

主要な CO₂ の分離・回収技術とコスト的課題

Research Clip
2022年4月

社会システム研究所
アナリスト
高橋 龍生 CFA

1. はじめに

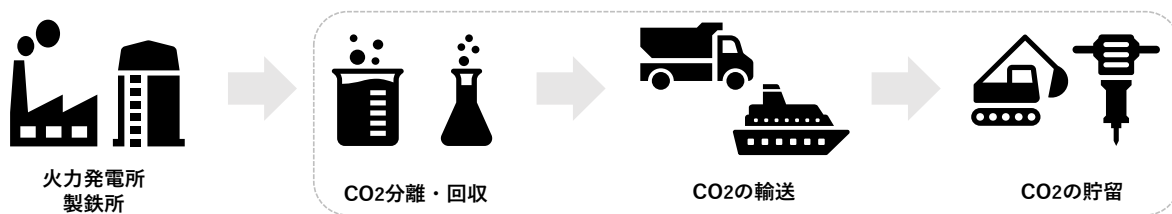
気候変動問題への対応から、世界的に温室効果ガスの排出削減が急務となっている。主要な温室効果ガスである二酸化炭素(以下、CO₂)の世界の年間排出量は約 330 億トンに上る。2015 年に開催された国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21) で採択されたパリ合意により、途上国を含めた世界各国で温室効果ガス排出削減の努力が行われている。

以上を受けて、世界中で火力発電から再生可能エネルギー発電への移行が進みつつある。一方で、石炭や天然ガスといった化石燃料をベースとした火力発電からの即脱却も現実的ではなく、排出された CO₂ を回収し、地中に貯留する Carbon dioxide Capture and Storage(以下、CCS)への注目が集まっている。本稿では、CCS における主要な CO₂ の分離・回収技術を取り上げた上で、同技術の導入において現状指摘されているコスト的課題について概説する。

2. CCS 技術の概要

CCS とは、火力発電所や製鉄所などから排出された CO₂ を分離・回収、輸送し、地中に貯留することにより、CO₂ の大気中への排出を防ぎ、固定化する技術である。したがって、CCS は CO₂ の①分離・回収、②輸送、③貯留、の 3 工程から成り立っている(図表 1)。また、昨今では回収した CO₂ を地下に貯留するだけでなく、水素と化学結合させメタンガスとして再利用するなど、カーボン利用(CCUS:Carbon dioxide Capture,**Utilization** and Storage)も進んでいる。

図表 1 CCS の 3 工程



(出所)日興リサーチセンター作成

3. CCS 浸透の背景

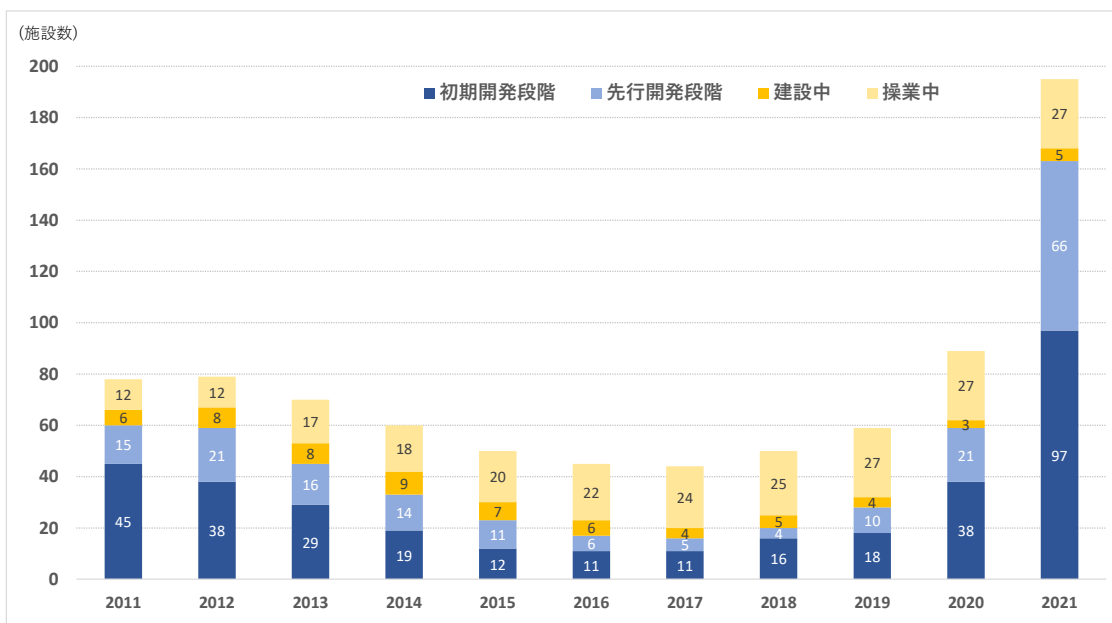
CCS は、排出源から高濃度の CO₂ を大規模に回収、削減できる技術であり、既存の火力発電システ

ムなどとの相性が良く、再生可能エネルギー発電への移行において重要な役割を担うと期待されている。

CCS に初めて焦点が当てられたのは、2005 年の G8 グレンイーグルズ・サミットである。同サミットにおいて、地球温暖化が長期的かつ深刻な人類共通の課題であることが再認識され、温室効果ガス削減のための「グレンイーグルズ行動計画」が策定された。同行動計画において、G8 は IEA(国際エネルギー機関)に対して、「代替エネルギーシナリオおよびクリーンで、賢明かつ競争力のあるエネルギーの将来に関する戦略」について提言を求めた。これを受けて、IEA が 2008 年の洞爺湖サミットで提出した最終報告において、エネルギー効率の向上、再生可能エネルギー、原子力発電の利用拡大以外にも、CCS の実用化が温室効果ガスの削減に寄与するとされた。IEA の同報告を受けて、洞爺湖サミットの G8 共同声明で CCS の実証プロジェクトの支持が表明されたことが、CCS 技術の研究拡大の大きな契機となった。

図表 2 は、世界の CCS プロジェクトの施設数の推移である。2020 年からは急激に開発が進んでいる。なお、日本では 6 件の CCS プロジェクトが進行しており、うち 3 件は火力発電所に CCS を設置するプロジェクトとなっている(図表 3)。

図表 2 世界の CCS プロジェクトの施設数



(出所)IEA の HP より日興リサーチセンター作成

図表 3 日本の CCS プロジェクト

| No. | 施設名 | 運用状況 | 地域 | 産業 | (国の委託)事業者 |
|-----|------------------|------|-------|---------|-------------------------------|
| 1 | COURSE 50 | 稼働中 | 千葉、広島 | 鉄鋼の生産 | 日本製鉄、JFEスチール、神戸製鋼所、日鉄エンジニアリング |
| 2 | EAGLEプロジェクト | 完成 | 福岡 | 火力発電 | 電源開発(J-POWER) |
| 3 | 三川燃焼後回収プラント | 稼働中 | 福岡 | 火力発電 | 東芝エネルギーシステムズ |
| 4 | 長岡プロジェクト | 完成 | 新潟 | 天然ガスの生成 | 地球環境産業技術研究機構 (RITE) |
| 5 | 大崎クールジェンプロジェクト | 建設中 | 広島 | 火力発電 | 大崎クールジェン(電源開発と中国電力の合併会社) |
| 6 | 苫小牧 CCS 実証プロジェクト | 稼働中 | 北海道 | 水素の製造 | 日本CCS調査 |

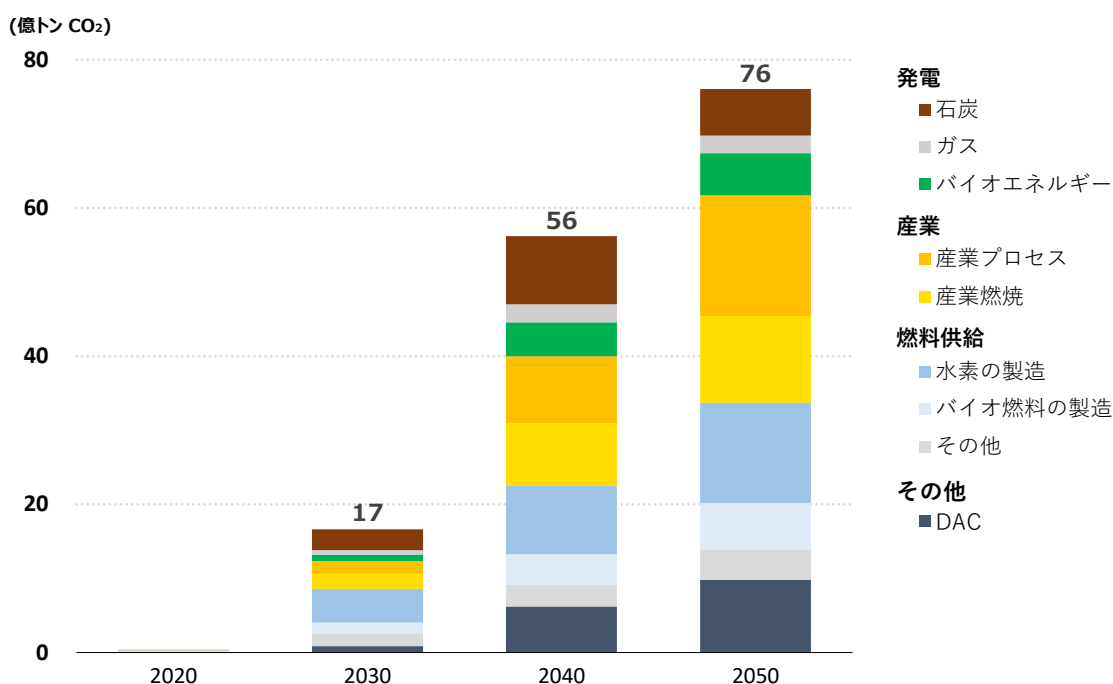
(出所) Global CCS Institute データベースより日興リサーチセンター作成

4. CCS の役割

温室効果ガスの削減努力だけでは、カーボンニュートラルは達成できないため、排出のオフセットおよびネガティブエミッションに CCS は必要不可欠となる。IEA が 2021 年に公表した「Net Zero by 2050 Roadmap for the Global Energy Sector」で示された 2050 年ネットゼロシナリオにおいては、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーへの移行、電化や省エネによる CO₂ 削減がネットゼロに主として貢献するとされている。また、CCUS もネットゼロシナリオにおいて、その利用が前提となっており、2050 年近辺では、年間平均およそ 70 億トン台の CO₂ 回収が試算されている(図表 4)。

特に、CCS は、火力発電、鉄鋼やセメントの製造工程など、電化や低炭素による代替が容易ではなく、CO₂ の削減が困難な Hard-to-Abate 産業のカーボンニュートラルに必要不可欠となってくる。また、IEA の同シナリオでは、火力発電や重化学工業から排出された CO₂ の回収だけではなく、大気中の CO₂ を直接回収する DAC(Direct Air Capture) やバイオエネルギー発電に CCS を付随させた BECCS(Bio-energy with Carbon Capture and Storage)などのネガティブエミッション技術の利用拡大も期待されている。さらには、産業プロセスに加え、ブルー水素の生産において発生する CO₂ も CCS の利用により、回収することが見込まれている。

図表 4 IEA の 2050 年ネットゼロシナリオにおける CO₂ 回収の用途と各回収量の見込み



(出所)IEA, "Net Zero by 2050 Roadmap for the Global Energy Sector"より日興リサーチセンター作成

5. 主な CO₂ 分離・回収方法

次に、主な CO₂ 分離・回収方法について紹介する。環境省の分類によると、CO₂ を分離・回収する方法は、①**燃焼後回収**(Post-Combustion)、②**燃焼前回収**(Pre-Combustion)、③**酸素燃焼**(Oxy-fuel)の3

種類に大別される。燃焼後回収は、化石燃料を燃焼した後に、火力発電所などから排出される排ガスから CO₂ を分離・回収する。主な燃焼後回収技術としては、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法、深冷分離法がある。

また、燃焼前回収は化石燃料から CO₂ と水素を分離生成し、CO₂ を回収した後に水素やアンモニアを燃料に用いる。主な燃焼前回収技術としては、物理吸収法、物理吸着法がある。

最後に、酸素燃焼法は、化石燃料の燃焼に(空気から分離させた)高濃度の酸素を使用し、排ガスの CO₂ 濃度を高め、効率的に CO₂ を回収する方法である。上記以外にも、化学ループ燃焼法が検討されている。同回収方法は、化石燃料を酸化鉄などの金属酸化物中の酸素を使って燃焼させる方法であり、空気由来の窒素などが混入せず、排ガスが CO₂ と水蒸気のみとなるため、容易に高濃度の CO₂ を回収できる。

図表 5 CO₂ 分離・回収方法の比較

| 手法 | | 原理 | 起動力 | 長所 | 短所 |
|----------|-----|-------|--------------|--|--|
| 化学吸収法 | | 化学反応 | 温度差 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 低分圧ガス向き ・ 炭化水素への親和力が低い ・ 大容量向き | <ul style="list-style-type: none"> ・ 吸収液が高価 ・ 腐食、浸食、泡立ちがある ・ 適用範囲が限定的 ・ 再生用熱源が必要 |
| 物理吸収法 | | 物理吸収 | 分圧差 (濃度差) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 高分圧ガス向き ・ 適用範囲が広い ・ 腐食、浸食、泡立ちが少ない ・ 再生熱源を必要としない | <ul style="list-style-type: none"> ・ 吸収液が高価 ・ 重炭化水素への親和力が高い |
| 膜分離法 | | 透過 | 分圧差 (濃度差) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 簡便 ・ 安価 ・ 小容量向き | <ul style="list-style-type: none"> ・ 低純度 ・ 運転費が高い ・ 大容量に不向き ・ 油脂分含有ガスに弱い |
| 深冷分離法 | | 液化・精留 | 相変化 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 高純度精製が可能 ・ 大容量向き | <ul style="list-style-type: none"> ・ 装置が複雑 ・ 建設費が高価 ・ 運転費が高い |
| 物理吸着法 | PSA | 吸着 | 分圧差 (濃度差) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 高純度精製が可能 ・ 装置が比較的簡易 ・ 適用範囲が広い | <ul style="list-style-type: none"> ・ 再生ガスが必要 ・ 水分の親和性が強い |
| | TSA | 吸着 | 温度差 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 高純度精製が可能 ・ 適用範囲が広い | <ul style="list-style-type: none"> ・ 吸着材量が多く、装置が大型化 ・ 吸着材費用が掛る ・ 再生用熱源が必要 |
| 酸素燃焼法 | | 空気分離 | 温度差 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 高純度精製が可能 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 空気分離設備が大型 ・ 空気分離装置に動力が必要 |
| 化学ループ燃焼法 | | 空気分離 | 温度差 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 低消費エネルギー | <ul style="list-style-type: none"> ・ 装置の耐久性に課題 |

(出所)環境省「平成 25 年度シャトルシップによる CCS を活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書」より日興リサーチセンター作成

(1)化学吸収法

化学吸収法は、イオン化学反応を利用して、CO₂ を分離する方法である。イオン結合により、CO₂ を吸収するモノエタノールアミン(MEA)液などのアミン水溶液に排ガスを通して、液中に CO₂ を取り込

む。吸収塔内で CO₂ は 40～50℃でアミン水溶液とイオン結合反応を起こし、アミン炭酸塩を生成する。生成されたアミン炭酸塩を再生塔で 110～130℃まで加熱すると、CO₂ はアミン水溶液から気化し、高濃度の CO₂ を回収することが可能となる。

しかし、化学吸収法では、CO₂ を吸収したアミン水溶液の加熱において、多大なエネルギーを消費するため燃費が悪い点が挙げられる。また、アミン水溶液の漏洩による生態系や人体への影響が懸念されている。したがって、エネルギー効率が良く、CO₂ 吸収率が高いアミン水溶液の開発が進められている。

(2)物理吸収法

物理吸収法は、CO₂ をイオン結合させて吸収する化学吸収法とは違い、吸収塔で CO₂ を吸収するポリエチレングリコール系溶液やメタノールなどの吸収液に排ガスを通して、高圧・低温下で物理的に CO₂ を吸収する方法である。そして、再生塔で減圧または加熱し、高濃度の CO₂ を回収する。化学吸収法がイオン結合を利用したのに対して、物理吸収法では圧力や温度を利用して吸収液に CO₂ を取り込む点で異なるが、基本的に装置設備は同様の構造となる。

(3)膜分離法

膜分離法は、排ガスを細かい膜に通して、CO₂ をろ過して取り出す方法である。膜分離法は、高圧力の排ガスからの CO₂ 分離においては、上記の化学吸収法および物理吸収法のように加減圧や加熱によるエネルギー消費がなく、最もエネルギー効率の良い回収方法であるため、期待が高まっている。

膜分離は、吸収法とは異なり、エネルギー効率が高い点で優れている。しかし、分離に必要な膜面積を確保するための物理的な空間を要する点やろ過技術の観点から、高濃度の CO₂ を得られない点で難が残っている。

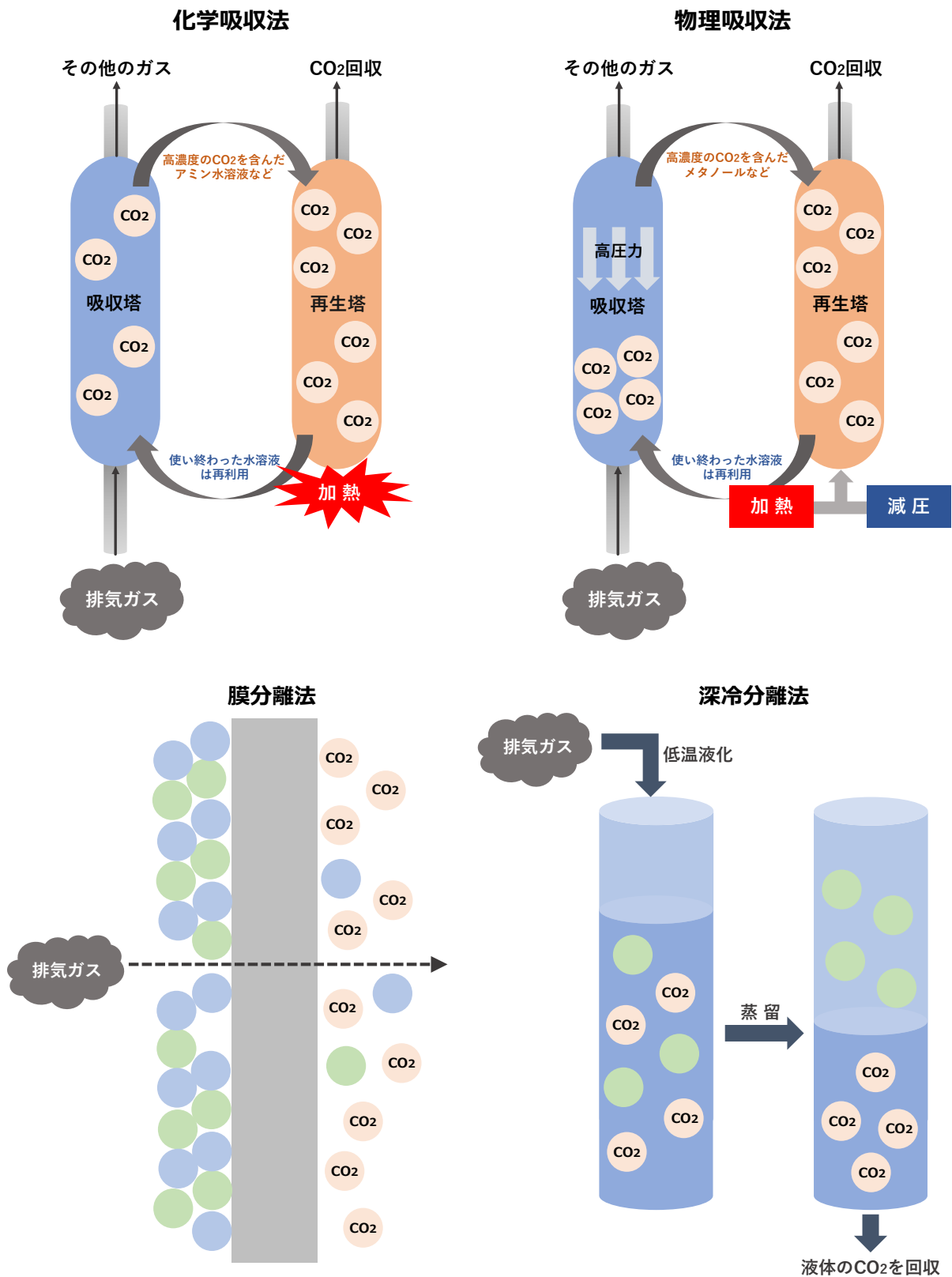
(4)深冷分離法

深冷分離法は、気体の沸点の違いを利用し、排ガスを圧縮および低温液化し、蒸留することで CO₂ を取り出す方法である。しかし、他の分離方法に対して、設備投資コストが高くなることや排ガスの圧縮に必要なエネルギー消費量が大きいため、実用化には至っていない。

(5)物理吸着法

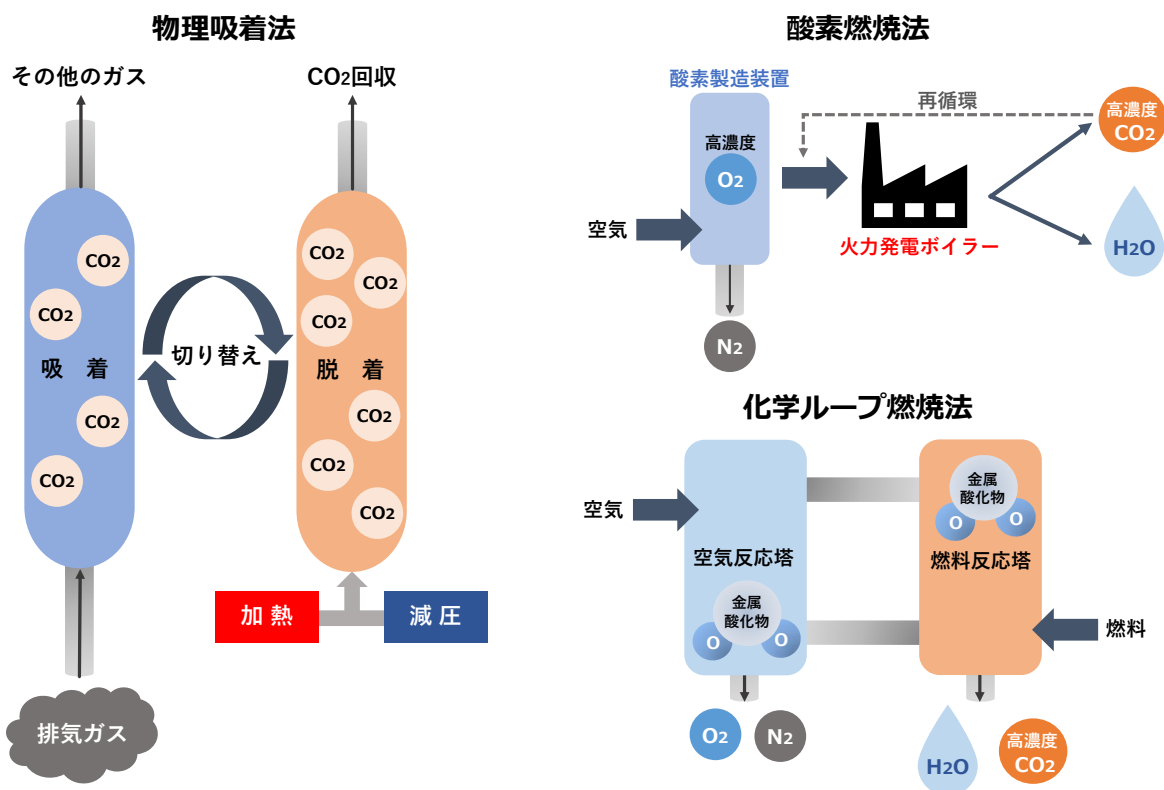
物理吸着法は CO₂ を圧力差と温度差を活用して、他の気体と分離させる方法である。具体的には、ゼオライトや活性炭などの固体の吸着材に排ガスを通して、CO₂ を吸着させて取り出す。また、物理吸着法は、高圧力をかけて、吸着させた CO₂ を低圧下で脱着させて回収する圧カスイング吸着法(PSA)と低温で吸着した CO₂ を高温で脱着させて回収する温度スイング吸着法(TSA)の 2 種類に加えて、両者を併用する PTSA 法がある。物理吸着法は、CO₂ の吸着と脱着の速度をいかに高めることができるのが重要となってくるため、吸脱着の速度の速い吸着材の開発が急務となっている。

図表 6 各 CO₂ 分離・回収方法のイメージ図



※上記のイメージ図は概略図であり、実際はさらに複雑な設備構造・プロセスとなっている。
(出所)日興リサーチセンター作成

図表6 各CO₂分離・回収方法のイメージ図 -つづき-



※上記のイメージ図は概略図であり、実際はさらに複雑な設備構造・プロセスとなっている。
(出所)日興リサーチセンター作成

6. CCS 技術の導入における CO₂ 回収コスト

CCS は Hard-to-Abate 産業のカーボンニュートラル達成に前提となっているが、導入にはコスト面での課題が残る。民間企業による CCS 設備の導入の有無は、EU-ETS や J-クレジットなどのカーボンクレジットや炭素税との比較が鍵となってくる。例えば、カーボンニュートラル達成において、CCS の活用よりもカーボンクレジットの購入の方が安価であれば、当然 CCS 設備の導入は普及しないであろう。また、CCS の導入コストが炭素税よりも高ければ、排出した CO₂ の分だけ税金を素直に納めた方が合理的な選択となる。したがって、CCS の普及は技術革新によるコスト低下が大前提となっている。

現状、最も実績があり、確立された CO₂ の回収方法であるアミン水溶液を用いた化学吸収法の CO₂ 分離・回収コストは、現行の技術水準では約 4,000~5,000 円/t-CO₂ となっている¹。しかし、過去の実績値ベースでは、米国テキサス州ヒューストンの Petra Nova Carbon Capture プロジェクトにおいて、三菱重工エンジニアリング社が納入した石炭火力発電の世界最大の CO₂回収プラントで約 6,000 円/t-CO₂ となっている²。

¹ 詳細は、Global CCS Institute(2019)「Global Status of CCS 2019」p.65 を参照。

² 同上

同プロジェクトは、化学吸収法で CO₂ が回収されており、三菱重工エンジニアリングが関西電力と共同開発した KS-1™という独自のアミン水溶液が使用されている。KS-1™は、従来のアミン水溶液に比べ、高い吸収性能を持ち、水溶液自体の劣化が少なく、吸収塔内の腐食が少ない点で優れている。しかし、同プラントの 1 日あたりの CO₂回収量である 4,776 トンに、1 トンあたりの CO₂回収コストである 6,000 円を乗じて算出する 1 日あたりの総 CO₂回収コスト³は約 3,000 万円にも上り、依然としてコスト面での課題が残っている。なお、不採算を理由に、同 CO₂回収プラントは現在稼働していない。

図表 7 Petra Nova Carbon Capture プロジェクトの概要

| | |
|-----------------------|--|
| 場所 | ヒューストン(米国テキサス州) |
| 事業者 | Petra Nova Parish Holdings LLC →NRG Energy Inc.とJX石油開発の合併会社 |
| 運転開始 | 2016年12月 |
| CO ₂ 回収方法 | アミン水溶液による化学吸収法 |
| 使用アミン水溶液 | KS-1™ →三菱重工エンジニアリングと関西電力の共同開発 |
| CO ₂ 回収率 | 90% |
| CO ₂ 回収量 | 4,776トン/日 |
| CO ₂ 回収コスト | 6,000円台/t-CO ₂ |

(出所)三菱重工業および Global CCS Institute から日興リサーチセンター作成

今後の見通しについて、経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」において、我が国日本の CO₂ 分離・回収コストの野心的な将来目標は、2030 年頃までに、低圧ガス向けでは 2,000 円台/t-CO₂、高圧ガス向けでは 1,000 円台/t-CO₂ とされた。圧力差を活用できず加熱や減圧などの追加的なエネルギー消費が必要になる低圧の排ガスでは主に化学吸収法および物理吸着法、一方で大気圧との圧力差を活用できる高圧の排ガスでは主に物理吸収法、膜分離法および物理吸着法のさらなる技術発展が期待される。

7. 最後に

再生可能エネルギーへの転換や電化による排出抑制策だけではカーボンニュートラルには十分ではなく、排出された CO₂ を回収・除去する必要がある。とりわけ、CCS は CO₂ の削減が困難な Hard-to-Abate 産業のカーボンニュートラル達成において、重要な役割を果たすことが期待される。

一方、社会的に段階的削減が求められている化石燃料をベースとした火力発電などの高排出産業は座礁化リスクが大きく、それらの延命措置とは言え、CO₂ の回収に莫大な導入・運転コストがかかる CCS への投資は不確実性が高い。加えて、CCS の実用化には CO₂ の分離・回収以外にも、回収した CO₂ の輸送方法および貯留場所の確保などもコストの観点で課題が残っている。

以上から、CCS の普及には、政策当局による実効性のあるロードマップが示された上で、更なるコスト低減に向けた技術革新が促進されるようなファイナンスを含む法制度の確立が不可欠となろう。

³ CO₂回収コストの内訳は、固定および変動での運転維持コスト、燃料コスト、設備コストから成る。

【参考文献】

- 一般財団法人 エネルギー総合工学研究所(2020)「図解でわかるカーボンリサイクル～CO₂ を利用する循環エネルギーシステム～」、技術評論社
- 一般財団法人 エネルギー総合工学研究所(2021)「図解でわかるカーボンニュートラル～脱炭素を実現するクリーンエネルギーシステム～」、技術評論社
- 環境省(2014)「平成 25 年度シャトルシップによる CCS を活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書」(<https://www.env.go.jp/earth/ccs/attach/mat03.pdf>)
- 経済産業省(2021)「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.html>)
- 地球環境産業技術研究機構(2018)「CCS 技術の新展開」、シーエムシー出版
- Global CCS Institute(2019), *Global Status of CCS 2019*
(https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/12/GCC_GLOBAL_STATUS_REPORT_2019.pdf)
- IEA(2020), *Energy Technology Perspectives 2020 Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transitions*
(https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf)
- IEA(2021), *Net Zero by 2050 Roadmap for the Global Energy Sector*
(https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf)
- IPCC(2018), *Global Warming of 1.5°C*
(https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf)
- National Petroleum Council(2021), *Meeting the Dual Challenge: A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use, and Storage: Volume III – Analysis of CCUS Technologies*, independently published

(END)