【本件リリース先】
（リリース時間）
11 月 12 日（木） 10:30
（資料配付）
文部科学記者会、科学記者会、原子力規制委員会記者控室、茨城県政記者クラブ、九州大学記者クラブ

令和 8 年 11 月 12 日
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
国立大学法人九州大学

植物由来スポンジで効率的に海水からウランを回収する技術を開発

―エネルギー資源の安定確保に新たな可能性―

【発表のポイント】

- 原子力発電の燃料となるウランは、エネルギー安全保障上重要な戦略的資源です。陸上資源の偏在や供給リスクを背景に、海水中のウランが新たな資源として注目されています。しかし、海水 1 L 中のウランはわずか約 3 μg(マイクロは 100 万分の 1)、海水約 100 トン(10 万 L)でも約 0.3 g しか含まれていません。一方、海水全体には膨大な量のウランが存在しており、この薄く広く分布する資源をいかに集めるかが大きな課題です。
- 本研究では、植物由来のセルロースを原料に「ウラン回収スポンジ」を開発し、天然海水中の極微量なウランを短時間で効率よく吸着できることを実証しました。吸着後は簡易な手順でウランを取り出すことができ、スポンジは繰り返し利用できます。さらに、ウランを人工的に添加した水溶液での測定では、スポンジ材 1g 当たり最大約 0.3 g のウランを吸着できる能力が推定されました。これは、海水約 100 トンに含まれるウランの総量に相当します。
- 今後は、黒潮などの海流や既存の海水取水設備を活用し、大量の海水から低いエネルギー消費でウランを回収するシステムの実現を目指します。そのために、スポンジの性能検証を進めるとともに、製造・回収・再利用に必要なエネルギーやコストを評価していきます。さらに、本技術をウラン以外の有用元素の回収や汚染物質の除去にも応用し、資源の有効利用から環境浄化まで幅広い分野への展開を目指します。



【概要】

本研究では植物由来のセルロース[1]を原料とするスポンジ状多孔質材料[2]の「ウラン回収スポンジ」を開発し、海水中に極低濃度で存在するウラン[3]の回収に成功しました。併せてスポンジが繰り返しウラン回収に利用できることも確認しました。

海水にはウランをはじめ様々な有用元素が溶け込み、広大な海に極めて薄く散らばっています。一方で、ナトリウムやマグネシウム、カルシウムなどは高濃度で存在するため、海水 1 L 中にわずか約 3 μg(マイクロは 100 万分の 1)と極微量しかないウランを集めるのは困難です。そこで研究グループは、天然素材のセルロースに着目しました。独自製法(凍結架橋法[4])で作製したセルロース製多孔質材料はスポンジ状で、内部に多数の空隙を持ち、吸水しても形状を保ちます。この素材にウラン吸着[5]の機能を与え、海水と接触させればウランを回収できるのではないかと考えました。

研究グループは、凍結架橋法で作製したセルローススポンジにウラン吸着の働きを持つリン酸基[6]を導入し、「ウラン回収スポンジ」を開発しました。スポンジ材自体の吸着性能をウランを人工的に添加した水溶液(pH5)で確認したところ、スポンジ材 1 g 当たりの最大ウラン吸着容量は約 0.3 g と推定されました。これは約 100 トン(10 万 L)の海水に含まれるウランの総量に相当します。実際に天然海水 1L 当たり 0.4 g のスポンジを用いると、24 時間で海水中のウラン 9 割超を吸着しました。さらに、カルシウムやマグネシウムなど海水中に大量に存在する共存元素[7]の影響を受けず、ウランを選択的に吸着することも確認しました。ウラン回収スポンジのもう一つの特徴は「簡単な方法で取り出して、再び使う」ことができる点です。吸着したウランを重曹(炭酸水素ナトリウム)[8]を用いて脱離[9]でき、再度、回収スポンジとしてウラン吸着に利用できます。

特殊な薬品を用いることなくウランを回収する本システムは、より簡便で環境負荷の小さい資源回収プロセスの確立につながる可能性があります。今後は実用化を視野に性能実証、全体のエネルギー消費やコスト評価などを進める方針です。また、今回の研究は海水を様々な有用元素が溶け込んだ「資源」として利用するための新たな材料技術開発です。豊富なセルロース由来のスポンジ状材料で海に薄く散らばる資源を集め、身近な試薬で取り出し、再度使う。このシンプルな仕組みを発展させれば、他の有用元素の回収技術への展開が期待されます。

本研究は国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(理事長　小口正範)の関根由莉奈研究主席、南川卓也研究副主幹、杉田朝子、今田未来技術員、松枝誠研究副主幹、紅祐介、高畠容子研究副主幹、柳澤華代研究副主幹、中西貴宏研究主幹、国立大学法人九州大学(総長　赤司浩一)の松本光助教、三浦佳子教授らによるものです。

本成果は、2026 年 11 月 11 日(米国東部時間)に米国化学会の国際学術誌「ACS Applied Materials & Interfaces」にオンライン掲載されました。

【これまでの背景・経緯】

エネルギーや資源の安定確保は、持続可能な社会を実現するうえで重要な課題です。私たちの身近にある海水にはナトリウムやマグネシウムだけでなく、様々な有用元素が溶け込んでいます。海は地球表面の約 7 割を占めており、海水中の有用元素を効率よく取り出すことができれば、海を新たな「資源」として利用できる可能性があります。

有用元素の中でも、ウランは原子力発電の燃料となる、エネルギー安全保障上重要な戦略的資源です。現在、ウランは主に陸上鉱山から確保していますが、資源の偏在や供給リスクを背景に、海水中のウランが新たな資源として注目されています。ただし、海水 1 L 中のウランはわずか約 3 μg なのに対し、ナトリウムやマグネシウム、カルシウムなどがはるかに高濃度で存在します。つまり、海水からのウラン回収は、膨大な量の他の元素が存在する中から極微量ウランを効率よく吸着しなければならず、技術的な大きな課題です。

これまでの先行研究では、ウランと結合しやすい様々な官能基を持つ吸着材料が開発されてきました。一方、社会実装に向けては吸着性能だけでなく、吸着材料そのものが安価で大量に利用できること、海水と効率よく接触できること、吸着したウランを簡便に取り出せること、そして、材料を繰り返し利用できることが重要になります。

これらの課題解決のため、植物由来の再生可能な素材で豊富に存在する天然高分子「セルロース」に着目しました。セルロースは表面に様々な機能を付与できることから、研究グループではこれまで、セルロースを原料として水を内部に取り込む吸水・保水性能を持つ多孔質材料の開発を進めてきました。この開発を踏まえ、セルロース多孔質材料にウラン吸着機能を加えれば、海水に薄く分布するウランを回収する材料を実現できるのではないかと考えました。

【今回の成果】

研究グループは、カルボキシメチルセルロースナノファイバー(CMCF)[10]を原料に、これまでに開発した独自の凍結架橋技術を応用してスポンジ状の多孔質材料を作製し、リン酸基を導入することでウラン吸着機能を持たせました（図 1）。

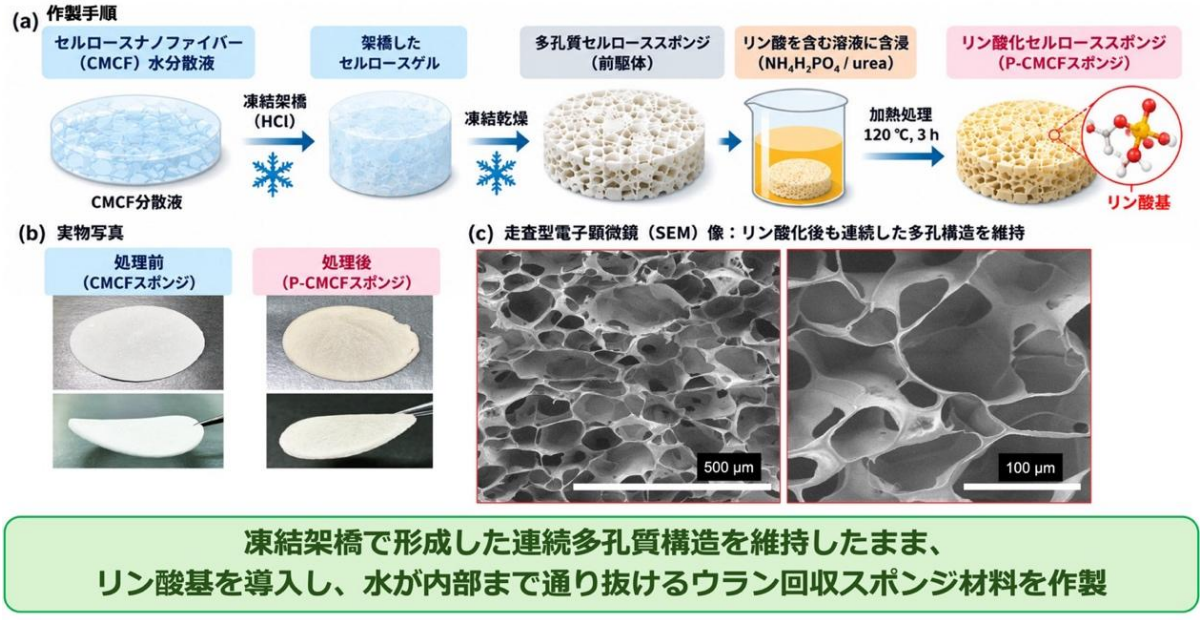


図 1　リン酸化セルローススポンジの作製と多孔構造

このスポンジ材には微細な空隙が無数にあるので、海水がスポンジ内部まで深く浸透してリン酸基との接触機会が増加し、効率よくウランを吸着できると考えられます。

【1】ウラン吸着性能の確認

開発したスポンジ材を実際の海水 10mL に浸し、ウランの回収性能を調べました。海水中ウラン濃度は約 3 μg/L ですが、未処理スポンジ 10mg はほとんどウランを吸着しなかったのに対し、リン酸基を導入したスポンジ材 10mg は 24 時間で約 99%のウランを吸着しました（図 2(a)）。

さらに、海水の量を増やし、スポンジ材の使用量や接触時間を変えて調べたところ、海水 1L 当たり 0.4 g の割合でスポンジ材を使用すると、24 時間で約 94%のウランを吸着しました。使用量を半分にしても、1 週間後には約 90%を吸着できました。また、共存元素による吸着性能への影響については、高濃度で存在するカルシウムとマグネシウム、海水中のウラン回収で競合元素として知られるバナジウムのそれぞれを添加したモデル海水で調べました。結果、99%以上のウラン吸着率を維持し、影響は小さいことも確認しました（図 2(b)）。

なお、スポンジ材自体の吸着性能を確認するためにウランを人工的に添加した水溶液(pH5)を用いて測定したところ、スポンジ材 1 g 当たりの最大ウラン吸着容量は約 0.3 g と推定されました。これは約 100 トン（10 万 L）の海水に含まれるウランの総量に相当します。

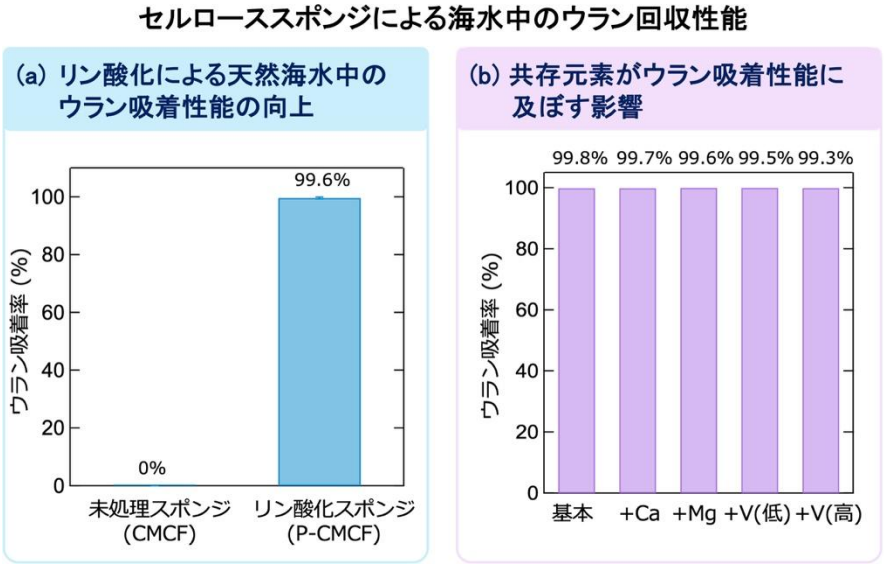


図 2 リン酸化セルローススポンジのウラン吸着性能　(a)天然海水 10 mL にスポンジ材 10 mg を添加し、24 時間後の吸着率を評価した(b)モデル海水中にカルシウム（Ca）、マグネシウム（Mg）、バナジウム（V）を添加した条件でも、99%以上の吸着率を維持した

【2】スポンジ材からのウラン脱離とスポンジ再利用の検証

海水からの回収ではスポンジ材から吸着ウランを取り出す必要があります。そこで、吸着したウランを脱離させる方法を検討した結果、家庭でも広く利用されている重曹（炭酸水素ナトリウム）の水溶液を用いることで、吸着ウランの約 90%を取り出すことができました。さらに、ウラン脱離後のスポンジ材を再び吸着に使用する「吸着→脱離→再利用」の試験を行い、3 回の吸着・脱離

サイクルを通じて高いウラン回収性能を維持し、繰り返し利用できることを確認しました。加えて、繰り返し使用後も、スポンジ材の多孔質構造や圧縮強度が使用前と比べてほぼ維持されていることを確認しました（図 3）。これにより、ウランを吸着して終わるのではなく、吸着したウランを取り出し、吸着材料を繰り返し利用できる可能性を示しました。

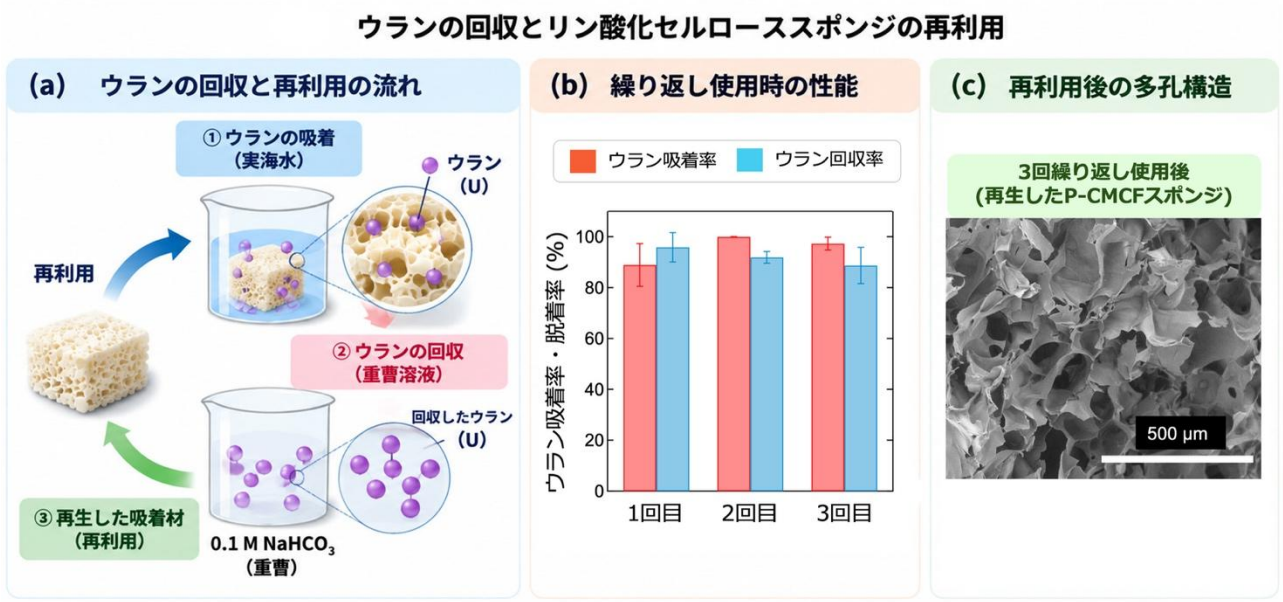


図 3 ウランの回収と材料の再利用　(a)吸着ウランを重曹（炭酸水素ナトリウム）溶液で回収し、スポンジ材を再利用する(b)吸着・脱離を 3 回繰り返したが、吸着・脱離性能は高水準を保った(c)3 回の繰り返し使用後もスポンジ材の微細構造は維持された

【まとめ・今後の展望】

本研究では、地球上に豊富に存在するセルロースを使用してウラン回収スポンジを開発し、海水中に極めて低濃度に存在するウランの吸着と、重曹によるスポンジからのウラン脱離、スポンジの繰り返し利用まで、一連のウラン回収プロセスを実証しました。

今後は、より大量の海水を用いた吸着試験や、海水を連続的に流した条件での回収性能、長期間の繰り返し利用などを検証します。また、黒潮などの海流や既存の海水取水設備を活用した低エネルギー消費型の回収システムを視野に入れ、スポンジの製造からウランの吸着・回収・再利用まで、プロセス全体のエネルギー消費やコストを評価し、実用化に向けた検討を進めます。

今回の成果は、海水を単なる「水」としてではなく、様々な有用元素が溶け込んだ巨大な「資源」として捉えなおすものです。海水には膨大な量の有用元素が含まれていますが、その多くは極めて低い濃度で存在しています。本研究で示した「豊富な材料を使って希薄な資源を集め、簡単な方法で取り出し、また材料を使う」という考え方を、ウラン以外の有用元素の回収や汚染物質の除去にも応用し、資源の有効利用から環境浄化まで幅広い分野への展開を目指します。

【論文情報】

○ 雑誌名：ACS Applied Materials & Interfaces

○ タイトル：Phosphate-Functionalized Macroporous Cellulose Sponges for Uranium Recovery

from Seawater

○ 著者名：Yurina Sekine[1], Takuya Nankawa[1], Asako Sugita[1], Miki Konda[1], Makoto Matsueda[2], Yusuke Beni[1], Yoko Takahatake[1], Kayo Yanagisawa[3], Takahiro Nakanishi[3], Hikaru Matsumoto[4,5], Yoshiko Miura[4], Hideyuki Yasufuku[6], Katsuhiko Ariga[7,8]

○ 所属： 1 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 NXR 開発センター バイオ由来機能性材料開発特別チーム/2 日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター/3 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所原子力基礎工学研究センター/4 九州大学大学院工学研究院/5 九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所（I^2CNER）/6 物質・材料研究機構 技術開発・共用部門/7 物質・材料研究機構 ナノアーキテクトニクス材料研究センター/8 東京大学大学院新領域創成科学研究科

DOI: http://doi.org/10.1021/acsami.6c18660

【各機関の役割】

・関根、南川（日本原子力研究開発機構）：研究のデザイン、データの解析・解釈
・杉田、今田（日本原子力研究開発機構）：吸着実験全般
・松枝、柳澤（日本原子力研究開発機構）：ICP-MS、ICP-MS/MS[11]などによる元素分析
・紅、高畠（日本原子力研究開発機構）：FTIR、SEM による材料分析
・中西（日本原子力研究開発機構）：海水通水試験に関する助言
・松本、三浦（九州大学）：通水試験
・安福秀幸（物質・材料研究機構）：XPS 測定・解析
・有賀克彦（物質・材料研究機構、東京大学）：研究全体および結果の解釈に関する助言
なお、関根と南川は本研究に同等に貢献しました。

【助成金の情報】

本研究は JSPS 科研費（「JP26K01436」（関根、南川、三浦、有賀）、「JP25K22235」（南川、関根））の助成を受けたものです。

【本件に関する問合せ先】
（研究成果・共同研究に関すること）
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所 NXR 開発センター
研究主席 関根 由莉奈
Mail：sekine.yurina@jaea.go.jp

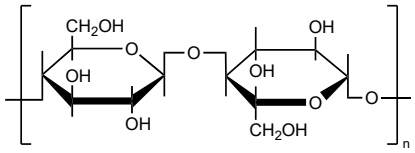
（報道担当）
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
総務部報道課
TEL：070-1460-5723、Mail：tokyo-houdouka@jaea.go.jp

国立大学法人九州大学
総務部広報課
TEL：092-802-2130、Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

【用語の説明】

[1] セルロース

植物の細胞壁を構成する主成分の一つで、地球上に豊富に存在する天然高分子です。木材や綿などに多く含まれ、紙や繊維など幅広い用途に利用されています。植物由来で再生可能な素材であり、化学的に加工することで様々な機能を付与することができます。



[2] 多孔質材料

内部に多数の小さな空隙（孔）を持つ材料です。空隙を通して水や溶液が材料内部まで入り込むことができるため、材料表面と水との接触面積を大きくすることができます。本研究では、セルロースから水が内部まで通り抜ける連続した多孔質構造を持つスポンジ状材料を作製しています。

[3] ウラン

天然に存在する元素の一つで、原子力発電の燃料などに利用されています。海水中にも溶け込んでいますが、濃度は約 3 μg/L（1 L の海水中に約 0.000003 g）と極めて低濃度です。一方、海全体では膨大な量のウランが存在すると考えられており、効率向上のための回収技術が研究されています。

[4] 凍結架橋法

セルロースを含む水溶液や分散液を凍結することで、セルロース同士の結合や集合を促し、三次元的な構造を形成する方法です。水が凍る際にセルロース成分が氷の結晶の間に集められることを利用して、連続した多孔質構造を形成することができます。

本研究グループは、2020 年に化学的に加工したセルロースナノファイバーから多孔質ゲルを形成する手法を開発し、2023 年には天然構造を持つセルロースナノファイバーへと展開しました。今回の研究では、これまで培ってきた凍結架橋技術を基盤として、セルロース多孔質材料にウラン吸着機能を付与し、実際の海水からの資源回収へと応用しました。

[5] 吸着

液体や気体中に存在する物質が、別の物質の表面や内部に取り込まれる現象です。本研究では、海水中に溶けているウランがセルロース多孔質材料に導入したリン酸基などと相互作用し、材料に吸着される現象を指します。

[6] リン酸基

リンと酸素を含む官能基の一種です。金属イオンなどと相互作用する性質を持つため、金属や有用元素を吸着する吸着材料の機能部位として利用されています。本研究では、セルロース多孔質材料にリン酸基を導入することで、海水中のウランを吸着する機能を付与しました。

[7] 共存元素（競合元素）

目的とする元素と同じ溶液中に存在し、吸着などに影響を与える可能性のある元素です。海水にはナトリウム、マグネシウム、カルシウムなどがウランよりもはるかに高濃度で存在します。また、バナジウムは海水からのウラン回収では競合する元素の一つとして知られています。本研究では、カルシウム、マグネシウム、バナジウムの影響を調べています。

[8] 重曹（炭酸水素ナトリウム）

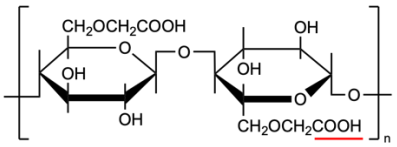
化学式 $NaHCO_3$で表される物質で、食品や洗浄剤などにも広く利用されています。本研究では、セルロース材料に吸着したウランを取り出すための溶液として使用しています。

[9] 脱離

吸着材料に吸着された物質を材料から取り出す操作です。本研究では、吸着したウランを重曹（炭酸水素ナトリウム）水溶液を用いて材料から取り出し、その後、材料を再びウラン吸着に使用しています。

[10] カルボキシメチルセルロースナノファイバー(CMCF)

セルロースの一部にカルボキシメチル基と呼ばれる官能基を導入したセルロースナノファイバーです。水との親和性が高く、本研究では多孔質スポンジを形成する材料として用いています。本研究では、ウォータージェットで物理的に解繊して得られた CMCF を用いました。



カルボキシル基

[11] ICP-MS／ICP-MS/MS

試料に含まれる元素を高感度に測定する分析法です。試料を高温のプラズマ中でイオン化し、その質量を使用して元素を分析します。極めて低い濃度の元素まで測定できるため、本研究では海水中に約 3 μg/L という低濃度で存在するウランの定量などに用いています。