

ファースト・ムーバーズに学ぶ

二酸化炭素除去の ベストプラクティス・ガイドライン

白書

2024年1月



目次

| | |
|--------------------------------|----|
| はじめに | 3 |
| エグゼクティブサマリー | 4 |
| 1 課題の概要 | 6 |
| 1.1 パリ協定の目標達成に炭素除去が不可欠な理由 | 6 |
| 1.2 炭素除去テクノロジーの現状 | 8 |
| 1.3 本白書の目的 | 8 |
| 2 技術系CDRの主な手法 | 9 |
| 2.1 市場にある炭素除去テクノロジー | 9 |
| 2.2 技術系CDRの高機能な特徴 | 12 |
| 3 今、技術系CDRに取り組むべき理由 | 14 |
| 3.1 企業の気候変動戦略に有益 | 14 |
| 3.2 ビジネスチャンスを提供 | 15 |
| 3.3 リーダーシップが不可欠 —「様子見」は選択肢ではない | 17 |
| 3.4 技術系CDRもコベネフィットをもたらす | 18 |
| 3.5 NCSと技術系CDRのミックスが必要 | 19 |
| 4 黎明期にある技術系CDR市場に参加する方法 | 21 |
| 4.1 予算確保の方法 | 21 |
| 4.2 適切な市場参加モデルの選択 | 24 |
| 4.3 社内外へのCDR活動実績の発信 | 26 |
| 結論 | 28 |
| 付録 | 29 |
| 協力者 | 30 |
| 参考文献 | 31 |

免責事項

本書は、世界経済フォーラムが、プロジェクト、インサイト領域、相互作用への貢献として発行したものである。本書に記載された所見、解釈および結論は、世界経済フォーラムによって促進され、承認された協力プロセスであるが、その結果は必ずしも世界経済フォーラムの見解を代表するものではなく、そのメンバー、パートナー、その他のステークホルダー全体を代表するものでもない。

© 2024 World Economic Forum. All rights reserved.
No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, including photocopying and recording, or by any information storage and retrieval system.

はじめに



ナシム・ポーア

世界経済フォーラム
カーボン・リムーバル・
マーケット・イノベーション・
リード

2023年に入ってから、世界の平均気温が工業化前と比べて1.5°C以上高い日が3分の1に上っています¹。10月末に、科学者は警鐘を鳴らしました。このままではあと5、6年ほどで、温暖化を1.5°Cにとどめるべく残りの炭素予算を、人類は使い果たしてしまうだろうと²。しかし、繰り返される警告、そしてこの気候大変動に向かってとどまる気配のない歯車を戻そうと2015年に195か国がパリ協定に合意しているにもかかわらず、温室ガス排出量は増える一方であり、減る気配はありません。

グローバル経済の脱炭素化は、最重要かつ喫緊の課題です。さらに、同じくらい差し迫った優先事項があります。大気から過剰な二酸化炭素(CO₂)を取り除くペースを加速することです。すべての国家および企業が2050年までに「ネットゼロ」、つまり二酸化炭素排出量正味ゼロを達成したとしても、十分ではないでしょう。私たちはその後何十年も二酸化炭素を除去し続けなければなりません。これまでに蓄積された排出量の分を削減し、脱炭素が最も困難な分野からの排出量については大気中の二酸化炭素を同量取り除くことで差し引きゼロを目指し、温暖化によって生じる地球自体のフィードバックループ(森林火災など)から私たちを守らなければならないからです。

この課題の規模は、率直に言って衝撃的です。今世紀末までに最大6,870億トンの二酸化炭素を除去する必要があり、しかも、2050年までに年間約100億トンの除去が求められています³。現在、人類は年間約20億トンの二酸化炭素を除去していますが、これは植林のような自然の力を活用した気候変動ソリューション(NCS: Natural Climate Solution)によるものです。ただし人類が何もせず、樹木や土壌、海に、自分たちの汚れ仕事を任せておくわけにはいきません。山火事や環境悪化によって、自然が回収した炭素が放出されるからです。

新しいソリューションが早急に求められています。現状を変えるために必要なスピードとスケールで、排出量削減について追加性、持続性があり、かつ定量化可能なインパクト

をもたらずテクノロジーが必要なのです。本白書ではこうした技術系二酸化炭素除去(CDR: Carbon Dioxide Removal)テクノロジーの中でも有望な、バイオ炭・回収・貯留を伴うバイオマス発電法(BECCS: Biochar, Bioenergy with Carbon Capture and Storage)、炭素貯留を伴う直接空気回収法(DACCS: Direct Air Capture with Carbon Storage)、岩石風化促進法(ERW: Enhanced Rock Weathering)を取り上げます。どのソリューションも、世界経済フォーラムのファースト・ムーバーズ・コアリション(FMC)が求める高いハードルをクリアすべく、より大規模で耐久性の高い二酸化炭素の回収・貯留が可能だと実証することに照準を合わせています。

FMCは企業の集団的購買力の影響力を駆使して明確な需要シグナルを市場に送り、ネットゼロへの移行に欠かせない新興の脱炭素テクノロジーをスケールアップさせます。十分な需要を刺激することで、FMCはこれらのテクノロジーの商用化、そして最終的にはコスト引き下げを目指します。

FMCのメンバーは、2030年までに最低5万トン、もしくは金額にして2,500万米ドル相当の耐久性と拡張性のあるCDR契約を結ぶことにコミットしています。このように今すぐ一歩前に踏み出し、技術系CDRのバイオニアに具体的な需要の意思表示ができる企業リーダーたちがさらに求められているのです。そうならばCDRデベロッパは自信を持って、人の命を救える有望なテクノロジーへの投資に必要な融資枠を確保することもできるでしょう。

私たちは様々な業界セクターのFMC参画企業から8人にインタビューを行いました。その中で、今すぐ着手することがなぜこれほど重要であるのか、「様子見」をする選択肢などない理由、そして黎明期にあるこの市場で困難を切り抜けていく最善策は何か、それぞれの洞察を知ることができました。各章ではメンバーの実例を具体的に紹介します。本白書は、各企業に、自社の幅広い気候戦略の一環として技術系CDRの市場にいち早く参加していくよう、呼びかけるものです。

エグゼクティブサマリー



2022年、世界の二酸化炭素排出量は2015年より20億トン(5%)増加した。パリ協定で合意した目標を達成するには、2030年までに排出量を40～60%削減する必要があるにもかかわらずだ。サイエンス・ベースド・ターゲット・イニシアチブ(SBTi)によると、グローバルな経済活動による排出量の90%を削減することが最優先となる。残りの10%は、大気中の二酸化炭素を回収し、永続的に貯留する「ネガティブエミッション」、つまり二酸化炭素除去(CDR)と呼ばれるアプローチに頼らざるを得ない。

CDRが必要な理由は3つある。1) 脱炭素が困難な残り10%の排出量に対処するため、2) 地球温暖化によって悪化したフィードバックループ(森林火災など)に起因する自然発生的な排出量を削減するため、そして3) これまでに蓄積された排出量を削減するためである。これは、毎年100億トン(ギガトン換算で10Gt)の二酸化炭素を大気から除去することを意味する。今世紀後半を通して、グローバルな排出量を、排出された二酸化炭素よりも除去された二酸化炭素の方が多き状態の「ネットマイナス」に維持しなければならない。

本白書は、持続可能性を追求する専門家を対象とし、技術系CDRソリューションの事例紹介や、黎明期にあるCDR市場に参加するためのガイドラインなどで構成されている。また、本白書で展開する議論は、2030年までに5万トン(もしくは2,500万米ドル相当)の二酸化炭素を耐久性と拡張性のある方法で除去することにコミットする契約を結んだファースト・ムーバーズ・コアリション(FMC)のメンバーへのインタビューに基づいている。

技術系 CDR の主な手法

バイオ炭： 燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下でバイオマスを加熱することで炭を生成し、バイオマス中の炭素を固定する。他の技術系CDRよりも経済的だが、持続可能なバイオマスを大量に入手しにくいという制約がある。

炭素回収・貯留を伴うバイオマス発電法 (BECCS)： 持続可能なバイオマスを燃焼させて電力や熱を発生させる、または処理する。その過程で発生する二酸化炭素は排ガスから除去し、圧縮して永続的に貯留する。炭素は植物の光合成によって回収される。

炭素貯留を伴う直接空気回収法 (DACCS)： フィルターを使用して二酸化炭素を回収し、圧縮して地中に貯留する。必要な土地の面積が小さく、永続的な地中貯留が可能なのがメリットだが、クリーンエネルギーを利用しなければならないため、現時点ではコストが非常に高額(1トン当たり600～1,000米ドル)となるのが難点である。

岩石風化促進法 (ERW)： 森林の土壌や農地、海岸に、水に溶けて二酸化炭素を吸収する岩石を散布し、数百年にわたって二酸化炭素を結合させる。コスト、副次的影響、持続性、拡張性についてはまだ不確かな面がある。

2050年までに年間10Gtの二酸化炭素を除去するためには、技術系の手法であれ自然を利用した取り組みであれ、あらゆるソリューションを強化する

必要がある。成功の鍵は、**十全性**（追加性があり、永続的かつ定量化可能なインパクトをもたらすこと）と**拡張性**（現状を変えるのに十分なスピードが出せること）にある。

技術系 CDR は、十全性において高い評価を得ている。DACCS と BECCS は炭素除去に特化した技術であり、この目的がなければ存在しないため、追加的なインパクトをもたらせるのは明らかである。いずれも数千年にわたり炭素を地中に貯留できるのに対し、自然気候ソリューション（NCS）には森林火災や自然環境の劣化によって炭素を放出するリスクがある。産業設備を用いる技術系 CDR ソリューションは、定量化がより容易である。

現在、様々な CDR 活動を通じて除去されている二酸化炭素は全体で年間 2Gt に上るが、そのうち 99.9% は新規植林、再植林などの NCS によるものだ。技術系 CDR による除去量はまだ全体の 0.1% に過ぎないが、今後増えていく可能性は高い。なぜなら NCS のために確保できる土地には限りがあるからだ。国連は、2050 年までに技術系 CDR がもたらす二酸化炭素の削減効果を年 62Gt と見積もっており、NCS の年 33Gt に比べて期待値がかなり高い。だが現状、技術系 CDR は総じて高コストであることが、拡大を制限する主要因となっている。その足かせを取り払うには、企業が重要な役割を果たすことが求められる。

なぜ企業は今、技術系 CDR に取り組むべきなのか

企業の気候変動戦略：気候変動対策の目標達成や残余排出量の相殺（オフセット）に向けた企業活動をより確実で、信頼性の高い取り組みにするためには、技術系 CDR の品質や拡張性を高めることが重要だ。技術系 CDR に率先して取り組むことで、企業はグリーンウォッシュ（環境配慮が上辺だけで実態を伴わないこと）であるという非難を防げると同時に、評判と競争力を向上させることができる。

ビジネスチャンス：企業は、インフラ整備、設備製造、工場運営、コンサルティングや CDR カーボンクレジット（除去系カーボンクレジット）に関するコンサルティングやカーボンクレジット取引など、既存の専門知識を活用して CDR 関連の新しいビジネスモデルを開発することができる。

コベネフィット：公正な移行に貢献できる。既存の化石燃料インフラ（劣化した油田やガス田、パイプライン、産業クラスターなど）を技術系 CDR に再利用することで、人員削減を防いだり、新たな雇用につなげたりすることができる。

リーダーシップ：新しい CDR 技術が値下がりするのを「様子見」する余裕はない。技術系 CDR デベロッパーは、将来の収益を保証するオフテイク契約を結ぶアーリアダプター（早期導入者）を必要としている。

除去費全体の抑制：今、技術系 CDR に投資すれば、長期的にはコストが抑えられる。一方、現時点で安価だという理由で NCS を選択すると、自然を利用したソリューションは枯渇して価格上昇を引き起こすことになる。

黎明期にある技術系 CDR 市場に参加する方法

インターナルカーボンプライシングで予算を確保する：

FMC メンバー企業には、CDR の実施期間中に支払うカーボンプライシングを社内で自主的に設定しているところもある。開示されている 2030 年までの価格には、1 トン当たり 80 米ドルから 200 米ドルまでの幅がある。また、インターナルカーボンプライシングを設定する戦略にはいくつかの利点がある。一つは、毎年の予算要求の不確実性を取り除けること、もう一つは、価格の透明性が CDR デベロッパーにとって明確な需要シグナルになること、さらに、長期的なオフテイク契約を結べるようになること、そして特に重要なのは、インターナルカーボンプライシングが高ければ高いほど、企業が CDR よりも排出削減を優先するようになることである。その他、希望する予算と年間除去量を組み合わせた目標を設定している FMC メンバーもいる。

適切な市場参加モデルの選択肢は、以下のとおり。

- **CDR デベロッパーとの直接取引：**バイヤーは正確な契約条件を交渉できるが、取引が成立するまでに多大な労力を要する。このモデルは、社内コンピテンシーや戦略的パートナーとの関係構築を目指す、オフテイク量の多い大企業に適している。
- **バイヤーズ・クラブ：**個々のバイヤーの需要を集約し、技術系 CDR のポートフォリオを形成する。仲介業者との間で契約を一つ締結するだけで、競争力のある価格で多様な除去方法を確保できる。このモデルは、長期的なオフテイクによって取引量を少なく抑えたい企業に向いている。
- **OTC (Over the Counter) 取引：**供給業者、ブローカー、バイヤーの間で技術系 CDR カーボンクレジットの取引を行う。1 トン当たりの価格は固定されていることが多く、多額の諸経費がかかるが、取引自体は迅速に、多くの労力を費やすことなく、柔軟に成立させることができる。
- **コンサルタント：**CDR に関する経験が少ない企業の場合、参加ルートに関する技術的なアドバイスや有意義な戦略構築を支援するサービスを提供する専門コンサルタントのサポートを受けることも有力な選択肢となる。

コミュニケーション戦略：本白書では、FMC メンバー企業が CDR 活動を社内外にどのように伝えたかを示すいくつかの事例を紹介している。どの事例も、できるだけ幅広い賛同を求めることがいかに重要であるかを物語っている。

課題の概要

2050年までのネットゼロが最終目的地ではない。その後、グローバルな排出量をネットマイナスにする必要があり、炭素除去がその目標への唯一の道筋となる。

1.1 パリ協定の目標達成に炭素除去が不可欠な理由

2050年までに、
年間およそ
100億トン
の二酸化炭素を
大気から除去しな
ければならない
可能性がある

現在、地球温暖化のスピードは、グローバル経済圏が二酸化炭素排出量を削減するスピードよりも速い。2015年12月、195か国が「気温上昇を産業革命以前の水準から1.5°Cに抑える努力」を追求する法的拘束力のあるパリ協定に署名⁴した。この日以降、新型コロナウイルスに誘発された一過性の減少があったにもかかわらず、温室効果ガスの純排出量は減少するどころか増加している。昨年の推定総排出量は2015年より20億トン近く多く、およそ5%の増加であった⁵。

国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）によると、パリ協定で想定されている目標を達成するには、2030年までにグローバルな二酸化炭素排出量を40～60%削減し（2010年比）、2050年までにネットゼロを達成する必要がある⁶。この2030年目標を達成するためには、毎年7%ずつというパンデミックレベルの排出量削減を行う必要がある（図1参照）。

人類の生活、移動、製造、消費の方法を脱炭素化することが最優先課題である。サイエンス・ベースド・ターゲット・イニシアチブ（SBTi）によれば、企業はバリューチェーンの絶対排出量を少なくとも90%削減する必要がある。残りの排出量は、従来の排出回避・削減系カーボクレジットではなく、永続的な二酸化炭素除去（CDR）によって除去または「中和」されなければならない。SBTiの「企業ネットゼロ基準（Corporate Net-Zero Standard）」によれば、「企業がネットゼロに到達したとみなされるのは、科学的根拠に基づく長期目標を達成し、残存する排出量を中和した場合のみ」である⁷。

IPCCが2018年の特別報告書『1.5°Cの地球温暖化（Global Warming of 1.5°C）』で示した4つの「モデルシナリオ」は、いずれもある程度のCDRに依存している⁸。このプロセスは「ネガティブエミッション」とも呼ばれ、ネットゼロを超えて、排出量よりも多く

の二酸化炭素を除去する必要があるところまで世界を押し上げる。

予測されるCDRの必要量は、目を覆いたくなるものだ。IPCCのシナリオのうち、より穏健な2つのシナリオでさえ、今世紀末までに3,480億～6,870億トンの累積炭素回収・貯留（CCS）が必要になる⁹。IPCCのネットゼロ・シナリオのいくつかの中央値によれば、2050年までに、年間100億トン近い二酸化炭素を大気から除去しなければならない可能性がある¹⁰。

次の3つの理由から、CDRは必須である。

- 本格的なネットゼロを実現するために必要な「脱炭素が困難な」分野の排出量（SBTiの企業ネットゼロ基準の残り10%）の埋め合わせをする
- 森林火災や永久凍土の融解で放出されるメタンなど、温暖化する地球の自然なフィードバックループ（森林火災など）から生じる地球自身の排出量を削減する
- これまでに蓄積された排出量を削減する

この最後の理由は重要である。IPCCが最初の報告書を発表した1990年以降に人類が排出した温室効果ガスは、それ以前に記録されたすべての履歴を上回っている¹¹。つまり、2050年までのネットゼロは最終目的地ではないということだ。今世紀半ば以降、グローバルな排出量をネットマイナスにする必要があり、CDRはそのための唯一の道筋を示すものである（図2参照）。

“ 1990年以降に人類が排出した温室効果ガスは、それ以前に記録されたすべての履歴を上回っている。

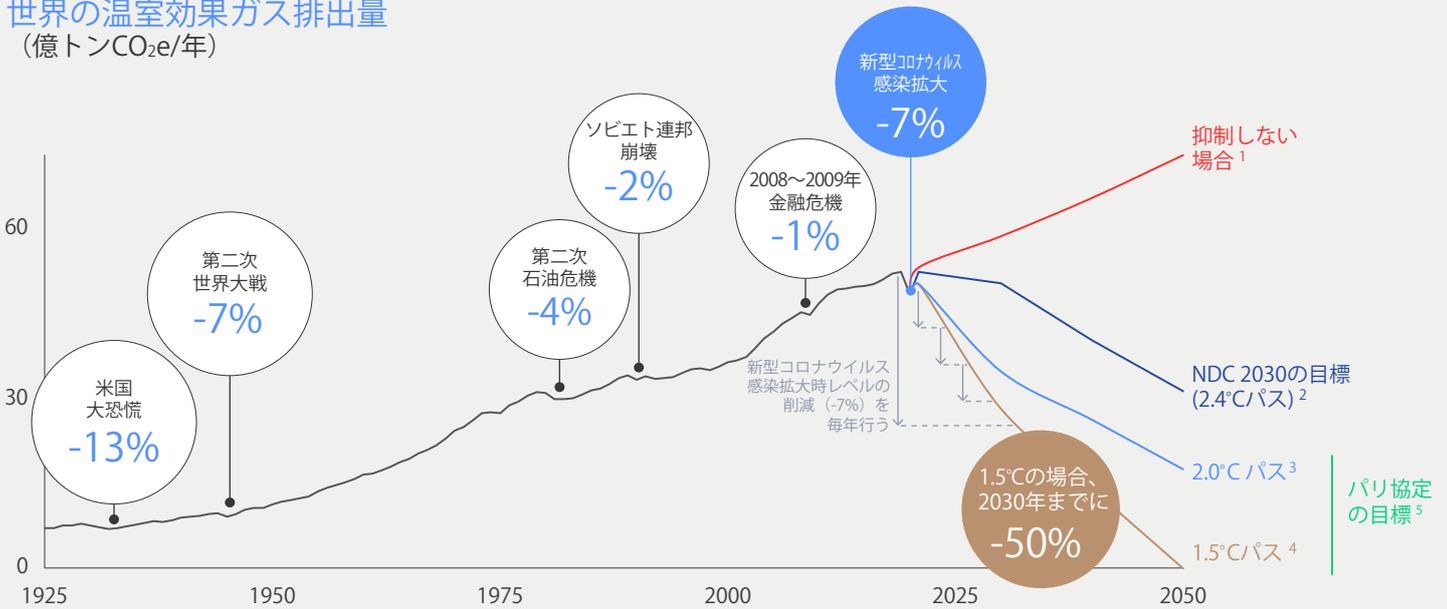
欧州環境政策研究所

図1と図2に、パリ協定の目標を達成するために必要なことをまとめた。

- 2030年までに排出量を半減
- 2050年までにネットゼロ
- 2050年以降、ネガティブエミッション

図1 パリ協定の目標を達成するために必要な排出量の軌跡

世界の温室効果ガス排出量 (億トンCO₂e/年)

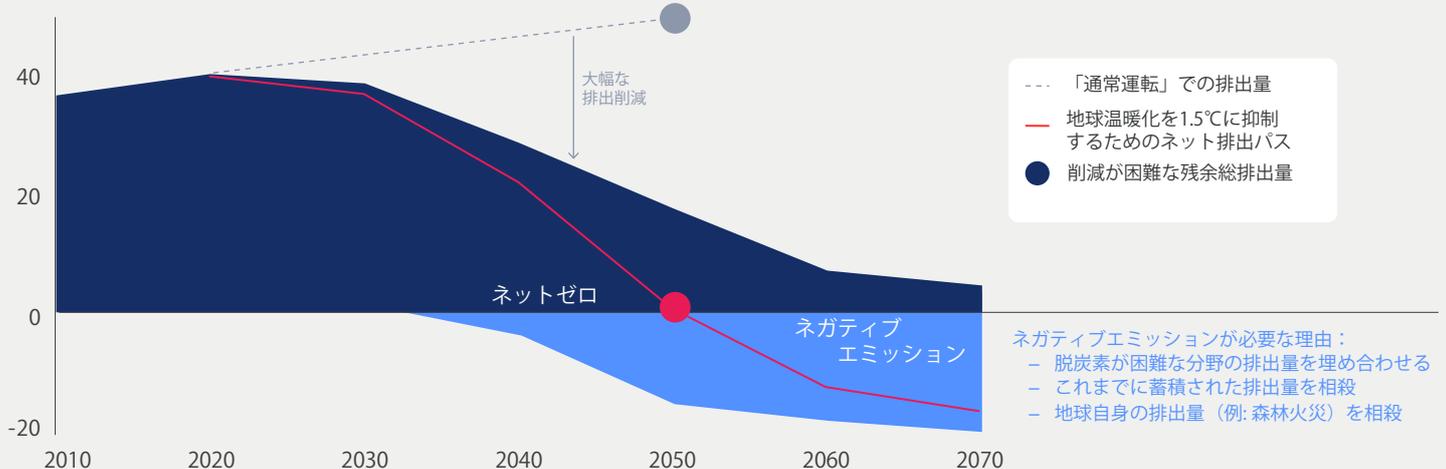


注 1. 2020年から2050年まで、UNEP 2019年ギャップ報告書の現行政策シナリオと同じ割合(年平均1.1%)でGHG排出量が回復・増加すると仮定。2. 2020年から2030年の間に、各国が「国が決定する貢献(NDC)」を達成するために必要な割合と同じ割合で脱炭素化を進めると仮定。3. .2030年までに25%削減、2070年までにネットゼロと仮定。4. .2030年までに45%削減、2050年までにネットゼロと仮定。5. パリ協定の目標は、地球温暖化を2.0°C、できれば1.5°Cに抑えること。数値は土地利用、土地利用変化、林業を除く。

出典:世界経済フォーラム¹²

図2 ネットゼロを超えて一炭素除去によるネガティブエミッションが必要

世界の温室効果ガス排出量 (億トンCO₂e/年)



予測中央値では、二酸化炭素換算排出量(CO₂e)で年間100億トン除去・貯蔵する必要がある炭素除去は次の1兆ドル産業 ← 2050年以降

注:排出シナリオが異なれば、総排出削減のタイミングと量に基づき、必要な二酸化炭素除去量が異なる。

出典:世界経済フォーラム¹³

1.2 炭素除去テクノロジーの現状

今日、二酸化炭素除去テクノロジーはまだ発展途上にある。成功している企業はほとんどなく、プロセスを開始した企業にも多くの障壁がある。現在注目されているのは、経済的ですぐに利用できる自然気候ソリューション（NCS）による炭素除去である。生物多様性、エコシステムサービス、自然災害へのレジリエンス（強靭性）などのコベネフィットをもたらすため、NCSを支援することは本質的に重要である。

炭素除去ソリューションのもう一つの系列は技術系CDRと呼ばれるもので、植物や土壌の代わりに技術系の手段を用いて大気中の二酸化炭素を回収・

貯蔵するものである。これらの技術は、長期的には世界が必要とする炭素除去能力の大部分をカバーできると期待されているにもかかわらず、現時点ではほとんど開発されていない。

したがって、排出削減は、これ以上遅れをとることが許されない巨大なタスクであるばかりでなく、十分な規模のネガティブエミッションを予定通りに実現できる炭素除去産業の構築もまた重要な課題となる。グローバルな気候変動目標を達成するには、企業の気候変動戦略は排出削減とCDRの両方に直ちに取り組む必要がある。

1.3 本白書の目的

本白書は、企業の気候変動戦略にCDRを加える過程にあるサステナビリティの専門家のために制作された。特に技術系CDRソリューションの事例を紹介し、黎明期であるCDR市場への参加障壁を下げることを目的としている。

本白書は、世界経済フォーラムのファースト・ムーバーズ・コアリション（FMC）のメンバーによって得られた教訓を共有し、技術系CDRの分野に一歩踏み出そうとする企業のためのベストプラクティス・

ガイドラインを提供するものである。多くの企業が、技術が実証されていないのになぜCDR市場に参加するのか、なぜ価格が下がるのを待ってから参加しないのかという、正当な疑問を抱いている。

本白書では、FMCのCDR目標（2030年末までに5万トン、または少なくとも2,500万米ドル相当の、耐久性があり拡張可能な正味の二酸化炭素除去を契約）にコミットしているFMC参画企業から8人にインタビューを行った（BOX 1参照）。

BOX 1

「メンバーは、最大限の直接排出削減努力に加え、持続的かつ拡張可能な正味の二酸化炭素除去の契約を2030年末までに達成することを約束する。

2030年末までに少なくとも5万トンの持続的かつ拡張可能な正味の二酸化炭素除去を契約するか、あるいは代替案として、2030年末までに少なくとも2,500万米ドルの持続的かつ拡張可能な正味の二酸化炭素除去を契約するかを選択できる」。

FMCの「耐久性と拡張性」の基準は、捕獲した炭素を1,000年間貯蔵できることを証明できるソリューションと、2030年までに少なくとも100万トン（1Mt）、2050年までに10億トン（1Gt）の炭素を貯蔵できる可能性のあるソリューションである。

出典：世界経済フォーラム、
ファースト・ムーバーズ・コアリション¹⁴

本白書の構成は次の通りである。

第1章では、炭素除去の課題について概観する。

第2章では、技術系CDRと黎明期にあるその市場について紹介する。

第3章では、なぜ企業が今、技術系CDRに取り組むべきなのかに焦点を合わせ、インタビューしたFMC参画企業が意思決定者に提示した主張を紹介する。

第4章では、予算の確保、市場参加モデルの選択、社内外へのCDR活動の伝達など、技術系CDR市場に参加する方法に関するFMCメンバーの洞察を紹介する。

付録には、本白書作成のための調査中にインタビュー対象の各企業が受けた質問の概要を示す。

技術系CDRの 主な手法

技術系 CDR のテクノロジーはまだ開発段階だが、その機能性は高い。今、この分野に投資すれば、大々的、かつ適切なタイミングでこの技術をフル活用できる。

2.1 市場にある炭素除去テクノロジー

二酸化炭素を地球の大気から除去する手法は通常、NCS¹⁵と、技術系 CDR に分けられる。

技術系 CDR には、バイオ炭、回収・貯留 (CCS) を伴うバイオマス発電 (BECCS)、二酸化炭素直接回収技術 (DACCS)、風化促進技術 (ERW) がある。1 トン当たりのコストと軽減能力のポテンシャルについて本章で記述するデータはすべて、2050 年に向けての長期的予測であり、IPCC が 2022 年に公表した第 6 次報告書に基づいている¹⁶。

バイオ炭：農業残渣、草、木などの植物からできたバイオマスを、燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下で加熱することでできるタイプの炭を使う。この熱分解と呼ばれるプロセスが、バイオマス中に炭素を容易に放出しにくくする¹⁷。土壌に投入して混ぜ込むと、バイオ炭の多くは分解されず、少なくとも 500 年は地中に残存すると言われている¹⁸。さらに、最新のいくつかの研究では、使用する原料と熱分解の温度によってバイオ炭は 1,000 年以上残存する可能性があることが示されている¹⁹。また、バイオ炭は土壌改良にも役立つ。

バイオ炭を作るプロセスは、他の技術系 CDR ソリューションと比べるとはるかに経済的である。IPCC の予測では、バイオ炭で二酸化炭素 1 トンを除去するのにかかるコストは 10 ～ 345 米ドルであり、2050 年までに年間 0.3 ～ 6.6Gt の二酸化炭素削減が可能だという²⁰。バイオ炭は比較的安価であるため、現在技術系 CDR 全体の約 80% を占める²¹。したがってこのソリューションは早急にスケールアップが可能だ²²。ただし、この手法による除去の将来性は、競合する需要がある持続可能なバイオマス（通常は、穀物や森林から排出される資源）の供給にかかっている。

回収・貯留 (CCS) を伴うバイオマス発電 (BECCS)：バイオマスを燃焼させてエネルギーを作る、あるいは、処理してバイオ燃料を作る方法。その過程で発生する二酸化炭素は大規模点源（各種物質の発生源。ポイントソース。例：燃焼後、燃焼前またはオキシ燃料）での炭素回収のために開発したテクノロ

ジーによって排ガスから除去される。炭素除去の有効性は 2 つのプロセスで測られる。第一に、植物成長過程での光合成において、バイオマスが固定した二酸化炭素量は、その植物を植え付け、収穫し、BECCS 施設に移送する際に排出される二酸化炭素量を超えなければならない。第二に、回収された二酸化炭素は永続的に地中貯留されなければならない。具体的には、高い圧力をかけ、地中深くの貯留槽（多孔質岩層があり、その上には、気体や液体を透過させない「キャップロック」と呼ばれる堅い層が遮蔽している）、または枯渇した石油貯留層に圧入する。注目すべき BECCS 使用例には廃棄物（例：自治体の固体廃棄物）を焼却したものもある。この廃棄物からエネルギーを作るプロセスで、廃棄物の中の植物由来（バイオジェニック）部分の燃焼時に排出ガス中の二酸化炭素が回収・貯留されることで、二酸化炭素の排出量はマイナスになる。BECCS の最大のメリットは、ネガティブエミッションを実現しながら「コジェネレーテッド（2 つのエネルギーを同時に生産）」な再生可能エネルギーであることだ。

IPCC の予測では BECCS は 1 トン当たり 15 ～ 400 米ドルのコストで二酸化炭素を除去し、2050 年までに年間 0.5 ～ 11Gt の除去が可能だという²³。2022 年 9 月の時点で、年間約 200 万トン (Mt) のバイオマス由来の二酸化炭素が回収されている。国際エネルギー機関 (IEA) による 2050 年までのゼロエミッションのシナリオでは、BECCS は 2030 年までに年間約 250Mt の二酸化炭素を回収しなければならない。しかし、機運は高まりつつあり、IEA は年間で合計約 20Mt の二酸化炭素回収が可能な合計容量を持つ BECCS 施設を 50 件以上新規開設する計画を発表している²⁴。バイオ炭の場合と同様に、持続可能なバイオマスの供給力に限界があるため、BECCS の回収能力はやがて先細りするだろう。

岩石風化促進法 (ERW)：自然界の二酸化炭素循環を模した方法。鉱物が年月をかけて地表水に溶け出すと、その水は大気中にある二酸化炭素をどんどん吸収し、そのままにしておくか何百年もかけて、二酸化炭素を固定化させることができる。カンラン

IEAの2050年までの
ネットゼロシナリオ
によると、2030年まで
にDACCSによる
二酸化炭素回収量は
年間60Mtに
なっていないければ
ならない。

石や玄武岩のように二酸化炭素を自然に吸収する性質を持つ岩石を粉砕し、森林土壌や農地、海岸に散布する。大気中の二酸化炭素と水が細かく粉砕されたケイ酸塩鉱物と反応すると、炭酸水素イオンが生成して二酸化炭素が石化し、土壌や排水中に炭酸塩鉱物として沈澱するか、あるいは水中で溶解したまま海に到達して海洋のアルカリ濃度を上昇させる。この技術系プロセスでは、岩石が持つ自然の風化、つまり炭素隔離能力を地質学的タイムスケールから人間本位のタイムスケールに加速し、1,000年以上にわたり炭素を永続的に隔離する。

コスト、副次的影響、耐久性と拡張性にはまだ不確実性がある。とは言え、他の技術系 CDR の手法と異なり、ERW では新規のインフラやテクノロジーが不要である。2022年に IPCC は風化促進技術のコストを、二酸化炭素 1トンの除去当たり 50～200米ドルと見ており、年間 2～4Gt の二酸化炭素軽減が期待できるとしている²⁵。

炭素貯留を伴う直接空気回収法 (DACCS) : このテクノロジーでは多数の巨大ファンを使って大気中の空気を物理的な特殊フィルター、あるいは有機物で作る膜に通し、二酸化炭素分子だけを分離・吸収する。BECCSと同様、回収された二酸化炭素は圧縮され、あるいは地中の深い層に数千あるいは数万年単位で貯留される。CDRの手法の中でも DACCS のメリットには、貯留パフォーマンスの高さ(地質学的に貯留された場合)、広い土地は不要であること、そしてウォーターフットプリント(そのサイクルの中で直接的・間接的に使用された水の量)の少なさが挙げられる。あるいは、ネガティブエミッションの処理をする代わりに、回収した二酸化炭素を水素と結合させて合成燃料を製造することもできる。

IPCC の予測では、DACCS のコストは 2050 年までには二酸化炭素 1トンの除去当たり約 100～300

米ドルとなり、年間 5～40Gt の二酸化炭素削減処理能力を見込んでいる²⁶。ただし、現在のところそのコストは突出して高く、その原因は主に大気のフィルタリングに莫大な量のクリーンエネルギーが使われることにある。2023年6月にボストンコンサルティンググループ(BCG)が発表した資料によると、Direct Air Capture (DAC) による二酸化炭素除去の開始から終了、そして最終的な貯留までのコストは現在、1トン当たり 600～1,000米ドル。BCGは2050年までに1トン当たり 150～200米ドルに下げることが可能だと考えている。ただしこれには、「投資の徹底強化、各国政府の支援、協業モデル、既存の枠を超えた業界の参画」が欠かせない²⁷。

DACCS の拡張性を制約するのはしたがって、コストだ。これは主に大気フィルタリングに使われる大量のクリーンエネルギーに左右される。そのため、現在世界で稼働中の DAC の計画はたった 18 件で年間二酸化炭素回収量も 0.01Mt にとどまる。それでも、年間 100 万トンの処理能力を持つプラントが米国で先行開発中である。BCG の報告によると、年間 100～400 万トンまで回収能力がスケールアップしたとしても、コストはおそらく 1トン当たり 300～400 米ドル程度までしか下がらない。ただし、実装率、低コスト資本へのアクセス、インフラやエネルギー価格の低減、そして協働的な学びを活発に行う動きが見られ、テクノロジーが一歩前進すればさらなる低減が可能だろう。

IEA による 2050 年までのネットゼロシナリオによると、2030 年までに DACCS による二酸化炭素回収量は年間 60Mt になっていなければならない。IEA は報告書でこう述べている。「実装レベル目標は達成間近だ。だが、さらにいくつかの大規模実証プラントがテクノロジーを洗練させ、回収コストを削らなければならないだろう」²⁸。

米国インフレ削減法 (IRA) で、米国政府は確実な方法で永続的に貯留した二酸化炭素に対して、1トン当たり180米ドルの税額控除が受けられる制度を立ち上げている。



DACのコストパフォーマンスを上げるには、年間処理能力を1ギガトンにまでスケールアップすべきである。これには2,000億米ドルの投資が必要だ。

DACCSの規模拡大という課題は、BECCSが直面する課題と似ている。これは単に、DACプラントを建設すればいいというものではない。回収した二酸化炭素を移送し、それを地中に貯留するまでの全部を処理するインフラが必要となる。こうしたイノベーションをサプライチェーン全体でどの程度支援していくのか。二酸化炭素の移送と貯留のためのインフラを誰が建設し、稼働させるのか。そして誰がその費用を支払うべきなのか。

について「企業は壁で囲った庭の中で開発を行い、自社の知的財産を守ろうとしている」と述べている。各国政府もまた、DAC実装を支援する政治環境の枠組みを作らねばならない(図3参照)。例えば、昨年の米国インフレ削減法(IRA)で政府は、確実な方法で永続的に貯留した二酸化炭素に対して、1トン当たり180米ドルの税額控除が受けられる制度を立ち上げている。

業界全体がスケールアップすると、設備投資に関する支出(CAPEX)と単価は通常、下がる。例えば、太陽光発電業界のスケールアップは成功を収めており、ここ数十年でメガワット時(MWh)当たりの電力価格が驚くほど下がっている。BCGはまた、ガス業界もDACと限りなく動きが似ていると論じる。ガスタービンのCAPEXコストは、生産能力が2倍になるたびに15%下がっている。DACのコストパフォーマンスを上げるためには、業界は年間処理能力を1ギガトンにスケールアップする必要があるだろう。その代わりに、今後さらに2,000億米ドルの追加CAPEXと、運営費用(OPEX)投資が必要になる。

BCGが行った最新の分析では²⁹、DACの高額なコストは大幅に引き下げられると示唆する。それも、諸条件を適切に組み合わせれば、1トン当たり100~200米ドルほど下げられるかもしれないと述べている。事前購入にコミットした今まで以上に強い需要シグナルを示すことがバイヤーには求められており、それがあれば実装レベルの増大を加速する追い風になる。CDRデベロッパーは、低コストの再生可能エネルギーと身の丈に合った資本が今まで以上に利用しやすくなることを求めている。また彼ら自身にも、今一層の知識共有と協働が必要だ。BCGは現在の状況

図3 DACコストダウンのシナリオ

| コスト/tCO ₂ | 説明 | DAC処理能力/年 |
|-------------------------|--|------------------|
| \$300~400/トン (通常の政策) | ボランタリー市場では、DACによる特別控除の制度の利用は限定的。 開発には支援政策やフィランソロピーによる個々の対応が必要。 | 100~400 Mtpa |
| <\$200/トン | 支援政策が実装の追い風になる。 市場シェア争いを繰り広げるプレイヤーの間では、技術開発の協働度が低い。 | 1,000~2,000 Mtpa |
| <\$100/トン | 支援政策が実装の追い風になる。 CDRデベロッパーの協働度が高いため、知識波及効果が得られる。 低炭素に特化したインフラによる相乗効果でコストをさらに削減。 | 2,000~3,000 Mtpa |

DACはネットゼロ到達への道のりで大きな役割を担う

注記: Mtpa = 100万トン/年

出典: ポストン コンサルティング グループ (BCG)

2.2 技術系CDRの品質特性

十全性と拡張性。すべてを包括するこの2つの基準が、思い切った取り組みの成功の要となる。

先に述べたように、IPCCによると2050年以降、世界規模で最大100億トン(10Gt)の二酸化炭素を毎年地球の大気から除去しなければならない。この目標達成には、NCS、技術系CDRを問わず利用できるあらゆるソリューションを飛躍的に成長させる必要がある。

すべてを包括する2つの基準が、この思い切った取り組みの成功の要となる。**十全性と拡張性**だ。十全性の高い炭素除去ソリューションはいずれも、排出量を追加的に削減でき、永続的かつ定量化可能なインパクトをもたらさなければならない。また、現状を変えるために必要なスピードと処理能力のスケールアップに対応できなければならない。本項では、こうした基準をいくつか取り上げ、技術系CDRの相対的なメリットを紹介する。

十全性

自主的炭素市場のための十全性評議会(ICVCM: The Integrity Council for the Voluntary Carbon Market)は、10項目のコアカーボン原則を制定した。その中で、どのような場合にカーボンクレジットが「十全性の高い」ものになるかを、ガバナンス、排出インパクト、持続可能な開発という3つの大項目に基づいて定めている。(図4参照)

以下の資料では、ICVCMによる十全性の高いカーボンクレジット原則のうち、排出インパクトに関連する「追加性」、「永続性/耐久性」および「定量化」の観点について詳しく検討している。大気中の二酸化炭素量を削減し、1.5~2.0°C気温を下げるレベル

表1 ICVCMによるコアカーボン原則

| 10項目のコア炭素原則 – カーボンクレジットを確実に「十全性の高い」ものにするために | | |
|---|---------------|---|
| ガバナンス | 有効なガバナンス | 透明性、説明責任、継続的な改善と全体的なカーボンクレジットのクオリティを確保する有効なガバナンスプログラムがある。 |
| | 登録簿の運用 | 登録簿を管理・活用する。削減活動を独自に認証、記録、追跡し、クレジットを安全かつ、曖昧さを回避して特定できるようにする。 |
| | 透明性 | 認証を受けた活動はすべて、包括的かつ透明性を持って情報開示する。当該情報は電子データで一般公開され、削減活動精査のために、専門家以外の人々もアクセスできるようにする。 |
| | 検証 | 削減活動について自律的な第三者が妥協のない審査・検証を行うためのプログラムレベルの要件がある。 |
| 排出インパクト | 追加性 | 削減活動から発生した温室効果ガス(GHG)排出の削減あるいは除去は追加的とみなす。つまり、これらはカーボンクレジット収入というインセンティブがなければ、発生しなかったものだからだ。 |
| | 永続性 | 削減活動からのGHG排出削減または除去は永続的であるが、もしもそれが反転するリスクがある場合は、リスクに対応し、反転を補償する手段が講じられる。 |
| | 定量化 | 削減活動から生じるGHG排出削減あるいは除去量は、徹底して計量する。保守的なアプローチに基づき、すべてを網羅した科学的手法を用いる。 |
| 持続可能な開発 | 二重計上の防止 | 削減活動に伴うGHG排出削減または除去は、二重計上しない。つまり、これらは削減ターゲットまたは目標達成に向けて一度だけカウントされる。二重計上には、カーボンクレジットの二重発行、二重訴求や二重使用が含まれる。 |
| | ベネフィットとセーフガード | 明確なガイダンス、ツール、遵守手順を備える。これによって、幅広く確立されている業界のベストプラクティスに準じる、あるいはそれを超越する削減活動を確実に実施しながら、持続可能な開発にプラスの影響を与える。 |
| | ネットゼロへの移行 | 削減活動では、今世紀半ばまでにGHG排出量正味ゼロ達成という目的にそぐわないGHG排出量レベル、テクノロジー、炭素集約型慣行によるロックイン(化石燃料をベースとするエネルギーシステムによる温室効果ガスの排出が固定化されること)を避けなければならない。 |

出典1:自主的炭素市場のための十全性評議会(ICVCM)³⁰

2050年までの技術系 CDR の二酸化炭素削減量ポテンシャルの最大予測値は合計で年間 62Gt。これに対して自然系ソリューションの二酸化炭素除去量は年間 33Gt である。

の目標達成には、これらの原則が不可欠であることが明確である。これらは近年、NCS が積極的に取り組んでいる分野でもある。NCS は今後も、気候変動を制御する重要なツールであり続け、同時にいくつものコベネフィットをもたらす続けるだろう。技術系 CDR スコアはとりわけ、これらの原則についてかなり高いスコアを弾き出している。

追加性：ICVCM はこう述べている。「削減活動に起因する GHG 排出削減または除去は、追加的なもの、つまり、カーボンクレジット収入によって生み出されるインセンティブがなければ、発生し得ないものでなければならない」。言い換えれば、当該プロジェクトが実施されなければ削減も除去もできなかったものでなければならない。DACCS のような技術系ソリューションは、明らかに追加的なものである。このテクノロジーは CDR のためだけに開発されたものだからだ。

永続性／耐久性：ネガティブエミッションを生み出すために回収された炭素はすべて、当面の間は隔離され、閉じ込められる。技術系ソリューションは耐久性という点でスコアが非常に高い。これらのソリューションでは、山火事や干ばつなど、NCS を反転させるリスク、つまり、温暖化している世界でこれから増えるであろうリスクが低い。技術系 CDR であれば、DACCS による大気からの直接回収であろうと、BECCS で排出ガスから回収したものであろうと、数世紀から数千年という単位で圧縮し地中貯留できる。

定量化：DACCS のような技術系ソリューションは、産業プロセスや設備の中にあるため、NCS よりもずっと測定や定量化がしやすい。あまりにも端的な言い方かもしれないが、技術系 CDR なら流量計さえあればいいとまで言われることもある。

拡張性

二酸化炭素除去の現況は、IPCC の予測を見る限り十分とは到底言い難い。その予測では今世紀半ばまでには年間約 10Gt の二酸化炭素除去が必要であり、今世紀後半にかけてはそれ以上の数字が求められる可能性が示されている。2023 年に英国のオックスフォード大学を中心とする研究者チームがまとめ、発表した「二酸化炭素除去の現状 (The State of Carbon Dioxide Removal)」によると、現在の CDR の合計二酸化炭素量は年間 2Gt であり、その 99.9% は NCS、それも主に新規植林と再植林が占めている³¹。いわゆる「新しい CDR 手法」(例：DACCS、BECCS、バイオ炭)と研究者たちが呼ぶ取り組みが占める割合はたった 0.1% である。著者たちは、今後 10 年間にかなりの数の「新しい CDR」を新規に実装しない限り実現不可能であると述べている。

NCS は他の土地利用(食料・飼料の生産、インフラ、先住民の所有権など)に制限されるが、技術系 CDR の注目すべきメリットは必要とされる物理的スペースが NCS よりもはるかに少ないことだ。基本的に、スペースに関しては DACCS をはじめとする技術系ソリューションの拡張性には制限がない。しかし、技術系 CDR の現在のコストが法外に高いことが、拡張性の主なハードルになっている。追加のインフラ整備の要件(クリーンエネルギー、パイプライン、貯蔵場所など)もまた、深刻な制約条件になっている。

2050年までの技術系 CDR の二酸化炭素削減量ポテンシャルの最大予測値は合計で年間 62Gt であるのに対し、自然系ソリューションの二酸化炭素除去量は年間で 33Gt である³²。技術系 CDR の 2030 年までの短期需要を予測するのは難しいが、米国のダートマス大学の研究者たちが予測した 2030 年における認証済み技術的二酸化炭素除去の需要は年間 31Mt から 623Mt の間と幅がある。これは、様々なコンプライアンス市場による導入に左右される³³。

規格と基準

技術系 CDR が抱える主な課題の一つに、完成度の高い品質規格がないことがある。IEA が発表した DAC に関する 2022 年のレポートによると、DAC 実装のための 6 つの優先事項のうちの一つが、「基準」であった。「DAC 認証と会計方法について国際的に認められたアプローチを策定する。曖昧なところがなく、透明性の高い、標準化された DAC の国際認証と会計方法があれば、炭素市場と IPCC の『温室ガスインベントリ報告書』でその認知度を高められる」³⁴。

国際 NGO である国際炭素削減・オフセット連盟(ICROA)は、「2008 年以来、GHG 排出削減とオフセットを最高基準の環境統合性で推進する自主的炭素市場 (VCM: Voluntary Carbon Market) 組織の業界標準として認められている」認定プログラムを提供している。ICROA は 2023 年 7 月に「ベストプラクティス規範 (Code of Best Practice)」のバージョン 2.1 を発表した³⁵。

炭素除去のためのバイヤーズ・クラブであるネクストジェンは、クレジットを購入するすべての CDR プロジェクトに、ICROA が承認する認証プロセスの実施を求めている。これは、品質についてある程度の自律的な検証と公開性を提供するものである。ネクストジェンはまた、技術系 CDR の第三者による認証を支援するための方法論にも取り組んでいる。

今、技術系CDRに取り組むべき理由

ネットゼロを実現する上で、技術系CDRソリューションがより確かな選択肢である企業もあれば、中核的なビジネスチャンスになり得る企業もある。どちらの理由も存在し続けるだろう。

技術系 CDR ソリューションが直面している包括的な課題は、コストである。世界経済フォーラムのファースト・ムーバーズ・コアリション (FMC)³⁶ は、そのメンバーに対し、2030 年末までに少なくとも 5 万トン、または少なくとも 2,500 万米ドル相当の「耐久性と拡張性のある正味の二酸化炭素除去」を契約するという CDR 目標を設定している³⁷。

この目標は計算上、CDR1 トン当たり 500 米ドルという今日の平均コストに基づくものだ。このような明らかにコストのかかる取り組みについて、どうすれば経営陣を説得できるだろうか。本章では、今、技術系 CDR に注力すべき最も適切な裏付けとなる議論に光を当てる。

3.1 企業の気候変動戦略に有益

技術系 CDR を採用する企業は、ネットゼロに必要な、信頼性が高く、拡張可能な炭素除去が可能となる。ネットゼロを目指す企業は、ネットゼロ、つまり総量ゼロを実現するために、信頼できる炭素除去サービスのポートフォリオを必要としている。第 2 章で概説したように、技術系 CDR は、気候変動緩和の緩和策に関するアウトカムに必要な十全性と拡張性の両面で、特に高い評価を得ている。自然気候ソリューション (NCS) が気候変動との闘いにおいて不可欠な手段であることに変わりはなく、また、そのネイチャーポジティブなコベネフィットを鑑みると、他に類を見ない価値を持つ。一方、技術系 CDR は、NCS が及びもつかないレベルの追加性と耐久性をもたらす。

したがって、インタビューに応じた FMC メンバーの間で、技術系 CDR について最も説得力があり、広く引用されている論拠は、NCS によく見られる十全性の不備の問題による風評リスクを防ぐことである。

否定的な評判から生じる風評リスクもまた、懸念を増している。一部の企業は、ネットゼロという大義名分の陰に、二酸化炭素削減のペースが遅いことが隠れてしまっているのではないかという疑惑に直面している³⁸。また、カーボンニュートラルを達成したという主張に法的な問題があると指摘されている企業³⁹もあり、多くの企業が不安や無為無策、あるいは炭素市場への参加を隠そうとする動き（「グリーンハッシング」）に陥っている。

インタビューに応じたあるメンバーは、次のように述べている。「カーボンオフセットは、世論の理解を得られる形での管理が非常に難しいため、オフセットを行うこと自体を避ける方法を検討している」。

カーボンクレジットに関して企業が主張できること、できないことに関する期待は、より厳しいものになっている。2023 年 6 月、ボランタリー・カーボン・マーケット・インテグリティ・イニシアチブ (VCMII: Voluntary Carbon Markets Integrity Initiative) は、「オフセット」から「貢献度クレーム」に議論を移すルールブックとなる「クレーム実践規範 (Claims Code of Practice)」を発表し、次のように述べている。「カーボンクレジットは、バリューチェーン内の排出削減目標の達成に算入することはできないが、企業の気候変動目標と気候変動緩和のための世界的な取り組みの両方への貢献を表すものである」⁴⁰。

拡張性に関して言えば、植林やその他の自然を利用したソリューションに利用できる土地の面積には制限があるため、単純に十分な NCS が供給されないことが懸念されている。

日本を拠点とするグローバルな海運企業である商船三井のエネルギー営業戦略部カーボン事業チームチームリーダー、香田和良氏は、「高品質な自然由来の炭素除去には供給限界がある」と言う。

同社は、バリューチェーンを超えた緩和のためのアクションの一環として、2030年までに合計220万トンの炭素除去を目標としている。「ネットゼロを達成する年に排出量を中和したいのであれば、そし

てNCSだけに頼るわけにはいかないのであれば、CDR市場を支援し、規模を拡大しなければならない」と同氏は述べている。



高品質な自然由来の炭素除去には供給限界がある。ネットゼロを達成する年に排出量を中和したいのであれば、そしてNCSだけに頼るわけにはいかないのであれば、CDR市場を支援し、規模を拡大しなければならない。

株式会社商船三井、エネルギー営業戦略部カーボン事業チーム、チームリーダー、香田和良氏



3.2 ビジネスチャンスを提供

技術系 CDR は商機をもたらす。このテクノロジー、あるいはそのバリューチェーン内につながるものが日常的な事業活動の一部になる企業もあるだろう。高度な革新的テクノロジー、大きな資本リスク、商業的実績のなさが組み合わさった技術系 CDR のような新興産業では、資金調達、インフラ開発、リスク回避、オペレーションなど、様々な面での専門知識が必要となる。

潜在的市場の大きさ（CDR は次の 1 兆ドル産業になるとよく言われる）が、あらゆる企業が CDR のバリューチェーンを研究し、どこに切り込むかを予測するよう誘いかける。言い換えると、こうした企業は、既存企業の専門知識を活用して事業活動を拡大したり、新しい CDR バリューチェーンをサポートする、あるいは新しい CDR バリューチェーンに

直接統合されるような新しいビジネスモデルを開発したりすることができるかを検討できる。

インタビューに応じたある担当者は、この機会を次のように表現した。「単に小切手を書くだけではだめだ。既存のビジネスプロセスや環境を補完する投資に目を向け、風評や大きなビジョンについても考慮すべきだ。小切手を書くだけではリーダーにはなれない」。

以下は、FMC の CDR 目標にコミットし、CDR をコアビジネスの一部としようとしている 2 つのグローバル企業の視点である。一つは国際商社、もう一つは世界的なエネルギーメジャーという、ユニークな角度から見たストーリーだ。

視点 1: 国際商社

トラフィグラは国際商社であり、他の天然資源と同様に炭素資産を開発するという観点から炭素除去分野に取り組んでいる。同社のカーボン・トレーディング部門グローバル・ヘッドであるハンナ・ハウマン氏は、この機会をこう説明する。「商取引は、現物商品であれ炭素収支であれ、生産量と消費量の自然なミスマッチを解決するために存在する。供給と需要の間にギャップや非効率性があれば、それが時間やテクノロジー、政策に関係するものであろうとなかろうと、そのギャップを埋めることに価値がある」。

同社の目的は、機関投資家とテクノロジーデベロッパーの世界を融合させ、銀行からの資金調達が可能でプロジェクトを生み出すことだ。「今現在、二酸化炭素除去がうまくスケールしていないのには理由がある。プロジェクトがまだ銀行からの資金調達が可能と見られていないからだ」と同氏。「プロジェ

クトと投資家の橋渡しをするために必要なのは、技術的・政策的理解、価格リスク管理、そして事実上のベンチャーキャピタルによる資金調達の組み合わせだ。これは、単一の組織には重すぎる課題だ」。

同社は現在までに「炭素除去を他の方法ではあり得ない規模に拡大するために」数億ドルを投入してきた。顧客がこれらの除去作業を必要とするのは2026年から2027年にかけてだが、「今始めなければ、準備は整わない」と同氏は言う。同社の狙いは、「カーボンファイナンスがフィンソロपीーとして行われる世界から、ネットゼロを証明できるカーボン・アカウンティング市場に移行すること」である。つまり、「買い手は購入しようとするものを理解し、いつ、何トン、いくらで引き渡されるのかが確実になる」調達スタンスへと、買い手にとっての機会をリフレーミングするのだ。



当社の狙いは、カーボンファイナンスがフィンソロपीーとして行われる世界から、ネットゼロを証明できるカーボン・アカウンティング市場に移行することである。

トラフィグラ、カーボン・トレーディング部門グローバル・ヘッド
ハンナ・ハウマン氏

炭素除去プロジェクトに資本を呼び込む際の大きな制約の一つは、実績がないことである。そこで、同社は、デベロッパーやプロジェクトオーナーと協力して、彼らのプロジェクトを銀行からの資金調達が可能なものにしようとしている。これは、プロジェクト資金を同社のバランスシートに組み入れて、実績

を示すことでリスクを軽減した後に、銀行や保険会社からオルタナティブ投資ファンドや年金基金までの他の投資家の参加を促すことを意味する。「インキュベーションとスケールアップは、私たちが最も得意とすることの一つだ」とハウマン氏は述べている。

視点 2: グローバルエネルギーメジャー

AES コーポレーションはフォーチュン 500 に名を連ねるエネルギー企業であり、低炭素および炭素ゼロのエネルギー源への責任ある移行において業界をリードすることを目指している。同社の炭素除去部門の客員起業家 (EIR: Entrepreneur-in-Residence) であるミハエル・パウテ氏は、CDR 業界には決定的なギャップがあると考えている。「プロジェクトデベロッパーが交渉当事者となっているのを見たことがない。問題は、誰がこれらの資産を所有するのかということだ」。同氏は、プロジェクトデベロッパーとしての AES の専門知識を活用し、この分野のプロジェクト管理と商用化を支援したいと考えている。資金調達、オフテイク契約の確保、土地の取得、許可の確保、サイト管理、商業基準の統合、CDR テクノロジーの実行可能な大規模産業へのスケールアップなどだ。これらが整えば、デベロッパーは市場に適した価格でテクノロジーを実用化することに集中できる。

同氏は、DACCS や BECCS から、まだ実証されて

いないその他のテクノロジーまで、あらゆる分野の開発機会を評価している。「私たちの関心はインフラ開発にあり、単位はメガトン以上になる。しかし、大量のオフテイクを確保できるまでは、私たちがやりたいことを実現するためのプロジェクト資金を見出すのは難しい」。

では、このようなインフラ整備に必要な資金はどのようにして調達できるのだろうか。「資本市場はその呼びかけに応えようとしている」と同氏は述べている。「資本市場は参加を望んでいるが、リスクを軽減する方法を探しているのだ」。各国政府のインセンティブがこれに役立つだろう。特に、2022年8月に署名されたバイデン大統領のインフレ削減法 (IRA) がそうだ。「現時点では、45Q がなければプロジェクトは立ち行かない」と同氏。45Q は IRA の条項で、二酸化炭素回収・利用・貯留に対する税額控除を指す。「また、単に DACCS や BECCS にとどまらず、テクノロジーを分かりやすく説明するための支援も必要だ」と付け加えた。



2040年までに1トン150米ドルにするところから始めよう。グローバルGDPに実質的な影響を及ぼすことはないだろうが、それ以上高くなればスケールしないだろう。

AESコーポレーション 炭素除去担当客員起業家 (EIR)、ミハエル・パウテ氏

もう一つの懸念は、このような政府の税額控除がいつまで続くのかということだ。パウテ氏は、この分野に対する国の支援意欲を評価するため、他国のCDR政策状況も追跡している。とは言え、除去炭素のトン当たり価格に関する自社の想定について

は、オープンにしている。「そこまで行けるかどうかは分からないが、2040年までに1トン150米ドルにするとところから始めよう」と彼は言う。「グローバルGDPに実質的な影響を及ぼすことはないだろうが、それ以上高くなればスケールしないだろう」。

3.3 リーダーシップが不可欠 — 「様子見」は選択肢ではない

CDRに投資する根拠が何であれ、もしある企業がネットゼロ目標年、例えば2050年までに残留排出量のバランスをとるため炭素除去の利用を計画しているのであれば、2049年まで様子を見るのではなく、その前にどこから除去するのかを考え始める必要がある。先に参加した企業がプレミアムが乗った価格を支払ってコストを下げてくれることを期待するだけで何もしないのは、経済学で「フリーライダー問題」と表現される行動である。

インタビューに応じたどの企業も、カーボンクレジット購入者の間で技術系CDRが急速に普及するとは考えていない。しかし、2030年代、2050年代、そしてそれ以降までに、技術系CDRソリューションが商業的に実行可能かつ必要な規模で運用されるようになるためには、今すぐ投資を開始することが不可欠であるという点では、全員が同意している。別の言い方をすれば、リーダーシップが不可欠ということだ。

インタビューに応じた企業の一つ、セールスフォースは、2022年5月にダボスで開催された世界経済フォーラム年次総会で、耐久性のあるCDRテクノロジーのスケールアップと商用化に1億米ドルを投資することを発表した。同社の気候・エネルギー

担当ディレクターであるジャミラ・ヤマニ氏によると、世界経済フォーラムのユニークな貢献の一つは、炭素除去という共通の目標のもとに一致団結した企業のクリティカルマスを作り上げたことだと言う。「FMCのおかげで、このトピックが私たちの経営陣に届くことになった。1社だけで市場を動かすことはできないが、同業他社と持続可能なCDRの拡大に関する目標やKPIを一致させることができれば、信頼が生まれ、プロセスのリスクを軽減できる」と同氏。さらに「そうすれば、リソースをより最適化することができる」と付け加えた。

FMCメンバーの現在のコミットメントにより、将来のCDR市場に貴重な需要シグナルを送ることができる。しかしそれにとどまらず、デベロッパーや供給業者は、5万トン以上の技術系CDRの拘束力のあるオフテイク契約を将来的なキャッシュフローの証明にして、銀行と交渉できるのだ。「炭素除去の供給業者は、実際の融資を必要としている。自己資金ではスケールアップできない。プロジェクト資金を得るためには、信用力のあるオフテイクカーから保証された収入が必要だ」と、再保険サービスを提供する多国籍企業、スイス・リーのサステナビリティ・チームでシニア・リスク・マネージャーを務めるミツシャ・レップマン氏は述べている。



炭素除去の供給業者は、実際の融資を必要としている。自己資金ではスケールアップできない。プロジェクト資金を得るためには、信用力のあるオフテイクカーから保証された収入が必要だ。

スイス・リー、シニア・サステナビリティ・リスク・マネージャー
ミツシャ・レップマン氏

今、積極的な立場をとることで、CDRデベロッパーは供給を拡大し、除去コストをより迅速に引き下げることができる。商船三井の香田和良氏によると、CDRの価格が下がるのを待つという選択肢はない。「多くの方は、CDR市場が発展する間、フリーライダーとなって、CDRテクノロジーのコスト低減を待とうとするだろう」と同氏は言う。「しかし、傍観するのではなく、私たちは先駆者となり、テクノロジーのコストをより早く下げる手助けをすることに決めた」。

リーダーシップをとることで、同業他社よりも優位に立つことができる。同氏によれば、商船三井の経営陣は技術系CDRに関するFMCの立ち位置を、突出したリーダーシップを発揮する機会と捉えている。

「ネットゼロを目標にするのは、今や当たり前だ。それによって競争力が高まるものではない」と同氏。商船三井はこの分野のフロントランナーとして真剣にこの問題に取り組んでいる。同社は、FMCの炭素除去目標にコミットしたアジア太平洋地域初の企業である。また、脱炭素が困難な海運分野の中で初の企業でもある同社は、他の企業も続くことを期待している。「私たちは、CDR市場を産業界のパートナーや顧客、特に脱炭素が困難な分野にとって、より手の届きやすいものにしたいと考えている」と香田氏は言う。



3.4 技術系CDRもコベネフィットをもたらす

技術系 CDR のコベネフィットは、NCS ほど顕著ではなく、性質も異なる。

例えば、バイオ炭や、ERW に使用した岩石を農地に散布すると、土壌が健康になって作物がよく育ち、収量が向上することが示されている。バイオ炭はまた、外来種が分泌する有毒物質を吸収することで、在来種の植物を保護するのにも役立つ⁴¹。さらに、海洋に岩石を散布すると、ERW に使用した岩石のミネラル分が酸性化を逆転させ、藻類の繁殖を抑えることができる⁴²。

技術系 CDR ソリューションに採用されているテクノロジーやプロセスの多くは、今日の化石燃料や重工業で使われているものに似ている。劣化した油田やガス田、パイプライン、産業クラスターなどの既存のインフラは、再利用や転用が可能である。

これにより、労働者の解雇を防ぎ、また排出量の多い従来型産業の衰退に直面している地域社会での新たな雇用につながる可能性がある。

また、新興市場にとっても、未開拓のクリーンエネルギー資源と優れた貯蔵オプションを兼ね備えた場所であれば、技術系 CDR 市場でいち早く重要な位置を占めるチャンスがある。このように、技術系 CDR の主なコベネフィットは、「働きがいも経済成長も」（国連の持続可能な開発目標 8）に対応した取り組みであり、公正な移行の必要性を物語っている。

インタビューに応じた企業は、技術系 CDR のコベネフィットについて、それぞれ異なる見解を示した。マイクロソフトのカーボン・リムーバル部門シニア・プログラマー・マネージャーのラファエル・ブローズ氏は、コベネフィットは二の次に考えるべきで、炭素隔離が最優先事項であると述べた。「私たちはまず除去できる炭素の量に注目する。そのテストに合格した後、他のコベネフィットがあれば、コベネフィットのあるソリューションを選ぶかもしれない。しかし、コベネフィットと炭素除去量を同時に考慮することはない。計算が混乱するからだ」。

しかし、セールスフォースのジャミラ・ヤマニ氏は、このような新しいテクノロジーが直面している大きな課題を次のように指摘している。「当社の CDR ポートフォリオでは、認証を受けていないカーボンクレジットを高コストで購入することになり、不引き渡しのリスクも高い」。この先物購入戦略の目標は、新たな早期市場を拡大することなので、効果を追跡するための斬新な主要業績評価指標（KPI）が検討されている。その多くは、NCS の世界で企業が慣れ親しんでいるコベネフィットに触発されたものだが、それとはまったく異なっている。

「当社の 1 億米ドルのコミットメントでは、大量の二酸化炭素除去を購入できる可能性は低いので、地中の二酸化炭素量以外で最大のインパクトをもたらす KPI に注目が重要だ」と同氏は述べている。

66

当社の1億米ドルのコミットメントでは、大量の二酸化炭素除去を
購入できる可能性は低いので、地中の二酸化炭素量以外で
最大のインパクトをもたらすKPIに注目することが重要だ。

セールスフォース、気候・エネルギー担当ディレクター
ジャミラ・ヤマニ氏

そうした KPI には次のようなものがある。このソ
リューションにより、テクノロジーの実現可能性が
何年加速されたか、いくつの新しい方式の開発に
貢献したか、先物購入によって、何トンの炭素除去

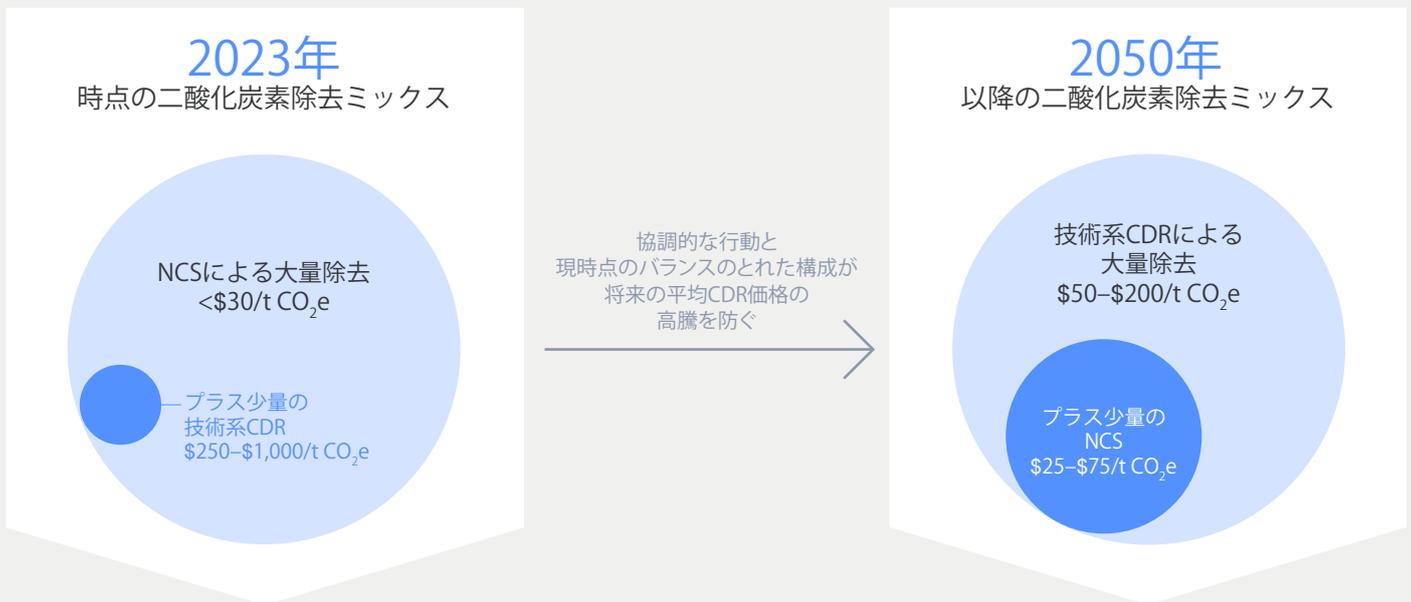
が促進されたか、従来の化石燃料経済が衰退しつ
つある地域社会で、この投資がどれだけの新規雇
用や労働者の再雇用に役立ったか、などだ。

3.5 NCSと技術系CDRのミックスが必要

FMC メンバーだけでなく、除去系カーボクレジッ
トの潜在的な買い手は、技術系 CDR の先行価格
が高いことに怖じ気づき、主導的な立場をとろうと
しないかもしれない。これを回避するために、より
安価で入手しやすい自然気候ソリューション（NCS）
による炭素除去に集中する誘惑に駆られる可能性
がある。しかし、この戦略は、他の市場参加者の価
格状況をさらに悪化させる可能性がある。炭素除
去予算のすべてを NCS に費やす企業は、CDR 全体

の価格（すべての技術系ソリューションと自然を利用
したソリューションの平均）を下げるどころか、長
期的にはむしろ上昇させることになるからだ。NCS
はより早く枯渇し、その価格は上昇する一方、投資
不足の技術系ソリューションは高価なままとなる。
マイクロソフトのラファエル・ブローズ氏はこう述べて
いる。「大企業が比較的安価な自然を利用した炭
素除去枠を買い占めているのであれば、公平性を
考慮する必要がある」。

図 4 企業はいかにしてCDRを賢く利用できるか



現時点でこうすることで
平均除去価格を $\$100/t CO_2e$ 以下に抑えることができ…

… 今世紀半ばの価格上昇を防ぎ、
平均除去価格を $\$100/t CO_2e$ 程度に抑えられる

注記：NCS = 自然気候ソリューション、CDR = 二酸化炭素除去、 $t CO_2e$ = 二酸化炭素換算トン

出典：ボストン コンサルティング グループ⁴³

今日、NCS を安易に利用拡大することなく、企業が炭素除去予算の一部を技術系 CDR に費やすとすれば、これらのテクノロジーはコストカーブを下降し始めると同時に、限られた質の高い NCS の供給に対する圧力が軽減されることになる。そうすれば、すべての市場参加者にとって平均的な CDR 価格が安くなり、うまくいけば世界がギガトン規模の CDR を必要とするタイミングに間に合うだろう。

トラフィグラのハンナ・ハウマン氏は、2030 年までに森林伐採を止め、生息地を回復させるという公約があるように、2020 年代は「自然のための 10 年」となる一方で、企業が今始めなければ 2040 年代に必要とされる規模の CDR ソリューションの準備が整わないため、今、技術系 CDR ソリューションの商業化に力を入れることが重要だと主張する。つまり、自然そのものを手助けする必要がある一方で、中長期的には技術系 CDR が不可欠なのだ。

ボストン コンサルティング グループ (BCG) ディレクター・オブ・サステナビリティのアントワン・プーリオン氏は、自社のポートフォリオに NCS と技術系 CDR が混在していることを踏まえて次のように語る。「私たちは、除去タイプ間のバランスを見出す必要があった。例えば、新規植林や再植林のような主流のクレジットを目指すだけでは、同時に必要となるより先駆的で持続的な技術系ソリューションの可能性を引き出すことはできない。一方、これらの新しいテクノロジーのみを利用してフットプリントを完全にカバーすることも、まだ発展途上であることを考えると実現不可能だった」。そこで同社は、自然系ソリューションと技術系ソリューションの両方を包含するよう CDR オプションを組み合わせることを決定した。



黎明期にある技術系 CDR市場に参加する方法

予算の確保、適切な市場参加モデルの決定、そしてCDR活動に関する社内外への発信は、いずれも優先すべき重要事項である。

技術系 CDR をビジネスとして展開するには、多くの疑問点を検討し、前もって答えを出しておく必要がある (BOX2 参照)。もちろん疑問点は他にもあるだろうし、ケースバイケースの対応も時には必要

になるだろうが、本章では予算を確保する方法、適切な市場参加モデルの選択、社内外に向けた良好なコミュニケーションといった基本的な必須課題について取り上げる。

BOX 2 技術系CDR市場への参加方法を決定する際に検討し、前もって答えを出しておくべき事柄

- 自社の気候変動戦略はどのようなものか。CDRの役割は組み込まれているか。
- 自社の事業戦略はどのようなものか。その戦略にCDR活動をリンクさせることはできるか。
- CDR活動のエグゼクティブ・スポンサーは誰か。スポンサーは活動の趣旨に賛同しているか。
- 社内どの部門(調達、財務、法務、持続可能性、ビジネスなど)をCDR活動に関与させるか。また、この活動を支持してくれるのは誰か。
- CDR活動に関わる自分自身や同僚、支持者の専門知識のレベルはどの程度か。コンサルタントに報酬を払う余裕はあるか。
- どれぐらい先まで、つまりどれほどのインパクトを残せるまで、活動を計画し、その将来像を展望できるか。
- 予算はどれほどの規模か。計画している活動を継続する間、その予算をいかに確保し続けられるか。
- 確保できる人的資源や予算に応じて、気候変動戦略や事業戦略と合致する形で市場参加するには、実際にはどのような方法をとることができるか。
- どの市場参加ルートに、どのようなパートナーが見込め、どこに協力を仰ぐ必要があるか。
- いつ、どこに向けて、何を伝えるべきか。

4.1 予算確保の方法

インターナルカーボンプライシングモデル

カーボンプレジットを購入する企業は多くの場合、すでに除去量(認証の数に見合うように立てた除去計画の算出ベースとなる現在の排出量)と1トン当たりの価格(参加する市場で現在取引されている価格)の両方を把握していると考えられる。

そうした情報をもとに予算を申請する。このプロセスは毎年繰り返される。除去活動にかかるコストとして想定する額は、承認される予算の規模に応じて算出するか、社内における実際の二酸化炭素排出者(例えば、旅客機を利用する社員)が負担する形を

とる。後者の場合は、その額が対象者にインターナルカーボンプライシングとして周知されるが、その額は選択したカーボンプレジットの市場価格に基づいて年ごとに変わる。

FMCメンバー企業の中には、技術系 CDR カーボンプレジットを取得する予算を確保する方法として、異なった戦略を採用しているところもある。そうした企業は前もって、現在、そして未来にわたって、CDRのためにいくら支払う用意があるかを検討する。そして確認できた支払い可能額を、計画している CDR 活動期間を通じて自社のインターナルカーボンプライシングポリシーとして運用する。こうすることで毎年、社内の排出者が負担する1トン当たりの価格が事前に確定できるようになる。調達チーム

はインターナショナルカーボンプライシングポリシーに見合う量だけオフテイク契約を締結でき、年間の様々な活動成果の平均価格が確実にその年のインターナショナルカーボンプライシングのレベルと見合うように調整できる。

この戦略には下記に示すいくつかの利点がある。

- 年間の予算申請額が承認されるか否かの不確実性を取り除くことができる。
- 価格の透明性が技術系 CDR デベロッパーや供給業者への明確な需要シグナルとなり、そこで生まれた信頼感の高まりが市場の発展につながる。
- 企業は長期的なオフテイク契約を結ぶことができるようになり、資金調達が必要な CDR デベロッパーは将来的な収入源を確保できる。
- さらに重要な点として、前もって決定し、広く周知されたインターナショナルカーボンプライシングが高くなればなるほど、企業が CDR カーボンクレジットの購入よりも排出削減に力を入れるようになる。

インターナショナルカーボンプライシングが任意的に設定されている現状では、実際の価格は企業によって大きく異なる。複数の企業に対して行ったインタビューでも、開示されている 2030 年までの価格には 1 トン当たり 80 米ドルから 200 米ドルまでの幅がある。

FMC メンバーのスイス・リーは、厳密なカーボンプライシングポリシーこそが質の高い CDR 予算を確保するという考え方を他社に先駆けて導入した。同社は 2021 年、二酸化炭素ネットゼロ・プログラムを立ち上げ、インターナショナルカーボンプライシングを実質二酸化炭素 1 トン当たり 100 米ドルとした。「カーボン・ステアリング・レヴィー」と呼ぶこの社内課徴金は、同社のスコープ 1、スコープ 2、そして出張などの物質的な上流活動を含むスコープ 3 に適用される。集められた資金は、質の高い炭素回避・除去の認証取得のために使用され、二酸化

炭素排出分の埋め合わせをする。カーボンプライシングは、2021 年から 2030 年までに二酸化炭素 1 トン当たり 100 米ドルから 200 米ドルへとゆるやかに上昇していくと予想している。また同時に、組み合わせられた様々な認証で求められる炭素除去比率は 2021 年の 10% から 2030 年には 100% にまで拡大することを視野に入れている。すなわち、スコープ内の残余排出量を、1 トン当たり平均 200 米ドルかかる高品質な炭素除去ですべて相殺しようとしているのである。

同社はどのようにしてこの価格に到達したのだろうか。最初に設定した 100 米ドルというのは、国連グローバル・コンパクトが推奨したインターナショナルカーボンプライシングだ⁴⁴。最終価格の 200 米ドルは、安全で耐久性のある炭素除去を行う場合を想定した 2020 年代末における推定単価である。同社のミッシェル・レップマン氏は、「200 米ドルというのは、私たちが 2030 年時点で排出量削減に必要なとなると想定した限界費用の数字でもある。したがって、削減費が 1 トン当たり 200 米ドルを下回るなら、炭素除去にコストを費やす前に排出量削減を優先させなければならぬ」と解説した上で、さらに次のように付け加えた。「価格が高くなればなるほど、除去より排出量の削減の方が重視される。このようにインターナショナルカーボンプライシングを設定すれば、炭素除去と排出量削減を両にらみすることができるようになる」。

年ごとに予算請求を行うのではなく、向こう 10 年間のカーボンプライシングポリシーを設定してカーボンクレジット取得のための資金を確保することには、重要な利点もある。そうすることで、除去系カーボンクレジットの長期的オフテイク契約に臨めるようになるからだ。例えば同社は 2021 年、スイスの DAC 企業であるクライムワークスと、10 年にわたって 1000 米ドルという、世界初の DAC 由来の技術系カーボンクレジット購買契約について合意に至った。このような契約は、資金を増やして次のステップを目指そうとするプロジェクトデベロッパーにとつて、将来的な財源となるはずだ。



200米ドルというインターナショナルカーボンプライシングは、当社が2030年時点で排出量削減に必要なとなると想定した限界費用の数字でもある。したがって、削減費が1トン当たり200米ドルを下回るなら、炭素除去にコストを費やす前に排出量削減を優先させなければならない。価格が高くなればなるほど、除去より排出量の削減の方が重視される。

スイス・リー、シニア・サステナビリティ・リスク・マネージャー
ミッシェル・レップマン氏

BCG もインターナショナルカーボンプライシングモデルを適用する企業の一例だ。同社は 2030 年までに気候変動の影響をネットゼロにすることにコミットしている。この公約を実現する方法として、2025 年までに排出量を半減させ、2020 年代の終わりまでに削減できずに残った排出分をすべて高品質の CDR で取り除くことを目指す科学的根拠に基づく目標を設定した。また BCG は 2022 年 5 月に、2030 年までに永続的に除去する炭素を 10 万トン分購入する意思も表明した⁴⁵。これは FMC の達成目標の 2 倍に相当する。そしてこの野心的な目標を達成するために、2022 年から 2030 年にかけて増大する排

出量の削減、抑制や相殺にかかる費用の見込み額を、1 トン当たりのインターナショナルカーボンプライシングに換算して米ドル単位で明確に示すことにした。「2022 年に私たちは 1 トンにつき 16 米ドルを費やした。これは市場平均よりも高額で、プレミアム・バイヤーとしての立ち位置を固める当社の意図を反映したものだ」とアントワン・プーラリオン氏は言う。同社では、この価格が 2025 年には 1 トン当たり 35 米ドル、2030 年までには 80 米ドルに跳ね上がると予想している。現実的な言い方をすれば、これは BCG が世界中に自社コンサルタントを飛行機で派遣するためにこれまで使ってきた、そしてこれ

からも投じる費用単価を意味する。そう考えると、1トン当たり80米ドルが今後の平均価格水準だと捉えておくことが賢明だ。自然を利用した炭素除去ソリューションの中にはおそらく、それよりもかなり安価となるものもある。一方、その水準をはるかに超える技術系ソリューションの中にはあるだろう。

予算と二酸化炭素削減トン数ベースで目標設定

FMCには予算および／または年間の炭素除去トン数の時限目標を設定するという別のアプローチをとる企業も存在する。

セールスフォースが重視したのは、耐久性のあるCDR技術のスケールアップと実用化に1億米ドルを投資する計画を公約に掲げることであった。これだけの資金を投じることについて、ジャミラ・ヤマニ氏が見返りとして期待しているのは、インパクトのある成果を出せることを第一に考えたポートフォリオを作成することであり、自社の事業や主要業績評価指標（KPI）の数値目標達成に最も有益な分野のCDR技術を手にすることだ。「この1億米ドルは、私たちに正しい選択ができる余地を与え、リソースの早期投入を可能にしてくれる。その結果、いずれ機が熟す頃には、自社が掲げた公約の実現や世界が目指している気候変動対策の目標達成を支えるCDRテクノロジーを大規模に展開する用意が整っているだろう」と同氏は見ている。

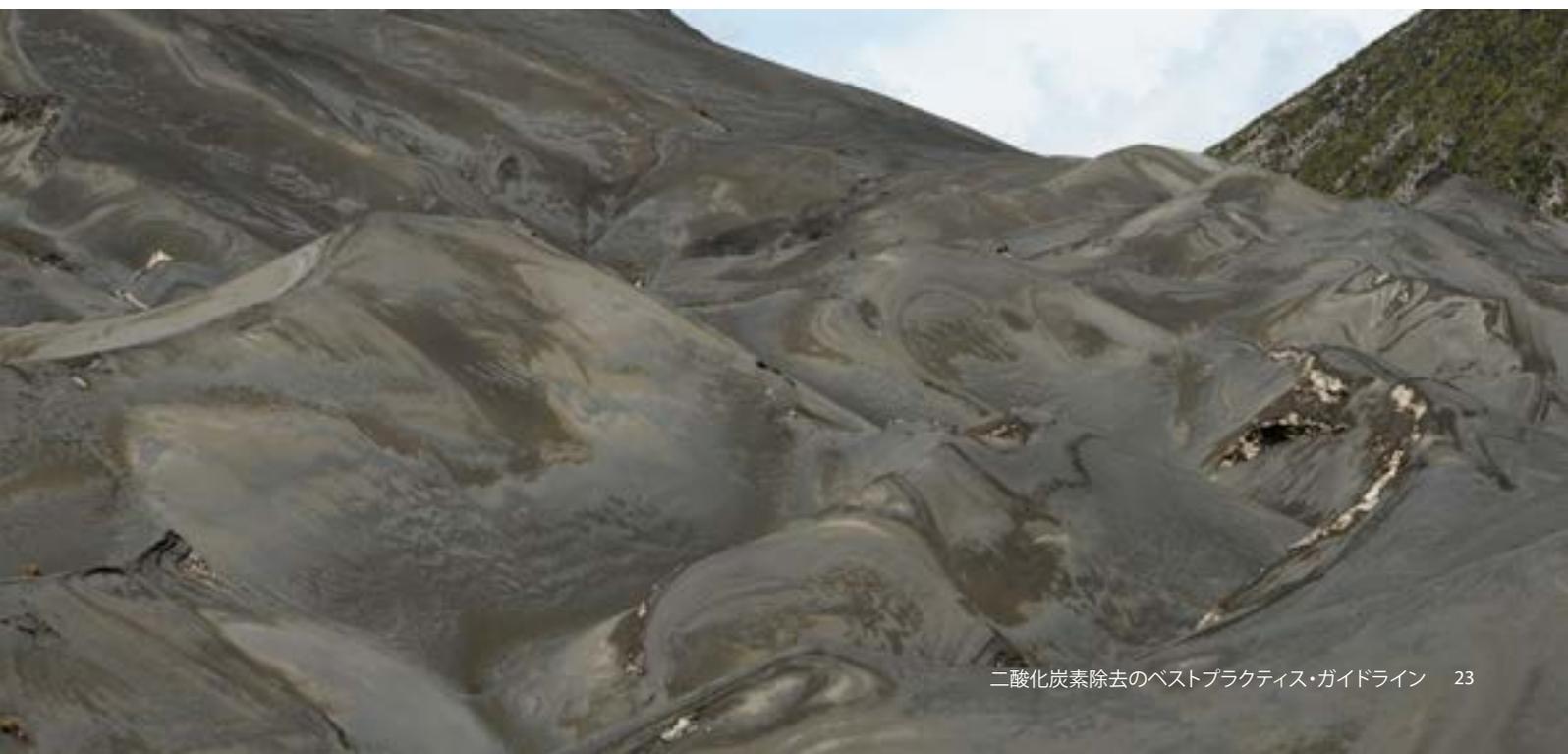
マイクロソフトは2020年に、自社のオペレーションとサプライチェーン全体を10年以内にカーボンネガティブにすると宣言した。この目標を達成するための道のりには、炭素排出の絶対量を55%削減しながら炭素除去も同時に行うという難題が待ち受けている。同社は同年、排出回避・削減系カーボンクレジットを用いたオフセットから段階的に手を引き、CDR活動に取り組み始めた。さらに野心的な試みとして、1975年の創立以来、同社が直接的に、あるいは電力消費を通じて排出してきた炭素の総排出量を除去する意思を表明した。

同社のファイナンス・アンド・サステナビリティ・チームは、それぞれが手がける事案の成功度を測るパラメーターとして、厳しい基準を設けている。同社では、2030年まで毎年550万トンの炭素を除去することを目指している。「私たちは予算と削減する排出量の両面で目標を設けている。そうすることが規律と集中力を生み、リスク管理の強化につながっている」とラファエル・ブローズ氏。同社のKPIには、(すでに本格的な取り組みを始めている) CDR活動が12か月間に除去できたトン数、2030年までに除去できるトン数、ポートフォリオ全般にわたる1トン当たりの平均価格、特定の除去プロジェクトの取引価格ならびにリスクが含まれている。取引に応じる契約は、同社が見込んでいる除去活動成果の長期保証と供給業者や投資家の利益保証をバランスよく組み合わせている。「当社が好きな時に撤退できることを条件にした契約では、銀行は融資もしないし、供給業者との契約も引き受けないだろう。そのため、契約から撤退するオプションを合理的な範囲まで自ら制限する内容にしている」と同氏は言う。

“ **炭素除去に関する当社の経験則はシンプルなものだ。様々な技術、供給業者、国を組み合わせた契約を結ぶことだ。**
マイクロソフト、炭素除去担当シニア・プログラム・マネージャー
ラファエル・ブローズ氏

どのCDRプロジェクトに投資するかを決定しなければならなかった時、同氏が重視するのはリスクの分散だ。新興経済国への投資には慎重を要する、と言う。近年、ジンバブエは国内のカーボンクレジットをすべて国有化する動きを見せているし、昨年

インドの担当相が、国が設定した上限を超える炭素の移転をすべて停止すると発言した。同氏は、「炭素除去に関する当社の経験則はシンプルなものだ。様々な技術、供給業者、国を組み合わせた契約を結ぶことだ」と述べている。



4.2 適切な市場参加モデルの選択

次に、企業は技術系 CDR 市場への参加方法を見つけなければならない。必要なのは、直接取引への意欲、取引に至る実務の管理能力、質・価格・量・納期に関する期待値など、その企業に適した購入戦略だ。参加ルートには一般的に次の3つがある。

- 直接取引
- バイヤーズ・クラブへの参加
- OTC 取引

どの参加モデルにおいても、活動の実行パートナーが存在する。FMC と協力する主なパートナーは、直接取引を中心にすべての参加モデルでコンサルタント役を務めることができるカーボン・ダイレクト⁴⁶、バイヤーズ・クラブのフロンティア⁴⁷とネクストジェン⁴⁸、そして相対取引に特化したカーボンフューチャー⁴⁹とパッチ⁵⁰である。

直接取引

技術系 CDR デベロッパーとの直接取引を選択すれば、買い手となる企業はデベロッパーを理解して契約条件を細部にわたって交渉できる。その際に必要になるのは、各デベロッパーが提供可能なソリューションの募集、最終選考に残ったデベロッパーの適正評価、契約交渉といった取引成立に至るまでの膨大な実務を処理する能力だ。したがって、直接取引が有効な参加モデルになるのは通常、オフテイク量の大きな大手企業に限られる。こういった大企業は外注コストがかかる中間業者を介在させる必要がないので、利益を独り占めできる。さらに重要なのは、デベロッパーと直接やりとりすることで社内のコンプテンシー向上や技術系 CDR 分野の戦略的パートナーとの関係構築が進めやすくなることだ。

カーボン・ダイレクトは炭素化学を使用して様々な組織に向けた排出量の削減・除去・利用ソリューションの提供を目指している。同社のクライアントから除去するよう求められている炭素の総量は現時点で1億トン以上上っており、この種の技術系 CDR 取引としては最大規模を誇っている。同社は、マイクロソフトが先頃デンマークのエネルギー大手オーステッドの電力施設から11年間にわたって約270万トンの BECCS 式炭素除去クレジットを買い付けた際のテクニカル・アドバイザーを務めている⁵¹。

マイクロソフトはまたこの他にも、エアルームと複数年にわたって最大31万5,000トン分の CDR を買い付ける契約を結んだ。これは DAC 分野では現時点で最大規模の契約の一つであり、エアルームにとっては、将来の施設建設プロジェクトの財源となる予測可能なキャッシュフローを約束するものとなった。

「カーボン・ダイレクトをテクニカル・アドバイザーに迎えたのは、彼らの深い専門知識と隅々まで見渡せる能力を高く評価したからだ。私たちはそうやってすべての取引を直接行うようになった。公正無私なアドバイザーを持つことが重要だと考えている」とラファエル・ブローズ氏。「私たちはそれぞれの

プロジェクトを、確信が持てるようになるまでしっかり精査している。どのプロジェクトも、価格やパートナーの話を始める前に、当社の品質基準をクリアしていなければならない」と付け加える。

リスクをバランスシートに計上して確実に管理しているトラフィグラも、やはりテクノロジーの開発者やプロジェクトオーナーと直接交渉し、実行可能性と弾力性のある炭素除去ビジネスを立ち上げようとしている。

バイヤーズ・クラブへの参加

バイヤーズ・クラブとは、複数のバイヤーが集まり、それぞれの除去需要をひとまとめにして、仲介者であるバイヤーズ・クラブ・マネージャーを通じて市場に出す組織体である。テクノロジーの開発者や供給業者、プロジェクトの規模や地理的要件などによって変わるプロジェクトのパイプライン作りをはじめとする、取引成立に至るまでの様々な実務や庶務は、このマネージャーが一手に引き受ける。前述した直接取引モデルではプロジェクトごとに個別の契約を結ぶ必要があるのに対して、バイヤーズ・クラブでは複数のメンバーが仲介者との一つの契約を結ぶだけで済む。各メンバーは独自に定めた出資額と除去量を携えてクラブに参加することを表明した後、クラブが管理する技術系 CDR ポートフォリオにアクセスする権利を得られるようになる。

ある程度時間が経てば、各メンバーは取りまとめられた除去系カーボンクレジットのポートフォリオからそれぞれの出資比率に応じた配分を手にすることができるため、単独で購入する場合に比べてポートフォリオはより多角的であり、平均価格も低い。バイヤーズ・クラブは、オフテイク量が比較的小さく、取引にあまり労力をかけられないものの、インパクトのある長期オフテイク契約を通じて炭素除去から利益を得たいと考える企業に適している。

フロンティアは売り手と買い手双方の代理人を務め、2022年から2030年の間に10億米ドル相当の永続的炭素除去クレジット購入を目指している。バイヤーはそれぞれ、2030年まで毎年、炭素除去にどれくらいの資金を投じるのかを決定する。同社はそれぞれの出資額を合算した年間の除去需要プールを設定し、炭素除去クレジットの供給業者を審査し、合格すれば通常の提案依頼書 (RFP: Requests for Proposals) を通じて購入案件の交渉の場に招き入れる。また、少量の先行購入と、前もって取り決めたトン数の炭素が将来的に除去された場合において、その時点で事前に合意した価格で購入する長期オフテイク契約の両方を促進することができる。供給業者には、取り決めたトン数の炭素が除去された時のみ、成功報酬が支払われる。

ネクストジェンは2025年までに100万トンの認証済み長期炭素除去権を確保し、2030年までに1トン当たり平均200米ドルで除去を完了することを目標に、信頼性と拡張性が高い CDR 市場の構築を目指している。同社を通じて購入する炭素除去サービスは品質・透明性・信用性を保証するため、すべて ICROA の基準⁵²によって認証されたものでなければならない。また、二重計上を避けるため、バイヤー

はすべての購入を認証機関の登録簿において償却する必要がある⁵³。

OTC取引

カーボンフューチャーやパッチといった新興市場プレイヤーが提供するのは、供給業者、ブローカー、バイヤーの間で技術系 CDR カーボンクレジットの取引を行う OTC 取引（仲介業者等との相対購入）方式の市場参加モデルである。この方式だと、購入は通常一度きりにとどまるため、直接取引もしくはバイヤーズ・クラブを通じて成立する長期オフテイク契約に比べ、市場に発信される需要シグナルは弱い。一方、1トン当たりの価格は（オフテイク量が一定の閾値を超えない限り）固定されていることが多く、将来的にブローカーや市場運営業者から多額の諸経費の請求があった場合にも対応しやすい。

バイヤーにとって、OTC 取引は多くの労力をかけずに取引成立までのプロセスを迅速に進められ、他の調達戦略よりも柔軟性が高い。例えば、実際の需要と、直接的なオフテイクやバイヤーズ・クラブを通じて取り交わされる契約の間にギャップが生じたとしても、この方式だと年度末にはその差異をいち早く補正できる。

市場拡大の鍵を握るのは 標準化されたオフテイク契約

スイス・リーのミッシャ・レップマン氏は、ネクストジェン誕生の経緯を次のように説明する。同社が



供給が不足しているのではなく需要が足りていないように見える。ネクストジェンの設立を後押しすることで、より多くのバイヤーが CDR 市場に参加しやすくなれば、需要拡大につながる。

スイス・リー、シニア・サステナビリティ・リスク・マネージャー
ミッシャ・レップマン氏

CDR 市場が拡大していくには、エネルギー業界で広く定着している電力購入契約（PPA: Power Purchase Agreements）のように、契約を標準化することも重要なポイントとなる。AES コーポレーションのミハエル・パウテ氏も、その見方に同調する一人だ。再生可能エネルギーのオフテイク契約としては世界最大規模の PPA を 2 年連続で締結した実績を持つことで知られる開発大手の同社は、自社の専門知識を CDR 市場でも活用したいと考えている。その上で同氏が CDR 市場拡大の阻害要因として懸念しているのは、契約締結の際にテクノロジーの開発者やクレジットの供給業者から求められる前払い金がバイヤーの目にはリスクが大きすぎると映ることだ。「業者側が現金の前払いを顧客に求め続ける限り、より多くのバイヤーに参加を促し、市場を活性化させることはできない。再生可能エネルギー業界では、例えば 10 年から 12 年間のオフテイク契約を結ぶ顧客の場合、業者への支払いは、その契約で定めた分量の電力の供給を受けることができた時に初めて発生する。CDR 契約に置き換えて言えば、約束した量の炭素が除去された時だ」と同氏は言う。

クライムワークスと初めて交わした長期オフテイク契約は、締結までに 6 か月を要した。契約交渉を白紙の状態から始めなければならず、スケジュールや取引量、受け渡し条件、除去する炭素 1 トン当たりの価格などを明確に設定しなければならなかったからだ。この炭素除去購入契約は、CRPA として知られるようになり、その後の取引のテンプレートとなった。

「当時、他にプロジェクトを 30 件も抱えていたので、当社のみでは対応できなかった。そこで、同じ長期オフテイク・モデルをベースにしたプロジェクトのパイプラインを持つ仲介業者を探すことにした」と同氏は振り返る。しかし条件に合う仲介業者が見当たらなかったため、同社は 2020 年からバイヤーズ・クラブとしてのネクストジェン立ち上げ準備を支援し、2022 年に同じく FMC の創立メンバーであり、バイヤーである BCG や商船三井と共にネクストジェンに参加した。

同社にとって、ネクストジェンのように標準化された CRPA を使用してグローバルな炭素除去需要を取りまとめることができる事業体とパートナーシップを築くことは、市場を拡大させる上で不可欠な取り組みだ。仲介業者は契約締結までの手続きの標準化と迅速化を図ることで、企業に時間的な余裕を与えるだけでなく、需要を集約して拡大させる重要な役割も果たせる。レップマン氏によると「供給が不足しているのではなく需要が足りていないように見える。ネクストジェンの設立を後押しすることで、より多くのバイヤーが CDR 市場に参加しやすくなれば、需要拡大につながる」。

これから始めるのなら、 コンサルタントを雇うべし

FMC のメンバーは上記 3 つの参加ルートを、複数同時または順番に、それぞれの目指すところや求めるもの、そして経験のレベルに応じて、様々な組み合わせで活用している。技術系 CDR そのものが新しい技術分野であり、新興市場であることを考えれば、ほとんどの企業にとって経験など皆無、もしくは限られたものでしかないだろう。ゆえに、外部の専門家にサポートを求めるのは至極当然のことだと言える。

企業はコンサルタントを雇うことで、技術系 CDR 市場の概要説明を受けられ、炭素市場に関連する基準や法律や権利要求など、最新の詳細情報も容易に入手できるようになる。それに加えて、上記 3 つの参加ルートのいずれについても専門的な助言を聞くことができ、特に直接結ぶオフテイク契約をインパクトの大きい実現可能な購入戦略と結びつけた場合は、有益な助言が得られる。また、コンサルタントがいれば、ソリューション案の募集、ベンダーやプロジェクトの適正評価の実施、契約交渉、引き渡し時のカーボンクレジットの取り扱いなど多岐にわたる実際の購入プロセスにも同行してもらえらるだろう。

4.3 社内外へのCDR活動実績の発信

社内向けの発信

企業が技術系 CDR に計画的に取り組むことを公約とするためには、経営トップがその取り組みに関与することが大前提となる。しかし、CDR 活動がトップ直轄の案件として扱われるようになるには、その下にいる何人もの政策決定者をまず納得させなければならない。できることなら CEO 自身が最終承認者となり、FMC のコミットメントのような形がとれるようになるのが理想的な姿だ。トップの承認が得られたら、次の重要なステップは自社が描く CDR 活動のストーリーを広く社員と共有することである。

AES では、ミハエル・パウテ氏がすでに社内に広く CDR について周知させる情報キャンペーンを開始している。だが彼が次のように語る通り、「これは単なる調達部門の一承認案件という類の話ではない。これは飛躍的な価値を生み出す可能性を秘めた、炭素除去という新しい分野の活動を通じて、新規ビジネスの開発を模索しようとする一大プロジェクトなのだ。したがって、これまでとは次元の違う、より深いレベルの精査が必要になる」。そこで同氏はまず「全社員が諸手を挙げて賛成する」ことを確約できるようなコミュニケーション戦略に力点を置くことにした。

1 万 6,000 人強の従業員を抱えるトラフィグラは、社内コミュニケーションを通じて、炭素除去活動に自主的に関わる意欲を示す社員が多く存在することを知った。「炭素除去について学ぼうとする社員たちの知識欲が旺盛だと分かったので、通常の広報活動に加えて、各部門とデスクに専用窓口を設け、入門者向けのウェビナーから全社的な取り組みに関する最新情報まで、当社がこの課題にどのように向き合おうとしているかをまとめて伝えられるようにするプログラムを展開することにした」とハンナ・ハウマン氏は言う。

スイス・リーは専用アプリからアクセスできる「NetZeroYou2」というプログラムを通じて、社員たちに自社のネットゼロ実現戦略への関与を促している。2021 年に立ち上げたこのプログラムは、グループに属する全従業員が「最善を尽くせ、残りを除去せよ」という社内モットーを体現する行動を個々に心がけるよう、周知徹底させることを目的としている。このうち、「最善を尽くせ」の部分についての社員サポートとして、同社では各自の日々の行動でどれだけの炭素を排出しているかを計算できるツールを提供したり、気候変動対策の一環として進められている様々な施策、活動やイベント等に関する情報を入手しやすくする仕組みを設けたりしている。また「残りを除去せよ」の部分に関するサポートとしては、社員がスイス・リーのカーボンクレジット購入キャンペーンに加わるようにした。このキャンペーンには通常、個人の資格では加わることができない長期オフテイク契約に基づく技術系 CDR 活動も含まれている。現在までに、1 万 4,000 人の社員のうち 5,000 人以上がこのプログラムに参加し、2,200 トン分のカーボンクレジットを確保している⁵⁴。

第三者向けの発信

企業にとって、炭素除去に向けた自社の取り組みや成果を第三者や広く一般に伝える意義はいくつもある。本白書のために実施したインタビューでは次のような点が重視されていた。

商船三井のような上場企業は、220 万トンに設定した自社の炭素除去目標をどのような形で達成しようとしているかを開示することが求められる。「私たちはまず、CDR クレジット償却の進捗状況を明らかにし、目標達成の目途が立っているのかどうかを示さなければならない」と香田和良氏は述べ、同社として「ステークホルダーに対し、しっかりとした手順を踏みながら作業を推し進めていること、そして

その現状について包み隠さず堂々と伝えること」に重きを置いていると付け加えた。

AESのように炭素除去を有益なビジネスにしたいと考えている企業にとって、市場とのコミュニケーションは自社を売り込むチャンスを広げる手段でもある。ミハエル・パウテ氏は、「技術開発系の事業者にも、炭素除去クレジットの購入を目指す企業にも、それぞれの事業展開を図る上で当社とパートナーシップを組むのが最適な選択だと思わせたい。インフラ開発に多くの実績を持つ当社なら、規模を拡大させる最善の方法を見つけられるだろう、という安心感をサプライヤーとバイヤー双方に与えられるはずだ」との見方を示した。

マイクロソフトでは、どのような除去系カーボンクレジットを購入しているかをすべて公表しており、そこから学んだ教訓をまとめたレポートも定期的に発行している。ラファエル・ブローズ氏は、「どの買い手や売り手とも進んで話し、助言できることがあれば、それを伝えたいと考えているし、それぞれと協働する機会も同時に探っている。特に技術系CDRに関して言えば、バイヤー間の競争はまだ存在しない今がチャンスだということを、購入を検討している多くの企業に知らせたい」と言う。



私たちは、1トンの炭素を除去するのにいくら費やしているかを公にしており、その情報の透明性の高さに誇りを持っている。また、当社が公開するそうした情報は、プロジェクトの開発者や資金提供者にとっても、そのレベルの金額まで支払う用意があるバイヤーがいることを確認できるので役立つと聞いている。

ボストン コンサルティング グループ、ディレクター・オブ・サステナビリティ
アントワン・プーラリオン氏

加えて、透明性は社内のコスト管理にも、広く社会との信頼関係を築くことにも大いに寄与する。プーラリオン氏はそのことについて、こう述べている。「社内的には、信頼できる情報をもとに全体的なコス

トの平準化を図れるので、経営陣は助かる。また、一般の人々にとっても、私たちが質の高い除去技術を購入するために最善を尽くしていることを知ることができるので、役立つ情報になるはずだ」。

一方、大きな顧客基盤を持ち、スコープ3のインパクトも多大なトラフィグラーでは、同社に備わっているとハウマン氏が指摘する「顧客と市場を代弁する能力」を白書の発行や映像物の公開、そして時にはポッドキャストの配信といった方法で実践している。

技術系 CDR 市場への参加を検討している企業が、炭素除去プロジェクトにどれほどの資金を投じる用意があるかを事前に公表するようになれば、その発表は技術系 CDR が投資に値する分野であることを市場に向けて発信する重要な需要シグナルになり得る。また、このような形のコミュニケーションは、FMC の結成理由の核心を突く内容でもある。

この点について、BCG のアントワン・プーラリオン氏は次のように語っている。「私たちは、1トンの炭素を除去するのにいくら費やしているかを公にしており、その情報の透明性の高さに誇りを持っている。また、当社が公開するそうした情報は、プロジェクトの開発者や資金提供者にとっても、そのレベルの金額まで支払う用意があるバイヤーがいることを確認できるので役立つと聞いている」。

結論

技術系CDRに今すぐコミットすることにより、企業は気候問題へのリーダーシップを発揮しながら、コストに見合った価値を高めることができる。

本白書では、各企業が技術系 CDR への投資にいち早くコミットした事例を紹介した。もちろん、このテクノロジーのコストはまだ高い。だが、企業が需要シグナルを市場に送りさえすれば、価格は下がる。すべての人々がより低価格で購入できるようになるのだ。

バイオ炭、BECCS、DACCS や ERW といった技術系 CDR のソリューションは、従来の枠を超えた、永続的かつ測定可能な炭素除去を可能にする。その恩恵として企業は気候変動に対する目標を達成し、グリーンウォッシュではないかというバッシングから身を守ることができる。また、その企業の視野の広い気候戦略について社会の信頼が築かれ、従業員、顧客、投資家からの評価もさらに高まる。

二酸化炭素軽減予算をすべて技術系 CDR のみにつぎこめる余裕のある企業はまだない。そこで、NCS と技術系 CDR のミックスが求められている。企業が技術系ソリューションに今コミットしなければ、技術系 CDR 関連コストは高止まりしたままとなり、NCS の供給は縮小し、炭素除去の平均コストは全体的に上昇するだろう。

技術系 CDR にコミットする最善の方法は、長期オフテイク契約だ。これにより、選択したテクノロジーに対して、供給業者が収入源を保証して融資枠を獲得することができるようになる。本白書では、どうすれば自社の規模と予算に合わせてこのような契約を締結できるかを述べた。その方法には、CDR デベロッパーとの直接取引、バイヤーズ・クラブへの参加、あるいは OCT 取引がある。

結論から言えば、世界の気温上昇を 1.5°C、できれば 2.0°C に抑え、しかもそのレベルを維持しようとするなら、技術系 CDR ソリューションをある程度取り入れる以外の選択肢はあり得ない。こうしたソリューションへの需要を企業が具体的に意思表示できるタイミングが早ければ早いほど、産業界も迅速にスケールアップに向けて動き出せるため、価格はより早く下がる。今必要なことは「様子見」ではない。今こそ、リーダーシップを発揮すべき時なのだ。

付録

本白書でインタビューした企業への質問は、次の通りである。

1. なぜ御社は技術系 CDR に取り組むことにしたのですか？ 経営陣をどのように説得しましたか？ その根拠としたのは、主に戦略的なものですか、それとも財務的なものですか？
2. 技術系 CDR 戦略を予算面でどのように実行していますか？ 採用することにしたソリューションは、技術系ソリューションと自然系ソリューションをどのように組み合わせていますか？ 何を資金調達の原因にしましたか？ インターナルカーボンプライシングですか、それも別の方法で算出した予算ですか？ CDR は御社のビジネスモデルの一つですか？
3. 技術系 CDR の導入に協力するパートナーはどのように見つけ、協働してきましたか？ パートナーを選定する際の審査方法は？ 技術系 CDR に取り組む最適な方法やオフテイクに関するモデルはどのように選択していますか？ どのような判断基準または規格を適用し、それをどのように測定していますか？
4. 取締役会、経営陣、あるいは広く市場と続けているコミュニケーションはどのように管理していますか？ プロジェクトの成果を伝えることが市場を活性化させ、発展の一助となるという視点で見たバイヤーとしての役割をどのように捉えていますか？

協力者

世界経済フォーラム

Nasim Pour
カーボン・リムーバル・マーケット・イノベーション・リード

Jonathan Walter
フリーランス・ライター

謝辞

世界経済フォーラムは、本白書の制作にあたって寛大かつ洞察に満ちた貢献をいただいた以下の方々に謝意を表します。

Michael Baute
Entrepreneur-in-Residence for Carbon Removal,
The AES Corporation

Rafael Broze
Senior Program Manager, Carbon Removal,
Microsoft

Katherine Duff
Principal, Boston Consulting Group

Jane Flegal
Climate advisor, Stripe

Lucy Hargreaves
Corporate Affairs & Climate Policy, Patch

Hannah Hauman
Global Head of Carbon Trading, Trafigura

Kazura Koda
General Manager, Carbon Desk, Mitsui O.S.K. Lines
(MOL)

Philip Moss
Chairman, NextGen CDR Facility

Henry Mumford
Consultant, Boston Consulting Group

Antoine Poulallion
Director of Sustainability, Boston Consulting Group

Mischa Repmann
Senior Sustainability Risk Manager, Swiss Re

Tom Spencer
Environmental Management Specialist, Swiss Re

Leila Toplic
Chief Communications & Trust Officer, Carbonfuture

Sumit Verma
Consultant, Boston Consulting Group

Jamila Yamani
Director, Climate & Energy, Salesforce

コンテンツとデザイン

Bianca Gay-Fulconis
Designer, 1-Pact Edition

Alison Moore
Editor, Astra Content

Charles Phillips
Editor, Astra Content

参考文献

1. McGrath, M. et al., "World Breaches Key 1.5C Warming Mark for Record Number of Days", BBC News, 7 October 2023: <https://www.bbc.co.uk/news/science-environment-66857354>.
2. Lamboll, R. et al., "Assessing the Size and Uncertainty of Remaining Carbon Budgets", Nature Climate Change, 30 October 2023: <https://www.nature.com/articles/s41558-023-01848-5>.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Special Report: Global Warming of 1.5°C, Summary for Policymakers, 2018, p.14: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Special Report: Global Warming of 1.5°C: FAQ Chapter 1, 2018: <https://www.ipcc.ch/sr15/faq/faq-chapter-1/>.
5. Statista, "Annual Carbon Dioxide (CO₂) Emissions Worldwide from 1940 to 2022 (in Billion Metric Tonnes)", November 2022: <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/>. Data as follows: 2015: 35.56 billion tonnes (Gt); 2016: 35.52 Gt; 2017: 36.1 Gt; 2018: 36.83 Gt; 2019: 37.08 Gt; 2020: 35.26 Gt; 2021: 37.12 Gt; 2022: 37.49 Gt (projection).
6. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Special Report: Global Warming of 1.5°C: Headline Statements from the Summary for Policymakers, 2018: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Headline-statements.pdf.
7. Science Based Targets Initiative (SBTi), "The Corporate Net-Zero Standard": <https://sciencebasedtargets.org/net-zero>.
8. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Special Report: Global Warming of 1.5°C: Summary for Policymakers, 2018: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.
9. Ibid. p. 14: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.
10. Azarabadi, H. et al., "Shifting the Direct Air Capture Paradigm", Boston Consulting Group (BCG), 5 June 2023: <https://www.bcg.com/publications/2023/solving-direct-air-carbon-capture-challenge>.
11. Stainford, T. and Brzezinski, B., "More Than Half of All CO₂ Emissions Since 1751 Emitted in the Last 30 Years", Institute for European Environmental Policy (IEEP), 29 April 2020: <https://ieep.eu/news/more-than-half-of-all-co2-emissions-since-1751-emitted-in-the-last-30-years/>.
12. World Economic Forum, On the Critical Role of Carbon Removal and How Companies Can Use It Smartly, Alliance of CEO Climate Leaders' Carbon Removal Action Group, with contributions from members of the Forum's Global Future Council on Net-Zero Transition, November 2021: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Carbon_Removal_for_CEOs_read.pdf.
13. Ibid.
14. World Economic Forum, First Movers Coalition: <https://www.weforum.org/first-movers-coalition/sectors>.
15. Natural climate solutions (NCS) include: forestation – either planting new trees on previously woodless land or restoring forests to preserve their capacity to act as natural carbon sinks; soil sequestration – increasing the carbon content of soil, through changes in land management, such as no-till agriculture and use of cover crops; blue carbon – wetland and marine ecosystems, such as mangroves and kelp, which can lock away carbon when managed properly.
16. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, Table 12.6, pp. 1275–1276: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
17. American University, Washington, DC, "Carbon Removal Fact Sheet: Soil Carbon & Biochar", 2018: https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/upload/icrlp_fact_sheet_soil_carbon_biochar_181006.pdf.
18. Chiquier, S. et al., "A Comparative Analysis of the Efficiency, Timing and Permanence of CO₂ Removal Pathways", Energy & Environmental Science, Issue 10, 2022: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/ee/d2ee01021f>.
19. Petersen, H. I. et al., "Carbon Stability and Morphotype Composition of Biochars from Feedstocks in the Mekong Delta, Vietnam", International Journal of Coal Geology, Vol. 271, 15 April 2023: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516223000514#t0010>.
20. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, Table 12.6, pp. 1275–1276: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
21. Cdr.fyi, "Key Metrics": <https://www.cdr.fyi/>.
22. Glaser, B. et al., "Biochar is Carbon Negative", Nature Geoscience, January 2009: <https://www.nature.com/articles/ngeo395#:~:text=Carbon%20sequestration%20through%20biochar%20involves,of%20about%20%2C000%20years5>.
23. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, Table 12.6, pp. 1275–1276: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.

24. International Energy Agency (IEA), "Bioenergy with Carbon Capture and Storage: Tracking – September 2022": <https://www.iea.org/reports/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>.
25. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, Table 12.6, pp. 1275–1276: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
26. Ibid.
27. Azarabadi, H. et al, "Shifting the Direct Air Capture Paradigm", Boston Consulting Group (BCG), 5 June 2023: <https://www.bcg.com/publications/2023/solving-direct-air-carbon-capture-challenge>.
28. International Energy Agency (IEA), "Direct Air Capture: Tracking – September 2022": <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>.
29. Azarabadi, H. et al, "Shifting the Direct Air Capture Paradigm", Boston Consulting Group (BCG), 5 June 2023: <https://www.bcg.com/publications/2023/solving-direct-air-carbon-capture-challenge>.
30. The Integrity Council for the Voluntary Carbon Market, "The Core Carbon Principles", 2023: <https://icvcm.org/the-core-carbon-principles/>.
31. Smith, S. et al., The State of Carbon Dioxide Removal – 1st Edition, University of Oxford, 2023: <https://www.stateofcdr.org/home/#key>.
32. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, Table 12.6, pp. 1275–1276: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. The data is calculated using the IPCC's upper estimates of mitigation potential for: engineered CDR (taken as the sum of: DACCS, enhanced rock weathering, BECCS and biochar); natural climate solutions (taken as the sum of afforestation/reforestation, soil carbon sequestration in croplands and grasslands, peatland and coastal wetland restoration, agroforestry and improved forest management); solutions with a low technology readiness level (TRL) are not counted.
33. Kalra, G. et al., Technical CO₂ Removals Market: Present and Future, Tuck School of Business, Dartmouth College, May 2022: [https://www.tuck.dartmouth.edu/uploads/content/TechnicalCO₂RemovalsMarketvF1.pdf](https://www.tuck.dartmouth.edu/uploads/content/TechnicalCO2RemovalsMarketvF1.pdf).
34. International Energy Agency (IEA), Direct Air Capture 2022, April 2022: <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>.
35. International Carbon Reduction and Offset Alliance (ICROA), "ICROA Code of Best Practice", July 2023: <https://icroa.org/icroa-code-of-best-practice/>.
36. First Movers Coalition (FMC): <https://www.weforum.org/first-movers-coalition/sectors>.
37. CDR technologies considered to be within the scope of the FMC's commitment must satisfy the following thresholds: permanence – solutions that demonstrably store captured carbon for 1,000+ years; and scalability – solutions that can potentially store at least 1Mt of carbon by 2030 and 1Gt by 2050.
38. Tyson, J., "Large Companies Hide Behind Net Zero 'Fig Leaf': Report", CFO Dive, 21 February 2023: <https://www.cfodive.com/news/large-companies-hide-behind-net-zero-fig-leaf-ESG-GHG-sustainability/643215/>.
39. Rives, K., "Companies Face 'Massive Growth' in Litigation over Climate Claims", S&P Global Market Intelligence, 6 July 2023: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/companies-face-massive-growth-in-litigation-over-climate-claims-76429935#:~:text=In%20May%2C%20a%20class%2Daction,on%20allegedly%20questionable%20carbon%20offsets>.
40. Voluntary Carbon Markets Integrity Initiative (VCMI), VCMI Claims Code of Practice, June 2023: <https://vcmintegrity.org/vcmi-claims-code-of-practice/>.
41. Adams, M. et al., "The Effect of Biochar on Native and Invasive Prairie Plant Species", Invasive Plant Science and Management, Vol. 6, Issue 2, pp. 197–207, June 2013: <https://doi.org/10.1614/IPSM-D-12-00058.1>.
42. Vaklifard, N. et al., "The Role of Enhanced Rock Weathering Deployment with Agriculture in Limiting Future Warming and Protecting Coral Reefs", Environmental Research Letters, Vol. 6, No. 9, 12 August 2021: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1818>.
43. World Economic Forum, On the Critical Role of Carbon Removal and How Companies Can Use It Smartly, Alliance of CEO Climate Leaders' Carbon Removal Action Group, with contributions from members of the Forum's Global Future Council on Net-Zero Transition, November 2021: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Carbon_Removal_for_CEOs_read.pdf.
44. United Nations Global Compact, "Carbon Pricing", 2023: <https://unglobalcompact.org/take-action/action/carbon>.
45. Boston Consulting Group (BCG), "BCG Commits to Remove 100,000 Tonnes of Carbon by 2030 as Expanded First Mover Coalition Sends Powerful Signal to Market to Commercialize Zero-Carbon Tech", 25 May 2022: <https://www.bcg.com/press/25may2022-bcg-expanded-first-mover-coalition-zero-carbon-tech>.
46. Carbon Direct: <https://www.carbon-direct.com/>.
47. Frontier: <https://frontierclimate.com/>.
48. NextGen: <https://www.nextgencdr.com/>.
49. Carbonfuture: <https://www.carbonfuture.earth/>.

50. Patch: <https://www.patch.io/>.
51. Gordon, O., "Ørsted Launches Landmark CCS Project in Denmark", Energy Monitor, 23 May 2023: <https://www.energymonitor.ai/tech/carbon-removal/orsted-launches-landmark-ccs-project-in-denmark/>.
52. International Carbon Reduction and Offset Alliance (ICROA), "Accrediting Best Practice in Carbon Offsetting": <https://icroa.org/>.
53. NextGen CDR Facility: <https://www.nextgencdr.com/>.
54. Swiss Re, "It's Time to Start Engaging Your Employees and Customers as Part of Your Sustainability Strategy": <https://www.swissre.com/sustainability/sustainable-operations/net-zero-you2-app.html>.

世界経済フォーラムは、
官民両セクターの協力を通じて
世界の現状の改善に取り組むこ
とを目的とする国際機関として、
政治、ビジネス、社会の主要な
リーダー参画のもと、
グローバル、地域、産業の
アジェンダを形成しています。

本書は、2024年1月に世界経済フォーラムが発表した
Carbon Dioxide Removal: Best-Practice Guidelines の日本語版です。

翻訳・制作責任:

株式会社商船三井
〒105-8688 東京都港区虎ノ門2-1-1 商船三井ビル
CBPMO@molgroup.com
www.mol.co.jp/

World Economic Forum
91-93 route de la Capite
CH-1223 Cologny/Geneva
Switzerland

Tel.: +41 (0) 22 869 1212
Fax: +41 (0) 22 786 2744
contact@weforum.org
www.weforum.org