

令和元年6月21日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03980

研究課題名(和文) 不安定核停止標的を用いた宇宙原初リチウム7合成問題の研究

研究課題名(英文) Primordial lithium 7 problem studied by using stopped unstable nucleus target

研究代表者

民井 淳 (Tamii, Atsushi)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：20302804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙誕生時のリチウム7合成量の計算が観測と合わない宇宙リチウム問題の解決をめざし、ベリリウム7と重陽子との共鳴反応率を100-400 keVのエネルギー領域に高精度で測定する。新開発の不安定核停止標的技術を適用する。東京大学CNSのCRIBにて $6.1 \times 10^{11}$ 乗個/平方mmのベリリウム7のインプラント、神戸大学タンデムにて $6.3 \times 10^{12}$ 乗個/平方mmの生成を行い、これらの標的を用いた重陽子との核反応測定に成功した。最終結果は解析中であるが、同反応の宇宙リチウム問題への寄与の決着をつけるものとなる。不安定核停止標的技術の実証実験に成功し、今後の実験展開を進める上で大きな成果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

測定に成功したベリリウム7と重陽子との共鳴反応率は、宇宙リチウム問題において重要な反応である。現在宇宙リチウム問題の解決にむけて、宇宙論や標準理論の修正の議論、新粒子の提唱などが行われている状況であり、核物理の情報のみでどこまでこの問題を追い込めるかを見極めることは極めて大きい意義を持つ。また、我々が開発を進めてきた不安定核停止標的という新しい技術を適用することで従来にない精度での核反応測定に成功したことは、今後の不安定核を対象とする核物理の進展に新たな潮流をもたらすものであり、同手法を用いた実験研究の飛躍的な発展をもたらす。

研究成果の概要(英文)：The resonant reaction between a beryllium-7 and a deuteron has been measured in the energy range of 100-400 keV. The experiment aims at solving the cosmological lithium problem, that is the overestimation of the lithium abundance after Big Bang than the astronomical observation. We applied a newly developed technique of stopped unstable nucleus target. We achieved a beryllium-7 density of  $6.1 \times 10^{11}$  per square mm by implantation at CNS, Univ. of Tokyo and  $6.3 \times 10^{12}$  by activation at Tandem accelerator, Kobe Univ. By using the targets, we successfully measured the cross section of the reaction. The data will give the conclusion on the contribution of the reaction to the cosmological lithium problem, though the data analysis is still in progress. The successful proof-of-principle experiment was a big step for the future extensions of the experiments using the stopped unstable nucleus target.

研究分野：実験核物理学

キーワード：宇宙リチウム問題 ビッグバン元素合成 不安定核停止標的 インプラント 共鳴反応

## 1. 研究開始当初の背景

### 宇宙リチウム問題

宇宙誕生時(ビッグバン)の元素合成過程の計算を近年精密に行うことができるようになってきている。宇宙マイクロ波背景放射の測定によって主要パラメータであるバリオン・光子エネルギー比が精度良く決められたことに伴い、宇宙初期の重水素、ヘリウム4、リチウム7などの合成量が水素に対する比として予言されている(図1)。このうち重陽子とヘリウム4は宇宙観測による存在比とよく一致しているが、リチウム7のみ観測値を3倍多く予言しているという違いがあり、標準宇宙論を揺るがす大きな問題となっている(宇宙リチウム問題)。宇宙誕生時の元素合成は宇宙の成り立ちを知るための大きな鍵であり、実際宇宙マイクロ波背景放射の発見や宇宙元素合成の予言が、宇宙にその誕生すなわちビッグバンが存在したことを決定づける証拠となった歴史がある。宇宙リチウム問題を解決するため、標準理論や宇宙論の修正、新粒子の存在などの理論が提唱されている。このような議論の中で、元素合成計算に関わる核反応率は欠かせない主要要素となっている。

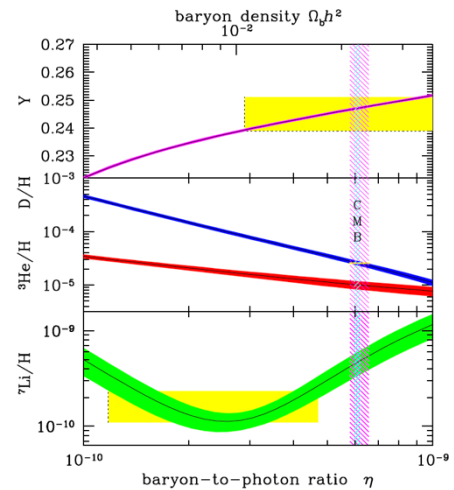


図1:ビッグバンでの原子核の生成量の計算値(線)と観測値(黄色縦軸)。横軸はバリオン・光子エネルギー比。[1]

### ベリリウム7と重陽子の反応の寄与

ビッグバン元素合成計算によるリチウム7生成の主過程は、宇宙初期の高温下で生成されたベリリウム7が宇宙冷却時にリチウム7に自然崩壊する過程である。従ってベリリウム7の生成量を下げる核反応が見つければ、リチウム7問題の解決もしくは宇宙論に関わるパラメータの修正をもたらすことになる。我々が着目しているのはベリリウム7と重陽子が反応して陽子とベリリウム8(生成直後に2つのヘリウム4に崩壊)に転換する過程である。これまでの実験データは乏しく、ビッグバンのエネルギー領域におけるデータは1点で、信頼に足る核反応率の精度が得られていない。一方で同エネルギー領域にベリリウム7と重陽子の複合系の共鳴状態が存在することが知られており、共鳴状態を経由することで反応率が急激に上昇する可能性が指摘されている。我々はベリリウム7を標的とする実験を行うことで、この反応率を精密に測定することを計画した。

### 不安定核停止標的による実験

自然崩壊する不安定核であるベリリウム7と他の核との核反応は、ベリリウム7をビームとして実施するのが通例である。実際ビッグバンエネルギー領域で唯一測定されたデータはベリリウム7をビームとしている。一方で我々は不安定核を標的として生成し、核反応を精密に測定する不安定核停止標的の技術開発を進めてきた。今回の測定は、不安定停止標的技術を応用する初めての事実実験としての側面を合わせ持っている。この技術の有用性を実証することで、不安定核反応の精密測定を可能とする新たな測定手法として、今後の広い研究展開が期待される。

## 2. 研究の目的

### 宇宙リチウム問題の解決

ビッグバン元素合成過程における大問題である宇宙リチウム問題の解決をめざし、ベリリウム7と重陽子の反応過程の精密測定を行う。この過程は現在の元素合成計算に取り入れられていない重要チャンネルである。ビッグバンに最も寄与するエネルギー領域である100-400 keVの測定データは1点のみで、分解能が悪く精度も低い。特に200 keV程度のエネルギーにベリリウム7と重陽子の複合共鳴状態が存在することが指摘されており、この共鳴状態が寄与することでベリリウム7を破壊する反応の断面積が該当エネルギー付近のみにおいて急激に上昇する可能性がある。したがって、100-400 keVのエネルギー領域にて、分解能と精度のよい測定が必要である。

### ベリリウム7と重陽子の反応の高精度測定

存在する1点のデータはベリリウム7をビームとする測定である。そのため100-400 keVという低エネルギーでの測定が難しく、エネルギー分解能が低く、統計精度も悪い。我々は、ベリリウム7を標的とし、重陽子をビームとする測定を実施することで、エネルギー分解能と統計精度の高い測定を実現し、特に200 keV領域の共鳴状態の寄与の大きさを明らかにする。共鳴状態の寄与が非常に大きい場合には、宇宙リチウム問題の解決に至ることになる。寄与がそれほど大きくない場合でも、不明な反応チャンネルの寄与を定量的に明らかにすることができ、宇宙リチウム問題における理論予言と観測量との違いをより明確にすることができる。これは、今後の標準理論や宇宙論の修正を含めた議論の土台として重要な寄与となる。

## 不安定核停止標的技術の展開

また本測定は、不安定核を標的として用いる不安定核停止標的技術の実証実験としての位置づけを持っている。不安定核は通常ビームとして用いられることが多いが、生成した不安定核を局所的な領域に埋め込む(インプラント法)ことにより、イオンビームとの反応測定が可能な密度を達成することができる。さらに代替手段として、標的にイオンビームを照射することにより標的内に不安定核を生成する放射化法(アクティベーション法)により、さらに密度をあげた標的を作る可能性を追求している。これらの技術が確立されれば、不安定核の低エネルギー、高分解能測定、偏極ビーム測定などにおいて大きなメリットを得ることができ、今後の不安定核研究の新たな手段としての展開を進めることができる。

### 3. 研究の方法

ベリリウム 7 を金標的にインプラントして標的とするインプラント法(I)、リチウム標的中にベリリウム 7 を生成するアクティベーション法(II)、の 2 つの方法によるベリリウム 7 停止標的での高精度測定の開発と実験を行った。以下に実施した項目と測定方法を記す。

#### I インプラント法による測定

I-1) 2016 年 6 月に東京大学 CRIB 装置を用いたベリリウム 7 生成と、金標的へのインプラントを行う最初の実験を実施した(図 2)。2700 enA のリチウム 7 ビーム(核子当たり 5.6 MeV)を冷却水素ガス標的に照射、生成したベリリウム 7 ビーム(核子当たり 4.0 MeV)を CRIB 装置にて分析し、銅板コリメータにて直径 2mm に切り出し、金 15  $\mu\text{m}$  の板によりエネルギー減衰した後、厚さ 10  $\mu\text{m}$  の金標的に照射した。計算によるインプラントの深さは  $5.4 \pm 1 \mu\text{m}$  である。照射後のベリリウム 7 標的数を、自然崩壊にて生じる 477.6 keV のガンマ線(放出確率 10.44%)を LaBr<sub>3</sub> シンチレーション検出器で計測することで確認した。19 時間の照射によって得られたベリリウム 7 の量は  $1.3 \times 10^{11}$  個(面密度  $4.2 \times 10^{10}$  個/ $\text{mm}^2$ )であった。この測定に必要な金標的やコリメータの制御装置、インプラントビーム調整時にベリリウム 7 を検出するためのプラスチックシンチレータ装置などを開発した。

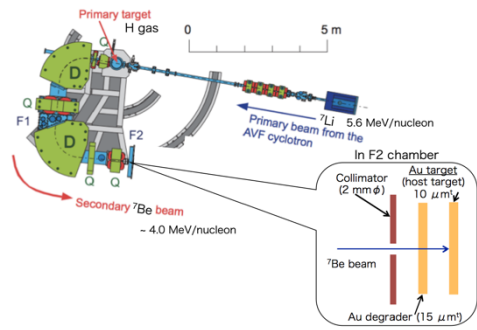


図 2:CRIB 装置でのベリリウム 7 生成と金標的へのインプラントの模式図。

この測定に必要な金標的やコリメータの制御装置、インプラントビーム調整時にベリリウム 7 を検出するためのプラスチックシンチレータ装置などを開発した。

I-2) ベリリウム 7 をインプラントした金標的を日本原子力開発機構のタンデム加速器施設(東海村)に移送し、2016 年 7 月に重陽子ビームを照射する実験を行った。散乱標的の真空槽、3 連シリコン検出器などの開発を事前に行い実験に使用した。重陽子ビーム量は直径 3mm に整形した後で 900 nA ( $130 \text{ nA}/\text{mm}^2$ )であった。CRIB 装置にてインプラントしたベリリウム 7 の量が想定よりも 1/25 程度と少なかったこと、および重陽子ビーム量が 1/2 程度と弱かったことなどが原因で、ベリリウム 7 と重陽子の散乱事象を同定するに至らなかった。この結果をもとに向上すべき項目を明らかにするとともに、次の実験に向けて戦略を練った。

I-3) 2017 年 5 月に東京大学 CRIB 装置において、ベリリウム 7 生成量を増やすための開発実験を行った。定量的測定を行うために、ベリリウム 7 ビームプロファイルの測定に必要な減衰版を開発して使用した。直径 3mm にコリメートした。リチウムビームおよび CRIB 装置のイオン光学を向上させることで、7 時間で  $1.2 \times 10^{12}$  個 ( $1.7 \times 10^{11}$  個/ $\text{mm}^2$ )のベリリウム 7 を金標的にインプラントすることができることを確認した。

I-4) 2018 年 5 月に東京大学 CRIB 装置を用いたベリリウム 7 インプラント実験を再度行った。前年の開発が功を奏し、直径 2mm にコリメートしたベリリウム 7 を、24 時間で  $1.9 \times 10^{12}$  個 ( $6.1 \times 10^{11}$  個/ $\text{mm}^2$ )金標的にインプラントすることに成功した。

I-5) 標的を日本原子力開発機構のタンデム加速器施設に移送し、2018 年 6 月に重陽子ビームとの反応実験を行った。重陽子ビーム量は直径 3mm にコリメート後 200nA であった。放出陽子同定により、インプラント標的による初の核反応測定に成功した。しかし、重陽子ビームから発生する中性子を主因とする検出器の損傷により、多くの統計量を獲得することができなかった。詳しいデータは現在解析中である。後日の検討により、重陽子ビームのエネルギーを下げるために使っていたアルミニウム減衰器により中性子の強度が高くなっていたことが判明した。

#### II アクティベーション法による測定

II-1) 2018 年 3 月に神戸大学海事科学研究科のタンデム加速器を用い、厚さ 100  $\mu\text{m}$  のリチウム標的に陽子ビーム(2.3 MeV)を照射することにより標的内でベリリウム 7 を生成するアクティベーション法による開発実験を行った。直径 2mm、50nA の陽子ビームを 19 時間照射することにより、 $2.8 \times 10^{11}$  個/ $\text{mm}^2$  のベリリウム 7 を標的内に生成することに成功した。続いて重陽子ビーム(1.4 MeV)を照射し、ベリリウム 7 との核反応の測定を行った。本実験は、神戸大学



タンデム加速器での初めての実験であり、各粒子のビームの輸送を我々自身の調整で行うことで、標的生成と散乱断面積測定において最大強度のビームを得ることに重きをおいた。検出器の調整と放出陽子の同定に時間を要し、物理的成果の目的では有意なデータを得ることができなかったが、次の開発段階につながる有意義な開発結果を得た。

II-2) 2018年8月に神戸大学タンデム加速器を用いたアクティベーションの実験を行った。厚さ  $100\ \mu\text{m}$  のリチウム標的に直径  $2\text{mm}$ 、 $500\ \text{nA}$  の陽子ビーム ( $2.7\ \text{MeV}$ ) を2日間照射することにより、 $1.5 \times 10^{13}$  個 ( $5.0 \times 10^{12}$  個/ $\text{mm}^2$ ) のベリリウム7を標的内に生成することに成功した。引き続き重陽子ビーム ( $1.6\ \text{MeV}$ ) を照射し、 $400\ \text{nA}$  2日間の測定で、アクティベーション法によるベリリウム7と重陽子との反応により生成する陽子を三連のシリコン検出器2セットにより測定することに成功した。この測定により、ビッグバンよりも高いエネルギー領域での散乱断面積を得るデータ取得に成功した。より詳細なデータは現在解析中である。

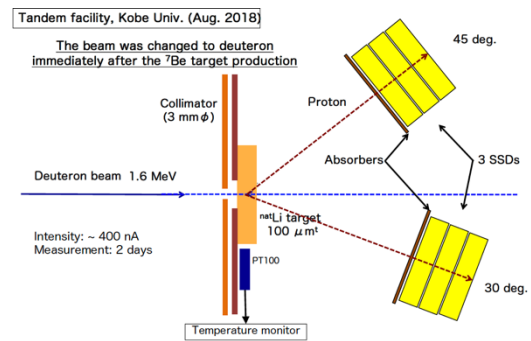


図3:神戸大学タンデム加速器でのベリリウム7と重陽子の反応測定。

II-3) 2019年1-2月に、神戸大学タンデム加速器を用いたアクティベーション法により、ビッグバンエネルギー領域でのベリリウム7と重陽子の反応を測定する実験を行った。厚さ  $30\ \mu\text{m}$  のリチウム標的に直径  $2\text{mm}$ 、 $400\ \text{nA}$  の陽子ビーム ( $2.36\ \text{MeV}$ ) を3日間照射することにより、 $1.9 \times 10^{13}$  個 ( $6.3 \times 10^{12}$  個/ $\text{mm}^2$ ) のベリリウム7を標的内に生成することに成功した。引き続き  $400\ \text{nA}$  の重陽子ビーム  $1.6$ ,  $1.0$ ,  $0.6\ \text{MeV}$  を各1, 0.1, 3日間照射し、ベリリウム7と重陽子との反応測定を行った。高精度高統計のデータを取得することに成功した。現在データの解析を進めている。

#### 4. 研究成果

一連の開発過程を経ることで、不安定核停止標的を用いた実証実験に成功し、物理的成果を伴う初めての核反応測定に成功した。

ベリリウム7と重陽子の反応過程について、インプラント法とアクティベーション法の2つの不安定核停止標的の手法開発を進めてきたが、最終的にアクティベーション法により精度のよい測定結果を取得することができた。物理的成果を提出する最終的な測定結果については解析を進めている途中であるが、ビッグバンのエネルギー領域 ( $100\text{--}400\ \text{keV}$ ) を含めたより高いエネルギーまでの範囲について、 $100\ \text{keV}$  程度の分解能で10%を有に上回る精度にて散乱断面積を提出できる予定である。アクティベーション法による高エネルギー側での測定結果の予備的解析状況について、2018年10月にハワイで行われた日米合同物理学会での口頭発表を博士学生の井上が行った。図4にその時点での散乱断面積の図を示す。2019年1-2月に取得した重陽子ビームエネルギーを下げたデータを合わせた詳細解析を進めることで、より精密な結果を論文出版できる予定である。予備解析の結果において、ビッグバンのエネルギー領域で  $200\ \text{keV}$  ( $0.2\ \text{MeV}$ ) の共鳴状態の効果により、以前のデータに比べて散乱断面積の顕著な増大傾向が見られているが、宇宙リチウム問題の解決に至るまでの増大は現状で見られていない。

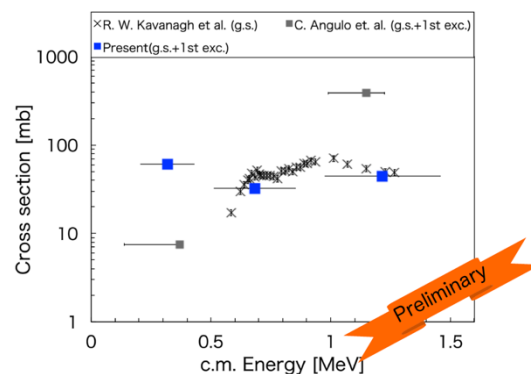


図4:2018年8月の神戸大学タンデム加速器でのベリリウム7と重陽子の反応測定の予備解析結果(青色)[2]。他のデータは[3,4]より。

アクティベーション法の進展により、結果的に精度が劣ることとなったインプラント法による実験のデータについては、宇宙リチウム問題を議論する物理的成果提出には使われないことになる。しかしこの差は反応測定技術の開発が順次進展した効果に由来するところが大きく、必ずしも手法としての優劣に基づくものではない。実際、インプラント法を用いる方がアクティベーション法に比べて標的中での核純度が高く、より広い研究に今後適している可能性が高い。逆にいえば今回のベリリウム7と重陽子との反応測定に関してはアクティベーション法を適用できたが、目的とする反応によっては不純物によるバックグラウンド事象による制限で測定ができなくなる可能性がある。不安定核停止標的に関するこれらの技術的開発については、別途技術的な論文を提出する予定である。また、大学院学生の井上が本研究により学位を取得する予定で準備を進めている。

本研究では、不安定核停止標的の実験手法を実証するとともに、宇宙リチウム問題において重要な核反応率を提出するデータを取得することができた。東京大学原子核科学研究センターお

よび日本原子力研究開発機構の研究分担者の貴重な協力を得て、大学院生の弛みない努力によって達成された実験手法開発が基盤となっている。今後の不安定核停止標的を用いた研究発展に向けての非常に大きな成果となった。

<引用文献>

- [1] Review of particle physics, particle data group, Physical Review D **98**, 1 (2018).
- [2] A. Inoue et al., presentation at 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 2018, Hawaii, US.
- [3] R.W. Kavanagh et al., Nuclear Physics **18**, 492 (1960).
- [4] C. Angulo et al., Astrophysical Journal **630**, L105(2005)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Von Neumann-Cosel P., Tamii A., Electric and magnetic dipole modes in high-resolution inelastic proton scattering at  $0^\circ$ , European Physics Journal A (掲載確定) (2019).
- ② Bracco A., Lanza E. G., Tamii A., Isoscalar and isovector dipole excitations: Nuclear properties from low-lying states and from the isovector giant dipole resonance, Progress in Particle and Nuclear Physics **106**, 340-433 (2019), 査読あり。  
DOI: 10.1016/j.pnnp.2019.02.001
- ③ Sullivan C., Zegers R. G. T., Noji S., A. Inoue, N. Kobayashi, A. Tamii et al., The  $(\text{Li}6, \text{Li}^*6[3.56\text{MeV}])$  reaction at 100 MeV/u as a probe of Gamow-Teller transition strengths in the inelastic scattering channel, Physical Review C **98**, 015804-1-10 (2018), 査読あり。  
DOI: 10.1103/PhysRevC.98.015804
- ④ Fearick R. W., Erler B., Matsubara H., von Neumann-Cosel P., Richter A., Roth R., Tamii A., Origin of fine structure of the giant dipole resonance in sd-shell nuclei, Physical Review C **97**, 044325-1-7(2018), 査読あり。  
DOI: 10.1103/PhysRevC.97.044325
- ⑤ M. Mathy, J. Birkhan, H. Matsubara, P. von Neumann-Cosel, A. Tamii et al., Search for weak M1 transitions in  $^{48}\text{Ca}$  with inelastic proton scattering, Physical Review C **95**, 054316-1-11 (2018), 査読あり。  
DOI: 10.1103/PhysRevC.95.054316
- ⑥ D. Martin, P. von Neumann-Cosel, A. Tamii et al., Test of the Brink-Axel hypothesis for the pygmy dipole resonance, Physical Review Letters **119**, 182503-1-5 (2017), 査読あり。  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.182503
- ⑦ S. Bassauer, P. von Neumann-Cosel, and A. Tamii, Gamma Strength Function and Level Density of  $^{208}\text{Pb}$  from Forward-Angle Proton Scattering at 295 MeV, Physical Review C **94**, 054313-1-7 (2016), 査読あり。  
DOI: 10.1103/PhysRevC.94.054313
- ⑧ J. P. Entwisle, B. P. Kay, A. Tamii et al., Change of nuclear configurations in the neutrinoless double  $\beta$  decay of  $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$  and  $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$ , Physical Review C **93**, 064312-1-10 (2016), 査読あり。  
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.064312
- ⑨ J. Birkhan, H. Matsubara, P. von Neumann-Cosel, A. Tamii et al., Electromagnetic M1 transition strengths from inelastic proton scattering: The cases of  $^{48}\text{Ca}$  and  $^{208}\text{Pb}$ , Physical Review C **93**, 041302(R)-1-5 (2016), 査読あり。  
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.041302

[学会発表] (計 17 件)

- ① 井上梓, ビッグバン元素合成における  $^7\text{Be}(d, p)$  反応のリチウム 7 問題への寄与の研究, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019), 九州大学。
- ② 民井淳, 共鳴の減衰と準位密度, 宇宙核連絡会 (招待講演) (2019), 北海道大学。
- ③ A. Inoue, Study of the Contribution of the  $^7\text{Be}(d, p)$  Reaction to the  $^7\text{Li}$  Problem in Big-Bang Nucleosynthesis, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 2018, Hawaii, US.
- ④ Atsushi Tamii, El Response with Inelastic Scattering of Protons, IIIrd Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure -- The Many Facets of Nuclear Structure (招待講演) (2018), Bormio, Italy.
- ⑤ 民井淳, 初代天体の進化に関わる核反応, 日本物理学会シンポジウム「特異的天体環境における量子現象と元素合成」(招待講演) (2018)。
- ⑥ Atsushi Tamii, Development of Light-Ion Reaction Measurements with Radioactive Target, The 7th Yamada Workshop on RI Science Evolution 2018 (RISE18) (招待講演) (2018), Osaka Univ., Japan.
- ⑦ Atsushi Tamii, Constraints on Nuclear EOS by Nuclear Response Experiments, Physics

- of Core-Collapse Supernova and Compact Star Formations (招待講演) (2018), Waseda Univ., Japan.
- ⑧ Atsushi Tamii, Electromagnetic Response of Nuclei Relevant to the Nuclear Equation of State Studied by Proton Inelastic Scattering, Gordon Research Conference on Nuclear Chemistry (招待講演) (2017), New London, US.
  - ⑨ Atsushi Tamii, Electric Dipole Response of Nuclei Studied by Proton Inelastic Scattering, International Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN17) (招待講演) (2017), Hanoi, Vietnam.
  - ⑩ Atsushi Tamii, Electric Dipole Response of Nuclei Studied by Proton Inelastic Scattering: Symmetry Energy, Pygmy Dipole Resonance, and the Neutron Skin Thickness, 40th Symposium on Nuclear Physics (招待講演) (2017), Cocoyoc, Mexico.
  - ⑪ Atsushi Tamii, Electric Dipole Response of Nuclei Studied by Proton Inelastic Scattering —Symmetry Energy and Neutron Skin Thickness —, Zakopane Conference on Nuclear Physics - Extremes of the Nuclear Landscape - (招待講演) (2016), Zakopane, Poland.
  - ⑫ Atsushi Tamii, Constraints on the Symmetry Energy Parameters from the Electric Dipole Polarizability in  $^{120}\text{Sn}$  and  $^{208}\text{Pb}$ , 6th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM16) (招待講演) (2016), Beijing, China.
  - ⑬ Atsushi Tamii, Electric Dipole Polarizability Studied by Proton Scattering, MITP Conference on Neutron Skin (招待講演) (2016), Mainz, Germany.
  - ⑭ Atsushi Tamii, E1・M1 応答と和則, 日本物理学会秋の分科会 (招待講演) (2016) 宮崎大学.
  - ⑮ Atsushi Tamii, Electric Dipole Response of Nuclei Studied by Proton Inelastic Scattering —Symmetry Energy and Neutron Skin Thickness —, International Nuclear Physics Conference (招待講演) (2016) Adelaide, Australia.
  - ⑯ Atsushi Tamii, Nuclear Responses Studied by Proton Inelastic Scattering and the Nuclear Matter Equation of State, Nuclear in the Cosmos XIV (NIC2016) (招待講演) (2016), Niigata, Japan.
  - ⑰ Atsushi Tamii, Electric Dipole Response of Nuclei Studied by Proton Scattering, Interdisciplinary Germany-Japan Symposium (招待講演) (2016), Dresden, Germany.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

- 研究分担者氏名: 山口英斉

ローマ字氏名: Yamaguchi Hidetoshi

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 理学系研究科

職名: 講師

研究者番号 (8 桁): 30376529

- 研究分担者氏名: 牧井宏之

ローマ字氏名: Makii Hiroyuki

所属研究機関名: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

部局名: 原子核科学研究部門先端基礎研究センター

職名: 研究副主幹

研究者番号 (8 桁): 20425573

### (2) 研究協力者

- 研究協力者指名: 小林信行

ローマ字氏名: Kobayashi Nobuyuki

- 研究協力者指名: 井上梓

ローマ字氏名: Inoue Azusa

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。