

2023年度成果報告会

バイオジェット燃料生産技術開発事業／ 技術動向調査／

国内外におけるSAF（持続可能な航空燃料） の製造技術ならびに低コスト化技術に係る 動向調査

発表日：2024年2月1日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 河岸俊輔

団体名 (株)三菱総合研究所 エネルギー・サステナビリティ事業本部

問い合わせ先 株式会社三菱総合研究所 E-mail: kawagisi@mri.co.jp TEL:080-8017-6306

1. 目的

諸外国（欧米、中国等）の最新の SAF 製造技術ならびにコスト低減技術動向の情報収集、国内技術との比較検討をすることで、将来的なSAF生産量拡大と安定供給に向けて重要となる技術開発要素について整理する。

2. 期間

2023年3月 ～ 2023年10月

3. 目標（中間・最終）

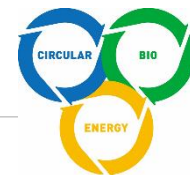
諸外国における最新のSAF生産技術開発状況を踏まえ、今後の我が国における技術開発・実証事業における技術開発課題等を特定する。

4. 成果・進捗概要

SAF製造技術の全体像を整理するとともに、技術開発等の必要性が特に認められる分野（優先分野）を特定した。

各種文献調査により欧米を中心とした先進的な技術開発・実証プロジェクトを整理するとともに、現地調査（欧州）、米国、中国におけるSAFの技術開発課題に関するヒアリングを実施した。また、国内有識者に対するヒアリングを行った。

上記に基づき、各分野における技術開発課題の素案となる文書を作成した。

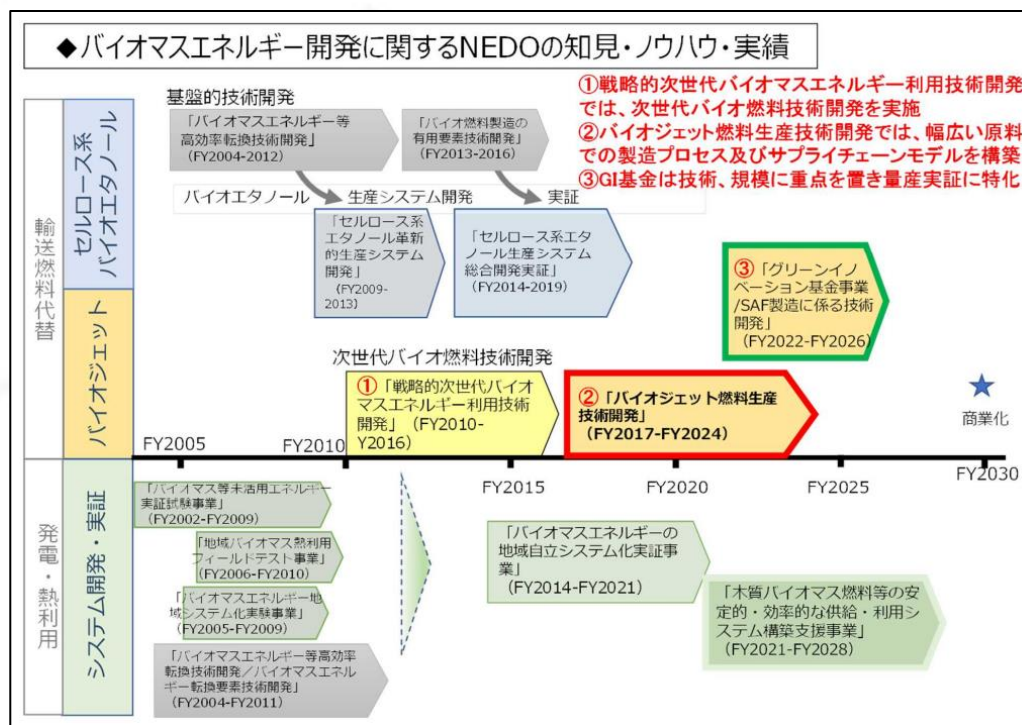


調査の背景

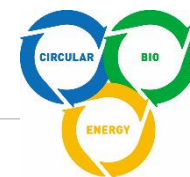
輸送用バイオ燃料の開発については2000年代前半より、基礎的技術開発、生産システム開発、実証、次世代バイオ燃料技術開発が実施されてきた。

SAF (Sustainable Aviation Fuel) は2017年より「バイオジェット燃料生産技術開発」事業において開発支援を行っており、2030年の商業化に向けて取り組みが進められている。

本検討は、2023年時点の欧米における最新のSAF生産技術開発状況を踏まえ、今後の事業における技術開発等の課題を検討するもの。



出所) 「バイオジェット燃料生産技術開発事業」中間評価報告書 (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 研究評価委員会 (2023年3月))



本調査は以下の手順により実施した。

A.技術開発等の必要性が特に認められる分野（優先分野）の特定

- ➡国内外の商用化・技術確立の進捗の整理
- ➡原料の期待供給量やGHG削減量に関する整理
- ➡上記に基づく優先度の高い分野の特定
- ➡諸外国が取り組む分野（諸外国の取組み概況）に基づく優先分野の妥当性検証

B.技術動向調査・技術開発課題の仮説設定

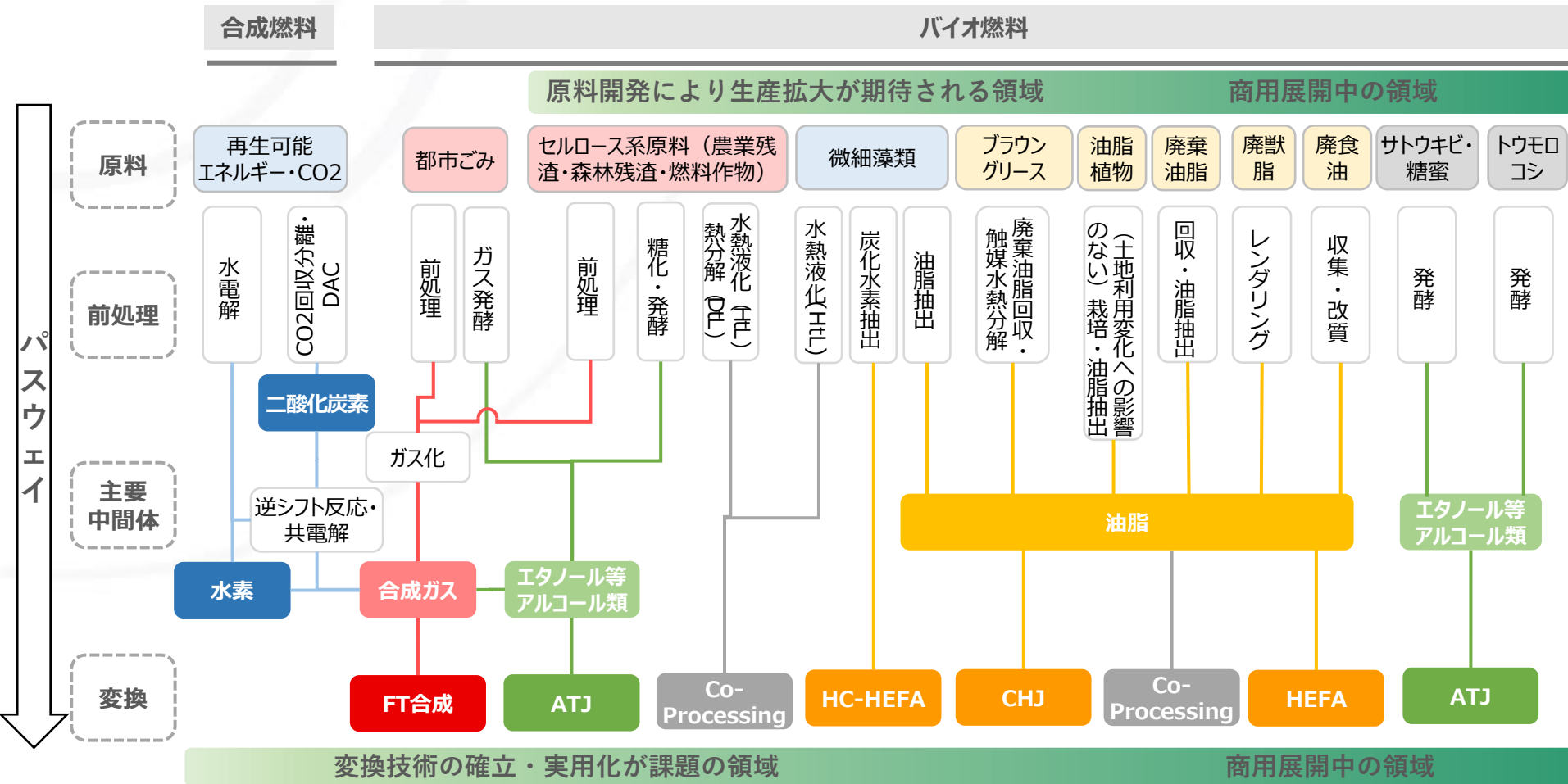
- ➡各優先分野の技術概要・商用化の現状の把握
- ➡諸外国が取り組む技術開発課題・我が国の技術開発等の現状把握
- ➡技術動向調査に基づく今後の技術開発課題の仮説設定

C. ヒアリング・現地調査に基づくブラッシュアップ・取り纏め

- ➡国内有識者へのヒアリングによる技術開発課題の具体化
- ➡米国・中国に関するヒアリング調査、欧州現地調査の実施
- ➡上記に基づく取り纏め文書の作成

SAF製造技術の全体像

●本調査において整理したSAF製造技術の全体像は以下のとおり

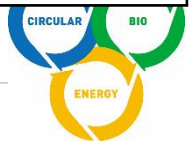


技術開発等の必要性が特に認められる分野 (優先分野)



● SAF 製造技術として以下の 4 分野

- **ガス化・FT 合成**：セルロース系原料を活用可能な製造技術であり、諸外国においても商用化に向けたコスト削減技術の開発・実証が継続されている。また今後、CCS との組合せなど、我が国が有する技術を活用した技術開発テーマを有する。
 - **アルコール・トゥ・ジェット（主に第二世代）**：未利用量の多いセルロース系原料を活用可能な製造技術であり、第二世代エタノール製造のコスト低減に向けた糖化・発酵技術の改善等の検討が継続されている。また今後、100%SAF技術の適用に向けた取り組みなどの技術開発テーマを有する。
 - **HtL ・ DtL 及びコプロセッシング**：セルロース系原料を活用可能な製造技術であり、諸外国においても商用化に向けコスト削減技術の開発・実証が継続されている。技術が確立された場合、発生源が地理的に分散した バイオマス資源の利用に有効である。
 - **合成燃料 (PtL)**：バイオマス原料の賦存に依らず供給量の拡大が可能なパスウェイとして普及展開に期待が持たれる。我が国において現在、技術実証が進展する一方、欧米において商用化計画が多数、一部商用化が実現されつつあり、実用化が加速している。
- **原料開発及びサプライチェーン開発**：油脂を原料とするパスウェイにおいて、新たな廃棄油脂（回収や処理の難易度が高い油脂）や新たな油脂植物の栽培等によって、国外からの輸入も含めた供給拡大に期待が持たれる。藻類バイオマスやセルロース系燃料作物も中長期的に重要な原料と位置付けられる。

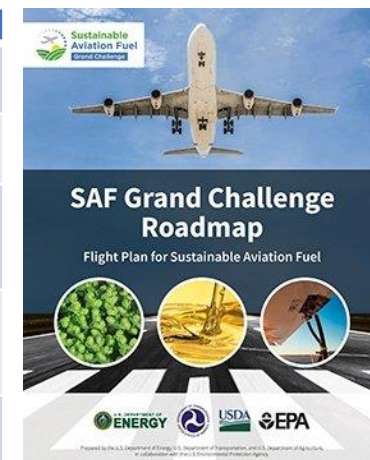


諸外国の取組み概況（米国）

● SAFグランドチャレンジ（2021年）・SAFグランドチャレンジ・ロードマップ（2022年）

➤ SAFの供給と最終用途の拡大、コスト削減、SAFの持続可能性の向上に資する課題を整理

分野	SAFグランドチャレンジロードマップのテーマ例
ガス化・FT	CT.1.7：バイオリファイナリへのCCS・CCUSの適用（CCSは現在～2030年、CCUは2030～40年） CT.5.2：ゼロ排出またはネガティブエミッション・バイオリファイナリ概念設計（2023年～40年）
ATJ	CT.1.2：コーンストーバーなど第二世代原料を利用したATJの生産量増加（2023年～20年代後半） CT.1.5：ATJ技術における耐水性触媒とリアクターの開発（2023年～35年）
HTL等のDTL技術	CT.3.5：主要中間生成品（セルロース糖、熱分解油、水熱液化油など）の要求仕様策定（2023～30年） CT.3.1：優先的な中間生成品の特定と変換プロセスの研究開発計画の策定（2024～2025年） CT.3.2：中間生成品とそれぞれの市場の価値提案（2024～2025年）
コプロセッシング	CT.3.3：ドロップイン原料となる代替油脂（中間生成品）を水素化処理で製造するプロセスの開発。パフォーマンス保証を提供する実証の実施。（2023年～様々） CT.3.4：製油所・水素化処理施設における中間生成品の混合点の特定（2023～2030年）
油脂原料開発	FI.2.3：既存の油糧作物の生産拡大（2030年のSAF製造目標に貢献） FI.2.4：新しい持続可能な油糧種子被覆作物を開発（2030年のSAF製造目標に貢献）



● バイオエネルギー技術局（BETO）による技術開発支援

➤ 足元ではバイオ燃料に関する多数の技術開発・実証プロジェクトが進展。2023年4月に実施されたピアレビューにおいて発表のあった分野、プロジェクト数は以下のとおり。

テーマ	プロジェクト数	テーマ	プロジェクト数
先進藻類システム - 栽培・株開発	16	データ、モデリング、分析プログラム	27
先進藻類システム - 統合	20	原料技術プログラム	36
アジャイルなバイオフィアウンドリコンソーシアム	34	原料変換インターフェースコンソーシアム	11
生化学変換とリグニンの利用	20	有機廃棄物の変換	19
二酸化炭素の利用	19	パフォーマンスに優れたバイオ製品、バイオプロセス分離	21
触媒改質	17		

諸外国の取組み概況（欧州）



● Horizon Europe

- EUでは、研究・イノベーション総局が所管する各種プログラムにおいて、SAFを含むバイオ燃料、合成燃料を対象とする技術開発プロジェクトが実施。特にTRLが6までの熟度の領域の技術開発支援は、Horizon Europe において支援を行っている。

分野	支援対象と支援の規模
ガス化・FT	GLAMOUR (TNO他) <ul style="list-style-type: none">グリセロールを活用した化学ループを用いた高圧自動熱改質/ガス化と小型FT反応器によるSAF・船舶用燃料の併産支援規模：4,989,000ユーロスケジュール：2020年5月～2024年4月
第二世代エタノール	EHLCATHOL (ライプニッツ研究所他) <ul style="list-style-type: none">リグノセルロース由来のエタノール製造における反応速度、収率の向上技術開発支援規模：3,999,628ユーロスケジュール：2020年～2024年
HtL/Pyrolysis・コプロセッシング	REFOLUTION (OMV、NESTE、VTT他) <ul style="list-style-type: none">高速熱分解油と水熱液化油のコプロセッシングの実証支援規模：10,146,216ユーロスケジュール：2023年～2026年
合成燃料	MegaSyn (Sunfire、OMV他) <ul style="list-style-type: none">SOECによる共電解を用いた合成ガス・合成燃料製造の大規模実証支援規模：7,785,793ユーロスケジュール：2021年～2025年
新たな油脂原料の利用を可能とする技術	FlexJetプロジェクト (SKYNRG BV、フラウンホーファー他) <ul style="list-style-type: none">廃植物油および有機固形廃棄物バイオマス(食品廃棄物)から航空バイオ燃料生産の商用前実証プラントを建設。圧カスイング吸着(PSA)による水素分離と触媒改質(TCR)、ハイドロ脱酸素(HDO)およびハイドロクラッキング/異性体化(HC)を組み合わせ。支援規模：9,999,732ユーロスケジュール：2018年4月～2024年3月

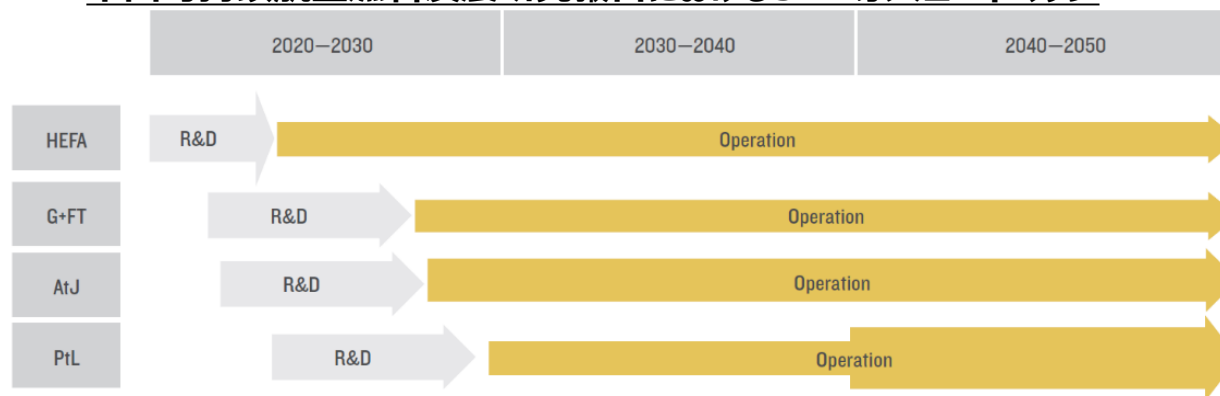


諸外国の取組み概況（中国）

● 中国持続可能航空燃料发展研究报告

- 2022年10月に、北京大学能源研究院が、中国可持続航空燃料发展研究报告 現状与展望として、SAFの導入拡大を見据えたロードマップや今後の課題等を含む文書を発表。

中国可持続航空燃料发展研究报告におけるSAF導入ロードマップ



● 中国におけるSAF製造技術に関する技術開発主体

- 各種公表資料から中国のSAF製造技術の開発動向を把握。研究開発主体は以下のとおり。

分野	研究開発主体
セルロース系原料由来エタノール	中国科学院広州エネルギー研究所、新疆カラマイ森禾生物能源科技有限公司
ガス化FT合成技術	中国科学山西煤炭化学研究所
排ガス由来エタノール	SGLT社
藻類	中国科学院広州エネルギー研究所、中国科学院青島生物エネルギープロセス研究所、浙江大学、大連（撫順）石油化学研究院
合成燃料	国家電力投資集团公司
その他	中国科学院広州エネルギー研究所



● 各要素技術のコスト削減

- 原料調達、ガス化、合成ガスの処理、FT合成触媒の保守（脱硫およびフィルタ技術）におけるコストが大きい。特に合成ガスの脱硫の効率化はFT合成における触媒の保守の効率化につながる（EUではCOMSYNプロジェクトとして取組み）。我が国でもこれらのコスト削減に取り組むことが期待される。
- 残留ガスの発電燃料利用など、併産物の利活用によるビジネスモデルの確立も重要である。

● 小型化技術

- 小型化によりCAPEXの総額を軽減、分散型の原料変換に対応することが期待される。EUの先行事例（COMSYNプロジェクト）に基づく、小型化によるCAPEX低減のメリットを得るには、合成ガスの脱硫や残留ガスのクリーニングプロセスの最適化が必要とされる。

● CCS付きガス化・FT合成技術

- BECCSはカーボンネガティブ技術として注目を集めており、BTL+CCSは構想があるが、実プロセスの実証は世界において未実施であり、今後の実証に期待される。

諸外国の主な取り組み

分野	技術開発の方向性	諸外国の主要取組み
ガス化・FT合成技術	各要素技術によるコスト削減	<ul style="list-style-type: none"> 原料調達及びガス化・合成ガスの処理・FT合成触媒の保守（脱硫およびフィルタ技術）のコスト削減、低圧FT合成炉設計（VTT）
	小型化・簡素化	<ul style="list-style-type: none"> プロセス簡素化によるCAPEX低減（VTT）
	CCS付きガス化・FT合成	<ul style="list-style-type: none"> 原理的なプロセスフロー構想、技術経済評価（Kreutz et.al）



技術開発課題

(アルコール・トゥ・ジェット (主に第二世代))



● 第二世代バイオエタノールのコスト削減技術

- 第二世代バイオエタノールのコスト削減が主要課題。特に、酵素のコストが大きく、諸外国では、酵素の回収・再利用技術の開発、酵素メーカー・酵母メーカーの連携による開発などがあり、同様の取組みが我が国でも期待される。この他、C5糖の発酵技術によるエタノール収率の向上、連続糖化・発酵技術、レトロフィットなどの諸外国事例がある。

● ATJ技術

- ATJ-SPKは生産、取引量の多い第一世代エタノールを原料とした商用化の動きに要留意。2023年中には今後100%SAFとして利用可能性があるATJ-SKAがD7566 Annex8が承認。

諸外国の主な取組み

分野	技術開発の方向性	諸外国の主要取組み
アルコール・トゥ・ジェット技術 (主に第二世代)	ATJ-SPK	・ 脱水・重合反応の速度向上に向けた触媒の改良(PNNL、アラバマ大学)
	ATJ-SKA (100%SAF)	・ C2-C5アルコールを原料とする100%SAF製造(2023年8月 ASTM認証取得) (Swedish Biofuels) ・ エタノールを原料とする100%SAF製造(Byogy)
	エタノール以外の中間生成物	・ イソブテンPathwayのASTM認証(Global Bioenergies)、2,3-ブタンジオール発酵菌株の開発(PNNL)、Methanol-to-Jet技術の開発(Enerkem等)
	酵素・薬品コスト削減	・ オンサイト酵素製造(Clariant)、酵素回収膜の開発(NREL)、薬品利用の転換(D3MAX)、薬品再利用技術開発(AVAPCO・IOGEN)
	C5糖の有効利用	・ C5糖・C6糖同時発酵が可能な菌株の開発(Clariant、Terranol)
	連続糖化・発酵技術	・ 糖濃度監視技術開発(Sekab・Terranol)、アルコール連続抽出膜の開発(ADM・Gevo)、酵素回収・再利用技術開発(NREL)、連続発酵用の耐久型菌株の開発(Terranol、オハイオ州立大学)
レトロフィット技術	・ 複数の産業プロセスに対するバイオ技術適用可能性の検討(BIOFIT)、第二世代技術の第一世代施設へのレトロフィット(D3MAX)	



技術開発課題 (HtL含むDtL・コプロセッシング)



● 既存の製油所設備を活用した地域分散型コプロセッシングモデル

- 諸外国においても、バリューチェーン確立に向けた実証的な取り組み、各種原料に由来する中間原料（HtL油、熱分解油）の製造実証、コプロセッシング投入ポイントの検討を進展させている段階。
- 我が国においても豊富な森林資源等を活用する事業モデルを検討することが望まれる。

● HtL・Pyrolysisを含む直接熱化学的液化技術の開発

- 我が国においても過去に技術開発に取り組んだ実績がある。今後はコプロセッシング等と連携した実証等が期待される。ASTM認証が未認証であることには留意が必要。

諸外国の主な取り組み

分野	技術開発の方向性	諸外国の主要取組み
HtL・DtL・ 「コプロセッシング」	HtLのバリューチェーン確立	<ul style="list-style-type: none"> 食品残渣等の湿性廃棄物を原料とするHtLバリューチェーン実証(Waste2Road、PNNL) 微細藻類を原料とするHtLバリューチェーン実証(PNNL)
	コプロセッシングに適した中間原料の開発（HtL油、DtL油を含む）	<ul style="list-style-type: none"> 森林残渣、ユーカリ、わら（4Refinery、REFOLUTION） 森林残渣、パーム油、廃食油（Repsol） ベイマツ由来熱分解油やその他バイオ原油（Petrobras） 廃食油（Hellenic Petroleum） ソルガム等（Marathon）
	有望なコプロセッシング投入ポイントの特定	<ul style="list-style-type: none"> バイオ原油へのFCCにおけるコプロセッシングの有用性は実証で確認済。プロセスデザイン、影響評価、経済性評価等と合わせて検討が進む（4Refinery、REFOLUTION）
	コプロセッシングプロセスへの技術的影響の改善	<ul style="list-style-type: none"> 水素化処理への投入の場合：反応器内への熱発生による処理への悪影響を回避するためのバイオ原油からの酸素除去・処理制御等 水素化分解への投入の場合：触媒への悪影響についての分析 FCCへの投入の場合：触媒への悪影響についての分析
	その他熱分解油を原料とするSAF製造プロセスの開発	<ul style="list-style-type: none"> IH2（Shell、Alder Fuels）



技術開発課題（原料開発）

- **総論**：諸外国と同様、全方位的に検討し、その活用可能性を検討することが望まれる。
- **油脂植物**：土地利用変化の考慮、栽培が行われる地域の事情に照らした生産が必要。
- **藻類**：欧州では藻類の商用化は2030年、米国では2040年の商用化を見据えているとの指摘。今後も培養効率や収率の向上に取り組むことが期待されるが、海外（特に米国）の技術開発テーマに照らした我が国の技術開発の位置づけの明確化が有効と考えられる。
- **回収難易度の高い油脂**：ブラウングリースをSAFに利用する技術の導入は米国で進展している。回収は既に日本でも取り組みが進展しており、今後SAFとしての実用化も期待。
- **セルロース（残渣・燃料作物）**：諸外国においてもサプライチェーン構築や持続可能性評価のFSを実施中。これまで通り、我が国においても同様な取り組みが望まれる。

諸外国の主な取り組み

原料タイプ	原料例	商用化への主な課題
油脂植物	ポンガミア、カメリナ、ソリス	<ul style="list-style-type: none"> 商業規模で育成・生産可能な適正地の特定
藻類	微細藻類、大型藻類（海藻）、シアバクテリア	<ul style="list-style-type: none"> 培養に要する土地、肥料、水資源 培養の安定化やコスト削減（オープンポンドでは季節よっての育成変動、死滅リスク対策。PBRではコスト削減） 油脂等の収率向上
回収難易度の高い油脂	ブラウングリース POME	<ul style="list-style-type: none"> 油脂、固形物、洗剤の混合物である。金属やリン類、塩素等の不純物の処理を要する。 90～95%が水分、残油、土粒子、浮遊物を含んでいる。処理において環境への悪影響を軽減する必要がある。
セルロース残渣	農業残渣、森林残渣	<ul style="list-style-type: none"> 収集コストの軽減や変換プロセス含むサプライチェーンの構築を要する
セルロース（草木系作物）	スイッチグラス、ススキ、ミスカンサス	<ul style="list-style-type: none"> 物理的、化学的な不均一性への対処 収穫や輸送におけるコスト、CO₂排出の抑制
セルロース（木質系作物）	ポプラ、ヤナギ	<ul style="list-style-type: none"> SAFへの変換効率が比較的低い 収穫された後の貯蔵中の劣化への対処

技術開発課題（合成燃料）



- **長期間にわたる統合プロセスの安定運転**：逆シフト反応・FT合成によるパスウェイは要素技術が確立されているが、諸外国においても新たな統合プロセスの安定的な運転のための実証に対して支援が行われている状況。
- **小型化・モジュール化反応装置とビジネスモデル開発**：分散型の再生可能エネルギー由来の電力の活用やCO₂排出源の活用のための小型化・モジュール化された装置が合成燃料由来のSAFの商用化に向けて有効。（ドイツでは既に実用化が進展）
- **e-Methanolを経由した技術**：メタノールについては、特に海運燃料分野において導入を推進する取り組みが加速。他セクターにおける併製品の供給も含めたビジネスモデルを構想し、実装していくことに期待が持たれる。
- **政策との連動**：ドイツではINERATEC等の商用化技術の展開とPtLマンドートを連動。

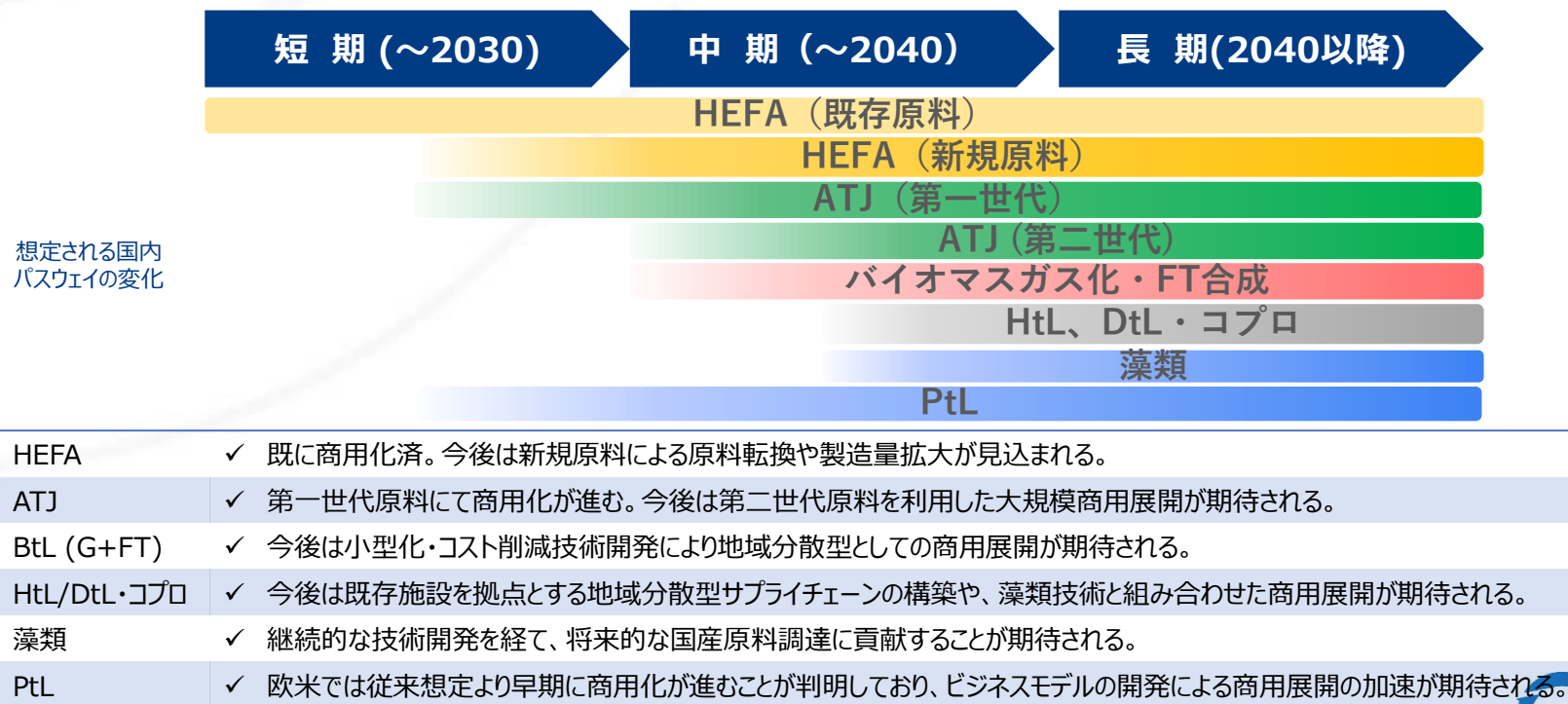
諸外国の主な取り組み

分野	技術開発の方向性	諸外国の主要取組み
合成燃料 (PtL)	長期間にわたる統合プロセスの安定運転	<ul style="list-style-type: none"> ・ 接触部分酸化（CPOX）と逆シフト反応の組合せの長時間（1000時間）運転実証。（VTT・e-Veturi） ・ ドイツではロードマップにおいて工業規模での全体的な技術統合・互換性を検討することを位置付け
	逆シフト反応・FT合成装置のモジュール開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 逆シフト反応器とFT反応器の組み合わせによるモジュールの開発（VTT・ICO2CHEM）
	FT合成粗油の最適化技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ FT合成反応の速度論的法則の特定（VTT・ICO2CHEM）
	SOECによる共電解技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ SOECのスケールアップ・コスト削減・耐久性向上（Sunfire・OMV）
	eメタノールを経由したパスウェイの実証 その他新規技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 産業排ガスを活用したeメタノール製造とケロシンの供給（EDF他） ・ プラズマCO₂分離等を用いたPtLモジュール（DIFFER他）、エチレンを経由した合成燃料製造技術（TNO他）、エタノール工場由来の回収CO₂利用（BETO）



各SAF製造技術の導入期待

- 以上に基づいて検討した今後の各SAF製造技術の導入期待は以下のとおり。
 - **HEFA向けの新規原料・ATJ（第一世代）・合成燃料**：2020年代の商用化の期待
 - **バイオマスガス化・FT合成・ATJ（第二世代）**：2030年代前半の商用化の期待
 - **HtL含むDtL技術・藻類**：2030年代の商用化の期待



本調査成果を活用して期待されること



- **計画としての具体化**：本調査で取り纏めた技術開発課題（素案）を下敷きとし、我が国におけるSAF製造技術開発計画を具体化する。
- **現地調査等で得られた知見の活用**：現地調査やヒアリングで得られた各種情報をプロジェクト組成へと活用する。
- **産業育成への貢献**：本調査を通じて得た知見を活用し、SAF製造技術開発や商用化を通じた我が国の産業・人材育成の促進へと活用する。

