

1.はじめに:地熱発電では、使用済みの熱水は地下に還元されるが、この際に熱水中の溶存シリカが地表のパイプラインのみならず地下の熱水通路にまで付着し地層の透水性を低下させている。その結果、熱水還元井の還元能力が低下し、発電所の維持、運営にあたって重要な問題となっている。本研究は、シリカの付着機構を表わす数学モデルを仮定し数値計算を行ない、実験データとの比較、検討を行なったものである。

2.実験:実験は図-1に示す装置を用いて行ない、粒径2mmのアルミナビーズを充填材として使用した。充填層は装置本体から取りはずして解体できるようにしており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から水頭(ϕ)、流量(Q)の測定を行ない、同時に化学分析の為に流入熱水、流出熱水を採取する。③通水停止後、充填層を取りはずして所定の位置におけるビーズを採取しビーズに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ー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いえる。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例を示す。これによるとAlやFeがスケール中に著しく濃縮されることがわかる。しかし、熱水中の(Fe/Si)は(Al/Si)の1/10ほどなのでAlがスケール生成に重要な役割を果たすと予想される。そこでスケール生成へのAlの影響をさらに明確にする目的で、熱水中にAlを注入しない場合(Al濃度:0.3ppm)と注入した場合(Al濃度:0.8ppm)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変化を表わしている。これよりAl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、熱水中のAl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、また沈澱する単量体ケイ酸は熱水のpHを考慮すると $\text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^-$ であると考えられる。

表-1 スケール中への微量元素の分配比

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}

分配比 = $\frac{\text{スケール中の (Me/Si)}}{\text{熱水中の (Me/Si)}}$

$$\left(\frac{\text{Me}}{\text{Si}}\right) = \frac{\text{金属の原子数}}{\text{ケイ素の原子数}}$$

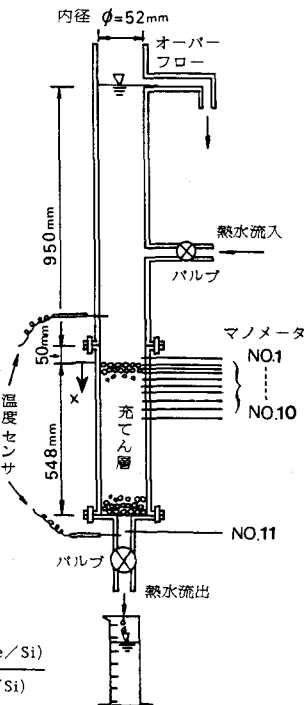


図-1 実験装置

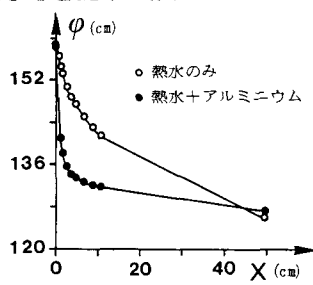
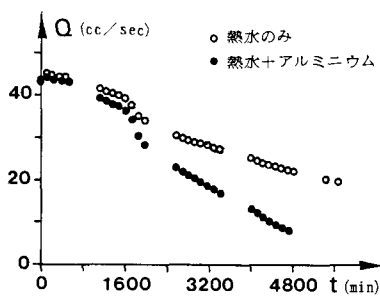
図-2 水頭分布 ($t=4735\text{min}$) の比較

図-3 流量変化の比較

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変化を表わしている。これよりAl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、熱水中のAl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、また沈澱する単量体ケイ酸は熱水のpHを考慮すると $\text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^-$ であると考えられる。

4.解析:実験でのレイノルズ数(Re)と抵抗係数(Co)の関係は、 $Co=1284 \times Re^{0.891}$ で表わされる。これより Re と Co 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。Co-Re数の関係から運動方程式は、

$$v=k(-\partial \phi / \partial x)^{0.902} \quad \text{--- (1)}$$

で表わされる。連続の式は、

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

である。シリカ濃度の連続式、アルミニウム濃度の連続式およびシリカの抑留式は、熱水中のシリカは単独で反応し沈澱を生ずる割合よりもアルミニウムが影響を及ぼして沈澱を生ずる割合のほうが大きいと考え、次のように仮定した。;

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

$$(v/\epsilon) \partial Ca / \partial x = -\beta_3 CsCa \quad \text{--- (4)}$$

$$\{(1 - \epsilon_0) \rho m / \epsilon\} \partial Qs / \partial t = \beta_1 CsCa(1 + \beta_2 Qs) \quad \text{--- (5)}$$

ここで、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、 ρm :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 :定数。数値計算は式(1)、(2)、(3)、(5)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)を用いて行なった。本来ならば式(4)も加えて逐次

計算してゆくことが必要であるが、計算モデルの妥当性をチェックするためここではアルミニウムの濃度分布を指数関数的に減少すると仮定し流入口、流出口の濃度を用いて与え、濃度に関しては式(3)のみを計算した。

5.考察:定数 β_1 、 β_2 を試行錯誤的に変化させて種々計算を行った。図-4は $\beta_2=0$ とし β_1 を種々変えた場合の計算結果を示している。又、図-5は $\beta_1=80$ (kl/s·mg)とし β_2 を種々変えた時の計算結果である。これより、 $\beta_1=80$ (kl/s·mg)、 $\beta_2=3200$ の場合に計算値は実測値にほぼ一致している。図-6~図-9はその場合における、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、シリカの生成におけるアルミニウムの影響は大きいことがわかり、それを考慮して仮定した数学モデルにより計算を進めていくことができるといえよう。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。

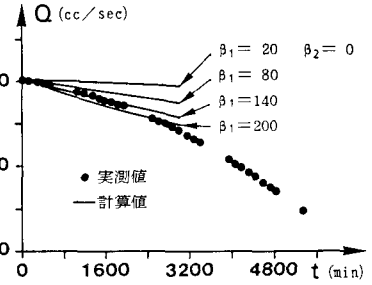


図-4 β_1 の推定

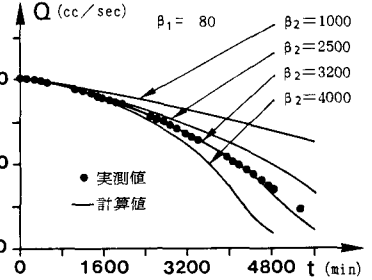


図-5 β_2 の推定

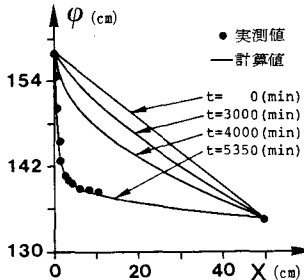


図-6 水頭分布の経時変化

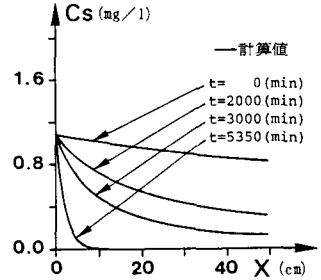


図-7 濃度分布の経時変化

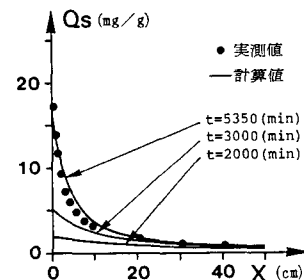


図-8 抑留量分布の経時変化

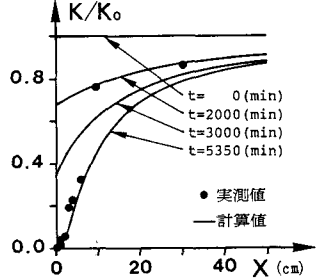


図-9 透水係数分布の経時変化