

ARC リポート

シリーズ 石油化学～CCU 化学の技術と動向(1)

石油化学～CCU 化学の技術と動向

～石油・天然ガス・新石炭・バイオマス・リサイクル・CCU 化学の 15 年

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

使用する資源で分類した化石資源化学(石油化学、天然ガス化学、新石炭化学)、循環資源化学(バイオマス化学、リサイクル化学)、CCU 化学(CO₂/H₂ 化学など)について、その基礎と過去 15 年間のトピックスを解説した。また、重要性が増す合成ガス&メタノール化学工業とバイオ燃料、バイオ化学品(特にバイオエタノール誘導品)についても解説した。近年、CO₂(二酸化炭素)を炭素源として、H₂(水素)を水素源とする CCU 化学(CO₂/H₂ 化学)による e-fuel(SAF など)、e-メタノール、e-メタンの製造が始まっている。

ポイント

- ◆過去 15 年(2011~25 年)の世界の環境政策年表と化学・燃料産業の技術年表を作成し、重要ポイントを解説した。(5-8 頁)
- ◆石油化学、天然ガス化学、新石炭化学、バイオマス化学、リサイクル化学の基礎と 15 年間のトピックスを概説した。この期間に、新石炭化学(中国の CTO:Coal to Olefins)、バイオマス化学(バイオエタノールやバイオナフサ原料)、およびリサイクル化学(熱分解油からの再生ナフサ原料)によるエチレン、プロピレンの製造が始まった。また、米国はシェール革命による天然ガス化学の復興で、エタン・クラッカーが多数建設された。一方、世界的に石油化学と天然ガス化学では不足するプロピレンとアロマ(BTX)は、石油精製による製造により補われてきた。FCC((流動)接触分解)によるプロピレン製造と接触改質によるアロマ(BTX)の製造である。これら各製法のエチレン、プロピレン、アロマ(BTX)の収率を比較した。(9-17 頁)
- ◆代表的なバイオマス由来製品であるバイオ燃料、バイオ化学品、バイオマスプラスチックの製造ルートと動向をまとめた。バイオエタノール由来の SAF(持続可能航空燃料)が工業化され、バイオエタノール由来のバイオエチレン、バイオプロピレンの製造拡大が検討されている。また、ケミカルリサイクル(CR)工場の最近の年次別建設推移をまとめた。(18-26 頁)
- ◆合成ガス・メタノールの化学工業体系が今後重要となる。合成ガス(COとH₂の混合ガス)は基幹物質で、天然ガス、石炭から製造されていたが、近年バイオマス、廃プラスチック、CO₂/H₂などの再生可能原料からも製造できるようになった。合成ガスからはもう 1 つの基幹物質であるメタノールや合成燃料の e-fuel を製造できる。(27-30 頁)
- ◆温室効果ガス(GHG)の CO₂ を炭素源として、H₂ を水素源として炭化水素化合物などを製造する CCU 化学(CO₂/H₂ 化学)が、カーボンニュートラル実現の有力な手段として注目され、世界で活発な工場建設が進められている。FT 反応による e-fuel(SAFなど)、e-メタノール、メタネーションによる e-メタンの製造などである。いずれも当面は燃料として使用されるが、将来化学品への展開が考えられる。(31-41 頁)

目次

はじめに.....	1
用語・略語.....	3
1. 世界の環境政策年表と化学・燃料産業の技術年表(2011~25年).....	5
2. 化石資源化学、循環資源化学、CCU化学の概要.....	9
2.1 資源化学の分類と命名.....	9
2.2 各種化学による軽質オレフィン(エチレン、プロピレン)の製造法.....	9
2.3 石油化学.....	11
2.4 天然ガス化学.....	12
2.5 軽質オレフィン&アロマ(BTX)製造についての石油精製との補完関係.....	13
2.6 各種製造法における軽質オレフィン&アロマ(BTX)の生成物収率.....	15
2.7 新石炭化学.....	17
2.8 バイオマス化学.....	18
2.9 リサイクル化学.....	26
3. 合成ガス・メタノール・エタノールの化学工業体系.....	27
3.1 合成ガスの製造法と誘導品の展開.....	28
3.2 エタノールの製造法.....	29
4. CCU化学におけるCO ₂ /H ₂ 化学の展開.....	31
4.1 CO ₂ /H ₂ からFT反応によるe-fuelの製造.....	32
4.2 CO ₂ /H ₂ からのe-メタノールの製造.....	36
4.3 CO ₂ /H ₂ からのメタネーションによるe-メタンの製造.....	39
おわりに.....	42
謝辞.....	43
参考文献.....	43

はじめに

本レポートは石油化学、天然ガス化学、新石炭化学、バイオマス化学、リサイクル化学、CO₂/H₂(二酸化炭素/水素)化学についての基礎を解説し、また過去 15 年間のトピックスを紹介したものである。

15 年前の 2011 年に、三菱化学と旭化成ケミカルズ(いずれも当時)が折半出資により、西日本エチレン有限責任事業組合の運営を開始した¹。この時が、近年の石油化学(40 万トン/年クラスのナフサ・クラッカー)の規模縮小と再編の始まりであった²。筆者は、これに少なからず問題意識を持って調査を始めた。そこで、日本が石油化学一本足打法なのに対して世界は原料多様化に大きく動いていることを知り危機感を持った。そして、石油化学をはじめ、天然ガス化学、新石炭化学、バイオマス化学³の動向をまとめ、以下の ARC レポートを発表した(参考文献(1)~(6)参照)。

① (2014 年 4 月)「石油化学」から「天然資源化学」へ ~シェール革命と現代的石炭化学のインパクト (参考文献(1))

:世界は、従来の「石油化学」から、石油、天然ガス、石炭、バイオマスなどを総合的に利用する「天然資源化学」の時代になった。特に注目すべきは、米国のシェール革命をベースとする天然ガス化学(エタン・クラッキング、プロパン脱水素)の発展、中国の安価な石炭を使った軽質オレフィン製造技術(CTO)などの新石炭化学がその代表である。

② (2014 年 9 月)バイオマス化学 ~ “「石油化学」から「天然資源化学」へ”続編 (参考文献(2))

:再生可能なバイオマス原料を使用するバイオ燃料、バイオ化学品(化学品やモノマーなど)、バイオプラスチックに焦点を当て、最近の技術進歩と工業化状況をまとめた。

③ (2017 年 3 月)天然ガス化学、石油化学、石炭化学 (参考文献(4))

:特に、重要性が高まっている天然ガスおよび天然ガス化学の魅力と課題について紹介した。

④ (2024 年 3 月)バイオマスプラスチックとバイオマス化学の動向(上) (参考文献(6))⁴

: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汎用プラスチックの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、マスバランス方式との関係を含めて解説した。また、バイオ燃料には

¹ 田島慶三「日本の化学産業、もうひとつ必要な再編成」東レ経営研究所 経営センサー 2025.12 19-29 頁 https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=202502243356984294

² 2016 年には旭化成ケミカルズ保有のエチレンプラントを停止、三菱化学保有のエチレンプラントに集約された。

³ ARC レポートでは、石油化学、新石炭化学、天然ガス化学、バイオマス化学の全体を天然資源化学と命名した。

⁴ ARC レポート『バイオマスプラスチックとバイオマス化学の動向(下)』はまだ発表していない。

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(脂肪酸メチルエステル)と需要が伸びている HVO(水素化処理植物油)がある。

今回は、新たにリサイクル化学と CO₂/H₂ 化学を追加し、その概要を解説した。

リサイクル化学には、従来のメカニカルリサイクル(MR)に加えて、ケミカルリサイクル(CR)や溶媒精製法が発展してきている。なお、MR や CR については、これまで 12 報の ARC リポートや解説記事を発表してきた⁵。

現在、カーボンニュートラルの要請から CO₂/H₂ 化学が注目されている。CO₂(二酸化炭素)を炭素資源として利用し、かつ GHG の CO₂ を削減しようとする一石二鳥のアイデアであるが、CO₂/H₂ は合成ガス(CO/H₂:一酸化炭素と水素の混合ガス)に比べ反応性が低く、また現在はグリーン水素が高価格なため事業化のバリアーは高い。

⁵—例は、ARC レポート『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

府川伊三郎、PETROTECH 『プラスチックリサイクル(MR&CR)の技術と産業化』2025 年 4 月号(第 48 巻) 191-203 頁。PETROTECH は石油学会の情報誌である。

用語・略語

- ・ ATJ(Alcohol to Jet):アルコール(エタノールやメタノール)を原料に触媒反応を使って、Sustainable Aviation Fuel(SAF)を製造する技術。
- ・ CCS(Carbon dioxide Capture and Storage):CO₂(二酸化炭素)を「分離・回収(Capture)」し、「貯留(Storage)」する技術。
- ・ CCU(Carbon dioxide Capture and Utilization):CO₂の回収と利用。
- ・ CR (Chemical Recycling、ケミカルリサイクル):廃ポリマーを化学反応で分解して、液体やガスにするリサイクル手法。欧米では、Advanced Recyclingともいう。
- ・ CTO(Coal to Olefins):石炭由来のメタノールからMTOまたはMTPで軽質オレフィンを製造する方法。
- ・ e-fuel:CO₂とグリーン水素などの非化石エネルギー源を原料として製造された石油代替の合成燃料。
- ・ e-メタノール:CO₂とグリーン水素などの非化石エネルギー源を原料として製造されたメタノール。
- ・ e-メタン:CO₂とグリーン水素などの非化石エネルギー源を原料としてメタネーション反応で製造された合成メタン。
- ・ 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1種。油脂(脂肪酸エステル)とメタノールのエステル交換反応で製造される。
- ・ FCC((流動)接触分解):重質油をゼオライトなどの触媒を使用して分解し、プロピレン、ガソリン、ガソリン原料、軽油などを製造する方法。
- ・ FT(Fischer-Tropsch)反応:触媒(鉄触媒など)を用いて合成ガス(COとH₂)から液体炭化水素を合成する方法。そこから合成燃料(e-fuelなど)が得られる。
- ・ GHG(Greenhouse Gas):温室効果ガス。CO₂、メタンは温室効果が大きい。
- ・ GTL(Gas to Liquid):天然ガスから合成ガス経由、FT反応で液体燃料を製造する方法。
- ・ HEFA(Hydro-processed Esters and Fatty Acids、水素化処理エステル・脂肪酸):廃食油・獣脂・非可食植物油などの脂肪酸エステルを水素化処理することでジェット燃料と同等の持続可能な航空燃料(SAF)を製造する技術。
- ・ HVO(Hydrotreated Vegetable Oil):水素化処理植物油。バイオディーゼル燃料の1種。
- ・ JPEC:一般財団法人カーボンニュートラル燃料技術センター。
- ・ MTG(Methanol to Gasoline):メタノールからガソリンを製造する方法。

- ・ MTO(Methanol to Olefins):メタノールから軽質オレフィンを合成する方法。
- ・ MTP(Methanol to Propylene):メタノールからプロピレンを合成する方法。
- ・ MR(Mechanical Recycling、メカニカルリサイクル):粉碎、洗浄、造粒により機械的に廃プラをリサイクルする方法。マテリアルリサイクルと同じ意味。
- ・ NEDO:国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構。
- ・ 接触分解(Reforming):ナフサを原料に触媒存在下にアロマ(BTX)を製造する方法。
- ・ RFNBOs(Renewable Fuels of Non-Biological Origin):生物由来でない再生可能燃料。
- ・ SAF(Sustainable Aviation Fuel):持続可能航空燃料。規格が決まっている。

本レポートで定義した用語

- ・ 化石資源化学:石油化学、天然ガス化学、新石炭化学の総称。
- ・ 循環資源化学:バイオマス化学、リサイクル化学の総称。
- ・ CCU 化学:CO₂/H₂ 化学とその他の CCU 化学。
- ・ 軽質オレフィン:エチレンとプロピレンの総称。
- ・ ポリマー:プラスチック、合成ゴム、合成繊維、塗料、接着剤などの総称。
- ・ 混合廃プラ(PE/PP/PS):PE、PP、PS からなる混合廃プラスチックのことで、熱分解法 CR に適する。廃プラは廃プラスチックの略。
- ・ 合成燃料:e-fuel、e-メタノール、e-メタンだけでなく、従来の GTL や MTG により製造された燃料を含む総称。
- ・ ドロップインプロダクト:新製法でつくられた既存品と同じ性質を持つプロダクト。

1. 世界の環境政策年表と化学・燃料産業の技術年表(2011～25年)

表1に、過去15年間(2011～25年)の世界の環境政策年表と化学・燃料産業の技術年表をまとめた。環境政策年表は循環経済とカーボンニュートラルに関する政策が中心である。

15年前の2011年3月11日の東日本大震災により発生した東京電力福島第一原子力発電所事故は日本の電力供給体制に大きなダメージを与えるとともに、日本のエネルギー政策の見直しを迫る契機となった。

翌年の2012年にEllen MacArthur財団⁶が「Toward Circular Economy」を発表し、次いで2016年にはプラスチックリサイクルを主テーマとする「The New Plastic Economy」をダボス会議で提言した。これを受けた形で、2018年1月にEUは「循環経済におけるEUプラスチック戦略」を発表した。これは、これまで提言され続けていたが、十分に実現することが難しかったプラスチックリサイクルに正面から取り組むことを宣言するものであった。そして、具体的にシングルユース(使い捨て)のプラスチック容器包装を中心に規制を順次発表した。その集大成として容器包装・容器包装廃棄物規則(PPWR)が2025年1月に制定された。PPWRには容器包装プラスチックの再生材含有量規制(主に2030年施行)が盛り込まれた。自動車用プラスチックについても再生材含有量規制の大筋が2025年にまとめられ、2026年に正式に公布される。さらに繊維(繊維to繊維リサイクル)の再生材含有量規制が近々発表される。

2011年に協栄産業-サントリーは先駆的に飲料用PETボトルのボトルtoボトルMR(メカニカルリサイクル)技術を実用化し、現在その技術は世界に広まっている。

EUプラスチック戦略が発表された2018年には、12月にBASF(ドイツ)が熱分解法CR(ケミカルリサイクル)の実証結果とマスバランス方式をセットで発表した。世界の主要化学企業がそれに賛同し、混合廃プラ(PE/PP/PS)熱分解法CR工場の建設(計画)を相次いで発表した。2027年末にはこのCR工場の廃プラ処理能力の合計は約70万トン/年に達する。日本でも既にCFPとENEOS-三菱ケミカルグループが工場を稼働し、ケミカルリサイクル・ジャパンが工場を完成した。

⁶ 財団は、Ellen MacArthurにより世界的にサーキュラーエコノミーを推進することを目的に2010年に設立されたイギリス拠点の組織である。

表 1 世界の環境政策年表と化学・燃料産業の技術年表(2011~25年)

年	環境政策など	化学・燃料産業の技術トピックス				
2011	東日本大震災、東京電力福島第一原子力発電所事故発生(3月)	三菱化学と旭化成ケミカルズが折半出資により西日本エチレン有限責任事業組合の運営開始				
		協栄産業・サントリーがPETのボトルtoボトルMRを実現				
		Braskem(ブラジル)がバイオPEの生産開始				
2012	Ellen MacArthur財団が「Toward the Circular Economy」の提言発表(1月)	米国はシェールガス・オイルにより、原油と天然ガスの合計産出量でロシアを抜き、世界トップに。米国化学工業はルネッサンス。				
2013		2013~14年：合成ゴムメーカー4社(旭化成、日本ゼオン、JSR、住友化学)がシンガポール・タイに進出してS・SBRを生産				
2014		三菱化学が鹿島第1エチレンプラント39万トン/年を停止				
2015	国連はSDGsを国連サミットで決定(9月)	住友化学が千葉エチレンプラント41.5万トン/年を停止				
	パリ協定採択(COP21：地球温暖化)(12月)	原油価格 50ドル/バレルまで低下(1月)				
2016	Ellen MacArthur財団が「The New Plastics Economy」の提言を発表	Ineosは米国のシェールエタンを専用液化エタン船で欧州に運搬し、エタン・クラッキングを開始				
		旭化成の水島エチレンプラント50万トン/年を停止				
		Plastic Energyがスペインの熱分解法CR工場を稼働				
2017	JXエネルギー、東燃ゼネラル石油合併、JXTGエネルギー発足(2020年に同社はENEOSに改称)					
2018	EUプラスチック戦略発表(1月)	BASFが熱分解法CR実証とマスバランス方式を発表(12月)				
	EUのRED II 発効：2030年に再エネ割合32%目標	LanzaTechが中国で合成ガスからエタノールを発酵法で製造				
2019	日本政府がプラスチック資源循環戦略決定 EUがグリーンディール政策発表					
2020	新型コロナウイルスの世界的流行、日本はレジ袋有料化 日本政府が2050年カーボンニュートラル宣言	カーボンニュートラル目標に向けて、経産省とNEDOはグリーンイノベーション(GI)基金事業設立、研究開発スタート				
	中国が3060目標発表：2060年にカーボンニュートラル	2016~20年：セルロース系のバイオエタノール事業からの撤退 (Abengoa Bioenergy、Dupont、POET-DSM)				
2021	日本政府がプラスチック資源循環の促進に関する法律発布	2013~21年：中国のCTO、MTO、MTPプラントが完成				
	EUがFit for 55(2030年までにCO2を55%削減)発表	2019~21年：Nestleは複数の化学会社とHVO由来のバイオナフサ供給の契約締結(目的はバイオPE・PPなどの製造)				
2022	米国はIRA(インフレ抑制法)発表(8月)	HIF Global(米国)チリにe-ガソリン工場稼働				
		2018~22年：米国でシェールガス関連のエタン・クラッカー、PDH(プロパン脱水素)、PE工場が集中的に完成				
2023	EUは航空燃料のReFuelEUを発効(10月)	Zero Petroleum(イギリス)のe-fuel(Direct FT)工場稼働				
	EUでRED III(2030年再エネ比率45%)が正式発効	InditexがAmbercycleの繊維リサイクルに投資(10月)				
2024	2024年頃より、中国の過剰生産による化学工業の世界的不況が顕在化	H&Mらが繊維リサイクル事業に投資し、Syreを創設(3月)				
		CFP(日本)が自社技術で熱分解法CR工場を稼働				
		コスモ石油が日本初のSAF工場完工(12月)				
2025	EUは容器包装に関する規則(PPWR)制定、ELV規則による自動車用プラスチックの再生材含有量規制の大筋を決定、PETボトルのリサイクルに、MRに加えてCR(燃料除外マスバランス方式)を追加する規則案発表	Avantium(オランダ)がバイオFDCAとバイオPEFの工業生産				
		European Energy(デンマーク)のe-メタノール工場5月稼働				
		Twelve Benefit(米国)のe-fuel工場稼働(Q2)				
		INERATEC(ドイツ)のe-fuel工場稼働(6月)				
	日本は改正資源法(再生プラスチックの利用目標計画：対象は容器包装、自動車、家電4品目)制定	Lanzatechが米国でSAFの生産開始(11月)				
米国政府はOBBB法を成立(7月) 日本政府はバイオ燃料導入拡大の検討開始	ExxonMobil(米国)CR第3工場完成(合計11万トン/年)					
2030	2030年はSDGsの達成期限					
循環経済政策	カーボンニュートラル政策	一般	石油化学	リサイクル	バイオマス	合成燃料

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

一方、2015年にGHG削減のパリ協定が締結されて、世界はカーボンニュートラル実現に向けても対応を進めている。欧州は2019年にグリーンディールを発表し、それに基づいて2021年にFit for 55(2030年までに1990年比、GHGを少なくともネット55%削減する政策)を打ち出した。米国は2022年に推進法案であるIRA(インフレ抑制法)を発表した。しかし、トランプ政権は2025年7月にOBBB法を成立させ、IRAの税額控除などの大幅な見直しを行った。日本は2020年に「2050年にカーボンニュートラルを達成する」というカーボンニュートラル宣言を発表した。この宣言に基づいて、経済産業省とNEDOは、大型次世代カーボンニュートラル技術の実証化を目指して、グリーンイノベーション(GI)基金を設立し、2022年から大型開発テーマをスタートした。例えば、カーボンニュートラルな新規燃料の開発(e-fuel、SAF)や、混合廃プラや廃タイヤの熱分解CRによる再生ナフサの製造である。

また、既に欧米、東南アジア、ブラジルでは再生可能資源であるバイオ燃料(バイオエタノール、バイオディーゼル)をガソリンやディーゼルにブレンドして使用している。バイオエタノールの導入量は2011年には、既に2023年の約7割のレベルに達していた。米国ではE-10(エタノールをガソリンに10%添加)が標準となった。バイオエタノールより遅れてバイオディーゼルが立ち上がり、2023年の使用量は2011年の2倍に増加した。それらの地域・国ではバイオ燃料使用義務を盛り込んだ燃料規制を制定して、また補助金を出してバイオ燃料の導入を推進してきた。さらに、2022年以降はCO₂/H₂原料からつくられる新規合成燃料のe-fuel、e-メタノール、e-メタンの工場建設が世界的に進められている。

世界のエチレン生産量(2013年と2023年)と生産能力(2012年と2023年)を表2に示す。中国のこの10年間の生産量増(1,567万トン)とこの11年間の生産能力増(3,497万トン)が顕著である。それに次ぐのは米国の生産量増(1,270万トン)と生産能力増(1,422万トン)である。中国はナフサ・クラッカー、エタン・クラッカー、CTO・MTO工場の新設によるものであり、米国は主としてエタン・クラッカーの新設である。

表 2 主要国のエチレン生産量と生産能力

製品	生産量または 生産能力	日本	中国	韓国	台湾	米国	欧州	サウジ
生産量	2013年（千トン）	6,696	16,225	8,135	3,925	25,165	18,521	14,265
	2023年（千トン）	5,324	31,899	9,437	2,679	37,868	16,660	15,045
	（生産量の増加）	-1,372	15,674	1,302	-1,246	12,703	-1,861	780
生産能力	2012年（千トン）	7,610	15,510	7,830	4,050	26,697	20,566	15,200
	2023年（千トン）	6,499	50,475	12,800	4,005	40,915	22,010	19,791
	（生産能力の増加）	-1,111	34,965	4,970	-45	14,218	1,444	4,591
	予測：2026～28年 の能力追加	なし	24,600	1,500	なし	7,285	475	1,650

注：2023年の世界のエチレン生産能力合計は222,504千トン。

出所：石油化学工業協会の「石油化学工業の現状 2024年」。ただし2012年の生産能力の出所は「化学経済」誌（2012年の欧州の生産能力の20,566千トンは欧州主要6か国の合計）。

一方、日本ではこの15年間にナフサ・クラッカー（エチレンプラント）の規模縮小（3基停止：2014年の三菱化学の鹿島、2015年の住友化学の千葉、2016年の旭化成の水島）が行われた。

例外的な規模拡大のトピックスは、2013～14年にかけて日本の合成ゴムメーカーが低燃費タイヤ（シリカタイヤなど）用のS-SBR（溶液重合SBR）プラントをシンガポールとタイに相次いで建設したことである⁷。シンガポールに旭化成（10万トン/年）、日本ゼオン（3～4万トン/年）、住友化学（4万トン/年）が進出し、タイにJSR（現ENEOSマテリアル、5万トン/年）が進出した。当時、低燃費タイヤ用SBRで世界のトップを行く日本の合成ゴムメーカーは、需要増加の原料ブタジエンを国内では入手できず、ブタジエンを求めて東南アジアに進出したのである。

世界の化学工業の状況はこの15年で大きく変化した。足元では、中国の石油化学製品の過剰生産の影響で、各国の石油化学は設備過剰と価格下落に苦しんでいる。

⁷ ARCレポート『溶液重合ゴムのイノベーション』（2015年）
：https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-989.pdf

2. 化石資源化学、循環資源化学、CCU 化学の概要

2.1 資源化学の分類と命名

化石資源と再生可能資源を峻別する時代になり、これまで ARC レポートで使用してきた「天然資源化学」の名称は不適切になった。

本レポートでは図 1 のように新たな分類と命名を行った。資源化学全体を、化石資源化学、循環資源化学、CCU 化学に分類した。化石資源化学は、石油化学、天然ガス化学、新石炭化学の 3 つに、循環資源化学はバイオマス化学、リサイクル化学の 2 つに、CCU 化学は、CO₂/H₂ 化学とその他の CCU 化学の 2 つに分類した。

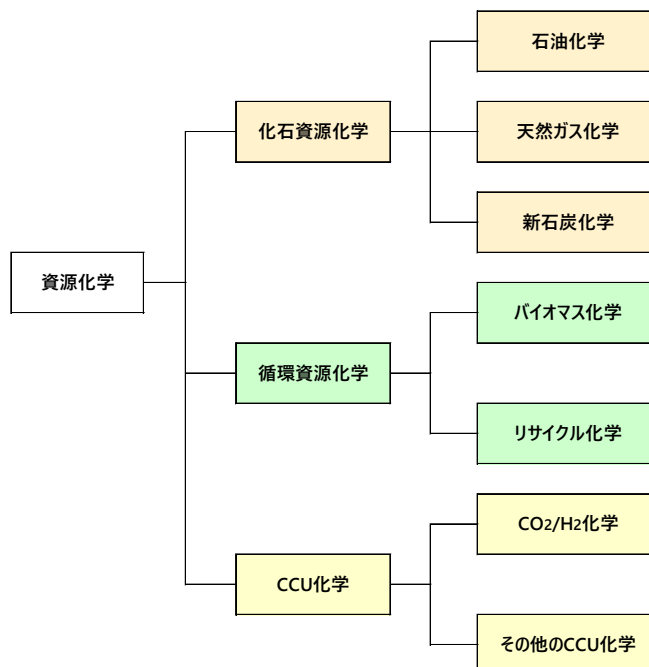


図1 資源化学の分類と命名

出所：旭リサーチセンター作成。

2.2 各種化学による軽質オレフィン(エチレン、プロピレン)の製造法

図 2 に、石油化学、天然ガス化学、新石炭化学、バイオマス化学、リサイクル化学による軽質オレフィンの製造ルートを示す。

この中で、石油化学と天然ガス化学による軽質オレフィンの製造は歴史が古い。一方、この 15 年間に新石炭化学、バイオマス化学、リサイクル化学による軽質オレフィン製造が新たに追加された。さらに、将来 CO₂/H₂ 化学が発展して安価に e-メタノールを入手できるようになれば、MTO や MTP プロセスを使って軽質オレフィンを製造できるようになるであろう。

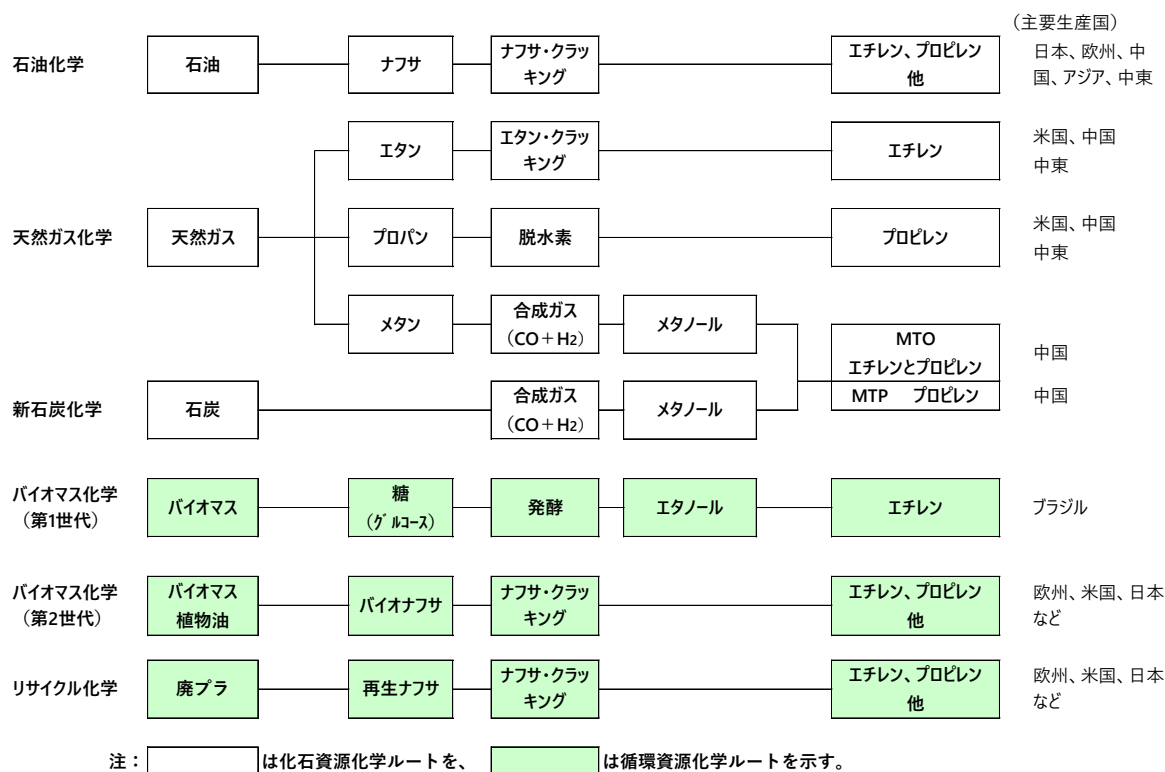


図 2 石油化学、天然ガス化学、新石炭化学、バイオマス化学、リサイクル化学による軽質オレフィン(エチレン、プロピレン)の製造ルート

出所：旭リサーチセンター作成。

以下に、図2の各化学による軽質オレフィン製造について簡潔に説明する。

- (1)石油化学：石油化学による軽質オレフィンの製造は、世界で最も多く採用されている方法である。日本は石油化学 100%で、他の方法での生産はない(この 15 年間も多様化は進まなかった)。
- (2)天然ガス化学：過去、米国は石油・天然ガスが枯渇気味で、石油化学・天然ガス化学は停滞気味であったが、シェールガスの発見によりエタン・クラッキングが復活した。2007～13 年頃、既存のナフサ・クラッキング工場はエタンフィードに大幅にシフトするとともにエタン・クラッキングの大規模工場が建設された。また同時に、プロパン脱水素によるプロピレン製造工場も建設された。
- (3)新石炭化学：中国は石炭を原料につくられたメタノールを出発物質として軽質オレフィンを製造する方法(CTO)を大規模に工業化した⁸。その技術のコアは MTO と MTP である。
- (4)バイオマス化学：2011 年に、Braskem(ブラジル)がバイオエタノールからつくられたエチレンを重合してバイオ PE の製造を開始した(第1世代(リアル))。次いで、2019～21 年に Neste(廃油脂を原料とする HVO メーカー)と契約を結んだ複数の化学会社が、HVO 由

⁸ 中国はこれを現代的石炭化学と呼び、従来の石炭化学(石炭原料のアセチレン化学)と区別している。

来のバイオナフサを使ってバイオ PE やバイオ PP などの製造を開始した(第 2 世代(マス バランス方式))。

(5)リサイクル化学:混合廃プラの熱分解で得られた再生ナフサは、既設のナフサ・クラッカー を使用してエチレン、プロピレン、ブタジエン、ブテン類、アロマ(BTX)が製造されている。

(6) CO₂/H₂ 化学:図 2 にはないが、中国の Jiangsu Sailboat(Petrochemical)が CO₂と H₂ 原料の e-メタノールを自社の MTO 工場に供給し、最終的にプラスチックをつ くらせているとの情報がある(39 頁の Jiangsu Sailboat の項参照)。

2.3 石油化学

15 年前には、ポリマーはほとんど石油化学で製造されていた。

石油化学とは、ナフサ・クラッカー(ナフサ分解)によるエチレン、プロピレン、ブタジエン、ブ テン類、分解ガソリン(BTX:ベンゼン、トルエン、キシレン)の製造と、それらの誘導品(化学品 やポリマー)の製造からなっている(図 3)。最終誘導品はプラスチック(PE、PP など)、合成ゴ ム、合成繊維、塗料、接着剤などポリマーがほとんどである。

ナフサ・クラッキング(ナフサ分解)は吸熱反応の上、高温(850℃)反応なので、エネルギー 使用量が極めて大きい(図 3)。カーボンニュートラル実現のため、燃料転換(例:通常の燃料 からアンモニア燃料への転換)やナフサの接触分解などが検討されている。

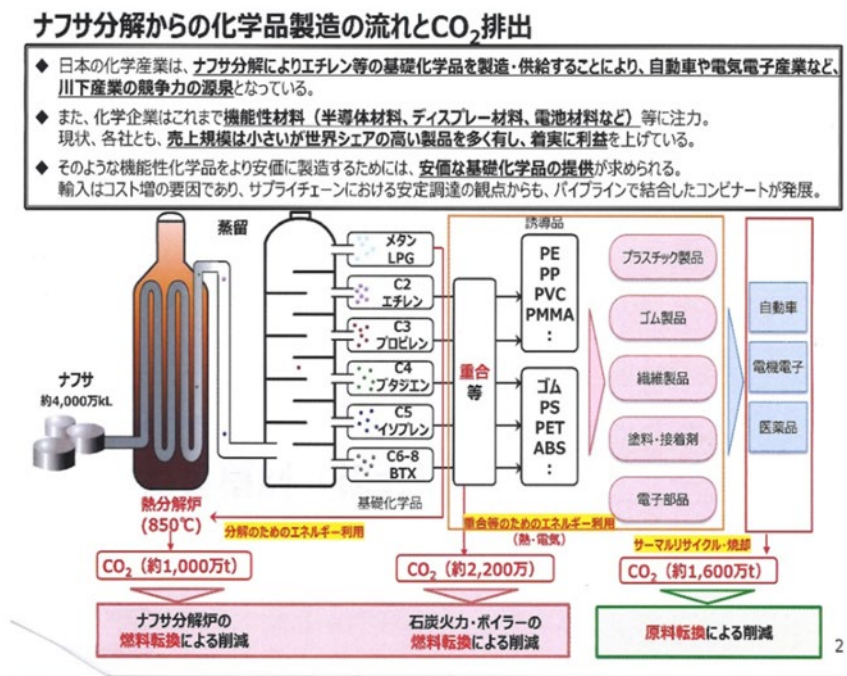


図 3 ナフサ・クラッキング(ナフサ分解)と誘導品

出所:経済産業省製造産業局 化学産業のカーボンニュートラルに向けた国内外の動向(2024年6月) https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/022.04.00.pdf

2.4 天然ガス化学

代表的なものは、エタン・クラッキングによるエチレン製造、プロパンの脱水素によるプロピレン製造である。

ここで、注意しなければいけないのは、エタン・クラッキングといっても、実際にはエタン原料だけでなくプロパンやブタンも原料に使用されていることである。エタンは高収率でエチレンを生成する。プロパン、ブタンを原料にすると、エチレン収率は下がるが、プロピレン収率は上がる(16 頁の図 7 参照)。エタンだけでなく、プロパン、ブタンを使用する理由は様々であろう⁹。このため、一概にエタン・クラッキングといっても原料ガス組成がどうなっているかを確認する必要がある。

米国はシェールガスとシェールオイルの発見の後、ナフサ・クラッキングから安価なエタンを原料に使用するエタン・クラッキングにシフトし、また大型のエタン・クラッカーが少なくとも 6 基新設された。石油化学からコスト的に断然有利な天然ガス化学へのシフトである。

米国の安価なエタン、プロパン、ブタンは、欧州、中国、インドに輸出された。例えば、欧州の Ineos は専用船を複数建造し、2016 年に米国から欧州や中国への輸送を開始した¹⁰。中国の複数企業とインドの Reliance Industries がエタン・クラッカーを建設した。その中には、Ineos Sinopec Tianjin Nangang project (Ineos と Sinopec (中国石油化工集団)の天津市での合弁事業)がある。

化学品などの市況・技術情報を提供する Argus Media が中国のエタン・クラッキングの状況を調査したりレポートを公表している(2024 年 12 月)¹¹。それによれば、「中国のエタン・クラッキングは 13 か所(総合計生産能力、990 万トン/年)である。その内、5 か所はエタン原料専用工場(計 460 万トン/年)、残り 8 か所はエタン、プロパン、ブタンの混合物を原料とする工場(計 530 万トン/年)である。中国の 2022(→2025)年の水蒸気分解¹²原料の比率は、エタン 7%、プロパン 7%、ブタン 1%、ナフサ 75%(→83%)、ガスオイル 10%(→2%)である。2021 年以降、エタン・クラッキングの収益性はナフサ・クラッキングを大きく上回る」とある。

現在、Ineos はベルギーのアントワープに新エタン・クラッカー(「Project ONE」)を建設中で、2027 年に稼働の予定である¹³。新クラッカーはエチレン生産能力 145 万トン/年、投資額 40 億ユーロである。完成時には、欧州の石油化学業界に大きなインパクトを与えるであろう。

⁹ ガス田にエタン、プロパン、ブタンを成分分離する装置がない場合や、プロパンとブタンは常温・低圧で液化しやすく輸送しやすいことなどが考えられる。

¹⁰ <https://cen.acs.org/articles/94/i12/Ineos-begins-shipping-US-ethane.html> (2016 年)

¹¹ <https://view.argusmedia.com/rs/584-BUW-606/images/CHE-Insight-paper-The-rise-of-Chinese-ethane-crackers.pdf> (2024 年 12 月)

¹² ナフサ・クラッキングとエタン・クラッキングはいずれも水蒸気分解である。

¹³ <https://project-one.ineos.com/en/about-project-one/>

2.5 軽質オレフィン&アロマ(BTX)製造についての石油精製との補完関係

エタン・クラッキングではプロピレンの生成量は少ないので、天然ガスの1成分であるプロパンの脱水素法工場が米国、中国、中東などで建設された。そのためのプロパンが、米国から中国に輸出されている。

また、米国では、歴史的に石油化学で不足するプロピレンを石油精製(ガソリン製造)のFCC(特にHS・FCC(ハイシビアリティのFCC))で製造し、同様に不足するアロマ(BTX)を接触改質(リフォーマー)で製造している(図4)。なお、各製法の生成物収率については16頁の図7と図8を参照。

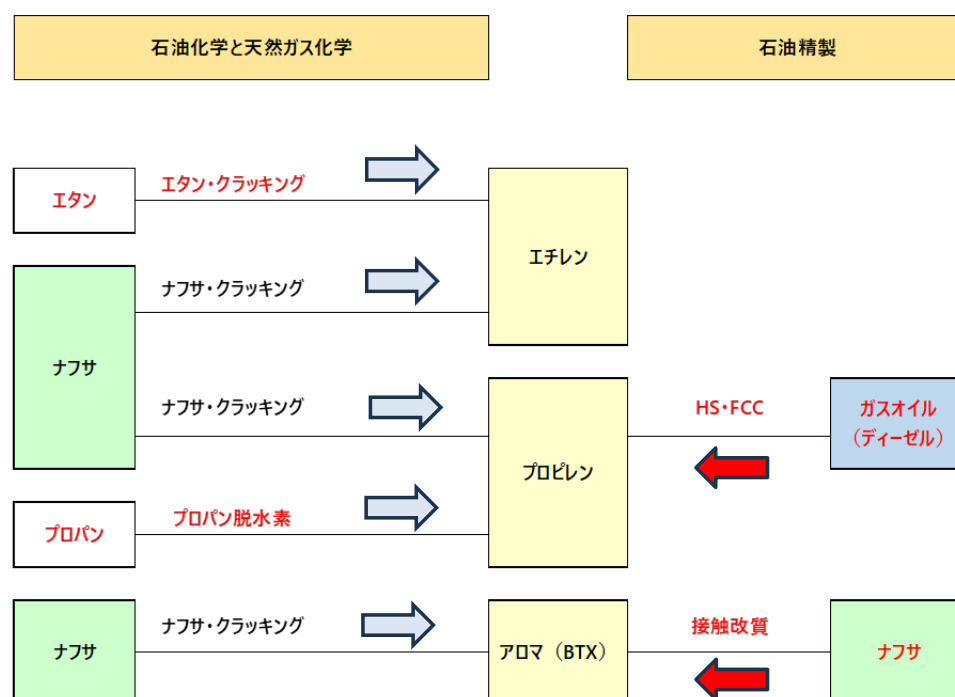


図4 米国におけるエチレン、プロピレン、アロマ(BTX)の製造ルート

出所：旭リサーチセンター作成

また、ブテンとエチレンのメタセシス反応によるプロピレンの工業的製造も行われている¹⁴。

¹⁴ 1. Industrial Catalyst News 触媒学会工業触媒研究会 No. 49 Aug. 1, 2010

<https://catsj.jp/wp/wp-content/uploads/2020/03/icn2049.pdf>

2. LyondellBasell は米国・テキサス州でメタセシスによるエチレンからプロピレンの製造を決定した。プロピレンの生産能力は40万トン/年である。(2025年3月)

<https://www.icis.com/explore/resources/news/2025/03/03/11079533/lyondellbasell-to-build-metathesis-unit-to-make-propylene/>

3. Technip Energies Propylene Metathesis using Clariant's MetaMax® Catalyst

<https://www.ten.com/sites/energies/files/2023-11/Metathesis-flysheets.pdf>

ブテンソースとしては、ナフサ・クラッキングや石油精製で発生する余剰のブテンを使用する場合と、エチレンの2量化反応でブテンを製造する場合(図5)がある。

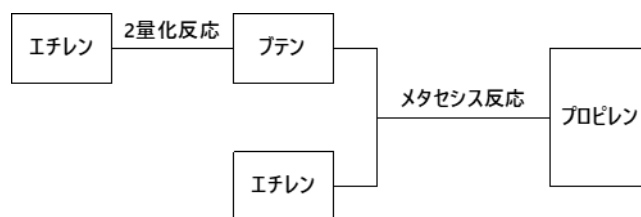


図5 メタセシス反応によるプロピレンの製造ルート

出所:旭リサーチセンター作成

OECD 資料(図6)によれば、北米のアロマ(BTX)とプロピレンの合計生産量の中の石油精製で製造される割合は80%という高い数字になっている。その割合は、ヨーロッパでは50%、アジア太平洋では60%、中東では59%となっている。

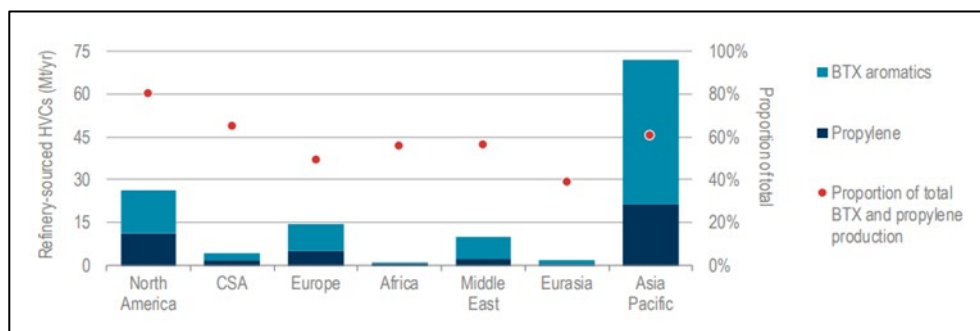


図6 地域別石油精製部門(FCC や接触改質)のアロマ(BTX)とプロピレンと生産量(百万トン/年)、およびアロマ(BTX)とプロピレンの全生産量に対する石油精製部門での生産比率(●印)

注:CSA は中南米

出所:The Future of Petrochemicals Towards more sustainable plastics and fertilisers
https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/10/the-future-of-petrochemicals_glg98d79/9789264307414-en.pdf (2018年10月)

公式データがなく、情報収集も十分でないが、表3に各地域のエチレン、プロピレン、アロマ(BTX)の製法別比率を推定した。数字はラフなイメージである。

表 3 各地域のエチレン、プロピレン、アロマ(BTX)の製法別比率の推定(ラフなイメージ)

製品		製法	日本	中国	米国	欧州	サウジ
エチレン生産量		2023年(千トン)	5,324	31,899	37,868	16,660	15,045
主要モノ マーの製法 別比率 (イメージ) (%)	エチレン	ナフサ・クラッキング	100	64	20	90	50
		エタン・クラッキング		18	80	10	50
		MTO		18			
	プロピレン	ナフサ・エタンクラッキング	90	35	35	55	50
		プロパン脱水素		15	25	5	10
		石油精製のFCC	10	30	40	40	40
		MTO & MTP		20			
	アロマ(BTX)	ナフサ・エタンクラッキング	40	40	20	40	40
石油精製の接触改質		60	60	80	60	60	

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

2.6 各種製造法における軽質オレフィン&アロマ(BTX)の生成物収率

図 7 は 2016 年に Honeywell UOP が発表した各種製造法の生成物収率である¹⁵。Honeywell UOP はプロパン脱水素法や MTO などのプロセスライセンサーである。また、図 8 は OECD が発表している同様な収率データである。

図 7 について、以下説明する。以下の①～③は図 7 の番号に対応している。

- ①エタン・クラッキングのエチレン収率は約 77%と高く、プロピレン、ブタジエン、分解ガソリンの収率は極めて小さい(各 1~2%)。
- ②エタン 70%とプロパン 30%の混合ガスをクラッキングすると、エチレン収率が約 62%に低下し、プロピレン収率が 9%に増加する。
- ③と④プロパンとブタンのクラッキングは、エチレン収率約 41%、プロピレン収率約 17%と軽質オレフィンの収率はエタン・クラッキングより低いが、ブタジエン収率が約 4%ある。

注：米国はナフサ・クラッキングが 10~20%で、ブタジエンができないエタン・クラッキングが 80~90%なので、ブタジエンが不足しているといわれる。実際にはエタン・クラッキングといってもエタンだけでなく、プロピレンやブタンのクラッキングも行われており、そこでブタジエンがある程度得られるので、それほど問題がないのかもしれない。

¹⁵<https://www.nationalacademies.org/read/23555/chapter/5#38> (2016 年)

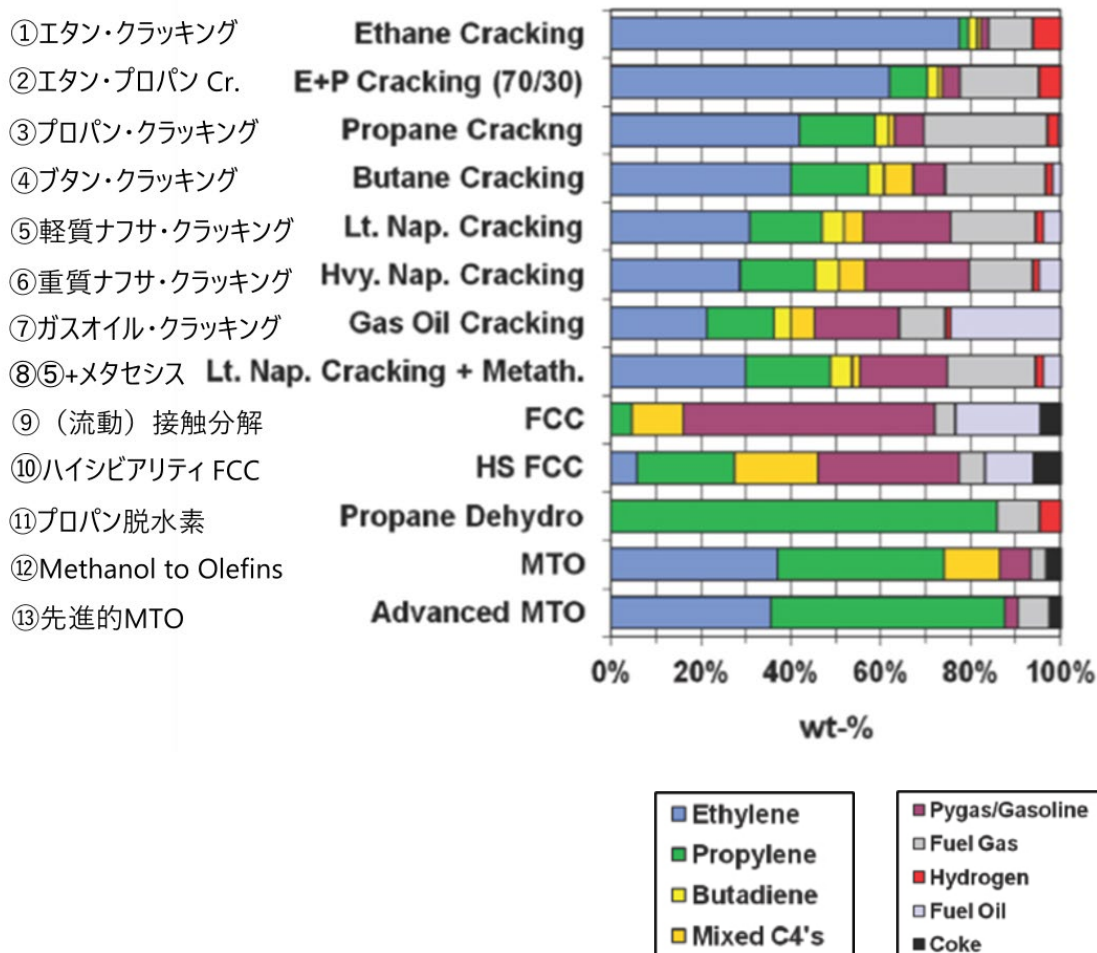


図 7 各種製造法によるエチレン、プロピレン、ブタジエン、C4 混合物、分解ガソリン、燃料ガス、水素、燃料油、コークなどの生成収率

出所: Honeywell UOP の Jeffery Bricker¹⁶

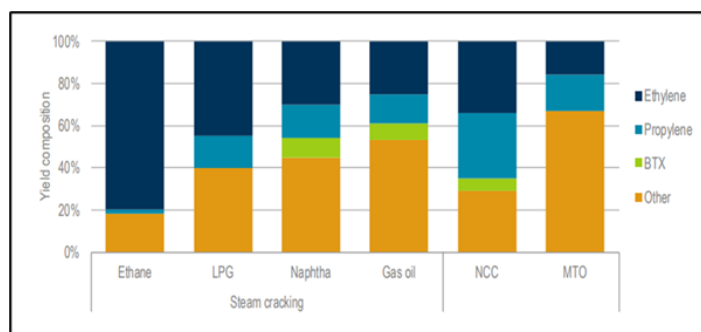


図 8 各種水蒸気分解等によるエチレン、プロピレン、BTX、その他の生成収率

注: NCC: naphtha catalytic cracking

出所: OECD、図 6 と同じ。

¹⁶<https://www.nationalacademies.org/read/23555/chapter/5>

- ⑤と⑥代表的なナフサ・クラッキングでは、有効成分のエチレン、プロピレン、ブタジエン、ブテン類、分解ガソリンがそれぞれ相当量得られる。
- ⑦ガスオイル(ディーゼル)のクラッキングは、有効成分の収率が、ナフサ・クラッキングに比べ劣る。そのため、原料のガスオイルはナフサよりも安価だが、ガスオイル・クラッキングの経済性はナフサ・クラッキングに比べ劣る。通常のナフサ・クラッカーはナフサ専用であるが、ナフサとガスオイルの両方が使えるようになっているクラッカーも少なくない。
- ⑧軽質ナフサ・クラッキングとそこで生成したエチレンをプロピレンに転換するメタセシス反応の組合せプロセスでは、軽質ナフサ・クラッキングに比べプロピレン収率が増加する。
- ⑨(流動)接触分解(FCC)は分解ガソリン(Pygas/Gasoline)の生成が多い。
- ⑩ハイシビアリティ FCC(HS FCC) はプロピレン収率が約 23%と高いので注目される。FCC やハイシビアリティ FCC はコーク(チャー)の生成が多い。
- ⑪プロパン脱水素では約 85%の高い収率でプロピレンが得られる。
- ⑫MTO はエチレン収率が約 37%、プロピレン収率が約 37%で、ほぼ 1:1 で得られる。
- ⑬MTO の副生成物であるブテン類などをさらに分解する先進的 MTO では、プロピレンが約 50%の高い収率で得られる。

2.7 新石炭化学

中国は石炭を原料に合成ガス経由でメタノールをつくり、これを MTO あるいは MTP のプロセスで軽質オレフィンを製造する方法を工業化した。この石炭を原料にするものは CTO という。中国はこれを現代的石炭化学と呼び、既存の石炭化学(石炭原料のアセチレン化学)と区別している。

MTO と MTP は、元々は欧州で開発された技術で、中国企業は技術導入した。一方、Sinopec(中国大手化学企業)は早い時期から独自技術を開発し、2010 年に中国初の CTO 工場を内モンゴルに建設し、稼働させた。

Wood Mackenzie によれば、「2019 年の中国の CTO と MTO で生産されるエチレン生産能力は 521 万トン/年で、エチレン全生産能力の 21%である¹⁷。2010 年以降の石油高で CTO、MTO はこれまで好調であったが、環境問題(CO₂ 排出量が多い¹⁸)、石油価格の低下、新規の大型水蒸気分解設備の建設計画(ナフサ・クラッカーとエタン・クラッカー:19 基、合計 1,970 万トン/年)があることから、MTO・CTO 投資は減速の見込みである」。

¹⁷ <https://www.woodmac.com/news/can-chinas-cto-and-mto-industries-survive-the-threat-of-massive-steam-cracker-investment/> (2019 年)

¹⁸ ナフサ・クラッキング(2 kg-CO₂/kg-olefin)に比べ、CTO は CO₂ 排出量が約 5 倍(10 kg-CO₂/kg-olefin)である。出所:経済産業省『化学産業のカーボンニュートラルに向けた国内外の動向』、6 頁(2023 年 1 月)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/013_04_00.pdf

露天掘りの安い石炭を原料に製造されたメタノールはコストが安いので、CTO はコスト競争力がある。当時、国際価格のメタノール(天然ガス由来)を原料にする MTO は採算に合わないといわれ、MTO を開発した欧米企業(Ineos など)は工業化を断念していた。ところが、中国は CTO 工場建設と並行して、市場の国際価格のメタノール(天然ガス由来)を原料に使用する MTO 工場を中国沿岸部に建設した。中国政府が石油を使用しない CTO と MTO を強力に支援したものと考えられる。

そして中国は現在、CO₂とH₂を原料とする e-メタノールの開発と製造に力を入れている。生産された e-メタノールは主に船舶燃料として販売している。将来スケールアップでコストが下がれば、CO₂ 排出量が少ない e-メタノールを MTO と MTP の原料に使用するだろう¹⁹。

2.8 バイオマス化学

2.8.1 バイオマス化学とリサイクル化学の関係

2012 年にサーキュラーエコノミー(CE:循環経済)が、Ellen MacArthur 財団によって提唱された(図 9)。CE の 2 本柱は図9の左側の再生可能資源を原料とするバイオマス化学と図 9 の右側の枯渇性資源(化石資源)のリサイクル化学である。

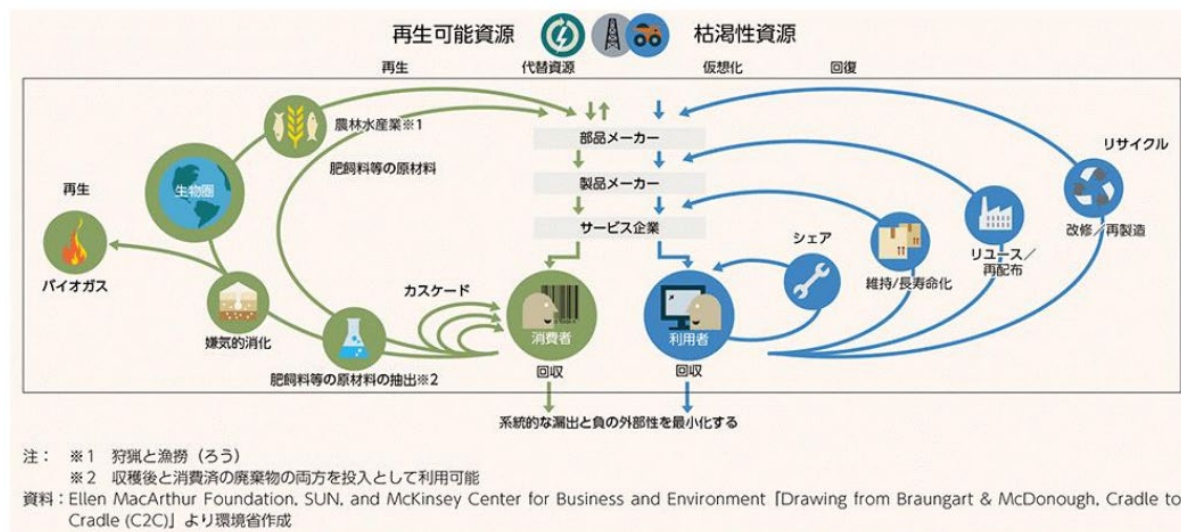


図 9 Ellen MacArthur 財団の循環経済(CE)の図

出所：環境省資料：https://www.env.go.jp/recycle/2matt04_2.pdf

このバイオマス化学とリサイクル化学は二者択一ではなく、どちらも循環経済社会実現に必須の技術である。バイオマス原料由来ポリマーも使用後はリサイクルしなければならない。また、

¹⁹39 頁(4)に記載の Jiangsu Sailboat (Jiangsu Sailboat Petrochemical) は CO₂/H₂ 原料由来のメタノールから MTO を使って軽質オレフィンの製造を行っている と推定される。

プラスチックのMR工程で発生するロス分をバイオマスプラスチックで補充したら、より理想的な循環資源化学になる。

2.8.2 バイオマス化学による化学品とプラスチックの製造

バイオマス化学により、バイオマス由来の化学品・プラスチックが製造される。

(1) バイオエチレンと第1世代(リアル)のバイオPEの製造

過去15年間のトピックスは、2011年にBraskem(ブラジル)がバイオエタノールからエチレン(バイオは適宜省略)とバイオPEの製造を開始したことである。これを第1世代(リアル)のバイオPEと呼ぶ。同社の現有生産能力は26万トン/年で、2030年までに100万トン/年に増設する計画がある。

(2) 第2世代(マスバランス方式)のバイオPEやバイオPP

第1世代のバイオPEに続いて、2019年に第2世代(マスバランス方式)のバイオPEとバイオPPが登場した。廃油脂由来のHVO製造時の副産物であるバイオナフサや木材のトール油からのバイオナフサを原料として、ナフサ・クラッキングと重合で製造されたバイオPEやバイオPPなどである。この場合、PEやPPなどのバイオマス含有量はマスバランス方式によって決められる。

Neste(フィンランド)がHVO由来のバイオナフサ、UPM(フィンランド)が木材由来ナフサの生産を開始した。2019~21年に世界の大手化学会社が相次いでこの2社と供給契約を結び、ISCCの認証も取得した²⁰。現状、供給契約とISCC認証は継続しているが、実際のバイオPEやバイオPPの生産量は限られている²¹。バイオナフサが石油ナフサよりかなり高く、供給量も限られているためである。

(3) バイオエタノールを原料とするバイオPEやバイオPP製造の製造計画

2022~23年にかけて、Lummus Technology & Citroniq Chemicalsなど4グループの製造計画が発表された²²。このように発表が集中したのは、バイオエタノールを化学品原料に近々使用しやすくなるという情報が当時あったのだろうか。4グループの当時の計画とその後の情報を脚注にまとめた²³。特にその後の進展はない。技術として注目されるのは、

²⁰ ARCレポート:バイオマスプラスチックとバイオマス化学の動向(上) https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1067.pdf (2024年3月)

²¹ バイオPEは第1世代と第2世代を合わせて、約22万トンである(21頁参照)。

²² ARCレポート:バイオマスプラスチックとバイオマス化学の動向(上) 15~16頁 https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1067.pdf (2024年3月)

²³ 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ことを発表した。米国の最初のプラント(Nebraska州)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Lummus“Verdene”PP技術を使用して、北米で4つのプラントを建設することで合意した。総投資額は50億ドル以上である。

Lummus Technology が保有するメタセシス反応によるエチレンからプロピレンの製造技術である(14 頁の図 5 参照)。

(4)日本のバイオエタノール誘導体製造に関する研究開発

住友化学はカーボンニュートラルなバイオエタノールからエチレンをつくり、エチレンから触媒反応によりプロピレンをつくるプロセスを開発中である²⁴。既に、同社はバイオエタノールからエチレンを製造する製造試験設備を千葉工場に新設している。

また、旭化成はゼオライト触媒を用いてバイオエタノールからエチレン、プロピレン、アロマ(BTX)を併産する E-Flex 法プロセスを開発中である。

最近のプレスリリースによれば、三菱ケミカル、三井化学、旭化成は共同でバイオエタノール原料に使用する「Revolefin」プロセスを共同開発する²⁵。「Revolefin」プロセスは E-Flex 技術をベースにしたものと推定される²⁶。

“Verdene”には、エタノールからエチレンへの変換技術、2 量化技術(2-ブテン生成)、オレフィン変換技術(メタセシス反応)、PP 製造技術の 4 つが含まれる。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。

(出所) a. アイシーラボ代表の室井高城氏からの情報提供

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

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

追加情報:2025 年 8 月 26 日に、ABB は統合された自動化、電化、デジタル技術を、契約に基づき、Citroniq Chemicals の Nebraska 州のバイオ PP 工場に導入して効率的な工場運営を実現することを目指すことを発表した。Citroniq Chemicals の Nebraska 工場の稼働は 2029 年の予定である(当初計画より 2 年遅れている)。<https://new.abb.com/news/detail/128365/abb-and-citroniq-target-a-world-first-with-100-bio-based-polypropylene-facility>

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。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。

追加情報:2024 年 3 月に New Energy Blue は、エチレン製造と SAF の製造のために子会社 New Energy Blue chemicals を設立した。主目的のエチレン製造のための投資決定はまだされていない模様。

③ Gevo(米国):同社は 2023 年 4 月 12 日、LG Chem(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。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”:US Patent No.12,486,207)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。

追加情報:2024 年 12 月 12 日に Gevo と LG Chem はバイオプロピレン共同開発契約を延長することを発表。

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。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。追加最新情報なし。

²⁴ 住友化学プレスリリース:エタノールからプロピレンを直接製造する独自プロセスのスケールアップを達成～石油化学産業の原料転換に貢献する新技術の実証を加速～ (2025 年 8 月)

<https://www.sumitomo-chem.co.jp/news/detail/20250820.html>

²⁵ <https://www.asahi-kasei.com/jp/news/2025/ze260127.html>

旭化成のプレスリリース抜粋:今後、経済産業省所管支援事業を活用し、旭化成が開発中のバイオエタノールからエチレン・プロピレンなどのグリーン基礎化学品を製造する技術「Revolefin」を用いた初期生産設備を、旭化成の水島製造所に設置する。設備性能・運転・操作面に関する確認を経て、2034 年度に 3 社共同でのグリーン基礎化学品の商用生産開始を目指す。

²⁶ 旭化成のウェブサイト:旭化成では、基礎化学品と呼ばれるエチレンやプロピレンなどの軽質オレフィン、ベンゼン、トルエン、キシレンなどのアロマティクスを、化石資源に代わり、植物由来のエタノールから製造する技術「Revolefin」を開発している。https://www.asahi-kasei.co.jp/biobased/biobased_materials/

(5)化学品のトピックス:Avantium(オランダ)のバイオ FDCA(フランジカルボン酸モノマー)と100%バイオのPEF(ポリエチレンフラノエート)の工業化

2025年にAvantiumが、それまで製造が難しくネックであったバイオFDCAの工業的生産に成功した。バイオFDCAとバイオモノエチレングリコール(バイオMEG)を縮合すると、100%バイオのPEFが製造できる。バイオPEFの本格生産も始まっている。バイオPEFはPETよりもガスバリアー性に優れるのが特徴で、同社は複数の企業と用途開発を進めている。

(6)バイオマスプラスチックの世界の生産量

European Bioplastics (EUBP)の発表によれば、2025年のバイオマスプラスチックの生産量は167万トン²⁷で、全プラスチックの0.4%を占めるに過ぎない。その内訳は非生分解性のものが58.0%で、生分解性のものが42.0%である。

非生分解性の内訳は、PA(ナイロン:N6,10やN10,10など)20.9%、PTT16.1%、**PE 13.1%(22万トン)**、**PET 4.2%(7万トン)**、APC2.2%、PP1.4%、PEF0.1%である。また、生分解性の内訳はPLA23.0%、SCPC(デンプンブレンド)4.5%、PBAT4.7%、PHA4.5%、CR(セルロース系)4.2%、PBS0.8%、CP(セルロース系)0.2%である。

2.8.3 バイオマス化学によるバイオ燃料の製造

再生可能なバイオ燃料として、ガソリンにはバイオエタノールがブレンドされ、ディーゼルにはFAME(EMAG)やHVOがブレンドされる。FAMEとはFatty Acid Methyl Ester(脂肪酸メチルエステル)のことで、菜種油やパーム油をメタノールとエステル交換反応させて製造される。HVOはHydrotreated Vegetable Oil(水素化処理植物油)のことで、廃食油や植物油を水素化処理し、酸素を含まない炭化水素にしたものである。HVOは化学構造的にディーゼルに近いので、品質が同等のドロップインプロダクトとして生産量が伸びている。HVOの製造時の副産物はバイオナフサで、これから第2世代(マスバランス方式)のバイオPEやバイオPPが製造される。

²⁷ <https://www.european-bioplastics.org/eubp-presents-the-results-of-the-2025-market-data-report/>の<https://www.european-bioplastics.org/news/multimedia-pictures-videos/>を参照。

図 10 に、バイオエタノールとバイオディーゼル(FAME(EMAG)や HVO)の消費量推移を示す。

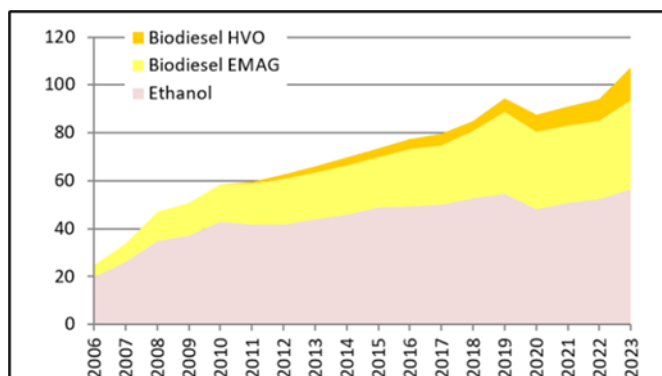


図 10 バイオエタノール、バイオディーゼル(EMAG(FAME))、

バイオディーゼル(HVO)の消費量推移(単位 Mtoe(石油換算トン))

出所:IFPEN, from S&P Global

<https://www.ifpenouvelles.com/article/biofuels-dashboard-2024>

15年前の2011年のバイオエタノールの消費量は既に、2023年のレベル(5,670万トン)の約70%になっている。米国、ブラジル、欧州の消費量が多い。一方、2011年にバイオディーゼル(FAMEとHVO)はバイオアルコールの2分の1以下であったが、その後連続して増加し、2023年にはほぼ同じ使用量(約5,000トン)になっている。欧州、米国、インドネシアの消費量が多い。バイオディーゼルの中では、ドロップインプロダクトであるHVOの伸びが顕著である。

バイオエタノールは主にサトウキビ、トウモロコシから、バイオディーゼルはパーム油、菜種油からつくられる。原料がいずれも可食性で食料品と競合すること、農産物生産地の環境やそこで働く人の人権の問題があり、増産は難しい状況にある。

また米国、欧州、インドネシア、ブラジルなどでは、バイオエタノールやバイオディーゼルの再生可能燃料として使用することが法的に義務づけられている。このためバイオエタノールやバイオディーゼル(ナフサ)はバイオ燃料用途に優先的に使用され、バイオプラスチック原料には回ってこないともいわれる。

その他、バイオマス由来CO₂とH₂を原料に、e-fuelやe-メタノールを製造する方法も工業化されている(表4と表5参照)。

2.8.4 ATJ(アルコール to ジェット)

最近のバイオ燃料のトピックスは、バイオエタノールを原料とする持続可能なジェット燃料(SAF)の開発である。LanzaTechとLanzaJetはバイオエタノールを脱水してバイオエチレンを製造し、これをオリゴマー化²⁸、水素添加、蒸留の工程を経てSAFを製造するプラント

²⁸ エチレンを2量化して得られるブテンをさらに2量化する方法と推定される。

を建設し、2025年から稼働を開始した²⁹。また、出光興産はバイオエタノール由来のバイオエチレンを2量体化してブテンとし、さらにそれを2量体化してオレフィン4量体にした後、SAFを製造する技術を開発中である³⁰。

2.8.5 バイオエタノール(以下、エタノールと略す)の製造

(1) サトウキビとトウモロコシの発酵によるエタノールの製造

サトウキビを原料とするエタノール製造はブラジル、インドネシア、タイなどで行われている。サトウキビはグルコースなので前処理なしに発酵工程に投入できる。サトウキビは荒地の利用で、新規栽培が可能といわれる。

トウモロコシを原料とするエタノール製造は米国を中心に行われている。2016年頃米国政府はバイオ燃料用エタノールに補助金を出していたが、現在も形を変えて補助は続いている(2016年頃、補助金が出ているエタノールは化学用に使用できない規定があった)。トウモロコシは前処理してグルコースに代えてから発酵工程に投入してエタノールを製造する。

サトウキビ原料のエタノールの方が、トウモロコシ原料のエタノールよりもLCA³¹的に優れているとの試算が発表された。ブラジル産サトウキビ原料のエタノールの炭素強度³²(LCAベース)は32.8gCO₂e/MJ、米国産トウモロコシ原料のエタノールの炭素強度(LCAベース)は、90.8gCO₂e/MJとなっている³³。

(2) セルロース系エタノール

非可食性のセルロース原料のエタノール製造技術の開発と生産が精力的に行われたが、ほとんどが失敗に終わった。2016~20年に、Abengoa Bioenergy、Dupont、POET-DSMなどの大手メーカーは撤退した。当時、残ったのはBeta Renewables(イタリア)だけであった。同社も倒産したが、ENIグループのVersalis(イタリア)が2018年に買収し、2022年に再スタートした³⁴。

²⁹ <https://ir.lanzatech.com/news-releases/news-release-details/worlds-first-commercial-ethanol-jet-fuel-plant-operational> (2025年11月)

³⁰ <https://www.nedo.go.jp/content/800017532.pdf>

³¹ LCA (Life Cycle Assessment): LCAとは、その製品に関わる資源の採取から製造、使用、廃棄、輸送などすべての段階を通して、投入資源あるいは排出環境負荷及びそれらによる地球や生態系への環境影響を定量的、客観的に評価する手法である。

³² 炭素強度とは、エネルギー消費あたりの二酸化炭素排出量

³³ JETROレポート、

<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2025/1103/54a58b8fccf3ce9c.html> (2025年12月) 国際民間航空機関(ICAO)文書(2024年10月)からJETROが作成

³⁴ <https://versalis.eni.com/en-IT/portfolio/technologies-licensing/technologies-production-renewable-raw-materials.html>

<https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2022/02/versalis-the-production-of-bioethanol-up-and-running-at-crescentino.html>

最近、セルロース由来のエタノールの製造が小規模ながらリバイバルしている³⁵。そのメーカー6社は、いずれも高付加価値のSAFの原料用途(ATJ)に焦点を当てている。

既に企業化しているのは、Raizen(ブラジル)、GranBio(ブラジル)、EcoCeres(中国・香港)の3社であり、その他に開発中のところが3社ある。Raizenは現在30mgy(mgy:年産百万ガロン)の生産能力があり、180mgyの工場を計画中である。GranBioは40mgyの工場を計画中である。EcoCeresは生産能力を開示していない。

バイオ原料としては、サトウキビのバガスやストロー、農業廃棄物、エネルギーグラス(energy grass)、コーンストーバー、バイオマス残渣である。

リバイバルのセルロース系エタノールは高価格のSAF用途では採算に合うだろうが、汎用用途でも採算に合うかどうかは注視しなければならない。

2.8.6 バイオマス化学の代表的事業化と開発の例

図11に、バイオマス化学の代表的な事業化例と開発例を、バイオマス原料から最終製品までのフローの形でまとめた。この内、バイオブタジエンー合成ゴムの製造とバイオパラキシレンーバイオテレフタル酸ーバイオPET100の製造は開発段階である。

³⁵ James Primrose(Stillwater Associates):Cellulosic Ethanol – Is a revival underway?
Mar 21, 2025 <https://stillwaterassociates.com/cellulosic-ethanol-is-a-revival-underway/>

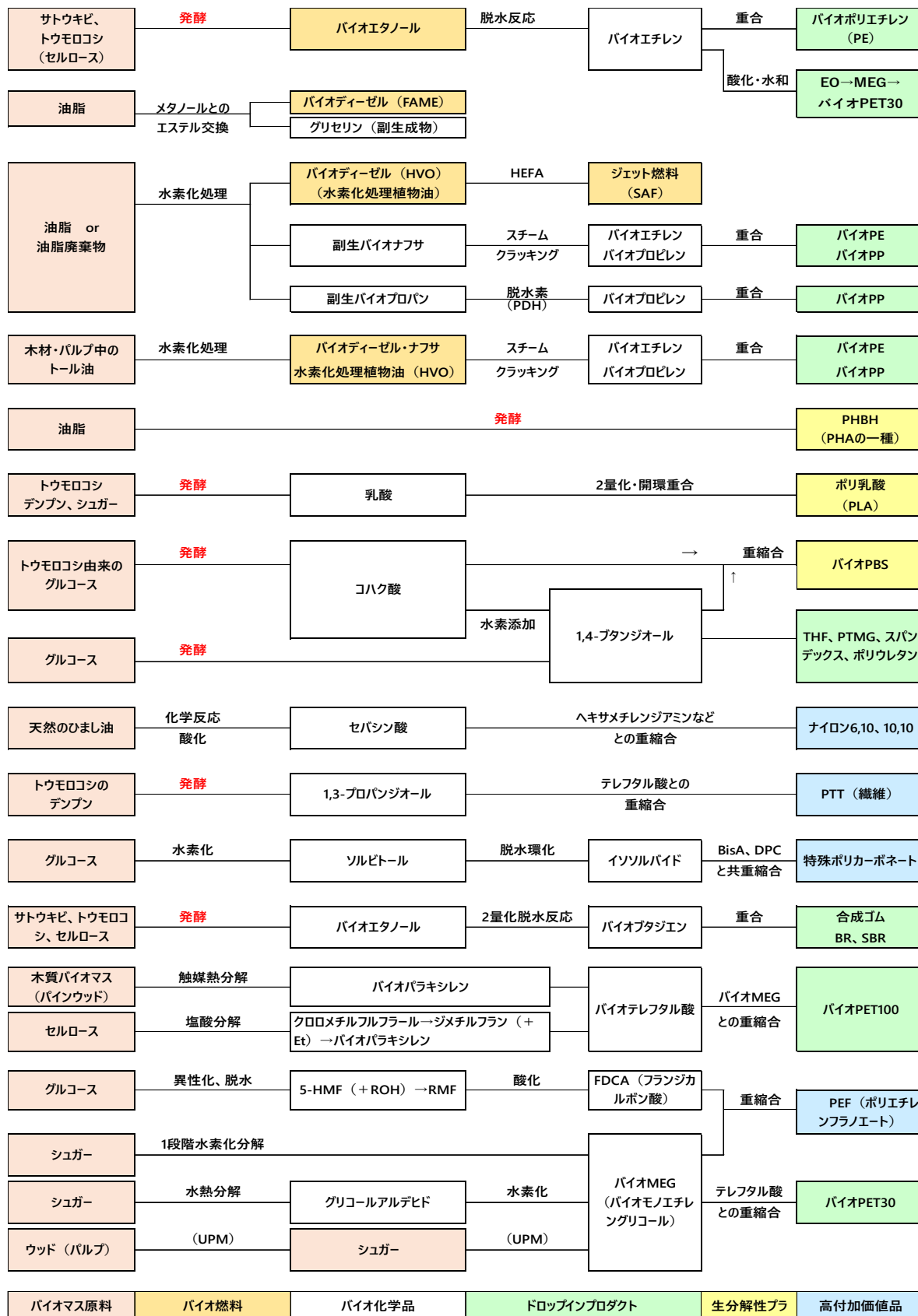


図 11 バイオ燃料、バイオ化学品、バイオマスプラスチックの製造ルート

出所: 旭リサーチセンター作成。

2.9 リサイクル化学

ポリマーのリサイクルには、MR と CR がある。MR は CR に比べ工程が短くコストが安い。PET ボトルでは理想的なボトル to ボトルのクローズドループの MR が実現している。PET 以外では MR に使用できる良質な廃プラは限られており、再生材の品質がバージン材に比べ劣ることが多い(物性、色、臭い)。このため、MR を補完するものとして、CR が注目されている。

CR には、熱分解法、解重合法、ガス化法などがある。このうち、廃プラスチックのメインを占める混合廃プラ(PE/PP/PS)は熱分解に適しているため、それを原料とした熱分解法 CR の工場が世界で建設中である。図 12 に年次別の建設された CR 工場と 2026~27 年の建設予定工場の廃プラ処理能力を示す。総合計 68 万トン/年になる。

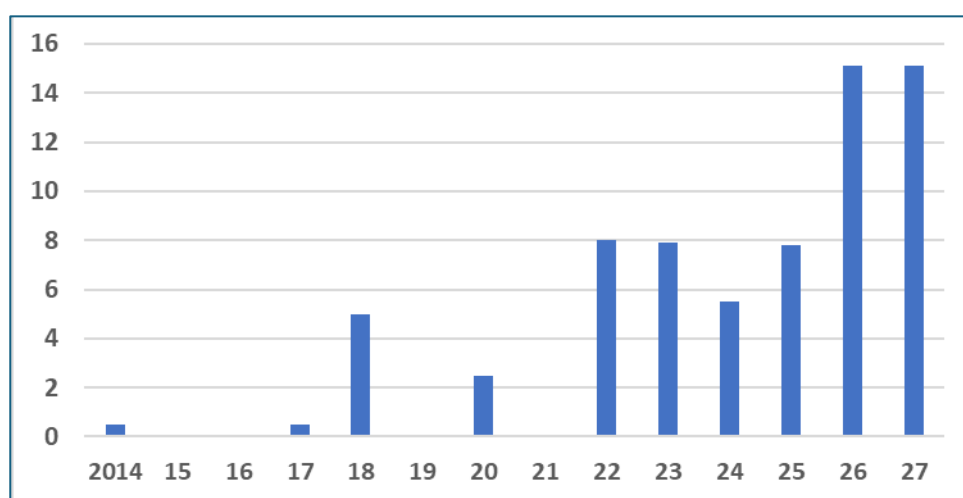


図 12 世界の熱分解法 CR 新工場の廃プラ処理能力(単位:万トン/年)の年次推移

注:2026~27年については2年間の廃プラ処理能力を平均化した。

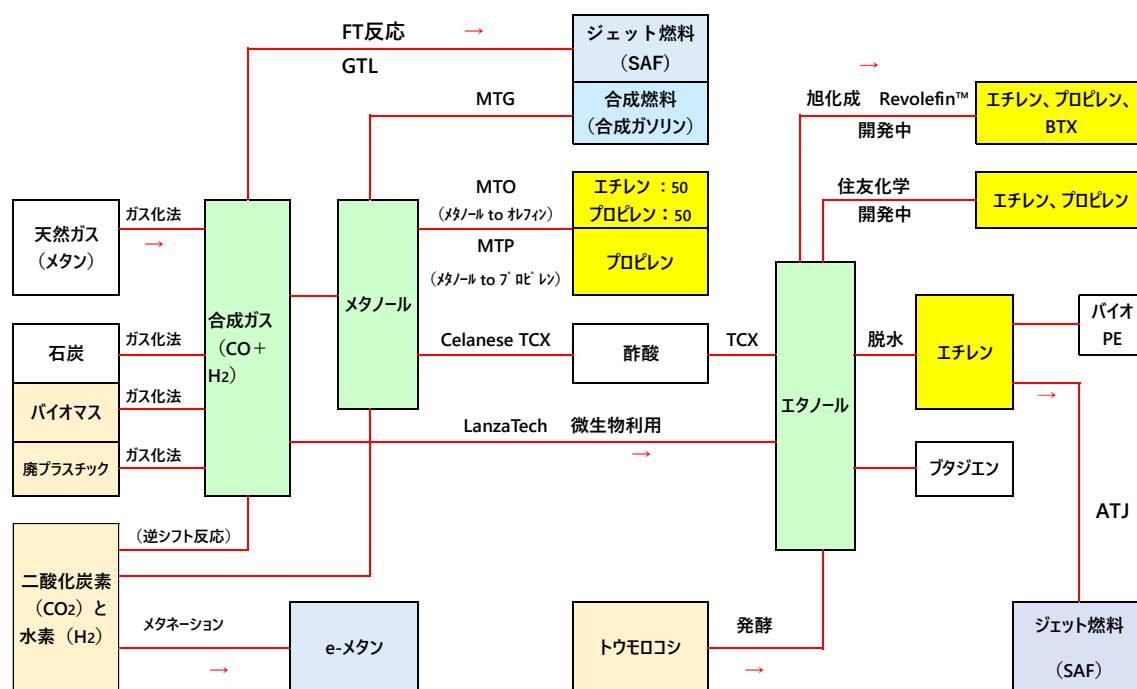
出所:旭リサーチセンター作成。

熱分解により得られた再生ナフサは既存のナフサ・クラッカーで水蒸気分解して軽質オレフィンが得られる。それらを重合すれば、品質がバージン並みの PE や PP が得られ、クローズドループが完成する。熱分解法 CR 技術は課題があり、究極のプロセスを求めて研究開発競争が続いている(参考文献(8)参照)。

また、石油精製工場で、粗熱分解油の水素化処理や高沸分を FCC で分解してナフサ収率をアップさせる方法が工業化されている。また、廃プラをシビアな FCC(HS(High Severity)FCC)に直接投入する方法や、廃プラの熱分解で直接軽質オレフィンやアロマ(BTX)を得る方法も発表されている。今後、まとめて紹介したい。

3. 合成ガス・メタノール・エタノールの化学工業体系

近年、従来の石油化学や天然ガス化学の体系とは別に、合成ガス・メタノール・エタノールの化学工業体系が注目されている³⁶(図13)。



注：合成の流れは赤矢印(→)で示すように、全て左から右である。

図13 合成ガス・メタノール・エタノールの化学工業体系

出所：旭リサーチセンター作成。

これは合成ガス・メタノールの原料に、従来の石油³⁷、天然ガス、石炭に加えて、バイオマス、廃プラスチック、CO₂/H₂などの持続可能資源を使用するようになってきたためである。持続可能資源を原料に使う場合にも既存の合成ルート(プラットフォーム)をそのまま利用できるメリットがある。既存プラットフォームとしては、合成ガスやメタノールからの化学品(酢酸、軽質オレフィン(MTO、MTP)、エタノール)やGTL(Gas to Liquid:天然ガスから合成ガスを経て、液体燃料(合成燃料)を製造)やMTG(Methanol to Gasoline)による合成燃料製造などがある。

³⁶ 合成ガス・メタノール化学工業体系は、使用する原料資源の幅が広く、石油化学からCO₂/H₂化学までの6つの化学のどれかに分類することができない。それで、別建てのこの章で説明する。

³⁷ 石油から合成ガスをつくることは技術的には全く問題なくできる。ただし、石油は高価格であり、石油から合成ガスをつくる企業はない。図13では石油は省略した。

また、合成ガス・メタノールの化学工業体系は CO₂/H₂ 化学と関係するところがあるので、図 13 には CO₂/H₂ 化学の合成ルートも載せた。

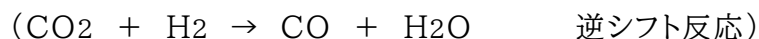
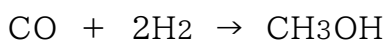
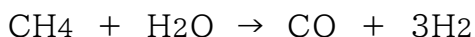
またエタノールの誘導品開発は、前述のように、バイオエタノール誘導品が中心で、各種バイオ燃料やバイオ化学品・バイオマスプラスチックの開発・事業化が進められている(これについては 2.8.2(19 頁)を参照)。

3.1 合成ガスの製造法と誘導品の展開

合成ガスはメタノールや合成燃料などの原料として重要である。

3.1.1 天然ガス(メタン)からの合成ガスとメタノールの製造

現在、メタノール(CH₃OH)は、メタンの水蒸気改質でつくられた合成ガスを原料に、工業的につくられている。次式に示されるように、化学量論的には CH₄(メタン)1 モルに対して H₂(水素)が 3 モル生成する。メタノール合成には 1 モルの CO(一酸化炭素)に対して 2 モルの H₂ で十分なので、H₂ が 1 モル余分になる。過剰な 1 モルはパージするか、CO₂(二酸化炭素)を系に入れて逆シフト反応で CO に変換する。



メタンから合成ガスを製造する工程は触媒使用の高温 750℃、合成ガスからメタノールを製造する工程は触媒使用の高圧 200～300 気圧の厳しい条件である³⁸。なお、最近は触媒改良で圧力が 50～100 気圧くらいまで下がった³⁹。

3.1.2 石炭からの合成ガスの製造

中国は石炭の水蒸気改質でつくった合成ガスを原料にメタノールを製造している。得られたメタノールは MTO や MTP などに使用される。石炭の水蒸気改質は CO₂ の発生量が、メタンの水蒸気改質より多い。化学量論的にいうと、メタンの水蒸気分解では、合成ガス(CO

³⁸ [水蒸気改質工程] 天然ガス(メタン)は水蒸気および CO₂ と混合され、改質炉で水性ガスに改質される。反応条件は、750℃、23 気圧、Ni 系触媒である。

出口ガスは原料 CH₄ 1mol あたり CO 0.74mol、CO₂ 0.29mol、H₂ 3.29mol、H₂O 2.0mol の組成。メタノール合成に必要な組成は量論的には H₂:CO=2:1 である。

[メタノール合成工程] 原料ガスを遠心式圧縮機により 200～300 気圧に加圧し、250～400℃の触媒層(触媒:Cu-Zn-Cr 系触媒)を通すことで合成反応を行う。一回通過転化率 67%。発熱反応であるため、反応ガスの一部を循環して反応温度を 300℃前後に制御する。生成物を冷却回収し、ガスは一部をパージし、残りは循環される。リサイクル比は 4～6。

[精製工程] 合成工程の生成混合物のメタノール 77%、水 22%、微量のエタノールと副生成物を 2 塔の蒸留塔で分離精製する。 出所:化学工学会 https://www0.scej.org/education/me_home.html

³⁹ <https://www.chiyodacorp.com/jp/service/transionenergy/gtl/>

+ 2H₂)を CO₂ の発生なく製造できるのに対し、石炭では同じ組成の合成ガスをつくるのに は 2CO₂ が発生する。

3.1.3 バイオマスからの合成ガスの製造

現在注目されているのはバイオマス原料から製造されるカーボンニュートラルな合成ガスである⁴⁰。バイオマスの小型ガス化装置が数多く販売されており⁴¹、また大型ガス化装置も開発されている。バイオマスの代表であるセルロース (C₆H₁₀O₅)_n は、分子構造中に酸素を含み、CH の含有量が 51%と低い。このため合成ガスの収率が低く、また酸素を供給してセルロースの一部を燃焼させながらガス化する場合には、燃焼熱が低いためガス化炉の温度が上がりにくいといわれる⁴²。

3.1.4 廃プラと可燃ごみからの合成ガスの製造

2003 年以來、レゾナック(旧昭和電工)が川崎で廃プラのガス化工場を稼働している。廃プラと少量の純酸素を供給し、2 段の高温熱分解反応で合成ガスを製造している。得られた合成ガスはシフト反応(CO + H₂O → H₂ + CO₂)により全量水素に転換した後、隣接するアンモニア工場で窒素と反応させてアンモニアを製造している。

一方、積水化学は LanzaTech と提携し、また政府の支援を得て、2022 年から岩手県久慈市で「一般廃棄物 - (ガス化) - 合成ガス - (発酵) - エタノール」の合成ルートの実証試験に取り組んできた⁴³。ところが、同社は 2025 年 12 月に実証試験を中止し、プロジェクトを撤収、清算することを発表した⁴⁴。

3.2 エタノールの製造法

3.2.1 メタノールからエタノールの製造

Celanese は、メタノール原料を用いて酢酸経由でエタノールを製造する TCX プロセスを中国で大規模に工業化している。

⁴⁰2011 年発行の三菱重工のバイオマスのガス化・液体化の総説

<https://www.mhi.com/jp/technology/review/sites/g/files/jwhtju2326/files/tr/pdf/483/483041.pdf>

⁴¹「国内におけるバイオマス小規模ガス化発電の最新の動向と課題」 株式会社 PEO 技術士事務所技術士(総合技術監理・衛生工学部門) 笹内謙一、出所:日本エネルギー学会 100 周年記念企画/日本エネルギー学会【リサイクル・バイオマス・ガス化】三部会(RGB)シンポジウム 講演要旨

⁴²PE や PP の廃プラは CH の含有量が 100%であること、ガス化の際に酸素を供給して燃焼させる場合は燃焼熱が高いためガス化炉の温度が上がりやすい特徴がある。

⁴³ https://www.sekisui.co.jp/news/2022/1373478_39136.html

⁴⁴ https://www.sekisui.co.jp/news/pdf/251211_1.pdf

発表抜粋:「岩手県久慈市のプラントにおいて、BRエタノール技術の実用化の目処は立ちましたが、商用化について一旦見送り、本プラントを撤収、清算することとしました。これに伴い、単体決算及び連結決算において、下記の特別損失を計上する見込みです。【連結】減損損失 14,829 百万円(単体は省略)」

Enerkem(カナダ)はレゾナックと同様、廃プラのガス化で合成ガスを製造し、これをメタノールに変換した。そして、このメタノールをエタノールに変換し、先進バイオ燃料として販売していた。しかし、メタノールからエタノールへの転換プロセスが順調に稼働せず、全体のプロセスを2024年に廃棄した。なお、メタノールからエタノールを合成する工程は、COによるカルボニル化反応で酢酸メチルをつくり、それを還元してエタノールにする方法である。

最近、カナダで Enerkem、Shell などによるメタノール合成の新たな産官プロジェクトが発表されている(38頁の表5)⁴⁵。プロジェクトは、リサイクルできない廃棄物やバイオマス残渣のガス化とグリーン水素による e-メタノールの製造を目指している。

3.2.2 合成ガスからの直接エタノール合成

LanzaTech(米国)は微生物利用発酵法で合成ガスからエタノールを直接製造する方法を2018年に工業化している(中国で製鉄工場の排ガス(合成ガス)を原料に利用)⁴⁶。画期的な技術である。

⁴⁵ <https://industrydecarbonization.com/news/is-enerkems-waste-gasification-technology-a-failure-or-a-promising-climate-solution.html> (2025年)

⁴⁶ <https://www.mitsui.com/solution/solutions/lowc-fuel/lanzatech>
https://www.mitsui.com/jp/ja/ir/investor/plus/1230184_11083.html

4. CCU 化学における CO₂/H₂ 化学の展開

パリ協定による GHG 削減の厳しい目標に対して、CO₂(二酸化炭素)を地下に貯蔵する CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)と CO₂ を原料として有効利用する CCU(Carbon dioxide Capture and Utilization)が提案された。この内、CCS は本レポートの範囲外なので、省略する。

CCU の 1 つとして、CO₂ を炭素源とする再生可能燃料(e-fuel、e-メタノール、e-メタンなど)の開発と工業化が世界的に活発に行われている。これら再生可能燃料の製造には、いずれも CO₂ の他に原料として H₂(水素)が必要なので、CO₂/H₂ 化学と呼ぶ。

カーボンニュートラルの観点から、CO₂ ソースとして望ましいものは、①「直接空気回収(DAC:Direct Air Capture)による CO₂、バイオマス由来の CO₂」、②「廃棄物燃焼ガスからの CO₂」、③「火力発電所や製鉄工場から排出される CO₂」の順番になろう。

同様に、H₂ソースとして望ましいものは、①「グリーン水素(再生可能エネルギー(太陽光発電、風力発電、水力発電)、または原子力発電の電力を使って水の電気分解により製造される水素)」、②「ブルー水素(石炭や天然ガスなどの化石燃料を CO₂と H₂に分解することで製造される水素で、副生成物の CO₂は CCS で貯蔵される前提の場合)」、③「グレー水素(天然ガスや石炭などの化石燃料を使ってつくる水素)」の順番になろう。

グリーン水素の製造法としては、①アルカリ水電解法、②PEM 型水分解法(PEM: Polymer Electrolyte Membrane(固体高分子電解質膜))、③AEM 型水分解法(AEM:Anion Exchange Membrane)、④SOEC⁴⁷水電解法、⑤SOEC 共電解法(CO₂と H₂O から共電解で CO と H₂をつくる)がある。

CO₂/H₂ 化学の製造ルートを図 14 に示す。

図 14 の赤線で示された CO₂/H₂ 化学の固有ルートとしては、①CO₂と H₂ から直接 FT 反応により e-fuel を製造するルート、②CO₂と H₂ から合成ガスをいったんつくり、それから合成ガスの FT 反応で e-fuel をつくるルート(ただし、FT 反応の部分は CTL(Coal to Liquid)や GTL(Gas to Liquid)で既に知られていた)、③CO₂と H₂ から e-メタノールを直接製造するルート、④CO₂と H₂ からメタネーションにより e-メタンを製造するルートがある。

⁴⁷SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell、固体酸化物型電解セル):水の SOEC 電解により水素が得られる。

一方、図 14 の黒線で示す既存ルートには、①CTL や GTL プロセスで液体燃料をつくるルート、②MTG プロセスによりガソリンをつくるルート、③メタノールから MTO や MTP により、軽質オレフィンをつくるルート、④合成ガスから LanzaTech の微生物利用によりエタノールをつくるルートがある。

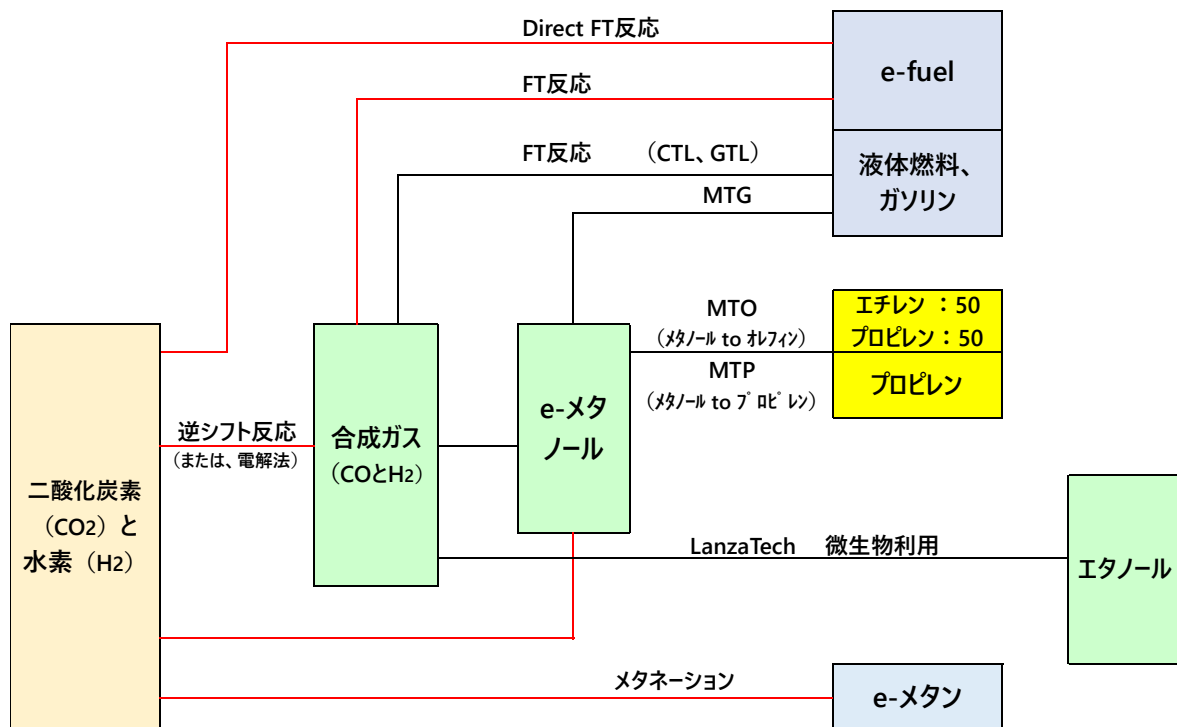


図 14 CO₂/H₂ 化学の誘導品体系

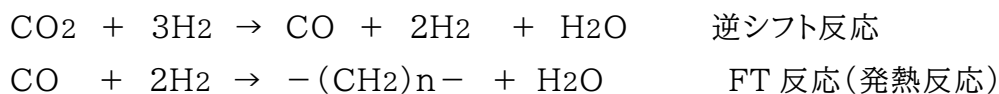
出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

4.1 CO₂/H₂ から FT 反応による e-fuel の製造

FT 反応は 1920 年代初めに Fischer と Tropsch により発見された反応で、長年実用化されてきた。例えば、南アフリカの化学会社 Sasol は石炭由来の合成ガスを使って、FT 反応により人工石油を製造 (CTL) してきた。また、JOGMEC と民間企業 6 社が設立した日本 GTL 技術研究組合は、2009 年に天然ガス由来の合成ガスを使って FT 反応により液体燃料を製造する GTL 実証プラントを新潟県に建設し、2 年間運転した⁴⁸。これらは、安価な原料である石炭や天然ガスから高価なガソリンを製造することが目的であった。

⁴⁸ <https://www.inpex.com/news/news/assets/pdf/20090416.pdf>
<https://mirai.jogmec.go.jp/ccs/column/02-03.html>

CO₂/H₂ 原料から逆シフト反応(Reverse Water Gas Shift (RWGS))で合成ガスを製造し、この合成ガスから FT 反応で炭化水素液体の e-fuel が製造される。



-(CH₂)_n-構造の炭化水素液体を 1 モルつくるのに、3 倍モルの H₂ が必要であり、水素消費量が多い。また、CO₂ の 2 倍モルの H₂O が副生する。

逆シフト反応は高温では平衡的に不利なため、温度を下げて行われる。現在は、水素リッチな混合ガス(H₂/CO₂=3~5)を原料にして、触媒存在下、800~900℃で反応する方法が主流で、INERATEC、Infinium、Repsol and Aramco(Johnson Matthey 技術)が本格工業化を目指している。

FT 反応の生成物である炭化水素(-(CH₂)_n-)は広い炭素数分布がある。このうちガソリン成分(C₄~C₁₀)、ジェット燃料成分(SAF など C₁₁~C₁₅)、ディーゼル成分(C₁₆~C₂₁)が有効成分である。FT 反応生成物の分解と分留により、SAF が工業的に製造される。

また、FT 反応の触媒はもともと鉄系であるが、目的生成物のより高い収率を目指してコバルト(Co)系触媒が工業的に使用されている。

また、逆シフト反応を回避する方法として、Direct FT 合成法や CO₂ 電解法がある。前者は合成ガス製造時に FT 触媒を共存させて、合成ガスの FT 反応を併発させて、逆シフト反応の平衡を生成物側にシフトさせる方法である⁴⁹(Zero Petroleum が採用:表 4 参照)。

CO₂ 電解法は、CO₂ を電解還元して CO にする方法(Twelve Benefit が採用:表 4 参照)である。SOEC 共電解法は CO₂ と H₂O を共電解して、CO と H₂ をつくる方法である(里川教授(研究代表)の NEDO プロジェクトで開発中⁵⁰:表 4 参照)。

表 4 に、e-fuel の製造工場と開発プロジェクトをまとめた。

⁴⁹ ENEOS 発表 https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2023/04/JPECForum_2023_program_004.pdf

⁵⁰ <https://www.nedo.go.jp/content/800031443.pdf> (2025 年 7 月)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/e_fuel/pdf/003_04_00.pdf (2024 年 12 月)

表 4 FT 反応による e-fuel の製造工場と開発プロジェクト

企業名	プロジェクト名	国名	工場サイト	稼働年	生産能力 (千トン/年)	用途	原料、中間原料	
							第1段反応	
							第2段反応	
INERATEC	ERA ONE	ドイツ	Industry Park in Hochst	2025年6月	2.5	e-fuel	電解槽、バイオガス (CO ₂)	
						SAF	逆シフト反応 (合成ガス) : Clariantのニッケル系触媒	
Infinium	Project Pathfinder	米国	Texas州	2024年4月	0.3万KL/年	ディーゼル (船 舶、化学品)	水素製造: 電解槽 CO ₂ 調達先: Howard Energy Partners (隣接工場)	
	Project Roadrunner	米国	Texas州	2027年	23	e-ナフサ SAF	逆シフト反応 FT反応 (Greyrock Technology (GTL触媒プロセス技術))	
Repsol and Aramco		スペイン	Bilbao	2024年	2.1	自動車、船 舶、航空燃料	逆シフト反応: Johnson Matthey 技術 (「HyCOgen」) FT反応: Johnson Matthey・BP 技術 (「FT CANS」)	
Zero Petroleum	Plant Zero.1	イギリス	Bicester heritage	2023年6月	30L/日	e-fuel	水素製造: 電解、CO ₂ : DAC	
	Plant Zero.2	—	—	2026年	6.1	e-SAF	自社のDirect FT技術	
Twelve Benefit		米国	Washington州	2025年Q2	800 L/日 (0.015万kL/ 年)	SAF	自社CO ₂ 電解技術 (低温、常圧で COに分解) FT反応 (Emerging Fuels Technologyの技術)	
NEDOプロジェクト		日本	開発中			e-fuel	CO ₂ とH ₂ Oの共電解、合成ガス、FT 反応 (Co/ゼオライト触媒)	
Elyse Energy	BioTJet	フランス	Dunkerque	2010年	8	e-fuel	木材のガス化	
			Pardies	2011年	110	SAF	FT反応	

注: 赤字はバイオマスを原料にしているもの。

出所: ①～⑤を基に旭リサーチセンター作成。

- ①アイシーラボ代表・室井高城氏からの各種情報提供
アイシーラボ 室井高城 「世界の合成燃料製造技術動向」第137回 触媒討論会特別シンポジウム 2026年3月24日など。
- ②JPEC: https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/e_fuel/pdf/003_03_00.pdf
(2024年12月)
- ③JPEC: https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2025/05/JPECForum_2025_program_043.pdf
(2025年5月)
- ④みずほリサーチ&テクノロジーズ:
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/e_fuel/shoyoka_wg/pdf/008_03_01.pdf
(2025年11月)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/e_fuel/shoyoka_wg/pdf/001_07_00.pdf
(2022年12月)
- ⑤e-fuel 製造企業のウェブサイト。

(1) INERATEC⁵¹: 逆シフト反応と FT 反応により、e-fuel や SAF をつくる技術である。FT 反応に細かな温度制御ができる固有のマイクロリアクターを使用するのが INERATEC 技術の特徴である。

逆シフト反応には、Clariant(スイス、触媒など specialty chemical の企業)のニッケル系の ShiftMax 100 RE 触媒を採用している⁵²。反応効率、選択性、コークス耐性、高温安定性において優れており、触媒寿命も延びるという。

FT 反応については、Sasol Chemicals が開発した次世代のコバルト系 FT 触媒を採用し、e-SAF の収率を最大 15% 増加させることを目標にしている⁵³。

2026 年までに商業利用が見込まれており、INERATEC の先駆的な Power-to-Liquid(PtL)プラント全体に展開しようとしている。その中には世界最大の PtL 施設である ERA ONE も含まれる。

出光興産は、「革新的な FT 合成と小型モジュールによる合成燃料の製造技術を有するドイツのスタートアップ INERATEC へ出資」を 2025 年 11 月 7 日に発表した⁵⁴。それによれば、一般的な FT 合成プラントの場合、大型化に伴い合成燃料を製造する反応器内の温度が不均一になるため、反応効率が低くなる。一方、INERATEC の FT 合成は、独自のマイクロリアクター(小型反応器)や細かな温度制御などにより、反応効率を従来比で高めることに成功し、必要とされる合成燃料を効率よく製造することが可能である。

(2) Infinium: 23 千トン/年の大型工場建設中(2027 年に稼働予定、JOGMEC と三菱商事出資⁵⁵、三井物産出資⁵⁶)。同社が提供する e-SAF や e-ディーゼルは、既存の飛行機、トラック、船舶にそのまま使用可能なドロップイン燃料であり、従来の化石燃料と比べて CO₂ 排出量を 90% 以上削減することが可能という。また、同社の e-ナフサは、プラスチック製造などの化学プロセスにおける低炭素代替品として活用される。

また、Infinium は Greyrock Technology を買収している⁵⁷。Greyrock Technology は GTL の触媒プロセス技術を持っている。

⁵¹ ビデオ <https://www.youtube.com/watch?v=GlnDRqtbgew>
<https://www.ineratec.de/en/news/ineratec-opens-era-one-europes-largest-e-fuel-production-plant-goes-operation-frankfurt>

⁵² <https://www.clariant.com/ja-JP/Corporate/News/2025/06/Clariant39s-ShiftMaxtrade-100-RE-catalyst-powers-INERATECacutes-groundbreaking-eFuels-plant>

⁵³ <https://www.ineratec.de/en/news/catalyst-impact-ineratec-and-sasol-chemicals-deepen-partnership-maximize-e-saf-yields>

⁵⁴ <https://www.idemitsu.com/jp/news/2025/251107.pdf>

⁵⁵ <https://www.mitsubishicorp.com/jp/ja/news/release/2025/20250117001.html>
2025 年 1 月

⁵⁶ <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000102.000088544.html> 2025 年 4 月

⁵⁷ <https://www.greyrock.com/>

(3) Johnson Matthey: 同社は逆シフト反応技術(「HyCOgen」)⁵⁸とFT反応技術(「FT CANS」)⁵⁹を有する。「FT CANS」はBPと共同開発したものである。

Johnson Mattheyの両技術は、Repsol and Aramcoの合成燃料プラント(スペイン、Bilbao)をはじめ、世界で採用されつつある。

(4) Twelve Benefit: CO₂を低温、常圧でCOに転換する電解技術。三井物産が出資。

(5) NEDO プロジェクト: CO₂とH₂OのSOEC共電解による合成ガスの製造の開発が進められている。

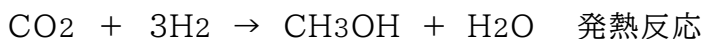
(6) Elyse Energy: CO₂/H₂化学ではなくバイオマス原料からつくった合成ガスよりFT反応でe-fuelやSAFを製造している。同社のBioTJetプロジェクトは、BioTfuelプロセスを活用しており、主に地元の林業や木材最終廃棄物からなるバイオマスから高度なバイオケロシン(ジェット燃料)を生産することが可能である。e-メタノールも開発中。

なお、その他2025年にも多くのプロジェクトが世界で発表されている。

国内では、経済産業省が2025年10月9日に『CO₂等を用いた燃料製造技術開発「液体燃料収率の向上に係わる技術開発」の計画見直しについて」⁶⁰を、また、2025年11月25日に、「合成燃料の導入促進に向けた取組について」を発表した⁶¹。

4.2 CO₂/H₂からのe-メタノールの製造

CO₂とH₂から直接e-メタノールを製造する方法が工業化されている。



CO₂に対して3倍モルのH₂が必要で、等モルの水が副生する。

この分野の専門家であるAtlantHyが2025年4月に総説を発表している⁶²。それによれば、化学的観点から見ると、CO₂水素化によるメタノール合成は、CO₂の水素化(1)、逆シフト(2)、CO水素化(3)という3つの基本的な平衡反応で説明できる。

⁵⁸ <https://matthey.com/en/products-and-markets/energy/sustainable-aviation-fuels/hycogen>

⁵⁹ <https://matthey.com/products-and-markets/energy/sustainable-aviation-fuel-saf-technology/ft-cans-technology>

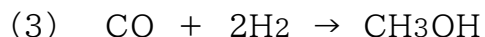
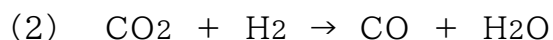
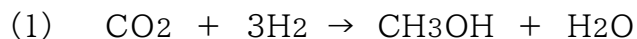
⁶⁰ https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/031_03_00.pdf

GI基金でe-fuelの大規模開発中であったENEOSは無期延期を表明した。プロセスは逆シフト反応とFT反応の組み合わせである。(2025年10月)

⁶¹

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/e_fuel/shoyoka_wg/pdf/008_03_03.pdf (2025年11月)

⁶² AtlantHy Decarbonizing methanol production through renewable hydrogen <https://hydrogentechworld.com/decarbonizing-methanol-production-through-renewable-hydrogen> (2025年4月)



熱力学的観点から見ると、CO₂の水素化によるメタノール合成は、低温・高圧が最も効率的である。CO₂をメタノールに水素化するための適切な触媒は、銅・亜鉛・アルミニウム触媒 (Cu/ZnO/Al₂O₃) に基づく多成分触媒系である。反応器内の最適温度範囲は 200℃～300℃の間で、運転圧力は 40～100 バールの間でなければならないと記している。

表 5 に稼働中あるいは稼働予定の e-メタノールの製造工場をまとめた。バイオマス原料を使った e-メタノール工場も併せて記載した。

表 5 e-メタノールの製造工場(CO₂/H₂ 原料とバイオマス原料)

企業名	プロジェクト名	国名	原料、中間原料、反応	稼働年	生産能力 (千トン/年)	用途
HIF Global	Haru Oni	チリ	CO ₂ /H ₂ 、メタノール合成 MTG	2022	0.013万kL/年	ガソリン
HIF USA		米国・Texas 州・マタゴル ダ	同上 その他計画(千トン/年): ウルグアイ (700)、チリ(175)、ブラジル (700)、オーストラリア(210)	2027	140万kL/年	船舶向け(e- SAF、ガソリン も)
European Energy	Kassø e- methanol facility	デンマーク	太陽光・電解H ₂ (PEM)、SMR技術 (バイオメタン を改質して合成ガスに転 換)、メタノール合成(クラリアントの MegaMax 触媒)	2025 (5月)	42	e-メタノール (船舶燃料と して販売)
Transition Industries	Pacifico Mexinol Project	メキシコ・ Sinaloa	天然ガス使用によるブルーメタノール製 造。その時の副生CO ₂ とグリーンH ₂ を使 用してグリーンメタノール製造	2029	180万トン/年のブルーメタノールと35万トン/年のグリーンメタノール	
Arcadia eFuels		デンマーク	バイオマス由来のCO₂ 、グリーンH ₂	2028	80 (10)	e-メタノール (SAF)
CRI		アイスランド	地熱CO ₂ 、アルカリ電解水素	2011	4	
Consortium Companies/CRI		ノルウェー	工場CO ₂ 、水力発電による電解水素	2024	100	
CRIの安陽工場 (CRI技術)		中国河南省 安陽市	CO ₂ : 石灰キルン排ガス、 H ₂ : コークス炉	2022	110	
Jiangsu Sailboat (CRI技 術)		中国江蘇省 連雲港	CO ₂ とH ₂ はサイト内(CO ₂ はエチレンオ キシサイド工場の副生物) (メタノール合成とMTO)	2023	100	MTOによる軽 質オレフィン (推定)
Tianying Group (CRI技術)		中国吉林省 遼源		2025	170	
Liquid Wind		スウェーデン	工場CO ₂ 、水力発電による電解水素	2023	45	
ABEL		オーストラリア タスマニア	バイオマスガス化炉のCO₂ 、水力発電に よる電解水素	2023 2027	60 300	
Energem, Shell, Suncor, Proman, Canada とQuebec政府	Varennes Carbon Recycling (VCR)	カナダ ケベック	水素: PEM電解水素 炭素: non-recyclable waste and residual biomass (20万トン/年) ガス化、メタノール合成	2026	12.5万kL/年	メタノール
Xuchang Longi Bioenergy	Xuchang Longi Bioenergy methanol	中国 Inner Mongolia	水素: 自社 炭素: 農業廃棄物のガス化 メタノール合成 3.25億ドルプロジェクト	2024年建 設開始	120	メタノール
Shanghai Electric	Taonan green methanol	中国 Taonan, Jilin	風力発電 バイオマス	2025年7月に小規模生産開始		
				第1段	50	メタノール
				2027	250	

注: 赤字はバイオマスを原料にしているもの。

出所: ①~⑤を基に旭リサーチセンター作成。

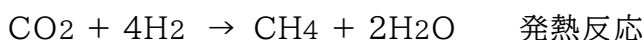
①アイシーラボ代表・室井高城氏からの各種情報提供。

アイシーラボ 室井高城「世界の合成燃料製造技術動向」第137回 触媒討論会特別シンポジウム 2026年3月24日など。

②~⑤ 表4の②~⑤と同じ(略)。

- (1) HIF Global(チリ): e-メタノールと MTG によるガソリンを製造。JOGMEC と出光興産が約 225 億円出資。世界に 5~6 か所の工場を建設する計画。
- (2) European Energy(デンマーク): 2025 年 5 月に 4.2 万トンの工場を稼働。三井物産が出資。このバイオメタノールは、electrified steam methane reforming(e-SMR)と呼ばれる革新的な技術によって製造される。この技術では、再生可能電力を用いてバイオガスまたはバイオメタンを合成ガスに加工し、その後、同社独自のメタノール技術を用いてグリーンメタノール⁶³に変換する。船舶燃料用途が中心で、既に販売を開始。
- (3) Transition Industries(メキシコ): メキシコに世界最大級のメタノール工場の建設を計画⁶⁴。同社は三菱ガス化学と低炭素メタノールの供給契約を締結(2025 年 11 月)⁶⁵。同社メキシコ工場には米国からの天然ガスパイプラインが通っており、供給された天然ガスからメタノールを生成し、発生する CO₂ を回収して原料にすることで、環境負荷の少ないグリーンメタノールの生産を実現。
- (4) Jiangsu Sailboat(中国): 同社は CRI(Carbon Recycling International)の技術を採用して、2023 年 10 月に持続可能なメタノール工場の稼働を開始した⁶⁶。同社は製造された持続可能なメタノールをポリマーやプラスチックの原料に使用している。同社のポリマーとプラスチックの年生産量は 240 万トンである⁶⁷。Jiangsu Sailboat と Jiangsu Sailboat Petrochemical は同じ会社である⁶⁸。Jiangsu Sailboat Petrochemical は大規模な MTO 工場を有している⁶⁹。

4.3 CO₂/H₂ からのメタネーションによる e-メタンの製造



CO₂ に対して 4 倍モルの H₂ が必要で、2 倍モルの水が副生する。20 世紀初頭に Sabatier(フランス)が開発したもので、CO₂と H₂から、触媒を用いて e-メタンを製造する。触媒は、Ni 系や Ru 系が用いられることが多い。発熱反応であり、低温高圧条件が有利とされる。

⁶³ 表 5 や本文には、グリーンメタノール、ブルーマタノール、持続可能なメタノール、低炭素メタノール、e-メタノールの用語を各社使用している。各社の原料と製法が詳しく公表されていないので用語の統一は難しいと考え、発表のままとした。なお、バイオマス原料を使用しているものはバイオメタノールとした。

⁶⁴ <https://www.spglobal.com/energy/en/news-research/latest-news/chemicals/063025-transition-industries-signs-contracts-for-worlds-largest-green-methanol-plant-in-mexico> (2025 年 6 月 30 日)

⁶⁵ <https://www.jetro.go.jp/biznews/2025/11/a36dba6e188ff9d6.html> (2025 年 11 月)

⁶⁶ <https://bioenergyinternational.com/start-up-of-jiangsu-sailboat-co2-to-methanol-plant/>
<https://carbonrecycling.com/projects/sailboat>

⁶⁷ 脚注 66 と同じ。

⁶⁸ <https://carbonrecycling.com/about/news/cri-chemical-plant-project-in-china-will-recycle-150000-tons-of-co2-per-year-to-make-materials-for-solar-panels>

⁶⁹ <https://uop.honeywell.com/en/news-events/2017/02/jiangsu-sailboat-petrochemicals-company>

用途は、都市ガスインフラへの e-メタン注入やガスエンジン、ボイラー、バーナー、SOFC などの設備への供給である。

日本では e-メタンやバイオメタンの導入義務化時期にあたる 2030 年度が迫る中で、動きが活発である⁷⁰。e-メタン関係の情報を 5 件紹介する。

- ①2025 年 6 月に資源エネルギー庁は「合成メタン(e-methane)等をめぐる状況について」を発表している⁷¹。
- ②2025 年 11 月 19 日のトーマツの公表資料⁷²(経済産業省関係資料):世界の e-メタンの主要プロジェクトは、日本への輸入を想定して、日本企業が参画しているものが多い。それらを中心に挙げると、Freeport LNG(米国、生産能力 0.28bcm(1bcm は 1 立方 km)、日本の参加企業:大阪ガス)、LIVE OAK e-NG⁷³(米国、同 0.14-0.3bcm)、Cameron LNG(米国、同 0.18bcm、同:東京ガス、東邦ガス、三菱商事)、Peru LNG(ペルー、同 0.08bcm、同:大阪ガス、丸紅)、Darwin & Gladstone LNG(豪州、同 0.18bcm、同:東京ガス、大阪ガス、東邦ガス)、Oman LNG(オマーン、同 0.01bcm、同:日立造船、Kanadevia)、Abuzabi(UAE、同不明、同:INPEX、大阪ガス、東京ガス)である。
- ③2025 年 12 月 1 日発表⁷⁴:東京ガスは、カナダで都市ガス原料「合成メタン」の生産事業に取り組む方針を固めた。2030 年度までの生産開始を目指す。同時期に米国で計画していた合成メタン生産事業からは撤退する(上記②の Cameron LNG のことと推定される)。
- ④2025 年 12 月 2 日発表⁷⁵:TotalEnergies(フランス)は Tree Energy Solutions (TES、ベルギー)、大阪ガス、東邦ガス、伊藤忠商事と、米国 Nebraska 州で日本市場向けに大規模な e-メタン生産計画「LIVE OAK e-NG」実施に向け、基本設計(FEED)のための共同開発・運営契約の締結を発表した。
TotalEnergies と TES は、e-メタンの大規模生産を先導する目的で 2023 年に締結した戦略的提携に基づき、再生可能エネルギーから生成するグリーン水素と、潤沢なトウモロコシ生産量を背景に米国第 2 位のバイオエタノール製造地となっている Nebraska 州の工場から回収するバイオマス由来の CO₂ を活用し、本計画を実施する。両社は同契約によりそれぞれ 33.35%の持分を維持し、日本企業 3 社に対して合計 33.3%の持分を付与した。

⁷⁰ 2030 年度に、供給ガス中の e-メタンかバイオメタンの含有量を 1%とする。

⁷¹ 「合成メタン(e-methane)等をめぐる状況について」、2025 年 6 月、資源エネルギー庁
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/014_03_00.pdf

⁷² トーマツ(2025 年 11 月 19 日)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/jisedai_kiban/gas_business_wg/pdf/004_08_00.pdf

⁷³ 40 頁の④の TotalEnergies(フランス)主宰の「LIVE OAK e-NG」のこと。

⁷⁴ <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC015V60R01C25A2000000/>

⁷⁵ <https://www.jetro.go.jp/biznews/2025/12/030199da8438246f.html>

本計画は約 250 メガワット(MW)の水電解能力と年間 7 万 5,000 トンの e-メタン生産能力を目指す。2027 年の最終投資意思決定(FID)を経て、2030 年をめどに商業化を予定している。

- ⑤2026 年 2 月 24 日に INPEX と大阪ガスは、新潟県のメタネーション試験設備(長岡市の INPEX 越路原プラント)の実証運転を開始したことを発表した⁷⁶。INPEX が採択された NEDO 助成事業のもと、両社は共同で都市ガスのカーボンニュートラル化に向けた CO₂-メタネーションシステムの実用化を目指した技術開発事業を 2021 年より開始し、2023 年からは世界最大級となる 400Nm³-CO₂/h(年間製造能力が家庭用約 1 万戸分のガス消費量に相当)の試験設備の建設を進めてきた。今回、試験設備に係る建設工事及び試運転が完了し、実証運転を開始した。さらに、製造した e-メタンの天然ガスパイプラインへの注入を 2026 年 2 月 20 日に実施した。新潟県で、都市ガスに導入を行った。2021 年発表の INPEX の資料によれば、メタネーションの一例は、プレート型反応器を使用し、反応条件はフィードが CO₂/H₂ = 1/4、Ni 系無機触媒存在下、最高反応温度は 525℃、反応圧力は 0.7MPaG である⁷⁷。

⁷⁶ <https://www.inpex.com/news/2026/20260224.html>

⁷⁷ INPEX の CO₂-メタネーション技術について ~NEDO-CO₂ 有効利用技術開発事業~2021 年 6 月 28 日
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/001_07_00.pdf

おわりに

- (1) よく知られているように、1906～08年にハーバーとボッシュが、空中窒素の固定によるアンモニア合成に成功した。当時、世界的に天然肥料(鳥のフン堆積物など)の枯渇で食料危機が迫っていたが、この発明により肥料の大量生産が可能となり、食料が増産されて人類は救われた。
CO₂/H₂化学は、空中CO₂を固定(DAC)して、水素と反応させて合成燃料をつくろうというものであり、アンモニア合成の話によく似ている。窒素固定のように、CO₂固定は、地球温暖化と資源枯渇という人類の危機を解決してくれるだろうか。
空気中のCO₂濃度は窒素濃度よりもはるかに希薄であり、水素はグリーン水素でなければならないなど、欧州の定義では原料の氏素性まで規定されてハードルは高い。
- (2) エタン・クラッキングのナフサ・クラッキングに対する価格優位性は続き、世界的にエタン・クラッキングが増えるだろう。日本も競合優位性を保つために、エタン・クラッキングを国内か海外で導入することは考えられないだろうか⁷⁸。
- (3) バイオマスの研究は進むが、発酵による大型の新規産生物は現れない。自然に発酵してできるようなメタン、エタノール、酢酸、乳酸の生産性は格段に優れていて、新参加者はなかなかかなわないのだろうか。
- (4) バイオエタノールとバイオディーゼル(バイオナフサ)の用途はほとんど燃料で、バイオPEやバイオPPのドロップインプロダクト製造の原料にはほとんど使われていない。バイオエタノールもバイオナフサもプラスチックの原料にするには価格が高いことや、プラスチックのバイオマス含有量規制がまだ制定されていないこともある。これについては深掘りして、続編シリーズ(2)として発表したい。
- (5) 本レポート(シリーズ(1))の内容に関してより詳細な技術レポートができれば、シリーズ(3)として発表したい。

⁷⁸ 信越化学は既に米国でエタン・クラッカーを建設してPVC原料用エチレンを自製しているが。

謝辞

多方面に、貴重なアドバイスとコメントをいただいたアイシーラボ代表の室井高城氏に深く感謝いたします。

参考文献

- (1)～(8)は ARC リポート:https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/#dropdown-01
執筆:(1)～(6)、(8)は府川伊三郎、(7)は府川伊三郎、下田晃義
- (1)「石油化学」から「天然資源化学」へ ～シェール革命と現代的石炭化学のインパクト 2014年4月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-970.pdf
- (2)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
- (3)石油化学」から「天然資源化学」へ (2016年版) ～ シェール革命、現代的石炭化学、石油価格下落のインパクト 2016年1月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-998.pdf
- (4)天然ガス化学、石油化学、石炭化学 2017年3月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1011.pdf
- (5)2030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
- (6)バイオマスプラスチックとバイオマス化学の動向(上) 2024年3月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1067.pdf
- (7)ケミカルリサイクルの最新動向(2023年1月～2024年3月) 2024年5月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1069.pdf
- (8)シリーズ(CR企業の米国特許と技術)(上、中、下) 2025年10～12月
[https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1080.pdf\(rs-1081,rs-1082\)](https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1080.pdf(rs-1081,rs-1082))
- (9)府川伊三郎、「プラスチックリサイクル(MR&CR)の技術と産業化」、PETROTECH(石油学会情報誌) 2025年4月号(第48巻)191-203頁

本レポートについて

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。

【キーワード】

石油化学、天然ガス化学、バイオマス化学、リサイクル、CCU、CO₂/H₂、合成ガス、エタノール、FT 反応、e-fuel、e-メタノール、e-メタン

【本レポートのお問い合わせ先】

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/>

ARC レポート RS-1085 2026.04

発行者 株式会社 旭リサーチセンター
〒100-0006 東京都千代田区有楽町 1-1-2
<https://arc.asahi-kasei.co.jp/>