

2023年度成果報告会

地熱発電導入拡大研究開発／
地熱発電高度利用化技術開発／

発電設備利用率向上に向けたスケール

モニタリングとAI利活用に関する技術開発

2024年1月31日

発表者：森 康一郎
会社名：九電産業(株)

九電産業(株)



(国) 九州大学



九州電力(株)



問い合わせ先

九電産業株式会社 環境部

E-mail: koichiro_mori@kyudensangyo.co.jp

TEL: 092-671-6091

事業概要

1. 背景・目的

多くの地熱発電所では、スケールによる配管の閉塞や還元井の飲み込み量低下が発生



スケール抑制法はいくつかあるが、地域特性等によって効果が異なるため、完全な問題解決には至っていない。問題が顕在化したときには手遅れだが、スケール問題の短期的な評価が困難。

(数日程度の) 短期のスケールモニタリングから長期的なスケール生成を予測する技術を確立しよう！

2. 実施期間

開始 : 2021年 10月
終了 (予定) : 2026年 2月

3. 実施内容・最終目標

- ① 定量的スケールモニタリング法の確立
- ② 定量的スケールモニタリング法によるデータセットの収集
- ③ スケール生成予測を実現するAI利活用に関する研究開発
- ④ フィールドでの実証実験



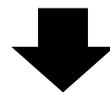
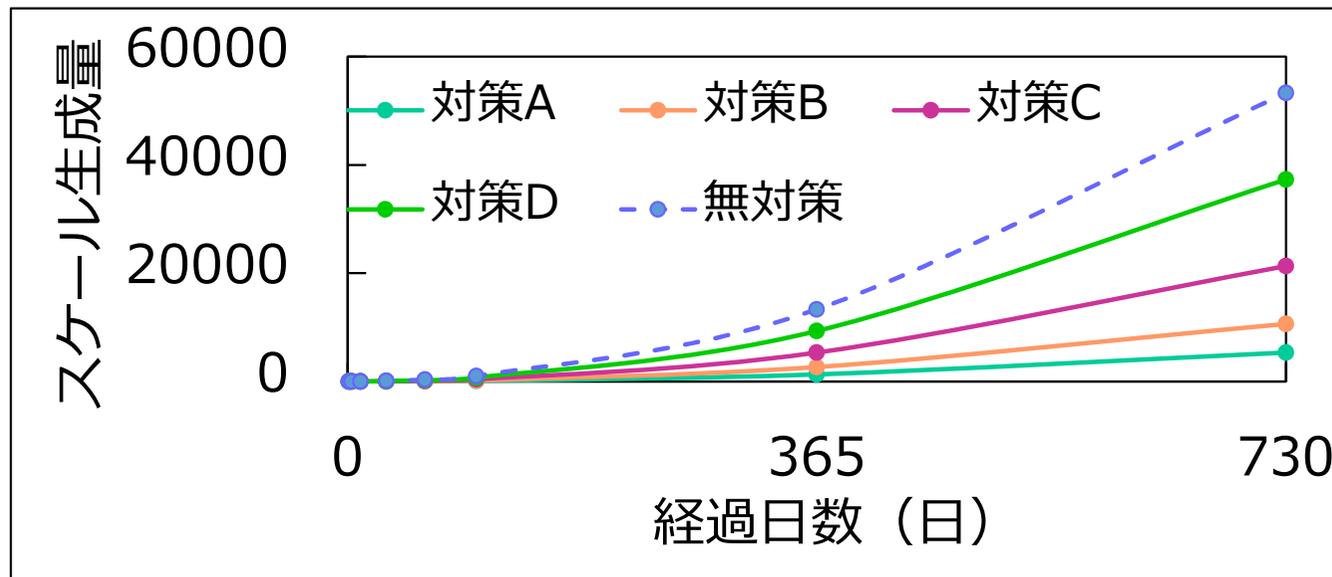
【最終目標】 地熱発電所におけるシステム利用率を10%~20%向上

最終目標のイメージ

定量的スケールモニタリング法により、データを取得



スケール生成過程を予測



地熱発電所におけるシステム利用率を10%~20%向上

- ・還元量減衰の低減
 - ・メンテナンスの適切な周期、箇所決定
 - ・バイナリーの熱交換効率低下の抑制
- 等

(数日程度の) 短期のスケールモニタリングから
長期的なスケール生成を予測する技術を確立しよう！

研究項目	中間目標	最終目標
① 定量的スケールモニタリング法の確立	<ul style="list-style-type: none">定量的スケールモニタリング法の標準化を完了	<ul style="list-style-type: none">500条件程度のAI入力データセットを取得
② 定量的スケールモニタリング法によるデータセットの収集	<ul style="list-style-type: none">熱水からのシリカスケール沈殿のケース(200条件以上)と、二相流および蒸気からのケース(20条件以上)で試験を実施	<ul style="list-style-type: none">スケール生成予測の結果を求める一連作業を可能とするアルゴリズムを作成
③ スケール生成予測を実現するAI利活用に関する研究開発	<ul style="list-style-type: none">シリカスケール生成予測を実現するAIの概要設計を完了	<ul style="list-style-type: none">実証実験により、システム利用率を10%~20%向上できることを明らかにする
④ フィールドでの実証実験		

研究開発スケジュール

[2022年度 計画]

- 定量的スケールモニタリング法の標準化とAI入力データセット増強のため、短期スケール試験および長期スケール試験の実施
- 熱水化学組成からスケール生成量を予測するAIモデルの試行的構築
- 実証試験装置の製作

事業項目	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度 (参考)	2025年度 (参考)
① 定量的スケールモニタリング法の確立	←	スケールモニタリング法の確立	→	スケールモニタリング法の改良 補完的データの収集	→
② スケールモニタリング法によるデータセットの収集	←		データセット収集(主に現場試験)		→
③ スケール生成予測を実現するAI利活用に関する研究	←	AI概念設計	←	AIデータ入力・アルゴリズム作成	→
④ フィールドでの実証実験	←	試験装置の設計・製作	←	実証試験	→ 評価
⑤ 技術検討委員会の設置、開催	←		適宜開催		→

定量的スケールモニタリング法の概要

2021年度の成果から、定量的スケールモニタリング法によってシリカスケールの生成初期段階を定量的にモニタリングできることが確認できたため、当試験法を標準的な方法として試験を実施する

【方法】

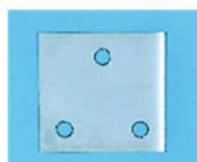
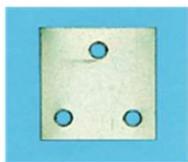
熱水にテストピースを1 - 5時間、1 - 5日間程度浸漬させ、経過時間ごとに1枚ずつ回収する。テストピース表面に付着した微量スケールをLA-ICP-MSを用いて元素ごとに定量分析を行う

【テストピースの材質】

チタン

銅

ステンレス

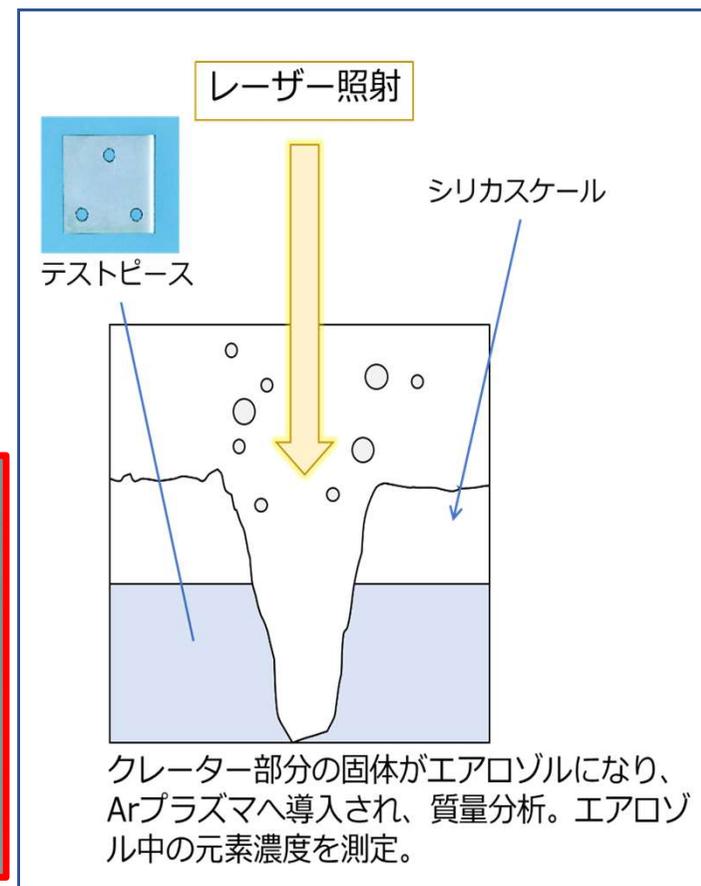


炭素鋼のテストピースは2023年度より実施



配管から一部熱水を取り出し、テストピースを浸漬させている様子

LA-ICP-MS分析の概要



定量的スケールモニタリング法を用いた短期スケール試験と長期スケール試験の内容

定量的スケールモニタリング法の確立（事業項目①）およびAI入力データセットの収集（事業項目②）に向けて、試験・分析項目を選定

定量的スケールモニタリング法を用いた短期スケール試験

試験・分析	分析項目	採用理由
①定量的スケールモニタリング法	微量スケールの成分濃度	短期間で付着した微量スケール生成のモニタリング
②熱水の化学分析	熱水中の主要成分濃度	スケール生成に関わる成分の選定
③ケイ酸の重合試験	ケイ酸の重合速度（ケイ酸度）	スケール生成の指標
④アルミニウムの吸着試験	熱水中の単核アルミニウム濃度	スケール核への濃縮
⑤DLSによる粒子径測定	熱水中の粒子サイズ	スケール生成の指標

長期スケール試験

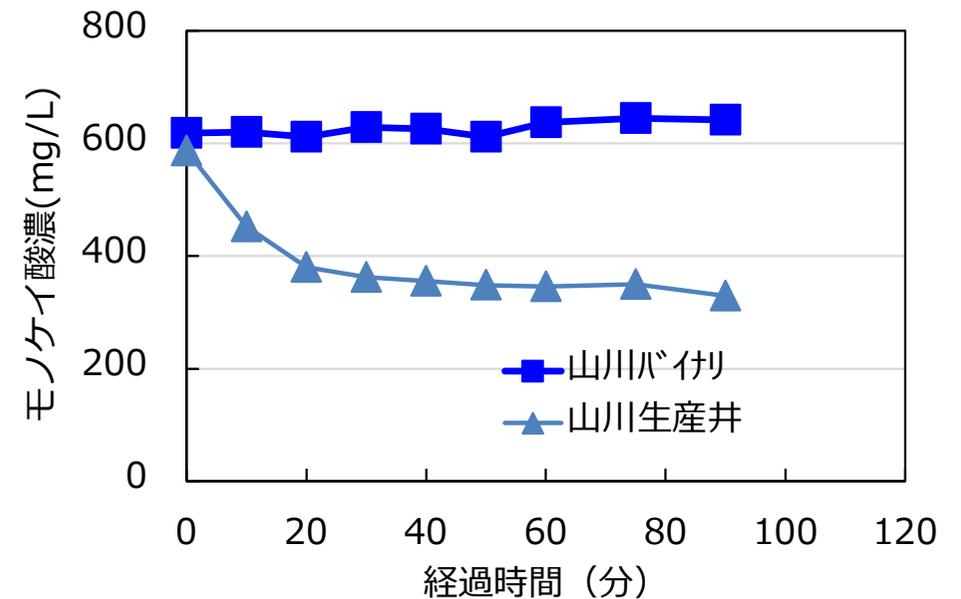
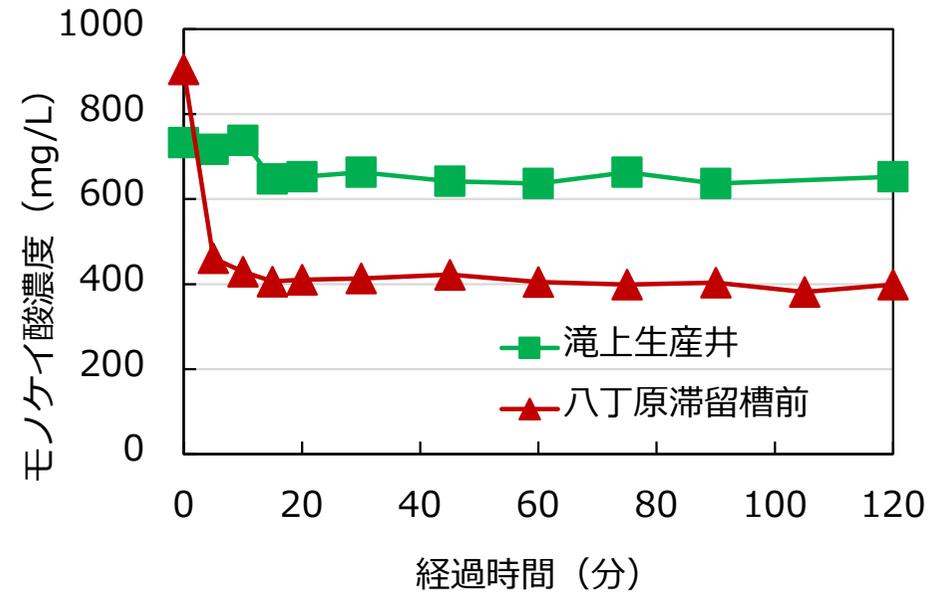
試験・分析	測定項目	採用理由
①長期スケール試験	スケール重量	AI精度の評価

現地スケール試験実績

発電所・フィールド	短期試験	対象の流体
八丁原発電所 1号	2021/11/30～12/5	・生産井熱水（H-32、H-36）
八丁原発電所 2号	2021/11/30～12/5	・還元熱水（pH調整前、pH調整後）
山川発電所	2022/2/27～3/4	・生産井熱水（SKG-10、WT-600）
山川バイナリー発電所	2022/2/27～3/4	・予熱器入口熱水
メディポリス指宿発電所	2022/2/28～3/4	・還元熱水（熱水タンク）
山下池南部	2022/5/22～5/27	・生産井熱水（YST-3）
滝上バイナリー発電所	2022/9/17～9/21	・生産井熱水（TT-13、再合流タンク入口、出口）
八丁原発電所 1号	2023/2/26～3/8	・還元熱水（pH調整後、HR-33）
八丁原発電所 1号	2023年度	・還元熱水（pH調整前、pH調整後、HR-19）
大岳発電所	〃	・還元熱水（pH調整後）生産井熱水（O-15）
発電所・フィールド	長期試験	対象の流体
八丁原発電所 2号	2022/1/20 ～ 終了	・還元熱水（pH調整前、pH調整後）
八丁原発電所 1号	2023年度	・還元熱水（pH調整前、pH調整後、HR-19）
大岳発電所	〃	・還元熱水（pH調整後）、生産井熱水（O-15）
山川バイナリー発電所	〃	・バイナリー予熱器入口熱水
山川発電所	〃	・生産井熱水（SKG-10、WT-600）

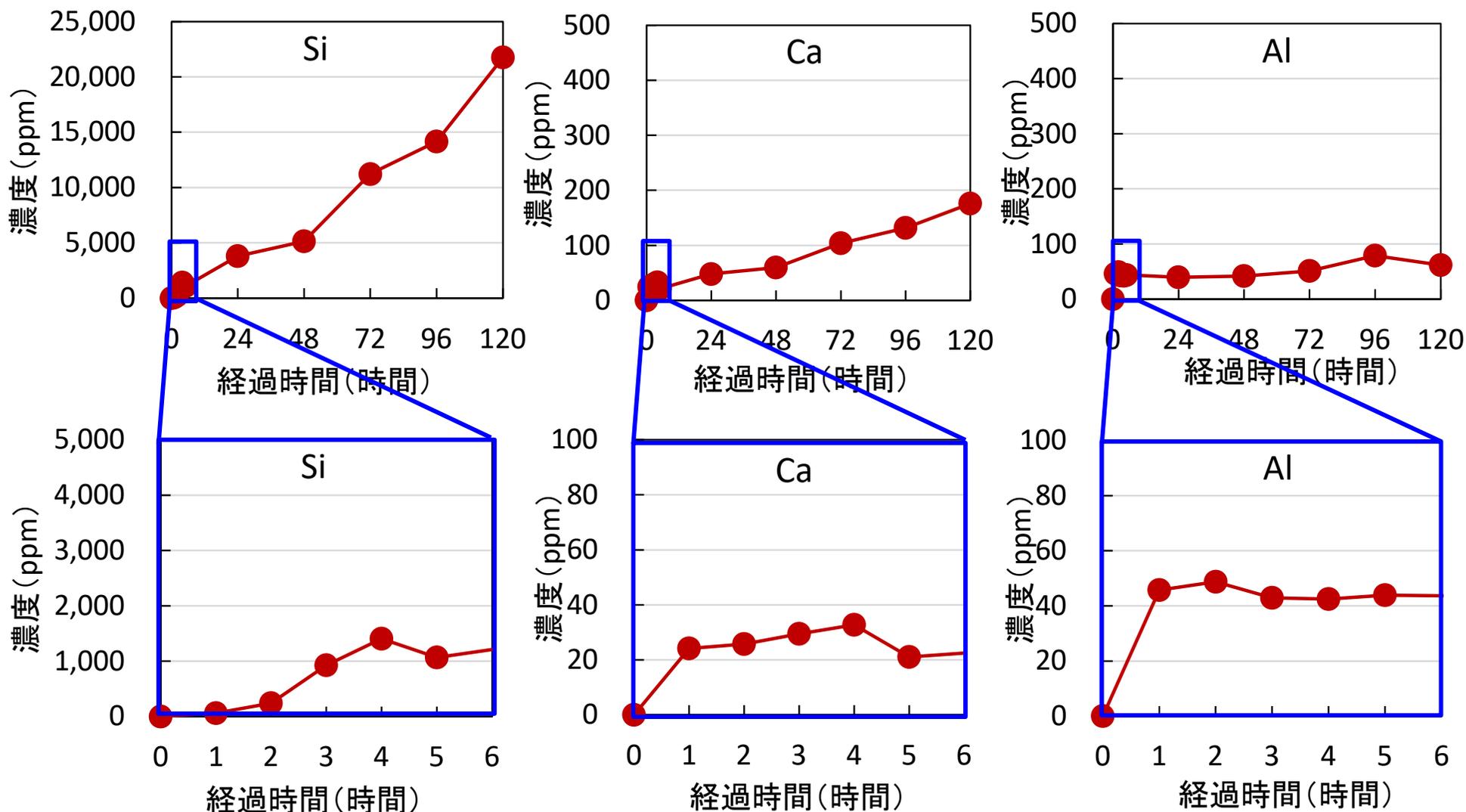
短期スケール試験結果(熱水性状とケイ酸の重合)

地点名		八丁原 滞留槽前	滝上 生産井	山川 生産井	山川 バイリ	
熱水成分	pH	-	8.8	9.3	7.3	5.1
	EC	mS/m	648	315	5660	4840
	Na	mg/L	1200	601	11400	9240
	K	mg/L	205	76.8	1470	1230
	Ca	mg/L	8.0	10.1	2040	1570
	Mg	mg/L	0.07	<0.001	2.81	2.10
	Al	mg/L	0.83	1.10	<0.01	0.14
	Cl	mg/L	1870	820	23100	19100
	Fe	mg/L	0.01	<0.04	0.40	0.19
	T-SiO ₂	mg/L	867	604	541	542



定量的スケールモニタリング法による試験結果(八丁原1号滞留槽前)

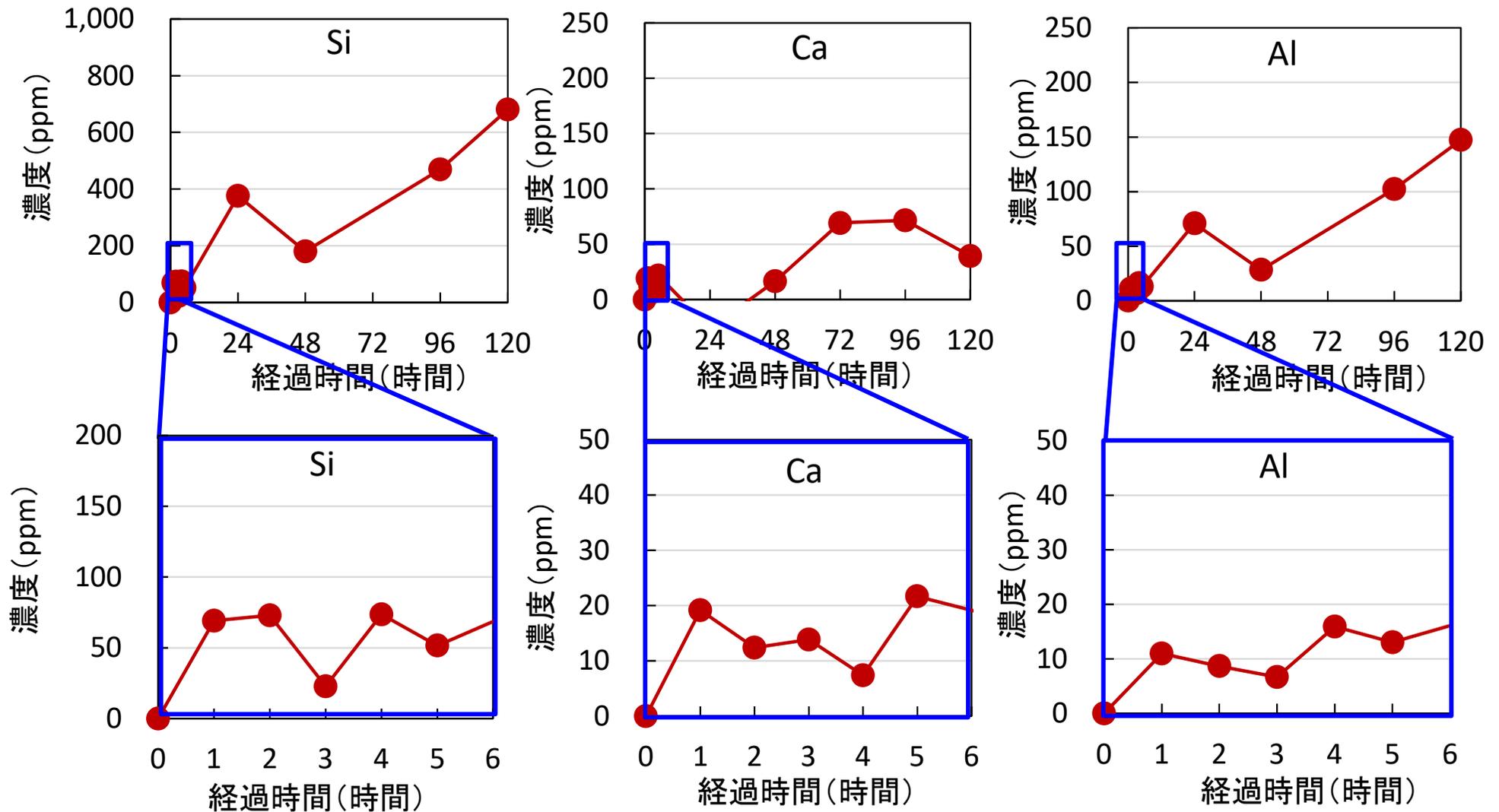
熱水に浸漬したテストピース表面をLA-ICP-MSにより分析



シリカスケールが生成しやすい八丁原1号熱水では5時間の浸漬でもSiをはじめCaやAlなどの微量元素の経時的な濃度上昇が確認できた

定量的スケールモニタリング法による試験結果(山川バイリ)

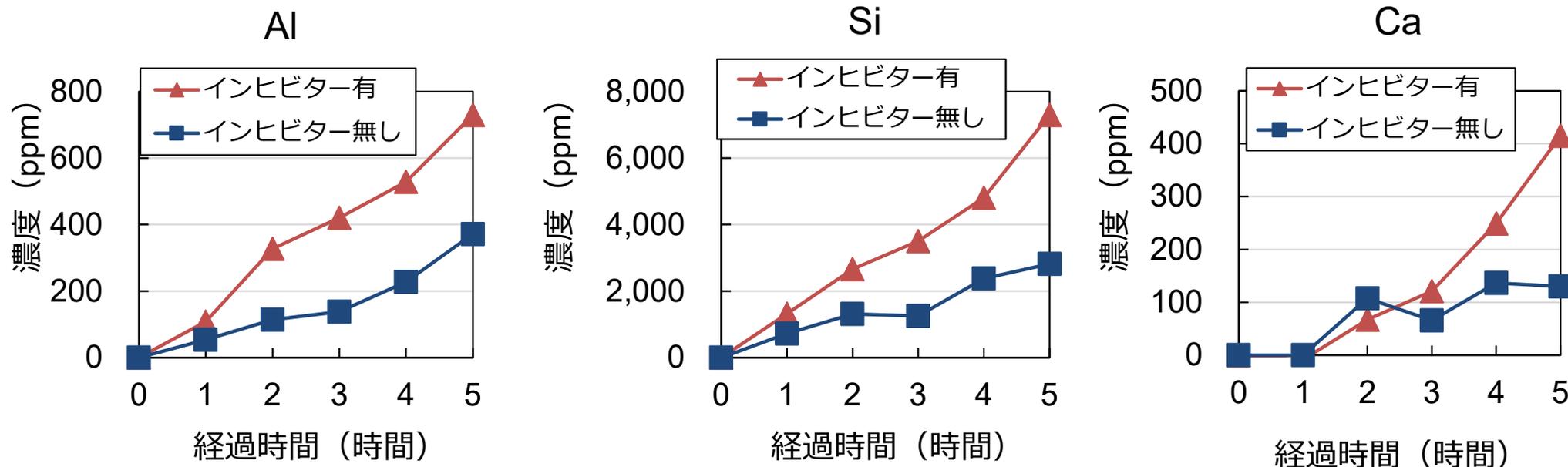
熱水に浸漬したテストピース表面をLA-ICP-MSにより分析



シリカスケール抑制のためpH調整を行った熱水でも5日間の浸漬であればSiをはじめCaやAlなどの微量元素の経時的な濃度上昇が確認できた

定量的スケールモニタリング法による試験結果(滝上)

薬品注入をした熱水に浸漬したテストピース表面をLA-ICP-MSにより分析

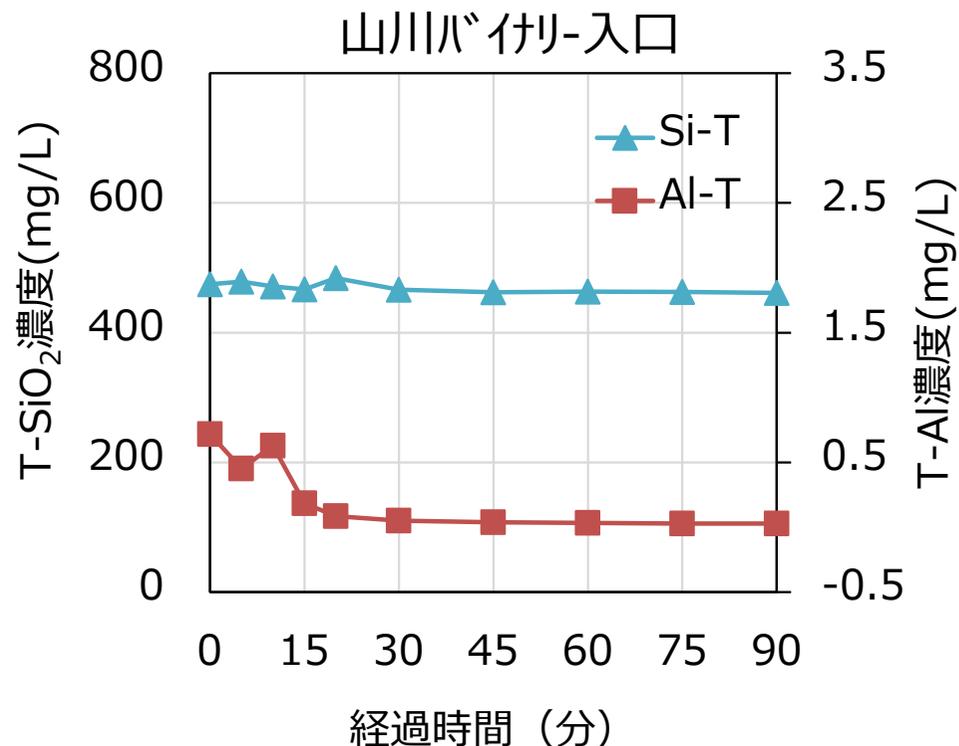
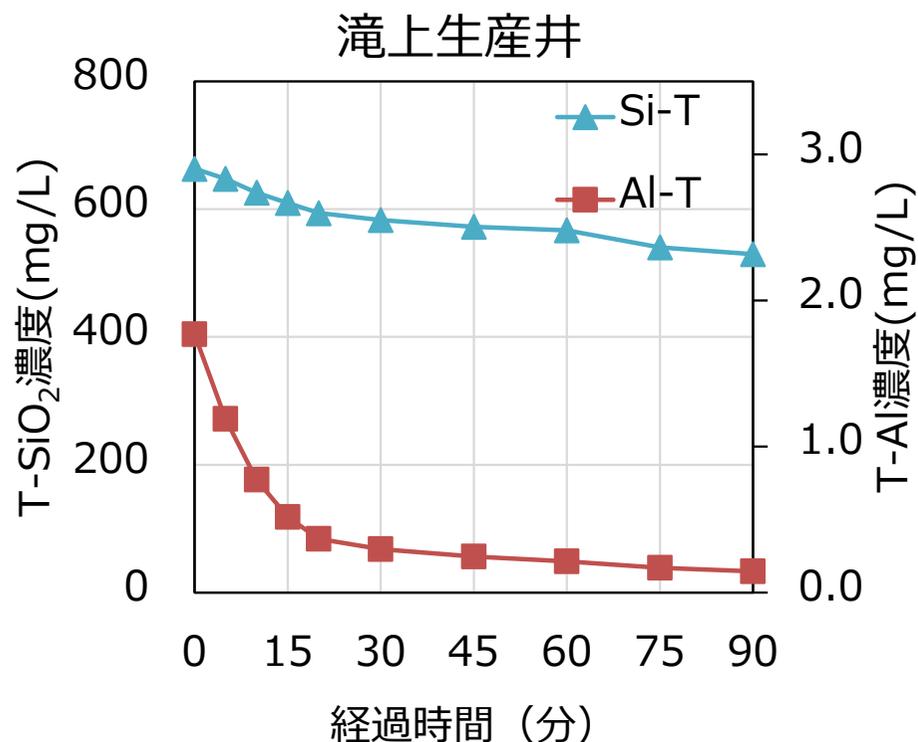


カルシウムスケールインヒビターを注入した条件の方がシリカ、アルミニウム、カルシウムの析出濃度が高かった。

薬品注入の有無によるスケール析出の違いを5時間の浸漬時間でも確認することができた

アルミニウムの吸着試験結果（滝上生産井）

シリカゲル(模擬シリカスケール)への熱水中のシリカおよびアルミニウムの吸着

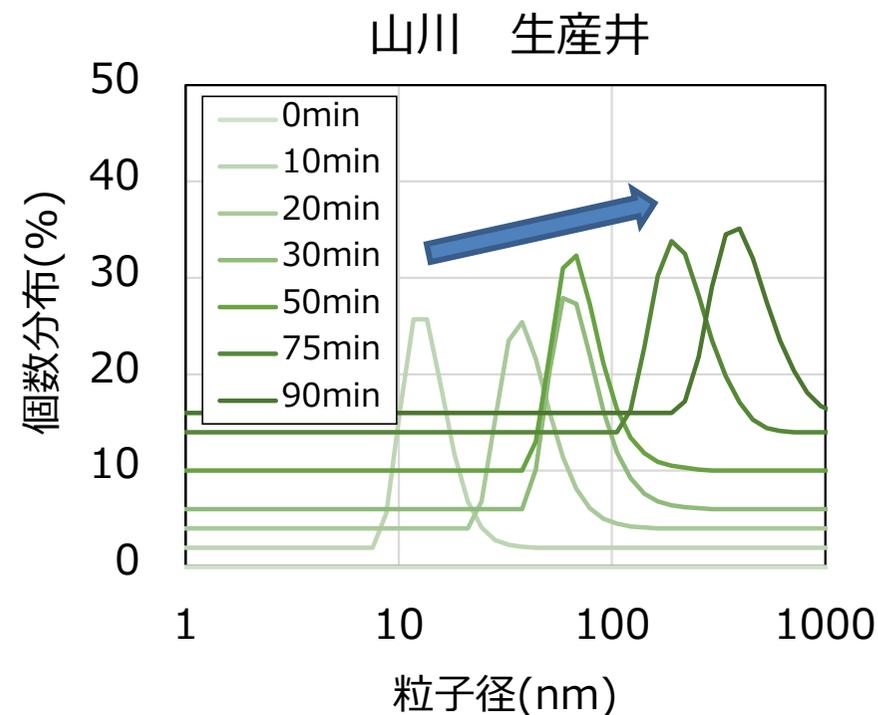
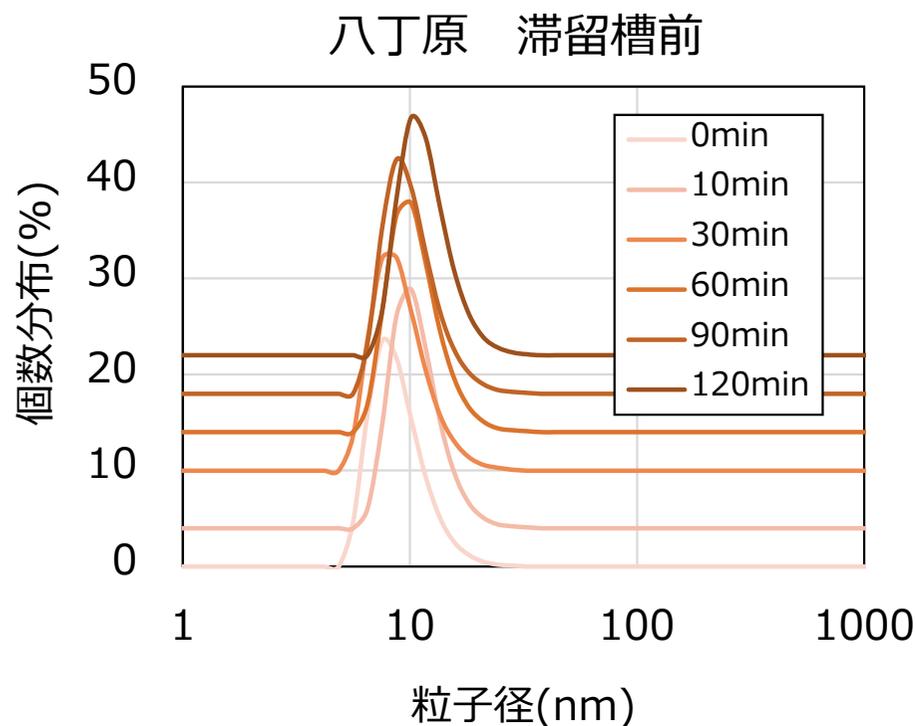


生産井ではシリカおよびアルミニウムともに大きく減少しており、両元素ともシリカゲルに吸着したと考えられる。一方、バイナリー入口ではシリカおよびアルミニウム濃度は生産井ほどの低下は見られない。

シリカスケールの生成に関与すると考えられるアルミニウムの挙動が把握できた。

DLSによる粒子径測定

pH調整前の熱水中の粒子径サイズ



八丁原：開始時から120分後にかけて、わずかに粒子の成長（7.5nm→10nm）

山 川：開始時から120分後にかけて、0.6nmから400nmまで急激に成長

熱水性状の違いによって粒子の成長も異なることが明らかとなった

熱水化学組成からスケール生成量を予測するAIの試行実績

概要：

熱水化学組成を説明変数とし、その熱水から生成されたスケール量を目的変数としスケール生成量予測を試みた。

なお、スケール量はチタン製の金属板を一定期間熱水に浸漬し、採取後重量測定した結果を用いた。

説明変数：

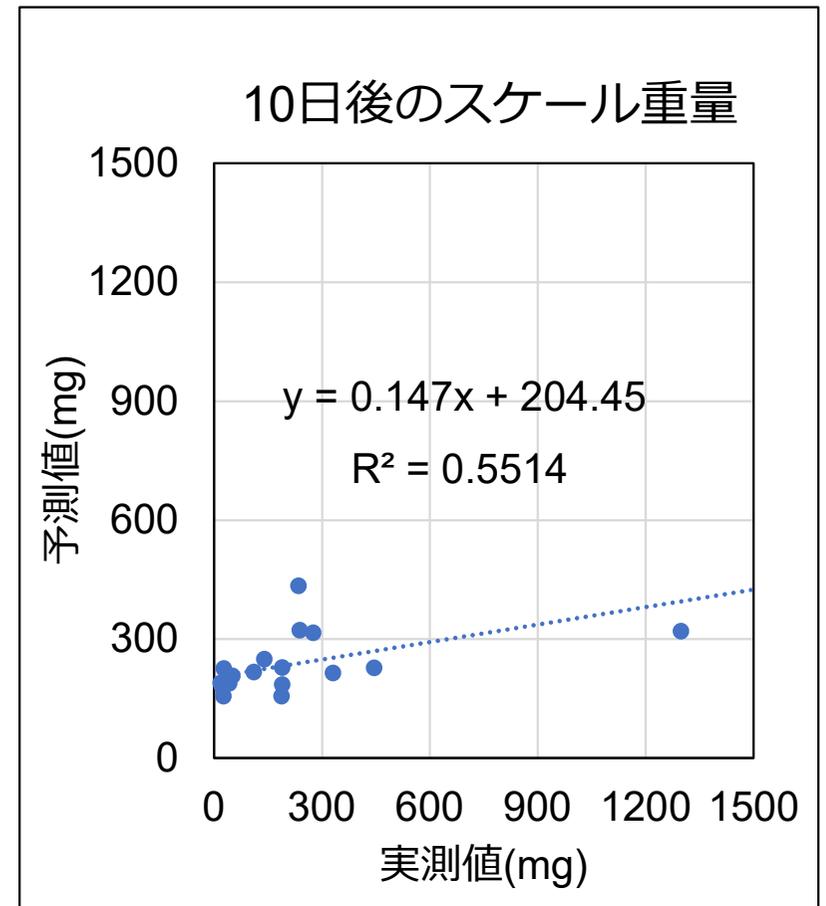
- ・ 熱水のpH、各主要成分濃度 (Si(T)、Si(M)、Na、K、Ca、Mg、Al、Fe、Cl、SO4)
- ・ 試験時の熱水の温度 (°C)

目的変数：

- ・ 金属板浸漬から10日後に付着したスケール重量

データ数：全19地点による

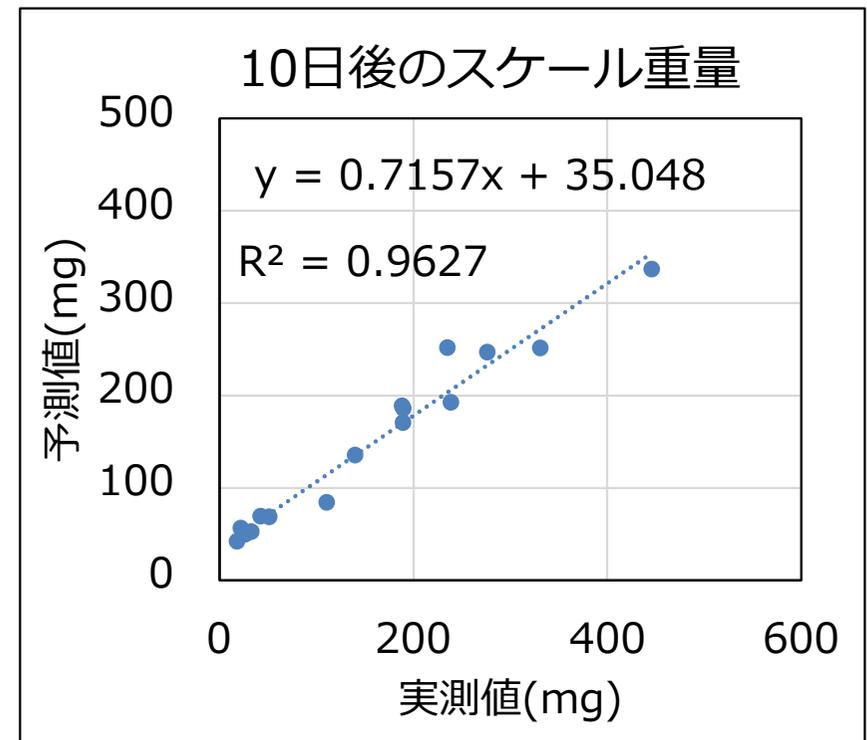
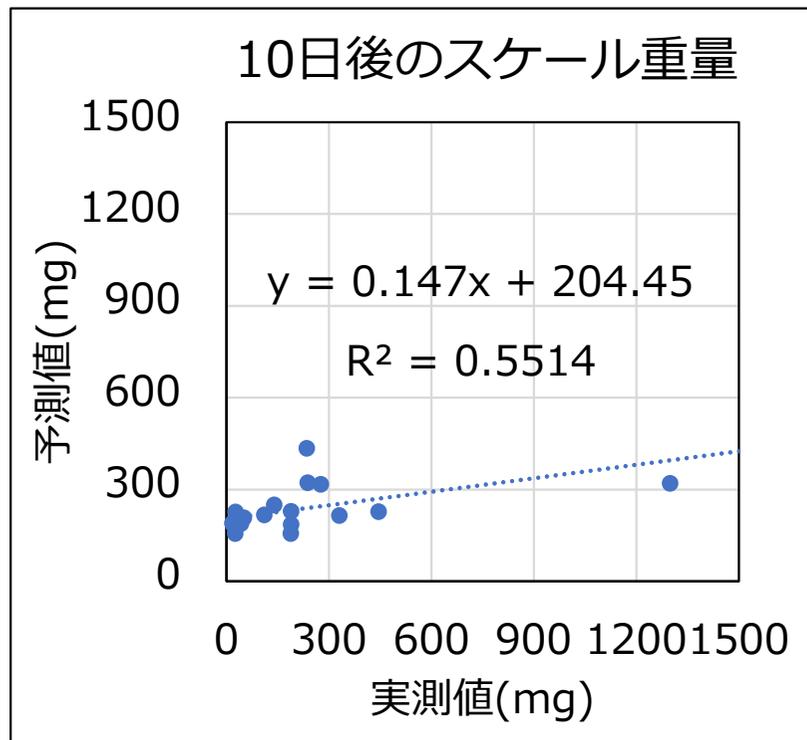
ソフトウェア：Multi-Sigma (Light-Stone社製)



AIによる予測精度向上のための検討

予測精度向上のため説明変数における以下のデータ処理を実施

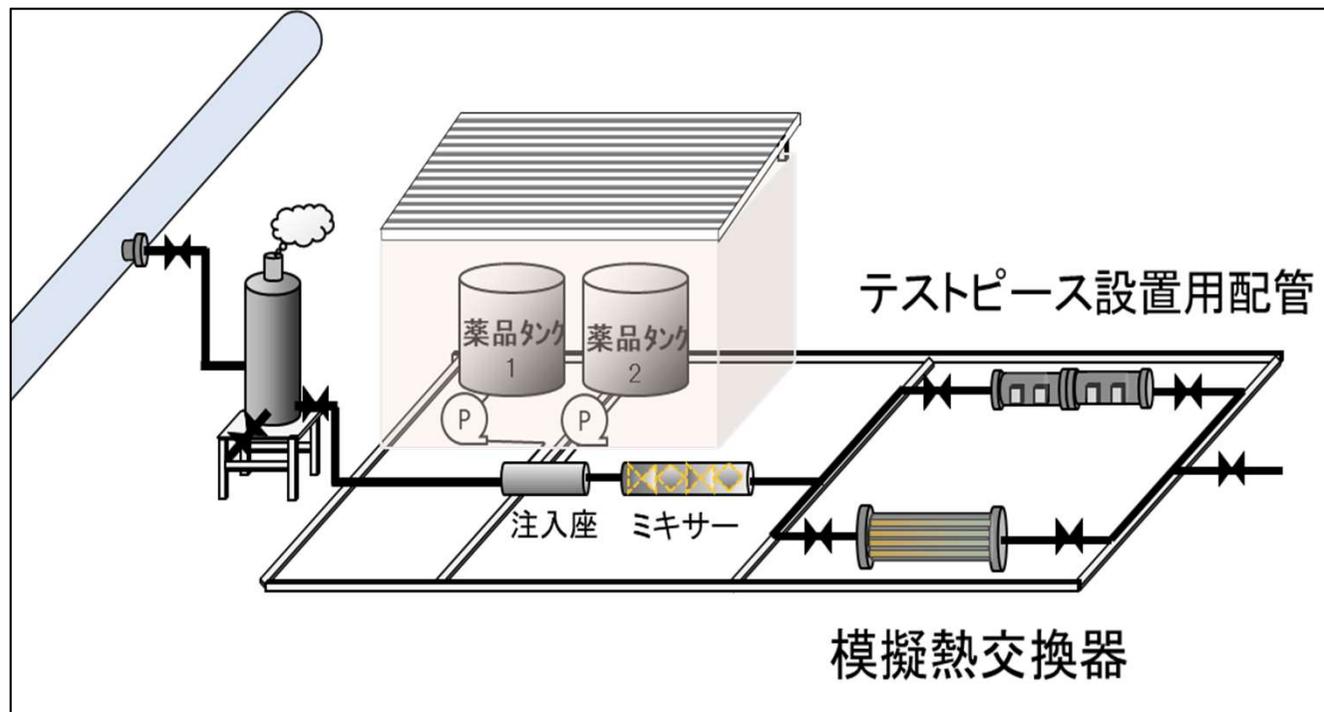
- ・ 外れ値の除去
他のデータの分布とは明らかに異なる場所に数値が出現する“外れ値”を説明変数から取り除いた
- ・ シリカ過飽和度データを追加
シリカ濃度をシリカの過飽和度に換算して説明変数に追加した



実証試験装置の製作

◇ 実証試験装置の概念設計

- ・ 地熱発電所等の現地に持ち込みやすいサイズとする。
- ・ pH調整や薬品注入ができるポンプを有する。
- ・ 温度調整機能を有する。
- ・ 熱水だけでなく蒸気の取出しも可能とする。



2022年度の成果・課題

研究開発項目	成果 (2023年3月まで)	今後の計画
①定量的スケール モニタリング法の確立	○ 試験条件の標準化を検討し、ベースとなる試験法はほぼ確定した。また、中間目標として挙げた条件数に対する進捗率は約7割を達成した。	AIモデル構築と予測結果から、データセットとして必要な項目の取捨選択と測定方法の改良を行う。
②定量的スケール モニタリング法による データセットの収集	○定量的スケールモニタリング法によって、数時間程度で付着するスケール構成元素の定量が可能であり、元素ごとの成長過程が得られる可能性があることがわかった。	八丁原発等での現地試験を実施し、中間目標数のデータセットを取得する。特に長期予測検証のための長期スケール試験が重要である。
③スケール生成予測を 実現するAI利活用に関する 研究開発	○各熱水の化学組成と生成したスケール量からAIモデル作成を試行した。その結果、ケイ酸の化学状態に関するデータを加味したり、データを熱水性状によってグループ化したりすることで、予測精度の向上が見込めることが見いだせた。	定量的スケールモニタリング法を用いた短期スケール試験および長期スケール試験のデータを用いてスケール予測AIを構築する。
④フィールドでの実証 実験	実証試験装置を製作するとともに、試験実施可能な発電設備を検討した。	製作した実証試験装置の試運転後、pH調整や温度を変えた条件でデータの取得を行う。