機能性材料・溶媒を用いる 迅速簡便な核燃料廃棄物処理処分プロセスの創出

Yiwei Zhang, Tommy TAN, 銭 欣逸, 井戸田 直和, 塚原 剛彦
（東京科学大学 総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所）

【本研究の背景】

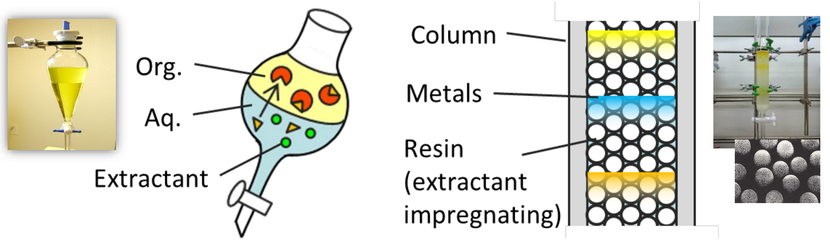
- 大学等の核燃施設には多種多様で大量の核燃廃液（レガシー廃液）が存在しており、その殆どで組成が複雑かつ性状も不明
- 廃棄体化方法も属人化により多様で、安全管理・品質管理の負荷が増大　→ レガシー廃液の精緻な分離と減容化が不可欠



大学等に保管されている多様な核燃廃棄物の例

【既存の核種分離法の課題】

溶媒抽出 (Solvent extraction)　クロマトグラフィー (Chromatography)



課題① 原理的に液液・固液の分配に依存
課題② 作業負荷（長時間・多段の化学操作）
課題③ 環境負荷（二次廃棄物、酸・有機溶媒による爆発・火災の懸念）

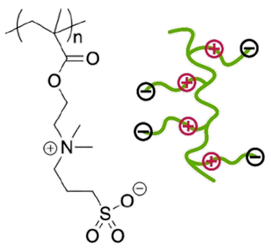
【本研究の目的】

“環境にやさしく” “すばやく” “簡単に” 核燃料廃棄物を減容化・再資源化する技術と方法論の創出
(Creation of Rapid and Facile Nuclear Waste Treatment and Disposal Processes Using Functional Materials and Solvents)

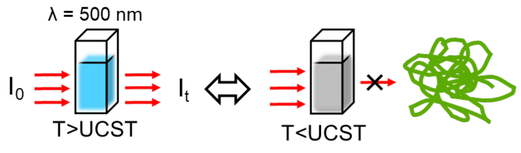
1. 温度スイング型分離材による核種のキャッチ＆リリース
2. PDMSスポンジによる”吸って-搾る“核種分離回収
3. 深共晶溶媒を利用した高速マイクロ核種分離分析

【技術1：環境に優しい温度スイング型分離材 ～刺激応答性ポリマーブラシによる核種のキャッチ＆リリース～】

Structure and phase transition behavior of zwitterionic polymer

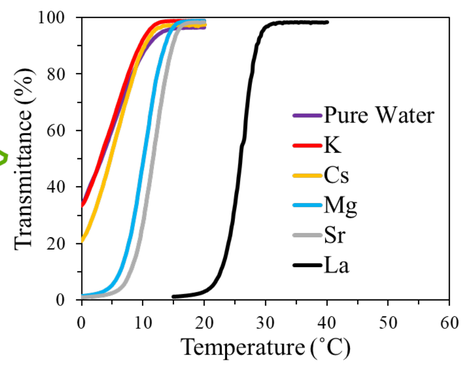


Sulfobetaine-typed zwitterionic polymers [poly(DMAPS)]

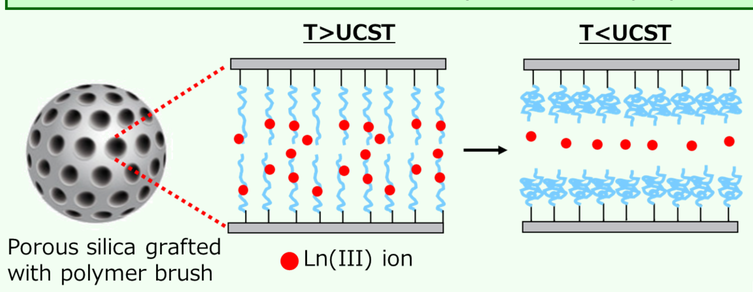


(UCST; Upper Critical Solution Temperature)

- Based on turbidity measurement, poly(DMAPS) can interact with metal ions.



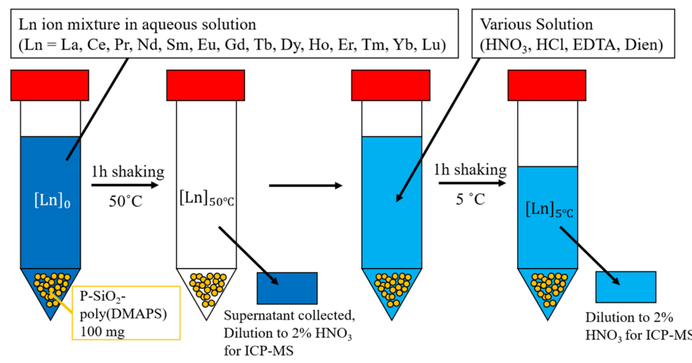
Catch and release of lanthanide ion by zwitterionic polymer brush



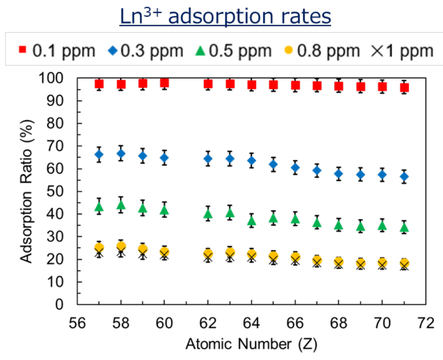
- Surface functionalization of porous silica with zwitterionic polymer that has adsorption capability for lanthanide ions
- **Chemically-immobilized poly(DMAPS)** enables the catch and release of Ln ions by only temperature-swing

[T.Tsukahara et al., *RSC Appl. Polym.*, 4, 736 (2026).他]

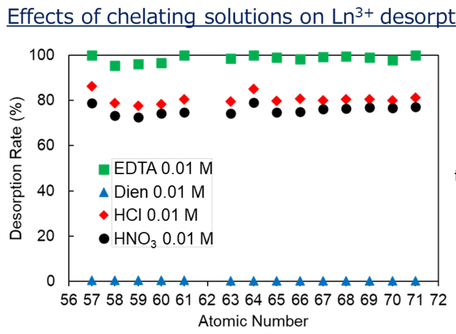
[Refs: *RSC Appl. Polym.*, 4 (2026) 736. *Proc. Global2026* (2026) 743.]

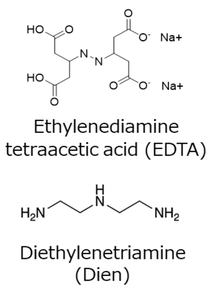


Ln3+ adsorption rates

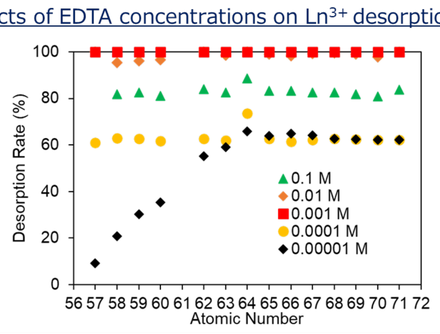


Effects of chelating solutions on Ln3+ desorption rates



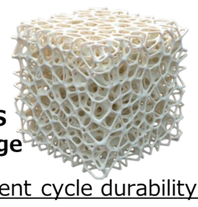


Effects of EDTA concentrations on Ln3+ desorption rates

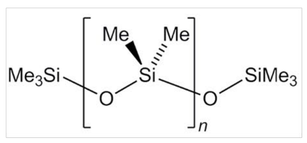


- Ln ions could be adsorbed on poly(DMAPS)-brush **above UCST**
- The adsorbed Ln ions could be desorbed into a chelating solution **below UCST** under shaking

【技術2：新概念の分離法 ～PDMS(Polydimethylsiloxane)スポンジによる”吸って-搾る“核種分離回収～】



PDMS sponge

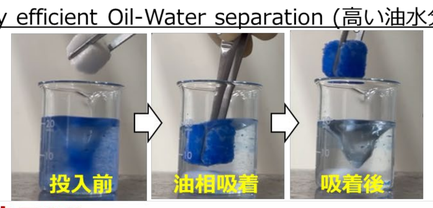


- **Flexible and good mechanical stability**
- **Hydrophobic and porous structure with high specific surface area**
- **Low cost and high cost-effectiveness**

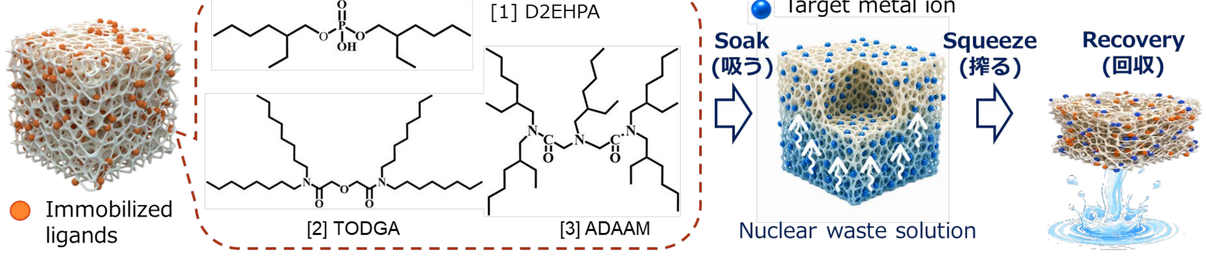
Excellent cycle durability (優れた繰り返し耐久性)



Highly efficient Oil-Water separation (高い油水分離特性)

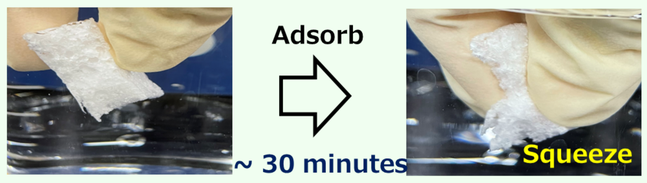


Development of “Soak-Squeeze (吸って−搾る)” radionuclides recovery method



[D2EHPA (Bis(2-ethylhexyl) Hydrogen Phosphate), TODGA (2,2'-Oxybis(N,N-di-n-octylacetamide)), ADAAM (2-ethylhexyl diamide amine)]

Adsorption step (吸着)



General adsorbents : **hours to dozen hours**

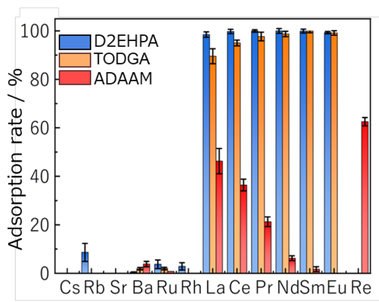
Desorption step (脱離)



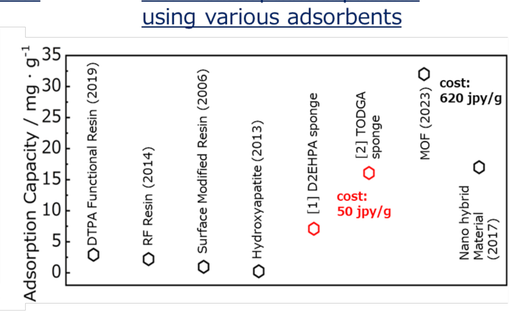
General method: **Time-consuming (>10 hours)**

> 20-fold increase in solution throughput
(> 20-fold waste volume reduction)

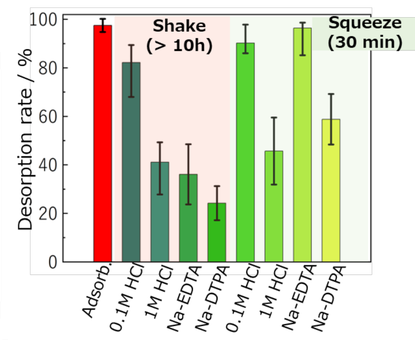
Adsorption rates of metal ions in HLLW



Sm3+ adsorption capacities using various adsorbents

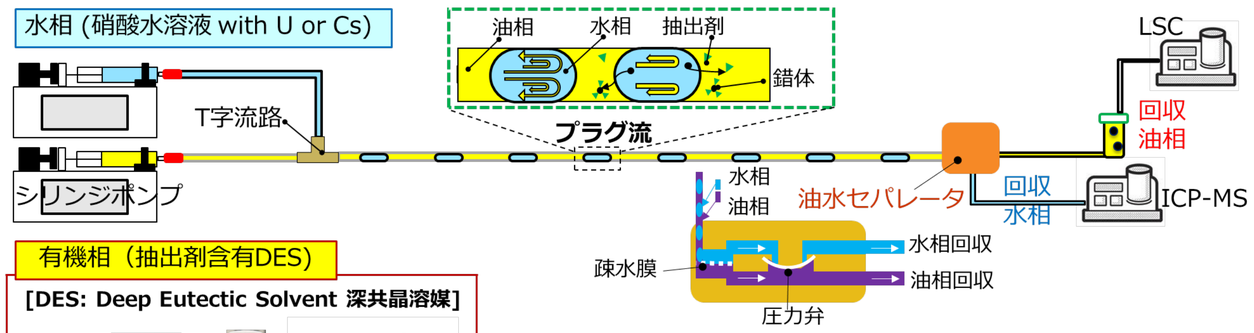


Effects of eluents on Sm3+ desorption



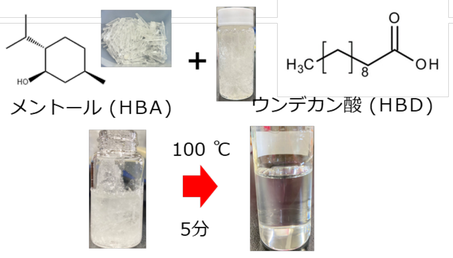
[Refs: *J. Hazard. Mater.*, 488 (2025) 137485. *Proc. Global2026* (2026) 732.]

【技術3：廃棄物を出さない核種分離 ～グリーン溶媒(深共晶溶媒)を利用した高速マイクロ核種分離分析～】



有機相（抽出剤含有DES）

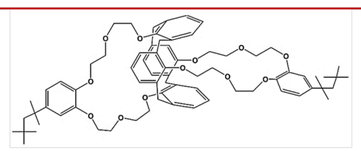
[DES: Deep Eutectic Solvent 深共晶溶媒]



- 複数の物質を混ぜるだけで溶媒を作成可能
- 天然物の利用による無毒・環境親和性
- 分子間相互作用が強く、蒸気圧が低い
- イオン液体よりも低コスト

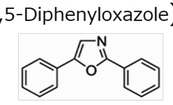
[Cs用]

・抽出剤BOBcalixC6
Calix(4)arene-bis(t-octylbenzo-18-crown-6

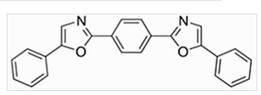


[U用]

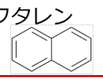
・第一蛍光体PPO (2,5-Diphenyloxazole)



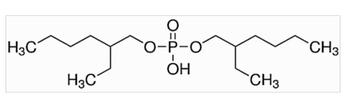
・第二蛍光体POPOP (1,4-Bis(5-phenyloxazol-2-yl)benzene)



・ナフタレン

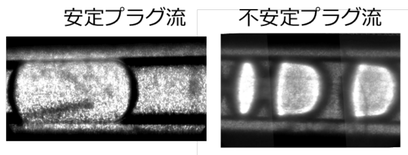


・抽出剤HDEHP (Di(2-ethylhexyl) phosphoric acid)

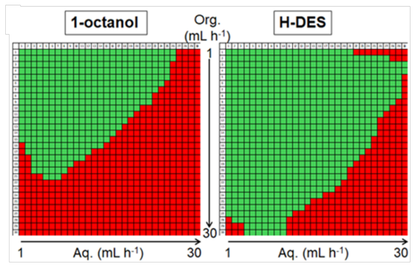


マイクロ油水プラグ流挙動

高速度カメラ観察



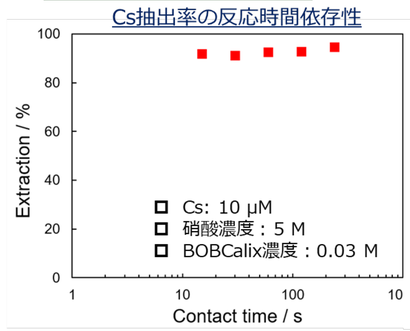
プラグ流の流速依存性
[色マッピング：安定(緑) vs.不安定(赤)]



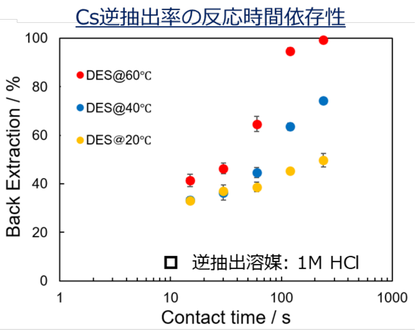
既存法に比べて超効率化
- **処理時間120倍高速化(30分が15秒)**
- **廃液量100倍減容化(100mLが1mL)**

Cs/U分離試験結果

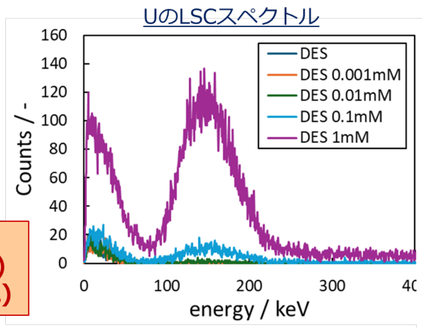
Cs抽出率の反応時間依存性



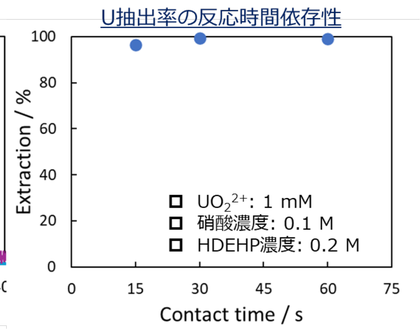
Cs逆抽出率の反応時間依存性



UのLSCスペクトル



U抽出率の反応時間依存性



[Refs: *ACS Sustainable Chem. Eng.* 14 (2026) 4460., *Anal. Sci., 42* (2026) 645.]

【今後の展望】

各技術の実廃液への適用と性能評価を実施すると共に、社会実装（適用可否の判断基準、性能確認方法、評価手順・指針の整理）へ向けた課題を抽出する。
(Each technology will be applied to actual nuclear waste solutions to evaluate its performance and identify potential challenges.)

本研究は、原子力規制庁の令和6~8年度原子力規制研究技術基盤構築事業費補助金（原子力規制研究の強化に向けた技術基盤構築事業）の補助を受けたものである。