

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | Development of RF carpet type He gas cell and high-precision mass measurement of neutron-rich nuclei at around $A = 50 - 60$ with MRTOF |
| Author(s)    | 飯村, 俊   |
| Citation     | 大阪大学, 2022, 博士論文  |
| Version Type | VoR   |
| URL          | <a href="https://doi.org/10.18910/87814">https://doi.org/10.18910/87814</a>   |
| rights       |   |
| Note         |   |

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 飯村 俊 )

## 論文題名

Development of RF carpet type He gas cell and high-precision mass measurement of neutron-rich nuclei at around  $A = 50 - 60$  with MRTOF  
 (RFカーペット型ヘリウムガスセル開発とMRTOFによる $A = 50 - 60$ 領域中性子過剰核の高精度質量測定)

## 論文内容の要旨

質量は原子核の最も基本的な物理量の一つであり、原子核の質量はそれを構成する陽子と中性子の合計質量よりも僅かに軽い。その質量欠損は結合エネルギーとして知られ、原子核の安定性に関わる量であるため、核の魔法性などの重要な核構造情報を含んでいる。近年の加速器施設の性能向上とともに、安定核よりも中性子や陽子の数が極端にアンバランスな不安定核の研究が盛んに行われ、特に中性子過剰な原子核では安定核領域で知られていた魔法数が消失したり、新魔法数が出現したりすることが明らかとなってきた。理化学研究所RIBF/BigRIPSでは現在世界最大強度の高エネルギー中性子過剰核ビームが生成でき、これらの短寿命核においては多重反射型飛行時間測定式質量測定装置 (MRTOF) による効率的な高精度質量測定が望ましい。しかしBigRIPSから供給されるビームは核子当たり数百MeVと高エネルギーであるが、MRTOFで質量測定するには数keV以下の低エネルギービームを入射しなければならない。そこで、我々は高エネルギービームを低エネルギービームに変換する高周波カーペット型ヘリウムガスセル (RFGC) を開発し、そのコミッション実験によりBigRIPSからの高エネルギー短寿命核ビームを低エネルギービームとして引き出し、MRTOFによる高精度質量測定に成功した。

RFGCの開発では、BigRIPSでの生成手法から生じる大きなエネルギー広がりをもつ高エネルギー短寿命核ビームに対応するために、新設計の電極構造を導入し、表面電離型イオン源を用いたオフライン試験で輸送効率を測定した。その際、電場やガスなどの様々な条件を検討し、輸送するイオンの質量電荷比に応じて最適条件を調べ、80%以上の輸送効率を達成した。オンライン実験に向けてRFGCをMRTOFと接続し、BigRIPSビームラインの下流に設置、インビーム $\gamma$ 線核分光実験 (HiCARI) と並行したパラサイト実験を行った。HiCARIでは7つの実験課題が実施され、その都度異なる核種の高速度RIビームが供給され、広い質量領域 (質量数 $A = 40$ から $A = 140$ まで) の短寿命核ビームをRFGCに入射させて、RFGCの性能を評価することができた。結果、全系の効率1%以上 (ビーム停止効率、イオン生存確率、RFGC+MRTOFの輸送効率、放射壊変損失などをすべて含む) を達成した。ガス中でのビーム停止効率を除くと最大で18%と高い引き出し効率を実現していることがわかった。

本実験では、MRTOFにより70核種以上の中性子過剰核の質量測定を行った。特に、 $A = 50-60$ 領域では、飛行時間スペクトルを補正するための新解析手法も導入し、15核種の質量を同定、その内 $^{55}\text{Sc}$ ,  $^{56}\text{Ti}$ ,  $^{58}\text{Ti}$ ,  $^{56}\text{V}$ ,  $^{57}\text{V}$ ,  $^{58}\text{V}$ ,  $^{59}\text{V}$ の質量精度は文献値より約10倍向上した。この結果を、過去の文献値や、異なる解析手法との比較検討により評価した。質量精度の向上によって、この領域の質量から直接得られる中性子分離エネルギーの系統性から、Ca同位体で確認されていた新魔法数 $N = 32, 34$ のシェルギャップの詳細な議論が可能となった。結果、 $N = 32$ についてはCaから原子番号の増加とともにシェルギャップが減少傾向にあることが高精度に確認され、 $N = 34$ ではSc, Ti, Vにおけるシェルギャップが消失していることが新たに判明した。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 ( 飯 村 俊 )  |     |                        |
|--|-----|------------------------|
|  | (職) | 氏 名                    |
| 論文審査担当者  | 主 査 | 教授 川畑 貴裕               |
|  | 副 査 | 教授 青井 考                |
|  | 副 査 | 教授 民井 淳                |
|  | 副 査 | 准教授 緒方 一介              |
|  | 副 査 | チームリーダー 石山 博恒 (理化学研究所) |
|  | 副査  | 准教授 小田原 厚子             |
| <b>論文審査の結果の要旨</b>  |     |                        |
| <p>本論文は、原子核の存在限界の地平線を広げてきた理化学研究所（理研）RI ビームファクトリー（RIBF）の BigRIPS で生成される安定核から遠く離れた原子核の質量を精密に測定するために重要となる RF カーペット型ヘリウムガスセル(RFGC)を開発し、質量数 50 から 60 領域の中性子過剰核の高精度質量測定に成功した研究である。</p> <p>質量は原子核の基本的な物理量の一つであり、原子核の基底状態の安定性などを示す情報を含んだ重要な量である。核図表上で安定核から遠く離れた原子核の質量を決定するために、短寿命でも測定可能な多重反射型飛行時間測定式質量測定装置（MRTOF）が理研で開発された。この装置には数 keV 以下の低エネルギービーム入射が要求されるが、理研 RIBF の BigRIPS が供給するビームは高速ビームである。このビームエネルギーの大きな違いの問題を解決するために、RFGC の開発が行われた。今回の RFGC では、ビーム方向に RI を引き出す従来の方法とは異なり、より安定なビーム輸送を目指して、垂直方向への引き出すという斬新なデザインが採用された。さらに、電極構造などに新しいアイデアが組み込まれた。新しい RFGC はオフライン実験を重ね、問題が生じるごとにさらなる改良を進め、最終的にガス圧、電圧などの最適化による各種条件を決定し、輸送効率が求められた。次に、RFGC に MRTOF を接続して BigRIPS ビームライン下流に設置され、インビーム核分光実験 (HiCARI) のパラサイト実験として実際の RI ビームを用いた質量測定が実施された。HiCARI では、異なる 1 次ビームと 1 次ターゲット、2 次ターゲットの組み合わせで、質量数 40 から 140 の短寿命核ビームが使用された。その広い質量領域の RI ビームで RFGC と MRTOF の性能評価が行われ、70 以上の中性子過剰核の質量測定が実施された。</p> <p>本論文では質量数 50 から 60 領域の 15 個の原子核の質量が精密に測定された。その中で、<sup>55</sup>Sc、<sup>56</sup>Ti、<sup>58</sup>Ti、<sup>56</sup>V、<sup>57</sup>V、<sup>58</sup>V、<sup>59</sup>V の質量は文献値よりも大幅に高精度で質量が決定された。今回、質量解析手法も新たな方法が開発され、MRTOF の質量分解能の向上につながっている。今回得られた高精度の質量を用い、その系統性の議論から、Ti 同位体における中性子の新魔法数 32 の存在の確定と、Sc、Ti、V 同位体では、Ca で見つかった中性子の新魔法数 34 のエネルギーギャップは存在しないことが明らかにされた。</p> <p>以上のように、本論文は原子核の高精度質量測定で重要な役割を果たす RF カーペット型ヘリウムガスセルの開発、それを用いた中性子数過剰核の質量の決定と、その情報による原子核構造の研究に多大な進展をもたらしたといえる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。</p> |     |                        |