

原位置での炭酸水注入による 岩盤強度・遮蔽性能向上に関する研究

京都大学 奈良禎太

研究背景

- 地球温暖化抑制を目的として、多孔質な堆積岩に二酸化炭素を貯留する、**二酸化炭素地中貯留(CCS)**が検討されている。
- 放射性廃棄物を地下に閉じ込めることを目的に、堆積岩や火成岩を対象に研究開発が行われている(**放射性廃棄物地層処分**)。
- このような地下岩盤を利用するプロジェクトにおいては、**岩盤の透水性**や、**周辺環境による透水性への影響**について知ることが重要である。

2

研究背景

CCSにおいて二酸化炭素を圧入する際、地下の温度・圧力条件下では、二酸化炭素が**超臨界状態**になることで、岩盤内で破壊を促進し、誘発地震を起こす可能性が問題視されている。(Zoback and Gorelick, 2012)

- 二酸化炭素を直接岩盤に注入するのではなく、**炭酸水(炭酸イオン)**の状態では、炭酸イオンが炭酸塩鉱物として固定され、超臨界状態になる二酸化炭素の量が減少することで、誘発地震のリスクが軽減される可能性がある。

3

研究目的

- 原位置岩盤において、炭酸水を注入したときの透水性への影響については十分にわかっていない。



- 幌延深地層研究センターの深度350m調査坑道(泥岩層)にてボーリング孔を掘削し、岩盤に炭酸水を注入する試験を行う。
- その間、原位置透水試験を行うことで透水系数を測定し、炭酸水注入による**岩盤の透水性への影響**を調べる。

4

施設の概要

日本原子力研究開発機構(JAEA) 幌延深地層研究センター



実験準備 (ボーリング孔掘削)

• 壁面にボーリング孔を掘削した。



実験方法 (原位置透水試験)

• 透水試験の装置を設置。



実験方法 (原位置透水試験)

1. ハンドポンプで送水し、試験孔とその周辺岩盤を水で満たす。

2. 試験孔に注水して原位置透水試験を行い、初期状態の岩盤の透水係数を測定する。

3. 炭酸水を緩やかに注入し続ける。(20 mL/min以下)

4. 1,2と同様の手順で原位置透水試験を行い、炭酸水注入中の透水係数を測定する。

繰り返す

実験方法（初期の透水係数測定）



9

実験方法（初期の透水係数測定）

- 試験孔に一定流量(30 mL/min)で注水し、注水圧を測定することで定流量透水試験を行い、透水係数を求めた。

- 原位置透水試験における透水係数 k (m/s)は、次の Hvorslevの定常式により求められる。

$$k = \frac{Q}{2\pi L} \frac{\rho_w g}{P} \ln\left(\frac{2L}{D}\right)$$

(Hvorslev, M., 1951)

Q : 注水流量(m^3/s), L : 試験区間長(m), D : 試験孔直径(m)
 ρ_w : 水の密度(kg/m^3), g : 重力加速度(m/s^2), P : 注水圧(Pa)

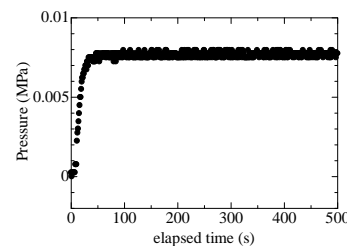
10

実験結果（初期の透水係数測定）

$$k = \frac{Q}{2\pi L} \frac{\rho_w g}{P} \ln\left(\frac{2L}{D}\right)$$

(Hvorslev, M., 1951)

時間の経過とともに、注水圧が一定となった時を定常状態とした。



注水圧の測定結果の例
(初期状態, 30mL/min)

- 岩盤の初期の透水係数は 2.2×10^{-7} m/s程度と求められた。

11

実験方法（原位置透水試験）

1. ハンドポンプで送水し、試験孔とその周辺岩盤を水で満たす。

2. 試験孔に注水して原位置透水試験を行い、初期状態の岩盤の透水係数を測定する。

3. 炭酸水を緩やかに注入し続ける。（20 mL/min以下）

4. 1,2と同様の手順で原位置透水試験を行い、炭酸水注入中の透水係数を測定する。

繰り返す

12

実験方法（炭酸水の注入）

- 試験孔に炭酸水(pH:4.0, 炭酸イオン濃度:1.8 g/L) を注入する.



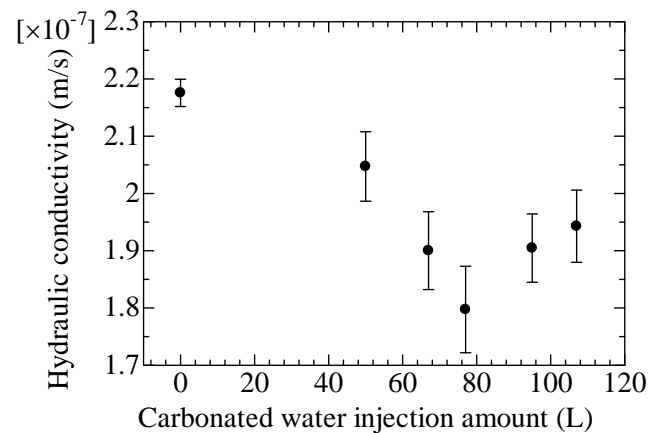
13

実験方法（原位置透水試験）

1. ハンドポンプで送水し, 試験孔とその周辺岩盤を水で満たす.
 2. 試験孔に注水して原位置透水試験を行い, 初期状態の岩盤の透水係数を測定する.
 3. 炭酸水を緩やかに注入し続ける. (20 mL/min以下)
 4. 1,2と同様の手順で原位置透水試験を行い, 炭酸水注入中の透水係数を測定する.
- 繰り返す

14

試験結果（炭酸水注入後の透水係数）



15

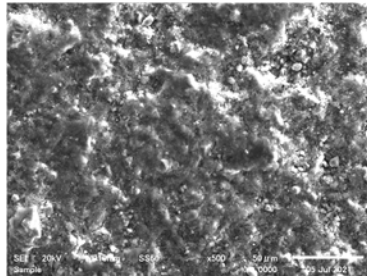
試験結果

- 炭酸水注入後, 透水係数が低下傾向を示している.
- 炭酸水中の炭酸イオンが周辺環境中に存在する陽イオンと反応することで鉱物析出が生じ, 周辺岩盤のき裂・空隙を充填している可能性がある.
- イオンクロマトグラフィーを用いて同じ深度の地下水中のイオン濃度を測定したところ, カルシウムイオン (濃度 22 mg/L), マグネシウムイオン (濃度 51 mg/L) が確認された.

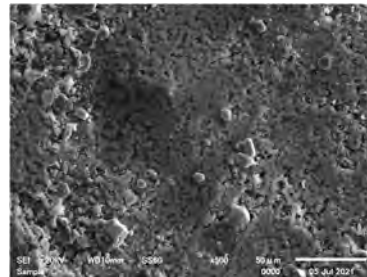
16

SEM-EDS 分析

- SEM（走査型電子顕微鏡）で撮影した二次電子像の比較。
- 炭酸水注入実験前後で**表面の形状に変化**があった。
↑ **析出鉱物によって被膜が形成**されている。



炭酸水注入前の泥岩試料

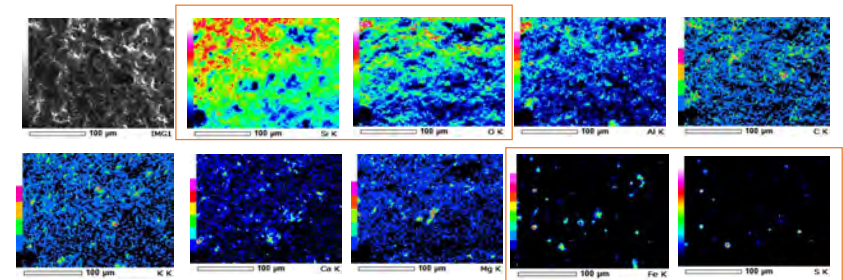


炭酸水注入後の泥岩試料

17

SEM-EDS 分析

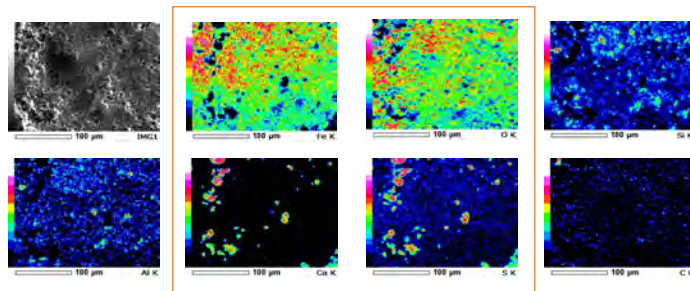
- 炭酸水注入前の泥岩試料（500倍）の元素マッピング結果。
- SiやO, Alなどの元素が満遍なく分布する（石英、クリストバライト、斜長石類など）。FeやSの分布は局所的であり、黄鉄鉱（ FeS_2 ）と考えられる。



18

SEM-EDS 分析

- 炭酸水注入後の泥岩試料（500倍）の元素マッピング結果。
- 全体的に**Fe, O**で主に構成される**鉱物の被膜**が形成されている。また、**Ca, S**で構成される**鉱物**がまばらに存在する。



19

まとめ

- 幌延深地層研究センターの深度350m調査坑道にて原位置透水試験を行い、**炭酸水注入による岩盤の透水性への影響**を調べた。
- 岩盤の初期の透水係数は 2.2×10^{-7} m/s程度と求められた。周辺岩盤にき裂がよく発達し、水みちとなっていると考えられる。
- 炭酸水の注入後に**透水係数が低下**した。
- 炭酸水注入により析出した**鉱物が岩盤内のき裂や空隙を充填**し、**透水係数の低下が生じた**と考えられる。

20

最近の研究結果と今後の展望

- カルシウムリッチな水中では、蒸留水中よりもき裂進展速度が低下する
 - カルシウム化合物の析出によるき裂進展の抑制
- セメント系材料を炭酸水と同時に注入すると、岩盤の透水係数がより顕著に低下する。
 - カルシウム化合物の析出による遮蔽性能の上昇

カルシウム化合物（特に炭酸カルシウム）が析出しやすい環境下では、岩盤の破壊抑制や遮蔽性能上昇が期待でき、岩盤の長期安定性確保に好都合である。