

ネガティブエミッション技術(NETs)について

第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG 2021.1.21

NEDO 技術戦略研究センター (TSC)

バイオエコノミーユニット

海外技術情報ユニット

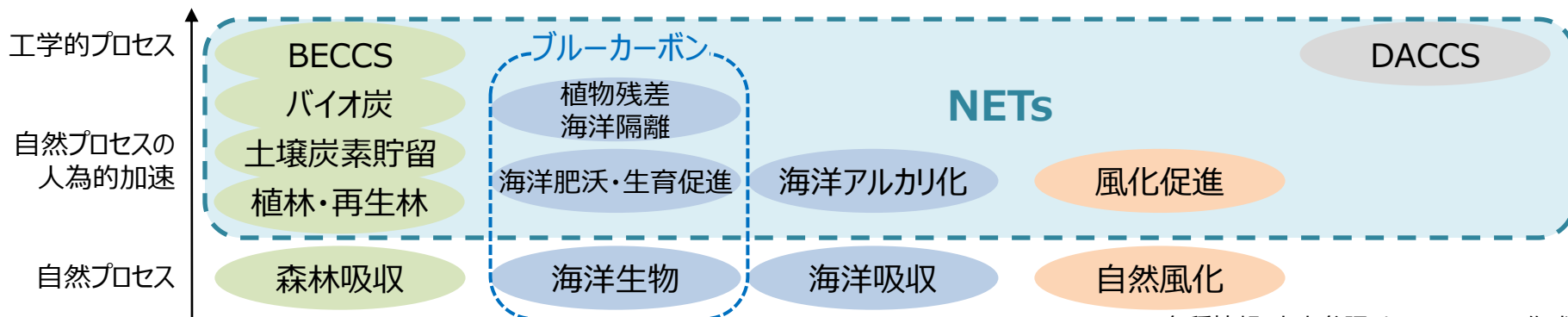
環境・化学ユニット

- ネガティブエミッション技術(NETs)とは
- NETsの位置付け(CO₂削減技術でのポジショニング)
- 技術比較(CO₂削減コスト・ポテンシャル、TRL他)
- 海外動向他
- 技術各論

ネガティブエミッション技術(NETs)1/2

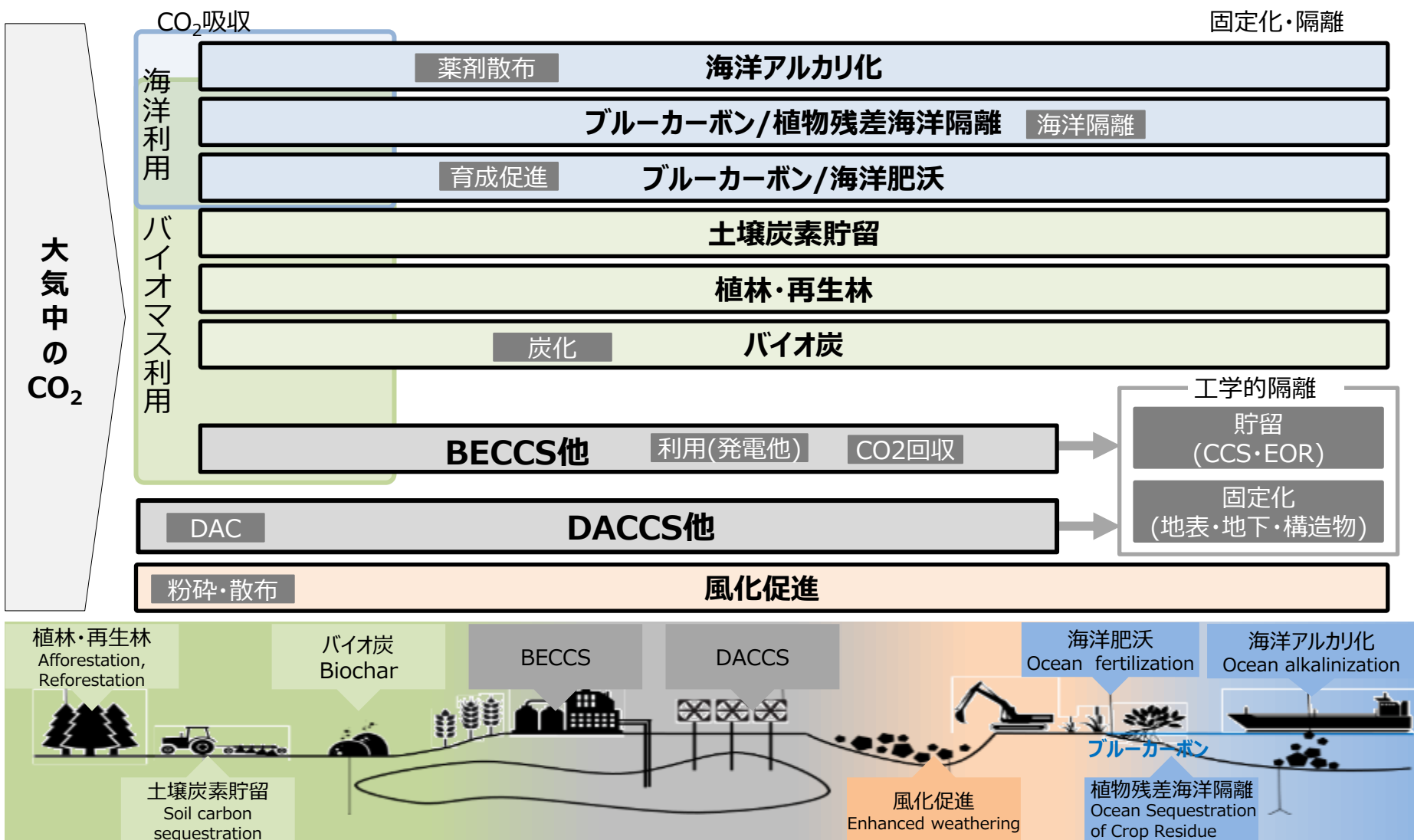
- ネガティブエミッション技術(**NETs**)とは、大気中のCO₂を回収・吸収し、貯留・固定化することで**大気中のCO₂除去** (CDR, Carbon Dioxide Removal)に資する**技術**
- 自然のCO₂吸収・固定化の過程に、人為的な工程を加えることで加速させる技術やプロセス(狭義)

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
ブルーカーボン	海洋肥沃・生育促進 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。
	植物残差海洋隔離 海洋中で植物残差に含まれる炭素を半永久的に隔離する方法（自然分解によるCO ₂ 発生を防ぐ）ブルーカーボンのみならず外部からの投入を含む
海洋アルカリ化	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



ネガティブエミッション技術(NETs)2/2

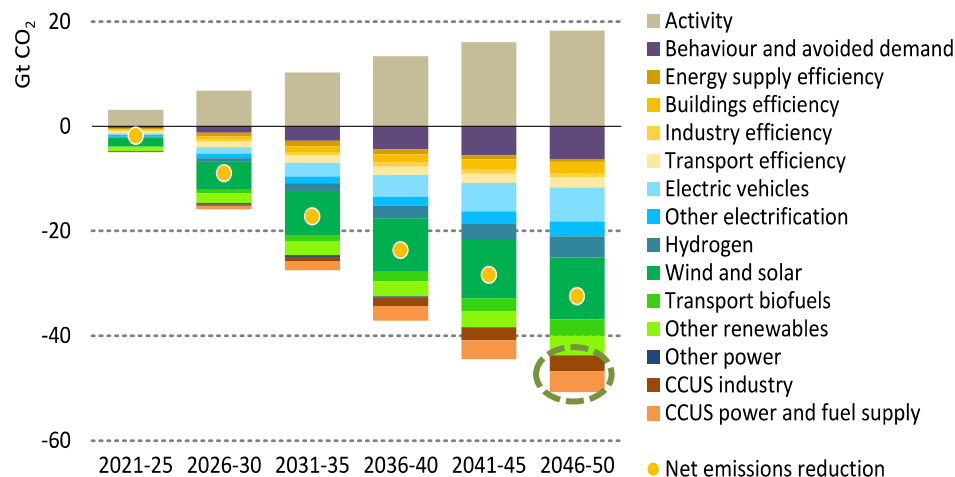
- NETsはCO₂吸収から固定化・隔離までの全体、一部はエネルギー等入を伴う工学的操作を含む
- バイオマス利用やDACは、複数の組み合わせ (DAC/バイオマス × 貯留/固定化)



■ NZE/2050年において、50GtCO₂/年の削減で、DACCS/BECCSは2Gt/年の削減寄与を想定 (NZEでは産業・エネルギー分野を対象としているためNETsとしてDACCSとBECCSを考慮)

CO₂削減寄与の内訳

Figure 2.4 ▷ Average annual CO₂ reductions from 2020 in the NZE

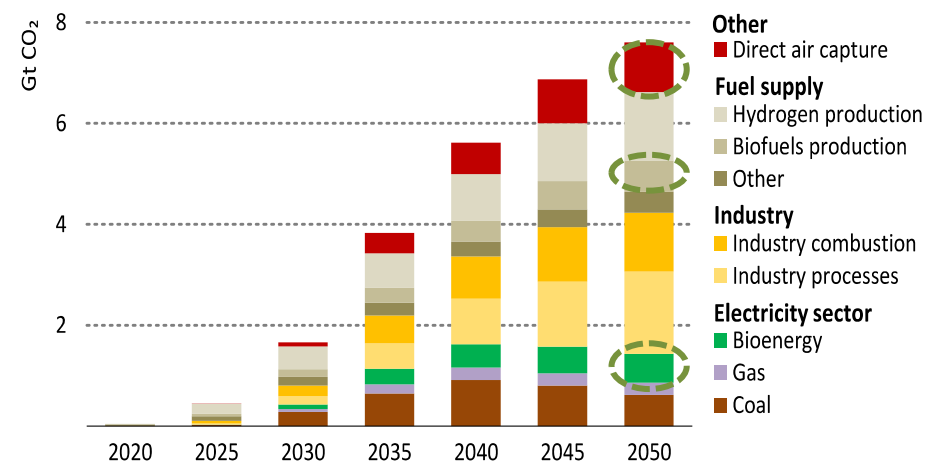


IEA. All rights reserved.

Renewables and electrification make the largest contribution to emissions reductions, but a wide range of measures and technologies are needed to achieve net-zero emissions

CO₂分離・回収の内訳

Figure 2.21 ▷ Global CO₂ capture by source in the NZE



IEA. All rights reserved.

By 2050, 7.6 Gt of CO₂ is captured per year from a diverse range of sources. A total of 2.4 Gt CO₂ is captured from bioenergy use and DAC, of which 1.9 Gt CO₂ is permanently stored.

国際協調の必要性:Carbon dioxide removal (CDR) programmes.

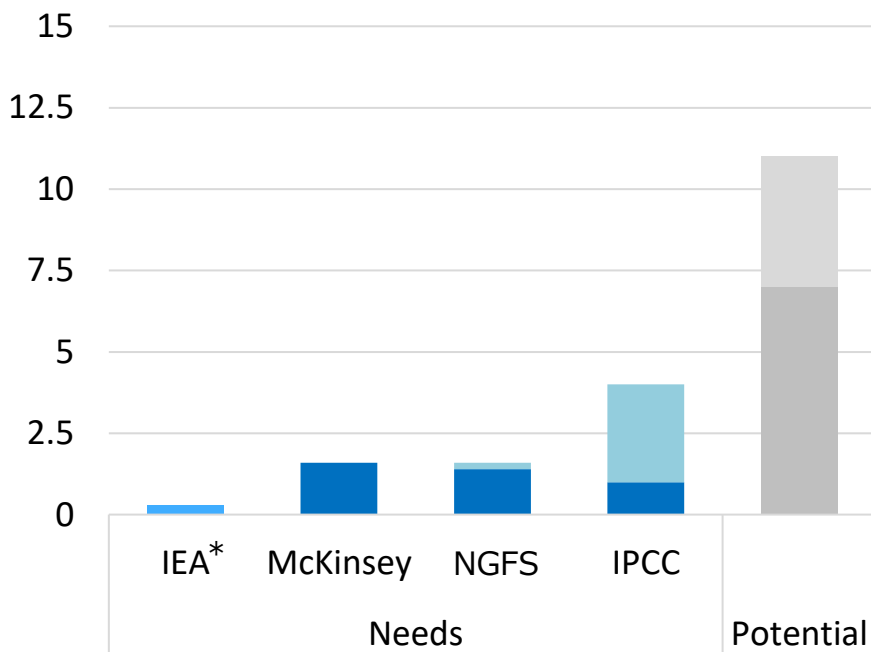
バイオエネルギーやCCUSを搭載したDACなどのCDR技術は、世界レベルでの排出削減を実現するために不可欠。適した土地、再生可能エネルギーの可能性、貯蔵資源がどこにあっても最大限に活用できるよう、これらのプログラムに資金を提供し、認証を行うための国際協力が必要である。国際的な排出権取引メカニズムは、一部のセクターや地域のマイナス排出を相殺する役割を果たす可能性があり、そのようなメカニズムは、市場の機能と整合性を確保するために高度な調整を必要とする。(4 Wider implications of achieving net-zero emissions 4.5 Governments 4.5.5 International co-operation)

ポジショニング2/3 (各機関のNETsのCO₂削減寄与想定)

- 各機関の想定によると、1.5℃排出経路において
NETsの削減寄与の下限は、世界で2030年に1～1.6GtCO₂、2050年に5～7GtCO₂、削減全体の約10%に相当し、再エネ、省エネ、CCUSに次ぐインパクトを想定

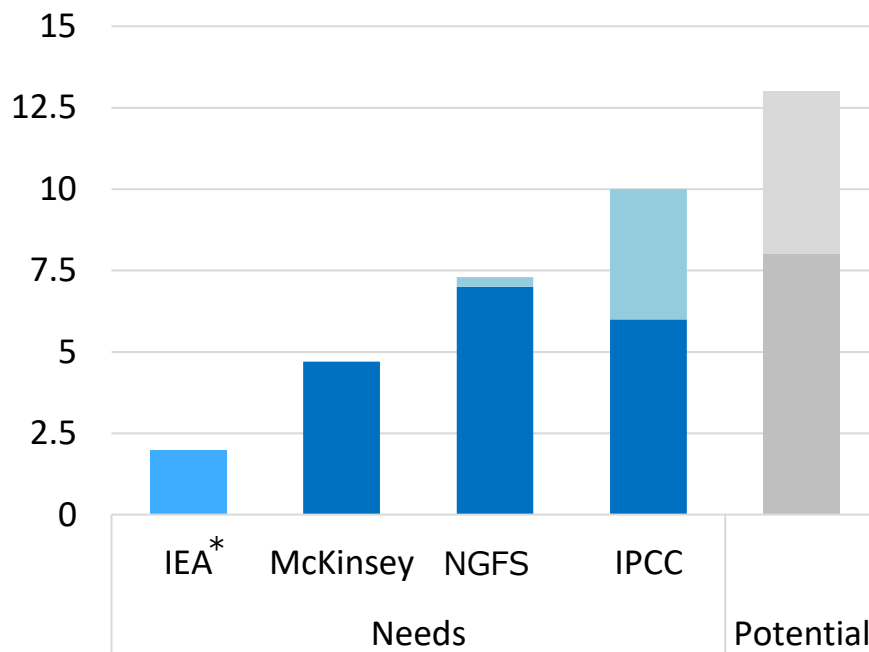
2030年

NETsのCO₂削減寄与・ポテンシャルの推定, GtCO₂/年



2050年

NETsのCO₂削減寄与・ポテンシャルの推定, GtCO₂/年



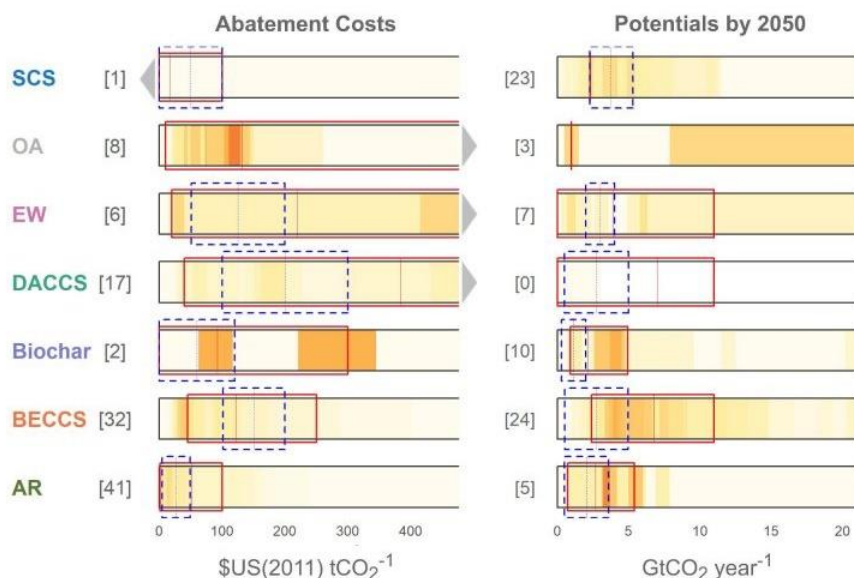
* IEAはDACCSとBECCSのみが対象

以下を元にTSCにて作成

IEA: Net Zero by 2050, NGFS: Network for Greening the Financial System, <https://www.ngfs.net/en/publications/ngfs-climate-scenarios> McKinsey: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/climate-math-what-a-1-point-5-degree-pathway-would-take> Potential: Coalition for Negative Emission, <https://coalitionfornegativeemissions.org/the-case-for-negative-emissions-executive-summary/>

- 1.5°C特別報告書におけるモデル分析の対象となっているNETsは主にBECCSと植林、他のNETsの扱いは、文献のレビュー

Panel A Estimated costs and 2050 potential



Panel B – Literature estimates on costs, potentials (2050) and side effects

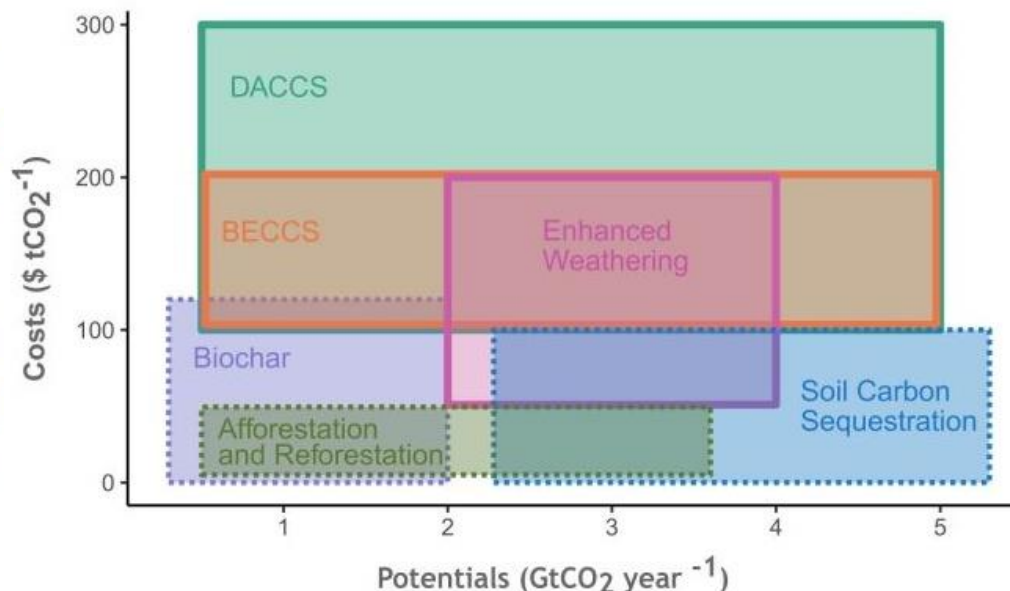


Figure 4.2 | Evidence on carbon dioxide removal (CDR) abatement costs, 2050 deployment potentials, and key side effects. Panel A presents estimates based on a systematic review of the bottom up literature (Fuss et al., 2018), corresponding to dashed blue boxes in Panel B. Dashed lines represent saturation limits for the corresponding technology. Panel B shows the percentage of papers at a given cost or potential estimate. Reference year for all potential estimates is 2050, while all cost estimates preceding 2050 have been included (as early as 2030, older estimates are excluded if they lack a base year and thus cannot be made comparable). Ranges have been trimmed to show detail (see Fuss et al., 2018 for the full range). Costs refer only to abatement costs. Icons for side-effects are allocated only if a critical mass of papers corroborates their occurrence

Notes: For references please see Supplementary Material Table 4.SM.3. Direct air carbon dioxide capture and storage (DACCS) is theoretically only constrained by geological storage capacity, estimates presented are considering upscaling and cost challenges (Nemet et al., 2018). BECCS potential estimates are based on bioenergy estimates in the literature (EJ yr⁻¹), converted to GtCO₂ following footnote 4. Potentials cannot be added up, as CDR options would compete for resources (e.g., land). SCS - soil carbon sequestration; OA - ocean alkalinization; EW- enhanced weathering; DACCS - direct air carbon dioxide capture and storage; BECCS - bioenergy with carbon capture and storage; AR - afforestation.

分類	TRL	削減コスト \$/tCO ₂ *1		削減ポテンシャル GtCO ₂ /年 *2		土地利用 *3 m ² /tCO ₂ /年	削減効果 の確認 *4	日本での実 施の優劣 *5
海洋アルカリ化	3	305	10~600	11.0	2~20	0	要	○
海洋肥沃化	3	67	23~111	4.4	2.6~6.2	0	要	○
植物残差海洋隔離	2	72	50~94	0.9	0.7~1	0	済	○
風化促進	4	128	50~200	3.0	2~4	29	要	○
DACCS	6	172	30~600	3.5	1~6	4	済	△
BECCS	7	135	60~200	5.6	0.5~15	379	済	△
植林・再生林	9	28	5~50	2.3	0.5~3.6	978	済	○
土壌炭素貯留	7	28	-45~100	4.1	0.4~8.6	0	要	○
バイオ炭	6	75	30~120	2.6	0.3~75	580	済	○
マテリアルとしての固定化（DAC+炭酸塩化+土木・建築利用、木造建築、木質素材の循環利用）								

*1:2050年想定のコ₂削減コストの中央値

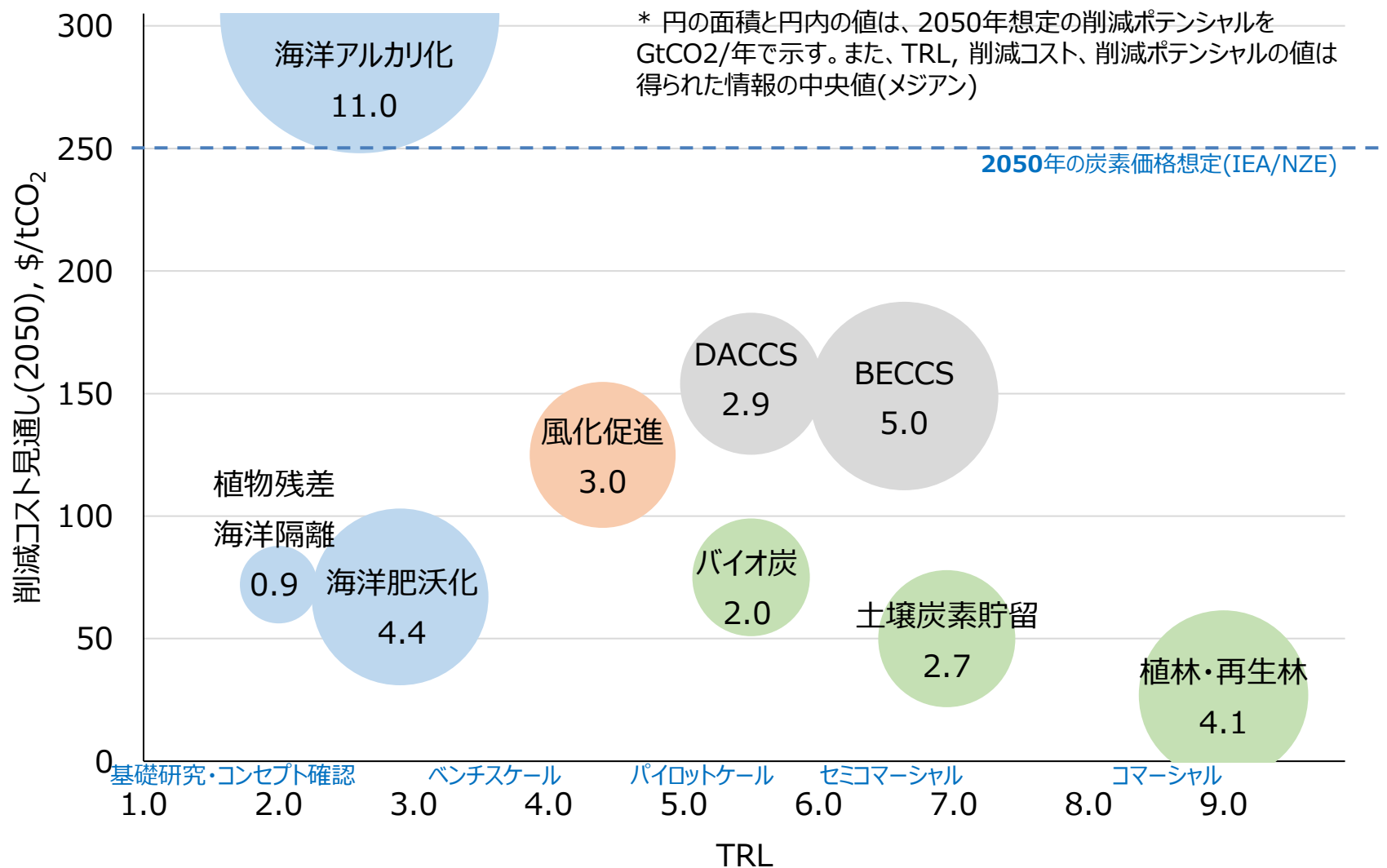
*2:2050年想定のコ削減ポテンシャルの中央値、陸上バイオ系は重複あり

*3:年間1トンのCO₂削減に必要な面積、植林・再生林978は北海道全体(8.3万km²)で0.85億tCO₂/年の削減に相当、PVは10程度(効率18%, 稼働率12%, 0.5kgCO₂/kWhの電力を代替の場合)

*4:CO₂削減効果が確認されコンセンサスを得ているか

*5:諸外国との比較で日本での実施の優劣、DACCSとBECCSはCCSが必須でCCS敵地の点で日本は劣後

- NETsのほとんどが2050年に\$200/tCO₂以下の削減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



エリア	概要
米国 	■ 既存の石炭やフラッキング産業を新エネルギー化推進と共に転換を図る狙い。採掘跡のCCS転用と化石燃料の将来の有効活用に重点化、<u>DACCS/BECCS/海藻類炭素固定を国のプロジェクトとして推進</u> ・ インフラ投資法案（2021年11月）において、DACS/CCUS関連の地域別ハブの建設や検査、標準化を対象に含め出資。 ・ DACCSへの基金として合計4,400万ドル（48.4億円）。DACCSとCCUSの混合プロジェクトやBECCSとCCUS混合プロジェクトを実施。海藻・海草類等による炭素固定化※のための基金設立も。 ※ “algae-based carbon capture”
中国 	■ 中央政府による強力な政策推進に加え、海洋沿岸の省でも独自に計画を策定。<u>風化促進を含むCCUSや海洋におけるネガティブエミッションを推進</u>。 ・ 中国政府は2016年よりブルーカーボンのプロジェクトを開始。2020年には5ヶ年計画を策定。貝や海藻類による炭素固定(※1)プロジェクトを推進。沿岸の山東省威海市でも2021年に「2021-2025年ブルーカーボン発展行動計画」を発表。 ・ 第13次5か年科学技術発展計画（2016年-）において、CO2鉱物化（風化促進）(※2)を含む、CCUS技術のイノベーション推進。また第14次5か年計画(2022年-)では、森林被覆率増加の目標も。 ・ 中国国家自然科学基金等の支援により、海洋のアルカリ化(※3)、環境改善、炭素吸収量増加を実証する研究も実施。 ※1 “microbial carbon pumps”, “Seaweeds (macroalgae) and shellfish farming”等によるアプローチ ※2 “CO2 mineralization and utilization” ※3 “enhancement of alkalinity and precipitation of carbonates in hypoxic coastal eutrophication waters”
欧州 	■ 英国ビジネスエネルギー・産業戦略省による英国の気候変動目標達成と6万件の雇用創出に向けた1億6,600万ポンド（約260億円）の大規模助成プログラム（2021年12月）。<u>DACCS、BECCS、海洋アルカリ化(※1)、CO2鉱物化（風化促進）(※2)を含むPhase-1に進む24のプロジェクトを選定</u>。 ※1 “carbon dioxide removal through ocean alkalinity enhancement” ※2 “capturing CO2 from air and converting it directly into a mineral by-product” ■ ドイツ連邦環境庁がCO2のDACの開発を勧告（2021年11月）。ドイツ連邦環境庁は、ドイツ政府が目標として掲げる2045年カーボンニュートラル達成のためにDACを必要な技術と位置付け、技術開発とスケールアップを進めるよう、政府に促している。 ■ EUが森林・草地など「炭素吸収源」の拡張計画を策定（2021年7月）。気候変動対策として、森林や草地などCO2を吸収する自然界の「炭素吸収源」を拡張する計画案を策定

動向の類別	概要
標準化	■ <u>米国：インフラ投資法案（2021年11月）</u> ・ DACS/CCUS関連の地域別ハブの建設や検査に加え、標準化も対象として含まれている。 ■ <u>中国：沿岸地域での事例（福建省廈門（アモイ）市）</u> ・ ブルーカーボン取引サービスプラットフォームを立ち上げ、漁業を含むブルーカーボン吸収源の基準※を推進 ※ “standards for blue carbon sinks” ■ <u>EU：「Sustainable Carbon Cycles」（2021年12月発表）</u> ・ 欧州グリーン・ディールのFarm to Fork戦略実行のための戦略文書。炭素削減に向けた認証制度の設計の提案も。 CO2の土壌貯留等※を促進するための方向性を提示 ※ “the increase of carbon sequestration in living biomass, dead organic matter and soils by enhancing carbon capture”
税制優遇・補助金 等	■ <u>米国：連邦45Q優遇税制、カリフォルニア州のLCFS（Low Carbon Fuel Standard）制度</u> ・ 連邦45Q優遇税制は、CCSに対する連邦税制優遇制度（2018年施行）、カリフォルニア州のLCFS（Low Carbon Fuel Standard）制度は、低炭素燃料の利用や炭素回収のプロジェクトに対しクレジットを付与し、クレジットをは市場で取引する制度（2011年施行）等。これらの制度により、DACを進める企業に対する公的なサポートが整備されつつある。またDACプラントの立ち上げ計画などの動きも。 ■ <u>EU：「Sustainable Carbon Cycles」（2021年12月発表、上記）</u> ・ CO2の土壌貯留を促進※のための方向性を提示（技術開発のための助成金、EU域内のCCUS市場構築、financial incentiveの提案等）。 ※ “increase the amount of carbon captured and stored in plants and soils” ■ <u>英国：DACCS技術導入への補助金</u> ・ 仏電気大手EDFが率いるコンソーシアムが英国サイズウェルC原子力発電所でのDACCS技術導入に対し、政府により補助金（25万ポンド（約4,000万円））
導入支援	■ <u>企業イニシアチブ：First Movers Coalition（2021年11月にCOP26において、米国ケリー特使と世界経済フォーラムにより発表された、2050年までにネット・ゼロを達成するために必要な重要技術の早期市場創出に向け立ち上げた世界の主要グローバル企業によるイニシアチブ）</u> ・ 参加事業者は、開発初期、実証、試作段階の新たな低炭素技術に対する新たな市場需要を創出するため、現時点では2030年までにそうした技術により提供されるゼロエMISSIONの製品やサービスを購入することをコミット。まず、鉄鋼、海運等のセクターで開始され、今後化学品、DAC等へもコミットを予定。

■ 米国政府発表の2050NZへの道筋では、NETsが削減量の10%前後の寄与

White House, The Long-Term Strategy of the United States

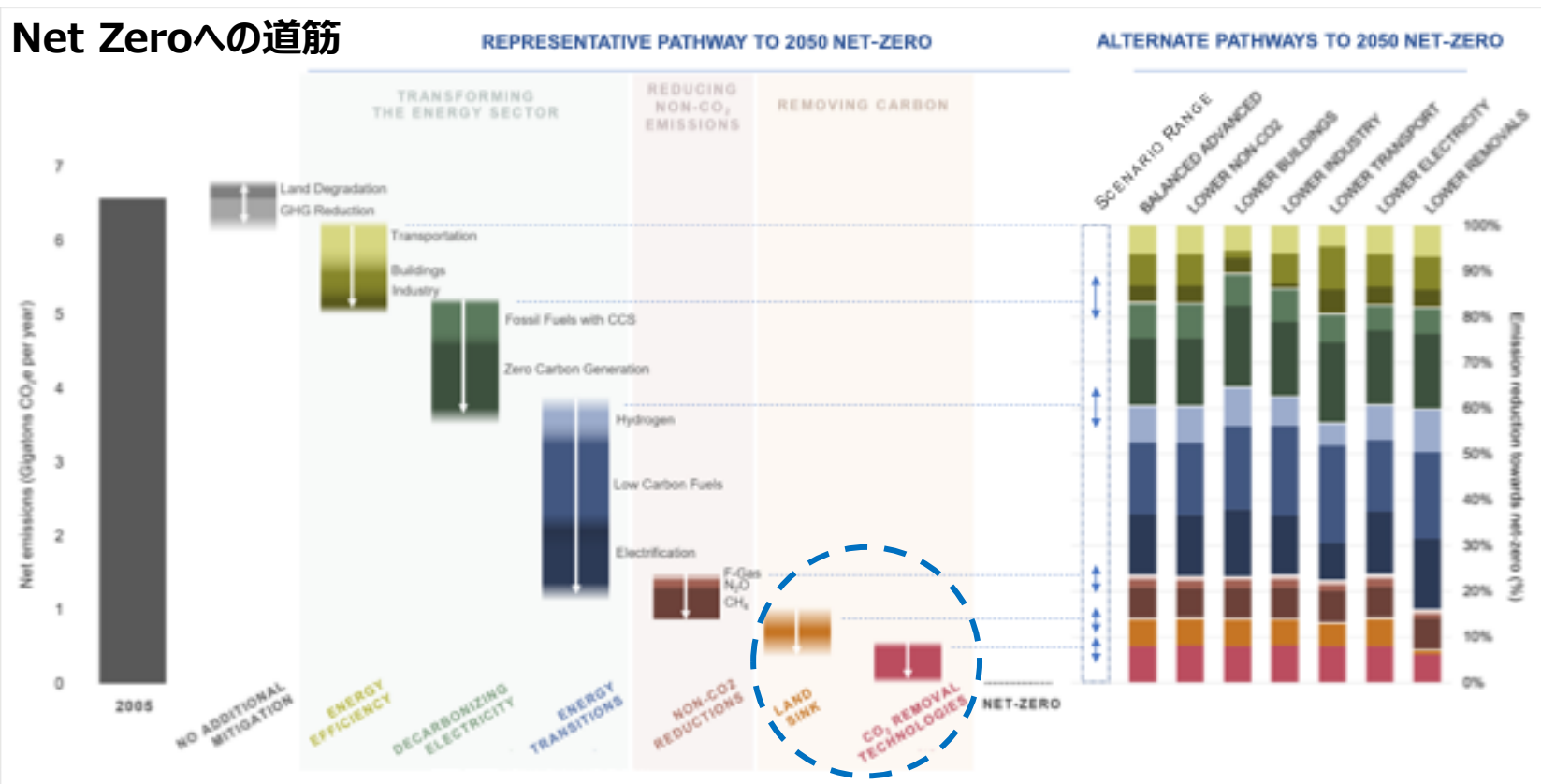
- Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050, Nov.2021

削減寄与に含まれるNETs

FORESTS, AGRICULTURAL LANDS, LAND SECTOR, BIOMASS CARBON REMOVAL AND STORAGE, DIRECT AIR CAPTURE AND STORAGE (DACS), ENHANCED MINERALIZATION, OCEAN-BASED CDR



Net Zeroへの道筋





<100 Dollars



1 Ton



1 Decade

The Carbon Negative Shot target is durable and scalable CO₂ removal under \$100/net metric ton CO₂e within a decade.



Carbon Negative

..but are not limited to, the following:

- Direct Air Capture with Durable Storage
- Soil, ● Carbon Sequestration, ● Biomass
- Carbon Removal and Storage, ● Enhanced Mineralization, ● Ocean-Based CDR,
- Afforestation/Reforestation

昨年11月のRFIから本格的なNETs関連プログラム

【政府】 エネルギー省、大気からギガトンの炭素汚染を除去する Carbon Negative Earth Shotを開始 2021.11.16

To advance the development of this **emerging and necessary industry**, DOE launched Carbon Negative Shot—the U.S. Government's first major effort in CDR.

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-11/Carbon-Negative-Shot-FactSheet.pdf>

イニシアティブを通じて推進する技術に必要な4つの性能要素

1. 回収・貯留で\$100/tCO₂e未満
2. ライフサイクル全体の排出量を確実に考慮（稼働時および構築時に発生する排出量を確実に考慮すること）
3. 高品質で耐久性のある貯蔵で、少なくとも100年間のモニタリング、報告、検証のためのコストが実証されていること
4. 必要なギガトン級の除去が可能であること

【政府】 エネルギー省、建築マテリアルの炭素貯留技術に4,500万ドルを投入2021.11.18

<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-45-million-carbon-storage-technologies-building-materials>

DOEは11月8日、ビルを炭素貯留構造に変換できる技術の開発を支援するため、最高4,500万ドルを提供。「建築マテリアル及び建設技法は、炭素シンクとして大きな有望性を持っている。ARPA-Eは、ここでも大きな変革に取り組む」ARPA-Eは、生産過程で大気中から二酸化炭素を排除し、最終品の中に炭素を貯留することで正味の炭素ネガティブとなる建築マテリアル及びビル設計の開発と実証に取り組むHarnessing Emissions into Structures Taking inputs from the Atmosphere: HESTIAと題するプログラムを開始

CO2ソース(DACや木質材料)によってもNETs

【民間】

●**テスラ**のイーロン・マスク氏は、「最高の二酸化炭素回収技術」を競うコンテストに賞金1億ドルを寄付すると発表。

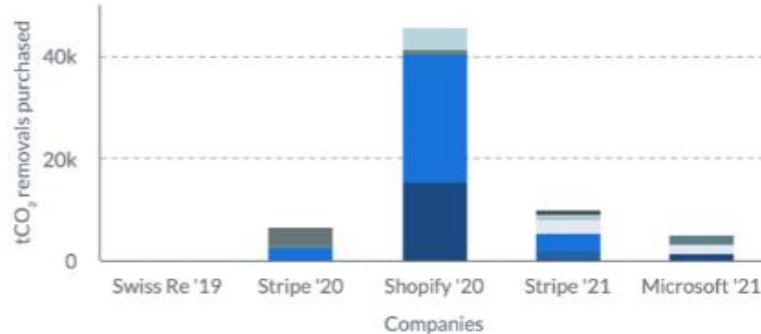
●DACCS分野において、Climeworks、Carbon Engineering、Global Thermostat、Oxy Low carbon Venturesなどスタートアップも活発。

●2025年にカリフォルニア州では農村での廃材焼却を禁止。これを踏まえ石油メジャー**シェブロン**、**マイクロソフト**などが当地特産のアーモンドの古木の廃材の新処理方法により、年間30万トンの炭素を削減する予定。

- VCCとして2019-21年6.5万tCO₂の市場での取引実績（販売：16社、購入：4社）
- 技術は9種類、鉱物化、DACCSの占める割合が大きい
- 直近のVCCの需要(8000万t)にしめるNETs割合の増加が顕著

Negative Emission Platform, Corporate purchases of carbon removal credits, 2021

Corporate purchases 2019-2021



Legend for Corporate purchases:

- DACS
- Enhanced Weathering
- Mineralisation/Carbonation
- Biochar
- Bio-oil
- Ocean Mineralisation
- Carbon Farming
- Ocean Air Capture
- Coastal Enhanced weathering

Stripe's NET portfolio



Stripe's NET portfolio breakdown:

- Bio-oil (3.96%)
- OC (3.47%)
- CF (4.76%)
- DAC (8.79%)
- EW (14.28%)
- CEW (31.72%)
- M/C (33.01%)

Shopify's NET portfolio



Shopify's NET portfolio breakdown:

- DAC (31.7%)
- OAC (1.49%)
- Bio-oil (2.04%)
- Biochar (5.5%)
- CF (8.35%)
- M/C (50.93%)

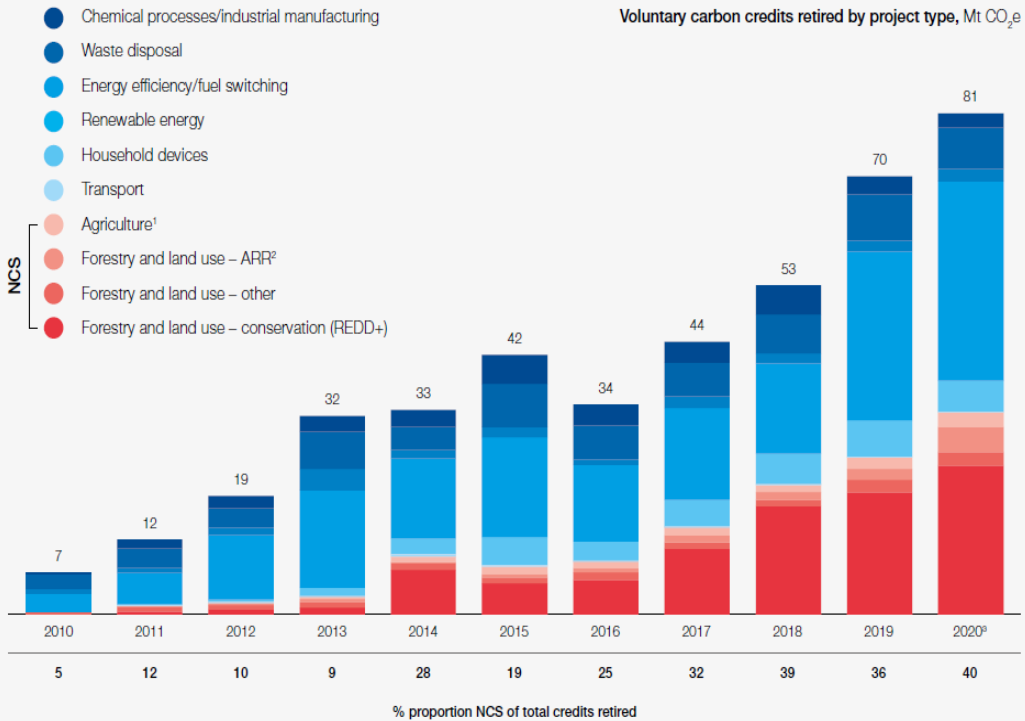
Microsoft's NET portfolio



Microsoft's NET portfolio breakdown:

- Bio-oil (37.74%)
- DAC (26.42%)
- Biochar (35.85%)

World Economic Forum, Mckinsey, Nature and Net Zero, 2021



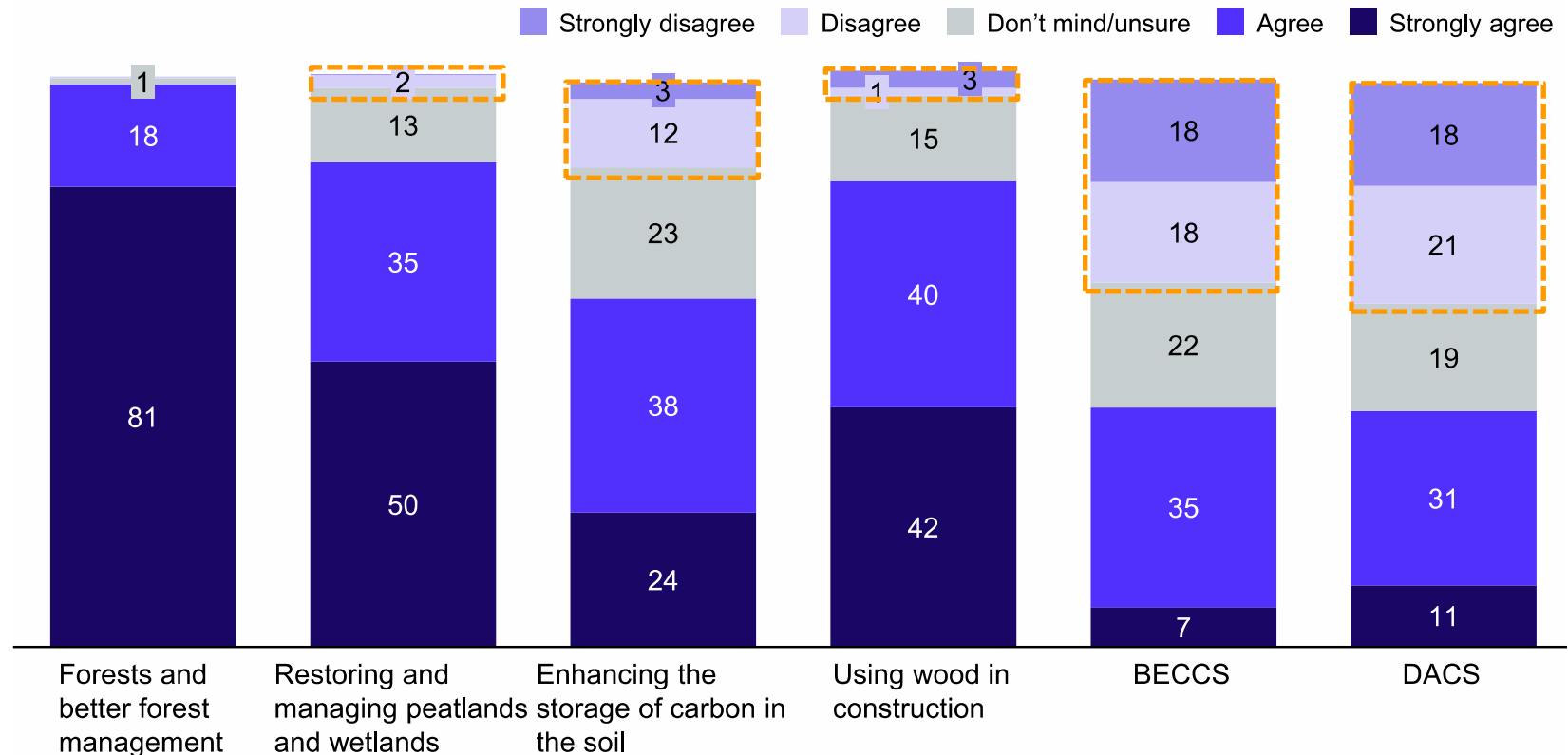
Amazon, Nestle, Shell, Walmartなどの直接投資を含むため左の取引と値は異なる

- BECCSとDACCSは、植物を利用した貯留より懐疑的な見方。地中貯留を利用した方法は、リークや技術の成熟度に関する懸念がその理由

Figure 19:

Responses to whether different removal types should be included in the UK's net-zero plans

Percentage of responses



Coalition for Negative Emissions, 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>

- 植林は京都プロトコルにカウントされていないエリアへ実施、再生林は、自然または人の活動によって減少した森への植林が対象
- 地域に適した品種の選択がCO₂固定化の効果および環境影響に重要
- 草原や農地への植林は生物多様性も含めその効果には注意が必要
- 炭素固定速度を速めるスーパーツリー*などの研究も進む
- 蓄積量の飽和に伴う適切な処理(BECCS, バイオ炭)

(注: 左右の図は縦軸の単位が異なる)

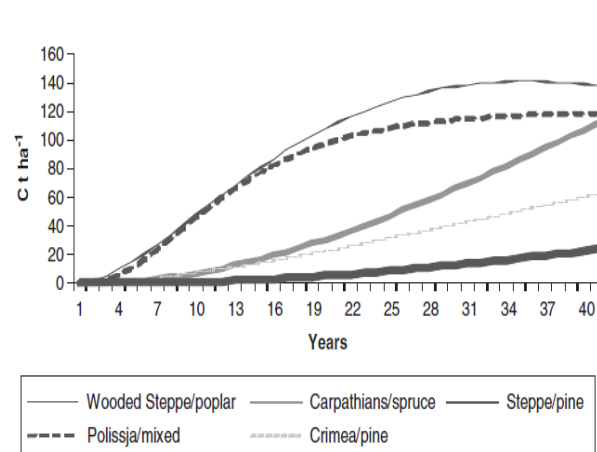


Figure 2 Cumulative carbon uptake by fast-growing tree species across regions in Ukraine, 0% discount rate.⁴⁶

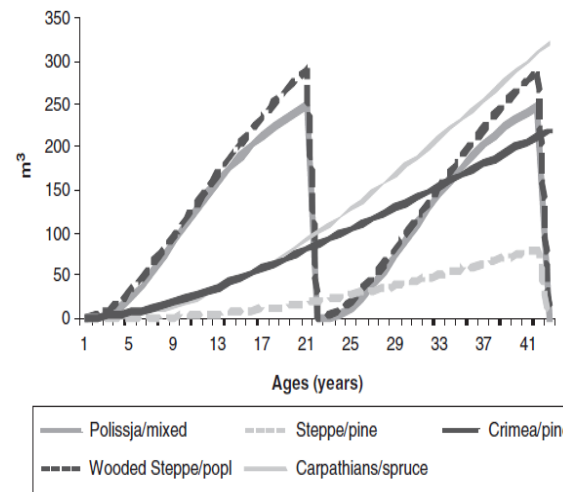
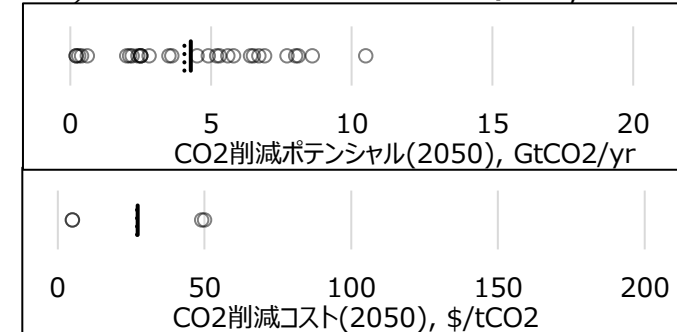


Figure 3 Graphical representation of growth functions of fast growing trees across the regions in Ukraine if the trees are harvested when their growth decelerates.⁴⁶

TRL	GtCO ₂ /年	\$/tCO ₂	M ² /tCO ₂	固定期間	検証	日本での実施
9	4.1	27	978	△	済	○

CO₂削減ポテンシャル・コストのデータ | 平均, 中央値



Pros

- ・日本での実施
- ・低コスト
- ・大きなエネルギー消費を伴う工程がない

Cons

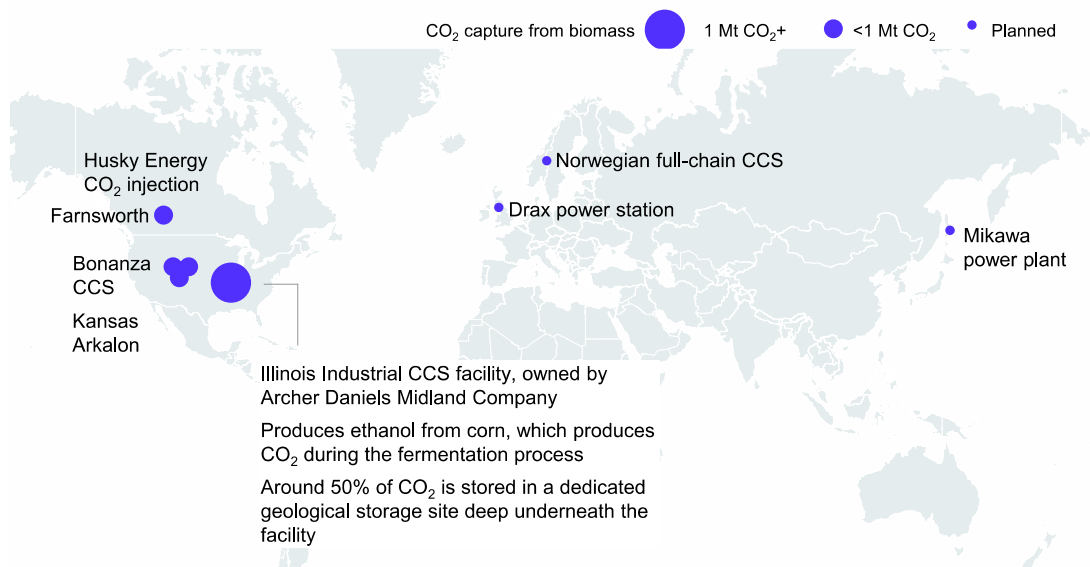
- ・必要土地面積
- ・水の消費
- ・効果の減少、分解等によるCO₂放出の可能性

●一般にバイオマス発電とCCS(EOR)とを組み合わせた技術。大気中CO₂をバイオマスとして固定し、エネルギーなどで活用、発生するCO₂の貯留と組み合わせでネガティブエミッションを実現

●バイオマスからの水素製造やバイオプロセスで発生するCO₂を対象とする場合や、炭酸塩化との組み合わせで固定化する場合も、BECCSに含まれることもある

●2021現在、CO₂回収量で100万t/年規模(エタノール発酵で発生するCO₂が対象)のものを含め、複数のBECCSが北米で稼働中

Locations of operational and planned BECCS facilities

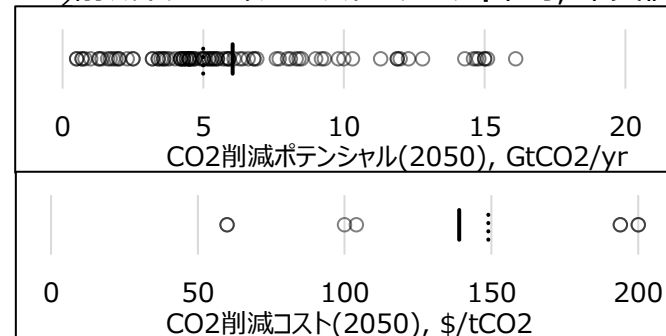


Coalition for Negative Emissions, The case for Negative Emissions, 2021

<https://coalitionfornegativeemissions.org/wp-content/uploads/2021/06/The-Case-for-Negative-Emissions-Coalition-for-Negative-Emissions-report-FINAL.pdf>

TRL	GtCO ₂ /年	\$/tCO ₂	M ² /tCO ₂	固定期間	検証	日本での実施
7	5.0	149	379	○	済	△

CO₂削減ポテンシャル・コストのデータ | 平均, 中央値



Pros

- ・バイオマス発電/分離回収/CCSはほぼ完成された技術
- ・持続可能なエネルギー共有とネガティブエミッションの両立
- ・永久貯留
- ・削減効果の検証が容易

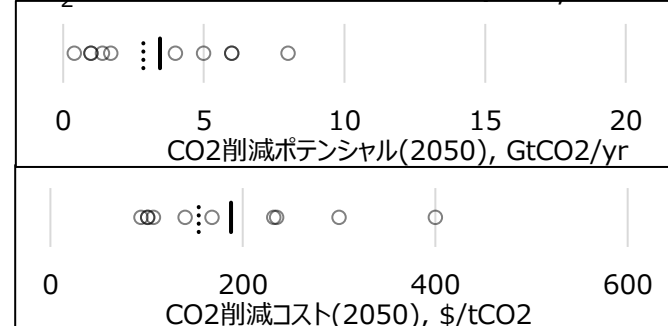
Cons

- ・CO₂削減コスト
- ・日本での実施(CCS)
- ・必要面積
- ・CCSの追加による効率のペナルティ

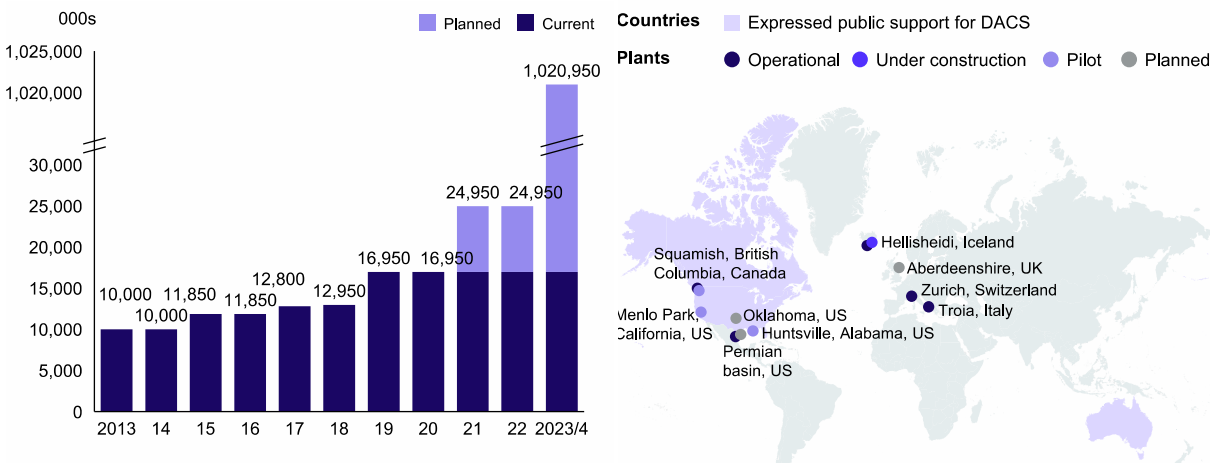
- 工学的プロセス(DAC)で回収した大気中CO₂を、一般には貯留(CCS)することでネガティブエミッションを実現
- DACで得られたCO₂を炭酸塩化等で固定化する場合も、ネガティブエミッションとなる
- 400ppm程度の希薄なCO₂の回収に多くのエネルギー(熱・電気)を消費するため、コストおよびCO₂削減効果の点からエネルギー消費削減が必須
- 方式(吸収液・固体吸収・膜分離、アクティブ・パッシブ等)によってTRLは異なる
- 2021現在、稼働中のDACCSの合計は1.7万tCO₂/年、2024年までに100万tCO₂/年の計画

TRL	GtCO ₂ /年	\$/tCO ₂	M ² /tCO ₂	固定期間	検証	日本での実施
6	2.9	154	4	○	済	△

CO₂削減ポテンシャル・コストのデータ | 平均, 中央値



Pros
・貯留・固定化場所への隣接が可能 ・必要面積が比較的少ない ・永久貯留 ・削減効果の検証が容易 ・世界市場への展開可能性(DAC)
Cons
・CO₂削減コスト ・日本での実施(CCS) ・エネルギー消費



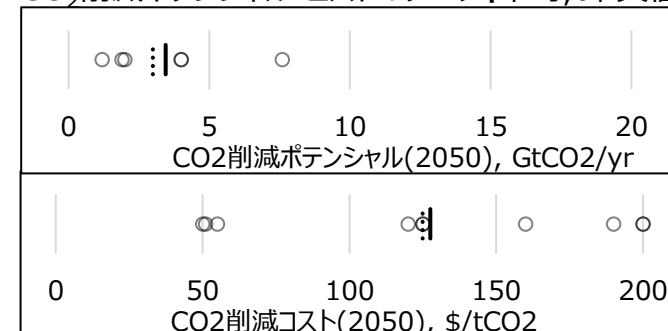
Coalition for Negative Emissions, The case for Negative Emissions, 2021

<https://coalitionfornegativeemissions.org/wp-content/uploads/2021/06/The-Case-for-Negative-Emissions-Coalition-for-Negative-Emissions-report-FINAL.pdf>

- 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を人工的に促進する技術
- 大気中のCO₂の炭酸塩化反応でCO₂を吸収する原理であるため、新規のブレークスルーは必要なく、早期の社会実装の可能性
- CO₂固定量あたりの必要面積が比較的少ない
- 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。日本においては、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であるが特化した研究は少ない
- CO₂削減効果、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	検証	日本での実施
4	3.0	125	29	○	未	○

CO₂削減ポテンシャル・コストのデータ | 平均, 中央値



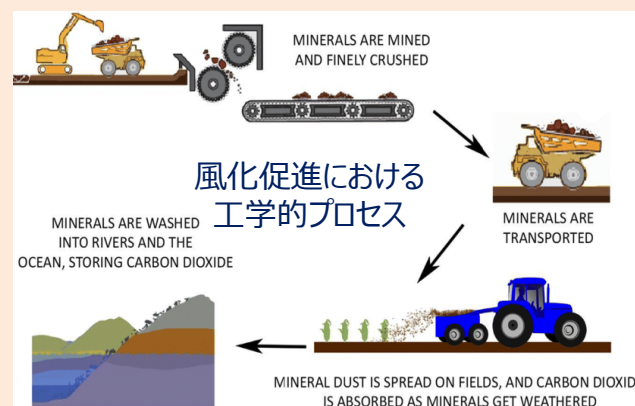
Pros

- ・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削減以外の便益の可能性

Cons

- ・CO₂削減コスト(輸送・粉砕・散布)
- ・CO₂削減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



Climatic Change (2021) 165: 23
<https://doi.org/10.1007/s10584-021-03050-y>

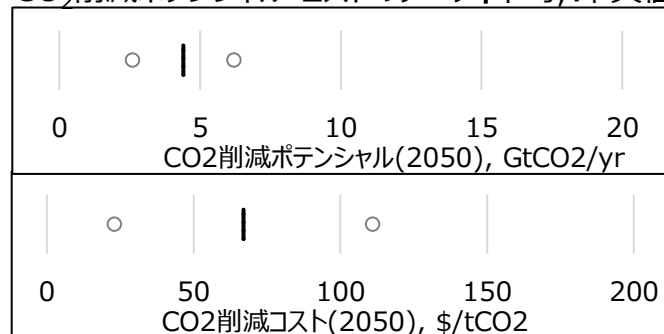
ブルーカーボン(ブルーリソース)

- UNEPにおいて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。
- 海藻は現時点ではブルーカーボンシンク（吸収源）とされていないが、海外および日本においてもブルーカーボン吸収ポテンシャルは大型海藻がメインと考えられている。
- IPCC湿地ガイドラインへの海藻のインベトリー化を目指し、ブルーカーボン評価モデルを作成（2020年度農水省事業）。日本は海藻の知見が多いことから国際的にも期待度が高い。
- 米国、豪州では生態系保全の観点から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。
- 欧州ではブルーエコノミーの観点から海藻養殖および海洋資源としての海藻の利活用に向けた取組み「Seaweed for Europe」が行われている。

海洋肥沃のケース

TRL	GtCO ₂ /年	\$/tCO ₂	M ² /tCO ₂	固定期間	検証	日本での実施
3	4.4	72	0	△	未	○

CO₂削減ポテンシャル・コストのデータ | 平均、中央値



Pros

- ・排他的経済水域の広さ（世界6位）/海岸線の長さ
- ・海藻養殖技術の保有
- ・藻場造成技術の保有
- ・多数のコベネフィット
- ・ASEAN地域への展開

Cons

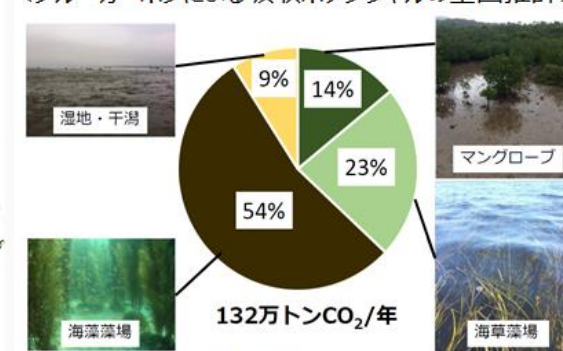
- ・産業従事者（関連水産業）／関連研究者の減少
- ・藻場造成コスト
- ・環境要因による藻場消失
- ・評価方法未確立（CO₂貯留、環境影響など）

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,土木学会論文集B2（2019）

- NETsとは、大気中のCO₂を回収・吸収し、貯留・固定化することによるCO₂除去(CDR, Carbon Dioxide Removal)に資する技術
- 2050年に5～7GtCO₂/年をNETsによる削減寄与の下限として各機関が想定。削減全体の約10%に相当し、再エネ、省エネ、CCUSに次ぐインパクト
- NETsのCO₂削減コストとして2050年\$200/tCO₂以下が期待されるが、海洋関連、風化促進DACCS、バイオ炭など、開発途上の技術も多い
- 欧米で先行するDACCS/BECCSに加え、森林、海洋関連、風化促進などのNETs関連研究開発プログラムの実施、税制優遇、導入支援の存在
- NETsの中には、工学的ブレークスルーやインフラ整備の必要がなく、実証から社会実装・普及が早い技術も存在

今後に向けて（仮説）

- 効率向上・効果促進のための要素技術・プロセス技術開発やフィールド実証に加え、削減効果、固定化期間、環境影響の検証、長期モニタリング手法などの基礎的研究も必要
- 農林水産業、鉱業、製造業、土木など産業分野横断、地質、土壌、農学、化学、生物、機械および人文科学など学術分野横断での取り組み
- 効果検証、認証制度など海外と連携した取り組み

- 1: IEA, Net Zero by 2050A 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: Taylor, L. L., Driscoll, C. T., Groffman, P. M., Rau, G. H., Blum, J. D., Beerling, D. J., Increased carbon capture by a silicate-treated forested watershed affected by acid deposition , Biogeosciences, 18, 169–188, 2021., 2021. L. L. Taylor - Increased carbon capture by a silicate-treated forested watershed affected by acid deposition (endnote.com)
- 4: Matti Kuittinen, Caya Zernicke, Simon Slabik, and Annette Hafner, How can carbon be stored in the built environment? A review of potential options , ARCHITECTURAL SCIENCE REVIEW, 2021.
<https://www.tandfonline.com/doi/epub/10.1080/00038628.2021.1896471?needAccess=true>
- 5: Mahdi Fasihi, et al., Techno-economic assessment of CO₂direct air capture plants , Journal of Cleaner Production, 224, 2019.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652619307772?token=2D2B15E055CB169009E403654FA4E6D9F89067760D53FA2F1DC756AF2CD1D6AD45FF4B7419D187C6B4C76FEB83C9E840>
- 6: Carbonengineering, A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere , Joule 2, 1573–1594, 2018.
[https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351\(18\)30225-3.pdf?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435118302253%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351(18)30225-3.pdf?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435118302253%3Fshowall%3Dtrue)
- 7: 室井高城, 触媒からみる炭素循環 (カーボンリサイクル) 技術2021 , シーエムシーリサーチ, 2021.
- 8: THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda , THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, 2019. <https://www.nap.edu/read/25259/chapter/1>
- 9: David J. Beerling et. al., Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands , nature, 2020.
<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2448-9>
- 10: Deirdre E. Clark et al., CarbFix2: CO₂ and H₂S mineralization during 3.5?years of continuous injection into basaltic rocks at more than 250°C, , Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703720302106>
- 11: Corey Myers and Takao Nakagaki, Direct mineralization of atmospheric CO₂ using natural rocks in Japan , Environmental Research letters, 2020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abc217>
- 12: A.T. Kearney, Negative Emission Technology , , 2019. <https://www.energy-transition-institute.com/documents/17779499/17781915/negative-emissions-technologies.pdf/6b380603-b436-6003-7abb-93a8124f9357?t=1571119906000>
- 13: Tom Terlouw, et al., Life cycle assesment of carbon dioxide removal technology , Energy&Environmental Science, 2021.
<https://coalitionfornegativeemissions.org/the-case-for-negative-emissions-executive-summary/>
- 14: National Academies, Negative Emissions Technologies and Sequestration , National Academies, 2019.
<https://www.nap.edu/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda>
- 15: IEA, ETP Clean Energy Technology Guid , , 2021. <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>

- 16: 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>
- 17: Climeworks, Climeworks社発表資料 , , .
- 18: C. Myers, T. Nakagaki, Direct mineralization of atmospheric CO₂ using natural rocks in Japan , Environmental Research Letters, 2020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abc217/pdf>
- 19: 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, 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計 , 土木学会論文集B2(海岸工学)/75 巻 1 号, 2019.
- 20: Sabine Fuss, et al., Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects , Environmental Research Letters, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f/meta>
- 21: Madalyn S. Blondes, et al., Carbon Dioxide Mineralization Feasibility in the United States , U.S. Geological Survey, 2018. <https://doi.org/10.3133/sir20185079>
- 22: Kelemen P, et al., An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations , Front. Clim., 2019. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2019.00009/full>
- 23: ICEF, Roadmap: Carbon Mineralization , , 2021. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ee/d0ee03757e>
- 24: , SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 °C , ipcc, 2019. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- 25: World Economic Forum, McKinsey & Company, Nature and Net Zero , , 2021. <https://www.weforum.org/reports/nature-and-net-zero>
- 26: Goldman Sachs, CarbonomicsIntroducing the GS net zero carbon models and sector frameworks , , 2021. <https://www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/carbonomics-gs-net-zero-models/report.pdf>
- 27: NGFS, Scenario Explorer , , 2020. <https://www.ngfs.net/ngfs-scenarios-portal/data-resources>
- 28: Hornung, A., Stenzel, F. & Grunwald, J. , Biochar—just a black matter is not enough. Biomass Conv. Bioref , Nature Gioscience, 2021.
- 29: Jessica Streffer, ThorbenAmann , Nico Bauer, Elmar Kriegler and Jens Hartmann, Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks , Environmental research Letters, 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4>



ご清聴ありがとうございます