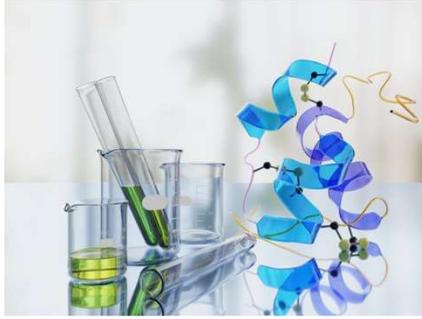


RITE Today 2024 Vol.19

Annual Report

公益財団法人 地球環境産業技術研究機構 年次報告書 2024年版 第19号



■ 特集 ■ 新規国家プロジェクト(GI基金、バイオものづくり革命)の獲得と今後の研究開発の展望について

RITE Today

2024 Vol.19

Contents

巻頭言

- CCS事業法の成立が、日本におけるCCSの社会実装の大きな転換点となる 3
●● 公益財団法人深田地質研究所 顧問 松岡俊文

特集

- 新規国家プロジェクト(GI基金、バイオものづくり革命)の獲得と今後の研究開発の展望について 4

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 10
- 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ものづくり技術の開発 30
- 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 38
- 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 49

プレスリリース

59

イベント情報

59

発表論文一覧

59

- 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

59

主な新聞記事

60

特許紹介

62



CCS 事業法の成立が、日本における CCS の社会実装の大きな転換点となる

公益財団法人深田地質研究所
顧問 松岡 俊文

二酸化炭素回収・貯留(CCS)技術は、大気中の CO₂ 濃度上昇を抑制し、地球温暖化対策に貢献する重要な技術の一つと位置付けられている。RITE では、設立以来 30 年近く CCS の研究開発を進めてきた。CO₂ の分離・回収技術や、地中貯留に関する基盤技術の開発は、新潟県長岡市での実証試験などを通じて、着実に技術を実用化レベルまで高めてきたと評価されている。

そして今、CCS は新たなステージを迎えようとしている。第 213 国会で「二酸化炭素の貯留事業に関する法律」(CCS 事業法)が成立したのである。CCS 事業法の成立は、日本における CCS の社会実装の大きな転換点となるだろう。CCS 事業法は、CCS を実施する上での許可制度や CO₂ 所有権などを定める法的枠組みを提供するものである。今後は、我が国においても、民間企業による CCS プロジェクトが加速し、2030 年頃には商用規模での CCS 開始が期待される。さらに CCS を新たな産業として確立するためには、技術開発と併せて、経済性の確保、社会受容性の醸成など、多岐にわたる課題への取り組みが不可欠である。日本でも CCS 事業法の成立を機に、CCS バリューチェーンを担う企業群の育成を進め、将来的な海外展開も視野に入れた産業基盤の確立を目指すべきである。

また CCS の社会実装が本格化すれば、2050 年のカーボンニュートラル実現に向けて大きく前進する。IEA の分析でも、CCS は 2050 年に年間 36 億トンから 72 億トンの CO₂ 削減に寄与すると見込まれている。日本でも、経済産業省が 2050 年までに年間 1.2 億トンから 2.4 億トンの CO₂ を CCS で削減する目標を掲げている。このような大規模な CCS の実施にあたっては、地下に CO₂ を安全に貯留するためのリスク管理が重要である。地下の地質状況を正確に把握し、それを基に圧入後の CO₂ の長期的な挙動をシミュレーションした上で、最適な貯留サイトを選定する必要がある。さらに、貯留層に対して継続的なモニタリングを行い、CO₂ が意図した通りに貯留されていることを確認しなければならない。この分野における RITE の研究開発成果や、国内外で行われた実証試験で得られた知見は、今後の CCS 事業でのリスク管理に活かされるだろう。

CCS 事業の実施には、技術的な安全性の確保に加えて、地域社会の理解と協力を得ることが不可欠である。CCS が温暖化対策の切り札として、また新たな産業として日本に根付くためには、技術的な課題解決とともに、社会の信頼を得ながら一步一步前進していくことが肝要である。さらに、CCS 事業の健全な発展のためには、技術者のみならず、地球環境問題や社会受容性など、多角的な視点を持った人材の育成も重要である。官民が連携して、CCS 関連の教育や人材育成に力を注ぐことが求められる。RITE の役割はこの点からも重要である。RITE が今まで行ってきた多くの研究開発成果が、CCS を気候変動対策と経済成長を両立する鍵となる技術として、日本と世界に貢献できる日が訪れることを心から願ってやまない。

新規国家プロジェクト(GI 基金、バイオものづくり革命)の獲得と今後の研究開発の展望について

バイオ研究グループ

グループリーダー・首席研究員
副主席研究員
主任研究員

乾 将行
平賀 和三
久保田 健

1. はじめに

バイオものづくりは、持続可能な社会の実現に向けて、カーボンニュートラルへの貢献が期待されている。この技術は、生物学的プロセスを利用して、化石燃料に依存しない方法で製品を生み出すことを可能にする。例えば、微生物を使用してCO₂を直接原料とするカーボンリサイクルが挙げられる。これにより、大気中のCO₂を有用な化合物に変換し、温室効果ガスの削減に貢献することができる。また、バイオマス資源などの再生可能資源から造られたバイオプラスチックやバイオ燃料などの製品は、従来の石油ベースの製品に比べて環境負荷が低い。これらの製品の普及により、産業全体のカーボンフットプリントを減らすことが期待されている。

RITE は、これまでにスマートセル技術やバイオリファインリー技術の研究開発を通じて、バイオ燃料やグリーン化学品の生産に取り組んできたが、2023年度にグリーンイノベーション基金事業とバイオものづくり革命推進事業を受託し、持続可能な社会の実現に向けた新たな一歩を踏み出した。これらの事業では、温室効果ガスであるCO₂やバイオマス資源を原料として化学品や燃料を生み出すカーボンリサイクル技術の開発を行う。今後は、バイオものづくり技術を核として、多様なバイオマス資源やCO₂を原料として高付加価値化学品を製造する革新的なものづくり手法を構築し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献することを目指す。この取り組みは、従来の化石資源を原料とした製造プロセスを置き換える持続可能なものづくりとして、次世代の産業基盤となり得ると期待できる。

本特集では、バイオものづくりに関する世の中の動向を概観した上で、グリーンイノベーション(GI)基金事業とバイオものづくり革命推進事業におけるRITEの取り

組みについて紹介する。

2. バイオものづくりに関する世界および日本の動向

バイオものづくりは、持続可能な製造法として世界的に注目されており、欧米を中心に、この分野における競争が激化している。

米国では、バイオテクノロジーとバイオものづくりの推進に関する大統領令が署名され、今後10年以内に製造業の3分の1をバイオものづくりが置き換わるとしており、その市場規模は約30兆ドルに達すると分析されている¹⁾。このような政策により、バイオものづくりの拡大と集中的な投資が行われる方針が示されている。

欧州では、循環型社会の構築に向けた国際ルール形成を重視しており、「包装と包装廃棄物に関する新規規則案」の採択²⁾や欧州再生可能エネルギー指令(REDⅢ)の改定³⁾など、環境規制戦略によってバイオものづくりの方向性の提示とバイオエコノミーの推進を図っている。

我が国では、これまでもこの分野での競争力確保のため、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)は、バイオ技術とデジタル技術を融合した独自で効率的な遺伝子設計・組換え技術の構築を目指し、「植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発(スマートセルプロジェクト、2016~2020年度)」⁴⁾を実施し、多くの成果を創出した⁵⁾。この考え方および成果は、現在の「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(バイオものづくりプロジェクト、2020~2026年度(予定))」⁶⁾などに引き継がれている。RITEも、これらのプロジェクトに参加し、多くのコア技術を開発して、現在の技術開発に生かしている(バイオ研究グループの研究活動概説を参照)。

そのような中で、2020年10月には、菅内閣総理大

臣(当時)が、2050年までにカーボンニュートラルを目指す(温室効果ガスの排出を全体としてゼロとする)ことを宣言した。それを受けて政府は、温暖化への対応を成長の機会ととらえ、2021年6月、「グリーン成長戦略」⁷⁾を策定し、そのための予算として、NEDOに2兆円の「グリーンイノベーション基金」⁸⁾を造成した。

さらに、2022年6月には、岸田内閣総理大臣が、「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画」を発表した⁹⁾。この中で、バイオものづくりは、地球規模での社会的課題の解決と経済成長との両立を可能とする、二兎を追える研究分野であり、この分野に大胆かつ重点的な投資を行うと記載されている。

これらの方針に基づき、2023年にNEDOは、「グリーンイノベーション基金事業／バイオものづくり技術によるCO₂を直接原料としたカーボンリサイクルの推進事業」および「バイオものづくり革命推進事業」を立ち上げ、バイオものづくりの原料と製品の多様化や生産技術の高度化、さらには将来の産業構造の見通しに基づき、効率的な物質生産微生物を設計・開発する国内プラットフォームの育成などを支援している¹⁰⁾。

RITEは、これら二つの事業に企業と共同で提案・採択され、事業を遂行している。以下、これらの事業におけるRITEの取り組みについて紹介する。

3. グリーンイノベーション基金事業^{*}

3.1. 事業概要

前述のように、2020年に日本政府が掲げた「2050年カーボンニュートラルを実現」という目標に向けて、「グリーン成長戦略」が策定され、その取り組みの一つとして2021年、NEDOに「グリーンイノベーション基金(GI基金)」が創設された。そして2023年にGI基金事業の一環として、NEDOは、「バイオものづくり技術によるCO₂を直接原料としたカーボンリサイクルの推進」(予算総額1,767億円)に着手することを発表し、公募の結果、合計6テーマが採択された。従来の「バイオマス資源」を原料とした微生物によるバイオものづくりではなく、「CO₂の炭素を直接原料」として利用する点が、GI基金事業の最大の特徴である。

本事業を通じて、CO₂を原料とした新しいバイオものづくり製品の開発と社会実装により、カーボンニュートラル実現に貢献するとともに、CO₂の資源化による産業構造の変革を目指す。

RITEは、積水化学工業株式会社と共同で「グリーンイノベーション基金事業／バイオものづくり技術によるCO₂を直接原料としたカーボンリサイクルの推進／CO₂を原料に物質生産できる微生物等の開発・改良、CO₂を原料に物質生産できる微生物等による製造技術等の開発・実証／バイオものづくり技術によるCO₂を原料とした高付加価値化学品の製品化」という事業が採択され、実施中である(事業期間:2023~2030年度の8年間)。

3.2. CO₂等の微生物利用によるものづくりへの挑戦

RITE／積水化学工業株式会社が本事業で用いる酢酸生成細菌(CO₂資化菌など)は、ガス固定を可能とする既報の7種の代謝経路の中では最も少ないATPのエネルギー消費で効率的にガスを固定できる特徴を有する。従って、ガスを原料として効率的に増殖し、有用物質を生産可能である。デメリットは、酢酸生成菌の多くが絶対嫌気性菌であり酸素を嫌うため、専用の嫌気培養設備と、培養のノウハウが必要である点や、酢酸生成菌からスマートセルを構築する際には、独自の遺伝子組換えツールと技術の開発が必要である点などが挙げられる。これらについては、RITEがGI基金事業で専用建屋を建築して専用設備・装置を導入し、研究開発することによって解決する。

RITEは長年、コリネ型細菌を用い、様々なバイオマス資源由来の糖原料から様々な有用化学品やバイオ燃料の生産を可能としてきた。本事業により、RITEは、「ガス原料」から「新しい微生物」を用いた、新しいバイオものづくりに挑戦する。

3.3. RITEの実施テーマ

RITE／積水化学工業株式会社が行う本事業の研究開発イメージを図1に示した。CO₂を、積水化学工業株式会社が化学触媒でエネルギー準位が高い(生物が利用

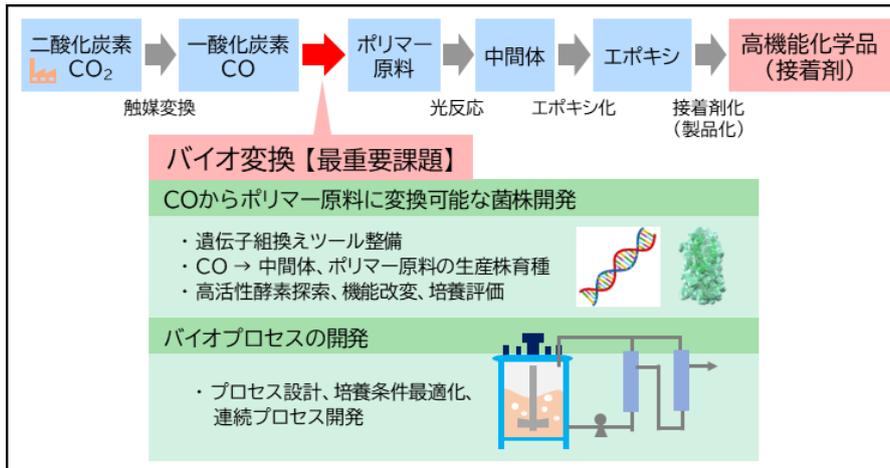


図1 バイオものづくり技術によるCO₂を原料とした高付加価値化学品の製品化イメージ

しやすい)CO に高効率変換し、RITE は、CO から酢酸生成菌(CO 資化菌など)等を用いたバイオプロセスによってエポキシ樹脂の原料となるポリマー原料に変換する。得られたポリマー原料は、積水化学工業株式会社が光二量体化、エポキシ化を経て耐熱性接着剤を製造する。この高付加価値な耐熱性接着剤は、スマートフォン、航空機、自動車などの耐熱性が求められる部材の特殊な接着に用いられる。使用後は、燃焼して CO₂ にして同じスキームで資源循環のサイクルを回すことが可能である。接着剤の製造コストは、現行品比 1.2 倍以下の実現を目指す。

RITE は、これまでに培ってきたスマートセル技術とバイオ生産技術を活かし、酢酸生成菌の一種である CO 資化菌などを用いて、最重要課題である①COからポリマー原料に変換可能な菌株の開発(CO 資化菌の遺伝子組換えツールの開発、CO から中間体やポリマー原料の生産株構築)と、②ポリマー原料の生産を可能とするバイオ生産プロセスの開発(プロセス設計、培養条件の最適化、連続プロセス開発)等を主にラボスケールで行う。

3.4. 今後の展望

我が国のごみ焼却施設は「完全燃焼型」のものが多く、定法によって NO_x、SO_x を除去すれば CO₂ を主成分とする排ガスを得ることができる。このような設備は国内に約 1 万か所あることから、本事業で開発した技術は全国のごみ処理施設へと展開できる可能性を秘めてい

る。また、ごみ焼却施設以外にも製鉄所、火力発電所、工場などから排出される CO₂ を効率よくバイオものづくりに利用できるようになれば、カーボンリサイクルの推進に貢献できるとともに、バイオマス資源由来の糖などを原料とするよりも、国内での炭素固定化やバイオマス資源運搬時の CO₂ 排出削減にも寄与できる可能性がある。可食や非可食バイオマス資源が豊富ではない日本においては、大気中の CO₂ を資源として活用できることは、将来の原料を確保する観点からも有利である。

将来的には、CO₂から様々な高付加価値化合物を高濃度・高収率で連続バイオ生産可能とする技術開発や、化学法では異性体の副生などによって製造が困難な高機能かつ高付加価値な化合物を、CO₂原料から選択的にバイオ生産可能とする技術開発などへの新展開が期待される。

4. バイオものづくり革命推進事業*

4.1. 事業概要

2023 年度から NEDO が新たに開始した「バイオものづくり革命推進事業」では、多様な原料を入口とし多様な製品を出口としたバイオものづくりのバリューチェーンの構築に必要な技術開発を実施する。これにより、バイオものづくりへの製造プロセスの転換とバイオ由来製品の社会実装を推進することで、経済成長と環境問題などの社会課題の解決を目指す。事業では、バイオものづくり原料の調達のための技術開発を行うとともに、バ

イオ由来製品の付加価値の源泉を握る微生物改変プラットフォームの育成や微生物等の改良技術の開発、量産化のための製造技術開発・実証等を行う。

本事業に対し、RITE は代表提案者として、共同提案者である高砂香料工業株式会社、帝人株式会社と共にバイオ由来製品の社会実装を強力に推進する開発計画を提案し、採択された。

4.2. 実施テーマ

採択された事業である「未利用原料から有用化学品を産み出すバイオアップサイクリング技術の開発」では、RITE は、生産株育種技術の開発と菌株開発拠点の整備を行い、高砂香料工業株式会社と帝人株式会社は、それぞれが得意とする産業分野において、バイオ香料とバイオ高機能繊維の実用化開発を行う。

この事業では、世界のバイオものづくり分野の研究開発に比して独自性と産業競争力を持った成果を挙げるため、次に示す項目に焦点を当て研究開発を行う。

①食品廃棄物や、現在廃棄されている余剰バイオマスを国内未利用資源と位置づけ、これを利用するための「未利用資源の原料化」を実施する。

②様々な未利用資源由来の原料を利用でき、さらに生物に毒性を示す物質までも生産可能とするための「高機能生産菌の育種技術開発及びそれを可能にする拠点整備」を実施する。

③大規模生産技術と、生産途中、生産後の培養液に含まれる目的物を効率良く取り出し精製する技術を確立することで、これまで不可能であった「毒性を示す有用化学品の製造技術開発・実証」を実施する。

④未利用資源からのバイオ由来製品製造プロセスについて LCA を実施し、従来の石化法からバイオ法への変換による CO₂ 削減効果などの環境性能を明確化する(図 2)。

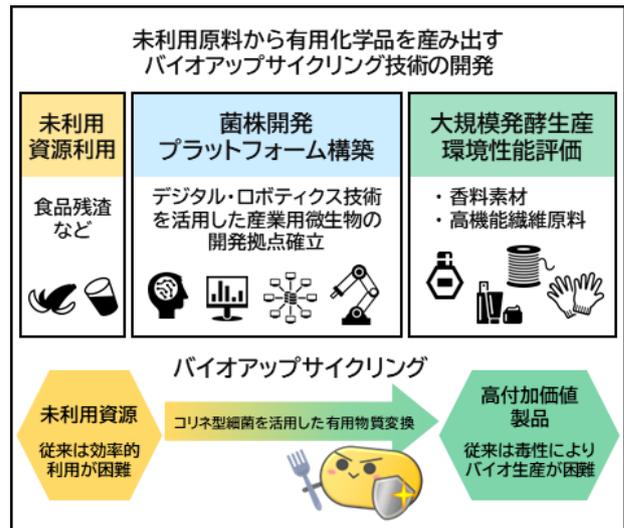


図 2 実施テーマ概要

4.3. RITE による微生物開発プラットフォームへの挑戦

プラットフォームとは、個人や企業などのユーザーがビジネスを展開する時、その基盤となるサービスを提供する企業・組織のことである。ユーザーの数が増えるほど、プラットフォームに蓄積される情報が増え、それを分析・活用することによってビジネスを拡大させることができる。Amazon、Google、Apple がプラットフォーム事業者の代表例であり、それぞれの分野に巨大な影響を与えている。ここで言う微生物菌株開発プラットフォームとは、微生物発酵を利用した物質生産技術の事業化の際の核となる、「高性能な物質生産菌株の開発」というサービスを提供する組織を指している。

RITE は、国家プロジェクトや企業共同研究でこれまで様々な物質生産菌株の開発を行ってきた。このような菌株開発は、高度なバイオテクノロジーを要求するため経験のない企業では初期投資や技術者の育成、ノウハウ習得など極めてハードルが高い。その結果、バイオものづくり産業への参入を望みながらためらう企業が数多く存在する。これらの企業が望む物質生産菌の開発を受託し、提供することが微生物開発プラットフォームの役割であり、その存在は製造プロセスのバイオものづくりへの転換とバイオ由来製品の社会実装を強く推進する。現在、日本においてバイオものづくり産業に参入を希望

する企業から菌株開発依頼を受け事業化につながる生産菌株を開発可能な企業・組織は、極めて限られている。RITE は、これまで蓄積してきた微生物発酵生産技術をフルに活用し、微生物開発プラットフォームとしてバイオ産業全体を活性化させる組織となることを目指す。

4.4. 今後の展望

バイオテクノロジー活用への期待は極めて大きい。環境問題と国内経済成長の二つの課題を同時に解決可能な、未利用資源を利用したバイオものづくりへの変革が強く望まれている。微生物開発プラットフォームはこのような変革を果たすための重要な役割を期待されており、特に RITE の微生物開発プラットフォーム (RITE プラットフォーマー) には次のような貢献が期待される。

①新たな微生物機能の発見と改良：RITE プラットフォーマーは、新たな微生物、微生物機能を探求し、有用な特性を持つ菌株を発見する役割を果たす。これにより、既存の微生物をさらに改良して、より効率的で環境に優しいバイオプロセスを実現することも期待される。

②持続可能な資源の利用：RITE プラットフォーマーは、再生可能な原料を活用するための微生物を開発することが求められる。特に非可食や廃棄されているバイオマスを原料として生産される、例えばバイオ燃料などは、持続可能なエネルギー源として注目される。

③産業界との連携：RITE プラットフォーマーは、産業界と連携して実用的なソリューションを提供する役割を期待されている。新規開発した生産微生物を用いた応用研究や生産実用化を、企業と協力して推進することが求められる。

④人材育成：RITE プラットフォーマーは、次世代の研究者や技術者を育てる役割も担う。可能な範囲での研究成果の共有により知識を広めバイオテクノロジーの発展に努めることが求められる。

RITE プラットフォーマーは、公益財団法人の特徴を活かし、利害関係のない状態で研究開発と人材育成が可能である。特定の企業だけでなく、広く産業界から高生産菌株創製の依頼を募り、未利用資源、再生可能資源

由来のバイオ製品を数多く世に送り出すことで持続可能な社会形成に貢献する(図 3)。

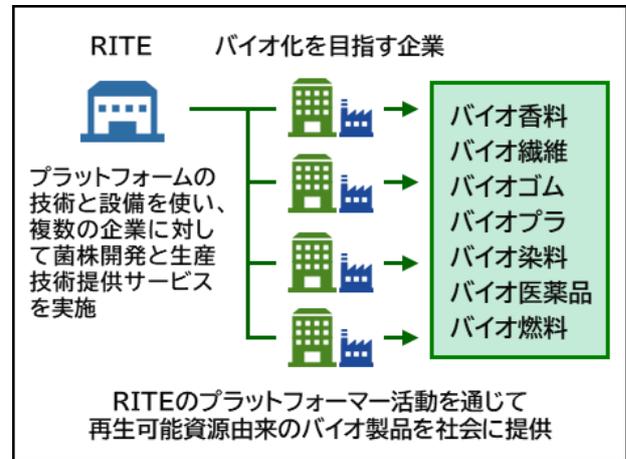


図 3 RITE プラットフォーマーの活動による社会貢献

5. おわりに

バイオものづくり技術の革新は、新しい産業構造を築き、持続可能な経済発展を加速する上で欠かせない要素である。RITE は、これらの技術開発に留まらず、社会実装の際に直面する課題への取り組みにも力を入れ、バイオものづくりの普及を推進していく。そのため、RITE は技術と設備を集約した研究施設を 2 棟、新たに建設することを計画している。それぞれ本特集で紹介した 2 つの新規事業に対応している。

GI 基金事業で整備する研究棟には、CO₂ を原料としたポリマー原料の発酵生産とそのバイオプロセス開発に特化した設備を導入する。この研究棟は本年度(2024 年度)竣工予定であり、これにより CO₂ からの高付加価値化合物の発酵生産技術開発を大きく加速することができる。

一方、バイオものづくり革命推進事業でもプラットフォーム機能を集約した専用の実験棟の建設計画を進めている。デジタル・ロボティクス技術を取り込み、超効率的な高生産菌株の育種を可能とする。企業から依頼された菌株開発を複数同時に行うため、情報セキュリティー面も十分に考慮した構成とする。こちらは本年度着工を目指している。

この特集における GI 基金事業とバイオものづくり革

命推進事業を推進し、それぞれの専用研究棟での活動を軌道に乗せることにより、RITEは、化石燃料に依存しない製造プロセスの実現可能性を探求し、CO₂ 排出量の削減による環境保全への貢献を目指す。

これらの活動は、循環型社会の構築と、2050年のカーボンニュートラル達成に向けた重要なステップである。RITEは、バイオものづくりのさらなる進化と、それがもたらす持続可能な社会の実現を追求し続ける。RITEの取り組みが、将来の世代にとってより良い環境を築くための土台となることを心から願っている。

この特集が、RITEの活動を広く知ってもらい、持続可能な未来を共に創造するためのきっかけとなることを期待している。

参考文献

- 1) 経済産業省、バイオものづくり革命の実現、2023年4月19日、
https://www.meti.go.jp/shin-gikai/sankoshin/shin-ki-jiku/pdf/014_05_00.pdf
- 2) 環境省、バイオプラスチック及び再生材利用の促進に向けた調査・検討委託業務 報告書、2023年3月24日、
<https://www.env.go.jp/content/000136496.pdf>
- 3) 再生可能エネルギー指令(Renewable Energy Directive:REDⅢ)が改正へ、
<https://baumconsult.co.jp/2022/10/07/%E5%86%8D%E7%94%9F%E5%8F%AF%E8%83%BD%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E6%8C%87%E4%BB%A4renewable-energy-directive%EF%BC%9Ared%E2%85%B2%E3%81%8C%E6%94%B9%E6%AD%A3%E3%81%B8%EF%BD%9E/>
- 4) NEDO スマートセルプロジェクト、
<https://www.jba.or.jp/nedo-smartcell/project/>
- 5) NEDO「スマートセルプロジェクト成果集」、
<https://www.nedo.go.jp/content/100923930.pdf>
- 6) NEDO バイオものづくりプロジェクト、
<https://www.jba.or.jp/b-production/>
- 7) 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、2021年6月18日、
<https://www.meti.go.jp/policy/energy-environment/global-warming/ggs/pdf/green-honbun.pdf>
- 8) NEDO グリーンイノベーション基金、
<https://green-innovation.nedo.go.jp/>
- 9) 「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画」2022年6月7日、
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/atarashii-sihonsyugi/pdf/ap2022.pdf>
- 10) 経済産業省「バイオ政策の進展と今後の課題について」、2023年5月12日、
https://www.meti.go.jp/shin-gikai/sankoshin/shomu-ryutsu/bio/pdf/016_04_00.pdf

※この成果は、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)の委託事業の結果得られたものです。

企画調査グループ

グループメンバー(2024年4月)

グループリーダー・主席研究員	柳生 勇	主幹	眞継 由佳
サブリーダー・主席研究員	野村 眞	主任研究員(兼)	山下 裕士
サブリーダー	【欠】	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	二階堂 仁之
副主席研究員	清水 淳一	主幹・研究員	松岡 美帆
副主席研究員	楠瀬 勤一郎	主任	辰巳 奈美
研究管理チームリーダー	高橋 嶺宏		久保 道代
調査役	望月 則孝		永田 瑞生
調査役	倉中 聡		

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、イノベーション創出について積極的に取り組みを進めている¹⁾。

カーボンニュートラルに向けた我が国の 2023 年度の動向について概観する。

2023 年 2 月に閣議決定された「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律案」(GX 推進法)²⁾が 2023 年 5 月に成立し、GX 推進法に基づき、2023 年 7 月、「脱炭素成長型経済構造意向推進戦略」(GX 推進戦略)が閣議決定された³⁾。また、CCS 事業化に向けた課題に関し、2023 年 9 月、総合エネルギー調査会資源・燃料分科会の下に設置された「カーボンマネジメント小委員会」において議論が開始され、2024 年 1 月、「CCS に係る制度的措置の在り方について」⁴⁾が取りまとめられ、同年 2 月、「二酸化炭素の貯留事業に関する法律案」(CCS 事業法)が閣議決定され⁵⁾、第 213 回通常国会に提出され、成立している。

1.1. GX 推進法

世界規模でグリーン・トランスフォーメーション(GX)実現に向けて投資競争が加速する中で、我が国でも 2050 年カーボンニュートラル等の国際公約と産業競争力強化・経済成長を同時に実現していくためには、今後 10 年間で 150 兆円を超える官民の GX 投資が必要である。その実現に向けて、GX 推進法では、(1)GX 推進戦略の策定・実行、(2)GX 経済移行債の発行、(3)成長志向型カーボンプライシングの導入、(4)GX 推進機構の設立、(5)進捗評価と必要な見直しを法定している。

(1)GX 推進戦略の策定・実行

政府は、GX を総合的かつ計画的に推進するための戦略を策定・実行する。

(2)GX 経済移行債の発行

政府は、GX 推進戦略の実現に向けた先行投資を支援するため、2023 年度から 10 年間、GX 経済移行債を発行し、GX 推進に関する施策を講じていく。

(3)成長志向型カーボンプライシングの導入

炭素排出に値付けをすることで、GX 関連製品・事業の付加価値の向上を図る。2028 年度から、化石燃料の輸入事業者等に対して、輸入等する化石燃料に由来する二酸化炭素の量に応じて、化石燃料賦課金を徴収する。また、2033 年度から、発電事業者に対して、一部有償で二酸化炭素の排出枠(量)を割り当て、その量に応じた

特定事業者負担金を徴収する。

(4)GX 推進機構の設立

経済産業大臣の認可により、GX 推進機構を設立する。GX 推進機構は、民間企業の GX 投資の支援(金融支援(債務保証等))、化石燃料賦課金・特定事業者負担金の徴収、排出量取引制度(特定事業者排出枠の割当て・入札等)を行う。

(5)進捗評価と必要な見直し

GX 投資等の実施状況や二酸化炭素の排出に係る国内外の経済動向等を踏まえ、施策の在り方について検討を加え、その結果に基づいて必要な見直しを講じる。化石燃料賦課金や排出量取引制度に関する詳細の制度設計について、排出枠取引制度の本格的な稼働のための具体的な方策を含めて検討し、この法律の施行後 2 年以内に、必要な法制上の措置を行う。

1.2. GX 推進戦略

2023 年7月、GX 推進法に基づき、GX 推進戦略が閣議決定され、主に以下の 2 点に取り組むことになっている。

(1)エネルギー安定供給の確保に向け、徹底した省エネに加え、再エネや原子力などのエネルギー自給率の向上に資する脱炭素電源への転換など GX に向けた脱炭素の取り組みを進める。

(2)GX の実現に向け、「GX 経済移行債」等を活用した大胆な先行投資支援、カーボンプライシングによる GX 投資先行インセンティブ、新たな金融手法の活用などを含む「成長志向型カーボンプライシング構想」の実現・実行を行う。

1.3. CCS 事業法

2050 年カーボンニュートラルに向けて、今後、脱炭素化が難しい分野における GX を実現することが課題である。こうした分野における化石燃料・原料の利用後の脱炭素化を進める手段として、CO₂を回収して地下に貯留する CCS の導入が不可欠である。

我が国としては、2030 年までに民間事業者が CCS 事業を開始するための事業環境を整備することとして

おり、公共の安全を維持し、海洋環境の保全を図りつつ、その事業環境を整備するために必要な貯留事業等の許可制度等を整備する。

(1)試掘・貯留事業の許可制度の創設、貯留事業に係る事業規制・保安規制の整備

①試掘・貯留事業の許可制度の創設

・経済産業大臣は、貯留層が存在する可能性がある区域を「特定区域」として指定した上で、特定区域において試掘や CO₂ の貯留事業を行う者を募集し、これらを最も適切に行うことができると認める者に対して、許可を与える。

・上記の許可を受けた者に、試掘権(貯留層に該当するかどうかを確認するために地層を掘削する権利)や貯留権(貯留層に CO₂ を貯留する権利)を設定する。CO₂ の安定的な貯留を確保するための、試掘権・貯留権は「みなし物権」とする。

・鉱業法に基づく採掘権者は、上記の特定区域以外の区域(鉱区)でも、経済産業大臣の許可を受けて、試掘や貯留事業を行うことを可能とする。

・従来、海域における CO₂ の貯留については、海洋汚染防止法の規定に基づき、環境大臣の許可が必要であったが、CCS 事業法では、許可手続きを一本化し、経済産業大臣は、あらかじめ環境大臣に協議をしてその同意を得たうえで許可することとなった。これに伴い、海防法に基づく海底下貯留にかかる環境大臣の許可制度は廃止されることとなる。

②貯留事業者に対する規制

・試掘や貯留事業の具体的な「実施計画」は、経済産業大臣の認可制とする。

・貯留した CO₂ の漏えいの有無等を確認するため、貯留層の温度・圧力等のモニタリング義務を課す。

・CO₂ の圧入停止後に行うモニタリング業務等に必要な資金を確保するため、引当金の積み立て等を義務付ける。

・貯留した CO₂ の挙動が安定しているなどの要件を満たす場合には、モニタリング等の貯留事業場の管理業務を JOGMEC((独法)エネルギー・金属鉱物資源機構)に移管することを可能とする。また、移管後の JOGMEC

の業務に必要な資金を確保するため、貯留事業者に対して、拠出金の納付を義務付ける。

- ・正当な理由なく、CO₂ 排出者からの貯留依頼を拒むことや、特定の CO₂ 排出者を差別的に取扱うこと等を禁止するとともに、料金等の届出義務を課す。
- ・技術基準適合義務、工事計画届出、保安規定の策定等の保安規制を課す。
- ・試掘や貯留事業に起因する賠償責任は、被害者救済の観点から、事業者の故意・過失によらない賠償責任(無過失責任)とする。

(2)CO₂ の導管輸送事業に係る事業規制・保安規制の

整備

①導管輸送事業の届出制度の創設

- ・CO₂ を貯留層に貯留することを目的として、CO₂ を導管で輸送する者は、経済産業大臣に届け出なければならないものとする。

②導管輸送事業者に対する規制

- ・正当な理由がなく、CO₂ 排出者からの輸送依頼を拒むことや、特定の CO₂ 排出者を差別的に取扱うこと等を禁止するとともに、料金等の届出義務を課す。
- ・技術基準適合義務、工事計画届出、保安規定の策定等の保安規制を課す。

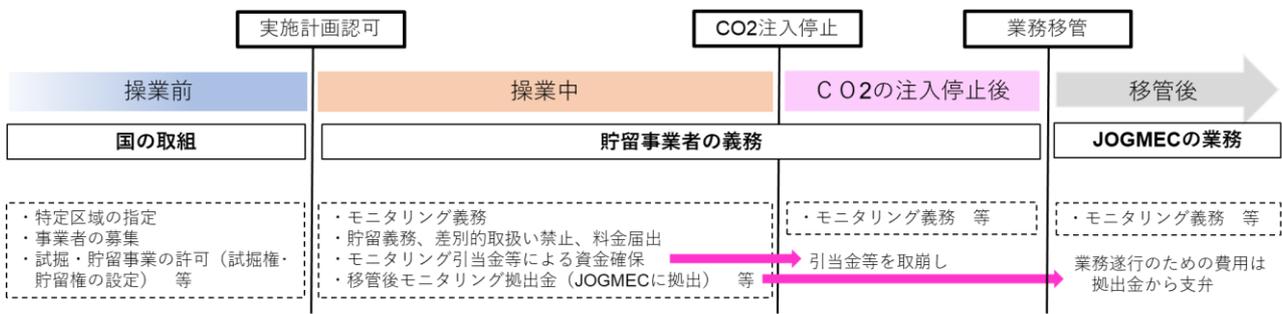


図 1 貯留事業に関するフロー

2. 調査研究活動

令和 5 年度において、経済産業省委託調査事業「燃料安定供給対策調査等事業(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 CCS 行動計画等に関する調査)(以下、本年度調査事業)」を受託し、『CCS 長期ロードマップ検討会 最終とりまとめ』⁶⁾にある「CCS 行動計画」検討のため、「コスト目標／技術開発指針」に関連する調査を実施した。ここでは、コスト目標を達成するための技術開発方針(=コスト低減策)を検討するため CCS のコスト構造調査を実施したことから、その概要を紹介する。

表1 「CCS 行動計画」の策定に向けた検討方針⁶⁾

検討項目	検討方針
年間貯留量目標	<u>各産業の意見を積み上げて 2050 年時点で達成すべき年間貯留量の目標を精緻化し、省エネルギーや電化、水素化等による脱炭素化の取組の進捗を踏まえ、更なる精緻化をしていく。</u>
コスト目標／技術開発指針	CCS コスト目標を必要に応じて見直した上で当該目標を達成するための技術開発指針を作成し、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	既存データのある地域での CO ₂ の貯留に適した地層の所在の推定を更に進めつつ、 <u>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。また地質構造調査における断層によるリスクの評価方法についても検討を進める。</u>

2.1. CCS コスト構造の把握

2.1.1. 試算イメージ

図 2 に試算イメージを示す。比較的成本データが揃っている石炭火力発電所(以下、石炭火力)及び天然ガスコンバインドサイクル発電所(以下、天然ガス火力)を排出源とし、輸送はパイプライン輸送と液化 CO₂ 船舶輸送、貯留は陸域からの圧入と海域(着底、浮体)での圧入とした。

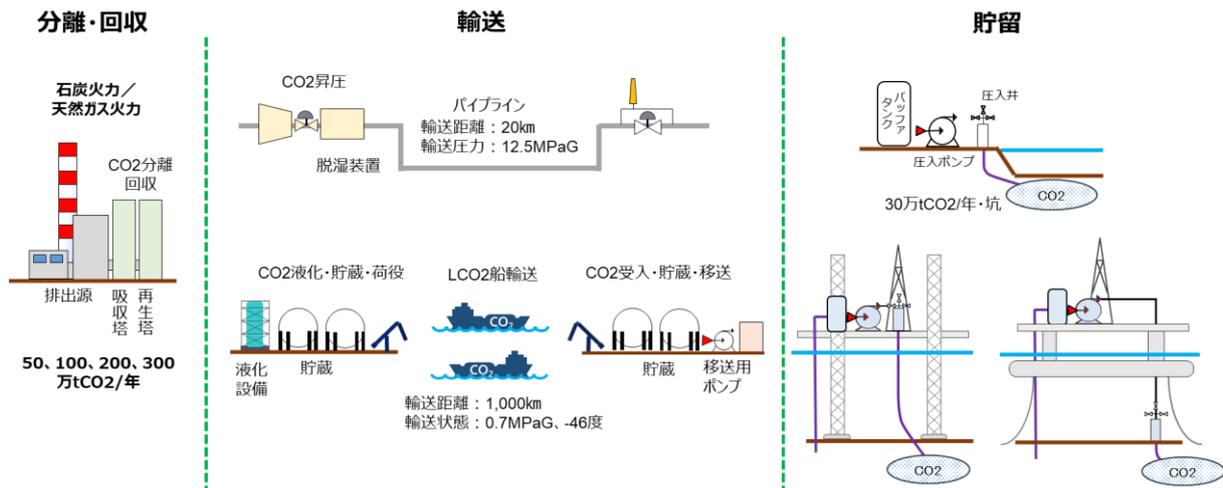


図 2 試算イメージ(分離・回収/輸送/貯留の組み合わせ)

2.1.2. 試算の留意点と主な前提条件

今回の試算は、公開データ等を基に RITE が任意に設定した前提条件の下、主に CO₂ 量を変数として試算したものであり、具体的な地点や設備等を想定した上での

積算ではない。また分離回収、輸送、貯留のいずれにおいても、土地の制約、土地代、予備費、補償費等は一切考慮していない点、留意が必要である。

表 2 CCS コスト試算の主な前提条件

項目	内容
プロジェクト期間	操業期間 (20 年) / 廃坑後管理 (20 年)
試算年、為替等	コストベース：2023 年 為替レート：139 円/US\$ (2023 年上半年期平均値) ⁷⁾ 割引率 5% 外部電気代：20 円/kWh 石炭価格 26,000 円/t (2023 年 9 月) ⁸⁾ LNG 価格 88,000 円/t (2023 年 9 月) ⁸⁾
想定排出源	石炭火力 (CO ₂ 濃度 12%~13%程度) 天然ガス火力 (CO ₂ 濃度 3%~4%程度) 設備利用率 70%
年間 CO ₂ 回収量	50、100、200、300 万 tCO ₂ /年
CO ₂ 分離回収設備	CO ₂ 回収率 90% 化学吸収法 (アミン) ※共通設備、既存設備の改修費用は含まず
パイプライン輸送設備	CO ₂ 輸送圧力 12.5MPaG ※昇圧機動力 (2 段圧縮にて試算)
液化輸送設備	液化設備 (直接冷却式) ※0.7MPaG、-46°C 貯蔵・出荷設備 (陸上) ※棧橋は対象外 受入・貯蔵設備 (陸上) ※棧橋は対象外 圧入設備への移送用昇圧設備
CO ₂ 輸送船	基準値 -46°C (上限 -43°C、下限 -50°C) 設計圧力 1.0MPaG ※船型は 5 万 t 型までとした。
その他	既存設備の改造、予備費、一般管理費、雑費含まず

2.2. 試算結果の概要

2.2.1. 分離回収コスト(図 3、4)

石炭火力、天然ガス火力のいずれも CO₂ 回収量の増加に伴い設備費の割合が小さくなる。スケールメリットについては、石炭火力発電の方が天然ガス火力より効果大きい。また、石炭火力では、いずれの回収量の場合も設備費の割合が高く、次いで、吸収液・工水等、再生

エネルギーとなっている。一方、天然ガス火力では、設備費の割合が高いのは回収量が 50 万トン、100 万トンの場合で、それ以外では再生エネルギーが高くなっている。また同じ CO₂ 回収量とした場合、石炭火力よりも排ガス流量が多くなるためブロワ・ポンプ動力の占める割合も高くなる。

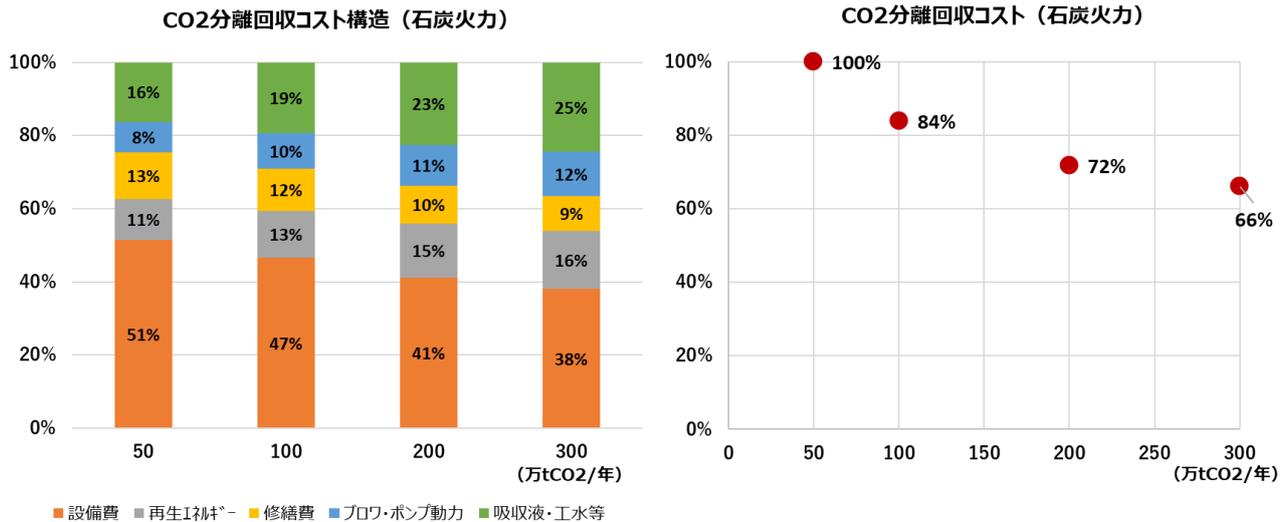


図 3 分離回収(コスト構造)※石炭火力

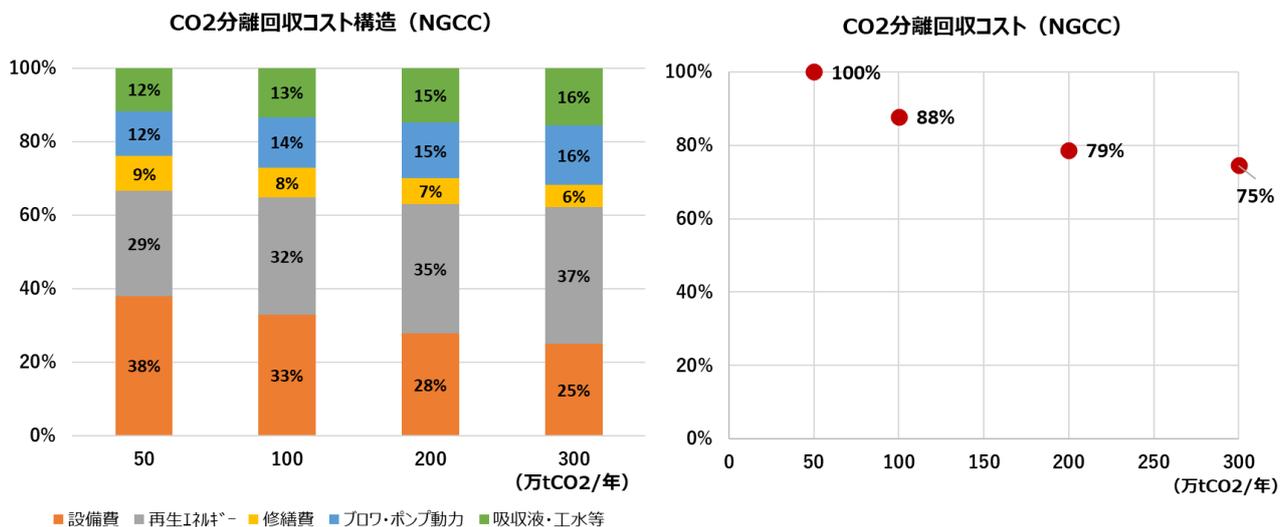


図 4 分離回収(コスト構造)※天然ガス火力

2.2.2. 輸送コスト(図 5、6)

パイプライン輸送及び液化 CO₂ 船舶輸送ともに CO₂ 輸送量の拡大に伴い設備費の割合が小さくなる。輸送規模の拡大によるスケールメリットについては、パイプライン輸送及び液化 CO₂ 船舶輸送ともほぼ同様の結果となっている。

パイプライン輸送では、いずれの輸送量の場合も昇圧

電気代(昇圧動力)の割合が高く、300 万トンの場合には 7 割程度を占める。

液化 CO₂ 船舶輸送では、いずれの輸送量の場合も液化電気代の占める割合が高い。今回の前提条件では外部電気代を 20 円/kWh としたことから、それぞれのエネルギーコストが高くなっている。

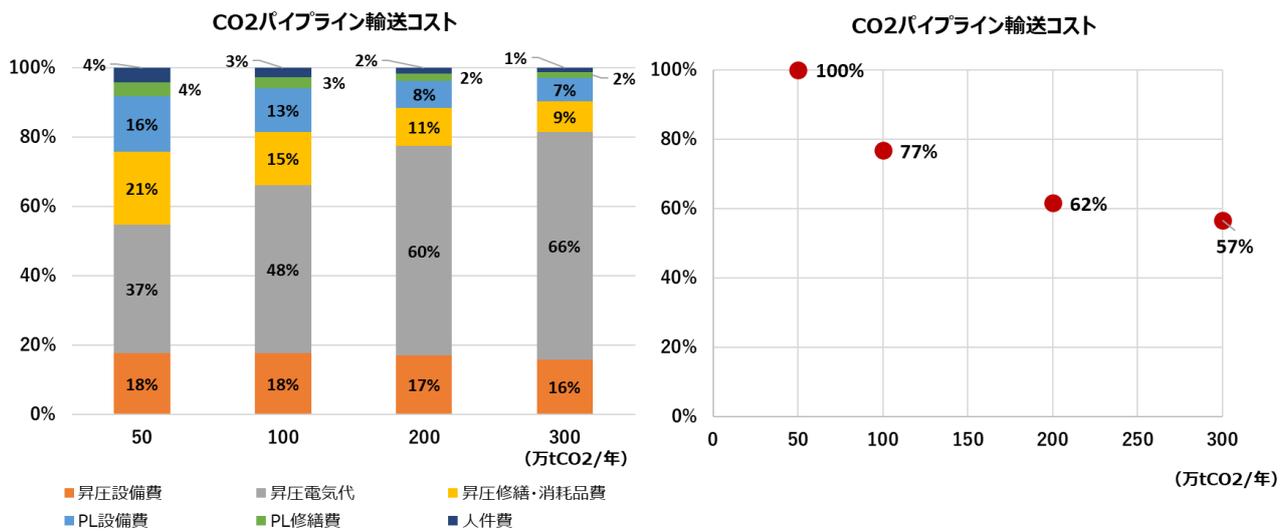


図 5 パイプライン輸送(コスト構造)

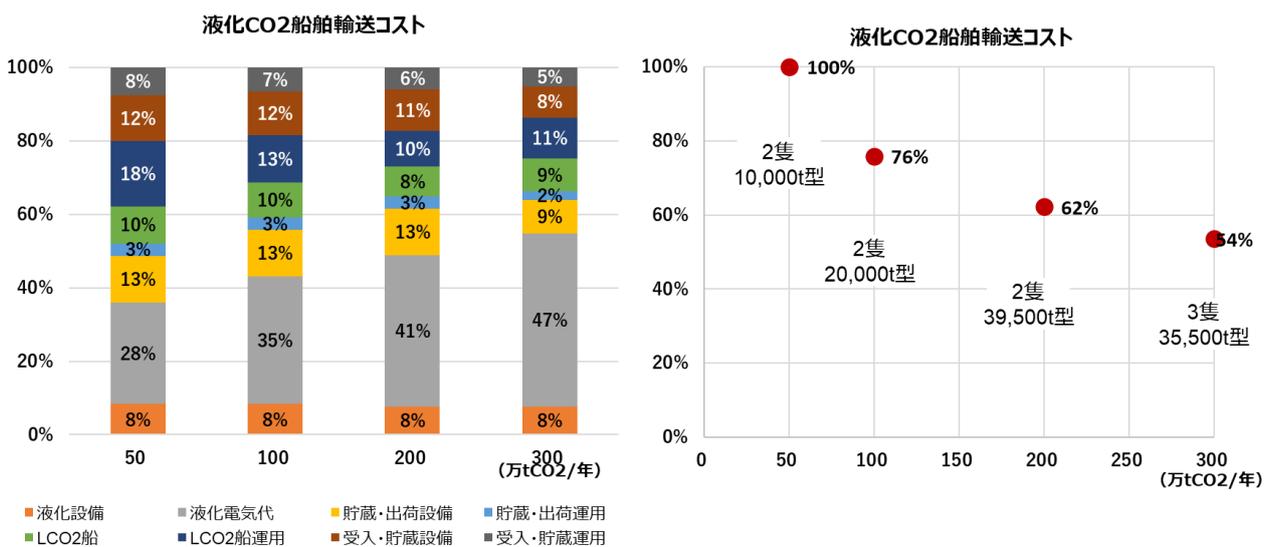


図 6 液化 CO₂ 船舶輸送(コスト構造)

2.2.3. 貯留・モニタリングコスト(図 7、8、9)

陸域、海域(着底)、海域(浮体)のいずれも掘削費の割合が高い。

陸域では掘削費に次いで、圧入中モニタリングコストの割合が高くなっているが、海域(着底・浮体)の場合は、それぞれ着底基地、浮体基地に係る費用の割合が高く

なる。

なお、海域(着底)では3番目は圧入中モニタリングコストとなるが、海域(浮体)では海底設備に係る費用となる。相対的に分離回収、輸送より設備費(CAPEX)の割合が高くなっている。

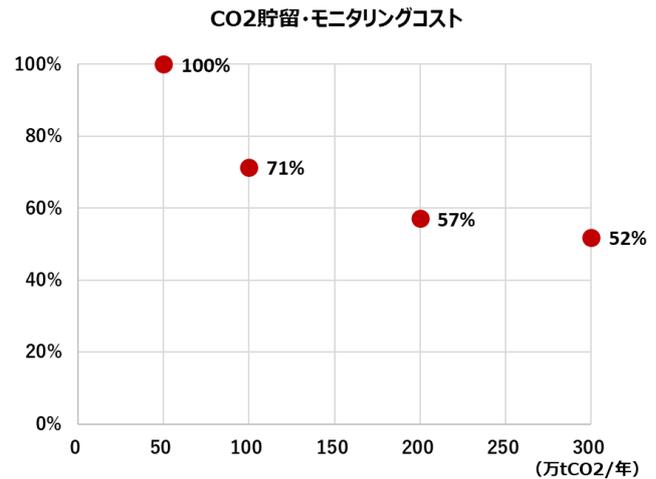
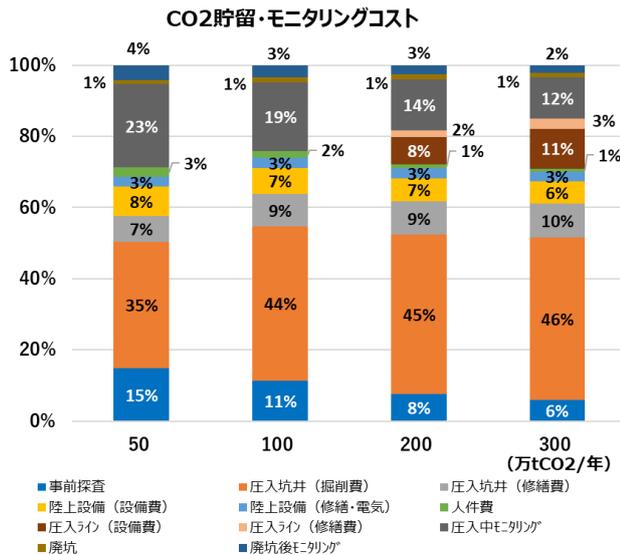


図 7 貯留・モニタリング(コスト構造)※陸域

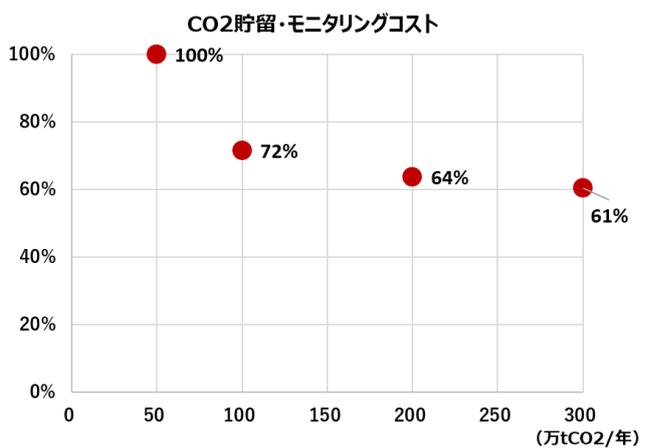
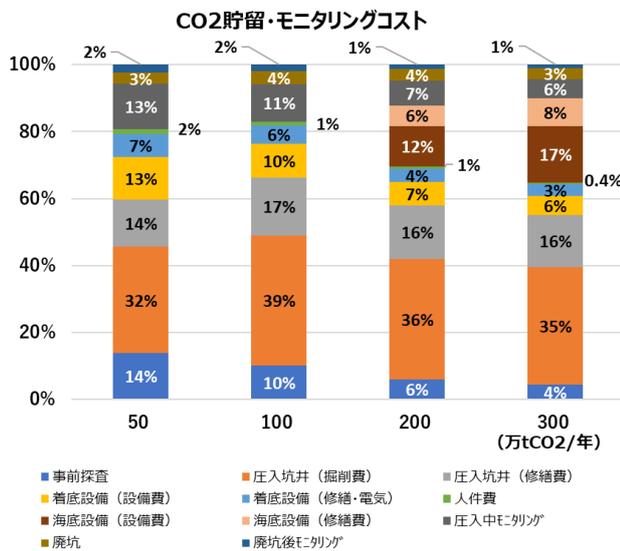


図 8 貯留・モニタリング(コスト構造)※海域(着底)

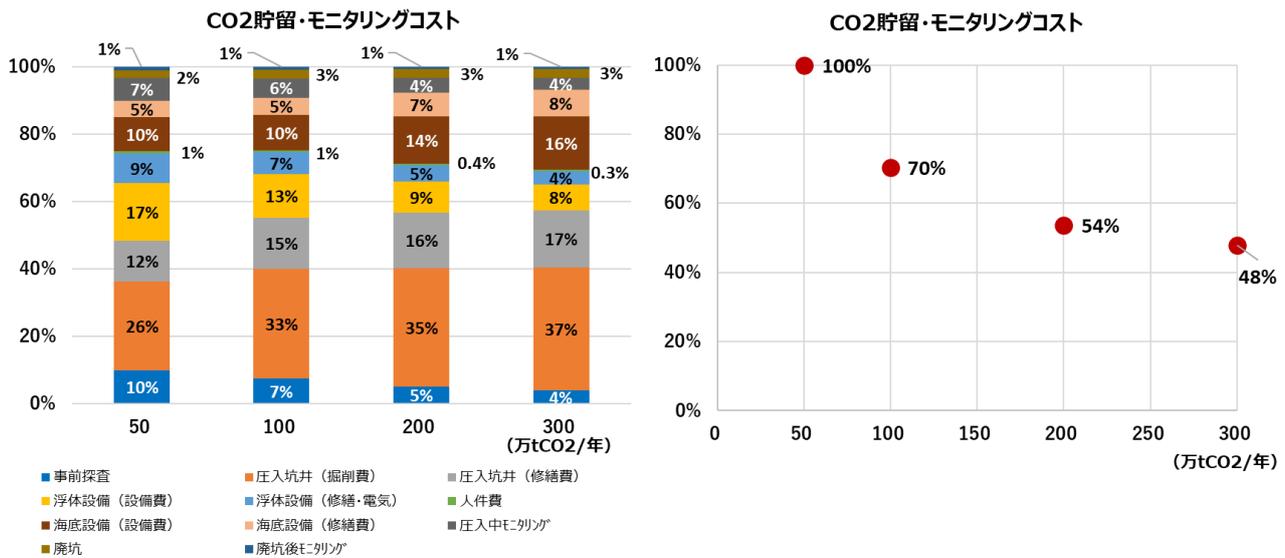


図 9 貯留・モニタリング(コスト構造)※海域(浮体)

2.3. まとめ

国内における CCS において、分離回収、輸送では、OPEX(電気代や燃料代等)が比較的高いことから省エネルギータイプの機器開発、廃熱利用等の技術開発が有効と考えられる。一方、貯留では CAPEX(掘削費、プラットフォーム、海底設備等)の割合が比較的高いことから、これらに関するコスト低減策を検討することが重要と考えられる。なお、今回は分離回収・輸送・貯留の一貫体制でのプロジェクトを想定し CCS コストを試算しているが、将来に向け億トン規模に CCS を拡大していく場合、個々の技術開発と合わせて、CCS 事業全体での最適化の検討がコスト低減には重要となる。

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 10)。IPCC では、2023 年 7 月に第 7 次評価サイクル(AR7)の新体制が立ち上がり、各作業部会報告書に加えて、気候変動と都市に関する特別報告書、短寿命気候強制力因子(SLCF)に関する方法論報告書、二酸化炭素除去(CDR)技術・炭素回収利用及び貯留(CCUS)に関する方法論報告書を作成することを決定して、活動が開始している。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。

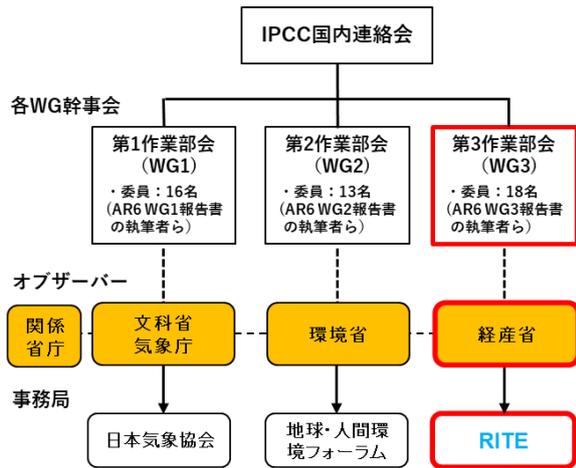


図 10 IPCC 国内連絡会と RITE

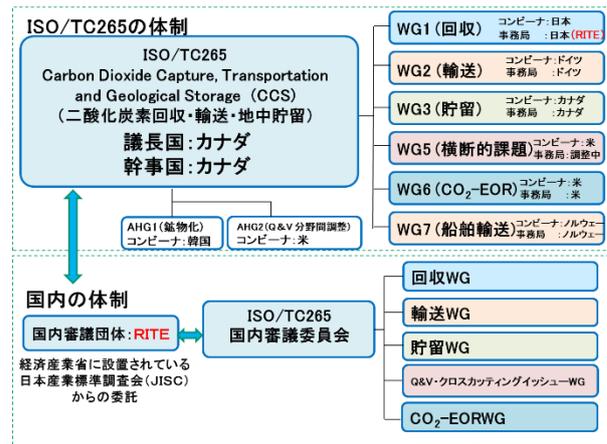


図 11 ISO/TC265 の各ワーキングと国内体制

3.2. ISO(国際標準機関)

ISO は、170 のメンバー国で構成される組織であり、国家間に共通な標準規格を提供し、世界貿易を促進している。ISO の標準を使用することで、安全・信頼性が高く、質の高い製品・サービスの提供が可能である。

すでに諸外国では、多くの実証試験、商業規模での二酸化炭素回収・貯留(CCS)事業も実施され、国際連携が進められるとともに、関連技術の国際標準化の枠組みが求められている。CCS の国際標準化によって、安全と環境面で、国際的に合意された知見に沿っていることが保証されるため、安全で適切な CCS の普及に貢献することが可能である。

RITE は、ISO/TC265(CO₂ の回収、輸送、貯留)の国内審議団体であるとともに WG1(回収)の事務局を担当しており、CCS 分野における設計、建設、操業、環境計画とマネジメント、リスクマネジメント、定量化、モニタリングと検証の国際標準化に関し積極的に活動している(図 11)。

2024 年 3 月末時点で、ISO/TC265 から CCS 分野に係る規格類は 13 件発行されているとともに、8 件の文書が開発中である。新規分野についても検討を開始しており TC265 全体の活動が活発化している。特に、排出源から CO₂ 圧入域までの輸送手段として注目されている CO₂ 船舶輸送の技術報告書は、2022 年に開発がスタートし各国の意見を取り込みながら開発が行われ、現在最終段階まで進んでいる。

4. 人材育成と知財戦略、産学連携の推進

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を進めている。2023 年度は 6 校から 133 名の生徒を受け入れ、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 12)。

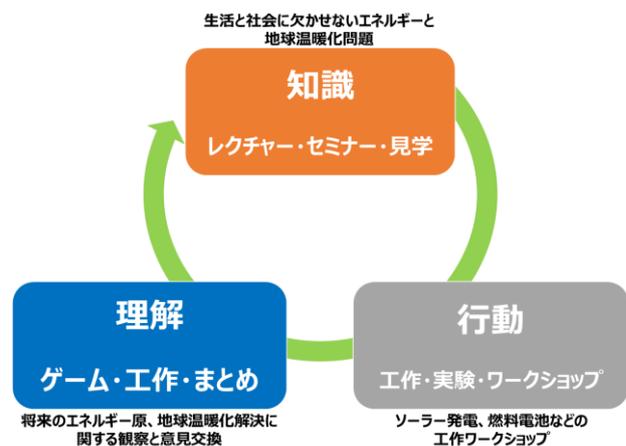


図 12 RITE における人材育成(小中高生)

<大学・大学院生> 次代の研究や技術を支える人材育成の一環として大学・大学院との教育連携を進め、RITE 研究者の教授等への兼務を行うとともに、大学院生を中心とした若手人材の研究現場への受け入れを行い、大学における教育と研究所における研究指導を展開している(図 13)。例えば、奈良先端科学技術大学院大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。

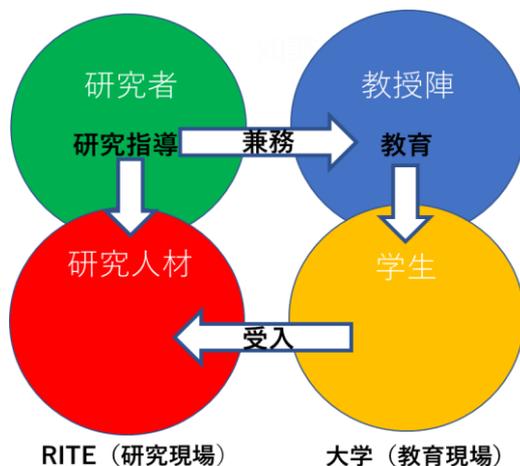


図 13 RITE における人材育成(大学・大学院生)

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る。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。

2024 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 16 件、外国出願が 18 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 71 件(うち企業にライセンス中 7 件)、外国権利 49 件(同、7 件)である。

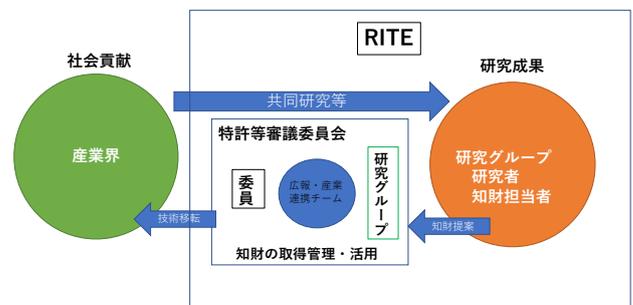


図 14 知財戦略と産業連携の推進

5. おわりに

2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、GX 経済移行債の発行が開始され、GX 推進に関する施策が開始されるとともに、CCS 事業法が成立し、2030 年頃からの CCS 事業を開始する事業環境整備が進捗したところである。しかしながら、カーボンニュートラルを実現することは、並大抵の努力では不可能であり、RITE としても、革新的環境技術の社会実装を見据えて積極的に推進・貢献していくことが求められている。CCS などの新技術を実用化していくには国民の理解増進を進めることが非常に重要であるため、RITE として、DACCS (Direct Air Capture and Storage: 大気中の CO₂ 直接回収・貯留) 技術を 2025 年大阪・関西万博に出展する機会を活用して、カーボンニュートラルの必要性や CCS の重要性などについて、国民の理解が進む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年カーボンニュートラル実現を目指し、技術開発、広報活動及び産学連携活動を積極的に推進していく。そして、RITEが一丸となって、革新的環境技術の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) 脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律(GX推進法)
(<https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210004/20230210004.html>)
- 3) 脱炭素成長型経済構造移行推進戦略(GX推進戦略)
(令和5年7月28日閣議決定)
(<https://www.meti.go.jp/press/2023/07/20230728002/20230728002.html>)
- 4) 中間とりまとめ「CCSに係る制度的措置の在り方について」
(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/carbon_management/pdf/20240129_1.pdf)
- 5) 二酸化炭素の貯留事業に関する法律案(令和6年2月13日閣議決定)
(<https://www.meti.go.jp/press/2023/02/20240213002/20240213002.html>)
- 6) 資源エネルギー庁 CCS長期ロードマップ検討会 最終とりまとめ(令和5年3月)
(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/20230310_1.pdf)
- 7) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社, 外国為替相場情報, 1990年以降の為替相場, 2024年2月確認
(<https://www.murc-kawasesouba.jp/fx/past3month.php>)
- 8) 財務省貿易統計, 輸出入額の推移(主要商品別), 世界月別(輸入), 2024年2月確認
(<https://www.customs.go.jp/toukei/suii/html/time.htm>)

システム研究グループ

グループメンバー(2024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	大西 尚子
副主席研究員	山田 航也	主任研究員	橋本 照子
主任研究員	和田 謙一	研究員	榎田 仁次
主任研究員	長島 美由紀	研究員	安藤 輝尚
主任研究員	本間 隆嗣	研究員	Jubair Sieed
主任研究員	佐野 史典	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
主任研究員	中野 優子		

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きた。

パリ協定長期目標 2°Cや 1.5°C未満の達成が求められている。しかし、現状や 2030 年に向けた国別貢献 (NDCs) で各国から提出されている排出削減目標とは大きな排出ギャップがあるとされている。2030 年や 2040 年といったトランジション期も含め、2°C、1.5°C 未満実現のための、各部門の排出経路・対策シナリオを定量的かつ整合的に提示することは重要な意義があると考えられる。このような中、2023 年度、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+ を用いて、2°C、1.5°C 未満を実現する、世界および日本の部門別ロードマップを策定した。RITE HP で公表している¹⁾ので、詳細は当該資料を参照されたいが、本報告ではその概要を紹介する。

1. CN に向けた長期シナリオ策定の背景とシナリオ想定

1.1. トランジションを含む CN に向けた長期シナリオ策定の背景

パリ協定長期目標の 2°Cや 1.5°C目標や 21 世紀後半早期のカーボンニュートラル(CN)実現に向けて各部門の対策を強化していく必要があるが、IPCC AR6²⁾においても、二酸化炭素除去(CDR)によって負の排出へ

の依拠が大きいシナリオや、低エネルギー需要社会の実現によって負の排出への依拠が小さいシナリオなど、様々な可能性が提示されている。更には、CN 実現に至るトランジションは、より一層の幅がある。例えば、産業部門毎の排出削減経路は、部門によって、既存インフラの寿命や、排出削減対策の難易度等が異なっている。一律の削減は、対策費用の増大を招き、却って排出削減を困難にしかねない。

しかし、各国、各産業・各企業の排出削減対策が、他の主体と比べて緩やかな率で進める場合、「グリーン・ウォッシュ」とみなされ、批判されるリスクも存在している。他方、金融機関そして評価機関であっても、必ずしもエネルギーシステム全体の整合性を有した排出削減への経路を十分理解できるわけでもないため、投資の適切性に関する判断ができる定量的な材料が必要な状況にある。そのため、気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク(NGFS)などでも、定量的な分析が可能な統合評価モデルを用いた排出削減シナリオの策定が行われている³⁾。一方、これらは、部門毎の排出削減経路に対しては十分な情報を与えていない。また、国際エネルギー機関(IEA)も提示しているものの、とりわけ 1.5°Cシナリオについて、国別の十分な情報提示がなされているわけではない。国際資本市場協会(ICMA)のレポート⁴⁾においても、地域性や産業特性の考慮に関して課題がある

とされている。日本政府は、トランジション・ファイナンスでの活用も念頭に、カーボンニュートラル実現に向けた具体的な移行の方向性を示すため、2021~22年度にトランジションロードマップを策定した。これについても有用な情報を提供するものであるが、一方、これらは、部門毎に策定されたものであり、全体としての 2℃、1.5℃排出削減経路との整合性、部門間での整合性について、説明性を更に向上させる必要性もある。

そこで、2100年までの期間について動的にコスト最小化の記述で最適化を行っている世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+ を用いて、世界全体で 2℃ や 1.5℃ 目標と整合性を有し、また、国間、部門間で差異を踏まえつつ、経済合理性の点で整合性を有する、排出削減対策シナリオを、部門別のトランジションロードマップを含めて策定した。

1.2. シナリオの想定

DNE21+モデルでの定量的な分析のシナリオ想定にあたっては、基本的に NGFS シナリオ³⁾を参考にした。NGFS は、Orderly シナリオ(規律がとれたシナリオ)と Disorderly シナリオ(不規律なシナリオ)が用意されている。これに準拠する形で、Orderly シナリオと Disorderly シナリオを用意した。これに加えて、IEA の Net Zero by 2050 (NZE)⁵⁾に近いシナリオも用意した。DNE21+モデル分析用に想定したシナリオの概略を表 1 に示す。気温上昇については、2℃目標と整合するシナリオを 2 種類、1.5℃目標と整合するシナリオを 3 種類想定した(世界の CO₂ 排出シナリオは図1のように想定)。

表1 シナリオ想定(概略)

シナリオ名	気温上昇	政策のスปีド ¹⁾	CDR	再エネ, EV	政策の地域差	他シナリオとの類似性		
						IPCC AR6	NGFS(2022)	IEA
Disorderly Below 2°C	1.7~1.8°C (ピーク:1.8°C, 2100年 1.7°C)	遅 (2030年 NDC)	中	中位進展	大(主要先進国 2050年 CN)	Likely below 2 C, NDC [C3b]	Disorderly: Delayed Transition	APS (WEO 2022)
Orderly Below 2°C	1.7°C程度	早(2030年 NDC: 全世界MAC均等化)	小	高位進展	小(MAC均等化)	Likely below 2 C with immediate action [C3a]	Orderly: Below 2C	SDS (WEO 2021)
Disorderly 1.5°C	1.4°C (ピーク:1.7°C, 2100年 1.4°C)	遅 (2030年 NDC)	大	中位進展	大(主要先進国 2050年 CN)	1.5 C with high overshoot (IMP-Neg) [C2]	(Disorderly Net Zero)*	
Orderly 1.5°C	1.4°C (ピーク:1.6°C, 2100年 1.4°C)	早(2030年 NDC: 全世界MAC均等化)	中	高位進展	中(主要先進国 2050年 CN)	1.5 C with no or limited overshoot [C1]	Orderly: Net Zero2050	
1.5C-CO2_CN	1.5°C程度 (CO2/ガスからの概略値)	早(2030年 NDC: 全世界MAC均等化)	小(部門別 Near-zero of CO2)	高位進展	中(主要先進国 2050年 CN)	1.5 C with no or limited overshoot [C1]		NZE

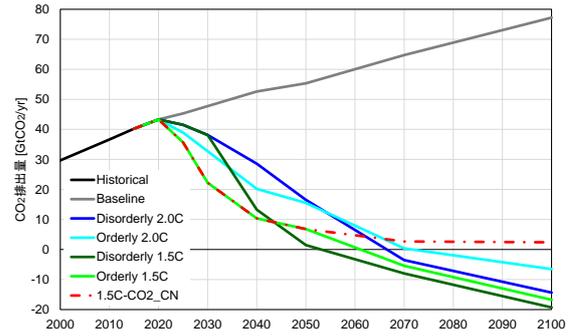


図1 分析シナリオの世界全体 CO₂ 排出経路

2. 世界

2.1. RITE の分析シナリオ

本節では世界のシナリオを示す。

図2に、世界全体の部門別 GHG 排出量を示す。発電部門からの CO₂ 排出は、他部門に比べて早い時期からの削減が経済合理的となっている。

図3には、世界全体の発電電力量を示す。石炭火力発電は 2030 年でも大きく抑制されている一方、ガス火力発電は CCS も導入しつつ、ベースラインより増加しているシナリオもあり、ガスへの転換が進んでいる。CO₂

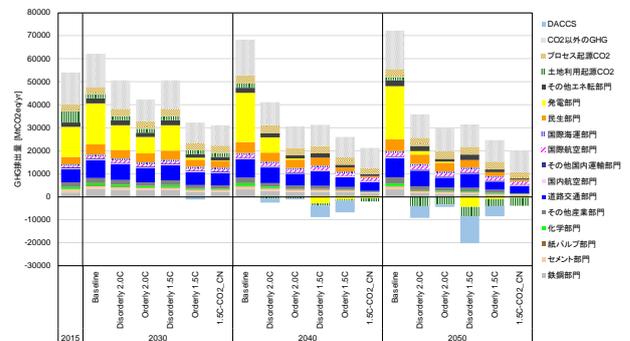


図2 部門別 GHG 排出量(世界全体)

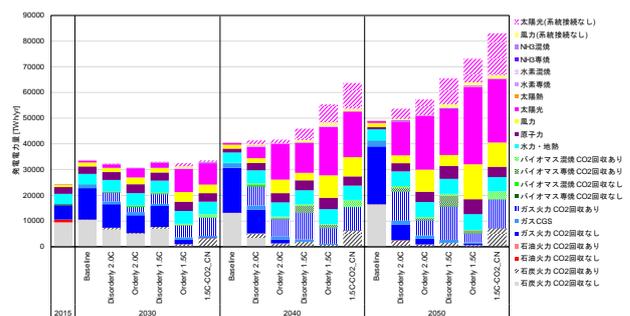


図3 発電電力量(世界全体)

貯留の拡大率を相対的に低く想定している Orderly シナリオにおいては、Disorderly シナリオに比べてガス火力+CCS の利用は少なく、代わりに更なるコスト低減を見込んでいる太陽光発電や風力発電が増加する。

図4に世界全体の産業部門最終エネルギー消費量を示す。発電部門と同様に、石炭利用は減少し、その一方でガスと電力の利用が増大する。鉄鋼部門での高炉による粗鋼生産のための石炭利用は必要となるため、発電部門に比べると石炭利用の減少は少ない。後に示す日本の結果と比べると、国内再エネ・国際連系線利用再エネや国内 CO₂ 貯留量が大きい国が多いことから、水素・アンモニアや合成メタン(e-メタン)の利用は相対的に少なくなっている。但し、CDR の利用を制約している 1.5C-CO₂_CN においては、それらの利用は相当量となっている。

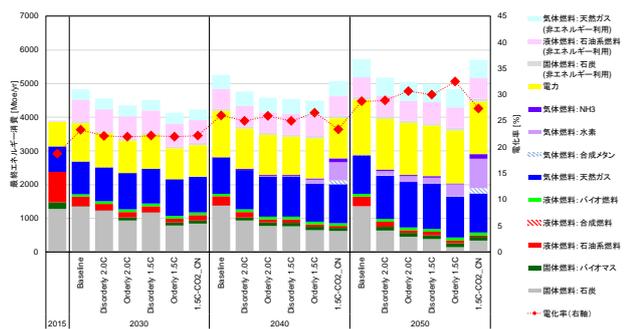


図4 産業部門最終エネルギー消費量(世界全体)

2.2. 他シナリオとの比較評価

以下に、既往の国際的なシナリオ分析との比較を示す。以下に記すように、モデルの違い、前提条件の違いから、若干の差異はあるが、RITE の分析シナリオはそれらとも、高い整合性、説明性を有している。

図5に IPCC の世界全体の部門別 CO₂ 排出量との比較を示す。DNE21+シナリオの部門別 CO₂ 排出量は、運輸、民生では、IPCC シナリオのレンジを若干超える部分もあるが、概ね IPCC と整合的かつ上下限をカバーしていると言える。これら部門の残余排出量が若干 IPCC シナリオのレンジを超えているのは、CDR とりわけ CO₂ 直接回収貯留(DACCS)のモデルでの考慮の有無によるところが大きいと考えられる(図6)。

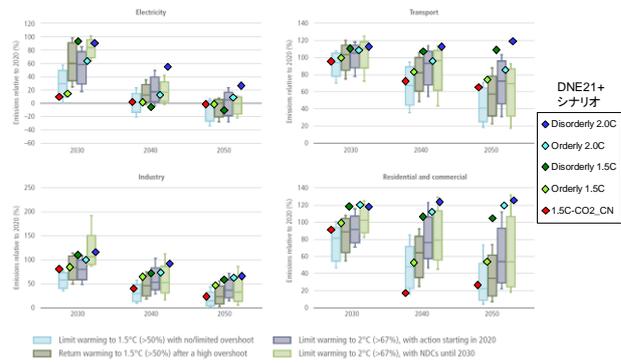


図5 IPCC シナリオの世界の部門別 CO₂ 排出量との比較

注:IPCC シナリオの棒の幅は 25~75%タイル、ひげの幅は 5~95%タイル
(出典:IPCC 報告書²⁾掲載のグラフに加工)

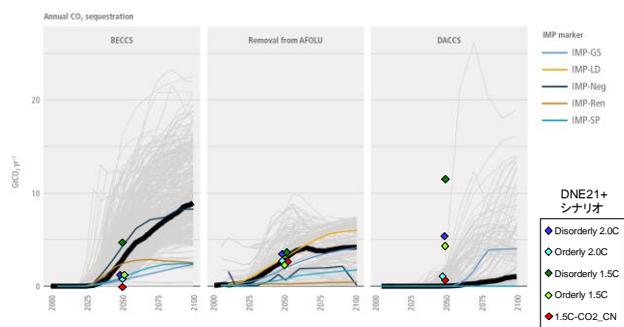


図6 シナリオの世界の CDR 利用量との比較

注:IPCC のシナリオは、C1~C3 カテゴリーのシナリオが表示されている。
(出典:IPCC 報告書²⁾掲載のグラフに加工)

図7に NGFS の各シナリオの炭素価格(CO₂ 限界削減費用)との比較を示す。1.5℃シナリオでは、DNE21+では DACCS を考慮していることから、限界値が抑制される傾向があり、若干低めの CO₂ 限界削減費用となる傾向があるものの、概ね NGFS シナリオと整合的な炭素価格水準を示している。IPCC の各シナリオの CO₂ 限界削減費用との比較は、図 8 に示している。IPCC 報告の多くのモデルは、CO₂ 限界削減費用均等化の条件下で計算している。DNE21+シナリオは、IPCC 報告値と整合的な水準と言える。ただし、多くの IPCC シナリオでは DACCS の想定がなされていない一方、DNE21+シナリオでは DACCS を想定しているため、2050 年の CO₂ 限界削減費用は IPCC シナリオの C1 と比較すると若干安価な推計になっている。

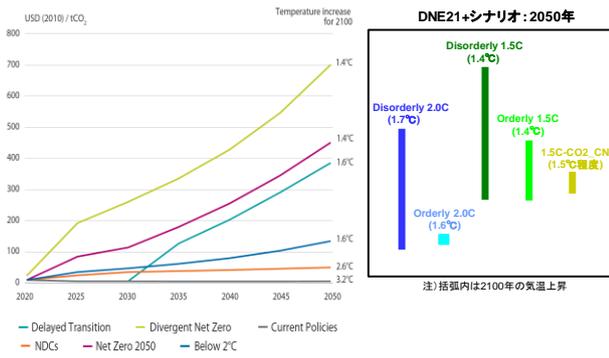


図7 NGFS の各シナリオと本シナリオの炭素価格の比較

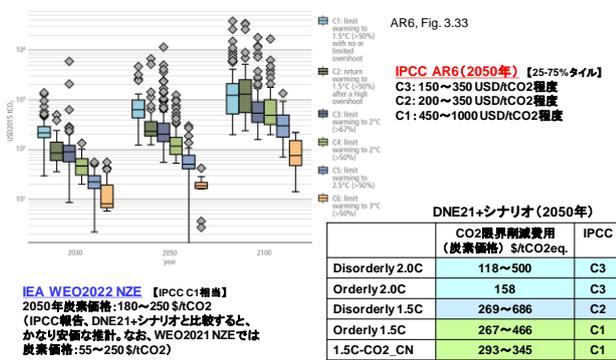


図8 IPCC の各シナリオと本シナリオの CO₂ 限界削減費用の比較

3. 日本

本節では、日本の定量的な分析シナリオを示す。

3.1. 排出量

図9に、日本の部門別 GHG 排出量を示す。2050 年に GHG 排出を実質ゼロとする3シナリオ(Disorderly 2.0C と Disorderly/Orderly 1.5C)においては、DACCS や土地利用起源 CO₂(植林による CO₂ 固定)の活用の他、発電部門からの CO₂ 排出を実質負とする(バイオマス+CCS(BECCS)、e-メタン+CCS によって達成)といった対策がとられている。2050 年に GHG 排出を実質ゼロと想定しておらず、世界全体で費用最小化(世界の CO₂ 限界削減費用均等化)を想定した Orderly 2.0C においては、2013 年比▲70%程度とするのが費用効率的となっている。この際には、発電部門や鉄鋼部門からの CO₂ 排出も残っている。

図 10 は、日本の CO₂ の回収と貯留・利用のバランスである。2030 年や 2040 年においては、石炭火力や

ガス火力、高炉から CO₂ 回収が行われている。バイオマス発電や DAC については、シナリオによっては 2040 年時点でも導入が見られるが、2050 年における回収が多くなっている。1.5-CO₂-CN では、発電部門での BECCS、e-メタン+CCS は不可としている他、DACCS も不可としている(DAC で回収した CO₂ を利用する CCU は可としている)ため、2050 年においても石炭火力(バイオマス混焼分からの回収も含む)、ガス火力、セメント部門での CO₂ 回収が見られる。

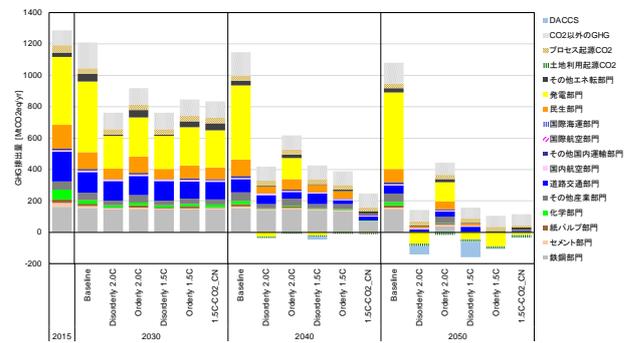


図9 部門別 GHG 排出量(日本)

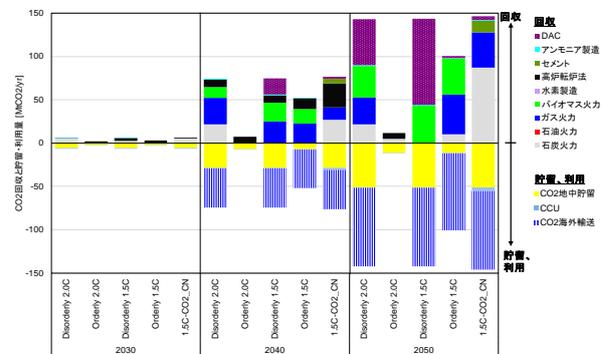


図 10 CO₂ バランス(日本)

3.2. 一次エネルギー供給量、発電、その他エネルギー転換

図 11 に、日本の一次エネルギー供給量を示す。日本は再生可能エネルギーや CO₂ 貯留のポテンシャルがエネルギー需要に比べて大きくないため、水素・アンモニアの他、e-メタンや e-fuels、バイオ燃料といったカーボンニュートラル燃料を輸入して利用することが費用効率的と評価されている。2050 年に 2013 年比▲70%程度の排出削減を行う Orderly 2.0C においては、そ

これらの量は相対的に少なく、世界全体での2°C目標達成のためには他国で排出削減を深掘することが全体として費用効率的で、CCS 無しの石炭やガスの供給が残っている。

図 12 は発電電力量である。電化を促進するため、とりわけ厳しい排出削減シナリオの下では総発電電力量が増加する。太陽光発電等の再エネの普及拡大や CCS の利用の他、輸入した水素・アンモニアによる発電を行うことにより、CO₂ 排出削減を進めている。なお、2050 年におけるガス火力発電+CCS は、Orderly 2.0C と 1.5C-CO₂-CN 以外のシナリオでは e-メタンが利用されている。Disorderly シナリオでは変動性再生可能エネルギー(VRE)が相対的に高いと想定していることから、海外から輸入した水素やアンモニア(CO₂ 貯留の拡大率を高く想定しているため、海外でブルー水素やブルーアンモニアを生産しやすい)を用いた発電が多い傾向にある。一方、Orderly シナリオでは、日本でも更に安価になると見込んだ VRE の利用が相対的に拡大し、CO₂ 貯留の拡大率を低く見込んでいることから海外での生産が困難になる水素やアンモニアを用いた発電はほとんど見られない。なお、1.5C-CO₂-CN では、BECCS および e-メタン+CCS は利用できないと制約していることから、CCS 付き石炭火力が導入される結果である。

図 13 には各シナリオの CO₂ 排出係数を整理しているが、2050 年に GHG 排出を実質ゼロとする Disorderly 2.0C/1.5C、Orderly 1.5C では、上述したように電源構成は異なるものの、CO₂ 排出係数の推移に大きな差異は無く、2040 年頃に実質ゼロとすることが全体として費用効率的であると評価される。

図 14 は発電部門の CO₂ 排出量について、日本政府ロードマップ⁶⁾との比較を示している。2020~2030 年の累積では、5 種類の DNE21+シナリオに比べて日本政府ロードマップは若干下回っており、2°C、1.5°C 排出削減経路と整合的である。また、2031~2050 年の累積についても、日本政府ロードマップは 5 種類の DNE21+シナリオの範囲内に位置しており、整合的である。

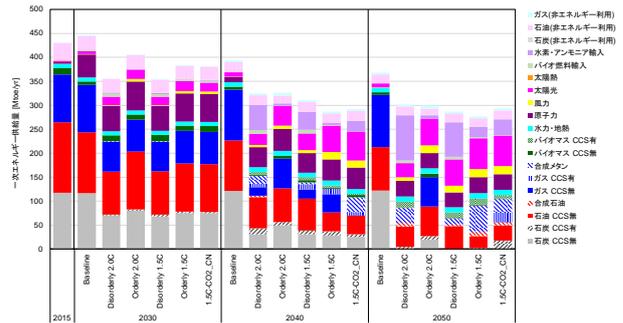


図 11 一次エネルギー供給量(日本)

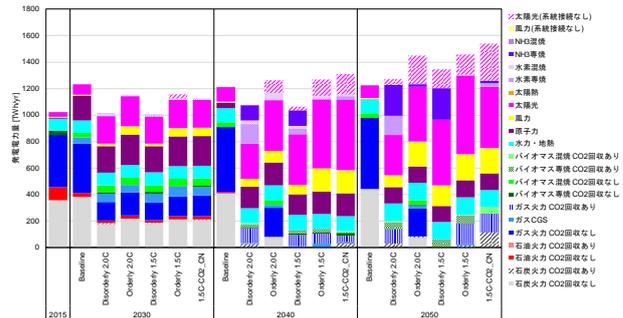


図 12 発電電力量(日本)

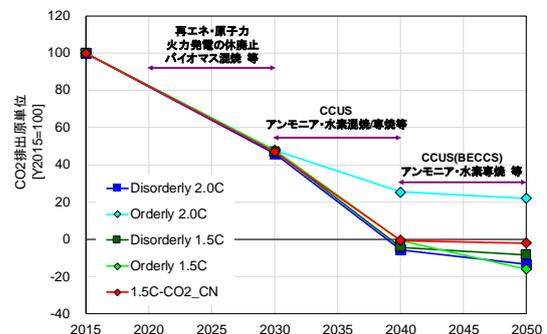


図 13 発電部門 CO₂ 排出係数(日本)

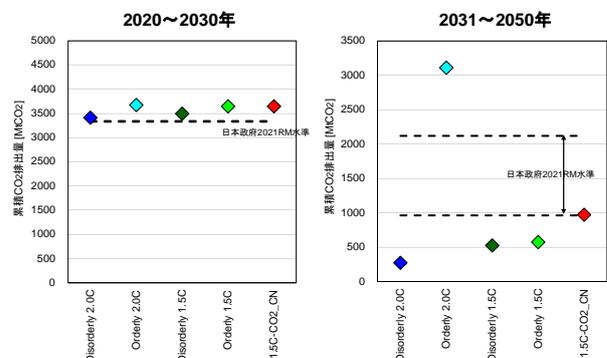


図 14 発電部門 CO₂ 排出量(日本)の日本政府ロードマップとの比較

水素系エネルギーについては、水素供給については、VRE の更なるコスト低減を見込んでいる Orderly 2.0C/1.5C や 1.5C-CO₂_CN では国内での水電気分解による製造も見られるが、その他のシナリオでは専ら海外からの輸入となっている。利用用途については、2030 年や 2040 年においては発電での利用が多いが、2050 年になると鉄鋼部門の水素直接還元製鉄での利用が多くなる。アンモニアについては、Disorderly 2.0C/1.5C では、VRE のコスト低減が相対的に緩やかであることもあり、海外で製造したブルーアンモニアが発電部門で利用される。その他、石油化学部門等、産業部門でのカーボンニュートラル燃料として利用されている。e-メタンは、民生部門やその他産業部門で利用される他、発電部門でも利用されている(CCS を導入することで、BECCS と同様に実質負排出)。なお、e-メタンの製造は再エネコストが安価な海外が主で輸入して利用しているが、1.5C-CO₂_CN の下では革新的メタネーション技術による国内生産も見られる。なお、e-fuels も輸入での利用が見られる。

3.3. ガス・石油供給

図 15 にガス供給量を示す。Orderly 2.0C では、2050 年までは天然ガスはほぼ現状～微減程度の供給量である。その他のシナリオでは、2040 年、2050 年にかけて水素、もしくは e-メタンによる供給が多い。なお、水素が e-メタンかは、コスト低減のタイミングの想定等、前提条件によってセンシティブである。図 16 はガス部門の CO₂ 排出量であるが、発電部門の CO₂ 排出係数の低減と比べると、2030 年や 2040 年時点での低減は進んでいない。天然ガスは CO₂ 原単位が小さいため、2030~40 年頃まではその活用は、2°C、1.5°C シナリオと整合的である。

図 17 に石油(液体燃料)の供給量を示す。供給量は、輸送サービス需要の減少や、自動車の燃費向上や EV 化等により、いずれのシナリオでも大きく低減している。特に、再エネと EV の技術進展を高位と見込んでいる Orderly 1.5C や 1.5C-CO₂_CN ではその傾向が強い。2050 年には e-fuels の利用も見られ、特に CO₂

貯留の拡大率を低く想定している Orderly 1.5C では、排出のオフセットが小さくなること、再エネコストの更なる低減で e-fuels 価格も低下すること、により石油系燃料から e-fuels への代替がより進んでいる。

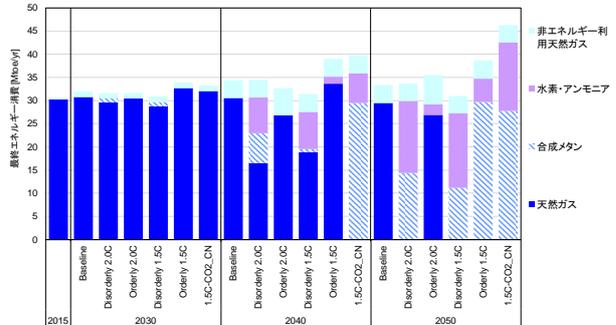


図 15 ガス供給量(日本)

注: グラフの水素・アンモニア供給量には発電部門、鉄鋼部門、石油化学部門での利用は含めていない。

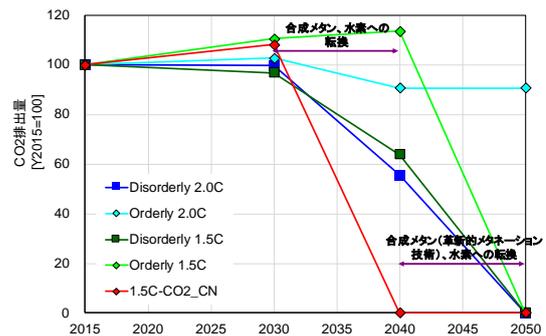


図 16 ガス部門 CO₂ 排出(日本)

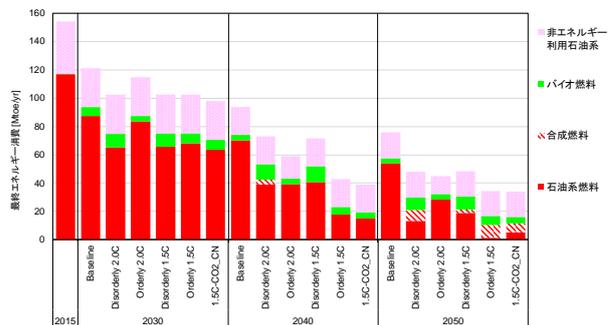


図 17 石油(液体燃料)供給量(日本)

注: グラフには発電部門での利用は含めていない。

3.4. 産業部門

図 18 は産業部門の最終エネルギー消費量を示している。2040 年においても 2030 年に近い水準の石炭利

図 23、図 24 は、セメント部門の最終エネルギー消費量、技術別クリンカ生産量をそれぞれ示している。Orderly 2.0C を除けば、2030 年においては石炭からガスへの転換が経済合理的な対策と評価されている。2040 年に向けては更にガスへの転換を進め、2050 年においては e-メタンの利用が主となっている。なお、CDR の利用を制約している 1.5C-CO₂_CN においては CCS の導入が進むため、他シナリオに比べエネルギー消費が多くなっている。図 25 にはセメント部門の CO₂ 排出原単位を示す。1.5C-CO₂_CN 以外のシナリオでは、CCS の導入は見られず、プロセス起源 CO₂ を

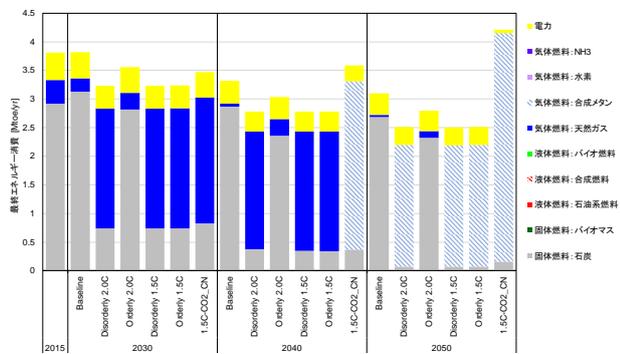


図 23 セメント部門最終エネルギー消費量(日本)

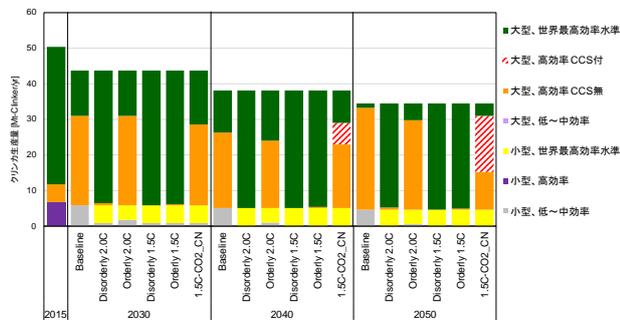


図 24 セメント部門技術別クリンカ生産量(日本)

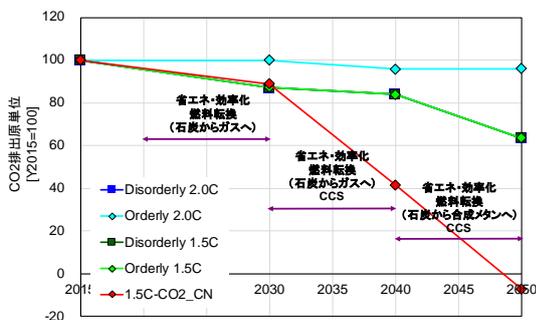


図 25 セメント部門 CO₂(エネルギー起源+プロセス CO₂)排出原単位(日本)

含む排出は 2050 年になっても残る。1.5C-CO₂_CN においては、e-メタン+CCS(正味負の排出)を導入することで、実質ゼロ排出となっている。

その他、紙パルプ、化学部門のシナリオ分析、ロードマップ策定も行った。

3.5. 運輸部門

図 26 は日本の運輸部門の最終エネルギー消費量をそれぞれ示している。再エネ及び EV の大幅なコスト低減を見込んでいる Orderly シナリオ、1.5C-CO₂_CN シナリオにおいては、2040 年頃から特に電力が増大していると同時に、e-fuels の利用も見られる。Orderly 1.5C や 1.5C-CO₂_CN においては、乗用車は BEV もしくは FCEV となっており、道路交通部門における e-fuels 利用はトラックが主となっている。

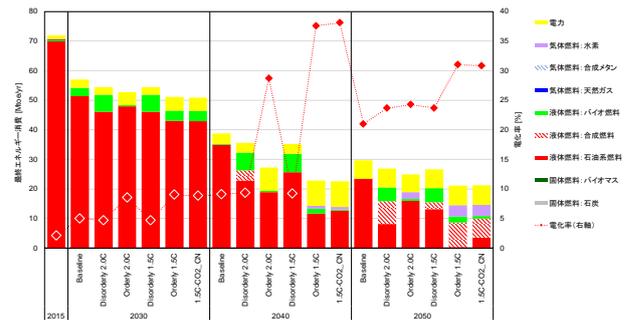


図 26 運輸部門最終エネルギー消費量(日本)

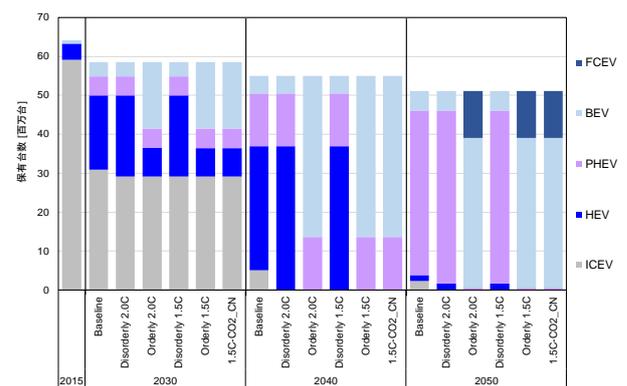


図 27 技術別乗用車保有台数(日本)

図 27 に、日本における技術別の乗用車保有台数を示す。EV の技術進展を中位としている Disorderly シナリオでは、乗用車については、2030 年頃の排出削減対策は HEV が中心で、以降は PHEV についても拡大し、2050 年には PHEV が主となる結果である。他方、EV

の技術進展を高位としているシナリオにおいては、BEVの普及がより早期から進み、2040年時点でBEVが主となり、2050年にはFCEVの普及も見込まれている。

3.6. 民生部門

図28に民生部門の最終エネルギー消費量を示す。排出削減が厳しい程、電化率を向上させることが経済合理的と評価される。Orderly 2.0Cにおいては、従来と同様に都市ガスが、その他のシナリオでは、気体燃料はe-メタン、もしくは水素利用となっている。

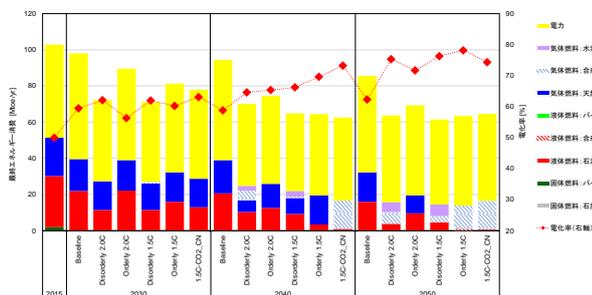


図 28 民生部門最終エネルギー消費量(日本)

4. まとめと課題

2°C、1.5°C目標に整合的で、NGFS や IEA シナリオと整合性を有する 5 種類のシナリオを想定し、定量的かつ整合的な分析が可能な DNE21+モデルを活用して、トランジションを含めた分析を行った。排出経路は、部門によって差異が大きくなっており、技術等の想定シナリオによっても幅が大きい。特に CDR の見通しによって大きな差異が生じ得る。なお、部門毎の排出経路を比較すると、排出削減オプションが豊富な発電部門におけるCO₂ 排出原単位の改善は、比較的早期からの進展が求められる結果となっている。これは、IPCC や IEA シナリオ等とも整合的な結果である。他方、CO₂ 排出原単位の小さな天然ガスは、2°Cや 1.5°Cシナリオにおいても、日本では 2030 年に向けては増大する方が経済効率的な対策と評価された。また、鉄鋼部門は、CO₂ 削減対策が困難で 2040 年頃までは最大 1 割程度の排出減に留まるシナリオが示された。これら分析は、2021~22 年度に日本政府において作成された部門別ロードマップとも総じて整合的であり、政府ロードマップは 2°Cの

みならず 1.5°Cの排出削減経路と整合的な水準になっていると言える。

今回の分析では、5 種類のシナリオに絞って提示した。それでも大きな幅があるが、実際には 5 種類のシナリオで考慮しきれない不確実性があり、シナリオの解釈には留意が必要である。また、DNE21+モデルは相対的には詳細なモデルではあるが、それでもモデルは、現実の事象を高度に簡素化して表現している。現実には多様な主体があるし、退出、新設ともに地元との調整に時間を要するなど、より複雑な移行過程が必要であるが、モデルはこれらについてはほとんど考慮できていない。モデル分析の透明性を確保するために、不透明な制約は意図的に考慮しないようにもしている。よって、これらの点もよく理解しつつ、出来る限り幅広い対策オプションの中から費用効率的な対策を採っていくことが、より早期のCN 実現の近道になると考えられ、本シナリオ分析、ロードマップはその戦略策定に有用と考えられる。

引き続き、技術動向等を注視し、適宜更新作業を実施する他、日本以外の個別国・地域のロードマップについても策定し、幅広い国での利用の促進に資することは、今後の課題である。

参考文献

- 1) RITE: カーボンニュートラルに向けたトランジションロードマップの策定(2023年度版) <https://www.rite.or.jp/system/latestanalysis/2024/01/FY2023sectorroadmap.html>
- 2) IPCC: Climate Change 2022–Mitigation of Climate Change. Cambridge (2022)
- 3) NGFS: NGFS Scenarios for central banks and supervisors (2022)
- 4) ICMA: Overview and Recommendations for Sustainable Finance Taxonomies (2021)
- 5) IEA: Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach (2023)
- 6) 経済産業省:分野別ロードマップの策定にあたって、経済産業分野におけるトランジション・ファイナンス推進のためのロードマップ策定検討会(2021, 2022)

バイオ研究グループ

グループメンバー(2024年4月)

グループリーダー・主席研究員	乾 将行	研究員	清水 崇史
副主席研究員	寺本 陽彦	研究員	Dita Grinanda
副主席研究員	平賀 和三	研究員	新宅 みゆき
副主席研究員	寺崎 肇	研究員	黒石川 嵩幸
副主席研究員	宮本 正人	研究員	田島 直幸
副主席研究員	畚野 信剛	研究助手	渡邊 淳子
主任研究員	田中 裕也	研究助手	池永 由布子
主任研究員	須田 雅子	研究助手	水口 祥子
主任研究員	北出 幸広	研究助手	永守 美雪
主任研究員	長谷川 智	研究助手	内藤 香枝
主任研究員	渡邊 彰	研究助手	池田 永子
主任研究員	小暮 高久	研究助手	米田 和代
主任研究員	久保田 健	研究助手	小泉 真夕
主任研究員	大井 潔	研究助手	西 素巳
研究員	肥後 明佳	研究助手	岩島 淳己
研究員	Natalia Maria Theresia	研究助手	吉田 佳世
研究員	柏木 紀賢	研究助手	岡田 亜弥
研究員	橋本 龍馬	研究助手	フォークナー 真紀
研究員	猿谷 直紀	研究助手	栢村 里美
研究員	野寄 裕貴	研究助手	初谷 良子
研究員	Dyah Candra Hapsari Subagyo		

カーボンニュートラルに貢献するバイオものづくり技術の開発

1. はじめに

バイオプロセスは常温常圧下でのものづくりが可能であるため、高温高压下でのものづくりが行われる化学プロセスと比べて、CO₂ 排出削減が期待できる。また、一般的に細胞内で多段階の反応により合成されるので、化学プロセスに比べて、炭素数の多い複雑な化合物の生産に強みを持つ。このように、バイオものづくりは、資源自律や化石資源依存からの脱却といった地球規模の社会課題解決と経済成長との両立を可能とするイノベーションとして注目されている。合成生物学やゲノム編集技術などのバイオテクノロジーと IoT や AI などのデジタル技術との融合によるバイオ×デジタル技術の発展や、化石資源脱却、資源自律の必要性など地球環境問題への意識の高まりに伴って、今後実用化が加速し、市場規模が急拡大すると予想されている。米中では同分野に巨額の投資が行われており、国際競争が激しさを増している。我が国でも、バイオものづくりに関して、新たな微生物の設計・開発や微生物を用いた製造プロセスの高

度化などに必要となる技術開発や社会実装を行う大型事業として、今年度からグリーンイノベーション基金事業とバイオものづくり革命推進事業が開始された。これらの事業は、原料を石油から大気中の CO₂ や未利用資源に切り替えることで、カーボンニュートラル・カーボンネガティブを実現することを目指している。

このような背景の下、RITE では、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。RITE では、代表的な工業微生物であるコリネ型細菌が、還元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などを効率よく生成する現象を見出し、これを基に、増殖非依存型バイオプロセス「RITE Bioprocess」^{※1}を開発した。また、工業化に必須な要素技術である「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」などを確立した(2章1節参照)。これらの技術を利用して、バイオ燃料

としてはエタノール、ブタノール、グリーンジェット燃料、バイオ水素、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など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、ポリマーなどの原料となる芳香族化合物などの生産技術開発やCO₂を直接原料としたバイオものづくり技術開発に注力している。

これまでに NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)「スマートセル」プロジェクトや「データ駆動型統合バイオ生産マネジメントシステム」プロジェクトに参画し、バイオ×デジタル技術である「スマートセル創製技術」の開発を進めてきた(2章2節参照)。また、同技術を利用した民間企業との共同開発として、NEDO「バイオものづくり実証」プロジェクトにも参画し、カロテノイドや香料のバイオ生産の事業化に向けた研究開発を行っている(3章4節、3章5節参照)。今年度からは、グリーンイノベーション基金事業とバイオものづくり革命推進基金事業に参画し、CO₂からの高機能接着剤原料のバイオ生産技術開発と未利用資源から有用化学品を産み出すバイオアップサイクリング技術開発を開始した(3章1節、3章2節参照)。さらに、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も取り組んでいる(3章6節参照)。

本概説では、まず、我々のコア技術である「RITE Bioprocess」^{※1} 及び「スマートセル創製技術」等について説明する。次に、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」^{※1}

RITEが開発した「RITE Bioprocess」^{※1} 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)。

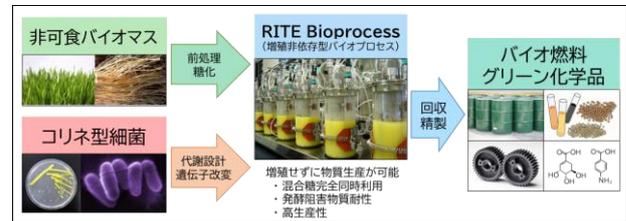


図1 「RITE Bioprocess」^{※1} を利用したバイオリファインリーの概念

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)。すなわち、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。

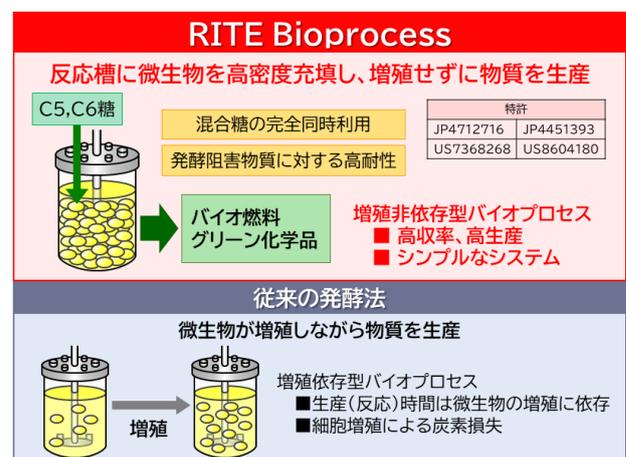


図2 「RITE Bioprocess」^{※1} の特長① (増殖非依存型バイオプロセス)

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。

RITE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。

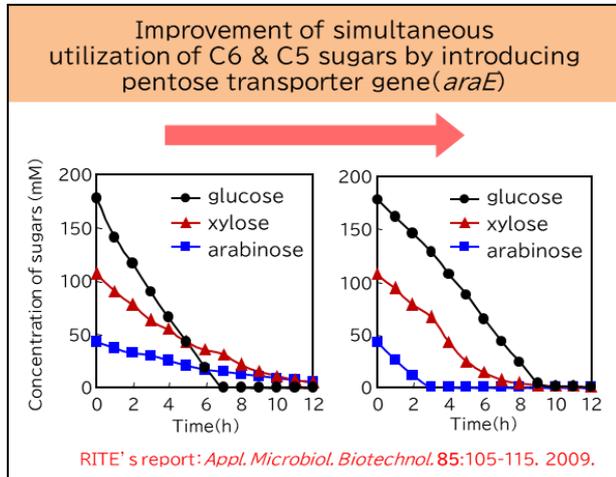


図3 「RITE Bioprocess」^{※1}の特長②
(C5&C6糖類の完全同時利用)

特長③ 発酵阻害物質に対する高耐性

「RITE Bioprocess」^{※1}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。

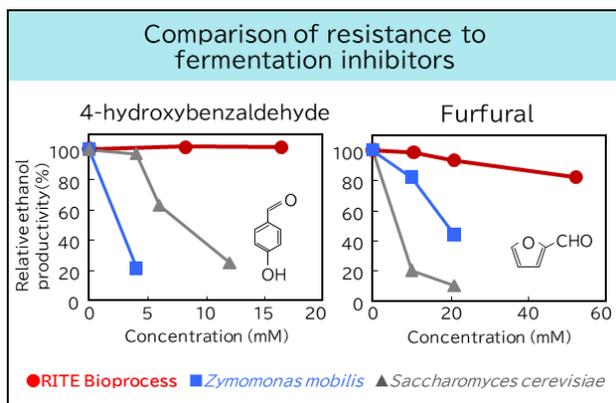


図4 「RITE Bioprocess」^{※1}の特長③
(発酵阻害物質に対する高耐性)

2.2. スマートセル創製技術

最先端バイオテクノロジーとデジタル技術の融合が進

むことで、生物細胞が持つ能力を最大限に引き出し、物質生産に最適化した細胞「スマートセル」を創り出すことが可能となってきた。スマートセルをデザインするための情報解析技術と、設計図を具現化した生産株を生み出すための要素技術が組み合わせることでスマートセル開発の飛躍的な効率化が進んでいる。RITE は、スマートセルプロジェクト(NEDO「植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発」、2016 年度~2020 年度)に参画することでこれらの技術群の開発に携わってきた。同時に実際にターゲット化合物を設定しその生産株を効率よく生み出すことで、技術の有効性を示すことができた。RITEはこの技術群を取り込むことで生産株育種技術と発酵生産技術のレベルアップに成功した(図5)。また、このスマートセル創製技術群は NEDO バイオものづくりプロジェクトに引き継がれ、微生物生産の実用化に向けた改良が重ねられている。

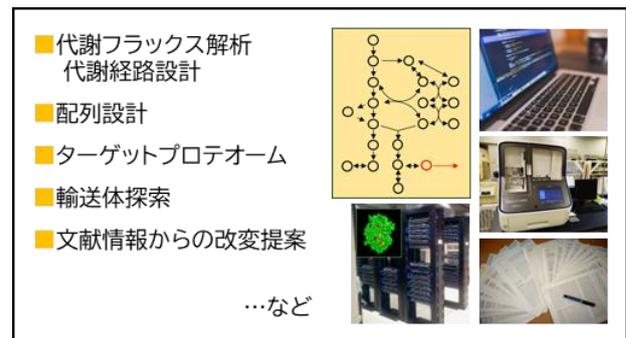


図5 スマートセル創製技術

2.3. 連続反応システム

RITE では、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する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となった。そこで、この細胞毒性の影響を回避して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が実現した。

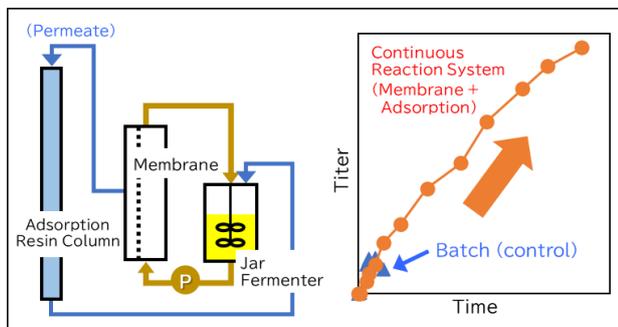


図 6 膜分離と樹脂吸着を利用した連続反応システム
(カテコール生産事例)

2.4. 主な生産物質

現在、RITE 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
<ul style="list-style-type: none"> ■ ガソリン混合・代替 ・エタノール* 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 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) ・アニリン*(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) ・プロピルカテコール*(化粧品原料)
<ul style="list-style-type: none"> ■ バイオジェット燃料 ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 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*
<ul style="list-style-type: none"> ■ バイオ水素 	<ul style="list-style-type: none"> ■ アミノ酸 ・アラニン(キレート類) ・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)
<ul style="list-style-type: none"> *: ポリマー原料 赤色文字: 世界的高水準生産達成 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 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)

図 7 「RITE Bioprocess」^{※1} による主な生産物質

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、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。RITE 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。

3. 基盤技術開発(国家プロジェクト)

3.1. NEDO グリーンイノベーション基金事業^{※2}

NEDO グリーンイノベーション(GI)基金事業「バイオものづくり技術による CO₂ を直接原料としたカーボンリサイクルの推進」は、「2050 年カーボンニュートラル」の目標達成に向け、CO₂ を原料とした新しいバイオものづくり製品の開発と社会実装により、カーボンニュートラル実現に貢献するとともに、CO₂ の資源化による産業構造の変革を目指す。

この中で RITE は、積水化学工業株式会社と共同で「バイオものづくり技術による CO₂ を原料とした高付加価値化学品の製品化」という事業を 2023 年度から開始し、実施中である(事業期間:2023~2030 年度の 8 年間)(詳細は「特集」を参照)。

3.2. NEDO バイオものづくり革命推進事業^{※2}

国内の廃棄されているバイオマスなどの未利用資源を原料としバイオテクノロジーにより有用な物質に変換することで環境問題などの社会課題と経済成長の両面の解決を目指すための事業である(詳細は「特集」を参照)。

3.3. NEDO バイオものづくりプロジェクト^{*2}

NEDO「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」、通称バイオものづくりプロジェクトでは、化石資源に依存しないバイオマスからの物質生産を目指し、バイオテクノロジーとデジタル技術を融合させた研究開発を行っている(2020 年度～)。スマートセルプロジェクトを前身とするこの事業では、新たなバイオ資源の拡充や分離・精製、回収等を含むバイオ生産プロセスを開発し、産業用物質生産システムの実証を通じてバイオ由来製品の創出を加速させることを目的としている。具体的には、「バイオ資源活用促進基盤技術開発」、「生産プロセスのバイオファウンドリ基盤技術開発」、「産業用物質生産システム実証」の三つの研究開発を実施している。

このプロジェクトに RITE 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群(産業用スマートセル創製技術)の開発を進めている(図 8)。2023 年度は主に巨大発酵槽内の培養環境不均一性に起因した培養ストレスによる生産性低下を解消する技術開発を連携研究機関と共に実施した。RITE は、培養ストレスを再現した環境での詳細な遺伝子発現データ、代謝物データを取得・提供することで発酵生産シミュレーションモデル構築と検証に貢献した。このような、実際の大スケールでの生産時に起こりうる問題の解決技術を提供することで生産株開発の手戻りをなくしバイオ由来製品の社会実装を加速することを目指す。



図 8 バイオものづくりPJ

産業用スマートセル創製技術の開発

3.4. NEDO バイオものづくり実証事業(カロテノイド)^{*2}

カロテノイドは植物や一部の微生物が生産する色素化合物で、近年、その高い抗酸化活性から、生活習慣病予防やアンチエイジングに有効な機能性成分としての需要が高まっている。しかし、カロテノイドの天然原料中の含有量は微量なため、市場に流通しているカロテノイドの大半は石油を原料とした化学合成品である。また、多くのカロテノイドはその化学構造に起因して体内に吸収されにくく、バイオアベイラビリティが非常に低いという問題がある。化学的に構造変換させ、バイオアベイラビリティを高める試みもされているものの、その変換率の低さが課題となっている。近年、カロテノイド高生産微生物の開発が世界で進められているが、その生産物も吸収性が低いタイプのカロテノイドである。

RITE では、2022 年から NEDO バイオものづくり実証事業「高吸収型天然カロテノイドの大量生産システム実証」(代表機関名:ハリマ化成株式会社)に参画し、バイオアベイラビリティに優れたカロテノイドをバイオ生産法によって大量供給するシステムの社会実装を目指している(図 9)。これまでに RITE では、バイオアベイラビリティに優れた高吸収型カロテノイドを特異的に高生産するスマートセルの開発に成功している。現在、スマートセルの改良に加え、大量培養法の確立、ならびに菌体に蓄積するカロテノイドの高効率な抽出・精製法の開発を進めている。

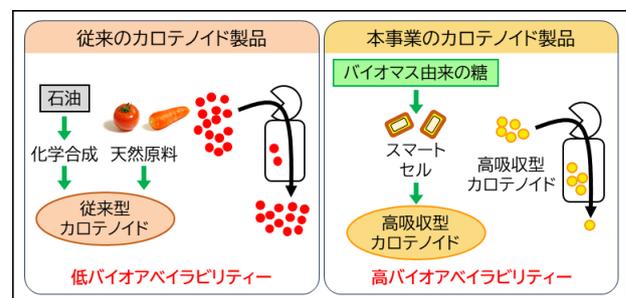


図 9 高吸収型カロテノイド生産の社会実装

3.5. NEDO バイオものづくり実証事業(ローズ香料)^{*2}

RITE では、2022 年から NEDO バイオものづくり実証事業「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 10)。2023年度は、生産株の開発と生産条件の検討により上記生産システムを用いて生産性を高めることに成功した。今後は、生産株の改良、スケールアップ検討、フロー連続単離装置の改造を進め、国産初の合成生物学による香料素材製造の社会実装を目指す。



図 10 ローズ香料素材の生産実証

3.6. NEDO ムーンショット型研究開発事業^{※2}

NEDO ムーンショット型研究開発事業の研究開発プロジェクト「非可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(図 11)。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、使用時にはマルチロック機構によって分解を抑えて耐久性・強靭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海洋生物や環境への悪影響が懸念されている。

RITE では、2023 年度は、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開発への展開)を含めた研究開発を実施した。まず、耐熱性のプラスチック分解酵素を生分解性の担体に静電的に結合させることで、酵素の耐熱性を飛躍的に向上させることに成功した。次に、これを熱溶融によってプラスチックに練りこん

だフィルムを作製して海水にさらした結果、速やかに酵素分解(オンデマンド分解)が生じることをラボレベルで証明することに成功した。

今後はプラスチック分解酵素の高機能化や、プラスチックとの混練条件の最適化などをつうじて、さらに高速なオンデマンド分解を目指す。また、海洋フィールド(愛媛県愛南町など)における分解試験の他、米国エネルギー省 ARPA-E との国際共同研究を新たに開始する。(本プロジェクトのホームページは[こちら](#))

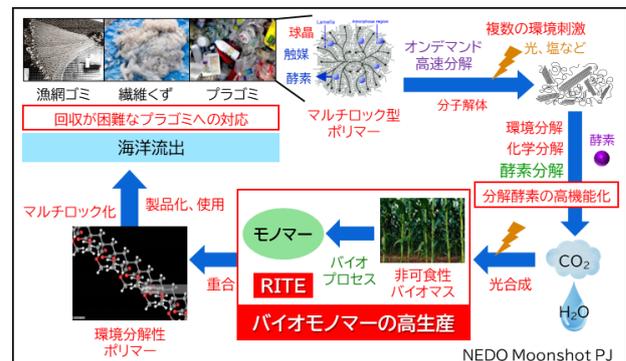


図 11 マルチロック型生分解性プラスチックの開発による資源循環の実現イメージ

3.7. JST COI-NEXT

RITE は、2023 年度に始まった JST(国立研究開発法人科学技術振興機構) COI-NEXT(共創の場形成支援プログラム)「カーボンネガティブの限界に挑戦する炭素耕作拠点」に参画し、研究開発課題 3(炭素耕作による燃料生産技術の開発)の中で、バイオ水素生産技術とバイオ液体燃料生産技術の開発を進めている。本研究では、光合成による CO₂ 固定量の大幅な増大を目指してバイオマス生産技術の開発を実施する参画機関と連携し、多様なバイオマスから高効率で燃料を生産するためのバイオ変換技術の開発を行う(図 12)。究極のクリーンエネルギーとして期待されており、カーボンニュートラルの鍵となる CO₂ フリー水素生産プロセスの開発を中長期的な課題とし、これと共通の基盤技術を利用した液体燃料生産プロセスの開発を短中期的な課題として設定している。バイオマス燃料生産技術の社会実装には、生産コストの低減が課題である。また、バイオマス原料の成分は多様であり、その組成は原料の種類によって大きく異

なるため、画一的な技術で広範な需要を満たすのは難しい。これらの課題を解決するため、本拠点では、多様な熱化学、及び生物学的変換技術の開発を一体的に進めることで技術融合・技術革新を実現し、経済性・環境性・社会受容性の観点から社会実装の実現性が高いシステムを選抜する。

RITE では、これまでに開発した高速バイオ水素生産プロセスを基盤とし、バイオマス由来糖類からの水素収率の大幅向上に向けた微生物触媒の開発に取り組んでいる。新規水素生産経路を導入した微生物を構築し、代謝改変により、その水素生産能が向上している。また、RITE は、C6&C5 混合糖を高効率にエタノールに変換できるバイオプロセスを確立している。この技術で、エネルギー作物や炭素固定量の多いイネ、糖含量の多い微細藻類等から可能な限り全ての糖類を回収、エタノールに変換し、これを化学反応によりジェット燃料に変換する SAF（持続可能な航空燃料）製造技術の確立を目指す。

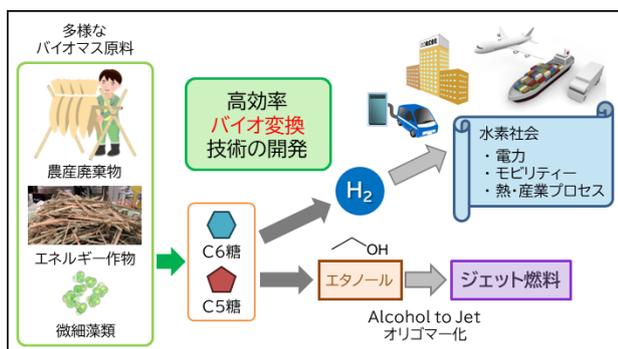


図 12 バイオ水素/バイオエタノール生産技術の開発

4. 実用化への取り組み

4.1. グリーンケミカルズ株式会社(GCC)

(本社・京都研究所:RITE 本体内、静岡拠点:住友ベークライト株式会社静岡工場内)

(GCC ホームページは[こちら](#))

2010 年 2 月、RITE は、住友ベ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。

2023 年度は GCC の開発品 2 品目の生産株、4-ヒドロキシ安息香酸(4-HBA)生産株とプロトカテク酸生産株に対し、経済産業省から産業利用の承認が得られた。

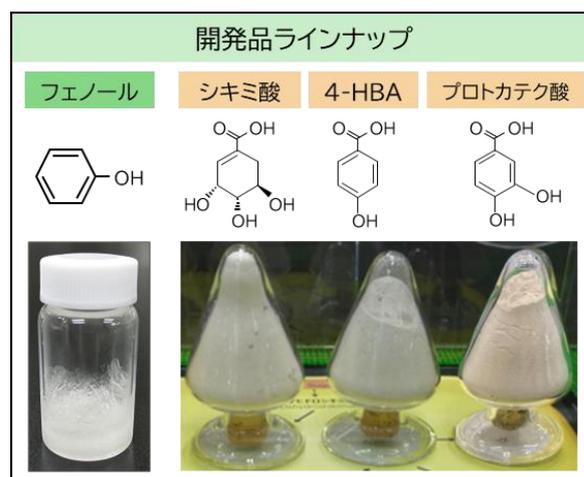


図 13 GCC の主な開発品ラインナップ

4.2. Green Earth Institute 株式会社(GEI)

(本社:東京都新宿区新宿三丁目 5 番 6 号 キュープラザ新宿三丁目 6 階、研究開発拠点:千葉県木更津市かずさアカデミアパーク)

(GEI ホームページは[こちら](#))

2011 年 9 月、RITE は、「RITE Bioprocess」^{*1}を事業化するため、Green Earth Institute 株式会社を設立した。2021 年 12 月、業績の発展に伴い、同社は東京証券取引所(マザーズ)に上場、2022 年 4 月、市場再編により東京グロス市場に移行した。

現在、同社では、NEDO より受託したバイオファウンドリ事業、グリーンイノベーション基金事業、バイオもの

づくり革命推進事業等、国内外のパートナー企業等との研究開発を推進させている。

4.3. 企業との共同研究

本概説で紹介している主な生産物質(第2章第4項参照)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。

前述の NEDO バイオものづくり実証事業のハリマ化成株式会社および高砂香料工業株式会社以外にも、多くの企業と共同研究を実施している。それらの中には、企業の1商品(化石資源由来の物質)を早期にバイオ由来に転換する研究開発に加えて、企業の主力商品あるいは主要原料(化石資源由来の物質)を、中長期的にバイオ由来に転換するための研究開発もある。

5. 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、3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)。

RITE では、今後も「スマートセル創製技術」や「RITE Bioprocess」^{※1} などを活用し、未利用資源や大気中のCO₂を原料とする研究開発、さらにはグリーン化学品の実用生産技術開発にも注力し、カーボンニュートラルに貢献するバイオものづくり技術の開発を推進してゆきたい。

なお、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 では、引き続き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、ぜひご連絡いただきたい。

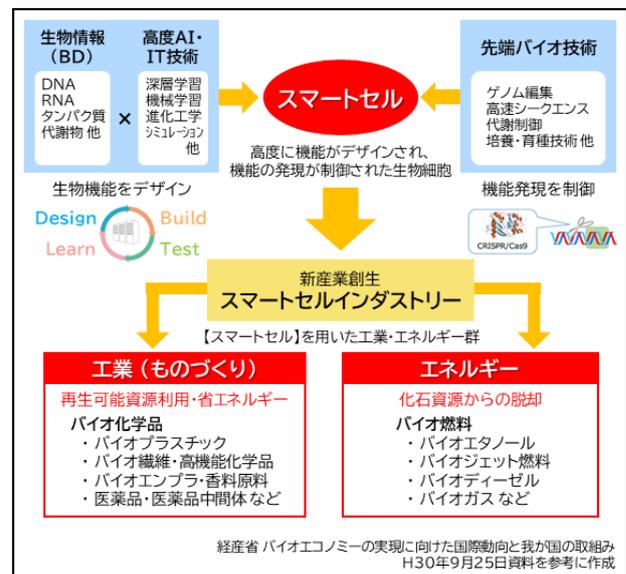


図 14 “バイオ×デジタル”が拓く世界

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

※2 この成果は、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)の委託・助成事業の結果得られたものです。

化学研究グループ

グループメンバー(2024年4月)

グループリーダー・主席研究員	余語 克則	研究員	前田 浩彰
サブリーダー・主席研究員	水野 雅彦	研究助手	荒木 華子
主席研究員	喜多 英敏	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
サブリーダー・副主席研究員	山田 昌宏	研究助手	尾方 秀謙
副主席研究員	林 成年	研究助手	小倉 公美子
副主席研究員	Firoz Alam Chowdhury	研究助手	鹿嶋 麻衣
主任研究員	甲斐 照彦	研究助手	片岡 梢
主任研究員	木下 朋大	研究助手	菰野 恵子
主任研究員	久貝 潤一郎	研究助手	杉本 理絵
主任研究員	後藤 和也	研究助手	手嶋 孝
主任研究員	瀬下 雅博	研究助手	奈良 裕子
主任研究員	村岡 利紀	研究助手	鳴瀧 陽三
主任研究員	龍治 真	研究助手	藤井 暁義
研究員	伊藤 史典	研究助手	藤原 洋一
研究員	大島 悠輔	研究助手	宮地 裕子
研究員	清川 貴康	研究助手	森 恵子
研究員	段 淑紅	研究助手	森 美佐都
研究員	Vu Thi Quyen	研究助手	保野 篤司
研究員	孟 烈	研究助手	吉井 隆裕
研究員	山口 創司	研究助手	吉野 直美
研究員	窪田 善之	研究助手	米澤 順子
研究員	鳥越 葵		

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

化学研究グループでは、研究部門と産業連携部門の組織体制を構成し、CO₂分離回収・有効利用に関わる各種技術の早期実用化・産業化を目指した研究開発およびその産業利用に向けた活動を行っている。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・有効利用技術の研究開発

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。

2022年5月には「クリーンエネルギー戦略」が策定され、該戦略の下でCCS長期ロードマップが取りまとめられた。2050年時点でのCO₂貯留量の目安が1.2~2.4億トンと明記され、その実現に向けた先進的CCS事業国内7拠点が採択されている。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・回収技術を確立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(経済産業省)」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。二酸化炭素の除去(CDR)、回収・利用・貯留(CCUS)においてCO₂を循環的に利用したり削減したりする取り組みであるカーボンマネジメントが本格化している。

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を使った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への展開も進めており、低温再生だけでなく酸化劣化耐性の高い固体吸収材を開発中である。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、これまで高圧ガス(二酸化炭素(CO₂)/水素(H₂))源としてIGCC(Integrated coal Gasification Combined Cycle:石炭ガス化複合発電)、水素製造プラントを適用先に想定してきたが、2024年度からは、小型中圧水素製造システム(CO₂回収型水素製造装置)の実証試験に向けた新たなNEDO事業を開始する。

CO₂分離・回収の標準化へ向けた取り組みも推進している。NEDO事業「CO₂分離素材の標準評価共通基盤の確立」において、国内初の実ガス試験センターをRITE内に設置し、実ガスを使用する標準評価法の確立を行う。2024年度中にセンターを竣工する予定である。また、ITCN(International Test Center Network: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)に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いる。該ネットワークを通して、CO₂分離・回収の標準化へ向けた取り組みを世界へ発信する。

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、産業廃棄物等に含まれるカルシウム、マグネシウムを利用して排ガス中に含まれるCO₂を固定化する。アミン液を利用してカルシウム、マグネシウムを選択的に抽出してCO₂と反

応させて高純度な炭酸カルシウムを製造する。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NEOOより受託し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CO₂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CO₂を含む溶液を加熱昇温し、高純度CO₂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CO₂濃度の混合ガスへの適用が可能であり、化学吸収法はCCS分野では最も成熟したCO₂分離・回収技術の一つである。

RITEは、「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、製鉄プロセスを対象に、CO₂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、その成果は、日鉄エンジニアリング株式会社の商業設備「省エネ型CO₂回収設備 ESCAP[®]」に採用されている(図1)。



図1 省エネ型CO₂回収設備 ESCAP[®]

(住友共同電力(株)新居浜西火力発電所内に設置の2号機。化学工場の化学副原料CO₂を製造。)

化学吸収法は前述のように商用レベルに達している

ものの、CCUSの社会実装加速には吸収液の量産化を含めた大規模化やコスト低減が課題であり、溶液再生工程でのエネルギー消費削減やアミンの耐久性向上などの取り組みが必要である。

RITEは、COURSE50において、水以外の溶媒を用いることで、CO₂の吸収形態および溶液中の分極影響を制御することができ、更なるエネルギー消費低減の可能性を有するブレイクスルー技術「混合溶媒系吸収液」を提示した(図2)。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CO₂との反応熱が低減できる。

本技術の研究開発は、2021年1月から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、混合溶媒系吸収液の化学種や液組成の最適設計、および実用性等の検討を進めている。2024年1月には日本製鉄(株)君津製鉄所において実際の高炉ガスを用いたベンチ試験を開始し、新たに開発した混合溶媒系吸収液の性能評価を実施している。



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、CO₂分離・回収エネルギーの低減が期待できる。

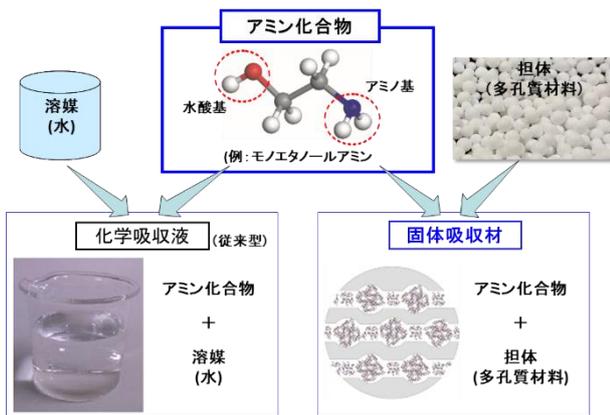


図3 化学吸収液と固体吸収材



図4 固体吸収法の開発ロードマップ

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以下の目的を得た。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が舞鶴発電所内に建設したパイロットスケール試験設備(40t-CO₂/day 規模)の試運転を完了し、2023 年度後半から RITE が供給した固体吸収材を用いた石炭火力発電所の燃焼排ガスからのCO₂分離・回収試験を開始した(図4)。

また、材料劣化機構の解明と劣化防止技術の開発、使用材の再利用技術、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。

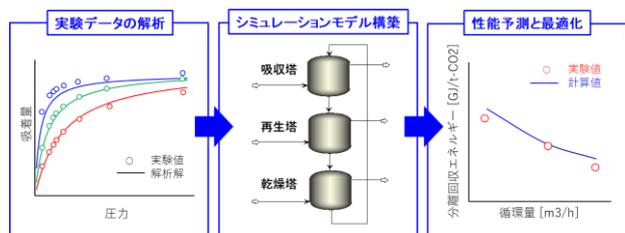


図5 RITEの保有するシミュレーション技術

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、千代田化工建設株式会社(幹事会社)、株式会社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 2024 年度にステージゲートが設定されているが、本年度開発したアミンにより目標を達成する固体吸収材の開発に成功している。この固体吸収材は低温再生が可能でなく、比較的酸素濃度が高い天然ガス火力発電所排ガスに適用できる非常に優れた酸化劣化耐性を有している点も特徴である(図 6)。

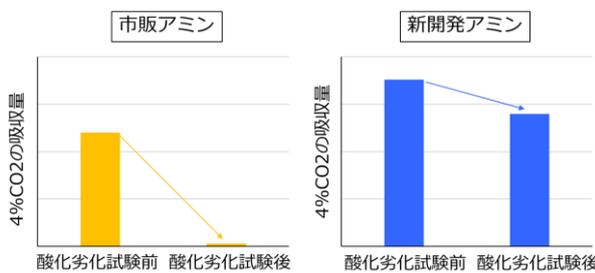
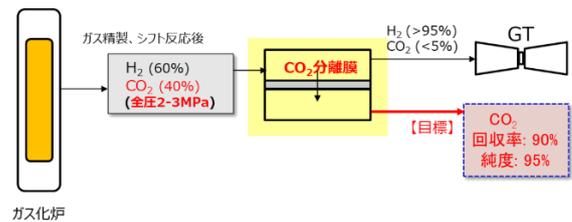


図 6 高温の酸素でアミンを強制的に酸化劣化させる試験実施前後の CO₂ 吸収量の変化
図中の縦軸は同じスケールを表す。

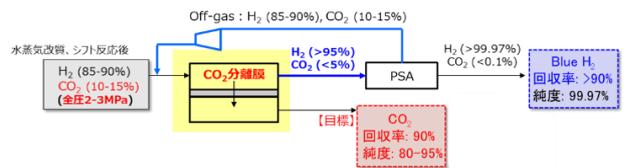
今後は前述のアミンの工業生産性を確認するとともに、ベンチ試験を実施し、その結果をもとに吸収材を改良していく予定である。

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)や水素製造装置への適用により、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)や水素製造装置からの 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。

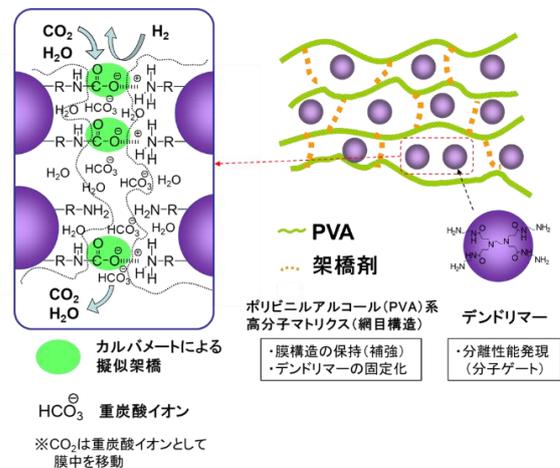


図 8 分子ゲート膜の概念図

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 及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。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だ。

膜材料の開発については、新たに本分離膜の適用先として小型中圧の水素製造装置を想定し、中圧条件向けに膜材料の改良を実施した。その結果、改良膜材料(単膜)の分離性能を向上させることができた。分離性能試験の結果を図 9 に示す。

膜材料の改良により、CO₂ パーミアンス、CO₂/N₂ 選択性共に向上させることに成功し、水素製造装置に適用するために必要な分離性能を示す膜材料が得られた。

膜エレメントの開発については、エレメント径が従来の 4 倍、エレメント長さが従来の 3 倍である 20cm 径、60cm 長の商用サイズ膜エレメントの開発に成功し、商用サイズ膜エレメントの製作技術を確認することができた(図 10)。2024 年度からは、小型中圧水素製造システム(CO₂ 回収型水素製造装置)の実証試験に向けた新しい事業を開始する。

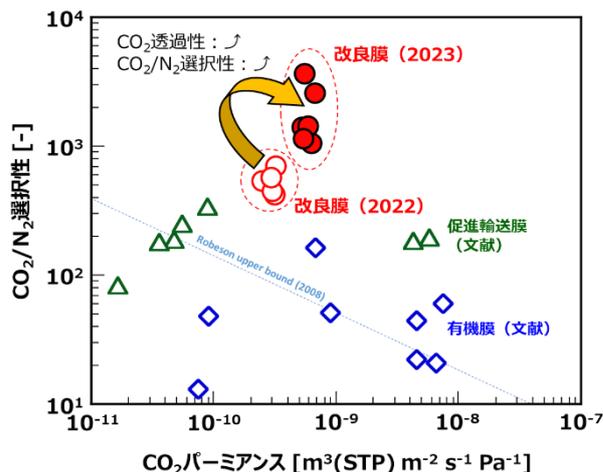


図 9 膜材料(単膜)の CO₂/N₂ 分離性能

MGM 膜の試験条件: 温度 85°C, 全圧 0.85MPa, 供給ガス組成 CO₂/N₂=20/80

文献: Kamio et al., J. Chem. Eng. Jpn., 56 (2023) 2222000.



CO₂ 分離膜



膜エレメント
(20cm 径、60cm 長)



膜モジュール
(20cm 径、60cm 長用ハウジング)

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、2023年度からは 6 件中 5 件が継続中である。

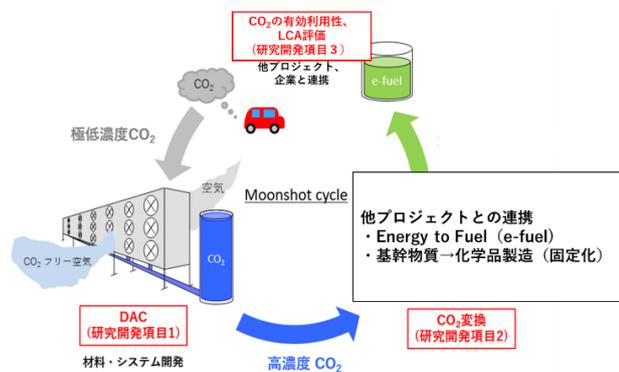


図 11 大気中からの高効率 CO₂ 回収・炭素循環技術の開発

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、大量の空気を通過さ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、吸収した CO₂ を圧力と温度スイングにより低エネルギーで脱離させる技術についても検討を進めている。ラボ試験装置(図 12)での基礎データの収集、プロセスシミュレーションによるアミン・吸収材構造の改良指針策定と最適運転条件の予測、DAC システム評価装置(図13; 三菱重工業株式会社にて設計・製作、RITE 敷地内に設置)での性能検証により、吸収材とシステムの性能向上を図っている。2025年には大阪・関西万博会場にて最大0.5t-CO₂/day 規模のベンチスケール実証試験を行う予定である。



図12 DAC ラボ試験装置

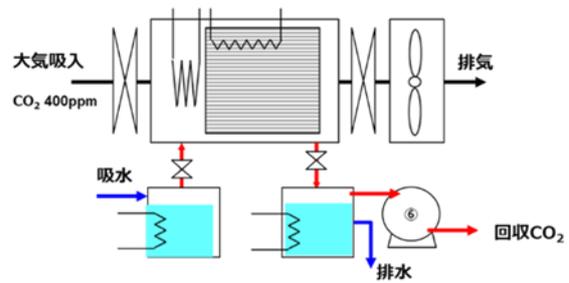


図13 DAC システム評価装置の概念図(上)と装置を設置した DAC 実験棟(下:RITE 敷地内)

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年間を予定(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。

2024年度までの3年間において、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、実ガスを用いて評価する実ガス試験センターを 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。実ガス試験センターは、図14に示すように、吸収液、吸着材および膜の各 CO₂分離技術の試験設備と、燃焼排ガスを供給するボイラーで構成し、2023年度までに基本設計が終了している。

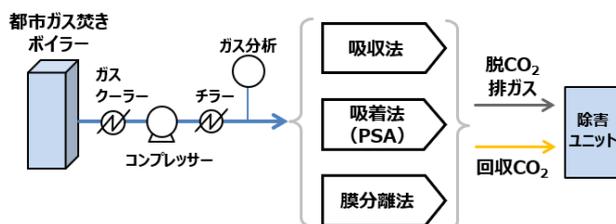


図14 実ガス試験センター全体構成

(各分離法に実ガスを供給:約 0.1t-CO₂/day 相当)

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、プロジェクト推進協議会を通じて国内企業の意見を収集するとともに、ITCN (International Test Center

Network)等の国際会合に参加し、海外の機関との協力体制構築にも努めている。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り、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 CO₂削減に効果的であり、世界各国で盛んに研究開発・実証検討が行われている技術である。その中で 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一つである。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。

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、比較的に高い透過分離性能を有する実用的長さの脱水膜を合成することに成功した。加えて、メタノール合成の反応温度域で目標値(H₂O 透過率: $1 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, H₂O/MeOH 選択性: >1,050)を達成することができた。特筆すべきは、長尺脱水膜の透過性が目標値の約2倍の高透過性を発揮しており、これは膜反応器に適用した際、メタノール合成効率の向上効果を期待することができる成果である(図15)。この性能を有する実用的長さの脱水膜を複数本具備したベンチスケール膜反応器

試験を JFE スチール(福山)にて実施中である。また、実用的長さの脱水膜の再現性向上を検討しており、図 16 に示す様に、合成条件を精査することにより、ラボスケール試験(図中のチャンピオンデータ)と同等程度の長尺膜を合成することに成功した。これは、すでに市販されている脱水膜よりも高い、あるいは同等程度の性能を有していた(図中の+のプロット)。また一般的な脱水膜である LTA 型ゼオライト膜と比較して Si-rich LTA 膜は高い水熱安定性が期待できるため、これまで LTA 型ゼオライト膜では適用の難しかった分離系への展開が可能になると考えられる。

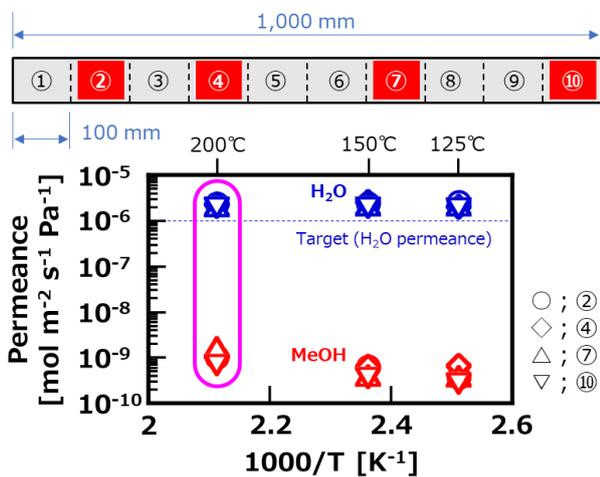


図 15 長尺脱水膜(100 mm カットサンプル)の H₂O/MeOH 透過分離性能

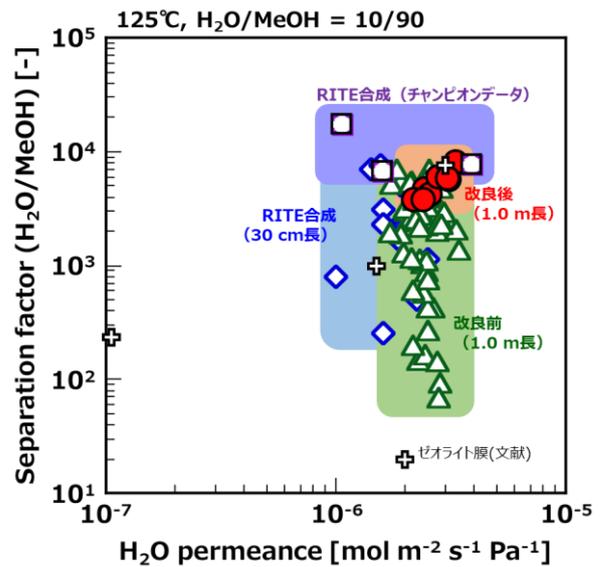


図 16 長尺脱水膜の H₂O/MeOH 透過分離性能

9. He 回収を目的とした無機系分離膜の開発

これまで RITE では水素製造を目的としたシリカ膜の開発を手掛けており、水素キャリアのひとつであるメチルシクロヘキサン(MCH)脱水素をはじめとして様々な反応により生成した水素を選択的に透過させることが可能な各種シリカ膜の製膜に成功している。シリカ膜は、対向拡散 CVD(Chemical Vapor Deposition:化学蒸着)法を用いて製膜しており、多孔質基材の内側に酸素(O₂)を、外側にシリカ源を供給することで、お互いが基材細孔内を拡散していき、出会ったところでシリカが析出する(図 17)。細孔内がシリカで埋まると、埋め切れていない箇所で優先的に反応が起こるため、比較的性能の高いシリカ膜を再現よく製膜することが可能である。

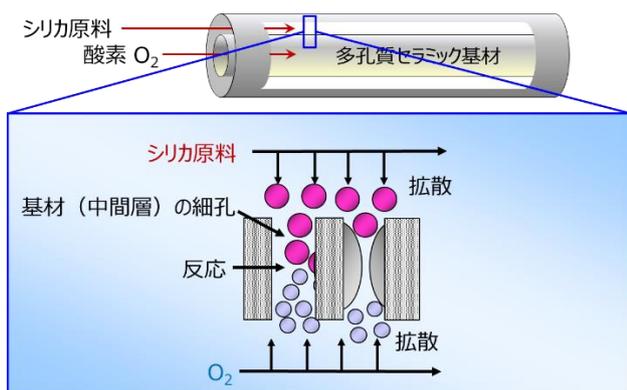


図 17 対向拡散 CVD 法によるシリカ膜の製膜イメージ

昨今、世界的なヘリウム危機が問題となっており、如何に確保できるかが重要となっている。また、省エネルギー性を考えると相変化を伴わない膜分離法でヘリウムを回収する方法が良いと考えられる。分子サイズは、ヘリウムが最も小さく、0.26 nm であり、そのほかの小分子のサイズは H₂:0.29 nm, CO₂:0.33 nm, N₂:0.36 nm, CH₄:0.38 nm であることを考えると、これまで RITE にて開発してきた水素分離用のシリカ膜はヘリウム分離に十分適用可能であると考えられる。現在、「NEDO 先導研究プログラム／新産業・革新技術創出に向けた先導研究プログラム／不燃性ガス田における高効率ヘリウム膜分離回収技術の開発」にて一般財団法人ファインセラミックスセンターからの再委託を受け、ヘリウム分離用シリカ膜の長尺化を検討している。

10. 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 年からは、民間企業との共同研究により、鉄鋼スラグ、廃コンクリート等から湿式でアルカリ土類金属を抽出し、工場等から排出される CO₂ を、安定した化合物である炭酸塩として回収する技術開発、生成した炭酸塩の有効技術の開発(図 18)に取り組んでいる。

本プロセスにおいて、これまで、反応温度の低下と反応時間の短縮による省エネ化、一度使用した液を再度使用するプロセス(再生液適用)を確立した。そして、スケールアップが可能なプロセスであることも明らかにした。加えて、抽出時に使用する液を改良することで、材料コストの低下も期待できる。現在、これまで明らかにしてきた知見と情報を基に、本プロセスの事業化を目指した検討を行っている。

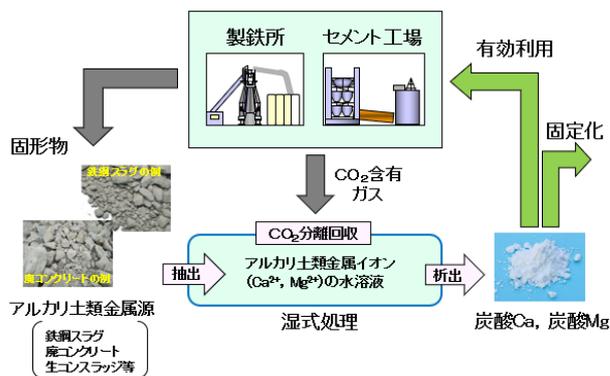


図18 CO₂ 炭酸塩固定化および有効利用技術

11. 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 33 社(2024年 4 月現在)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。

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て以下の事業を推進した。

【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、ホットトピックスの発信
- 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
- ④ 会員企業のニーズとシーズのマッチングを仲介

2023年度は CO₂ 分離回収研究会と膜反応器の2つの研究会を実施した。

CO₂ 分離回収研究会では、化学研究グループより、最新の DAC 技術について、各 DAC 企業の技術概要とトピックス紹介を行った。

膜反応器研究会では、化学研究グループより、膜反応器全般に関する情報提供、CO₂フリー水素製造に関する情報提供を行った。

会員限定無料セミナーは会場＋オンラインで3回開催し、大学、民間企業の研究者から CO₂ 分離回収および有効利用に関する最新の研究開発動向や開発事例の講演を行い、活発な質疑・応答が行われた。

さらに、講演内容に関連する特許・文献調査を行い、化学研究グループ研究員のコメントを記載した「ニーズ・シーズ情報」を 2 回、学会トピックスや経済産業省、NEDO の最新情報を記載した「ホットトピックス」を 1 回発信し、会員の技術開発推進と知見向上に寄与した。

また、2024 年 2 月に開催した「革新的 CO₂ 分離回収・有効利用技術シンポジウム」のポスター発表では、産業化戦略協議会の取り組みに加えて、会員企業 2 社からも参加いただいた。

12. 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。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となる。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。

具体的には、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・関西万博でのベンチスケール実証向け装置の製作・吸収材の製造を行う。膜分離法では、後継事業として 2024 年度から「高圧用 CO₂ 分離膜の水素製造システムへの適用性検討」を開始した。標準評価法の確立については、2024 年度中に実ガス試験センターを竣工し、実ガスを使用した試験を開始する。

また、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継続して推進する。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く。さらに、実ガス試験センターの設置、産業化戦略協議会の活動を通じた、CO₂ 分離回収の産業界の皆様との連携をますます強化していくことも継続して推進する。国内 CO₂ 分離回収技術のさらなる発展、貢献できるように取り組む所存である。

CO₂貯留研究グループ

グループメンバー(2024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	主任研究員	今村 哲己
主席研究員	横井 悟	主幹	淵上 聡子
主席研究員(兼)	野村 眞	主任	中西 公美子
副主席研究員	高須 伸夫	研究員	三善 孝之
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 金荣
主任研究員	三戸 彩絵子	研究員	穂積 章一郎
主任研究員	利岡 徹馬	研究員	宮坂 啓
主任研究員	高野 修	研究員	小谷 雅文
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	氷見 悠子
主任研究員	指宿 敦志	研究助手	西出 朱美
主任研究員	渡辺 雄二	研究助手	奥道 恵美
主任研究員	張 毅	研究助手	佐々木 恵
主任研究員	朴 赫	研究助手	日高 奈江
主任研究員	末国 次朗	研究助手	大野 晶子
主任研究員	山下 裕士		

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月に経済産業省によって公表された「CCS長期ロードマップ検討会」の最終取りまとめにおいて、CCSは我が国のエネルギーの安定供給とカーボンニュートラルの実現にとって不可欠な技術とされ、2030年までの事業開始に向けた事業環境を整備することとされている。この中で、事業化に向けての具体的なアクションが示され、「CCS事業への政府支援」の一環として、2023年6月に7つの「先進的CCS事業」が選定されている。また、2024年2月には「二酸化炭素の貯留事業に関する法律案」(CCS事業法)が閣議決定され、第113回通常国会に提出され、成立している。CCS事業法は、貯留事業・試掘に係る許可制度と貯留権・試掘権の創設や、貯留事業とCO₂導管輸送事業に関する事業規制・保安規制等、事業環境を整備するものである。

技術開発においては、具体的なコスト削減目標を掲げ、技術開発・実証を推進するとしている。RITEは、二酸化炭素地中貯留技術研究組合の一員として、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)の委託事業において、国内CCS事業に適用することを

念頭に置いた技術開発を推進している。光ファイバーセンシング技術を活用した地層やパイプラインのモニタリングによる安全確保とコスト低減、CCSの事業化を支援する技術の開発、また、CCS事業者にとって手引きとなる技術資料の整備をおこなっている。

モニタリング技術の開発では、米国の商用CCSプロジェクトサイトをはじめ国内外サイトにおいて実証試験をおこなっている。光ファイバーを利用して温度、ひずみ、音響を計測し、CO₂パイプラインや坑井など地中貯留に関わる設備の健全性と地層の安定性を監視する手法の技術実証をおこなっている。

また、CCSの事業化までの各種業務を支援する技術として、立地地域等とのコミュニケーション手法の開発、事業計画の構想において不可欠となる排出源立地情報の整備、事業性評価のためのコスト試算ツールの開発等に取り組んでいる。

さらに、CCS事業の計画から操業、閉鎖後に至るまで各段階の業務に対するナレッジを国内外事例から整理、編集した技術事例集を作成している。2023年度末までに全7編が完成しており、逐次公開される予定である。

2. 主な研究課題と成果

2.1. 光ファイバーを用いた地層健全性評価モニタリングシステムの開発

国内外で本格的に進められつつあるCO₂地中貯留事業において、地下モニタリングは必要不可欠な要素技術の一つである。圧入されたCO₂が地層内に安全に貯留されていることを確認するために、CO₂の広がりやの把握に加えて、地層圧の上昇に伴う地層変形や圧力伝播範囲の監視、万が一の漏洩検知を目的とした坑井の健全性監視等を行う。このモニタリングは長期間に渡るため、経済的な技術が求められる。また、圧入条件の変更など即時の意思決定に資する情報を提供するために、リアルタイムのモニタリングシステムが期待される。光ファイバーセンシングは、こうした要件に適合するモニタリング技術として有望視されている。

光ファイバーセンシングは、光ファイバーに光パルスを送信した際に生じる後方散乱光を計測、解析することによって、光ファイバー周辺に生じた環境変化を測定する技術である。散乱光ごとに測定対象が異なり、ラマン散乱光は温度計測(DTS: Distributed Temperature Sensing)、ブリルアン散乱光は、温度とひずみ計測(DSS: Distributed Strain Sensing)に用いられる。レイリー散乱光は、曲げなどによって散乱光強度が変化することを利用した損傷箇所の同定や音響(振動)計測(DAS: Distributed Acoustic Sensing)が主な用途であるが、近年では、そのスペクトル変化を利用して高精度の温度、ひずみ計測にも用いられる。光ファイバーセンシング技術の特徴は、光ファイバー全体が受信部となるために、空間的に連続した記録の取得が可能なことである。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・音響を捉えるマルチセンサーとして利用でき、多数のセンサーを設置する場合に比べて大幅なコスト低減を図ることができる。さらに、光ファイバーケーブルは、直径が数ミリメートルから数センチメートルと細く、狭小箇所への設置が容易なため、坑井を保持するためのケーシングと呼ばれる鉄管の外側にある地層とのわずかな隙間に設置することも可能である。

RITEでは、これまで、室内試験および現場試験を通じて光ファイバーセンシング技術の研究開発を進めており、現在では、複数の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や施工方法の改善に加えて、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測定技術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・音響の同時測定を実施している。豪州では、ビクトリア州Otwayサイトおよび西オーストラリア州Perth南部サイトにおいて、浅部断層からの漏洩監視および深部断層の安定性監視を目的とした現場試験を実施中である。

以下では、各サイトで実施中の現場試験の概要を紹介する。

2.1.1. 国内試験サイト

千葉県茂原地区にある試験サイトでは、光ファイバーセンシングによるCO₂地中貯留モニタリングシステムの技術検証を目的とした現場試験を行っている。これまでに、深度300m程度の浅部坑井に様々な光ファイバーケーブルを設置して、坑井を用いた水圧入試験や揚水試験を行うことで、光ファイバーケーブルの測定性能評価を行ってきた。2022年度には、深度900m超の坑井を新たに掘削し、温度・ひずみ・音響を同時に測定できる光ファイバーケーブルを設置した。同試験によって、光ファイバーケーブルを深部坑井に設置する技術の向上、設置器具の改良、施工方法の改善を図ることができた(図1)。また、坑井のセメント健全性を評価する光ファイバー測定技術の開発を進めている。同技術は、CO₂地中貯留サイトの圧入井からの万が一の漏洩に影響を与えるセメンチングの良否を施工中に評価することができるリアルタイムモニタリング技術として期待されている。

2022年度のファイバー設置以降、同サイトではDSS(ひずみ計測)による、長期連続モニタリングを継続中である。サイト周辺の水圧入や揚水等によるひずみ変化を計測し、光ファイバーひずみ測定データに基づくジオメ

カニクス解析によるサイト周辺の水理特性評価技術として利用している。この技術は、将来の国内CO₂地中貯留において必須となる複数の坑井を効果的に配置する技術へとつながるものとして期待されている。



図1 国内サイトでの光ファイバー設置作業

2.1.2. 米国ノースダコタ州CCSサイト

米国ノースダコタ州CCSプロジェクトは、エタノール精製過程から回収される年間約18万トンのCO₂を地下深部約2,000mの塩水帯水層に圧入貯留する商業プロジェクトである。2022年6月中旬から圧入を開始し、2024年3月末現在、約25万トンのCO₂が貯留されている。

同プロジェクトでは、4本の坑井(圧入井、観測井、浅部地下水観測井×2)とCO₂パイプライン沿いに、光ファイバーケーブルを設置し(図2)、DAS、DTSおよびDSSの同時測定を継続実施中である。同プロジェクトは、一本の光ファイバーケーブルにおけるマルチセンシング技術の商業プロジェクトにおける技術実証として、国内における事業化規模の一つの目安となる100万トン圧入時まで測定を継続することで、国内CCS事業に資するモニタリングシステム運用における課題や対策などの知見の集積を進めている。

地下のCO₂の広がりを把握する貯留層モニタリングには、繰り返しの弾性波探査を用いたCO₂プルームのイメージング技術が用いられる。弾性波探査技術の一つとして、坑井に受振装置を配置する坑内探査(Vertical Seismic Profiling: VSP)を用いることで、計測対象と受振器が近づくため、高品質なデータ収録が可能になる。さらに、無数の受振器を備える光ファイバーを坑内受振器として利用することで、受振点位置ずれによって

発生するノイズを低減できるほか、データ収録の高速化も実現する。

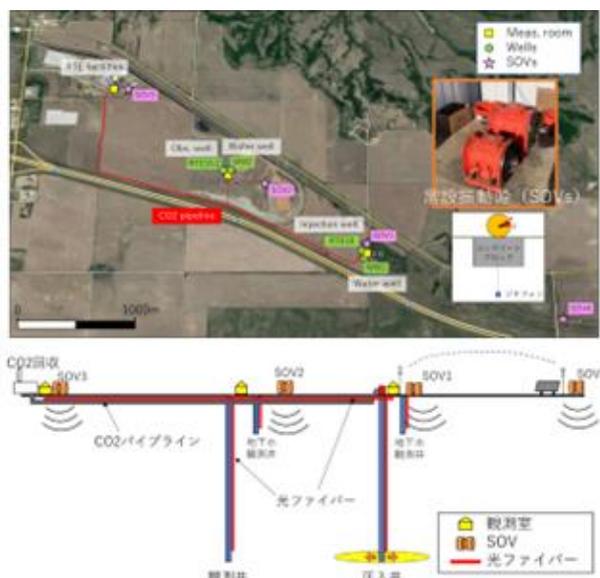


図2 ノースダコタサイトでの光ファイバー モニタリングシステムの概要

CO₂プルームの広がり把握を目的とした繰り返しの3D弾性波探査は、通常1年～数年毎に実施される。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が高速に回転することで、地層中に振動を伝える常設型の振動装置である。遠隔操作および自動コントロールが可能のため、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、SOVsをサイト内の4箇所に設置し、随時発振を行っている。

取得した記録のうち、(ゼロ)オフセット記録は、圧入開始後すぐのCO₂プルームの検知に用いられ、オフセットのあるVSP記録は、CO₂プルームの広がりを把握するために用いられる。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進めている。また、万が一の漏洩を検知するために、CO₂パイプラインや圧入井の全区間におけるDTSおよびDSS(温度・ひずみ計測)を行っている。従来は、パイプラインの出入口および坑底などに設置した流量計や温度・圧力計による

点計測を行っていたが、光ファイバーセンシング技術では、光ファイバー全体が計測点となる利点を活かして、経路全区間のリアルタイムモニタリングを継続している。

2.1.3. 豪州サイト

断層が多い国内においてCO₂地中貯留事業を実施する場合のリスクとして、圧入に伴う断層への影響や、断層からの漏洩等が考えられる。これらのリスクに対応するためには、断層破碎帯特性評価、断層安定性監視および断層からの漏洩検知・監視技術が必要不可欠である。これまで、RITEが研究開発を進めてきた光ファイバーセンシング技術が有効な手段となるが、それらの技術確立のためには実サイトにおける多様な試験が必要である。そのため、既知の断層が分布する試験サイトを有する豪州研究機関と2021年度から日豪共同研究を行っている。

豪州ビクトリア州南西部のOtwayサイトでは、光ファイバーセンシング技術を用いた浅部断層からのCO₂漏洩検知現場試験を進めている。同サイトは、豪州研究機関CO₂CRCによって、数万トン規模のCO₂が圧入された実証試験サイトである。本サイトに新たに2本の坑井を掘削し、高性能のDSS(ひずみ計測)ができる新しい光ファイバーケーブルを設置し、水圧入試験を実施した。現在、同計測データを用いた、サイトおよび断層の水理学的特性評価を進めている。今後は小規模のCO₂圧入によって漏洩検知性能の評価を行う予定である。



図3 Otwayサイトでの光ファイバー設置作業

豪州西オーストラリア州南西部のPerth南部サイトで

は、特に深部断層を対象とした断層安定性評価のための現場試験を進めている。同試験サイトでは、深部断層帯を貫く坑井を掘削し、光ファイバーケーブルを設置し、DSS(ひずみ計測)結果に基づいて断層や破碎帯の水理的・力学的特性評価および断層再活動性評価を図るものである。豪州研究機関であるCSIROとの研究協力によって、既存の試験サイトを利用して実証試験を進めている。2023年度は、新たに傾斜坑井を掘削し、温度・ひずみ・音響計測を同時に行える光ファイバーケーブルを設置するとともに、サイト周辺の地震活動調査、サイトの断層評価を進めてきた。傾斜坑井のケーシング背面への光ファイバーケーブルの設置に成功したことで、CO₂地中貯留モニタリングにおける光ファイバー設置技術の向上を図ることができた。今後は、流体圧入試験を実施し、同計測結果を用いた断層の水理的・力学的特性評価等を行う予定である。



図4 豪州Perth南部サイトでの光ファイバー設置作業

2.2. CCS事業化支援

JOGMECによる先進的CCS支援事業が2023年度に開始されるなど、我が国のCCSの大規模化、事業化が本格的に展開されている。

RITEにおいても、CCSの大規模展開を支援するための研究開発を実施している。具体的には、CCS実施地域の理解促進方法、適切なCCS事業化形態の設定支援、さらにはCCSの経済性評価などである。以下、それぞれの研究開発の内容や進捗状況を報告する。

2.2.1. CCS事業における地元とのコミュニケーション

CCS事業を行うことを決めると、事業者は事業の理解や支持を得るために、ステークホルダーや地元住民と

コミュニケーションを取る必要がある。コミュニケーション活動は、できるだけ早期に、広範囲の関係者を対象に行うことが望ましいとされている。事業計画が全て決定してから、地元へ受け入れを求めるといった事業者から地元への一方のコミュニケーションではなく、早い段階から地元と密にコミュニケーションを取り、地元の考えや要望も組み入れて事業計画を立てていくという双方向のコミュニケーションを行うべきというのがそのベースの考え方である。

RITEでは、CCS事業実施にあたっての地元とのコミュニケーションについて調査を行ってきた。本稿ではコミュニケーション最初期にCCSの認知度を高めることの重要性について述べる。海外において、地元住民やステークホルダーがCCSについてよく知らないまま事業計画が進んだことが、地元の事業反対の要因になった事例がある。そのため、地元の住民やステークホルダーにCCSについて理解してもらうことが重要である。

日本では、CCSの認知度が低く、一般市民の約半数がCCSという言葉を知ったことすらないというのが現状である。そのため、まずは「CCS」という言葉を知り、馴染んでもらう必要がある。全く聞いたことがない「CCS」に関するコミュニケーションイベントが行われていても、参加してみようとはなかなか思わないからである。国はCCSをカーボンニュートラルに向けた重要なオプションとみなしており、昨年から先進的CCS事業も始まった。今後「CCS」という言葉を見聞きする機会が多くなると考えられるが、当面はCCS事業者もコミュニケーションの第一歩として「CCS」という言葉の普及活動をする必要がある。

「CCS」という言葉を見聞きする機会が増えると、検索してCCSを調べる人が増えると考えられる。「CCS」を調べてみようと思った人が最初に見る情報は重要である。その情報で、CCSに対して肯定的な考えを持ったり、否定的な考えを持ったりするようになるかもしれないからである。北海道の胆振東部地震の際に、著名人がSNSに流したCCSに関する情報が流言飛語とみなされた例があるように、CCSに関する誤った情報が流れることもある。もし最初に誤った情報に接すると、それを

基にCCSに対して誤った考えを持つことにもなりかねない。いったん情報を信じ、その情報に基づいた考えを持つと、その考えは容易には変わらないと言われている。人は自分の考えに合う情報のみを選択的に受け入れやすい上、最近ではSNSなどで自分と同じ考えの人とだけつながり、考えが強化されるということが起きやすいからである。そのため、CCSに関する科学的、学術的な知見に基づく情報が検索でかかりやすくなることが重要である。

ただし、検索でかかりやすくても、読まれることがなければ意味がない。CCSをよく知らない人がCCSとは何かを知ろうと思って検索した場合には、体系だった詳細な解説は敬遠されやすく、端的な解説の方が読まれやすい。RITEでは、CCSに関して一般市民が疑問に思いそうなことを一問一答の形式で説明したQA集を作成しているが、このQA集の役割の一つは「CCS」について検索したり調べたりした人が疑問を解決できるようにすることである。そのために、A(回答)は予備知識がなくても読めるように工夫している。今後、図やイラストを使ってさらに親しみやすく見られやすくなるようにQA集の改善を進めていく予定である。

2.2.2. CCS実施による地元経済波及効果分析

CCS事業においては、CCSの技術的、科学的な説明だけでなく、事業が地元にもたらす経済的な効果の説明も重要である。RITEでは、CCSの実施による地元経済波及効果の分析手法を手順化し、実際の地域に適用し、経済波及効果等を訴求している。以下、地元経済波及効果の分析手法を紹介する。

①投資額試算

地元経済波及効果を分析する前段として、CCSプロジェクトの事業形態を設定し、全体投資額を把握する必要がある。当試算については、後述する排出源DBやCCSコスト試算ツールを用いて実施する。

②経済波及効果・雇用促進効果分析

CCSプロジェクトの投資額が設定された後、その投資が地元にとり得る経済波及効果・雇用促進効果をもたらすか試算を行う。その際、各都道府県が公開している

産業連関表や経済波及効果分析ツールを活用すれば、地元経済に即した効果を試算することが可能となる。

ただし、「CCS」は新しい産業であり、既存の経済波及効果分析ツールには当該項目はない。そのため、CCSがどのような産業から成立しているかを分析し、それらの既存産業項目の組合せで、経済波及効果の分析を行う必要がある。CCSの産業構成は、対象とするCCSプロジェクトの特性を考慮して設定するが、その分析の精緻化、手順化が今後の課題となっている。

③サイト訪問による経済効果

CCSプロジェクトによる直接的な経済波及効果の他に、サイトに見学者が来ることによる経済効果が得られる。実際、苫小牧におけるCCS大規模実証試験では、多くの見学者が苫小牧市を訪れている。このような先行事例を参考にし、CCS見学者数を推定し、来訪による経済波及効果を分析するのも重要である。

④経済効果を向上させる手法の検討

CCS産業構成要素として大きいのが、「建設」と「汎用機械」などの資機材調達である。建設については、地元で対応できる部分が大きく、経済波及効果拡大に貢献するが、資機材については、CCSの実施地域では調達できない物も多く、経済波及効果を発揮できない要因となる。

産業連関表には、関連する資機材の自給率が示されており、その値を向上させれば、経済波及効果は向上する。地元でどのような産業や人材を育成すれば良いかの定量的な指針となる。

このように、CCSの経済波及効果分析は、立地地域での産業育成政策の立案にも貢献する。

⑤CCS/CCUの連携効果分析

CO₂の地中貯留のみでなく、CO₂の利用(CCU)も注目を集めている。CCUを行う場合、CO₂の需給のマッチングが重要であるが、CO₂の供給量が大きく上回り、回収したCO₂を放散せざるを得ないケースもある。CCUとあわせてCCSを行えば、余ったCO₂を地中貯留することでクレジットを得られる。

つまり、CCSの実施は、CCU事業の不確実性を抑制し、事業の予見性を高めることに貢献する。CCSの経済

効果を議論する際は、このような視点も重要である。

⑥当分析手法の適用・改良について

以上、CCS事業実施による地元の経済波及効果の分析手法を紹介した。すでに一部の地域ではその手法を適用しているが、今後、分析の実践例を増やし、その精度や使い勝手を向上させたいと考えている。CCSの地元経済効果を検討されている方がいれば、ぜひお声がけいただきたい。

2.2.3. CO₂排出源データベースの開発

CCSの事業化には、CO₂排出源と貯留層の適切なマッチングが重要となる。そこで、RITEでは、このマッチング支援を目的としたCO₂排出源データベース(以下、排出源DB)の開発に取り組んでいる。

以下、そのデータ構造、機能概要、今後の展開について紹介する。

①排出源DBのデータ構造

環境省の「温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度」に基づく公開データ(以下、温対法データ)には、1万を超えるCO₂排出源情報が登録されている。排出源DBでは、その情報をベースとしつつ、CCSによる脱炭素化の特徴に合うよう以下a)b)c)の対応を行っている。

a) 直接CO₂排出量の試算、DB化

温対法データにおける各事業所のCO₂排出量には、他者から供給される電力・熱に相当するCO₂が内数として含まれている。CCSは、当該事業所で実際に排出される直接CO₂排出分を回収・貯留するものであり、電力、熱相当分のCO₂排出量を除外する必要がある。そこで、事業種別に「直接排出係数」を一定の統計処理で求め、温対法上のCO₂排出量に乘じ、各事業所からの直接CO₂排出量を算出し、DB化している。

b) バイオマス燃料CO₂排出源情報の組み込み

温対法データは、化石燃料からのCO₂排出を対象としており、バイオマス燃料からのCO₂排出は、カーボンニュートラルのため対象外となっている。一方、バイオマス発電所もCO₂を排出しており、それを回収・貯留することで、BECCS化、ネガティブエミッション化が図れるなど、脱炭素化促進に重要な要素となる。そこで、資源エネル

ギー庁電力調査統計等の情報を参考に、バイオマス燃料からのCO₂排出源情報も調査し、CO₂排出量の試算と排出源DBへの組み込みを図っている。

c) 貯留ポテンシャル情報の反映

RITEが実施した「全国貯留層賦存量調査」の貯留ポテンシャルのマッピング情報も排出源DBに反映している。

②情報マッピング、スクリーニング機能の実現

a) 排出源と貯留層候補のマッピング機能

CO₂排出源と貯留層の適切なマッチングを図るため、その位置関係を視覚的に捉えることが重要である。そこで、①で示したデータをマッピングする機能を実現した。図5はその一例であり、排出源は太平洋側に集中し、貯留層は日本側に多いなど、その特徴を容易に捉えることが可能になる。

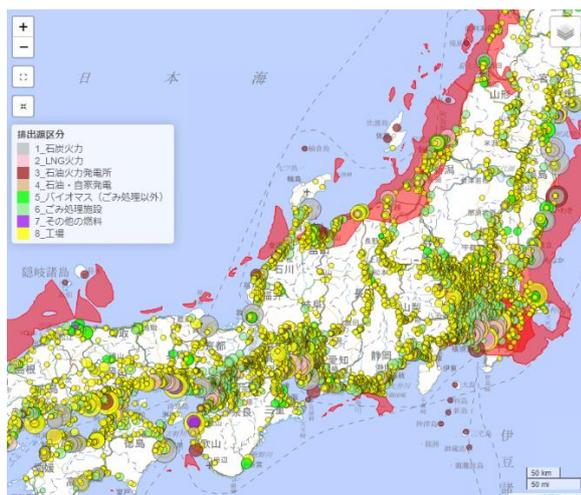


図5 CO₂排出源と貯留ポテンシャルの統合表示例

b) 情報スクリーニング機能

視覚化された地図は、自在に動かし、特定箇所をズームアップしたりすることが可能である。さらにある地域を四角で囲むことで、その地域のCO₂排出源情報を抽出することができるため、排出源のクラスタリング等に活用可能である。さらに、石炭火力発電所や工場など、排出事業者別に表示することもできる。例えば、バイオマス燃料のCO₂排出源に絞り込んだ表示をすれば、BECCS化によるCO₂排出量オフセット戦略の立案に貢献することなども可能となる。

③CCS事業化支援のプラットフォーム化を目指して

上記の機能に加え、港湾のCO₂排出の集中度分析、港湾から一定距離を持つ内陸型排出源のスクリーニング機能、既存ガスパイプラインの表示機能等、CCSの大規模化、本格普及化を見据えた機能も随時付加している。

CCSの事業化には、政策担当者、技術者、投資家、事業経営者など、多くの関係者が協力し、その方向性を定める必要がある。

本DBを活用すれば、必要な情報への迅速なアクセス、視覚化機能を活かした関係者間の情報共有が可能となる。さらに、次に紹介するCCSコスト試算ツールなど、他の支援機能と連携し、CCSの事業化を的確に支援するプラットフォーム化を図りたいと考えている。当DBに関するコメント、ご要望があればぜひお伝えいただきたい。

2.2.4. CCSコスト試算ツールの開発

本ツールは、CCSを検討している事業者が、想定される複数の事業形態について、コストを比較検討できるように開発したものである。単独で実施するCCSの回収から貯留までの一連のコストを試算できるだけでなく、沿岸域等で複数の排出源をまとめて集約化するハブ&クラスタのコストについても試算の対象としている。

後者の複数排出源を対象にしたコスト試算については、排出源データベース(2.2.3)を利用して集約化グループの構成を検討した案が、どの程度のコスト低減効果を見込めるか、あるいはその構成がコスト的にみてベストであるかなどを具体的に検証する上でも有用である。

また、本ツールは高速で計算できるので、パラメータを変更しながらリアルタイムで結果を確認できる。このため試行錯誤的に最適な実施形態を探り出す際の支援ツールとしての活用も期待している。

①ツールで可能な試算

本ツールには国内で想定されるCCSを想定して、回収、輸送、貯留のそれぞれの工程に選択肢が設けられている。例えば、回収には石炭火力発電所やLNG火力発電所があり、輸送には陸上・海底パイプラインと船舶輸送がある。こうした工程に関するオプションの他、当該CCS全体に関係する選択肢として、事業期間や年間

CO₂処理量、割引率、為替レートなどの設定が可能である。これらを選択して組み合わせることによって、ユーザはイメージしているCCSをツール上で組むことができる。

②特定工程の試算例

ここでは、貯留工程における試算例を紹介する。日本での貯留は、大部分が海底下貯留と考えられていることから、本ツールは海底下貯留を対象としている。海域の設定は貯留地点の離岸距離と水深によって決まり、A.陸域からの圧入(苫小牧式)、B.着床基地からの圧入(ジャッキアップ式)、C.浮体基地からの圧入(セミサブ式)の3通りの中から、自動で選択される仕組みになっている。

図6に今回比較した3種類の貯留方式を示す。図の左側に貯留方式のイメージを、右側に試算の前提条件を記した。



図6 比較した貯留方式

また、CO₂を地下に圧入すると、それに伴うモニタリングが必要となるため、貯留工程の試算ではモニタリングコストもあわせて算出される。

図7に貯留およびモニタリングコストの試算結果を示した。試算に際してCO₂処理量(圧入量)を100万t/年から500万t/年の5段階に変化させ、どの程度のスケールメリットが発生するかについても検討した。

図から、貯留コストが最も低かったのは陸上からの圧入であり、ジャッキアップ式、セミサブ式の順に高くなった。スケールメリットについては、セミサブ式において300万t/年までは効果がでたが、それよりも多いCO₂

処理量では見られなかった。他の貯留方式については、スケールメリットは小さいか、ほとんどでなかった。

一方、モニタリングについては、3種類の貯留方式とも、スケールメリットが大きく働くことがわかった。コスト的には、陸上からの圧入が他よりも高くなった。水深の設定が45mで、ストリーマを使った震探が行えず、海底受信ケーブル(OBC: Ocean Bottom Cable)を利用した震探が採用されたためと考えられる。

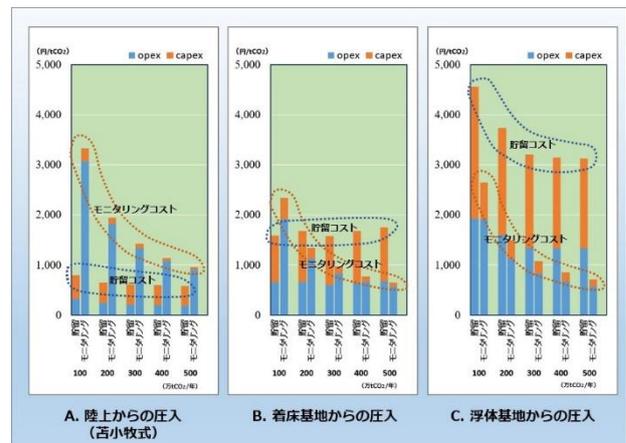


図7 貯留およびモニタリングコストの試算結果

③集約化において排出源をグループ編成する際の検討

CCSコストの低減を考える場合、ハブ&クラスター等で排出源をネットワーク化し、大量のCO₂を処理すると、工程によってはコスト低減効果が大きく働く。集約化は、既存の技術で実施できるコスト低減対策であることから、排出源を取りまとめて共同で実施しようとする考えは、自然な発想である。

ここでは、ある沿岸域において、2つの集約化グループの編成が進められている場合、その間にある排出源にとっては、どちらのグループに参加するのが有利であるかを検討してみる。

図8に集約化グループ編成時のイメージを示した。図にはグループAとBの2つの検討中のグループがあることを示している。その際、グループAとBで、既に契約できている合計のCO₂量に違いがあるという設定であり、グループAでは300万t/年、またグループBでは150万t/年のCO₂がそれぞれ確保できているとする。また、排出源X(100万t/年)から各グループのハブまでの陸上

パイプラインの費用は排出源Xが負担するとし、船舶輸送距離や貯留方式は両グループで同じであるとした。なお、A港-B港間の距離は100kmとした(各港にハブがあるとする)。

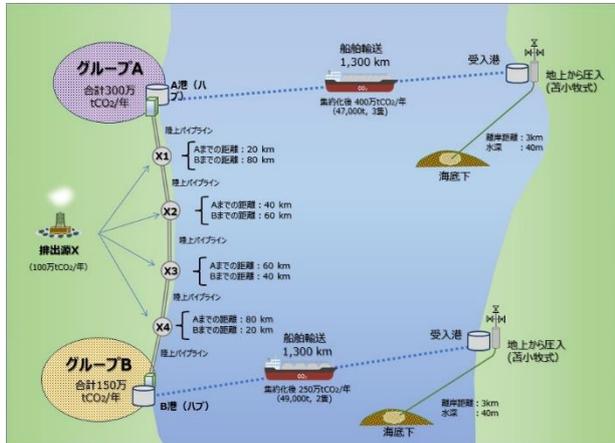


図8 集約化グループ編成時のイメージ

図9に排出源XからA港までの距離とCCSコストの関係を示した。紫のラインがA港を利用した場合のコスト、オレンジのラインがB港を利用した場合のコストを示している。図9の上の図は排出源Xが単独でCCSを実施した場合のものであり、集約化グループの影響を受けないため、単純に両港の間中点(50km)で両コストが一致した。

一方、図9の下の方では排出源Xが集約化グループの影響を受けており、もともとCO₂処理規模が大きかったグループAの方が、グループBよりコスト低減が大きくなる。その結果、紫のラインがより下方に移動したことから、ラインの交点が右側に移動した。これにより排出源Xは、A港からの距離が80km以内の場合、Aグループに参加する方が低コストであり、それを越えると、すなわちB港からの距離が20km以内になるとBグループに参加する方が低コストであることがわかる。

なお、上記の検討では、グループA、BのCO₂処理量と排出源Xからの距離のみを考えたが、実際には種々のバリエーションがある。例えば、グループA、Bで船舶輸送距離が異なる、貯留方式が異なる、圧入レートが異なる、事業期間が異なる、さらにいずれかのグループがパイプライン敷設コストを負担するといったことも考えられる。

④ ツールの公開に向けての作業

現時点までに、コストを計算する部分(計算エンジン)

については、予定分の搭載を終えており、先に示したような試算が可能となっている。一方、公開のためには、誰もが理解し易いインターフェイスを搭載する必要があり、同時に図表等によるわかり易い出力も重要である。さらに、本ツールは、WEBシステムとして公開するため、サイバーテロへの対策も不可欠と考えている。

こうした種々の作業を終えた後に、WEB公開前のテスト(フィールドテスト)等を実施し、信頼性や安定性が確認された時点で公開する予定である。

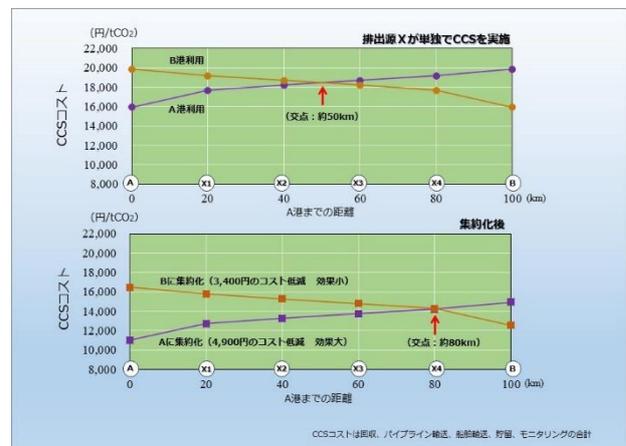


図9 排出源XからA港までの距離とCCSコストの関係

2.3. 技術事例集

RITEではCO₂地中貯留技術の実用化に向けて、モニタリング技術などの様々な技術や手法の開発に取り組んでいるが、それらの成果を基にCCS普及条件・基準整備の一環として、「CO₂地中貯留技術事例集」(以下、本事例集と称す)を作成している。

本事例集は、将来のCCS事業者のための参考マニュアルとなることを目的とし、CO₂地中貯留に関する国内外の技術情報や事例をまとめている。例えば、「二酸化炭素地中貯留技術開発」(2000年度～2007年度;長岡CO₂圧入実証試験)、「CCS実証事業の安全な実施にあたって」(2009年、経済産業省)、「苫小牧におけるCCS大規模実証試験事業」(2022年、経済産業省、他)等の主な成果と、海外機関による大規模CO₂地中貯留事業の知見をまとめたマニュアル、ガイドラインも参考にしている。

図10は、本事例集に記載されたCO₂地中貯留事業全

体の構成である。



- ・ 基本計画 CO₂地中貯留事業基本計画の策定
- ・ 貯留サイト選定 貯留候補サイト(複数)の抽出
- ・ サイト特性評価 候補サイトの特性評価、最適サイト決定
- ・ 実施計画 実施計画の策定、基本設計、経済性評価
- ・ 設計、建設 事業設備等の詳細設計・建設
- ・ 操業、管理 圧入の操業、管理、モニタリングの実施
- ・ サイト閉鎖 圧入井の封鎖、圧入設備の撤去
- ・ 閉鎖後管理 事業の責任移譲までのサイト管理

図10 CO₂地中貯留事業の全体構成

①基本計画

事業の全体像／基本的な考え方(経済性検討含む)、各フェーズでの作業方針・内容、スケジュール等を示す。

②貯留サイト選定(スクリーニング)

基本計画に示された全体計画に基づき、既存地質資料を使用してCO₂貯留サイトとしての要件を満たした候補サイト(複数)を選定する。

③貯留サイト決定(サイト特性評価)

CO₂貯留候補サイトに対して、必要に応じ地質データの取得を行い、詳細評価を実施する。地質モデルを構築し、CO₂圧入シミュレーションにより貯留可能量評価や、輸送・圧入施設の概念設計を基に経済性評価、リスク評価も実施する。その結果、圧入サイトが最終決定される。

④実施計画の策定

サイト特性評価結果を踏まえ、CO₂圧入作業やモニタリングなどの具体的な事業実施計画や作業計画を策定する。事業総コスト／経済性検討、リスク評価等を含めて最終投資判断を行い、規制当局に事業申請のための実施計画書を提出する。

⑤設計・建設

規制当局からの事業認可後、それまでの概念設計・基本設計をもとに圧入・輸送設備等の詳細設計、さらに建設、試運転を行う。

⑥操業・管理

実施計画に従い圧入操業を行う。地下に圧入されたCO₂の分布状況や貯留層の圧力変化をモニタリングし、

CO₂挙動予測との乖離がある場合は地質モデルを改良し、長期挙動予測の高精度化を図る。また、CO₂漏出に関するモニタリングも行う。

⑦サイト閉鎖・閉鎖後管理

CO₂圧入完了後、圧入井を廃坑し、閉鎖後モニタリングに必要な設備を除き、すべての施設を撤去する。サイト閉鎖後も、CO₂挙動の確認および漏出モニタリングを継続する。一定期間経過後に、規制当局が安全性の確保を判断したら、サイトの管理業務等は公的組織に移譲されることになる。



図11 技術事例集公開版

この技術事例集は、第1編から第7編までが製作されており、METI、NEDOのホームページにも逐次公開しており、今後は東南アジア諸国等海外への情報発信も行う予定である。

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
2023年7月13日	帝塚山中学校 3年生	27
2023年7月27日	京都府立西舞鶴高等学校 理数探求科 2年生	8
2023年10月4日	島根県立出雲高等学校 理数科・普通科 1年生	42
2023年10月31日	奈良県立奈良北高等学校 数理情報科 2年生	21
2023年11月6日	立命館高等学校 Japan Super Science Fair 参加者	28
2024年2月2日	精華町立精華西中学校 1年生	7

◆環境教育(小学生向けワークショップ)

実施日	イベント名	人数
2023年8月3日 (同日に3回開催)	地球温暖化とエネルギーについて考える 工作・実験ワークショップ	97

掲載年月日	見出し	掲載紙名
2023.4.14	積水化学 CO ₂ 由来の高機能接着剤 微生物を用い生産	化学工業日報
2023.4.14	CO ₂ から接着剤生産 積水化など、微生物活用 30年事業化	日刊工業新聞
2023.4.15	RITE 2022年度ALPS国際シンポジウム開催「GXの実現に向けて」をテーマに	ガスレビュー
2023.4.20	IPCC統合報告「60%減」 温室ガス削減 危機感あらわ	東京読売新聞
2023.5.26	休止火力を維持「予備電源」 300万~400キロワット確保へ エネ庁	電気新聞
2023.5.26	GX脱炭素電源法案 S+3Eの回復が重要 参院経産委 参考人質疑で山地氏	電気新聞
2023.5.29	[CO ₂ を捕まえるー川重のDAC開発](上) 事業化前夜、進む技術競争 25年商用化へコスト削減	電気新聞
2023.6.8	社説 CO ₂ 回収で技術的優位性の堅持を	化学工業日報
2023.7.15	IPCCシンポジウム「IPCC第6次評価報告書 統合報告書から気候変動の最新知見を学ぶ」開催	ガスレビュー
2023.7.21	「グリーン万博」協賛者決定 RITE・大ガスなど 脱炭素や資源循環実証	日刊工業新聞
2023.7.24	新たに13者が協賛/万博協会	建設通信新聞
2023.7.26	CO ₂ 回収実証プラントを設置/RITE、万博事業に協賛	環境新聞
2023.8.1	[テックビジュアル解体新書] 転換技術「CCU」脚光 脱炭素への両輪 貯留も開発進む コスト・場所が課題	日本経済新聞
2023.8.10	「同時市場」論点は エネ庁、広域機関 詳細設計着手 電源の配分いかに 市場価格どう算出	電気新聞
2023.8.31	ごみからエポキシ原料 積水化学 高機能接着剤に採用	化学工業日報
2023.9.5	RITE、大阪でシンポ 脱炭素向け技術紹介	電気新聞
2023.9.15	CO ₂ 回収に水処理技術 分離膜、コスト半減に道	日経産業新聞
2023.9.21	[特集]安定供給を支える火力 対談 脱炭素社会へ 火力の現状と将来展望 渡部哲也氏×山地憲治氏	電気新聞
2023.9.27	NEDOバイオものづくり革命事業 東洋紡、帝人、ファーマフーズなど 一次公募で6件採択	化学工業日報
2023.9.27	バイオものづくり開発 島津・凸版など6テーマ	日刊工業新聞
2023.10.3	川崎重工業、石炭火力発電所でCO ₂ 回収 京都で実証実験	日本経済新聞 電子版
2023.10.4	京都・舞鶴の関西電力発電所にCO ₂ 除去の新技术 必要なエネルギー削減	京都新聞 速報版
2023.10.4	排ガスからCO ₂ 省エネ分離 国内初の試験設備完成 舞鶴発電所	京都新聞
2023.10.4	川崎重工 RITE 舞鶴火力でCO ₂ 回収 固体吸収法 年内、1日40トンから	電気新聞
2023.10.4	CO ₂ 分離・回収設備 川重など年内実証	日刊工業新聞
2023.10.6	川崎重工 RITE 固体吸収材でCO ₂ 分離・回収 試験設備が稼働開始	化学工業日報
2023.10.10	社説 CO ₂ 直接回収技術に継続的支援を	化学工業日報

掲載年月日	見出し	掲載紙名
2023.10.11	川重が関電舞鶴発電所に試験設備 CO ₂ 、効率的に分離・回収 石炭火力排ガス 国内初の方式採用	神戸新聞
2023.10.25	明日をつなぐ SDGs達成へ注目技術③ CO ₂ 分離・回収<上> カーボンネガティブの切り札	化学工業日報
2023.10.26	明日をつなぐ SDGs達成へ注目技術④ CO ₂ 分離・回収<下> 30年向け低圧・低濃度ガスに挑戦	化学工業日報
2023.11.15	RITE 大阪で「未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西」開催	ガスレビュー
2023.11.22	脱炭素目標の「未達ドミノ」に懸念、COPで進捗状況を初検証へ	Bloomberg
2023.11.26	週刊学ぼう産経新聞 今週のテーマ COP28が始まるね	産経新聞
2023.12.1	50年需要想定 議論着手 広域機関 シナリオ3者提示	電気新聞
2023.12.1	難路の温暖化ガス削減 COP28開幕 CO ₂ 回収・除去技術に望み	日本経済新聞
2023.12.11	全国調整スキーム 地内系統、適用範囲は 役割踏まえ整理 エネ庁 慎重な見方も	電気新聞
2023.12.21	RITEなど CO ₂ を路盤材に固定 工場排出分 1時間で最大15キログラム	電気新聞
2023.12.21	前田道路ら／再生路盤材へのCO ₂ 固定化技術の検証開始、25年の実用化を目指す	日刊建設工業新聞
2023.12.21	実装化に向け検証開始／合材工場由来のCO ₂ 固定化システム／前田道路ら3者	建設通信新聞
2024.1.15	RITE「革新的環境技術シンポジウム2023～2050年カーボンニュートラルを支えるイノベーション～」開催	ガスレビュー
2024.1.24	電力システム改革 検証始まる 供給力、規制料金など論点 エネ庁	電気新聞
2024.1.25	需給、3シナリオ提示 広域機関 40、50年の分析で	電気新聞
2024.2.14	CO ₂ 回収材の開発加速 RITE、ガス試験拠点稼働 標準評価法提供	日刊工業新聞
2024.2.15	高効率CO ₂ 吸収材 RITE 圧力損失低く1.4倍	日刊工業新聞
2024.2.16	ニュース拡大鏡 直接大気捕集 事業化進む RITE、実用化急ぐ	日刊工業新聞
2024.2.22	グリーン成長は「幻想」 参院調査会 浜野議員が参考人質疑	電気新聞
2024.2.26	岐路に立つ電力ビジネス 第二部 危機下のエネルギー政策⑩ 長期の需給想定どう描く	電気新聞
2024.3.6	50年需給シナリオ検討 3者提示 DC需要増 想定に開き	電気新聞
2024.3.11	前田道路／CO ₂ を固定化した再生路盤材で試験施工／1トンで最大10キロ確認	日刊建設工業新聞
2024.3.11	需要想定一区切り、予測の困難さ浮き彫り／広域機関	ガスエネルギー新聞
2024.3.14	AI到来、電力はどうする(DeepInsight)	日本経済新聞
2024.3.28	日本は「CCS適地」 衆院経産委 法案巡り質疑	電気新聞
2024.3.29	図解！大阪・関西万博 未来技術編 エネルギー 水素利用で脱炭素、資源循環	日刊工業新聞

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^{2024 Vol.19}

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



OSAKA, KANSAI, JAPAN
EXPO2025

RITEは、大阪・関西万博の未来社会ショーケース事業「グリーン万博」のシルバーパートナーです。万博会場内にRITEネガティブエミッション実証プラントを建設し、DAC(Direct Air Capture)の実証試験を行います。カーボンニュートラル、更にそれを超えて過去のストックベースでの二酸化炭素を削減する最新のネガティブエミッション技術をご紹介します。