

第56回油脂産業論文

持続可能な社会づくりへの油脂産業の貢献

海洋保全モデル「SMART」の創生

日油株式会社

機能材料事業部 尼崎研究所

むねかた ゆうき
宗形 裕基

もりしげ たかひろ
森重 貴裕

目 次

はじめに	1
第1章 海とプラスチック	
1-1 プラスチックのジレンマ	2
1-2 海洋プラスチックの悪影響	3
1-3 海洋プラスチックへの現状の取り組み	4
1-4 解決策としての海洋生分解性プラスチック	5
第2章 油脂産業の現況	
2-1 BDFの概説	7
2-2 BDFの課題	7
第3章 海洋保全モデル「SMART」	
3-1 廃材を活用した海洋生分解性バイオマスプラスチックの製法	10
3-2 油脂産業へのフロー法の導入	11
3-3 「SMAP」の創製	14
3-4 「SMART」の全容	15
第4章 海洋保全モデル「SMART」の検証と評価	
4-1 プロセスと物質収支	16
4-2 適用地と経済性評価	17
4-3 海洋保全への効果	20
おわりに	22
注釈・略語	23
参考文献	25

はじめに

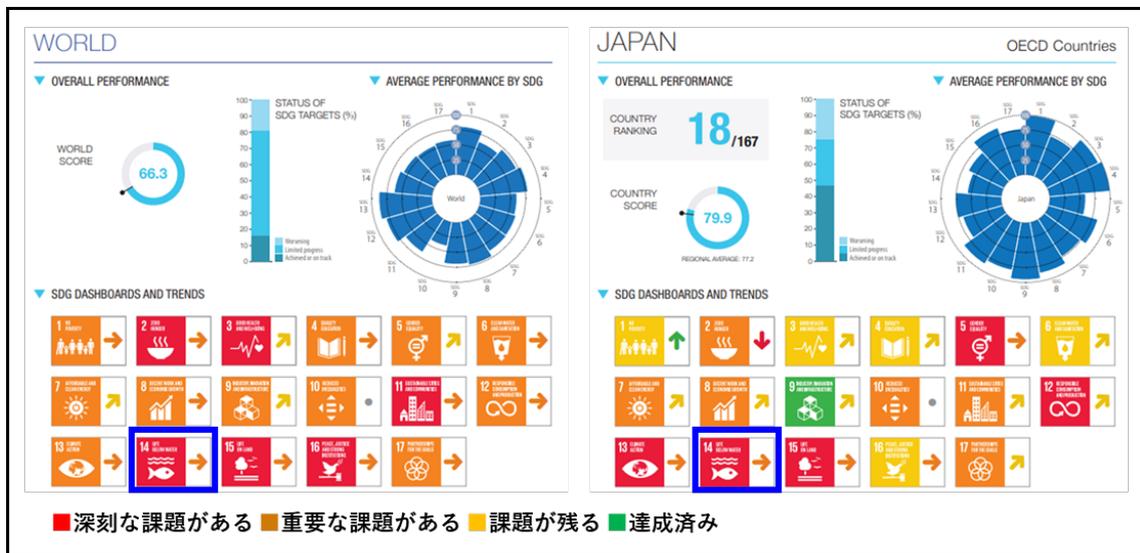
産業革命以降、科学技術は目覚ましい発展を遂げ、人々の生活は豊かになったが、気候変動、海洋汚染、生物多様性の損失等、地球環境に大きな負荷をかけている。こうした環境をめぐる危機的状況に鑑み、2015年に持続可能な社会づくりに向け「持続可能な開発目標、SDGs (Sustainable Development Goals) ^{※1}」が制定され、世界各国で様々な取り組みがなされている。

本論文では、SDGsの目標の一つである「14. 海の豊かさを守ろう」に着目し、持続可能な社会が求められる世界的潮流の中で、油脂産業でしか成しえない技術や資源を活用することにより、オンリーワンの海洋生分解性材料「SMAP」を創製すると共に、それを実現するための海洋保全モデル「SMART」を提唱する。

第1章 海とプラスチック

1-1 プラスチックのジレンマ

国際的な研究組織「持続可能な開発ソリューション・ネットワーク (SDSN) ※²」は、世界各国のSDGsの達成度を評価している(図1)¹⁾。本評価において、世界および日本は共通して「14. 海の豊かさを守ろう」が最低評価の「深刻な課題がある」に位置付けられており、その原因の一つとして海洋プラスチックの問題が挙げられる。プラスチックは安価で加工しやすいことから非常に便利な素材であり、我々の生活に欠かせないものとなっている。しかしながら、ペットボトルやレジ袋のポイ捨て等、適切に廃棄されずに海洋へ流出したプラスチックは、環境および経済に多大な悪影響を与えており、年々その深刻さが増している。特に、経済発展が目覚ましいアジア新興国からの海洋プラスチックの流出量が多く、全体の6割以上を占めると試算されている(図2)。我が国は島国であり、近隣諸国から流出した海洋プラスチックが日本海や太平洋の海流に乗って流れ着くため、この問題は決して他人事ではない²⁾。



SDSN 「SUSTAINABLE DEVELOPMENT REPORT 2024」より抜粋

図1. SDGs 達成に向けた現況 (世界と日本)

順位	国	海洋へのプラスチック流出量 (万t/年)
1	中国	132-353
2	インドネシア	48-129
3	フィリピン	28-75
4	ベトナム	28-73
5	スリランカ	24-64
6	タイ	15-41
7	エジプト	15-39
8	マレーシア	14-37
9	ナイジェリア	13-34
10	バングラディッシュ	12-31
	⋮	
	⋮	
30	日本	2-6

赤字：アジア地域の国

Jenna R. Jambeck et al., *Science*, 2015, Vol 347, Issue 6223, pp. 768-771を参照

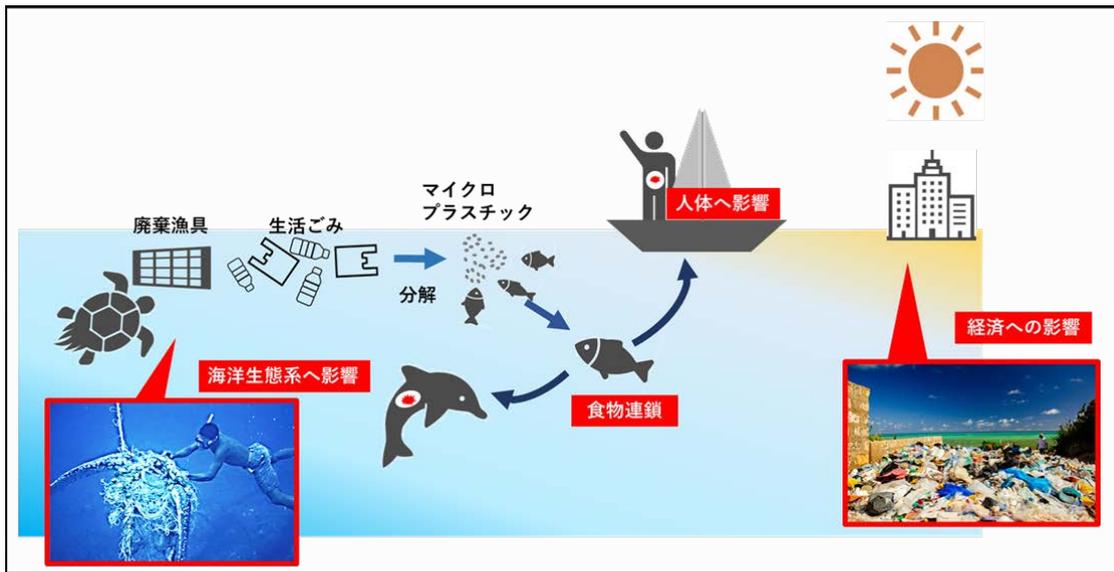
図2. 海洋へのプラスチック流出量の上位10カ国と日本

1-2 海洋プラスチックの悪影響

ここで、海洋プラスチックの影響に目を向けてみよう（図3）。海洋プラスチックは分解されにくく、長い間海を漂うため、ウミガメ等の海洋生物がポリ袋を誤食したり、漁網に絡まったりすることで、その命が脅かされている。すなわち、我々人間は知らず知らずのうちに大規模で残酷な動物虐待をしていると言っても過言ではない。

また、海洋プラスチックは紫外線による劣化や波の作用で破砕されると、マイクロプラスチックと呼ばれる直径5mm以下の微小なプラスチックとなる。これを海洋生物が摂取した場合、その後の食物連鎖であらゆる生物の体内にプラスチックが取り込まれる。人間も例外ではなく、1週間にクレジットカード1枚分に相当する5gものプラスチックを摂取している可能性がある³⁾。また、血管内にたまった微小なプラスチック粒子が、心臓発作（心筋梗塞）、脳卒中による死亡のリスクの高さに関連するといった研究結果も発表されている⁴⁾。

更に人間の生活圏にある海洋プラスチックは景観を著しく悪化させたり、漁場を汚染したりすることで、産業に経済損失をもたらしている。例えば、アジア太平洋地域の年間損失は観光業で6.2億ドル、漁業・養殖業では3.6億ドルになると推定されている⁵⁾。



WWFジャパン「海洋プラスチック問題について」より一部抜粋
<https://www.wwf.or.jp/activities/basicinfo/3776.html>

図3. 海洋プラスチックの様々な影響

すでに大きな問題となっている海洋プラスチックであるが、今後更に蓄積すると言われており、2050年にはその量が魚の重量を超える約9億tにもなるという驚きの推計がなされている⁵⁾。

1-3 海洋プラスチックへの現状の取り組み

昨今、小売店のレジ袋の有料化や、カフェチェーンにおける紙製ストローの採用等、我々の生活の中で脱プラスチックの取り組みを実感する機会が増えている。これらはリデュース（削減）、リユース（再利用）、リサイクル（再資源化）にリニューアブル（再生可能資源への切り替え）を加えた3R+Renewableを基本原則とする「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」^{※3}に基づいた施策であり、これと同様の取り組みが世界各国で行われている⁶⁾。

環境省は海洋プラスチックへの対策として具体的なアクションプランを提示しており⁷⁾（図4）、①廃棄物処理制度等による回収・適正処理の徹底や②ポイ捨て・不法投棄、非意図的な海洋流出の防止等、第一に海洋へプラスチックの流出をさせない取り組みに次いで、③陸域での散乱ごみの回収、④海洋に流出したごみの回収等、流出したプラスチックを回収する取り組みが推進されている。加えて、海洋へのプラステッ

クの流出を直ちにゼロにすることは現実的には困難であるため、⑤代替素材の開発・転換等のイノベーションに向けた取り組みが積極的になされている。

環境省：海洋プラスチックごみ対策アクションプラン	
①	廃棄物処理制度等による回収・適正処理の徹底
②	ポイ捨て・不法投棄、非意図的な海洋流出の防止
③	陸域での散乱ごみの回収
④	海洋に流出したごみの回収
⑤	代替素材の開発・転換等のイノベーション

環境省HPより抜粋

https://www.env.go.jp/water/marine_litter/mpl.html

図4. 環境省の掲げる海洋プラスチックごみ対策アクションプラン

1-4 解決策としての海洋生分解性プラスチック

先述の「代替素材の開発・転換等のイノベーション」の一つとして、海洋生分解性プラスチックの開発が進んでいる。

ここで海洋生分解性プラスチックと現行のプラスチックを整理する。プラスチックの種類は生分解性の有無と原料の由来によって4種に分類できる(図5)。生分解性プラスチックとは、環境中の微生物等によって分解されて最終的に水や二酸化炭素になるプラスチックであり、環境中に蓄積されない。また、バイオマス由来のプラスチックは温室効果ガスの排出と吸収の収支を実質ゼロと見なせることからカーボンニュートラル^{※4}な材料であり、環境負荷低減に貢献する。その中で、海洋生分解性バイオマスプラスチック (Marine-Biodegradable Biomass Plastics、以下、MBBP) は、海洋中で分解されることから、先述した海洋プラスチックの蓄積や、マイクロプラスチックの問題を解決できるカーボンニュートラルな素材として期待されている。

しかし、MBBPとして機能するプラスチックは限られている。それは微生物の数が豊富な土壌と比較して、海洋では微生物の数が少なく、土壌では速い速度で生分解する素材であったとしても、海洋では非常に遅い速度で分解するか、ほとんど分解しないためである^{8) 9)}。

現在、MBBPとして実用化されているものにはポリヒドロキシアルカン酸（以下、PHA^{※5)}）が挙げられ、株式会社カネカやアメリカのNewlight Technologies社が製品化している¹⁰⁾。また、それらのPHAを成形した日用品も実用化されている(図6)。しかし、その生産量は国内外を合わせても年間約4万tであり、4億tを超えるとされる全プラスチック材料の0.01%にも満たない¹¹⁾。また、価格に関してもポリエチレンやポリエチレンテレフタレートといった汎用のプラスチックが約150～200円/kgであるのに対し、約360円/kgと高価である¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。

	石油由来	バイオマス由来
非生分解性樹脂	PE：ポリエチレン PP：ポリプロピレン PET：ポリエチレンテレフタレート PA：ポリアミド(ナイロン) PS：ポリスチレン PVC：ポリ塩化ビニル	バイオPE バイオPET バイオPA
生分解性樹脂	PBS：ポリブチレンサクシネート PVA：ポリビニルアルコール PBAT：ポリブチレンアジペートテレフタレート	PLA：ポリ乳酸 PHA：ポリヒドロキシアルカン酸 →海洋生分解性あり(MBBP)

図5. プラスチック材料の分類



株式会社カネカ HPより抜粋
<https://www.kaneka.co.jp/solutions/phbh/>

図6. MBBPの実用化例

このような要因から、MBBPは海洋保全に貢献する素材として期待されているものの、その普及は未だに限定的である。そのため、我々の生活で使用されるプラスチック材料はポリエチレンやポリエチレンテレフタレート等の非生分解性プラスチックが依然として主流であり、更なるMBBPの開発が望まれている。

第2章 油脂産業の現況

2-1 BDFの概説

油脂産業は様々な事業を通じて、持続可能な社会づくりに貢献しており、その事例の一つにバイオディーゼル燃料（以下、BDF^{※6}）が挙げられる（図7）。なお、BDFには複数の種類があるが、その中でも脂肪酸メチルエステル（以下、FAME^{※7}）は「第一世代バイオディーゼル」と呼ばれ、現時点で主要なBDFとして使用されている。本論文で言及する「BDF」は、基本的に「FAME」を指す。

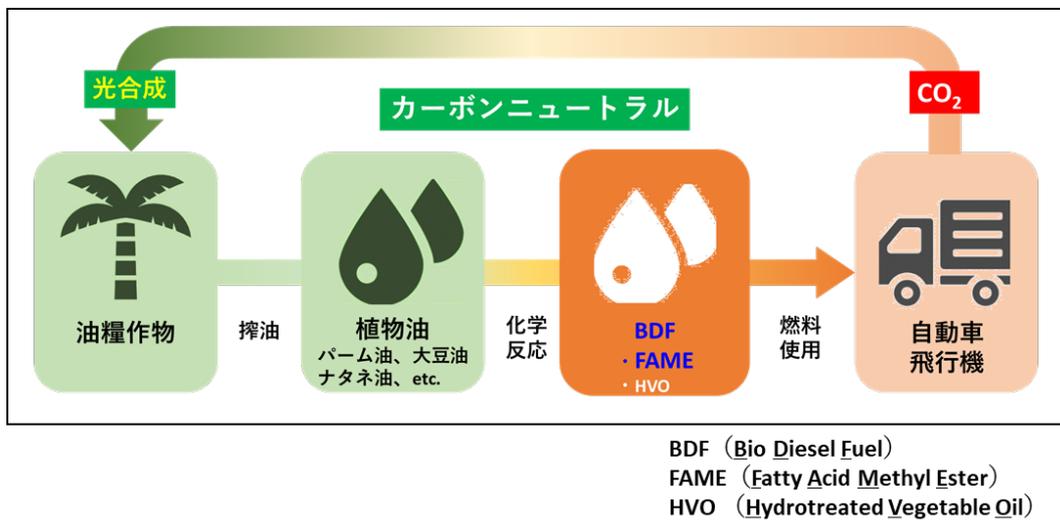


図7. BDFの製造から使用までの流れ

BDFは植物油を主な原料とするカーボンニュートラルな燃料であることから、世界的に需要が増加している。特に生産量が世界トップのインドネシアでは、軽油に30%のBDFを混合した燃料であるB30の義務化によって国内消費が大きく伸びたため、その生産量は2018年から2023年にかけて約2倍以上となっている¹⁵⁾。

2-2 BDFの課題

BDFはカーボンニュートラルであることから需要が堅調に推移しているものの、解決すべき課題も残されており、その一つに廃グリセリンの有効活用が挙げられる。

BDFは、油脂（トリグリセライド^{※8}）とメタノールを原料とするエステル交換反応^{※9}を行い、副生物と分離することで製造される（図8）。この副生物がいわゆる廃グリセリンと呼ばれるものであり、BDFに対して約20%生成する。この副生物は約半分がグリセリンであり、その他に脂肪酸石鹸等を含む。これを純粋なグリセリンとして使用するには、精製して不要物を除去するためのコストを要することや、グリセリンの供給が潤沢であることも相まって、その活用は進んでいない。全世界のBDF生産量から推定される廃グリセリンの量は約800万t¹⁵⁾と試算されるが、これらの多くは産業廃棄物として焼却処分されているのが実情である¹⁶⁾。

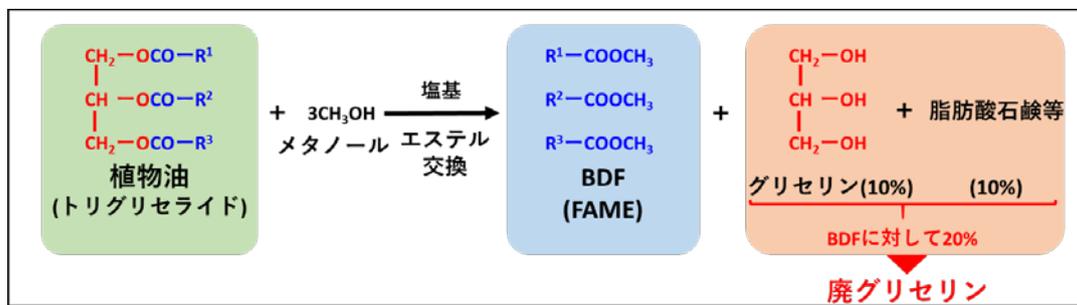
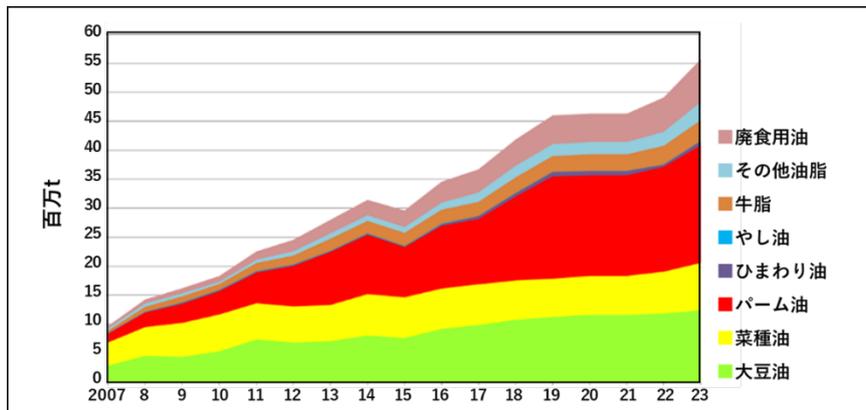


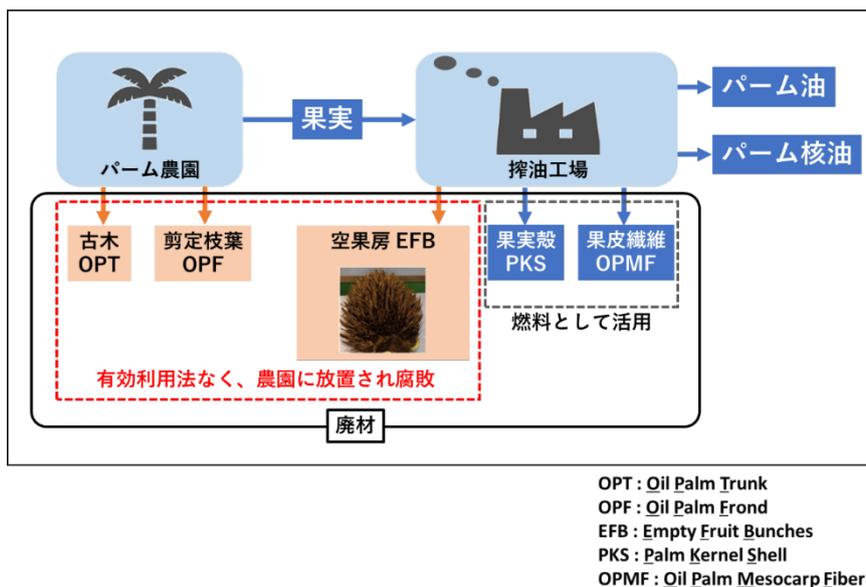
図8. FAMEの合成スキーム

またBDFに付随する問題としてパーム廃材が挙げられる。油脂産業を代表するパーム油は、食用や化粧品等、我々の身近な製品に使用されており、その生産量は年々増え続け、2023年には対2010年比で約2倍となっている¹⁴⁾。パーム油は、BDFの原料として最も多く使用される植物油であり、今後も変わらず利用され続けることが予想されている（図9）。しかし、アブラヤシの果実からパーム油を得た後、その残渣や他の部位は未利用で農園内に放置されている（図10）。これらが腐敗することでメタンガスを含む温室効果ガスを放出したり、ガノデルマ病^{※10}等のパーム真菌症が発生したりする。これがいわゆるパーム廃材として問題になっており、特にインドネシアは、パーム油の生産量が世界トップであるため、その問題は深刻さを増している¹⁷⁾。



一般社団法人日本植物油協会「植物油の道-植物の生産から消費まで」より抜粋
https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/seisan03_02.html

図9. 原料油種ごとのBDF生産量推移



OPT : Oil Palm Trunk
 OPF : Oil Palm Frond
 EFB : Empty Fruit Bunches
 PKS : Palm Kernel Shell
 OPMF : Oil Palm Mesocarp Fiber

図10. パーム油産業における廃材の発生経路

以上のことから、油脂産業はBDFの原料であるパーム油の生産を通じて、カーボンニュートラルの観点において持続可能な社会に貢献している一方で、大量の廃グリセリンやパーム廃材を発生させてしまっている。しかし、見方を変えれば、これらの廃材は油脂産業でしか確保できない、豊富な未利用資源と捉えることもできる。そこで、筆者はこれらの有効活用を検討し、先述の海洋プラスチック問題への応用を考案した。すなわち、廃グリセリンとパーム廃材を原料としたMBBPの創製と海洋保全モデルの構築である。

第3章 海洋保全モデル「SMART」

3-1 廃材を活用した海洋生分解性バイオマスプラスチックの製法

筆者は海洋の持続的な保全に貢献する技術として、Sustainable Marine-conservation Technology、「SMART」を考案した（図11）。「SMART」はBDF製造時の廃グリセリンとパーム廃材を活用することによって海洋生分解性プラスチック素材を製造する一連の技術を指し、以降ではその詳細について述べる。

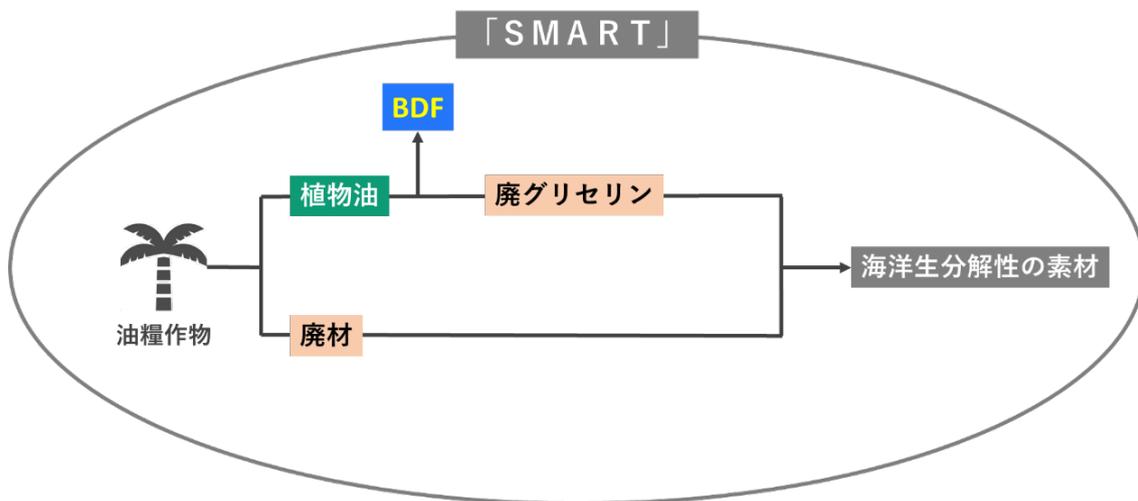


図11. 「SMART」の概要

初めに、廃グリセリンを有効活用すべく、グリセリンを金属触媒^{*11}存在下で水素と反応させてプロピレンを得る技術に着目した¹⁸⁾。これにより、BDF製造時に生じる廃グリセリンからプロピレンを得ることができる（図12）。次に、2024年に東京大学から発表された最新の技術により、プロピレンを一酸化炭素と共重合させることでポリケトン（PK）を得て、更にそのケトン基を酸化反応によりエステル基へと変換することでポリケトンエステル（PKE）^{*12}を合成する¹⁹⁾。このPKEはエステル部位に起因する海洋生分解性を示すことが実証されており、バイオマス由来のグリセリンを原料とする新たなMBBPとして、海洋プラスチック問題への貢献が期待できる²⁰⁾。

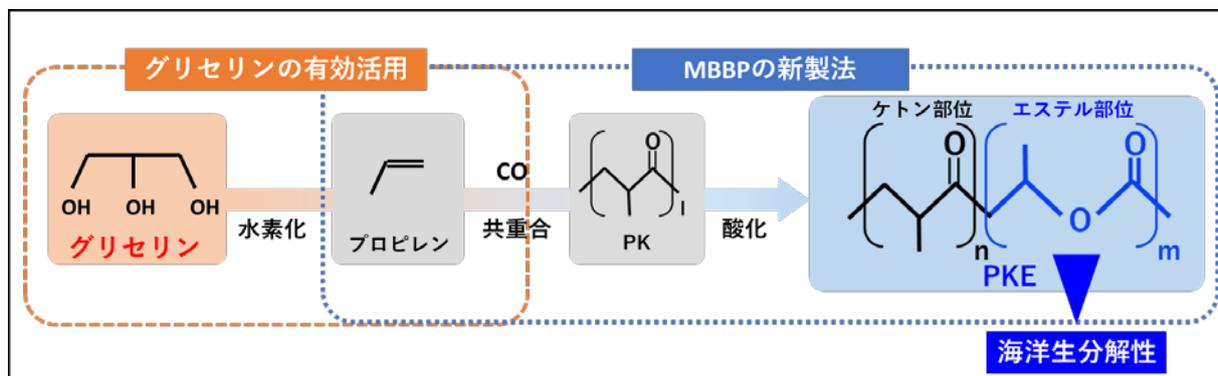


図12. グリセリンからPKEを合成するスキーム

しかし、この実現には「BDF製造時における廃グリセリンの純度向上」と「PKからPKEへの酸化反応の制御」という二つの技術的課題が存在する。前者については、先述のとおり、廃グリセリンにはグリセリンの他にも脂肪酸石鹸等の副生物が含まれており、除去の際にコストアップや収量低下につながる。後者については、PKEの海洋生分解性部位であるエステル部位を増加させるために、酸化反応を促進させようとする、同時にPKEが分解する副反応が生じる¹⁹⁾。これらの課題に対し、筆者はフロー法という新プロセスの導入による解決を考案した。

3-2 油脂産業へのフロー法の導入

反応方法として一般的なバッチ法は、従来の密閉された反応容器中で反応物を一定の温度で一定時間混合する製法である。一方、今回導入を考案したフロー法は、反応物を反応容器に連続的に流し、同時に生成物を収集する製法である(図13)。フロー法のメリットはいくつかあるが、その中でも今回は、「触媒の固定化が可能な点」と「反応制御性に優れる点」に着目した²¹⁾。

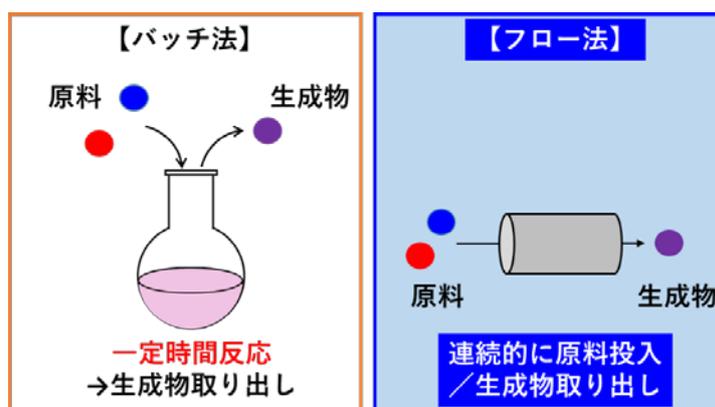


図 1.3. バッチ法とフロー法の比較

初めに、「BDF 製造時における廃グリセリンの純度向上」という課題に貢献しうる新技術として、BDF 製造時に利用可能な固体酸触媒^{*1,3}と、これを固定化したフロー法の適用を提案する^{2,2)}。この方法では、原料の植物油とメタノールが触媒固定相に供給されることで反応が進行するため、触媒および触媒由来の副生物が生成物へ持ち込まれず、生成物としてBDFとグリセリンのみが得られる(図14)。そのため、バッチ法では精製が必要になるが、フロー法ではその精製工程を省略でき、BDFと高純度なグリセリンが連続的に得られるようになる。

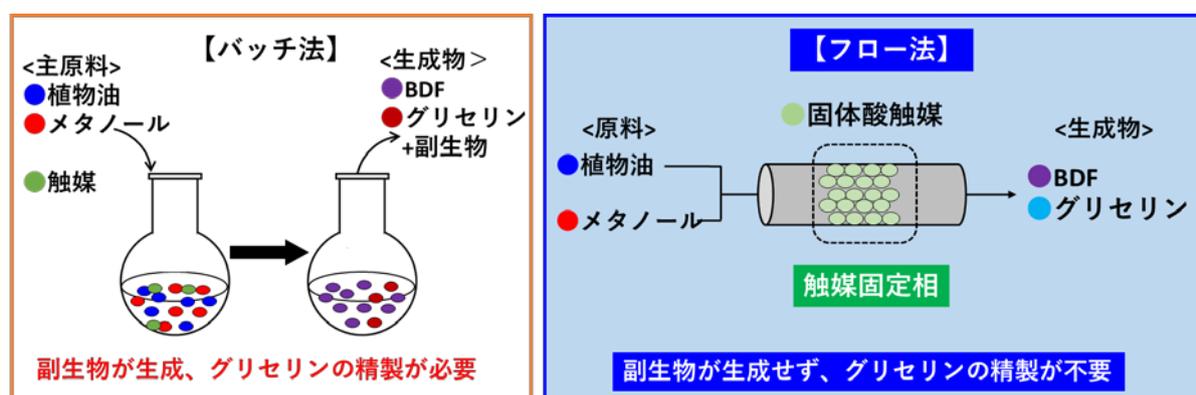


図 1.4. フロー法のメリット①：触媒の固定化

次に「PKからPKEへの酸化反応の制御」という課題について、PKからPKEを得る工程にもフロー法を適用する(図15)。従来のバッチ法においては、PKEのエステル部位を増加させるために、酸化反応を促進させようとする、同時にPKE

が分解する副反応を生じ、目的物のみを得ることが困難であることが示唆されている¹⁹⁾。一方、本反応にフロー法を適用した場合、PKが酸化反応後にただちに系外へ排出され、反応が停止するため、PKEの経時による副反応の進行が抑制される。つまり、PKEのエステル部位の増加と、分解物の抑制の両立が可能となり、従来のMBBPと同等の性能を示すPKEが生成可能となる^{19) 20)}。なお、フロー法によるポリマーの製造はポリプロピレンなどで既に普及している技術であるため、これらに応用することでグリセリンを出発原料としてPKEを得るまでの全ての工程にフロー法を応用可能と考える²³⁾。

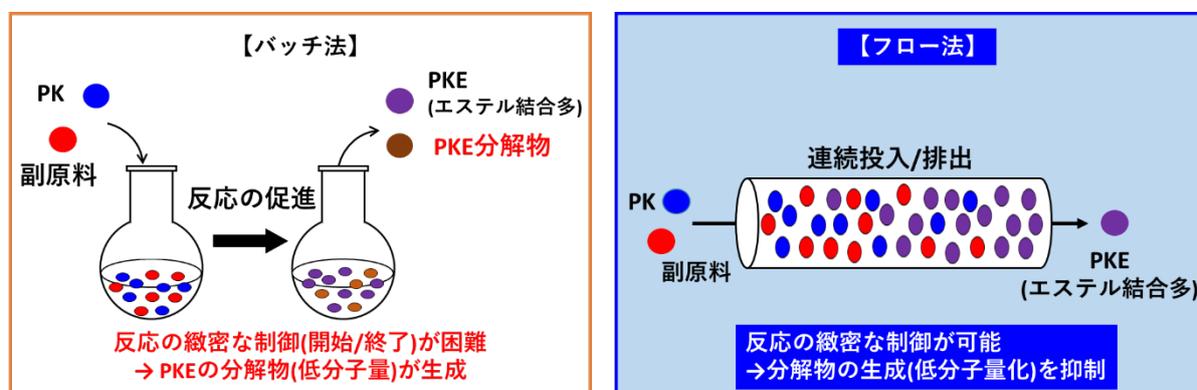


図15. フロー法のメリット②：反応の制御

上記の通り、BDFの製造工程、およびPKEの製造工程にそれぞれフロー法を適用することで、廃グリセリンを活用したMBBPの創製が可能となる(図16)。

	バッチ法	フロー法
BDF製造時の廃グリセリン	低純度で精製が必要 →コストアップ、収量減	高純度で精製が不要 →PKEの原料として有効活用可
PKからPKEへの酸化反応	酸化反応を促進すると副反応が発生 →PKEの性能低下	反応を細かに制御可能 →酸化反応を促進しつつ、副反応を抑制 →海洋生分解性の向上

図16. フロー法のメリット：まとめ

さらに、筆者はパーム油産業における廃材の問題解決を図るとともに、MBBPを実装する施策を考案した。

3-3 「SMAP」の創製

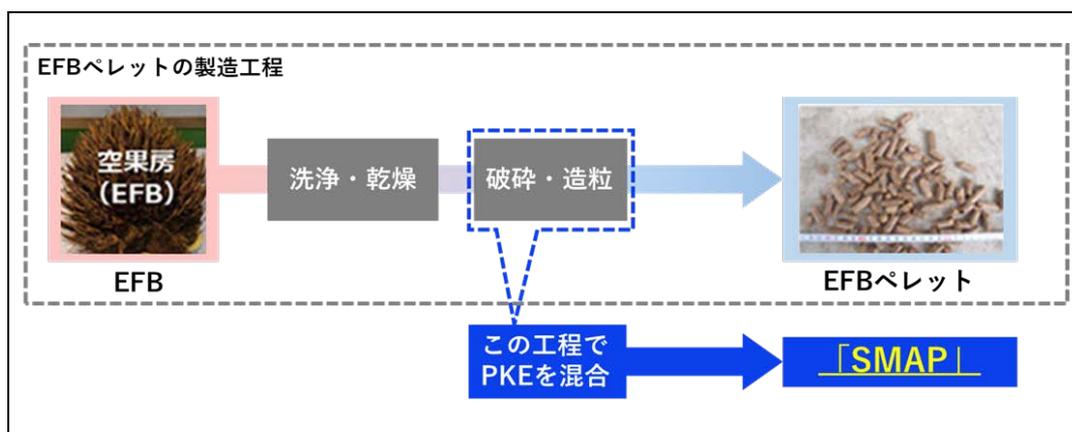
これまで述べてきたPKEをポリエチレン等の汎用的なプラスチックの代替材料として広く普及させるには、その物性についても改良の余地があると言える。例えば、今回製造するPKEと類似の構造を持つPHAではその脆さ、すなわち弾性率の低さが問題になることがある²⁴⁾。

プラスチックの弾性率向上は多様な分野で検討されており、その有効策の一つとしてフィラー（充填剤）^{*14}とプラスチックのコンパウンド^{*15}化技術がある。そこで、PKEにフィラーを添加するコンパウンド化の検討を行った。PKEに配合するフィラーは、バイオマスかつ海洋流出しても悪影響がなく、加えて安定した品質で大量に供給できるものでなくてはならない。この条件を満たすフィラーの一つとして、木材由来のセルロース繊維が挙げられ、樹脂に対して10～150%添加することで引張弾性率を最大で約4倍向上させることが報告されている^{24) 25)}。

そこで、筆者は油脂産業の中核をなすパーム油産業の廃棄物であるEMPTY FRUITS BUNCH（以下、EFB）を、PKEに添加するフィラーとして提案する。EFBはパーム椰子房から果実を取り出した後の残渣物であり、年間3,000万tも発生し、そのほとんどが不適切に廃棄されることで温室効果ガスを排出する等の問題が生じている。EFBを有効活用する数少ない事例として、ペレット化したEFB（以下、EFBペレット）の固形燃料としての利用が挙げられ、火力発電利用の実証試験が2023年より始まっている¹⁷⁾。筆者はこのEFBペレットに目を付けた。

EFBペレットは、燃料としてペレット化される前に、洗浄、乾燥されて清浄化され、また燃焼を促進させるために細断されるため、これをフィラーへ応用することが可能であると考え（図17）。そしてEFBの主成分は木材と同様にセルロースであり、海洋での分解も進行することから、PKEとのコンパウンドについても海洋生分解を示す²⁶⁾。

以降、このコンパウンドを持続可能な海洋保全に貢献する世界に一つだけのプラスチックとして、Sustainable Marine Alternate Plastic、「SMAP」と呼称する。



株式会社IHI「パーム廃棄物を活用した固体バイオマス燃料事業を本格化」
https://www.ihico.jp/all_news/2018/resources_energy_environment/1190427_1616.html

図17. 「SMAP」の製造工程

3-4 「SMART」の全容

これまでに述べた筆者が思い描く新しい油脂産業の形を整理すると次のとおりである(図18)。既存の油脂産業であるBDFの製造に対し、3-1で述べた「MBBPの新製法」と3-2で述べた「フロー法」という技術を新たに導入することで、植物油を原料にして、BDFと併せてPKEの製造が可能になる。更に、3-3で述べたように、PKEにパーム油産業の廃棄物であるEFBをフィラーとして配合した「SMAP」が、海洋プラスチック問題の解決に対して大きく貢献する。

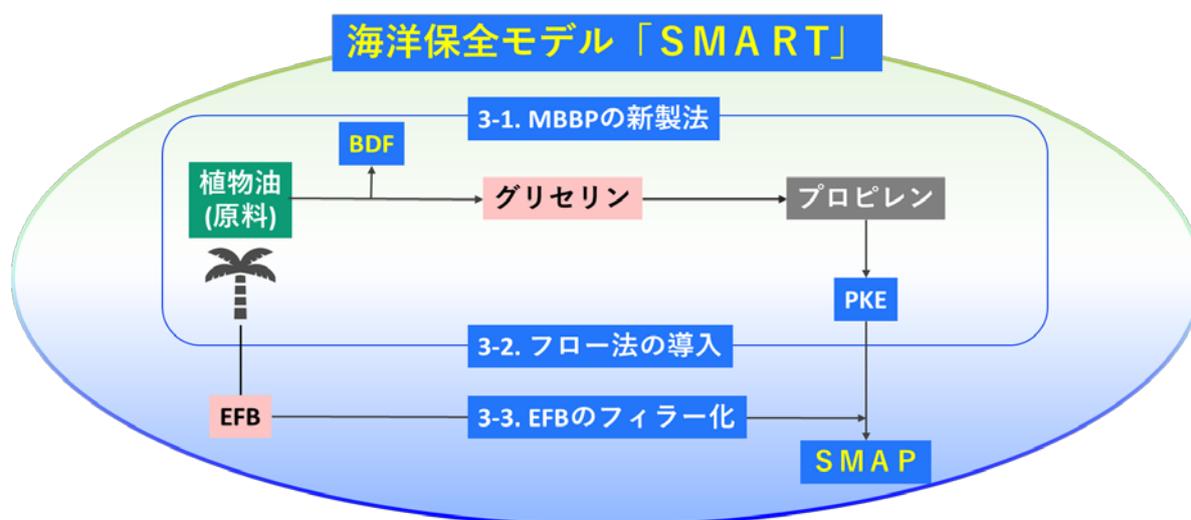


図18. 「SMART」のモデル図

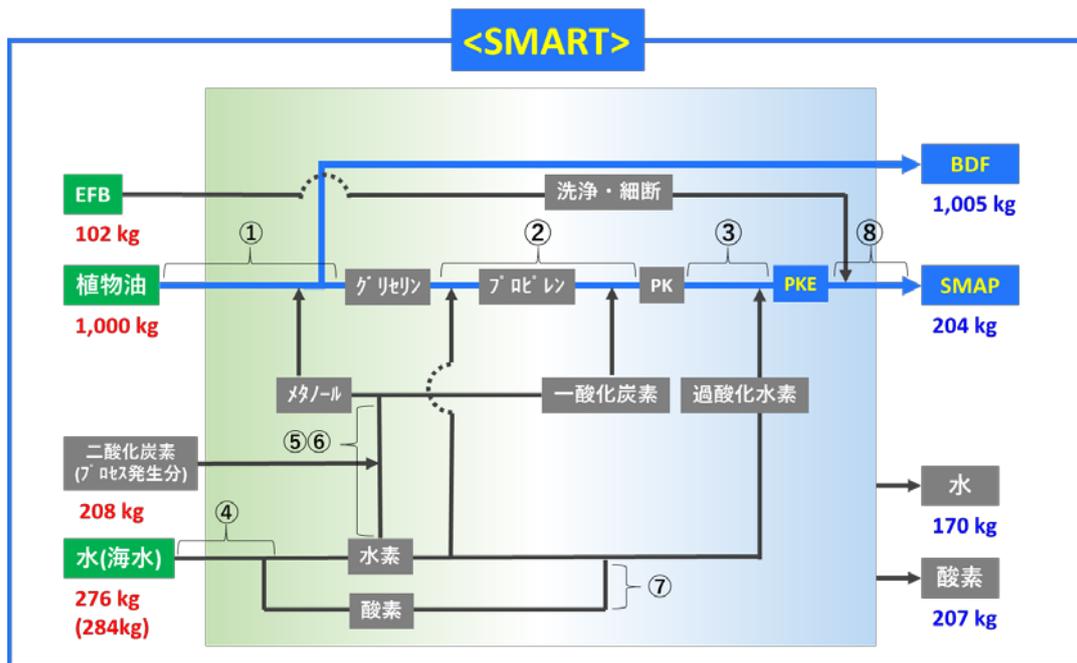
第4章 海洋保全モデル「SMART」の検証と評価

4-1 プロセスと物質収支

筆者は「SMART」で使用される原料についても、バイオマス、あるいは環境に配慮した材料を適用することで、この技術そのものを持続可能なものとするのが可能であると考え。ここでは副原料を含めた「SMART」の詳細なプロセスを説明する(図19)。初めに、植物油とメタノールからBDFとグリセリンを製造する(図19①)。次に、グリセリンと水素からプロピレンを生成し、一酸化炭素との反応によってPKを得る(図19②)。更にPKと過酸化水素からPKEを製造する(図19③)。各工程において、触媒や溶媒を用いるが、これらはフロー法の特徴を最大限に活かし、固定化、あるいは繰り返し循環して使用することを想定する。従って、純粋な原料として植物油の他に消費されるものとしては、メタノール、水素、一酸化炭素、過酸化水素が挙げられる。前述のとおり、筆者はこれらについても可能な限り、環境に配慮した原料を選定した。水素と酸素については海水の電気分解から得ることを考案した²⁷⁾(図19④)。また、メタノール(図19⑤)、一酸化炭素(図19⑥)については、上記の水素とプロセス上発生する二酸化炭素を利用する環境に配慮した製法が²⁸⁾²⁹⁾、過酸化水素(図19⑦)については電気分解で得られた水素と酸素を有効活用する製法が、それぞれ実証されている³⁰⁾。

「SMART」においては、このような技術の集結により、植物油と海水のみを主原料としてBDFと「SMAP」の同時製造が可能である。更に、フィルターとして活用するEFBについては、パーム油生産国であるインドネシアやマレーシアから容易かつ安価に入手可能であり、これを洗浄、乾燥した後に、細断しフィルター化したものを、PKEとコンパウンド化することで、「SMAP」を得ることができる(図19⑧)。

化学量論比に基づき、それぞれの原料の必要量(物質収支)を算出すると以下のとおりである。植物油1,000kgを原料としてBDFを1,005kg製造可能であり、副生する109kgのグリセリンからは102kgのPKEが得られる。この際、上述した植物油以外の原料はそれぞれ、メタノールが114kg、水素が5kg、一酸化炭素が33kg、過酸化水素が40kg消費されるが、これらは284kgの海水にて賄うことが可能である。



※赤字：消費量、青字：生成量
 ※※未反応原料の再利用を前提に、各工程の収率は100%として計算。
 ※※※植物油は分子量845として計算。
 ※※※※二酸化炭素はプロセス上排出されるものを有効活用。
 ※※※※※SMAP中のPKEとEFBの質量比は50:50として計算。

図19. 「SMART」の物質収支

次に、筆者は本プロセスを基にした新規油脂産業を提案するにあたり、その経済性の評価を行う。

4-2 適用地と経済性評価

筆者は「SMART」が最大限の効果を発揮する適用地としてインドネシアを選定した。インドネシアと言えば、世界有数の観光地であるバリ島をはじめとして、美しいビーチリゾートを多数有している。しかしながら、年間で48～129万tもの海洋プラスチックを流出しており（図2）、美しい砂浜に大量の海洋プラスチックが漂着し、景観が損なわれている。

インドネシアはパーム油の生産量が世界一であることから、原料であるパーム油およびEFBの入手が容易である¹⁵⁾。また、政策としてBDFの増産や海洋プラスチックの削減にも取り組んでいることから、本プロセスを導入しやすく、既存のパーム油産業やBDFメーカーとの協業も期待できる^{31) 32)}。従って、インドネシアは資源確

保や社会情勢の観点から本プロセスとの親和性が高く、「SMART」導入のモデルケースとして最適であると考えた。

ここからは、実際に筆者が考案した「SMART」をインドネシアのBDFメーカーに提案し、同地で事業化することを仮定した際の経済性について検証を行う。

インドネシアにおいては2023年時点で年間約1,100万tのBDFが製造されているが、再生可能エネルギーの開発に注力する同地においては、毎年約100万tずつその生産量が増加している。そこで、この約100万tのBDFの増産に対して、「SMART」を適応した際の経済性を試算した(図20)。

その際、先の計算を基に、年間100万tのパーム油を原料として100万tのBDFと20万tのSMAPを製造するプラント、および海水を年間28万t処理して、水素と酸素を製造する設備が必要になる。プラントの建設費用としては、植物油からBDFを製造する設備に約1,046億円、グリセリンからPKを介してPKEを製造する設備に200億円、PKEをEFBとコンパウンド化して「SMAP」とする設備に150億円、海水を分解して水素と酸素を製造する設備に2,400億円、それぞれ投資が必要となる。以上より、プラントの建設費用は3,796億円となり、減価償却を10年で行うと仮定すると、年間380億円が費用として計上される。また、原料である100万tのパーム油に1,480億円、EFBの回収費用に8億円を要し、更に、人件費に9億円、プラントの稼働に必要なユーティリティに174億円を要する見込みである。

以上の試算より、年間に100万tのBDFと20万tのSMAPを製造するのに要する費用として、2,051億円が必要となる。

上記の費用を基に、BDFを170円/kg、SMAPを200円/kgで販売することで、2,100億円の売り上げが得られ、49億円の営業利益を得ることが可能であり、経済性と環境保全を兼ね備えた事業になり得ると言える。

「SMART」の収支 (インドネシアにてBDFを年間100万t、SMAPを年間20万t製造時)			
項目		金額(億円)	備考
初期設備投資	BDF製造プラント建設費 ⁽¹⁾	1,046	BDF(100万t)を製造
	PKE製造プラント建設費 ⁽²⁾	200	PKE(20万t)を製造
	SMAP製造プラント建設費 ⁽³⁾	150	SMAP(20万t)を製造
	水素製造プラント建設費 ⁽⁴⁾	2,400	海水の電気分解設備を想定
	合計	3,796	
初期設備投資の減価償却費		380	10年での償却を想定 ⁽⁵⁾
パーム油費用 ⁽⁶⁾		1,480	
EFB回収費用 ⁽⁷⁾		8	
人件費 ⁽⁸⁾		9	1,332人 ⁽⁹⁾ 、 1ドル=143.3円で計算
ユーティリティ ⁽¹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾		174	
合計		2,051	
売上	BDF	1,700	販売単価170円(FAMEとして)
	SMAP	400	販売単価200円
	合計	2,100	
収支		49	

(1)岡田正史、日本マリンエンジニアリング学会誌 第47巻 第1号(2012)、「バイオディーゼル燃料の製造方法と利用の現状」を参考に計算(前処理工程、精製工程は不要なため、設備容量を3倍とした)。

(2)日本経済新聞、三井化学系 車用樹脂に400億円 千葉に新設備、2021年5月31日
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC315BI0R30C21A5000000/>を参考に計算した。

(3)日新商事株式会社、バイオマス燃料ペレット製造設備建設に関するお知らせ、2024年5月10日
https://www.nissin-shoji.co.jp/storage/ir/pdf/439/20240510_04.pdfを参考に計算した。

(4)日経ビジネス、イベルドローラやネルが覇権狙う 勃興する欧州のグリーン水素市場、2024年2月18日
<https://business.nikkei.com/atcl/NBD/19/special/01710/>を参考に計算した。

(5)国税庁、耐用年数の適用等に関する取扱通達の付表
<https://www.nta.go.jp/law/tsutatsu/kobetsu/sonota/700525/fuhyou/10.htm>を参考に計算した。

(6)Chematels、パーム油輸入CIF価格、2023年の平均価格を用いて計算した。
https://chematels.com/market/palm_oil

(7)林野庁、燃料の生産方法
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/pdf/250610biomass2.pdf>を参考に計算した。

(8)日本貿易振興機構、アジアの製造業の給与水準、10年で大幅上昇も都市間の差は拡大
<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2024/37977922f57e157a.html>を参考に計算した。

(9)株式会社プライムポリマー、基本情報
<https://www.primepolymer.co.jp/jp/corporate/summary/overview/index.html>を参考に計算した。

(10)一般社団法人 海外電力調査会社、各国の電気事業(アジア)
<https://www.jepic.or.jp/data/asia01indn.html>を参考に計算した。

(11)三宅明子ら、4kWh/Nm3高効率水電解システム、神鋼パナテック技法 Vol. 47 No.1, 2003/8
https://www.kobelco-eco.co.jp/development/docs/150_04.pdfを参考に計算した。

図20. 「SMART」の収支

4-3 海洋保全への効果

最後に、「SMART」の海洋保全に対する効果について論述する(図21)。筆者は、海洋プラスチックの排出量が多い新興国において、「SMAP」を汎用プラスチックの代替材料として、カトラリーや食品容器といった身近な消耗品へ展開することを想定する。そうすることで、プラスチックごみの回収システムが途上段階である新興国において、海洋プラスチックの問題に貢献できる。例えば、先ほど「SMART」の適応地として選定したインドネシアは、海洋プラスチックの流出量が世界で2番目に多いことから、それを「SMAP」に代替することで海洋保全に一定の効果を及ぼすといえる²⁾。

更に、カトラリーや食品容器の他にも、刺し網等の漁具へ「SMAP」を適用することができれば、海洋プラスチックの問題解決へ大きく貢献できると考える。これは海洋プラスチックの約4割もの量が漁具であるとされており、実際に漁具の原料を生分解性プラスチックへ代替する検討も行われていることから見て取れる^{33) 34)}。しかし、カトラリー等の日用品と比べて、漁具には水流等に耐える相応の強度が必要であることから、強度の高いナイロン樹脂等が利用されており、その代替のハードルは高いと言える。そのような中、先述したEFB等のバイオマスフィラーに関する研究は現在も多くなされており、特にセルロースナノファイバーはプラスチックの強度を上げるための有力な技術となる³⁵⁾。また、プラスチックとフィラーを適切に混合するための相溶化剤についても油脂産業の中核をなすステアリン酸等の適応が検討されており、これらの材料を活用することで強度を向上できる報告もある²⁴⁾。つまり、これら技術の発展によって「SMAP」を漁具に対しても適応することは十分に可能と考える。

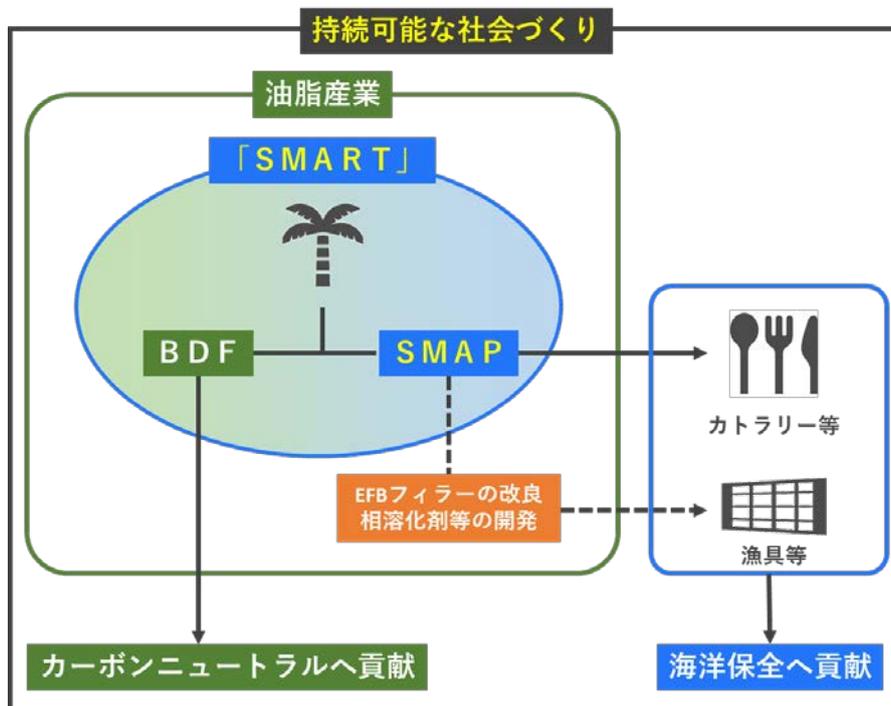


図 2 1. 「SMART」による持続可能な社会づくりへの貢献

さらに、「SMAP」の生産量は本論文で論述した以上のポテンシャルを秘めている。「SMART」は、BDFを製造している、あるいはこれから着手しようとしている国々や企業に対して広く提案可能な技術である。なぜならば、原料となる植物油は必ずしもパーム油である必要はなく、例えば、菜種油や大豆油、更には廃食用油等を回収したものを用いても問題ないためである。また、フィルターとしてはEFBのみならず、もみ殻等のその他油糧作物から発生する廃棄物についても検討されているため、それらも「SMART」に適応可能である³⁶⁾。世界におけるBDF (FAME) の生産量は2021年時点で4,000万tを上回っており、更にはその生産量は堅調に推移していることから、「SMART」による「SMAP」の生産についても、年間約800万t以上のポテンシャルがあると言える³⁷⁾。本技術がさらに発展すれば、現行で流通している全てのプラスチックを「SMAP」に置き換えることも夢ではないと考える。

おわりに

「環境に優しい大会にするか、それとも、そもそもパリでは開催しないか」。オリンピック誘致の際に、パリのイダルゴ市長が述べた言葉である。2024年7月から開催されたパリオリンピックは、最も環境負荷の少ないオリンピックとして注目された。その一環として使い捨てプラスチックの持ち込みが禁止される史上初の試みとなり、全世界に対するプラスチック問題の大規模な啓蒙活動となったであろう。

国連環境計画は各国が既存の技術を使用し、主要な政策変更を行うことで2040年までにプラスチック汚染を80%削減できると報告していることから、世界中が注目したパリオリンピックを契機として各国の意識改革が起き、それを実現することで「14. 海の豊かさを守ろう」、ひいてはSDGsが達成されることを期待する。そして、2040年のオリンピック開催時には、世界に一つだけの海洋生分解性プラスチック「SMAP」と、それを実現する「SMART」が革新技術ではなく、世界の常識へと進展し、持続可能な社会づくりに貢献できれば本望である。

注釈・略語

- ※1 【SDGs】 Sustainable Development Goalsの略。2030年までに持続可能でよりよい世界を目指す国際目標で、17のゴール・169のターゲットから構成されている。
- ※2 【SDSN】 Sustainable Development Solutions Networkの略。持続可能な社会を実現するためのグローバルネットワークで、SDGsやサステナビリティの課題に取り組む多様なステークホルダーと協働することを目的にしている。
- ※3 【プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律】 プラスチック使用製品の設計からプラスチック使用製品廃棄物の処理まで、プラスチックのライフサイクルに関わるあらゆる主体におけるプラスチックの資源循環の取組を促進するための措置を盛り込んだ法律であり、令和3年6月成立した。
- ※4 【カーボンニュートラル】 温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させることを指す。具体的には、CO₂の排出量と吸収量をプラス・マイナスでゼロにし、大気中のCO₂の全体量を増減させない取り組みが挙げられる。
- ※5 【PHA】 Poly Hydroxy Alkanoic acid の略。微生物が体内に蓄積するバイオプラスチックの一種で、高い生分解性を示す。
- ※6 【BDF】 Bio Diesel Fuelの略語。植物油を原料とする軽油代替燃料であることから、前述のカーボンニュートラルへの貢献が可能である。
- ※7 【FAME】 Fatty Acid Methyl Esterの略。最も主流なBDFであり、植物油とメタノールを後述のエステル交換反応することによって得られる。
- ※8 【トリグリセライド】 植物油の主成分であり、3分子の脂肪酸が1分子のグリセリンとエステル結合した構造をとる物質である。
- ※9 【エステル交換反応】 トリグリセライドとメタノールを触媒によって反応させることで、FAMEとグリセリンへと交換させる化学反応。この際、グリセリンは純分としてトリグリセライドの約10%発生する。しかし、実際には触媒や不純物を含むことから、そのままの状態ではグリセリンとして使用することは困難である。
- ※10 【ガノデルマ病】 ガノデルマ属糸状菌がアブラヤシに感染すると、樹の水分伝

達機能が阻害され、実の収量が低下し、やがて枯死してしまう。

※11【金属触媒】鉄、白金、銅等の遷移金属およびその酸化物から成る触媒。本論文においては、グリセリンが水素と反応し、水とプロピレンを生成する際の触媒として用いる。

※12【PKE】Poly Ketone Esterの略。従来のMBBPであるPHAと類似の構造を有しており、海洋での生分解性が確認されている。

※13【固体酸触媒】メタフェノールスルホン酸とホルムアルデヒドから成るポリフェノールスルホン酸樹脂触媒のことを指す。この高分子酸触媒は水にも油にも溶けず、エステル交換反応の触媒として長期にわたって利用可能であり、かつ得られたFAMEやグリセリンの中に触媒由来の不純物が含有されない。

※14【フィラー】プラスチック材料に混ぜて性能や加工性を向上させる充填剤。

※15【コンパウンド化】プラスチック材料に顔料や添加剤などを混ぜ合わせて新しい外観や機能を持つように加工すること。

参考文献

- 1)SDSN、「SUSTAINABLE DEVELOPMENT REPORT 2024」
- 2)JAMSTEC BASE、深海にもプラスチックの溜まり場が!海のプラスチック汚染を可視化する-深海底や中層に溜まる永遠に消えないごみ、2024年2月21日
<https://www.jamstec.go.jp/j/pr/topics/explore-20240221/>
- 3)CNN、人間が日常生活で飲み込むプラスチック、週にカード1枚分 豪研究、2019年6月12日
<https://www.cnn.co.jp/fringe/35138381.html>
- 4)国連環境計画、世界環境デー2023「プラスチック汚染をなくそう」
- 5)WWF ジャパン、海洋プラスチック問題について、2018年10月26日
<https://www.wwf.or.jp/activities/basicinfo/3776.html>
- 6)環境省、「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」の普及啓発ページ
<https://plastic-circulation.env.go.jp/>
- 7)環境省、海洋プラスチックごみ対策アクションプラン
https://www.env.go.jp/water/marine_litter/mpl.html
- 8)ハイケム株式会社、生分解性プラスチック
<https://highchem.co.jp/biodegradable/>
- 9)粕谷健一、海洋生分解性プラスチックが導くクリーンアースな未来、〔生物工学会誌 第100巻 第9号 478-482. 2022〕
- 10)環境省、バイオプラスチック導入ロードマップ検討会(第3回)
https://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/20201117_3.html
- 11)マイナビニュース、2019年のプラごみ発生3億5300万トン OECDが「海洋汚染続く」と警告する報告書、2022年2月25日
- 12)Mordor Intelligence、「ポリヒドロキシアルカノエート市場規模」
<https://www.mordorintelligence.com/ja/industry-reports/polyhydroxyalkanoate-market>
- 13)Statistics MRC、「ポリヒドロキシアルカノエート(PHA)市場の2030年までの予測」、
<https://www.gii.co.jp/report/smrc1503381-polyhydroxyalkanoate-market-forecasts-global.html>
- 14)Chematels (ポリエチレン、ポリエチレンテレフタレート)の2024年の輸入価格を参照
<https://chematels.com/>
- 15)一般財団法人日本植物油協会、植物油の道-植物油の生産から消費まで

https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/seisan03_02.html

16) ニューススイッチ、グリセリンはバイオディーゼル燃料の厄介者ではなくなる!?, 2016年5月28日

<https://newswitch.jp/p/4813>

17) 株式会社 IHI、パーム廃棄物を活用した固体バイオマス燃料事業を本格化、2018年11月14日

https://www.ihico.jp/all_news/2018/resources_energy_environment/1190427_1616.html

18) 竹本真、C-O 結合を選択的に水素化分解する金属錯体触媒の開発

https://shingi.jst.go.jp/pdf/2020/2020_3kansai_4.pdf

19) Haobo Yuan, et al, J. Am. Chem. Soc. 2024, 146, 19, 13658-13665

20) Taku Omura, et al. Microbial decomposition of biodegradable plastics on the deep-sea floor. Nat Commun 15, 568 (2024) 21) 小林修ら、有機合成のためのフロー化学、P1-P16

22) Hao Hu, et al, Organic Letters, 2020, 22, 1, 160-163

23) 伊藤章、ものづくりと学問「ポリエチレンーガスからプラスチックを作るー」

24) 特許公報、国際公開番号 W02018/180469

25) 古川電気工業株式会社、「セルロース繊維強化樹脂」、<https://www.furukawa.co.jp/celre/>

26) JAMSTEC BASE、「木」や「カニの殻」由来の代替素材で、海洋プラスチック問題に挑む!、2024年2月22日 <https://www.jamstec.go.jp/j/pr/topics/explore-20240222/>

27) Jiaxin Guo et al, Nature Energy volume 8, pages264-272 (2023)

28) 産業技術総合研究所、低温で二酸化炭素からメタノールを合成可能な触媒を開発、2021年1月14日

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2021/pr20210114/pr20210114.html

29) Ryota Yamano et al, EES Catal., 2023, 1, 1228) Seiji Ogo et al, J. Am. Chem. Soc. 2023, 145, 8, 4384-4388

30) Seiji Ogo et al, J. Am. Chem. Soc. 2023, 145, 8, 4384-4388

31) 日本経済新聞、「プルタミナ、もろ刃のバイオ燃料シフト パーム油に逆風」、2021年2月15日 <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGM2691SOW1A120C2000000/>

32) 味の素株式会社、海洋プラスチックの削減（インドネシア）

<https://www.ajinomoto.co.jp/company/jp/activity/society/02/>

33) 環境省、海洋ごみをめぐる最近の動向

https://www.env.go.jp/water/marine_litter/conf/02_02doukou.pdf

34) みなと新聞、「世界初の生分解性刺し網 ニチモウグループら開発」、2023年10月13日

<https://www.minato-yamaguchi.co.jp/minato/e-minato/articles/137031>

35) 大阪大学、デンプンを基盤とした海洋生分解性バイオプラスチックの創製、2023年4月1日

36) 三洋化成工業株式会社、バイオマスをプラスチックに均一に分散させる機能ー活用促進で石油由来資源の使用量低減に貢献ー

<https://www.sanyo-chemical.co.jp/magazine/archives/4613>

37) UFOP, BIODIESEL&CO. 2022/2023

https://www.ufop.de/files/5316/9761/9068/Biodiesel_und_Co_2022-23_DE.pdf