

〈特集〉

大気中からの CO₂回収 (DAC) 技術開発の動向

余 語 克 則

公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) 化学研究グループ グループリーダー・主席研究員
(〒 619-0292 京都府木津川市木津川台 9-2 E-mail: yogo@rite.or.jp)

概 要

カーボンニュートラルを実現するためには、排出削減困難なセクターからの残余排出を相殺するため、大気中に既に蓄積された CO₂を低減する技術、すなわちネガティブエミッション技術の導入が不可欠とされている。大気中から CO₂を直接回収する Direct Air Capture (DAC) 技術は海外で既に大規模化が進められており、日本の企業からの出資、連携も進んでいる。一方、日本においてはムーンショット型研究開発事業として研究開発が進められており、RITE が開発中の DAC 技術が大阪・関西万博でパイロットスケール試験を実施する予定である。

キーワード：CCUS, DACCS, Negative emission 技術, カーボンニュートラル

原稿受付 2025.1.14

EICA: 29(4) 47-50

1. はじめに

近年、カーボンニュートラル実現に向けて大規模な CO₂排出削減が期待される技術の研究開発や早期社会実装に向けた環境整備が各国で進められている。CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)/カーボンリサイクルは主要な取り組みの1つであり、カーボンニュートラルを可能とする重要な革新的技術として位置付けられている。また、カーボンニュートラルを実現するためには、排出削減困難なセクターからの残余排出を相殺するため、大気中に既に蓄積された CO₂を低減する技術、すなわちネガティブエミッション技術の導入が不可欠とされている。植林/再森林化、風化促進、BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)、バイオチャーの活用による土壤炭素隔離などに加えて、大気中から CO₂を直接回収する DAC (Direct Air Capture) が注目されている¹⁾。DAC はバイオマス利用と比較して必要な土地や水の使用量が少ないことがメリットとされている。

2. DAC 技術開発の課題

DAC に関して注意したいのは、大気中から回収した CO₂の従来型の化学製品や燃料としての (再生可能エネルギー利用を前提とした) 利用は CO₂の排出削減に寄与し、部分的にはカーボンニュートラルに近い状態になり得るが、使用後再び CO₂は大気中に放出されるため、長期的には大気中から CO₂を除去する効果 (削減効果) はない。一方、大気中から回収し

た CO₂を貯留する DACCS (Direct Air Capture with Carbon Storage) は鉱物固定や BECCS とともに、大気中からの CO₂除去に対して寄与し得る²⁾。すなわち、DAC は Storage と組み合わせない限りネガティブエミッション技術とはならないということに注意された

い。化学プロセスを使用して直接空気から CO₂を回収する DAC システムは、現状ではコストが極めて高く、エネルギー消費も大きいため、CO₂削減の主たる方法には成り得ない。しかし、回収が困難とされている運輸部門や家庭由来の CO₂を回収可能な技術であり、今後カーボンニュートラルを実現するためには不可欠な技術である。

DAC 技術開発の課題として、第一に大気中に含まれる CO₂濃度は 400 ppm 程度と極めて薄いため、処理ガス量が極めて大きくなるということがあげられる。CO₂回収量として 1 ton/day 相当の空气体積はおおよそ 1,272,500 m³ (標準状態) となり、これは東京ドーム容積 (124 万 m³) に相当する。回収率 100% であってもこの程度の大量の空気の処理が必要となり、石炭火力燃焼排ガス (CO₂濃度 12~13%) と比較して大量 (300 倍程度) の空気の処理が必要となるため、どうしてもコンタクターが大きくならざるを得ない。実際にコストを見積もると、現状技術では吸収塔が極めて大きくなるため、回収コストは APS (American Physical Society) によると楽観的ケースで \$600/ton-CO₂ と見積もられているが、MEA (モノエタノールアミン) 水溶液による回収シミュレーションでは消費電力 1.452 MWh/ton-CO₂、リボイラー熱負荷 10.7 GJ/ton-CO₂ という値が報告されている³⁾。また、

膜分離では高濃縮が困難であることなどから、最近では固体吸収材を用いた DAC 技術開発が主流になりつつあるが⁴⁾、固体吸収材方式では \$ 150~600/ton-CO₂ 程と出典によりかなり幅があり、現時点でその妥当性の評価は困難であり、今後の詳細検討が待たれる。Climeworks の DAC に関しても排熱やヒートポンプを活用する前提での LCA 試算が報告されているが⁵⁾、排熱が利用できないと 11 GJ/ton-CO₂ の熱が必要であり、ヒートポンプは CAPEX を増大させることになる。

3. 海外 DAC 企業の開発動向

Table 1 に DAC 技術に関する海外の事例を示す。既に海外の DAC 企業 3 社を中心に大規模化が進められており、50~100 万 ton-CO₂/year 規模での回収が予定されている。

スイスの Climeworks 社は世界で最初の商用 DAC プラント (回収量: 900 ton-CO₂/year) を稼働させた企業である。2021 年 9 月にアイスランドに “Orca” を稼働させた⁶⁾。Orca は CO₂ 回収量 4,000 ton-CO₂/year で Carbfix の地中貯留 (鉱物化) と組み合わせ CO₂ の回収・貯留を行っている。回収した CO₂ を水に溶解し、玄武岩層に注入、炭酸塩化して固定が可能であり、アイスランドで注入した CO₂ の 95% が 2 年以内に鉱物化するとのことである⁷⁾。アイスランドは 400 Gton 以上の CO₂ を貯留できると推定されている。さらに 2024 年 5 月に最大回収量を 3.6 万 ton-CO₂/year 規模に拡大した Mammoth を稼働させた

のことであるが、筆者が 2024 年 10 月に見学した時点ではその 1/6 の 6,000 ton-CO₂/year 分が稼働している状況であり、未完成である。Climeworks の DAC での分離回収コスト公表値 \$ 600/ton-CO₂ に対して、現状での DACCS によるクレジットはおおよそ \$ 1,000/ton-CO₂ 程度であることから、実際のプロセスでは文献値よりもかなりコストがかかる部分があるのではないかと思われる。現在のクレジットはマイクロソフトなどの IT 系企業によるボランタリークレジットの購入が主流であり、さらに拡大してくためには大幅なコストダウンが必要と思われる。

カナダの Carbon Engineering 社は 2015 年からアルカリ水溶液を用いた DAC のパイロットプラントを立ち上げている⁸⁾。最近、Occidental Petroleum に買収され、50 万 ton-CO₂/year の設備を米国テキサス州に建設中である⁹⁾。

また、米国の Global Thermostat はチリ南部のパタゴニア地方において Haru Oni project を実施しており、風力発電で発生させた電力で PEM 電解槽を用いて水素を製造 DAC で回収した CO₂ との MTG 反応で eFuel を製造し、2022 年に 13 万 L、2024 年に 5,500 万 L の製造を目指しているとしていたが¹⁰⁾、最近 Zero Carbon Systems に買収された。海外の DAC ベンチャー企業はもともと売り抜けを想定したビジネス指向している企業もあるとみられ、今後このような買収・合併がさらに進むものと思われる。

また、この他に最近新しい試みがいくつか見られるようになってきている。一つは Mordenite ゼオライトによる DAC (California Institute of Technology)

Table 1 DAC plants in operation/planned overseas and costs*

DAC 企業/技術	CO ₂ 回収規模 (ton/year)	コスト
Corbon Engineering (Canada) KOH 吸収液 Occidental Petroleum が買収	STRATOS (米国 テキサス) 年間最大 50 万 ton の CO ₂ 回収予定, 2025 年半ばに商業的に稼働予定	不明, APS (American Physical Society) の試算によると \$ 600/ton-CO ₂ 程度 (代替燃料による削減平均コストが \$ 600/ton-CO ₂) を超える脱炭素化が難しい輸送業界に短期的に低コストの削減ソリューションを提供できるとしている
Climeworks (Switzerland) アミン固体吸収材	2021 年 9 月 ~ 4,000 ton/year (Orca) 2024 年 5 月 ~ 36,000 ton/year Mammoth (現状世界最大) (2050 年までに 10 億 ton/year 達成)	CHF20, 50, 100 のレベル別で料金を設定, DNV 証書発行 クレジット: CHF 1,250 ton-CO ₂ (およそ 2 万人 (個人) が参加中) コスト公表値: \$ 600/ton-CO ₂ 目標 (2040 年) \$ 300~400/ton-CO ₂
Heirloom (USA) Ca(OH) ₂ 吸収材	1,000 ton/year 商用プラント (Tracy, CA) DAC Hubs Project 2 拠点 (ルイジアナ, ノースウェスト) に参画	2035 年までに、26,900 ton 分のカーボンクレジットを総額 2,660 万ドルで Stripe, Meta, Shopify, JPMorgan, Mckinsey, Workday, H&M, Autodesk に販売する契約を 2023 年 11 月に締結 目標 \$ 100/ton-CO ₂
AspiraDAC (Australia) 吸着剤 (MOF)	310 ton/year Prototype Stage DAC 装置 Southern Green Gas が New South Wales 州の休耕地に DAC 装置を設置	クレジット: 900 €/ton-CO ₂ (Puro Standard を満たす PJ に対してクレジットを発行) 2024 年 ~ 事業開始
Global Thermostat (USA) アミン固体吸着材 Zero Carbon Systems が買収	1,000 ton/year 自社敷地内 (デンバー) Haru Oni Project (チリ Magallanes) で スケールアップ装置を製作中	現状: > \$ 800/ton-CO ₂ 目標: (2025 年) \$ 300/ton-CO ₂ (2050 年) < \$ 200/ton-CO ₂ (願わくば \$ 100)/ton-CO ₂

(*Prepared by RITE based on each company's website and various data.)

Table 2 Investment and Collaboration of Japanese Companies in DAC Companies

DAC 企業	日本企業の出資・連携
1 Point Five (米)	日本航空
Climeworks (スイス)	ANA, ENEOS (装置購入)
Calcite Carbon Removal (米)	JX 石油開発 (DAC プロジェクトへの参画)
Capture (米)	日本航空, 日立製作所
Global Thermostat (米)	東京ガス, 住友商事
Heirloom (米)	三井物産, 三菱商事, 日本航空, 商船三井

が検討されている¹¹⁾。一般にゼオライトなどの物理吸着剤は水分が共存すると CO₂ の吸着性能が著しく低下するため、使用は困難である。除湿剤と Mordenite の組合せは DAC に利用可能で、100℃ の低温で完全に再生可能であるとしている。また、物理吸着剤を用いた DAC では水管理が重要な要素とのことで、システム最適化で CO₂ 回収コストは \$ 246~568/ton-CO₂、DAC は水利用が統合されたシステムで稼働すれば採算が取れるとしている。

また、大気中から CO₂ を回収するのではなく海洋中から CO₂ を回収する試み DOC (Direct Ocean Capture) も行われるようになってきた。米国の Capture 社は日本航空、(株)日立製作所などから出資を受け、2025 年には 1,000 ton-CO₂/year の装置を稼働させる予定としている¹²⁾。海洋中には単位体積中に含まれる CO₂ が大気中の 150 倍程度あり、有利であるということから電気透析を用いた研究等が行われている。日本では JAMSTEC が同様の研究を実施している。

商社を中心に日本企業の海外 DAC 企業に対する出資、連携も進んでいる。**Table 2** に最近報道された日本企業の海外 DAC 企業への出資、連携状況を示す。公になっている分だけでもかなりの数に上っている。

一方で我が国では DAC についてはこれまで基礎研究にとどまっておらず、実用的な研究がほとんど行われておらず、この分野では欧米から大幅に遅れをとっている。日本でも実用化・ビジネス展開を志向した早期の大規模化・実証を進める必要がある。

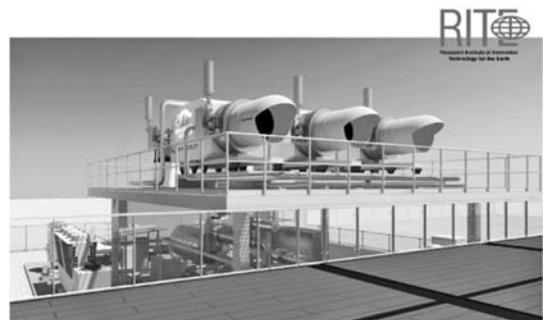
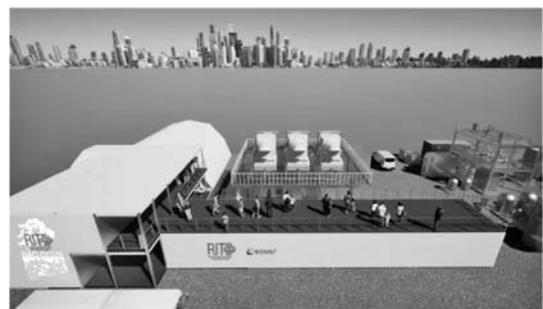
4. 日本における研究開発

日本では 2020 年度よりスタートした「ムーンショット型研究開発事業」で DAC の研究開発が行われている。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (以降「NEDO」という) が取り組む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、複数テーマが実施されている¹³⁾。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、金沢大学および三菱重工業(株)と協力し

て、DAC に最適な材料およびシステムの検討を行っている。

海外の DAC 企業が大型加速していることを鑑み、三菱重工業(株)の協力を得て早期にパイロットスケール試験を実施すべく、開発の加速に取り組んでいる。RITE の敷地内 (京都府木津川市) に専用の実験棟を整備するとともに、1 日あたり数 kg 規模で大気中から CO₂ を直接回収する小型の試験装置 (DAC 小型試験装置) を開発し、本装置を活用することで、実機サイズの CO₂ 固体吸収材の評価、さらに装置の大型化・実用化に向けたデータの収集、知見の蓄積が可能となった。

これまでの成果をもとに RITE は、2025 年大阪・関西万博での未来社会ショーケース事業に協賛者として、RITE ネガティブエミッション技術の実証プラント (DAC) を出展する予定である¹⁴⁾。大気から CO₂ を直接回収し、回収した CO₂ は地下に貯留する CCS (貯留するのは万博会場内ではなく、別の CO₂ 貯留サイト)、アスファルト舗装材に用いる炭酸塩固定を行うとともに、大阪ガス(株)が実施するメタネーション設備に供給する予定である。この DAC の実証試験は NEDO のムーンショット型研究開発委託事業として実施するもので、RITE が開発した DAC 用アミンを用いて、三菱重工業(株)が設計・製作した装置で実証を行う。パイロットスケール規模での DAC+ Utilization (メタネーション) を連動させた実証は国内初となる。既に会場に装置の据付は完了し、試運転を開始している。

**Fig. 1** Image of DAC demonstration plant**Fig. 2** Overall image of the plant at the Osaka Expo

同敷地内では同じくムーンショット型研究開発事業で開発を実施している名古屋大学(吸収液)と九州大学(膜分離)の装置の展示も行われる予定である。

その他の日本の企業では、川崎重工業(株)がグループビジョン2030進捗報告会で2030年にDACの事業規模を約500億円に育成すると発表した。25年頃に2万ton-CO₂/yearの二酸化炭素(CO₂)回収プラントで実証し大型化に道筋をつけながら事業を始め30年に50万~100万ton-CO₂/yearの大型設備の建設を目指すとのことである。また、IHI(株)が相馬市のラボで固体吸収材を用いたDAC装置を稼働したとの報告があるが、詳細は不明である。また最近、大阪ガスはMOFを用いたDAC試験装置を大阪市内の研究所で稼働させ、試験を開始したとしている。

先に述べた物理吸着方式に関しては日本でもPlanet Saversがゼオライトを用いたDACシステムの開発を開始しているが、技術の詳細は不明である¹⁵⁾。素材メーカーでは日本ガイシ(株)、ノリタケ(株)がそれぞれDAC向けの素材を開発したというプレスリリースを行っており、その他自動車会社も学会等では基礎検討レベルの報告を行っていることから、この他にも自社でDAC技術開発に取り組んでいる企業はかなりの数にのぼると思われるが、そのほとんどが詳細は公開されていない。現状では各社が独自の技術開発を進めている段階であり、海外で実施されているような大型化にはまだしばらく時間がかかるものと思われる。

5. 今後の展望

最近、日本の商社などを中心に海外企業への出資の取り組みも見られているが、Climeworksの事例にみられるように、現時点で世界最大のDAC装置は6,000ton-CO₂/year規模であり、固定発生源からのCO₂回収で求められる100万ton-CO₂/yearスケールと比較して、地球温暖化対策としてはまだ規模が小さすぎる。DACで1万ton-CO₂/yearスケールを実施するのは容易ではない。現状、唯一Carbon Engineering(1 Point Five)の実施する50万ton-CO₂/year規模が建設中であり、その他は実現性が不確実である。

先述の通り、DACの困難さは通常の石炭火力発電(CO₂濃度:12~13%)と比較してCO₂濃度が極めて低いことに加え、酸素濃度も高く(石炭燃焼排ガスで5%程度、空気は19%)、コスト低減のためには劣化耐性の高い材料を用いる必要がある。強アルカリ水溶液を用いれば酸化劣化に対しては耐性が見込めるが、

CO₂を吸収したアルカリ水溶液を加熱して吸収液を再生し、CO₂を回収するためには900℃以上の高温が必要になることや、強アルカリ水溶液の飛散の問題も考えられるため、新たな材料開発が必要であろう。また、システムに関しても、大量の空気を処理するための圧力損失の低い吸収塔の開発が必要になると思われる。特にコンタクター部分のコスト低減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。

現時点ではDACコストがどこまで削減可能かを見極めるのは困難であるが、DACはBackstop Technologyと言われており、脱炭素化のための総削減費用を押し下げる効果がある¹⁶⁾。

DACを現実的なものとするためには技術のブレークスルーが必要であるが、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の開発を目指しており、エンジニアリング企業と連携して今後大規模実証、早期社会実装へとつなげていきたいと考えている。

謝辞

本稿中で紹介したRITEの研究開発はNEDO「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」事業の一環として実施中である。

参考文献

- 1) Energy Technology Perspectives 2020, (IEA).
- 2) C. Hepburn et al, Nature, Vol. 575, 7 November 2019, 87.
- 3) Ali Kiani et al, Frontiers in Energy Research, 2020 (9) Article 92.
- 4) 2022 Carbon Management Project Review Meeting - Carbon Dioxide Removal (August 15-19, 2022) (<https://netl.doe.gov/22CM-CDR-proceedings>).
- 5) Sarah Deutz & André Bardow, Nature Energy volume 6, pages 203-213 (2021).
- 6) <https://climeworks.com/orca>
- 7) <https://www.carbfix.com>
- 8) <https://carbonengineering.com/>
- 9) <https://www.1pointfive.com/launch-release>
- 10) <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2021/haru-oni.html>
- 11) Donglong Fu and Mark E. Davis, Cell Reports Physical Science 4, 101389, May 17, 2023.
- 12) <https://capturacorp.com/>
- 13) https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100161.html
- 14) <https://www.rite.or.jp/news/others/2024/04/18.html>
- 15) <https://planetsavers.earth/AboutPlanetSavers>
- 16) Direct Air Capture of Carbon Dioxide, ICEF Roadmap 2018.