

産総研におけるCO₂地中貯留技術開発 - 地化学影響を考慮した長期評価 -

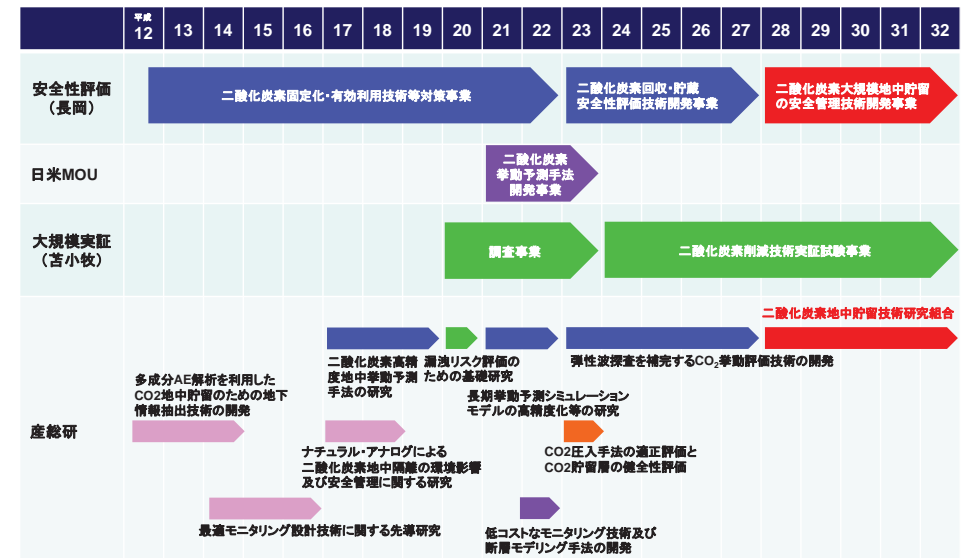
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地圏資源環境研究部門 CO₂地中貯留研究グループ
徂徠 正夫

発表内容

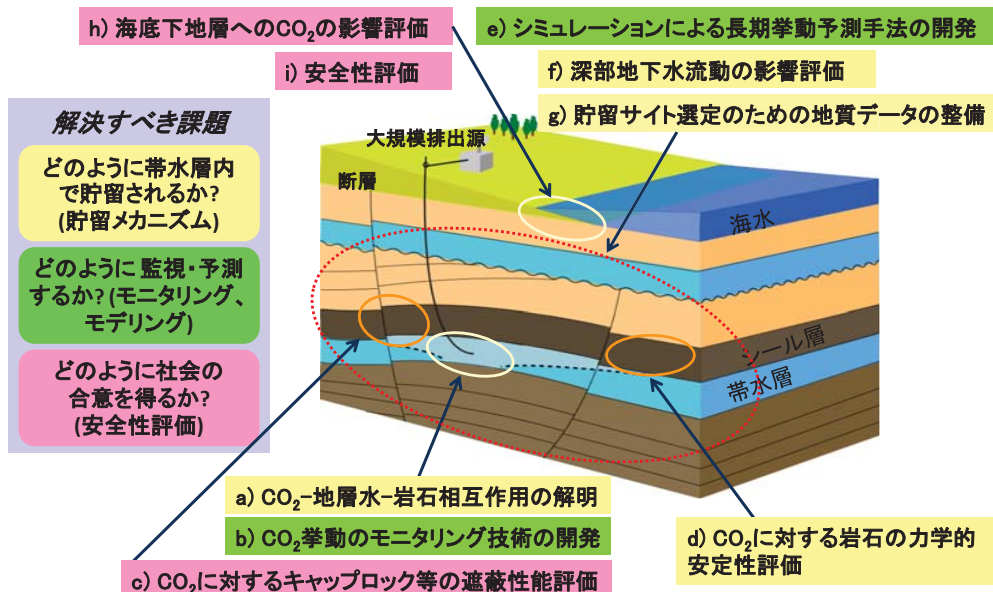
- 産総研におけるCO₂地中貯留技術開発の概要
 - 昨年度までの産総研の取り組み
 - 二酸化炭素地中貯留技術研究組合
- 地化学影響を考慮した長期評価
 - 鉱物トラップの定量化に向けた速度論的アプローチ
 - 遮蔽性能に及ぼす地化学影響
- まとめと今後の展望

産総研におけるCO₂地中貯留 技術開発の概要

CO₂地中貯留に関わるR&Dプロジェクトの推移

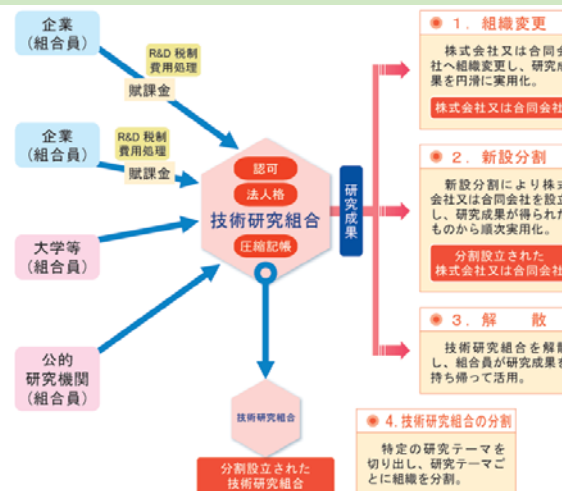


産総研におけるCO₂地中貯留研究への取り組み



技術研究組合とは

技術研究組合は、産業活動において利用される技術に関して、組合員が自らのために共同研究を行う相互扶助組織(大臣認可法人)。各組合員は、研究者、研究費、設備等を出しあって共同研究を行い、その成果を共同で管理し、組合員相互で活用する。



- 1. 組織変更
株式会社又は合同会社へ組織変更し、研究成果を円滑に実用化。
株式会社又は合同会社
- 2. 新設分割
新設分割により株式会社又は合同会社を設立し、研究成果が得られたものから順次実用化。
分割設立された株式会社又は合同会社
- 3. 解散
技術研究組合を解散し、組合員が研究成果を持ち帰って活用。
- 4. 技術研究組合の分割
特定の研究テーマを切り出し、研究テーマごとに組織を分割。

(http://www.meti.go.jp/policy/tech_promotion/kenkyuu/01.html)

二酸化炭素地中貯留技術研究組合

Geological Carbon Dioxide Storage Technology Research Association

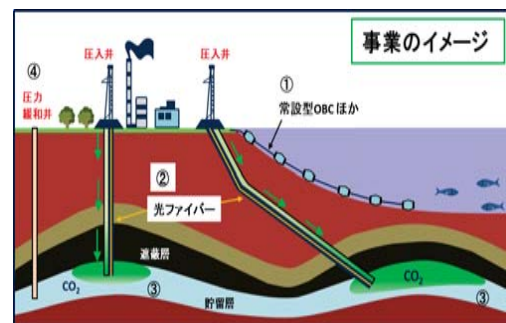
- 【設立】 2016年4月
- 【理事長】 山地 憲治(公益財団法人地球環境産業技術研究機構 理事 研究所長)
- 【組合員】 4社・2機関
応用地質(株)、国際石油開発帝石(株)、石油資源開発(株)、大成建設(株)、地球環境産業技術研究機構、産業技術総合研究所
- 【目的】 安全かつ大規模・効率的なCO₂地中貯留技術の実現に向けて、わが国の貯留層に適した実用化規模(100万トン/年)でのCO₂地中貯留技術を開発するとともに、CCSの社会受容性の獲得を志向した研究開発を行う。
- 【研究概要】
 1. 二酸化炭素圧入・貯留の安全管理技術の確立
 2. 大規模貯留層有効圧入・利用技術の確立
 3. CCS普及環境整備・基準の整備

【実施プロジェクト名】

経済産業省「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」

二酸化炭素地中貯留技術研究組合

Geological Carbon Dioxide Storage Technology Research Association



出典：二酸化炭素地中貯留技術研究組合
(http://www.meti.go.jp/policy/tech_promotion/kenkyuu/saishin/45.pdf)

- ① 自然地震や微小振動観測結果を基にした、ATLS(advanced traffic light system)による圧入安全管理
- ② 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視
- ③ 圧入中のCO₂挙動モニタリングを基にした、圧入後の長期挙動予測
- ④ CO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置及び貯留率向上
- ⑤ CO₂貯留安全管理プロトコル(IRP)の構築

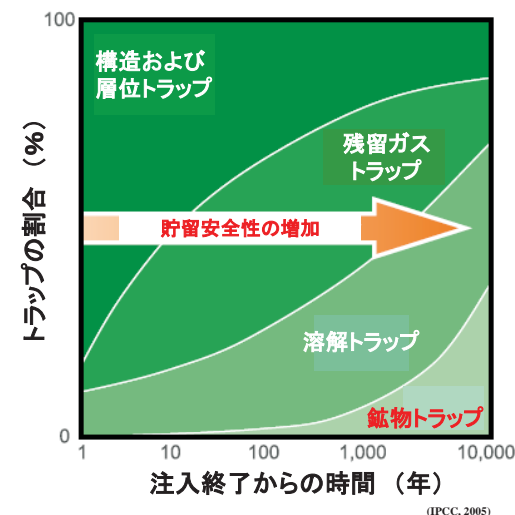
産総研の役割

貯留したCO₂の長期モニタリング技術や、水理-力学連成解析技術、地化学反応速度測定技術など、産総研が独自に有する優位性のあるコア技術を基に、プロジェクトを推進

地化学影響を考慮した長期評価

鉱物トラップの定量化に向けた速度論的アプローチ

CO₂の地下水への溶解 → 地下水の酸性化 → 岩石の溶解 → CO₂の鉱物化

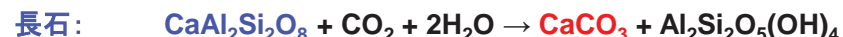
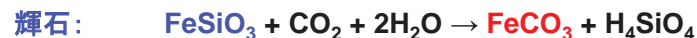
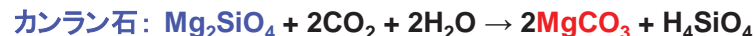


鉱物トラップのメカニズム

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価の陽イオンと溶存炭酸成分が結合して炭酸塩鉱物が成長
HCO₃⁻、CO₃²⁻



ケイ酸塩鉱物が炭酸塩鉱物に置き換えられる

特定のパラメータに注目する

- 鉱物の反応速度式

$$Rate = k A e^{-Ea/RT} \prod a_i^{n_i} f(\Delta G_r)$$

k: 反応速度定数

A: 反応表面積

Ea: 活性化エネルギー

R: 気体定数

T: 温度

a_i: 化学種 *i* の活量

f(Δ*G_r*): ギブス自由エネルギー変化

$$\Delta G_r = RT \ln(Q / K_{eq}) = RT \ln \Omega$$

Ω: 飽和度

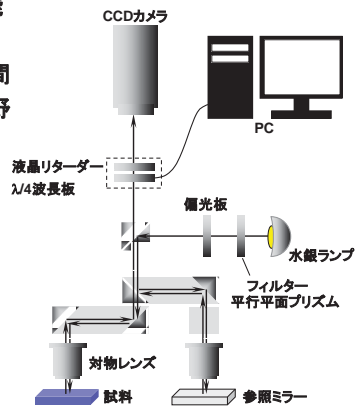
Q: 活動度積

K_{eq}: 平衡定数

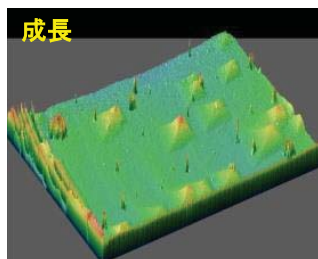
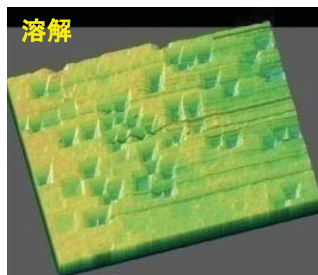
ナノスケールで測る

● 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



現場(温泉)で反応させる

北海道ウトロ温泉
 - 含CO₂塩化物泉
 - 中塩濃度、中Mg/Ca比

群馬県内各温泉
 - 含CO₂塩化物泉
 - 中~高塩濃度、低~高Mg/Ca比

大分県長湯温泉
 - 国内有数の炭酸泉と炭酸水素塩泉
 - 低塩濃度、高Mg/Ca比

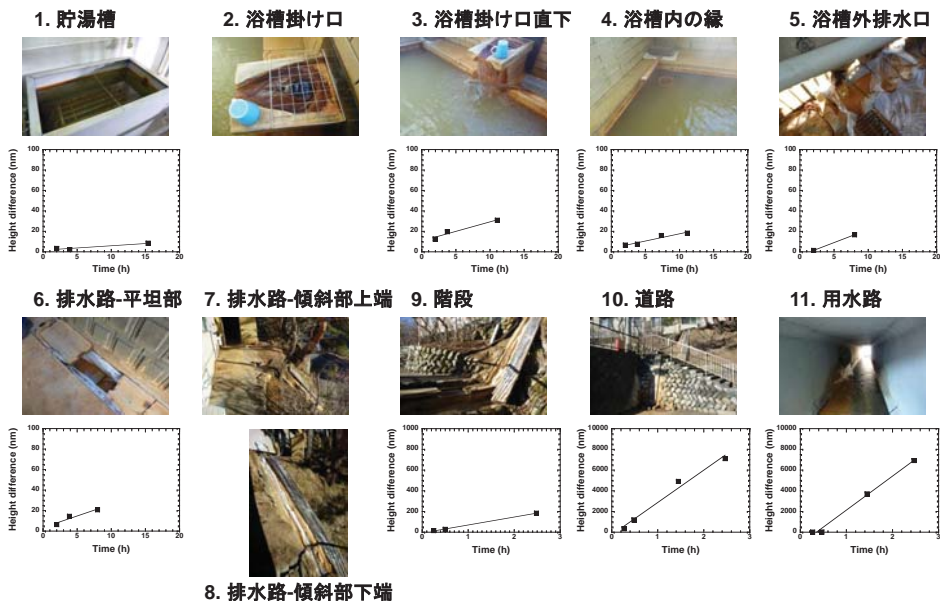
和歌山市内各温泉
 - 塩化物泉
 - 高塩濃度、高Mg/Ca比

白浜温泉
 - 塩化物泉
 - 中塩濃度、中Mg/Ca比

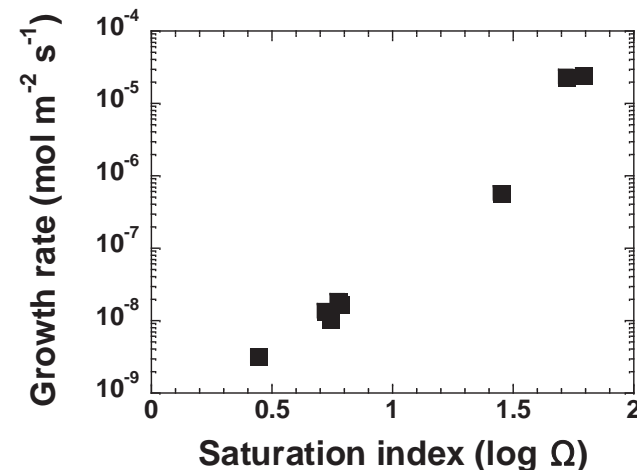
山梨県増富温泉
 - 含CO₂塩化物泉
 - 中塩濃度、低Mg/Ca比

千葉県青堀温泉
 - 塩化ナトリウム泉
 - 中塩濃度、高Mg/Ca比

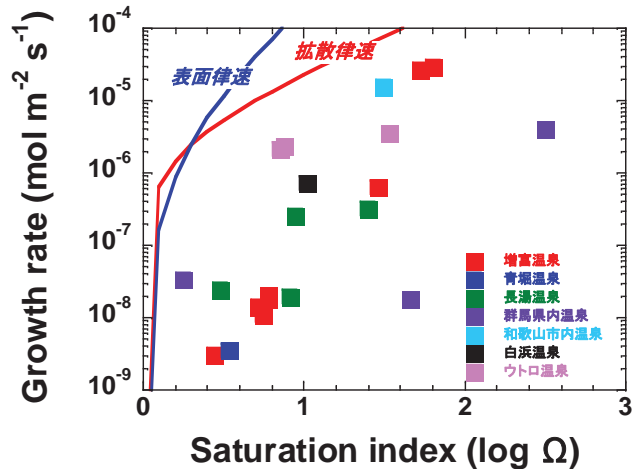
カルサイト成長速度の測定(増富温泉)



カルサイト成長速度の飽和度依存性

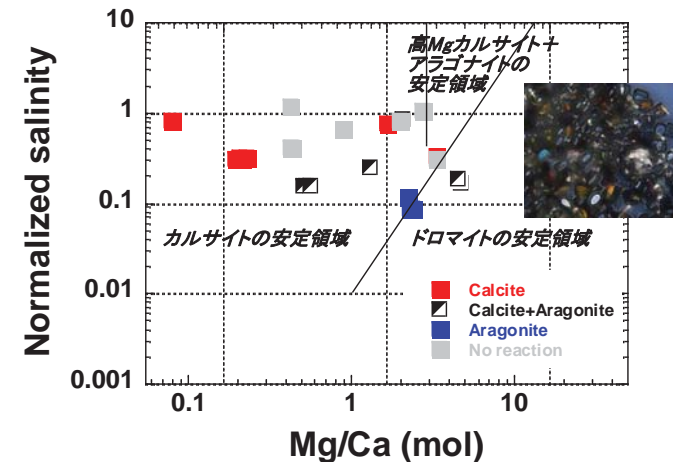


天然におけるカルサイトの成長速度



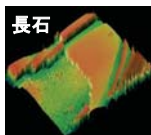
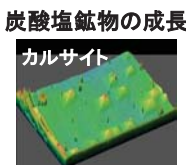
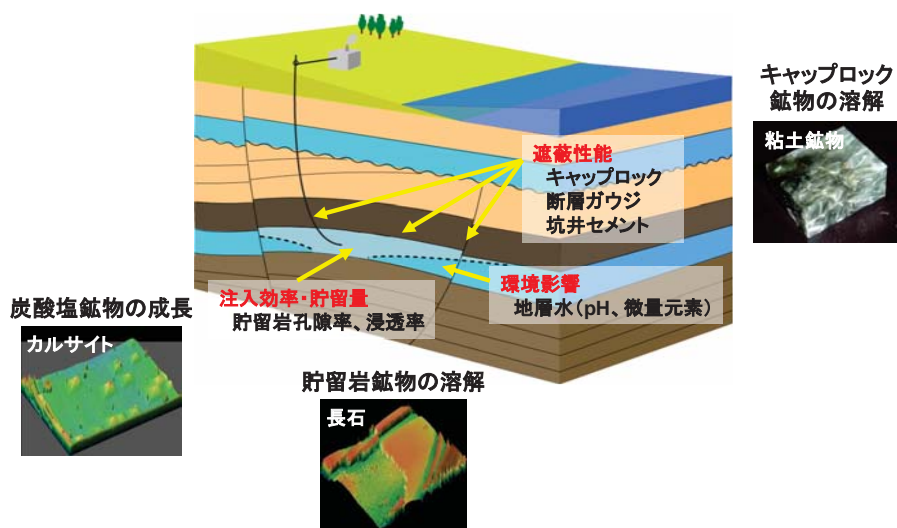
- カルサイトの現場での成長速度は、理論式と比較して大きく低下。
- 従来の地化学シミュレーションは、炭酸塩の成長速度を過大評価の可能性。

各種炭酸塩鉱物の成長条件



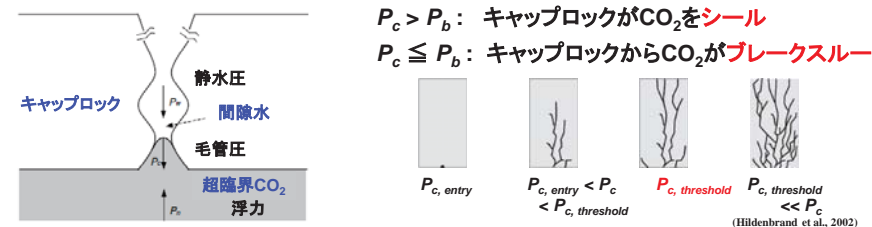
- 安定領域と生成領域は必ずしも一致しない。過飽和度だけから生成相の予測はできない。
- 余剰のMgはカルサイトの成長速度をさらに遅延させる効果あり。

地化学プロセスが及ぼす影響



キャップロックの遮蔽性能

● 毛管圧：静的なシール



スレッシュホールド圧 P_c^{th} : CO₂が岩石を最初に貫通する際の毛管圧

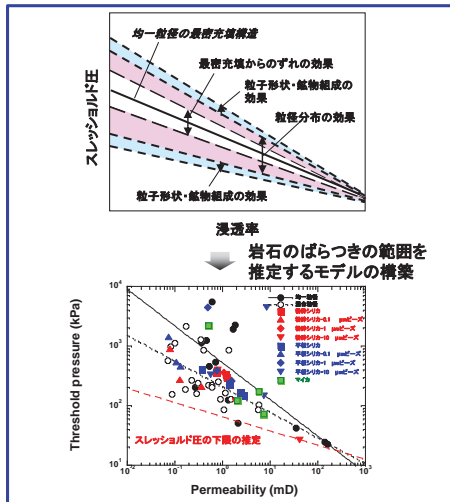
● 浸透率：動的なシール

岩種	浸透率 (darcy)	岩種	浸透率 (darcy)
砂岩	$3.1 \times 10^{-5} - 6.2 \times 10^{-1}$	岩塩	$1.0 \times 10^{-7} - 1.0 \times 10^{-5}$
シルト岩	$1.0 \times 10^{-6} - 1.5 \times 10^{-3}$	硬石膏	$4.2 \times 10^{-8} - 2.1 \times 10^{-3}$
石灰岩, ドロマイト	$1.0 \times 10^{-4} - 6.2 \times 10^{-1}$	シェール	$1.0 \times 10^{-8} - 2.1 \times 10^{-4}$
カルスト石灰岩	$1.0 \times 10^{-1} - 2.1 \times 10^3$		

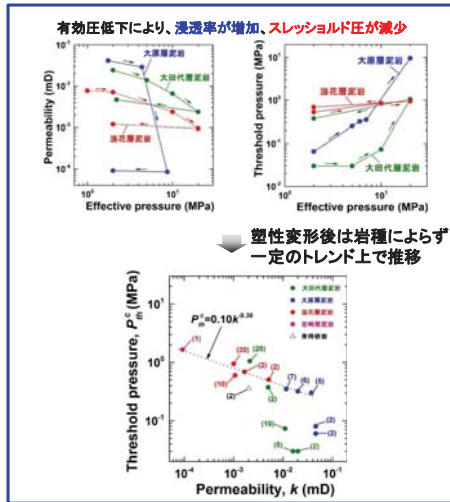
(Domenico and Schwartz, 1998)

スレッシュホールド圧ー浸透率の相関性のモデル化

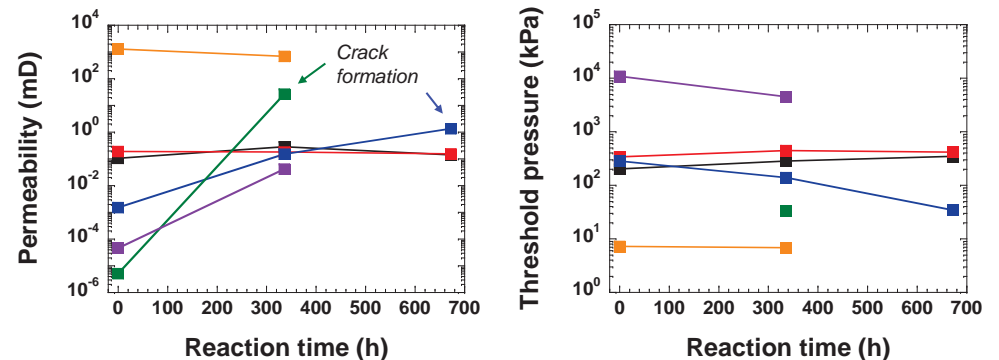
人工試料により、遮蔽性能に及ぼす粒子構造の効果を定量化



間隙圧上昇(有効圧低下)による遮蔽性能への影響を検証



地化学反応が遮蔽性能に及ぼす影響



岩石試料	石英	斜長石	カルサイト	ドロマイト	シペライト	ゼオライト	雲母	緑泥石	スメクタイト
A 浪花層泥岩	△	+	-		-				-
B 大原層泥岩	△	+	+				-	-	-
C 一志層泥岩	+	+				+			-
D 五日市町層群泥灰岩	△			○					
E 大泊有孔虫砂岩	+	+	○						-
F 灰爪層石灰質頁岩	-	-	○						

○ Large amount; △ Middle amount; + Small amount; - Trace amount

界面効果による長期遮蔽性能への影響

$$P_c = 2\sigma \cos\theta / r$$

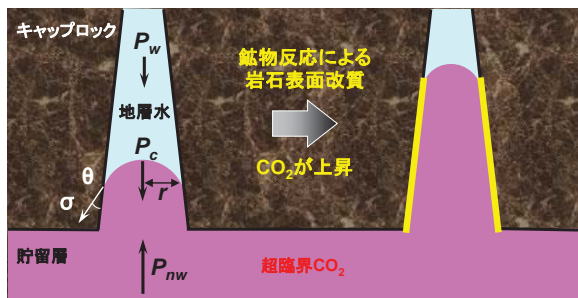
P_c : 毛管圧

σ : 界面張力

θ : 接触角

r : スロート径

- 高接触角 ($\theta > 45^\circ$) では $\cos\theta$ の値は θ の変化に敏感。
- 接触角は鉱物種により変化。
(カルサイト < 石英 < 長石 < 雲母: Farokhpoor et al., 2013)

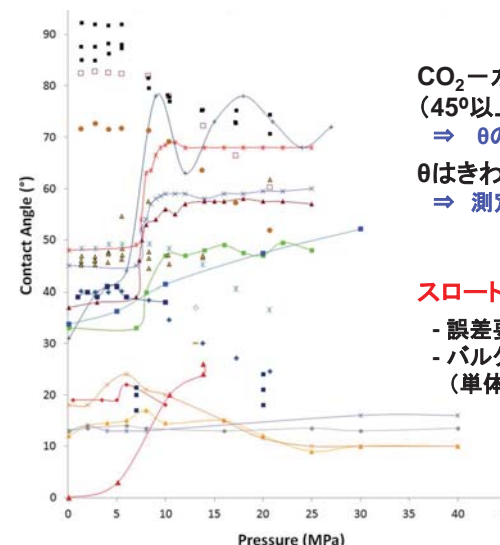


鉱物の溶解や二次鉱物の沈殿など、キャップロック表面の改質により接触角が変化

長期的には遮蔽性能が低下する可能性あり

接触角推定の新たなアプローチ

石英ー水(塩水) - CO₂系での水の接触角 (Iglauer et al., 2014)



CO₂ー水系では θ は 0° ではない (45°以上の可能性もある)

⇒ θ のわずかな変化が P_c に影響

θ はきわめてばらつきが大きいパラメータ

⇒ 測定結果の信頼性は低い

スロート径既知の岩石の P_c 測定により θ を逆算

- 誤差要因となる液滴制御が不要
- バルクの物性値としての取得が可能 (単体鉱物ではなく、含泥率などで一般化)

まとめと今後の展望

地化学研究の今後の課題

- CO₂の鉱物化に過度の期待は禁物。
一方で、貯留したCO₂の長期的挙動を理解する努力は必要。
 - 鉱物トラップの時間的・空間的スケールの定量化
 - 遮蔽性能および圧入性に及ぼす地化学プロセスの影響
 - 水理-力学-地化学連成解析手法の開発
- 地化学プロセス応用の可能性の検討
 - 貯留層鉱物の溶解 ⇒ 圧入性の改善
 - CO₂のゲル化・鉱物化 ⇒ 緊急時のCO₂漏洩停止
 - CO₂の鉱物化促進 ⇒ モニタリングの早期終了



地化学プロセスを活用したCO₂の増進貯留技術の開発
(ECS: Geochemically Enhanced CO₂ Storage)

産総研の果たすべき役割

- 実用化・事業化の促進
 - ソフト面の拡充
社会が安心する知見や情報の提供
 - トータルシステムとしてのコスト低減
- 技術研究組合内での連携強化
- 異分野への応用

ご清聴ありがとうございました