

地熱熱水還元時の地層の透水性低下に関する実験的考察

九州大学 工学部 池田典男 畑中耕一郎 神野健二
生産科学研究所 糸井龍一 前川宏明
理学部 横山拓史 九州電力㈱ 清水 展

1. まえがき: 地熱発電で使用された熱水は、還元井を通して地下へ還元される。この際、熱水中に多量に含まれているシリカの付着により、還元井周辺の地層の透水能力が、徐々に低下している。著者等は、これまでシリカの付着過程を明らかにするために九州電力㈱大岳地熱発電所より排出される熱水を用いて室内実験を行ってきたが、今回は、未変質の岩砕を用いた。本報では、実験及び数値計算によって得られた結果をもとに充填材の相違による付着過程の相違を示し、考察を加えたのでここに報告する。

2. 実験装置及び実験手順:

(2.1) 実験装置: 実験は、図-1に示すような定水位試験装置を用いて行った。セル及び熱水供給塔には、放熱を防ぐための保温材を巻き付けた。また、スケール付着は上部に集中すると考え、付着による差圧変化を詳しく読み取るために、充填層上部ではマノメータを密に配置した。さらに、充填層の流入口及び流出口での熱水温度を測定するために、充填層の上下に2本の温度センサを設置した。実験中は、流入口、流出口の熱水を採取して化学成分の分析を行っている。

(2.2) 実験手順: セルに水を飽和した状態で充填材であるアルミナビーズ(粒径2.14mm、比重2.72)、岩砕(粒径2.03mm、比重3.62)を別々に詰めて充填層を作成し、これらを実験装置に取り付ける。ポンプで充填層に温水を循環させ、充填層内の温度を熱水と同じ温度に保ち、その後、バルブを切り替え、熱水を流入させて通水を開始する。実験開始後、マノメータの読みが落ち着いた時点で、各マノメータの値を読み取り、同時に流出口からの流量を測定した。通水停止後、充填層を取りはずし分解して、所定の位置の充填材を採取し、抑留量を測定する。

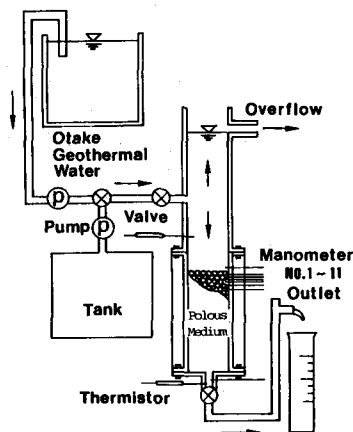


図-1 実験装置

3. 基礎式: 浸透層の流れを、ダルシー則 $U = -K \partial \phi / \partial x$ が成立すると仮定する。また、流れは非圧縮性と仮定する。ここに、 U : 断面平均流速 (cm/sec)、 ϕ : 速度ポテンシャル (cm)、 K : 透水係数 (cm/sec)

熱水の化学分析の結果から、ろ材表面ではモノマーシリカが単独で反応して吸着するのではなく、アルミニウムが重要な役割を果たしていることがわかっている。そこで、シリカ濃度及びアルミニウム濃度の連続式を次のようにおいた。

$$u \partial C_s(x, t) / \partial x = -\beta_1 C_s(x, t) C_a(x, t) (1 + \beta_2 Q_s(x, t)) \quad (1)$$

$$u \partial C_a(x, t) / \partial x = -\beta_3 C_s(x, t) C_a(x, t) \quad (2)$$

ここに、 C_s : モノマーシリカ濃度 (mg/l)、 C_a : アルミニウム濃度 (mg/l)、 u : 空隙内の実質流速 (cm/sec)

Q_s : シリカ抑留量 (ろ材1g当りのシリカのグラム数; g/g)、 β_1 、 β_2 、 β_3 : 吸着パラメータ

また、抑留量の時間的変化、空隙率の変化は、それぞれ、

$$\{ (1 - \epsilon_0) \sigma_m \rho_w / \epsilon(x, t) \} \partial Q_s(x, t) / \partial t = \beta_1 C_s(x, t) C_a(x, t) (1 + \beta_2 Q_s(x, t)) \quad (3)$$

$$\epsilon(x, t) = \epsilon_0 - \{ \sigma_m (1 - \epsilon_0) / \sigma_s (1 - f\sigma) \} Q_s(x, t) \quad (4)$$

である。ここに、 ϵ : 空隙率、 ϵ_0 : 初期空隙率、 $f\sigma$: 2次空隙率、 σ_s : シリカの比重、 σ_m : ろ材の比重、

ρ_w : 水の密度 (g/cm³)

透水係数 $K/K_0(x, t)$ と抑留量との関係は、充填材の種類に関係なく次のKozeny-Stein式で与えられることにする。

$$K/K_0 = \{ \epsilon_0 - (1 - \epsilon_0) \sigma_m Q_s / \sigma_s (1 - f\sigma) \}^3 / \epsilon_0^3 \{ 1 + \sigma_m Q_s / \sigma_s (1 - f\sigma) \}^2 \times \\ \{ \{ \sigma_m Q_s / 3 \sigma_s (1 - f\sigma) + 1/4 \}^3 + \sigma_m Q_s / 3 \sigma_s (1 - f\sigma) + 1/2 \} \quad (5)$$

4. 数値計算: 図-2、3は、それぞれビーズと岩砕の透水係数と抑留量との関係をプロットしたものであり、実線は2次空隙率を種々変えた場合のKozeny-Stein式の計算値である。これより、数値計算には $f\sigma$ としてビーズの場合には0.89、岩砕の場合には0.95を用いた。また、式(1)、(2)、(3)における未知パラメータ β_1 、 β_2 、 β_3 は試行

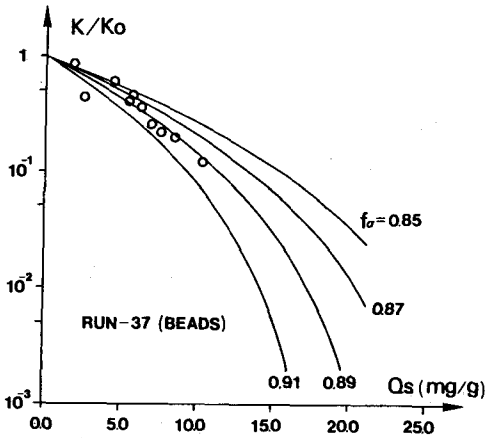


図-2 抑留量と透水係数の関係

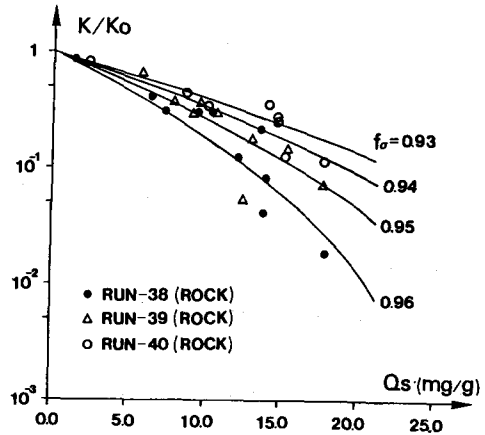


図-3 抑留量と透水係数の関係

錯誤的に変化させた。なお、充填層内でのシリカとアルミニウムの吸着状態は同じであると仮定し $\beta_1 = \beta_2$ とした。この結果、パラメータ β_1 、 β_2 がビーズの場合には、 $\beta_1 = 120 (\text{kl/sec} \cdot \text{mg})$ 、 $\beta_2 = 810$ が、また、岩砕の場合には $\beta_1 = 220 (\text{kl/sec} \cdot \text{mg})$ 、 $\beta_2 = -8$ のときが流量の実験データと比較よく一致した。

5. 実験結果及び数値計算結果: 図-2、3に示すように岩砕を用いた場合の方がビーズの場合より2次空隙率が大きいようであるが、いずれの場合もKozeny-Stein式でほぼ整理される。実験初期における流量の減少速度は岩砕を使用した場合、ビーズに比べてやや大きい。しかし、ある段階に達すると、流量の減少状況は、いずれの充填材の場合でも同様の傾向を示す。岩砕に対するシリカの付着機構は、表面積、形状、その他化学的性質等の条件に依存すると考えられるが、初期の段階においては岩砕の方が付着量が多いようである。図-5、6は、抑留量分布の経時変化、図-7、8は透水係数分布の経時変化を表している。これらの結果から、シリカは充填層上部に集中して付着しており、ビーズよりも岩砕のほうが付着量が多いことがわかる。

6. むすび: 今回の実験で充填材の違いによりシリカの付着機構が異なることが示唆された。今後、実験回数を増やし、岩砕に対するシリカの付着機構を解明し、実際の地層への適用を目指したい。

謝辞: 本研究を行うにあたり、九州大学工学部上田年比古教授、生産科学研究所福田道博助教授、九州電力(株)火力研究所の方々、並びに新エネルギー開発機構(NEDO)の方々に有益な御助言、御助力を頂きました。ここに記して感謝いたします。

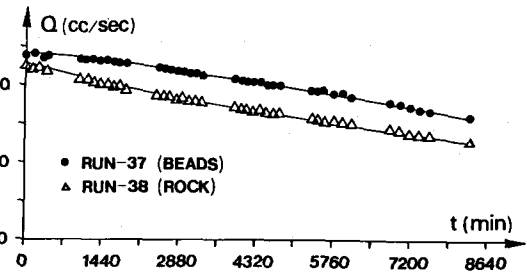


図-4 流量の経時変化

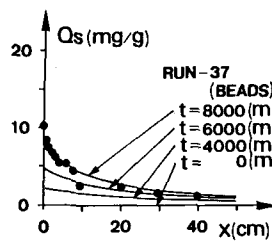


図-5 抑留量分布の経時変化

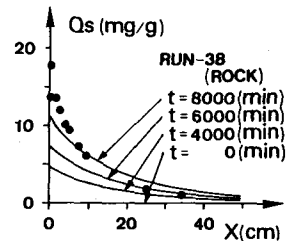


図-6 抑留量分布の経時変化

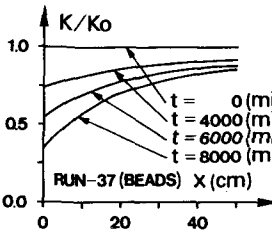


図-7 透水係数分布の経時変化

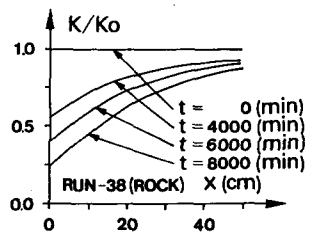


図-8 透水係数分布の経時変化