

SAFの製造技術とバイオマス・廃プラスチック利用

SAF Manufacturing Technology and Biomass/ Waste Plastics Utilization

越川 翔生

(株)レボインターナショナル
炭素源循環創造部
〒612-8473
京都府京都市伏見区下鳥羽広長町 173

Shoi KOSHIKAWA
REVO International inc.
173 Hiroosa-cho, Shimotoba,
Fushimi-ku, Kyoto 612-8473, Japan



西田 孝伸

(株)レボインターナショナル
炭素源循環創造部
〒612-8473
京都府京都市伏見区下鳥羽広長町 173

Takanori NISHIDA
REVO International inc.
173 Hiroosa-cho, Shimotoba,
Fushimi-ku, Kyoto 612-8473, Japan

松永 興哲

(株)レボインターナショナル
炭素源循環創造部
〒612-8473
京都府京都市伏見区下鳥羽広長町 173

Kotetsu MATSUNAGA
REVO International inc.
173 Hiroosa-cho, Shimotoba,
Fushimi-ku, Kyoto 612-8473, Japan



谷利 駿

(株)レボインターナショナル
炭素源循環創造部
〒612-8473
京都府京都市伏見区下鳥羽広長町 173

Syun TANIKAGA
REVO International inc.
173 Hiroosa-cho, Shimotoba,
Fushimi-ku, Kyoto 612-8473, Japan

論文要旨：運輸部門の中でも環境負荷の高い航空分野では、従来のジェット燃料からSAF（Sustainable Aviation Fuel：持続可能な航空燃料）への代替が進んでおり、空のカーボンニュートラルが加速している。本総説では弊社が目指す炭素源循環社会の実現に向けた取り組みと国内外におけるSAFの研究開発動向について述べるとともに、特に弊社のREVO方式急速接触熱分解（R-CFP：REVO-Catalytic Fast Pyrolysis）技術について紹介する。R-CFP技術では廃食用油に加え、さらに賦存量の多い木質系バイオマスや廃プラスチックへと原料を拡大し、SAF等低炭素燃料を製造する高度資源化プロセスの確立および分解活性の長期安定化と低コスト化を図っている。R-CFP技術を用いることで高い軽質油（ナフサ+SAF+軽油）収率および高SAF選択率が得られる。

Abstract: There is a growing trend in aviation to replace conventional jet fuel with SAF (Sustainable Aviation Fuel), and carbon neutrality in the sky is accelerating around the world. This review article describes our efforts to realize a carbon-recycling society and research and development of SAF in the world, and introduces our R-CFP (REVO-Catalytic Fast Pyrolysis) technology in particular. The R-CFP technology is expanding not only to waste cooking oil, but also to more abundant raw materials such as woody biomass and waste plastics. The R-CFP technology is also used to establish an advanced resource conversion process to produce low-carbon fuels such as SAF, as well as to stabilize the decomposition activity over a long term and reduce the cost of the process. High light oil (naphtha + SAF + gas oil) yield and high SAF selectivity can be obtained by using the R-CFP technology.

Key words: sustainable aviation fuel, R-CFP technology, jet fuel, fast pyrolysis, bio-coke

1 はじめに

2050年カーボンニュートラルに向け、世界的に脱化石燃料の動きが加速しており、再生可能エネルギー（太陽光、風力、バイオマスなど）の利用が増加している¹⁾。バイオマスなどを原料とする代替燃料（バイオメタン、バイオディーゼル、バイオエタノール、水素など）は90年代頃まで化石系資源枯渇への対応策であったが、地球温暖化問題が顕在化するにつれ、代替燃料の主目的はCO₂排出量削減対策へと変化した。したがって、現在の代替燃料は地球温暖化抑制に寄与するカーボンニュートラル燃料へと移行している。2050年カーボンニュートラルの達成には温室効果ガスの排出量削減が急務である。国際エネルギー機関の報告では、2021年時点での世界の総CO₂排出量は約363億tであり¹⁾、2050年カーボンニュートラルの達成には電化の促進と燃料転換、高効率化・省エネルギー対策等によるエネルギー起源CO₂排出量の削減が重要である。また、グリーン成長戦略²⁾では、再生可能エネルギーを最大限導入するとしている。運輸部門の中でも航空機は多量のエネルギーを消費し、環境負荷の高い輸送手段であることから、カーボンニュートラル燃料であるSAF（Sustainable Aviation Fuel）が注目されている。日本では2030年時点のSAF使用量を「本邦エアラインによる燃料使用量の10%をSAFに置き換える」との目標を設定しており³⁾、SAFの導入を加速させるためにSAF官民協議会が設立されている。特に現在使用されている航空用液体燃料であるケロシンは、重量当たりのエネルギー密度がリチウムイオン電池の約60倍、体積当たりのエネルギー密度が液体水素の約3倍⁴⁾と高いことから、この石油由来のケロシンと同様の化学組成と性能を有する代替燃料SAFへの移行が航空分野における世界的な主流となっている。このような流れの中で、国内では国産SAFの商用化および普及・拡大に取り組む有志団体の設立⁵⁾や、廃食用油を原料とした国内初となる国産SAFの大規模生産実証設備の建設が開始しており⁶⁾、空のカーボンニュートラルが加速している。SAFを従来のジェット燃料に混合および代替することでCO₂排出量を50~80%削減することが可能である⁷⁾。しかしながら、日本国内における廃食用油の排出量は50万t/year⁸⁾程度であり、原油供給量1.2億t/year⁹⁾に対して僅少である。したがって、廃食用油以外の長期的に安定供給可能な原料の発掘ならびにそれに対応できるバイオ燃料製造技術の開発が強く求められている。特に廃棄物系有機資源は、木クズや廃プラスチック、糞尿および汚泥など多岐に亘り、エネルギー賦存量は約2.6億t/year¹⁰⁾と膨大である。中でも廃

プラスチック排出量の内、サーマルリサイクルされるものは510万t/year、未利用は107万t/year存在し¹¹⁾、令和7年の未利用林地残材は320万tの見込み¹²⁾であることから、SAFなど高付加価値燃料の原料としての利用可能性が十分ある。

このような背景のもと、弊社は炭素源触媒を用いたREVO方式急速接触熱分解（R-CFP：REVO-Catalytic Fast Pyrolysis）技術を考案し、木質系バイオマスや廃プラスチック等から持続可能なバイオ燃料を製造するプロセスの開発を進め、炭素源触媒とR-CFP技術の有効性を確認している¹³⁻¹⁵⁾。

ここでは、まず弊社が目指す炭素源循環社会の実現に向けた取り組みとSAFの研究開発動向について述べるとともに、特に弊社のR-CFP技術について紹介し、それが炭素源循環社会において果たすべき役割について展望する。

2 炭素源循環社会の実現に向けて

カーボンニュートラルとは温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させることであり、弊社は炭素源循環社会の構築によってCO₂排出量削減に貢献している。特に運輸部門においては電動化だけではなく、熱機関のさらなる環境負荷低減および熱効率向上が急務であり、燃料のカーボンニュートラル化も重要な技術となっている。電動化が大きく進歩した場合はエネルギーの安定供給は必須であり、太陽光や風力、廃棄物系バイオマスといった地域に賦存する分散型エネルギーの活用が望まれる。弊社が目指す炭素源循環社会システムの基本構想をFig. 1に示す。エネルギー生産時・使用時に発生するCO₂はバイオマスで吸収し、さらには廃プラスチックや廃食用油等の有機廃棄物や未利用バイオマスを利活用することで炭素源を循環させるシステムである。弊社は創業以来、バイオマス、廃棄物の有効活用の一環として、地域から廃食用油を有価物として引き取り、脂肪酸メチルエステル系バイオディーゼル燃料を製造し、市バスや公共交通機関で利用するなど地産地消の取り組みを行なっている。2005年、2006年には弊社バイオディーゼル燃料を用いて国内耐久レースやダカールラリーへも参加し、燃料の品質や安全性等を証明した。また、国内外の新しいニーズに応えるべく、廃食用油を原料とした低圧水素化接触分解技術により、炭化水素系バイオ液体燃料（バイオナフサ、SAF、バイオ軽油等）製造プロセス開発を推進し、廃棄物資源の有効利用に繋がる事業を展開している¹⁶⁾。2020年にはSUPER GTシリーズにて、競技運営車両であるセーフティーカーにバイオガソリンを供給し¹⁷⁾、圧縮着火機関だけでなく、火花点火機関におい

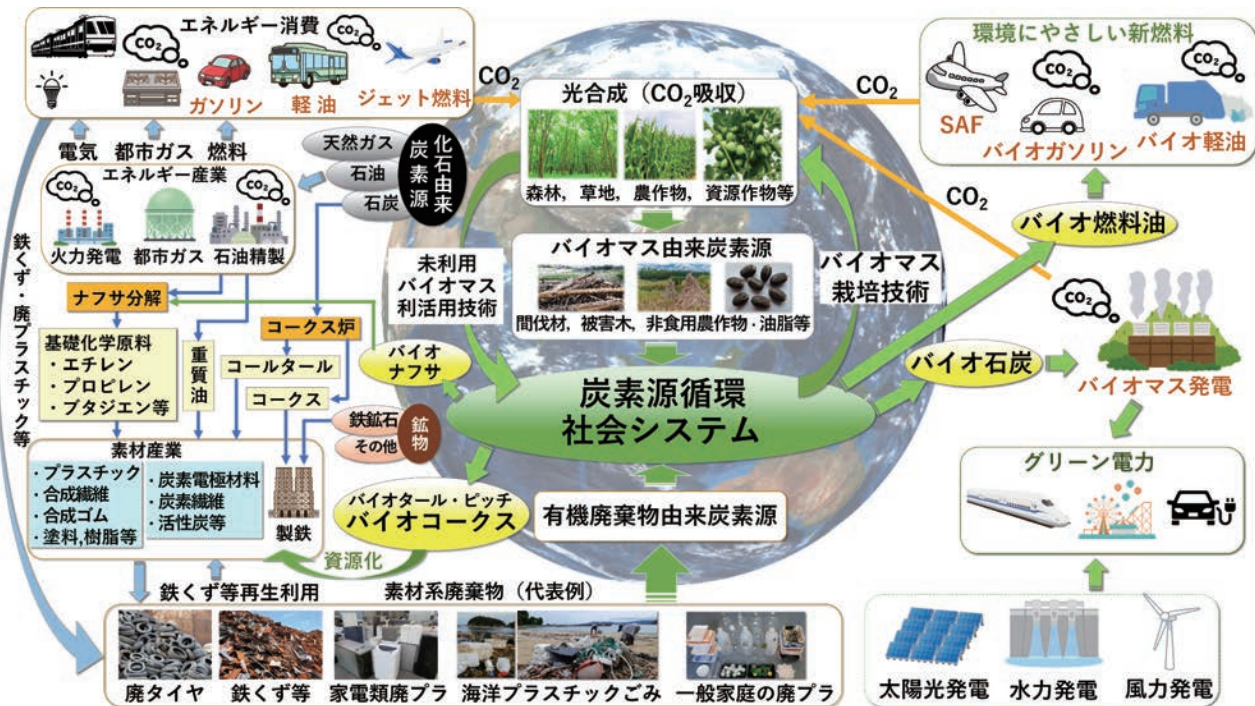


Fig. 1 Concept of carbon source recycling society system

でも温室効果ガス排出量削減に貢献できることを示した。更には国産 SAF の大規模生産の実現に向け合同会社を設立し、NEDO の助成事業として採択された¹⁸⁾。このように自治体や企業等と連携し、脱炭素だけではなく、炭素源が循環する仕組みを弊社は目指している。

3 SAF の研究開発動向

3.1 SAF の制約・規制等について

まず初めに SAF とは持続可能な航空用燃料のことであり、バイオマスなど有機廃棄物等の持続可能な物質を原料とし、かつ従来のジェット燃料と同様の炭化水素組成を持った航空用燃料のことである。そのため、自動車用燃料に使用されるバイオエタノールや脂肪酸メチルエステルとは異なり、構造中に酸素を含まない炭化水素で構成されているため、既存のインフラやエンジン等の改修が必要なく、従来のジェット燃料と同様の取り扱いが可能となる。ジェット燃料の成分は灯油と概ね同等であるが、使用環境から厳しい規格が設けられている。SAF も例外では無く航空用代替燃料用の国際規格として ASTM-D7566 に規定されている。ASTM-D7566 は Table 1 に示す通り、製造する技術および原料によって 8 つの категорияが承認されている。中でも、HEFA-SPK (Synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids) は既に商用化された技術であり、従来のジェット燃料 (JetA-1) と比較して動粘度・表面張力に大きな差はないものの、芳香族成分がほとんど含

まれておらず、不飽和分が少なく、密度も小さい¹⁹⁾ ことから現状では、従来のジェット燃料に対して体積比最大 50% までの混合が認められている。

国際航空業界団体は 2021 年に航空輸送分野において 2050 年までにカーボンニュートラルとする目標を発表し、そのために必要な SAF の量は 2022 年時点の世界のジェット燃料供給量の 1.5 倍となる約 4.5 億 kL と推計している²⁰⁾。また、国際民間航空機関 (ICAO) は「CO₂ 排出量の増加を伴わない国際民間航空のためのカーボンオフセットおよび削減スキーム (CORSIA)」を採択し、2021 年から運用を開始している²¹⁾。この CORSIA では 2019 年度の CO₂ 排出量を基準として航空技術・運航改善・代替燃料 (SAF) では賄いきれない CO₂ 超過分をクレジット活用等することで温室効果ガス排出量の増加防止を目的としたものであり、2027 年以降は一部の国を除き全ての ICAO 加盟国で参加を義務づけている。さらに、ICAO は長期的な脱炭素目標として 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを 2022 年に採択している。また、ASTM-D7566 で認証されている代替燃料は持続可能な CO₂ 排出量低減効果を見込むものだけで構成されておらず、SAF として持続可能性を認められるものは CORSIA 適格燃料 (CORSIA Eligible Fuel: CEF) で定められている²²⁾。そのため、SAF の製造事業者は CEF として認証を得ることが SAF の供給・利用において重要な項目となる。

3・2 SAFの原料と製造技術

Table 2 に SAF の原料と製造方法の分類を示す。SAF の原料は主に廃食用油、廃プラスチックや廃ガスを含む都市ゴミ、バイオマスに分類できる。廃食用油は主に飲食店や家庭から排出されたものを回収し、原料として活用する。廃食用油を用いた HEFA-SPK はエステルまたは脂肪酸を水素化処理することで製造される。そのため、バイオマス由来の植物油、動物油脂や微細藻類から採取される油からも同様に製造可能であり、多種多様な油脂を利用可能である。しかし、バイオマス由来植物油に関しては食料競合が起きないように、ジャトロファ等の非可食植物の利用が望ましく、(株)J-オイルミルズは食料と競合しない植物油脂利用による SAF サプライチェーンモデルの実証を行なっている²³⁾。

一般的な植物油は主に炭素鎖長が C₁₆ と C₁₈ の油で構成されており、一般的な航空燃料の炭素鎖長 C₈~C₁₆ より長い。そのため、分解・異性化により炭素鎖長の調整を行う必要がある。油脂類を使った燃料はすでにバイオディーゼル燃料として世界中で製造販売されており、油脂等の回収網は既に構築されている。また、HEFA-SPK は水素化バイオディーゼルといった既に普及しているバイオディーゼル燃料の製造方法と類似していることから、使用設備が既存設備の改造で済むこともあり、最も商用利用されている技術であるため、World Energy 社や Neste 社などが商用的に HEFA-SPK で SAF を製造している。日本国内では、SAFFAIRE SKY ENERGY 社が 2025 年から HEFA-SPK で SAF を供給開始し、3 万 kL/year の SAF を製造予定である²⁴⁾。

Table 1 Types of SAF in ASTM-D7566

| Annex 番号 | 種類 | 原料例 | 構成成分 | | | |
|----------|-------------|----------------------|------------|------------|---------------|-----------|
| | | | n-paraffin | i-paraffin | cycloparaffin | Aromatics |
| A1 | FT-SPK | リグノセルロース, 都市ゴミ | ○ | ○ | ○ | × |
| A2 | HEFA-SPK | 植物油, 動物油脂, 廃食用油 | ○ | ○ | ○ | × |
| A3 | HFS-SIP | デンプン/糖 | ○ | ○ | × | × |
| A4 | SPK/A | 非石油由来芳香族 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| A5 | ATJ-SPK | デンプン/糖, 都市ゴミ, 排ガス | ○ | ○ | ○ | × |
| A6 | CHJ | 微細藻類および廃食用油 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| A7 | HC-HEFA-SPK | 微細藻類抽出油 | ○ | ○ | ○ | × |
| A8 | ATJ-SKA | バイオマス由来アルコール (C2-C5) | ○ | ○ | ○ | ○ |

Table 2 SAF Raw Materials and Production Methods

| 原料 | | 合成工程 | 種類 | | |
|--------------------------|----|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------|
| バイオマス | 植物 | デンプン/糖 | 微生物発酵→脱水・重合・水素化 | ATJ-SPK | |
| | | | ファルネセン発酵→水素化・異性化 | HFS-SIP | |
| | | 油脂 | 脂質抽出→水素化・異性化 | HEFA-SPK | |
| | | | 前処理→接触水熱分解→水素化 | CHJ | |
| | | リグノセルロース | 糖化→微生物発酵→脱水・重合・水素化 | ATJ-SPK | |
| | | | 糖化→ファルネセン発酵→水素化・異性化 | SIP | |
| | | | ガス化→合成ガス→FT 合成→水素化 | FT-SPK | |
| | | | ガス化→合成ガス→アルコール生成→脱水・重合・水素化 | ATJ-SPK | |
| | 動物 | 油脂 | 脂質抽出→水素化・異性化 | HEFA-SPK | |
| | | | 前処理→接触水熱分解→水素化 | CHJ | |
| | | 糞尿 | 微細藻類培養→脂質抽出→水素化・異性化 | HEFA-SPK | |
| | | 微細藻類 | 油脂 | 培養→油脂抽出→水素化・異性化 | HEFA-SPK |
| | | | 粗油 (炭化水素) | 培養→粗油 (炭化水素) 抽出→水素化・異性化 | HC-HEFA-SPK |
| | | | バイオマス (藻) | 培養→藻の回収→水熱処理→バイオオイル→水素化・異性化 | HTL |
| 廃食用油 | 油脂 | 脂質抽出→水素化・異性化 | HEFA-SPK | | |
| | | 前処理→接触水熱分解→水素化 | CHJ | | |
| 都市ゴミ (廃プラスチック・廃ガスも含む) | | ガス化→合成ガス→FT 合成→水素化 | FT-SPK | | |
| | | ガス化→合成ガス→アルコール生成→脱水・重合・水素化 | ATJ-SPK | | |

都市ゴミや木質バイオマスなどの有機物全般を用いた FT-SPK (Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene) は原料をガス化して合成ガス (CO, H₂) を生成し、得られた合成ガスからフィッシャー・トロプシュ (FT) 合成で炭化水素を生成する。原理的に再生可能エネルギー由来の電力などで製造されたグリーン水素と大気中や工場などから回収された CO₂ を原料として逆シフト反応によって CO を生成し²⁵⁾、FT 合成によっても SAF を製造可能である。FT-SPK はノルマルパラフィン以外の含酸素化合物やオレフィンの混合物が含まれているため、水素化・異性化処理による精製が必要である。FT 合成で生成されるアルカン、アルケンの炭素鎖長を SAF の範囲内に収めるために様々な触媒 (遷移元素: Co, Fe, Ni, Ru, アルカリ金属: Li, Na, K, Rb, Cs, アルカリ土類金属: Mg, Ca, Sr, Ba) が試されている²⁶⁻³²⁾。

HEFA-SPK 同様に、FT-SPK は主にイソパラフィンやノルマルパラフィンで構成されており、芳香族はほとんど含まれていない。そのため、従来のジェット燃料に対して体積比最大 50% までの混合が認められている。これまでに、Fulcrum BioEnergy 社は都市ゴミから SAF を製造している。また、日本国内では三菱パワー (株) から 4 社が木材を原料としたガス化と FT 合成によって SAF を製造し、エンジン試験や実際のフライトに使用している³³⁾。さらに、(株) JERA から 4 社はバイオマスガス化 FT 合成による商業規模製造設備での SAF の製造を目指しており、1.2 万 kL/year を計画している³⁴⁾。

HEFA-SPK と同じく廃食用油や動植物油脂を原料とする CHJ (Synthesized kerosene from hydrothermal conversion of fatty acid esters and fatty acids) は前処理工程、接触水熱工程、後処理工程で SAF を製造する。前処理工程では①多価不飽和脂肪酸を異性化し、共役二重結合を形成する工程、②形成された共役二重結合ヘディールス・アルダー反応によりアルケンを付加する工程、③脂肪酸の二重結合へアルキル基やアシル基を求電子置換して分枝状分子を形成する工程があり、前処理工程のこれらの処理により五員環、六員環、分枝状分子が形成される。前処理の後、触媒存在下で水熱処理 (450℃~475℃, 210 bar の高温高压条件) によるクラッキング・加水分解が行われ、直鎖状、分枝状、環状、芳香族分子が形成される。更に、生成された分子は触媒の効果で脱炭酸と脱水がなされる。形成された直鎖状、分枝状、環状オレフィンは後処理での水素化によりアルカンへ変換される。CHJ で製造された SAF はこれらの工程により製造されるため HEFA-SPK や FT-SPK と異なり芳香族炭化水素を多く含有するため、従来のジェット燃料と類似し

た組成となる³⁵⁾。

ATJ-SPK (Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene) ではアルコール (エタノール, イソブタノール) を脱水・重合・水素化・異性化することで炭化水素を製造する。原料となるアルコールはデンプン (トウモロコシ, 芋類に由来) や糖 (サトウキビ, リグノセルロースの分解物に由来) から微生物による発酵で生成すること (糖化・発酵プロセス (SFP)) が可能である。また、都市ゴミや木質バイオマスをガス化して得られた合成ガスを化学合成プロセス (GCP) あるいは生物合成プロセス (GBP) により変換することで生成することもできる。SFP, GCP, GBP でのリグノセルロースからのエタノール収量はそれぞれ 290, 288, 368 L/dry-t となり、GBP がより効率良くエタノールを製造できることが報告されている³⁶⁾。更に、GBP では製造プロセス内で必要な電力と熱を自給できるため CO₂ の削減量も大きくなる。

工場の排ガス中の CO と H₂ を GBP によりエタノールに変換する技術が開発されており、LanzaTech 社は製鉄工場の排ガスからエタノールを製造する工場を中国で稼働させている³⁷⁾。LanzaJet 社はエタノールを原料とした ATJ の開発を進めており、2024 年 1 月には SAF 生産施設が完成し、2030 年までに 379 万 kL の SAF 生産を目指すとしている。Gevo 社はイソブタノールを原料とした ATJ の特許を取得している³⁸⁾。日本国内では、コスモ石油 (株) と三井物産 (株) が LanzaJet 社の ATJ 技術を用いて、国産 SAF の大規模生産を目指しており、2027 年度までに 22 万 kL/year の SAF 製造・供給を計画している。また、出光興産 (株) は ATJ 実証設備の開発を進めており、バイオエタノール由来 SAF を 2027 年に 10 万 kL/year 供給することを目標とし³⁹⁾、(株) Biomaterial in Tokyo と三友プラントサービス (株) は 2024 年度に国産古紙パルプからバイオエタノール由来 SAF を 150 kL/year 製造することを計画している⁴⁰⁾。

微細藻類を用いた HC-HEFA-SPK (Synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed hydrocarbon, esters and fatty acids) は特定の藻類 (*Botryococcus braunii*) から抽出した粗油 (炭化水素) を水素化処理することで製造され、処理方法は HEFA-SPK と同じである。この藻は非可食植物であり、光合成により炭化水素を生産し、大量に培養可能であることが特徴として挙げられる⁴¹⁾。

4 R-CFP 技術

4・1 R-CFP 技術について

R-CFP 技術を中核とする高度資源化プロセスの概略を Fig. 2 に示す。R-CFP 技術ではこれまでの廃食用油に加え、さらに賦存量の多い木質系バイオマス (間伐材、

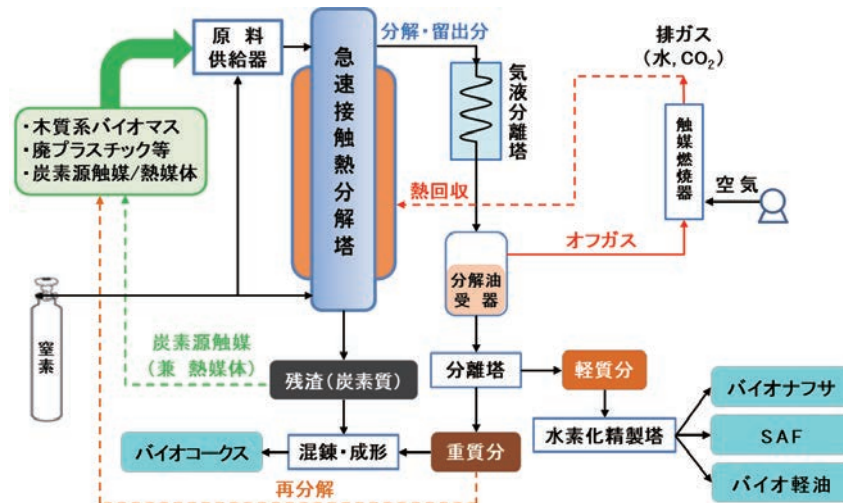


Fig. 2 Advanced resource conversion process using R-CFP technology

林地残材、剪定枝葉など)や廃プラスチック(PE, PP, PS, ABS, PETなど)へと原料を拡大し, SAF等低炭素燃料を製造する資源化プロセスの確立を目指している。

また, 炭素源触媒を用いたR-CFP技術により, 固体有機原料に対する高分解油収率・高オイル収率・高SAF収率を達成し, ゼオライト系触媒等比べて分解活性の長期安定化と低コスト化を図っている。さらに液体燃料だけでなく, 副生の残渣と残油から高カロリーバイオ石炭・バイオコークスの製造が可能である。

本技術開発において弊社では2020年にラボ装置を立ち上げ, 2023年にはベンチ装置へとスケールアップを行い, SAFの試作を行っている。次節以降ではラボ装置及びベンチ装置を用いたSAFの製造および製造過程で得られる副生物を有効利用したバイオコークスの試作における代表的な試験例を紹介する。

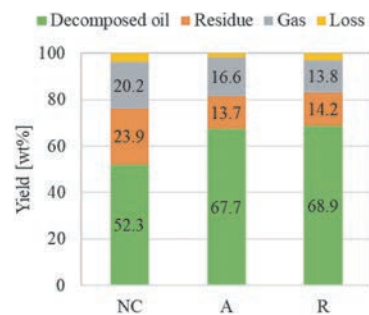
4・2 R-CFPシステムにおける試験方法と結果

R-CFP装置では, 分解塔に予め炭素源触媒(兼熱媒体)を投入し, 窒素気流中, 所定反応温度に加熱して流動層を形成させている。急速接触熱分解処理は試料と炭素源触媒を所定比で混合したものを分解塔内に投入しながら行なった。試料の分解により分解塔上部から留出された成分は, 気液分離塔にてオフガスと分解油に分離し, 下部の分解油受器に分解油を溜め込んだ。得られた分解油あるいはその分解油を重質分と軽質分に分離後の軽質分は更に水素化処理を行い, 水素化精製油を得た。この水素化精製油を分留することで, 沸点順にナフサ, SAF, 軽油を作成した。

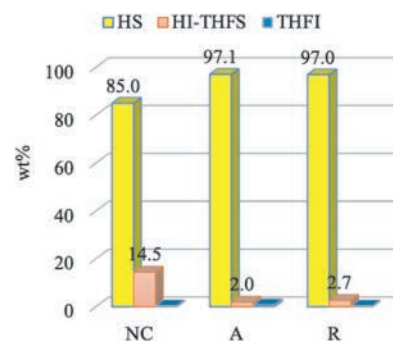
一方, 急速接触熱分解で副生した残渣と上記分解油から分離した重質分を濃縮して得られたバイオピッチを所定比で混合・混捏後, 金型に充填して, 熱プレス成形機

にて加温加圧してバイオコークスを試作した。

Fig. 3にラボスケールの流動床式接触熱分解装置(縦型電気炉加熱方式のステンレス製反応管)を用い, 乾燥杉粉(4mm以下)と廃プラスチック模擬試料(PE:PP:PS=49%:33%:18%の質量比で混合したもの, 4mm以下粒子)を1:1の質量比で配合した混合原料を450℃にて処理して得られた分解生成物の収率および分解油の成分分析結果を示す。なお, 成分分析はヘキサ



(a) Decomposition product yields



(b) Decomposed oil composition

Fig. 3 Decomposition product yields and decomposed oil composition from cedar and waste plastics

ン,テトラヒドロフラン (THF) を用いて,ソックスレー抽出法により分解油 (留出液) を溶剤分別処理し,ヘキサン可溶分 (HS, オイル分),ヘキサン不溶-THF 可溶分 (HI-THFS, アスファルテン類),THF 不溶分 (THFI, 炭素質前駆体) に3分割している。また,触媒の効果を比較するため炭素源触媒である活性炭 (A) および残渣 (R) と無触媒 (NC) で得られた結果を記載している。

炭素源触媒 (A, R) を用いた場合,無触媒の場合に比べて分解油収率が15~17%程度増加し,炭素源触媒の分解活性が確認された。また,残渣を用いることで活性炭よりも分解油収率が増加し,コスト低減が可能であることも確認された。

次に,分解油中のオイル分 (HS) は炭素源触媒 (A, R) を使用した分解試験の場合,無触媒と比較して10%以上も高い値を示している。これらより,炭素源触媒の使用によって分解油の収率と品質の両面から改善効果が明らかとなり,炭素源触媒とR-CFP技術の有効性が確認されている。

Fig. 4 に廃プラスチック模擬試料を使用し,反応温度470℃にて得られた分解生成物の収率および水素化処理後のガスクロマトグラフによる分析結果を示す。なお,装置にはベンチスケールの流動床式接触熱分解装置を用いた。分解油収率は84.1%と高分子量のプラスチックから非常に高い分解油収率が得られた。また,得られた分解油を水素化処理した結果,高い軽質油収率 (ナフサ+SAF+軽油=91.2%) および高 SAF 選択率 (製品となる軽質油に対しては62.8%) が得られ,SAFは48.2%と高い歩留が得られた。次に, Fig. 5 に杉粉と廃プラスチックの急速接触熱分解で副生した残渣 (炭素質) と重質分 (ピッチ) を有効利用して作ったバイオコークス試

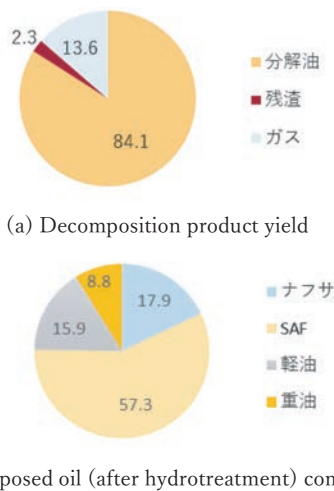


Fig. 4 Decomposition product yields and its decomposed oil (after hydrotreatment) composition from waste plastics

| | 単位 | 測定値 | |
|------|-------|-------|------|
| 総発熱量 | cal/g | 7,830 | |
| 元素分析 | H | wt% | 3.2 |
| | C | wt% | 85.2 |
| | N | wt% | 1.6 |
| | O | wt% | 7.5 |
| Ash | wt% | 3.0 | |



Fig. 5 Appearance and analysis results of bio coke

作品の外観と発熱量,元素分析,灰分測定結果を示す。試作品は成形性がよく,密度は約1.2 g/cm³であった。総発熱量 (高位発熱量) は7,830 cal/gと,先行研究のバイオコークス (4,767 cal/g)⁴²⁾ に比べて高い値を示した。また,元素分析と灰分測定結果からも高 [C+H],低 [O+Ash] 含量が確認され,本プロセスで副生した残渣とピッチから高カロリーのバイオコークスも製造可能であることが明らかとなった。

5 まとめ

2050年カーボンニュートラルを目指すにあたり,航空分野を取り巻く環境とSAFの研究開発動向を述べるとともに,弊社が目指す炭素源循環社会の実現に向けた取り組みとR-CFP技術について紹介した。航空機は環境負荷の高い輸送手段であることから空のカーボンニュートラルが加速しており,廃食用油を用いたSAFが既に商用化されている。これまで弊社は廃食用油から脂肪酸メチルエステル系バイオディーゼル燃料や炭化水素系バイオ液体燃料 (バイオナフサ, SAF, バイオ軽油等) を製造してきたが,持続可能なバイオ燃料の世界的なニーズに応えるためには,廃食用油以外の持続的に安定供給可能な原料の発掘並びにそれに対応できるバイオ燃料製造技術の開発が強く求められている。そこで弊社は炭素源触媒を用いたR-CFP技術を考案し,SAF等低炭素液体燃料を製造する高度資源化プロセスの確立および分解活性の長期安定化と低コスト化を図りつつ,バイオコークス等高付加価値固体燃料の製造に関する探索も行なっている。このR-CFP技術は,廃食用油等液体原料から木質系バイオマスや廃プラスチック等のより豊富な固体原料へと拡大することで海洋プラスチックごみなどの環境汚染問題に対応すると共に,廃棄物を有効資源として活用することで,炭素源循環社会システムを構築し,CO₂排出量実質ゼロの実現を目指している。さらに,国や地域に合わせた廃棄物や再生可能エネルギー等の分散型エネルギーの利活用方法を最適化し,地産地消型のエネルギー循環に取り組んでいきたい。そして,エネルギーの安定供給やコスト等の観点からグリーン水素といった脱炭素燃料だけでなく,SAF等の低炭素燃料

を活用することでCO₂排出量実質ゼロの実現に貢献したい。

文 献

- 1) International Energy Agency, World Energy Outlook 2022, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, (accessed on 15 December, 2023).
- 2) 経済産業省, 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 令和3(2021)年6月18日, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf (Ministry of Economy, Trade and Industry).
- 3) 経済産業省, “GX実現に向けた基本方針参考資料”, https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_3.pdf (Ministry of Economy, Trade and Industry).
- 4) 国土交通省航空局, 航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会(第1回), <https://www.mlit.go.jp/common/001395880.pdf> (Civil Aviation Bureau).
- 5) ACT FOR SKY, 国産SAFで, カーボンニュートラルな空へ, <https://actforsky.jp>
- 6) 株式会社レポインターナショナル, 国内初となる国産SAFの大規模生産実証設備の起工式を実施, <https://revo-international.co.jp/2023/05/17/> (REVO International inc.).
- 7) Zhang, L. *et al.*, *Green Energy to Sustainability*, Chapter 5, 85-110 (2020).
- 8) 全国油脂事業協同組合連合会, UCオイルのリサイクルの流れ図(令和3年度版), https://zenyuren.or.jp/document/220407_ucorecycleflow_r3.pdf (UCO Japan).
- 9) 資源エネルギー庁, 令和4年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2023), <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/html/2-1-3.html> (Agency for Natural Resources and Energy).
- 10) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課, 令和4年度事業 産業廃棄物排出・処理状況調査報告書, <https://www.env.go.jp/content/000123320.pdf> (Ministry of the Environment).
- 11) プラスチック循環利用協会, プラスチックリサイクルの基礎知識2023, <https://www.pwmi.or.jp/pdf/panfl.pdf> (Plastic Waste Management Institute).
- 12) 林野庁, 木質バイオマスのエネルギー利用の現状と今後の展開, https://woodrecycle.gr.jp/wp/wp-content/uploads/211117_FA.pdf (Forestry Agency).
- 13) 松永興哲ほか, R-CFP技術による炭化水素系バイオ液体燃料製造に関する研究, 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会, 岡山(2021年10月)(Matsunaga, K. *et al.* The 32nd Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management (2021)).
- 14) 松永興哲ほか, バイオマスと廃プラスチックからのSAF等バイオ液体燃料の製造に関する研究, 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会, 宮崎(2022年9月)(Matsunaga, K. *et al.* The 33rd Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management (2022)).
- 15) 越川翔生ほか, バイオマスと廃プラスチックからのSAF等バイオ燃料の製造に関する研究, 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会, 大阪(2023年9月)(Koshikawa, S. *et al.* The 34th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management (2023)).
- 16) 谷利駿ほか, 日本ガスタービン学会誌, **51**, 5, 394-399 (2023)(Tanikaga, S. *et al.* *Journal of the Gas Turbine Society of Japan* **51**, 394-399 (2023)).
- 17) 株式会社レポインターナショナル, 使用済み食用油を原料とした次世代バイオガソリンの新たな時代に向けたセーフティーカーでの利用から, <https://revo-international.co.jp/2020/12/02/> (REVO International inc.).
- 18) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「バイオジェット燃料生産技術開発事業/実証を通じたサプライチェーンモデルの構築」に係る実施体制の決定について, https://www.nedo.go.jp/koubo/FF3_100312.html (New Energy and Industrial Technology Development Organization).
- 19) 岡井敬一, 航空分野におけるカーボンニュートラルの展望と持続可能な航空燃料SAFの役割, 第34回内燃機関シンポジウム, 東京(2023年12月)(Okai, K. 34th Internal Combustion Engine Symposium (2023)).
- 20) IATA, Net zero 2050: sustainable aviation fuels, <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet--alternative-fuels/>
- 21) Matteo P. *et al.* *Renewable and Sustainable Energy Rev.* vol. **150** (2021).
- 22) ICAO, CORSIA Eligible Fuels, <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Eligible-Fuels.aspx>
- 23) (株)J-オイルミルズ, プレスリリース, https://www.j-oil.com/press/article/230828_004233.html (J-OIL MILLS, INC.).
- 24) 日揮ホールディングス(株)ほか, 国産廃食用油を原料とするバイオジェット燃料製造サプライチェーンモデルの構築, 2022年度NEDO新エネルギー部成果報告会, 東京(2023年2月), <https://www.nedo.go.jp/content/100957716.pdf> (JGC HOLDINGS CORPORATION).
- 25) Yamano, R. *et al.* *EES Catal.* **1**, 125-133 (2023).
- 26) Wei, J. *et al.* *Nat. Commun.* **8**, 15174, 1-8 (2017).
- 27) Mejia, C.H. *et al.* *ACS Catal.* **10**, 7343-7354 (2020).
- 28) Feyzil, M. *et al.* *J. Nat. Gas Chem.* **19**, 341-353 (2010).
- 29) Ma, W. *et al.* *Reactions* **2**, 62-77 (2021).
- 30) Carballo, J.M. *et al.* *J. Catal.* **284**, 102-108 (2011).
- 31) Eliseeva, O.L. *et al.* *Kinet. Catal.* **54**, 207-212 (2013).
- 32) Li, J. *et al.* *Appl. Catal. A* **464-465**, 10-19 (2013).
- 33) 山内康弘ほか, 三菱重工技報, **59** (4), 1-8 (2022)(Yamauchi, Y. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review* **59** (4), 1-8 (2022)).
- 34) (株)JERAほか, バイオマスガス化FT合成によるSAF製造およびサプライチェーン構築, 2022年度NEDO新エネルギー部成果報告会, 東京(2023年2月), <https://www.nedo.go.jp/content/100957717.pdf>
- 35) Li, L. *et al.* *Energy Fuels* **24**, 1305-1315 (2010).

- 36) 佐賀清崇ほか, エネルギー・資源 **32** (6), 1-6 (2011) (Saga, K. *et al. Energy and Resources* **32** (6), 1-6 (2011)).
- 37) 加藤淳也ほか, オレオサイエンス **21** (10), 14-24 (2021) (Kato, J. *et al. Oleoscience* **21** (10), 14-24 (2021)).
- 38) Gevo, Inc., Matthew, W.P. *et al. US Pat.* 8373012(2013).
- 39) 出光興産(株), 最先端のATJ (Alcohol to Jet) プロセス技術を用いたATJ実証設備の開発と展開, 2022年度NEDO新エネルギー部成果報告会, 東京(2023年2月), <https://www.nedo.go.jp/content/100957725.pdf>
- (Idemitsu Kosan Co., Ltd.).
- 40) (株) Biomaterial in Tokyo ほか, 国産第二世代バイオエタノールからのバイオジェット燃料生産実証事業, 2022年度NEDO新エネルギー部成果報告会, 東京(2023年2月), <https://www.nedo.go.jp/content/100957718.pdf>.
- 41) 松澤克明, えねるみくす **96**, 1, 34-39 (2017) (Matsuzawa, K. *Enermix* **96**, 1, 34-39 (2017)).
- 42) 大橋憲ほか, *J. Smart Process* **5**, 198-206 (2016) (Ohashi, K. *et al. J. Smart Process* **5**, 198-206 (2016)).

