

素粒子原子核研究所活動報告(2) 和光原子核科学センター 2024年4月14日

和光原子核科学センター(WNSC)は、宇宙における重元素合成過程の解明を柱とした研究活動を進めている。理研 RIBF 施設内に独自の短寿命原子核研究施設 KISS(KEK Isotope Separation System、元素選択型質量分離装置)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-II、BigRIPS-SLOWRI)において多重反射型飛行時間測定式(MRTOF)質量分光器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ける原子核実験からの寄与は、元素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)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 は、多核子移行(MNT)反応を用いて中性子過剰な原子核を生成してアルゴンガス中に停止させ、一旦中性化した原子をレーザーによって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キロ電子ボルトのエネルギーに加速して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提供することができ、精密な崩壊核分光や質量分光が可能となる。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を測定することができ、電磁モーメントや原子核の荷電半径を原子核の理論模型に依存することなく決定することが可能である(レーザー核分光)。MNT 反応は、二つの原子核の間で核子の『足し算』と『引き算』の両方が同時に起こる反応であり、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することができる。2023 年度後期は RIBF 施設の主力加速器 SRC の長期故障により、BigRIPS-SLOWRI で計画していた多くの実験が実施できなかったが、旧施設での KISS や GARIS-II を用いた実験が実施できた。

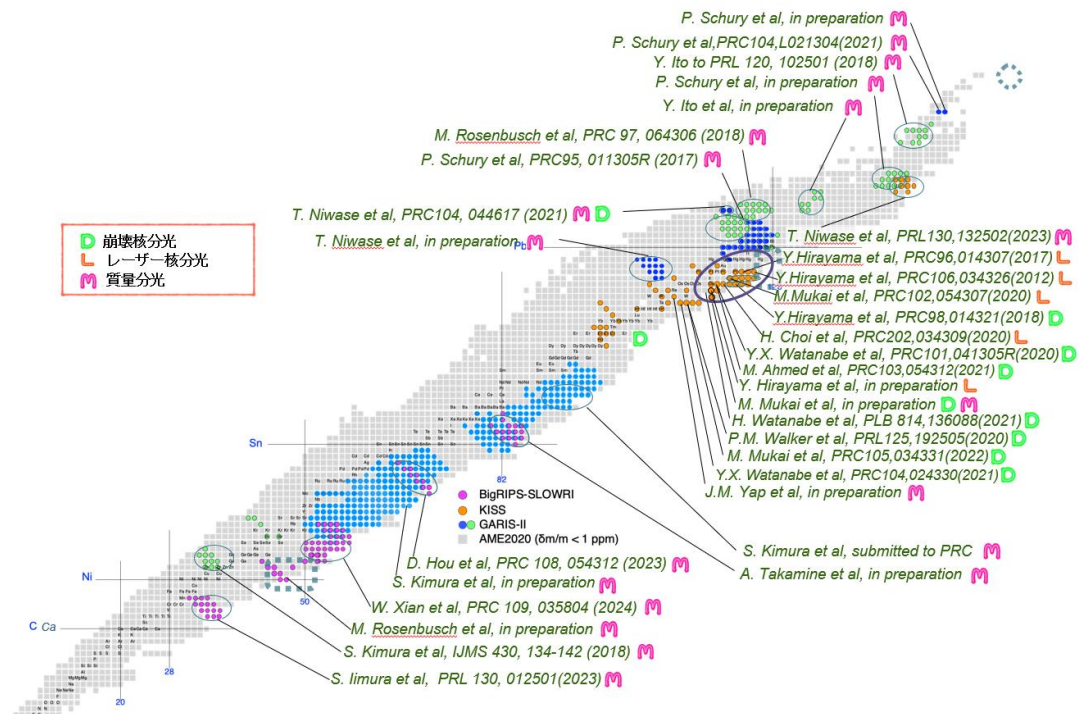


図1. KISS および RIBF 施設の GARIS-II、BigRIPS-SLOWRI で WNSC が主体となって研究した核種

1. KISS でのレニウム(Re)同位体のガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光による核構造研究

陽子と中性子から構成される原子核は形を持つ構造体であり、中性子と陽子の数に応じて球形、縦長のプロレート変形、横長のオブレート変形等、様々な形状をとることが知られている。その中でプロレート変形が最も多く見られる形状であることがこれまで実験的に分かっている。

しかしながら、何故原子核がプロレート変形を好むのか、理論的解釈は未だなされていない。原子核が相対的に安定となる中性子の数(中性子魔法数)の近傍ではプロレート変形からオブレート変形に形状遷移する領域が存在することが観測されており、その理論的解明には核図表上での系統的な形状の実験的調査が不可欠である。原子番号(Z)が 72 から 78 までの元素では、中性子数(N)が 116 から 118 近傍で原子核の形状が変化することが理論的に予測されているが、これらの元素は高融点元素であるため合成した原子核を研究に適した状態で取り出すことが困難であり、形状に関する研究では未開拓領域として残っている。現状、KISS は MNT 反応で高融点元素の中性子過剰な短寿命原子核を合成してビームとして供給し、レーザー共鳴イオン化法による系統的な形状変化の探索が可能な唯一の施設である。原子核の形状は原子核内で陽子や中性子が運動する軌道と密接な関係があり、特に最もエネルギーの浅い軌道にある最外殻の陽子や中性子の軌道が重要である。これらの軌道は角運動量(j)とパリティ(π)で特徴づけられ、レーザー共鳴イオン化核分光による超微細相互作用(HFS)分布の測定により決定できる原子核のスピン(I)・パリティから軌道の情報を得ることができる。

系統的な原子核形状の探索の一つとして、中性子過剰なレニウム同位体 $^{191}, ^{192}\text{Re}$ ($Z=75, N=116, 117$) のガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光を KISS で実施した。図 2 に天然に存在する長寿命の ^{187}Re ($N=112, I^\pi = 5/2^+$) と MNT 反応で合成した短寿命原子核 $^{191}, ^{192}\text{Re}$ の HFS 分布の測定結果を示す。 ^{187}Re の核スピン・パリティは $I^\pi = 5/2^+$ と知られているため、測定された HFS 分布からレーザー核分光の応答関数を導出することができる。この応答関数を用いて $^{191}, ^{192}\text{Re}$ の HFS 分布を精度よく解析した。図 2(a) は $I^\pi = 5/2^+$ の典型的な非常に幅の広い HFS 分布を示しているが、図 2(b) では幅が 1/3 程度の分布が観測されて ^{191}Re の陽子の軌道が明らかに変化していることがわかり、核スピン・パリティとして $I^\pi = 1/2^+$ が強く示唆された。図 2(c) では更に幅の狭い分布が示されており、 $I^\pi = 0^-$ であることが分かった。これは、レニウム同位体では ^{187}Re から $^{191}, ^{192}\text{Re}$ への形状変化に伴い最外殻陽子の軌道が $j^\pi = 5/2^+$ 軌道から $j^\pi = 1/2^+$ 軌道へ変化することを示唆している。今後、レニウム同位体の系統的なレーザー核分光から陽子軌道変化(形状変化)の中性子数依存性を明らかにする予定である。

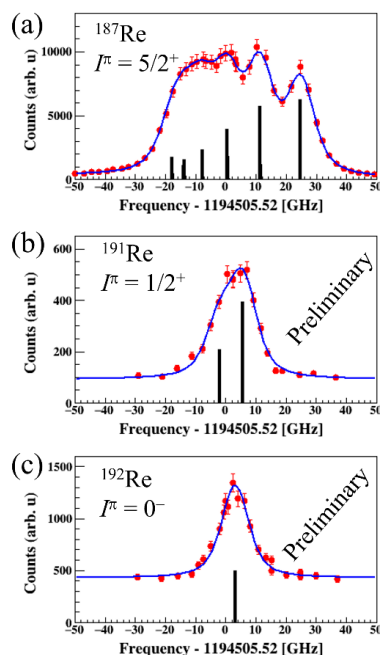


図 2. KISS で測定した (a) ^{187}Re 、(b) ^{191}Re 、(c) ^{192}Re の HFS 分布。黒い垂直線は各共鳴原子遷移のレーザー周波数と強度を示す。

2. KISS での大型アルゴンガスセルの開発

KISS では MNT 反応によって合成した反応生成核をガスセル内のアルゴンガスで停止させてアルゴン原子との衝突により中性な原子に変換する。中性な原子はアルゴンガスの流れで輸送され、ガスセルの出口直前でレーザーに照射されて元素選択的にイオン化される。ビームはビームパイプを通してガスセル内に入ることなく下流のビームダンプに輸送されるが、ガスセル内に散乱される弾性散乱粒子によりアルゴンガスは電離してプラズマを発生させる。密度の高いプラズマは再結合による輻射によりガスセル出口付近のアルゴンガスを電離し、レーザー共鳴イオン化法でイオン化した目的核種を再び中性化させる原因になると考えられる。現在 KISS で使用しているアルゴンガスセルでは、 ^{136}Xe ビームを用いた場合 10 pA 程度以上のビーム強度で反応生成核の収量のビーム強度に対する比が低下する。これは弾性散乱粒子によってアルゴンガス中に生成された密度の高いプラズマが原因と考えられる。プラズマの密度を低下させるためにはアルゴンガスの圧力を減少させることが有効と考えられるが、広いエネルギー分布と角度分布で標的から放出される MNT 反応の生成核に対する収集効率が低下してしまう。従来のアルゴンガスセルの収集効率を保ったままプラズマ密度を低下させるために図 3 に示される大型のアルゴンガスセルを開発している。大型アルゴンガスセルは従来のガスセルに比べて 100 倍の体積を持ち、1/5 の圧力で反応生成核をこれまでと同様に停止させることが可能になるため、プラズマ密度を 1/5 に低減できると期待される。

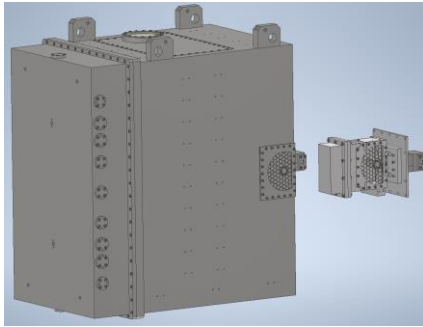


図 3. 従来のアルゴンガスセル(右)と大型アルゴンガスセル(左)。

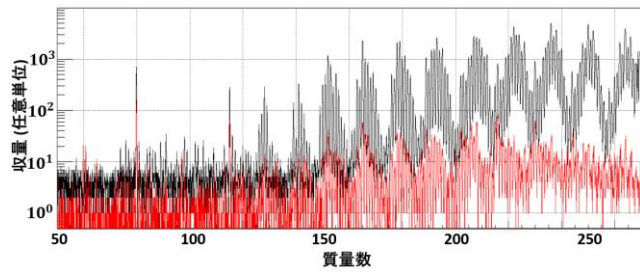


図 4. 大型アルゴンガスセルから引き出されるイオンの質量数分布。黒線と赤線はそれぞれガスセルのベーキング前と後の測定結果を示す。

目的核種のレーザー共鳴イオン化のためには、反応生成核を中性な原子としてガス中を輸送させることが必要である。アルゴンガス中に炭化水素重合体などの不純物があると研究の目的とする単体の原子の一部と結合して分子を形成するため、レーザー共鳴イオン化の効率が低下する。図 4 の黒線は白金のフィラメントをアルゴンガス中で加熱して蒸発させた時に大型アルゴンガスセルから引き出したイオンの質量数分布を示す。質量数 250 以上の領域まで不純物と結合した分子がイオンとして引き出されていることが分かる。大型ガスセルでは従来のガスセルに比べて表面積が大きいため、内壁に吸着した不純物の影響が大きいと考えられ、吸着物質を除去するためにガスセルのベーキングを行った。図 4 の赤線はガスセルを 100℃以上に数日間ベーキングした後に引き出されたイオンの質量数分布を示しており、ベーキングによって不純物を減少できていることが分かる。

大型アルゴンガスセルを用いたビーム照射実験を 2024 年 3 月に実施した。理研リングサイクロトロンで 10.75 メガ電子ボルトに加速した ^{136}Xe ビームを 9 μm のチタン箔で減速して白金標的に照射し、MNT 反応による反応生成核を大型アルゴンガスセルで収集して引き出した。レーザー照射の有無、ガス圧、ビーム強度を変化させてその応答を測定したところ、同じ条件下での測定結果に大きなばらつきがあり、条件変化に対する応答時間が長いことが示唆された。詳細な解析を進め、今後の開発方針を検討する。

3. GARIS-IIでの超重核の精密質量測定に向けたビームエネルギーの最適化

超重核の精密質量測定を行う SHE Mass プロジェクトでは、RIBF 施設の気体充填型反跳分離器 GARIS-II に MRTOF 質量分光器を設置し、現在ドブニウム同位体の質量測定を進めている。超重核は理研リングサイクロトロン RRC で核子当たり 6 メガ電子ボルトに加速した ^{51}V ビームを用いた核融合反応により合成される。研究の目的とする超重核の同位体を合成するために最適なエネルギーで融合反応を起こさせるため、GARIS-II の上流にはエネルギー減衰板と標的が設置されている。融合反応で合成された超重核は GARIS-II によって一次ビームから分離され、ヘリウムガスキャッチャーによって停止された後、MRTOF 質量分光器によって精密に質量が測定される。質量測定と同時にアルファ崩壊やベータ崩壊を検出することで、目的核種の原子質量測定の確度を向上させるとともに、寿命の測定も可能にしている。

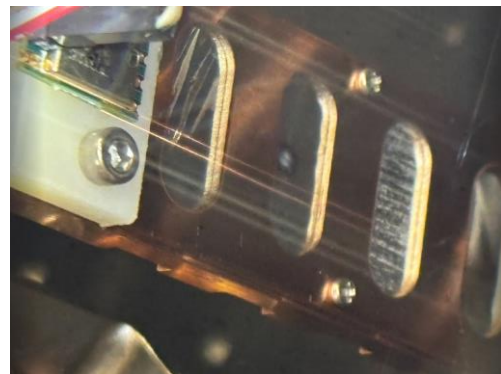


図 5. ビームのエネルギーを変化させて融合反応の断面積を測定するために GARIS-II に導入された回転式エネルギー減衰板。

これまでに金属鉛標的を使用して合成した ^{257}Db の質量測定に成功しているが、標的の劣化を防止するためビーム強度は 300 pA に制限されていた。アルミニウムのエネルギー減衰板と硫化鉛標的を使用することでビーム強度を 1.5 μA まで高めることに成功したが、さらにビーム強度を 3 μA に高めて収量を 2 倍にすることを目指してチタンのエネルギー減衰板を導入して

実験を実施したところ、ドブニウムの事象は観察できなかった。実験ごとにドブニウムの収量に大きな差異がある原因を調べるため、断面積が知られているランタン標的を用いた融合反応の測定実験を実施した。図 5 に示される回転式のエネルギー減衰板を導入してビームのエネルギーを変化させて反応生成核の収量を測定したところ、実験ごとにビームのエネルギーに 1~2% 程度のばらつきがあることが分かった。融合反応で合成される特定の同位体の断面積はエネルギーに大きく依存するため、理研重イオン線形加速器 RILAC を用いて既に断面積を測定したテルビウム標的を用いた融合反応を実験ごとに測定し、ビームエネルギーを較正してドブニウムの融合反応の測定を行う手法を確立した。