

NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2026 プログラムNo. B1-2-13

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

発表：2026年7月22日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名：（国）九州大学 米津 幸太郎

団体名：九電産業（株）、（国）九州大学、九電みらいエナジー（株）

問い合わせ先：九電産業(株)環境部

E-mail：eiki_watanabe@kyudensangyo.co.jp TEL: 092-671-6071

事業概要

1.研究の背景と目的

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確立する

2.実施期間

開始：2021年 10月 終了：2026年 3月

3.実施体制

九電産業、九州大学、九電みらいエナジー

4.実施内容・最終目的

- 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



スケールが付着した
還元熱水配管

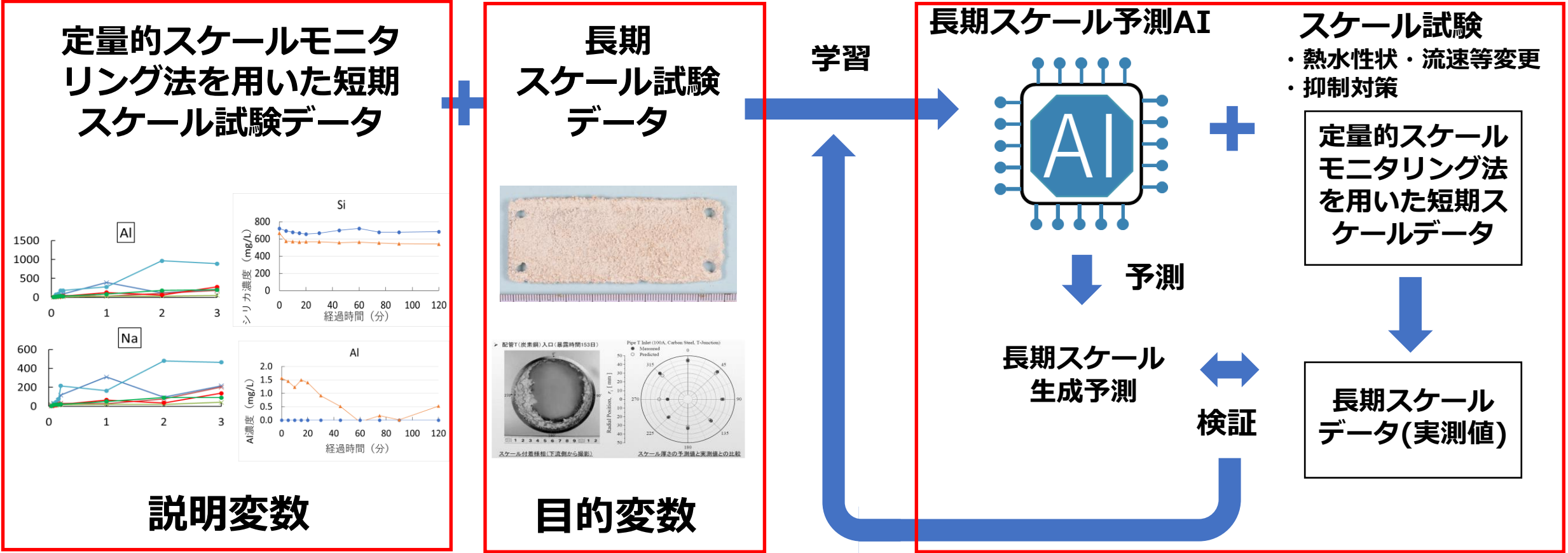


スケールが付着した
熱水槽



研究概要

- 短期間で付着した微量スケールに対してLA-ICP-MS分析を用いた「定量的スケールモニタリング法」の確立
- 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から得られたデータセットを用いてAIモデル構築
- 実証試験装置を用いたスケール試験等で得られたデータセットによるAIの更なる学習



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の内容

シリカスケール生成の要因分析と生成量予測をするためのAIの構築のためのデータセットの収集

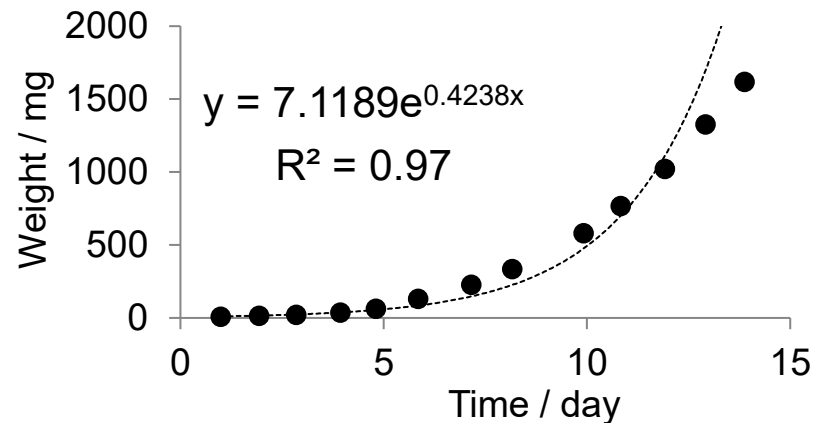
1. 現場試験における熱水性状試験

- ・ケイ酸の重合試験
- ・シリカゲルへの吸着試験（ケイ酸・アルミニウムなどに着目：シリカゲルを先に生成したシリカスケールのモデル物質とみなしての、シリカスケール生成のモデル反応）と吸着
→化学種の化学状態の決定（NMR）
- ・イオン交換樹脂へのケイ酸・アルミニウム化学種の吸着試験→化学状態分析
- ・DLSによる粒子径測定

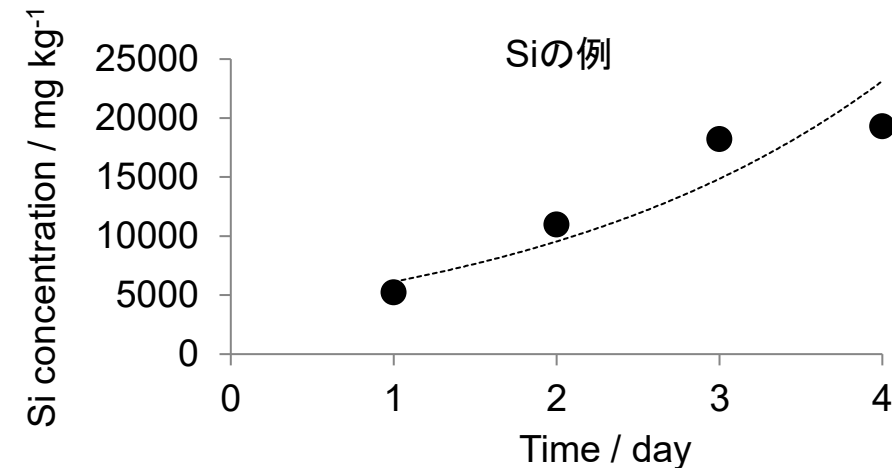
2. テストピース浸漬による微量表面沈殿物の定量的解析（SEM-EDX、LA-ICP-MS分析）の組み合わせ

○従来の金属板浸漬法による情報－

浸漬時間と生成した**スケール重量**との関係（mg/dm²/day）
単調増加関数である指数関数で近似



LA-ICP-MSによるSiの結果：元素ごとのSUS板への吸着挙動



定量的スケールモニタリング法によりスケール生成のメカニズムを解明する

試験実施個所



名称	上の岱(うのたい)地熱発電所
所在地	秋田県湯沢市高松字大日台
認可出力	28,800kW
蒸気部門	東北自然エネルギー株式会社
発電部門	東北自然エネルギー株式会社
運転開始	平成6年3月4日
発電方式	シングルフラッシュ

主な日本の地熱発電所位置図
(2024年8月現在、1,000kW以上の地熱発電所)



名称	葛根田(かつこんだ)地熱発電所
所在地	岩手県岩手郡雫石町西根字高倉山1-1
認可出力	2号機:30,000kW
蒸気部門	東北自然エネルギー株式会社
発電部門	東北自然エネルギー株式会社
運転開始	2号機:平成8年3月1日
発電方式	2号機:シングルフラッシュ



名称	八丁原(はっちょうばる)発電所
所在地	大分県玖珠郡九重町
認可出力	1号機:55,000kW、2号機:55,000kW
蒸気部門 発電部門	九電みらいエナジー株式会社
運転開始	1号機:昭和52年6月24日、2号機:平成2年6月22日
発電方式	1号機:ダブルフラッシュ、2号機:ダブルフラッシュ

スケール試験実績（短期試験）

発電所・フィールド	短期試験	対象の流体
A発電所1号	2021年11月	生産井熱水（2ヶ所）
A発電所2号	2021年11月	還元熱水（2ヶ所）
C発電所	2022年 2月	生産井熱水、還元熱水
D発電所	2022年 2月	pH調整熱水
E発電所	2022年 2月	還元熱水
Aフィールド	2022年 5月	生産井熱水
F発電所	2022年 9月	生産井熱水、還元熱水
A発電所1号	2023年 2月	還元熱水（2ヶ所）
A発電所1号	2023年 4月	還元熱水（3ヶ所）
B発電所	2023年 6月	還元熱水、生産井熱水（2ヶ所）
A発電所1号	2024年 3月	還元熱水
A発電所2号	2024年 3月	還元熱水
C発電所	2024年 6月	生産井熱水、還元熱水

発電所・フィールド	短期試験	対象の流体
Bフィールド	2024年 6月	生産井熱水
Bフィールド	2024年 7月	生産井熱水
Cフィールド	2024年 9月	温泉水（3ヶ所）
A発電所1号	2024年11月	実証試験 還元熱水 （pH＝5.0、インビター-A）
A発電所1号	2024年12月	実証試験 還元熱水 （pH調整前、pH＝4.0、インビター-B）
A発電所1号	2025年 5月	実証試験 pH調整後の還元熱水 （pH＝4.5、無調整）
G発電所	2025年 8月	還元熱水（2ヶ所）
H発電所	2025年 8月	還元熱水（2ヶ所）
I発電所	2025年10月	還元熱水

【発電所】 10ヶ所
【フィールド】 3ヶ所 **全480条件**

スケール試験実績（長期試験）

発電所・フィールド	長期試験	対象の流体
A発電所1号	2022年1月～4月	還元熱水（2ヶ所）
A発電所2号	2023年5月～10月	還元熱水（3ヶ所）
B発電所	2023年7月～10月	還元熱水、生産井熱水（2ヶ所）
D発電所	2023年8月～11月	pH調整熱水
C発電所	2023年9月～11月	生産井熱水、還元熱水
Aフィールド	2024年2月～3月	生産井熱水
C発電所	2024年6月～9月	生産井熱水、還元熱水（2ヶ所）
Bフィールド	2024年6月～7月	生産井熱水
Bフィールド	2024年7月～8月	生産井熱水
A発電所1号	2024年8月～11月	還元熱水（2ヶ所）
A発電所2号	2024年8月～11月	還元熱水（3ヶ所）

発電所・フィールド	長期試験	対象の流体
A発電所1号	2024年10月～12月	実証試験 還元熱水（pH調整前熱水）
A発電所1号	2025年2月～7月	実証試験 還元熱水（pH調整熱水）
A発電所1号	2025年6月～12月	実証試験 還元熱水 粗さ試験
A発電所1号	2025年11月～12月	実証試験 還元熱水 流速試験
A発電所1号	2026年1月～3月	実証試験 還元熱水 流速+粗さ試験
G発電所	2025年8月～9月	還元熱水（2ヶ所）
H発電所	2025年8月～9月	還元熱水（2ヶ所）
I発電所	2025年10月～11月	還元熱水（2ヶ所）

【発電所】 8ヶ所
【フィールド】 2ヶ所

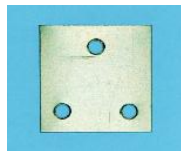
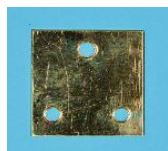
定量的スケールモニタリング法の概要

【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】

銅 ステンレス チタン 炭素鋼



Cu

SUS

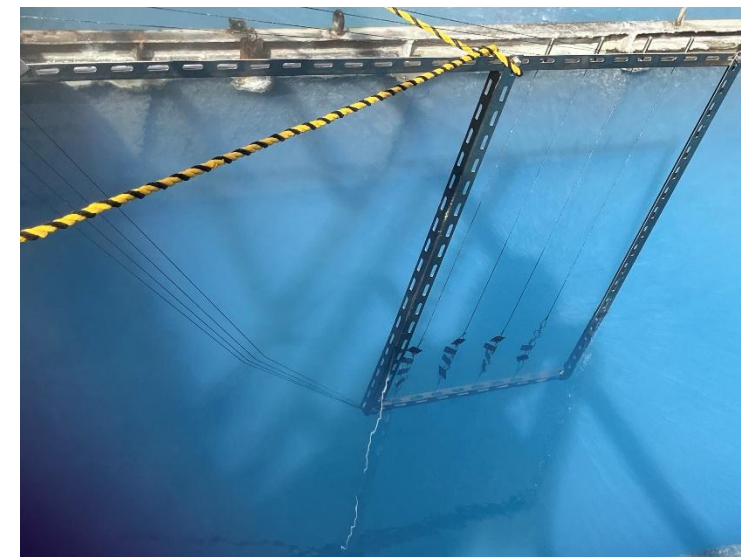
Ti

SS

テストピース1セット



試験槽を使った試験

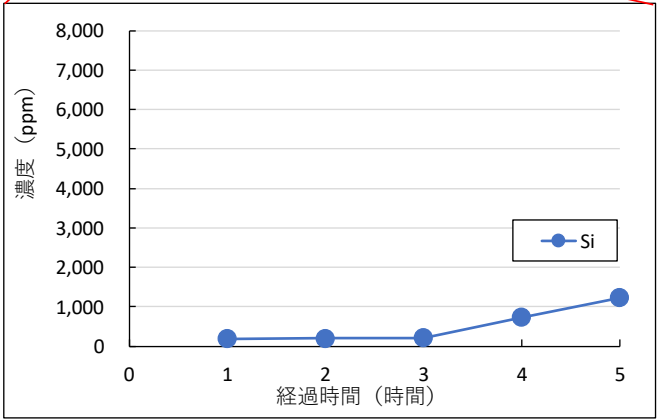
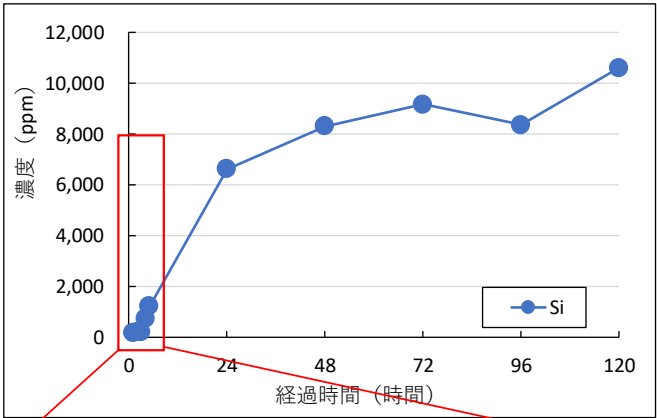
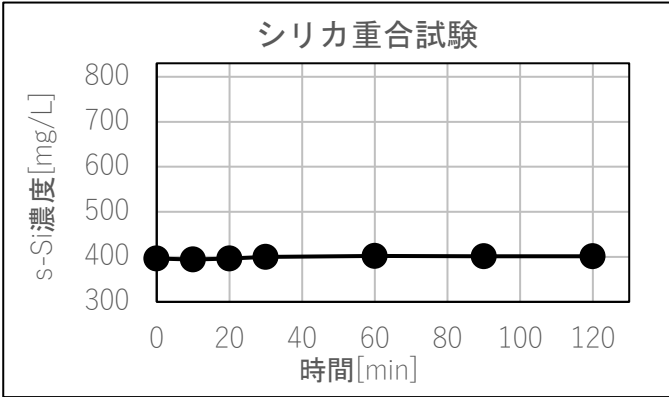


熱水槽を使った試験

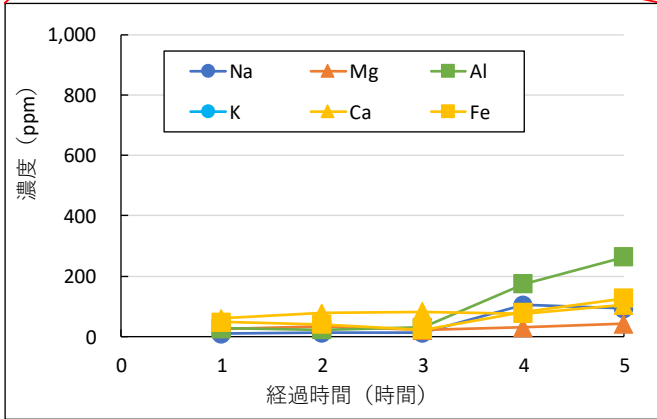
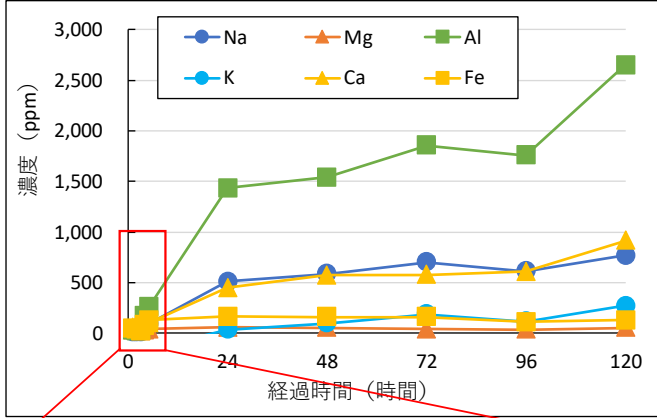
定量的スケールモニタリング法の分析結果（新規地点：Aフィールド）

シリカ重合試験において、2時間後の溶解性シリカ濃度の減少は見られなかったが、LA-ICP-MS分析ではSi、Alの濃度上昇が確認され、成分毎の変化をとらえる事が出来た。

地 点 名			Aフィールド
熱水成分	pH	(-)	8.5
	電気伝導率	(mS/m)	432
	ナトリウム	(mg/L)	812
	カリウム	(mg/L)	73.2
	カルシウム	(mg/L)	20.7
	マグネシウム	(mg/L)	0.021
	アルミニウム	(mg/L)	0.59
	塩化物イオン	(mg/L)	1230
	砒 素	(mg/L)	0.888
	全 鉄	(mg/L)	0.04未満
	全シリカ	(mg/L)	396



シリカ



シリカ以外の成分

LA-ICP-MS分析結果

現地試験（A発電所2号）

A発電所2号滞留槽熱水の硫酸添加前後における化学分析結果

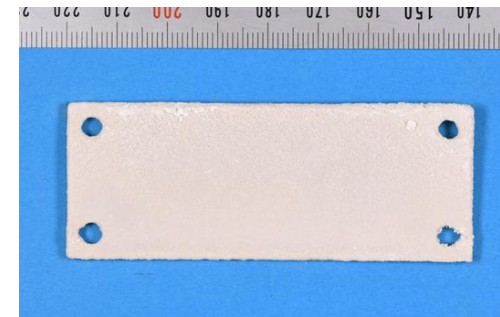
硫酸			添加前	添加後
熱水成分	pH	(-)	8.6	5.1
	ナトリウム	(mg/L)	1260	1230
	カリウム	(mg/L)	223	216
	カルシウム	(mg/L)	6.77	6.71
	マグネシウム	(mg/L)	0.06	0.09
	アルミニウム	(mg/L)	1.01	0.93
	塩化物イオン	(mg/L)	2160	2120
	全シリカ	(mg/L)	970	968
	溶解性シリカ	(mg/L)	605	610

- 滞留槽での硫酸添加前後の、定量的スケールモニタリング法の結果を示す。特に溶存アルミニウム成分の化学状態変化をNMRで追跡し、熱水成分の化学分析だけでは見えない（スケール生成に寄与する/しないも含めて）情報も加味した。

【長期テストピース試験結果（3ヶ月後）】



【硫酸添加なし】



【硫酸添加あり】



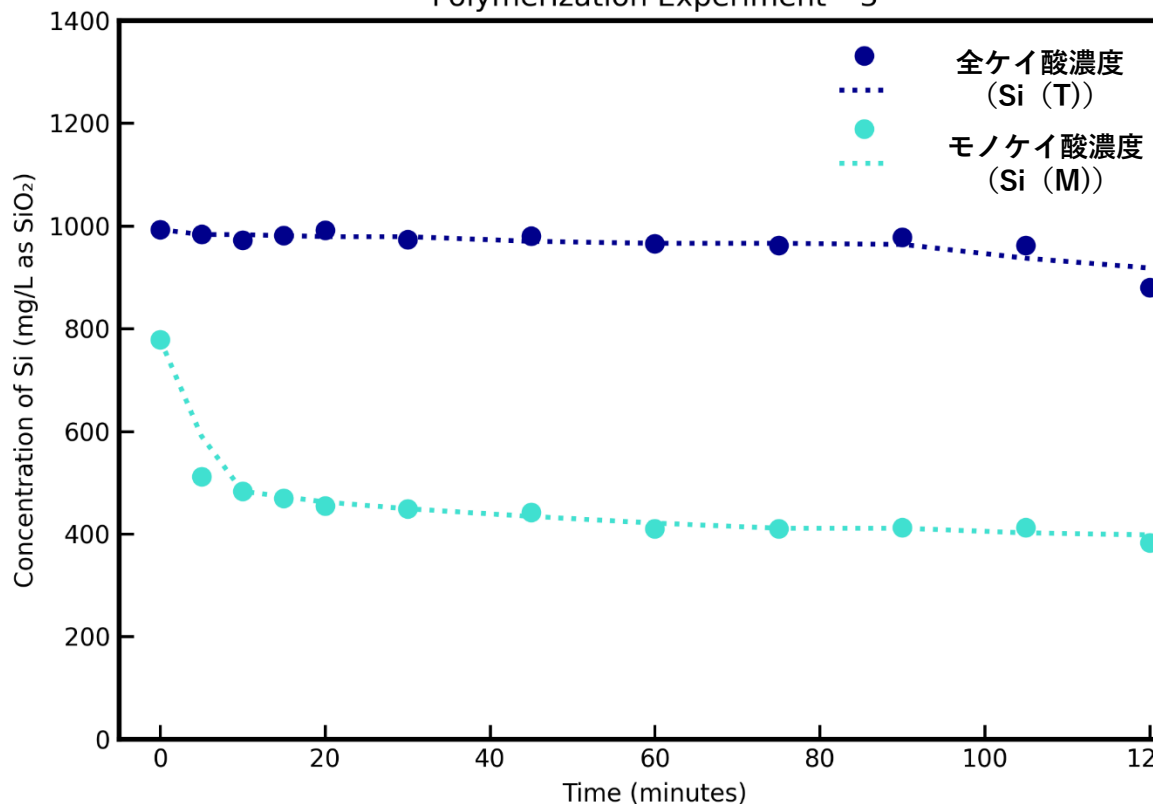
【現地試験状況】

A 発電所2号（熱水性状試験：シリカ重合試験）

pH調整前（pH 8.6）

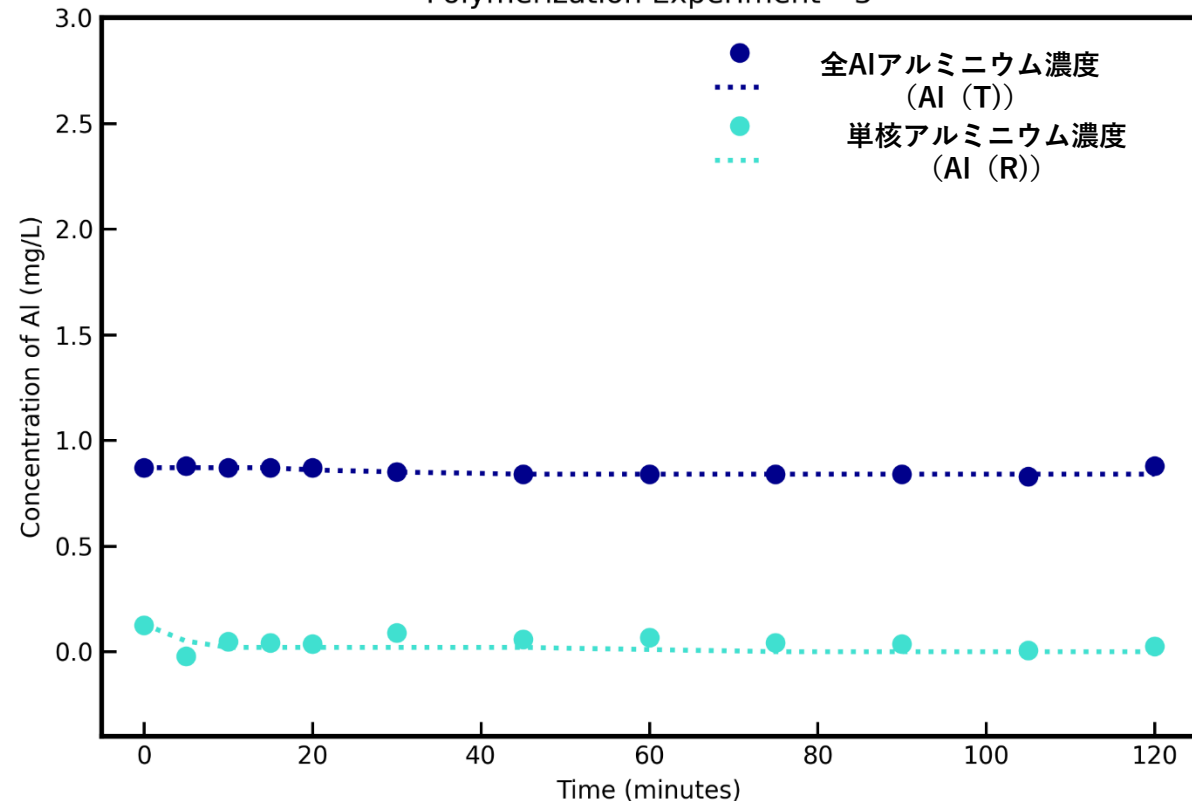
ケイ酸の重合におけるケイ酸の挙動

Polymerization Experiment - 3



ケイ酸の重合におけるアルミニウムの挙動

Polymerization Experiment - 3



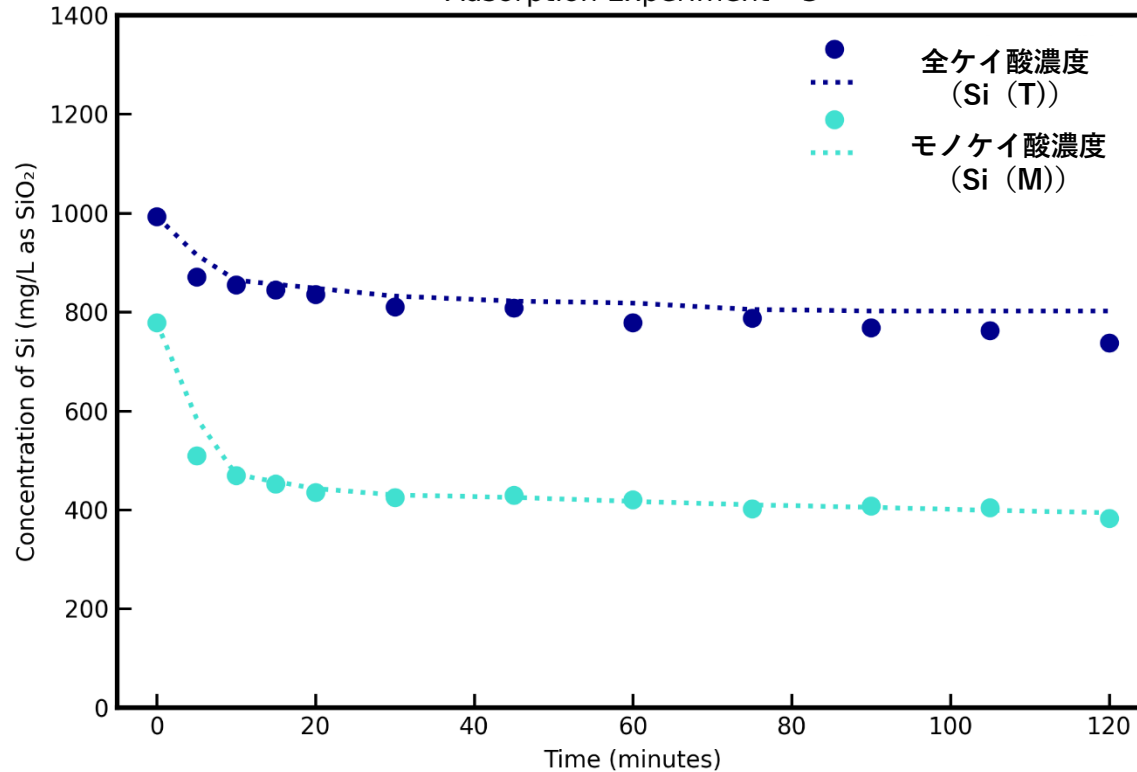
反応初期に急速なケイ酸の重合（モノケイ酸の減少）とそれに伴うAl (R)の取り込みが進行している（沈殿は生じていない）

A発電所2号（熱水性状試験：シリカゲルへのケイ酸の吸着挙動）

pH調整前（pH 8.6）

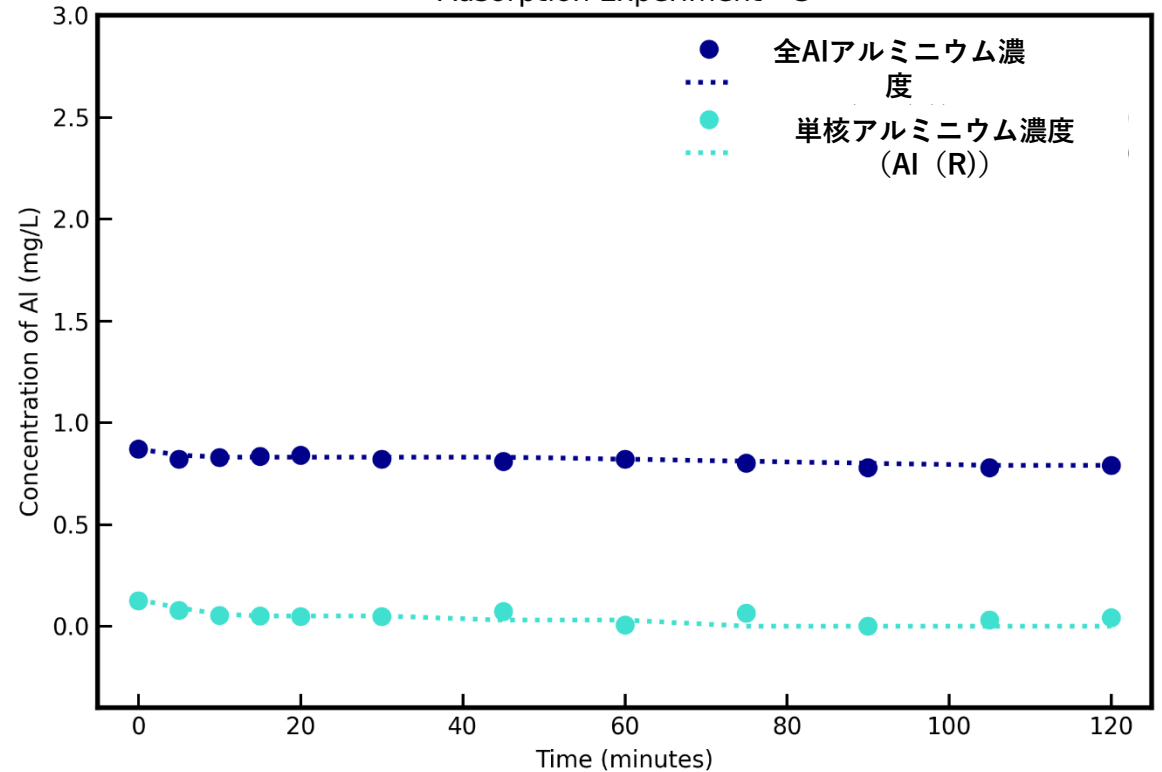
シリカゲルへのケイ酸の吸着挙動

Adsorption Experiment - 3



シリカゲルへのアルミニウムの吸着挙動

Adsorption Experiment - 3



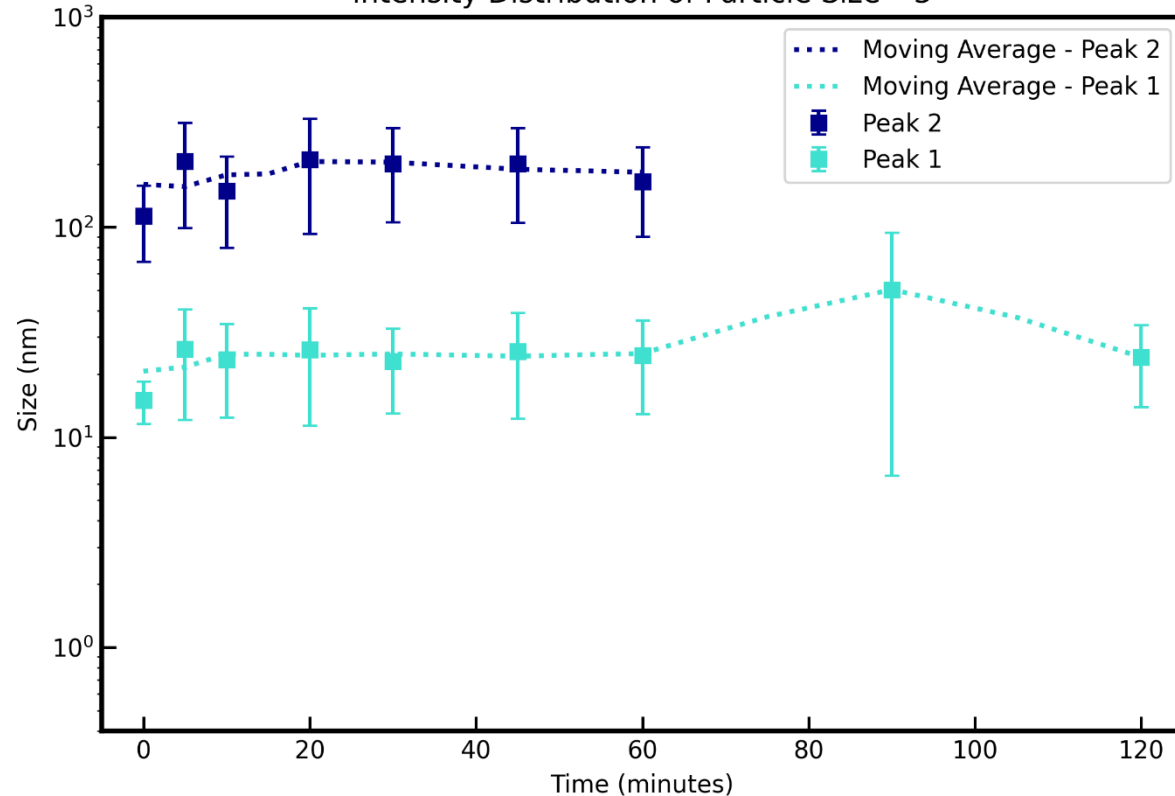
全ケイ酸および全アルミニウムが減少することから、これら化学種のシリカゲルへの吸着が生じている
→固相表面でのスケール成長につながる

A 発電所2号（熱水性状試験：DLS）

pH調整前（pH 8.6）

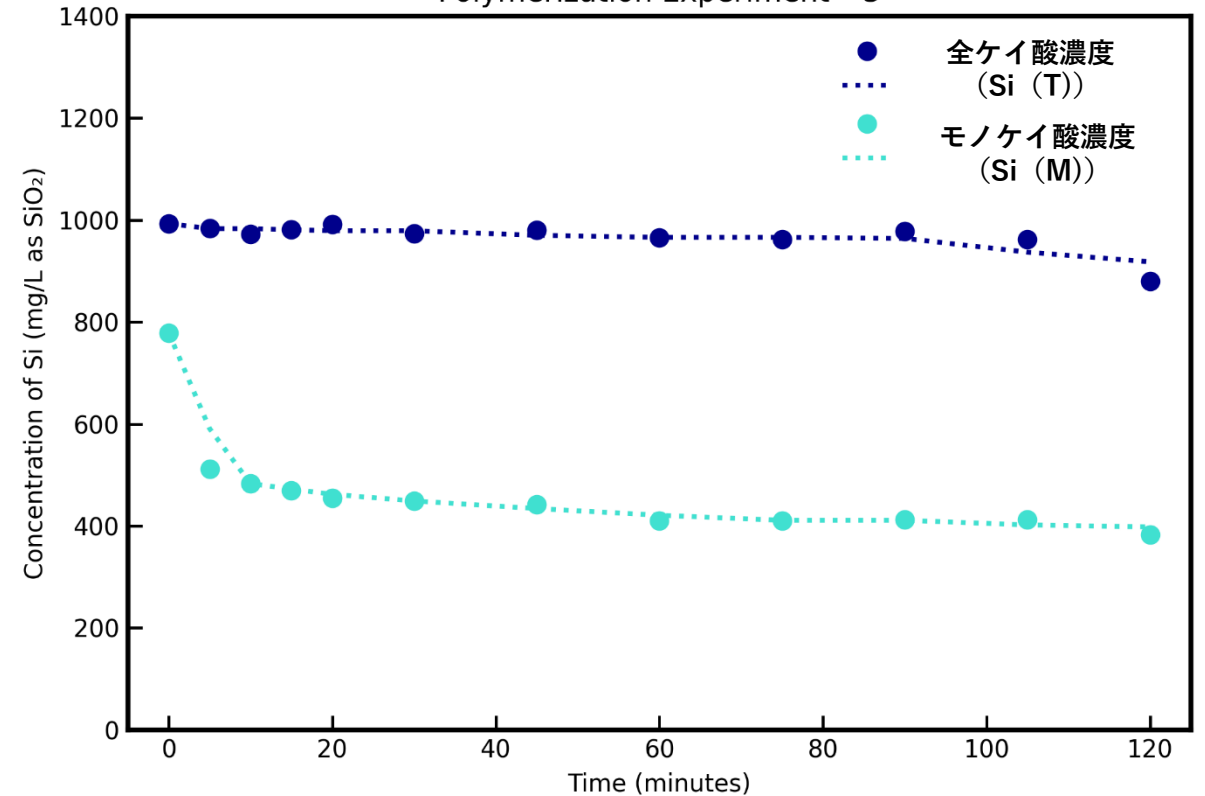
ポリケイ酸粒子径

Intensity Distribution of Particle Size - 3



ケイ酸の重合におけるケイ酸の挙動

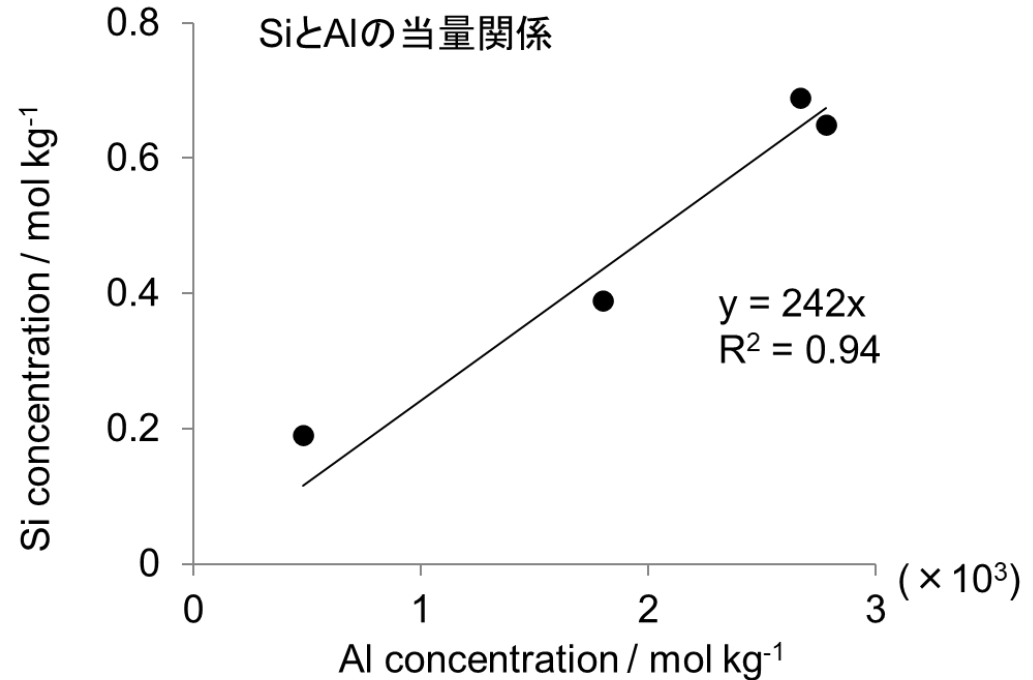
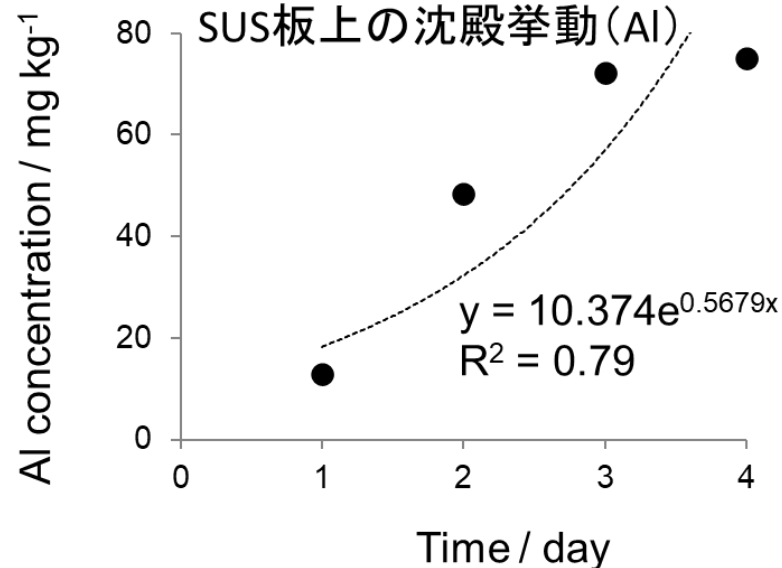
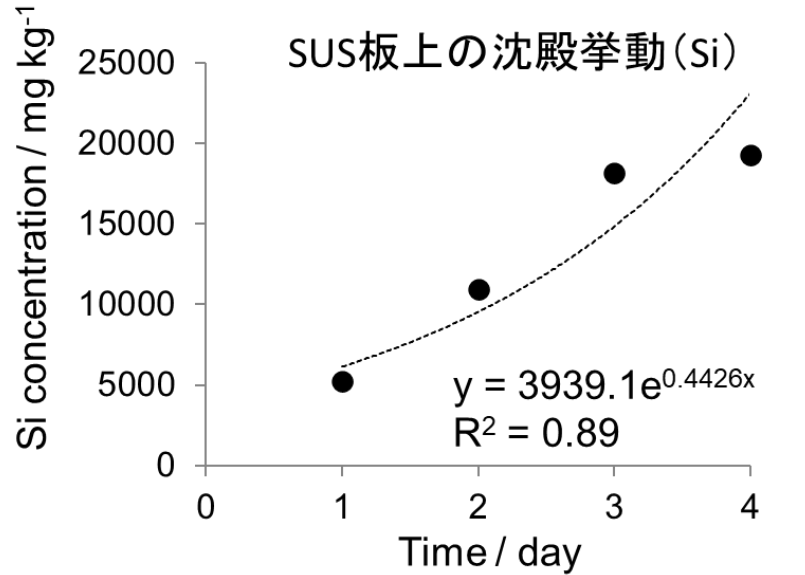
Polymerization Experiment - 3



- 個数の少ないやや大きなポリケイ酸が反応初期のケイ酸の重合で生成
- 大部分のポリケイ酸は20nm前後の大きさのまま

A発電所2号（テストピース浸漬による微量表面沈殿物の定量的解析）

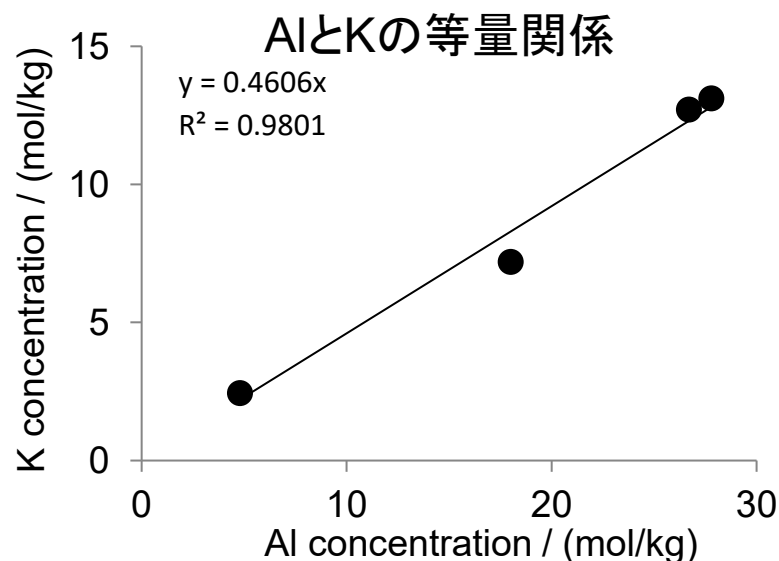
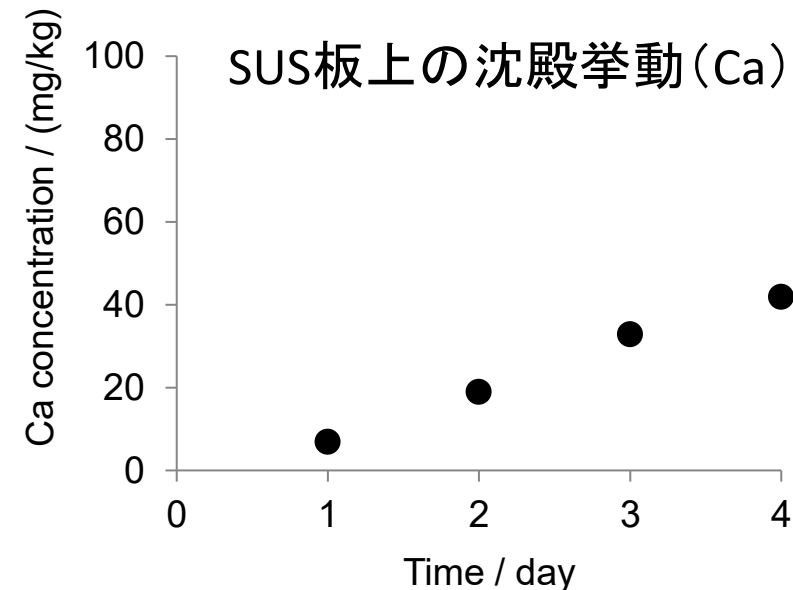
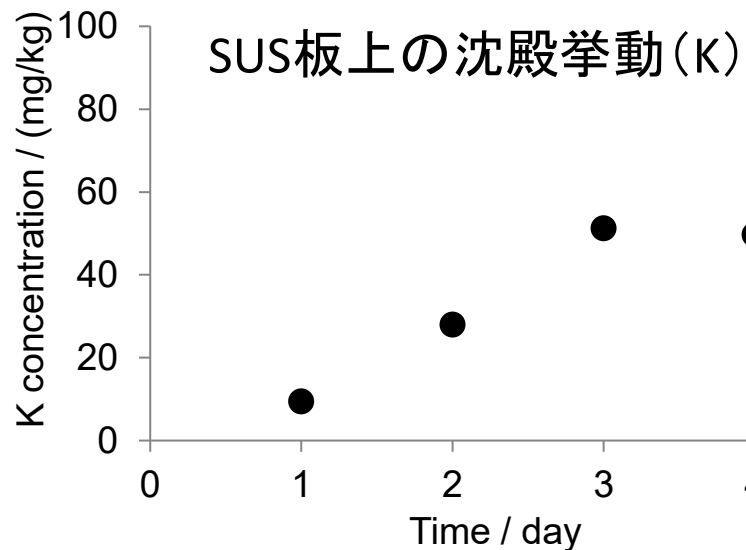
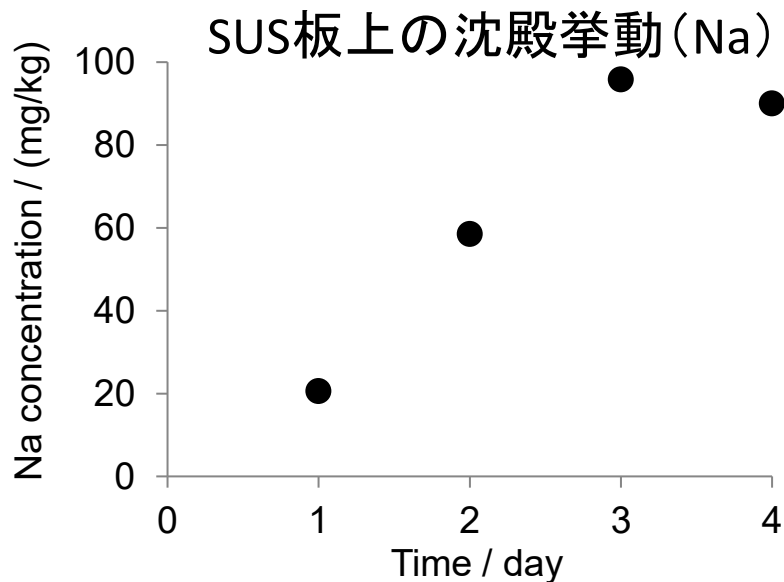
pH調整前（pH 8.6）



- Si、Alともに単調増加を示す（強い相関あり）
- ケイ酸はアルミニウムと化学量論反応で沈殿
→ シリカスケールの生成の主反応

A発電所2号（テストピース浸漬による微量表面沈殿物の定量的解析）

pH調整前（pH 8.6）

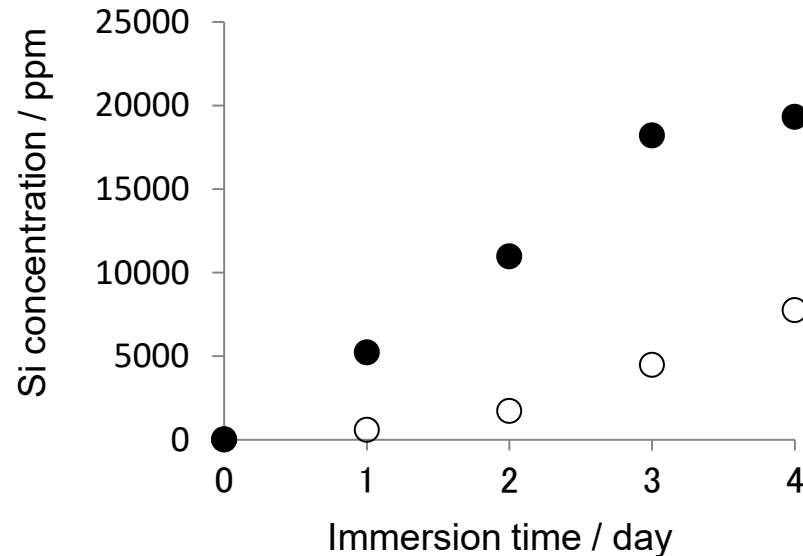


- 多元素同時分析により、熱水から沈殿物中への元素の移動が確認できる
 - Alとこれら元素の等量関係もみられることから、これら元素も化学量論反応でシリカスケールに取り込まれる
 - Si⁴⁺の沈殿にAl³⁺が取り込まれ、その電荷補償として静電的に取り込まれる
- シリカスケールの生成機構が見える

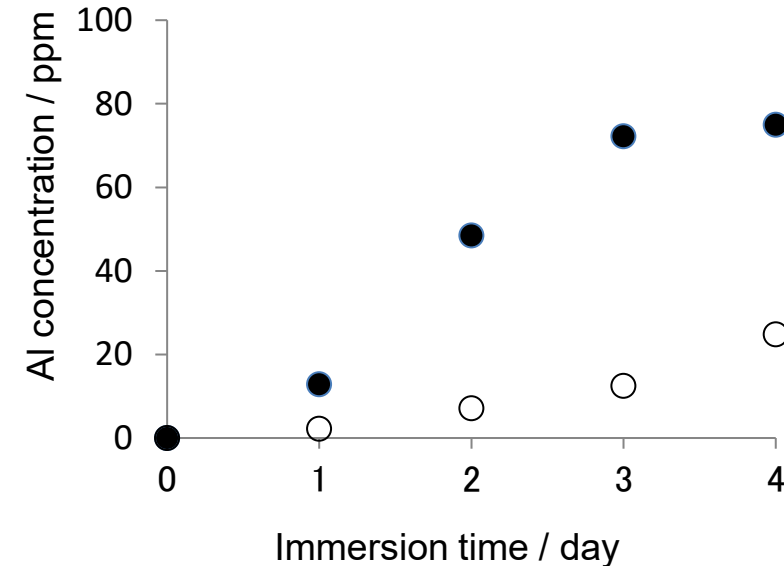
A発電所2号（テストピース浸漬による微量表面沈殿物の定量的解析）

pH 8.6とpH5.1の比較 (pH調整法の効果)

SUS板上の沈殿挙動 (Si)



SUS板上の沈殿挙動 (Al)



pH調整前後のSUS板へのSiとAlの吸着挙動（●：pH 8.6, ○：pH 5.1）

* pHを8.6から5.1へ調整することでSiとAlの付着速度がかなり低下（pH調整法の効果）

A 発電所2号（アルミニウムの化学状態をNMR分析）

pH 8.6とpH5.1の比較 (pH調整法の効果)

地熱熱水を酸性化することで何故シリカスケールの生成速度は低下するのか？
ケイ酸とアルミニウムは酸性化により化学状態を変えるのか？
(同じ熱水の化学成分でもスケール生成に差異があることは経験的に知られている)



* ケイ酸はpHが低下することでイオン状態から中性分子へと変化



ケイ酸の吸着挙動に影響

* アルミニウムは熱水のpHが低下することでどのように変化するのか？

この解明のために、アルミニウムは水溶液中での化学状態を維持したままイオン交換樹脂に吸着させ、この化学状態を ^{27}Al MAS NMRで分析

* 同様に、シリカゲルへ吸着したアルミニウムの化学状態を熱水中の状態と比較
シリカスケール生成によりアルミニウムの化学状態変化を分析

特に、 ^{27}Al MAS NMR：化学シフト値から4配位 $\text{Al}(\text{AlO}_4)$ と6配位 $\text{Al}(\text{AlO}_6)$ を区別できることに着目

A 発電所2号（アルミニウムの化学状態をNMR分析）

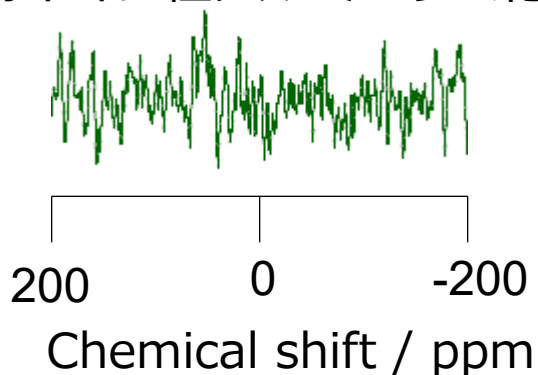
pH 8.6とpH5.1の比較

（pH調整法の効果）

イオン交換樹脂に吸着したアルミニウムの ^{27}Al MAS NMRスペクトル

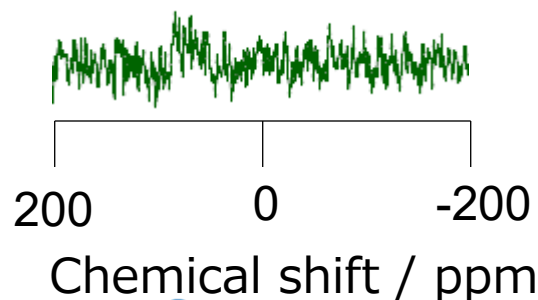
pH = 8.6 Na形陽イオン交換樹脂

吸着する陽イオン性アルミニウム化学種は存在しない



pH = 5.1

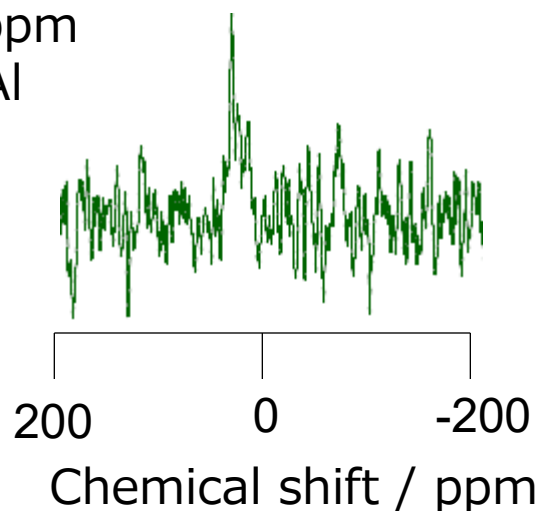
吸着する陽イオン性アルミニウム化学種は存在しない



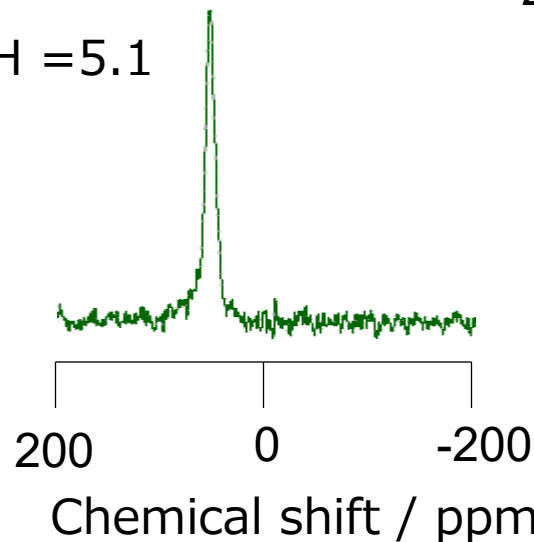
pH = 8.6 Cl形陰イオン交換樹脂

36.4 ppm

5配位Al



pH = 5.1



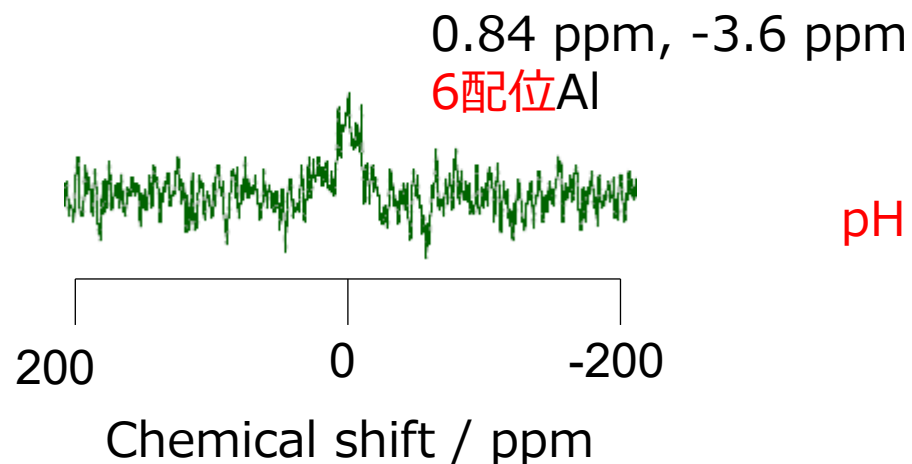
52.7 ppm

4配位アルミノケイ酸錯体

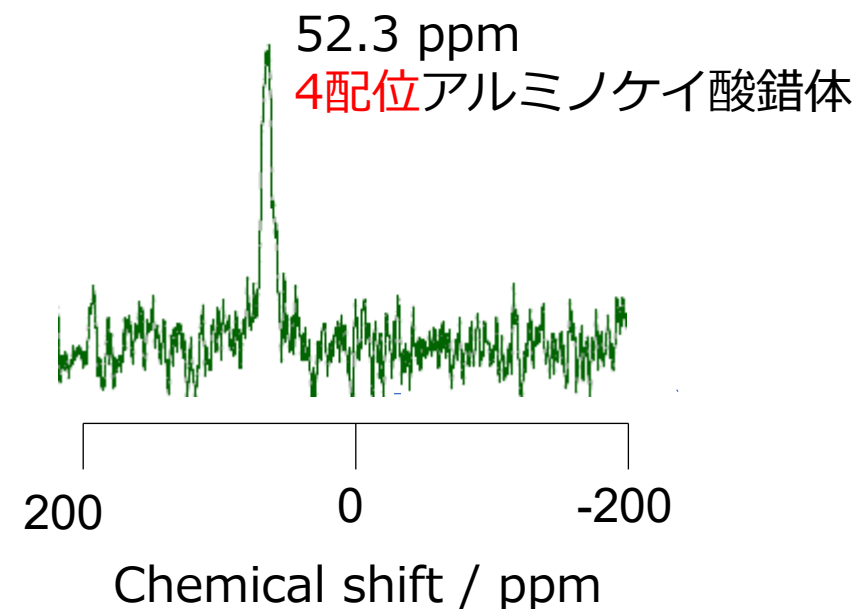
A発電所1号（アルミニウムの化学状態をNMR分析）

イオン交換樹脂に吸着したアルミニウムの ^{27}Al MAS NMRスペクトル

pH = 4.5 Na形陽イオン交換樹脂

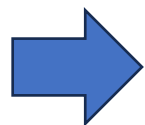


pH = 4.5 Cl形陰イオン交換樹脂

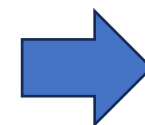


pH = 4.5では、4配位と6配位のAlが両方存在

pH調整法でpHを
変えること



熱水のpHだけが単に変化し、ケイ酸の
重合を抑制するだけではなく、溶存
化学種を変えてしまう



シリカスケール生成機構
そのものを変えてしまう

定量的スケールモニタリング法で明らかになったスケール生成のメカニズム

- ケイ酸の重合試験 → ケイ酸の重合過程でアルミニウムが取り込まれる
- ポリケイ酸粒子径測定 → ケイ酸の重合の可視化
- シリカゲルへの吸着実験
 - * ケイ酸とアルミニウムが吸着 → シリカスケールの生成反応とみなせる
- イオン交換樹脂を用いるアルミニウムの吸着
 - * 熱水中のアルミニウムの化学状態
 - pHの違いおよび熱水の性質により熱水中でのAlの化学状態が異なる
(6配位Alと4配位Alのスケール生成への関与の仕方の違い)
- テストピース浸漬による微量表面沈殿物の定量的解析
 - * シリカスケールを構成する元素の吸着挙動
 - ケイ酸はアルミニウムとの化学量論反応で沈殿 (生成速度と生成機構)

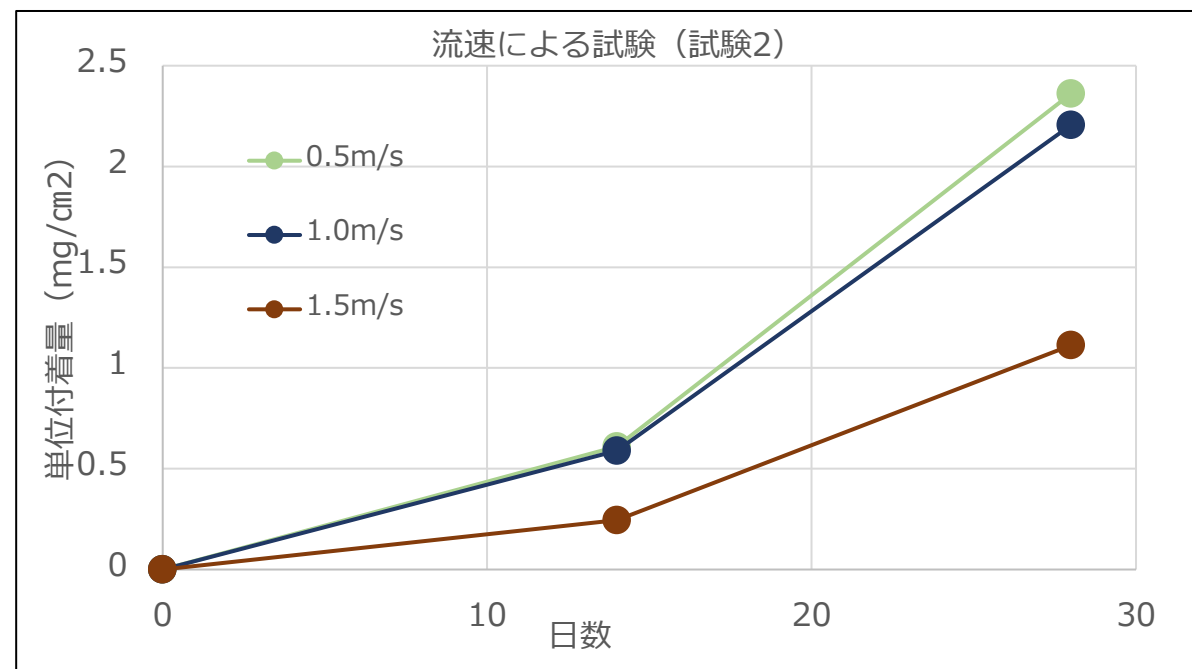
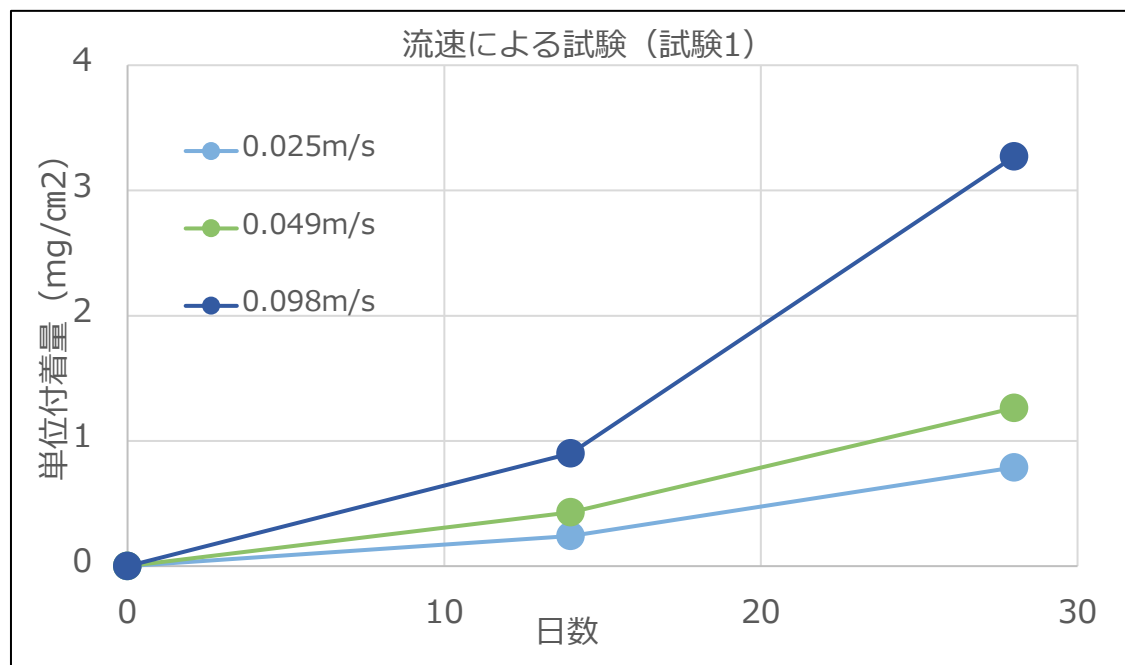
◎ 流速と粗さの違いによるスケール生成挙動の違いを定量的スケールモニタリングで調べた

実証試験でのデータ収集（流速による試験）

実証試験装置を用いて異なる流速での試験を実施した。

試験 1 は滞留槽内の速度（0.025m/s）、試験 2 は還元配管内の速度（0.84m/s）を基準として試験を実施した。

【*テストピース材質：Ti、粗さ：0.4 μ m】

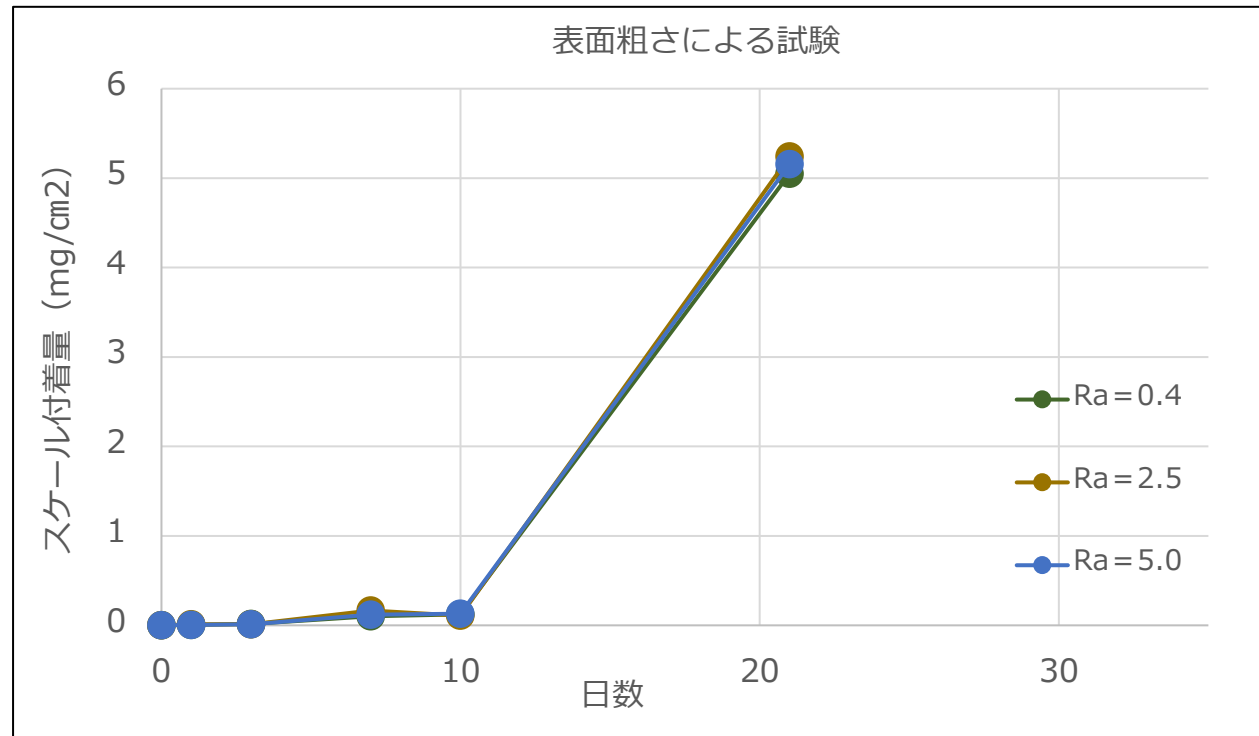


この結果、低速度である0.025～0.098m/sまでは流速の上昇とともに、スケール付着量が増加した。高速度での試験では、0.5及び1.0m/sはほぼ同等値となり、1.5m/sになると付着量が減少する結果であった。また、1.5m/sでは0.049m/sと同等レベルまでスケール付着量が下がる結果であった。

表面粗さによるスケール付着試験結果（滞留槽浸漬による試験）

異なる粗さのテストピース（ $Ra=0.4\mu\text{m}$ 、 $2.5\mu\text{m}$ 、 $5.0\mu\text{m}$ ）を用いて、スケール付着試験を実施した。

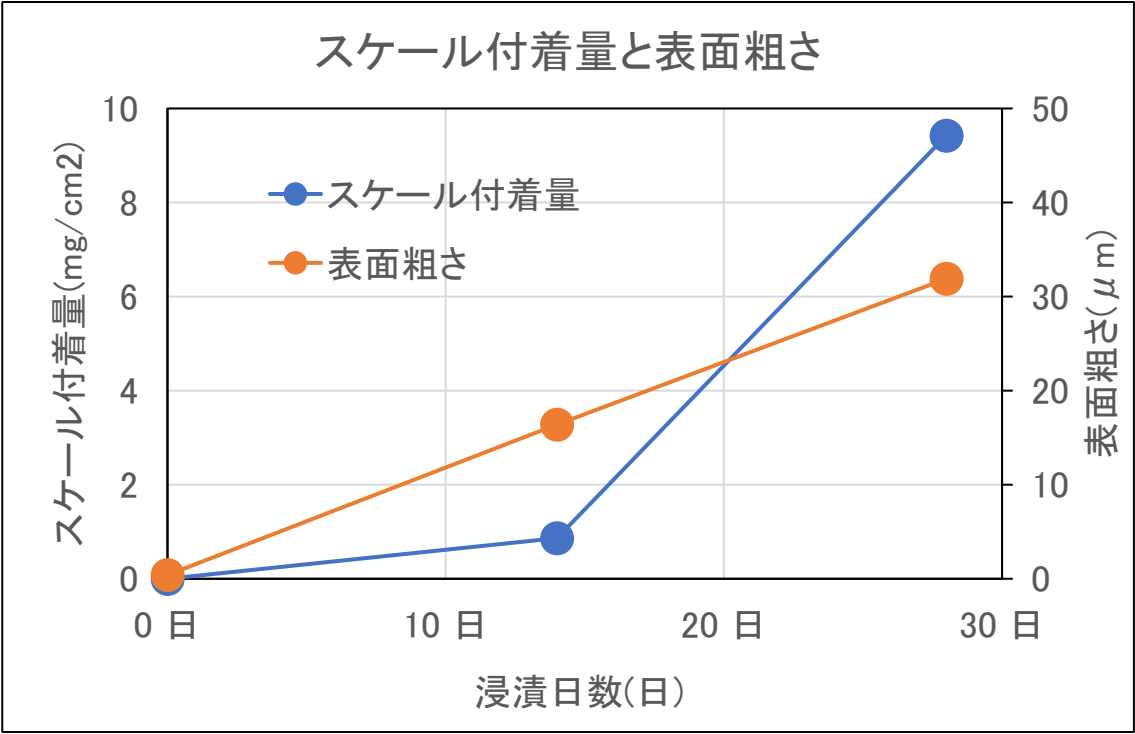
【* 流速 = 0.049m/s 、テストピース材質 Ti】



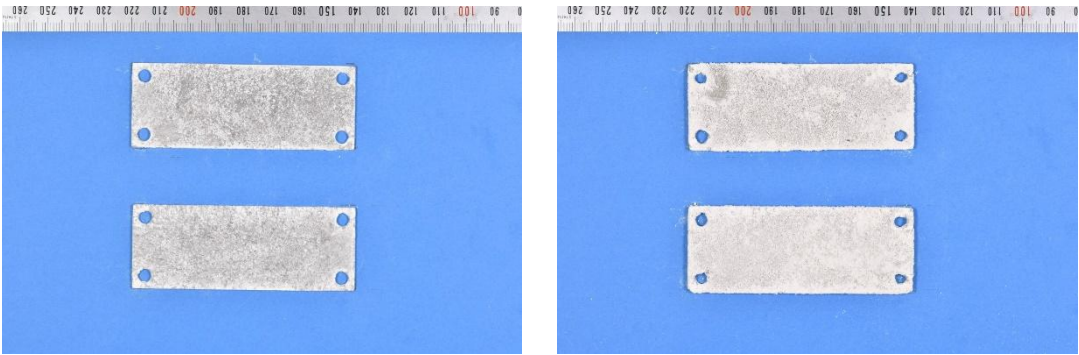
いずれも10日以降に急激にスケール付着量の増加が見られたが、粗さの違いによるスケール付着量の違いは見られなかった。

スケールが付着したテストピース表面の粗さ分析

A発電所 1号滞留槽出口で長期スケール試験を行ったテストピース表面の粗さ分析を実施した。



		浸漬前	浸漬14日	浸漬28日
スケール付着量	(mg)	0.0	42.0	458.4
単位付着量	(mg/cm ²)	0.000	0.864	9.43
表面粗さ(Ra)	(μm)	0.4	16.4	31.9



浸漬 1 4 日

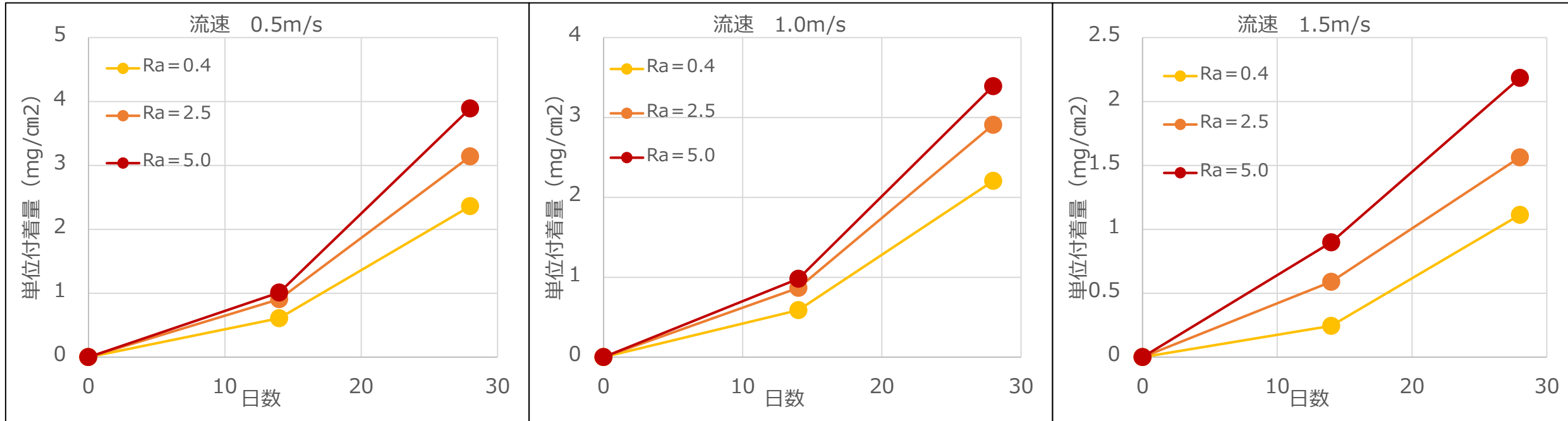
浸漬 2 8 日

スケール付着量の増加に伴って、表面の粗さは粗くなるという結果であった。

実証試験でのデータ収集（表面粗さと流速による試験）

実証試験装置を用いてテストピースの粗さ（ $Ra=0.4\mu\text{m}$ 、 $Ra=2.5\mu\text{m}$ 、 $Ra=5.0\mu\text{m}$ ）と高流速（ 0.5m/s 、 1.0m/s 、 1.5m/s ）によるスケール付着試験を実施した。

【テストピース材質 Ti】



いずれの流速でも、テストピースの粗さが粗くなるにしたがって、スケールの付着量が多くなるという結果であった。

定量的スケールモニタリング法で明らかになったスケール生成のメカニズム

- ケイ酸の重合試験 → ケイ酸の重合過程でアルミニウムが取り込まれる
- ポリケイ酸粒子径測定 → ケイ酸の重合の可視化
- シリカゲルへの吸着実験
 - * ケイ酸とアルミニウムが吸着 → シリカスケールの生成反応とみなせる
- イオン交換樹脂を用いるアルミニウムの吸着
 - * 熱水中のアルミニウムの化学状態
 - pHの違いおよび熱水の性質により熱水中でのAlの化学状態が異なる
(6配位Alと4配位Alのスケール生成への関与の仕方の違い)
- テストピース浸漬による微量表面沈殿物の定量的解析
 - * シリカスケールを構成する元素の吸着挙動
 - ケイ酸はアルミニウムとの化学量論反応で沈殿 (生成速度と生成機構)
- * このようなシリカスケール生成に影響する因子をAIによる機械学習にどのように反映させるかが次のAIの利活用への課題
 - AIに機械学習させるパラメータへの反映 (主として)
 - 熱水性状
 - 定量的スケールモニタリングから得られた各元素の吸着速度
 - シリカゲルへのケイ酸とAlの吸着速度
 - pHのグルーピング: Alおよびケイ酸の化学状態を反映
 - [モノケイ酸濃度]/[全ケイ酸濃度]: 熱水中におけるケイ酸の重合状態およびAlの化学状態を反映

スケール生成予測AI構築（概要）

- ・スケールモニタリング法におけるデータセット（熱水組成とスケール生成）を構築し、AIによる長期的なスケール生成予測を目指す。
- ・並行して、発電設備の利用率向上に向け、発電所運転データ、スケール成長速度等のデータを収集、検証し、スケール生成予測を利用率向上に反映させる方法論についても検討。

小規模データによるパラメータ調整

説明変数パラメータ	パラメータ入力
熱水性状	・ 各元素濃度 ・ pH, 濃度のグルーピング(pH, Si, Fe, Al)
重合試験	・ 濃度(SiM, SiT, AIR) ・ モノケイ酸(SiM)、全ケイ酸濃度(SiM)の比 ・ 時間当たりの濃度変化量(SiM, SiT, AIR)
テストピース浸漬試験	・ 時間に対する濃度変化量

最良の学習精度の
入力形式を保存



大規模データに応用

スケール生成予測AI構築（学習パラメーター）

• 説明変数 パラメータ：データ数 44(小規模)

- 熱水成分パラメータ：
 - 'Temp', 'Flow', 'pH-Field', 'EC', 'Na', 'K', 'Ca', 'Mg', 'Al-Total', 'Cl', 'SO4', 'As', 'Fe-Total', 'Si-Total' :
 - 熱水の温度、流量、pH, EC, 各元素成分の濃度(ppm)
 - 'SSI' : アモルファスシリカの溶解度 (Gunnarsson & Arnórsson, 2000)
- 重合試験パラメータ
 - 'SiT_0', 'SiT_5', 'SiT_10', 'SiT_20', 'SiT_30', 'SiT_45', 'SiT_60' : 時間0～60分における全ケイ酸濃度[ppm]
 - 'SiM_0', 'SiM_5', 'SiM_10', 'SiM_20', 'SiM_30', 'SiM_45', 'SiM_60' : 時間0～60分におけるモノケイ酸濃度[ppm]
 - 'AIR_5', 'AIR_10', 'AIR_20', 'AIR_30', 'AIR_45', 'AIR_60' : 時間0～60分における反応性アルミニウム濃度[ppm]
 - DLS-Number0' : 0分における粒子径
- テストピース浸漬試験パラメータ：
 - 'Ti-SUS' : 熱水槽に浸漬させた金属片の材質(0がTi, SUSが1)
 - 'time_day' : outputパラメータに対応する、金属片の浸漬時間（最大で28日）
 - 'Na-slope', 'Mg-slope', 'Al-slope', 'Si-slope', 'K-slope', 'Ca-slope' : 金属片に付着した各元素のLA-ICP-MSの1h～120hの濃度変化の近似直線の傾き

• 目的変数 パラメータ：

- 熱水に浸漬させた金属片に付着した重量(mg) 【最大に28日浸漬させている】

スケール生成予測AI構築（手法：ニューラルネットワークの構築）

• 基本手順

1. 生データを7:3の割合で訓練データとテストデータに分割した。
2. データをMaxminで正規化を行った。（①式）

$$x_{normalized_i} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \cdot \cdot \cdot \textcircled{1}$$

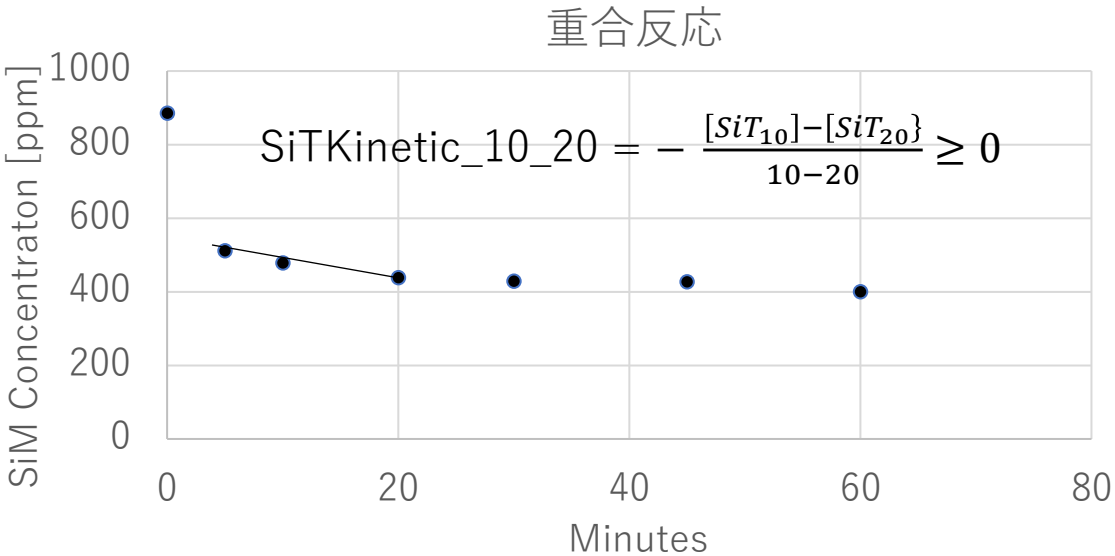
3. 隠れ層が1~10個の学習モデルを作成した。
4. アンサンブルモデルの作成のために、3~5個の組み合わせを計算し、最も学習精度が高い(真値に対する予測値の R^2 が1に近い)モデルを保存した。
5. 1~3を10回繰り返した。
6. 1~5で得られた10個のアンサンブルモデルから最も学習精度が高いモデルを代表モデルとした

スケール生成予測AI構築

(小規模データを用いた学習パラメーターの調整：データ数 44)

説明変数(短期試験)	目的変数(長期試験)
1. 熱水成分 + 浸漬日数	長期の浸漬によって 金属片に付着した シリカスケール重量
2. 熱水成分 + 浸漬日数 + テストピース浸漬試験	
3. 熱水成分 + 浸漬日数 + 重合試験 (SiT, SiM, AlR濃度)	
4. 熱水成分 + 浸漬日数 + 重合試験 (SiMとSiTの濃度比であるSiM/SiTパラメータを作成)	
5. 熱水成分 + 浸漬日数 + 重合試験 (SiM, SiT, AlRに対してKineticsパラメータを作成)	
6. 熱水成分 + 浸漬日数 + 熱水成分のグルーピング(pH及び濃度SiT, AlT, FeTをグループ分け)	

- 4, 5について、重合挙動を注目するため、独自のパラメータを使用した
- SiM / SiT：モノケイ酸濃度を全ケイ酸濃度で割ったもの。
 - $SiTKinetic_{t_1-t_2} = - \frac{[SiT]_{t_1} - [SiT]_{t_2}}{t_1 - t_2}$, $[SiT]_t$ は時間tにおけるSiTの濃度である。これと同様に、SiMKinetic, AlKinetics の計算を行った。



スケール生成予測AI構築

(小規模データを用いた学習パラメーターの調整：予測結果)

説明変数(短期試験)	最良モデルの学習精度 (R^2)	10個のアンサンブルモデルの平均精度(R^2)
1. 熱水成分 + 浸漬日数	0.7904	0.7182
2. 熱水成分 + 浸漬日数 + テストピース浸漬試験	0.9012	0.8287
3. 熱水成分 + 浸漬日数 + 重合実験(SIT, SiM, AIR濃度)	0.9495	<u>0.9061</u>
4. 熱水成分 + 浸漬日数 + 重合実験 (SiM/SiT)	0.8795	0.7927
5. 熱水成分 + 浸漬日数 + 重合実験 (Kinetics)	0.9466	<u>0.9173</u>
6. 熱水成分 + 浸漬日数 + 熱水成分のグルーピング	0.8689	0.8040

スケール量400mg未満のデータのみ使用

- 1の学習結果と比べ、2~6の学習パラメータを増やすことで、学習精度は改善された。
- 3, 5の重合実験の結果より、5のKineticsを用いた最良のモデルの精度は、3の精度より低かったが、10個のアンサンブルモデルの平均では最も精度が高かった。
→2, 4, 5, 6の学習モデルを統合して、再度学習モデルを作成した際、学習精度(R^2)は0.9698だった

スケール生成予測AI構築

(大規模データを用いた学習：データ数 157)

・説明変数 パラメータ：

・熱水成分パラメータ：

- ・ 'Temp', 'pH-Field', 'Na', 'K', 'Ca', 'Mg', 'Al-Total', 'Cl', 'SO4', 'Fe-Total', 'Si-Total' : 熱水温度,pH, 各元素成分の濃度 [ppm]

- 6 {
- ・ pH_group, Si_group, Al_group, Fe_group : 各パラメータをグルーピングし、小さい値のグループから0,1,2と値付けしたもの

・重合試験パラメータ：

- 5 {
- ・ 'SiTKinetic_0_5', ..., 'SiMKinetic_45_60' : 0~60分の各時間における単位時間当たりの全ケイ酸濃度変化量[ppm/min]
 - ・ 'SiMKinetic_0_5', ..., 'SiMKinetic_45_60' : 0~60分の各時間における単位時間当たりのモノケイ酸濃度変化量[ppm/min]
 - ・ 'AlRKinetic_0_5', ..., 'AlRKinetic_45_60' : 0~60分の各時間における単位時間当たりの反応性Al濃度変化量[ppm/min]
- 4 {
- ・ 'SiM_SiT0', 'SiM_SiT5', ..., 'SiM_SiT60' : 0~60分の各時間におけるモノケイ酸濃度/全ケイ酸濃度(SiM/SiT)

・テストピース浸漬実験パラメータ：

- ・ 'Ti-SUS' : 熱水槽に浸漬させた金属片の材質(0がTi, SUSが1)
 - ・ 'time_day' : outputパラメータに対応する、金属片の浸漬時間 (最大で91日)
- 2 {
- ・ 'Na-slope', 'Mg-slope', 'Al-slope', 'Si-slope', 'K-slope', 'Ca-slope' : 金属片に付着した各元素のLA-ICP-MSの1h~120hの濃度変化の近似直線の傾き

・目的変数 パラメータ：

- ・ 金属片単位面積あたりの付着物の重量[mg/cm²]
- ・ 1日当たりの金属片単位面積あたりの付着物の重量[mg/cm²/day]

スケール生成予測AI構築

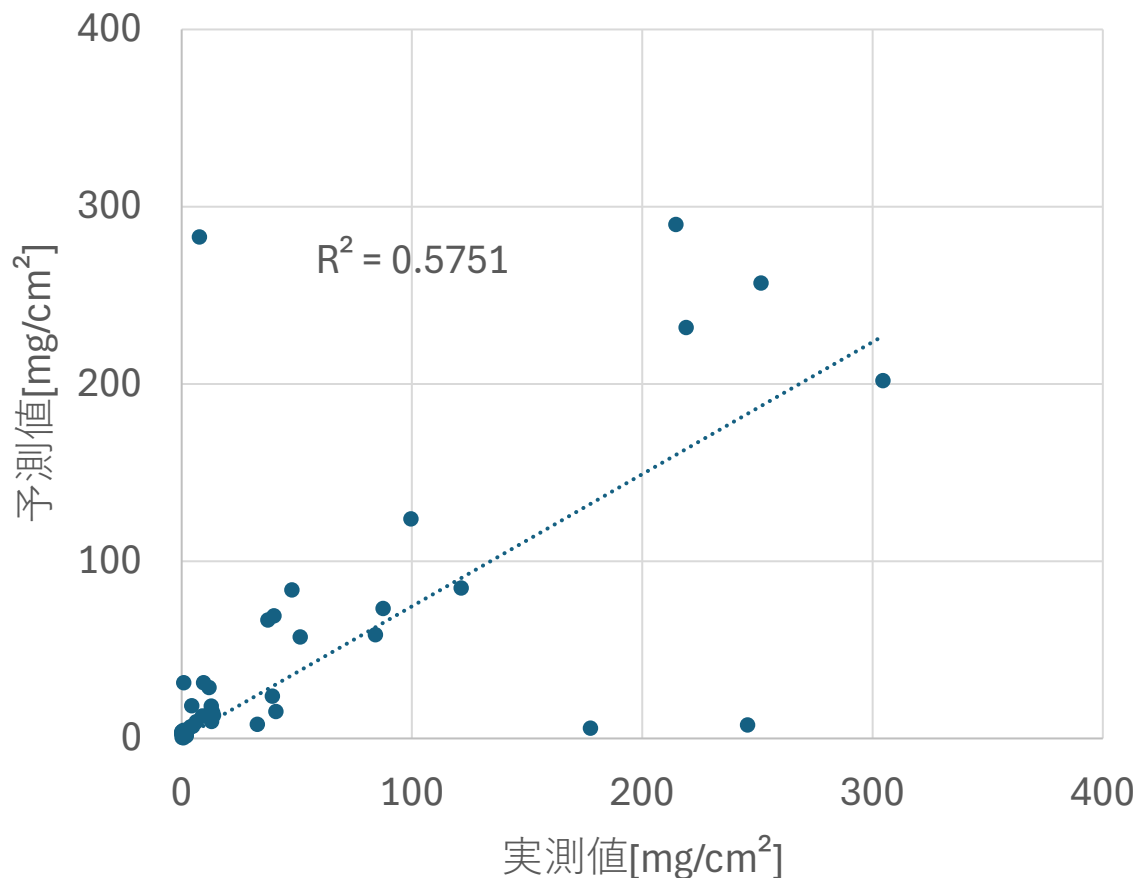
(大規模データを用いた学習：Multi-Sigma 作成モデル)

File name	8bb4d7b	26398fe	925b9e4	130da1a
Number of epochs	7858	4828	2812	6138
Number of hidden layers	8	6	3	7
Number of neurons of hidden layers	82	25	25	68
Dropout rate of the input layer	0	0	0	0
Dropout rate except for the input layer	0	0	0	0
Size of training data	98	98	98	98
Batch size	26	28	20	62
Number of patience in early stopping	7858	4828	2812	6138
Validation set ratio in early stopping	0	0	0	0
Activation function except for the output layer	relu	relu	relu	relu
Activation function for the output layer	linear	linear	linear	linear
Optimizer	adam	adam	adam	adam
Number of epochs when training stopped	7858	4828	2812	6138
Cumulated distance between validation data	12.75017	13.84978	14.25602	13.38144
RMSE on the scale after preprocessing	0.023	0.023	0.025	0.026

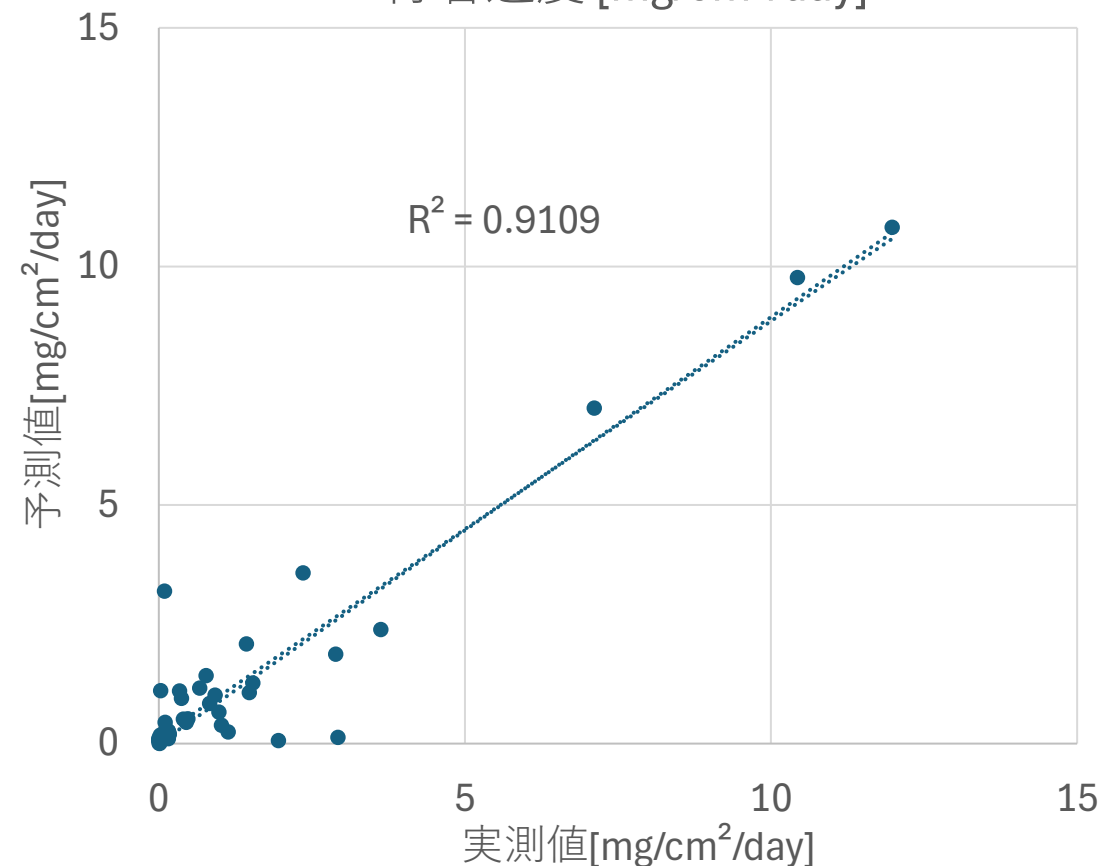
スケール生成予測AI構築

(大規模データを用いた学習：アンサンブルモデルの学習精度)

付着重量 [mg/cm²]



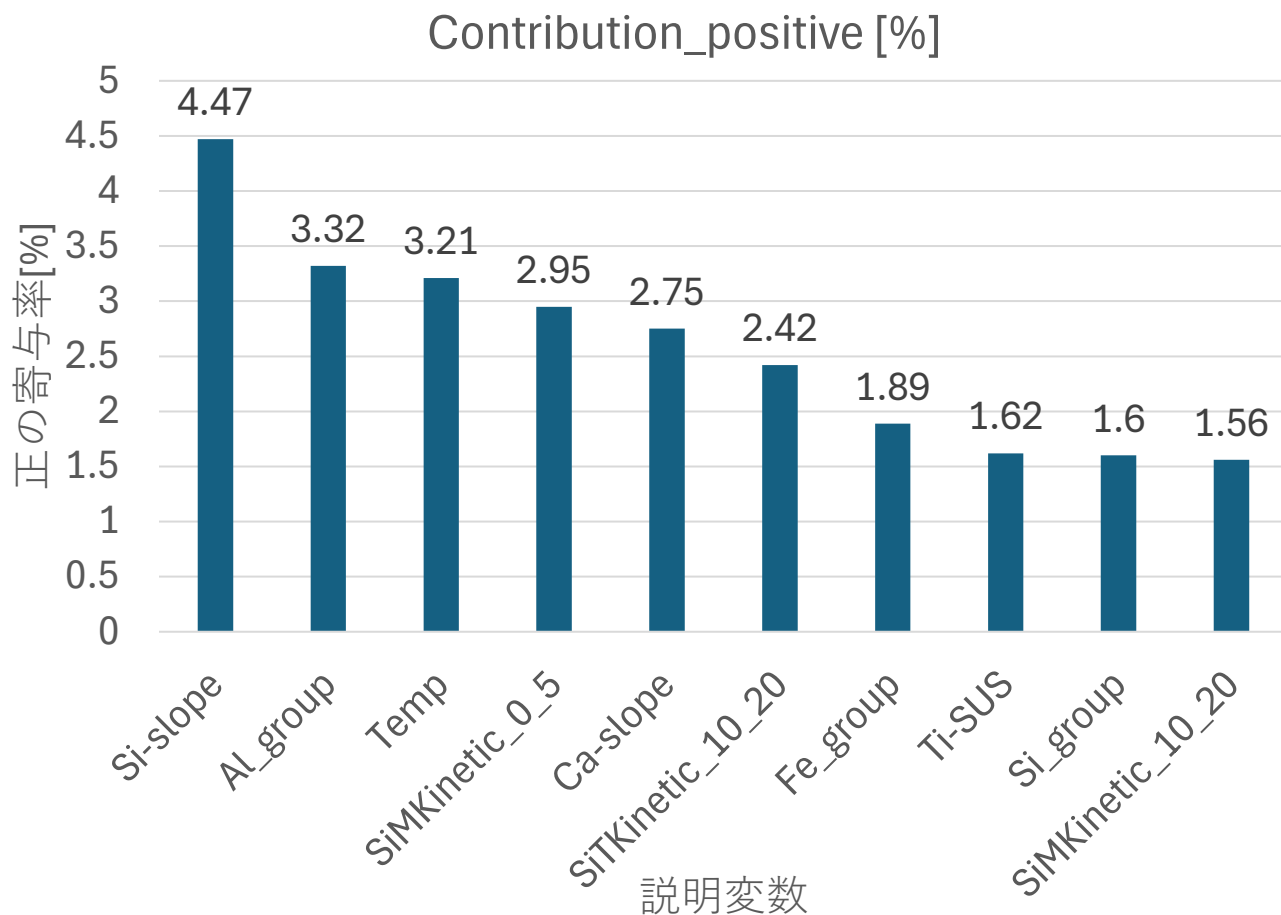
付着速度 [mg/cm²/day]



- 4つの学習モデルを使用したアンサンブルモデルによる学習精度は、付着重 [mg/cm²] と付着速度 [mg/cm²/day] のそれぞれで0.5751と0.9109だった。

スケール生成予測AI構築

(Multi-Sigmaを用いた付着速度への寄与率：正の寄与率)

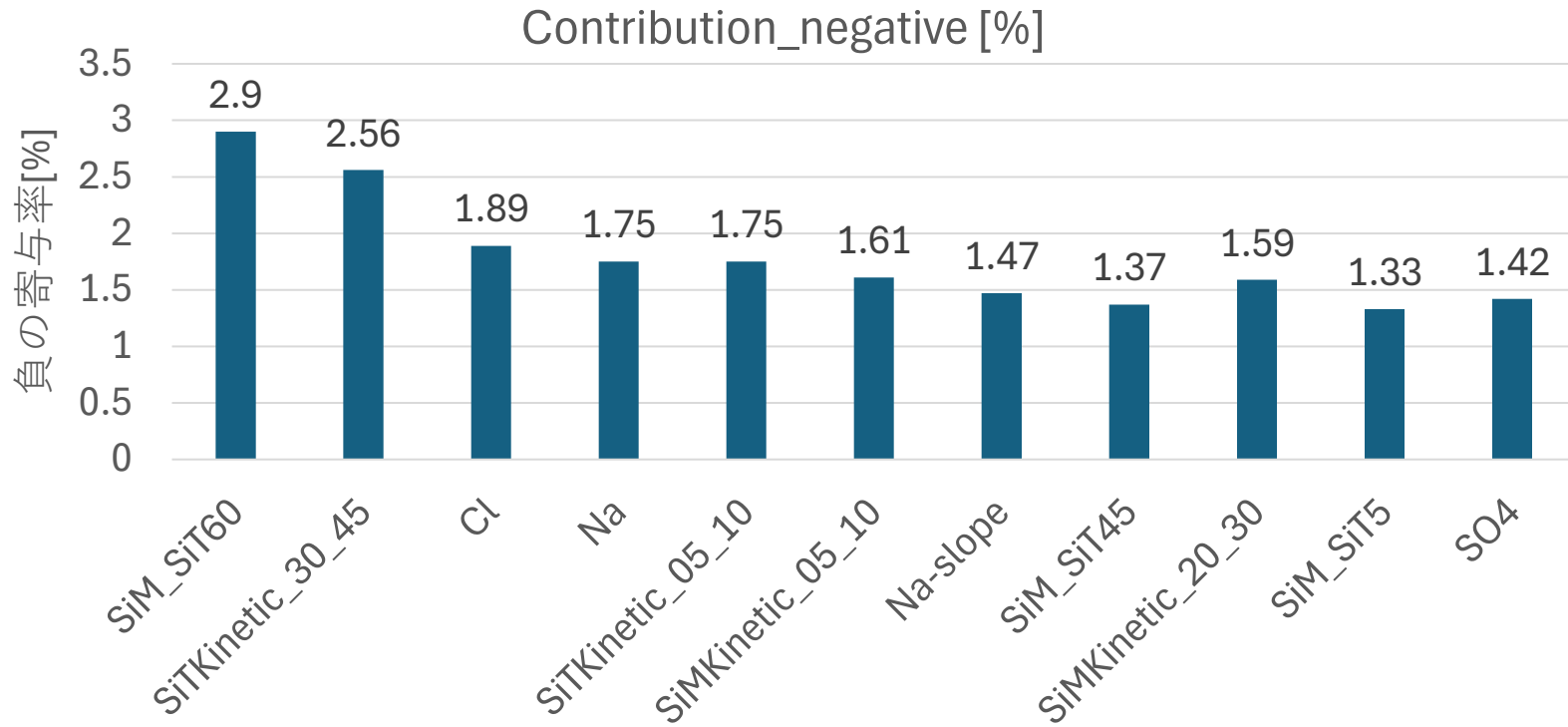


- ・ Si-slopeに4.47%の正の寄与があり、0~120hの間で浸漬させた金属片に付着するSiの濃度が高ければ高いほど、付着速度が高くなることが示されている。

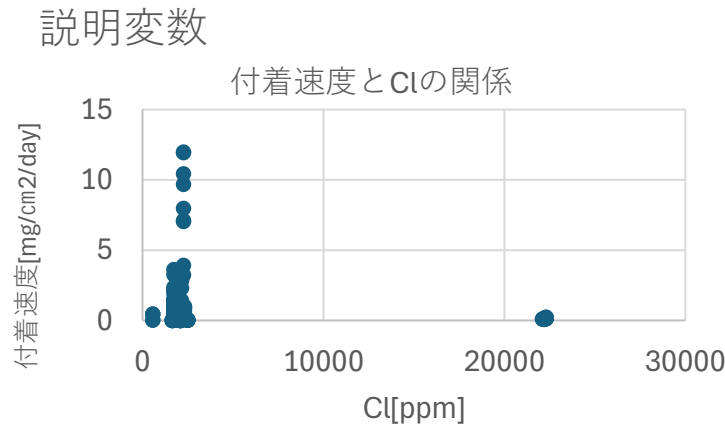
- ・ 熱水性状に関して、Grouping処理を行ったAl_group, Fe_group, Si_groupも比較的高い正の寄与を有していた。この結果は、熱水中の各全濃度が高ければ付着速度が高くなることを示しており、AlとFeがシリカ質沈殿物に濃集すること(Yokoyama et al., 1993)の報告に矛盾しない。

スケール生成予測AI構築

(Multi-Sigmaを用いた付着速度への寄与率：負の寄与率)



- 60分におけるモノケイ酸濃度を全ケイ酸濃度で割ったSiM/SiT60の負の寄与が2.9%と比較的高かった。
- NaとNa-slopeに付着速度に対して負の寄与が見られるが、熱水中のNa濃度が極端に高い説明変数を使用したことが原因であると考えられる。Cl濃度に関しても同様のことが言える。



スケール生成予測AI構築（結論）

- 小規模データを用いた学習パラメータの調整より、熱水成分だけでなく、熱水成分のGrouping(溶存化学状態を反映)、テストピース浸漬実験、重合度合いの指標(SiM/SiT、 Kinetics)、をそれぞれ用いることで学習モデルの精度(R^2)が改善された。
- 付着速度に対する寄与率の結果から、SiM/SiTを使用した指標によって重合反応が起こりやすい系を捉えていること、AlやFeがスケール生成に寄与していることを示していた。

化学的な知見を基にしたシリカスケール生成の挙動をAIの要因分析で反映させることが可能であり、スケール対策の一助になる

最終目標のイメージ

還元量が確保できないため出力抑制

【A 発電所】
2023年12月～2025年12月の実績
平均出力31.5MW 還元量585t/h

スケール予測AIを用いて熱水条件に
合わせた適切なスケール抑制処理

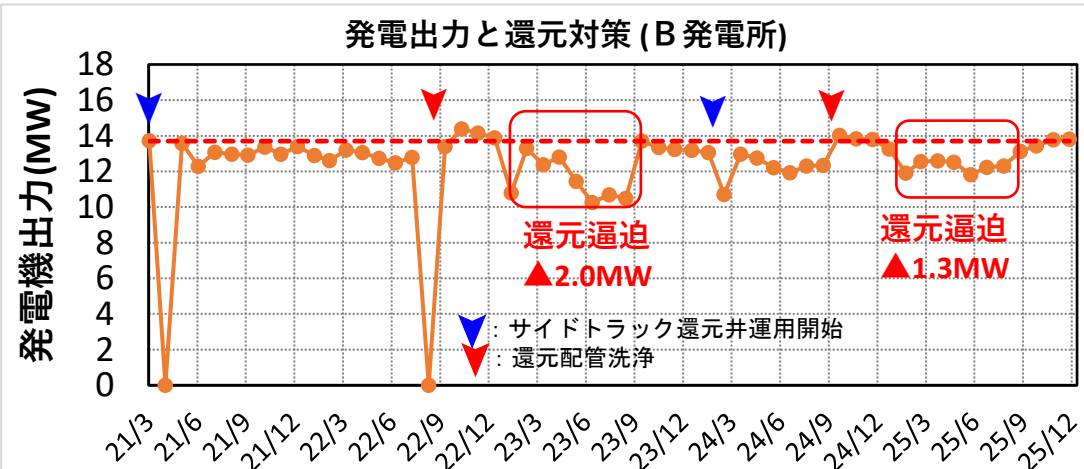
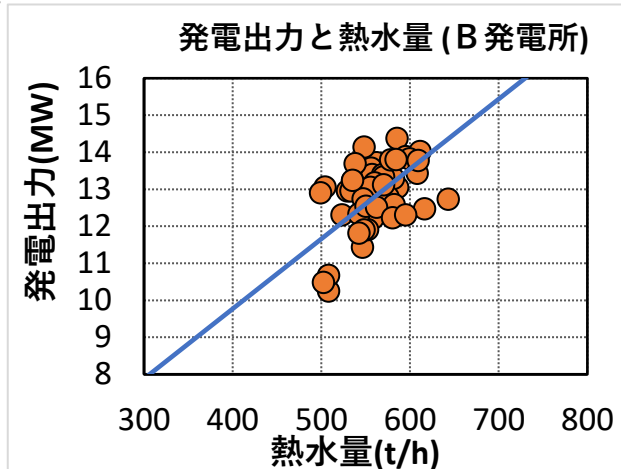
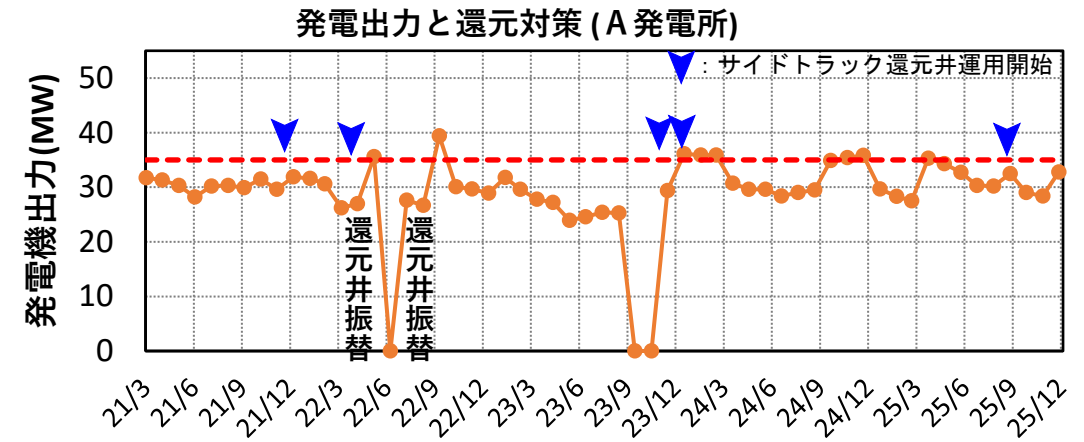
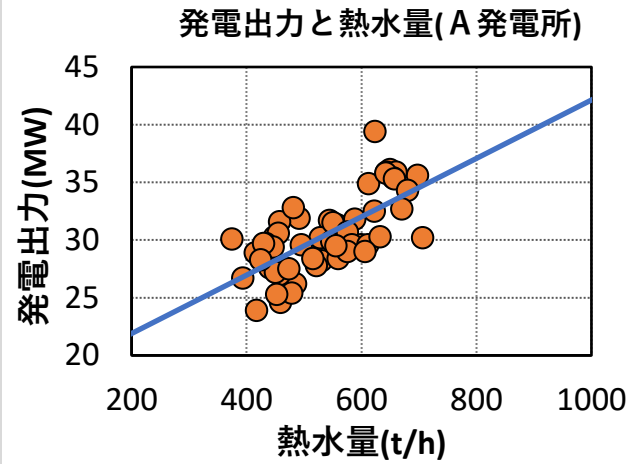
還元容量700t/h確保 出力35MW
+3.5MW(11%)

【B 発電所】
2023年2月～2023年9月及び2025年2月～
2025年8月の実績
平均出力11.9MW 還元量554t/h
平均低下出力1.7MW

スケール予測AIを用いて熱水条件に
合わせた適切なスケール抑制処理

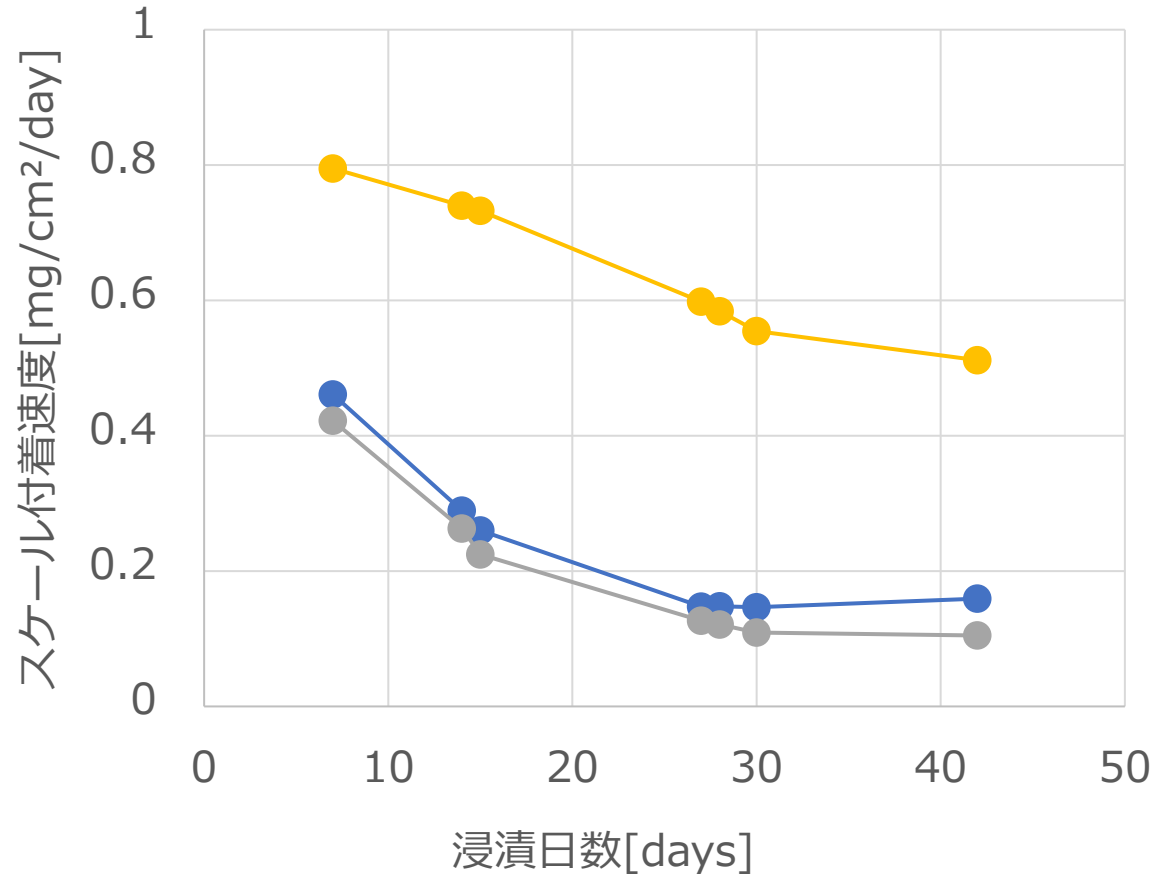
還元容量600t/h確保 出力13.6MW
+1.7MW(14%)

還元配管、還元ピット清掃のために生じる発電
抑制回数の減少、清掃工事期間の短縮効果も見
込まれる



AIを用いたシリカスケール付着速度評価

AIによるスケール付着速度予測



- 硫酸添加前の熱水pH8.3から予測されるスケール付着速度と硫酸添加後のpH5および4で予測されるスケール付着速度には大きな差が出ることが示された

→ この例では、pHを4に下げても5のときとあまり抑制効果は変化しないことが示唆され、最適なスケール抑制方法へ応用可能

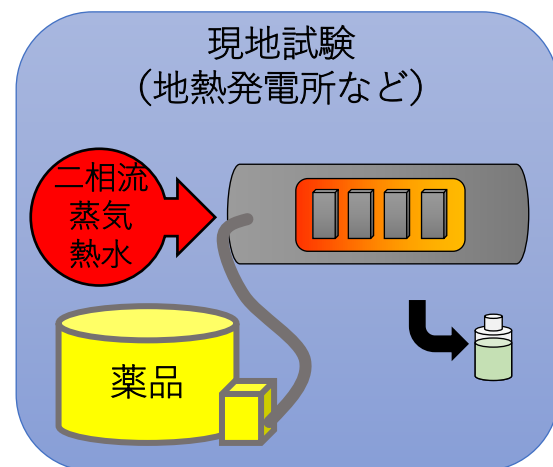
ビジネスモデルについて（１）

- ・ 既存発電所のスケール対策コンサル

スケールによるトラブルや還元スケール対策で困っている発電所での短期間現地試験からスケール生成を予測（AI利活用）し、スケール抑制についてのコンサルティングを行う。

- ・ 新規調査井のスケール評価

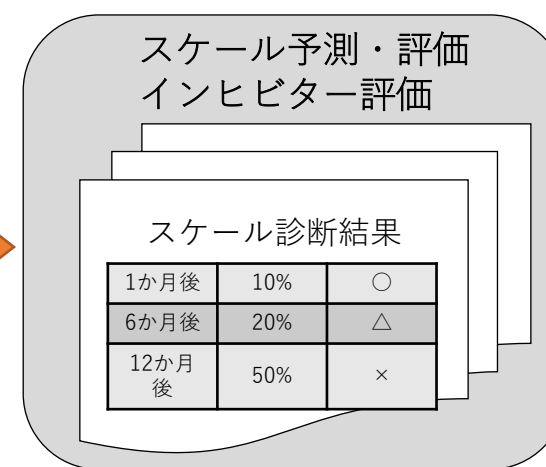
噴気試験時の流体分析にあわせて短期スケール試験を行いスケール評価を行う。



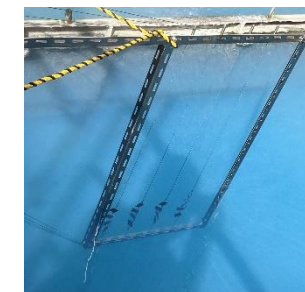
テストピース浸漬法を用いた
現地試験



LA-ICP-MS等スケール分析、熱水分析



スケール生成予測（AIを利活用）
スケール抑制コンサルティング



ビジネスモデルについて（２）

・インヒビターの評価

短期スケールモニタリング法を用いて実運用に応じたインヒビターの選定、注入方法や注入量等の評価を行う

・実証試験装置を用いた評価試験(実機では検証しにくい条件での試験)

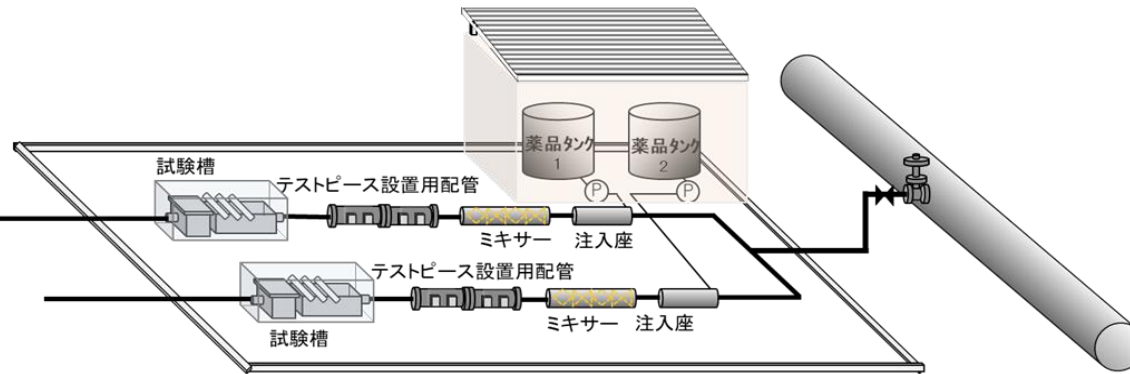
- ・ pH値によるスケール生成及び腐食試験
- ・ 薬剤によるスケール抑制効果試験
- ・ 材質によるスケール生成試験



長期テストピース設置部



短期テストピース試験槽



薬液注入部



実証試験装置



薬注ポンプ

ご清聴ありがとうございました