

「ヒートポンプ DAC」は地球温暖化問題を一発で解決できるか？

杉山 大志 (すぎやま たいし) キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹

1. 直接空気回収技術 (DAC) とは何か？

「大気中の CO₂ を取り込んで地中に埋める」という技術が、近年、注目を集めている。「直接空気回収 (Direct Air Capture; DAC、ダックと発音する)」と呼ばれるものだ。地球温暖化の原因が CO₂ であるならば、その CO₂ を大気から取り除いてしまえばよい、という訳である。

原理的には、これはいままでも出来る。CO₂ は酸性なので、アルカリ性の溶液に吸収できる。その後、溶液を温めれば CO₂ が発生するので、それを集めて地中にポンプで押し込んでやればよい。砂岩であれば隙間があるから、CO₂ はそこに入る。大気中に漏れてこないためには、その上に泥岩などの隙間の無い地層があって蓋になっていけばよい。そのような都合の良い地形は、世界を探せば結構ある。例えば天然ガスを産出するガス田は、そのような地形に、太古の生物が分解されてできたガスが溜まったものだ。

ただし以上を、一定のコストで実現するには、様々なハードルがある。特に、CO₂ は大気中に僅か 0.04% しかないから、それを集めて濃縮するには、材料やプロセスに様々な工夫が要るし、エネルギーも必要だ。だが DAC は一定のコストで実現可能だとして、あらたなアイデアに基づく試算が続々と出てきた。更にはパイロットプラントも建設されている。

2. コスト試算例

以下では (Fasihi, Efimova, & Breyer, 2019) のレビュー論文に基づいて試算例を概略紹介しよう。

Fig 1 は DAC を提案している 7 つの企業についてまとめている。Type として、回収した CO₂ を放出する際の温度で分けて、高温プロセス (HT) (900℃ 程度) および低温プロセス (LT) (100℃ 以下) があるとしている¹。低温プロセスは、さらに温度変化吸着法 (TSA) か湿度変化吸着法 (MSA) で分かれている。

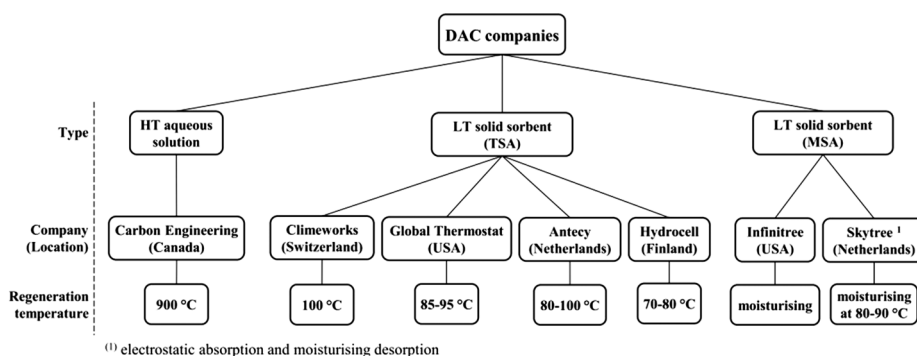


Fig. 1. Companies active in the field of CO₂ DAC. Abbreviations: high temperature, HT, low temperature, LT, moisture swing adsorption, MSA, temperature swing adsorption, TSA.

¹ この高温プロセスについてさらに詳しくは、CIGS 国際シンポジウム「Geoengineering and CCUS: Their Role in Managing Climate Change Risks」における講演要旨および Keith 氏講演資料を参照されたい。
https://cigs.canon/event/report/20191031_6038.html

Fig. 7はそのコスト試算例であり、モロッコで2040年に実現した場合を想定している。高温プロセス（左）では1トンのCO₂あたり91ユーロ、低温プロセス（右）ではヒートポンプの活用により熱を発生させ（図中のHeat）ることで、1トンのCO₂あたり69ユーロでCO₂を大気から回収し地中に埋めることが出来る、としている。

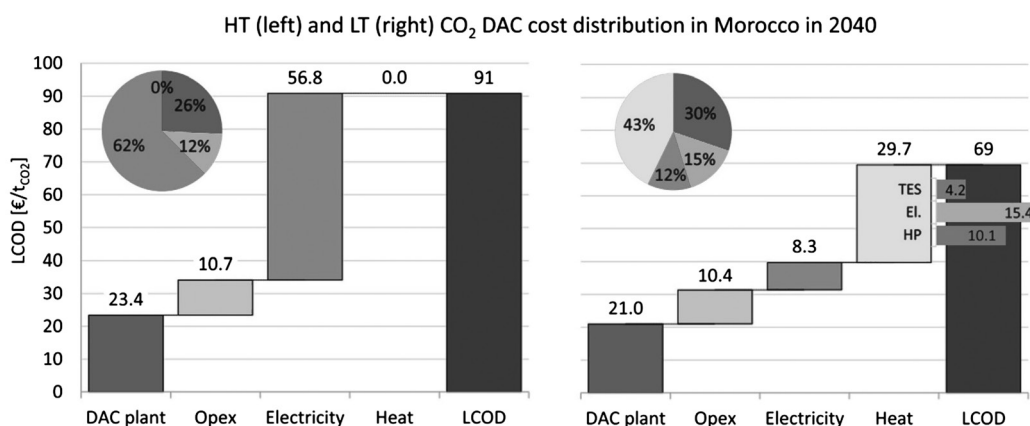


Fig. 7. LCOD cost breakdown for the fully electrified HT DAC system (left) and LT DAC system (right) for 8000 FLh and conditions in Morocco in 2040.

Fig. 9はコストが将来的にどのように変わるか、という試算である。技術進歩の見通しに依存して、保守的な見積もりか（CS）、ベースライン（BS）か、の2通りの試算がある。いずれも、世界規模でDACが普及し累積の建設量が増えると、学習効果・量産効果によってコストダウンが起きるとしている。

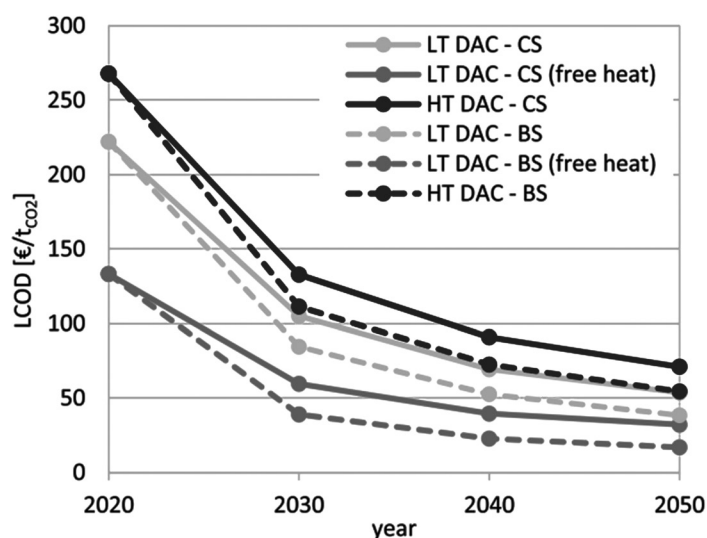


Fig. 9. LCOD for LT and HT DAC systems with 8000 FLh and 7% WACC for the conservative scenario (CS) and base case scenario (BS) assumptions.

なお DAC については経済産業省および公益財団法人地球環境産業技術研究機構も着手しており、技術課題を整理している。（経済産業省、文部科学省、2019）、カーボンリサイクル技術事例集 p22 https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/pdf/tech_casebook.pdf

3. システム設計の課題

DACとCCS(Carbon Capture and Storage, CO₂を発電所や工場などの排煙から回収して地中に貯留する技術)を比較するとどうか。DACはCO₂濃度が0.04%と極めて低い大気からCO₂を回収して濃度を高めるので、CCSによって火力発電所からの濃度の高いCO₂を回収・濃縮するのに比べて、熱力学理論的には不利である。しかし、

このような熱力学理論による限界からは DAC も CCS も何れも遠いとされており、むしろエンジニアリング的に低コストで実現できるかどうかがかぎとなる。

他方で DAC には CCS には無いメリットが多くある：

1. 立地地点を貯留の容易な場所に出来ること
2. 立地地点をエネルギー供給の容易な場所に出来ること
3. 既存の発電所や工場に隣接する必要がないこと
4. 既存の発電所や工場の操業に影響を与えないこと
5. 費用がかかる以外に、既存の経済・社会の構造を変える必要が全くないこと。

さて安価なエネルギー供給と貯留に適した立地地点は、米国等の大陸諸国には多く存在する。残念ながら日本は適地に乏しい。ありうる日本の当面の寄与としてはプラントエンジニアリング等の技術提供によるものが主となるだろう。

システムの設計としてはまだこれから様々なアイデアがあり、腕試しをしたいエンジニアにはとても面白いお題と思う。ざっと上げるだけでも、

・[材料] CO₂ 吸収剤、CO₂ 吸着材、または CO₂ 分離膜。低コストで丈夫なもの。回収した CO₂ を放出する際、消費エネルギーが少なく、かつ低温で動作するものが望ましい。材料科学は、原子レベルでの微細設計・加工・計測技術、計算機シミュレーション技術等の進歩に支えられて、急速に発達しているので、その恩恵をフル活用できるだろう。

・[ヒートポンプ] 低温のプロセスであれば、上述の Fig 7 の試算がそうであるように、ヒートポンプの活用で、投入電力を大幅に低く抑えられるかもしれない。どのようなヒートポンプが良いのだろうか？

・[気候] 特に低温のプロセスであれば、どのような気候条件を選ぶかで、大きな影響を受けるだろう。ヒートポンプを活用するのに適した気候はどこだろうか？

・[エネルギー] 莫大なエネルギーが、しかも安価に必要なことは間違いない。どのような立地で、どのようなエネルギーが良いか？ DAC は、砂漠や北極圏のような、不毛な場所を利用できるのが重要な利点だ（特にバイオエネルギー生産とは対照的である）。Figure 7 の試算では再生可能エネルギーが安価になった場合を想定しているが、それよりも有利な方法があるかもしれない。不毛な場所では原子力利用への敷居も低くなる。小型モジュール原子炉（SMR）を、排熱も含めて活用すると良いかもしれない。SMR に DAC プラントを合わせてモジュール化すると量産効果が上がるだろう。あるいは原子力ではなく、天然ガス田や炭鉱のすぐそばに立地して、化石燃料をエネルギー源にする方法もある。天然ガス田であれば、枯渇後には CO₂ 貯留にも使える。

・[CO₂ 貯留] CO₂ は石油の増進回収（EOR）はもちろん、農業増産にも使える。工業原料にもなる。これらは当面のニッチ市場として役立つ場面があるだろう。だが莫大な CO₂ を処理するには巨大な地下貯留ポテンシャルがある場所が良いだろう。これは世界を見ればふんだんにある。あるいは、海洋に貯留するというのも、有望なオプションだ（海洋への貯留は、現在は国際条約で禁止されているが、これは不合理な話であり、長期的には覆りうるし、そうすべきである）。

4. 経済性と市場規模

上述の試算例は全て研究者が報告した数字であり、本当にシステムとして使い物になるか、またそれが報告されたコストで実現可能かどうかは、今後、パイロットプラントなどで実証してゆかないと何とも言えない。

従って、取らぬ狸の皮算用のようでもあるが、仮に試算のように 1 トン CO₂ あたり 100 ドル程度で DAC が活用できるならば、大規模に実用化した場合の市場規模はどの程度だろうか。日本の CO₂ 排出の 1 割程度の 0.1 Gt CO₂ を対象とすると、総額で \$10 G/year = 100 億ドル / 年 = 1 兆円 / 年となる。これは巨額だけれども、現在の再生可能エネルギー賦課金が年間 2.4 兆円に達していることと比較すると、不可能な数字ではないと分かる。というより、この程度で地球温暖化問題の呪縛から解放されるならば、十分に魅力的なオプションと言える。

市場規模はどうか。上記の計算は日本だけを対象にしていたが、もしも地球規模であればこの30倍になり、またCO₂排出量の1割ではなく3割を対象とするならばさらに3倍になる。すると、地球全体のCO₂排出の3割に相当する量をDACで回収すると100兆円/年程度ということになる。世界市場の規模はこのような巨額のものとなる。

5. DACの真価

まだ試算やパイロットプラントの段階であるにも関わらず、以下の3つの理由により、日本は特にDAC研究を推進すべきである、と思う。

第1に、DACはそれ単独で温暖化問題を解決する力を持っているので、CO₂削減コストに上限を与えること。いま研究開発されている温暖化対策技術には、1トンCO₂あたり100ドルをはるかに上回るコストのものが多い。コストに上限を与えることは、技術開発に明確な目標を与える。また、いつまでもコスト目標を達成する見込みがない技術開発を中止出来ることも重要である。

仮に現時点で1トンCO₂あたり100ドルではなく500ドルかかるとしても、それをプラントで実証しておくことが望ましい。いま500ドルならば、長い目で見れば大幅なコストダウンが可能であろう。これによって、温暖化問題を解決する道筋を本当に描くことができる。

対照的に、現在、多くの研究者によって描かれている1.5℃や2℃に温暖化を抑えるという大幅なCO₂排出削減シナリオは、経済的にも、政治的にも、およそ現実離れしているものが多い。DACが実証できれば、仮にいまは1トンあたり500ドルかかるとしても、大幅なCO₂排出削減シナリオが本当に現実的になる。

第2に、温暖化対策に柔軟性を与えること。

温暖化問題はよく喫緊の課題と言われる。だがじつは、科学的には不確実なことが多い。また今のところさほど悪影響が顕在化した訳でもない。日本についていえば、今のところ、台風は増えてもいないし強くなってもいない。豪雨も猛暑も地球温暖化による寄与はあったとしてもごく僅かである。将来については、シミュレーションによっては大きな被害を予測している。ただしこれはかなり不確実であるので、莫大な費用をかけて急激にCO₂を減らすべきとは思えない。

ひとたびDACを人類が獲得すれば、いつでもCO₂を削減しようと思えば一定のコストで出来る様になるので、慌ててCO₂を減らさずとも、精神的・時間的なゆとりを持つことが出来る。DACの開発は当面はコストダウンを重視し、CO₂の増大が本当に甚大な悪影響を及ぼしそうだとはっきりしたら、DACの大幅な普及に舵を切れればよい。

なお地球温暖化問題については100年以上の時間スケールで考えて環境影響を心配する人々がいるが、DACがあればそのような心配はなくなる。たとえば産業革命前から2度高い気温が4000年続けばグリーンランドの氷が全て溶けるという試算があるが、DACでCO₂を減らせばそのようなことは防止できる。

第3に、温暖化問題を他の社会経済的な課題から切り離せること。DACでもかなりの費用がかかることは間違いない。しかし、これまで提案されてきた諸々の温暖化対策に比べれば、社会経済に対して「非侵襲的」である。

「侵襲的」ということの意味であるが、例えば、太陽、風力、バイオ発電などの再生可能エネルギーは、いずれも莫大な土地を利用する（DACも大きな土地を必要とするが、再エネよりは遥かに少ないとされ、また不毛な僻地を利用できるという利点がある）。また再エネは景観、騒音、生態系影響などもある。送電網の増強も必要だし、既往の火力発電などの運用法も変えねばならない。

CCSは、再エネよりは非侵襲的であるが、それでも、既往の発電所や工場の操業の仕方は変えねばならない。またCO₂パイプラインを人口の多い地域に建設しなければならない。CO₂輸送のコスト低下のためにはCO₂貯留地点は回収地点の近くが良いが、それだと立地への反対運動が強いかもしれない。

省エネは、大幅に実施しようとするならば、工場の生産活動、家庭の生活のあり方、街づくりのあり方を大き

く変えることになる。省エネと社会経済とのかかわりが深いことは、技術普及のチャンスであるという見方があり、コベネフィットを実現しつつ、ライフスタイルを抜本的に見直すチャンスでもある、という意見もしばしば聞かれる。

しかし、既存の社会経済の大幅な変更が必要な技術というのは、それだけ多くの政治的な利害関係の調整を必要とするものであり、かつ既往の法や制度に変更を迫ることだから、じつは普及させることが極めて難しい。

1970年代ごろにピークがあった過去の公害問題においても、経済成長を止めるべきとか、自動車を使うのを止めるべきといった意見もあった。だが結局のところ、公害問題を解決したのは、排煙処理技術のような、既往の社会経済活動への修正が少なく済む技術だった。

地球温暖化問題についても、人類文明の見直しなどと大上段なことを言うと、解決は不可能と思う。そうではなく、これまで通りエネルギーを使い経済活動を行うことを概ね是認し、それらの活動とは離れた場所で、人知れず、CO₂についてはDACで問題の解決を図る、という方が実現可能性が高く思える。

6. 研究開発体制と国際約束

DACのシステム研究開発の課題については上述した通りである。体制についてであるが、まだ黎明期にある技術で、全く新しいアイデアが役に立つ可能性もあることから、基礎研究は重要である。他方で、早めの実施可能性を見定め、温暖化対策のコスト上限を設定し、温暖化対策全般に柔軟性を与える為には、パイロットプラントによる実証が重要である。例えば以下の様なことが考えられる。

・**基礎研究**： 国の研究開発投資で、RITE等の研究機関が実施するほか、内外のベンチャーを含む私企業が材料、プラント、熱源等の基礎研究を行う。CO₂を回収する材料やプラントのイノベティブなアイデアを広範に募るには、コンテストや懸賞金制度を設けるのも一つの手かもしれない。

・**実証試験**： コストが500ドル/tCO₂以下になる見通しがあれば、国の投資によってパイロットプラントで実証する。場所は世界中どこでも良い。また、初期の実証は、CO₂を回収するまでで良い。というのはCO₂の貯留のハードルは相対的に低いためである。一度実証に成功すれば、その後はコスト目標を下げて実証を繰り返してゆく。

また執筆現在、日本政府は2030年以降に向けての温暖化対策のあり方の議論をしているが、パリ協定等の国際約束の中にDACの開発目標を書き込むのも良いかもしれない。例えば、以下のようなものだ。

・**開発目標**： 2035年までに、商用規模のDACを100ドル/トン以下で実現する。日本が実現に寄与したDACプラントを世界において建設・運転することで、2050年までに、日本の官民資金の合計で年間xトンを、他国の官民資金の合計で年間yトンを、大気中より回収して地中ないし海洋に隔離する。

パリ協定などの国際条約においても、東大有馬純教授も提案しているように、CO₂排出量ではなく、技術開発の目標を世界にコミットするという方法は十分にありうる。

<http://ieei.or.jp/2020/08/opinion200824/>

文献

Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>

経済産業省、文部科学省。(2019). エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会 報告書 2019年6月. Retrieved September 5, 2020, from <https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190610002/20190610002-1.pdf>