

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02091

研究課題名(和文) 稀ガンマ崩壊モード探索による宇宙における元素合成過程の解明

研究課題名(英文) Search for rare gamma-decay modes to understand nucleosynthesis in the universe

研究代表者

川畑 貴裕 (KAWABATA, Takahiro)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：80359645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,600,000円

研究成果の概要(和文)：トリプルアルファ反応は宇宙における元素合成において最も重要な反応のひとつである。しかし、高温($T > 20$ 億 K)下において重要な役割を果たす ^{12}C 核の $E_x = 9.64$ MeV 状態のガンマ崩壊確率が知られていなかったため、その反応率には大きな不定性が残されていた。本研究では、固体水素標的システムとGion反跳粒子検出器を開発し、 $^1\text{H}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{Cp})$ 反応を測定することで、 $E_x = 9.64$ MeV 状態の稀ガンマ崩壊確率を初めて測定し、 $E_x = 9.64$ MeV 状態がトリプルアルファ反応率を増大させていることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トリプルアルファ反応は、元素合成が質量数5ないしは8において停滞するという、いわゆる「質量数5と8の壁」を乗り越え全ての重元素合成の戸口となる反応であり、宇宙における元素合成過程において最も重要な反応である。これまで、NACREと呼ばれる核反応率ライブラリに収録された推定値が天体核計算に広く用いられてきたが、20億Kを超える高温下におけるトリプルアルファ反応率には大きな不定性が残されていた。今回の研究成果により、高温下における反応率が明らかとなり、不定性が劇的に低減された。宇宙における元素合成過程の理解に大きく寄与するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：The triple alpha reaction is one of the most important reactions in the nuclear astrophysics. However, its reaction rate in high temperature environments at $T > 2$ GK was still uncertain because the gamma-decay probability of the 9.64-MeV state in ^{12}C as a key parameter to estimate the reaction rate was unknown. In the present work, we have developed a new solid-hydrogen target system and the Gion recoil-particle counter telescope, and have measured the gamma-decay probability of the 9.64-MeV state for the first time by measuring the $^1\text{H}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{Cp})$ reaction, and found that the 9.64-MeV state noticeably enhances the triple alpha reaction rate.

研究分野：原子核実験

キーワード：トリプルアルファ反応 宇宙における元素合成過程 固体水素標的 稀ガンマ崩壊

1. 研究開始当初の背景

トリプル・アルファ反応は、元素合成が質量数5ないしは8において停滞するという、いわゆる「質量数5と8の壁」を乗り越え全ての重元素合成の戸口となる反応であり、宇宙における元素合成過程において最も重要な反応である。

図1にトリプル・アルファ反応の経路を示す。2つの ^4He (α 粒子)の共鳴状態である単寿命の ^8Be に、新たな α 粒子が捕獲されることで3つの α 粒子の共鳴状態が ^{12}C の励起状態として生成される。結合状態のない ^8Be に対し、 ^{12}C には安定な結合状態が存在するため、 3α 共鳴状態を経由することにより「質量数5と8の壁」を乗り越えることが可能となる。生成された 3α 共鳴状態の大半は再び3つの α 粒子へと崩壊するが、極めて稀な確率で γ 崩壊して ^{12}C の基底状態となる。すなわち、 ^{12}C の 3α 共鳴状態における α 崩壊と γ 崩壊の分岐比 (γ 崩壊確率)は ^{12}C の生成速度を決定する極めて重要な物理量であり、宇宙における重元素合成の鍵を握るパラメータである。しかし、その重要性にもかかわらず、現在でも未測定 of γ 崩壊確率が残されており、トリプル・アルファ反応の速度には、いまだに不確定な要素が残されている。

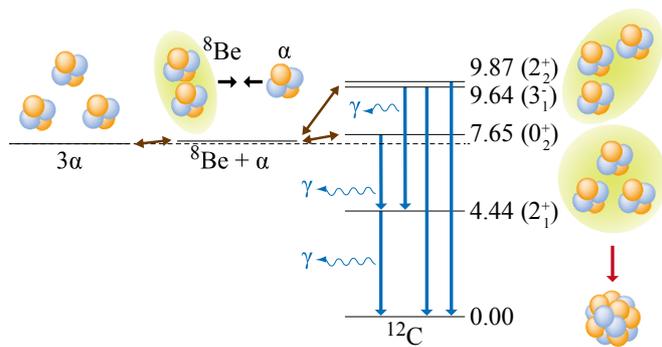


図1: トリプル・アルファ反応の経路図

通常温度 ($\sim 10^8$ K) におけるトリプル・アルファ反応は、主に 3α 崩壊の閾値に近い 0_2^+ (ホイール) 状態を経由する。ひとたび生成されたホイール状態は、 $4.4(5) \times 10^{-5}$ の確率で γ 崩壊によって脱励起し ^{12}C の基底状態へと至る。一方、 2×10^9 Kを超える高温下では、ホイール状態よりもエネルギーの高い 3α 共鳴状態である 3_1 状態や 2_2^+ 状態の寄与が重要になる。当初、H. Fyboらの研究によって、トリプル・アルファ反応に対する 2_2^+ 状態の寄与は小さいと考えられていたが¹⁾、近年のM. Itoh²⁾ や W. Zimmerman³⁾ らの研究により、 2_2^+ 状態の γ 崩壊確率が測定され、トリプル・アルファ反応に対する寄与が明らかになった。一方、 3_1 状態の γ 崩壊確率は未だに知られておらず、高温下におけるトリプル・アルファ反応率を決定するために、これを実験的に決定することが強く望まれていた。

通常温度 ($\sim 10^8$ K) におけるトリプル・アルファ反応は、主に 3α 崩壊の閾値に近い 0_2^+ (ホイール) 状態を経由する。ひとたび生成されたホイール状態は、 $4.4(5) \times 10^{-5}$ の確率で γ 崩壊によって脱励起し ^{12}C の基底状態へと至る。一方、 2×10^9 Kを超える高温下では、ホイール状態よりもエネルギーの高い 3α 共鳴状態である 3_1 状態や 2_2^+ 状態の寄与が重要になる。当初、H. Fyboらの研究によって、トリプル・アルファ反応に対する 2_2^+ 状態の寄与は小さいと考えられていたが¹⁾、近年のM. Itoh²⁾ や W. Zimmerman³⁾ らの研究により、 2_2^+ 状態の γ 崩壊確率が測定され、トリプル・アルファ反応に対する寄与が明らかになった。一方、 3_1 状態の γ 崩壊確率は未だに知られておらず、高温下におけるトリプル・アルファ反応率を決定するために、これを実験的に決定することが強く望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、 ^{12}C の 3_1 状態における稀 γ 崩壊モードを探索して、その崩壊確率から高温下におけるトリプル・アルファ反応率を決定し、宇宙における元素合成過程を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

3_1 状態の γ 崩壊モードの探索は、過去にも試みられてきたが、 3_1 状態の γ 崩壊確率が 10^{-8} — 10^{-5} と極めて小さく、これまで測定に成功した例はなかった。そこで、我々は高い感度で 3_1 状態の γ 崩壊モードを探索する独自の手法を考案した。図2に示すように、 ^{12}C ビームを固体水素標的へ入射し、 ^{12}C を励起させる。このとき、反跳された陽子のエネルギーと角度を測定すれば、 3_1 状態が励起された事象を同定することができる。励起された 3_1 状態は、大半が3つの α 粒子へと崩壊するが(図2左)、ごく稀に γ 線を放出して ^{12}C の基底状態へと脱励起する(図2右)。ゆえに、 ^{12}C と陽子を同時計測すれば、 γ 崩壊事象を同定し、全励起事象数との比較により 3_1 状態の γ 崩壊確率を決定することができる。

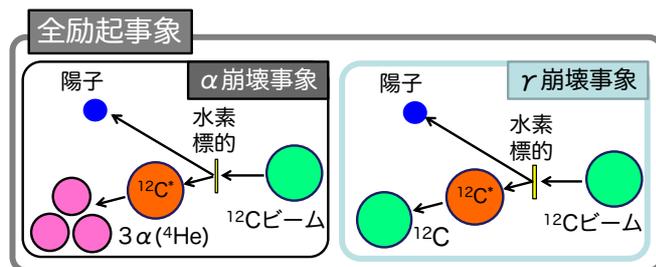


図2: 3_1 状態における γ 崩壊モード探索の概念図

この手法によって稀 γ 崩壊モードを同定するには、低バックグラウンドでの精密測定が必須である。本研究では、標的中の不純物に起因するバックグラウンドを削減するための極薄で大面積の固体水素標的や、高計数率の環境下であって反跳陽子のエネルギーと角度を決定できる荷電粒子検出器 Gion の開発を行ったほか、 ^{12}C と陽子の同時計測におけるバックグラウンドとなる偶然同時計測事象の削減を図るために、現実的な実験条件を踏まえたシミュレーション計算を行い、検出器配置の徹底的な最適化を行った。

実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP) のリングサイクロトロン施設において実施した。AVF サクロトロンを用いて加速した ^{12}C ビームを15 mm四方で厚さ0.5 mmの固体水素標的に照射し、反跳陽子をGion検出器で測定した。また、前方角度に放出された ^{12}C ないし α 粒子はRCNPが誇る高分解能磁気スペクトロメータであるGrand Raidenを用いて運動量分析したのちに計測した。反跳陽子の測定から得られた 3_1 状態の全励起事象数と、散乱 ^{12}C の同時計

実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP) のリングサイクロトロン施設において実施した。AVF サクロトロンを用いて加速した ^{12}C ビームを15 mm四方で厚さ0.5 mmの固体水素標的に照射し、反跳陽子をGion検出器で測定した。また、前方角度に放出された ^{12}C ないし α 粒子はRCNPが誇る高分解能磁気スペクトロメータであるGrand Raidenを用いて運動量分析したのちに計測した。反跳陽子の測定から得られた 3_1 状態の全励起事象数と、散乱 ^{12}C の同時計

測によって得られた γ 崩壊事象数を比較し、さらにシミュレーション計算から評価した同時計測事象の検出効率を評価することで 3_1 状態の γ 崩壊確率を $1.3(8) \times 10^{-6}$ と決定することに成功した。

4. 研究成果

図3に本研究を含めた近年の測定に基づくトリプル・アルファ反応率 $r_{3\alpha}$ と天体核計算において広く用いられているNACREと呼ばれているライブラリ⁴⁾に収録されている反応率 $r_{3\alpha}$ (NACRE)の比を温度の関数として示す。薄灰色はNACREにおける評価誤差である。NACREが構築された当時には 2^+_{2} 状態や 3_1 状態に関する実験的情報が不足していたため、 2×10^9 K以上の高温領域で大きな誤差が残っていた。Fynboらの主張¹⁾に従うと 2^+_{2} 状態の寄与は無視できる程度に小さいため、高温領域でのトリプル・アルファ反応率は点線で示すようにNACREに比べ1桁以上小さな値となる。Zimmerman³⁾らによって測定された 2^+_{2} 状態の情報を考慮すると、破線で示すように、トリプル・アルファ反応率は高温領域においていくぶん回復するものの、測定された 2^+_{2} 状態の γ 崩壊確率がNACREにおいて仮定されていた値よりも小さいため、依然としてNACREにおいて評価されていた誤差範囲を逸脱して抑制されたままとなる。

一方で、本研究によって得られた 3_1 状態の γ 崩壊確率を考慮すると太い実線と濃灰色の誤差範囲で示されたトリプル・アルファ反応率となる。 3_1 状態の寄与により、高温領域における反応率がさらに回復し、結果的にはNACREに収録された反応率と誤差の範囲内で一致することが初めて明らかになった。この成果をとりまとめた学術論文⁵⁾の執筆はほぼ完了しており、現在、共著者の間で原稿の最終確認を行っているところである。

本研究では、NACREに比べるとトリプル・アルファ反応率の誤差を大幅に縮小することに成功したが、今回測定された 3_1 状態の γ 崩壊確率には依然として50%を超える測定誤差が残されており、今後、測定精度の向上を図り、トリプル・アルファ反応率の精度を高めていく必要がある。

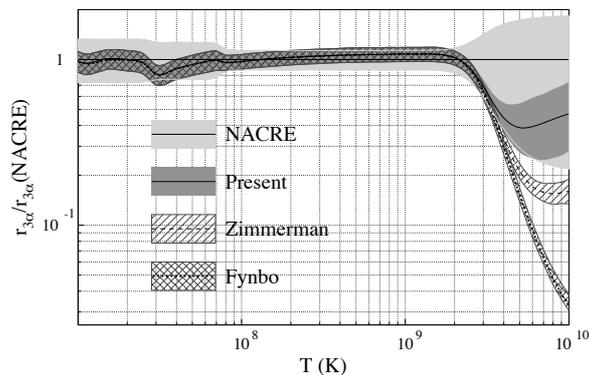


図3: 近年の測定に基づくトリプル・アルファ反応率とNACRE⁴⁾に収録された反応率の比

<参考文献>

- 1) H. Fynbo et al., Nature **433**, 136—139 (2005).
- 2) M. Itoh, T. Kawabata et al., Phys. Rev. C **84**, 054308 (2011).
- 3) W. Zimmerman et al., Phys. Rev. C **110**, 152502 (2013).
- 4) C. Angulo et al., Nucl. Phys. A **656**, 3—183 (1999).
- 5) M. Tsumura, T. Kawabata et al., in preparation.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Adachi S., T. Kawabata et al	4. 巻 97
2. 論文標題 Systematic analysis of inelastic scattering off self-conjugate $A=4n$ nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevC.97.014601	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 T. Kawabata et al.	4. 巻 118
2. 論文標題 Time-Reversal Measurement of the p-Wave Cross Sections of the $7\text{Be}(n, \gamma)4\text{He}$ Reaction for the Cosmological Li Problem	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 52701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.118.052701	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 Furuno T., Kawabata T., Adachi S., Ayyad Y., Kanada-En'yo Y., Fujikawa Y., Inaba K., Murata M., Ong H. J., Sferrazza M., Takahashi Y., Takeda T., Tanihata I., Tran D. T., Tsumura M.	4. 巻 100
2. 論文標題 Neutron quadrupole transition strength in ^{10}C deduced from the $^{10}\text{C}(\gamma, n)$ measurement with the MAIKo active target	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54322
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.100.054322	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 Furuno T., Kawabata T., Ong H.J., Adachi S., Ayyad Y., Baba T., Fujikawa Y., Hashimoto T., Inaba K., Ishii Y., Kabuki S., Kubo H., Matsuda Y., Matsuoka Y., Mizumoto T., Morimoto T., Murata M., Sawano T., Suzuki T., Takada A., Tanaka J., Tanihata I., Tanimori T., Tran D.T., Tsumura M., Watanabe H.D.	4. 巻 908
2. 論文標題 Performance test of the MAIKo active target	5. 発行年 2018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 215--224
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.042	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 Kawabata Takahiro	4. 巻 2076
2. 論文標題 Nuclear experimental approaches towards nucleosynthesis in the universe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 30008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5091634	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 川畑貴裕	4. 巻 64 Supplement 1
2. 論文標題 原子核におけるクラスター構造と宇宙における元素合成過程	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 原子核研究	6. 最初と最後の頁 13--21
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18件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 KAWABATA Takahiro
2. 発表標題 Nuclear Astrophysics at RCNP
3. 学会等名 JSPS/NRF/NSCF A3 Foresight Program "Nuclear Physics in the 21st Century" Joint Kick Off Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 KAWABATA Takahiro
2. 発表標題 Search for Rare α -decay Modes in ^{12}C and Recent Activities of Kyoto-Osaka Experimental Nuclear Cluster Physics Group
3. 学会等名 ECT* Trento Workshop on "Light clusters in nuclei and nuclear matter: Nuclear structure and decay, heavy-ion collisions, and astrophysics" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川畑貴裕
2. 発表標題 極端環境下におけるトリプルアルファ反応率
3. 学会等名 宇宙核物理連絡協議会研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 KAWABATA Takahiro
2. 発表標題 Nuclear experimental approach to cluster correlation and nucleosynthesis in the universe
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土井隆暢, 川畑貴裕, 古野達也
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いたMAIKo TPCの飛跡データの解析
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土井隆暢, 川畑貴裕, 古野達也
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いたTPCの飛跡検出法の開発
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kawabata, M. Tsumura and Y. Takahashi, for RCNP E404 Collaboration
2. 発表標題 Search for rare β -decay modes in ^{12}C
3. 学会等名 The 4th International Workshop on State of the Art in Nuclear Cluster Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川畑貴裕
2. 発表標題 宇宙リチウム問題のための $^7\text{Be}(n, \gamma)^4\text{He}$ 反応断面積の直接測定
3. 学会等名 宇宙核物理連絡協議会研究会, (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川畑貴裕
2. 発表標題 シンクロトロン施設における逆コンプトンガンマ線生成と原子核物理への応用
3. 学会等名 シンクロトロン光が拓く学際的物理研究の可能性 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川畑貴裕
2. 発表標題 Direct measurement of the $^7\text{Be}(n, \gamma)^4\text{He}$ reaction cross sections for the cosmological lithium problem
3. 学会等名 the Korean Physics Society Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川畑貴裕
2. 発表標題 Alpha inelastic scattering and cluster structures in stable and unstable nuclei
3. 学会等名 the International workshop on Hadron and Nuclear Physics 2017 (HNP2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川畑貴裕
2. 発表標題 Present Status of the Cosmological Lithium Problem
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kawabata, T. Furuno, T. Hashimoto, M. Ichikawa, M. Itoh, N. Iwasa, Y. Kanada-En'yo, A. Koshikawa, S. Kubono, E. Miyawaki, K. Mizutani, T. Morimoto, M. Murata, T. Nanamura, S. Nishimura, R. Sawada, T. Takeda, M. Tsumura, K. Watanabe, and S. Yoshida
2. 発表標題 Direct measurement of the ${}^7\text{Be}(n, \gamma){}^4\text{He}$ reaction cross sections for the cosmological Li problem
3. 学会等名 7th International Conference on Heavy-Ion Collisions at Near-Barrier Energies (FUSION17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Kawabata, T. Furuno, M. Ichikawa, N. Iwasa, Y. Kanada-En'yo, A. Koshikawa, S. Kubono, E. Miyawaki, T. Morimoto, M. Murata, T. Nanamura, S. Nishimura, Y. Shikata, Y. Takahashi, T. Takeda, M. Tsumura, and K. Watanabe
2. 発表標題 The first measurement of cross section for the ${}^7\text{Be}(n, \gamma){}^4\text{He}$ reaction near the threshold energy
3. 学会等名 International Nuclear Physics Conference (INPC2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Tsumura, T. Kawabata
2 . 発表標題 Search for the rare β -decay mode in ^{12}C
3 . 学会等名 the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV (NIC-XIV) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 越川亜美, 川畑貴裕, 古野達也, 津村美保, 村田求基, 森本貴博, 黒澤俊介, 山路晃宏, 村上力輝斗, 堀合毅彦, 知場啓志
2 . 発表標題 GAGGを用いた荷電粒子検出器の性能評価
3 . 学会等名 日本物理学会第71回年次大会
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Tsumura, T. Kawabata, S. Adachi, T. Furuno, A. Koshikawa, M. Murata, T. Morimoto, A. Tamii, T. Hashimoto, K. Hatanaka, Y. Matsuda, K. Miki, C. Iwamoto, T. Itoh, M. Miura, J. Zenihiro, S. Kubono, M. Itoh, Y. Maeda, S. Sakaguchi, H. Akimune, H. Fujimura, I. Ou
2 . 発表標題 Search for the rare gamma-decay mode in ^{12}C
3 . 学会等名 Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Tsumura, T. Kawabata, S. Adachi, T. Furuno, A. Koshikawa, M. Murata, T. Morimoto, A. Tamii, T. Hashimoto, K. Hatanaka, Y. Matsuda, K. Miki, C. Iwamoto, T. Itoh, M. Miura, J. Zenihiro, S. Kubono, M. Itoh, Y. Maeda, S. Sakaguchi, H. Akimune, H. Fujimura, I. Ou
2 . 発表標題 Search for the rare gamma-decay mode in ^{12}C
3 . 学会等名 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻 原子核実験研究室
http://nucl.phys.sci.osaka-u.ac.jp/

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	久保野 茂 (KUBONO Shigeru) (20126048)	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・客員主管研究員 (82401)	
研究分担者	伊藤 正俊 (ITOH Masatoshi) (30400435)	東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・准教授 (11301)	
研究分担者	松田 洋平 (MATSUDA Yohei) (50569043)	東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教 (11301)	
研究分担者	秋宗 秀俊 (AKIMUNE Hidetoshi) (60319829)	甲南大学・理工学部・教授 (34506)	
研究協力者	津村 美保 (TSUMURA Miho)	京都大学・大学院理学研究科・大学院生 (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	高橋 祐羽 (TAKAHASHI Yu)	京都大学・大学院理学研究科・大学院生 (14301)	