

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03713

研究課題名(和文)トリウム-229核異性体構造の解明：高精度時計科学の新展開

研究課題名(英文)Study of Thorium-229 isomeric state: towards new science with nuclear clock

研究代表者

磯部 忠昭 (Isobe, Tadaaki)

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・専任研究員

研究者番号：40463880

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,100,000円

研究成果の概要(和文)：これまで主に使用されてきたTESが感度のあるエネルギー領域は最大10keV程度である。本研究課題における光のエネルギーは30keVとそれに比べて高いため、最大40keV相当のX線まで測定できるTESの開発をNISTと共同のもと行った。30keVのX線への感度を高めるため、X線吸収体として金を採用し試作品の作成を進めた。

また飛行時間分別装置に設置する電子検出器の設計を行い、崩壊電子測定用シリコン検出器の準備を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TESはゲルマニウムをはじめとする半導体検出器よりさらに分解能の良い次世代検出器として注目を浴びている。これまでTESは10keV以下のX線領域をターゲットとした研究開発が行われてきたが、本研究における極低励起準位を探索する為、より高エネルギー領域のX線をターゲットとした検出器が開発されつつある。これは本研究にとどまらず、ミュオン原子といった他のX線高精度測定への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The dynamic energy range of conventional TES is up to about 10 keV. For our research project, we need novel TES which has wider energy dynamic range for 30 keV X-ray measurement. Then, we started the collaboration with NIST to invent the novel TES which has the dynamic energy range of up to 40 keV. In order to realize such kind of TES, we made a prototype TES which employs Au as absorber of X-ray.

In addition, we proceed the designing of time-of-flight mass separator system. A silicon detector is under preparation to detect the electron coming from Th-229 decay.

研究分野：原子核物理

キーワード：原子核時計 不安定核 RIBF TES トリウム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

世の中の標準時刻を定義している原子時計では、原子・分子に固有の決まったスペクトル吸収線波長をリファレンスとする事で時計の調整・修正を行っている。昨今の光格子時計技術の確立により、数千個の原子共鳴が一度に測定可能になり、18桁の精度での時間測定が現実のものとなってきた。時計の精度が18桁まで達成できると相対論的物理効果も見え始め、この効果を用いてダークマターの探索、重力波の測定や物理基本定数の測定など様々な研究用途が提案されている。

原子の励起を利用する代わりに原子核の励起を利用し、原子時計ならぬ原子核時計の実現を目的とする。原子核時計による高精度時間測定の分野を切り開いた上で、物理定数の一つ：微細構造定数の恒常性を実験的に検証し「時間という測定量を通して得られる物理量のユニバーサリティは担保されるのか？」といった基本的な問いに迫る。

通常原子核を励起させるには数MeV程度のエネルギーを与えないと励起せず、数MeVでは励起エネルギーが高すぎて時計のリファレンスとして用いるのは難しい。現在レーザーで励起が可能となる10 eV以下の超低励起準位をもつ原子核として知られているのは、トリウム-229の $\pm 0.5$  eV励起状態がほぼ唯一の候補である。トリウム-229を用いた原子核時計のアイデアは2003年PeikとTammにより提案され、これまで多くのトリウム-229超低励起状態探索実験が行われてきた。しかし超低準位故に測定上のバックグラウンドが多く、その励起準位はいまだ確認されていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は10 eV以下の励起準位を持つと言われるトリウム-229核異性体(励起した状態の原子核)の存在を確かめ、それを使った原子核時計を実現する事で新たな超高精度時計科学分野を切り拓く事である。

現在原子時計では光格子時計によって16-17桁の高精度での時刻決定を実現している。トリウム-229原子核時計の場合、強い力だけで決まる原子核の励起準位をリファレンスとして使う事により、さらに1-2桁精度を改善した時刻定義が可能となる。

本研究を通して0.01 eV程度の精度でトリウム-229核異性体の励起準位を決め、レーザーを使ってさらに高精度に励起準位を決定し、原子核時計を実現させる。

### 3. 研究の方法

本研究では純度の高いIRIを大量に生成可能なRIビーム施設理化学研究所RIビームファクトリー(RIBF)と可視光用超電導転移端センサー(TES)を組み合わせ、トリウム-229核異性体の第一励起準位を0.01 eV程度の高精度で決定する。これを実現する為、本研究では以下の2つの方法での測定を行う

1. 第一励起準位からの崩壊によって発生する内部転換電子のエネルギーを測定する
2. 30keV弱の第二励起準位から第一励起準位への崩壊によるガンマ線、及び第二励起準位から基底状態への崩壊によるガンマ線を測定し、その差分から第一励起エネルギー準位を決定する

### 4. 研究成果

第一励起準位から発生する電子のエネルギーは電場で容易に変わる一方、第二励起準位から発生する30 keV程度のガンマ線は透過率が高く、高精度でのエネルギー測定が可能なTESと相性が良いため、まず30 keVの光子を測定するシステムの開発を米国NIST・X線検出グループと共同で行った。

本研究における測定対象の光のエネルギーは30 keVと通常のX線エネルギーに比べて高く、これまでのX線吸収体ではその検出効率が著しく下がる事が予測される。硬X線への感度を高めるため、X線吸収体として金を採用し試作品の作成を進めた。作成したTESは20-30 keVガンマ線エネルギー程度の光測定を測定対象とする0.5-0.6 mm角程度の大きさのものである。(図1) Mo K<sub>1</sub>による17.5 keVのX線をエネルギー測定解像度の評価に、Eu K<sub>1</sub>(41.5 keV), K<sub>2</sub>(40.9 keV), K<sub>1</sub>(47.0 keV)のX線を検出器の線形応答性の評価に使用した。その結果、40keV弱程度までの線形性を確認し、17.5 keV X線に対して測定精度は半値幅で6.9 eVだという事がわかった。

またTESを加速器実験に応用するにあたり、その検出範囲の狭さは大きなデメリットである。これを解決する為にマイクロ波共鳴を使った多チャンネル読み出し系の開発を行った。図2は本研究予算で導入したマイクロ波共鳴読み出しを実現するADR冷凍機で、この冷凍機を使う事で500ピクセル程度のTESを使った読みだしが実現する。

また内部転換電子のエネルギーを高精度に測定する為、光吸収体を取り除いたeVエネルギー測定用のTESを試作した。電子測定用TESの研究開発は進んでおらず、このTESを使ってeVエネルギーの電子測定を高精度に実現する。

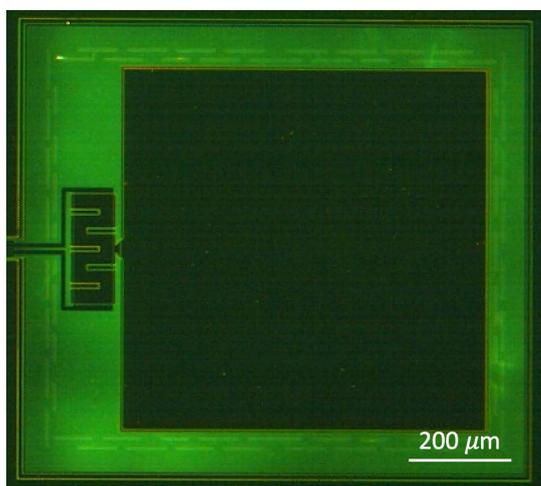


図1：トリウム-229 実験用 TES  
右側 1mm 角の領域が金吸収体

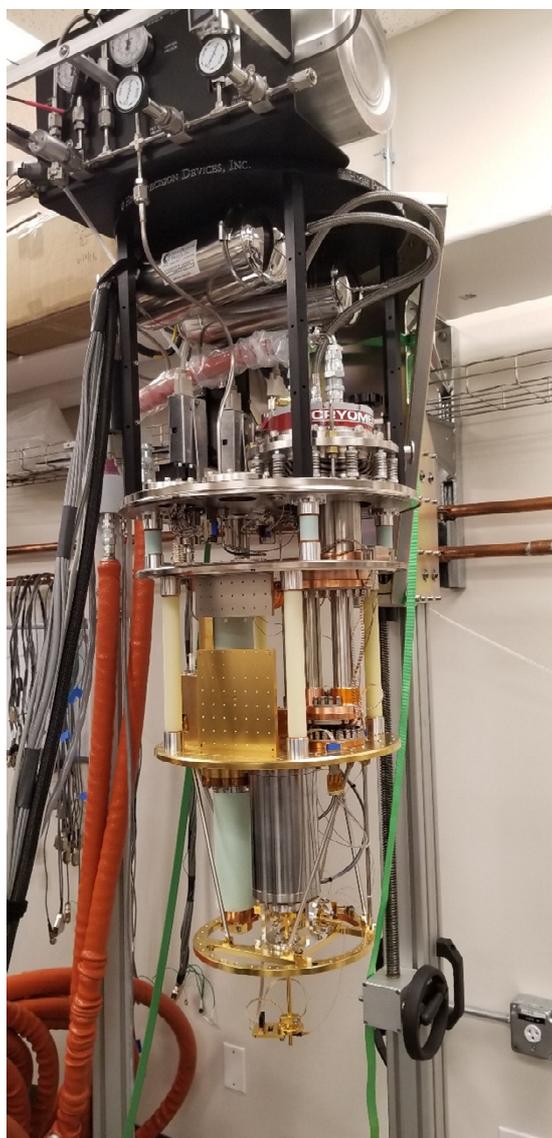


図2：本研究にて開発するマイクロ波読み出しを導入する冷凍機

## 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 5件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Lokotko T. et al.	4. 巻 101
2. 論文標題 Shell structure of the neutron-rich isotopes Co69,71,73	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34314
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.101.034314	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 Sinclair L. et al.	4. 巻 100
2. 論文標題 Half-lives of Sr73 and Y76 and the consequences for the proton dripline	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44311
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.100.044311	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 Nakada N., Hattori K., Nakashima Y., Hirayama F., Yamamoto R., Yamamori H., Kohjiro S., Sato A., Takahashi H., Fukuda D.	4. 巻 199
2. 論文標題 Microwave SQUID Multiplexer for Readout of Optical Transition Edge Sensor Array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 206 ~ 211
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-019-02298-0	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 Konno Toshio, Takasu Sachiko, Hattori Kaori, Fukuda Daiji	4. 巻 199
2. 論文標題 Development of an Optical Transition-Edge Sensor Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 27 ~ 33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-020-02367-9	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 Yan Daikang et al.	4. 巻 31
2. 論文標題 Transition-Edge Sensor Optimization for Hard X-ray Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3059972	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 Okumura Takuma et al.	4. 巻 31
2. 論文標題 Dynamical Response of Transition-Edge Sensor Microcalorimeters to a Pulsed Charged-Particle Beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3067793	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 Yamada Shinya et al.	4. 巻 92
2. 論文標題 Broadband high-energy resolution hard x-ray spectroscopy using transition edge sensors at SPring-8	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 013103~013103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0020642	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1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Tadaaki Isobe
2. 発表標題 Measurement of Th-229 low lying isomeric state with MRTOF+TES system at RIKEN-RIBF
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-18) (国際学会)
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
研究 分担者	服部 香里  (Hattori Kaori)  (10624843)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員   (82626)	

	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
連携 研究者	西村 俊二  (Nishimura Shunji)  (90272137)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・ 先任研究員   (82401)	
連携 研究者	岡田 信二  (Okada Shinji)  (70391901)	国立研究開発法人理化学研究所・東原子分子物理研究室・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			
米国	NIST			