

多核子移行反応における角運動量の付与 ～超重元素領域にある安定の島をめざすには～

西尾 勝久
Nishio Katsuhisa

1. はじめに

古典的な液滴モデルによれば、原子核を構成する陽子数 (= 原子番号) が 106 に達すると原子核の核分裂障壁が無くなるため、これより重い原子核は存在できなくなる。しかし、現在、人類は 118 番までの元素の生成をしており、日本でも理化学研究所を中心とする研究グループが 113 番元素を生成しニホニウム (Nh) の元素名を与える等、我々は、はるかに重い元素の存在を知っている。超重元素が存在できるのは、原子核を構成する陽子や中性子のミクロなエネルギー準位構造に起因して核分裂の障壁が

出現するためである。超重元素を開拓することは、原子核についての我々の知見を豊かにする。理論によれば、鉛 208 (陽子数 $Z=82$, 中性子数 $N=126$) の次に位置する 2 重閉殻の原子核が超重元素領域に存在し、 $N=184$ 及び $Z=114$ (又は $120, 126$) で閉殻を作ると考えられており、この構造のため原子核の存在領域が拡大する。この中心領域は「安定の島」と呼ばれ、未到達の領域として残っている。ここに到達し、原子核の構造を詳細に知ることは原子核研究の金字塔となるもので、元素の存在限界を知る上でも重要である。図 1 に、これまで合成された原子核と安定の島の位置を示す。現在、加速した原子核

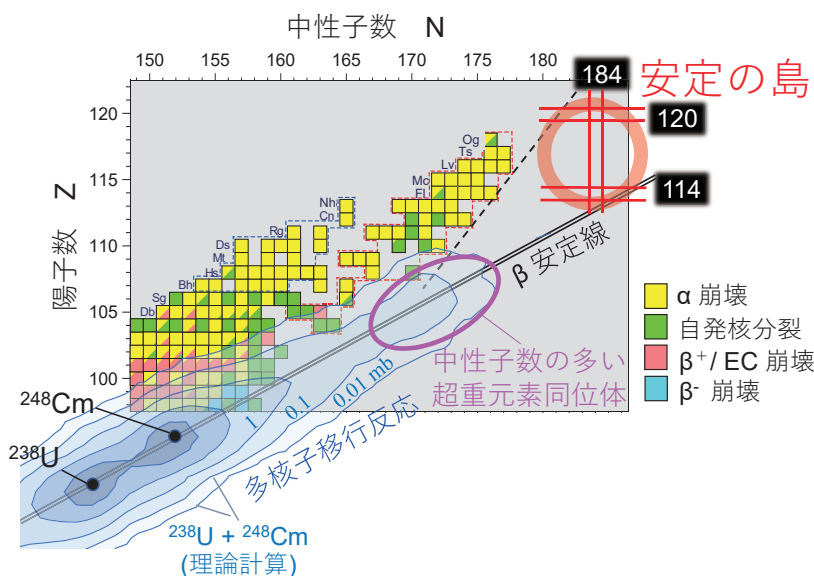


図 1 超重元素領域の核図表

これまで生成された原子核と、「安定の島」の位置を示した。等高線は $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$ の反応で生成される複合核の生成断面積を表している。これまで合成された原子核を、崩壊様式によって色分けして示した

と標的原子核を衝突させ、核融合反応を起こすことで超重元素が合成されている。一方、利用可能なビーム核種と標的核の組合せでは、中性子数において安定の島に届かない。図1には、 β 安定線と呼ばれる線が描かれているが、これまで生成された超重原子核は、中性子数が欠損した領域に位置する。安定の島に向かう中性子過剰核を生成するには、別な反応を用いる必要がある。この方法として、近年、「多核子移行反応」が注目されている。この反応は、原子核同士が衝突した際に起こる反応の1つで、入射核と標的核の間で中性子や陽子をいくつか交換するものである。図1には、ウラン238 (^{238}U) ビームをキュリウム248 (^{248}Cm) に衝突した直後にできる高励起状態の原子核（複合核）の生成断面積が示されている¹⁾。これが中性子を出して冷え固まり、蒸発残留核となることで中性子過剰核ができる。アクチノイド以上の重い元素同位体を合成する場合、複合核が核分裂で壊れてしまう過程が競合する。中性子数の多い超重元素として残れるか、あるいは核分裂で壊れるか、これらの確率を決定する重要なパラメータが角運動量であり、原子核の回転エネルギーを与える量である。

多核子移行反応によって複合核を生成し、蒸発残留核に至る過程を図2に示した。ここで、複合核の角運動量が大きいと核分裂で失う割合が増えるため、複合核を多く作るだけでは意味がない。このため、角運動量を定量的に評価できるモデルが必要であり、これにより衝突させる核種やビームエネルギー等、中性子過剰核を生成する方法を最適化でき

る。一方、これまで多核子移行反応における角運動量の詳細な測定は無く、角運動量に対する理解は限定的であった。本研究では、複合核に与えられる角運動量の定量化を目指すと共に、移行する陽子や中性子の数との関係を明らかにすることを目指した。

2. 多核子移行反応における角運動量の付与

図2は、酸素18 (^{18}O) がネプツニウム237 (^{237}Np) に衝突して多核子移行反応が起こり、複合核が生成される例を示している。角運動量を定量的に調べるため、本研究ではこの $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 反応において、複合核の核分裂に伴って放出される核分裂片の角度分布を調べた。この原理を、実際に使った検出器の配置と共に図3に示す²⁻⁵⁾。入射核は標的核といくつかの核子を移行した後、特定の角度に散乱されて出てくる。実験では、この散乱粒子を検出する。この時、入射ビーム軸と散乱角の進行方向で定義される「反応面」が決まるが、このことは、複合核の回転軸、すなわち反応面と垂直な軸、を決めたことになる。回転軸は角運動量の軸である。実験では、回転軸に対して核分裂片が放出される角度 θ をイベントごとに検出し、立体角当たりの核分裂片の放出角度分布 $W(\theta)$ を取得する（後述の図4）。原子核が回転していない場合、 $W(\theta)$ は θ に対して一様な分布を持つ。一方、角運動量が増加し、回転エネルギーが上がると、核分裂片は $\theta=90^\circ$ 方向、すなわち反応面上に多く飛び出すことになる。これは、高速で回転している物体が壊れたとき、破片が回転軸と垂直の

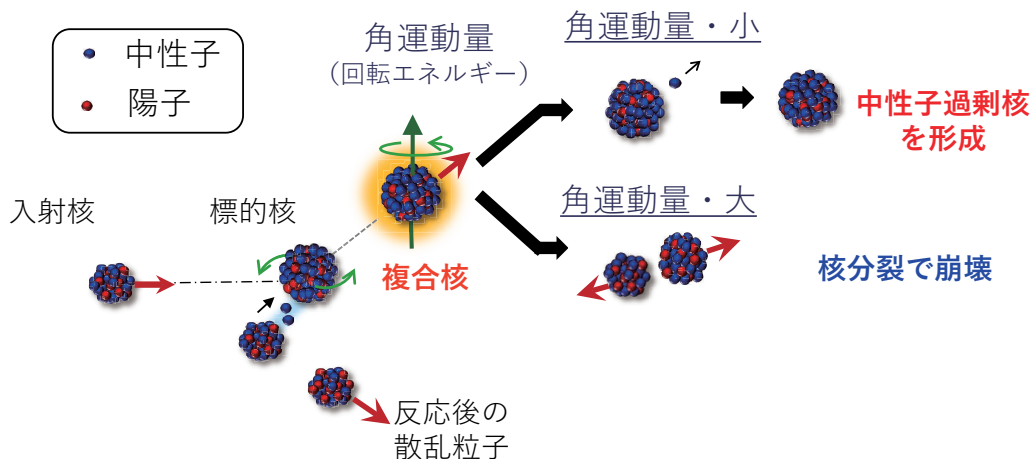


図2 多核子移行反応で生成される複合核が核分裂することなく中性子を放出すると蒸発残留核として残る

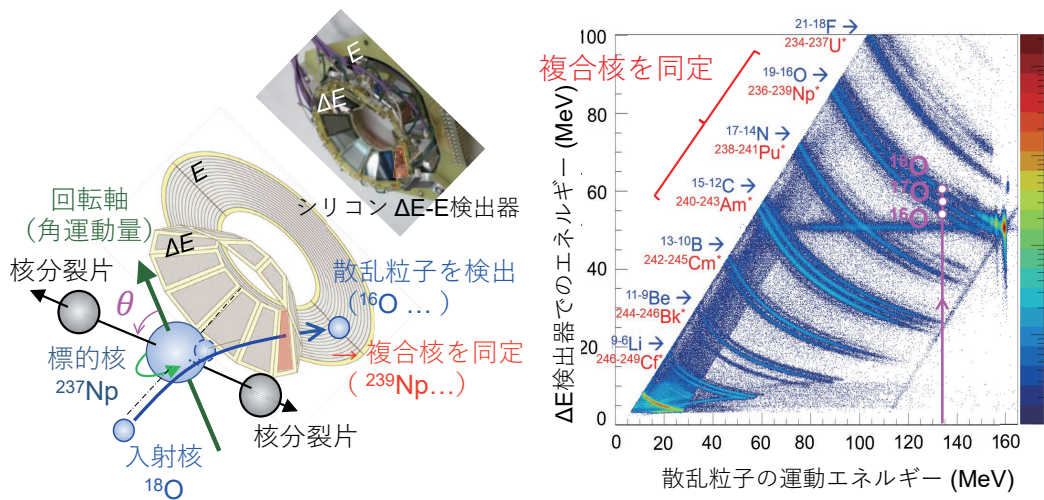


図3 (左) 多核子移行反応によって放出される散乱粒子の核種を識別し、反応面を決定する実験配置。散乱粒子を検出した ΔE 検出器の位置から反応面(回転軸)が決まる。(右) シリコン ΔE -E 検出器で散乱粒子を識別した結果。同位体ごとに異なる曲線が現れており、粒子識別ができています

面に飛んでいくことからイメージできる。

実験は、原子力機構のタンデム加速器施設(東海・原子力科学研究所)で行った。

まず第1に、生成された複合核の核種をイベントごとに決定することが重要である。このため、反応により、ビームの前方に放出される散乱粒子をシリコン ΔE -E 検出器で検出した。 ΔE 検出器(厚さ $75\mu\text{m}$)は図3に示すような台形をしており、これを12枚、円環状に並べた。散乱粒子を検出した ΔE 検出器から、反応面を決定できる。 ΔE 検出器を貫通した散乱粒子は、後方に置いた円環型のE 検出器($300\mu\text{m}$)で検出し、残りのエネルギー E_{res} を求めた。よって、散乱粒子の運動エネルギーは $\Delta E + E_{\text{res}}$ となる。図3には、 ΔE -E 検出器で散乱粒子を識別した結果を示した。酸素や窒素等の原子番号はもとより、すべての同位体の種類を識別できていることが分かる。例として、図には ^{18}O 、 ^{17}O 、 ^{16}O の識別の様子を書いているが、これらは、それぞれ複合核 $^{237}\text{Np}^*$ 、 $^{238}\text{Np}^*$ 、 $^{239}\text{Np}^*$ の生成を示している(ここで $^{237}\text{Np}^*$ は、非弾性散乱で生成された)。これらの核分裂によって生成された2つの核分裂片は、入射位置を記録できる多芯線比例計数管で検出した(図3には示していない)。本セットアップは、複合核の核種の同定と、核分裂片の角度分布の測定を両立させている点の特徴である。

核分裂片の角度分布を3種類の複合核($^{237,238,239}\text{Np}^*$)について示したのが図4である⁵⁾。データ解析では、

複合核の励起エネルギーとして $10\sim 20\text{ MeV}$ の範囲の事象を用いた。いずれも、角度分布は $\theta = 90^\circ$ で最大となっている。また、 $^{237}\text{Np}^* \rightarrow ^{238}\text{Np}^* \rightarrow ^{239}\text{Np}^*$ の順に、入射核から標的核に移行する中性子の数は0個、1個、2個と増えるが、後者ほど $\theta = 90^\circ$ に多くの核分裂片が放出され、角運動量が高くなるのが分かる。同図では、核分裂片の角度分布を理論計算と比較している^{6,7)}。このモデルは、角運動量と核分裂片の角度分布の関係を与えるもので、実験データを最も良く再現する角運動量を探すことで角運動量の平均値を決定した。具体的な値は、図4の各パネルに示した(\hbar はプランク定数を 2π で割った単位)。

更に、陽子移行してできる核種 $^{238}\text{Pu}^*$ 、 $^{239}\text{Pu}^*$ 、 $^{240}\text{Pu}^*$ 及び $^{239}\text{Am}^*$ 、 $^{240}\text{Am}^*$ 、 $^{241}\text{Am}^*$ についてもデータを得た。それぞれの核種の解析から得られた角運動量を図5に示す⁵⁾。この結果、移行する中性子・陽子の数が少ないうちは、核子の移行数に伴って角運動量が増えるものの、3個を超えると角運動量は飽和する様子が明らかになった。最近の実験では、更に多くの核子が移行する場合を調べたが、角運動量は明らかに飽和することが分かっている。また、核運動量の値は、陽子と中性子の移行において違いないことが分かった。

より重い原子核同士の衝突を用いて、超重元素や中性子過剰核を作るには、入射核から標的核に移行する陽子や中性子の数を増やす必要がある。核子が

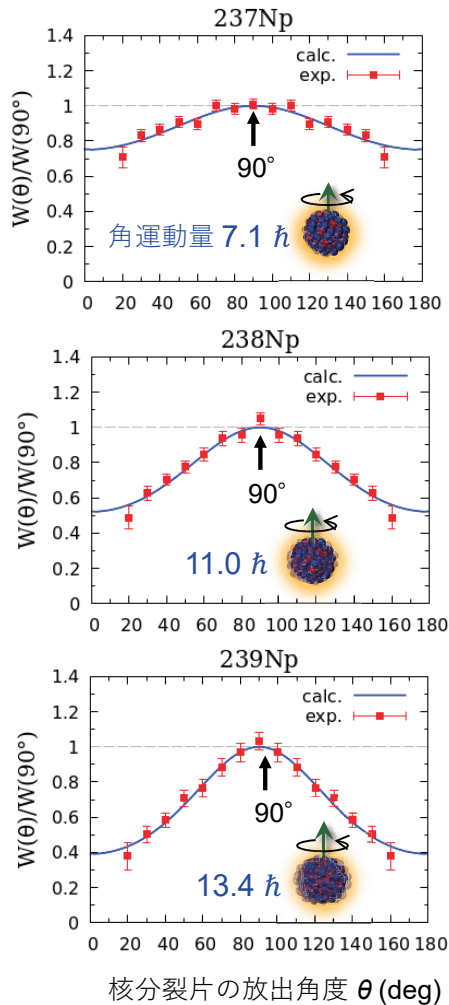
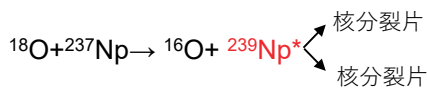
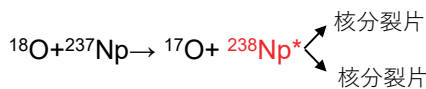
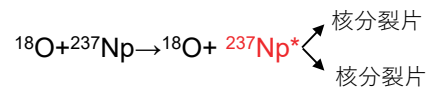


図4 $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ の多核子移行反応で生成される3種類の複合核の核分裂において、放出される核分裂片の角度分布を測定した結果

縦軸は、 $\theta = 90^\circ$ での収率を1.0として規格化し、 $W(\theta) / W(90^\circ)$ とした。角運動量と角度分布の関係を記述する理論による計算結果を実線で表した。解析で得られた角運動量の平均値を図中に示す

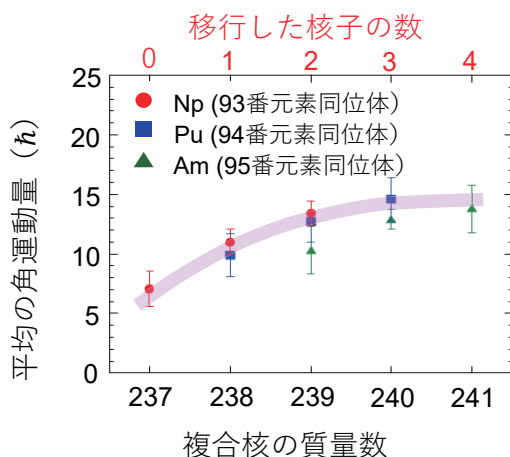


図5 $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ の多核子移行反応で生成される複合核の質量数に対する平均角運動量の変化

図の上の目盛りは、移行する核子の数を示す。曲線は、傾向を示すためのガイド

移行した数に伴って角運動量が増加すると、蒸発残留核の合成は難しくなる。本研究で得た結果、すなわち角運動量の飽和は、新領域の原子核を開拓する上で有利な現象と見ることができる。

3. まとめと今後の展望

多核子移行反応で与えられる角運動量の定量は、原子核反応における難問の1つであるが、本研究結果は、角運動量が付与されるメカニズムを明らかにする上で、重要な知見を与えるものである。今後は、「安定の島」に向かうような、重い反応系における角運動量を調べる計画である。

別な方法でも核運動量を定量する予定である。複合核を生成した後、核分裂するか蒸発残留核を生成

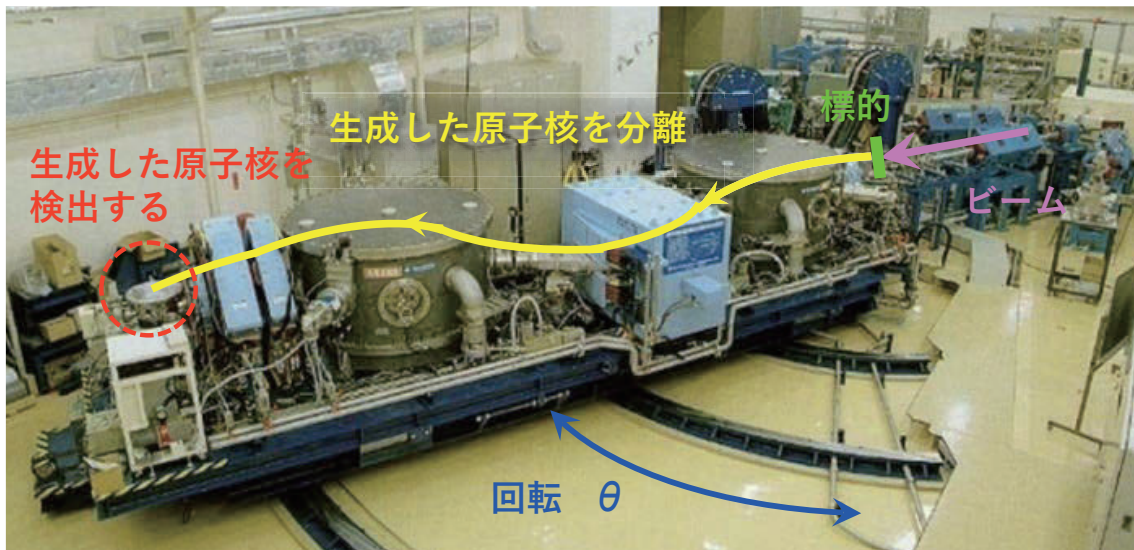


図6 原子力機構タンデム加速器施設に設置されている反跳生成核分離装置

するか、これらの確率は角運動量の大きさに応じて変化することを述べた(図2)。角運動量を定量化するため、原子力機構では、核分裂片に加え、蒸発残留核を検出し、これらの確率を決定する実験を開始した。原子力機構タンデム加速器施設には、図6に示す反跳生成核分離装置(JAEA-RMS)⁸⁾が設置されており、これを用いて蒸発残留核を分離し、検出する。核融合反応で生成される超重元素は、ビームの進行方向(0°)に反跳を受けて飛び出すため、0°方向に限定して蒸発残留核を分離する設計にとどまっている。一方、JAEA-RMSは標的散乱槽回りに最大40°回転することができ、任意の角度に反跳されて出てくる蒸発残留核を分離することができる。多核子移行反応では、一般に、任意の角度で蒸発残留核の生成断面積が最大になると考えられ、

JAEA-RMSは、本目的に最適の装置と言える。今後は、核分裂片と蒸発残留核測定の方から実験を進める予定である。

参考文献

- 1) V. Zagrebaev, *et al.*, *Phys. Rev. C.*, **73**, 031602 (R) (2006)
- 2) R. Léguillon, *et al.*, *Phys. Lett. B.*, **761**, 125 (2016)
- 3) K. Hirose, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 222501 (2017)
- 4) M.J. Vermeulen, *et al.*, *Phys. Rev. C.*, **102**, 054610 (2020)
- 5) S. Tanaka, *et al.*, *Phys. Rev. C.*, **105**, L021602 (2022)
- 6) B.B. Back and S. Bjornholm, *Nucl. Phys. A* ..**302**, 343 (1978)
- 7) P. Dyer, *et al.*, *Nucl. Phys. A.*, **322**, 205 (1979)
- 8) H. Ikezoe, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. A.*, **376**, 420 (1996)

((国研)日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター)