

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 8 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K10381

研究課題名(和文) Heビームを用いた医療用Mo-99/Tc-99mの製造技術にかかる基礎研究

研究課題名(英文) Feasibility study on a medical radioisotope Mo-99/Tc-99m production using He beam

研究代表者

萩原 雅之 (Hagiwara, Masayuki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・准教授

研究者番号：10450363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：原子炉の老朽化や核不拡散上の問題等のため世界的な供給不足が危惧されている放射性医薬品(テクネチウム製剤)の原料となるモリブデン99(Mo-99)の長期的な安定供給のために、高濃縮ウランや原子炉に依存しない小型加速器を利用しZr-96(γ, n)Mo-99反応によりMo-99を製造する新たなMo-99製造技術開発にかかる基礎検討を行った。

本研究によって、5 MeV/u程度の反応しきいエネルギー近傍の低エネルギーヘリウムビームを利用することで、他の手法に比べて放射化や副産物RI生成が少なく、高い比放射能を有するMo-99が製造できることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内で最も多く利用されている放射性医薬品(テクネチウム：Tc-99m製剤)の原料となるモリブデン99(Mo-99)については、現在その供給量のほぼ100%を輸入に依存しており、製造元の原子炉の老朽化や空輸でのトラブルによる供給不足が深刻な問題となっている。多大の費用と時間、社会的理解が不可欠である原子炉の新規制基準対応や、核不拡散上の懸念から、原子炉に依存しない加速器を用いた新たなMo-99製造技術の確立が期待されている。本研究で提案するMo-99製造技術が実現すれば、国内の放射性医薬品の長期的な安定供給の一翼を担うことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：Technetium-99m/Molybdenum-99 is one of the most important radioisotopes used in nuclear medicine for common diagnostic imaging technologies such as single photon emission computed tomography (SPECT). For long-term stable supply of Tc-99m/Mo-99, which is now at risk of global shortages due to aging reactors for the Mo-99 production and nuclear nonproliferation problems, we carried out feasibility studies on the development of an innovative accelerator-based Tc-99m/Mo-99 production technology via the Zr-96(γ, n)Mo-99 reaction.

In this study, we have demonstrated the possibility of Mo-99 production with higher specific activity, less activation and by-products production than the other accelerator-based technologies, by measuring the neutron production and excitation functions of radioisotopes on zirconium induced by helium.

研究分野：放射線計測

キーワード：医療用放射性同位元素 モリブデン99 テクネチウム99m ヘリウム 加速器 核反応 放射化 ジルコニウム96

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

放射性同位元素 (RI) を含む、特定の臓器や細胞に集積しやすい化合物 (放射性医薬品) を利用する核医学診断法は、他の形態画像診断では得られない機能情報が得られることから、先進医療には欠かすことのできない診断法として重用されている。しかし、国内で最も多く利用されている放射性医薬品 (テクネチウム製剤) の原料となるモリブデン 99 (^{99}Mo) については、国内需要のほぼ 100% を輸入に依存しており、製造元や空輸でのトラブルによる供給不足が深刻な問題となっている。世界の ^{99}Mo の 9 割以上はカナダや欧州等の RI 製造用原子炉により製造されているが、原子炉の故障や老朽化、核不拡散政策上の問題等により、数年後の ^{99}Mo 供給は非常に不透明な状況に陥っている。 ^{99}Mo の供給不足は重篤な疾患を持つ患者の診療等に深刻な問題を引き起こしかねないため、安定した供給体制を構築することが重要かつ緊急な課題となっている。

現在、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ やその親核である ^{99}Mo の安定供給に向けた、原子炉あるいは加速器を用いた代替方式が世界中で検討されている。[①] 加速器を用いた $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製造法としては、20 MeV 程度に加速した陽子を用いて $^{100}\text{Mo}(p,pn)^{99}\text{Mo}$ 反応または $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$ 反応により ^{99}Mo あるいは $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を製造する方法や 10-14 MeV の高速中性子を用いて $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$ 反応により ^{99}Mo を製造する方法や電子線形加速器を用いて $^{100}\text{Mo}(\gamma,n)^{99}\text{Mo}$ 反応により ^{99}Mo を製造する方法等がこれまで検討されてきた。[①,②,③] 加速器による製造法は、ウランターゲットを必要とせず、原子炉と比べて施設の管理が容易という長所があり、大きな期待が寄せられているが、供給量と技術的成立性の観点で課題が残り、未だに ^{99}Mo の長期的な安定供給への突破口には至っていないのが現状である。

研究代表者らはこれまで量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所等の加速器施設を用いて、荷電粒子入射反応の核データ測定を行ってきた。[④,⑤] 系統的な測定データの解析を進めていく中で、低エネルギーの荷電粒子入射に伴う融合反応 (標的核よりも生成核の方が原子番号が大きくなる反応) の断面積が反応のしきいエネルギー付近で大きなピーク構造を持つことが分かった。しきいエネルギー近傍では目的とする融合反応以外の核反応は起こり難いため、 $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$ 反応断面積のピークエネルギーに荷電粒子の入射エネルギーを合わせることで、低エネルギーの小型加速器で比放射能の高い ^{99}Mo を製造する技術、更には化学分離を行うことで高価な ^{96}Zr 試料ををリサイクルする技術の着想に至った。

本研究では、しきいエネルギー近傍の $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$ 反応を利用することで、副産物 RI が少なく比放射能が高い ^{99}Mo をコンパクトかつ放射化が少ない低エネルギー加速器で製造するための基礎データを取得するとともに、フィジビリティ・スタディを行った。

2. 研究の目的

本研究では、核子当り 5 MeV 程度のヘリウムイオンを ^{96}Zr 標的に照射し、 $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$ 反応により、副産物 RI が少なく比放射能が高い ^{99}Mo を製造するシステムを構築するため、以下に示す(1)-(2)を明らかにする。

- (1) $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$ 反応と同時に生成される副産物 RI の生成反応の断面積をしきいエネルギーから核子当り 6 MeV まで精密に測定する。 $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$ 反応については、1995 年と 2014 年に測定された実験データ [⑥,⑦] があるが、二つの実験データ間で大きな差異がみられることや、本研究で対象としている核子当り 5 MeV 以下の低エネルギー領域に関しては測定点が数点しかないので、本研究では核子当り 5 MeV 以下に焦点を置き細かいエネルギー間隔で重点的にデータを取得する。国内の ^{99}Mo 需要量に対し、求められる加速器の性能を明らかにするため、得られた実験データから入射エネルギーやビーム照射量に対する ^{99}Mo の生成量の関係を精度よく導出する。
- (2) ^{99}Mo 製造時に発生する中性子を効率的に遮へいするための基礎データとして、Zr 標的から放出される中性子の発生量、エネルギー・角度分布の測定を行う。医療機関等の限られたスペースでの ^{99}Mo 製造を想定すると、二次中性子の効率的な遮へいが重要となる。適切な遮へいを施すことで装置や装置室の放射化の低減につながる。

3. 研究の方法

照射実験は量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 (HIMAC) と AVF サイクロトロン (NIRS-930) を用いて行った。HIMAC での照射実験では、中エネルギービーム照射室に真空チャンバーを設置し、ビームライン中心に ^{nat}Zr 箔 (純度 99.2%) と ^{nat}Ti 箔 (99.9%) をスタック状に重ねた厚い照射試料を配置し、24.5 MeV の ^2He ビームを ~ 3 nA で 1 時間程照射した。照射試料は、5 μm 厚の ^{nat}Zr 箔 17 枚に ^{nat}Ti の 5 μm 厚の箔 18 枚を交互に挟みこんで作成した。照射試料をスタック状に分割することで、それぞれの試料から、入射エネルギーの異なったヘリウムイオンにより生成された放射性核種の断面積が得られる。また、国際原子力機関 (IAEA) によって $^{nat}\text{Ti}(\alpha,x)^{51}\text{Cr}$ の反応断面積が精度良く評価されている [⑧] ので、各 ^{nat}Ti 箔に生成した ^{51}Cr 量を測定することで、試料に入射したヘリウムイオンの総量やエネルギーをモニターできる。照射中のヘリウムイオンの入射量は、照射試料に接続されたカレントインテグレータの電流値としても計測した。生成放射能のビーム強度変動による補正を実施できるように、カレントインテグレータの積算電荷出力をマルチチャンネルスケーラに接続し 1 分ごとのビーム電荷を記録した。照射終了後、高純度 Ge 検出器を用いて照射された Zr

試料から放出される γ 線を測定し、得られた γ 線スペクトルから $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ 断面積を求めた。各試料への入射エネルギーは SRIM2013 コード[⑨]で計算された阻止能を用いて導出した。

NIRS-930 での照射実験では、汎用照射室の C6 コースに HIMAC 照射実験と同様の真空チャンバーを設置し、ビームライン中心に natZr 箔（純度 99.2%）をスタック状に重ねた厚い照射試料を配置し、24.5, 46.4 MeV の ^2He ビームをそれぞれ 100, 300 nA で 1 時間程照射した。ヘリウムイオンの入射量は、照射試料に接続されたカレントインテグレータの積算電荷出力をマルチチャンネルスケータに入力し、1 分ごとの積算ビーム電荷量として計測した。照射終了後、高純度 Ge 検出器を用いて照射された Zr 試料から放出される γ 線のエネルギースペクトルを測定し、生成された放射性核種の放射能と SRIM2013 コードによって計算されたヘリウムイオンの入射エネルギーから $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ や副産物 RI の $\text{natZr}(\alpha, x)^{93\text{m}}\text{Mo}, ^{97}\text{Nb}$ 等の励起関数を導出した。

また、中性子・ γ 線生成量の測定では、2 インチ径×2 インチ長の NE213 有機液体シンチレータを $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の角度点に設置して、24.5 MeV のヘリウム照射に伴って厚い natZr 標的から発生する中性子や即発 γ 線のエネルギースペクトルをアンフォールディング法によって導出した。室内散乱等のバックグラウンドイベントを除去するため、各角度点において、検出器と標的の間に鉄 30 cm 厚のシャドーバーを設置した測定も行った。シャドーバー無の測定値からシャドーバー有の測定値を差し引くことで、標的から直接検出器に入射する中性子や γ 線の寄与を評価した。

4. 研究成果

(1) 放射性核種の励起関数

図 1 に本研究で得られた励起関数[⑩]の一部 ($^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$, $\text{natZr}(\alpha, x)^{93\text{m}}\text{Mo}, ^{97}\text{Nb}$ 反応) を他の実験値[⑥, ⑦, ⑪, ⑫]や計算値(TENDL-2017[⑬])とともにそれぞれ示す。また、TENDL-2017 データの中で主要な反応を塗りつぶして表示している。 $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ 反応に関して本実験結果は、15 MeV 付近で 232 ± 15 mb となり、2018 年に測定された最新の実験値[⑪]と良い一致を示した。一方で 2014 年以前に測定された実験値[⑥, ⑦, ⑫]については、反応によって一致するものと一致しないものがあり、ばらつきがみられた。 $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ 反応については、1995 年に測定された実験データ[⑥]はピーク位置等の励起関数形状は良く一致するものの絶対値が異なっており、2014 年に測定された実験データ[⑦]はピーク値が他の実験値より高エネルギー側にシフトしていることが分かった。TENDL-2017 は TALYS コードによって計算された理論計算値であるが、 natZr の主要核種である ^{90}Zr (天然存在比: 51.45%) に対しては実験値をよく再現するが、 ^{92}Zr (天然存在比: 17.15%), ^{94}Zr (天然存在比: 17.38%), ^{96}Zr (天然存在比: 2.8%) に関しては、実験値を過小評価していることが分かった。

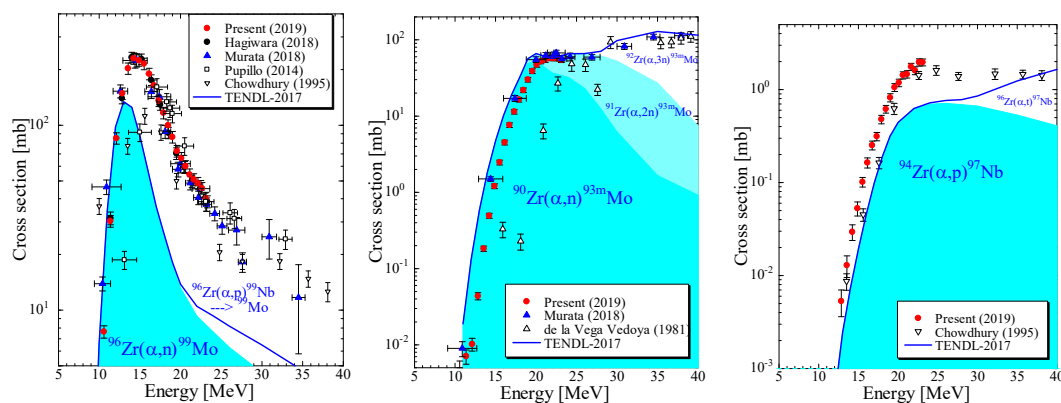


図 1 He 入射によって natZr 中に生成する放射性核種の励起関数、左図は $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ 反応、中央図は $\text{natZr}(\alpha, x)^{93\text{m}}\text{Mo}$ 反応、右図は $\text{natZr}(\alpha, x)^{97}\text{Nb}$ 反応、実線は TENDL-2017 の評価値を表し、その中で主要な反応を塗りつぶしている。

(2) 厚い標的による RI 生成率

図 2 に本研究で得られた $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ 反応の厚い標的による RI 生成率 (Thick target yield: TTY [$\text{Bq } \mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$])[⑩] を 2014 年に Pupillo らによって報告された実験データ[⑦]とともに示す。図 1 で示した励起関数と同様に本実験値は、2014 年の実験データと全体的な形状については一致しているが、絶対値については 50% ほど高い値となった。本研究で得られた ^{99}Mo の生成率は、20 MeV (5 MeV/u) の入射エネルギーで $1.5 \text{ MBq } \mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$ である。この生成率は、 ^{100}Mo を標的とする他の手法 ($^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$ 反応や $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反応) と比べて決して高い値ではないが、本手法では標的の ^{96}Zr が ^{99}Mo に比べて原子番号が 2 つ異なることから、 ^{99}Mo の比放射能を上げるために ^{100}Mo から ^{99}Mo を分離するような極めて難しい同位体分離を考える必要は

なく、比較的容易な化学分離で Zr から Mo を分離できる可能性がある。このことから、高い比放射能（化学分離で Mo の 90%濃縮を仮定とすると 1.7 TBq/g）の ^{99}Mo 試料が製造できると推定されるため、薬事法等で確立された $^{99}\text{Mo} / ^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレーターシステムを利用することが可能であると考えられる。更に、照射後 ^{96}Zr を化学分離で回収し標的として再利用することでできれば、技術的成立性の観点で有望な手法となり得ると考えられる。しかし、mA オーダーのヘリウムビームが安定供給できる加速器の実現と標的の除熱の課題が残っているが、 $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ 反応を用いた ^{99}Mo 製造サイクル技術は更に検討・推進する価値があると思われる。

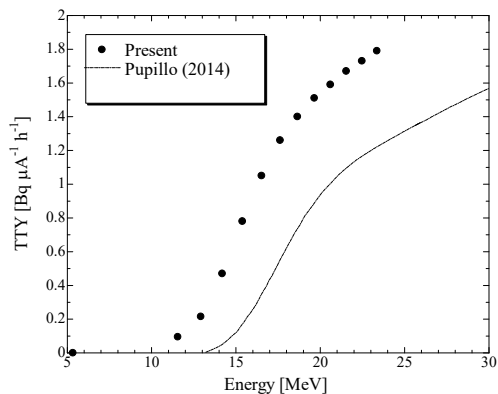


図2 $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ の厚い標的による RI 生成率 $[\text{Bq } \mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}]$

(3) 中性子・γ線生成量

図3,4に24.5 MeV He 入射によって厚い natZr から生成した中性子やγ線の角度ごとのエネルギースペクトルとそのエネルギー積分量を TENDL-2017 データとともにそれぞれ示す。本実験値と TENDL-2017 はよい一致を示した。TENDL-2017 における中性子・γ線生成の各同位体 (^{90}Zr : 51.45%, ^{91}Zr : 11.22%, ^{92}Zr : 17.15%, ^{94}Zr : 17.38%, ^{96}Zr : 2.8%) からの寄与を考えると、 natZr の主要核種である ^{90}Zr (天然存在比: 51.45%) からの寄与が支配的であり、励起関数の結果と同様に、TENDL-2017 は、 natZr の主要核種である ^{90}Zr (天然存在比: 51.45%) に対して実験値をよく再現することが分かった。

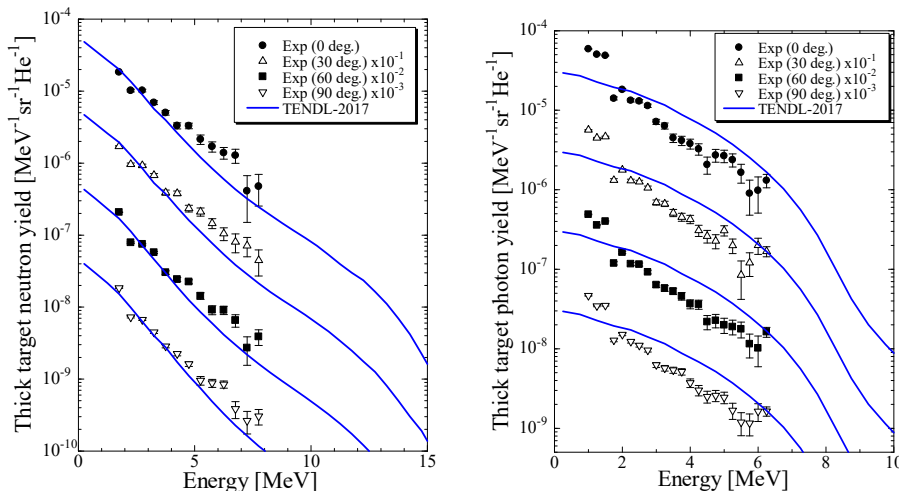


図3 24.5 MeV He 入射によって厚い natZr から生成した中性子やγ線の角度ごとのエネルギースペクトル、左図は中性子、右図はγ線

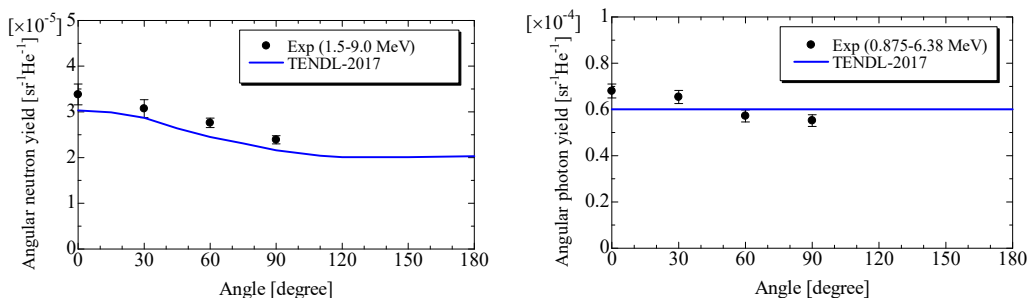


図4 24.5 MeV He 入射によって natZr から生成した中性子やγ線の角度ごとの生成量、左図は1.5~9 MeV の中性子の生成量、右図は0.875~6.38 MeV のγ線の生成量

5. まとめ

24.5 MeV と 46.4 MeV に加速したヘリウムビームを ^{nat}Zr 標的に照射し、それぞれ中性子・ γ 線生成量の測定と放射性核種生成断面積や放射性核種生成量の測定を行った。本実験結果は、15 MeV 付近で $232 \pm 15 \text{ mb}$ となり、2018 年に測定された最新の実験値と良い一致を示した。TENDL-2017 は、 ^{nat}Zr の主要核種である ^{90}Zr (天然存在比：51.45%) に対しては実験値をよく再現するが、 ^{92}Zr (天然存在比：17.15%)、 ^{94}Zr (天然存在比：17.38%)、 ^{96}Zr (天然存在比：2.8%) に関しては、実験値を過小評価する結果となった。

24.5 MeV ヘリウム入射に伴う ^{nat}Zr 標的からの中性子や γ 線の角度ごとのエネルギースペクトルとそのエネルギー積分量については、TENDL-2017 による評価値とよい一致を示した。各同位体からの寄与としては ^{nat}Zr の主要核種である ^{90}Zr (天然存在比：51.45%) からの寄与が支配的であり、励起関数の結果と同様に、TENDL-2017 は、 ^{nat}Zr の主要核種である ^{90}Zr (天然存在比：51.45%) に対して実験値をよく再現することが分かった。

^{99}Mo の生成率は、20 MeV (5 MeV/u) の入射エネルギーで $1.5 \text{ MBq } \mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$ と推定され、 ^{100}Mo を標的とする他の手法 ($^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$ 反応や $^{100}\text{Mo}(\gamma,n)^{99}\text{Mo}$ 反応) と比べて決して高い値ではないが、本手法では ^{96}Zr 標的が ^{99}Mo に比べて原子番号が 2 つ異なることから、 ^{100}Mo から ^{99}Mo を分離するような極めて難しい同位体分離ではなく、比較的容易な化学分離手法が応用できる可能性がある。このことから、高い比放射能 (Mo の化学分離で 90% 濃縮が達成できると仮定とすると $\sim 1.7 \text{ TBq/g}$) の ^{99}Mo 試料が製造できると推定されるため、薬事法等で確立された $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ジェネレーターシステムを利用することが可能であると考えられる。更に、照射後に ^{96}Zr 試料を化学分離で回収し再利用することができれば、技術的成立性の観点で有望な手法となり得ると考えられる。

<引用文献>

- ① R. V. Noorden, Radioisotopes: The Medical Testing Crisis, Nature, 504(7479), 2013, 202–204
- ② Y. Nagai, K. Hashimoto, Y. Hatukawa, H. Saeki, S. Motoishi, N. Sato, M. Kawabata, H. Harada, T. Kin, K. Tsukada, K. T. Sato, F. Minato, O. Iwamoto, N. Iwamoto, Y. Seki, K. Yokoyama, T. Shiina, A. Ohta, N. Takeuchi, Y. Kawachi, N. Sato, H. Yamabayashi, Y. Adachi, Y. Kikuchi, T. Mitsumoto, T. Igarashi, J Phys. Soc. Jpn., 82, 2013, 064201-1–064201-7
- ③ S. Sekimoto, K. Tatenuma, Y. Suzuki, A. Tsuguchi, A. Tanaka, T. Tadokoro, Y. Kani, Y. Morikawa, A. Yamamoto, T. Ohtsuki, J Radioanal. Nucl. Chem., 311 (2), 2017, 1361–1366.
- ④ F. Tárkányi, A. Hermanne, B. Király, S. Takács, F. Ditrói, J. Csikai, A. Fenyvesi, M. S. Uddin, M. Hagiwara, M. Baba, T. Ido, Y. N. Shubin and A. V. Ignatyuk, New cross-sections for production of ^{103}Pd : review of charged particle production routes, Appl. Rad. Iso., 67(9), 2009, 1574-1581
- ⑤ H. Yashima, Y. Uwamino, H. Sugita, T. Nakamura, S. Ito and A. Fukumura, Projectile dependence of radioactive spallation products induced in copper by high-energy heavy ions, Phys. Rev. C, 66(4), 2002, 044607
- ⑥ D. P. Chowdhury, Sujit Pal, S. K. Saha, S. Gangadharan, Determination of cross section of α -induced nuclear reaction on natural Cr and Zr by stacked foil activation for thin layer activation analysis, Nucl. Instrum. Meth. B, 103(3), 1995, 261-266
- ⑦ G. Pupillo, J. Esposito, M. Gambaccini, F. Haddad and N. Michel, Experimental cross section evaluation for innovative ^{99}Mo production via the (α,n) reaction on ^{96}Zr target, J Radioanal. Nucl. Chem., 302, 2014, 911–917
- ⑧ International Atomic Energy Agency, Charged particle cross-section database for medical radioisotope production: diagnostic radioisotopes and monitor reactions, IAEA-TECDOC-1211, 2011
- ⑨ JF. Ziegler, The stopping and range of ions in matter (SRIM), <http://www.srim.org>.
- ⑩ M. Hagiwara, H. Yashima, T. Sanami, S. Yonai, Measurement of the excitation function of $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$ for an alternative production source of medical radioisotopes, Radioanal. Nucl. Chem. 318(1), 2018, 569-573
- ⑪ T. Murata, M. Aikawa, M. Saito, N. Ukon, Y. Komori, H. Haba, S. Takács, Production cross sections of Mo, Nb and Zr radioisotopes from α -induced reaction on ^{nat}Zr , Appl. Rad. Iso., 144, 2019, 47-53
- ⑫ M. De la Vega Vedoya, C. Wasilevsky, S.J. Nassiff, Alpha particle induced reactions on zirconium, J Radioanal. Chem., 67, 1981, 165-181
- ⑬ A. J. Koning and D. Rochman, Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System, Nuclear Data Sheets 113, 2012, 2841

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 M. Hagiwara, H. Yashima, T. Sanami and S. Yonai	4. 巻 318
2. 論文標題 Measurement of the excitation function of $^{96}\text{Zr}(\text{ ,n})^{99}\text{Mo}$ for an alternative production source of medical radioisotopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 569-573
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10967-018-6118-4	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 M. Hagiwara, H. Yashima, T. Sanami, S. Yonai
2. 発表標題 MEASUREMENTS OF ECITATION FUNCTION OF $^{96}\text{Zr}(\text{ ,n})^{99}\text{Mo}$ FOR ALTENATIVE PRODUCTION SOURCE OF MEDICAL RADIOISOTOPES
3. 学会等名 the 11th. International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC XI) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 H. Yashima, M. Hagiwara, T. Sanami, S. Yonai
2. 発表標題 MEASUREMENTS OF THE ALPHA-INDUCED ACTIVATION CROSS SECTIONS FOR CU
3. 学会等名 the 11th. International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC XI) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 萩原雅之, 八島浩, 佐波俊哉, 米内俊祐
2. 発表標題 Heビームを用いた医療用Mo-99/Tc-99mの製造技術の基礎研究 (2) ジルコニウム標的に対するヘリウム照射によるRI生成と励起関数の測定
3. 学会等名 日本原子力学会 2018秋の大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 M. Hagiwara, H. Yashima, T. Sanami, S. Yonai
2. 発表標題 Measurement of the excitation functions on zirconium induced by alpha particles up to 46 MeV
3. 学会等名 the 6th. International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics (CNR*18) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 H. Yashima, M. Hagiwara, T. Sanami, S. Yonai
2. 発表標題 Excitation function measurements of alpha-induced reaction on natural copper and titanium up to 46 MeV
3. 学会等名 the 6th. International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics (CNR*18) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 萩原雅之, 八島浩, 佐波俊哉, 米内俊祐
2. 発表標題 Heビームを用いた医療用Mo-99/Tc-99mの製造技術の基礎研究 (1) $96Zr(\alpha, n)99Mo$ 反応の励起関数測定
3. 学会等名 日本原子力学会 2018春の年会
4. 発表年 2017年～2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	八島 浩 (Yashima Hiroshi) (40378972)	京都大学・複合原子力科学研究所・助教 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力 者	米内 俊祐 (Yonai Shunsuke)		