

2016A1683

BL19B2

温泉スケールの 3 次元微細構造の X 線 CT 観察および時間依存性 X-CT Observation on Three Dimensional Microstructure of Geothermal Scale and Its Time Dependency

木崎 彰久^a, 平野 伸夫^b, 中村 勤^c, 波津久 達也^d
Akihisa Kizaki^a, Nobuo Hirano^b, Tsutomu Nakamura^c, Tatsuya Hazuku^d

^a 秋田大学, ^b 東北大学, ^c (株)管通, ^d 東京海洋大学

^a Akita University, ^b Tohoku University, ^c Kantsu Co., Ltd.,

^d Tokyo University of Marine Science and Technology

バイナリー式温泉発電所の熱水輸送配管において、配管内に付着する温泉スケールへの対策が求められている。本研究では、温泉スケールを効率的に除去するための知見を得ることを目的として、温泉スケールの三次元構造についての X 線 CT 観察を実施した。実験観察の結果、温泉スケールの結晶は時間経過とともに析出が進行していることが示唆され、温泉スケールをより効率良く除去するためには、できる限り早期の段階で速やかに除去することが有利であると考えられた。

キーワード： Geothermal Scale, Geothermal Energy, X-CT

背景と研究目的：

再生可能エネルギーの導入拡大は、エネルギーセキュリティ、経済効率の向上ならびに気候変動抑制の観点から世界的な技術課題の一つである。再生可能エネルギーの中でも、新規掘削を伴わないバイナリー式温泉発電は、安定したベースロード電源としての期待が持たれており、産業基盤技術として積極的な技術開発が必要と考えられる[1, 2]。バイナリー式温泉発電所の熱水輸送配管において、配管内に付着する温泉スケールは流量低下の原因となりうるため、その対策が求められている。また、このようなスケール対策技術は温泉に限らず石油・天然ガス分野においても必要とされている[3]。本研究では、温泉スケールを効率的に除去するための知見を得ることを目的として、温泉スケールの三次元構造についての X 線 CT 観察を実施した。

温泉スケールは温泉熱水の流動を停止した後、時間経過とともに強度上昇が生ずることが経験的に知られている。しかしながら、その強度がどのように発現しているのかについては明らかではない。温泉スケールの強度は 3 次元的な微細構造に依存していると考えられ、X 線 CT 観察による温泉スケールの内部構造観察は、温泉スケールの強度発現メカニズムを探る上で有効な観察法と考えられる。

温泉スケールの強度増加は、スケール除去作業のコスト増加に直結している。したがって、温泉スケールの微細構造の経時変化を明らかにすることにより、温泉熱水の流動停止後におけるデスケールリング時期の最適化に寄与する判断材料を得ることができると考えられる。また、除去に適したデスケールリング法について、ミクロ視点からの裏付けデータが取得できることも期待される。

実験：

観察に使用した試料は、主成分がケイ酸マグネシウム(MgSiO₃)および炭酸カルシウム(CaCO₃)のシリカスケール(密度 2.0–2.7 g/cm³、固体角柱様状、5×5×10 mm 程度)である。X 線 CT 観察における実験方法としては、BL19B2 ビームラインを用いた。温泉スケール試料は、測定前日の朝に長崎県雲仙市小浜温泉の温泉配管から採取し(Fig. 1)、温泉水ごと保温容器に入れ 90°C 以上に保った状態で SPring-8 まで運搬して実験に供した。X 線 CT 撮影の測定条件は、エネルギーが 25 keV (波長 0.496 Å) である。検出器はビームモニター BM2 (f = 50 mm) とイメージングカメラ C4880-41S (f = 105 mm) を組み合わせ、カメラ距離を 100 mm とした。撮影画像におけるピクセルサイズは 2.97 μm/pixel であり、画素数は 4000×1560 pixel である。スキャンモードは、ステップスキャンおよび連続スキャンを用いた。ステップスキャンでは試料を 180° 回転する間に 0.5° 毎に露光時間 300 ms で、合計 361 枚の透過 X 線画像を測定した。連続スキャンでは同じ露光時間で 258 枚の

透過像を得た。

最初に温泉スケールを設置せずに容器に温泉水のみを入れた状態で測定を行い、容器ならびに水滴の影響について調べた。次に、温泉スケールの下部を水没させ、ステップスキャンにて気中部の温泉スケールの X 線イメージング測定を行った。ステップ動作時に温泉水が揺れ動くことによる画像の乱れが見られたため、以降の温泉水中の測定は連続スキャンにて実施した。試験条件の詳細は以下の通りである。まず熱水にスケールを半分水没させ、気中部を撮影した。測定は試料設置から 0、3、6、15、30、60 min 後においてそれぞれ実施し、各測定時間は約 3 min であった。続いて、湿乾状態において 0、3、6、2h 後の計 4 回の測定を行った。最後に、Fig.2 に示すように熱水中に浸漬させたスケールを 0、1、3、6、12、18、24 h 後の計 7 回の測定を行った。各試験条件は、温泉水の流れを停止した配管の中で、水面より上部にあり空気に曝されている温泉スケール、水面付近の温泉スケール、水没している温泉スケールを想定している。また、温泉スケールの除去作業の開始時間を考慮して、試料設置から複数の時間を設定して計測を行った。



Fig. 1 サンプル直後の配管スケール



Fig. 2 温泉水で満たした観察容器内の温泉スケール

結果および考察：

X 線イメージング実験(Fig. 3)の結果、各条件において Fig. 4 に示すような X 線画像が得られ、それらの画像を再構成することで X 線 CT 画像が得られた。温泉スケールを熱水に半分水没させた状態において気中部を撮影した結果を Fig. 5 に示す。以降の各撮影画像の一边の長さは、11.88 mm である。Fig. 5 (a) ~ (f)は、それぞれ、試料設置から 0、3、6、15、30、60 min 経過後において連続スキャンで撮影した画像である。得られた CT 画像からシリカスケールの内部にはスケール析出に伴う樹状の構造が存在していることが明らかになった。このことから、温泉スケールは時間経過とともに樹状にデンドライト成長が進行したと考えられる。また、樹状構造の隙間には空隙が発達していることも観察された。画像中には気泡も映り込んでいるが、気泡の位置が時間とともに変化していることが観察される。このことから、スケール間隙内の水が温度変化による対流によって流動していることが示唆される。また、図中の白矢印が指す箇所を観察すると時間の経過とともにスケールの析出が進み、やや結晶の太さが増しているようにも見受けられる。

Fig. 6 に湿乾状態で撮影した温泉スケールの析出過程の画像を示す。Fig. 6 (a) ~ (d)は、それぞれ 0、3、6、2h 経過後の計 4 回の測定結果である。Fig. 6 (a)の初期画像 (0h) を見ると結晶間隙に水分が多く分布していることが分かるが、時間とともに下部へ流動あるいは一部が蒸発したため、3 h 以降の画像 (Fig. 6 (b) ~ (d)) では間隙水はあまり見られない。このように水が流動あるいは蒸発した結果、樹状の結晶の乾燥が進み、初期画像 (0h) とそれ以外の画像の白矢印が指す部分を比較すると結晶がやや変形していることが見受けられた。3h 経過以降の結晶についてはそれほど大きな変化は見られない。

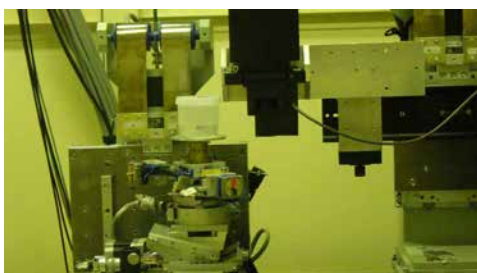


Fig. 3 X 線イメージング実験

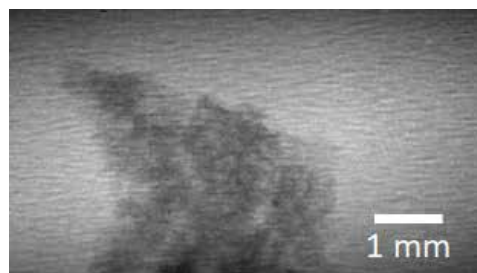


Fig. 4 X 線 CT 撮影画像

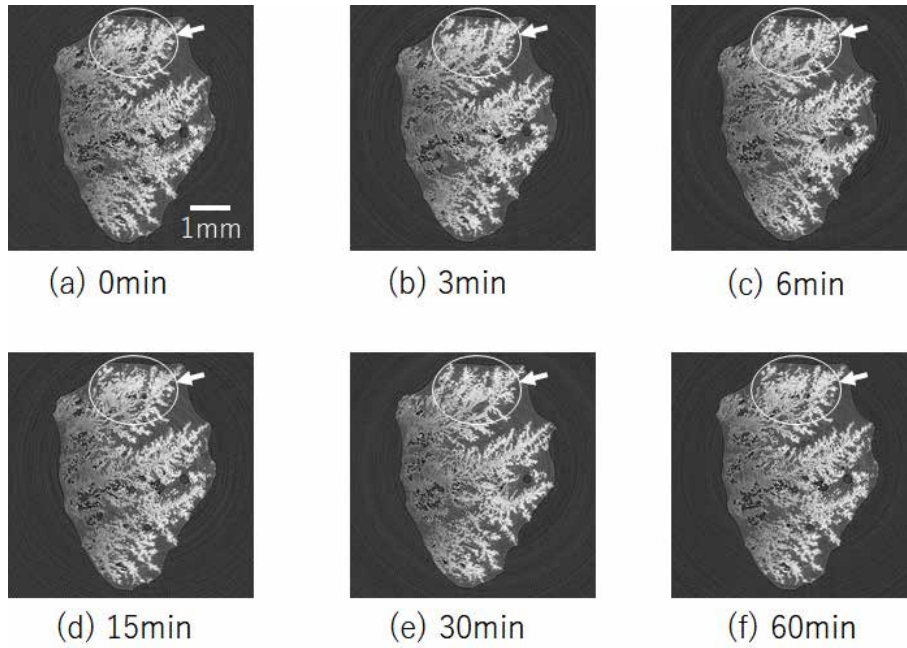


Fig. 5 温泉スケールの析出過程（半分水没させ気中部分を撮影）

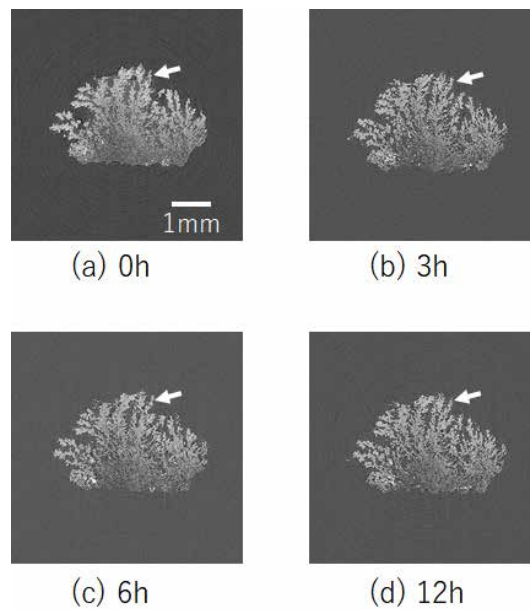


Fig. 6 温泉スケールの析出過程（湿乾状態で撮影）

Fig. 7 に水没状態で撮影した温泉スケールの析出過程の画像を示す。初期状態では熱水であるが、時間とともに冷却されている状態を撮影している。本条件は、温泉スケールの除去作業において源泉を停止し、温泉水が配管内に存在する状態で開放されている状態に近いと考えられる。Fig. 7 (a)~(f)は、それぞれ測定開始から0、1、3、6、18、24 h 経過後の計6回の測定結果である。図中の白矢印が指す箇所を観察すると既に述べた結果と同様に、時間経過とともにスケールの析出が進み、樹状結晶の太さが増しているように見受けられる。したがって、これらの観察より、温泉スケールは源泉停止後、いずれの条件においても時間とともに析出が進むことが分かった。なお、

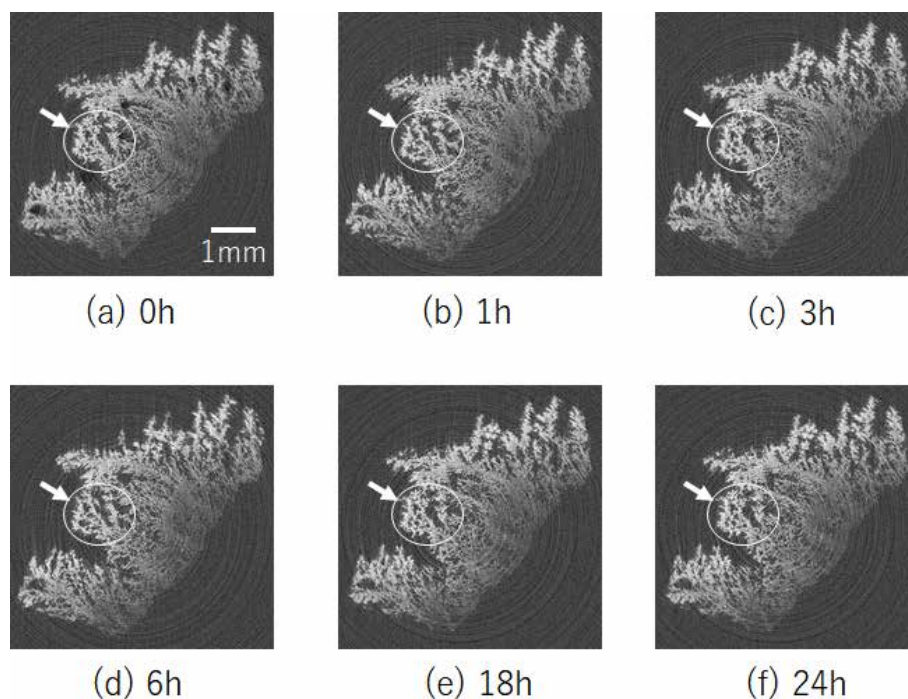


Fig. 7 温泉スケールの析出過程（水没状態）

今後より詳細な検討を行うためには、温泉スケールの密度変化の分析が必要と考えられる。スケールの析出が進行すると、スケール結晶がより太くなるため、スケールの強度も上昇することが推測される。このことは、時間経過とともに温泉スケールの除去難易度が高くなることを示唆している。したがって、温泉スケールをより効率良く除去するためには、源泉停止後できる限り早期の段階で速やかに除去することが有利であると考えられる。

まとめ：

本研究では、温泉スケールの効率的な除去方法を開発することを目的として、温泉スケールの強度に関する3次元的な微細構造について、X線CTを用いた微細観察を行った。実験観察の結果、温泉スケールの結晶は時間経過とともに析出が進行していることが示唆され、このことから温泉スケールをより効率良く除去するためには、源泉停止後できる限り早期の段階で速やかに除去することが有利であると考えられた。また、以上のことから、温泉スケールの内部構造観察は、温泉スケールの強度発現メカニズムや効率的な除去法を探る上で有効な観察法であると考えられる。

参考文献：

- [1] 村岡洋文, 温泉科学, **61**, 157 (2011).
- [2] 日本地熱学会 地熱発電と温泉との共生を検討する委員会, 報告書『地熱発電と温泉利用との共生を目指して』, (2010).
- [3] W. W. Frenier and M. Ziauddin, Formation, Removal, and Inhibition of Inorganic Scale in the Oilfield Environment, SPE (2008).