

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14750

研究課題名（和文）陽子過剰核の精密質量測定に向けたビーム透過型ガスセルの開発

研究課題名（英文）Development of beam-through-type gas-cell for mass measurement of proton-rich nuclei

研究代表者

木村 創大 (Kimura, Sota)

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・特別研究員

研究者番号：10827348

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：陽子過剰不安定核の精密質量測定を目指しビーム透過型ガスセルを行った。理化学研究所にある超電導RIビーム生成分離装置BigRIPSに開発したビーム透過型ガスセルおよび多重反射型飛行時間式質量分析器から構成される装置を設置し、運用試験として中性子過剰不安定核の精密質量測定実験を行った。結果として $^{88,89}\text{As}$ および $^{112}\text{Mo}$ について初めてこれらの質量を実験的に決定することに成功した。またこの実験から開発を行ったビーム透過型ガスセルについてイオンの引き出し効率に関して多少の課題が残っているものの実用段階に達していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不安定原子核を用いた種々の精密測定実験にはエネルギーの揃った高純度の低エネルギーイオンビームが必要とされている。しかし不安定核は高エネルギーのイオンとして生成されるためガスセルを用い一度低速イオンに変換する。本研究で開発したビーム透過型ガスセルは大強度の入射ビームに対してその効率を保ちつつ、更にガスセル内での不純物イオンの発生低減を狙ったものであり、不安定原子核を用いた実験の可能性を大きく広げるものである。

研究成果の概要（英文）：A beam-through-type gas cell has been developed for the precise mass measurement of proton-rich nuclei. A new apparatus consisting of a beam-through-type gas cell and a multi-reflection time-of-flight mass spectrometer was installed in the superconducting in-flight RI beam separator BigRIPS at RIKEN, and the mass measurement experiment of neutron-rich nuclei was performed as commissioning. As a result, the masses of  $^{88,89}\text{As}$ , and  $^{112}\text{Mo}$  were experimentally determined for the first time. The beam-through-type gas cell was confirmed to have reached the practical stage, although there still is room for improvement.

研究分野：原子核物理（実験）

キーワード：ガスセル 多重反射型飛行時間式質量分析 精密質量測定 不安定核

## 1. 研究開始当初の背景

X線バーストは宇宙で最も高頻度の爆発的天体現象であり、元素合成過程の一つである速い陽子捕獲(rp)過程によって駆動されていると考えられているが、現在の理論モデルでは観測量を十分に説明できていない。rp過程の反応経路は原子核の質量に強く依存するが、質量に関する実験データが不足している。そのためrp過程計算は大きな不確かさを持ちX線バーストの理論モデルの検証を困難にしている。rp過程で重要となる陽子過剰な中重核の半減期は短く、高精度の質量データが要求されるため従来の質量測定手法は適さない。そこで本研究では、我々が近年実用化した多重反射型飛行時間式質量分析法を用いた測定を計画した。しかし陽子過剰な中重核の測定に特有な実験上の困難があることがこれまでの実験から明らかとなっており、これを取り除くため新たにビーム透過型ガスセルの開発を行うこととした。

## 2. 研究の目的

本研究ではビーム透過型ガスセルの開発を行い、これにより多重反射型飛行時間式質量測定器による陽子過剰核、 $^{65}\text{As}$ 、 $^{66}\text{Se}$ 、 $^{80}\text{Zr}$ 、および $^{84}\text{Mo}$ の精密質量測定を行うことでrp過程計算の不定性を取り除くことを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1)ビーム透過型ガスセルを製作し、アルカリイオン源や $^{248}\text{Cm}$ 線源を用いたオフライン試験と共に必要な改良を随時行ってゆき、最終的に加速器を用いたオンライン試験による性能評価を行う。

(2)上記(1)と並行し、他の既存のガスセルを用い開発するビーム透過型ガスセルの運転条件最適化に必要な研究をオンライン実験に近い環境を再現可能な $^{252}\text{Cf}$ 線源を用いて行う。

## 4. 研究成果

まず初めに本研究は理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 低速RIビーム生成装置開発チームおよび高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 和光原子核科学センターと共同して行った。

(1)図Aに本研究で開発を行ったビーム透過型ガスセルを含む不安定原子核(RI)の精密質量測定用セットアップの概要を示す。このセットアップ(以下、ZD-MRTOFと呼ぶ)は原子核質量測定器として多重反射型飛行時間式質量分析器を採用し、理化学研究所 仁科加速器科学研究センターが有する超伝導RIビーム生成分離装置BigRIPS下流にある超前方多機能超伝導スペクトロメータ(ZDS: Zero degree spectrometer)の最下流に設置された。

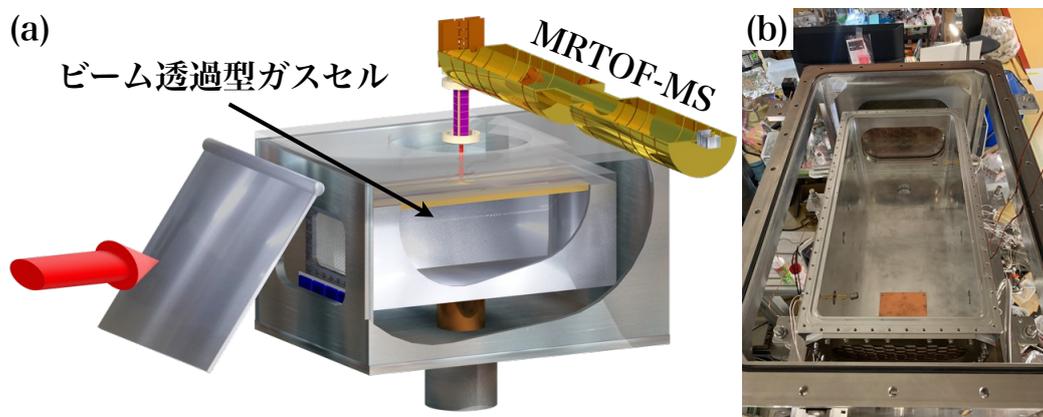


図 A (a) ビーム透過型ガスセルおよび MRTOF-MS (多重反射型飛行時間式質量分析器) を含む測定系の概要。赤色の矢印は超伝導 RI (不安定原子核) ビーム生成分離装置 BigRIPS からの入射ビームを表し、その直後の板は入射エネルギー調整のためのエネルギー減衰板。(b) ビーム透過型ガスセル組み立て時の写真。ビーム方向は下から上でガスセルの下端と上端に薄膜から成る窓がある。

ZD-MRTOF の運用試験となるオンライン実験を令和 2 年および令和 3 年にかけて行った。この運用試験において質量測定を行った核種を図 B に示す。この際の ZD-MRTOF 全体の効率率は 0.2-0.4% でありその内訳はビーム透過型ガスセル内での停止効率が 2-4%、その後の輸送効率が 4-10% と見積もられる。この運用試験から改善の余地はあるものの目的である陽子過剰不安定核の質量測定実験を行うには十分な全体効率を持つことが確認できた。以降この運用試験中に行った中性子過剰不安定核の質量測定によって得られた結果について述べる。

①Sc-V 領域。 $^{55}\text{Sc}$ 、 $^{56,58}\text{Ti}$ 、および  $^{56-59}\text{V}$  の精密質量測定を行った。 $^{56,58}\text{Ti}$ 、および  $^{56-59}\text{V}$  については質量値の不確かさを 10 keV レベルまで低減した。この  $^{58}\text{Ti}$  および  $^{59}\text{V}$  の高精度質量測定により Ca 同位体において発見された新魔法数  $N=34$  が Ti および V 同位体では消失していることを実験的に明らかにした。

②Ga-Br 領域。 $^{83,84}\text{Ga}$ 、 $^{82-86}\text{Ge}$ 、 $^{82-89}\text{As}$ 、 $^{82,84-91}\text{Se}$ 、 $^{85,86,89-92}\text{Br}$ 、 $^{89,91,92}\text{Kr}$ 、および  $^{91}\text{Rb}$  の精密質量測定を行った。このうち  $^{88,89}\text{As}$  については初めてその質量を実験的に決定した。 $^{86}\text{Ge}$  および  $^{90,91}\text{Se}$  については質量値の不確かさを数百 keV 程度から 10 keV 以下まで小さくした。またこの測定による結果は Se 同位体における中性子数  $N=56$  における閉殻構造の存在を示唆するものではなかった。

③Mo-Sb 領域。 $^{111,113}\text{Ag}$ 、 $^{111-113}\text{Pd}$ 、 $^{111,113}\text{Rh}$ 、 $^{111-113}\text{Ru}$ 、および  $^{111,112}\text{Mo}$  の精密質量測定実験を行った。 $^{112}\text{Mo}$  については初めてその質量を実験的に決定した。得られた中性子数  $N=70$  近傍での二中性子分離エネルギーの傾向は滑らかなものであり、閉殻などの特徴的な性質は確認できなかった。

(2) ビーム透過型ガスセルの開発と並行して他の極低温 He ガスセルを用いて実験時におけるガスセル運転条件決定のための研究を行った。この研究では自発核分裂により 1 MeV/u 程度の RI イオンを生成可能な  $^{252}\text{Cf}$  線源を使用した。これまでに Se から Eu までの 30 元素、核種にして約 270 種 (図 B) についてガスセルからの引き出し、多重反射型飛行時間式質量分析器による質量測定に成功している。広範な範囲の元素についてガスセルからの引き出し試験を行うことができ、ガスセルにおける化学についての知見を多く得られた。例えばほとんどの元素は 1 価および 2 価のイオンとしてガスセルから引き出せることが確認できたがアルカリ金属である Rb については 1 価のイオンのみしか確認できなかった。また Y、Zr、Nb、Mo、Ru および Sb について 3 価のイオンを確認できたがイオン化エネルギーの関係からこれらの中に 3 価のまま存在しにくい元素も含まれており明らかにするべき点が残っている。ガスセルの化学に関しては更なる研究が必要である。

また質量測定に成功した核種の内  $^{152,155}\text{Ce}$  についてはその質量を初めて実験的に決定した。

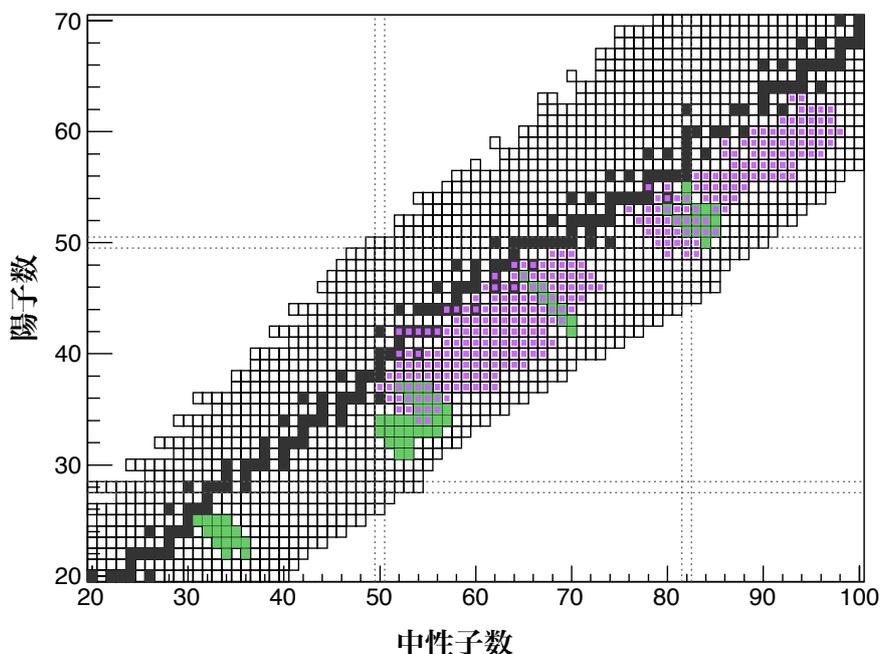


図 B 核図表。黒色は安定核を表している。ZD-MRTOF の運転試験で測定した核種は緑色四角で示している。紫色四角は  $^{252}\text{Cf}$  線源を用いたガスセルの研究において観測した核種に対応している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iimura S., et al.	4. 巻 130
2. 論文標題 Study of the N = 32 and N = 34 Shell Gap for Ti and V by the First High-Precision Multireflection Time-of-Flight Mass Measurements at BigRIPS-SLOWRI	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 012501-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.130.012501	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., Wada M., Chen S., Takamine A., Iimura S., Hou D., Xian W., Yan S., Schury P., Hirayama Y., Ito Y., Ishiyama H., Kimura S., Kojima T., Lee J., Liu J., Michimasa S., Miyatake H., Moon J.Y., Mukai M., Naimi S., Nishimura S., Niwase T., Sonoda T., Watanabe Y.X., Wollnik H.	4. 巻 1047
2. 論文標題 The new MRTOF mass spectrograph following the ZeroDegree spectrometer at RIKEN's RIBF facility	5. 発行年 2023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 167824 ~ 167824
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2022.167824	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 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 木村創大
2. 発表標題 MRTOF-MSを用いた <sup>252</sup> Cf自発核分裂片の網羅的精密質量測定
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村創大
2. 発表標題 MRTOF-MSを用いた <sup>252</sup> Cf核分裂片の精密質量測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Kimura
2. 発表標題 Study of the neutron-rich 252Cf-fission-fragments with MRTOF-MS
3. 学会等名 the 16th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------