

LCA/TEAの評価基盤構築による風化促進システムの研究開発



PM：森本 慎一郎
環境・社会評価研究チーム長
ゼロエミッション国際共同研究センター
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

PJ参画機関：国立研究開発法人 理化学研究所
国立大学法人 筑波大学
学校法人 東京農業大学

プロジェクト概要とポイント

ムーンショット目標4：2050年カーボンニュートラル実現に向けて

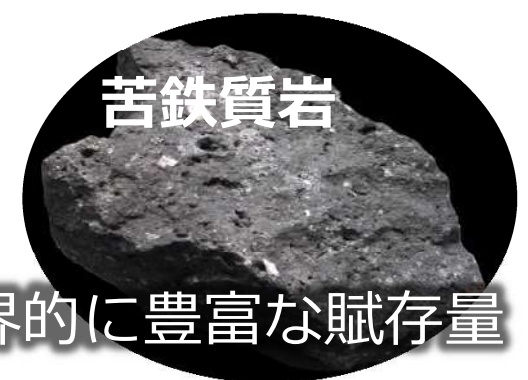
大気中の希薄なCO₂を苦鉄質岩等の**炭酸塩化（風化現象）**によって吸収し、また同時に苦鉄質岩の土壌散布によって**植物育成を促進**するまでのトータルシステムを**LCA/TEA**の観点から最適化する評価基盤を開発。

風化促進の課題は・・・

- 正確なCO₂削減量が算定できず、効果不明(グリーンイノベーション戦略推進会議)。
- 苦鉄質岩や炭酸塩の利活用に関する実証データが存在しない。
- 風化現象の反応が遅く、経済的に不利(≒\$218/t-CO₂ by Fuss, 2018)。

開発ポイントと最終目標

- 苦鉄質岩のCO₂固定量を**精緻にアカウンティング**。
- 苦鉄質岩等の最適な**土壌散布方式**を解明。
- 低コスト化に向けた**風化促進技術開発**と最適条件探索を行う**LCA/TEA評価ツール**開発。



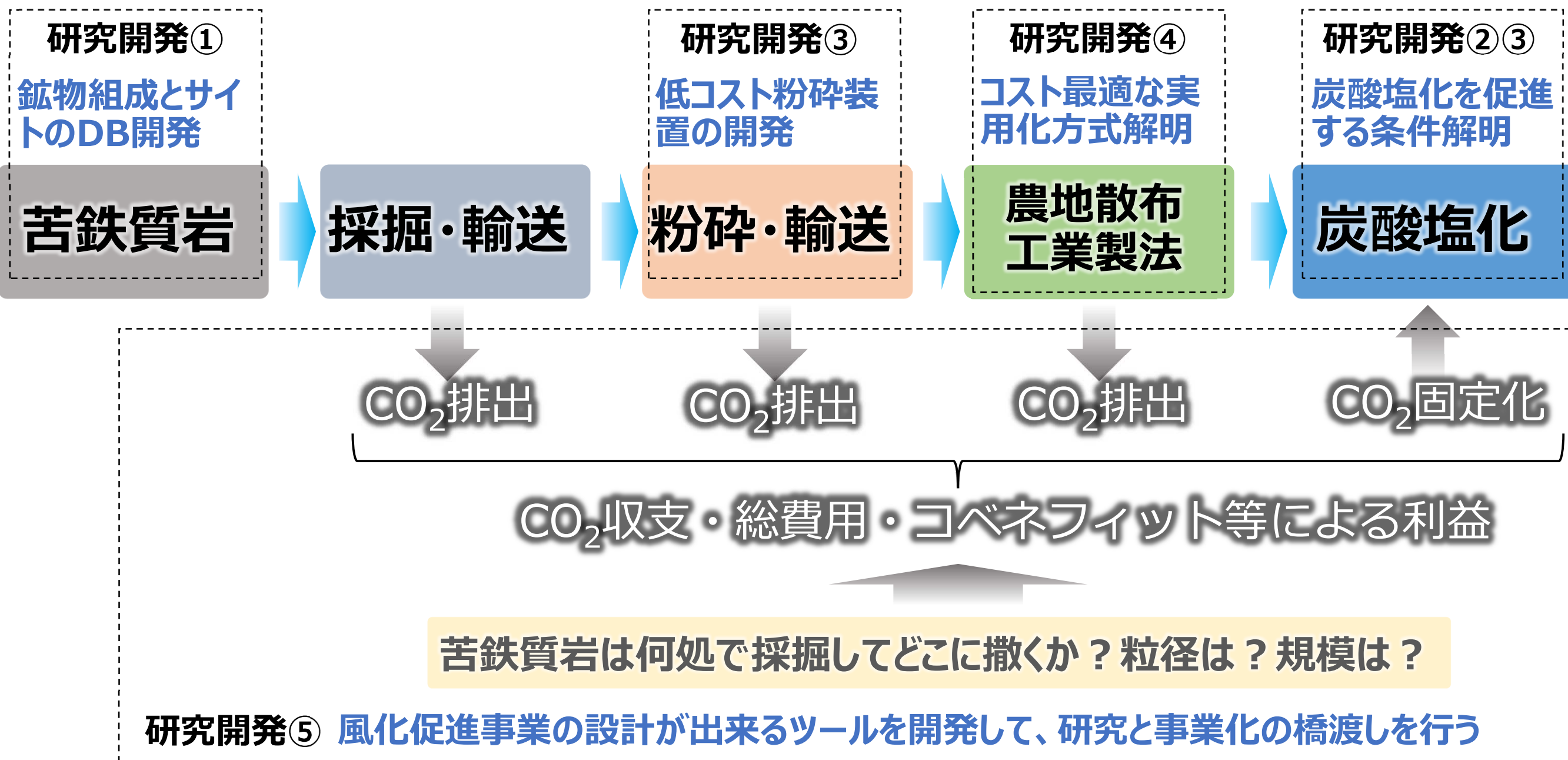
世界的に豊富な賦存量



炭酸塩は植物育成効果を持つ

風化促進のプロセスと研究開発

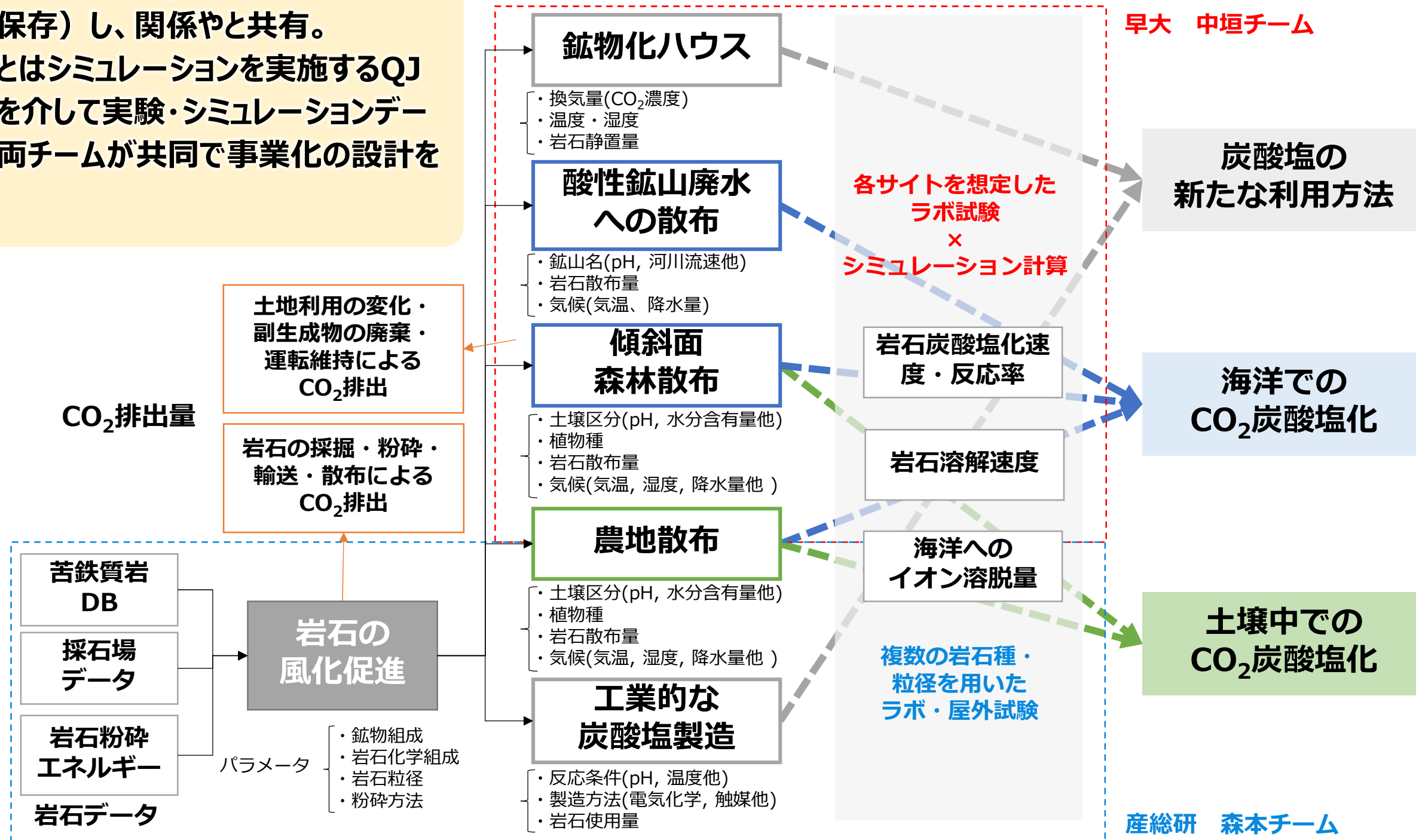
風化促進を事業化するためには①炭酸塩化によるCO₂固定量を精緻にアカウントイング②低コスト化に向けた研究開発③事業化設計を行うツール開発が必要。



データマネージメント・中垣チームとの連携

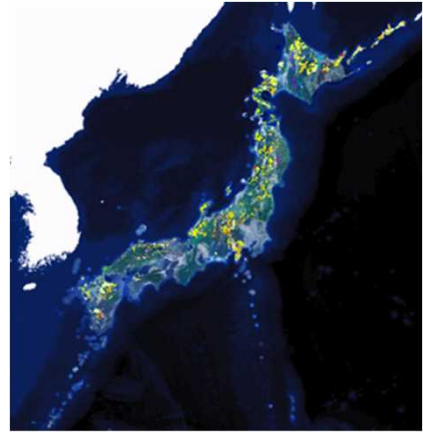
- ・実験・分析データはLCA/TEA評価ツールにて一元管理（保存）し、関係者と共有。
- ・中垣チームとはシミュレーションを実施するQJサイエンス社を介して実験・シミュレーションデータを共有し、両チームが共同で事業化の設計を目指す。

炭酸塩化の方法・アウトプット ※実証実験を実施予定

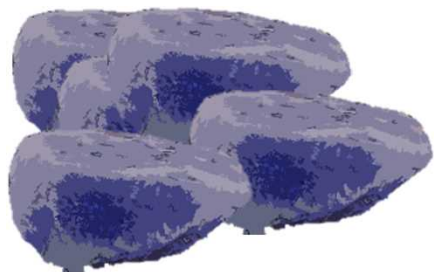


風化促進の社会実装シナリオ

採掘場所の選定



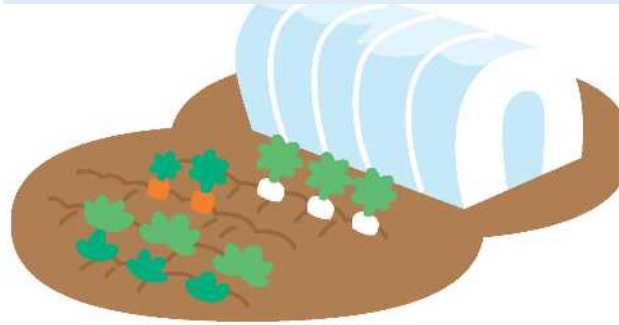
雇用創出など地域振興効果も含めて最適な鉱山から採掘を展開



既存の採石場からの採掘と粉碎

企業との出口戦略作成

地域農協+肥料メーカーと連携して農地に展開+未利用地



社会受容性を醸成する期間、工業的製法も検討

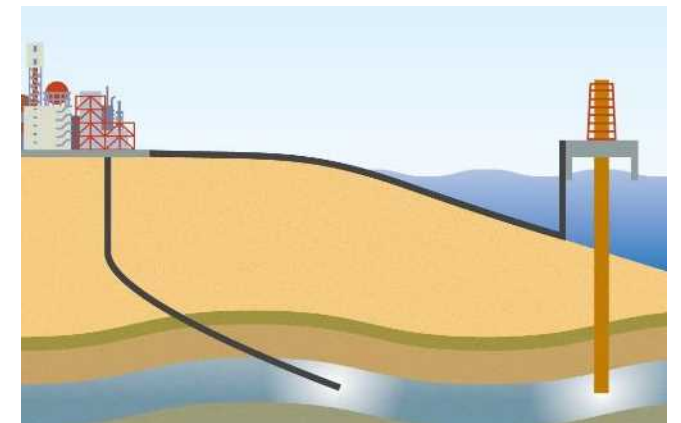


工業的に炭酸塩を生成し、企業と連携しながら出口戦略を検討

実験データを基にパイロットスケールに展開



国内だけでなく、世界的な大規模社会実装を目指す



社会受容性を勘案し、最終的な処分方法を検討

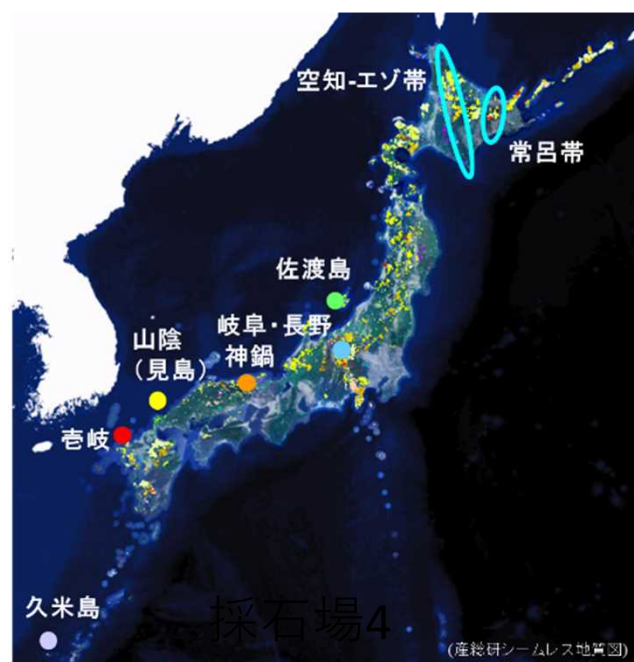
研究開発① 苦鉄質岩DBの開発

アカウントティング・低コスト化・利活用

➤ 苦鉄質岩の**鉱物組成、性状、採掘サイト**情報等に関する国内版データベースを開発。

風化促進用岩石選定に資する苦鉄質岩DBの構築

苦鉄質岩の化学組成・鉱物組成はCO₂固定量に影響を与えるため、国内のデータベースが必要

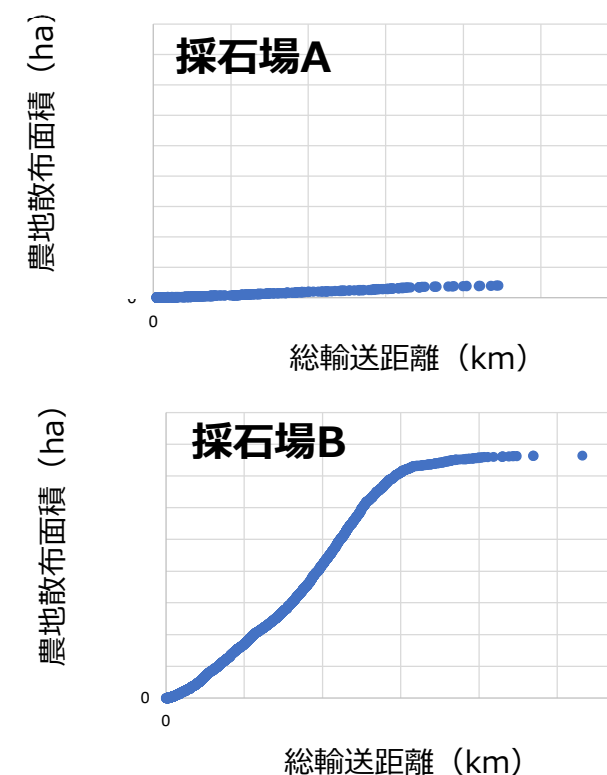


代表的な苦鉄質岩産出地域について、**現地調査と岩石採取**により苦鉄質岩の**化学組成・鉱物組成データ**を整備。

全国の採石場と新たな採石場所候補を**GIS上にプロットし、道路ネットワークと組み合わせる。**



全国の苦鉄質岩産出地域における**輸送距離と散布面積**のグラフを作成。



これまでの成果：7地域における苦鉄質岩分析データの収集。全国の採石候補地における輸送距離と散布面積の推計。
2023年度目標：風化促進に適する採石候補地を選定し、**プロトタイプ**の苦鉄質岩データベース構築。
2024年度目標：全国、数十か所の苦鉄質岩データベース完成。

アカウントティング・低コスト化・利活用

➤ **制御条件（試料室内）、長期屋外暴露条件、土壌散布条件でのCO₂吸収量をマイクロレベルで測定。**

CO₂の炭酸塩化速度および固定量評価技術の開発

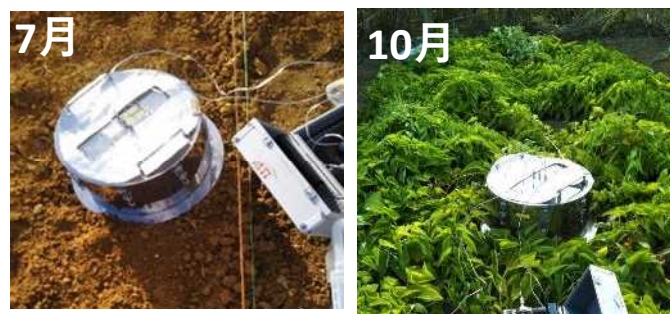
苦鉄質岩の炭酸塩化（プロセス1）と溶脱（プロセス2）の現象を確認し、詳細な風化促進条件を測定

長期屋外曝露条件下での炭酸塩化速度の評価



降雨により岩石からイオンが容易に溶出（**pH増加量は岩石種に依存**）。少なくとも**MgO**の一部において**炭酸塩化**を確認。

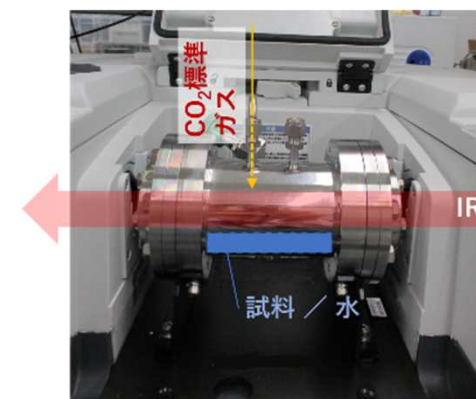
苦鉄質岩風化評価の圃場試験



宮古島での土壌チャンバー実験によりCO₂吸収量を試験観測。モニタリング手法としての可能性を検討中。



つくばセンターにおける大型容器を用いた苦鉄質岩風化促進モニタリングの開始。



密閉容器内での炭酸塩化速度測定実験装置の開発。ガスセルを制作。

これまでの成果：**一部試料の鉱物化と岩石種に依存した溶出挙動の確認**。大気観測装置や大型容器を用いた苦鉄質岩風化促進モニタリングシステムの整備、計測開始。密閉容器内での炭酸塩化速度評価装置開発。

2023年度目標：**CO₂の炭酸塩化速度とCO₂濃度減少量測定手法の開発**。

2024年度目標：**鉱石種類・温度・湿度の影響評価と炭酸塩化阻害因子検討と圃場における土壌チャンバー実験展開**。

アカウントティング・低コスト化・利活用

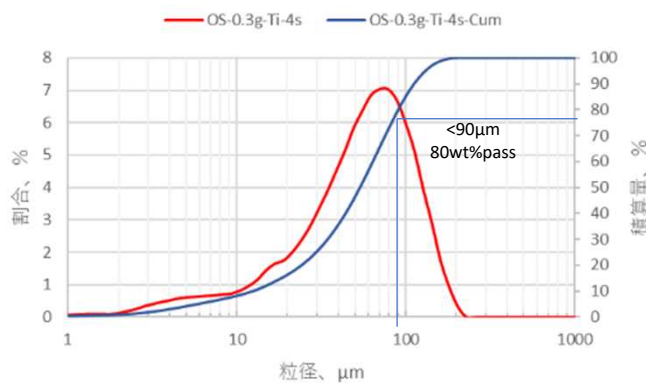
➤ 超音波粉碎方法を用いて、粉碎に要するエネルギーを削減し、CO₂固定化コストを現状の半分以下に。

高効率超音波粉碎技術による風化促進高速化

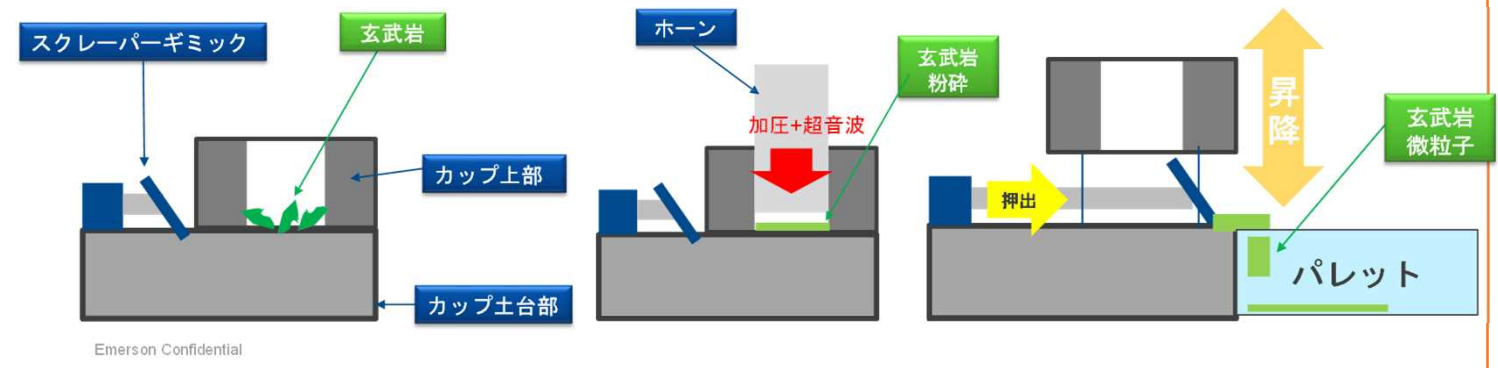
風化促進によるCO₂固定化で最もエネルギーコストの割合が高い粉碎の大幅な低コスト化が可能。

粒径の微細化は風化促進に有効な手段。高効率粉碎技術は風化促進を実用化する上での一つの重要課題。

連続粉碎装置の設計。



	文献 (1)	文献 (2)	本研究
粉碎方法	ボールミル	ボールミル	超音波粉碎
回収率	80wt% pass <38 μm	80wt% pass <106 μm	80wt% pass <90 μm
粉碎エネルギー kWh/t	83	38	(1),(2)より25~50% 低い



これまでの成果：超音波によるオリビンサンドを粉碎、100μ以下粒子の歩留まり80%以上、粉碎エネルギーは従来のボールミル粉碎方法より25~50%kWh/ton低い。連続粉碎装置の設計中。

2023年度目標：粉碎エネルギー50%減少、100μ以下粒子歩留まり40%以上となる条件を得る。

2024年度目標：連続自動超音波粉碎装置の製作。

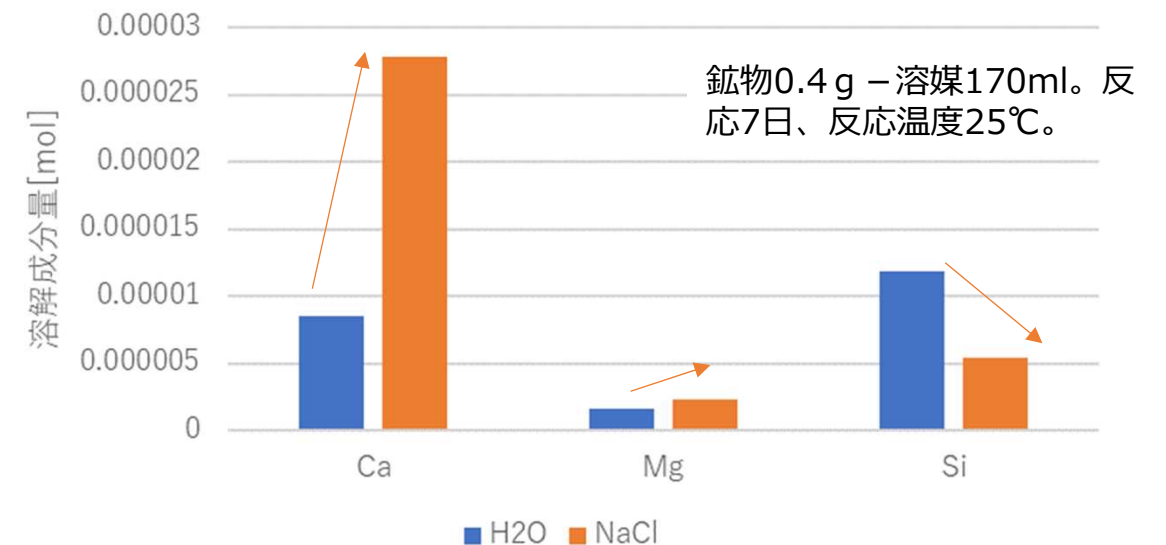
アカウントティング・低コスト化・利活用

➤ 湿度、温度、CO₂濃度、pH、時間的要因変化による反応速度への影響解析、人為的な反応加速実現。

岩石	粉碎・運搬	溶解・鉱物化反応
<ul style="list-style-type: none"> 組成 鉱物種類 不純物 有害元素 	<ul style="list-style-type: none"> コスト 手法 サイズ 時間 エネルギー 	<ul style="list-style-type: none"> 水分量 温度 pH CO₂濃度 塩水 添加物 細孔分布 結晶性、歪み 共存イオン 再析出 被覆妨害 土壌影響

※赤字は検討中項目

- ・ 大気と鉱物と純水の混合では、溶解カチオンの対アニオンはほぼHCO₃⁻状態であることを確認。鉱物溶解水から、CaCO₃やNa₂CO₃固体塩を取り出した。
- ・ 温度やpH、さらに有機酸、NaCl添加で溶解促進効果を確認した。→高温地域、酸性水、土壌有機物、塩水の利用可能性を示唆。
- ・ 粉碎と分級で各種粒子径サンプルを調製した。溶解率や速度の関係を評価し、長期溶解挙動予測を検討中。



図：玄武岩溶解のNaCl(0.5M)の溶解促進効果
オリビンやウォラストナイトもNaClで溶解促進効果があった。

これまでの成果：溶解と固体炭酸塩生成の速度に影響する因子多くの因子を明確化した。特許2件出願準備中。
 2023年度目標：溶解と炭酸塩化に関して、従来法よりアカウントティングや経済性で有利な新規手法を複数提示。
 2024年度目標：各種実験情報を集積し、経済合理性のある新規手法の屋外実証のためのあらゆるデータを揃える。

研究開発④-1

岩粉等の土壌散布による植物・微生物への影響解析

アカウントティング・低コスト化・利活用

- 形状（粒子サイズ等）や岩質（苦鉄質岩）が異なる培土条件（含有量の違いによるミネラル分・pHの変化）における植物の光合成活性、生育促進効果、CO₂固定等を計測。

RIPPSによる土壌水分量のリアルタイム測定

苦鉄質岩1含有量 (%)

シロイヌナズナ 発芽誘導後12日目

水分給水量 (mL)

苦鉄質岩1の散布は水利用効率を上昇させる

岩粉散布によるバイオマス増強効果や水利用効率の向上を確認

トマト

コントロール

播種後29日目の地上部

C% 苦鉄質岩2

スケールバー (水色) = 2 cm

コントロール

播種後19日目の根部

C% 苦鉄質岩1

スケールバー (白色) = 10 cm

新鮮重 (g)

播種後36日目の地上部の重さ (戸高ら、未発表データ)

播種後116日目の地上部

ポット試験による植物生育の評価・CO₂固定効果 (産総研連携)

キャッサバ

円柱ポットを設計して、この筒の中のイオン動態や炭酸塩化を調査する

マルハチ産業 水やり当番 M2個セット

パイプ内径 150mm

パイプ全長 700mm

深度10cm 1.8L 岩粉+土

深度30cm 8.8L 土

深度50cm

(内海ら、未発表データ)

ポット試験による植物生育の評価・CO₂固定効果 (産総研連携)

これまでの成果：岩粉処理による植物生育の増強効果を温室やポット試験で定量的に確認。問い合わせ先：関 原明(理研CSRS, e-mail:motoaki.seki@riken.jp)

2023年度目標：植物生育のリアルタイム観察を実施。ポットで植物生育・水利用効率の向上を確認。

2024年度目標：生育促進を可能にする各種オミックス解析や光合成活性測定等の生理実験を実施。

- 形状（粒子サイズ等）や岩質（苦鉄質岩）が異なる培土条件（含有量の差によるミネラル分・pHの変化）における植物生育促進効果検証。
- 圃場環境（宮古島）でCO₂固定と微生物活性（細菌叢）を含めた土壌全体への効果を評価。



①ポット試験

- ・ヤムイモ（実施中）
- ・キャッサバ（B岩粉で地上部・根生育促進）
（A岩粉で地上部生育促進）
- ・陸稲（地上部生育促進・苦鉄質岩/発芽阻害無し）
- ・コーヒノキ（実施中）

②圃場試験による植物生育評価

- ・ヤムイモ（地上部生育促進・実施中）
- ・キャッサバ（実施中）

③微生物叢の評価（DNA濃度・メタゲノム解析・実施中）

④土壌（圃場）の保水性・透水性の評価（調査中）

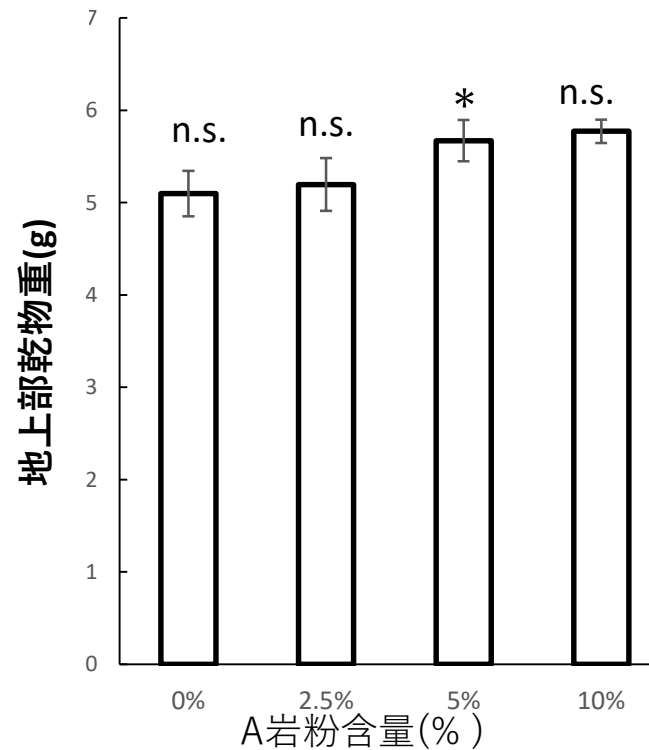
⑤CO₂固定効果（産総研連携・実施中）

土壌：2種類・岩粉：A・B

問い合わせ先：菊野日出彦
東京農大 宮古亜熱帯農場,
e-mail:h3kikuno@nodai.ac.jp

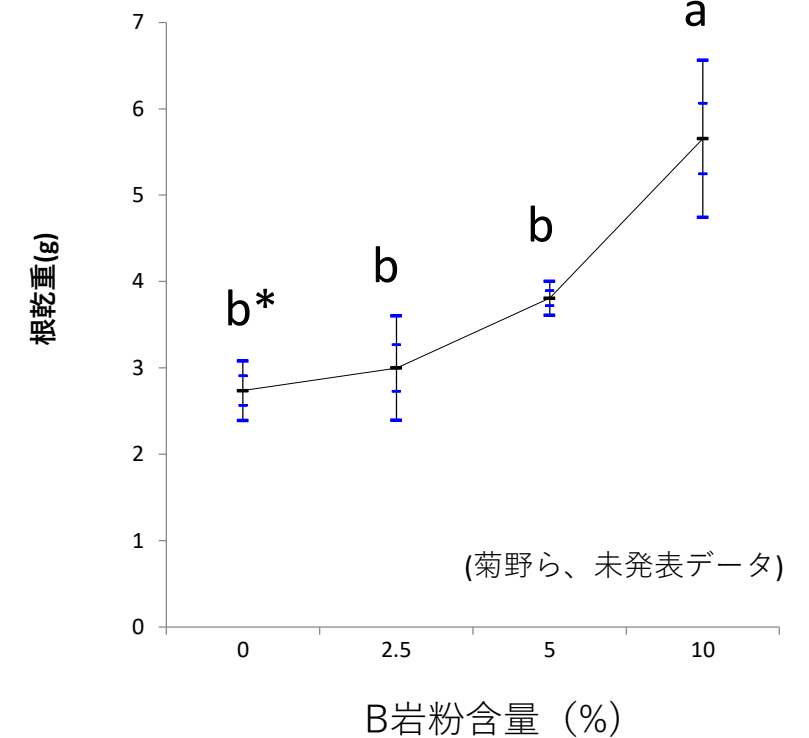
（菊野ら、陸稲の一部を除き
全て未発表データ）

苦鉄質岩の土壌施用が陸稲の初期生育を促進する
（ポット試験・無施肥）



*Values followed by different letter is significantly different at P < 0.05 by Tukey-Kramer test .

苦鉄質岩の土壌施用がキャッサバの初期生育（根）の成長を促進する（ポット試験・無施肥）



*Values followed by different letter is significantly different at P < 0.01 by Tukey-Kramer test .

（菊野ら、未発表データ）

日本熱帯農業学会第134回講演会・近畿大学・2023年10月14日・陸稲については成果の一部を口頭発表

これまでの成果：岩粉による植物生育の促進効果をポット試験で確認（学会発表・有）、圃場試験を開始。

2023年度目標：圃場・ポットで植物生育と土壌微生物叢の変化を解析し、効果のある処理濃度を絞る。

2024年度目標：異なる土壌・施肥条件下における処理が植物生育や細菌叢に与える影響を総合的に提示。

入力項目

(= 各種試験の実験条件)

岩石情報

- ・ 岩石種
- ・ 粒径
- ・ 輸送地

散布条件

- ・ 散布量
- ・ 散布深度

農地条件

- ・ 土壌区分
- ・ 植物種

気候条件

- ・ 気温
- ・ 湿度
- ・ 降水量

ツール要素

岩石の
炭酸塩化係数

岩石溶解速度

土壌からの
イオン溶脱量

採掘・粉砕エネ
ルギーとユー
ティリティ

輸送距離とエネ
ルギー

植物育成量

CAPEX & OPEX

出力結果

(= CO₂固定量と排出量を積み上げ計算)

CO₂固定
ポテンシャル
プロセス1&2

CO₂
固定量

土壌からの
CO₂排出量

全行程でのCO₂排
出量

全行程におけるコ
スト合計

植物育成促進によ
る利益

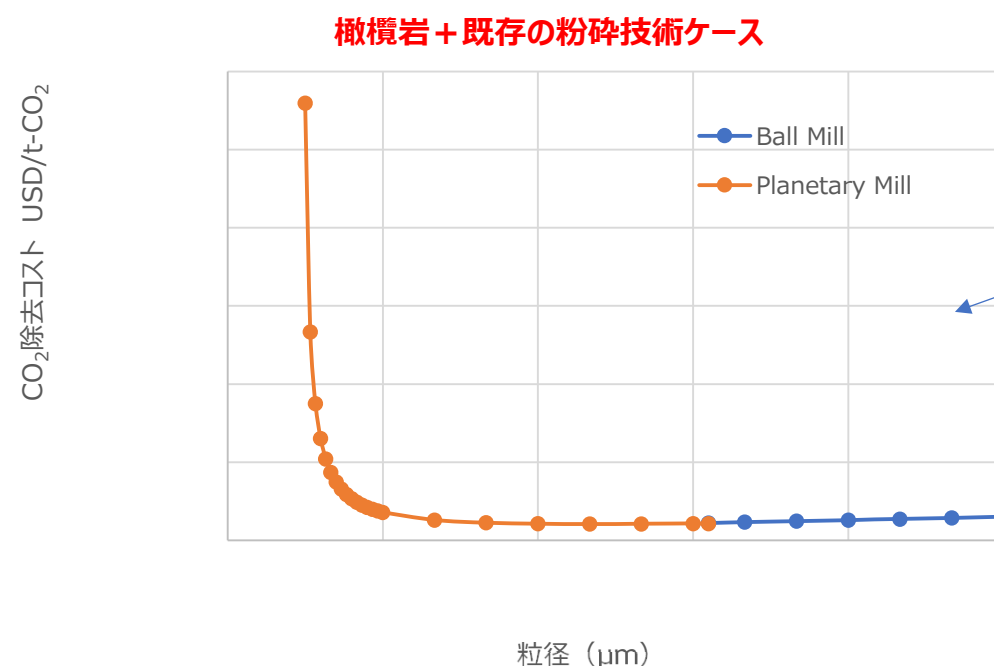
アカウントティング・低コスト化・利活用

- CO₂吸収量等の時系列変化を考慮し、**将来シナリオに基づくLCA/TEAを行う評価ツール開発。**
- 利活用まで含めた苦鉄質岩等、岩粉粒度の**最適化**とコスト最小となる**トータルシステム設計。**

風化促進システム設計に向けたLCA/TEA評価ツールの開発

- 評価ツールの土台を作成。国内での風化促進の評価に必要な採掘・輸送・粉砕・散布のデータを収集。
- 将来シナリオの作成とバックグラウンドデータ作成。採掘シミュレーションによる採掘エネルギーの精査。

	文献値	評価ツール
設備費 (\$/ton-year)	中央値: 2.8 最小: 0.03 最大: 13.5	海外の 文献値 と日本に おける収 集データ の比較
採掘・粉砕費 (\$/t)	中央値: 9.9 最小: 3.13 最大: 58.6	
輸送費 (\$/t.km)	0.05	
散布費(\$/t)	中央値: 10.7 最大: 17.8	



CO₂削減コスト最小となる粒径の評価

今後の課題

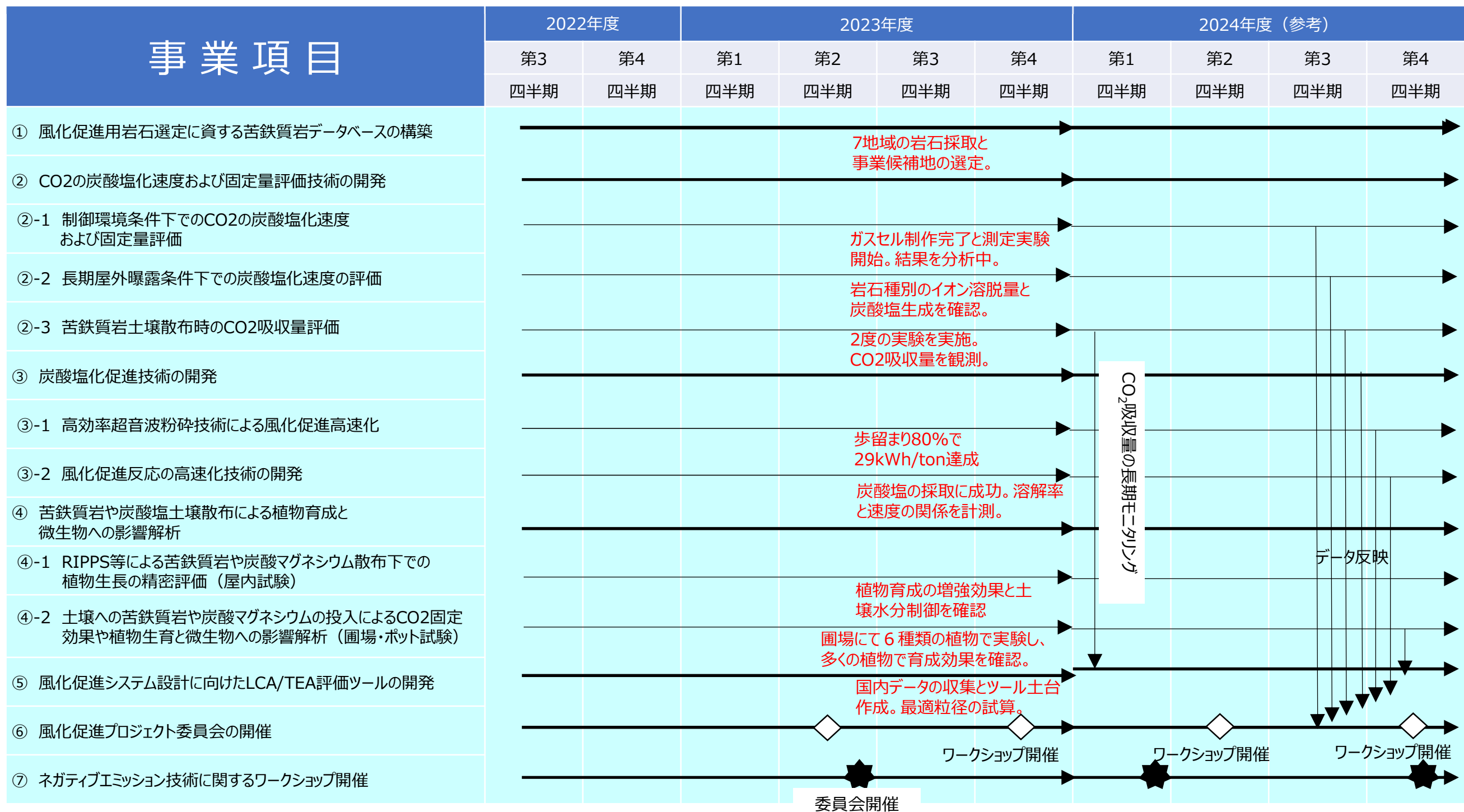
- ・GISによる輸送距離と散布量の精査。
- ・CO₂固定量におけるシミュレーション結果の反映
→ 実験値の挿入
- ・超音波粉砕データの反映

(2件の学会発表予定)

これまでの成果：日本版風化促進の評価ツールの土台作成。簡易版ツールで粒径最適値の試算。
 2023年度目標：風化促進システムのインベントリーデータを収集し、評価ツールの基本骨格を構築。
 2024年度目標：評価ツールにより200~250USD/t-CO₂以下となるシステムの設計。

プロジェクト進捗状況

- 2023年度は一連の実験開始と基礎データの取得、LCA/TEA評価ツールの土台開発。
- いくつかの実験からは風化促進の効果を裏付ける有効なデータが取得できており、開発も予定通り進捗。



企業連携と国際連携による成果の普及

産総研 ムーンショット事業

・肥料散布、工業的風化促進、排ガスへの適用、炭酸塩廃棄等について4社と協議中。

中垣PJ

評価ツール構築を通じて風化促進の社会実装に向けた連携。

米国DOE (ARPA-E)

米国大学、国立研

MINERプロジェクトで鉱山採掘時の鉱石を使用した風化促進を実施中。共同でLCAの手法検討予定。

米国連携

米国DOE

CO₂除去技術におけるLCAの手法開発。

ミッション イノベーション

カナダ省庁、大学、国立研
廃棄物を利用した風化促進でLCAの方法検討中。

豪州、サウジ、UK

世界の風化促進PJのDBを作成。これまでの風化促進のLCA手法を整理。ガイドライン素案作成中。

肥料散布についてコートジボワール・ケニアと連携

ワークショップの開催と委員会



ムーンショット型研究開発風化促進 第1回ワークショップ

日時：2023年10月30日(月) 13:00~17:30

場所：UDX AKIHABARA SPACE – UDX GALLERY

内容・早大中垣PMと合同で開催。ARPA-Eからもメッセージを配信。

- ・参加登録は528件、当日の参加は会場101名、オンライン306名、合計407名
- ・風化促進の国内大規模ワークショップとしては国内初。

風化促進プロジェクト推進委員会

委嘱手続き完了。7月14日（金）に第一回を開催。

ELSIに関するマネージメント

健康被害防止に向けた法令確認と分析。関係団体へヒアリング（早稲田大学チームと連携）。

ご清聴ありがとうございました

PM：森本 慎一郎
環境・社会評価研究チーム長
ゼロエミッション国際共同研究センター
国立研究開発法人 産業技術総合研究所