

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

森 康一郎  
九電産業(株)  
2023年2月2日

【委託先】

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



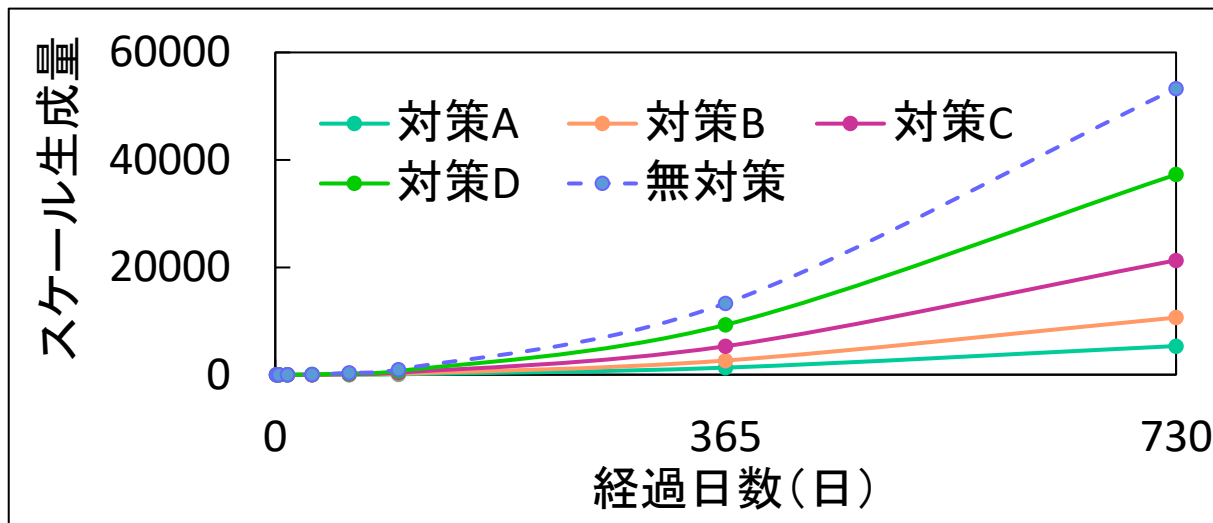
**【最終目標】** 地熱発電所におけるシステム利用率を10%～20%向上

# 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
- ・バイナリーの熱交換効率 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"><li>定量的スケールモニタリング法の標準化を完了</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>500条件程度のAI入力データセットを取得</li></ul>
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"><li>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</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>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</li></ul>
③スケール生成予測を実現するAI活用に関する研究開発	<ul style="list-style-type: none"><li>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</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>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</li></ul>
④フィールドでの実証実験		

## 【2021年度の目標】

- 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

### 定量的スケールモニタリング法

項目	採用理由
熱水の水質分析	地域特性の把握 熱水性状データの取得
ケイ酸の重合試験	シリカスケール生成能の評価 重合速度データの取得
テストピース浸漬試験(短期)	LA-ICP-MSとの組み合わせにより微量スケールの 定量分析が可能
テストピース浸漬試験(長期)	AIによるスケールの長期予測との整合性の評価

◎各分析・試験の有効性の評価と試験法の標準化が必要

# テストピース浸漬試験(短期)

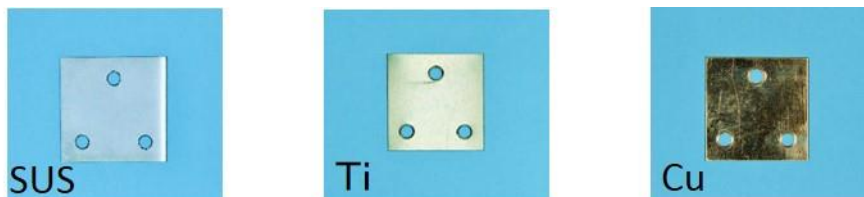
## 【試験の流れ(現地試験～分析)】

- ① 金属フレーム(架台)にテストピースをセット
- ② 流れている熱水に金属フレームを浸漬
- ③ 一定時間経過ごとに1セットずつ回収
- ④ 回収後すぐに水とエタノールで洗浄し、保管
- ⑤ テストピース表面の元素分析

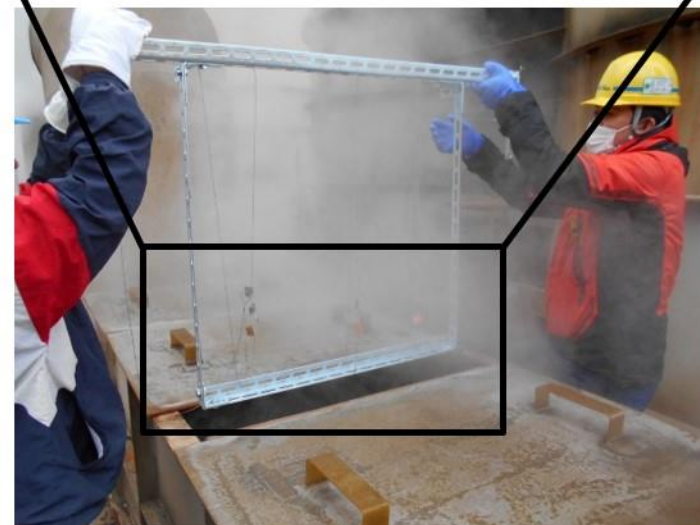
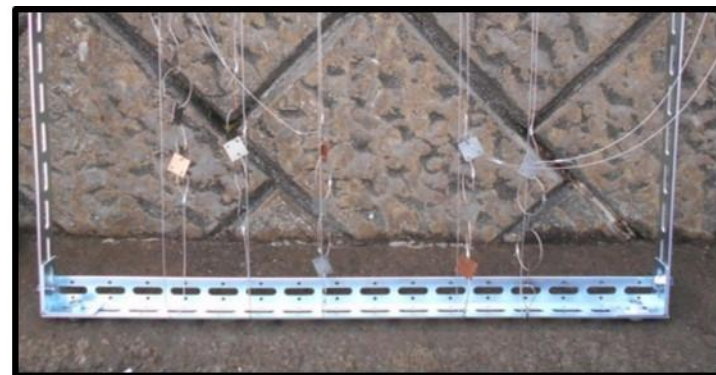
- ・SEM-EDX (SEM像、元素マッピング)
- ・LA-ICP-MS (各元素の定量分析)

浸漬時間：1～72時間(1, 2, 3, 4, 5, 24, 48, 72時間)

テストピースの材質：Cu, SUS, Ti(約25mm四方)



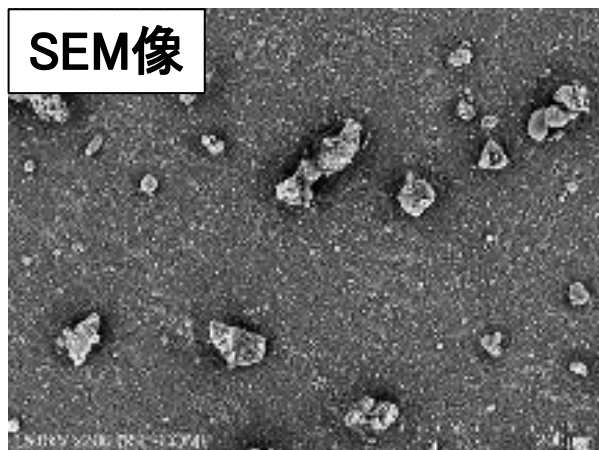
腐食に強い 鉄(Fe)を評価できる



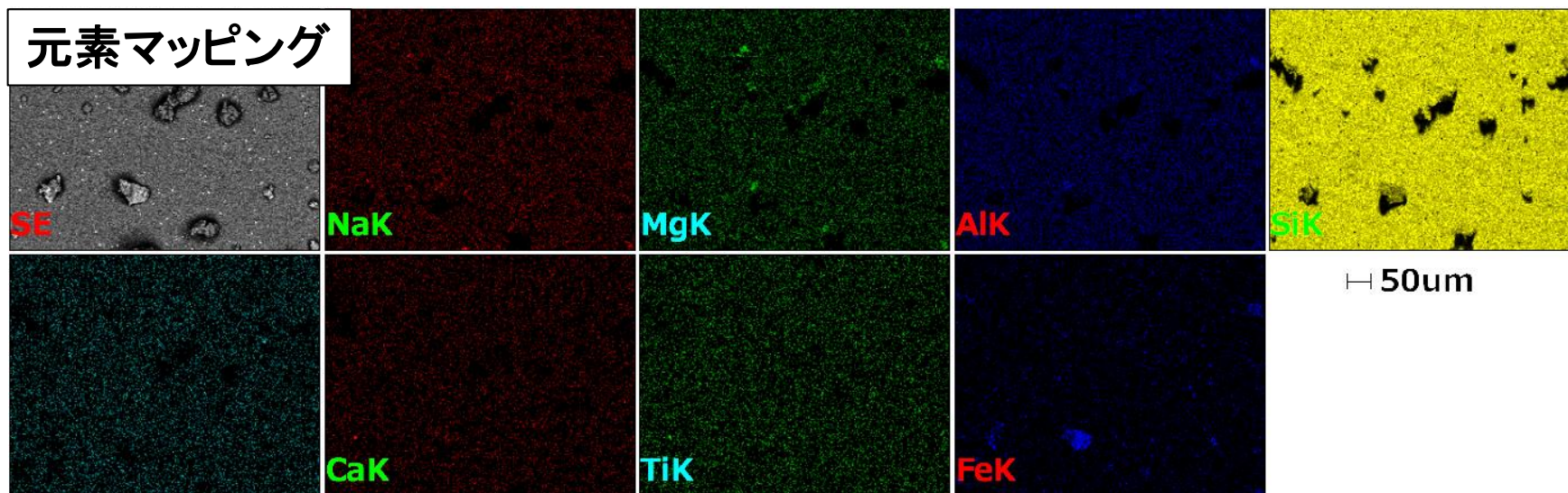
テストピースを熱水に浸ける様子

# テストピース浸漬試験(短期)【SEM-EDXによる分析】

## SEM像と元素マッピング画像の取得(視覚的な情報)



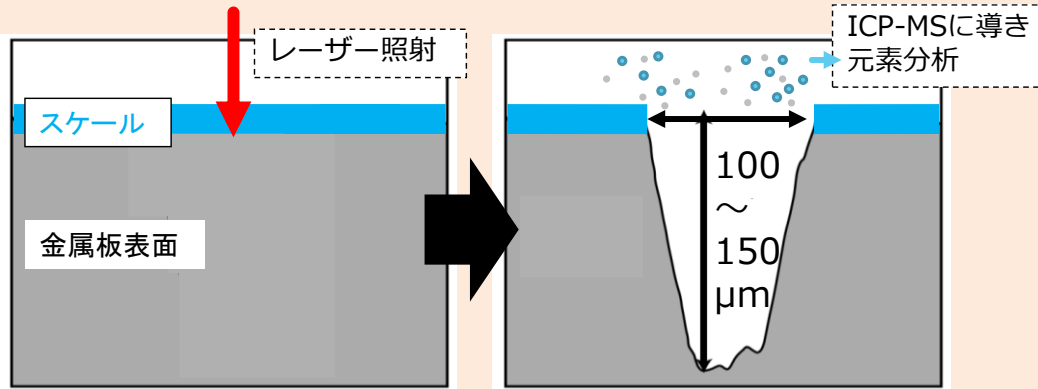
- ・シリカスケール生成過程を視覚的に評価
- ・EDXで半定量的な情報の取得(LA-ICP-MS分析のバックアップ的な位置づけ)



# テストピース浸漬試験(短期)【LA-ICP-MSによる分析】

テストピース表面付着物量の取得(微量物質にも対応、固体のまま分析可能)

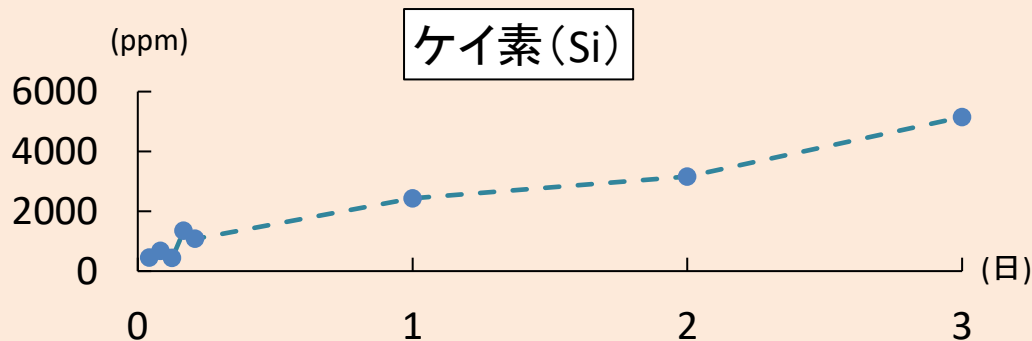
## ①分析



レーザーをテストピース表面に照射し、微粒子化。微粒子は、キャリアガスによってICP-MSに運ばれ、元素ごとに定量分析。

データの代表性確保のため、テストピース1枚につき2箇所で行なわれる。

## ②分析結果の解析





# テストピース浸漬試験(短期)

短期のスケールモニタリング法として、テストピース浸漬試験を採用した。  
テストピース浸漬試験は、おもに長期試験に用いられるが、微量物質(固体)の分析が可能なLA-ICP-MSと組み合わせることにより短期試験にも応用できる可能性。

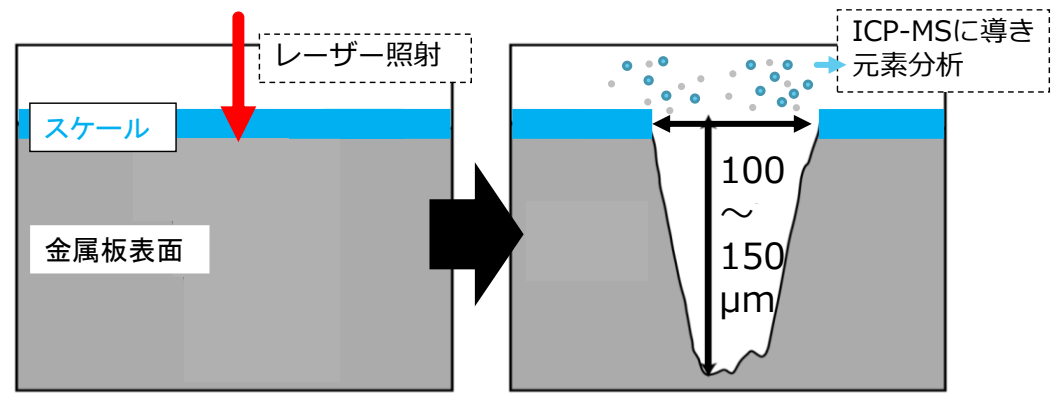
そこで、

- ①テストピースの浸漬時間
- ②テストピースの材質
- ③LA-ICP-MSの分析結果の代表性
- ④LA-ICP-MSの分析項目 から、シリカスケールの生成初期段階における当試験法の有効性の評価および標準化を目指す。

現地試験



LA-ICP-MS分析



# 八丁原発電所での試験概要

暫定的な定量的スケールモニタリング法を実施し、有効性を評価

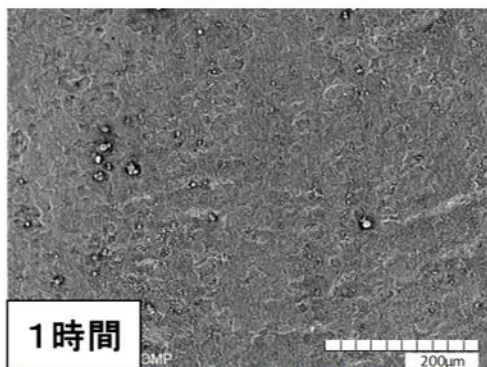
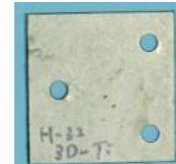
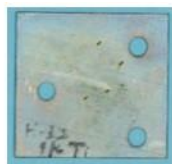
定量的スケールモニタリング法		
項目	試験場所	試験期間
熱水の水質分析	八丁原発電所 生産井 ・H-32号井 ・H-36号井 計2か所	2021年11月29日 —2021年12月4日
ケイ酸の重合試験		
テストピース浸漬試験(短期)		
テストピース浸漬試験(長期)	八丁原発電所 滞留槽 ・pH調整前 ・pH調整後	2022年1月 —2022年4月



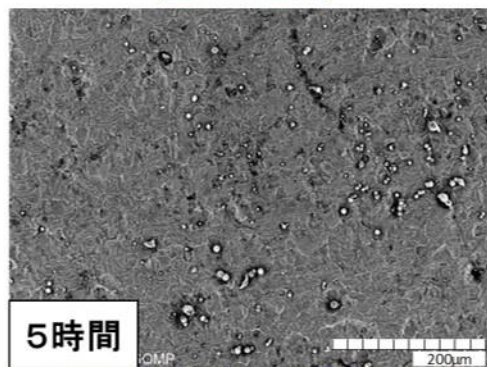
H-36号井に設置されている熱水堰と流れる熱水の様子

# 八丁原発電所での試験結果(テストピース浸漬試験(短期))

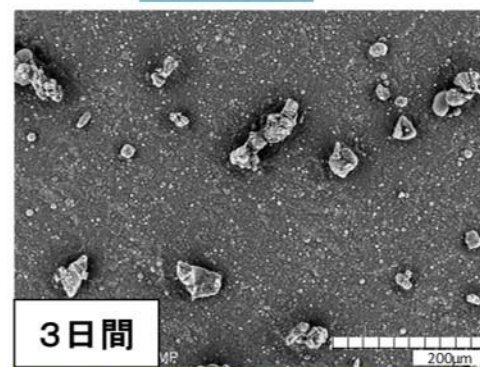
## 1. 浸漬したテストピースの表面分析(SEM-EDX)



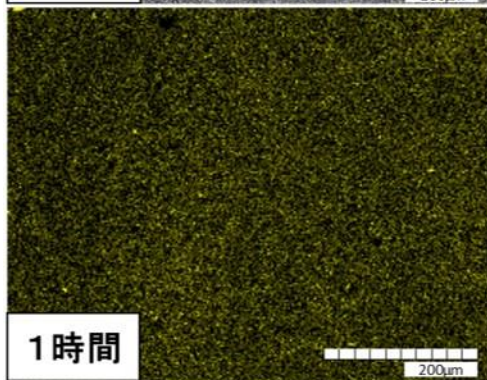
1時間



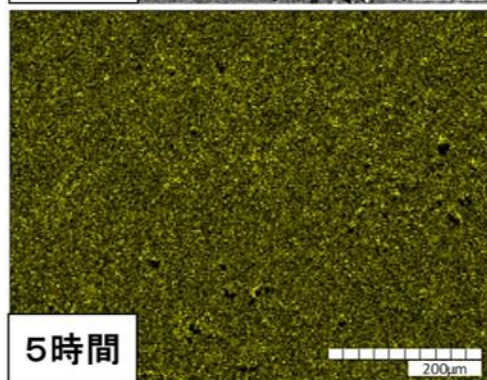
5時間



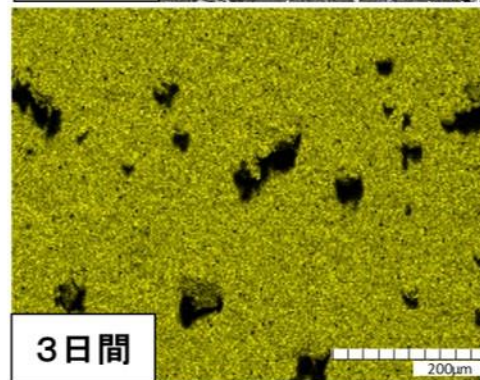
3日間



1時間



5時間



3日間

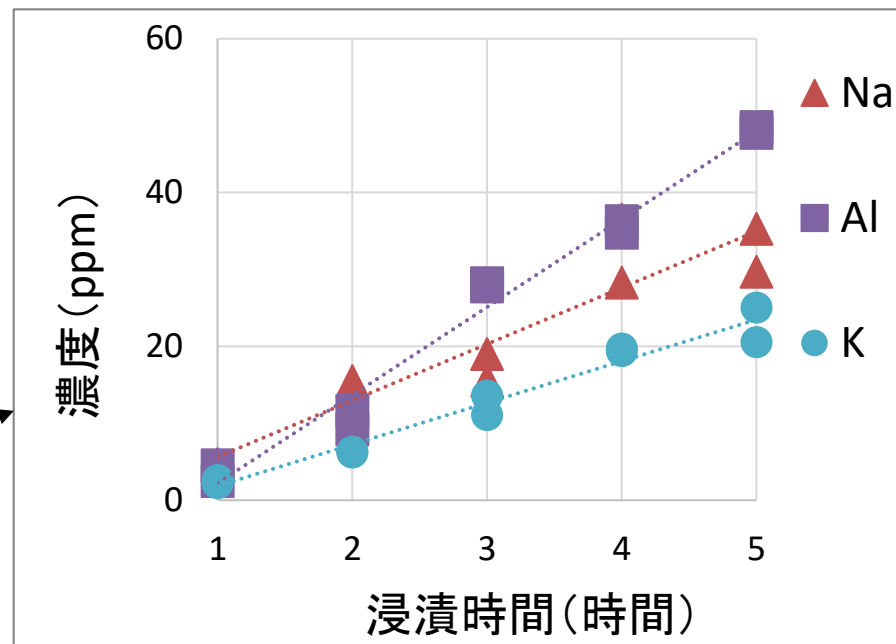
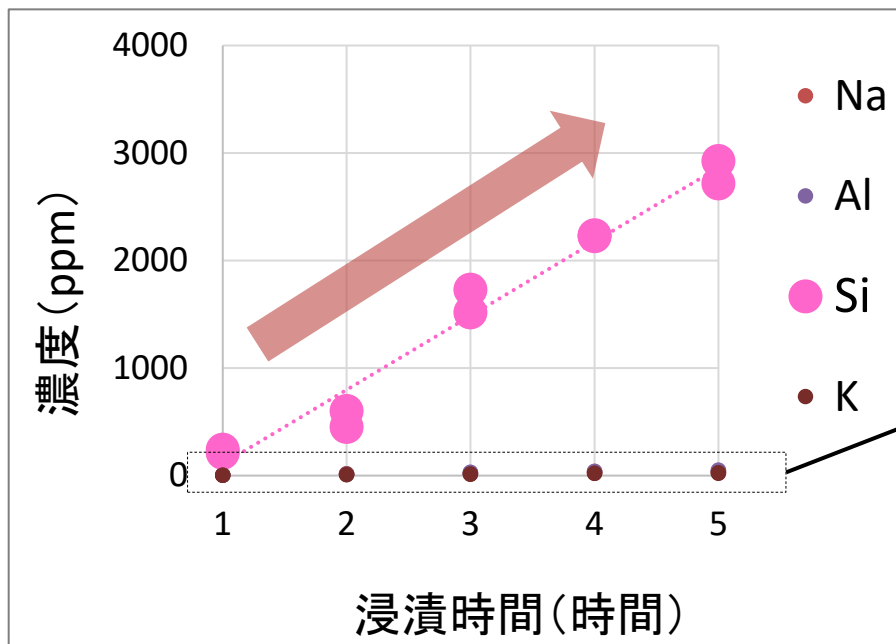
- ・粒子が徐々に大きくなっている
- ・ケイ素のマッピング(黄色)が徐々に濃くなっている



短期のテストピース浸漬試験でも  
経時的なスケール付着状況を確認

# 八丁原発電所での試験結果(テストピース浸漬試験(短期))

## 2. 浸漬したテストピースの表面分析(LA-ICP-MSによる定量分析 材質:SUS)

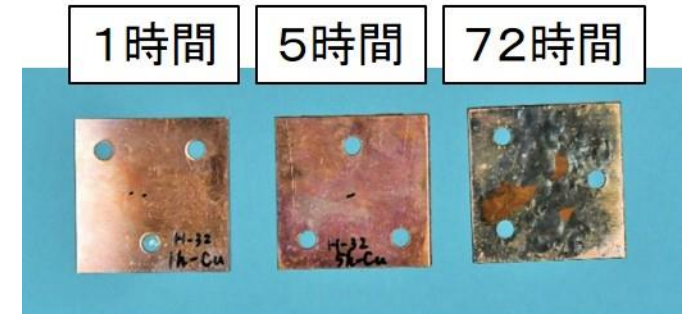
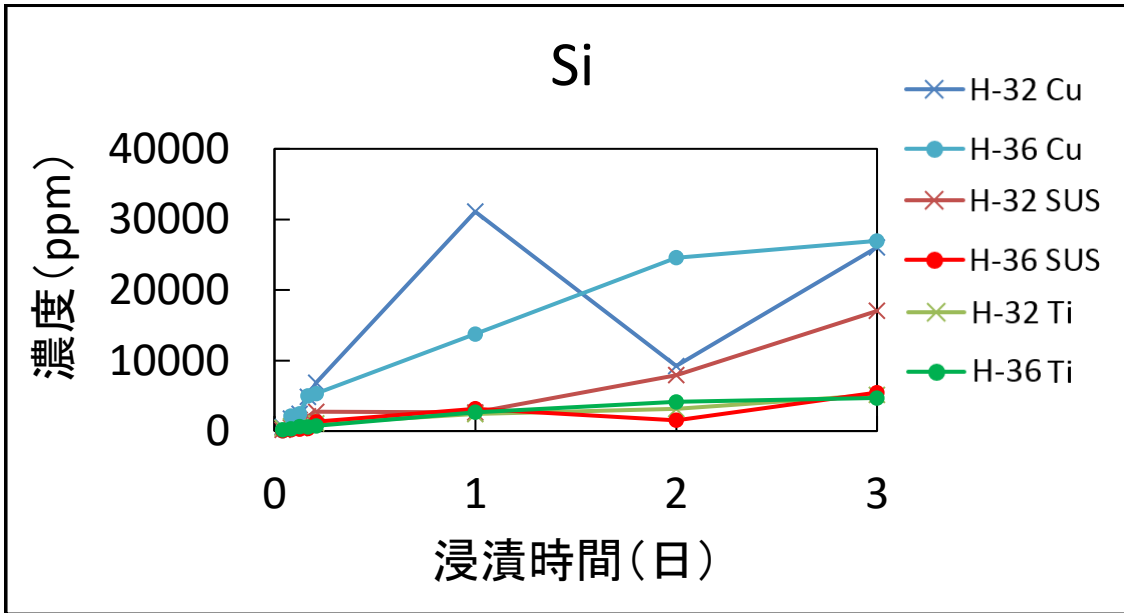


浸漬時間の経過とともに、ケイ素(Si)をはじめ、多くの元素で付着量が増加  
(開始5時間では、各元素ともに一次関数的に上昇)

当試験法により、スケール生成初期段階の短期的かつ定量的なモニタリングに成功

# 八丁原発電所での試験結果(テストピース浸漬試験(短期))

## 2. 浸漬したテストピースの表面分析(LA-ICP-MSによる定量分析)



H-32号井に浸漬させた銅のテストピース

- ・一部、単純な増加傾向を示さないものもある
- ・被膜の剥離(腐食による影響)

テストピースの材質は1種類に絞らず数種類を組み合わせて、腐食等による影響をカバーする必要がある

# 八丁原発電所での試験結果(テストピース浸漬試験(短期))

短期のテストピース浸漬試験の有効性を4つの項目で評価

項目	評価
テストピースの浸漬時間	3日間でもシリカスケールの生成初期段階のモニタリングに成功 さらに長い期間で実施予定
テストピースの材質	一部腐食の影響を受けたが、数種類を組み合わせるにより、相補的な結果が得られた
LA-ICP-MSの分析結果の代表性	3点分析を行い、結果を比較予定
LA-ICP-MSの分析項目	シリカスケール生成に関与すると考えられる元素は網羅できた

改善点や確認事項はあるが、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たため、

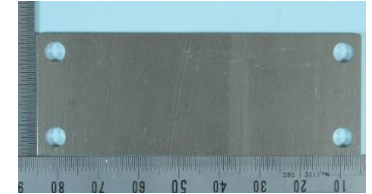
**当試験法を短期のテストピース浸漬試験の標準的な方法として試験を実施する。**

# 八丁原発電所での試験結果(テストピース浸漬試験(長期))

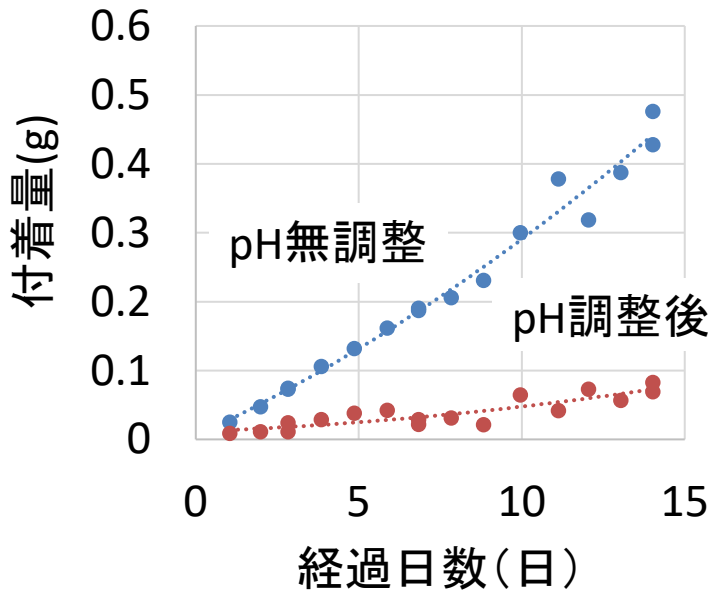
## 【試験方法】

- ・ 熱水: 八丁原滞留槽入口 (pH無調整)、出口 (pH=5程度に調整)
- ・ テストピース材質: チタン
- ・ 浸漬期間: 1~14日(1日おき)、28日、83日
- ・ 実施時期: 2022年1月~2022年4月
- ・ テストピースを熱水に浸漬させ、上記期間経過後に回収し重量を測定

チタン製テストピース



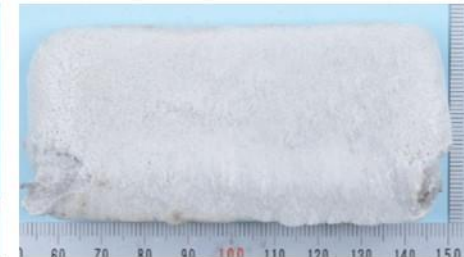
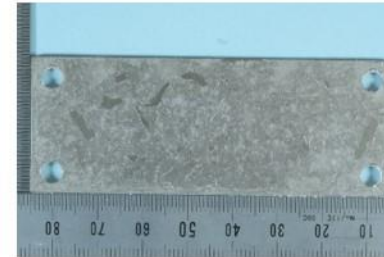
## 八丁原発電所滞留槽



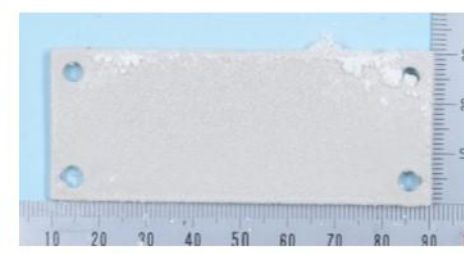
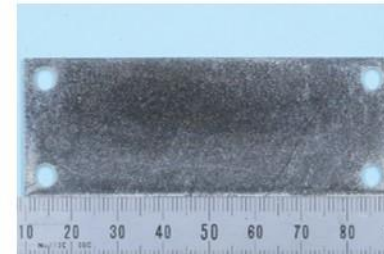
14日後

83日後

入口  
無調整

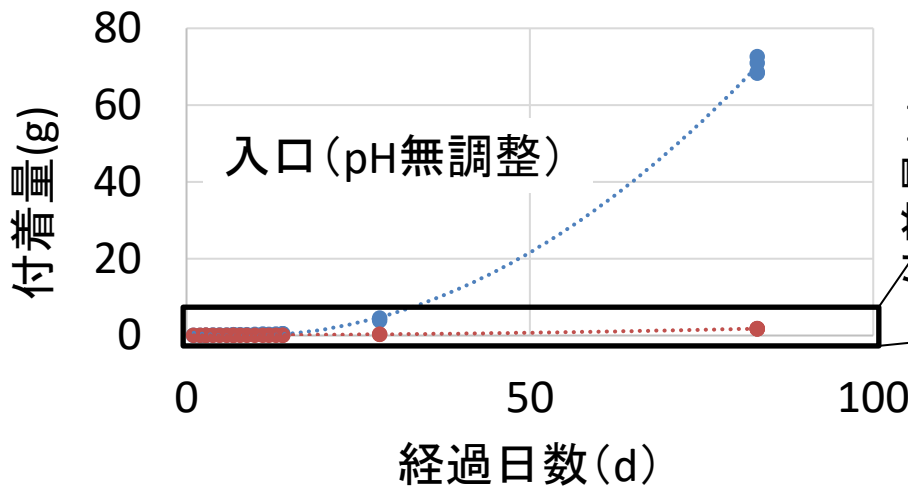


出口  
pH調整後

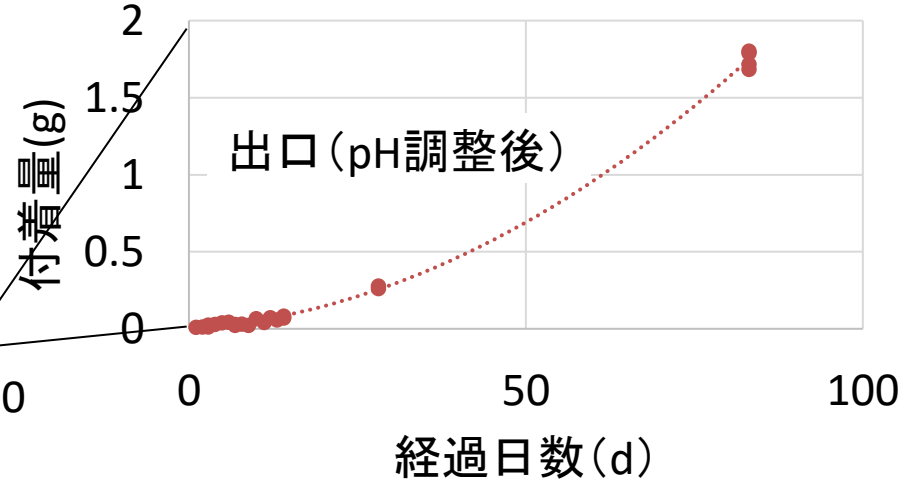


# 八丁原発電所での試験結果(テストピース浸漬試験(長期))

八丁原2号滞留槽入口  
(pH無調整)



八丁原2号滞留槽出口  
(pH調整後)



数日程度の初期スケールの生成速度(直線的)から、数か月程度をみるとスケール生成速度が変化していく可能性。

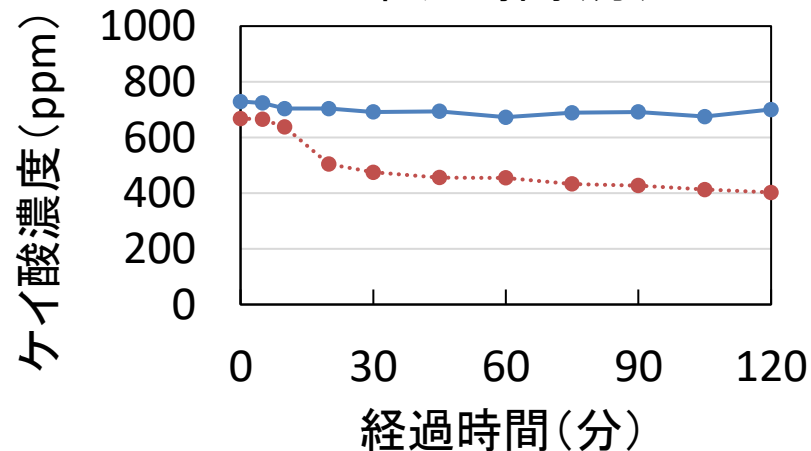
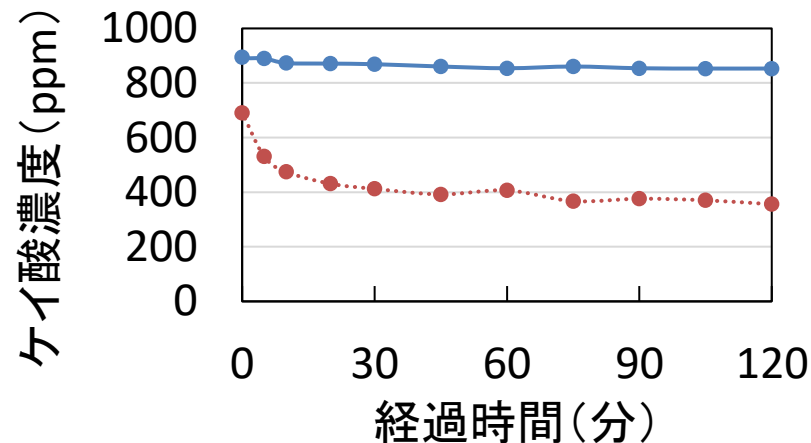
短期的なデータをもとに、AIによる長期スケール予測を検証するため、長期のスケール生成速度、化学組成データの拡充も必要。



# 八丁原発電所での試験結果(熱水の水質分析、ケイ酸の重合試験)

熱水成分	生産井	H-32号井	H-36号井
pH	( - )	7.6	9.0
電気伝導率	(mS/m)	811	562
ナトリウム	(mg/L)	1440	1030
カリウム	(mg/L)	229	130
カルシウム	(mg/L)	10.9	11.5
マグネシウム	(mg/L)	0.079	0.002
アルミニウム	(mg/L)	0.58	0.58
塩化物イオン	(mg/L)	2540	1510
硫酸イオン	(mg/L)	192	394
砒素	(mg/L)	3.08	2.10
全鉄	(mg/L)	0.35	0.40
全シリカ	(mg/L)	879	710

Si-T : 全ケイ酸濃度    Si-M : モノケイ酸濃度



生産井ごとの熱水性状や重合速度データを取得。  
今後、AIを活用しながら必要な項目を選択予定。

# 目標・成果・課題

目標	成果	課題
① 定量的スケールモニタリング法の確立	<ul style="list-style-type: none"><li>・ LA-ICP-MSとの組み合わせにより、短期的なテストピース浸漬試験を実施し、シリカスケールの生成初期段階を定量的に評価</li><li>・ 長期のテストピース浸漬試験により、バルクスケールの重量データを取得</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 浸漬時間の妥当性</li><li>・ AIに導入するデータの選択(熱水性状、短期スケール、バルクスケール)</li><li>・ テストピースの材質(炭素鋼等も検討)</li><li>・ 分析結果の代表性</li><li>・ 物理データの導入</li></ul>
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"><li>・ 熱水からのシリカスケール沈殿のケース 120条件/200条件達成</li><li>・ 二相流および蒸気からのケース 4条件/20条件達成</li><li>・ 八丁原発電所の熱水を用いた長期試験(約3か月)を実施</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 長期試験を実施できる施設が少ない</li></ul>

AIによるスケール生成予測を進めながら、定量的スケールモニタリング法の確立に向けて試験・分析内容の試行錯誤を繰り返していく。