

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05390

研究課題名(和文) Cu同位体の励起状態核磁気モーメント測定による中性子過剰核の核構造研究

研究課題名(英文) Study of neutron-rich nuclear structure through the magnetic-moment measurement of excited states of Cu isotopes

研究代表者

市川 雄一 (Ichikawa, Yuichi)

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：20532089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、中性子過剰領域の銅同位体 ^{75}Cu 励起状態の核磁気モーメント測定実験を行った。理化学研究所RIBFにて行った実験では、独自に開発してきた分散整合二回散乱法によるスピン整列RIビームを用いることで、30%という非常に高いスピン整列度を持つ ^{75}Cu ビームの生成に成功し、 ^{75}Cu の励起状態の核磁気モーメント測定に成功した。本実験で得られた核磁気モーメント測定値を最新の理論計算と比較した結果、 ^{75}Cu は変形したコアの周囲をバレンス陽子が周回している描像でよく記述できることが明らかになり、さらに中性子過剰銅同位体における変形の効果を取り入れた殻進化の描像を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、陽子魔法数28近傍の不安定核に対して基底状態のみならず励起状態に対しても磁気モーメントを測定することで、変形の効果を踏まえた上での殻進化の描像を提示した。エキゾチック核の見せる多様性には、殻進化と変形の両者が競合しながら寄与する。本研究は、その統一的な理解への第一歩となるものである。今後、他の魔法数近傍核でも磁気モーメント測定を通じて、詳細な内部構造の検証が可能になると期待される。

研究成果の概要(英文)：The nuclear structure of neutron-rich Cu isotopes was studied through the magnetic-moment measurement of an excited state of ^{75}Cu . At the experiment carried out at RIKEN RIBF, the RI beam of ^{75}Cu with spin alignment as large as 30% was produced by employing the two-step reaction scheme with momentum-dispersion matching, and its magnetic moment was determined for the first time. As a result of the comparison of the experimental value with theoretical calculations based on the Monte-Carlo shell model, the ^{75}Cu nucleus was found to be regarded as a system of one valence proton orbiting a deformed ^{74}Ni core. Furthermore, this results proposes a picture of nuclear shell evolution in the presence of deformation in the neutron-rich Cu isotopes.

研究分野：実験原子核物理

キーワード：不安定核 スピン 磁気モーメント RIビーム 励起状態

1. 研究開始当初の背景

天然に存在する安定原子核に比べて陽子数と中性子数の比が大きく異なる不安定核は多様で時にエキゾチックな存在形態を見せることが知られている。この多様性を生み出す原動力となっているのが、構成核子の殻構造が変化する「殻進化」、そして原子核形状の全体的な「変形」である。実際の不安定核では、この二つの特徴が競合しながら構造が発現すると考えられる。

このような殻進化と変形の競合に関して注目を集めているのが、中性子過剰な銅 (Cu) 同位体である。Cu 同位体の陽子数は 29 であり、魔法数 28 よりも 1 だけ多いことから、基底状態、および低励起状態に陽子の一粒子運動的性質が発現する。しかし、中性子数が魔法数 40 から 50 まで (^{69}Cu から ^{79}Cu まで) 変化していくうちに、ある程度の変形の効果も生じているはずである。この中性子過剰 Cu 同位体の中で最も重要なものは、中性子数 46 を持つ ^{75}Cu である。図 1 に示すように、中性子数が偶数である奇質量 Cu 同位体では、スピンパリティ $5/2^-$ を持つ一粒子的状态の励起エネルギーが中性子増加に伴って低下していく。そして、 ^{73}Cu まで基底状態のスピンパリティは $3/2^-$ であるが、 ^{75}Cu で突然 $5/2^-$ へと変化する。この ^{75}Cu における基底状態のスピンパリティ変化は、これまでは主に殻進化の帰結として説明されてきたが、変形効果がどの程度影響しているかは分かっていなかった。当該中性子過剰領域は宇宙元素合成過程において重要な役割を果たす二重魔法数核 ^{78}Ni の近傍であるため、この領域のエキゾチックな核構造を殻進化と変形の両者の効果を取り入れて統一的に理解することは不安定核物理の喫緊の目標の一つである。それに向けたマイルストーンとして、これまでの Cu 同位体における殻進化の議論の基盤となっていた励起エネルギーだけではなく、波動関数という微視的な観点から殻構造と変形の効果の競合を明らかにすることが求められていた。

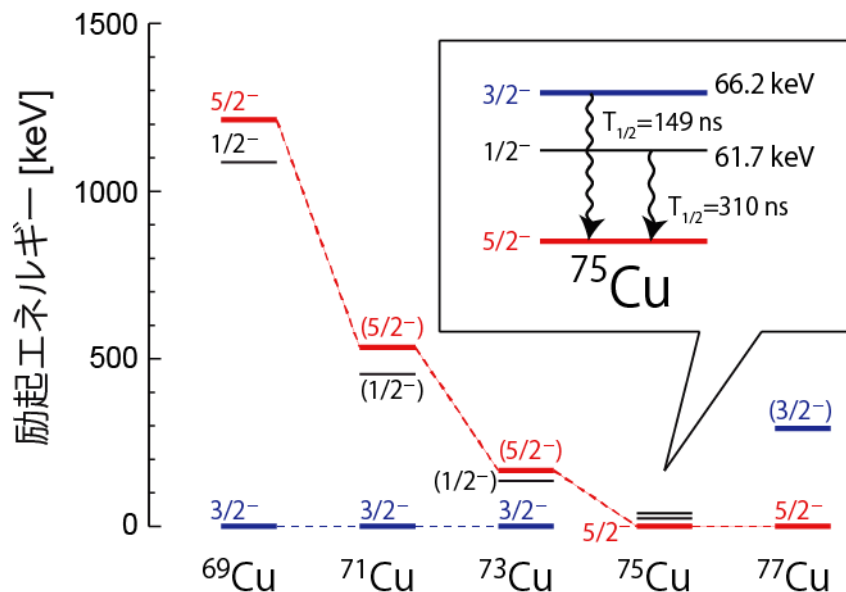


図 1. 中性子過剰な奇質量 Cu 同位体における励起エネルギーとスピンパリティの変遷
 中性子数の増加とともに $5/2^-$ 状態の励起エネルギーが低下していき、 ^{75}Cu で基底状態のスピンパリティが $3/2^-$ から $5/2^-$ へと変化する。 ^{75}Cu には二つのアイソマー励起状態が存在する。本実験の結果から 66.2 keV の励起状態がスピンパリティ $3/2^-$ を持つことが確認された。

2. 研究の目的

本研究では、中性子過剰領域の Cu 同位体 ^{75}Cu の励起状態の核磁気モーメント (以下、単に「磁気モーメント」) 測定実験を通じて、二重魔法数核 ^{78}Ni 近傍における核構造の変遷を波動関数的観点から調べることを目的とする。

磁気モーメントは目的とする状態における核子の軌道配位、すなわち波動関数をよく反映する。そのため、ある状態におけるバルクな観測量からエキゾチックな核構造が示唆されているときに、その異常性をより微視的な観点から議論するときに決め手となる観測量である。

本研究で対象とする ^{75}Cu では、基底状態のスピンパリティが $5/2^-$ になった代わりに、スピンパリティ $3/2^-$ を持つ状態が準安定なアイソマー励起状態として発現する。既知の基底状態の磁気モーメントに加えて、このアイソマー励起状態の磁気モーメントを測定することで、 ^{75}Cu における突然の状態変化が、本当に殻進化によるものなのか、あるいは変形の効果によるものなのかが判別可能になる。

3. 研究の方法

本研究では、分散整合二回散乱法によるスピン整列 RI ビームを用いて、 ^{75}Cu の励起状態の磁気モーメント測定を行った。

短い時間で放射線を出して崩壊する不安定核の磁気モーメントを測定するためには、核スピンの揃った（スピン整列した）状態を作り出す必要がある。ところが短寿命なエキゾチック核の多くは反応前後の質量差が大きい複雑な破碎反応でしか作れないため、有効な大きさのスピン整列状態を生成することができず、これまで磁気モーメントの測定が不可能であった。

本研究で目的とするような安定線から遠く離れたエキゾチック核に対しても有効なスピン整列を生成する方法として独自に開発を行ってきたのが「分散整合二回散乱法」である。分散整合二回散乱法では目的の核を二段階の破碎反応によって生成する。第二反応として一つの核子を抜き取る単純な反応を選び出すことによって、不安定核に対しても普遍的に大きなスピン整列を付与することができる。しかし単に反応回数を二回とするだけでは、三次ビームとして得られる不安定核の生成量は極端に少なくなってしまう。この困難を克服するために、三次ビームのビーム輸送において運動量分散整合条件を課すことによって、大きなスピン整列度を維持したまま統計的収量の大幅な増大が可能になる。2010年に理化学研究所 RIBF において行った分散整合二回散乱法の実証実験では、8%のスピン整列度を持つ RI ビームを生成することに成功し、整列度および収量から決まる測定の効率は従来手法に比べて 50 倍以上に上ることを報告していた。

本研究は、この分散整合二回散乱法を上述したようなエキゾチックな核構造を持つ不安定核のフロンティアに初めて適用した実験である。本実験は理化学研究所 RIBF において行った。図 2 に示すように、一次ビーム ^{238}U から二次ビーム ^{76}Zn を經由して、三次ビームとして一陽子抜き取り反応によって ^{75}Cu ビームを生成した。第二反応は分散整合焦点面 F5 において起こし、運動量の選択は二重消色焦点面 F7 にて行った。

今回、この分散整合二回散乱法をスピン整列 ^{75}Cu ビームの生成に適用するにあたって、新たに第二反応における角運動量 スピン間の対応に着目した。第二反応において、陽子数・中性子数ともに偶数である偶々核の基底状態（スピンパリティ 0^+ ）を始状態（入射核）として、角運動量 j を持つ軌道核子を抜き取ってスピン I を持つ終状態（破碎片）を生成する場合を考えると、 $j=I$ となる軌道・状態の対応が成り立つときに、核子が持ち去る運動量と破碎片における生成角運動量の関係が直接的になる。つまり第二反応において、反応機構を極限まで単純化することで、スピン整列度の最大化が期待できる。今回のケースでは、二次ビームとして ^{76}Zn を生成し、($p_{3/2}$ 軌道を占有する) 一陽子抜き取り反応によって ^{75}Cu の $3/2^-$ アイソマー励起状態を生成した。

磁気モーメントの測定は時間微分型摂動角分布（Time Differential Perturbed Angular Distribution, TDPAD）法により行った。スピン整列した原子核アイソマー状態は、脱励起する際のガンマ線の放出角度に異方性を持つ。外部磁場により磁気モーメントをラーモア歳差運動させると、ガンマ線異方性もその歳差運動と同期するため、そのガンマ線強度の時間変化を測定することでラーモア歳差周波数、ひいては磁気モーメントを決定できる。本実験では、スピン整列した ^{75}Cu ビームをアニール処理した銅試料に停止し、脱励起ガンマ線を 4 台の Ge 検出器で測定した。測定するアイソマー状態の半減期は 150 ns と短いため、時間分解能に優れた平板型 Ge 検出器を使用した。

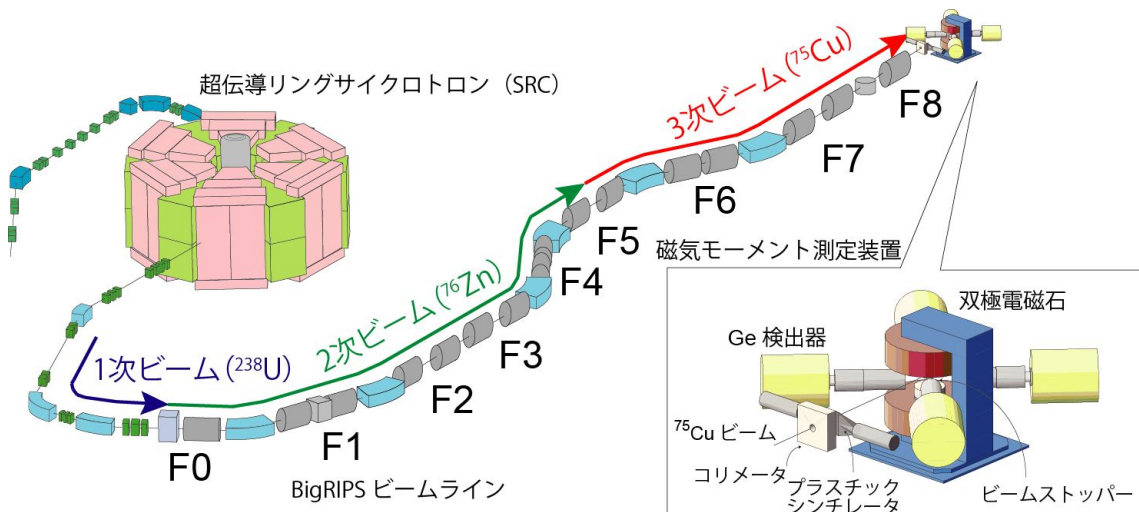


図 2. BigRIPS ビームラインにおける分散整合二回散乱法を用いた ^{75}Cu ビームの生成
理化学研究所 RIBF の BigRIPS ビームラインにおいて、一次ビーム ^{238}U から二次ビーム ^{76}Zn を生成し、F5 焦点面における一陽子抜き取り反応によって ^{75}Cu を生成した。生成した ^{75}Cu ビームを F8 焦点面まで輸送し、磁気モーメント測定を行った。

4. 研究成果

本実験では、 ^{75}Cu の二つのアイソマー状態から脱励起する 61.7 keV と 66.2 keV のエネルギーを持つガンマ線を観測した。それぞれのガンマ線に対して TDPAD 法によって非等方性を導出したところ、図 3 に示すように、66.2 keV のガンマ線に対してのみ、歳差信号を観測することができた。この歳差信号の振幅から ^{75}Cu ビームにおいて実現したスピン整列度は 30% にのぼることが明らかになった。これは、最も単純な反応機構を仮定したときに得られる原理的な最大値 41% に迫る大きさであった。

本実験では ^{75}Cu ビームは毎秒 50 個、そのうち励起状態にあるものは毎秒 1 個しか生成することができなかった。しかし、分散整合二回散乱法に角運動量 スピン対応を組み込むことで極限まで高めたスピン整列度のおかげで、 ^{75}Cu のように生成量が微弱なエキゾチック核に対しても、5 の信頼度で有意な歳差運動信号を観測することができた。

有意な歳差運動を観測したことから、66.2 keV の準位がスピンパリティ $3/2^-$ を持つ状態であると同定した。一方、歳差運動信号を観測できなかった 61.7 keV の準位はスピンパリティ $1/2^-$ を持つ状態であることがわかった。これはスピン $1/2$ の状態に対しては原理的にスピン整列度が生成できず、ガンマ線の非等方性が生じないためである。66.2 keV のガンマ線に対する歳差信号の周期から $3/2^-$ 励起状態の磁気モーメントの値を初めて決定した。

図 4 に示すように、得られた磁気モーメントの値は一粒子的構造を仮定したときの値から大きく乖離しており、確かに ^{75}Cu には変形の効果が生じていることがわかった。本実験で得られた核磁気モーメント測定値をモンテカルロ殻模型による最新の理論計算と比較した結果、 ^{75}Cu の基底状態および励起状態は変形したコアの周囲を一つの陽子が周回している描像でよく記述できることが明らかになった。図 4 には、さらに中性子の魔法数 40 と 50 の間の数を持つ Cu 同位体 (^{69}Cu から ^{79}Cu まで) に関して既知の磁気モーメント実験値および理論計算値がプロットされている。理論計算との比較からは、これらの Cu 同位体をニッケル (Ni) 同位体 (陽子数 28) に一つ陽子を加えた系と見なしたときに、Cu 同位体とコアとなる Ni 同位体が同等の変形を持つことも明らかになった。つまり、コアとなる Ni 同位体が、中性子数 40 から 50 にかけて球形から変形し、再び球形になるのにつれて、Cu 同位体も同等の変形を追従する中で、最後に追加された最外殻陽子は一粒子的性質を保っていることになる。つまり、中性子過剰 Cu 同位体では、中性子数の変化に従ってコアの形状は変形しながらも、最外殻陽子に関する殻進化が起こっていると考えることができる。このように、強力なスピン整列ビームを用いた励起状態の磁気モーメント測定と最新鋭のモンテカルロ殻模型計算の組み合わせによって、これまで明らかになっていなかった変形効果の存在下での殻進化の描像を提示した。

本研究成果は 2019 年に Nature Physics 誌に掲載された。本研究により、スピン整列ビームを用いたエキゾチックな核の磁気モーメント測定手段の有効性が実証され、不安定核の構造を司る「殻進化」と「変形」を統一的に理解する第一歩が刻まれた。今後の他のエキゾチック核に対する測定を通じて、両特徴を包括的に取り入れた究極の原子核のモデル構築へと進んでいくことが期待できる。

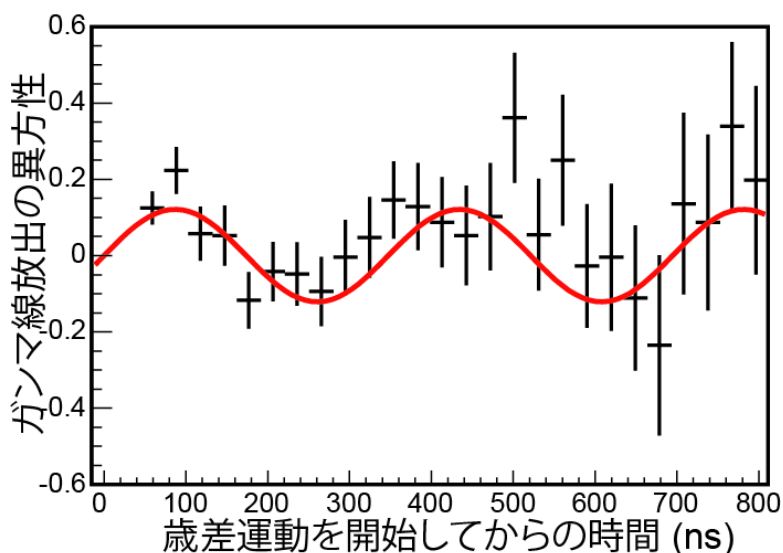


図 3. 歳差運動スペクトル

スピン整列した原子核から放射されるガンマ線は放出角度異方性を持つので、磁場中で歳差運動させることにより、歳差運動と同期したガンマ線強度変化を観測することができる。本実験では、 ^{75}Cu の 66.2 keV の励起状態からの脱励起ガンマ線に対して、5 の信頼度で歳差運動を観測した。歳差運動の周期から磁気モーメントを決定した。

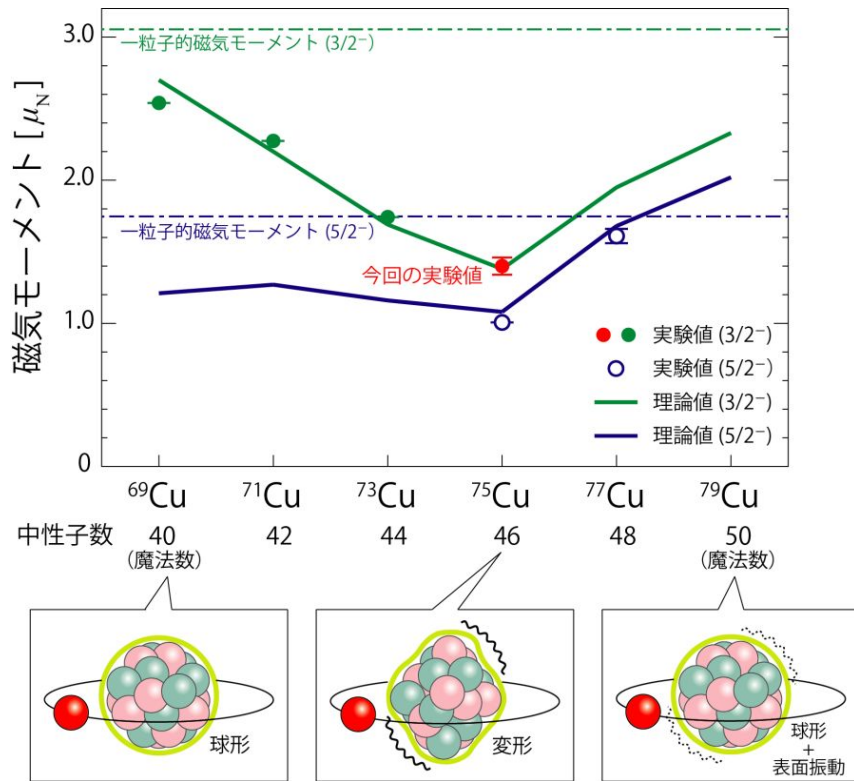


図 4. 中性子過剰な奇質量 Cu 同位体の磁気モーメント

横軸に質量数（中性子）変化、縦軸に核磁子を単位とする磁気モーメントを表す。数緑色のプロットは $3/2^-$ 状態、青色のプロットは $5/2^-$ 状態の磁気モーメント実験値である。赤色のプロットが本研究での実験値である。緑色の実線、青色の実線はモンテカルロ殻模型計算による理論値である。緑色および青色の一点鎖線はそれぞれ一粒子的構造を仮定したときの磁気モーメントの値であり、ここからのずれが変形の効果であるとみなせる。理論解析の結果、中性子過剰 Cu 同位体では、中性子数の変化に従って、コアの形状は変形しつつも、最外殻陽子に関する殻進化が起きていることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Ichikawa et al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Interplay between nuclear shell evolution and shape deformation revealed by the magnetic moment of ^{75}Cu	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 321-325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41567-018-0410-7	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 F. Boulay, G. S. Simpson, Y. Ichikawa et al.	4. 巻 124
2. 論文標題 g Factor of the ^{99}Zr (7/2+) Isomer: Monopole Evolution in the Shape-Coexisting Region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 112501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.112501	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 市川 雄一	4. 巻 765
2. 論文標題 変形しながら殻進化 磁気モーメントで探るエキゾチック核の「中身」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Isotope News	6. 最初と最後の頁 26-29
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. Ichikawa et al.	4. 巻 in press
2. 論文標題 Magnetic moment of the isomeric state of ^{75}Cu measured with a highly spin-aligned beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Ichikawa	4. 巻 in press
2. 論文標題 Nuclear-moment measurements of exotic nuclei using spin-oriented RI beams at RIBF	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceefings	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Nuclear moment studies using spin-oriented RI beams
3. 学会等名 REIMEI Workshop on Universal Features of Quantum Flows with Spin, Orbital and Tensor Correlations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Nuclear-moment measurements of exotic nuclei using spin-oriented RI beams at RIBF
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference 2019 (APPC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川 雄一
2. 発表標題 不安定核励起状態の磁気モーメント測定
3. 学会等名 2019年度「物質階層原理研究」&「ヘテロ界面研究」合同春合宿
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Single-particle states and collective modes: results from magnetic moment measurement of ^{75}Cu
3. 学会等名 The 10th international conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ichikawa et al
2. 発表標題 Magnetic moment of ^{75}Cu measured with a highly spin-aligned beam
3. 学会等名 13th international conference on nucleus-nucleus collisions (NN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Nuclear magnetic dipole moments measured with spin-oriented RI beams at RIKEN RIBF
3. 学会等名 The International Conference on Hyperfine Interactions and their Applications (HYPERFINE 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Interplay between nuclear shell evolution and shape deformation revealed by the magnetic moment of ^{75}Cu
3. 学会等名 The 265th RIBF Nuclear Physics Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川 雄一
2. 発表標題 不安定核の核スピン偏極・整列生成について
3. 学会等名 第10回 停止・低速ビームを用いた核分光研究会 (10th SSRI)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Magnetic moment measurement of isomeric state of ^{75}Cu using spin-aligned RI beam at RIBF
3. 学会等名 Advances in Radioactive Isotope Sciences (ARIS) 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Nuclear moment measurements using spin-aligned RI beam at RIBF
3. 学会等名 Argonne National Laboratory seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Nuclear moment measurement using spin-oriented RI beam at RIBF
3. 学会等名 International Symposium on RI Beam Physics in the 21st century: 10th Anniversary of RIBF (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Magnetic moment of isomeric state of ^{75}Cu measured with highly spin-aligned beam
3. 学会等名 International Nuclear Physics Conference (INPC) 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Magnetic moment measurement using spin-aligned beam at RIBF
3. 学会等名 RIBF Users Meeting 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>理化学研究所プレスリリース：「磁気モーメントから分かる銅同位体の新たな姿」 https://www.riken.jp/press/2019/20190130_2/</p> <p>理化学研究所プレスリリース：「ジルコニウム同位体は励起状態でも突然変形する」 https://www.riken.jp/press/2020/20200317_2/</p>
--

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