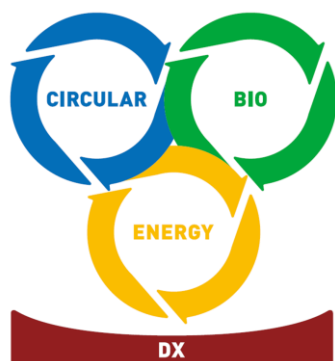


ネガティブエミッション技術について (風化促進/バイオ炭/ブルーカーボン)

2023年4月19日



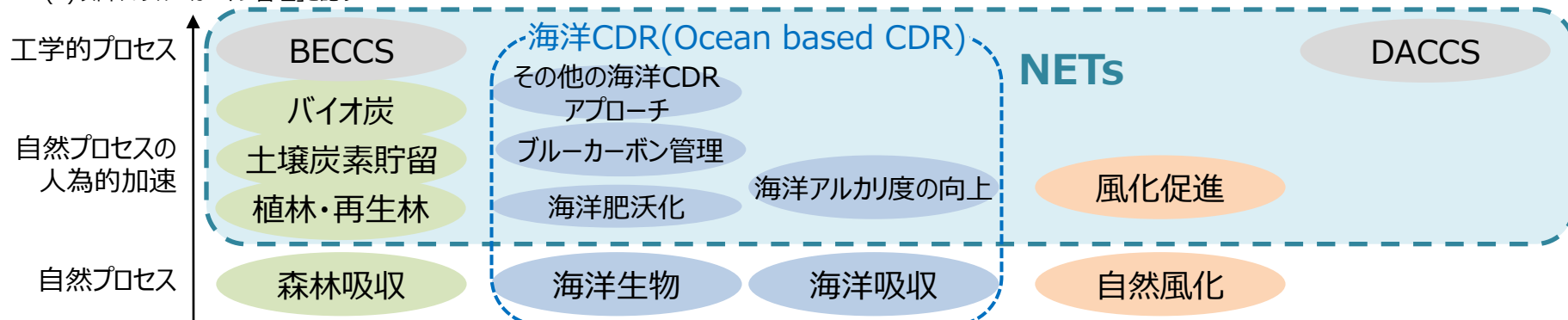
国立研究開発法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)
技術戦略研究センター (TSC)

ネガティブエミッション技術(NETs)概要

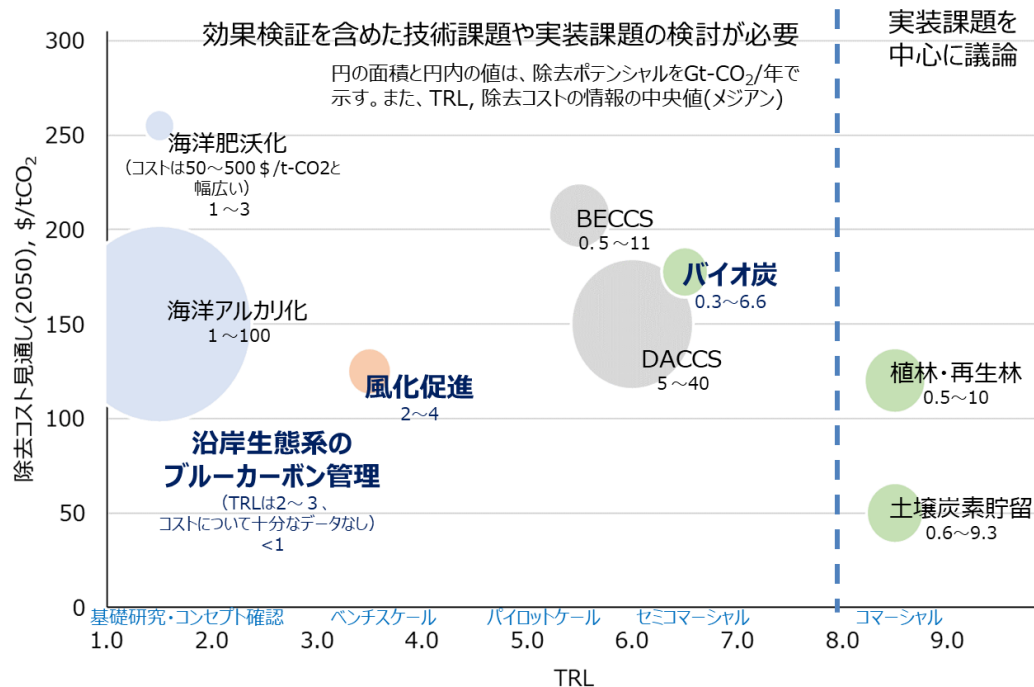
- ネガティブエミッション技術(**NETs**)とは、大気中のCO₂を回収・吸収し、貯留・固定化することで**大気中のCO₂除去** (CDR, Carbon Dioxide Removal)に資する**技術**
- 自然のCO₂吸収・固定化の過程に、人為的な工程を加えることで加速させる技術やプロセス(狭義)

植林・再生林	植林は新規エリアの森林化、再生林は自然や人の活動によって減少した森林への植林
土壌炭素貯留	バイオマスを土壌に貯蔵・管理する技術（自然分解によるCO ₂ 発生を防ぐ）
バイオ炭	バイオマスを炭化し炭素を固定する技術
BECCS	バイオマスの燃焼により発生したCO ₂ を回収・貯留する技術
DACCS	大気中のCO ₂ を直接回収し貯留する技術
風化促進	玄武岩などの岩石を粉砕・散布し、風化を人工的に促進する技術。風化の過程(炭酸塩化)でCO ₂ を吸収
海洋肥沃化	海洋への養分散布や優良生物品種等を利用することにより生物学的生産を促してCO ₂ 吸収・固定化を人工的に加速する技術。大気中からのCO ₂ の吸収量の増加を見込む。
海洋アルカリ度の向上	海水にアルカリ性の物質を添加し、海洋の自然な炭素吸収を促進する炭素除去の方法
沿岸生態系のブルーカーボン管理(*)	マングローブ・塩性湿地・海草などの沿岸のブルーカーボン維持・再生によるCDR。大型海藻類(例えば、昆布)など沿岸における他の炭素隔離の可能性を議論中。
その他の海洋CDRアプローチ	研究事例が少ないが、「人工湧昇」「作物残渣または丸太など陸上バイオマス投棄」「大型海藻養殖などの海洋バイオマスCDRオプション」「海水からの直接CO ₂ 抽出（貯蔵あり）」などの手法がある

(*)以降、「ブルーカーボン管理」と記す



- NETsのほとんどが**\$200/t-CO₂以下の除去コストが期待**されるが、海洋関連、風化促進、DACCS、バイオ炭など、**効果検証も含め開発途上の技術も多い**
- 自然界にCO₂を貯留するNETsは、**低濃度のCO₂を低コストで固定できる能力やコベネフィット**を持つ点が特徴だが、**環境影響・利点について科学的な評価が重要（アカウンティング）**
- 工学プロセスを活用するDACCS/BECCSは、CO₂除去効果が明確だが、コストダウンが必要



CDR項目	Status (TRL)	コベネフィット
バイオ炭	6-7	作物収量の増加、土壌からのCO ₂ 以外のGHG排出量の削減、干ばつへの回復力
風化促進	3-4	植物の生育促進、浸食の減少、土壌炭素の増加、pHの低下、土壌の保水性。
沿岸生態系のブルーカーボン管理	2-3	多くの非気候的な利益を提供し、生態系に基づく適応、沿岸保護、生物多様性の増加、海洋酸性化の減少に貢献する。また、人間の栄養や陸上農業の肥料、メタン生成抑制飼料添加物、工業用や材料用の原料を生産する可能性がある。
泥炭地と塩性湿地保全	8-9	雇用と地域生活の向上、漁業の生産性向上、生物多様性の向上、土壌の炭素と栄養循環の改善

出所：IPCC Sixth Assessment Report 「Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change」

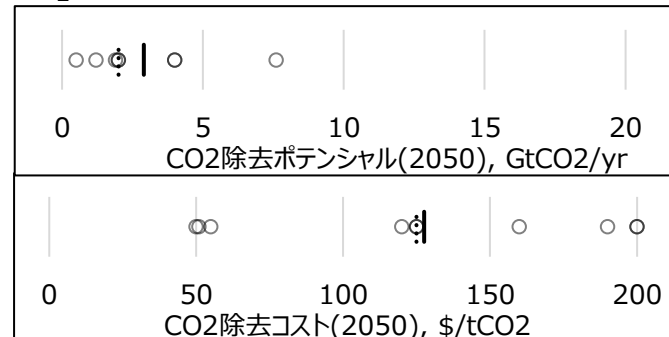
出所：IPCC Sixth Assessment Report 「Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change」

風化促進（概要）

- 玄武岩などケイ酸塩を含む岩石を粉砕・散布し、千年～万年スケールの自然の風化（炭酸塩化）を人工的に促進する技術
- 採掘・粉砕や散布などの技術要素は既存技術が利用できる可能性があり、早期の実現が期待される
- 玄武岩等の鉱物資源、実施場所としての耕作地・森林・海岸など、日本国内で要件が揃う
- 近年、海外での研究開発、実証試験が活発。
- 日本は、必要な地質、地球化学情報、かつ関連する技術分野の専門家は豊富。ムーンショットプロジェクトで研究開発が開始
- CO₂除去効果、環境影響(リスク評価)、モニタリング、シミュレーションなど、未検証、未確立

TRL	GtCO ₂ /年	\$/tCO ₂	m ² /tCO ₂	固定期間	効果検証	日本での実施
4	2.0	125	29	○	未	○

CO₂除去ポテンシャル・コストのデータ | 平均, 中央値



出所：各種情報（巻末参照）を元にNEDO技術戦略研究センターにて作成

Pros

- ・必要面積が比較的少ない
- ・永久貯留
- ・日本での実施
- ・自然現象の加速
- ・土壌改良などのCO₂除去以外の便益の可能性

Cons

- ・CO₂除去コスト(輸送・粉砕・散布)
- ・CO₂除去効果の検証が不十分
- ・環境影響評価（土壌、微生物、河川）が不十分
- ・ステークホルダーの合意形成

風化促進とは

自然風化のルート
千～万年の時間スケール

大気中のCO₂

風化促進のルート

岩石破碎等で、炭酸塩化を1年～数年に加速

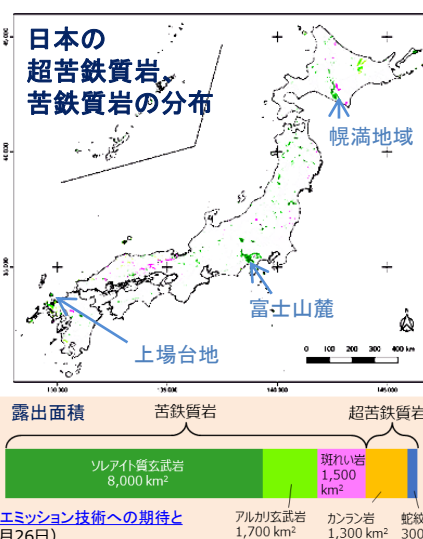
耕作地・森林・海岸等へ散布

柱状玄武岩
写真出展：Wikipedia

CO₂固定

炭酸塩鉱物
または
炭酸イオン

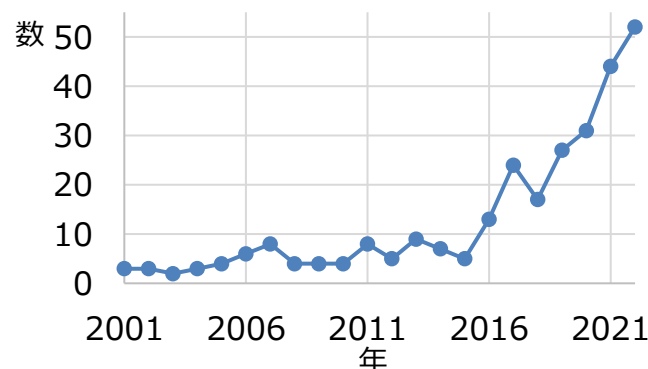
岩石採掘・破碎・散布は
既存の産業技術が活用可能



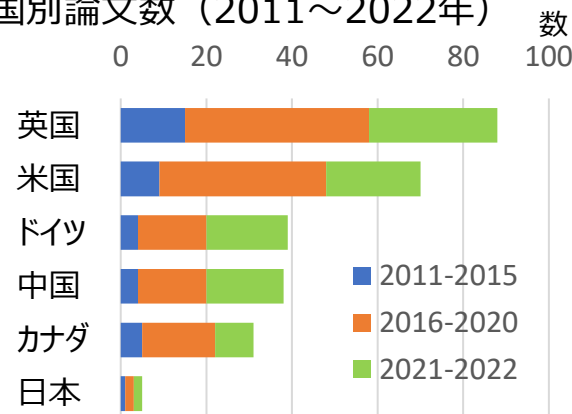
出所：TSC調査分析レポート「ネガティブエミッション技術への期待と「風化促進」の技術課題」（2022年12月26日）

- 風化促進に関連する論文数は、欧州・米国・カナダ・中国を中心に、近年大幅に増加している。一方、日本の論文数は極めて少ない。
- 海外では、CO₂除去ポテンシャルの検討や実サイトでの実証試験が先行して開始されている。
- 日本でもムーンショットプロジェクトで研究開発が開始。

“風化促進”で検索した論文数



国別論文数（2011～2022年）



Web of Science™による分析
（国は責任著者の研究場所を基に分類）

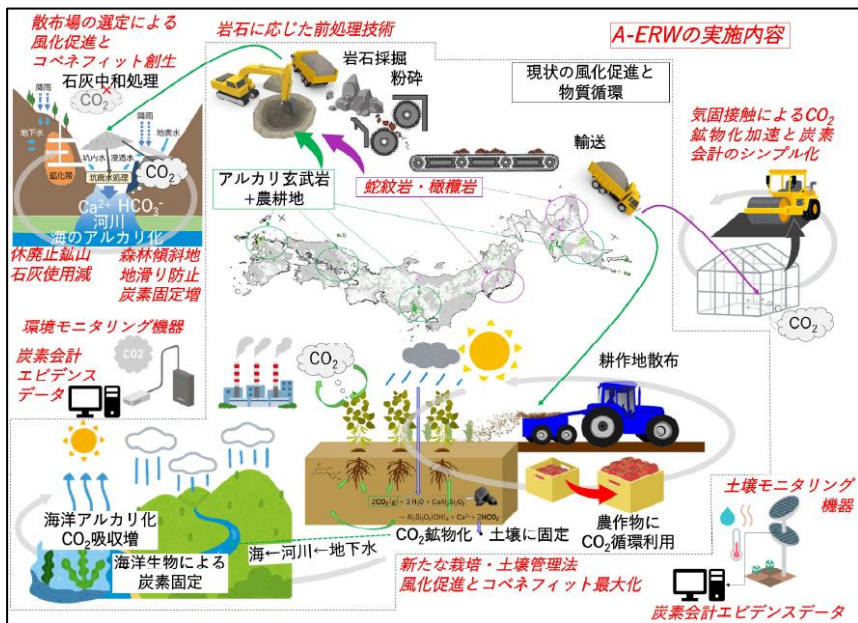
風化促進に関するプロジェクトの概要

出所：各種情報（巻末参照）を元にNEDO技術戦略研究センターにて作成

フェーズ	開始年	プロジェクト実施主体	概要
調査	2018	USGS (米国)	米国内のCO ₂ 排出源・量・サイトおよび苦鉄質または超苦鉄質の岩石および鉱山尾鉱の分布を地質学的に整理し、地中貯留および風化促進のCO ₂ 除去ポテンシャルを検討。
実証	2019	Project vesta @Carbon180 (米国)	カンラン岩でできた炭素除去砂を海洋沿岸に散布して、CO ₂ を可溶性相としての除去ポテンシャルを検討、実証を目指す。併せて海洋酸性化へ直接対処することも検討。
調査	2019	PALEOCARBON (アイルランド)	玄武岩の風化について、植物や水、炭酸塩化等による複合的なメカニズムを、数百万年前の高CO ₂ 期間中の地層の実態から研究。
調査	2020	D.J. Beerlingら報告 (英国)	2050年想定で世界における風化促進のCO ₂ 除去ポテンシャル（0.5～2 Gt-CO ₂ /年）およびコスト（\$55～\$190 /t-CO ₂ ）を試算（Nature）。
実証	2021	The Future Forest Company (英国)	風化促進が商業的に可能であることの実証。CO ₂ 除去量を推定する独自のモデルを開発、その検証の方法論を構築。玄武岩散布のリスク、農業と林業への相乗便益。風化率を高めるための粉砕の影響を検討。
実証	2021	KCAC Mine Carbon Mineralization Field Test (米国)	鉱山の尾鉱を活用したCO ₂ 除去の検討。安全かつ費用対効果の高い手法を開発・実証する。コスト目標は100USD/t-CO ₂ 未満。
実証	2022	DETAILS (スペイン)	鉱山廃棄物によるCO ₂ 除去の検討。サイトごとに異なる様々な岩石を対象に現場での試験に焦点。pH変更、鉱山現場の熱源とCO ₂ 源、微生物の反応を利用したCO ₂ 除去の促進を検討。

岩石と場の特性を活用した風化促進技術 “A-ERW”の開発

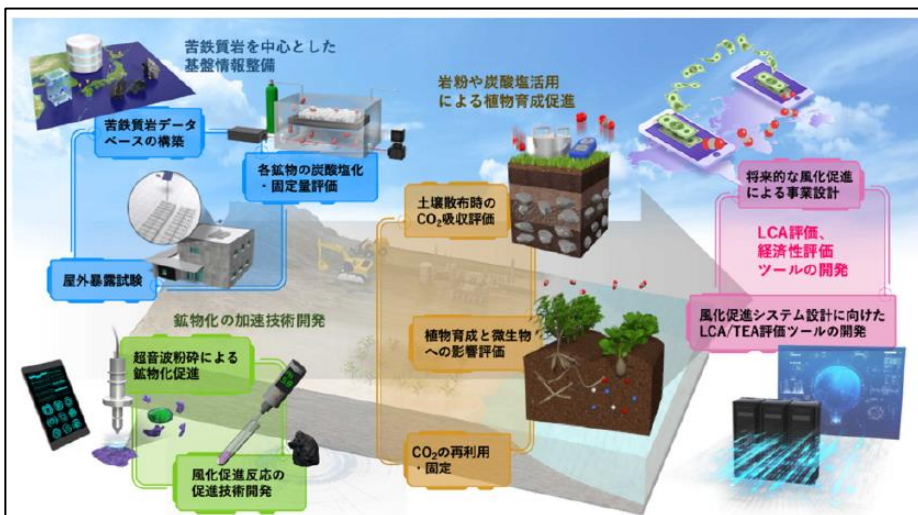
（学）早稲田大学 中垣 隆雄



- 農地、森林、鉱山など幅広い散布場での風化加速策とコベネフィットの創生を検討
- 岩石や散布場の特性に応じた効果的なCO₂固定法の開発
- 炭素会計法の開発と国際コンセンサスの醸成
- コベネフィット最大化を目的とした栽培・土壌管理法の開発

LCA/TEAの評価基盤構築による風化促進システムの研究開発

（国研）産業技術総合研究所 森本 慎一郎



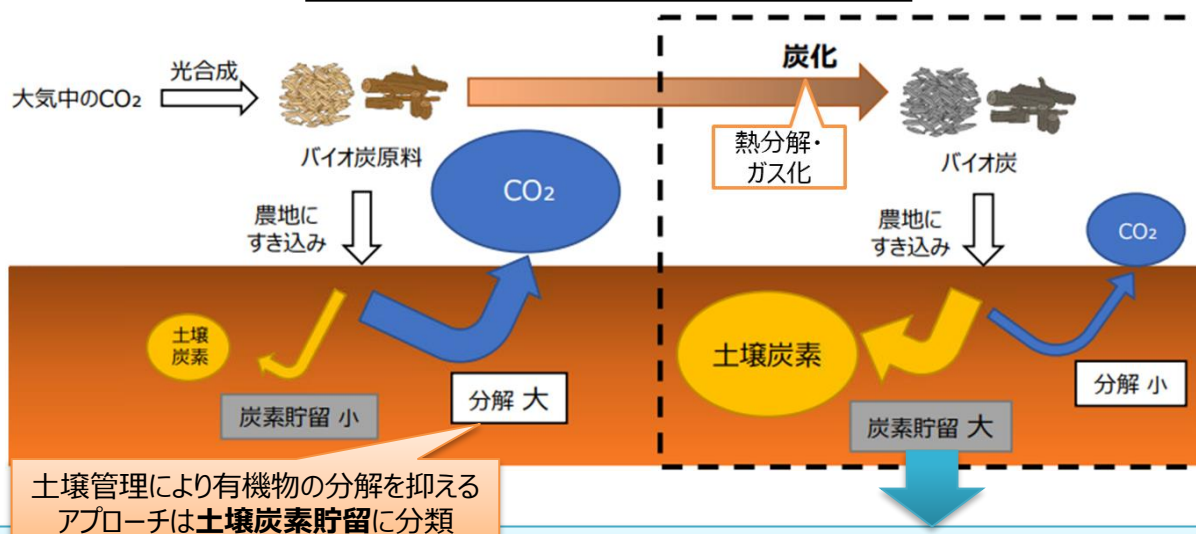
- 苦鉄質岩の鉱物組成・形状・採掘サイトなどに関する国内版データベースを開発
- 土壌散布後のCO₂固定量をIRで精密に測定する技術を開発
- 粉砕エネルギーを低減する粉砕法の開発
- 植物の生育を最大にする散布条件の最適化
- 炭酸塩を利活用するトータルシステムをLCA/TEAの観点で最適化する評価基盤の開発

●バイオ炭は、バイオマス原料を熱分解またはガス化させて得られた炭化物の総称であり、施用したバイオ炭は、長期（100年単位）にわたって難分解性炭素として土壌に貯留される。

●「2006年IPCC国別温室効果ガスインベントリガイドラインの2019年改良」（2019年 IPCC総会承認）において、農地・草地土壌へのバイオ炭投入に伴う炭素貯留量の算定方法が追加。

●国内では2020年の温室効果ガスインベントリから、土壌炭素プールの算定にバイオ炭の農地施用による炭素貯留量の算定を追加。

バイオ炭投入による炭素貯留のイメージ



炭素固定量の算定方法

$$\Delta BC_{Mineral} = \sum_{p=1}^n \left(BC_{TOTp} \cdot F_{Cp} \cdot F_{perm_p} \right)$$

$\Delta BC_{Mineral}$: バイオ炭投入による土壌炭素貯留変化量

BC_{TOTp} : 当該年に土壌に投入されたバイオ炭の量

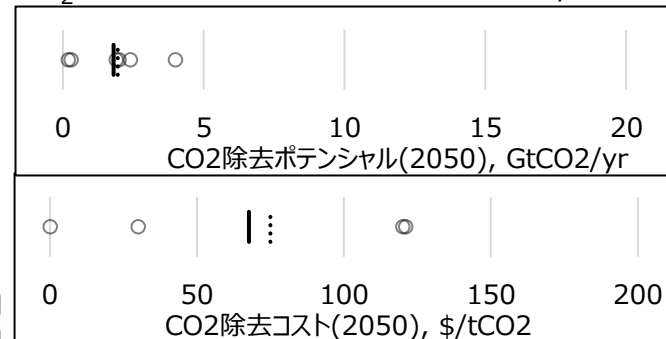
F_{Cp} : タイプpのバイオ炭の炭素含有率

F_{perm_p} : タイプpのバイオ炭の100年後の炭素残存率

p : バイオ炭の種類

TRL	GtCO ₂ /年	\$ /tCO ₂	m ² /tCO ₂	固定期間	効果検証	日本での実施
5	2.0	75	580	○	済	○

CO₂除去ポテンシャル・コストのデータ | 平均, 中央値



出所：各種情報（巻末参照）を元にNEDO技術戦略研究センターにて作成

Pros

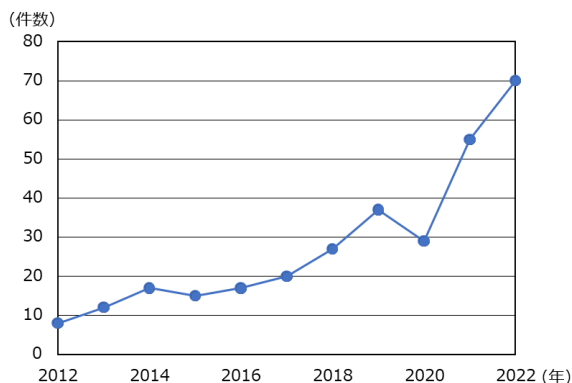
- ・土壌改良（物理性、化学性、生物性）とネガティブエミッションの両立
- ・100年以上の長期貯留効果
- ・除去効果の検証が容易
- ・木質資源ポテンシャル 等

Cons

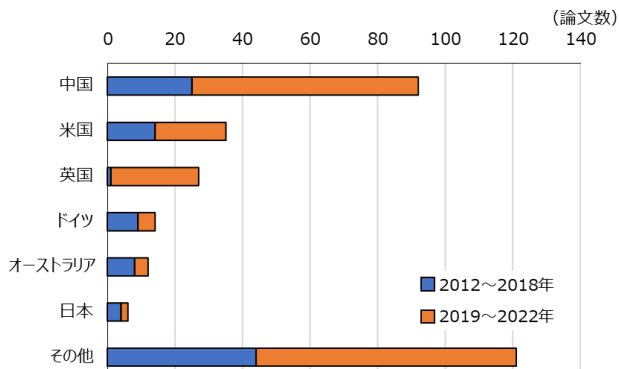
- ・必要面積・適用対象（※）
- ※「農地」又は「採草放牧地」における鉱質土壌
- ・日本でのバイオマスの入手性 等

- 国内外で圃場試験レベルでのバイオ炭施用による土壌炭素貯留量、作物影響の評価が実施されている。また、バイオ炭を含む有機態炭素を土壌に施用した際の効用・効果の定量化とメカニズム解明が進められている。
- この他、地域のバイオマス原料からの効率的なバイオ炭製造方法、地域ごとのバイオ炭の製造・使用に対するLCA評価及び経済性評価等が研究課題として挙げられる。
- 特にLCA評価においては、バイオ炭のライフサイクルインベントリデータが不足しており、また、サイトごとの長期施用の固定効果、施用後の流出等による影響、地域ごとのバイオマス資源の利用可能性等の課題がある。

関連論文数の推移（参考）



論文数の国別内訳（2012～2022年）



Web of Scienceによる検索結果（2023年4月10日アクセス）
（国は筆頭著者の研究場所を基に分類）

バイオ炭の土壌炭素貯留に関連するプロジェクト実施例

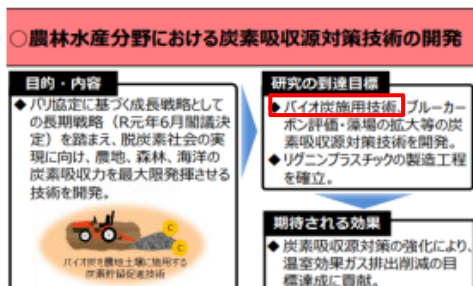
開始年	プロジェクト実施主体	概要
2019	ワシントン州立大学 （米国）	バイオ炭の 家畜ふん尿管理、堆肥原料、土壌改良資材への適用性及び土壌炭素貯留効果に係る実証試験 。家畜用ベッドにバイオ炭を混ぜ、使用後ベッドをコンポスト化して圃場施用し、施用効果を検証。（USDA SAREプログラム）
2021	USDA （米国）	農業生態系における 炭素貯留と損失のメカニズム解明 。炭素の固定化に炭素投入方法の違い（表面施用又はすき込み）や化学性、微生物反応が及ぼす影響等を検証。
2021	EJP SOIL(CarboSeq) （EU他）	技術的、経済的な制約等を考慮した、 実行可能な土壌有機態炭素貯留ポテンシャルを評価 。異なる土壌管理シナリオに対応した土壌炭素動態モデル（RothC等）改良に向けて、新規のデータベースを構築し、適用可能な土地のポテンシャル評価を行う。この中で、バイオ炭を含む有機質資材が土壌炭素ストックに及ぼす影響を検証。
2022	EJP SOIL(TRUE SOIL) （EU他）	気候配慮型の農業における土壌管理について、 土壌炭素ストックとGHG排出のトレードオフと動的関係性について検証 。従来実施される有機物（堆肥、バイオ炭、植物残渣等）の投入による悪影響（既に固定されていた炭素等の分解を促す等）を含め、土壌管理が土壌炭素貯留とGHG排出へ与える影響を評価する。
2020	福井県他 （日本）	炭素貯留、肥効、N ₂ O排出削減に資する バイオ炭混合材料等の開発 、バイオ炭製造および施用の 地域循環モデルの構築 、バイオ炭およびバイオ炭堆肥による 土壌炭素貯留効果の総合評価 を実施。
2022	NEDO （日本）	バイオ炭製造の 低コスト化 、農作物の増収、高品質化に資する 微生物添加バイオ炭の製造 を中心に研究開発が開始。（GI基金）

- 国内では、利用拡大に向けた研究開発の他、民間企業において用途拡大（バイオ炭のコンクリート混和材利用等）に係る研究開発が進められている。

みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業のうち農林水産研究の推進 農林水産分野における炭素吸収源対策技術の開発 「農地土壌の炭素貯留能力を向上させるバイオ炭資材等の開発」

◆ 事業概要

- 農林水産業・食品産業の競争力強化に向け、国主導で実施すべき重要な研究分野について、戦略的な研究開発を推進
- 研究開発と研究成果の社会実装を効果的に行えるよう、知財マネジメントの強化等の環境整備を一体的に実施



◆ 研究内容

- ① 農地土壌の炭素貯留、肥効、N₂O排出削減に資する**バイオ炭混合資材等の開発**
 - ・N₂O低排出型バイオ炭資材の開発
 - ・鶏ふんを原料とするバイオ炭開発
- ② 地域で循環する**バイオ炭製造とその施用のモデル構築**
 - ・地域バイオマスによるバイオ炭製造技術の開発と日本版バイオ炭規格の作成
 - ・国内各地域でのバイオ炭施用試験（異なる栽培体系での実証試験）
- ③ **バイオ炭およびバイオ炭堆肥による土壌炭素貯留効果の総合評価**
 - ・バイオ炭生産資源評価
 - ・農地炭素貯留データベースとマッピング
 - ・J-クレジット組織化とLCA

◆ 事業期間

- 令和2～6年度

◆ 実施体制

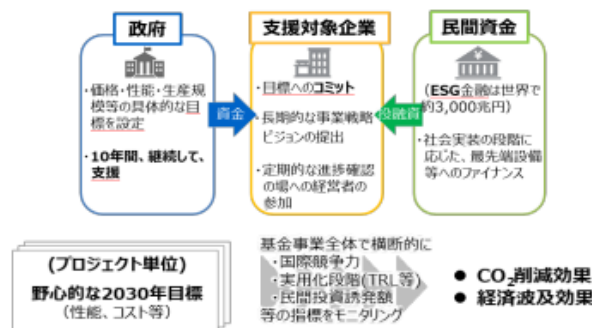
- 福井県、立命館大学、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 等

グリーンイノベーション基金事業

食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発 「農業副産物を活用した高機能バイオ炭の製造・施用体系の確立」

◆ 事業概要

- 2050年カーボンニュートラルの実現に向け、NEDO^{*1}に2兆円の基金を造成
- ^{*1}：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 野心的な目標にコミットする企業等に対して、最長10年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援



◆ 取組内容

- バイオ炭の普及拡大を図るため、バイオ炭の製造・施用コストを削減するとともに、農作物の生育促進などを助ける有用微生物の機能を付与することにより、農作物の収量性を向上させる**高機能バイオ炭を開発**する
- 農地炭素貯留の取組によって生産された農産物の「環境価値」を客観的に評価する手法を確立し、当該価値を取引価格に転嫁できるようにすることで、バイオ炭農法の収益性を改善し、農業者の導入インセンティブを付与する

◆ 事業期間

- 令和4～12年度

◆ 実施体制

- 株式会社ぐるなび、片倉コープアグリ株式会社、ヤンマーエネルギーシステム株式会社、全国農業協同組合連合会、（高機能バイオ炭製造実証を行う）各地の農業協同組合、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構

海洋CDR（二酸化炭素除去技術）の分類

分 類	細分類
海洋肥沃化 (Ocean fertilisation)	
海洋アルカリ度の向上 (Ocean alkalinity enhancement)	
ブルーカーボン管理 (Blue carbon management)	
その他の海洋CDR アプローチ	人工湧昇 (Artificial Upwelling)
	陸上バイオマス（作物 残渣または丸太）投棄 (Terrestrial biomass dumping)
	海洋バイオマスCDRオプ ション (Marine biomass CDR options) ： 大型海藻養殖 など
	海水からのCO ₂ の抽出 (貯蔵あり) (Extraction of CO ₂ from seawater (with storage))

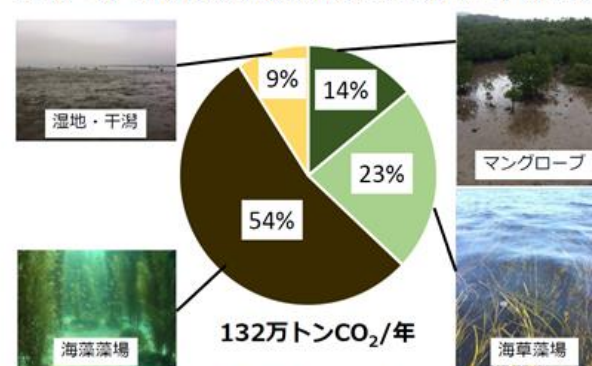
- 海洋に大気よりも長いタイムスケールでCO₂が、追加貯蔵できる可能性があり、海洋CDRの方法として、海洋肥沃化、海洋アルカリ度の向上、ブルーカーボン管理、大型海藻養殖などを含む他の海洋CDRアプローチが提案されている。
- 国連環境計画（UNEP）でブルーカーボンシンク（吸収源）とされるのは、マングローブ、塩性湿地、海草の3つである。
- 現時点で海藻は、ブルーカーボンシンクとされていないが、大型海藻によるCO₂吸収ポテンシャルは非常に大きいと期待されている。
- 欧米では海洋CDRに関するプロジェクトが進められ、米国、豪州では生態系保全の観点からもブルーカーボン分野の研究が積極的に行われ、インベントリへの算定や独自の評価手法開発にも着手している。
- IPCC湿地ガイドラインへの海藻のインベントリ化を目指し、ブルーカーボン評価モデルを2020年度農水省事業にて作成。海藻の知見が多い日本への期待は大きい。

Global Distribution of Blue Carbon Ecosystems



出所：「the Blue carbon initiative」<https://www.thebluecarboninitiative.org/>

<ブルーカーボンによる吸収ポテンシャルの全国推計>

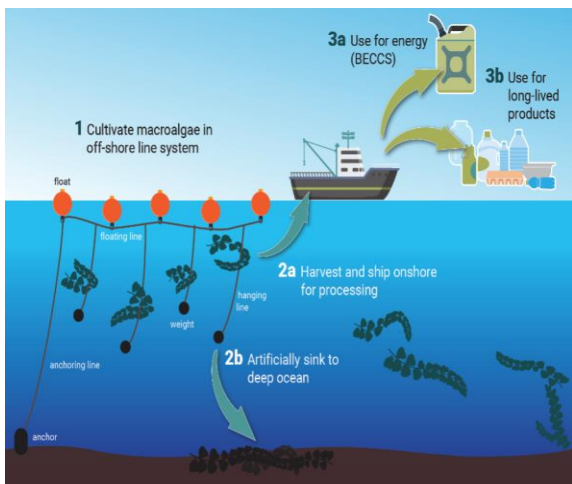


出所：桑江ら、土木学会論文誌B2（2019）

出所：IPCC Sixth Assessment Report「Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change」p1268～p1273

- 海外ではVerra、The Gold Standard等の民間企業やNGO、国内ではジャパンプルーエコノミー技術研究組合がブルーカーボン管理のクレジット化などを介して生態系保全に取り組んでいる。
- 大型海藻養殖に関する技術開発が進行中。対象は沿岸及び沖合となり、特に欧米では、沖合養殖、モニタリング、LCA評価なども含んだ多面的なプロジェクトが進められている。
- 大型海藻類の沿岸/沖合養殖では海洋環境やデータ収集・評価方法などに違いがあり、海域に合わせた海洋観測技術開発が必要。
- 多数のコベネフィットを活用する実証実験（洋上風力発電での海藻養殖、魚介類との複合養殖等）が行われている。

大型海藻養殖



大型海藻養殖で得られたバイオマスを長期貯蔵し、単位面積当たりのCDR率向上

海藻養殖場への出資（Amazon社）



風力発電所内の空きスペースを利用した海藻養殖拡大を実施

出所：EFI（Energy Futures Initiative.）“Uncharted Waters: Expanding the Options for Carbon Dioxide Removal in Coastal and Ocean Environments.” December 2020.

出所：North Sea Farmers (NSF)「AMAZON FUNDS THE WORLD'S FIRST COMMERCIAL-SCALE SEAWEED FARM LOCATED BETWEEN OFFSHORE WIND TURBINES」

ブルーカーボン管理

TRL	GtCO ₂ /年	\$ /tCO ₂	m ² /tCO ₂	固定期間	効果検証	日本での実施
2.5	<1.0	—	0	○	済	○

出所：IPCC Sixth Assessment Report「Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change」

大型海藻養殖

TRL	GtCO ₂ /年	\$ /tCO ₂	m ² /tCO ₂	固定期間	効果検証	日本での実施
—	<1.0	131	333	○	—	—

出所：DOE MARINER Project review

Pros

- ・ 排他的経済水域の広さ（世界第6位）/海岸線の長さ
- ・ 土地、水資源の競合がない
- ・ 多くのコベネフィット
- ・ 海藻養殖技術の保有
- ・ 藻場造成技術の保有
- ・ 発展途上国へ展開（技術移転）

Cons

- ・ 気候変動等の環境変化（藻場減少）
- ・ 産業従事者（関連水産業）/関連研究者の減少
- ・ 藻場造成・大型システム設置のコスト
- ・ 漁業権及び沖合漁場の使用権利
- ・ 評価方法が未確立（CO₂吸収能評価、賦存量、環境影響等）

ブルーカーボン管理/ 大型海藻養殖（技術開発動向）

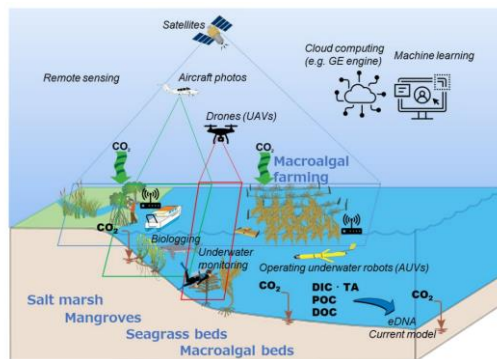
- 欧米では、**海洋CDR**や**大型海藻養殖（沖合養殖含む）**に関して総合的な研究開発がプロジェクト体制で進められている。日本では、要素技術の開発は進められているが、欧米のような規模化のための生産技術や観測技術などの多面的な研究開発への取り組みは現状見られない。
- 世界的にも**自主的クレジット制度**（日本：Jブルークレジット）が整備されてきており、クレジット認証のために、科学的に**CO₂吸収能評価**、**賦存量管理**を把握するための**海洋観測技術**の開発が進められている。

Jブルークレジット[®]申請発行推移

	2020	2021	2022
プロジェクト数	1	4	21
合計発行数量（t-CO ₂ ）	22.8	80.4	3733.1

出所：ジャパンブルーエコノミー技術研究組合 HP資料よりNEDO技術戦略研究センター作成

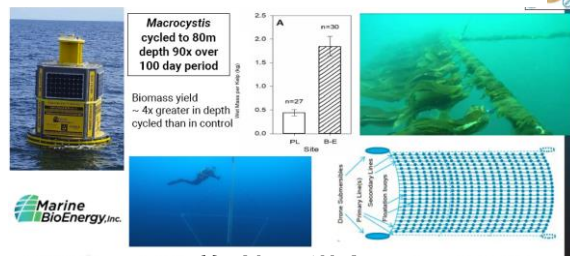
ブルーカーボンの観測技術と解析ツール



ブルーカーボン生態系の面積と活動量を正確に把握するため、衛星画像、ドローン、水中ドローン撮影、潜水作業など海洋観測によるモニタリングが必要

出所：ICEF「Blue Carbon Roadmap- Carbon Captured by the World's Coastal and Ocean Ecosystems」2023年1月

米国DOE MARINERプロジェクト



沖合養殖、モニタリング、LCA評価なども含み、多面的に進められている

出所 <https://arpa-e.energy.gov/mariner-annual-review-2021>

ブルーカーボン管理/大型海藻養殖に関するプロジェクト概要

実施機関	プロジェクト名	概要
DOE (米国)	MARINERプロジェクト	エネルギー用途のバイオマスとして大型海藻養殖をプロジェクト化。大型藻類（コンブ）の種苗から収穫（沖合養殖開発も含む）、モニタリング、LCA評価まで22のプロジェクトを実施。
DOE (米国)	SEA CO ₂ プロジェクト	海洋CDR手法における測定、検証するためのセンサー技術や海洋炭素輸送・貯蔵モデルの解明の研究開発を実施
欧州委員会	Ocean NETsコンソーシアム	海洋ベースのNETsの研究推進を目的としたOcean NETsコンソーシアムを結成。
欧州委員会	EUインテグレート・プロジェクト	既存の魚介類養殖施設から排出される栄養塩や有機物を活用した多栄養段階統合養殖（IMTA）に関するプロジェクト
Amazon社 (米国)	North Sea Farm 1プロジェクト	オランダ・アムステルダム沿岸の風力発電所内の空きスペースを利用した海藻養殖拡大を実施。海藻の養殖方法を試験・改善や海藻の炭素を吸収能の研究を実施。
NEDO (日本)	ムーンショット型研究開発事業	ムーンショット目標4「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」にてブルーカーボン関連研究が1件採択
NEDO (日本)	グリーンイノベーション基金事業	食料・農林水産業のCO ₂ 等削減・吸収技術の開発/漁港を利活用した海藻バンクによるブルーカーボン生態系拡大プロジェクトにおいて海藻育成用基盤ブロックの開発

ページ	文献
1, 2 (共通)	1: IEA, Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021. https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050 2: ICEF, ICEF 2020 Roadmap: Biomass Carbon Removal and Storage (BiCRS), 2021. https://www.icef-forum.org/roadmap/ 3: L.L. Taylor, C.T. Driscoll, P.M. Groffman, G.H. Rau, J.D. Blum, and D.J. Beerling, Biogeosciences, 18, 169-188, 2021. https://bg.copernicus.org/articles/18/169/2021/ 4: M. Kuittinen, C. Zernicke, S. Slabik, and A. Hafner, Archit. Sci. Rev., 2021. https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1896471 5: M. Fasihi, O. Efimova, C. Breyer, J. Clean. Prod. 224, 957-980, 2019. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619307772 6: D.W. Keith, G. Holmes, D.St. Angelo, K. Heidel, Joule 2, 1573-1594, 2018. https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(18)30225-3#%20 7: 室井高城, (株) シーエムシーリサーチ, 2021. https://cmcre.com/archives/78988/ 8: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, The National Academies Press., Washington, DC, 2019. https://nap.nationalacademies.org/catalog/25259/ 9: D.J. Beerling, E.P. Kantzas, M.R. Lomas, P. Wade, R.M. Eufrasio, P. Renforth, B. Sarkar, M.G. Andrews, R.H. James, C.R. Pearce, J.-F. Mercure, H. Pollitt, P.B. Holden, N.R. Edwards, M. Khanna, L. Koh, S. Quegan, N.F. Pidgeon, I.A. Janssens, J.Hansen, and S.A. Banwart., Nature 583, 242-248, 2020. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9 10: D.E. Clark, E.H. Oelkers, I. Gunnarsson, B. Sigfusson, S.O. Snabjornsdottir, E.S. Aradottir, and S.R. Gislason, Geochimica et Cosmochimica Acta, 2792020, 45-66, 2020. https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.03.039 11: C. Myers, and T. Nakagaki, Environ. Res. Lett. 15 124018, 2020. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abc217 12: A.T. Kearney Energy Transition Institute., 2019. https://www.energy-transition-institute.com/documents/17779499/17781915/negative-emissions-technologies.pdf/6b380603-b436-6003-7abb-93a8124f9357?t=1571119906000 13: T. Terlouw, C. Bauer, L. Rosa, M. Mazzotti, Energy Environ. Sci., 14, 1701-1721, 2021. https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ee/d0ee03757e#!divRelatedContent&articles 14: IEA, ETP Clean Energy Tech. Guid., 2021. https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide

ページ	文献
1, 2 (共通)	15: Coalition for Negative Emission, The case for Negative Emissions, 2021. https://coalitionfornegativeemissions.org/wp-content/uploads/2021/06/The-Case-for-Negative-Emissions-Coalition-for-Negative-Emissions-report-FINAL.pdf 16: 桑江 朝比呂, 吉田 吾郎, 堀 正和, 渡辺 謙太, 棚谷 灯子, 岡田 知也, 梅澤 有, 佐々木 淳, 土木学会論文集B2(海岸工学), 75, 10-20, 2019. https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/75/1/75_10/article/-char/ja/ 17: Sabine Fuss, , W.F. Lamb, M.W. Callaghan, J. Hilaire, F. Creutzig, T. Amann, T. Beringer, W.O. Garcia, J. Hartmann, T. Khanna, G. Luderer, G.F. Nemet, J. Rogelj, P. Smith, J.L.V. Vicente, J. Wilcox, M.M.Z. Dominguez, and J.C. Minx, Environ. Res. Lett., 13, 063002, 2018. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f/meta 18: M.S. Blondes, M.D. Merrill, S.T. Anderson, and C.A. DeVera, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018, 5079, 29, 2018. https://doi.org/10.3133/sir20185079. 19: P. Kelemen, S.M. Benson, H. Pilorge, P. Psarras, and Jennifer Wilcox, Front. Clim., 1, 2019. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2019.00009 20: ICEF, Roadmap: Carbon Mineralization, 2021. https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2021_roadmap.pdf 21: IPCC, SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 °C, 2019. https://www.ipcc.ch/sr15/ 22: World Economic Forum, McKinsey & Company, Nature and Net Zero, 2021. https://www.weforum.org/reports/nature-and-net-zero 23: Goldman Sachs Group Inc, Carbonomics, 2021. https://www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/carbonomics-gs-net-zero-models/report.pdf 24: NGFS, Scenarios Portal, 2022. https://www.ngfs.net/ngfs-scenarios-portal/data-resources 25: A. Hornung, F. Stenzel, and J. Grunwald, Biomass Conv. Bioref., 2021. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01284-5 26: J. Streffler, T. Amann , N. Bauer, E. Krieglner, and J. Hartmann, Environ. Res. Lett., 13,034010, 2018. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4 27: J.O. Asibor, P.T. Clough, S.A. Nabavi, and V. Manovic, J. Env. Man., 294, 113039, 2021. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721011014 28: J. Full, S. Ziehn, M. Geller, R.Miehe, and A. Sauer, GCB Bioenergy, 14, 597-619, 2022. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12932 29: J.A. Bennett, M. Abotalib, F. Zhao, and A.F. Clarens, Int. J. Greenh. Gas Control., 111 ,103468, 2021. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583621002206

ページ	文献
1, 2 (共通)	30: S. G.-Freites, C. Gough, and M. Roder, Biom. Bioe. 151, 106164, 2021. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953421002002 31: M. Bui, D. Zhang, M. Fajardy, and N.M. Dowell, Int. J. Hydrog. Energy, 46, 15298-15321, 2021. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921005267 32: S. Neto, A. Szklo, and P.R.R. Rochedo, Int. J. Greenh. Gas Control., 110, 103401, 2021. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583621001535#! 33: IEA, World Energy Outlook 2022, 2022. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022 34: IPCC, WGIII AR6, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

- USGS
<https://pubs.usgs.gov/sir/2018/5079/sir20185079.pdf>
- Project vesta@Carbon180
<https://www.vesta.earth/>
- PALEOCARBON
<https://cordis.europa.eu/project/id/840799>
- D.J. Beerlingら報告
<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2448-9>
- The Future Forest Company
<https://thefutureforestcompany.com/>
- KCAC Mine Carbon Mineralization Field Test
<https://netl.doe.gov/project-information?p=FWP-FEW0278>
- DETAILS
<https://cordis.europa.eu/project/id/101018312>
- Web of Science(2023年4月10日アクセス)において、以下の検索式で検索(関連論文数)
ALL=("Enhanced weathering" or "Enhanced rock weathering")

- バイオ炭をめぐる事情（農林水産省）2023年3月アクセス
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/attach/pdf/tuchi_kanren-10.pdf
- バイオ炭の農業利用と脱炭素～国内外の動向と今後の展望（岸本, 2022）
https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/18/1/18_36/pdf/-char/ja
- Appendix 4 Method for Estimating the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Ap4_Biochar.pdf
- Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: a critical review (Terlouw et al., 2021)
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d0ee03757e>
- Sustainable Biochar (Yale University HP)
<https://yao.research.yale.edu/research/sustainable-biochar>
- Web of Science（2023年4月10日アクセス）において、以下の検索式で検索（関連論文数）
ALL =((biochar AND "carbon dioxide removal") OR (biochar AND "negative emissions") OR (biochar AND "soil sequestration") OR (biochar AND "soil carbon sequestration") OR (biochar AND "soil C sequestration"))
- USDA Sustainable Agriculture Research and Education (SARE)
<https://www.sare.org/>
- CarboSeq (EJP SOIL)
<https://ejpsoil.eu/soil-research/carboseq>
- TRUESOIL (EJP SOIL)
<https://ejpsoil.eu/soil-research/first-external-call-projects-selected/truesoil>
- Soil C Cycling in Irrigated Agroecosystems (USDA Agriculture research Service)
<https://www.ars.usda.gov/research/project/?accnNo=440770>
- 農地土壌の炭素貯留能力を向上させるバイオ炭資材等の開発（農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究）
<https://www.affrc.maff.go.jp/docs/project/jisseki/2020/index.html>
- 清水建設株式会社 プレスリリース バイオ炭を用いた環境配慮型コンクリートを実工事に初適用
<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2023/2022070.html>
- 立命館大学日本バイオ炭研究センター・バイオ炭コンソーシアムシンポジウム資料
<https://www.ritsumeikan-carbon-minus.org/>

- 海洋CDRの分類 (2023年4月13日アクセス)
- IPCC Sixth Assessment Report「Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change」
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf p1268~p1273
- The blue carbon initiative (2023年4月13日アクセス)
<https://www.thebluecarboninitiative.org>
- ブルーカーボンによる吸収ポテンシャルの全国推計(2023年4月13日アクセス)
- 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計 桑江ら 土木学会論文集B2, Vol.75, No.1, 10-20, 2019.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/75/1/75_10/_pdf
- EFI (Energy Futures Initiative.) "Uncharted Waters: Expanding the Options for Carbon Dioxide Removal in Coastal and Ocean Environments." December 2020. (2023年4月13日アクセス)
https://energyfuturesinitiative.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/UnchartedWaters_Report_Dec2020.pdf
- North Sea Farmers (NSF)「AMAZON FUNDS THE WORLD'S FIRST COMMERCIAL-SCALE SEAWEED FARM LOCATED BETWEEN OFFSHORE WIND TURBINES」2023年2月16日 (2023年4月13日アクセス)
<https://www.northseafarmers.org/news/20220216-amazon>
- DOE MARINER Project review (2023年4月13日アクセス)
<https://arpa-e.energy.gov/mariner-annual-review-2021>
- ジャパンブルーエコミー技術研究組合 (2023年4月13日アクセス)
<https://www.blueeconomy.jp/credit/>
- ICEF「Blue Carbon Roadmap-Carbon Captured by the World's Coastal and Ocean Ecosystems」
(2023年4月13日アクセス)
https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2022_roadmap_Blue_Carbon.pdf
- SEA CO₂ プロジェクト (2023年4月13日アクセス)
<https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/sea-co2>
- OceanNETs (2023年4月13日アクセス)
<https://www.oceannets.eu/>
- EU Integrate project (2023年4月13日アクセス)
<https://integrate-imta.eu/>
- NEDO ムーンショット型研究開発事業 (2023年4月13日アクセス)
<https://www.nedo.go.jp/content/100952116.pdf>
- NEDO グリーンイノベーション基金 (2023年4月13日アクセス)
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101602.html