

地熱井、配管中のスケール予測シミュレーションの研究

三ヶ田 均*・武川 順一**・亀井 志織***¹

1. 研究の目的

岩石中の亀裂を熱水が流れる際には、亀裂壁面に付着物（スケール）が発生し、やがて水みちを閉塞させることが知られている。この現象は、資源工学の分野において重要である。例えば、地熱発電においては、生産する水蒸気に含まれる溶存シリカが、スケールとして熱水輸送管、生産井あるいは還元井を閉塞させる原因となり、スケール除去などの対策が必要である。地熱発電は、再生可能エネルギーのうち天候に左右されにくく安定的に発電可能なベースロード電源として今後更なる開発が期待されており、スケール障害対策は地熱発電システムの最重要課題となっている。地熱発電システムで観察されるスケールは、アモルファスシリカ（Amorphous silica）を主体とするシリカスケール、CaCO₃（カルサイト）やCaSO₄（硬石膏）といったカルシウム系スケールの他、Fe・Al・Zn・Mnなどの金属硫化物・酸化物などであり、その成分は地熱地域における流体の性状・温度・圧力条件及び熱水組成により大きく異なる。その中でも、最も多量に析出し、洗浄除去や付着防止が最も困難であるとされているのがシリカスケールであり、このシリカスケール障害の解決が最も重要な課題とされている（森・安田, 2004; Ocampo-Diaz et al., 2005）。これらスケール対策として抑制剤の注入や酸などを用いた pH 調整などが行われている。

化学反応に基づいたシリカスケール析出プロセスを考慮する場合、析出量は温度によって大きく変化することが考えられるが、析出量が熱水温度に依存しなかったとの報告もなされている（川原他, 2013）。さらに、いくつかの研究においてはシリカスケール析出における流速の不均質性の影響が報告されている。Garibaldi (1980) は、実験装置において流速の低い領域で析出量が増加することを確認した。また、実際の地熱井においても継手部分などの流れの激む箇所において、析出量の増加が確認されている (Mercado et al., 1989)。これら流体の影響を考慮したスケールの析出シミュレーションもいくつか試みられている (Pott et al., 1996; Brown & Dunstall, 2000) もの未だモデル化手法は確立されておらず、Mercado et al. (1989) などでも観測されたような実際の地熱井でのスケール析出予測に関する詳細な検討が必要である。

2. 研究の方法

昨年度までの受託研究において、格子ボルツマン法を用い、反応速度論に基づく化学的な沈殿プロセスだけではなく、流速の影響を考慮した物理的な沈殿プロセスの重要性を数値的に評価した。今年度の研究では、粒径が 500 nm を下回る微粒子挙動に関し支配的となるブラウン運動の影響、そして壁面に付着した粒子の再離散を考慮し Mizushima et al. (2016) のモデルをさらに物理学的に完備された手法に昇華させた。また、pH の影響を取り込むため、様々な実験結果を物理プロセスに取り込めるよう配慮した。流体中のスケール因子は球形のコロイダル粒子として存在するとみなす。この粒子が管壁に到達するまでの挙動は、Mizushima et al. (2016) が提案した手法に基づき、粒子に働く力の和を持って運動すると想定し、結晶成長等の追跡に適用可能な流体シミュレーション手法である格子ボルツマン法を用いて、熱水配管におけるケーシング継ぎ目部分でシリカスケールが析出していく現象を記述した。

3. 得られた成果

本シミュレーションでの結果を図 1 に示す。壁面剪断流速が小さく、流れに激みが生じる領域で優先的にスケールが析出している。また、急拡部手前の壁面垂直方向の流れの影響により、横に張り出すようなスケール形状が認められる。さらに、配管内の流速が異なる場合において、スケールが配管の上方へ伸展する形状も再現されている。これらは Mercado et al., (1989) により報告された

*京都大学・教授, **同・助教, ***同・事務補佐員

特徴と一致する (図 2)。

シリカスケール析出の予測及び制御に関して、溶存シリカ粒子のブラウン運動および壁面に接触した粒子の再分散という力学的な現象を取り込むシミュレーションが現象の記述に有用であることを確認した。これにより、反応速度論による化学的手法を中心とした解析が行われてきたスケール成長のメカニズムを、物理的かつ定性的・定量的に評価することができた。

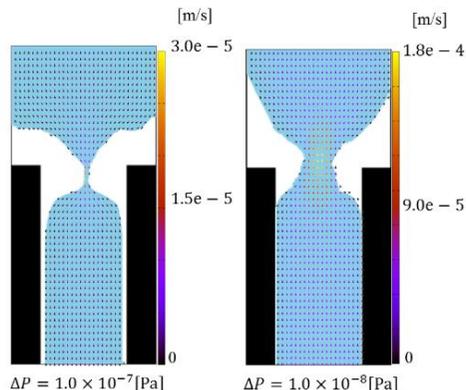


図 1 本研究のシミュレーション結果

4. 謝 辞

本研究は、地熱技術開発株式会社の委託研究として遂行された。関係各位に篤く御礼申し上げる。

発 表 論 文

Iwata, M., Mikada, H., Takekawa, J., Quantitative simulation of silica scale deposition from physical kinematics perspectives, 21st International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics (RAEG 2017), 20 May 2017, 4pp. doi: 10.3997/2352-8265.20140220

Iwata, M., Mikada, H., Takekawa, J., Kinematics of a Silica Particle in the Deposition to Piping of Geothermal Power Plant, 79th EAGE conference & exhibition 2017, 2017. doi:10.3997/2214-4609.201700535

参 考 文 献

- Garibaldi, F. (1980). The effect of some hydrodynamic parameters on silica deposition, Diploma Project 80.11, Geothermal Institute, University of Auckland.
- 川原義隆, 柴田浩晃, 久保田康幹. (2013). 地熱熱水利用バイナリー発電システムにおけるシリカスケール対策技術 (特集 創エネルギー技術: 発電プラントと新エネルギー), 富士電機技報= Fuji Electric journal, 86(2), 102-106.
- Mercado, M., Bermejo, F., Hurtado, R., Terrazas, B., & Hernandez, L. (1989). Scale incidence of production pipes of Cerro Prieto geothermal wells, *Geothermics*, 18 (1/2), 225-232.
- Mizushima, A., Mikada, H., & Takekawa, J. (2016). The role of physical and chemical processes of silica scale growth in geothermal wells, *Recent Advances in Exploration Geophysics (RAEG 2016)*. doi: 10.3997/2352-8265.20140209.
- 森英利, 安田啓司. (2004). 地熱エネルギー利用システムにおけるシリカスケール抑止技術の開発, 平成 14 年度-平成 15 年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))研究成果報告書.
- Ocampo-Díaz, J. D. D., Valdez-Salaz, B., Shorr, M., Saucedo, M., & Rosas-González, N. (2005). Review of corrosion and scaling problems in Cerro Prieto geothermal field over 31 years of commercial operations, *Proceedings of World Geothermal Congress, International Geothermal Association (IGA), Antalya, Turkey.*

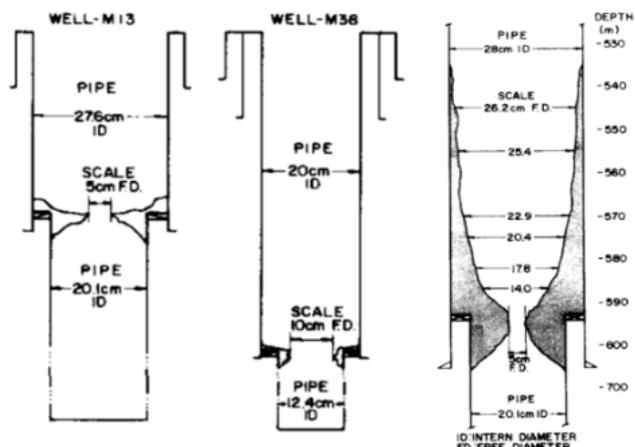


図 2 実測されたスケール形状 (Mercado *et al.*,1989)

