



# 海のCO<sub>2</sub>吸収の仕組みとCDR技術 —気候変動と生物多様性のソリューションとなる可能性—

2024/1

三井物産戦略研究所  
技術・イノベーション情報部 インダストリーイノベーション室  
稲田雄二

## Summary

- 海洋は大気中のCO<sub>2</sub>を陸より多く吸収している。CO<sub>2</sub>除去（CDR：Carbon Dioxide Removal）は、植林や土壌貯留など陸での対策が主だが、地球の7割を占める海洋を利用する技術開発が進められている。
- 海洋がCO<sub>2</sub>を吸収する仕組みを利用する除去技術は「海洋CDR技術」と呼ばれ、大きく「直接海洋吸収法」、「生物固定法」、「風化促進法」の3つがある。
- これらの技術は開発途上であり、商用化には今後5年以上かかる見通しで、コストも明らかになっていない。ただし、単にCO<sub>2</sub>を除去するだけでなく、海の生物多様性の保全や酸性化防止の効果も得られることから、ネイチャーポジティブと連動して脚光を浴びる可能性がある。

## 1. 海洋でのCO<sub>2</sub>吸収がなぜ注目されるのか

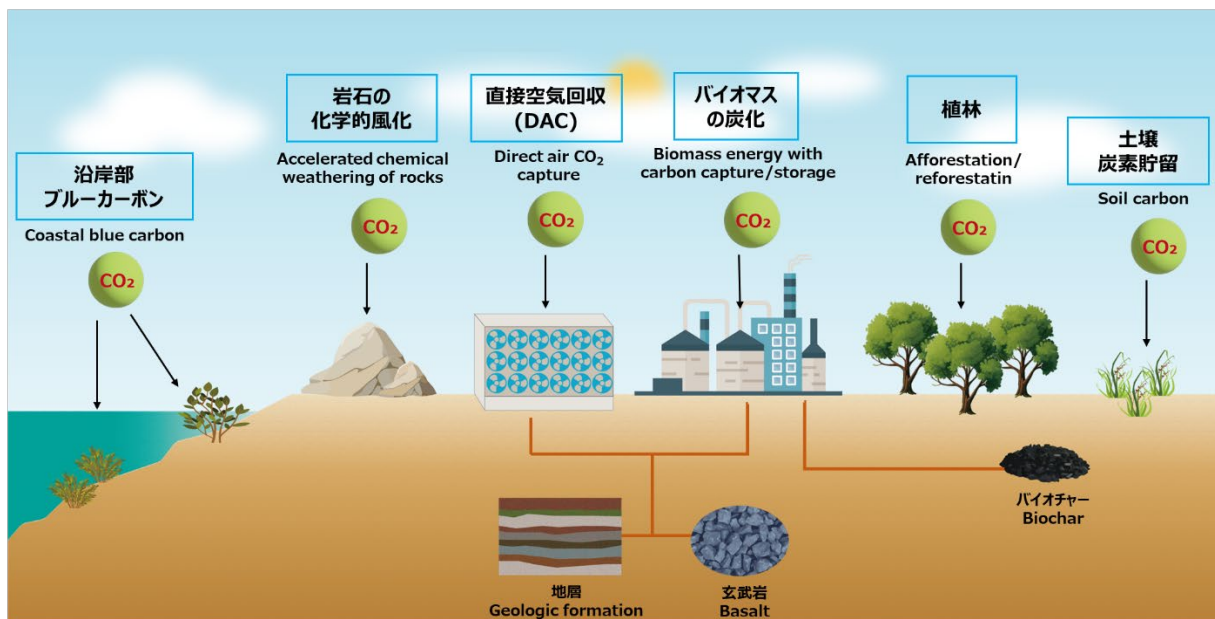
### 1-1. CO<sub>2</sub>除去はカーボンニュートラルの重要技術

CO<sub>2</sub>除去（CDR：Carbon Dioxide Removal）技術は、大気中のCO<sub>2</sub>を回収して吸収し、貯留・固定するものである。自然がCO<sub>2</sub>を吸収し固定する過程に、人為的な工程を加えることで、それらを加速させることを目指している。2050年にカーボンニュートラルを実現するためには、どうしても避けられないCO<sub>2</sub>排出を相殺する必要があり、CDR技術が不可欠である。植林・再生林、土壌炭素貯留、バイオマス炭化、BECCS<sup>1</sup>（バイオマスエネルギー利用時に排出されるCO<sub>2</sub>の回収・貯留）、DACCS<sup>2</sup>（大気中のCO<sub>2</sub>直接回収・貯留）、風化促進、海藻・海草類によるCO<sub>2</sub>固定化など、さまざまな技術がある（図表1）。

<sup>1</sup> BECCS: Biomass Energy with Carbon Capture and Storage

<sup>2</sup> DACCS: Direct Air Carbon Capture and Storage

図表1 さまざまなCDR技術

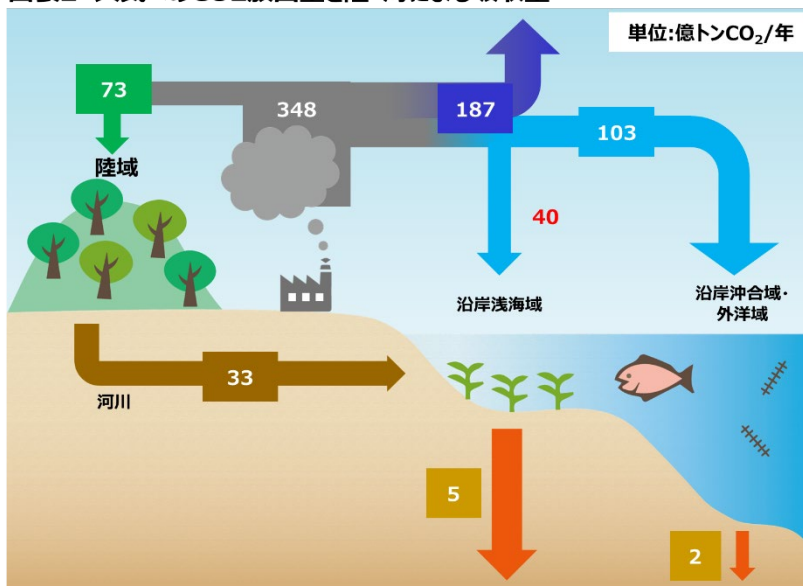


出所：National Academies Press, Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda (2019), Chapter:1 Introductionから三井物産戦略研究所作成 <https://nap.nationalacademies.org/read/25259/chapter/3> (2023年12月15日最終閲覧)

### 1-2. 海のCO<sub>2</sub>吸収と海洋CDR技術への期待

これまでのCDR技術は陸上で利用する技術が中心であった。一方、大気中に放出されるCO<sub>2</sub>は年間348億トンあり、陸域で73億トンが、海域では陸よりも多い103億トンが吸収されている（図表2）。このように海は膨大なCO<sub>2</sub>を吸収している<sup>3</sup>。

図表2 大気へのCO<sub>2</sub>放出量と陸・海による吸収量



出所：ジャパンブルーエコミー技術研究組合『Jブルークレジット@認証申請の手引き, Kuwae and Crooks(2021)』から三井物産戦略研究所作成 [https://www.blueeconomy.jp/wp-content/uploads/jbc2023/20230816\\_J-BlueCredit\\_Guideline\\_v2.3\\_rev\\_his.pdf](https://www.blueeconomy.jp/wp-content/uploads/jbc2023/20230816_J-BlueCredit_Guideline_v2.3_rev_his.pdf) (2023年12月15日最終閲覧)

<sup>3</sup> 沿岸部に植生するマングローブや湿原湿地、海草藻場などの海洋生態系が主要な吸収源となっている。

気候変動対策を研究するIPCC（気候変動に関する政府間パネル）も海洋によるCO<sub>2</sub>吸収に注目し、第6次評価報告書で海洋生態系の保全や再生は、気候変動の緩和策の1つとして「高いコスト効果や多面的な共益を有する」と評価している<sup>4</sup>。

## 2. 海洋CDR技術とは何か

### 2-1. 海がCO<sub>2</sub>を吸収するメカニズム

海がCO<sub>2</sub>を吸収する仕組みは複雑であるが、大きく分類すると（1）直接溶解、（2）生物固定、（3）化学固定の3つに分けられる。

1つ目の直接溶解（図表3（1））は、大気が海の表面上で風や波によってかき混ぜられ、大気中のCO<sub>2</sub>が海に溶け込むことを指す。CO<sub>2</sub>が海水に溶解する量は、その場所の海水温や塩分濃度などの環境に影響される。概して海水温が低く塩分濃度が高い海域ではCO<sub>2</sub>濃度が高い。気象庁による日本南方海上の観測によると、表面海水中のCO<sub>2</sub>濃度は約360ppmとなっている<sup>5</sup>。1980年代から2015年までに約40ppm増加していることから、大気と同様に海のCO<sub>2</sub>増加も懸念されている<sup>6</sup>。

2つ目の生物固定（図表3（2））は、植物プランクトンや海藻などの生物が海水中に溶け込んだCO<sub>2</sub>を光合成で有機物（炭素と酸素と水素の化合物）として取り込む過程で起こる。この有機物は魚や貝などの生物により捕食される食物連鎖により、さらに取り込まれ拡大する。これらの有機物の一部は海底に沈降して長期間にわたって貯留されるため、CO<sub>2</sub>も海底に貯留されることになる。

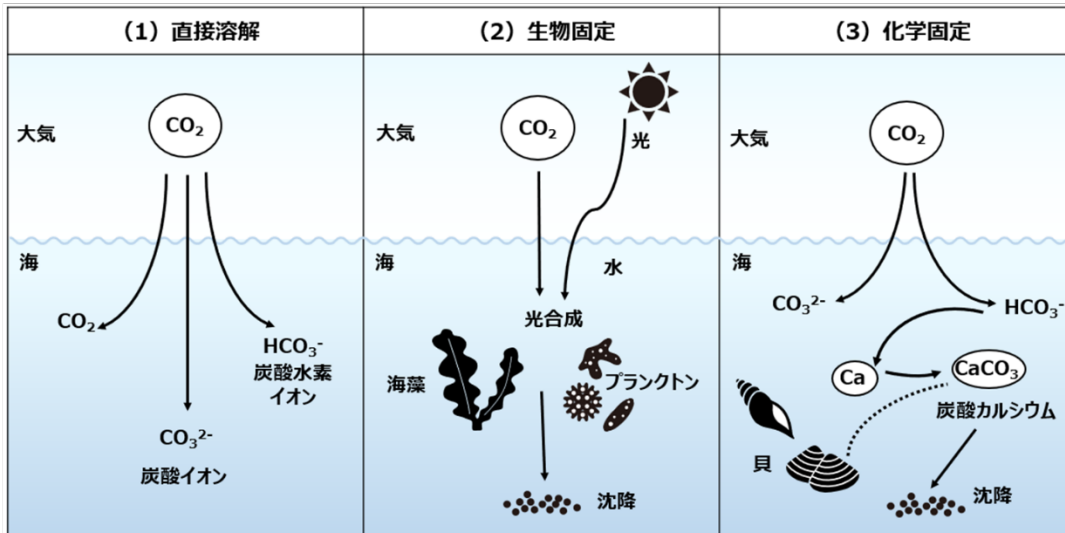
3つ目の化学固定は、海水中に溶け込んだCO<sub>2</sub>が他の物質と化学反応を起こしてCO<sub>2</sub>を貯留する仕組みである（図表3（3））。直接溶解で示したように海水中のCO<sub>2</sub>は、水と反応して炭酸水素イオン（HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>）や炭酸イオン（CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>）といったイオンに変化する。これらのイオンが海水中に存在するカルシウムやマグネシウムと反応して化合物を形成する。この化合物が海中に浮遊、あるいは海底に沈降することでCO<sub>2</sub>を貯留することになる。貝類が炭酸カルシウムの殻を作るメカニズムと同様で、生物も化学固定の一部を担っている。

<sup>4</sup> 同報告書では、海洋生態系の減少や破壊は、気候変動の影響や人間の活動によって加速されており、大気中のCO<sub>2</sub>増加や生物多様性の低下につながると警告、保全や再生は気候変動の影響に対する適応策としても有効であると述べている。また、WRI（世界資源研究所）などの国際的な研究機関も海洋を新たなCO<sub>2</sub>貯留源として捉える動向がある。

<sup>5</sup> ppmはparts per millionの略で100万分の1を示す単位。1ppmは0.0001%に相当し、10,000ppmは1%である。

<sup>6</sup> 日本を含む北西太平洋域の二酸化炭素濃度の状況（気象庁）

図表3 海がCO<sub>2</sub>を吸収する仕組み



出所：三井物産戦略研究所作成

## 2-2. 海洋CDR技術の種類と特徴

海のCO<sub>2</sub>吸収量は、実際には海と大気との物理的・化学的な関係や海洋生物の活動量などの要素が複雑に関係している。広域な海のCO<sub>2</sub>吸収量を正確に把握することは現在の技術では難しい課題だが、海のCO<sub>2</sub>吸収量が増えれば大気からの吸収量が増えることは確かな自然原理である。海洋CDR技術により海水中のCO<sub>2</sub>を削減できれば、その結果、大気中のCO<sub>2</sub>を海洋に取り込む量を増やすことが可能となる。

本稿では、海によるCO<sub>2</sub>吸収の3つの仕組みに対応する海洋CDR技術として、(1) 直接海洋吸収法、(2) 生物固定法、(3) 風化促進法の各技術を紹介する。

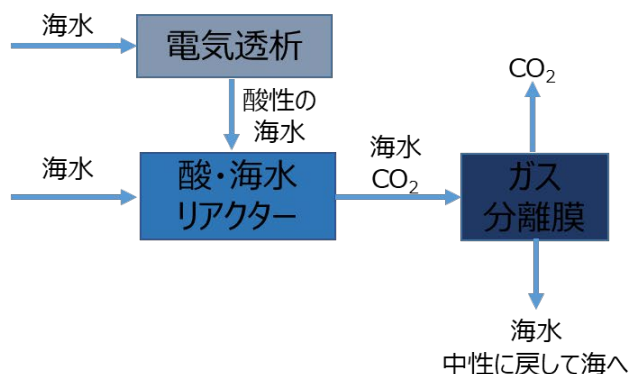
### (1) 直接海洋吸収法

直接海洋吸収 (DOC: Direct Ocean Capture) 法は、海水に溶け込んだCO<sub>2</sub>、炭酸イオンを電気化学的な方法で回収する技術であり、前述の直接溶解に対応する。電気を用いて海水に化学反応を起こして海水からCO<sub>2</sub>を放出させる。

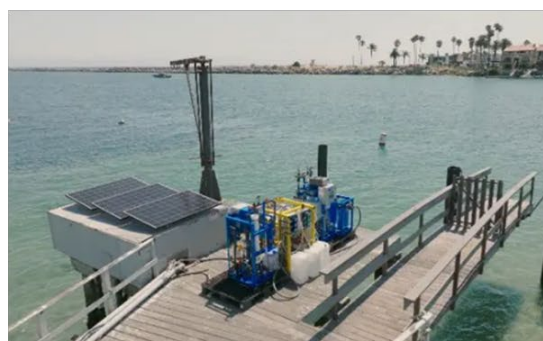
米Captura社は、電気透析で酸性の海水を作り、これに普通の海水を混ぜてCO<sub>2</sub>を放出させ、ガス分離膜で効率的にCO<sub>2</sub>を回収する技術を開発している(図表4 (a))。同社は年間1トンのCO<sub>2</sub>を回収する小規模な試験装置で開発中だが(図表4 (b))、Southern California Gasから資金を得てロサンゼルス港にて年間100トンのCO<sub>2</sub>回収のパイロット試験を実施する計画である。将来的には海上に設置する大型装置を構想している(図表4 (c))。他にも米Heimdall社や米Ebb Carbon社などが直接海洋吸収法を開発している。

図表4 Captura社の直接海洋吸収法

(a) 海水を電気分解して膜でCO<sub>2</sub>回収する概念図



(b) 1t-CO<sub>2</sub>/年回収 試験装置



(c) 海上に設置する大型装置のイメージ



出所：(a) Captura社資料『Carbon Dioxide Removal Pathway : Ocean Health and MRV』から三井物産戦略研究所作成  
<https://capturacorp.com/wp-content/uploads/2023/10/Captura-Carbon-Dioxide-Removal-Pathway.pdf>  
(b) (c) Captura社ウェブサイト <https://capturacorp.com/> (いずれも2023年12月15日最終閲覧)

## (2) 生物固定法

生物固定 (Biomass fixation) 法は、海洋表面で海藻類を栽培し光合成により海水中のCO<sub>2</sub>を吸収・成長させ、一定期間の成長後、海底に沈めCO<sub>2</sub>を貯留する技術である (図表5 (a))。

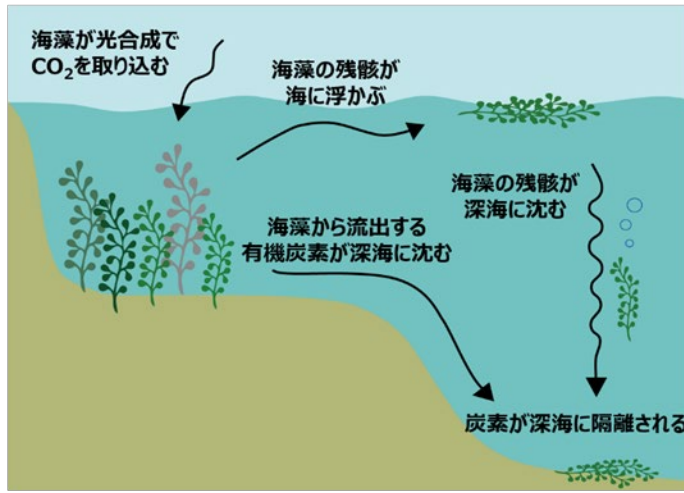
米Running Tide社は、「カーボンブイ」と呼ばれる特殊な浮き (図表5 (b))を使用して海中で海藻を成長させ、海底に沈めてCO<sub>2</sub>を除去する技術を開発している。

カーボンブイは、海水の温度や塩分濃度などの環境条件に応じて、海中を上下に移動し、海藻が十分に成長するとブイから切り離されて自然に沈むよう作られている。海藻が深海に沈むと光合成の過程で吸収されたCO<sub>2</sub>が半永久的に隔離されると同社は主張している。



図表5 Running Tide社の生物固定

(a) 海藻による生物固定の仕組み



(b) カーボンパイ



出所：(a) ハーバード大学GRASウェブサイト「How Kelp Naturally Combats Global Climate Change」から三井物産戦略研究所作成  
<https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2019/how-kelp-naturally-combats-global-climate-change/>  
(b) 英Lune Climate社ウェブサイト「Amplifying nature's climate solution – a deep dive on ocean carbon removal」  
<https://lune.co/blog/deep-dive-on-ocean-carbon-removal-ft-running-tide/> (いずれも2023年12月15日最終閲覧)

### (3) 風化促進法

風化促進 (Enhanced Weathering) 法は、鉱物の一種であるカンラン石などのマグネシウムやカルシウムが大気や海水中のCO<sub>2</sub>と結合して化合物を作る鉱物化反応を応用した技術である。この現象は自然界にある鉱物が風化する過程そのものであることから風化促進と呼ばれている。

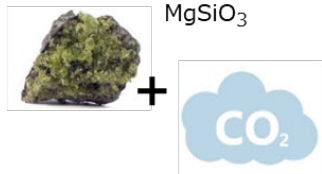
米Project Vesta社は、カンラン石がCO<sub>2</sub>と結合してマグネシウム化合物を作る反応を利用した技術を開発している (図表6 (a))。粉砕したカンラン石を海岸に散布してCO<sub>2</sub>を除去する (図表6 (b))。大量のCO<sub>2</sub>を除去するためには、広大な散布面積が必要となり、最も適しているのが海岸沿岸部への散布であり、海水と大気の両方からCO<sub>2</sub>を除去できる効果もある。同社はノースカロライナ州やハワイ島でフィールドテストを実施中である。また、カンラン石を豊富に有するオマーン国、アラブ首長国連邦 (UAE) で採掘し、中東の沿岸部で散布する計画を表明している<sup>7</sup>。米国や中東に限らず、風化促進は安価に鉱物を調達でき、散布する場所が確保できれば採用できる技術であり、広く世界に普及するポテンシャルがある。

<sup>7</sup> 国内では、2022年にNEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) がムーンショット事業で、玄武岩を散布してCO<sub>2</sub>を固定するテーマを採択した。早稲田大学や北海道大学、三菱重工エンジニアリングなどが技術開発を進めている。ただし、本開発は海洋でのCO<sub>2</sub>除去ではなく、玄武岩を採石場や農地、休廃止鉱山に散布して、主として大気中のCO<sub>2</sub>除去を目的としている。

## 図表6 Project Vesta社の風化促進法

(a) カンラン石による風化促進の仕組み

カンラン石 (ケイ酸マグネシウム成分含有)  
 $MgSiO_3$



マグネシウムと $CO_2$ が反応し、  
マグネシウム炭酸塩鉱物 $MgCO_3$   
を作り $CO_2$ を固定する

(b) 海洋沿岸に散布するイメージ



出所：(a) 三井物産戦略研究所作成

(b) INDIEGOGOウェブサイト Project Vesta - Turning the Tide on Climate Change

<https://www.indiegogo.com/projects/project-vesta-turning-the-tide-on-climate-change#> (2023年12月15日最終閲覧)

### 2-3. 海洋CDR技術のコスト、特徴/課題

図表7に各海洋CDR技術の企業例、 $CO_2$ 削減コスト、特徴/課題をまとめた。

直接海洋吸収法は、1トン当たりの $CO_2$ 削減コストが300～500ドルと見込まれている。海水中の $CO_2$ を電気化学、膜技術により気体として取り出すため、除去した $CO_2$ 量が明確である一方、システムが複雑であり装置の駆動エネルギーが必要となるため、他の海洋CDR技術に比べてコストが高い。

生物固定法は、コストが50ドル/t- $CO_2$ 以下で、海藻を海洋の自然環境で育成させるため費用を抑えられる。一方、海藻が深海に沈降し長期間にわたり貯留できる $CO_2$ 量が科学的に証明されていない。また、沈降した海藻が深海環境に与える影響が未解明であることが課題である。

風化促進法は、コスト100～125ドル/t- $CO_2$ と想定され、散布した鉱石が自然環境下で $CO_2$ を吸収するため直接海洋吸収法に比べて低いコストとなっている。しかし、生物固定と同様に鉱石による $CO_2$ 固定量が散布した環境に左右され海洋から除去できる $CO_2$ 量の定義が難しく、また、散布する沿岸部への長期的な環境影響も現在のところ明らかになっていない。

それぞれに技術課題はあるが、大気中から $CO_2$ を回収する直接空気回収 (DAC: Direct Air Capture) 法のコストは500～600ドル/t- $CO_2$ と予測されており、海洋CDR技術の方が低コストと見込まれ、このコストを商業化段階で実現でき、課題を解決する見通しが立てば普及する可能性がある。

図表7 海洋CDR技術のコスト、特徴/課題

海洋CDR技術	企業例	CO <sub>2</sub> 削減コスト (ドル/t-CO <sub>2</sub> )	特徴/課題
直接海洋吸収法	米 Captura、米 Heimdal、 米 Ebb Carbon	300~500	・海水からCO <sub>2</sub> を気体として取り出すためCO <sub>2</sub> 量が明確 ・システムが複雑で、動力が必要なため高コスト
生物固定法	米 Running Tide、 英 Brilliant Planet	50 以下	・自然環境を利用するため低コスト ・海藻によるCO <sub>2</sub> 固定量の定義が不明確 ・深海への環境影響が未解明
風化促進法	米 Project Vesta、 英 Cquestr8	100~125	・自然環境を利用するため低コスト ・鉱石によるCO <sub>2</sub> 固定量の定義が不明確 ・海洋沿岸への環境影響が未解明

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

### 3. 今後の展望

海洋CDR技術の課題には、コストや削減したCO<sub>2</sub>量の定量化・標準化、海洋生態系への影響解明がある。さらには、生物固定法においては海藻を深海に沈降させる場合は廃棄物の不法投棄にあたる可能性もあり、規制上の障壁も考えられる。

このような課題を整理し解決するため、米エネルギー省はMarine Carbon Dioxide Removal Techniquesプログラムを立ち上げ、また、EU Horizon EuropeもSEA02-CDRプログラムにより、学術機関や新興企業らが開発を進めることを支援している。これらのプログラムではCO<sub>2</sub>固定のメカニズムと定量性の評価や海洋生態系への影響調査などが実施され、課題の整理と解決の道筋が示されるだろう。

現段階の海洋CDR技術は、商業化に至る技術の選別には5年以上かかり、実現は2030年以降と見込まれているため、早期の事業化を期待することは時期尚早と言えよう。

一方、海洋の酸性化防止や海洋生態系にプラスの影響があると証明されれば、CO<sub>2</sub>を削減しながら海の環境を修復・保全することもできる。気候変動対策と自然資本・生物多様性の双方を重視する昨今の観点から、海洋CDR技術が優れたソリューションとなる可能性もあるため、今後の動向を注視する必要がある。

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できるとされる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。