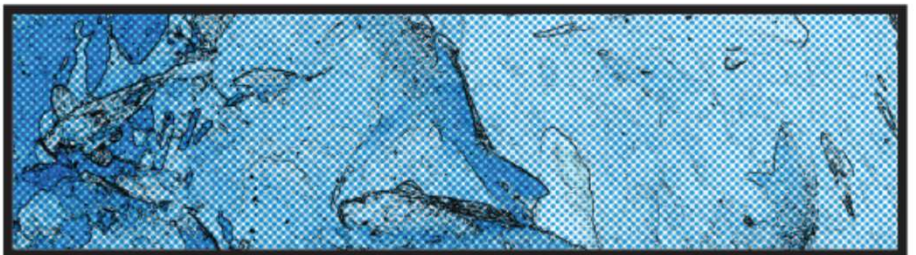
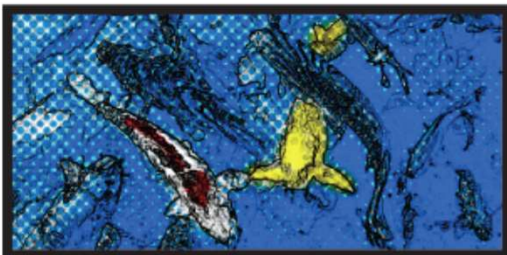
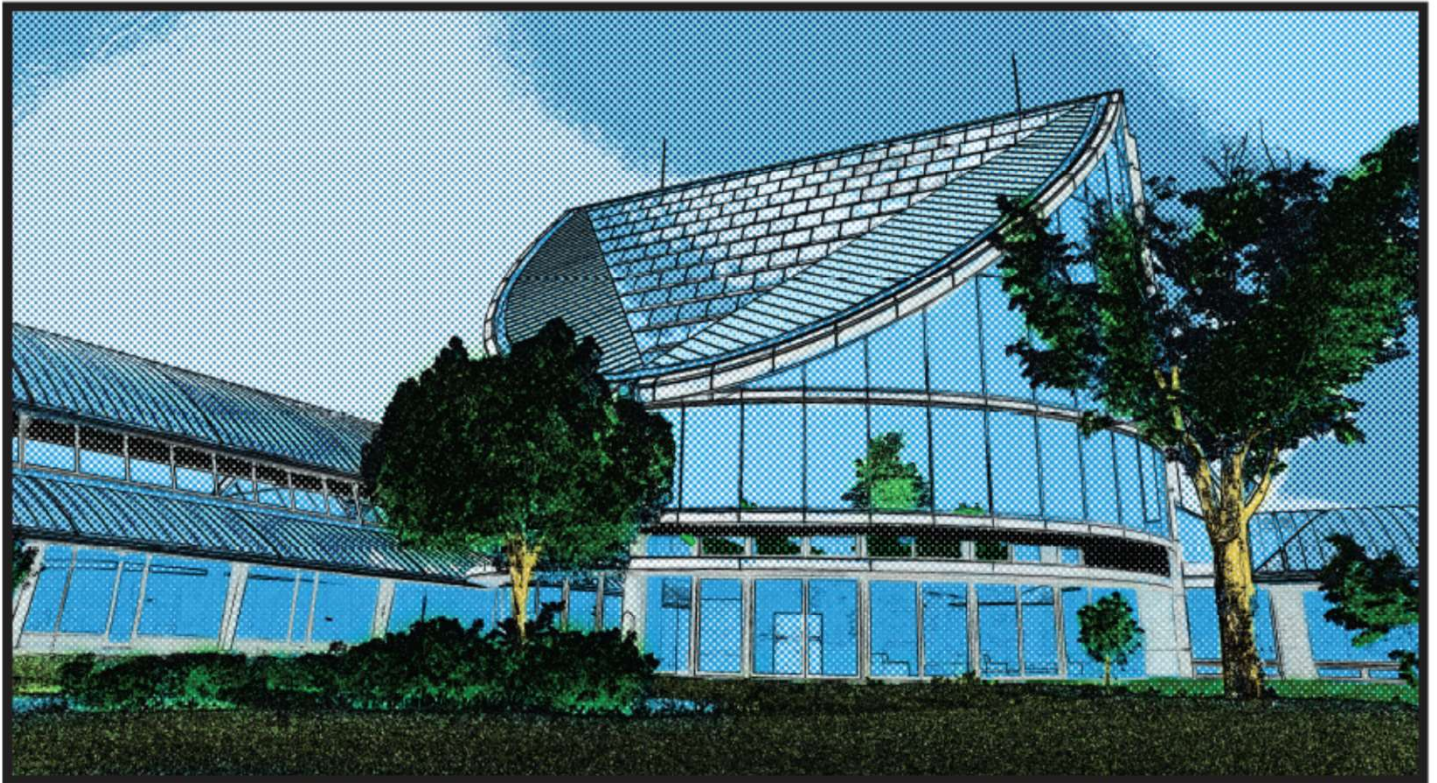
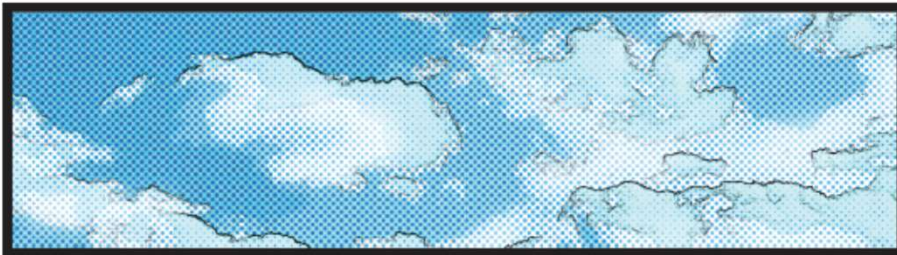


RITE Today^{2021 Vol.16} Annual Report

公益財団法人 地球環境産業技術研究機構 年次報告書 2021年版 第16号



RITE Today

2021 Vol.16

Contents

巻頭言

- 革新的イノベーションへの取り組み 3
●● 常務理事 河上豊

特集

- ビヨンド・ゼロEXPO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の実現に向けた取り組み 12
●● 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 20
●● バイオ研究グループ 持続可能な社会の実現を目指したバイオリファイナリー技術の開発 27
●● 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 38
●● CO₂貯留研究グループ 安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術研究開発の取り組み 44
●● 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 50

プレスリリース 55

イベント情報 55

発表論文一覧 55

- 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 55

主な新聞記事 56

特許紹介 57



革新的イノベーションへの取り組み

公益財団法人地球環境産業技術研究機構

常務理事 河上 豊

RITEで常務理事をしております河上でございます。

RITEは昨年、設立30年を迎え、今年は次の10年の歩みを進める最初の年となります。

メンバー一同、気持ちも新たにより一層の努力、研鑽に励み、成果を上げ、公益財団法人として、社会に貢献する所存、引き続き、皆さまからのご指導、ご支援、ご協力を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

RITEは地球温暖化問題を中心とした地球環境問題を解決するための技術開発に取り組む研究機構ですが、世界的なコロナ禍の中、世の中の地球温暖化問題への関心も陰っていた感がありましたが、本来、長期的な課題である地球温暖化問題の重要性が変わるものではなく、最重要課題として昨年10月の菅首相の所信表明において、2050年にカーボンニュートラルを目指すことが宣言され、それまでの2050年80%削減から取り組みが加速化されることとなりました。

地球温暖化問題の難しさは大幅な温室効果ガス削減に伴うコスト負担であり、SDGsにおける地球温暖化問題以外の目標とのトレードオフの関係やエネルギー政策においてベースとなるS+3E(安全を最優先に環境、経済、エネルギーセキュリティの同時達成)を考えると、その解決には革新的イノベーションが必須となります。また、あらゆる分野での革新的イノベーションを総動員して挑まなければ、達成は不可能な難題であります。

このような中、私ども RITE の重要性はますます増していることを一同認識し、身の引き締まる思いで日々、尽力しております。

RITEにおいてはCCSやバイオリファイナリーといった既存の研究については既に、実証段階から社会実装の段階に至っており、加速化を図っています。既存技術は着実に進めていく一方、あらゆる分野での取り組みが必要と申し上げた通り、新たな取り組みにも挑んでおります。新たな取り組みの一例を紹介します。

システム研究グループではエネルギー供給サイドの検討が中心でしたが、AIやIT技術の進展を受け、需要サイドでのエネルギー使用量の大幅削減の可能性を織り込んだシミュレーションを進めております。

化学研究グループでは将来のCO₂大幅削減において有効な技術となる可能性のある直接、大気中からCO₂を回収するDACの技術開発に着手しております。

CO₂貯留研究グループでは国内での貯留に留まらず、海外への技術展開を進めております。

バイオ研究グループでは地球温暖化問題と廃プラスチック問題の両方に寄与する技術としてバイオプロセスによる生分解性プラスチックの開発に着手しております。

無機膜研究センターでは水素関連の技術開発を中心としていましたが、無機膜を用いたCCUによる燃料製造技術の開発に着手しております。

これからもRITEは我々の持つ技術シーズや知見、ノウハウをフル活用して、多岐にわたる分野での革新的イノベーションを完遂し、バランスのとれたリスク対応が可能となるよう、研究成果を上げて参る所存です。

今後のRITEの研究成果に注目頂きたいと思います。

ビヨンド・ゼロ EXPO について

専務理事 企画調査グループ	グループリーダー・主席研究員 サブリーダー 研究管理チームリーダー 調査役	本庄 孝志 柳生 勇 川口 圭史 箕浦 靖明 金星 春夫 久保 道代 辰巳 奈美 秋元 圭吾
システム研究グループ 化学研究グループ	グループリーダー・主席研究員 サブリーダー・主席研究員 副主席研究員 主任研究員	長谷川 俊之 余語 克則 山田 秀尚 内田 堅二
CO ₂ 貯留研究グループ	サブリーダー・主席研究員 主任研究員	三戸 彩絵子
無機膜研究センター	主任研究員	安原 健一郎

1. はじめに

2020年10月26日の菅首相所信表明に示されたように2050年社会はCO₂排出実質ゼロが求められている。実現のためには、高効率化による必要エネルギーの低減、太陽光・風力等CO₂を排出しないエネルギーの最大活用に加えて、排出を避けられないCO₂を回収し地中貯留や固定化利用し、カーボンニュートラルを実現するシステムの確立が重要となる。そしてこの地中貯留・固定化利用技術の普及・発展とCO₂排出の更なる減少により、革新的環境イノベーション戦略に示されるニュートラル(すなわちゼロ)を超えるビヨンド・ゼロの実現が近づくと考えられる。我々は2025年の大阪・関西万博(図1)で、このビヨンド・ゼロを単なる展示ではなく、会場内・開催期間で先駆的に達成するシステムであるビヨンド・ゼロ EXPO を提案する。



図1 大阪・関西万博会場イメージ
(提供:2025年日本国際博覧会協会)

このシステム構築のために、まず期間内での会場への供給電力はCO₂を排出しないエネルギーに限定する必要がある(グリーン電力証書の獲得)。また都市ガスは(2025年時点では避けられないため)製造・消費に伴い発生するCO₂をクレジットで相殺する(カーボンニュートラル都市ガス)。水素に関しても、グリーンまたはブルー水素とし、カーボンニュートラルとする。さらに会場内車両も電気自動車・水素自動車を活用し、ガソリン自動車は都市ガス同様発生するCO₂分をクレジットで相殺する。これらの取り組みにより、端緒としてカーボンニュートラルを実現する。

その上で次のステップとしてビヨンド・ゼロ実現および環境技術のアピールのため、本提案では会場内大気中のCO₂を回収し地中貯留や固定化利用を行う。

大気中のCO₂濃度は約400ppmと、分離回収技術で実用化されている対象の数百分の一という薄さであり、これを効率的に回収する技術はまだ確立しているとは言いがたい。しかし日本の最先端技術を駆使し、トン単位(1日あたり)のCO₂を効率的に回収するDAC(Direct Air Capture)装置を2025年までに製造し、会場で設置・実働させることは可能と考えている。

次に回収したCO₂を大量かつ恒久的に処理するため、会場内で地中貯留(CCS)を行う。貯留量自体は会場で数百トン程度と少量(苫小牧で30万トン/3年の実績)ではあるが、大阪という大都市での貯留は世界に類を

見ない画期的な試みであり大きな意味がある。

加えて環境技術として、回収した CO₂ の固定化技術・カーボンリサイクル技術も会場内で実現する。具体的には前述の DAC 装置からの CO₂ とカーボンフリー水素からメタンを製造するメタネーション装置を会場内で設置し、迎賓館厨房等へ都市ガスとして供給する。さらに会場内に設置した植物工場にも同様に CO₂ を供給し、栽培した野菜を日々迎賓館食堂等へ提供する。また CO₂ 固定化により製造したメタノールを原料としたアクリル樹脂で会場備品・記念品等を製造する。

これらの提案をまとめると図2のようになる。さらに博覧会会場では装置を展示ディスプレイとしても位置づけ、カーボンニュートラルや DAC、地中貯留その他 CO₂ 固定化・カーボンリサイクル技術とあわせビヨンド・ゼロパビリオンとし、日本の環境技術を多くの来訪者にアピールしたいと考えている。

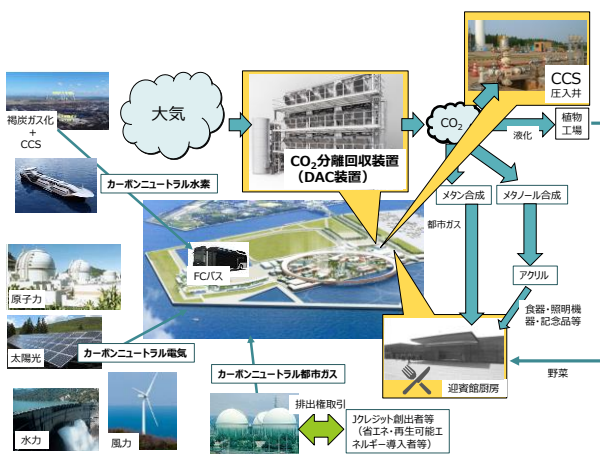


図2 ビヨンド・ゼロ EXPO 提案イメージ

本特集ではビヨンド・ゼロEXPO実現に関する各技術を詳しく紹介する。まず2章でカーボンニュートラル実現の必要性からビヨンド・ゼロへの展望について述べる。次に第3章ではDAC、地中貯留、その他技術（メタネーション・メタノール合成・植物工場）について紹介する。第4章はまとめとして、本提案と大阪・関西万博の基本方針の関連について述べる。

2. カーボンニュートラル実現のために

前章にあるように2020年10月26日に菅首相は「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言した。カーボンニュートラル実現のためにはどのような対策が求められるのかについて議論する。

2.1. カーボンニュートラル実現の複数の可能性

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)1.5℃特別報告書(SR15)は、1.5℃上昇に抑えるには、2050年頃に世界のCO₂排出量を正味でほぼゼロにすることが必要とした¹⁾。2050年カーボンニュートラルはこれに沿ったものである。

SR15においては、典型的な4種類のシナリオについて提示がなされている。そのうちの極端な2種類について言及しておく。1つは、徹底的な省エネシナリオであり、Low Energy Demand (LED)シナリオとして知られるものである。エネルギー需要サイドには本来必要な水準を大きく超えるエネルギーが利用されている。それはデジタル化技術の進展等により大きく低減できる可能性がある。それに社会変化が重なって低エネルギー需要、低CO₂排出社会を実現し得る可能性が示されたシナリオである(RITEシステム研究グループでは2020年度よりEDITS事業を立ち上げ、低エネルギー需要シナリオの国際的な詳細検討を開始)。SR15で引用されたLEDシナリオでは、CDR(Carbon Dioxide Removal)技術の利用は想定されていない。もう一つの典型的なシナリオは、化石燃料が引き続き安価な中、カーボンニュートラルを実現するシナリオであり、化石燃料を利用しながら、大量のCDR技術を利用するものである。CDRにはCCUSに加え、負の排出を実現するCCS付バイオマス(BECCS)、大気中CO₂直接回収貯留(DACCS)等が含まれる。複数のシナリオを有しつつ、カーボンニュートラルの実現性を高めていき、早期に達成するようにしていくことが望まれる。

2.2. カーボンニュートラル実現のイメージ

図3は、温室効果ガス排出で見たネットゼロエミッション(=カーボンニュートラル)の対策のイメージである。

大きくは省エネと CO₂ 原単位の低減があるが、まず、デジタル化による物質、エネルギーサービスの低減を含む、省エネルギーは基本的に重要である。CO₂ 原単位の低減については、電力は非電力よりも低減しやすい傾向にあるので、IPCC でも、電化を促進し同時に電源の脱炭素化を進めることが重要としている²⁾。一方、省エネにしても、CO₂ 原単位の低減にしても、大幅に低減しようとすればするほど、とりわけゼロに近付けようとすればするほど、費用が急激に増大する。更には、畜産から発生するメタンなど CO₂ 以上に削減が難しい部門もある。それら残る排出量を負の排出技術(NETs)でキャンセルアウトするというのがカーボンニュートラル実現の大きな方向性となる。ただ、前節で述べたように、それぞれの寄与度の見通しは複数ある。オプションを広く持ってカーボンニュートラルを目指すべきである。

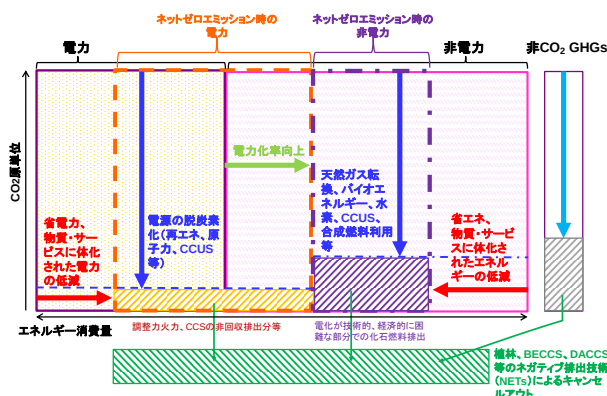


図3 温室効果ガス排出で見たネットゼロエミッションの対策のイメージ

図4は、同様にネットゼロの対策のイメージを日本における一次エネルギー供給の視点で記載したものである。一次エネルギーとしては、原則、再生可能エネルギー、原子力、化石燃料+CCSのみで構成することが必要となる。ただし、再エネ、CCSについては海外資源の活用を考えることも重要で、その際、水素への転換が重要になる。再エネ由来はグリーン水素、化石燃料+CCS由来はブルー水素とも呼ばれている。また、利便性向上のため、水素をアンモニアや合成燃料に転換して、輸送、利用することも重要となり得る。ただ、CCS無しの化石燃料利用も残る可能性は高い。これを植林、BECCS、CO₂

鉱物化(コンクリートでのCO₂固定など)等でキャンセルアウトすることも必要である。しかし、量の制約のため、DACCSの活用も重要と考えられる。なお、BECCS、DACCSを含むCCSは貯留可能量により制約を受けるため、CO₂貯留サイトの確保が重要であるし、また、海外のCO₂貯留サイトの活用も視野に入れることも重要性が高い。

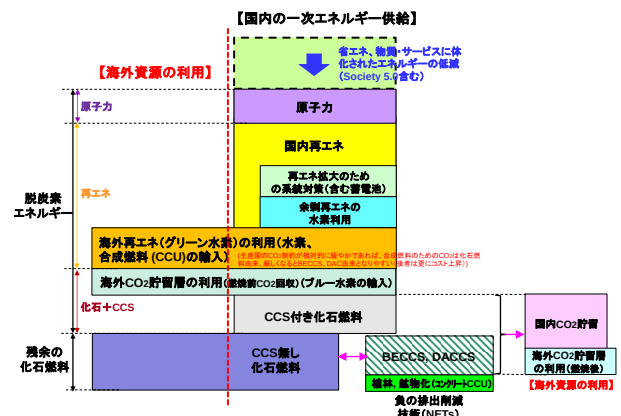


図4 日本の一次エネルギー供給量で見たネットゼロエミッションの対策のイメージ

2.3. 世界エネルギーシステム・温暖化対策評価モデルによる総合的な分析例: DACCS の役割

次に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。排出シナリオの内、2℃未満、1.5℃未満シナリオはそれぞれ2060年頃、2050年頃にCO₂排出量がネットゼロになりその後ネガティブ(ビヨンド・ゼロ)となるシナリオであり、温室効果ガス排出ではそれぞれ2100年頃、2065年頃にネットゼロとなり、その後ネガティブとなるシナリオである。1.5℃シナリオについては本モデルの想定では、DACを想定しない場合、実行可能解はなかった(表1)。

図5はモデル分析結果としての世界のCO₂回収と貯留・利用のバランスを示している(分析の詳細は文献3)を参照)。DACのコストを高位(現状技術水準維持)と想定したシナリオでも、余剰再エネの活用により投入エネルギーの費用が低減するため、カーボンニュートラルを目指す上で2050年頃には費用効率的なオプションと評価される。コスト低位シナリオでは、更に大規模な利用

が見られる。DACCS によって負排出とできる分、CCS 無しの化石燃料も適切な水準で利用可能となる。DAC の技術開発余地はまだ大きく残っているが、全体として費用効率的なカーボンニュートラルの達成に寄与し、更にビヨンド・ゼロ達成も視野に入る。

表 1 DAC 関連のモデル分析の想定シナリオ

	排出シナリオ	DAC 想定	実行可能解
2°C(DAC 無)	2°C未満 (>66%)	無	○
2°C(DAC 有, コスト高位)		コスト高位	○
2°C(DAC 有, コスト低位)		コスト低位	○
1.5°C(DAC 無)	2100 年 1.5°C未満 (>66%)、 気温オーバー シュート有	無	×
1.5°C(DAC 有, コスト高位)		コスト高位	○
1.5°C(DAC 有, コスト低位)		コスト低位	○

注)DAC の想定は文献 4)を参考にした。必要エネルギーは2050年時点でコスト高位の場合 5.5~7.2 GJ/tCO₂、低位の場合 4.7 GJ/tCO₂を想定

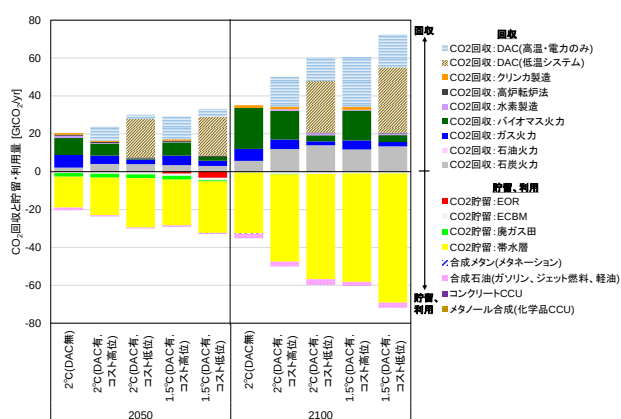


図 5 世界の CO₂ 回収と貯留・利用のバランス

3. 技術紹介

3.1. DAC

近年、大気中からの CO₂ 回収技術(DAC: Direct Air Capture)が実現可能性のある気候変動緩和技術のオプションとして提唱されて以来、本コンセプトが注目を浴びている。Energy Technology Perspectives 2020 では、持続可能開発シナリオの達成にむけて、BECCS(Bio-energy with CCS)と DACCS(Direct Air CO₂ Capture and Storage)等により 2070 年に 3Gt のネガティブ・エミッションに貢献、あ

るいは 5 百万バレル/d のクリーンな航空燃料を生産するために使用されると位置づけている。

DAC は Storage と組み合わせた DACCS としてネガティブエミッション技術と成り得るが、DAC で回収した CO₂ を有効利用する技術も検討されている。従来型の化学製品や燃料としての利用は CO₂ の排出削減、CO₂ 有効利用に寄与し得るが、大気中からの CO₂ 除去効果は小さい。

また、DAC はエネルギー消費量が多くコストも高いと考えられているが、BECCS や植林・再植林よりも土地面積と水使用量は少なく済むため、食糧生産との土地競合の問題や生物多様性への悪影響を抑制できる可能性がある。

表 2 海外における DAC 技術の開発状況⁵⁾

会社名	材料	CO ₂ 分離回収エネルギー・コスト	備考
Climeworks (スイス)	アミン修飾フィルター(固体吸収材でフィルターは樹脂)	9.0GJ/t-CO ₂ (熱) 450kWh/t-CO ₂ (電力) 600\$/t-CO ₂ (2025年項目 標コスト100\$/t-CO ₂)	世界初の商用プラント(900t-CO ₂ /year)を発表、これまでに8か所に導入済み。エネルギーとコストが高い。
Carbon Engineering (Canada)	KOH/Ca(OH) ₂ を含む水溶液	5.3 GJ/t-CO ₂ (熱) 366 kWh/t-CO ₂ (電力) 94-232\$/t-CO ₂	Occidental Petroleum社と50万t-CO ₂ /yのDACプラント2基を2022年に稼働予定。唯一アルカリ水溶液を使用し、エネルギー・コスト削減余地がない。
Global Thermostat (USA)	アミン含有セラミックス(固体吸収材)	4.4 GJ/t-CO ₂ (熱) 160 kWh/t-CO ₂ (電力) 150\$/t-CO ₂ (将来達成可能なコスト: 50\$/t-CO ₂)	ジョージア工科大と協力、これまでに6基の導入実績。消費エネルギーの低減が課題。4,000t-CO ₂ /yearのパイロット設備を建設。
Center for Negative Carbon Emissions, Arizona State Univ. (USA)	イオン交換樹脂(アミン系)	220\$/t-CO ₂ (将来達成可能なコスト: 30\$/t-CO ₂)	除湿・加湿のスイングで吸脱着、Artificial treeを高速道路沿いに設置を提案
The VTT Technical Research Centre (Finland)	イオン交換樹脂(アミン系)	8.9GJ/t-CO ₂	Day/night capture cycle方式で、1~2kg-CO ₂ /day

表 2 に示すように、米国や北欧でアミン系固体吸収材を用いたシステムの研究が行われているが、現状では高コストであり、今後の普及のためには回収エネルギー・コストともに大幅に低減する必要がある。コスト低減(特にコンタクター部分)と吸収材の加熱再生エネルギーの低減(廃熱利用等含め)が課題である。また、DAC はまだ発展途上ということもあり、試算されるコストの幅が広い(\$ 100~600/t-CO₂)、今後精査が必要である。

大気中からの CO₂ 分離回収は、通常の天然ガスや石炭等の燃焼後排ガスから CO₂ 分離回収する場合と比べ、CO₂ 濃度は 400ppm 程度と 2~3 桁低いと、その分回収コストも高価になることが予想される。1ton の CO₂ を含む空気量はおよそ 127 万 m³ であり、CO₂ 回

収率が 100%であったとしても、東京ドーム(容積: 124 万 m^3)に相当する空気を処理しなければならない。

DAC を現実的なものとするためには、これまでにない高性能な CO_2 分離材料の開発と大量の空気を効率よく吸脱着できるプロセスを構築する必要がある。 CO_2 分離材料については、RITE がこれまで取り組んできた固体吸収材や有人宇宙活動用の CO_2 吸着剤の研究経験で培ってきたアミン系化合物を中心とする材料設計の知見を活かし、回収コストを低減できる優れた材料開発を目指している。一方、 CO_2 分離回収プロセスについては、民間企業、大学の協力を得て、高効率な DAC システムの開発を目指している(図 6)。

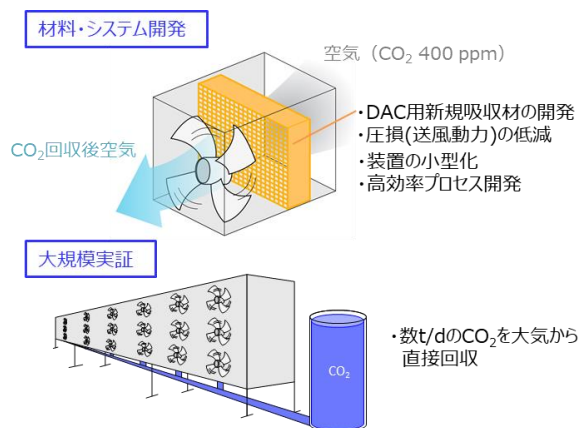


図 6 大気中からの CO_2 回収技術開発

本提案では我々は日本の最先端技術を駆使し、トン単位(1 日あたり)の CO_2 を効率的に回収するDAC (Direct Air Capture)装置を製造し、会場で設置・実働させることを考えている。

3.2. CO_2 の地中貯留

地中への CO_2 圧入・貯留については、油層に CO_2 を圧入して石油の増進回収を行う EOR (Enhanced Oil Recovery)、炭層に CO_2 を圧入してメタンを回収する ECBM (Enhanced Coal Bed Methane)、塩水性帯水層への貯留などがある。

CO_2 を地中貯留する場合の地質構造として「貯留層」と「遮蔽層」が必要である。「貯留層」としては、多孔質砂岩のような堆積層が適しており、浸透性の大きい帯水層

がそれに相当する。

帯水層貯留とは、地下 800m 以深の砂岩層を対象とした貯留方法である。砂岩層は砂粒が堆積してできる地層で、砂粒の隙間には地下水利用されない塩水が留まっている。図 7 に帯水層貯留のイメージ図を示す。地上から掘削した坑井から、 CO_2 は砂岩層に圧入され、塩水を押しのけて隙間に溜まり、一部は塩水に溶解して貯留される。砂岩層上部にガスや液体をほとんど通さないシール性の高い泥質岩が存在する場所では、 CO_2 を長期に安定して貯留することが可能である。

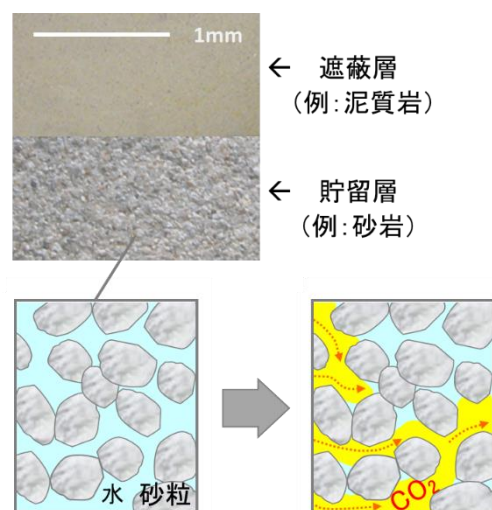


図 7 CO_2 地中貯留の模式図

図 8 に CO_2 貯留サイトの概観を示す。 CO_2 の発生源から CO_2 を分離・回収し、地上施設から直下に貯留、地上施設から海底下に貯留、あるいは海上施設から海底下に貯留する。

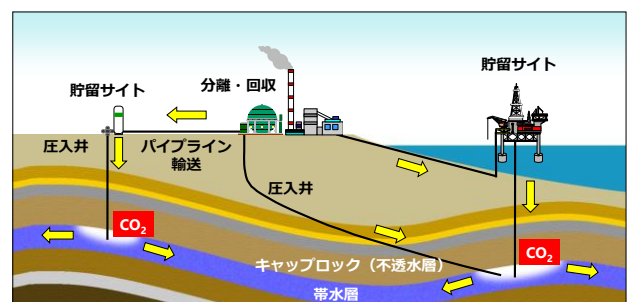


図 8 CO_2 地中貯留サイトの概観

前章で述べたように CO_2 地中貯留は、回収した CO_2

を隔離する方策として重要な選択肢のひとつである。

地球温暖化を抑制するレベルの CO₂ 分離・回収をして、それを地中貯留するには、多数の CO₂ 圧入井が必要であるが、全世界で今までに掘削された石油生産井の数に比べればごくわずかである。CO₂ 地中貯留が本格的に活用され、地球温暖化対策のひとつになることが期待される。このような CO₂ 地中貯留について広く皆様に知ってもらうため、大阪・関西万博で紹介することは意義深いといえる。

本提案では会場内で地中貯留を行う。貯留量自体は会期で数百トン程度と少量(苫小牧で 30 万トン/3 年の実績)ではあるが、大阪という大都市での貯留は世界に類を見ない画期的な試みであり大きな意味がある。

3.3. その他

3.3.1. メタネーション

メタネーションとは CO₂ と水素からメタンを合成する技術である。合成にエネルギーを要するが、水素と異なり、既存の都市ガスインフラを活用できる利点が大きく、注目されている。

技術自体は 1911 年にフランスの化学者サバティエが発見した既存技術であり、日本国内においては 2019 年に NEDO の CO₂ 有効利用技術開発事業のプロジェクトにおいて、国際石油開発帝石と日立造船がメタン合成能力 8Nm³/h の試験設備を完成させ、連続運転などの実証試験を実施した。一方、都市ガスとして活用された事例はなく、転換効率・経済性の向上とスケールアップが課題とされている。合成には CO₂ の 4 倍量の水素が必要であるが、水素を再生可能エネルギーの余剰電力から製造すれば、合成メタンを利用することで化石燃料としての天然ガス使用量が削減でき、脱炭素化に貢献する。また、実質カーボンゼロに向けて大量の再生可能エネルギー電源が導入された場合、大量の余剰電力の貯蔵が課題とされているが、メタネーションはその貯蔵技術や電力系統の安定化としても期待されている。

水素をメタンに変換する理由は、水素は貯蔵、輸送、利用において新たな設備投資や設備技術の開発が必要なのに対し、メタンは天然ガスとほぼ同じ成分であり、

ガスのパイプラインに接続すれば新たな設備を建設することなく利用が可能といった点である。また、1 次エネルギーの熱利用に対する低位炭素化の観点から、エネルギーキャリアとしてのメタンはその可能性が注目されている。

脱炭素化への動きが進む欧州では、Audi がメタン合成能力 315Nm³/h の世界最大の実証プラントを稼働しており、再生可能エネルギーが大量に市場に出た際に市場価格が下がると想定し、再生可能エネルギー由来の電力と、バイオガスから分離した CO₂ からメタネーションしている。また、2060 年に CO₂ 排出量実質ゼロを目指すとする中国において、2020 年 12 月に日立造船がメタネーション技術の事業実証検討することを公表し、社会実装に向けてサプライチェーンや事業採算性等を評価する計画である。

本提案では前節の DAC 装置からの CO₂ を活用したメタネーション装置を会場内で設置し、迎賓館厨房等へ都市ガスとして供給することを考えている。

3.3.2. メタノール合成

メタノールは、エチレンやプロピレンといった低級オレフィンを製造する原料として広く使用されているほか、合成樹脂や接着剤、薬品、塗料など化学品の基礎原料である。世界で年間約 8,000 万トンの需要があり、現在は、化石資源である天然ガスや液化石油ガス、石炭を主原料に、高温高压下で複数の製造工程を経て生産されている。

このメタノールを化石資源を原料に得るのではなく、石炭燃焼発電所や高炉等の燃焼排ガスや大気から分離・回収して得られる CO₂ と再生可能エネルギー由来の水素を原料として合成することで、温室効果ガス排出量の削減と同時に、メタノールという有用な工業製品の生産が可能となる。

この分離・回収により得た CO₂ と再生可能エネルギー由来の水素から得られたメタノールは、その後、メタクリル酸と反応させる事で、アクリル樹脂(PMMA)を合成することができる。アクリル樹脂は、高い透明性・耐衝撃性があり、加工や着色も容易なことから、建築や乗り物

の窓材、照明器具のカバー、看板等さまざまな用途に利用されている。

本提案では、会場でこのアクリル樹脂を用いた展示品や記念品、さらには大気中の CO₂ を分離・回収する装置として博覧会場で展示する DAC (Direct Air Capture) 装置の周囲を囲う透明ボードなどに用いる事で、炭素循環社会実現の一例として示したいと考えている (図 9)。

メタノール合成

万博会場の CO₂ 由来のメタノールを利用し、アクリル樹脂を製造し、食器、照明、記念品に活用

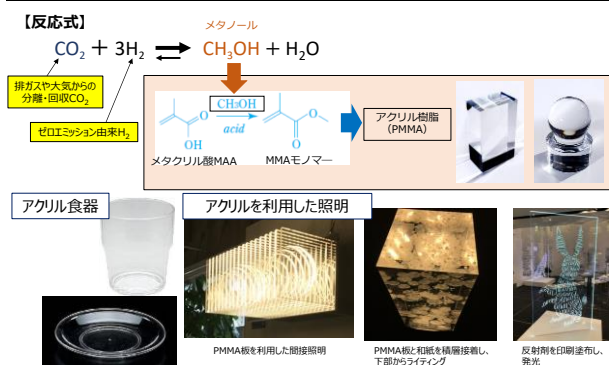


図 9 メタノールの万博での活用

3.3.3. 植物工場

将来的に世界規模で CO₂ を利用するものとして植物工場がある。植物工場には人工光型植物工場と太陽光型植物工場があるが、人工光型植物工場 (図 10) は光源に人工光を用い、空調と養液栽培を導入し、植物生育に必要な環境要素 (光、温度、湿度、CO₂ ガス濃度、気流) を制御し、周年安定的に高品質の植物を栽培している⁶⁾。

例えば実用化されているリーフレタス (1 株 100g) では 3000 株生産するためには CO₂ 22kg の追加が必要となっており、生産性に大きく寄与している⁶⁾。また、イチゴの生産に向けて研究開発が進められているなどさらなる発展が期待できる。

本提案では、会場内 DAC で回収した CO₂ を利用し、実用化されている最新の野菜を生産する小型工場を設置し、その野菜を迎賓館等の厨房に供給することにより、カーボンリサイクル、植物工場の最新技術をアピールする。



図 10 人工光型植物工場例
(Techno Farm HP より)

4. おわりに

以上のような技術を用いて我々は 2025 年の大阪・関西万博において、ビヨンド・ゼロを展示だけではなく、会場内・開催期間で先駆的に達成するシステムの提案を行っている。

この提案はすでに 2020 年 9 月 24 日に弊機構が主催するシンポジウム (未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西) で概要を発信し、化学工業日報紙にも 10 月 14 日付で記事として取り上げていただいている。

一方で 2020 年 12 月 21 日に閣議決定された大阪・関西万博の基本方針においては 12 項目の基本的な考え方の第三項目にカーボンニュートラルを目指す上での大阪・関西万博の形として以下の記載がある。

『日本は 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指し、ネガティブエミッション技術 (Direct Air Carbon Capture and Storage)、次世代型太陽電池やカーボンリサイクルをはじめとした、革新的なイノベーションの実用化を見据えた研究開発を促進していくことで地球温暖化対策を進めていくこととしている。『未来社会の実験場』である会場では、過去の

ストックベースでの二酸化炭素の削減(ビヨンド・ゼロ)を可能とする日本の革新的な技術を通して世界に向けて脱炭素社会の在り方を示していく。』

またその基本方針概要の2ページにも重要な位置づけとして『カーボンニュートラルを目指す上での大阪・関西万博での形』が紹介されている(図 11 参照)。



図 11 万博基本方針概要(2ページ)

我々はこの基本方針の実現に向けて、本提案を更に精査・具体化に尽力していく。

参考文献

- 1) IPCC 1.5℃特別報告書(2018)
- 2) IPCC WG3 第5次評価報告書(2014)
- 3) 佐野 他、第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2021)
- 4) M. Fasihi et al., J. Cleaner Prod. (2019)
- 5) ICEF「Direct Air Capture of Carbon Dioxide」他、各社公表資料より作成
- 6) 一般社団法人日本植物工場産業協会 HP

企画調査グループ

グループメンバー(2020 年 12 月末)

グループリーダー・主席研究員	柳生 勇	調査役	金星 春夫
サブリーダー・主席研究員	野村 真	主幹・研究員	木原 大輔
サブリーダー	川口 圭史	主幹	倉中 聡
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	内村 泰三		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り組んでいる¹⁾。

2020 年は、我が国として、2050 年にカーボンニュートラルを目指すことが宣言されるなど、温暖化対策に関する大きな動きがあったことから、まずは、それについて概観する。

1. 我が国におけるカーボンニュートラルの動き

2020 年、温暖化対策に関する国際枠組みである「パリ協定」が、本格運用開始された。そのため、我が国は、「今世紀後半のできるだけ早期」のカーボンニュートラルに向け、2050 年「ビヨンドゼロ」技術の確立を目指し、長期戦略に掲げた目標に向けて社会実装を目指していくため、2020 年 1 月、「革新的環境イノベーション戦略」²⁾を策定している。また、「ムーンショット型研究開発事業／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」³⁾が開始され、RITE も採択されてい

る。

2020 年 10 月、第 203 回臨時国会において、菅総理が「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⁴⁾したことから、カーボンニュートラルに向けた動きが加速された。梶山経済産業大臣は、それを受け、「カーボンニュートラルへの挑戦は、日本の新たな成長戦略であり、あらゆるリソースを最大限投入し、経済と環境の好循環を生み出していく」と言及した。

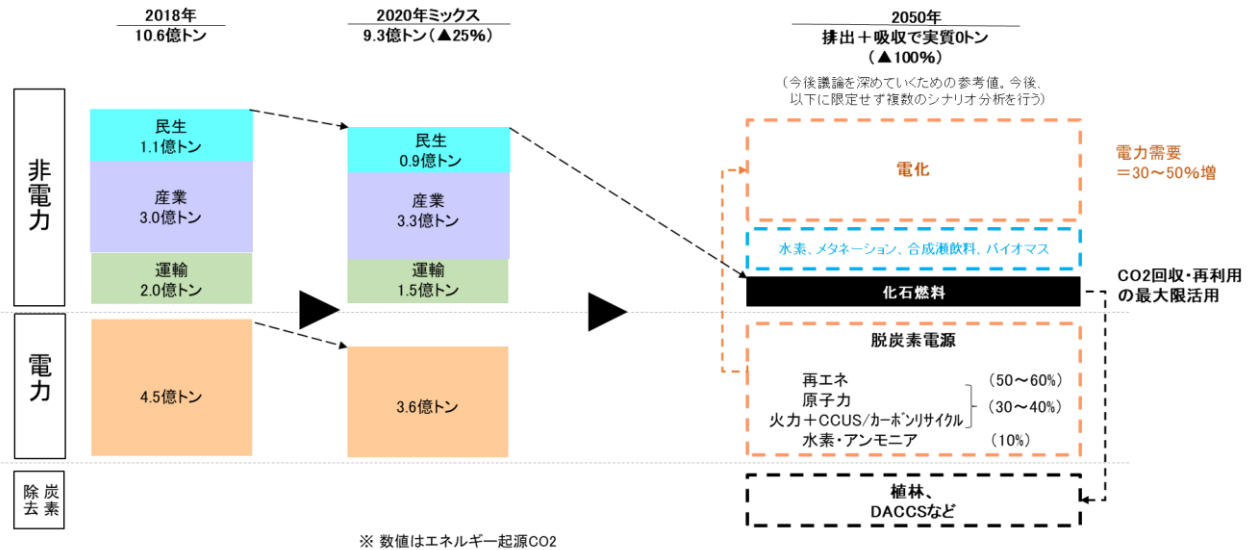
温暖化への対応を、経済成長の制約やコストとする時代から発想を転換し、積極的に対策を行うことが、産業構造や社会構造の変革をもたらしながら、次なる成長につなげていくことを目指して、「経済と環境の好循環」を作っていく産業政策として、2020 年 12 月、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」⁵⁾が策定された。

同成長戦略において、2050 年カーボンニュートラルに向けては、温室効果ガス排出の 8 割以上を占めるエネルギー分野の取組が特に重要となるため、エネルギー政策及びエネルギー需給の絵姿について議論を深めていくに当たっての参考値として示されている(図1)。

また、2050 年カーボンニュートラルを実現する上で不可欠な重点分野である 14 分野(図2)において、①年限を明確化した目標、②研究開発・実証、③規制改革・標準化などの制度整備、④国際連携、などが盛り込まれた「実行計画」が策定されている(図3)。今後、グリーン成

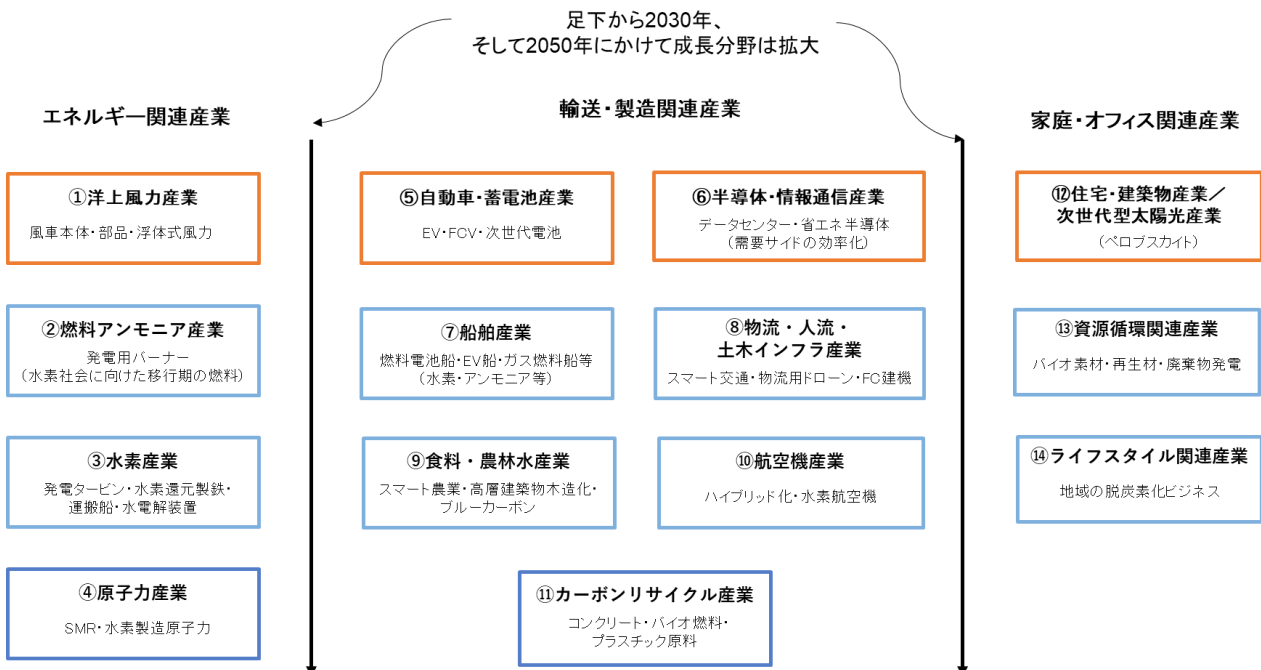
長戦略の改定に向けて、これらの分野における実行計画の着実な実施、目標や対策の更なる深堀についても検

討を深めていくことになっている。



(出典)「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(令和2年12月)

図1 カーボンニュートラルへの転換イメージ



(出典)「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(令和2年12月)

図2 重要産業の整理図

⑪カーボンリサイクル産業の
成長戦略「工程表」

●導入フェーズ：

1. 開発フェーズ

2. 実証フェーズ

3. 導入拡大・
コスト低減フェーズ

4. 自立商用フェーズ

●具体化するべき政策手法：①目標、②法制度（規制改革等）、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

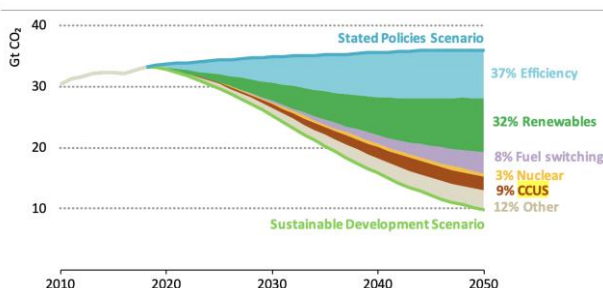
※代表事例を記載	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
●コンクリート コスト目標 2030年 30円/kg (=既製品と同等)	・大阪万博(2025年)における導入を検討 ・新技術に関する国交省データベースにCO ₂ 吸収型コンクリートを登録。地方自治体への周知拡大。 さらに、公共調達の拡大等による販路拡大、コスト低減 ・防錆性能を持つコンクリートの技術開発 ・防錆性能を持つコンクリートの実証 ・日米の産学官の関係者がCO ₂ 炭酸塩化(コンクリート化)に関する共同プロジェクトを実施 ・関係国とのカーボンリサイクル協力MOCを締結し、共同研究・実証を推進					・国際標準化や大規模な国際展示会でのPR等を行い、途上国等へも販路拡大		
●燃料 コスト目標 2030年 100円/L (=既製品と同等)	・2030年頃の商用化に向けた大規模実証、コスト低減 ・国際航空に関し、ICAOにより、2019年比でCO ₂ 排出量を増加させないことが制度化(2021～2035年) (※ICAO:国際民間航空機関) ・CO ₂ 吸収効率の向上や藻の安定的な増殖による生産性向上、品質改良の技術開発を継続					・バイオジェット燃料の国際市場の動向に応じて、航空機へ競争力のある藻類ジェット燃料の供給拡大		
藻類の培養による バイオ燃料								
●化学品 コスト目標 50年100円/kg (=既製品と同等) 〔人工合成〕	・大規模実証に必要な生産性の高い光触媒の開発 ・関連規制の緩和、保安・安全基準を制定					・大規模実証 ・補助金等によるコスト低減・導入支援		
●分離回収 コスト目標 (/CO ₂ t) 低圧ガス: 30年2千円台 高圧ガス: 30年千円台 DAC: 50年2千円台 目標規模 50年 世界で約25億 CO ₂ t	○排ガス由来 ・高効率なCO ₂ 分離回収技術を開発し、コスト低減 ・大規模実証 ○大気由来(DAC) ・ムーンショット型研究開発制度等を活用した、大気からのCO ₂ 直接回収(DAC)技術の研究開発 (エネルギー効率向上、コスト低減)					・更なるコスト低減による導入拡大 ・実証による更なる低コスト化 ・さらなる低コスト化・補助金等による導入拡大		

出典)「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(令和2年12月)

図3 分野毎の「実行計画」の工程表の例

2. 調査研究活動

CCSは、IEAのWorld Energy Outlook 2019⁶⁾において、2050年までの世界の累積CO₂削減量の9%をCCUSが担うことになっているなど、大いに期待されている(図4)。

図4 CCUSによるCO₂削減
(IEA 持続成長可能シナリオ)

経済産業省から、地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費として、「我が国のCCS導入のあり方に係る調査事業」⁷⁾を受託して実施したことから、結果概要について取りまとめる。

2.1. 世界各国のCCS大規模商用プロジェクト

GCCSI(Global CCS Institute)⁸⁾が整理する各国で建設中及び運用中の大規模商用プロジェクトについて、2020年6月時点において、運用中が21件、建設中が4件となっている(図5)。なお、大規模とは、凡そ年間40万トン程度以上のCO₂を回収・貯留すると定義されている(※GCCSIでは現在のこの基準を見直し、「商用運転」か否かで分類している)。

これら大規模のプロジェクトの多くは、回収したCO₂をEOR(石油増進回収)に利用している。また、CO₂排

出源は、CO₂ 回収が生産プロセスの一部となっている天然ガス精製あるいは肥料、水素製造等が多くを占めている。これらの運用中のプロジェクトにより、年間約

3700 万トンの CO₂ が恒久的に地下に貯留されたことになる。さらに、建設中のプロジェクトも加味すると、年間約 4,000 万トンの貯留量が見込まれる。

実施段階	地域	プロジェクト名	回収方式	貯留方式	運用開始	回収量
運用段階	米国	Terrell Natural Gas Processing Plant	天然ガス精製	EOR	1972	40～50万
		Enid Fertilizer	工業的分離(化学肥料)	EOR	1982	70万
		Shute Creek Gas Processing Plant	天然ガス精製	EOR	1986	700万
		Century Plant	天然ガス精製	EOR	2010	840万
		Air Products Steam Methane Reformer	工業的分離(水素製造)	EOR	2013	100万
		Coffeyville Gasification Plant	工業的分離(化学肥料)	EOR	2013	100万
		Lost Cabin Gas Plant	天然ガス精製	EOR	2013	70万
		Illinois Industrial Carbon Capture and Sequestration	工業的分離(エタノール)	陸域帯水層	2017	100万
		Petra Nova Carbon Capture	燃焼後(石炭火力発電)	EOR	2017	140万
	カナダ	Great Plains Synfuels Plant and Weyburn Midale	工業的分離(合成ガス)	EOR	2000	300万
		Boundary Dam Carbon Capture and Storage	燃焼後(石炭火力発電)	EOR	2014	100万
		Quest	工業的分離(水素製造)	陸域帯水層	2015	100万
		Alberta Carbon Trunk Line with Agrium CO ₂ Stream	工業的分離(化学肥料)	EOR	2020.6	30万
		Alberta Carbon Trunk Line with North West Sturgeon Refinery	石油精製	EOR	2020.6	160万
	ブラジル	Petrobras Lula Oil Field	天然ガス精製	EOR	2013	100万
	ノルウェー	Sleipner CO ₂ Storage	天然ガス精製	海底下帯水層	1996	100万
		Snøhvit CO ₂ Storage	天然ガス精製	海底下帯水層	2008	70万
	サウジアラビア	Uthmaniyah CO ₂ -EOR	天然ガス精製	EOR	2015	80万
	アラブ首長国	Abu Dhabi CCS	工業的分離(鉄鋼)	EOR	2016	80万
	中国	CNPC Jilin Oil Field CO ₂ EOR	天然ガス精製	EOR	2018	60万
	豪州	Gorgon CO ₂ Injection Project	天然ガス精製	陸域帯水層	2019	340～400万
21 件の大規模 CCS プロジェクト (CO ₂ 回収量(tCO ₂ /年))					3,680～3,750万	
建設段階	中国	Yanchang Integrated Carbon Capture and Storage	工業的分離(化学肥料)	EOR	2020～2021	41万
		Sinopec Qilu Petrochemical CCS	工業的分離(化学肥料)	EOR	2020	40万
	米国	The ZEROS Project	酸素燃焼(廃棄物発電)	EOR	2020	150万
	ノルウェー	Langskip CCS - Brevik Norcem	工業的分離(セメント工場)	海底下帯水層	2024	40万

図 5 世界の大規模 CCS プロジェクトの状況

2.2. 課題の整理および今後の対応

世界で運用中の大規模 CCS プロジェクト(21 件)において、プロジェクトの実施主体は、中国およびサウジアラビアが国有企業であることを除けば、全て民間事業者である。これらの CCS プロジェクトが成立している要件

は幾つかあるが、次のように纏められる。まず、既存工程で CO₂ を分離・回収している場合には、CCS を行うにあたり必要となる追加コストは、輸送、圧入に係る工程への投資のみであり、比較的低コストで実施可能である。EOR が可能な場合は、EOR による収益および天然

ガス生産による収益が確保できること、あるいは、補助金、税額控除などのインセンティブ施策が十分である場合も CCS プロジェクトは経済的に成立する。つまり、低コストで実施可能であるケース、および EOR のような収益が得られるケースについては、最初は着手しやすい事例(Low-hanging fruits)からスタートしていると言える。

また、海外で構築されている CCS 導入のための制度の枠組みは、民間事業者が実施することを前提として、各種施策(補助金、税制優遇、債務保証、差額決済契約等)と共に、圧入後の長期的責任についての制度整備や政府移管など、ビジネスモデルを構築するための環境整備を行っている。

なお、CO₂ の大量輸送については、パイプライン輸送と船輸送が考えられるが、船輸送については、液化設備の最適化などの技術開発要素が残っている。さらに、将来大規模化によるコスト低減が期待できることから、早い時期での検証が望ましい。

また、将来の CO₂ 圧入量 1 億トン／年のためには、大規模貯留地の確保が必要であり、現在、日本 CCS 調査(株)による適地調査事業が行われている。これまでの調査の結果から、3D 探査実施エリアで約 70 億トン、2D 探査実施エリアで約 460 億トン(精査 30 億トン、概査 430 億トン)と評価され、圧入性能等の不確実性は残るものの、日本における CCS 候補地点の貯留可能量は、十分であると評価されている。ただし、貯留適地選定のためには調査井掘削による圧入性能等の貯留層評価、さらに、排出源も含めた CCS 全体の経済性評価、安全性評価が必須となってくる。

CCS を推進していくには、最初は着手しやすい事例から始め、コスト低減を達成しつつ、CCS 事業化を随時本格化させていくシナリオは、現時点において、最も合理的な政策といえる。

その実現に向け、官民協力して実現性の高いロードマップの策定に早急に着手すると共に、具体的な進め方を示したアクションプランを作成し、それを官民で共有することが重要である。

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、推薦で選ばれた専門家が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 6)。IPCC では、2018 年から 2019 年にかけて「1.5 度特別報告書」、「土地関係特別報告書」、「海洋・雪氷圏特別報告書」をそれぞれ公表し、さらに、2022 年の完成を目指して「第 6 次評価報告書」の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。

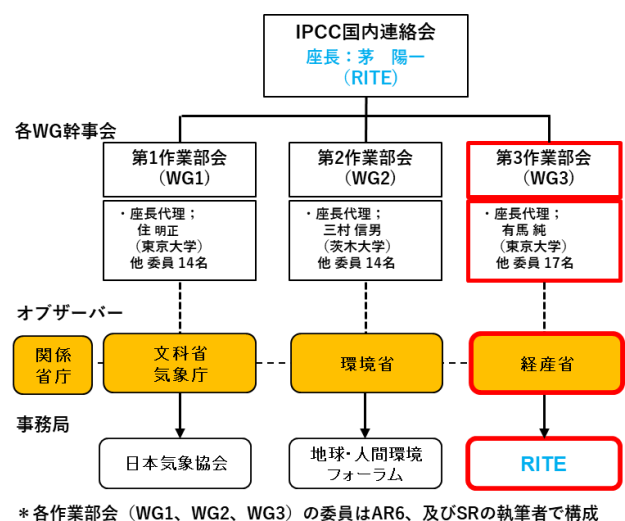


図 6 IPCC 国内連絡会と RITE

3.2. ISO(国際標準機関)

ISOは、各国の165標準化団体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7)。

2020年12月時点で、ISO/TC265からCCS分野に係る規格類は9件出版されており、また6件を開発中である。開発中規格のうち、回収分野および貯留分野の計2件は日本主導で開発を進めている。

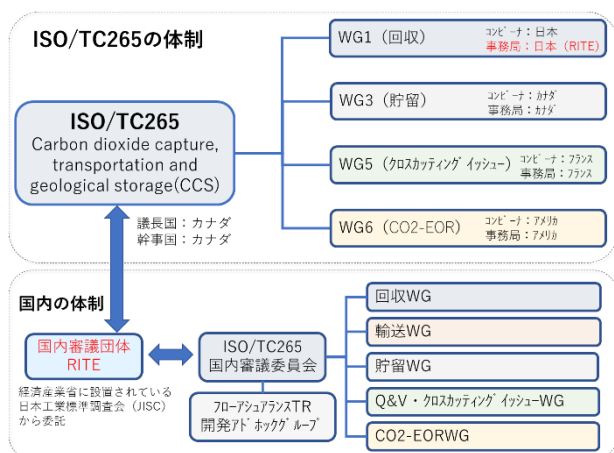


図7 ISO/TC265の各ワーキングと国内支援体制とRITE

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8)。

ただ2020年は新型コロナウイルスの影響で1,2月の37人に留まった(2019年は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。

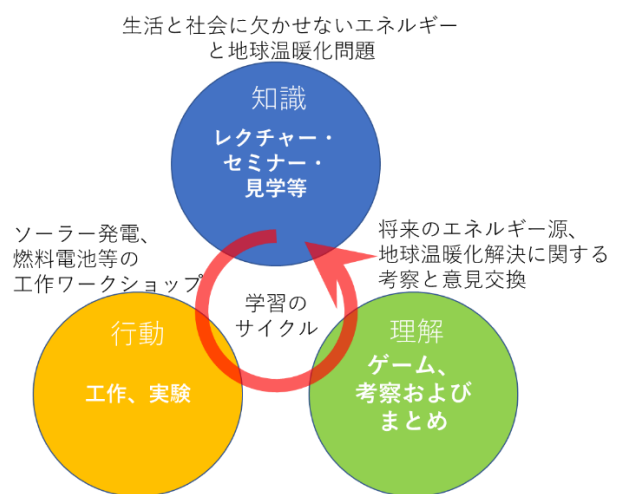


図8 RITEにおける人材育成(小中高校生)

<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9)。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。

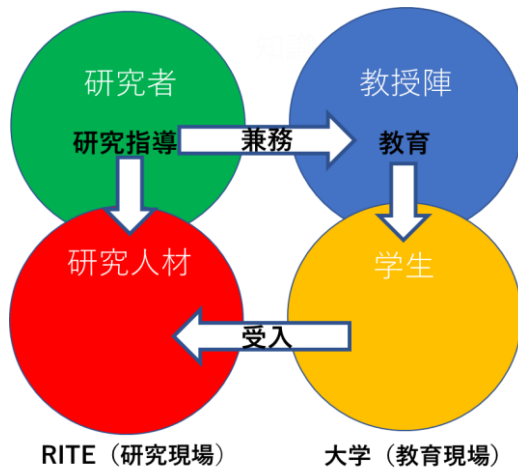


図9 RITEにおける人材育成(大学・大学院生)

4.2. 知財と産学連携

RITE は、研究開発、調査研究等で得られた成果について、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。

2020 年末時点で、RITE が保有する特許は、国内権利 106 件(うち企業にライセンス中 11 件)、外国権利 49 件(同、13 件)である。

発明の認定、国内および外国への特許出願、審査請求、特許権維持等といった組織的知財経営を推進するため、RITE では「特許等審議委員会」を設置し、知財専門家を配した広報・産業連携チームによる運営を行なっている(図 10)。

学術研究全般の発展のため、早い段階での論文等発表により、世界の公共財産としての知識を高めることに加え、研究者の発明を特許により権利化し、チャレンジ意欲ある企業等を実施権を与えて産業化を加速するなど研究機関として公益と産業化によるイノベーションについて、バランスを取りながら研究開発推進が可能となる。

さらに知財化は、企業等との連携機会を産み、適切な情報管理と契約に基づき、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。また、国際標準(本章 3.2 など)との連携など、標準を支えるために関連技術を利用可能とするための知財化という側面も期待されている。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。

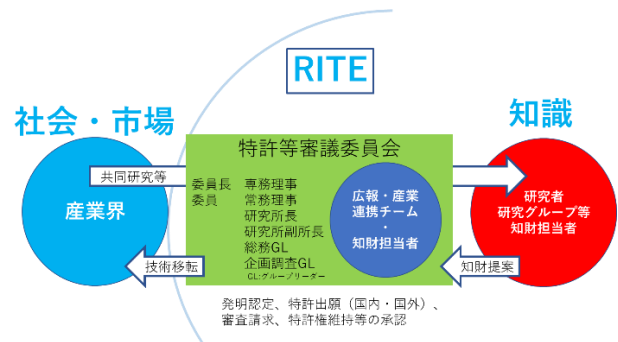


図10 知財戦略と産学連携の推進

5. おわりに

2020 年は、我が国において、「2050 年カーボンニュートラル」が宣言されたが、RITE が、「地球環境と経済の両立」を使命として設立されてから、30 周年となる節目の年である。

2050 年にカーボンニュートラルを目指すためには、「革新的環境イノベーション戦略」で示された革新的技術確立することが必要になり、RITE が長年技術開発を実施してきた CO₂ の分離回収技術の開発・実証が不可欠であることから、RITE への期待が、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) 革新的環境イノベーション戦略
(<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/kankyousenryaku2020.pdf>)
- 3) ムーンショット型研究開発制度
(<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/project.html#a4>)
- 4) 第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説
(https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html)
- 5) 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
(<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryakukaigi/dai6/>)
- 6) IEA, World Energy Outlook (2019)
(<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>)
- 7) 令和元年度地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費として、「我が国の CCS 導入のあり方に係る調査事業」
(https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000145.pdf)
- 8) GCCSI(Global CCS Institute)
(<https://www.globalccsinstitute.com/>)

システム研究グループ

グループメンバー(2020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	林 礼美
主席研究員	友田 利正	主任研究員	伏見 温子
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	榎田 仁次
主任研究員	本間 隆嗣	研究助手	山本 清美
主任研究員	佐野 史典	研究助手	斎藤 美三子
主任研究員	小田 潤一郎	研究助手	北村 喜代美
主任研究員	山川 浩延	研究助手	工藤 幸子
主任研究員	金星 春夫 (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、脱炭素化に向けた対応戦略について、システム的な分析等の研究成果を紹介する。

1. カーボンニュートラル実現に向けた CCU の役割

本号 RITE Today のビヨンド EXPO 記事において、カーボンニュートラル実現の対策の方向性について記載するとともに、負排出を実現する、大気中 CO₂ 直接回収・貯留(DACCS)の役割について紹介した。ここでは、カーボンニュートラル実現における CO₂ 回収・利用(CCU)の役割について、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+による分析を含め紹介する。

1.1. CCU の概要と留意点

CCU には、石油増進回収(CO₂ を地中に圧入し石油を増進回収する)など CO₂ 地中貯留の1つとしての CO₂ 利用の他、燃料利用、化学品利用、鉱物化の促進などがある。なお、CO₂ は、エネルギー準位が低く安定的である。エネルギーや化学品利用する場合には、水素等の合成によってエネルギーを追加する必要がある。一方、セメントにおける鉱物化の促進などにおいては、その反応において水素等のエネルギー投入は不要である。

例えば、燃料利用の場合は、その効果について注意が

必要である。合成に用いた CO₂ は燃焼時に再び放出されるため、CO₂ の回収には排出削減効果はない。CO₂ はあくまで水素の利便性を高めるため、水素輸送を媒介する役目となる。あくまでカーボンフリー水素エネルギーによる、化石エネルギーの代替効果によって、CO₂ が削減されることとなる。ただ、その代替効果の CO₂ 排出削減効果は、合成に利用された CO₂ 量と同値となる。

また、合成燃料に用いる CO₂ は、どこから回収された CO₂ であっても原理的には差異がなく、化石燃料燃焼に伴って排出される CO₂ を回収して利用しても差異はない。ただし、化石燃料燃焼 CO₂ 回収の場合は、別途、化石燃料燃焼は行われるため、グロスでの排出ゼロは実現できない。そして、ネットでゼロ排出を実現するには、その化石燃料燃焼による CO₂ 排出をキャンセルするために、別途、負排出技術(NETs)が世界のどこかで行われる必要がある。よって、合成燃料用の CO₂ は DAC もしくはバイオエネルギーからの CO₂ 排出回収に限定する必要があるとの指摘もある。しかし、原理的に差異がないので、全体システムにおける経済合理性の中で評価する必要がある。CCU の評価は難しく、過大、過小の両方の評価が見受けられ、実態を踏まえつつ、全体システムでの、より良い評価を試みるのが重要である。

1.2. 世界モデルによる合成燃料(CCU の代表例)の役割の評価

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 年までの期間を分析できる。ここでは、特にシステムの分析が重要と考えられる合成燃料について分析結果を紹介する。合成メタン、合成石油の詳細な評価は、それぞれ参考文献 1)、2)を参照されたい。参考文献 1)では、各国間の排出削減目標の限界削減費用に差異が大きい場合、限界削減費用が相対的に小さい国でメタネーション製造を行い、相対的に高い国に合成メタンを輸出して利用することが経済合理的な対応となるため、特に合成メタンの経済性が大きくなりやすいことを示している。ここでは、世界の限界削減費用が均等化する、合成燃料にはやや保守的な結果となりやすいシナリオについて分析した結果のみを示す。

表1はモデル分析の想定シナリオである。

図1に合成燃料のエネルギー源となる水素の製造、利用について示す。太陽光発電のコスト低減が標準的な場合(2DS_1 シナリオ)、石炭・褐炭+CCS からの水素製造(ブルー水素)が、コスト低位の場合(2DS_1 以外のシナリオ)は、太陽光からの水素製造(グリーン水素)が主たる製造方法となっている。利用については、発電、鉄鋼部門における水素直接還元製鉄、運輸部門での利用など、水素の直接的な利用も多く見られるが、合成メタン、合成石油といった回収 CO₂ を用いた合成燃料利用も経済合理的な対策と評価される。図2には、世界の合成燃料の CO₂ 利用量を示す。この量は、合成燃料(カーボンフリー水素)利用による、化石燃料代替による CO₂ 削減効果とも合致する。なお、合成燃料用に利用される CO₂ は、DAC を想定した 1.5℃シナリオでも、DAC やバイオマス燃焼からの CO₂ 回収に限定されず、化石燃料燃焼の回収 CO₂ が主に利用される結果となっている。

表1 モデル分析のシナリオ

シナリオ名	世界排出シナリオ	【供給側】再エネコスト(太陽光発電コスト)	【需要側】シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	【負排出技術】大気 CO ₂ 直接回収技術(DAC)
2DS_1	2℃未満(>50%): IEA ETP2017の[2DS]相当	標準	想定せず	想定せず
2DS_2				
2DS_3				
B2DS_2	2℃未満(>66%): IEA ETP2017の[B2DS]相当	低コスト(中東・北アフリカ中心に)	シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	想定せず
B2DS_3				
B1.5D_3_DAC	2100年1.5℃未満(>66%): 気温のオーバーシュート有	低コスト(中東・北アフリカ中心に)	シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	DAC実現(コスト低位)【DAC想定無しの場合、1.5℃は実行可能解無し】

注)①太陽光発電コストについては、標準シナリオで 2050 年に 60\$/MWh 以下が太陽光発電の世界全体のポテンシャルの 6%程度、60~80\$/MWh が 24%程度。コスト低減シナリオでは、30\$/MWh 以下が全ポテンシャルの 15%程度、30~40\$/MWh が 14%程度のコスト分布を想定。②完全自動運転車実現シナリオでは、完全自動運転車が 2030 年以降実現すると想定し、それによって、ライドシェア、カーシェアリングが進展すると想定。③DAC の必要エネルギーは 2050 年時点で 4.7 GJ/tCO₂ を想定

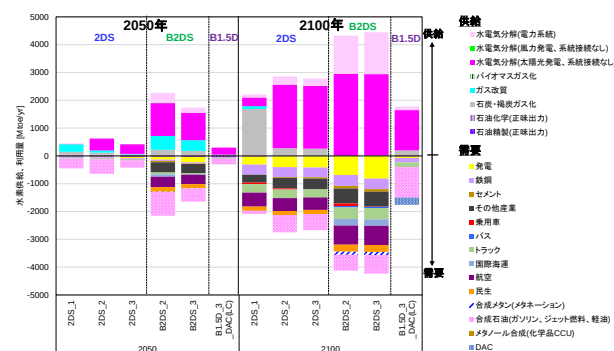


図1 世界の水素の需給バランス

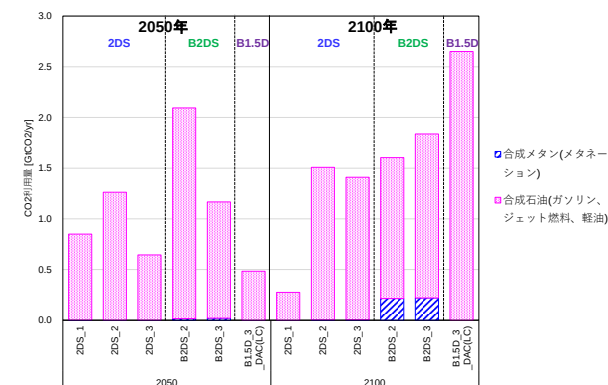


図2 世界の合成燃料 CCU 利用

合成メタンの利用は、都市ガスでの利用によって、既存インフラおよびガス機器を活用しつつ、カーボンニュートラル実現に寄与することとなる。また、合成石油についても、道路交通部門において既存インフラやハイブリッド車等を含む既存技術を活用しつつ、カーボンニュートラル実現を可能とする。また、航空、海運、産業などで、電気や水素への代替が難しい対策にも有効となる。

CCU としての合成燃料は、水素供給と一体的に評価する必要があり、評価が容易ではないが、これらのシステム分析からも、カーボンニュートラル実現の重要な1ピースとなり得ることがわかる。

2. 世界エネルギー経済モデルを用いた国境炭素調整の導入による影響分析

2.1. 国境炭素調整に関する背景

2050 年までにネットゼロ・エミッションを達成するという目標が世界各国で掲げられている。ある国・地域の温室効果ガスの削減費用負担が他の国・地域より大きくなると、当該国・地域のエネルギー多消費産業の国際競争力に影響を与えるとともに、CO₂ 排出量が他の国・地域にリークage(国内製品の海外製品による代替および生産拠点の海外移転)する可能性がある。これに対処するためのオプションの一つとして国境炭素調整(BCA: Border Carbon Adjustment)が議論されている。一般的に BCA は排出削減努力が不十分である国からの輸入品に対して国内産品と同等の負担を課す国境措置である。

2019 年 12 月に欧州委員長のフォン・デア・ライエン氏は 2050 年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロとする目標を含む「The European Green Deal」³⁾を発表した。その中で BCA に関するロードマップを示し、2020 年 7 月の欧州首脳会議で 2021 年前半に制度設計を終了し、2023 年の初頭までに導入するということが同意された。一方、BCA は世界貿易機関(WTO)ルールとの整合性や各財の炭素含有量の推計および税率の調整などの課題がある。

2.2. 分析の方法

そこで、本研究では RITE で従来から開発してきた世界エネルギー経済モデル DEARS⁴⁾を用いて BCA の影響について分析を行った。DEARS は世界全体の消費効用最大化を目的関数としたトップダウン型経済モジュール(一般均衡型)と簡略化されたボトムアップ型エネルギーシステムモジュールの統合モデルである。経済モジュールでは、非エネルギー16 産業を想定し、国際産業連

関表 GTAP に基づく産業連関構造を明示してモデル化している。貿易に関しては、輸入財と国内財の代替性を考慮したアーミントン構造を定式化している。

本研究では鉄鋼製品を事例に取り上げ、国境調整として 2 種類の関税方法を想定し、複数ケースのもとで経済影響および CO₂ 排出量を示す。

① BCA 関税

一般的に BCA 関税は、輸入品に対して、その生産国の当該製品に体化された CO₂ 重量の平均値に応じて税率が決定される。この場合、同一製品内の異質性は考慮されていない。

② CSTR (Cooperative Sectoral Tariff Reduction) 関税

CSTR 関税とは、より CO₂ の排出低減を促すため、同一製品内の異質性を考慮して、製品の原単位に基づいて税率を決定するものである(参考文献 5 を参照)。ただし、各国内の鉄鋼生産のエネルギー原単位の分布を推計することは相当な困難が伴うため、本分析では仮想的に以下の通り想定した。鉄鋼製品を、エネルギー原単位に対応した 3 種類の仮想的な製品グループ(世界共通)に分類し、原単位に関して、Good (0.10[GJ/\$]), Middle (0.80), Poor (1.50)を想定した(以下、Good, Mid., Poor と記す)。その上で、国・地域毎の平均原単位に合致するようにそれぞれのグループに属する比率を想定した。

輸入財と国内財については、参考文献 6-7)を参考に、標準ケースの代替弾力性(δ)を 1.5 と想定した CES 型関数を用いて、輸入財と国内財の需要に関する代替性を想定した。製品グループ間の需要については、代替弾力性 2.0 を想定した。

本研究の分析ケースを表 2 に示す。本研究では、日米 EU が協調して国内排出削減対策を実施する一方、それ以外の国については排出削減対策がなされない、と簡略化した仮想的な想定を行った上で、国境炭素措置やそれに対抗した報復措置による影響を分析した。炭素関税の課税方法については前述の 2 種類を想定し、最も原単位の優れた製品グループへの減免による影響も検討した。

炭素価格・炭素関税は、EU-ETS の EUA 価格（2019 年 7 月）を参照し 32\$/tCO₂ を想定し、税収は政府消費（一般会計）に用いられると想定した。課税対象は電気・熱配分後排出量とした。また、国内対策により上昇した価格が輸出時に相殺される輸出リポートも考慮した。報復措置はさまざまな方法が考えられるものの、ここでは報復関税として炭素関税と同率を、同じ鉄鋼製品に対して課されると想定した。本研究におけるベースライン（特段の温暖化政策を考慮しないケース）の社会経済シナリオは、中位シナリオ SSP2 を想定した（参考文献 8）参照）。

表 2 モデル分析のケース

ケース名	国内の削減対策を実施地域	炭素関税の方法 [日米 EU が実施]	Good 最優遇 [課税ゼロ] (-G)	報復関税 [その他地域が実施] (-R)
(1) TRI	日米 EU	×	×	×
(2) WLD	全地域	×	×	×
(3) TRI-BCA	日米 EU	BCA	×	×
(4) TRI-BCA-R	日米 EU	BCA	×	○
(5) TRI-CSTR	日米 EU	CSTR	×	×
(6) TRI-CSTR-R	日米 EU	CSTR	×	○
(7) TRI-CSTR-G	日米 EU	CSTR	○	×
(8) TRI-CSTR-G-R	日米 EU	CSTR	○	○

2.3. 分析結果

(1) 国境炭素調整の課税方式による影響

日米 EU が実施する BCA（ケース 3 及び 4）と CSTR（ケース 5～8）は、ケース（1）比でそれぞれ鉄鋼・生産額計がプラスに転じていることから、いずれの課税方式も日米 EU の国際競争力低下を軽減する（図 3）。また、炭素リーケージに関し、BCA 及び CSTR を導入した場合、ケース（1）比でみると、それぞれ炭素リーケージを縮小する効果がみられる（図 4）。

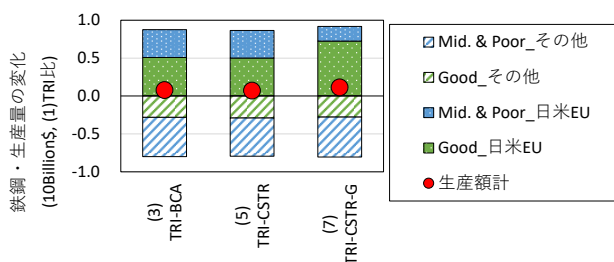


図 3 国境調整による鉄鋼・生産量への影響（2020 年）

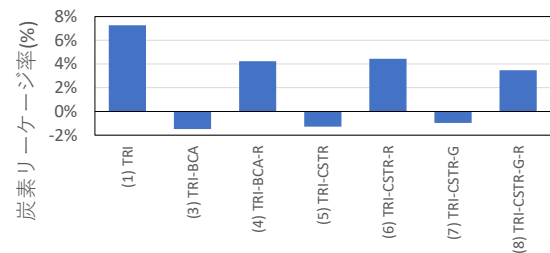


図 4 炭素リーケージ率（2020 年）

注：日米 EU のベースライン比 CO₂ 削減量（鉄鋼製品）に対する、その他地域の CO₂ 増加量

BCA、CSTR とともに原単位の優れた製品（Good）への生産シフトを促すと推計されるが、課税方式による違いの影響は大きくない。そして、世界全体の CO₂ 削減効果に関しても、図 4 の例えばケース（3）とケース（5）の比較から課税方式の違いによる差異も大きくない。むしろ Good 製品への減免措置は、Good への生産シフトに対する効果は大きい、世界全体の排出削減効果は劣る。

(2) 報復による影響

日米 EU の国境調整措置に対抗して、その他地域で実施される報復ケースでは、報復無しのケースと比べその他地域における日米 EU からの輸入価格が相対的に悪化するため、日米 EU からその他地域へ生産がシフトする（図 5）。また、報復関税により日米 EU の国際競争力は低下し、リーケージは悪化する（図 4）。ただし、世界全体の排出量への影響も非常に小さいと推計された。

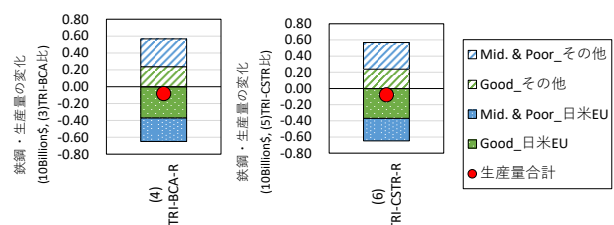


図 5 報復関税による鉄鋼・生産量への影響（2020 年）

(3) 国際協調による影響

世界が排出削減に協調して、その他地域を含めて鉄鋼製品の国内生産の全てに同率の炭素価格が課される

と想定したケース(2)では、ケース(1)に比べその他地域の Mid と Poor の生産が減少する一方、日米 EU の生産が増加する(図 6)。

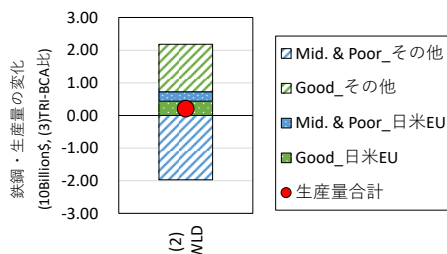


図 6 国際協調による鉄鋼・生産量への影響(2020 年)

(4) 地域別影響の比較

日米 EU が国境調整措置を実施した場合には、中国などのその他地域は報復措置を実施するインセンティブが高い(図 5)。そのような状況下において、日米 EU の各地域への影響は異なり、報復による悪影響は日本では相対的に大きく米国では小さい(図 7)。その要因として以下の 2 つが考えられる。第一に、日本は転炉鋼、電炉鋼それぞれの原単位は優れているが⁹⁾、転炉鋼・電炉鋼を区別しない枠組みでは、日本の優位性は適切に反映されず、炭素価格・関税が課せられた際の鉄鋼製品の価格の上昇率は「日本(転炉鋼比率が高い) > EU > 米国(電炉鋼比率が高い)」の順になると推計されるためである。第二に、鉄鋼製品の輸出入比も国境調整措置・報復措置による地域別影響の違いの要因となる。2020 年ベースラインにおける鉄鋼製品の輸入量に対する輸出量の比率は、日本 5.0、米国 0.9、EU 2.0、中国 1.5 と推計される。日本の輸出入比は非常に大きく、国境措置によるメリットが小さいため報復措置による悪影響が大きいことが示唆される。

一方、米国では輸入比率が高いため国境措置によるメリットが大きく、報復措置による悪影響も小さい。また、転炉鋼・電炉鋼を区別しない枠組みのもとでは、電炉比率が高い米国は原単位が優れて算出される。よって、この枠組みでは米国では報復を想定したとしても国境調整措置を実施するインセンティブが高い。

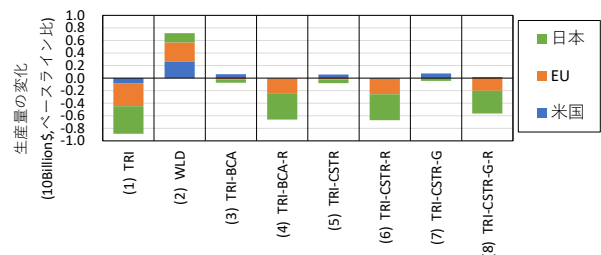


図 7 日米 EU 地域別の鉄鋼・生産量の変化(2020 年)

(5) 国内財と輸入財の代替弾力性に関する感度分析

国内財と輸入財の代替弾力性が大きい高位想定($\delta = 2.8$)の場合¹⁰⁾、ケース(1)では、その他地域への移行が大きくなるために、標準想定($\delta = 1.5$)よりも炭素リーケージ率は増加する(図 8)。また、国境調整措置によるリーケージ縮小の効果はあるが、報復措置によって標準想定よりもリーケージ率は増加する。

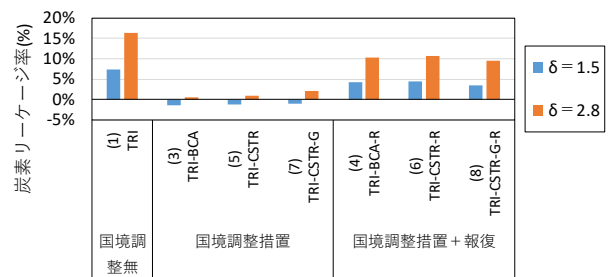


図 8 代替弾力性による炭素リーケージへの影響(2020 年)

2.4. まとめ

製品平均の原単位に基づく一般的な BCA 関税と各製品の原単位に基づく CSTR 関税の 2 種類の関税方式は、国内削減策による国際競争力低下を軽減し、CO₂ リークエージを縮小させる効果がみられ、両方式による違いはほとんどないと推計された。一方、報復措置により日米 EU の国際競争力は低下し、世界全体の排出量への影響は非常に小さいものの炭素リーケージが悪化すると推計された。

この枠組みのもとでは、国境調整を導入するインセンティブは、国・地域の生産構造や貿易構造によって異なることが示唆された。

本研究の今後の課題として、鉄鋼製品に関しては転炉鋼・電炉鋼の区分の拡張や、その他のエネルギー多消費財や主要な貿易財への拡張を検討することが重要と考えられる。

3. 技術革新・社会変化による低エネルギー需要社会の研究事業(EDITS)の概要

RITE は、2020 年度に経済産業省からの委託事業「技術革新によるエネルギー需要変化に関するモデル比較国際連携事業」、通称、EDITS(Energy Demand changes Induced by Technological and Social innovations)を受託し、国際的な研究協力の下での研究を開始した。

3.1. 背景

我々は、エネルギーを消費したいがためにエネルギーを使っているわけではない。サービスを享受したいがために、そこに体化されたエネルギーを消費している。そして、そのサービスを得るために、特に最終需要に近いところで多くのエネルギーが無駄に使われている(図 9)。

最終的に必要なサービスのためのエネルギーは、一次エネルギー消費全体の 5%前後とされている。しかし、我々の利便性を阻害する「隠れた費用」を含めると、多くが合理性を有しているため、社会のエネルギー需給がこのような形で成り立っていた。ところが、技術進展とともに変わりつつある。例えば、人がいないときの照明は自動消灯も実用化してきたし、エアコンも人のいるところを集中的に冷やすことが可能となり、サービスの低下を抑えつつ省エネにつながった。一方、社会システムとしてはまだまだ無駄が多い。

情報通信技術(ICT)の技術進展は、最終エネルギー需要側の社会イノベーションを誘発するポテンシャルがあり、①独立した技術から技術間の接続へ、②所有から利用へ、③シェアリングエコノミー、サーキュラーエコノミーの誘発 につながる可能性がある。

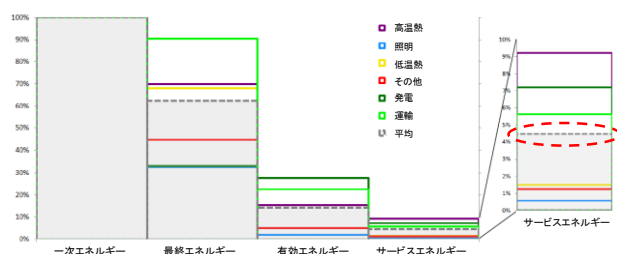


図 9 世界における各エネルギー利用段階でのエネルギー消費量 (一次エネルギー消費量を 100%としたとき)¹¹⁾

例えば、ICT 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、自家用車は活用されていない。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。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。それにより SDGs の同時達成に寄与し得る。

自動車に限らず、アパレル、食料システムなど、多くにおいて過剰な生産がなされており、それらも ICT の進展により削減できる可能性がある。直接的にエネルギーを低減するだけでなく、サービス、製品に体化されたエネルギーを低減することで、社会全体のエネルギー需要の抑制をはかることが重要と考えられる。

一方、ICT により、データセンターでのエネルギー消費の増大や、その他、様々なリバウンド効果も考えられるため、行動変化も含めた総合的な分析が求められる。

3.2. EDITS の概要

このような背景の中、EDITS 事業では、以下のような内容の研究を開始したところである。

- 研究コミュニティの構築: 需要側に焦点を当てた、新しいデータ、新しい概念、方法論、および政策分析の共有を通じて、研究と政策分析に対する相互作用を通じたより良い理解の促進
- 最先端の需要側モデルの改良: 方法論やモデルの相互比較、学問領域、部門、環境分野を超えた、概念、方法論の共有により、環境および気候政策分析の需要側モデルの更なる改良を実施
- モデル相互比較分析: 特に、デジタル化、シェアリングエコノミー、SDGs と気候目標の統合による相乗効果を有する政策デザイン等に焦点を当てながら、需要側の政策による、SDGs に対するシナジーと

リードオフ、潜在的な影響、障壁を評価する、モデル分析やシミュレーションを実施

国内外の多くの研究機関、研究者が協力して、この重要かつ難しい分析課題に取り組むこととしており、RITE および国際応用システム分析研究所(IIASA)が中心となり、東京大、大阪大、米ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)、米スタンフォード大、米ウィスコンシン大、中国清華大の他、韓国、イタリア、ドイツ、タイ、ブラジルなどの研究機関、大学などと連携している。

参考文献

- 1) 佐野 他、エネルギー・資源学会論文誌、42(1)、2021
- 2) 金星 他、第 37 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2021
- 3) European Commission, The European green deal
- 4) Homma, T., and Akimoto, K., Energy Policy 62, 2013
- 5) Banks, G.D. and Fitzgerald, Climatic Change, 162, 2020
- 6) MIT, EPPA Model Structure
- 7) 日経センター、日本経済研究センターの一般均衡モデル JCER-CGE による分析、2009
- 8) O'Neill, B.C., et al., Climatic Change 122, 2014
- 9) Oda, J., et al, Energy Policy, 44, 2012
- 10) Global Trade Analysis Project (GTAP)
- 11) Global Energy Assessment, 2012

バイオ研究グループ

グループメンバー(2020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	和二
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
主任研究員
主任研究員
研究員
研究員
研究員
研究員 TH
研究員
研究員
研究員
研究員
研究員
研究員
研究助手
研究助手

久保田 健
大島 俊宏
生出 伸一
清水 哲
原 知明
肥後 明佳
Natalia Maria
柏木 紀賢
小林 淳平
橋本 龍馬
猿谷 直紀
野崎 裕貴
渡邊 淳子
池永 由布子

研究助手
研究助手
研究助手
研究助手
研究助手
研究助手
研究助手
研究助手
研究助手
研究助手
研究助手

水口 祥子
永守 美雪
内藤 香枝
池田 永子
米田 和代
小泉 真夕
西 淳子
森 佳代子
岩島 素巳
吉田 佳世
岡田 亜弥
岸 紀美代

持続可能な社会の実現を目指したバイオリファイナリー技術の開発

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症の世界的な大流行が、経済社会活動に多大な影響を与えている。一方、地球温暖化や海洋プラスチックなどの環境問題は依然として深刻化している。こういった状況の下、バイオエコノミーの推進は、感染症収束後の経済回復、および環境問題の解決に向け、益々重要性が高まっている。

バイオエコノミーとは、バイオテクノロジーや再生可能な生物資源等を利活用して、地球規模での課題を解決しながら、持続的で、再生可能性のある循環型の経済社会の拡大を図るというコンセプトである(図1)。

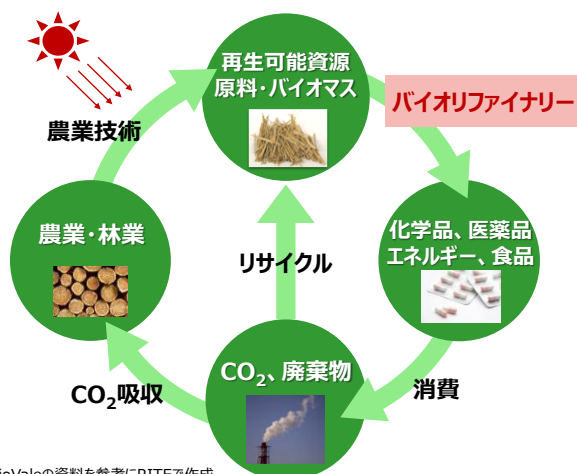
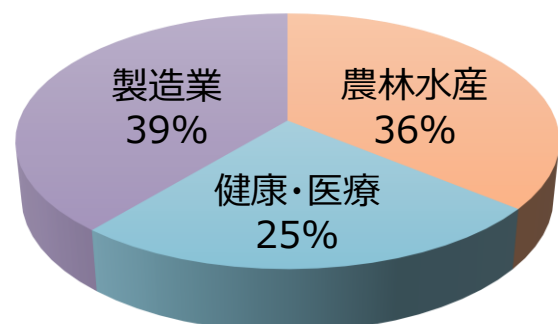


図1 バイオエコノミーのコンセプト

2030年、約1.7兆ドル



出典：The Bioeconomy to 2030. OECD(2009)、NEDO作成資料より

図 2 バイオエコノミー市場予測

経済協力開発機構(OECD)によると、「2030 年バイオ市場は加盟国全体で約 190 兆円規模に拡大、製造業分野は約 4 割に達する」と予測(図 2)されており、全産業がバイオ化するともいわれている。

そのような情勢の中、政府は、「2030 年に世界最先端のバイオエコノミー社会を実現」することを目標とする総合的な政策パッケージとして、2019 年 6 月に、「バイオ戦略 2019」を策定。これを毎年更新しながら推進することとしており、2020 年 6 月に、「バイオ戦略 2020(基盤的施策)」を、2021 年 1 月に「バイオ戦略2

020(市場領域施策確定版)」を公表した。

当グループでは、微生物を利用して、このバイオエコノミーの中核技術である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いる。

本項では、まず、バイオ燃料やバイオプラスチック(汎用プラスチック代替)について概況を紹介する。

バイオ燃料

バイオ燃料の代表格であるバイオエタノールは、米国ではトウモロコシ、ブラジルではサトウキビを原料として生産され、ガソリンに10~25%ほど混合されて自動車用燃料として供給されている。最大の生産・消費国である米国では、米国エネルギー情報局(EIA)によれば、2019年158億ガロン(5,981万kL)のバイオエタノールが生産された。OECD-FAOの「Agricultural Outlook 2020-2029」によれば、2019年は1.29億kLのバイオエタノールが世界で生産されており、その半分以上を米国が占めたことになる。この割合は、ここ数年変わっていない。

原料が食料資源と競合しない第2世代バイオ燃料であるセルロースエタノールは、トウモロコシ等の農業残渣を原料として生産される。米国再生可能燃料基準(RFS)によるセルロース系原料からのバイオ燃料の2020年生産見込み(米国環境保護庁(EPA)、2020年3月改訂)は、5.9億ガロン(約223万kL)である。これは2007年に定められたRFS目標値の5.6%余りとどまっており、今後、商用化の加速が求められている。RITEでは、セルロース系バイオマスを効率的に利用できるバイオプロセスを開発している(第2章参照)。

航空燃料に関しては、国際民間航空機関(ICAO)が、2010年総会において、2020年以降温暖化ガスの総排出量を増加させないこと等を決定した。また、2016年の総会で、2020年以降に市場メカニズムを活用した温室効果ガス削減制度(GMBM: Global Market-Based Measures)を導入すると決定した。それに基づき国際航空運送協会(IATA)は、バイオジェット燃料の使用、排出権取引の活用などによる具体的な行動計

画を策定した(図3)。GMBMは、2021年から開始される予定である。それらに伴い、バイオジェット燃料は、主として欧米で年々普及が進んでおり、調理用廃油などを利用したサステナブルな航空燃料(SAF)として商業飛行が継続されている。

当グループでも、バイオ燃料に関する研究開発を行っており、日本航空株式会社(JAL)が主催するプロジェクトでは、国産バイオジェット燃料の製造に国内で初めて成功し、国内線定期便に搭載された(第4章1節参照)。

また、石油系燃料への混合比率の制限をなくしそのままジェット燃料に利用できるグリーンジェット燃料の研究開発も行っている(第4章1節参照)。

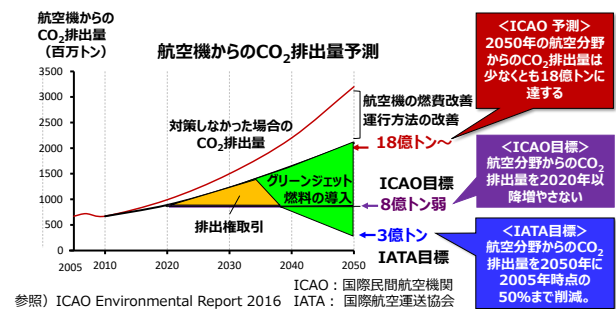


図3 航空機からのCO₂排出量削減対策

船舶燃料に関しては、一般財団法人日本船舶技術研究協会(JSTRA)等が連携して設立した、日本の国際海運GHG(温室効果ガス)ゼロエミッションプロジェクトにおいて、2050年ゼロエミッション目標に向けて、次世代の低炭素燃料(バイオ水素等)への代替などのイノベーションの推進など、ゼロエミッション実現に向けた取り組みの加速を図るロードマップを策定している。

バイオプラスチック(汎用プラスチック代替)

温室効果ガス削減に対応した化石資源に依存しないプラスチックの普及・汎用化が停滞していることや、海洋プラスチックごみによる環境汚染等が重大な世界的課題となっていることから、再生可能資源であるバイオマスを原料としたバイオプラスチックや生分解プラスチックに大きな期待が寄せられている。

「バイオ戦略2020」では、バイオ戦略2019で示さ

れた 9 つの市場領域の 1 つである「バイオプラスチック（汎用プラスチック代替）」についても、歩みを止めることなく、遅滞なく推進することが重要とされている。

当グループは、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)のムーンショット型研究開発事業プロジェクト(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)に参画し、「非可食バイオマスを原料としたバイオモノマー生産とポリマー分解酵素の開発」に取り組むこととしている。

<https://www.rite.or.jp/bio/info/20200928MoonshotResearchandDevelopmentProgram.pdf>

2. バイオ研究グループのコア技術

当グループでは、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®」を確立し、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 4)。

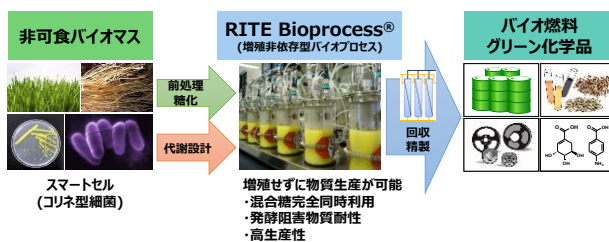


図 4 「RITE Bioprocess®」を利用した
バイオリファインリーの概念

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、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(スマートセル)を大量に培養し、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反応を行う(図 5)。

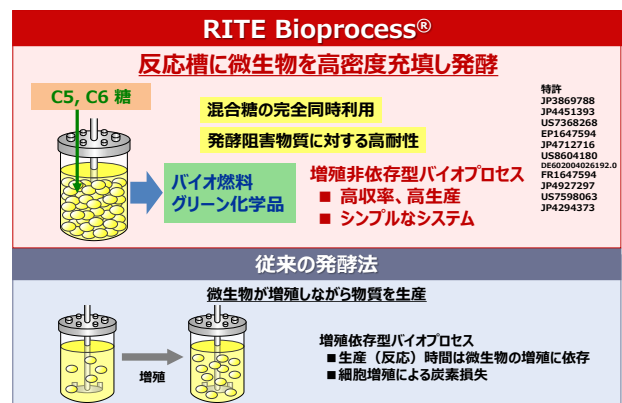


図 5 「RITE Bioprocess®」の特長①
(増殖非依存型バイオプロセス)

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。これにより、微生物細胞を極めて効率的に利用することが可能で、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ため、微生物バイオ燃料の効率的な生産には、C5糖と C6糖の同時利用が不可欠である。しかしながら、野生のコリネ型細菌は、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6左側グラフ参照)、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。

当グループでは、C5糖の利用に関与するいくつかの遺伝子を導入することによってコリネ型細菌の代謝系を改良し、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6右側グラフ参照)。

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した。

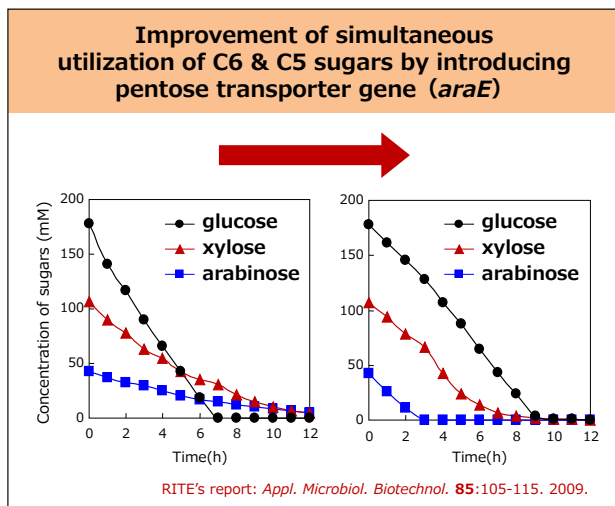


図6 「RITE Bioprocess®」の特長②
(C5&C6糖類の完全同時利用)

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。

当グループが開発したコリネ型細菌は、いくつかの遺伝子を導入することによって、発酵阻害物質に対する高耐性を有することが実証されている(図7)。

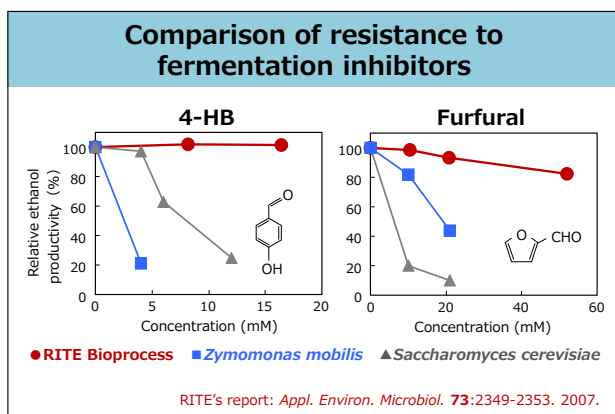


図7 「RITE Bioprocess®」の特長③
(発酵阻害物質に対する高耐性)

2.2. 「RITE Bioprocess®」による主な生産物質

現在、エタノール、L-乳酸、D-乳酸、アミノ酸等の高効率生産に加えて、ブタノールやジェット燃料素材、芳香族化合物などの高機能化学品生産へ幅広い展開を図っている(図8)。

バイオ燃料	グリーン化学品
■ ガソリン混合・代替 ★ エタノール* ■ 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 ■ ★ バイオ水素	■ 芳香族化合物 ★ シキミ酸 (インフルエンザ治療薬タミフル原料) ★ フェノール* (フェノール樹脂, ポリカーボネート) ★ 4-ヒドロキシ安息香酸* (ポリマー原料) ★ アニリン* (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) ★ プロトカデク酸* (化粧品原料) ■ 有機酸 ★ D-乳酸*, L-乳酸* (ステレオコンプレックス型ポリ乳酸) ★ コハク酸* ■ アミノ酸 ★ アラニン (キレート剤) ★ バリン (次世代飼料用アミノ酸, 医薬品原料) ★ トリプトファン (次世代飼料用アミノ酸, 医薬品原料) ★ メチオニン (飼料用アミノ酸, 調味料) ■ アルコール ★ イソプロパノール (プロピレン原料) ★ キシリトール (甘味料)

図8 「RITE Bioprocess®」による主な生産物質

次章以降では、当グループが参画している国家プロジェクトにおける取り組みや、主要ターゲットであるバイオ燃料および芳香族化合物を含むグリーン化学品の生産技術開発について説明し、それらの実用化に向けた取り組みについても紹介する。

3. 基盤技術開発

3.1. NEDO スマートセルプロジェクト

NEDO が実施する「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)に当グループは初年度の2016年から参画し研究開発を継続している(RITE Today 2019, 2020 参照)。このプロジェクトでは「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する技術の開発とその技術の有効性検証を行う。

当グループはこのプロジェクトで扱う宿主微生物をコリネ型細菌、生産ターゲットを芳香族化合物の1つと定め、研究開発を進めてきた。この化合物は産業的な利用価値は高いものの、これまで生物を利用して高濃度生産された例はない。微生物全般に対して毒性を示すことと、糖からの代謝経路のステップ数が多く複雑なことがその原因だと考えられる。また、コリネ型細菌は元来この目

的芳香族化合物の生産経路を持たない。スマートセルプロジェクトで開発する技術(スマートセル設計システム)を活用してコリネ型細菌の代謝経路を適切に改変することで、カテコール生産能の付与と高い生産性を示す生産株を短期間で開発することを目指した。

まず、既存の代謝経路に対しカテコール生産に必要な遺伝子のみを補うことで、シンプルな生産株を作製した。この初期生産株はごく微量のカテコールを培養液中に蓄積することがわかった。このような状況から開発を進め、高生産株の育種を行った。プロジェクトに参画している複数の大学、研究所、企業と連携することでスマートセル設計システムの高精度化を図るとともに多様な改変指針の提案を挙げることができた。例えば、コリネ型細菌の代謝モデルを利用したシミュレーションから、最適生産代謝経路や高発現すべき遺伝子、削除すべき遺伝子の提案が可能となった。また、mRNA 二次構造の自由エネルギー計算などから遺伝子の高発現が期待できる塩基配列が提案された。さらに過去文献の膨大なデータベースから生産性向上が期待できる遺伝子改変の提案も可能であった。このようにスマートセル設計システムを利用することで複数の改変提案が挙げられ、それらをコリネ型細菌に反映させることで生産株を育種した。その結果、目的芳香族化合物の生産濃度が段階的に向上し、これまで報告されていた世界最高の生産濃度を短期間で大きく上回った(図 9)。

https://www.rite.or.jp/news/press_releases/pdf/press20201202.pdf

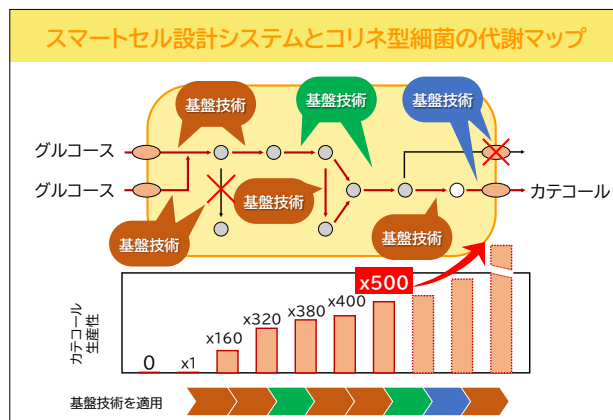


図 9 スマートセル設計システム適用による
カテコール生産性の向上

2020 年度はプロジェクトの最終年度にあたり、すでにプロジェクトでの目標値を超える生産性を達成している。現時点では未適用の改変提案においても生産性の改善を示唆する予備検討結果を得ているため、スマートセル設計システムを利用することで今後もさらなる生産性向上が期待できる。

3.2. NEDO バイオものづくりプロジェクト

2020 年度から新たな NEDO プロジェクト「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)がスタートした。これまでスマートセルプロジェクトにおいて、生物が持つ物質生産能力を人工的に最大限引き出した細胞“スマートセル”を構築するための基盤技術を開発してきた。これを踏まえ本プロジェクトでは、生物機能を活用した産業用物質生産技術の開発を実施する。スケールアップや精製などまで含め、工業化に向けた生産プロセスに関わる技術を開発することで、バイオ由来製品の社会実装の加速化を目指す(図 10)。

当グループはこのプロジェクトに参画し、微生物による物質生産技術の実用化に伴う課題の洗い出しと、課題を解決するための“産業用スマートセル創出技術”の開発に貢献することを目指した。さらに生産目的物質をテルペン系化合物と定め、実用化を目指した生産株開発を行った。

まず、数か所の改変を加えた初期生産株を育種し、生

産目的物質を生産可能であることを示した。次に生産株を用いて詳細な培養プロファイルデータを取得した。データは連携機関と共有し、産業用スマートセル創出技術の高精度化に使用した。さらに、スマートセル設計システムで開発した代謝モデルシミュレーションを利用し、生産目的物質の生産性向上のための改変候補を抽出した。現在この提案を採用した生産株の構築を進めており、生産検討を今後順次行う。

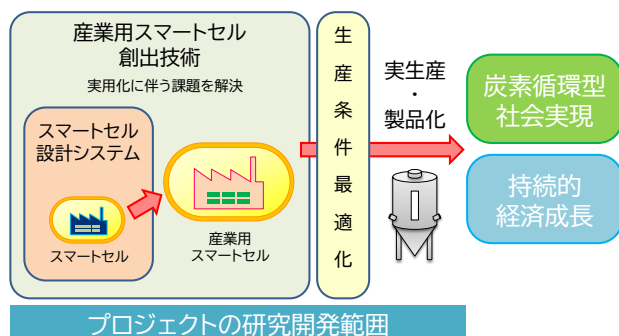


図10 バイオものづくり産業基盤開発

4. ターゲット別開発

4.1. 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。さらにブタノールを出発原料として化学変換によってジェット燃料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いる。2015年度から2019年度まで、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。我々の生産技

術の特徴は、原料としてセルロース系バイオマス由来の混合糖を利用可能で、且つ高速・高収率生産が可能な点にある(図11)。

しかし、ブタノールは細胞毒性が強い問題がある。そこで、本事業では高度な育種技術により、ブタノール生産株の耐性化を推進して「RITE Bioprocess®」の高い生産性を更に引き上げると共に、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を加速させた。

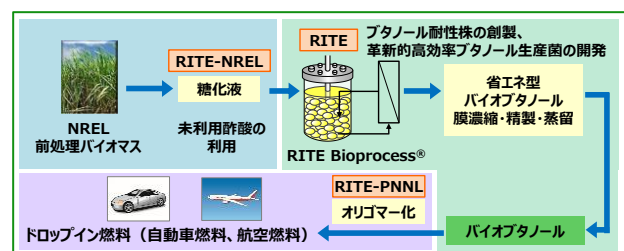


図11 「RITE Bioprocess®」によるバイオブタノールおよびジェット燃料生産

更に、2017年からは米パシフィック・ノースウエスト国立研究所(PNNL)との共同研究により、ブタノールを化学的にオリゴマー化したり、ブタノールのバイオ生産時に原料由来の酢酸を同時にエタノール化し、ブタノール/エタノールの混合物をオリゴマー化したりする新しいアイデアに基づいて、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。

ブタノール生産においては、蒸留におけるエネルギー消費が大きいことから、蒸留とPV(permeation)膜濃縮を組み合わせることによって、精製に必要なエネルギーを約10分の1に低減する省エネルギー型ブタノール回収技術の開発も並行して進めた。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、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、および上記省エネルギー型ブタノール回収技術の開発などの個別要素技術開発に成功し、当初の計画通り本プロジェクトを完成させた。

一方、事業化に向けた取り組みとして、RITE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)にて技術協力を行った。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)も参画し、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、2021 年 2 月 4 日の JAL の羽田～福岡線に、初の国産バイオジェット燃料として使用された。

<https://www.rite.or.jp/news/20210215news.pdf>

今後は、これらの要素技術と数々のノウハウを組み合わせることにより、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。

グリーンジェット燃料

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り、密度や析出点などの物理的性質が厳格に規格化されている。

これまでに、油脂を水素化処理して製造する HEFA、バイオマスを経由して液体燃料化して製造する FT-SPK、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 6 種類のバイオジェット燃料製造法が ASTM International によって認証されており、2020 年には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いずれもイソパラフィンを主成分とし、必須成分であるシクロパラフィンや芳香族化合物をほとんど含んでいないため単独ではジェット燃料の規格を満たさず、使用するには石油系ジェット燃料と混合して 50%以下の割合

にすることが必須となっている。そのため将来的にバイオジェット燃料の供給可能量が需要量に追いついたとしても、需要の 50%以上は石油系ジェット燃料を使い続けざるを得ない。

そこで我々は、既存のバイオジェット燃料に課されている混合比率の制限をなくすため、シクロパラフィンや芳香族化合物も含んで単独でも ASTM の規格を満たす高性能グリーンジェット燃料の開発も行っている。本高性能グリーンジェット燃料は石油系ジェット燃料の混合をほとんど必要とせず、単独使用も期待される。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などをこれまでに開発している。

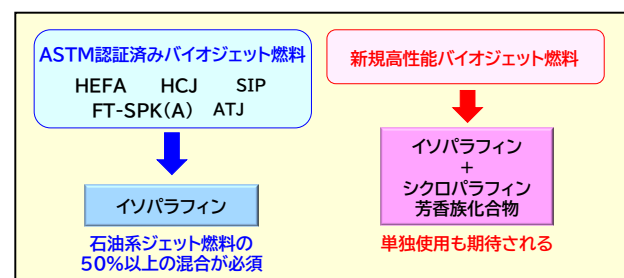


図 12 新規高性能バイオジェット燃料の開発

バイオ水素

水素は燃焼時に水しか生成しないため、究極のクリーンエネルギーとして期待される。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。2017 年に開催された「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」において策定された「水素基本戦略」では、2030 年前後の水素利用技術の本格的な普及に向けた目標を踏まえつつ、2050 年を見据えた水素社会の実現のために革新的な CO₂ フリー水素製造技術の中長期的な開発が必要とされている。

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、高密度菌体触媒を用いた

高速バイオ水素生産プロセスを開発し、従来技術と比較して2桁程度高い生産速度を達成している。この成果を基盤として、現在、セルロース系バイオマスからのバイオ水素生産プロセスにおける収率の向上を目指し、代謝工学による水素生産微生物の改良に取り組んでいる。

光合成細菌は有機物の分解により生成する還元力(e^-)を用いて、 N_2 固定酵素(ニトロゲナーゼ)により水素(H_2)を生成する(図13)。 H_2 は、 N_2 からアンモニア(NH_3)を生成する窒素固定反応の副生物であるが、 N_2 非存在下ではプロトン(H^+)の還元により H_2 のみを生成する。この「光発酵水素生産」では光エネルギーを利用して、熱力学的に不利な「暗発酵水素生産」で副生する酢酸からの水素生産が可能となるため、暗発酵と光発酵の統合型水素生産プロセスの構築により大幅な収率の向上が期待できる。しかしながら、光合成細菌において、還元力は CO_2 固定、炭素貯蔵物質(ポリマー)合成などで消費されることにより、水素生産での利用が制限される。また、生成した水素は水素取り込み系酵素(ヒドロゲナーゼ)により細胞への還元力の供給に再利用される。これらの知見を踏まえ、H/C/N代謝経路の改変を組み合わせることにより、酢酸からの光発酵水素生産における収率が大きく向上することを示した。

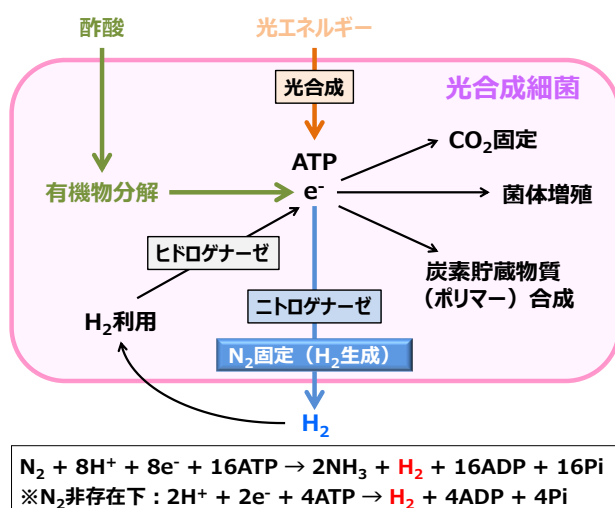


図13 光合成細菌における H_2 生成反応(N_2 固定反応)と還元力(e^-)の消費に関する競合

4.2. 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、高生産性の達成に重要である。これに対して RITE 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。

4.3. 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 14)。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、前述した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。

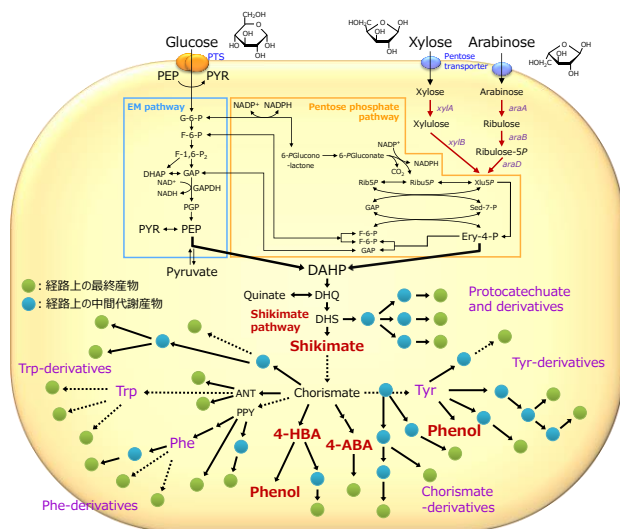


図 14 様々な芳香族化合物の生合成経路

4.4. SIP(高機能ポリマー用バイオモノマーの開発)

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program)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。課題の一つ「スマートバイオ産業・農業基盤技術」では、バイオとデジタルの融合・データ活用により生物機能を活用したものづくりによる持続可能な成長社会の実現を目指している。

RITEは本課題のコンソーシアムの一つ「革新的バイオ素材・高機能品等の機能設計技術及び生産技術開発」に参画している。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。ポリマーグループとモノマーグループに分かれて取り組んでいる。目標達成のために、前者はポリマー設計技術、機能予測技術およびこれらの技術検証を行い、後者は生合成可能なモノマーの抽出、モノマーの生合成に向けた代謝設計、酵素機能改変技術の開発並びにその検証を行う。RITEはモノマーグループのリーダーとしてグループ内の各チームより提案される目的モノマー合成能を有すると推測された酵素候補および合成能を付与させるための改変候補について、機能検証を行う。

3年目となる2020年度は、芳香族ジオール生合成酵素、芳香族ジアミンの前駆体生成酵素を対象に技術検証を行い、機能の向上、拡張を達成した。さらなる確度の向上に向けた技術開発、技術検証を進める。

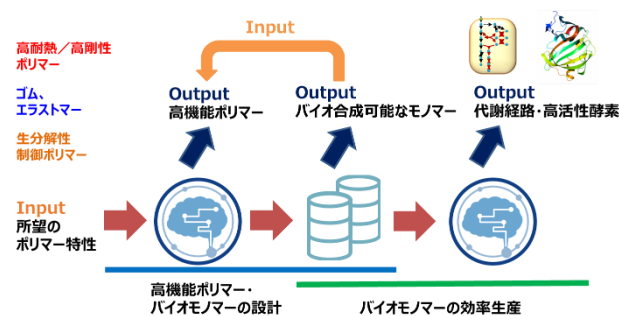


図 15 バイオマテリアル設計・生産技術統合システム

4.5. NEDO「ムーンショット型研究開発事業 ～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～」

本プロジェクトでは、使用時には通常の石油由来のポリマー並みにタフで、使用後は海洋などの環境における外部刺激によって速やかに分解する「マルチロック型バイオポリマー」の開発を目指す。これにより、高分子分野における地球温暖化問題および環境汚染問題の同時解決を目指す。一般的にプラスチックの強靱性と海洋分解性(生分解性)はトレードオフの関係にあるが、本プロジェクトではこれらの両立を実現する。



図16 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イメージ

https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_10_0161.html

本プロジェクトにおいて、RITE は「非可食バイオマスを原料としてバイオモノマー生産とポリマー分解酵素の開発」を推進する。具体的には、① マルチロック型バイオポリマーの原料となる「バイオモノマー」を高生産可能とするバイオプロセスを確立するため、バイオモノマー高生産株の構築や、バイオモノマースケールアップ生産技術の開発を推進する。また、② マルチロック型バイオポリマーの実用化に向け、マルチロック機構における効率的な酵素分解のために、ポリマー分解酵素の高機能化や、該酵素の高生産技術の開発を推進する。

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)

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2014年5月にグリーンフェノール開発株式会社(GPD)を設立した。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4章3節参照)。

図17に現在のGCCの開発品ラインナップを示した。2020年には、GCCが保有するパイロットスケールの発酵槽を用いて2つのターゲット化合物(プロトカテック酸とシキミ酸)の高濃度生産に成功し、実用生産の段階に進んでいる。

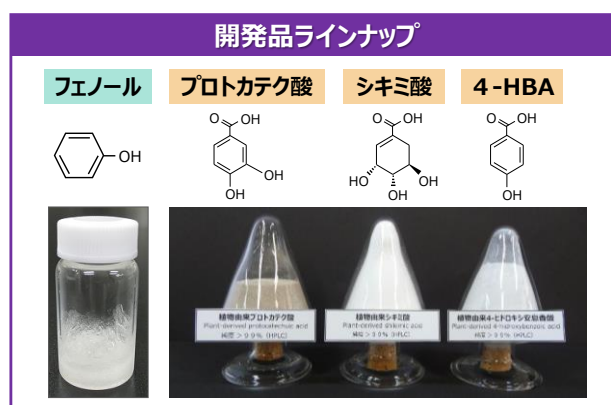


図17 GCCの開発品ラインナップ

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)

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 日に設立した RITE 発ベンチャー企業である。同社は、RITE 開発の微生物(コリネ型細菌)を用いた「RITE Bioprocess®」による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 との共同研究や事業化を目指した活動を実施している。

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 RITE 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。現在、国内外のパートナー企業とのライセンス契約により、商用生産を実現している(4 章参照)。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、非可食バイオマス为原料にしたバイオジェット燃料に関しても、RITE 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。(第 4 章 1 節参照)

その他化粧品素材などのグリーン化学品についても RITE 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、RITE 発技術の事業化を実現するベンチャーとして、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。

6. おわりに

前述したように、バイオエコノミーの推進は、感染症収束後の迅速な経済回復を見据え、今後、益々重要性が増大してくるものと思われる。

そのような中で、近年、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おり、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(バイオとデジタルの融合)が急速に発展している。当グループもそのような複数の国家プロジェクトに参画している(3 章参照)。

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、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 18)。

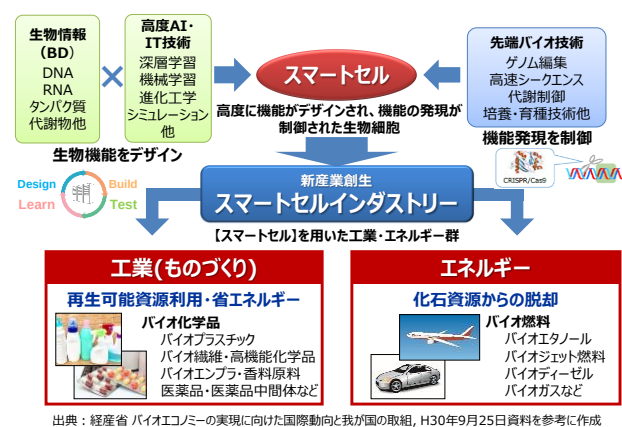


図 18 バイオ×デジタルが変える

工業／エネルギー分野の融合

当グループでは 2021 年も引き続き最先端バイオテクノロジーである「スマートセル」を中心とした革新的なバイオリファイナリー生産技術の開発に取り組み、低炭素社会の構築や持続可能社会の実現に貢献していきたい。

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

化学研究グループ

グループメンバー(2020 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	菰野 恵子
副主席研究員	余語 克則	研究助手	白井 隆一
副主席研究員	馬場 宏治	研究助手	片岡 梢
主任研究員	後藤 和也	研究助手	杉本 理絵
主任研究員	甲斐 照彦	研究助手	米澤 順子
主任研究員	山田 秀尚	研究助手	森 美佐都
主任研究員	Firoz Alam Chowdhury	研究助手	吉野 直美
主任研究員	龍治 真	研究助手	大西 紀子
研究員	段 淑紅	研究助手	鹿嶋 麻衣
研究員	伊藤 史典	研究助手	森 恵子
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	手嶋 孝
研究員	VU Thi Quyen	研究助手	尾方 秀謙
研究員	淵上 暢彦	研究助手	小倉 公美子
研究員	孟 烈	研究助手	山田 美久

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、COP21 で「パリ協定」が採択され、これまで以上に CO₂ 排出量の低減が必須となってきた。我が国では、2019 年 6 月に、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」および「統合イノベーション戦略 2019」が策定され、世界の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示された。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 の化石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。最近では 2020 年 10 月の第 203 回臨時国会の所信表明演説において、菅義偉内閣総理大臣は「2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュー

トラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言された。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。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、そのコストの約 6 割程度を占めると試算されている排出源からの 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、低温で脱離性能の良い固体吸収材を見出すことに成功している。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実証試験を行う予定である。

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。

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、産業界で実用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

吸収法では、混合ガス中のCO₂が溶液に選択的に溶解することを利用してCO₂を分離する。特に、溶液中のアミンとCO₂との化学反応に基づく化学吸収法は、燃焼排ガス等、比較的低濃度のCO₂にも適用が可能であり、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、アミン分子の構造がこれらの要因と密接に関わるこ

とに着目し、新規アミン液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%を目標としたプロジェクト「COURSE50」(NEDO 委託事業)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。COURSE50 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。

ESCAP®1号機は室蘭製鉄所構内に、飲料等を含む一般産業用途向けに建設された(120t-CO₂/day)。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は、世界で初めてのものである。2018 年には、2 号機が新居浜西火力発電所で操業を開始した(143t-CO₂/day)。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は、日本初の商業設備である。回収されたCO₂は、近接する化学工場で化学副原料として利用されている。



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

アミンを水などの溶媒に溶かした化学吸収液と異なり、

固体吸収材は、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では、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。

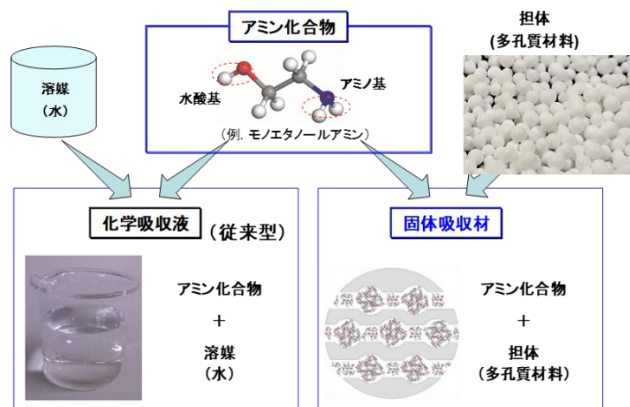


図2 化学吸収液と固体吸収材

RITE は、2010 年に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 1.5 GJ/t-CO₂ 以下を実現した。本固体吸収材は、低エネルギー回収のみならず、60℃での低温プロセスを可能とする革新的な材料である。

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、CO₂ 分離・回収コスト 2,000 円台/t-CO₂ に目途を得た。アミン固体吸収材を用いた他の事業と比較して、本事業の回収規模、エネルギー、コストはいずれも世界トップ水準である。

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、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 年度から石炭火力発電所から排出される燃焼排ガス中の CO₂ 分離・回収試験を開始する予定である。現在、RITE では、パイロットスケール試験に向けて、固体吸収材製造技術の合理化・低コスト化、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の高度化などを進めている。



図3 固体吸収法の開発ロードマップ

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、高压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）。

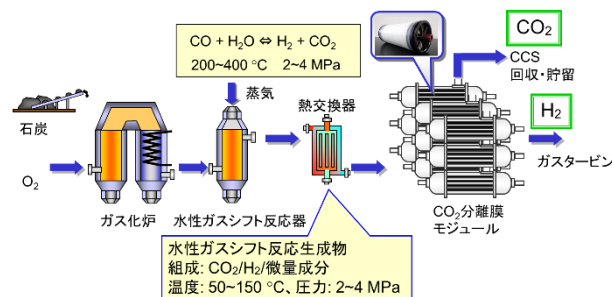


図4 分離膜を用いた石炭ガス化複合発電(IGCC)からの CO₂ 分離・回収

RITE では、高密度のアミノ基を有するポリアミドアミンデンドリマー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、このデン

ドリマー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。

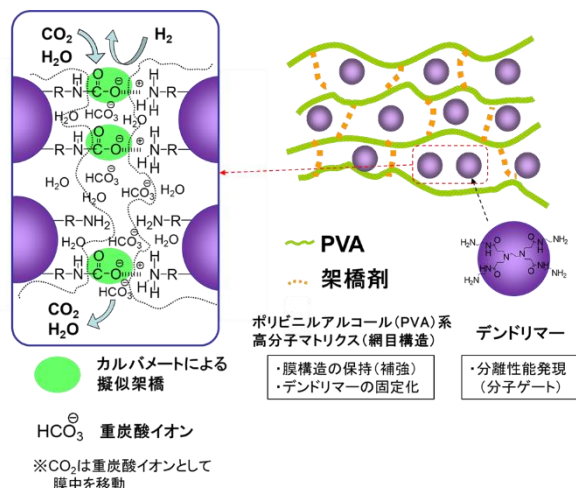
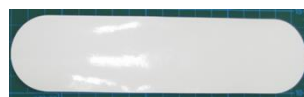


図5 分子ゲート膜の概念図

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。

基礎研究段階として、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)によって、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検討を実施中である。



CO₂分離膜



膜エレメント
(4inch; 長さ200mm)



膜モジュール
(2inch用ハウジング)

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)

METI 委託事業の「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)で開発した膜素材、膜エレメントや膜分離システムを基礎として、現在、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の開発を進めており、実用化に向け、MGM 組合として連続製膜技術および連続製膜した膜を用いた膜エレメントを開発中である。

連続製膜を用いた膜エレメントの量産化に向けた検討により、2.4MPa の高圧下においても安定な外径 2 インチおよび 4 インチの膜エレメントが作製でき、膜エレメントの基本製法の確立に目途を得た。

また、実ガス試験による膜エレメントの分離性能、プロセス適合性等に関する技術課題の抽出と解決を行うために、電源開発株式会社若松研究所(以下、若松と記載)において、石炭ガス化炉からの実ガスを用いた膜エレメントの検証試験を実施した。4 インチ膜エレメントを用いた実ガス試験結果を図7に示す。なお、若松における石炭ガス化ガスの圧力条件に即して、全圧 0.8MPa(絶対圧)での試験を行った。

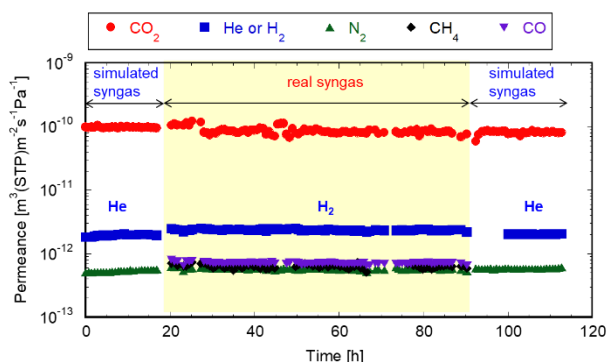


図 7 実ガス試験および実ガス試験前後の模擬ガス試験におけるCO₂分離性能

温度:85℃、0.8MPa(絶対圧)

模擬ガスにはCO₂/He/N₂を供給ガスとして使用。

実ガス試験前後で膜エレメントの分離性能は、ほぼ同等の分離性能である事が判った。また、実ガス試験中の分離性能低下も認められなかったことから、4 インチ膜エレメントが実ガスに対する初期(短期)耐久性を有することを確認することができた。

今後は、これまでの成果に基づき、実機サイズの大規模膜モジュールの開発および膜分離システムの研究開発を進める予定である。

5. 新たな取り組み

これまで述べたように、化学研究グループでは、製鉄所や発電所などの大規模CO₂排出源を対象としたCO₂分離・回収技術の高度化・実用化に注力してきた。最後に別の新たな取り組みについての二つの事例を紹介する。一つは、大気中からのCO₂回収すなわち Direct Air Capture(DAC)、もう一つはCO₂を炭酸塩として固定化する技術の開発である。

カーボンニュートラルを実現するためには、大気中に排出されてしまったCO₂を除去できる技術、すなわちネガティブエミッション技術が不可欠である。近年、DACは代表的なネガティブエミッション技術の一つとして注目されており、海外でも検討が進んでいる。今後の普及のためには回収エネルギーおよびコストを大幅に低減することが望まれ、日本でも、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」で挑戦的な

研究開発が行われつつある。RITEは当該事業に採択された「大気中からの高効率CO₂分離・回収・炭素循環技術の開発」で、金沢大学および民間企業と協力して、DACに最適な材料およびシステムの検討を開始したところである。本テーマを含め、ムーンショット目標4の「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」を達成するための技術開発の中で「(1)温室効果ガスを回収、資源転換、無害化する技術の開発」として、計8テーマが採択されている。

大気中からのCO₂回収は、通常の石炭等の燃焼後排ガスからCO₂を分離・回収する場合と比べ、CO₂濃度は400ppm程度と2~3桁低いため、回収コストは極めて高価になると言われている。DACを現実的なものとするためには、これまでにない高性能なCO₂分離材料の開発と大量の空気を効率よく吸脱着する事の出来るプロセスを構築する必要があり、CO₂分離材料については、RITEがこれまで取り組んできた固体吸収材や有人宇宙活動用のCO₂吸着剤の研究経験で培ってきたアミン系化合物を中心とする材料設計の知見を活かし、回収コストを低減できる優れた材料開発を目指している。一方、CO₂分離・回収プロセスについては、共同実施者である金沢大学の吸着材ハニカムロータを用いたデシカント除湿空調プロセス研究の知見を活用し、CO₂分離材料とプロセス技術の両者が連携することで高効率なDACシステムの開発を目指している。

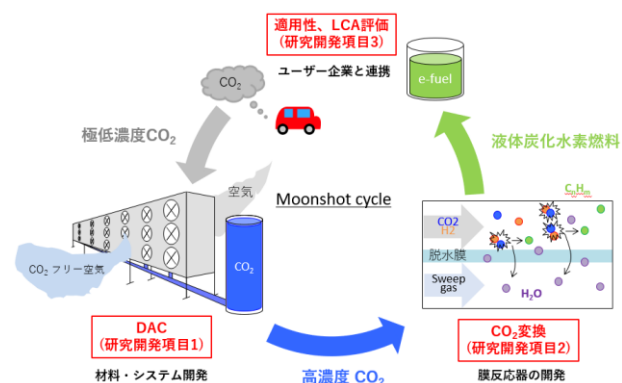


図8 大気中からの高効率CO₂回収・炭素循環技術の開発

CO₂を炭酸塩として固定化する技術において、RITEは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、JFE スチール株式会社、太平洋セメント株式会社、および RITE は、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 CO_2 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。RITE の独自プロセスや研究開発スキルと鉄鋼およびセメント業界をリードする 2 社の技術力や幅広い見識を融合することによって、技術開発におけるシナジー効果が期待される。

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 CO_2 分離・回収技術を提案していきたいと考える。

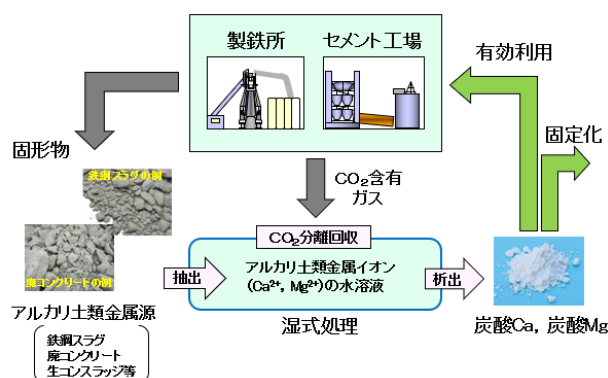


図9 CO_2 炭酸塩固定化および有効利用技術

6. 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 CO_2 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 CO_2 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2020 年度より $40\text{t-CO}_2/\text{day}$ 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 CO_2 と H_2 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 CO_2 の炭酸塩固定化技術開発にも取り組み始めたところである。

化学研究グループでは、これらテーマにおける個々の

CO₂ 貯留研究グループ

グループメンバー(2020 年 12 月末)

グループリーダー・主席研究員	薛 自求	主任研究員	張 毅
サブリーダー・主席研究員	内田 堅二	主任研究員	朴 赫
主席研究員	横井 悟	主任研究員	末国 次朗
主席研究員(兼)	野村 真	主任	淵上 聡子
副主席研究員	高須 伸夫	主任	中西 公美子
副主席研究員	中島 崇裕	研究員	孫 艷坤
副主席研究員	名井 健	研究員	三善 孝之
副主席研究員	田中 良三	研究員	小谷 雅文
主任研究員	橋本 励	研究員	永田 丈也
主任研究員	三戸 彩絵子	研究員	Amer, Rasha
主任研究員	岡林 泰広	研究員	吉川 浩人
主任研究員	利岡 徹馬	研究助手	平井 順子
主任研究員	高野 修	研究助手	辻 志織
主任研究員	内本 圭亮	研究助手	氷見 悠子
主任研究員	小牧 博信	研究助手	西出 朱美
主任研究員	指宿 敦志	研究助手	奥道 恵美
主任研究員	清水 信寿	研究助手	佐々木 恵
主任研究員	副島 勉	研究助手	佐々井 登喜男
主任研究員	渡辺 雄二		

安全な CCS 実施のための CO₂ 貯留技術研究開発の取り組み

1. はじめに

CO₂ の発生源から分離・回収した CO₂ を隔離する方策として、CO₂ 地中貯留は重要な選択肢の一つである。

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。

本事業は、現在、CO₂ の大規模貯留の実用化に向けた技術開発のフェーズにある。実用化のためには、大規模な貯留層に年間 100 万トン程度の CO₂ を安全に圧入・貯留する必要があり、これを実現するための安全管理技術の開発、大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発を行っている。

これまでの取り組みにより、上記開発技術の構成要素である圧入安全管理システム、地層の安定性評価・監視技術、有効圧入技術など各種のシステムや技術が、実際の現場に適用できるレベルとなっている。

さらに、実用化に向けては、開発した技術で大規模サイトにおいて実証することが有効である。本事業においても、海外の大学や研究機関などと積極的に連携し、海

外の大規模サイトでの技術実証を進めている。

ここでは、2020 年度で技術・システムを確立した、マイクロバブル CO₂ 圧入技術、圧入安全管理システム、CO₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムを紹介する。

これらについては、実用的で汎用性の高い装置・システムを構築することができた。このうち、マイクロバブル CO₂ 圧入技術については、米国や中国での CO₂ 貯留や石油増進回収(CO₂-EOR)などへも展開する。

上記のほか、当研究グループの技術を貯留サイトで実証しているものとして、光ファイバーセンシングがある。地層のひずみを検出する独自の手法を開発し、温度、圧力、音響、そして、ひずみを同時に計測するマルチセンサー機能を実現した。これについても海外のサイトに適用し実証している。

このように、当研究グループは、それぞれの技術を発展させて実サイトに適用することで、CCS 普及促進に貢献していく。

2. 主な研究課題と成果

2.1. マイクロバブル CO₂ 圧入技術の確立

マイクロバブル CO₂ 圧入技術とは、特殊なセラミックフィルターに CO₂ を通して微細気泡(マイクロバブル)化し、地下に圧入する技術である。マイクロバブル化には CO₂ を地中貯留する上で、次の利点がある。

- ・貯留層を構成する砂岩の隙間(孔隙)に入りやすい。
- ・貯留層内に密に留まりやすい。
- ・孔隙中の水に溶けやすい。

当グループは、これらの利点を室内実験と現場試験によって検証してきた。室内実験は、岩石コア試料を対象として X 線 CT 装置を利用して実施している図 1 上部は岩石コア試料の X 線 CT 画像の例である。図の左から注入された CO₂ が、コア試料の 82mm の位置に到達した時点の CO₂ 分布を寒色から暖色への変化で示している。2 本のコア試料の 82mm までの孔隙体積は、ほぼ同じである。マイクロバブル圧入による CO₂ が通常圧入よりも密に孔隙を満たしており(図 1 上部)、また、CO₂ の圧入量と溶解量も、共に多くなる(図 1 下部)。

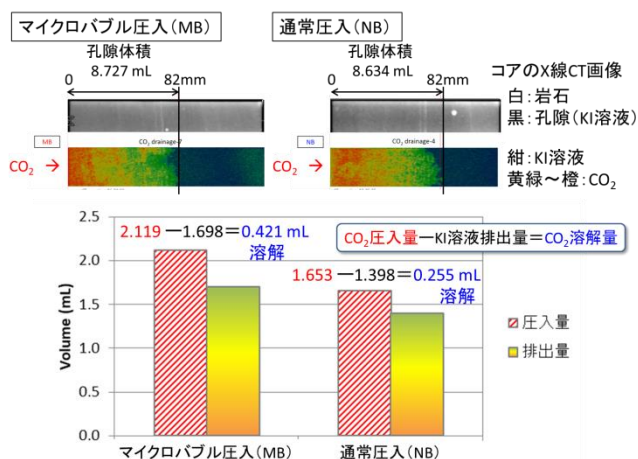


図 1 岩石コア試料を用いた
マイクロバブル CO₂ の貯留効率評価

実サイトでのマイクロバブル圧入試験は、2019 年度に引き続き、秋田県男鹿市の石油資源開発株式会社申川鉱場内で現場試験を行った。CO₂ 圧入対象層は地下約 800m にある低浸透性の砂岩層である。2020 年度は、マイクロバブル CO₂ 発生装置の坑内設置作業の効

率化を図るため、パッカーより下のシステム全長を 2019 年度の 84m から 14m へと 1/6 に縮小した(図 2)。設置・回収に伴う作業時間は 15 時間から 4 時間へと約 1/3 に短縮できた。

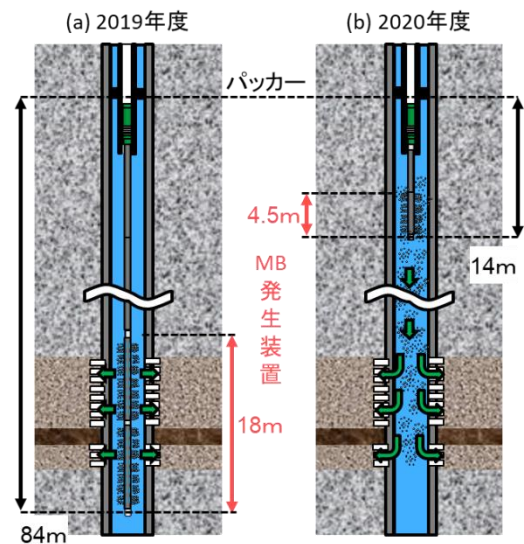


図 2 マイクロバブル(MB)発生装置の設置模式

システムの短尺化により、マイクロバブル発生装置本体の長さは 18m から 4.5m になった。また、マイクロバブルが発生する深度は、圧入対象層付近(図 2a)から浅くなった(図 2b)。このような設置条件で、2019 年度と同等のマイクロバブル CO₂ の圧入効果が発揮できるか検証した。マイクロバブル CO₂ の圧入レートは 2019 年度と同じ 1.5 トン/日である。坑口圧は 8.4MPa であった。坑底圧は 8.8MPa から 14.9MPa に上昇し、その後一定圧力で圧入できた。1MPa あたりの CO₂ 圧入レートを示す CO₂ 圧入指数は 0.25 トン/日/MPa であり、2019 年度の 0.36 トン/日/MPa とほぼ同じであった。マイクロバブル発生装置の設置条件が変わっても、通常圧入法の 0.09 トン/日/MPa よりも多くの CO₂ を圧入できることが確認できた。また、CO₂ 貯留率も高く、2019 度と同等の 82.9% であった。

一連の現場試験により、短尺のマイクロバブル発生装置の有効性ならびにその設置効率の向上が確認できた。これにより、本システムの製作や設置回収作業に関するコストの削減に大きく貢献できる。

2008 年に東京ガス株式会社と共同で基礎研究に着

手したマイクロバブル CO₂ 発生技術は、「貯留物質の貯留装置および貯留方法」として特許(特許第 5399436 号)も取得している。室内試験と現場での実証試験を経て、マイクロバブル CO₂ 圧入の技術を確立できた。2021 年以降は、実用技術として米国ノースダコタ州での CO₂ 貯留や中国君倫石油との CO₂-EOR 等、実適用を通して、本技術の普及・展開を図っていく。

2.2. 圧入安全管理システム(ATLS)の完成

様々な流体圧入プロジェクトにおいて、地層内圧力の増加に起因する地震の誘発が懸念されている。そのため、鉱廃水圧入プロジェクトや高温岩体地熱発電(EGS)では、サイト周辺の振動イベント発生状況を基に、操業を管理するトラフィックライトシステム(Traffic Light System)が利用されている。これまで CO₂ 地中貯留サイトでは、マグニチュード 1.1 以下の微小振動しか報告されていないものの、CO₂ 地中貯留事業においても誘発振動活動に対するリスクマネジメントが必要である。

当研究グループでは、我が国の実情に適した CO₂ 地中貯留のための圧入安全管理システム(ATLS: Advanced TLS)の開発を行ってきた。その要件としては、

- (1) 自然地震が多く、人為的ノイズも大きい観測データから微小振動イベントを抽出できること
 - (2) 微小振動イベント位置が決定可能なこと
 - (3) 自動でリアルタイムのデータ処理が可能なこと
- などが挙げられる。これらを満たす管理システム構築のために、CO₂ 貯留サイトで実観測を行っている苫小牧実証試験サイトの観測データを利用して研究開発を行ってきた。図 3 に ATLS の処理フロー概要を示す。地震観測データ入力後、イベントピック、位置決定を自動的に行う。同時に気象庁一元化震源情報を取得し、遠地の自然地震を排除した微小振動カタログを作成する。さらにイベントのマグニチュードと位置から判定を行う。

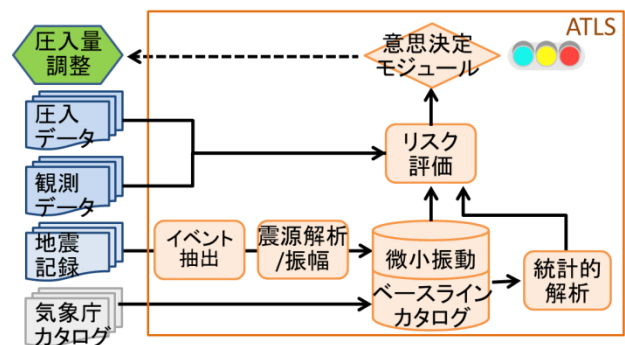


図 3 ATLS 概要図

ATLS は苫小牧サイトでの 2 年以上の長期間の連続観測データに対しても、自動的に信号処理および圧入地点近傍の微小振動イベントの位置決定が行えることを確認した。ATLS の出力(レポート)イメージを図 4 に示す。この図では監視対象区域内の微小振動発生頻度・イベント位置、およびそれらから判定されたトラフィックライトの色が示されている。

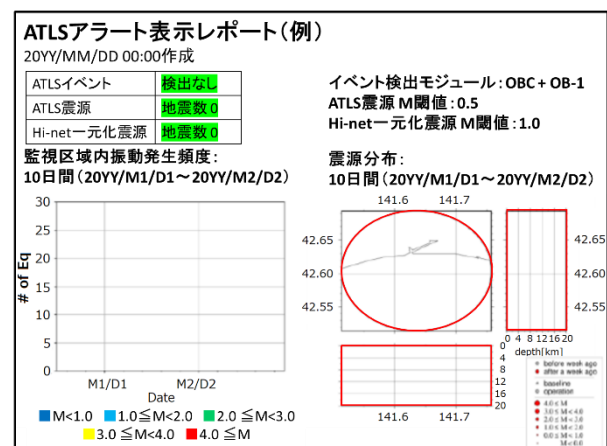


図 4 ATLS 出力例

これらの ATLS の基本機能に加え、様々なサイトにおいても本システムを適用できるように、補助的なツールの開発も行った。まず観測点設置に係わるツールとして、具体的な地震計配置と仮想イベント発生位置を指定した場合に、観測データからイベント位置推定を行うものを整備した。これは ATLS と同じ、平田・松浦(1987)による震源決定プログラム hypomh を活用したものとなっている。本ツールにより、どのような地震計配置がよい

のか、および観測網でのイベント位置決定精度の評価が行える。

また、入力データフォーマットを変換するツールを開発した。これまでの ATLS では苫小牧実証試験サイトに特化し、SEGD 形式のデータのみを対象としていた。この形式以外に、一般的な自然地震観測でも使われている、mini-SEED 形式と ASCII 形式のデータも取り扱えるようにした。

これらの改良を行った結果、実際の我が国の CO₂ 地中貯留サイトで動作検証され、かつ他のサイトでも適用可能な汎用性のある圧入安全管理システムが完成した。

SEGD 形式：地震探査学会 (Society of Exploration Geophysicists, SEG)が開発した地震データファイルの形式のひとつ。

mini-SEED 形式：地震データ交換標準 (The Standard for the Exchange of Earthquake Data, SEED)に則った地震データファイルの形式。時系列データを含む。

ASCII 形式：米国規格協会によって定められた文字コード (American Standard Code for Information Interchange)によるテキスト形式

2.3. CO₂ 漏出検出・環境影響評価総合システム

CO₂ 地中貯留において、貯留サイトの選定は、CO₂ が安全かつ安定的に貯留されるように慎重に行われるため、貯留した CO₂ が漏出するおそれは極めて小さいと考えられている。しかし、万が一の漏出に対する社会的な懸念を考えると、環境を監視することは重要である。また、海底下に CO₂ を貯留する場合には、法令により、漏出を仮定した環境影響評価をすることや、漏出やその兆しが生じていないか監視することが定められている。そこで、当研究グループでは、これまで海洋環境影響評価手法と監視手法の研究開発を行ってきたが、2020 年度にその成果を CO₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムとしてまとめた。ここでは、環境影響評価手法と監視手法の概略を紹介する。

海洋環境影響評価手法は、仮定した CO₂ の漏出によ

り、海水中の pCO₂ (CO₂ 濃度の指標の一つ)が、どの範囲でどれだけ上昇するのかを推定し、その pCO₂ 上昇幅 (ΔpCO_2)により、どんな生物がどんな影響を受けるかを示すものである。海に漏出した CO₂ は海の流れにより拡散されるため、海洋モデルを用いたシミュレーションで ΔpCO_2 の分布を計算する。 ΔpCO_2 の計算のためには数10km~100km程度の領域を計算すればよい。また、CO₂ を拡散させる海の流れは数 100km スケールの気象や海岸・海底地形の影響を受けて生じる。しかし、数 100km の領域を高解像に計算するのは効率が悪いので、当グループでは、 ΔpCO_2 の分布の計算に用いるのとは別の低解像のモデルで数 100km の領域を計算し、そのデータを利用することで適切な流れを再現し ΔpCO_2 の分布を計算できるようにした。一方、 ΔpCO_2 の生物影響を調べた研究、論文は多いが、そのデータがまとまった形になっておらず、シミュレーションによって得られた ΔpCO_2 の値がどんな生物にどんな影響を与えるのかを調べるのは容易ではない。そこで当研究グループでは、データベースを構築し、 ΔpCO_2 の値と生物の影響の対応関係を容易に抽出できるようにした。構築したデータベースに生物の条件(分類群、生息域など)を入力すると、その条件に合った生物がどの程度の ΔpCO_2 でどんな影響を受けるのかが出力される。この出力データとシミュレーションで得られた ΔpCO_2 の分布を組み合わせることにより、どの範囲で、どんな生物種が、どんな影響を受け得るかを推量することができる。

漏出が生じていないかの監視は、CO₂ が貯留される地層(貯留層)から海中まで対象が広範囲に及ぶ。貯留層は海底下 1km 以深にあるため、当研究グループの行った計算によれば、CO₂ が貯留層から漏れ出たとしても、真上の海底までの移動には 5 年以上かかる。また、貯留層から海底までの CO₂ の移動経路は地層の状況によるため、必ずしも貯留層の真上の海底から CO₂ が漏出するとは限らない。このようなことを勘案し、当研究グループでは、以下の手順で監視を行うことを提案する。まず、貯留層やその周囲の地層の監視をしっかり行う。そして、貯留層から CO₂ が漏れ出ていることがわかれば、

CO₂ が海底に到達するまでの間に地層内の詳細調査を行い、海底のどの辺りから漏出し得るか、範囲の絞り込みを行う。最後に、その絞り込んだ範囲を対象に海中を監視する。

海中での監視に関しては、漏出シグナルの検出手法の研究開発も行った。海中での漏出シグナルとしては、漏出 CO₂ の気泡と漏出 CO₂ の海水への溶解による CO₂ 濃度上昇の 2 種類が考えられる。気泡の検出にはサイドスキャンソナー (SSS; 音響探査機器の一種) が有効と考え、SSS の CO₂ 気泡検知能力を明らかにするための実験を行った。海域で海底から CO₂ 気泡を放出し、SSS で検出できるかどうか、条件を変えて繰り返し調べる実験である。この実験により、SSS は 2~4 トン/年以上の漏出速度の CO₂ 気泡を検出できることや、監視時の測線間隔は SSS の高度 (海底から SSS までの距離) 以内にしなければならないことなどを明らかにした。なお、4 トンの CO₂ は、10 人の人が呼吸で一年間に排出する量に相当する極めて少量の CO₂ である。一方、CO₂ の濃度上昇シグナルの検出のためには、pCO₂ の異常値の検出に関する研究を行った。CO₂ はもともと海水中に存在し濃度が自然変動するため、pCO₂ の上昇が自然変動によるのか (正常値)、漏出によるのか (異常値) を区別するのが難しく、異常値判定基準をどのように設定すればよいかが課題である (図 5)。当研究グループでは、pCO₂ と溶存酸素 (DO) の相関関係を用いた異常値判定基準 (pCO₂-DO 法) を考案した。まず、大阪湾の 9 年間の四季調査データ (1 観測点につき 1 季節 1 データ) の解析により、pCO₂ の変動が大きい海域や夏季は、pCO₂ の値だけで設定した異常値判定基準よりも、pCO₂-DO 法の方が精度よく異常値の検出ができることや、適切な基準を設定するためには少なくとも 5 年程度以上のデータを用いる必要があることを示した。次に、1 年以上に渡る pCO₂ や DO などの連続観測を行い、夏季の大阪湾奥部では pCO₂ の変動が大きく、場合によっては、観測時刻が数時間異なるだけでも pCO₂ の値が大きく異なりえることを明らかにした。一年を通じたデータが得られたことにより、pCO₂-DO 法では、偽陽性 (自然変動を異常と誤判定) の生じやすさが季節に

よって異なり得ることもわかった。センサーを用いた観測の場合には、センサーの応答時間を考慮して相関関係を計算する必要があることもわかった。このように、pCO₂ と DO の相関関係を用いた pCO₂ 異常値検出基準について、実際の運用で重要となる様々な特徴を明らかにできた。一方で、漏出 CO₂ は海の流れにより拡散されやすいことや、同じ点から漏出しても流れの向きや漏出率によって pCO₂ の高くなる範囲が変わり得ることなどから、漏出による pCO₂ の異常値を捉えるには、時間的・空間的に密な観測が必要となる。そのため、当研究グループでは、pCO₂ や pH などの CO₂ 濃度指標の観測は漏出を検出するためではなく、環境影響の有無を確認することに用いるのが適当と考えている。

得られた研究成果は事例集に組み込み、今後の海底下 CO₂ 貯留実用化において有効に活用されることを期待している。

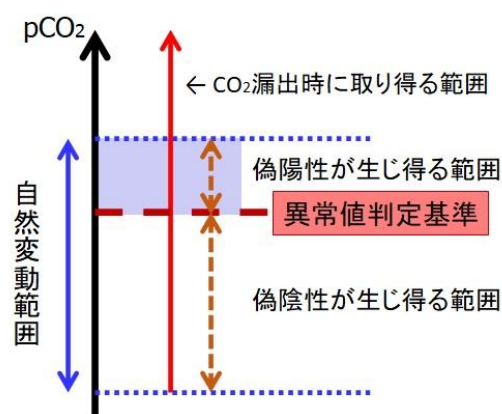


図 5 pCO₂ 異常値判定と偽陽性、偽陰性の関係

2.4. 先進技術開発による世界への貢献

世界各国では、大規模な CO₂ 貯留プロジェクトが進行している。ノルウェーの Snøhvit、カナダの Quest、豪州の Gorgon の各プロジェクトなどであり、いずれも年約 100 万トンの CO₂ 貯留が実現されている。

大規模 CO₂ 貯留で、世界各国が先行する中で、我が国が世界各国と対等に連携し、CCS の普及促進を先導していくには、核となる独自技術の提供で世界に貢献していく必要がある。

その一つが、前述したマイクロバブル CO₂ 圧入技術である。当該技術の適用により、流体の浸透性が必ずしも

良くない地層においても、CO₂の貯留効率を高めることができる。そのため、CO₂ 供給点近傍立地など、貯留地点選定の選択肢を高め、世界の CCS 普及促進に貢献することが可能となる。さらには、2018 年より中国君倫石油と共同開発を進めている低浸透性の油田での油の増産を実証し、CO₂-EOR への貢献も強化する。

もう一つが、光ファイバーセンシング技術である。地下の温度や圧力のモニタリング技術として、石油分野等ですでに適用が進んでいるが、当グループは光ファイバーにより地層のひずみを検出する独自の手法を開発し、温度、圧力、地震、そしてひずみを同時に計測するマルチセンサー機能を実現、実証した。

当該技術は、世界から高い関心を集めている。例えば米国ノースダコタ州立大学エネルギー・環境研究センター(EERC)と、実際の CCS サイトで共同実証試験を実施している。米国側は CO₂ 貯留サイトの地層安定性や CO₂ 挙動把握が可能となる一方、日本側は、大規模 CO₂ 貯留サイトで、光ファイバー計測技術の検証や施工技術の改良を図れるなど、相互にウィンウィンの関係を構築している。

また、海底下地中貯留の安定性を検証する欧州の SENSE プロジェクトにおける海底面の挙動監視への適用、さらには、アジア各国で計画されている CO₂ 貯留プロジェクトでの適用など、実証や活用の方が広がっている。

我が国の温室効果ガス排出を 2050 年までに実質ゼロにする目標を実現するには、世界各国と協調した CCS の普及促進が不可欠である。新技術開発やその活用コンサルティング等で貢献する RITE、CO₂ 貯留研究グループの今後の活動にぜひ注目いただきたい。

無機膜研究センター

グループメンバー(2020 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	山口 祐一郎	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	安原 健一郎	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	李 惠蓮	研究助手	菰野 恵子

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

シリカ膜やゼオライト膜など無機膜は、その高い分離性能に加え、耐熱性や耐環境性に優れるなどの特長を有しており、多様な用途への適用が可能と期待されている。また、蒸留法や吸着法など従来の分離・精製法と比較して、大幅な省エネルギー化が図れるとともに、CO₂分離・回収用途や水素社会構築に不可欠な水素分離・精製用途にも開発が進められており、地球環境の保全に資する環境・エネルギー技術として大きな注目を集めている。しかしながら、その実用化は、これまでアルコールの脱水など一部用途に留まっており、今後、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・産業化に向けた取り組みが求められている。

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ている。組織も研究部門と産業連携部門の2つから構成されており、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として、水素分離・精製・製造や分離回収されたCO₂の有効利用等の研究分野に取り組んでいる。また、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および共同研究の企画・立案等を図るべく、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。

2020 年は、NEDO から受託したメタンを直接分解し水素を製造する事業でシリカ膜とパラジウム膜を用いたメンブレンリアクター(膜反応器)を構築し、この反応系においてメンブレンリアクターの有用性を確認し、NEDO の委員会などで報告した。

CO₂ 分離・回収、有効利用 (CCU: Carbon Capture and Utilization)に関する取り組みについては、水に対して高選択性を有するゼオライト膜を開発し、膜反応器に応用することでメタノールへの転化率が、触媒反応器での転化率に比べて、約 3 倍向上することを確認した。また、NEDO のムーンショット型研究開発事業で、「大気中からの高効率 CO₂ 分離回収・炭素循環技術の開発」を金沢大学と共同で受託し、無機膜研究センターは、大気中から回収された CO₂ から液体炭化水素燃料を製造するプロセスの開発を行うことになった。

産業化戦略協議会では、共通基盤(信頼性評価等)研究会と CO₂ 分離研究会の第 2 フェーズ(2019～2020 年度)が終了し、セミナーでは web 開催を取り入れた。

本稿では、メタンからの水素製造および CCU 技術開発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。

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 CO_2 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°C 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水素分離膜と触媒から構成されるメンブレンリアクター(図 1)の開発とその有効性の実証

を開発項目としている。

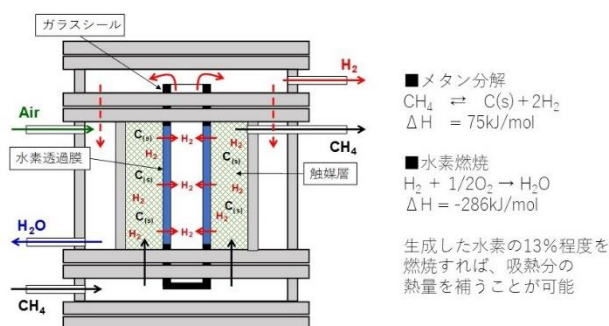


図1 メタン分解により水素製造するメンブレンリアクター

①の水素分離膜の開発については、シリカ膜とパラジウム膜を水素分離膜の候補として、製膜実験や文献調査を元に製膜の指針を絞り込んだ。シリカ膜の開発については、種々のシリカ源を用いて検討を行い、透過分離性能を評価することで、シリカ源の選定を行った。その結果、DMDMS(Dimethoxydimethylsilane; Si を中心にメチル基 2 つ、メトキシ基 2 つが結合しているケイ素化合物)をシリカ源とした膜において、本プロジェクトの目標性能を達成することができた。さらに、DMDMS の製膜条件を精査することにより、高い耐熱性を発揮するシリカ膜の製膜を可能とした(図 2)。

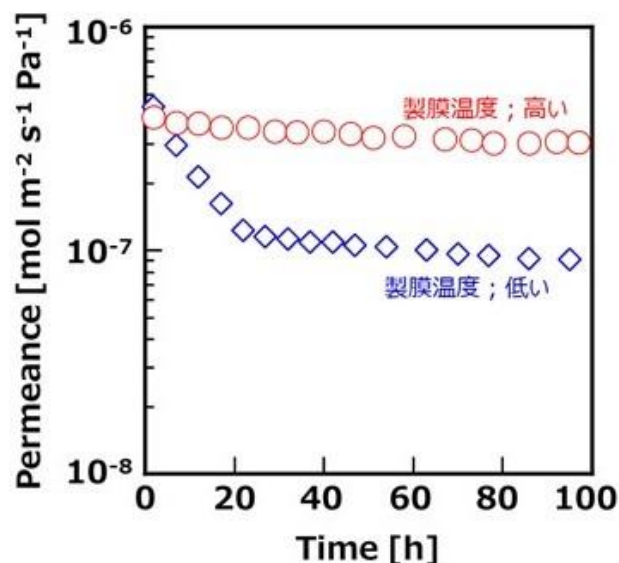


図2 製膜条件の異なるシリカ膜の耐熱試験の結果

パラジウム膜の開発については、高い水素透過性を維持しつつ、耐熱性の向上が見込まれる Pd-Cu 合金膜の製膜条件を検討し、RITE 無機膜研究センターの技術である細孔内充填型で Pd-Cu 合金膜の製膜を可能とした。製膜した膜の SEM-EDX から狙い通りの組成 (Pd60-Cu40wt%) で製膜できていることを確認している。さらに、製膜条件を精査することにより、細孔内充填型 Pd 膜の 500°C における水素透過率を $1.3 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ (これまでは $8 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ 程度) に向上することができた。耐熱性を有する水素透過膜を開発し、目標とする性能の目途を得た。

②の触媒開発については、国内外のメタン直接分解による水素製造を対象とした文献調査を行い、技術開発動向を把握するとともに膜反応器への適用可能性のある触媒を調査した。その結果、比較的低温で高い収率が得られると報告のある Ni/Fe/ Al_2O_3 系の触媒を候補として選定した。その触媒について、共沈温度、滴下の方法、沈殿剤の種類といった調製条件や、組成などを変更した 20 種類の触媒を試作し、反応性を評価した結果、比較的性能が高い触媒を膜反応器用の触媒として選定した(図3)。

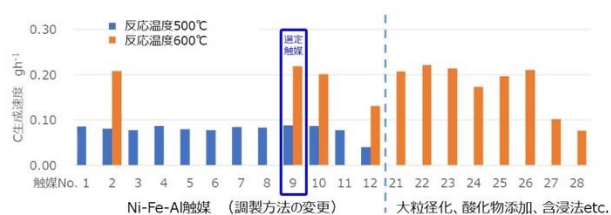


図3 メタン分解用触媒の試作と性能評価

③の膜反応器開発については、膜反応装置を設計・製作し、②において本反応系に適していると考えられるNi/Fe/Al₂O₃触媒、水素分離膜としてPdおよびシリカ膜を用いた膜反応試験を行った。反応温度 600℃、反応圧力 0.4 MPa の条件において、Pd 膜、シリカ膜の適用により転化率が向上することを確認し、膜反応器の有効性を実証するとともに、得られたカーボンは触媒を中心にグラフェンが積層している構造であることを確認した(図4)。

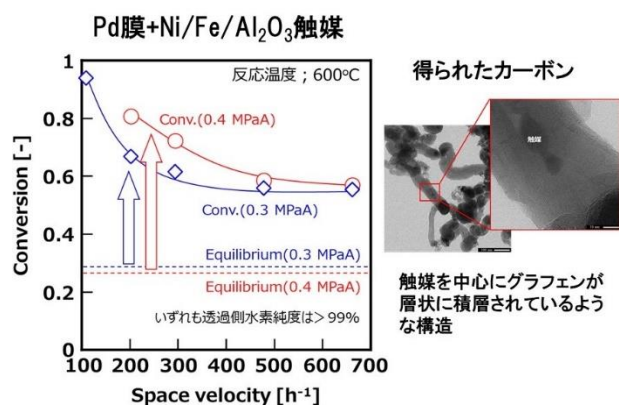


図4 Pd 膜を用いた膜反応試験の結果および得られたカーボンのSEM 画像

一方で、試験後のPd膜の水素透過性能がおよそ1/2に低下していた。試験後の膜のSEM-EDX 結果よりPd 層内にカーボンが固溶している様子が確認され、水素透過性能の低下はカーボンの固溶によるものであることが示唆され、新たな課題として対策に取り組んでいる。

3. CO₂ 有効利用技術の開発

CO₂ 有効利用技術は EU をはじめとする世界各国でCO₂ 削減に効果的であると盛んに研究開発・実証検討

が行われている技術である。一方で、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。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 を原料としたメタノール合成では顕著である。



この課題を解決する方法のひとつとして、膜反応器の適用が挙げられる。熱力学的平衡制約に支配される反応であるメタノール合成反応により生成した水(あるいはメタノール)を取り除くことができれば反応はメタノール生成側に促進される。一方で、一般的な脱水膜であるA型ゼオライト(LTA)膜の本反応系への適用は、水熱安定性の観点から難しいことが知られている。

そこで、無機膜研究センターでは、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、その新規ゼオライト膜を適用したメタノール合成膜反応器(MR; Membrane reactor)は、従来の触媒充填層型反応器(PBR; Packed bed reactor)よりも高いCO₂転化率を示すことを実験で明らかにしてきた(図5)。今後は、実用化に向けた研究開発を進めていく。

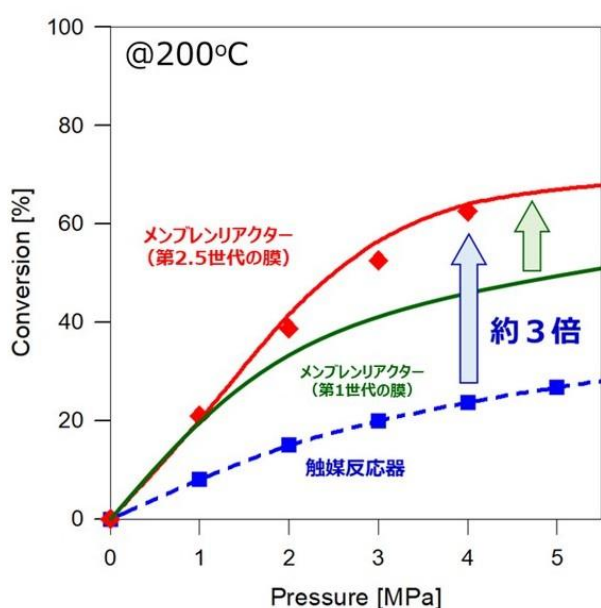


図5 脱水膜を用いた膜反応器によるメタノール合成

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

NEDO 事業「ムーンショット型研究開発事業／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／大気中からの高効率 CO₂ 分離回収・炭素循環技術の開発」に採択され、2020 年度より金沢大学と共に研究開発を行っている。無機膜研究センターは、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する (図6)。FT 合成もメタノール合成と同様に、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。また逐次反応であり、生成物は ASF (Anderson-Schulz-Flory) 則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。



図6 プロジェクトの全体概要

そこで本事業では、大気中から分離回収した CO₂ を

原料として、膜反応器を用いた高効率かつ省エネルギー型の CO₂ 変換技術の開発を以下の3項目を柱として進めていく。

- ① FT 合成へ適用可能な脱水および水素選択透過膜
- ② FT 合成用膜反応器
- ③ 最適プロセス構造

生成する水は、例えばゼオラ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ができれば触媒劣化を抑制することができると思われる。また反応制御については、例えばシリカ、パラジウムなどの水素選択透過膜を介して反応場に H₂ を供給することで制御することが可能であると考えられる。無機膜研究センターでは、これまで従来の LTA 型ゼオライト膜よりも水熱安定性を向上させた Si-rich LTA 型ゼオライト膜の開発に成功しているとともに、細孔内充填型 Pd 膜、水素透過性に優れるシリカ膜の開発も手掛けている。今後、これまでに得られている知見を最大限に活用し、FT 合成に適用可能な無機系分離膜および膜反応器の開発を強力に推進するとともに、これまで放置されがちであった無機系分離膜の“Science”を解き明かしていくつもりである。

4. 実用化・産業化に向けた取り組み

当センターの産業連携部門のコアとなるのは、「産業化戦略協議会」である。この協議会は、分離膜・支持体メーカーとユーザー企業計 18 社 (2021 年 1 月時点) が参画し、メーカーとユーザー企業のビジョンの共有および国費事業等共同研究の企画・立案等を推進して革新的環境・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、

- 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

などの事業を推進している。

2020 年は、新型コロナウイルスの感染拡大の影響で、例えば、研修会の開催を見送るなど、当初計画から変更が生じたものもあったが、web を活用した開催方法を取り入れ、CO₂ 分離研究会と共通基盤(信頼性評価等)研究会およびその下部組織として具体的作業を進める作業部会において、CO₂ 分離研究会で計 4 回、共通基盤(信頼性評価等)研究会で計 7 回開催し、調査検討を更に深めた。共通基盤研究会では具体的なゼオライト膜の加速劣化予備試験を行い、長期信頼性確立のための基礎データを取得して、2021 年度以降の国費事業等の立ち上げを目指している。CO₂ 分離研究会では、「高濃度 CO₂ を含む天然ガス田への無機膜適用性検討」をメインテーマとして検討した。

また、協議会会員向けセミナーを、web を活用して開催(2020 年度は年間 3 回)した。アドバイザリーボード、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、討論が行われている。無機膜の実用化・産業化に関連した有用な知識を得られる上に、会員企業間や第一線の研究者との交流の場としても有意義な場であると高い評価を得ている。

さらに、協議会会員向けセミナーの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

2020 年は、NEDO 事業であるメタンからの水素製造事業にメンブレンリアクターを適用し、その有用性を実証し、NEDO に報告を行った。本事業については、2021 年度から新しい事業が開始する予定であり、その事業を通じてより実用化に向けた取り組みを行う予定である。また、CO₂の有効利用を行う研究開発で着実に成果を上げると共に、新規にムーンショット型研究開発事業(「大気中からの高効率 CO₂ 分離回収・炭素循環技術の開発」)で、大気中から回収された CO₂ から液体燃料を製造するプロセスの開発を行うことになった。長期予算の獲得により安定して、センターの運営が可能となり、今後、世界の無機膜開発・実用化をリードする中核組織となるよう鋭意活動を進めていきたい。



図7 セミナーでの講演風景(2019 年 4 月開催分)

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 27 日	木津川市立木津川台小学校 第五学年	33
2 月 4 日	山城地方退職校園長会会員	37
2 月 18 日	精華町立精華南中学校 第一学年	4

掲載年月日	見出し	掲載紙名
2020.1.21	RITE、CO2分離・回収シンポ 実質ゼロ貢献 意義発信	電気新聞
2020.1.21	二酸化炭素を効率的に分離・回収 東京大学でシンポ	電波新聞
2020.1.23	温暖化対策でCCUS技術に注目 シンポやワークショップ相次ぐ	電波新聞
2020.1.24	CCSの事業化を展望 関連団体が最新動向紹介	電気新聞
2020.1.31	経産省 気候変動緩和へ議論 IPCCシンポ 世界の潮流を解説	電気新聞
2020.2.1	RITE「革新的環境技術シンポジウム2019」開催	ガスレビュー
2020.2.14	産業界の取り組み発信 RITE 脱炭素化でシンポ	電気新聞
2020.2.17	脱炭素技術開発に意欲 東ガス六水副社長が環境シンポで表明	ガスエネルギー新聞
2020.3.15	RITE「ALPS国際シンポジウム2020-脱炭素に向けた長期戦略-」等開催	ガスレビュー
2020.4.21	JFEスチール、太平洋セメントなど CO2有効利用で研究会 鉄鋼スラグの成分活用	鉄鋼新聞
2020.4.21	JFEスチール CO2固定技術共同開発へ 鉄鋼スラグなど活用	日刊産業新聞
2020.4.21	脱炭素社会構築に貢献 JFEスチール太平洋セメントら3者で研究会設置	建設通信新聞
2020.4.21	太平洋セメントら3者 炭酸塩へのCO2固定化技術を開発へ 研究会設立	日刊建設工業新聞
2020.4.22	JFEスチール・太平洋セメントなど、CO2・副産物で炭酸塩 温暖化対策	日刊工業新聞
2020.4.22	JFEスチールなど3社、CO2回収技術開発へノウハウを共有	日刊自動車新聞
2020.4.30	グリーンフォーラム21 第3回事例研究会 「石炭をめぐる問題」を考える 産業界の取り組み	日刊工業新聞
2020.5.1	炭酸塩固定技術を研究 JFEスチール 太平洋セメントなど	化学工業日報
2020.7.14	CO2固体吸収法 石炭火力で回収試験 NEDO パイロット設備設置	化学工業日報
2020.8.21	RITE CO2排出抑制新技術を紹介 9月に講演会	電気新聞
2020.9.25	CO2の分離・回収 舞鶴発電所で試験 RITEと川崎重工業 2022年度から	京都新聞
2020.9.25	地球環境産業技術研究機構と川崎重工 CO2分離・回収でパイロット機建設へ 関電・舞鶴発電所で	鉄鋼新聞
2020.9.25	舞鶴発電所でCO2分離回収 RITE、川重、関電 22年度から実証	電気新聞
2020.9.25	石炭火力でCO2分離・回収 舞鶴発電所 関電、システム実証	日刊工業新聞
2020.9.29	川重、関電とCO2回収実験	日経産業新聞
2020.9.30	石炭火力CCUS実証 川崎重工－RITE－関西電力 22年度から着手	化学工業日報
2020.10.5	舞鶴でCO2分離回収を実証	ガスエネルギー新聞
2020.10.13	高効率移動層システム 大気中から回収 メタ合成しPX 川重、CCU実用化に拍車	化学工業日報
2020.10.14	ビヨンド・ゼロ実現へ 温暖化対策シンポ RITE 最新の研究成果を報告	化学工業日報
2020.11.2	血友病治療薬に大賞を授与 バイオインダストリー大賞 奨励賞にバイオマスプラモ	包装タイムス
2020.11.7	「脱炭素社会の先導役に」下京 RITE設立30年で講演	京都新聞
2020.11.9	循環炭素社会への挑戦③ CO2分離<上>日本の技術に競争力	化学工業日報
2020.11.10	循環炭素社会への挑戦④ CO2分離<中>50年には1000円以下に	化学工業日報
2020.11.11	循環炭素社会への挑戦⑤ CO2分離<下>次世代技術の開発も進展	化学工業日報
2020.11.26	【風雲「究」】2050 温室ガスゼロの実現性 地球環境産業技術研究機構主席研究員・秋元圭吾氏	産経新聞
2020.12.3	カテコールを発酵生産 RITE 持続可能な香料原料	化学工業日報
2020.12.15	RITE「革新的環境技術シンポ」 50年までに社会実装狙う 大気中からCO2回収し燃料合成 非可食植物で海洋分解ポリマー	化学工業日報
2020.12.15	RITE設立30周年記念講演・祝賀会を開催 「2050年まで温室効果ガス100%削減目標達成にはCCSが必須の技術」 松岡京大名誉教授	ガスレビュー
2020.12.28	経済教室 温暖化ガス実質ゼロの論点(上)「地中貯留」促進へ官民組織を 茅陽一・東京大学名誉教授、山口光恒・地球環境産業技術研究機構参与	日本経済新聞

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

RITE Today^{2021 Vol.16}

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