

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10月3日

短寿命核グループ活動報告（2022.3.7 報告からのアップデート）

短寿命核グループ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 (MTOF-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、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”的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の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。

2023年はRIBFの主力加速器SRCの長期故障により、計画していた多くの実験が実施できなかつたが、旧施設を用いたKISS実験や、核分裂線源を用いたオフライン実験、KISSのUpgrade計画のための重要な技術開発と試験実験が実施できた。

- >400核種の質量測定(KISS, GARIS, BigRIPS-SLOWRI)
 - 高融点元素の中性子過剰核のレーザー・ $\beta\gamma$ 分光@KISS
 - 超重元素(Db)同位体の初質量測定★
 - 中性子魔法数N=34の消滅の発見★
 - ウランの新同位体発見★

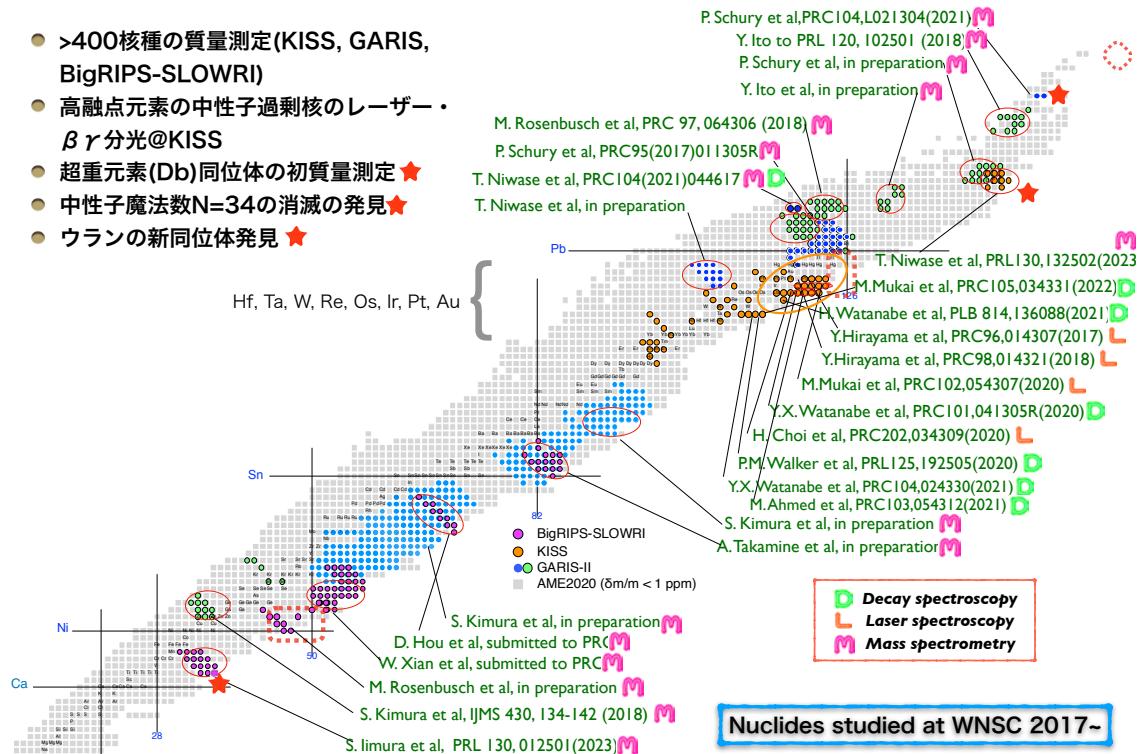


図 1 KISS および RIBF の GARIS-II, BigRIPS-SLOWRI で WNSC が主体となって研究した核種

KISS の Upgrade の計画の要点は、効率・能率の向上と、アクチノイド標的の使用による重い中性子過剰核へのアクセスである。前者のために開発を進めているのが、高周波ワイヤーカーテンを装填したヘリウムガスセルであり、後者のパイロット実験として、固定キュリウム標的をガスセルの直前に設置して反応生成核を直接捕集して中性子数 $N=152$ の魔法数性の盛衰を KISS Upgrade に先んじて解明しようとしている。

1. KISS におけるヘリウムガスセル開発

KISS 装置では、多核子移行反応によって生成された短寿命核を、アルゴンガス中で停止・中性化し、ガス流でセルの出口まで輸送し、そこでレーザーを照射し、共鳴イオン化法による元素選択して真空中に 1 値イオンとして取り出す。それを 20 kV の静電場で加速し、双極電磁石で質量数選択をすることで、高純度の短寿命核ビームを得ている。この「ガス流で輸送」における長い輸送時間による短寿命核の損失と、「中性化と共鳴イオン化」の過程における効率の低下の課題があった。これらを解決するために、BigRIPS や GARIS 装置で実用化しているヘリウムガスセル+高周波カーペットを用いて、イオンのままガスセル中で熱化し直流電場と不均一高周波電場で高速かつ高効率に真空中に引き出す構造の試験を開始している。従来型の基本構造に加えて、ワイヤーを用いた高周波カーテンをガスセル内部に配置することでより高速かつ高効率で引き出すことを期待している。高周波カーテンは、従来の高周波カーペットのように真空隔壁にはならないが、ガスセル中に設置することにより効率よく輸送できる。これは、偶発的に 2 本の電極間にに入ったイオンでも絶縁物に失われること無く「裏側」に回り込んで輸送されるからである。

図 2 は、KISS の標的周辺部を示しており、この初号機では、反応生成物の内、ビームの右側半球だけ捕集する構造をとっている。

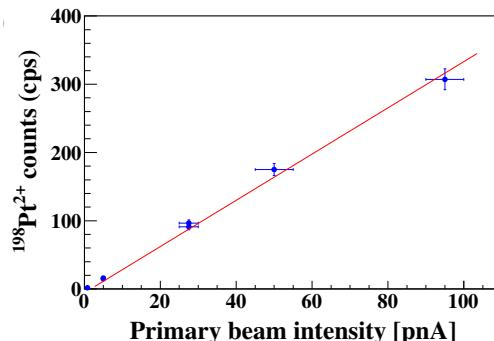


図 3 引き出した標的反跳粒子 ^{198}Pt の一次ビーム強度依存性

最初のオンライン試験は、 ^{198}Pt 標的に ^{136}Xe ビームを照射して標的反跳粒子 ^{198}Pt および多核子移行反応生成イオンを MRTOF 質量分光器および β 崩壊観測にて実施した。図 3 は、引き出された ^{198}Pt イオンの一次ビーム強度依存性を示したもので、100 pna の強度でも効率を劣化させずに輸送できていることを示している。これは従来のアルゴンガスセルを用いた場合の 2 倍程度の強度に相当する。図 4 は、多核子移行反応生成物の内、質量数 199 の同重体の MRTOF の飛行時間スペクトルを観測したものであり、一部のごく質量が近い同重体を除いて良く分離できていることがわかる。また、引き出された ^{199}Pt の量は、従来の 10 倍以上であることが示された(Y. Hirayama et al., NIM A, submitted)。

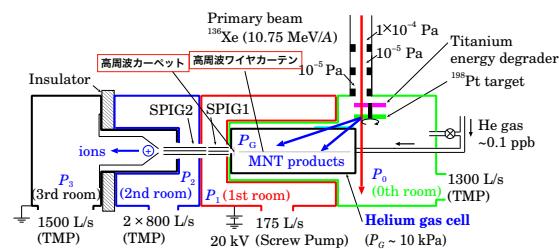


図 2 He ガスセルを用いた KISS の標的周辺の模式図

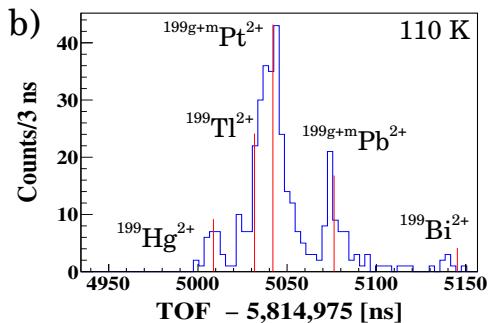


図 4 反応生成粒子 ^{199}Pt および同重体イオンの TOF スペクトル

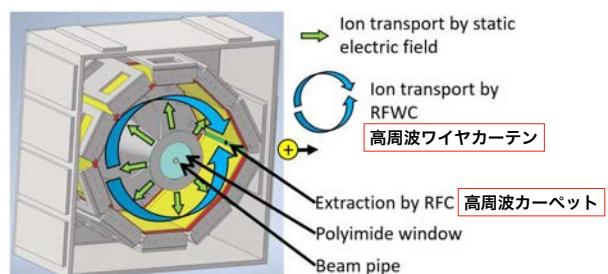


図 5 360 度方向を受容できる新しいヘリウムガスセル

このように、高周波ワイヤーカーテンを用いたヘリウムガスセルは、より高いビーム強度で運用できると同時に効率も高く、従来に比べて遙かに高収量が得られることが示せた。レーザーイオン化のような元素による分離ができていないが、MRTOFと組み合わせることで同重体を分離・識別することができるので、質量測定などの実験では同時にすべての同重体を測定できることが可能になり、高い能率が期待できる。現在、360度の全周方位に高周波ワイヤーカーテン張り巡らしたドーナツ型 He ガスセルを製作中であり(図 5)、いよいよ γ -過程研究の核心部である中性子数 $N=126$ 近傍の中性子過剰核の測定に向かう計画である。

2. キュリウム標的を用いた多核子移行反応のパイロット実験

γ -過程の終焉やウランの起源を探査する上で、アクチノイドの中性子過剰核の研究は欠くことができないにもかかわらず、従来の反応では到底アクセスすることはできなかった。KISS の発展計画では、高強度のウランビームとアクチノイド標的を用いた多核子移行反応によって、この領域を開拓することを計画している。そのパイロット実験として、GARIS 装置において固定キュリウム標的を使用した実験を準備している(図 6)。ガスセル直前に標的を置き、多核子移行反応生成物を直接ヘリウムガスセルに入射して、MRTOF で測定することで、微弱な一次ビームでも相当数のアクチノイドの中性子過剰核の発見と精密質量測定が期待できる(図 7)。この実験の準備として、 nat Pb 標的と Xe ビームを使用した試験実験を遂行した(S. Kimura et al., NP2212-RRC78)。

図 8 は、MRTOF で観測された鉛の安定同位体 207 Pb の標的反跳粒子のビーム強度依存性を調べた測定で、1 pA 程度の入射ビームでは効率の劣化無しに実験できることができた。図 9 は、核子移行反応で生成された 209 Bi が TOF スペク

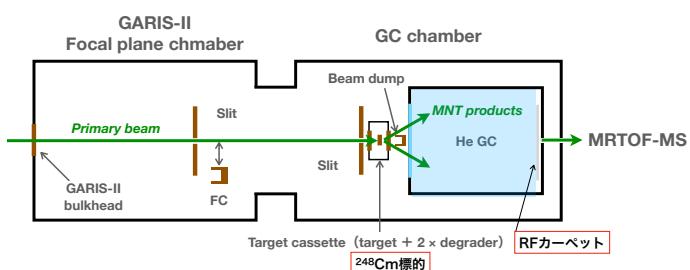


図 6 キュリウム標的使用の多核子移行反応パイロット実験装置概念

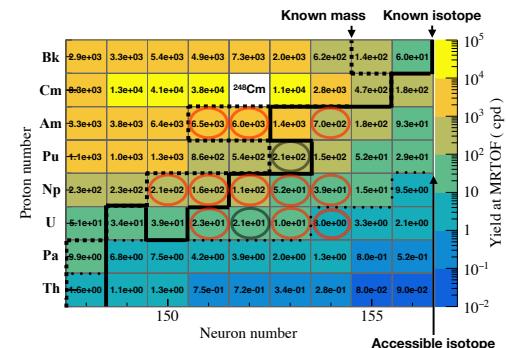


図 7 1 pA の微弱 238 U ビームと 248 Cm により生成される中性子過剰アクチノイド同位体

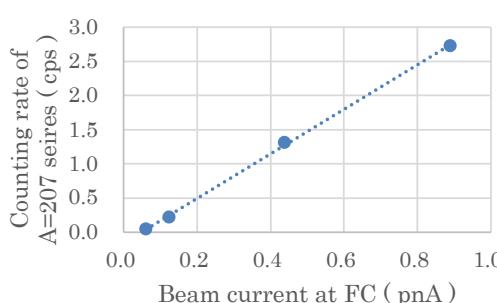


図 8 標的反跳粒子 207 Pb の生成量の一次ビーム強度依存性

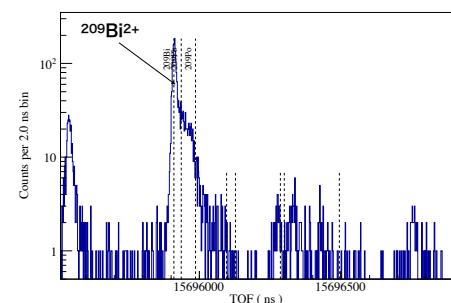


図 9 核子移行反応生成物 209 Bi の ToF スペクトル

トルに明瞭に観測されていることを示す。この実験で得られた生成量 0.21 cps は、期待していた値と相違なく、本実験への期待が高まった。この原子核の領域では、自発核分裂の寿命から Cf, Fm, No において中性子数 $N=152$ に強い魔法数性が示唆されているが、より軽い Cm やより重い Rf ではそれが消失しているという問題がある。この魔法数は γ -過程によるウラン生成経路に重要な意味を持つものであり、本実験による質量測定で Cm, Pu, Np, U 同位体での魔法数性の盛衰を解き明かすことが期待されている。

3. KISS の段階的発展計画(KISS-1.5)

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しており、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、 r -過程の終焉の解明に大きな寄与するべく、KISS の発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 万倍強の性能向上を目指していた。しかし、科研費等の外部資金では届かない計画なので、まずは、超伝導ソレノイド無しで、KISS の 100-1000 倍の性能を目指した計画、通称 KISS-1.5 計画を実現するべく、特別推進研究（代表：渡邊裕）に申請している。図 10 は、KISS-1.5 計画の装置配置図を示す。現在の KISS 装置の隣のビームラインを利用して新しい装置の開発と並行して実験を実施することができる。

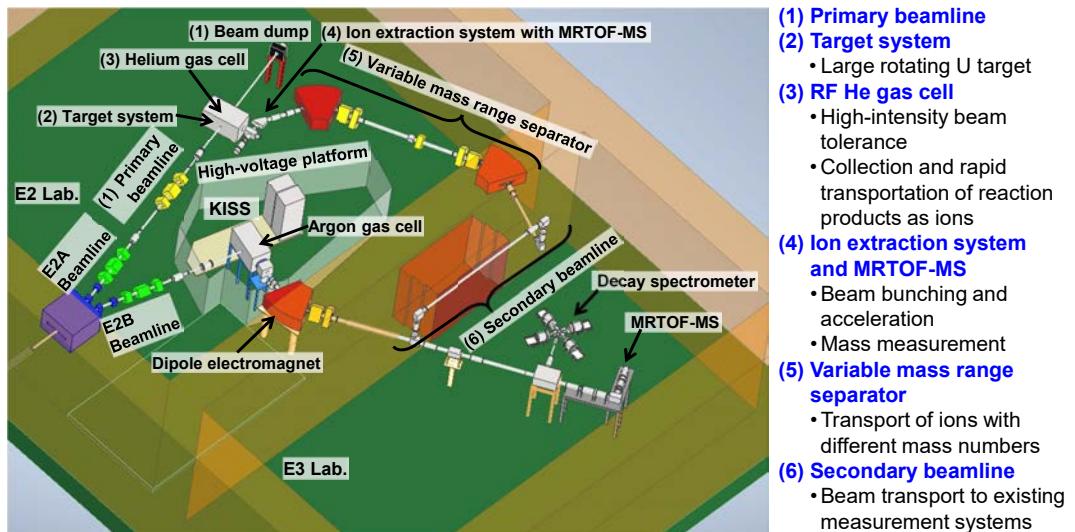


図 10 KISS-1.5 計画の装置構成・配置案

4. KISS の発展計画で期待される新同位体

多核子移行反応と独自の高効率・高能率の精密質量測定とそれによる同位体の同定により、アクチノイドの中性子過剰側だけでも、200 核種以上の新同位体の発見が期待できる（図 11）。この領域はこれまで他所でアクセスできなかった「ブルーオーシャン」たる所以である。網羅的精密質量測定から様々な核構造の指標が得られるが、とりわけ質量の二階差分から勘定できる二中性子殻空隙エネルギーは、中性子魔法数の良い指標となっており、それは r -過程経路解明の鍵となる性質である（図 12）。

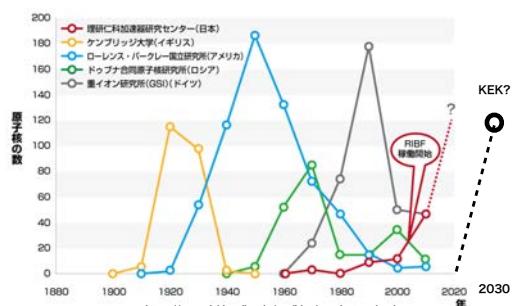


図 11 世界トップ 5 の研究所における 10 年ごとの原子核発見数（仁科センター Web サイトより）に加筆

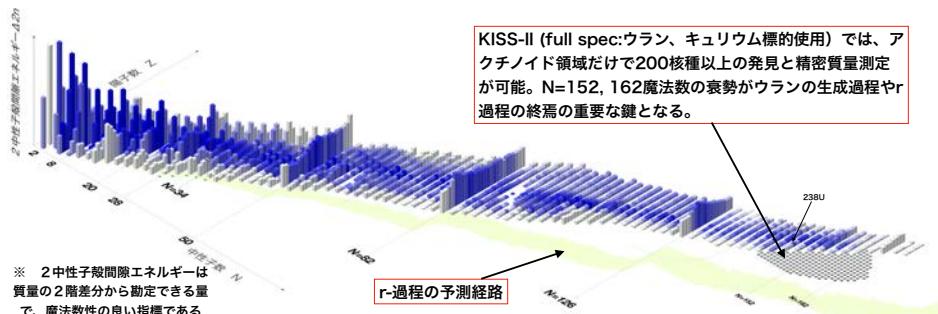


図 12 KISS 発展計画で発見が期待できるアクチノイドの新同位体と、核図表全体の $\Delta 2n$ プロット