



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

2022年3月

カーボンリサイクル分野（CCUによる 機能性化学品製造）の技術戦略策定に向けて

Vol. 108

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 社会課題と将来像の定義.....	3
1-2 解決・実現のための方法.....	6
1-3 環境分析とベンチマーキング.....	9
1-4 まとめ.....	15
2章 解決・実現手段の候補.....	16
2-1 解決・実現のための課題.....	16
2-2 分析から得られた課題に対する解決手段の候補.....	17
2-3 技術開発の方向性.....	20
3章 おわりに.....	21

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及び「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はもとより、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分野を含む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」は重要分野に位置付けられている。

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、2030年頃から普及が期待できる、水素が不要な技術や高付加価値製品を製造する技術に重点的に取り組むとされている。

本レポートでは、CO₂を資源として捉えて分離回収・再利用するカーボンリサイクル分野の中で、早期社会実装が期待される非還元的(水素不要)な、CO₂を原料とする機能性化学品の製造に関して、日本企業の産業競争力の強化とCO₂削減を同時に実現するための技術開発の方向性、及び国の支援の在り方を検討した。

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

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

³ <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/kankyousenryaku2020.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 社会課題と将来像の定義

気候変動問題は、人為起源で排出された GHG の影響である可能性が極めて高く、GHG 排出の大部分を占める CO₂ の削減は世界的に喫緊の課題である。その解決のためには、炭素循環という観点から、CO₂ の排出削減、貯蔵・固定化、再利用などの全ての工程に亘って包括的に取組むことで、持続可能な社会を目指すことが重要である。

図 1 に炭素循環から見た社会システムの概念図を示す。まず、エネルギー需要部分では、省エネルギー化の推進や、再生可能エネルギー、水素、バイオマスの利用により、化石燃料の使用量を削減することで CO₂ 排出量を低減させる。その際、省エネルギー化も含めて、持続可能なエネルギーの利用を最大化することが求められる。次に、排出される CO₂ については、分離回収し、CCS(CO₂回収・貯留: Carbon dioxide Capture and Storage)や EOR(石油増進回収法: Enhanced Oil Recovery)により地中に貯留させるとともに、CCU(CO₂回収・利用: Carbon Capture and Utilization)により、化学物質等に変換して利用する。このような CO₂ を回収、利用、貯留する技術は CCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)と呼ばれている。このような物質資源の循環利用を推進するサーキュラーエコノミーや、バイオマスの有効活用を推進するバイオエコノミーを社会システムとして実現していくことが、CO₂ 削減に効果的である。

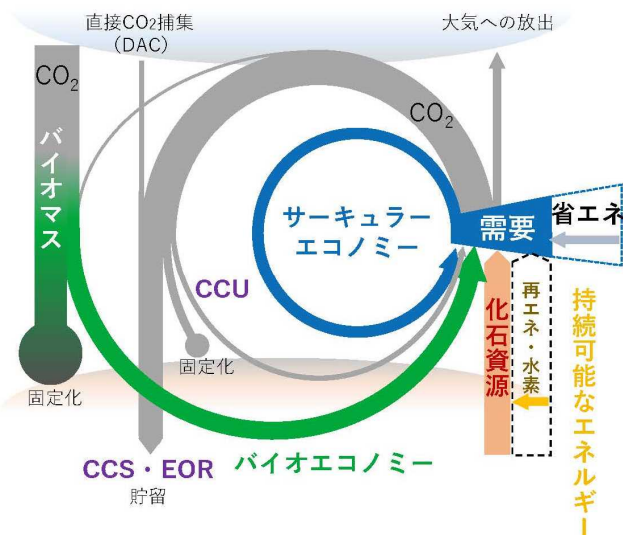


図 1 炭素循環から見た社会システムの概念図

出典: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

本レポートが対象とする化学産業は、国内産業部門の中で鉄鋼業に次ぐ規模の年間56百万トンのCO₂を排出しており(2019年度)⁷、温暖化対策は重要な課題である。それとともに産業が成長していくことも重要な課題であり、これらが両立する産業への転換が求められる。

化学産業におけるCO₂削減策のそれぞれについて、関連する政策、ナショナルプロジェクト、並びに国内での有効性について整理したものを表1に示す。

表1 化学産業におけるCO₂削減対策

	省エネ	燃料の低炭素化 (天然ガス、 水素、アンモニア、 電化)	原料の低炭素化				CCS併用
			天然ガス転換	代替原料 の利用	CCU/カーボンリサイクル		
					非還元 (水素不要)	還元 (水素利用)	
原料/燃料	変化なし	-/天然ガス,水素, アンモニア,電化	天然ガス/-	廃棄物、バイオマス/-	CO ₂ /-	水素、CO ₂ /-	変化なし
内容	エネルギー効率・生産効率向上 コージェネ、排熱の活用等 電化に注目	・天然ガスバーナー ・水素バーナー ・アンモニアバーナー ・再エネ+電気炉	エタンクラッキング、プロパン脱水素	未利用の炭素資源(廃棄物、バイオマス)を利用	CO ₂ からの化学品製造	CO ₂ と水素からの化学品製造	メタノール、アンモニア等、大規模CO ₂ 発生源から進む
政策文書	・省エネ技術戦略 ・革新イノベ ・グリーン成長戦略	・革新イノベ ・グリーン成長戦略	-	・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	・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	・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	・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				・カーボンリサイクル関連 ・戦略的省エネ	・人工光合成 ・カーボンリサイクル関連	・CCS関連
国内有効性	・即効性あり、既存原料/燃料利用でも 有効	・天然ガスは当面の燃料転換による低炭素化には資するが、将来的には輸入コスト、石油資源である点から 有効性低い ・水素、アンモニア、低炭素電源での電化は 将来有効	・天然ガスは当面の燃料転換による低炭素化には資するが、将来的には輸入コスト、石油資源である点から 有効性低い	・原料の低炭素化対策として 有効	・原料の低炭素化対策として 有効	・原料の低炭素化対策として 有効 ・特に、低炭素な水素が大量供給される 将来有効	・国内のCCSサイトが確立される 将来有効

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、同改定2019)
- 革新イノベ 革新的環境イノベーション戦略(2020)
- グリーンイノベ 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)

省エネは、エネルギー効率や生産効率向上につながるプロセス改良や触媒開発を含む。燃料の低炭素化は、熱源として使用される天然ガスの利用や将来的には水素、アンモニアなど低炭素な物質への転換が主であるが、低炭素電源による電化も含む。原料の低炭素化は、現状のナフサから天然ガスへの転換、並びに、バイオマスやリ

⁷ 環境省、国立環境研究所。2019年度(令和元年度)の温室効果ガス排出量(確報値)について。2021, p.22. <https://www.nies.go.jp/whatsnew/jqjm1000000xcmba-att/jqjm1000000xcmzf.pdf>

サイクルによる廃プラなどの廃棄物の利用を含み、CCU(CO₂ や水素の利用)が対象となる。また、これらの CO₂削減策と CCS の併用では、排出される CO₂を分離回収して削減させる。

化学産業の CO₂削減には、このような対策を多元的に推進することが有効であり、社会実装の時期、及び CO₂削減効果を考慮して、幅広い分野の技術の開発を進める必要がある。燃料や原料の天然ガスへの転換については、低コストなシェールガス由来のメタン、エタン、プロパン等低級炭化水素の利用が米国を中心に先行しているが、日本では、LNG としての輸入コストや新たな設備投資が必要になるといった課題があることや、天然ガスも化石資源であり最終的な絵姿とはならないこと、などを考慮すると、有効性が低い。一方、CCUS 分野、特にカーボンリサイクル分野は、化学産業において技術の確立と社会実装が期待される分野である。ただし、CCUS による CO₂削減には追加のコストを必要とし、技術導入が円滑に進むためには、社会が許容できるコストで利用可能な革新的技術の開発が求められる。

以上を踏まえて、化学産業のカーボンリサイクル分野について、現状の社会課題と実現したい将来像を以下のように考える。

現状の社会課題 : CO₂削減に向けて、成長と温暖化対策を両立させる化学産業への転換。

実現したい将来像 : 産業活動によって排出せざるを得ない CO₂を回収、利用、貯蔵する CCUS 分野、特にカーボンリサイクル分野が、社会的・経済的に受容される形で成立し、日本の化学メーカーが世界で競争力を維持・強化している状態。

1-2 解決・実現のための方法

前節で将来像を実現するための方法として挙げた CCUS 分野について、回収した CO₂ を有効利用するカーボンリサイクル分野に焦点を当て体系的に整理する。副原料、生成物、活用分野で分類した CO₂ 削減対策における機能性化学品 CCU の位置付けを図 2 に示す。CCU 技術のうち、最下段に示した水素還元による技術は、燃料製造の他、エチレン、プロピレン、メタノールなどの基礎化学品製造に用いられる。これら基礎化学品製造の CCU 技術への転換は、大規模な CO₂ 利用が可能であり、大きな CO₂ 削減ポテンシャルが期待される。しかし、CO₂ フリー水素の大量な調達を必要とするなど、克服すべき課題も多い。一方で、水素を使用せず非還元的に CO₂ を転換することで生成が可能な機能性化学品には、ポリウレタン、ポリカーボネートなど複数の化合物が存在する。基礎化学品に比べて生産量は少なく、CO₂ 削減ポテンシャルはあまり大きくは見込めないものの⁸、最終製品に直接利用される化学品であり、消費者に近いことから、本来の機能性に加えて環境性能が付与されることで、商品競争力の向上が期待される。

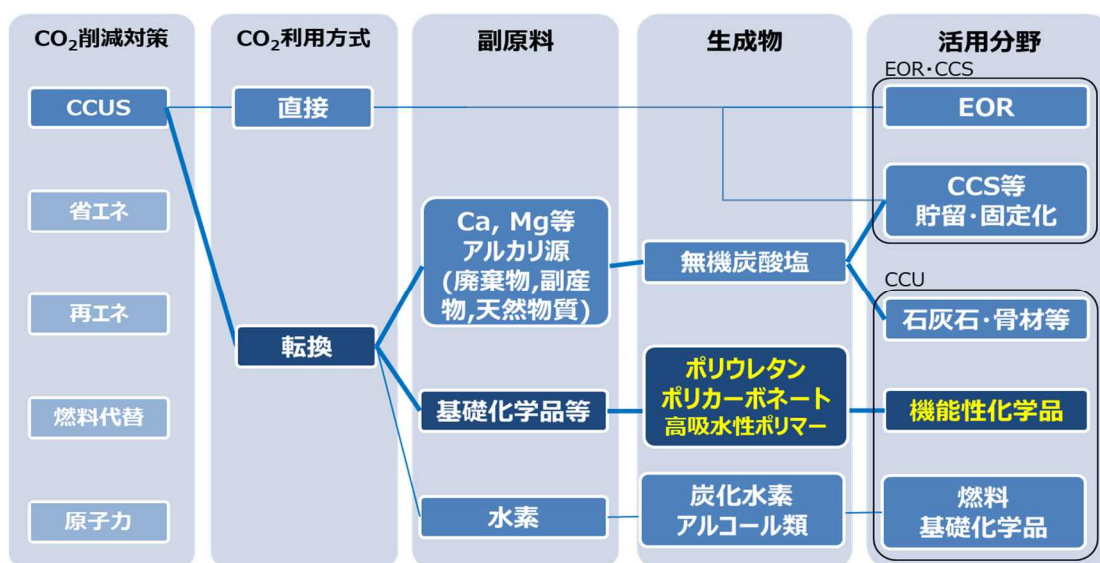


図2 CO₂削減対策における機能性化学品 CCU の位置付け

CO₂ 削減ポテンシャルはあまり大きくは見込めない一方で、水素を必要としない非還元的反応によって CO₂ を利用して製造するカーボネート、イソシアネート等の機能性化学品中間体は、その反応において、多量のエネルギーの投入を必要としないこ

⁸ NEDO 技術戦略研究センター. TSC Foresight, 持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2020, 増補版. 2021. <https://www.nedo.go.jp/content/100930145.pdf>

とから、理論的な投入エネルギー量の視点から捉えた場合には CO₂ 削減に有利と考えられる(図 3)。

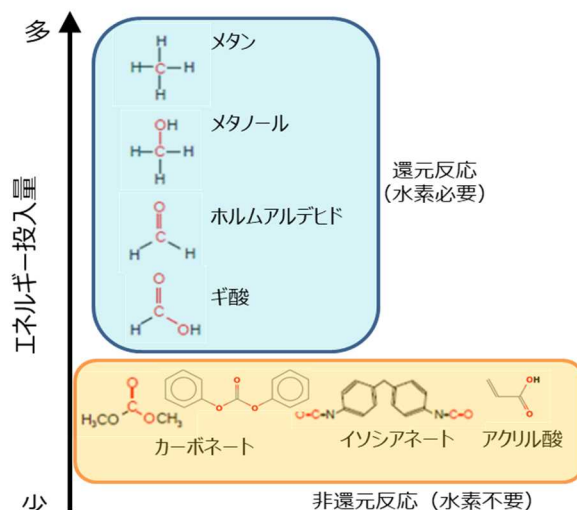


図 3 CO₂ からの製造が可能な化合物と必要なエネルギー量

出典: Thilbault Cantat et al, Angew. Chem. Int Ed., 2012, 51.187 を基に

NEDO 技術戦略研究センター作成

以上のように、化学産業における CO₂ 削減の多元的な対策の中で、非還元的に CO₂ を利用する機能性化学品の製造は、CO₂ 削減ポテンシャルはあまり大きくないものの、製造に多量のエネルギー投入を必要とせず、水素を必要としないこと、および、環境性能の付与による商品競争力向上が期待できることに加えて、一部の製品について技術開発が商用化の段階にあることから、早期の社会実装が期待される(表 2)。

表 2 CCUS 分野の各実現方法と機能性化学品の特徴

実現方法	特徴	技術開発段階	CO ₂ 削減ポテンシャル	PJの有無	対象市場, プレーヤー
CO ₂ 分離回収	•CCUSにおける共通技術として必須, 設備建設で高いシェア	研究・開発 ~商業化	(間接)	CCUS実証、 ムーンショット等	エンジンメーカー, 素材メーカー
CO ₂ 直接 注入	•CO ₂ 削減ポテンシャル大. EOR を中心に商業運転が拡大中	商業化	80億t	—	エネルギー関連企業
		商業化		CCS実証, 環境省	新規市場, 制度・規制 に依存
炭酸塩化	•CO ₂ 削減ポテンシャル大. •発生源から利用まで多くの産業 の連携が必要. 建築物等、制 度・規格も係る製品適用	実証	43億t	セメント, カーボ ンリサイクル関連	新規市場, 制度・規制 に依存
		実証		カーボンリサイ クル関連	既存製品の置き換え
機能性化学品	•削減ポテンシャルは小さいが, 環境性能が商品競争力に •早期社会実装に期待	研究・開発 ~商業化	1億t 以下	カーボンリサイ クル関連, 戦略的 省エネ	既存製品の置き換え
燃料・基礎化学品	•ポテンシャルが比較的大きいが低 炭素な水素の利用が前提	研究・開発	11億t	人工光合成, カーボンリサイ クル関連, 環境省	既存製品の置き換え
植物による固定	•植林地帯: コストは安い, 膨 大な面積が必要	研究~実証	38億t	—	新規市場, 制度・規制 に依存

経済産業省の「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(令和元年 6 月策定、令和 3 年 7 月改訂)⁶(図 4)では、2030 年に向けたフェーズ 1 では、「特に 2030 年頃から普及が期待できる、水素が不要な技術や高付加価値製品を製造する技術に重点」を置くとの方向性が示された。その後、「革新的環境イノベーション戦略」(令和 2 年 1 月閣議決定)³においても、イノベーション・アクションプランの中で「2030 年までに、カーボンリサイクル技術により CO₂ を原料に機能性化学品を製造するプロセスを構築し、既存同等コストを目指す」との方向性が示された。また、令和 2 年 10 月の政府による「2050 年カーボンニュートラル宣言」に対応し、令和 2 年 12 月には、産業政策とエネルギー政策の両面から、成長が期待される 14 の重要分野について、国として高い目標を掲げ、可能な限り、具体的な見通しを示した「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。この中で、カーボンリサイクルは、カーボンニュートラル実現に向けたキーテクノロジーと位置付けられ、CO₂ を原料とする機能性化学品(ポリカーボネート等含酸素化合物)等については、2030 年までに製造技術を確立し、2050 年までに既存製品と同価格を目指す、今後の取り組みが示された。

このように政府が示す政策の中にも、水素を必要としない CCU 分野の早期社会実装への期待がうかがえる。

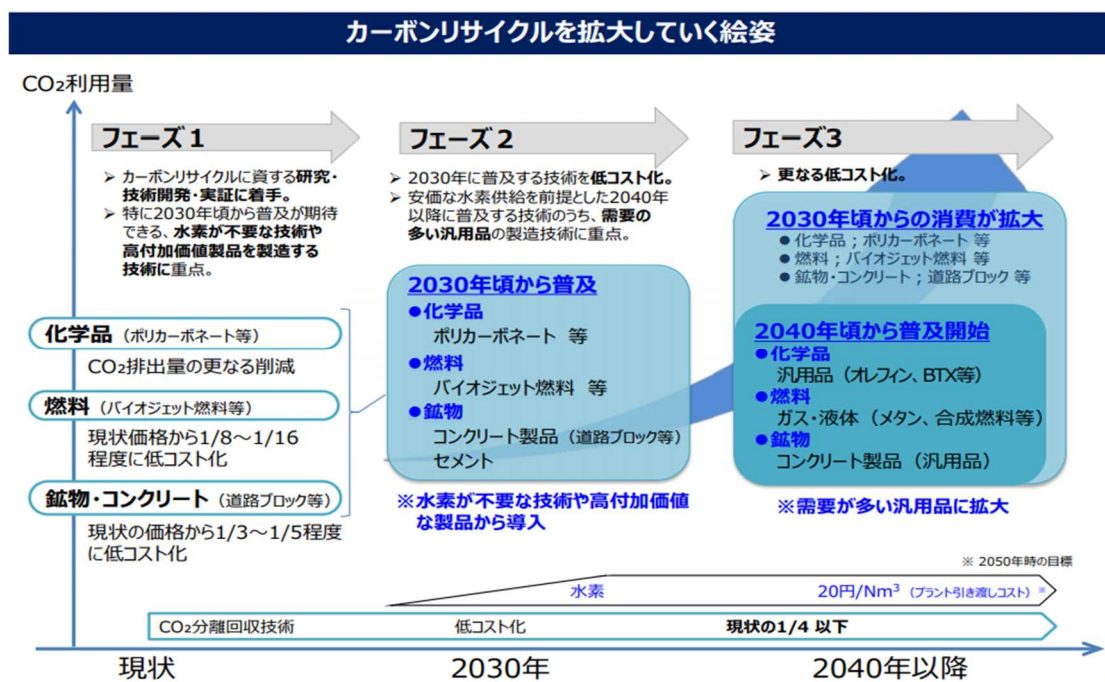


図 4 カーボンリサイクル技術ロードマップ

出典：「カーボンリサイクル技術ロードマップ令和元年 6 月(令和 3 年 7 月改訂)」
(経済産業省他、2021)

1-3 環境分析とベンチマーキング

(1) 機能性化学品分野の市場動向

素材分野における日本の競争力を図 5 に示す。素材分野の中でも本レポートが対象とする機能性化学品(機能性プラスチック)分野の日本企業の売上げは世界で 1 兆円近くに及び、市場シェアも欧州に次いで米国と並ぶ位置につけている。

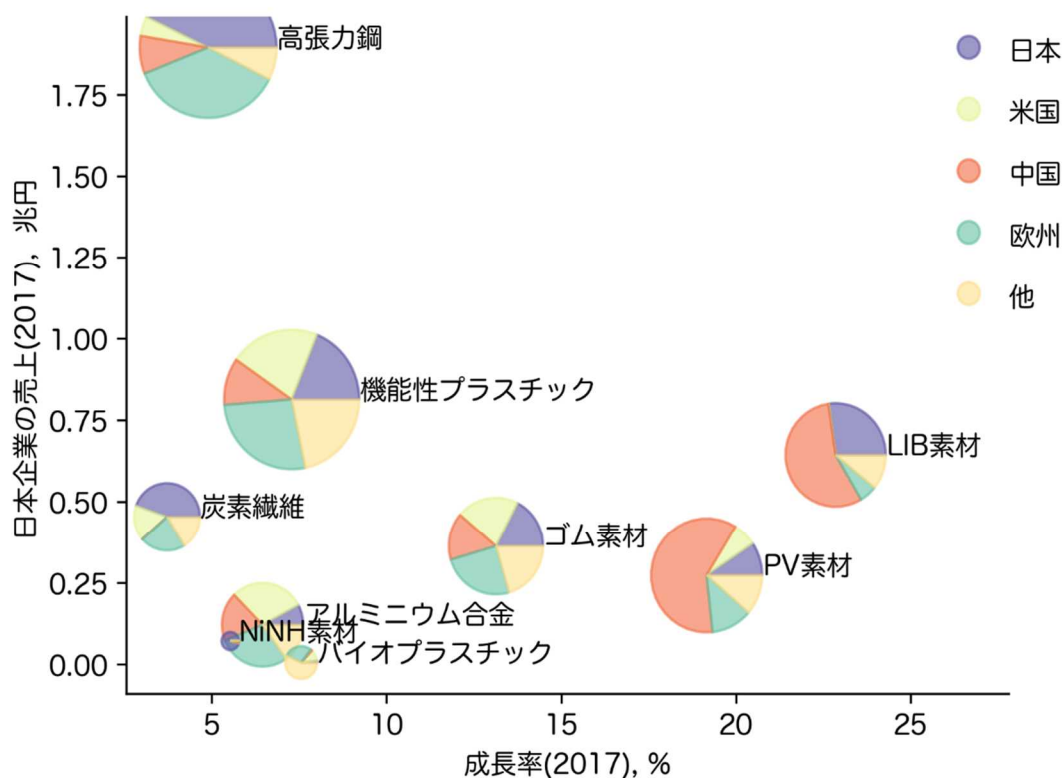


図 5 素材分野における日本の競争力

出典: NEDO 平成 30 年度成果報告書「日系企業のモノ、サービス及びソフトウェアの国際競争ポジションに関する情報収集」を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2020)

CCUによる製造が可能な機能性化学品(含酸素化合物)として、ポリカーボネート、ポリウレタン、高吸水性高分子の市場と日本のポジションを表 3 に示す。

表 3 機能性化学品(含酸素化合物)の市場と日本のポジション

機能性化学品 (含酸素化合物)	世界需要 2018年		世界販売 百万\$	日本 需要 2018年 百万 ton	日本企業生産能 力2019年 (ライセンス生産 含む, 2013年データ)		その他
	百万 ton	成長 率, %			百万 ton	シェア %	
ポリカーボネート (PC) ※1	4.6	4~5	27,600 2018年	0.3	1.3 (2.0)	28 (43)	ライセンス生産は世界需 要の15%
ポリウレタン原料 (ポリオール、 イソシアネート) ※2	21.6	4	55,282 2018年	0.7	1.4	6.4	
高吸水性高分子原料 (アクリル酸) ※3	6.8	4.5	12,000 2020年	0.2	1.1	16	技術的に高いハードル、バ イオールトによる可能性※4

※1: 需要生産能力は、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の開発と市場2020, CMCリサーチ、旭化成技術イニシアチブで製造、生産能力は2013年データ <http://blog.knak.jp/2013/12/post-1339.html>, 電中研調査報告書<https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/V19004.html>, 化学工業日報社「化学経済」2018年3月 第65巻第4号, 日本プラスチック工業連盟 プラスチック原料販売実績より、世界販売は<https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polycarbonate/>のTrading Price図より単価を\$6,000/トとして算出
 ※2: 2019ポリウレタン原料製品の世界市場、富士経済より
 ※3: 需要・生産能力は、化学品ハンドブック 2016, 日本触媒「新生日本触媒2020 NEXT」, 各社HPより、世界販売は<https://www.aqi.co.jp/report/go957418-acrylic-acid.html>より
 ※4: ワークショップ(2021.3.3)における指摘

これらの世界市場は、いずれも新興国の発展に伴う需要増により~5%/年の成長が期待される。日本企業の生産能力は、世界市場が 3 兆円規模のポリカーボネートでは世界需要のおよそ 3 割に上る。6 兆円規模のポリウレタン原料のポリオールやイソシアネートでは約 6%、1 兆円規模の高吸水性高分子(SAP: Super Absorbent Polymers)では約 16%である。このように、対象とする機能性化学品分野は日本が強い分野と考えられる。中でも、いち早く CO₂ を原料とした製造技術の確立に成功したポリカーボネートは、ライセンス生産を含めると、日本企業の世界シェアは 4 割を占めている。このポリカーボネートを先行事例として、他の機能性化学品においても、CCU による生産の早期社会実装を実現することは、成長する世界市場での競争力強化につながる可能性がある。

(2)CCUによる機能性化学品製造分野の技術動向

CCUによるカーボネート、ウレタン、アクリル酸製造関連の論文発行状況を図6に示す。カーボネート関連の論文数が、ウレタン、アクリル酸関連に比較して多い。また、国・地域別では中国、欧州が多い。5年ごとの推移でも中国、欧州を中心に論文数が年々増加している。日本のこの分野の研究論文数は中国、欧州、米国に及ばない。

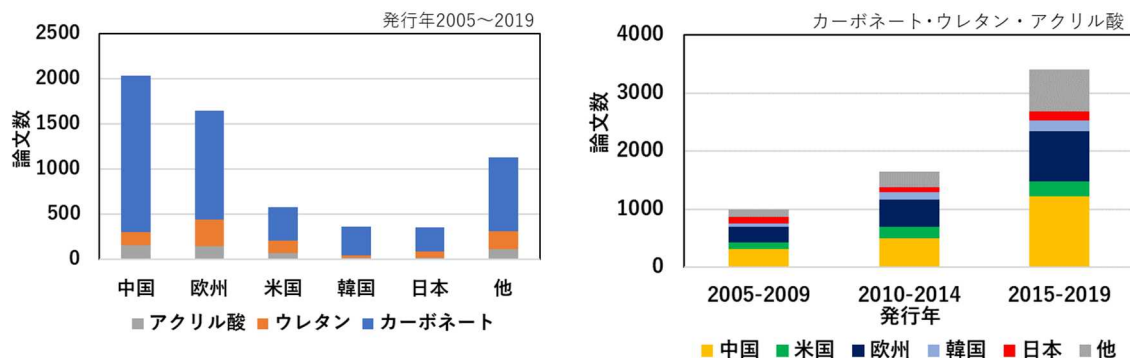


図6 CCUによるポリカーボネート、ウレタン、アクリル酸製造技術の論文発行状況

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 (2021.3)

CCUによるポリカーボネート、ウレタン製造技術の特許出願状況を図7に示す。中国が大幅に出願数を伸ばして、欧州、日本、米国が続く。日本は欧米に比較してウレタン関連の出願が多くなっている。論文と異なり、近年、日米欧の出願は減少傾向となっている。なお、論文数の状況とは異なり、アクリル酸関連の特許はほとんど出願されていない。

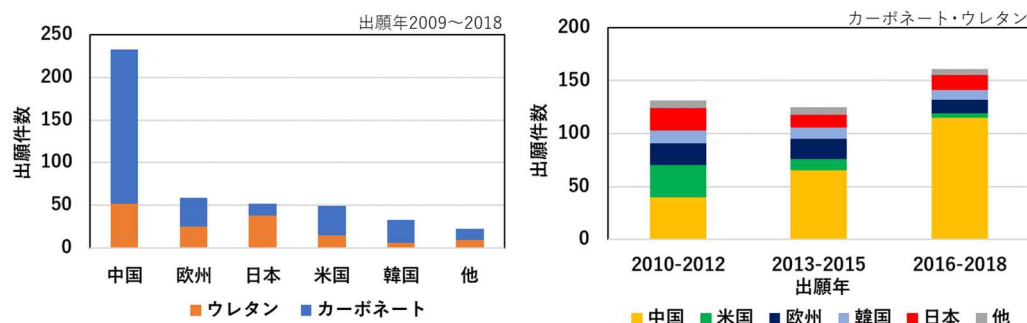


図7 CCUによるポリカーボネート、ウレタン製造技術の特許出願状況

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 (2021.3)

ポリカーボネートは国内化学メーカーが既に CO₂ を原料に利用した製造技術を商業化している。この技術は、従来法で原料としていた有毒なホスゲンを用いることなく、CO₂ を原料化したことが革新的である(図 8⁹)。また、ポリカーボネートに関してはさらなる省エネルギー化、低コスト化を目指した研究開発が国内で実施されている。ポリカーボネートに限らず、CCU による機能性化学品の製造プロセスは、一般的に特殊、且つ、多段の工程からなる技術である。このような技術の商用化には、パイロット規模による、エンジニアリング技術開発が不可欠である。

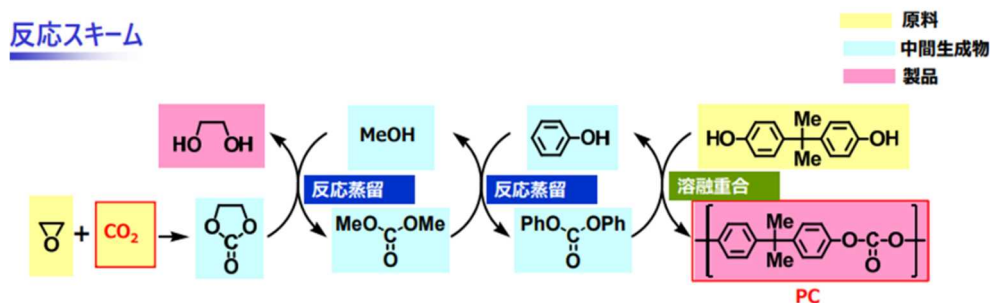


図 8 CCU による機能性化学品の製造プロセス例

<機能性化学品CCU>

- ・反応が多段で、各反応毎に収率改善など、触媒反応条件の最適化が重要
- ・原料、中間生成物、副生物など、関係化合物が多く、反応均一性、移送など考慮したプロセス設計、確認・改善が重要

⁹ 旭化成. カーボンリサイクルを実現する旭化成の CO₂ ケミストリーのご紹介. 第 1 回グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ, 2020.

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/001_06_02.pdf

ここで、CCU による機能性化学品(含酸素化合物)製造に関する世界の技術開発動向を表 4 に示す。今後の市場拡大が期待される機能性化学品のポリカーボネート、ポリウレタン、その原料のポリオール、高吸水性高分子原料のアクリル酸など含酸素化合物について、CCU による製造法の研究が世界的に活発化している。欧州、米国ではポリカーボネートとポリウレタン関連の「実証」が公的資金の投入も含め活発化している。アクリル酸はいずれの国においても基礎研究段階であり、社会実装までの技術的ハードルが高いと考えられるが、海外では BASF といった大手化学企業による研究推進が公表されている。このように、日本はポリカーボネートの商用化で先行するものの、他の素材では商用化に欠かせない実証段階の推進の点で劣後している。

表 4 CCU による機能性化学品製造に関する世界の技術開発動向

機能性化学品 (含酸素化合物)	公的資金	実績・動向
ポリカーボネート	\$14.1M 不明 ~\$2.0M \$1.2M	<ul style="list-style-type: none"> 旭化成は2002年世界に先駆けて、CO₂を原料としたポリカーボネート製造技術を台湾で商業化.140,000t/y. 省エネ化の実証も推進 青島Aspirit Chemicalがジメチルカーボネート10万t/y規模の実証 東北大、三菱ガス化学等がNEDO先導研究で、CO₂からのPC原料製造を研究 (より低エネルギーでの生産、副生物は水のみ) CO₂原料のDMC製造をMedia & Process Tech.が実証(DOE)
ポリウレタン	€2.5M €7.8M ~\$1.0M	<ul style="list-style-type: none"> CO₂を用いたウレタン原料製造のベンチャー企業ECONICが実証 Carbon4PURが20t/y規模の実証 大阪市立大、産総研、東ソー、日本製鉄等がNEDO 未踏チャレンジ2050で、CO₂からのウレタン原料製造を研究
ポリオール (ポリウレタン原料)	不明 €7.8M €3.6M 不明	<ul style="list-style-type: none"> Empoere Materialsが接着剤用途で商業化 Covestroが商用化. 数千t/y規模の実証. 重量の40%がCO₂由来 Econic Industriesが実証. 重量の50%までの任意割合がCO₂由来 Saudi Aramucoが5,000 t/y規模の実証
アクリル酸 (SAP原料)	不明 \$0.8M	<ul style="list-style-type: none"> BASFがCO₂とエチレンから高吸水性ポリマー合成触媒の研究推進 東工大でエチレンとCO₂からのアクリル酸合成を研究(JST・ACT-C)

1\$=¥100

次に、CCU による機能性化学品(含酸素化合物)製造に対する世界の公的資金による研究動向を表 5 に示す。機能性化学品の CCU による製造の CO₂ 削減ポテンシャルはグローバルでも 1 億トン/年未満と他の技術に比較して小さい³が、海外でも公的支援が行われており、この分野への期待が伺われる。EU の Carbon4PUR、米国エネルギー省(DOE)の Carbon Utilization Program など、欧州、米国では「実証」への公的資金が投入されている。日本の公的資金は過去に「実証」に投入されたが、現状の主な対象は「研究」となっており、「実証」への政策的支援に関しては、欧米に比べて限られている。

表 5 CCU による機能性化学品製造に対する世界の公的資金による研究動向

地域	公的資金	概要
欧州	€7.8M	Carbon4PURがポリウレタンで20t/y規模の 実証
	€2.5M	CO ₂ を用いたウレタン原料製造のベンチャー企業ECONICが 実証
	€7.8M	Covestroがポリオールを商用化. 数千t/y規模の 実証 . 重量の40%がCO ₂ 由来
	€3.6M	Econic Industriesがポリオール製造の 実証 . 重量の50%までの任意割合がCO ₂ 由来
米国	\$1.2M	CO ₂ 原料のDMC製造をMedia & Process Tech.が 実証 (DOE)
日本	\$14.1M	旭化成は2002年世界に先駆けて、CO ₂ を原料としたポリカーボネート製造技術を 実証を完了 し商業化.その後、省エネ化の 実証も完了
	~\$2.0M	東北大、三菱ガス化学等がNEDO先導研究で、CO ₂ からのPC原料製造を 研究 (より低エネルギーでの生産、副生物は水のみ)
	~\$1.0M	大阪市立大、産総研、東ソー、日本製鉄等がNEDO 未踏チャレンジ2050で、CO ₂ からのウレタン原料製造を 研究
	\$0.8M	東工大でエチレンとCO ₂ からのアクリル酸合成を 研究 (JST・ACT-C)

1\$=¥100

(3)主要化学・素材メーカーへの CCU による機能性化学品に関するヒヤリング
国内の主な化学・素材メーカーに機能性化学品の CCU 製品に関する考え方について聞き取り調査を行った。この調査において、カーボンニュートラルな水素の普及に合わせて CO₂ 削減ポテンシャルの大きい基礎化学品の CCU 製造に注力すべきとの戦略を持つ企業も存在したが、以下では、機能性化学品の CCU 製造の推進するための戦略や課題認識についてまとめた。

<CCU による機能性化学品製造に対する企業戦略>

- 商業化した CCU プロセスを持ち、製造時のエネルギー投入が少ないプロセスを**実証済み**。新規化学品の製造プロセスも検討。
- 既存ビジネスの原料について、既存石炭火力発電からの CO₂ を活用した、CCU 技術の適用を目指す。基礎化学品の CCU 製造とのシナジーも期待。

- CCU の低コスト化を検討。商用化に向けたパイロットデータを持つことで、コストが見合えばすぐに実装できるように準備。ライセンスも視野。

<CCU による機能性化学品製造に対する課題認識>

- 元来化学的に安定な CO₂ 利用技術開発は高難易度。原料 CO₂ のコストもまだ高くコスト増加が不可避。
- 市場は CO₂ 利用をコストアップと捉え、その価値を認めないという実態。
- これらにより、企業にとって CCU による機能性化学品製造に対する投資の判断が困難。

以上のヒヤリングによれば、近年 ESG 投資など低炭素技術に対する投資傾向が強まる中であっても、市場では機能性化学品においてもコスト追求の姿勢は衰えていない。そのため、元来化学的に安定な CO₂ を利用する機能性化学品の技術開発は難度が高く、コストアップにつながる。このコスト増分を環境価値として価格に転嫁することが許容されない可能性が高いなかにあって、企業にとっては投資判断が困難な状況にある。

1-4 まとめ

非還元的で水素不要な CCU による機能性化学品製造分野の環境として、次の状況が明らかとなった。すなわち、

- ・CO₂ 削減ポテンシャルは小さいが、技術開発が進んでおり早期の社会実装が期待できる。
- ・海外に先駆け CO₂ を原料とした製造技術確立に成功したポリカーボネートは、ライセンス生産を含めると、日本企業が世界シェアの 4 割を占めるなど、日本が強い産業領域である。また、他の機能性化学品においても、市場の拡大が見込まれており、早期社会実装を実現することが、世界市場での競争力強化につながる可能性がある。
- ・機能性化学品の CCU 製造プロセスは特殊かつ多段であり、実装にはパイロット規模でのエンジニアリング技術の確立が必須である。海外では早期の社会実装を目指して、公的支援を受けた実証が活発化しており、この点で日本は欧米に遅れをとっている。
- ・元来化学的に安定な CO₂ の利用技術の開発は難度が高く、コストの価格転嫁が見通せない環境価値の不確実性から、各企業にとっては投資判断が難しい状況にある。環境価値の訴求の実現が求められる。

2章 解決・実現手段の候補

2-1 解決・実現のための課題

1章の環境分析の結果から、CCUによる機能性化学品製造分野の将来のあるべき姿が次のように導かれる。

- ・環境価値の訴求を実現することで、ライセンスビジネスを含む世界展開でシェアを拡大し、産業競争力を維持・強化する。そのため、早期実装による優位性を確保する。
- ・社会実装の早期実現に向け、実証など重要な技術要素に注力し、国の支援も含め、産学官で開発を加速する。

この分野は、現状、日本が強い産業分野であり、日本企業の高い技術力を活かして、市場成長期待の大きい化合物分野を中心に、多数の機能性化学品に対するCCU製造技術の商用化を進めることが重要である。また、早期の商用化により、高いシェアを獲得、産業競争力を強化し、経済的にも合理的にCO₂削減に貢献すること、また、それによる一層の経済成長が期待される。

先行する研究動向や主要メーカーへのヒヤリングから考えられるあるべき姿の実現に向けた課題を、技術の観点と市場の観点に分け、以下のとおり整理した。

<技術の観点>

- ・反応および精製工程の低コスト、低エネルギー化等を目指した反応性の確保、及び精製の効率化技術の確立、並びに、原料となるCO₂ガスの品質の適正化。
- ・プロセス全体の省エネ化を目指した、パイロット規模でのCO₂ガス品質の最適化、及びプロセスエンジニアリング技術の開発。

<市場の観点>

- ・コストアップや環境価値の市場受容性に対する不確実性から、各企業にとっては、投資判断が難しい状況に対し、素材のユーザーとなる企業との連携による用途拡大と消費者にCO₂削減効果を訴求する活動・ルールづくり。

2-2 分析から得られた課題に対する解決手段の候補

2-1 節で整理した課題に対する解決手段の候補、並びに、それらの各手段に対する、現状と将来の目標を整理し、表 6 に示す。

表 6 あるべき姿の実現に向けた課題の解決手段と、現状・目標

分類	課題	現状	目標		
技術の観点	基礎技術	反応性の確保	商用化済(従来法より多エネルギー消費) 低コスト低エネルギーに資する要素技術確立済 異なる反応経路の技術も確立済 低コスト低エネルギーに資する要素技術確立済 異なる反応経路の技術も開発中 反応性低い	低コスト低エネルギーを実現する実証試験に資する要素技術確立	
		精製の効率化			対象化合物 ・ホリルタン ・アクリル酸・他
		原料CO ₂ 品質の適正化			・各プロセスの 不純物の影響は殆ど不明 ・試験は高純度CO ₂ で実施 ・CO ₂ 分離回収技術開発において、不純物濃度の制御技術を開発中
	スケールアップ技術	反応性の確保 精製の効率化 原料CO ₂ 品質の適正化	・ポリカーボネートは、NEDO-PJで低エネルギーな技術を実証済み。異なる反応経路を介する技術の 実証試験は未実施* 。 ・ポリウレタンは、要素技術は確立されたが 実証試験は未実施* 。 ・アクリル酸は、 実証レベルに至っていない 。 ※パイロット試験は高額投資であり、市場価値が不明瞭な現状では 投資判断ができない ため 原料CO ₂ 品質の適正化の 実証試験は未実施 。	・パイロット試験で、 スケールアップを可能とするデータセットの獲得 ・ 排出源とプロセスの組み合わせ毎に原料CO₂品質を最適化 することによる、低コスト低エネルギープロセスの実現	
需要創出	製品の機能性向上	具体的研究は少ない。	新用途に繋がる高機能マテリアルの提案		
市場の観点	消費者にCO ₂ 削減効果を訴求する仕組み ルール化 国際市場での低CO ₂ 商品価値を高める	国内では、具体的提案なし。 欧州は、文化としてのリサイクル推進力を糧に、BASFなどで、機能性化学品CCUと限定されないが、リサイクル推進の議論が進んでいる(マスバランスアプローチ*など)。 ※ https://www.basf.com/jp/ja/who-we-are/sustainability/management-and-instruments/circular-economy/mass-balance-approach.html また、EU内の排出権取引、プラスチックの焼却によるエネルギー回収の禁止など、CCU商品の低CO ₂ 規制化を発想させる活動が 活発化 。	CO ₂ 削減の 企業のビジネス化に向けたルール化 の確立 - 必須要件とするか、推進を促す仕組みとするか - 国内での利用CO ₂ 定量化ルール、試験法の確立 - 輸出入での日本の運用ルールの確立 - CO ₂ 利用の アロケーション 法の確立(排出/利用/ライセンス) - 素材メーカーである消費者に直接商品を販売する商品製造メーカーを巻き込み環境価値の訴求を共同検討 海外動向と協調した商品価値の向上		

<技術の観点>

・基礎技術

(1) 反応性の確保

低エネルギー投入で低コストな技術の実現に向けては、反応速度の向上、収率の改善、および副生物の生成などによる反応性低下への対策が必要であり、高活性・高選択性の新規触媒の開発、反応条件の最適化、適切な中間体の選定などが重要である。

ポリカーボネートについては、先行する商業プロセスをベースとしたより低コスト、低エネルギー投入が可能となる技術、さらには、異なる反応経路を介する技術も開発され、パイロットレベルでの実証が求められる段階に至っている。

ポリウレタンにおいても、ポリカーボネートと同様に低エネルギー投入で低コストな要素技術が確立され、反応経路の異なる技術も開発されつつある。

他方、アクリル酸については、基礎研究の段階においても反応性の大幅な改善が求められるレベルにとどまっている。

(2) 生成物の分離精製の効率化

多段の工程からなるCCU製造法では、CO₂の反応プロセスで生じる副生成物や副生成水が、後段のプロセスの不純物となって反応を抑制するなどの悪影響があることから、効率的な精製や脱水プロセスの開発が求められる。

(3) 原料CO₂ガスの品質の適正化

プロセス毎の不純物の影響と同様、原料となるCO₂ガスに含まれる不純物など原料CO₂品質は反応性に影響を及ぼすことが想定されるが、高純度CO₂を原料とした検討が実施されているのが現状であり、原料CO₂中の不純物の影響把握が重要である。不純物濃度の制御方法については、CO₂分離回収技術において開発中であり、両者の知見の組み合わせにより、プロセスの最適化に向けて適正なCO₂品質を低コストで得る技術を開発することが求められる。CO₂供給源とCO₂分離回収技術の組み合わせにより、提供可能なCO₂品質とコストの関係を明確にすることは、組み合わせる化学合成技術開発の目標の明確化につながる。

・スケールアップ技術の確立

パイロットプラントを活用した試験で、実装に必要なデータを取得することが重要である。基礎技術の項で挙げた、反応性の向上および分離精製の効率化については、プロセス条件の最適化、省エネルギー化、安定した反応の実現、運転制御方法の確立などのスケールアップ技術を確立する必要がある。

ポリカーボネート製造法に対しては、先行する商業プロセスの低エネルギー化技術を実証済であるが⁹、異なる反応経路を介する要素技術についての実証は未実施である。また、ポリウレタン製造法についても、要素技術は開発されたが実証は行われていない。

実証では、原料CO₂品質の精製、反応、分離精製など一連の工程を連結した検討が望まれる。特に原料CO₂実ガス中の不純物の影響評価が重要となる。供給されるCO₂の品質は、CO₂供給源の違いや、適用するCO₂分離回収技術の違いにより、様々なバリエーションが考えられる。機能性化学品合成技術においては、利用するCO₂品質に対するロバスト性を高め、低コストで低品質な

CO₂ を利用可能とすることによる、トータルコスト低減の可能性を検討する必要がある。

・需要創出

CCU による機能性化学品製造で削減できる CO₂ は少ないことから、CO₂ 削減効果の増大を目指して、技術開発による製品の機能向上や新商品の提案による用途拡大など、新たな需要の創出に向けた検討も必要である。

<市場の観点>

・消費者に CO₂ 削減効果を訴求する仕組みの策定

コストアップや環境価値の市場受容性に対する不確実性から、各企業にとっては、投資判断が難しい状況にある。これを打破するためには、素材のユーザーとなる商品メーカーを巻き込んだ活動による用途拡大、CO₂ 削減に関する企業のビジネス化に向けたルール作りなど、一般消費者に CO₂ 削減効果を環境価値として訴求する仕組みづくりに取り組むことが重要である。

2-3 技術開発の方向性

社会実装の早期実現に向けて開発を加速するためには、実証レベルに近い研究を選択して、早期に実証に移行することが重要である。

これらの技術開発を効果的に行う手段のひとつとして、コンビナート連携での実証が考えられる。図 9 にコンビナート連携での実証による研究加速と、全体最適による低コストなプロセス構築のイメージを示す。

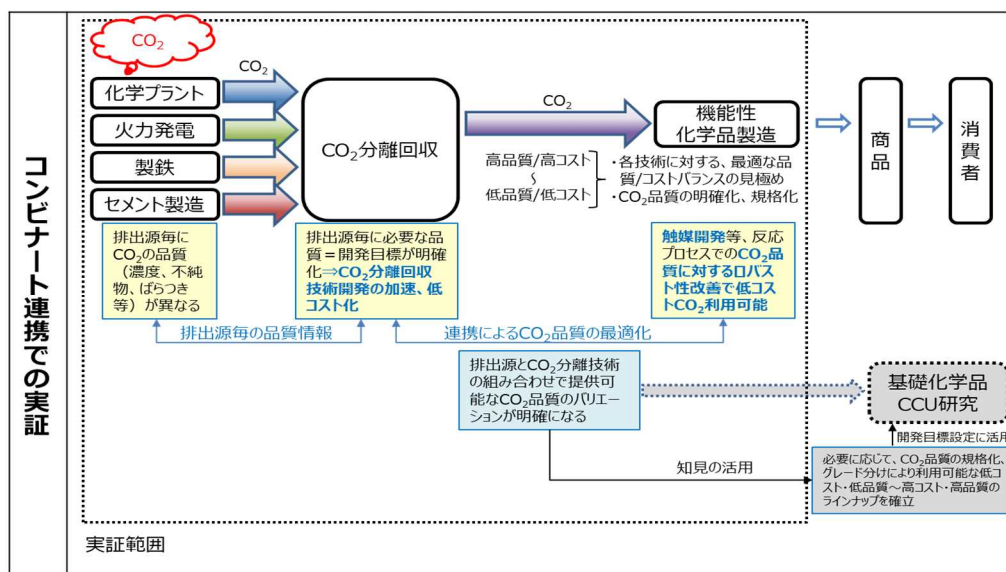


図 9 コンビナート連携での実証による研究加速と、全体最適による低コストなプロセス構築のイメージ

要素技術として、CO₂の反応性改善や、生産物や副生物の分離精製の効率化を目的とした様々な基礎研究を対象として、省エネルギーでの反応が可能であるかなど、コストとトータルでの CO₂ 削減の見込みを確認した上で、有望なものについて、コンビナート連携での実証を行うことで、早期に実用化を図ることが重要である。このようにして CO₂ 排出側の産業、CO₂ 分離回収産業、および機能性化学品製造産業の間で、利用する CO₂ ガスの品質情報を共有することで得られた CO₂ 品質情報の知見は、将来の CCU による基礎化学品製造研究の加速にとっても重要な役割を果たすなど、日本の有益な技術資産となり、他分野への波及効果が期待できる。

3章 おわりに

本レポートでは、CO₂削減に資するカーボンリサイクル分野の中で、早期に社会実装が期待される非還元的(水素不要)なCCUによる機能性化学品の製造について、日本企業の産業競争力を維持、強化するための技術開発の方向性を整理した。

CCUによる機能性化学品製造は、国の方針として重点的に取り組む分野に位置付けられている。早期実装に向けたこの分野の技術開発の方向性として、基礎技術の確立、実証規模でのスケールアップ技術の確立の2項目を示し、これらに共通する要素として、原料CO₂ガス品質が下流へ与える影響の明確化が重要であることを示した。また、環境分析では、CO₂削減という社会課題に対して、市場でのインセンティブが明確でなく、CO₂固定コストの価格転嫁が許容されないため、企業の投資判断が難しい状況があることを課題として整理し、需要創出に向けた検討、並びに、消費者に環境価値を訴求する仕組みに関するルール化などの項目を示した。

化学メーカーとしてスケールアップ技術を確立するために行う実証については、競争領域との見方もあり得る。しかしながら、社会課題としてのCO₂削減に対するコストの価格転嫁が許容されない現状においては、このような事業は不確実性が高いと捉えられる。また、この分野の技術開発を加速するためには、CO₂排出側の産業、CO₂分離回収産業、および機能性化学品製造産業の間で、利用するCO₂ガスの品質情報を共有した産業間の連携体制を構築することが重要である。CO₂品質情報の知見は、将来のCCUによる基礎化学品製造研究の加速にとっても重要な役割を果たすなど、日本の有益な技術資産となり、他分野への波及効果が期待できる。この分野の研究開発を加速し、早期に社会実装を実現することは、日本産業の世界市場での競争力強化、並びに、日本技術によるCO₂削減への世界的な貢献につながる。また、市場の観点からは、一般消費者に直接商品を販売するメーカーも巻き込んだ幅広い業種間連携で、環境価値の訴求のルール化を検討することも求められる。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.108

カーボンリサイクル分野（CCU による機能性化学品製造）の技術戦略策定に向けて

2022 年 3 月 31 日発行

TSC Foresight Vol.108 カーボンリサイクル分野（CCU による機能性化学品製造） 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 土肥 英幸
- ・研究員 寒川 泰紀
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。