

短寿命核グループでは爆発的天体における重元素合成過程の解明を研究の柱として、おもに理研 RIBF 施設での短寿命原子核による実験的研究を進めている。中心的な研究基盤は KEK が理研に設置した和光原子核科学センター(WNSC)にあり、ここで元素選択型質量分離装置(KISS)の共同利用および多重反射型飛行時間測定式質量分光器(MRTOF-MS)による原子核の網羅的原子核質量測定プロジェクトを推進している。

[1] KISS(KEK Isotope Separation System) 共同利用

- ・ 9/15-18 に実施された KISS 共同利用実験採択課題「NP1512-RRC41, Y. Hirayama: Lifetime measurements of nuclei around N = 126 using KISS」では、<sup>198</sup>Pt 回転標的と <sup>136</sup>Xe ビームを用いて、<sup>199-201</sup>Pt、<sup>198-200</sup>Ir、<sup>195-198</sup>Os を生成して引き出し、β崩壊の寿命測定およびγ線核分光を行った<sup>(1-3)</sup>。今回、未知核 <sup>198</sup>Os の β崩壊寿命に成功し、<sup>195,197</sup>Os に長寿命の未知準安定状態を発見した。

⇒図 1 では、これまでに測定された N=126 周辺のイリジウム、オスmium 同位体の半減期をいくつかの理論予測と比較している。

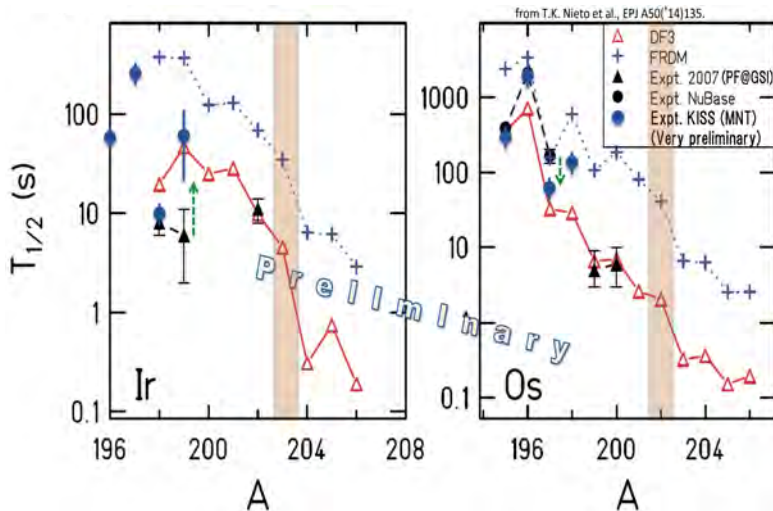


図 1 イリジウム(Ir)、オスmium (Os) の中性子過剰同位体半減期。黄土色帯が N=126 の同位体。青丸は KISS での測定値。ドイツ重イオン研究所(GSI)での入射核破碎反応による測定値(黒三角)と異なる部分がある。密度汎関数法の予測値(DF3)が系統的振舞いを再現してるように見える。

⇒図 2 は、<sup>195</sup>Os の核分光において、新たに見出された核異性体(<sup>195m</sup>Os)および、<sup>195g</sup>Os からのベータ遅発γ線の崩壊様式を示している<sup>(4)</sup>。これらの情報から、集団運動により変形した中性子過剰重原子核の構造を調べる事が可能となり、核模型との比較から元素合成過程研究で重要な半減期予測精度の向上に寄与するものと期待される。

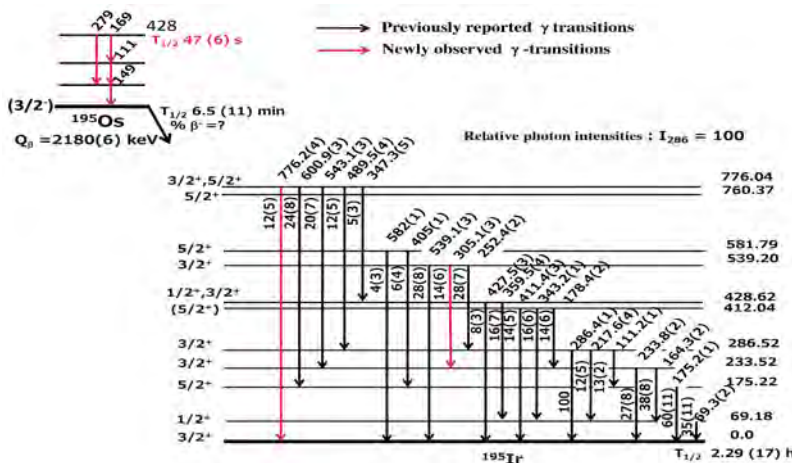


図 2 <sup>195</sup>Os の崩壊分光から初めて求められたβ-遅発γ-崩壊様式と新たに同定された<sup>195m</sup>Os の寿命及び推測される準位構造(preliminary)。赤字は KISS 共同利用で得られたデータ。今後β強度関数の導出を進めて半減期予測の精度向上を目指す。

・2017/12/7-9 に行われた RIBF-PAC にて、KISS 共同利用課題が 3 件採択された。課題番号、タイトルは以下のとおり。

NP1712-RRC37R1: P. Walker (Univ. of Surrey), “The Structure and Decay of High-K Isomers in  $^{187}\text{Ta}$ ”

NP1712-RRC40R1: Y. X. Watanabe (KEK), “Yield development of KEK Isotope System (KISS)”

NP1712-RRC59: J. Y. Moon (IBS), “Direct mass measurement of neutron-rich isotopes of Ir and Os : first step toward  $N = 126$  and the r-process pathway”

**[2] MRTOF-MS による網羅的原子核質量測定プロジェクト**

・2017年度より始まった特別推進「革新的質量分光器を用いた超重元素の起源の研究」(和田)では、数台の MRTOF-MS を理研 RIBF 施設に設置して、1000個におよぶ原子核質量の精密測定を目指している。

⇒RIBF の気体充填型反跳イオン分析器(GARIS II)焦点面に設置された MRTOF-MS による 80 核種におよぶ質量測定結果は、そのいくつかが論文公開された<sup>(5-8)</sup>。特に超ウラン元素のアインシュタニウム( $Z=99$ ,  $^{246}\text{Es}$ )、フェルミウム( $Z=100$ ,  $^{251}\text{Fm}$ )、メンデレビウム( $Z=101$ ,  $^{249-252}\text{Md}$ )およびノーベリウム( $Z=102$ ,  $^{254\text{m}}\text{No}$ )同位体の質量測定結果については、KEK、理研、九大との三者共同発表として、3月29日付けでプレスリリースした(図3)<sup>(5)</sup>。

超重元素の存在確認は崩壊  $\alpha$  線の観測という手法だけだったが、本研究は精密質量測定という手法が  $\alpha$  崩壊連鎖が既知原子核に繋がっていない超重元素、例えばモスコビウム同位体( $Z=118$ )などを物理測定量から同定できる可能性を示した。また長寿命で  $\alpha$  線を発しないと予想される「安定の島」の未知超重原子核の探索実験に有効な手法となるだろう。

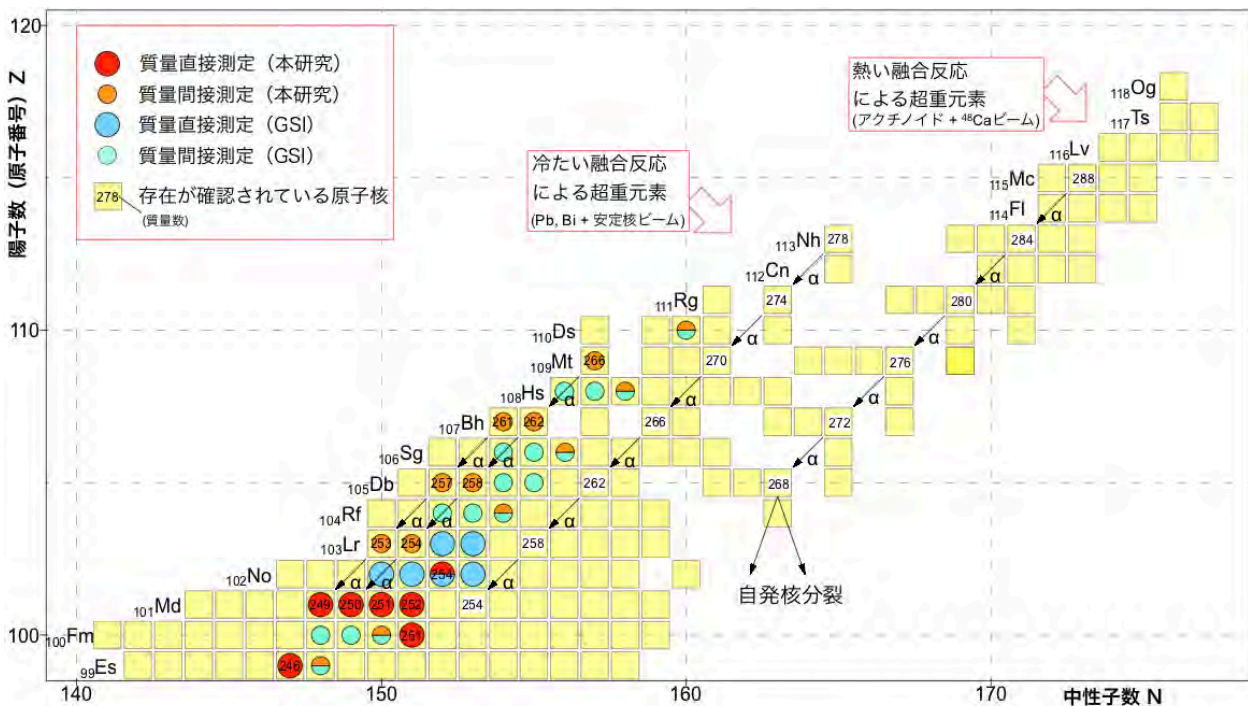


図3 超重元素領域の発見されている核種と質量測定の現状

原子番号  $Z=99$  以上の核図表。■は存在が確認されている核種を示し、赤円および橙色円は本研究において直接あるいは間接的に質量測定された核種、青円および水色円はドイツ重イオン研究所(GSI)で直接あるいは間接的に質量測定された核種を示す。参考のため、典型的な冷たい融合反応による超重元素( $^{278}\text{Nh}$ )と典型的な熱い融合反応による超重元素( $^{288}\text{Mc}$ )の連続的  $\alpha$  崩壊経路を示した。



- ・上記研究を行った MRTOF-MS は、理研の施設改造に伴い GARIS II とともに仁科記念棟 E6 実験室に移動した。2018 年度早々に実験可能な状態となるよう整備中である。
- ・韓国 IBS との共同研究（及び基盤 A；宮武）で進めている KISS 装置への MRTOF-MS 新設は、順調に進んでいる（図 4）。2018 年度後半に機器総合試験までを終了する予定である。
- ・今後 RIBF の低速短寿命核ビーム供給施設(SLOWRI)や高速短寿命核生成分離装置(BIGRIPS)の焦点面などにも MRTOF-MS を整備し、各実験装置の特徴に応じて広範な原子核質量測定を進めていく予定である（図 5）。

### MRTOF-MS装置 (IBSとの共同研究)

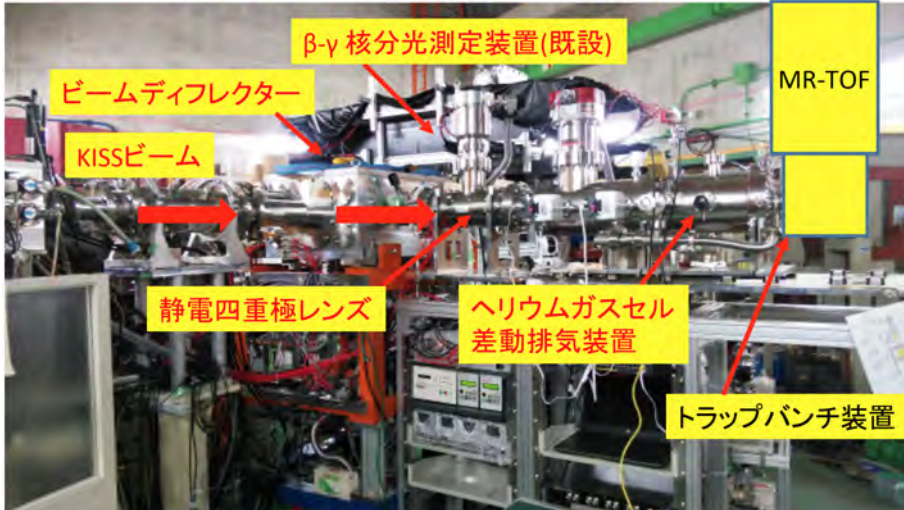


図 4 KISS-MRTOF-MS

KISS からの短寿命核ビームをガス中で捕獲後低速のバンチ状ビームとして MRTOF-MS に入射させる gas-cell buncher までが据え付けられている。従来より小型な mini-MRTOF は他の場所で整備中（後述）で、来年度早々に全系の整備が終了する。

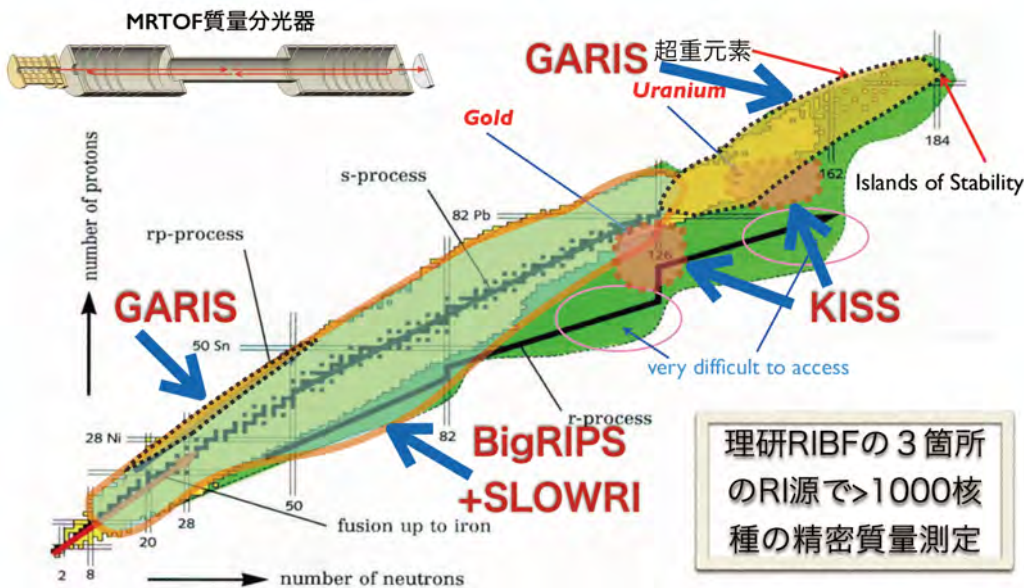


図 5 網羅的原子核質量測定プロジェクトの測定対象。

WNSC の KISS の他に、RIBF 施設の GARIS, BigRIPS, SLOWRI などに MRTOF-MS を設置する。

- ・2017/12/7-9 に行われた RIBF-PAC にて MRTOF 関連の 3 件の実験課題が採択された。課題番号、タイトルは以下のとおり。
- NP1712-RIBF167: M. Wada(KEK), “Multiple MRTOF mass spectrographs at GARIS-II, KISS and BigRIPS+SLOWRI”
- NP1712-LINAC31: M. Wada(KEK), “Direct mass measurements of Mc and Nh Isotopes”
- NP1712-LINAC07R3: P. Schury (KEK), Modification of “Initial Study of Atomic Masses in Trans-Uranium Elements at GARIS-II by Means of a Multi-Reflection Time-of-Flight Mass Spectrograph”

[3] 開発研究

- In-gas-jet レーザーイオン化核分光に向けた開発 : KISS の測定対象は不揮発性元素領域にあり、レーザーによる超微細構造測定を用いた核分光研究が困難とされてきた。レーザー共鳴イオン化を用いる KISS では化学的性質によらず超微細構造の測定ができる。これまでに短寿命同位体 4 核種の核磁気モーメント、荷電半径のシフト量決定等に成功した。より高精度な超微細構造測定による電気四重極モーメントやスピン・パリティ決定による研究拡大を目指した装置開発が科研費（基盤 A；平山）で進められている。ガスセル内(In-gas-cell)でのレーザー共鳴イオン化を、ガスセル出口のラバールノズルにより生み出された均一速度のジェット内(In-gas-jet)で行い、2桁程度の分光分解能の向上を目指す（図6）。2018年度後半に開発終了の予定。

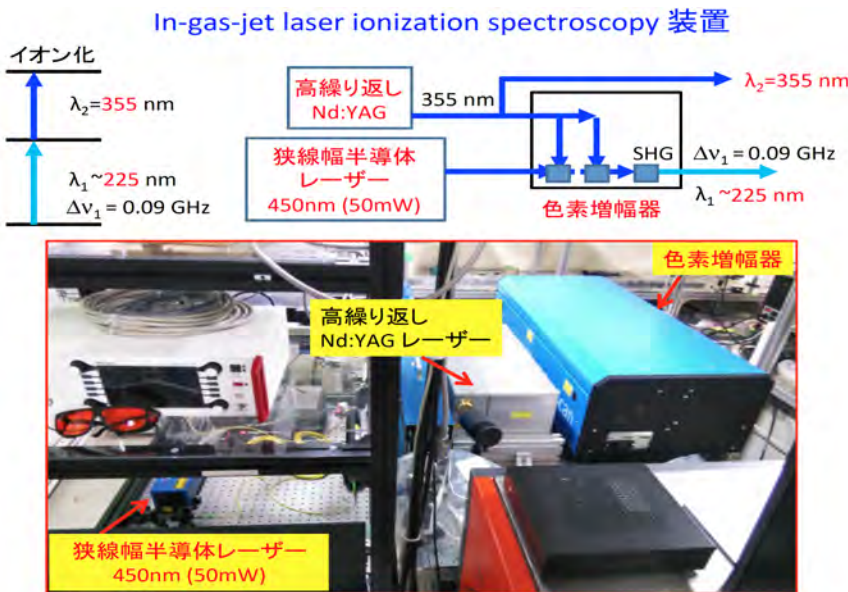


図 6 In-gas-jet laser ionization 用の 2 光子生成スキーム。従来のポンプ用 EXCIMER レーザー (~100 Hz, 5 W) を Nd:YAG (10 kHz, 60 W) に置き換え、ガスジェット中の高効率なイオン化を保証する。同時に狭線幅半導体レーザーを用いて従来の有効波長幅 ( $\Delta \nu \sim 12$  GHz) よりも 2 桁狭い ( $\Delta \nu = 0.3$  GHz) 高分解能レーザー分光を可能にする。

- 3次元位置感応型極低バックグラウンド多重セグメント比例計数管開発 : 2016, 2017年度の共同利用実験に威力を発揮した多重セグメント比例計数管 (Multi-Segment Proportional Gas Counter, MSPGC) のアノードワイヤを抵抗芯線に置換えることによって、3次元位置情報を利用した極低バックグラウンド  $\beta$  線検出器 (3D-MSPGC) を開発中である。従来機よりも一桁低い 0.01 cps のバックグラウンド率を目指している。高抵抗カーボンを用いた基本性能は確認済み。差動増幅を伴う直結型前置増幅器カードの開発が進んでいる（図7）。さらに高抵抗な芯線（日本グラフィートファイバー社、XN-P9-60A;  $\sim 3$  k $\Omega$ /cm）を組み込み 2018年度前半に全体の完成予定で、生成量の少ない N=126 同調体の寿命測定に投入する。

3D tracking gas counter for low-background rate of 0.01 cps

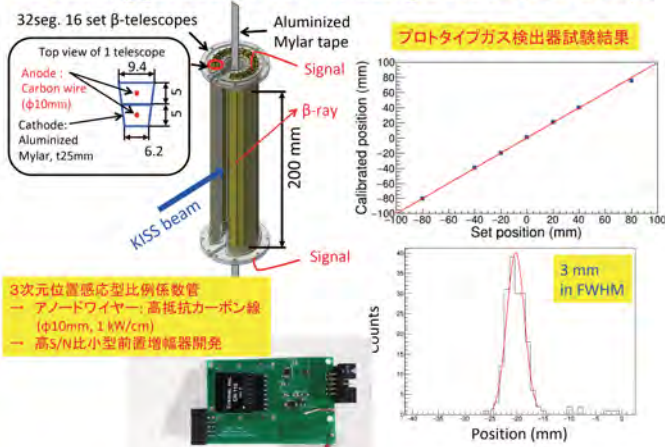


図 7 3D-MSPGC。左上の図が、その概要を示している。右側上下の図は、試験的に製作した 1 本の比例計数管（芯線は XN-35-60Z,  $\sim 1$  k $\Omega$ /cm）で測定した位置線形応答と、測定位置分解能。十分な性能であることを確認した。左下の写真は、開発中の前置増幅器カード。要求されるノイズレベルは 20 mV 以下で最大信号出力は 10 V である。



・ $\alpha$ -TOF 検出器開発 : MRTOF-MS 実験において、一日に1イベント以下と予想される熱い融合反応による超重元素の質量測定では、バックグラウンドイベントとの明瞭な識別が要求される。そのために、飛行時間測定用の検出器(ETP 社製 MagToF 検出器)のイオンが衝突して時間信号を取り出す部分に  $\alpha$  線検出用の半導体検出器を据え付けた、 $\alpha$ -TOF 検出器を開発した(図8)。この検出器は負の高圧電位に置かれるため、 $\alpha$  線の信号処理をする回路を高圧に浮かせ、光でアナログ信号を伝送する装置も開発している。



図8 開口部中央に半導体検出器が見える。表面から放出された二次電子は、下部にある電子増幅器で時間信号に変換される。

・Mini-MRTOF 装置開発 : KISS 用の MRTOF 装置として小型の質量分光器を開発している。小型(高さ70cm程度)ながらも、より高電圧の静電イオンミラーを形成し、高い質量分解能が得られることを目指している(図9)。



図9 mini-MRTOF-MS コンパクト化を進め、既存の約半分の全長となっている。

#### [References]

- (1) Y. Hirayama et al., “Nuclear spectroscopy of r-process nuclei around  $N = 126$  by using KISS”, RIBF 10th anniversary Symposium, 4-5, Dec., Riken, 2017.
- (2) M. Mukai, “In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of  $^{196-198}\text{Ir}$ ”, Doctor Dissertation, Tsukuba University, 2017.
- (3) H. Miyatake et al., “Present status of the KISS project”, Int. workshop Impact of Exotic Nuclear Structure on Explosive Nucleosynthesis, 23-24, Nov., Beihang Univ., 2017.
- (4) M. Ahmed et al., “Isomeric state of  $^{195}\text{Os}$  observed in  $\beta$ - $\gamma$  spectroscopy at KISS”, JPS meeting, 22-25, Mar., Tokyo Univ. Sci.
- (5) Y. Ito et al., “First direct mass measurements of hot-fusion transuranium isotopes with an MRTOF-MS”, Phys. Rev. Lett., doi:10.1103, 2018.
- (6) M. Wada, “Mass measurements of short-lived nuclei with a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph - recent results and future plans -”, 10th Int. Conf. Nucl. Phys. Storage Rings (STORF17), 13-18, Nov., Kanazawa, 2017.
- (7) S. Kimura et al., “Atomic masses of intermediate-mass neutron-deficient nuclei with relative uncertainty down to 35-ppb via multireflection time-of-flight mass spectrograph”, arXiv:1706.00186, 2017.
- (8) M. Rosenbusch et al., “New mass anchor points for neutron-deficient heavy nuclei from direct mass measurements of radium and actinium isotopes”, arXiv:1801.02823, 2018.
- (9) 庭瀬暁隆、「超重核質量と崩壊特性の相関測定へ向けた $\alpha$ -TOF 検出器の開発」、日本物理学会、3/22-25、東京理科大。