

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03695

研究課題名(和文) 蓄積リングでの質量測定によるハロー原子核の探索

研究課題名(英文) Study for halo-nuclei by mass measurements in storage-ring

研究代表者

小沢 顕 (Ozawa, Akira)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：80260214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：理化学研究所のRIビームファクトリー(RIBF)は、現在、世界最強の不安定核ビーム(RIビーム)施設である。稀少RIリング(R3)は、不安定核、それも安定線より遠く離れた不安定核の質量測定を主目的とした、RIBFの大型基幹装置であり、2015年度より稼働を始めた。R3は、稼働間もないこともあり、まだ十分な質量の精度を挙げられていなかった。本研究により、R3のキッカー磁石、質量測定用の検出器などのアップグレードを行い、質量の精度をより高めることができた。今後は、ハロー原子核を含めた不安定核の質量測定を進めていく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不安定核の蓄積リングは、質量測定だけでなく、寿命測定を行うことができる。また、多価イオンを蓄積できるので、多価状態のベータ崩壊など、通常とは異なる物理現象の観測も可能になる。理研RIビームファクトリー(RIBF)は、現在、世界最強のRIビーム施設であり、ハロー原子核を含む安定線から遠く離れた不安定核を数多く作ることができる。本研究により、RIBFの蓄積リングをアップグレードしたことで、RIBFでの不安定核研究をより高めることに貢献した。

研究成果の概要(英文)：RI Beam Factory in RIKEN (RIBF) is presently most intense unstable nuclear beam facility in the world. Rare-RI Ring (R3) in RIBF is motivated by mass measurements for unstable nuclei, that are located very far from the stability. R3 is operated from FY 2015. However, since R3 is shortly after the operation, accuracy for mass measurements was insufficient. In this research, we upgraded kicker magnets in R3 and detectors for mass measurements. Thus, we could increase the accuracy. Hereafter we will perform precise mass measurements for unstable nuclei in R3.

研究分野：原子核実験物理学

キーワード：原子核の質量 蓄積リング 不安定核

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) は、現在、世界最強の不安定核ビーム (RI ビーム) 施設である。RIBF では、大強度の重イオンビームにより、質量数が 50 以下の軽い領域では、存在限界のドリップ線近傍までの不安定核が生成され、反応断面積の測定などから ^{31}Ne 、 ^{37}Mg などのハロー核候補が続々と発見されていた。稀少 RI リング (R3) は、RIBF の大型基幹装置として整備され、2015 年度より稼働を始めた。R3 の主要目的は、不安定核、それも安定線より遠く離れた不安定核の質量測定である。R3 稼働当時、不安定核の質量測定を目的とした RI ビーム蓄積リングは、世界で 2 台しか稼働していなかった (ドイツ GSI の ESR と中国 IMP の CSRe)。そこで質量測定の領域は、リファレンス核導入の点から、質量数が 50 以上の重い核に限られていた。R3 では、本研究の申請時 (2017 年 11 月) までに 4 回のマシンスタディ (MS01~MS04) を行い、R3 の基本性能 (個別入射、等時性磁場など) の確認を行うとともに、質量測定の検証実験も行った。2016 年 11 月に行なった 3 回目のマシンスタディ (MS03) では、本測定を見立てた測定を行った。この実験では、 ^{78}Ge をリファレンスとして周辺の 4 つの核の質量を導出した。導出した質量は、誤差の範囲で既知の質量と一致することを確認した。また、2016 年 12 月には、R3 での初めての質量測定実験のプロポーザルを申請し採択された。R3 での最初の質量測定実験は重い領域 (Ni 領域) に設定されていたが、一方で、質量測定領域の拡充 (質量数が 200 近いより重い領域、および質量数が 50 以下のより軽い領域での質量測定) の可能性の検討も始まっていた。このような背景で、本研究の申請がなされた (2017 年 11 月)。

2. 研究の目的

本研究の申請時における当初の目的は、質量数が 50 より軽い中重核領域でのハロー核を探索するために、中重核の質量測定を行うことであった。不安定核では、安定核にはない特異な構造が現れることがわかっている。代表的な特異構造は、一つあるいは二つの核子が少し離れて束縛する量のような構造を持つハロー構造である。ハロー核候補が、ハロー構造を持つかどうかは、これらの核がどのくらい弱束縛かによる。それを判定するには、これらの核の質量測定が必須である。RIBF では、大強度の重イオンビームにより、質量数が 50 以下の軽い領域では、存在限界のドリップ線近傍までの不安定核が生成され、反応断面積の測定などから ^{31}Ne 、 ^{37}Mg などのハロー核候補が続々と発見されていた。これらの質量測定を行い、ハロー構造の有無を確認するのが当初の目的であった。

3. 研究の方法

本研究の申請時における当初の目的は、質量数が 50 より軽い中重核領域でのハロー核を探索するために、中重核の質量測定を行うことであった。現在の蓄積リングでの質量測定には、質量既知核であるリファレンス核の導入が不可欠である。ESR と CSRe では、質量数 50 以上の中重核領域の質量測定を行なっているが、その理由の一つは、重い核の領域では、多くのリファレンス核を同時に入れやすいからである。一方、質量数 50 より軽い領域では、リファレンス核の同時混入が困難となる。この領域で質量測定を行う場合、質量を較正するためのリファレンス核導入が問題となる (リファレンス核導入問題)。我々は、この問題を解決するために、R3 に「時間分割校正法」を導入することを考えた。質量測定系 (R3) の磁場は変えず、時間的に、破砕片分離器 (BigRIPS) の設定のみを変えて、リファレンス核を導入する。「時間分割校正法」では、二つの測定で、RI ビーム以外で R3 の磁場がモニターできることが必須である。R3 のセクターに磁場モニター (NMR) を設置するとともに、RI ビームと同時に入射できる原子クラスター ($A \sim 40,000$) のイオン源を設置することを考えた。原子クラスターの R3 中での飛行時間の測定により、R3 の磁場変動がモニターできる。R3 には 1 台であるが、既に高精度の NMR が設置されているので、本研究では、特に、原子クラスター ($A \sim 40,000$) のイオン源導入の検討を行なった。RI ビーム以外の R3 での磁場モニターを確立できれば、「時間分割校正法」の検証を行い、「時間分割校正法」が有効であるとわかれば、質量数 50 より軽い領域で、ハロー核候補の不安定核の質量測定を行う予定であった。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」に書いたように、本研究では、R3 での「リファレンス核導入問題」解決のために、「時間分割校正法」を提案している。「時間分割校正法」確立のために、研究開始当初に原子クラスターイオン源導入の検討を行なった。我々は、2010 年にマグネトロンスパッタ型ガス凝集クラスター源を開発し、W の $n=280$ ($A \sim 50,000$) のクラスター生成に成功していたが、生成量は $\sim 0.02\text{cps}$ であり、R3 の磁場モニターとして導入するには、生成量が十分ではなかった。

このイオン源はその後解体されてしまったので、既製のクラスターイオン源も含めて、R3の磁場モニターとして導入できそうなクラスターイオン源の検討を行なった。研究開始1年目の検討により、マグネトロンスパッタ型ガス凝集クラスター源では、Wの $n=280$ ($A\sim 50,000$)のクラスターを大量に生成するのは難しいことがわかった。マグネトロンスパッタ型ガス凝集クラスター源に代わるクラスターイオン源として、アルゴンガスクラスターイオン源(GCIB)の検討を行なった。このイオン源では、Arの $n=3000$ までが、最大10kV、イオン電流10nA以上が得られる。クラスターサイズ、生成量も十分であったが、Arは希ガスであり、常温では、Arクラスターは、イオン源から取り出してすぐに蒸発してしまう可能性があった。GCIBのメーカー側に蒸発時間の測定はなく、R3での周回時間(数ms)より長いという保証もされなかった。R3は、周長60mあり、全てを冷却するのも難しく、GCIBの導入は見送らざるを得なかった。研究2年目には、新たなクラスターイオン源として、アークプラズマ蒸着源(APS)の検討を行なった。このイオン源は、Wなど金属を標的とし、アーク放電により、標的を溶融し、溶融した物体を照射するイオン源である。成膜に使われており、このイオン源の照射によりナノ薄膜の形成が確認されていた。しかしながら、イオン源からインフライトで原子クラスターが生成できているかどうかの確認はできていなかった。メーカーからAPSのデモ機を借りることができたので、研究3年目に、我々は、APSを借りて、イオン源からインフライトで原子クラスターが生成できているかどうかを確認する研究を始めた。3年目の研究では、イオン源から一価のプラスと思われるイオンが飛翔していることは確認できたが、クラスターの飛翔までは確認できなかった。デモ機は今後も借りることが可能なので、今後は、磁場を印加し磁場と飛行時間を組み合わせた測定により、クラスター飛翔の有無を確定する予定である。

研究開始1年目の2018年11月にR3の最初の物理実験(質量測定実験)をNi領域で行なった。この実験では、二つ設定で実験を行った。 ^{78}Ge , ^{77}Ga , ^{76}Zn , ^{75}Cu , ^{74}Ni と ^{80}Ge , ^{79}Ga , ^{78}Zn , ^{77}Cu , ^{76}Ni である。 ^{74}Ni および ^{76}Ni 以外の不安定核の質量は既知である。それぞれの設定で、 ^{76}Zn と ^{78}Zn をリファレンスとして、質量が未知である ^{74}Ni と ^{76}Ni の質量導出を目指した。この実験のデータは現在も解析中であるが、 ^{76}Zn と ^{78}Zn をリファレンスとして、他の質量既知核の質量を導出すると、導出値と既知の質量の間に、有意に系統的なズレ($\sim 10^{-5}$)が現れることがわかった。このズレの原因の全ては、現在(2021年6月)でも必ずしも明らかにはなっていないが、本研究の2年目以降の研究の方向転換の契機となった。ズレの原因はいくつ考えられたが、本研究2年目に、ズレの原因の一つとして、キッカー磁石の磁場波形が考えられることがわかった。これまでのキッカー磁石の磁場波形を図1(a)に示す。これまでのR3のキッカー磁石の磁場波形は図1(a)の黒線に示したように正弦波に近い形をしており、入射する粒子のタイミングの違いによりキック量が変わってしまう。以前、 ^{78}Kr ビームで確認した際の結果が図1(a)の黒丸で示されている。研究3年目に、キッカー磁石のアップグレードを行った。3台あるキッカー磁石のユニットにキャパシターを付け波形をずらして重ねることにより、フラットトップを作ることを試みた。キッカー磁石に印加する電流波形から予想したキッカー磁石の磁場波形が図1(b)の青線で示されている。この磁場波形を確かめるために、2020年10月にR3でマシンスタディ実験(MS05)を行った。 ^{238}U の一次ビームから、約165MeV/uの ^{75}Ga を生成し、R3に入射した。キッカー磁石直後のプラスチックシンチレーターで ^{75}Ga のイベントを測定した。図1(b)にキッカー磁石印加のトリガーのタイミングを変えた時のイベント量を示した(青丸)。イベント量は、500nsから600nsでほぼ一定を示し、約100nsのフラットトップが形成できたことが確認できた。今後のR3の実験では、この磁場波形を使う予定である。フラットトップ付きの磁場波形により、質量のズレが改善されれば、R3の質量測定実験を行う予定である。

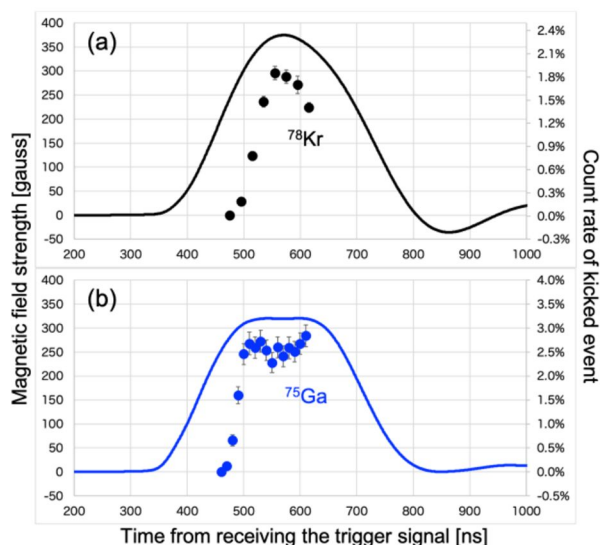


図1 (a)これまでのキッカー磁石の磁場波形(黒線)と生成量の測定結果。(b)今回のキッカー磁石の磁場波形(青線)と生成量の測定結果。

最後に、本研究に関連した研究成果として、R3およびそこでの質量測定に関連する検出器の開発について記述する。R3では、リング内におけるイオンの飛行時間からイオンの質量を導出するため、高時間分解能(< 70 ps)の飛行時間検出器が不可欠である。また、飛行時間測定のスタート信号を発生する検出器では、通過粒子の速度変化を可能な限りなくす必要がある。本研究では、これらの要求を満たす飛行時間検出器の開発も行なった。検出器は一枚の薄膜と電極、永久磁石からなり、粒子通過により薄膜から発生した二次電子を電磁場でマイクロチャンネルプレート検出器(MCP)へ誘導し検出する仕組みである。本研究開始以前の状況は以下であった。

検出器内の磁場 150 ガウスの飛行時間検出器で < 40 ps の時間分解能、薄膜上の直径 40 mm の領域で検出効率約 100%を達成したが、高すぎる電磁場に起因して、R3 での実用に必要とされる一週間以上の安定動作が困難だった。そのため、研究 1 年目に、安定動作を目標に検出器の改良を行った。電極を改良した磁場 140 ガウスの飛行時間検出器で性能試験を行った。性能試験では、放射線医学総合研究所 HIMAC で供給される ^{84}Kr ビーム (200 MeV/u) を検出器に照射した。結果、140 ガウスでも 150 ガウスと同等の性能が得られることがわかった。しかし、電磁場を小さくした検出器でも 1 週間の安定動作が困難であることがわかったため、さらに電磁場を小さくしつつ、時間分解能および検出効率を維持できるように、電極構造の改善を行うことにした。研究 2 年目には、電場強度を下げることで安定動作可能な電磁場設定を確立し、本番環境と同等の重イオンビームを使用して性能試験を行った。性能試験では、放射線医学総合研究所 HIMAC で供給される ^{84}Kr ビーム (200 MeV/u) を検出器に照射し、時間分解能と検出効率を評価した。時間分解能は < 21 ps、検出効率は二次電子発生用薄膜のほぼ全面 (40 mm) で 90%以上であり、R3 での質量測定に必要な性能が得られた。この検出器は、研究 3 年目の 2020 年 10 月のマシNSTAディ実験 (MS05) に使用され、実験期間中 (3 日間) 安定に動作した。この検出器は、今後の R3 での質量測定に使用される予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 10件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Xu X., Ozawa A. (39th) et al.	4. 巻 100
2. 論文標題 Masses of ground and isomeric states of In101 and configuration-dependent shell evolution in odd-A indium isotopes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 51303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.100.051303	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 Xu X., Ozawa A. (26th) et al.	4. 巻 99
2. 論文標題 Masses of neutron-rich Sc52-54 and Ti54,56 nuclides: The N=32 subshell closure in scandium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 64303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.99.064303	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 Ito Y., Schury P., Wada M., Arai F., Haba H., Hirayama Y., Ishizawa S., Kaji D., Kimura S., Koura H., MacCormick M., Miyatake H., Moon J.Y., Morimoto K., Morita K., Mukai M., Murray I., Niwase T., Okada K., Ozawa A., Rosenbusch M., Takamine A., Tanaka T., Watanabe Y.X., Wolnik H., Yamaki S.	4. 巻 120
2. 論文標題 First Direct Mass Measurements of Nuclides around Z=100 with a Multireflection Time-of-Flight Mass Spectrograph	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 152501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.120.152501	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 Zhang Y. H., Ozawa A. (33rd) et. al.	4. 巻 98
2. 論文標題 Isochronous mass measurements of Tz=-1 fp-shell nuclei from projectile fragmentation of Ni58	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14319
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.98.014319	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 Xing Y.M., Ozawa A. (44th) et al.	4. 巻 781
2. 論文標題 Mass measurements of neutron-deficient Y, Zr, and Nb isotopes and their impact on rp and p nucleosynthesis processes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 358 ~ 363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.04.009	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 Rosenbusch M., Ito Y., Schury P., Wada M., Kaji D., Morimoto K., Haba H., Kimura S., Koura H., MacCormick M., Miyatake H., Moon J. Y., Morita K., Murray I., Niwase T., Ozawa A., Reponen M., Takamine A., Tanaka T., Wollnik H.	4. 巻 97
2. 論文標題 New mass anchor points for neutron-deficient heavy nuclei from direct mass measurements of radium and actinium isotopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 64306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.064306	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 Fu C. Y., Ozawa A. (33rd) et al.	4. 巻 98
2. 論文標題 Masses of the Tz=-3/2 nuclei P27 and S29	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.014315	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 Nagae D., Ozawa A. (27th) et. al.	4. 巻 986
2. 論文標題 Development and operation of an electrostatic time-of-flight detector for the Rare RI storage Ring	5. 発行年 2021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 164713 ~ 164713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164713	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 Naimi S., Ozawa A. (23rd), et. al.	4. 巻 1643
2. 論文標題 Experimental Challenges of the First Mass Measurement Campaign at the Rare-RI Ring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012058 ~ 012058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1643/1/012058	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 Fu C. Y., Zhang Y. H., Wang M., Zhou X. H., Litvinov Yu. A., Blaum K., Xu H. S., Xu X., Shuai P., Lam Y. H., Chen R. J., Yan X. L., Chen X. C., He J. J., Kubono S., Sun M. Z., Tu X. L., Xing Y. M., Zeng Q., Zhou X., Zhan W. L., Litvinov S., Audi G., Uesaka T., Yamaguchi T., Ozawa A., Sun B. H., Sun Y., Xu F. R.	4. 巻 102
2. 論文標題 Mass measurements for the Tz=-2 fp-shell nuclei Ti40, Cr44, Mn46, Fe48, Co50, and Ni52	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PHYSRevC.102.054311	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3件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 A. Ozawa
2. 発表標題 Mass measurements for Ni-isotopes in Rare-RI Ring, RIBF
3. 学会等名 China-Japan Collaboration Workshop on "Nuclear Mass and Life for Unraveling Mysteries of R-process" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Ozawa
2. 発表標題 Mass measurements in Rare-RI Ring in RIBF
3. 学会等名 Workshop on "Physics at HIAF High-Energy Beam Lines" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Ozawa
2. 発表標題 Present status of Rare-RI Ring (R3) and mass measurements
3. 学会等名 RIBF Users Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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	山口 由高 (Yamaguchi Yoshitaka) (40415328)	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・技師 (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		
中国	IMP		
ドイツ	GSI		