



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

2022年10月

基礎化学品（ゴム原料のC4、C5）の原料多様化 分野の技術戦略策定に向けて

はじめに	2
1章 解決すべき社会課題と実現したい将来像.....	3
1-1 解決すべき社会課題.....	3
1-2 化学産業のCO ₂ 削減策	4
1-3 日本の化学産業の将来像.....	7
1-4 環境分析	9
1-5 まとめ	13
2章 解決・実現手段の候補.....	14
2-1 解決・実現のための課題.....	14
2-2 実現手段の候補	16
2-3 実現のためのシナリオ	22
3章 おわりに	24

Vol.

109

TSCとはTechnology Strategy Center（技術戦略研究センター）の略称です。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター(TSC)

はじめに

2019年6月に閣議決定された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」¹および「統合イノベーション戦略2019」²に基づき、日本が強みを有するエネルギー・環境分野において革新的なイノベーションを創出し、社会実装可能なコストを実現、これを世界に広めていくために、2020年1月に「革新的環境イノベーション戦略」³が策定された。この戦略では、温室効果ガス(GHG: Greenhouse Gas)の国内での大幅削減とともに、世界全体での排出削減に最大限貢献するとしている。この「革新的環境イノベーション戦略」を着実に実行し最大限の成果を生み出すことを目的として、グリーンイノベーション戦略推進会議が継続的に開催され、カーボンリサイクル・マテリアル産業、および、資源循環関連産業を含む14の重要分野について議論がなされ、その方向性が示された。その後、2020年10月の政府による「2050年カーボンニュートラル宣言」⁴に対応し、2021年6月に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」⁵が策定された。この成長戦略においても、同様に「カーボンリサイクル・マテリアル産業」、および、「資源循環関連産業」は重要分野に位置づけられている。

また、経済産業省資源エネルギー庁の2021年7月の「カーボンリサイクル技術ロードマップ改訂版」⁶では、2040年以降の中長期に普及を目指すものとして、化学品では需要の多いオレフィン等の汎用品である基礎化学品を製造する技術に重点的に取り組むとされている。

これらの政策においては、化学産業では、化石資源依存からの脱却や、カーボンリサイクル技術によるCO₂の原燃料化といった、ゼロカーボン技術を最大限活用することが示唆されていることから、基礎化学品においても、リサイクルやCO₂原料利用などの原料多様化の推進が重要になると考えられる。

本レポートでは、基礎化学品の原料多様化分野の中で、日本が世界で存在感を持つタイヤ産業にとって欠かせない、合成ゴムやタイヤの主原料であるC4、C5(ブタジエン、イソプレン)の製造に関して、日本企業のサプライチェーン全体でのCO₂削減と産業競争力の強化を同時に実現するための技術開発の方向性、および国の支援のあり方を検討した。

¹ <https://www.env.go.jp/press/111781.pdf>

² https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019_honbun.pdf

³ <https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/kankyo.pdf>

⁴ 第百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説. 首相官邸. 2020-10-26.

https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html

⁵ https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf

⁶ <https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.pdf>

1 章 解決すべき社会課題と実現したい将来像

1-1 解決すべき社会課題

(1) 世界の動向

本レポートが対象とする化学産業は、IEA (International Energy Agency) の ETP (Energy Technology Perspectives) 2017⁷⁾によると、エネルギー消費とCO₂排出量の多い製造業として、鉄鋼、セメントとともに挙げられている(図 1)。化学産業は化石資源をエネルギーとしての利用に加え原料としても利用しており、これらを合わせた化石資源消費量が最も多い。また、CO₂ 排出量は、鉄鋼、セメントに次いで多い産業である。

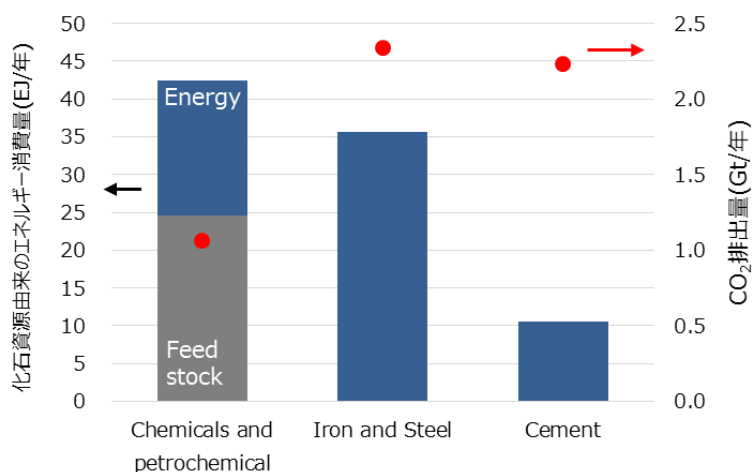


図 1 製造業におけるエネルギー消費とCO₂排出(2014年)
(左軸:エネルギー消費量(棒グラフ)、右軸:CO₂排出量(●))

出典:IEA「ETP2017」を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

(2) 日本の化学産業の現状

日本の化学産業も世界と同様に化石資源(石炭、石油、天然ガス)の消費が多い産業であり、製造業の中では約 5 割を占める⁸⁾(図 2 左)。化学産業での化石資源利用量の 8 割は原料(非エネルギー利用)であり⁹⁾、その大半は石油由来のナフサである。化学産業におけるCO₂排出量は製造業では鉄鋼に次ぎ、57 百万 tCO₂/年(電力・熱配分後)となっている(図 2 右)。日本の化学産業にとっても資源有効利用率の向上、CO₂ 排出削減を進めることが、喫緊の課題となっている。

⁷⁾ <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>

⁸⁾ ここでの化石資源消費量は直接的な消費、電力利用を通じた間接利用は含まない。

⁹⁾ 資源エネルギー庁. 総合エネルギー統計簡易表. 2018 年度

https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2

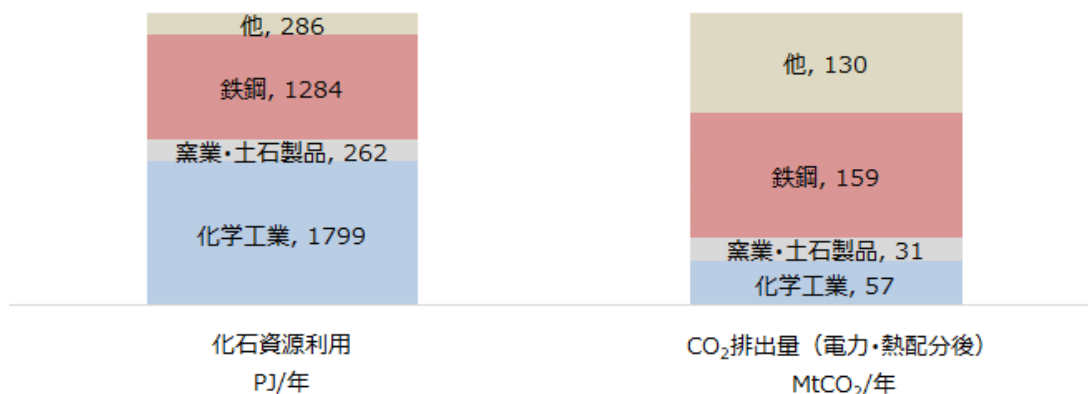


図2 日本の製造業における化石資源利用とCO₂排出実績(2018年度)

出典:資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

1-2 化学産業のCO₂削減策

化学産業における将来のCO₂排出量についてIEAがまとめたThe Future of Petrochemicals¹⁰のRTS(Reference Technology Scenario)によれば、プラスチックなどの化学品の需要の増加に伴い、2017年時の1.5GtCO₂/年から、2050年には2.1GtCO₂/年に増加が見込まれる(図3)。一方、CO₂排出量だけでなく、大気や水の汚染を減らすCTS(Clean Technology Scenario)では、CO₂排出量が0.7GtCO₂/年へ削減された将来像が予測されている。CTSにおける化学産業のCO₂排出量削減策としては、①CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage)、②石炭から天然ガスへの原料転換、③省エネルギー、④プラスチックリサイクル、⑤代替原料の利用が想定されている(図4)。CO₂削減への大きな寄与が期待されている①のCCUSには、CCS(Carbon Capture and Storage)やEOR(Enhanced Oil Recovery)による貯留とCO₂の利用が含まれる。②の原料転換は、主にエチレン等の製造用のナフサとメタノール製造用の石炭を天然ガスへ転換する対策が対象となっている。③の省エネルギーは触媒開発などによるプロセスへの投入エネルギー削減や、廃熱利用など幅広い対策が対象となっている。④のプラスチックリサイクルはボトルの再利用などのマテリアルリサイクル、ポリマー原料として再利用するケミカルリサイクルにより、ヴァージン原料の利用を削減する。⑤の代替原料の利用は未利用炭素資源としてのバイオマス、廃棄物などの利用が対象となる。

¹⁰ <https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>

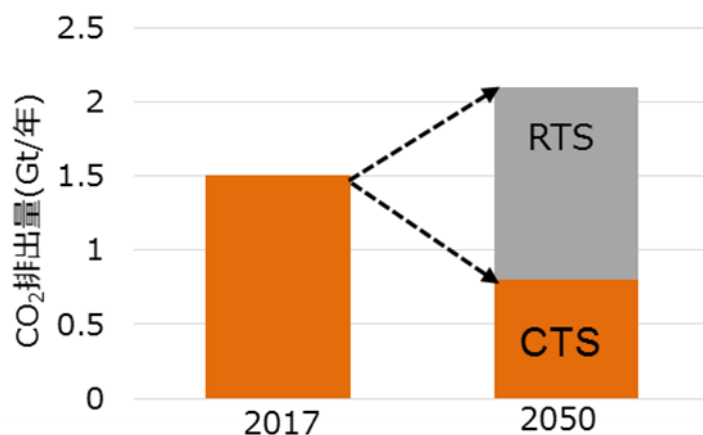


図3 化学産業でのCO₂排出量(直接)の予測

出典:IEA「The Future of Petrochemicals」2018年を基にNEDO技術戦略研究センター作成

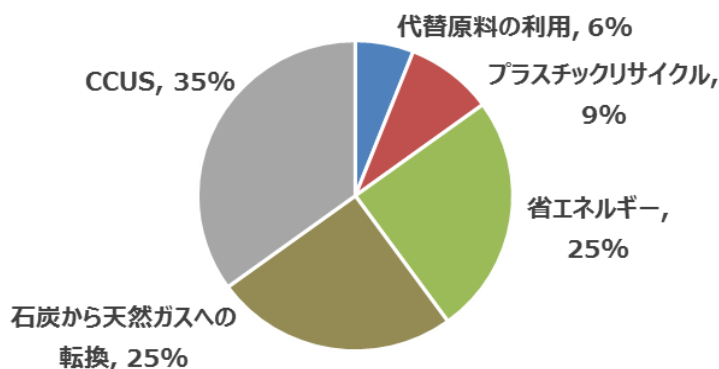


図4 CTSにおける化学産業のCO₂排出量削減量の割合(2017~2050年の積算値)

出典:IEA「The Future of Petrochemicals」2018年を基にNEDO技術戦略研究センター作成

化学産業における製品サプライチェーンの現状を図5に示す。化学産業のサプライチェーンの最上流に位置し、エチレン(C2)、プロピレン(C3)などの基礎化学品を製造するナフサクラッカーは、石油由来のナフサを主に原料として用いている。このナフサクラッカーでは、エチレン、プロピレンの他に連産品として、ブテン、ブタジエンなどのC4、イソプレンなどのC5、ベンゼン、トルエン、キシレンなどの芳香族(BTX)が生産される。

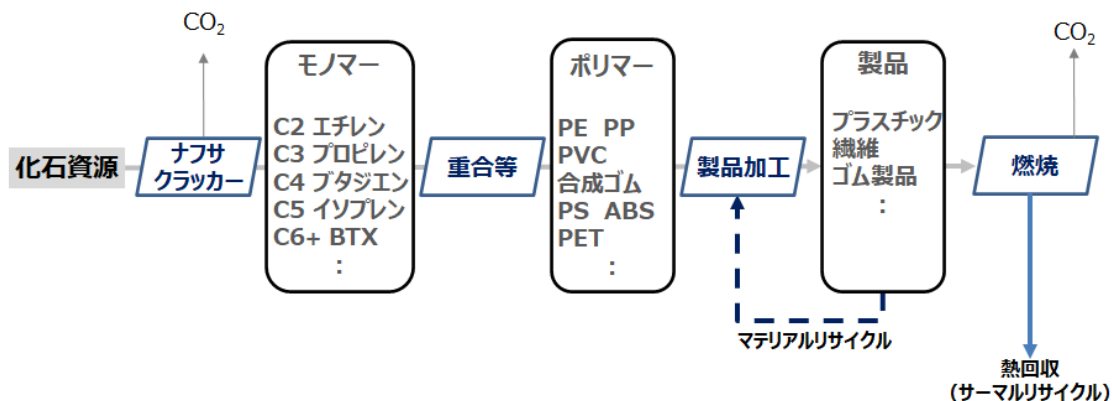


図5 化学産業における製品サプライチェーンの現状

代表的なナフサクラッカーで生産される基礎化学品の内訳を図6¹¹に示す。C4、C5ともにナフサからの製造割合が小さく、特にC5はC4の1/10程度の製造割合のためグラフには示されていない。しかしながら、いずれも、特殊なプラスチックやタイヤ等ゴム製品の主原料として欠かせない基礎化学品である。また、これらC4、C5は連産品であり目的製造が困難なため比較的ボラティリティが高い製品¹²となっている。

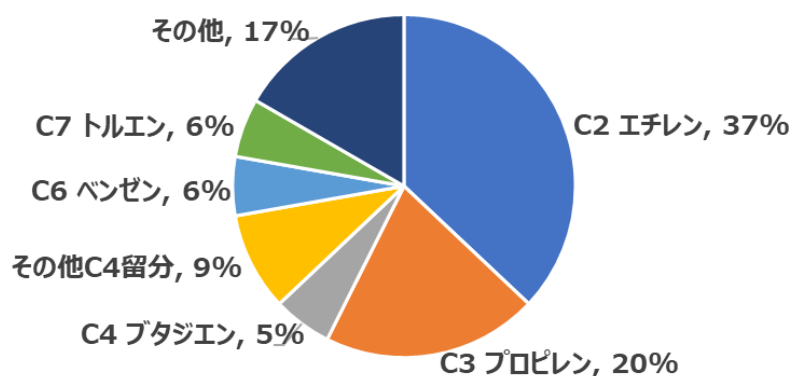


図6 ナフサからの基礎化学品の製造割合

出典：旭リサーチセンターARCレポート「『石油化学』から『天然資源化学』へ」2014年を基に
NEDO 技術戦略研究センター作成

近年、安価な米国のシェールガスを背景に、シェールガス由来の原料からのエチレン製造が北米地域で増加している。シェールガス由来のエチレン製造コストは200ドル/tを下回る水準にあり、日本を含むアジア地域でのナフサからの製造コスト400ドル

¹¹ https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-970.pdf

¹² 例えば、ブタジエン価格は2017年には3,000ドル/tまで高騰したが、直近の2020年は450ドル/tへ大幅に下落している。

ル/tの1/2~1/3程度となっている(図7)。シェールガス由来のエチレン製造がさらに増加すると、日本で製造されたエチレンの価格競争力低下によって、国内のナフサクラッカー稼働率が下がるリスクがある。シェールガスにはC4、C5留分がほとんど含まれず、シェールガス由来のエチレン製造ではC4、C5はほとんど製造されないため、ナフサクラッカーの稼働率低下は連製品のC4、C5にも影響し、これらを原料とするゴム製品等のサプライチェーンにとっても潜在的なリスクとなる。

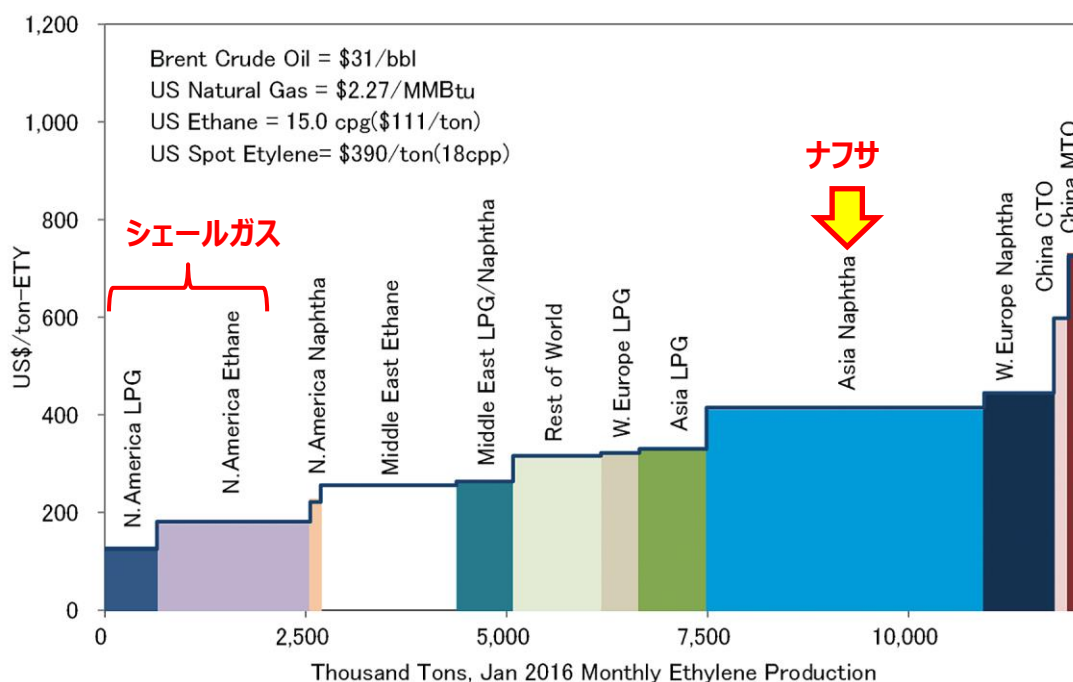


図7 各種原料からのエチレン製造コストの比較

出典:石油天然ガス・金属鉱物資源機構「石油化学産業の発展と今後の展望(2017)」

(赤は NEDO 技術戦略研究センター加筆)

1-3 日本の化学産業の将来像

日本政府は、2050年までにカーボンニュートラルを実現すると宣言した。国内の化学産業では、省エネ、廃棄物のリサイクルやバイオマスを利用した原料多様化、および、CO₂フリー水素を利用したCCUやCCSの併用によりカーボンニュートラル化を目指すのが有効と考える。これらの対応策を含んだ国内化学産業の将来像を図8に示した。

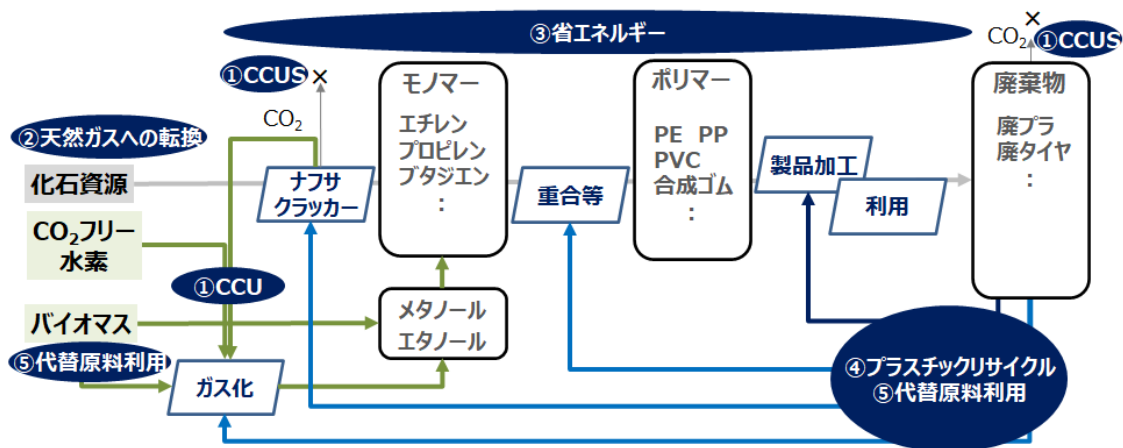


図 8 カーボンニュートラル化を実現する化学産業の将来像

化学産業における CO₂ 削減策について、政策との関連やこれまでのナショナルプロジェクトとして取り組んできた研究プロジェクトについて表 1 にまとめた。

水素を利用した CCU や CCS 併用は、CO₂フリー水素の大量調達や地政学的制約など、日本において克服すべき課題も多いが、将来的には化学産業に限らず CO₂ 削減への大きな寄与が期待される。シェールガス由来のメタン、エタン、プロパンなど、天然ガスや低級炭化水素への原料転換は米国を中心に進展すると考えられるが、天然ガスを LNG(液化天然ガス)として輸入する日本においては輸送コストが負担となること、シェールガスを対象とした設備投資をこれから行わなければならないことなど、ハードルが高い。日本における早期の社会実装を考えた場合、化学プロセスの省エネの他、原料を現状のナフサから廃棄物、バイオマス等の未利用の有用炭素源へ多様化することが重要である。

本レポートでは、日本国内においても早期の社会実装が期待される化学産業の原料多様化を主たる検討対象とする。

表 1 化学産業における CO₂ 削減策

	①CCUS	②天然ガスへの転換	③省エネルギー	④プラスチックリサイクル	⑤代替原料の利用
原料	CO ₂ 、グリーン水素	天然ガス (含 シェールガス)	変化なし	廃プラスチック	バイオマス、廃棄物
内容	CO ₂ とグリーン水素からの化学品製造	エタンクラッキング、プロパン脱水素	コジェネ、排熱利活用等 電化に注目	未利用炭素資源としての廃プラスチックを利用	未利用炭素資源としてのバイオマス、廃棄物を利用
政策文書	・革新イノベ ・カーボンリサイクル技術RM	—	・省エネ技術戦略 ・革新イノベ ・グリーン成長戦略	・循環経済ビジョン2020 ・革新イノベ ・カーボンリサイクル技術RM	・循環経済ビジョン2020 ・革新イノベ ・カーボンリサイクル技術RM ・グリーン成長戦略
研究PJ			・戦略的省エネ ・未利用熱革新的活用	・革新的プラスチック資源循環	・二酸化炭素原料基幹化学品製造

凡例

政策文書

省エネ技術戦略

省エネルギー技術戦略2016（2016、同改訂2019）

革新イノベ

革新的環境イノベーション戦略（2020）

グリーン成長戦略

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（2021）

カーボンリサイクル技術RM

カーボンリサイクル技術ロードマップ（2019、同改訂2021）

研究PJ

戦略的省エネ

戦略的省エネルギー技術革新プログラム（2012～2022年度）

未利用熱革新的活用

未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発（2015～2022年度）

革新的プラスチック資源循環

革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発（2020～2024年度）

二酸化炭素原料基幹化学品製造 二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発（2014～2021年度）

1-4 環境分析

(1) 技術動向

日本における基礎化学品の原料多様化の検討状況について表 2 にまとめた。エチレン、プロピレンからポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)につながるサプライチェーンは様々な技術が既に実装または研究開発プロジェクトによる検討が進められている。PET はリサイクル技術が一部実装済みであり、研究開発も進行中である。ポリスチレン(PS)では再利用により低品質化を伴うカスケードリサイクル利用が実装段階にあり、さらに、品質を保ったリサイクルにおける収率向上の検討も行われている。

ナフサクラッカーの稼働率低下による供給量低下が懸念される C4、C5 は、スチレン等の他の基礎化学品とともに合成ゴムの原料となり、その製品生産量は塩化ビニルに次ぐ。合成ゴムは 8 割以上がタイヤの原料として消費されているが¹³、日本では廃タイヤの多くはサーマルリサイクル(熱エネルギーとして利用)されているため¹⁴、それ以外のリサイクルによる原料多様化の検討が遅れている状況である。

¹³ 日本ゴム工業会. ゴム工業における 2019 年(令和元年)の新ゴム消費量(3 月確定). 2020. の製品別内訳.

<https://rubber.or.jp/kanri/download.php?file=page3.7.21.pdf&org=consume-fixed.pdf>

¹⁴ 日本自動車タイヤ協会. 廃タイヤのリサイクル.

https://www.jatma.or.jp/environment_recycle/aboutscraptyres.html

表 2 日本における原料多様化の検討状況

★:Foresight vol.35において検討済

基礎化学品	代表的製品	製品生産量 万t/年	原料の転換		リサイクル
C2:エチレン	ポリエチレン	247	天然ガス (エタン)	メタノール (原料メタン)	★ケミカルリサイクル(油化) (★マテリアルリサイクル)
C3:プロピレン	ポリプロピレン	244	天然ガス (プロパン)		
	塩化ビニル	173			
芳香族 (BTX)	PET	37	メタノール(原料メタン) 原油の直接分解		マテリアルリサイクル ケミカルリサイクル(解重合)
	ポリスチレン	77			
C4:ブタジエン	合成ゴム	162			
C5:イソプレン					

出典:各種情報を基に、NEDO技術戦略研究センター作成

(2) 日本の基礎化学品の産業動向

各基礎化学品の生産量と代表的な製品例および各製品の粗付加価値額の比較を図 9 に示す。C4、C5 が原料となるゴム製品(合成ゴム)の粗付加価値額は 1.4 兆円に達する。C4、C5 は、プラスチック製品の原料となる C2、C3、芳香族に比較して、生産量は 1/20 以下程度と少ないが、粗付加価値額は 1/3 程度と重量当たりの付加価値が高く、産業競争力の観点で重要な基礎化学品である。

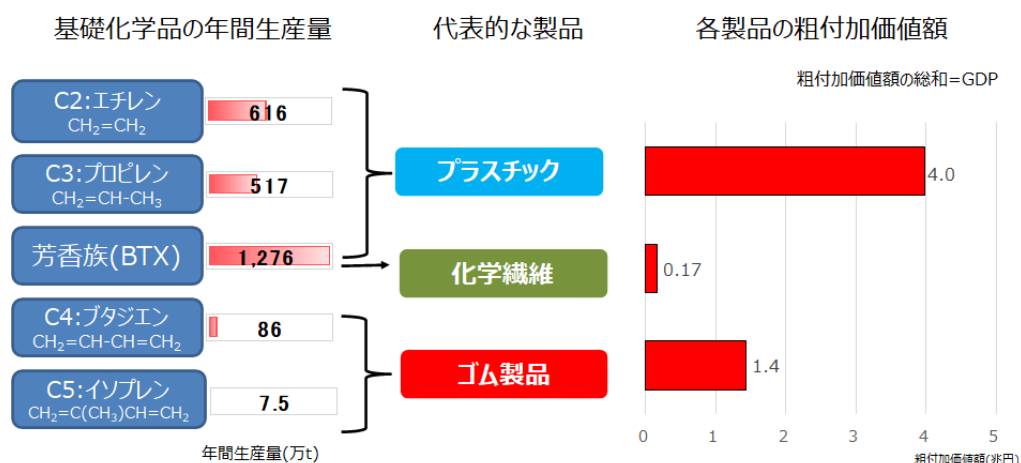


図 9 基礎化学品の生産量と代表的な製品例および各製品の粗付加価値額の比較

出典:各種資料¹⁵を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

¹⁵ 左:石油化学工業協会「年次統計資料 石油化学製品の生産」2018年、の国内出荷量に基づく。イソプレンは日本ゴム工業会「合成ゴム品種別出荷量」2019年のイソプレンゴム(IR)の国内生産量を採用した。右:ゴム製品には“タイヤ・チューブ”、“その他のゴム製品”を含む。総務省「2015年度産業通関表」

(3) 市場動向

化学産業における製品の生産動向を図 10 に示す。C4、C5 を原料として生産される合成ゴムは、プラスチックや化学繊維に比べて、世界の生産量に占める日本のシェアが高い。

また、合成ゴムの最終製品であるタイヤの世界市場の動向を図 11 に示す。日系企業の売り上げは 23.5% を占めトップであり 2 位フランス、3 位米国と続く。2018 年のタイヤの世界市場規模は売り上げで 17 兆円/年に達しているが、2050 年の世界の都市間旅客量(人・km)、貨物輸送量(t・km)はそれぞれ 2.5 倍、3.0 倍(2017 年比)と予測され¹⁶、タイヤの世界市場も 2050 年には現状の 2~2.5 倍の成長¹⁷が期待される。一方でタイヤの原料の一つである天然ゴムは、その生産拡大に環境への影響を考慮する必要があり、急激な拡大には課題が残る。

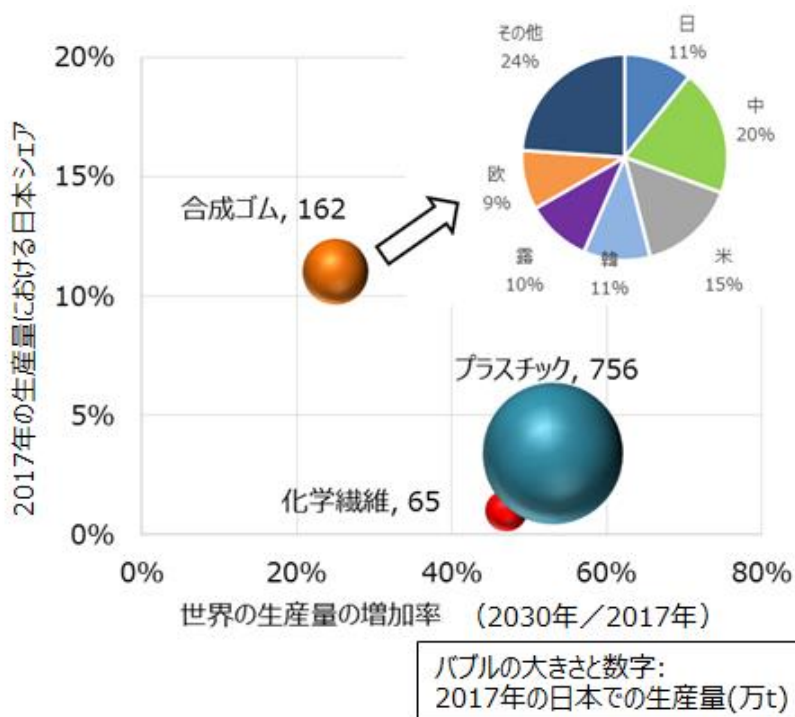


図 10 各製品の生産動向
出典: 各種統計データを基に技術 NEDO 技術戦略研究センター作成

¹⁶ ITF. ITF Transport Outlook 2019.
https://read.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2019_transp_outlook-en-2019-en#page36

¹⁷ ブリヂストン. サステナビリティレポート 2019-2020. 2020.
<https://www.bridgestone.co.jp/csr/library/pdf/sr2019.pdf>

17兆円市場

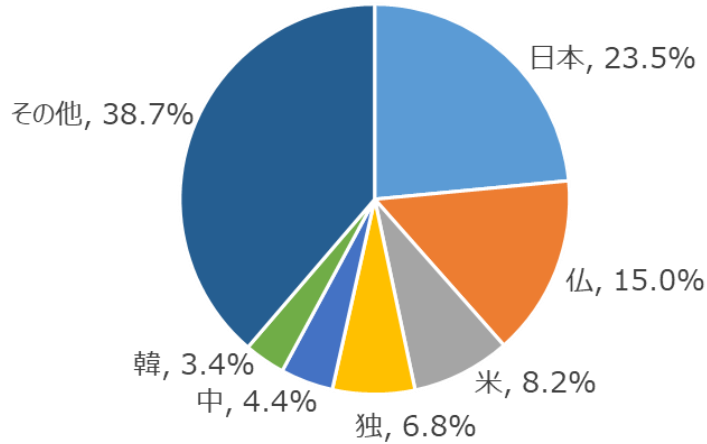


図 11 タイヤの国別シェア

出典:ブリヂストン「サステナビリティレポート 2019-2020」2020年¹⁷を基に
NEDO 技術戦略研究センター作成

(4)各国の動向

このような中、日本企業のライバルであるミシュラン(仏)はタイヤ製造のCO₂削減の実現に向けて、研究開発を活発化している。ADEME(フランス環境エネルギー管理庁)が推進するバイオ・バタフライ・プロジェクトにおいて、バイオマス利用とリサイクルの拡大により化石資源を削減し低炭素化を実現する研究開発を実施中である(図12)。このプロジェクトには、ミシュラン、IFPEN(IFP Energies nouvelles)、Axens など、欧州を代表する企業が参画しており、LCA(Life Cycle Assessment)評価の研究も併せて実施するなど、規格・標準化も視野に入れた動きであることが推察される。

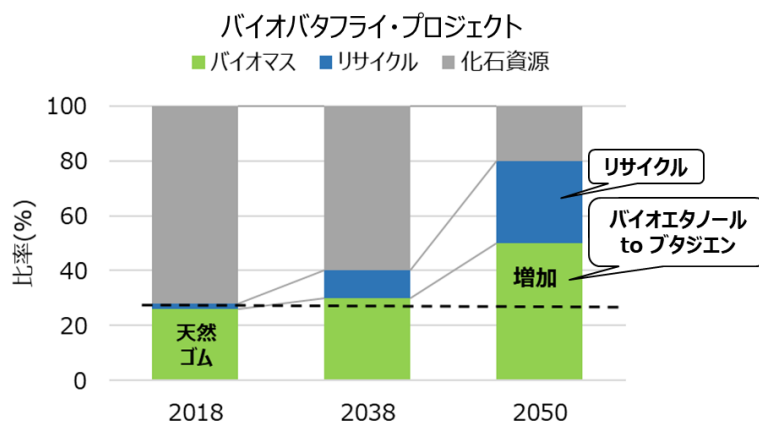


図 12 ミシュラン(仏)における原料多様化の計画

出典:各種情報を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

また、欧州では BASF(独)を中心にマスバランスアプローチ¹⁸の運用が広がっている。これは、バイオマス、再生可能エネルギー由来の低炭素原料、CO₂ など、環境価値の高い原料を既存のプロセスへ導入し、環境価値を自由に割り当てることができる仕組みで、本来の原料の寄与にとらわれず、環境価値の配賦(Allocation)が可能となる。BASF は廃タイヤの熱分解油の利用を ChemCycling プロジェクトの一環として実施しており¹⁹、マスバランスアプローチも活用した原料多様化による低炭素化を推進していると推察される。

1-5 まとめ

化学産業はエネルギー消費とCO₂排出量の多い製造業であり、化石資源依存からの脱却や、カーボンリサイクル技術によるCO₂の原燃料化といった、ゼロカーボン技術を最大限活用する対策が求められている。日本の製造業の化石資源利用の5割は化学産業が占めており、その8割を超える原料利用の大半は石油由来のナフサである。ナフサクラッカーの主製品はエチレン、プロピレンであるが、連産品としてブテン、ブタジエン、イソブレンといったC₄、C₅化合物が生産される。これらの化合物は特殊なプラスチックやタイヤ等ゴム製品の主原料として利用されている。一方、近年安価な米国のシェールガスを原料としたエチレン製造が増加しているが、このプロセスからはC₄、C₅は生産されず、価格競争力低下によって、国内のナフサクラッカー稼働率が低下することは、ゴム製品等の原料としてのC₄、C₅の供給リスクとなっている。

化学産業のCO₂削減策は、省エネや天然ガス等低級炭化水素の利用、廃棄物やバイオマスを利用した原料多様化、CO₂フリー水素を利用したCCUやCCSの併用などが対象となる。天然ガスや低級炭化水素への原料転換は安価なシェールガスにより米国を中心に進展すると考えられる。水素を利用したCCUやCCSの併用は、将来的には化学産業に限らずCO₂削減への大きな寄与が期待されるが、CO₂フリー水素の大量調達や地政学的制約など、日本にとって克服すべき課題も少なくない。国内化学産業への早期の社会実装を考えた場合、化学プロセスの省エネの他、原料を現状のナフサから廃棄物、バイオマス等の未利用の有用炭素源へ多様化することが重要である。

基礎化学品の中でも、日本が世界市場で優位にあるタイヤの原料として重要なC₄、C₅について、ナフサ依存を脱却し、低炭素化と競争力維持・強化を両立するため、原料多様化の早期実現が必須である。

¹⁸ <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach.html>

¹⁹ <https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2020/09/p-20-311.html>
<https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2020/09/p-20-287.html>

2 章 解決・実現手段の候補

ナフサ依存による C4、C5 の原料調達に関する将来の潜在的リスク、および C4、C5 製造からタイヤ産業におけるサプライチェーン全体での CO₂ 削減の世界的な潮流に対応し、今後成長著しい世界市場における日系企業の競争力を維持・強化するには、原料多様化によるサプライチェーン全体の低炭素化が急務である。本章ではその手段、課題および今後の技術開発の方向性について述べる。

2-1 解決・実現のための課題

(1) C4、C5 製造からタイヤ産業のサプライチェーン関連技術動向

日本の強みや特徴を活かし、取り組むべき技術領域を検討するため、C4、C5 製造からタイヤ産業のサプライチェーンでの CO₂ 削減に関連する原料多様化技術の状況を整理する。タイヤ産業のサプライチェーンでの原料多様化には、タイヤやゴムをそのまま利用するマテリアルリサイクル(水平リサイクル)のほかに、タイヤを解重合、油化、ガス化などにより様々な形態に分解し再利用するケミカルリサイクル、合成ガス発酵や糖発酵などのバイオルートがある(図 13)。C4、C5 製造からタイヤ産業のサプライチェーン全体の低炭素化を実現するために必要な原料多様化技術とその課題について表 3 にまとめる。

- ①タイヤを対象とした解重合は、その生成物として粗ブタジエン、粗イソプレンが得られるため、メタセシス分解プロセスの適応が実現すれば、それ以外は既存の設備の利用(レトロフィット)が可能であることに加え、カーボンブラックを回収できる可能性を有するが、研究開発段階であり世界でも実用化の例はない。
- ②油化では、その生成物として粗ナフサが得られることから、同様にナフサクラッカ一等既存の設備へのレトロフィットが可能であり、カーボンブラックの回収の可能性を持つが多量に残る二重結合に起因するナフサの酸化劣化への対応が必要になる。

解重合および油化は、技術が完成すればレトロフィットが可能のため実装のハードルが低く一気に実装が進む可能性を有する。

- ③合成ガス化・アルコール転換・C4 等生成の工程で構成される合成ガスルートは、多段階工程のためコスト等の課題がある。タイヤ等のガス化ができれば、残りのプロセスは開発済みである。ガス化は天然ガスや石炭を原料として海外を中心に既に多くの実績があるが、特殊な原料への対応など、日本も複数の開発実績を持つ。また、元来ガス化設備はスケールメリットを享受しやすい設備であるが、大規模化のためには原料調達やマルチフィード化の課題がある。合成ガスからエタノールへの転換においては、発酵法では LanzaTech(米)の技術、熱化学法では Enerkem(カナダ)におけるジメチルエーテルのカルボニル化等の技術の開

発が活発であり、実証においては欧米がリードしている。ただし、発酵法については生産性が低く、熱化学法は収率が低いので、商業運転にはコスト等の課題がある。

- ④バイオマスの糖化・発酵ルートは基礎研究段階で RITE(日)などが研究を進めている。生産効率向上が課題であり、その解決手段として中間体を経て触媒反応で転換する二段階プロセスなども検討対象となる。
- ⑤タイヤの材料リサイクルでは、水平リサイクルを目指した熱可塑性エラストマーの研究をブリヂストン(日)が行っている。しかし、タイヤの水平リサイクルを可能にする素材技術は世界的にも実現していない。

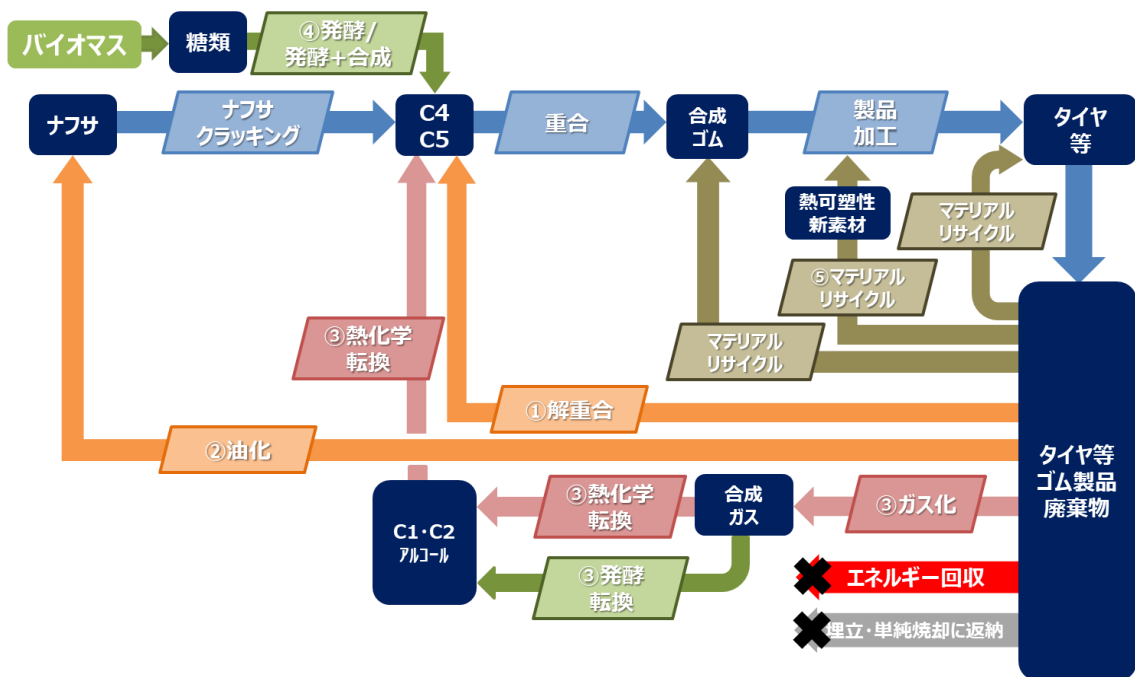


図 13 C4、C5 から合成ゴムを経てタイヤに至るサプライチェーン

表3 C4、C5 から合成ゴムを経てタイヤに至るサプライチェーンの原料多様化関連技術

方式	要素技術		海外	既存設備の活用	課題
ケミカルリサイクル	① 解重合		研究段階	○	・メタセシス分解の適応 ・カーボンブラックの回収
	② 油化		実証で先行	○	・油化技術のタイヤの二重結合への適応 ・カーボンブラックの回収
	③ 合成ガスルート	ガス化	多くの商業化実績	—	・タイヤのガス化 ・大規模化のためのマルチフィード化
		合成ガス転換	熱化学プロセス	実証で先行	—
バイオルート	④ 糖類の発酵によるC4、C5の生産		研究段階	—	・生産効率向上
	⑤ マテリアルリサイクル(水平リサイクル)		研究段階	—	・新熱可塑性エラストマーのタイヤへの適応

2-2 実現手段の候補

(1) 関連する論文・特許の状況

表3にまとめた原料多様化に関する要素技術について、主要な要素技術に関する論文と特許の状況を分析した。

ゴム・タイヤのメタセシス分解(解重合)に関する論文発行状況を図14に、特許出願状況を図15に示す。中国、欧米を中心に論文数、出願数が年々増加している。日本は1件の特許出願があるが論文は見られない。

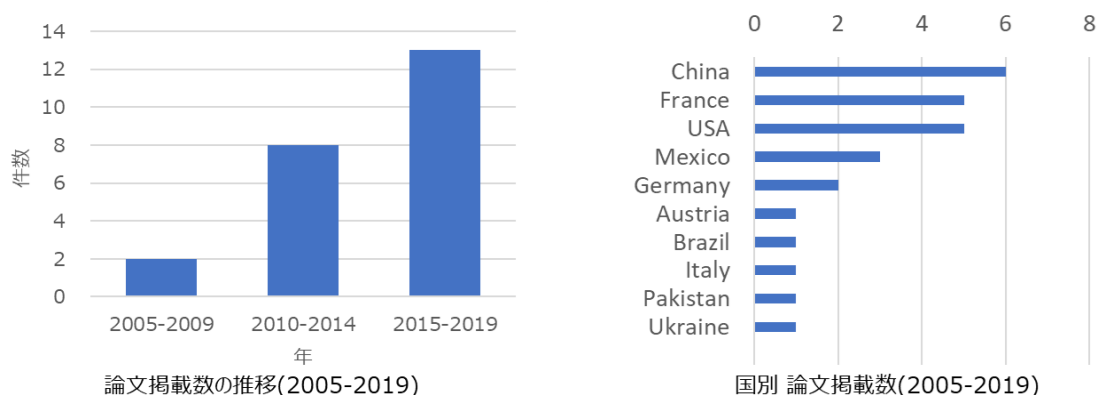
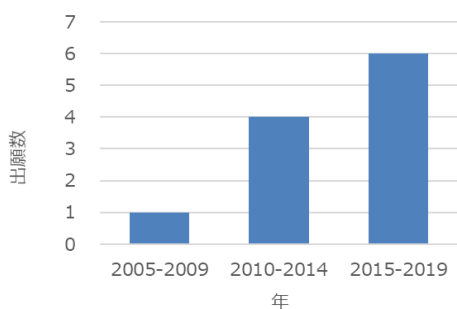
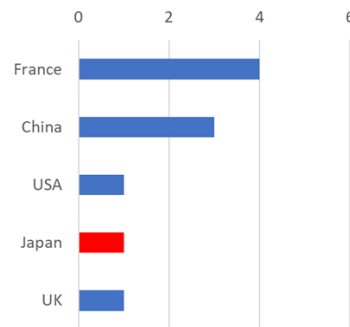


図14 ゴム・タイヤのメタセシス分解(解重合)に関する論文発行状況

出典: Web of Science™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2021.4)



特許出願件数の推移

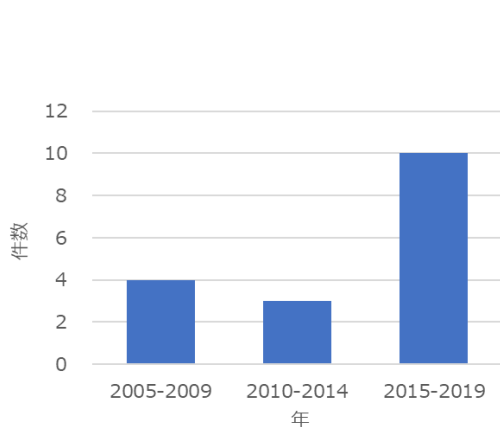


国別 特許出願件数(2005-2019)

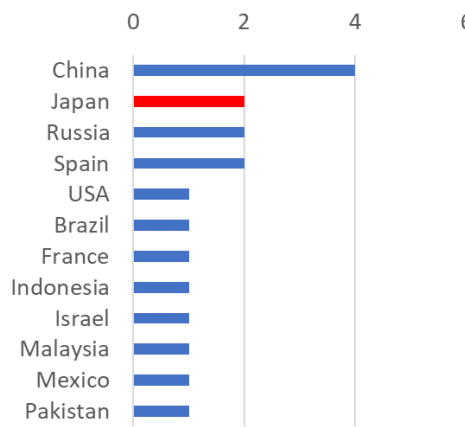
図 15 ゴム・タイヤのメタセシス分解(解重合)に関する特許出願状況

出典: Derwent World Patents Index™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021.4)

ゴム・タイヤの油化に関する論文発行状況を図 16 に、特許出願状況を図 17 に示す。論文数は近年増加するが特許出願数は変化が小さい。論文、特許ともに中国が 1 位で、日欧米が続く。



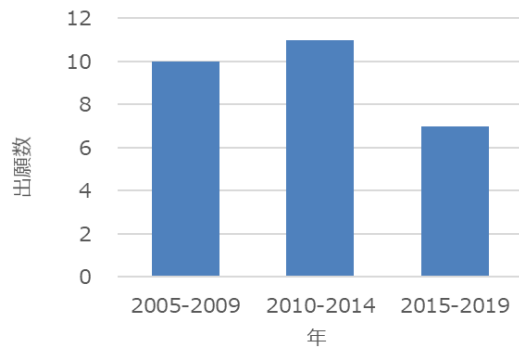
論文掲載数の推移(2005-2019)



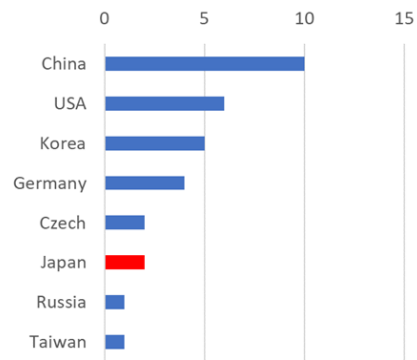
国別 論文掲載数(2005-2019)

図 16 ゴム・タイヤの油化に関する論文発行状況

出典: Web of Science™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021.4)



特許出願件数の推移

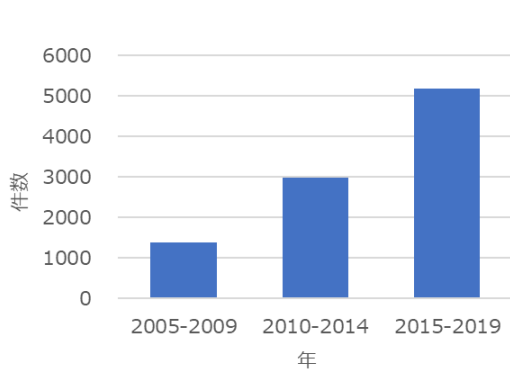


国別 特許出願件数(2005-2019)

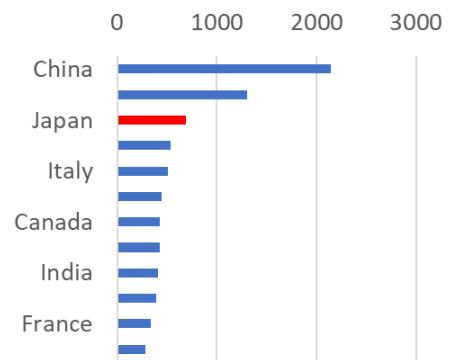
図 17 ゴム・タイヤの油化に関する特許出願状況

出典: Derwent World Patents Index™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021.4)

廃棄物(廃タイヤ、廃ゴムを含む)・バイオマスの合成ガス化に関する論文発行状況を図 18 に、特許出願状況を図 19 示す。論文数は近年増加するが特許出願数は変化が小さい。論文、特許ともに中国が 1 位で、米国が 2 位、日欧が続く。



論文掲載数の推移(2005-2019)



国別 論文掲載数(2005-2019)

図 18 廃棄物・バイオマスの合成ガス化に関する論文発行状況

出典: Web of Science™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021.4)

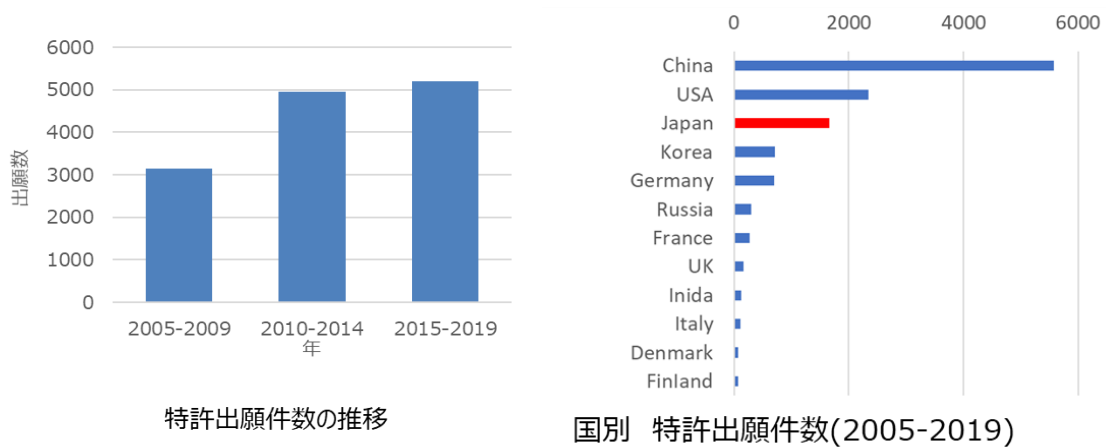


図 19 廃棄物・バイオマスの合成ガス化に関する特許出願状況

出典: Derwent World Patents Index™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021.4)

合成ガスからのエタノール転換に関する論文発行状況を図 20 に、特許出願状況を図 21 に示す。論文数は近年増加するが特許出願数は変化が小さい。論文、特許ともに中国が 1 位で、米国が 2 位、日欧が続く。

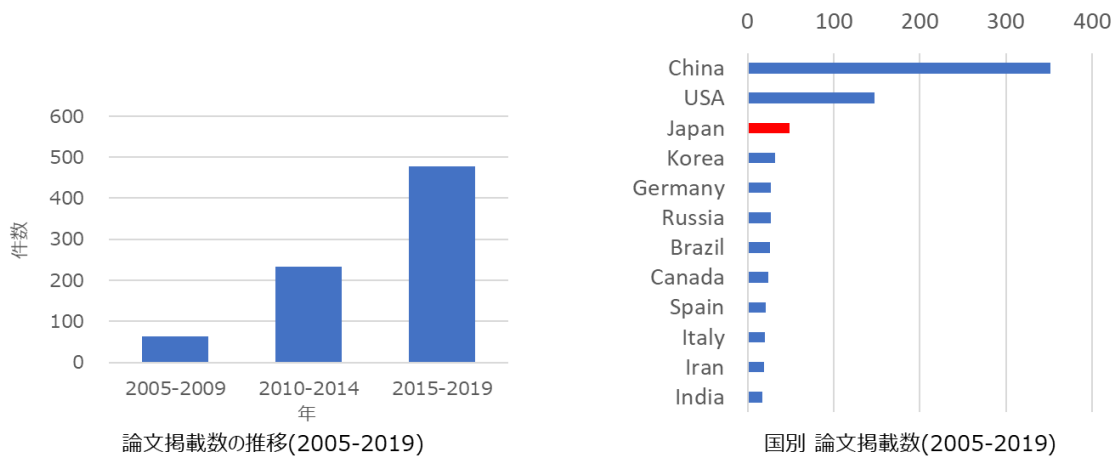


図 20 合成ガスからのエタノール転換に関する論文発行状況

出典: Web of Science™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021.4)

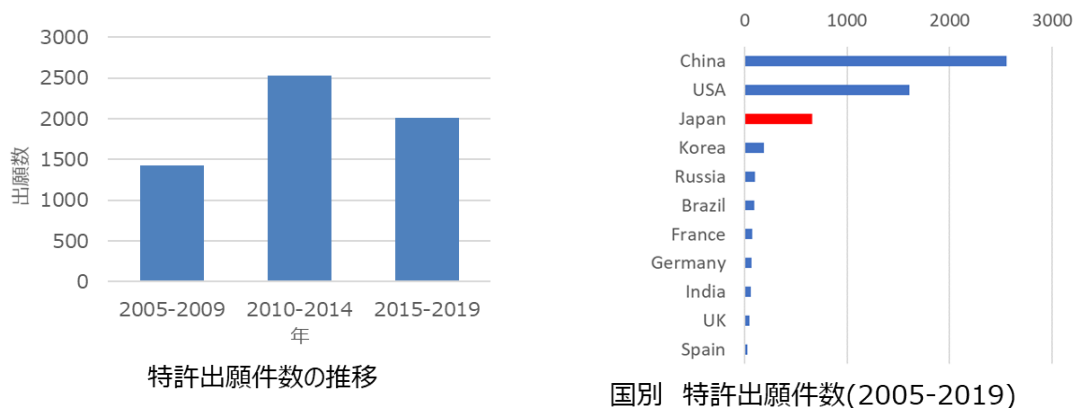


図 21 合成ガスからのエタノール転換に関する特許出願状況

出典: Derwent World Patents Index™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021.4)

(2) 具体的実現手段の候補と技術開発の方向性

日本の企業、大学等における研究開発実績を基に日本の独自性・強みを表 4 に示す。これまでの分析から、C4、C5 から合成ゴムを経てタイヤに至るサプライチェーンの循環型への転換、低炭素化の実現に向けた原料多様化を実現するため、日本の取るべき解決手段、技術開発の方向性は以下のように考えられる(表 4)。

- ① 解重合は触媒寿命とイソプレン(C5)の収率向上が必要。
- ② 油化は国内にも小規模な装置はあるが、産業レベルの大型装置にて、タイヤの構成要素を低コストで分離する技術開発が必要。
- ③ 合成ガス転換は海外が先行する。マルチフィード化に対応するため、汚れ対策やガス化効率改善が課題。海外技術を追いかける形になるが、触媒改良や生産性の向上によるコスト低減も課題となる。熱化学プロセスでは高速スクリーニングによる触媒探索、合成ガス発酵では高温菌を使った生産性向上が有効。合成ガス転換は、C4、C5 のみならず化学産業全体への波及効果が大きいことから、プレイヤーの拡大を含む研究の強化が必要。
- ④ バイオルートにおける糖類の発酵による C4、C5 の生産では、シャーシ株による複数の候補を活用した基礎研究による可能性探索が必要。
- ⑤ マテリアルリサイクルにおいては、新規な熱可塑性エラストマーの活用による、再生可能なタイヤ技術の確立が必要。

表 4 解決手段と技術開発の方向性

方式	要素技術	海外	日本の独自性・強み	技術開発の方向性	
ケミカルリサイクル	①解重合	研究段階	メタセシス分解 ²⁰ と熱分解の併用	触媒寿命、イソプレン収率の向上、FS 研究の推進	
	②油化	実証で先行	ASR(自動車破碎残渣)中プラの分離技術・油化研究 ²¹	カーボンブラック、樹脂、金属などタイヤ構成要素の低コスト分離	
	③合成ガスルート	ガス化	多くの商業化実績	廃プラ等による複数の実証 PJ と実装 ²²	汚れ、ガス化効率をマルチフィード化への対応
		合成ガス転換	熱化学プロセス	実証で先行	高速スクリーニングによる触媒開発 ²³
	④糖類の発酵による C4、C5 の生産	合成ガス発酵	実証で先行	高温菌を使った発酵 ²⁴	生産性向上、精製プロセス検討、生成物拡大
⑤マテリアルリサイクル(水平リサイクル)		研究段階	新熱可塑性エラストマー ²⁶	タイヤとしての利用技術確立	

タイヤ産業を循環型に転換するための原料多様化に関する技術開発は、世界的に取り組みが遅れている。日本においては、表 4 に挙げた解決手段の要素技術について、特定のものに絞り込むのではなく、全般に亘って開発を加速し、その中で早期に確立された特長ある技術を核として、サプライチェーン全体を巻き込んで実証試験、実用化へとつなぐことが重要である。

²⁰ https://www.tia-nano.jp/data/doc/1656892085_doc_43_0.pdf

²¹ https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/haikibutsu_recycle/jidosha_wg/pdf/048_s03_03.pdf

²² https://www.jgc.com/jp/media/pdf/catalog_03.pdf
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100506.html
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101345.html
<https://www.nedo.go.jp/hyoukaku/articles/201103metawater/index.html>

²³ https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2019/pr20190722/pr20190722.html

²⁴ <https://metab.hiroshima-u.ac.jp/ja/edu-tech/gas-fermentation/>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389172321002085?via%3Dihub>

²⁵ https://www.rite.or.jp/bio/biofuels/post_5.html

²⁶ https://www.bridgestone.co.jp/technology_innovation/susym/

2-3 実現のためのシナリオ

日本の強みや特徴を活かした原料多様化技術が社会実装されることにより、C4、C5 から合成ゴムを経てタイヤに至るサプライチェーンの循環型への転換、低炭素化を実現し、産業競争力の維持・強化を実現することが、本レポートで目指す将来像である。その実現のシナリオとして、この将来像が実現した場合のビジネスエコシステムの例を図 22 に示す。

廃タイヤの回収・供給は、既存の静脈産業が担うことを想定している。日本国内では廃タイヤの回収は 90%を超える量が経済性を伴って再利用されており、回収・供給のシステムは既に構築されている。しかし、その多くはサーマルリサイクルである。したがって、ケミカルリサイクル等の技術開発は、現状より高い価格で廃タイヤを購入しても経済的に成り立つことが求められる。

新規な熱可塑性素材による水平リサイクルのルート(図 22 の⑤)は、素材メーカーおよびタイヤメーカーがプレーヤー候補となる。解重合ルート(①)や油化(②)は、生成されるブタジエン、イソプレン、粗ナフサの純度に応じて、石油化学メーカーか、合成ゴムメーカーがプレーヤー候補となる。

合成ガスを経るルート(③)は、経済性の向上に大規模化が必須であり、廃タイヤだけでなく、廃プラスチックやバイオマス等も含めた原料とし、同一の装置でこれらの多様な原料の利用を可能とするマルチフィードを実現することが大規模化の解決策となる。また、製品である合成ガスは、メタノール、エタノール、エチレン、プロピレン等、様々な製品への展開が可能である。ガス化ルートでは、それぞれの製品に対する個別の技術確立が前提となるが、社会実装された設備およびシステムは、様々な原料を対象とし、多様な最終製品につながる共通プラットフォームのような役割を果たすと考えられる。したがって、合成ガスルートの社会実装には、本レポートが対象とする C4、C5 分野の技術開発が成功するだけでなく、他分野の合成ガスルートの技術開発の成功も欠かせない。また、産業の低炭素化の推進に影響が大きいと考えられるルールやシステム、例えば欧州で進められているマスバランスアプローチなど、その整備状況を踏まえた実装計画が不可欠となる。石油化学メーカー等がそのプレーヤー候補と考えられる。

バイオルート(④)における糖類の発酵による C4、C5 の生産は、まだ基礎研究段階であるが、高効率な反応ルートが見いだせれば、エネルギー投入の少ない合成法として化学プロセスに置き換わる可能性がある。バイオルートは合成ガスルートとは対照的に経済性に対して大規模化の効果が小さいため、小規模での社会実装に有利である。

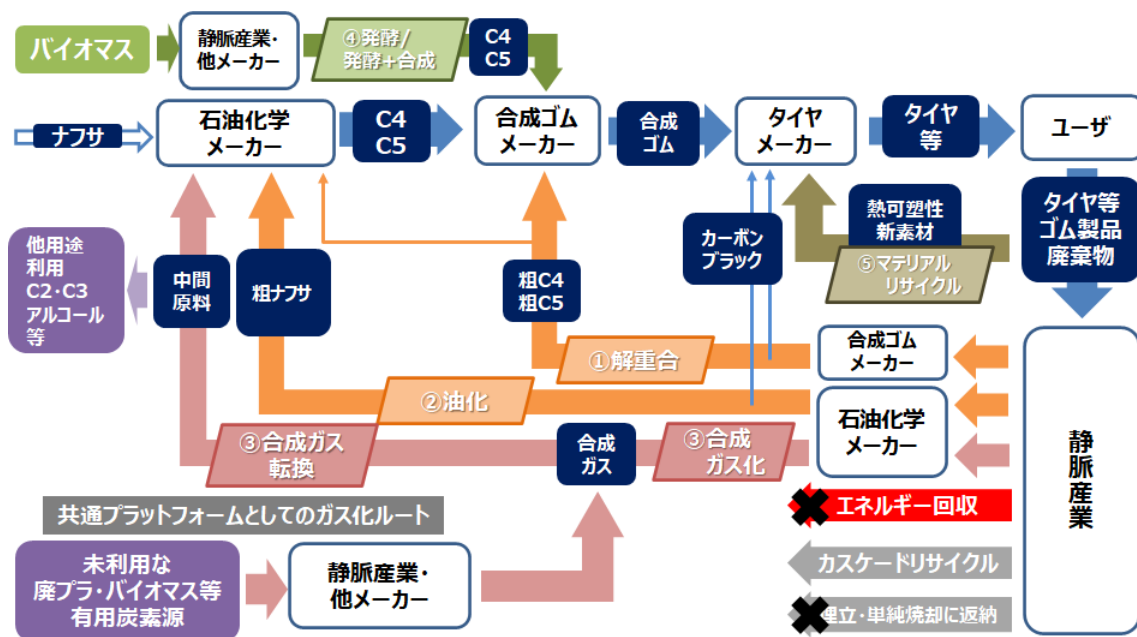


図 22 将来像が実現した場合のビジネスエコシステム

3章 おわりに

本レポートでは、基礎化学品の原料多様化分野の中で、合成ゴムやタイヤの主原料であるブタジエン(C4)、イソプレン(C5)の製造に関して、日本のサプライチェーン全体でのCO₂削減とタイヤ産業の産業競争力の強化を同時に実現するための技術開発の方向性を整理した。

化学産業はエネルギー消費とCO₂排出量の多い製造業であり、化石資源依存からの脱却や、カーボンリサイクル技術によるCO₂の原燃料化といった、ゼロカーボン技術を最大限活用する対策が求められている。カーボンリサイクル・マテリアル産業、および、資源循環関連産業は、国のグリーン成長戦略においても重要分野に位置づけられ、その中で、化学品などの需要が多い汎用品を製造する技術は、重点的に取り組むとされている。化学産業のCO₂削減策としては、省エネや天然ガス等低級炭化水素の利用、廃棄物やバイオマスを利用した原料多様化、および、CO₂フリー水素を利用したCCUやCCSの併用などが対象となる。

世界では米国の安価なシェールガスを原料としたエチレン製造が増加しており、国内のナフサクラッカーが価格競争力低下によってその稼働率が低下すると、連産品として生産されるC4、C5の供給リスクとなる。

日本の化学産業の原料多様化の取り組みの中で、エチレン(C2)、プロピレン(C3)に対しては様々な検討が行われているが、ゴム製品等の原料となるC4、C5については、タイヤのエネルギー回収としての利用が徹底されていることもあり、循環型に転換するためのリサイクル等の原料多様化の検討が遅れている。

日本が強い産業分野であるタイヤ産業について、今後成長著しい世界市場における日系企業の競争力を維持・強化するには、原料として重要なC4、C5のナフサ依存を脱却し、原料多様化によるサプライチェーン全体の低炭素化の早期実現が有効である。

C4、C5から合成ゴムを経てタイヤに至るサプライチェーンの循環型への転換、低炭素化の実現に向けた、原料多様化技術の特徴と技術開発の方向性は以下の通りである。

- ・解重合は、世界でも研究段階の技術であるが、その生成物として粗ブタジエン、粗イソプレンが得られるため、既存の設備の利用(レトロフィット)が可能であることに加え、カーボンブラックを回収できる可能性を有する。触媒寿命とイソプレン(C5)の収率向上の検討が重要である。
- ・油化もレトロフィットが可能、かつカーボンブラックの回収の可能性を有するが、多量に残る二重結合への対応が必要になる。産業レベルの大型装置にて、タイヤの構成要素を低コストで分離する技術開発が重要である。

- ・ガス化・アルコール転換・ブタジエン等転換からなる合成ガスルートは、タイヤ等の構成要素のガス化ができれば、残りのプロセスは開発済みである。しかし、ガス化設備はスケールメリットを受けやすい設備であり、大規模化のための原料調達の問題がある。マルチフィード化に対応するため、汚れ対策やガス化効率改善が重要である。先行する海外を追いかける形になるが、触媒改良や生産性の向上によるコスト低減も重要である。合成ガス転換は C4、C5 のみならず化学産業全体への波及効果が大きいことから、より多くのプレーヤーの参画による研究の強化が必要である。
- ・バイオルートにおける糖類の発酵による C4、C5 の生産では、シャーシ株による複数の候補を活用した基礎研究による可能性探索が必要である。
- ・マテリアルリサイクル、特に水平リサイクルを可能とする技術は世界的に見ても存在しない。熱可塑性エラストマーは存在するものの、タイヤの構成要素としての利用技術の確立が必要である。

日本国内では廃タイヤの回収は 90%を超える量が経済性を伴って再利用されており、回収・供給のシステムは既に構築されていることから、今後の原料多様化の技術開発においては、より高い価格で廃タイヤを購入しても経済的に成り立つことが求められる。

これら C4、C5 から合成ゴムを経てタイヤに至るサプライチェーンに対する原料多様化技術に対しては、対象分野を広く捉えて、要素技術の全般に亘って開発を加速し、その中で早期に確立された特長ある技術を核として、サプライチェーン全体を巻き込んで実証試験、実用化へとつなぐことが重要である。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.109

基礎化学品（ゴム原料の C4、C5）の原料多様化分野の技術戦略策定に向けて

2022 年 10 月 12 日発行

TSC Foresight Vol.109 基礎化学品（ゴム原料の C4、C5）の原料多様化分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター(TSC)

■センター長 岸本 喜久雄

■センター次長 飯村 亜紀子
西村 秀隆 (2021 年 6 月まで)

■環境・化学ユニット

- ・ユニット長 中村 勉
土肥 英幸 (2022 年 3 月まで)
- ・研究員 寒川 泰紀
柏谷 誠 (2021 年 4 月まで)
林 直之 (2020 年 9 月まで)
柳田 泰宏 (2021 年 3 月まで)
- ・フェロー 指宿 堯嗣 一般社団法人産業環境管理協会顧問
島田 広道 国立研究開発法人産業技術総合研究所フェロー (2021 年 3 月まで)
府川 伊三郎 株式会社旭リサーチセンターシニアリサーチャー (2021 年 3 月まで)
室井 高城 アイシーラボ代表

●本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

●本書は以下 URL よりダウンロードできます。
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。