

奨励金No.1487

# セメント系材料と炭酸水の注入による鉱物析出促進と 安全で安心な地下岩盤利用・環境保全技術の創出

奈良 禎太  
京都大学 准教授

## Technique for environmental protection and safe usage of underground rock mass by injection of carbonated water and cementitious material

Yoshitaka Nara,  
Kyoto University, Associate Professor



本研究の目的は、地球温暖化ガスである二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）から炭酸水を用意し、セメント系材料から作成する粉末と共に地下に注入することで、CO<sub>2</sub>を炭酸塩鉱物の形で大気中に排出させず地下岩盤に固定し、それを地下岩盤の長期安定性確保や安全なエネルギー資源開発に繋げ、さらに地球温暖化抑制の形で環境保全に役立つ技術を創出することである。特に、CO<sub>2</sub>を鉱物固定して岩盤内の亀裂や紀伊劇を充填することによって、透水係数がどのように変化するかを調べる。本研究の結果、炭酸水の注入量の増大とともに、岩盤の透水係数が低下し、遮蔽性能が向上することが示された。

It is important to decrease the emission of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) to air considering the problem related to the global warming. In this study, we consider a technique to decrease the emission of CO<sub>2</sub> by injecting the powders of a cementitious material and carbonated water in a rock mass. By this technique, CO<sub>2</sub> will be fixed in the underground by the precipitation of calcium carbonate, and then the emission of CO<sub>2</sub> decreases. Especially, the change of the permeability is investigated with increasing the injection of carbonated water. It is recognized that the permeability of the rock mass decreased with increasing the injection of carbonated water.

### 1. 研究内容

二酸化炭素地中貯留（CCS）や放射性廃棄物地層処分のような地下岩盤を用いたプロジェクトでは、岩盤の力学特性について知ることが重要である。特に透水特性は、岩盤内での流体の移動のしやすさを示すものであるため、資源開発や土木工学、地球科学等において極めて重要である。透水特性は、材料内の亀裂や空隙のネットワークに大きく影響を受け、亀裂が閉塞することで透水係数が低下する（Nara et al., 2011）。地下岩盤を利用するプロジェクトではセメント系材料が多く利用され、そこに二酸化炭素を供給すると炭酸カルシ

ウムの析出が起こり、透水係数が低下する可能性があるが、原位置岩盤においては十分に調べられていない。そこで、原位置岩盤において、炭酸水およびセメント系材料の粉末試料を注入が岩盤の透水係数に影響を及ぼすかどうかを調べた。

### 2. 試験方法

本研究では、地下岩盤において原位置試験を行い、岩盤の透水特性を調べることにした。そこで、日本原子力研究開発機構（JAEA）幌延深地層研究センターの深度 350 m 調査坑道にて試験・計測を行った。この現場は珪質泥岩によって構成されて

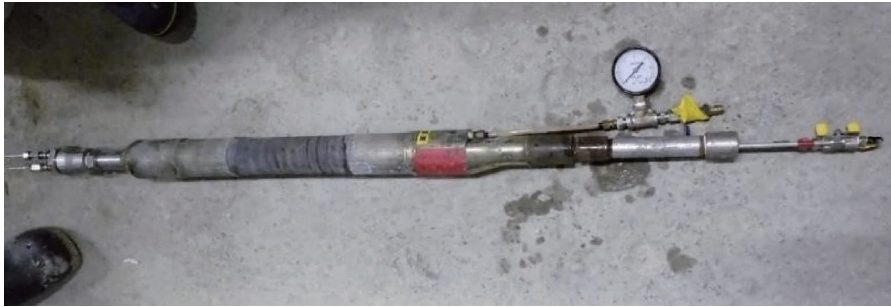


図1 水を岩盤内に注入するための装置

いる。なお、本研究で行った透水試験は、図1のような水の注入装置を、図2のように坑道壁面に掘削した試験孔に設置し、一定流量で水を注入した際の圧力を測定することによって行った。測定時の水の流量は70 ml/minである。

本研究では、まず粉末試料100 gを岩盤に注入し、その後炭酸水を岩盤内に緩やかに注入し、その上で現場で得た淡水を一定流量で注入し、その際の水の注入圧力を測定することによって、透水係数を求めた。特に、炭酸水はおよそ20 ml/min程度で注入している。また、炭酸水の注入を適宜停止し、淡水を一定流量で注入することで透水係数を求めることを繰り返すことによって、炭酸水の注入量が増大するとともに透水係数がどのように変化するかを調べた。

岩盤に注入した粉末試料として、セメント系材

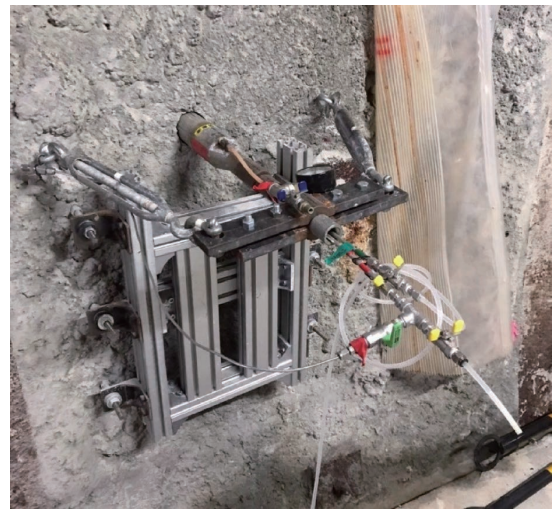
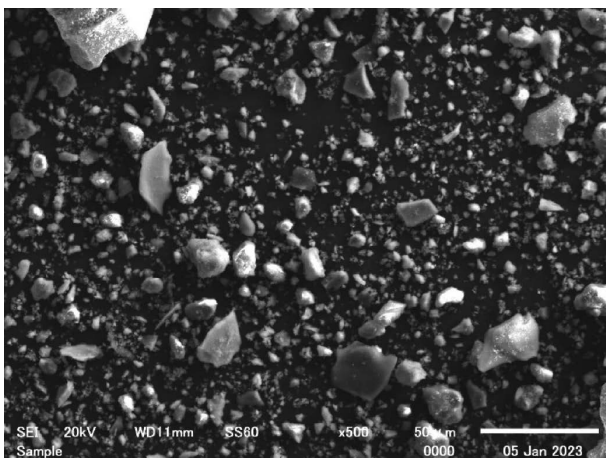
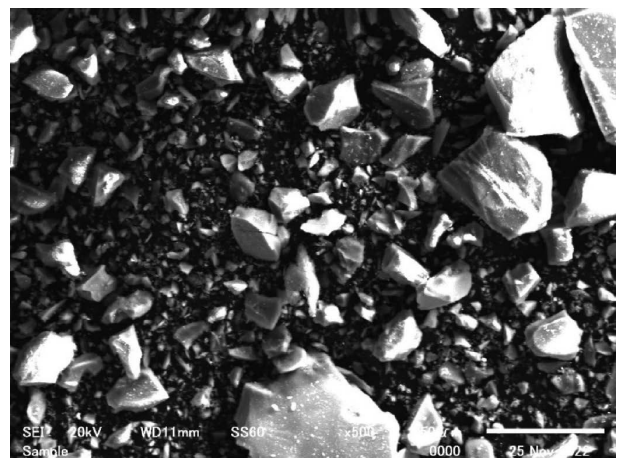


図2 現位置岩盤の坑道壁面に設置した水注入装置

料と岩石を混合したものを用いた。特に、セメント系材料として、実験や実務で使用しなくなったものから粉末を用意しており、本研究では、太



(a)



(b)

図3 粉末試料の顕微鏡写真。(a)：高強度高緻密コンクリート、(b)：Clashach 砂岩

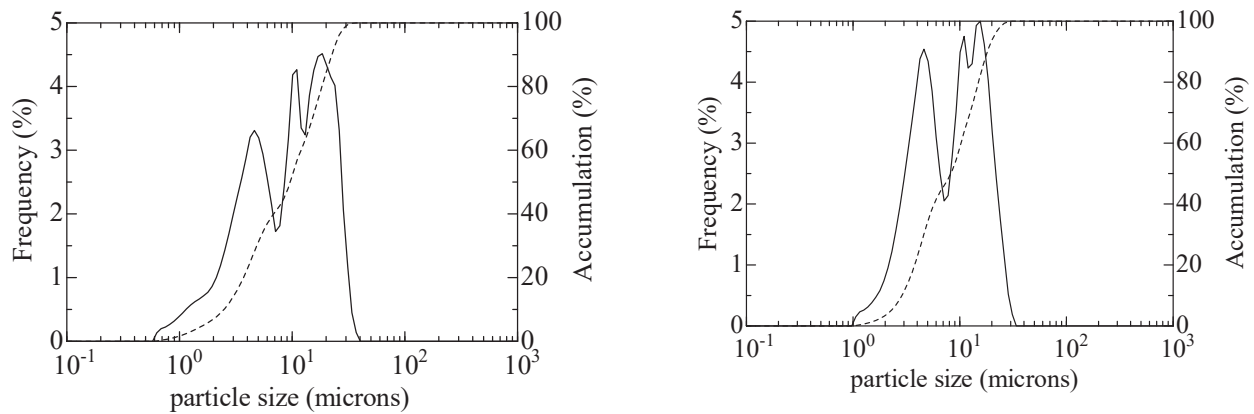


図4 粉末試料の粒度分布. 北海道大学工学部資源循環システムコースの協力により情報収集.  
(a) : 高強度高緻密コンクリート、(b) : Clashach 砂岩

平洋セメント株式会社製の高強度高緻密コンクリート (High-strength and Ultra-low Permeability Concrete, HSULPC) を用いた (Nara et al., 2010)。さらに、石英の含入率が90%以上で粘土鉱物をほとんど含まない Clashach 砂岩 (奈良ら、2012) から粉末を用意して混合粉末を準備し、それぞれの材料から 50 g ずつ、合計 100 g の粉末試料を用意し、炭酸水とともに岩盤に注入し、透水試験を行った。図3に走査型電子顕微鏡で撮影した粉末試料の顕微鏡写真を、図4に粒度分布を示す。なお、粒度分布の情報は、レーザードップラー電気泳動法を用いて取得しており、実線は頻度を、破線は累計を示す。図4に示されているように、本研究では 50  $\mu\text{m}$  以下となるように粉末試料を準備した。また、粉末試料と一緒に注入した炭酸水は、 $\text{CO}_2$  濃度約 1.8 g/L、 $\text{pH}=4.0$  程度である。

### 3. 結果

図5に、一定流量 70 ml/min で岩盤に水を注入した際に得た水の注入圧の測定結果を示す。この図において、注水によって圧力が増大し、その後ほぼ一定の値となることが示される。このときを定常状態とし、ここでの圧力を透水係数の算出に用いた。しかし、本研究では、圧力計から試験孔までは約 6 m の距離があったため、管路摩擦による圧力損失があると考えられる。そこで、次

に示されている式を用いて、管路による圧力損失  $\Delta P$  [MPa] を計算し、得られた定常状態での圧力に補正をかけ、透水係数を算出することとした (原田、1959)。

$$\Delta P = \lambda \frac{1}{d} \frac{\rho_w u_m^2}{2} \quad (1)$$

今回、管路内の流れは十分にゆるやかであり、層流とみなせる。この場合、

$$\lambda = \frac{64}{R_e}, \quad (R_e = u_m d / \nu) \quad (2)$$

ただし、(1)(2)式中の  $\lambda$  は抗力係数、 $l$  は管路の長さ [m]、 $d$  は管路の内径 [m]、 $\rho_w$  は水の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、 $u_m$  は管路内の平均流速 [m/s]、 $R_e$  はレイノルズ数、 $\nu$  は水の動粘性係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] である。

定常状態における圧力に、上記の方法で補正をかけて算出し圧力の値を、Hvorslev の定常式 (Hvorslev, 1951) に代入することで、透水係数  $k$  を求めた。

$$k = \frac{Q}{2\pi L} \frac{\rho_w g}{P} \ln \left( \frac{2L}{D} \right) \quad (3)$$

ただし、(3)式中の  $Q$  は注水流量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]、 $L$  は試験区間長 [m]、 $D$  は試験孔直径 [m]、 $\rho_w$  は水の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、 $g$  は重力加速度 [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]、 $P$  は注水圧 [MPa] である。

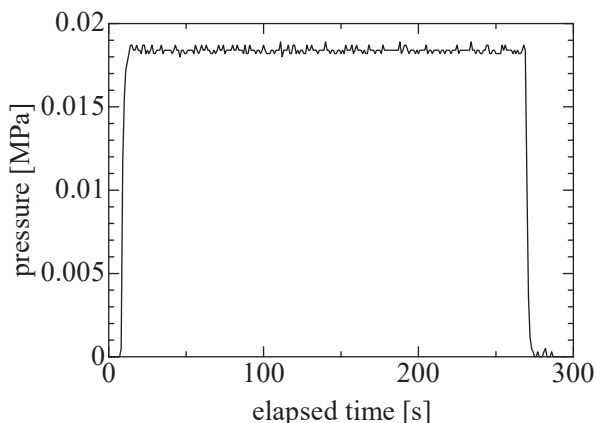


図5 透水試験時における水の注入圧の時間変化の一例

図6に、岩盤内に炭酸水と粉末試料を注入した際の透水係数の測定結果を示す。この図において、横軸は粉末を注入した後の炭酸水注入量である。図6より、炭酸水の注入量が多くなる場合、岩盤の透水係数が低下する傾向が示されている。これは、粉末試料が岩盤内の亀裂や空隙をじゅうてんすることや、水中の炭酸イオンとセメント系材料から供給されるカルシウムイオンが反応して炭酸カルシウムが沈殿し、亀裂や空隙を充填することで、流路が閉塞したため、透水係数の低下がもたらされたと考えられる。

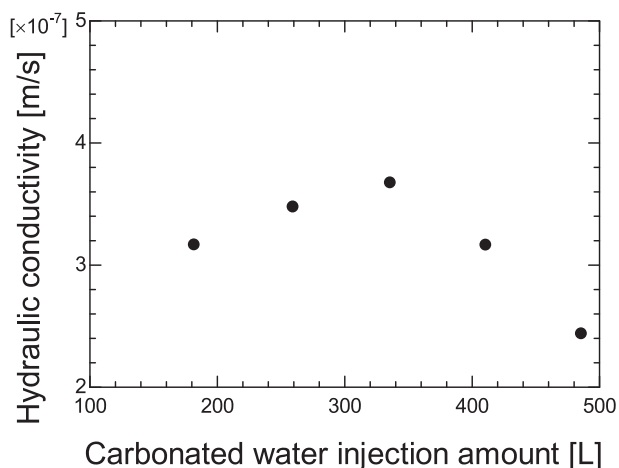


図6 炭酸水注入に伴う現位置岩盤での透水係数の変化

#### 4. まとめ

本研究の試験より、セメント系材料の粉末と炭酸水を注入することによって、岩盤の透水係数が

低下することが示された。これは、カルシウムイオンの供給源となる材料が岩盤内に存在し、そこに二酸化炭素を注入することによって、二酸化炭素を放出させずに地下に固定でき、地球温暖化抑制に貢献できることを示唆するものである。また、岩盤内の亀裂や空隙の充填により透水係数の低下が現れることから、放射性廃棄物処分のような岩盤の遮蔽性能が求められる工学プロジェクトに貢献できることも示唆される。さらに、亀裂や空隙の充填は材料の強度の回復や向上につながることから、地下構造物周辺の岩盤の長期安定性の確保にも貢献できると考えられる。

今後は、本研究で得た透水係数の低下の程度をさらに向上させられるような機構を見出し、その技術を創出するようにできればと考えている。また、環境に与える負荷がほとんどない形での岩盤内への粉末と炭酸水注入技術を見出したいと考えている。特に、カルシウムイオンの供給源を、人工材料であるセメント系材料ではなく、天然の材料である岩石を用いること、特に、カルシウムを多く含む炭酸塩岩石（石灰石や大理石）を用いる形で同様の効果を得られるような機構を見出したいと考えている。

#### 5. 引用文献

- 原田幸夫 (1959)、流体の力学、槇書店。  
 M.J. Hvorslev, M. J. (1951). *Water ways experiment station*, Corps of engineers, U.S. Army Bulletin 36, 50 p.  
 Y. Nara, M. Takada, D. Mori, H. Owada, T. Yoneda and K. Kaneko (2010). *Int. J. Fract.*, Vol. 164, pp. 57-71.  
 Y. Nara, P. G. Meredith, T. Yoneda, and K. Kaneko (2011). *Tectonophysics*, Vol. 503, pp. 52-59.  
 奈良禎太、中林亮、米田哲朗、金子勝比古、P.G. Meredith (2012). *材料*, Vol. 61, pp. 214-221.