

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026

プログラムNo. B1-2-22

地熱発電導入拡大研究開発/地熱発電におけるスケール抑制・除去技術開発に関する調査/

放射光分析を用いた局所構造解析によるシリカ・ケイ酸塩スケール抑制及び除去技術の開発に関する調査

発表日：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) 東京海洋大学 盛田 元彰

団体名 地熱技術開発(株)、東北自然エネルギー(株)、(国) 東京海洋大学

問い合わせ先 地熱技術開発(株) E-mail: msato@gerd.co.jp TEL:03-5541-9072

1. 目的

本調査事業では、シリカ・ケイ酸塩スケールを対象にとして、放射光などの先端計測技術と従来の解析手法を組み合わせることで、これまで明らかにされてこなかったナノレベルの局所構造把握手法について調査・検討を行ったおよびその特性を把握した。併せてこれにより、より効果的な薬剤等の開発を促進するため、地熱開発の推進に資するスケール対策技術の実現可能性について検討を行った。

2. 実施期間

2024年9月 ～ 2026年3月

3. 本調査の概要

- ① 地熱発電所の問題の1つはスケーリングであり、中でもシリカ・シリケートは非晶質であり、その構造解析は難しい課題であった。しかし、近年、短配位—中距離構造の構造解析手法の発展はめざましく、特に放射光分析の手法を用いることで、局所構造の違いを明らかにすることが容易となってきた。
- ② 局所構造の違いはシリカ・シリケートの性質や特性の差と関連があることから、地熱発電所にて生成する非晶質シリカ・シリケートの構造を元に、それらの対策手法の有効可否を検討することを目的とする。

熱水中のシリカ（主に非晶質シリカ）の析出機構

温度やpHの低下、蒸気分離による濃縮によって過飽和状態になり、析出開始。

対応策：化学的制御（析出を抑制）と物理・プロセス制御（析出物を除去）に大別

1. 化学的制御（注入剤・水質調整）

薬剤を添加し溶液の性状を変化させる方法。

① pH調整（酸注入）

硫酸などを注入して熱水のpHを5.5～6.0程度の弱酸性に下げ、重合抑制。

② 高温還元

地熱流体中に含まれるシリカ濃度を溶解度以上の温度に維持し、晶出防止。

③ シリカスケール防止剤（アンチスケール剤）の注入

官能基を持つ有機ポリマーなどの薬剤を微量注入し、重合・凝集・析出を抑制。

2. シリカスケール除去法

清掃機器や水圧による坑内、管内スケールの物理的除去、化学的な溶解除去

① 定期的な管内洗浄

高圧洗浄（ハイドロブラスト）や機械的なドリル（ピグ等）を用いて除去。

② 化学的方法

苛性ソーダ、フッ化水素酸等による溶解除去。

これらの方法が全て並行展開できるわけではない。

シリカスケール構造解析の重要性

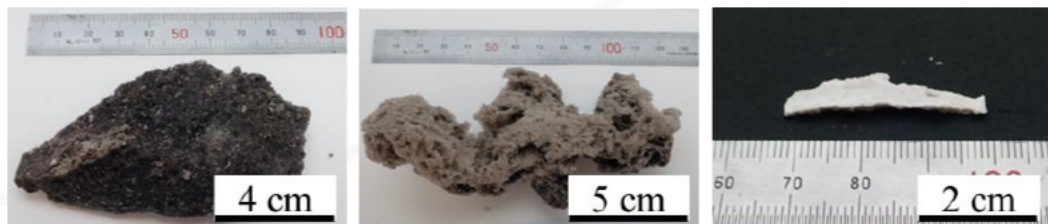
非晶質シリカスケールと1つに分類される。
しかし、発電所や井戸毎でその性質に大きな差がある。



**物質の性質は構造由来
構造解析により解明できる可能性**

1. 除去容易・困難なスケールの差異を把握
2. 成長や性質変化に影響する因子の解明
3. 薬剤による構造変化の挙動理解…

➡ これまでは溶液化学的なアプローチが主であったが、構造解析の観点からのアプロー



硬質 ←————→ 軟質

既存技術の最適化・新規対策技術の開発のため、性質と構造の関係整理が重要
課題：シリカスケールは非晶質であり、従来手法では解析困難

PDF/RMC、XAFS解析手法の特徴

中距離構造解析：PDF/RMC解析

員環構造など中距離構造秩序の情報が得られるが、元素選択性はなし。

短距離構造解析：XAFS解析

シリカスケールはAl、Feなどの微量成分を含む複雑な構造を持つため、XAFSのような元素選択的手法が有効と期待される。

項目	PDF/RMC (Pair Distribution Function/ Reverse Monte Carlo)	XAFS (X-ray Absorption Fine Structure)
分析対象	全元素	特定の元素
元素選択性	なし	あり
主な情報	原子間距離分布 全体的な構造情報	局所構造（結合距離・配位数） 化学状態（価数など）
空間的平均性	試料全体の構造平均	特定元素周囲の局所平均
主な利用目的	全体構造の評価（短～中距離）	特定元素の状態や局所構造の評価

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

(幹事会社)

地熱技術開発株式会社

- 企画、幹事会社
- 文献調査
- 研究内容全体とりまとめ
- 事業化に向けた検討

国立大学法人東京海洋大学

- 研究実施主体
- 文献調査、試料元素分析
- 局所構造把握、メカニズム解析

東北自然エネルギー株式会社

- 熱水、スケール試料提供
- ナノテラス利用権提供

調査スケジュール



		2024年度	2025年度
I	全体開発設計		
1)	放射光分析によるスケール局所構造解析の実施対象を検討・決定		
2)	インヒビター製造会社を含めた対策方針の検討		
3)	実証試験計画等の立案		
II	文献調査		
1)	国内外の文献調査		
III	シリカ・ケイ酸塩スケールの局所構造把握		
1)	スケール元素分析		
2)	放射光施設を利用したスケール構造解析		
3)	地熱発電所各所のシリカ・ケイ酸塩スケールの構造の把握・検証		
IV	非晶質スケール対策方法の検討		
1)	インヒビターの効果とスケール構造との因果関係の把握		
2)	とりまとめ・成果報告書		

解析スケールサンプル



B_{outer} B_{inner} A

← 硬質 → 軟質

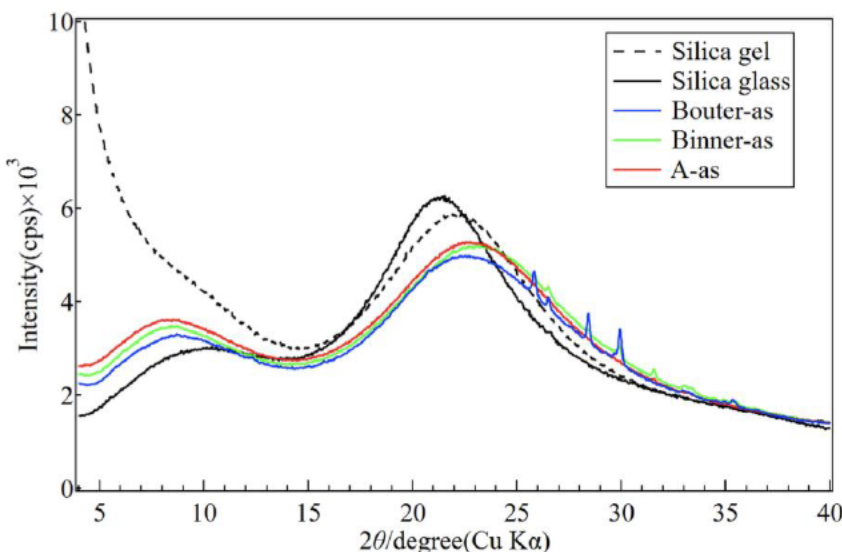
葛根田地熱発電所Well-20還元熱水配管
比較対象：シリカゲル・シリカガラス

BおよびA基地より採取

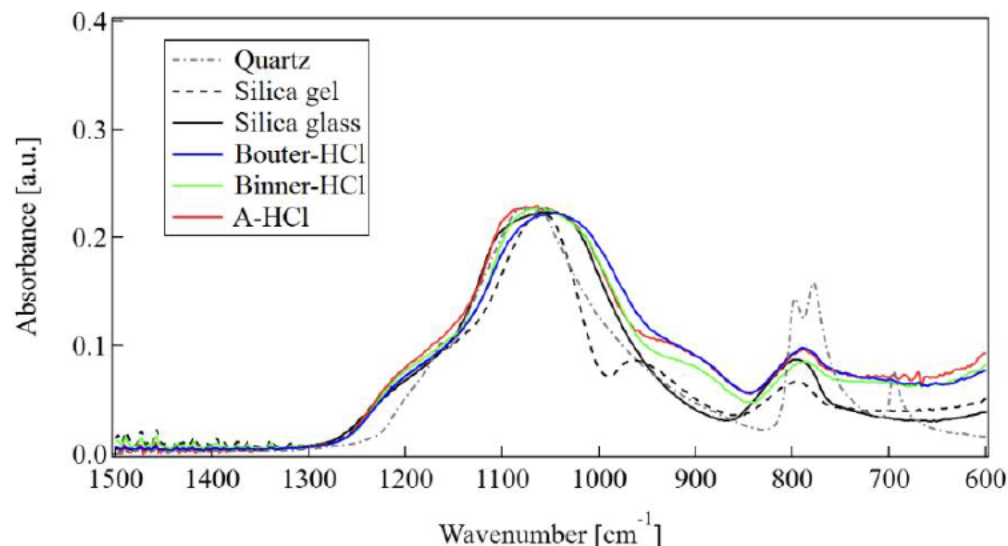
従来解析法を用いた構造解析 ～結晶・分子・水構造解析と元素分布～

従来法による構造解析：XRDとFT-IR

XRD



FT-IR



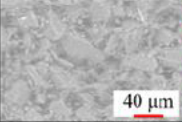
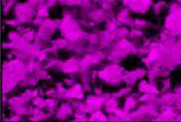
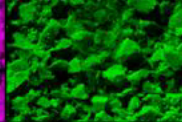
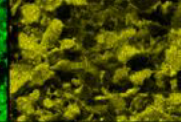
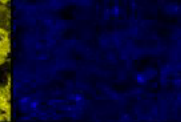
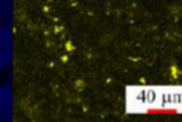
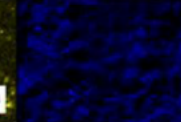
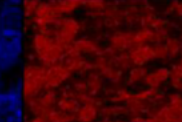
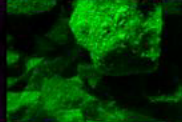
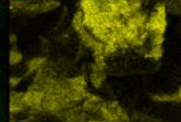
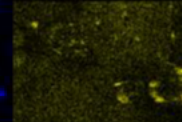
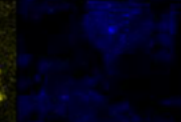
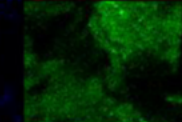
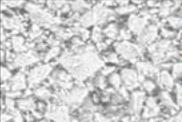
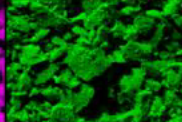
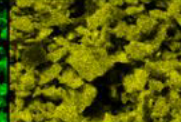
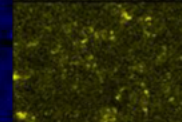
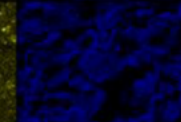
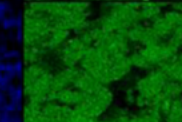
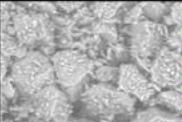
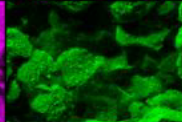
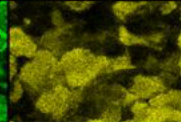
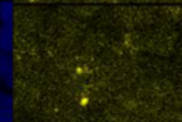
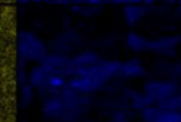
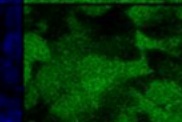
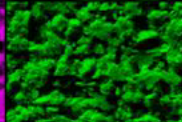
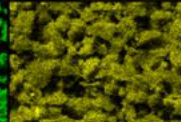
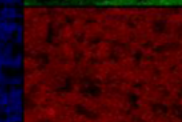
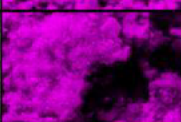
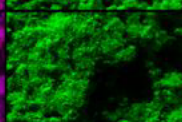
- 葛根田地熱発電所のスケールはシリカゲルやシリカガラスとはブロードピークのトップ位置や広がりには差があり、それらとは結晶構造と分子構造は異なる。
- スケールサンプル間でもわずかに差があるように思われる。

水の種類	吸着水	結合水	構造水(−OH基)
脱水温度	< 200℃	200–500℃	500–1000℃
Bouter-as	−4.96	−1.85	−0.76
Binner-as	−6.20	−2.09	−0.84
A-as	−5.33	−1.81	−1.03
Silica gel	−12.47	−1.59	−1.86
Silica glass	−0.02	−0.01	+0.29

スケールサンプルの機械的強度はBouter-as、Binner-as、A-asの順に大きく、構造水の量もこの順に少ない。

脱水縮合が進むほど、スケールの強度が増す可能性を示唆

SEM/EDS解析による元素の遍在と凝集

(a)	BSE	Si	O	Al	Ca	Fe	Na	K
Bouter-as								
Bouter-HCl								
Binner-as								
Binner-HCl								
A-as								
A-HCl								

解析例

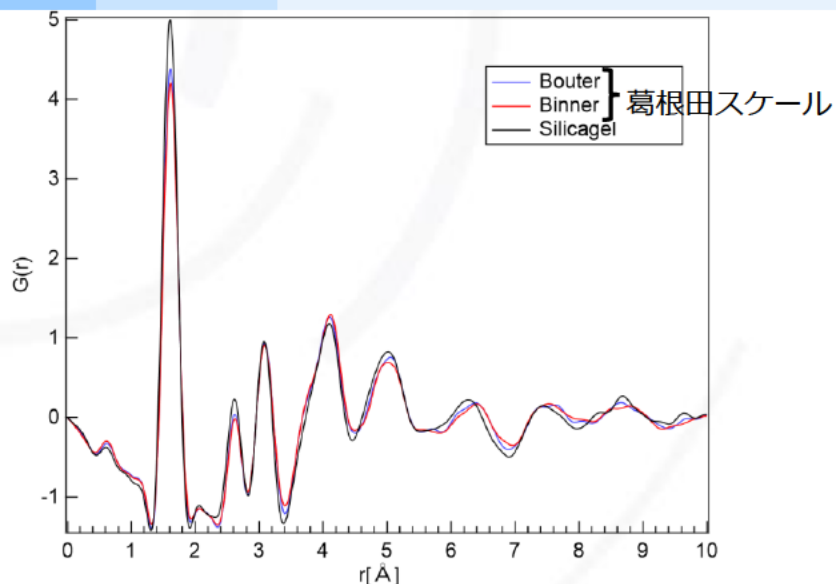
「凝集元素」と「遍在元素」に分類。 Feは凝集

凝集元素 : Fe、S、Cu、Zn、Pb、Ca、Cl

遍在元素 : Si、O、Al、Fe、Na、K、Ca、Mn

短距離・中距離構造解析 ～PDF/RMC解析とXAFS解析～

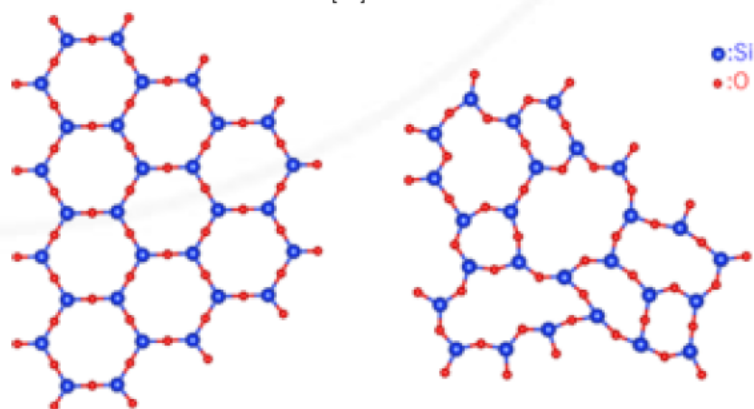
スケールがネットワーク構造をもつ



シリカゲルと葛根田スケールの間にスペクトルの差はあるもののパターンが一緒



非晶質シリカスケールがネットワーク構造である。



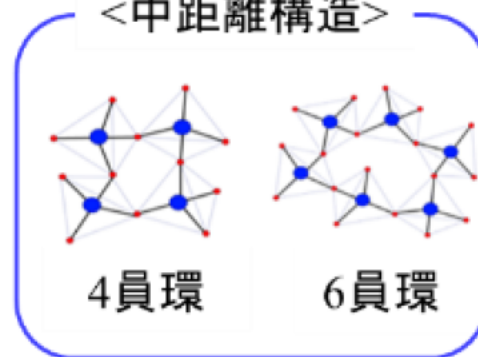
結晶質

非晶質

白又・吉元, リガクジャーナル, 50(1), p.1-8, (2019).図10を引用

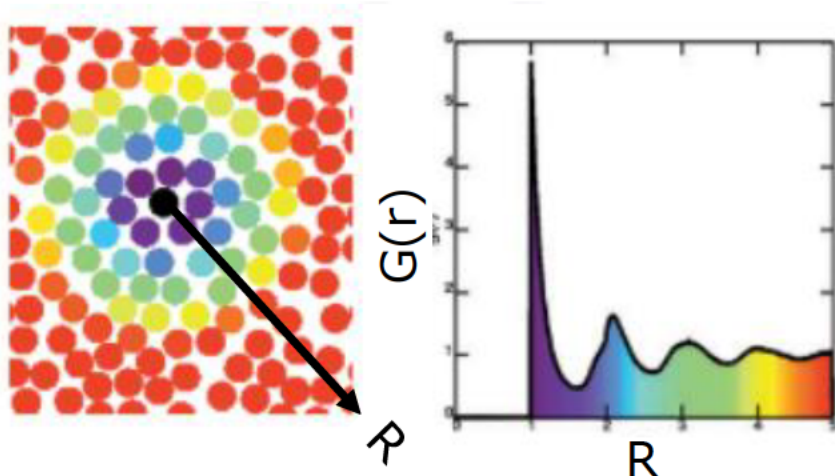
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

<中距離構造>



員環：SiとOの数でカウント
 n 個のSiとO = n 員環

非晶質の原子分布とPDF



Pair Distribution Function, 二体分布関数

任意の原子を基準として、
距離Rだけ離れた位置に
他の原子が存在する確率(数)を示す

➡非晶質の構造秩序を比較可能

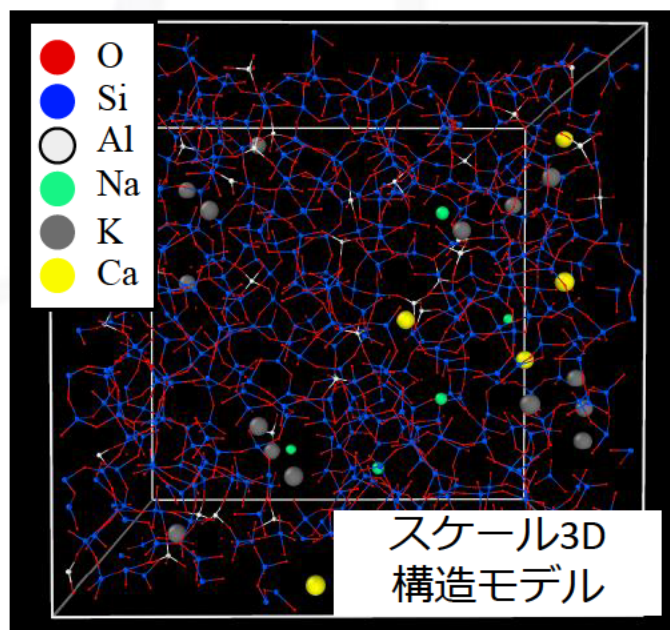
鈴谷: *RADIOISOTOPES*, 60, p.63-87 (2011). 図1を引用

MD-RMC法による非晶質構造モデルリングの流れ

1. 実験により実サンプルのデータを取得
2. PDFにより二体分布関数を導出
3. MDに基づく原子間相互作用・構造制約を取り入れながら、測定PDFを再現する原子配置をRMCにより探索
4. 非晶質構造の詳細評価が可能

MD: Molecular Dynamics, 分子動力学

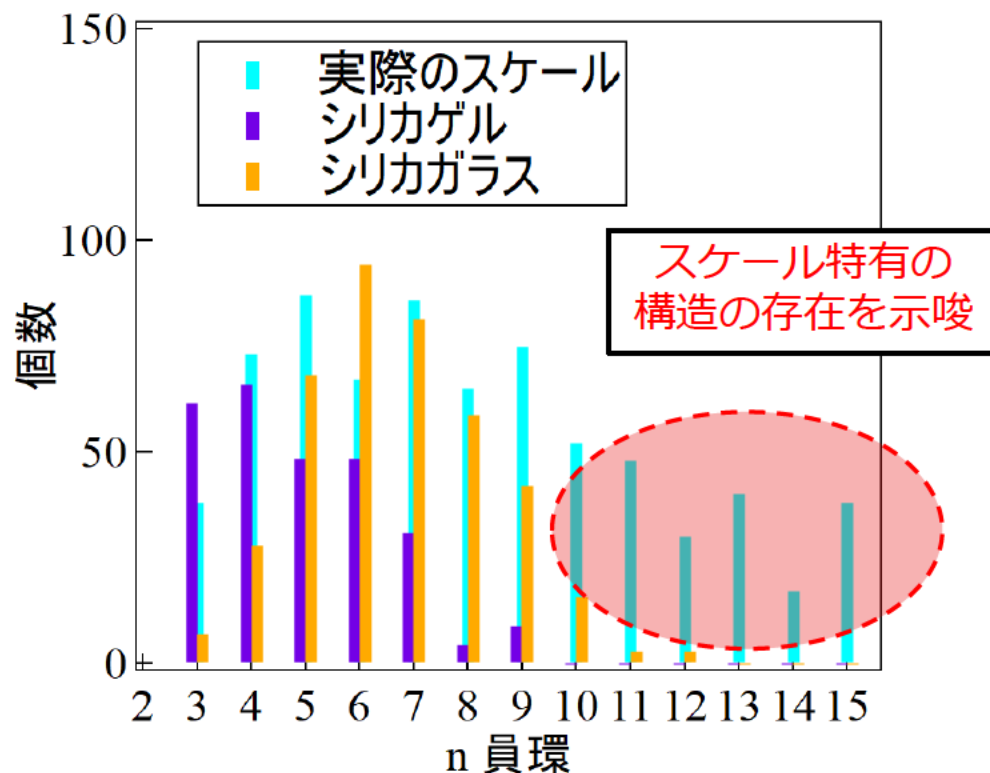
これまでの解析結果



改善を検討

- ・ 組成：酸素濃度の最適化、シリカの縮合状態について反映
- ・ 密度：シリカスケールの実測密度を使用

シリカスケールの非晶質構造を解析可能であった。標準的なシリカとの差異を評価できた一方、**組成(SiO_2 縮合度)**および**密度に改善点**がある状況。



XAFS解析

シリカスケールの微量元素の影響評価に対してXAFSが有効な手法となりえるか、その有効性を検証する。

(1) 評価可否

シリカスケール中の微量元素を解析できる品質のデータが得られるのか？

(2) 測定手法の最適化検討

より有効な情報を得るために必要な手法（試料、測定、解析）は何か？

実施する上で課題となることは何か？

(3) シリカスケールの局所構造に関する基礎的知見の収集

XAFSの測定結果からどのような知見が得られるのか？

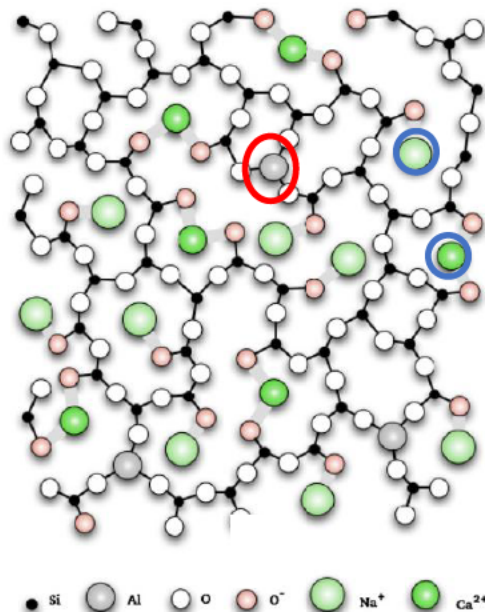
従来の手法との違いは何があるか？

- 分析施設 : ナノテラス（仙台・青葉山）
- 分析時期 : 2025年2月、2025年6月
- ビームライン : BL08W（テンダーX線＋硬X線）、BL08U（軟X線）
- 分析方法 : 軟X線＋テンダーX線 @部分蛍光収量法＋全電子収量法
硬X線 @部分蛍光収量法＋透過法
- 吸収端 : K端

引用：QST HP



SiO₂ネットワーク構造における微量元素の存在状態評価



○ネットワーク形成剤 (以下、形成剤)

SiO₂ネットワークを形成する元素

○ネットワーク修飾剤 (以下、修飾剤)

SiO₂ネットワーク中に取り込まれる元素

○中間剤

形成剤・修飾剤の双方の働きをする元素

分類名はSun, K. (1947) Fundamental Condition of Glass Formation
Journal of the American Ceramic Society, 30, 277-281. を参考。

例：ソーダ石灰ガラスでの例

出典：出典：三芝硝材株式会社
「ガラスとは？」の一部を引用

https://www.sanshiba-g.co.jp/post_5.html
(アクセス日：2026年6月11日)

SiO₂ネットワークには関与している元素だけでなく、関与していない元素と区別できることを検証できた。また、種々元素の役割についても知見を得た。

+

スケール内で凝集している形態（硫化物、塩化物、酸化物、水酸化物など）が存在

シリカスケールの構造を評価する目的で、PDF解析およびMD-RMC法の適用を検討した。

1. 従来解析法では、同じ SiO_2 から成る標準的な非晶質シリカ（シリカゲルやシリカガラス）と構造が異なることは理解できるが、それ以上の理解はできない。
2. PDF解析/MD-RMC法はスケールの非晶質構造を評価可能であり、標準的な非晶質シリカとの差があることを明らかにできた。シリカスケールは標準的な非晶質とは異なる構造秩序の特徴を有する。
3. XAFS解析により、 SiO_2 ネットワークには関与している元素だけでなく、関与していない元素と区別できることを検証できた。また、種々元素の役割についても知見を得た。

スケールの生成・成長や硬質・難溶化を制御する各種スケール対策技術の科学的根拠を示せるようになる。

本構造解析手法を用いて、抑制手法（システム・薬剤等）の高度化を目指す。

ご清聴ありがとうございました。