ノ ー ト[†]

¹⁰⁷Pd の ICP-MS 測定のためのレーザー誘起光還元法による 非接触・選択的パラジウム分離—分離条件と Pd 回収率の関係—

蓬 田 匠^{*1}, 浅井 志保¹, 佐伯 盛久², 半澤有希子¹,
堀田 拓摩¹, 江坂 文孝³, 大場 弘則², 北辻 章浩¹

1 緒 言

原子力発電で使用した燃料中には、ウランの核分裂や核反応により様々な放射性核種が生成する。核分裂生成物の一つである質量数 107 のパラジウム (¹⁰⁷Pd) は、半減期が約 650 万年と長く、長期間に渡り放射線を放出して人体に影響を及ぼす可能性があることから、廃棄物中に含まれる存在量を正確に把握する必要がある¹⁾。過去にも放射性廃棄物を対象として ¹⁰⁷Pd を分析する試み²⁾がなされているが、検出限界値を上回る廃棄物に適用された例はなく、実用性が確かめられていない。

微量の ¹⁰⁷Pd を正確に化学分析するには、試料から Pd を分離する必要がある。使用済燃料や、そこからウランやプルトニウムを取り出した後に残る高レベル放射性廃液 (High-level radioactive liquid wastes; HLLW) から測定に十分な量の ¹⁰⁷Pd を得るためには、高い放射能を持つ試料の取り扱いが避けられない。既存の Pd 分離法には、共沈法³⁾、溶媒抽出法⁴⁾、及びイオン交換法⁵⁾⁶⁾などが用いられているが、多段階の煩雑な分離操作が必要である。これらの方法では近接した状態で長時間の分離操作が不可避であり、高濃度の放射性物質を含む試料を扱う作業者の放射線被ばくが問題となる。また、分離操作時において、試料を密閉系の容器から取り出す際に作業環境を放射性物質で汚染させる可能性もある。そのため、遠隔かつ単純な操作で Pd を分離する方法が必要であった。

遠隔で Pd を分離する方法として、「レーザー誘起光還元法」がある。この手法では、溶液中の白金族元素 (Pd, Ru, Rh など) のイオンに紫外レーザー光を照射し、イオンの電荷移動吸収帯を選択的に励起して還元することで、白金族

元素が金属として析出し沈殿が生成する^{7)~10)}。生成した沈殿はろ過や遠心分離によって回収できる。この方法を ¹⁰⁷Pd の質量分析のための前処理に適用すれば、密閉容器にレーザー光を照射するだけの 1 ステップで沈殿生成が完了する上に、遠心ろ過分離による回収で高い放射能を持つ試料の近接作業を最小限に抑えることが可能になる。そのため、分離操作の大幅な簡略化による作業者の被ばく、及び作業環境の汚染可能性の低減が期待できる。

そこで、著者らのグループでは、レーザー誘起光還元法を使用済燃料試料の分析前処理に適用することで高純度に Pd を分離し、誘導結合プラズマ質量分析計 (Inductively coupled plasma-mass spectrometry; ICP-MS) を用いて Pd 同位体を計測して正確な ¹⁰⁷Pd の定量に成功した¹¹⁾。しかし、様々な履歴の使用済燃料が混合され、組成がより予測しにくい HLLW 等の廃棄物試料に適用するためには、レーザー誘起光還元法における分離条件と Pd 回収率の関係を明らかにし、確実に Pd を分離できる条件を知る必要がある。本研究では、HLLW へのレーザー誘起光還元法の適用を念頭に、HLLW 中の主要な 14 元素を含む模擬試料を用いて分離条件を検討した。検討した項目は、Pd 回収率に大きな影響を及ぼすと予想される、(a) 還元剤 (エタノール) の濃度、(b) Pd 濃度、(c) レーザー光の照射時間、(d) パルスエネルギーである。これらの条件を変えて Pd の回収試験を行い、他元素の共存下において Pd を高回収率かつ選択的に分離できる条件を調べた。

2 実 験

2.1 装 置

試料の元素濃度の測定には、ICP-MS (Agilent 製, 7700x) を用いた。試料導入は、アルゴンキャリアガスによる負圧吸引により行い、プラズマガス流量 15 L min⁻¹、ネブライザーガス流量 0.9 L min⁻¹、補助ガス流量 1.03 L min⁻¹ とした。プラズマの高周波出力は 1550 W とし、積分時間 0.3 秒の測定を 5 回繰り返した。また、Pd 沈殿の形態観察には、走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscope; SEM, JEOL 製, JSM-7800M) を用いた。SEM 観察時の加

[†] 若手研究者の初論文特集

^{*} E-mail: yomogida.takumi@jaea.go.jp

¹ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター: 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方 2-4

² 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構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白方 2-4

³ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構安全研究センター: 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方 2-4

Fig. 1 Preparation procedure based on laser-induced photoreduction for a Pd measurement with ICP-MS

速電圧は 20 kV, プローブ電流は 1 nA とした. 超純水の製造には, 超純水装置 (Merck Millipore 製, Milli-Q Reference) を用いた.

2.2 試薬

試料調製には, 超純水 (比抵抗 18.2 MΩ cm), エタノール (和光純薬工業製, 特級), 高純度硝酸 (多摩化学工業製, TAMAPURE AA-10, 68 %), 及び高純度塩酸 (多摩化学工業製, TAMAPURE AA-100, 30 %) を用いた. ICP-MS の検量線用の溶液は, Zr, Mo, Ru, Rh, Pd の各元素の原子吸光用元素標準液 (和光純薬工業製, 1000 mg L⁻¹), 希土類元素混合標準液 (High-Purity Standards 製, Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sc, Sm, Tb, Tm, U, Y, Yb, 10 mg L⁻¹, 2 v/v% HNO₃), 多元素混合標準液 (SPEX CertiPrep 製, XSTC-331, Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Rb, Se, Sr, Tl, Th, V, Zn, U, 10 mg L⁻¹, 2 v/v% HNO₃) から調製した. 主要 14 元素を含む HLLW の模擬液 (3 mol L⁻¹ HNO₃) は, 過去の文献¹²⁾に基づいて和光純薬工業(株)により調製された. 各元素濃度 (μg mL⁻¹) は次の通りである: Rb, 126; Sr, 273; Zr, 1212; Mo, 1140; Ru, 746; Rh, 148; Pd, 483; Cs, 941; Ba, 583; La, 425; Ce, 829; Pr, 396; Nd, 1394; Sm, 299.

2.3 実験手順

HLLW 模擬液からの Pd 分離と ICP-MS 測定溶液の調製手順を Fig. 1 に示す. HLLW 模擬液に 1.0 mol L⁻¹ HNO₃, エタノール, 超純水を加え, エタノール含有率 0~50 v/v%, HLLW 模擬液からの希釈倍率 20~2000 倍のレーザー照射用試料 (Pd 0.24~24 μg mL⁻¹, 0.5 mol L⁻¹ HNO₃) を照射直前に調製し, 2 mL を石英セル (GL サイエンス製, 12 mm×12 mm×40 mm, 光路長 10 mm) に入れた. レーザー照射時の硝酸濃度は, 共存元素の沈殿を防ぐために過去の文献¹⁰⁾¹¹⁾を参考として, 0.5 mol L⁻¹ HNO₃ にした.

調製したレーザー照射用試料に, レーザー光源 (Spectra Physics 製, INDI-40-10) を用いて, 355 nm (繰り返し 10 Hz, パルス幅 7 ns) の紫外レーザー光を照射した. アtteネーターによりパルスエネルギーを 10~150 mJ に調整し, 直径 10 mm の円形のレーザー光を試料に照射した.

レーザー光の照射を 0~60 分間行ったのち, 生成した Pd 沈殿を含む試料溶液を, フィルタ孔径 0.2 μm の遠心フィルタ (Merck Millipore 製, Ultrafree MC) に移した. その後, 遠心分離器 (Merck Millipore 製, Minispin+) を用いて, 過去の文献¹¹⁾と同様に, 12,000 rpm で回転数上昇時間 (10 秒) を含めて 15 秒間遠心ろ過分離を行い, Pd 沈殿を溶液相と分離した. 遠心フィルタ上に回収された Pd 沈殿に 2 % HNO₃ を加えて洗浄したのち, 再度遠心ろ過した. また, SEM により遠心フィルタ上に回収された Pd 沈殿の形態観察を行った.

遠心フィルタ上に回収された Pd 沈殿を, 0.05 mL の王水を用いて溶解した. 得られた Pd 沈殿の溶解液を 1.0 mol L⁻¹ HCl を用いて希釈し, ICP-MS 用の測定溶液とした. レーザー照射用試料及び Pd 沈殿溶解液に含まれる各元素の濃度を, ICP-MS を用いて測定した. 各金属イオンの回収率は, レーザー照射用試料中の量 (A_o) と Pd 沈殿溶解液中の量 (A_p) を用いて算出した.

$$\text{Recovery}[\%] = \frac{A_p}{A_o} \times 100 \quad (1)$$

3 結果及び考察

3.1 エタノール濃度

エタノールは還元剤として, Pd イオンの光還元反応に寄与する. 過去の研究例¹¹⁾では, エタノール濃度として 40 v/v% が用いられているが, エタノール濃度と Pd 回収率の関係は明らかになっていない. Fig. 2 に, レーザー照射用試料のエタノール濃度を, 0~50 v/v% に変化させた際の Pd 回収率を示す. エタノール濃度を増した場合, Pd 回収

Fig. 2 Dependence of the Pd recovery on the ethanol concentration

An error bar is the standard deviation of the datum, $n = 3$.

率も増加するが、含有率 40 v/v% をこえると低下した。エタノール濃度は Pd イオン濃度より大過剰であるが、Pd の回収率はエタノール濃度依存性を示した。このことは、エタノールには還元効果だけでなく溶媒和により Pd イオンを安定化させる効果があり、エタノール高濃度領域では Pd 沈殿が生成しにくくなって回収率が低下した可能性を示唆する。効率的に Pd 沈殿を生成させる条件として、以後の検討ではエタノール濃度を 40 v/v% に固定した。

3・2 Pd 濃度の検討

高濃度の放射性物質を含む試料の分析時には、取り扱い試料の量を少なくして設備の汚染や作業者の被ばくを低減することが望ましい。HLLW 量を抑えつつ、Pd を分離回収できる濃度条件について明らかにするため、HLLW 模擬液からの希釈倍率を変化させて検討を行った。Table 1 に、HLLW 模擬液からの希釈倍率を変えた試料をレーザー照射した際の各元素の回収率を示した。HLLW 模擬液からの希釈倍率が 2000 倍 (Pd $0.24 \mu\text{g mL}^{-1}$) の場合、Pd は 4.5 % しか回収されなかった。一方、希釈倍率が 200 倍 (Pd $2.4 \mu\text{g mL}^{-1}$) の場合、Pd 回収率は 58.9 % となった。その他の元素の回収率もすべて 1 % 未満となった。また、Ru と Rh の回収率はわずかに増加した。希釈倍率を 20 倍 (Pd $24 \mu\text{g mL}^{-1}$) にした場合、Pd の回収率は 86.9 % まで増加し、Ru と Rh の回収率も更に増加した。この結果より溶液に含まれる白金族金属の元素濃度が高くなると、レーザー誘起光還元法による回収効率が増加することを示している。

Pd 回収率が試料中の Pd 濃度に依存するため、実際の HLLW に含まれる ^{107}Pd の正確な定量には、回収率の変化にかかわらず ^{107}Pd の存在量を直接導出する必要がある。この問題を解決するために、 ^{107}Pd が含まれた試料に天然組成の Pd 標準液を添加したあとで、レーザー誘起光還元法

Table 1 Recoveries (%) of each components in simulated HLLW sample under different Pd concentrations

elements	Pd concentration/ $\mu\text{g mL}^{-1}$		
	0.24	2.4	24
Rb	0.02	0.01	0.01
Sr	0.02	0.05	0.02
Zr	0.00	0.01	0.01
Mo	0.01	0.01	0.17
Ru	0.03	0.65	3.49
Rh	0.05	0.21	1.11
Pd	4.52	58.86	86.86
Cs	0.01	0.01	0.00
Ba	0.04	0.01	0.04
La	0.01	0.01	0.01
Ce	0.01	0.01	0.01
Pr	0.01	0.01	0.01
Nd	0.01	0.01	0.01
Sm	0.02	0.02	0.01

Volume: 2 mL; solution: $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ HNO}_3$; Ethanol: 40 v/v %; pulse energy: 50 mJ; irradiation time: 20 min

を適用する方法がある¹¹⁾。標準液中の ^{102}Pd は天然にのみ存在して試料中にはなく、 ^{107}Pd は天然に存在しない。そのため、 ^{102}Pd の添加量と、HLLW と Pd 標準液を混合した試料の ^{107}Pd と ^{102}Pd の同位体比を用いれば、試料中の ^{107}Pd の存在量が直接求まる。ただし、この手法を適用する場合は質量数 102 の同位体を持つ Ru を除去する必要がある。よって、HLLW の希釈倍率は 6 割程度の Pd を回収しつつ、Ru の除去率も 99 % 以上と十分に高い、200 倍が実際の分析時の希釈倍率に適すると考えられる。

一方、その他の元素に関しては回収率が 0.2 % を下回り、レーザー照射用試料の希釈倍率を下げても Pd 沈殿への混入がほとんどない。組成の予測が難しい HLLW の分析への適用を考える際には、試料中の Pd 濃度に幅があっても、放射性試料から取り除くべき元素を除去できるかが分離法として重要である。主要な放射線源となる元素、Sr, Cs, Ba の回収率は 0.05 % を下回り、沈殿分離²⁾や溶媒抽出¹³⁾による Pd の分離方法と比較しても同等の性能を有する。さらに、 ^{107}Pd の質量分析時にスペクトル干渉源となる Zr の回収率も 0.01 % 以下となり、Pd 沈殿中にはほとんど含まれない。よって、HLLW 模擬液の希釈倍率を 20 倍から 2000 倍の間で大きく変化させた場合でも、Pd 沈殿を高純度で回収できることが明らかとなった。

また、試料中の共存元素濃度は、Pd 回収率に影響を及ぼしている可能性がある。HLLW 模擬液と Pd 標準液を混合し、 $2.5 \mu\text{g mL}^{-1}$ の Pd 濃度を保って共存元素の濃度を 100 分の 1 程度にすると、レーザー誘起光還元法による Pd 回収率が 80 % まで向上する¹¹⁾。このことは、試料中の共存元素の存在が Pd イオンの光吸収や光還元反応、あるいは沈殿生成の阻害要因であることを示している。

Fig. 3 Dependence of the Pd recovery on the irradiation time

An error bar is the standard deviation of the datum, $n = 3$.

Fig. 4 Dependence of the Pd recovery on the pulse energy

An error bar is the standard deviation of the datum, $n = 3$.

以上の結果から、HLLW 模擬液からの希釈倍率を 200 倍 ($\text{Pd } 2.4 \mu\text{g mL}^{-1}$) とすると、HLLW の取扱量を少なく抑えながら、6 割程度の Pd を回収できることが分かった。

3.3 レーザー照射時間の検討

Fig. 3 に、レーザー照射時間を 0～60 分と変えた場合の Pd の回収率の変化を示す。照射時間 5～20 分の間に Pd 回収率が大きく増加し、20 分以降は Pd 回収率の変化はほとんどない。また、共存する他元素は、レーザー照射時間の増加に伴い Ru 及び Rh の回収率がわずかに増加するものの、いずれの条件においても回収率は 1 % 未満となった。Pd 濃度の違いにより沈殿生成反応の終了時間が異なる可能性はあるが、Pd 濃度が $2.4 \mu\text{g mL}^{-1}$ の場合は 20 分という短い時間で Pd を選択的に沈殿させて、他の元素と分離できることが明らかとなった。

Fig. 5 Scanning electron images of the Pd precipitates that were recovered after centrifugation on the membrane filter

Magnifications (a) $\times 5000$ and (b) $\times 40000$. (Volume, 2 mL; solution, $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ HNO}_3$; Ethanol, 40 v/v %; pulse energy, 100 mJ; irradiation time, 20 min).

3.4 レーザー光のパルスエネルギーの検討

レーザー光のパルスエネルギーには、光還元－沈殿生成反応を進行させるための閾値があると報告されている⁹⁾。レーザー光のパルスエネルギーを 10～150 mJ と変化させた際の、Pd 回収率の変化を Fig. 4 に示す。10 mJ ではほとんど Pd が回収されなかった。一方で、20 mJ では Pd 回収率は 20 % 程度に向上した。パルスエネルギーをさらに大きくすると、50 mJ 以上の領域で回収率が約 60 % でほぼ飽和した。以上の結果から、Pd 濃度が $2.4 \mu\text{g mL}^{-1}$ の場合、パルスエネルギーは 50 mJ で十分であることが分かった。また、共存する Ru 及び Rh はパルスエネルギーの増加に伴い回収率がわずかに増加し、Pd の回収率と似た傾向を示したが、いずれの条件においてもその回収率は 1 % 未満であった。

3.5 Pd 回収率の低下要因についての考察

過去の研究例¹¹⁾では、遠心フィルタ上に回収された Pd 沈殿の詳細な形態が明らかにされていない。Pd 沈殿の遠心ろ過時における損失が考えられたため、遠心フィルタ上の Pd 沈殿の SEM による観察を行った。倍率 5000 倍で観察した遠心フィルタ上の Pd 沈殿を Fig. 5 (a) に示す。大きいものでは数マイクロメートル程度の Pd 沈殿が、繊維状の遠心フィルタ上に別れている様子が確認できた。一つの沈殿を拡大し、倍率 40000 倍で観察したものを Fig. 5 (b) に示す。数 10 nm から数 100 nm の Pd 沈殿が凝集している様子が確認できた。遠心分離には孔径 $0.2 \mu\text{m}$ の遠心フィルタを用いているため、生成した沈殿を溶液相から分離する際に、沈殿の一部を捕集できていないと考えられる。したがって、沈殿回収方法の改善により Pd 回収率を向上できる可能性が示された。

4 結 言

単純な分離操作、かつ非接触で白金族金属を分離できる、レーザー誘起光還元法を HLLW 模擬液に適用し、分離

条件の検討を行った。Pd の回収率は、エタノール濃度、Pd 濃度、レーザー光の照射時間、レーザー光のパルスエネルギーに依存した。また、Pd 選択性が高くなり、高い放射能を持つ HLLW の使用量を少なくできる条件として、エタノール濃度 40 v/v%, Pd 濃度 $2.4 \mu\text{g mL}^{-1}$, レーザー照射時間 20 分、パルスエネルギー 50 mJ を選定した。この分離条件において、20 分という短時間のレーザー照射により、59 % の Pd を他元素の除去率 99 % 以上で選択的に回収できた。Pd 回収率の低下要因としては、試料中の共存元素による Pd イオンの光還元・沈殿生成の反応の抑制、もしくは Pd 沈殿の損失が考えられる。一方、HLLW 中で主要な放射エネルギーとなる元素の除去率は広い濃度範囲で 99.9 % 以上と高く、 ^{107}Pd の ICP-MS 測定時にスペクトル干渉源となる元素の混入もほとんどない。本報告で検討した照射条件を用いることで、レーザー誘起光還元法は HLLW など実際の放射性廃棄物に含まれる ^{107}Pd の ICP-MS 測定前処理として十分に適用可能であると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金「基盤研究 (B)」(15H04248), 「若手研究 (B)」(16K17927), 及び原子力機構平成 28 年度萌芽研究開発資金制度の支援によりなされたことを付記し、ここに謝意を表します。

(平成 27 年 9 月 11 日, 分析化学会)
(第 64 年会及び平成 28 年 3 月 9 日,
Pittcon 2016 において, 一部発表)

文 献

- 1) “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—”, JNC-TN 1400 99-010 (1999).
- 2) B. Andris, M. Pražský, F. Šebesta : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **304**, 123 (2015).
- 3) M. B. Gómez, M. M. Gómez, M. A. Palacios : *J. Anal. At. Spectrom.*, **18**, 80 (2003).
- 4) S. Hann, G. Koellensperger, K. Kanitsar, G. Stinger : *J. Anal. At. Spectrom.*, **16**, 1057, (2001)
- 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) K. Song, H. Cha, J. Lee, J. S. Choi, Y.-I. Lee : *Microchem. J.*, **68**, 121 (2001).
- 8) K. Song, H. Cha, J. Lee, J. Choi, Y. I. Lee : *J. Korean. Nucl. Soc.*, **32**, 531 (2000).
- 9) M. Saeki, F. Esaka, T. Taguchi, H. Ohba : *JAEA-Research*, 2012-030 (2012).
- 10) M. Saeki, T. Taguchi, N. Nakashima, H. Ohba : *J. Photochem. Photobiol. A*, **299**, 189 (2015).
- 11) S. Asai, T. Yomogida, M. Saeki, H. Ohba, Y. Hanzawa, T. Horita, Y. Kitatsuji : *Anal. Chem.*, **88**, 12227 (2016).
- 12) Japan Atomic Energy Agency (ED) : “Handbook on Process and Chemistry of Nuclear Fuel Reprocessing” : *JAEA-Review*, 2008-037, p. 147 (2008).
- 13) A. Dakshinamoorthy, A. G. C. Nair, S. K. Das, R. K. Singh, S. Prakash : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **162**, 155 (1992).

Non-contact and Selective Pd Separation Based on Laser-induced
Photoreduction for Determination of ^{107}Pd by ICP-MS
—The Relation between Separation Conditions and Pd Recovery—

Takumi YOMOGIDA^{*1}, Shiho ASAI¹, Morihisa SAEKI², Yukiko HANZAWA¹,
Takuma HORITA¹, Fumitaka ESAKA³, Hironori OHBA² and Yoshihiro KITATSUJI¹

^{*} E-mail : yomogida.takumi@jaea.go.jp

¹ Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

² Quantum Beam Science Research Directorate, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, 2-4, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1106

³ Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

(Received March 16, 2017; Accepted July 12, 2017)

Palladium-107 can be found in high-level radioactive liquid wastes (HLLW). Owing to its long half-life (6.5 million years), determining the ^{107}Pd contents in HLLW is essential to evaluate the long-term safety of HLLW repositories. However, the ^{107}Pd contents in HLLW have not been reported because of difficulties in a pretreatment for the measurement. Treating highly radioactive samples, such as HLLW, may cause radioactive contamination and radiation exposure to workers. Therefore, a simple and non-contact separation procedure is desirable. In this study, we applied a simple and non-contact separation technique based on laser-induced photoreduction to a simulated HLLW solution. The solution, which consisted of 14 major elements (Rb, Sr, Zr, Mo, Ru, Rh, Pd, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm) in a 3 mol L⁻¹ HNO₃ solution, was used to evaluate the separation performance. The results showed that the recovery of Pd from a simulated HLLW solution depended on the solvent, concentration of ethanol, concentrations of Pd ion, irradiation time and pulse energy. The results indicate that the coexisting elements in a sample hampered the photoreduction of Pd ions or the formation of a Pd precipitate and the loss of a Pd precipitate at centrifugation caused a decrease of the Pd recovery. By considering the conditions at laser irradiation, the results showed that the Pd recovery reached 59 %, while about 99 % of the other 13 elements was removed. This indicates that the non-contact and high-selective separation of Pd is achievable with the proposed separation technique under a suitable separation condition.

Keywords: palladium-107; ICP-MS; pulse laser; photo reduction; precipitation.