



JAEA-Review

2024-038

DOI:10.11484/jaea-review-2024-038

## 使用済燃料に含まれる有価元素及び核種の 分離・利用に関する調査報告

Investigation on Partitioning and Utilization of Valuable Elements and  
Radio Isotopes from Spent Nuclear Fuel

佐賀 要

Kaname SAGA

原子力科学研究所  
NXR 開発センター

NXR Development Center  
Nuclear Science Research Institute

September 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課  
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

## 使用済燃料に含まれる有価元素及び核種の分離・利用に関する調査報告

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

佐賀 要

(2024年7月10日受理)

日本原子力研究開発機構では、使用済燃料に含まれる元素の中から産業分野において利用価値の高い元素を分離する手法を開発してきた。本調査報告では、産業分野の最近の動向を踏まえて、利用価値の高い元素及び核種を把握することを目的とした。使用済燃料中に含まれる元素及び核種の存在量と産業分野の需要の観点から調査を実施し、以下の調査結果を得た。

産業分野における放射性同位体の経済規模(放射線利用も含める)は、工業、医療、農業の分野で近年増加傾向である。一方で、利用核種の国内生産量は少量に留まっており、核種によっては全量輸入に頼っている状況である。なお、使用済燃料中には Sr-90, Mo-100, Cs-137, Am-241 など、産業利用に向けた適度な長さの半減期を持つ核種が多く存在している。

元素の利用としては、産業利用の価値が高く、かつ、国内自給率も低い元素である白金族元素と希土類元素の産業利用について調査した。白金族元素では、使用済燃料に含まれる存在量から国内の新規生産源として一定量を供給できる可能性があると評価した。一方で、自給率の乏しい希土類元素では、現在の年間供給量と使用済燃料から供給可能な量を比較した場合、供給可能な量は、年間供給量の1%にも満たないことから効果は期待できないと評価した。

希土類元素は、国内のリサイクル率が低調である。そこで、リサイクル率向上に資する技術の提供が産業分野への貢献度が高いと評価した。具体的には、使用済燃料から有価元素を分離する技術である溶媒抽出法の数値シミュレーション技術の提供である。数値シミュレーション技術の提供により分離プロセスの処理段数計算や処理速度を分離・利用したい元素に合わせて最適な運転条件を試算することが可能になる。運転条件の具体化によりリサイクル費用なども試算できることで、リサイクル工程の導入に貢献できる可能性がある結論付けた。

## **Investigation on Partitioning and Utilization of Valuable Elements and Radio Isotopes from Spent Nuclear Fuel**

Kaname SAGA

NXR Development Center, Nuclear Science Research Institute

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 10, 2024)

The purpose of this report is understanding the elements and radio isotopes with highly useful based on the current trends in the industrial field. The survey was conducted from the viewpoint of the abundance of elements and radio isotopes contained and the demand in the industrial field, and the following survey results were obtained. The economic scale of radio isotopes in the industrial field (including radiation use) has been increasing in recent years in the manufacturing, medical, and agricultural sectors. On the other hand, the domestic production of the utilized radio isotope is still small, and some radio isotopes are entirely imported. Radio isotopes such as Sr-90, Mo-100, Cs-137, and Am-241 from spent fuel are suitable for industrial use because of their abundance in spent fuel and half-lives.

As for the utilization of elements, the industrial use of platinum group elements and rare earth elements were explored because these elements are high industrial value and low domestic self-sufficiency. The platinum group elements were evaluated to have the potential to be supplied in a certain amount as a new domestic production source based on their abundance in spent fuel. On the other hand, for rare earth elements, which have also low self-sufficiency rate, the ratio of the amount that could be supplied from spent fuel compared to the current annual supply was evaluated to be less than 1%, and therefore, no effect could be expected.

The domestic recycling rate of rare earth elements is low, and the provision of numerical simulation technology, which improves the recycling rate, could highly contribute to the industries. This technology makes it possible to calculate the optimal operating conditions for the separation process, such as the number of processing stages and processing speed, in accordance with the elements to be separated and used. It was concluded that specifying the operating conditions would allow recycling costs to be estimated, which could contribute to the introduction of recycling processes.

Keywords: Partitioning and Utilization Technology, Valuable Element, Recycling Radioisotope

目次

1. 背景.....	1
2. 調査目的.....	1
3. 調査方法.....	1
3.1 調査方法.....	1
3.2 評価の仮定.....	1
4. 調査結果.....	2
4.1 使用済燃料に含まれる元素の種類及び存在量の把握.....	2
4.1.1 使用済燃料に含まれる主な元素の種類及び存在量.....	2
4.1.2 使用済燃料に含まれる主な核種の種類と半減期.....	2
4.1.3 使用済燃料に含まれる主な元素の発熱量.....	3
4.2 使用済燃料由来の元素の供給量と供給価値の検討結果.....	3
4.2.1 放射性同位体の利用.....	4
4.2.2 元素の利用.....	5
5. おわりに.....	8
参考文献 .....	8

Contents

1. Introduction.....1

2. Object of this investigation report.....1

3. Methods of investigation.....1

    3.1 Methods of investigation.....1

    3.2 Assumptions of evaluation.....1

4. Results of investigation.....2

    4.1 Understanding the types and amounts of elements contained in spent fuel.....2

        4.1.1 The types and abundance of major elements contained in spent fuel.....2

        4.1.2 Major radio isotopes contained in spent fuel and their half-lives.....2

        4.1.3 Decay heat values of major elements contained in spent fuel.....3

    4.2 Results of study on supply volume and supply value of elements derived from spent fuel.....3

        4.2.1 Use of radio isotopes.....4

        4.2.2 Use of elements.....5

5. Conclusion.....8

References .....8

図表リスト

表 1	放射性核種の利用例.....	4
図 1	使用済燃料 1t 当たりの元素の存在量 .....	2
図 2	使用済燃料に含まれる主な核種(U 除く)と半減期.....	3
図 3	使用済燃料に含まれる主な元素と発熱量 .....	3

This is a blank page.

## 1. 背景

日本原子力研究開発機構では、2024 年度に原子力発電で発生した使用済燃料から利用価値の高い元素を分離し、資源として産業利用することを目標の一つとして NXR 開発センターを設置した。NXR 開発センターの分離・利用技術開発特別チームでは、海外からの輸入に依存している元素について「新たな供給源の開拓」と「資源セキュリティの確保に貢献するための分離回収手法の開発」をめざしている。そこで、本報告書では、使用済燃料中に含まれる元素及び核種の存在量と産業分野の需要の観点から調査を実施した。

## 2. 調査目的

産業分野の最近の動向を調査し、利用価値の高い元素及び核種を把握することを目的とした。使用済燃料に含まれる存在量の多い元素及び核種を炉心燃焼計算の結果を基にして抽出し、産業分野で需要の高い元素及び核種と合致する元素及び核種について、具体的な用途及び製品について調査結果を記載した。

## 3. 調査方法

### 3.1 調査方法

調査方法は、調査を 2 段階に分け、1 段階目の調査結果を基に、2 段階目の工程の調査を行った。具体的には、(1)原子力発電で発生した使用済燃料の組成及び特性を炉心燃焼計算の結果を基に、各元素の存在量、半減期、発熱量の観点で元素及び核種の特性を評価した。評価結果から(2)産業利用価値の高い元素を抽出し、抽出した元素の供給量などを基に供給価値を評価した。

### 3.2 評価の仮定

炉心燃焼計算では、軽水炉から発生する使用済燃料を対象とした。具体的には年間 800t の使用済燃料が生成・再処理されると仮定し、使用済燃料中に含まれる元素及び核種の存在量、半減期及び発熱量を整理した。

## 4. 調査結果

### 4.1 使用済燃料に含まれる元素の種類及び存在量の把握

#### 4.1.1 使用済燃料に含まれる主な元素の種類及び存在量

使用済燃料中に含まれる元素の種類及び存在量を図 1 に整理した。図 1 の燃焼計算は、PWR 使用済燃料 1t 当たりについて、ORIGEN2, 3.9%EU, 45000MWd/t, 37.5MW/t, 5 年冷却の条件で行った。図 1 の横軸は元素の種類、縦軸は使用済燃料 1t 当たりに含まれる存在量[g]を示す。図 1 より、使用済燃料中には、さまざまな元素が存在し、核種はその数よりもさらに多いとわかる。また、存在量[g]については、天然では存在量が少ない元素及び埋蔵地域が偏在している元素なども使用済燃料の中には含まれることがわかる。具体的には、白金族元素(PGM: Platinum Group Metal)や希土類元素(REE: Rare Earth Element)などの希少金属などが挙げられる。日本などの資源に乏しい国・地域においては、使用済燃料に含まれる元素を分離・回収し、産業利用することは、資源の自給率向上の数少ない方法の 1 つとして期待できる。また、使用済燃料に含まれる核種は、原子炉内で中性子照射され、核分裂及び放射化により生成される。これらの核種には天然から生産することが困難な核種も含まれる。この人工的に生成される核種が放出する放射線や崩壊熱の利用は医療分野や品質管理及びエネルギー分野で期待されている。

そこで、次節以降では、使用済燃料中に含まれる元素の特徴について、半減期と崩壊熱の観点から整理する。

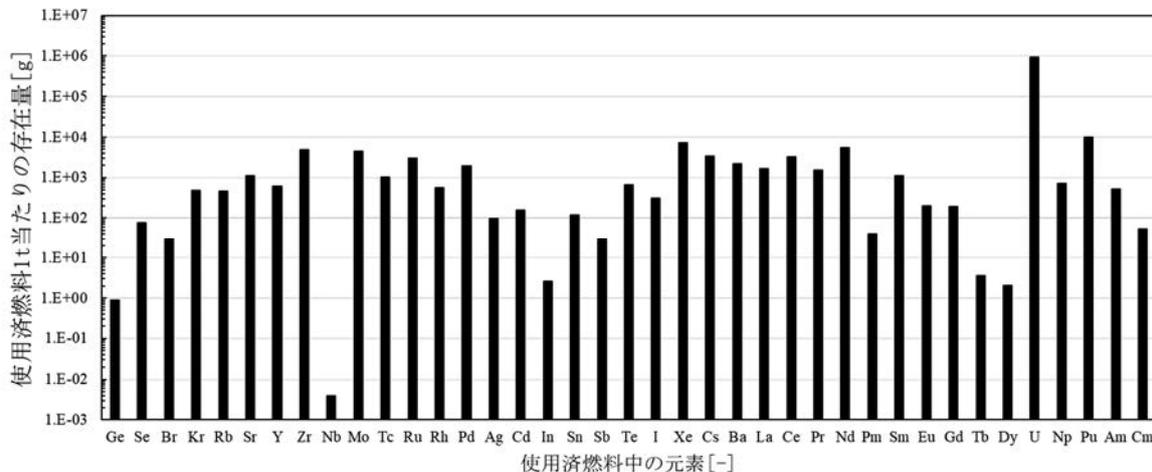


図 1 使用済燃料 1t 当たりの元素の存在量

#### 4.1.2 使用済燃料に含まれる主な核種の種類と半減期

図 2 の横軸は核種の種類、縦軸は半減期を対数で示している。図 2 より、核種に応じて半減期は異なり、同一元素でも核種が異なることで半減期が大きく異なることがわかる。例えば、Cs では、Cs-134, Cs-137 の半減期はそれぞれ 2.1 年と 30 年であるが、Cs-135 の半減期は、230 万年であり、同一元素でも半減期は核種に依存して大きく異なる。そのため、分離後の元素を使用するためには元素の核種の特性まで把握することが求められる。

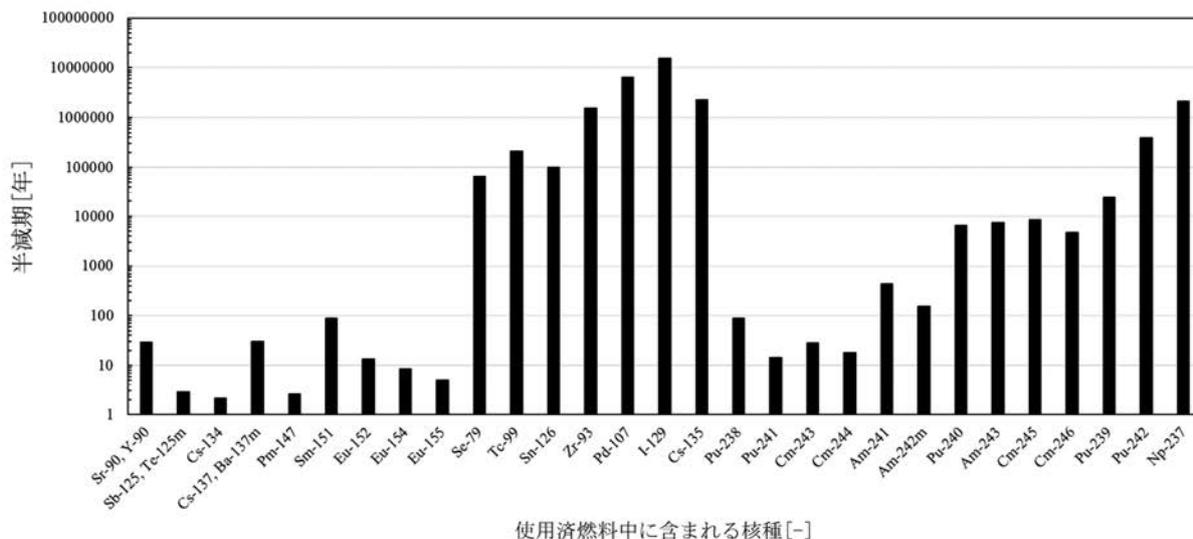


図2 使用済燃料に含まれる主な核種(U 除く)と半減期

4.1.3 使用済燃料に含まれる主な元素の発熱量

図3の横軸は元素の種類、縦軸は使用済燃料 1t 当たりの各元素の発熱量を示している。図3より、発熱量が高い元素の数は限定的であり、発熱量が大きい元素としては、Sr, Y, Rh, Cs, Ba, Pr, Eu, Pu, Am, Cm に限定できる。これらの元素の発熱を熱源として利用することで電池として機能させる原子力電池はこれまでも複数開発されてきた<sup>1)</sup>。近年では、Cs と Sr を熱源としたヒートポンプのシステムに関する研究開発が実施されている<sup>2)</sup>。また、計画段階ではあるが、火星探査機への利用が米国と欧州で検討されている<sup>3)</sup>。

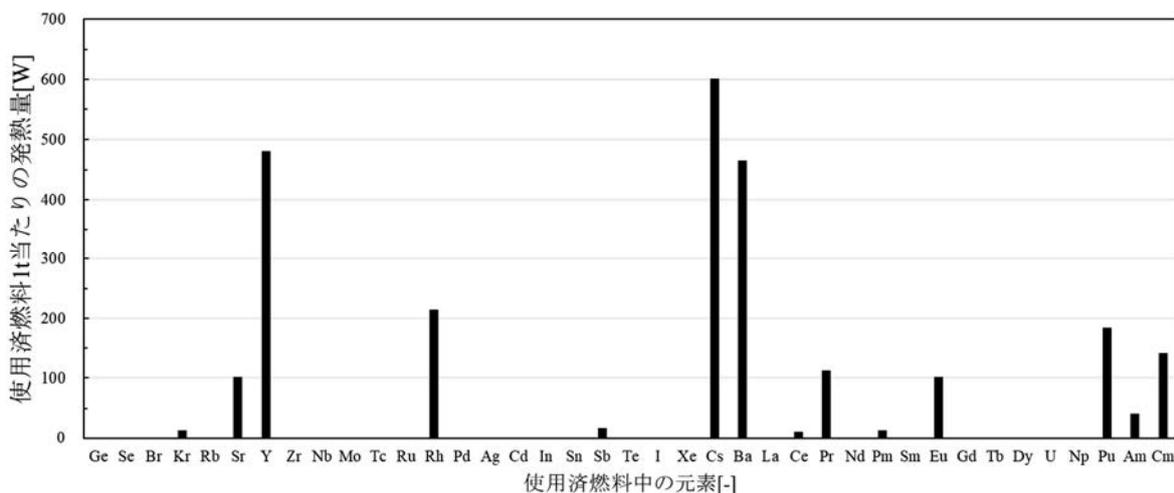


図3 使用済燃料に含まれる主な元素と発熱量

4.2 使用済燃料由来の元素の供給量と供給価値の検討結果

4.1.1 に記述した通り、使用済燃料には産業価値の高い元素が含まれている。そこで、本報告書では、使用済燃料由来の元素について、放射性同位体(RI)の利用と元素の利用の2つ観点

から産業利用の価値を整理した。

#### 4.2.1 放射性同位体の利用

原子炉内で生成する放射性核種の産業利用について整理する。原子炉からは、図 2 に示すように多種多様な核種が生成される。生成された核種の特徴を活かすことで、産業利用価値の高い製品などに再利用することができる。これまでも原子炉または加速器などを利用して、人工的に生成した核種を用いた製品は数多く存在している<sup>1)</sup>。その一例として、放射性核種ごとの利用例を表 1 に示す。

表 1 放射性核種の利用例<sup>1,3)</sup>

元素	核種	半減期	主な用途
Sr	Sr-90	27.7 年	医療用線源(Y-90) 厚さ測定用線源 熱源
Mo	Mo-99, Mo-100	66 時間 10 <sup>19</sup> 年	医療用線源(Tc-99m)
Cs	Cs-137	30 年	厚さ測定用線源 熱源
Am	Am-241	432 年	熱源

表 1 には代表的な核種を示した。表 1 に記載した核種は使用済燃料中の存在量も多く、産業利用に適している。本報告書では主な用途を医療利用、工業利用に分けて整理した。なお、医療・工業利用を含めた放射線利用全体の経済規模は、この 20 年間継続して増加傾向にある<sup>4)</sup>。とりわけ医療利用では、経済規模が 10 年間で約 30%増加している<sup>4)</sup>。医療利用の増加の要因は、悪性腫瘍に対する核医学治療の実績が顕著な増加傾向を示していることから説明できる<sup>4)</sup>。具体的な核種としては、放射性医薬品として利用されている Tc-99m が挙げられる。Tc-99m は核医学検査において利用件数が最多である。放射性医薬品として、循環器の疾患や腫瘍の骨転移などの診断に利用されている<sup>5)</sup>。Tc-99m の主原料である Mo-99 に関して、日本は米国に次ぐ消費国であるにもかかわらず、国内生産はされておらず、すべてを輸入に頼っている現状である<sup>4)</sup>。この現状を改善するために、加速器を用いた国内生産が検討されている。具体的には、Mo-100 ターゲットに高速中性子を照射することで得る手法を開発している<sup>6)</sup>。ここで、ターゲットとなる Mo-100 の天然存在比は天然で 9.6%であるが、使用済燃料中では、存在比が 28.5%まで増加するという特徴がある。使用済燃料中では天然存在比の約 3 倍の濃縮度に達している。そのため、Mo-100 の濃縮にかかる負担及びコストの低減が期待できる。前述のように、Mo-100 ターゲット製造には同位体濃縮が必須である。同位体濃縮技術としては、ウラン濃縮工場で使用される遠心分離技術による濃縮が応用できる可能性がある。

もう 1 つの代表核種としては、Y-90 が挙げられる。Y-90 は、Sr-90 の子孫核種として、使用済燃料に含有されている。欧州では、使用済燃料の再処理工程で生じる高レベル放射性廃液から Sr-90 を分離し、Sr-90 からミルキングした Y-90 を用いた医薬品製造及び販売の実績もある<sup>7)</sup>。Y-90 は、抗体にキレート剤を介して結合されることで、腫瘍細胞へ作用する。使用済燃料から分離した Sr-90 を介した Y-90 製剤の製造は、使用済燃料由来の核種の有効利用及び医療利用の成功例であると言える。

次いで、放射性同位体の工業利用について記載する。工業利用としては、放射性同位体が発する放射線による厚さ測定などの非破壊計測への利用が代表的であり、Cs-137, Sr-90 などの核種を用いて、発電所内や化学プラントの配管検査などに使用されている<sup>8)</sup>。

もう 1 つの例として、熱源利用に関して記載する。前述の通り、Cs と Sr を熱源としたヒートポンプのシステムに関する研究開発が実施されており、熱源としての利用についても検討が進んでいる。これまでには、Cs-137, Sr-90 を熱源に用いた原子力電池が開発されてきた<sup>1)</sup>。原子力電池の原理は、放射性核種が崩壊する際に発生するエネルギーを熱エネルギーとして利用し、「高温部」を作り出す。「高温部」と温度差がある部分を「低温部」として、この高温部と低温部を 2 種の異なる金属線で結束した熱電対を構成する。構成された熱電対は温度差により、起電力を発生させるという原理である。実用的な電力を取り出すためには、十分に安定した高温部が必要である。そのため、Sr-90 など崩壊熱の大きい核種を利用することで、高温部の温度帯域を高くするタイプの原子力電池が多く利用された。しかし、技術の進展により、Am-241 などの微弱な熱源でも電池として利用できる可能性が出てきた。Am-241 の半減期は、432.2 年と長いため、半永久電池として利用できる可能性がある。Am 電池は、とりわけ宇宙空間などの探索に活用できる可能性がある。実際に、アメリカ航空宇宙局と欧州宇宙機関が進めている火星探査計画「ExoMars」では、火星探査車「Rosalind Franklin」のミッションにおいて、Am-241 を熱源とした原子力電池を搭載する計画を示している<sup>3,9)</sup>。

#### 4.2.2 元素の利用

資源の乏しい日本においては、自国生産源として使用済燃料を利用可能であれば、調達リスクの高い元素について、リスクの低減に貢献できる。また、限りある地球環境への負担軽減にも貢献できる可能性がある。そこで、日本を例として、PGM と REE の自国供給量とリサイクル量及び輸入量と使用済燃料からの潜在的な供給量を比較した。比較結果から使用済燃料の資源化の有効性を評価した。

PGM について整理する。一般的に PGM は、6 元素(Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Os)とされている<sup>10)</sup>。図 1 より、使用済燃料に含まれる元素では、Pd, Rh, Ru の存在量が多い。そこで、Pd, Rh, Ru について、調査した結果を下記する。

Pd の利用として代表的な製品としては、自動車の排ガス触媒が挙げられる。そのほか、化学触媒、歯科用材料、電子回路用配線パターンなどに使用されている<sup>11)</sup>。また、2017 年以前、Pd はコスト面で Pt よりも安価であったため、Pd を排ガス触媒の代替材として使用する製品が増加した<sup>10)</sup>。結果として、Pd の需要量は Pt の 3 倍近くに上り、価格も Pd の方が高価になった<sup>10)</sup>。Pd は国内新規生産量 4.5t/年、リサイクル量 23.8t/年、輸入量は 49.1t/年で合計

77.4t/年が消費された<sup>11)</sup>。一方、年間 800t の使用済燃料から Pd を分離・回収できれば、その生産量は 1.59t になる。1.59t/年の国内新規生産量は、現状の 4.5t/年から比較すると約 35% 相当と試算でき、十分に貢献できる供給量と言える。一方で、Pd 全体の国内年間需要である 77.4t/年から考えると約 2%相当である。この結果から、自給率を大幅に改善するには至らないと評価した。国内では、産業上重要な鉱物及び材料は 180 日分の備蓄を法律で求めている<sup>12)</sup>。備蓄量は年間量の約 1/2 と試算できるため、約 39t になるが、この備蓄量に対しても十分な量ではないことはわかる。仮定とした使用済燃料年間 800t ではすべての備蓄を賄うことは困難であるが、国内新規生産としては、貢献が可能であると言える。

Rh は還元特性に優れる化学的特徴を持つ<sup>11)</sup>。そのため、Pd、Pt と同様に自動車用排出ガス触媒の必須元素である。加えて、石油精製触媒や熱電対電極などにも使用されている。Rh の国内新規生産はなく、リサイクルとして 1.0t/年、輸入量は 7.4t/年で合計 8.4t/年が消費される。一方で、年間 800t の使用済燃料から Rh を分離・回収した場合、0.48t を国内新規生産量として生産できる。現状、国内新規生産はないため、国内で新規生産できる唯一の選択肢となり得る。つまり、国内新規生産量としては、十分に貢献できると評価した。しかし、Rh 全体の年間消費量である 8.4t/年から考えると約 6%相当であり、自給率を大幅に改善するには至らない。産業上重要な鉱物及び材料の 180 日分の備蓄を考えた場合は、約 10%を賄うことができる。備蓄量を賄うことも単独では困難であるが、リサイクル量と合わせると 35%を国内資源で賄うことができると試算できる。また、Rh の世界需要は年間 35t であり、そのうち日本が 8.4t 消費しているため、世界の年間需要の約 25%を日本で消費していることになる。この結果から、Rh は日本にとって重要な元素であると言え、資源セキュリティ上も自国供給源を有している必要があると言える。使用済燃料を供給源とすることは、供給量としては不十分であるが、国内生産の唯一の選択肢を提供できる可能性がある。

Ru は高温・高圧の過酷環境下に耐えられる化学特性を持つため、電子部品などに使用されている<sup>11)</sup>。他の PGM と同等に触媒としての利用も多く、石油精製、有機化合物合成、医薬品合成などに使用されている。Ru は国内新規生産に関する情報及びリサイクルに関する情報も同様にほとんどない。ただし、いくつかの報告ではリサイクル率が低い旨の報告がある<sup>13)</sup>。Ru は Pt の生産時に副生成物として、生産されるため、Pt の世界生産量が 200t/年であれば、数十 t/年の生産量になると言われている<sup>14)</sup>。ここでの検討では、Ru の国内消費を Rh と同等程度と仮定した。仮定では、Ru の国内消費量を約 8.4t/年、リサイクル率は 0%として検討を行った。年間 800t の使用済燃料から Ru を分離・回収した場合、2.4t を生産できることになる。国内新規生産量は、Rh と同様に現状 0t/年と仮定しているため、新規生産できる唯一の選択肢となり得る。国内新規生産量としては、十分に貢献できる可能性があると評価した。一方で、Ru 全体の年間消費量を 8.4t/年と仮定すると年間消費量の約 30%相当にあたり、自給率を大幅に改善できる可能性がある。産業上重要な鉱物及び材料の 180 日分の備蓄を考えた場合は、約 57%を賄うことができる可能性があり、備蓄量を賄うことは単独では困難であるが、十分に貢献できる。また、PGM は元素特性が類似していることから、PGM 元素同士が相互に補完できる可能性がある。そのため、PGM のうち、1 種類だけでも自国に十分な供給源を有していることは、調達リスク低減への貢献が期待できる。

以上、PGM に関する使用済燃料由来の分離元素の利用については、Rh, Ru については、自国新規生産の唯一の供給源になり得ること、リサイクル量を鑑みても自国供給源として一定の量を賄えると評価した。特に、Ru については、年間 2.4t 供給できる可能性があり、国内の消費量に対して、十分量を供給できる可能性がある。また、PGM のリサイクルはすでに導入されているが、Ru では工程が構築されていない。Pd, Rh についてもリサイクル率向上の余地はあると考える。

PGM に続き、REE についても整理する。REE は、周期表では、La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu のランタノイド族に属する 15 元素に加えて、第 3 族の Sc, Y を含めた 17 元素を指す<sup>15)</sup>。REE は各元素の性質が良く似ており、用途は強力な永久磁石やモーター、水素二次電池、コンデンサなど多くの高機能製品に使用されている。REE の用途は年々拡大している<sup>16)</sup>。REE の鉱物としての特徴は、ほぼすべての鉱物の場合で REE を複数種含有していることであり、REE はそれらの鉱物から相互分離して使用される<sup>16)</sup>。REE は、La, Ce, Pr など元素番号が小さい元素を軽希土類と呼び、Tb, Dy 以降の元素を重希土類と呼ぶ。REE の原産国は、PGM と同様に偏在しており、世界生産の約 60%を中国が占有している状況である<sup>17)</sup>。そのため、調達リスクが一段と高い元素である。中でも重希土類は、REE の中でもさらに鉱床が中国に偏在している。

上記のような状況を踏まえて、使用済燃料からの REE 供給について整理した結果を示す。まず、使用済燃料 1t 当たりに含まれる REE は合計約 13.4kg である。年間 800t の使用済燃料から REE を分離回収・資源化した場合、供給量は 10.7t/年と試算できる。使用済燃料中に含まれる他の元素群と比較しても REE の組成比は大きい。しかし、REE の国内需要は 17,401t/年であるため、使用済燃料からの供給量 10.7t/年では、国内需要の 0.1%未満の量しか供給できず、国内需要に貢献できるとは言えない。それほど REE の国内需要は大きい物量であるとわかる。一方で、REE の資源利用において、リサイクル量/率ともにほとんど 0%であるという特徴がある。年間約 20,000t 近くが国内流通しているため、リサイクル率を向上させることが調達リスクの低減につながる。PGM はリサイクル網が構築されているにもかかわらず、REE については、リサイクル網の構築が遅れている。REE のリサイクルについては、経済産業省も政策として検討しており<sup>18)</sup>、リサイクルが進まない理由として以下 4 つの課題が挙げられている。

#### (1)回収量の確保

使用済製品が回収されずに、海外へ流出し廃棄されるもの、家庭内に退蔵されるものなどが存在し、回収量確保が課題。

#### (2)回収品が REE 等のリサイクル事業者が届かない

使用済製品が回収されても、リサイクル事業者が届かず、海外へ流出するケースや鉄くずなどとして処理されるケースが存在。

#### (3)技術開発

経済的なリサイクル技術が開発途上。

#### (4)REE の含有情報

REE の含有量に関する情報は、企業秘密に属するものであり、関係者間で十分に共有

されておらず、そのまま廃棄されるケースが存在。

以上の課題の中で、原子力分野が貢献できる可能性を検討した。貢献できる可能性があるのは(3)の技術開発である。REE の分離回収(リサイクル)技術と原子力の再処理及び資源回収技術は、溶媒抽出法を用いるという点で同一である。原子力分野では、溶媒抽出法の抽出剤開発と溶媒抽出シミュレーション技術の開発を継続してきている<sup>19)</sup>。REE の溶媒抽出とは、溶媒が硝酸ではなく塩酸、標的金属が異なるなどの相違点はあるが、大部分が共通技術であり、親和性の高い技術である。以上から、REE については、使用済燃料からの REE の供給量は限定的であるが、REE のリサイクル技術の開発には貢献できる可能性があると評価した。

## 5. おわりに

本報告書で取り扱った元素及び核種を適切なタイミングで必要量を分離回収できる分離プロセス及び供給システムを構築し、それを最適化することで使用済燃料中の元素及び核種の価値の最大化が期待できる。使用済燃料から回収可能な資源を最大限有効活用するには、個々の元素及び核種の提供価値を精緻に評価するとともに、分離プロセス及び供給システムの最適化に資するため利用シナリオの検討も重要である。

## 参考文献

- 1) 佐藤乙丸, 原子炉の燃えかすから取り出したアイントープの利用, 生産研究, 28 巻, 1 号, 1976, pp.11-27.
- 2) 青森県量子科学センター, 高レベル放射性廃棄物から分離した放射性 Cs および Sr の熱利用設計に関する研究開発, 2021.
- 3) American Nuclear Society, Americium-241 heat source planned for Mars rover in a space exploration first, Research & Applications, <https://www.ans.org/news/article-6075/nasa-will-supply-am241-heat-sourcesfor-mars-rover-in-a-space-exploration-first/> (参照:2024 年 5 月 31 日).
- 4) 内閣府 原子力政策担当室, 医療用等ラジオアイソトープ(RI)製造・利用促進の検討について(案), 2021.
- 5) 永井泰樹他, 小型加速器から得られる中性子による <sup>99</sup>Mo 等医療用 RI 生産に向けて, 日本物理学会誌, vol.69, no.6, 2014, pp.370-375.
- 6) 日本メジフィジックス株式会社, 自社生産のモリブデン-99、試製造を開始～放射性医薬品のさらなる安定供給を目指して～, News Release, 2023, pp.1-2.
- 7) 細馬隆, 使用済燃料の再処理工程で生じる高レベル放射性廃液から抽出した <sup>90</sup>Y を含有する医薬品及び医療機器に関する調査・検討, JAEA-Review 2012-008, 2012, 83p.
- 8) 原子力委員会, 平成 30 年度版 原子力白書, 2019.
- 9) Elizabeth Gibney, How Nuclear Waste Will Help Spacecraft Explore The Moon, Nature, vol.612, 2022, pp.385-386.

- 10) 森下祐一, 白金族金属の供給と利用, 資源地質, 63(1), 2013, pp.21-30.
- 11) エネルギー・金属鉱物資源機構, 鉱物資源マテリアルフロー2022-白金族(PGM)-, 2024.
- 12) 経済産業省, レアメタル備蓄制度の見直しについて(参考), 資料 5-2,  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen\\_nenryo/pdf/029\\_05\\_02.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/pdf/029_05_02.pdf), (参照:2024年5月31日).
- 13) 永井燈文 他, RhならびにRuの分離・回収, Journal of MMIJ, vol.129, no.12, 2013, pp.694-700.
- 14) 内閣府重要課題専門調査会,  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/wg\\_nano/3kai/siryu2-12-2.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/wg_nano/3kai/siryu2-12-2.pdf), (参照:2024年5月31日).
- 15) 足立吟也 他, 希土類金属の化学 (金属の化学 3), 化学と教育, vol.48, no.9, 2000, pp.587-591.
- 16) エネルギー・金属鉱物資源機構, 鉱物資源マテリアルフロー2021-レアアース(REE)-, 2022, 13p.
- 17) エネルギー・金属鉱物資源機構, レアアース供給源多角化の進展状況, 2023.
- 18) 経済産業省, レアメタルのリサイクルに係る現状-資料 4-, 2011, 36p.
- 19) 津幡靖宏 他, 再処理抽出分離工程シミュレーションコード PARC の開発, 日本原子力学会和文論文誌, vol.8, no.3, 2009, pp.211-220.

This is a blank page.



