

ネガティブエミッション技術について

2022年2月

産業技術環境局

今後の検討に当たっての論点

- 多くの脱炭素シナリオでネガティブエミッション技術が必要となってくることを踏まえ、まずは、ネガティブエミッション技術について、その技術全体を鳥瞰し、分析した上で、その導入に当たっての方針を検討してはどうか。
- 分析に当たっては、以下の観点に留意しながら検討を進めていくことが必要ではないか。
 - どのような要素技術があるか
(DACなど工学的技術に加えて、森林、海洋、農業など自然資源の活用)
 - それぞれの技術の成熟度やコスト分析、CO₂削減効果
 - 我が国の地理的、技術的ポテンシャル
 - 複数の技術分野のセクターカップリング 等
- ネガティブエミッション技術の実用化、ビジネス化に向けて、どのような観点で検討を行っていくべきか。

グリーンイノベーション戦略推進会議WGでのご指摘（第5回・第6回）

課題

➤ NETsの位置づけや意義/役割

- 目標・マイルストーンの設定が必要。
- 社会実装像や新産業構造についての分析が必要。

➤ 技術開発に当たっての課題

- コスト・ポテンシャル評価のための技術およびデータが必要。
- 低コスト・省エネルギー化が重要。
- 社会受容性、環境影響、ポテンシャル（地理的特性など）等の課題。
- 自然・物質の循環が関わるため、幅広い分野・エリアにまたがる。自然の仕組みの活用が重要。

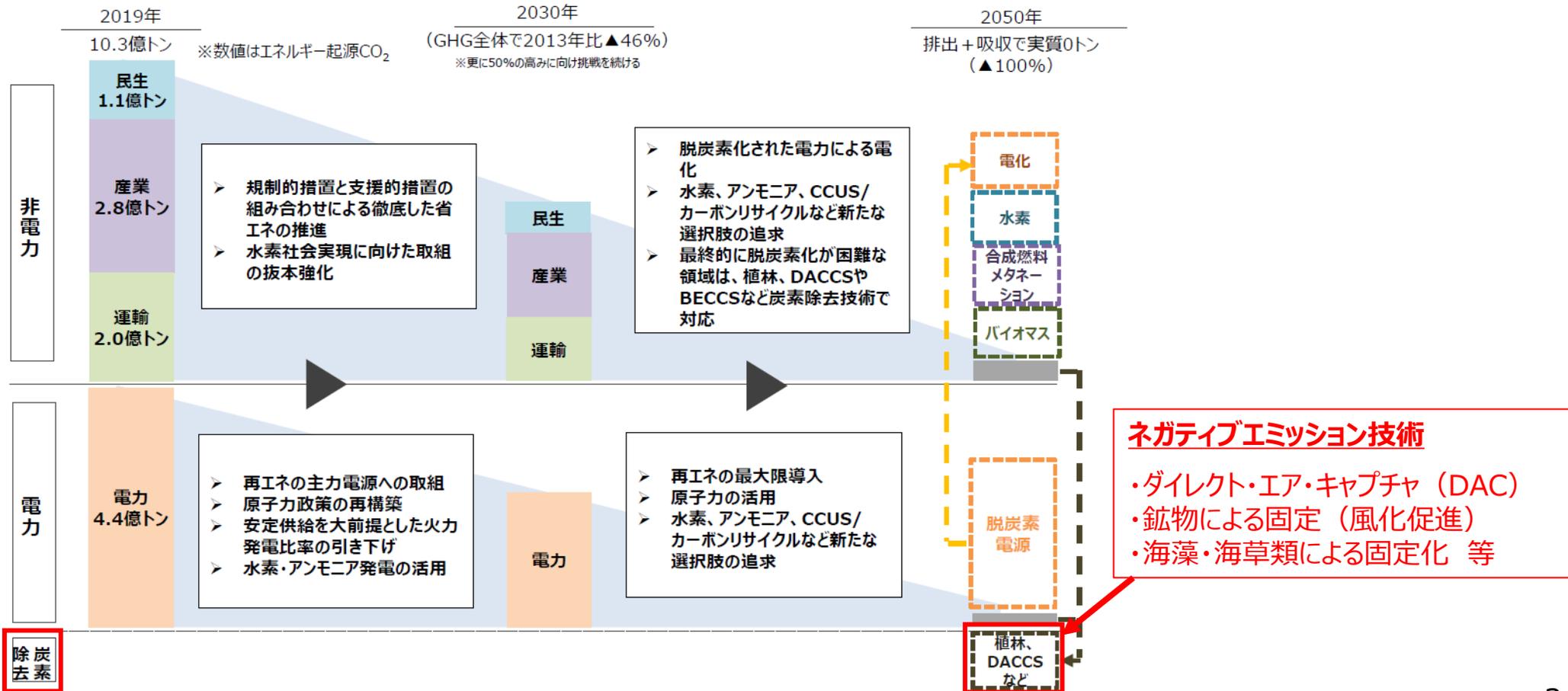
➤ 技術開発から産業化につなぐ際の課題

- カーボンクレジット取引市場の動きにも注目すべき。
- スマートアグリ等を進める産業、演習林を有する大学など、多様な主体との連携が重要。
- 再エネの活用が重要。CO₂の循環・利活用の促進が重要。
- コスト・ポテンシャル評価のための技術およびデータが必要。（再掲）
- 低コスト・省エネルギー化が重要。（再掲）
- 社会受容性、環境影響、ポテンシャル（地理的特性など）等の課題。（再掲）

ネガティブエミッション技術（NETs）の位置づけ

- 2050年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GHG排出を吸収するネガティブエミッション技術が不可欠。（下記の炭素除去部分）
- 将来の成長産業の萌芽として、どのように技術を磨き、ビジネスとして育成していくか検討が必要。

【国内】

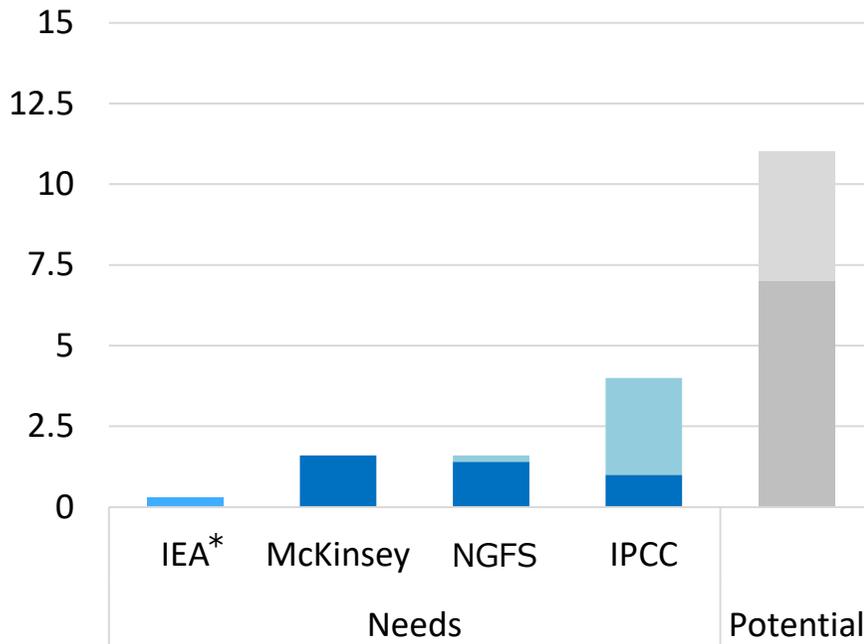


(参考) 各機関のNETsのCO₂削減寄与想定【世界】

- 各機関の想定によると、1.5°C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

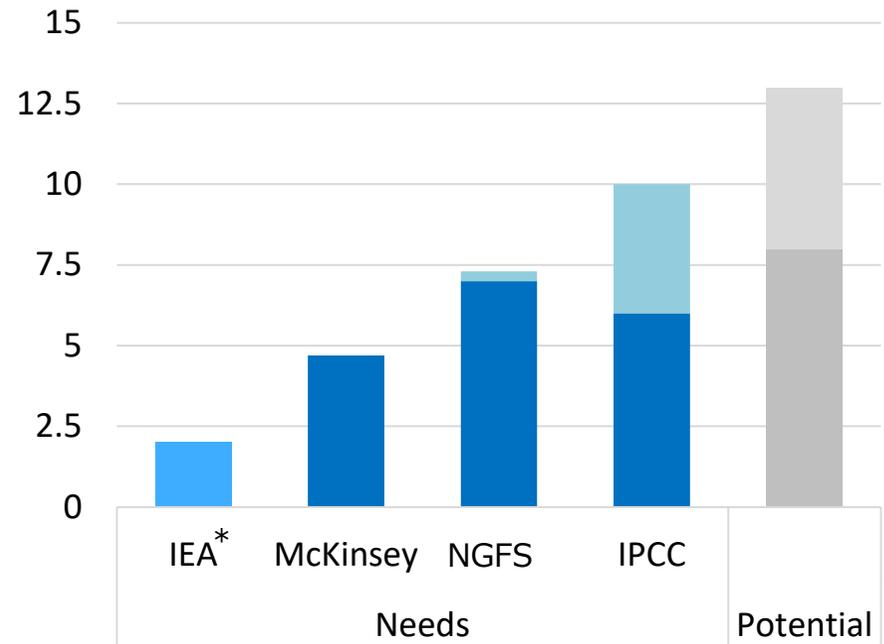
2030年

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

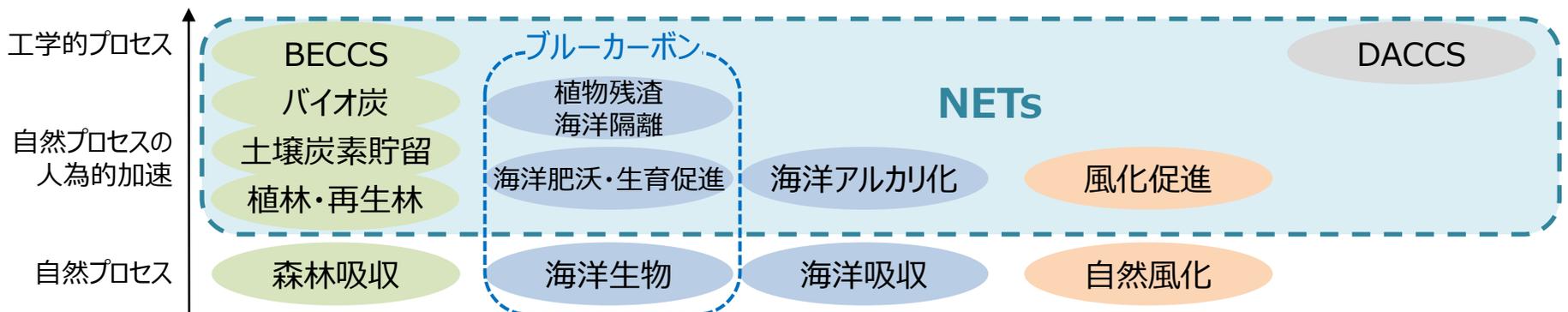
出典：第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG発表資料,以下を元にNEDO-TSCにて作成, (2022)

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/>

ネガティブエミッション技術

- 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の再生・回復。	
土壌炭素貯留	バイオマス中の炭素を土壌に貯蔵・管理する技術 (バイオ炭を除く)	
バイオ炭	バイオマスを炭化し炭素を固定する技術	
BECCS	バイオマスエネルギー利用時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。
	植物残渣海洋隔離	海洋中で植物残渣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	



技術比較

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	○
植物残渣海洋隔離	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年の世界の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適地の点で日本は劣後

出典：第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG発表資料, (2022), 各種情報(文末参照)を元にNEDO-TSC作成資料を一部加筆

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の再生・回復。
- 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植物*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)

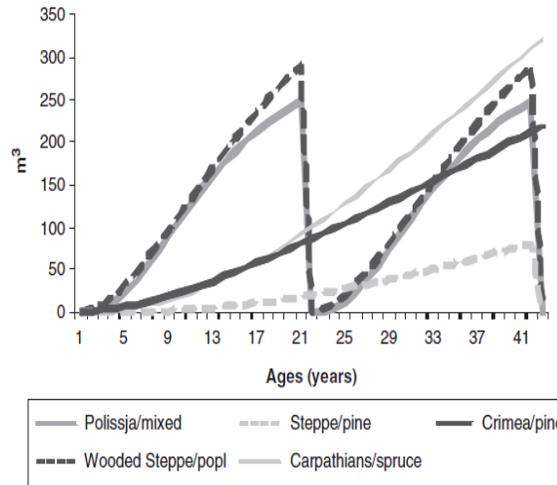
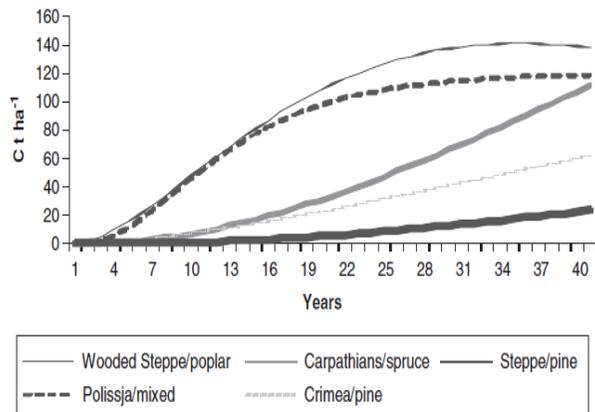


Figure 2 Cumulative carbon uptake by fast-growing tree species across regions in Ukraine, 0% discount rate.⁴⁶

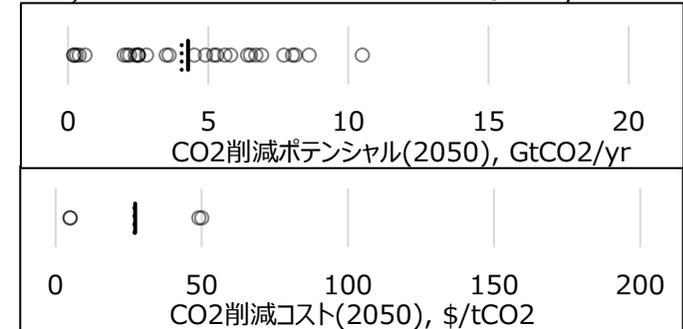
Figure 3 Graphical representation of growth functions of fast growing trees across the regions in Ukraine if the trees are harvested when their growth decelerates.⁴⁶

Nijnik, Maria. (2010). Carbon capture and storage in forests. Iss Environment Sci Tech. 29. 203-238. https://www.researchgate.net/publication/291103287_Carbon_capture_and_storage_in_forests

* <https://www.fastcompany.com/90646232/these-supertrees-are-engineered-to-capture-more-carbon>

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
<ul style="list-style-type: none"> ・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
<ul style="list-style-type: none"> ・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

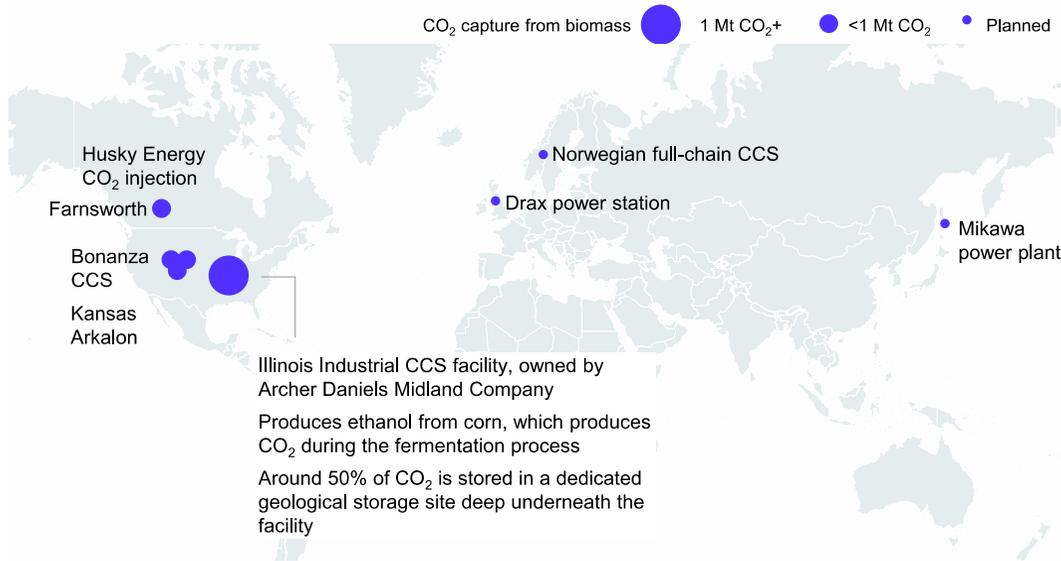
BECCS

● 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

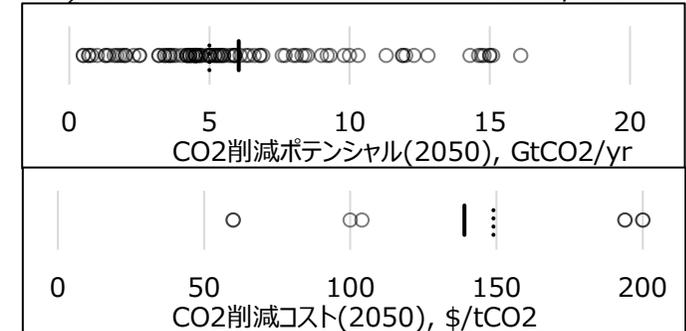


Coalition for Negative Emissions, The case for Negative Emissions, 2021

<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

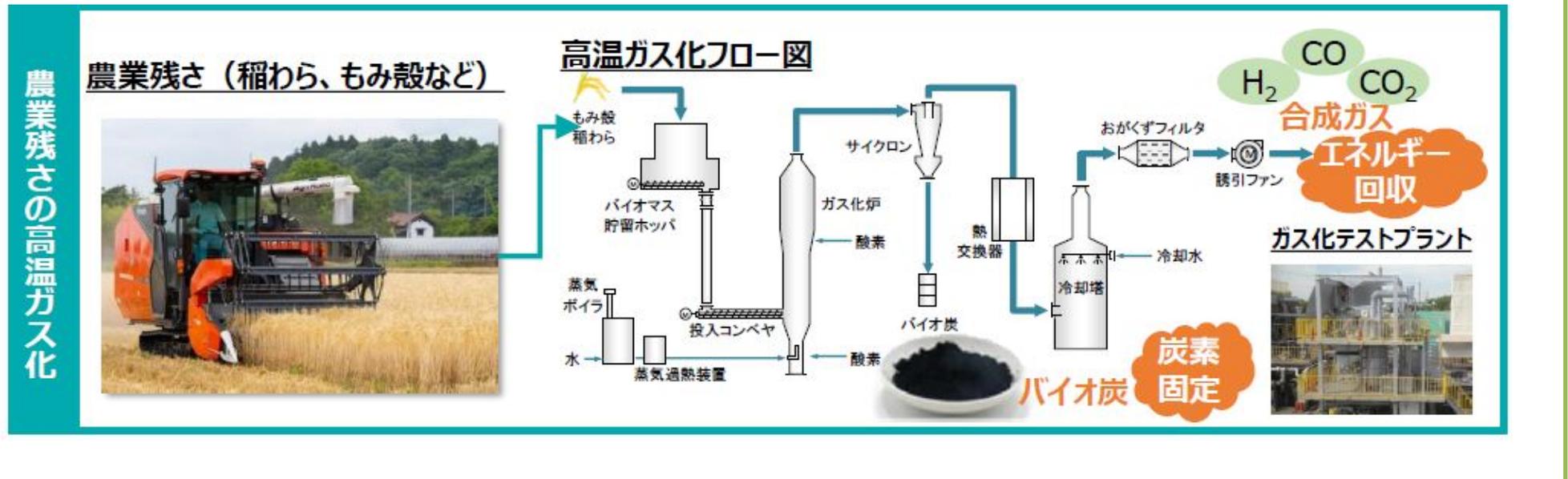
Cons

- ・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

(参考) 企業の研究開発例

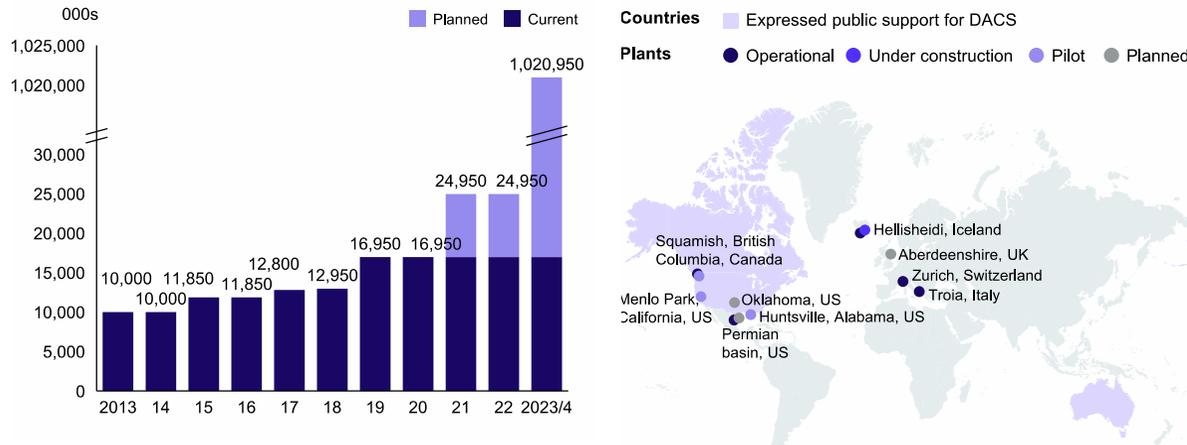
クボタの取り組み

- 水・環境事業で培った廃棄物処理技術を活かし、バイオマスの有効利用・炭素固定化（ネガティブエミッション）実現に向け、様々な研究開発を推進。
- 例えば、農業残渣（稲わら、もみ殻など）の高温ガス化等による炭素固定とエネルギー回収技術を開発中。



DACCS

- 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



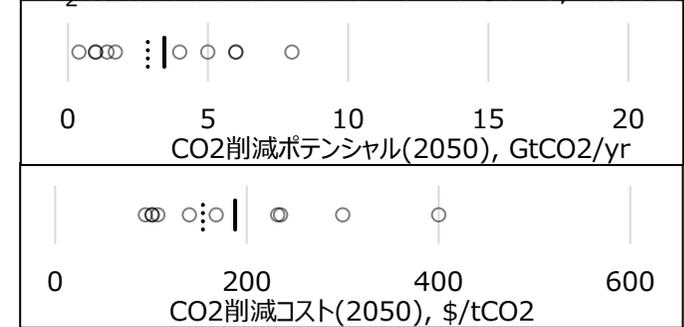
Coalition for Negative Emissions, The case for Negative Emissions, 2021

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

出典：第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG発表資料, 各種情報(文末参照)を元にNEDO-TSCにて作成, (2022)

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

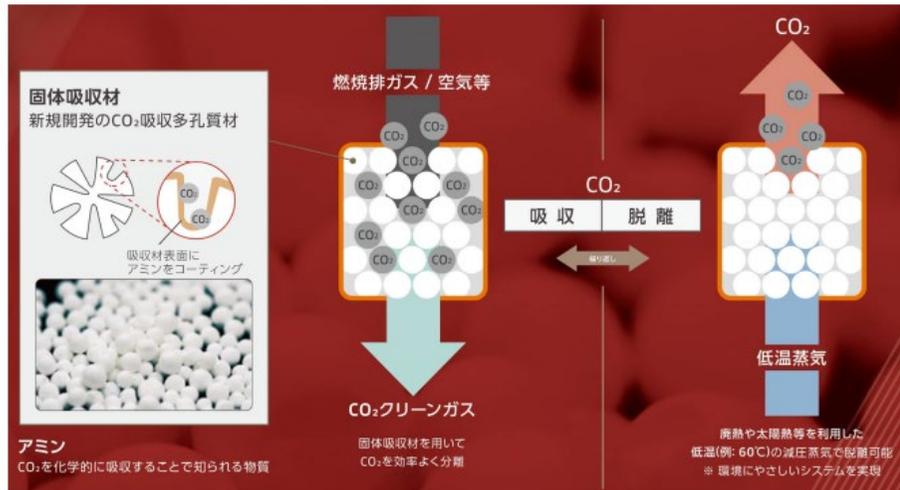
- ・CO₂削減コスト
- ・日本での実施(CCS)
- ・エネルギー消費

(参考) 企業の研究開発例

川崎重工業 DACCS関連の取り組み

- 40年前から潜水艦や宇宙船など閉鎖空間における呼気由来のCO₂除去技術として固体吸収材を用いたCO₂分離回収技術を開発。
- 長年培った技術が生かされる製品として直接空気回収 (DAC) の早期実現に向けた研究・開発・実証を進めている。
- 多孔体にアミンを担持した新規開発の固体吸収材を用いることにより、CO₂回収温度が60℃程度で済むことから、従来方式より省エネルギーでのCO₂分離回収が可能に。
- 小型実証装置を明石工場内に設置し実証試験を実施中。5kg-CO₂/日の回収性能を確認。

(KCC: Kawasaki CO₂ Capture)



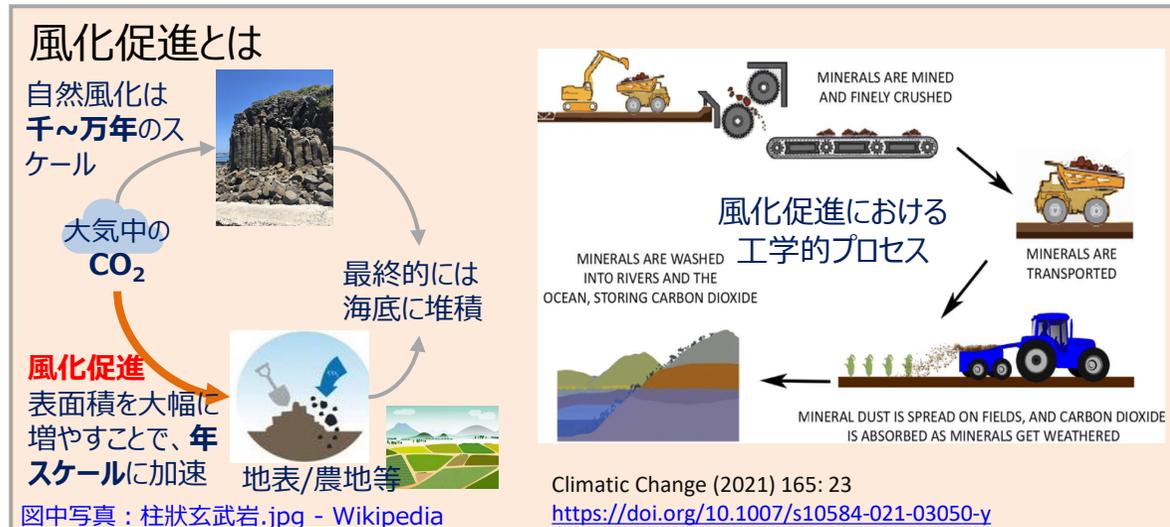
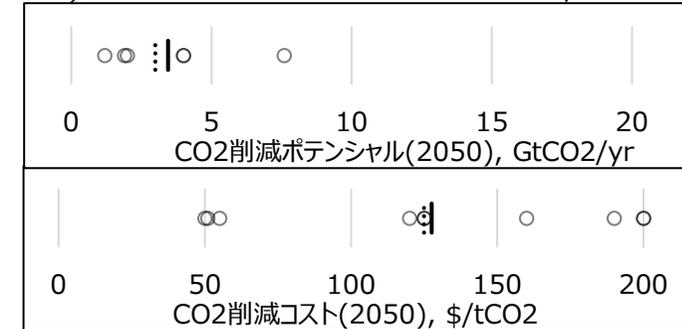
5kg-CO₂/day Direct Air Capture 実証試験機

風化促進

- 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、新規のブレイ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

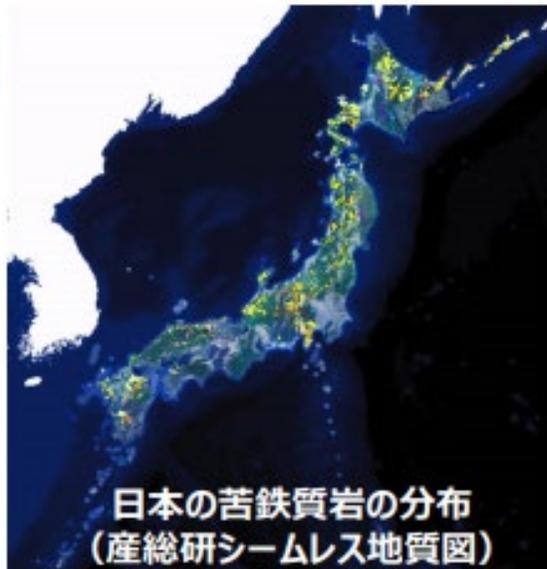


Pros
<ul style="list-style-type: none"> ・必要面積が比較的少ない ・永久貯留 ・日本での実施 ・自然現象の加速 ・土壌改良などのCO₂削減以外の便益の可能性
Cons
<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂削減コスト(輸送・粉砕・散布) ・CO₂削減効果の検証が不十分 ・環境影響評価(土壌、微生物、河川)が不十分 ・ステークホルダーの合意形成

(参考) 風化促進関連の研究開発例

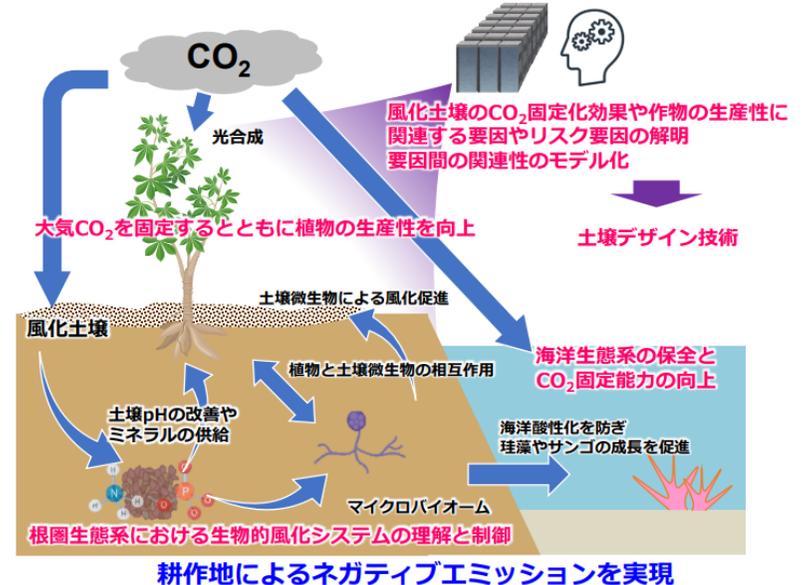
CO₂の天然鉱物固定技術

- 国内でも玄武岩が産出(偏在)を確認。海洋底は玄武岩の宝庫。
- 海洋底の玄武岩が活用できれば、鉱物かの促進のみならず、貯留ポテンシャルの拡大が期待できる。
- 鉱物化によるCO₂固定技術やLCA評価、環境影響評価により、小規模・分散型CCS技術を検討



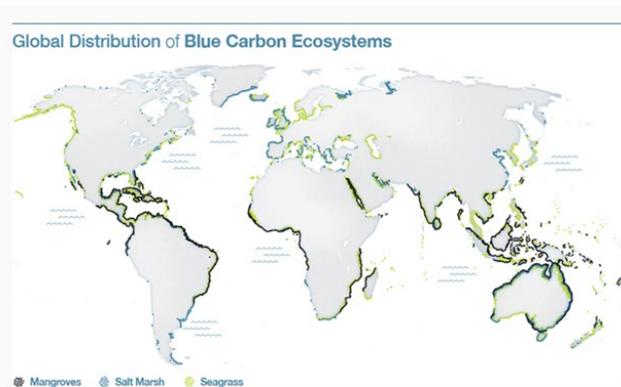
生物的風化促進を利用した大気CO₂固定化技術

- 耕作地の風化促進は、土壌pHの改善、作物へのミネラルの供給等の促進により、作物の生産性や根圏の土壌微生物にも影響。
- 耕作地の生態系は多様であり、風化土壌のCO₂固定化の効果に関連する生物的要因や環境リスクの解明が必要。
- 耕作地のCO₂固定効果と作物の生産性を最適化する技術を開発



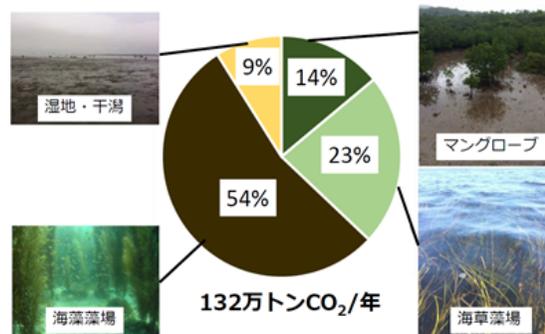
ブルーカーボン・ブルーリソース

- 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類の追補を目指し、ブルーカーボン評価モデルを作成中（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。
- 国内においても、ブルーカーボンのクレジット化に向けて、「ブルークレジット」という形でのVCCの取組が行われている。



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>

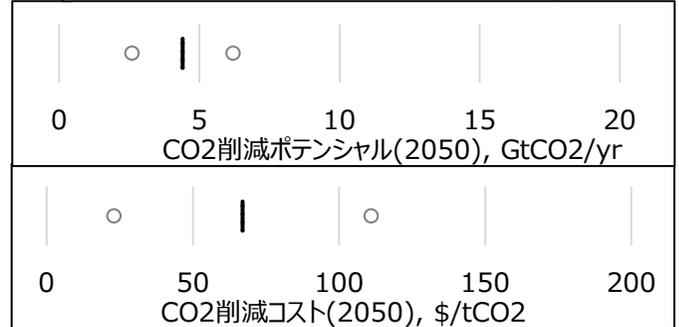


出所：桑江ら, 土木学会論文誌B2 (2019)

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
<ul style="list-style-type: none"> ・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
<ul style="list-style-type: none"> ・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）

(参考) その他の研究開発例

ブルーカーボンの評価手法

- 我が国周辺のすべての海藻・海草を対象として、評価値を精密化・簡便化していく。
- 衛星画像の解析結果は、単純に植生（藻場）の有無のみであり、藻場の構成種の情報がない。こうした中、各種環境データを用いて解析することにより、構成種別の面積情報を高度化する新たな面積算定手法を衛星画像に頼らない形で構築。

現在のBC生態系の分類

機能・地域別藻場タイプへ

- 海草藻場(アマモ場)
- 海藻藻場 (ガラモ場)
(コンブ場)
(アラメ場)
- マングローブ
- 干潟 (塩生湿地)



最も単純な評価

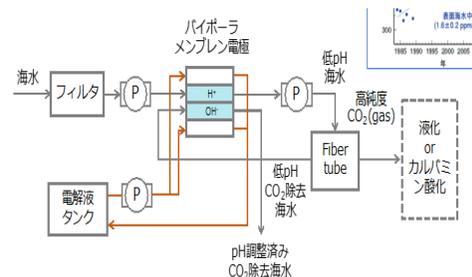


様々な活動量を詳細に評価

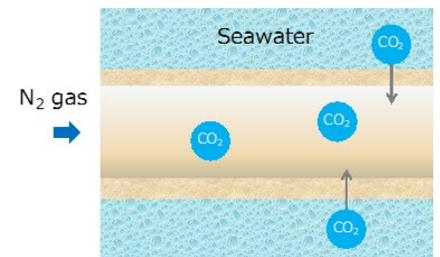
Direct Ocean Capture(DOC)

- 海洋は大気中のCO₂を平衡になるまで取り込む。海洋表層のCO₂を人為的に回収し、海洋のCO₂吸収能力が高まると、大気からのCO₂取り込みが促進され、大気中のCO₂濃度の低下に資する。
- そのため、海洋表層からCO₂を安定的に直接回収するための手法を開発中。具体的には、電気透析型として、海水のpHを下げてCO₂ガスを回収する手法があり、膜の安定運用技術や異常検出技術を開発中。
- また、低エネルギー型として、自然の力や触媒を利用し、上記手法より低エネルギー・低コストで海中からCO₂を回収する手法も開発中。

■ 電気透析型手法



■ 低エネルギー型手法



ネガティブエミッション技術にかかわる評価技術

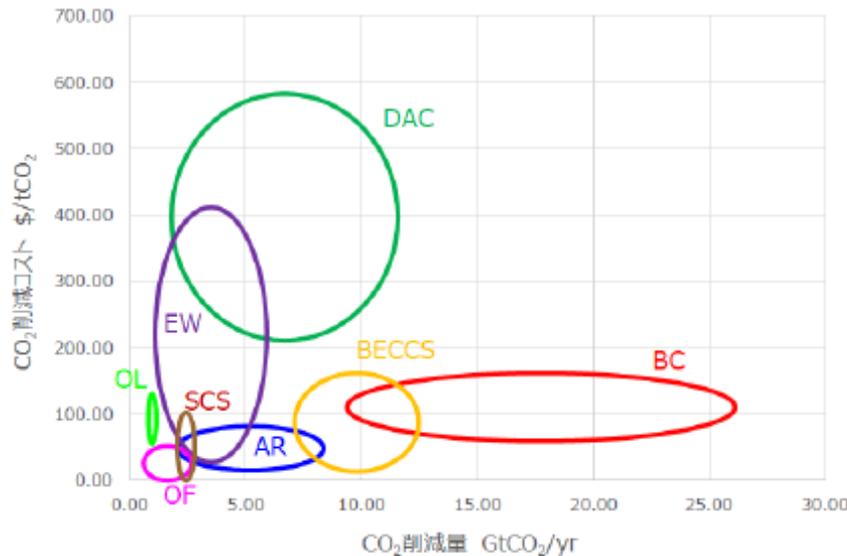
- ネガティブエミッション技術は、まだ開発段階であり、工業的なものから、植物、海洋、鉱物を利用したものなど、様々な可能性がある。TRLの低いものから高いものまであり、それぞれのCO₂固定量について正しい評価が必要。

➤ LCAの重要性

NETs技術についてのLCAやコスト評価についての検討は日が浅く、世界的に評価方法が確立されておらず、不確実性が高い状況。
国際的なクレジットの導入のためには、正しい評価方法とその共有が必須。

➤ LCAの方向性

CO₂吸収にかかわるLCAについては、評価の詳細について**透明性を確保したうえで**、供給から廃棄まで等の境界条件の範囲、その評価している時間、装置や実施するための土地の面積や規模などの機能単位などを明確にし、**ライフサイクル思考**（サプライチェーンや連鎖・波及を考慮して評価すること。）が求められる。



ネガティブエミッション技術のCO₂削減量とコスト

Jan C Minx, Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis, *Environ. Res. Lett.* 13 (2018) 及び Sabine Fuss, Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side Effects, *Environ. Res. Lett.* 13 (2018) より産総研で加工

各技術のCO₂削減ポテンシャル算定方法

	ポテンシャル算定方法
A. 植林 (AR)	瘦地面積
B. バイオ発電 (BECCS)	土地利用可能量（食料との分配）と貯留ポテンシャル
C. バイオチャー (BC)	BCに使えるバイオマス生産量
D. 風化促進 (EW)	作物用土地面積など統一された考え方がない。
E. DAC	無制限であるが予算規模をポテンシャルと考える方法あり
F. 海洋プランクトン (OF)	モデルシミュレーションによって計算
G. 土壌炭化 (SCS)	土壌中の炭素有機物が飽和するまで

企業の動き（海外）

- 欧米のスタートアップを中心に、DACCSやブルーリソース、植林、BECCS、風化促進といったNETsに関する取組が活発化。
- 今後数年の間に、百万t-CO₂/年規模の炭素除去実現を目指すなど、商用規模を視野に入れて取り組まれている。
- 収益化の方法は大きく分けて、①ネガティブエミッションの効果が付加価値として販売、②ネガティブエミッションの副産物の販売、の2つに大別。
- 企業や消費者向けに少量から購入できるプランを用意することなどで、環境価値を基に収益化している点が特徴。今後は、低コスト化や大規模化に向けた技術開発が課題。

■ Climeworks（スイス）【DAC】

（事業概要）

特殊なフィルターで大気中CO₂を吸着。捕獲したCO₂を企業や消費者が継続して購入できるサブスクリプションサービスを展開。CO₂を、近隣の温室設備で栽培されているトマトやキュウリの肥料として供給。

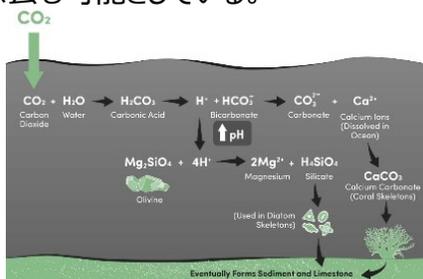


■ Project Vesta（米）

【風化促進・海洋アルカリ化】

（事業概要）

粉砕した「かんらん石」を沿岸に配置することにより海洋のアルカリ性を増し、大気中のCO₂を海水に溶解させる。顧客に対して炭素除去クレジットを販売。最終的には、1億t以上の二酸化炭素除去も可能としている。



■ Charm Industrial（米）

（事業概要）

セルロース系バイオマスを集めて高速熱分解を行いバイオオイルに分解。バイオオイルを井戸に沈め、固化することで恒久的に貯留。一般消費者向け、企業向けにCO₂を除去するプランを提供。\$ 600/t-CO₂・月にてカーボンオフセットを販売。将来的には、\$ 250まで引き下げることを目指している。

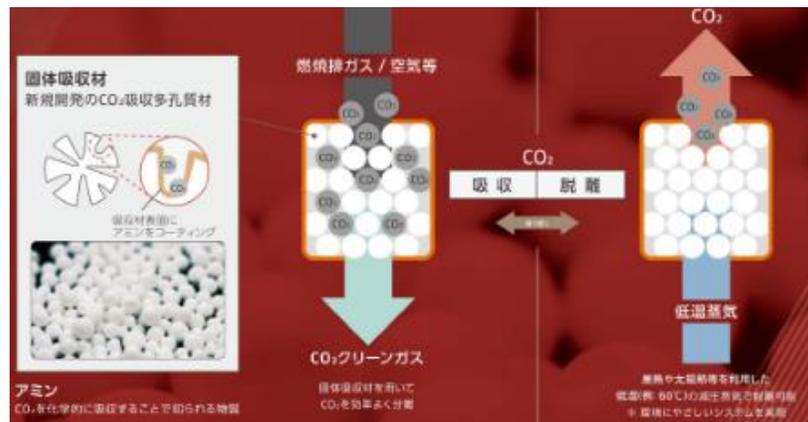


(参考) 国内企業の取組事例

- 川崎重工は、低温でのCO₂回収を可能とするDAC技術を開発中。
- Kubotaは、農業残渣の炭素固定・エネルギー回収等に関する技術を開発中。
- 課題は、大規模化、低コスト化、そしてマネタイズ化。

■ 川崎重工 (概要)

- 40年前から、潜水艦や宇宙船など閉鎖空間におけるCO₂除去技術として吸収材を用いたCO₂分離回収技術を開発。
- 多孔体にアミンを担持した新規の固体吸収材を用いることで、100℃以下の排熱を利用可能とし、省エネを実現。再エネなどの利用により、LCA評価でネガティブエミッションとなることを確認。
- 現在の実証規模は5kg/日、回収されたCO₂は純度95%。



■ Kubota (概要)

- 自動運転農機の作業効率化によるCO₂削減、スマート水管理による水田からのメタン削減、精密可変施肥による肥料削減、バイオ炭等によるネガティブエミッションなど、「食料・水・環境」ソリューションのシナジーにより、持続可能なカーボンニュートラル・資源循環型農業の実現を目指す。
- 農業残渣（稲わら、もみ殻など）の高温ガス化等による炭素固定とエネルギー回収技術を開発中。世界の農業由来のGHG排出量の約半分を占めるアジアへの展開を視野。



※1ネガティブエミッション：炭素貯留を指し「4パーセント・シナジー」に寄与

NETsに関する国内外の政策動向（1）

国	概要
日本	<ul style="list-style-type: none"> ● CCUSを2025年までに社会実装することを目指し、大規模な実証試験事業や貯留適地の調査事業を実施。2019年に目標である30万トンの圧入に成功。 ● グリーン成長戦略（2021年6月）において高効率なCO2分離回収技術を開発する旨を明記。 ● 革新的環境イノベーション戦略(2020年1月)において、DAC技術を追求する旨を明記。
米国	<ul style="list-style-type: none"> ● 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、DACCS/BECCS/海藻類炭素固定を国のプロジェクトとして推進 ● 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。 <p>※“algae-based carbon capture”</p>
中国	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。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。 ● 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ヶ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ヶ年計画(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。 <p>※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”</p>
英国	<ul style="list-style-type: none"> ● 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）。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。 <p>※1“carbon dioxide removal through ocean alkalinity enhancement” ※2“capturing CO2 from air and converting it directly into a mineral by-product”</p>

NETsに関する国内外の政策動向（2）

種類	概要
ルールメイキング	<ul style="list-style-type: none"> ● 米国：インフラ投資法案（2021年11月） 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。 ● 中国：沿岸地域での事例（福建省廈門（アモイ）市） 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 ● 日本：グリーン成長戦略（令和3年6月） CO₂分離回収の標準評価技術を確立し、日本の技術の国内外への展開を加速するため、国際標準化について検討する旨を明記。 ● EU：「SustainableCarbonCycles」（2021年12月発表） 欧州グリーン・ディールのFarmtoFork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
税制優遇 ・ 補助金等	<ul style="list-style-type: none"> ● 米国：連邦45Q優遇税制、カリフォルニア州のLCFS（LowCarbonFuelStandard）制度 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（LowCarbonFuelStandard）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。 ● EU：「SustainableCarbonCycles」（2021年12月発表） 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、financialincentiveの提案等）。 ● 日本：ムーンショット型研究開発事業 DACに加えBECCSや風化促進、ブルーカーボンの研究開発を支援。R3年度補正予算案においては40億円を措置 ● 英国：DACCS技術導入への補助金 ● 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））
初期需要創出	<ul style="list-style-type: none"> ● FirstMoversCoalition（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）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ミッション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等も対象となる予定。

(参考) 国際連携

- 二酸化炭素削減技術は、世界的な共通課題。各国の技術をもちより、開発していくことが重要。
- 22カ国+EUが参加し、脱炭素化に向けた研究開発の国際連携を進める「ミッション・イノベーション (Mission Innovation)」では、有志国によりCDR (二酸化炭素除去技術 Carbon Dioxide Removal) ミッションを立ち上げ。今後、4つの技術分科会で、ロードマップ策定等の作業を進める。日本は、LCA/TEAs 分科会の共同リーダーに立候補。他の3つにも参加を表明。

- DAC (Direct air capture)、
- BiCRS (Biomass with Carbon Removal and Storage)
- Mineralization (Enhanced mineralization)
- LCA/TEAs (Life Cycle Assessments / Technoeconomic Analysis)

- MIのCDRミッションでは、2月中に各技術分科会の初回会合を開催。3月末までにイノベーションロードマップを、さらに9月までにアクションプランを策定予定。このほか、日本の主催により、CDR技術のLCAをテーマにしたオンラインWSを3月中旬に開催予定。産総研の研究者の他、海外のDACの技術開発ベンチャーや関連企業、アカデミア等の登壇を調整中。
- ICEF2021でもNETsをテーマとして取り上げ、国内外の有識者が議論。研究開発動向の報告書を公表。

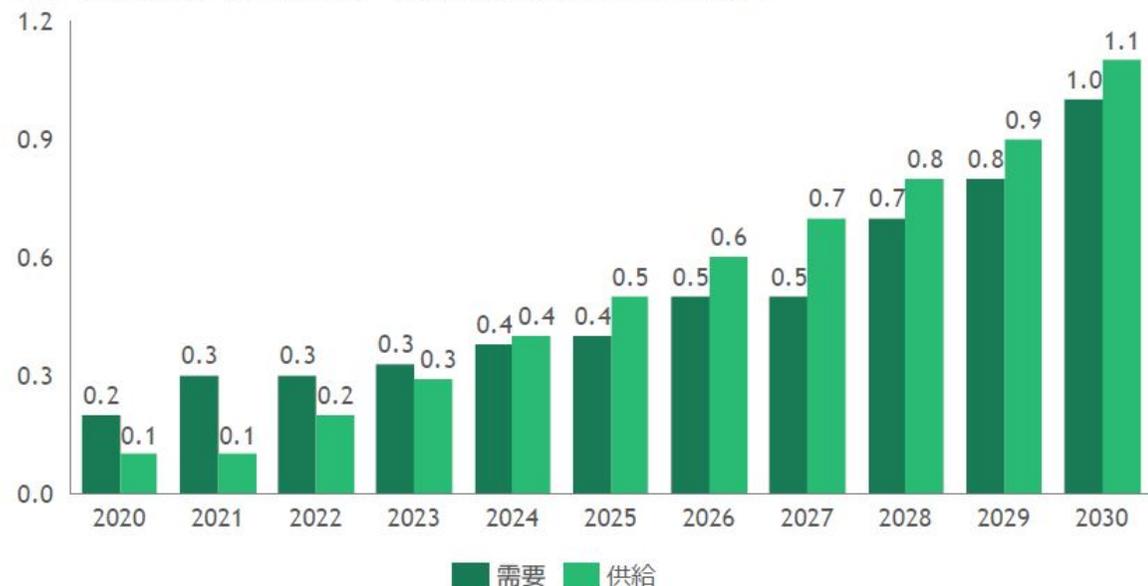
Member	Notes
Australia	<ul style="list-style-type: none"> • Supporting member
Canada	<ul style="list-style-type: none"> • Co-lead • Primary interests: DAC, LCA/TEAs • Potentially interested in BiCRS, Min.
EC	<ul style="list-style-type: none"> • Supporting member • Interests: TBC
India	<ul style="list-style-type: none"> • Supporting member • Interested in contributing to discussions on DAC, BiCRS, Min., LCA/TEAs
Japan	<ul style="list-style-type: none"> • Supporting member • Primary interest: LCA/TEAs. • Interested in contributing to discussions on DAC, BiCRS, Min.
Norway	<ul style="list-style-type: none"> • Core member • Primary interests: DAC, LCA/TEA • Some interest in BiCRS (around post-conversion paths)
Saudi Arabia	<ul style="list-style-type: none"> • Co-lead • Primarily interested in Mineralization and LCA/TEA.
US	<ul style="list-style-type: none"> • Co-lead • Interest in all topics.

CO₂排出削減のビジネス化に向けて

- VCCでの排出削減量は0.1Gt(2018年)から0.2Gt (2020年) へと2倍に増加^[1]。
- VCCの供給・需要は今後急拡大する見込み。

カーボンプレジットの需要と供給 (GtCO₂e)

コンプライアンス市場とボランタリー市場の連携が進むシナリオの場合



2024年には市場がショートする可能性

- このシナリオの場合、2030年の需要量は1.1 Gtとなる見込み

	CAGR	
	2020-2025	2025-2030
供給	13%	20%
需要	31%	17%

Note: 設定した3つのシナリオのうち、市場拡大が中間のシナリオ。2020年のデータは実績値、2021年以降は推計値

Source: Registries (Verra, Gold Standard, ACR, CAR, CDM); CORSIA; IMO; IEA; CDP; Company commitments; ICAP; Fraunhofer ISI; BCG分析

[1] 出典 : State of the Voluntary Carbon Markets 2019, 2021, Ecosystem Marketplace, (2019), (2021)

(参考) VCC全体の中での自然ベースCO2除去の割合

- VCCの自然ベースのCO₂除去に関するクレジットは8.6%。そのうち、植林・再生林によるクレジットが最大。

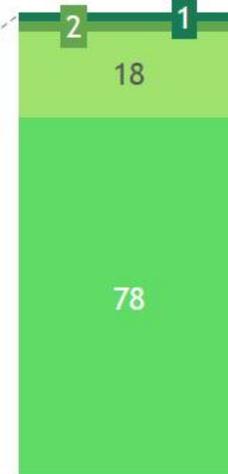
VCC全体(%)



自然系のクレジット(%)



自然系除去クレジット(%)



- 燃料転換
- 産業用ガス
- エネルギー効率化
- 廃棄物
- 再生可能エネルギー
- 自然系

- 土地転換の回避
 - 森林伐採の回避
 - 除去
- 排出
回避

- 農業系新技術
- 泥炭地/湿原再生
- 森林管理の改善
- 植林・再生林

自然系のVCC
32%



そのうち除去
27%

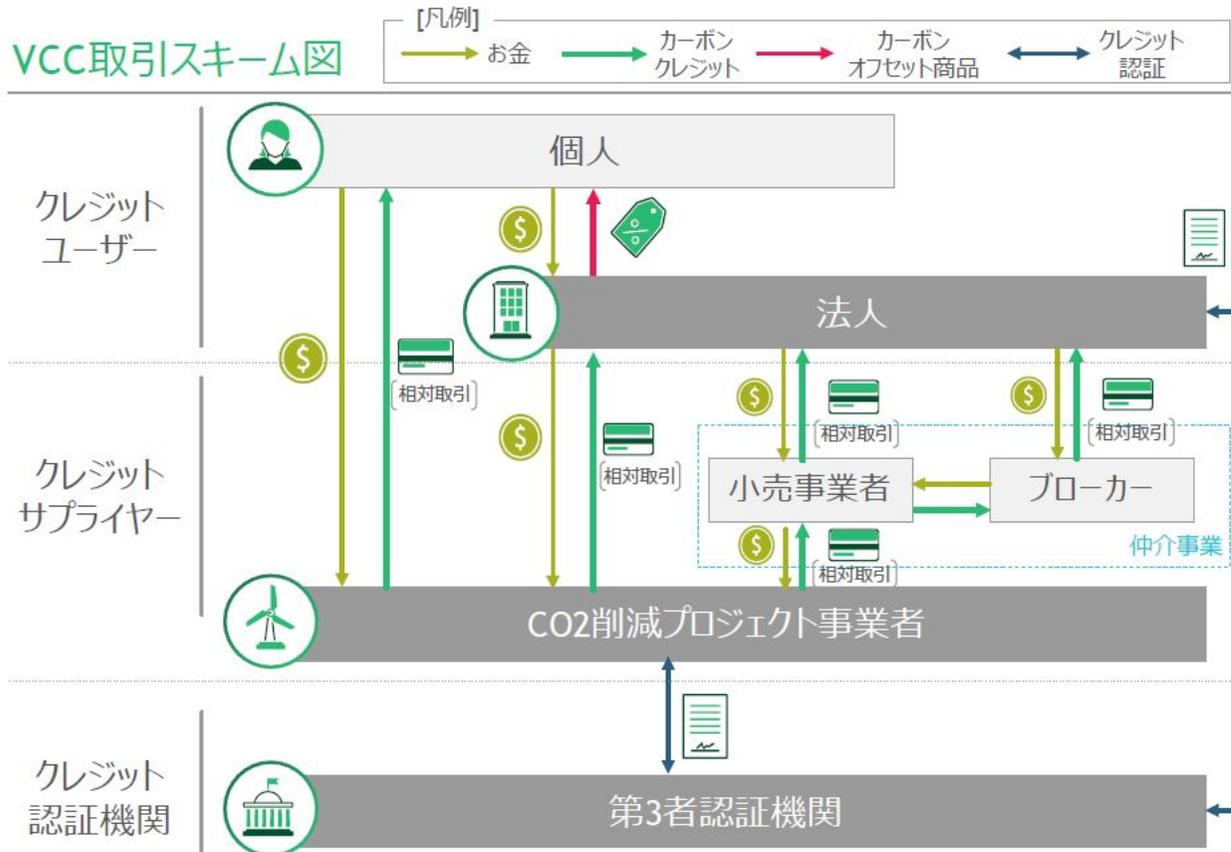


VCCに占める自然系除去クレジット
8.6%

Note: Verra VCS、Gold Standard、ACR、CARの2020年のデータをもとに分析
Source: Voluntary Carbon Market Dashboard (Climate Focus), BCG分析

(参考) VCC取引スキームと直近のトレンド

- 従来のCO₂削減事業者/第三者認証機関/法人のスキームから、最近は「仲介事業者の台頭」「カーボンオフセット販売」などの動きがある。



Source: BCG分析

各レイヤーにおける特徴/トレンド

自社購入カーボンクレジット+自社商品を組み合わせたカーボンオフセット販売が拡大

- 投融資家・個人消費者の環境意識の高まり、マーケティング活動の一環として実施
 - 例: JALは飛行機搭乗によるCO₂排出相当量のオフセットプログラムを提供

VCCニーズ/取引量拡大に伴い取引仲介の動きが出現

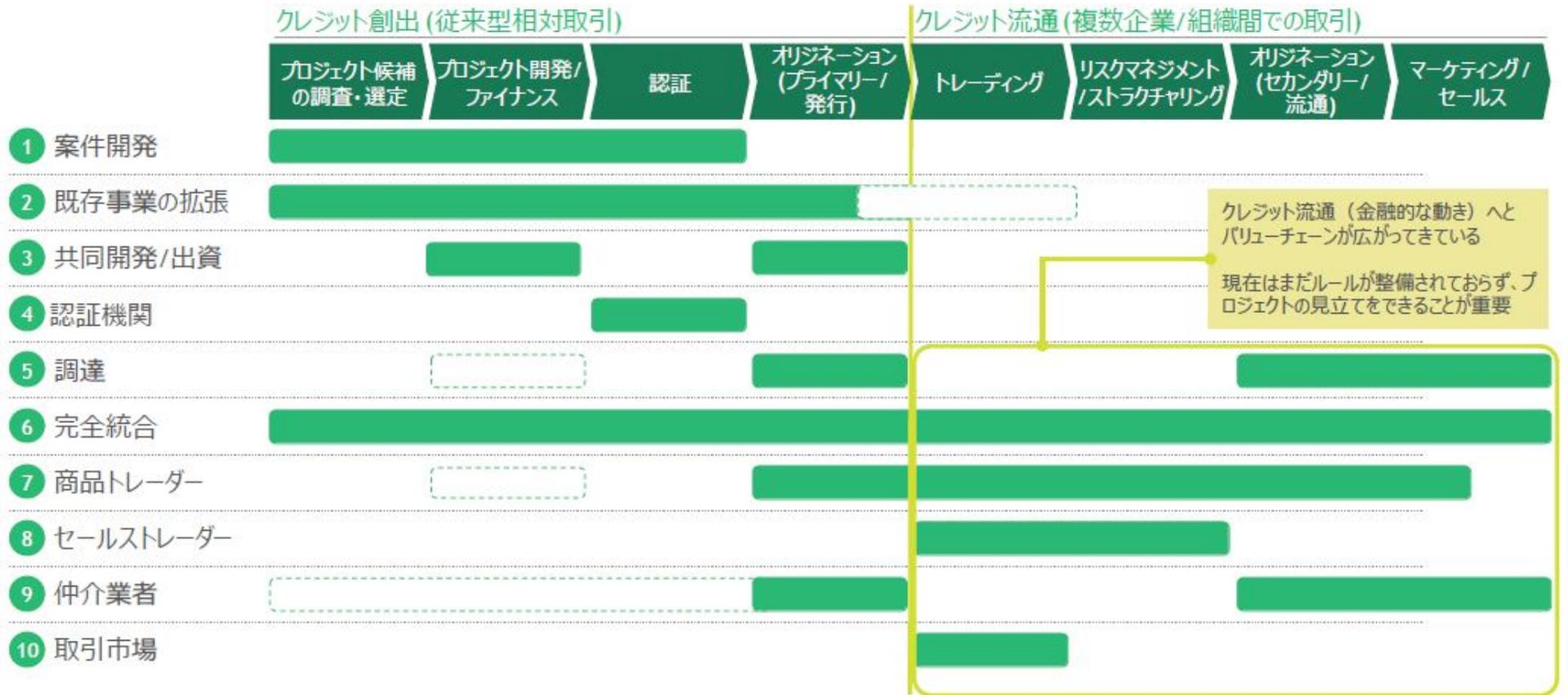
- 小売事業者: CO₂削減プロジェクト事業者からバルクでクレジットを購入し、ブローカー経由 or 法人に直接販売
- ブローカー: 複数小売事業者とのネットワークからクレジット調達し、法人に販売

主要認証機関はNGOが設立/参加する以下4機関

- VERRA (VCS)
- Gold Standard事務局 (GS)
- Climate Action Registry (CAR)
- Winrock International (ACR)

VCCのバリューチェーンとビジネスモデル

- VCC市場においてはバリューチェーンのカバー範囲に応じて10のビジネスモデルが存在。
- 最大プレーヤーであるVerraの認証項目を基準に、他プレーヤーは項目を追加して対抗する状況。



Note: 技術、方法論、プロセスなどによりバリューチェーンを支えるプレーヤーも存在 (例: Planetly, COMET-Farm)
Source: Expert interviews; BCG分析

■ : 対象範囲
□ : 部分的に対象、一部の企業/組織が取り組み

VCC市場の現状と今後の動き

- 従来行われてきた1対1の相対取引でのルールから、多くの企業・組織が参画することを想定したプラットフォームやルールの確立等が必要。

VCC市場の現状： 1対1の相対取引の中でルールを整備

- ①クレジット当たりの統一排出量基準が存在
 - ・ マーケット全体で「1クレジット = 1tCO2削減」が業界標準
- ②クレジット種類の分類基準も確立
 - ・ クレジットの種類はCO2排出回避/CO2削減に分類され、更に手法により自然ベース/技術ベースに分解
- ③発行要件の徹底
 - ・ 全プロジェクトが第三者機関の認証を経てクレジット化されるルールが徹底
- ④共通ライフサイクルの確立
 - ・ クレジットの認証から発行、償却まで全クレジットで共通のライフサイクルが確立済み

今後必要な動き： 多企業・組織が参画することを想定した整備が必要

- ①取引プラットフォームの確立
 - ・ 現状の相対取引から株式市場の様なプラットフォームの確立により、取引の透明性/公平性を担保
- ②価格設定基準の整備
 - ・ 共通基準を設け、価格の妥当性を開示/担保
 - 社会ベネフィットの付随で環境効果以上の値付けをする企業も存在する等、価格が幅広、且つ不透明
- ③最適マッチングの仕組み整備
 - ・ 取引プラットフォームを通じ、売り手(プロジェクト事業者)と買い手(法人/個人)の最適なマッチングを図る
- ④品質基準の確立
 - ・ 共通評価基準を設け、クレジット全体の品質担保/向上を図る

NETsの施策の方向性

- NETsの位置づけや意義/役割の明確化
 - 政府主導で社会実装に向けた目標・マイルストーンを設定。これにより、技術開発・市場形成を加速。

- NETs関連の技術開発をどのような観点で磨いていくか
 - NETsの低コスト化・省エネルギー化に向けた研究開発プロジェクトを実施。（工学的プロセス・自然プロセスの双方が必要なことに留意）
 - NETsの不確実性・課題（コスト・ポテンシャル・環境負荷・LCA等）を適切に評価・分析するための技術開発・データ収集を実施。
 - 幅広い技術分野・適応エリアにまたがるため、海外研究機関・企業等との連携も図る。

- NETs関連の技術開発をどのように産業化につなげていくか
 - 政府調達による初期需要の創出。企業によるCN製品購入の促進。
 - NETs関連の機器・材料を購入する際の補助制度・減税制度の導入。
 - VCC市場においてNETs関連のクレジットの導入拡大を促すための方策を検討。
 - ※ NETsクレジットの位置づけ（他クレジットとの関係）
 - ※ 信頼性と透明性の両方を担保した取引プラットフォームの確立とルール整備。
 - ※ 回収・貯留（・利用）における排出削減寄与度の帰属についてルール整備。
 - 海外市場への展開を見すえて、国際連携の推進を検討。

参考資料1/2

- 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>

参考資料2/2

- 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 Strefler, Thorben Amann , 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>