

## レーザー微粒子化反応を利用した放射性廃液からの白金族元素分離法の開発

レーザー微粒子化分離は、非接触かつ単純な操作でPdなどの白金族元素を分離できる、放射性廃液からの元素回収に適した手法である。本稿ではレーザー微粒子化分離の歴史的背景およびその原理について説明し、パルス発振レーザーを用いた微粒子化分離の特徴、使用済核燃料溶解液での<sup>107</sup>Pd分析の前処理に適用した例などを紹介する。また、処理能力向上を目指した、レーザー微粒子化の反応機構研究について展望する。

佐伯 盛久, 浅井 志保, 大場 弘則

### 1 はじめに

原子力発電所から排出される使用済核燃料の処理・処分は重要な問題になっており、この問題を軽減するための元素分離や核変換研究が近年、進められている<sup>1)</sup>。使用済核燃料およびそれから発生する高レベル放射性廃液（使用済核燃料から再利用できるウランおよびプルトニウムを分離したもの）中には、ウラン核分裂生成物として白金族元素であるパラジウム、ロジウム、ルテニウム等有用な希少元素が含まれている（図1）<sup>2)</sup>。そして、これら希少元素を高レベル放射性廃液から分離・回収することにより、環境負荷軽減のみならず、資源として有効に再利用することが提案されている<sup>3)</sup>。また、質量数107のパラジウム（<sup>107</sup>Pd）は長寿命放射性核種（半減期650万年）なので、使用済核燃料中の存在量を正確に把握する必要があり、ICP-MSによる<sup>107</sup>Pd質量分析の前処理法としてもPd分離・回収技術の開発が必要とされている<sup>4)</sup>。

これまで使用済核燃料の溶解液や高レベル放射性廃液

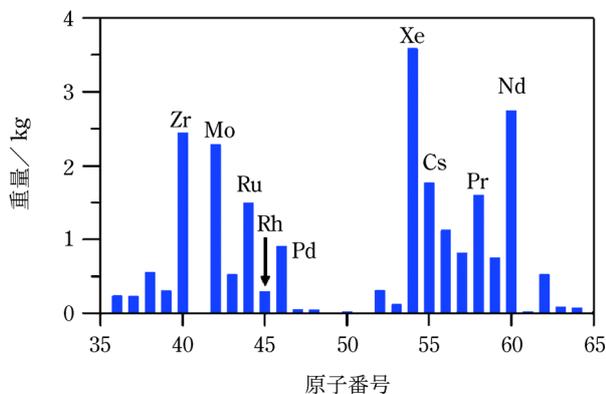


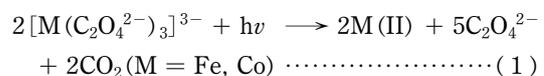
図1 使用済核燃料1トン中の核分裂生成物の重量分布例（文献2のデータをグラフ化）

Development of Separation of Platinum-group Metals by Using Laser-induced Particle Formation.

から白金族元素を分離する方法として、イオン交換法<sup>3)5)6)</sup>や溶媒抽出法<sup>7)</sup>、共沈法<sup>8)</sup>、電解還元法<sup>3)</sup>などが研究されてきた。これらの手法では白金族元素の高効率な分離が可能であるが、その一方で、(i)放射性廃液に長時間浸漬したイオン交換樹脂や金属電極が放射性廃棄物になる、(ii)分離した白金族元素がイオン交換樹脂や溶媒抽出剤と強く結合してしまい回収するのが困難である、(iii)多段階の煩雑な分離操作が必要である、などの課題を抱えている。

そこで筆者らは、概念としては電解還元法に類似しているが、金属電極の代わりにレーザー光で溶液中の金属イオンを還元する「レーザー元素分離法」に着目し、この手法を使用済核燃料の溶解液や高レベル放射性廃液からのPd, Rh, Ru分離に利用することを考案した。レーザー元素分離では、波長・強度を調節したレーザー光を溶液に照射して特定の元素だけを選択的に還元し、その結果生成する微粒子または沈殿物をろ過や遠心分離などにより回収する。この手法では、分離時にレーザー光で元素イオンを還元するので放射性廃液に金属電極のような媒体を接触させる必要がなく（非接触プロセス）、放射性廃棄物の発生量を抑えることができる。この点において、レーザー元素分離は放射性廃液からの有用金属回収に適した手法と言える。

レーザー元素分離のアイデアは、論文では1970年代、Naval Research Laboratory（アメリカ）のDonohueにより初めて提案された<sup>9)</sup>。DonohueはFe(III)とCo(III)のオキサラト(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>2-</sup>)錯体を溶かした希硫酸水溶液を試料溶液として準備し、そこに紫外または可視光レーザー(337~515 nm)を照射して光還元反応



を誘起した。そして、還元した2価イオンM(II)から生成するFeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>およびCoC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>を沈殿物として遠心分離することにより、水溶液中からFeおよびCoを回収

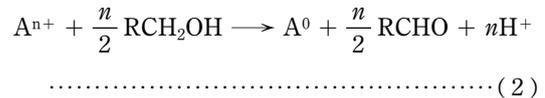
した。また、元素回収率の照射レーザー波長依存性が Fe と Co で異なることを利用して、それらが相互分離できることも示している。さらに Donohue はランタノイド元素 (Eu<sup>10</sup>, Ce<sup>11</sup>) でも同様の実験を行い、これらにもレーザー元素分離法が適用できることを証明している。

レーザー元素分離の白金族元素への適用例は、Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI, 韓国) の研究グループにより、2001 年に報告されている<sup>12)</sup>。研究グループは、電子供給源としてシュウ酸やエタノールを加えた Pd 酸性水溶液 (硝酸, 塩酸, 過塩素酸) に紫外レーザー (波長 355 nm) を照射することにより、Pd を沈殿物として回収した。さらに、Dy との混合溶液にレーザーを照射した場合には、Pd だけが選択的に沈殿することも示している。

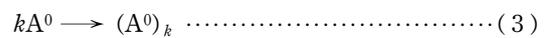
このようにレーザー元素分離の研究は 1970 年代から始まったにもかかわらず、その技術開発はほとんど進んでおらず、特に白金族元素への利用は 2001 年の KAERI の論文以降、報告されていなかった。その理由を筆者なりに考察した結果、「レーザーで誘起される光化学反応の特徴を活かしたアイデアがなかったためである」という結論に至った。そこで、筆者らはパルス発振レーザーを使った「レーザー微粒子化反応を利用した元素分離法 (以下、レーザー微粒子化分離法と略す)」を考案し、高レベル放射性廃液の模擬溶液で原理実証実験を積み重ねた。そして、そこで得られた知見を基に、レーザー微粒子化分離を使用済核燃料の溶解液からの元素分離に応用し、非接触かつ単純なプロセスで Pd だけを選択的に回収することに成功した。本稿ではレーザー微粒子化分離の原理を説明した後に、パルス発振レーザーを使用した時のレーザー微粒子化分離の特徴、使用済核燃料の溶解液からの Pd 分離実験、そして Rh, Ru の分離実験について紹介する。

## 2 レーザー微粒子化分離法の原理

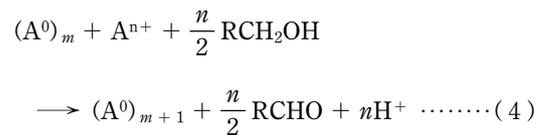
レーザー微粒子化分離の概念図を図 2a に示す。アルコール RCH<sub>2</sub>OH などを添加した水溶液中のイオン A<sup>n+</sup> (A=Pd, Rh, Ru) は、紫外領域 (<400 nm) に電荷移動吸収帯をもち、この吸収帯に共鳴する波長の紫外レーザーを水溶液に照射すると、アルコールから白金族元素イオンへの電荷移動反応



が進行し、中性原子 A<sup>0</sup> まで還元される。中性原子 A<sup>0</sup> では、イオン間では働いていた静電的な反発力が失われるため、自発的な凝集過程



により微粒子核を形成する。さらに形成された微粒子核は autocatalytic surface growth と呼ばれる反応



などを繰り返し、より大きな微粒子へと成長していくと考えられている<sup>13)</sup>。

一方、使用済核燃料に多く含まれるその他の元素イオン B<sup>n+</sup> (アクチノイドやランタノイド, モリブデン, ジルコニウムなど) に紫外レーザーを照射すると、紫外領域に電荷移動吸収帯がないため、微粒子形成は起こらない。この結果、イオン A<sup>n+</sup> とイオン B<sup>n+</sup> が共存している溶液系に紫外レーザーを照射したとき、A だけが選択的に微粒子化して、他のイオンと分離される。微粒子化した白金族元素は、ろ過などにより回収する。

ここで電荷移動反応 (2) の励起にレーザーを用いる利

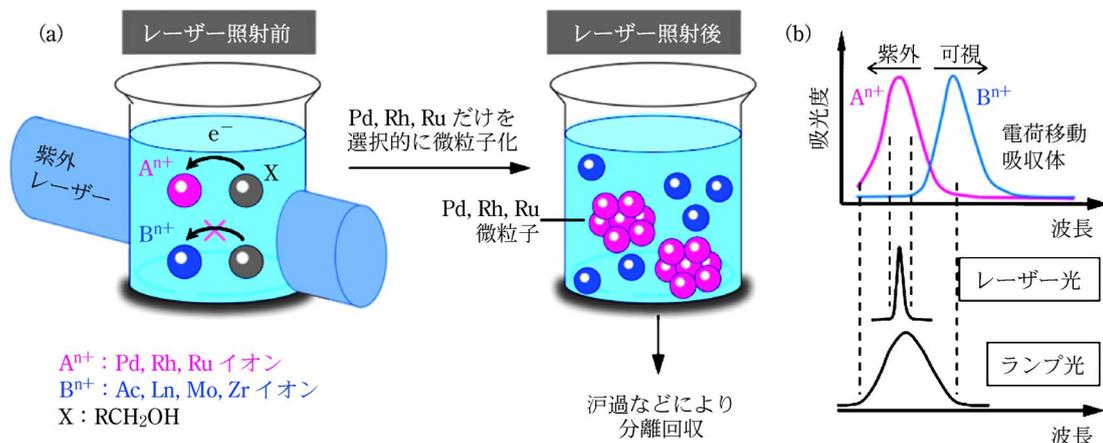


図 2 レーザー微粒子化分離の概念図

点について説明する。レーザーでは、フラッシュランプなどから発生する光を光共振器内に閉じ込めて複数回反射させ、光の干渉作用により特定の共鳴周波数をもつ定常波を発生させる。この結果、ランプなどの通常光源から発生する光は幅広い波長成分をもつのに対し、レーザーからは単色性の高い光が発生する。よって、図 2b に示すように、通常光源を照射すると  $A^{n+}$  だけでなく  $B^{n+}$  の電荷移動吸収帯も励起してしまうのに対し、レーザーを用いると  $A^{n+}$  だけの電荷移動吸収帯を効率よく励起することができ、元素分離効率を高められる。

### 3 レーザー微粒子化分離の実験例

#### 3.1 パルス発振レーザーを用いた微粒子化分離の特徴

レーザーは時間的な発振動作の違いにより、一定の出力を連続的に発生する連続発振レーザーと、一定の繰り返しで出力を短時間（フェムト  $10^{-15}$  秒からナノ  $10^{-9}$  秒）に発生するパルス発振レーザーに大別できる。パルス発振レーザーでは、フラッシュランプから発生した光を光共振器内で反射させるだけでなく、Q スイッチと呼ばれる技術により光を光共振器内で蓄積させてからパルス的に放出するため、連続発振レーザーよりもはるかに強度の高い光を発生できる。このような高強度なパルス光を溶液中の元素イオンに吸収させた場合、通常とは異なる光化学反応が起きることが期待できる。

そこで、パルス発振レーザーを用いたレーザー微粒子化分離の特徴を調べるため、Pd と Mo の 2 元素混合溶液で分離試験を行った<sup>14)</sup>。なお Mo は、図 1 に示したように、使用済核燃料中に多く含まれる遷移元素である。

試料溶液は数 mM の Pd と Mo が溶解した 0.5 M 硝酸水溶液に 1 vol% のエタノールを加えて作製した。次に、調製した 1.8 mL の試料溶液を石英セルに入れ、波長 355 nm のナノ秒パルス紫外レーザー光（繰り返し 10 Hz、パルス幅 8 ns）を照射し、光微粒子化反応により生成した微粒子を濾過（孔径 200 nm フィルター使用）により回収した。そして、回収前および回収後の元素イオン濃度（ $[M]_{\text{original}}$  および  $[M]_{\text{final}}$ ）を ICP-AES で測定し、Pd および Mo について元素回収率

$$\text{回収率 (\%)} = \frac{[M]_{\text{original}} - [M]_{\text{final}}}{[M]_{\text{original}}} \dots\dots\dots (5)$$

を求めた。また、ナノ秒パルス紫外レーザー光との比較を行うため、同じ波長の疑似連続紫外レーザー光（繰り返し 30 kHz）を用いて同様の実験を行った。なお単位時間あたりの照射強度が両者で等しくなるよう（実験時は 0.5 W に設定）、光学フィルターを用いてレーザー強度を調整した。

図 3a に Pd および Mo の元素回収率を、レーザー照

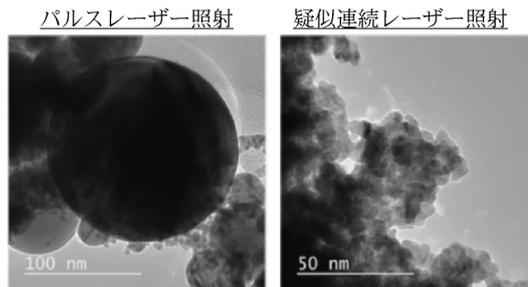
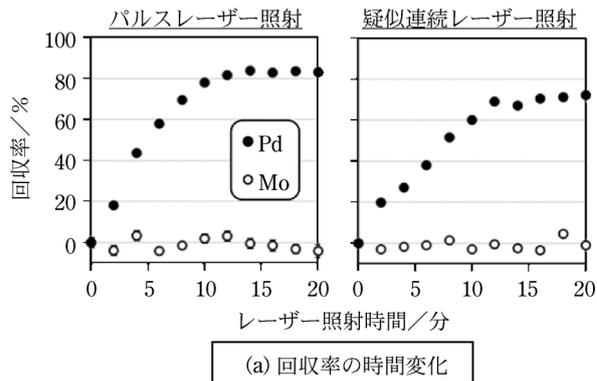


図 3 ナノ秒パルスおよび疑似連続レーザーを Pd, Mo 混合溶液に照射した時の (a) 元素回収率の時間変化および (b) 回収した Pd 微粒子の電子顕微鏡像

射時間に対してプロットしたものを示す。ナノ秒パルス光照射および疑似連続光照射のどちらの場合でも、Pd 回収率は照射直後から上昇していき 10 分後には一定になるのに対し、Mo 回収効率は 20 分照射しても 0 % のまま変化しない。これは、レーザー微粒子化分離により、Pd と Mo の 2 元素混合溶液から Pd だけを選択的に回収できることを示している。さらに、照射 20 分後の Pd 回収率を比較すると、ナノ秒パルス光照射では 84 % なのに対し、疑似連続光照射では 72 % にとどまることがわかる。この結果より、ナノ秒パルス光レーザーを用いると、微粒子化分離における元素回収率が向上することが明らかになった。

ナノ秒パルス光照射で Pd 回収率が向上した理由を調べるために、濾過で回収した Pd 微粒子の形状を透過型電子顕微鏡により調べた。その結果、図 3b に示すように、ナノ秒パルス光照射時には粒径 100~500 nm の球状微粒子が多く生成しているのに対し、疑似連続光照射時には粒径 10 nm 以下のナノサイズ微粒子が生成し、その凝集体を回収していることがわかった。孔径 200 nm のフィルターを用いて Pd 微粒子を回収していることを考慮すると、ナノ秒パルス光照射時にはサブミクロンサイズまで微粒子が成長するのでそのまま回収できるが、疑似連続光照射時には微粒子成長はナノサイズで止まってしまうので、さらにナノ微粒子どうして 2 次凝集しなければ回収できない。よって、疑似連続光照射時

にはナノ微粒子のまま溶液中に分散しているPdは回収されず、回収率が下がる。このように、ナノ秒パルスレーザーを使用した微粒子化分離の利点として、微粒子成長反応を促進することにより元素回収率を向上できることが挙げられる。

### 3・2 使用済核燃料中の<sup>107</sup>Pd質量分析の前処理法としての利用

使用済核燃料中の<sup>107</sup>Pdの存在量をICP-MSで分析する時には、まず何十種類もの元素が共存している分析試料からPdだけを選択的に分離しなければならない。この作業では、放射線による被曝を軽減するために、取り扱う試料濃度をできるだけ低くし、かつ分離作業も迅速に行う必要がある。そのため放射性廃棄物中の<sup>107</sup>Pdの分析研究は数例しかなく、しかも存在量に関しては検出限界値以下であるという報告しかなく<sup>15)~17)</sup>。そこで筆者らは、非接触かつ単純な操作でPd分離できるレーザー微粒子化分離を使用済核燃料中の<sup>107</sup>Pd分析の前処理法として採用し、ICP-MSによる<sup>107</sup>Pdの質量分析を試みた。

レーザー微粒子化分離を効率的に行うための実験パラメーターとして(a)添加する還元剤(エタノール)の濃度、(b)パルス発振レーザーの照射時間、(c)レーザー強度、が挙げられる。そこで使用済核燃料でのPd分析を行う前に、主要14元素(Rb, Sr, Zr, Mo, Ru, Rh, Pd, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm)を表1に示した濃度に調整した模擬試料でパラメーターを最適化した<sup>18)</sup>。放射性廃液での作業を想定して模擬試料を200倍希釈した溶液(Pd 2.4 µg/mL)を準備し、それにパルス紫外レーザー光(波長355 nm)を照射してPd回収率が最大になるようパラメーター(a)~(c)を最適化した。そして、最適化した条件(エタノール濃度40 v/v%, レーザー照射時間20分、レーザー強度50 mJ)で分離試験を行った結果、表1に示すように14元素が共存している系からでも~60%の効率でPdを選択的に回収でき、不純物の混入は数%以下に抑えることに成功した。

Pd回収率はPd自身の濃度にも依存し、表1の模擬試料を2000倍希釈した系(Pd 0.24 µg/mL)では4.5%まで減少し、20倍希釈した系(Pd 24 µg/mL)では87%まで増加する<sup>18)</sup>。よって使用済核燃料中の<sup>107</sup>Pdを正確に定量するためには、Pd回収率に影響されない分析法が必要である。そこで、筆者らは<sup>107</sup>Pdを含む使用済核燃料に天然組成のPd標準液を添加(スパイク)した分析試料を準備し、そこからレーザー微粒子化分離によりPdを分離回収して質量分析する定量法を考案した。標準液中の<sup>102</sup>Pdは天然にのみ存在して使用済核燃料中にはなく、一方<sup>107</sup>Pdは天然に存在しない。そのため、添加した<sup>102</sup>Pd量と、スパイク添加後の分析試料中の<sup>107</sup>Pdと<sup>102</sup>Pdの同位体比の実測値から、<sup>107</sup>Pdの存

表1 模擬試料中の元素濃度および回収率<sup>18)</sup>

元素	模擬試料中の元素濃度 (µg/mL)	200倍希釈溶液での回収率 (%)
Pd	483	58.86
Rb	126	0.01
Sr	273	0.05
Zr	1212	0.01
Mo	1140	0.01
Ru	746	0.65
Rh	148	0.21
Cs	941	0.01
Ba	583	0.01
La	425	0.01
Ce	829	0.01
Pr	396	0.01
Nd	1394	0.01
Sm	299	0.02

表2 使用済核燃料の溶解液から分離した元素の回収率<sup>19)</sup>

元素	回収率 (%)	元素	回収率 (%)	元素	回収率 (%)
Pd	91.4±0.5	Mo	<0.01	Ru	0.03
Am	<0.01	Nd	0.03	Sm	<0.01
Ba	0.10	Np	<0.01	Sr	0.26
Ce	0.08	Pr	0.05	Tc	0.45
Cm	<0.01	Pu	<0.01	U	<0.01
Cs	0.03	Rb	0.07	Zr	0.02
La	0.05	Rh	0.05		

在量が直接求まる。なお、このPd標準液を用いた定量法には、Pd濃度を高めることにより、レーザー微粒子化分離によるPd回収率が増加するという長所もある。

分析した使用済核燃料の溶解液は、日本の加圧水型原子炉(発電出力44.9 GWd/t)から取り出された燃料を約28年間冷却したのから調製した。使用済核燃料の溶解液中の沈殿物は除去し、上澄みを7M硝酸で希釈したものを分析試料溶液とした。そして、Pd標準液と分析試料溶液の混合溶液を純水で希釈し、さらに40 v/v%になるようにエタノール濃度を添加したもので、模擬試料で決めたパラメーターを用いてレーザー微粒子化分離を行った<sup>19)</sup>。その結果、表2に示すようにPdは~90%の効率で回収でき、不純物の混入は<1%に抑えることに成功した。さらに回収したPdについてICP-MSで<sup>107</sup>Pdの質量分析を行い、分離前の試料に含まれるウラン同位体<sup>238</sup>Uとの存在比を求めた結果、測定した使用済核燃料の溶解液試料では1 mgの<sup>238</sup>Uに対して239±9 ngの<sup>107</sup>Pdが存在することを世界で初めて明らかにした。

### 3・3 Rh, Ruのレーザー微粒子化分離

これまで、波長355 nmのナノ秒パルス紫外レーザー光を使用済核燃料の溶解液に照射すると、Pdが分離・回収できることを説明した。一方、使用済核燃料の溶解

液には Rh, Ru も含まれており、これらのイオンも紫外光領域に電荷移動吸収帯を持つはずであるが、355 nm レーザー励起では微粒子として回収されていない。これは Rh, Ru の電荷移動吸収帯が Pd よりも高エネルギー側にあり、波長 355 nm (エネルギー 3.49 eV) の光では励起できない可能性を示唆している。そこで、筆者らは波長 266 nm (エネルギー 4.66 eV) のナノ秒パルスレーザーを用いて、Rh, Ru にもレーザー微粒子化分離が適用できるか試した<sup>20)</sup>。

試料溶液は、Pd, Rh, Ru および Nd (使用済核燃料に多く含まれるランタノイド) の塩化物を水/エタノール混合溶液 (v/v=1/1) に溶解し、各イオン濃度が 0.5 mM になるように調製した。次に、1.5 mL の試料溶液に 266 nm ナノ秒パルスレーザー (レーザー強度 20 mJ) を 40 分照射し、濾過 (孔径 100 nm フィルター使用) により生成した金属微粒子を回収した。その結果、各々の元素に対する回収率は Pd : 100.0 %, Rh : 99.0 %, Ru : 68.5 %, Nd : 0.5 % となり、試料溶液から白金族元素をランタノイドと分離して回収できることがわかった。以上のことより、Rh, Ru の電荷移動吸収帯は Pd よりも短波長側にあり、より高エネルギーのレーザー光を用いれば、Pd だけでなく Rh, Ru も分離できると筆者らは結論した。

#### 4 今後の展開

本稿では、使用済核燃料や高レベル放射性廃液の処理

に適した、非接触かつ単純なプロセスで白金族元素を分離できる、レーザー微粒子化分離の歴史的背景およびその原理について説明した。そして、①パルス発振レーザーを試料溶液に照射したときに起きる特徴的な微粒子化反応を利用すると元素回収率を高められること、②使用済核燃料中の <sup>107</sup>Pd 定量分析の前処理法として、レーザー微粒子化分離を利用できること、③ Pd だけでなく、Rh, Ru もレーザー微粒子化でランタノイドと分離して回収できること、を紹介した。なお、レーザー元素分離研究は 1980 年代に日本でも検討されたことを追記しておく<sup>21)</sup>。

ここで見方を変えて、レーザープロセッシング (レーザーを利用した加工技術のこと) の観点からレーザー微粒子化分離を考察した場合、この技術では十分な強度があればレーザー光を広げてもプロセスを効率よく進行させることができるので、<sup>107</sup>Pd 分析のような少量試料の処理だけでなく、プラントレベルでの元素分離までスケールアップできる可能性を秘めている。しかし現状では、レーザー微粒子化分離で処理できる試料量は数 mL に限られており、今後この手法の汎用性を高めていくうえで、処理能力を向上させる必要がある。そのためには Pd, Rh, Ru の回収速度・回収率を向上させる技術を開発しなければならないが、高レベル放射性廃液のような強酸性環境下 (通常 0.5~6 M 硝酸) での光微粒子化に関する反応研究はこれまでになく、溶液条件 (酸性度や酸の種類) が Pd, Rh, Ru の光微粒子化反応にどのよう

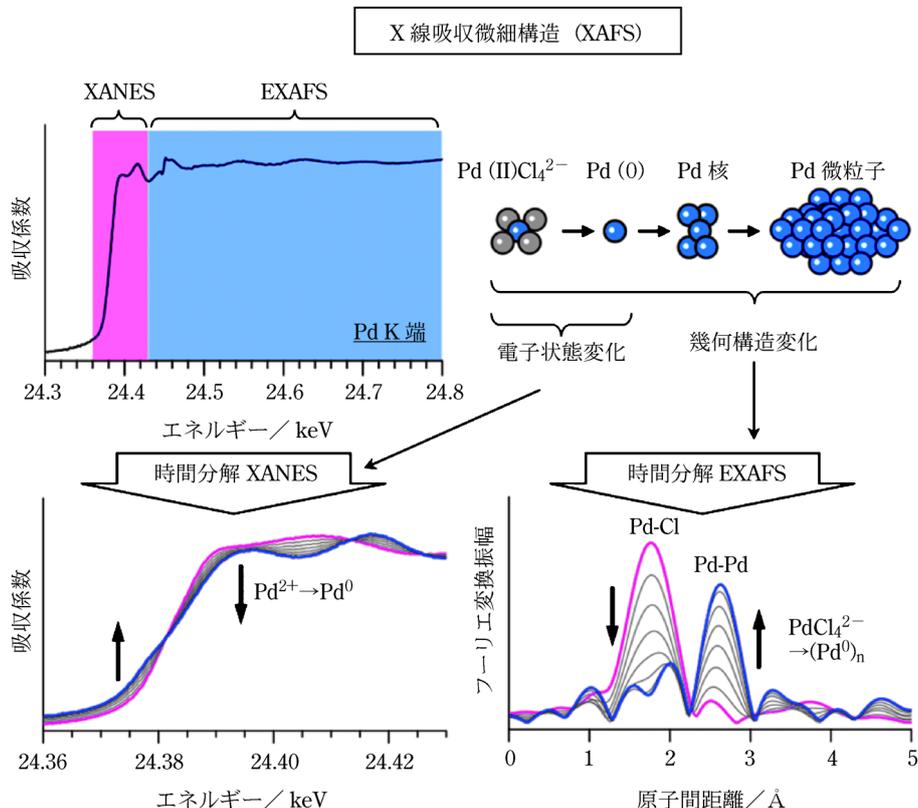


図 4 時間分解 XAFS による微粒子化の反応機構研究

な影響を与えるかがわかっていない。また、ナノ秒パルスレーザー照射によるサブミクロンサイズ微粒子の形成も、最近発見されたばかりの現象であり、レーザー照射条件（波長、強度、繰り返し時間、パルス幅）と光微粒子化反応との関係も不明である。

そこで、筆者らは溶液条件やレーザー照射条件が溶液中 Pd, Rh, Ru の微粒子化反応にどのような影響を及ぼすか調べるために、時間分解 X 線吸収微細構造 (X-ray absorption fine structure: XAFS) 分光により、レーザー微粒子化の反応機構を追跡する実験を進めている<sup>22)</sup>。例えば、レーザー微粒子化が進行中の PdCl<sub>4</sub><sup>2-</sup> 水溶液に X 線を照射すると、Pd K 吸収端において図 4 に示すような吸収スペクトルが測定できる。吸収端近傍の構造は XANES (X-ray absorption near edge structure) と呼ばれ、光還元 (2) のようにイオンの電子状態が変化する反応の情報を与える。一方、それよりも高エネルギー側に現れる振動構造は EXAFS (extended XAFS) と呼ばれ、それをフーリエ変換したものは核形成 (3) や微粒子成長 (4) により生成した Pd 微粒子の幾何構造に関する情報 (Pd-Pd 距離, Pd 配位数) を与える。よって、時間分解 XAFS 分光を用いると反応 (2) - (4) の変化を同時に観測し、比較することができる。今後は、様々な溶液条件およびレーザー照射条件における溶液中 Pd, Rh, Ru の微粒子化反応を時間分解 XAFS により調べ、その相関関係を明らかにする。そして、その結果を系統的に解析し、レーザー微粒子化分離による白金族元素の回収速度・回収率向上に活かすことを計画している。

謝辞 レーザー微粒子化分離開発では、科研費 (15H04248, No.21686072) の支援を受けました。研究立案過程において、横山 淳博士 (元量研機構)、中島信昭博士 (阪市大) には貴重な助言を頂きました。また、実験を進めるにあたり、田口富嗣博士 (量研機構)、蓬田 匠氏、半澤有希子博士、堀田拓摩氏、北辻章浩博士、江坂文孝博士、佐々木祐二博士、辻 卓也博士、松村大樹博士 (原子力機構) にはご協力頂きました。改めて、感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 藤田玲子: 日本原子力学会誌, **58**, 93 (2016).
- 2) 日本原子力研究開発機構: 再処理プロセス・化学ハンドブック第3版, JAEA-Review 2015-002 (2015).
- 3) M. Ozawa, T. Suzuki, S. Koyama, H. Akatsuka, H. Mimura, Y. Fujii: *Prog. Nucl. Energy*, **50**, 476 (2008).
- 4) “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—”, JNC TN 1400 99-020 (1999).
- 5) I. Jarvis, M. M. Totland, K. E. Jarvis: *Chem. Geol.*, **143**, 27 (1997).
- 6) Y. V. Yi, A. Masuda: *Anal. Chem.*, **68**, 1444 (1996).
- 7) S. Hann, G. Koellensperger, K. Kanitsar, G. Stingeder: *J. Anal. At. Spectrom.*, **16**, 1057 (2001).

- 8) M. B. Gomez, M. M. Gomez, M. A. Palacios: *J. Anal. At. Spectrom.*, **18**, 80 (2003).
- 9) T. Donohue: *Chem. Phys. Lett.*, **48**, 119 (1977).
- 10) T. Donohue: *J. Chem. Phys.*, **67**, 5402 (1977).
- 11) T. Donohue: *Chem. Phys. Lett.*, **61**, 601 (1979).
- 12) K. Song, H. Cha, J. Lee, J. S. Choi, Y. I. Lee, K. S. Choi: *Microchem. J.*, **68**, 121 (2001).
- 13) M. Harada, Y. Kamigaito: *Langmuir*, **28**, 2415 (2012).
- 14) M. Saeki, T. Taguchi, N. Nakashima, H. Ohba: *J. Photochem. Photobiol. A*, **299**, 189 (2015).
- 15) M. Bertaux, P. Bienvenue, O. Provitina, C. Point, J.-B. Bilcot, E. Brochard, S. Pontremoli, N. Arnal: *ATALANTE 2008*, Montpellier, France, May 19-22 (2008).
- 16) T. Adachi: JAERI-M 91-010 (1991).
- 17) S. Dulanska, B. Horvathova, B. Remenec, L. Mátel: *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **310**, 645 (2016).
- 18) T. Yomogida, S. Asai, M. Saeki, Y. Hanzawa, T. Horita, F. Esaka, H. Ohba, Y. Kitatsuji: 分析化学, **66**, 647 (2017).
- 19) S. Asai, T. Yomogida, M. Saeki, H. Ohba, Y. Hanzawa, T. Horita, Y. Kitatsuji: *Anal. Chem.*, **88**, 12227 (2016).
- 20) M. Saeki, F. Esaka, T. Taguchi, H. Ohba: JAEA-Research 2012-030 (2012).
- 21) 榎田洋一: “原子燃料サイクルにおける新技術とその応用”, 「原子燃料サイクル」研究専門委員会編, p 74 (1989), (日本原子力学会).
- 22) M. Saeki, T. Taguchi, H. Ohba, D. Matsumura, T. Tsuji, T. Yomogida: 電気学会研究会資料, EFM-17-015 (2017).



佐伯盛久 (Morihisa SAEKI)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門 東海量子ビーム応用研究センター (〒319-1106 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4)。東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了。博士 (学術)。《現在の研究テーマ》レーザー微粒子化反応を利用した元素分離法の開発  
E-mail: saeki.morihisa@qst.go.jp



浅井志保 (Shiho ASAI)

日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター分析化学研究グループ (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4)。千葉大学大学院自然科学研究科物質高次科学専攻修了。工学博士。《現在の研究テーマ》難測定放射性核種の分析法開発。



大場弘則 (Hironori OHBA)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門 東海量子ビーム応用研究センター (〒319-1106 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4)。長岡技術科学大学院工学研究科創造設計工学専攻修士課程修了。博士 (工学)。《現在の研究テーマ》レーザー誘起ブレイクダウン分光法などの分光学。