

NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.2-8

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：2025年7月17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：九電産業(株) 渡邊 英樹

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

背景：地熱発電におけるスケール問題

多くの地熱発電所は依然としてスケール問題を抱え続けている

年度	1997年	2016～2018年 平均	減少
発電電力量(GWh)	3,757	2,434	1,323
暦日利用率(%)	81	56	25

* 日本の地熱発電所における
発電電力量と暦日利用率の変化

▶ 還元井の還元容量減衰

→ 生産抑制、発電出力低下

熱水が還元できないため、生産井を絞ることとなり、発電出力低下



スケールが付着した
還元熱水配管

▶ 熱水輸送管の閉塞

→ メンテナンスコスト増、
設備停止

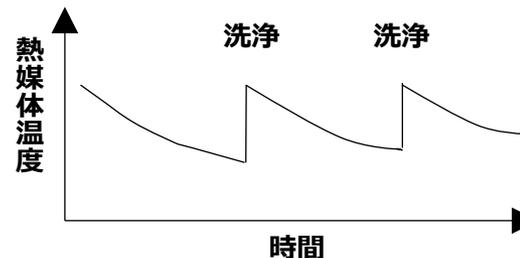
場所によってスケール付着量が異なり、
メンテナンス周期、箇所決定が困難。
結果として突発作業が発生、設備停止



▶ バイナリー熱交換器のスケール付着

→ 熱交換効率低下

熱交換効率低下による出力低下、ス
ケール除去のため設備停止



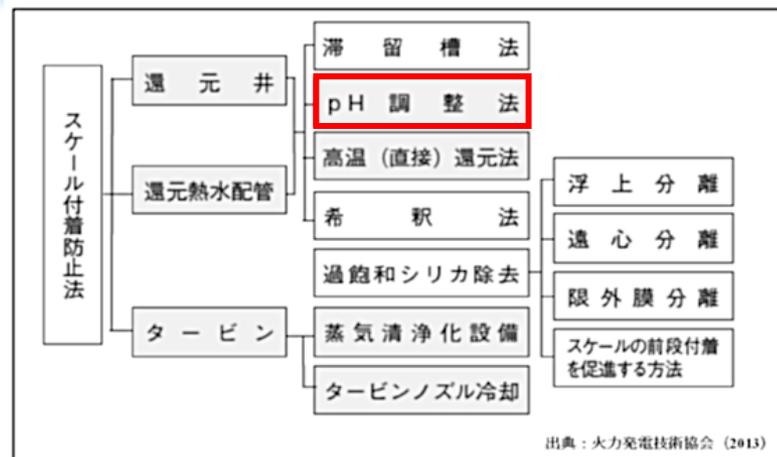
目標・目的

現状の対策法

還元熱水のシリカスケール対策は硫酸添加によるpH調整法が主流

pHを5に調整してもスケールの生成は起こる

熱水の特性等により、完全な問題解決には至っていない。



適切なスケール対策がとれていない

スケールがどこにどのくらい付着するか予測できない

スケール対策の評価に時間がかかる

スケール生成には様々な因子が影響し予測が困難

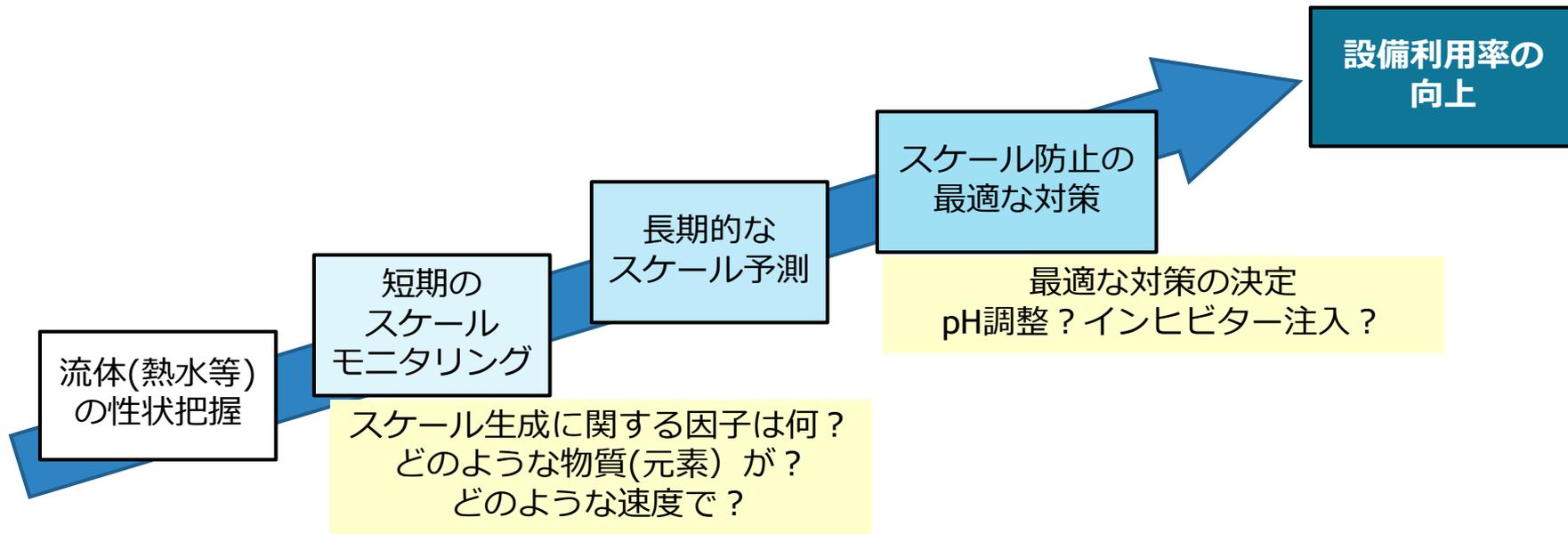
【問題が顕在化したときには手遅れ】

(数日程度の) 短期のスケールモニタリング法を確立し、そのデータから長期的なスケール生成を予測する技術を確立する

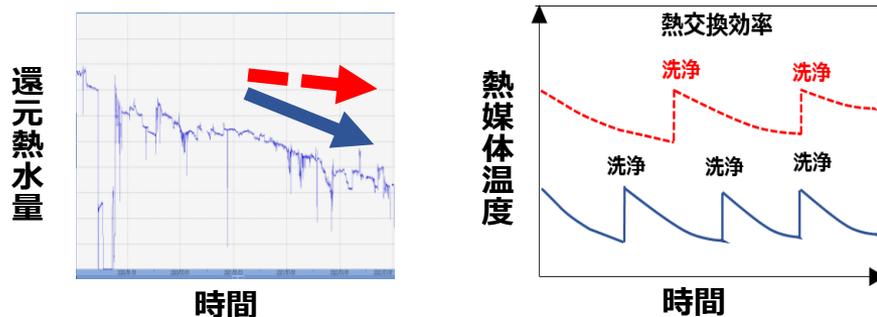
【最終目標】 地熱発電所におけるシステム利用率を10%~20%向上

課題解決のアプローチ

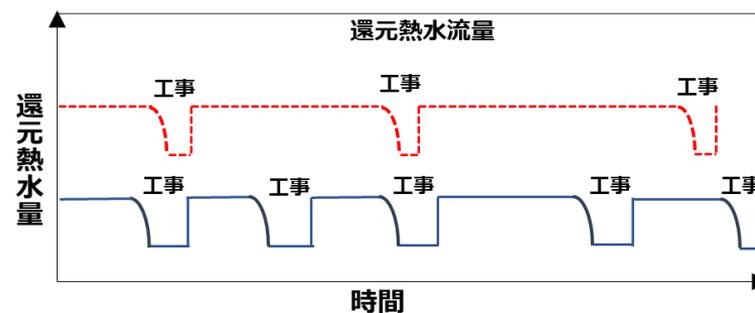
新規のスケールモニタリング法・評価法を確立し
AIの利活用による設備利用率の向上を目指す



◎ 対策によりスケール付着量の低減



◎ 計画的な修繕工事により停止期間の短縮



研究開発事業の項目とスケジュール

(1) 研究テーマ	「地熱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」
(2) 研究期間	2021年10月 ~ 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

事業項目	2021年度	2022年度	2023年度 (中間目標年度)	2024年度	2025年度
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 標準化の完了→完了			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 熱水200条件以上→231条件 蒸気・2相流20条件以上→20条件			熱水500条件以上	
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の概念設計→スケール予測AIを試行的構築		AIデータ入力・アルゴリズム作成 スケール予測AIを構築		
④ フィールドでの実証実験	試験装置の設計・製作 実証試験装置製作・試運転		実証試験		評価
⑤ 技術検討委員会の設置、開催	適宜開催				

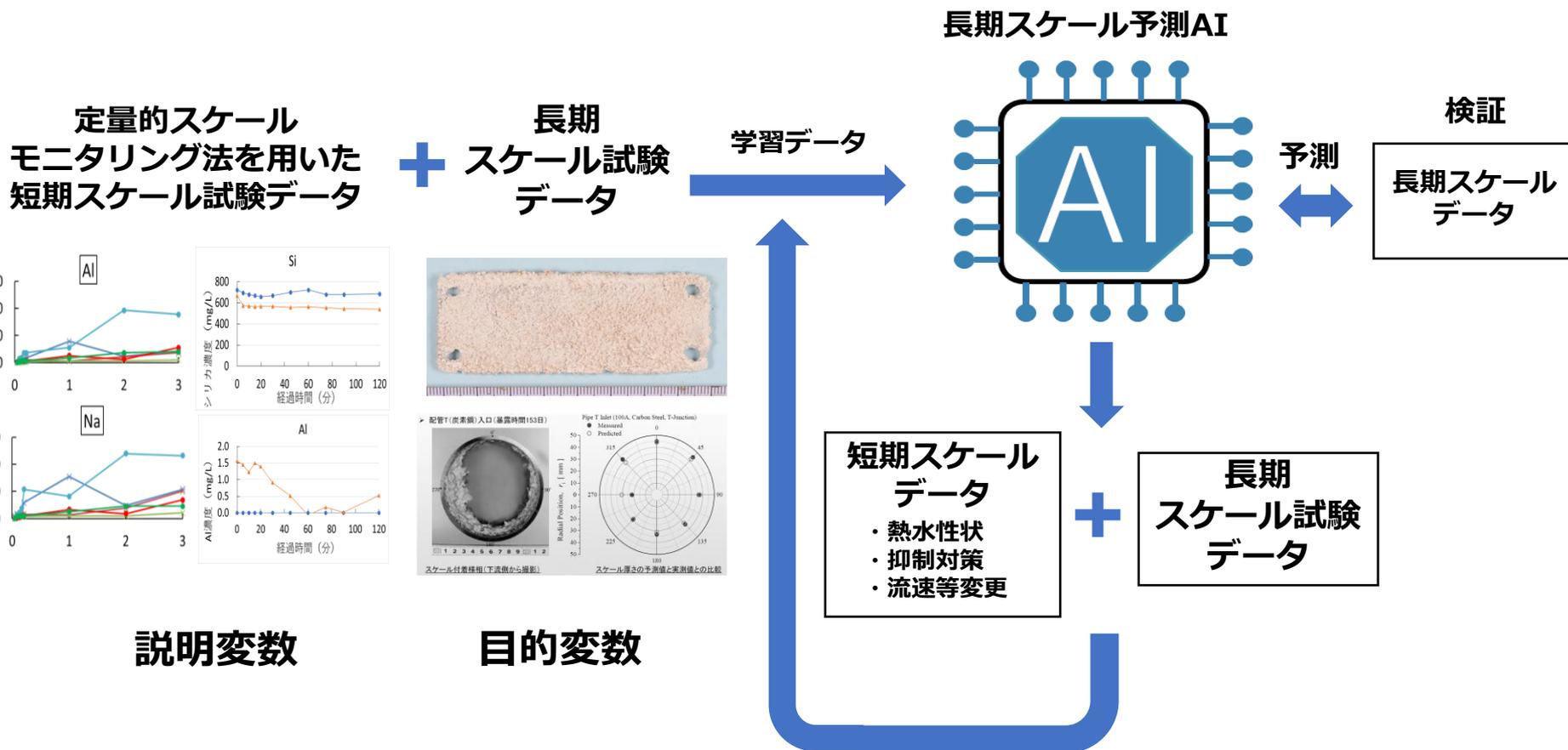
定量的スケールモニタリング法を用いた短期スケール試験と長期スケール試験の内容

AI入力データセットの収集のため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を実施

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(説明変数)		
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 (ケイ酸濃度)	スケール生成の指標
④アルミニウムとケイ酸の吸着試験	熱水中の単核アルミニウム濃度 熱水中のケイ酸濃度	スケール核への濃縮 シリカスケールのモデル反応
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(目的変数)		
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

短期スケール試験から長期スケール予測AIへの拡張

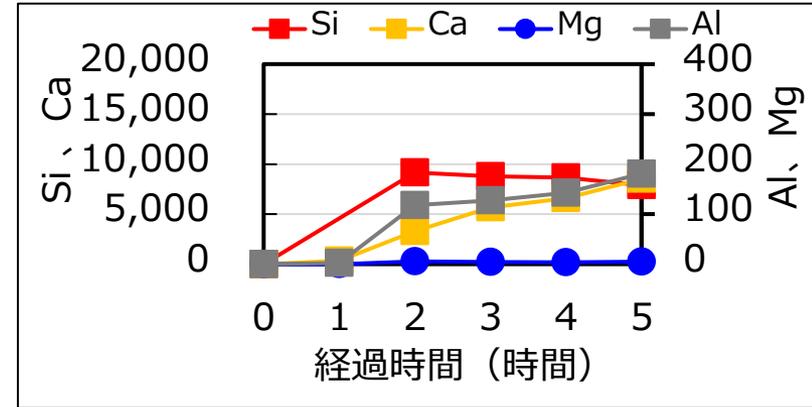
- 定量的スケールモニタリング法を用いた短期スケール試験と長期スケール試験から得られたデータセットを用いてAIモデル構築
- 実証試験装置を用いたスケール試験等で得られたデータセットによるAIの更なる学習



定量的スケールモニタリング法の確立

各現場で試験を実施し、定量的スケールモニタリング法の標準化は完了。

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を確認
(CaやAlなどの経時的な濃度上昇)



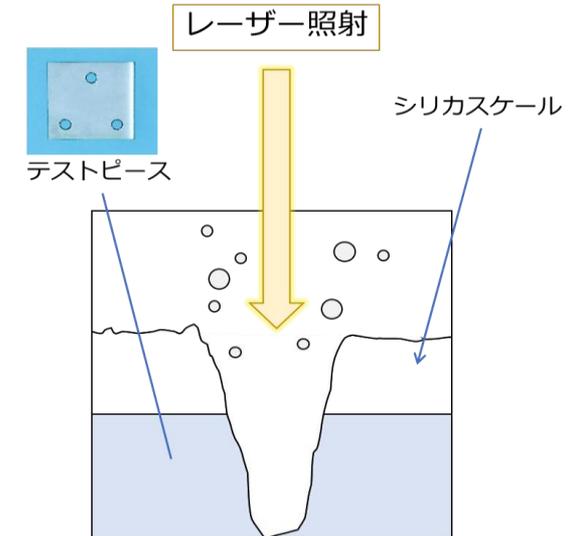
チタン 銅 ステンレス 炭素鋼



定量的スケールモニタリング法

浸漬方法	対象熱水にテストピースを1-5時間、1-5日間浸漬させる
テストピース材質	銅、SUS、チタン、炭素鋼
分析方法	LA-ICP-MSにより、テストピース表面5か所に対し、線分析を行う (3か所測定から5か所測定に変更)

LA-ICP-MS分析



クレーター部分の固体がエアロゾルになり、Arプラズマへ導入。
エアロゾル中の元素濃度を質量分析。

現地スケール試験実績(2025年1月まで)

短期スケール試験

地点	試験期間	対象の流体
A発電所	2021年11月	・生産井熱水(2か所)
A発電所	2021年11月	・還元熱水(2か所)
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
G発電所	2022年9月	・還元熱水(2か所)
A発電所	2023年2月	・還元熱水(2か所)
A発電所	2023年4月	・還元熱水(3か所)
B発電所	2023年6月	・還元熱水、生産井熱水(2か所)
A発電所	2024年3月	・還元熱水
A発電所	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(2か所)
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	・生産井熱水
A発電所	2024年11月	・還元熱水
A発電所	2024年11月	・還元熱水
A発電所	2024年11月	・実証試験 還元熱水(5条件)

長期スケール試験

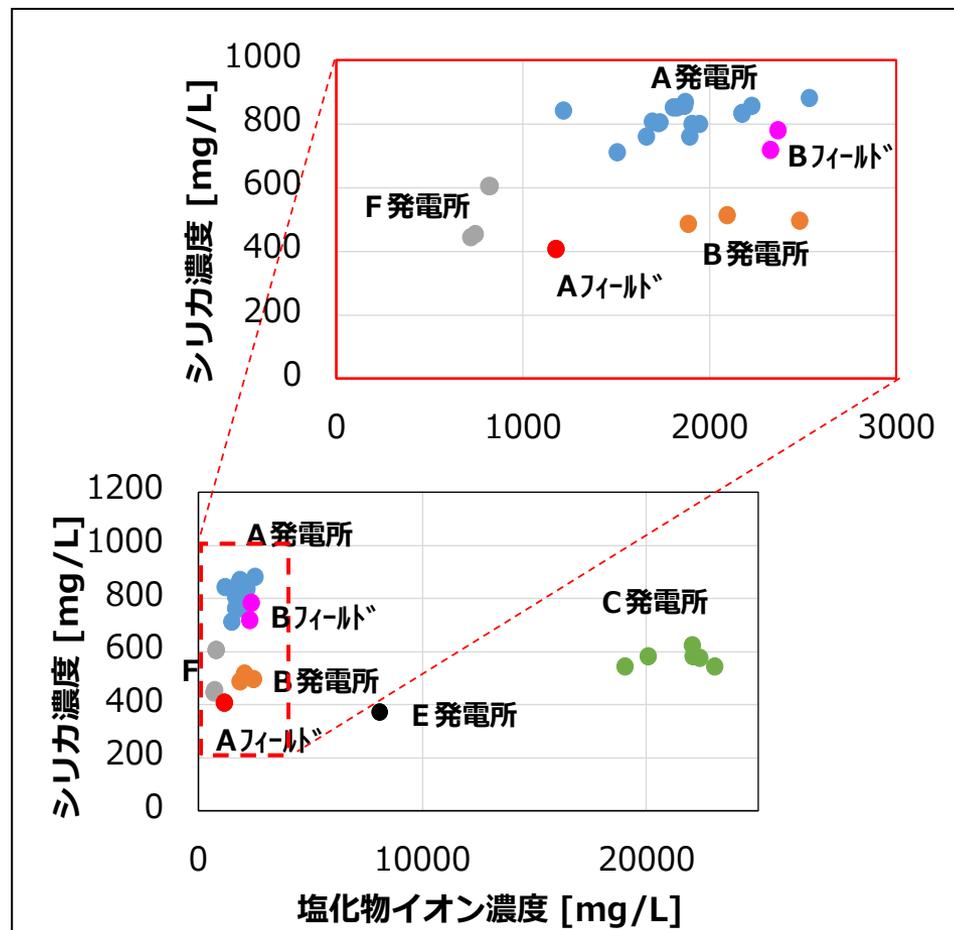
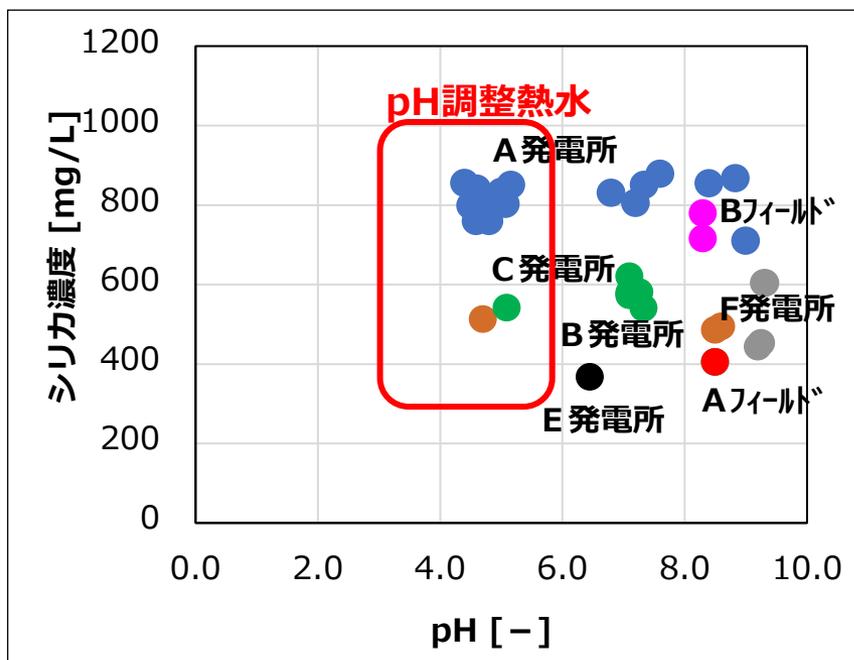
地点	試験期間	対象の流体
A発電所2号	2022年1月 ~ 4月	・還元熱水(2か所)
A発電所1号	2023年5月 ~ 10月	・還元熱水(3か所)
B発電所	2023年7月 ~ 10月	・還元熱水、生産井熱水
D発電所	2023年8月 ~ 11月	・還元熱水
C発電所	2023年9月 ~ 11月	・生産井熱水、還元熱水
Aフィールド	2024年2月 ~ 3月	・生産井熱水
C発電所	2024年6月 ~ 9月	・生産井熱水、還元熱水(2か所)
Bフィールド	2024年6月 ~ 7月	・生産井熱水
Bフィールド	2024年7月 ~ 8月	・生産井熱水
A発電所	2024年8月 ~ 11月	・還元熱水(2か所)
A発電所	2024年8月 ~ 11月	・還元熱水(4か所)
A発電所	2024年10月 ~ 12月	・実証試験 還元熱水(5条件)

蒸気スケール試験

地点	試験期間	対象の流体
A発電所	2021年12月	・集合蒸気
Aフィールド	2022年5月	・集合蒸気
A発電所	2023年4月	・集合蒸気
A発電所	2023年4月	・集合蒸気
C発電所	2024年2月	・集合蒸気(2か所)
C電所	2024年2月	・坑井蒸気
D発電所	2024年2月	・集合蒸気

試験実施個所の熱水性状(2025年1月まで)

多様な熱水成分に対応したスケール予測AIを構築するため、性状の異なる熱水を用いて試験を実施することとした。



還元熱水を用いたスケール試験

A発電所		C槽還元熱水	還元井入口熱水
温度	℃	87.3	85.6
流速	m/min	1.5	0.09
pH	-	4.6	4.6
塩化物イオン	mg/L	1950	2130
全シリカ	mg/L	798	841

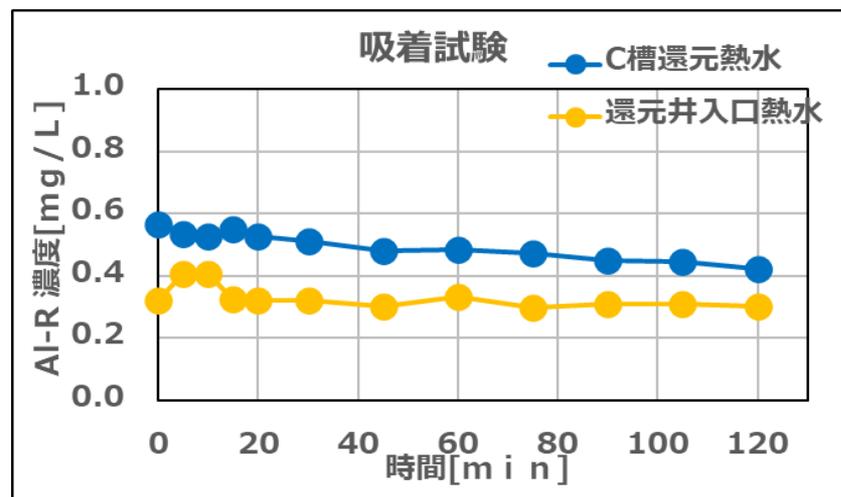
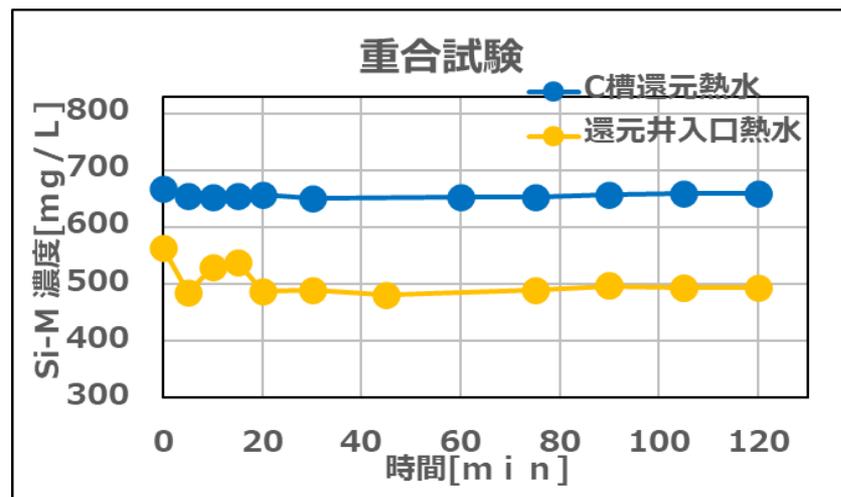
C発電所		生産井熱水	セパレータ 出口熱水	還元井入口 熱水
温度	℃	97.9	96.6	98.7
流速	m/min	0.22	0.22	0.22
pH	-	7.1	7.1	7.1
塩化物イオン	mg/L	22100	22100	22500
全シリカ	mg/L	574	579	557

新規地点		Aフィールド 生産井熱水	Bフィールド A生産井熱水	Bフィールド B生産井熱水
温度	℃	97.4	97.1	97.6
流速	m/min	2.58	3.08	2.92
pH	-	8.5	8.3	8.3
塩化物イオン	mg/L	1180	2340	2400
全シリカ	mg/L	405	703	768

短期スケール試験結果（A発電所）

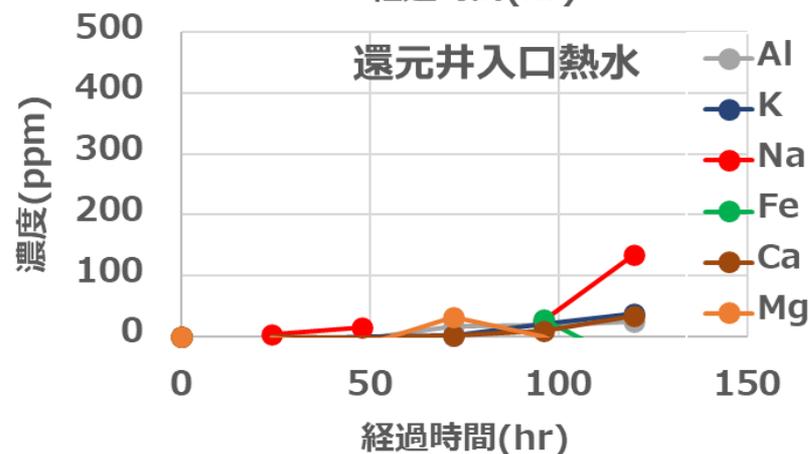
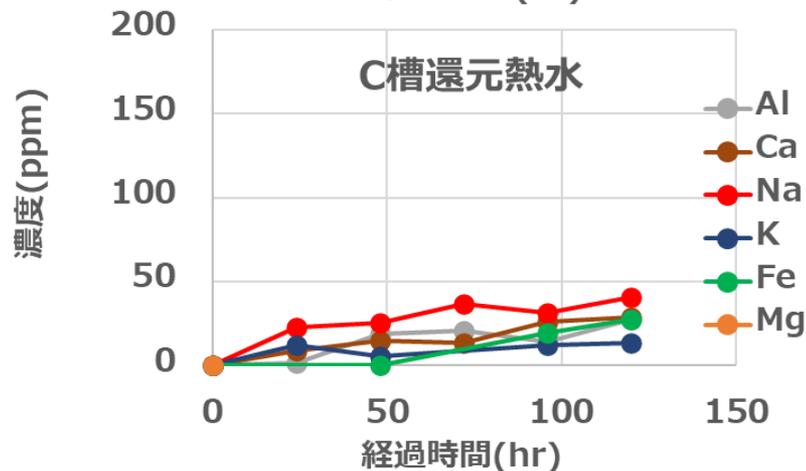
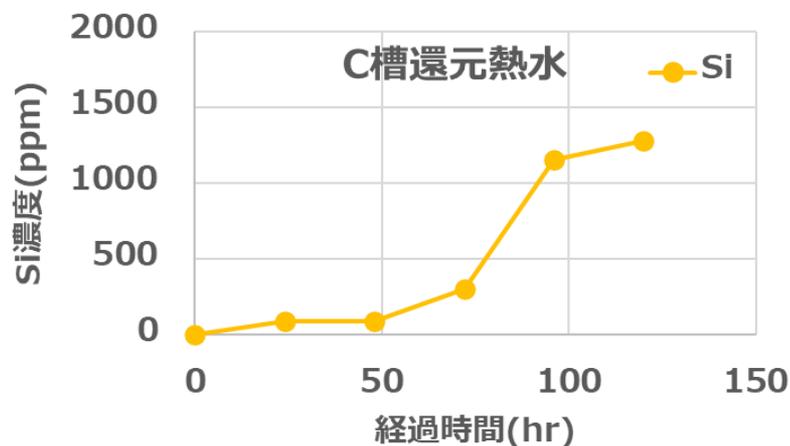
pH調整後の熱水において、C槽還元熱水では重合が進まず還元井入口熱水では重合が進んだ。しかし、吸着試験のAl-Rはもに減少が見られた

項目	試料名		
	C槽還元熱水	還元井入口熱水	
温度	℃	87.3	85.6
流速	m/min	1.48	0.092
pH	-	4.6	4.6
電気伝導率	mS/m	661	700
ナトリウム	mg/L	1200	1260
カリウム	mg/L	200	225
カルシウム	mg/L	8.27	6.27
マグネシウム	mg/L	0.153	0.087
アルミニウム	mg/L	0.68	0.66
塩化物イオン	mg/L	1950	2130
硫酸イオン	mg/L	288	209
砒素	mg/L	2.80	3.26
全鉄	mg/L	0.07	0.17
全シリカ	mg/L	798	841



定量的スケールモニタリング法の結果（A発電所）

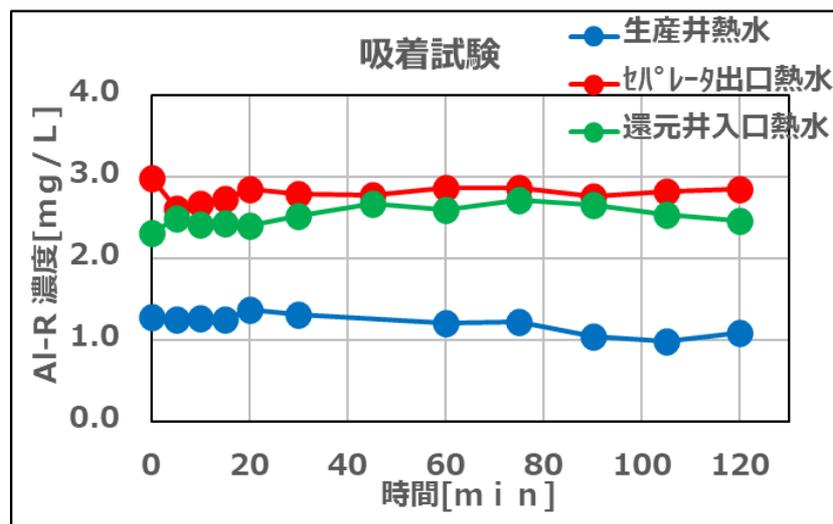
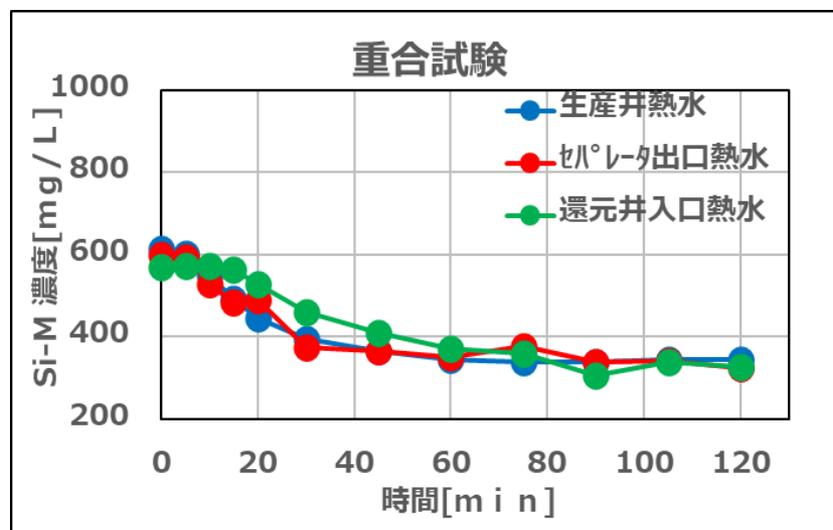
どちらの地点もLA-ICP-MS分析により金属板表面に付着する物質量の増大が元素ごとに確認できた。C槽還元熱水より還元井入口熱水の方がSi濃度が高い



短期スケール試験結果（C発電所）

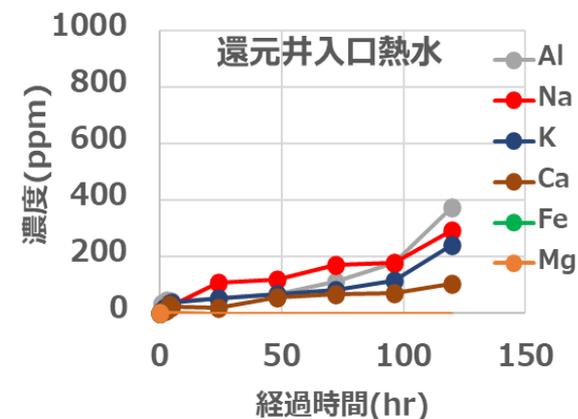
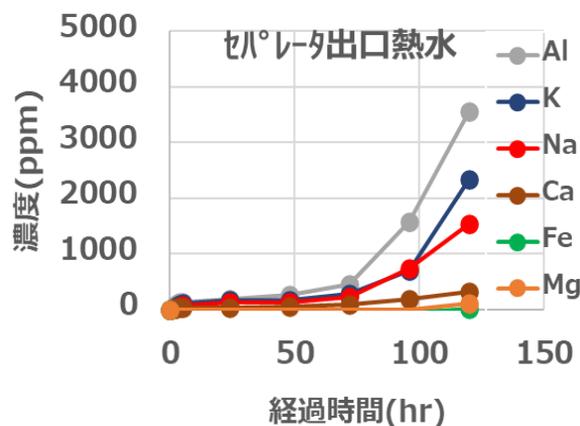
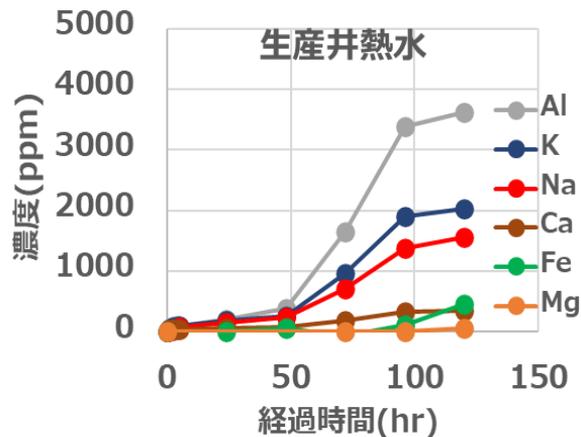
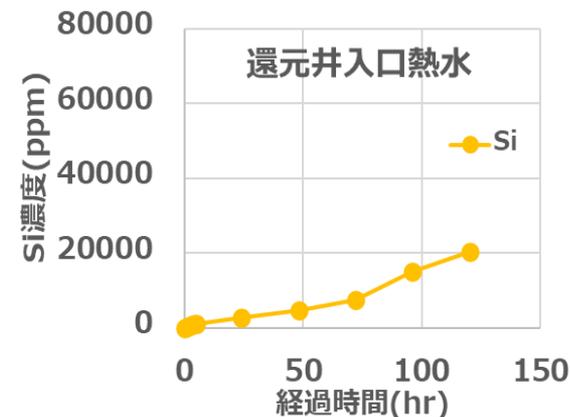
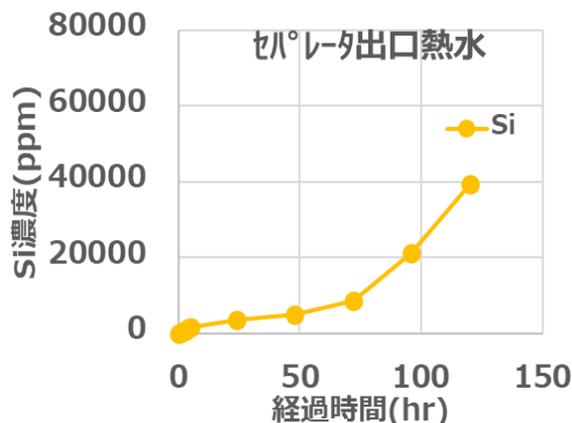
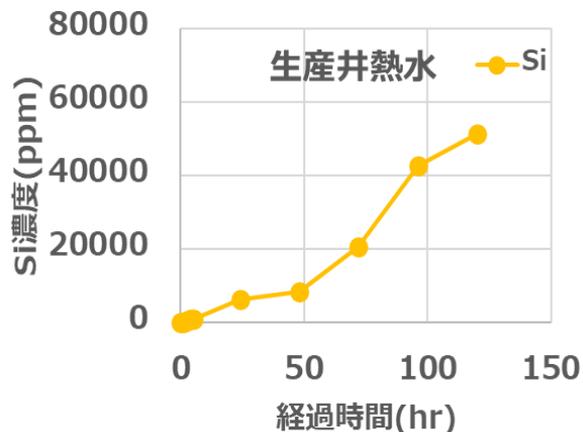
熱水系統において、シリカ重合に大きな違いは見られなかった

項目	試料名	生産井熱水	セパレータ出口熱水	還元井入口熱水
温度	℃	97.9	96.6	98.7
流速	m/min	0.22	0.22	0.22
pH	-	7.1	7.1	7.1
電気伝導率	mS/m	5530	5590	5670
ナトリウム	mg/L	11000	11000	11200
カリウム	mg/L	1390	1410	1430
カルシウム	mg/L	1870	1880	1870
マグネシウム	mg/L	2.140	2.140	2.120
アルミニウム	mg/L	0.36	0.34	0.20
塩化物イオン	mg/L	22100	22100	22500
硫酸イオン	mg/L	41.7	42.1	44.2
砒素	mg/L	2.75	2.78	2.76
全鉄	mg/L	0.33	0.37	0.55
全シリカ	mg/L	574	579	557



定量的スケールモニタリング法の結果（C発電所）

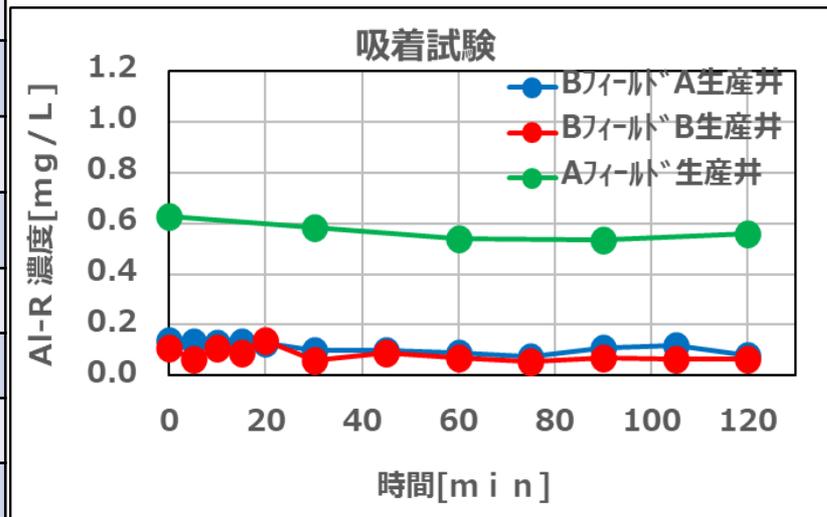
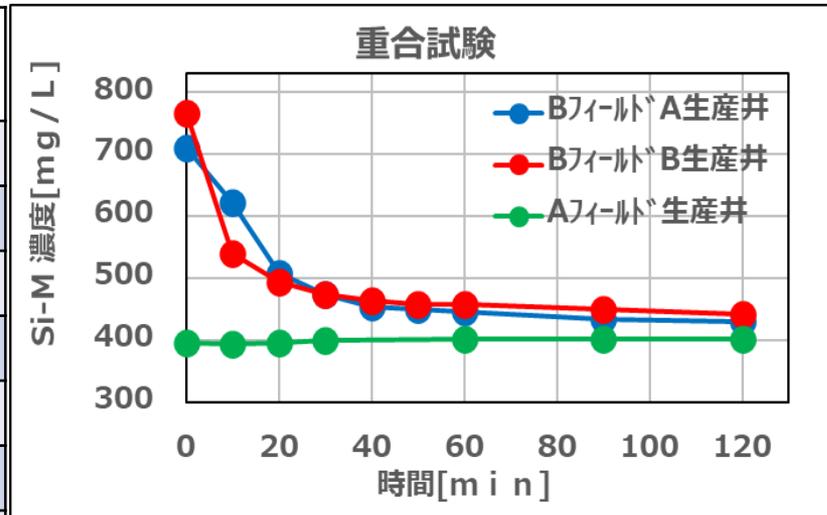
金属板表面に付着した物質量の増大が元素ごとに確認できた
 上流側の生産井熱水、セパレータ熱水と比べて、下流側の還元井熱水ではSi濃度が低い



短期スケール試験結果（Aフィールド[®]、Bフィールド[®]）

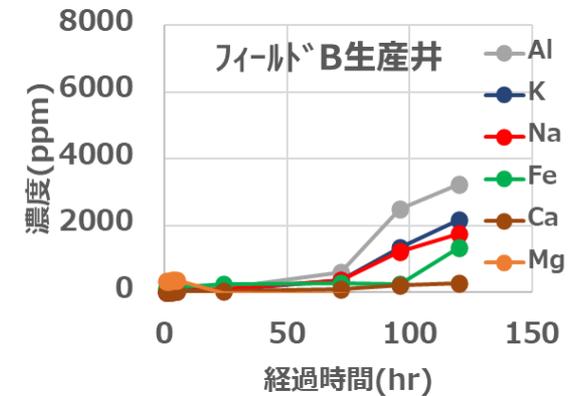
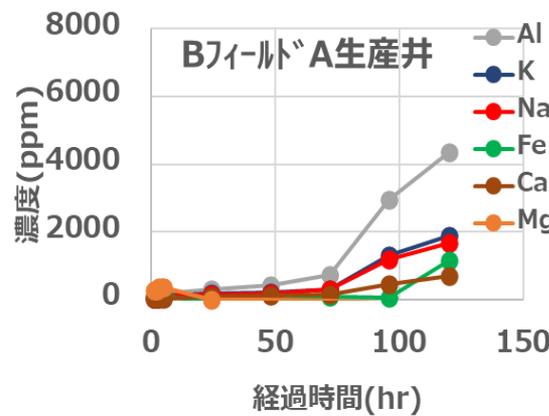
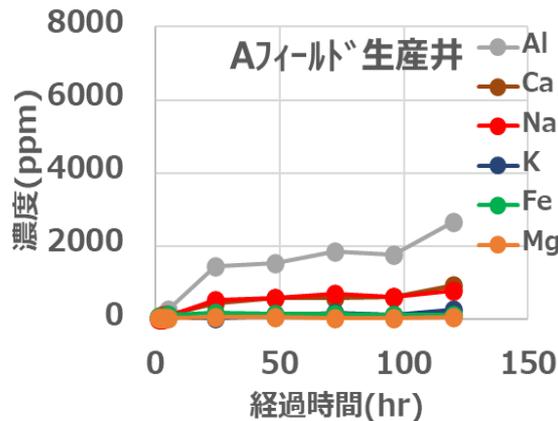
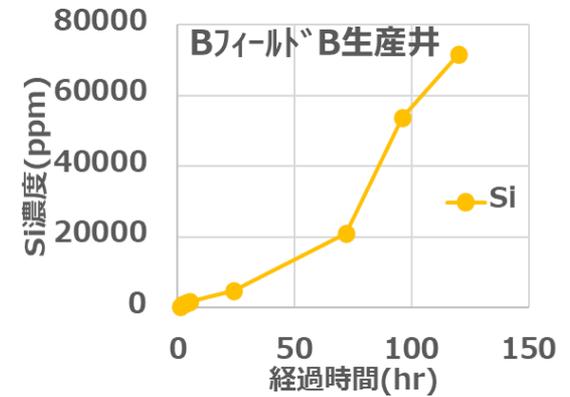
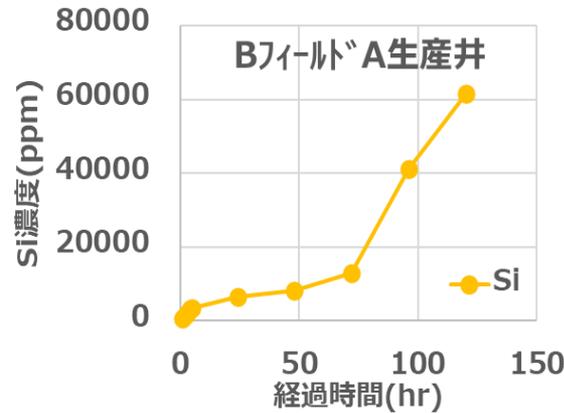
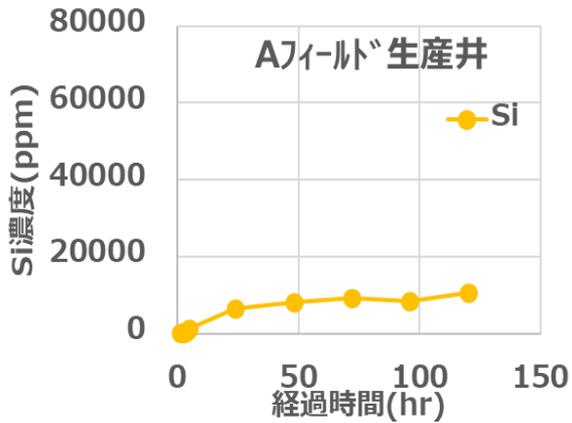
シリカ濃度が高いBフィールド[®]生産井熱水のシリカの重合速度は速く、シリカ濃度の低いAフィールド[®]の生産井熱水のシリカの重合は進まなかった

項目 \ 試料名		Aフィールド [®] 生産井熱水	Bフィールド [®] A生産井熱水	Bフィールド [®] B生産井熱水
温度	℃	97.4	97.1	97.6
流速	m/min	2.58	3.08	2.92
pH	-	8.5	8.3	8.3
電気伝導率	mS/m	431	751	749
ナトリウム	mg/L	776	1390	1390
カリウム	mg/L	74.3	195	181
カルシウム	mg/L	20.6	22.4	10.6
マグネシウム	mg/L	0.027	0.003	0.014
アルミニウム	mg/L	0.660	0.9	1.58
塩化物イオン	mg/L	1180	2330	2400
硫酸イオン	mg/L	178	43.9	81.8
砒素	mg/L	0.867	2.86	2.75
全鉄	mg/L	0.04未満	0.06	0.04未満
全シリカ	mg/L	396	712	775



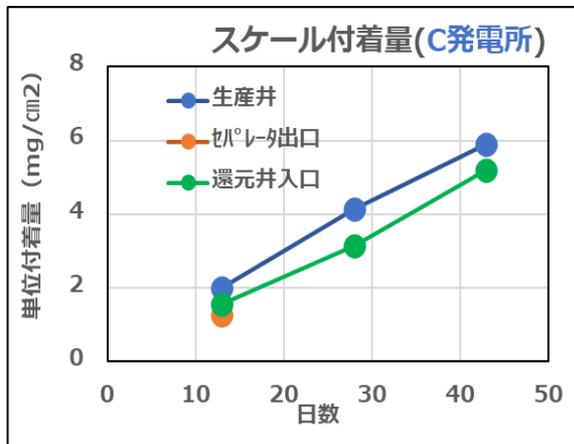
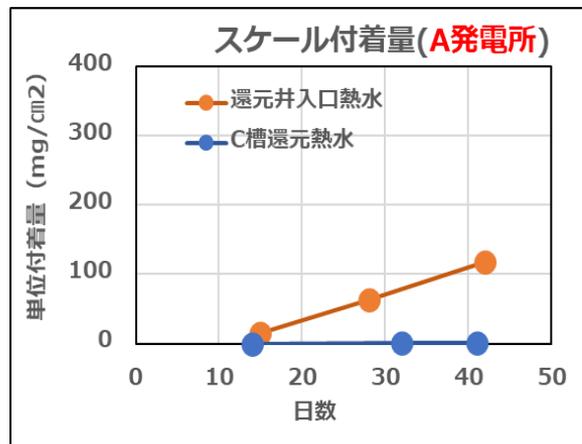
定量的スケールモニタリング法の結果（Aフィルド、Bフィルド）

Aフィルド、Bフィルド熱水においても金属板表面に付着した物質量の増大が元素ごとに確認できた。熱水中のシリカ濃度が低いAフィルドはBフィルドと比べてSi濃度が低い値となった。



長期スケール試験の結果

A発電所においては、C槽還元熱水に比べて還元井入口の方がスケール付着量が多い
 C発電所の3ヶ所のスケール付着量はほぼ一緒
 新規地点はシリカ濃度の高い2坑井で付着量に大きな差が見られた



項目	試料名	C発電所			新規地点				
		C槽還元熱水	還元井入口熱水	生産井熱水	セパレータ出口熱水	還元井入口熱水	A7-1坑生産井	B7-1坑A生産井	B7-1坑B生産井
温度	℃	87.3	85.6	97.9	96.6	98.7	97.4	97.1	97.6
流速(線速度)	m/min	1.48	0.092	0.22	0.22	0.22	2.58	3.08	2.92
pH	-	4.6	4.6	7.1	7.1	7.1	8.5	8.3	8.3
全シリカ	mg/L	798	841	574	579	557	396	712	775
粒子径(数)	nm	7.531	11.7	8.721	11.7	4.849	164.2	37.84	1.499
粒子径(強度)	nm	43.82	32.67	5560	11.7	4.849	190.1	43.82	24.36

スケール成分分析結果

スケール付着量に違いがみられたBフィールドのA生産井とB生産井において、スケール成分に違いは見られなかった。

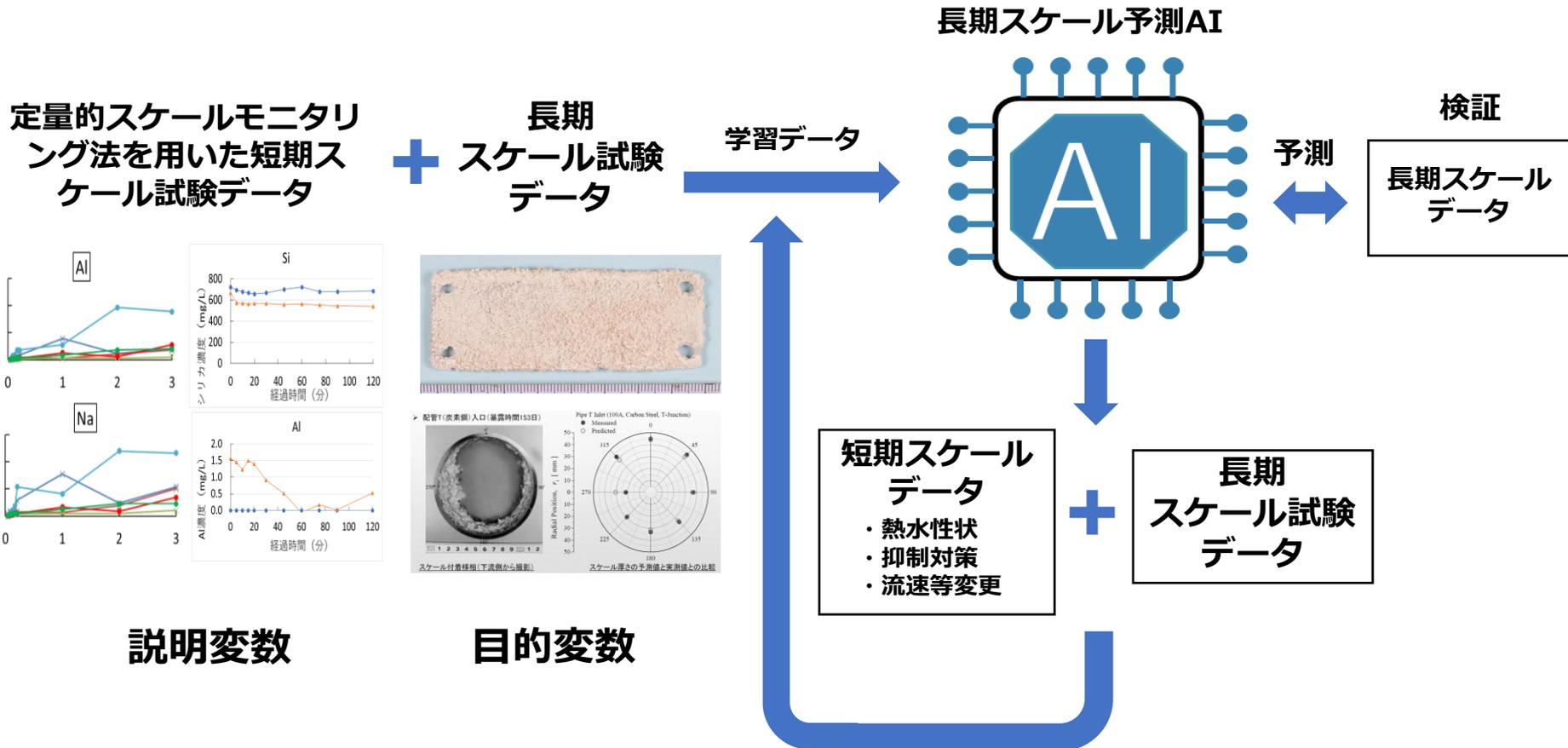
pH調整後熱水は硫酸注入によりSO4濃度が上昇するが、CaSO4スケールは見られなかった

スケールの蛍光X線分析結果

成分分析 (%)	A発電所熱水槽入口 (pH調整後)	A発電所熱水槽出口 (pH調整後)	Bフィールド A生産井	Bフィールド B生産井	C発電所熱水タンク (pH調整前)	C発電所還元井入口 (pH調整後)
Fe (as Fe ₂ O ₃)	0.51 (0.73)	0.15 (0.21)	2.95 (4.22)	2.49 (3.55)	3.66 (5.23)	1.04 (1.49)
Al (as Al ₂ O ₃)	< 0.02 (0.00)	< 0.02 (0.00)	3.22 (6.09)	2.74 (5.17)	4.45 (8.41)	1.88 (3.55)
Si (as SiO ₂)	45.42 (97.16)	47.06 (100.67)	39.76 (85.05)	40.56 (86.77)	30.65 (65.57)	40.22 (86.03)
Mg (as MgO)	0.08 (0.13)	0.05 (0.08)	0.24 (0.40)	0.29 (0.48)	2.09 (3.47)	0.50 (0.82)
Na (as Na ₂ O)	0.76 (1.02)	0.62 (0.84)	1.27 (1.71)	1.08 (1.46)	2.07 (2.80)	2.34 (3.15)
Ca (as CaO)	0.05 (0.07)	< 0.02 (0.00)	0.80 (1.12)	0.64 (0.89)	1.80 (2.51)	0.62 (0.86)
S (as SO ₃)	0.28 (0.69)	0.10 (0.25)	0.13 (0.31)	0.15 (0.36)	1.01 (2.52)	0.10 (0.24)
K (as K ₂ O)	0.38 (0.46)	0.36 (0.43)	0.82 (0.99)	0.69 (0.83)	1.24 (1.49)	0.92 (1.11)
As (as As ₂ O ₃)	0.27 (0.35)	0.1 (0.13)	< 0.02 (0.00)	< 0.02 (0.00)	0.36 (0.47)	< 0.02 (0.00)
Cl (as Cl)	0.06 (0.06)	0.05 (0.05)	< 0.02 (0.00)	< 0.02 (0.00)	< 0.02 (0.00)	3.15 (3.15)
結晶形 (X線回折分析法)	SiO ₂ (非晶質・Quartz) A-Fe ₂ O ₃	SiO ₂ (非晶質・Quartz)	SiO ₂ (非晶質・Quartz) NaAlSi ₃ O ₈ NaAlSi ₂ O ₆ Fe ₃ O ₄	SiO ₂ (非晶質・Quartz) NaAlSi ₃ O ₈ Fe ₃ O ₄	SiO ₂ (非晶質・Quartz) FeS PbS	SiO ₂ (非晶質) NaCl

短期スケール試験から長期スケール予測AIへの拡張

- 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



現地試験データを用いたスケール予測AIの構築

短期スケール試験と長期スケール試験結果を用いて、
3つの手法をもちいてスケール生成予測AIモデルを構築



① A発電所・B発電所・C発電所の試験結果を用いてスケール生成予測AIモデルを構築

② A発電所・B発電所・C発電所の試験結果を化学的・物理的な意味を持つ値に変換したデータによりスケール生成予測AIモデルを構築

- 熱水成分濃度(mg/L) → 物質質量(mol/L)に変換 ex. Na 1212.5 mg/L → 0.05274 mol/L
- 流量(L/min) → 線速度(m/min)に変換 ex. 4 L/min → 0.092 m/min

③ A発電所・B発電所・C発電所の長期試験で得られた結果(目的変数)の設定を変更することで学習データを増やしてスケール生成予測AIモデルを構築

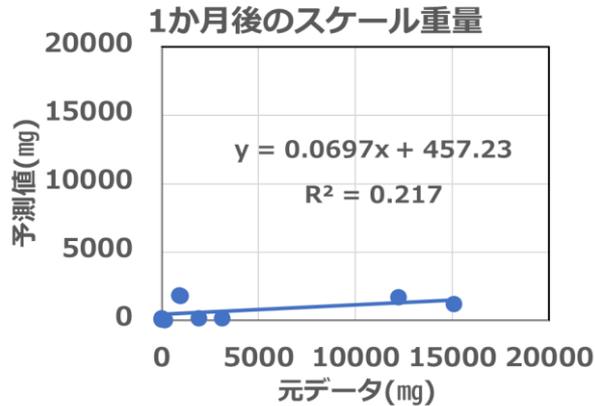
- 2個のスケール重量データ(2週間と1カ月)をセットにして1つの目的変数として扱っていたものを付着速度に変換しそれぞれのデータとして入力
ex. 2weeks 65.9, 1month 149mg → 0.095 mg/cm²/dayと0.108 mg/cm²/day

スケール生成予測AI構築のための学習データ(例)

試験箇所	説明変数データ													目的変数データ			
	熱水性状				重合		吸着		LA-ICP-MS			DLS	付着速度				
	Temp	pH	EC	Na	...	S-Si(0)	S-Si(5)	...	Al-R(0)	Al-R(5)	...	Na	K	Ca	...	Peak	(mg/cm ² /day)
A発電所滞留槽入口 2Week	92	8.8	648	1202	...	904	461	...	0.13	0.05	...	0.95	0.5	1.19	...	9.08	0.095
A発電所滞留槽入口 1month	92	8.8	648	1202	...	904	461	...	0.13	0.05	...	0.95	0.5	1.19	...	9.08	0.108
A発電所滞留槽入口 1.5month	92	8.8	648	1202	...	904	461	...	0.13	0.05	...	0.95	0.5	1.19	...	9.08	0.096
A発電所滞留槽入口 2month	92	8.8	648	1202	...	904	461	...	0.13	0.05	...	0.95	0.5	1.19	...	9.08	0.054
A発電所滞留槽入口 3month	92	8.8	648	1202	...	904	461	...	0.13	0.05	...	0.95	0.5	1.19	...	9.08	0.093
...
...
...
D発電所予熱器入口 1Month	97	5.1	4840	9236	...	623	619	...	1.09	1.04	...	0.16	0	0.44	...	164	0.009
D発電所予熱器入口 1.5Month	97	5.1	4840	9236	...	623	619	...	1.09	1.04	...	0.16	0	0.44	...	164	0.011
D発電所予熱器入口 2Month	97	5.1	4840	9236	...	623	619	...	1.09	1.04	...	0.16	0	0.44	...	164	0.014
D発電所予熱器入口 3Month	97	5.1	4840	9236	...	623	619	...	1.09	1.04	...	0.16	0	0.44	...	164	0.017

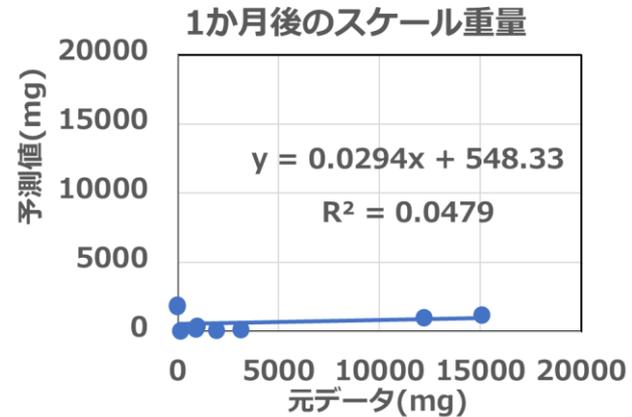
スケール生成予測AIの予測精度検証結果

スケール生成予測AIモデル①



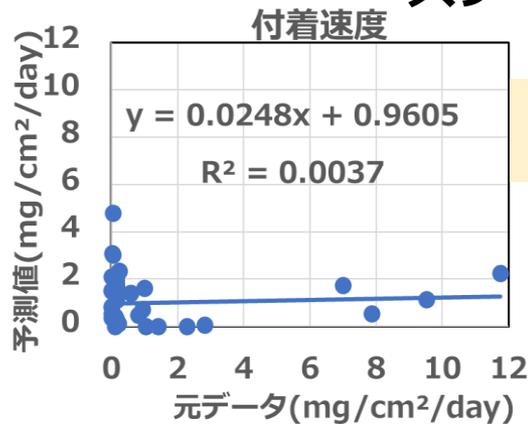
精度良く予測することはできず

スケール生成予測AIモデル②

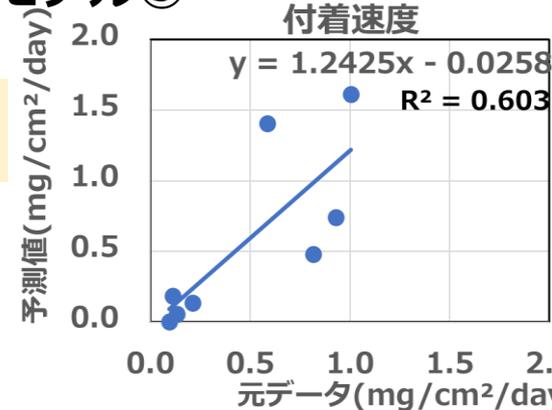


精度良く予測することはできず

スケール生成予測AIモデル③



予測させるデータを一部の地点に限定



実測値に近い予測値が得られた

予測の範囲をどこまでにするか検討が必要

精度良く予測することはできず

進捗と今後の計画

研究項目	進捗と今後について
① 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方法は標準化が終了
② スケールモニタリング法によるデータセットの収集	○ pH、温度、流量、表面の粗さ、インヒビター等の条件を細分化し試験を実施予定 実証試験装置を用いて試験実施中
④ フィールドでの実証試験	熱水：目標500条件(地点×時間) 現在 約430条件
③ スケール生成予測を実現するAI利活用に関する研究	○短期スケール試験及び長期スケール試験の結果からシリカスケール生成を予測するAIを構築し、一定のスケール生成予測の成果が得られた。 ○実証試験装置を用いて、AIのデータベースを拡充し精度の高いスケール生成予測のAIモデルの作成を目指すとともに、予測範囲の検討を行う。 ○スケール予測から利用率を向上させる道筋を明確にする。

実証試験でのデータ収集

A発電所のpH調整前の還元熱水を用いて、条件を変えながら多くのデータセットを取得するとともに実機では検証しにくい条件での試験を行う。

