

低温蛇紋岩化反応実験による 国内天然水素資源ポテンシャルの評価

国立大学法人 北海道大学
大学院工学研究院環境循環システム部門



大竹 翼

地球化学・資源地質学
代表者(野外調査・
実験担当)



菊池 亮佑

鉱物学
(鉱物分析担当)



佐藤 努

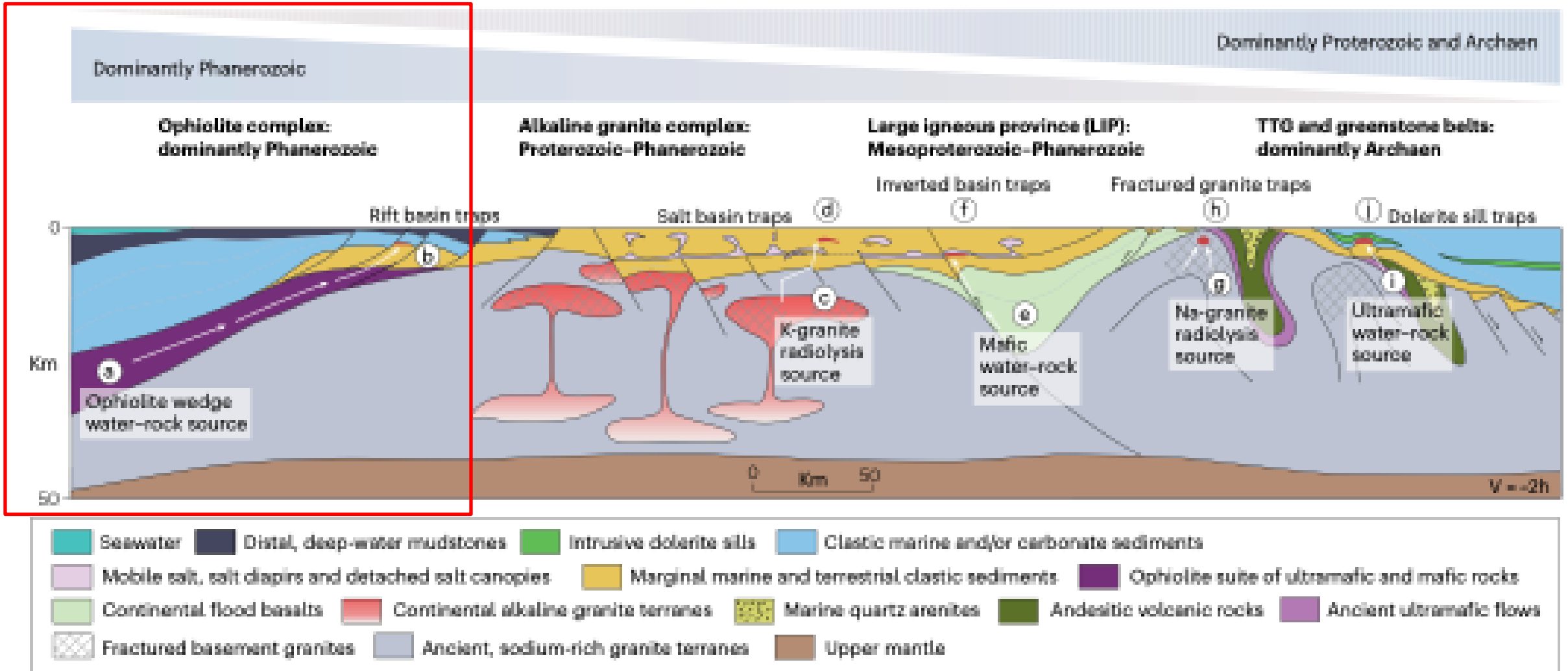
鉱物学・地球化学
(モデリング担当)



鎌倉 大輔

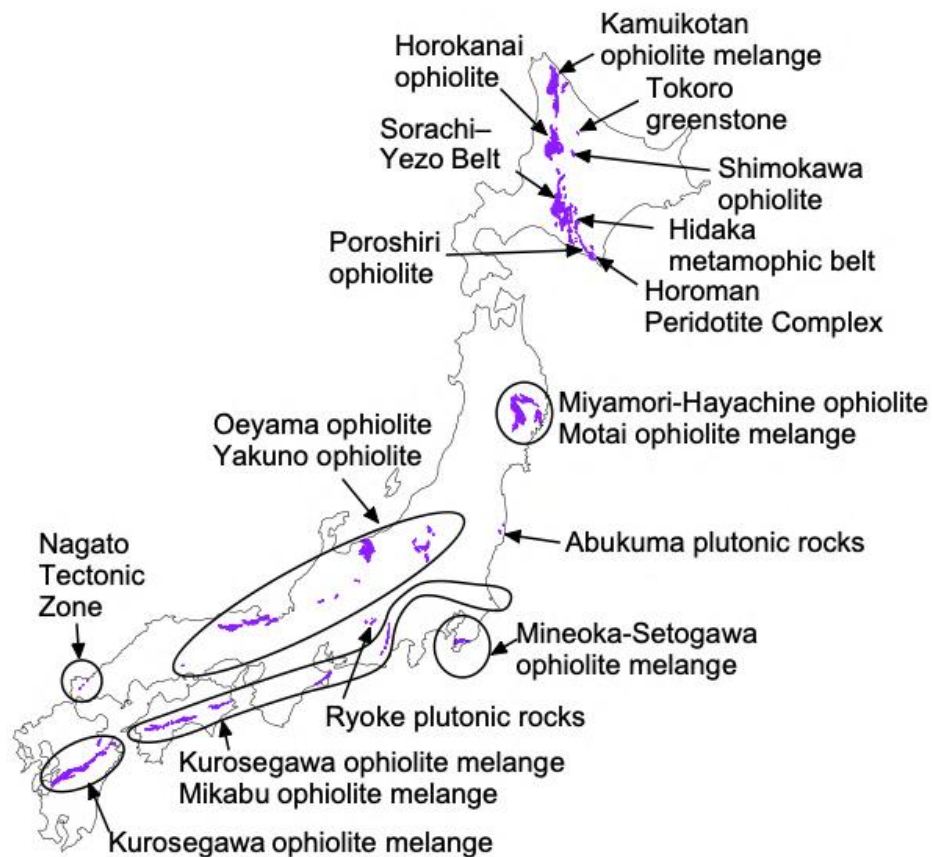
(実験担当)

天然水素 (ホワイト水素) の起源



本研究開発課題の目的

- 日本国内に分布する様々な超苦鉄質岩を用いて低温蛇紋岩化反応による水素生成実験を行うことで、天然水素発生のメカニズムを解明し、水素生成量や速度に与える鉱物学的要因・地球化学的要因を明らかにすること
- また、室内実験の結果を再現する地球化学反応モデリングを構築し、天然環境や増進回収における水素生成量の予測に繋げること



(山崎, 2025天然水素ワークショップの講演資料より.
データ元は産総研データベース).

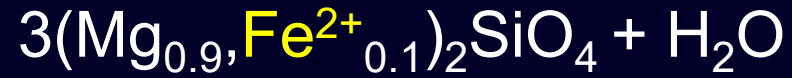
開発項目A: 水素生成に適した国内根源岩の調査 (野外調査＋実験)

開発項目B: 水素生成促進条件の調査 (実験)

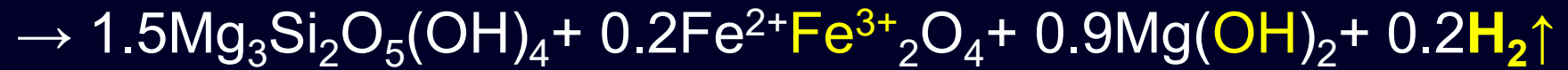
開発項目C: 沈殿物中の微量低結晶性鉱物同定法の開発 (分析)

開発項目D: 地球化学反応モデルの開発 (計算)

低温蛇紋岩化反応



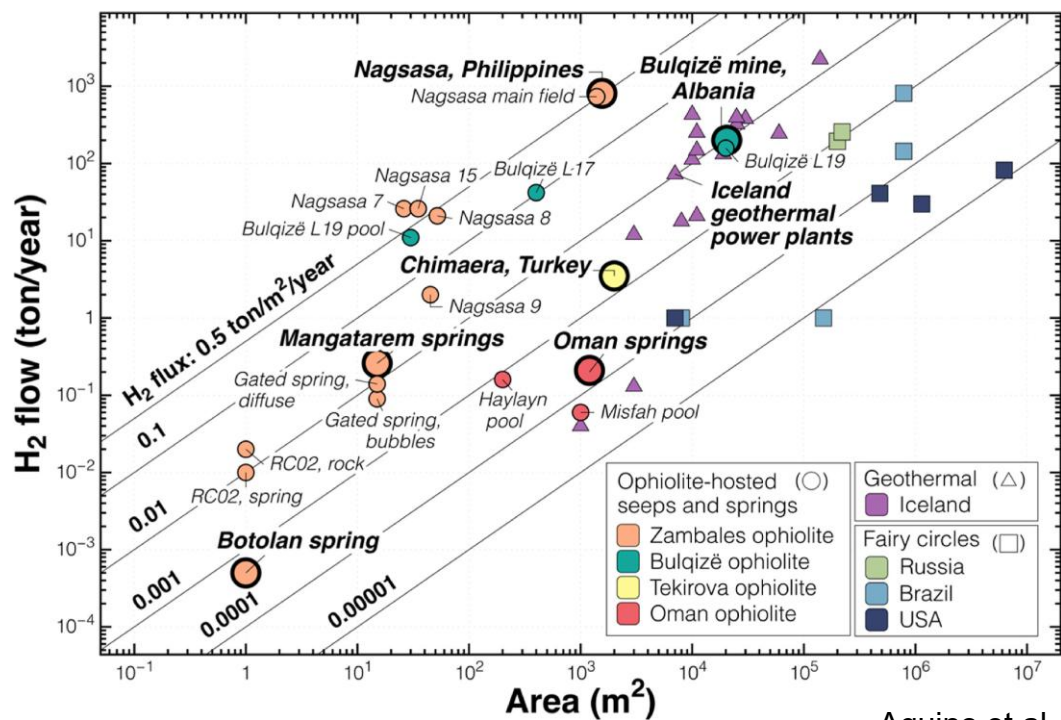
かんらん石



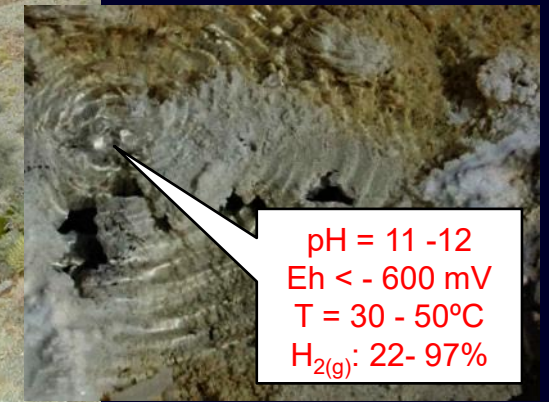
蛇紋石

磁鉄鉱

ブルーサイト



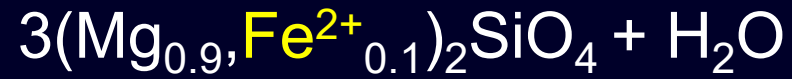
Aquino et al., 2025



pH = 11 - 12
Eh < - 600 mV
T = 30 - 50°C
H_{2(g)}: 22- 97%

(Neal and Stanger, 1983)

低温蛇紋岩化反応



かんらん石

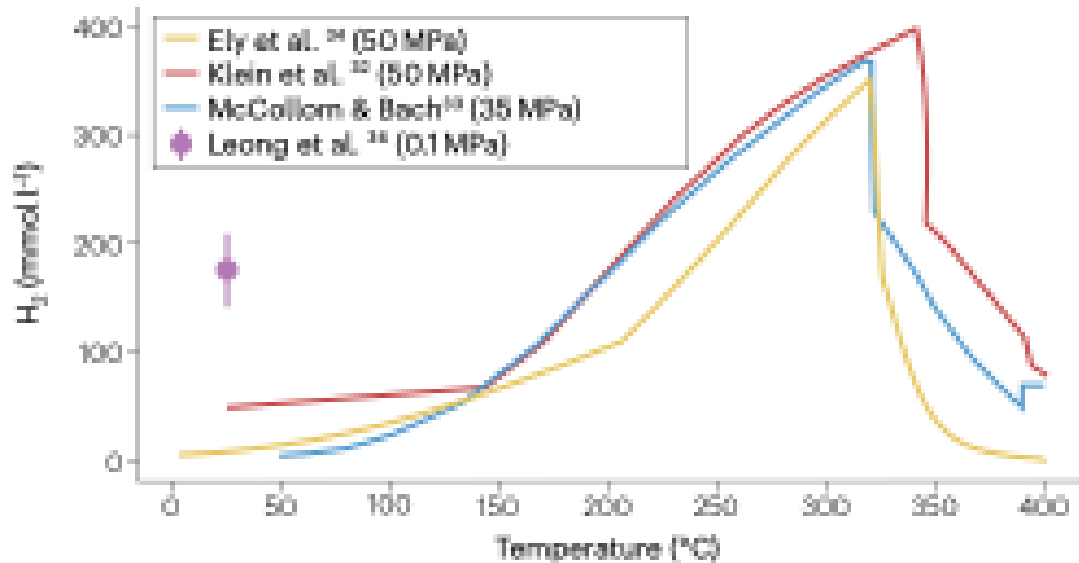


蛇紋石

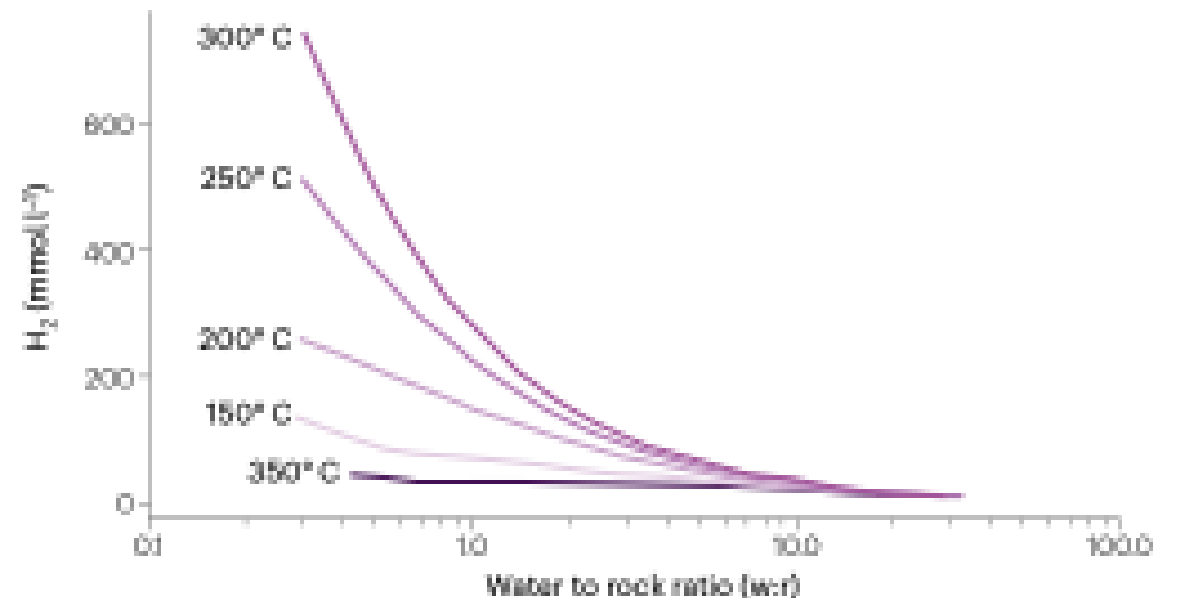
磁鉄鉱

ブルーサイト

a H₂ concentration in water from harzburgite at different temperatures

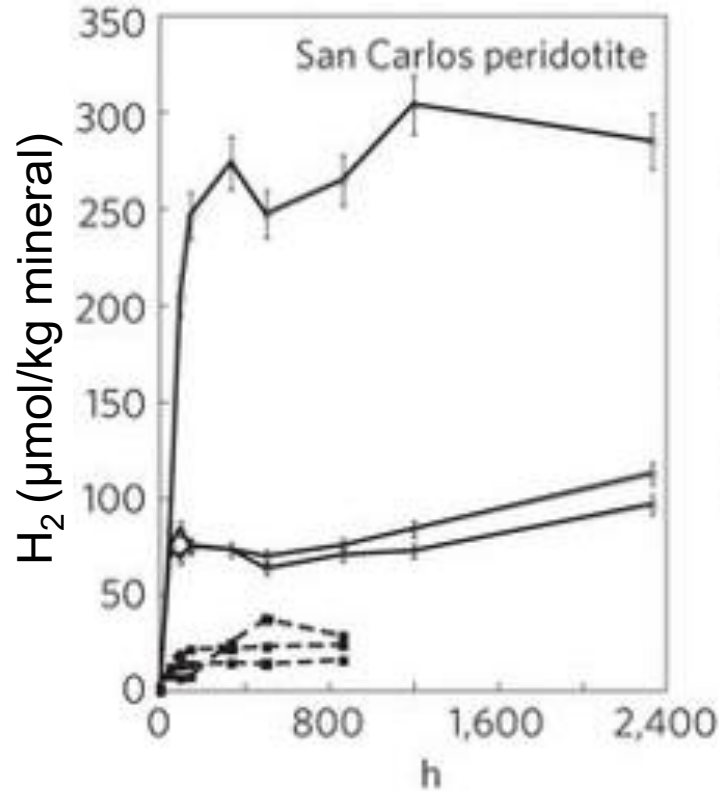


b H₂ concentration in water from different water-rock ratios and temperatures

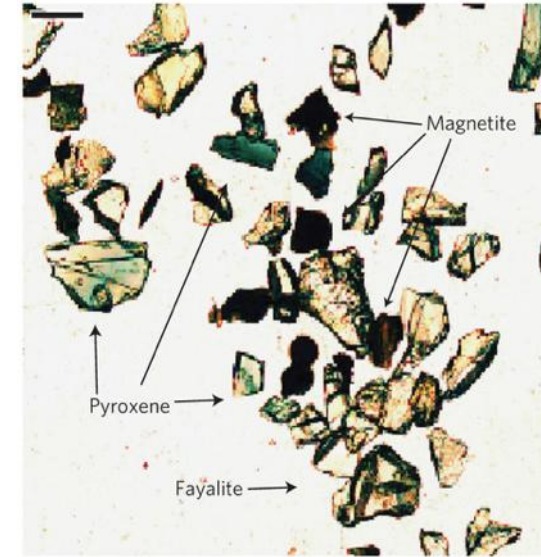
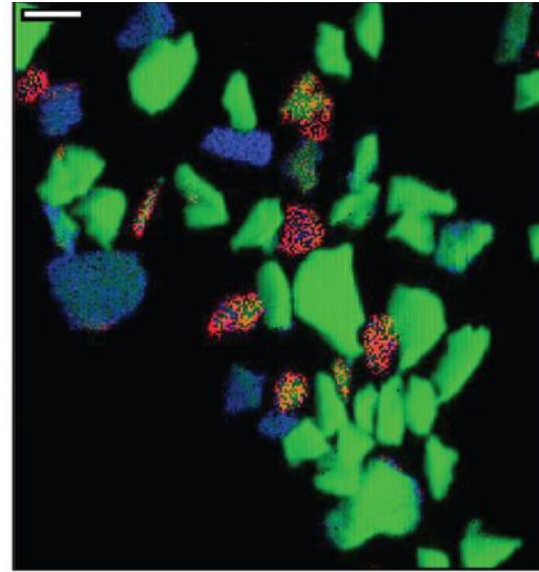


低温蛇紋岩化反応

Mayhew et al. (2013, Nature Geosc.) @100°C



Mineral map based on XANES



スピネルによる触媒作用？

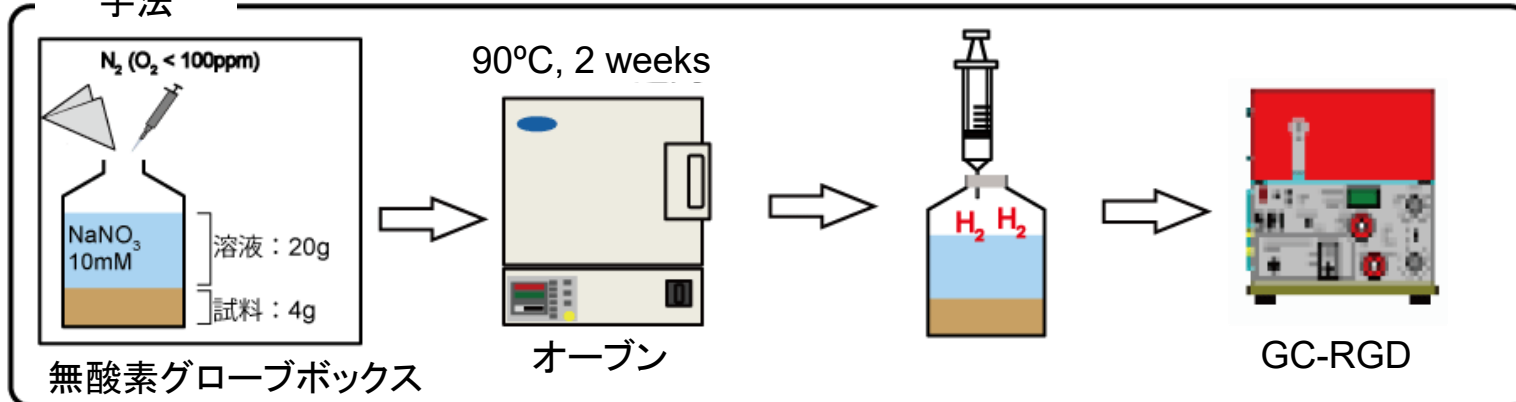
低温 ($< 100^\circ\text{C}$) 蛇紋岩化反応においてはその反応メカニズムや水素生成に関わる要因が分かっていない

- どのような岩石が水素生成に適しているのか？
- どのような流体中の溶存成分 (e.g., pH, Si, Al, Mg, Ca) が水素生成に影響を与えるのか？

➡ 天然岩石試料を用いた室内実験による研究が必要

バッチ式実験 (Ohtomo et al., Geochem. J., 2025)

手法



・実験は3回繰り返した

・ブランク実験の結果は $2\mu\text{mol/kg}$ 以下の水素生成量であった

国内

【幌満, 北海道】

HM-D
HM-H

【若松, 鳥取】

WM-D
WM-H

オマーン

(Wadi Hilt)

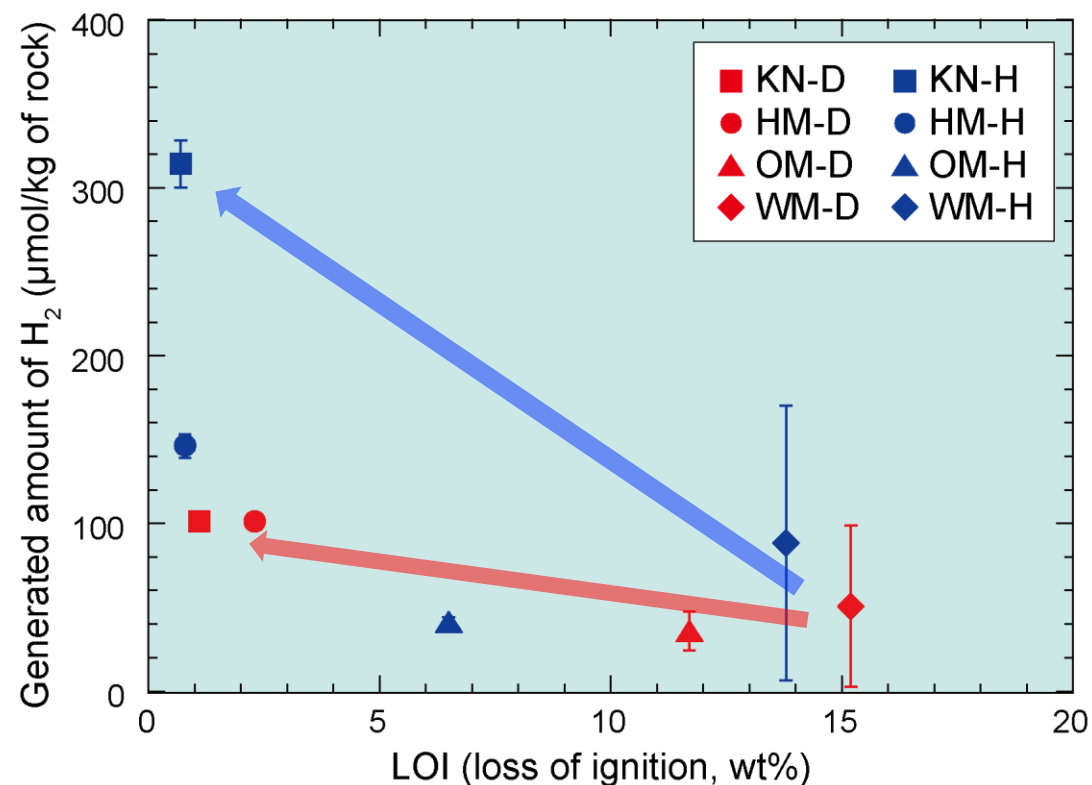
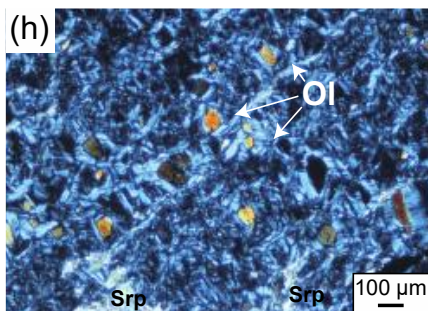
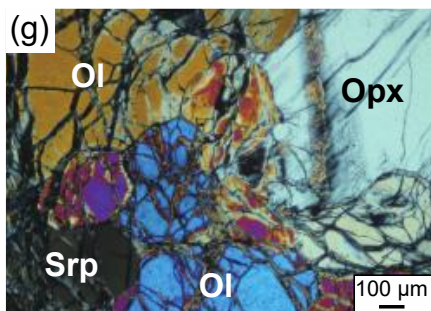
OM-D
OM-H

インドネシア

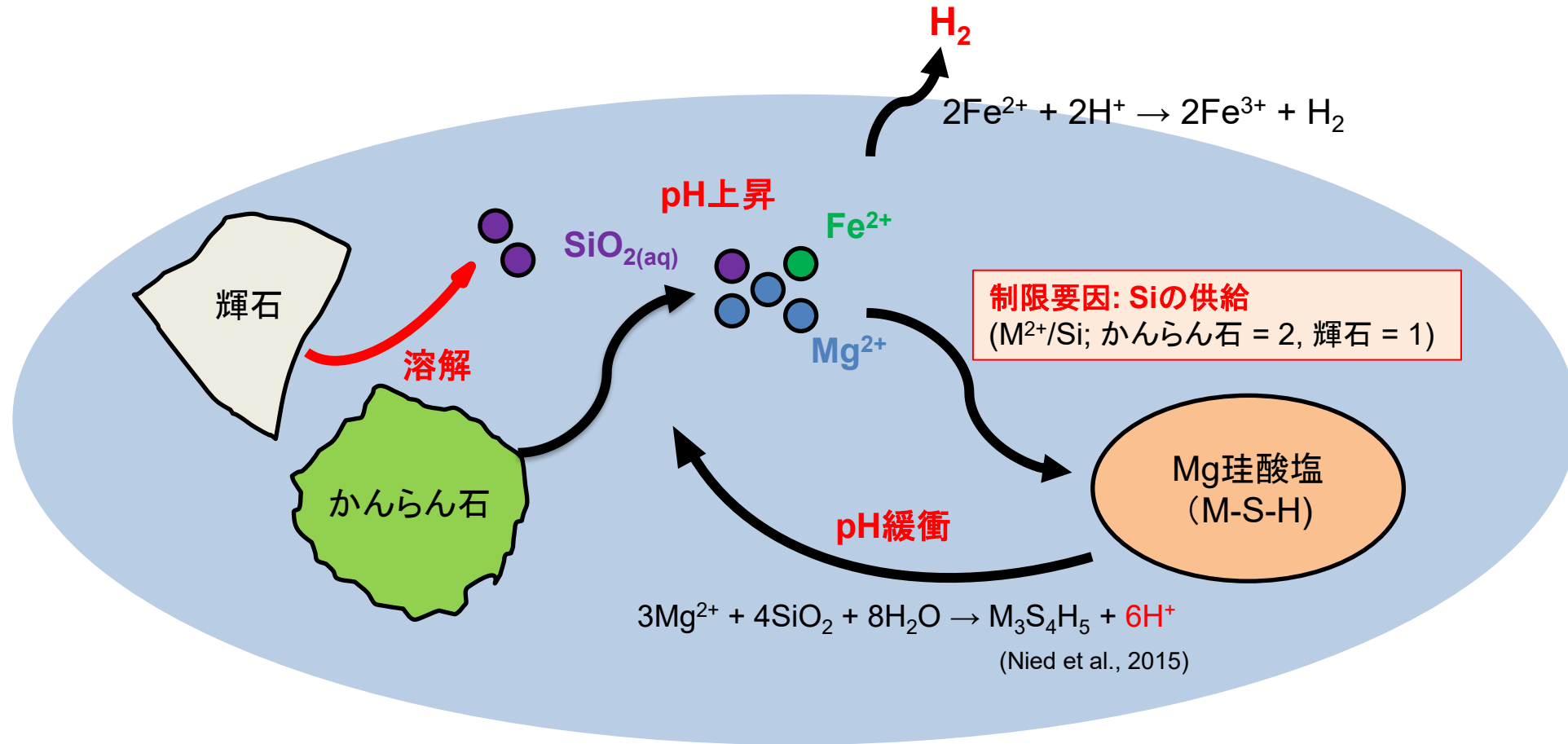
(Konde, Soroako)

KN-D
KN-H

D: ダナイト, H: ハルツバージャイト
($< 53\mu\text{m}$ 粉末)



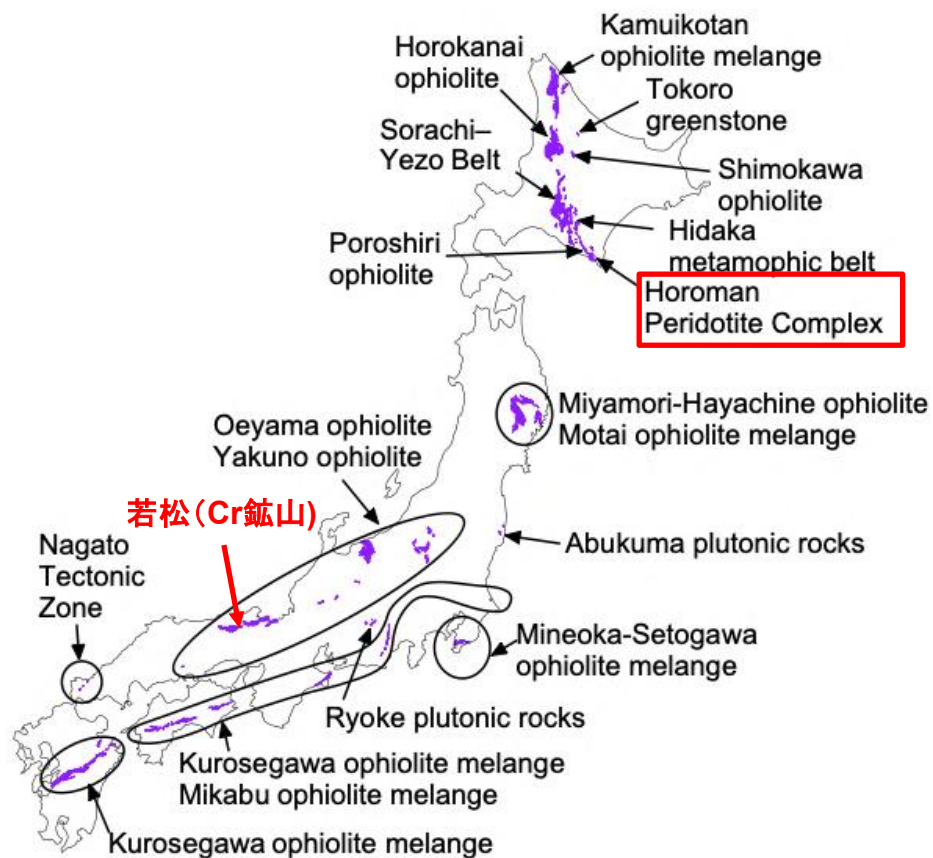
低温蛇紋岩化反応における水素生成プロセス



低温領域 (<150°C) では異なる鉱物学的・地球化学的要因によって蛇紋岩化反応における水素生成量が規定されている可能性がある

➡ 国内産の超苦鉄質岩石 (かんらん岩, 蛇紋岩) 試料を用いた室内実験が必要

本研究開発課題の目的



(山崎, 2025天然水素ワークショップの講演資料より.
データ元は産総研データベース).

- 日本国内に分布する様々な超苦鉄質岩を用いて低温蛇紋岩化反応による水素生成実験を行うことで, 天然水素発生のメカニズムを解明し, 水素生成量や速度に与える鉱物学的要因・地球化学的要因を明らかにすること
- また, 室内実験の結果を再現する地球化学反応モデリングを構築し, 天然環境や増進回収における水素生成量の予測に繋げること

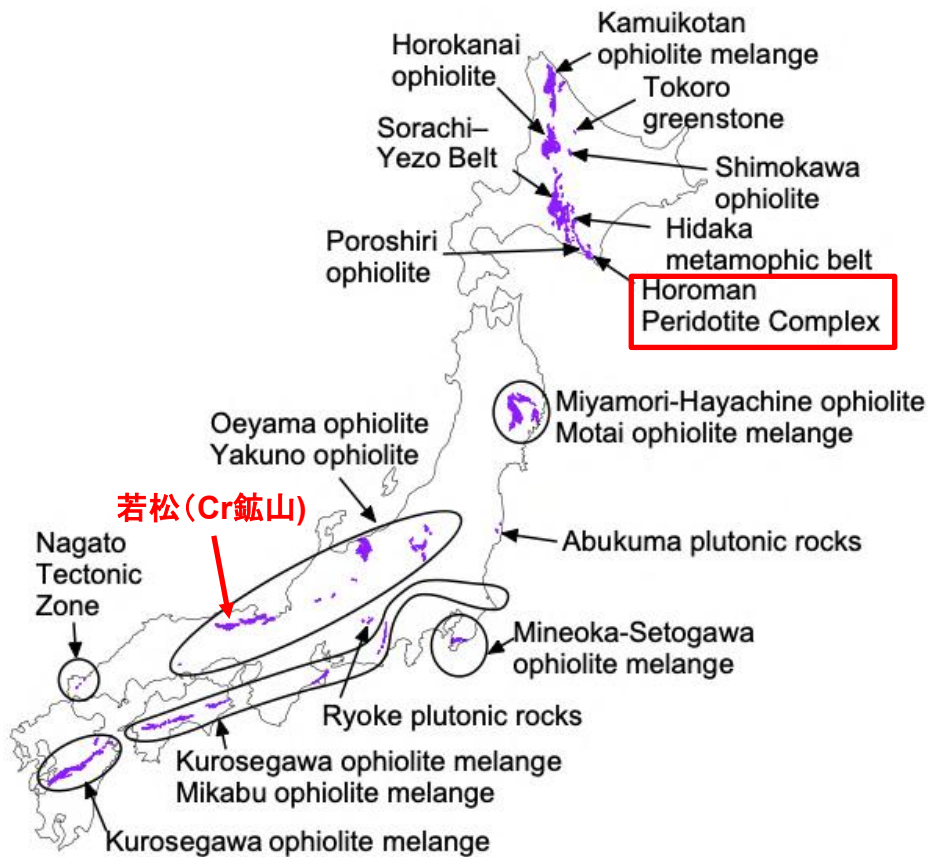
開発項目A: 水素生成に適した国内根源岩の調査 (野外調査+実験)

開発項目B: 水素生成促進条件の調査 (実験)

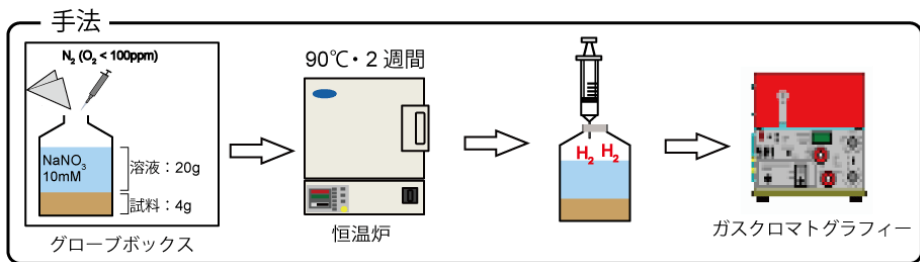
開発項目C: 沈殿物中の微量低結晶性鉱物同定法の開発 (分析)

開発項目D: 地球化学反応モデルの開発 (計算)

研究開発課題A: 水素生成に適した国内根源岩の調査



(山崎, 2025天然水素ワークショップの講演資料より.
データ元は産総研データベース).



A-1: 野外調査

- ・産業技術総合研究所チームと連携
- ・実験対象試料を10試料ほどに絞り込む(50岩体 × 3~5試料)
- ・輝石の化学組成や二次鉱物の種類に着目
- ・鉱物組成や化学組成のキャラクタリゼーションが必要

国内の主要蛇紋岩分布域から4, 5地域で計10試料ほどの超苦鉄質岩を採取し, その鉱物組成・化学組成を明らかにする

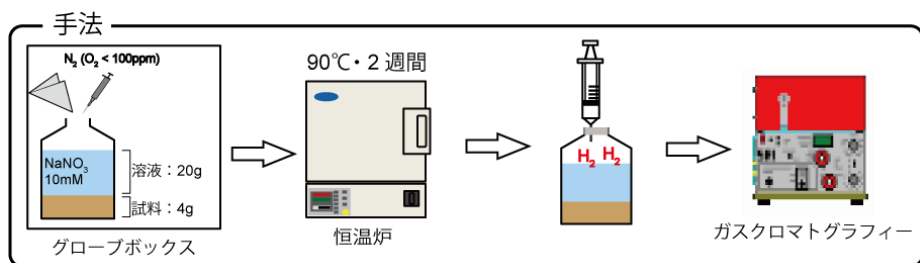
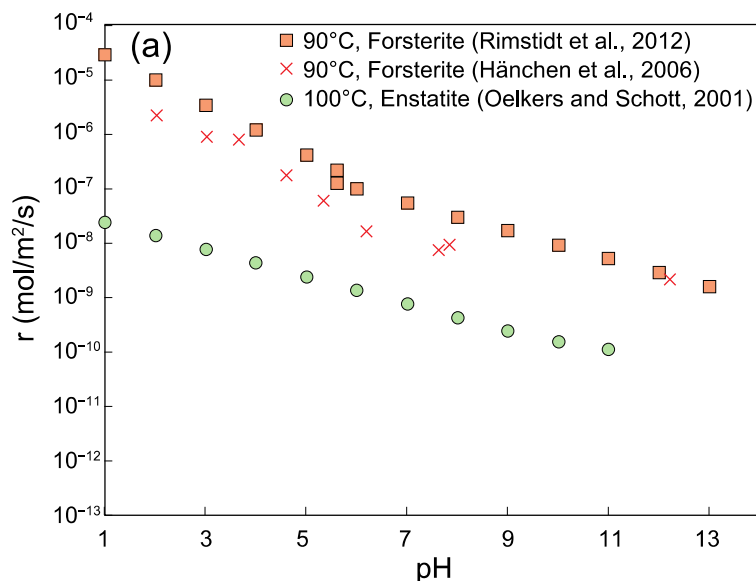
A-2: バッチ式実験

- ・手法は前述の科研費の実験と同様
- ・A-1で得られた試料を出発物質に使用する

上記10試料について水素生成実験を行い, その水素生成量の比較から天然水素の国内根源岩として適切なサイトや岩種を2サイトほどに絞り込む。

研究開発課題B:一次鉱物溶解速度と水素生成促進条件の調査

かんらん石・輝石の溶解速度



固体のみを回収し、再度実験に供する
(最大5回繰り返す)

着目するパラメータ:pHと水/岩石比

B-1: バッチ式実験

- ・岩石種は1, 2試料に固定
- ・NaCl, NaOHによってpHを変化させるほか, pHを緩衝液によってpH=4, 7, 9程度に固定させる。

1, 2の岩石試料に対して3条件のpHで実験を行い, 溶解速度と水素生成量の関係性を明らかにし, 適したpHを決定する。

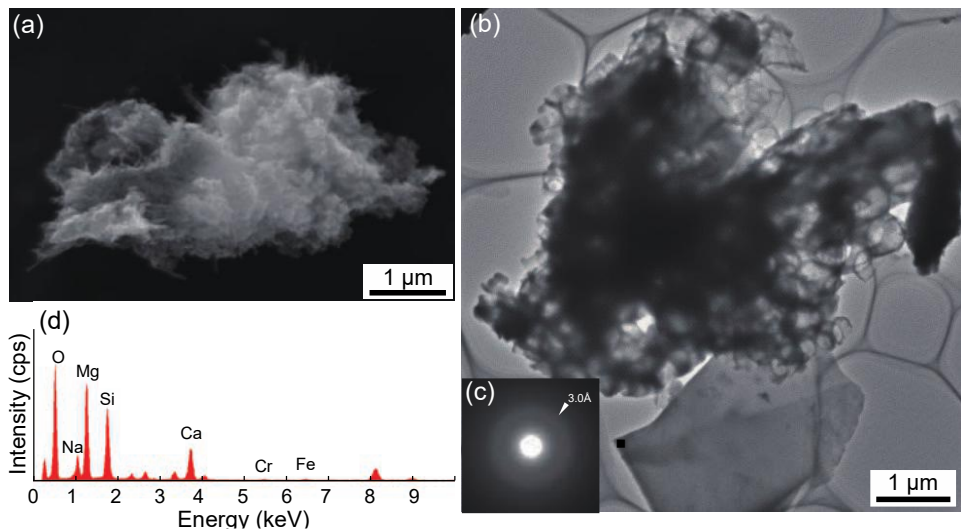
B-2: シリアルバッチ式実験

- ・液固比 (20ml/4g) を振る: 5→20程度まで
- ・実験後の固体を回収し, 再度バッチ式実験に用いることで擬似的な開放系を再現する
- ・水/岩石比の増大に伴い, 水素生成量も増大することが期待できる

1, 2の岩石試料に対してシリアルバッチ式実験を行い, 水素生成量に対する水/岩石比の効果を明らかにする。

研究開発課題C: 沈殿物中の微量低結晶性鉱物同定法の開発

実験生成物のSEM/TEM観察・分析



低温実験の生成物は低結晶性であり、同定が難しい

これまでの問題点: 鉄の挙動や形態について解明できていない

- ・開発項目Bの実験条件の変更により反応率の高い生成物の観察を行う
- ・SEM/TEM/STEM (走査型透過電子顕微鏡) を使用し, 生成物中の元素マッピングを調べる
- ・電子回折による鉄ホスト相の同定
- ・EELS (電子エネルギー損失分光法) 用いた鉄の価数の同定

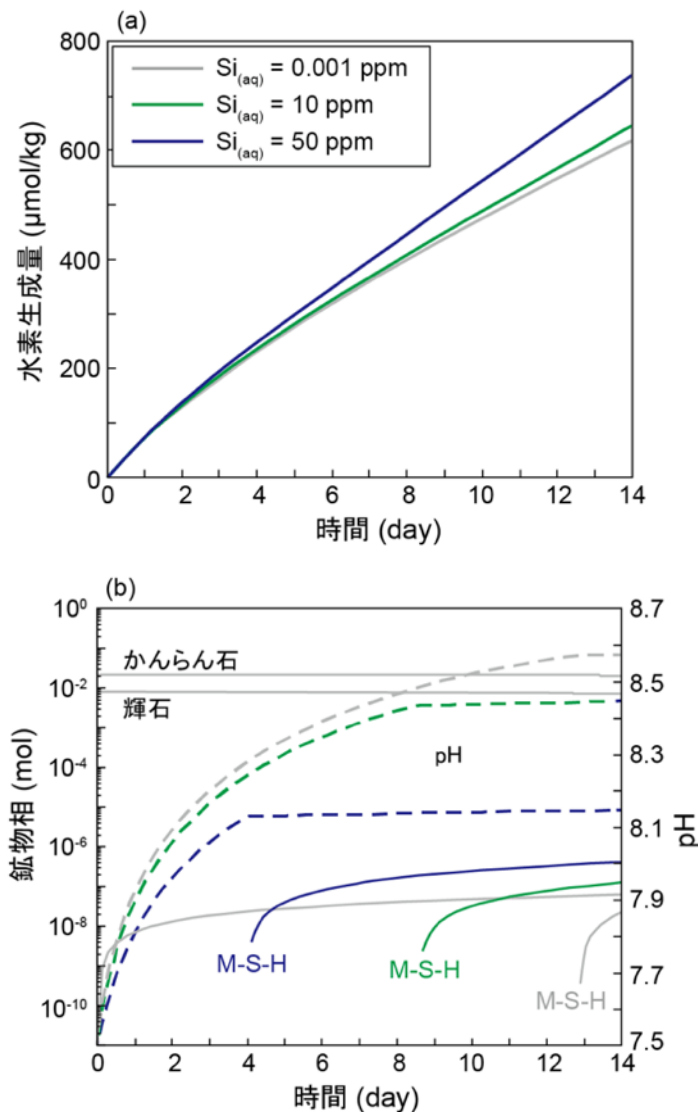


滴定などのオーソドックスな方法との結果の比較

実験系に含まれている微量な低結晶性鉱物を観察・分析するための前処理法を確立し, その化学組成や鉄の価数を同定するための手法を開発する。少なくとも1つの実験系についてその沈殿物の観察・分析を行う。

研究開発課題D:低温蛇紋岩化反応の地球化学反応モデルの開発

ハルツバージャイトを用いたバッチ式実験のモデル結果



開発項目D:低温蛇紋岩化反応の地球化学反応モデルの開発

・B-1 (pH変化), B-2 (水/岩石比)の実験結果を再現する地球化学反応モデルの構築

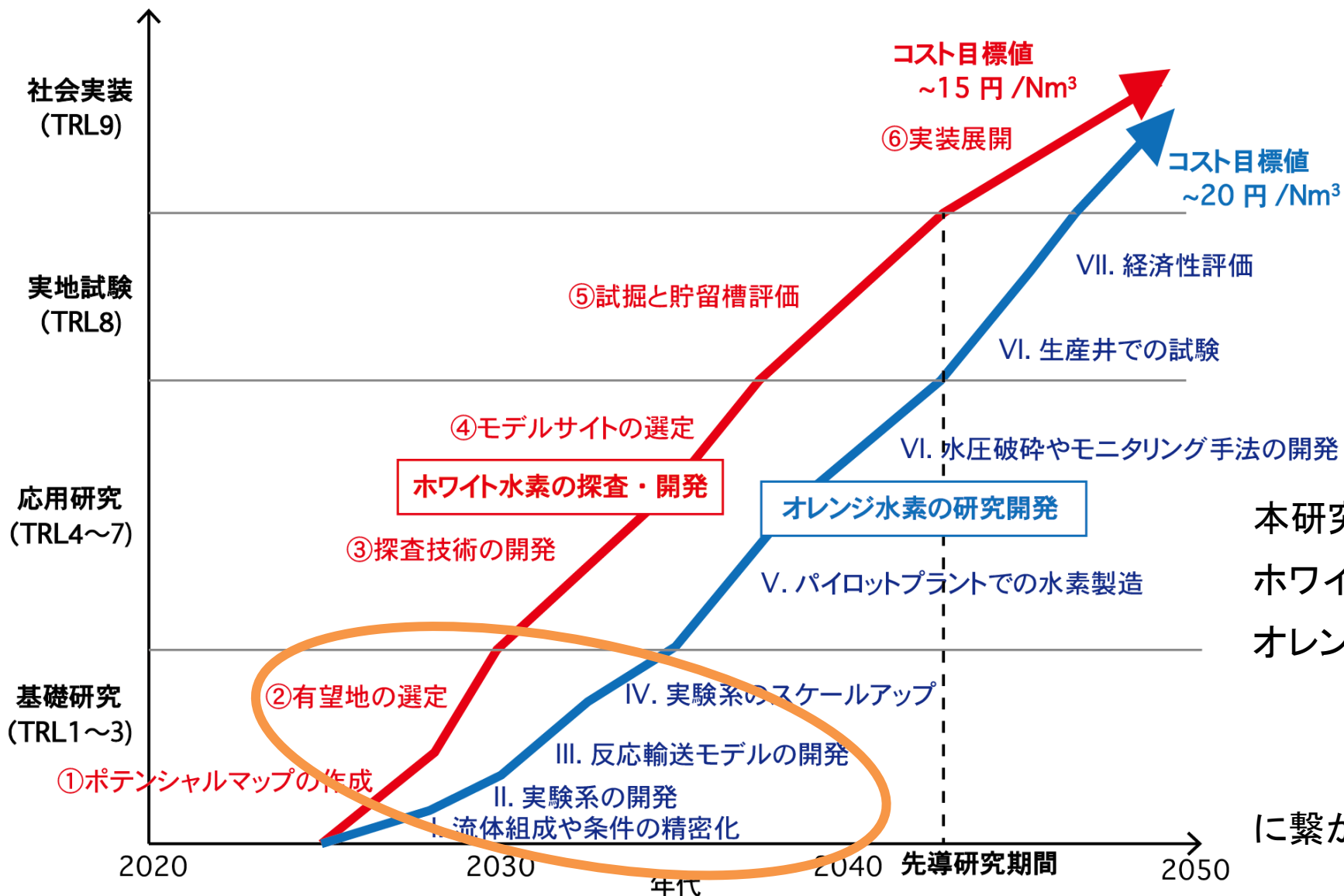
➡ 条件を外挿した際の水素生成量の予測が可能に

・Cの観察結果(鉄のホスト相)を考慮に入れた熱力学データベース
(e.g., 磁鉄鉱, グリーンラスト, F-S-H)

将来的な増進回収の妥当性評価へ繋げる

準安定相を含む多様な鉄鉱物の沈殿を予測可能な蛇紋岩化反応における化学反応モデルを構築する。また, B-2のシリアルバッチ式の実験結果を再現する。

社会実装に向けてのシナリオ・構想



本研究課題は、
ホワイト水素の②有望地の選定や
オレンジ水素の I. 流体組成や条件の精密化
II. 実験系の開発
III. 反応輸送モデルの構築
に繋がる重要な技術/知見を提供する