

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19999

研究課題名（和文）励起光波長選択による4f,5f元素分離技術の開発

研究課題名（英文）Development of separation technique of 4f and 5f elements with optical switching of oxidation states

研究代表者

松田 晶平（Matsuda, Shohei）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・研究開発アシスタント

研究者番号：00824591

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：ランタノイドとアクチノイドのf-f遷移を介する共鳴多光子電荷移動の研究を行った。メタノール溶媒中の3価ユウロピウムの共鳴2光子還元量子収率を決定した。また、3価アメリシウム硝酸錯体における共鳴多光子電荷移動を発見した。これはアクチノイドで初めての観測であり、共鳴多光子電荷移動による酸化反応の最初の例である。そして、レーザー照射実験、放射光X線吸収微細構造解析、量子化学計算などからメカニズムを解明した。さらに、共鳴多光子電荷移動による酸化状態の制御と溶媒抽出を組み合わせ、新奇なfブロック元素分離法である「レーザーアシスト元素分離」を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実証したレーザーアシスト元素分離は、他のfブロック元素へ適用できる可能性がある。そして、原理的には周期表で隣り合う元素の相互分離も可能である。そのため、光による元素選別を用いる分離に初めて成功したことは、予想を上回る成果であり、1つの分岐点と言えるほど大きなインパクトがある。実用に向けての現実的な次のステップとして、励起状態の情報を実験的に明らかにし、効率的な励起プロセスの開拓が期待される。また、本研究はアクチノイドの光化学分野の発展に貢献する。アクチノイドは多数の酸化状態をもつため、配位子を選択することで酸化あるいは還元の自在な制御も期待される。

研究成果の概要（英文）：We investigated resonance-enhanced multiphoton charge transfer (REMPCT) via f-f transitions in lanthanides and actinides complexes. The quantum yields of each step of two-photon reduction of trivalent europium in methanol were determined. In addition, we found REMPCT in a nitrate complex of trivalent americium. This is the first observation of REMPCT for actinides and also the first finding of oxidation for f-block elements by REMPCT. Laser-irradiation experiments, synchrotron radiation X-ray absorption fine structure analyses, and quantum chemical calculations revealed its mechanism. Furthermore, we demonstrated laser-assisted element separation, which is a novel separation method for f-block elements using optical control of their oxidation states through REMPCT in combination with solvent extraction.

研究分野：物理化学

キーワード：共鳴多光子電荷移動 レーザーアシスト元素分離 選択励起 共鳴吸収 多光子過程 ランタノイド  
アクチノイド f電子

### 1. 研究開始当初の背景

周期表において  $f$  ブロック元素に分類される元素群は、 $f$  軌道に電子が順に占有されるという特徴を持つ。第 6 周期の原子番号 57~71 までを  $4f$  元素 (ランタノイド)、第 7 周期の原子番号 89~103 までを  $5f$  元素 (アクチノイド) と呼ぶ。ランタノイドは発光材料や磁性材料として身近に存在し、アクチノイドは使用済み核燃料に含まれる。ランタノイドは希少資源であるため、アクチノイドは放射性廃棄物の減容化につながるため、これらの分離回収技術の研究開発が行われてきた。しかし、一般的にこれらの元素分離は難しい。多くは 3 価の酸化状態にあり、外殻電子配置が共通していることに加え、イオン半径と酸化還元電位にほとんど差がないためである。また、既存の分離手法には、工程が多段階に及ぶ点や二次廃棄物の発生などの課題がある。

近年では、酸化状態を制御し、価数を変更することで分離を容易にするというアプローチがある。具体的には、配位子で表面修飾した電極を用い、電気化学的手法によりアメリシウム (Am) の 3 価から 5 価あるいは 6 価への酸化反応を選択的に誘起することに成功したとの報告がある [1]。これに対して本研究では、 $f$  ブロック元素の分光学的な特徴に着目した。

図 1 にランタノイドとアクチノイドの一部に関して、3 価の水溶液における吸収スペクトルを示す。液相であるにも関わらず、線幅の狭い元素固有の吸収ピークが可視域に確認できる。これは  $f$  軌道電子の光学遷移である。Laporte 則では禁制であるため吸収は弱い。しかし、この選択的な吸収を利用して価数を制御、つまり、光酸化還元を引き起こすことができれば、新奇な分離手法が実現する可能性がある。弱い可視域の吸収を介して反応を誘起するには、多光子励起が必要である。そこで、共鳴多光子イオン化法に倣い、共鳴多光子酸化還元を引き起こす。歴史的には、1970 年代後半に Donohue が、 $f-f$  遷移を介する多光子酸化還元は元素分離へ応用することが期待できると提唱した [2,3]。以降、液相では Nakashima らのグループがユウロピウム (Eu)、サマリウム (Sm)、イッテルビウム (Yb) の共鳴多光子還元を報告している [4-7]。

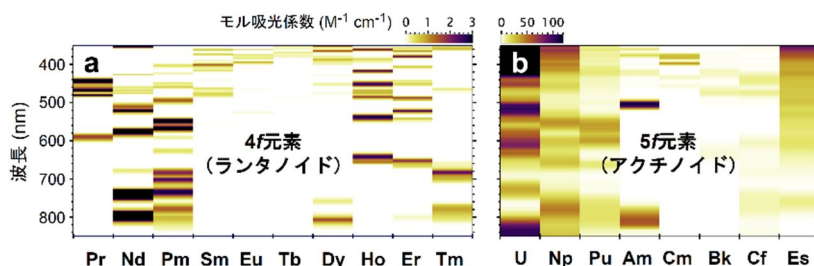


図 1  $f$  ブロック元素の吸収スペクトルと  $f-f$  遷移。(a)ランタノイドの一部の 10 元素、(b)アクチノイドの一部の 8 元素。

### 2. 研究の目的

共鳴多光子酸化還元による元素の選別法と、従来の抽出分離法を組み合わせた「レーザーアシスト元素分離」を創出することを目指した。そのために、 $f$  ブロック元素の共鳴多光子酸化還元の基礎知見を集積した。応用に向けて重要な課題が効率である。そこで、まず分光分析装置を構築し、効率の向上を図る上で不可欠な効率の評価法を確立した。そして、取り扱いが容易な  $4f$  元素 (ランタノイド) を用い共鳴多光子過程の量子収率を明らかにした。また、これまで報告されている例は全てランタノイドであり、なおかつ還元反応のみである。そこで、 $5f$  元素 (アクチノイド) での共鳴多光子酸化還元を調べ、アクチノイドの酸化状態の制御に取り組んだ。また、配位子によって錯体を制御することで酸化反応の実現を目指した。さらに、 $4f$  元素及び  $5f$  元素の混合溶液から標的元素を分離し、レーザーアシスト元素分離を実証することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) $4f$ 元素 (ランタノイド)

3 価ユウロピウム ( $\text{Eu}^{III}$ ) の共鳴多光子還元の量子収率を実験的に調べた。そのための光学システムを構築した。図 2 にその光学配置を示す。ポンプ用に Ti:sapphire レーザー (394 nm, 15Hz, FWHM  $\leq 30$  pm) を使用した。出力は 1/2 波長板と偏光子で構成した減衰器により制御した。ポンプ光はレンズ L1 と L2 でコリメートした。L3 のレンズで  $a = 2f_3$  を満たすように、セル位置の像を CMOS カメラに転送した。取得したビームプロファイルから断面積  $S$  を見積もった。

プローブ用に OPO レーザー (350 nm, 20 Hz,

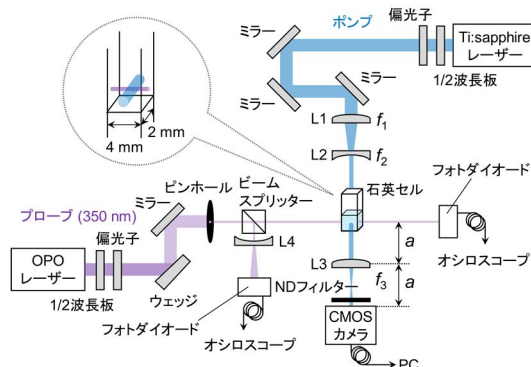


図 2 光学配置の概略

FWHM $\leq$ 40 pm)を用い、生成物の吸光度変化をその場測定した。逆反応(1光子酸化)を抑えるため、透過光強度のS/N比が許す限り減衰器で低出力にした。

## (2) 5f元素(アクチノイド)

3価アメリシウム( $\text{Am}^{\text{III}}$ )の硝酸錯体の共鳴多光子電荷移動を実験的に調べた。レーザー照射実験では、励起光減にOPOレーザー(503 nm,  $\sim$ 5 ns,  $<$ 34 mJ, 10 Hz)を使用した。照射時間は10–40 min。レーザー内のOPO用光学結晶のビームプロファイルを石英セル位置へ像転送することで、ビーム直径を $\sim$ 2 mmに制御した。紫外可視分光光度計を用いて吸収スペクトルを測定し、反応物と生成物の同定と定量を行った。メカニズムの解明のために、 $\text{Am}^{\text{III}}$ 硝酸錯体の共鳴多光子電荷移動の励起波長依存性、励起光強度依存性、硝酸濃度依存性を測定した。さらに、光化学反応の鍵となる $\text{Am}^{\text{III}}$ 硝酸錯体の構造を、大型放射光施設SPring-8でのX線吸収微細構造(XAFS)解析及び大型計算機を用いた量子化学計算により検討した。加えて、多光子励起後のf電子の挙動を電子励起状態計算により推定した。

## (3) 4f及び5f元素混合系におけるレーザーアシスト元素分離

核分裂生成物の模擬としてランタノイドの1つであるプラセオジウム(Pr)を加え、Amと混合した2元素混合硝酸水溶液に対してレーザー照射を行った。元素混合系においても標的要素 $\text{Am}^{\text{III}}$ の共鳴多光子電荷移動が選択的に誘起されるかを確認した。その後、光化学反応で変化した状態のAmを溶媒抽出法により分離した。試料として0.1 mM  $\text{Am}^{\text{III}}$ と0.55 mM  $\text{Pr}^{\text{III}}$ を混合した3 M 硝酸( $\text{HNO}_3$ )水溶液を $\sim$ 100  $\mu\text{L}$ 調製した。この試料へ503 nm、 $\sim$ 30 mJのOPOレーザーを15時間照射した。照射後、16 mMの抽出剤TODGA(N,N,N',N'-tetraoctyl-3-oxapentanediamide)のドデカン溶液を $\sim$ 100  $\mu\text{L}$ 加えて溶媒抽出を行った。水相と有機相それぞれの吸収スペクトルを分光光度計で測定した。

## 4. 研究成果

### (1) 4f元素(ランタノイド)

メタノール溶媒中の $\text{Eu}^{\text{III}}$ へ394 nmのレーザーを照射した。溶存酸素を取り除くため、試料は事前に凍結脱気を行い密閉した。レーザー照射前後の差スペクトルから生成物を2価ユウロピウム( $\text{Eu}^{\text{II}}$ )と同定した。そこで、レーザー照射前後の差スペクトルにおける350 nmでの吸光度差( $\Delta A_{350}$ )を用いて生成物 $\text{Eu}^{\text{II}}$ を定量した。 $\Delta A_{350}$ から $\text{Eu}^{\text{II}}$ 濃度へ換算するため、 $\text{Eu}^{\text{II}}$ のモル吸光係数(220–450 nm)を事前に測定し、350 nmでのモル吸光係数 $\epsilon_{350}$ を決定した。

$\Delta A_{350}$ の励起波長依存性は、 $\text{Eu}^{\text{III}}$ のf-f遷移( $^5\text{L}_6\text{--}^7\text{F}_0$ )の吸収スペクトルとよく一致した。そのため、f-f遷移において還元反応が誘起されることが確認できた。

従来よりも広いフルエンス領域を測定するため、励起レーザーのパルスエネルギーとビーム断面積を制御した。これにより、 $10^2\text{--}10^4\text{ mJ cm}^{-2}$ の範囲の励起光強度依存性を測定することができた。測定した $\Delta A_{350}$ のレーザーフルエンス依存性を単純に冪関数でフィットすると、 $< \sim 10^3\text{ mJ cm}^{-2}$ の領域では冪指数 $\sim 2$ が得られた。そのため、観測された $\text{Eu}^{\text{III}}$ の還元反応を2光子過程として解析した。

単パルス当たりの2光子還元反応の確率は $p_{\text{red}} = N_{\text{II}}/N_{\text{III}}$ と定義できる。 $N_{\text{III}}$ はレーザーパルス照射前の反応体積における $\text{Eu}^{\text{III}}$ の数であり、 $N_{\text{II}}$ は照射後に生成した $\text{Eu}^{\text{II}}$ の数である。3準位の分布に関する微分方程式から2光子過程の反応確率 $p_{\text{red}}$ は、1光子目の量子収率( $\phi_1$ )、2光子目の量子収率( $\phi_2$ )、レーザーフルエンスを用いて表現できる。また、励起波長394 nmは生成物 $\text{Eu}^{\text{II}}$ も電荷移動帯の裾でわずかに吸収する。そのため、生成した $\text{Eu}^{\text{II}}$ が、同じパルスで $\text{Eu}^{\text{III}}$ へ戻る逆反応(1光子酸化)が起こりうる。そこで、逆反応をモデルに取り入れた。1光子酸化の反応確率 $p_{\text{oxi}}$ を用いると、観測される正味の還元反応確率は $p = p_{\text{red}}(1 - p_{\text{oxi}})$ と表すことができる。

図3に測定値 $\Delta A_{350}$ から換算した反応確率 $p$ に対するレーザーフルエンス依存性を示す。光吸収の飽和と逆反応をモデル化して解析することで実験結果をよく再現した。これにより1光子目の量子収率( $\phi_1$ )と2光子目の量子収率( $\phi_2$ )を決定できた。このように共鳴多光子酸化還元各ステップの量子収率を決定することは、全体の効率を見積る上で欠かせない。また、共鳴多光子酸化還元後の酸化状態が励起光を吸収する可能性は、他のfブロック元素でも考えられる。そのような場合でも、この研究で行った測定及び解析法は適用できるため有用である。

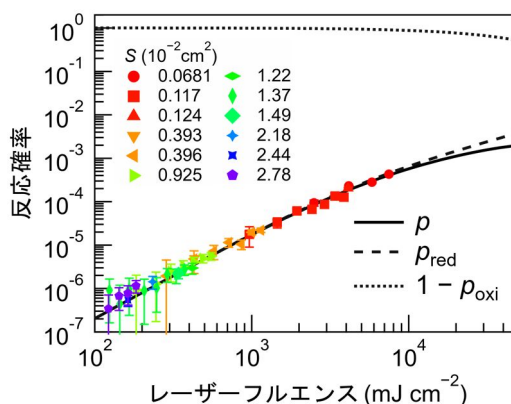


図3 単一パルスによる $\text{Eu}^{\text{III}}$ の共鳴多光子還元反応確率のレーザーフルエンス依存性。



(2) 5f元素 (アクチノイド)

Am<sup>III</sup> 硝酸水溶液への 503 nm レーザー照射により、Am<sup>III</sup> の消費、5 価アメリシウム (Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup>) と亜硝酸 (HNO<sub>2</sub>) が生成した。この Am<sup>III</sup> から Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> への光酸化の反応機構を解明するために、励起波長依存性、励起光強度依存性、硝酸イオン依存性を調べた。解析では、それぞれの吸収ピークの変化量から擬一次反応速度定数を見積り、上記の各依存性を評価した。以下では、この光酸化による Am<sup>III</sup> 消費の速度定数を  $k^{\text{III}}$ 、Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> 生成の速度定数を  $k^{\text{V}}$  で示す。

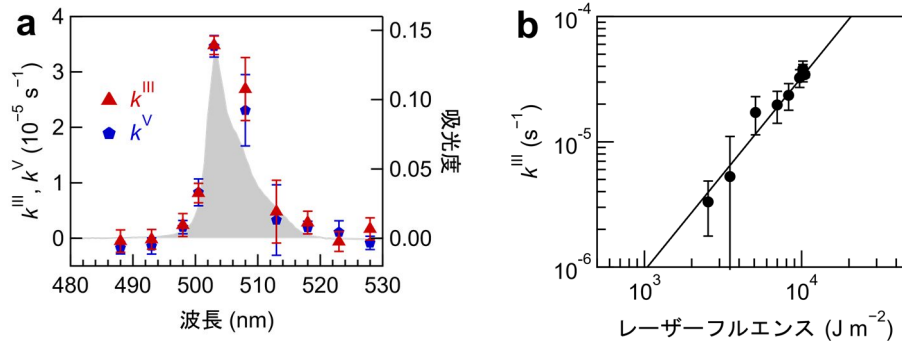


図 4 Am<sup>III</sup> 硝酸水溶液における共鳴多光子酸化の(a)励起波長依存性と(b)励起光強度依存性。(a, b)硝酸濃度[HNO<sub>3</sub>] = 3 M、照射時間 10 min。(a)塗りつぶしは Am<sup>III</sup> 硝酸水溶液の吸収スペクトル、パルスエネルギー~32 mJ。(b)励起波長 503 nm。

励起波長依存性の結果 (図 4a) から観測された光酸化は Am<sup>III</sup> の  $f$ - $f$  遷移 (<sup>5</sup>L<sub>6</sub>-<sup>7</sup>F<sub>0</sub> 遷移) で起こることがわかった。励起光強度依存性の結果 (図 4b) を冪関数で近似し最適化したところ、冪指数~1.5 が与えられた。この単純な解析には、光吸収の飽和が組み込まれていない。そのため、1 よりも有意に大きな冪指数は、2 光子過程を示唆している。実際、503 nm の 2 光子のエネルギーは 39761 cm<sup>-1</sup> であり、この値は電荷移動帯 (CT バンド) の閾値 42500 cm<sup>-1</sup> とおおよそ一致する。以上から、Am<sup>III</sup> の  $f$  電子励起状態 (<sup>5</sup>L<sub>6</sub>) を介する Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> への共鳴多光子酸化が誘起されたことがわかった。

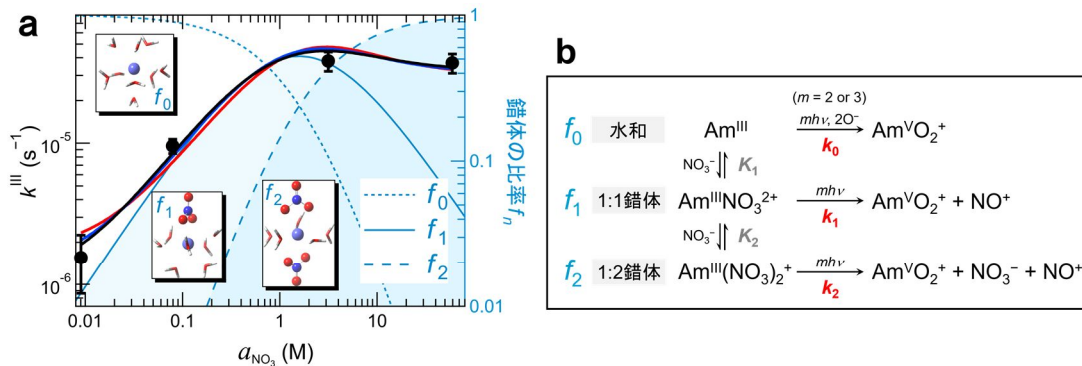
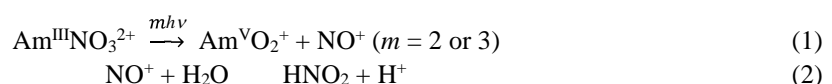


図 5 Am<sup>III</sup> 硝酸水溶液における共鳴多光子酸化の(a)硝酸イオン依存性と(b)スキーム。(a)横軸は NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の活量  $a_{\text{NO}_3}$ 。錯体の比率  $f_n = [\text{Am}^{\text{III}}(\text{NO}_3)_n]^{3-n} / \sum_{i=0}^2 [\text{Am}^{\text{III}}(\text{NO}_3)_i]^{3-i}$ 、 $n$  は NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の数 ( $n = 0, 1, 2, \dots$ )。503 nm 励起、~32 mJ、10 min。挿入した錯体構造は、密度汎関数理論 (DFT) 計算により最適化した。

Am<sup>III</sup> の共鳴多光子酸化は、これまでのところ硝酸水溶液でのみ観測された。硝酸イオン (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 依存性の結果 (図 5a) から、硝酸イオンの活量  $a_{\text{NO}_3} < \sim 1$  M の領域では、 $k^{\text{III}}$  は傾き 1 に近く比例しているが、 $a_{\text{NO}_3} > \sim 1$  M の領域では、飽和が確認できる。これは、Am<sup>III</sup> の水和イオンでは共鳴多光子酸化が起こらず、Am<sup>III</sup> と NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の錯体で起こることを意味する。そこで、反応スキーム (図 5b) に基づいて、 $k^{\text{III}}(a_{\text{NO}_3})$  をモデル化した。 $k^{\text{III}}$  を各錯体由来に分割した  $k_n$  と平衡定数  $K_n$  を用いると、 $k^{\text{III}}(a_{\text{NO}_3})$  を表現できる。 $k_n$  をパラメーターとして解析すると測定値をよく再現した (図 5a)。最適化された  $k_n$  から、 $k_0/k_1 = 0.0040 \pm 0.0003$  と  $k_2/k_1 = 0.44 \pm 0.07$  が得られた。 $k_1$  が  $k_0$  に対して 3 桁大きいことは、1:1 錯体 (Am<sup>III</sup>NO<sub>3</sub><sup>2+</sup>) が共鳴多光子酸化に必須であると理解できる。また、 $k_2$  が  $k_1$  に対して <1/2 であることは、1:2 錯体 (Am<sup>III</sup>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>+</sup>) では共鳴多光子酸化が抑制されることを示唆している。

反応機構として、反応(1)のように 2 光子あるいは 3 光子によって、Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> とニトロソニウムイオン (NO<sup>+</sup>) が生成されるモデルを提案した。また、HNO<sub>2</sub> の生成は、反応(2)で説明できる。



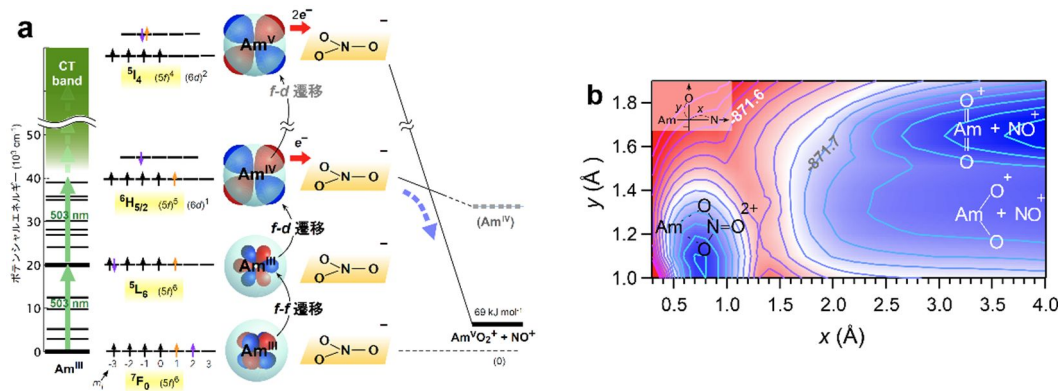


図6 (a)Am<sup>III</sup>-NO<sub>3</sub> 錯体における共鳴多光子電荷移動の概念と(b)AmNO<sub>3</sub> の断熱ポテンシャルエネルギー曲面と構造変化。(a)左から Am<sup>III</sup> のエネルギーダイアグラム、電子配置、光学遷移と電子移動のイメージ。(b)左上は座標系の定義。

図6aに Am<sup>III</sup>-NO<sub>3</sub> 錯体における共鳴多光子電荷移動の概念を示した。電子構造を考えると、Am<sup>III</sup> は 503 nm を 1 光子吸収することで基底状態 <sup>7</sup>F<sub>0</sub> から *f-f* 遷移し、励起状態 <sup>5</sup>L<sub>6</sub> の電子配置 (5f)<sup>6</sup> に変化する。2 光子目の吸収により <sup>5</sup>L<sub>6</sub> の 2 電子で占有された 5f 軌道から 6d 軌道への *f-d* 遷移が起こると、Am<sup>IV</sup> の基底状態 <sup>6</sup>H<sub>5/2</sub> の電子配置 (5f)<sup>5</sup> になりうる。さらに 3 光子目を吸収し、<sup>6</sup>H<sub>5/2</sub> の 5f 軌道から 6d 軌道への *f-d* 遷移が起こると、Am<sup>V</sup> の基底状態 <sup>5</sup>I<sub>4</sub> の電子配置 (5f)<sup>4</sup> になりうる。

配位構造が類似する 3 価ネオジム (Nd<sup>III</sup>) 硝酸錯体の XAFS 解析結果から、Am<sup>III</sup>-NO<sub>3</sub> 錯体でも、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の O 原子 2 つが Am<sup>III</sup> へ対称的に二座配位することが示唆された。そのため、図 6a のように *f-d* 遷移によって NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の空軌道への電荷移動が起こり、Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> と NO<sup>+</sup> に変化する可能性がある。この反応経路を検証するために量子化学計算を行った。その結果、ポテンシャルエネルギー曲面に沿って、錯体は図 6b のように構造変化することがわかった。また、各構造での *f* 電子数の計算結果を考慮すると、Am の酸化数が III IV V と段階的に変わる、つまり、Am<sup>III</sup> から NO<sub>3</sub><sup>-</sup> に 2 電子が段階的に移動することが明らかになった。このように、光励起で直接 Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> が生成されるのではなく、光励起によって Am<sup>III</sup>-NO<sub>3</sub> 錯体において電子の乗り移りが起こりやすくなることで、安定な Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> が生成される反応経路をたどることが示唆された。

ここまでの結果から、アクチノイドの共鳴多光子電荷移動を初めて観測した。また、*f* ブロック元素の共鳴多光子電荷移動において初めて酸化反応に成功した。

### (3) 4f 及び 5f 元素混合系におけるレーザーアシスト元素分離

調製した溶液の吸収スペクトルのピークは、Am<sup>III</sup> と Pr<sup>III</sup> の *f-f* 遷移に帰属された。これに対し 503 nm レーザー照射後の吸収スペクトルでは、新たに Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> に帰属される *f-f* 遷移と HNO<sub>2</sub> の吸収が現れた (図 7a)。また、照射中の各元素の酸化状態から、Pr<sup>III</sup> と Am (total) は一定で、他の価数は確認されなかった。従って、元素混合系でも期待通り Am<sup>III</sup> の選択的な価数制御が実現した。

照射後の試料に対し、3 価に作用する抽出剤 TODGA を用いて溶媒抽出した結果が図 7b である。選択励起で価数制御した Am<sup>V</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> を水相に、残りの Am<sup>III</sup> と Pr<sup>III</sup> は有機相に分離することができた。この結果から共鳴多光子電荷移動による元素の選別と、従来の抽出分離の組み合わせである「レーザーアシスト元素分離」を実現できた。

[Matsuda et al., *Sci. Adv.* **8**, eabn1991 (2022)]  
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abn1991>

### 参考文献

- [1] C. J. Dares et al., *Science* **350**, 652–655 (2015)
- [2] T. Donohue, *J. Chem. Phys.* **67**, 5402–5404 (1977)
- [3] T. Donohue, *Chem. Phys. Lett.* **48**, 119–121 (1977)
- [4] M. Kusaba et al., *Chem. Phys. Lett.* **221**, 407–411 (1994)
- [5] N. Nakashima et al., *J. Phys. Chem. A*, **103**, 3910–3916 (1999)
- [6] D. Nishida et al., *J. Phys. Chem. A*, **114**, 5648–5654 (2010)
- [7] N. Nakashima, K. Yamanaka, T. Yatsuhashi, *J. Phys. Chem. A*, **117**, 8352–8359 (2013)

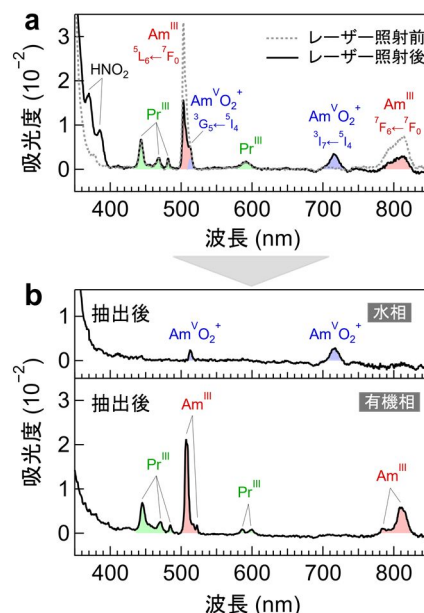


図7 (a) Am<sup>III</sup> と Pr<sup>III</sup> を含む 3 M 硝酸水溶液へのレーザー照射 (503 nm, ~30 mJ, 15 h) 前後の吸収スペクトル。(b) 溶媒抽出後の水相と有機相の吸収スペクトル。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 松田晶平, 横山啓一	4. 巻 786
2. 論文標題 高レベル放射性廃液中の元素を光で選別	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Isotope News	6. 最初と最後の頁 6-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuda Shohei, Nakashima Nobuaki, Yokoyama Keiichi, Taniguchi Seiji, Chosrowjan Haik, Somekawa Toshihiro, Yatsunashi Tomoyuki	4. 巻 802
2. 論文標題 Laser-fluence dependence of resonance-enhanced multiphoton reduction of trivalent europium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 139759 ~ 139759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2022.139759	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi Akiko, Nagata Kojiro, Kobayashi Keita, Tanaka Kazuya, Kobayashi Tohru, Tanida Hajime, Shimojo Kojiro, Sekiguchi Tetsuhiro, Kaneta Yui, Matsuda Shohei, Yokoyama Keiichi, Yaita Tsuyoshi, Yoshimura Takashi, Okumura Masahiko, Takahashi Yoshio	4. 巻 25
2. 論文標題 Extended X-ray absorption fine structure spectroscopy measurements and ab initio molecular dynamics simulations reveal the hydration structure of the radium(II) ion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 iScience	6. 最初と最後の頁 104763 ~ 104763
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isci.2022.104763	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Matsuda Shohei, Yokoyama Keiichi, Yaita Tsuyoshi, Kobayashi Tohru, Kaneta Yui, Simonnet Marie, Sekiguchi Tetsuhiro, Honda Mitsunori, Shimojo Kojiro, Doi Reisque, Nakashima Nobuaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Marking actinides for separation: Resonance-enhanced multiphoton charge transfer in actinide complexes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabn1991
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abn1991	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山口瑛子, 永田光知郎, 田中万也, 小林恵太, 小林徹, 下条晃司郎, 谷田肇, 関口哲弘, 金田結依, 松田晶平, 横山啓一, 矢板毅, 吉村崇, 奥村雅彦, 高橋嘉夫	4. 巻 45
2. 論文標題 EXAFSによるRaの水和状態と粘土鉱物への吸着状態の解明	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 放射化学	6. 最初と最後の頁 28-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobuaki Nakashima, Tomoyuki Yatsunami, Kenji Sakota, Izumi Iwakura, Sena Hashimoto, Keiichi Yokoyama, Shohei Matsuda	4. 巻 752
2. 論文標題 An electron-capture efficiency in femtosecond filamentation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 137570
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2020.137570	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 松田晶平, 横山啓一, 矢板毅, 小林徹, 中島信昭
2. 発表標題 硝酸溶液における三価アメリシウムのf-f遷移を介する多光子励起により誘起される酸化過程
3. 学会等名 2021年光化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口瑛子, 永田光知郎, 田中万也, 小林恵太, 小林徹, 下条晃司郎, 谷田肇, 関口哲弘, 金田結依, 松田晶平, 横山啓一, 矢板毅, 吉村崇, 奥村雅彦, 高橋嘉夫
2. 発表標題 EXAFSによるRaの水和状態と粘土鉱物への吸着状態の解明
3. 学会等名 日本放射化学会第65回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口瑛子, 永田光知郎, 田中万也, 小林恵太, 奥村雅彦, 小林徹, 下条晃司郎, 谷田肇, 関口哲弘, 金田結依, 松田晶平, 横山啓一, 矢板毅, 吉村崇, 高橋嘉夫
2. 発表標題 ラジウムの水和構造及び粘土鉱物への吸着構造の解明
3. 学会等名 日本地球化学会第68回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 MATSUDA, Shohei; YOKOYAMA, Keiichi; YAITA, Tsuyoshi; KOBAYASHI, Tohru; NAKASHIMA, Nobuaki
2. 発表標題 Photooxidation of trivalent americium in nitric acid
3. 学会等名 第36回化学反応討論会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>プレスリリース 高レベル放射性廃液中の元素を光で選別、分別回収の革新的原理を実証 デザインされた光により、光反応の元素選択性と反応性を両立させることに成功 2022年5月20日 (日本原子力研究開発機構) <a href="https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22052003/">https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22052003/</a> (大阪公立大学) <a href="https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-00833.html">https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-00833.html</a> (SPring-8) <a href="http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2022/20220520/">http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2022/20220520/</a></p> <p>報道 日刊工業新聞「レーザー光で分別回収 放射性廃液中の元素 希少金属精錬に応用」2022年5月24日 <a href="https://www.nikkan.co.jp/articles/view/637196">https://www.nikkan.co.jp/articles/view/637196</a> 電気新聞「廃液のアメリカシウム分離 実証成功 減容化も」2022年5月25日 科学新聞「高レベル放射性廃液中の元素 光で選別して分別回収」2022年6月17日 Science Japan「JAEA and others successfully separate and recover americium from highly radioactive waste」2022年7月13日 <a href="https://sj.jst.go.jp/news/202207/n0713-03k.html">https://sj.jst.go.jp/news/202207/n0713-03k.html</a></p>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------