

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23445

研究課題名（和文）Ac-229を利用したTh-229mの原子核壊変特性の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the nuclear decay property of Th-229m utilizing Ac-229

研究代表者

重河 優大（Shigekawa, Yudai）

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：60845626

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：Ac-229やPa-229をフッ化物の結晶にドーブするという新しい手法によって、超低エネルギー励起核Th-229mの内部転換過程を抑制し、線放出過程を観測することを目指した。加速器により大量のPa-229を製造し、標的や核分裂生成物から高効率で分離する手法を開発した。また、Th-229mの線を高効率・低ノイズで測定するための真空紫外光測定装置を開発した。CaF₂結晶の上でPa-229溶液を加熱した試料を用いて、Pa-229の放射壊変由来のバックグラウンド光子を測定した。今後Pa-229をCaF₂結晶内部に導入する手法を改善すれば、Th-229mの線を明確に観測できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、今まで誰も観測に成功していないTh-229mの線放出過程の直接観測を目指して、Ac-229やPa-229を用いた手法を新しく開発した。手法をさらに改善することで、Th-229mの線を観測し、Th-229原子核時計を開発する上で重要なパラメータである線放出の半減期を決定できると期待される。将来的に既存の原子時計よりも精度の高い原子核時計を実現できれば、基礎物理学や測地学などの発展に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：We aimed to inhibit the internal conversion process of Th-229m and observe its γ -ray emission process using the new method in which a fluoride crystal is doped with Ac-229 or Pa-229. We developed a method for producing a large amount of Pa-229 using an accelerator and separating it from a target and fission products with high efficiency. We also developed an apparatus for measuring γ rays (VUV photons) originating from the decay of Th-229m. Using a CaF₂ crystal on which a Pa-229 solution was heated, we measured background photons originating from the decay of Pa-229. We will be able to clearly observe the γ rays of Th-229m by improving the method for introducing Pa-229 into a CaF₂ crystal.

研究分野：核化学・放射化学

キーワード：トリウム229 原子核時計 アクチニウム プロトアクチニウム Th-229m 核異性体 真空紫外光

1. 研究開始当初の背景

一般的に、原子核のエネルギーレベル (keV~MeV) は価電子のエネルギーレベル (eV) に比べてはるかに大きい。しかし、 ^{229}Th 原子核の第一励起状態である $^{229\text{m}}\text{Th}$ は、価電子のエネルギーレベルに近い 8 eV 程度の励起エネルギーを持つ。そのため、価電子遷移に基づく既存のレーザー技術を利用して、基底状態の ^{229}Th を $^{229\text{m}}\text{Th}$ へ励起できる可能性がある。 ^{229}Th 原子核のレーザー励起が実現すれば、その共鳴周波数から、原子時計や光格子時計よりも精度の高い原子核時計 (誤差 10^{-19} 程度) を作製できると予測されている[1,2]。原子核時計が実現すれば、数 mm 程度の標高の違いを時計のずれから観測したり、微細構造定数 α の経時変化の有無を既存の方法より 5 桁程度[3]も高い感度で測定したりできると考えられる。そのため、 ^{229}Th を利用した原子核時計は、測地学や基礎物理学など様々な分野の進展に大きく貢献できると期待される。

^{229}Th の原子核励起に必要な波長のレーザー (真空紫外領域) を用意するために、予め $^{229\text{m}}\text{Th}$ の励起エネルギーを 0.1 eV 程度 (~ 1 nm) の精度で求める必要がある。数 10 keV の γ 線の核分光により 7.8 ± 0.5 eV [4] という値が得られているが、誤差が大きい上に、原子核壊変のモデルに応じて 6~10 eV 程度の範囲で値が変わることが知られている[5]。そのため、正しい励起エネルギーの値を 0.1 eV 程度の精度で決定できる手法が必要である。

一方、不確定性原理による線幅の広がり (時計の誤差) を抑えるために、半減期の短い (~ 10 μs) 内部転換を抑制し、半減期の長い ($\sim 10^3$ – 10^4 s) γ 線放出により $^{229\text{m}}\text{Th}$ を脱励起させる必要がある。しかし、内部転換が禁制となる状態 (=価電子の結合エネルギーが $^{229\text{m}}\text{Th}$ の励起エネルギーよりも高い状態) に $^{229\text{m}}\text{Th}$ を置くことは難しく、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線の検出に成功した例は全くない。そのため、レーザー核励起の際に重要な情報となる γ 線放出の半減期も明らかになっていない。従って、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線を検出し、 γ 線放出半減期を求められる手法が必要である。

2. 研究の目的

本研究の当初の目的は、原子核時計の実現を目指して、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の励起エネルギーを 0.1 eV 程度の精度で決定するとともに、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線放出半減期を決定することであった。しかしながら、本研究課題の開始時に、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の励起エネルギーが 0.1 eV 程度の精度で決定されたことが海外の研究グループにより発表された[6]。 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線放出の半減期を決定するという次の重要な成果を世界に先駆けて得るために、本研究課題は、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線を世界で初めて検出し γ 線放出半減期を決定するという目的に絞って遂行することとした。

3. 研究の方法

$^{229\text{m}}\text{Th}$ を内部転換期禁制にして γ 線を放出させるために、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の電子状態を適切に制御して、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の周囲の価電子の結合エネルギーができるだけ高くなるような状態にする必要がある。そのような電子状態を実現するために、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ を電気陰性度の大きいフッ化物イオンと配位させるという方法が考えられる。特に、真空紫外光に対する透過率が高いフッ化物結晶 (CaF_2 結晶等) に $^{229\text{m}}\text{Th}$ を適切にドープすることができれば、内部転換を禁制にするとともに、発生した γ 線 (真空紫外光) を大きなロスなく測定できると考えられる。

過去の研究では、 ^{233}U 線源 (半減期 $\sim 10^5$ 年) から α 壊変の反跳エネルギーにより飛び出してきた $^{229\text{m}}\text{Th}$ をフッ化物結晶中に打ち込むという実験が行われたが、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の壊変に由来した真空紫外光は観測されなかった。この原因は、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ が持ち出す反跳エネルギーが 84 keV と非常に大きいため、結晶に打ち込まれた直後は $^{229\text{m}}\text{Th}$ が結晶中のフッ化物イオンと適切に配位しておらず、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ が内部転換により即座に脱励起してしまったからであると考えられる。

そこで本研究では、 ^{229}Ac (半減期 63 分) の β -壊変および ^{229}Pa (半減期 1.5 日) の EC 壊変によって $^{229\text{m}}\text{Th}$ を生成することにした。これからの壊変過程では、生成された $^{229\text{m}}\text{Th}$ が持ち出す反跳エネルギーが数 eV 以下である。そのため、 ^{229}Ac や ^{229}Pa をあらかじめフッ化物結晶中に適切にドープすれば、生成された $^{229\text{m}}\text{Th}$ は同じ位置にとどまってフッ化物イオンと適切に配位した状態になり、内部転換が禁制となると期待される。

$^{229\text{m}}\text{Th}$ が生成される分岐比が ^{229}Pa よりも ^{229}Ac のほうが大きいため、研究課題開始直後は ^{229}Ac を用いて実験を行うことを計画していた。しかしながら、以下 3 つの理由のために ^{229}Ac よりも ^{229}Pa のほうが優れていると判断し、 ^{229}Pa を利用して研究を実施するという方向に方針転換した。理由 : ^{229}Ac の β -線とフッ化物結晶の相互作用により多量のチェレンコフ光が生成され、それが $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線測定の際の大きなバックグラウンドとなると計算されたため。 ^{229}Pa を用いた場合は、そのようなチェレンコフ光はほとんど発生しないと予測された。

理由 : ^{229}Ac や ^{229}Pa は、加速器によって加速された高エネルギーのプロトンを ^{232}Th ターゲットへ照射することで生成される。その後、化学的な手法によって ^{229}Ac や ^{229}Pa をターゲットから分離する必要があるが、半減期 63 分の ^{229}Ac の場合、非常に迅速に分離を完了させる必要があり、半減期 1.5 日の ^{229}Pa の場合に比べて高度な技術開発が要求されると考えられたため。ま

た、 ^{229}Ac の場合はプロトンの照射直後にターゲットを取り出して化学分離を開始する必要があり、被爆の観点からも ^{229}Pa のほうが安全であると考えられた。

理由：海外の研究グループが、本研究とは異なる手法で ^{229}Ac を生成し、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ を用いた実験を実施することを提案している[7]。その手法では本研究よりも多量の ^{229}Ac を生成できると期待されるが、 ^{229}Pa は生成できない。そのため、 ^{229}Pa を用いた手法のほうがより独自性が高いと考えた。

本研究は、 ^{229}Pa を加速器で生成し、ターゲットから化学分離し、フッ化物結晶 (CaF_2 結晶) へ適切にドーブし、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線を検出するという流れで実施される。 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線の信号量をできるだけ増やすため、大量の ^{229}Pa を製造し化学的に分離する手法を開発することとした。また、 ^{229}Pa をフッ化物結晶中へ高い効率で導入し、適切にフッ化物イオンと配位させる手法を開発することを目指した。さらに、観測された真空紫外光が $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線であることを高い確度で示すために、真空紫外光測定装置を開発することにした。研究成果の項には、これらの手法開発の成果と、実際に ^{229}Pa を用いて真空紫外光測定まで実施した結果を記載する。

4. 研究成果

(1) 大量の ^{229}Pa の製造法の開発

$^{232}\text{Th}(p,4n)^{229}\text{Pa}$ 反応により大量の ^{229}Pa を製造し、 ^{232}Th ターゲットから ^{229}Pa を高い効率かつ高い分離能で化学的に分離する手法を開発した。まず、理化学研究所の AVF サイクロトロンにより加速された 30 MeV のプロトン $1\ \mu\text{A}$ を ^{232}Th 金属箔に合計 10 時間照射した。次に、照射後の ^{232}Th 金属箔を濃塩酸に溶解し、陰イオン交換法によって ^{229}Pa を ^{232}Th や核分裂生成物などから分離することを試みた。分離実験は異なるスキームで 3 回実施した。1 回目の分離スキームでは、濃塩酸系で ^{229}Pa を陰イオン交換カラムに着点した後、8 M HNO_3 をカラムに流すことで Zr, Mo, Ru などの核分裂生成物を取り除き、最後に 9 M $\text{HCl}/0.1\ \text{M}\ \text{HF}$ を流すことで ^{229}Pa を溶出させた。分離効率は 90% 程度と高かったものの、 ^{229}Pa の溶離液に多少の Zr 同位体が混入することが分かった。2 回目の分離スキームでは、カラムに吸着した Zr の量を減らすために、8 M HNO_3 をカラムに流す前に 6 M HCl を流したが、最終的な ^{229}Pa には Zr が依然として混入することが分かった。そこで、3 回目の分離スキームでは、塩酸とフッ化水素酸の混合溶液系での陰イオン交換を追加することで、 ^{229}Pa と Zr 同位体を分離することにした。各酸の濃度を適切に設定することで、最終的に得られた ^{229}Pa 溶液に含まれる Zr 同位体の量を検出器の検出限界以下まで抑えることができた。全体を通しての ^{229}Pa の化学収率は 91% であり、 ^{229}Pa を高い分離能で効率よく分離する手法の開発に成功した。

(2) $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線 (真空紫外光) 測定装置の開発

^{229}Pa をドーブした CaF_2 結晶から放出される $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線の信号量は微弱であるため (^{229}Pa の放射能に対してわずか 1% 程度の信号量)、 ^{229}Pa の放射線由来のバックグラウンドや検出器のノイズなど、様々なバックグラウンド信号から $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線の信号を確実に選り分ける必要がある。それを実現するための γ 線測定装置を開発した (図 1)。本装置では、 ^{229}Pa をドーブした CaF_2 結晶から放出される $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線を真空チャンバー内に設置された光電子増倍管 PMT1 (浜松ホトニクス R10454) によって測定する。測定器と結晶の間に 151 nm と 171 nm の波長に対応したバンドパスフィルタを設置し、フィルタを真空の外から自動で交互に入れ替えられるようにした。151 nm のフィルタでは、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線がフィルタを透過して検出器まで届くのに対して、171 nm のフィルタでは検出器まで届かないと予測される。 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線以外のバックグラウンド光子 (^{229}Pa の放射線等) はどちらのフィルタに対しても同程度の透過率を持つと考えられるため、151 nm のフィルタだけに対して検出された光子は、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線に対応すると考えられる。また、真空チャンバー内に光電子増倍管 PMT2 (浜松ホトニクス R7154) を設置することによって、 ^{229}Pa の放射線と CaF_2 結晶の相互作用で発生したシンチレーション光を検出できるようにした。これによって、PMT1 で検出される ^{229}Pa の放射線由来のバックグラウンド光子をアンチコインシデンス法により低減できるようになった。また、2 台の光電子増倍管をペルチェ素子で -25 度程度まで冷却することによって、光電子増倍管のダークカウントを大きく低減することができた。冷却時の PMT1 のダークカウントは 1 秒当たり 0.1 カウント未満であり、非常に微弱な信号を測定することが分かった。一方、 $^{229\text{m}}\text{Th}$ の半減期は 1000 秒程度と比較的短い可能性があるため、 CaF_2 試料の導入から測定開

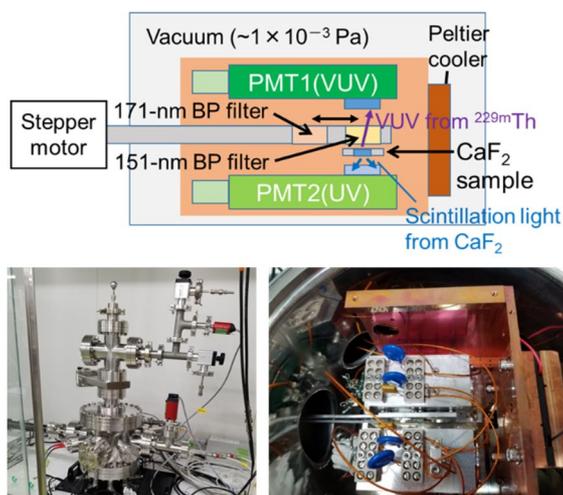


図 1. 開発した $^{229\text{m}}\text{Th}$ の γ 線 (真空紫外光) 測定装置

始までの時間をできるだけ短くする必要があった。そこで、光電子増倍管を設置してあるメインチャンバーを真空に保ったまま、サブチャンバーとゲートバルブを介して CaF_2 試料を導入できるようにした。これによって真空排気時間が大幅に低減されるとともに、光電子増倍管を暗所かつ低温に保てるので、迅速に測定を開始できるようになった。

(3) アニール法により作成された $^{229}\text{Pa}+\text{CaF}_2$ 試料の光子測定

単純なアニール法により ^{229}Pa を含んだ CaF_2 結晶を作製し、その結晶に対して光子測定を実施した。まず、(1)の方法で得た ^{229}Pa をフッ化水素酸に溶解して CaF_2 結晶に滴下し、900 度・He 気流中で 1 時間結晶を加熱した。アニール後、結晶をすぐに(2)の真空紫外光測定装置へ導入し、2 台の光電子増倍管による光子測定を開始した。151 nm と 171 nm のバンドパスフィルタは 5 分ごとに交互に入れ替えた。

PMT2 を利用したアンチコインシデンス法により、PMT1 で検出される光子の計数率が 1/3 程度になることが分かった。PMT1 で検出された光子計数率の経時変化 (図 2) は、 ^{229}Pa および副生成物の ^{230}Pa の減衰曲線で説明できることが分かった。2 つのバンドパスフィルタに対する光子計数率の経時変化 (図 2 上下) を比較すると、両者はほぼ等しいことが分かる。 ^{229}mTh の γ 線が観測されていれば、151 nm のフィルタに対してのみ光子の成長減衰曲線が観測されるはずである。従って、観測された光子は ^{229}mTh の γ 線ではなく、高エネルギーの放射線由来のバックグラウンド光子であることが分かった。

観測されたバックグラウンド光子の計数率と、予測される ^{229}mTh の γ 線の計数率を用いてシミュレーションしたところ、今回の実験条件では ^{229}mTh 由来の γ 線が観測されるはずであるということが分かった。 γ 線を観測することができなかった原因として、

^{229}Pa が CaF_2 結晶へ適切にドーピングされておらず、 ^{229}mTh の内部転換を抑制できていなかったということが挙げられる。今回実施した単純なアニール法では、 ^{229}Pa を CaF_2 結晶の内部まで輸送することができていないと推定される。そこで今後は、 ^{229}Pa をイオン化して 30 keV 程度まで加速して CaF_2 結晶の内部まで打ち込み、その後アニールすることによって ^{229}Pa を結晶内部で適切にフッ化物イオンと配位させたいと考えている。 ^{229}Pa のイオン化の手法として、セシウムスパッタ型イオン減とレーザーアブレーション型イオン減の 2 種類を検討しており、現在装置開発を進めている。本研究では ^{229}mTh の γ 線を明確に観測するところまでは至らなかったが、 ^{229}Pa のイオン化と結晶への打ち込みの方法を確立できれば、本研究で開発した ^{229}Pa の製造・分離手法や光子測定装置を用いることで、世界に先駆けて ^{229}mTh の γ 線を観測できると期待される。

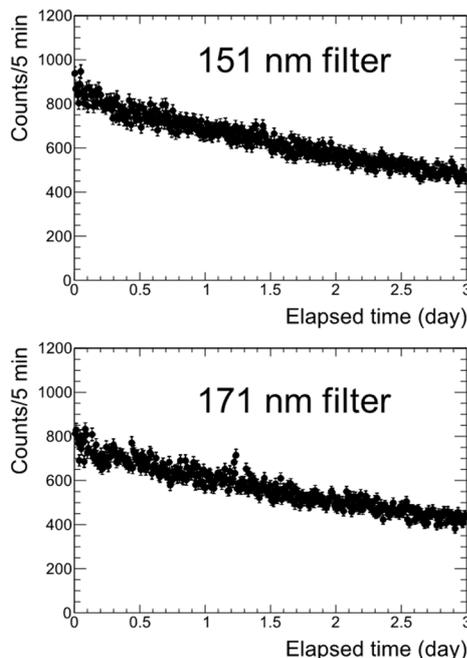


図 2. PMT1 で検出された光子の計数率の経時変化
上：151 nm のバンドパスフィルタ、
下：171 nm のバンドパスフィルタ

参考文献

- [1] E. Peik *et al.*, *Europhys. Lett.* **61**, 181 (2003).
- [2] C. J. Campbell *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 120802 (2012).
- [3] V. V. Flambaum, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 092502 (2006).
- [4] B. R. Beck *et al.*, LLNL-PROC-415170 (2009).
- [5] E. V. Tkalya *et al.*, *Phys. Rev. C* **92**, 054324 (2015).
- [6] B. Seiferle *et al.*, *Nature* **573**, 243 (2019).
- [7] M. Verlinde *et al.*, *Phys. Rev. C* **100**, 024315 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shigekawa Y., Kasamatsu Y., Watanabe E., Ninomiya H., Hayami S., Kondo N., Yasuda Y., Haba H., Shinohara A.	4. 巻 100
2. 論文標題 Observation of internal-conversion electrons emitted from Th229m produced by decay of Ac229	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.100.044304	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 Masuda Takahiko他（Shigekawa Yudai 18番目）	4. 巻 573
2. 論文標題 X-ray pumping of the 229Th nuclear clock isomer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 238 ~ 242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41586-019-1542-3	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 Shigekawa Y., Kasamatsu Y., Yamakita Y., Yasuda Y., Watanabe E., Kondo N., Haba H., Shinohara A.	4. 巻 976
2. 論文標題 Development of a retarding-field type magnetic bottle spectrometer for studying the internal-conversion process of 235mU	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164207 ~ 164207
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2020.164207	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. Shigekawa, A. Yamaguchi, K. Suzuki, H. Haba, T. Hiraki, H. Kikunaga, T. Masuda, S. Nishimura, N. Sasao, A. Yoshimi, and K. Yoshimura	4. 巻 53
2. 論文標題 Half-life determination of nuclear excited states of 229Th by the coincidence measurement between particles and rays from 233U	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RIKEN Accel. Prog. Rep.	6. 最初と最後の頁 51 ~ 51
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 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. Shigekawa, A. Yamaguchi, N. Sato, A. Takamine, M. Wada, and H. Haba	4. 巻 53
2. 論文標題 Development of an RF-carpet gas cell for the chemistry of superheavy elements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RIKEN Accel. Prog. Rep.	6. 最初と最後の頁 168 ~ 168
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 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 Kasamatsu Yoshitaka, Toyomura Keigo, Haba Hiromitsu, Yokokita Takuya, Shigekawa Yudai, Kino Aiko, Yasuda Yuki, Komori Yukiko, Kanaya Jumpei, Huang Minghui, Murakami Masashi, Kikunaga Hidetoshi, Watanabe Eisuke, Yoshimura Takashi, Morita Kosuke, Mitsugashira Toshiaki, Takamiya Koichi, Ohtsuki Tsutomu, Shinohara Atsushi	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 Masuda Takahiko, Watanabe Tsukasa, Beeks Kjeld, Fujimoto Hiroyuki, Hiraki Takahiro, Kaino Hiroyuki, Kitao Shinji, Miyamoto Yuki, Okai Koichi, Sasao Noboru, Seto Makoto, Schumm Thorsten, Shigekawa Yudai, Tamasaku Kenji, Uetake Satoshi, Yamaguchi Atsushi, Yoda Yoshitaka, Yoshimi Akihiro, Yoshimura Koji	4. 巻 28
2. 論文標題 Absolute X-ray energy measurement using a high-accuracy angle encoder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 111 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577520014526	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

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 重河優大, 笠松良崇, 渡邊瑛介, 安田勇輝, 近藤成美, 二宮秀美, 速水翔, 羽場宏光, 篠原厚
2. 発表標題 Ac-229の線電子同時計数測定によるTh-229mの内部転換電子の観測
3. 学会等名 日本放射化学会第63回討論会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重河優大, 笠松良崇, 山北佳宏, 金子政志, 渡邊雅之, 渡邊瑛介, 安田勇輝, 近藤成美, 篠原厚
2. 発表標題 酸化物・フッ化物・塩化物系におけるU-235mの半減期および内部転換電子エネルギースペクトルの測定
3. 学会等名 日本放射化学会第63回討論会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重河優大, 山口敦史, 鈴木健太, 羽場宏光, 平木貴宏, 菊永英寿, 西村俊二, 笹尾登, 吉見彰洋, 吉村浩司
2. 発表標題 U-233の - 同時計数測定によるTh-229の原子核励起状態の半減期の決定
3. 学会等名 日本放射化学会第64回討論会(2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 重河優大, 山口敦史, 佐藤望, 高峰愛子, 和田道治, 羽場宏光
2. 発表標題 核化学研究用高周波イオン収集システムの開発
3. 学会等名 日本放射化学会第64回討論会(2020)
4. 発表年 2020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
研究協力者	羽場 宏光 (Haba Hiromitsu) (60360624)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・室長 (82401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	横北 卓也 (Yokokita Takuya) (10802655)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・特別研究員 (82401)	
研究協力者	小森 有希子 (Komori Yukiko) (50726370)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・協力研究員 (82401)	

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