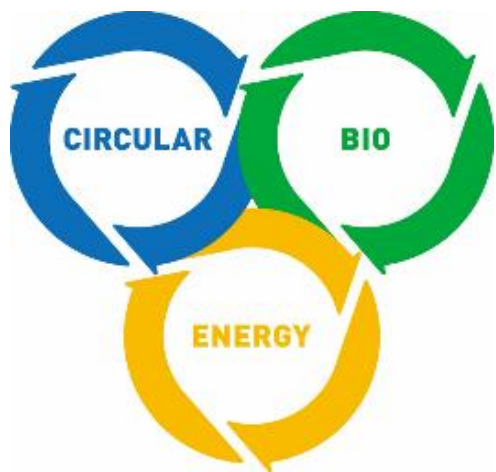


ネガティブエミッション技術への期待と 「風化促進」の技術課題



環境・化学ユニット
技術戦略研究センター
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 2022

I. はじめに

II. 2050年のカーボンニュートラルに向けた
ネガティブエミッション技術の役割と期待

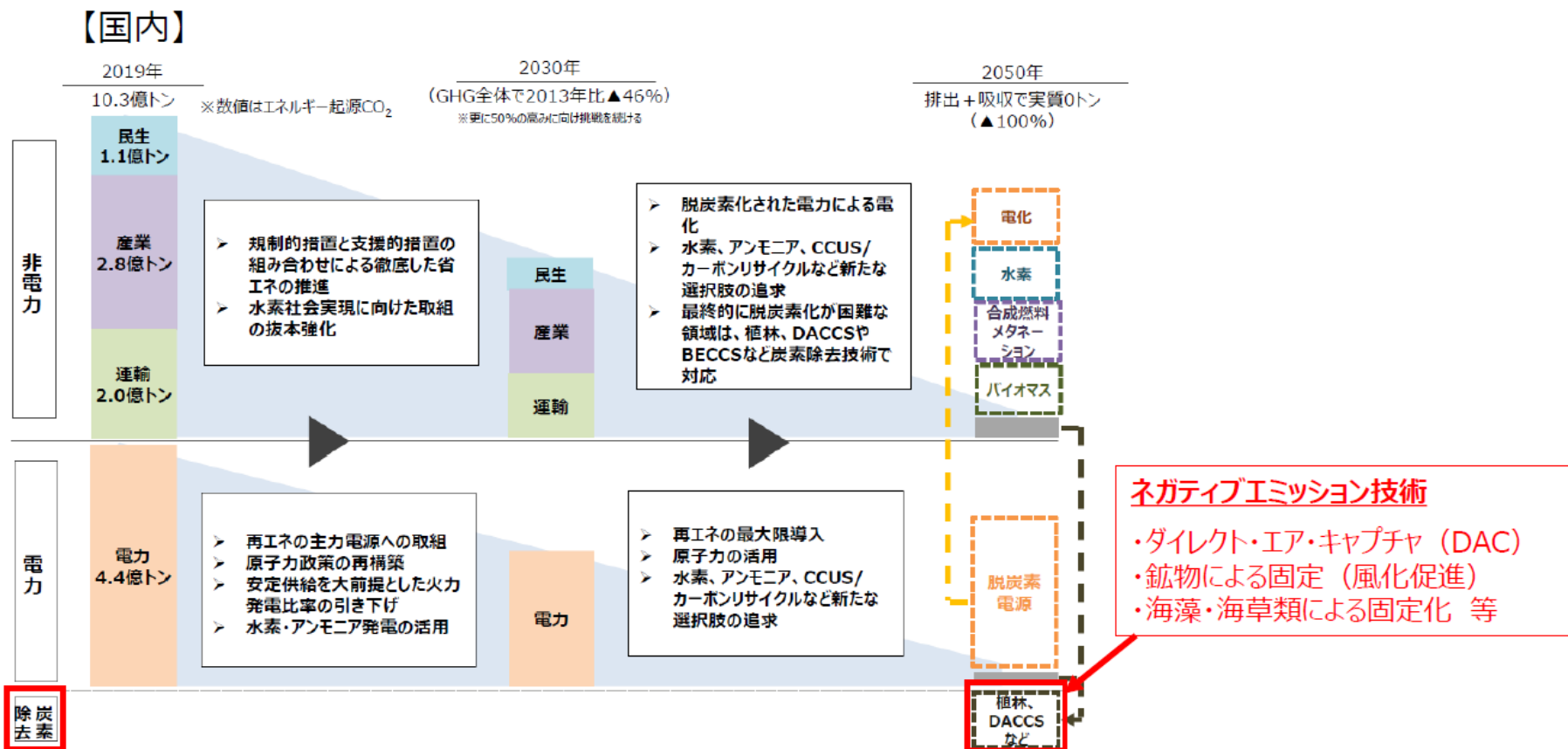
III. 風化促進の実現に向けた課題

IV. まとめ

- 2050年のカーボンニュートラル実現に向け、エネルギー、運輸、産業など様々な分野で大幅なCO₂排出削減が求められている。しかし、完全に排出量をゼロにすることは難しく、排出せざるを得ないCO₂を削減するためにはネガティブエミッション技術で相殺する必要がある。
- ネガティブエミッション技術とは、大気中のCO₂を回収・吸収、貯留・固定するCO₂除去に資する技術である。
- 海洋アルカリ化／肥沃化、風化促進、DACCS（Direct Air Carbon Capture and Storage）、BECCS（Bio-Energy with Carbon Capture and Storage）、植林、土壌炭素貯留、バイオ炭と多くのネガティブエミッション技術で、2050年想定で数Gt-CO₂/年程度の大きなCO₂削減ポテンシャルが期待される。
- その中で風化促進は、CO₂を吸収する鉱物が国内に豊富に存在し、採掘・粉碎や散布などの技術要素は鉱業や農業など産業の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。
- 海外では風化促進のCO₂削減ポテンシャルの検討や実サイトでの実証試験などが先行しており、日本でもプロジェクトが開始された。
- そこで本レポートでは、ネガティブエミッション技術を俯瞰的に整理するとともに、風化促進に必要な技術要素について、いくつかの事例とともに技術開発課題と方向性を示した。また、その他の課題として、経済合理性やリスクマネジメント等についても示した。これらの課題提起が、風化促進技術の早期実現に向けた検討の一助となることを期待する。

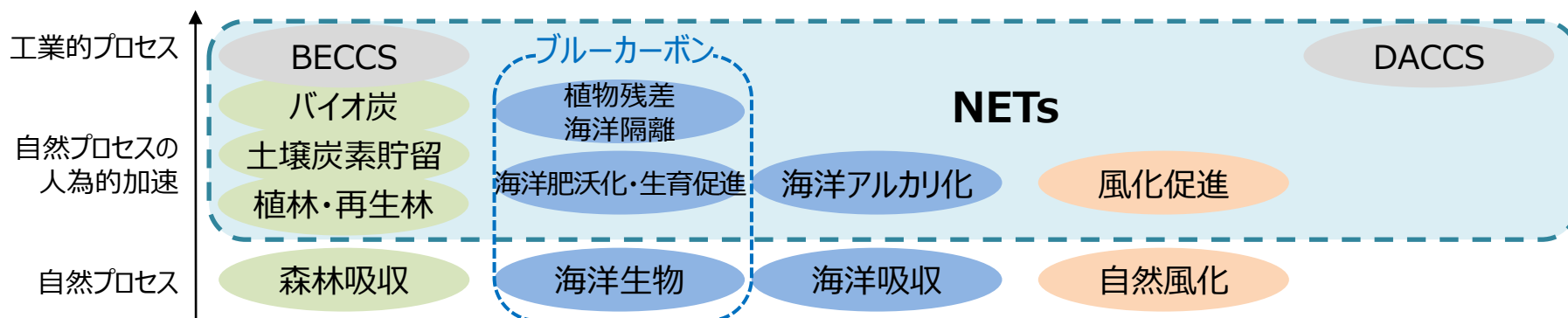
II. 2050年のカーボンニュートラルに向けた ネガティブエミッション技術の役割と期待

- 日本国内における2050年までのカーボンニュートラルの実現に向け、エネルギー、運輸、産業など様々な分野で大幅なCO₂排出削減が必要。
- しかしながら、排出を完全にゼロに抑えることは現実的に難しいため、排出せざるを得ないCO₂を相殺するネガティブエミッション技術（NETs, Negative Emission Technologies）の活用が必要である。



- NETsとは、大気中のCO₂を回収・吸収、貯留・固定化することで、大気中のCO₂の除去に資する技術である。
- 自然のCO₂吸収過程を人為的に加速させる技術や工業的プロセスのみでCO₂を吸収する技術などがある。

| | | |
|---------|---|---|
| 海洋アルカリ化 | 海水にアルカリ性の物質を添加して海洋の自然な炭素吸収を促進する炭素除去の方法 | |
| ブルーカーボン | 海洋肥沃化・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大気中からのCO ₂ 吸収・固定化を人為的に加速する技術 |
| | 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） |
| 風化促進 | 玄武岩などの岩石を粉砕・散布し風化を人為的に促進する技術 風化の過程（炭酸塩化）でCO ₂ を吸収・固定化 | |
| DACCS | 大気中のCO ₂ を直接回収し貯留する技術 | |
| 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 | |
| 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 | |

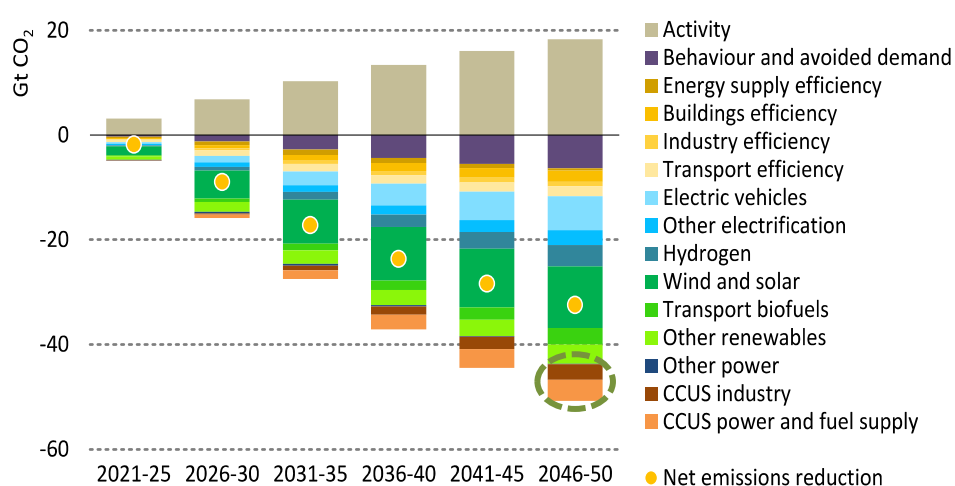


■ IEAのNet Zero by 2050では、2050年の世界全体におけるCO₂削減量約50 GtのうちDACCS/BECCS*1で約2 Gtの削減寄与が想定されている。

*1 IEAは産業・エネルギー分野を対象としているため、NETsの対象はDACCSとBECCSのみ

CO₂削減寄与の内訳

Figure 2.4 ▷ Average annual CO₂ reductions from 2020 in the NZE*2



IEA. All rights reserved.

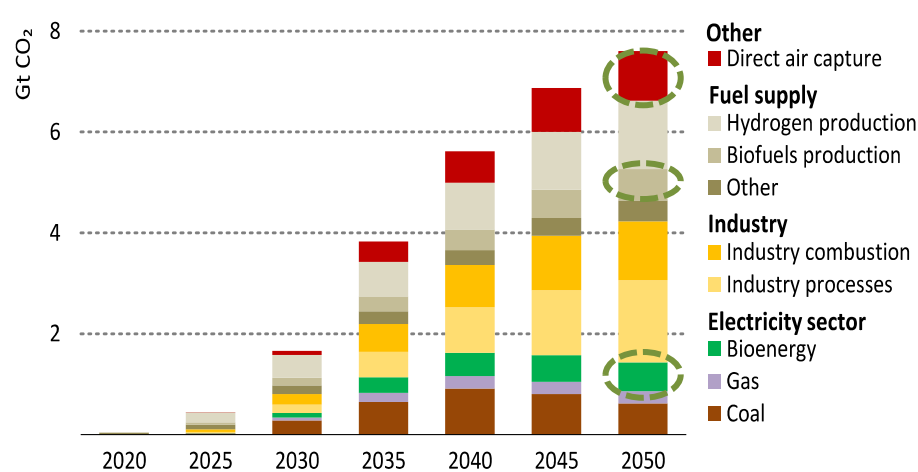
Renewables and electrification make the largest contribution to emissions reductions, but a wide range of measures and technologies are needed to achieve net-zero emissions

2050年では、約50 GtのCO₂削減が必要。
うち、約7.6 GtがCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) の寄与 (図中の囲み部分) 。

*2 Net Zero Emissions

CO₂分離・回収源の内訳

Figure 2.21 ▷ Global CO₂ capture by source in the NZE



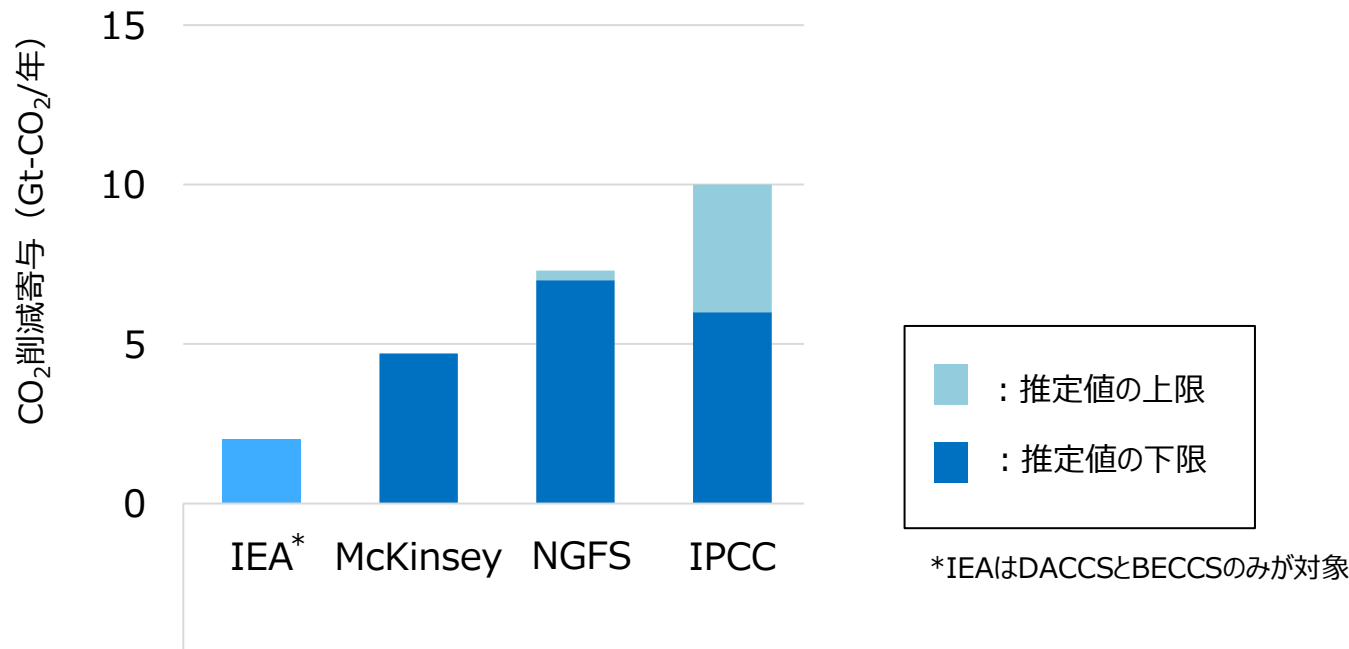
IEA. All rights reserved.

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.

約7.6 Gt-CO₂のCCUSのうち、NETsである
DACCS/BECCSは、合計約2 Gt (図中の囲み部分)

- 各機関の想定によると、2050年のカーボンニュートラル実現における、NETsのCO₂削減寄与の下限の見積もりは、世界で5～7 Gt-CO₂である。
- これは、CO₂削減全体（約50 Gt）の約10%に相当し、再生可能エネルギー、省エネルギー、CCUS（NETsを除く）に次ぐ寄与である。

各機関が想定する2050年におけるNETsのCO₂削減寄与



以下の資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成

IEA : Net Zero by 2050 https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

McKinsey : <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/climate-math-what-a-1-point-5-degree-pathway-would-take>

NGFS (Network for Greening the Financial System) : <https://www.ngfs.net/en/publications/ngfs-climate-scenarios>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) : <https://www.ipcc.ch/sr15/>

各NETsのCO₂削減への期待と風化促進の位置付け

- 文献等から、各NETsのCO₂削減ポテンシャル、コスト、必要土地面積などを整理した。
- いずれの技術もポテンシャルやコストの予測幅は大きいですが、中央値で見ると、**2050年想定で多くの技術で数Gt-CO₂/年程度の大きなCO₂削減ポテンシャルが期待される。**
- **本レポートで取り扱う「風化促進」は、削減ポテンシャルは2~4 Gt-CO₂/年、削減コストは\$50~\$200 /t-CO₂と、十分なポテンシャルと低コストでの実施が期待される。**

| 分類 | TRL | 削減ポテンシャル Gt-CO ₂ /年 *1 | | 削減コスト \$/t-CO ₂ *2 | | 必要土地面積 *3 m ² /t-CO 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 | 11.0 | 2~20 | 305 | 10~600 | — | 要 | ○ |
| 海洋肥沃化 | 3 | 4.4 | 2.6~6.2 | 67 | 23~111 | — | 要 | ○ |
| 植物残差海洋隔離 | 2 | 0.9 | 0.7~1 | 72 | 50~94 | — | 済 | ○ |
| 風化促進 | 4 | 3.0 | 2~4 | 128 | 50~200 | 29 | 要 | ○ |
| DACCS | 6 | 3.5 | 1~6 | 172 | 30~600 | 4 | 済 | △ |
| BECCS | 7 | 5.6 | 0.5~15 | 135 | 60~200 | 379 | 済 | △ |
| 植林・再生林 | 9 | 2.3 | 0.5~3.6 | 28 | 5~50 | 978 | 済 | ○ |
| 土壌炭素貯留 | 7 | 4.1 | 0.4~8.6 | 28 | -45~100 | 0 | 要 | ○ |
| バイオ炭 | 6 | 2.6 | 0.3~75 | 75 | 30~120 | 580 | 済 | ○ |

*1 2050年想定削減ポテンシャルの中央値、陸上バイオ系は重複あり

*2 2050年想定CO₂削減コストの中央値

*3 年間1トンのCO₂削減に必要な追加の土地面積、太陽光発電は10程度（効率18%、稼働率12%、0.5 kg-CO₂/kWhの電力を代替の場合）。
風化促進は、カンラン岩（CO₂固定量が多い岩石）を用いた数値。土壌炭素貯留は、現行の土地流用を想定。

*4 CO₂削減効果が確認されコンセンサスを得ているかを基準に、未確認なものを要とした。

*5 諸外国と比較した際の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のため、△のスコアとした。

III. 風化促進の実現に向けた課題

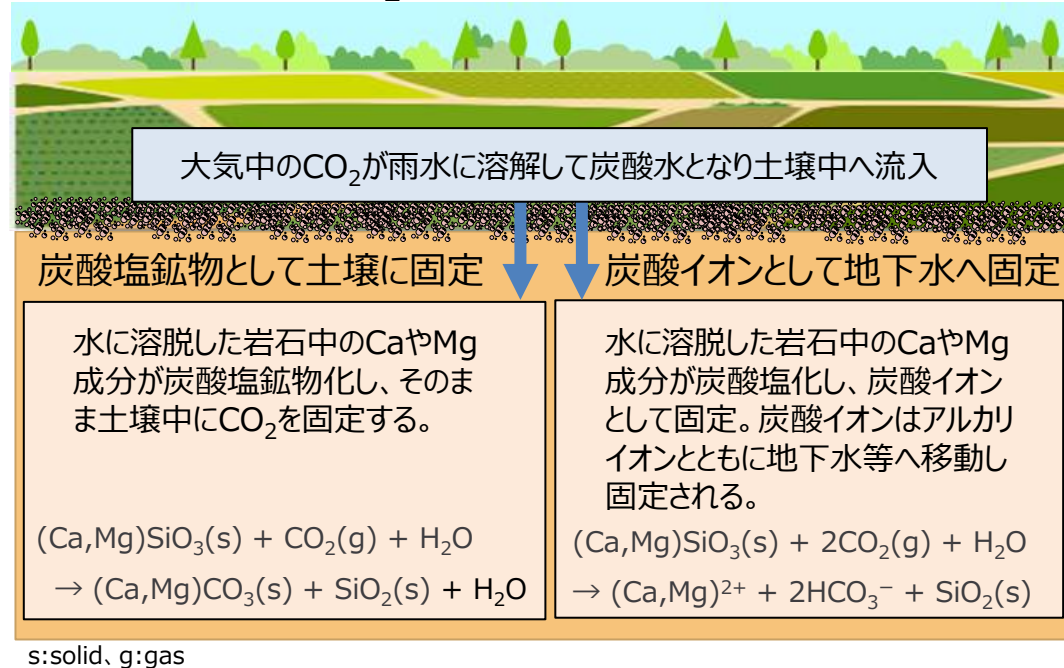
- 風化促進の技術概要と課題
- 風化促進の実現に向けたその他の課題

- 風化とは、地表面に露出した岩石が、自然環境の下で千年～万年の時間スケールで次第に微細化、組成変化していく現象である。温度変化や風などの作用で微細化が進む**物理風化**、および炭酸塩化や酸化、微生物による鉱物成分の消化など、組成変化を伴う**化学風化**があり、両方が並行して進行する。
- 炭酸塩化とは、岩石中に含まれる塩基性のケイ酸塩カルシウム (CaSiO₃) やケイ酸塩マグネシウム (MgSiO₃) などから、CaCO₃やMgCO₃などの炭酸塩が生成されること。この組成変化によって、大気中CO₂を固定する。
- **風化促進とは、岩石の破碎などの工業的プロセスによって、風化における炭酸塩化を1年～数年単位に加速し、大気中のCO₂の炭酸塩鉱物・炭酸イオンとしての固定を人為的に促進する技術**である。
- 岩石の採掘・破碎・散布は、鉱業や農業など産業の既存技術の適用が可能なことから、早期の実現が期待される。

風化促進とは

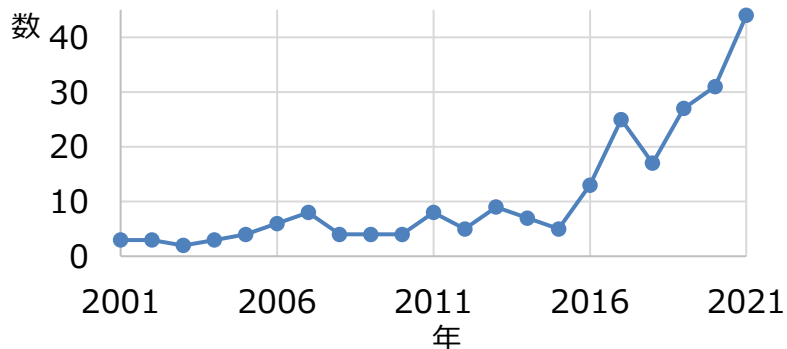


風化促進におけるCO₂固定のメカニズム

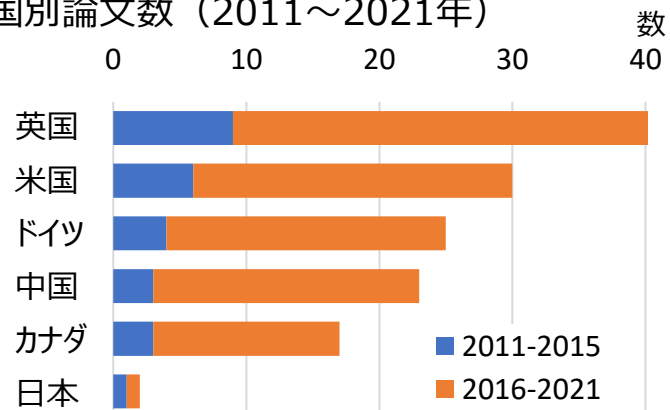


- 風化促進に関連する論文数は、欧州・米国・カナダ・中国を中心に、近年大幅に増加している。一方、日本の論文数は極めて少ない。
- 海外では、CO₂削減ポテンシャルの検討や実サイトでの実証試験が先行して開始されている。
- 日本でもプロジェクト化に向けた検討が始まった。

“風化促進”で検索した論文数



国別論文数 (2011~2021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)

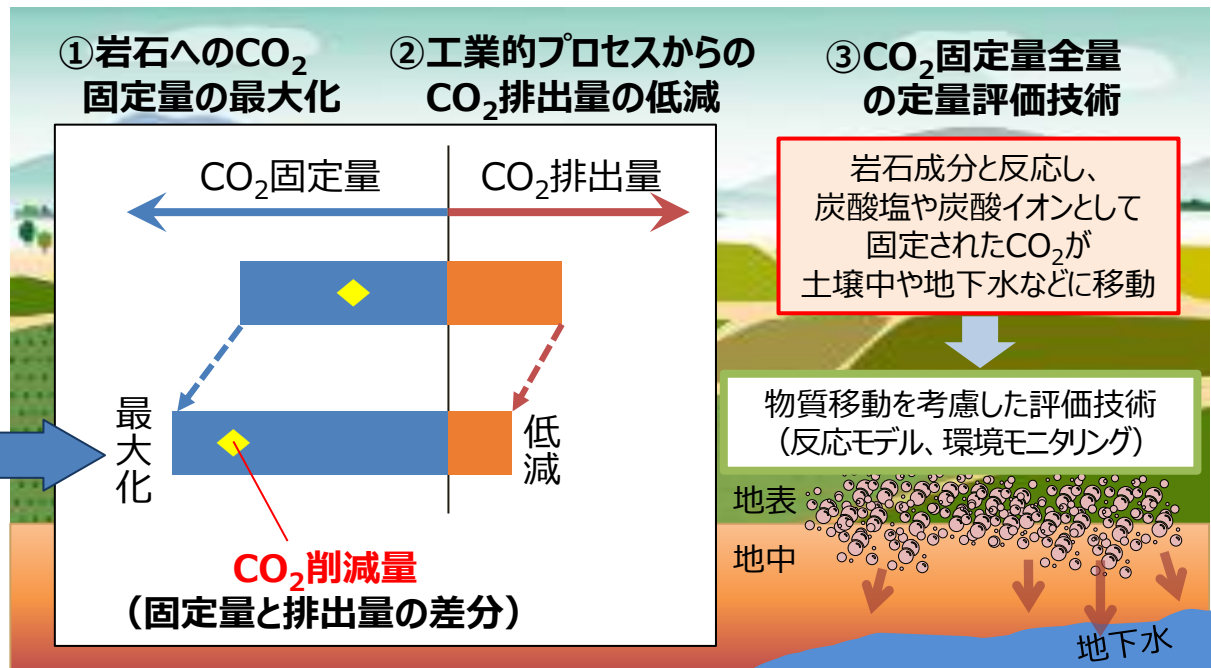
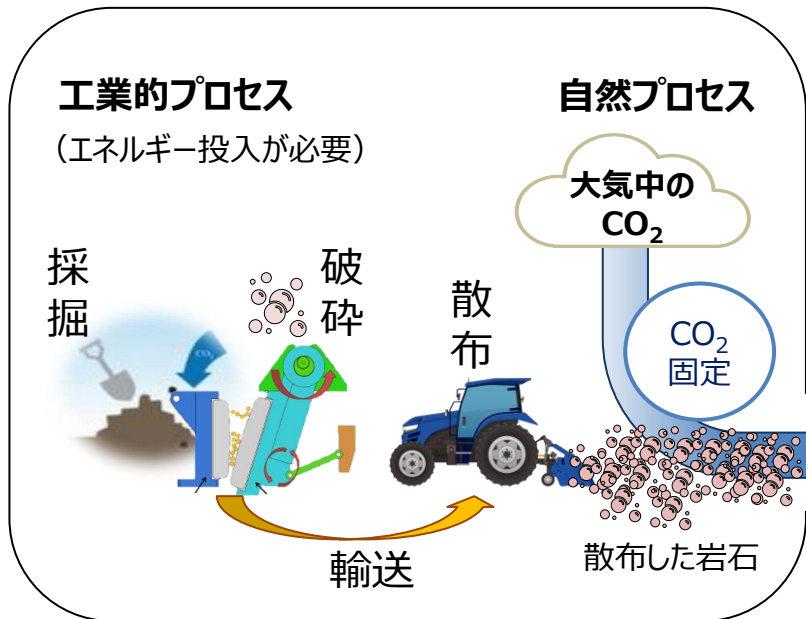
風化促進に関するプロジェクトの概要

| 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 削減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削減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 削減ポテンシャル (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 削減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 | 2022 | DETAILS (スペイン) | 鉱山廃棄物によるCO ₂ 削減の検討。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 削減の促進を検討。 |
| 実証 | 2022 | NEDO (日本) | 自然プロセスを人為的に加速させることでCO ₂ を削減する技術を中心に研究開発が開始。 |

- 風化促進の有効性を高めるためには、CO₂削減量を最大化することが重要である。そのためには、岩石へのCO₂固定量を可能な限り増加させることに加え、CO₂固定を加速するための工業的プロセスにおけるエネルギー投入に伴うCO₂排出量を低減することが重要である。
- 一方、岩石の成分と反応し、炭酸塩や炭酸イオンとして固定されたCO₂は、雨水等によって土壌中や地下水などに移動するため、この物質移動を考慮してCO₂固定量の全量を正確に評価することが必要である。
- すなわち、風化促進に必要な技術要素は、以下の3つの観点に大別される。
 - ① 岩石へのCO₂固定量を最大化する技術
 - ② 工業的プロセスに伴うCO₂排出量を低減する技術
 - ③ CO₂固定量全量の定量評価技術
- これらの3つの技術要素に着目し、技術開発の課題と方向性を考察した。

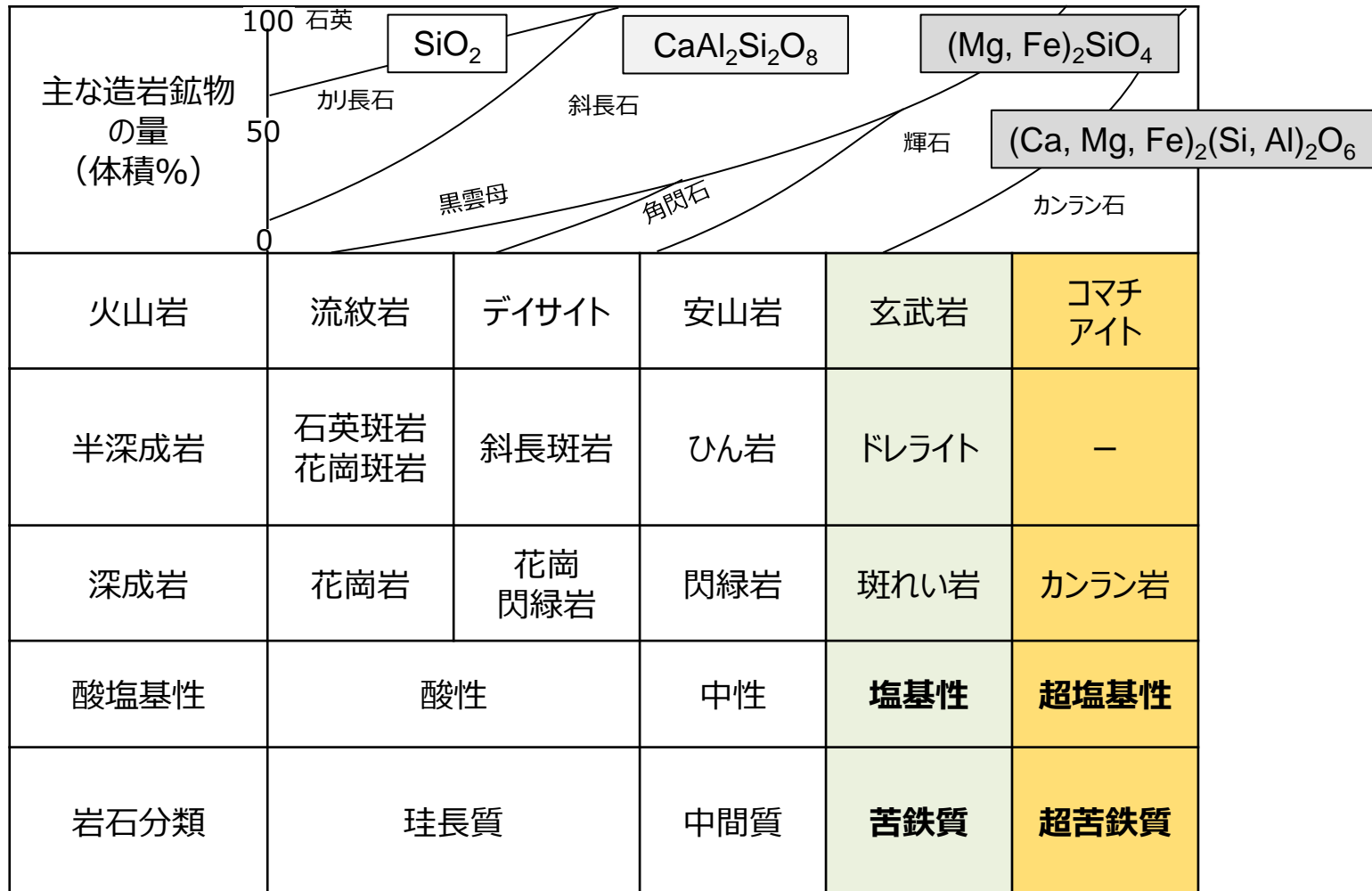
風化促進のプロセス

風化促進に必要な技術要素



①-1 岩石へのCO₂固定量を最大化する技術 ～適切な岩石の選定～

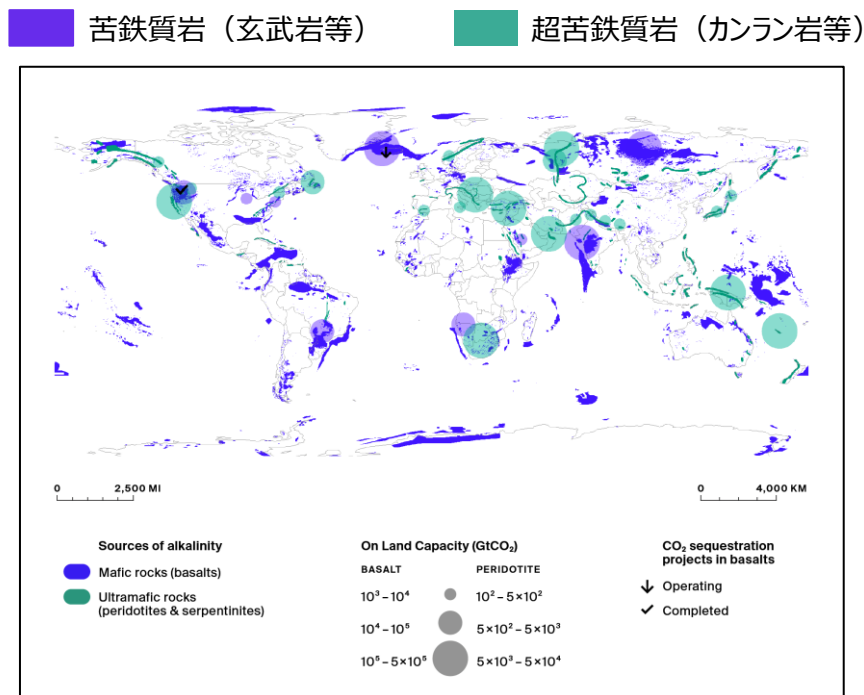
■ 風化促進では、岩石中に含まれる**塩基性**のCaSiO₃やMgSiO₃などが、炭酸塩化反応によって大気中CO₂を固定する。よって、CO₂固定に適する岩石は、**超塩基性の超苦鉄質岩（カンラン岩など）**、次いで**塩基性の苦鉄質岩（玄武岩、斑れい岩など）**である。



①-1 岩石へのCO₂固定量を最大化する技術 ～適切な岩石の選定～

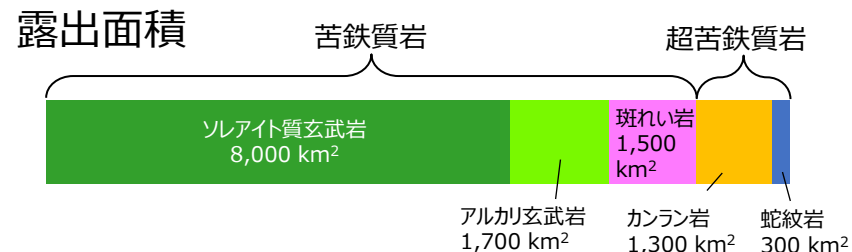
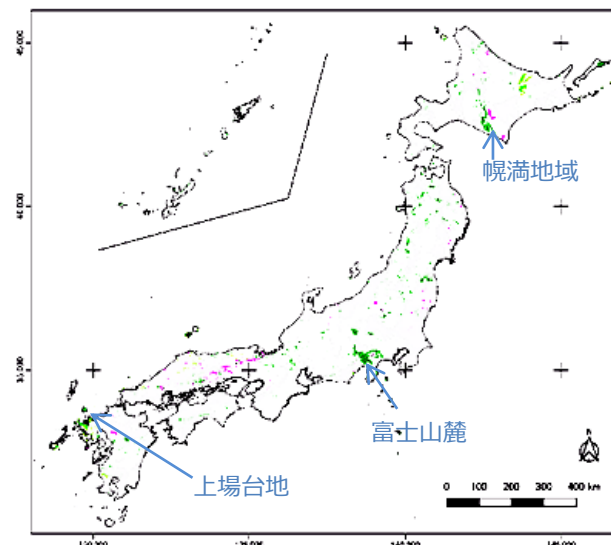
- 風化促進に適する**超苦鉄質岩（カンラン岩など）**や**苦鉄質岩（玄武岩、斑れい岩など）**は世界中に幅広く分布しており、これらを有効活用できれば、風化促進は世界各地で広く実施可能なNETsと期待される。
- 国内においても、超苦鉄質岩や苦鉄質岩は幅広く分布しており、その露出総面積は**合計12,800 km²（国土の3.4%に相当）**に達する。

世界の超苦鉄質岩、苦鉄質岩の分布



出典：CDR Primer, Chapter-3
<https://cdrprimer.org/read/chapter-3>

日本の超苦鉄質岩、苦鉄質岩の分布



産総研地質調査総合センター、20万分の1日本シームレス地質図V2
<https://gbank.gsj.jp/seamless/>
 国土交通省、国土数値情報、表層地質図データ
<https://nlftp.mlit.go.jp/>
 を基にNEDO技術戦略研究センター作成

①-1 岩石へのCO₂固定量を最大化する技術 ～適切な岩石の選定～

- 苦鉄質岩の玄武岩でも組成（構成鉱物）が異なると1年後のCO₂固定量の試算値は異なる。これは、炭酸塩化速度の**大きい成分**と**小さい成分**の構成比の影響を受けるためである。
- CO₂固定量を最大化するためには、構成鉱物の特性を考慮して**最適な岩石を選定することが重要**である。

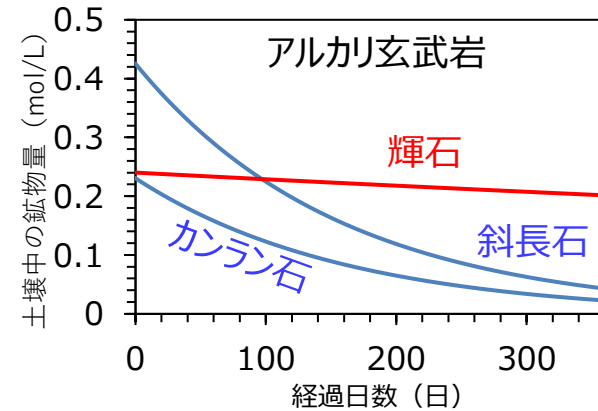
玄武岩の種類・組成（構成鉱物）とCO₂固定量

| | 構成鉱物 | 重量分率 (%) | 1年後CO ₂ 固定量試算値 (t-CO ₂ /t-rock/y) |
|-----------|-------|----------|---|
| アルカリ玄武岩 | 斜長石 | 43 | 0.134 |
| | 輝石 | 21 | |
| | カンラン石 | 12 | |
| | その他 | 24 | |
| ソレライト質玄武岩 | 斜長石 | 45 | 0.085 |
| | 輝石 | 34 | |
| | その他 | 21 | |

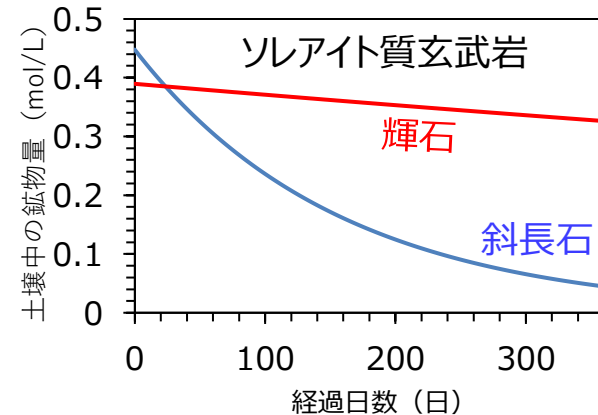
斜長石（炭酸塩化速度大）： $\text{Ca}_{0.6}\text{Na}_{0.4}\text{Al}_{1.6}\text{Si}_{2.4}\text{O}_8$
 輝石（炭酸塩化速度小）： $\text{Ca}_{0.9}\text{Mg}_{0.9}\text{Na}_{0.1}\text{Al}_{0.4}\text{Fe}_{0.2}\text{Si}_{1.9}\text{O}_6$
 カンラン石（炭酸塩化速度大）： Mg_2SiO_4

D.J. Beerling et al., [Nature, 583\(2020\)242](#)
 を基にNEDO技術戦略研究センター作成

炭酸塩化に伴う鉱物量減少速度解析



【反応輸送解析による試算の前提】
 ・岩石組成：左表の重量分率
 D.J. Beerling et al., [Nature, 583\(2020\)242](#)より、同一値を設定。
 ・岩石粒径：10 μm
 ・散布量：40 t/ha散布
 ・雨水（大気CO₂と平衡）の浸透率：1200 mm/yr

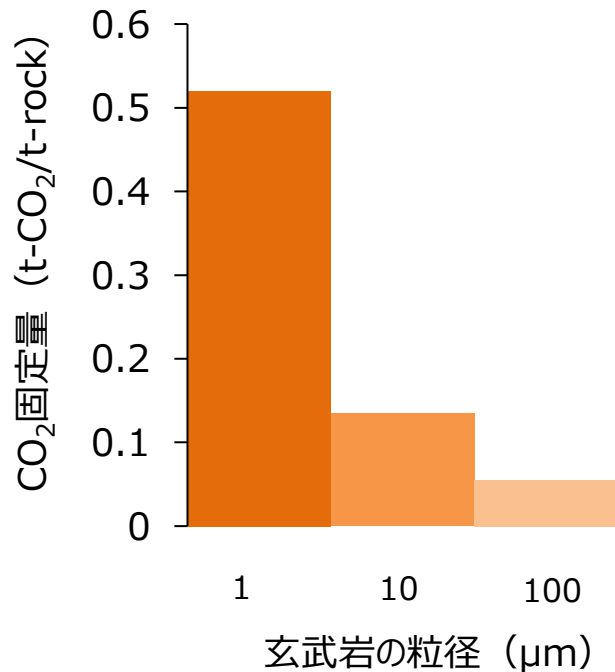


【試算の前提】
 ・同上

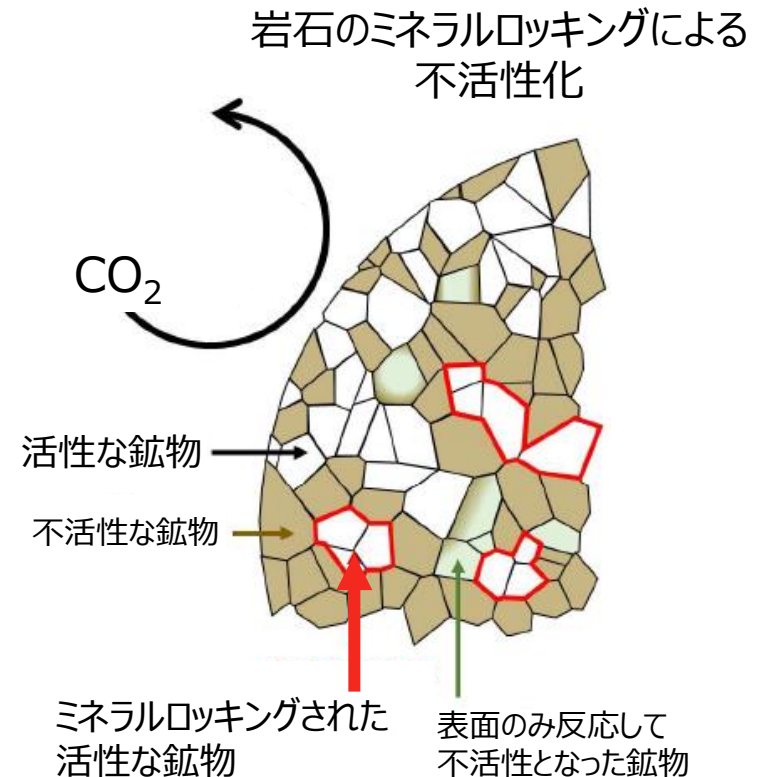
①-2 岩石へのCO₂固定量を最大化する技術 ～岩石の微粒化～

- 岩石のCO₂固定量は、粒径が小さいほど大きくなる傾向がある。
- 炭酸塩化に活性な鉱物が不活性な鉱物で覆われ（ミネラルロッキング）CO₂と反応しにくくなる場合がある。微粒化は表面積の増加に加え不活性層の破壊により、CO₂固定量の増加に有効と考えられる。
- よって、岩石へのCO₂固定量を最大化するには、**岩石を微粒化することが有効**と考えられる。

玄武岩の粒径とCO₂固定量*の関係



*最初の1年間におけるCO₂固定量



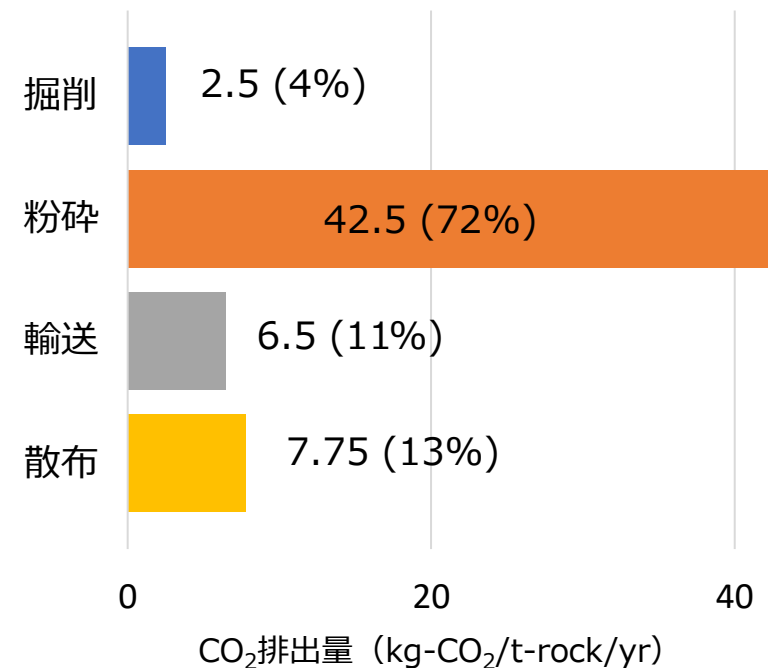
②-1 工業的プロセスのCO₂排出量を低減する技術 ～各工程のCO₂排出量～

- 工業的プロセスのCO₂排出量を把握するため、掘削・粉砕・輸送・散布の各工程でのCO₂排出量の概算を試みた。
- 粉砕粒径10 μmなど、岩石を採掘・粉砕する総エネルギーや輸送距離、単位面積当たりの岩石散布重量の前提を置き、現状のエネルギーや燃料のCO₂排出原単位を用いて概算した結果、粉砕工程に起因するCO₂排出量が最も多かった。
- **工業的プロセスのCO₂排出量を低減するためには、粉砕エネルギーを低減する技術開発が重要**である。

工業的プロセスのCO₂排出量概算における前提条件

| | 前提条件 |
|----|--|
| 掘削 | 穿孔、小割、積込、運搬での軽油消費と発破の消費エネルギーの総和より算出（排出係数：軽油2.58 t-CO ₂ /kl, 発破ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil explosive) 0.60 kg-CO ₂ /kg) |
| 粉砕 | 粉砕（粒径10 μm, 320 MJ/t-rock ^[1] ）、破碎、ふるい分、集塵、運搬で消費する電力エネルギーの総和より算出（排出係数：35.61 t-C/TJ, 0.47 kg-CO ₂ /kWh) |
| 輸送 | 10 tディーゼルトラック4台で、鉱山～施用地まで50 kmの輸送。改良トンキロ法 ^[2] より算出。 |
| 散布 | 農耕機械による散布で、散布する際の移動距離を考慮。40 t/haを散布。改良トンキロ法 ^[2] より算出。 |

各工程のCO₂排出量の概算値



* 括弧内は工業的プロセス全体に占める排出割合

出典：

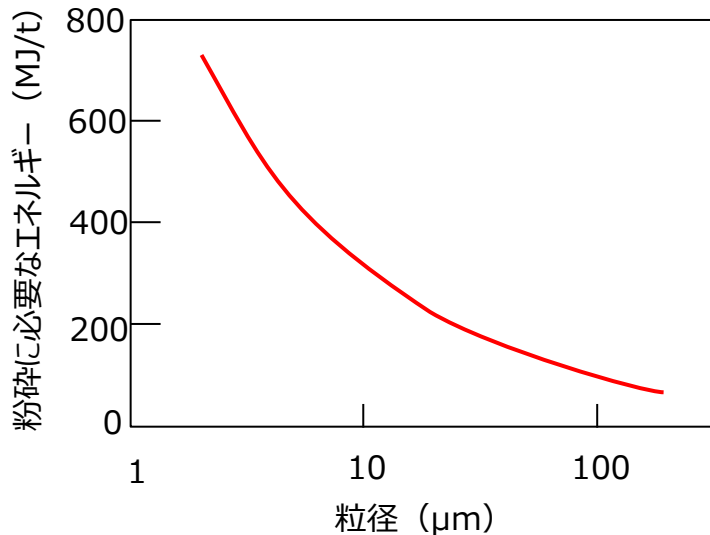
[1] D.J. Beerling et al., [Nature](#), 583(2020)242

[2] 経済産業省、国土交通省、ロジスティクス分野におけるCO₂排出量算定方法 共同ガイドラインVer. 3.1

②-2 工業的プロセスのCO₂排出量を低減する技術 ～粉碎エネルギーの低減～

- 岩石の粉碎粒径が小さいほど、CO₂固定量は大きくなるが、一方で必要な粉碎エネルギーが大きくなるためCO₂排出量は増える。両者がトレードオフの関係にあることから、粉碎粒径の最適点を見極める必要がある。
- 粉碎エネルギーは、表面エネルギー*1や表面積の増分*2、研削効率*3に依存する。岩石の物性やCO₂固定能力に応じた最適な粉碎技術や粒径を選択することが重要である。

岩石の粉碎粒径と要するエネルギーの関係



D.J. Beerling et al., [Nature, 583\(2020\)242](#)
を基にNEDO技術戦略研究センター作成

表面エネルギーと粉碎エネルギーとの関係

$$E_{grind} = \frac{\gamma \Delta S}{\eta}$$

表面エネルギー 表面積増分
粉砕エネルギー 研削効率

1粒子を粉砕したときの表面積増分

$$\Delta S = R_f (N \cdot 4\pi r^2 - 4\pi r_0^2)$$

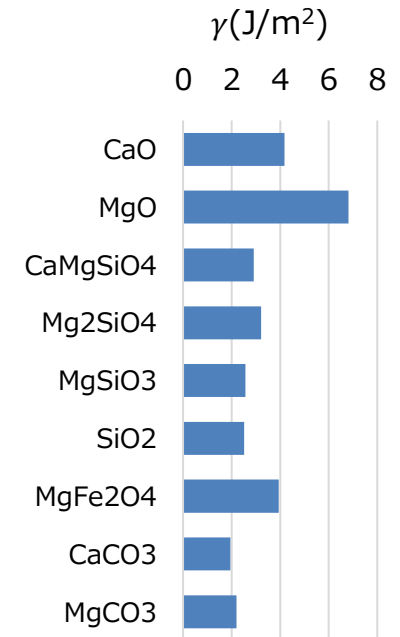
表面粗さ
粉砕後に生成した粒子数
粉砕前の粒径

粉砕後の粒径

- *1 表面エネルギーは、鉱物が硬いほど大きくなる。
- *2 表面積の増分は、鉱物を細かく粉砕するほど大きくなる。
- *3 研削効率は、以下の式で表せる。

$$\text{研削効率} = \frac{\text{理論粉砕エネルギー}}{\text{実際の粉砕エネルギー}}$$

鉱物種固有の表面エネルギー

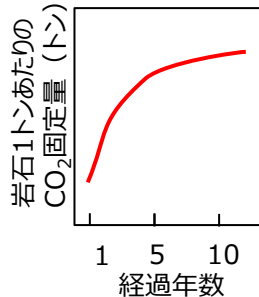


③ CO₂固定量の定量評価技術

- 岩石の成分と反応し、炭酸塩や炭酸イオンとして固定されたCO₂は、雨水等によって土壤中や地下水などに移動するため、これを考慮したCO₂固定量全量を正確に計測・推算する技術が必要。
- CO₂固定量全量を精度よく推算するためには、(A) 土壌や地下水へのCO₂移動を考慮した反応モデルと、(B) 土壌や地下水の環境条件のモニタリング法を構築し、(C) 実証試験を通じて精度向上を図ることが必須。
- (A) CO₂反応モデルとして、岩石の鉱物種や粒径・組織構造に応じた反応特性や土壌・地下水への炭酸塩・炭酸イオンの移動量を把握し、正確なCO₂固定量を推定するモデルを構築する。
- (B) 環境条件のモニタリング法として、土壌や地下水の温度、湿度、アルカリ度などから、精度よく計測可能でCO₂固定量に影響する代表指標を特定し、反応モデルに活用し得る手法を構築する。
- 固定量予測の蓋然性の担保には、定量評価手法としての国際的な標準化の取り組みが重要。

(A) CO₂反応モデル

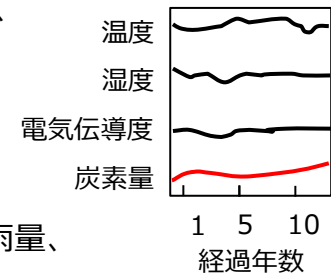
- ・炭酸塩化による土壌や地下水等へのCO₂固定量の推定モデル
- ・モデル変数：
岩石を構成する鉱物種、組織構造、粒径、表面状態、環境条件など
- ・環境条件は、(B)モニタリング法より反映



精度よく計測可能な環境条件
モニタリング手法の確立と
反応モデルへの反映

(B) 環境条件モニタリング法

- ・土壌：温度、湿度、pH、アルカリ度、電気伝導度、炭素量
- ・地下水：温度、pH、アルカリ度
- ・大気：気温、湿度、降雨量、降雨頻度など



CO₂固定量推定の精度向上

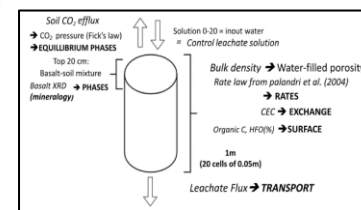


モニタリング・計測の精度向上

(C) 実証試験

実証試験例：制御された屋外実験場における炭素隔離の評価と1次元数理モデル

- ・環境条件が安定したラボ試験での影響度評価によるモデルパラメータフィッティング
- ・実サイトでの実証試験を通じたモデル精度検証



出典：
A. Vienne et al.,
[Frontiers in Climate](https://doi.org/10.3389/fclm.2022.869456)
4(2022)869456

- 風化促進を実現するためには、経済合理性の追求やリスクマネジメントの検討、およびこれらを踏まえたステークホルダーとの合意形成が必要。
- 経済合理性の追求のためには、コスト評価に留まらず、炭素クレジットなどのインセンティブ、農作物の生産性向上効果などの相乗便益（コベネフィット）など、意思決定に優位に働く要素等を加味した検討が重要。
- リスクマネジメントの検討では、岩石からの重金属流出リスクなどに対して、評価手法を確立するとともにリスク自体を最小化する手段の確立が重要。
- ステークホルダーは、農業、林業、漁業など広範囲にわたり、経済合理性とリスクマネジメントも包含した風化促進技術の認知と合意形成が必要。経済メリットが享受できる可能性が高い領域から順次実証試験を実施して、新たな認知と合意形成の促進、普及拡大を狙う。

| 項目 | 分類 | 検討事項 |
|-----------|--------------------|--|
| 経済合理性 | コスト評価 | ・ 適地調査、掘削～散布に要する工業的プロセスのコスト試算 |
| | インセンティブ | ・ 炭素クレジット等のマネタイズに向けた市場整備 |
| | コベネフィット | <ul style="list-style-type: none"> ・ 以下に例示されるコベネフィットに関する効果確認 - 農耕地の土壌改良による農作物の生産性向上への寄与 - 酸性化した鉱山廃水の無害化への寄与 - 岩石中からのFe溶出による海洋鉄肥沃化と漁業への寄与 |
| リスクマネジメント | 岩石から溶出する重金属による環境影響 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 安全性評価方法の確立 ・ 土壌汚染、人体有害性等へのリスク最小化の検討 |
| | 鉱物の掘削・破碎・輸送時のリスク | ・ 安全性を考慮した作業・輸送路管理 |

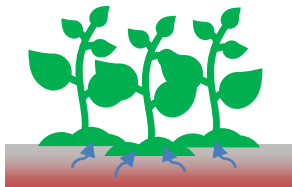
| | | |
|-------------|----------------|---|
| ステークホルダーの合意 | 農業、林業、漁業関係者の合意 | <ul style="list-style-type: none"> ・ コベネフィットを含む経済メリットやリスクの明確化 ・ 普及拡大の土台形成 |
|-------------|----------------|---|

- 風化促進は、農耕地や海洋の植物の成長促進などの**コベネフィットが期待**されており、効果把握のためにラボ評価や実証試験などを通じたコベネフィットの定量化が重要。
- **農耕地**では、酸性土壌のアルカリ化の効果と、岩石に含まれる植物の成長に必須なミネラル成分の供給により、実証試験で**植物の収量増加が確認**されている。
- **海洋**では、**海洋鉄肥沃化**による**植物プランクトンの増殖が確認**された。岩石に含まれる鉄(Fe)が河川を通じて海洋に到達し、食物連鎖を通じて魚類の成長を促進し、漁業の生産性が改善することが期待される。

農耕地や海洋への風化促進によるコベネフィット

農耕地の土壌改良

岩石に含まれるCa等でのアルカリ化による酸性土壌での根の傷みや養分の吸収力阻害の改善、Fe等植物の成長に必須なミネラル成分の供給、粉碎粒子の混合による土壌の硬さ、浸水性などの物理特性の改善により、農作物の収量増加、および有機炭素の貯留量増加が期待される。

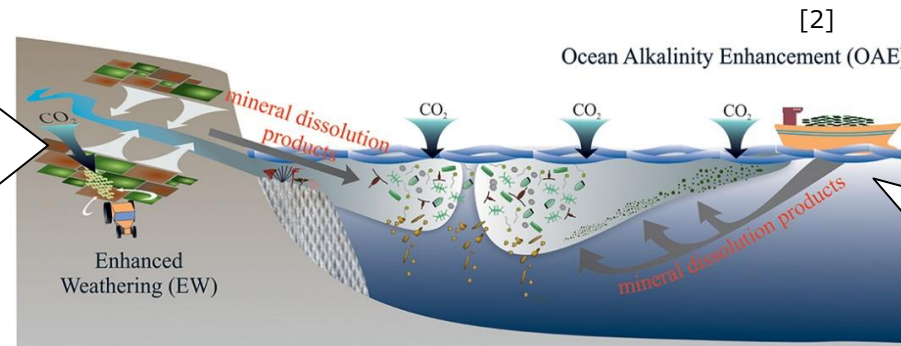


Si, Ca, K, Feなど

玄武岩を100 t/haで散布。
120日後に、約12%~30%の
植物収量が増加^[1]。

海洋の肥沃化

岩石からのFeが河川を通じて海洋に到達する海洋鉄肥沃化が、植物プランクトンを増殖し、食物連鎖を通じて、魚類の成長を促進し、漁業の生産性を改善することが期待される^[2]。



植物プランクトン
Fe

鉄の海洋散布による植物プランクトンの大規模増殖を確認^[3]

出典：

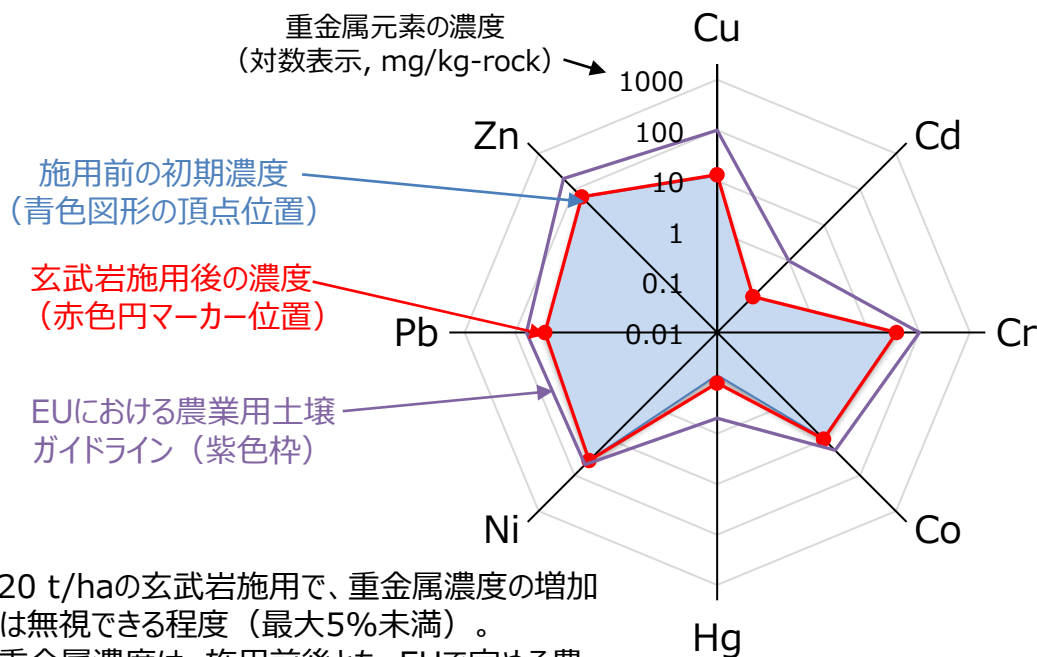
[1] D.J. Beerling et al., Global Change Biology, 6(2020)3658-3676

[2] L.T. Bach et al., Front. Clim., 11(2019) 00007

[3] <http://www2.fish.nagasaki-u.ac.jp/FISH/KYOUKAN/s-takeda/Fe-fertilization.pdf>

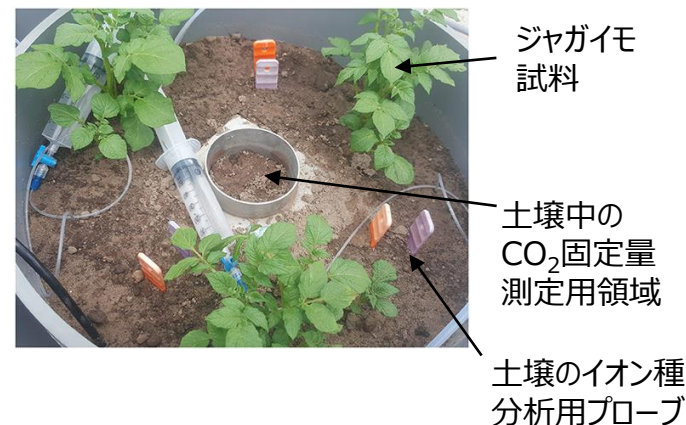
- 岩石に、カドミウム、クロム、ニッケル、鉛などの重金属が含まれる場合、環境や生態系へ影響を及ぼすリスクがあるが、これまでの実証試験ではガイドラインを超えるような重金属の有害な影響は報告されていない。
- リスク最小化のためには、環境や生態系への影響を引き起こさない条件（岩石の種類、粒径、温度、湿度、土壌のpH等）を把握することが重要であり、ラボ評価や実証試験を通じたデータベース拡充やリスク管理手法の検討が必要である。

玄武岩の試験施用における土壌中の重金属元素種の測定例とEUにおける農業用土壌ガイドラインとの比較^[1]



- 20 t/haの玄武岩施用で、重金属濃度の増加は無視できる程度（最大5%未満）。
- 重金属濃度は、施用前後とも、EUで定める農業用土壌ガイドラインの閾値未満の値。
- 元素記号：名称
Cu：銅、Cd：カドミウム、Cr：クロム、Co：コバルト
Hg：水銀、Ni：ニッケル、Pb：鉛、Zn：亜鉛

自然環境を模擬した土壌の実験例^[2]



- 自然に近い環境を人工的に作り出した土壌で、温度や光などの環境条件を制御し、玄武岩を散布してジャガイモを育成。
- 長期にわたる土壌やジャガイモにおける炭素量、栄養素量、重金属量の増減をモニタリング。

出典

[1] 英国のプロジェクト資料, [The Future Forest Company](#)

[2] A. Vienne et al., [Front. Clim., 17, 2022, Negative Emission Technologies](#)

- 2050年のカーボンニュートラルに向けたネガティブエミッション技術（NETs）の役割と効果を、各機関の報告書等の資料から整理した。2050年想定のコ₂削減ポテンシャルは、多くのNETsで数Gt-CO₂/年程度であり、カーボンニュートラルへの十分な貢献が期待できる。
- NETsの中で、風化促進は、国内で鉱物資源を調達でき、採掘・粉砕や散布といった技術要素は既存の産業技術を利用できる可能性があり、早期の実現が期待される。実サイトでの実証試験などは海外が先行しているが、日本でも研究開発が開始されている。
- 風化促進に必要な技術要素について、①岩石へのCO₂固定量を最大化する技術、②工業的プロセスに伴うCO₂排出量を低減する技術、③CO₂固定量の定量評価技術の3つの観点に着目。①～③の技術要素をいくつかの事例とともに考察し、適切な岩石の選定、粉砕エネルギーの低減、CO₂反応モデルや環境条件モニタリング法などが重要であるとの方向性を示した。
- 風化促進を普及させるためには、上記以外にも、炭素価格などのインセンティブや農耕地や海洋へのコベネフィットなどの検討による経済合理性の確立、さらに鉱物中の重金属流出リスクなどに対する評価手法ならびにリスク自体を最小化する手段の確立が重要である。
- ステークホルダーは、農業、林業、漁業などの広範囲にわたり、経済合理性とリスクマネジメントも包含した風化促進技術の認知と合意形成が必要。経済メリットが享受できる可能性が高い領域から順次実証試験を実施して、新たな認知と合意形成の推進、普及拡大を狙う。

| ページ | 文献 |
|--------------|--|
| 6, 9 (共通) | 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: 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. Eufrazio, 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 |
|--------------|---|
| 6, 9 (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. Strefler, T. Amann , N. Bauer, E. Krieglger, and J. Hartmann, Environ. Res. Lett., 13,034010, 2018. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4 |

| ページ | 各プロジェクト実施主体へのリンク |
|-----|--|
| 12 | 1: USGS https://pubs.usgs.gov/sir/2018/5079/sir20185079.pdf 2: Project vesta@Carbon180 https://www.vesta.earth/ 3: PALEOCARBON https://cordis.europa.eu/project/id/840799 4: D.J. Beerlingら報告 https://www.nature.com/articles/s41586-020-2448-9 5: The Future Forest Company https://thefutureforestcompany.com/ 6: DETAILS https://cordis.europa.eu/project/id/101018312 7: NEDO https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101573.html |



技術戦略研究センターレポート

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 発行

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

- センター長 岸本 喜久雄
- センター次長 飯村 亜紀子
 西村 秀隆（2021年6月まで）
- 環境・化学ユニット
 ユニット長 中村 勉
 土肥 英幸（2022年3月まで）
- 研究員 鈴木 秀士
- 研究員 寒川 泰紀
- 研究員 坂本 友樹
- 研究員 柳田 泰宏（2021年3月まで）

- ・本資料に掲載されている全てのドキュメント、画像等の著作権は、特に記載されているものを除き、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター（以下、NEDO TSCという。）に帰属します。
- ・本資料の内容の全部又は一部について、私的使用又は引用等著作権法上認められた行為として、適宜の方法により出所を明示することにより、引用・転載複製を行うことが出来ます。
ただし、NEDO TSC以外の出典元が明記されている場合は、それぞれの著作権者が定める条件に従ってご利用下さい。
- ・本資料に掲載されている著作物を商業目的で複製する場合は、予め下記お問い合わせ宛にご連絡下さい。
商業目的で複製とは、直接収益を得ることを目的に著作物を複製して販売すること等を指します。
- ・本資料の全部又は一部について、NEDO TSCに無断で改変を行うことはできません。
- ・本資料に関する問い合わせ先：
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター
電話 044-520-5150 E-Mail: tsc-unit@ml.nedo.go.jp