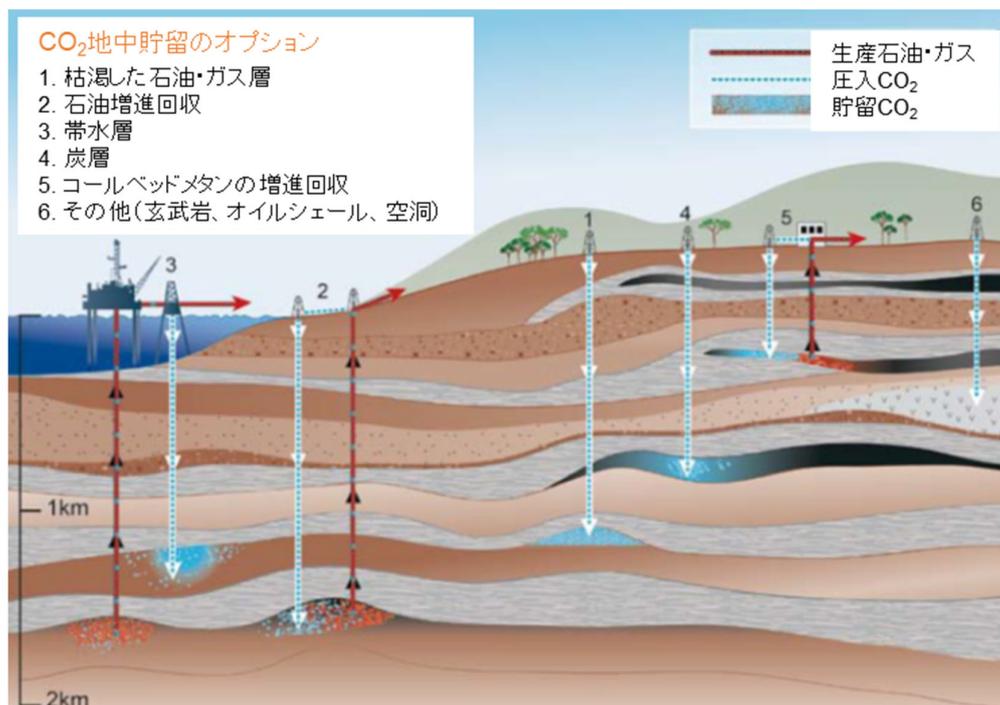


産総研におけるCO₂の地中貯留および 鉱物化に関する研究開発の課題と展望

地圏資源環境研究部門 CO₂地中貯留研究グループ
(兼)ゼロエミッション国際共同研究センター 環境・社会評価研究チーム

徂徠 正夫

CCS(二酸化炭素回収・貯留)とは Carbon dioxide Capture and Storage

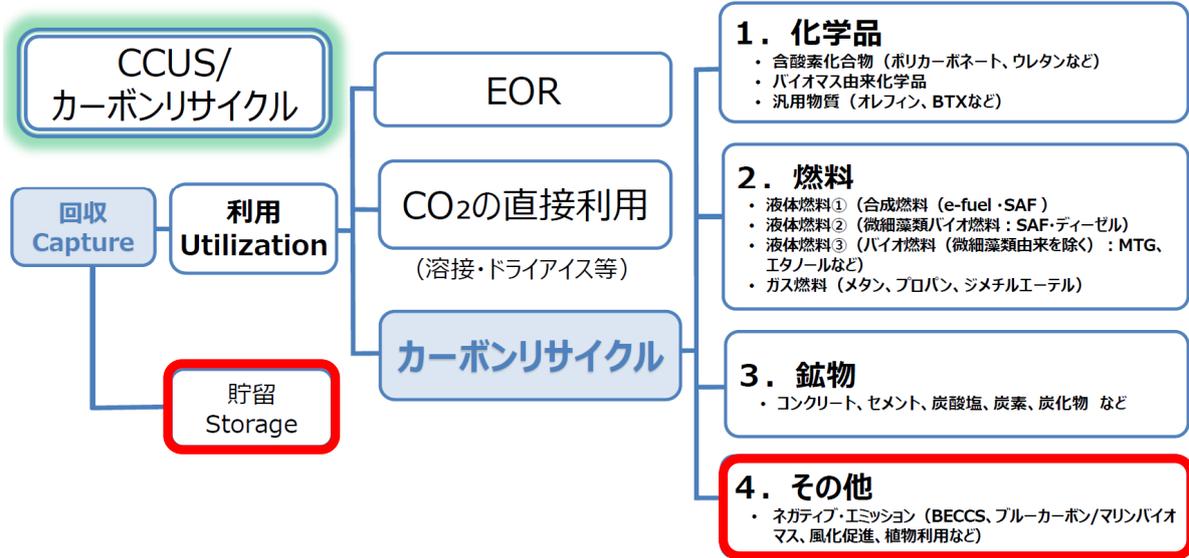


(IPCC, 2005を和訳)

CCUS(二酸化炭素回収・利用・貯留)とは

Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage

- カーボンリサイクル：CO₂を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化によりコンクリート等、人工光合成等により化学品、メタネーション等により燃料へ再利用し、大気中へのCO₂排出を抑制。
- カーボンリサイクルは、CO₂の利用（Utilization）について、世界の産学官連携の下で研究開発を進め、非連続的イノベーションを進める取り組み。
- 省エネルギー、再生可能エネルギー、CCSなどとともカーボンリサイクルは鍵となる取り組みの一つ。



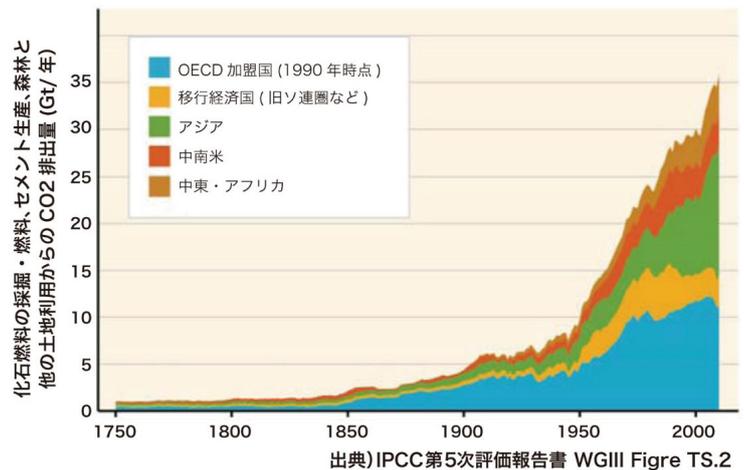
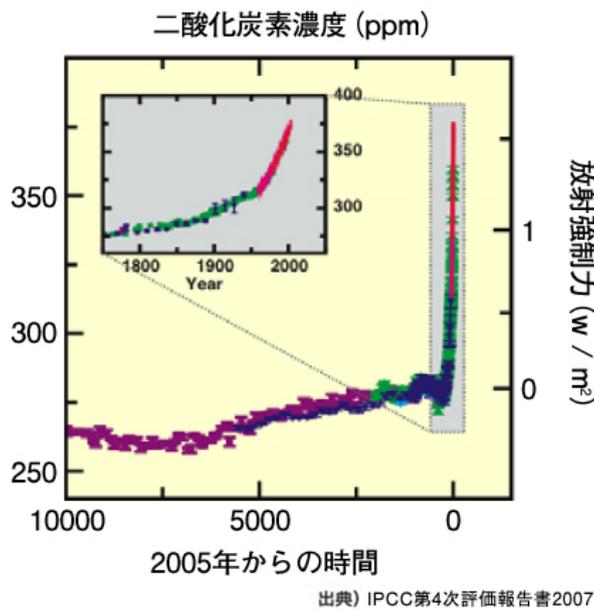
(経済産業省、カーボンリサイクル技術ロードマップ、令和3年7月改訂)

発表内容

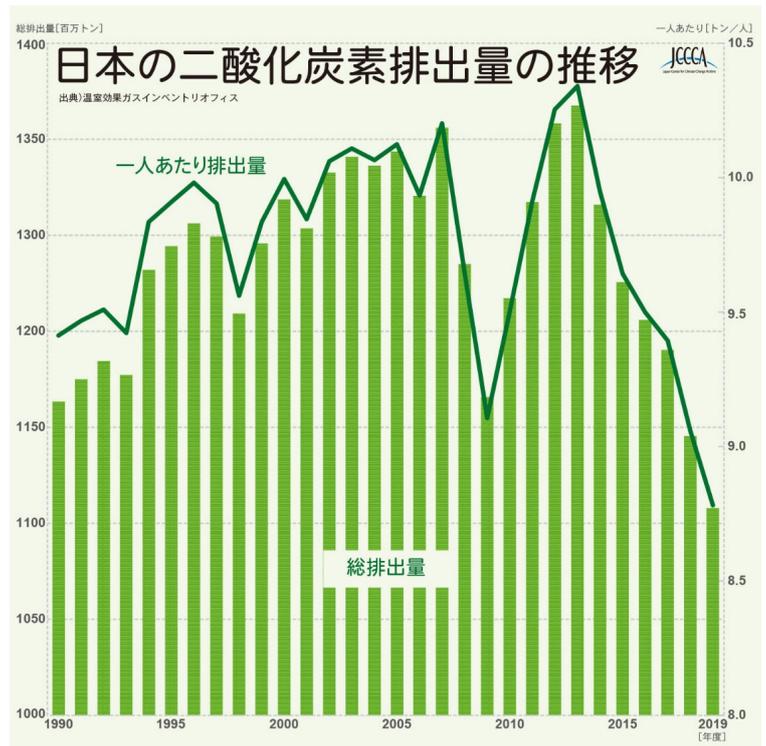
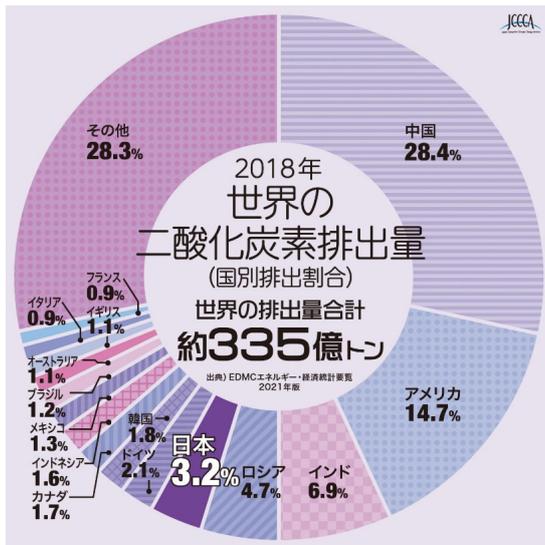
- 地球温暖化対策としてのCCUSの位置づけ
- 産総研におけるCO₂地中貯留研究
- 玄武岩によるCO₂鉱物固定の動向
- 次世代大規模CCSに向けた玄武岩の適用性評価
- まとめ

地球温暖化対策としてのCCUSの位置づけ

大気CO₂濃度とCO₂排出量の推移



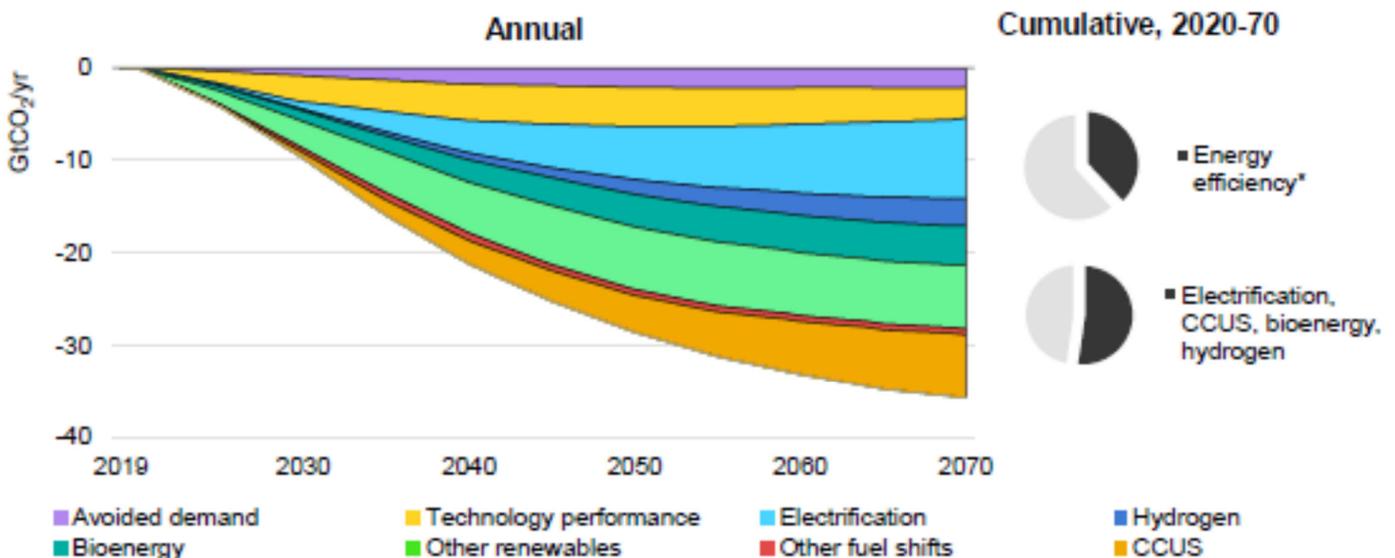
日本のCO₂排出量の推移



(温室効果ガスインベントリオフィス/全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト(<https://www.jccca.org/>))

温暖化対策におけるCCUSの位置づけ

IEA (国際エネルギー機関) 報告書によると、2070年までの累積CO₂削減量の15%をCCUSが担うことが期待されている



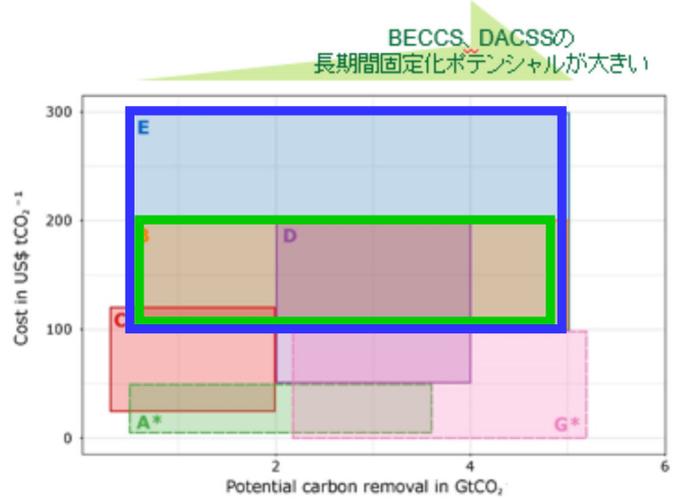
(IEA 2020, Energy Technology Perspectives 2020: 2020https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf)

ネガティブエミッション技術としての期待

ネガティブエミッション技術

A		Afforestation & Reforestation (AR)	植林・再森林化によるCO ₂ を植物に固定する
B		Bioenergy with carbon capture & storage (BECCS)	バイオマス発電等から生じるCO ₂ を回収し、地層等に貯蔵する
C		Biochar (BC)	農林業の廃棄物や廃木材、食品廃棄物などの有機物を大量に炭化し埋設する
D		Enhanced Weathering (EW)	表面積拡大等により、人為的に岩石の風化を促進させ、炭酸塩やケイ酸塩としてCO ₂ を貯蔵する
E		Direct air capture (DACCS)	化学吸着により、大気中からCO ₂ を回収し、地層等に貯蔵する
F		Ocean fertilization (OF)	鉄分や窒素分を海水上層に加え、植物プランクトンの成長を促す。その後プランクトンが深海に沈み、CO ₂ を隔離する
G		Soil carbon sequestration (SCS)	近代農業、草地の修復、湿地形成など土地管理により、土壌中の有機炭素量を増加させる

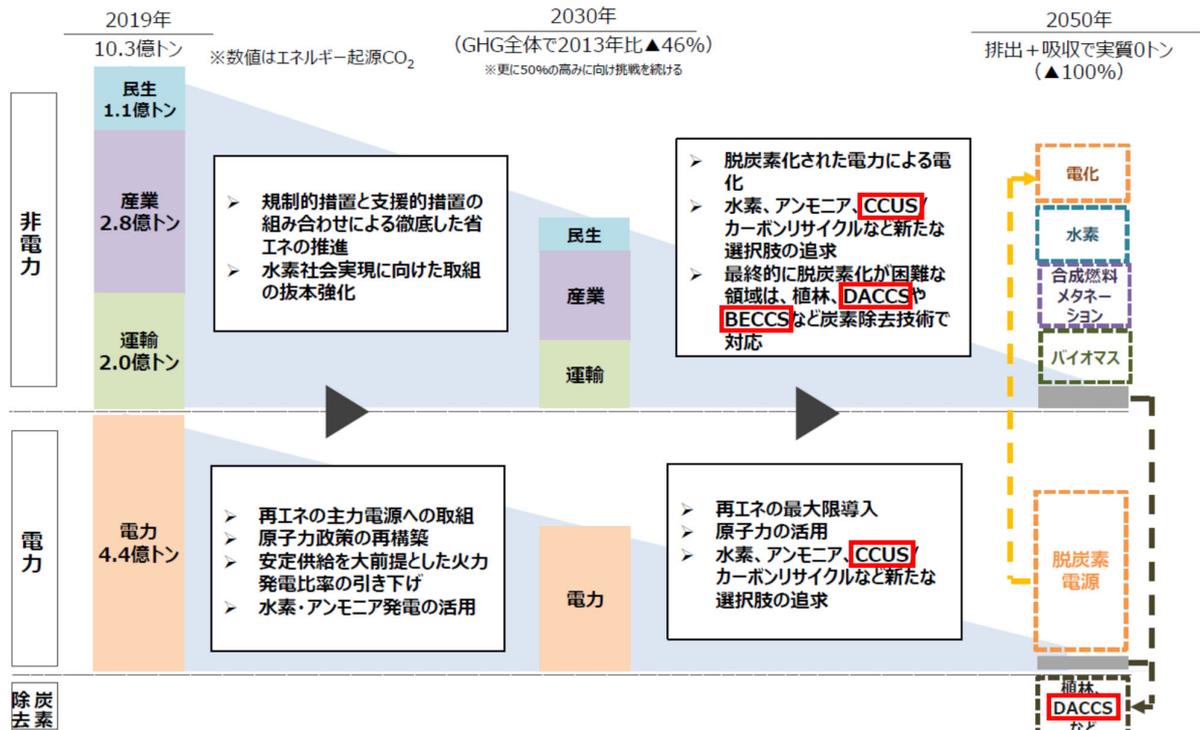
2050年時点のCO₂削減ポテンシャルとコスト*



(エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会報告書, 2019)

グリーン成長戦略におけるCCUSの位置づけ

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

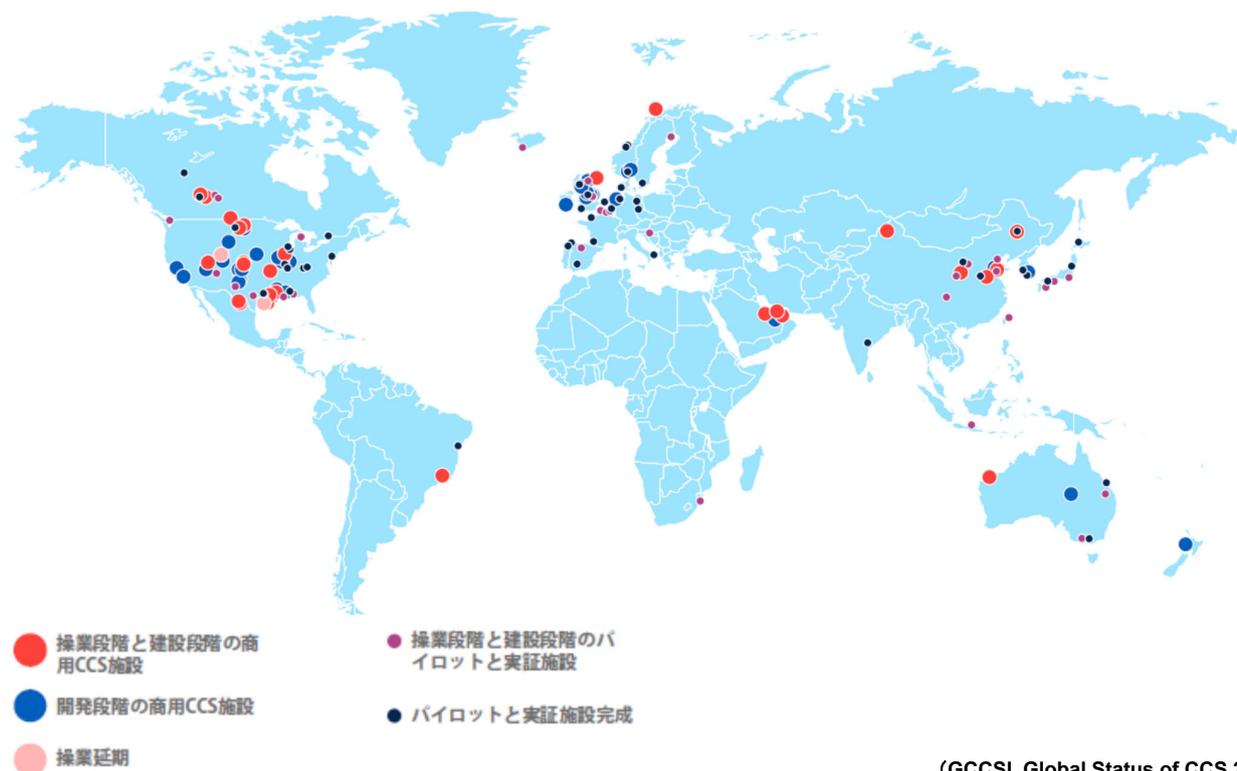


(METI, 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 令和3年6月18日)

産総研におけるCO₂地中貯留研究

世界の大規模CCS事業

2021年時点で、135の商用CCS施設(うち29施設が操業段階)が存在



(GCCSI, Global Status of CCS 2020; 2021)

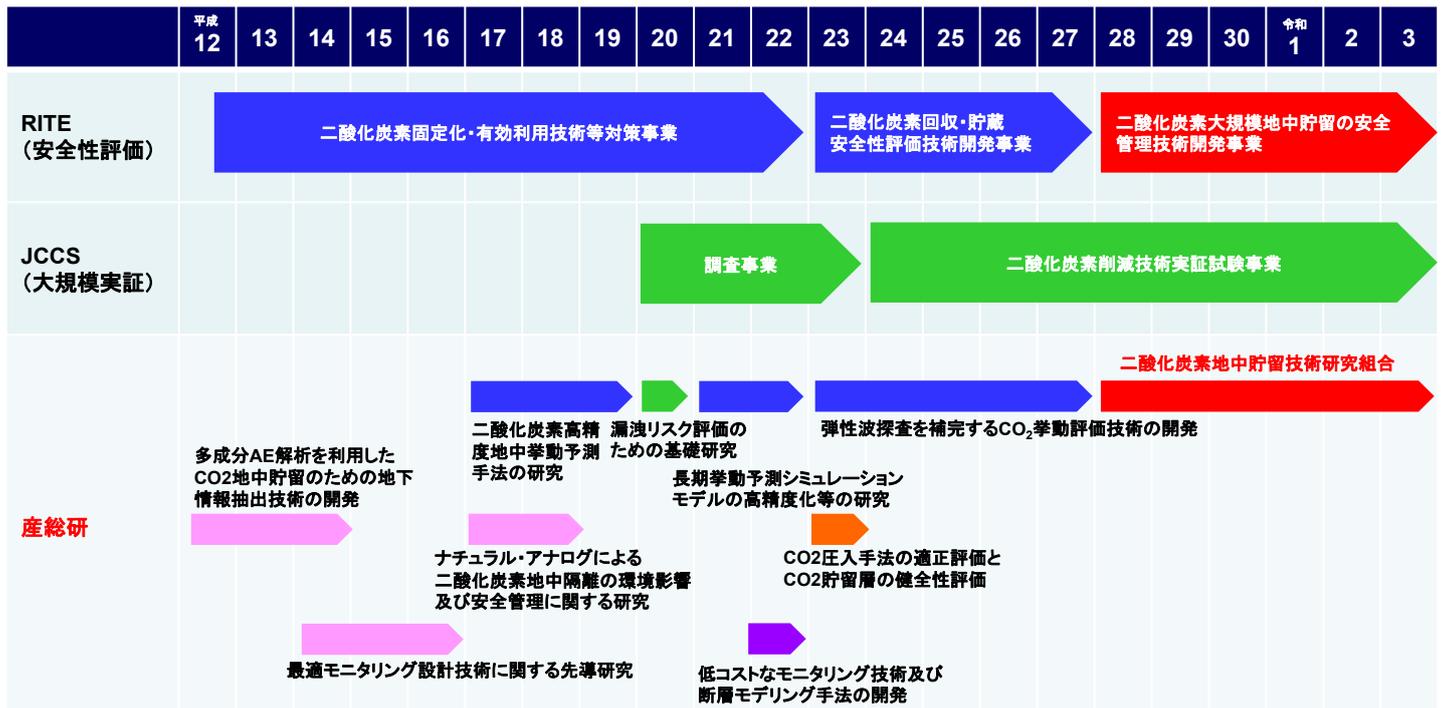
我が国におけるCCSの現況と課題

- 苫小牧実証により、国内においてCCSを実施する技術可能性は輸送手段を除いて示されつつある。
- 依然、社会実装へ向けて、貯留適地の確保、トータルコストの削減、ステークホルダーとの連携が不可欠。

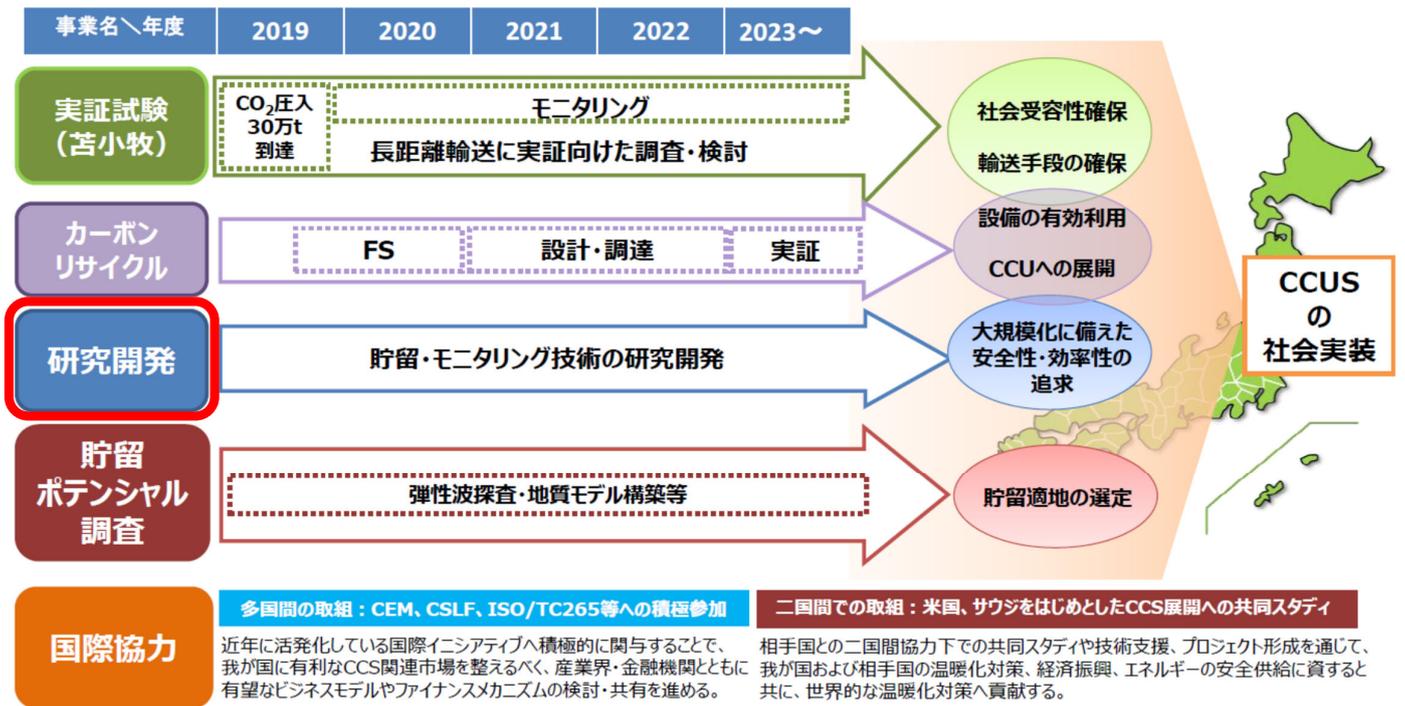
	現状	今後の課題	あるべき導入環境
貯留適地の確保	・既往地質情報、弾性波探査等から、数十億トン規模が期待(数か所)	・貯留適地の条件整理、弾性波探査、調査井の掘削、貯留層の総合評価など	・良好な圧入性とポテンシャルを有する貯留地点の確保
トータルコストの削減	回収 ・アミン吸収液による分離回収。 ・固体吸収材等の低コストな回収技術の実証を計画中	・アミン吸収液の実績の蓄積 ・固体吸収材等の低コストな回収技術の実証	・多様な排出源からの回収手法の低コスト化
	輸送 ・長距離輸送の実績なし。	・船舶を含む長距離輸送の検討	・長距離輸送手段の確立
ステークホルダーとの連携	貯留 ・多様な技術を組合せて実施中。(弾性波探査、微小振動観測など)	・安全かつ最適なモニタリング手法の検証	・安全かつ最適なモニタリング手法の検証
	・苫小牧実証、および適地調査について、地域社会と密接に連携。	・CCS関係事業者との連携 ・地域社会とのコミュニケーション ・実プロジェクトを通じたCCS関係人材の育成	・地域社会・国民理解の獲得 ・高い技術を持つ人材の確保

(経済産業省, CCSを取り巻く状況, 2018年6月11日)

産総研におけるCO₂地中貯留研究の推移



経済産業省のCCUS事業



(METI, 経済産業省のCCUS事業について, 2020年8月)

二酸化炭素地中貯留技術研究組合

【設立】 2016年4月

【理事長】 平松 晋一 (応用地質株式会社)

【組合員】 9社・2機関

伊藤忠商事(株)、伊藤忠石油開発(株)、応用地質(株)、石油資源開発(株)、大成建設(株)、電源開発(株)、三菱ガス化学(株)、(株)INPEX、JX石油開発(株)、地球環境産業技術研究機構、産業技術総合研究所

【目的】 安全かつ大規模・効率的なCO₂地中貯留技術の実現に向けて、わが国の貯留層に適した実用化規模(100万トン/年)でのCO₂地中貯留技術を開発するとともに、CCSの社会受容性の獲得を志向した研究開発を行う。

【研究概要】

1. 二酸化炭素圧入・貯留の安全管理技術の確立
2. 大規模貯留層有効圧入・利用技術の確立
3. CCS普及環境整備・基準の整備

【実施プロジェクト名】

NEDO「CCUS研究開発・実証関連事業/安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発」

産総研の実施課題

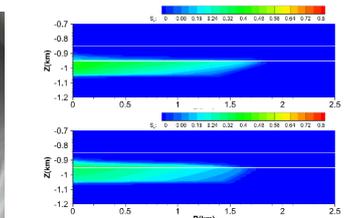
1. CO₂長期モニタリング技術の開発

- ・ 苫小牧実証試験サイトにおけるモニタリング
 - ・ CO₂地中貯留に適したデータ処理方法の開発
 - ・ 長期連続計測を可能とするための運用法の確立
 - ・ 他サイトへの展開のための検討
- ⇒ 堀川「重力・自然電位を用いた低コストモニタリング技術の開発」
加野「地球物理シミュレーションと貯留層モニタリング設計」



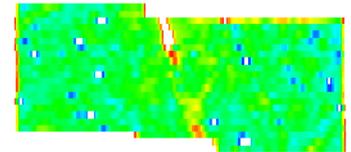
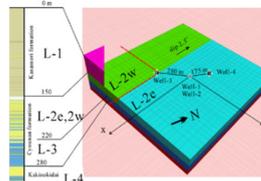
2. 長期遮蔽性能評価手法の開発

- ・ 地化学反応の遮蔽性能への影響評価
- ・ 接触角評価手法の開発
- ・ 地化学プロセスの活用に向けた検討



3. ジオメカニクスモデリング手法の開発

- ・ 二相流動・変形連成過程に関する検討
 - ・ せん断・透水実験に基づく水理と力学の関係解明と定式化
 - ・ 軟岩亀裂、断層モデリング手法の開発
- ⇒ 藤井「CO₂地中貯留における水理/力学的視点からの軟岩の特性評価」



4. 社会受容性の向上、国際標準化との整合

- ・ 国際標準に準拠したリスクコミュニケーション手法の要件整理

玄武岩によるCO₂鉱物固定の動向

CO₂鉱物化のメカニズム

炭酸水によりケイ酸塩鉱物が溶解し、2価の陽イオンが溶出
Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺

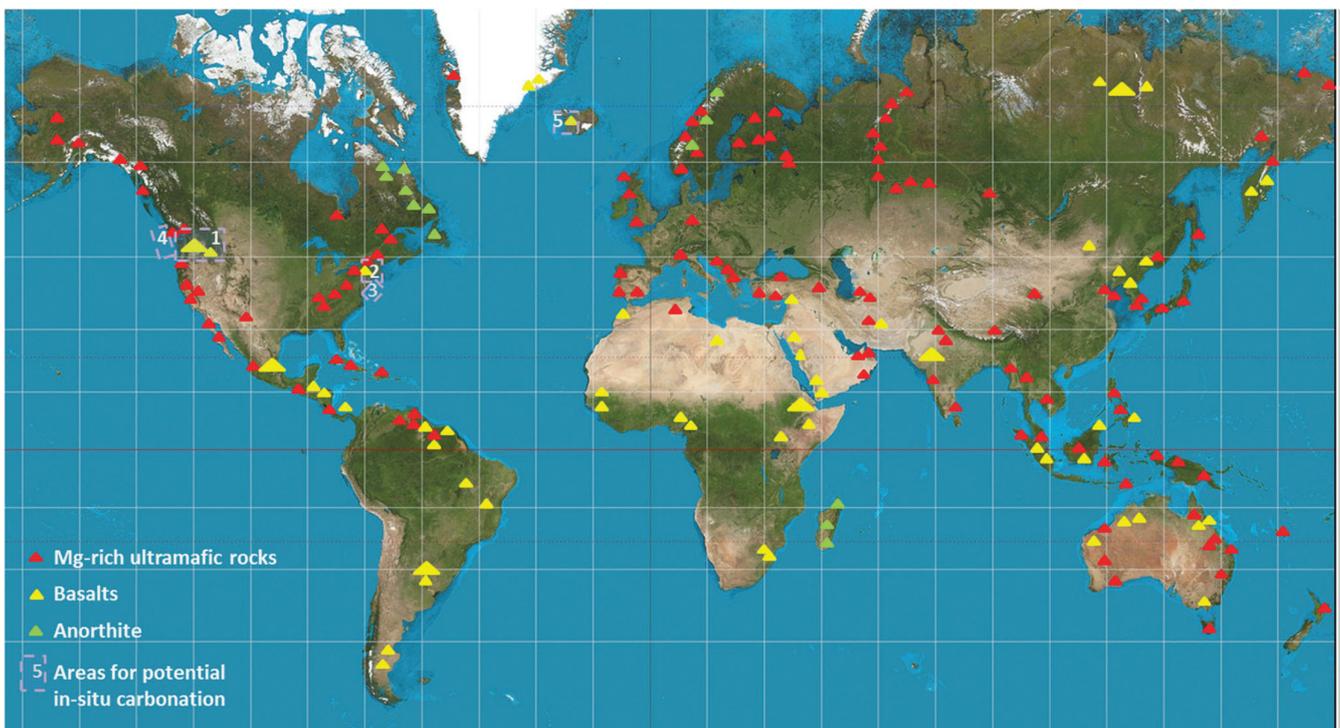


2価の陽イオンと重炭酸イオンが結合して炭酸塩鉱物が沈殿
HCO₃⁻、CO₃²⁻



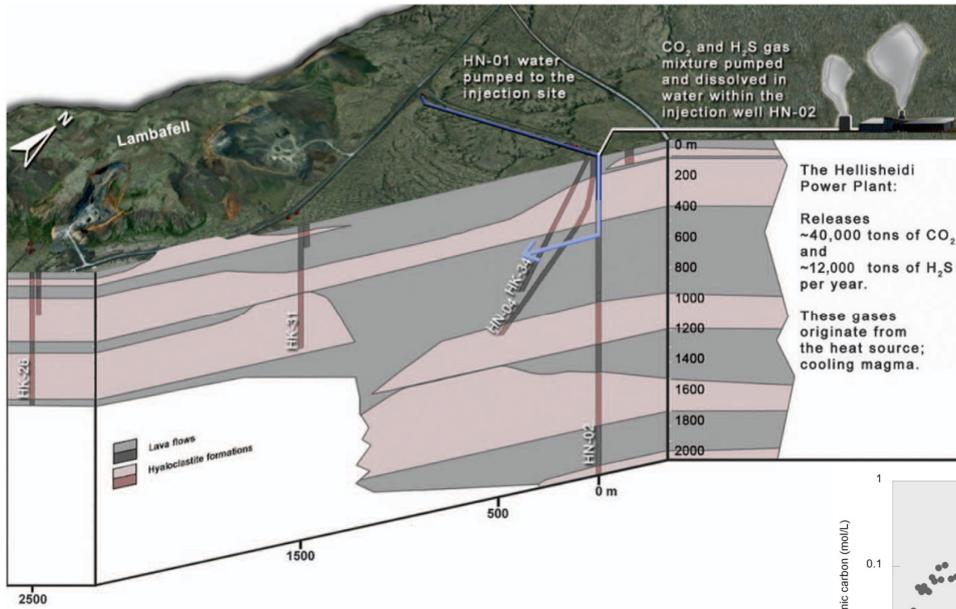
ケイ酸塩鉱物が炭酸塩鉱物に置き換えられる

地球上の苦鉄質岩・超苦鉄質岩の分布



(Sanna et al., 2014)

CarbFixプロジェクト(アイスランド)

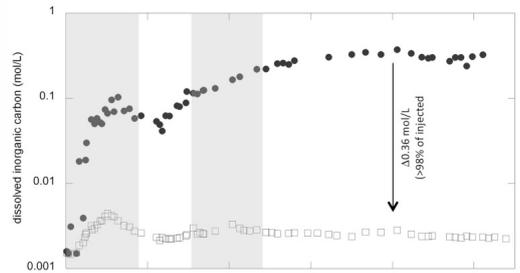


貯留層: 深度 400~800 m、20~33°C

浸透率: 水平0.3 darcy、鉛直1.7 darcy

Phase I: CO₂ 175トン+H₂O(2012年1~3月)

Phase II: CO₂ 55トン+H₂S+H₂O(2012年6~8月)



(Matter et al., 2016)

550日以内に圧入CO₂の95%以上が炭酸塩化

Wallula玄武岩プロジェクト(米国)

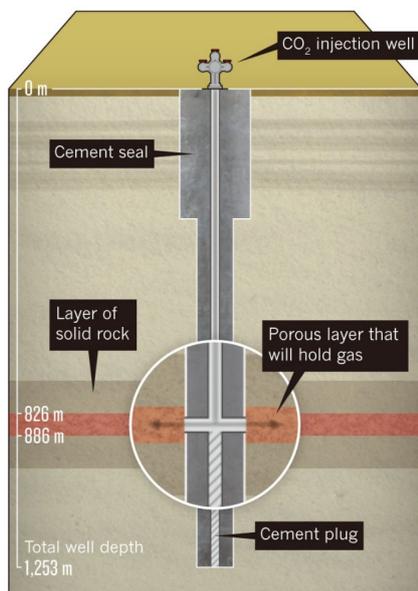
サイト: コロンビア川台地-洪水玄武岩

貯留層: 深度 826~886 m

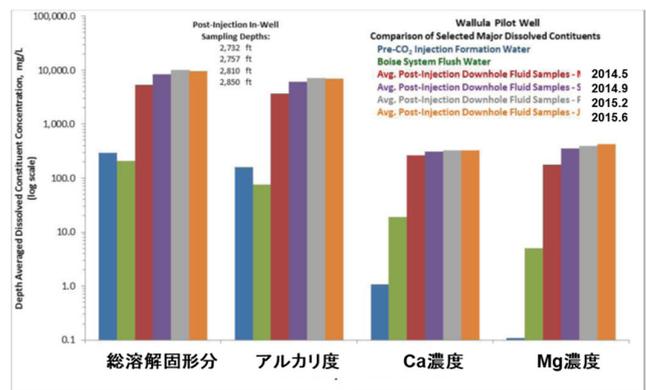
浸透率 1.2~2.5 darcy

圧入量: 1,000トン(超臨界CO₂)

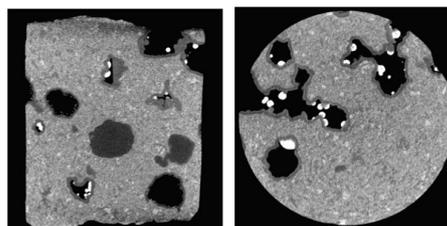
圧入期間: 2013年7~8月



(Tollefson, 2013)



総溶解固形分、アルカリ度、Ca、Mg濃度が1.5~3桁増加 (Fe、Mn、Sr、Bも同様)

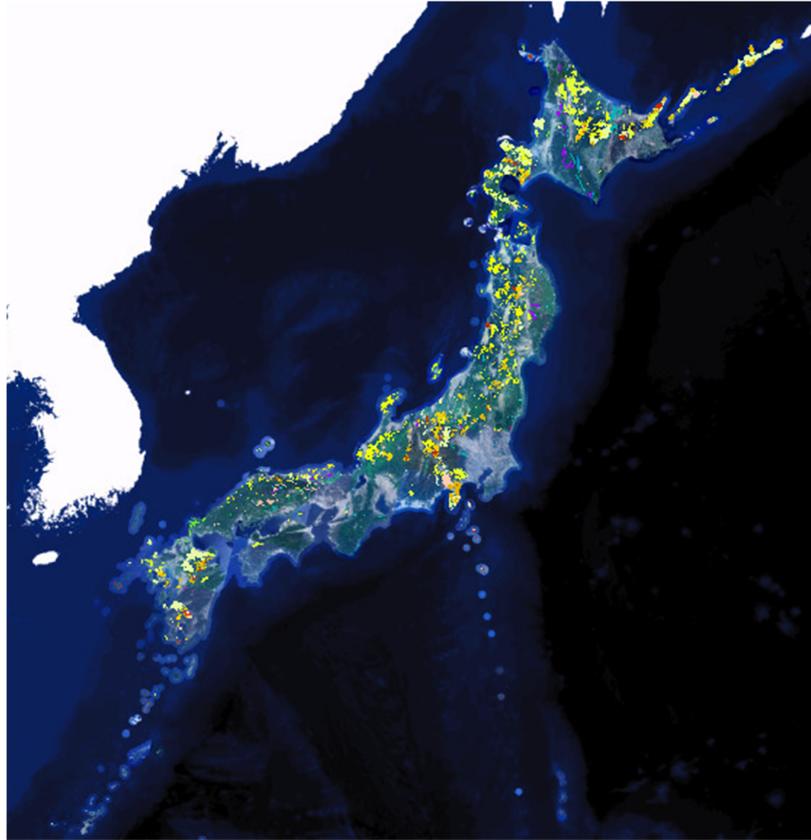


側壁コアにアンケライト (CaFe(CO₃)₂) のノジュールが形成。同位体組成が注入したCO₂と一致。

(McGrail et al., 2017)

- 圧入されたCO₂が24カ月以内に炭酸塩鉱物に変換
- 超臨界CO₂の地下での鉱物化の最初の例

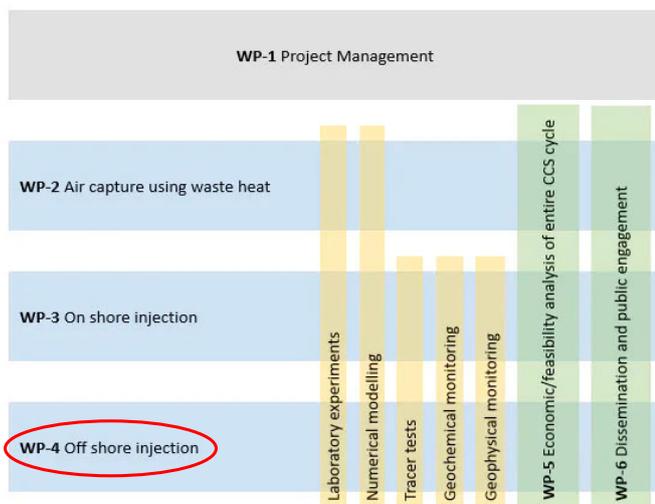
日本の苦鉄質岩の分布



(産総研シームレス地質図)

海洋玄武岩を対象としたCCSプロジェクト

CarbFix IIプロジェクト(アイスランド)

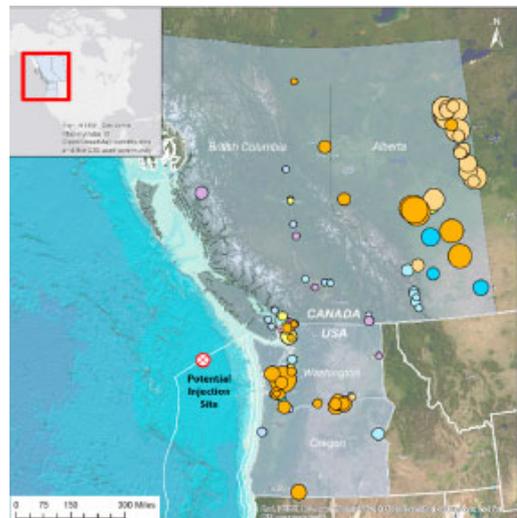


- 6つのWP (ワークパッケージ) の一つで、海底下貯留へのCarbFixアプローチの適用性を検討
- 海岸沿いの既存井からCO₂溶解海水を圧入、地下水流により溶解CO₂は海底下に移動

(<https://www.carbfix.com/carbfix2>)

CarbonSAFE: Cascadiaプロジェクト(米国)

米国ワシントン州およびカナダブリティッシュ・コロンビア州で回収した5000万トンのCO₂を海底下玄武岩に貯留する計画について、実現可能性を調査



(Goldberg et al., 2018)

ネガティブエミッション技術としての風化促進

Urey reaction (Urey, 1952) :
太古の地球のCO₂濃度は岩石の化学風化が規定

CO₂は石灰岩として海底に固定



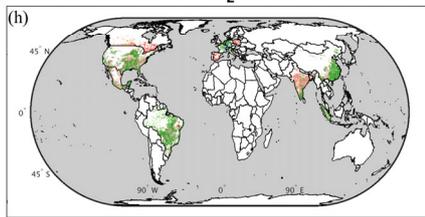
地球内部での熱分解によりCO₂が放出

“China, the United States and India have the highest potential for CO₂ removal using this method.”



(Lehmann and Possinger, 2020)

Net Carbon Sequestration (t CO₂/ha)
for 2.00 Gt CO₂ Target, 2°C

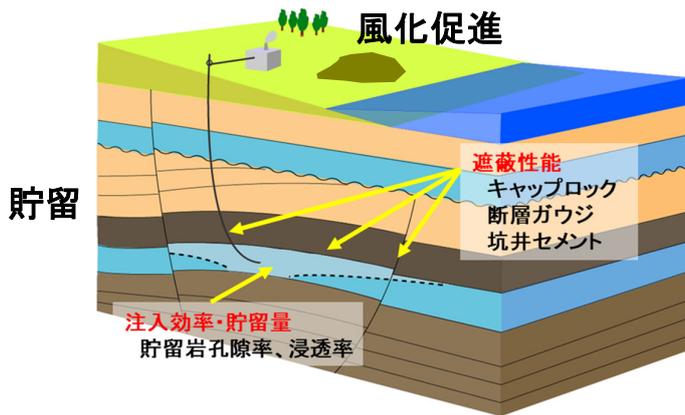


(Beerling et al., 2020)

- 粉碎したCa、Mgに富むケイ酸塩岩石を耕地に散布し、大気中のCO₂と反応させる
- 生成物は肥料として残存、あるいは海洋に流出
- 工業起源の鉱山表土、セメント、鉄鋼スラグ等の利用も検討

次世代大規模CCSに向けた玄武岩の適用性評価

貯留と風化促進：留意点の違い



玄武岩貯留、風化促進ともにCO₂の**鉱物化が最終目標**

貯留では、貯留層の**圧入性**、および**遮蔽性能**が重要な因子

風化促進では、**反応の加速**と**岩石粉体の制御**が不可欠

項目	因子	玄武岩貯留	CO ₂ 地熱	風化促進
環境条件	温度	30~50°C	200~300°C	5~35°C
	圧力	10~20MPa	10~20MPa	0.1MPa
流動性	浸透率（空隙率）	◎	◎	—
	キャップロックの遮蔽性能	◎	◎	—
反応性	鉱物組成（化学組成）	○	○	◎
	粒径（比表面積）	○	○	◎
固定量評価		○	○	◎

陸上玄武岩の地質調査・岩石採取

- ・ジュラ紀海台玄武岩
- ・ジュラ紀海台玄武岩起源高圧変成岩
- ・蛇紋岩(マントル起源)



- ・ジュラ紀～白亜紀海山/海台玄武岩
- ・アイスランドと類似
- ・蛇紋岩(地殻起源)

- ・1000万年前
- ・アルカリ玄武岩
- ・陸上噴火

- ・数10～数100万年前
- ・海底噴火

玄武岩の適用性評価の流れ

①各岩石試料について、必要物性を明らかにする

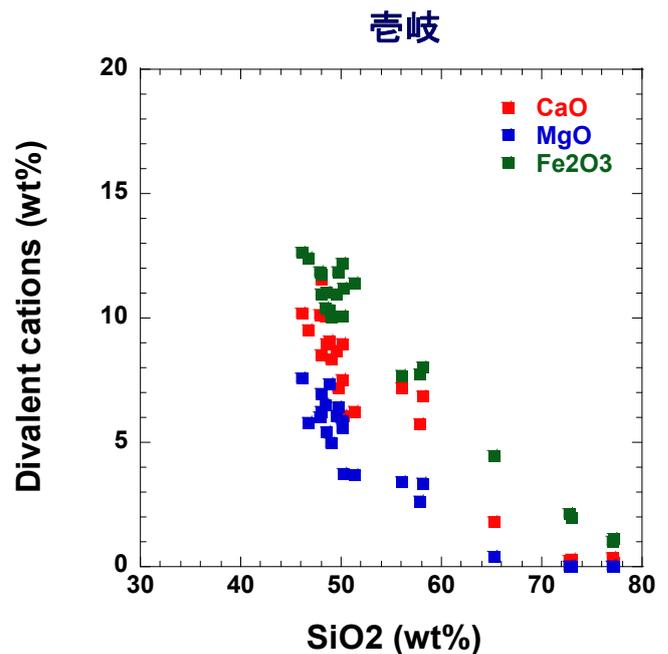
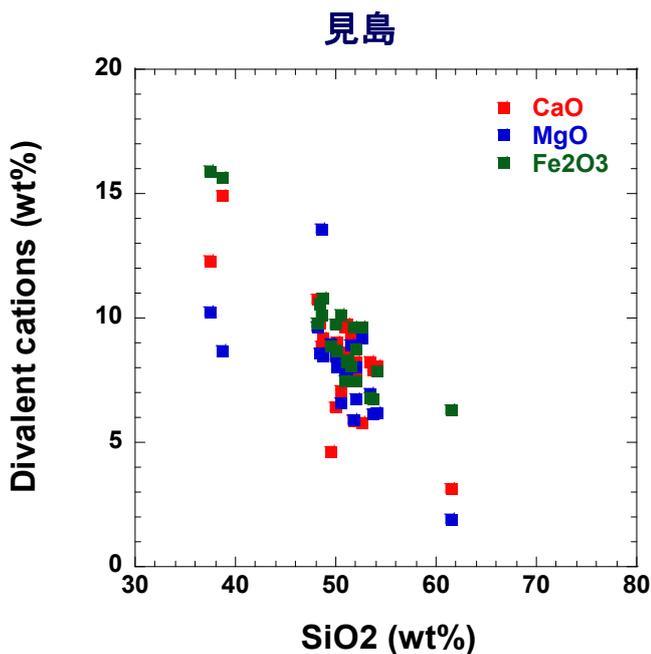
知りたい物性	定性解析	定量解析
浸透率	空隙率	浸透実験
貯留ポテンシャル	空隙率	浸透実験
力学特性	力学強度	剪断透水試験等
鉱物化ポテンシャル	化学組成・鉱物組成	反応実験
CO ₂ 変換ポテンシャル	化学組成・鉱物組成	反応実験（触媒添加？）

②個々の岩石物性に基づき、以下の観点から体系的な整理と分析を行う

- 岩石組成(中央海嶺玄武岩、海洋島玄武岩、アルカリ玄武岩等)
- 形状(溶岩、スコリア等)
- 年代

③CO₂削減に対する国内の陸上玄武岩のポテンシャルを提示する

玄武岩の化学組成

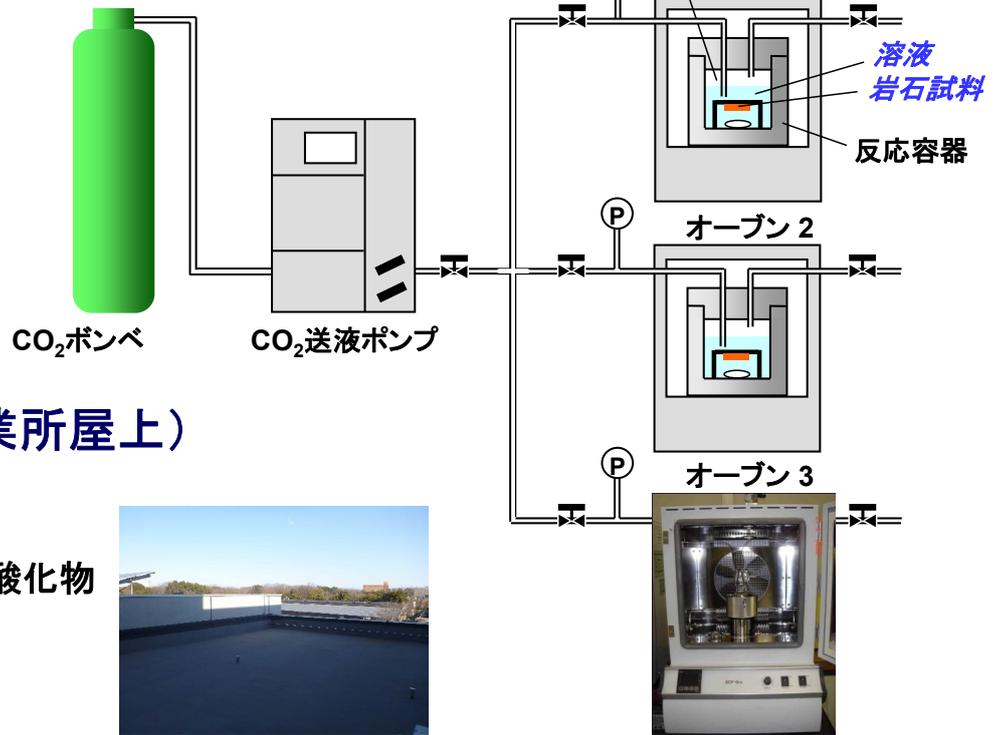


活動時期や産状により、Ca、Mg、Feの量比にばらつき

玄武岩の反応実験

貯留(超臨界CO₂岩石反応システム)

- 圧力 : 10 MPa
- 温度 : 40°C
- 試料 : 粉末、岩石片
- 溶液 : 純水、塩水
- 期間 : 1~3ヵ月



風化促進(事業所屋上)

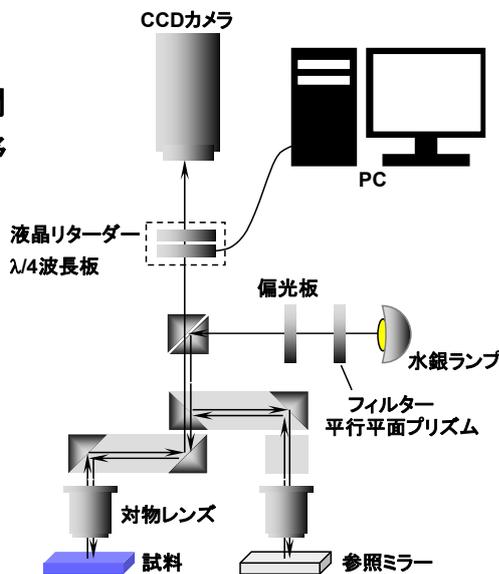
- 圧力 : 大気圧
- 温度 : 5~35°C
- 試料 : 粉末、薄板、酸化物
- 期間 : 1年間



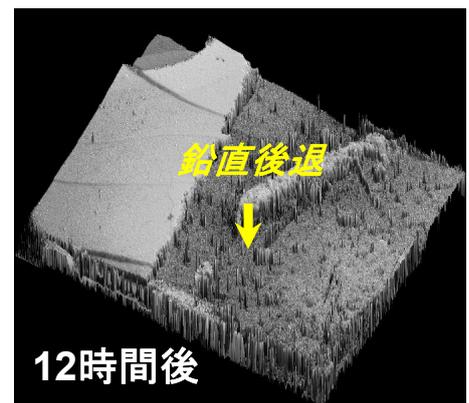
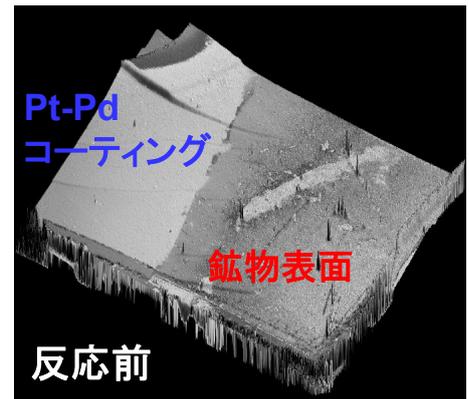
ナノスケールでの表面観察

位相シフト干渉計の適用

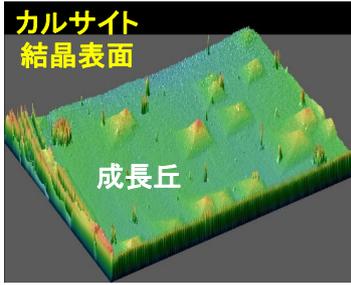
- ナノの分解能
- 非破壊
- 短い計測時間
- 広い観測視野
- その場観察



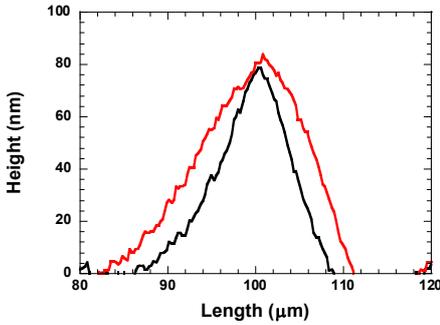
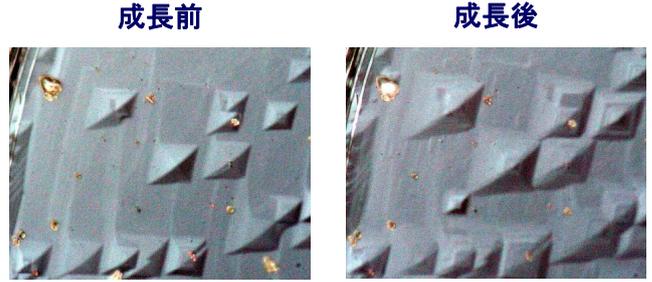
鉛直分解能: 1 nm ($\lambda/4 \times 1/256$)
 水平分解能: 1 μ m



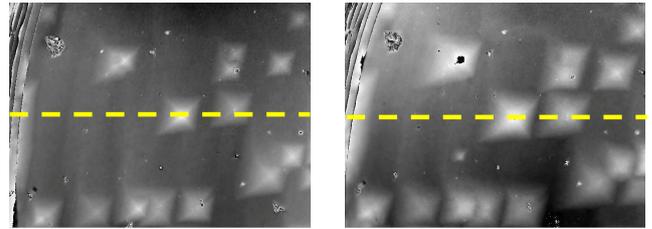
表面観察に基づいた炭酸塩成長速度の測定



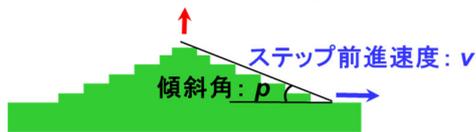
顕微鏡像



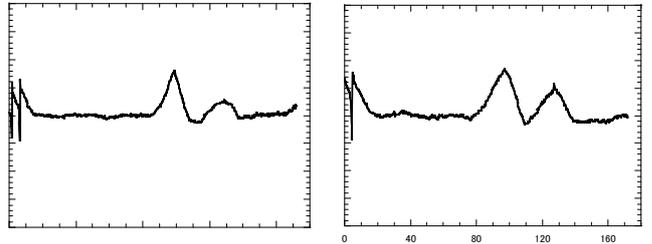
位相シフト干渉計像



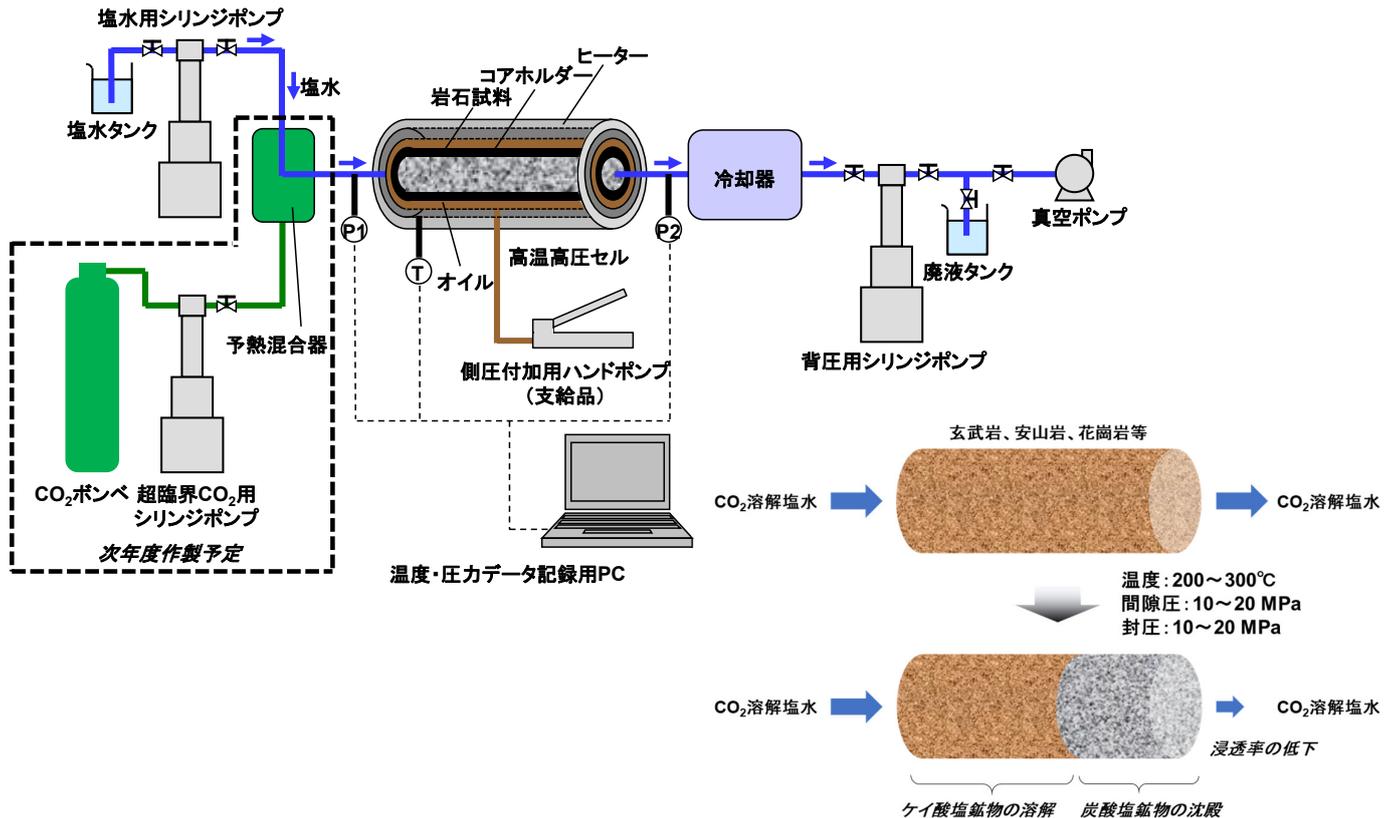
鉛直成長速度: $R = v \times p$



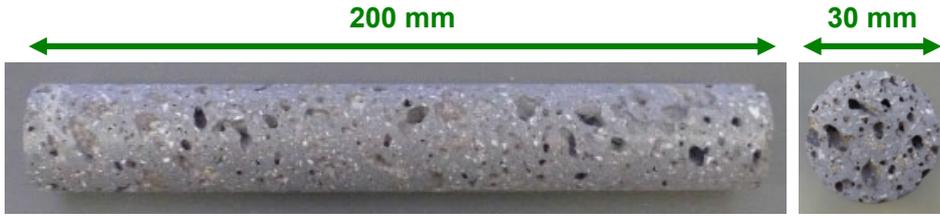
断面プロファイル



流通試験による貯留層水理特性変化の検証



玄武岩の浸透性



CarbFIXプロジェクトの玄武岩
(CarbFIX, <https://www.carbfix.com/photos>)

- 多孔質玄武岩にも関わらず、必ずしも浸透性はよくない
- き裂系や異方性の可能性など、岩石内の流路についての解析が必要



温泉水による流通予備試験

鉱物化の加速

鉱物化を加速する因子

- 原料
 - 反応性の高い岩石・鉱物の選定
 - 原料分解、表面改質
- 粒径
 - 微細粒子化による表面積増大
 - 板状岩石の設置
- 温度／湿度
 - 高温多湿環境の選定
- 溶媒、触媒
 - 有機酸(クエン酸)で反応加速の例
- 全体プロセス設計
 - 玄武岩の溶解(低pH)と炭酸塩の沈殿(高pH)の分離

ま と め

- ゼロエミッション技術としてのみならず、DACCSやBECCS等の**ネガティブエミッション技術**として、CCSへの期待が増大。
- CCSの実用化促進には、圧入終了後のモニタリングコストの低減と社会的受容性の拡大が重要。**CO₂の鉱物化**は、両者に貢献。
- 貯留層としての**玄武岩**の活用は、CO₂鉱物化の促進のみならず、貯留ポテンシャル拡大に向けた切り札になる可能性がある。
- 玄武岩を活用した**風化促進**を含め、天然メカニズムを最大限に活用した技術を検討することで、地域に見合ったCO₂削減に貢献していくことが重要。

ご清聴ありがとうございました