

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244043

研究課題名(和文)ハイパー核ガンマ線分光法を用いた核内ラムダ粒子の磁気モーメントの研究

研究課題名(英文)Study of Lambda's g-factor in a nucleus via hypernuclear gamma-ray spectroscopy

研究代表者

田村 裕和 (Tamura, Hirokazu)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：10192642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,400,000円

研究成果の概要(和文)：ハイパー核精密線分光により、ハイパー核の スピン反転M1遷移の換算遷移確率B(M1)を測定して核内粒子の磁気モーメントを求め、バリオンの核媒質効果を調べる。そのためJ-PARC E13実験を進めた。線検出器Hyperball-J、K1.8/SKSスペクトロメータ検出器、液体標的の開発・製作・調整を行い、実際のビームで装置全体の性能確認を行った。(K-, -)反応断面積の新しいデータも得た。Ge検出器超高計数用読み出し回路も開発した。J-PARCの事故のためビームタイムが中断し期間内に物理データが取れなかったが、H27年4月の運転再開後直ちに実験を行い、¹⁹F等の成果が出る予定である。

研究成果の概要(英文)：By measuring the g-factor of a particle in a nucleus via B(M1) values of spin-flip -transitions of hypernuclei using hypernuclear -ray spectroscopy, we study possible nuclear medium effects of baryons. For this purpose, we have prepared for the J-PARC E13 experiment; we developed, manufactured, installed, and tested a germanium detector array, Hyperball-J, and various detectors for the K1.8/SKS magnetic spectrometers. A new high-rate readout method of Ge detectors has been also developed. The whole apparatus has been tested with an actual K- beam at K1.8 beam line and found to have good performance. In addition, new data for the (K-, -) reaction cross sections were also obtained. Unfortunately, due to an accident at the J-PARC facility in May of 2013, our beam time postponed for almost 2 years and we were not able to take physics data by the end of FY2014. However, we will be able to obtain physics results for ¹⁹F hypernucleus immediately after beam recovery in April 2015.

研究分野：実験核物理

キーワード：実験核物理 ハイパー核 ストレンジネス ガンマ線分光 磁気モーメント 粒子 媒質効果 J-PARC

1. 研究開始当初の背景

以前より、核内にあるハドロンの性質が自由空間にあるときとは異なることを示唆するさまざまな実験データや理論的考察があったが、こうしたハドロンの核媒質効果についての一貫した理解は進んでいなかった。一方、原子核中で QCD のカイラル対称性が部分的に回復することが理論的に予測され、この十数年の間に、ハドロンの核内での質量変化の研究が核物理の重要なテーマとして認識されるようになった。

この世界の物質の質量の大部分は、わずかに数 MeV の質量をもつ u, d クォークが、低温低密度の環境でハドロンとなる際にカイラル対称性の自発的破れによって $m_{\text{eff}} \sim 300$ MeV の有効質量を獲得することで生ずると考えられているが、その機構の詳細を QCD から完全に理解するには至っていない。核物質中では、カイラル対称性の部分的回復によって u, d クォークの有効質量が減少することが理論的に予測されており、これを実験で調べることでハドロンの質量獲得のシナリオを検証できる。実際、核内にある ϕ などのベクトル中間子が崩壊する際、その不変質量分布が低い側にシフトすることを示唆するデータが KEK-PS E325 実験で得られている。一方、Sn 同位体の深いパイ中間子原子レベルからも、理論予想と consistent なカイラル対称性の回復を示すデータが得られている。

これらの研究では核内に埋め込んだ中間子を対象としており、バリオンを対象とした研究は行われていない。そこで、ここでは核内バリオンの磁気モーメントを考える。バリオンの磁気モーメントは、u, d クォークが構成子質量 $m_{\text{eff}} \sim 300$ MeV の Dirac 粒子磁気モーメント $\mu = qh_{\text{bar}}/2m_{\text{eff}}c$ をもつとするとうまく説明できる。よって、カイラル対称性の部分的回復によって核内で m_{eff} が 1~2 割減少するならば、核内のバリオンの磁気モーメントは 1~2 割増加する可能性がある。通常の原子核の磁気モーメントは、核密度の低い場所にある最外殻の核子が担うため変化をあまり受けない上、核力のスピン依存性が強いために芯偏極効果が大きく、核内での核子自身の g 因子を調べることは困難である。しかし Λ 粒子は核内でパウリ効果を受けず深部の 0s 軌道に存在できる上、 Λ スピンに依存する Λ ・核子間相互作用は核子・核子間相互作用に比べて 1 桁小さいことが我々の一連のハイパー核 γ 線分光実験により最近確立した。実際、 Λ 粒子がハイパー核の Λ 以外の部分(芯核)のスピン構造をほとんど変えないことがわかっている。そこで核内の 0s 軌道にある Λ 粒子の g 因子を調べることが可能と考えられる。

2. 研究の目的

Λ ハイパー核の核内にある Λ 粒子の磁気モ

ーメント(正確には g 因子)を測定し、これを自由空間での値と比較することによって、原子核内部にあるバリオンの磁気モーメントに対する核媒質効果を研究する。本実験では、 Λ ハイパー核の基底状態二重項間の Λ スピン反転 M1 遷移の換算遷移確率 $B(M1)$ を測定し、そこから Λ 粒子の核内 g 因子を導出する。

核内 Λ 粒子の磁気モーメントの測定方法としては、偏極した Λ ハイパー核を磁場中で歳差運動させて磁気モーメントを直接測るのが正攻法だが、 Λ の短い寿命のためこの方法は現状では不可能である。そこで、本研究では、我々が 1998 年に開拓した Λ ハイパー核精密 γ 線分光の手法を用いて、 Λ ハイパー核の基底状態二重項間の Λ スピン反転 M1 遷移について、換算遷移確率 $B(M1)$ を測定する。この $B(M1)$ は、コア核の g 因子 g_c と Λ の g 因子 g_Λ によって

$$B(M1) = (2J_{\text{up}} + 1)^{-1} |\langle \psi_{\text{low}} \| \mu \| \psi_{\text{up}} \rangle|^2 \\ = \frac{3}{8\pi} \frac{2J_{\text{low}} + 1}{2J_c + 1} (g_c - g_\Lambda)^2$$

と書けるため g_Λ を導出できる。 $B(M1)$ は、励起状態の寿命 τ を測定し、

$$1/\tau = 16\pi/9 E_\gamma^3 B(M1)$$

から求める。寿命の測定には「Doppler shift 減衰法」を用いる。精度よく寿命を求めるには、反応で生成し、ある反跳速度で動き出したハイパー核(励起状態)が、標的物質中で減速して静止するまでの時間 t_{stop} と、その励起状態の γ 線放出寿命 τ とが、同程度である必要がある。

3. 研究の方法

Λ ハイパー核の基底状態二重項間の Λ スピン反転 M1 遷移の換算遷移確率 $B(M1)$ を測定し、 Λ 粒子の核内 g 因子を導出する。J-PARC K1.8 ラインと SKS スペクトロメータを用い、1.5~1.8 GeV/c の K⁻ ビームによる (K⁻, π^-) 反応で、 ${}^7_\Lambda\text{Li}$ 、 ${}^{19}_\Lambda\text{F}$ などの標的から ${}^7_\Lambda\text{Li}$ や ${}^{19}_\Lambda\text{F}$ の基底状態二重項の励起状態を生成し、そこから基底状態への Λ スピン反転 M1 遷移の γ 線を新型 Ge 検出器群 Hyperball-J を用いて高精度測定し、Doppler 効果によるピークの広がりから 5% 程度の精度で励起状態の寿命を測り、 $B(M1)$ を求めることを目指す。実験は、すでにビームタイムが認められている J-PARC E13 実験(実験責任者は研究代表者の田村)として行う。 ${}^7_\Lambda\text{Li}$ と ${}^{19}_\Lambda\text{F}$ のように質量数の異なるハイパー核の測定から、核内 Λ 粒子の g 因子変化の核密度依存性がわかり、バリオン磁気モーメントへのカイラル対称性回復の効果を調べることができる。

研究の手順は以下の通り。まず、これまで開発してきた Hyperball-J の Ge 検出器や PWO

検出器の改良を進め、これらを製作し組み上げて Hyperball-J を完成させる。これを J-PARC ハドロン施設 K1.8 ラインに設置し、調整を行うとともに、K1.8/SKS 磁気スペクトロメータの検出器系を開発・製作・調整する。その後、 ${}^4\Lambda\text{He}$ および ${}^{19}\Lambda\text{F}$ の線分光実験を実施する。その後、K1.1 ラインにおいて検出器系を整備して ${}^7\Lambda\text{Li}$ の線分光実験を実施する。ここではビーム強度の増加が期待されるため、Ge 耐高計数率性能を高めた波形読出し法を開発する。

なお E13 実験では、最初にまず液体ヘリウム標的を用いた ${}^4\text{He} (K, \pi) {}^4\Lambda\text{He}$ 反応により ${}^4\Lambda\text{He}$ ハイパー核の γ 線を測定し、そこから ΛN 相互作用の荷電対称性の破れを調べる。この荷電対称性の破れは、核内 Λ 粒子の Λ - Σ 混合が原因と考えられるが、 Λ - Σ 混合は核内 Λ 粒子の磁気モーメントにも影響を与えるため、 ${}^4\Lambda\text{He}$ のデータも本研究課題にとって重要な情報を与えることとなる。

4. 研究成果

(1) Hyperball-J の開発と設置

ハイパー核ガンマ線分光専用のゲルマニウム検出器群 Hyperball-J (本課題の開始以前から開発を行っていたもの) の開発・製作に成功した。

まず、通常の液体窒素温度よりも低温に結晶を保持して放射線損傷の影響を大幅に低減するため、Ge 検出器にパルス管冷凍機を接続した低温型 Ge 検出器の開発が終了した。エネルギー分解能は 1.33 MeV で 3 keV (FWHM) 程度であり、従来の液体窒素冷却型には及ばないが、本研究には十分なレベルであった。

バックグラウンド抑止用の PWO カウンターについては、製作済の検出器の詳細なテストを行うとともに、高計数率の下流側に設置する 4 台分について高品質のロシア製 PWO 結晶を購入して日本で加工して新たに製作し、性能を確かめた。

なお、Ge 検出器の一部は東日本大震災で被害を受けたため修理を行い、震災のため J-PARC での実験ができなかった H24 年春までの期間には、検出器を福島汚染土壌の分析に使用した。

H24 年 6 月に J-PARC K1.1BR ラインで 2 組の Ge 検出器と PWO カウンターを設置して、本番と同じ中間子ビームを用いてテスト実験を行ったところ、Ge 検出器の検出効率と分解能の大強度ビームに対する性能は、過去の経験から予想される性能を若干上回った。PWO カウンターの性能も良好であった。

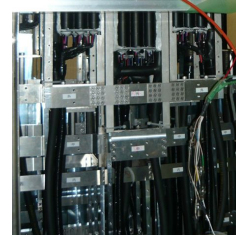
さらに、高圧電源や Ge 検出器冷凍機等の制御システムを完成させ、Hyperball-J の磁気シールドやケーブル類などの周辺装備を整え、また、昇降機構を備えた専用架台を設計・製作した。

H25 年 3 月に J-PARC K1.8 ラインに Hyperball-J を組立て、配線、調整を行った(下図は設置した Hyperball-J の写真)。また、読み出し回路系とデータ収集系を構築した。

H25 年 4~5

月 (J-PARC の事故直前) には、K1.8 ラインの K-ビームを用いて本番と同じ条件で性能確認を行い、分解能や検出効率などについて十分な性能が確かめられた。

Hyperball-J の解析プログラムを開発・改良した。目的のハイパー核 γ 線ピークに Doppler shift 減衰法を適用して γ 線放出の寿命を求め、そこから核内 Λ 粒子の g 因子を導出するための解析プログラムも開発した。



(2) 磁気スペクトロメータ系の整備

K1.8/SKS 磁気スペクトロメータの検出器については、E13 実験に合わせた設置位置の変更や調整、動作確認を行った。さらに、 (K, π) 反応で実験を行う場合に、ビーム中の K^- の $K^- \pi^0, \mu^- \nu^{\text{bar}}$ 崩壊事象がハイパー核の missing mass スペクトルに大きなバックグラウンドを生じさせることがわかっていたため、これを抑制するための π^0 検出器 (SP0) とミュオンフィルタ検出器 (SMF) を新たに開発するとともに、ビームおよび散乱粒子の K^- と π を精度よく分別するための 3 種類の高性能エアロゲルチェレンコフカウンターを開発した。これらを製作し、H25 年 3 月に K1.8 ラインに設置した。

一方、K1.8 ライン上流と標的直後の位置検出器として、東北大で開発したシンチレーションファイバー飛跡検出器を設置し、H24 年 12 月~H25 年 1 月に K1.8 ラインで行われた別のハイパー核実験 (E10) において性能を調べ、従来の 5~10 倍の大強度ビーム中で動作することが分かった。

(3) 液体標的の開発

E13 実験で使用するヘリウムとフッ素標的のための液体標的を開発した。

いずれも専門家である KEK 石元氏の協力を得て設計・製作した。ヘリウム標的は GM 冷凍機による再凝縮機能をもつもので、物質量を最小限に抑えた体積 2.5 リットルのステンレス製セルの中に長期間安定して液体ヘリウムを維持することができた。

フッ素標的としては、他の元素からくるバックグラウンドが無視でき、低密度のため Doppler shift 減衰法が使える条件に当てはまる、無水フッ化水素(HF)の標的の開発を進めた。容積 1 リットルのテフロン製特殊容器を製作し、ガスとして移送して冷やして液化する方式のものを試作した。何重にも安全に配慮した充填・移動・保管方法を検討したが、最終的に J-PARC 施設側からの使用許可を得ることができなかった。そこで HF に次いでバックグラウンド元素が少なく密度が小さいフッ素化合物である CF_4 の低温液体標的(体積 1.4 リットル)を開発した。これは、液体ヘリウム標的用の冷却器と同じものをヒーターで制御して高温で使用することで CF_4 ガスをステンレス製の標的セルの中に液化して維持するものであり、長期的に安定して運転することに成功した。

(4) (K^-, π^-) 反応の断面積測定

H25 年 5 月の J-PARC 事故の直前に収集したビームによるテストデータを解析し、1.8, 1.5 GeV/c の K^- ビームによる $\text{K}^- p \rightarrow \Sigma^+ \pi^-$ 反応の微分断面積、および、1.5, 1.8 GeV/c での ^{12}C (K^-, π^-) 反応による ^{12}A ハイ - パ核の生成の微分断面積を導出した。(下図は得られた ^{12}A ハイ - パ核の質量スペクトル。) これらは、今後 (K^-, π^-) 反応によってハイパー核を生成する実験を行う際の参考となるとともに、 (K^-, π^-) 反応を理解するための貴重なデータとなった。さらに K1.8 / SKS 磁気スペクトロメータが十分なエネルギー分解能と検出効率をもつことを確認した。

(5) J-PARC 放射線事故とその後の対応

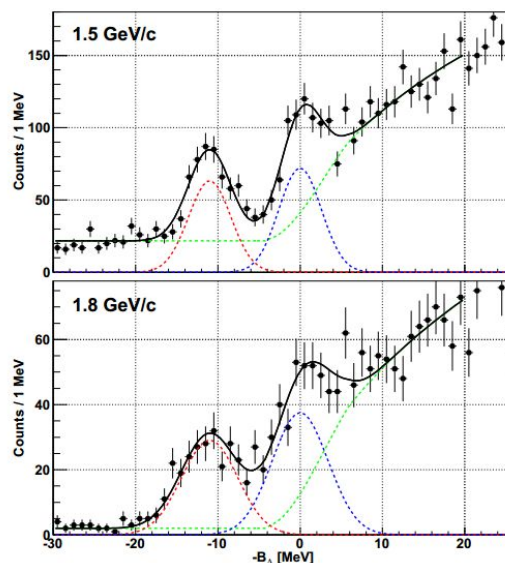
E13 実験の本データを取得する直前の H25 年 5 月に、J-PARC ハドロン施設の 2 次ビーム生成標的の溶解事故が発生し、施設の運転が中断した。事故対策として進められたハドロン施設の改修が予想より遅れ、H26 年度内には運転が再開しなかった。だが、必要な実験装置の設置、調整、性能テストをすべて完了していたため、H27 年度に施設の運転が再開すればその直後にデータが取れ、結果が出せる状況となっている。

H26 年秋からは、実験再開に向けて改めて Ge 検出器の真空引き等のメンテナンスを行い、再び K1.8 ラインの Hyperball-J 架台に設置して、全体の動作確認を行った。

なお、H27 年 4 月 24 日に施設のユーザービーム利用が再開し、 ^4He (K^-, π^-) ^4A He 反応による ^4A He ハイパー核の γ 線分光のデータを 5 月上旬にかけて収集することができた。核内 Λ の磁気モーメントの情報が得られると期待される ^{19}F ハイパー核の γ 線分光実験は 6 月に実施されることとなっている。

(6) Ge 検出器の高計数読み出し系の開発

今後の J-PARC ビーム強度向上に備えて、波形解析によるゲルマニウム検出器の超耐



高計数読み出し系の開発を進めた。

波形デジタイザを用いて Ge 検出器の波形データを取得し、パイルアップやベースラインシフトなどの高計数率で読み出し効率を低下させる事象に対してはオフラインで波形分解やベースライン補正を行う方式を考案した。波形デジタイザとしては、米国アルゴンヌ研究所製の Ge 検出器用のデジタイザシステムを利用することとしたが、ハイパー核ガンマ線分光の高計数率の実験環境では、通常よりプリアンプゲインが低いリセット型 Ge 検出器を使用する必要があり、そのプリアンプ出力をデジタイズするためには、デジタイザの前段に信号を微分して増幅する回路が必要であることがわかった。そこでその前段処理回路を開発した。微分回路で生ずるリセット時の巨大な信号を除去するためにアナログスイッチを導入した。試作の結果、実際に使用可能なものができ、これを用いた読み出し系の性能は十分良いことが確かめられた。我々の将来の実験だけでなく、超高計数率下での Ge 検出器の読み出し法として広く利用されるものと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 22 件)

T. Koike, N. Chiga, T. Haruyama, K. Hosomi, H. Ichinohe, K. Kasami, T. Matsushita, Y. Mizoguchi, H. Ono, K. Shirotori, T. Takeuchi, H. Tamura, T.O. Yamamoto, “Development of a low-temperature germanium detector via mechanical cooling with a compact pulse-tube refrigerator”, Nucl. Instr. Meth. A 770 (2015) 1-7. (査読あり) DOI: 10.1016/j.nima.2014.09.084

S.B. Yang, T. Koike, K. Miwa, H. Tamura (49 名中 42 番目), M. Ukai et al., “High precision gamma-ray spectroscopy of ^4A He and ^{19}F at J-PARC”, JPS Conf. Proc. 1 (2014) 013076. (査読あり)

DOI: 10.7566/JPSCP.1.013076

H. Tamura,

“Nuclear Matter in Neutron Stars -- A Great Challenge in Nuclear Physics”,
JPS Conf. Proc. 1 (2014) 011003. (査読あり)
DOI: 10.7566/JPSCP.1.011003

H. Tamura, K. Hosomi, S. Bufalino, N. Chiga, P. Evtoukhovitch, A. Feliciello, R. Honda, T. Koike, Y. Ma, K. Miwa, A. Sasaki, Y. Sasaki, K. Shirotori, K. Tanida, Z. Tsamalaidze, M. Ukai, T.O. Yamamoto, S.B. Yang,
“Gamma-ray spectroscopy of hypernuclei -present and future”,
Nucl. Phys. A 914 (2013) 99-108. (査読あり)
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2013.03.014

K. Hosomi, T. Koike, K. Miwa, H. Tamura (34 名中 28 番目), M. Ukai et al.,
“Gamma-ray spectroscopy of $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ via the (π^+, K^+) reaction”,
Nucl. Phys. A914 (2013) 184-188. (査読あり)
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2013.04.007

H. Tamura, M. Ukai, T.O. Yamamoto, T. Koike,
“Study of Lambda hypernuclei using hadron beams and gamma-ray spectroscopy at J-PARC”,
Nucl. Phys. A881 (2012) 310-321. (査読あり)
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2012.02.013

Toshiyuki Takahashi, Takeshi Koike, Koji Miwa, Hirokazu Tamura (75 名中 60 番目), Mifuyu Ukai et al.,
“Beam and SKS spectrometers at the K1.8 beam line”,
Prog. Theor. Exp. Phys. 2012 (2012) 02B010. (査読あり) DOI: 10.1093/ptep/pts023

H. Tamura,
“Strangeness nuclear physics experiments at J-PARC”,
Prog. Theor. Exp. Phys. 2012 (2012) 02B012. (査読あり) DOI: 10.1093/ptep/pts056

[学会発表] (計 24 件)

H. Tamura,
“Recent results and perspective on hypernuclei”,
Particles And Nuclei International Conference (PANIC2104), 2014.8.25 ~ 8.29, Hamburg, Germany.

H. Tamura,
“Results and Perspectives from J-PARC”,
Perspectives of high resolution hypernuclear spectroscopy at JLab, 2014.5.7 ~ 5.29, Jefferson Laboratory, Newport News, Virginia, USA.

H. Tamura,

“Future Prospect of Hadron/Nuclear Physics at J-PARC”,
KEK Theory Center Workshop on J-PARC Hadron Physics
2014.2.10 ~ 2.12, IQBRC, Tokai, Japan.

H. Tamura,

“Gamma spectroscopy of hypernuclei”,
The Fourth International Conference on Nuclear Fragmentation (NUFRA2013), 2013.9.29 ~ 10.6, Kemer, Turkey

H. Tamura,

“Prospect of hypernuclear γ -ray spectroscopy”,
YITP workshop on nuclear equation of state and hypernuclear physics, 2013.1.18 ~ 1.19, Yukawa Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan.

H. Tamura,

“Strangeness Nuclear Physics”,
Int. Symposium on “Quarks to Universe in Computational Science”, 2012.12.13 ~ 12.16, Nara, Japan.

H. Tamura,

“Gamma-ray spectroscopy of hypernuclei”,
11th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2012),
2012.10.1 ~ 10.5, Barcelona, Spain.

H. Tamura,

“Gamma-ray spectroscopy in hypernuclei”,
10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics,
2012.9.24 ~ 9.28, Debrecen, Hungary.

H. Tamura,

“Gamma-ray spectroscopy of hypernuclei”,
RIBF ULIC and CNS Symposium on Frontier of gamma-ray spectroscopy (gamma11), 2011.6.30 ~ 7.2, RIKEN, Wako, Japan.

H. Tamura,

“Hyperons in nuclei – review”,
The XIV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron2011), 2011.7.13 ~ 7.17, Munich, Germany.

H. Tamura,

“Hypernuclear Physics via γ -ray spectroscopy”,
2011 Fall Meeting of the APS Division of Nuclear Physics, 2011.10.26 ~ 10.29, Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA.

田村裕和

「ハイパー核ガンマ線分光の展開」
日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011.9.16 ~ 9.19, 弘前市.

〔その他〕

(1) ホームページ

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/strangeness/>

(2) 修士論文

田辺 鴻典 (2014 年度、東北大学)

「 (K, π) 反応によるハイパー核 γ 線分光実験用トリガーカウンターシステムの開発」

山本 康嵩 (2014 年度、東北大学)

「ハイパー核ガンマ線分光実験用 Ge 検出器のデジタル読み出しシステムの開発」

佐々木 昭雄 (2013 年度、東北大学)

「ハイパー核ガンマ線分光装置 Hyperball-J 検出器ユニットの性能評価」

佐々木 侑輝 (2013 年度、東北大学)

「 (K, π) 反応を用いた ハイパー核実験における ビーム粒子崩壊識別検出器の研究」

杉原 謙光 (2011 年度、東北大学)

「Development of a fast readout system for the Ge detector array, Hyperball-J」

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

田村 裕和 (TAMURA Hirokazu)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：10192642

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

小池 武志 (KOIKE Takeshi)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：70396422

三輪 浩司 (MIWA Koji)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：50443982

鷓養 美冬 (UKAI Mifuyu)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：30420053

肥山 詠美子 (HIYAMA Emiko)

理化学研究研・仁科加速器研究センター・准主任研究員

研究者番号：10311359