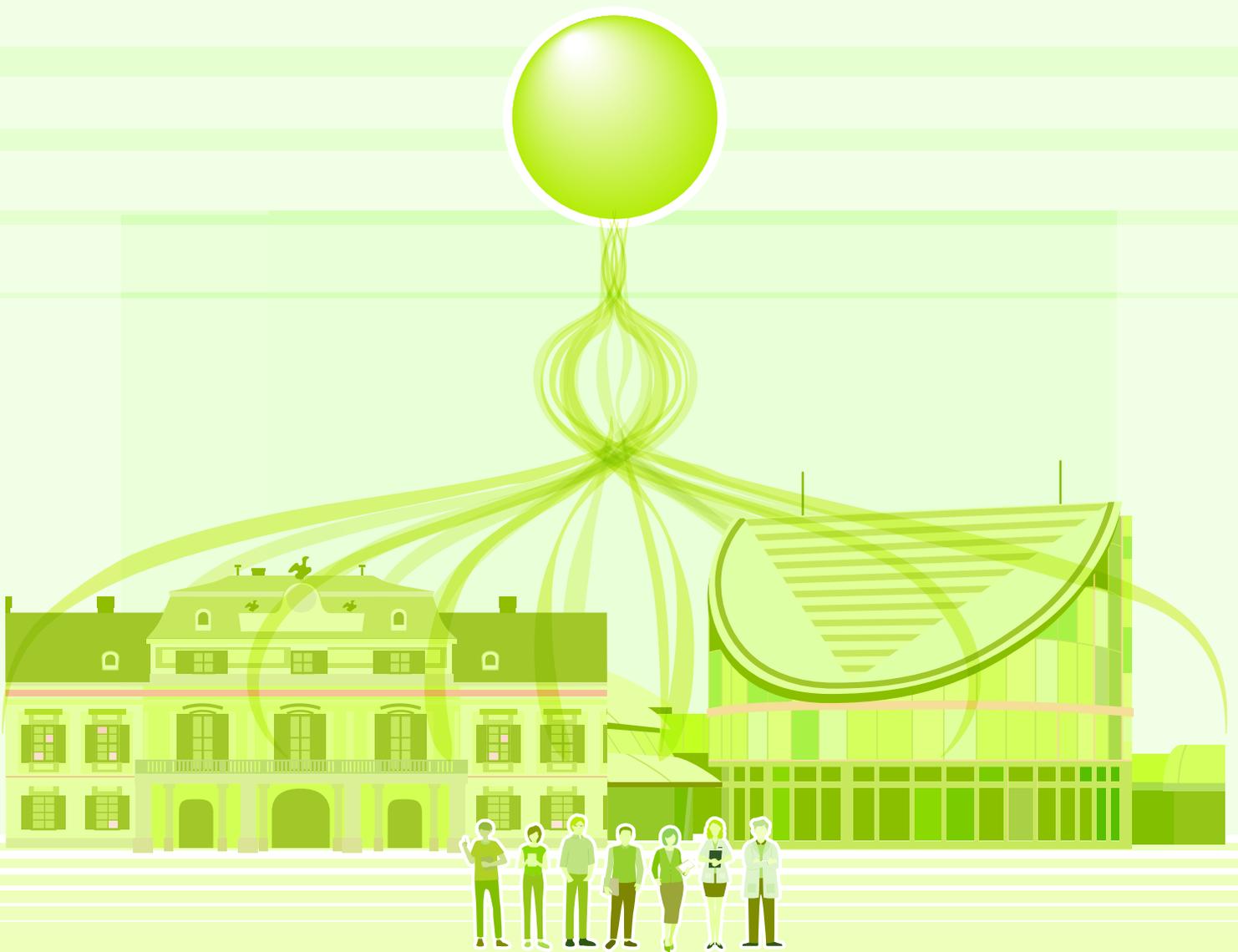


RITE Today ^{2022 Vol. 17} Annual Report

公益財団法人 地球環境産業技術研究機構 年次報告書 2022年版 第17号



特集

 **EDITS**
Energy Demand changes Induced by
Technological and Social innovations



RITE Today 2022 Vol.17

Contents

巻頭言

- 多様性の融合で進めるイノベーション 3
●● 理事長・研究所長 山地憲治

特集

- 技術・社会イノベーションによる低エネルギー需要社会の実現へ 4
●● -国際モデル比較プロジェクトEDITS-

研究活動概説

- 企画調査グループ カーボンニュートラルの実現に向けた取り組み 11
- 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 17
- バイオ研究グループ カーボンニュートラルに貢献するバイオリファイナリー技術の開発 26
- 化学研究グループ CO₂分離・回収技術の高度化・実用化への取り組み 36
- 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 42
- 無機膜研究センター 無機膜を用いた革新的環境・エネルギー技術の研究開発、およびその実用化・産業化に向けた取り組み 48

- プレスリリース 53

- イベント情報 53

- 発表論文一覧 53

- 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
- 無機膜研究センター

- その他の活動 53

- 主な新聞記事 54

- 特許紹介 55



多様性の融合で進めるイノベーション

公益財団法人地球環境産業技術研究機構
理事長・研究所長 山地 憲治

2021年6月から理事長を務めることになり、この機会を借りて所見を述べさせていただきたい。

RITE は設立以来30年余、CCS(二酸化炭素回収・貯留)、バイオリファイナリー、温暖化対策のシナリオ分析など、地球温暖化問題の解決に向けて様々に取り組んできた。この間に国内外で地球温暖化問題への取組みは大きく進展し、RITE もその一翼を担い貢献してきたと自負している。

最近も地球温暖化対策について大きな動きがあった。昨年10月、パリ協定に基づき我が国は、2050年カーボンニュートラル実現に向けて温室効果ガスを2030年に13年度比で46%削減するという非常に野心的な NDC(国が決定する貢献)を国連に通告した。気候変動枠組み条約の締約国会合である COP26 では、世界的にも多くの国が気温上昇を1.5度までに抑えるというゴールに向けて温暖化対策の目標を引き上げた。更に一層、RITE への期待が高まってきたと思う。RITE の研究をさらに進めて、期待に応える必要がある。カーボンニュートラルを実現する手段として、CCUS(CCS+CO₂ 利用)やバイオ技術に大きな期待がかけられている。実用化に向けて新たな段階に入ったと認識すべきである。

とはいえ、研究は一步一步着実に進めるもので、一足飛びにゴールが実現するというものではない。わが国をはじめ多くの国が掲げたカーボンニュートラルという目標の実現に関わる技術は多様に存在する。電化と電気の脱炭素化、水素や CCUS などのエネルギー関連の対策に加えて、農林水産業における対策も重要である。温室効果ガス削減が難しい分野に関しては、大気から CO₂ を回収して排出を相殺する対策も必要になる。また、技術的な対策に加えて社会イノベーションも重要な役割を果たす。

しかし、世界の動向には注意が必要である。COP26 で我が国は水素やアンモニアを利用した「火力発電のゼロエミッション化」を表明したことで化石賞を受賞した。その他にもノルウェーは CCS を進めていること、フランスは原子力の新設を表明したことにより化石賞を受賞している。火力のゼロエミッション化も CCS も原子力も地球温暖化対策の重要な手段である。カーボンニュートラルという高い目標の実現には、このように特定技術を排除して選択肢を狭めることは大きな障害になる。

地球温暖化対策には、負担は地域ごとに発生するが利益は世界全体に裨益するという構造がある。このような構造を持つ問題に対して、主要国が離脱するような状況を作るとか、特定技術を排除することは、世界の連携を破壊し、地球温暖化対策の自滅を招く。

地球温暖化問題のように世界全体で長期的に取り組むべき課題への対処で重要なのは、技術や文化の多様性を認めて連携・融合を維持することである。最近イノベーション政策でもエコシステムの重要性が指摘されているが、これもベンチャーと事業者、産業界と学界など、異業種を隣接させることで多様性の融合が生じてイノベーションを起こすと考えているからである。

RITE も多様性の融合で地球温暖化対策のイノベーションを進めていく。

デバイスの進展やユーザーの慣れなどが相まって効果が表れてきたように見受けられる。

ただし、ダンボール紙の消費量は、宅配などの増加により、引き続き、上昇傾向が見られている。

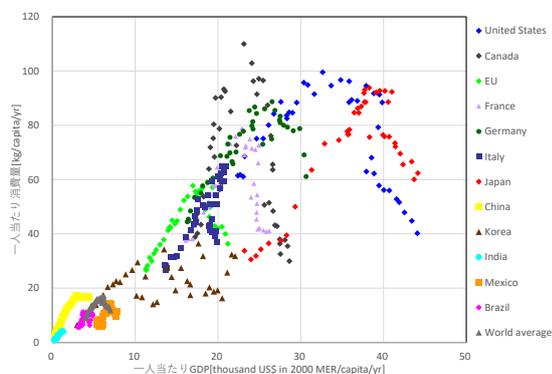


図3 印刷・情報用紙の消費量の変遷⁹⁾

2.3. アパレル

アパレルは、製造から廃棄に至るまでのエネルギー消費量やライフサイクルの短さなどから、環境負荷が高いとの指摘がなされている。例えば文献¹⁰⁾では、地球環境に対してファッション産業は世界のCO₂排出量の8-10%(年間40~50億t)を占めているとしている。

また文献¹¹⁾によると、ヨーロッパの家庭における衣料品の使用(洗濯、乾燥、アイロンなど)に伴うCO₂排出は年間5.3億tと概算されている。衣料品の使用方法や同じ衣服を何回着るのかという維持管理は消費者個人の選択に依存するため概算しかできないが、平均的なTシャツの使用段階におけるCO₂排出量は、ライフサイクルにおける排出量の半分を占めているとされる。例えば、綿のTシャツのライフサイクル排出量を試算すると、50回洗濯した場合、CO₂排出量の35%は繊維生産に起因し、52%は使用段階で発生するとされる。なお、天然繊維は石油原料の合成繊維に比べて生地生産段階におけるCO₂排出量は少ないが、天然繊維は合成繊維に比べて洗濯、乾燥、アイロンがけに必要なエネルギーが大きいため、生産時の低カーボンフットプリントは、使用段階で相殺される可能性もある。

近年、アパレルの売り上げは飛躍的に伸びており、その背景にあるのがファストファッションの台頭である。フ

アストファッションとは、1990年代後半から2000年代前半にかけて登場した衣料販売チェーンの業態のことを差し、その特徴は短いサイクルで流行のデザインを追いながら衣料品を大量生産し、低価格で販売することによって消費者に大量消費を促すというものである。服の50%は着られることなく、廃棄されているとされているし、多くの服は稼働率が低く、クローゼットで出番を待っている。

ファッション業界も環境や社会に配慮した製品の推進も行ってきているところである。eコマースでの販売によって、ブランド企業は実店舗を維持することによるエネルギー消費や在庫を抱える必要がない。しかし、上述したように試着をせずにeコマースを通して衣服を購入してしまうと、サイズが合わなかったり、イメージが違っていたりするため、未使用で捨てられる服を増やしてしまうという側面がある。そのような問題を解決する方法としてバーチャル・フィッティングや体型を自動的に計測する技術などが開発されている。

更に、インターネットオークションの進展による中古服等の取引は、事実上の服のシェアリングの進展にあたるものであり、需給のマッチングを促し、アパレル製品の稼働率の向上、廃棄の低減となる。

アパレルについてのより詳細は、文献¹²⁾を参照されたい。

2.4. 食料

農水産物生産から、食品加工、輸送、調理等を含む食料システム全体で排出されるGHGは世界総排出の21-37%¹³⁾とされる(これら推計は一般にフロー財を対象としているが店舗や施設等ストック財も含めると一層大きくなると見込まれる)。一方、人の消費のために生産された食品の約1/3はロス・廃棄されている。その原因は地域によって異なるが、中・高所得国では販売機会損失を避けるための過剰生産や消費段階での廃棄が多いとされる¹⁴⁾。近年進展が著しいICT(情報通信技術)を活用し、食料需要をより正確に予測等できれば、食品ロス・廃棄が減ると同時に、プラスチック容器の低減、スーパーのスペース低減、冷蔵・冷凍エネルギー、輸送エネ

ルギーの低減などに波及し、エネルギー消費・GHG 排出の低減につながる可能性がある。また、SDGs の同時達成にも寄与し得る。

日本について産業連関表を利用した分析¹⁵⁾によると、高度需要予測技術や規格外品の個別販売等により、青果農業、食品業、家庭部門で発生している廃棄を 50% 低減できたとした場合、日本の総エネルギー消費は▲0.08～▲0.04EJ/年(日本の一次エネルギー供給の 0.4～0.2%に相当)、GHG 総排出は▲8.4～▲5.9 百万 tCO₂eq/年(日本の GHG 総排出の 0.6～0.5%に相当)変化すると推計している。日本の場合、食品廃棄率が小さいため、必ずしも大きな低減量の推計とはなっていないが、廃棄率がより大きいとされる海外も含め世界全体で取り組んだ場合には、より大きな低減効果があると考えられる。世界全体の試算では、各種想定した食品ロス・廃棄低減策によって、世界で 11 億 tCO₂eq/yr 程度の排出削減が見込まれる¹⁶⁾。ただし、食料システムの地域多様性は非常に高く、食品ロス・廃棄の低減効果等推計の不確実性があるため、引き続き精査・研究が必要と考えている。

2.5. 移動:カーシェアリング・ライドシェアリング

デジタル化の進展は、モビリティに大きな影響を及ぼす可能性がある。Connected; Autonomous; Service & Shared; Electric (CASE)と呼ばれる変化が起こっている。自家用車の稼働率は 4～5%程度と推計され、多くの時間は、自家用車は活用されていない。それは、高い費用を払っても、いつでもすぐにプライベート空間で移動が可能という利便性の高さのためである。しかし、完全自動運転車が実現すれば、ライドシェアリング、カーシェアリングとなっても、利便性を大きくは損なわず、また、稼働率の上昇によって、より安価な費用で利用可能となり得る。そのため、一部の趣向的な車などは除いて、ライドシェアリング、カーシェアリングが急激に進む可能性がある。そして、ライドシェアリングは直接的に自動車のエネルギー消費を低減し、カーシェアリングは自動車の台数を減らし、鉄やプラスチックなどの素材の利用を低減するとともに、その製造において必

要なエネルギー消費を低下し得る。RITE でも統合評価モデルを用いた定量的な試算を実施している¹⁷⁾。

OECD/ITF は、実際のデータ(人口分布、道路・公共交通ネットワーク、平日のトリップ需要(時間帯、OD (Origin-Destination)),トリップ選好等)に基づいてモデルを構築し、分析を行っている¹⁸⁾。アイルランドのダブリンにおいて、全ての自家用車をシェアカーに置き換えた場合はその 2%弱の車両台数で現在のモビリティを供給できるとしている。また、自家用車の 20%を置換した場合は(EV 無しでも)CO₂排出量が 22%低減されるとしている。

2.6. 産業:3D プリンティング

3D プリンター(アディティブ・マニュファクチャリング: AM)が進展してきている。金型を作っての成形や切削による造形などに比べ、複雑な形状を作成でき、同じ強度でも軽い製品を作成できる場合が多くあり、マテリアル効率の向上にもつながり得る。また、大量生産ではなく、それぞれのニーズに合わせた製品製造が可能で、大量生産、大量廃棄を避けることができる可能性もある。

2.7. 行動変容

技術だけではなく、個々人の行動変容とそれに伴う社会変化も重要である。一方、行動変容だけに期待しても、大きな効果は得られにくい。技術と社会の意識の変化が相乗効果を持つことが、大きな社会変化につながるはずである。エシカル消費のような動きが、企業の行動変化も促し、社会全体での対応につながる。

例えば、若年層の運転免許証取得率が低下してきている。それは、自家用車の購入を減らす要因にもつながってくるため、企業における完全自動運転車開発の動機づけにもなってくるだろう。

2.8. リバウンド効果

一方でリバウンド効果としてのエネルギー需要増大の可能性もある。

文献 19)によれば、世界のデータセンターの電力消費量は 2010 年に 194 TWh であり、2018 年には 205

TWh(世界全体の電力消費量の約 1%)に増加したと推計されている。同時期の計算インスタンスは+550%になったのに対し、電力消費量は+6%に留まっているとされる。エネルギー効率向上の主な要因は、サーバー効率化、仮想サーバー化、ストレージドライブ効率化・高密度化、データセンターインフラの効率化、サーバータイプの変化である。一方で、ムーアの法則の終焉の可能性もあり、今後、データセンターの電力消費量の大幅な増大を推計している研究もある(文献 20)など。

リバウンド効果は、IoT による直接的な電力消費量の増大にとどまらない。例えば、完全自動運転車により、利便性が増せば電車やバスからの乗り換えが起り、新たな移動需要そのものを誘発する可能性もある。更にマクロ的な視点からは、仮に特定の分野で消費が減っても、その分、別の消費に向かって、そこでエネルギー消費やCO₂排出が増えるというリバウンド効果も考えられる。研究として包括的な分析が必要であるとともに、実社会としての包括的な政策も必要と考えられる。

3. EDITS プロジェクトの概要

このような背景、問題意識の下で、RITE では、2020 年度より経済産業省の委託事業として EDITS 事業を開始した。

3.1. EDITS の目的

2019 年6月の G20 軽井沢アクションプランにおいて、「我々は、将来のエネルギー需給のより良い理解に関する定量分析の重要性、並びに、デジタル化、人工知能(AI)、インターネットオブシングス(IoT)及びシェアリングエコノミーによって牽引される需給両面のイノベーションの役割を認識する。我々は、世界の科学コミュニティ及び国際機関・枠組によってなされる、エネルギー・気候モデルのための経済全般にわたる全範囲シナリオのさらなる洗練及び開発のための努力を支持する。」とされた。

EDITS 事業では、大きく以下の 3 点を目的としている。

1) エネルギー需要サイドに焦点を置いた、国際的な研究コミュニティの構築を行う。エネルギー需要サイド

に関する、最新のデータやコンセプト、方法論、政策分析の共有を行う。それらを通して研究と政策分析の議論を深め、相互充実化を促進する。

- 2) 方法論やモデルの国際比較を通して、環境や気候政策分析に関する最先端の需要モデルを進展させる。また、学問分野横断的、エネルギー分野横断的、環境の領域横断的に、コンセプトと方法論を進展させ、また、それを広く国際的に展開する。
- 3) 構造化されたモデル実験とシミュレーションを通して、より良い政策提言を行う。特にデジタル化、シェアリングエコノミー、SDGs と気候目標との統合に相乗効果を有する政策立案のような、新しい分野やサービス供給を扱うモデルを構築、活用し、需要サイドの政策の潜在的インパクトや障壁、そして他 SDGs 目標とのシナジーおよびトレードオフを含めた評価を行う。

3.2. EDITS の研究体制

2 節で紹介したような内容を包含して、研究を深堀していくため、以下のようなテーマを設定し、それに対応した作業部会を設けて研究を実施している。また、各テーマの統合も行っていく予定である。研究全体のコーディネーションは、国際応用システム分析研究所(IIASA)の協力を得て実施している。

【部門別モデル化・分析・検討】

■ 産業部門

[主な課題] 産業部門モデル間の比較(理論、地理的/時間的/生物物理学的カバレッジ、データの利用可能性、手法等における相違の把握)、マテリアル効率性の効果等

■ 建築(民生)部門

[主な課題] 建築部門モデル間の比較(地域差、異質性)、シェアリングエコノミーの効果及びスマートワーキングが商業建築部門に与える影響 等

■ 運輸部門

[主な課題] 運輸部門モデルの比較(活動タイプ(旅客/貨物)、ロケーション(都市型/非都市型)、車両サイズ、モードの相違 等)

【データ収集・整理】

【主な課題】 需要側のマイクロデータ収集及び共有

【部門別モデル化・分析・検討】

■ 定性的シナリオ検討・策定

【主な課題】 1.5°C目標及び SDGs 目標に沿った低エネルギー・マテリアル需要に関する定性的シナリオ構築

■ モデル分析比較の Protokol 策定

【主な課題】 モデル間の比較分析の実施(各モデルの特徴を活かしたモデル分析比較)

■ 部門の統合分析

【主な課題】 定性的シナリオに沿った評価フレームワークの開発(厚生及び実行可能性評価) 等

部門横断的なテーマとしては、特に、デジタル化、公平性、ライフスタイル・行動変容、ビジネスモデル、理論構築に焦点を当てている。



図4 EDITS ロゴマーク(下段は、左から産業、建築、運輸、データ、定性的シナリオの作業部会)

エネルギー需要側は様々な部門にまたがっており、また国によっても多様である。そのため、上記のテーマを遂行するにあたって、表1に示すように多くの国・地域から多くの専門分野の研究者の参画を得て、EDITS 事業を推進しているところである。また、表1に記載以外にも、幅広い参加、協力を得ているところである。

4. おわりに

CN 実現への道のりは険しい。様々な方策を総動員する必要がある。デジタル化に誘因された、エネルギー需要側の様々な対策は、普及の障壁となっている「隠れた費用」を小さくできるようになることで誘発され得るも

のである。幅広いデジタル化の進展は、若い世代の意識変化も伴って、正に「環境と経済の好循環」を生み出す可能性を有している。また、気候変動対策のみならず、様々な SDGs の解決にも資する可能性がある。

表1 EDITS 参加研究機関

参加研究機関	実施内容
International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)	RITE とともに、プロジェクト全体のコーディネーション、国際モデル比較の共有シナリオの策定、関連情報の収集 等
OECD/ITF	輸送部門関連情報の収集、分析
Stanford University	国際モデル比較の共有シナリオの策定支援
東京大学 未来ビジョン研究センター	国際モデル比較の共有シナリオの策定、参加関係機関・研究者との調整
Lawrence Berkeley National Labs (LBNL)	エネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
Utrecht University	エネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC)	デジタル化技術のエネルギーへの影響評価、関連情報の収集、国際モデルによる分析試算
清華大学	中国のモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
UFRJ/COPPETEC	ブラジル及び南米のモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
Asian Institute of Technology (AIT)	インド、南アジア、東南アジアのモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
大阪大学	日本の民生部門モデル分析
University of Wisconsin	アメリカ関連データ収集、分析支援、デジタル化技術の影響評価
University of California, Santa Barbara (UCSB)	アメリカ関連データ収集、分析支援
The Korean Society of Climate Change Research	韓国関連のモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
Central European University	欧州の民生部門モデル分析
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU)	産業セクターモデル分析
University of Freiburg	産業セクター等のモデル分析
ISCTE - University Institute of Lisbon	テクノロジー、産業、政策など分野横断的分析
Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)	ドイツのモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
University of East Anglia (UEA)	欧州等でのライフスタイルの変化に伴う分析
University of Groningen	環境行動と状況的要因がエネルギー技術と受容性に与える影響分析

EDITS 事業では、次期 IPCC 報告書への貢献や、各国政府や企業などのエネルギー需要側対策の推進につながる研究成果を提供していく。EDITS で主たる対象と考えているエネルギー需要側対策は、直接的にエネルギーや CO₂ を削減するよりも、デジタル化技術等の進展を通して、製品やサービスを変化、最適化することで間接的にエネルギー、CO₂ を削減するものである。よって、政府や社会も直接的な理解はしにくく、対応が遅れる可能性もある。そのため、本事業では、複雑なシステムをよく理解できる形にし、また定量的に見える形にして、政府、企業、社会に発信していきたい。

参考文献

- 1) IPCC, Special Report on 1.5 °C (2018)
- 2) A. Grübler et al. Nature Energy 3(6) (2018)
- 3) 秋元圭吾 他、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2021)
- 4) J. Millward-Hopkins et al., Global Environmental Change (2020)
- 5) C. Wilson et al., Science 368(6486) (2020)
- 6) F. Creutzig et al., Nature Climate Change 8(4) (2018)
- 7) Global Energy Assessment (2012)
<https://iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/Home-GEA.en.html>
- 8) A. Grübler et al. (2021)
https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitionstoNewTechnologies/LED_Greenpeace_Gruebler.pdf
- 9) FAO, FAOSTAT database (2021)
- 10) K. Niinimäki et al., Nature Reviews Earth & Environment 1 (2020)
- 11) G. Peters et al., International carbon flows: Clothing, Carbon Trust (2011)
- 12) 木谷佳楠 他、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
- 13) IPCC, Special Report on Climate Change and Land (2019)
- 14) FAO, Global food losses and food waste: extent, causes and prevention (2011)
- 15) 林礼美 他、エネルギー・資源 (2020)
- 16) 林礼美 他、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
- 17) K. Akimoto et al., Technological Forecasting and Social Change (2022)
- 18) OECD/ITF, Shared Mobility Simulations for Dublin (2018)
- 19) Masanet et al., Science 367(6481) (2020)
- 20) M. Koot & F. Wijnhoven, Applied Energy (2021)

企画調査グループ

グループメンバー(2021年12月末)

グループリーダー・主席研究員	柳生 勇	調査役	望月 則孝
サブリーダー・主席研究員	野村 真	調査役	倉中 聡
サブリーダー	川口 圭史	主幹・研究員	木原 大輔
主席研究員	東井 隆行	主任	眞継 由佳
副主席研究員	出口 哲也	研究員	小林 由美
副主席研究員	青木 好範	研究員	安本 夏子
副主席研究員	鈴木 公仁		辰巳 奈美
副主席研究員	清水 淳一		久保 道代
研究管理チームリーダー	箕浦 靖明		永田 瑞生

カーボンニュートラル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、研究グループ及びセンターとともに、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組を進めている¹⁾。

2021 年は、第 6 次エネルギー基本計画が閣議決定されるなど、2050 年カーボンニュートラルの実現に向けたエネルギー政策の道筋が示されたことから、まずは、それについて概観する。

1. 第 6 次エネルギー基本計画の策定

2020 年 10 月、第 203 回臨時国会において、菅総理(当時)が「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言²⁾し、2021 年 4 月、地球温暖化対策計画が改定され、2030 年度において、2013 年度から 46%削減、更に 50%の高みを目指して挑戦を続ける新たな削減目標³⁾が表明されている。その実現に向けたエネルギー政策の道筋、また、気候変動対策を進めながら、日本のエネルギー需給構造が抱える課題の克服に向け、安全性の確保を大前提に安定供給

の確保やエネルギーコストの低減に向けた取組を示すため、2021 年 10 月、第 6 次エネルギー基本計画⁴⁾が閣議決定されている(図1)。

2021 年 12 月より、2050 年カーボンニュートラルや 2030 年 46%削減の実現を目指す中で、将来にわたって安定的で安価なエネルギー供給を確保し、更なる経済成長につなげるため、「点」ではなく、「線」で実現可能なパスを描くために、「クリーンエネルギー戦略」⁵⁾の検討が開始されており、2022 年 6 月頃の取りまとめが予定されている。

クリーンエネルギー戦略では、脱炭素を見据え、将来にわたって安定的で安価なエネルギー供給を確保することや、供給サイドに加えて産業など需要サイドの各分野でのエネルギー転換の方策について検討することになっている。

- ・今回の見通しは、2030年度の新たな削減目標を踏まえ、徹底した省エネルギーや非化石エネルギーの拡大を進める上での需給両面における様々な課題の克服を野心的に想定した場合に、どのようなエネルギー需給の見通しとなるかを示すもの。
- ・今回の野心的な見通しに向けた施策の実施に当たっては、安定供給に支障が出ることのないよう、施策の強度、実施のタイミングなどは十分考慮する必要。(例えば、非化石電源が十分に導入される前の段階で、直ちに化石電源の抑制策を講じることになれば、電力の安定供給に支障が生じかねない。)

		(2019年度⇒ 旧ミックス)	2030年度ミックス (野心的な見通し)
省エネ		(1,855万kl ⇒ 5,090万kl)	6,200万kl
最終エネルギー消費 (省エネ前)		(35,000万kl ⇒ 37,700万kl)	35,000万kl
電源構成	再エネ	(18% ⇒ 22~24%)	36~38%
	水素・アンモニア	(0% ⇒ 0%)	1% (再エネの内訳)
	原子力	(0% ⇒ 20~22%)	20~22%
	LNG	(37% ⇒ 27%)	20%
	石炭	(32% ⇒ 20%)	19%
	石油等	(7% ⇒ 3%)	2%
(+ 非エネルギー起源ガス・吸収源)			
温室効果ガス削減割合		(14% ⇒ 26%)	46% 更に50%の高みを目指す

※現在取り組んでいる再生可能エネルギーの研究開発の成果の活用・実装が進んだ場合には、38%以上の高みを目指す。

発電電力量：
10,650億kWh
⇒
約9,340
億kWh程度

(出典)エネルギー基本計画の概要(令和3年10月、資源エネルギー庁)

図1 第6次エネルギー基本計画 - 2030年度におけるエネルギー需給の見通しのポイント1

2. 調査研究活動

昨年度、経済産業省委託調査事業「令和2年度地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費(我が国における CCS 事業化に向けた制度設計や事業環境整備に関する調査事業)」⁶⁾を受託して実施したことから、その結果概要について取りまとめる。

2.1. 世界の商用 CCS プロジェクトの推移

図2は、GCCSI(Global CCS Institute)⁷⁾にある世界の商用 CCS プロジェクトの設備容量(CO₂回収可能量)の推移を示したものである。2010年から2011年は増加傾向にあったが、その後は年々減少し、2017年には、2011年の半分以下まで低下した。CCSは、比較的投資規模が大きく、リードタイムが長い事業であり、最終投資決定までに様々な理由により、延期または中止となったためである。2018年以降は、再び増加に転じているが、これは2016年に発効したパリ協定の影響と推察される。将来的な削減目標が明確になったことに加え、その目標達成のためには、人為的排出の大幅な削減

が条件となることが認識され、各国が CCS の重要性を再認識したためである。その結果、2021年は、これまでピークであった2011年と同等の水準まで増加した。

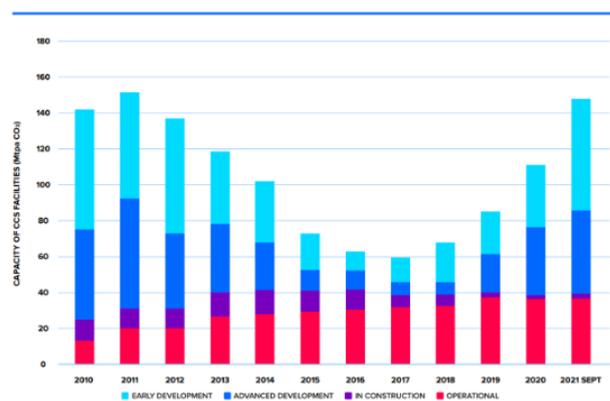


図2. 世界の商用 CCS プロジェクトの推移

(出典:GCCSI, The Global Status of CCS 2021)⁷⁾

2.2. CCS 導入障壁

CCS 導入のための事業環境整備の枠組みを検討するため、これまで海外で中止となった32件の CCS プロジェクトについて調査し、中止理由(導入障壁)を整理

した。32 件の主な中止理由から、CCS の導入障壁としては、①政策・法制度の問題(16%)、②経済性の問題(61%)、③社会受容性・貯留地点の問題(16%)に大別できることがわかった。

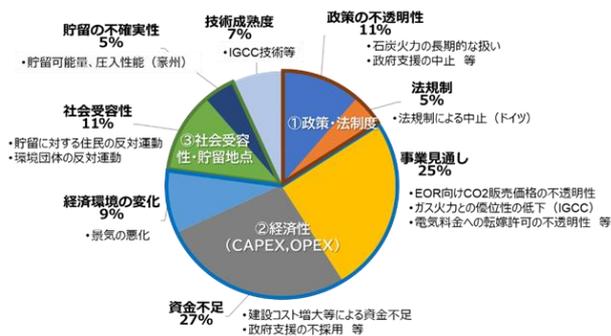


図 3 CCS の導入障壁

(出典:経済産業省委託調査事業調査報告書)⁶⁾

2.3. CCS 導入のための事業環境整備の枠組み

CCS 導入障壁としては、先述のとおり①政策・法制度の問題、②経済性の問題、③社会受容性・貯留地点の問題に大別される。これらの不確実性に伴う事業リスクを下げるのが重要である。そのため CCS 導入のための事業環境整備としては、①CCS の意義・許認可、②CCS 事業の見通し、③CCS 事業の前提、それぞれの枠組みが示された。

- ①CCS の意義・許認可(政策・法制度の問題への対応):
 - a)政策における明確な位置づけ、CCS 導入時期・CCS コスト目標の目安等を示すロードマップの検討が必要
 - b)CCS のライフサイクルに対応した包括的な法制度(探査、圧入、廃坑後管理、責任移管等)が必要
- ②CCS 事業の見通し(経済性の問題への対応):
 - a)CCSに伴う追加コストを考慮しても収益が得られる収益構造(ビジネスモデル)、資金調達のための枠組みが必要
 - b)CCS の実施体制の検討および CCS 事業における事業者の責任範囲の明確化が必要
- ③CCS 事業の前提(社会受容性・貯留地点の問題への対応):
 - a)国民が CCS に対し、温暖化対策のための合理的な

技術としての認知が低いままであれば、CCS への公的支援(補助金等)あるいは社会実装そのものに否定的になる可能性がある。そのため、社会受容性の向上に関する枠組みが必要

b)貯留可能量等の貯留性能に係る不確実性は、CCS 導入実施判断の前提となる。貯留適地の探査・評価等に関する枠組みが必要

CCS はリードタイムが長い事業である。温暖化対策技術として活用するためには、それぞれの枠組みについて、早期に検討し、構築していく必要がある。

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、各国から推薦で選ばれた専門家が報告書の取りまとめを行っており、科学的分析に加え、社会経済への影響、気候変動を抑制する対策など多角的な評価・検討が行われている。また、この成果は、各国の政策にも科学的根拠を与えるため、ここからの報告書は国際交渉にも高い影響力を持つと考えられている。

RITEでは、緩和策(第3作業部会)の国内支援事務局を担い、研究開発・調査と政策を結びつける役割を担っている(図4)。IPCCは、2021年8月に第6次評価報告書第1作業部会報告書を公表し、引き続き、2022年2月に第2作業部会報告書、4月に第3作業部会報告書、9月に統合報告書の完成を目指して執筆やレビューに取り組んでいる。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。

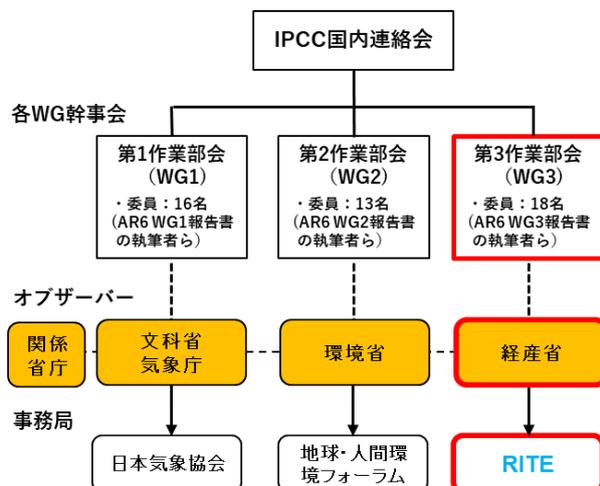


図4 IPCC国内連絡会とRITE

3.2. ISO(国際標準機関)

ISOは、167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。

二酸化炭素回収・貯留(CCS)は、CO₂の大気中への排出量削減効果が大きいこと等から、地球温暖化対策の重要な選択肢の一つであり、すでに諸外国では、多くの実証試験、商業規模でのCCS事業も実施され、国際連携が進められるとともに、標準に関する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5)。

2022年1月時点で、ISO/TC265からCCS分野に係る規格類は12件発行されている。今後CO₂船舶輸送に関するWGも設置され、規格の開発を開始する予定である。その他の分野の新規提案も提出される中、既発行の規格の定期見直し改訂も始まり、現在開発中の文書を合わせて7件の開発が予定されている。

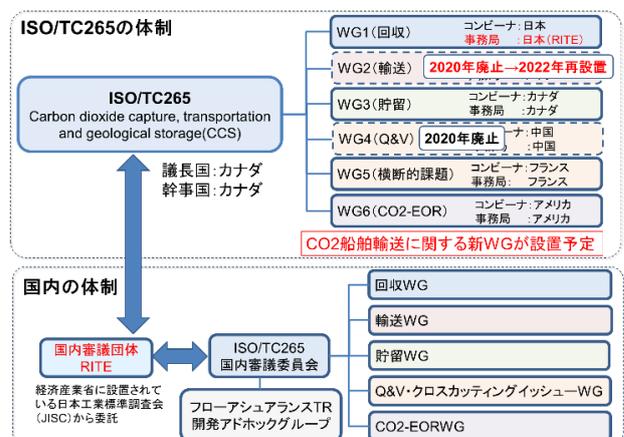


図5 ISO/TC265の各ワーキングと国内支援体制とRITE

4. 人材育成と知財戦略、産学連携の推進

4.1. 人材育成

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

ただ 2021 年も 2020 年同様、新型コロナウイルスの影響で 54 人に留まった(2020 年は 37 人・2019 年 397 人)が、今後状況が改善され次第、授業やワークショップを再開することにしたい。

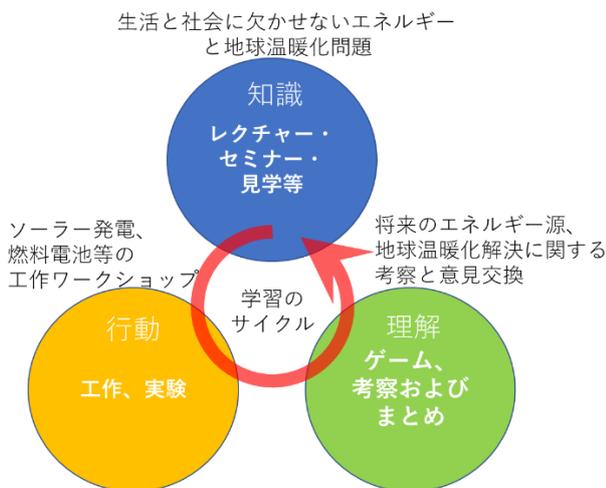


図 6 RITE における人材育成(小中高校生)

<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 7)。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。

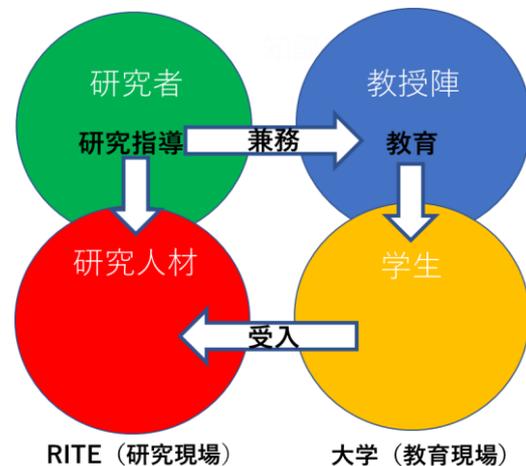


図 7 RITE における人材育成(大学・大学院生)

4.2. 知財と産学連携

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、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。

このような知財化は、企業等との連携機会を産み、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を期待することができる。RITE では、こういった知財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、戦略的に知財化を推進している。

戦略的知財化推進の一環として、RITE 幹部を委員とし、広報・産学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の活用を、主な議事内容として運営を行っている。

2021 年末時点で、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 24 件、外国出願が 21 件であり、権利化された特許は、国内権利 98 件(うち企業にライセンス中 11 件)、外国権利 53 件(同、13 件)である。

なお、企業にライセンスした事例としては、2021 年 12 月に東証マザーズ市場に上場された GEI 株式会社(バイオ研究グループ 5.3 参照)から、アミノ酸に関するライセンス料を頂いている。

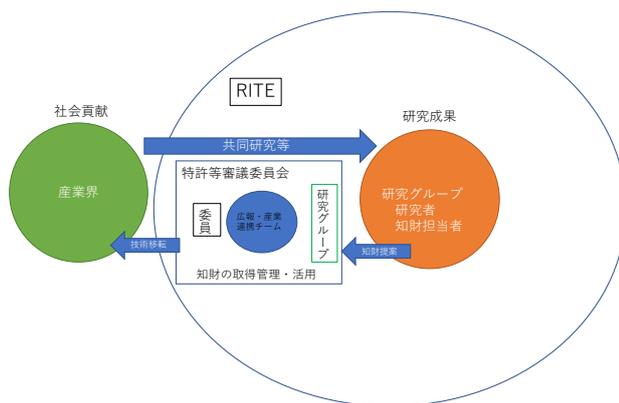


図 8 知財戦略と産学連携の推進

5. おわりに

2021 年は、東日本大震災及び東京電力福島第一原子力発電所事故からちょうど 10 年目の節目である。

その中で、気候変動問題への対応と日本のエネルギー需給構造の抱える課題の克服という二つの視点を踏まえて、2021 年 10 月、第 6 次エネルギー基本計画が策定されている。

2050 年のカーボンニュートラルに向けては、現時点では社会実装されていない脱炭素技術について、これを開発・普及させていくことが求められており、RITE が長年技術開発を実施してきた CO₂ の分離回収・貯留技術の期待が益々大きくなっていると感じている。しかし、2050 年カーボンニュートラルを実現するのは、並大抵の努力では不可能であり、RITE としても、社会実装を見据えて積極的に推進していくことが求められている。

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、研究グループ及びセンターとともに、2050 年に社会実装を目指し、技術開発を積極的に推進していく。そして、社会実装が

進展していけば、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” (<http://www.rite.or.jp/about/>)
- 2) 第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説 (https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html)
- 3) 地球温暖化対策計画(令和3年 10 月 22 日閣議決定) (<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html>)
- 4) 第 6 次エネルギー基本計画 (https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf)
- 5) クリーンエネルギー戦略 (https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/001_02_00.pdf)
- 6) 令和2年度地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費(我が国における CCS 事業化に向けた制度設計や事業環境整備に関する調査事業)調査報告書 (https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2020FY/000266.pdf)
- 7) GCCSI, The Global Status of CCS 2021 (https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2021/10/0-4-GCCSI_Jarad-Daniels.pdf)

システム研究グループ

グループメンバー(2021年12月末)

グループリーダー・主席研究員	秋元 圭吾	主任研究員	Joni Jupesta
副主席研究員	山田 航也	研究員	中野 優子
主任研究員	和田 謙一	研究員	大西 尚子
主任研究員	長島 美由紀	研究員	榊田 仁次
主任研究員	本間 隆嗣	研究員	安藤 輝尚
主任研究員	佐野 史典	研究員	松岡 祐子
主任研究員	山川 浩延	研究助手	山本 清美
主任研究員	林 礼美	研究助手	斎藤 美三子
主任研究員	伏見 温子	研究助手	北村 喜代美
主任研究員	副島 勉	研究助手	工藤 幸子
主任研究員	望月 則孝 (企画調査グループ兼務)		

システム研究グループの研究活動報告

システム研究グループは、システム的な思考、システム的な分析を通して、地球温暖化やエネルギー対応に関する有用なる情報提供を国内外に行っている。本稿では、1) カーボンニュートラルに向けた対応戦略の分析(第1節)と、2) 2030年の排出削減目標の排出削減費用、排出削減努力、国際競争力への影響等の分析(第2節および第3節)についての研究成果を紹介する。

1. 2050年カーボンニュートラルのシナリオ分析

2020年10月に菅首相(当時)は、2050年までにカーボンニュートラル(以下CNと記す)を目指すと言明した。これは1.5℃未満の気温上昇に抑制するシナリオと整合性があるとされる目標である。2021年10月には、エネルギー基本計画、地球温暖化対策計画、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略を改定し閣議決定された。

RITEは、エネルギー基本計画の議論を行った総合資源エネルギー調査会基本政策分科会の要請を受けて、RITEが開発してきた世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+モデル(文献1)などを用いて、2050年CNについて複数のシナリオを想定した分析を行い、2021年5月に基本政策分科会に提示した²⁾。本節では、そのシナリオ分析を中心に紹介を行う。

1.1. CNの概要

CN実現について、一次エネルギー供給の視点で記載したのが図1である。CNはエネルギーの脱炭素化が不可欠であるが、後述のように脱炭素化に貢献し得る各エネルギーには、技術的、社会的、経済的な制約がある。そのため、全体コストの最小化の視点も踏まえると、省エネルギーはCN実現においても重要である。個別の技術の省エネルギーを超えて、シェアリング経済、サーキュラー経済の実現をもたらすような、デジタルトランスフォーメーション(DX)による社会変化が重要になると考えられる。

その上で、一次エネルギーとしては、原則、再生可能エネルギー(再エネ)、原子力、CO₂回収貯留(CCS)付きの化石燃料のみで構成することが必要となる。また、これら国内のゼロ排出エネルギー源にコストや量の制約もあるため、経済合理性の点から、海外の再エネやCCS化石燃料を水素に転換した上で活用することも考えられる(前者はグリーン水素、後者はブルー水素とも呼ばれる)。更に、利便性を高めるために、水素に窒素や炭素を付加して、アンモニアや合成燃料(合成メタンや合成液体燃料)にして利用することも重要性が高いと考えられる。

いずれにしても、各種技術の将来見通しや社会的な制約等について不確実性が大きい。複数のシナリオによる

分析が必要である。その上で、重要なことは、前提条件の下で、全体システムとしてコストを含めた統合的な分析であり、そのため、数理モデルを用いた定量的かつ統合的な分析が必要となる。

を追加(表中の「海外クレジット活用ケース」と「合成燃料活用ケース」)したシナリオを紹介する。

表1 モデル分析の想定シナリオ

	2050年GHG排出削減	各種技術の想定(コスト・性能)
海外クレジット活用ケース(世界費用最小化=世界限界削減費用均等)	1.5°Cシナリオ、国内削減率はモデルで内生的に決定	モデルの標準想定
参考値のケース	1.5°Cシナリオ、国内▲100% (日本以外については、欧米はそれぞれ▲100%、それ以外は、CO2について全体で▲100%を想定 (GHGは2065年頃▲100%) : 1.5°Cシナリオ)	(注:ただし、再エネ比率が高いシナリオでは、疑似償性が実現し、普及していることが暗黙の前提となる) 再エネのコスト低減加速 原子力の導入拡大
① 再エネ100%		
② 再エネイノベ		
③ 原子力活用		
④ 水素イノベ		
⑤ CCS活用		
⑥ 合成燃料活用		
⑦ 需要変容		

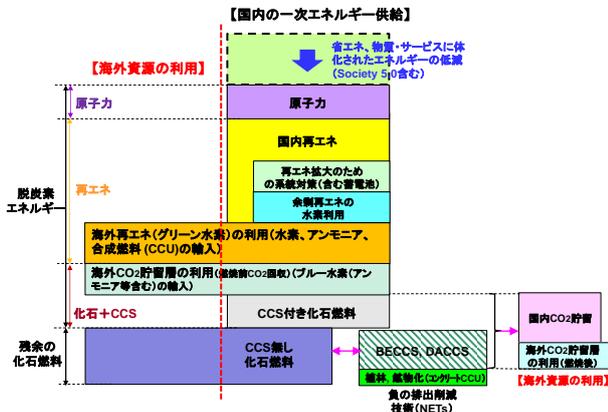


図1 一次エネルギー供給で見たCNのイメージ

1.2. モデルの概要

世界エネルギーシステム・温暖化対策評価モデルDNE21+による世界全体のカーボンニュートラルの対策の分析例について示す。DNE21+は、500程度の技術を具体的に考慮しており、世界を54地域に分割し、2100年までの期間について動学的な最適化を行うモデルである。エネルギー供給(発電部門、水素系エネルギー等)、CO₂回収・利用・貯留(CCUS)技術、並びにエネルギー需要部門のうち、鉄鋼、セメント、紙パ、化学、アルミ、運輸、民生の一部については、個別技術を積み上げてボトムアップ的にモデル化している。

なお、日本については、変動性再生可能エネルギー(VRE)の系統統合費用について、DNE21+で想定 of 簡略な統合費用想定から、東京大学と日本エネルギー経済研究所による日本国内を5地域に分割し、時間解像度も1時間ステップでモデル化された電源構成モデルの結果を援用し、DNE21+に統合して分析を行った。

1.3. 想定シナリオ

表1および2に、本稿で示す2050年CNに関するモデル分析の想定シナリオを示す。更にCN達成の機会の幅を広げて理解をするために、文献1)から2シナリ

表2 想定シナリオにおける各種技術の想定

シナリオ名	再エネコスト	原子力比率	水素コスト	CCUS (貯留ポテンシャル)	完全自動運転(カーライドシェア)
参考値のケース ¹⁾	標準コスト	10%	標準コスト	国内貯留: 91MtCO ₂ /yr、海外への輸送: 235MtCO ₂ /yr	標準想定 (完全自動運転率実現・普及想定せず)
①再エネ100%	0%				
②再エネイノベ	低位コスト	10%	水電解等の水素製造、水素液化設備費: 半減		
③原子力活用 ²⁾		20%			
④水素イノベ	標準コスト	10%	標準コスト	国内: 273MtCO ₂ /yr、海外: 282MtCO ₂ /yr	
⑤CCS活用				国内貯留: 91MtCO ₂ /yr、海外への輸送: 0MtCO ₂ /yr	
⑥合成燃料活用	低位コスト ³⁾			国内91Mt、海外235Mt	
⑦需要変容				2030年以降完全自動運転率実現・普及し、カーライドシェア拡大、自動車台数低減により素材生産量低下	

¹⁾ DAC無しでは、2050年CNの実行可能解が無く、全てのシナリオでDACが利用可能と想定
²⁾ 原子力活用シナリオは別途、比率50%まで分析を実施
³⁾ 国内は②再エネイノベと同じコスト・ポテンシャル想定。海外は更に安価な再エネコスト・ポテンシャルを想定

1.4. シナリオ分析結果

図2に日本の部門別GHG排出量を示す。1.5°Cシナリオを世界全体で費用最小となる対策(海外クレジット活用ケース)においては、日本は2013年比▲63%程度と計算された。世界においては、日本よりも相対的に安価に負の排出を実現できるCO₂除去技術(CDR)もしくは負の排出技術:NETs)の機会が多く存在しているためである。CCS付きバイオエネルギー(BECCS)や大

気中 CO₂ 直接回収貯留(DACCS)など、バイオマス資源や DAC のためのエネルギーとしての VRE と CO₂ 地中貯留ポテンシャルが大きい地域・国で CDR を実施する方が費用対効果が高い。

それを理解した上で、しかし、国内での CN 達成手段を考える必要がある。その場合でも、DACCS は重要な手段と見られる。ただし、国内もしくは海外への移送を含め、回収した CO₂ を十分に貯留できる量が確保できない場合、DACCS の寄与度は減り、かわりに合成燃料(合成メタン、合成液体燃料)の役割が一層大きくなる。ただし、いずれのシナリオにおいても、DACCS を想定しない場合、国内での CN 達成の実行可能解は本分析の想定下では存在しなかった。

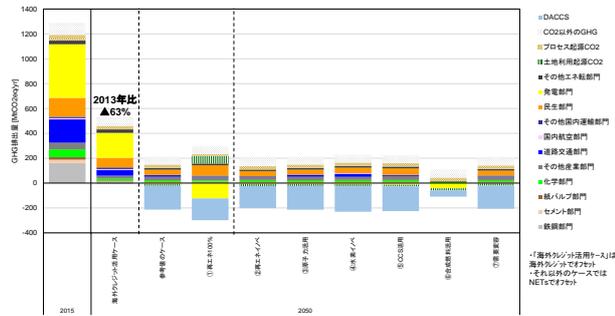


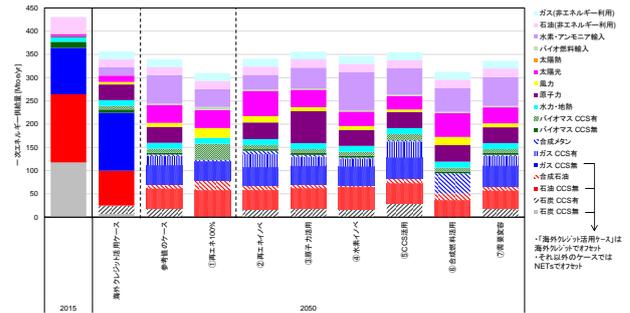
図2 日本の部門別 GHG 排出量(2050年)

図 3、4、5 には、それぞれ、日本の一次エネルギー供給量、発電電力量、最終エネルギー消費量を示す。

図 3 から、まず、省エネはいずれのシナリオにおいても重要である。現状よりも 25%程度の一次エネルギー供給量の低下が見られる。その上で、再エネ、CCS、原子力いずれも重要である。ただし、CCS、原子力は利用に上限制約を想定しており、いずれのシナリオでもほぼ想定の上限一杯活用する結果となっている。再エネは将来的なコスト低減は見込んでいるものの、導入量の上昇とともに単価の上昇も見込まれ、コストの幅が大きい。したがって、先述の DACCS オプションや、海外からの水素・アンモニア、合成燃料の輸入オプションなどの中で、費用対効果の高い導入比率がモデル内で決定され、結果として示されている。

一次エネルギー供給量とは異なり、発電電力量は、ほ

とどこのシナリオで現状よりも増加が見られる。電化を促進し、電力の脱炭素化を図ることが必要である。ただし、再エネ 100%のシナリオだけは、系統対策の統合費用の急上昇に伴う、電力コストの大幅な上昇により、電化の促進を避けるような結果が見られる。バランスのとれた電源構成が求められる。



注1) 一次エネルギー換算はIEA統計に準じている。バイオマス以外の再エネ:1 TWh=0.086 Mtoe, 原子力:1 TWh=0.086+0.33 Mtoe
注2) CCSなしの化石燃料は、負排出技術でオフセットされており、カーボンニュートラル化石燃料となっている。

図3 日本の一次エネルギー供給量(2050年)

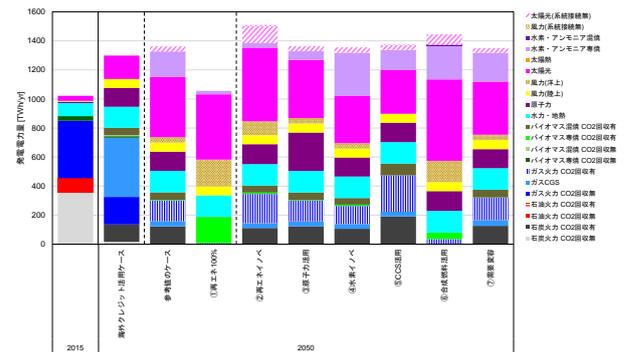


図4 日本の発電電力量(2050年)

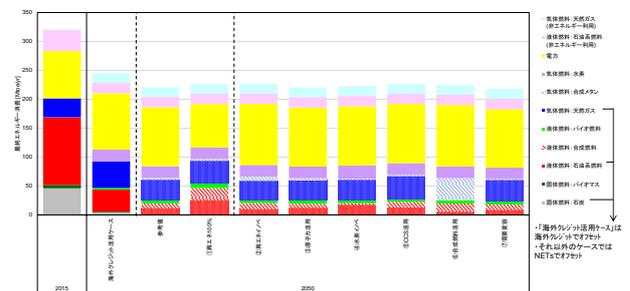


図5 日本の最終エネルギー消費量(2050年)

最終エネルギー消費量は、電化が重要であるとともに、水素はとりわけ産業部門で、合成液体燃料は運輸部門で、民生部門や一部産業部門では合成メタンの利用等が

見られる。ただし、DACCS で比較的大きく排出のオフセットが可能なシナリオでは、天然ガスの利用は残り、それをオフセットすることも含めた対策が見られる。

排出削減費用については、1.5℃シナリオを世界全体で費用最小となる対策(海外クレジット活用ケース)では、世界共通となる CO₂ 限界削減費用(炭素価格)は 168 \$/tCO₂ と推計されるが、国内で CN を達成する、例えば参考値のケースでは、525 \$/tCO₂ と大きな費用が推計された。ただし、想定した各種イノベーションシナリオによって、コストは低減する可能性は示されており、様々な技術・社会イノベーションを誘発していく必要がある。

1.5. シナリオ分析からの示唆

DACCS は、CN 下ではバックストップ技術として重要な役割を果たし得る。国内で CN を達成する際には、国内での DACCS は費用対効果の高い対策となり得る。一方、世界全体での CN 達成の場合には、より安価に余剰再エネや CO₂ 貯留ポテンシャルにアクセス可能な地域で DACCS を実施し、排出クレジットでオフセットすることが経済合理的と見られる。DACCS の実施やクレジットの枠組み等について不確実性は残っているため、両者の可能性を見極めていくことが重要と考えられる。水素、アンモニア、合成燃料(合成メタン、合成液体燃料)は、DACCS と同様に比較的高価なオプションではあるが、やはり CN 目標下では費用対効果のある対策と見られる。一方、エネルギー源については海外からの CN のエネルギー源の輸入についても経済合理性が高いと見られる。海外での CCS、再エネの活用を含めたエネルギーシステム全体の構築が重要と考えられる。再エネの重要性は論を俟たないが、再エネ比率が増すと、条件の悪い場所での発電となり単価の上昇要因があり、また、再エネの系統統合費用の増大が見込まれる。適正なレベルの導入を志向しつつ、様々なエネルギーの組み合わせや需要側の対策の強化により、全体対策費用を抑制していくことが重要である。

CN を早く達成するためにも、第 6 次エネルギー基本計画に記載があるように、現段階では選択肢の幅を狭

めず、「あらゆる選択肢を追求」することが重要と考えられる。

2. 2030 年 NDCs の排出削減努力の評価

2.1. はじめに

2015 年の COP21 で合意されたパリ協定で 2020 年以降の排出削減目標について、すべての国が国別貢献(NDCs: Nationally Determined Contributions)を策定し国連に提出して、それをレビューする、プレッジ・アンド・レビュー形式をとることとなった。システム研究グループでは、2015 年度に、パリ協定の前までに提出された約束草案(INDCs: Intended Nationally Determined Contributions)の排出削減目標について、各種指標を用いて分析を行っている(文献 3)、4))。

2021 年 4 月の気候変動サミットに前後して、先進国を中心に、NDCs の排出削減目標を引き上げた。日本については 2030 年に 2013 年比▲26%としていた排出削減目標を 2013 年比▲46%に引き上げ、更に 50%減の高みを目指して挑戦するとした。この目標に対応した日本のエネルギーミックスを含む、「第 6 次エネルギー基本計画」が策定され、地球温暖化対策計画も改定された(2021 年 10 月に閣議決定)。一方、中国、インド、ロシアなどは原則従来通りの排出削減目標であるが、中国は CO₂ 原単位目標であり、GDP 成長見通しは 2015 年当時よりも低位となっており、排出削減努力がより大きく必要になっているとも想像される。

そこで、COVID-19 の経済やベースライン排出量への影響も踏まえつつ、最新の NDCs の 2030 年排出削減目標の排出削減努力の評価を様々な指標により複合的に評価した。そのうち、排出削減費用等に関連する評価については、システム研究グループが開発してきた世界温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて分析を行った。また、NDCs とパリ協定 2℃、1.5℃長期目標との関係性についても DNE21+を用いて評価を行った(文献 5))。

2.2. 主要国の NDCs

表 3 は、主要国の NDCs の排出削減目標を示している。日、米、EU、英国の先進国は、2015 年 INDCs から深掘りした目標となっている。但し、基準年は国によって異なっており、排出削減率の大小による国間の比較は出来ない。また、中国やインドは GDP 当たりの原単位目標である他、BAU における排出量を想定して BAU 比の削減目標を提出している国もあり、現状からどの程度排出削減を進める目標であるのかは、基準年を揃えた上で比較することが必要である。図 6 は、一例として日本の基準年である 2013 年比で排出量を比較したものである。ここでは、排出量の実績値と、各国が提示している排出削減目標、そして CO₂ 原単位で目標を提示している国については、将来の GDP 成長見通しに基づいて 2030 年の排出量を算定し、比較したものである。2013 年比では、主要国の中では英国の排出量が最も小さく、次いでスイス、ニュージーランドとなっている。文献 3) で述べたように、将来の人口や経済の見通しなどは国によって大きく異なっているため、経済発展が先進国より進むと見込まれる発展途上国の基準年比排出削減率は、相対的に小さくても排出削減努力が足りないとは言えない。仮に先進国間のみでの比較であったとしても、基準年までに進めてきた排出削減努力が異なるため、基準年比の排出削減率は、排出削減努力の比較の指標として、適切なものとは言いがたいことには注意されたい。

表 3 主要国の NDCs の排出削減目標

	提出済み NDCs の 2030 年目標
日本	2013 年比▲46%
米国	2005 年比▲50%~▲52%
EU27	1990 年比▲55%
英国	1990 年比▲68%
ロシア	1990 年比▲30%
中国	GDP 当たり CO ₂ 排出量を 2005 年比▲65%
インド	GDP 当たり GHG 排出量を 2005 年比▲33%~▲35%

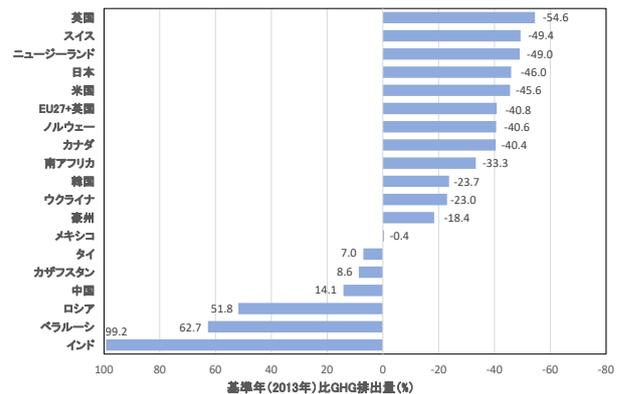


図 6 基準年(2013年)比排出量の国際比較

この他、一人当たり排出量、GDP 比排出量その他、世界温暖化対策評価モデルを用いて算定した BAU 比の排出量といった指標についても評価を行った。

2.3. 世界温暖化対策評価モデルを用いた NDCs の評価

図 7、図 8 は、NDCs の CO₂ 限界削減費用、GDP 当たりの排出削減費用の国際比較をそれぞれ示している。ここでの評価では、日本については、第 6 次エネルギー基本計画で示された電源構成比率(再エネ: 38%、水素・アンモニア: 1%、原子力: 20%、LNG: 20%、石炭: 19%、石油: 2%)を制約として考慮した評価した場合の結果を示している。

以前の評価(文献 4))と比較すると、先進国については、COVID の影響もあり、将来の各種産業の生産量や輸送サービス需要等の多くの見通しは下方修正されたものの、先に述べたように排出削減目標が引き上げられた影響で、CO₂ 限界削減費用と GDP 比排出削減費用は多くの国でより大きな費用を要すると評価された。なお、ニュージーランドの CO₂ 限界削減費用が 546\$/tCO₂ と非常に高いが、これはメタンの比率が高く、米国 EPA による評価ベースで構築している非 CO₂ GHG 排出削減評価モデルで想定している削減ポテンシャルが十分大きくないため、その分エネルギー起源 CO₂ の排出削減が大きくなっていることが一因である。ニュージーランドの 2005 年比▲50%という GHG 排出削減目標について、これを CO₂ のみで評価すると、

CO₂ 限界削減費用は 406 \$/tCO₂ と評価され、米国やカナダと近い水準となる。特に、土地利用 CO₂ や非 CO₂ GHG のコスト評価については、更に慎重な評価が必要である。

中国については、排出削減目標自体は変わらないものの、原単位ベースでの目標であり、GDP の成長見通しが下方修正されたことから排出できる量が少なくなったこともあり、CO₂ 限界削減費用は先進国同様に、以前の評価より高く評価された。

GDP 比削減費用については、化石燃料の輸出国については、輸出量が低下することによる正味のコスト増の効果も含まれ、ロシア等は費用の増大が大きい傾向が見られている。

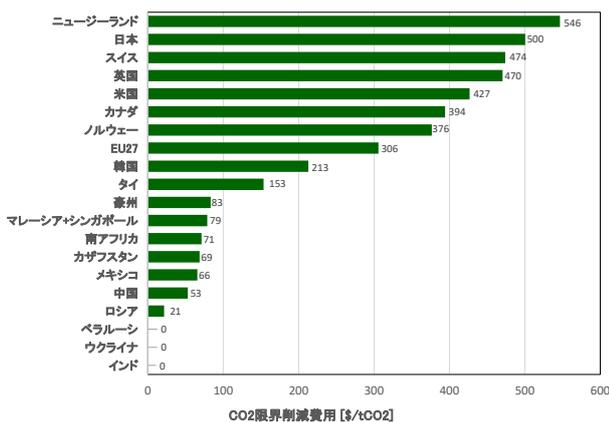


図 7 NDCs の CO₂ 限界削減費用の国際比較

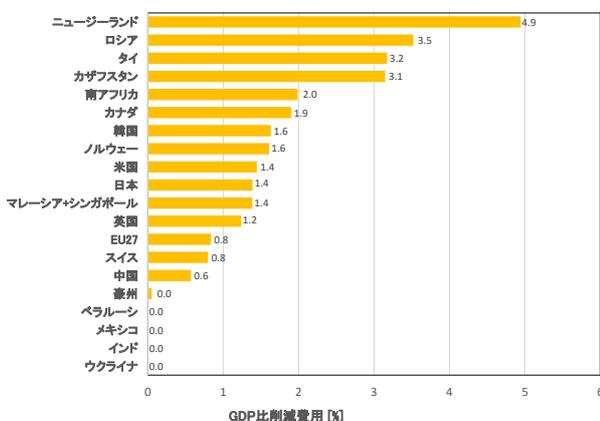


図 8 NDCs の GDP 当たり排出削減費用の国際比較

2.4. 2030 年 NDCs とパリ協定長期目標との関係性

図 9 は、2050 年までのベースライン(限界削減費用がゼロのシナリオ)および 2030 年 NDCs の下での世界全体の GHG 排出量見通しに加え、2°C(>66%)シナリオ、1.5°C(>66%)シナリオの排出経路を示している。

NDCs の下での2030年の世界全体のGHG 排出量は 50GtCO₂/yr 程度と推計され、UNEP 等の推計(文献 6))と整合的な水準である。なお、UNEP のレポートでは、2°Cや 1.5°Cの排出経路と NDCs の下での排出量とのギャップが強調されている。しかし、カーボンバジェットを制約条件とした最適化計算によれば、DACCS 等の CDR により気温の一定程度のオーバーシュートを許容するなら、2030 年 NDCs は 2°Cや 1.5°Cを達成することが不可能な水準であるという訳では必ずしもなく、むしろ費用対効果が高い可能性もある。

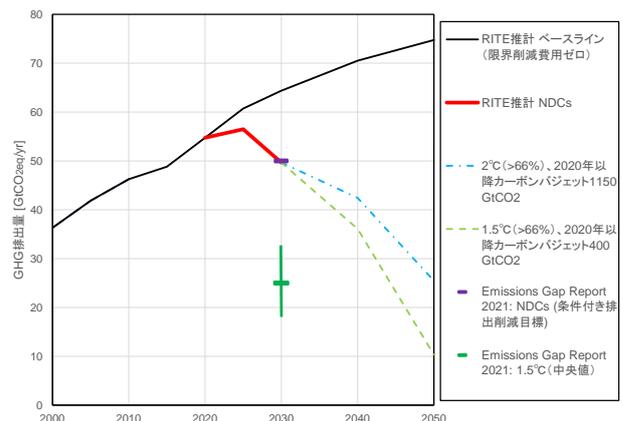


図 9 世界全体での NDCs の期待排出削減量推計

2.5. NDCs 排出削減努力評価からの示唆

パリ協定 NDCs はプレッジ・アンド・レビューの仕組みであり、各国間で差異はあるものの、衡平な排出削減努力を志向することが、制度の維持、世界全体での削減効果のために重要である。最新の NDCs でも排出削減努力に各国間で差異が大きく残っている可能性も示唆され、引き続き、NDCs の検証を行っていくことが重要と考えられる。

3. 2030年の日本のNDCsの経済影響評価

3.1. はじめに

本節では、排出削減目標に関する経済影響に焦点を当て、世界エネルギー経済モデルを用いて、2030年の46%削減目標・エネルギーミックスに関する経済影響分析を行った。46%削減目標・第6次エネルギー基本計画と、従来の目標であった26%削減(2013年度比)・第5次基本計画の経済影響の比較を行った(文献7))。

3.2. 分析方法

本分析で用いた世界エネルギー経済モデル DEARS は、世界を18地域に分割し、トップダウン型経済モジュールとボトムアップ型エネルギーシステムモジュールを統合した構造を持つ。世界全体の消費効用最大化を目的関数とした、動的的非線形最適化モデルである。経済モジュール(一般均衡モデル型)では、国際産業連関表データベース GTAP (文献8))に基づく産業連関構造を明示し、産業構造や貿易構造を明示化したモデル化をしている。エネルギーモジュールでは、ボトムアップによる簡略化したエネルギーシステムを明示化し、エネルギーミックスを制約条件として扱うことが可能である。

ベースライン GDP は、COVID19の影響も一部考慮された「内閣府・中長期の経済財政に関する試算」(2021年7月)の経済成長実現ケース(10-30年平均成長率は約1.4%/年)を想定した。2020年のCO₂排出量は炭素価格ゼロとして想定し、COVID-19による排出減の影響は、GDP 想定を介して反映した。ベースラインにおける2030年発電構成は、2019年比固定と想定した。▲46%ケースの電源構成は、石炭火力19%、LNG火力20%、石油火力2%、太陽光16%、風力5%(そのうち、洋上風力は1000万kWを想定)、水力地熱12%、原子力20%と想定した。各電源の発電コストの想定に関して、発電コストWG(文献9))の新設データを反映した。新設の発電単価は、年割引率5%を想定し、各電源の諸元一覧をもとに想定した。VRE 導入時の統合費用についても、同資料の「電源立地や系統制約を考慮しない機械的な試算」を参照した。米国の2030年の削減目標はGHG▲50%(05年比)、EUは▲55%

(90年比)を想定した。

3.3. 分析結果

▲26%、▲46%目標の経済影響を比較する。図10には、ベースライン、▲26%、▲46%ケースのGDPを示した。▲26%ケースでは約0.5%(約▲3兆円、ベースライン比)のGDP減少であるが、▲46%ケースでは約4.2%(約▲28兆円)の減少と大きな経済影響が推計される。削減目標に必要な炭素価格は、▲26%、▲46%ケースでそれぞれ105、534 \$/tCO₂と推計された。▲46%ケースにおいて、低炭素・脱炭素エネルギーに対する投資の増加の効果はあるものの、製造業等の競争条件の悪化(貿易財に関する輸出の相対価格の悪化)による純輸出の低下、また消費の低下の影響が大きく、GDPが低下すると推計された。

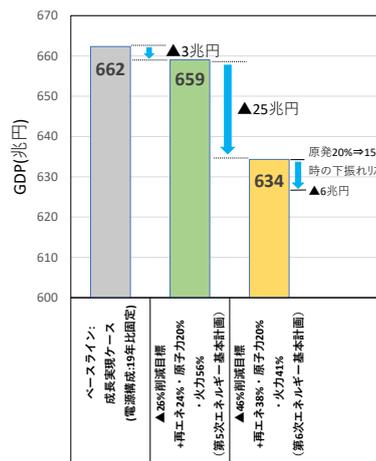


図10 日本のGDP(2030年)

過去に実施した▲26%の経済影響の推計¹⁰⁾と、同じく▲26%の経済影響を比較すると、本推計ではGDPロスや炭素価格が小さく推計されている。これらは、文献10)と比較すると、本分析におけるベースラインGDPの低下(10-30年成長率: ▲約0.2%/年)や、再エネの発電コスト想定低下などに起因する。

図11には、▲26%、▲46%ケースにおける産業別の生産量変化を示す。エネルギー多消費で国際競争に晒されやすい製造業である鉄鋼産業や化学産業などでは、産業平均を表すGDP変化よりもかなり大きい12~14%程度の生産量減少が見込まれる。

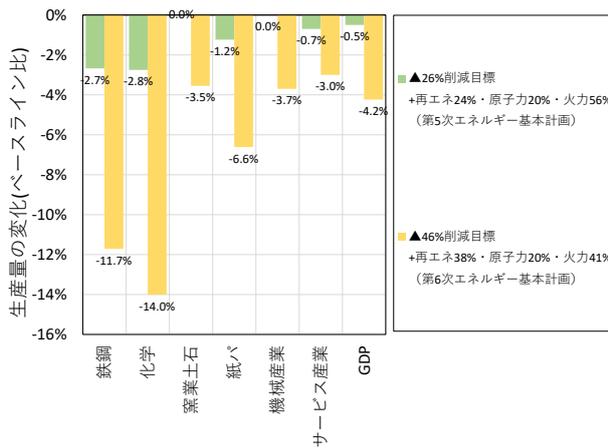


図 11 産業別の生産量変化(日本、2030年)

図 12 には、▲26%、▲46%ケースの電気料金の変化を示した。図中の「炭素価格による上昇」は、電源構成を変化させた上で、排出削減目標のための炭素価格を火力発電のパナルティとして追加した際の価格影響を示す。電力料金は、▲26%ケースに比べ、▲46%ケースでは大幅に増加すると推計された。主な要因は、電源構成変化より、炭素価格が上乗せされたコスト増加による要因である。

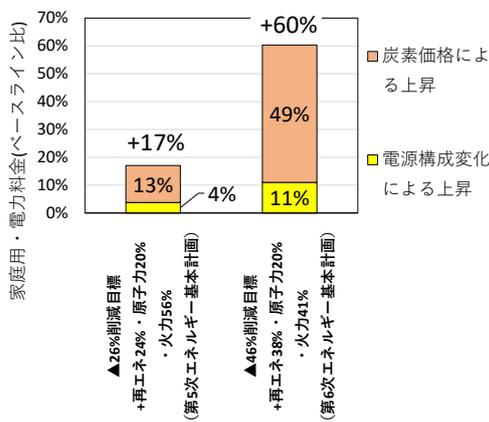


図 12 電気料金への影響(日本、2030年)

図 13 には、排出削減水準及び再エネ・火力比率に関する感度分析の結果を示す。削減目標が▲35%から▲46%にかけて、GDP ロスが大幅に上昇すると推計された。エネルギー供給側の対策の余地が小さくなり、生産活動の低下を含む需要側の対策の対応の必要性が高まるためである。

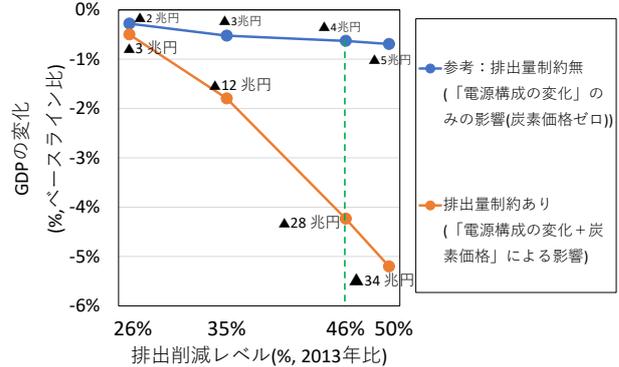


図 13 排出削減水準と再エネ/火力比率を変化させた場合の GDP への影響

3.4. 日本の NDCs 経済影響のまとめ

日本政府は、国内外での気候変動緩和の強化の要請を受け、2030年の排出削減目標を▲46%に引き上げたが、GDP で▲4%程度の影響が推計された。投資は増大するものの、貿易の競争条件の悪化による純輸出の低下と財・サービス価格の上昇に伴う家計消費の低下の影響は大きい。また、エネルギー多消費で国際競争に晒されやすい製造業である鉄鋼や化学産業などでは、産業平均に相当する GDP ロスよりかなり大きい生産量減少が見込まれる。また、家庭部門においても、電力料金や光熱費が大幅に上昇する可能性が示された。

本分析では、一般均衡型モデルによる均衡後の解が示されている。現実社会の移行過程においては、特定の産業においてより厳しい悪影響となる可能性がある点に留意が必要である。また、国際的な炭素価格の差異が極めて大きく推計されており、特定の産業においては価格弾性による影響が非連続的に働く可能性もあり、分析結果の解釈には十分な留意が必要である。

ファイナンス面など、国際的なビジネス環境が、厳しい排出削減目標への取り組みを強く促す状況にあり、気候変動への取り組み強化は不可欠である。一方、▲46%目標は、経済に大きな悪影響をもたらすリスクもあり、イノベーションを誘発しつつ、適切なトランジションを進めていくことの重要性が示唆される。

参考文献

- 1) K. Akimoto, et al.; Climate change mitigation measures for global net-zero emissions and the roles of CO₂ capture and utilization and direct air capture, Energy and Climate Change (2021)
- 2) 秋元圭吾, 佐野史典, 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会(2021年5月13日)資料 (2021)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf
- 3) 佐野史典、秋元圭吾、本間隆嗣、徳重功子、日本の2030年温室効果ガス排出削減目標の評価、エネルギー・資源学会論文誌、37(1)、pp. 51-60(2016)
- 4) RITE システム研究グループ、約束草案の排出削減努力の評価と世界排出量の見通し、
https://www.rite.or.jp/system/analysis/pdf/GlobalCO2Emission_INDCs_20151104.pdf
- 5) 佐野史典、秋元圭吾、長島美由紀、大西尚子、世界温暖化対策評価モデルによる2030年NDCsと2050年カーボンニュートラルの評価、第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2022)
- 6) UNEP、Emission Gap Report 2021
- 7) 本間隆嗣、秋元圭吾、世界エネルギー経済モデルを用いた、2030年の日本のエネルギーミックスと約束草案に関する経済影響分析、第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス15-3 (2021)
- 8) Global Trade Analysis Project (GTAP),
<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>
- 9) 資源エネルギー庁、発電コスト検証ワーキンググループ令和3年9月報告書、(2021)
- 10) 本間隆嗣他、現状の気候・エネルギー政策を考慮したパリ協定国別貢献における国際競争力に関する分析、エネルギー・資源、Vol.41, No.5, (2020)

バイオ研究グループ

グループメンバー(2021年12月末)

グループリーダー

主席研究員	乾 将行
副主席研究員	寺本 陽彦
副主席研究員	平賀 和三
副主席研究員	寺崎 肇
副主席研究員	宮本 正人
主任研究員	田中 裕也
主任研究員	須田 雅子
主任研究員	北出 幸広
主任研究員	豊田 晃一
主任研究員	加藤 直人
主任研究員	長谷川 智
主任研究員	渡邊 彰
主任研究員	小暮 高久
主任研究員	久保田 健
主任研究員	生出 伸一
主任研究員	大井 潔
研究員	清水 哲
研究員	肥後 明佳
研究員	Natalia Maria Theresia

研究員	柏木 紀賢
研究員	小林 淳平
研究員	橋本 龍馬
研究員	猿谷 直紀
研究員	野崎 裕貴
研究員	Dyah Candra Hapsari Subagyo
研究助手	渡邊 淳子
研究助手	池永 由布子
研究助手	水口 祥子
研究助手	永守 美雪
研究助手	内藤 香枝
研究助手	池田 永子
研究助手	米田 和代
研究助手	小泉 真夕
研究助手	西 淳子
研究助手	森 佳代子
研究助手	岩島 素巳
研究助手	吉田 佳世
研究助手	岡田 垂弥
研究助手	岸 紀美代

カーボンニュートラルに貢献するバイオリファイナリー技術の開発

1. はじめに

日本政府は、2020年10月、「2050年カーボンニュートラル」を宣言した。2030年までに温室効果ガスの排出を46%削減し、2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとする。これにより、2050年に脱炭素社会を実現することを目標とした。

本宣言を実現するための政策として、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が2020年12月に策定され、2021年6月に改訂された。本戦略において、産業として成長が期待され、なおかつ温室効果ガスの排出を削減する観点からも取り組みが不可欠と考えられる14の重要分野が設定された。この中でバイオテクノロジーが貢献できる分野として、「⑩カーボンリサイクル・マテリアル産業」が挙げられる。具体的には、ATJ(Alcohol to Jet)や微細藻類によるバイオ代替航空機燃料などのカーボンリサイクル燃料や、バイオマス資源やCO₂、及び廃プラスチックや廃ゴムを原料としてバイオテクノロジーで生産するカーボンリサイクル化学製品の生産分野である。

一方、近年、バイオテクノロジーは、合成生物学やゲノム編集技術等が急速に進展している。さらにバイオテクノロジーと、発展が著しいIoTやAI等の情報技術(デジタル)とが融合した“バイオ×デジタル技術”の技術革新が起こりつつある。このバイオ×デジタル技術やバイオ資源を活用した“バイオものづくり”は、カーボンニュートラル・カーボンネガティブの点において大きく貢献が期待できる。

当グループでは、これまで、地球環境と経済の両立をめざして、微生物を利用したバイオリファイナリー技術、即ち再生可能資源(バイオマス)を原料としてバイオ燃料やグリーン化学品を製造する技術の開発を進めてきた。これは、前述の「⑩カーボンリサイクル・マテリアル産業」に貢献できる技術である。この開発で我々は、代表的な工業微生物であるコリネ型細菌が、還元条件下では増殖は抑制されるものの代謝機能は維持され、糖類を代謝し有機酸等を効率よく生成する現象を見出した。そして、これを基に、増殖非依存型バイオプロセス「RITE

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

それらの技術を利用して、バイオ燃料としてはエタノール、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、シキミ酸、プロトカテク酸、4-アミノ安息香酸、4-ヒドロキシ安息香酸等の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・医薬等の原料となる芳香族化合物等の生産技術開発に注力して研究開発を行っている(第3章参照)。

また、一方で、これまでにバイオテクノロジーとデジタルを融合した最新の技術開発として、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「スマートセル」プロジェクト、SIP 戦略的イノベーション創造プログラム、NEDO「バイオものづくり」プロジェクトに参画し、従来の合成法では生産が難しかった高機能化学品の合成や生産プロセスの効率化に向けて研究開発を進めている。2020年からは、NEDO「ムーンショット」プロジェクトに参画し、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にも取り組んでいる(第4章参照)。

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

2. RITEのコア技術「RITE Bioprocess[®]」

当グループは、新しい技術コンセプトに基づく革新的バイオプロセス「RITE Bioprocess[®]」を RITE のコア技術として確立している。そして、バイオ燃料や、アミノ酸・芳香族化合物を始めとしたグリーン化学品を、高効率で製造する技術開発に大きな成果を上げ、国内外から高い評価を得ている(図1)。

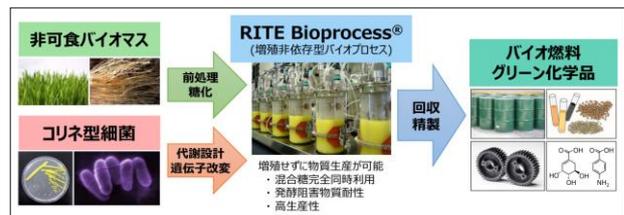


図1 「RITE Bioprocess[®]」を利用したバイオリファインリーの概念

2.1. 「RITE Bioprocess[®]」の特長

特長① 増殖非依存型バイオプロセス

「RITE Bioprocess[®]」では、まず、目的物質を効率的に生産できるように高度に代謝設計されたコリネ型細菌を大量に培養する。そして、細胞を反応槽に高密度に充填後、嫌気的な条件や、増殖に必要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反応を行う(図2)。

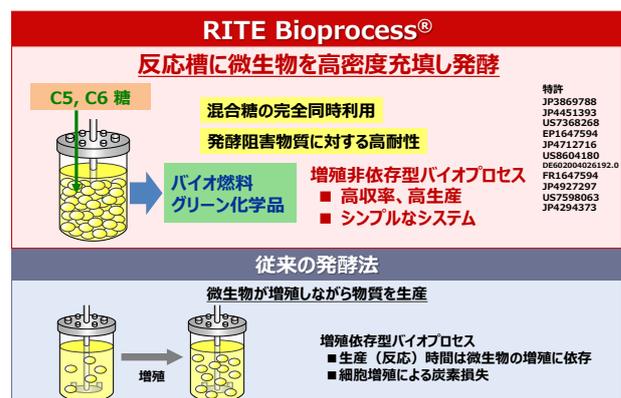


図2 「RITE Bioprocess[®]」の特長① (増殖非依存型バイオプロセス)

高効率化の鍵は、微生物の増殖を抑制した状態で化合物を生産させるという、増殖非依存型バイオプロセスにあり、増殖に必要な栄養やエネルギーが不要となる。すなわち、添加した糖原料が増殖等に使われず、目的物質の生産に使用される点がポイントとなる。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させることに成功した。

特長② C5&C6糖類の完全同時利用

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。そのため、セルロース系バイオマスを原料として効率的に生産するためには、C5糖と C6糖の同時利用が不可欠である。

C5 糖代謝遺伝子を導入したコリネ型細菌は、グルコース(C6糖)に比べ、キシロース(C5糖)、アラビノース(C5糖)の利用速度が遅いため(図 3 左グラフ参照)、原料を連続的に投入すると C5糖が蓄積され、やがて、化合物の生産効率が低下する。

これに対し、さらに C5糖輸送体遺伝子を導入することによって、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 右グラフ参照)。これにより、C5 & C6糖類の完全同時利用が可能となり、セルロース系原料を効率的に利用できるようになった。

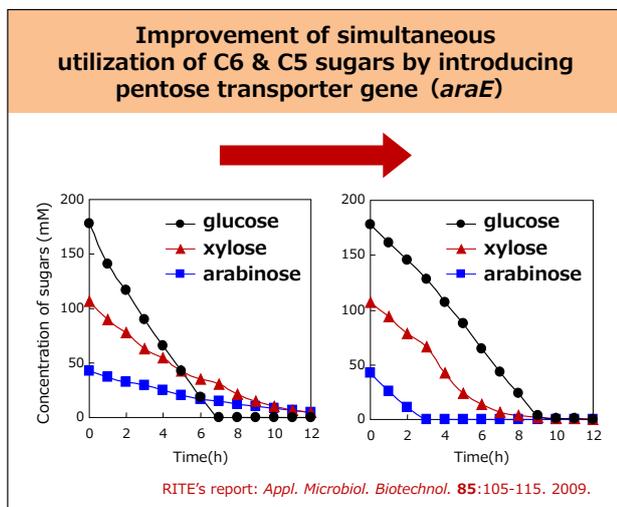


図 3 「RITE Bioprocess®」の特長② (C5&C6糖類の完全同時利用)

特長③ 発酵阻害物質に対する高耐性

リグノセルロース系バイオマスの前処理中に生成するフェノール類、フラン類などの発酵阻害物質は、目的物質の製造過程で強い阻害を示すことが知られている。

このため、目的物質を効率的に生産できるようにするには、微生物(細菌)の発酵阻害物質に対する耐性を高めることが不可欠である。

「RITE Bioprocess®」では、前述のように増殖しないため、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)。

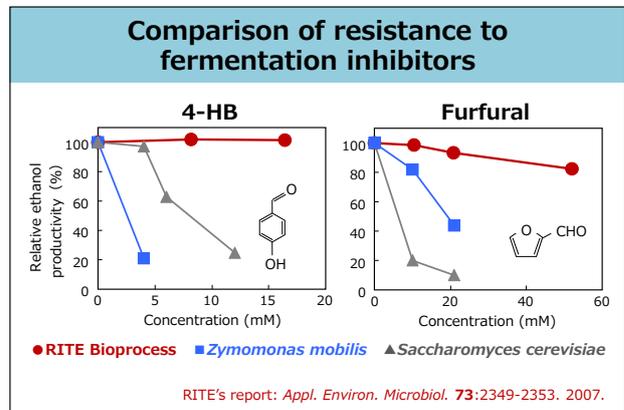


図 4 「RITE Bioprocess®」の特長③ (発酵阻害物質に対する高耐性)

2.2. 「RITE Bioprocess®」による主な生産物質

現在、当グループによって高生産を実現している物質の一部を図 5 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からブタノールや高性能バイオジェット燃料素材へ、グリーン化学品では、L-乳酸、D-乳酸、アミノ酸から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 <ul style="list-style-type: none"> ・エタノール* ■ バイオジェット燃料 <ul style="list-style-type: none"> ・イソブタノール* ・n-ブタノール* ・C9~C15飽和炭化水素 + 芳香族化合物 ■ バイオ水素 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 芳香族化合物 <ul style="list-style-type: none"> ・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) ・プロトocatech酸* (化粧品原料) ■ 有機酸 <ul style="list-style-type: none"> ・D-乳酸*, L-乳酸* (ステレオコンプレックス型 ポリ乳酸) ・コハク酸* ■ アミノ酸 <ul style="list-style-type: none"> ・アラニン (キレート剤) ・バリン (次世代飼料用アミノ酸、医薬品原料) ・トリプトファン (次世代飼料用アミノ酸、医薬品原料) ■ アルコール <ul style="list-style-type: none"> ・イソプロパノール (プロピレン原料) ・キシリトール (甘味料)
*: 由来原料 赤色文字: 世界的高水準生産達成	

図 5 「RITE Bioprocess®」による主な生産物質

3. ターゲット別開発

3.1. バイオ燃料

バイオブタノール

ブタノールは、ガソリン代替としてエタノールよりもエネルギー密度が高く、蒸気圧が低く、水と混和しにくいという優れた特性を有している。さらにブタノール(C4)を出発原料として化学変換によってジェット燃料(C9-C15)を製造することができる。即ち、植物由来のバイオブタノールから製造したバイオジェット燃料で航空機を飛ばすことができる。航空機からの CO₂ 排出削減には原油から植物由来の原料に置換することが必須と認識され、業界団体の動きが加速している。ブタノールを原料としたジェット燃料は、Alcohol to Jet を略して ATJ 燃料と呼ばれ、2016 年に米国材料試験協会 (ASTM) の規格をクリアし、商業フライトへ利用が可能となった。

こうした動きに先駆け、当グループでは、「RITE Bioprocess[®]」を利用した高効率バイオブタノール生産プロセスの開発を進めてきた。この中で我々は国際共同研究活動の一環として、経済産業省の「革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業」を実施した。この事業では、米国立再生可能エネルギー研究所(NREL)との共同研究により、非可食バイオマス由来の混合糖を原料としたバイオブタノール生産技術の開発、および、米パシフィック・ノースウエスト国立研究所(PNNL)との共同研究により、ブタノールをジェット燃料などの drop-in 燃料に変換する技術開発を進めた。加えて、当グループでは、生産株のブタノール耐性の向上、生産株の代謝経路の最適化、および省エネルギー型ブタノール回収技術の開発等を行った。これらにより、ブタノールのバイオ生産では、世界最高レベルの高生産性を達成している(図6)。

一方、事業化に向けた取り組みとして、当グループは、日本航空株式会社(JAL)が主催する「10 万着で飛ばそう! JAL バイオジェット燃料フライト」プロジェクト(2018 年~2020 年)にて我々の技術が採用された。本プロジェクトは、JAL と日本環境設計株式会社が協力して回収した古着を原料とし、バイオジェット燃料を製造

するものである。本プロジェクトには、RITE 発のベンチャー企業である Green Earth Institute 株式会社(GEI)が RITE と共に参画し、RITE が開発したコリネ型細菌を使用して、「RITE Bioprocess[®]」によりイソブタノールを生産した。2020 年には、このイソブタノールから製造されたバイオジェット燃料が、純国産として、初めて国際規格である ASTM D7566 Annex5 Neat に合格した。そして、国産バイオジェット燃料を搭載した初フライトが、2021 年 2 月 4 日の JAL の羽田一福岡線で実現した。(詳細は[こちら](#))

今後は、これらの要素技術を更にブラッシュアップするとともに、要素技術の統合・最適化、様々な非可食原料の利活用などを通じてバイオブタノールからのジェット燃料生産と実用化・事業化を目指す。

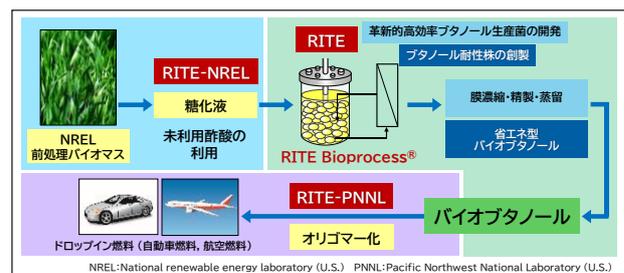


図6 「RITE Bioprocess[®]」によるバイオブタノールおよびジェット燃料生産

グリーンジェット燃料

航空分野においても環境負荷低減が急務となっており、CO₂ 排出量削減対策として航空機の電動化や水素の利用が試みられてはいるものの技術的課題が大きく、現行の航空機にそのまま利用可能で再生可能な液体バイオ燃料の普及が不可欠となっている。

ジェット燃料は炭素数 C9~C15 のノルマルパラフィン、イソパラフィン、シクロパラフィンと芳香族化合物を主成分とする混合物である。これまでに、油脂を水素化処理して製造する HEFA、発酵生産したエタノールやブタノールを化学重合して製造する ATJ など7種類のグリーンジェット燃料製造法が ASTM International によって認証され、2020 年には前述の様に、当グループのバイオブタノール生産技術を用いたバイオジェット燃料

も ATJ 燃料として認証を受けている。しかしこれら認証済みバイオジェット燃料は主にイソパラフィンから構成され、ジェット燃料に必須なシクロパラフィンや芳香族化合物成分が不足していることから、単独では燃料規格を満たさず、石油系ジェット燃料と混合して最大でも 50%までの割合でしか使用できない。

そこで我々は、シクロパラフィンや芳香族化合物も含み、石油系ジェット燃料と混合せずに単独使用も可能な高性能グリーンジェット燃料の開発も目指している。当グループでは関連する技術として、C2-C8 化合物を連結してジェット燃料サイズの C9-C15 分岐鎖・環状ジェット燃料前駆物質を生成できるバイオ触媒の開発や、前駆物質のジェット燃料成分への化学変換の実証などを行ってきた(図 7)。

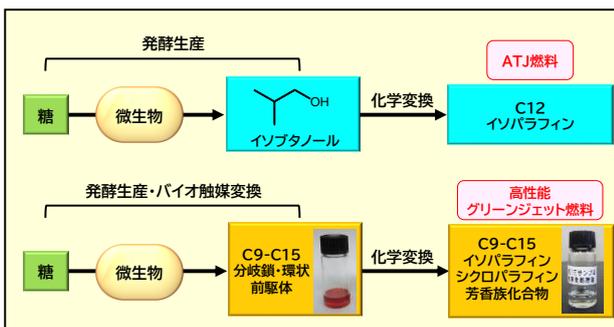


図 7 新規高性能グリーンジェット燃料の開発

バイオ水素

水素は燃焼時に水しか生成しないこと、再生可能エネルギーを含む多様なエネルギー源からの生産・貯蔵・運搬が可能で、電力、運輸、熱・産業プロセスのあらゆる分野に利用することで脱炭素化が可能で、などから、カーボンニュートラル実現の鍵となる。しかしながら、現行の主要な水素製造技術は化石エネルギーを原料とするため、これに由来する CO₂ の排出が大きな課題となる。日本では、2017 年に再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議において「水素基本戦略」が策定され、その中で、2050 年を見据えた中長期の水素社会の実現、水素利用の本格普及のためには、水素の製造、輸送・貯蔵、利用に至るまで、広範な革新的技術の着実な開発が必要とされている。また、2021 年には、米国エネルギー省が「Energy Earthshots Initiative」を立ち上げ、第 1 弾の「Hydrogen Shot」で野心的な CO₂ フリー水素のコスト目標(10 年以内に 80%削減)を打ち上げるなど、世界各国で水素国家戦略が一気に動き出している。

微生物を利用した水素生産(バイオ水素生産)は、将来の持続可能な CO₂ フリー水素製造技術となり得るが、経済性あるバイオ水素生産技術の確立には、生産性の飛躍的な向上が必要とされる。当グループは、シャープ株式会社との共同研究により、ギ酸を介した暗発酵水素生産経路を利用して圧倒的な水素生産速度(最大 300 L H₂/h/L)を達成している。この成果を基盤とし、光発酵との統合による水素収率の向上に向けた技術開発に取り組んでいる。

ギ酸を介した水素生産経路では、バイオマス由来糖類(グルコース)の分解により生成する還元力の一部しか利用できないため、原料あたりの水素収率が低いことが課題となる。そこで、還元力として NADH と還元型フェレドキシン(Fd²⁻)を利用できる高収率水素生産経路を導入し、これが駆動することを示している。また、光発酵水素生産に利用する光合成細菌のユニークな酢酸代謝制御機構を明らかにし、これを利用して酢酸から水素への変換効率を向上させることに成功している(図 8)。

ギ酸を介した水素生産経路では、バイオマス由来糖類(グルコース)の分解により生成する還元力の一部しか利用できないため、原料あたりの水素収率が低いことが課題となる。そこで、還元力として NADH と還元型フェレドキシン(Fd²⁻)を利用できる高収率水素生産経路を導入し、これが駆動することを示している。また、光発酵水素生産に利用する光合成細菌のユニークな酢酸代謝制御機構を明らかにし、これを利用して酢酸から水素への変換効率を向上させることに成功している(図 8)。

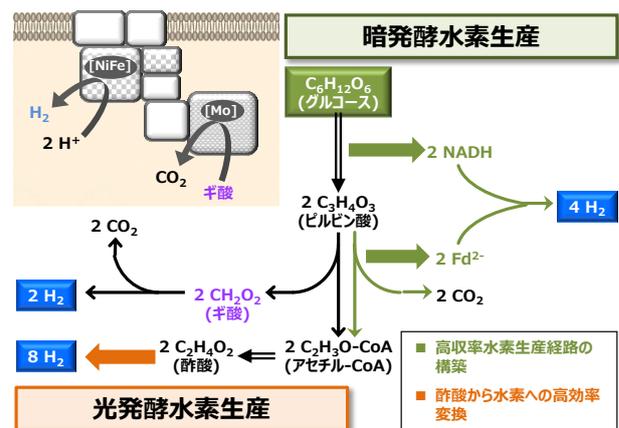


図 8 暗発酵および光発酵水素生産株の代謝工学

3.2. アミノ酸(アラニン、バリン)

一般的なアミノ酸発酵は、微生物の培養と発酵生産に

通気(酸素)を必要とし、この通気量が適切にコントロールされることが、高生産の達成に重要である。これに対して当グループでは、前述したように通気の必要がない「RITE Bioprocess[®]」を用いて、シンプルなプロセス制御による省エネルギー、高生産なアミノ酸生産プロセスの開発を進めてきた。非通気条件でアミノ酸を生産するには、酸素を使わずに細胞内の酸化還元バランスを適正に保つ仕組みが必要であり、この目的のためには目的アミノ酸に応じた人工的な生合成経路を細胞に導入する必要がある。当グループでは、こうした課題を解決した非通気条件でのアミノ酸生産プロセスのコンセプトを2010年に学術雑誌に発表した(Appl. Microbiol. Biotechnol. 87: 159-165. 2010.)。

RITEは、RITE発ベンチャー企業 Green Earth Institute 株式会社(GEI)を2011年9月に設立し、「RITE Bioprocess[®]」によるアミノ酸等のバイオ化学品やバイオ燃料の事業化を目指した共同研究を実施している(5章参照)。本共同研究において、アミノ酸の一種であるL-バリン生産に関しては、生産菌株の開発、スケールアップ検討やコスト低減のための各種検討を進め、2019年には、GEIの海外パートナー企業が保有する商業スケールの発酵槽を用いた試験生産に成功。さらに生産の大規模化も成功し、商用生産を実現している。また、L-アラニン生産に関しても、実用生産の段階に進んでおり、厚生労働省食品安全委員会による評価の結果、食品添加物としての安全性が確認され、工業用用途のみならず食品添加物としても利用可能になっている。更に、他のアミノ酸についても同様の実用化を目指し、研究開発を進めている。

3.3. グリーン芳香族化合物

芳香族化合物は、ポリマー等の原料として重要な基幹工業化学品であると同時に、医薬品、機能性栄養素材、香料、化粧品等の原料となる高付加価値な化合物が数多く存在する。芳香族化合物は現在、石油や天然の植物等を原料として製造されているが、脱石油依存、環境保全、および生産性の観点から、高効率なバイオ生産法の確立が望まれている。微生物細胞内ではフェニルアラニ

ン、チロシン、トリプトファンといったアミノ酸や葉酸(ビタミン B₉)、補酵素 Q など種々の芳香族化合物が生合成されている。これらの化合物は全てシキミ酸経路と呼ばれる代謝経路から派生する(図9)。我々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。

また、多種生物由来の遺伝子を導入することによりコリネ型細菌が本来合成できない有用芳香族化合物についても高生産菌株の育種を進めており、後述するスマートセルプロジェクトにおいて開発された技術を適用することで更なる生産性向上を図る。

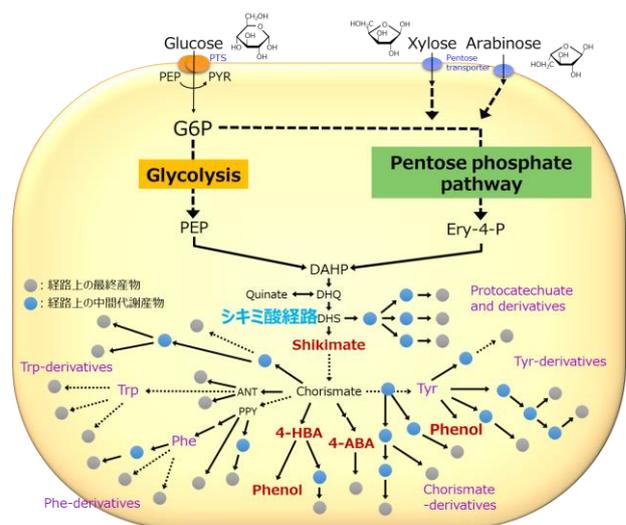


図9 様々な芳香族化合物の生合成経路

4. 基盤技術開発

4.1. NEDO バイオものづくりプロジェクト

2030年に世界最先端のバイオエコノミー社会を実現することを目指した国家戦略のもと、バイオものづくり産業の基盤となる物質生産技術の開発が急務となっている。生物機能を活用することで、原料を化石資源に依存しないバイオマスからの物質生産が可能であり、炭

素循環型社会実現への変革が期待できる。

これらの社会的状況を受け、「カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発」(NEDO バイオものづくりプロジェクト)が 2020 年から開始された。これまで培った発酵生産技術に立脚もしくは従来法にとらわれない次世代生産技術の開発及び検証を行う。

当グループは、このプロジェクトの前身である「植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発」(NEDO スマートセルプロジェクト)において、「高度に機能がデザインされ、機能の発現が制御された生物細胞」いわゆるスマートセルを設計、育種する技術を複数の大学、研究所、企業と連携して実施した。さらにその技術を使い目的物質を高濃度に生産可能な生産株を短期間で育種することで、技術の有効性検証を行った。

バイオものづくりプロジェクトではスマートセルプロジェクトにおいて開発された育種技術をさらに発展させるとともに、スケールアップや精製などを含んだ生産プロセス技術の開発を行う。さらに生産パラメータ情報等を利用し生産を制御可能な情報解析技術も併せて開発することで高度なバイオ生産システム基盤の構築およびその周辺技術の開発を目指す。これによりバイオ由来製品の社会実装の加速化を目指す。

当グループはこのプロジェクトに初年度から参画し、微生物による物質生産技術の実用化に伴う課題を解決するための“産業用スマートセル創出技術”の開発と、その技術の実証研究を進めている。生産目的物質は芳香族化合物の 1 つであるカテコールとした。スマートセルプロジェクトにおいて開発した生産株と、蓄積したオミクスデータ(メタボローム、トランスクリプトーム、プロテオーム)を利用することで産業用スマートセル創出技術の開発を目指す。さらにカテコールの生産技術開発を通してプロジェクトで開発された各技術の実証検討を行う(図 10)。

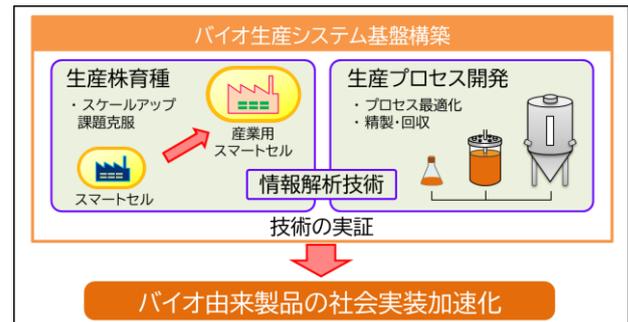


図 10 バイオ生産システム基盤構築

4.2. SIP(高機能ポリマー用バイオモノマーの開発)

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

当グループが参画する本課題のコンソーシアムの一つ「高機能バイオマテリアル設計・生産技術開発」では、市場が所望する新機能を有するポリマーを、バイオマスなどの安価な原料から生合成されたモノマーを用いて合成することを目標としている。これまでに非常に高い耐熱性を有するポリマーや電池材料となるポリマーの開発を達成している(図 11)。これらのポリマーを構成するモノマーの生合成経路を構築するために、当グループはこれらのポリマーを構成するモノマー原料の生合成に関わる酵素を対象に酵素機能改変技術の開発並びにその検証を進めている。より具体的には、多数の変異体の酵素活性データを機械学習に供することで、有望な変異の組合せの効率的な抽出技術や、酵素のアミノ酸配列情報を基に目的機能を有する新規酵素の探索技術について検証している。これらの技術により、基質特異性の改変や活性の向上を達成している。2021 年度からは、新たに連携を強化しモノマー生産株の改良、培養条件の検討に取り組んでいる。培養条件の検討により、これまでの生産性を約 2 倍に高めることに成功した。今後、連携コン

ソーシアムより提供されるバイオマス由来の原料からの生産性について検証を進める。

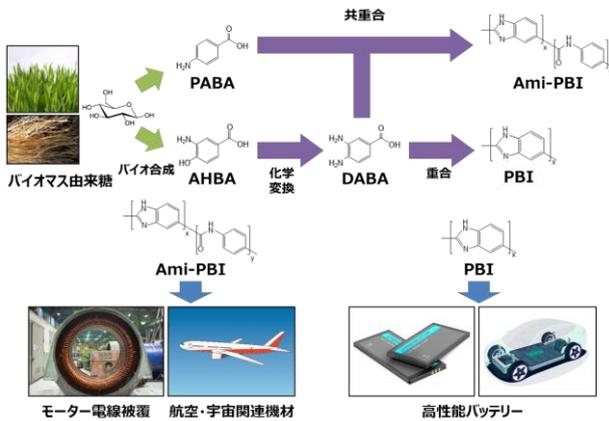


図 11 開発モノマー及びポリマー合成とその用途

4.3. NEDO ムーンショット型研究開発プロジェクト

プラスチックは軽量、安価で耐久性にも優れ、我々の生活に不可欠な高分子材料である。しかし、化学的に安定であるため自然環境で分解されにくい問題がある。

一般的にプラスチックなどの高分子の生分解性と耐久性・強靭性は典型的なトレードオフの関係にある。すなわち生分解性ポリマーは自然環境下で劣化が進みやすいため耐久性に劣り、機械特性も十分ではないため限定された用途に限られる。逆に汎用プラスチックは、耐久性・強靭性に優れるが生分解性に劣る。

もしも耐久性・強靭性と生分解性を両立させることができれば、環境低負荷型のプラスチックとして幅広い用途に使用でき、資源循環も可能となる。特に海洋環境に散逸したプラスチックは回収が困難であり、生態系に悪影響を及ぼす。生分解のタイミングとスピードをコントロールできるプラスチック(マルチロック型バイオポリマー)の開発は資源循環の観点から極めて重要である。

NEDO ムーンショット型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、プラスチックのトレードオフ関係を打破するため、プラスチックの分解に「マルチロック機構」を導入する。すなわち分解の際に、光、熱、酸素、水、酵素、微生物、触媒などの複数の刺激を同時に必要とすることで、使用時には分解を抑えて耐

久性・強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、非可食バイオマスを原料として得られるプラスチック、タイヤ、繊維、漁網や釣具である。産学官の連携によってマルチロック型生分解性プラスチックの材料設計指針を確立する。この中で、当グループは、非可食性バイオマス原料からこれら製品の原料となる各種モノマーのバイオ生産と、マルチロック機構に活用できるプラスチック分解酵素の高機能化について研究開発を推進中である(図 12)。(本プロジェクトのホームページは[こちら](#))

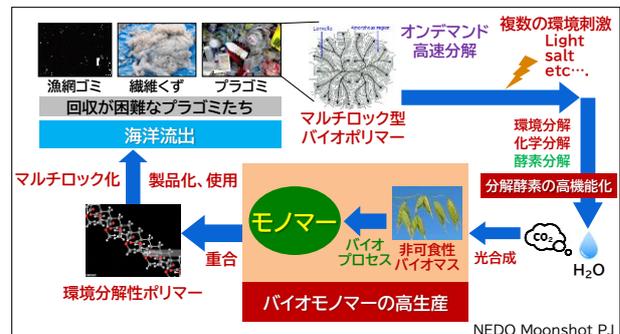


図 12 マルチロック型生分解性プラスチックの開発による資源循環の実現イメージ

5. 実用化への取り組み

5.1. グリーンケミカルズ株式会社(GCC)

(本社・京都研究所:RITE 本体内、
静岡拠点:住友バークライト株式会社静岡工場内)
(GCC については[こちら](#))

現在の工業生産されているフェノールはすべて石油由来の原料から製造されている。我々は地球環境保全や温室効果ガス削減の観点からグリーン化が困難とされてきたバイオ法によるフェノール製造技術開発を進めてきた。我々の開発した2段工程法を利用した実用生産を早期に実現するため、住友バークライト株式会社と共同で2010年2月に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、2014年5月にはグリーンフェノール開発株式会社(GPD)へ

改組した。これは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GPDはグリーンケミカルズ株式会社(GCC)へ社名を変更した。

現在、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、従来は不可能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(第3章3節参照)。

図13に現在のGCCの主な開発品3品目を示した。2021年は、ターゲット化合物の一つである4-ヒドロキシ安息香酸(4-HBA)の品質評価が複数の企業により進行中である。



図13 GCCの主な開発品3品目

5.2. Green Earth Institute 株式会社(GEI)

(本社:東京都文京区、研究所:千葉県木更津市かずさ)
(GEI ホームページは[こちら](#))

Green Earth Institute 株式会社(GEI)は、RITEが独自開発した前述の革新的バイオプロセス「RITE Bioprocess®」の研究成果を早期に事業化するため2011年9月1日に設立されたRITE発ベンチャー企業である。同社は、微生物を用いたアミノ酸等のグリーン化学品生産技術やブタノール等のバイオ燃料生産技術の実用化のため、RITEとの共同研究を含めた技術開発や事業化を目指した活動を実施しており、2021

年12月には、東証マザーズに上場を果たしている。

アミノ酸では、前述のように、L-アラニンやL-バリンに関して当グループが開発した生産株による商用スケールでの生産に成功している(3章2節参照)。また、L-アラニンに関しては、厚生労働省により食品添加物としての安全性が確認され、工業用途のみならず食品添加物としても利用可能になっている。

航空機からのCO₂排出削減に向けて大きな期待が寄せられている、非可食バイオマスを原料にしたバイオジェット燃料に関して、当グループと継続的に共同研究を実施する等、事業化に向けた取り組みを行っている。その成果として、2021年2月4日のJL319便(羽田空港発、福岡空港行き)にて「日本で初めての純国産バイオジェット燃料フライト」に成功した(第3章1節参照)。

その他のグリーン化学品についても当グループと協力して開発を進め、事業化に向けたマーケティングや量産化に向けたスケールアップを行っている。

今後も、GEIは、化石資源に頼らない社会の実現に向けて、バイオリファイナリー事業の発展に貢献していく。

5.3. 企業との共同研究

本概説で紹介しているバイオ燃料やグリーン化学品以外にも多くの物質に関して、企業からの要望に応じて共同研究を実施している。それらの内容については、ここでは紹介できないが、以下のようなケースがある。

- ① その企業のメイン商品である物質を、「2050年カーボンニュートラル」に向け、化石資源由来からバイオ由来に変更するための対応を早い段階で行う。この場合、中長期の研究開発として実施中。
- ② これまで他社から購入していた主要原料を、「2050年カーボンニュートラル」に向け、化石資源由来からバイオ由来に変更するための対応を早い段階で行う。この場合も、中長期の研究開発として実施中。
- ③ その企業の1商品である物質、あるいは、その原料を、化石資源由来からバイオ由来に変更する。この場合は、早い段階で事業化可能な物質で、かつ、単価が高いものを短期間の研究開発として実施中。

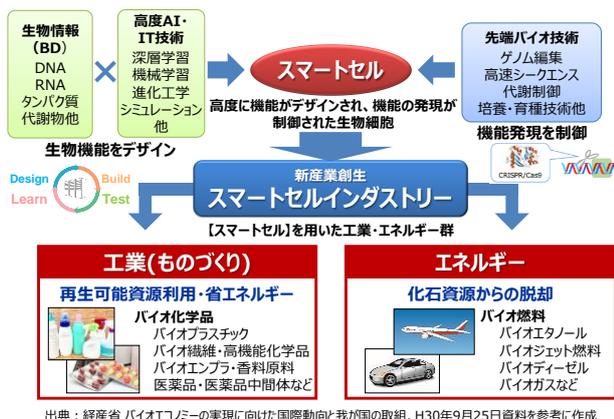
6. おわりに

近年、前述の「バイオ×デジタル技術」の技術革新により、大量の生命情報から法則を発見するという「データ駆動型」のアプローチによる生命現象の理解が進展している。それを背景に、生物機能について設計(Design)、構築(Build)、評価(Test)、学習(Learn)のサイクル(DBTL サイクル)を繰り返すことによってデータを蓄積し、生物機能を理解していく合成生物学が急速に発展している。

4 章で紹介したすべての国家プロジェクトでもこれらの技術革新や新たな知見・手法を利用して、開発の飛躍的な効率化を実現している。そして、これらのプロジェクトでは、前述したスマートセルを利用したバイオリファイナリー技術が中核技術として大きな役割を果たしており、エネルギーに加えて工業分野(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 バイオ研究グループでは、5 章 3 節にて紹介した以外のケースも含め、共同研究先企業を募集中である。これまで、一般的には微生物生産が難しいとされる化合物についても、例えば、前記、芳香族化合物と同様に、最新の要素技術開発の成果等を利用して高生産できる可能性がある。バイオ化したい化合物があれば、是非、ご連絡いただきたい。

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



出典：経産省 バイオエコノミーの実現に向けた国際動向と我が国の取組，H30年9月25日資料を参考に作成

図 14 バイオ×デジタルが変える

工業／エネルギー分野の融合

当グループでは、2022 年も引き続き、前述の「RITE Bioprocess[®]」や「産業用スマートセル設計システム」等を利用した芳香族化合物等のグリーン化学品生産やバイオ燃料生産等の研究開発、さらにはそれらの実用生産技術開発にも注力し、「グリーンバイオプロセスによるカーボンニュートラルの実現」に貢献していきたい。

尚、2020 年 10 月の「2050 年カーボンニュートラル」宣言以来、企業からの問い合わせや引き合いが増加しており、企業との共同研究の件数も増えてきている。

化学研究グループ

グループメンバー(2021年12月末)

グループリーダー・主席研究員	中尾 真一	研究助手	荒木 華子
サブリーダー・主席研究員	長谷川 俊之	研究助手	大西 紀子
主席研究員(技術統括)	余語 克則	研究助手	尾方 秀謙
副主席研究員	馬場 宏治	研究助手	小倉 公美子
主任研究員	甲斐 照彦	研究助手	鹿嶋 麻衣
主任研究員	後藤 和也	研究助手	片岡 梢
主任研究員	Firoz Alam Chowdhury	研究助手	菰野 恵子
主任研究員	村岡 利紀	研究助手	白井 隆一
主任研究員	安原 健一郎	研究助手	杉本 理絵
主任研究員	龍治 真	研究助手	手嶋 孝
研究員	伊藤 史典	研究助手	鳴瀧 陽三
研究員	木下 朋大	研究助手	藤原 洋一
研究員	清川 貴康	研究助手	森 恵子
研究員	Quyen Thi Vu	研究助手	森 美佐都
研究員	段 淑紅	研究助手	山田 美久
研究員	淵上 暢彦	研究助手	吉野 直美
研究員	孟 烈	研究助手	米澤 順子

CO₂分離・回収技術の高度化・実用化への取り組み1. CO₂分離・回収技術の研究開発

2015年12月のCOP21で「パリ協定」が採択され、異常気象など気候変動による悪影響を最小限に抑えるために、産業革命前からの世界の平均気温の上昇を「2℃より充分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求する」ことが目標とされた。その後、さらなる気温上昇や世界規模で発生している甚大な自然災害など危機感の高まりを受けて、先の2021年11月のCOP26におけるグラスゴー気候合意では、気温上昇幅を「1.5℃に制限する努力の追求を決意」とされ、世界で初めて1.5℃が数値目標となった。IPCCによると、1.5℃目標のためには、2010年比で2030年までにCO₂を45%削減し、2050年までにネットゼロを達成する必要がある。

我が国においても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推し進められている。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CCUS(Carbon dioxide Capture,

Utilization and Storage)/カーボンリサイクルがある。CCUS/カーボンリサイクルでは、「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)」と「分離・回収したCO₂の地中貯留(CCS)」の組合せにより、大きなCO₂削減効果が見込まれている。さらに、CO₂分離・回収技術はCCUSの基盤となることが示され、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等が、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、ネガティブエミッション技術が必要であり、特に最近注目されている大気中からのCO₂の直接回収すなわちDirect Air Capture(DAC)は重要であり、2021年7月に改訂された「カーボンリサイクル技術ロードマップ(経産省)」では、進展のあった新たな技術分野としてDACが追記された。

このような背景を受けて、様々なCO₂排出源に対し、最適な分離・回収技術を提案することにより、CCUSの実用化を推進していかなければならない。なかでも地球

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。

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、新化学吸収液の開発目標とした分離・回収エネルギー 2.0GJ/t-CO₂ を達成するとともに、吸収液からの CO₂ 回収温度を 100℃以下で可能とする画期的な吸収液を見出すことに成功した。また、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は、商用化されている。

固体吸収法においては、CO₂ 高効率回収・低エネルギー消費型の固体吸収材の研究開発に取り組み、これまでに、低温で CO₂ 脱離性能の良い固体吸収材・システムを見出している。現在、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によるスケールアップ試験の準備を進めている。

膜分離法は、圧力を有するガス源から CO₂ を低コスト、省エネルギーで分離するプロセスとして期待されている。RITE では石炭ガス化複合発電(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)等の高压ガスから低コスト、省エネルギーで CO₂ を回収することを目指した膜および膜エレメントの開発を行っている。実用化を目指し、量産化を念頭に連続製膜技術、および膜エレメント製造技術等の開発を進めるとともに、実ガスを用いた膜エレメントの検証試験を実施し、商用化を目指して取り組んでいる。

また、新たに NEDO のムーンショット型研究開発事業の中で大気中から CO₂ を回収 DAC(Direct Air Capture)し、燃料や原料として利用する技術の検討を開始した。低濃度 CO₂ の分離・回収に適したアミン化合物の開発を進めながら、金沢大学および民間企業と協

力して、大気中から高効率で CO₂ を分離回収できる DAC システムの開発に取り組んでいる。

以上のように、幅広い次世代の礎となる革新的な技術開発に取り組み、CO₂ 削減に向けた研究開発をリードするとともに、社会実装される技術確立を目指している。また、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)に加盟し、CO₂ 分離・回収技術の早期実用化に向けて海外ネットワークを利用する活動も推進している。

2. 化学吸収法

吸収法は、混合ガス中の CO₂ を溶液中に選択的に溶解させることで CO₂ を分離する。特に、溶液中のアミンと CO₂ との化学反応を利用した化学吸収法は、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、CCS 分野では最も成熟した CO₂ 分離・回収技術の一つである。

化学吸収法では、溶液再生工程でのエネルギー消費やアミンの劣化などがコスト増大の要因となる。RITE は、アミンの分子構造がこれらの要因と密接に関わることに着目し、新規アミンの開発にいち早く着手した。2004 年に開始した「低品位廃熱を利用する二酸化炭素分離・回収技術開発(COCS)」(経済産業省(METI)補助事業)以降、主に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アミン系化学吸収液の開発を実施した。

製鉄プロセスにおける CO₂ 削減 30%を目標とした COURSE50 プロジェクトでは、RITE は、日本製鉄株式会社と共同で化学吸収法の高度化に取り組んでいる。ここで開発した化学吸収液およびプロセスは、2014 年に商用化した日鉄エンジニアリング株式会社の省エネ型 CO₂ 回収設備 ESCAP[®]に採用された。これまでに2基の商業設備が稼働し、1号機は室蘭製鉄所構内において飲料等を含む一般産業用途向けに、2号機は新居浜西火力発電所において近接する化学工場の化学副原料用に CO₂ を製造している。前者は製鉄所の熱風炉燃焼排ガスを CO₂ 回収源とする化学吸収法による商業設備とし

て世界初のものであり、後者は石炭火力発電の燃焼排ガスを CO₂ 回収源とする化学吸収法による CO₂ 分離回収設備として日本初の商業設備である。

また、最新の研究では、水以外の溶媒を用いた吸収液において、吸収形態および分極影響を制御することで更なるエネルギー消費低減の可能性を見出しており、新規溶媒および組成検討に継続して取り組んでいる。



図1 省エネ型 CO₂ 回収設備 ESCAP[®]
(住友共同電力株式会社新居浜西火力発電所内)

3. 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。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。

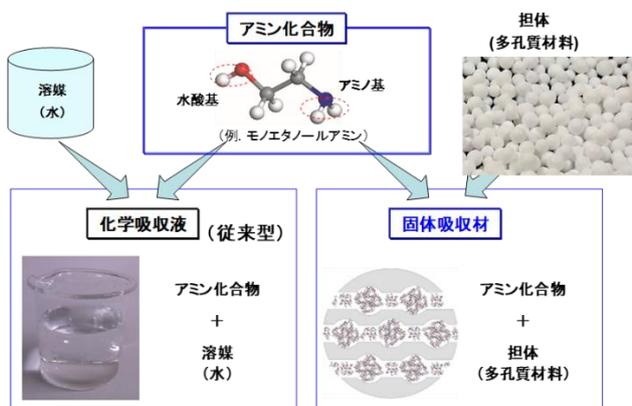


図2 化学吸収液と固体吸収材

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以下の目標を得た。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 は川崎重工業株式会社とともに NEDO 委託事業「先進的二氧化碳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、パイロットスケール試験設備(40t-CO₂/day 規模)を舞鶴発電所内に建設し、2022 年度後半から石炭火力発電所の燃焼排ガスからの CO₂ 分離・回収試験を開始する予定である。



図3 固体吸収法の開発ロードマップ

現在、RITE では、パイロットスケール試験に向けて、固体吸収材のスケールアップ合成やベンチスケール試験の成果を基に最適化した固体吸収材の 100m³ スケール

ルでの製造を進めている。また、材料劣化機構の解明と劣化防止技術の開発、プロセスシミュレーション技術による効率的な運転条件の検討なども進めている。

4. 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、高圧ガスである燃焼前回収(Pre-combustion)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 4)。

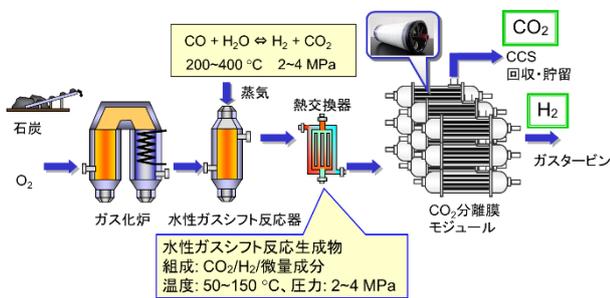


図 4 分離膜を用いた石炭ガス化複合発電(IGCC)からの CO₂ 分離・回収

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 5 に示す。

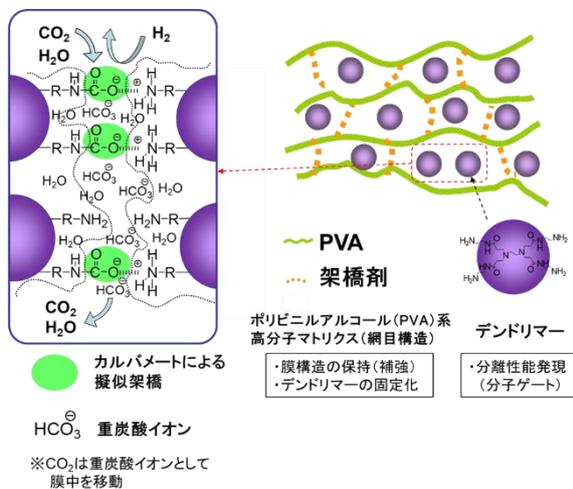


図 5 分子ゲート膜の概念図

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。

これまでに、優れた CO₂ 透過速度と CO₂/H₂ 選択性を有する複合膜の開発に成功している。この成果の実用化を推進するために、現在、RITE および民間企業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、膜エレメントの開発(図 6) および膜分離システム開発に取り組んでいる。

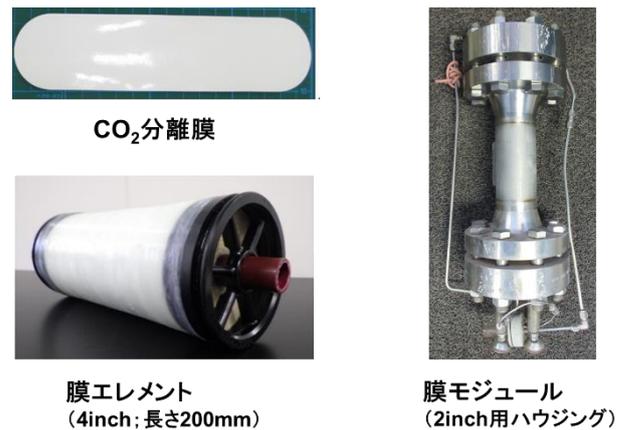


図 6 CO₂ 分離膜、膜エレメント(大面積の膜、支持体および流路材等の部材を一体化したもの)および膜モジュール(膜エレメントと収納容器(ハウジング)を組み合わせたもの)

過去の METI 委託事業「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」(2011~2014 年度)および「二酸化炭素回収技術実用化研究事業(二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業)」(2015~2018 年度)で得た成果(膜素材、膜エレメントや膜分離システム)を基に、その後、NEDO 委託事業「CCUS 研究開発・実証関連事業/CO₂ 分離・回収技術の研究開発/二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発」(2018~2021 年度)において、実機膜モジュールシステム開発を目指し、連続

製膜技術の確立とこれを用いた膜エレメントの開発に取り組んできた。

前事業では、連続製膜を用いた膜エレメントとして外径 2 インチおよび 4 インチの膜エレメントを作製し、2.4MPa の高圧下においても安定な分離性能を確認し、膜エレメントの基本製法の確立に目途を得た。また、4 インチ膜エレメントを用いて、石炭ガス化炉からの実ガスを用いた分離性能の検証試験を実施し、膜エレメントの実ガスに対する分離性能を確認できた。

今後の取り組みとして、新たに採択された NEDO 委託事業「CCUS研究開発・実証関連事業／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、前事業の成果に基づいて膜エレメントの CO₂ 分離性能・耐久性向上に関する検討、商用サイズに向けた膜モジュールのスケールアップ検討、CO₂ の利用プロセスに適する膜分離システム設計を行い、社会実装に繋がる実用化研究開発に取り組む。

5. 大気からの CO₂ 回収技術

RITE は 2020 年度よりスタートした NEDO の「ムーンショット型研究開発事業」で掲げられた目標 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」で金沢大学および民間企業と協力して、大気からの高効率 CO₂ 分離回収・炭素循環技術の開発に取り組んでいる。

「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この「ムーンショット型研究開発制度」が位置づけられている。

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

ている。

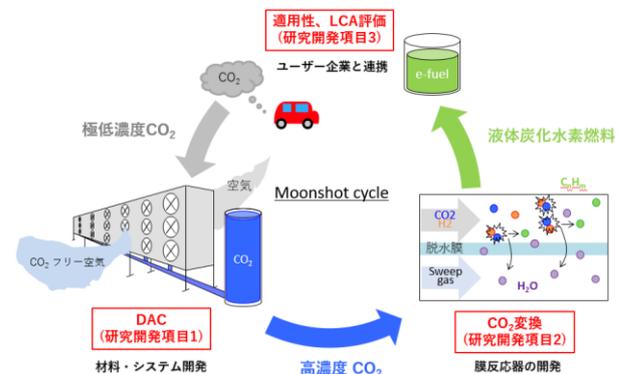


図 7 大気からの高効率 CO₂ 回収・炭素循環技術の開発

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についても検討を進めている。DAC 用に開発したアミンおよび担体を用いて、実際に RITE 周辺の外気を流通させて性能評価を行っている。大気は季節や天候、時間によって温度湿度が刻々と変化するため、大量の空気の温度湿度をコントロールできるように工夫を施した装置を新たに設計・製作し、様々な環境を想定した試験を実施している。



図 8 DAC ラボ試験装置

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

ーション技術を活用している。液体炭化水素燃料の変換に適した量や純度の CO₂ を最も低いエネルギーで回収するプロセスについて計算と実験の両側面から検討を実施している。

6. 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)の要素技術である。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り、生態系に影響を与えない CO₂ 固定化技術として注目されている。特に近年は、アルカリ土類金属を含む副産物や廃棄物を用いることで、早期社会実装が期待されている。

RITE は、CO₂ を炭酸塩として固定化する技術において、長年にわたり培ってきた独自プロセスを保有している。2020 年より、民間企業と研究会を設置し、鉄鋼スラグや廃コンクリート等を対象として、これらから湿式で抽出したアルカリ土類金属を活用し、工場等より排出された CO₂ との反応により、安定した化合物である炭酸塩として回収する技術の開発、および生成した炭酸塩の有効利用技術の開発等(図9)に協力して取り組んでいる。

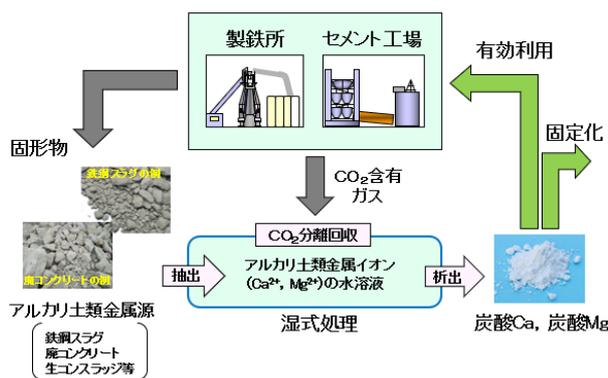


図9 CO₂ 炭酸塩固定化および有効利用技術

7. おわりに

化学研究グループでは、前述のとおり、主に化学吸収法・固体吸収法・膜分離法を対象に CO₂ 分離・回収技術開発を精力的に推し進めてきた。化学吸収法では実証ス

テージから高炉排ガスや石炭火力燃焼排ガスの商用機へ展開され、既に CO₂ 分離・回収技術として実用化されている。固体吸収法では、石炭火力燃焼排ガスに対して 2023-2024 年度に計画されている 40t-CO₂/day 規模のパイロット試験に向けた検討に着手している。膜分離法では、IGCC 燃焼前排ガスからの膜エレメントを用いた実ガス試験において CO₂ と H₂ の分離能を確認するなどの成果を得た。他にも新たに NEDO の「ムーンショット型研究開発事業」において採択された DAC 技術開発や、鉄鋼スラグや廃コンクリート等からの CO₂ の炭酸塩固定化技術開発に取り組んでいるところである。

化学研究グループでは、これら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を目指し取り組んでいく。同時に、革新的技術開発に取り組み、より省エネルギーで低コストが可能な CO₂ 分離・回収技術を提案していきたいと考える。

特に今後の脱炭素化に向けた持続可能開発シナリオでは、天然ガスやバイオマス燃焼のからの CO₂ 回収の寄与が増大すると言われており、DACCS などのネガティブエミッション技術も必要とされている。したがって今後は、これらのより低濃度の 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。CO₂ 濃度が低くなると、その分処理すべきガス量が増大し、また高酸素濃度も高いため、今後はより低コストで劣化耐性の高い材料開発とそれに対応したシステム開発が重要であろう。

CO₂ 貯留研究グループ

グループメンバー(2021年12月末)

グループリーダー・主席研究員	薛 自求	主任	村上 聡子
サブリーダー・主席研究員	内田 堅二	主任	中西 公美子
主席研究員	横井 悟	研究員	三善 孝之
主席研究員(兼)	野村 眞	研究員	小谷 雅文
副主席研究員	高須 伸夫	研究員	永田 丈也
副主席研究員	中島 崇裕	研究員	Amer, Rasha
副主席研究員	名井 健	研究員	吉川 浩人
副主席研究員	田中 良三	研究員	曹 金榮
副主席研究員	橋本 励	研究員	石毛 宏和
主任研究員	三戸 彩絵子	研究員	沖本 竜太
主任研究員	利岡 徹馬	研究員	佐藤 珠希
主任研究員	高野 修	研究助手	平井 順子
主任研究員	内本 圭亮	研究助手	辻 志織
主任研究員	小牧 博信	研究助手	水見 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	佐々井 登喜男
主任研究員	末国 次朗	研究助手	日高 奈江
主任研究員	時田 和仁		

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

二酸化炭素回収・貯留技術は、北海ノルウェー領の天然ガス随伴 CO₂ 貯留事業(Sleipner や Snøhvit プロジェクト)を機に、地球温暖化対策の有効な手段として期待されている。近年ではカナダや米国(北米地域)に加えて、豪州でも大規模 CO₂ 地中貯留事業が実施・計画されている。

我が国でも、新潟県長岡における実証試験(計 1 万トンの CO₂ 圧入)に引き続き、北海道苫小牧沖で計 30 万トンの CO₂ 圧入実証試験が終了したところである。

CO₂ 地中貯留の実用化にあたっては、大規模な貯留層に年間 100 万トン程度の CO₂ を安全に圧入・貯留する必要がある。これを実現するため、CO₂ 貯留研究グループは、二酸化炭素地中貯留技術研究組合の一員として NEDO 事業「安全な CCS 実施のための CO₂ 貯留技術の開発研究」に取り組んでいる。本事業では、安全管理技術の開発、大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発、CCS 普及条件の整備・基準の整備を行っており、これまでに、圧入安全管理システムや光ファイバー測定(ひ

ずみ、音響、温度)技術、貯留率向上のためのマイクロバブル CO₂ 圧入技術などを開発した。

2021 年度からはこれまでの研究成果を踏まえ、実用化に向けての技術実証・経済性向上・リスク低減・法整備支援、等に取り組んでいる。技術実証については、海外の大規模 CO₂ 圧入サイト等で昨年度までに開発した光ファイバー計測技術を検証している。経済性向上・リスク低減に関しては、Storage Resource Management(SRM)として包括的に検討し、貯留性および経済性向上の手法を開発する。また、CO₂ 地中貯留技術事例集を作成、事業者用として公開し、海外展開にも活用する。さらに、従来のパブリックアウトリーチ(Public Outreach(PO))や社会受容性(Public Acceptance(PA))を発展させ、社会合意形成(Social License to Operate(SLO))の手法を開発する。SLO は、国内大規模 CCS の展開支援に適用する計画である。このように、当研究グループは実用化に向けた技術実証に加えて、情報発信や技術支援にも取り組むことで、CCS の普及促進に貢献する。

2. 主な研究課題と成果

2.1. 光ファイバー測定技術開発と技術実証

CO₂ が安全に地中に貯留できていることを確認するため、圧入されたCO₂の広がりや監視に加えて、地層圧の上昇にともなう地層変形や圧力伝播範囲の監視が必要となる。

これらの監視を効果的に実施する技術の一つとして、分布型光ファイバーセンシング技術がある。分布型光ファイバーセンシング技術は、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を取得できる。したがって、坑井に沿って光ファイバーを設置することで深度方向に連続的なモニタリングが可能となる。また複数のファイバーを一度に設置することで、ひずみ・音響・温度をすべて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。

当研究グループでは、光ファイバー測定技術開発と国内外サイトでの技術実証を行っている。以下にこれらについて紹介する。

以前の光ファイバー測定試験等で使用していたケーブルは、柔らかい樹脂で複数の光ファイバーを被覆したタイプ(電話線仕様)や、細いワイヤのより線の外装を施したタイプ(アーマード仕様)であった。現場での取り扱いをより向上させ、感度の良いものを目指し、複数の光ファイバーをステンレス(SUS)製の金属管に封入したケーブル(金属管仕様)を設計した。

この新たな金属管仕様のケーブルの性能を確認するため、国内のサイトにて試験を実施した。坑井に上記3種類の光ファイバーケーブルを設置し、近傍の別の坑井に水を注入した(注水試験)。図1に試験結果を示す。金属管仕様のケーブルが、注水によるわずかな地層のひずみを感度良くとらえていることが確認できた。

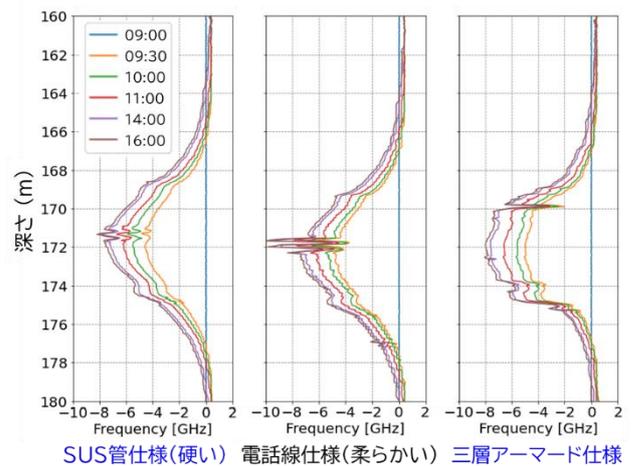


図1 注水試験時の地層ひずみ測定結果

海外での実証試験は、2023年度にかけて、以下に示す3か所のサイトにおいてそれぞれの目的で行う。

米国ノースダコタの大規模CO₂圧入サイトでは、光ファイバーによるCO₂の挙動モニタリング(地層安定性や坑井健全性監視を含む)を行う。坑井への光ファイバーケーブルの設置は完了しており、今後はCO₂を圧入して計測する予定である。この実証を踏まえた、マルチセンシング・分布型音響センシング(DAS: Distributed Acoustic Sensing)・弾性波探査(VSP: Vertical Seismic Profiling)の測定技術を確立させる。

豪州のサイトでは、光ファイバーによる断層安定性監視技術の確立を目的に実証試験を行う。断層近傍の坑井に光ファイバーを設置し、浅部断層からの漏洩監視、深部断層の安定性監視を実施する。

また、ノルウェー地盤工学研究所(NGI: Norwegian Geotechnical Institute)等との国際協力プロジェクトに参画し、情報交換をするとともに、遠浅の海底に光ファイバーを設置して海底地盤変形監視技術を実証する。

2.2. Storage Resource Management (SRM) システムの開発

Storage Resource Management (SRM) システムの開発とは、貯留性および経済性向上のための手法開発である。主要課題には、次の2つが挙げられる。

- ・ 大規模CO₂貯留サイトにおいて地下の貯留容量(リソース)を有効活用する手法の構築
- ・ CCS事業全体のコスト、操業リスクに伴うコスト等の経済性評価ツールの開発

SRM システムで対象とするCCS事業の範囲を図2に示す。CCS 事業は排出源から CO₂ を輸送し、貯留するまでのすべての工程を含む。時系列としては地域評価から CO₂ 貯留を終了し、長期管理に至るまでを含む。全体のコスト、操業リスクに伴うコスト等の経済性評価ツールを開発する。

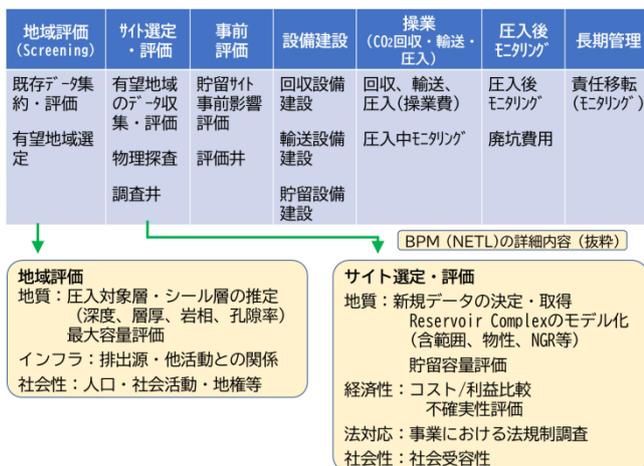


図2 SRMシステムで対象とする事業範囲

経済性評価にあたっては、CO₂ 貯留地点の適切な選定と貯留層の有効活用が鍵となる。これまで、当グループでは、以下の技術開発を主に行ってきた。

- ・ 大規模貯留層を対象とした地質モデル開発
 - ・ CO₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術開発
 - ・ CO₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法確立
- これら要素技術を統合・発展させることにより、貯留リソースの評価・管理手法を構築する。

特に、貯留層の有効活用には、国際的な指針である ISO 27914: 2017 Carbon dioxide capture,

transportation and geological storage — Geological storage や 米国石油技術者協会 (SPE, 2017) による CO₂ Storage Resources Management System (SRMS) を参照する。ISO 27914 は商業 CCS を対象に、安全かつ長期的な CO₂ の封じ込めを促進することを目的としている。環境、天然資源、人間の健康に対するリスクを最小限に抑えるための要件と推奨事項を提示している。SPE は、CO₂ の貯留可能量の算定に対して、概算から商業利用までの等級を示している。汎用的な取り決めがある一方で、適地の選択と管理は各 CCS 事業を実施する場所ごとに固有であり、内在する地層評価に係る不確実性や技術的リスクは場所ごとに対処する必要がある、

貯留層を含む地層評価に係る不確実性を考える上で、地層の成り立ちを考慮することが重要である。既存の地質情報として、RITE(2006)の CO₂ 地中貯留可能量(ポテンシャル)調査(図3)がある。この調査は、国によって油ガス資源探査で得られた基礎調査データを活用し、CO₂ が超臨界になる 800 m 以深の深部塩水帯水層の分布から CO₂ 貯留可能量を概算したものである。深部塩水帯水層は、主に砂泥互層から成る。地層の均質性や連続性に不確実性が潜んでおり、詳細な検討が必要である。不確実性の検討を進め、事業化検討地域では、概算値をより正確な貯留リソースに更新する。

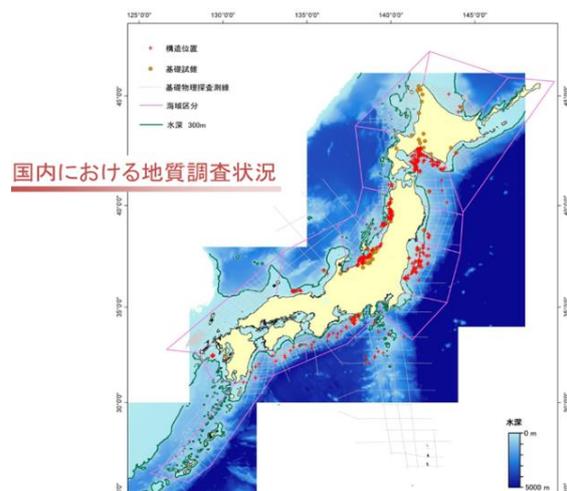


図3 基礎物理探査より得た日本列島における背斜構造の分布図

貯留サイトと排出源との距離は、CO₂ 輸送方法の決定や輸送コスト試算にとって重要であり、CCS 事業の経済性に大きく影響する。既存の基礎調査や貯留可能量評価の成果を基に、複数の実想定サイトを選定し、サイト周辺の CO₂ 排出源とのマッチングを念頭に、Low-Cost & Low-Risk の事業モデル検討を進めている(図 4)。このような事業モデル検討は、経済産業省の調査報告書に示された徐々に拡大していく事業展開とも整合する。一方、地域によっては、実想定サイトの既存データ量や質に差異がある。また、周辺の排出源の種類(石炭火力発電所、製鉄所、化学工場)や CO₂ 排出量も異なる。複数の実想定サイトの検討によって、国内の未調査地域での地質調査への知見提供や早期実現型 CCS 事業モデルの提案ができる。これらを通じて、事業コスト試算ツールを開発していく。このコスト試算ツールは、CO₂ 回収・輸送・貯留をカバーしており、CCS 事業全体のコスト試算だけでなく、投融資や事業保険の検討にも役立つ。



図 4 早期実現型 CCS 事業モデル検討概念

2.3. CCS 普及のための社会合意形成、情報発信・技術支援の取り組み

CCS の普及には技術の発展・確立だけでなく、事業者が事業を実施するための環境整備や CCS に対する社会の理解や合意が必要である。当研究グループでは、事業実施の環境整備として、事業者用に緊急時対応手順(日本版 IRP)の作成ガイダンスを取りまとめるとともに、CO₂地中貯留技術事例集を作成している。また、社会の理解や合意のために、社会合意形成手法(SLO)開発に取り組んでいる。

2.3.1 インシデント対応手順(日本版 IRP)

CO₂貯留事業の安全確保、緊急時対応に加え、CCS の社会受容性を確保するためには、インシデントが生じた際の手順・計画(プロトコル)を明確にしておくことが必要である。インシデントとは、CO₂貯留事業を遅滞または中断させるおそれのある事象である。坑井や貯留層の異常など事業上の異常、大地震や台風、未知の断層の判明など事業上の異常の要因となり得る事象、地層や地表の異常な変形、CO₂の漏洩や漏出、誘発地震など地中環境・外部環境への影響、生態系の変化、地下飲料水への混入、人命/健康/家屋の被害など生態系や資源等への影響がインシデントとして想定される(図 5)。

CCS 事業者が日本で貯留事業を実施するに当たってのインシデントへの対応手順を日本版 IRP(Incident Response Protocol)と呼ぶこととし、その策定のためのガイダンスを取りまとめた。

日本版 IRP ではインシデントによる外部環境への影響の程度に応じ3つの異常事態レベルに分類した。レベル1は影響がない場合、レベル2は状況が悪化すれば影響が生じるおそれがある場合、レベル3は影響が生じている場合である。インシデントが発生した場合、異常事態レベルの判定を行い、異常事態と判定した場合には、そのレベルに応じた対応体制を立ち上げ、異常事態への技術的対応と社会的対応を取るようになる。技術的対応としては、インシデントの調査や監視、発生個所の修復、影響の抑止・遮断・復旧の実施が想定される。社会的対応とは、行政機関への対応や近隣利害関係者、一般市民、メディアとのコミュニケーションである。ガイダンスには想定インシデントごとに対応例を記載している。

また日本版 IRP の補完として QA 集を作成した。QA 集では、地震による貯留サイトへの影響に対する疑問、貯留事業による誘発地震に対する疑問、CO₂漏出時の人や生物、環境等への影響に対する疑問に関する回答のポイントを科学的根拠に基づきまとめた。

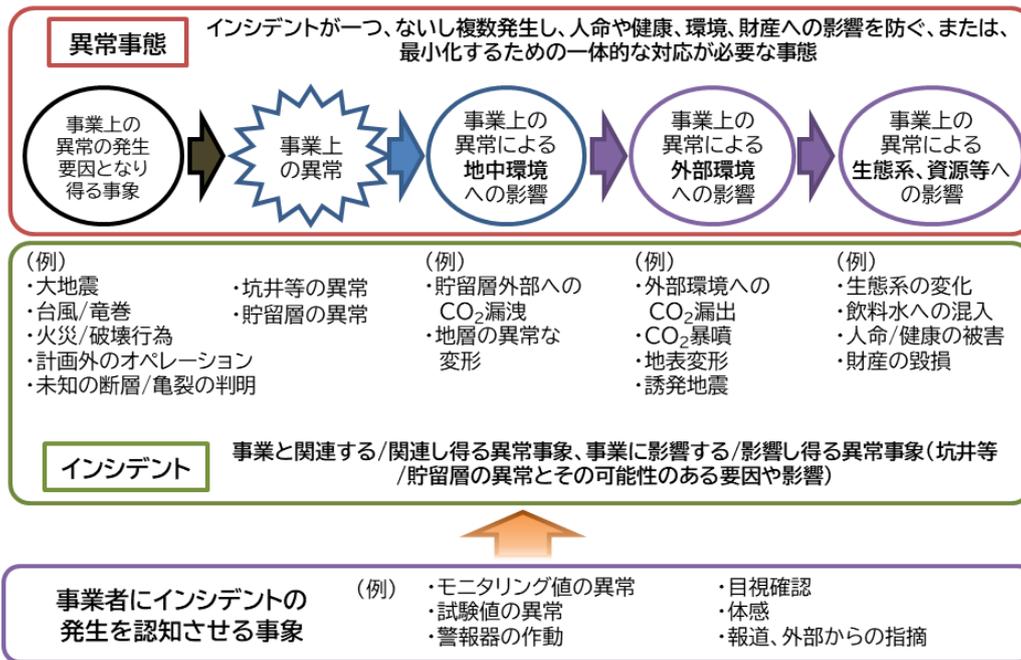


図5 異常事態の分類とインシデント例

2.3.2 CO₂ 地中貯留技術事例集

我が国における CCS 事業者の参考マニュアルとなるように、CO₂地中貯留に関する国内外の事例を紹介する CO₂地中貯留技術事例集の作成を行っている。技術事例集は、貯留事業のフェーズに対応して、基本計画、サイト選定、サイト特性評価、実施計画、設計・建設、操業・管理、サイト閉鎖、閉鎖後管理の8章から成る。このうち、第1章(基本計画)は、2021年10月にウェブで公開した。

基本計画の目的は、事業開始段階において事業実施者が事業の全体像を示し、利害関係者から事業への理解を得ることである。そのため、基本計画で検討・立案・確立されるべき内容は、技術的/経済的/法的あるいは社会的側面と多岐にわたる。事例集第1章では、事業全体の工程を示し、各フェーズの概略を述べている。

また、国内外の関連法規を取りまとめ、必要な許認可のタイミングを示している。経済性に関しては、事業コストの概略を示し、海外事業でのコスト実績を示している。リスク管理やパブリックアウトリーチや社会受容性(PO/PA)の考え方の概要も述べている。

各フェーズの詳細は第2章以降に書かれており、順次

ウェブで公開する。また、海外での活用も見据えて、英語版も作成中であり、順次公開してゆく予定である。

2.3.3 CCS 実施に向けての社会合意形成(SLO)手法

CCS の社会実装には社会の合意が必要である。そこで当研究グループでは、社会合意形成(SLO)手法の研究開発に取り組んでいる。

CCS 事業の実施には地元の理解が欠かせない。地元の理解、合意形成のためには、地元と事業者とのコミュニケーションが重要である。海外の事例では、早期に双方向のコミュニケーションを行うことが推奨されている。双方向のコミュニケーションとは、事業者が一方向的に事業の説明をし、地元へ事業の受入れを求めるのではなく、地元も事業者に対して、意見や考え、懸念を伝えることで、互いの理解を深め信頼関係を構築していくコミュニケーション手法である。これまでにいくつもの双方向コミュニケーション手法が提案されている。当研究グループでは、事業者が地元のどの利害関係者を対象に、どのようにコミュニケーションを取るのが適当なのかを、事業のフェーズごとに検討している。また CCS 事業による地元への経済波及効果の分析も行っている。

社会の合意とは、地元住民、一般市民が CCS を受け入れるということだけを意味するのではない。社会には、地元住民、一般市民だけでなく投資家、政策担当者、さらには事業者自身まで様々な利害関係者が含まれる。他の多くの事業とは異なり CCS はそれ自身で利益を生み出すわけではないため、投資家や政策担当者、事業者の合意形成には、事業として成り立つ仕組みとしてインセンティブが必要となる。そこで、どのようなインセンティブが適切なのか、海外の事例を調査し、我が国の事情に適したインセンティブデザインの検討を進めている。また、CCS 事業にかかるコストの分析も行っている。海外事例のコスト分析などを通して、コストの詳細や年次展開についての研究を行っている。

参考資料

- 1) ISO (2017) ISO 27914: 2017 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Geological storage, <https://www.iso.org/standard/64148.html>
- 2) SPE (2017) CO₂ Storage Resources Management System, <https://www.spe.org/en/industry/co2-storage-resources-management-system/>
- 3) RITE (2006) H15 年度 二酸化炭素地中貯留 成果報告書
- 4) 経済産業省 (2020) 地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費 (我が国の CCS 導入のあり方に係る調査事業) 調査報告書, <https://www.meti.go.jp/medi lib/report/2019FY/000145.pdf>
- 5) 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (2021) CO₂ 地中貯留技術事例集, 第 1 章 基本計画, <https://www.co2choryu-kumiai.or.jp/co2/>

無機膜研究センター

グループメンバー(2021年12月末)

センター長・主席研究員	中尾 真一	研究助手	浦井 宏美
副センター長・主席研究員	小西 久美子	研究助手	奈良 裕子
主席研究員	喜多 英敏	研究助手	佐々 和明
主任研究員	瀬下 雅博	研究助手	大野 信成
主任研究員	來村 和潔	研究助手	新堂 千代子
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	菰野 恵子
研究員	孟 烈		

無機膜を用いた革新的環境・エネルギー技術の研究開発、およびその実用化・産業化に向けた取り組み

1. はじめに

2020年に「パリ協定」が本格的に運用開始され、更に10月には日本においても「2050年カーボンニュートラル」が宣言された。この目標達成のためには、温室効果ガスの実効的な排出削減と、CO₂を資源として活用するカーボンリサイクルの実現が求められている。

シリカ、ゼオライトおよびパラジウムに代表される無機膜は、高分子を素材とする有機膜に比べ、機械的強度や耐熱性・耐薬品性に優れている。また、無機膜を用いたメンブレンリアクター(膜反応器)を用いることで、蒸留法や吸着法などの分離精製工程を必要とする従来の反応プロセスと比較して、エネルギー消費量を大幅に削減し、プロセスを簡素化できる可能性も有している。このような無機膜の優れた特性を踏まえ、革新的生産プロセスを実現できる技術として、蒸留代替としての分離膜の適用、分離回収されたCO₂の有効利用等の研究が進められている。さらに、水素社会構築に不可欠なCO₂フリーかつ低コスト水素製造のための水素分離膜の開発も進められており、温室効果ガスの排出削減に大きく貢献する革新的技術として期待されている。

無機膜研究センターは、無機膜を用いた革新的環境・エネルギー技術の早期の実用化、産業化を目的に、研究開発と産業連携を両輪として活動を進めるべく、組織も研究部門と産業連携部門の2つから構成されている。

研究部門では、それぞれに優れた特長を有するシリカ

膜、ゼオライト膜、パラジウム膜をコア技術に、メンブレンリアクターを利用したCO₂分離・回収、有効利用(CCU: Carbon Capture and Utilization)に関する取り組みとして、CO₂を原料とするメタノール合成技術の開発、大気中から回収されたCO₂から液体炭化水素燃料を合成する技術の開発を行っている。また、CO₂フリーかつ低コスト水素製造を目的としたメタン直接分解による水素製造に関する研究も行っている。

産業連携部門では、無機分離膜・支持体メーカーとそのユーザー企業計18社からなる「産業化戦略協議会」において、メーカーとユーザー企業のビジョンの共有を図るべく、会員企業が定期的に意見交換を行い、研究会などの活動を活発に推進している。

本稿では、CCU技術開発とメタンからの水素製造など研究部門の主な成果と今後の展望、そして産業化戦略協議会の活動状況について紹介する。

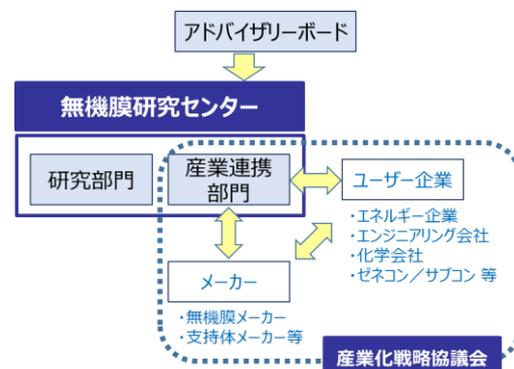


図1 無機膜研究センターの推進体制

2. メタン直接分解によるCO₂フリー水素製造技術の開発

水素社会の構築のためには、水素を低コストで且つ大量に製造する方法が求められる。シェールガス革命以降、長期に安定して供給が可能であるメタンに着目し、これを熱分解することで水素と固体のカーボンを製造し、副生カーボンを販売することで水素の製造コストを低減する技術検討を実施している。メンブレンリアクターの適用により転化率を向上させ、効率的且つ省エネルギーな水素製造を目指す。また、水素製造に際してCO₂を排出しないメリットがあり、脱炭素社会に資する技術開発である。

2019年度にNEDOの委託事業として採択され、

①メタン分解に必要な反応温度500℃以上の耐熱性を有する水素選択透過膜の開発

②メンブレンリアクターにおいてメタンを効率的に分解する触媒の開発

③水素選択透過膜と触媒から構成されるメンブレンリアクター(図2)の開発とその有効性の実証

を開発項目としている。

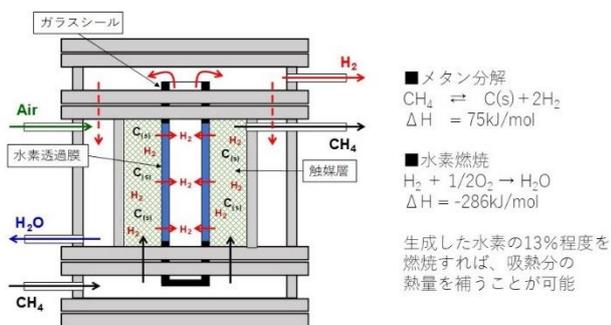


図2 メタン分解により水素製造するメンブレンリアクター

水素選択透過膜膜の開発においては、シリカ膜およびパラジウム(Pd)膜の開発を行った。その結果、共に500℃においてプロジェクトの最終目標である水素透過率 $5 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、H₂ 選択透過性3,000以上の透過分離性能を有するとともに、高い耐熱性を有する水素選択透過膜膜の開発に成功した。また触媒については、600℃における活性が比較的に高いNi/Fe/Al₂O₃触媒を見出した。

メンブレンリアクター(MR; Membrane reactor)の開発については、メタン直接分解用メンブレンリアクターの水素製造効率およびCO₂排出量の検討を行った結果、図3に示す様に反応温度500~600℃において、従来の触媒充填型反応器(PBR; Packed bed reactor)と比較して高い水素製造効率および低いCO₂排出量となることが明らかとなった。一般的な水素製造方法であるメタン水蒸気改質反応によるCO₂排出量と比較すると、水蒸気改質反応が0.95 kg-CO₂/Nm³-H₂に対し、メンブレンリアクターによるメタン直接分解では0.2 kg-CO₂/Nm³-H₂であり、約1/5に排出量を抑制できることがわかる。今回の計算では未反応メタンと水素を燃焼させることにより反応熱を賄っているが、水素のみを燃焼させることでCO₂排出を限りなく“ゼロ”に近づけることも可能になると期待できる。

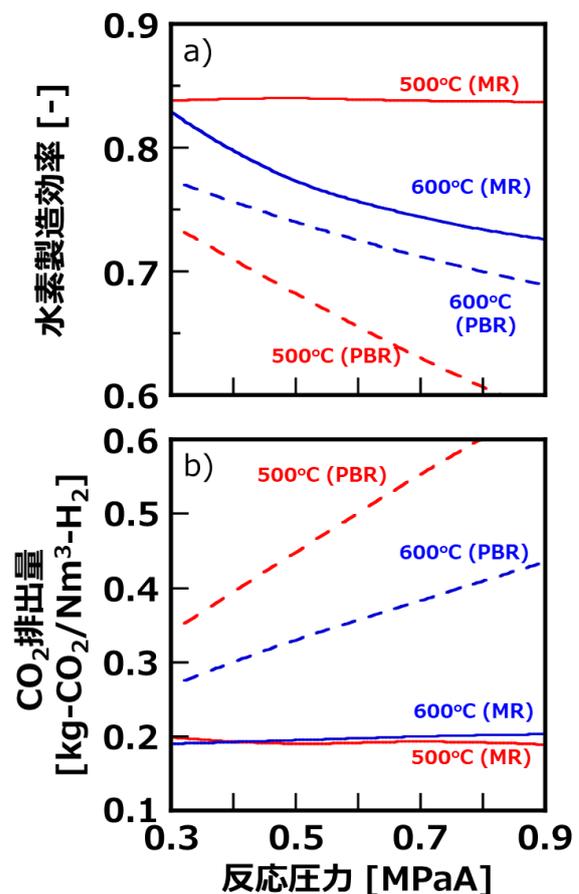


図3 メンブレンリアクター適用による効果の試算結果

a) 水素製造効率, b) CO₂ 排出量

開発したシリカ膜および Pd 膜を用いたメタン直接分解試験の結果を図4に示す。図中の点線は触媒を充填した反応器、実線はメンブレンリアクターによって理論的に得られる最大のメタン転化率を示している。この結果より、反応温度 600℃、反応圧力 0.4 MPa において Pd 膜の場合で約 80%、シリカ膜の場合で約 70%の転化率が得られており、触媒充填型反応器(約 20%)よりも高い転化率が得られることを実証した。一方で、高い水素製造効率が見られると試算された反応温度 500℃では、メンブレンリアクターと触媒充填型反応器とではメタン転化率が同程度となった。これは、用いた Ni/Fe/Al₂O₃ 触媒の 500℃における活性が低いためであると考えられ、反応温度のさらなる低温化を達成するためには触媒の改良(低温活性の高い触媒の開発)が必要不可欠である。これはメタン直接分解に限らず、無機膜を用いたメンブレンリアクター開発における大きな課題のひとつであり、今後は触媒開発と分離膜開発が一体となって研究開発が推進されていくべきであると考えられる。

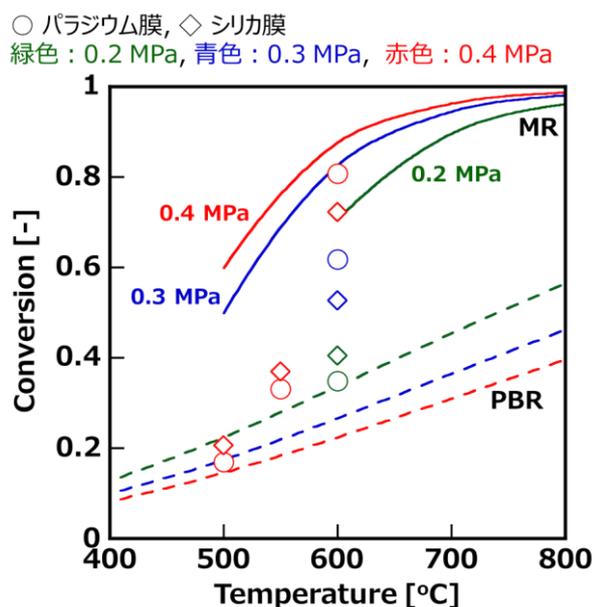


図4 メンブレンリアクターの適用によるメタン転化率の向上効果

3. CO₂ 有効利用技術の開発

CO₂ 有効利用技術はカーボンニュートラル社会を

現するためのキーテクノロジーとして盛んに研究開発・実証検討が行われている。中でも CO₂ の水素化による有効利用技術は反応により水が生成し、その水が触媒の活性劣化、反応速度の低下の原因となる点が課題となっている。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、無機膜研究センターではメンブレンリアクターによる高効率かつ省エネルギー型の CO₂ 有効利用技術の開発を推進している。

3.1. CO₂ を原料とするメタノール合成技術の開発

メタノールは化学品の基幹物質であり、今後需要拡大が見込まれる。メタノール合成は、主として天然ガスを原料とした水蒸気改質反応により合成ガス(COとH₂の混合ガス)を原料として合成される。一般的に Cu/ZnO 系の触媒が用いられており、473~573 K、高压条件下で反応が行われる。しかしながら、メタノール合成は熱力学的には低温・高压有利の反応系であり、この温度域ではワンパスの収率が低い。これは、以下の反応式で表される CO₂ を原料とした場合に顕著である。



一方で、CO₂ からメタノールを合成することができれば、約1億 t/year(メタノールの需要:5000 万 t/year を仮定)の CO₂ 削減ポテンシャルが期待できる。そのため、高効率なメタノール製造方法が求められており、生成する水を反応系外に除去することができればワンパス収率を向上するとともに、従来の触媒反応では困難であった比較的低压条件下にてメタノール合成が可能となる。その方法のひとつとして、水を選択的に引き抜くことのできる膜を具備したメンブレンリアクターの利用が挙げられる。これまで無機膜研究センターでは、水熱安定性を向上させた Si-rich LTA 膜を開発し、メンブレンリアクターに適用することにより反応温度 200℃、反応圧力 4 MPa にてCO₂転化率 60%を達成した。これは同条件の触媒充填層型反応器と比較すると約 3 倍の転化率である。

2021 年度、新たにNEDO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」に
 JFE スチール株式会社との共同提案が採択され、今後は、
 脱水膜のさらなる高性能化および長尺・大面積化を
 検討し、実用化に向けた研究開発を進めていく。

3. 2. 大気中の CO₂ を原料とした液体炭化水素燃料 (e-fuel) 合成技術の開発

多岐にわたるカーボンリサイクル技術の中でも、合成
 燃料は既存の燃料インフラが活用可能であり、他の新燃
 料に比べて導入コストを抑えることが可能なことから、
 その製造プロセスの確立は強く求められている。

無機膜研究センターは、2020 年度より金沢大学およ
 び RITE 化学研究グループと共に NEDO 事業「ムーン
 ショット型研究開発事業／地球環境再生に向けた持続可
 能な資源循環を実現／大気中からの高効率 CO₂ 分離回
 収・炭素循環技術の開発」に参画し、DAC (Direct Air
 Capture) 技術により回収した CO₂ を FT 合成
 (Fischer-Tropsch Synthesis) により液体炭化水
 素燃料に変換する技術開発を担当している(図 5)。FT
 合成もメタノール合成と同様に、CO₂ と水素の反応によ
 り生成する水が触媒劣化、反応速度低下の原因となる。
 また炭素鎖の逐次反応であるため、生成物が ASF 則
 (Anderson-Schulz-Flory: 炭素鎖が成長する確率)
 に従うため、反応制御が困難であることも課題として挙
 げられる。

そこで当センターでは、FT 合成用のメンブレンリアク

ターを用いた高効率かつ省エネルギー型の CO₂ 変換技
 術開発を以下の3項目を柱として進めている。

- ① FT 合成へ適用可能な脱水および水素透過膜
- ② FT 合成用メンブレンリアクター
- ③ CO₂ 分離回収を含めた最適プロセス構造

脱水膜は、反応により生成する H₂O を、例えばゼオリ
 イトなどの親水性を有する分離膜を用いて反応系外に
 除去することにより触媒劣化を抑制することを目的とし
 ている。水素透過膜は、ゼオライト膜やカーボン膜と比較
 して H₂ の透過性に優れたシリカ膜を用い、炭素鎖の逐次
 反応の最適な反応タイミングで H₂ を反応場に供給す
 ることにより反応制御を行い、液体炭素燃料を多く得るこ
 とを目的とした新しい取り組みである。現在、これらの
 新規分離膜の開発を行っており、H₂/N₂ および H₂/CO₂
 分離を目的とした従来のシリカ膜よりも高い透過分離性
 能を有するとともに、高い耐水蒸気性を発揮するシリカ
 膜の開発に成功している。

FT 合成用メンブレンリアクターは、新規装置を設計し
 稼働予定である。実験に先立ちシミュレーションモデル
 を構築し、メンブレンリアクターは従来の触媒充填層型
 反応器よりも高い CO₂ 転化率が得られることを確認し
 た。今後、新規装置を用いて FT 合成触媒や操作条件の
 検討を行い、高効率に液体炭化水素を得ることのできる
 メンブレンリアクターの開発を行い、さらにシステム全体
 の最適化を検討することにより省エネルギーな最適プロ
 セス構造の構築を目指す。



図 5 プロジェクトの全体概要

本事業のムーンショット型研究開発事業は、「日本発の破壊的イノベーションの創出を目指し、挑戦的な研究開発(ムーンショット)を推進するもの」である。無機膜研究センターは、無機膜の構造と耐久性との相関、および分離メカニズムという“Science”を解き明かし、省エネルギー化が期待できる FT 合成用メンブレンリアクターの研究開発を強力に推進していく。

4. 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、分離膜・支持体メーカーとユーザー企業計 18 社(2022 年 1 月時点)が参画している。協議会では、メーカーとユーザー企業のビジョンを共有し革新的環境・エネルギー技術に資する無機膜産業を確立することを目的としている。その実現のために、以下のような事業を推進している。

- ①無機膜を用いた革新的環境・エネルギー技術の実用化・産業化に向けたニーズ・シーズマッチングやロードマップ策定を行う「研究会」の設置および運営
- ②国、NEDO 等からの資金による事業の共同実施の企画
- ③センター研究部門への研究員派遣の受け入れ、研修会の実施
- ④センターアドバイザリーボードおよび研究部門からの技術指導
- ⑤協議会員向け無料セミナーの開催
- ⑥協議会員向けニーズ・シーズ情報の発信

2021年は、新型コロナウイルスの感染拡大の影響で、対面での活動は自粛せざるを得なかったが、WEB を活用して研究会活動、セミナーなどを積極的に推進した。

研究会活動としては、膜反応プロセス研究会と共通基盤(性能評価等)研究会の2つの研究会で新たな検討を開始した。具体的には、膜反応プロセス研究会では、メンブレンリアクターの社会実装に必要な、性能・エネルギー収支・コストの比較検討を可能にする計算プラットフォームの検討を行い、共通基盤(性能評価等)研究会では、無機膜の産業化促進を目指し、分離膜性能評価手

法の標準化に向けた基礎的な検討を行った。

協議会会員向けセミナーもオンラインで開催し、大学、会員企業、膜関連企業などから最新の研究開発動向やニーズ、シーズの紹介、膜の実用化開発事例の紹介などの講演があり、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、その要約に無機膜研究センターとしてのコメントを付したニーズ・シーズ情報も、定期的に会員に提供している。

5. おわりに

2021 年 11 月には、2 年ぶりとなる「未来を拓く無機膜 環境・エネルギー技術シンポジウム」をオンラインで開催し、389 名の方に聴講いただいた。本シンポジウムでは、「カーボンリサイクル」を主題として、CO₂分離回収・有効利用、炭素循環技術等の最新動向や実用化に向けた取り組みについて、大学および企業の方々にご講演いただくとともに、無機膜研究センターの最新の研究成果や産業化戦略協議会の取り組みを紹介した。

聴講者からは、カーボンリサイクルについての俯瞰的・総合的展望に加え、実用化に向けた具体的な取り組み、分離技術における無機膜の有効性などについても理解を深めることができたことと好評だった。

2050 年カーボンニュートラルに向け、脱炭素に資する革新的環境・エネルギー技術開発へのニーズはますます高まっている。無機膜研究センターとしても無機膜の強みを生かした基礎・応用研究を深めるとともに、社会実装に向けた動きを加速化させていきたい。

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](#)

 [無機膜研究センター](#)

その他の活動

◆環境教育

実施日	対象者	人数
1月7日	京都府立城陽高等学校 理科 教員	9
7月30日	京都府立西舞鶴高等学校 理数探求科 2年生	9
10月21日	京都理化学協会	16
11月22日	奈良県立奈良北高等学校 数理情報科 2年生	20

掲載年月日	見出し	掲載紙名
2021.2.3	RITE CO ₂ 分離・回収でシンポ 最新の技術動向解説	電気新聞
2021.3.2	鉄鋼で国境炭素税導入なら… 日本の競争力低下の恐れ RITEが分析	鉄鋼新聞
2021.5.14	再生可能エネルギー5割でコスト2倍の可能性 政府目標達成へ経産省が試算	東京新聞
2021.5.14	温室ガスゼロ 電力コスト2倍 RITE分析	日刊工業新聞
2021.5.14	50年カーボンニュートラル/「水素還元製鉄の実用化」必須条件/RITEが分析	鉄鋼新聞
2021.5.14	50年実質ゼロ排出 電力コストは2倍に RITE分析 確立技術活用を	電気新聞
2021.5.17	2050年CNヘシナリオ議論、発電費用倍増の懸念も/総合エネ調	ガスエネルギー新聞
2021.5.17	RITE/50年電源構成の再エネ割合5割以上でコスト大幅増/低減策立案が急務	日刊建設工業新聞
2021.5.17	電力コスト2倍増試算/50年、利用者負担増も	琉球新報
2021.5.18	RITE、脱炭素で電力コスト「2倍」	日経産業新聞
2021.5.19	2050年脱炭素、電力コストは倍増/総合エネ調査会、委員から批判相次ぐ/RITE試算、再エネ100%なら4倍に	環境新聞
2021.5.24	電力コスト、50年に倍増も 有識者中間報告 再エネ大量導入も一因	マガジナ「ビジネスアイ」
2021.6.22	RITE 新理事長に山地氏就任	電気新聞
2021.6.25	理事長に山地氏 RITE	化学工業日報
2021.6.28	理事長に山地氏、茅氏は顧問就任/RITE	ガスエネルギー新聞
2021.8.9	地球を救え! ムーンショット NEDOプログラム(2) 大気からCO ₂ 回収 液体の炭化水素燃料に 金沢大学・RITE	日刊工業新聞
2021.10.15	RITE「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 カーボンニュートラルを見据えた技術開発と、実現にいたる課題を分析	ガスレビュー
2021.12.29	グリーンフォーラム21 第2回事例研究会「エネルギー基本計画とその周辺」 地球環境産業技術研究機構 主席研究員 秋元圭吾氏	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](#)

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

RITE Today^{2022 Vol.17}

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