

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



京都府立大学
Kyoto Prefectural University

直接受託機関：



北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY



再委託・共同実施機関



ソブエクレ株式会社



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



農研機構



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



琉球大学
UNIVERSITY OF THE RYUKYUS



三菱重工パワー環境ソリューション



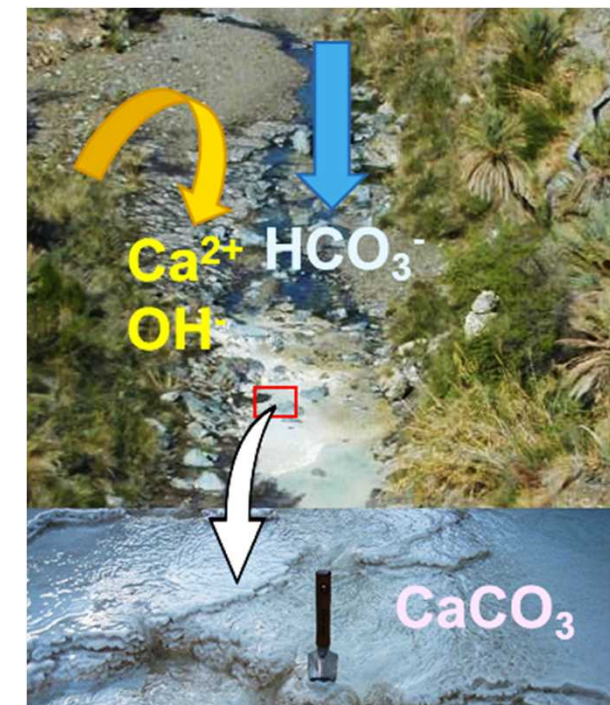
PM：中垣隆雄
早稲田大学 理工学術院 教授

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



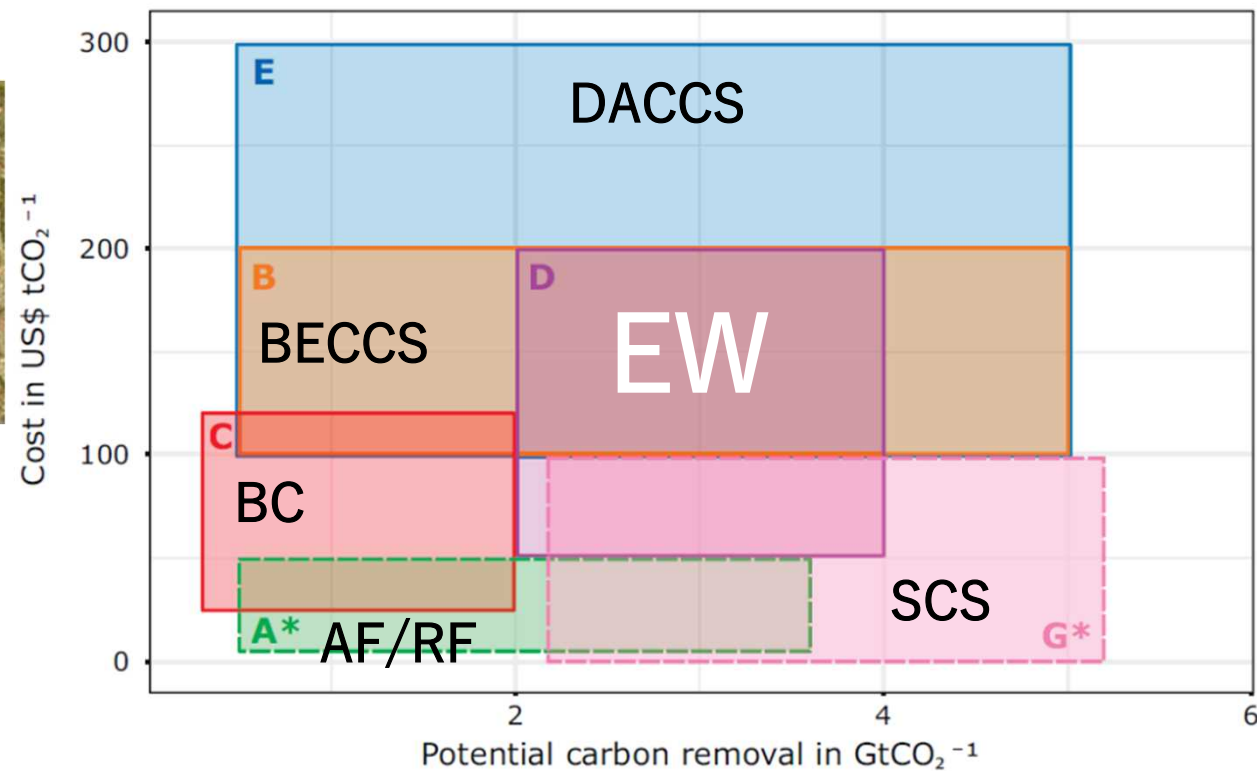
河川での炭酸カルシウム鉱物の生成例

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

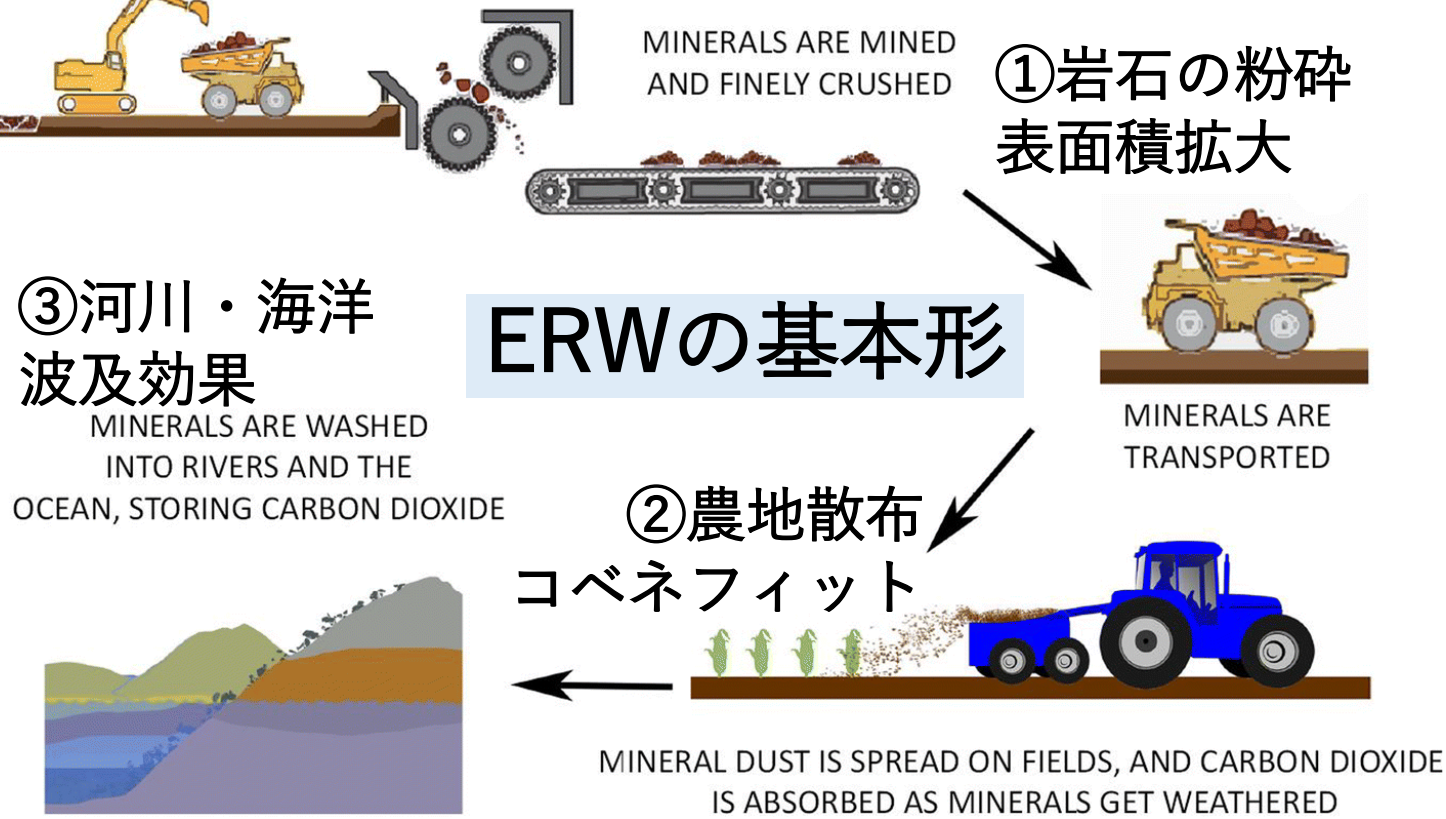


NETs (TRL)	土地利用 m ² /t-CO ₂ /y	正味削減	日本での実施の優劣
EW(4)	29	確認中	◎
DACCS(6)	4	確認済	△
BECCS(7)	379	確認済	△
AF/RF(9)	978	確認済	○
SCS(7)	0	要確認	○
BC(6)	580	確認済	○

本PJの研究開発対象：天然岩石を用いて**風化** × **CO₂鉱物化**を人為的に加速、**正味削減量** (アカウンティング方法) が明確な**ERW** (Enhanced Rock Weathering) 技術の研究開発

ERWの世界の現状認識と課題

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



農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
岩石依存の粉碎エネルギー評価
土壌依存の炭素固定量の定量化

森本チームと連携

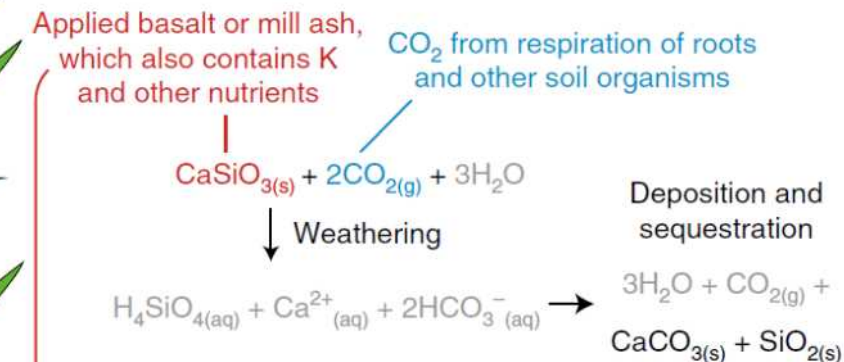
Si/Ca/K溶出
⇒ 肥料
• 土壌改良
• 収量増加

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)

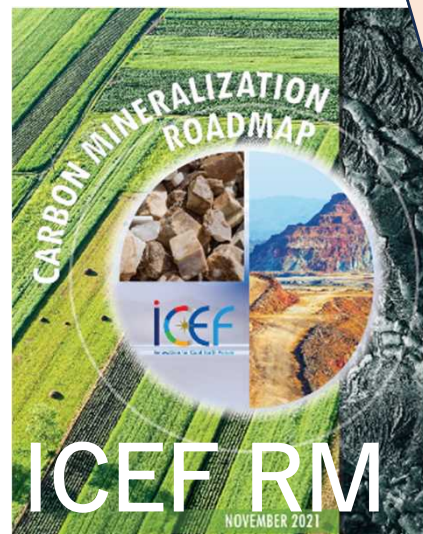
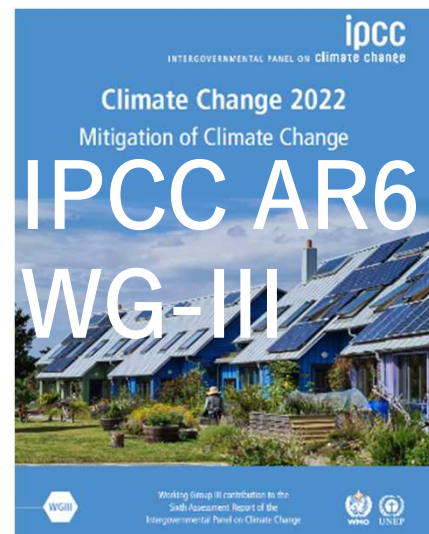
炭素会計が不明瞭



河川を通じて海洋へCa²⁺
⇒ アルカリ化, CaCO₃固定

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

Enhanced ocean alkalinity and growth of diatoms, foraminifera and corals

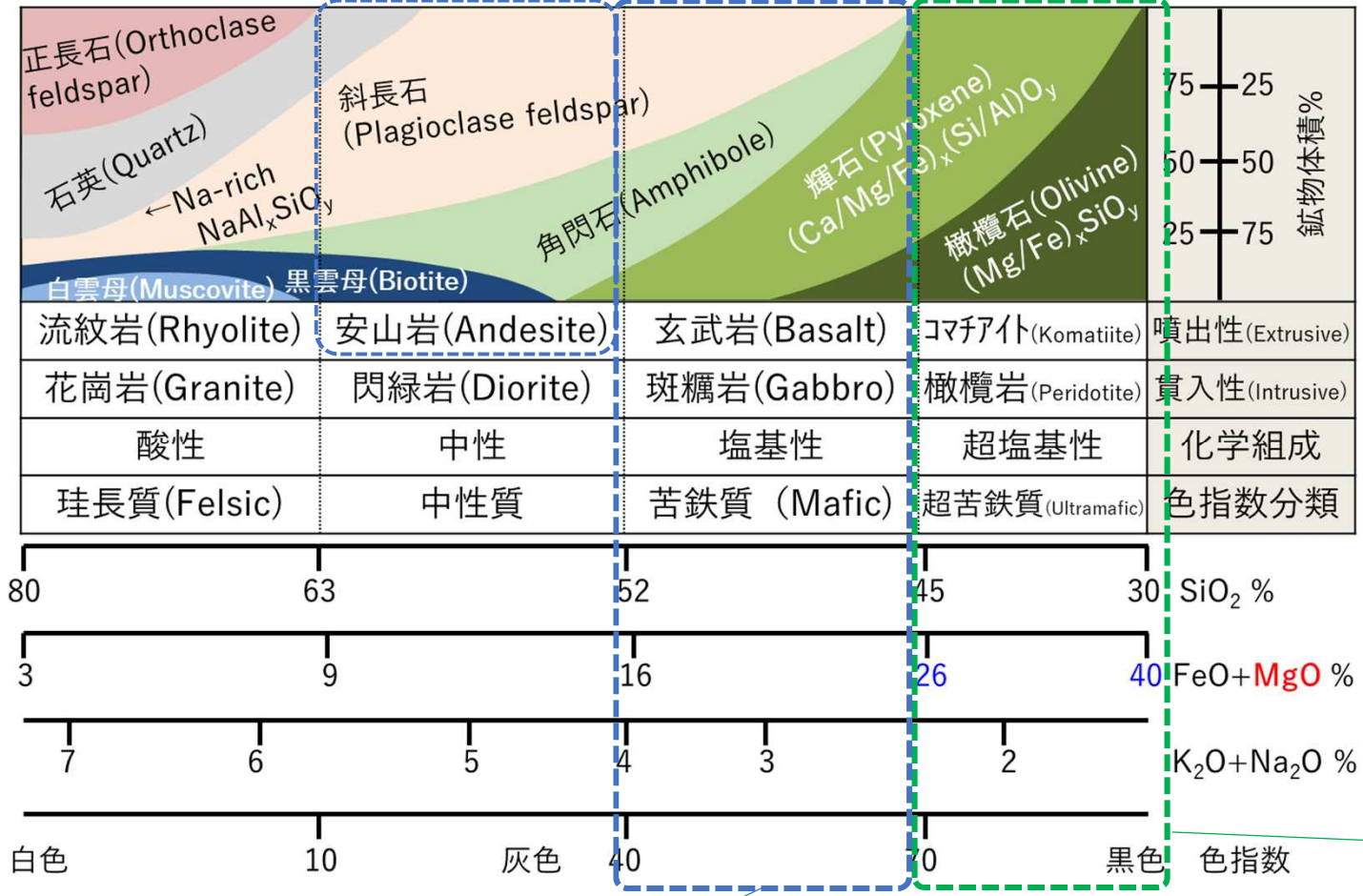


玄武岩以外は？ 土壌への負の影響は？

主要レポートにも期待大との記載、しかし…

※安山岩の可能性も今後追及 A-ERWプロジェクト実施内容

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



点在する風化ポテンシャルの高い岩石を
できる限り活用 ⇒3つのアプリケーション

- ✓ 風化促進+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
- ✓ 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
- ✓ 工業的に管理された鉱物化法で適用岩石を拡大

玄武岩以外	気固接触ハウス※
炭素会計	管理されたSSのみ ほぼ正確に算出可能
コベネフィット	再緑化材等として その場に埋め戻し

玄武岩	農地への散布
炭素会計	土壤有機炭素含むSS+OS 気候風土×土壤種×作物種×岩石散布仕様 これらの組み合わせの数だけ検証が必要
コベネフィット	作物の収量増の他、栄養供給、土壤物理性改善、 有機炭素貯留増加、高GWPのCH ₄ /N ₂ O削減、 海洋アルカリ化 など

ERWの基本的アプリケーション

散布場の選定で高速に風化⇒粉砕動力不要

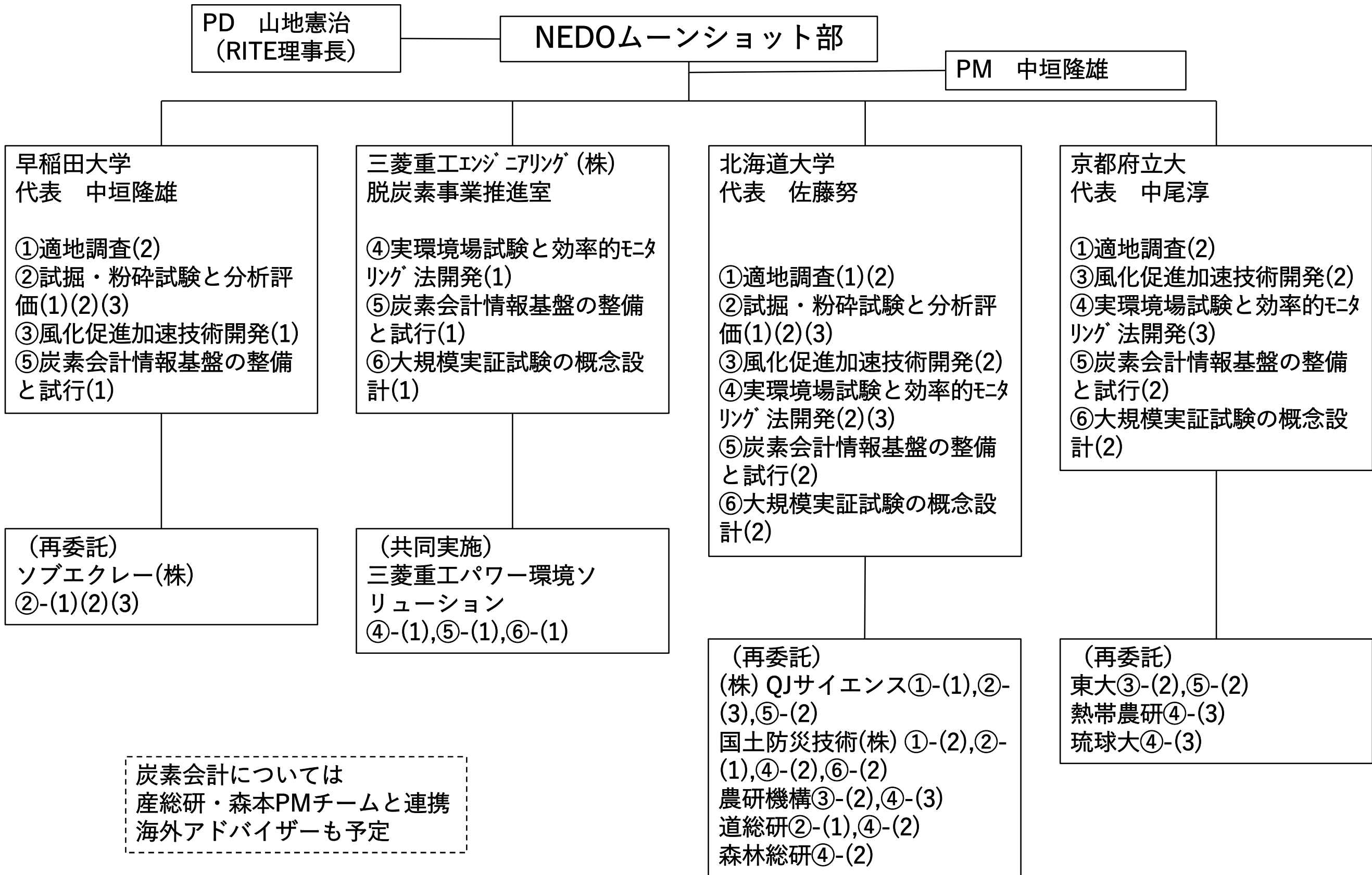
玄武岩	休廃止鉱山・森林傾斜地散布
炭素会計	ほぼOSのみ 溶脱量を正確に算出可能
コベネフィット	酸性廃水中和、石灰代替のCO ₂ 削減、地滑り防止、 海洋アルカリ化 など

本庄早稲田キャンパスにて
建設済みの気固接触ハウス



参考：Heirloom Carbon Technologies

A-ERWの実施体制 実施期間2022年10月～2025年3月



2023年度 研究開発項目ごとの進捗

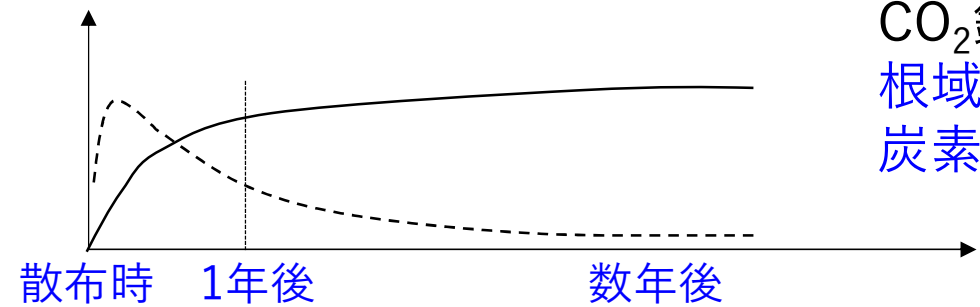
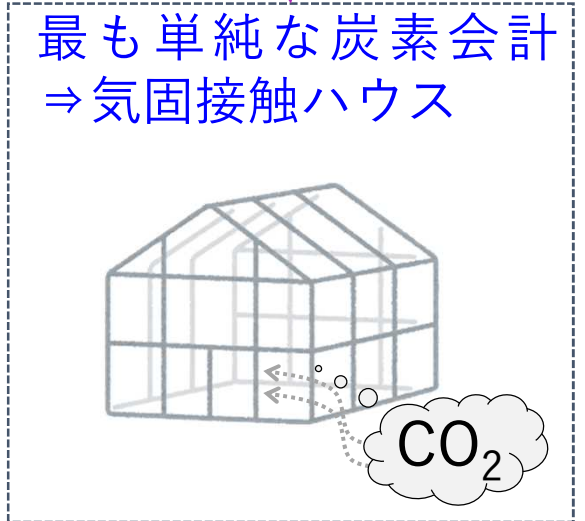
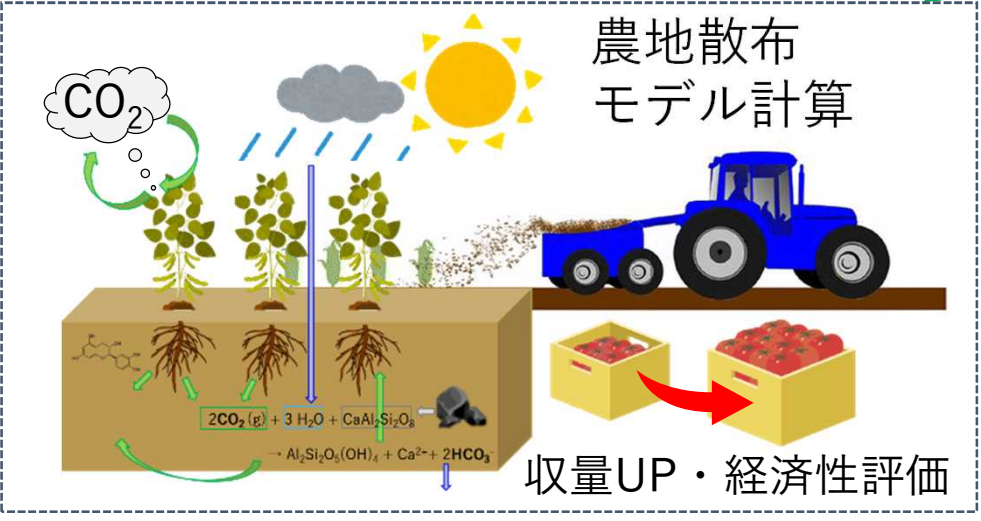
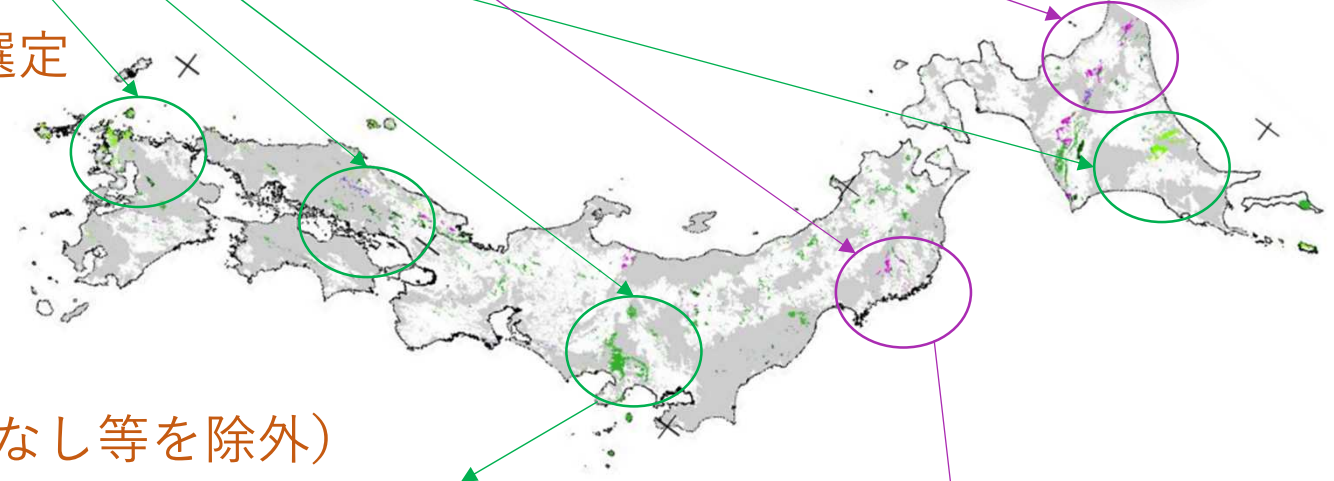
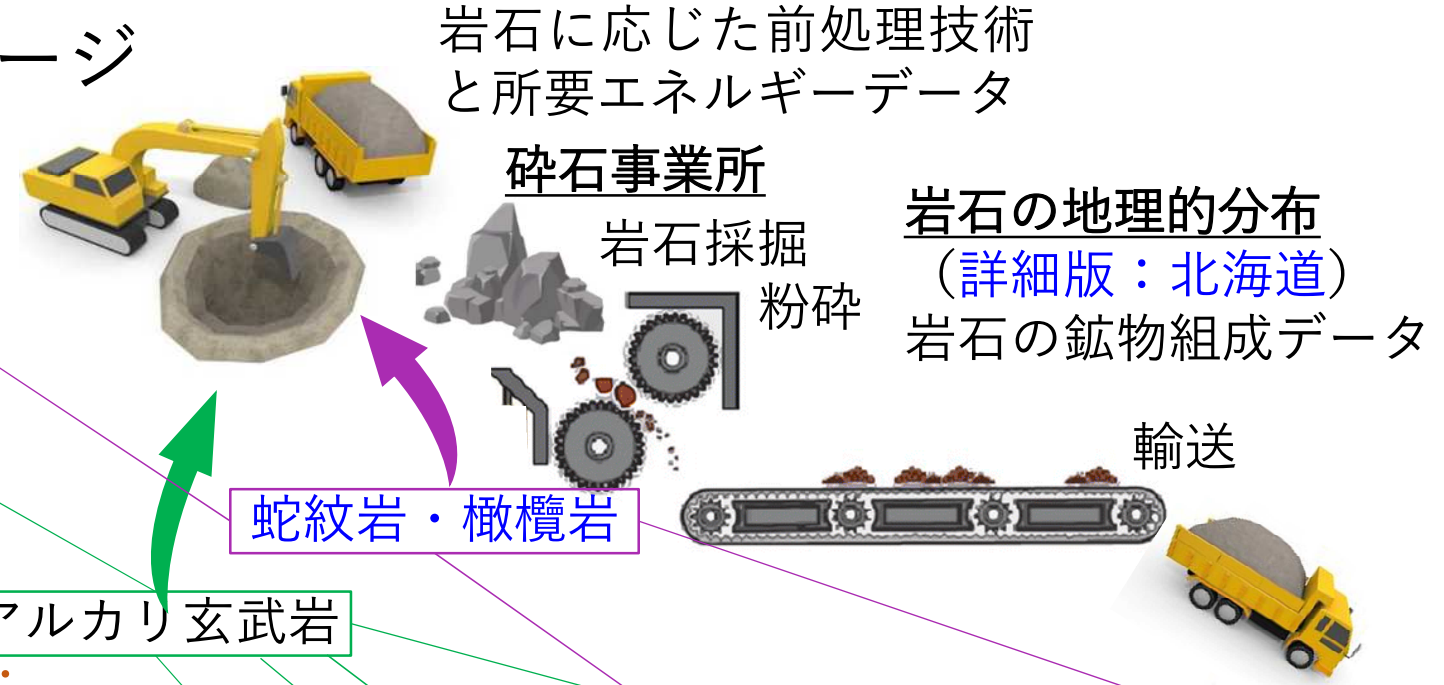
大項目	中項目	2024年度最終目標
①適地調査	(1)地質学的調査	8/8箇所×4種類完了
	(2)事業環境調査	3か所の大規模実証の有力候補地決定
②試掘・粉碎試験と分析評価	(1)試料調達候補地調査	3か所で試掘、データベース構築
	(2)粉碎試験, 鉱物相分析評価	総数32の岩石の試験データ取得, 4か所の採掘～粉碎までエネルギー評価完了
	(3)前処理の所要エネルギー予測技術の開発	理論値との比較も含む粉碎エネルギー評価とLCA用基礎データの整備
③風化促進加速技術開発	(1)工業的鉱物化法	加速因子をパラメータとした鉱物化データ取得を完了, 0.2t-CO ₂ /t-Rockの条件探索
	(2)開放系散布風化促進法	散布場の条件に沿ったモデル構築完了
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	風化促進加速の工業的アプローチの最適化
	(2)森林・休廃止鉱山	2か所ずつで検証データ取得
	(3)農地散布	気候・土壌条件・作物種の異なる3箇所の圃場で実環境試験を実施
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	機能単位t-CO ₂ /t-Rockの算出完了
	(2)自然の炭素循環を含む炭素会計法の開発	評価境界の決定、算定、コベネフィット評価の完了、TRLのランクアップ
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	フルスケール実施想定・VRE導入等での正味NE量の影響, 経済性評価完了
	(2)開放系散布風化促進法の概念設計	コンセプト検討と概算費用算出完了

事業終了時の炭素会計情報基盤イメージ

プロジェクト単位の精細な固定量算定
 Σ プロジェクト = All Japanのポテンシャル
 技術経済分析
 ダイナミックLCA (~2050)



日本型ERWの成功のカギ：
3条件の重なるロケーションの選定
 = **ERWに適した岩石地層**
 (道総研・全国大は産総研)
 × **砕石業・粉砕業の事業所**
 (砕石協会・タルク協会等)
 × **散布適用の適地**
 (国立公園、人口密集地、林道なし等を除外)



CO₂鉱物化・土壌炭素収支 (QPAC)
 根域モデル精緻化・確度向上
 炭素収支の動的変化

文字の凡例
 黒：2つの風化促進PJで共有
 青：A-ERW 水色：産総研
 赤：2PJ対象外 (論文ベース推算)

風化促進ワークショップ



稲葉敦 (日本LCA推進機構理事 会長)



中垣隆雄 (早稲田大学/PM)



佐藤努 (北海道大学)



中尾淳 (京都府立大学)



上野貴弘 (電力中央研究所上席研究員)



辻悠介 (三菱商事株式会社次世代エネルギー部門カーボンマネジメントオフィス CCUSライン長)



桑江朝比呂 (ジャパンブルーエコノミー技術研究組合 理事長)



吉野彰 (産総研ゼロエミッション国際共同研究センター研究センター長)



吉田朋央 (NEDO新領域・MS部室長)



森本慎一郎 (産総研/PM)



徂徠正夫 (産総研)



関原明 (理研)



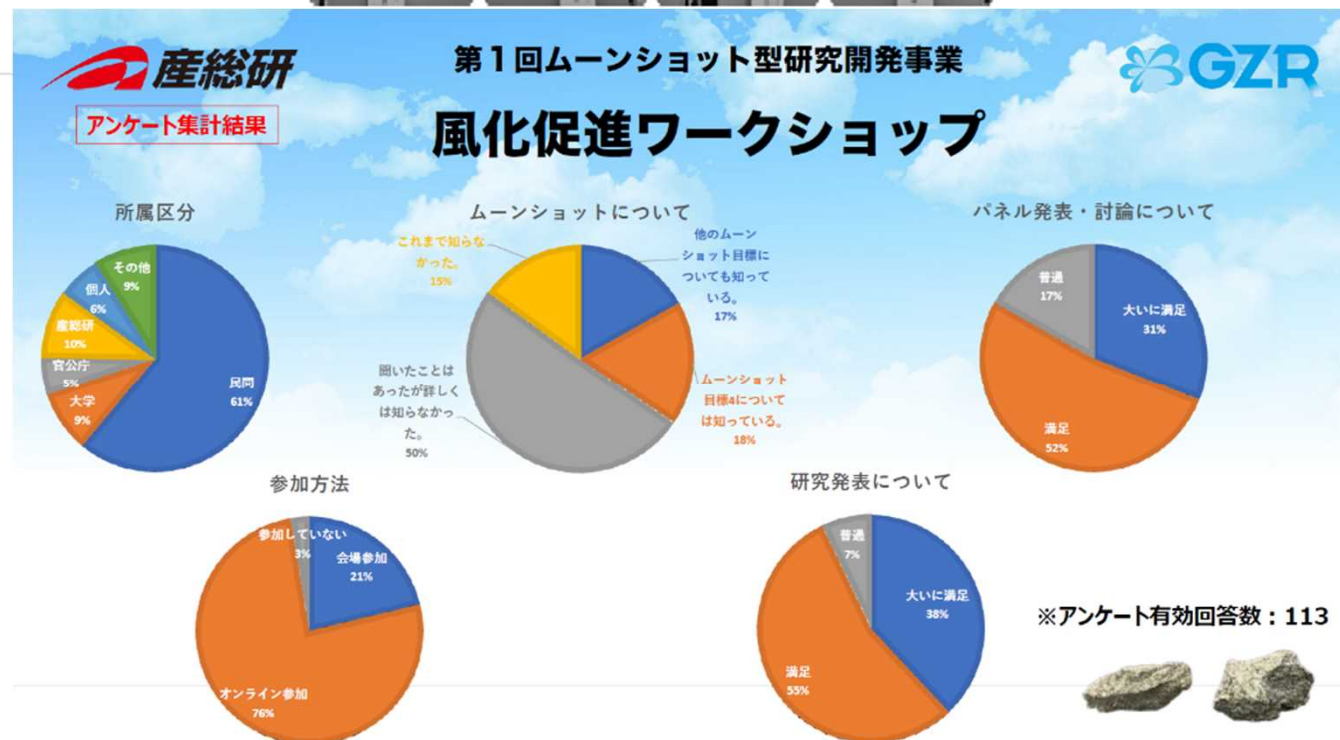
アンケート結果
↓概ね高評価



ビデオメッセージ
Dr. Douglas Wicks (米国DOEARPA-EPROGRAMDIRECTOR)

産総研GZR主催
森本PMチームと合同で開催

A-ERWからは中垣, 佐藤, 中尾の3名が登壇



炭素会計情報基盤のデータとマネジメント方針

データマネジメントの範囲：CO₂の固定化量の算出に関わるA-ERW事業の全データ

地理的分布データ

地質・岩石の分布（道総研）
関連事業者の地理的位置（砕石協会）
事業可能箇所（林道などGISデータ）
事業困難箇所 等

前処理データ

岩石層からの一次採取エネルギー
破碎・輸送エネルギー（砕石業から提供）
粉碎エネルギー（ソブエクレー）
散布のエネルギー 等
+（関連バックグラウンドデータ）

風化事業中・後のデータ

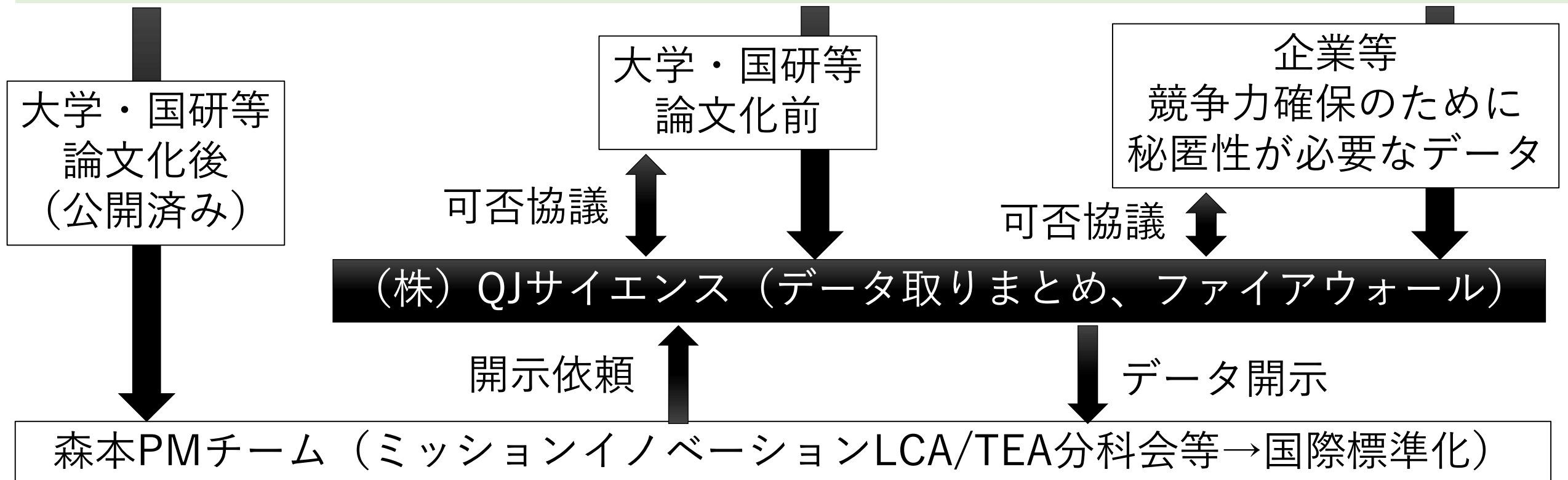
鉱物化ハウス運転エネルギー
ポスト処理エネルギー 等
（三菱重工，国土防災）

CO₂固定量データ

ポテンシャル・鉱物化速度
溶脱・河川/海洋への流出
土壌炭素固定（大学・国研）

コベネフィットデータ

休廃止鉱山・森林
農地散布（大学・国研）



事業開始以来，高頻度で炭素会計のミーティングを開催中

③風化促進加速技術開発 概要と方針

適用技術	(1)気固接触ハウス	(2)-1休廃止鉱山	(2)-2森林傾斜地	(3)農地
加速対象	CO ₂ 鉱物化	溶脱・物理風化	溶脱・物理風化	風化・CO ₂ 鉱物化
拡張性	砕石業・面積集約	サイト数	森林総面積	耕作地総面積

ベンチマークとした風化促進の速度
(Beerlingらの論文を基にしたQJサイエンスの調査事業報告)

10μmの玄武岩粉を40 t/ha/y		玄武岩質	
農地散布	単位	アルカリ	ソレアイト
SS:土壌固定	t-CO ₂ /ha/y	1.42	1.55
	t-CO ₂ /t-R/y	0.035	0.039
OS:海洋固定	t-CO ₂ /ha/y	6.66	2.70
	t-CO ₂ /t-R/y	0.166	0.068
SS+OS	t-CO ₂ /ha/y	8.08	4.25
	t-CO ₂ /t-R/y	0.202	0.106
ポテンシャル	t-CO ₂ /t-R	0.345	0.320
	1年後風化	62.6%	50.9%

SS: Soil Sequestration, OS: Ocean Sequestration

(3) 農地散布の方針

栽培管理法開発

(気候, 土壌種, 作物種, 岩石種・粒径・散布量)

局所依存性(根圏域等)定量化, 土壌炭素貯留, CO₂以外のGHG定量化

4.3 × 10⁶ haの耕作地面積が対象

(1) 気固接触ハウスの方針

深成岩・超苦鉄質岩, 粒径制御, 加湿, 強制対流
目標KPI: 4倍程度(0.2 t-CO₂/t-R/y)

※積層型のトレイによる面積集約

+ 40 t-CO₂/ha/yの制約なし

⇒面積規定では10³~10⁴倍も可能だが,
砕石業者の敷地面積に依存

(2)-1 休廃止鉱山の方針

粉碎工程 - 0.0425 t-CO₂/t-R
(28~47%減)

⇒酸性鉱山廃水にて粉碎分担
投入粒径, pH, 流水条件

※面積ではなく, 1サイトごと
でスポット的に大量に散布可

(2)-2 森林傾斜地の方針

粉碎工程 - 1.70 t-CO₂/ha/y
(28~47%減)

⇒雨水(pH ≈ 5.6)にて粉碎分担
投入粒径, 流水条件

※面積散布量は20 t/ha程度
2.5 × 10⁷ haの森林面積が対象

CO₂固定化ポテンシャル試算例

	気固接触ハウス	休廃止鉱山	森林傾斜地	農地（一例）
t-CO ₂ /ha/y	6,600~13,200	50（サイトあたり）	0.3	3.0
ポテンシャル試算例	33,000~66,000 t-CO ₂	50 t-CO ₂ /y	37,500 t-CO ₂	20,000 t-CO ₂
条件	北海道の一つの砕石事業所で0.1ha×50サイト=5ha程度を基準 鉱物化ポテンシャル 0.5t-CO ₂ /t-R 鉱物化率 44% 敷地面積0.1ha/サイト 岩石量3,000~6,000t/y/サイト 年に2mずつ採掘	鉱物化ポテンシャル 0.0492t-CO ₂ /t-R 鹿部町精進川鉱山に1000t/y ※廃水源のため面積制約ではなく、河川や廃水処理場への投入総量に制約	農地×1/10=0.3と仮定 鹿部町精進川鉱山に20t/ha（農地の1/2） 全国の森林総面積は2.5×10 ⁷ ha×1%に散布	ソバ畑の全国作付け面積 65,200 ha×10% ※福島でのソバ畑への実績, 150 t/ha散布で0.59 t-CO ₂ /ha/2.5か月から推算 全農地は4.3×10 ⁶ ha

安い・速い・大量生産
⇒土地集約の鉱物化ハウス



高級・高付加価値化⇒
じっくり育てる農地散布



双方のいいとこどりなら
休廃止鉱山
森林傾斜地

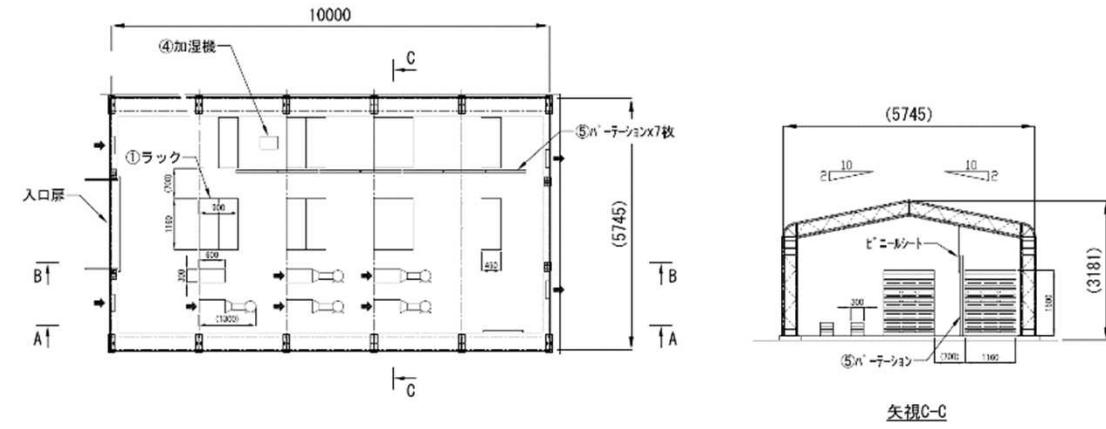
A-ERW 実環境場試験の様子



橄欖岩碎石場



本庄早稲田気固接触ハウス・設計図



京都府与謝野町棚田



北大試験農場 大豆



つくば 農研機構



森林傾斜地



鹿部町旧精進川鉦山坑口



石垣島 国際農研

②試掘・粉砕試験と分析評価 (2)粉砕試験, 鉱物相分析評価

CO₂鉱物化ポテンシャルのデータベースを構築

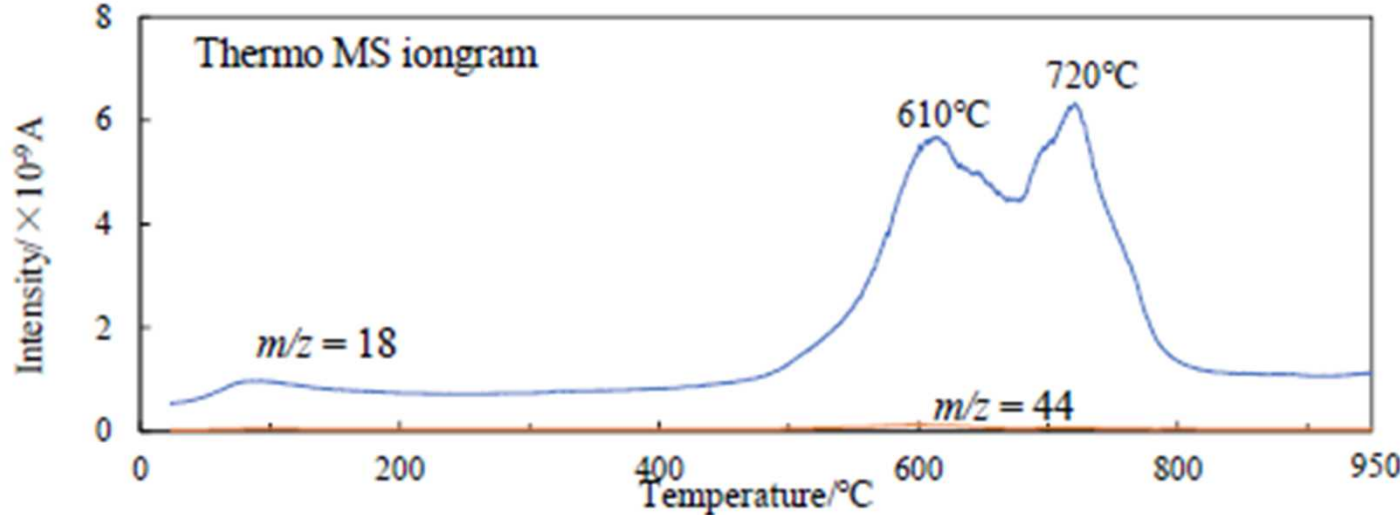
①CO₂鉱物化ポテンシャルの判定 = 有効成分 (鉱物) の定量

- ✓ 偏光顕微鏡観察 (岩石の組織、鉱物の形状等)
- ✓ X線回折分析 (鉱物組成、リートベルト解析)
- ✓ XRF (バルクの主要・微量化学組成分析)
- ✓ 電子顕微鏡観察 (岩石の組織、鉱物の化学組成)
- ✓ 簡易化学抽出法の開発

②アスベスト分析

- ✓ XRD定性分析 (JIS A 1481-1)
- ✓ 熱重量分析 (TGA)
- ✓ 示差熱重量/質量分析 (TG-DTA-MS)

※天然岩石のアスベスト定量分析に目途
⇒ JIS 1481-6として規格化目標にデータ蓄積中

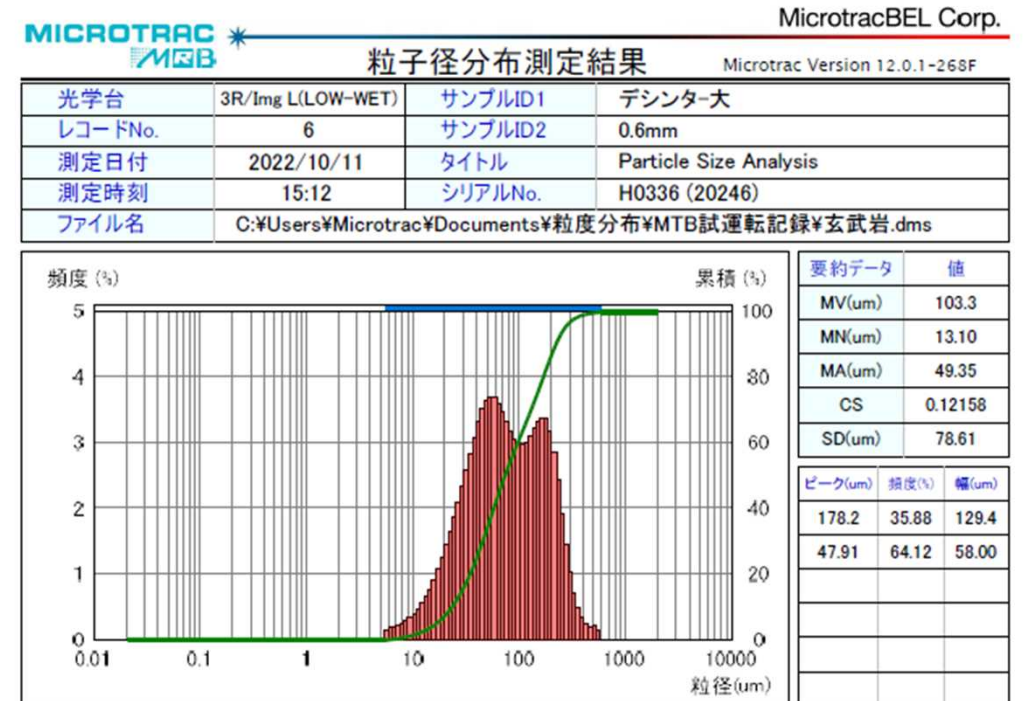


500 °C台でH₂O発生 ⇒ リザルダイト
600 °C前半でH₂O発生 ⇒ クリソタイル
700 °C以上でH₂O発生 ⇒ アンチゴライト

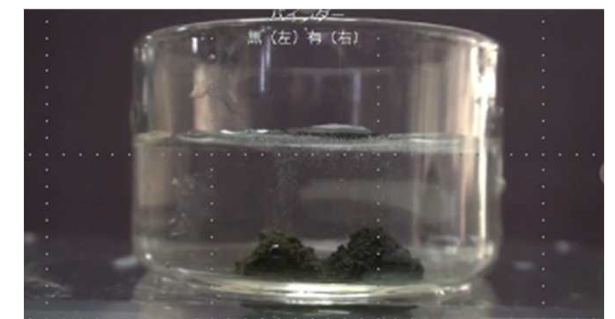
③粉砕試験と粉砕後試料の評価

データ取得 ⇒ 粉砕評価

- ✓ 粉砕前の粒度分布
- ✓ 粉砕後の粒度分布
- ✓ 消費電力
- ✓ 1時間あたりの粉砕量
- ✓ 真比重



④粒状化試験と試料の評価



②(3)前処理の所要エネルギー予測技術の開発

実測値の例 (玄武岩ダスト)

粉砕能力
900~1000 kg/h

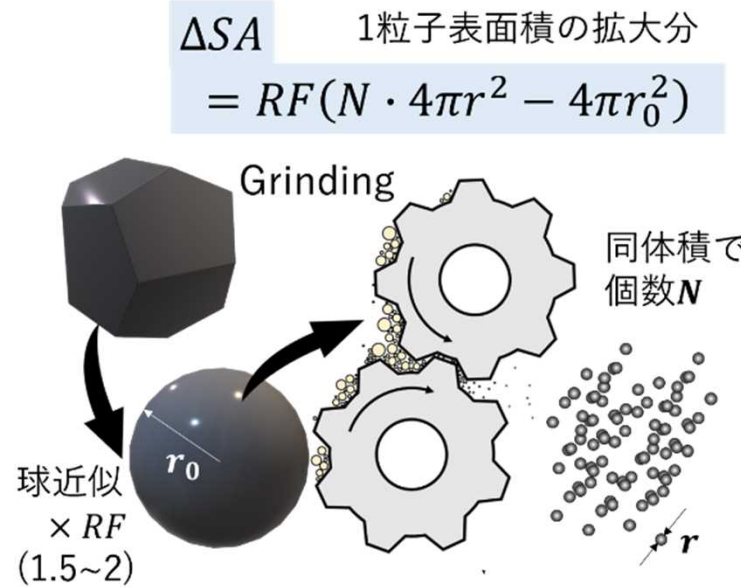
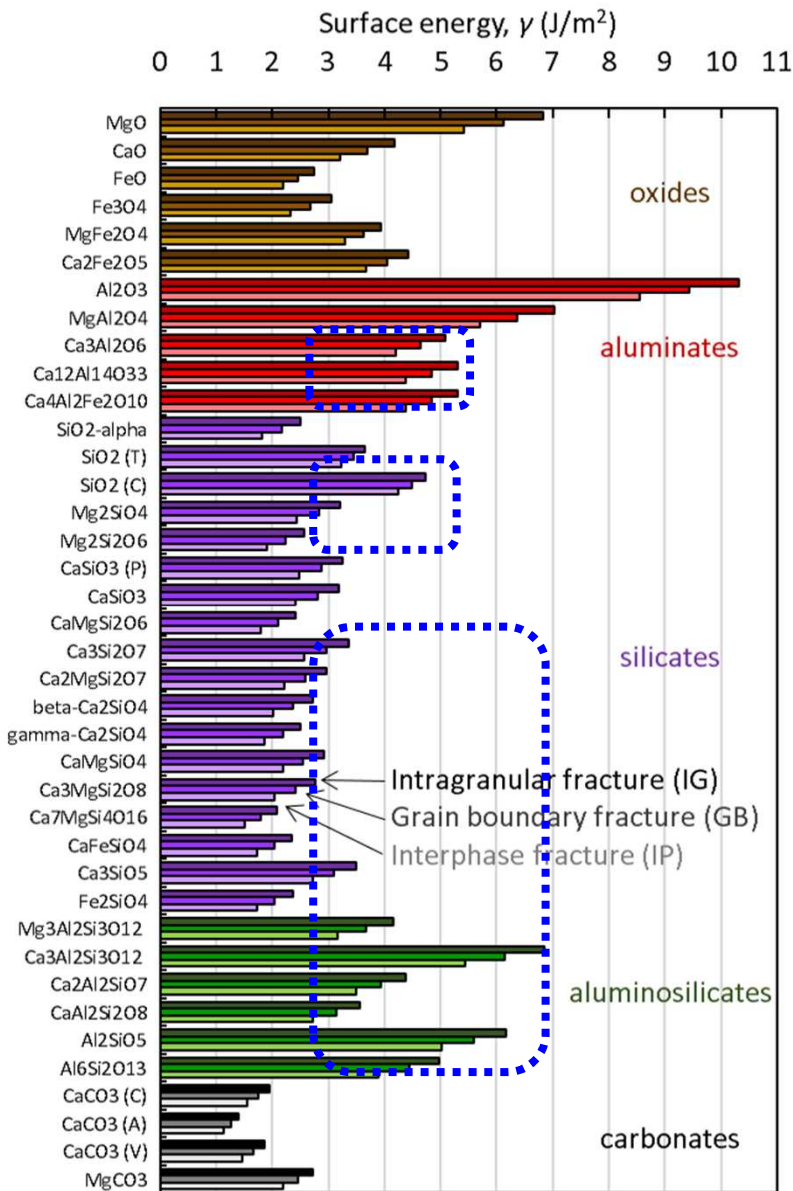
平均電圧値 : 205.6 V
平均電流値 : 56.65 A
平均電力 : 20.17 kW

950kg処理として,
20.17 kWh = 72612 kJ
単位質量あたりでは76.4 kJ/kg
0.010 t-CO₂/t-Rock
(売電元の排出係数)
※J-LCAのCR2プロジェクトでは
0.013 t-CO₂/t-Rockと報告済み

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

ΔSA : 表面積の変化量 [m²/kg]
 E_{grind} : 実際の消費電力 [J/kg]
 γ : 表面エネルギー [J/m²]
 η : 研削効率 [%]

CH	粒径(μm)	頻度(%)	累積(%)	CH	粒径(μm)	頻度(%)	累積(%)	CH	粒径(μm)	頻度(%)	累積(%)	CH	粒径(μm)	頻度(%)	累積(%)
1	2000	0.00	100.00	34	114.1	1.77	55.65	67	6.541	0.33	1.47	100	0.375	0.00	0.00
2	1826	0.00	100.00	35	104.7	1.81	53.88	68	5.998	0.29	1.14	101	0.344	0.00	0.00
3	1674	0.00	100.00	36	95.96	1.87	52.07	69	5.500	0.25	0.85	102	0.315	0.00	0.00
4	1535	0.00	100.00	37	88.00	1.95	50.20	70	5.044	0.23	0.60	103	0.289	0.00	0.00
5	1408	0.00	100.00	38	80.70	2.03	48.25	71	4.625	0.22	0.37	104	0.265	0.00	0.00
6	1291	0.00	100.00	39	74.00	2.11	46.22	72	4.241	0.15	0.15	105	0.243	0.00	0.00
7	1184	0.00	100.00	40	67.86	2.20	44.11	73	3.889	0.00	0.00	106	0.223	0.00	0.00
8	1086	0.00	100.00	41	62.23	2.27	41.91	74	3.566	0.00	0.00	107	0.204	0.00	0.00
9	995.6	0.27	100.00	42	57.06	2.33	39.64	75	3.270	0.00	0.00	108	0.187	0.00	0.00
10	913.0	0.42	99.73	43	52.33	2.36	37.31	76	2.999	0.00	0.00	109	0.172	0.00	0.00
11	837.2	0.47	99.31	44	47.98	2.37	34.95	77	2.750	0.00	0.00	110	0.158	0.00	0.00
12	767.7	0.53	98.84	45	44.00	2.36	32.58	78	2.522	0.00	0.00	111	0.145	0.00	0.00
13	704.0	0.59	98.31	46	40.35	2.33	30.22	79	2.312	0.00	0.00	112	0.133	0.00	0.00
14	645.6	0.69	97.72	47	37.00	2.29	27.89	80	2.121	0.00	0.00	113	0.122	0.00	0.00
15	592.0	0.82	97.03	48	33.93	2.23	25.60	81	1.945	0.00	0.00	114	0.111	0.00	0.00
16	542.9	1.02	96.21	49	31.11	2.16	23.37	82	1.783	0.00	0.00	115	0.102	0.00	0.00
17	497.8	1.29	95.19	50	28.53	2.08	21.21	83	1.635	0.00	0.00	116	0.094	0.00	0.00
18	456.5	1.74	93.90	51	26.16	1.99	19.13	84	1.499	0.00	0.00	117	0.086	0.00	0.00
19	418.6	2.43	92.16	52	23.99	1.89	17.14	85	1.375	0.00	0.00	118	0.079	0.00	0.00
20	383.9	2.96	89.73	53	22.00	1.77	15.25	86	1.261	0.00	0.00	119	0.072	0.00	0.00
21	352.0	3.33	86.77	54	20.17	1.65	13.48	87	1.156	0.00	0.00	120	0.066	0.00	0.00
22	322.8	3.45	83.44	55	18.50	1.51	11.83	88	1.060	0.00	0.00	121	0.061	0.00	0.00
23	296.0	3.30	79.99	56	16.96	1.38	10.32	89	0.972	0.00	0.00	122	0.056	0.00	0.00
24	271.4	3.05	76.69	57	15.56	1.24	8.94	90	0.892	0.00	0.00	123	0.051	0.00	0.00
25	248.9	2.70	73.64	58	14.27	1.10	7.70	91	0.818	0.00	0.00	124	0.047	0.00	0.00
26	228.2	2.40	70.94	59	13.08	0.97	6.60	92	0.750	0.00	0.00	125	0.043	0.00	0.00
27	209.3	2.14	68.54	60	12.00	0.86	5.63	93	0.688	0.00	0.00	126	0.039	0.00	0.00
28	191.9	1.96	66.40	61	11.00	0.75	4.77	94	0.630	0.00	0.00	127	0.036	0.00	0.00
29	176.0	1.84	64.44	62	10.09	0.66	4.02	95	0.578	0.00	0.00	128	0.033	0.00	0.00
30	161.4	1.76	62.60	63	9.250	0.57	3.36	96	0.530	0.00	0.00	129	0.030	0.00	0.00
31	148.0	1.73	60.84	64	8.482	0.50	2.79	97	0.486	0.00	0.00	130	0.028	0.00	0.00
32	135.7	1.72	59.11	65	7.778	0.44	2.29	98	0.446	0.00	0.00	131	0.026	0.00	0.00
33	124.5	1.74	57.39	66	7.133	0.38	1.85	99	0.409	0.00	0.00	132	0.023	0.00	0.00



$$\Delta SA = RF \sum_i \left(\frac{V_i}{\frac{4}{3}\pi r_i^3} \cdot 4\pi r_i^2 - \frac{V_{i0}}{\frac{4}{3}\pi r_{i0}^3} \cdot 4\pi r_{i0}^2 \right)$$

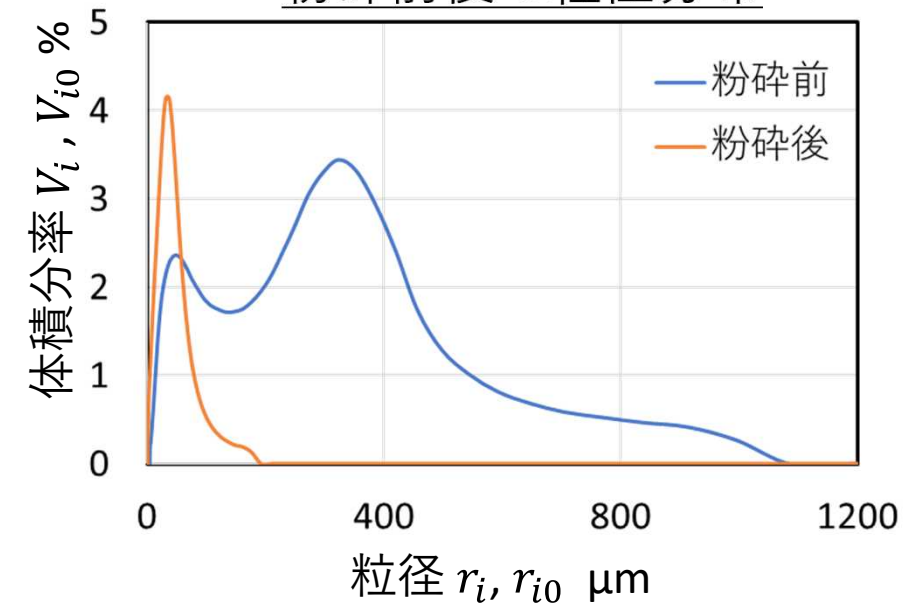
$$= (1.5 \sim 2) \times (275.4 - 52.6)$$

$$= 334.2 \sim 445.6 \text{ m}^2/\text{kg}$$

(粒径分布から算出)

$\gamma = 3 \sim 7 \text{ J/m}^2$ とすれば, $\eta = 1.3 \sim 4.1\%$

粉砕前後の粒径分布

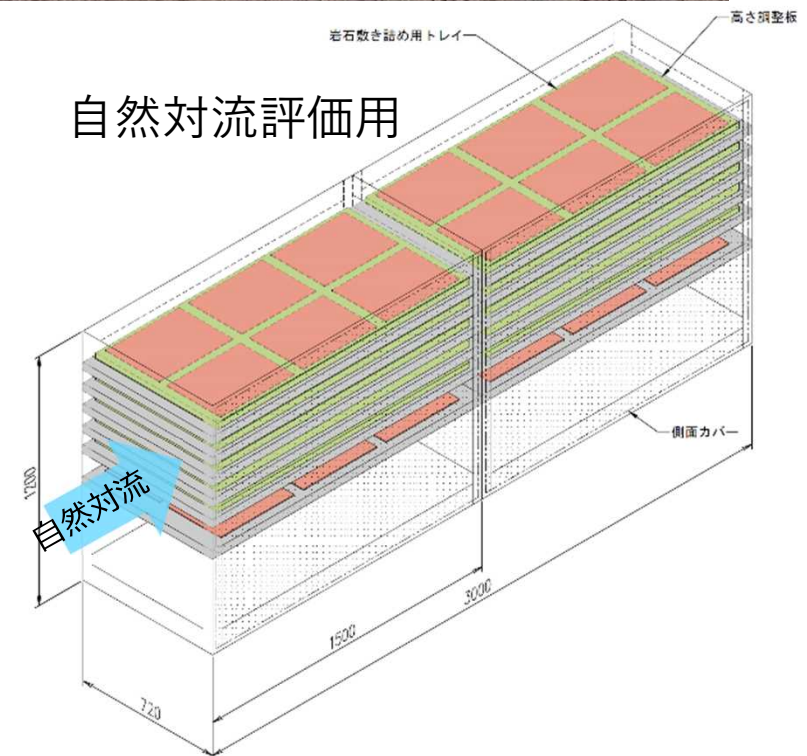
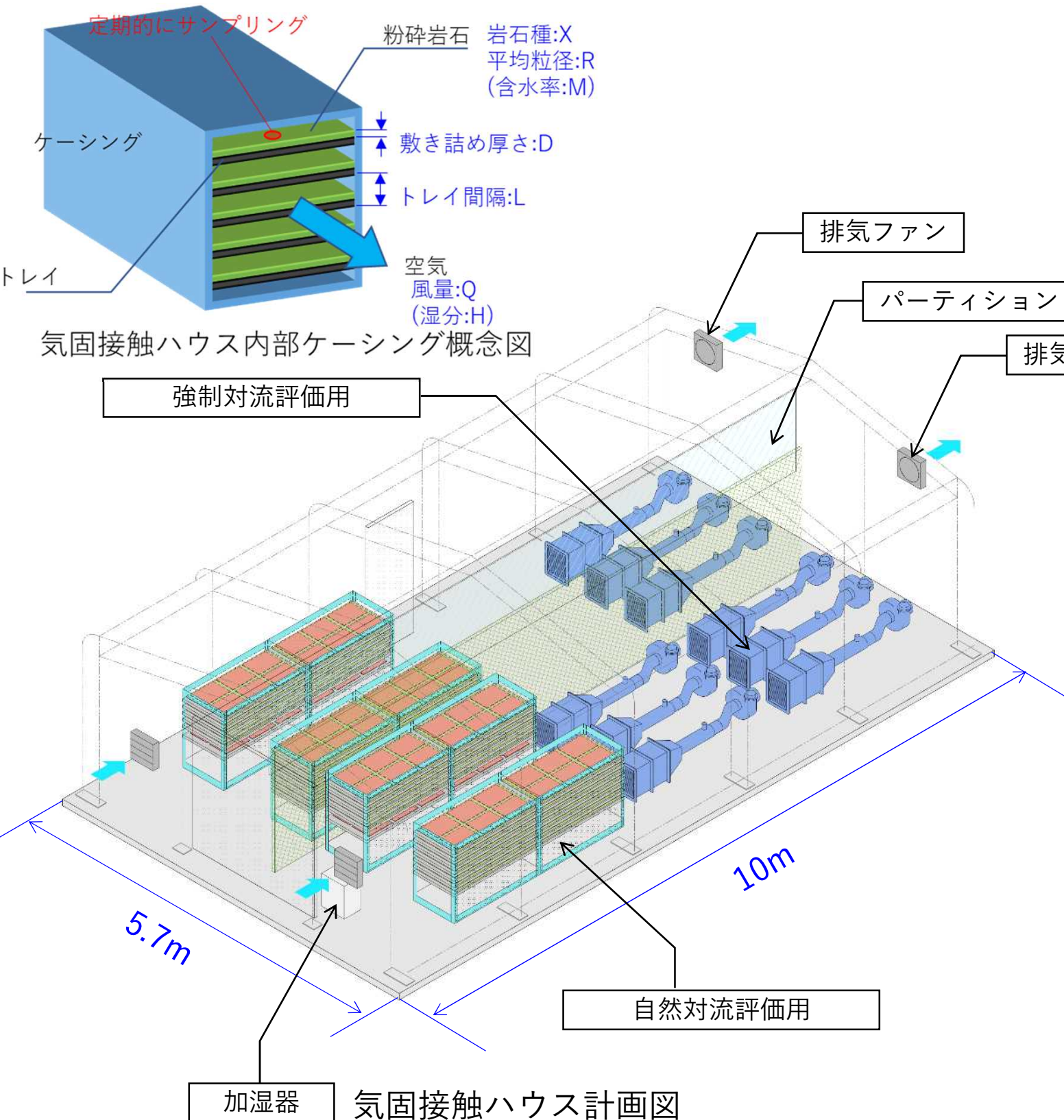


④実環境場試験と効率的モニタリング法開発

(1)気固接触ハウス

鉱物化ハウス

- 気固接触ハウスの詳細設計、建築確認申請を完了
- ハウス建設に着手、2024年2月までに設備完了予定
- 2024/4~2025/3（1年間）でCO2鉱物化データを取得予定



④(2)森林・休廃止鉱山

1. 鉱物溶解の速度論モデルと一次元反応輸送モデルの検証
2. 岩石の風化促進量とCO₂固定量のカーボンアカウント

休廃止鉱山



森林（精進川鉱山周辺）

以下の試験区の設置とそのモニタリングを実施

- ✓ メインプロット（2m×5mを2か所、6プロット）
- ✓ ワグネルポットによる原位置試験
- ✓ サブプロット（1m×1mを2か所×10プロット）

※メインプロットに対しては断面調査の他に、雨量、温湿度、風向・風速、地表二酸化炭素濃度、土壌水分、土壌pH、土壌養分、土壌重金属などをモニタリング



①適地調査 (2)事業環境調査 ~方法論確立~
 ③風化促進加速技術開発 (2)開放系散布風化促進法

休廃止鉱山

鉱物溶解の一次元反応輸送モデルと炭素会計を合わせて検討可能なプラットフォームの構築

1. 北海道CO₂鉱物化ポテンシャルマップ→事業ポテンシャルマップを作成
2. 休廃止鉱山試験地での対話集会開催と理解醸成活動→大規模実証試験
3. 有力候補地（休廃止鉱山+森林，農地，気固接触による工業的風化促進）の選定

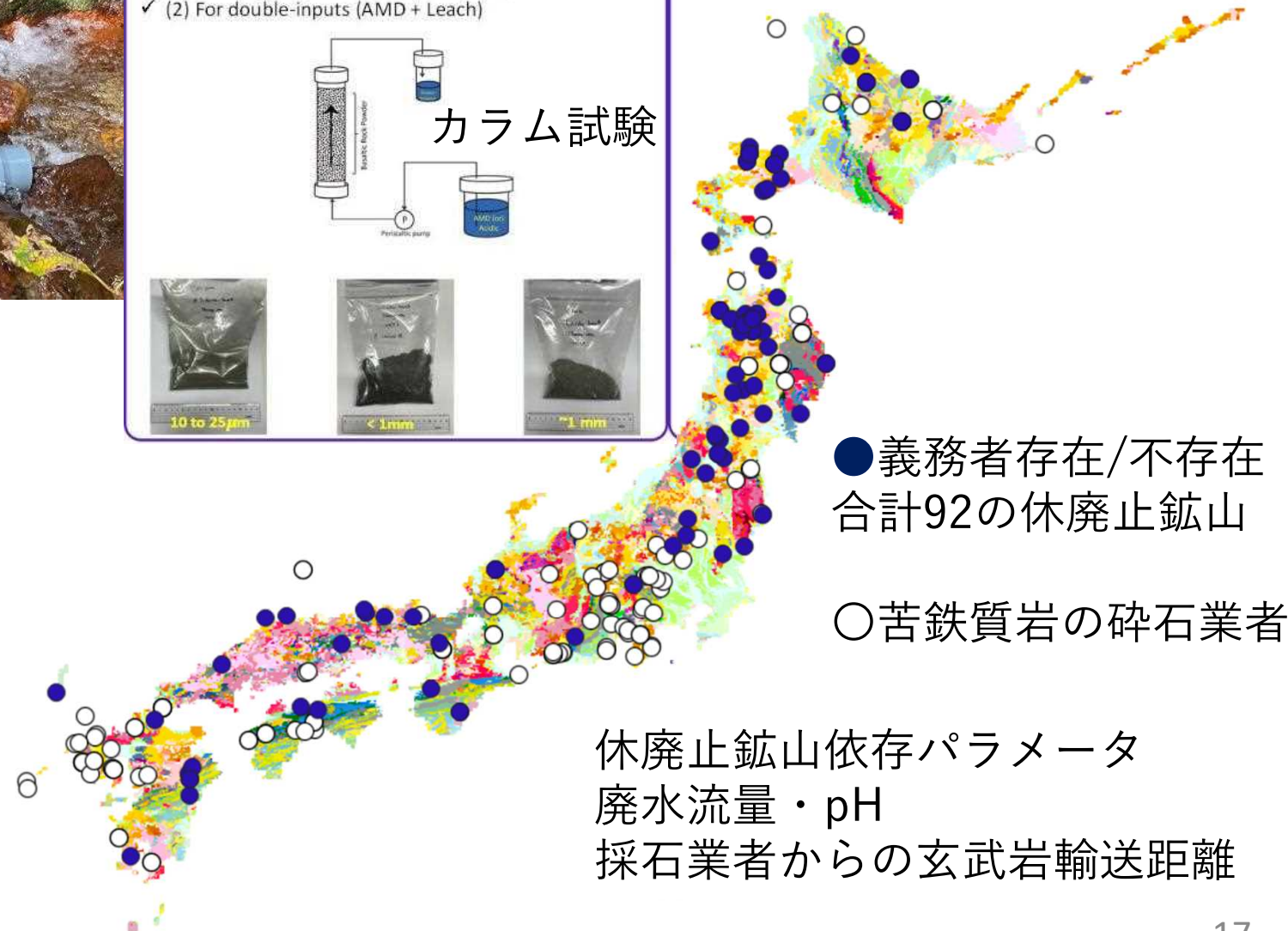
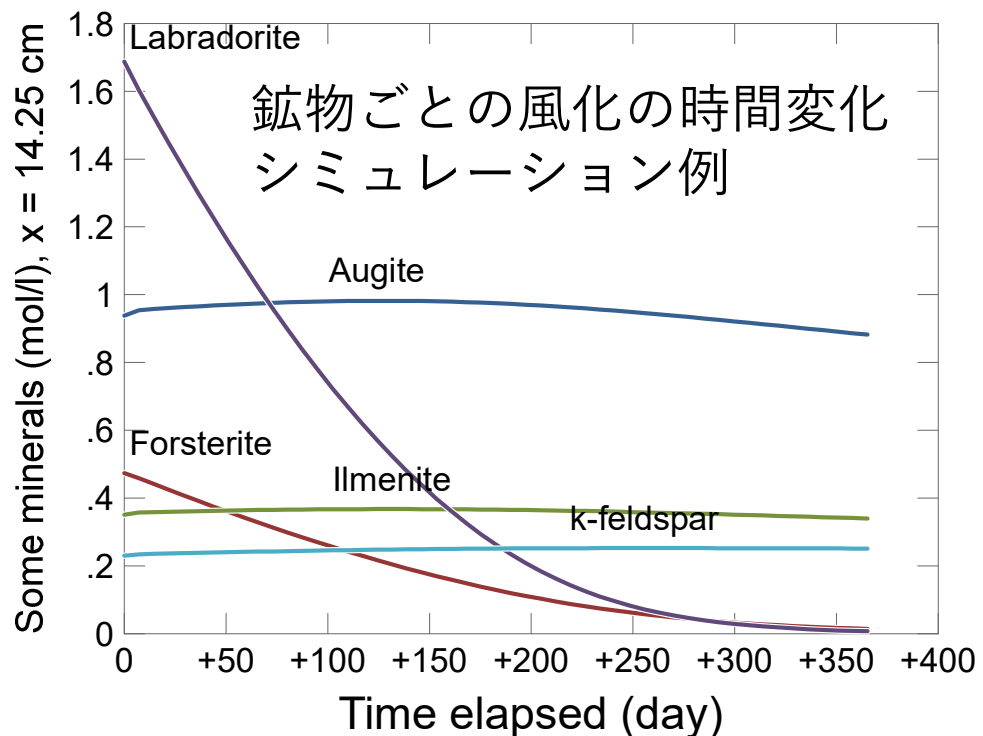
- 日本全国の休廃止鉱山の廃水の流量（pH≒2.8と仮定）と粒径（100μmと1mm）から1年間で消費される有効成分鉱物量を見積もり，地球化学反応モデルから風化促進CDRを算出
- 休廃止鉱山と玄武岩・橄欖岩採石場の位置から輸送距離を計算
- 事業ポテンシャルをCDR量として算出（森本PMチームとの共同作業）

カラム試験による検証

- 反応・輸送モデル
- 各構成鉱物の反応速度式
- 鉱物の反応表面積（粒径）
- 流速

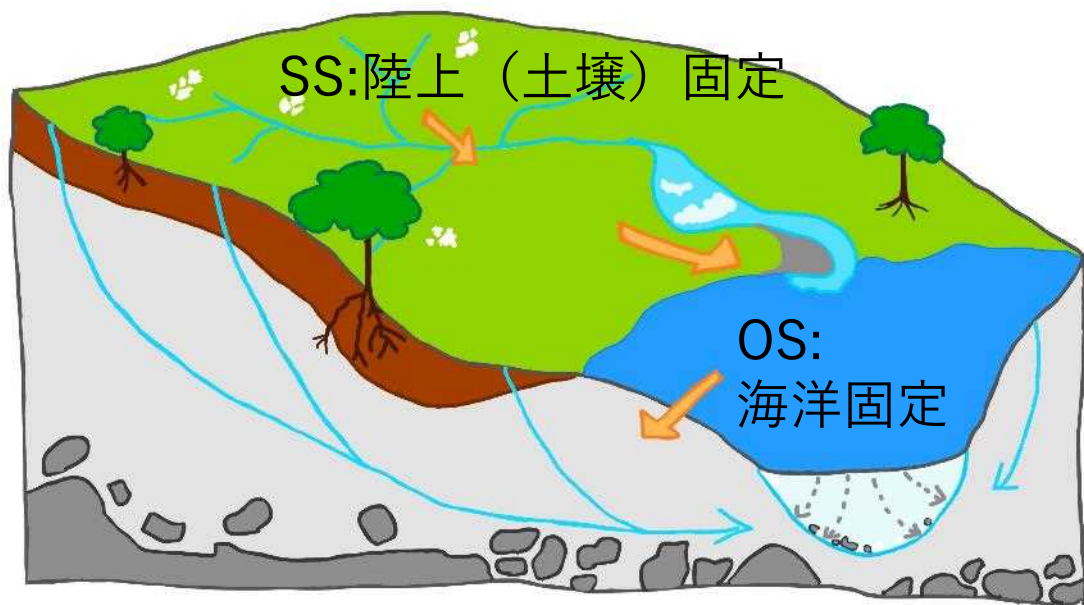


場の特性を活かした地産地消型の事業展開でポテンシャルを算出



⑤(2)開放地散布

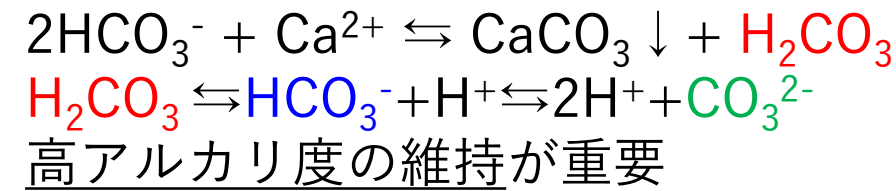
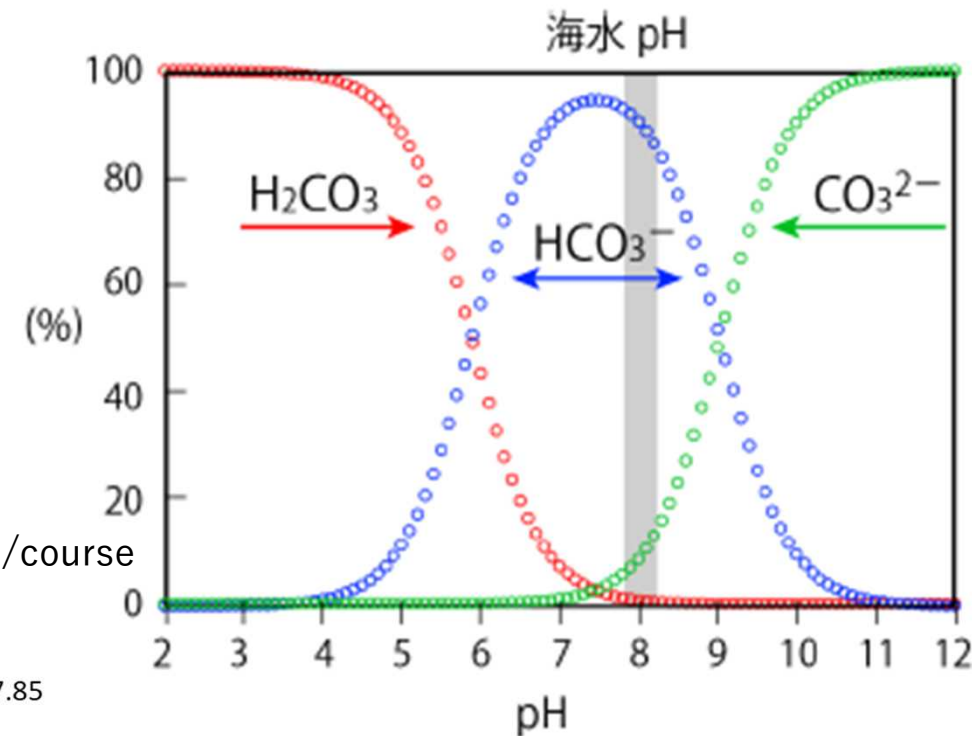
溶脱Ca/Mgによる海洋でのCDR



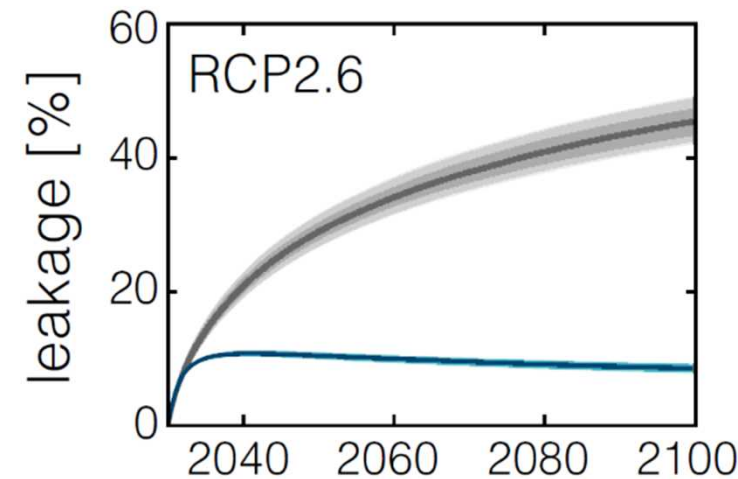
SS：溶脱メカニズム
 酸性鉱山廃水pH<3
 雨水pH≈5.6
 (農地, 森林傾斜地)
 ※鉱物化ハウスは湿分

OS：開放地散布で算定

<https://repun-app.fish.hokudai.ac.jp/course/view.php?id=415>



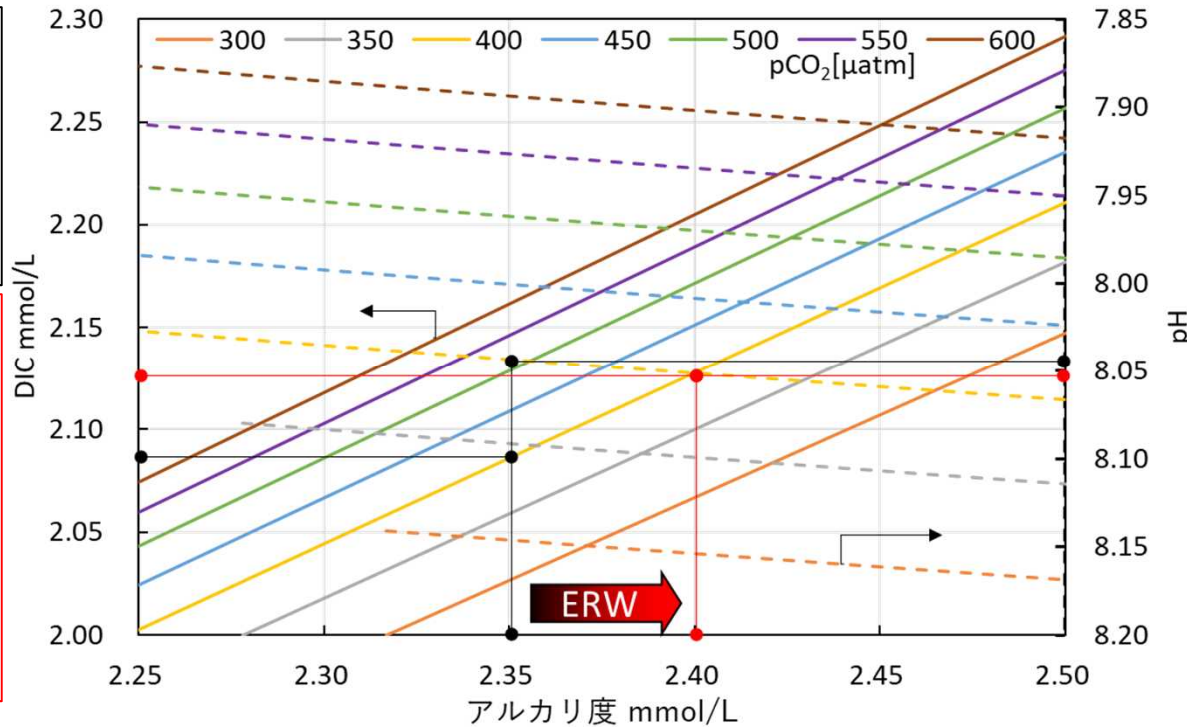
ブルーカーボンとの連携の必要性：
 有機物分解のNO₃⁻放出
 →アルカリ度低下
 岩石散布による鉄分等の供給
 →藻類育成・難分解性への影響解明



Kanzaki, et al., PNAS Nexus, 2023, 2, 1-9
<https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad059> 18

計算例 散布前：
 アルカリ度2.35mmol/L
 pH=8.04
 DIC=2.08mmol/L

散布後：
 アルカリ度2.40mmol/L
 pH=8.05
 DIC=2.12mmol/L
 ΔDIC=+0.04mmol/L
 ⇒**表層海水へのCDR**



数年間の固定化：

自然風化のCa²⁺/Mg²⁺の流入でも表層海水のアルカリ度は一定
 ⇒有孔虫・貝類やサンゴ等の生物によってカルサイト・アラゴナイトで保持
 表層海水では過飽和状態で溶解しない ⇒流入Ca²⁺と等モルのCO₂が固定化

2100年までの長期間の固定化：最新の研究成果を適用

温暖化でDICの40%が海洋から放出

⇒ERWの流入Ca²⁺がアルカリ度維持に寄与, 10%まで低減可能との試算あり

①適地調査 (2)事業環境調査

1. 日本全国の農耕地178地点から土壌を採取
2. 土壌中に元々存在する鉱物の組成を定量分析し，易風化性鉱物の現存量を把握
3. 易風化性鉱物量が少ない = 玄武岩散布効果が大い土壤種の選定

- 黒ボク土に分類される火山性の土壌には，易風化性のCa型の斜長石が多く含有されるが，風化抵抗性の大きい石英は少ない
- 非火山性の土壌には主にNa型の斜長石，K長石，石英，雲母などの風化抵抗性の大きい結晶性鉱物が含有 ⇒ 玄武岩による風化の影響が大きく，散布がより効果的

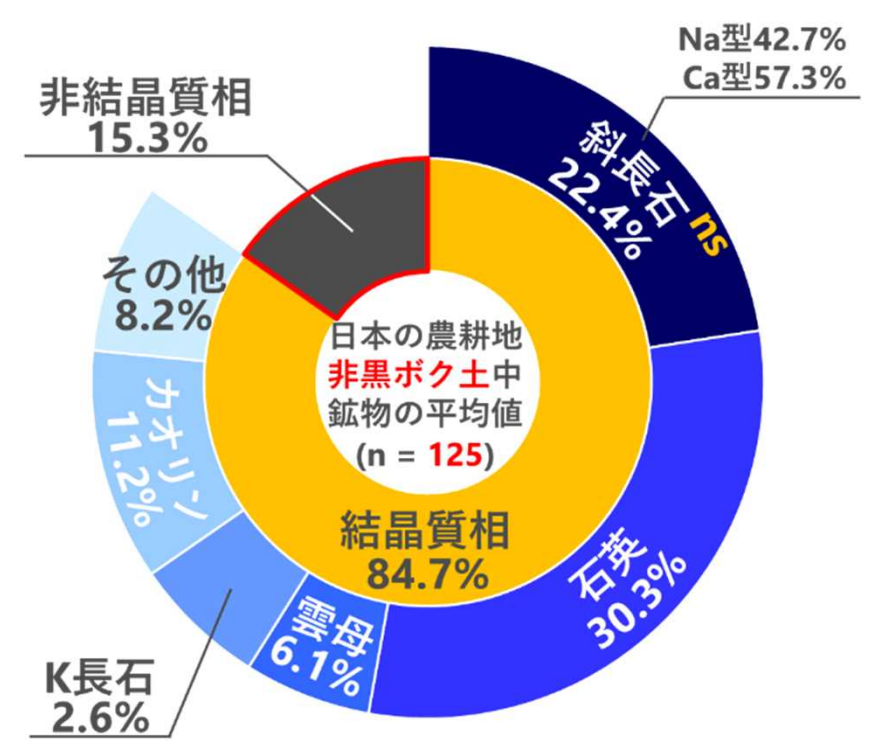
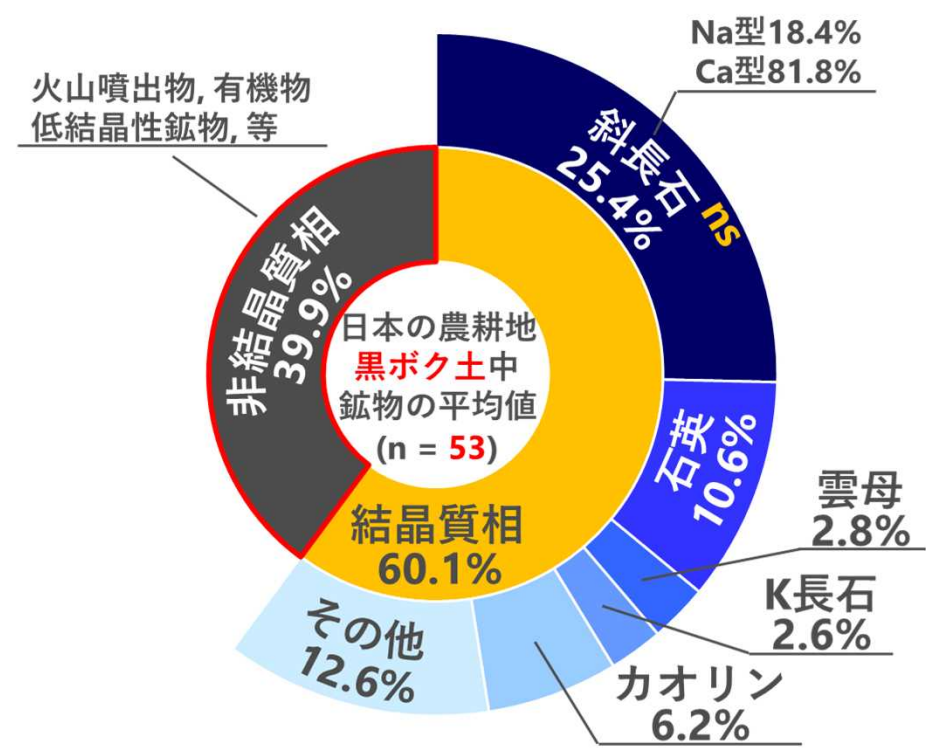
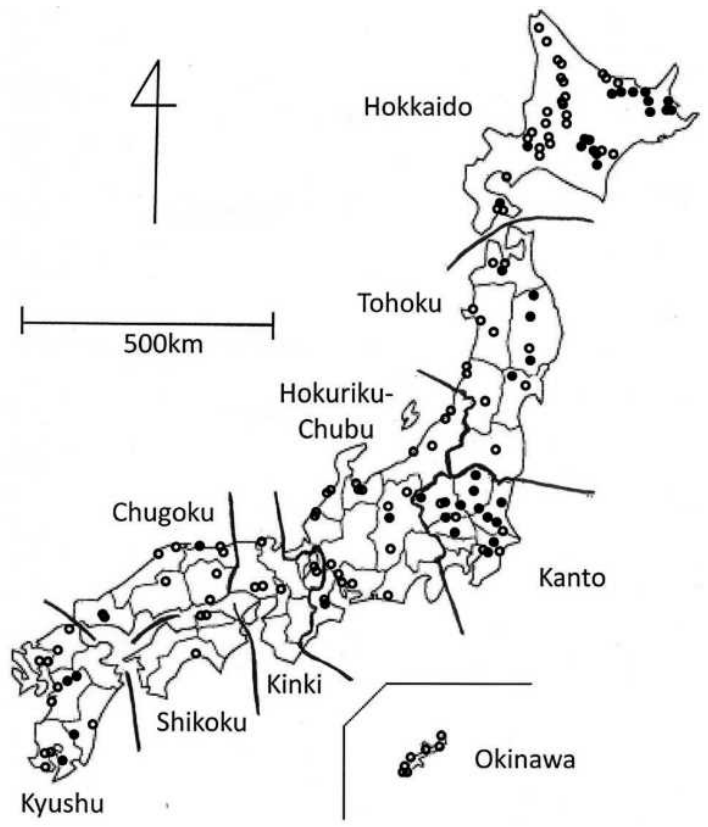


Figure 1. Locations of the sampling sites. ●: Volcanic soils. ○: Non-volcanic soils.

土壌採取178地点分布

火山性の土壌

非火山性の土壌

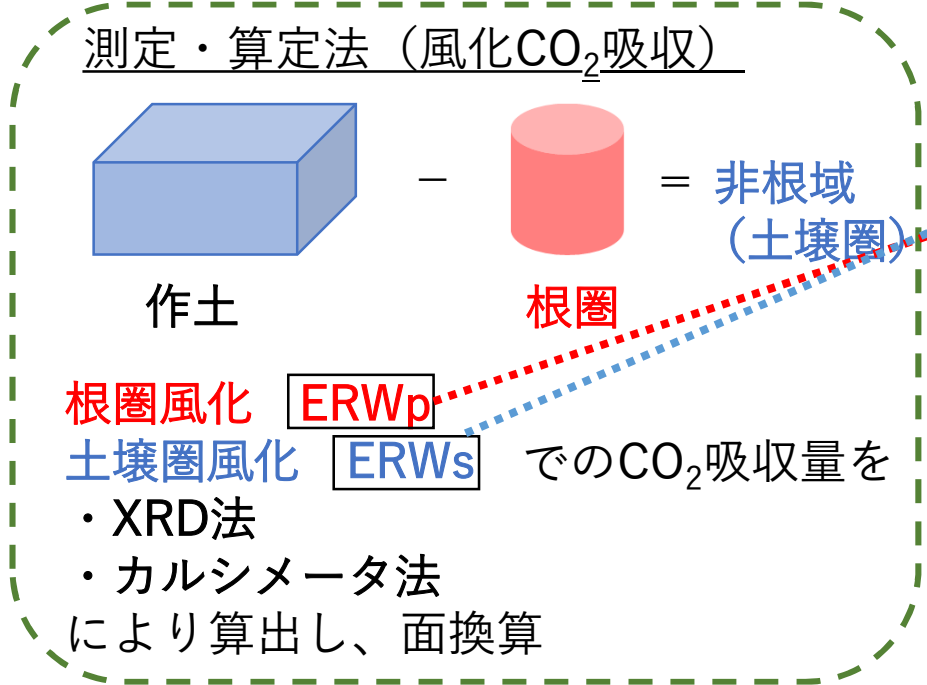
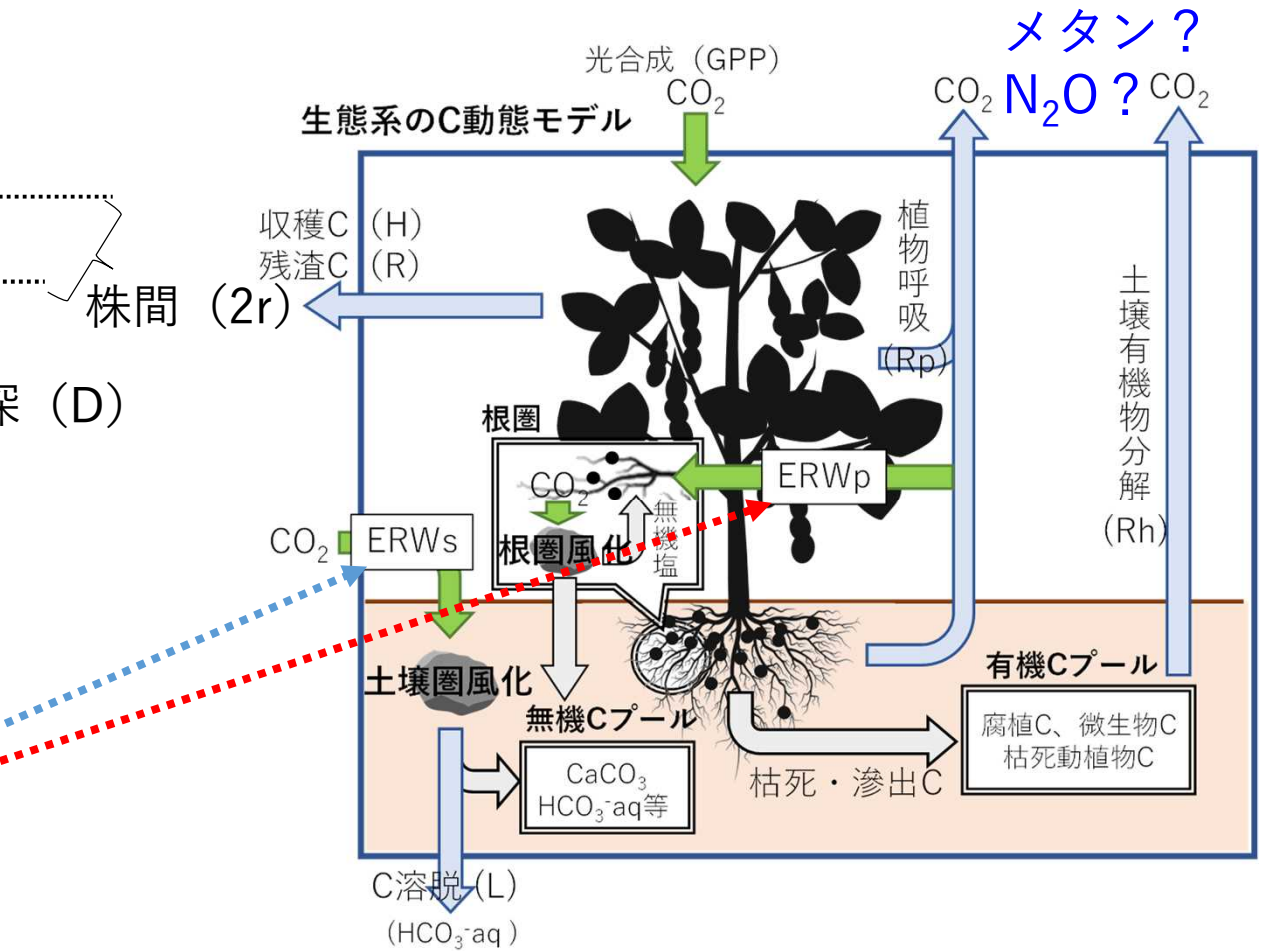
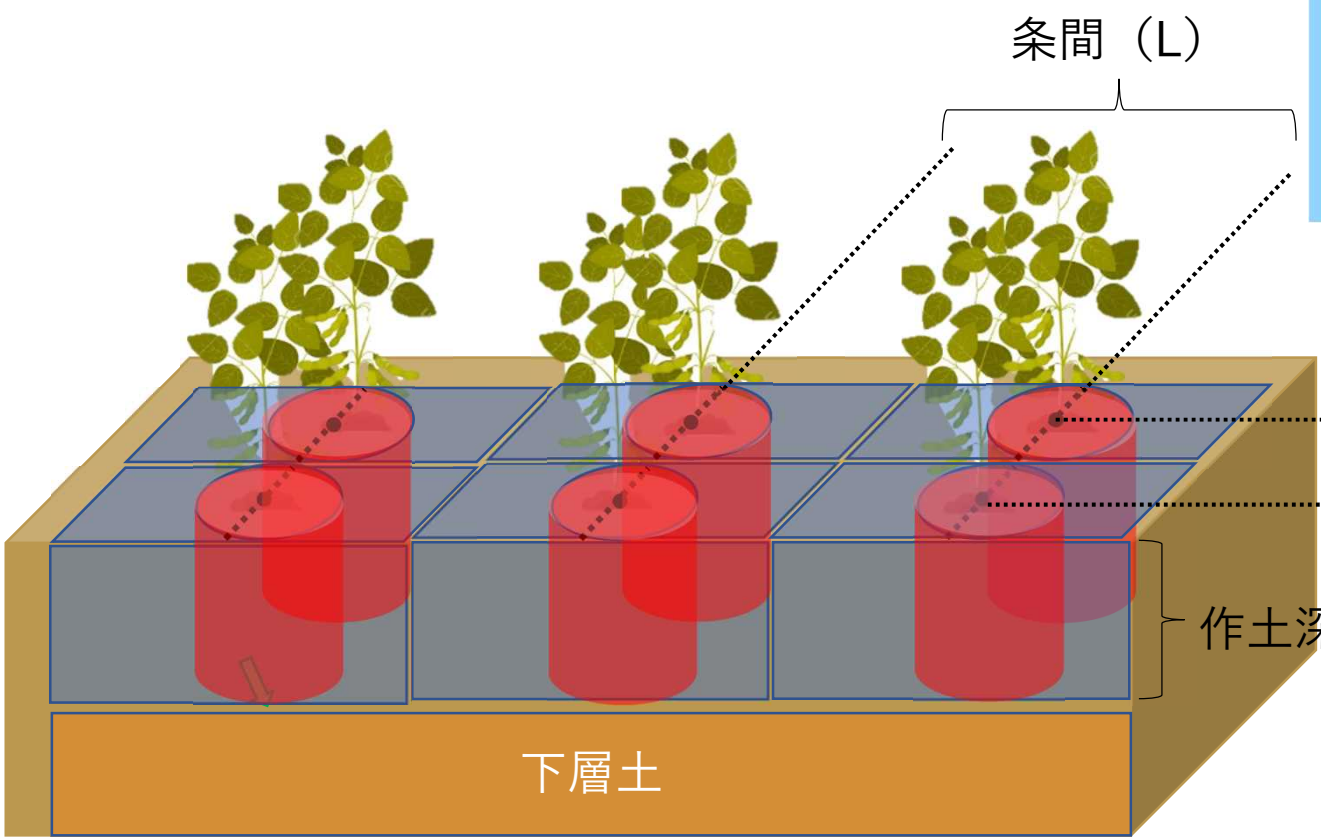
⑤炭素会計情報基盤の整備と試行

(2)自然の炭素循環を含む炭素会計法の開発

散布岩石の風化量 + 散布による有機炭素動態の変化量 = 新しい炭素会計法の開発



南澤PMプロジェクトと協働
 「資源循環の最適化による農地由来の温室効果ガスの排出削減」
 市民科学として土壌サンプル調査で協力
 N₂O削減のコベネフィットも炭素会計化



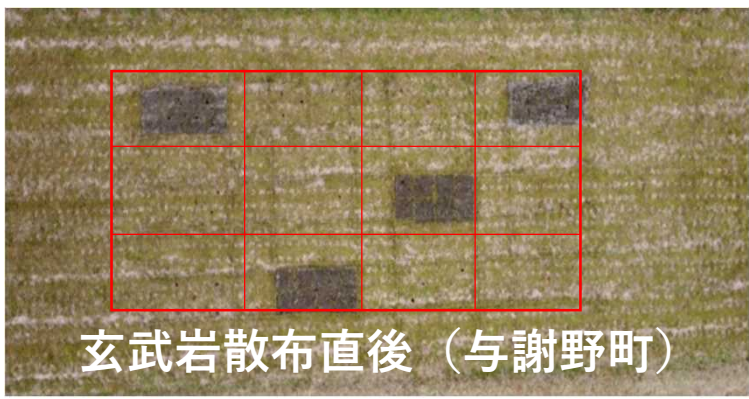
実測

- ・ CO₂放出量 (チャンバー法)
- ・ C溶脱量 (ライシメータ & ポーラスカップ)
- ・ 降水量 (気象モニタリング装置)
- ・ 土壌水分量 (気象モニタリング装置)

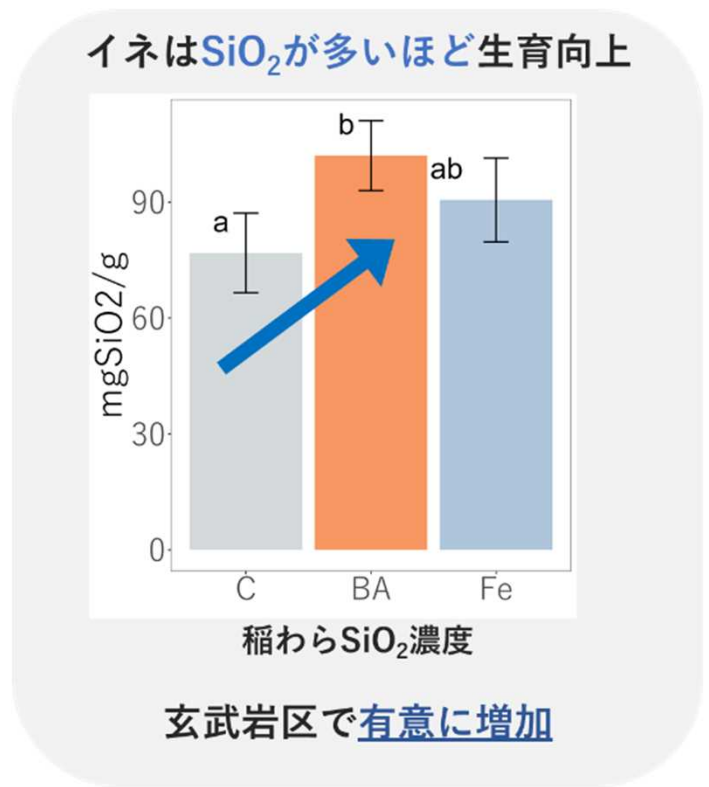
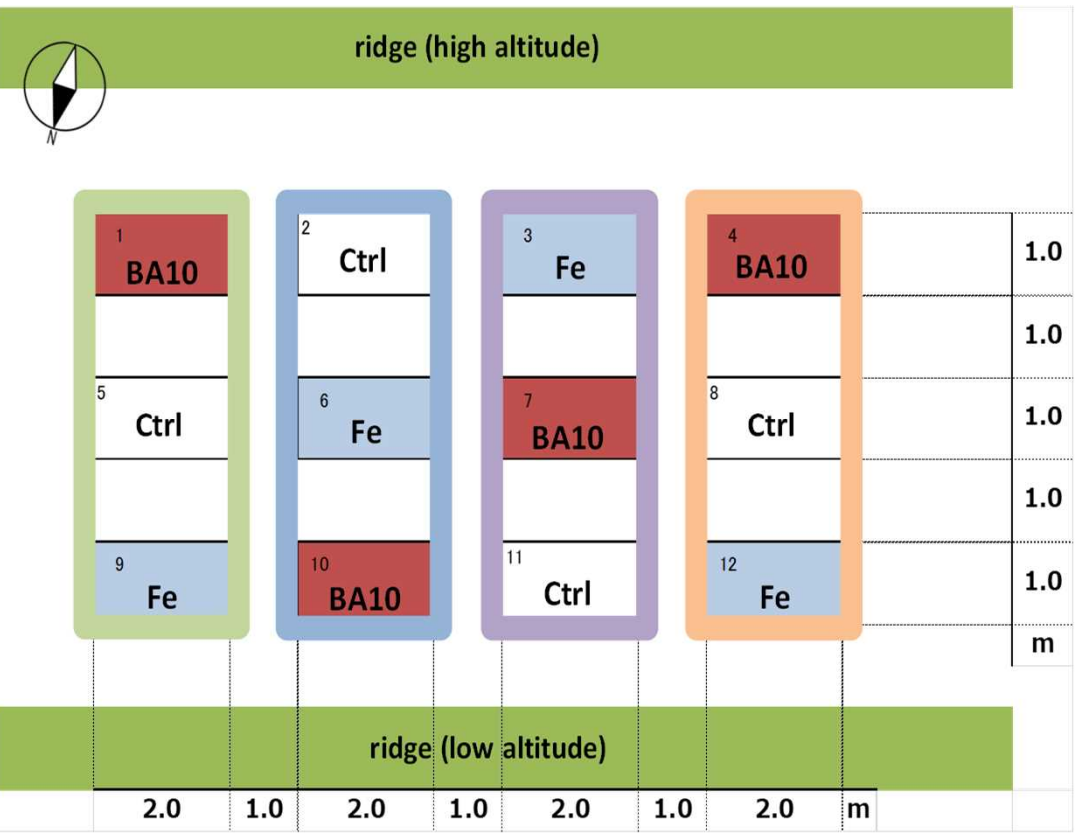
連続データから年間フラックスを推定する重回帰モデルを構築

④実環境場試験と効率的モニタリング法開発 (3)農地散布

1. 試験農場（北海道，つくば，石垣島）で玄武岩散布・栽培・作物の収穫済み
2. 営農水田（京都府与謝野町）に玄武岩散布・栽培・作物の収穫済み
3. 海外展開先として台湾の試験地を選定，玄武岩散布・栽培試験開始→1月収穫予定



- 各試験区で実施中のモニタリング
- ✓ 土壌
 - pH, CEC*, 可給態元素量など
 - ✓ 作物
 - バイオマス量, 元素吸収量など
 - ✓ 溶脱水
 - 重炭酸イオン, その他元素濃度
 - ✓ その他環境データ
 - 雨量, 温湿度, 土壌CO₂濃度など



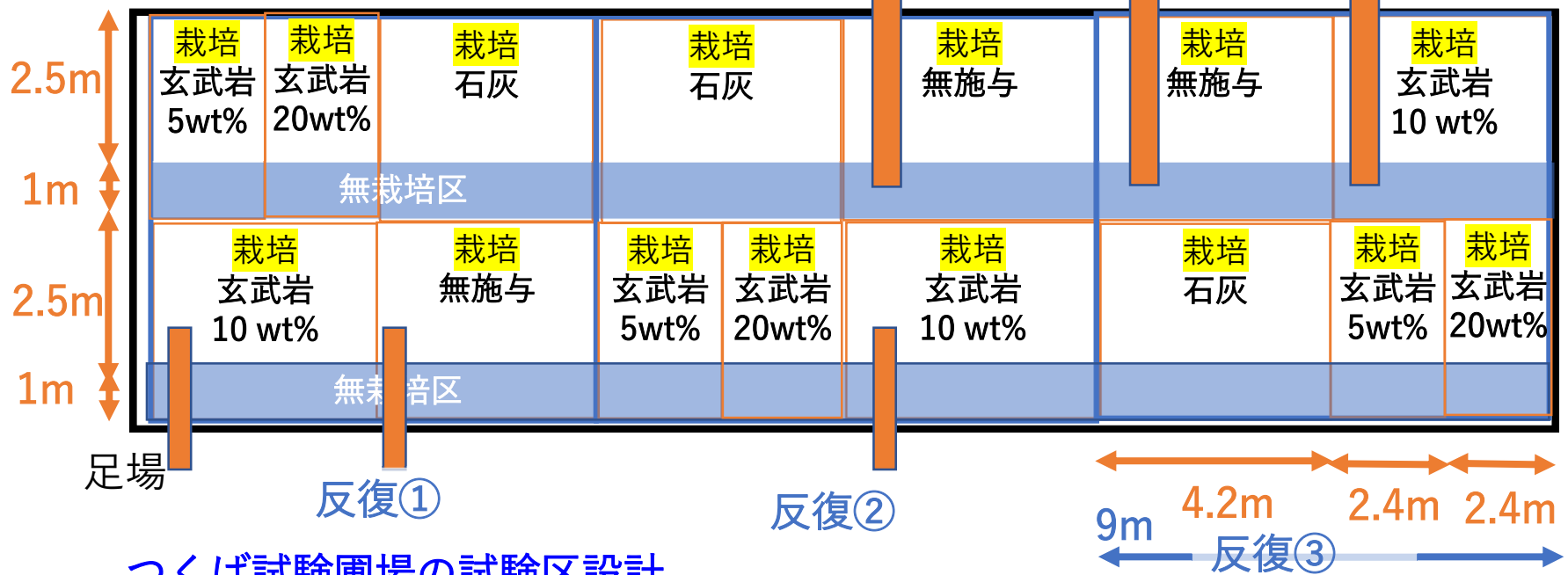
*陽イオン交換容量

- 各試験圃場（台湾除く）で作物の収穫と収穫期の土壌の採取終了
- 収穫作物の元素組成，土壌中での鉱物風化量などのデータ取得中
- イネのSi濃度増加，Ni濃度低下等のコベネフィット確認
- 一方，土壌 - 作物の組み合わせ次第で収量減少も確認（原因究明次第でべからず集への反映視野）

④ 実環境場試験と効率的モニタリング法開発 (3) 農地散布

1. 試験農場（北海道，つくば，石垣島）で玄武岩散布・栽培・作物の収穫済み
2. 営農水田（京都府与謝野町）に玄武岩散布・栽培・作物の収穫済み
3. 海外展開先として台湾の試験地を選定，玄武岩散布・栽培試験開始→1月収穫予定

北大札幌農場の試験区設計



- いずれも玄武岩投与区にて：
- 表層土壌の乾燥密度が増加（北大）
 - 表層と下層で土中のpHとCO₂濃度が増加（カラム実験でも同様，既往文献とも整合）
 - 電気伝導度が増加（溶脱Ca/Mgの影響）

つくば試験圃場の試験区設計

