

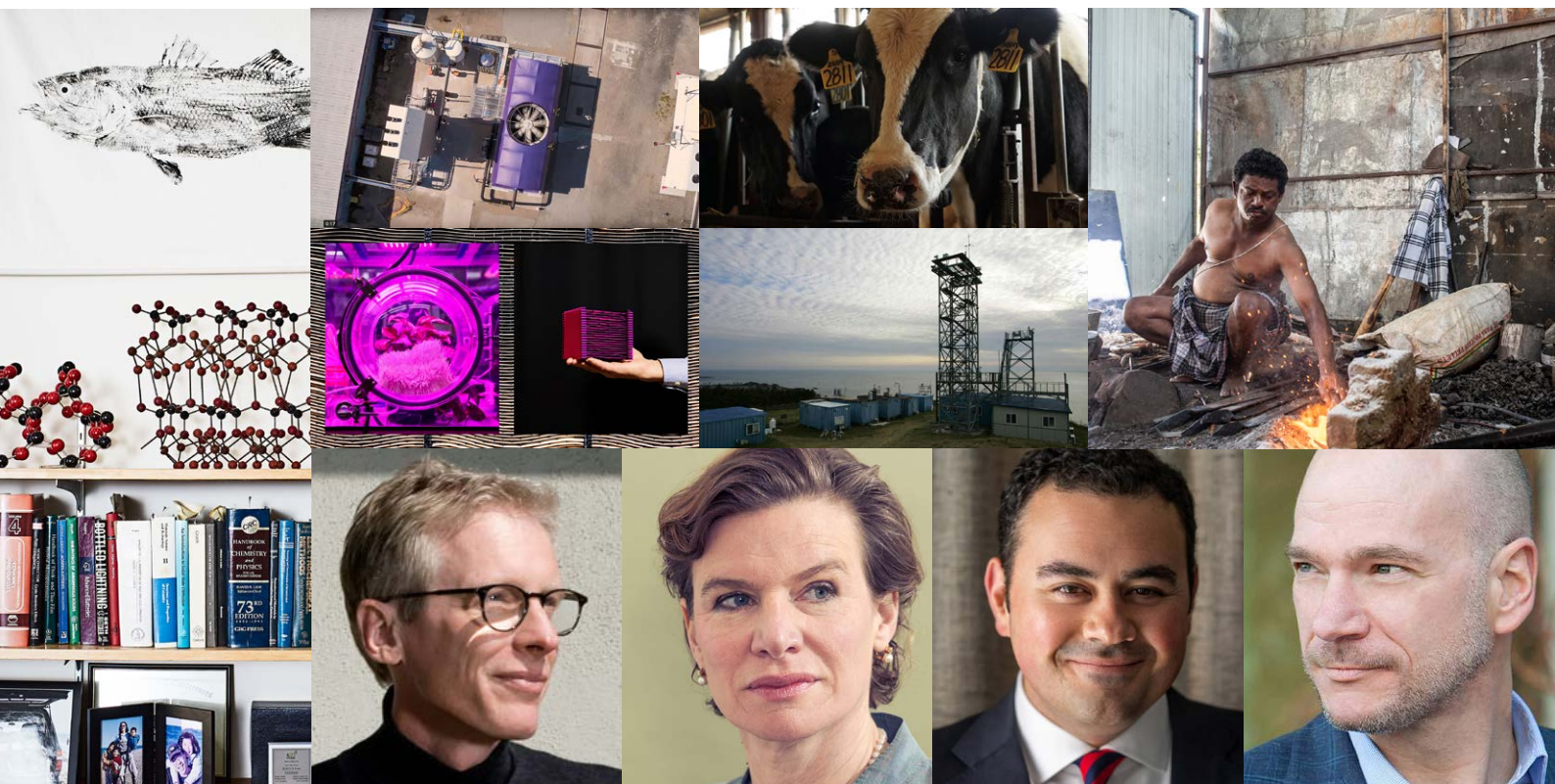
MIT Technology Review

Published by KADOKAWA / ASCII

Climate Change 2

テクノロジーは危機を救えるか





CONTENTS

- 001 人類を救う「炭素回収」技術、
挑み続けた開拓者の 20 年
- 014 世界最大規模の CO2 大気回収プラント、
抱える根本的な矛盾
- 020 気候変動対策のカギ
「炭素の社会的費用」が浮き彫りにする不都合な真実
- 029 深刻な「牛のげっぷ」問題
「海藻」が注目される理由
- 037 「全廃」のはずのフロンが中国で増加、
国際協定の限界露呈
- 042 温暖化予測はなぜブレる？
不確定要素の「半減」目指す米研究者に聞く
- 047 トランプ支持者にも変化あり、
米国の「保守」が気候変動を認め始めた理由
- 054 グリーン・ニューディールは新しい「産業政策」なのか？
マツカート教授に聞く
- 059 アンドリュー・マカフィー
「資本主義の強化こそが温暖化対策」
- 064 航空機「電化」に賭ける夢、
高出力の新電池開発を目指す材料科学者たち

9月23日の国連気候行動サミットに先立ち世界各地で実施された大規模なストライキは、人々の気候変動への強い危機感を表すものとなった。だが、温暖化などの気候変動に対する各国の具体的な取り組みはまだ鈍い。世界の危機に対して、テクノロジーはいま何ができるのだろうか？ 二酸化炭素回収技術から、海藻によるメタンガスの削減、航空機の電化のための新電池まで、気候変動に立ち向かうテクノロジーと人々の取り組みを追う。



人類を救う「炭素回収」技術 挑み続けた開拓者の20年

by James Temp 翻訳者：山口 桐子

20年前に素粒子物理学から二酸化炭素を大気から回収するテクノロジーの研究に転じた
クラウド・ラックナー教授の考えは、ようやく世間から認められつつある。

ラックナー教授は、二酸化炭素回収技術を確立しなければ、
地球温暖化により人類は深刻な危機に瀕すると主張している。

クラウド・ラックナー教授の研究室に置かれ
た大きな金属製の容器は、地球を救う装置
にはとても見えない。まるでゴミ箱のようだ。という
より、ゴミ箱そのものだ。

ラックナー教授が、きっちりと折り目のついた
カーキ色のズボンのポケットに手を突っ込んで眺
めていると、その機械が変形し始める。マット
レスのような形をした3つの金属製フレームが、
容器の内部から出てきて、アコーディオンが広が
るように天井に向かって伸びていく。

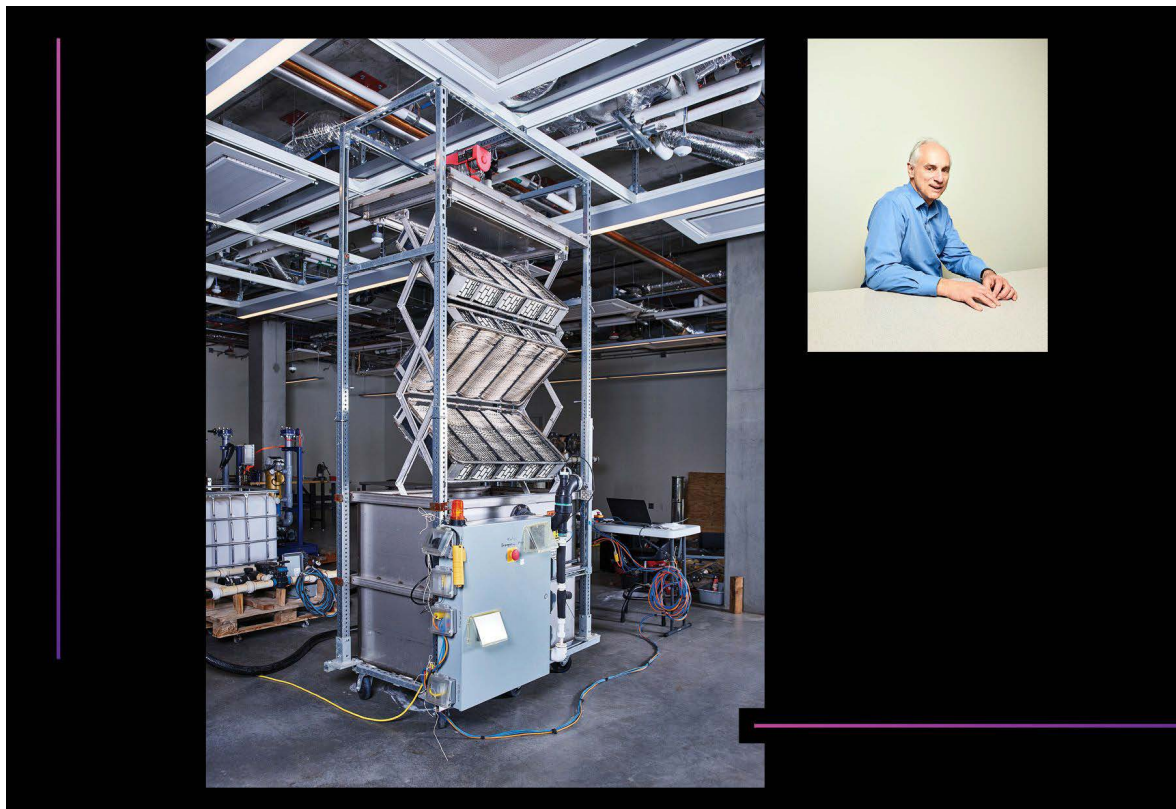
それぞれのフレームには、二酸化炭素分子と結
合する樹脂で満たされた数百もの白いポリマーの
細長い布が入っている。この布は、船の帆のよう
な形をしており、この奇妙な装置を大気が吹き抜
けるときに、温室効果ガスを取り出すように設計

されている。

重要なのは、この材料が湿ると、二酸化炭素を
放出するということだ。このことを実証するため、
ラックナー教授は、装置のフレームを容器内に格
納し、水で満たした。放出された二酸化炭素を集
めれば、他の用途に活用することが可能で、再び
初めから同じプロセスを繰り返せる。

アリゾナ州立大学にあるネガティブ・カーボン・
エミッション・センター（Center for Negative
Carbon Emissions）のラックナー教授の研究室
は、気候変動の影響を緩和するために二酸化炭素
を回収してリサイクルするという壮大な目的を掲
げ、シンプルな機械を作った。ラックナー教授は、
この装置が森のように無数に設置され、田園地帯
を越えて広がり、数十億トンもの二酸化炭素を大

One man's two-decade quest to suck greenhouse gas out of the sky



最新の試作機は、フレームが広がり大気中から二酸化炭素を回収する。
クラウス・ラックナー教授は、大気回収分野の開拓者だ

気から回収する風景を思い描く。

薄くなった白髪頭のラックナー教授（66歳）は、20年間この問題に取り組んできた。1999年にロスアラモス国立研究所の素粒子物理学者として、大気から二酸化炭素を回収することで気候変動に対抗することの実現可能性を探る最初の科学論文を書いた。何年もの間、ラックナー教授の声は届かなかった。だが、壊滅的な温暖化を防ぐための温室効果ガス排出量の迅速な削減に世界が苦勞する中、多くの人がラックナー教授の考えに同意するようになってきている。ラックナー教授

の論文は、複数の大気回収スタートアップ企業にヒントを与え（そのうちの1社はラックナー教授自身の企業だ）、研究者を刺激して科学論文の発表も増加している。同じようなスタートアップ企業であるカーボン・エンジニアリング（Carbon Engineering）を共同創業したハーバード大学のデビッド・キース教授は、「たった1人の人間の考えや主張から生み出された製品によって作られた分野というのは、他に類を見ません。ラックナー教授は、二酸化炭素による気候問題を解決できる規模で、大気から直接回収する技術を開発できる

と主張する研究者の中心的存在でした」と話す。

この枠組みがうまくいくかどうかは、ラックナー教授を含め、誰にも分からない。化学式は極めて単純だ。だが、気候変動に待ったをかけられるような二酸化炭素除去装置を本当に作れるのだろうか？ 資金は誰が提供するのだろうか？ さらに、回収した二酸化炭素をどう処理したらいいのだろうか？

ラックナー教授は、答えがまだわからない部分があることをすぐに認めたが、プロセスが安価になるほど実現に近づくとも考えている。「『炭素問題の解決には1トン当たり1000ドルかかる』といえば、『気候変動は、でたらめだ』と言われるでしょうし、1トン当たりの処理額が5ドルや、1ドルだと言えば、『なぜ早く解決しないのだ』と言われるでしょう」。

選択肢を絞り込む

大気中の二酸化炭素濃度は410ppmに近付いている。そのため、すでに地球の気温は産業革命

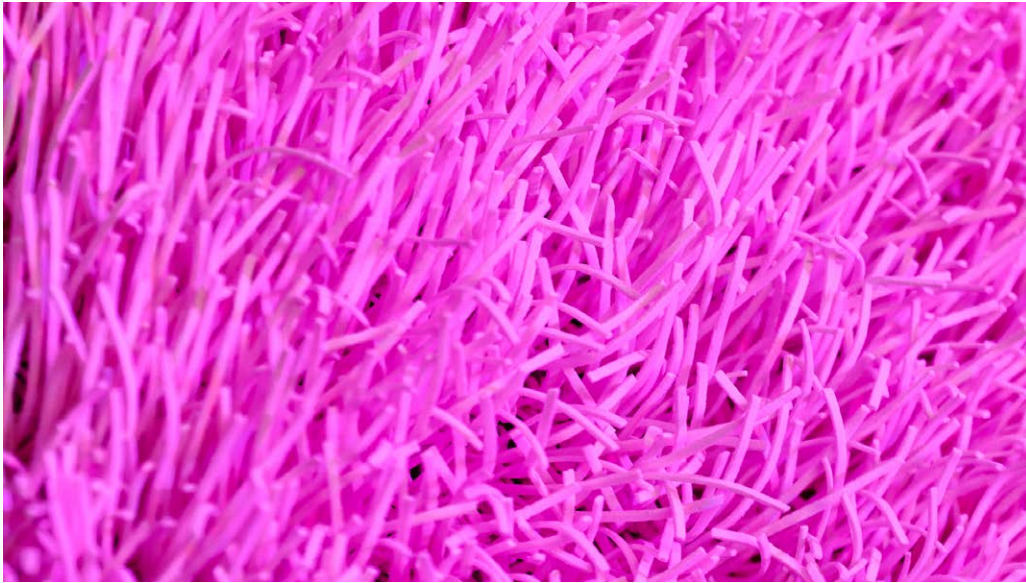
前と比べ約1℃強も上昇し、干ばつや山火事などの自然災害が頻発するようになっている。排出量が増え続ければ、こういった危機的状況が悪化するだけだろう。

一部の科学批評家は、ラックナー教授の予測が間違っているだけでなく、危険でもあると論じた。2011年には、二酸化炭素大気回収の実現はついでたように思われた。しかし、ラックナー教授は、動じなかった。

国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）による最新の評価では、地球温暖化を1.5℃に抑えるためには、今世紀末までに1000億から1兆トンの二酸化炭素を除去しなければならないという。1兆トンの二酸化炭素は、現在のペースの排出量のほぼ30年分に匹敵する。

二酸化炭素を大気から抽出する方法はいくつかある。多くの木を植える、草原など自然に土壌中に炭素を保持している地域を復元する、二酸化炭素を吸収する植物などのバイオマスを燃料とし、使用するときには排出量を回収する（このプロセス

One man's two-decade quest to suck greenhouse gas out of the sky



草のような形をした二酸化炭素回収材のクローズアップ。気温が上昇すると二酸化炭素を放出する初期の設計のもの
Spencer Lowell

は二酸化炭素を回収・貯蔵するバイオ燃料として知られる)、といった方法だ。

だが、2018年10月の全米アカデミーズの報告によれば、こういった方法だけでは、少なくとも食料が必要ならば、温暖化による気温上昇を2℃に抑えるには十分ではないという。それだけの量の二酸化炭素を回収するのに必要な土地の広さは、大量の農業食料生産を犠牲にして実現するものだからだ。

ラックナー教授たちが開発する大気回収装置の魅力は、はるかに小さな土地面積で同じ量の二酸化炭素を吸収できる点だ。大きな問題点は、現時点では植樹の方がはるかに低コストということだ。二酸化炭素1トン当たり約600ドルという現在のコストで1兆トン回収するには、世界の年間GDPの7倍を超える約600兆ドルが必要となる。

ハーバード大学のキース教授が2018年夏に発表した論文では、同教授が設計を手伝った大気回収システムが本格稼働した場合、コストは最終的に1トン当たり100ドル以下になると試算している。ブリティッシュコロンビア州に本拠を置くカーボン・エンジニアリングは、試験プラントを拡張して、回収した二酸化炭素と水素を組み合わせた合成燃料の生産量を増やしているところだ。こういった合成燃料は、ディーゼル燃料やジェット燃料に転換され、化石燃料を新たに掘り出す必要がないためカーボンニュートラルとみなされる。

キース教授の方法を用いて1トン当たり100ドルで二酸化炭素を回収できるのなら、こういった合成燃料を市場で販売しても、公共政策による支援があれば利益を出せるだろう。たとえば、カリフォルニア州の再生可能燃料基準や、欧州連合

One man's two-decade quest to suck greenhouse gas out of the sky

の新たに策定された再生可能エネルギー利用促進指令 (Renewable Energy Directive) などだ。こういった類を早い機会に与えることにより、テクノロジーのスケールアップや、コスト削減、市場の開拓が促進されると期待されている。

スイスに本拠を置くクライムワークス (Clime works) やニューヨークのグローバル・サーモスタット (Global Thermostat) など他のスタートアップ企業も、同レベルか、より低いコストを達成できると考えている。こうしたスタートアップ企業は、植物の発達を促すために二酸化炭素を多く含んだ空気を使うナトリウム化合物産業や温室市場を調査している。

だが、二酸化炭素を販売することは、簡単なことではない。

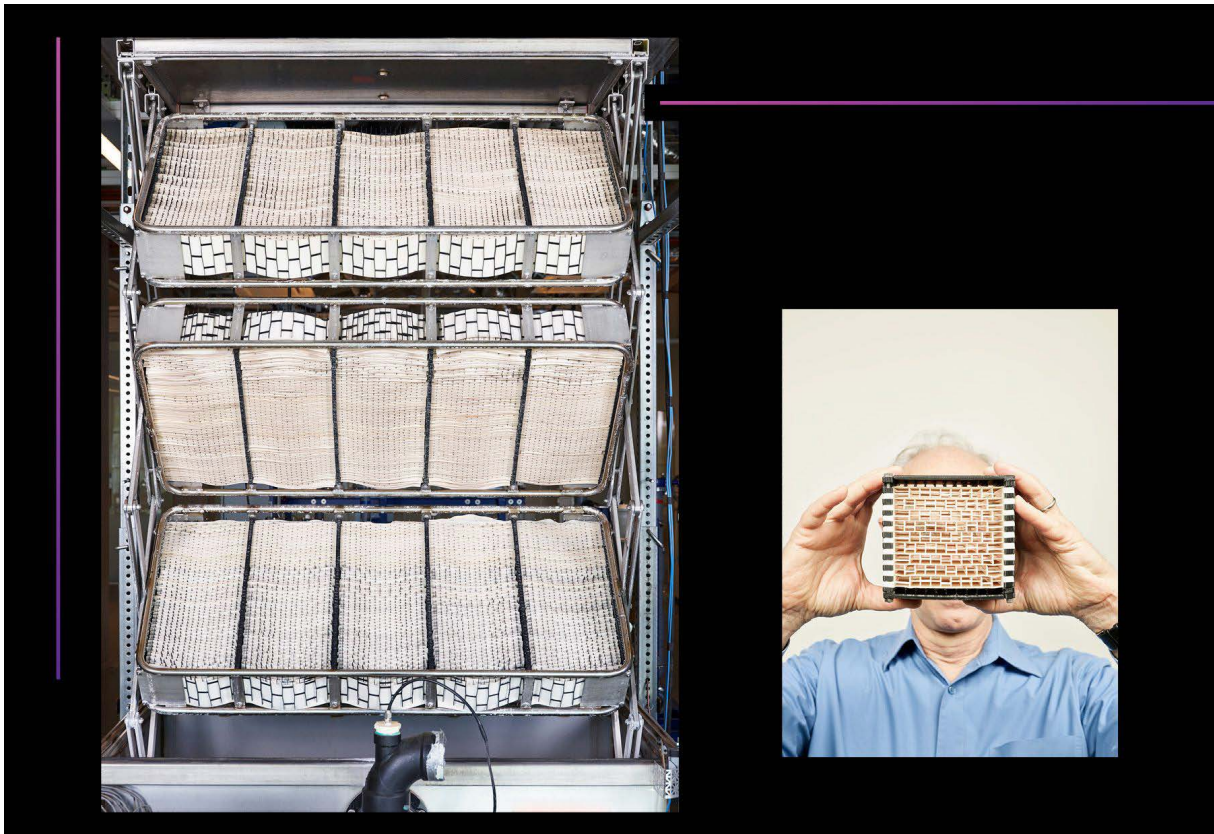
全世界の需要は比較的少なく、全米アカデミーズの調査によれば、年間およそ数億トンで、最終的に年間除去すべき数百億トンのわずかな割合に過ぎない。さらに、需要の大部分は原油の3次回収法 (EOR: Enhanced Oil Recovery) だ。これは、圧縮された二酸化炭素を強制的に油井に

注入して残っている原油を取り出す手法だが、気候問題をさらに悪化させてしまう。

炭素回収スタートアップ企業にとって重大な課題は、二酸化炭素市場が今後どれだけ成長するかということだ。数十社が、新規事業立ち上げの道筋を模索している。たとえば、カリフォルニア州に本社を置くオーパス12 (Opus12) は、二酸化炭素を用いて化学物質やポリマーを作り出そうとしている。ノバスコシア州 (カナダ) のカーボンキュア (CarbonCure) は、100社以上のコンクリート製造業者と協働し、二酸化炭素を炭酸カルシウムに転換し、硬化させてコンクリートの中に二酸化炭素を閉じ込める手法を開発中だ。

グローバル CO2 イニシアチブ (Global CO2 Initiative) が2016年に発表した報告書の見積もりによれば、液体燃料やポリマー、メタノール、コンクリートといった二酸化炭素活用製品の市場は、2030年までに8000億ドルに達する可能性があるという。こういった市場により、年間70億トン、つまり世界の年間排出量の約15%が使用される可能性がある。

One man's two-decade quest to suck greenhouse gas out of the sky



数百ものポリマーの細長い布で帆のような形状を作り、装置の中を風が通りぬけるとときに、二酸化炭素の分子を取り込む。炭素吸引材を格子状に成形した大気回収装置の初期モデルを覗き込むラックナー教授

だが、こうした予想は極めて楽観的だ。複数の産業でこういった大きな変動があったとしても、回収した大量の二酸化炭素は依然として残り、永久的に地下に貯蔵されなければならない。

こうしたことを実現するには、社会がコストを負担しなければならない。一部の意見は懐疑的だ。大気から二酸化炭素を回収するということは、2500 の分子の中から二酸化炭素分子1つだけを取り出すことを意味する（大気中の二酸化炭素濃度は2500分の1だ）。気候変動に対抗しようと

するときに最もエネルギーを消費し、最もコストの高い方法だ。「二酸化炭素の大気回収は、二酸化炭素の排出量を削減するよりもコストのかかる方法です。しかし現在、私たちは排出量削減にすら多くの資金を費やそうとしていません」というのは、カーネギー研究所気候科学者であるケン・カルデイラ博士だ。「したがって、大気回収によって世界規模のネガティブ・エミッション（すでに大気中に存在する二酸化炭素の除去）を実現するという考えは、私にとって夢物語に過ぎません」。

ロボットを作るロボット

1992年のある夏の夜、ロスアラモス国立研究所の研究者だったラックナー教授は、仲間の素粒子物理学者とともにビールを飲みながら、大胆な科学的アイデアがないことに愚痴をこぼしていた。1〜2杯のビールを飲んだ後、彼らはあることを思いついた。機械が機械を作れるとしたら何が可能になるだろう？ 作れるものの大きさと作る速さの限界はどのくらいなのだろうか？

ラックナー教授たちは、この方法がうまく機能するのは、自身で原料をすべて土から掘り出し、ソーラーパネルを建造してプロセスに電力を供給するロボットを作った場合だけだと、すぐに気付いた。そしてこの場合、ロボットは永遠に自分たちのコピーも作り続けなければならない。

翌朝、ラックナー教授とその友人のクリストファー・ヴェント博士(ウィスコンシン大学マディソン校)は、ある考えを検討してみることにした。2人は、数学を解き明かし、大量の二酸化炭素を

回収して炭酸塩岩に変換する自己複製型ロボットなどいくつかの応用を検討して、最終的に論文を発表した。

「私は常に受動的であるべきだと主張しています」と、ラックナー教授はいう。「風の中に立つ木になれば、二酸化炭素は自然に運ばれてくるのです」。

ロボットの大部隊やソーラーパネル、炭素変換機、岩石の山はすべて指数関数的に増加し、「10年以内に大陸規模」に到達するだろうと、論文は結論づけている。大気中の二酸化炭素の20%を炭酸塩岩に変換すると、厚さ50センチメートル、面積100万平方キロメートル(エジプトと同じ広さ)になるという。

もちろん、問題は自己複製型ロボットなど存在しないことだ。ラックナー教授は、計画を進めて、化石燃料の代用としての太陽光発電にしばらくの間、焦点を当てた。だが、問題を研究すればするほど、再生可能エネルギーが、価格や豊富さ、エネルギー密度の面で、石炭や石油、ガソリンと競

争することは難しいと考えるようになった。

「これは化石燃料ベースの電力が将来も無くならないであろうことを示していました」とラックナー教授はいう。だが、もし二酸化炭素除去技術のコストを十分に低くできれば、「化石燃料の販売企業を店仕舞いさせられる」と、ラックナー教授は考えた。

数年後、ラックナー教授は「二酸化炭素の大気からの抽出。これはただの選択肢だろうか？」と題する論文を発表した。ラックナー教授は、技術的には実現可能であり、1トンあたりわずか15ドルというコストも可能かもしれないと主張した（ラックナー教授は現在、コストの下限はおそらく30ドルと50ドルの間だろうと考えている）。

2001年にラックナー教授は、コロンビア大学に移り、大気回収の商業化への初めての取り組みであるグローバル・リサーチ・テクノロジーズ（Global Research Technologies）を共同設立した。衣類や家具の通販会社であるランズエンド（Lands 'End）の創業者であるゲイリー・カマーは、800万ドルをグローバル・リサーチ・テク

ノロジーズに投じた。ラックナー教授はこの資金を「ベンチャー・キャピタルではなく、アドベンチャー・キャピタル」と呼んでいる。

グローバル・リサーチ・テクノロジーズは、小規模の試作機を製作したが、すぐに資金は底をついた。ある投資家グループが、グローバル・リサーチ・テクノロジーズの経営権を取得し、サンフランシスコに拠点を移して、キリマンジャロ・エネルギー（Kilimanjaro Energy）と社名を変更した。ラックナー教授はそこで顧問取締役を務めたが、それ以上の資金を集めることが出来ず、静かに会社を清算した。

こうした失敗にもかかわらず、ラックナー教授は、安価で効率的に大気回収ができる方法を見付け出そうと研究を続けた。ラックナー教授は、大気回収に関する100本以上の科学論文と論説を発表し、24件以上の特許を申請した。

しかし、一部の科学批評家は、ラックナー教授の予測が間違っているだけでなく、危険でもあると論じた。つまり、大気から安価かつ安易に二酸化炭素を回収できるという主張は、温室効果ガ

One man's two-decade quest to suck greenhouse gas out of the sky



Spencer Lowell

ス排出削減の重圧を軽減してしまうというのだ。2011年に発表された2つの論文は、大気回収テクノロジーは1トン当たり600ドルから1000ドルの費用がかかるだろうと結論付けた。

2つの論文のうち1つを共同執筆したマサチューセッツ工科大学（MIT）エネルギー・イニシアティブのハワード・ヘルゾーク上級研究員は、大気回収テクノロジーを扱う一部の企業は「がまの油売り」だと一歩踏み込んで発言した。2018年、MITテクノロジーレビューの取材でヘルゾーク上級研究員は、主にラックナー教授のことを言っていると話した。「ラックナー教授は、本当にかんりの変わり者です」と、ヘルゾーク上級研究員はいう。

多くの人は、2つの論文により、大気回収は実現しないと結論付けられたと考えた。しかし、ラッ

クナー教授は、断固として譲らなかった。2つのうちの最初の論文が発表された後、ネイチャー（Nature）誌にこう語っている。「この研究は、二酸化炭素の大気回収に関する、ある特定の方法の費用が高いことを証明しています。ペンギンを研究して、鳥は空を飛べないという結論に飛びつくようなものです」。

2014年、ラックナー教授は、グローバル・リサーチ・テクノロジーズの共同創業者であるアレン・ライトとともに、ネガティブ・カーボン・エミッション・センターをアリゾナ州立大学に設立した。

合成林を植える

ネガティブ・カーボン・エミッション・センターの開発の核となるのは、商業的に入手可能な、あ

る特定の陰イオン交換樹脂だ。大気中の二酸化炭素がポリマーの細長い布の間を通過すると、負に帯電したイオンが二酸化炭素分子と結合して重炭酸水素塩（重曹や制酸剤などが主な化合物）に変換される。

その後、装置はポリマーの布を収縮させて装置内に取り込んで水で満たす。すると、その水が、重炭酸水素塩分子を炭酸イオンに変換し始める。

水が排出されると、化合物は不安定になり、容器内で二酸化炭素に戻る。二酸化炭素濃度の高い空気はその後、チューブを通して隣接するタンクに吸い込まれるという仕組みだ。

大気中の二酸化炭素濃度は比較的低いため、他のほとんどの大気回収法は、大型のファンを使用して空気を結合剤に吹きつけて、より多くのガスを回収しようとする。そうした方法では、その後、熱を用いて後続反応を起こし、二酸化炭素を放出する。いずれの工程も、多くのエネルギーを消費する。対照的に、ラックナー教授とライトの手法では、機械の伸縮、水の汲み上げ、空気の吸い出し

をするのに必要な電力はわずかだという。

「私は常に受動的であるべきだと主張しています」と、ラックナー教授はいう。「風の中に立つ木になれば、二酸化炭素は自然に運ばれてくるのです」。

だが、この方法には大きな欠点がある。風が吹いているときのみ機能し、乾燥地帯でのみ意味をなす方法だということだ。湿度が高いと二酸化炭素が放出されてしまうからである。さらに、最終的な空気の中の二酸化炭素濃度は、カーボン・エンジニアリングやクライムワークスの約98%に対し、5%以下だ。

炭素回収のスタートアップ企業にとって重大な課題は、二酸化炭素市場が今後どれだけ成長するかということだ。数十社が、新規事業立ち上げの道筋を模索している。

この低レベルの濃度は、温室の植物に施肥するのに適している。しかし、その市場は小さい。だが、ラックナー教授は壮大な構想を持っている。

ラックナー教授は、これらの装置を世界の暑い

乾燥地帯に設置して、大気から二酸化炭素を回収しつつ、隣接したソーラーパネルから得た電気で水を電気分解して水素を取り出す情景を想像する。二酸化炭素と水素は、その場で結合され、1日に数千バレルの合成燃料を生産できる。この合成燃料は、暖房や輸送用に販売することも、天候に左右される風力や太陽光発電のような再生可能エネルギーを補う電力として送電網に供給することもできる。

だが、この計画にはいくつかの課題がある。電気分解は、まだ非常に高価なのだ。また、水蒸気や窒素、酸素を除去しつつ、二酸化炭素を必要な濃度に圧縮しなければならない。

可能ではあるが、コストと必要なエネルギーが大幅に増加してしまうかもしれない。「この点はラックナー教授が、少し取り繕っている点で、極めて重要です」と、全米アカデミーズの報告書の共著者であるウースター工科大学のジェニファー・ウィルコックス教授はいう。

理論家であり、大局を見ることができると人物としてのラックナー教授の強みが、材料科学や化学

においては、数々のアイデアを必要な進歩に変換するのに活かされていないと考える人もいる。特に、ネガティブ・カーボン・エミッション・プロジェクトは、資金を集めてスタッフを雇用し、商業規模ではないにせよ実証実験をしているカーボン・エンジニアリング、クライムワークス、およびグローバル・サーモスタットに後れを取っている。

だが、ラックナー教授は、自分のアプローチは、ライバルよりも安価になるだろうと確信している。「私はそのことを、ユニットプロセスごとに詳しく説明できます。第一原理の面では、すべてのステップで私の方法の方が少し安いのです」とラックナー教授はいう。

深刻な危機

この研究の道を切り開いてから20年以上たった今、ラックナー教授は、大気回収テクノロジーの展望についてどう思っているのだろうか？ 答えは簡単ではない。ラックナー教授は、簡単に答えたりしないからだ。ヤシの木並木のあるアリゾ

ナ州テンピの大学内を散歩しながら、ラックナー教授は、今でも大気回収は実現可能であると自信を持っており、商業規模に達すればコストがかなり下がると信じていると語った。

「しかし、そのしきい値を突破する政治的意思に関しては、それほど楽観的ではありません」。

高い初期費用と限られた市場であることを考慮すれば、このテクノロジーを広めるには、政府からの多額の資金援助か、厳しい規制が必要となる。そのうえ、二酸化炭素を回収し、活用されない二酸化炭素の大部分を地下へ埋蔵するには、政府からの多大な支援も必要になるだろうとラックナー教授はいう。ラックナー教授は、二酸化炭素は下水のように処理されるべきだと考えている。つまり、消費者や企業が回収と処分のために、税金でも料金でもよいが、費用を負担するべきだというのだ。

だが、この数十年というもの、気候変動に対する政治的な活動は比較的少なく、炭素税に関する社会からの抵抗は激しかった。そのため、ラックナー教授は、あまりにも悲惨で無視できないくら

い大きな気候災害が起こるまで、世界が費用を負担する気にならないだろうと懸念を示している。

ラックナー教授は、他の誰よりも多くの時間を、二酸化炭素除去に関して考えることに費やしてきた。そのラックナー教授が、人類は二酸化炭素を除去しなければならないと確信しているのだ。「この私が真っ先に、大気回収が立証されていないことを認めます。確かに、大規模な大気回収の目処はいまだに立っていません。しかし、大気回収の目処を立てなければ、人類は深刻な危機に瀕してしまうでしょう」。

**eムックは、MITテクノロジーレビュー
有料会員限定サービスです。
有料会員はすべてのページ（残り62ページ）を
ダウンロードできます。**

ご購入はこちら



<https://www.technologyreview.jp/insider/pricing/>

No part of this issue may be produced by any mechanical, photographic or electronic process, or in the form of a phonographic recording, nor may it be stored in a retrieval system, transmitted or otherwise copied for public or private use without written permission of KADOKAWA CORPORATION.

本書のいかなる部分も、法令または利用規約に定めのある場合あるいは株式会社 KADOKAWA の書面による許可がある場合を除いて、電子的、光学的、機械的処理によって、あるいは口述記録の形態によっても、製品にしたり、公衆向けか個人用かに関わらず送信したり複製したりすることはできません。