

低温熱水還元時のスケール付着機構の研究

九州大学工学部 正員 神野健二 学生員〇 野崎昭三 学生員 畑中耕一郎

理学部 横山拓史 生産科学研究所 糸井龍一

前川宏明 龍田清丈 九州電力㈱ 清水展

1.はじめに:地熱発電において、発電に供する蒸気を分離したのち排出される大量の熱水を地下に還元する際に、熱水中のシリカが地表のパイプラインのみならず地熱貯留層にまで付着し地層の透水性を低下させ、その結果還元井の還元能力を経時的に低下させている。このようにシリカの付着は発電所の維持、運営にあたって重要な問題となっている。本報は地熱貯留層内におけるシリカの付着機構の解明を目的として、地熱発電所から排出される熱水を用いて実験を行ない物理的、化学的に検討を加え解析を行なったものである。

2.実験:実験は図-1に示す装置を用い、充填材には粒径2mmのアルミナビーズを用いた。充填層は装置本体から取りはずして解体できるようになっており11個のマノメータ用の孔をもつ。実験条件はマノメータNo.1とNo.11の水頭差(ΔH)を変えることによって決定した。実験手順は①熱水とほぼ同温度に保った充填層を本体に取り付け熱水を流入させる。②マノメータの読みが落ち着いた時点で水頭(ϕ)、流量(Q)の測定を始める。③通水停止後、充填層を取りはずし解体して所定の位置におけるビーズを採取し付着したシリカスケールの重量を測定する。

3.シリカスケールの生成機構:実験に用いた熱水に含まれるケイ酸はほとんどモノマーであり、また充填層内でケイ酸の重合は起こらないので実験において大きなケイ酸ポリマーはスケール生成に関与していない。また通水後のダイマ-濃度が通水前とほとんど変化しないことからスケール生成は大部分モノマーのみが関与する反応であると結論できる。

充填層内で生成したシリカスケールは水を除くと殆ど SiO_2 であるが、種々の微量元素も含まれている。

表-1にシリカスケール中への微量元素の分配比の一

金属	分配比
Al	9.82
Fe	19.8
Mg	0.44
Ca	2.52×10^{-2}
Li	9.19×10^{-4}
Na	17.77×10^{-4}
K	10.10×10^{-3}

$$\text{分配比} = \frac{\text{熱水中の (Me/Si)}}{\text{スケール中の (Me/Si)}} = \frac{\text{金属の原子数}}{\text{ケイ素の原子数}}$$

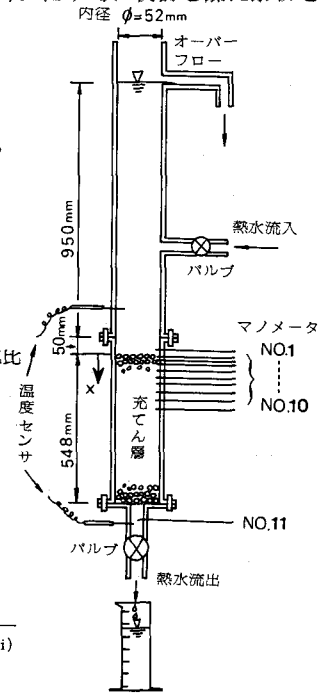


図-1 実験装置

例を示す。これによるとアルミニウムや鉄がスケール中に著しく濃縮されることから、それらがスケール生成に重要な役割を果たすことが予想される。そこでスケール生成へのアルミニウムの影響をさらに明確にする目的で、地熱熱水中にアルミニウムを注入しその濃

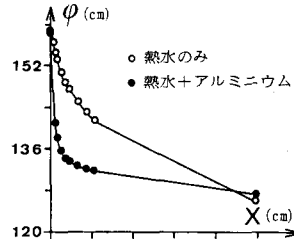


図-2 水頭分布の経時変化

度を0.5ppm増加させて、注入しない場合(0.3ppm)と比較した。図-2、

図-3はそれぞれ $t=4735(\text{min})$ における水頭分布と流量の経時変化で

ある。これよりアルミニウム濃度が高い方がスケール生成が速いことがわかる。従って、自然熱水中のアルミニウムが固相表面に沈澱してケイ酸の吸着サイトを与えてケイ酸の沈澱の速さを増加させるものと考えられる。また沈澱する単量体ケイ酸は熱水のpHを考慮すると $\text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^-$ であろう。

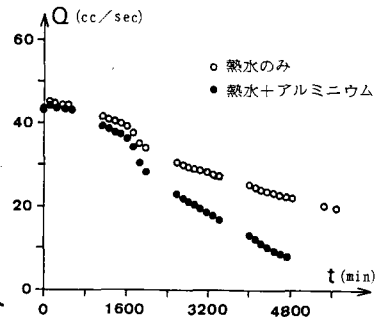


図-3 流量の経時変化

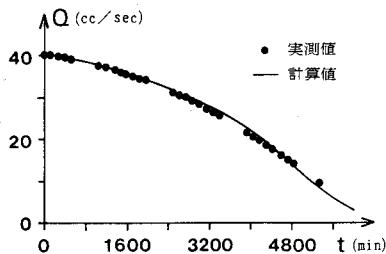


図-4 流量の経時変化

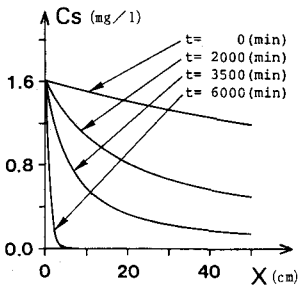


図-6 濃度分布の経時変化

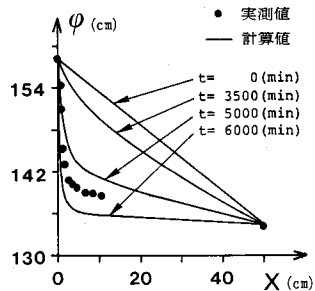


図-5 水頭分布の経時変化

4. 数値シミュレーション: 実験でのレイノルズ数(Re)と抵抗係数(CD)の関係を面対数紙上で最小二乗法を用いて表わすと、 $C_D = 3939 \times Re^{-0.78}$ なる直線が得られた。これよりReとCDは互いに反比例の関係ではなくしたがって本実験がダルシーの法則が成立しない範囲で行なわれたことがわかる。運動方程式はCD-Re数の関係から

$$v = k(-\partial \phi / \partial x)^{0.991} \quad \text{--- (1)}$$

で表わされる。連続の式は

$$\partial v / \partial x = 0 \quad \text{--- (2)}$$

である。また、シリカ濃度の連続式およびシリカの抑留式を次のように仮定する;

$$u \partial Cs / \partial x = -\beta_1 Cs(1 + \beta_2 Qs) - \beta_3 CsCa(1 + \beta_4 Qs) \quad \text{--- (3)}$$

$$\{(1 - \epsilon_0) \rho_m / \epsilon\} \partial Qs / \partial t = \beta_1 Cs(1 + \beta_2 Qs) + \beta_3 CsCa(1 + \beta_4 Qs) \quad \text{--- (4)}$$

ここで、u: 断面平均流速(cm/s)、Cs: シリカ濃度(mg/l)、Ca: アルミニウム濃度(mg/l)、Qs: シリカ抑留量、 ρ_m : 充填材の比重(g/cm³)、 ϵ : 空隙率、 ϵ_0 : 初期空隙率、 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 : 実験定数。式(1)~(4)と抑留量と空隙率の関係式、透水係数と抑留量の関係式(Kozeny-Stein式)を用い数値計算を行なった。本来ならばアルミニウムについても式(3)と同様に連続の式を考えて逐次計算してゆくことが必要であるが、シリカに比べて小さいことなどを考慮してここでは一応シリカのみを考慮した。

5. 考察: ここではシリカの抑留に際して、熱水中のシリカが単独で反応し沈澱を生ずる割合よりも、アルミニウムが大きな影響を及ぼす割合のほうが大きいと考え、式(4)、(5)において右辺第一項は無視した。定数 β_3 、 β_4 を試行錯誤的に変化させて種々計算を行った。 $\beta_3 = 1.0 \times 10^5$ (l/s·mg)、 $\beta_4 = 1600$ の場合の流量の計算例を図-4に示す。同図に見られるように計算値は実測値にほぼ一致している。図-5~図-8はその時における、水頭分布、濃度分布、抑留量の分布、透水係数の分布の経時変化である。それぞれにおいて時間毎の計算値とともに、抑留量の実験終了時(t=5350min)の実測値をプロットしている。充填層上部にシリカが集中的に抑留され、これに対応して水頭分布、透水係数の分布が急激に変化を起こしている様子がうかがえ、実測値とも比較的一致している。

6. むすび: 以上のことから数値計算を進めていく上での手がかりがつかめたといえよう。今後、より深い化学的根拠をふまえた上で濃度式、抑留式を検討し、シリカの抑留を表わす式体系を確立したい。

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)火力研究室の方々、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。

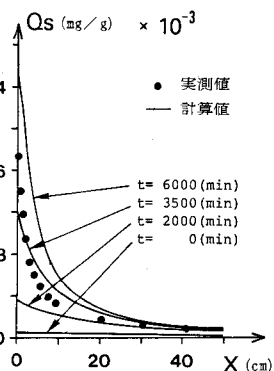


図-7 抑留量分布の経時変化

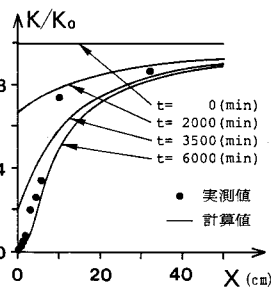


図-8 透水係数分布の経時変化