)

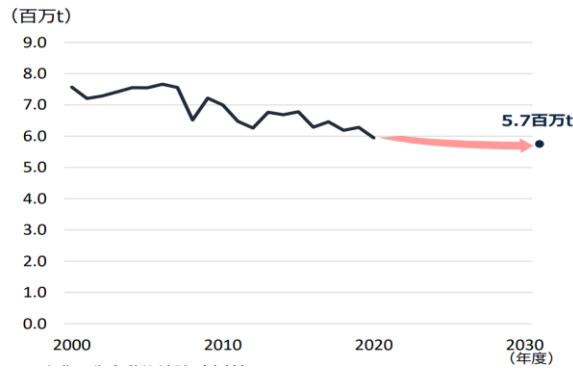


図6 エチレン生産量の見通し  
(経済産業省 生産動態統計より)

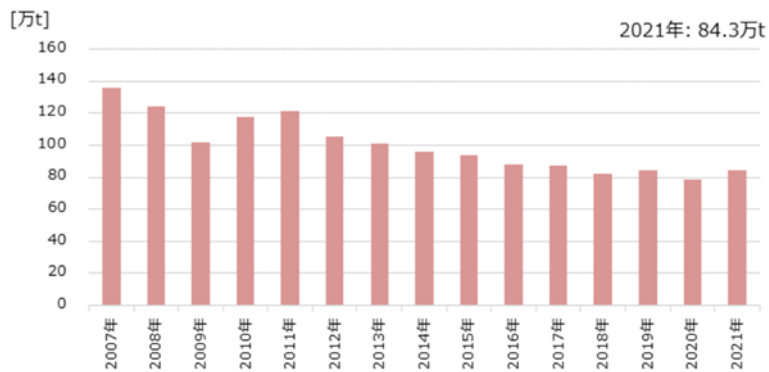


図7 アンモニア生産量の推移  
(経済産業省 生産動態統計 化学工業より)

表2 石油・化学業界からの高純度水素供給可能量

(単位：億Nm<sup>3</sup>/年)

業界	現状のポテンシャル	回収率	供給可能量
石油	49	75%	36.75
石油化学	13		9.75
ソーダ	11		8.25
アンモニア	10		7.25
合計	83	—	62

※水素回収ロスを25%と仮定

表3 各水素源別の水素精製回収コストの比較 (参考文献 11 より)

水素源	精製回収コスト(原料代除く)					
	水素純度	圧力	電力費	その他 用役費	固定費	合計
石油精製	97%	1.6 MPa	0.0	1.1	0.7	1.7
石油化学	89%	0.54MPa	2.5	1.2	3.1	6.7
ソーダ	95%	0.01MPa	1.9	1.1	1.6	4.6
アンモニア	74%	2.6 MPa	0.0	1.4	1.1	2.5
鉄鋼	57%	0.01MPa	3.8	1.8	4.5	10.1

### 3-2 アブラヤシ廃棄物からの水素供給

地球温暖化の大きな問題になっているアブラヤシ廃棄物からの水素生産について提案する。

パーム油製造工程から排出される廃棄物は、パーム空果房 ( Empty Fruit Bunch : EFB )、パーム搾油工場排水 ( Palm Oil Mill Effluent : POME )、パームヤシ殻 ( Palm Kernel Shell : PKS )、パーム中果皮繊維 ( Oil Palm Mesocarp Fiber : OPMF ) が挙げられる。また、パームプランテーションから排出されている廃棄物には、パーム古木 ( Oil Palm Trunk : OPT )、パーム枝葉がある。これらのうち EFB、OPT は有効な利用法がないうえに、排出される量が膨大で、その発生量はパーム油の生産量の 85% を占めるマレーシアとインドネシアで EFB は 5,000 万 トン/年、OPT は 6,500 万

トン/年 といわれている。また、POME は適切な処理がなされないため、腐敗して大気中へメタンガスが放出される。メタンガスの発生量を算出すると、POME から 250 万 t/年にのぼる<sup>12)</sup>。メタンガスはそのまま大気中に戻せば地球温暖化の原因となるが、天然ガスの主成分であり、水素製造に利用することが可能である。そこで、アブラヤシ廃棄物により放出されるメタンガスからの水素供給について考える。

アブラヤシ廃棄物からのメタンガス製造方法について考える。メタン発酵とは、酸素の無い嫌気環境でメタン菌と呼ばれる嫌気性微生物が有機物を分化し、メタンガスを作り出すことをいう。メタン発酵技術を用いてパーム廃棄物からメタンガスを製造する場合、EFB から 275 万トン/年、OPT から 741 万トン/年、合計で 1,266 万トン/年と算出される<sup>13),14)</sup> (図 8)。メタン発酵の前処理に必要なアブラヤシ廃棄物の粉碎コストは、33.6 円/kg、メタン発酵に関して、メタンガス製造コストは 33.7 円/kg と試算されている<sup>15)</sup>。水素は液化しても密度が小さいためインドネシアやマレーシアからメタンガスの状態で輸送し、国内で水素を製造する方がコストを抑えられると考える。米国ーアジア間の天然ガスの液化コスト、液化燃料、輸送費用は \$5/MMBtu であり、31.6 円/kg と算出される<sup>16)</sup>。粉碎コスト、メタンガス製造コスト、輸送コストを踏まえると、98.9 円/kg-メタンガスで国内に供給できる試算である。

このメタンガスを用いて水素を製造する方法について考える。一般的にメタンガスから水素を作るときには、3-1 で述べたようにメタンガスの水蒸気改質という技術が用いられるが、水素の精製に伴って CO<sub>2</sub> が排出されるため、カーボンニュートラルとするには、発生した CO<sub>2</sub> を回収・固定する装置が必要となる。一方、メタン直接分解法は、水蒸気改質法と比較して、メタン 1 分子あたりの水素生成量は 1/2 であるものの、反応によって CO<sub>2</sub> が排出されず、固体の炭素（カーボンブラック）が生成される。この炭素をそのまま貯蔵又は他の用途で利用することでカーボンニュートラルとなるため、生成する水素は CO<sub>2</sub> フリー水素となる (図 9)。原料に天然ガスの主成分であるメタンガスを用い、CO<sub>2</sub> を排出せずカーボンニュートラル由来の水素である「ターコイズ水素」は近年注目を集めており、国内でもエア・ウォーターなどが技術開発に着手している<sup>17)</sup>。本施策では、ターコイズ水素となるメタン直接分解による水素製造方法について考える。メタン直接分解法では、単純計算すると、1kg のメタンから 0.25kg の水素と 0.75kg のカーボンブラックが生成する。メタン直接分解法による水素とカ

カーボンブラックの収率をエア・ウォーターが開発している水素製造システムの目標値である 85%とすると、1,266 万トンのメタンガスから 269 万トンの水素、807 万トンのカーボンブラックが製造できる試算である。メタン熱分解プラント（1500℃）における水素製造コストは、\$1.72/kg-水素、そのうち原材料費は\$0.57 と推定されている<sup>18)</sup>。これを本論文のメタンガス原料費と置き換えると \$3.81/kg-水素（47.5 円/Nm<sup>3</sup>）と試算される。これは、2030 年までの目標値である 30 円/Nm<sup>3</sup> より高いが、本来であればアブラヤシ廃棄物から排出されるメタンガスを用いており、カーボンネガティブにつながることから付加価値をつけて販売できると考える。また、本コストはカーボンブラックの利用を考慮していない。カーボンブラックはゴム製品の補強材や電線の被覆材などの用途で利用されており、200 円/kg 程度で販売されている（2023 年 6 月単価）。カーボンブラックの利用も考慮すると水素製造コストを大幅に削減できる可能性が考えられる。以上のことから、課題はあるものの十分実現可能性の高い方法と考える。

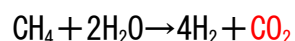
	万トン	固形分	メタンガス生成量（万トン）
EFB	5,000	35%	275
OPT	6,500	60%	741
POME			250
		合計	1,266

1gのEFB（湿重）あたり0.055gのメタンガスが生成すると仮定<sup>13)</sup>

1gのOPT（乾重）あたり0.19gのメタンガスが生成すると仮定<sup>14)</sup>

図 8 アブラヤシ廃棄物からのメタン生成量

- ・メタンの水蒸気改質・シフト化反応による水素の生成



- ・メタン直接分解法による水素の生成

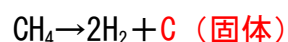


図 9 水素製造方法

### 3-3 スマートセルを活用した水素細菌の生産性向上

水素細菌を用いた油脂生産の実用化に向けて、水素供給のコスト低下と安定供給の他に、油脂生産性や細胞増殖性、油脂品質の向上などパーム油に代わる高品質の油脂を生産する水素細菌の品種改良が必要である。このような課題の解決に向けてスマートセル技術の活用について提案する。

スマートセルとは、特定の物質を作らせるために複数の遺伝子改変を加えた細胞のことを指し、目的とする物質の製造機能を合理的に高めることができる。このスマートセルを用いて機能性物質を生産させ利用する次世代のモノづくり産業群として「スマートセルインダストリー」が注目されている。近年のバイオテクノロジー分野では、①次世代シーケンサの開発によるゲノム解析の短時間化とコスト低減、②AI・IT技術の進化によるゲノム情報の分析やゲノム設計、③ゲノム編集技術による狙った生物機能の発現の3分野の技術革新がおり、バイオ技術とデジタル技術分野の融合により2016年に経済産業省によるNEDOの潜在的な生物機能を引き出すスマートセルプロジェクトがスタートしている。スマートセルプロジェクトでは、最新バイオ技術やAI・IT技術を加えた“DBTLサイクル”【Design（設計）→Build（構築）→Test（評価）→Learn（学習）→】を用いて新たな物質生産プロセスを構築し、高機能・省エネルギー・低コストな生産技術を目指しており、化学合成では生産が難しい化合物の生産への取り組み、有用物質生産の加速、食料問題に対する取り組みなどが期待されている（図10）。実際、不二製油はスマートセル技術により油脂合成効率向上等を図り、油脂高蓄積酵母としての実用開発を進めている<sup>19)</sup>。また、旭化成ファーマは、野生株に対し約30倍高い原料酵素の生産性を実現している<sup>20)</sup>。このスマートセル技術を用いることで、油脂生産性や、油脂品質を向上させたパーム油に代わる油脂を生産する水素細菌を得ることが期待できる（図11）。



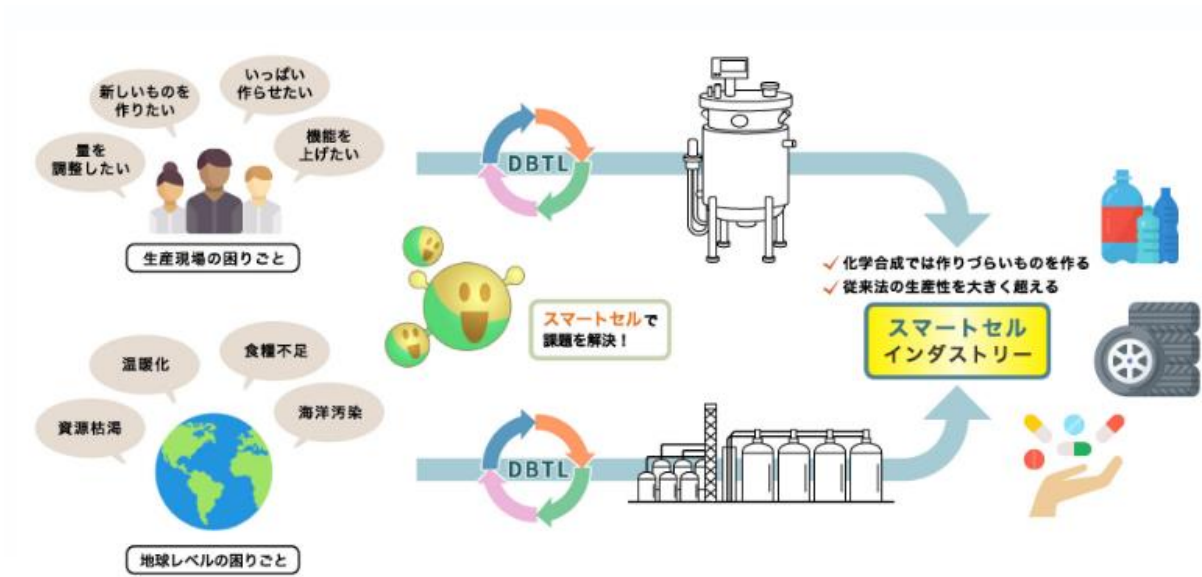


図 10 スマートセル開発ワークフロー  
(NEDO SMARTCELL PROJECT より)

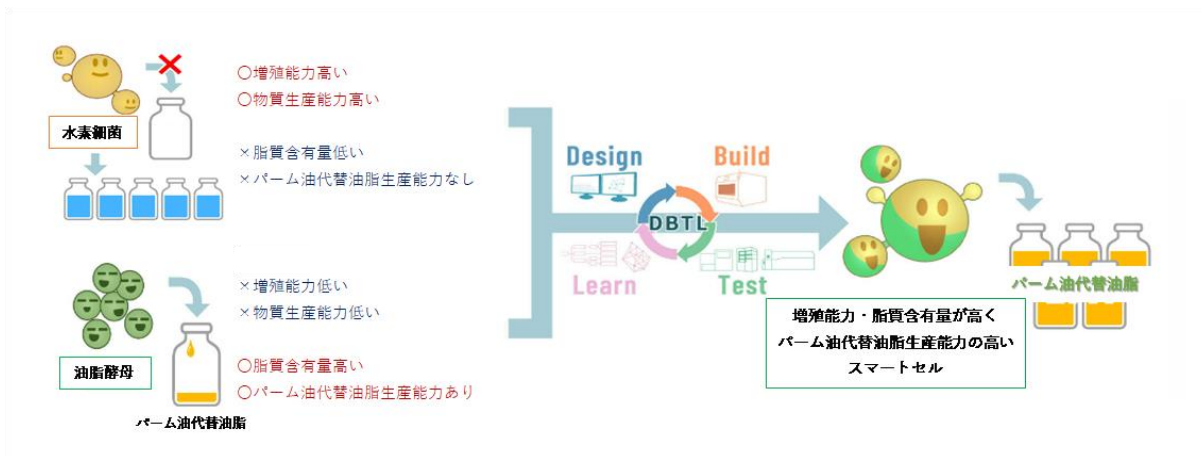


図 11 水素細菌のスマートセルの開発フローモデル

### 3-4 本施策によるコスト試算

本施策における水素細菌によるパーム油代替油脂生産システムについて図 12 に示す。

#### ①CO<sub>2</sub>供給について

水素細菌の培養には、水素のほかに炭素源として、大量のCO<sub>2</sub>が必要である。大気中のCO<sub>2</sub>濃度は0.04%程度であり、大気の直接利用は水素細菌の高い増殖速度を考慮すると現実的ではない。日本のCO<sub>2</sub>排出量は年間11.1億トンであるが、そのうちの約6割が製油所・発電所等、鉄鋼、化学工業である（図13）。したがって、水素と同様に石油化学コンビナート内でCO<sub>2</sub>を一括で供給していく仕組みが有効と考えられる。既に発電所や製鉄所などから発生するCO<sub>2</sub>の捕集、地下隔離の実用化が始まっており、石油化学コンビナートを用いたCO<sub>2</sub>供給システム実現の可能性は十分高いと考える。

#### ②スマートセル技術を活用したパーム油代替油脂高蓄積水素細菌について

スマートセル技術により油脂生産性や、油脂品質を向上させたパーム油代替油脂高蓄積水素細菌について下記のように仮定する。

- ・脂質含有量は85%とする。(微生物の中でも油脂蓄積含有量の多い油脂酵母 *Lipomyces starkeyi* を参考にした)<sup>21)</sup>。
- ・倍加時間：1.4h、生産性：10g 乾物重量/L/h、必要な水素量：3.1Nm<sup>3</sup>/kg-乾燥菌体、最大培養密度：51g 乾物/L とする<sup>22)</sup>。
- ・水素細菌から生産される脂質は、パーム油に脂肪酸組成が類似しているものとする。
- ・培養培地は H<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>=7:1:2 の容積比の混合ガスとする。

#### ③バイオリアクターを用いたパーム油代替油脂生産コストについて

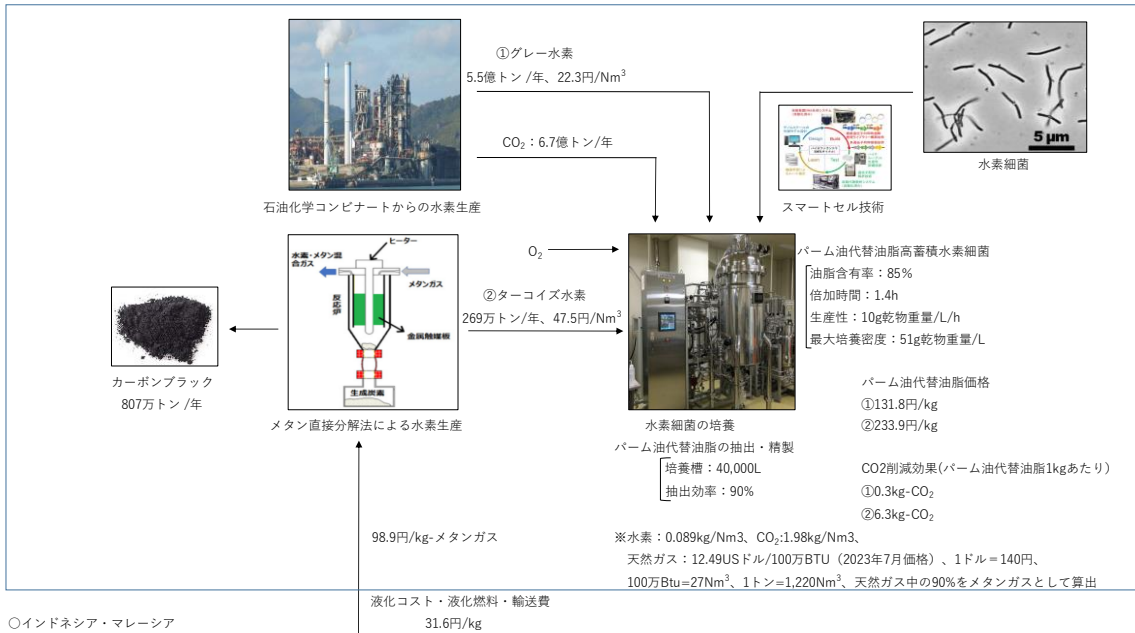
リアクターによるエタノール生産コスト<sup>23)</sup>を参考に40,000Lのバイオリアクターでパーム油代替油脂高蓄積水素細菌を培養し、パーム油代替油脂を生産した際のコストを試算した（図 14）。その結果、水素製造コストは、①石油化学コンビナートから生産された水素を使用した場合、131.8 円/kg、②アブラヤシ廃棄物から生産された水素

を使用した場合、233.9 円/kg と試算された。2023 年 7 月のパーム油価格は 123.7 円/kg であることから、①はパーム油と概ね同等のコストである。しかし、本試算は、スマートセル技術により水素細菌の油脂生産性や油脂品質等を向上したと仮定した際の試算である。そのため、実用化に向けて、スマートセル技術の更なる進歩が必要になる。また、②はパーム油の約 2 倍のコストである。そのため、実用化するには、スマートセル技術だけでなく、低コストで水素を製造する技術を確立する必要がある。

#### ④CO<sub>2</sub>削減効果

水素細菌培養培地は H<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>=7:1:2 の容積比の混合ガスであり、水素細菌の培養には CO<sub>2</sub> が利用される。これより、本施策による水素細菌を用いてパーム油代替油脂を生産する際の CO<sub>2</sub> 削減量は、2.3kg-CO<sub>2</sub>/kg と試算される。また、水素を生産する際の CO<sub>2</sub> 発生量も加味すると、①石油化学コンビナートから水素を生産した場合、2.0kg-CO<sub>2</sub>/kg の排出量、②アブラヤシ廃棄物から水素を生産した場合、カーボンブラック生産分の炭素は大気中に戻らなかったと考えられるため、4.0kg-CO<sub>2</sub>/kg の削減量、と試算され、あわせて①0.3kg-CO<sub>2</sub>/kg の削減効果、②6.3kg-CO<sub>2</sub>/kg の削減効果、となり、どちらの場合においても、カーボンネガティブなパーム油代替油脂を製造することが可能となる。政府は 2050 年までに脱炭素社会の実現を目指しているが、本施策が実現すると、①石油化学コンビナートから水素を生産した場合、生産した水素は燃料電池自動車などの他用途にも利用されることが想定されるため、生産分の 1%、550 万トンの水素を利用し、パーム油代替油脂を製造したと仮定すると、約 50 トン-CO<sub>2</sub> の削減量となる。一方、②アブラヤシ廃棄物から水素を生産した場合、生産した水素を全量利用し、パーム油代替油脂を製造したと仮定すると、約 4,700 万トン-CO<sub>2</sub> の削減量となる。パーム油 1kg あたりの温室効果ガス排出量は約 3.9~30kg と推計されている。更に、本施策により生産された油脂をパーム油の代わりに利用したと仮定し、例えばパーム油 1kg あたりの温室効果ガス排出量を 10kg とすると、①約 1.2 億トン-CO<sub>2</sub> の削減量、②約 1.5 億トン-CO<sub>2</sub> の削減量となる。日本の CO<sub>2</sub> 排出量が 11.1 億トンであることから、本施策により、1 割を超える CO<sub>2</sub> 排出量削減に貢献できる。国内では、油脂酵母からパーム油代替油脂を生産するための開発が進められているが、水素細菌を活用した本施策が実現すれば、油脂酵母より高い CO<sub>2</sub> 削減効果が期待できる。

○日本



○インドネシア・マレーシア

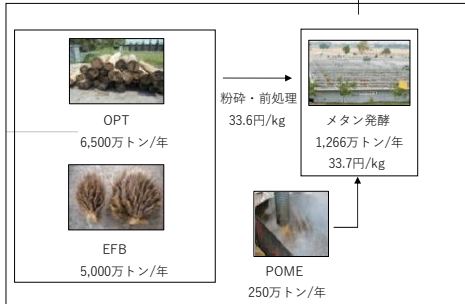


図 12 水素細菌によるパーム油代替油脂生産システム

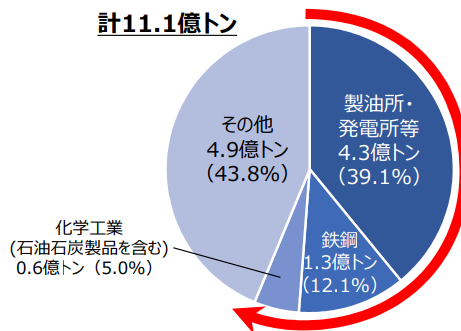


図 13 CO<sub>2</sub> 排出量

(国立環境研究所 HP 資料より)

内容	単位	
仕込み量	L/バッチ	40,000
稼働日数	日/年	300
1バッチにかかる日数	時間	5
水素細菌中の脂質量	%	85
脂質収率	%	90
脂質生産量	kg/バッチ	1,530
脂質生産量	トン/年	2,203.20
設備投資額	億円	2
償却年	億円	10
減価償却費	万円/年	2,000
その他固定費	万円/年	500
固定費計	円/kg	11.3
水素コスト	円/kg	① 90.4
O <sub>2</sub> コスト	円/kg	3.6
CO <sub>2</sub> コスト	円/kg	0
培地コスト	円/kg	① 94.0 ②196.1
ユーティリティコスト	円/kg	13.3
残渣処理費	円/kg	3.2
抽出・精製コスト	円/kg	10
変動費計	円/kg	①120.5 ②222.6
製造コスト	円/kg	①131.8 ②233.9

※酸素は7.3円/m<sup>3</sup>(2021年価格)より算出

※①は石油化学コンビナートから水素を生産した場合

②はアブラヤシ廃棄物から水素を生産した場合☒

図 14 パーム油代替油脂製造コスト試算

おわりに

本論文では、油脂産業における脱炭素社会への貢献策として、水素細菌を活用したパーム油に代わる新しい油脂生産システムについて提案した。この施策は、地球温暖化の原因である CO<sub>2</sub> を用いて油脂を生産するため、カーボンニュートラル以上のカーボンネガティブが実現できることから脱炭素社会実現に大きく貢献できると考える。また、水素細菌と同様に CO<sub>2</sub> を活用して油脂を生産する微生物として微細藻類が挙げられる。微細藻類は光合成によって CO<sub>2</sub> を固定するが、国土が狭く、日射量の強い地域が限定的である日本においては、光エネルギー回収のための大きな設備面積が必要であること、照射量の強い地域に活用が限定され、季節や気候変動の影響を受けてしまうことなどの課題がある。一方、水素細菌の培養に必要なのは水素などの無機化合物のみであることから、日本での活用を考慮すると優れた方法であると考えられる。

さらに、日本政府は次の社会として水素社会の実現を目指し取り組みを行っており、実現のための最初のステップとして、水素利用の飛躍的拡大を挙げている。本施策は、水素細菌を培養する際に大量の水素を利用するため、水素需要拡大につながり、水素社会実現にも貢献できると考える。

一方、水素細菌を活用した本施策は、従来の方法とは根本的に異なる生産方法であるため、法整備や消費者の理解、安全面など課題は山積みである。しかしながら、世界気象機関(WMO)などは2023年7月の世界平均気温が観測史上最高の月になる見込みだと発表し、地球温暖化の時代は終わり、地球沸騰の時代が到来したと危機感を訴えている。このような異常気象をニューノーマルとしないためにも、カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現に向けたこれまでにない革新的なイノベーションが必要である。本論文で提案した水素細菌を活用した油脂生産システムが普及し、脱炭素社会実現への一助となれば幸いである。

## 参考文献

1) WMO 温室効果ガス年報

[https://www.data.jma.go.jp/env/info/wdcgg/GHG\\_Bulletin-18\\_j.pdf](https://www.data.jma.go.jp/env/info/wdcgg/GHG_Bulletin-18_j.pdf)

2) パリ協定の概要（仮訳）-環境省

[https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop21\\_paris/paris\\_conv-a.pdf](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop21_paris/paris_conv-a.pdf)

3) 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 6 次評価報告書

<https://www.meti.go.jp/press/2021/08/20210809001/20210809001-1.pdf>

4) 水素基本戦略（案）-経済産業省

[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene\\_shinene/suiso\\_seisaku/pdf/20230606\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_1.pdf)

5) 植物油の道 | 一般社団法人 日本植物油協会

[https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/seisan02\\_01.html](https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/seisan02_01.html)

6) C16 Biosciences HP

<https://www.c16bio.com/>

7) Clean Food Group HP

<https://cleanfood.group/>

8) 不二製油 G など、微生物からパーム油の代替油脂効率生産，日本経済新聞，2022 年 10 月 4 日

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQ0UF043XJOU2A001C2000000/>

9) CO2 資源化研究所 HP

<https://www.co2.co.jp/>

10) 電力中央研究所報告 微生物による CO2 固定

11) 水素社会に向けた石油業界の位置付けと石油化学コンビナートからの水素供給システム

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/hpi/42/3/42\\_3\\_130/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/hpi/42/3/42_3_130/_pdf)

12) パーム産業における未利用バイオマスの有効利用と 最適なプロセス開発

<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/ais/950021/1/AA1940319007.pdf>

- 13) Nurliyana M. Y., et al, (Universiti Putra Malaysia) “Effect of C /N ratio in methane productivity and biodegradability during facultative co-digestion of palm oil mill effluent and empty fruit bunch” *Industrial Crops and Products*, 76, p 409–415, 2015
- 14) Sitthikitpanya S., et al, (Khon Kaen University) “Two-stage thermophilic bio-hydrogen and methane production from oil palm trunk hydrolysate using *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* KKU19” *International J. Hydrogen Energy*, 42, p 28222–28322, 2017
- 15) パーム廃材からのエメラルド水素製造システムによるカーボンネガティブなシン・油脂産業の提案
- 16) 石油・天然ガスレビューVol.53 No.5 2019年9月号  
<https://oilgas-info.jogmec.go.jp/ebook/201909/pdfViewer>
- 17) エア・ウォーター、メタンから水素製造 戸田工業と研究 - 日本経済新聞
- 18) 株式会社東レリサーチセンター 平成29年度科学技術イノベーション創造推進委託事業エネルギー・環境分野における有望技術の技術課題に関する包括的調査調査報告書 2018年3月
- 19) 油脂酵母からのパーム油代替油脂で世界トップレベルの生産量(98g/L)を実現  
[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101581.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101581.html)
- 20) 産総研:スマートセル技術により、野生株に対し約30倍高い原料酵素の生産性を実現  
[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2021/pr20210225/pr20210225.htm](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2021/pr20210225/pr20210225.htm)  
|
- 21) 酵母 *Lipomyces starkeyi* の生育条件と脂質脂肪酸組成の関係  
<https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2030282184.pdf>
- 22) 電力中央研究所報告 微生物によるCO<sub>2</sub>固定-1-温室効果ガス放出低減効果
- 23) 研究者に必要な生産コストの知識  
[http://www.sbj.or.jp/wp-content/uploads/file/sbj/9311/9311\\_yomoyama.pdf](http://www.sbj.or.jp/wp-content/uploads/file/sbj/9311/9311_yomoyama.pdf)