

RITE Today

Annual Report

2023 Vol.18

公益財団法人 地球環境産業技術研究機構 年次報告書 2023年版 第18号

特集

我が国のCCS事業環境整備に関する動向
ーCCS長期ロードマップ策定の経緯と最終とりまとめー

RITE Today

2023 Vol.18

Contents

巻頭言

- RITEのカーボンニュートラル達成への貢献 3
●● 理事・研究所長 下田吉之

特集

- 我が国のCCS事業環境整備に関する動向 4
●● –CCS長期ロードマップ策定の経緯と最終とりまとめ–

研究活動概説

- 企画調査グループ カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組み 11
●● 2025年大阪・関西万博準備室
- システム研究グループ システム研究グループの研究活動報告 21
- バイオ研究グループ カーボンニュートラルに貢献するバイオリファイナリー技術の開発 31
- 化学研究グループ CO₂分離・回収、有効利用技術の高度化・実用化への取り組み 40
- CO₂貯留研究グループ CO₂地中貯留の実用化へ向けた技術実証、情報発信と技術支援 50

プレスリリース 57

イベント情報 57

発表論文一覧 57

- システム研究グループ
- バイオ研究グループ
- 化学研究グループ
- CO₂貯留研究グループ

その他の活動 57

主な新聞記事 58

特許紹介 59



RITE のカーボンニュートラル達成への貢献

公益財団法人地球環境産業技術研究機構

理事・研究所長 下田 吉之

過去数年の間、地球温暖化の緩和目標は大きく変化した。2015 年に採択されたパリ協定において「産業革命以来 1.5℃」というそれまでほとんど検討されてこなかった目標が提示され、それを受けて 2018 年には IPCC から 1.5℃ 特別報告書が公表され、1.5℃ 目標を達成するシナリオとしておおむね 2050 年にカーボンニュートラルとなる経路が示された。そして EU 等が 2050 年カーボンニュートラルを宣言し、日本でも 2020 年に 2050 年にカーボンニュートラルの達成が宣言され、2021 年に「第 6 次エネルギー基本計画」が制定、「地球温暖化対策計画」「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」が改定された。2022 年には IPCC 第 6 次評価報告書第 3 作業部会報告書が発表されている。

このような流れだけを見ると、あたかも 1.5℃ 目標は簡単に達成できるものと思われがちであるが、カーボンニュートラル宣言以前には日本で 2050 年温室効果ガス 80%削減という概ね 2℃ 目標に準拠した目標の達成可能性について激しい議論が交わされていたように、その達成は保証されていない。近年再生可能エネルギー価格の低下等の好材料も見えているが、温室効果ガス排出の大幅低減につながる大きなイノベーションがあったわけではなく、これら緩和目標強化の動きは、地球温暖化の進行による気候変動リスクの増大に対して国際社会が強い危機感を抱いたことから導かれたものであり、目標と現在の技術による実行可能解の間には依然大きなギャップが存在する。このギャップを埋めるには、更なるイノベーションの創出が急務である。この点は、オゾン層破壊の問題に対して代替フロンの速やかな普及が進んだモントリオール議定書のケースと状況が大きく異なる。

私は 2022 年の 6 月に研究所長に就任する以前から、科学技術諮問委員会委員として数年間 RITE の仕事を拝見してきたが、この様な大きな転換期になってようやく取り上げられるような革新的な技術を 30 年前に企画した RITE 創設時の関係者の慧眼、それを着実に育ててきた RITE のスタッフの努力は特筆すべきものがあると感じていた。IPCC 第 6 次評価報告書の第 3 部会報告書では大幅な温室効果ガス排出削減のシナリオが類型化されているが、特徴的なものとして以前より存在する太陽光や風力などを重点的に活用した IMP-Ren 経路の他、ネガティブエミッション技術を利用した IMP-Neg 経路、低エネルギー需要を目指した IMP-LD 経路が示されている。IMP-Neg 経路では化学研究グループや無機膜研究センター(2023 年 4 月に化学研究グループに統合)が培ってきた CO₂ の分離・回収技術、CO₂ 貯留研究グループによる貯留技術が基盤であるし、LD 経路はシステム研究グループがおこなっている EDITS 事業が取り組むシナリオである。またバイオ研究グループの研究は Ren 経路のバイオマス燃料、および化石燃料資源を代替するものづくりとして LD 経路の重要な一部を成している。研究面以外でも、この数年のわが国の政策形成や IPCC の事業に対して RITE のスタッフは大きな貢献をおこなっている。

ここしばらくは長年培ってきた技術を社会に着実に実装していく仕事と、次なる革新的な温暖化対策技術へのチャレンジの準備が RITE の重要な仕事になると考えている。引き続き関係者の皆様のご支援をお願いする次第である。

我が国の CCS 事業環境整備に関する動向 ー CCS 長期ロードマップ策定の経緯と最終とりまとめー

企画調査グループ

サブリーダー・主席研究員
副主席研究員野村 眞
清水 淳一

1. はじめに

温室効果ガス(GHG; Greenhouse Gas)の削減は、世界的にも重要な課題である。2020 年以降の気候変動問題に関する国際的な枠組みであるパリ協定(2016 年 11 月 4 日発効)では、世界共通の長期目標として、世界の平均気温上昇を産業革命以前と比較して、2℃より十分に低く保つとともに、1.5℃に抑える努力をする。また、できる限り早く世界の GHG の排出をピークアウトし、今世紀の後半には、GHG 排出量と森林などによる吸収量のバランスを取ることが明記されている¹⁾。

日本においても「地球温暖化対策計画」、「エネルギー基本計画」などに基き、2050 年のカーボンニュートラル(CN)および 2030 年度の温室効果ガス排出 46%削減(2013 年度比)の実現のため GHG 排出削減に取り組んでいる。このような状況の下、2022 年 1 月に設置された「CCS 長期ロードマップ検討会」において、一年間に亘る活動の結果、2023 年 3 月に「CCS 長期ロードマップ検討会 最終とりまとめ」が公表されたことから、その概要を報告する(表 1 は、至近における日本の CCS/CCUS に係る主な政策を示す)。

表 1 CCS/CCUS に係る主な政策

カーボンリサイクル技術ロードマップ (2019 年 6 月 7 日策定)²⁾ CO₂ を資源として捉え、これを分離・回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルに係る技術は、将来有望な選択枝の一つであり、そのイノベーションを加速化していく。
革新的環境イノベーション戦略 (2020 年 1 月 21 日策定)³⁾ CO₂ の大幅削減に不可欠なカーボンリサイクル、CCUS 技術を重点領域の一つと位置づけて、脱炭素かつ安価なエネルギー供給技術の実現を進め、温室効果ガス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。特に CCUS/カーボンリサイクルの基盤となる低コストの CO₂ 分離回収技術として、2050 年までに CO₂ 分離回収コスト 1,000 円/t-CO₂を目指す。
官総理大臣、所信表明演説 (2020 年 10 月 26 日)⁴⁾ 「我が国は、2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言。
2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2021 年 6 月 18 日策定)⁵⁾ 2020 年 12 月 25 日に策定された同成長戦略(2050 年カーボンニュートラルへの挑戦を経済と環境の好循環につなげるための産業政策)を更に具体化したもの。 - 電力部門は再エネの最大限の導入及び原子力の活用、さらには水素・アンモニア、CCUS などにより脱炭素化を進める等、あらゆる選択枝を追求する重要性を示す。
パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略 (2021 年 10 月 22 日閣議決定)⁶⁾ 2019 年 6 月 11 日に前回の長期戦略が閣議決定されているが、その後、2020 年 10 月にあった 2050 年カーボンニュートラル宣言を受け、それを基本的な考えとして位置づけ、閣議決定したもの。 - 地球温暖化対策は経済成長の制約ではなく、経済社会を大きく変革し、投資を促し、生産性を向上させ、産業構造の大転換と力強い成長を生み出す、その鍵となるもの。 2050 年カーボンニュートラルを実現するため、再生可能エネルギーについては、最大限の導入に取り組み、水素・CCUS については、社会実装を進めるとともに、原子力については、国民からの信頼確保に努め、安全性の確保を大前提に、必要な規模を持続的に活用していくことを示す。
地球温暖化対策計画 (2021 年 10 月 22 日閣議決定)⁷⁾

- ・ 温室効果ガスの排出抑制及び吸収の量に関する目標、事業者・国民等が講ずべき措置に関する基本的事項、目標達成のために国・地方公共団体が講ずべき施策等を示す。
- ・ 日本は 2030 年度において、温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することを目指すこと、さらに、50%の高みに向け、挑戦を続けていく事を掲げている。

第 6 次エネルギー基本計画（2021 年 10 月 22 日閣議決定）⁸⁾

- ・ 2050 年カーボンニュートラル、2030 年度の 46%削減、更に 50%の高みを目指す新たな削減目標の実現に向けたエネルギー政策の道筋を示す。
- ・ 2050 年カーボンニュートラルを実現するため、再エネは最大限の導入に取り組み、水素・CCUS は社会実装を進めるとともに、原子力は国民からの信頼確保に努め、安全性の確保を大前提に、必要な規模を持続的に活用していく。
- ・ 2030 年までに CCS の商用化を前提とした導入のため、CCS 実装ロードマップを策定し、共有した上で、技術開発、適地開発、輸送実証、事業環境整備、ネットワークの最適化のため、官民共同でモデル拠点構築への取り組みを進める。
- ・ 石油・天然ガス・鉱物資源の安定供給確保に加え、これまで資源外交で培った資源国とのネットワークを活用した水素・アンモニアのサプライチェーン構築や CCS 適地確保等を一体的に推進すべく、「包括的な資源外交」を新たに展開。

1.1. 第 6 次エネルギー基本計画における CCS 技術の位置づけ

2021 年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画⁸⁾には、大きく 2 つの目的が示されている。一つは、気候変動問題への対応である。2020 年 10 月、菅内閣総理大臣の所信表明演説において表明された「2050 年カーボンニュートラル」および 2021 年 4 月の地球温暖化対策推進本部の会合にて表明された「2030 年度の温室効果ガス排出 46%削減(2013 年度比)、さらに 50%削減の高みを目指す」という野心的な削減目標の実現に向けたエネルギー政策の道筋を示している。もう一つは、日本のエネルギー需給構造が抱える課題の克服についてである。気候変動対策を進めながらも「S+3E(安全性+エネルギーの安定供給、経済効率性の向上、環境への適合)」という基本方針を前提にした取り組みが示されている。

第 6 次エネルギー基本計画において、CCS は、火力発電所の脱炭素化や電化・水素化等による脱炭素化が難しい産業分野からの CO₂削減のために、CCU とともに最大限活用すべき技術と位置づけられている。また、将来にわたって必要な資源・燃料を安定的に確保する上でも CCS は重要な技術と位置付けられている。このように CCS は、再生可能エネルギー、原子力、水素・アンモニア、CCU とともに、我が国の脱炭素化とエネルギー安定確保を両立するための「鍵」となる重要なオプションの一つと捉えられている。また、CCS の活用に向けた対応として、技術的確立・コスト低減、適地開発や事業化に

向けた環境整備について、長期のロードマップを策定し関係者と共有した上で進めていくことが明記されている。

2. CCS 長期ロードマップ検討会

第 6 次エネルギー基本計画に示されているとおり、CCS の技術的確立・コスト低減、適地開発、事業化に向けた環境整備等を検討し、CCS 長期ロードマップの策定を目的とするための CCS 長期ロードマップ検討会が 2022 年 1 月に設置された⁹⁾。この CCS 長期ロードマップ検討会は、学識経験者、産業界、研究機関等からの委員で構成されており、2022 年 1 月に第 1 回を開催し、月 1 回のペースで 5 回の議論を経て、2022 年 5 月に中間とりまとめを公表している。

更に、2022 年 9 月には、CCS 事業の国内法整備に向けた各種課題について議論を行う「CCS 事業・国内法検討ワーキンググループ」を、また、CCS バリューチェーン全体での現状コストと将来コスト目標、政府支援の在り方等の議論を行う「CCS 事業コスト・実施スキーム検討ワーキンググループ」をそれぞれ立上げ、両ワーキンググループにて集中的に議論を進めた。

これら両ワーキンググループでの検討結果を踏まえ、2023 年 1 月 26 日、第 6 回 CCS 長期ロードマップ検討会(CCS 事業コスト・実施スキーム検討ワーキンググループ/CCS 事業・国内法検討ワーキンググループ 合同開催)にて、最終取りまとめの議論が行われた。

第1回 2022年1月28日 ・CCSの事業化に向けた今後の論点整理 ・2050年CNのシナリオ分析 第2回 2月24日 ・CCS付き火力等のコスト分析 ・業界団体、企業から、CCSプロジェクトの構想、課題等をヒアリング 第3回 3月30日 ・事業環境整備（法制度、インセンティブ）に向けた諸課題の検討 第4回 4月20日 ・CCS長期ロードマップ骨子の検討 第5回 5月11日 ・CCS長期ロードマップの中間とりまとめ 第6回 2023年1月26日 ・CCS長期ロードマップの最終とりまとめ	<table border="1"> <thead> <tr> <th>CCS事業・国内法検討WG</th><th>CCS事業コスト・実施スキーム検討WG</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>第1回 9月1日 ・法整備の主な論点の整理</td><td>第1回 9月2日 ・今後のCCS事業の進め方の検討</td></tr> <tr> <td>第2回 10月7日 ・法的枠組みに関する基本的考え方、二酸化炭素の法的性質の整理 ・業界団体によるCCUSに関する緊急提言等</td><td>第2回 10月3日 ・RITEからCCSコスト試算をヒアリング</td></tr> <tr> <td>第3回 11月8日 ・貯留事業権、貯留事業に係る保安、貯留事業者の賠償責任の検討</td><td>第3回 10月31日 ・業界団体、企業からCCS事業への支援策に関する主な提言をヒアリング</td></tr> <tr> <td>第4回 12月2日 ・貯留事業財団、分離回収・輸送事業、二酸化炭素の輸出、二酸化炭素の取引の検討</td><td>第4回 11月22日 ・国民理解の増進に向けた取組方針、海外CCS事業の推進、政府支援の在り方の検討</td></tr> </tbody> </table>	CCS事業・国内法検討WG	CCS事業コスト・実施スキーム検討WG	第1回 9月1日 ・法整備の主な論点の整理	第1回 9月2日 ・今後のCCS事業の進め方の検討	第2回 10月7日 ・法的枠組みに関する基本的考え方、二酸化炭素の法的性質の整理 ・業界団体によるCCUSに関する緊急提言等	第2回 10月3日 ・RITEからCCSコスト試算をヒアリング	第3回 11月8日 ・貯留事業権、貯留事業に係る保安、貯留事業者の賠償責任の検討	第3回 10月31日 ・業界団体、企業からCCS事業への支援策に関する主な提言をヒアリング	第4回 12月2日 ・貯留事業財団、分離回収・輸送事業、二酸化炭素の輸出、二酸化炭素の取引の検討	第4回 11月22日 ・国民理解の増進に向けた取組方針、海外CCS事業の推進、政府支援の在り方の検討
CCS事業・国内法検討WG	CCS事業コスト・実施スキーム検討WG										
第1回 9月1日 ・法整備の主な論点の整理	第1回 9月2日 ・今後のCCS事業の進め方の検討										
第2回 10月7日 ・法的枠組みに関する基本的考え方、二酸化炭素の法的性質の整理 ・業界団体によるCCUSに関する緊急提言等	第2回 10月3日 ・RITEからCCSコスト試算をヒアリング										
第3回 11月8日 ・貯留事業権、貯留事業に係る保安、貯留事業者の賠償責任の検討	第3回 10月31日 ・業界団体、企業からCCS事業への支援策に関する主な提言をヒアリング										
第4回 12月2日 ・貯留事業財団、分離回収・輸送事業、二酸化炭素の輸出、二酸化炭素の取引の検討	第4回 11月22日 ・国民理解の増進に向けた取組方針、海外CCS事業の推進、政府支援の在り方の検討										

図1 CCS 長期ロードマップ検討会及び両 WG の開催状況⁹⁾

3. 「CCS 長期ロードマップ検討会 最終とりまとめ」¹⁰⁾の概要

2023 年 3 月に公表された「CCS 長期ロードマップ検討会 最終とりまとめ」について、その概要を説明する。

3.1. CCS 事業化に向けた世界の動向

CCS を取り巻く世界的な情勢は、懐疑論から政策導入へ転換している。米国では超党派でのインフラ投資法に加え、2022 年 8 月には 10 年間で約 50 兆円程度の国による CCS を含む対策（インフレ削減法）を定め、「空前の CCS ブーム」とも言われ、国際世論に大きな影響を与えている。中国では、2050 年に年間貯留量 20 億 t を目標とし、国内開発だけでなく他国との関係構築を推進するなど、CCS の推進に転換している。ドイツは CCUS に否定的であったが、昨年末、CCUS を容認する動きに転じ、国内政策の整備に着手した。そのほかの国でも CCS 政策導入に向けた動きが起きており、CO₂ 貯留地を巡る「大競争時代」が到来している。また、現在進行中のプロジェクトは EOR を伴わない帯水層貯留が多数進展している。

3.2. CCS 長期ロードマップ

3.2.1. 基本理念

「CCS を計画的かつ合理的に実施することで、社会コストを最小限にしつつ、我が国の CCS 事業の健全な発展を図り、もって我が国の経済及び産業の発展、エネルギーの安定供給確保やカーボンニュートラルの達成に寄与することを目的とする」ことを CCS 長期ロードマップの基本理念としている。

3.2.2. CCS 長期ロードマップの目標

IEA の世界脱炭素シナリオの CO₂ 回収量試算結果と、日本の CO₂ 排出量の割合から推計すると 2050 年時点の CCS 想定年間貯留量は、約 1.2～2.4 億 t が目安となる。2030 年に CCS を導入する場合、2050 年までの 20 年間の毎年、CCS プロジェクトを立ち上げて約 600～1,200 万 t ずつ年間貯留量を増やしていく必要があり、CCS の導入時期を先送ることで、2050 年カーボンニュートラルの実現に必要な年間貯留量の確保が困難となる。

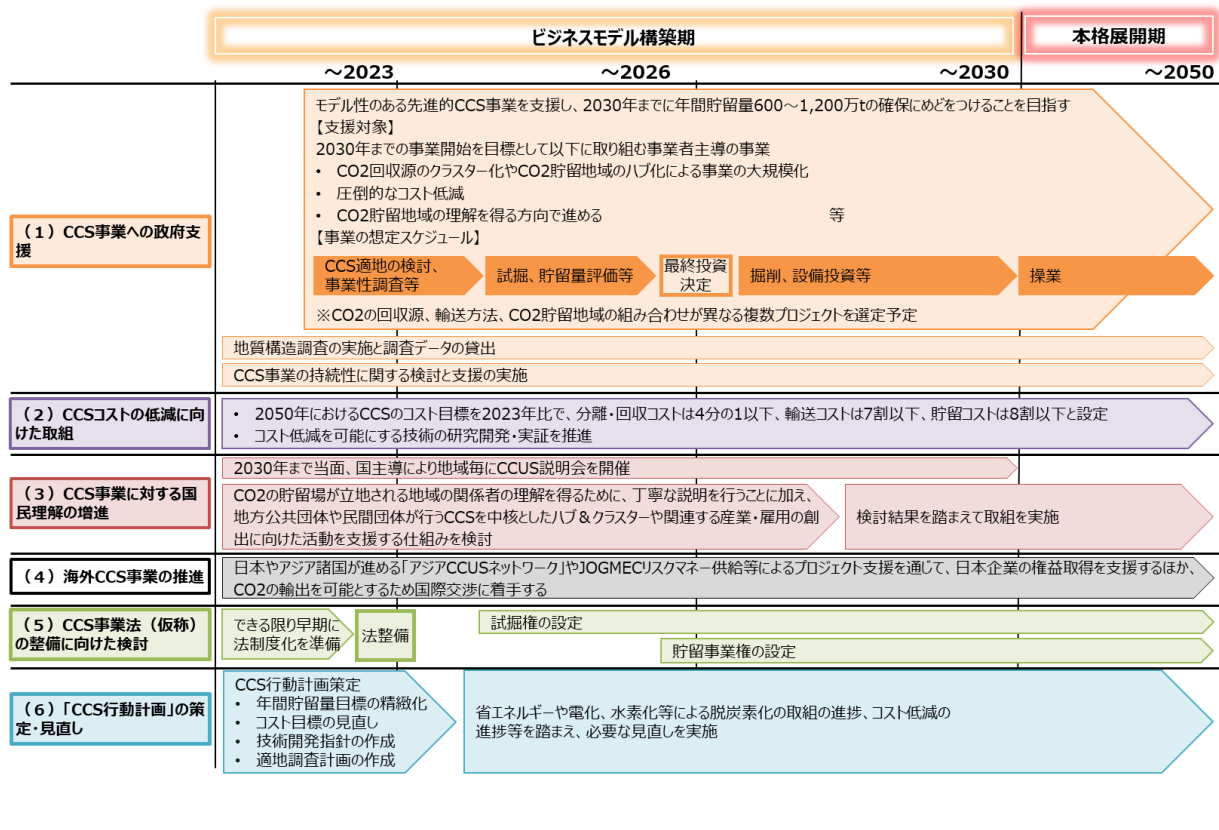
このため、2050 年時点で年間約 1.2～2.4 億 t の CO₂ 貯留を可能とすることを目安に、2030 年までの事業開始に向け、事業環境を整備（コスト低減、国民理解、海外 CCS 推進、法整備）し、2030 年以降本格的に CCS 事業を展開することを目標とする。

3.2.3. 具体的アクション

2030 年 CCS 事業開始までをビジネスモデル構築期、それ以降を CCS 本格展開期として、次の具体的アクションを随時実施する。

- (1) CCS 事業への政府支援
- (2) CCS コストの低減に向けた取組
- (3) CCS 事業に対する国民理解の増進
- (4) 海外 CCS 事業の推進
- (5) CCS 事業法（仮称）の整備に向けた検討
- (6) 「CCS 行動計画」の策定・見直し

図2 CCS 長期ロードマップ



(1) CCS 事業への政府支援

① モデル性のある先進的 CCS 事業の支援

将来の CCS 事業の普及・拡大に向けて横展開可能なビジネスモデルを確立するため、2030 年までの事業開始を目標とし、事業者主導による「先進的 CCS 事業」を選定し、国により集中的に支援する。

具体的には、CO₂の回収源、輸送方法、CO₂貯留地域の組み合わせが異なる 3~5 プロジェクトから支援を開始し、多様な CCS 事業モデルの確立を目指すとともに、2030 年までに年間貯留量 600~1,200 万 t の確保に目途を付けることを目指す。

モデル性としては、CO₂回収源のクラスター化や CO₂貯留地域のハブ化による事業の大規模化と圧倒的なコスト低減に取り組む事業とする。

なお、事業の選定に当たっては、事業の早期実現性、拡張性、経済性に加えて、CO₂貯留地域の理解を得る方向であるか、将来 CCS 事業の発展に寄与するかを重点的に確認する。

表2 想定される CO₂の回収源、輸送方法、CO₂貯留地域のパターン

CO ₂ の回収源	輸送方法	CO ₂ 貯留地域
火力発電所 製鉄所 化学工場 セメント工場 製紙工場 水素製造工場 等	パイプライン 船舶	陸地の地下 海底下(沿岸地域) 海底下(沖合)

② CCS 適地の開発促進／地質構造調査

これまで石油・天然ガス開発を目的に地質構造調査が実施されてきたが、2023 年度からは CCS を目的とした地質構造調査も実施予定であり、今後 CCS 適地調査の計画を検討するとともに、調査データの民間事業者等への貸し出しを JOGMEC が実施する。

これまでの調査において、11 地点で計 160 億トンの貯留層があると推定。当面は、民間事業者による経済性

等の分析・評価が行われ、試掘等の開発行為につながる
ことが期待される一方で、CO₂ 排出源との距離が近く
輸送コストの低減が期待できる沿岸地域のデータが乏し
く、開発が困難な状況にあり、今後は沿岸地域の地質構
造調査についても検討を進める。

また、CCS 適地を検討する際に断層リスクの評価が
重要な要素の一つ。国際エネルギー機関(IEA)では、過
去の実証プロジェクトにおいて地震との関係性は認識さ
れていないものの、断層によるリスクの評価方法の開発
について早急に検討する。

③ CCS 事業の持続性に関する検討

当面、CCS 事業の開始に向けた CAPEX 支援を行う
ものの、2030 年から開始することになる稼働時支援
については、先行する英国等の最新の知見を参考にしつ
つ、CCS の事業モデルを検討する。

また、コスト低減の状況、事業環境の整備の状況を踏
まえつつ、「先進的 CCS 事業」後の CCS 事業について、
CCS の持続性確保の観点からシームレスな支援策を検
討する。

(2) CCS コストの低減に向けた取組

2050 年における CCS のコスト目標を 2023 年比
で、分離・回収コストは 4 分の 1 以下、輸送コストは 7 割
以下、貯留コストは 8 割以下とし、CCS 全体で約 6 割
以下となる見込み。また、2030 年時点での分離・回収

はコストの目標は、2023 年比で約半減とする。

目標達成に向け、研究開発指針を作成し、大幅なコス
ト低減を可能にする技術の研究開発・実証を推進する。

(3) CCS 事業に対する国民理解の増進

2030 年まで当面、国主導により地域毎に CCUS 説
明会を開催し、丁寧な説明を行い、CCS の意義や負担、
CCS の安全性、地域への投資効果、雇用創出効果、消費
増進効果等に理解を得るとともに、CCS に対する懸念
を払拭する。CO₂ の貯留場が立地される地域において
は、地方公共団体や民間団体が行う CCS を中核とした
ハブ＆クラスターや関連する産業・雇用の創出のに向けた
活動を支援する仕組みを検討する。

(4) 海外 CCS 事業の推進

有望な海外の貯留ポテンシャルの活用は有力な選択
肢の一つとなるため、日本からの CO₂ 輸出を前提とし
た具体的な交渉を複数国と開始する。

また、日本が主導するアジア・エネルギー・トランジシ
ョン・イニシアティブ(AETI)に基づく「アジア CCUS ネット
ワーク」や JOGMEC によるリスクマネー供給等を通じ
て、日本企業の権益取得を支援する。さらに、二国間ク
レジット制度(JCM)や CCS 由来の国際的なクレジット
制度の立ち上げを支援する。

表3 一定条件下で行った CCS コストの低減見込みの試算結果(RITE)

円/tCO ₂	足元	2030年	2050年 足元コストからの低減率
分離回収①	4,000	2,000円台 (2,000)	1,000円以下 (1,000)
輸送② (PL20km)	2,600 (50万tCO ₂ /年)	2,600 (50万tCO ₂ /年)	1,600 (300万tCO ₂ /年)
輸送③ (船舶1,100km)	9,300 (50万tCO ₂ /年)	9,300 (50万tCO ₂ /年)	6,000 (300万tCO ₂ /年)
貯留(陸上)④	6,200 (20万tCO ₂ /年・本)	6,200 (20万tCO ₂ /年・本)	5,400 (50万tCO ₂ /年・本)
貯留(海上)⑤ ※着底	6,900 (20万tCO ₂ /年・本)	6,900 (20万tCO ₂ /年・本)	5,400 (50万tCO ₂ /年・本)
合計			
PL+陸上: ①+②+④	12,800	10,800	8,000 (38%低減)
PL+海上: ①+②+⑤	13,500	11,500	8,000 (41%低減)
船舶+陸上: ①+③+④	19,500	17,500	12,400 (36%低減)
船舶+海上: ①+③+⑤	20,200	18,200	12,400 (39%低減)

(出典)第3回 CCS 事業コスト・実施スキーム検討ワーキンググループ(2022 年 10 月 31 日)資料より引用

(5) CCS 事業法(仮称)の整備に向けた検討

CCS 事業に関して法制度による対応が必要となる背景は次のとおり。

- ・ CCS 事業に対する法令の適用関係(鉱業法・鉱山保安法等)がはっきりせず、事業者側で準拠すべきルールや国の監督の体制が不明確なこと。
- ・ CO₂ の分離・回収、輸送、貯留という CCS のバリューチェーンの中で、ガスの組成を整え、計測し、輸送し、データを提供するルールがないこと。
- ・ 長期の事業の安定性を図るための第三者からの妨害の排除・予防の仕組みがないこと。
- ・ CCS の整備は、住民理解を得ながら進める必要があるが、保安規制への準拠の状況や損害賠償の仕組みなどがなく、事業者が住民に説明すべき内容が明確ではないこと。
- ・ 貯留事業者の保安責任やモニタリング責任が不明確であり、責任が消滅しなければ事業性が担保できない状況であること。

このための措置として以下の方針で検討を進める。

- ・ 新法として CCS 事業法をできる限り早期に整備する。
- ・ CCS バリューチェーンを踏まえ、事業法の範囲は「分離・回収」「輸送」「貯留」を対象とすべきであり、「分離・回収」事業については、CO₂ 排出者が実施する場合が多いと考えられることから、また「輸送」事業については、パイプラインや船舶輸送など様々な手段が考えられ、導入障壁を低くするため、届け出制を原則とする方針。
- ・ 一方、「貯留」事業は、石油・天然ガス事業と共通する点が多いため、許可制とし、排他的に CO₂ 貯留層を使えるよう措置する方針。また鉱業法制を参考とし、「海陸共通の制度化」、「貯留事業権」の新設、保安体制の整備・賠償責任の明確化(無過失責任)、モニタリング責任の有限化等を措置する方針。
- ・ 海外 CCS の推進に向けた CO₂ の輸出に向けた法的枠組みを措置するとともに、CCU/カーボンリサイクルの推進のために回収 CO₂ を売却可能とする方針。

(6) 「CCS 行動計画」の策定・見直し

CCS の年間貯留量目標、コスト目標、技術開発指針や適地調査計画について、より詳細な検討を行った上で、「CCS 行動計画」を策定し、適時の見直しを実施する。そのため、今年度、有識者による検討会で議論が行われる予定。

「年間貯留量目標」については、産業界の意見を積み上げ、2050 年時点で達成すべき年間貯留量の目標を精緻化するとともに、他の脱炭素化施策の取組の進捗を踏まえ、更なる精緻化を行う。

「コスト目標／技術開発指針」については、CCS コスト目標を必要に応じて見直した上で、目標を達成するための技術開発指針を作成する。さらにコスト低減の進捗を踏まえ、精緻化していく。

「適地調査計画」については、既存データのある地域での CO₂ 貯留適地の所在推定を進めるとともに、沿岸地域の地質構造調査についても検討を進める。また、断層によるリスク評価方法についても検討を進める。

参考文献

- 1) 外務省, 2020 年以降の枠組み: パリ協定,
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html
- 2) 経済産業省(協力府省 内閣府 文部科学省 環境省),
カーボンリサイクル技術ロードマップ, 令和元年 6 月,
<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.html>
- 3) 革新的環境イノベーション戦略, 令和 2 年 1 月 21 日,
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12358320/www8.cao.go.jp/cstp/tougosen-ryaku/kankyo.pdf>
- 4) 第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説, 令和 2 年 10 月 26 日,
https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/state-ment/2020/1026shoshinhyomei.html
- 5) 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦

略, 内閣官房 経済産業省 内閣府 金融庁 総務省 外務省 文部科学省 農林水産省 国土交通省 環境省,
令和 3 年 6 月 18 日,

<https://www.meti.go.jp/policy/energy-environment/global-warming/ggs/pdf/green-honbun.pdf>

- 6) パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略(令和 3 年 10 月 22 日閣議決定),

<https://www.env.go.jp/content/900440767.pdf>

- 7) 地球温暖化対策計画(令和 3 年 10 月 22 日閣議決定),

<https://www.meti.go.jp/policy/energy-environment/global-warming/on-taikeikaku/keikaku-honbun.pdf>

- 8) 第 6 次エネルギー基本計画(令和 3 年 10 月 22 日閣議決定),

<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>

- 9) 経済産業省, CCS 長期ロードマップ検討会,

<https://www.meti.go.jp/shingikai/energy-environment/ccs-choki-roadmap/index.html>

- 10) 経済産業省, CCS 長期ロードマップ 最終とりまとめ,

<https://www.meti.go.jp/shingikai/energy-environment/ccs-choki-roadmap/20230310-report.html>

企画調査グループ

グループメンバー(2023 年4月)

グループリーダー・主席研究員	柳生 勇	調査役	倉中 聡
サブリーダー・主席研究員	野村 真	主幹・研究員	星野 真男
サブリーダー	樋口 裕思	主幹	眞継 由佳
主席研究員	東井 隆行	主任研究員	小林 由美
副主席研究員	出口 哲也	主任研究員	安本 夏子
副主席研究員	青木 好範	主任研究員(兼)	山下 裕士
副主席研究員	清水 淳一	主任	辰巳 奈美
副主席研究員	楠瀬 勤一郎		久保 道代
研究管理チームリーダー	高橋 嶺宏		永田 瑞生
調査役	望月 則孝		

2025 年大阪・関西万博準備室

メンバー(2023 年4月)

室長	柳生 勇	室員	辰巳 奈美
室長代理	菊池 直樹	室員	久保 道代
室長代理	梅田 信雄	室員	久貝 潤一郎
室員	出口 哲也	室員	横井 悟
室員	樋口 裕思	室員	三戸 彩絵子
室員	望月 則孝	室員	穂積 章一郎
室員	高橋 嶺宏		

カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組み

企画調査グループは、1)国内外の政策や技術動向を把握しつつ、RITE が持つ研究ポテンシャルを活かした新規技術開発課題の探索と提案・実施、2)IPCC(気候変動に関する政府間パネル)に関する政府支援や ISO(国際標準機関)等国際機関との連携、3)RITE 技術の普及啓発や将来世代の人材育成、4)産業連携による技術の実用化といった役割を持ち、研究グループとともに、地球環境と経済の両立を目指した政策支援や技術開発や、イノベーション創出について積極的に取組を進めている¹⁾。

2025 年大阪・関西万博において、RITE が長年に渡って研究開発を進めてきた革新的環境技術として、DAC、CCS などのカーボンニュートラル技術を紹介していくことを検討している。そこで、万博開催の開始の

2 年前となる 2023 年 4 月 1 日、「2025 年大阪・関西万博準備室」として、公益社団法人 2025 年日本国際博覧会協会など関係部署との連絡・調整を一元的に実施できるように、企画調査グループ、化学研究グループ及び CO₂貯留研究グループの職員を集めて設置されている。

2022年度は、2022 年 5 月、クリーンエネルギー戦略²⁾が取りまとめられ、2030 年度の温室効果ガス排出量 46%削減や 2050 年カーボンニュートラルを目指すための実現可能なパスが示されている。また、2023 年 2 月には、グリーントランスフォーメーション(GX)実現に向けた基本方針³⁾が閣議決定されていることから、まずは、それらについて概観する。

1.1. クリーンエネルギー戦略

2022 年5月、「クリーンエネルギー戦略」に関する有識者懇談会において、クリーンエネルギー戦略の中間整理を取りまとめている。中間整理では、先ず第 1 章において、ウクライナ危機・電力需給ひっ迫を踏まえ、エネルギー安全保障の確保に万全を期し、その上で脱炭素を加速させるための政策が整理されている。第 2 章では、①脱炭素を経済の成長・発展につなげるための産業のGX、②産業界のエネルギー転換の具体的な道筋や取組、③地域・くらしの脱炭素化に向けた具体的取組を整理した上で、それらを踏まえ、④GX を実現するために必要となる政策等が整理されている。

炭素中立型社会に向けた今回の転換は、産業革命以来の化石燃料中心の経済・社会、産業構造をクリーンエネルギー中心に移行させるものであり、主要な分野における脱炭素に関連する投資額を、一定の仮定の下で積み上げた場合、2050 年のカーボンニュートラルに向けた投資額は、2030 年単年で約 17 兆円、今後 10 年で約150兆円と試算されている(表 1、表2)。

表 2 GX リーグの段階的発展

GXリーグ構想	
GXリーグ(440社が賛同)	カーボン・クレジット市場
✓ GXリーグでの取組 ① 2050年カーボンニュートラルのサステイナブルな未来像を議論・創造 ② カーボンニュートラル時代の市場創造やルールメイキングを議論(例：CO2ゼロ商品の認証制度等)I ③ カーボンニュートラルに向けて掲げた目標に向けて自主的な排出量取引を行う	✓ 企業由来 GXリーグ参加企業による削減価値クレジット ✓ プロジェクト由来 J-クレジット JCM 質の高い海外ボランティアクレジット (国際標準クレジット) 等
GXリーグの段階的発展に向けた論点(例) ・ 排出量取引の実施方法 ・ 多排出事業者を含め、更なる賛同者の拡大のための仕掛け ・ より野心的な削減目標の設定や、排出削減に向けた投資拡大を引き出す仕掛け ・ GC市場創造(初期需要等)等の仕掛け(企業の実践状況も加味) ・ 取引の厚みの増加や、	

表1 脱炭素に必要な投資額

脱炭素に必要な投資額			
● 主要な分野における脱炭素に関連する投資額を、それぞれ一定の仮定の下で積み上げた場合、2050年CNに向けて必要な投資額は、 <u>2030年単年で約17兆円、今後10年で約150兆円</u>			
脱炭素関連投資	年間 約17兆円	10年間で約150兆円	
電源脱炭素化 ／燃料転換	約5兆円	✓ 再エネ ✓ 水素・アンモニア ✓ 蓄電池の製造	約2.0兆円 約0.3兆円 約0.6兆円
製造工程の 脱炭素化等	約2兆円	✓ 製造工程の省エネ・脱炭素化 ✓ 産業用ヒートポンプ、コージェネ設備等の導入	約1.4兆円 約0.5兆円
エンドユース	約4兆円	✓ 省エネ性能の高い住宅・建築物の導入 ✓ 次世代自動車の導入	約1.8兆円 約1.8兆円
インフラ整備	約4兆円	✓ 系統増強費用 ✓ 電動車用インフラ整備 ✓ デジタル社会への対応	約0.5兆円 約0.2兆円 約3.5兆円
研究開発等	約2兆円	✓ カーボンリサイクル ✓ カーボンニュートラルに資する製造工程の開発 ✓ 原子力 ✓ 先進的なCCS事業の実施	約0.5兆円 約0.1兆円 約0.1兆円 約0.6兆円

1.2. GX 実現に向けた基本方針

2023年5月、「GX 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ」が閣議決定されている。GX の実現を通して、2030 年度の温室効果ガス46%削減や 2050 年カーボンニュートラルの国際約束の達成を目指すとともに、安定的で安価なエネルギー供給につながるエネルギー需給構造の転換の実現、さらには、我が国の産業構造・社会構造を変革し、将来世代を含む全ての国民が希望をもって暮らせる社会を実現すべく、GX 実行会議における議論の成果を踏まえ、今後 10 年を見据えた取組の方針が取りまとめられている。

具体的には、以下のように取りまとめられている。

(1) エネルギー安定供給の確保を大前提としたGXの取組

①徹底した省エネの推進

- ・ 複数年の投資計画に対応できる省エネ補助金の創設
- ・ 主要 5 業種に対して、政府が非化石エネルギー転換の目安を提示

②再エネの主力電源化

③原子力の活用

- ・ 廃炉を決定した原発の敷地内での次世代革新炉への建て替えを具体化

④その他の重要事項

- ・ 水素・アンモニアの生産・供給網構築に向け、既存燃料との価格差に着目した支援制度を導入

(2)「成長志向型カーボンプライシング構想」等の実現・実行

①GX経済移行債を活用した先行投資支援

- ・ GX 経済移行債を創設し、今後 10 年間に 20 兆円規模の先行投資支援

②成長志向型カーボンプライシング(CP)によるGX投資インセンティブ

③新たな金融手法の活用

- ・ GX 技術の社会実装段階におけるリスク補完策(債務保証等)を検討・実施

④国際戦略・公正な移行・中小企業等のGX

- ・ 「アジア・ゼロエミッション共同体」構想を実現

(3)進捗評価と必要な見直し

2. 調査研究活動

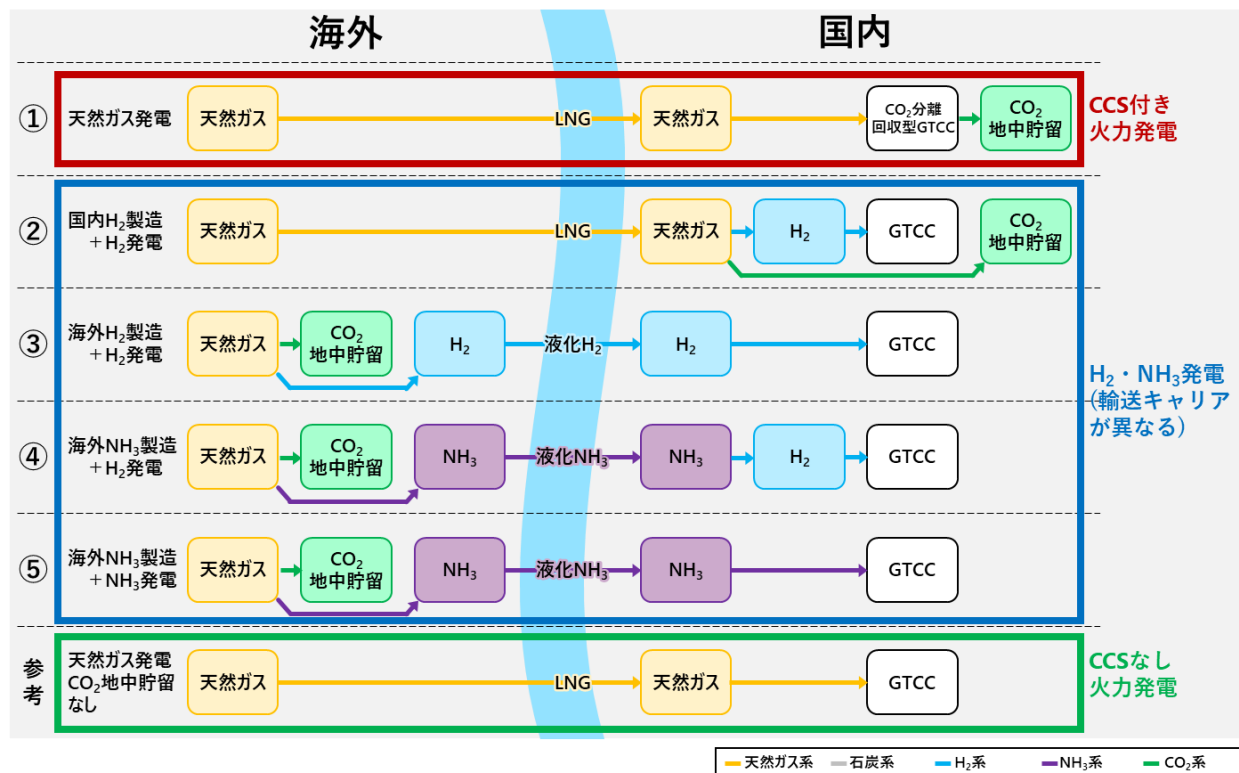
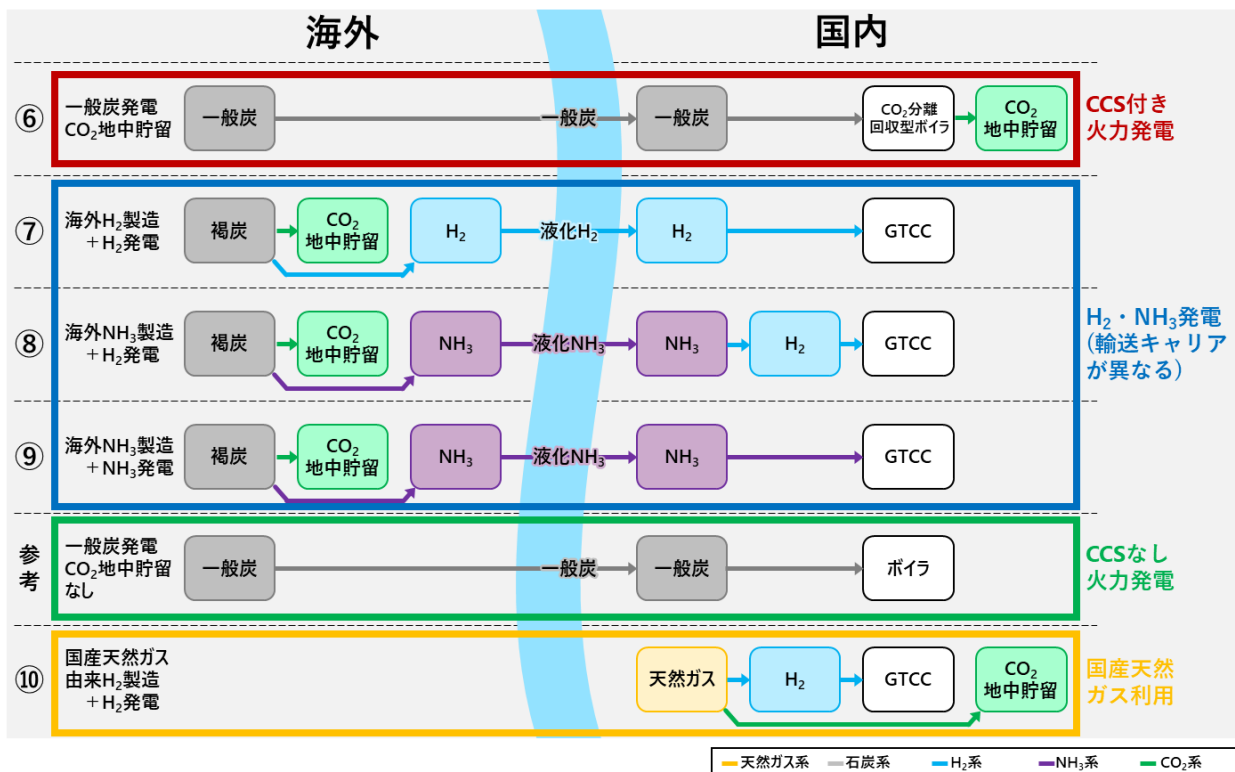
令和 3 年度及び令和 4 年度(継続事業)において、経済産業省委託調査事業「燃料安定供給対策に関する調査事業(2050 年カーボンニュートラルに向けた CCS の事業環境整備や実装ロードマップ等に関する調査事業)」⁴⁾を受託し、令和 4 年度における、「CCS 長期ロードマップ検討会」において調査報告を実施したことから、その概要を紹介する。

2.1. 水素・アンモニア及び CCS 付き火力発電コスト試算⁵⁾

CCS の位置づけ等を把握するため、CCS を導入し生産した脱炭素燃料(水素(H_2)、アンモニア(NH_3))を利用した場合の発電コストと、火力発電に CCS を導入した場合の発電コストを把握するため試算を行った。 H_2 ・ NH_3 による発電コストは、主に文献調査の結果を基に電力中央研究所にて試算を行い、CCS 付き火力発電コストは、2021 年 9 月に公開されている発電コスト WG⁶⁾の諸元等を基に、液化 CO_2 輸送船による輸送コストのケースを RITE にて試算した。また、これらの試算結果の取りまとめ等については、電力中央研究所にて行っている。なお、コスト試算に必要な技術進展の見込み及び前提条件等については、既往文献等に基づき任意に設定しているため、今後の技術進展等によっては、試算結果が変わる可能性があることに留意が必要である。

2.1.1. 試算ケース

図 1、図 2 に、試算した 10 ケースのイメージを示す。原料を天然ガス、石炭の化石燃料として、そのまま輸入し、CCS 付き火力発電所に利用するケース、また、天然ガス、石炭それぞれから H_2 ・ NH_3 を海外で生産し、輸入して、火力発電所で利用するケースを基本に試算した。なお、国内で生産される天然ガスから H_2 を生産し、火力発電所で利用するケースでの試算も行った。

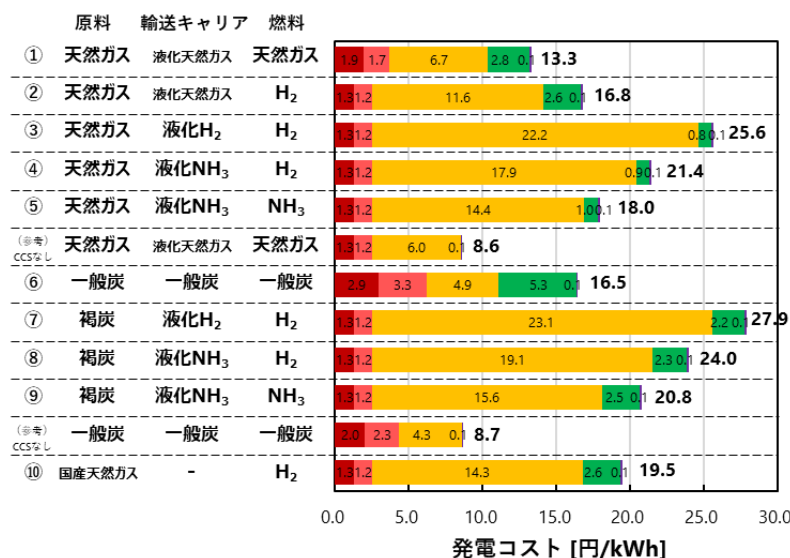
図1 海外天然ガス+CO₂地中貯留の試算ケース⁵⁾図2 海外石炭、国産天然ガス+CO₂地中貯留の試算ケース⁵⁾

2.1.2. 試算結果

試算結果は、資本費、運転維持費、燃料費、社会的費用及び政策経費別に整理した。社会的費用は、海外及び国内における CO₂ 輸送・地中貯留費であり、H₂・NH₃ 製造の際に行う CO₂ 輸送・地中貯留費も計上している。政策経費は、技術開発の予算等、電源種別ごとに必要とされる税金等で賄われる費用である。

今回の試算結果については、CCS 付きの火力発電

(天然ガス;①, 石炭;⑥)の発電コストの方が、H₂・NH₃ 発電(天然ガス;②~⑤, ⑩, 石炭;⑦~⑨)の発電コストより安くなった。理由としては、今回設定した条件の下では、天然ガス・石炭の輸送コストの方が液化 H₂ 及び液化 NH₃ の輸送コストより安く、かつ、火力発電に追加される CCS コストに比べ、天然ガス・石炭から H₂ や NH₃ を製造する際のコスト(エネルギー損失等)の方が高いためである。



注) 資本費・運転維持費; 発電設備分のみ

注) 燃料費; H₂・NH₃ 製造設備の資本費・運転維持費を含む

図3 発電コスト試算結果⁵⁾

2.2. CCS 普及に向けた枠組みの海外事例⁷⁾

国内での CCS 導入に向けた検討のため海外事例を調査した。

CCS の普及においては、多くの場合、事業の予見性が担保できるインセンティブ施策が必要となる。とりわけ、CO₂ 貯留が帯水層貯留の場合、石油増進回収 (EOR; Enhanced Oil Recovery) とは異なり事業収益が見込めないため、十分なインセンティブ施策が不可欠となる。

2.2.1. インセンティブ施策・規制の海外事例

海外の商用 CCS プロジェクトにおけるインセンティブ施策・規制等について、ノルウェー、カナダ・アルバータ州、カナダ・サスカチュワン州、米国、豪州、英国、オランダで

進められているプロジェクトを調査した結果、CAPEX に対する直接補助金と OPEX 支援を組み合わせている割合が多い。OPEX 支援については、税額控除を導入している米国以外は、排出クレジットの免除または付与、炭素税の免除となっており、OPEX 支援として直接補助金を適用している例は少ない。また、資金調達支援は必ずしも盛んではないが、米国の事例があった。これらの支援はいずれも先行プロジェクトを対象としているため、手厚い補助となっており補助率は 100% 程度と推定される。

表 3 規制・インセンティブの海外事例⁷⁾

	CAPEXへの支援	稼働時の支援	補助率
ルウー Longship	・直接補助金	・10年の直接補助金 ・排出クレジット免除、または付与	直接補助金67% + 排出クレジット免除・付与20%
カナダ アルバータ Quest	・直接補助金	・10年の直接補助金 ・炭素税免除 ・貯留量の2倍のワセットクレジット	100%
米国	・直接補助金（検討中） ・導管の低金利融資（検討中） ・クリーンコールへの投資税額控除 ・化石燃料CCSへの債務保証	・貯留量（/利用量）に応じた税額控除	不明
豪州 Moomba	・直接補助金（少額）	・炭素クレジット免除 ・25年の炭素クレジット付与	>100% (25年)
英国 ハブ&クラスター	・輸送/貯留と産業CCS、 火力CCSへの直接補助金。	・各種の補助制度。産業は15年 ・排出クレジット免除 ・輸送・貯留：利用料の徴収	100% + α (15年)
オランダ Porthos	・ECの直接補助金 （相当額がSDE++から減額）	・15年間の固定価格買取 ・排出クレジット免除 ・輸送・貯留：利用料の徴収	100% + α (15年)
カナダ サスカチュワン BD3	・連邦政府の直接補助金 ・州政府による公的出資	・電気料金への転嫁	100%

表 4 海外の規制・インセンティブの特徴⁷⁾

スキーム	分析	備考
CAPEX支援	直接補助金は先行事業向けが基本。	高い波及効果の事業へ出資。
	政府には未稼働リスクあり。 事業者にとっては早期の投資回収。	アルバータ州Questでは、未稼働リスクを回避するため CAPEX支払いを8段階で実施。
	投資減税は、納税額 ≥ 減税額の必要あり。 投資減税は新設企業に不利。	
稼働時支援	既存スキームと高い親和性。	
	直接補助金は先行事業向けが基本。	高い波及効果の事業へ出資。
	貯留税額控除は、納税額 ≥ 減税額である必要。	米国45Qで未消化クレジット分の補助金化の動き。
	税額控除は歳入減。 排出クレジット免除と炭素税免除には歳入増・歳入減なし。	米国EORは\$70/bblでロイヤリティ・法人税増により 歳入超過。
資金調達支援	排出クレジットに価格下落リスク。	英、蘭では炭素価格が一定水準以下になると 炭素税を導入。
	事業者には長所のみ。行政側の運用負担大。	米DOEには債務保証の専門部署。

2.2.2. 国内の CCS の導入に向けて

海外で操業中の商用 CCS は、既存工程において CO₂ を高濃度で分離している排出源から EOR 目的で油田(地下情報の多い地点)へ圧入する組合せが多い^{※1}。このような状況を踏まえ、国内で実施する CCS についても分離回収ならびに貯留地点開発の追加コストが少ない組合せとすることで総投資額が抑えられ、より受入やすい CCS になると考えられる。このような組合せの CCS は特に普及黎明期には有力な候補となり得る。

ただし、既存工程において CO₂ を高濃度で分離している排出源は、比較的小規模(年間数万吨規模)と考え大規模排出源(年間数百万トン規模)からの CCS に比べ高くなることが想定される。CCS は外部不経済でありコスト低減は必須である。したがって、将来の CCS の広範な普及を目指すには、複数の排出源から排出された CO₂ を集積し、共用インフラとして輸送、圧入するハブ&クラスターの検討が必要になる。ハブ&クラスターとすることで、規模の経済でのコスト削減が期待でき、さらには複数の事業者が参画するためクロスチェーンリスク^{※1}の軽減も期待できる。

小規模な排出源から導入を進めるにしても、大規模な排出源から導入を進めるにしても、いずれにしても CCS の普及のためには、CCS に取組む事業者が投資判断を可能にするインセンティブ施策の整備が必要となる。

※1 クロスチェーンリスク;回収、輸送、貯留のいずれかのチェーンの操業が停止することで、全てのチェーンの操業を停止せざるを得なくなるリスクのこと。

3. イノベーション創出のための国際連携

3.1. IPCC(気候変動に関する政府間パネル)

IPCC は、人為起源による気候変化、影響、適応及び緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988 年に国連環境計画(UNEP)と世界気象機関(WMO)により設立された。ここでは、地球温暖化に関する科学的知見を収集・評価し、温暖化予測(第 1 作業部会)、影響と適応(第 2 作業部会)、緩和策(第 3 作業部会)からなる報告書の作成を行っている。

IPCC では世界の科学者による論文や観測データ等に基づき、各国から推薦されて選ばれた専門家が報告書の取りまとめを行っており、科学的分析に加え、社会経済への影響、気候変動を抑制する対策など多角的な評価・検討が行われている。また、この成果は、各国の政策にも科学的根拠を与えるため、ここからの報告書は国際交渉にも高い影響力を持つと考えられている。

RITE では、緩和策(第 3 作業部会)の国内支援事務局を担い、研究開発・調査と政策を結びつける役割を担っている(図 4)。IPCC は、2021 年 8 月に第 6 次評価報告書 第 1 作業部会報告書を、引き続き、2022 年 2 月に第 2 作業部会報告書、4 月に第 3 作業部会報告書、2023 年 3 月に統合報告書を公表した。引き続き、7 月に開催予定の IPCC 総会から、第 7 次評価報告書のサイクルが開始する。RITE はここでも、情報収集・分析・報告・助言等を通じて支援を行っている。

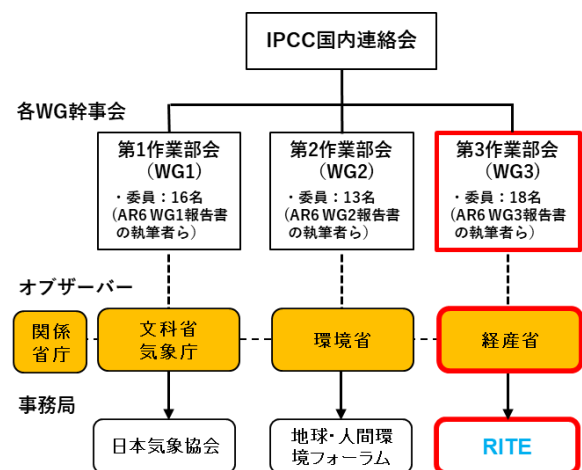


図 4 IPCC 国内連絡会と RITE

4.1. 人材育成

RITEでは次代の研究者育成のため、さまざまな人材育成活動を実施している。ここでは、小中高校生と大学／大学院生に分けて人材育成活動を説明する。

＜小中高高校生＞地球温暖化問題に関する次世代への教育が重要であり、RITE では、i)小中高生を対象に研究所施設を用いた校外学習の受け入れ、ii)職員等が教材・機材とともに学校を訪問する出前授業要請への対応を進めている。授業では RITE が取り組む研究の中から CCS 技術を取り上げ、地球温暖化メカニズムを知識として説明し、主要温暖化ガスである CO₂を地中に貯留しても粘土層(遮蔽層)によって漏洩の可能性が低いこと、さらに考察と意見交換を通じて理解を深めるといった学習サイクルに基づく活動を実施している(図 6)。

ただ 2022年も 2021年同様、新型コロナウイルスの影響で 58人に留まった(2021年は54人)が、授業やワークショップを再開しており、今後、積極的に対応していく予定である。

生活と社会に欠かせないエネルギーと
地球温暖化問題

知識
レクチャー・セミナー・見学

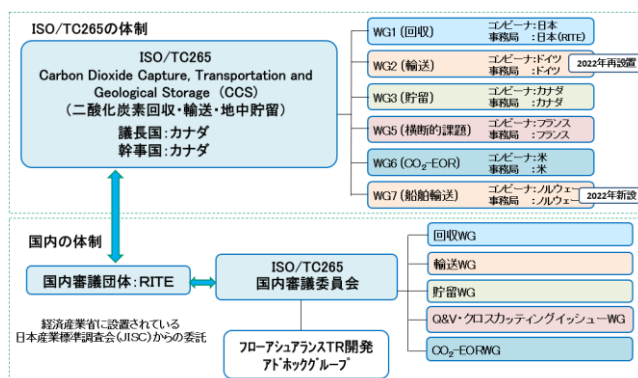
行動
工作・実験・ワークショップ

理解
ゲーム・工作・まとめ

将来のエネルギー源、地球温暖化解決に
関する観察と意見交換

図5 ISO/TC265の各ワーキングと国内支援体制と
RITF

18



学バイオサイエンス領域の大学連携研究室を RITE に設置し、単なる技術開発だけでなく、グローバルな生産・消費システムの理解の上に、植物を原料とし、バイオマスを有効に利用した再生可能資源による循環型および低炭素社会実現を目指した研究と教育を進めている。また、物質創成科学領域との連携研究室も設置し、CO₂ 分離回収技術の研究と教育を進めている。

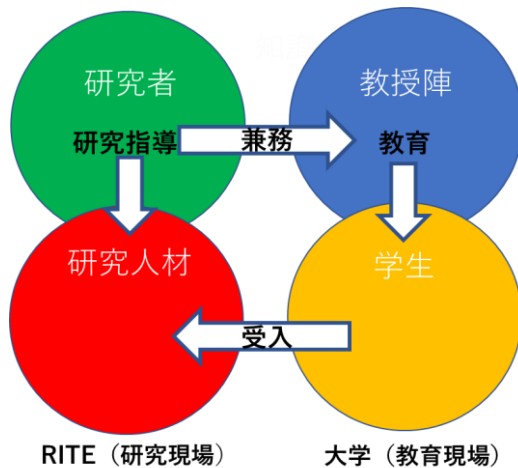


図7 RITEにおける人材育成(大学・大学院生)

4.2. 知財と産業連携

RITE は、研究開発等で得られた研究成果について、特許、ノウハウ等の知的財産権を戦略的かつ効率的に取得・管理し、さらに積極的な活用を行うことにより、公益目的である、地球環境の保全に資する産業技術の進歩向上を図ることとしている。

このような研究成果の知財化は、企業等との産業連携機会を産み、共同研究および共同出願により、さらなる知財を生み出すという好循環により、社会貢献することができ。RITE では、こういった知的財産権の持つ多様な機能に着目し、市場や他の研究開発動向なども踏まえつつ、戦略的に知財活動を推進している。

知財戦略推進の一環として、RITE 幹部を委員とし、広報・産業連携チームを事務局とした「特許等審議委員会」を設置し、研究グループからの申請により、発明の認定、国内および外国への特許出願、および審査請求、特許権維持等といった知財の取得・管理、ならびにライセンス契約の承認等といった知財戦略を、主な議事内容と

して運営を行っている。

2022年 3 月末時点で、RITE が単独または共同で出願人となっているものの内、出願・審査中の特許は、国内出願が 17 件、外国出願が 16 件であり、登録された権利を維持している特許は、国内権利 72 件(うち企業にライセンス中 8 件)、外国権利 52 件(同、12 件)である。

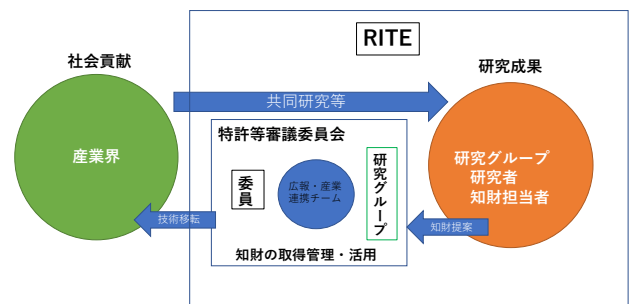


図8 知財戦略と産業連携の推進

5. おわりに

2023 年 4 月、2025 年大阪・関西万博準備室を設置しており、RITE として、大阪・関西万博において、ネガティブエミッション技術(Direct Air Carbon Capture and Storage:DACCS)の発展を検討している。

2050 年にカーボンニュートラルを実現するのは、並大抵の努力では不可能であり、RITE としても、社会実装を見据えて積極的に推進していくことが求められている。2021 年 12 月、DACCS の認知度調査を実施したところ、DACCS について全く知らないという人の割合が 7 割弱に達していることから、国民の理解増進を進むことがとても重要と考えている。RITE として、2025 年大阪・関西万博において、DACCS 技術を出展することにより、国民の認知度が上がるように積極的に努力していきたいと考えている。

企画調査グループとして、国内外の政策や技術動向の情報収集に積極的に努めていくとともに、研究グループとともに、2050 年に社会実装を目指し、技術開発及び広報活動を積極的に推進していく。そして、研究グループと協力して、社会実装が進展していくことにより、

RITE の使命である「地球環境と経済の両立」の達成に貢献していくことができると考えている。

参考文献

- 1) RITE, “RITE の役割: 地球環境と経済の両立を目指して” (<https://www.rite.or.jp/about/>)
- 2) クリーンエネルギー戦略
(https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/20220519_1.pdf)
- 3) グリーントランスフォーメーション(GX)実現に向けた基本方針(令和5年2月10日閣議決定)
(<https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>)
- 4) 経済産業省 資源エネルギー庁, CCS 長期ロードマップ検討会(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/index.html)
- 5) 経済産業省 資源エネルギー庁, 第2回 CCS 長期ロードマップ検討会(2022年2月24日), 資料3「水素・アンモニア発電コストおよび CCS 付き火力発電コスト試算(電力中央研究所)」(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/002_03_00.pdf)
- 6) 発電コスト検証 WG, 「基本政策分科会に対する発電コスト検証に関する報告」(令和3年9月(令和4年4月5日差替))(https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_20210908_01.pdf)
- 7) 経済産業省 資源エネルギー庁, 第3回 CCS 長期ロードマップ検討会(2022年3月30日), 資料6「CCS 普及に向けた規制とインセンティブの海外事例(RITE)」(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/003_06_00.pdf)
- 8) GCCSI (Global CCS Institute), Global Status of CCS 2021

システム研究グループ

グループメンバー(2023 年 4 月)

グループリーダー・主席研究員	秋元 圭吾	主任研究員	中野 優子
副主席研究員	山田 航也	主任研究員	大西 尚子
主任研究員	和田 謙一	主任研究員	橋本 照子
主任研究員	長島 美由紀	研究員	榊田 仁次
主任研究員	本間 隆嗣	研究員	安藤 輝尚
主任研究員	佐野 史典	研究員	Jubair Sieed
主任研究員	山川 浩延	研究員	Dahyun Kang
主任研究員	林 礼美	研究助手	山本 清美
主任研究員	伏見 温子	研究助手	斎藤 美三子
主任研究員	望月 則孝 (企画調査グループ兼務)	研究助手	工藤 幸子
主任研究員	桑鶴 整	研究助手	南村 良子

システム研究グループの研究活動報告

システム研究グループは、システム的な思考、システム的な分析を通して、地球温暖化やエネルギー対応に関する有用なる情報提供を国内外に行っている。

本稿では、技術・社会イノベーションによる低エネルギー需要社会の実現を後押しするシナリオ策定等を実施してきている、国際モデル比較プロジェクト「技術革新によるエネルギー需要変化に関するモデル比較国際連携事業」(経済産業省からの委託事業)、通称 EDITS (Energy Demand changes Induced by Technological and Social innovations)事業の研究進捗について報告する。EDITS 事業については、FY2022 の RITE Today にも記載しており、必要に応じて参照されたい。

1. はじめに

2℃、1.5℃目標の実現に向けて、エネルギー供給サイドだけではなく、エネルギー需要サイド、そして低エネルギー需要社会実現に向けた社会変化を誘発していく必要がある。しかもそれは、単なる需要の低減ではなく、「経済と環境の好循環」をもたらすような、つまり、ウェルビーイング(wellbeing)は向上させつつ需要は低下させる社会の実現を志向する必要がある。RITE では、別途、ALPS (ALternative Pathways toward Sustainable development and climate

stabilization)事業において、モデル開発を実施しつつ、EDITS 事業の国際モデル比較事業でのシナリオプロトコルに沿い、また、他の研究機関シナリオと調和を図った形で、世界全体で、そしてエネルギー供給サイドと需要サイド、また需要側部門間でも整合性がとれている、定量的なシナリオ作成を行った。

1.1. エネルギー需要側対策の重要性とシナリオ動向

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、2018 年に 1.5℃特別報告書(SR15)¹⁾を公表した。そこでは、1.5℃を実現する、様々な排出経路が示されたが、とりわけ、Low Energy Demand (LED)というシナリオ²⁾が注目をされた。これは、通常のモデル分析で示されるような、最終エネルギー需要よりもずっと小さなエネルギー消費の姿を示したものである。気候変動対策のみならず、持続可能な開発目標(SDGs)の同時達成にも寄与し得るとされる。文献 3)では、需要サイドで多く見られる小規模技術の技術進展の速さ等についても指摘がなされている。分散型の小規模技術は、近年のエネルギー自由化市場、技術革新、デジタル化によりこれら新技術の活用が広がっていることを指摘している。そして、IPCC 第 6 次評価報告書⁴⁾では、新たに需要サイドの対策に特化した章が設けられ現状における論文等のサーベイがなされ、そして、「需要側の対策とエンドユースサ

ービスの新しい提供方法によって、エンドユース部門における世界全体の GHG 排出量をベースラインシナリオに比べて 2050 年までに 40~70%削減しうる。」「需要側の緩和対応策は、全ての人々の基本的幸福の向上と整合的である。」(政策決定者向け要約 SPM, C.10)とされた。

図 1 には、温暖化対策の全体像を示す。従来、社会構造変化・ライフスタイル変化は、外生的なシナリオとして分析されることがほとんどであった。しかし、その場合、どのような対策によって、低エネルギー需要が達成されるのか不透明であった。また、ライフスタイル変化は、教育といった文脈で議論されることが大部分で、しかし、教育の重要性は理解できるものの、全世界的に大きな効果として表れるためには時間軸が長いことと、効果が不透明な点が課題で、分析的な研究が十分なされてきていない。本研究では、デジタル化技術などの技術変化がきっかけとなり、社会構造変化・ライフスタイル変化に結び付く可能性を定量的に分析していこうという点で新規性が高い。エネルギー需要側技術の進展により、ベースライン排出量自体が低位になるような変化がなければ、2050 年カーボンニュートラルや、大幅な排出削減の実現はとても難しいと考えられる。

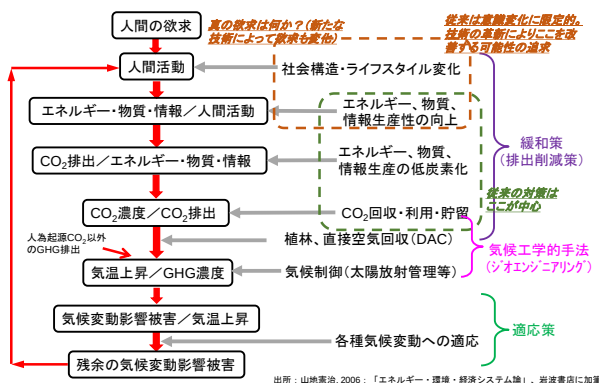


図1 地球温暖化対策の基本構造と社会構造・ライフスタイル変化の位置づけ

1.2. DX による低エネルギー需要等の実現可能性の評価例

デジタルトランスフォーメーション(DX)およびその他のイノベーションによって、暗黙的なコストを低減し、比

較的安価なコストによって、サーキュラー・シェアリングエコノミーを誘発できる余地が生まれてきている(文献5)など)。IPCC 第6次評価報告書(AR6)⁴⁾でも、文献5)を含め、各種文献からの各対策におけるエネルギー需要や CO₂ 排出量の低減効果に関する報告結果として、図2、図3のような整理もなされた。推計の幅が大きいものの、エネルギー需要や CO₂ 排出量のかなり大きな低減も期待されることが示されている。一方、これらの分析は、各対策の低減率に関する評価であり、部門横断的に整合的かつ定量的なエネルギー低減量や、CO₂ 排出低減量が示されているわけではない。また先述のように IPCC AR6 は、「需要側の対策とエンドユースサービスの新しい提供方法によって、エンドユース部門における世界全体の GHG 排出量をベースラインシナリオに比べて 2050 年までに 40~70%削減しうる。」とした。ただし、各対策をそれぞれ積み上げて評価したものであり、対策コストを含めて、必ずしも整合的かつ定量的なモデルを使って部門横断的に推計したものではない。

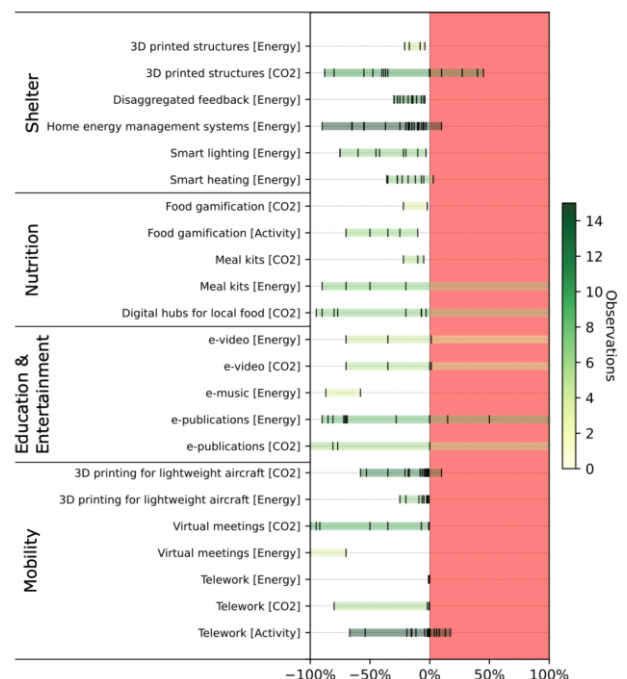


図2 デジタル化によるエネルギー消費・CO₂排出への影響(出典:文献4))

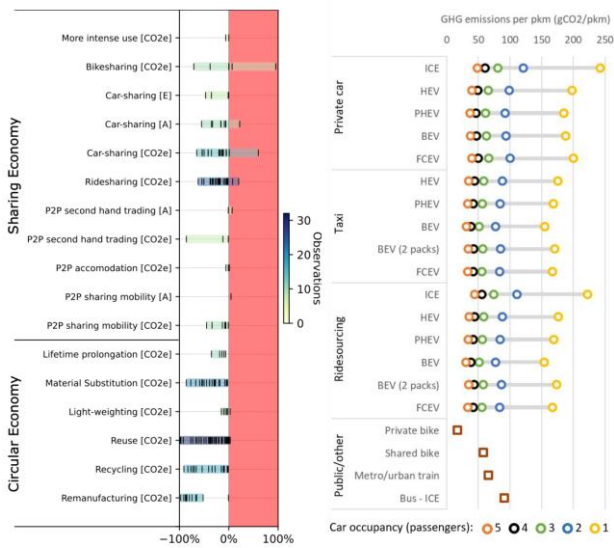


図3 シェアリング・サーキュラーエコノミーによるエネルギー消費・CO₂排出への影響(出典:文献4))

2. 分析シナリオの想定

複雑なシステムを包括的かつ定量的に分析し、その有用性と課題を明確にしていくことが、DXによって誘発される、サーキュラー・シェアリングエコノミー等の低エネルギー需要社会を社会全体として推進していく上での強力な推進力となると考えられる。EDITS事業で探索し定量的なシナリオとして提示を試みるのは、単なる需要の低減ではなく、「経済と環境の好循環」をもたらすような、つまり、ウェルビーイングは向上させつつ需要は低下させる社会の実現のシナリオである。

2.1. 定性的シナリオ

EDITS事業においては、ナラティブWGにおいて、図4のようなドライバーを考慮した定性的なシナリオ“high wellbeing with low resource use (High-with-Low)”シナリオが提示された⁶⁾。

デジタル化の進展と新結合によるイノベーション、そして適切な生活水準(DLS)が融合した世界観であり、wellbeingを高めながら、低需要(エネルギーおよび各種物質や製品等)を実現し得るとするシナリオである。要素間の関係性については、図5に示す。

これまでの統合評価モデル(IAM)分析では、最終エネルギー消費量を人口、GDPのシナリオから外生的に与

え、弾性値等を使って気候変動対策下での最終エネルギー消費量を推計するといった手法をとることが多い。しかし、産業などの需要はあくまで wellbeing を高める消費行動による結果としての需要である。エネルギー需要は、あくまで製品・サービスを得るための派生的需要である。製品・サービスを得る消費行動の変化に焦点を当て、結果としての素材製品やエネルギー需要の低減を推計し、その上で、全体としてのエネルギー需給、そして、結果としてのCO₂排出量を推計していく手法が新規性の高いところとなっている。それを通して、需要サイドの対策の効果の見える化を図り、「経済と環境の好循環」実現に向けた社会変化の誘因としていく。

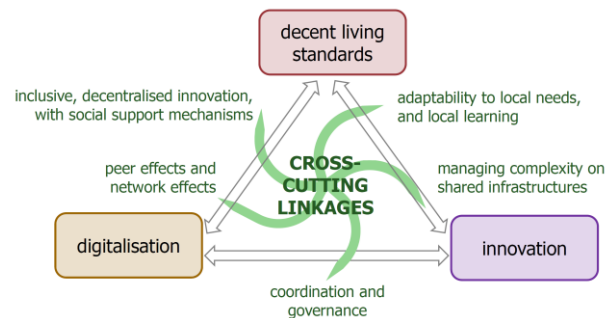


図4 定性的シナリオ'High-with-Low'の想定ドライバー(出典:文献6))

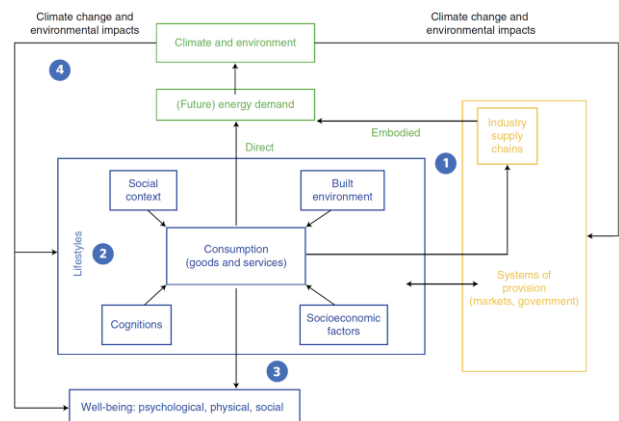


図5 定性的シナリオ'High-with-Low'の要素間の関係(出典:文献6))

2.2. 定量的シナリオ分析の想定

世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて、DXを中心にして誘発されるサーキュラーエコノ

ミー、シェアリングエコノミーによる、低エネルギー需要社会の実現、そして、GHG 排出量の低減効果を定量的に推計した。推計には現時点では定量的なデータ入手の困難性もあり、波及効果について一部しか考慮できていないことに注意が必要である。また、モデル前提条件の想定についても、不確実性が大きく、より良いデータの入手、反映の課題が残っている。DNE21+モデルは、鉄鋼、セメント、化学製品など、CO₂ 排出原単位の高い製品を積み上げ評価しているため、サーキュラーエコノミー、シェアリングエコノミー等による基礎素材製品の低下、それに伴うエネルギー消費の低下等を整合的に分析可能である。

図4のような定性的なシナリオドライバーを基に、定量的なシナリオ想定を行った。表1に分析を行った、DX によるサーキュラーエコノミー(CE)誘発のシナリオ想定を示す(以降、本報告では、シェアリングエコノミーもサーキュラーエコノミーに内包されるものとして、CE と記載する)。また、表 2 には、分析を行ったシナリオ名と、各シナリオの想定内容を示す。排出シナリオとしては、特段の排出シナリオを想定しないベースライン(Baseline)と、2℃、>66%確率の B2DS シナリオを想定した。B2DS では、別途、日本を含む主要先進国それぞれについては 2050 年 GHG のカーボンニュートラルを想定した。

需要側のデジタル化の進展、イノベーションとして、CE 関連だけではなく、変動性再生可能エネルギーの利用増大に資する、電力需要側の柔軟性の提供の可能性についても考慮した。具体的には、DNE21+の電力需要曲線において、BEV や PHEV、ヒートポンプ給湯器、コジェネレーションシステムが、特に太陽光の日中の供給力の需要調整を、標準のシナリオよりも、柔軟に提供できると想定した("FL"シナリオ)。系統統合費用については、BEV、PHEV の逆潮流の発生によって、系統側での蓄電池低減を伴うことも想定し、系統統合費用の低減が可能と想定した。

また、需要側技術は、granular technologies と呼ばれるような規模の小さい技術が多い。これら技術は、サイクルが早いことがあって、一般に技術習熟率が高い傾向が観測される。DNE21+では、太陽光発電や風力発電、EV 用バッテリーなど、標準シナリオでも大きなコスト低減を見込んでいる。しかし、これら比較的規模の小さい技術の技術習熟率が一層高くなるシナリオ("GR"シナリオ)も想定した。ただし、このシナリオはあくまで外生的な想定であり、参考として他シナリオの結果と比較すべきものという位置づけであることに注意されたい。

表1 DX によるサーキュラーエコノミー(CE)誘発のシナリオ想定

DX による CE 誘発等	エネルギー消費への直接的な影響	エネルギー消費への間接的な影響	DNE21+モデル分析における想定(暫定試算)
1) 完全自動運転車等の実現により誘発されるライドシェア、カーシェアリング(2030年時点までは想定せず)	- ライドシェアによる乗用車用エネルギー消費量の低減	- カーシェアリングに伴う乗用車台数の低下に伴う、鉄鋼、プラスチック、ゴム、ガラス、コンクリート等の低減 - 製品、素材の国際貨物輸送の低減⇒項目8)	- 鉄鋼製品生産量:▲4%(車両+立体駐車場。道路建設含まず) - プラスチック製品:▲1% - タイヤ製品:▲28%(乗用車向け比)(エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定) - ガラス製品:▲28%(乗用車向け比)(エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定) - セメント製品:▲1%(立体駐車場のみ。道路建設含まず)
2) バーチャルミーティング、テレワーク	- 移動の低減に伴う運輸部門のエネルギー消費量の低減	- 長期的に建築物の稼働率上昇、必要な空間面積の低減により、鉄鋼、コンクリート等の低減の可能性有【今回のモデル分析では未考慮】	- 旅客需要:▲10%
3) E-publication等による紙の代替	- 紙の生産のためのエネルギー消費量の低減	- 紙媒体の配送等の貨物需要低減の可能性有【今回のモデル分析では未考慮】	- 紙パ生産量:▲20%
4) E-コマースや他のDXによるアパレルのリサイクル・シェア化の促進	- アパレル製造のエネルギー消費の低減	- ショッピングセンター等、小売店舗の低減と、それに伴うエネルギー消費、また建築物建設の低減により、鉄鋼、コンクリート等の低減の可能性有【今回のモデル分析では未考慮】	- アパレル生産量:▲20%(エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定)
5) 都市開発、設計等の進展による建築物の高寿命化	- 建築物の高寿命化による、セメント、鉄鋼製品の低減に伴うエネルギー消費量の低減		- 建築物の高寿命化: +40%、それに伴うセメント:▲3%、鉄鋼製品需要の低減:▲3%
6) 需要予測の向上等による食品廃棄の低減	- 必要食品生産量の低減等に伴う、窒素肥料、プラスチック製品等の生産に伴うエネルギー消費量の低減 - 小売店舗等のエネルギー消費量の低減 - 必要食品生産量の低減等に伴う、メタン、一酸化窒素排出量の低減	- 農畜産物、食品等の低減に伴う国際貨物輸送の低減⇒項目8) - 食品販売量の低減に伴う、小売店舗の低減に伴う鉄鋼、コンクリート製品等の低減の可能性【今回のモデル分析では未考慮】 - 他用途への利用可能な土地面積の増大に伴う植林等によるCO ₂ 固定可能性【今回のモデル分析では未考慮】	- 石油化学製品(窒素肥料含む)の低減:▲1% - プラスチック製品:▲1% - 紙パ製品:▲0.5% - 輸送サービス需要:▲1% 他 (以上、産業連関表より算定) - メタン、一酸化窒素排出低減:▲493 MtCO ₂ eq/yr in 2050
7) 3D プリンティングの適用による素材の低減	- アルミニウム、鉄鋼製品等の低減 - 製造段階による電力消費量の低減	- 航空機の軽量化に伴う運航時のエネルギー消費量の低減 - 自動車等の軽量化に伴うエネルギー消費量の低減【今回のモデル分析では未考慮】	- アルミニウム製品:▲1% - 鉄鋼製品:▲0.02% - 直接的電力消費量:▲1% - 航空機の運航時のエネルギー消費量:▲10%
8) 基礎素材やその他製品需要の低減に伴う国際海運需要の低減	- 国際海運需要の低減によるエネルギー消費量の低減	-	- 国際海運需要:▲1%

赤字: 家庭部門関連、緑字: 業務部門関連、青字: 輸送部門関連、紫字: 産業部門関連、茶字: 非 CO₂ GHG 等

表2 DXによるサーキュラーエコノミー(CE)誘発のシナリオ想定

	排出削減経路	主にデジタル化によるエネルギー需要低減						電力需要の フレキシビリティ(EV, HP, CGS)	小規模技術(PV、 風力、EV等)の より急速なコスト 低減
		運輸 1)	家庭 2, 3, 4)	建築物 5)	農業・ 食品 6)	産業 7)	派生 効果 8)		
BL-Std	Baseline (特段の気 候変動緩和 政策を想定 せず。炭素 価格0)	—	—	—	—	—	—	—	—
BL-Mobil		○							
BL-Resid			○						
BL-Build				○					
BL-Food					○				
BL-Ind						○			
BL-All_CE		○	○	○	○	○	○		
BL-All_CE+FL		○	○	○	○	○	○	○	
BL-All_CE+FL+GR		○	○	○	○	○	○	○	○
B2DS-Std	B2DS 2℃を十分 に下回る排 出に抑制 (かつ2030 年の各国 NDCsを想 定、主要先 進国:2050 年GHGでの CN)	—	—	—	—	—	—	—	—
B2DS-Mobil		○							
B2DS-Resid			○						
B2DS-Build				○					
B2DS-Food					○				
B2DS-Ind						○			
B2DS-All_CE		○	○	○	○	○	○		
B2DS-All_CE+FL		○	○	○	○	○	○	○	
B2DS-All_CE+FL+GR		○	○	○	○	○	○	○	○

注1) 今回の分析では、IPCC等で用いられている共有社会経済パス(SSP)は、中位的なSSP2ベースで分析

注2) 本来、DXによる電力消費量の増大等のリバウンド効果も考えられるが、CO2限界削減費用低下に伴うリバウンド効果以外のリバウンド効果は今回考慮していない

3. シナリオ分析結果

まず、特段の気候変動緩和政策を想定しない、Baseline シナリオの結果を示す。図 6、図 7 に、CE 進展を想定しない標準シナリオ(Std)からの世界の最終エネルギー消費量の低減と、GHG 排出量の低減をそれぞれ示す。かなり限定された波及効果のみを考慮した分析段階ではあるものの、想定した CE 実現によって部門横断的に大きな省エネ効果が期待できることが示されている。また、GHG の排出低減効果も大きいことが推計される。完全自動運転車等の実現によって誘発されるカーシェアリング、ライドシェアによる低エネルギー需要への寄与は、今回想定した DX の効果としては、産業部門への波及を含めて大きい、それ以外にもバーチャルミーティングなどの効果等も大きい効果があることを示している。食品ロスの低減は、特に非 CO₂ GHG の削減を大きく促す可能性を示している。

同じく、B2DS シナリオについて、図 8、図 9 に、CE

進展を想定しない標準シナリオ(Std)からの世界の最終エネルギー消費量の低減と、GHG 排出量の低減をそれぞれ示す。かなり限定された CE の事例および波及効果のみを考慮しただけでも、2050 年では、現在の世界の最終エネルギー消費量全体の 6%程度、また、2℃目標下で経済合理的と推計される省エネ量の半分程度もの省エネが、CE によって更に追加できる可能性が示唆される。排出削減目標が決まっている条件では、想定した CE 対策は相対的に費用が安価なため、限界的な費用の対策と評価される、CCS 付きバイオエネルギー(BECCS)や大気中 CO₂ 直接回収貯留(DACCS)といった二酸化炭素除去(CDR)技術への寄与を低減し得る。なお、最終エネルギー消費量の低減効果は大きい、CO₂ 削減効果は、エネルギー供給側の CO₂ 原単位低減も伴っているため、エネルギー消費量ほど、大きくは算定されない。ただし、後述のように、費用低減効果は大きい。

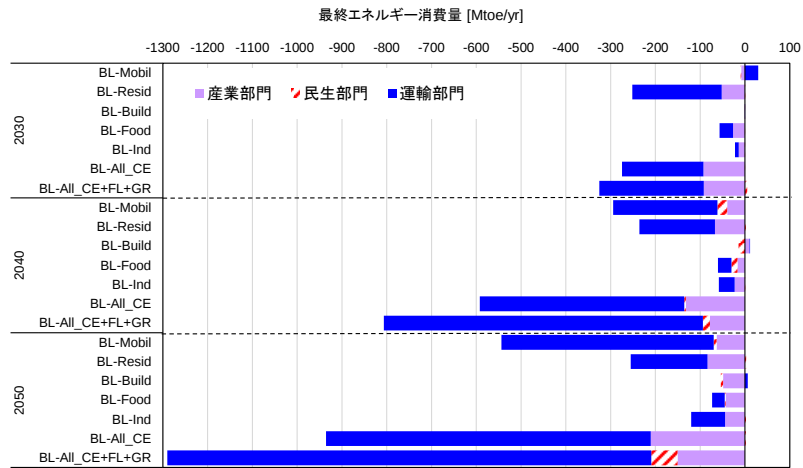


図6 世界エネルギー消費量(ベースラインシナリオ、CE 想定時の変化)

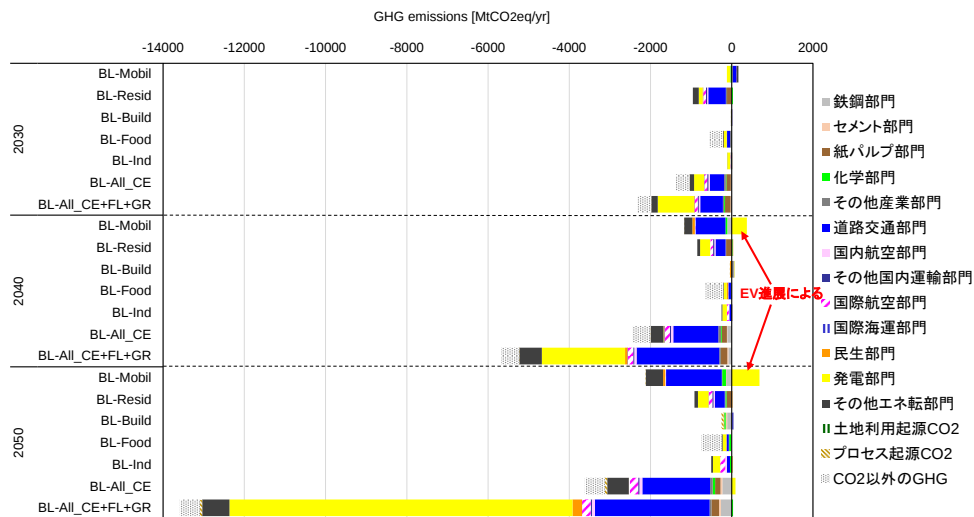
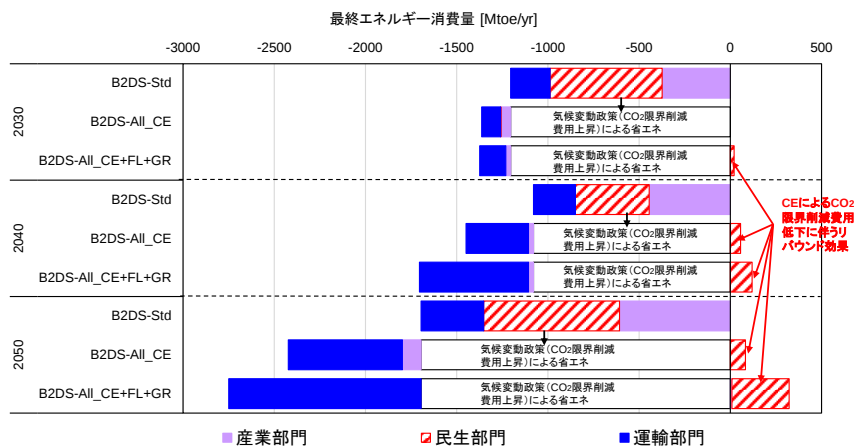


図7 世界の GHG 削減効果(ベースラインシナリオ、CE 想定時の変化)



参考) 2019年の世界の最終エネルギー消費量実績値: 10 Gtoe/yr, 2050年のベースラインの最終エネルギー消費量推計値: 14 Gtoe/yr

図8 世界エネルギー消費量(B2DS シナリオ、CE 想定時の変化)

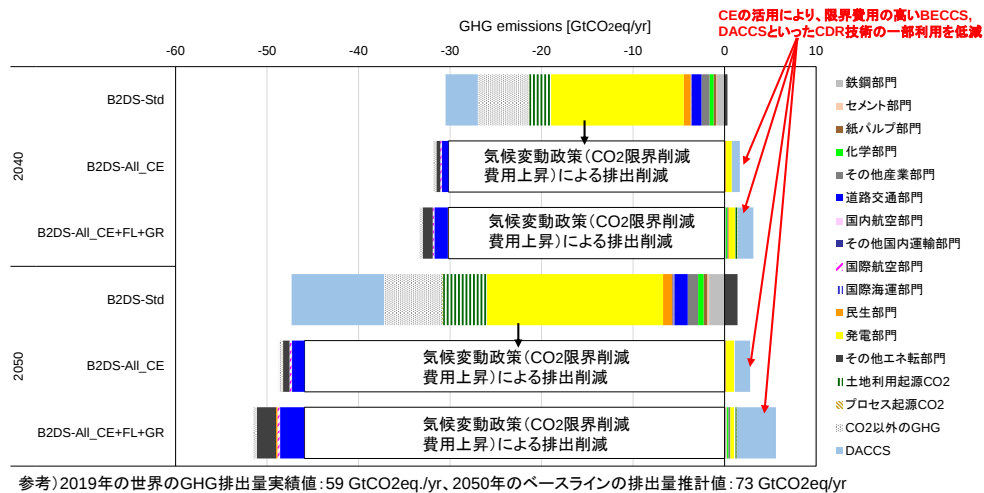


図9 世界の GHG 削減効果(B2DS シナリオ、CE 想定時の変化)

図 10 には、世界地域別の一人当たり最終エネルギー消費量を示す。先進国では、特に需要側で必要以上に多くのエネルギーが消費されており、'High-with-Low' シナリオは、主に先進国の低エネルギー需要の実現を誘発し、一人当たりエネルギー消費の国際的な格差を縮小させる。

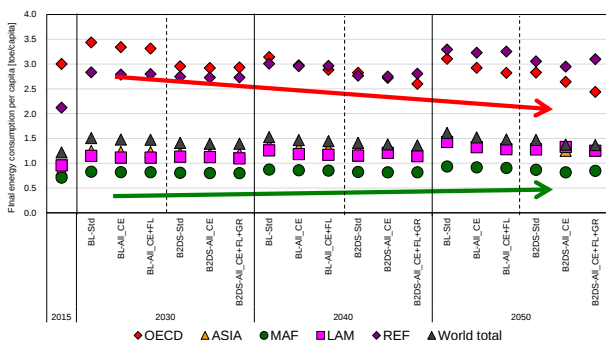


図 10 世界地域別の一人当たり最終エネルギー消費量

表 3 には、CE シナリオ下におけるエネルギーシステム総コストの Std シナリオ比での低減を、また、表 4 には、B2DS 時の CO₂ 限界削減費用を示す。DX に誘因された CE の推進により、エネルギーシステムコストの大きな低下が推計される。特に完全自動運転車等によるライドシェア、カーシェアによって社会全体としての大きなコスト低減効果が期待できるが、テレワークなどの家庭部門の変化、食品ロス低減なども、エネルギーシステムコストの低減に比較的大きな効果が期待できる。

また、表 4 で確認できるように、2℃目標等の長期目標の実現においては、CO₂ 限界削減費用の低下(2～3割程度)が期待できる。

表 3 エネルギーシステム総コストの低減:CE 想定時(単位:Billion USD/yr)

	Scenarios	Mobil	Resid	Build	Food	Ind	All CE	All CE +FL	All CE +FL+GR
2030-2040 年の 間の年平均値	Baseline	▲547	▲339	▲1	▲57	▲4	▲894	▲894	▲963
	B2DS	▲556	▲352	▲0	▲64	▲5	▲926	▲928	▲1038
2040-2050 年の 間の年平均値	Baseline	▲1601	▲459	▲1	▲74	▲7	▲1971	▲1971	▲2085
	B2DS	▲1635	▲477	▲6	▲90	▲14	▲2037	▲2038	▲2266

※ Baseline、B2DS のそれぞれの排出シナリオの標準ケースからの CE ケースによるコスト低減分

表 4 B2DS 時の CO₂ 限界削減費用(単位:USD/tCO₂eq)

	B2DS-Std	B2DS All-CE	B2DS All-CE+FL	B2DS All-CE+FL+GR
2040 年	68-310	57-238	57-240	50-195
2050 年	146-739	123-524	122-522	60-364

※ 費用の幅は国による差異(主要先進国に別途 2050 年 CN 制約を想定していることによる)

4. まとめ

本年度は、ナラティブグループが提示した定性的なシナリオ“high wellbeing with low resource use (High-with-Low)”のコンセプトに沿って、地域・国、部門横断で整合的かつ定量的なシナリオとして世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+において、モデル化を行い、一次試算を行った。本年度の分析では、定量的な推計の困難さから、一部の DX によって誘発され得る CE についてのみ、モデル化して分析・評価を行った。また、その波及効果についても定量的な推計の困難さから、限定的な波及効果のみ考慮した。それに関わらず、相応のエネルギー低減効果、GHG 排出削減効果が推計された。また、エネルギーシステムコストの低減や、B2DS シナリオ(2℃未満、>66%確率)では CO₂ 限界削減費用の低下が推計された。これは、まさに「経済と環境の好循環」もしくは「high wellbeing with low resource use」の可能性を示すシナリオと言える。

しかしながら、IPCC SR1.5 で取り上げられた Low Energy Demand (LED)シナリオにおける最終エネルギー消費量の推計は、本分析の推計値を大きく下回るものであり、引き続き、様々な DX によって誘発され得る各種対策、更に派生的に誘発され得る CE 等の社会変

化を定量的にモデル化し、定量的なシナリオ評価を実施していく必要がある。一方で LED シナリオとギャップが生じる理由の理解を深めていくことも重要と考えられる。定量的かつ包括的な分析を一層進めること、他方でそれでもなおギャップが存在するのであれば、そのギャップの理解を深めることが、次期 IPCC 報告書等の評価等で重要になると考えられる。また、エネルギー低減側の評価だけではなく、リバウンド効果も含めた分析も進め、より一層の包括的な評価を行っていくことが重要である。

参考文献

- 1) IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C (2018)
- 2) A. Grubler et al., A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies. Nat. Energy, 3(6), 515-527 (2018)
- 3) C. Wilson et al., Granular technologies to accelerate decarbonization. Science, 368(6486), 36-39 (2020)

- 4) IPCC WG3 AR6: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (2022)
- 5) C. Wilson, L. Kerr, F. Sprei, E. Vrain, M. Wilson, Potential Climate Benefits of Digital Consumer Innovations. Annu. Rev. Environ. Resour., 45(1) (2020)
- 6) EDITS WG3 Narratives group (Arnulf Grubler, Greg Nemet, Shonali Pachauri, Charlie Wilson), The 'High-with-Low' Scenario Narrative (2022)

バイオ研究グループ

グループメンバー(2023年4月)

グループリーダー・主席研究員 乾 将行
 副主席研究員 寺本 陽彦
 副主席研究員 平賀 和三
 副主席研究員 寺崎 肇
 副主席研究員 宮本 正人
 主任研究員 田中 裕也
 主任研究員 須田 雅子
 主任研究員 北出 幸広
 主任研究員 加藤 直人
 主任研究員 長谷川 智
 主任研究員 渡邊 彰
 主任研究員 小暮 高久
 主任研究員 久保田 健
 主任研究員 大井 潔
 研究員 清水 哲
 研究員 肥後 明佳
 研究員 Natalia Maria Theresia
 研究員 柏木 紀賢
 研究員 小林 淳平
 研究員 橋本 龍馬
 研究員 猿谷 直紀

研究員 野寄 裕貴
 研究員 Dyah Candra Hapsari Subagyo
 研究員 清水 崇史
 研究員 Dita Grinanda
 研究員 新宅 みゆき
 研究員 黒石川 嵩幸
 研究助手 渡邊 淳子
 研究助手 池永 由布子
 研究助手 水口 祥子
 研究助手 永守 美雪
 研究助手 内藤 香枝
 研究助手 池田 永子
 研究助手 米田 和代
 研究助手 小泉 真夕
 研究助手 西 淳子
 研究助手 森 佳代子
 研究助手 岩島 素巳
 研究助手 吉田 佳世
 研究助手 岡田 亜弥
 研究助手 フォークナー 真紀

カーボンニュートラルに貢献するバイオリファイナリー技術の開発

1. はじめに

世界的に脱炭素化の潮流は加速しており、各国ともグリーン分野への研究開発支援や先端技術の導入支援などを積極的に実施している。日本政府は2020年10月、2050年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロとする「2050年カーボンニュートラル」を宣言した。バイオプロセスは常温常圧下でものづくりが進行するため、高温高圧条件下でものづくりが行われる化学プロセスと比較して、CO₂排出削減が期待できる。また、“バイオものづくり”は、化学プロセスとは異なり、一般的に細胞内で多段階の反応により合成されるので、炭素数の多い化学構造が複雑な化合物生産ほど競争力が高い。2022年3月の「第4回新しい資本主義実現会議」において岸田内閣総理大臣は、今後、重点的に投資を行う5つの科学技術・イノベーション分野の一つとして、“バイオものづくり”をあげた。この会議の中で「“バイオものづくり”は、地球温暖化などの社会課題の解決と経済成長の二兎を追える研究分野として推進する」と発言されている。

一方、近年、バイオテクノロジーは、合成生物学やゲノム編集技術等が急速に進展している。さらに、発展が著しいIoTやAI等の情報技術(デジタル)とバイオテクノロジーとが融合した“バイオ×デジタル技術”の技術革新が起こりつつある。この“バイオ×デジタル技術”により、原料を石油からバイオマス資源や大気中のCO₂に変換可能な“バイオものづくり”の社会実装が加速し、カーボンニュートラル・カーボンネガティブへの大きな貢献が期待できる。

このような背景の下、当グループでは、これまで、地球環境と経済の両立をめざして、微生物を利用したバイオプロセスによって、非可食バイオマスからバイオ燃料やグリーン化学品を高効率で生産するバイオリファイナリーの技術開発に取り組んでいる。この開発で我々は、代表的な工業微生物であるコリネ型細菌が、還元(嫌気)条件下では増殖は抑制されるものの代謝機能は維持され、糖類を代謝し有機酸等を効率よく生成する現象を見出した。そして、これを基に、増殖非依存型バイオプロセス

「RITE Bioprocess」を開発した。また、工業化に必須の要素技術である「非可食バイオマス由来の混合糖の完全同時利用」や「発酵阻害物質への高度耐性」等を確立した(第2章参照)。

それらの技術を利用して、バイオ燃料としてはエタノール、イソブタノール、水素等について、グリーン化学品としては乳酸、コハク酸、アラニン、バリン、トリプトファン、シキミ酸、プロトカテク酸、4-アミノ安息香酸、4-ヒドロキシ安息香酸等について世界最高レベルの高効率生産を報告している。現在は、より高付加価値な香料、化粧品、医薬品、繊維、ポリマー等の原料となる芳香族化合物等の生産技術開発等の“バイオものづくり”技術に注力している(第3章参照)。

また、一方で、“バイオ×デジタル技術”の最新の技術開発として、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)スマートセルプロジェクト、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)、NEDOバイオものづくりプロジェクトに参画し、従来の合成法では生産が難しかった高機能化学品の生合成や生産プロセスの効率化に向けて「スマートセル創製技術」等の研究開発を進めている。2022年7月には、「スマートセル創製技術」を利用した民間企業との連携開発による香料やカロテノイドの生産について、NEDOバイオものづくり実証プロジェクトに採択され、事業化に向けた研究開発を開始している。また、NEDOムーンショットプロジェクトにも参画しており、非可食バイオマスを原料とした海洋分解可能なマルチロック型バイオポリマーの研究開発に取り組んでいる(第4章参照)。

本概説では、まず、我々のコア技術である「RITE Bioprocess」及び新たなコア技術である「スマートセル創製技術」等について説明する。次に、それらを利用したターゲット別の開発成果等について紹介する。そして、基盤技術開発として、近年進展が著しい“バイオ×デジタル技術”の技術革新に基づく国家プロジェクトについて述べ、最後に、事業化への取り組みについて紹介する。

2. RITEのコア技術

2.1. 「RITE Bioprocess」

当グループが開発した「RITE Bioprocess」は、バイオ燃料や、アミノ酸・芳香族化合物等のグリーン化学品を、高効率で製造することを可能にする独自技術である(図1)。以下にその3つの特長について紹介する(詳しくは、RITE Today 2022参照)。

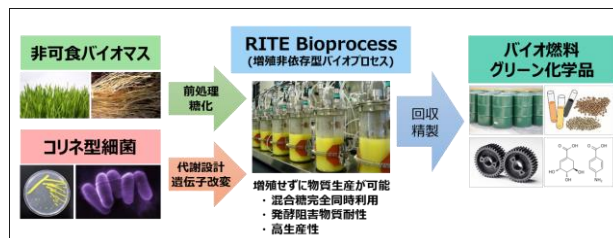


図1 「RITE Bioprocess」を利用した
バイオリファインリーの概念

特長① 増殖非依存型バイオプロセス

嫌気的な条件や、増殖に必須な因子を削除することにより、細胞の分裂を停止させた状態で目的とする一連の反応を行うことを可能にした(図2)。即ち、これまで増殖に使われていた栄養やエネルギーが、目的物質の生産に使用される。これにより微生物細胞を化学触媒のように極めて効率的に利用することが可能となり、通常の化学プロセスと同等以上の高い生産性を備えたバイオプロセスを実現した。

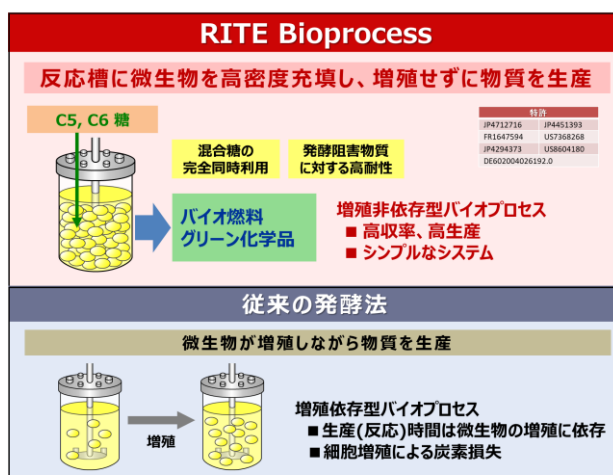


図2 「RITE Bioprocess」の特長①
(増殖非依存型バイオプロセス)

特長② C5&C6糖類の完全同時利用

非可食バイオマスの多く(セルロース系バイオマス)は、

キシロースやアラビノースなどのC5糖と、グルコースなどのC6糖の混合物から構成される。

当グループは、C5糖代謝遺伝子に加えC5糖輸送体遺伝子を導入することにより、C5糖の利用速度をC6糖並みに高めることに成功している(図3)。これにより、C5&C6糖類の完全同時利用が可能となり、セルロース系(非可食バイオマス)原料を効率的に利用できるようになった。

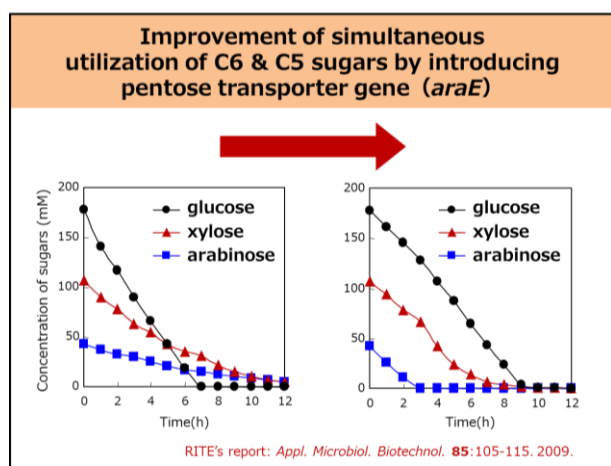


図3 「RITE Bioprocess」の特長②
(C5&C6糖類の完全同時利用)

特長③ 発酵阻害物質に対する高耐性

「RITE Bioprocess」では、前述のように微生物が増殖しないため、発酵阻害物質に対して高耐性であることを実証している(図4)。そのため、様々な発酵阻害物質が含まれた糖化液の利用、さらには発酵阻害物質の生産にも適用できる。

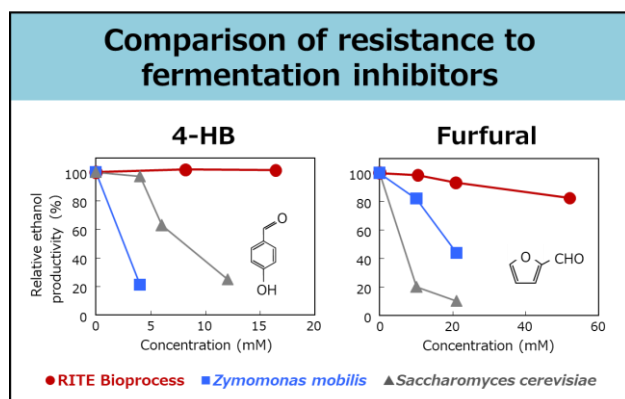


図4 「RITE Bioprocess」の特長③
(発酵阻害物質に対する高耐性)

2.2. 新しいRITEのコア技術

近年、バイオテクノロジーが高度化し、IT・AI 技術の応用分野が急速に広がる中で、複数の国家プロジェクト等において、「高度に機能がデザインされ、機能の発現が制御された生物細胞」いわゆるスマートセルを設計、育種する技術等を複数の大学、研究所、企業と連携して開発してきた(第4章参照)。それら新しい有用技術の一部を紹介する。

スマートセル創製技術

「スマートセル」=「賢い細胞」とは、遺伝子改変により、高度に機能がデザインされ、機能の発現が制御された生物細胞を意味する。当グループではより具体的に、最先端の情報解析技術とバイオテクノロジーにより高度に機能がデザインされ、これまで利用できなかった生物機能を引き出すことによって物質生産能力が人工的に最大限引き出された細胞の事をスマートセルと呼ぶ。このスマートセルを効率的に創る技術群を「スマートセル創製技術」や「スマートセル設計システム」と総称している(図5)。当グループは後述のNEDOスマートセルプロジェクト(2016-2020)及びNEDOバイオものづくりプロジェクト(2020-継続)に参画しこれらの技術群の開発に携わってきた。同時に、高い生産能力を持つコリネ型細菌を開発することで技術の有効性を実証した。

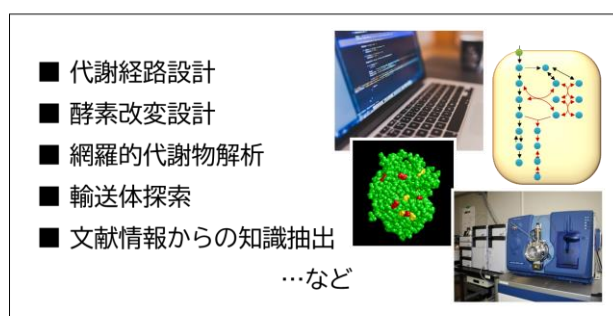


図5 スマートセルを効率的に創る技術群

連続反応システム

当グループはこれまでバイオ技術を駆使して様々な化合物生産に取り組んできたが、生産ターゲット化合物によっては細胞毒性の影響が著しく強く、反応液中に蓄積した目的化合物そのものの毒性によって生産が停止し

てしまうという課題に直面した。例えば、NEDOスマートセルプロジェクトやNEDOバイオものづくりプロジェクトで開発に取り組んでいるカテコールは、従来のバッチ法ではある一定の濃度に達したところで生産が頭打ちした。そこで、細胞毒性の影響を回避した高生産を実現すべく、菌体反応に吸着や抽出などの工学的手法を組み合わせることで、目的化合物だけを選択的に系外へ除去・回収しながら生産が可能な連続反応システムを構築した。一例として、図6に示すような樹脂吸着と膜分離を組み合わせた連続反応システムを構築し、カテコール生産に適用することで、カテコールの飛躍的な高生産を実現した。

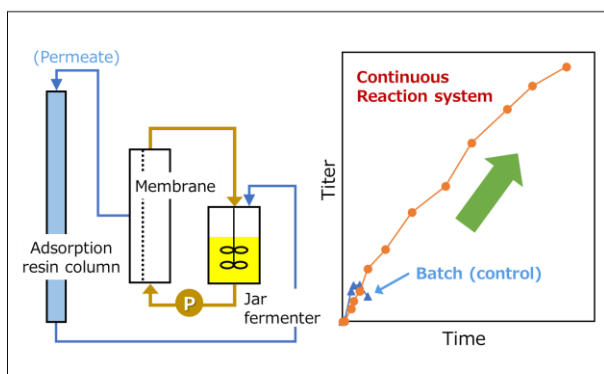


図6 膜分離と樹脂吸着を利用した連続反応システム
(カテコール生産事例)

2.3. 主な生産物質

現在、当グループによって高生産を実現している物質の一部を図7に示す。前述の様に、多くの物質で世界最高レベルの生産性を達成している。バイオ燃料では、エタノールやバイオ水素に加えブタノールや高性能バイオジェット燃料素材などへ、グリーン化学品では、L-乳酸、D-乳酸、アミノ酸に加え、芳香族化合物などの高機能化学品へと幅広い展開を図っている。

バイオ燃料	グリーン化学品
ガソリン混合・代替 ・エタノール* Bio-jet fuels ・イソブタノール* ・n-ブタノール* ・C9~C15 飽和炭化水素 + 芳香族化合物 バイオ水素	芳香族化合物 ・シキミ酸* (インフルエンザ治療薬タミフル原料) ・フェノール* (フェノール樹脂、ポリカーボネート) ・4-ヒドロキシ安息香酸* (ポリマー原料) ・アコリン* (石油外天然資源タイヤ原料) ・4-アミノ安息香酸* (医薬品原料) ・プロトカデク酸* (化粧品原料) 有機酸 ・D-乳酸*, L-乳酸* (ステレオコンプレックス型 ポリ乳酸) ・コハク酸* アミノ酸 ・アラニン (キレート剤) ・バリン (次世代飼料用アミノ酸、医薬品原料) ・トリプトファン (次世代飼料用アミノ酸、医薬品原料) アルコール ・イソプロパノール (プロピレン原料) ・キシリトール (甘味料)

* : ポリマー原料
赤色文字 : 世界的水準生産達成

図7 「RITE Bioprocess」による主な生産物質

3. ターゲット別開発

3.1. バイोजェット燃料

エタノール(C2)やブタノール(C4)を出発原料として、化学変換によってジェット燃料(C9-C15)を製造することができる。即ち、植物由来のバイオエタノールやバイオブタノールからバイオジェット燃料を製造して航空機を飛ばすことができる。航空機からのCO₂排出削減には原油から植物由来の原料に置換することが必須と認識され、業界団体の動きが加速している。バイオエタノールやバイオブタノールを原料としたジェット燃料は、Alcohol to Jetを略してATJ燃料と呼ばれ、米国材料試験協会(ASTM)の規格をクリアし、商業フライトへ利用が可能となっている。

当グループでは、「RITE Bioprocess」を利用したバイオエタノール及びバイオブタノール高効率生産プロセスの開発を行い、エタノールやイソブタノールのバイオ生産では、世界最高レベルの高生産性を達成している。今後、これらの要素技術を更にブラッシュアップするとともに、要素技術の統合・最適化、様々な非可食原料の活用などを通じてバイオエタノールやバイオブタノールからのジェット燃料生産と実用化・事業化を目指す。

3.2. バイオ水素

水素は燃焼時に水しか生成しないこと、再生可能エネルギーを含む多様なエネルギー源からの生産・貯蔵・運搬が可能なこと、電力、運輸、熱・産業プロセスのあらゆる分野に利用することで脱炭素化が可能なこと、などが

ら、カーボンニュートラル実現の鍵となる。しかしながら、現行の主要な水素製造技術は化石エネルギーを原料とするため、これに由来するCO₂の排出が大きな課題となる。日本では、2017年に「水素基本戦略」が策定され、その中で、2050年を見据えた水素社会の実現のために革新的なCO₂フリー水素製造技術の着実な開発が必要とされている。また、2021年には、米国エネルギー省が「Hydrogen Shot」で野心的なCO₂フリー水素のコスト目標(10年以内に80%削減)を打ち上げるなど、世界各国で水素国家戦略が一気に動き出している。CO₂フリー水素生産技術としては、CCUSと組み合わせた化石資源からの大規模水素生産、再生可能エネルギー発電と組み合わせた水電解と並んで、バイオマス/廃棄物を原料とした発酵水素生産技術が大きく取り上げられている。

微生物機能を利用した発酵水素生産(バイオ水素生産)は、将来の持続可能なCO₂フリー水素製造技術となり得るが、経済性あるバイオ水素生産技術の確立には、生産性の飛躍的な向上が必要とされている。これを実現するためには、先進的なバイオテクノロジーによる高効率水素生産微生物の創製技術が重要な鍵となる。当グループは、ギ酸を介した暗発酵水素生産経路を利用して圧倒的な水素生産速度(最大300 L H₂/h/L)を達成している。この成果を基盤とし、光発酵との統合によるバイオマス原料(糖)からの水素収率の大幅向上に向けた技術開発に取り組んでいる(図8)。ギ酸を介した暗発酵水素生産では利用されない余剰の還元力を利用できる水素生産経路の導入・強化を行い、また、光発酵水素生産微生物の水素代謝/炭素貯蔵/酢酸代謝の制御因子の改変をベースに恒常的水素高生産株の確立に成功している。

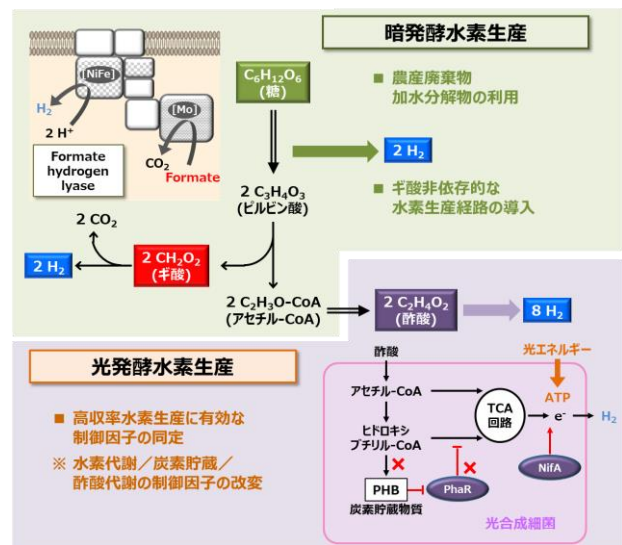


図8 暗発酵および光発酵水素生産株の代謝工学

3.3. グリーン芳香族化合物

芳香族化合物は、ポリマー等の原料として重要な基幹工業化学品であると同時に、医薬品、機能性栄養素材、香料、化粧品等の原料となる高付加価値な化合物が数多く存在する。芳香族化合物は現在、石油や天然の植物等を原料として製造されているが、脱石油依存、環境保全、および生産性の観点から、高効率なバイオ生産法の確立が望まれている。微生物細胞内ではフェニルアラニン、チロシン、トリプトファンといったアミノ酸や葉酸(ビタミンB₉)、補酵素Qなど種々の芳香族化合物が生合成されている。これらの化合物は全てシキミ酸経路と呼ばれる代謝経路から派生する。当グループは適切な遺伝子組換えを施したコリネ型細菌を高効率バイオ変換技術へ適用することで、非可食バイオマスを原料としてインフルエンザ治療薬タミフルの原料とされるシキミ酸、機能性ポリマー原料として有望な4-アミノ安息香酸、そしてポリマー、医薬品、化粧品、接着剤、香料(バニリン)原料として有望な芳香族ヒドロキシ酸の高生産プロセスの確立に成功してきた。

当グループでは、2022年からNEDOバイオものづくり実証プロジェクト「フロー連続単離法と増殖非依存型バイオプロセスによるローズ香料の生産システム実証」(代表機関名:高砂香料工業株式会社)に参画し、産業用

スマートセルの開発と香料素材が有する微生物阻害を回避するバイオ生産システムの開発を進めている(図9)。



図9 ローズ香料素材の生産実証

4. 基盤技術開発(国家プロジェクト)

4.1. NEDOバイオものづくりプロジェクト

バイオものづくり産業の基盤となる次世代生産技術開発を、「カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発」(NEDOバイオものづくりプロジェクト)にて実施する。生物機能を利用した物質生産は、従来の化学プロセスに比べて省エネルギー化が期待できる。さらに原料として化石資源ではなくバイオマスを利用できるため、炭素循環型社会の実現に大きく貢献する。

このプロジェクトの前身である「植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発」(NEDOスマートセルプロジェクト)において、当グループはスマートセルを設計、育種する技術を複数の大学、研究所、企業と連携して実施した。さらにその技術を使い目的物質を高濃度に生産可能な生産株を効率的に短期間で育種することで、技術の有効性を示した。スマートセルの社会実装を促進させるため、バイオものづくりプロジェクトではスマートセル創製技術をさらに発展させ、スケールアップや精製などを含んだ生産プロセス技術の開発を行う。

2020年度から始まったこのプロジェクトに当グループは初年度から参画し、バイオものづくり技術の実用化に伴う課題を解決するための新規技術の開発を進めている(図10)。2022年度は主に石化代替品をバイオ生産する際に問題となる生産物毒性を克服する技術の開発を進めた。加えて、最適な培養液成分を決定する情報解析技術の開発と有効性検証を実施した。今後は上記に加えて他の有用な技術の開発とその有効性検証を、コリネ型細菌を用いて実施する。これら各種技術の開発に

よりバイオ由来製品の社会実装を加速することを目指す。

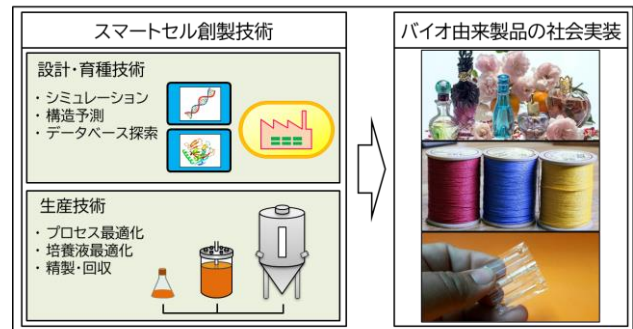


図10 スマートセルを用いたバイオ由来製品の社会実装

4.2. NEDOMーンショット型研究開発プロジェクト

NEDOMーンショット型研究開発プロジェクト「非食性バイオマスを原料とした海洋分解可能なマルチロック型バイオポリマーの研究開発」では、プラスチックの分解に「マルチロック機構」を導入すべく研究開発を行っている。すなわち分解の際に、光、熱、酸素、水、酵素、微生物、触媒などの複数の刺激を同時に必要とすることで、使用時には分解を抑えて耐久性・強靱性を保って劣化を防ぎ、海洋環境中に誤って拡散した際にはマルチロックが外れて高速なオンデマンド分解を実現可能とする。

本プロジェクトにおいて実用化を目指す製品は、使用時に2次的な微細粉などを発生するタイヤ、繊維のほか、プラスチックボトル、ゴーストフィッシングの要因となる漁網や釣具であり、いずれも海洋への流出による環境への悪影響が懸念されている。

当グループでは、2022年度は、これまでに企業などから要望があった数種のモノマーについて、人工代謝経路の設計や高生産株の構築、生産条件の検討など実施し、高生産に成功した。今後は人工代謝経路の改変等をつうじてさらなる生産濃度の向上を目指す。プラスチック分解酵素については、2022年度は変異導入等によって顕著な高機能化と、酵素の生産濃度向上に成功した。今後は、マルチロック型プラスチックの分解開始のタイミングを人工的に制御可能とする技術の開発(分解酵素を活用した新技術への展開)を含めた研究開発を目指す。(本プロジェクトのホームページは[こちら](#))

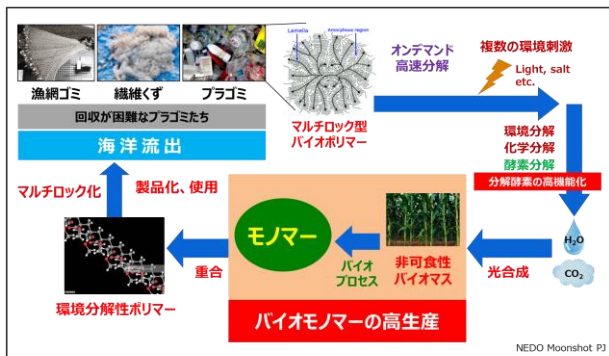


図11 マルチロック型生分解性プラスチックの開発
による資源循環の実現イメージ

4.3. SIP(高機能ポリマー用バイオモノマーの開発)

バイオによる物質生産において目的物質が生産できるかはその物質の生合成経路を構築できるかによる。生合成経路は複数の酵素によって形成され、出発物質(基質)が酵素反応により変換されて生じた生成物が次の酵素の基質となり変換を受ける。現在8000を超える酵素反応が知られており、これらを組み合わせることで生合成経路の改変、拡張を行う。

当グループは府省・分野の枠を超えて基礎研究から実用化・事業化までを見据えた取組を産学官連携で進めるプログラムである戦略的イノベーション創造プログラム(SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program)における課題「スマートバイオ産業・農業基盤技術」に参画しており、目標であるバイオとデジタルの融合・データ活用により生物機能を活用したものづくりによる持続可能な成長社会の実現に向けて研究開発を進めている。

当グループが参画する本課題のコンソーシアムの一つ「高機能バイオマテリアル設計・生産技術開発」では、市場が所望する新機能を有するポリマーを、バイオマスなどの安価な原料から生合成されたモノマーを用いて合成することを目標としている。これまでに非常に高い耐熱性を有するポリマーや電池材料となるポリマーの開発に成功している(図12)。これらのポリマーを構成するモノマーの生合成経路を構築するために、当グループはこれらのポリマーを構成するモノマー原料の生合成に関わ

る酵素を対象に酵素機能改変技術の開発並びにその検証を進めている。より具体的には、多数の変異体の酵素活性データを機械学習に供することで、有望な変異の組合せの効率的な抽出技術や、酵素のアミノ酸配列情報を基に目的機能を有する新規酵素の探索技術について検証している。これらの技術により、基質特異性の改変や活性の向上を達成している。2022年度はモノマー生産株の改良、培養条件の検討を進めることで生産性を高めると共に連携コンソーシアムより提供されるバイオマス由来の原料からの生産を実証した。また、芳香族ジアミンの生合成経路を構成する酵素を新規対象として、酵素機能改変技術の有効性検証を進めている。

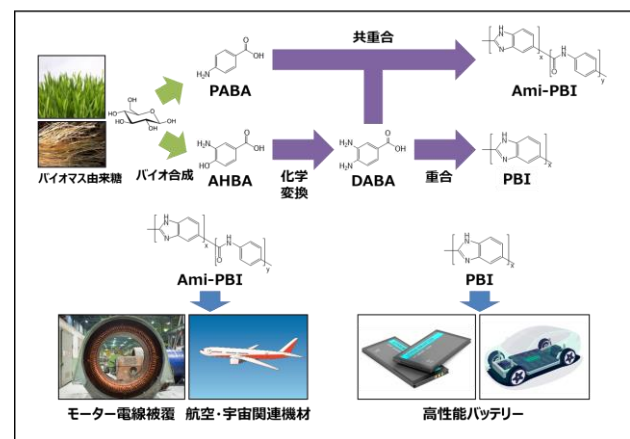


図12 開発モノマー及びポリマー合成とその用途

5. 実用化への取り組み

5.1. グリーンケミカルズ株式会社(GCC)

(本社・京都研究所:RITE本部内、

静岡拠点:住友バークライト株式会社静岡工場内)

(GCCについては[こちら](#))

2010年2月、RITEは、住友バークライト株式会社と共同で、非可食バイオマスを原料として、バイオプロセスによるフェノール生産およびフェノール樹脂製造に関わる基盤技術開発を進めるためグリーンフェノール・高機能フェノール樹脂製造技術研究組合(GP組合)を設立した。2014年5月、同組合をグリーンフェノール開発株式会社(GPD)へ改組し、これが技術研究組合の株式会社化第1号となった。2018年4月には、同社の技術はフェノール生産以外にも有用な化合物を並行的に生産可能

であるため、グリーンケミカルズ株式会社(GCC)へ社名を変更した。

現在、GCCでは、グリーンフェノール生産技術開発で培った量産技術とノウハウを活用し、従来は高生産が難しいと考えられていた芳香族化合物などの付加価値の高い様々なグリーン化学品(図13)の量産技術の確立を鋭意進めており、顧客ニーズに合致したグリーン化合物の商品化を加速している。

また、原料となる非可食バイオマスについても、これまで利活用されてこなかった「みかん脱汁液」をはじめ、様々な物質を対象に、幅広く実用化の検討を進めている。

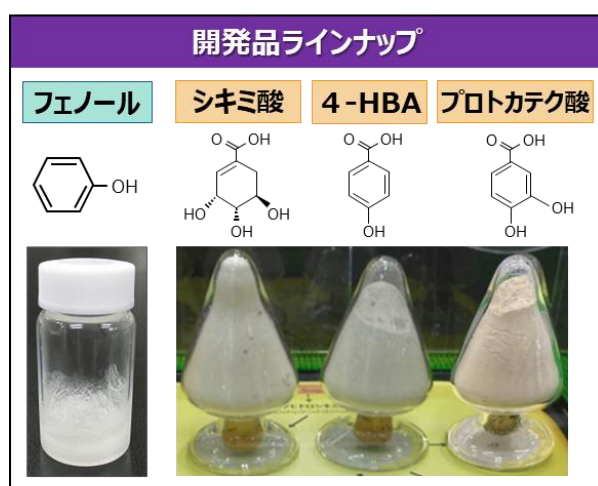


図13 GCCの主な開発品ラインナップ

5.2. Green Earth Institute株式会社(GEI)

(本社:東京都新宿区、

研究所:千葉県木更津市・千葉県茂原市)

(GEI ホームページは[こちら](#))

Green Earth Institute 株式会社(GEI)は、RITEが独自開発した前述の革新的バイオプロセス「RITE Bioprocess」の研究成果を早期に事業化するため2011年9月1日に設立されたRITE発ベンチャー企業である。同社は、微生物を用いたアミノ酸等のグリーン化学品生産技術やブタノール等のバイオ燃料生産技術の実用化のため、RITEとの共同研究を含めた技術開発や事業化を目指した活動を実施している。

2021年8月からは、政府が進めるバイオ戦略の要で

あるグローバルバイオコミュニティの中核として、バイオリファナリー技術のプラットフォームを構築するバイオファウンドリ事業(NEDO委託事業)を実施している。

2021年12月には、東証マザーズに上場を果たしている(2022年4月4日付の東京証券取引所の市場区分の見直しに伴い、同日以降の上場金融商品取引所名は、東京証券取引所グロース市場となっている)。

現在、GEIとは、アミノ酸にて商用スケールでの生産に成功した実績を活かし、これまでとは別種のアミノ酸にて商用生産の実現に取り組んでいる。

この他にも、バイオプラスチックの原料となる化学品や、生分解性樹脂の原料となる化学品など、持続可能な発展に貢献するバイオ生産の実現を目指し、協力して開発を進め、事業化に向けたマーケティングや量産化に向けたスケールアップを行っている。

5.3. 企業との共同研究

本概説で紹介しているバイオ燃料やグリーン化学品以外にも多くの物質に関して、企業からの要望に応じて共同研究を実施している。

ハリマ化成株式会社とは、高吸収型天然カロテノイドの大量生産システムの開発と実証に関して、NEDOの委託事業として共同研究開発を実施している(詳細は[こちら](#))。

高砂香料工業株式会社とは、フロー連続単離法と増殖非依存型バイオプロセスによるローズ香料の生産システム実証に関して、NEDOからの助成を受け協力して実施している(詳細は[こちら](#))。

これら以外にも、多くの企業と共同研究を実施している。それらの内容について、具体的には紹介できないが、早期事業化を目指して企業の1商品(化石資源由来の物質)をバイオ由来にする研究開発に加えて、企業の主要商品や原料(化石資源由来の物質)をバイオ由来にする中長期の研究開発も複数実施している。

6. おわりに

近年、前述の「バイオ×デジタル技術」の技術革新や新たな知見・手法により、4章で紹介した国家プロジェクト

を中心に、スマートセル開発の飛躍的な効率化を実現している。そして、それらの成果により創製されたスマートセルの社会実装に向けて、生産実証の取り組みが精力的に実施されている。これらにより、新産業(スマートセルインダストリー)が創生され、エネルギー分野に加えて工業分野(ものづくり)にも大きな波及効果を与えることが期待されている(図14)。

当グループでは、2023年も引き続き、国家プロジェクトや企業との共同研究を通じて、前述の「RITE Bioprocess」や「スマートセル創製技術」等を利用して、芳香族化合物等のグリーン化学品生産やバイオ水素等のバイオ燃料生産の研究開発、さらにはそれらの実用生産技術開発を行い、カーボンニュートラルの実現に貢献してゆきたい。

尚、2020年10月の「2050年カーボンニュートラル」宣言以来、企業からの問い合わせや引き合いが増加しており、企業との共同研究の件数も増えてきている。RITEバイオ研究グループでは、5章3節にて紹介した以外のケースも含め、共同研究先企業を募集中である。これまで、一般的には微生物生産が難しいとされる化合物、例えば、前記、芳香族化合物に関しても、最新の要素技術開発の成果等を利用して高生産できる可能性がある。バイオ化したい化合物があれば、是非、ご連絡いただきたい。

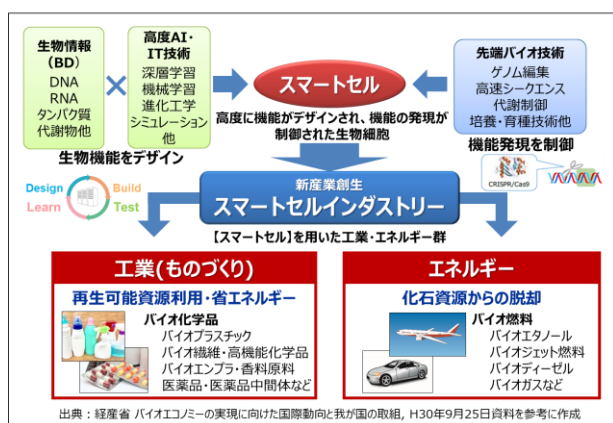


図14 “バイオ×デジタル”が拓く世界

※「RITE Bioprocess」は、RITEの登録商標(商標登録第5796262号)

化学研究グループ

グループメンバー(2023年4月)

グループリーダー・主席研究員	余語 克則	研究員	山口 創司
主席研究員	喜多 英敏	研究助手	荒木 華子
サブリーダー・主席研究員	水野 雅彦	研究助手	井田 博之
サブリーダー・主席研究員	松好 弘明	研究助手	浦井 宏美
サブリーダー・副主席研究員	菊池 直樹	研究助手	大西 紀子
副主席研究員	馬場 宏治	研究助手	大野 信成
副主席研究員	Firoz Alam Chowdhury	研究助手	尾方 秀謙
主任研究員	甲斐 照彦	研究助手	小倉 公美子
主任研究員	來村 和潔	研究助手	鹿嶋 麻衣
主任研究員	木下 朋大	研究助手	片岡 梢
主任研究員	久貝 潤一郎	研究助手	菰野 恵子
主任研究員	後藤 和也	研究助手	杉本 理絵
主任研究員	瀬下 雅博	研究助手	手嶋 孝
主任研究員	村岡 利紀	研究助手	奈良 裕子
主任研究員	龍治 真	研究助手	鳴瀧 陽三
研究員	伊藤 史典	研究助手	藤井 暁義
研究員	大畠 悠輔	研究助手	藤原 洋一
研究員	清川 貴康	研究助手	森 恵子
研究員	小寺澤 耀	研究助手	森 美佐都
研究員	段 淑紅	研究助手	保野 篤司
研究員	淵上 暢彦	研究助手	吉野 直美
研究員	Vu Thi Quyen	研究助手	米澤 順子
研究員	孟 烈		

CO₂分離・回収、有効利用技術の高度化・実用化への取り組み

1. はじめに

昨年度まで CO₂の分離・回収及び有効利用技術の研究開発は、化学研究グループと無機膜研究センターで別個に実施してきたが、有機膜と無機膜の研究開発、また、CO₂有効利用に関する研究開発を連携させるため、2023 年度から両組織を統合し、効率的な運営を行う組織体制とした。今後、CO₂分離回収・有効利用に関わる各種技術の早期実用化・産業化を目指して、産業化戦略協議会の活動内容を拡大する予定である。以下、現在の化学研究グループの取り組みについて述べる。

2. CO₂分離・回収技術の研究開発

2015年12月のCOP21で「パリ協定」が採択され、異常気象など気候変動による悪影響を最小限に抑えるために、産業革命前からの世界の平均気温の上昇を「2℃より充分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求する」

ことが目標とされた。その後、さらなる気温上昇や世界規模で発生している甚大な自然災害など危機感の高まりを受けて、先の2021年11月のCOP26におけるグラスゴー気候合意では、気温上昇幅を「1.5℃に制限する努力の追求を決意」とされ、世界で初めて1.5℃が数値目標となった。IPCCによると、1.5℃目標のためには、2010年比で2030年までにCO₂を45%削減し、2050年までにネットゼロを達成する必要がある。

我が国においては2020年10月の「2050年カーボンニュートラル」宣言と、2020年12月に策定(2021年6月詳細策定)された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を受けて、様々な方面からの地球温暖化防止のための取り組みが進められている。CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)/カーボンリサイクルは、主要な取り組みの1つであり、カーボンニュートラルを可能とする重要

な革新的技術として位置付けられ、「CO₂ を炭素資源として捉えて、分離・回収した CO₂ の燃料や素材への再利用(CCU)」や「分離・回収した CO₂ の地中貯留(CCS)」との組合せにより、大きな CO₂ 削減効果が見込まれる。CO₂ 分離・回収技術は CCUS 推進のための基盤技術であり、2050 年度までに CO₂ 分離・回収コスト 1,000 円/t-CO₂ を目指し開発を進めることや様々な CO₂ 排出源に対応する分離・回収技術を確認していくことが目標として示されている。また、カーボンニュートラルを実現するためには、大気中の CO₂ 濃度を低減する技術、すなわちネガティブエミッション技術の導入が不可欠であり、特に大気中から CO₂ を直接回収する Direct Air Capture(DAC)が注目されている。2021 年 7 月に改訂された「カーボンリサイクル技術ロードマップ(経産省)」では、進展のあった新たな技術分野として DAC が追記された。

このような背景を受けて、様々な CO₂ 排出源に対し、最適な分離・回収技術を提案することにより、CCUS の実用化を推進していかなければならない。地球温暖化対策として CO₂ の大規模削減が期待できる CCS を早期に導入、実用化するためには、大規模発生源等から排出される CO₂ 分離・回収コストの低減が重要である。また、並行して CO₂ 分離・回収技術の標準化を推進していくことも重要である。国際的な標準化の動向に歩調を合わせながら、国内の分離素材の評価方法を標準化して、様々な分離素材を共通の方法で評価できるようにすることが求められている。また、CCU(utilization)の早期社会実装も強く求められている。分離回収した CO₂ を炭素源として有効利用して化学品、燃料、鉱物へ変換してカーボンリサイクルする技術開発が重要である。

化学研究グループでは、CO₂ 分離回収技術の研究開発を行っており、これまでに化学吸収法、固体吸収法、膜分離法で世界をリードする研究開発成果を上げてきた。材料の開発に始まり、加工、システム検討までを一貫して研究開発していることが特徴である。化学吸収法においては、COURSE50(「環境調和型プロセスの技術開発」プロジェクト、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託事業)で開発した化

学吸収液が、実用化されている。固体吸収法では、低温で CO₂ 脱離性能の優れた固体吸収材・システムのパイロット試験を、NEDO 委託事業において民間企業と共同で、石炭火力発電所の実燃焼排ガスを使って進めている。CO₂ 濃度が低い天然ガス火力発電所排ガス向けにも展開すべく、最近、新たな吸収材の開発を開始したところである。さらに、NEDO ムーンショット型研究開発事業の中で大気から CO₂ を分離・回収する DAC(Direct Air Capture)の開発も進めている。膜分離法は、圧力を有するガス源から CO₂ を低コスト、省エネルギーで分離するプロセスを目指して膜および膜エレメントの開発を行っている。適用先候補は、石炭ガス化複合発電(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)向け、ブルー水素製造向けである。

CO₂ 分離・回収の標準化へ向けた取り組みも推進している。International Test Center Network(略称 ITCN、CO₂ 分離・回収技術の研究開発を推進する世界各地の施設のグローバル連合)へ加盟する国内唯一の機関として RITE は、海外 ITCN メンバーとの情報交換を定期的に行ってきた。また、2022 年度から始まった NEDO 事業「CO₂ 分離素材の標準評価共通基盤の確立」を受託し、国内初の実ガス試験センターを RITE 内に設置すべく準備を開始したところである。

CO₂ 有効利用技術については、現在、アミン技術を利用した炭酸塩固定化と脱水膜を利用するメタノール合成に取り組んでいる。炭酸塩固定においては、産業廃棄物中のカルシウム、マグネシウムを利用して高純度な炭酸カルシウムを製造する。炭素源、金属源ともリサイクルする環境負荷低減効果の高い製法である。メタノール合成においては、発電所、製鉄所、セメント、化学工場から排出する CO₂ を膜反応器(メンブレンリアクター)により水素と反応させて高効率にメタノールを合成する。「CO₂ を用いたメタノール合成における最適システム開発」を民間企業と共同で受託し 2021 年度から開発を行っている。

3. 化学吸収法

化学吸収法は、混合ガス中の CO_2 を化学反応を介して溶液中に選択的に溶解(分離)させ、次工程において CO_2 を含む溶液を加熱昇温し、高純度 CO_2 を回収する技術である。特に、アミンを利用した化学吸収液は、燃焼排ガス等、比較的低 CO_2 濃度の混合ガスへの適用が可能であり、CCS分野では最も成熟した CO_2 分離・回収技術の一つである。しかし、社会実装の加速にはコスト低減が課題である、溶液再生工程でのエネルギー消費やアミンの劣化などへの取り組みが必要である。

RITE は、アミンの分子構造がこれらの要因と密接に関わることに着目し、2004 年以降、新規アミン及び高性能化学吸収液の開発を推進してきた。「低品位廃熱を利用する二酸化炭素分離・回収技術開発(COCS)」（経済産業省(METI)補助事業)、および COURSE50 においては、製鉄プロセスを対象に、 CO_2 分離・回収エネルギーおよびコスト低減を可能とする高性能なアミン系化学吸収液を開発した。新規の化学吸収液は、日鉄エンジニアリング株式会社の商業設備「省エネ型 CO_2 回収設備 ESCAP[®]」に採用され、これまでに2基の商業設備が稼働している。1号機は室蘭製鉄所構内において飲料等を含む一般産業用途向けに、2号機は新居浜西火力発電所において近接する化学工場の化学副原料用に CO_2 を製造している(図1)。



図1 省エネ型 CO_2 回収設備 ESCAP[®]
(住友共同電力株式会社新居浜西火力発電所内)

前者は製鉄所の熱風炉燃焼排ガスを CO_2 回収源とす

る化学吸収法による商業設備として世界初のものであり、北海道地区の産業用 CO_2 の製造を担っている。後者は石炭火力発電の燃焼排ガスを CO_2 回収源とする化学吸収法による CO_2 分離回収設備として日本初の商業設備である。

また、COURSE50 では、水以外の溶媒を用いた吸収液において、吸収形態および分極影響を制御することで更なるエネルギー消費低減の可能性を見出し、化学吸収法におけるブレークスルー技術として「混合溶媒系吸収液」を提示した(図2)。本技術では、従来のアミン系化学吸収液で一般的であった溶媒の水の一部を非水溶媒に置き換えることにより、溶液の比熱や CO_2 との反応熱が低減できる。但し、化学種や液組成の最適設計、更には実用性検討等の課題解決はこれからであり、2022 年1月開始のグリーンイノベーション基金事業「製鉄プロセスにおける水素活用」において継続して研究開発に取り組んでいる。

<混合溶媒系吸収液>



図2 混合溶媒系吸収液のコンセプト

4. 固体吸収法

固体吸収材は、アミンを水などの溶媒に溶かした化学吸収液と異なり、アミンをシリカや活性炭などの多孔質材料に担持したものである。(図3) 固体吸収材を用いたプロセスは、溶媒に起因する蒸発熱や顕熱を抑制できることから、 CO_2 分離・回収エネルギーの低減が期待できる。

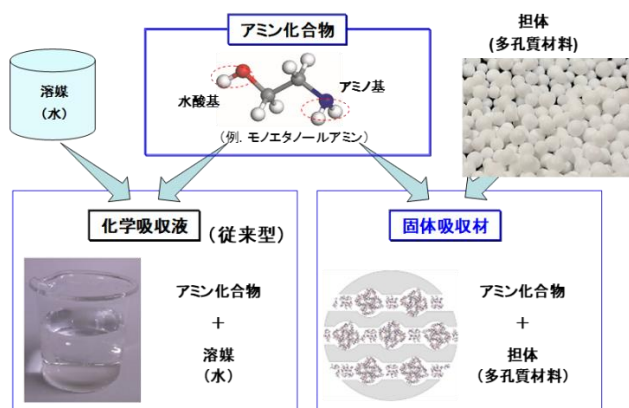


図3 化学吸収液と固体吸収材

1) 石炭火力発電所向け

2010年、RITEは主に石炭火力発電所の燃焼排ガスからのCO₂分離・回収を対象に、固体吸収材の開発に着手した(METI 委託事業)。基盤研究フェーズ(2010～2014 年度)では、固体吸収材に適した新規アミンの開発に成功し、ラボスケール試験において、分離・回収エネルギー1.5GJ/t-CO₂以下の目途を得た。本固体吸収材システムは、低エネルギー回収のみならず、排熱利用が可能なレベル(60℃)の低温プロセスを可能とする革新的な材料である。アミン系固体吸収材を用いた他の事業と比較して、本事業の低温再生という観点では世界トップの水準である。2015～2019 年度までの実用化研究フェーズ(METI/NEDO 委託事業)では、川崎重工業株式会社(KHI)をパートナーとして、固体吸収材のスケールアップ合成(>10m³)、ベンチスケール試験(>5t-CO₂/day)、石炭火力発電所での実ガス曝露試験などを実施した。

2020年、RITEはKHIとともにNEDO委託事業「先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究」に採択された。本事業では、関西電力株式会社の協力を得て、KHIがパイロットスケール試験設備(40t-CO₂/day 規模)を舞鶴発電所内に建設し、2022年度後半から試運転を開始した。RITEでは、固体吸収材のスケールアップ合成やベンチスケール試験の成果を基に最適化した固体吸収材を100m³スケールで製造し、パイロット試験設備へ供給した。今後、石炭火力発電所の燃焼排ガスからのCO₂分離・回収試験を

2023～2024 年度に実施する予定である。(図4)

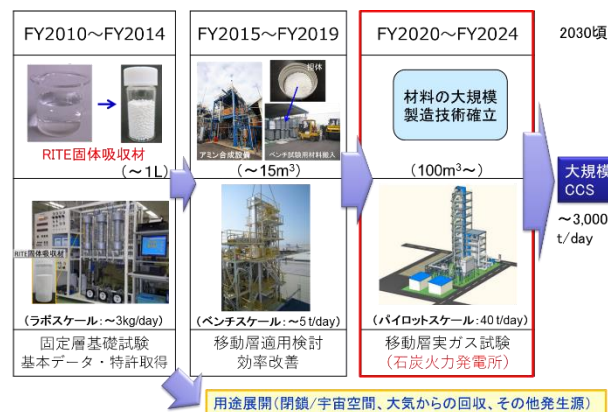


図4 固体吸収法の開発ロードマップ

また、材料劣化機構の解明と劣化防止技術の開発、プロセスシミュレーション技術による効率的な運転条件の検討なども進めており、プロセスシミュレーション技術では、KHIの移動層システムにおいて高い精度でCO₂回収量や分離回収エネルギーを予測可能なシミュレータを開発している。(図5)

パイロット試験ではこのシミュレーション技術を活用して運転条件の最適化を行う予定である。さらに、シミュレーションは実際には観測が困難な装置内部での吸脱着挙動を把握するのに役立っており、計算結果は材料開発にも活用されている。

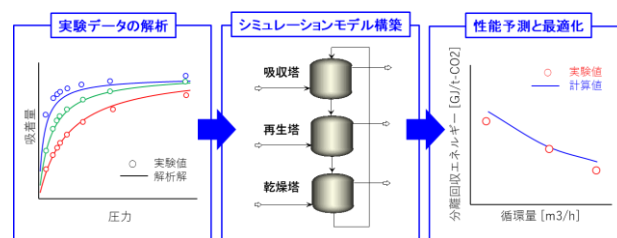


図5 RITEの保有するシミュレーション技術

2) 天然ガス火力発電所向け

2022年より、グリーンイノベーション基金事業/CO₂の分離回収等技術開発において、千代田化工建設(幹事会社)、JERAと共同で、天然ガス燃焼排ガスからの低コストCO₂分離・回収プロセス商用化の実現への取り組みを開始した。天然ガス燃焼排ガスに含有するCO₂濃度

は4%前後と石炭燃焼排ガス中のCO₂濃度(13%)と比較して低い一方、酸素濃度は10%程度と高いため、低いCO₂濃度においても、高いCO₂吸収性能を示し、酸化に対する高い耐久性を有する固体吸収材が求められ、RITEは過去に培った知見、技術に基づくアミン開発およびそれを担体に担持させた固体吸収材開発を担当している。本事業は2022年から2030年までの9年間の事業である。固体吸収材の開発が中心のフェーズ1(2022年～2024年)にてステージゲートを通過すると、ベンチ試験装置での開発を実施するフェーズ2(2025年～2026年)、さらにステージゲートを通過すればパイロット実証試験を天然ガス火力発電所サイトでの実排ガスで実施するフェーズ3へと進む予定である。(図6)

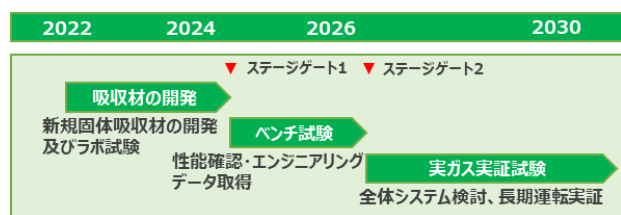
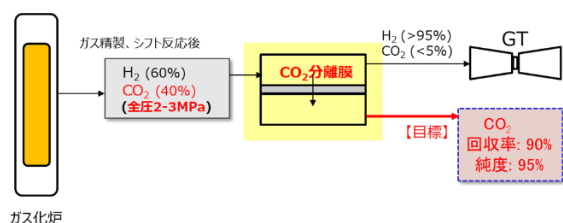


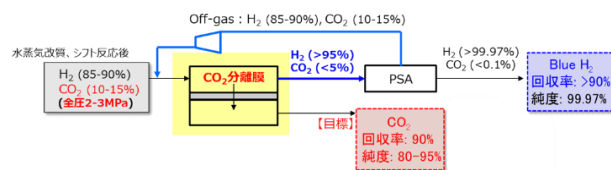
図6 研究開発スケジュール

5. 膜分離法

膜分離法は、圧力差によって分離膜の供給側から透過側へCO₂を透過・分離する分離法である。そのため、高圧ガスである石炭ガス化複合発電(IGCC)や水素製造プラントへの適用により、低コスト、省エネルギーでのCO₂分離・回収が期待される(図7)。



(a)IGCC



(b)水素製造プラント

図7 分離膜を用いた石炭ガス化複合発電(IGCC)や水素製造プラントからのCO₂分離・回収

RITEでは、高密度のアミノ基を有するポリアミドアミン dendrimer を用いた新規な高分子系材料が優れたCO₂とH₂の分離性能を有することを見出し、この dendrimer と架橋型高分子材料の分離機能層を有する複合膜(分子ゲート膜)の開発を行ってきた。分子ゲート膜の概念図を図8に示す。

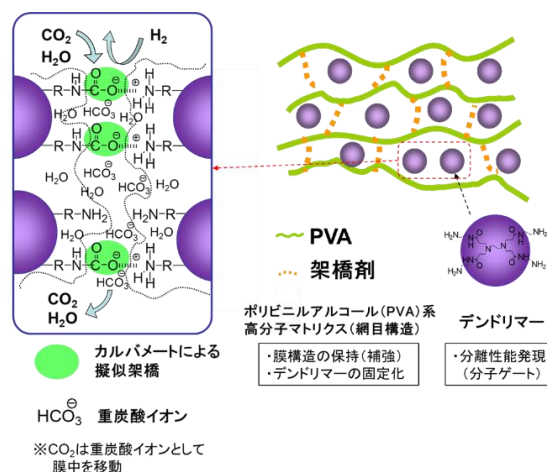


図8 分子ゲート膜の概念図

ここに示すように、透過機構としては、加湿条件で、膜中に取り込まれたCO₂が膜中のアミノ基とカルバメートや重炭酸イオンを形成し、分子サイズの小さなH₂の透過を阻害することで、従来のCO₂分離膜では分離が難しかったCO₂とH₂を効率良く分離できると考えている。また、高圧条件への適用のために、ポリビニルアルコール(PVA)系の架橋高分子マトリクスを使用し、十分な耐圧性を有する膜材料を開発した。

この成果の実用化を推進するために、現在、RITE お

よび住友化学株式会社を組合員とする次世代型膜モジュール技術研究組合(MGM 組合)において、CO₂ 分離膜、膜エレメントおよび膜分離システムの開発に取り組んでいる。これまでに 5-10cm 径、20cm 長の膜エレメントを作製し、2.4MPa の高圧下において安定な分離性能を確認し、石炭ガス化炉からの実ガスを用いた分離性能の検証試験を実施してきた。

現在の NEDO 委託事業「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／CO₂分離・回収技術の研究開発／二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発／高性能CO₂分離膜モジュールを用いたCO₂—H₂膜分離システムの研究開発」においては、これまでの成果に基づいて膜エレメントのCO₂分離性能・耐久性向上と商用サイズ膜モジュールの開発、CO₂の利用プロセスに適する膜分離システム設計等、社会実装を目指した開発に取り組んでいる。

本事業では、膜材料の耐圧性向上を検討している。改良膜材料(単膜)の分離性能の全圧依存性を図9に示す。

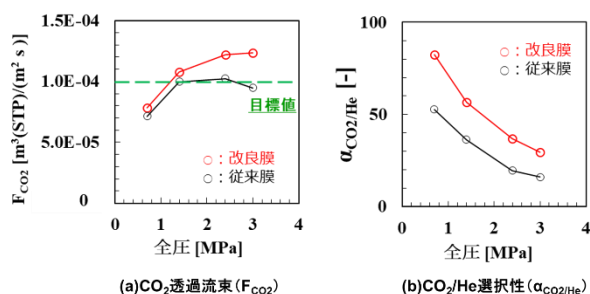


図9 膜材料(単膜)の分離性能の全圧依存性

試験条件:温度 85℃, 全圧 0.7~3MPa, 供給ガス組成 CO₂/He=40/60, 湿度 60%RH

膜材料の改良により、3MPa までの耐圧性を得ることが出来た。また、従来膜よりも分離性能が向上し、膜材料としての目標性能達成の目途が得られた。

膜エレメント開発については、エレメント長さが従来の2倍である10cm 径、40cm 長の膜エレメントの開発に成功した(図10)。今後、改良膜材料を用いた膜エレメント開発およびさらなるスケールアップ検討を実施し、商用サイズ膜エレメントの製作技術の確立を目指す。



図10 CO₂分離膜、膜エレメント(大面積の膜、支持体および流路材等の部材を一体化したもの)および膜モジュール(膜エレメントと収納容器(ハウジング)を組み合わせたもの)

6. 大気中からのCO₂回収技術

「ビヨンド・ゼロ」を可能とする技術を2050年までに確立することを目指す「革新的環境イノベーション戦略」のイノベーション・アクションプランを後押しするための制度の一つとして2020年度よりNEDO「ムーンショット型研究開発制度」がスタートした。

RITEは、この中の目標4「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」の「(1)温室効果ガスを回収、資源転換、無害化する技術の開発」において、金沢大学および三菱重工業株式会社と協力して、大気中からの高効率CO₂分離回収・炭素循環技術の開発に取り組んでいる。

大気中から直接CO₂を回収する技術はDirect Air Capture(DAC)と呼ばれている。DACはネガティブエミッション技術として期待されており、前述の「(1)温室効果ガスを回収、資源転換、無害化する技術の開発」では、他にもDACに関する研究テーマが6件採択されている。

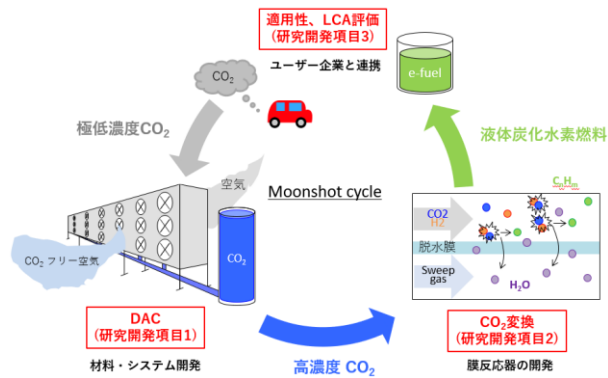


図 11 大気中からの高効率 CO₂ 回収・炭素循環技術の開発

RITEはこれまでの知見を活かし、大気中のCO₂を効果的に吸収・脱離する新たなアミンの開発を実施するとともに、大量の空気を通わせることができるように固体吸収材をハニカム等の圧力損失の少ない構造体にする技術についても検討を進めている。DAC 用に開発したアミンおよび担体を用いて、実際に RITE 周辺の外気を流通させて様々な環境を想定した性能評価試験を実施している。(図 12)



図12 DAC ラボ試験装置

更に、実機で使用されるサイズの固体吸収材構造体を評価できる DAC システム評価装置を、三菱重工エンジニアリング株式会社にて設計・製作、RITE 敷地内に設置し、スケールアップを見据えた研究開発にも着手した。

経済的に受容可能な DAC の実現に向けては材料開発だけでなく、プロセス開発も重要である。RITE では最適な運転プロセスを効率的に探索するため、シミュレ

ーション技術を活用している。

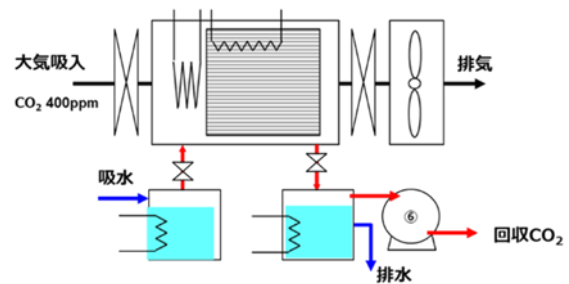


図13. DAC システム評価装置の概念図(上)と装置を設置した DAC 実験棟(下:RITE 敷地内)

7. CO₂ 分離素材の標準評価共通基盤の構築

脱炭素化に向けては、電力部門・産業部門ともに燃料やエネルギー源の転換が進むが、一定の化石燃料需要は残存し、CO₂ 排出も必然的に避けられない。そのため、比較的 CO₂ 排出量の少ない天然ガスの燃焼によって排出される CO₂ 濃度 10%以下の低圧・低濃度排ガスからの CO₂ 分離回収に対して、低エネルギー・低コスト技術の開発が必要である。RITE は、2022 年 5 月に、国立研究開発法人産業技術総合研究所と共同で、NEDO 委託事業「グリーンイノベーション基金事業／CO₂ の分離回収等技術開発プロジェクト／低圧・低濃度 CO₂ 分離回収の低コスト化技術開発・実証／CO₂ 分離素材の標準評価共通基盤の確立」を受託した。カーボンニュートラル社会実現を念頭に、世界で拡大する CO₂ 分離回収市場において国内企業の産業競争力を強化してシェアを拡大することを支援するため、新規の CO₂ 分離素材を実ガスを使って性能評価できる共通基盤の構築を実施する。

本事業は、2022 年から 2030 年までの 9 年間で予定(第 1 期:2024 年度まで)し、次の研究開発項目を実施する。(a)実ガスを用いた標準評価法の策定(実ガス試験センターの設置・運営)、(b)革新的分離素材開発に向けた標準評価法の確立、(c)耐久性評価手法の開発、(d)データベースの構築と標準評価法の普及。

RITE は、2024 年度までの 3 年間に於いて、発電所排ガスおよびボイラー排ガス等を想定した燃焼排ガスを対象とする CO₂ 分離素材を評価するために、実ガス試験評価装置を RITE 本部研究所内に設置するとともに、標準評価法の素案を策定する。

近年、カーボンニュートラルに向けた CO₂ 分離素材の開発において、世界では共通基盤の確立が進んでいるが、日本ではそのような基盤が整備されておらず、共通に評価できる装置の設置・運営体制が求められている。RITE は、本事業を通して、CO₂ 分離素材開発に関わる企業・機関が活用できる国内初の実ガス試験センターを提供する予定である。今後も我が国が CO₂ 分離回収技術において世界のトップランナーであり続けるよう、国内の CO₂ 分離素材開発の促進に貢献する。

8. CO₂ を原料とするメタノール合成技術の開発

CO₂ 有効利用技術は世界各国で CO₂ 削減に効果的であり、盛んに研究開発・実証検討が行われている技術である。一方、CO₂ の水素化による有効利用は反応により水が生成し、その水が触媒の劣化、反応速度の低下の原因となる。また、多くは発熱反応であり、反応により発生した熱を如何に効率的に除去するかも課題のひとつである。これらの課題を解決すべく、RITE では膜反応器による高効率かつ省エネルギー型の CO₂ 有効利用技術、特に CO₂ を原料としたメタノール合成技術の開発を行っている。

メタノールは化学品の基幹物質であり、今後需要の拡大が見込まれる。メタノールは、主として天然ガスの水蒸気改質反応から生成する合成ガス(CO と H₂ の混合ガス)を原料として合成されており、一般的に Cu/ZnO 系の触媒を用いて、高温・高圧条件下で反応が行われる。しかしながら、メタノール合成は熱力学的には低温・高圧

有利の反応系であり、高温域ではワンプスの収率が低い。これは以下の反応式で表される CO₂ を原料としたメタノール合成において顕著である。



この課題を解決する方法のひとつとして、図 14 に示すような膜反応器の適用が挙げられる。平衡反応であるメタノール合成において生成した水(あるいはメタノール)を反応系外に取り除くことができれば反応はメタノール生成側に促進される。

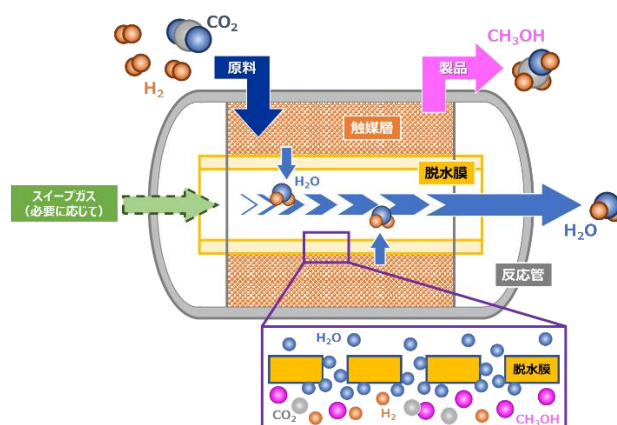


図14 メタノール合成用膜反応器の概略図

RITE ではこれまでに、高い水熱安定性と透過分離性能を兼ね備える脱水膜(Si-rich LTA 膜)の開発に成功するとともに、その新規脱水膜を適用したメタノール合成膜反応器は従来の触媒充填層型反応器よりも3倍のCO₂ 転化率を示すことを実験的に明らかにしてきた。現在は、NEDO 委託事業「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／CO₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発／化学品への CO₂ 利用技術開発／CO₂ を用いたメタノール合成における最適システム開発」にて、開発した脱水膜の長尺化を検討しており、2022 年度までに実用的な長さの脱水膜の合成に成功した。

9. 炭酸塩固定化技術

CO₂ 鉱物化(CO₂ mineralization)は、ネガティブエミッション技術の一つである風化促進(Enhanced

weathering)の要素技術であり、CO₂をアルカリ土類金属と反応させ、化学的に安定な炭酸塩として固定化する技術である。更に近年は、カーボンニュートラル社会の早期実現に向けて、CO₂を資源として有効活用する技術課題への注目が高まっており、産業分野の廃棄物や副産物に含まれるアルカリ土類金属を用いたCO₂炭酸塩固定化技術の研究開発が国内外で進められている。

RITEは、CO₂を炭酸塩として固定化する技術において、長年にわたり培ってきた独自プロセスを保有している。2020年より、民間企業と研究会を設置し、鉄鋼スラグや廃コンクリート等を対象として、これらから湿式で抽出したアルカリ土類金属を活用し、工場等より排出されるCO₂を、安定した化合物である炭酸塩として回収する技術の開発、および生成した炭酸塩の有効利用技術の開発等(図16)に協力して取り組んでいる。

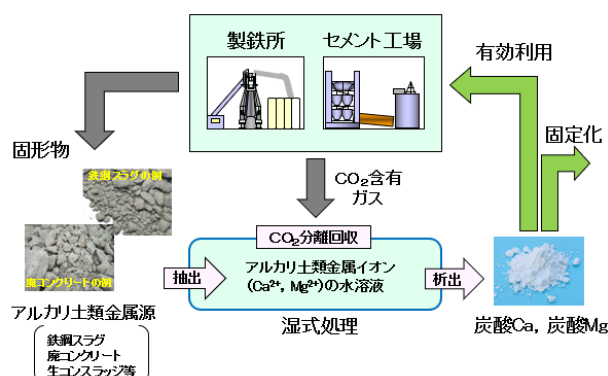


図16 CO₂炭酸塩固定化および有効利用技術

10. 実用化・産業化に向けた取り組み

産業連携部門のコアとなるのは、「産業化戦略協議会」で、民間企業計17社(2023年3月時点)と特別会員として、一般社団法人ファインセラミックスセンターが参画している。2022年度までの協議会では、メーカーとユーザー企業のビジョンを共有し革新的環境・エネルギー技術に資する無機膜産業を確立するという目的で、これまで以下のような事業を推進してきた。

【全体活動】

- ① 研究会の実施
- ② 会員限定無料セミナーの実施

- ③ 会員向けニーズ・シーズ情報の発信

- ④ シンポジウムの開催

【個別活動】

- ① 共同研究、国費事業の立案・予算申請および獲得
- ② 研究部門への研究員派遣の受け入れ
- ③ 技術相談の“優先”受付(技術評価・分析依頼)
- ④ 会員企業のニーズとシーズのマッチングを仲介

2022年度の研究会活動としては、膜反応プロセス研究会と共通基盤(性能評価等)研究会の2つの研究会を実施した。膜反応プロセス研究会では、メンブレンリアクターの社会実装に必要な、性能・エネルギー収支・コストの比較検討を可能にする計算プラットフォームの検討と会員への配布を行い、共通基盤(性能評価等)研究会では、無機膜の産業化促進を目指し、分離膜性能評価手法の標準化に向けた基礎的な検討と提案を行った。

会員限定無料セミナーはオンラインで3回開催し、大学、公的研究機関、民間企業の研究者から無機膜に関する最新の研究開発動向やニーズ、シーズの紹介、膜の実用化開発事例の紹介などの講演を行い、活発な質疑・応答が行われた。さらに、セミナー講演内容に関連する特許・文献調査を行い、その要約にRITE研究員のコメントを付記した「会員向けニーズ・シーズ情報」を会員に提供した。

2023年度からは、革新的環境・エネルギー技術に資するCO₂分離回収・有効利用技術を確立することを目的に活動内容を広げる予定である。「会員向けニーズ・シーズ情報」に加えて、国内外の動向がわかる情報を取りまとめた「会員向けホットピックス」を発行する予定である。また毎年11月に開催している「未来を拓く無機膜環境・エネルギー技術シンポジウム」は毎年2月に開催している「革新的CO₂分離回収シンポジウム」と統合して、「革新的CO₂分離回収・有効利用シンポジウム」して開催する予定である。

11. おわりに

化学研究グループでは、今後も継続して、様々な排出

源を対象とする CO₂ 分離・回収技術開発を精力的に押し進めていく。化学吸収法では実用化されている化学吸収液のさらなる普及、高度化を目指す。固体吸収法では、2023 年度から始まる石炭火力燃焼排ガス向け 40t-CO₂/day 規模のパイロット試験を確実に実行するとともに、新たに開始している天然ガス火力燃焼排ガス向けの新規吸収材開発を着実に遂行する。DAC 技術開発については、2025 年大阪・関西万博での小型実証へ向け開発を加速する。膜分離法では、商用サイズモジュールの試作完成とそれを用いた実証試験計画立案を 2023 年度に行い、開発フェーズへのステージアップを狙う。実ガス試験センターについては、2023 年度に詳細設計を行う計画である。国内 CO₂ 分離素材を研究する皆様が使いやすいセンターとなるよう、利用を予定いただく皆様から意見を広く集め設計へ反映させる。2024 年度中のオープンを予定する。

最後に、化学研究グループの将来について述べる。各テーマにおける個々の研究課題に精力的に取り組み、実用化ステージに近いものは、スケールアップ検討や実ガス試験を通して早期の技術確立、社会実装を目指し取り組んでいく。低濃度の CO₂ 排出源にも対応できるよう技術開発を進める必要がある。脱炭素化に向けた持続可能開発シナリオで CO₂ 回収の寄与が大きく期待される DACCS などのネガティブエミッション技術にも力を注ぐ。CO₂ 濃度が低くなると、その分処理すべきガス量が増大し、また酸素濃度も高いため、今後はより低コストで劣化耐性の高い材料開発とそれに対応したシステム開発が重要であろう。これら技術開発を一層に加速させ、より省エネルギーで低コストが可能な CO₂ 分離・回収技術を早期に社会実装できるよう取り組んでいく。

分離・回収した CO₂ の有効利用(Utilization)やそのために必要となる水素製造技術への取り組みも推進する。鉄鋼スラグや廃コンクリート等への CO₂ 炭酸塩固定化技術開発に加え、今後は、CO₂ を燃料や化学原料にリサイクルする新たな探索研究にも力を入れていきたい。

CO₂貯留研究グループ

グループメンバー(2023年4月)

グループリーダー・主席研究員	薛 自求	主任研究員	麻島 健
サブリーダー・主席研究員	梅田 信雄	主幹	淵上 聡子
主席研究員	横井 悟	主任	中西 公美子
主席研究員(兼)	野村 真	研究員	三善 孝之
副主席研究員	高須 伸夫	研究員	小谷 雅文
副主席研究員	中島 崇裕	研究員	永田 丈也
副主席研究員	名井 健	研究員	Amer, Rasha
副主席研究員	橋本 励	研究員	曹 金榮
主任研究員	三戸 彩絵子	研究員	沖本 竜太
主任研究員	利岡 徹馬	研究員	峰崎 智成
主任研究員	高野 修	研究員	穂積 章一郎
主任研究員	内本 圭亮	研究助手	平井 順子
主任研究員	小牧 博信	研究助手	辻 志織
主任研究員	指宿 敦志	研究助手	氷見 悠子
主任研究員	渡辺 雄二	研究助手	西出 朱美
主任研究員	張 毅	研究助手	奥道 恵美
主任研究員	朴 赫	研究助手	佐々木 恵
主任研究員	末国 次朗	研究助手	佐々井 登喜男
主任研究員	山下 裕士	研究助手	日高 奈江

CO₂地中貯留の実用化へ向けた技術実証、情報発信と技術支援

1. はじめに

2023年3月に国が取りまとめた「CCS長期ロードマップ」では、2050年時点のCO₂地中貯留規模が1.2～2.4億トンとなっている。2030年のCCS事業開始を目指して、法制度をはじめCCS実用化の環境整備を急いでいる。また、CCS事業の安全性確保と同時に、コスト低減等の技術開発も求められている。

我が国におけるCO₂地中貯留技術開発は、2000年代前半の新潟県長岡市郊外の小規模実証試験(計1万トンのCO₂圧入)を皮切りに、2010年代前半までに様々な基盤技術が開発されてきた。その後、北海道苫小牧沖では計30万トンの大規模CO₂圧入実証試験が行われた。

CO₂貯留研究グループは、二酸化炭素地中貯留技術研究組合の一員として、100万トン/年規模のCO₂貯留技術の実用化に取り組んでいる(NEDO委託事業「安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の開発研究」)。

本事業の主眼は、CCS事業の安全性や経済性の向上のための技術開発とCCS普及のための条件整備であり、これまでに、圧入安全管理システムや光ファイバーによる分布式温度(DTS:Distributed Temperature

Sensing)、ひずみ(DSS:Distributed Strain Sensing)および音響(DAS:Distributed Acoustic Sensing)測定技術、貯留効率向上のためのマイクロバブルCO₂圧入技術などを開発してきた。現在は、国内外サイトでの技術実証試験を進めている。また、CCS技術の社会実装に向けての社会受容性向上手法の開発等にも取り組んでいる。

光ファイバー測定技術に関しては、米国内の大規模CO₂圧入サイトでの有効性検証や国内CCS事業への実適用に向けての計測システム運用等のノウハウの蓄積も進めている。排出源と貯留サイトのマッチングや国内CCS事業の経済性向上(コスト削減)の検討では、既存の地質情報や地下探査データを基に、“Storage Resource Management”(SRM)手法を検討しており、従来の貯留ポテンシャル評価に加えて、最適な事業計画検討が可能なCCSコスト試算ツールも開発している。また、従来のPA(Public Acceptance)やPO(Public Outreach)を発展させ、国内CCS事業に役立つ社会合意形成(SLO:Social License to Operate)の手法を開発している。

2. 主な研究課題と成果

2.1. 光ファイバー測定技術開発と技術実証

CO₂地中貯留では、圧入されたCO₂が地下に安全に貯留されていることを示さなければならない。そのためには、地下のCO₂分布範囲の把握に加えて、地層圧の上昇に伴う地層変形、圧力影響範囲の監視、CO₂漏洩検知を目的とした坑井やCO₂パイプラインの健全性監視等が必要である。これらの監視を効果的に実施できる技術として、光ファイバー測定技術が有望である。

光ファイバー測定技術は、光ファイバーそのものがセンサーとなるために、光ファイバーケーブルの長さ方向に連続的にデータ計測ができる。また、複数の光ファイバーを束ねた一本の光ファイバーケーブルを設置することで、温度・ひずみ・音響をすべて捉えるマルチセンサーとして利用でき、それぞれのセンサーやシステムを設置する場合に比べて大幅なコスト削減が期待できる。

当研究グループでは、室内試験および現場試験を通じて同技術の研究開発を進めており、現在では国内外サイトにおいて実証試験を実施中である。国内サイトでは、開発した光ファイバーケーブルの性能評価に加えて、複数坑井での圧入など実事業を想定したCO₂圧入環境下での光ファイバー計測の有効性検証を進めている。また、米国ノースダコタ州CCSサイトでは、マルチセンシング型CO₂地中貯留モニタリングシステムの技術実証として、一本の光ファイバーケーブルを用いた温度・ひずみ・音響の同時計測を実施している。以下では、米国ノースダコタ州CCSプロジェクトについて紹介する。

米国ノースダコタ州CCSプロジェクトでは、エタノール製造工場から回収される年間約18万トンのCO₂を地下深部約2,000mの塩水性帯水層に圧入している。2022年6月中旬から圧入を開始し、2023年3月末現在、約10万トンのCO₂が貯留されている。

同プロジェクトのCO₂モニタリングは、我々の光ファイバー測定技術が用いられている。図1はCO₂貯留サイトと光ファイバーモニタリングシステムの概要図を示している。4本の坑井(圧入井、観測井、浅部地下水観測井×2)とCO₂輸送パイプラインには、光ファイバーケーブルが設置され、DTS(温度)、DSS(ひずみ)およびDAS

(音響)の同時計測を実施している。各計測システムの役割を表1にまとめた。

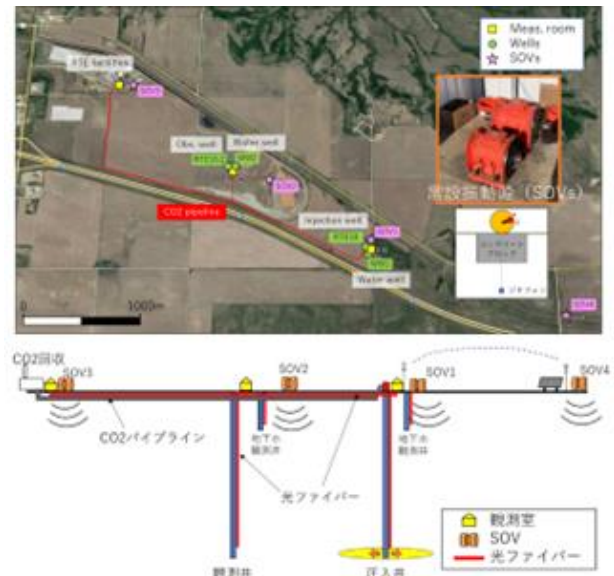


図1 光ファイバーモニタリングシステムの概要

表1 光ファイバー計測の役割

DAS (音響計測)	CO ₂ 分布状態の把握、地震観測
DTS (温度計測)	坑井・パイプライン周辺の漏洩監視
DSS (ひずみ計測)	貯留層・遮蔽層の安定性監視

地下のCO₂の広がり把握するには、2本の深い坑井に設置した光ファイバーによる弾性波探査(DAS-VSP)技術が用いられる。VSP (Vertical Seismic Profiling)探査では、坑井に受振装置を配置する探査手法であり、計測対象と受振器が近づくため、高品質なデータ取得が可能である。坑内受振器として、光ファイバーを利用することで、データ収録が高速化され、かつ繰り返し探査における受振点位置ずれによる誤差が低減できる。また、光ファイバーケーブルは直径が数ミリメートル程度であり、ケーシング背面に設置できるほかに、坑内装置のある圧入井であっても利用することができる。

地下のCO₂の広がり把握を目的とした繰り返しの3次元弾性波探査は、数年毎に実施されることが多い。この観測期間のギャップを埋めるため、頻回なデータ取得が可能な常設型の発振装置 (Surface Orbital

Vibrators: SOVs)を導入した。SOVsは、コンクリートブロック上に設置された偏芯おもり付きのモーターが高速に回転することで、地下に振動が伝わるようになっている。また、遠隔操作および自動コントロールが可能であるため、発振作業のための現場オペレーターが不要である。ノースダコタサイトでは、サイト周辺に4箇所設置し、毎日発振作業を行っている。

図2は、圧入井から約60mと約1,000mの地点にそれぞれ設置したSOVsから発振されたDAS-VSP測定結果である。横軸が深度に対して、縦軸が経過時間であり、左上から右下方向に連続する直達P波が、地表から地下(下方)に向かって伝播するのに対し、右上から左下方向に連続する波は、地下から上方へと伝播する反射波を表す。VSPデータ解析において主要なシグナルとなる反射波(上方へ伝播するP波)がS/Nよく記録されている。坑井近傍で発振されるゼロオフセット記録は、圧入開始直後のCO₂ プルームの検知に用いられ、坑井から離れたオフセットVSP記録は、CO₂ プルームの広がり把握するために利用される。現在、CO₂ の広がり把握のために、繰り返しのVSP記録のタイムラプス解析を実施中である。

図3は、圧入開始前後の圧入井におけるDTS計測結果である。カラーコンター図は縦軸深度、横軸時間に対して計測された温度を示しており、深度方向の時間的溫度変化が確認できる。圧入開始前は地温勾配を反映した深度方向の温度分布であるが、圧入開始直後は最大で約20℃も温度が低下している。これは、坑井近傍の温度よりも低い温度のCO₂ が圧入されたためである。また、圧入開始後も、短期間の温度上昇・低下が数回ほど見られる。これは、圧入を一時停止したことにより、CO₂ によって冷やされていた坑井周辺の温度が元の地層温度に戻ろうとする様子を示している。

CO₂ 圧入に伴う地層変形の監視として、坑井に設置した光ファイバーによって地下深部から地表までの連続したDSS(ひずみ)計測を実施している。ノースダコタ州CCSプロジェクトでは、衛星データを用いた地表変形監視も合わせて実施しており、地表変状(隆起)が地下深部へのCO₂ 圧入との関連性を見極めることができるよう

になっている。

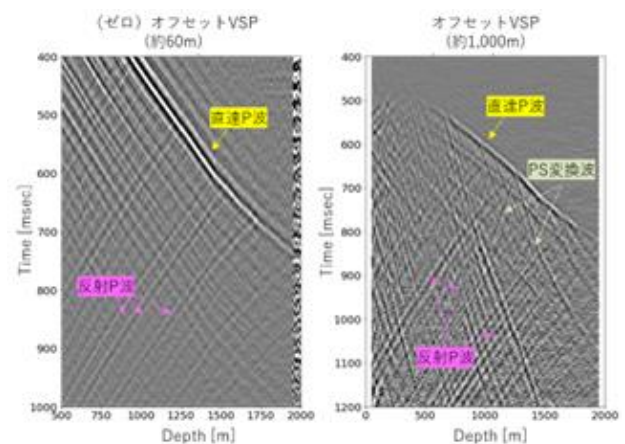


図2 SOV発振によるDAS計測結果

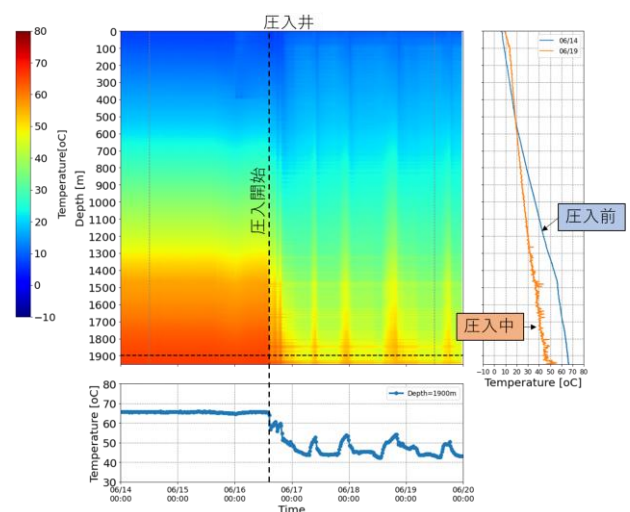


図3 圧入開始前後の圧入井のDTS計測結果

一方、豪州ビクトリア州南西部のOtwayサイトでは、光ファイバー測定技術を用いた浅部断層からのCO₂漏洩検知現場試験が進められている。図4はCO₂漏洩検知試験のために、新規に掘削された圧入井(Brumby 3)と観測井(Brumby 4)と既存の2つの坑井の配置を示す断面図である。豪州研究機関CO₂CRCの先行研究では、浅部断層破砕帯を貫く坑井を掘削し、光ファイバーを用いてDTS(温度)測定を実施した。DTS測定では設置された光ファイバー周囲の狭い範囲の温度変化しか監視できない。このため、新規掘削の2つの坑井に

は高性能のDSS(ひずみ)測定ができる新しい光ファイバーを設置した。

この光ファイバーは米国ノースダコタサイトや国内サイトでも使用されており、DSSのほかにDTSとDAS計測も実施できる。漏洩検知試験では、圧入井(Brumby 3)からCO₂ガスを圧入し、一部のCO₂が断層破碎帯に沿って地表に向かって移動すれば、観測井(Brumby 4)の光ファイバーがCO₂漏洩の挙動を検出・追跡できると期待できる。CO₂漏洩検知試験は、今夏に予定している。

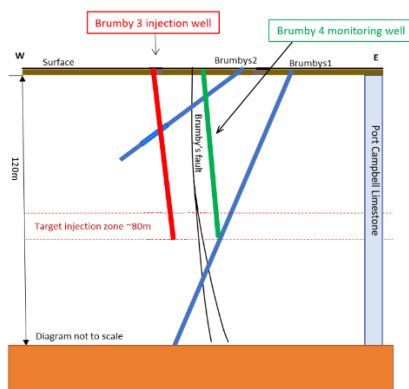


図4 Otwayサイトの坑井配置の概念図

2.2. SRM手法開発:コスト試算ツールの開発

Storage Resource Management (SRM) 手法開発では、CO₂貯留サイトにおける地下の貯留容量(リソース)を有効活用する手法と、CCS事業全体のコスト評価を行うツールの開発を行っている。CCS事業全体には、CO₂回収・輸送・貯留のステージが含まれており、様々なCO₂排出源、輸送方法、圧入量の選択肢に対応したコスト試算が可能であることを目指している。

2.2.1. ツールの特徴と構成

当研究グループでは、専門家以外でもCCS事業コストを適切に試算できるとともに、専門家にも種々のCCSのケーススタディーに利用していただけるようCCSコスト試算ツールの開発を進めている。ツールの仕様としては、個別ケースでの試算の他に、複数ケースを一括して処理できる仕組みを備えており、ケース毎の比較検討の他、ケースを組み合わせた検討も可能である。

以下に、開発中のツールについてその特徴を記す。

1)使いやすいインターフェイス:ユーザが画面を見ながら、迷うことなく適切に必要なデータの入力が行え、計算実行の指示ができるよう、入力インターフェイスに工夫を凝らしている。画面がわかりにくかったり、操作が複雑であったりすると、ユーザは正しく諸元を入力できず、それが原因で誤った結果を導いたり、操作時間の浪費に繋がったりする。そのため、平易かつ明瞭な入力インターフェイスは重要である。図5にケースの選択画面を示した。この画面から諸元確認画面の呼び出しや、計算の実行を行うことができる。



図5 ケース選択画面

また、出力インターフェイスも同様に重要である。計算結果はWeb画面上に表で出力されるが、簡単にコピー＆ペーストができるため、Excelや専用のグラフ作成ソフトに取込んで、自由にグラフを作成することができる。図6は本ツールからの出力を利用して、パイプラインを利用した場合と船舶を利用した場合との輸送量別、距離別のCCSコストを示した。なお、ここでのパイプラインは陸上型を想定している。

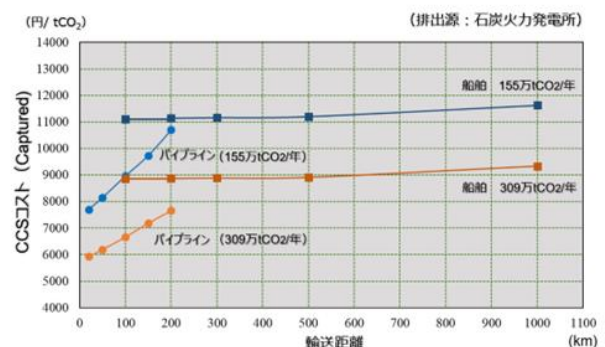


図6 パイプラインと船舶における輸送量別、距離別のCCSコスト

2)DBMS(database management system)の搭載:ユーザ別に各検討ケースにおけるデータの管理を、容易かつ安全に行うことを目的に汎用のDBMSを搭載した。また、DBMSの搭載は、インターフェイスとデータの管理部分ならびに計算エンジンとを独立させる上でも重要である。コスト試算ツールは、完成すれば一連の開発が全て終わるわけではなく、ルールの変更や追加、データの更新など継続的な保守が必要である。本ツールでは各部の独立性を高めることで保守性の向上を図っている。

3)WEBシステムとして開発:ユーザ側に特別なソフトや更新等の操作は必要なく、ブラウザだけで利用できる。また、計算は全てサーバ上で処理されるため、ユーザPCの能力やプラットフォームに影響されない。そのため、会議室でスマホやパットを利用して、特定の諸元を変えて再計算する等にも、対応が可能である。

2.2.2. 開発の進捗状況と今後の開発計画

図7に、これまでに搭載済みのモジュール(赤枠)と開発予定のモジュール(青枠)を示した。

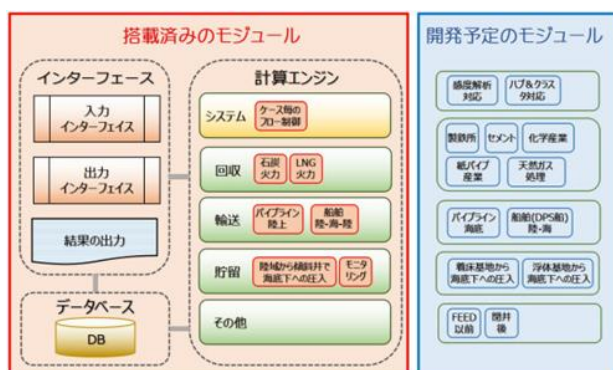


図7 これまでに搭載済みのモジュールと開発予定のモジュール

回収では、石炭火力発電所とLNG火力発電所が搭載済である。輸送では陸上パイプラインならびに、船舶輸送のうち陸から荷積みして海上を輸送し、再び陸に荷揚げするパターンの計算が可能である。貯留では陸から傾斜井で海底下にCO₂を圧入するパターンの計算ができる。今後は、図の右側に示したモジュールについて、順次作り込みを行う予定である。その中には、各工程のコスト計算のほか、感度解析やハブ&クラスターといった、基

本機能を拡張した計算機能も追加してゆく予定である。

なお、第一段階の開発(2023年度末まで)においては、CCSに要する費用の試算に特化する予定であるが、将来的にはインセンティブも考慮した経済性指標等の算出機能も搭載し、ビジネスモデルの検討にも利用できるように開発を進める計画である。

2.3. 社会合意形成(SLO)手法の開発

CCS事業を実施するには、地元を含む社会の合意が必要不可欠である。地元住民がCCSの必要性を理解し、事業を支持するために、事業者が地元住民とどのようにコミュニケーションを取るべきなのかが社会合意形成(SLO)手法の重要な課題の一つである。

事業者と地元住民のコミュニケーションという観点から見たCCS事業の大きな特徴は、一般市民のCCSに関する認知度が極めて低いということである。最近行われた認知度の調査では、「CCSを知っている」と答えた人は14%、「CCSという言葉聞いたことがある」と答えた人は42%で、半数近い人がCCSという言葉すら聞いたことがないという状況であった。このためCCS事業の初期のコミュニケーションでは、CCSの認知度を上げること、すなわち地元住民にCCSを知ってもらうことが主たる目的となる。

オランダのBarendrechtプロジェクトは地元住民の反対で中止になったCCS事業として有名である。住民の反対の要因として、手続きの公正性や信頼など、リスクコミュニケーションにおいて重要とされることがいくつも欠如していたことが指摘されている。しかし、ここで注目するのは住民がCCS(事業)を十分に理解していなかったと考えられる点である。当初、住民は利害関係者と見なされず、情報の提供が十分ではなかった。また、住民の反対が顕在化した後は、公的な情報提供が住民から「CCS派のプロパガンダ」とみなされ、住民への情報提供が十分機能しなかった。住民が十分な情報を得ていないということから、住民の反対がCCSや事業の理解に基づくものではなかった可能性が考えられる。すなわち、信頼できる人(著名人やメディアなど)や多くの人から耳にする情報を基にして反対した可能性がある。こ

のような場合には、誤った情報を基にして判断が行われることもある。実際、Barendrechtのケースでは、火山の噴火のようにCO₂が街に噴出するという現実には起こり得ない絵が雑誌の表紙になったりもしている。事業初期にCCSの認知度を高めることの重要性の一つは、CCSやCCS事業を理解した上で、事業に対する賛否を判断できる人を増やすことである。

コミュニケーションに関する文献では、事業者が一方的な説明(一方向コミュニケーション)をするのではなく、住民・市民の意見を聞き、対話すること(双方向コミュニケーション)が重要と指摘されている。しかし、これはCCS事業初期のコミュニケーションには必ずしも当てはまるとは限らない。対話の機会を作ったとしても多くの人は積極的に参加しないおそれがある。社会的な課題に対しては「自分の貴重な時間や労力を割いてまで解決に向けて協力しようとは思わない」人が多いという指摘もある。また受動的な(一方向)コミュニケーションの方が良いと感じる人もいる。双方向コミュニケーションでは、何か意見を述べなければならないと思い、精神的負担が大きいと感じるということと思われる。このため、事業初期のコミュニケーションでは、一方向か双方向かよりも、参加の負担が小さく、参加しやすいことが重要と考えられる。

科学技術の普及、特に、科学技術への関心が低い人に科学技術に親しみをもってもらうための科学イベントとして、講演会や展示会、サイエンスカフェなどがある。CCS事業の初期のコミュニケーションイベントにおいても、参加の負担が小さいことからこれらの科学イベントが適している。しかし、科学イベントの多くは、その目的に反し、科学技術に関心の低い人の参加率が極めて低いことが知られている。ただし、科学イベントでも、個人的利害に関わるテーマや生活に直結するテーマであれば科学技術に関心の低い人の参加率が上がる。このことから、CCS事業の初期のコミュニケーションイベントは2種類、すなわち、科学技術に焦点を当てたイベントと生活に直結する事柄に焦点を当てたイベントを開催する必要があると考えられる。

また、参加のしやすさという観点からはイベントをオ

ンラインで行うことも効果的である。コロナ禍により、それまで対面で行われていたイベントの中には、オンラインで行われるようになったものもあるが、オンライン化により対面イベントでは参加の少なかった層が参加するようになったという報告がある。ただし、オンラインイベントは参加も気軽にできる反面、集中して見なかったり、途中で見るのをやめたりすることが起きやすいという短所もある。

なお、ここまで述べてきたのは、あくまでも事業初期のコミュニケーションであり、事業の計画が具体化していくにつれ双方向コミュニケーションの重要性が増していく。事業者が決定したことを住民に説明し受け入れてもらうということではなく、事業者は双方向コミュニケーションで住民と対話し、その結果を意思決定に反映させることが必要であり円滑な事業実施に重要となる。また、CCSやCCS事業の認知度を上げるためには、このようなイベントと並行して、事業初期からwebやSNS、パンフレットなどを使った広報活動も必要である。

当研究グループでは、住民にCCSについて説明したり、住民からの質問に回答したりする際に参照できるQA集の作成も行っている。一般市民がCCSに対して感じる不安や懸念の主たるものはCO₂の漏出と地震の誘発と言われている。そのため、QA集ではこの2つに特に重点を置いている。A(回答)は、当研究グループのこれまでの研究開発成果を含む科学的知見に基づいた内容ではあるが、予備知識が無くても理解できるよう説明になるよう努めている。

住民・市民の「合意」には、CCS技術そのものを理解してもらうことが重要であり、CCS事業を行うことによるメリットを知ってもらうことも重要である。海外のCCS事業では、事業実施による投資額や雇用者数の増加について紹介している。商業規模といわれる100万トン/年程度の設備では、おおよそ1,000億円の設備投資額が見込め、雇用効果は、建設時に数千人、操業時に数十人の規模と報告されている。米国では、石炭火力発電所を廃止せずに、CCSを実施することにより、失業や地域産業の過疎化を防ぐ効果があることも示されている。当該地域では、石炭火力発電所に隣接して、炭鉱がある。

地域住民のほとんどが発電所や石炭産業に関わりを持っているため、石炭火力発電所の閉鎖は地域住民のみならず、自治体の存続にも悪影響が及ぶ。我が国においても、CO₂大量排出源である製油所、製鉄所、石炭火力発電所などの休廃止により、地元自治体の税収が激減することが懸念されている。脱炭素化のオプションとしてのCCSは持続可能な地域運用に貢献でき、地元へのメリットが十分にある。

CCSの事業化には、国内各地域の状況にあったCCSビジネスモデルを想定する必要がある。CO₂排出量を把握するために、排出源データベースを作成した。CO₂排出量は火力発電所要覧、温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度に基づく温室効果ガス排出量の集計結果などから換算して、直接排出量として整理した。排出源データベースには位置情報を含み、地図上で示すことができる。個社では排出量が少ない場合でも、地域クラスターとして排出源をまとめることにより、ハブ＆クラスター方式のCCSの検討に役立つ。排出源マップとRITEが所有するCO₂貯留地の賦存量マップを統合し、事業イメージを可視化しやすくなるよう、工夫した。さらに、港湾情報を付加したことにより、排出源から貯留地までの輸送経路を陸路のみならず航路を含めて計画することを可能にした。現在、CCSのコスト試算ツールも開発しており、経済性の観点からも、CCS実施メリットを検討できるようSLO手法をとりまとめている。

リンクをクリックすると RITE ウェブサイトの該当ページが開きます。

[プレスリリース](#)

[イベント情報](#)

発表論文一覧

●● [システム研究グループ](#)

●● [バイオ研究グループ](#)

●● [化学研究グループ](#)

●● [CO₂貯留研究グループ](#)

その他の活動

◆環境教育(校外学習の受け入れ)

実施日	対象者	人数
2022 年 7 月 29 日	京都府立西舞鶴高等学校 理数探求科 2 年生	15
2022 年 11 月 22 日	奈良県立奈良北高等学校 数理情報科 2 年生	17
2023 年 1 月 20 日	精華町立精華南中学校 2 年生	7

◆環境教育(小学生・一般向けワークショップ)

実施日	イベント名	人数
2022 年 8 月 2 日、 4 日、5 日、8 日、10 日	将来のエネルギーについて考える工作・実験ワークショップ	121
2022 年 8 月 22 日	夏の思い出作ろうよ！精華町体験型モニターツアー	13
2023 年 2 月 23 日	けいはんな科学体験フェスティバル 2023 「実験とクイズで学ぼう！地球温暖化」	25

掲載年月日	見出し	掲載紙名
2022.1.31	高炉・転炉法でのエネ効率／日本鉄鋼業、世界最高を堅持／RITE調査	鉄鋼新聞
2022.1.31	国内転炉鋼／19年時点 中・印改善、差縮める／エネ効率、世界最高維持	日刊産業新聞
2022.2.2	国内鉄鋼 世界最高水準 エネ効率 RITE分析レポート 鉄連が公表	日刊工業新聞
2022.2.28	経済教室 COPグラスゴー合意後の展望(上) 経済との両立が大原則 秋元圭吾・地球環境産業技術研究機構主席研究員	日本経済新聞
2022.3.4	電炉製造エネルギー効率 日本、世界最高を維持 RITE調査	鉄鋼新聞
2022.3.4	日本の電炉鋼／エネ効率が世界最高水準／RITE調査、19年時点	日刊産業新聞
2022.3.25	[編集企画][ウクライナショック]どうする？ 日本のエネルギー戦略(6) 地球環境産業技術研究機構(RITE)理事長・研究所長 山地憲治氏	電気新聞
2022.4.8	無機膜反応器を開発 メタン水素化やCO ₂ 資源化 RITE、大規模実証先を募集	化学工業日報
2022.6.21	鉄鋼業「カーボンニュートラルへの道筋」／30年度目標、排出原単位削減も重要／地球環境産業技術研究機構(RITE)／ 秋元圭吾主席研究員／移行期に政府の支援必要	鉄鋼新聞
2022.8.18	大阪で温暖化対策技術シンポ	化学工業日報
2022.8.31	[語る]岸田政権の課題 電力確保 原発は外せない 秋元圭吾氏52	読売新聞
2022.9.21	大気からCO ₂ 直接回収 NEDOなど開発 技術確立へ試験装置	電気新聞
2022.9.21	大気中のCO ₂ 、1日数kg回収 NEDO・RITE・三菱重工エンジンが小型試験装置	日刊工業新聞
2022.9.21	CO ₂ 固体吸収材評価に着手 三菱重工エンジンなど DAC小型試験装置	化学工業日報
2022.10.27	NEDOら CO ₂ 回収の評価開始 京都に小型試験装置設置	電子デバイス産業新聞
2022.11.2	石炭排ガス、最大1.1兆円 CCS事業コスト 計画から閉鎖まで エネ庁提示	電気新聞
2022.11.9	脱水膜でメタノール合成 種結晶の質向上・長尺化で実用化へ RITE、無機膜シンポ開催	化学工業日報
2022.12.1	時流読解・CCS(CO ₂ 回収・貯留)30年事業開始へ	建設通信新聞
2023.1.15	RITE「革新的環境技術シンポジウム2022 ～2025年カーボンニュートラルを支えるイノベーション～」	ガスレビュー
2023.2.16	RITEが固体吸収材 60℃でCO ₂ 放出 未利用排熱使用の回収システム活用	日刊工業新聞
2023.3.1	RITEとMGM組合「革新的CO ₂ 分離回収技術シンポジウム」開催	ガスレビュー

リンクをクリックすると RITE ウェブサイトの該当ページが開きます。

[特許紹介](#)

- バイオリファイナリー関連分野
- 二酸化炭素分離・回収関連分野
- 無機膜関連分野
- 二酸化炭素圧入関連分野

RITE Today^{2023 Vol.18}

Annual Report



公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

URL: www.rite.or.jp

Email: pub_rite@rite.or.jp

〒619-0292

京都府木津川市

木津川台9丁目2番地

TEL.0774-75-2300

9-2 Kizugawadai,

Kizugawa-shi, Kyoto

619-0292 JAPAN

TEL.+81-774-75-2300