

## 米国におけるバイオリファイナリー事業の動向

- ◇バイオリファイナリーは米国に展開されつつあるが、セルロース系バイオマスの分解効率向上への技術開発やバイオマス原料の安定的調達が今後の課題である。
- ◇米国ではバイオリファイナリー化を促進するための政策的なサポート(例えば再生可能燃料基準等)があり、再生可能燃料生産者を経済的に援助している。
- ◇大手石油メーカーも含め、再生可能燃料に関わる投資、生産計画が2021年に次々と発表され、2022年より一部本格的な商業化が始まった。
- ◇米国の再生可能ディーゼルは2024年に年間50億ガロンまで大幅増加の可能性あり。

### 1. はじめに

バイオリファイナリーとは再生可能なバイオマス<sup>1</sup>から様々なバイオ関連製品を生産する工場である。具体的には原油から各種石油製品を生産する際にCO<sub>2</sub>を大量に排出する石油リファイナリーとは異なり、CO<sub>2</sub>をバイオマスの一部として吸収、資源化し、先端バイオ技術を駆使して再生可能なエネルギーや化学品を高効率生産する革新的な生産工場、これがバイオリファイナリーである(図1)。つまりCO<sub>2</sub>の資源循環によりGHG (Green House Gas) 排出量の大幅な削減を可能とし、資源エネルギー問題、環境問題を克服し、安全で持続的に発展できる低炭素循環型未来社会を実現することが出来る手法の1つということになる。

バイオリファイナリーの概念や実現化に関しては、世界のほとんどの場所でまだ初期段階にある。しかしながらその潜在的な可能性は高く、有機廃棄物の最適な利用に役立ち、廃棄物管理とGHG排出量抑制の問題を同時に解決する可能性がある。原料となるバイオマス廃棄物は、バイオリファイナリーでの適切な酵素、化学処理によって、気体または液体燃料に変換することができる。

### 1. はじめに

2. バイオリファイナリーの基本プロセスと課題
3. 米国の再生可能燃料に関わる政策動向
  - 3-1. 再生可能燃料基準
  - 3-2. 再生可能燃料クレジットの仕組み
  - 3-3. カリフォルニア州独自の政策
4. 再生可能燃料供給メーカーの動向
  - 4-1. 大手石油メーカーの取り組み
  - 4-2. その他のメーカーの取り組み
  - 4-3. 生産実績と今後の見込み
5. まとめ

<sup>1</sup> 生物資源 (bio) の量 (mass) を表す概念で、エネルギーや物質に再生可能な、動植物から生まれた有機性の資源 (石油や石炭などの化石資源は除く) のこと。具体的には農林水産物 (さとうきび、コーン等)、稲わら、もみガラ、食品廃棄物、家畜排せつ物、木くず、等

本レポートではバイオリファイナリーに関わる一般的な技術に関して解説し、生産される製品としての燃料、すなわち再生可能燃料に注目していく。更に昨年よりバイデン政権に代わってから環境対策強化を反映した米国における再生可能燃料に関わる政策面での現状や、米国石油メーカー等における再生可能燃料生産に向けた最新の取り組み状況を紹介する。

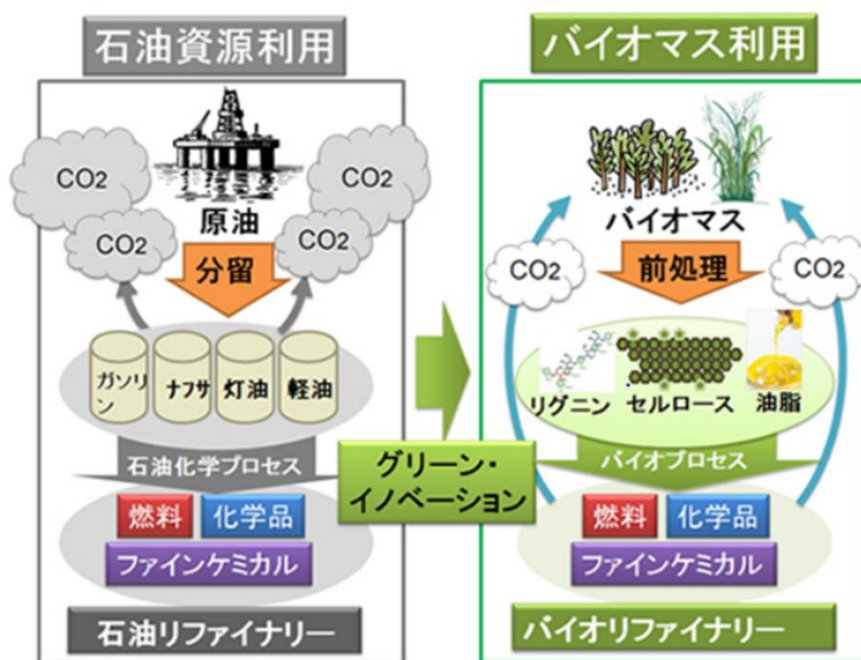


図1 石油リファイナリーとバイオリファイナリーの比較

出所：文科省先端領域バイオプロダクション次世代農工連携拠点<sup>2</sup>

## 2. バイオリファイナリーの基本プロセスと課題

過去20～30年間、バイオマス原料、すなわち農作物、林業バイオマス、家庭廃棄物や産業廃棄物の有機物、水質バイオマス（すなわち藻類）は、燃料や高付加価値化学物質の再生可能資源として、研究及び商業的関心が高まっている。生物由来の製品を使用することの利点はよく知られているが、化石燃料が相対的に安価で入手可能であるため、バイオマス原料が従来の化石燃料に対して競争力を持つようになるためには、バイオマス原料から燃料や化学品、及びエネルギーを生み出す上での化学反応プロセスの効率向上、省エネ化、結果として経済性を向上させることが重要な要件となり、これがバイオリファイナリーの基本コンセプトになる（図2）。

このコンセプトは、バイオ素材をその構成モノマーユニットに分解、変換し、それを更に再構成して高付加価値の産業前駆体、化学物質、エネルギー（燃料、熱電併給ストリームを含む）を生産するために、幅広い技術を使用するものである。バイオマス原料の中でも農業バイオマスに関しては2000年以降で急速にその利用が拡大した。ブラジルでのさとうきび利用や米国でのコーンを利用したバイオエタノ

<sup>2</sup> <https://www.org.kobe-u.ac.jp/bioproduction/base/outline.html>

ールの生産拡大は典型的な例であるが、これはバイオエタノール生成の反応プロセスが安価かつ比較的容易であったことが要因である。一方で、さとうきびやコーンは食料でもありグローバルにみれば食糧不足の地域が存在することも考慮すると、バイオエタノールへの行き過ぎた転換には問題があると警告が鳴らされている<sup>3</sup>。参考までに米国でのバイオマス原料及び廃食用油の年間消費を図中に記載した。

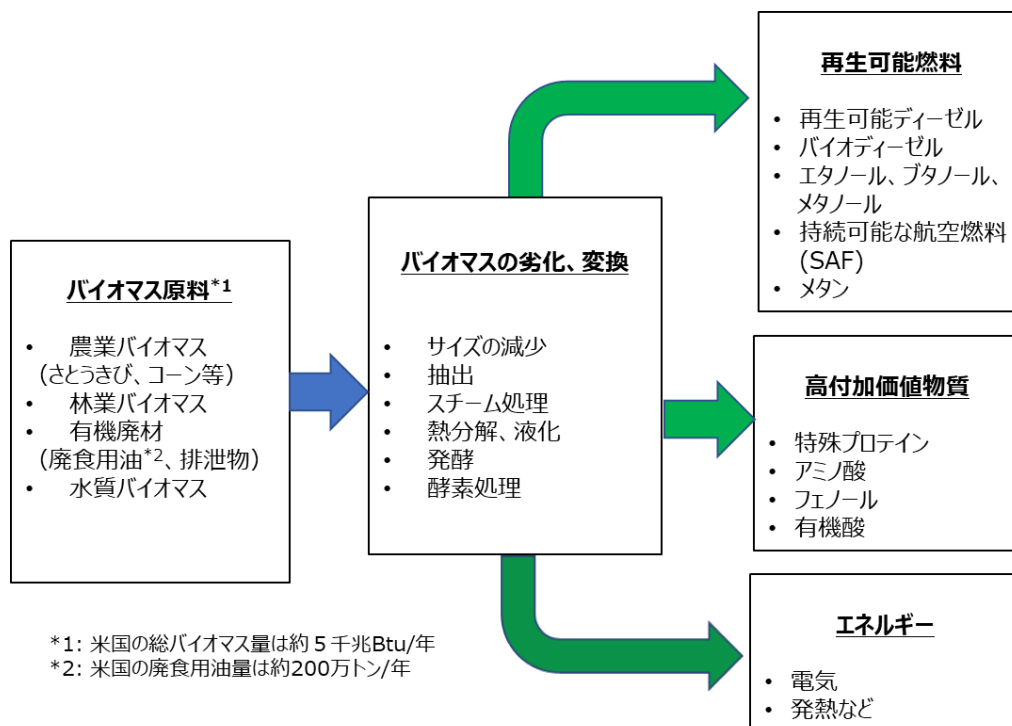


図2 バイオリファインリーの概念図

出所： 各種資料より JPEC 作成

また有機廃材、特に廃食用油を原料としたものが近年はバイオマス原料として注目されている。現在各地で石油リファインリーの改造を実施し、再生可能ディーゼル燃料生産の大規模商業化に活用されているのは、先の農業バイオマス（さとうきび、コーン等）を除けばこの廃食用油利用のみである。

一方、セルロース系バイオマス（稲わら、木くず等）は極めて分解し難い特性を持つことから、その利活用が阻まれており技術革新が必要である。技術的には大きく2つの課題があり、1つ目の課題はバイオマスから製品にいたるプロセス全体の反応効率が低く、かつエネルギーを多く消費すること、2つ目の課題は、微生物が本来発酵生産できる対象化合物の種類が極めて少ないことである。現在、グローバルな規模で様々な研究がなされており、セルロース系バイオマスに最適なスーパー微生物を創出することができれば経済的に競争力のあるバイオベース製品への転換が可能となる。バイオマス原料は個々に見

3

<https://www.hydrocarbonprocessing.com/blog/2012/08/analysis-corn-shortage-forces-trade-off-between-food-and-ethanol>

れば有限の資源であるため、今後は対象となるバイオマス原料に適切に対応可能な化学プロセスを開発していく必要があり、それがカーボンニュートラルを達成可能な1つのオプションといえる。

### 3. 米国の再生可能燃料に関わる政策動向

#### 3-1. 再生可能燃料基準

再生可能燃料基準 (RFS : Renewable Fuel Standard) は米国における大気浄化法 (Clean Air Act) に基づいてバイオ燃料 (ここでは再生可能燃料と同義) の利用促進を目的に、2005年に制定された。これに関連して2007年に制定されたエネルギー・自立・安全保障法 (EISA2007 : Energy Independence and Security Act of 2007) では2022年までの再生可能燃料の最低添加義務量 (RVO : Renewable Volume Obligation) が定められている。RVOは従来のバイオ燃料 (GHG削減効果が20%以上) と先進バイオ燃料 (GHG削減効果が50%以上) とにカテゴリー分けされており、先進バイオ燃料では更に細かい分類がある。一方で再生可能燃料が製造不足となる場合を考慮して、米国環境保護庁 (EPA) は毎年11月末までに前年 (バイオマス由来軽油については前々年) の法定義務量を下方修正する権限を与えられている。

表1 RFSにおけるRVO値 (2021、2022年) の最終確定結果 (単位: 億ガロン/年)

	バイオ燃料		先進バイオ燃料 <50%以上>						バイオ燃料 (指定なし)	
	添加義務量		セルロース系 <60%以上>		バイオマス由来軽油 (ディーゼル)		先進型バイオ燃料 (指定なし)		<20%以上>	
	EISA 2007	EPA 改定後	EISA 2007	EPA 改定後	EISA 2007	EPA 改定後	EISA 2007	EPA 改定後	EISA 2007	EPA 改定後
2020年	300.0	171.3	105.0	5.1	10.0	24.3	35.0	16.9	150.0	125.0
2021年	330.0	185.2 → 188.4	135.0	6.2 → 5.6	(EPAによる設定値でも可)	24.3	35.0	21.5 → 20.6	150.0	133.2 → 137.9
2022年	360.0	207.7 → 206.3	160.0	7.7 → 6.3		27.6	40.0	22.4	150.0	150.0

<>内%はGHG削減効果

赤字が最終確定の際に2021年12月の改定案からの変更値

出所: 連邦官報<sup>4</sup>を基にJPEC作成

表1が2022年6月に最終確定したRFSにおけるRVO値である。バイデン政権に移行後、2021年12月に初めてRFSにおけるRVOの改定提案が実施され、その後のパブリックコメントなどを経て確定した。これを見て大きく目立つのがセルロース系先進バイオ燃料のRVOであり、EPA改訂値は当初

4

<https://www.federalregister.gov/documents/2022/07/01/2022-12376/renewable-fuel-standard-rfs-program-rfs-annual-rules>

EISA が 2007 年に制定した値から大きく乖離し、約 1/25 という低水準である。また今回 2022 年 6 月の最終確定においても 2021 年 12 月改定案から更に要求値が低下した。これは先のバイオリファイナリー基本プロセスと課題でも説明したが、セルロース系バイオマス分解技術の開発、商業化がうまくいっていないためであり、この分野の技術革新が強く望まれる。

一方でバイオマス由来の軽油については、EISA2007 想定を上回っている。このカテゴリーでは従来型の脂肪酸メチルエステル (FAME : Fatty Acid Methyl Ester) に加えて、廃食用油などを高温高圧下で水素化処理することで生産される水素化精製植物油 (HVO : Hydrotreated Vegetable Oil) も含まれ、先進型バイオ燃料のカテゴリーでは唯一商業化が進んでいる。

従来型バイオ燃料においては GHG 削減効果が 20%以上であればどのようなバイオ燃料を使用しても良いが、実質的には米国産のコーンを原料とするエタノール混合ガソリンで大半が賄われている。エタノールのガソリンへの混入比率は一般的には 10~15 vol%に抑えられており、これは食品価格との連動を抑制するためと、エタノール混合比率の増加がエンジンへ及ぼす影響や大気 (スモッグ発生) に与える悪影響などがまだよくわからないことなどによる。2020 年 3 月から本格化した新型コロナウイルスの感染拡大はガソリン需要を大きく減少させ、結果的に中西部に立地するコーン・エタノール製造業者の中には製造中止に追い込まれた企業も多かった。

結果としてバイオ燃料全体で見た RFS の RVO 値は当初の EISA2007 から大きく低下しているものの、バイオ燃料の製造、商業化は着実に進んできている。これは再生可能燃料が RVO の義務と同時にクレジットを持っており、市場で取引できることが関係している。

### 3-2. 再生可能燃料クレジットの仕組み

再生可能識別番号 (RIN : Renewable Identification Number) は、法令を遵守する観点から使用されるクレジットであり、RFS プログラムの「通貨」であるとも言え、以下の流れとなる。

〈プロセスの流れ (図 3) 〉

- ・ 再生可能燃料生産者 (Renewable Fuel Producer) が生産した Renewable Fuel (RF) に RIN を設定
- ・ 非再生可能燃料製油所 (Non-Renewable Fuel Refiner) や石油輸入者 (Importer) が以下を対応
  - ✓ RIN が設定された RF を購入
  - ✓ RVO を遵守するために必要量の RF を化石燃料 (Non-Renewable Fuel) 等とブレンド
  - ✓ 基準を満たしたブレンド燃料 (Blended Fuel) を市場 (Service Station) へ供給
  - ✓ 入手した RIN を償却

RIN に関わる本市場参加者の種類は、①義務者 (ガソリン又はディーゼルの精製業者および輸入業者)、②再生可能燃料の輸出業者、③再生可能燃料生産者、④登録された RIN 市場参加者、が想定される。また参加者には外国企業も含まれ、1 つの企業が複数のカテゴリーに該当する可能性があり、取引や事業活動に応じて年ごとに変更されることがある。

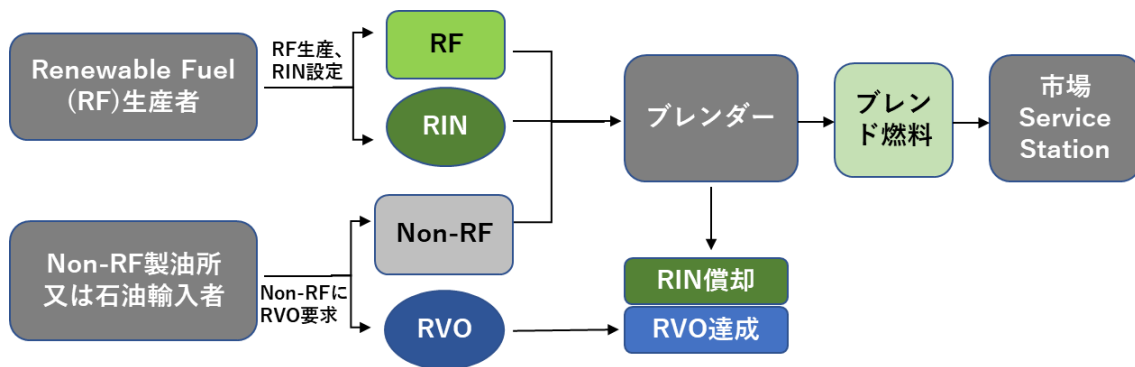


図3 再生可能識別番号 (RIN) の市場におけるライフサイクル一例

出所：米国環境保護庁 (EPA) データを基にJPEC作成

### 3-3. カリフォルニア州独自の政策

カリフォルニア州では州独自に低炭素燃料基準 (LCFS : Low Carbon Fuel Standard) を設定し、輸送用燃料の炭素強度 (CI : Carbon Intensity) を削減し、GHG 排出量の減少と低炭素燃料の利用促進、及び大気質の改善を目指すことを目的としている。本制度は 2011 年から施行されている。ここで言う CI とは、燃料のライフサイクル (生産・輸送・消費) 全体のエネルギー量に対する GHG 排出量を指し、燃料ごとにカリフォルニア州大気資源局 (CARB : California Air Resource Board) により特定される。

燃料供給事業者は、燃料ごとにライフサイクル分析を実施、CI スコアを算出する。この CI スコアは CARB が定めた CI 基準以下であれば、取引量に応じてクレジットが付与される。これは次年度以降に使用可能であり、また他社へ売買することも可能である。一方、基準に達しなかった場合はこれとは逆の手続き、つまり前年以前に保有するクレジットがあればそれを利用、又は他社からのクレジット購入によって対応する。実際に再生可能燃料を推進する事業者にとっては、金銭的な対価となるクレジットの付与は大きく、再生可能燃料の普及に大きく貢献している。

このクレジットは ZEV (Zero Emission Vehicle) インフラの設置等からも取得でき、それらクレジットの売り買いをクレジット精算市場 (CCM : Credit Clearance Market) で行うことが可能である。CCM では市場価格の乱高下を防ぐ取引価格の上限が設定され、市場の安定維持に貢献している。

### 4. 再生可能燃料供給メーカーの動向

既に説明の通り、米国では再生可能燃料 (ガソリン、ディーゼル燃料) の最低添加量 RVO があり、これとセットで再生可能燃料供給業者へのクレジットが設定されており、これが再生可能燃料を供給する業者へのドライビングフォースになっている。また昨年より大手石油メーカーが各種提携先との契約を

相次いで発表し、再生可能燃料に対する取り組みが急速に活発化している

#### 4-1. 大手石油メーカーの取り組み

表 2 に大手石油メーカーの再生可能燃料（主にガソリン、ディーゼル）への対応状況をまとめた。特徴としては再生可能燃料で生産実績のあるメーカーとの提携、企業買収を通じて業務の加速化を図っている。また Marathon Petroleum、Phillips 66 や Valero は既の実施中、あるいは製油所の生産設備改造中の段階であるのに対して、Chevron などは投資額が非常に大きいものの計画段階のものが多く、各社によって対応状況はまちまちである。

表 2 大手石油メーカーの再生可能燃料への取り組み状況

石油メーカー	提携先 (主な再生可能燃料)	製油所 (場所)	目標時期	生産量	投資額
			(年)	(億ガロン/年)	(億ドル)
ExxonMobil	Imperial Oil (再生可能ディーゼル)	Strathcona (カナダ)	2024	3.1	n.a.
	Global Clean Energy (再生可能ディーゼル)	Bakersfield (米・カリフォルニア)	2022	2.1	n.a.
	Biojet (再生可能ディーゼル)	Follum (ノルウェー)	2025	1.3	n.a.
	Neste (再生可能ディーゼル, SAF)	シンガポール Rotterdam (オランダ)	2023	4.6	n.a.
Chevron	R.E.G* (再生可能ディーゼル, 他)	米国内9製油所	2030	15.4	31.5
	Bunge (再生可能ディーゼル, 他)	Destrehan (米・ルイジアナ) Cairo (米・イリノイ)	2024	7.8	6
	自社 (再生可能ガソリン、 ディーゼル, SAF)	El Segundo (米・カリフォルニア)	2030	15.3	100
Marathon Petroleum	Neste (再生可能ディーゼル)	Martines (米・カリフォルニア)	2023	7.3	12
	ADM (再生可能ディーゼル)	Spiritwood (米・ノースダコタ)	2023	0.8	0.4
Phillips 66	自社 (再生可能ディーゼル)	Rodeo (米・カリフォルニア)	2024	8	7.5
Valero	Diamond Green Diesel (再生可能ディーゼル)	St. Charles (米・ルイジアナ) Port Arthur (米・テキサス)	2024	12	n.a.

(R.E.G\*は Chevron が企業買収)

出所：各社情報から JPEC 作成

Valero は既に年間 7 億ガロンの再生可能ディーゼルを生産しており、カリフォルニア州、カナダ及び欧州に供給、輸出をしている。また Marathon Petroleum と Phillips 66 はカリフォルニア州サンフランシスコ・ベイエリアにそれぞれが保有する Martinez 製油所、及び Rodeo 製油所において地元のコントラコスタ郡当局による審査が完了、2022 年前期に最終投資決定に至っている。Martinez 製油所では 2022

年後半に年間 2.6 億ガロンの再生可能ディーゼルの生産が始まる予定である。

ExxonMobil は再生可能燃料で実績のある Global Clean Energy と提携、専属パイヤーとなり 2022 年より提携先（Bakersfield 製油所）で生産される再生可能燃料のビジネスを開始する。

再生可能燃料を生産するにあたっては主として廃油の水素化処理プロセスを用いるため、水素が容易に手に入る既存の製油所を改良することが設備上好都合である。よって石油会社としては今後の化石燃料の消費量低下が予測されるなかで、一部製油所での設備改造に大きく舵を切り始めている。

#### 4-2. その他メーカーの取り組み

再生可能燃料の中には持続可能な航空燃料（SAF : Sustainable Aviation Fuel）がある。米国内の SAF に関する供給メーカーの計画、対応状況を表 3 に示す。

表 3 米国 SAF 供給メーカーの計画、対応状況

SAF供給メーカー (主な供給先)	提携先 (SAF製造技術)	製油所(場所)	目標時期	生産量
			(年)	(億ガロン/年)
<b>LanzaJet</b> (Vergin Atrantic, British Airways, ANA, etc.)	自社 (ATJ : Alchol to Jet)	Soperton (米・ジョージア)	2030	8.8
	Marquis (ATJ : Alchol to Jet)	Hennepin (米・イリノイ)	2022	1.2
<b>World Energy</b> (United Airline, JetBlue Airways, etc.)	Air Products (HEFA: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)	Paramount (米・カリフォルニア)	2025	3.4
<b>Neste</b> (American Airline, Alaska Airlines, KLM, etc.)	自社 (HEFA: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)	米・製油所(Marathon, etc.)	2023	4.9
		シンガポール		
		欧州各所		
<b>Gevo</b> (One World, Delta Airline, etc.)	One World (Air Alliance) (ATJ : Alchol to Jet)	米・中西部(準備中)	2027	2
	Delta Airline (ATJ : Alchol to Jet)	Luverne (米・ミネソタ)、他	Mid 2026	0.75
<b>Fulcrum Bioenergy</b> (United Airlines, etc.)	Johnson Matthey/ BP (FT : Fischer-Tropsch)	Sierra (米・ネバダ)	2022	0.3
<b>Sky NRG</b> (Boeing, Alaska Airlines, etc.)	Bank of America (FT : Fischer-Tropsch)	米・北西部	2027	0.3

出所：各社情報から JPEC 作成

SAF に関してはまだ具体的なクレジットなどの法的整備がなされていないため大手メーカーでの対応が遅れており、現在各種取り組みが進んでいるのは比較的小規模なメーカーである。一方で、航空機は



電動化のみで移動目的を達成するハードルが自動車と比較してかなり高く、引き続き液体燃料が必要である。よって実用上、SAFの早期展開は環境対応、GHG削減の観点からも非常に重要といえる。

米国政府でも2021年に三省（エネルギー省、運輸省、農務省）連携によるSAF Grand Challenge<sup>6</sup>がようやく打ち出された。これは2030年までに年間30億ガロンのSAF生産を行うというものである。これを実現するために、各種支援（研究開発助成金、製造設備融資、燃料評価データやモデリングサポート、等）が盛り込まれている。しかしながらバイデン政権肝煎りの「Build Back Better 法案」が未成立のため、再生可能ディーゼルのようなクレジットの仕組みは法案成立を待たねばならない状況である。SAFの製造技術としては、ATJ（エタノール又はブタノールを原料としてSAFを生産）またはHEFA（主に廃食用油などを水素化精製してSAFを生産）が主流となっている<sup>7</sup>。

#### 4-3. 再生可能ディーゼル生産実績と今後の見込み

米国では、先の表2で示した石油メーカーと提携先とのプロジェクトが発表されており、再生可能ディーゼルの生産能力は2024年までに大幅に増加することが見込まれている（図4）。

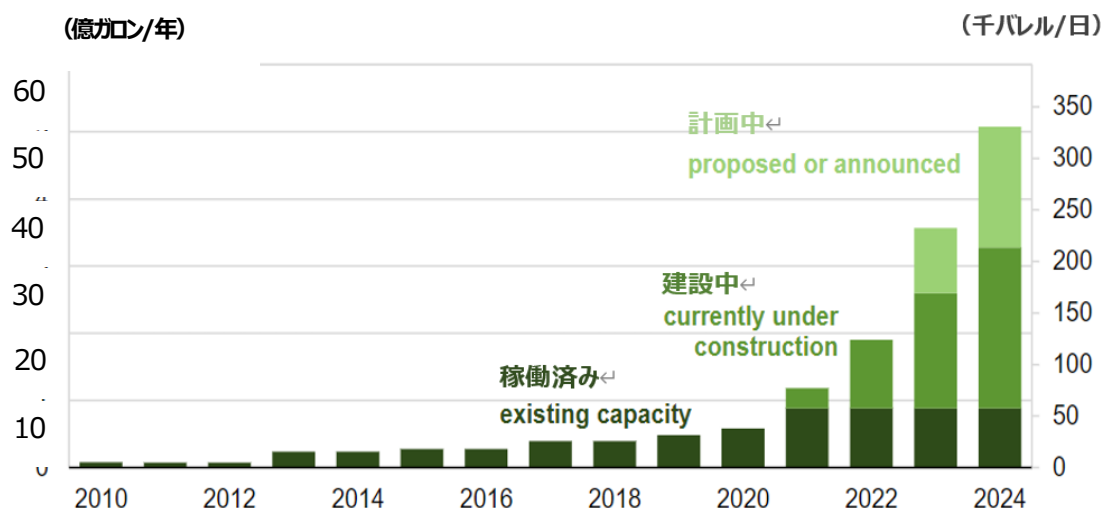


図4 米国における再生可能ディーゼル燃料の生産能力の実績と見込み (2010～2024年)  
出所：EIA データを基に JPEC 補図<sup>8</sup>

2020年末時点で、米国の再生可能ディーゼル生産能力は年間6億ガロン（日量約4万バレル相当）である。現在計画中の全てのプロジェクトが予定通り稼働した場合、2024年末には米国の再生可能ディーゼル生産量は年間50億ガロン（日量約33万バレル）に達する見込みである。これは石油系ディーゼル

<sup>6</sup> [https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-09/S1-Signed-SAF-MOU-9-08-21\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-09/S1-Signed-SAF-MOU-9-08-21_0.pdf)

<sup>7</sup> [https://www.peci.or.jp/wp-content/uploads/2022/04/JPEC\\_report\\_No.220401.pdf](https://www.peci.or.jp/wp-content/uploads/2022/04/JPEC_report_No.220401.pdf)

<sup>8</sup> <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=48916>

精製能力がほぼ横ばいであれば、2024年までに現在の米国ディーゼル燃料生産能力の約5%が再生可能ディーゼルで占められることを意味する。

再生可能ディーゼルは石油系ディーゼルと化学的に同等で性能もほぼ同じであるため、石油系ディーゼル燃料にどの割合で混合して使用しても問題が無いことが特長である。ディーゼル燃料中に2 vol%から20 vol%の範囲でしか混合できないバイオディーゼルと比べるとメリットがある。

一方で再生可能ディーゼルの生産能力拡大におけるリスクとして、原料油脂の調達がある。再生可能ディーゼルの生産量増加に伴い、その原料の価格は上昇している。バイオディーゼル及び再生可能ディーゼル生産者は、バイオディーゼル税額控除やRFS、LCFSにおけるクレジット価格等のインセンティブに頼って経済性を確保してきた。安定的な原料調達価格と政府からのインセンティブは、近い将来の再生可能ディーゼル生産の経済性を考える場合、引き続き重要なポイントになると思われる。

## 5. まとめ

米国におけるバイオリファイナリーの現状に関して、その技術的課題と共に米国の再生可能燃料基準などの政策動向、大手石油メーカーやSAF供給メーカーにおける再生可能燃料の生産計画などを交えて解説した。再生可能燃料や合成燃料に関しては欧州が一步進んだ取り組みを展開しているが、米国においてもようやく本格的な取り組みが始まろうとしている。

米国は世界で1, 2を争う自動車社会であるため、バイオリファイナリーの普及、再生可能燃料の生産拡大はカーボンニュートラル達成には必須アイテムの1つであると考えられる。しかしながらそれを低価格で安定的に実現していくための技術開発はまだ不十分であり、今後の技術革新が期待される。また原料の安定的調達方法や再生可能燃料生産者のメリットをサポートしていく政策的な取り組みも引き続き重要である。

(問い合わせ先)

一般財団法人石油エネルギー技術センター 調査国際部 [jrepo-0@peci.or.jp](mailto:jrepo-0@peci.or.jp)

本調査は、一般財団法人石油エネルギー技術センター(JPEC)が資源エネルギー庁からの委託により実施しているものです。無断転載、複製を禁止します。

Copyright 2022 Japan Petroleum Energy Center all rights reserved