

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K22596

研究課題名（和文）アルファ線核医学治療を視野に入れたアクチニウム-225線源製造とその応用の試み

研究課題名（英文）Attempt of actinium-225 source production and the application for alpha-ray medical treatment

研究代表者

大槻 勤（Ohtsuki, Tsutomu）

京都大学・複合原子力科学研究所・特任教授

研究者番号：50233193

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではアルファ線源内療法に用いるAc-225をRa-226(γ, n)Ra-225反応を用いて製造し、Ra-225の娘核種として容易に製造する手法の開発を試みた。結果は国際会議Nuclear Medicine (SNMICON:年度ごと)などにおいて発表した。また、これらの核種をC60、C70やC82フラーレンへ内包させたナノコンテナなどの応用も含めた研究など、関連する研究の知見を得る準備や計画を進めた。さらに、関連として核データの実験では、Be-7などの原子番号の小さな放射性同位元素の半減期や巨大共鳴に伴う核分裂の断面性を取得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

前立腺等のがんは年々増加しているのが現状であり、それに伴い、アルファ線放出核種(RI)による核医学治療が重要度を増してきている。しかし、日本では前立腺がんや骨がんの放射性薬剤としての認可を受けたばかりであり、この分野の早急な進展が望まれている。本研究では、ウラン系列の放射性廃棄物として多量に存在するラジウム-226 (Ra-226) を、高エネルギーガンマ線を用いて前立腺がん等の核医学治療に有効なAc-225の製造を試み、RIナノコンテナなどへの応用を探るといった学術的意義が大きい。また、関係する研究としてBe-7の半減期やU-238などの核データの新たな知見を得た。

研究成果の概要（英文）：An Ac-225 has nuclear properties well suited for use in targeted alpha therapy and clinical trials have demonstrated the applicability of radiopharmaceuticals containing Ac-225 to treat various cancers. In this work, thus accelerator-based Ac-225 production systems have been developed. We have carried out an experimental study on the production of Ra-226(γ, n) Ra-225 using an electron linear accelerator and here Ra-225 decays to Ac-225 for the objective targeted alpha therapy(TAT).

We pushed forward preparations to get associated knowledge including the TAT for the application such as nano-containers of such alpha emitted nuclide (Ac-225) in C60, C70 and C82 fullerene in body. Furthermore, in nuclear data as the relation in the present work, we acquired the characteristics of half-life of small atomic number radioisotopes such as Be-7. Nuclear fission properties accompanied with the huge resonance in such as Th-232 and/or U-238 etc.

研究分野：放射化学

キーワード：医用放射性同位元素 線源内療法 加速器 研究用原子炉 分析技術 半減期 核分裂

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

前立腺がんは年々増加し、2011年度の国内における罹患者数は約8万人、2016年の前立腺がんでの死亡者数は1万人以上となっている。それに伴い、アルファ線放出核種(RI)による核医学治療が重要度を増してきている。しかし、日本では前立腺がんや骨がんの放射性薬剤としてゾーヒゴ(Xofigo:Ra-223の塩化物)の認可を受けたばかりであり、この分野の進展が望まれている。

近年、アクチニウム-225(Ac-225)を用いた核医学治療が欧米で注目を浴びていて、特にPSMA(prostate-specific membrane antigen)にAc-225付加させたAc-225-PSMAを用いた治療が、前立腺がん非常に効果があることが確認されており、Ac-225及びその壊変核種のBi-213を用いたTAT(Targeted α -ray Therapy)の研究開発が、世界中で注目されている[1]。Ac-225は、現状、海外3カ所で、Th-229からの崩壊で生成されるRa-225の崩壊で製造されているが、これが、国内で容易に製造供給できれば、TATに対して、日本が主導的立場を取れる可能性がある。また、Ac-225ばかりでなく、放射性核種のMo, Cu, Ga, Ge, Au等を用いて電子線や荷電粒子などの加速器による医療用放射性同位体の製造はTATばかりでなく、 α 線を用いた同様の核医学検査や治療も全世界で注目を浴びていて、これらの開発と実践的利用にも期待が持たれているところである。特にMo-99に関しては、国内の研究用原子炉ではMo-99供給を目的とした稼働はされていない。この原因には高濃度濃縮したU-235を使用できないためである。これは国内に留まらず、全世界に共通する課題となっている。現状では、カナダのNRUに留まらず老朽化した原子炉はMo危機をさらにおおっている。したがって現在の原子炉によるMo-99製造法に代わる方法を開発することは意義が大きい。

また、これらの放射性同位体を含んだナノコンテナはDrug Delivery System(DDS)の核医学利用に大きな期待ができ、世界中で開発に乗り出しているのが現状である。さらに、これらの基礎的研究として、半減期核分裂などの核データの整備も待たれ、IAEAによる提言がなされているところでもある。

国内で検討されている加速器を用いたRI製造は中性子や陽子を用いたものが多いが、我々は医療用RI製造法として、より低コストのコンパクトな電子線加速器を使用したMo-99/Tc-99mやその他のRI製造を提案してきた。さらにこのプラットホームに核医学治療核種として期待されるAc-225やその他、多くのRIの製造が載ればその波及効果は絶大である。特にRa-226はウラン系列核種であり、放射性廃棄物として大量に存在している。この資源を核医学治療に有効に利用できるのであれば、挑戦的研究としての意義も大きいと考えた。本研究ではAc-225の製造と放射性DDSの可能性も検討する。後者についても挑戦的と考えた。本研究の進展で、がん細胞・がん組織に高い選択性を持ってRIを含んだ物質(ナノコンテナ)を届けることができるなら、その治療効果は大きくなる。斬新な着想および方法論では、中空物質であるフラーレンやナノチューブをナノコンテナとして利用するアイデアを提案する。本研究ではまず、高効率でのAc-225の製造を目指す。次にナノチューブは多くのRIを内包することができると期待でき(ダンプカー的のようなもの)、そのようなRIナノコンテナDDS開発には挑戦的研究として大きな価値があると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、ウラン系列の放射性廃棄物として多量に存在するラジウム(Ra-226)を、電子線加速器による高エネルギーガンマ線を用いて前立腺がん等の核医学治療に有効なAc-225の製造を試み、RIナノコンテナなどへの応用を探る[Ra-226(γ ,n)Ra-225壊変Ac-225]。ここでは、ウラン系列の放射性廃棄物として多量に存在するラジウム-226(Ra-226)を、光核反応(γ ,n)を用いて、前立腺がん等の核医学治療に有効なアクチニウム(Ac-225)の製造の基礎検討を行うことを目的とした。さらに将来的に有用とされる様々な放射性同位体を用いたDDS(Drug Delivery System)を目指した放射性核種を伴ったRIナノコンテナ(C60,C70,ナノチューブ)などへの応用を探ることを目指した。放射性核種のMo, Cu, Ga, Ge, Au等を用いて電子線や荷電粒子などの加速器による医療用放射性同位体の生成断面積を実験及びシミュレーション両面から検討を行う。それに伴う核データを整備にも着目した。小型のハイパワー電子線加速器の開発は[Ra-226(γ ,n)Ra-225壊変Ac-225]反応による治療用Ac-225の開発に留まらず、Tc-99mやCu-67など、その他多くの有用な核医学利用核種製造の裾野を広げることとなり、これらのことも最終目的となる。

3. 研究の方法

まず、光核反応(γ ,n)と壊変を用いて、Ac-225の製造・開発を行った。現在、放射性医薬品に用いるMo-99/Tc-99mの国内生産において種々の方法が議論されてきた。我々もその有力な手法として高出力の電子線加速器を提案し、電子線からの制動放射線による(γ ,n)反応を用いたMo-99の生成

量の見積もりと Tc-99m の迅速分離法の開発を行ってきた[2]。この手法を用いて、[Ra-226(,n)Ra-225 壊変 Ac-225]を検討した。具体的には以下のようなプロセスに分けて検討した。

- Ra-226/Ac-225の分離技術の検討と開発(イオン交換等)

塩化ラジウム(Ra-226)線源をパックし照射ターゲットとし、電子線のエネルギー30MeV程度で照射を行った。Eichrom Technologies 社等で開発されている resin を用いて Ra-226 と Ac-225 の分離試験を行う。

特にアクチノイド系で利用されている DGA resin を用いた硝酸系イオン交換が適応できるという文献もあり、この手法を確認し、さらに数度の分離を繰り返し、分離技術の習得を目指した。また、制動放射線による Ra-226 の生成断面積の検討、照射エネルギーの最適化を行った。上記のような分離技術が習得すると同時に、電子線の照射エネルギーと電流に対する Ac-225 の収率を検討した。電子線のエネルギーを 20MeV から 5MeV 程度ごとに変えて収率試験を行う必要がある。断面積シミュレーション計算用のタリスコード(Talys Code)を用いて収率の理論計算を行い、実験的に得られた収率と比較検討を行う。Ra-226 に対する(,n)反応の実験結果は存在しないので、核データのにも重要な情報となり、結果は纏めて投稿する。

- 放射性DDS(Drag Delivery System)等への応用の基礎検討

核医学治療用 Ac-225 の生産ばかりでなく、放射体の検討:ポロニウム(Po-210:半減期 138 日), Po-206(半減期 8.8 日), Po-207(5.8 時間), アスタチン(At-211:半減期 7.2 時間), A-207t(半減期 1.8 時間) 等の可能性も探った。これらは RI ナノコンテナの DDS への応用の基礎検討となる。線放出核種はその反跳により娘核種は大きなエネルギーを持つ。これまで、フラーレンやナノチューブを Pb-212

線放出核種の濃縮溶液にかすだけで、内包化が起こることが報告されている[3]。また、我々の研究でも同様の研究を行い医療用放射性核種 Mo, Tc-99m@C60 の生成の可能性を実験・理論の両面から研究を行ってきた[4,5]。同様の手法を用いて Ac-225 内包 C60 やナノチューブなどの収率を求め、RI ナノコンテナを用いた DDS を探る基礎検討を行う[6]。

また、Ac-225 ばかりでなく、放射性核種の Mo, Cu, Ga, Ge や Au 等を用いて加速器による医療用放射性同位体の製造開発と実践的利用を検討した。本研究では、これらの前段研究として電子線加速器を用いて放射性の Mo-99 や Cu-67, Sc-47, Cu-67, Ga-68, Rh-105, Lu-177, Re-188 他に及び核種の製造する実践的研究も行った。これらの核種は有効な治療用核種として考えられている[7,8]。電子線加速器を用いた新しい製造手法が開発されれば国内はもとより世界でもより安価に各医療施設に提供できる可能性がある。その他、電子線による医療用放射性同位体の製造ばかりでなく原子炉まで拡張して製造を試みた。

- さらに、これらに伴う核データ(半減期や核変換)の整備にも着目した。

4. 研究成果

- Ra-226/Ac-225 の分離技術の検討と開発(ion exchange method)

本研究では以下のようなプロセスを考えた。電子線により発生する制動放射線を Ra-226 に照射して Ra-225(半減期 14.8 日)が製造される。その娘核種である Ac-225(半減期 10.0 日)は半減期が程よく短いことが重要な核的特徴である。体内で放射線を出し続けることなく、患者に投与してからの物理学的半減期と生物学的半減期を考慮すると、効率的な放射性核種と言える。生成された Ac-225 は、永続平衡状態となり有効な子孫核種を持つ。Ac-225 を放射性医薬品の原料として適用するためには、Ra-225/226 からの Ac-225 の分離が必要となる。世界の現状では Th-229 の崩壊で生成する Ra-225 とその子孫核種である Ac-225 から、Ac-225 のみを分離している[1]。東北大学電子ライナックを用いた光核反応 Ra-226(,n)Ra-225 で Ra-225 の製造を行い、放射平衡になるのを待って ion exchange resin を用いて Ac-225 の分離を検討した(京大ライナックを用いた実験を行う予定であったが、加速器のメンテナンスのため東北大ライナックを用いた)。昨今 Eu の分離や Sr-Y の分離などに DGA-resin などが検討されてきた。ここでは UTEVA-resin 及び RE-resin を用いた検討を行った。UTEVA-resin は、ジアミルアミルホスホン酸(DAAP:DiAmyl Amyl Phosphonic acid)を樹脂に固着させたものである[9]。4M の硝酸(HNO₃)溶液における Th の分配係数が高いが、Ra-225 及び Ac-225 に対する分配係数が小さいことから、Th-229 は UTEVA-resin に保持され、Ra-225 及び Ac-225 が保持されないことで分離できる。但し、もともとの Th-229 が多量であることから、保持されなかった Th-229 が後段に抽出される。RE-resin は、不活性のメタクリル酸高分子支持体にコーティングされたリン酸トリブチル中の n-オクチル(フェニル)-N,N'-ジイソブチルカルバモイルメチルホスフィンオキサイド(CMPO:n-octyl(phenyl)-N,N'-diisobutyl Carbamoyl-Methyl Phosphine Oxide)で構成された抽出用クロマトグラフィ材料であり、希土類元素の群

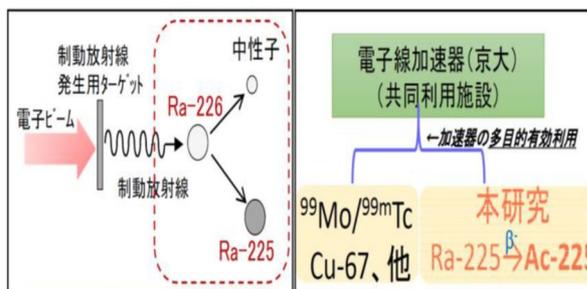


図1. 電子線加速器を用いた核医学 RI 製造の概要。

分離に使用されている。4M の硝酸に溶けた Th-229, Ra-225, Ra-226 及び Ac-225 を RE-resin に通すことで, Th-229, Ra-225 及び Ra-226 は, CMPO に保持されず抽出されるが, Ac-225 は保持される。CMPO に保持された Ac-225 は, 低濃度(0.05M)の硝酸によって抽出される。やはり, もととの Th-229 の量が多いことから, Ac-225 に加えて, Th-229 も抽出される。これらの手順により, Ra-225 及び Ra-226 と, Ac-225 を分離することができる。UTEVA-resin における Th-229 の分配係数は, HNO₃ のモル濃度が大きい方が大きいことから, 6M の HNO₃ を用いて, さらの UTEVA-resin を三段に重ねて用いることで, Th-229 を十分吸着し, Ac-225 を分離できることが分かった。本手法では, Th-229 が混在しないことから, UTEVA-resin を使う必要は無く, RE-resin に, 4M の硝酸に溶けた Ra-225, Ra-226 及び Ac-225 を RE-resin に通すことで, Ra-225 及び Ra-226 は, CMPO に保持されず抽出されるが, 4M の硝酸に対する Ac-225 の分配係数が高いことから Ac-225 は保持され, 保持された Ac-225 は, Ac-225 の分配係数が低い低濃度(0.05M)の硝酸によって抽出できると考えられる。これらの手順により, Ra-225 及び Ra-226 と, Ac-225 を分離することができた。但し, もととの Ra-226 の量が多いことから, 低濃度(0.05M)の硝酸による抽出時に Ra-226 が抽出される場合は, RE-resin を多段化することで対応する必要があった。これらの成果は第 34 回 欧州核医学会:Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine(EANM2021).等で発表した。我々は, 小型で製造効率化が高いと期待される電子線形加速器を用いることとし, Ra-226 の(α, n)反応により生成される Ra-225 の崩壊により, Ac-225 を製造することを検討できた。最終的に, 基礎試験の約 1,000 倍(50MBq)の Ra-226 原料を用いたスケールアップ試験を実施でき, 試料作製及び照射試験の結果を発表した。本研究ではさらに大量の Ra-226 を扱うので[Ra-226(α, n)Ra-225 壊変 Ac-225], さらに resin の放射線分解や熱分解など, まだ多くの課題を克服する必要がある。

➤ 放射性DDS(Drag Delivery System)等への応用の基礎検討:

ポロニウム(Po-210:半減期138日), Po-206(半減期8.8 日), Po-207(5.8 時間), アスタチン(At-211:半減期7.2時間), A-207t(半減期1.8 時間)等の可能性を探った。この中で 線と同時にポジトロンを放出する核種を選択すると(たとえば207Po(5.8 時間), At-207(半減期1.8 時間), ポジトロン断層装置(PET)により生体内の放射性同位元素をトレースでき, さらに 線により癌等の部位を体内から照射できる利点がある。本研究ではこれらの放射性同位元素のC60 内包収率を測定した。大野らの開発した第一原理計算により, C60 を含んだ機能性素材の設計に入り, 最適構造を探った。どのような分子が有効か予測する計算を行った。内包フラーレンの分離生成:放射性同位元素C60 内包フラーレンをo-ジクロロベンゼン等の溶剤に溶かし, 高速液体クロマトグラフ装置で分離した後, 減圧蒸留により溶剤を取り除き乾固する。効率の良い水溶液化の検討を行った。たとえば硝酸系水溶液に乾固体を溶解しフラーレンへ変換し, ろ過後, 放射能測定により収率を求め, 得られた水溶液と, 簡単な生体試薬などを混合し, 触媒や高圧ミル, 線照射等による化学反応の検討も行った。結果としてポロニウム等の大きな原子でもC60に内包可能であることが分かった。本研究ではさらにMo-99/Tc-99mやAu@C60についても生成可能であることを実験やシミュレーションを用いて示すことができた[10,11]。近年, Ac-225を含んだC60等の報告もあり重要性を増している[6]。定性的な分離により十分な収量が得られていないので, 今後さらなる検討が必要である。

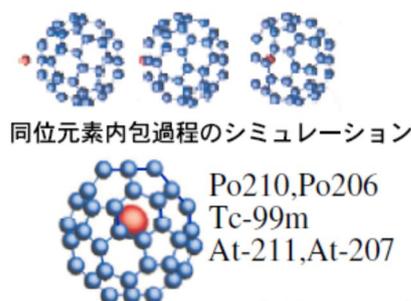


図2. 加速器を用いた核医学RI 製造と放射性核種のナノコンテナ生成の概要。

電子線形加速器で発生させた制動放射線を利用して, 医療用放射性核種である Mo-99 や Cu-67, Re-188, Ga-68, Rh-105, Lu-177, Re-188 の製造が可能であることを確認し, 国際会議や論文として報告してきた[12]。特に Mo-99 に関しては, 国内の研究用原子炉では Mo-99 供給を目的とした稼働はされていない。娘核種である核医学検査に欠かせない Mo-99 の製造に関しては高濃縮同位体 Mo-100 を用いて電子線加速器からの制動放射線を照射することにより効率的に Tc-99m を高収率で取り出せるか評価を行った。他の核種についても電子の加速エネルギーを変えて各核種の生成量を見積もり, 将来の国内需要を満たす量の製造が可能かどうかを評価した。特に Cu-67 については, 本手法により, 他の大型の加速器を用いる方法と比較しても充分な量の製造が期待されることが分かった。これらは建設コストが安価及び小型の電子線形加速器で発生させた制動放射線を用いて効率的な医療用 RI 製造法の開発のための基礎検討であり, これまで国内では検討されていない斬新な方法を提案するものである。小型の電子線形加速器を使用した医療用 RI の製造システムが実現できれば, 各地方の拠点医療施設ごとにそれらを配備し, 必要に応じた医療用 RI の供給が可能となる。光核反応と 壊変を用いた有用 RI の製造・開発の根幹をなすものである。

➤ 核データ(半減期や核変換)の整備

有用は放射性同位体, 特に核医学利用核種の核データ精度の向上は IAEA 等から求められている

事実である。これらの研究として、半減期の精密測定はその重要なものとなっている。精密測定の装置や測定法解析技術は重要な要素となっている。本研究では軌道電子捕獲崩壊[EC崩壊]核種の Be-7 を取り上げ、その精密測定を試みた。EC崩壊核種 Be-7 の半減期変化では、核位置に存在する軌道電子を核内核子に取り込んで崩壊する現象で、その確率は核位置での電子密度に比例する。本研究の目的は加速器による量子ビーム(荷電粒子や電子)を用いて Be-7 を製造し、温度・化学形・結晶形等の因子を変えて、半減期を大きく変化させることである。

本研究では Be-7@C70 の温度変化(室温と 5K)で半減期変化をみる実験をおこなった。その結果、室温のベリリウム金属中 Be-7 と 5K に冷却された C70 内の Be-7 の半減期を比較すると 1.6%以上も短くなることを見出した。これまでも C60 を特殊な環境下での Be-7 の半減期測定を行い[13]、大きな半減期変化を得た実験結果と比較検討した。

光核分裂および光中性子反応を U-238 および Th-232 核を利用して行われた。ここでは New-SUBARU シンクロトロン放射光施設のレーザー・コンプトン散乱からの γ -光線源[14]で巨大双極子共鳴(GDR)でエネルギーの高効率反応領域を利用してこと実行された。実験的な (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$, (γ, f) の横断面が報告された。ロスアラモス・モデルで得られる迅速な分裂放出計算でコード(統計モデル計算)と今回の実験の結果が比較された。

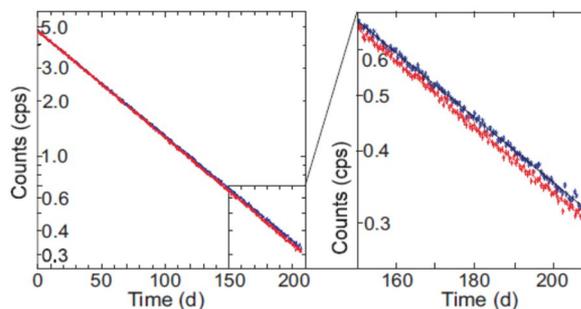


図3. 軌道電子捕獲崩壊[EC崩壊]核種の Be-7 半減期変化。赤は Be-7@C70, 青は Be-7 in Be 金属。

参考文献

- [1] C. Kratochwil et al., J. of Nuclear Medicine **57**, 1941-1944 (2016).
"Ac-225-PSMA-617-Targeted α -Radiation Prostate Cancer Therapy"
- [2] M. Inagaki et al., JRNC 324, 681-686 (2020).
"Production of $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ by photonuclear reaction using a natMoO₃ target"
- [3] M. D. Diener, J. Am. Chem. Soc. **129**, 16, 5131-5138 (2007).
"Pb-212@C60 and Its Water-Soluble Derivatives: Synthesis, Stability, and Suitability for Radioimmunotherapy"
- [4] T. Ohtsuki et al., JACS, **117**, 12869 (1995).
"C-11 labeled C70, C70"
- [5] T. Ohtsuki, K. Ohno, Phys. Rev. B **72**, 153411 (2005).
"Formation of Po@C60"
- [6] J. G. Mwakisege et al., ACS Omega, **42**, 27016-27025 (2020).
"Synthesis and Stability of Actinium-225 Endohedral Fullerenes, Ac-225@C60"
- [7] L. Mou et al., Molecules **27**, 1501 (2022).
"Cu-67 Production Capabilities: A Mini Review"
- [8] A. Dash et al, Nucl Med Mol Imaging. **49**, 85-107 (2015).
"Production of Lu-177 for Targeted Radionuclide Therapy: Available Option"
- [9] E.P. Horwitz et al., Analytica Chimica Acta **266**, pp. 25-37(1992).
"Separation and preconcentration of uranium from acidic media by extraction chromatography"
- [10] T. Ohtsuki, 11th Conference Asian Consortium of Computational Materials (ACCMS), (2016).
"Radiochemical study of endohedral fullerene and MD simulation"
- [11] T. Ohtsuki et al., RSC Adv., **11**, 19666-19672 (2021).
"Creation of Mo/Tc and Au@C60"
- [12] M. Inagaki et al., JRNC 322, 1703-1709 (2019).
"Production of Sc-47, Cu-67, Ga-68, Rh-105, Lu-177, and Re-188 using electron linear accelerator"
- [13] T. Ohtsuki et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 112501 (2004).
"Enhanced electron-capture decay rate of Be-7 encapsulated in C60 cages"
- [14] A. Ando et al., J. Synchrotron Radiation **5**, 342-344 (1998).
"Isochronous Storage Ring of the New-SUBARU Project"

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Soliman Mohamed, Abdou Fatma S., Ho Van-Doanh, Sekimoto Shun, Takamiya Koichi, Mohamed Nader M. A., Ohtsuki Tsutomu	4. 巻 331
2. 論文標題 Measurement of neutron flux parameters for implementation of k0-INAA at Kyoto University Research Reactor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 3949-3956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-022-08391-1	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 該当する
1. 著者名 稲垣誠, 関本俊, 高宮幸一, 沖雄一, 大槻勤	4. 巻 2022
2. 論文標題 福島原発事故に由来する不溶性放射性微粒子のレーザー加熱による模擬生成実験	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd Workshop on Environmental Radioactivity	6. 最初と最後の頁 159-164
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ohtsuki Tsutomu, Manjanath Aaditya, Ohno Kaoru, Inagaki Makoto, Sekimoto Shun, Kawazoe Yoshiyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Creation of Mo/Tc@C60 and Au@C60 and molecular-dynamics simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 19666-19672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0ra10196f	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 Kasamatsu Yoshitaka, Nagase Masahiro, Ninomiya Hidemi, Watanabe Eisuke, Shigekawa Yudai, Kondo Narumi, Takamiya Koichi, Ohtsuki Tsutomu, Shiohara Naoya, Shinohara Atsushi	4. 巻 179
2. 論文標題 Coprecipitation with samarium hydroxide using multitracer produced through neutron-induced fission of 235U toward chemical study of heavy elements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Radiation and Isotopes	6. 最初と最後の頁 110006-110006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apradiso.2021.110006	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 Y. Kasamatsu, K. Toyomura, H. Haba, T. Yokokita, A. Kino, Y. Yasuda, Y. Komori, J. Kanaya, M.H. Huang, M. Murakami, H. Kikunaga, E. Watanabe, T. Yoshimura, K. Morita, T. Mitsugashira, K. Takamiya, T. Ohtsuki, A. Shinohara	4. 巻 13
2. 論文標題 Co-precipitation behaviour of single atoms of rutherfordium in basic solutions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 NATURE CHEMISTRY	6. 最初と最後の頁 226-230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41557-020-00634-6	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 M. Sliman, N.M.A. Mohamed, K. Takamiya, S. Sekimoto, M. Inagaki, Y. Oki, T. Ohtsuki	4. 巻 324
2. 論文標題 Estimation of 47Sc and 177Lu production rates from their natural targets in Kyoto University Research Reactor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 1099-1107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-020-07156-y	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 M. Inagaki, S. Sekimoto, W. Tanaka, T. Tadokoro, Y. Ueno, Y. Kani, T. Ohtsuki	4. 巻 324
2. 論文標題 Production of 99Mo/99mTc by photonuclear reaction using a natMo03 target	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 681-686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-020-07086-9	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 J. Jang, H. Kikunaga, S. Sekimoto, M. Inagaki, T. Kawakami, T. Ohtsuki, Sh. Kashiwagi, K. Takahashi, K. Tsukada, K. Tatenuma, M. Uesaka	4. 巻 987
2. 論文標題 Design and testing of a W-Mo03 target system for electron linac production of 99Mo/99mTc	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A	6. 最初と最後の頁 164815
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164815	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 N. Kinoshita, T. Noto, K. Kosako, M. Aasada, K. Torii, A. Tada, K. Urabe, T. Ohtsuki, S. Sekimoto	4. 巻 131
2. 論文標題 Uncertainty derived from elemental analysis and its effect on the separation of radioactive waste into low-level radioactive waste and waste for clearance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 103597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnucene.2020.103597	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 M. Inagaki, S. Sekimoto, W. Tanaka, T. Tadokoro, Y. Ueno, Y. Kani, T. Ohtsuki	4. 巻 322
2. 論文標題 Production of 47Sc, 67Cu, 68Ga, 105Rh, 177Lu, and 188Re using electron linear accelerator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 1703-1709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-019-06904-z	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 M. Inagaki, S. Sekimoto, W. Tanaka, T. Tadokoro, Y. Ueno, Y. Kani, T. Ohtsuki	4. 巻 324
2. 論文標題 Production of 99Mo/99mTc by photonuclear reaction using a nat-MoO ₃ target	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 681-686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-020-07086-9	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 M. Sliman, N.M.A. Mohamed, K. Takamiya, S. Sekimoto, M. Inagaki, Y. Oki, T. Ohtsuki	4. 巻 324
2. 論文標題 Estimation of 47Sc and 177Lu production rates from their natural targets in Kyoto University Research Reactor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 1099-1107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-020-07156-y	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15件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 前田瑞穂, 田所孝広, 上野雄一郎, 可児祐子, 西田賢人, 渡辺敬仁, 佐々木貴裕, 菊永英寿, 柏木茂, 白崎謙次, 吉本光喜, 大貫和信, 藤井博史, 大槻勤, 関本俊, 稲垣誠, 福谷哲, 芝原雄司
2. 発表標題 電子線形加速器を利用した ^{225}Ac スケールアップ製造及び薬剤標識実験
3. 学会等名 日本原子力学会 2022年秋の大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Maeda, T. Tadokoro, Y. Ueno, K. Nishida, Y. Kani, T. Sasaki, T. Watanabe, H. Kikunaga, S. Kashiwagi, K. Shirasaki, S. Sekimoto, T. Ohtsuki, M. Inagaki, S. Fukutani, Y. Shibahara, M. Yoshimoto, K. Ohnuki, H. Fujii
2. 発表標題 Production experiments for ^{225}Ac using an electron linear accelerator and radiolabeling tests using the produced alpha emitter
3. 学会等名 Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine, 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲垣誠、秋山和彦、関本俊、大槻勤
2. 発表標題 レーザーによる放射性核種内包フラレーンの生成に向けた基礎実験
3. 学会等名 日本放射化学会第66回討論会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲垣誠、関本俊、高宮幸一、沖雄一、大槻勤
2. 発表標題 福島原発事故に由来する不溶性微粒子の模擬生成
3. 学会等名 日本放射化学会第66回討論会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tadokoro, M. Maeda, T. Koiwai, K. Nishida, Y. Ueno, Y. Kani, T. Sasaki, T. Watanabe, H. Kikunaga, S. Kashiwagi, S. Sekimoto, M. Inagaki, T. Ohtsuki
2. 発表標題 Demonstration of Ac-225 production on the order of MBq using an electron linear accelerator
3. 学会等名 TAT12 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro Tadokoro, Yuichiro Ueno, Yuko Kani, Makiko Shimada, Takahiro Sasaki, Takahiro Watanabe, Hidetoshi Kikunaga, Shigeru Kashiwagi, Makoto Inagaki, Shun Sekimoto, Tsutomu Ohtsuki
2. 発表標題 Experimental study on the production of Ac-225 using an electron linear accelerator
3. 学会等名 Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Maeda, T. Tadokoro, Y. Ueno, K. Nishida, Y. Kani, M. Itoh, T. Sasaki, T. Watanabe, H. Kikunaga, S. Kashiwagi, K. Shirasaki, S. Sekimoto, T. Ohtsuki, M. Inagaki
2. 発表標題 Large-scale production experiment for Ac-225 using an electron linear accelerator
3. 学会等名 Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田所 孝広、前田 瑞穂、西田 賢人、上野 雄一郎、可児 祐子、渡辺 敬仁、伊藤 雅春、佐々木 貴裕、菊永 英寿、柏木 茂、白崎 謙次、大槻 勤、関本 俊、稲垣 誠
2. 発表標題 電子線形加速器を利用したAc-225製造スケールアップ試験 (1)Ra-226 試料作製及び制動放射線照射試験
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田 瑞穂、田所 孝広、西田 賢人、上野 雄一郎、可児 祐子、渡辺 敬仁、伊藤 雅春、佐々木 貴裕、菊永 英寿、柏木 茂、白崎 謙次、大槻 勤、関本 俊、稲垣 誠
2. 発表標題 電子線形加速器を利用したAc-225製造スケールアップ試験 (2)Ac-225の分離精製及び定量評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tadokoro, Y. Ueno, Y. Kani, M. Shimada, T. Sasaki, T. Watanabe, H. Kikunaga, S. Kashiwagi, S. Sekimoto, T. Ohtsuki
2. 発表標題 Production of Ac-225 for targeted alpha therapy using an electron linear accelerator
3. 学会等名 EANM2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田所孝広, 上野雄一郎, 可児祐子, 渡辺敬仁, 佐々木貴裕, 島田真生子, 菊永英寿, 柏木茂, 大槻勤, 関本俊
2. 発表標題 電子線形加速器を利用したAc-225の製造基礎試験
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田所孝広, 西田賢人, 上野雄一郎, 可児祐子, 渡辺敬仁, 佐々木貴裕, 島田真生子, 菊永英寿, 柏木茂, 大槻勤, 関本俊, 稲垣誠
2. 発表標題 電子線形加速器を利用したAc-225製造量の電子線エネルギー依存性
3. 学会等名 日本原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsutomu Ohtsuki
2. 発表標題 Project on Research Reactor Utilization(RRU)
3. 学会等名 Forum for Nuclear Cooperation in Asia,kazakhstan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Inagaki, S. Sekimoto T. Tadokoro, Y. Kani, Y. Ueno, T. Ohtsuki
2. 発表標題 Medical Radioisotopes Production using an Electron Linear Accelerator
3. 学会等名 Forum for Nuclear Cooperation in Asia,kazakhstan
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田野城 一希、加藤 千図、福谷 哲、関本 俊、大槻 勤、大野 剛、藤井 俊行
2. 発表標題 クラウンエーテル樹脂を用いたカラムクロマトグラフ法によるモリブデン同位体濃縮
3. 学会等名 日本原子力学会年2019秋の大会
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------