

## ネガティブエミッション技術に係る動向調査

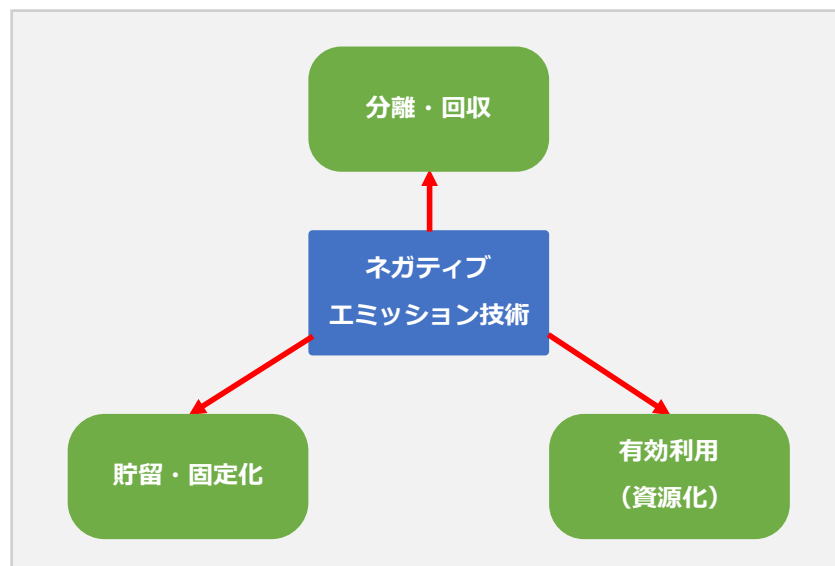
Short Review  
2023年2月資産運用研究所  
主任研究員  
藤原 崇幸

## 1. はじめに

近年は、世界の至るところで干ばつや水害、熱波、寒波など大規模な自然災害の発生が頻発しており、多くの人々の生命が危険にさらされ、多大な経済的損失を被っている。気候変動が及ぼす甚大な災害を低減するため、各国では異常気象の要因の一つとしてとらえられている温室効果ガス（GHG）の排出量を削減し、産業革命以前と比較して平均気温上昇を1.5℃に抑える目標を掲げ、その目標を実現すべく、カーボンニュートラル（CN）への取り組みを加速させている。

CNの実現のためには、あらゆる経済活動において排出されるGHGの排出量を削減する必要があり、さまざまな新技術の開発に注目が集まっている。その中でも期待されているのが、ネガティブエミッション技術（NETs）（図表1）である。NETsとは、大気中の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を分離・回収し、貯留・固定化・有効利用（資源化）することで大気中のCO<sub>2</sub>を除去する技術のことである。

図表1 主なネガティブエミッション技術



(出所) 日興リサーチセンター作成

そこで本レポートでは、このNETsに焦点を当て、取組状況や課題などに関する最新の動向を調査し、その内容を次章以降にまとめる。

## 2. 分離・回収に関する技術の動向

第2章では、各国の状況を交えながら、CO<sub>2</sub>を分離・回収する技術の最新動向について確認していく。

例えば、米国では2022年12月にエネルギー省が大気中のCO<sub>2</sub>を直接分離・回収する技術であるDAC (Direct Air Capture) を活用した事業などに2022会計年度～2026会計年度の5年間に渡って37億ドルを拠出すると発表した。また、2022年8月に成立したインフレ抑制法 (Inflation Reduction Act) では気候変動対策に3,700億ドルの歳出を盛り込み、CCS (CO<sub>2</sub>を貯留・固定化する技術) やDAC、EOR (Enhanced Oil Recovery: 石油増進回収技術) などに対する支援の強化を打ち出している。

我が国においても2030年のGHG排出量の2013年比46%削減や2050年のカーボンニュートラルの達成を見据えた動きが活発で、令和2年度第3次補正予算において2兆円の「グリーンイノベーション基金」を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) に創設し、エネルギー構造転換分野の枠内でCO<sub>2</sub>の分離・回収に関する技術開発プロジェクトが起ち上げられている。

例えば、住友化学とOOYOO (株式会社ウーユー) では分離膜を用いたCO<sub>2</sub>分離回収システムの開発・実装、昭和電工 (現: レゾナック) と日本製鉄では革新的分離剤による低濃度CO<sub>2</sub>分離システムの開発が同基金に採択されるなど、多くの企業の参加で技術的な進展が期待されている。

このように、各国で取り組みが進んでいるCO<sub>2</sub>の分離・回収技術開発について、経済産業省や環境省などの公表資料をもとに、以下に同技術の主な方法と特徴を記す (図表2)。

図表2 主なCO<sub>2</sub>分離・回収技術

技術	方法	内容
発電所などから排出されたCO <sub>2</sub> を分離・回収	化学吸収法	CO <sub>2</sub> と液体との化学反応を利用して分離・回収する方法
	物理吸収法	CO <sub>2</sub> を液体中に溶解させて分離・回収する方法
	物理吸着法	固体の吸着剤にCO <sub>2</sub> を吸着させ、減圧または加熱により分離・回収する方法
	固体吸収法	固体の吸収材にCO <sub>2</sub> を吸収させ、化学反応により分離・回収する方法
	膜分離法	CO <sub>2</sub> 分離機能を持つ膜を利用して分離・回収する方法
	クローズドIGCC	CO <sub>2</sub> 分離・回収機能を持つ発電システムで、石炭をガス化してガスタービン、蒸気タービンの2種類の発電形態で複合発電を行う
大気中のCO <sub>2</sub> を分離・回収	DAC	吸収液や吸着材に大気中のCO <sub>2</sub> を吸収・吸着させ分離・回収する方法

(出所) 経済産業省、環境省資料より日興リサーチセンター作成

CO<sub>2</sub>を分離・回収する技術であるが、大別すると2つに分かれ、一つは「発電所などから排出される

CO<sub>2</sub>を分離・回収する技術」、もう一つは「大気中のCO<sub>2</sub>を分離・回収する技術」である。

① 化学吸収法

化学吸収法は、CO<sub>2</sub>と液体との化学反応を利用して分離・回収する方法であり、主に用いる液体はアミン<sup>1</sup>（特にモノエタノールアミンが用いられることが多い）である。NEDOの資料<sup>2</sup>によると分離・回収コストとして4,200円/t-CO<sub>2</sub>と見込まれている。

② 物理吸収法

物理吸収法は、高圧下でCO<sub>2</sub>をSelexol（ポリエチレングリコールジメチルエーテル）液などの吸収液に溶解させて分離・回収する方法である。NEDOの資料によると分離・回収コストとして2,000円台/t-CO<sub>2</sub>と見込まれている。

③ 物理吸着法

物理吸着法は、ファンデルワールス力（分子間力）を利用して固体の吸着材にCO<sub>2</sub>を吸着させ、減圧または加熱により分離・回収する方法である。

④ 固体吸収法

固体吸収法は、CO<sub>2</sub>と固体吸収材との化学反応を利用して分離・回収する方法である。化学吸収法よりCO<sub>2</sub>分離に要するエネルギーを低く抑えることができるとされている。NEDOの資料によると分離・回収コストとして物理吸収法と同じ2,000円台/t-CO<sub>2</sub>と見込まれている。

⑤ 膜分離法

膜分離法は、CO<sub>2</sub>を分離する機能を持つ膜を利用して分離・回収する方法である。NEDOの資料によると分離・回収コストとして1,000円台/t-CO<sub>2</sub>と見込まれている。

⑥ クローズドIGCC

クローズドIGCCは、石炭をガス化してガスタービン、蒸気タービンの2種類の発電形態で複合発電を行う発電システム（IGCC）にCO<sub>2</sub>を分離・回収する設備を備えたものである。ガスタービン、蒸気タービンに加えて燃料電池の3種類の発電形態で複合発電を行う場合はIGFCという。

⑦ DAC

DACは、大気中に0.04%程度含まれるCO<sub>2</sub>を吸収液や吸着材に吸収あるいは吸着させ、大気から直接分離・回収する方法である。

### 3. 貯留・固定化に関する技術の動向

第3章では、各国の状況を交えながら、CO<sub>2</sub>の貯留・固定化に関する技術の最新動向について確認

<sup>1</sup> アミンとは、アンモニアの1つもしくは複数の水素がアルキル基で置換された化合物の一群のこと（ボルハルト・ショアー現代有機化学より）

<sup>2</sup> 「CO<sub>2</sub>分離・回収技術の概要」（<https://www.nedo.go.jp/content/100932834.pdf>）

していく。

例えば、カナダでは、シェルやシェブロン、マラソンが事業主体となって CCS 施設を建造、2015 年に商業運転を開始し、地下 2,000m に 600 万トン以上の CO<sub>2</sub>を貯留・固定化を行う予定としている。また、豪州では、シェブロンやエクソンモービル、シェルに加え大阪ガスや東京ガス、JERA が事業主体となって CCS 施設を建造、2019 年 8 月に商業運転を開始し、地下 2,000m 以上に 2022 年 7 月までに 700 万トン以上の CO<sub>2</sub>を貯留・固定化を行うとしている。

我が国では CCS を CN の実現に不可欠な技術と位置づけ、2022 年 1 月に「CCS 長期ロードマップ検討会」が設置された。まもなく最終とりまとめが出されようとしており、2050 年時点で年間約 1.2～2.4 億 t-CO<sub>2</sub>の貯留を目標に、2030 年までの事業開始を目指している。

このような動きに合わせ、JX 石油開発、ENEOS、電源開発では本格的な国内での CCS 実装に向け合弁会社を設立した。また、伊藤忠、三菱重工、INPEX、大成建設では船舶輸送を用いた大規模広域 CCS バリューチェーン事業の検討に入るなど民間の動きも活発となっている。

このように、CO<sub>2</sub>の貯留・固定化技術も分離・回収技術と同様に各国で取り組みが進んでいる。なお、CO<sub>2</sub>を貯留・固定化する主な技術は 2 つあり、一つは「発電所などから排出される CO<sub>2</sub>を地中に貯留・固定化する技術」、もう一つは「発電所などから排出される CO<sub>2</sub>を深海域に貯留・固定化する技術」である（図表 3）。

図表 3 主な CO<sub>2</sub>貯留・固定化技術

技術	方法	内容
CCS	CO <sub>2</sub> を地中に貯留・固定化	発電所などから排出された CO <sub>2</sub> を回収設備を通じて分離・回収し、陸地あるいは海底の地層へ貯留・固定化する方法
ハイドレート	CO <sub>2</sub> を深海域に貯留・固定化	発電所などから排出された CO <sub>2</sub> を回収設備を通じて分離・回収し、深海域（水深500m～）の低温・高圧を利用して CO <sub>2</sub> をハイドレート化して貯留・固定化する方法

（出所）経済産業省、環境省資料より日興リサーチセンター作成

経済産業省や環境省などの公表資料をもとに、以下に CO<sub>2</sub>を分離・回収する技術の主な方法の特徴を記す。

#### ① CCS

発電所などから排出された CO<sub>2</sub>を、回収設備を通じて分離・回収し、陸地あるいは海底の地層へ貯留・固定化する方法。我が国では、北海道・苫小牧にて 2012 年度～2015 年度にかけ実証試験場を建設、2016 年度～2019 年度にかけ地層へ 30 万トンの CO<sub>2</sub>圧入を実施し、現在はモニタリングを行っている。CO<sub>2</sub>と水が地層の岩石に反応し、鉱物化することで半永久的に固定

化されることも期待されている。

## ② ハイドレート<sup>3</sup>

発電所などから排出されたCO<sub>2</sub>を、回収設備を通じて分離・回収し、深海域（水深 500m〜）の低温・高圧を利用してCO<sub>2</sub>をハイドレート化して深海域に貯留・固定化する方法。2022 年 12 月に、電源開発と国立研究開発法人海洋研究開発機構の共同研究により、深海域でのCO<sub>2</sub>ハイドレート化現象を確認したことを発表し、CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留・固定化の実用化に向けた期待を抱かせている。

## 4. 有効利用（資源化）に関する技術の動向

第 4 章では、各国の状況を交えながら、CO<sub>2</sub>の有効利用（資源化）に関する技術の最新動向について確認していく。

CO<sub>2</sub>の有効利用（資源化）については、CCS などを通じて分離・回収したCO<sub>2</sub>を資源として捉え、CO<sub>2</sub>を再利用（リサイクル）することで大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制することが期待され、CCUS とも呼ばれている。

例えば、米国や英国では鉄鋼製品の製造過程で発生する製鋼スラグとCO<sub>2</sub>から炭酸カルシウムなどの炭酸塩を製造、CO<sub>2</sub>を固定化する技術の開発を行っている。カナダではセメント硬化中にCO<sub>2</sub>を注入することで、CO<sub>2</sub>を固定化したコンクリートの製造技術の開発を行っている。また、カーボンリサイクル燃料を開発・製造するチリの企業は約 60 億ドルを投じて、米国にカーボンリサイクル燃料生産拠点を建設し、2026 年の操業を目指している。

我が国でも、2019 年 6 月にカーボンリサイクル技術ロードマップを策定、さらに 2021 年 7 月に改訂版のカーボンリサイクル技術ロードマップを策定した。現在は、このロードマップに基づいて、官民が協力して取り組みを加速させている。

例えば、神戸製鋼所と神鋼環境ソリューションでは、NEDO の「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／CO<sub>2</sub>排出削減・有効利用実用化技術開発」において「製鋼スラグを活用したCO<sub>2</sub>固定化プロセスの開発」が採択され、研究開発を行っている。また、世界で初めて人工光合成の実証試験に成功した豊田中央研究所は、人工光合成のリーディングカンパニーとして 2021 年には太陽光変換効率 10.5%を達成、植物の光合成効率の約 10 倍という高い変換効率を実現させている。

このように、各国でCO<sub>2</sub>の有効利用（資源化）技術開発の取り組みも進んでおり、以下に主なCO<sub>2</sub>の有効利用（資源化）技術やそれらに関する方法、特徴などを記す（図表 4）。

<sup>3</sup> ハイドレートとは、メタンやCO<sub>2</sub>などのガスが、低温高圧の条件下で水分子にガス分子が取り込まれ、氷状の固体結晶となった状態を言う。総称して、ガスハイドレートと呼ばれる。



図表 4 主なCO<sub>2</sub>有効利用（資源化）技術

技術	方法	内容
EOR/EGR	直接圧入	発電所等から排出されたCO <sub>2</sub> を回収し、油層（もしくはガス層）に直接圧入することで、1次回収等では回収できなかった油槽（もしくはガス層）に留まっている残余原油（ガス）の状態を変化させて回収率を大幅に改善させる方法
人工光合成	CO <sub>2</sub> と水素による有機化合物生成	発電所等から排出されたCO <sub>2</sub> を回収設備を通じて分離・回収し、太陽光と光触媒を利用して水を水素と酸素に分解、生成された水素と反応させて有機化合物を生成する方法
メタネーション	CO <sub>2</sub> と水素によるメタン生成	発電所等から排出されたCO <sub>2</sub> を回収設備を通じて分離・回収し、水素と反応させメタンを生成、エネルギーとして利用し、燃焼した際に発生するCO <sub>2</sub> をさらに回収して再利用（リサイクル）する方法
次世代FT合成	CO <sub>2</sub> と水素から液体合成燃料生成	発電所等から排出されたCO <sub>2</sub> を回収設備を通じて分離・回収し、FT合成技術を用いて水素と反応させ液体合成燃料を製造する方法
炭酸塩固定技術	CO <sub>2</sub> を製鋼スラグにより固定化	発電所等から排出されたCO <sub>2</sub> を回収設備を通じて分離・回収し、アルカリ土類金属とCO <sub>2</sub> を反応させ炭酸塩を製造する方法

（出所）経済産業省、環境省資料より日興リサーチセンター作成

① EOR（Enhanced Oil Recovery：石油増進回収技術）/EGR（Enhanced Gas Recovery：ガス増進回収技術）

発電所等から排出されたCO<sub>2</sub>を分離・回収し、油層（もしくはガス層）に直接圧入することで、1次回収や2次回収では回収できなかった油槽（もしくはガス層）に留まっている残余原油（もしくは残余ガス）の状態を変化させて回収率を大幅に改善させる方法である。例えば原油の場合、一般的には2次回収の時点でも地下に60～70%程度の残余原油がある。EOR/EGRによってさらなる効率的な資源利用が期待されている。

② 人工光合成

発電所等から排出されたCO<sub>2</sub>を、回収設備を通じて分離・回収し、太陽光下で水を光触媒により水素と酸素に分解、生成された水素と反応させて化学品などの原料となるオレフィンなど有機化合物を生成する方法である。光触媒が重要なキーデバイスであり、高い太陽光変換効率の実現がカギを握っている。

③ メタネーション

発電所等から排出されたCO<sub>2</sub>を、回収設備を通じて分離・回収し、水素と反応させメタンを生成、エネルギーとして利用し、燃焼した際に発生するCO<sub>2</sub>をさらに回収して再利用（リサイクル）する方法である。LNGとのコスト差額などの課題が残るが、メタネーションによるエネルギー

ーサイクルが実用化・商用化されれば、コンビナート等のCO<sub>2</sub>大量排出施設におけるCN化などが期待される。我が国でも2021年6月に「メタネーション推進官民協議会」を設置し、メタネーションの実現に向けた取り組みが進んでいる。

#### ④ 次世代 FT 合成<sup>4</sup>

発電所等から排出されたCO<sub>2</sub>を、回収設備を通じて分離・回収し、FT合成技術を用いて水素と反応させ液体合成燃料を製造する方法である。再生可能エネルギーなどを由来とするCO<sub>2</sub>フリー水素と回収CO<sub>2</sub>から合成燃料を製造することでCN実現が期待される。ただし、商用化に向けて、安価かつ大量の水素の製造、高濃度のCO<sub>2</sub>の調達などが課題として挙げられている。

#### ⑤ 炭酸塩固定技術

発電所等から排出されたCO<sub>2</sub>を、回収設備を通じて分離・回収し、アルカリ土類金属とCO<sub>2</sub>を反応させ炭酸塩を製造する方法である。炭酸塩固定技術によってCO<sub>2</sub>を固定化するためには大量のアルカリ土類金属（カルシウムやマグネシウムなど）を必要とするが、製鋼スラグは酸化カルシウムやシリカを主成分とし、酸化マグネシウムなども含有しており、固定化の原料として有望視されている。

## 5. おわりに

本レポートでは、CNの実現に向けて大きな期待を寄せられているNETsの中でも特に注目を集めている「分離・回収」、「貯留・固定化」及び「有効利用（資源化）」に関する技術を取り上げ、それぞれについて最新動向などを紹介した。

2015年に採択されたパリ協定において「世界共通の長期目標として地球の気温上昇を産業革命以前と比べて2度以内の目標設定、1.5度以内に抑える努力の追求」が掲げられ、全世界でCNの実現に向けた取り組みが行われている。

地球温暖化の主な要因と考えられているGHGの中でもとりわけ排出量が多いCO<sub>2</sub>も、2050年のCO<sub>2</sub>排出ネットゼロ社会を実現するため大幅な削減が求められており、削減のための様々な技術開発が進行している。ただし、これら技術が実用化・商用化へと進んでいくためには、技術的な課題の他、制度面やコスト面の課題解決も必要となる。

特に、コスト的課題はCO<sub>2</sub>削減のための技術開発において非常に大きな課題として認識されており、コスト低減のための努力も続けられている。ただし、これまでコストフリーで排出してきたCO<sub>2</sub>をコストフリーで削減することはほぼ不可能であり、全世界でCNを実現、ひいては持続可能な社会を構築していくためには応分のコスト負担が不可避である。したがって、地球上で生活するすべての人がコスト負担の必要性を理解し、受け入れる努力をすることも必要である。

<sup>4</sup> FT合成は、合成ガス（例：一酸化炭素と水素の混合ガス）から石油代替燃料や化学品を合成する触媒反応のことで、フィッシャー・トロプシュ合成とも言う。

2050年のネットゼロ社会の実現に向けて、これからも様々なハードルが出現してくると思われるが、CO<sub>2</sub>削減に向けたNETsの早期進展が期待される。

#### 参考文献

エネルギー省（米国,2022）,「Biden-Harris Administration Announces \$3.7 Billion to Kick-Start America's Carbon Dioxide Removal Industry」

<https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-37-billion-kick-start-americas-carbon-dioxide>

ホワイトハウス（米国,2022）,「Inflation Reduction Act Guidebook」

<https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook/>

経済産業省,「グリーンイノベーション基金事業」

<https://green-innovation.nedo.go.jp/>

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（2021）,「CO<sub>2</sub>分離・回収技術の概要」

<https://www.nedo.go.jp/content/100932834.pdf>

Shell Canada（カナダ）,「Quest Carbon Capture And Storage」

[https://www.shell.ca/en\\_ca/about-us/projects-and-sites/quest-carbon-capture-and-storage-project.html](https://www.shell.ca/en_ca/about-us/projects-and-sites/quest-carbon-capture-and-storage-project.html)

Chevron Australia（豪州）,「Gorgon Carbon Capture And Storage」

<https://australia.chevron.com/our-businesses/gorgon-project/carbon-capture-and-storage>

経済産業省,「CCS 長期ロードマップ検討会」

[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/ccs\\_choki\\_roadmap/index.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/index.html)

苫小牧市,「苫小牧におけるCCS大規模実証試験」

<https://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/kigyoritchi/ccs/ccsnogaiyo.html>

電源開発株式会社,「深海域でのCO<sub>2</sub>ハイドレートの生成を確認しました」

[https://www.jppower.co.jp/news\\_release/2022/12/news221215.html](https://www.jppower.co.jp/news_release/2022/12/news221215.html)

独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構,「令和元年度JOGMEC石炭開発部成果報告会海外炭開発高度化等調査」

<https://www.jogmec.go.jp/content/300368454.pdf>

テキサス州政府（米国,2022）,「Governor Abbott Announces Highly Innovative Fuels Selection Of Matagorda County For eFuels Facility In Bay City」

<https://gov.texas.gov/news/post/governor-abbott-announces-highly-innovative-fuels-selection-of-matagorda-county-for-efuels-facility-in-bay-city>



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（2021）, 「「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」に係る実施体制の決定について」

[https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3\\_100235.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100235.html)

株式会社豊田中央研究所, 「実用サイズの人工光合成で植物の太陽光変換効率を超える」

<https://www.tytlabs.co.jp/presentation/case-11.html>

独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構, 「令和元年度 JOGMEC 石炭開発部成果報告会海外炭開発高度化等調査」

[https://www.jogmec.go.jp/oilgas/technology\\_004.html](https://www.jogmec.go.jp/oilgas/technology_004.html)

外務省, 「2020 年以降の枠組み：パリ協定」

[https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w\\_000119.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html)

(END)