

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540336

研究課題名(和文) 中重核領域における短寿命中性子過剰核の磁気モーメントの測定

研究課題名(英文) Measurement of magnetic moment of neutron-rich unstable nuclei

研究代表者

篠塚 勉 (SHINOZUKA, TSUTOMU)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・非常勤講師

研究者番号：10134066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：中重核領域の中性子過剰核を対象に精密核分光研究を行う事を目的として、短寿命な不安定核を迅速・高効率に取り出して質量分離するための装置として、RFイオンガイド法の開発を行っている。本研究では、不安定核イオンの引出し部に六極型イオンガイドを導入することで質量分解能の改善を図り、不安定核イオンの収量向上を目指した。また、SPIGの導入と同時に、加速領域の真空コンダクタンスの改善を行った。これらの改良の後、中重核領域に複数の安定同位体を持つXeを用いて従来のスキマーシステムとの比較を行った。その結果、質量分解能はスキマーシステムの60に対し、SPIGシステムでは310まで向上させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：To conduct the precision nuclear spectroscopy of neutron-rich nuclei in the medium mass region, we have been developing an RF-ion guide method with a short extraction time and a high extraction efficiency. In this study, we have newly installed a sextupole ion guide (SPIG) which is used to transport the ions from the exit hole of the gas cell to the acceleration electrode. The SPIG improves the efficiency of differential pumping and reduces the energy spread of the extracted ions. This results in a high mass resolution and consequently in a large mass-separated yield of neutron-rich nuclei at the detection region. The mass resolving power (MRP), defined as $M/\Delta M$, has been measured for the stable Xe isotopes to investigate the effect of the SPIG. The MRP of 310 was achieved after installing the SPIG. The MRP is more than 5 times higher than that before installing the SPIG. We have succeeded in improving the MRP with the SPIG.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核構造 不安定核 オンライン質量分離 イオンガイド法 SPIG

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発における中性子吸収による r-Process 元素合成は、天体核物理学の主要テーマであるが、原子核構造の立場から、これら元素合成プロセス上の中性子過剰核の核構造は非常に少ない情報となっている。未知 2 重魔法核のひとつである ^{78}Ni などや、中性子星を起源とする r-Process による重い元素生成のシナリオの構築は、原子核物理学ばかりでなく、天体核や宇宙物理学等の関連する領域に対して貴重な情報を与えることから、中性子過剰核の精密分光は重要なテーマとなっている。

従来、中性子過剰核領域の研究は、中高エネルギー重イオンによる入射核破砕反応が中心になって、質量数 30 前後までの新しい中性子過剰核の発見、検出が進められてきた。しかし、より重い核種の領域に進むにつれ、中性子過剰核生成断面積はより小さくなり、加速重イオンの高エネルギー化、重イオン源強度などの制約などから、質量数 50 以上の中性子過剰不安定核の高効率、高速分離による高質不安定核ビームの生成は中高エネルギー重イオンによる入射核破砕反応ではなされていない。理化学研究所をはじめとする世界の高エネルギー重イオン加速器による不安定核研究施設がより高いエネルギー、より強いビーム強度を目指しているのも、この故である。

他方、ターゲット核破片反応や核分裂反応を用いた不安定核ビームの生成法 (ISOL 法) は、高エネルギー重イオンビームによる不安定核の生成、分離法に比較して、反応生成物を停止させた状態から、分離、加速するため、高質のビームが得られる特徴を持つ。このことは、核分光、試料の核偏極化による核モーメント測定、トラップ化、低温化による精密質量測定などから不安定核の原子核構造を探る精密核分光には不可欠の方法となっている。高エネルギー重イオンビームを用いた不安定核研究とは相補的な関係として、CERN - ISOLDE 等を中心に開発が進められている。

しかし、大強度陽子入射ビームや原子炉などで行われているターゲット核破片反応や核分裂反応を用いた不安定核ビームの生成法 (ISOL 法) は、生成と引出しに関するイオン源技術の難易度が高く、アルカリ系の低融点の元素に限って中性子過剰核の研究が進められ、高融点金属系の短寿命の不安定核に関しては進んでいない。r-Process による元素合成通路で重要な役割を果たすニッケルより重い中性子過剰核に関しては、ほとんど精密核分光研究がなされていない。

^{78}Ni の未知 2 重魔法核に迫り、更に重い中性子過剰核領域での元素生成の r-Process を原子核の立場から理解するには、もう一段の突破口を見つけなければならない。中高エネルギー重イオンによる入射核破砕反応によって開かれた不安定核研究が、真の精密原子

核物理学に昇華するための手法として、ISOL 型による高質不安定核ビームを開発しなければならないという課題が、世界の不安定核ビーム計画でも次の世代の主要技術開発として重点化されている所以である。

2. 研究の目的

本研究は、このような状況を打破する Break-through のひとつとして、計画されているものである。本研究グループは、陽子入射核分裂反応をイオンガイド法 (旧型は 1 cc) に適用し、 ^{78}Ni の探索を行ってきたが、質量数 80 の Zn を検出することには成功している。同時に新方式である、RF イオンガイド法によって、ウラン核分裂生成物である、中性子過剰の高融点、短寿命不安定核の生成分離には成功し、中性子過剰核領域の測定には生成量、および分離、検出等の効率を合わせて 10 倍以上の収量、検出効率を要求されている。新 RF イオンガイドシステムと東北大学サイクロトロンからの大強度陽子ビームの活用、の組み合わせで、これまでの収集、測定効率が飛躍的に高まることは確実である。また、新 RF イオンガイド、大強度陽子ビーム、高効率測定器、不安定核の偏極生成テストの実験をもって、 ^{78}Ni および質量数 80 - 120 領域での中性子過剰不安定核領域での新不安定核の発見と、新領域での精密原子核分光を飛躍的に発展させることを目的とする。

本計画では、短寿命化する不安定核を高速、高効率に分離、輸送できるイオンガイド法の原理を拡張し、従来、低効率を余儀なくされていた不安定核収集部の体積を大幅に拡大し、その際、ガイド中にロスすることを避けるため、DC、RF 電場を導入し、高速かつ高効率で質量分離器に引き出す新イオンガイド法を完成させる。本方式はすでに開発に着手しており、現在までに ISOLDE 等のイオン源方式では到達できなかった中性子過剰不安定核の収集分離に成功している。

本研究では、これまでに調べた装置の各特性 (電場構成、ガス純化法、冷却法、引出し法) の各部の設計見直しを行い、線形イオントラップ装置 (SPIG ; 6 極構造型イオンガイド) をイオン引出系に付加して、不安定核収量の向上を目指した開発を行う。

3. 研究の方法

短寿命の不安定核を迅速、高効率で取り出して質量分離するための装置として RF イオンガイド法を開発している。図 1 に RF イオンガイドの概略図を示す。RF イオンガイド中には天然ウラン標的が設置されており、サイクロトロンからの 50 MeV の陽子ビームが入射される。入射された陽子ビームによる標的の核分裂反応により生成された中性子過剰核は、ガスセル中のヘリウムバッファースにより 1 価のイオンのまま止められる。止められた中性子過剰核イオンは、静電場によって直径 1.2 mm のガスセル出口へと誘導さ

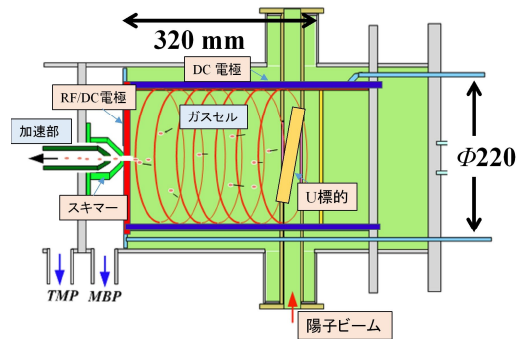


図1：RF イオンガイド全体図

れる。この時、中性子過剰核イオンがガスセル壁面に当たり失われることを防ぐために、ガスセル出口がある壁面にはRF電場形成するRFカーペットが設けられている。ガスセル出口まで誘導された中性子過剰核イオンは、スキマー電極に印加されたスキマー電圧 (~1 kV) により引き出され、加速部(30 kV)へと輸送される。このスキマー電極は、ガスセルの低真空領域(3 kPa)と、加速部の高真空領域(3×10^{-3} Pa)とを隔てている電極であり、差動排気部を形成している。差動排気部は、高排気速度のメカニカルブースターポンプ(MBP)により排気されている。図2にSPIG導入前のスキマーシステムの概略図を示す。30 kVで加速された中性子過剰核イオンは、質量分離され、検出領域へと輸送される。

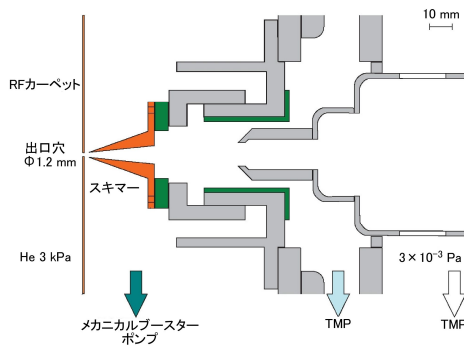


図2：スキマーシステムの概略図

本研究では、中性子過剰核イオンの取り出し部分の改造を行った。それまでのイオンガイドでは、スキマー電極が設置されている差動排気部に、1 kVの高電圧を印加して中性子過剰核イオンを引き出していたことから、引出時にガス衝突による速度分散を起し、結果として引出し効率、質量分解能、輸送効率の劣化を招いていた。特に質量分解能は60程度であり、これにより輸送効率が30%以下となっていた。そこで、高真空を保ちながら低電圧での高効率引出しを実現するために、ガスセルの出口とスキマー電極との間にSPIGを設置した。

図3に本研究で設置したSPIG電極を示す。

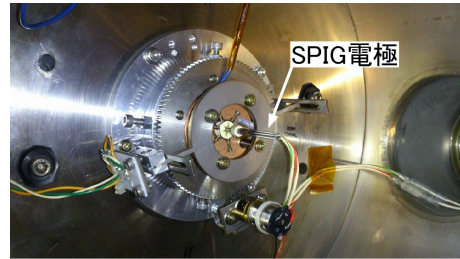


図3：SPIG電極の写真

導入したSPIG電極は、直径1.0 mm、長さ106.5 mmの6本のモリブデン製ロッドで構成されている。それぞれのロッドは、内径が1.8 mmとなるようにセラミックス(ホトベール)で支えられるとともに、電的に絶縁されている。SPIG電極全体は、モーター駆動が可能な台座に固定されており、ガスセル出口とSPIGとの間の距離を0から7 mmの範囲で外部制御可能となっている。図4にSPIG

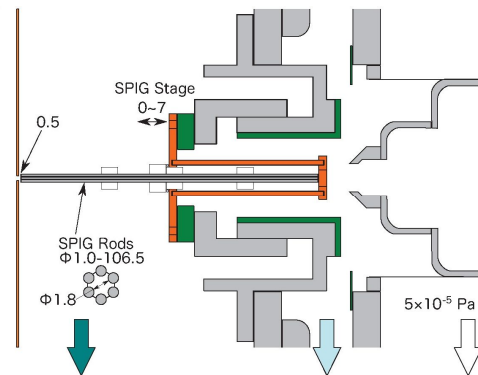


図4：SPIGシステムの概略図

導入後のガスセル出口付近の概略図を示す。SPIG電極を用いることにより、ガスセル出口穴から漏れてくるヘリウムガスを効率良く排気することが可能となり、差動排気部や加速領域での真空度が改善される。一方、中性子過剰核イオンは、SPIG電極内にトラップされ、加速領域へと輸送される。このとき、SPIG電極に必要な電圧は低く、かつ加速領域の真空度が良いため、ガス衝突による速度分散を大幅に改善できる。

4. 研究成果

SPIG導入の効果を調べるために、質量分析スペクトルの測定を行った。その際、中重核領域での質量分解能を測定するために、バッファガスとしてガスセルに導入しているヘリウムガスに、Xeガスを少量混入した。Xeは、質量数130前後に複数の安定同位体を持ち、中重核領域にたいする質量分解能測定に適している。Xeのイオン化には、主としてガスセル中に設置した放電型イオン源を用い

た。その結果、質量分解能は SPIG 導入前と比較して、2 倍に向上した。さらに質量分解能を改善するために、スキマー電極の撤去と差動排気部のコンダクタンスを改善する改良を実施した。先に示した図 4 は、この改良後の概略図である。これらの改良の後に測定した質量分析スペクトルを図 5 に示す。イオンの検出には、電子増倍管を用いた。この電子増倍管の開口部の直径は 8 mm である。図中の点線は SPIG 導入前の質量分析スペクトルである。この時の質量分解能はおよそ 60 であり、質量数が 130 の領域ではそれぞれの質量数のスペクトルを分解できていない。一方、図中の実線は、SPIG 導入後の質量分析スペクトルであり、質量分解能が大幅に改善していることがわかる。質量分解能を求めると、およそ 310 となり、SPIG 導入前と比較して大幅に改善することに成功した。この改善により、幅 10 mm の検出領域に、より効率良くイオンを輸送することが可能となった。

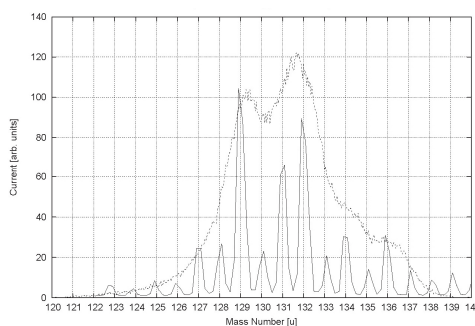


図 5 : Xe の質量スペクトル

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 17 件)

X. F. Yang, T. Wakui(3 番目), T. Shinozuka(22 番目) 他 22 名、An effective method for trapping ion beams in superfluid helium for laser spectroscopy experiments、EPJ Web of Conference、査読無、66、2014 年、11041p1-p4

DOI : <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146611041>

T. Furukawa, T. Wakui(2 番目), T. Shinozuka(30 番目) 他 30 名、Novel nuclear laser spectroscopy method using superfluid helium for measurement of spins and moments of exotic nuclei、Nucl. Instrum. and Methods B、査読有、317 2013 年、590-594
DOI : 10.1016/j.nimb.2013.08.023

X. F. Yang, T. Wakui(3 番目), T. Shinozuka(28 番目) 他 28 名、Control of stopping position of radioactive ion beam in superfluid helium for laser

spectroscopy experiments、Nucl. Instrum. and Methods B、査読有、317、2013 年、599-602

DOI : 10.1016/j.nimb.2013.07.068

T. Sonoda, T. Shinozuka(10 番目), T. Wakui(11 番目) 他 21 名、Development of a resonant laser ionization gas cell for high-energy, short-lived nuclei、Nucl. Instrum. and Methods B、査読有、295、2013 年、1-10

DOI : 10.1016/j.nimb.2012.10.009

T. Sonoda, T. Shinozuka(15 番目), T. Wakui(16 番目) 他 18 名、Development of a gas cell-based laser ion source for RIKEN PALIS、Hyperfine Interact.、査読有、216、2013 年、103-107

DOI : 10.1007/s10751-013-0817-6

[学会発表] (計 15 件)

園田 哲、RIBF-SLOWRI 共鳴イオン化レーザーイオン源 (PALIS) の開発とレーザー核分光への応用、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 20 日 ~ 2013 年 9 月 23 日、高知大学

川瀬 頌一郎、偏極陽子標的を用いた陽子ノックアウト反応による 14, 22, 240 のスピン軌道分離の研究 II、第 68 回日本物理学会年次大会、2013 年 3 月 26 日 ~ 2013 年 3 月 29 日、広島大学

河原 朋美、ペンタセン分子の光励起三重項状態の時間発展とその温度依存性、第 68 回日本物理学会年次大会、2013 年 3 月 26 日 ~ 2013 年 3 月 29 日、広島大学

K. Shimada、Recent activities with RF-IGISOL at CYRIC、EMIS2012(XVI International conference on electromagnetic isotope separators and techniques related to their applications)、2012 年 12 月 2 日 ~ 2012 年 12 月 7 日、松江

T. Sonoda、Development of a gas cell-based laser ion source for RIKEN PALIS、EMIS2012(XVI International conference on electromagnetic isotope separators and techniques related to their applications)、2012 年 12 月 2 日 ~ 2012 年 12 月 7 日、松江

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

篠塚 勉 (SHINOZUKA, TSUTOMU)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・非常勤講師

研究者番号 : 10134066

(2) 研究分担者

涌井 崇志 (WAKUI, TAKASHI)

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

研究者番号 : 70359644