

バイオマスプラスチックと バイオマス化学の動向（上）

バイオマス原料からつくられるバイオ化学品、バイオマスプラスチック、バイオ燃料について、技術開発と工業化のトピックスをまとめた。(上)では、バイオエタノール由来のバイオPEとバイオPETに加えて、新たにバイオナフサを原料とするドロップインプロダクト（バイオPE、バイオPP、バイオPVCなど）の製造について、マスバランス方式やケミカルリサイクルとの関係を含め解説した。また、バイオ燃料にはバイオエタノールとバイオディーゼルがあり、バイオディーゼルには FAME と需要が伸びている HVO がある。

2024年3月



株式会社 旭リサーチセンター

シニアリサーチャー 府川伊三郎

まとめ

- ◆天然資源化学における「バイオマス化学」の位置付けを解説した。バイオマス化学にはバイオ化学品、バイオマスプラスチック、バイオ燃料が含まれる。 (3～5頁)
- ◆化石資源枯渇と地球温暖化の対策として「再生可能資源化学」へのシフトが求められ、この中で「バイオマス化学」はさらに重要になる。また、合成ガス・メタノール・エタノールをプラットフォームとする新体系が根幹となる。 (6～8頁)
- ◆バイオマスプラスチックの分類と定義を説明した。 (9～10頁)
- ◆バイオマスプラスチックの工業化例を16例取り上げ、それらのバイオマサー化学品(モノマー)ープラスチックの製造ルートと使用技術を解説した。 (11～13頁)
- ◆バイオエタノール由来のバイオPEやバイオPET30(「第一世代ドロップイン」)は、高コスト構造と使用を義務付ける法規制がないことから市場は期待ほど伸びていない。最近、米国でバイオエタノール由来のエチレン、プロピレンとその誘導体(PEやPP)を大規模に生産する複数の計画が発表され、注目される。 (14～24頁)
- ◆Dow、LyondellBasell、Ineos、Sabic、Covestro、三井化学など石油化学メーカーは、NesteやUPMの廃棄物由来の再生ナフサ(ディーゼル)を原料にして、既存の石化プラントでバイオベースのPE、PP、PVC、PC、PU(「第二世代ドロップイン」(マスバランス方式採用))の生産を開始した。バイオマスプラスチックをリサイクルすることにより、サステナビリティを高める相乗効果が期待できる。 (25～35頁)
- ◆サステナブル材料であるバイオマスプラスチック、メカニカルリサイクル再生材、ケミカルリサイクル再生材について、それらの利点と課題を比較した。また世界の大手化学企業のそれらサステナブル材料の事業化状況をまとめた。 (35～40頁)
- ◆2020年のバイオ燃料生産量は9,100万トンで、バイオエタノールが5,100万トンで、バイオディーゼルが4,000万トンであった。バイオディーゼルはFAME(脂肪酸メチルエステル)が84%、HVO(水素化処理植物油)が16%となっている。HVOは2000年頃より登場したもので、FAMEに比べて既存ディーゼルに近い性状を持つため、新增設が相次ぎ急速に拡大している。HVOにはバイオナフサもある。 (41～52頁)

企業による開発と事業化のトピックス(2014~2023年)

1. LanzaTech : ①発酵プロセスによる合成ガスからエタノール合成 (工業化) と MEG の直接合成 (開発)、②エタノールを原料にした JET 燃料の工業化 (7、19 頁)。
2. バイオ PET30 は予想外に伸びず、Braskem、Avantium、UPM がコストダウンを目指してバイオ MEG 製法の開発に取り組む。バイオ PET100 はいまだ工業化されず (17 頁)。
3. 非可食性バイオマス原料からのエタノール製造は、撤退が相次いだが、①Versalis が継続中 (46 頁)、②新たに Dow が New Energy Blue と提携して取り組む (16 頁)。
4. 第二世代ドロップイン (PE、PP、PVC、PC、PU、PET など) の事業化 : バイオナフサ原料サプライヤー (Neste と UPM) と石化メーカー (Dow、LyondellBasell、Ineos、Borealis、三井化学、Covestro など) が提携して商業化 (29、31 頁)。
5. UPM は木材ベースの Biorefinery でバイオナフサ・ディーゼルを製造中 (28 頁)、MEG&MPG・フィルター製造用の Wood refinery は 2024 年に完成予定 (18 頁)。
6. Avantium の FDCA プラントは 2024 年に完成し、PEF 事業化へ (HMF→FDCA→PEF)。Origin Materials の CMF プラントは稼働開始済み (CMF→FDCA→PEF および CMF→パラキシレン→テレフタル酸→バイオ PET100 の展開計画) (20 頁、下巻)。
7. バイオディーゼルの中で、HVO (水素化処理植物油) が伸びている。Neste が世界のリーダーで大きなシェアを占めている。ENI と TotalEnergies が続く (50 頁)。
8. HVO 製造時の副生バイオプロパンから、Borealis がバイオ PP を製造 (30 頁)。
9. 日本の RITE は「イソブタノール高生産コリネ型細菌」を用いるイソブタノール製造技術開発。バイオジェット燃料やバイオパラキシレン製造を目指す (下巻)。
10. バイオブタンジオールは事業撤退もあったが、イタリアの Novamont が工業化し、また Cargill が米国で大規模工業化計画。いずれも Genomatica の技術 (下巻)。
11. バイオコハク酸は撤退が相次いだが、イタリアの Roquette が継続中 (下巻)。
12. Dupont・PTT(Sorona®)、三菱ケミカル・PC (DURABIO™) が事業拡大中 (下巻)。
13. 生分解性プラスチックは、①カネカが PHBH の設備能力を 2024 年に 2 万トン/年に大増強、②タイで Total-Corbion と NatureWorks が PLA 工場 : 各 7.5 万トン/年、③中国の生分解性プラスチック (PBAT や PLA など) の生産と消費が急拡大 (下巻)。

目次

はじめに	1
用語・略語	2
1. 「天然資源化学」におけるバイオマス化学	3
2. 「天然資源化学」から「再生可能資源化学」へのシフト	6
3. バイオマスプラスチックの種類と定義	9
4. バイオマスプラスチックとバイオマス化学の工業化・開発例	11
5. 「バイオマス第一世代ドロップインプロダクト」	14
5.1 バイオポリエチレン（バイオPE）とバイオポリプロピレン（バイオPP） ..	14
5.2 バイオPET30とバイオMEG	17
5.3 バイオPET100とバイオテレフタル酸	19
5.4 飲料メーカーのペットボトルの再生材・バイオマス含有量目標	21
5.5 その他プラスチックの「第一世代ドロップイン」	24
6. 「バイオマス第二世代ドロップインプロダクト」	25
6.1 「第二世代ドロップイン」の定義とマスバランス方式	25
6.2 バイオナフサ・バイオディーゼルの供給メーカー（NesteとUPM）	27
6.3 石油化学メーカーによるバイオPEとバイオPPの製造	29
6.4 バイオベースのPVC、PC、PU、PA、PS、ABS、PET、BR、SBRの製造	31
6.5 「第一世代ドロップイン」と「第二世代のドロップイン」の比較	33
6.6 バイオマスドロップインとリサイクルの関係	34
6.7 PE&PPのMR再生材、CR再生材、バイオマスドロップインの総合比較	35
6.8 バイオマスプラスチックと再生材（MR&CR）の供給メーカー	38
7. バイオ燃料（バイオエタノールとバイオディーゼル）	41
7.1 概要	41
7.2 世界の地域別生産量と各国の状況	42
7.3 バイオエタノール	45
7.4 セルロース系バイオ燃料	45
7.5 FAME（Fatty Acid Methyl Ester：脂肪酸メチルエステル）	47
7.6 HVO（Hydrotreated Vegetable Oil：水素化処理植物油）	47
7.7 バイオ燃料規制	52
おわりに	53
謝辞	53
引用文献・参考文献	54

はじめに

本レポートは、ARC レポート「バイオマス化学」(2014 年 9 月発行、引用文献①) の続編である。2014 年 9 月から約 10 年が経過した。前回レポートと同様にバイオマスからつくられるバイオマスプラスチック、バイオ化学品、バイオ燃料について調査し、過去 10 年間の開発と工業化のトピックスを中心にまとめた。したがって、本レポートは最近のトピックスだけでなく過去のトピックスも含まれている。

一方、この 10 年間、プラスチックのサステナビリティについて、世界的に様々な問題が発生してきた。すなわち、プラスチックの廃棄物処理問題→海洋プラスチックごみ・マイクロプラスチック問題→資源循環問題(化石資源枯渇)→地球温暖化問題(温室効果ガス(CO₂)排出)と問題が拡大してきた。いずれも解決しなければならない重要な課題である。

図 1 に、これらの問題とそれを解決するために出された規制や技術開発を模式的に示す。この中で再生可能資源由来でありカーボンニュートラルなバイオマス化学とバイオマスプラスチックはますます重要になった。今後、バイオマス化学とバイオマスプラスチックの発展により、多くの問題が解決されることを期待する。

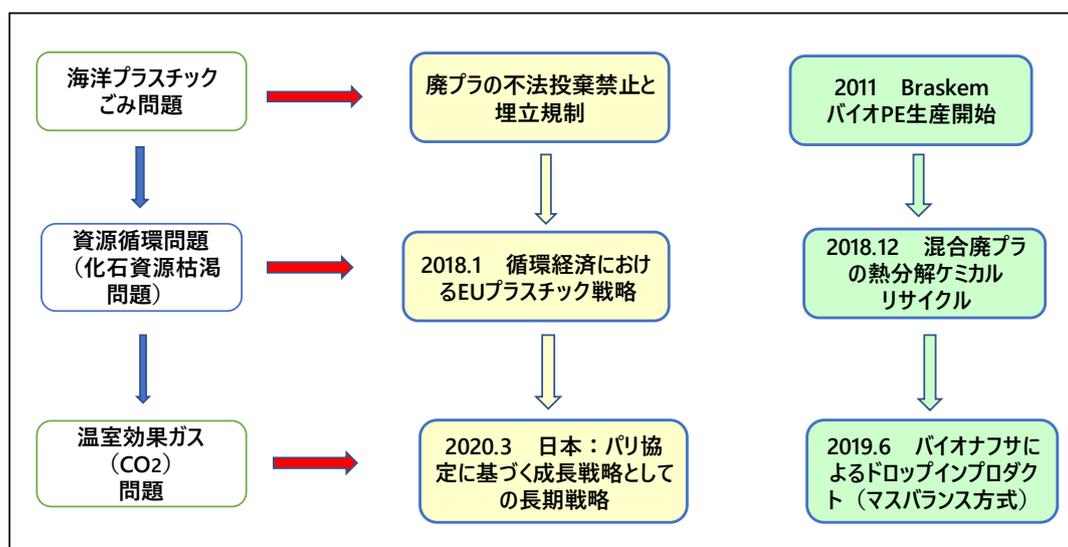


図 1 プラスチックのサステナビリティに関する課題、規制、技術開発

出所：旭リサーチセンター作成。

用語・略語

(1) 全般

- ・ドロップインプロダクト（略　ドロップイン）：既存品と同じ性質のプロダクトを別の製法でつくったもの。例：石油化学原料のPEに対するバイオPEのこと。
- ・バイオマスプラスチック：バイオマス由来のプラスチック。9頁参照。
- ・マスバランス方式：25頁の6.1参照。
- ・MR（メカニカルリサイクル、マテリアルリサイクル）：選別—粉碎—洗浄—押し出し（脱気・脱臭、メルトフィルターによる異物除去）による再生材の物理的製法。
- ・CR（ケミカルリサイクル）：化学反応を含むリサイクル法。解重合法、熱分解法、ガス化法、コークス炉原料化法、高炉還元剤法などがある（引用文献③と⑤参照）。
- ・スチーム・クラッキング：ナフサ、ガスオイル、エタンなどの水蒸気分解。

(2) プラスチックの略語

PA：ポリアミド（ナイロン）	PTT：ポリトリメチレンテレフタレート
PBAT：ポリブチレンアジペートテレフタレート（共重合体）	
PBS：ポリブチレンサクシネート	PEF：ポリエチレンフラノエート
PET：ポリエチレンテレフタレート	PET100：100%バイオマス由来のPET
PET30：30%（MEG部分）のみバイオマス由来のPET	PGA：ポリグリコール酸
PHA：ポリヒドロキシアルカノエート	PLA：ポリ乳酸

(3) バイオ化学品、バイオ燃料の略語

MEG：モノエチレングリコール（いわゆるエチレングリコールのこと）
FDCA（2,5-Furandicarboxylic acid）：2,5-フランジカルボン酸、PEFの原料
HMF（Hydroxymethylfurfural）：FDCAの原料
CMF（Chloromethylfurfural）：パラキシレン（テレフタル酸、PET）、FDCAの原料
FAME（Fatty Acid Methyl Ester）：脂肪酸メチルエステル、バイオディーゼル燃料
HVO（Hydrotreated Vegetable Oil）：水素化処理植物油、バイオディーゼル燃料
SAF（Sustainable Aviation Fuel）：持続可能な航空機燃料

1. 「天然資源化学」におけるバイオマス化学

日本はナフサを原料とする石油化学主体であるが、既に世界は石油、天然ガス、石炭、バイオマスなどの天然資源を総合的に利用する「天然資源化学」の時代になった¹。それぞれを、石油化学、天然ガス化学、石炭化学、バイオマス化学と表記した（図 2）。

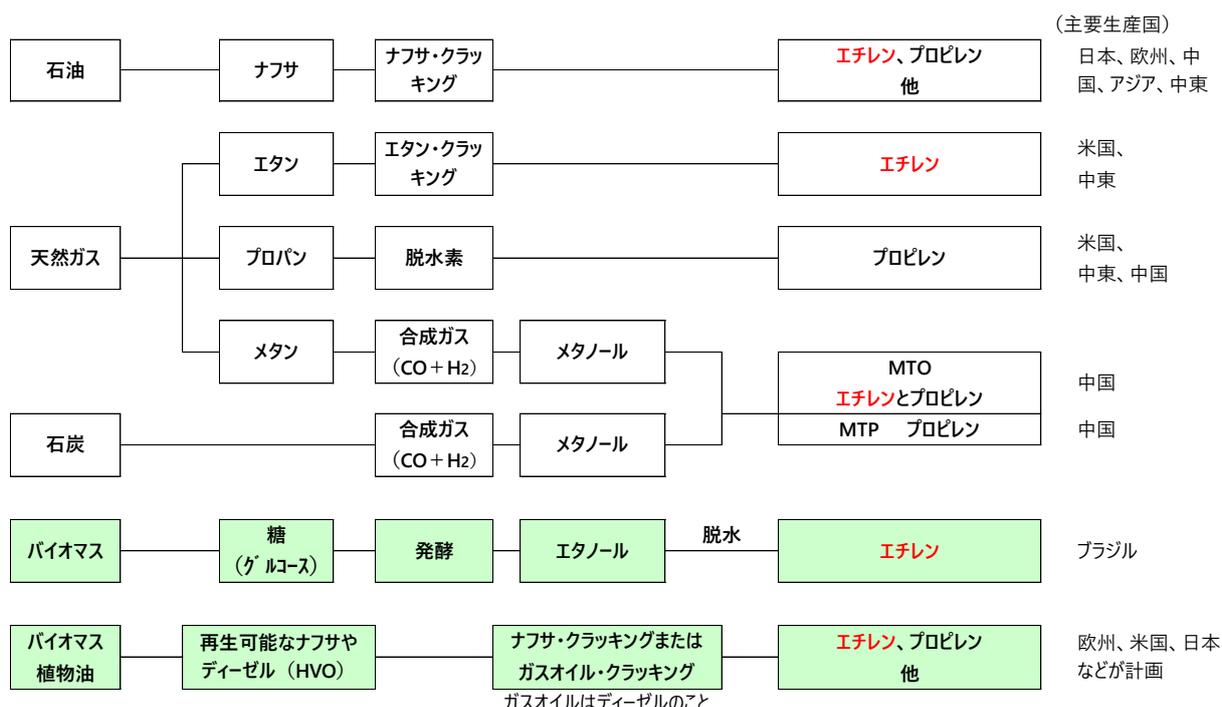


図2 石油化学、天然ガス化学、石炭化学、バイオマス化学によるエチレン、プロピレンの製造

出所：旭リサーチセンター作成。

(1) 石油化学

ナフサをスチーム・クラッキング（ナフサ・クラッキング）して、エチレン、プロピレン、C4 留分、分解ガソリンを製造する。日本は石油化学が主体である。欧州やアジアもナフサ・クラッキングが中心である。

エネルギー多消費型のナフサ・クラッキングの CO₂ 排出量を抜本的に削減する技術革新が始まっている。BASF、SABIC、Linde の 3 社は共同で、世界初の大型電気加熱式蒸

¹ ① ARC リポート RS-998 「石油化学」 から 「天然資源化学」 へ（2016 年版）

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-998.pdf

② 「 」 は本リポートで命名した名称を示し、“ ” は企業、政府などが命名した名称を示す。

気分解炉の実証プラントの建設に着手することを発表した（2022年9月1日）²。天然ガスの代わりに再生可能エネルギー由来の電力を使用することで、CO₂を90%削減する可能性があるという。翌年の2023年9月11日の発表によれば、建設が進み最終段階に入っているという³。

（2）天然ガス化学

米国は安価なシェールガス中のエタンを原料とするエタン・クラッキングによるエチレン製造を復活させ、大增設を行った（ナフサ・クラッキングの比率は10%程度に縮小した）。また、シェールガス中のプロパンの脱水素によるプロピレンの製造（PDH）が、米国だけでなく世界的に拡大した。

中東はかつて安価な石油随伴ガスを活用したエタン・クラッキングが主流であったが、石油随伴ガスの発生が頭打ちになったことから、だいぶ以前からナフサ・クラッキングが増加している。

エタン・クラッキングについてもCO₂を抜本的に削減する変革が始まっている。Ineosは、新時代の「ヨーロッパで最も環境に優しいエタン・クラッカー」を目指して、水素を燃料とすることでCO₂排出量ゼロを実現する“Project ONE”の建設と操業のために、35億ユーロの資金を確保したことを発表した（2023年2月13日）⁴。プラントはアントワープに建設、CO₂排出量はヨーロッパの平均的なスチーム・クラッカーの3分の1、ベストパフォーマンスのスチーム・クラッカーの2分の1以下になるという。

また、Dowは、世界初の炭素排出量ゼロのエチレンおよび誘導品の工場建設計画（カナダのアルバータ州での“Path. 2. Zeroプロジェクト”）を発表した（2021年10月6日）⁵。そして2023年12月6日に、Path. 2. Zeroプロジェクトの最終投資決定を発表

² <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/whats-new/sustainability-news/2022/basf-sabir-and-linde-start-construction-of-the-worlds-first-demonstration-plant-for-large-scale-electrically-heated-steam-cracker-furnaces.html>

³ <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2023/09/p-23-288.html>

⁴ <https://www.ineos.com/news/ineos-group/ineos-secures-3.5-billion-financing-for-project-one---the-greenest-cracker-in-europe/>

⁵ <https://jp.dow.com/ja-jp/news/dow-announces-plans-to-build-the-worlds-first-zero-carbon-ethylene-and-derivative-plant.html>

した⁶。このプロジェクトは、スコープ 1 および 2 について初の排出量ネットゼロを実現するエタン・クラッカーおよび誘導体施設である。このプロジェクトの費用は、政府のインセンティブと補助金を除いて 65 億ドルで、新しいエタン・クラッカーの建設と 200 万トン/年のポリエチレン生産能力増加が含まれている。

(3) 石炭化学

中国はナフサ・クラッキングに加えて、石炭由来のメタノールを原料としてエチレンとプロピレンを併産する MT0 プロセス (methanol to olefin) とメタノールからプロピレンのみを生産する MTP プロセス (methanol to propylene) を大規模に工業化した。なお、メタノールは天然ガスからも製造されるため、天然ガス由来のメタノールを原料とする MT0 プロセスも可能で、これも中国で工業化されている。中国の MT0・MTP によるエチレンとプロピレンの総生産量は、2018 年に 1,085 万トンと推定された⁷。短期間に驚異的な拡大である。

(4) バイオマス化学

バイオマスからつくられたバイオエタノールを脱水してエチレンをつくり、そのエチレンからポリエチレンを製造する技術が、2011 年にブラジルの Braskem によって工業化された。これにより、バイオマスからもエチレンがえられる時代になった。そして、2019 年より、植物油を水素化処理してつくられた再生可能なナフサやディーゼル (HVO：水素化処理植物油) を、既存の石油化学プラントに投入して、エチレン・プロピレンやバイオマスプラスチックを製造する計画が相次いで発表された (図 2)。

⁶ <https://www.frackcheckwv.net/2023/12/06/new-dow-chemical-company-ethane-cracker-plant-set-for-alberta-canada/>

⁷ <https://coal.jogmec.go.jp/content/300368076.pdf> 26 頁の表

その他参考：https://chemicalmarketanalytics.com/blog/high_oil_price_environment/
<https://www.woodmac.com/news/editorial/how-cto-mto-will-affect-the-global-olefins-market/>

2. 「天然資源化学」から「再生可能資源化学」へのシフト

(1) 「天然資源化学」の限界

「天然資源化学」のうち化石資源を使用する石油化学、天然ガス化学、石炭化学は資源枯渇の恐れがあり、焼却処分をするとCO₂を排出する問題がある。

循環経済とカーボンニュートラル社会への加速が求められる現在、バイオマス化学を含めた「再生可能資源化学」へのシフトが求められる。

(2) 求められる「再生可能資源化学」(図3)

「再生可能資源化学」には、まずバイオマス化学があり、そしてプラスチックリサイクルによる「再生材化学」があり、またグリーン水素を原料とする「水素原料化学」がある。

(3) 「再生可能資源化学」のプラットフォームとなる合成ガス化学(図3)

合成ガスは、化石資源の石油、天然ガス、石炭のいずれからでもつくることができる。また、再生可能資源のバイオマス、廃プラスチック、CO₂と水素からでもつくることができる。合成ガスから主要な燃料やプラスチック原料を製造できるプラットフォームが既に開発・工業化されている。再生可能資源はこの合成ガスのプラットフォームを利用できるのが大きなメリットである。

(4) 合成ガス化学体系によるエチレンとプロピレンの製造(図3)

エチレン・プロピレン製造プロセスとしては、①と②がある。

①合成ガス由来のメタノールを原料とするMTOとMTPプロセス。

②エタノールの脱水によるエチレン製造プロセス。

(5) 合成ガス化学体系による各種燃料の製造(図3)

各種燃料の製造プロセスとしては、①～⑥がある。

- ①合成ガスからのメタノール製造。
 - ②各種ルートのエタノール製造：バイオマスの発酵によるバイオエタノール合成、合成ガス（特にCO）の発酵によるエタノール合成（LanzaTech（米国））、合成ガス由来メタノール→酢酸→エタノールのルート（Celanese's TCX® 技術や Enerkem（カナダ）のCOカルボニル化反応による酢酸経由のエタノール合成技術）がある。
 - ③合成ガスのFT（Fischer-Tropsch）反応による合成ガソリン（合成燃料）製造。
 - ④メタノールからの合成ガソリンの製造（MTG）。
 - ⑤合成ガスのメタネーションによるSNG（代替天然ガス）の製造。
 - ⑥エタノールからのジェット燃料（ATJによるSAF）製造（LanzaTechや出光興産）。
- 出光興産がバイオエタノールを用いたSAF製造の技術開発に取り組んでいる。最先端のATJ（Alcohol to Jet）プロセスの開発である（2023年2月1日発表）⁸。

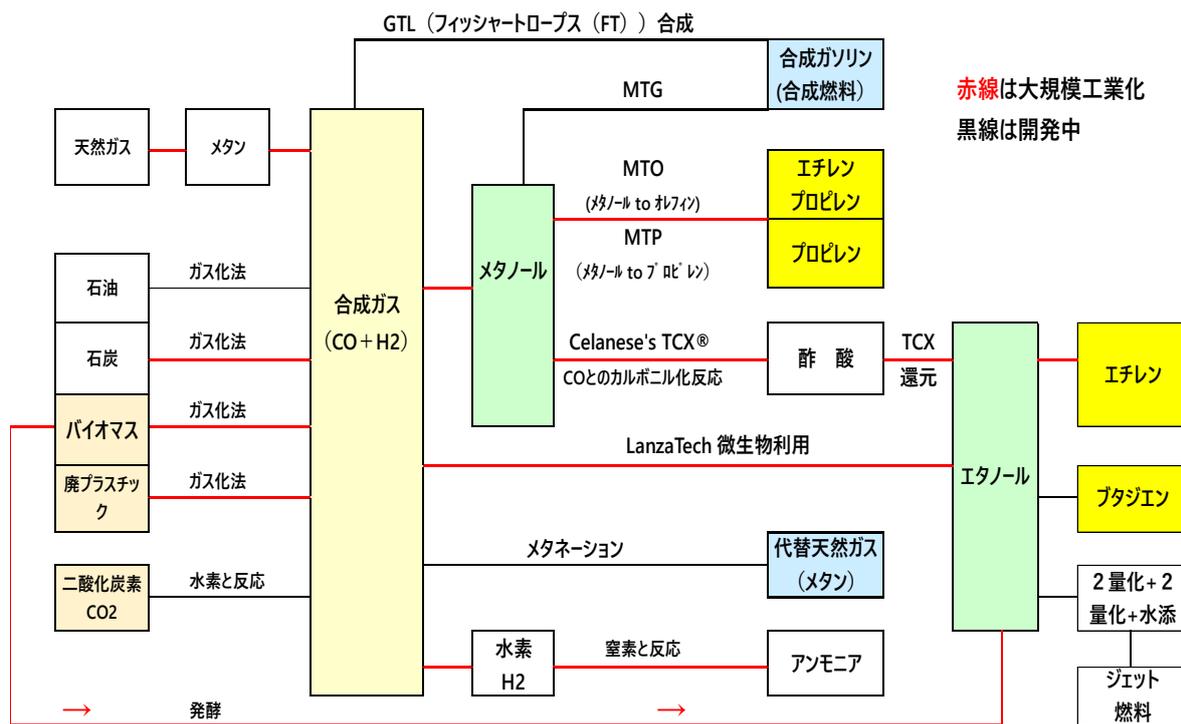


図3 合成ガス化学、メタノール、エタノールの新体系

出所：旭リサーチセンター作成。

⁸ <https://www.nedo.go.jp/content/100957725.pdf>：プロセスは、バイオエタノール脱水→エチレンのオリゴマー化→ブテンのオリゴマー化→オレフィンの水素添加→精留→ジェット燃料。

(6) 持続可能な航空機燃料（SAF）の製法別シェア予測

航空機は自動車と違い電気モーター駆動は難しく、バイオ燃料の SAF に頼らざるを得ない。Sky NRG による欧州における SAF の製法別シェア予測を図 4 に示す。

まず、現在主流の HVO は、2031 年以降は増加していない。これは、HVO の原料である使用済み植物油の回収量が増加しないこと、また新たに天然林を切り開いてパーム油などを増産することは環境的に制限されるためと推察される。

2 番目はバイオマスをガス化して合成ガスをつくり、FT 反応でジェット燃料を製造する方法である。

3 番目は、アルコールからジェット燃料をつくる（AtJ または ATJ）方法である。

4 番目は、CO₂ と H₂（電解水素）を原料に、FT 反応で合成燃料をつくる PtL（Power-to-Liquid）⁹である。長期的には PtL が最も多くなると予想している。

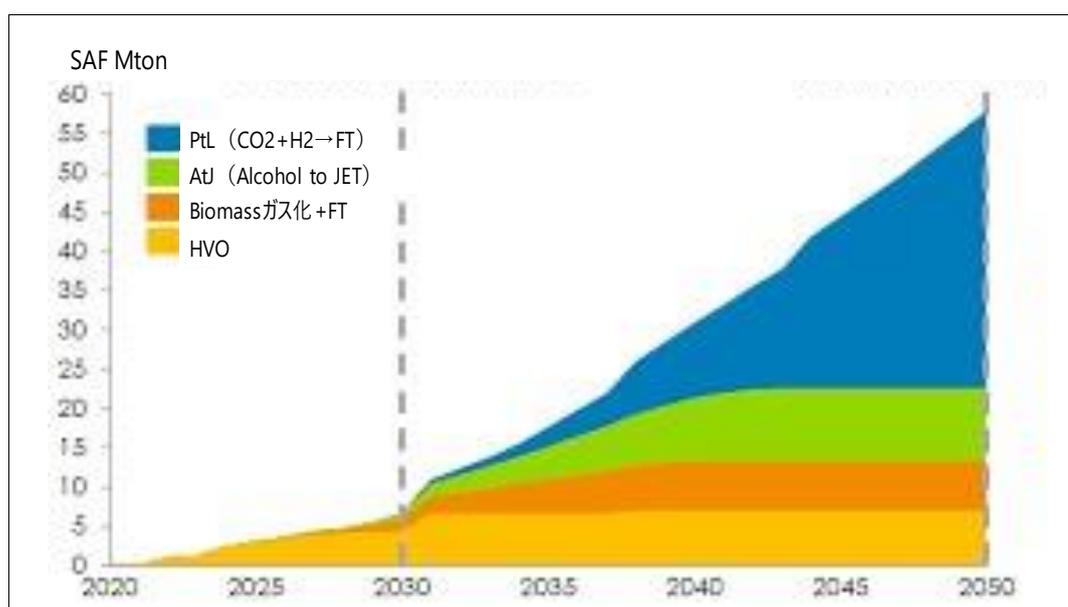


図 4 サステナブルな航空機燃料(SAF)の製法別シェアの将来予測(欧州)

出所: SkyNRG, A market Outlook on Sustainable Aviation Fuel, July, 2021

⁹ <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-07-power-to-liquids-explained>

3. バイオマスプラスチックの種類と定義

表1にバイオプラスチックとバイオマスプラスチックの種類と定義を示した。

表1 バイオプラスチックとバイオマスプラスチックの定義

	非生分解性		生分解性
化石資源ベース (枯渇資源) (焼却時CO ₂ 発生)	既存汎用品	高付加価値品	PBAT PBS PCL PGA
	PE、PP、PET、PS	エンプラ	
バイオマス プラスチック (再生可能資源) (カーボンニュートラル)	ドロップイン プロダクト	高付加価値品	生分解性 バイオプラスチック
	バイオPE バイオPET30	PEF PTT 特殊PC 特殊PA	PLA (ポリ乳酸) バイオPBS PHA (PHBH、PHBV)

生分解性プラスチックのメーカー例 PLA：ネーチャーワークス PHA (PHBH)：カネカ PBAT：BASF
PBS：三菱ケミカル PCL：ダイセル PGA：クレハ

出所：旭リサーチセンター作成。

(1) バイオプラスチックの定義 (表1の青色点線内と赤色点線内)

バイオプラスチックは、バイオマスプラスチックと生分解性プラスチック (バイオマス由来のものと石油化学由来のもの) の総称と定義する。石油化学由来の生分解性プラスチックはマイナーであるから、バイオプラスチックとバイオマスプラスチックはほぼ同じ意味となる。

(2) バイオマスプラスチックの定義 (表1の青色点線内)

バイオマスプラスチックとは原料にバイオマスを使用するものと定義する¹⁰。バイオマスは再生可能資源なので資源が枯渇することがなく、またカーボンニュートラルであることが特徴である。本レポートではバイオマスプラスチックを便宜的に次の三つに分類した (表1)。

¹⁰ 以前は、バイオベースポリマーと呼ばれることが多かった。

① ドロップインプロダクト(ドロップインと略す)

既存のプラスチックの製造原料を石油からバイオマスに代えたもので、プラスチックの性能は既存品と同じである。例は、バイオ PE、バイオ PET などである。

また、ドロップインには、次の二つがある。

「**第一世代ドロップイン**」(**リアル**)：バイオマス由来のモノマーからつくられたプラスチック (14 頁参照)。バイオマス含量は炭素同位体 (C14) の分析で測定できる。

「**第二世代ドロップイン**」(**マスバランス方式**)：バイオナフサと既存の石油ナフサの混合物から既存の石油化学設備を使って、バイオ PE、バイオ PP などをつくるものである (25 頁参照)。バイオマス含有量はマスバランス方式で決定される。

② 高付加価値品

ドロップインでも生分解性プラスチックでもないものを便宜的に「高付加価値品」と命名した。石油化学ではつくりにくいモノマー (1,3-プロパンジオール) をグルコースの発酵で製造したもの (PTT 繊維) や、バイオマス由来の特別な化学構造と特性を有するプラスチック (PEF、特殊 PC (特殊ポリカーボネート)、特殊 PA (特殊ポリアミド (特殊ナイロン)) などがある (下巻参照)。

③ バイオマス由来の生分解性プラスチック

PHA、PLA、バイオ PBS などがある (下巻参照)。

(3) 生分解性プラスチック (表 1 の赤色点線内)

生分解性プラスチックは、微生物の力を借りて二酸化炭素 (CO₂) と水に分解するものと定義されている。

生分解性プラスチックには、バイオマス由来のもの (PHA、PLA、バイオ PBS など) と石油化学由来のもの (PGA、PBS、PBAT、PCL (ポリカプロラクソン)) がある (下巻参照)。PBS は原料のバイオマス化が進行中である。

4. バイオマスプラスチックとバイオマス化学の工業化・開発例

図5に、代表的な工業化例と開発例を16例まとめた。

(1) バイオマス原料

使用されるバイオマス原料は、シュガー、グルコース、デンプン、トウモロコシ、油脂（ナタネ油、パーム油、大豆油など）などの可食性のものが大部分である。可食性のバイオマスを食料以外の用途に使用することについては、国際的に批判が続いている。このため非可食性の木材やセルロースの活用が精力的に進められてきたが、残念ながらあまり成功していない。非可食性セルロースを原料とするエタノール発酵については、Versalis（イタリア）1社を除き、ほとんどの企業が撤退してしまった。

(2) バイオ燃料

バイオ燃料としては、バイオエタノール、バイオディーゼルのFAME、バイオディーゼルのHVOの3種がある。バイオエタノールは燃料だけでなくバイオエチレンの原料でもあり、そこからバイオPEやバイオPET30などの「第一世代ドロップイン」（14頁）がつくられる。また新たに、HVOを既存の石油ナフサと混合したものをスチーム・クラッキングして「第二世代ドロップイン」（バイオPE、バイオPPなど）（25頁）がつくられるようになった。このようにバイオ燃料はバイオプラスチックの原料でもあり、その動向次第で原料入手可能性が左右される。

(3) バイオ化学品とバイオマスプラスチック

バイオマス原料から生分解性プラスチックのPHBH(PHAの一種)、PLA、バイオPBSがつくられる。PHBHは油脂から直接発酵プロセスで製造される。乳酸は昔からの確立した発酵製品であり、それを重合して生分解性のPLAがつくられる。

バイオPBSの原料になるバイオコハク酸は多くのメーカーが開発に取り組んだが、石油化学品との競争で苦戦している。現在、少なくとも1社（Novamont）が事業化している。バイオPBSのもう一つの原料であるバイオ1,4-ブタンジオールはグルコースの

発酵で工業化されており、それを原料に THF（テトラヒドロフラン）、PTMG（ポリテトラメチレングリコール）、スパンデックス（ポリウレタン弾性繊維）、ポリウレタンなどが製造される。天然のひまし油から工業的につくられるセバシン酸(C10)は、特殊 PA（N610、N1010、N11）の原料となる。

高付加価値のバイオマスプラスチックには、DuPont の PTT 繊維、三菱ケミカルの特殊 PC（イソソルバイド系共重合 PC）がある。

開発段階の技術としては、バイオエタノールからのブタジエンを原料とする合成ゴム（バイオ BR、バイオ SBR）の製造、バイオテレフタル酸とバイオ MEG によるバイオ PET100、開発中の新プロセス（水熱分解、熱分解法など）で合成されるバイオ MEG を使ったバイオ PET30 がある。

高付加価値品の PEF のキー原料であるフランジカルボン酸（FDCA）モノマーの本格プラントが 2024 年後半に稼働する。FDCA ができれば、PET の重合技術を利用して PEF は容易に製造できる。また、クロロメチルフルフルール（CMF）製造プラントが 2023 年に稼働した。CMF を原料に別ルートで FDCA を製造することができる。

（4）バイオマスプラスチックの製造技術

図 5 に示すように、製造技術には発酵法（バイオプロセス）と有機合成法の二つがある。発酵法単独で、バイオマス原料からバイオマスプラスチックを製造する例は予想外に少ない。むしろ有機合成法単独か、有機合成法と発酵法を組み合わせる例が多い。バイオマス化学においても有機合成化学が重要であることを示している。

バイオマス原料の変換に発酵法を工業的に使用しているものには、エタノール、PHA、乳酸、コハク酸、1,4-ブタンジオール、1,3-プロパンジオールがある。

一方、バイオマス原料の変換に使用されている有機合成法としては、エステル交換反応、水素化処理、酸化、（触媒使用）熱分解、水熱分解、塩酸分解などがある。

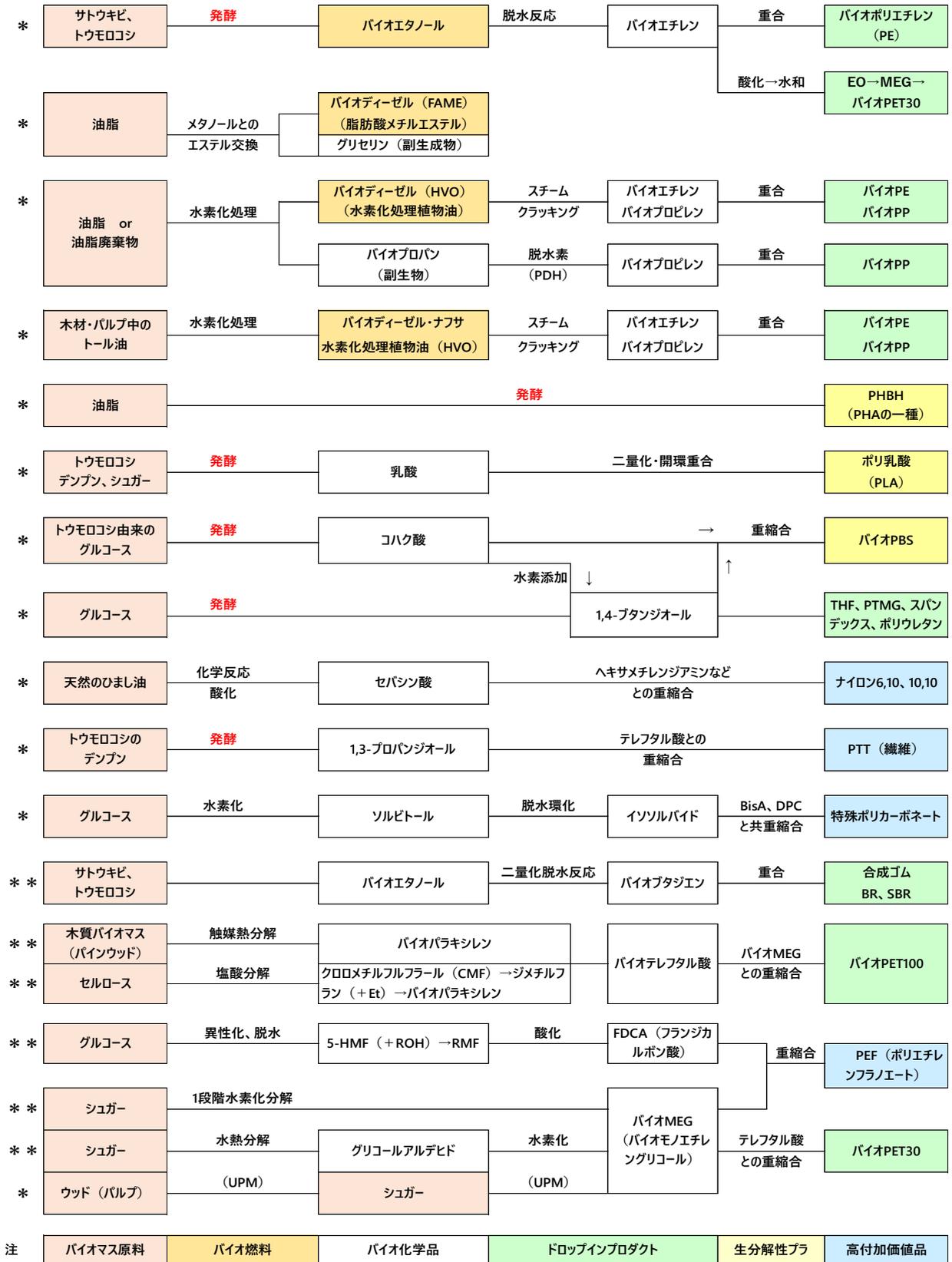


図 5 バイオマス化学の製造ルート(*印は工業化、**印は開発中(ベンチ・パイロット))

出所：旭リサーチセンター作成。

5. 「バイオマス第一世代ドロップインプロダクト」

本レポートでは、バイオマス由来のモノマーからつくられたドロップインプロダクトを「第一世代ドロップイン」と命名する。例えば、図6や図7のルートでそれぞれ製造されるバイオPEやバイオPET30である。バイオPE（バイオPET30）は、化石原料由来のPE（PET）とは炭素同位体（C14）の分析で識別できるリアルなドロップインである¹¹。

5.1 バイオポリエチレン（バイオPE）とバイオポリプロピレン（バイオPP）

(1) Braskem（ブラジル）のバイオPE

2011年以來、Braskemはサトウキビ原料から発酵でエタノールをつくり、これを脱水してエチレンに変換し、バイオPEを製造している（図6）。生産能力は20万トン/年である。26万トン/年に増設する計画を2023年7月27日に発表している¹²。

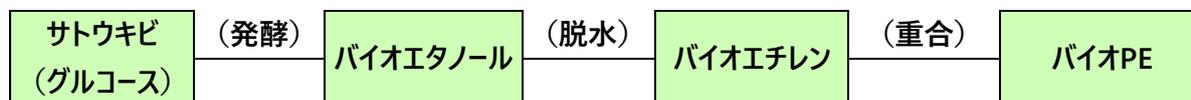


図6 バイオPEの製造ルート

出所：旭リサーチセンター作成。

2023年1月17日には、BraskemはバイオエタノールからバイオPPを生産する投資をFS評価するプロジェクトを発表した¹³。世界最大のエタノール生産地であり、バリューチェーンがそろっている米国での生産を目指している。

¹¹ プラスチック中のバイオマス含有量は、炭素の同位体分析で測定することができる。日本では日本バイオプラスチック協会が「バイオマスプラ識別表示制度」に基づき測定し、バイオマス含有量（バイオマスプラスチック度）25%以上で所定のスペックに合致するものはバイオマスプラスチックと認定している。

¹² <https://www.packaginginsights.com/news/braskem-boosts-biopolymer-production-in-brazil-with-us87m-investment.html>

¹³ <https://www.braskem.com.br/usa/news-detail/braskem-announces-project-to-evaluate-production-of-bio-based-polypropylene>

2023年8月17日には、BraskemとSCG Chemicals（タイ）はバイオエタノール脱水からバイオエチレンを生産し、それからバイオPEを製造するための合弁事業（JV）契約を締結した。技術はBraskemとLummus Technologyとの共同開発で、タイRayong県Map Ta Phutに建設される予定である¹⁴。最終投資決定はこれからである。

（2）バイオエタノールからのエチレン・プロピレン、PE、PPの製造の最近の動き

これまでバイオエタノールはほとんどバイオ燃料に使用され、化学品原料としての使用は非常に少なかった。しかし、バイオエタノール燃料の生産量（需要）は頭打ちで（42頁の図20）、今後電気自動車の普及でガソリン需要が減少すればそれに比例して需要は縮小し、コストも下がることが予想される¹⁵。そうなれば、化学用途での使用が増えるだろう¹⁶。

また、バイオエタノール原料のサトウキビは肥沃でない荒地でも栽培が可能で増産しやすいといわれる。一方、バイオディーゼルの原料であるパーム油の増産は厳しく管理されている。

最近の注目されるバイオエタノールを原料とする事業計画を以下に示す。

① Lummus Technology（米国）とCitroniq Chemicals（米国）：

両社は2023年11月9日、グリーンポリプロピレン（バイオPP）の生産プロセスのライセンス・エンジニアリング契約を締結したと発表した¹⁷。米国の最初のプラントは2027年に完成予定で、40万トン/年のバイオPPを生産する。既に、2023年4月に両社は

¹⁴ [News-Braskem and SCG Chemicals join forces to advance in the bio-based Ethylene project in Thailand](#)

¹⁵ ARCレポート https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1011.pdf 14頁によれば、エタノール原料のバイオエチレンは、エタン・クラッキングやナフサ・クラッキングに比較してコストが高い。理由はエタノール価格がエタンやナフサに比べ相対的に高いことがある。なお、エタノールを脱水してエチレンにすると重量が化学量論的に60%に減少してしまう。エタノールはC₂H₅OH（分子量46）、エチレンはC₂H₄（28）なので、46gのエタノールから28gのエチレンしか得られない。なお、エタノールの脱水反応によるエチレンの製造は定量的に進み取率は高い。

¹⁶ 米国はバイオ燃料用バイオエタノールが約4,300万トン（約5,400万KL）生産されているが、これは燃料以外に使用することは禁止されていた（政府の補助金が出ているためか）。仮に米国のバイオエタノールをすべてエチレンにすると、約2,600万トンのエチレンが製造できる。

¹⁷ <https://www.lummustechnology.com/news/releases/lummus-and-citroniq-announce-licensing-and-engineering-agreements-for-green-polypropylene-plant>

Lummus “Verdene”¹⁸PP 技術を使用して、北米で 4 つのプラントを開発することで合意していた。“Verdene”には、エタノールからエチレンへの変換技術、二量化技術、オレフィン変換技術、PP 製造技術の 4 つが含まれる¹⁹。

現在、Citroniq Chemicals はトウモロコシからつくられたバイオエタノールを原料にバイオ PP を生産している（バイオ PP の世界シェアは約 10%）²⁰。

② Dow（米国）と New Energy Blue（米国）：

2023 年 5 月 25 日に両社は、非可食性トウモロコシ残渣から再生可能なプラスチック材料を開発するためのバイオエチレンの長期供給契約を締結したと発表した²¹。New Energy Blue が新工場（アイオワ州 Mason City）でトウモロコシ残渣（28 万トン/年）からバイオエタノールとクリーンリグニンを生産する。バイオエタノールの半分は Dow 向けのバイオエチレンに変換される。

③ GEVO（米）：

同社は 2023 年 4 月 12 日、LG Chemical（韓国）とバイオプロピレンに関する共同開発契約を締結したと発表した²²。GEVO の保有するエタノールからオレフィンへの固有変換技術（“ETO Technology”）を使用し、バイオプロピレンを開発するためのものである。バイオプロピレンはバイオ PP の製造などに使用される。

④ 三菱ケミカルと豊田通商：

両社は 2022 年 3 月 14 日に、バイオエタノールを原料とする 100%植物由来のエチレンとその誘導品を製造し、またそのバイオエチレンを原料として国内初となる植物由来のプロピレンおよび誘導品を製造し、それらを販売する計画を発表した²³。2025 年度の販売開始を目指し、事業化に向けた検討を開始した。

¹⁸ <https://www.lummustechnology.com/process-technologies/petrochemicals/polypropylene-production/verdene-technology>

¹⁹ エタノールからプロピレンを製造するルートとしては、例えば、エタノール→エチレン→二量化してブテン→ブテンとエチレンのメタセシス反応→プロピレンがある。

²⁰ <https://citroniq.com/carbon-negative-manufacturing/>

²¹ <https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-and-new-energy-blue-announce-collaboration-to-develop-renewa.html>

²² <https://investors.gevo.com/news-releases/news-release-details/gevo-enters-joint-development-agreement-lg-chem-develop-bio>

<https://www.greencarcongress.com/2023/04/20230413-gevo.html>

²³ <https://greenproduction.co.jp/archives/5346>

5.2 バイオ PET30 とバイオ MEG

(1) バイオ PET30

バイオエチレンからバイオ MEG を製造し、石油由来のテレフタル酸と縮合してバイオ PET30 が製造される（図 7）。メーカーは Indorama Ventures（Indorama と略す。タイ）、Lotte Chemical（韓国）、東洋紡、帝人などである。飲料メーカーがバイオ PET30 製ボトルを採用している。日本の需要は 2019 年に約 1.8 万トン、世界の需要は 2022 年に約 9 万トンである。

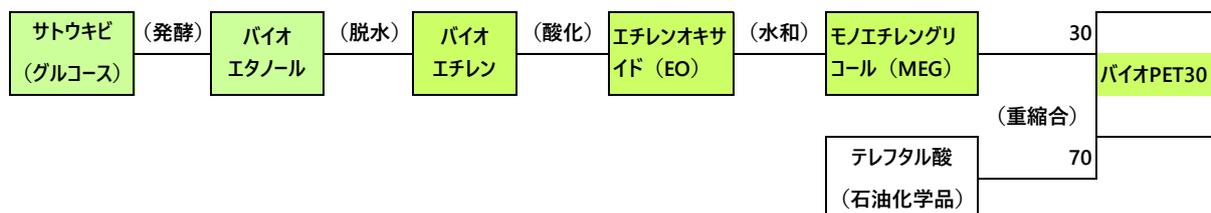


図 7 バイオ PET30 の製造ルート

出所：旭リサーチセンター作成。

(2) バイオ MEG

バイオ MEG はインドの India Glycols などによって製造されている。

バイオ PET30 の需要は期待したほどには伸びていない。その理由の一つは、バイオ MEG が石油化学品に比べコスト高であるためである²⁴。

このため、画期的なコストダウンを目指して、化学会社 4 社がバイオマス原料から直接バイオ MEG をつくる革新技术の開発に取り組んでいる。

① Braskem と Topsoe（デンマーク）

2020 年 11 月に、両社はデンマークのデモパイロットでバイオ MEG の最初の生産に成功した²⁵。原料はシュガーで、触媒を使用した水熱分解により活性な中間体（グリコールアルデヒドなど）をつくり、これを水素化してバイオ MEG をつくる。Braskem と双日は

²⁴ 現行のバイオ MEG 製造法では、エタノールの脱水工程、EO(エチレンオキシド)製造工程、および水和による MEG 製造の三工程をバイオエタノール原料 100%用の専用設備でつくらなければならない。EO と MEG の製造工程は既存の工場を利用したいが、既存設備は規模が大きすぎて使用に適さない。また、EO は爆発の危険性が高い化合物なので、EO 製造設備は高度な安全性が求められる。このため、EO の小規模プラントは設備費が高く、採算性が悪い。結果として、石化由来の安いエチレンを使用し、大規模プラントで製造している MEG にはコスト的に太刀打ちできない。(筆者見解)

²⁵ <https://www.prnewswire.com/news-releases/braskem-and-haldor-topsoe-achieve-first-production-of-bio-based-meg-from-sugar-301178199.html>
<https://www.topsoe.com/blog/topic/biobased-chemicals>

2022年3月に合弁会社を設立し、実用化プラント建設を目指している（2023年中に投資決定）²⁶。第一プラントのスタートアップは2025年の予定。

② Avantium（オランダ）

2019年11月に、同社はオランダにパイロットプラントを完成した²⁷。生産能力は10トン/年、設備投資2,200万ドルである。原料はシュガーで、one-step hydrogenolysis process（1段階水素化分解法：“Ray Technology”）である²⁸。

2021年4月にAvantiumとCosun Beet Company（オランダ）は、MEGを生産するプラントを共同で建設、運営すると発表した²⁹。なお、Avantiumは、バイオMEGとバイオFDCAをモノマーとするバイオPEFを開発中である。バイオFDCAの旗艦プラント（生産能力5,000トン/年）を建設中で、2024年後半に完成の予定である。

③ UPM Biofuels（UPMと略す、フィンランド）

同社はドイツのLeunaに、“ウッドリファイナリー”を2020年に着工した³⁰。全体の生産能力は22万トン（建設費5.5億ユーロ）である³¹。プロセスを図8に示す。

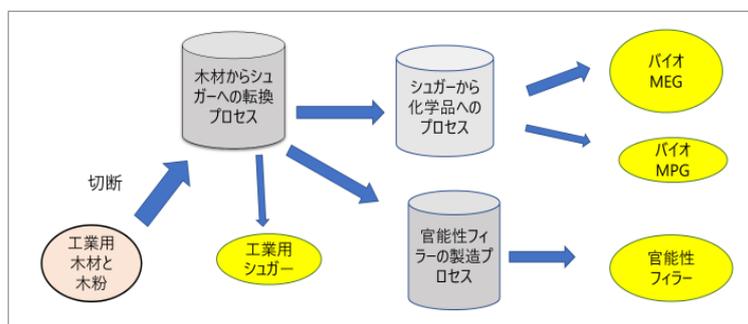


図8 UPMのウッドリファイナリーによるMEG、MPG、官能性フィラーなどの製造ルート

出所：UPM資料を基に旭リサーチセンターが作成。

²⁶ <https://www.braskem.com.br/usa/news-detail/braskem-and-sojitz-corporation-join-hands-to-bring-renewable-meg-technology-to-the-market>
<https://www.sojitz.com/jp/news/2022/03/20220325.php>

²⁷ <https://www.avantium.com/wp-content/uploads/2019/11/20191107-Press-release-Avantium-advances-its-plant-based-MEG-technology-with-the-opening-of-its-demonstration-plant-final.pdf>

²⁸ C&EN November 18, 2019, P14

²⁹ <https://www.avantium.com/wp-content/uploads/2021/04/20210422-Cosun-Beet-Company-and-Avantium-join-forces-with-the-ambition-to-produce-plant-based-glycols-from-sugars.pdf>

³⁰ <https://www.upmbiochemicals.com/about-upm-biochemicals/biorefinery-leuna/>

³¹ <https://www.upmbiochemicals.com/biorefinery/>
<http://www.fao.org/forestry/47194-096cb11406eb00e44a2712a059f89ee49.pdf>

主要製品は MEG とリグニンベースの官能性フィラー（ゴム用途で、カーボンブラックやシリカの代替を目指す）で、併製品はモノプロピレングリコール（MPG）と工業用シュガーである³²。“ウッドリファイナリー”は2024年末完成予定である。

UPM は、同社の bio-MEG BioPuraTMの韓国における独占的販売会社に Dongsung Chemical（ドンソン・ケミカル）を選定した（2023年10月17日発表）³³。

④ LanzaTech（米国）

同社は2022年5月、製鉄所からの排出ガスや、バイオマス廃棄物をガス化して得られる炭素から直接、発酵法により MEG を合成したと発表した³⁴。さらに、2023年5月に同社はこの CCT（carbon capture and transformation）プロセスからつくられた MEG を活用して、Plastipak Packaging（グローバル企業）と共同で、PET樹脂の製造に成功したと発表した³⁵。工業化スケジュールは発表されていない。

5.3 バイオ PET100 とバイオテレフタル酸

MEG だけでなく、テレフタル酸もバイオマス由来にできれば、バイオマス 100%のバイオ PET100 が誕生する。10年くらい挑戦されてきているが、工業化されていない難しいテーマである。テレフタル酸の原料であるパラキシレンの開発例を紹介する。

① Anellotech（米国）：サントリーと共同開発

同社プロセスは、木質バイオマス原料をクラッキングにより一段で BTX（キシレン、ベンゼン、トルエン）に分解し、分離精製によりパラキシレンを得る（図9）³⁶。触媒にはゼオライトを使用し、反応は流動層反応器を採用している。テキサス州にパイロットプラントがある。Anellotech とサントリーはプロトタイプのペットボトルを発表して

³² <https://www.upmbiochemicals.com/about-upm-biochemicals/biorefinery-leuna/>
<https://www.upmbiochemicals.com/ja/>

³³ <https://www.upm.com/about-us/for-media/releases/2023/10/upm-selects-dongsung-chemical-as-sole-korean-distributor-of-its-new-bio-based-meg/>

³⁴ <https://www.sustainableplastics.com/news/lanzatech-demonstrates-meg-production-carbon-emissions>

³⁵ <https://ir.lanzatech.com/news-releases/news-release-details/lanzatech-and-plastipak-partner-produce-worlds-first-pet-resin>

³⁶ <https://anellotech.com/tcat-8%C2%AE-pilot-plant>
<https://anellotech.com/press/anellotechs-bio-tcat%E2%84%A2-technology-making-bio-pylene-toluene-and-benzene-woody-biomass-ready>（2021年12月15日発表）



図 9 Anellotech のパインウッドからのバイオパラキシレンの製造ルート

出所：Anellotech の資料に基づいて旭リサーチセンター作成。

いるが、本格工業化はまだである³⁷。

② “NaturALL Bottle Alliance” と Origin Materials

このアライアンスは 100%バイオマスペットボトルを開発するために 2017 年に創設されたもので、メンバーは Danone、Nestle waters、PepsiCo と Origin Materials (米国のベンチャー) である。基本技術を持つ Origin Materials の反応ルートを図 10、図 11 に示す。既に、CMF の製造プラントが稼働を開始しており、実用化の可能性が高く注目すべき技術である。詳細は下巻で解説する。

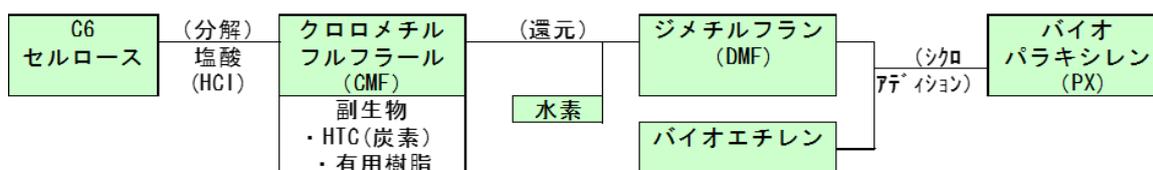


図 10 Origin Materials が開発中のバイオパラキシレン製造ルート

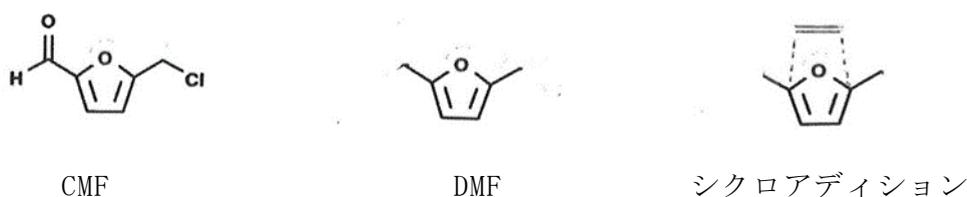


図 11 関係化合物の化学構造式

図 10 と図 11 の出所：Origin Materials の公表資料などを基に旭リサーチセンターが作成。

③ Virent (米国)

同社は、シュガーを原料に ZSM5 ゼオライト触媒を使用して “BioForming®” プロセスで芳香族化合物を製造する技術を有する。Johnson Matthey と提携している³⁸。また、

³⁷ サントリーが植物由来原料 100%使用ペットボトルの開発に成功—米国 Anellotech との共同開発
<https://www.suntory.co.jp/news/article/14037.html> (2021 年 12 月 3 日発表)

³⁸ <https://www.virent.com/technology/>

同社は、バイオPET100の実用化を目指すBP（イギリス）と製造技術で提携した（2019年3月）³⁹。また、同社は、Cargill（米国）が持つcorn dextrose（コーンシロップ）をバイオ原料に使用するためにCargillと提携した（2020年9月発表）⁴⁰。同社は、Coca-Cola発表の100%植物由来の素材で作られた900本のペットボトルの重要なコンポーネントを提供した（2021年10月）。Virentは東レとも提携している。

5.4 飲料メーカーのペットボトルの再生材・バイオマス含有量目標

(1) EU政府のボトル規制発表（2019年）と飲料メーカーの対応

EUはPET、PE、PPなどすべてのプラスチックのボトルについて、回収率と再生材含有量の規制を発表した（2019年5月に最終決定）（表2）。再生材とはリサイクルしたプラスチックのことである。

表2 EU政府のボトル回収率と再生材含有量に関する規制および飲料メーカーの対応方針

	EU	サントリー	Coca-Cola		PepsiCo
	EU政府	飲料メーカー	世界 飲料メーカー	日本コカ・コーラ 飲料メーカー	飲料メーカー
発表	2019年5月 EU議会最終決定：ボトル規制など	2018年11月「ボトルtoボトル推進」* 2019年5月 プラスチック基本方針	2018年1月「World Without Waste」	2019年7月「容器の2030年ビジョン」	2018年10月「容器に関するサステイナブルゴール」（2025年）
ボトル回収率目標	プラスチックボトル 2025年 77% 2029年 90%		2030年 販売量と同量を回収・リサイクル	2030年 販売量と同量を回収	
rPET（再生材）の使用比率目標	PETボトル 2025年 25%以上	*2025年までにrPET 50%以上		2022年 rPET使用率 50%以上 2025年 素材をすべてサステナブル材料に転換	2025年 バージンPET35%削減 とrPET含有率25%
	プラスチックボトル 2030年 30%以上	2030年 rPETと植物由来PETに100%切り替える	2030年 再生材含有率 50%	2030年 ボトルtoボトル 90%	

出所：ARC リポート 引用文献②（2020年2月発行）

これに対して、サントリー、Coca-Cola、日本コカ・コーラ、PepsiCo など飲料メー

³⁹ <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-partners-with-virent-and-johnson-matthey-on-virents-bioforming-process.html>

⁴⁰ <https://www.cargill.com/2020/cargill-and-virent-collaborate-to-study-virents-bioforming>

カーは、2018～19 年にかけて規制値を上回る意欲的な目標値を発表した（表 2）。サントリーの目標には、rPET（再生 PET）だけでなく植物由来 PET が含まれており、2030 年に rPET と植物由来 PET に 100%切り替えることを目標としている。日本コカ・コーラも 2025 年に素材を 100%サステナブル素材に切り替えるとしている。サステナブル素材には rPET と植物由来 PET が含まれる。

（2）今もってないバイオマス含有量規制

上記の飲料メーカーのバイオマス由来のペットボトルに対する積極的な動きや、25 頁以降に示される「バイオマス第二世代ドロップインプロダクト」の事業化に対する欧州化学企業の積極的な取り組みを見ると、近々バイオマス含有量を義務付ける規制が発表されると筆者は予想していた。

例えば、EU 政府の“再生材含有量 30%以上”の規制が“サステナブル素材含有量 30%以上”の規制に置き換わることが考えられた。しかし、予想に反して、現在のところ、再生材含有量規制のみであり、バイオマス含有量を義務付ける規制はない。

さらに、EU 政府の容器包装・容器包装廃棄物に関する新規制案が 2022 年 11 月 30 日に発表された。それによれば、“使い捨てプラスチック製飲料ボトル”の 2040 年以降の再生材最低含有量は 65%となっているが、バイオマス含有量についての記載はない。

なお、日本の清涼飲料業界は 2021 年 4 月 19 日に、2030 年までにペットボトルの「水平リサイクル」である「ボトル to ボトル」比率 50%を目指すことを宣言した⁴¹。

（3）飲料メーカー各社の現在の方針

① サントリー

サントリーは、表 2 記載の 2019 年 5 月に発表した“プラスチックの基本方針”（2030 年に rPET（再生 PET）と植物由来 PET に 100%切り替える）を堅持している⁴²。なお、

⁴¹ http://www.j-sda.or.jp/ippan/news_view.php?kind=1&id=311

⁴² 現在の方針は、“プラスチック基本方針”に基づき、2030 年までにグローバルで使用するすべてのペットボトルをリサイクル素材、あるいは植物由来素材などに 100%切り替え、化石由来原料の新規使用をゼロにすることを宣言。ペットボトルの 100%サステナブル化を目指している（2023 年 11 月 13 日現在）。

2022年の切り替え実績は国内46%（グローバルで24%）である⁴³。

② Coca-Cola

最近発表された同社の容器包装の“SUSTAINABILITY GOAL”⁴⁴は、2018年発表の基本方針を堅持している⁴⁵。

なお、2022年の実施状況は、①パッケージの90%がrecyclable、②使用されるPETの15%が再生PET（rPET）、③同社のパッケージの61%が回収されている。

③ 日本コカ・コーラ

日本コカ・コーラの容器/PETの中長期的目標と方向性は次の通りである⁴⁶。

- ・2025年までに、すべての製品のペットボトルにサステナブル素材を使用
- ・2030年までに、すべての製品のペットボトルを100%サステナブル素材に切り替え
- ・2030年までに回収・リサイクル100%を達成（注：日本国内で発売した自社製品と同等量のペットボトルを回収）

④ PepsiCo

PepsiCoの“goals”は、より持続可能な容器包装をバリューチェーンに導入し、2030年までに世界の食品および飲料のポートフォリオ全体でバージンプラスチックを50%削減する予定である。プラスチック容器包装の再生材含有量を50%にすることと、ソーダストリームなどの使い捨てプラスチックを回避または最小限に抑えるビジネスモデルでこれを実現する⁴⁷。

⁴³ https://www.suntory.co.jp/company/csr/env_circular/（2024年1月24日検索）

⁴⁴ <https://www.coca-colacompany.com/content/dam/company/us/en/reports/coca-cola-business-sustainability-report-2022.pdf> 7頁参照

⁴⁵ ・2025年までに世界中で、当社パッケージを100%recyclable（リサイクル可能）にする。
・2030年までに当社のパッケージは再生材含有率が少なくとも50%のものを使用する。
・2030年までに販売したボトルと同量を回収、リサイクルする。
・2020年から2025年の間に、再生不可能な資源に由来する累計300万トンのバージンプラスチックの使用を削減する。以下略。

⁴⁶ <https://www.coca-cola.com/jp/ja/sustainability/resources>（2024年1月24日検索）

⁴⁷ <https://sustainabilityaction.pepsico.com/pep-positive-pillars/positive-value-chain-packaging>（2024年1月24日検索）

5.5 その他プラスチックの「第一世代ドロップイン」

① バイオPA6(ポリアミド6) (Genomatica と Aquafil)

Genomatica (米国) は Aquafil (イタリア・Trento にある PA メーカー) とバイオ PA6 に関する共同開発プロジェクトを立ち上げた (2018 年 1 月)。ポイントは発酵法によるバイオカプロラクタムの製造である。さらに、両社は、2022 年 7 月、Aquafil の Slovenia プラントで、植物ベースの PA6 生産の実証運転を完了した⁴⁸。数トン規模の植物ベースのカプロラクタムを製造して、これを PA6 に変換し、繊維やカーペット用途での評価を行っている。

② バイオポリウレタン (Covestro)

Covestro (ドイツ) は 2021 年 1 月 19 日、バイオベースの熱可塑性ポリウレタン (TPU) Desmopan®EC を発表した⁴⁹。炭素含有量の最大 60% はバイオマス由来で、バイオコハク酸とバイオプロパンジオールでつくられ、履物など幅広い用途を見込んでいる。化石資源ベースの TPU と比較して、CO₂ 排出量は 20% 以上削減される。バイオマス含有量は、ASTM-D6866 (C14 利用) に基づき測定できる。

③ バイオ MMA モノマー

Evonik は 2023 年 3 月 21 日、バイオ MMA “VISIOMER® Terra” が TÜV Rheinland Group の認証機関である DIN CERTCO から 50~85% のバイオマス含有量の認証を取得したと発表した⁵⁰。DIN CERTCO は C14 放射性炭素法と ASTM D6866:2021 プロトコルを使用した認証である。

⁴⁸ <https://www.genomatica.com/news-content/geno-and-aquafil-begin-pre-commercial-production-for-plant-based-nylon-6/>

⁴⁹ <https://www.covestro.com/press/covestro-strengthens-portfolio-of-alternative-raw-materials/>

⁵⁰ <https://methyl-methacrylate-monomers.evonik.com/en/evonik-obtains-certification-for-visiomer-terra-biobased-methacrylates-195948.html>

6. 「バイオマス第二世代ドロップインプロダクト」

6.1 「第二世代ドロップイン」の定義とマスバランス方式

(1) 「バイオマス第二世代ドロップインプロダクト」の定義

図 12 に示すような、植物由来のバイオナフサと石油系ナフサの混合物を原料にして、既存石油化学設備を使ってつくられたバイオ PE・バイオ PPなどを「バイオマス第二世代ドロップインプロダクト」、略して「第二世代ドロップイン」と命名した。

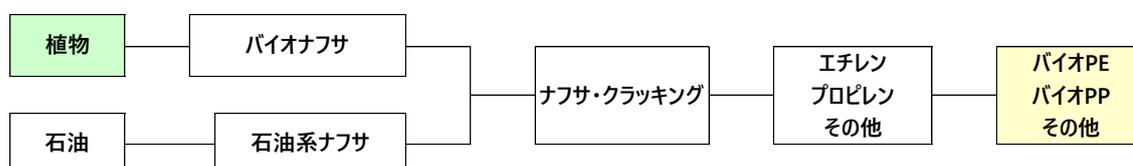


図 12 「第二世代ドロップイン」の製造スキーム

出所：旭リサーチセンター作成。

(2) マスバランス方式

「第二世代ドロップイン」のバイオ PE、バイオ PP などのバイオマス含有量はマスバランス方式により配分され、ISCC (International Sustainability & Carbon Certification) などの第三者機関によりチェックされ、合格すれば認証 (ISCC PLUS など) が得られる。「第一世代ドロップイン」のように、炭素同位体分析で識別することはできない。

マスバランス方式では、原料のバイオマス重量と製品群のバイオマス重量が一致 (バランス) している限り、どの製品にどのようなバイオマス含有量を配分することも可能である。適用例を図 13 の上図と下図に示す。

上図では、バイオナフサ 18 万トンと石油系ナフサ 82 万トンから P0 (ポリオレフィン: PE と PP) 100 万トンを製造し、マスバランス方式にしたがい、バイオマス含有量 100% の P0 を 18 万トンとバージン P0 を 82 万トンに配分することができる。

また下図では、バイオマスプラスチックとしては最低の部類のバイオマス含有量

30%の製品をつくる際には、バイオマス含有量の30%のPOを60万トンと、バージンPOを40万トンに配分することができる。一般に、POの容器包装用途は約60%なので、この用途にバイオマス含有量30%のPOを供給することができ、好都合である。

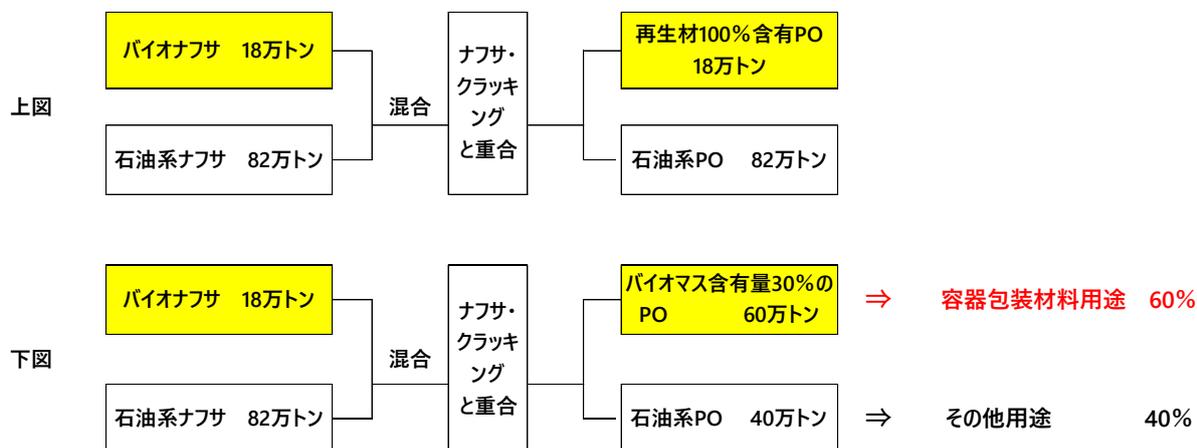


図 13 「第二世代ドロップイン」のマスバランス方式の例

出所：旭リサーチセンター作成。

また、図 14 に、a. 既存の「石油化学ルート」、b. 「HVO（水素化処理植物油）を原料とするバイオマスプラスチックの製造ルート」、c. 混合廃プラの「熱分解法ケミカルリサイクルによる再生材の製造ルート」を示す。b. と c. は既存の石油化学設備を利用して、PE、PP、PS、BR・SBR などを得ることができる点で共通している。

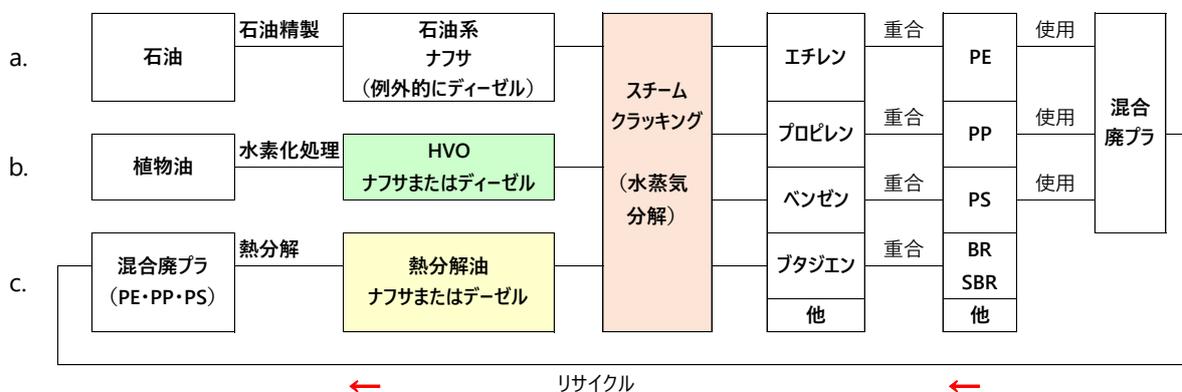


図 14 石油系ナフサ、HVO、熱分解油を原料とする石油化学製造スキーム

出所：旭リサーチセンター作成。

6.2 バイオナフサ・バイオディーゼルの供給メーカー（Neste と UPM）

2019 年から欧州で「第二世代ドロップイン」の工業化が急速に進んだ。原料は、Neste の“Renewable Diesel”（使用済み植物油由来）と UPM の“Renewable Naphtha”（パルプ製造時副生成物のトール油由来）で、いずれも植物廃棄物由来であることに特徴がある。これを石油系のナフサやディーゼルの代わりに使用する（図 15）。

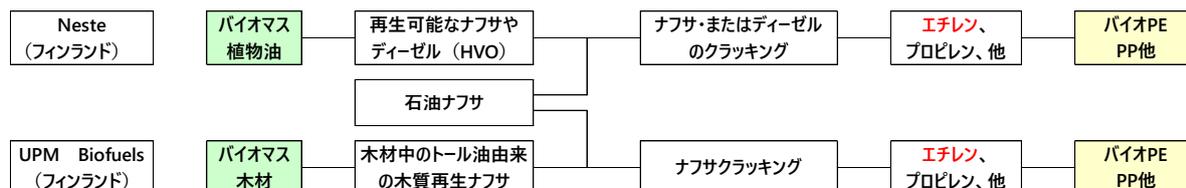


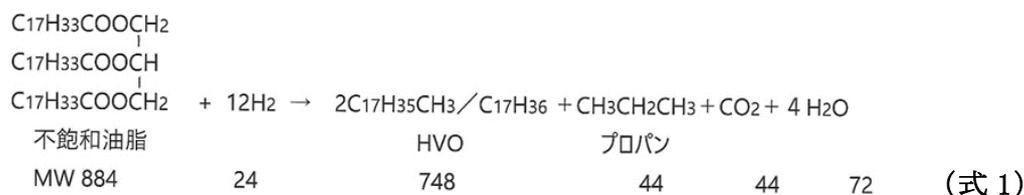
図 15 バイオマス「第二世代ドロップイン」の製造スキーム

出所：旭リサーチセンター作成。

(1) Neste（フィンランド）

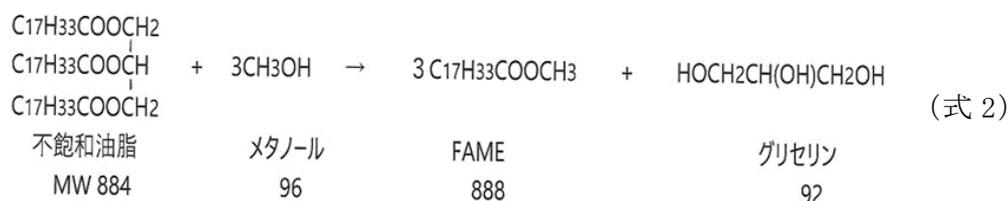
Neste は、2022 年の売上高が 258 億ユーロのオイル（油）とガスの大企業である。バイオディーゼルの一種である HVO（水素化処理植物油）に関する世界のトップメーカーである。HVO の生産能力は約 300 万トン/年で、フィンランドの Porvoo、オランダの Rotterdam、Singapore で生産している。さらに Singapore で 155 万トン/年のプラント拡張が計画されている（50 頁の表 8 参照）。Neste は Renewable Jet Fuel（SAF の一種）の大手サプライヤーでもある。

Neste の“Renewable Diesel”とは 植物由来の廃棄物油や残渣油（油脂）を水素化処理（Hydrotreat）してつくられた HVO で、炭化水素で酸素を含まない（式 1）。



HVO は代表的なバイオディーゼルである FAME とは異なる。FAME は、油脂をメタノー

ルとエステル交換反応させてつくられた脂肪酸メチルエステルである（式 2）。



(2) UPM (UPM Biofuels、フィンランド)

① UPM の“バイオリファイナリー”

UPM はフィンランドの Lappeenranta に木材ベースの“バイオリファイナリー”を 2015 年に完成し、パルプ製造時の副生成物であるトール油由来の“Renewable Naphtha”と“Renewable Diesel”を製造している⁵¹（図 16）。設備能力は 13 万トン/年で、投資額は 1.79 億ユーロ、雇用者数 250 人である⁵²。また、50 頁の表 8 によれば 50 万トン/年の新規プロジェクトを発表している。

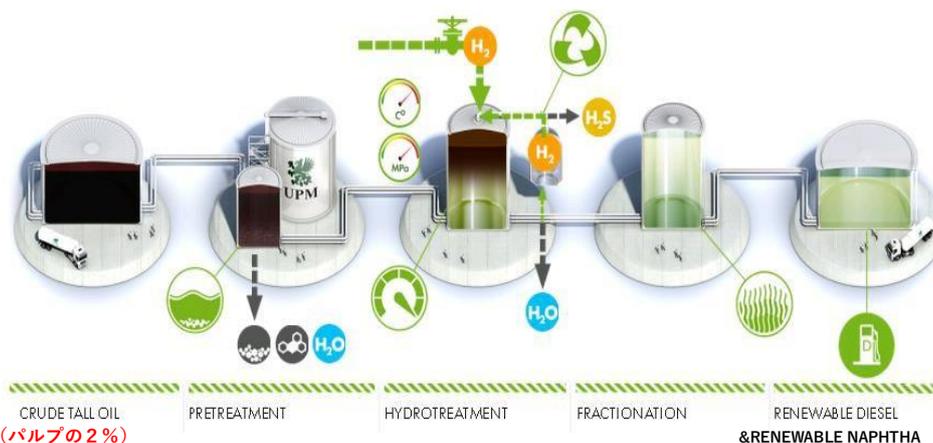


図 16 UPM のトール油から再生可能ディーゼル・ナフサを製造するプロセス

出所：UPM

② “Renewable Naphtha” & “Renewable Diesel” の製造法

UPM は木材を加工して、50%をパルプに、48%をエネルギーに使用し、2%の残渣と

⁵¹ <https://www.fao.org/forestry/47194-096cb11406eb00e44a2712a059f89ee49.pdf>

⁵² https://www.etipbioenergy.eu/images/Factsheet_UPM_final.pdf

してトール油を得ている。トール油はパルプのリサイクルを阻害するので、除去しなければならない廃棄物である。このトール油には脂肪酸や樹脂酸（ロジン）が含まれており、これを原料にバイオナフサ&バイオディーゼルが製造される。まず粗トール油を前処理して塩、粒子、水を除去する。次いで水素化処理（トール油中の脂肪酸を炭化水素化するのが主反応）して副生する水を除く。生成物中に残る硫化水素とガスを除去し、精留してバイオナフサ&バイオディーゼルの得る。

6.3 石油化学メーカーによるバイオ PE とバイオ PP の製造

(1) 概要

石油化学メーカーの LyondellBasell、Borealis、Ineos、Dow、Sabic、LG Chem、三井化学などは、Neste あるいは UPM と相次いで提携し、バイオナフサやバイオディーゼルの原料とする「第二世代ドロップイン」のバイオ PE やバイオ PP の製造を開始した（表 3）。

表 3 植物油由来のナフサ&ディーゼルの原料とするバイオ PE とバイオ PP の製造

原料メーカー（本社）	バイオモノマー（工場立地）	バイオポリマー（工場立地）	発表年月
Neste（フィンランド） Renewable Diesel （Neste RE™） 使用済み植物由来 HVO	LyondellBasell（オランダ） エチレン、プロピレン	LyondellBasell（オランダ） LDPE、PP	2019.7
	Borealis（ベルギー） プロピレン（バイオプロパンの脱水素）	Borealis（ベルギー） PP	2020.3
	LG Chem(韓国) は、Nesteのシンガポール工場のバイオナフサをナフサクラッカーに投入		2020.11
	三井化学、豊田通商はNesteのバイオナフサを ナフサクラッカー（三井化学、堺）に2021年末に投入	三井化学、豊田通商 化学品とプラスチック（PE、PP）	2021.5
UPM Biofuels （フィンランド） トール油からつくった木 質再生ナフサ	Ineos（ドイツ） UPMと木質再生ナフサの供給契約	Ineos（ケルン）のクラッカーに投入	2020.2
	Dow（ベルギー） エチレン	Dow（ベルギー） PE（容器包装）	2019.6
	UPMとDowは共同でバイオのPEラベルフィルムを製造		2020.5
	Sabic（オランダ） エチレン	Sabic PP DSM 高分子量PE	2020.3

出所：旭リサーチセンター作成。

なお、石油化学ではナフサを用いたナフサ・クラッキングが主流であるが、設備の小改造でディーゼル（石油化学ではガスオイルという）を用いたガスオイル・クラッキングも可能になる。日本でもガスオイルを使用できるナフサ・クラッカーは多い。

(2) Neste と最初に提携した LyondellBasell

LyondellBasell⁵³は自社工場（ドイツの Wesseling）で、Neste の“Renewable Diesel”をスチーム・クラッキングして、エチレン・プロピレンを製造し、これからバイオ LDPE とバイオ PP の世界初の商業生産に成功した（表 3）⁵⁴。原料には“Renewable Diesel”と石油系ディーゼル（またはナフサ）の混合物を使用した。得られたバイオ LDPE とバイオ PP のバイオマス含有量はいずれも 30%であった。

(3) HVO 副生のバイオプロパンからのバイオプロピレンの製造（Borealis）

式 1（27 頁）に示すように、HVO 製造時の副生成物はバイオプロパンである。化学量論的には HVO100 重量部に対して 6 部のバイオプロパンが得られる。Borealis はベルギーの工場（Kallo と Beringen）で、Neste の副生バイオプロパンを脱水素してバイオプロピレンをつくり、それを原料にバイオ PP の製造を開始した（2020 年 3 月 10 日発表）⁵⁵。Kallo と Beringen の両工場は ISCC PLUS の認証を得て、バイオマス含有量が最高 50%のバイオ PP を販売している⁵⁶。

そして、Borealis は Kallo に PDH（プロパン脱水素）プラントを建設中で、生産能力は 74 万トン/年（投資額 10 億ユーロ）、技術は UOP の“Oleflex”、2019 年 9 月着工で、2024 年後半にスタート予定である⁵⁷。

伊藤忠商事は Borealis のバイオ PP に関する日本市場でのマーケティングについて Borealis と合意した（2020 年 9 月 25 日発表）⁵⁸。

⁵³ LyondellBasell は欧州と米国に PE・PP の工場を持つ、PE・PP の世界のトップメーカーである。

⁵⁴ <https://www.neste.com/releases-and-news/neste-and-lyondellbasell-announce-commercial-scale-production-bio-based-plastic-renewable-materials>

⁵⁵ <https://www.borealisgroup.com/news/borealis-producing-certified-renewable-polypropylene-at-own-facilities-in-belgium>

⁵⁶ <https://www.borealisgroup.com/storage/Industries/Consumer-Products-literature/Borealis-extends-its-Bornewables%E2%84%A2-portfolio-together-with-Neste-and-BE-0-Lifestyle.pdf>（2024 年 1 月 26 日検索）

⁵⁷ https://www.borealisgroup.com/storage/Borealis-Combined-Report-2022_Group_EN.pdf 34 頁

⁵⁸ <https://www.itochu.co.jp/ja/news/press/2020/200925.html>

6.4 バイオベースの PVC、PC、PU、PA、PS、ABS、PET、BR、SBR の製造

マスバランス方式を使って、バイオナフサ（バイオディーゼル）原料からバイオベースの PE、PP だけでなく、より下流のバイオベースのポリ塩化ビニル（PVC）、ポリカーボネート（PC）、ポリウレタン（PU）、ポリアミド（PA）、ポリスチレン（PS）、ABS、PET100、ポリブタジエン（BR）、SBR などの生産が発表された（表 4）。石油化学各社とも ISCC PLUS の認証を取得している。最近、日本のメーカーの ISCC PLUS の取得が目立っている（表 4）。

表 4 第二世代のバイオベースの PVC、PC、PU、PA、PS、ABS、PET、BR、SBR の製造

原料メーカー（本社）	バイオモノマー（工場（予定地））	バイオポリマー（工場（予定地））	発表年月
Neste（フィンランド） Renewable Diesel （Neste RE™）	CovestroはBorealisより1,000トンのバイオフィェノールを入手		2020.1
	Borealis（オーストリア） ベンゼン+プロピレン→フェノール	Covestro（ドイツ） ポリカーボネート（PC）	2020.5
	SK geo centric（韓国） ベンゼン	Covestro（上海） MDI（ポリウレタン原料）	2022.6
	DSM（オランダ）：Nesteと戦略的パートナーシップ。 化石燃料からNesteのバイオマス燃料やリサイクル原料（熱分解油）への転換を図る	戦略的提携 ポリアミド：Stanyl® B-MB（バイオベース・マスバランス方式）	2020.11 2022.6（ポリアミド）
	三井化学 ビスフェノールA	三菱ガス化学 ポリカーボネート	2023.2
	出光興産 スチレンモノマー	奇美実業（台湾） ABS 東レ ABS DIC ポリスチレン（PS）	2022.1 2023.2 2023.3
UPM Biofuels（フィンランド） トル油からつくった木質再生ナフサ	Ineos（ドイツ） UPMと木質再生ナフサの供給契約	Ineos（ケルン）のクラッカーに投入	2020.2
	Ineos（ドイツ）→ Inovyn（Ineosグループ） エチレン → VCM	PVC（商標BIOVYN（100%バイオ）：2019年商品化）	2019.1
	Sabir（オランダ）→ Vynova エチレン → VCM	Vynova（フランスまたはオランダ） PVC	2020.2
TotalEnergies（フランス）	CovestroはTotal（フランス、ノルマンディー）より2,000トンのバイобенゼンを入手、バイобенゼンはCovestroのアントワープ工場でMDIに変換。最終PU（ポリウレタン）に使用		2021.1
	TotalEnergiesのトル油由来のバイオスチレンモノマー	LANXESS イオン交換樹脂	2023.1
	旭化成 バイオアクリロニトリル（バイオAN）、東西石化（韓国）で実施		2022.1
	旭化成 バイオBR、バイオSBRの販売、製造は川崎工場とシンガポール工場		2022.11

出所：各社発表より旭リサーチセンター作成。

① Ineos：

同社は UPM と組んで、バイオ PVC 製造を発表した（2020 年 2 月）⁵⁹。Ineos が UPM か

⁵⁹ <https://cen.acs.org/materials/biomaterials/Ineos-poised-make-bio-PVC/98/i7>
<https://renewable-carbon.eu/news/inovyn-launches-worlds-first-commercially-available-grade-of-bio-attributed-pvc/>

ら供給される“Renewable Naphtha”をスチーム・クラッキングしてバイオエチレンを製造する。次に、Ineos グループの Inovyn がバイオエチレンからバイオ VCM（塩化ビニルモノマー）を経て、バイオ PVC を製造する計画である。

Inovyn は欧州最大の VCM と PVC のメーカーである。VCM 生産能力は 226 万トン/年、PVC 生産能力は 219.5 万トン/年である。

② Vynova（欧州 PVC メーカー）⁶⁰：

同社は、Sabic のバイオエチレンを使ってバイオ PVC を製造する計画を発表した（2020 年 2 月）。Sabic は UPM より“Renewable Naphtha”を入手し、オランダ・Geleen のナフサ・クラッカーで製造したバイオエチレンを Vynova に供給する。

③ Covestro（ドイツ、PC と PU の大手メーカー）：

同社は、Neste と提携してバイオ PC の製造を行うことを発表した（2020 年 5 月）⁶¹。Covestro は、Borealis よりバイオ PC 用のバイオフィェノールの最初の 1,000 トンの供給を受けたことを発表した（2020 年 10 月、表 4 参照）⁶²。

一方、Covestro は TotalEnergies（フランスの石油会社・化学会社）より最初のバイオベンゼン 2,000 トンを受け取ったことを発表した（2021 年 1 月）⁶³。バイオベンゼンはジイソシアネート（MDI）の製造に使用され、最終的にはバイオポリウレタン（PU）となる。

④ DSM（オランダ）：

同社は“持続可能な原料”から Performance materials をつくることについて、Neste と 2020 年 11 月に戦略的提携を行い、契約は継続している。“持続可能な原料”とは、Neste の“Renewable Diesel”と Neste が工業化準備中の混合廃プラ

⁶⁰ Vynova はクロルアルカリと PVC のメーカーで、従業員 1,275 人以上、2022 年の売上高 18 億ユーロ、欧州に 5 ヶ所の工場を有する。VCM モノマーの生産能力はベルギーに 55 万トン/年、ドイツに 40 万トン/年を持っている。バイオ PVC は当初、フランス Mazingarbe 工場（PVC 生産能力 27.5 万トン/年）とオランダ Beek 工場（PVC 生産能力 22.5 万トン/年）で製造する予定である。PVC 工場としてほかにドイツ工場（生産能力 32 万トン/年）がある。

⁶¹ <https://www.covestro.com/press/renewable-raw-materials-for-plastics-production/>

⁶² <https://www.covestro.com/press/covestro-receives-first-supply-of-certified-renewable-phenol-for-polycarbonates-from-borealis/>

⁶³ <https://www.covestro.com/press/covestro-receives-first-delivery-of-sustainable-benzene-from-total/>

(PE/PP/PS) の熱分解法ケミカルリサイクルで得られる熱分解油（ナフサやディーゼル）を意味する。Neste は熱分解法ケミカルリサイクルについて、2030 年までに廃プラ処理能力 100 万トン/年の達成を目標としている。

DSM は主力製品である Stanyl® (PA66) よりサステナブルな新バージョンとしてバイオ由来成分を含む Stanyl® B-MB (バイオベース・マスバランス方式) を発売した (2022 年 6 月 29 日発表) ⁶⁴。

⑤ ENEOS (日本) :

同社は、水島製油所で使用済み食用油などの未利用資源を用いたバイオマス原料 (Neste のバイオナフサ使用) からマスバランス方式により、商業規模で世界初となるバイオパラキシレンを製造することで PTA (テレフタル酸) のバイオ化を実現する計画を発表した (2023 年 8 月 7 日) ⁶⁵。合成法によるリアルなバイオパラキシレンの製造が困難なのでその解決方法として、マスバランス方式によるバイオパラキシレン製造を計画した。

バイオパラキシレンとバイオ MEG と組み合わせて 100%バイオの PET 樹脂をつくるのが可能になる。ENEOS は、2023 年内にペットボトル約 3,500 万本 (1 本 30g と仮定して、約 1,000 トン) に相当するバイオパラキシレン (約 600 トンと推算) を製造する予定である。最終的に、サントリーのサステナブルペットボトルの原料として 2024 年から活用される。なお、三菱商事がバイオパラキシレンから PET 樹脂製造までのサプライチェーンのマネジメントを担う。

6.5 「第一世代ドロップイン」と「第二世代のドロップイン」の比較

「第一世代ドロップイン」にはバイオモノマーが必要で、PC、PU、PET はいずれも製造に 5 ステップ⁶⁶かかるので、これをバイオ専用で製造することは大変なことである。

⁶⁴ <https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20222906-DSM.php>

⁶⁵ https://www.eneos.co.jp/newsrelease/upload_pdf/20230807_01_01_0906370.pdf

⁶⁶ PC の製造は、ナフサ→ベンゼン→クメン→フェノール→ビスフェノール A→PC という 5 ステップ。PU の製造は、ナフサ→ベンゼン→ニトロベンゼン→アニリン→MDA (ジアミン) →MDI→PU の 5 ステップ。PET 製造は、ナフサ→混合キシレン→パラキシレン→テレフタル酸→PET とナフサ→エチレン→エチレンオキシド→MEG の 2 ルートの合成が必要であり、共通しているところ除いても 5 ステップが必要である。

なお、「第一世代ドロップイン」のバイオマス含有量は炭素同位体分析（C14）で分析でき、認証される。

一方、「第二世代ドロップイン」は既存プロセスを使って製造し、マスバランス方式で所望のバイオマス含有量に割り当てることができるため、「第一世代ドロップイン」に比べてきわめて簡単である（何段階の製造ステップがあっても問題ない）。そして、バイオマス含有量は ISCC PLUS で認定される。そのバイオマス含有量は、実際に炭素同位体分析（C14）で分析した値とは異なる。

「第一世代ドロップイン」と「第二世代ドロップイン」が、ユーザーにとって明確に区別できる表示は必要であろう。

6.6 バイオマスドロップインとリサイクルの関係

プラスチックのバイオマス化とリサイクルは競合するものなのか、それとも共存できるものなのかとよく聞かれる。実は、プラスチックのバイオマス化とリサイクルは競合するものではなく、両者とも化石資源枯渇問題と温室効果ガス問題（CO₂ 排出問題）に対する有効な解決策であり、両者を組み合わせれば相乗効果が発揮される。

バイオマスドロップイン（バイオPEとバイオPPなど）は、既存の石油系プラスチック（PEとPPなど）と全く同じように、使用後にリサイクル（MRやCR）することができる。バイオマスプラスチックをリサイクルすれば、原料の植物資源の使用量を減らすことができる。

そして将来は図 17 に示すような、リサイクルのクローズドループにおいてリサイクルロス分をバイオナフサで補充する形が究極のサーキュラーエコノミーであろう。リサイクル収率が最高で70%とすれば、残り30%はバイオナフサで補給する。

なお、図には書かなかったが、ロスエネルギーは回収する。

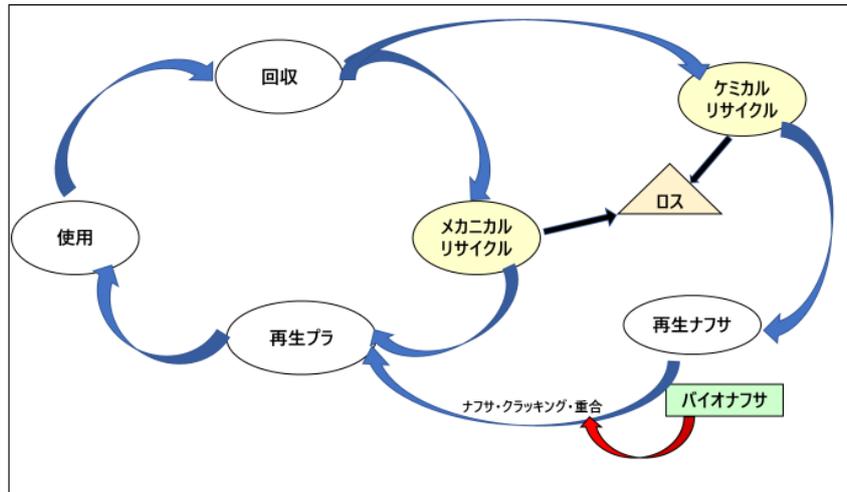


図 17 リサイクルとバイオナフサを使用した理想的クローズドループ

出所：旭リサーチセンター作成。

6.7 PE&PP の MR 再生材、CR 再生材、バイオマスドロップインの総合比較

表 5 に、PE&PP の石化バージン品、MR 再生材、CR 再生材、バイオマスドロップインについて、原料とプロセス、主要プレイヤー、利点と課題を比較した。

表 5 PE&PP の石化バージン品、MR 再生材、CR 再生材、バイオマスドロップインの総合比較

各種プラスチック	原料とプロセス	主要プレイヤー	利点	課題
石化バージン品	ナフサ原料の既存石油化学	化学会社	・品質が優れる	・化石資源の使用 ・CO2の発生
メカニカルリサイクル (MR) 再生材	廃プラ原料のメカニカルリサイクル	リサイクラー	・化石資源の不使用 ・CO2 排出量減 ・LCA的に優れる ・PETボトルなどは水平リサイクル可能	・リサイクルしやすいプラスチックの量的不足 ・品質が劣り水平リサイクルが難しい (PETボトルなどを除く)
ケミカルリサイクル (CR) 再生材	廃プラ由来の熱分解ナフサ→既存石油化学 (設備) 利用	化学会社	・化石資源の不使用 ・CO2排出量減 ・バージン品並みの再生材質品質 ・既存石化設備の利用	・コスト (設備費、使用エネルギー) が高い
バイオマスドロップイン	第一世代ドロップイン 植物→バイオモノマー→バイオマスプラスチック	化学会社	第一世代&第二世代共通の利点 ・化石資源の不使用～使用削減 (バイオマス含有量比率による) ・カーボンニュートラル～CO2排出減 (バイオマス含有量比率による)	・バイオマスソースが国際的に規制される (天然林の伐採禁止など)
	第二世代ドロップイン 植物油→バイオナフサ→既存石油化学 (設備) 利用	石油会社・エネルギー会社	・バージン品並みの再生材質品質 ・リサイクル可能 第二世代ドロップインの利点 ・既存石化設備の利用	

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

① 主要プレイヤー

化学会社が主要プレイヤーとして活躍できるのは、既存の石油化学、CR、「第一世代ドロップイン」であろうか。MR はリサイクラーが主体である。「第二世代ドロップイン」はバイオナフサの製造を行う石油会社・エネルギー会社が主体となろう。

② 品質

「第一世代&第二世代ドロップイン」は CR 再生材と同様、品質的に石化バージン品と同等であり、総体的に見て MR 再生材よりも優れる。

③ MR 再生材の利点と課題

MR はシンプルなプロセスでエネルギー消費が少なく LCA 的に優れ、設備費も小さい。その点で CR よりも優れている。ただし、品質課題があり、PET や PO の一部を除き水平リサイクルができない。また、MR に適した廃プラ（汚染が少ないものや単一素材の廃プラ）の量が不足している。

④ CR 再生材の利点と課題

CR は MR できない廃プラのリサイクル方法として有効であり、世界的に CR プントの建設ラッシュである（引用文献⑤）。また、CR 再生材はバージン並みの品質が期待されることが最大の特徴である。ナフサ収率が低いこと、コストが高いことが課題である。

⑤ バイオマスドロップイン（「第一世代&第二世代ドロップイン」）の利点

最大の利点は再生可能資源であること、カーボンニュートラルであることである。MR 再生材と CR 再生材の原料は廃プラなので化石資源を使用しないが、その廃プラは元々は石油からつくられたものである。

⑥ 「第二世代ドロップイン」の利点

「第二世代ドロップイン」は CR と同様、既存の石油化学設備を利用できる。一方、「第一世代ドロップイン」や MR は既存の石油化学設備を利用しないので、その生産量が増えれば、その分の石油化学設備は不要になってしまう。

⑦「第一世代ドロップイン」の課題：専用モノマー設備

バイオモノマーを専用に作らなければならないので、コスト高になりやすい。

⑧「第二世代ドロップイン」の課題：原料の確保と高価格バイオナフサ

「第二世代ドロップイン」は、HVO 原料のバイオマス（パーム油など）が国際的に厳しく管理されており、入手や増産がかなり困難なことが課題である。

一方、バイオ燃料は過去約 20 年にわたり、バイオマス原料を大量に使用してきた実績がある。

また、最近では SAF の規制や EU の再生可能エネルギー指令（52 頁の表 9）などの法規制でバイオ燃料の使用が義務付けられている。一方、前述のようにバイオマスプラスチックの使用を義務付ける法規制は世界的にない。日本は 2019 年のプラスチック資源循環戦略で、2030 年までに 200 万トンのバイオマスプラスチックを導入するという目標を掲げたが⁶⁷、義務ではなく目標である。EU にも規制はない。オランダに目標があるだけである⁶⁸。

このような状況から、バイオマス原料は、バイオ燃料に当面優先的に供給されるであろう。特に、SAF が不足し、HVO の価格が高騰している現状では、PE や PP のような安価なプラスチック向けにバイオナフサやバイオディーゼルを大量に確保するのはかなり難しい（51 頁の図 24、図 25 のバイオナフサの価格参照）⁶⁹。PE や PP でも化粧品や医療用など特殊用途に限られるだろう。

一方、CR がしにくい PVC、高付加価値商品の PC、PU、PA、PET（バイオ PET100）などプレミアム価格が期待できるものではバイオマス化が実現しやすい。

ここで、2022 年 11 月 30 日に発表された欧州委員会の“バイオベース、生分解性プラスチック、コンポストブルプラスチックの政策枠組み”⁷⁰の中での原料に関するコメ

⁶⁷ <https://plastic-circulation.env.go.jp/about/senryaku>

⁶⁸ オランダには目標値がある。バイオマスプラスチックについて、国内市場投入量を 2015/2016 年の約 2 万トンから 2030 年には 37 万トンに増加させ、生産量を 2017 年の 1.5%から 15%に増加させる方向性が示されている。出所：バイオプラスチックを取り巻く国内外の状況 環境省。

<https://www.env.go.jp/recycle/mat052214.pdf>

⁶⁹ Neste や UPM とバイオナフサやバイオディーゼルの長期供給契約を結んだ会社は、契約量は入手できるもののそれを超える量には限界があるであろう。TotalEnergies や ENI のように自らバイオナフサやバイオディーゼルの生産する石油兼石油化学会社はどう行動するであろうか。（筆者意見）

⁷⁰ <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/12/aace7c4bc5a48176.html>

https://environment.ec.europa.eu/system/files/2022-12/COM_2022_682_1_EN_ACT_part1_v4.pdf

ントが記載されているので、その要旨を紹介する。

“a. バイオマスはプラスチックを含む材料に使用することが、燃料に使用するよりも優先度が高いが、プラスチックとしてはシングルユースプラスチックではなく寿命の長いプラスチックにすべきである。b. バイオ燃料に使用される原料については、バイオマス廃棄物や使用済みの植物油が望ましく、食料用途と競合する大豆などの使用が制限される可能性がある。c. バイオ燃料のバイオマスソースの拡大には環境保全の観点から具体的制約要件が RED II に列記されている。バイオマスプラスチックのバイオマスソースについても同様の制約が課せられるであろう”と記されている。

⑨ バイオマスプラスチックの共通課題：日本国内での CO₂ 排出

「第一世代&第二世代ドロップイン」を含むすべてのバイオマスプラスチックの日本での課題として、日本国内の CO₂ 排出問題がある。

バイオマスプラスチックは資源枯渇対策やカーボンニュートラルの視点から望ましい方向である。しかし、日本でこれを実際に工業化する場合は、原料（バイオエタノールや HVO）を海外から輸入し、国内でバイオマスプラスチックをつくるか、バイオマスプラスチックを輸入することになる。バイオマスプラスチックは国内で使用され、何回かリサイクルし、最終的には焼却することになるので CO₂ を排出することになる。バイオマスプラスチックはカーボンニュートラルであるが、国内に限ってみれば、既存の石油由来のプラスチックと同量の CO₂ を排出することになる。

6.8 バイオマスプラスチックと再生材（MR&CR）の供給メーカー

(1) バージン PE&PP に加えて 4 種の持続可能な PE&PP の提供

現在、プラスチックのサステナビリティという時代的要請に応えるべく、4 種の PE&PP が市場に供給されることになった（図 18）。すなわち、既存石油化学によるバージンの PE&PP に加えて、①MR による再生 PE&PP、②熱分解法 CR による再生 PE&PP、③植物由来ナフサのクラッキングによる「第二世代ドロップイン」PE&PP、④バイオマス由来モノマーによる「第一世代ドロップイン」PE&PP の 4 種である。これらの 4 種は、欧州では今や顧客の人気が高いブランド品である。

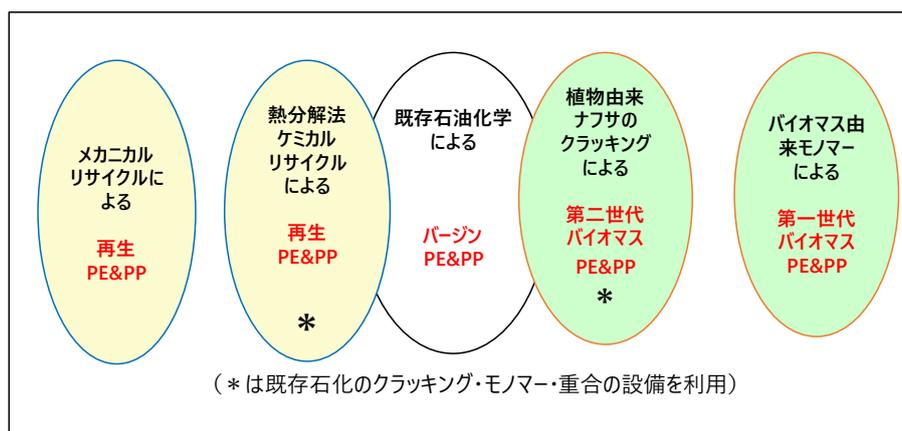


図 18 サステナビリティ時代の 4 種の新たな PE & PP

出所：旭リサーチセンター作成。

(2) 大手化学メーカーのリサイクルとバイオマスプラスチックの事業化状況

2019 年以降、欧州を中心に大手化学メーカーの動きはきわめて活発で、MR、CR、およびバイオマスドロップイン（第一世代&第二世代）の事業化に取り組んでいる（表 6）。

特に、Dow、LyondellBasell、Borealis、TotalEnergies の 4 社はリサイクラーの買収やリサイクラーとの提携（再生材の長期供給契約など）により MR 事業に参入していることが注目される。これら 4 社は熱分解法 CR（PE/PP/PS の混合廃プラ）、「第二世代ドロップイン」PE&PP にも取り組んでおり、全方位の態勢である。

また、Sabic、Ineos なども熱分解法 CR と「第二世代ドロップイン」PE&PP の両方に取り組んでいることがわかる。なお、BASF はスチーム・クラッカーを持っているが、現在は PE、PP 事業を持っていないので、取り組みが限られる。

表 6 大手化学メーカーの MR、CR、バイオマスプラスチックの取り組み状況

会社名	本社	化学品売上高順位 (2020)	スチーム・クラッカーの所在地 (例)	PE・PP・PSの製造	メカニカルリサイクル (MR)	ケミカルリサイクル (CR)		バイオマスプラスチック	
						解重合法	熱分解法	ドロップイン	生分解性
BASF	ドイツ	1	ドイツ、米国 (共同)				混合廃プラ、廃タイヤ		PBAT
Dow	米国	3	オランダ、米国	PE	PE		混合廃プラ	PE	
Ineos	イギリス	4	UK、ドイツ	PE・PP・PS	PE	PS	混合廃プラ	PE、PVC	
Sabir	サウジアラビア	5	オランダ、サウジアラビア	PE・PP			混合廃プラ	PE、PVC	
LG Chem	韓国	7	韓国	PE・PP			混合廃プラ		
三菱ケミカル	日本	8	鹿島、水島	PE・PP	インプラ	PMMA	混合廃プラ		PBS
LyondellBasell	米国	10	ドイツ、米国 (共同)	PE・PP	PE、PP		混合廃プラ	PE、PP	
Exxon Mobil Chem	米国	11	米国	PE・PP			混合廃プラ		
住友化学	日本	16	シンガポール、サウジアラビア	PE・PP		PMMA	混合廃プラ		
Covestro	ドイツ	21	なし	PC・PU	PC			PC、PU	
Shell Chem	オランダ	22	オランダ、米国	PE・PP			混合廃プラ		
Braskem	ブラジル	24	ブラジル、メキシコ	PE・PP			混合廃プラ	PE	
三井化学	日本	25	堺、千葉	PE・PP			混合廃プラ	PE、PP、PU	
Indorama	タイ	30	なし	PET	PET	PET			
Lotte Chemical	韓国	31	韓国	PE・PP			混合廃プラ		
旭化成	日本	34	水島 (共同)	PE・PS	PE、PP	PS		AN、BR、SBR	
Borealis	オーストリア	43	ベルギー	PE・PP	PE、PP		混合廃プラ	PP	
Versalis (ENI)	イタリア	-	イタリア	PE・PP・PS	PE、EPS、PS	PS	混合廃プラ	BR、SBR	
出光興産	日本	(石油・化学)	千葉	PE・PP・PS		PS	混合廃プラ	スチレン	
TotalEnergies	フランス	(石油・化学)	フランス	PE・PP・PS	PE、PP	PS	混合廃プラ	(ベンゼン)	PLA
Neste	フィンランド	(燃料)	なし				混合廃プラ	(PE、PP)	
Michelin	フランス	(タイヤ)	なし				廃タイヤ	BR、SBR	

注：化学品売上高順位はC&ENによる。黄色地は事業化、肌色地はプラント建設中、緑色地は開発中（実証プラントを含む）を示す。

出所：各社の発表に基づき旭リサーチセンター作成。

7. バイオ燃料(バイオエタノールとバイオディーゼル)

7.1 概要⁷¹

再生可能なバイオマスからバイオエタノールやバイオディーゼルなどのバイオ燃料を製造し、化石資源の石油（ガソリン、ディーゼル（軽油））を代替する政策が世界的に進められてきた。特に、バイオエタノールの導入が米国、ブラジルを中心に、バイオディーゼルの導入が欧州を中心に進められてきた。バイオエタノールはガソリンとブレンドし、バイオディーゼルは既存ディーゼルにブレンドして使用される。一方、日本のバイオ燃料の使用は微々たるものである（43 頁、表 7）。

世界のバイオ燃料は 2000 年代に生産量が 6 倍になる急激な成長を遂げた。その後、成長率は鈍化したが、ピークの 2019 年は 2010 年比約 1.7 倍に拡大している（図 19）。2019 年の生産量は 9,480 万トンで、道路交通のバイオ燃料比率は 2017 年に 4% になった。バイオ燃料は再生可能資源であり、カーボンニュートラルであることから、引き続き需要は増加すると予想される。

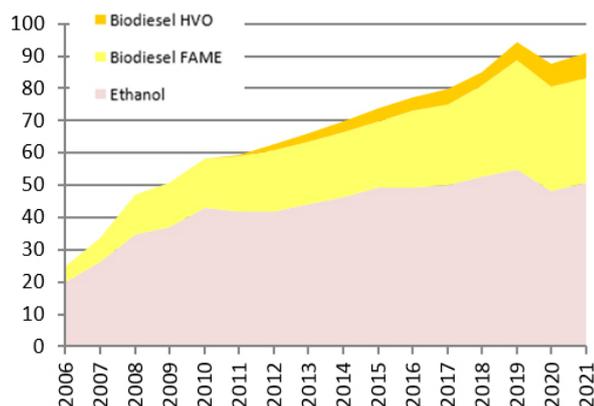


図 19 バイオエタノール、FAMEバイオディーゼル、HVOバイオディーゼルの生産量推移
(単位Mtoe)

出所：IFPEN, from FO Licht, Biofuels Dashboard 2022, IFPN

⁷¹ バイオ燃料について、JPEC 資料（引用文献⑦、⑧）および国際環境経済研究所の小林茂樹氏のレポート（引用文献⑨、⑩）に詳しい。本レポート作成に当たり、参考および引用させていただいた。

図 19 によれば、2021 年のバイオ燃料生産量は 9,100 万トンで、バイオエタノール生産が 5,100 万トンで、バイオディーゼルが 4,000 万トンであった。バイオディーゼルの内訳は FAME（脂肪酸メチルエステル）が 84%、HVO（水素化処理植物油）が 16%となっている。

7.2 世界の地域別生産量と各国の状況

(1) 世界の地域別生産量

① バイオエタノール：

2021 年の地域別生産量は北米（実質は米国）がトップで、南米（主にブラジル）、欧州、その他となっていて、80%以上を北米と南米で占めている（図 20）。

② バイオディーゼル：

2021 年の地域別生産量は、欧州がトップであり、次いでアジアパシフィック（インドネシア・タイ・シンガポール・マレーシアが多い）、北米、南米（ブラジル、アルゼンチンが多い）である（図 21）。欧州は、欧州内のバイオマス原料だけではバイオディーゼル使用目標値の達成が難しいためインドネシアなど東南アジアから輸入した。

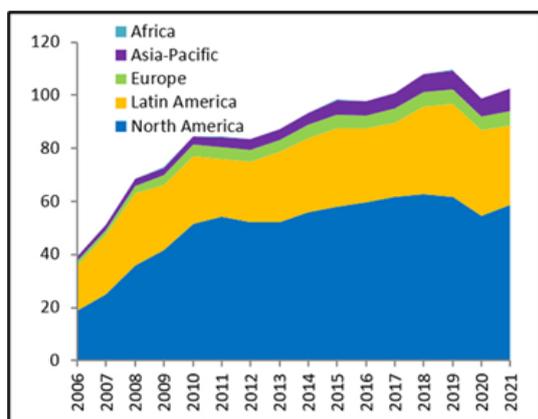


図 20 地域別エタノール燃料の生産量推移
（図 20 と図 21 の単位は 10 億リットル）

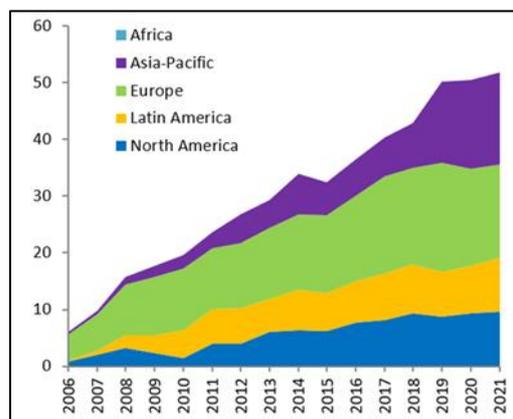


図 21 地域別バイオディーゼル
（FAME & HVO）の生産量推移

図20と21の出所：IFPEN, from FO Licht, Biofuels Dashboard 2022, IFPN

2011 年と 2019 年のバイオディーゼル燃料（FAME と HVO）の原料ソースを図 22 に示

す。Rapeseed（ナタネ油）が最も多く、2019年はUCO（Used Cooking Oil（使用済みクッキングオイル））の比率が急増し、二番目に多い。次いで Palm（パーム油）、Animal fats（動物性脂肪）、Soybean（大豆油）、Sunflower（ひまわり油）の順となっている。

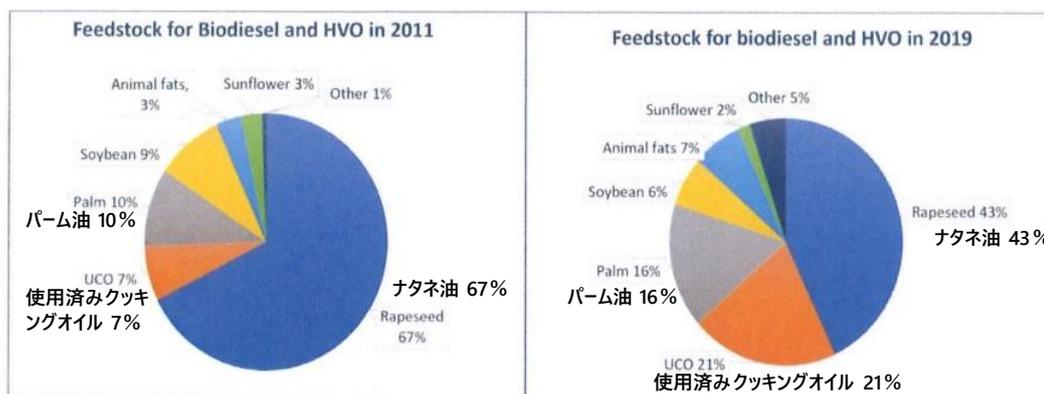


図 22 バイオディーゼルと HVO の原料ソース(2011 年と 2019 年の比較)

出所：https://www.bike-biofuels.eu/wp-content/uploads/2021/09/20210914_BIKE_D3.1_4.0_REC.pdf
 元資料：IEA bioenergy [7], Biofuels annual[8].

(2) 各国のバイオ燃料の生産と消費（表 7）

表7 世界各国のバイオ燃料導入状況

	油種	バイオ燃料の導入実績		
		消費量	バイオ燃料の導入実績	バイオ燃料の導入比率
日本	ガソリン	5,130万kL	83万kL	約1.6%
	軽油	2,544万kL	-	-
欧州	ガソリン	10,121万kL	517万kL	約5.1%
	軽油	31,769万kL	1,556万kL	約4.9%
米国	ガソリン	54,215万kL	5,434万kL	約10.0%
	軽油	22,561万kL	789万kL	約3.5%
ブラジル	ガソリン	5,851万kL	2,710万kL	約46.3%
	軽油	5,756万kL	396万kL	約6.9%

注：軽油はディーゼルのこと

出所：資源エネルギー庁（2019年6月発表資料）

① 米国

米国のバイオ燃料はトウモロコシを原料としたバイオエタノールが主体であり、バイオディーゼルの使用量は少ない。バイオエタノールのガソリンへのブレンド比率は10%（E-10）を達成している（表7）。ブレンド比率を10%以上に引き上げることには様々な壁（E-10の壁）があり、E-10が標準になっている。

② ブラジル

サトウキビを原料としてバイオエタノールを生産し、国内でガソリンへの高いブレンド比率（E-30：エタノール30%）を実施している。自動車やガソリンスタンドがE-30に対応する仕様になっている。現状はそれよりも高いブレンド比率となっている。

③ 欧州

バイオ燃料としてはバイオディーゼルが主流で、植物由来の油脂をメタノールとエステル交換してつくられたFAMEが中心である。輸送用燃料に占めるバイオ燃料の比率の目標として、2009年に再生可能エネルギー指令（RED）で10%を設定したが、達成されていない（表7）。EU内の植物油だけでは不足するため、インドネシアからパーム油やFAMEを輸入した。過去、インドネシアにおいてパーム油増産のための森林伐採されたことで重大な環境問題が発生した。国際的批判が高まり、輸入にブレーキがかかっている。

なお、欧州では約10年前からHVOが市場に登場し、現在、HVO製造設備の新增設が活発に行われている。バイオディーゼル生産のうちHVOが20%以上を占めている。

④ インドネシア

パーム油を原料としたFAMEの生産が盛んで、欧州に輸出するとともに、国内でもバイオディーゼルのブレンド比率義務B20（20%混合）を設定している。さらに30%混合を計画している。

⑤ 日本

バイオエタノール導入目標量は2012年の21万kLから2017年に50万kLに増加し

たが、2018～2022年の目標量は50万kLで変わっていない⁷²。最近の導入実績は83万kLである(表7)。全量輸入である。なお、バイオディーゼルについては目標が定められていない。

表7に示すように、日本は欧州、米国、ブラジルに比べバイオ燃料の導入量がはるかに少ない。

7.3 バイオエタノール

前述のように、米国とブラジルはバイオマスによるバイオエタノールの大規模な生産を行っている。米国では税控除や補助金の特例を設けバイオエタノール製造を支援している。再生可能な資源を活用して、ガソリンの使用量を抑えることが最大の目的である。また、エタノールは酸素含有基材なのでガソリンのオクタン価を改良する効果がある。オクタン価改良剤(酸素含有基材)として、以前はMTBE(メチル-t-ブチルエーテル：原料はイソブテンとメタノール)が使用されていた。しかし、MTBEは親水性のためガソリンスタンドなどで漏れると地下水を汚染する心配があり、米国などで使用が禁止された。それに代わって同じ酸素含有基材であるエタノールが使用された。

7.4 セルロース系バイオ燃料

非可食性セルロース系バイオ燃料は第二世代のバイオ燃料と呼ばれる。

米国では2013～14年にかけて、4社がセルロース系バイオエタノールの商業プラントを建設したが⁷³、4社とも撤退してしまった。まずAbengoa Bioenergy(工場は米国・カンサス州、生産能力7.2万トン/年)は、親会社のアルコール製造会社のAbengoa(スペイン)とともに2016年に倒産した⁷⁴。DuPont(工場は米国・アイオワ州、エタノール生産能力9万トン/年)は2017年に撤退し⁷⁵、DuPontのプラントはドイツ

⁷² バイオ燃料の導入に係る高度化法告示の検討状況について 資源エネルギー庁(2019年6月)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/pdf/027_05_00.pdf

⁷³ ARCレポート RS-998「石油化学」から「天然資源化学」へ(2016年版)21頁の表6参照
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-998.pdf

⁷⁴ <https://bioenergyinternational.com/biofuels-oils/five-us-abengoa-ethanol-plants-to-change-hands>

⁷⁵ <https://www.reuters.com/article/us-dowdupont-ethanol-idUSKBN1D22T5>

の会社を買収し、バイオマス発電工場に転換した。POET-DSM（工場は米国・アイオワ州、エタノール生産能力 7.5 万トン/年）も 2019 年に撤退した⁷⁶。Ineos Bio（工場は米国・フロリダ州、エタノール生産能力 2.4 万トン/年）は、3 社よりも早く撤退した。

いずれの会社も政府からの資金援助や債務保証をもとに工場建設をしたものであり、採算性が危惧されていたが、その通りになってしまった。

図 23 の左図のように、米国は 2007 年に定めた再生可能燃料基準（RFS）により、セルロース系バイオ燃料の年次義務量（棒グラフの赤茶色）を決めたが、図 23 の右図の実績が示すように義務量を全く達成できていない。

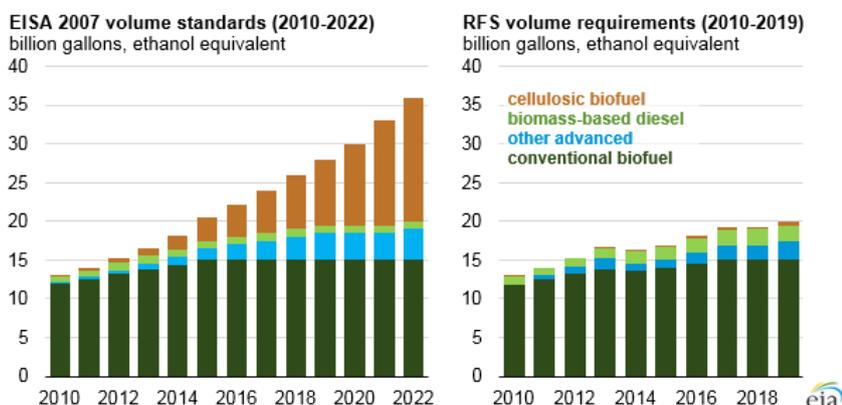


図23 左図は2007年に作成された2010～2022年の容量基準(RFS)、右図はRFSの実績

出所：U. S. EIA, based on U. S. EPA'S Renewable Fuel Standard program (2018年12月)
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=37712>。

また、欧州の Beta Renewables（イタリア）は“Proesa 法”を開発し、世界に先駆けて 2013 年にイタリアの Crescentino 工場（エタノール生産能力 4 万トン/年、発電能力 13MW）を稼働したが、親会社（Mossi & Ghisolfi Group）が倒産してしまった。イタリアの Versalis（ENI グループ）が引き継いで運転している（2020 年 3 月）⁷⁷。

日本では、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）や公益

⁷⁶ ① <https://bioenergyinternational.com/poet-dsm-pause-ethanol-production-and-revert-to-rd-at-project-liberty/>

② C&EN November 25, 2019, P14 <https://cen.acs.org/magazine/97/09746.html>

⁷⁷ <http://ethanolproducer.com/articles/16974/versalis-to-restart-italian-cellulosic-ethanol-plant>

財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）が開発を進めていたが、工業化には至っていない。

7.5 FAME (Fatty Acid Methyl Ester: 脂肪酸メチルエステル)

バイオディーゼル燃料の大半は FAME である。既存のディーゼルにブレンドして使用されるが、特性が既存ディーゼルと異なるためブレンド比率に上限がある。

FAME の製造方法を 28 頁の式 2 に示す。不飽和油脂（不飽和脂肪酸のグリセリド）とメタノールを反応させ、エステル交換によりメチルエステルにしたものである。化学量論的に言うと、不飽和油 884g とメタノール 96 g を反応させて、FAME 888g が得られ、グリセリン 92g が副生する。メタノールとグリセリンの量はほぼ同じである。FAME の約 10% の大量の副生グリセリンが発生するため、その用途開発が活発に行われた。

FAME には原料の不飽和油脂が持つ不飽和結合がそのまま残っているため、酸化安定性に劣る。また、ディーゼルではオクタン価ではなくセタン価が重要である。したがって、FAME の持つエステル基の酸素はディーゼルとしては必要なものではない。

7.6 HVO (Hydrotreated Vegetable Oil : 水素化処理植物油) ⁷⁸

(1) HVO の概要

HVO の最初の開発企業は Neste（フィンランド）である。HVO は 2000 年頃より欧州市場に登場し、発展してきた。HVO は FAME と異なり、水素化処理により油脂中の酸素を除去して炭化水素に転化したものである。このため既存の石油系ディーゼルに近い化学構造と特性を持つことから“Drop-in”⁷⁹と呼ばれる。既存ディーゼルと自由にブレンドでき、FAME のような既存ディーゼルとのブレンド比率の上限がない。また HVO は FAME に比べ、不飽和結合を含まないため酸化安定性に優れる。

HVO の代表的なものは最初の開発者である Neste が製造する“Renewable Diesel”

⁷⁸ JPEC 資料（引用文献⑦、⑧）および国際環境経済研究所の小林茂樹氏のレポート（引用文献⑨、⑩）に詳しく書かれているので参考および引用させていただいた。

⁷⁹ “Drop-in”は、バイオマスプラスチックに使っていた「ドロップイン（プロダクト）」と同様な意味である。使用している対象がバイオ燃料なので、引用文献⑨、⑩に使用されている“Drop-in”の用語をそのまま使用した。

である。原料に使用済み植物油を使用していることから、持続可能性の高いバイオ燃料として EU 政府が特に後押ししている。航空機燃料としても期待されており、同社の“Renewable Jet Fuel”を燃料に使用した民間航空機の飛行が始まっている。

Neste は HVO の世界トップメーカーで、生産能力は約 300 万トン/年を有し、155 万トン/年の拡張計画がある（表 8）。

成長する HVO に欧米の多くの石油精製メーカーが参入している。既存の石油精製プラントの水素化処理プロセス技術を活用できる。既存プラントを利用した“Co-processing”プラントもある。FAME はエステル交換反応のための別の専用化学工場を必要とする。この点でも HVO は FAME より優れている。

(2) HVO の製造方法⁸⁰

植物油を触媒存在下で高温（300～400℃）、高圧下に水素で処理し、次いである程度異性化（分岐）させたのち、蒸留で製品（HVO）を分離する。水素化処理過程で原料である油脂中の不飽和結合は水素付加されて飽和結合となる。異性化はオイルの粘度を低下させて、既存ディーゼルの粘度に合わせるためである。

上述のように製造条件は高温、高圧で、よりマイルドな反応条件が求められ、それを可能とする新触媒の開発が行われている⁸¹。

HVO の主製品はディーゼル燃料であるが、プロセスのシビアリティや異性化の程度などのプロセス条件によっては、ケロシン（灯油）やナフサを得ることができる。

副生成物は、グリセリンの水素化でできたプロパンと CO₂ と水である。水素化（脱酸素化）とともに脱炭酸が起こるため CO₂ が発生する。小林茂樹氏の引用文献⑨ではエステル基の 3 分の 1 が脱炭酸する反応式が示されている。これに基づいて 27 頁の式 1 を

⁸⁰ ① IEA Bioenergy: New Publication - Advanced Biofuels - Potential for Cost Reduction (2020) https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41_CostReductionBiofuels-11_02_19-final.pdf

② <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/conventional-technologies/hydrotreatment-to-hvo>

⁸¹ 一例：紫外線照射下に Pt-TiO₂ 触媒を使うと、30℃、0.2MPa 水素で脱酸素化ができ、90% 収率で炭化水素が得られるという Dalian Institute of Chemical Physics の報告がある (C&EN March 2/9, 2020, P16)。

作成した。化学量論的に言うと、不飽和油脂 884g から水素 24g を使って、HVO 748g と副生のプロパン 44g、CO₂ 44g、水 72g が生成することになる。

HVO 専用の工場のほかに、既存の石油精製プラントを転用したものや既存プラントとインテグレートした“Co-processing”プラントがある。設備費を抑えることができるメリットがあるので増えてきている⁸²。

HVO 製造技術については、数社が技術を保有しており、技術ライセンスも行われている。例えば、Neste は“NEXBTL Process”と呼ぶ技術を有し、Honeywell UOP は“Ecofining process technology”と呼ぶ技術を有している。

TotalEnergies はフランス北中央部にある Grandpuits refinery に“バイオリファイナリー”を建設するに当たり、Honeywell UOP の“Ecofining process technology”を採用したことを発表した（2020 年 11 月）⁸³。TotalEnergies はこのプロジェクトに 5 億ユーロを投資する。完成時には、17 万トン/年のバイオジェット燃料、12 万トン/年の HVO、5 万トン/年のバイオマスプラスチック製造用ナフサを製造する計画である。

(3) HVO の生産能力

Greenea の 2019 年の発表によれば、プラント稼働中のものが 591 万トン/年、建設中のものと計画中のものが 1,015 万トン/年で、合計で世界の生産能力は 1,600 万トン/年である⁸⁴。表 8 の下図（米国など）はこの Greenea の資料である。

表 8 の上図（欧州）はより最近の S&P Global の資料（2021 年）で、欧州の生産能力合計は増えており約 700 万トンになる。なお、UPM、Kaidi、Preem、Shell は、wood base の HVO を製造する。

⁸² IEA Bioenergy: New Publication - Advanced Biofuels - Potential for Cost Reduction (2020)
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41_CostReductionBiofuels-11_02_19-final.pdf

⁸³ ① <https://bioenergyinternational.com/technology-suppliers/total-selects-honeywell-uop-ecofining-for-grandpuits-zero-crude-project>

② C&EN October 5, 2020, P6

⁸⁴ <https://www.greenea.com/en/>

表8 水素化処理植物油(HVO)の稼働中生産能力と建設中および計画中的生産能力

欧州

企業名	国名	場所	生産能力 (千トン/年)		
			千トン/年	スタート	植物油、動物油脂以外の原料
Neste	フィンランド	Porvoo	400	2012年	
	オランダ	Rotterdam	1,300	2014年	
UPM Biofuels	フィンランド	Lappeenranta	500	計画中	wood- base residueほか
		Lappeenranta	130	2015年	wood- base residueほか
Kaidi	フィンランド	Kemi	225	計画中	wood- base residue
Preem	スウェーデン	Lysekil	730	2024年	
		Gothenburg	300	2010年	wood- base residueほか
STI	スウェーデン	Gothenburg	200	2022年	
Shell	ドイツ	Rheinland	100	2025年	green hydrogenとwood base
	オランダ	Pemis	820	未定	
Phillips 66	イギリス	Humber	221	2018年	
TotalEnergies	フランス	Grandpuits	340	2024年	
ENI	イタリア	Porto Marghera	360	2014年	
		Gela	750	2019年	
OMV	オーストリア	Schwechat	160	2023年	
Repsol	スペイン	Cartagena	250	2023年	
Galp	ポルトガル	Sines	220	計画中	

米国・南米・中東・中国

企業名	国名	場所	生産能力 (千トン/年)		
			稼働中	建設中および計画中	
Phillips 66 Ryze	米国	Las Vegas	500		
MARATHON	米国			500	建設中
WORLD ENERGY	米国		130		
DIAMOND GREEN DIESEL	米国		740	1,180	拡張
WORLD ENERGY	米国			900	プロジェクト
REG	米国		250	138	新規プロジェクト
EMERALD BIOFUELS	米国	ルイジアナ州		280	建設中
Next Energy Group	米国			1,700	建設中
Neste	シンガポール	Singapore	1,150	1,550	拡張 (2022)
ECB GROUP	南米			700	プロジェクト
PETRIXO	UAE			400	プロジェクト
ECO Biochemicals	中国	張家港 (上海近郊)	120		
HUNANYU	中国		120		
YANGZHOU JIANYUAN	中国	揚州市	100		
全世界合計			5,910	10,154	

出所：①上図（欧州）は、下記URLのS&P Globalの資料を基に旭リサーチセンターが編集した。

<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/blogs/oil/081921-bionaphtha-demand-petrochemicals-fuels> 2021年8月

②下図（米国など）は2020年度JPECフォーラム（2020年5月8日）（引用文献⑦）

元資料 ARA 15th International Symposium July 23-26, 2019 Greenea資料。

(4) バイオナフサの価格

図 24 に示すように、バイオナフサ（HVO）と石油ナフサの市場価格が公表されている。それによれば、バイオナフサの価格は既存石油系ナフサと比較して 4 倍近く高い⁸⁵。SAF などの需要が多く、供給が追いつかないためであろう。

バイオナフサの価格については、2 社間の長期供給契約に基づくものとオープンな市場価格があると推定される。長期契約の価格は安定しているが、市場価格は市場規模が小さいとその時々需給状況に敏感に反応する。バイオナフサ全体に占める長期契約の割合や価格は重要だが、情報が得られてない。

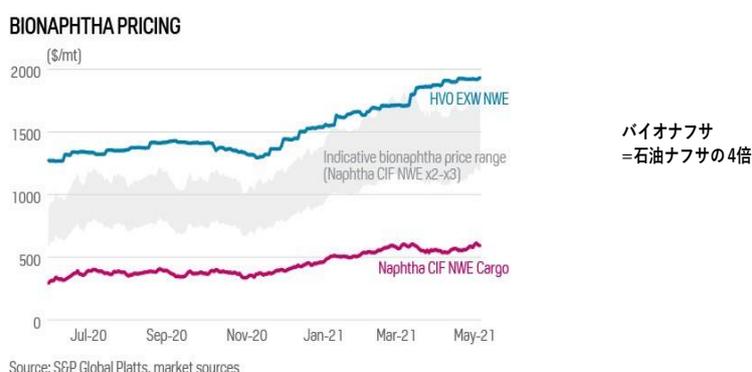


図24 バイオナフサ(HVO)と石油ナフサの相場

出所：<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/blogs/oil/060921-bionaphtha-market-biofuels-gasoline-petchems-plastics-clean-energy> (2021年6月発表)

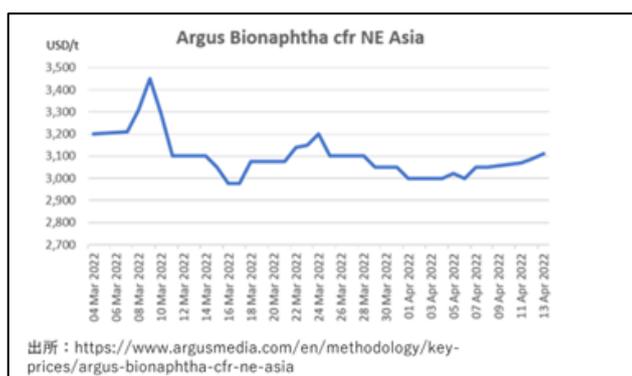


図 25 北東アジアのバイオナフサの相場

出所：<https://www.argusmedia.com/en/methodology/key-prices/argus-bionaphtha-cfr-ne-asia>

⁸⁵ <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/blogs/oil/060921-bionaphtha-market-biofuels-gasoline-petchems-plastics-clean-energy> (2021年6月発表)

また最近、北西アジアのバイオナフサの相場（価格）が 2022 年から公表されるようになった（図 25）。原油高もあり、3,000 ドル/トンを超える高値となっている。日本や韓国に入ってくるバイオナフサはこの価格になる。

7.7 バイオ燃料規制

欧州の輸送燃料業界にとって最も影響力のある立法は、再生可能エネルギー指令（RED）である。表 9 に、再エネ指令をまとめたものを示す。現状は再生可能電力がまだ少ないため、再エネ比率目標達成にはバイオ燃料に依存するところが大きい。

表 9 運輸部門におけるバイオ燃料関連目標

指令	再エネ比率	GHG排出原単位の削減率 (2010年比)	先進的バイオ燃料比率
再エネ指令 (RED I) (指令2009/28/EC)	2020年までに10% (道路と鉄道)	—	—
燃料品質指令 (指令2009/30/EC)	—	2020年までに6% (道路輸送と道路以外の移動機械)	—
再エネ指令 (RED II) (指令2018/2001/EU)	2030年までに14% (運輸部門全体)	—	2030年までに3.5% (先進的バイオ燃料とバイオガス)
再エネ指令 (RED III) (指令2023/2413/EU)	2030年までに29% (運輸部門全体) または	2030年までに14.5% (運輸部門全体)	2030年までに5.5% (先進的バイオ燃料とバイオガス、 RFNBOs) (注)

(注) RFNBO: Renewable fuels of non-biological origin (非バイオ由来の再生可能燃料)。
(出所) ジェトロビジネス短信⁸⁶を基に旭リサーチセンター作成。元資料は欧州会計検査院報告書⁸⁷。

欧州会計検査院報告書⁸⁶によれば、2021年のEUの道路と鉄道のエネルギーミックスは、化石資源が92.5%、再生可能資源 (Renewables) が7.5%である。Renewablesの内訳は、①食料と飼料ベースのバイオ燃料とバイオガスが4.0%、②成熟した技術を利用したバイオ燃料とバイオガス (from used cooking oil and animal fats (Part B of Annex(X))) が1.3%、③先進的なバイオ燃料とバイオガス (mainly from wastes, residues and co-products (Part A of Annex(X))) が0.8%、④その他の compliant バイオ燃料0.6%、⑤輸送分野の再生可能電力が0.7%である。

⁸⁶ 欧州会計検査院、EUの長期的なバイオ燃料政策の必要性指摘(EU) | ビジネス短信 —ジェトロの海外ニュース—ジェトロ 2023年12月22日

⁸⁷ https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-29/SR-2023-29_EN.pdf

おわりに

1. ARC リポート「バイオマス化学」(2014 年)以降の最大のトピックスは、EU で始まったバイオナフサを原料として既存石油化学設備でつくられるバイオ PE やバイオ PP などの「第二世代ドロップイン」である。多くのプラスチック(バイオ PVC、バイオ PC など)に拡大し、最近では日本企業の ISCC PLUS の取得例が増えている。ただし、使用済み植物油の量は回収に限界があり、新たなパーム油などの増産は国際的に環境上制限されている。将来とも原料供給量が限られる可能性があるのが懸念点である。
2. バイオエタノールは燃料需要が頭打ちで、将来は電気自動車の普及から燃料需要が減少するかもしれない。また、バイオエタノールの原料の一つであるサトウキビはパーム油より増産しやすい。このような事業環境から、近い将来にバイオエタノールを原料とするエチレン、プロピレンとその誘導体であるバイオ PE、バイオ PP が大規模に生産される可能性がある。製造されるバイオ PE とバイオ PP は「第一世代ドロップイン」と「第二世代ドロップイン」の両方であろう。既に Dow など有力化学会社の計画が発表され注目される。
3. 「第二世代ドロップイン」を推進するために、マスバランス方式の採用は必要である。ただし、マスバランス方式には制限がなく、現状は「第一世代ドロップイン」より大変有利になっている。マスバランス方式の適用範囲の制限や「第一世代ドロップイン」との価値の違いを明確にする国際的公的ルールづくりが必要と考えられる。当然、表示による両者の明確な区別が必要であろう。
4. リアルなバイオマス化学品(モノマーなど)であるバイオ MEG、バイオパラキシレン、FDCA、CMF などの開発が進んでおり期待される。
5. 日本は、バイオマス原料を輸入して製造した(あるいは輸入した)バイオマスプラスチックを国内で使用し、最終焼却することになる。バイオマスプラスチックはカーボンニュートラルだが、日本だけで見ると既存石化系プラスチックと同量の CO₂ を排出することになる。植物が成長時に吸収する CO₂ 分は原料輸出国の権利であることを留意すべきであろう。

謝辞 本 ARC リポート作成に当たり情報提供とアドバイスをいただいたアイシーラボ代表の室井高城氏に感謝いたします。

引用文献・参考文献

(1)ARC リポート 府川伊三郎

- ①バイオマス化学 “「石油化学」から「天然資源化学」へ” 続編 2014年9月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-978.pdf
- ②リサイクルが進む PET 樹脂は循環経済を実現するか 2020年2月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1043.pdf
- ③プラスチックのケミカルリサイクルとその技術開発 (上)、(下) 2020年5月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1046.pdf
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1047.pdf
- ④2030年の日本のプラスチック (リサイクルとバイオマスプラスチック) 2023年4月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1062.pdf
- ⑤世界で建設が進むケミカルリサイクルプラントの動向 2023年7月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1063.pdf
- ⑥重縮合ポリマーのケミカルリサイクル (PET、PBT、PC、PA、PU、PF、エンブラ) 2023年10月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1064.pdf

(2)JPEC

- ⑦2020年度 JPEC フォーラム (2020年5月8日)「GHG 排出量削減効果が期待される次世代液体燃料の製造スキームや将来見通しの調査 (バイオ燃料)」
<https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2020/06/jf007.pdf>
- ⑧JPEC レポート No. 201004 (2020年10月)「欧米での製油所を活用したバイオ燃料製造の取り組み動向」

(3)国際環境経済研究所

- ⑨小林茂樹 「バイオ燃料の現状と将来 (1)」国際環境経済研究所 2020年10月
- ⑩小林茂樹 「バイオ燃料の現状と将来 (2)」国際環境経済研究所 2020年11月

<本レポートのキーワード>

バイオマスプラスチック、バイオマス化学、バイオ燃料、バイオ化学品、生分解性プラスチック、HVO、バイオプロセス、ドロップインプロダクト、バイオPET、バイオPE

(注) 本レポートは、ARCのWEBサイト (<https://arc.asahi-kasei.co.jp/>) から検索できます。

このレポートの担当

シニアリサーチャー 府川伊三郎

E-mail fukawa.ig@om.asahi-kasei.co.jp

<https://arc.asahi-kasei.co.jp/contact/>