

岩石と場の特性を活用した風化促進技術 “A-ERW” の開発

PJ参画機関

直接受託機関：



北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY



京都府立大学
Kyoto Prefectural University

三菱重工エンジニアリング

再委託・共同実施機関



ソブエクレア株式会社



国土防災技術株式会社



地方独立行政法人
北海道立総合研究機構（道総研）



国立研究開発法人 森林研究・整備機構
森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

QJ Science

農研機構
NARO



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

JIRCAS
国際農研

琉球大学
UNIVERSITY OF THE RYUKUS



三菱重工パワー環境ソリューション

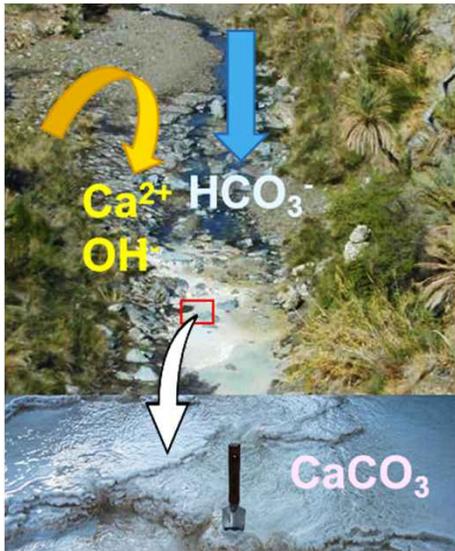
PM：中垣隆雄
早稲田大学 理工学術院 教授

風化促進 (EW) によるCO₂固定化技術の概要

風化：岩石が自然環境の下で破碎・溶解し、新しい物質が沈殿するプロセス。千年・万年単位での自然現象



CO₂鉱物化：CaやMgを含む鉱物（ケイ酸塩鉱物）の溶解によってCO₂を炭酸塩鉱物として固定化する現象



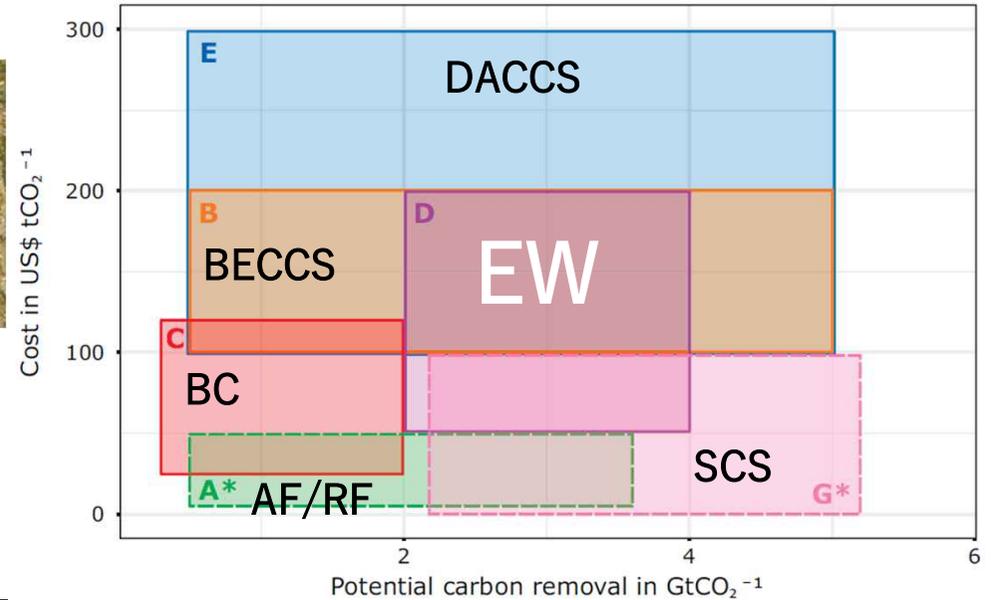
河川での炭酸カルシウム鉱物の生成例

アイスランドCarbfixプロジェクト
玄武岩層にCO₂圧入



NETsにおけるEWの利点と課題 ⇒ (光合成には水も必要)

風化促進 (EW)のコストとCO₂削減ポテンシャル

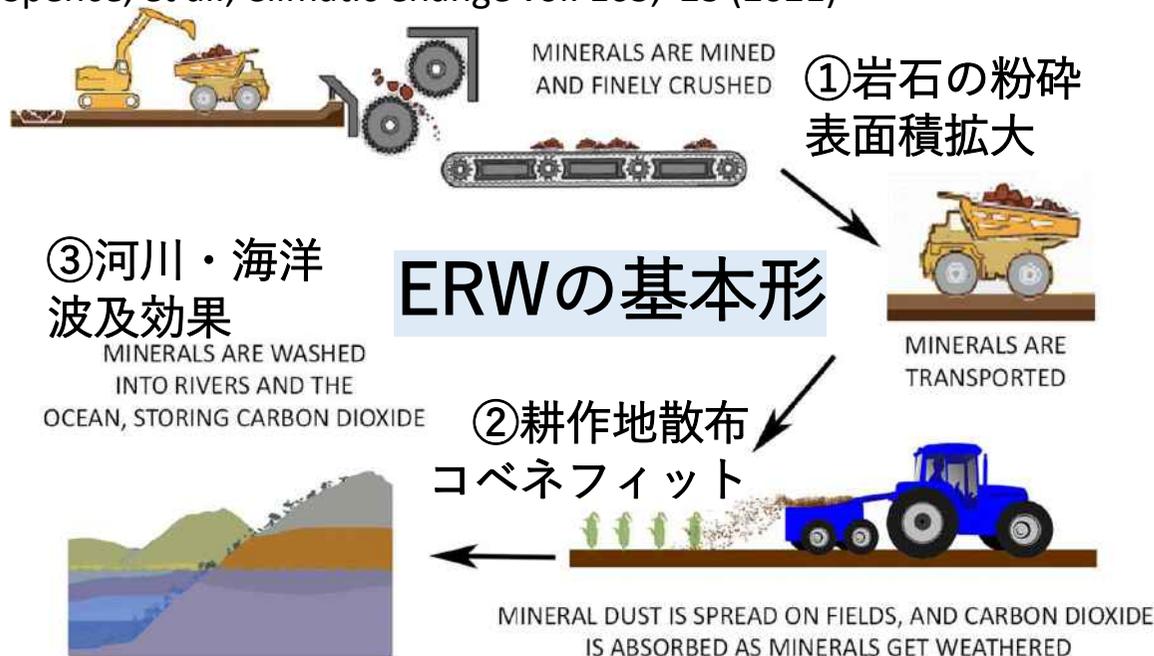


NETs (TRL)	土地利用 m ² /t-CO ₂ /y	正味削減	日本での実施の優劣
EW(4)	29	要確認	◎
DACCS(6)	4	確認済	△
BECCS(7)	379	確認済	△
AF/RF(9)	978	確認済	○
SCS(7)	0	要確認	○
BC(6)	580	確認済	○

本PJでは岩石を用いて**風化**×**CO₂鉱物化**を加速させ、**正味削減量**（アカウンティング方法）が明確な**ERW**（Enhanced Rock Weathering）技術を研究開発対象とする。

ERWの世界の現状認識と共通課題

Spence, et al., Climatic Change vol. 165, 23 (2021)



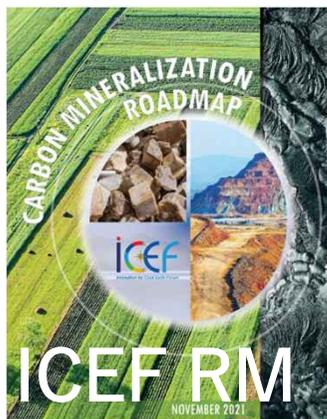
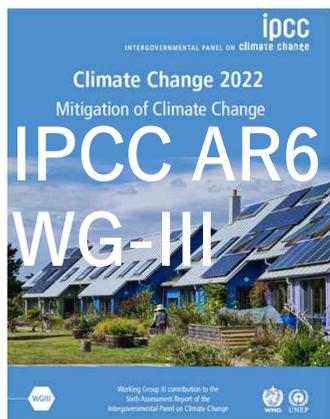
②耕作地散布以外の適用先は未開拓

出典：Nature



アカウンティング方法の確立必須

- ① 岩石依存の粉碎エネルギー評価
- ② 土壌依存の炭素固定量の定量化



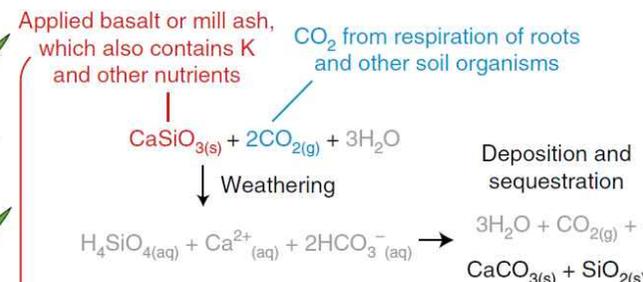
Si/Ca/K溶出 ⇒ 肥料

- 土壌改良
- 収量増加

Enhanced crop vigour and yield due to greater uptake of Si, Ca, K and micronutrients

Enhanced root growth due to improved pH, nutrient supply and physical conditions

Beerling, Nature Plants, vol. 138, 4 (2018)



河川を通じて海洋へCa²⁺ ⇒ アルカリ化, CaCO₃固定

Enhanced ocean alkalinity and growth of diatoms, foraminifera and corals

Weathering products in surface and groundwater runoff (less N, higher Si:N ratio)

主要レポートにも期待大との記載、しかし…

- ① 玄武岩のみ対象？
- ② 土壌への負の影響は？

共通認識課題 + A-ERW独自の課題設定

共通認識の課題：アカウンティング方法の確立必須（ERWに必要不可欠）
 岩石依存の粉碎エネルギー評価 + 省エネ工程開発
 土壌依存の炭素固定量の定量化 + 自然循環モデルの高度化と炭素会計情報基盤整備



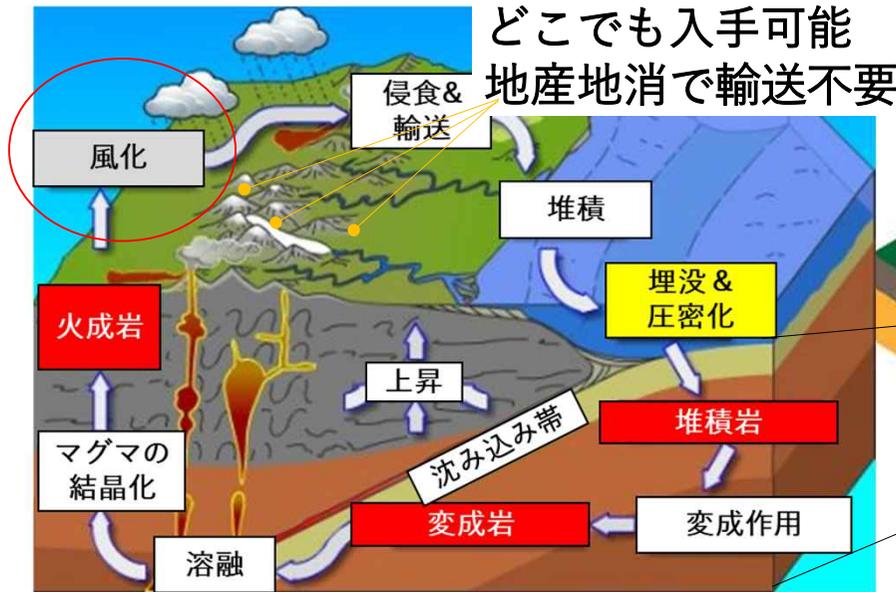
本PJの独自の課題設定とチャレンジ

- A) 日本の地質特性を活かした適用岩石の拡大
- B) 散布場の選定による風化促進の加速と新たなコベネフィットの創生
- C) 風化促進とコベネフィット最大化を目的とした栽培・土壌管理法の開発

海外では日本と地層が異なり
局在化している



玄武岩の柱状節理



どこでも入手可能
地産地消で輸送不要

地質は北海道で事例研究



日本の地質の特徴
プレートの沈み込み帯に位置するため、岩石資源が多様かつ豊富

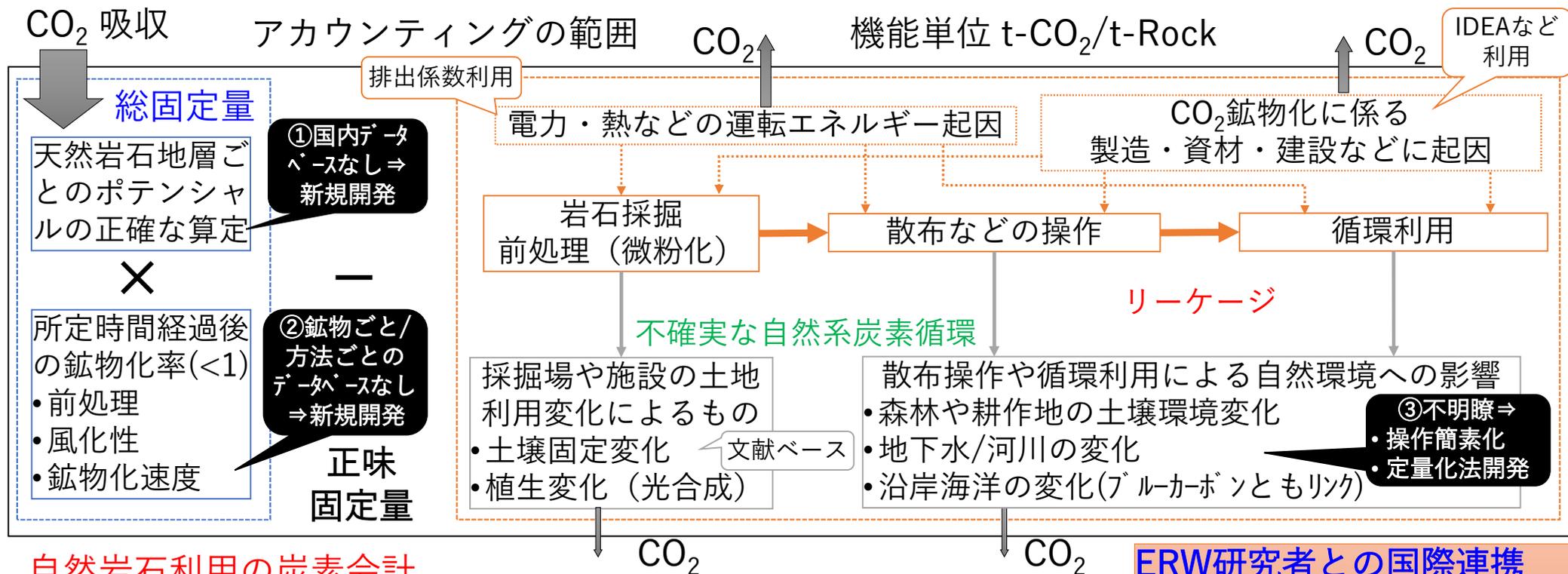
- Accelerated
- Accurate Accounting
- Advanced
- Active
- Agro-industrial
- Advantageous

"A-ERW"の開発

日本の地質(岩石)の特性・散布場の特性の双方を活用し、
「岩石ごとの人工的風化」×「効果的なCO₂鉱物化法」を開発、
「自然循環も含む炭素会計明確化のための情報基盤」を整備

炭素会計の明確化の方法案

日本LCAフォーラムで発表済み



自然岩石利用の炭素会計

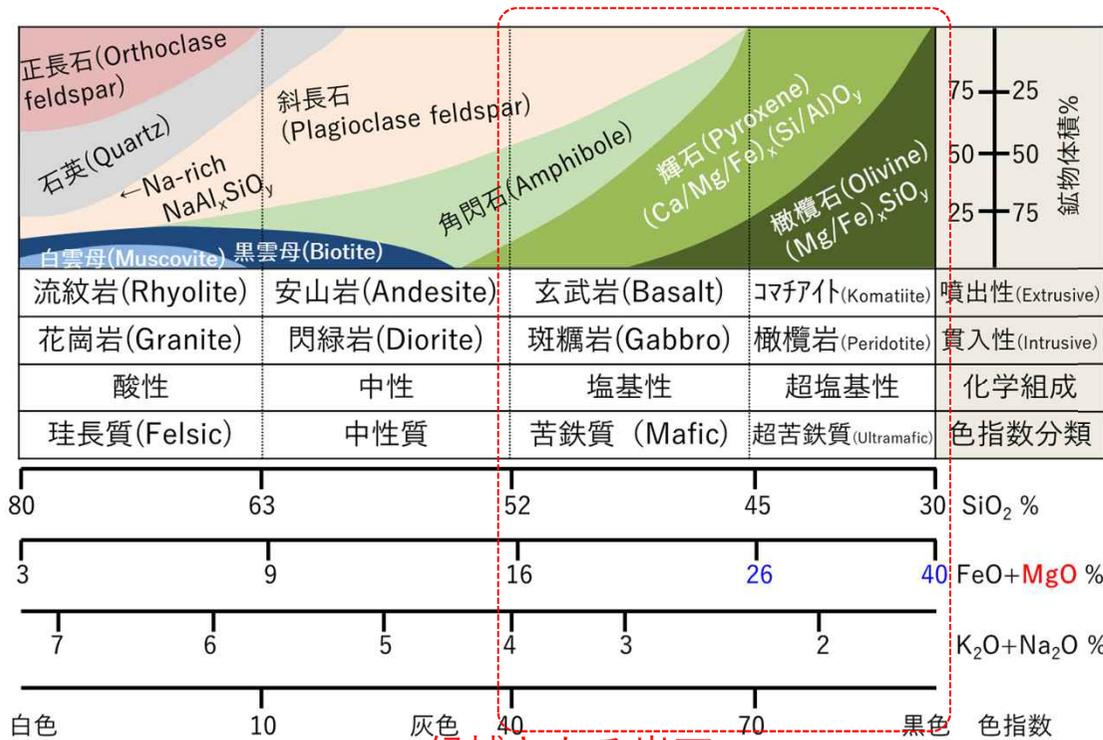
⇒ 岩石ごとのエンジニアリングデータの取得：**情報基盤整備**

ERW研究者との国際連携
日本発炭素会計の方法論の
国際的コンセンサス醸成

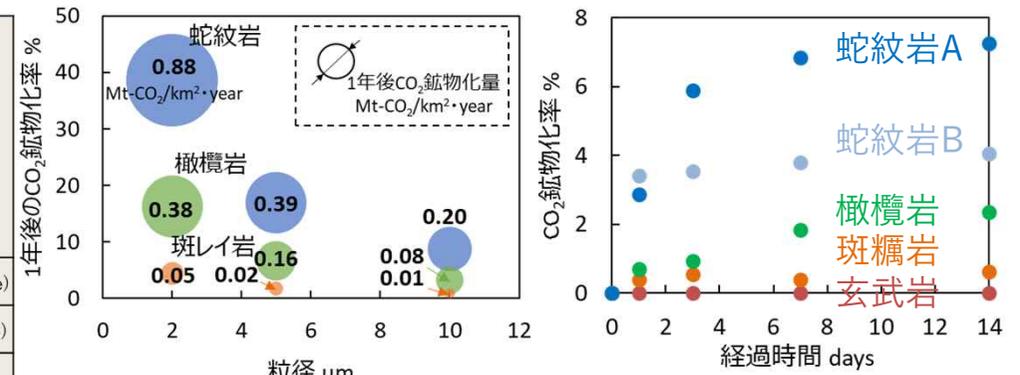
既往文献整理からの抽出課題：これらを全て解決

- ①国内の地層・岩石に関する分布データはあるが、**CO₂ 鉱物化ポテンシャルのデータベースはない** (風化耐性:弱 ≠ CO₂ 鉱物化:適 などの認識なし)
- ②数理モデル自体はあるが、**鉱物種依存、前処理法・風化性依存の鉱物化率が明確ではない** (基本的なメカニズムはある程度既知だが、気固・気液界面を介したCO₂の輸送・溶解・Ca/Mgとの反応など、複数の経路のモデリングが不完全)
- ③耕作地散布や循環利用による自然環境への影響とそれらの炭素収支変化が不明、**モニタリング法もない** (生育環境：**気候・土壌種・作物種の組み合わせ**に応じた炭素収支の変動の法則や変化量が未解明。さらに**N₂OやメタンなどのGHGも未考慮**)

独自①：日本の地質特性を活かした適用岩石の拡大



候補となる岩石



鉱物種ごとに適した風化促進法

蛇紋岩や橄欖岩なら気固接触でも可能？

⇒ **アカウントインベントリのシンプル化**
岩石種 + 粒径の適正化で鉱物化時間を大幅短縮

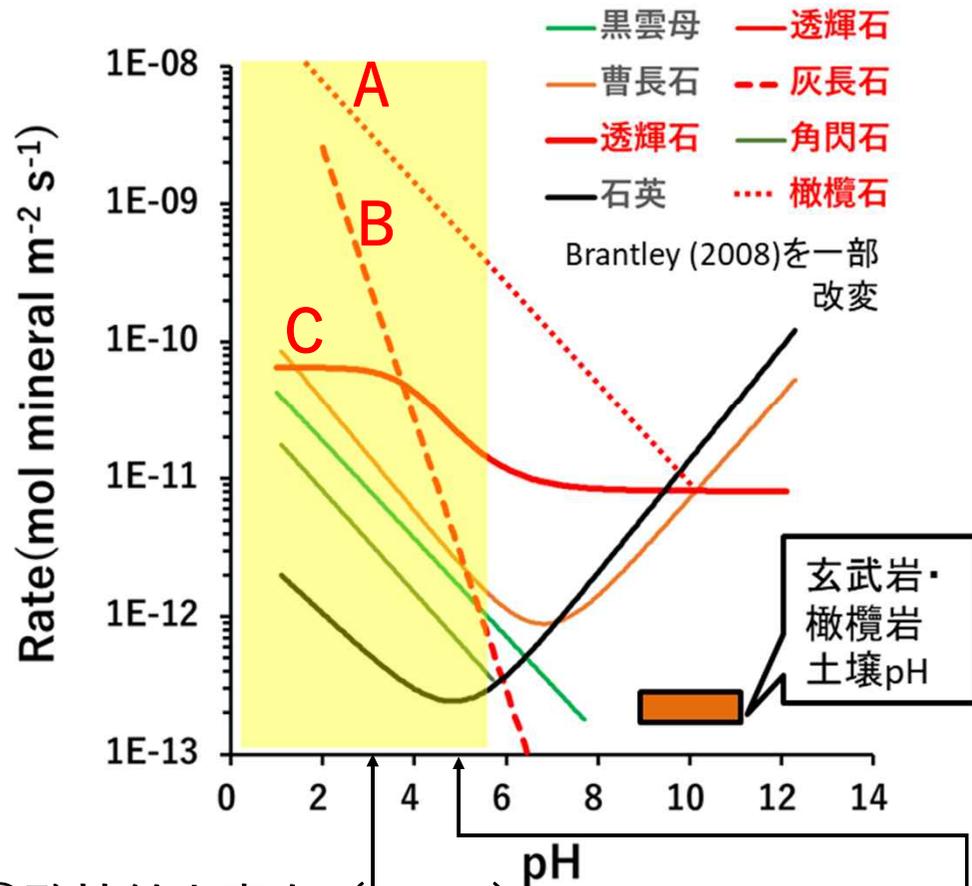
※CO₂鉱物化後の用途開発調査 (例：コンクリート細骨材, 土木用途など) も実施予定

この他, 火山灰なども可能性あり

岩石	風化性 (非晶質, 鉱物の耐風化性)	CO ₂ 鉱物化ポテンシャル (Ca/Mg含有量)	CO ₂ 鉱物化速度 (塩基性, 高pH)	現時点での評価
玄武岩	○	◎	○	いずれも平均以上, 耕作地散布に適する 海外で露出地層が多く, ERW事例が多い? 気固接触鉱物化には向かない?
橄欖岩	○	○	◎	ポテンシャルは大きい分布が限られる 耕作地散布は不可
斑禰岩	△	◎	○	橄欖岩や玄武岩よりは劣る
蛇紋岩	△	△~○	○~◎	沈み込み帯 (日本など) に多い変成岩 脆いので土木用途×, 粉碎エネルギーは小さい? 蛇紋岩化の程度により, 鉱物化率のばらつきが大きい? 耕作地散布に不適な元素 (Ni等) を含むものもある

独自②：散布場の選定による風化促進の加速と新たなコベネフィットの創生

酸性環境下で
 鉱物の風化（溶解）速度 対数的に速度上昇



C Ca-rich $\text{CaAl}_x\text{SiO}_y$ Amphibole	B 輝石(Pyroxene) $(\text{Ca}/\text{Mg}/\text{Fe})_x(\text{Si}/\text{Al})\text{O}_y$	75 — 25	鉱物体積%
		50 — 50	
	A 橄欖石(Olivine) $(\text{Mg}/\text{Fe})_x\text{SiO}_y$	25 — 75	
玄武岩(Basalt)	コマチアト(Komatiite)	噴出性(Extrusive)	
斑糲岩(Gabbro)	橄欖岩(Peridotite)	貫入性(Intrusive)	
塩基性	超塩基性	化学組成	
苦鉄質 (Mafic)	超苦鉄質(Ultramafic)	色指数分類	

酸性 (pH6以下) が保持される場

①酸性鉱山廃水 (pH<3)



廃水処理の石灰依
 存からの脱却

↓
 鉱業との
 コベネフィット

②溶脱優勢な傾斜面にある森林



森林土壌の改良
 地滑り防止

↓
 林業との
 コベネフィット

独自③：風化促進とコベネフィット最大化を目的とした栽培・土壌管理法の開発

農地への岩石散布による大気CO₂削減

社会実装に
必要な要件

- 作物の品質の維持・向上
- 土壌有機炭素の維持
- 温室効果ガス排出の抑制

これらを
担保するために...

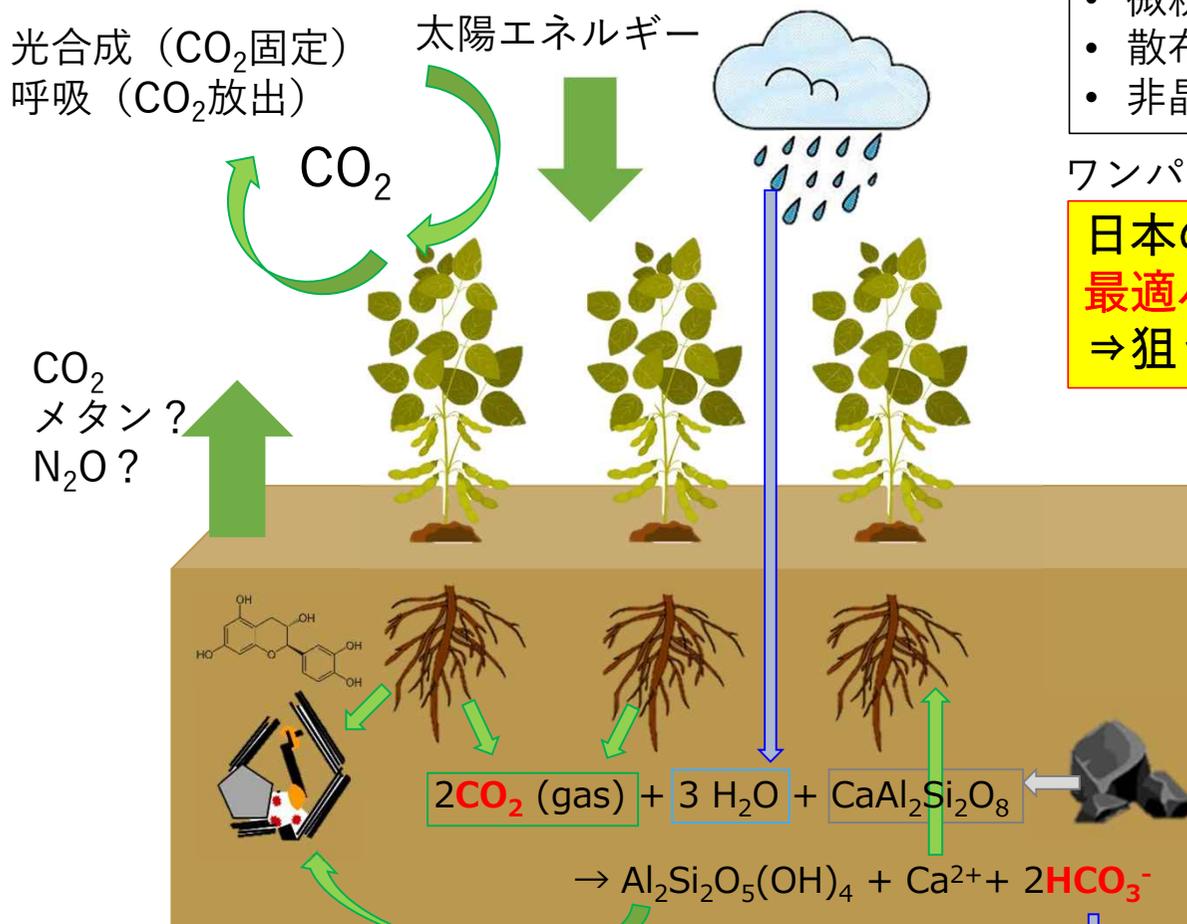
複雑系の土壌システムで必須の評価
気候・土壌種・作物種+岩石種の相互作用

負の影響も併せて評価

- 微粉末による孔隙の充填 = 物理性悪化
- 散布量増加による養分バランス変化
- 非晶質鉱物の過剰生成 = リン不足 等を想定

ワンパターンでは通用しない⇒カスタマイズ

日本の気象・土壌・栽培条件に合わせた
最適パッケージの探索が不可欠！
⇒狙うコベネフィットもそれぞれ異なる



Co-benefit ① 養分供給

- 例. ケイ素：南西諸島強風化土壌
カルシウム：熱帯強酸性土壌
カリウム：黒ボク土

Co-benefit ② 物理性改善

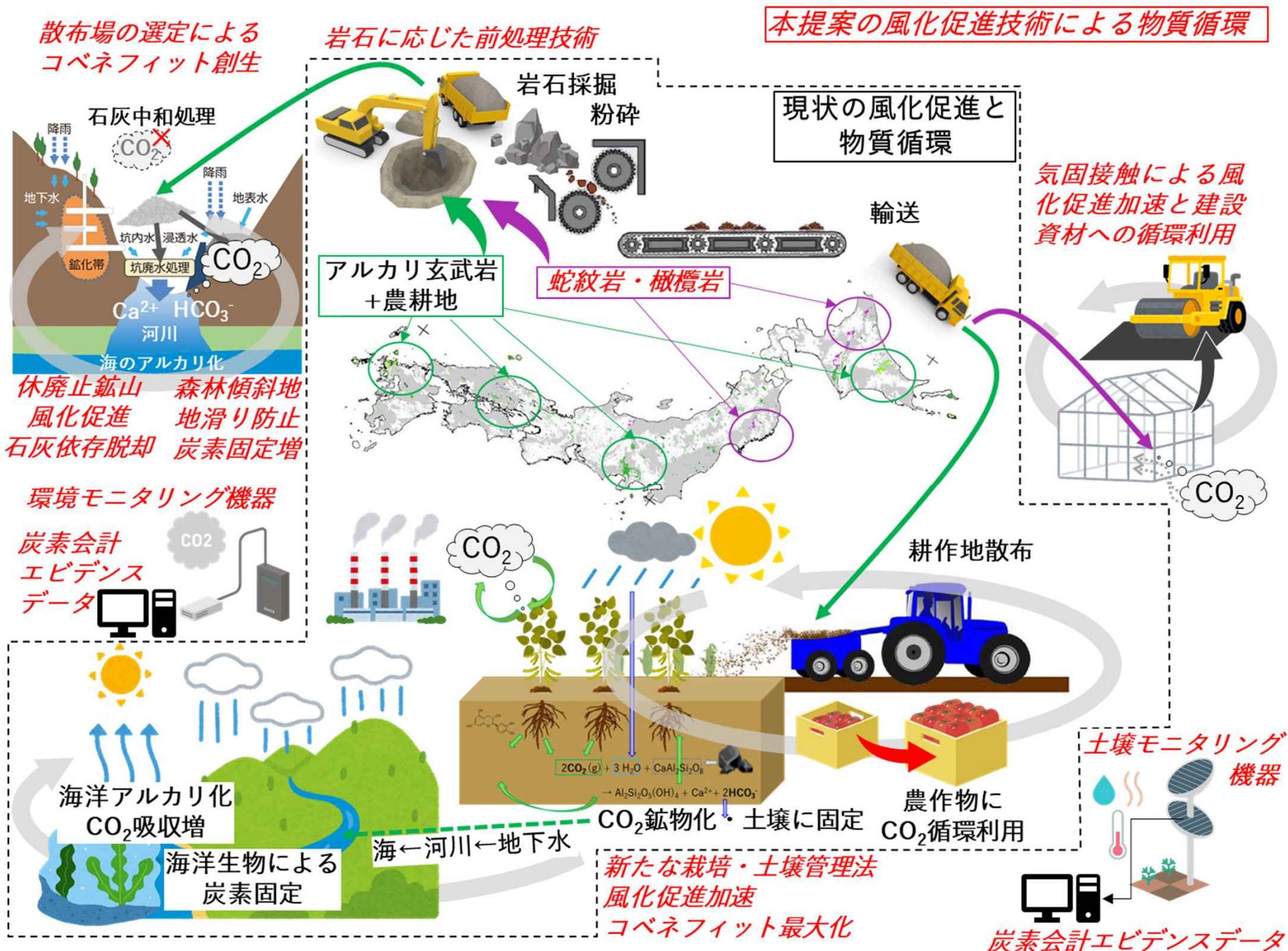
(例. 北海道の重粘質土壌)

Co-benefit ③ 有機炭素の貯留

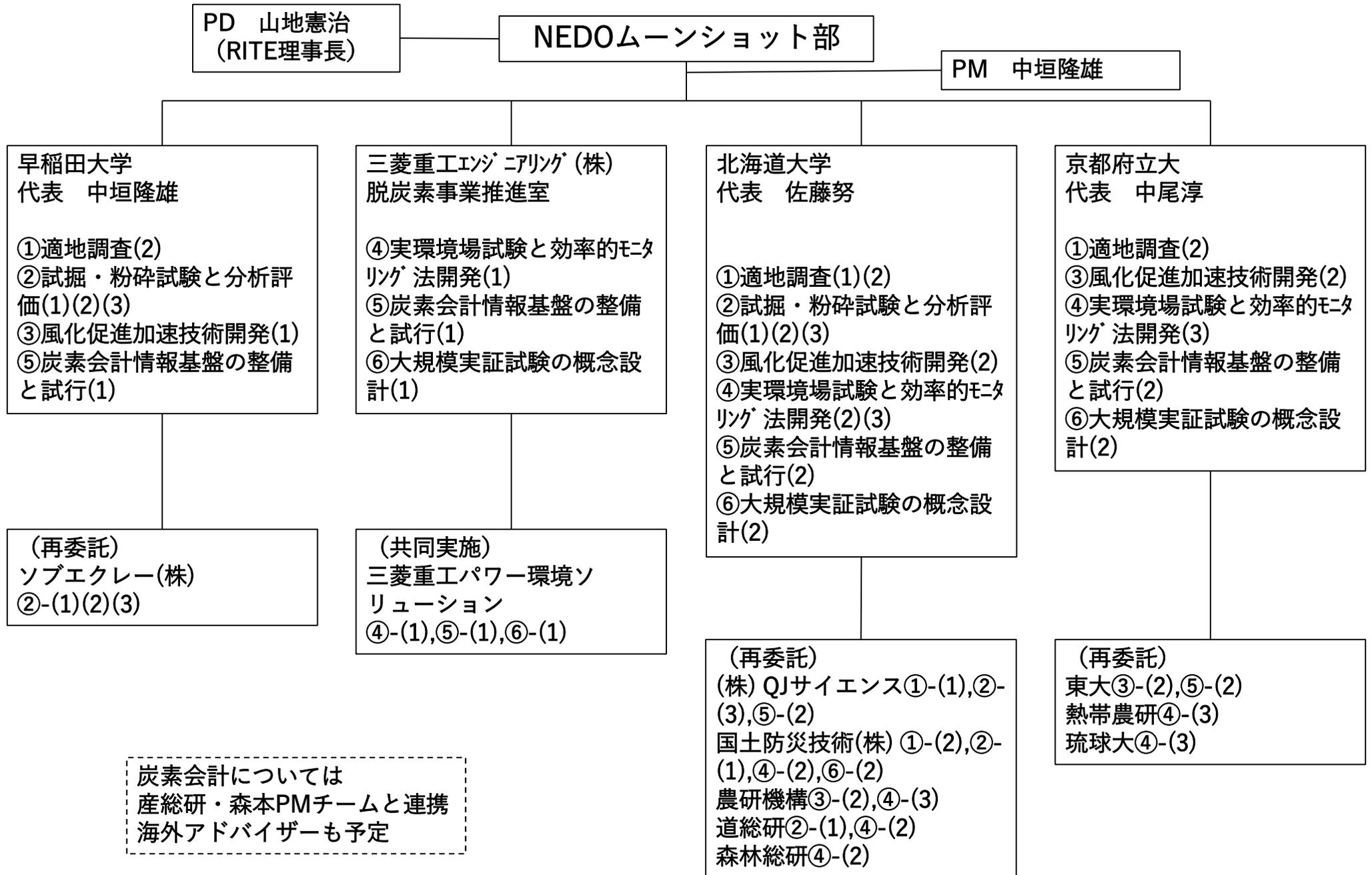
(カルシウムおよび生成する非晶質鉱物との結合)

土壌内でCaCO₃として沈殿
溶脱→海洋へ運搬されCaCO₃として沈殿

A-ERWの全体像と資源循環のイメージ



A-ERWの実施体制 実施期間2022年10月～2025年3月



研究開発項目ごとの分担と再委託先の一覧

大項目	中項目	早大	三菱重工エンジ	北大	京都府大
①適地調査	(1)地質学的調査			○ (QJサイエンス・道総研)	
	(2)事業環境調査	○		○ (国土防災)	○
②試掘・粉碎試験と分析評価	(1)試料調達候補地調査	○ (ソブエクレ)		○ (道総研・国土防災)	
	(2)粉碎試験, 鉱物相分析評価	○ (ソブエクレ)		○北大環 (国土防災)	
	(3)前処理の所要エネルギー予測技術の開発	○ (ソブエクレ)		○ (QJサイエンス)	
③風化促進加速技術開発	(1)工業的鉱物化法	○			
	(2)開放系散布風化促進法			○北大環・農 (農研機構)	○ (東大)
④実環境場試験と効率的モニタリング法開発	(1)気固接触ハウス		○ (三菱重工パワー環境ソリューション)		
	(2)森林・休廃止鉱山			○北大環 (道総研・国土防災・森林総研)	
	(3)農地散布			○北大農 (農研機構)	○ (国際農研・琉球大)
⑤炭素会計情報基盤の整備と試行	(1)工業的鉱物化法の炭素会計法の開発	○	○		
	(2)自然の炭素循環を含む炭素会計法の開発			○ (QJサイエンス)	○ (東大)
⑥大規模実証試験の概念設計	(1)工業的風化促進法の概念設計		○ (三菱重工パワー環境ソリューション)		
	(2)開放系散布風化促進法の概念設計			○北大環 (国土防災)	○