

素粒子原子核研究所活動報告(1) 和光原子核科学センター 2023 年 3 月 7 日
短寿命核グループ活動報告 (2021.12.8 報告からのアップデート)

短寿命核グループでは宇宙における重元素合成過程の解明を研究の柱とし、素核研・和光原子核科学センター(WNSC)を研究基盤として研究活動を進めている。WNSC は、理研 RIBF 施設内に独自の短寿命原子核研究施設 KISS を運営し国内外の研究者に対して共同利用実験環境を提供すると同時に、それを用いた短寿命原子核の分光研究と、KISS 及び他の RIBF 施設の装置 (GARIS, BigRIPS-SLOWRI)において多重反射型飛行時間測定式質量分光器 (MRTOF-MS) を用いた網羅的質量測定プロジェクトを推進している(図 1)。

重元素の起源の研究において、実験原子核からの寄与は、合成に関与する千種類以上の原子核(その多くは未知の短寿命原子核である)を生成・分離し、質量・半減期・励起状態・崩壊様式などの特性を網羅的に測定することである。

KISS(KEK Isotope Separator System)は、多核子移行反応(MNT)を用いて中性子過剰核を生成し、一旦中性化した原子をレーザーによる共鳴イオン化することで、元素を選択する。そのイオンを 20 keV に加速したビームを電磁同位体分離器で分離することで、高純度の短寿命核ビームを生成することができる、精密な分光研究が可能となる。さらに、共鳴イオン化レーザーの波長から、短寿命原子核原子の超微細構造や同位体シフトの測定が可能で、電磁モーメントや原子核の荷電半径を原子核モデルに依存することなく決定することができる。多核子移行反応は、核子の“足し算”と“引き算”の両方が同時に起こる反応なので、標的核およびビーム核の周辺的全方向の原子核を満遍なく生成できる。とりわけウランの中性子過剰核領域は MNT の独断場である。2022 年のハイライトは、この KISS におけるウランの中性子過剰同位体の 43 年ぶりの発見と、RI ビームファクトリの基幹施設 BigRIPS の下流に理研と共同で整備している低速 RI ビーム生成施設 SLOWRI における質量測定の最初の成果としての新中性子魔法数 $N=34$ の盛衰の研究が上げられる。

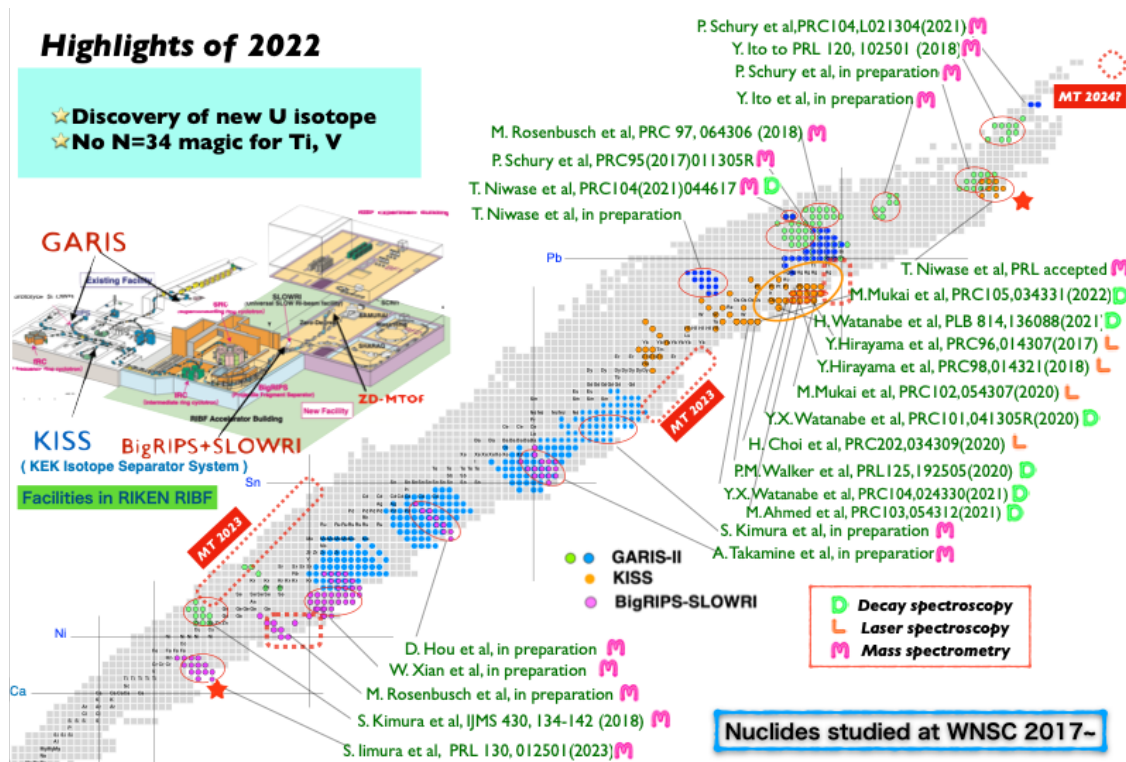


図 1 RIBF の KISS, GARIS-II, BigRIPS-SLOWRI で WNSC が主体となって研究した主な核種

1. ウランの新同位体 U-241 の発見と質量測定

ウランを始めとするアクチノイド元素の中性子過剰同位体は、宇宙における爆発的要素合成過程の終焉、とりわけウラン、トリウム、プルトニウムの起源研究において最も重要な原子核であるにも関わらず、その生成が困難であったため、ベータ安定線近傍のごくわずかの原子核しか発見されていない(図 2)。KISS において世界で初めて実用化した多核子移行反応によって合成し、MRTOF による精密質量測定によって同定することで、初めてそれが可能となった。

U-238 ビームを Pt-198 標的に照射して生成された多種多様な原子核は、アルゴンガス中で中性原子として停止する。それをウランの共鳴波長に調整したレーザーでイオン化し、同位体分離器で質量数によって選り分けることで、ウランを選択的に分離する。さらにそれを MRTOF で同重体を分離することによって、明確に目的の原子核を同定するばかりでなく、その質量を高精度で決定することができる。図 3 に示す飛行時間スペクトルは、上がウランの共鳴レーザー、下がネプツニウムの共鳴レーザーを照射して MRTOF 質量分光器で取得されたものであり、明確に新同位体 U-241 が同定され、その質量は誤差 45 keV の高精度で決定できた。

新同位体の同定は、古くは反応性生物の化学分離とその放射線測定によって行われてきたが、収量が極少ないものや寿命が長いものは困難であった。近年では、高エネルギーの新同位体ビームを透過させた検出器内でのエネルギー損失とビームの磁気剛性から同定が行われている場合が多いが、その方法では核種の同定(陽子数と中性子数のみ)しかできていない。一方、本研究の KISS+MRTOF による方法では、微量の長寿命同位体でも同定することが可能であり、原子核の最も重要な特性である質量を精密に決定できるという優れた特徴がある。今後アクチノイド領域の大きな開拓が期待できる。

なお、本研究の成果は Physical Review Letter 誌に掲載が決定し、Editor's Suggestion に選定されている。

2. 中性子魔法数 N=34 の盛衰

BigRIPS の SLOWRI 装置における ZD-MRTOF 装置を用いた網羅的質量測定は、他の実験のパラサイトビームも利用して精力的に進められており、解析がすすんだものから順次論文に公表している。チタン-バナジウムの中性子過剰同位体の測定はパラサイト実験として行われ、対象核種は既に質量が知られている核種であったため、大きな成果は期待していなかった。しかし、結果が既報の値と大きく異なり、核構造研究の中心的課題の一つである新魔法数の盛衰の研究に大きな寄与があるものとなった。例え既知の値でも高確度で系統的に測ることの重要性を示した好例となった。

中性子魔法数の良い指標として、同位体間の質量の 2 階差分から得られる殻空隙エネルギー $\Delta_{2n} = \{m(N) - m(N-2)\} - \{m(N+2) - m(N)\}$ がある。図 5 はそれを核図

²³⁸ Am 1950	²³⁹ Am 1949	²⁴⁰ Am 1949	²⁴¹ Am 1949	²⁴² Am 1949	²⁴³ Am 1950	²⁴⁴ Am 1950	²⁴⁵ Am 1955	²⁴⁶ Am 1955	²⁴⁷ Am 1967	
²³⁷ Pu 1949	²³⁸ Pu 1949	²³⁹ Pu 1946	²⁴⁰ Pu 1949	²⁴¹ Pu 1949	²⁴² Pu 1950	²⁴³ Pu 1951	²⁴⁴ Pu 1954	²⁴⁵ Pu 1955	²⁴⁶ Pu 1955	²⁴⁷ Pu 1983
²³⁶ Np 1949	²³⁷ Np 1948	²³⁸ Np 1949	²³⁹ Np 1940	²⁴⁰ Np 1953	²⁴¹ Np 1959	²⁴² Np 1979	²⁴³ Np 1979	²⁴⁴ Np 1987		
²³⁵ U 1935	²³⁶ U 1951	²³⁷ U 1940	²³⁸ U 1896	²³⁹ U 1937	²⁴⁰ U 1953	²⁴¹ U 2023	²⁴² U 1979			
²³⁴ Pa 1913	²³⁵ Pa 1950	²³⁶ Pa 1963	²³⁷ Pa 1954	²³⁸ Pa 1968	²³⁹ Pa 1995					
²³³ Th 1935	²³⁴ Th 1900	²³⁵ Th 1969	²³⁶ Th 1973	²³⁷ Th 1993	²³⁸ Th 1999					

図 2 Th-Am 中性子過剰同位体の発見年。青印は本研究で質量測定した核種。

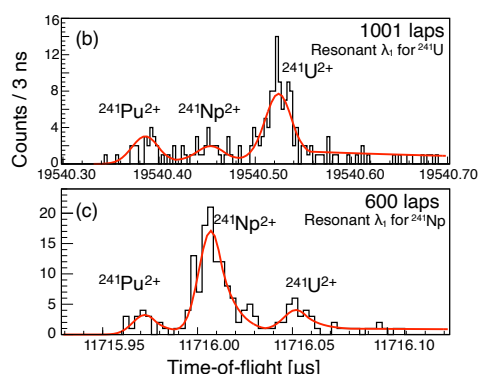


図 3 KISS-MRTOF の ToF スペクトル。同重体が分離され共鳴した元素が強調して観測されている。

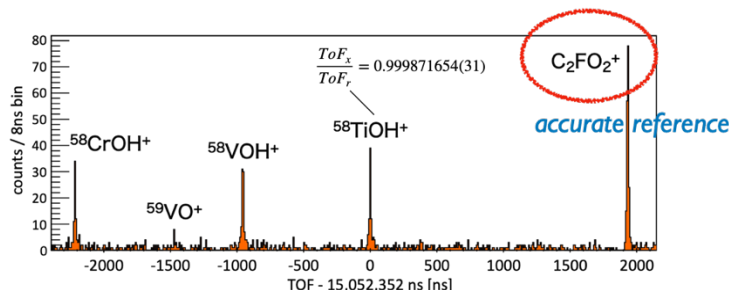


図 4 Ti-58 の分子イオンを含む $A/q=75$ 同重体イオンの ToF スペクトル

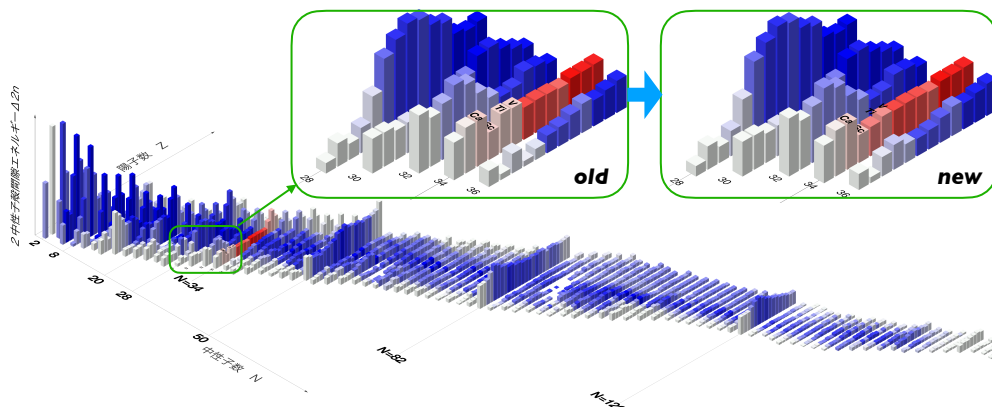


図5 核図表に示した殻空隙エネルギー $\Delta 2n$ の俯瞰図。色調は $\Delta 2n$ の精度を表し、赤は $N=34$ の同調体を示す。

表全体（ただし中性子数が偶数核のみ）について俯瞰したものであり、既知の中性子魔法数において明瞭な尾根を形成していることがわかる。基本的な魔法数 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 に加えて、不安定核では 16, 32 等の新しい魔法数の出現や消失が観測されている。

本研究で注目している中性子数 34 の魔法数は、カルシウム同位体で発見され、その後スカンジウムでは消失し、チタン、バナジウムでは再出現しているという報告があった。 $N=34$ の同調体の $\Delta 2n$ の推移を調べるためには、 $N=32, 24, 36$ の質量が各々の元素において必要になる。それは、チタン同位体では Ti-54, 56, 58 に、バナジウム同位体では V-55, 57, 59 に相当する。本研究では、Ti-58, V-59 の質量を既報の値に比べて遥かに高精度かつ高確度で決定することができた。図 4 は、 $^{58}\text{TiOH}^+$ イオンを含む飛行時間スペクトルであり、同時に測定されている極めて正確に質量がわかっている C_2FO_2^+ イオンを較正に用いることができるため、本質的に高確度の測定が可能になる。その結果 Ti-58 の質量は既報値に比べて 500 keV も小さく（より結合エネルギーが高い）、V-59 は 200 keV 小さいことがわかった。その結果、図 6 に示すように Ti と V の $\Delta 2n$ は Sc と同程度であることが示され、 $N=34$ はチタン、バナジウムでは魔法数ではないことが解った。この結果は最新の大規模モンテカルロ殻模型計算でも支持されている。

この成果は、Physical Review Letters 130, 012501 (2023) に報告されている。

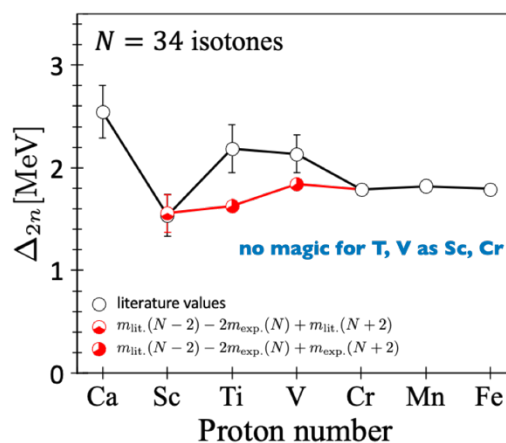


図6 $N=34$ 同調体の殻空隙エネルギー $\Delta 2n$ 。黒印は既報値で赤印は本研究の測定結果。

3. KISS の段階的發展計画の推進

KISS において示された多核子移行反応の中性子過剰原子核生成に対する有効性と、MRTOF の質量測定および核種同定能力の高さは、世界の注目を集めており、世界中の相当数の加速器施設において同様の計画が進みつつある。現在のリードを保ち、さらにエキゾチックな広範囲の原子核を探索することを目指して、KISS の發展計画をすすめている。当初、KISS-II 計画として、超電導ソレノイドによる一次ビーム強度の増強、大型高周波ガスセルによる効率の大幅向上、複数質量数選択型同位体分離器および MRTOF による測定能率の向上から、1 万倍の性能向上を目指していた。しかし予算規模 15 億円の KISS-II 計画は、KEK の PIP-2022 において新規事業の 4 件には選定されず、当面開始できる見込みがなくなった。そこで、外部資金等を活用して一刻も早く開始できるよう、最も高額（約 7 億円）の構成要素である超電導ソレノイドを除いた段階的計画(KISS-1.5 相当)を進める予定である(図 7)。

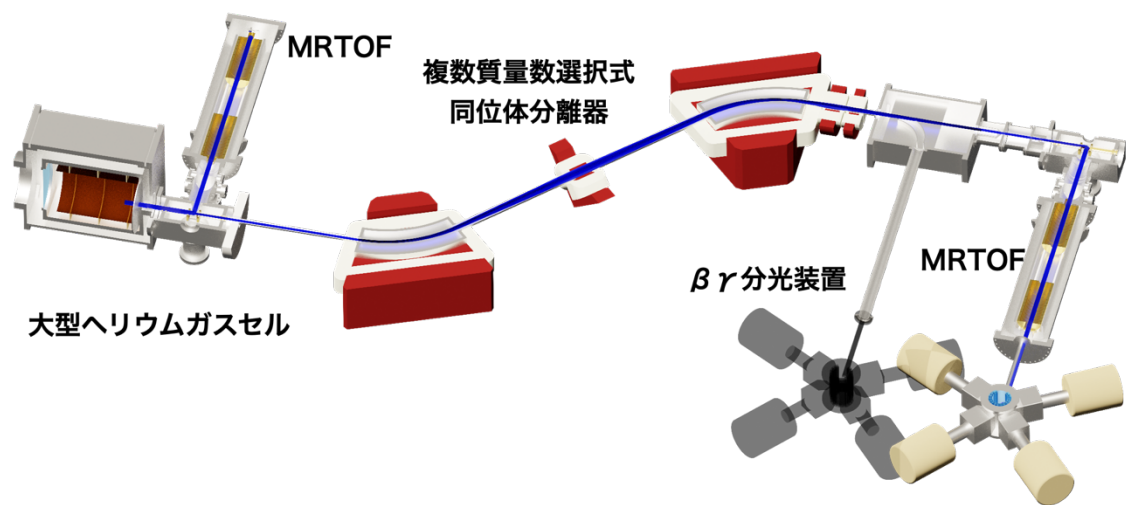


図7 段階的 KISS 発展計画の模式図

一方、大きなハードウェアの実装をするのに先立って、パイロット実験を計画している。これは、現在超重元素の質量測定実験を実施している GARIS-II のガスセルの直前に標的を設置し、多核子移行反応生成物をそのまま捕集して MRTOF で質量測定および同定を行う計画である。ビーム強度は 1 pnA 程度(6×10^9 pps)に限られるが、効率を失う段階が少ない分、十分エキゾチックな原子核にアクセスできる。とりわけ、キュリウム標的を使用することにより、既に多くの新同位体の発見や、ウランの起源研究で重要な中性子数 154 の変形魔法数の変遷を確認できる可能性が高い。