

重イオン核融合反応と核分裂

Fusion between heavy nuclei and nuclear fission process

西尾 勝久 重原子核反応フロンティア研究グループ



- ・ラグビーボール型に変形したウラン原子核を標的とする重イオン核融合反応機構を明らかにする研究を行いました。
- ・核分裂片の質量数分布を測定して融合確率を決定し、反応に及ぼす変形効果を明らかにするとともに、実際に超重元素の合成に応用しました。
- ・反応機構の解明は、重元素を合成する上で重要な指針を与えます。

概要

アクチノイド原子核を用いた重イオン反応による超重元素の合成過程を、反応で生成される核分裂過程を調べることで明らかにしました。また、ここで示した融合確率の決定方法が妥当であることを実際に超重原子核を合成して確認しました。

本研究は東北大学、ドイツ重イオン研究所、ロシア・フレロフ原子核反応研究所等との共同研究で行いました。本成果は、米国物理学会の学術誌 Physical Review Cなどに掲載されました。

1. 研究の背景

原子核を「電荷をもった液滴」とする古典モデルでは、原子番号104が元素の存在限界になります。しかし、実際には原子核を構成する陽子と中性子の運動に起因する結合エネルギーの変化のため、さらに重い元素まで存在することが予言されます。元素の存在限界を知ることは、原子核物理や化学の分野で重要な意義があります。実際、日本では理研が113番元素を合成し、フレロフ研究所は118番までの元素を合成しました。これら原子核は、2重魔法数核 ^{208}Pb の次に位置する閉殻構造のために検出可能な寿命を持つと予想できますが、実際に閉殻がどこに位置するかは明らかになっていません。このため、さらに多くの超重元素同位体を合成し、それらの核的な性質を明らかにする必要があります。

超重原子核は、原子核どうしの融合反応で生成されます。しかし、生成断面積はピコ・バース (pb, $1\text{pb} = 10^{-36}\text{cm}^2$) 程度と極めて低く、1つの原子核を合成するのに大強度加速器を用いて数日を要しま

す。断面積を正しく予測することは、実験を計画するために重要です。断面積は、図1に示すように以下の3つの因子の積で決まります。(1) 原子核どうしがクーロン障壁を超えて接触する断面積、(2) 接触した原子核が一体となり、複合核を生成する確率(融合確率)、および(3) 複合核が核分裂で崩壊することなく、中性子など軽粒子を蒸発して生き残る確率です。このうち(1)の断面積の決定方法はほぼ確立されており、また(3)の生き残る確率も統計モデルにより評価できます。(2)の過程を理解するのが課題となります。ここで、核融合と競合する反応として準核分裂(quasifission)、すなわち図に示したように反応途中で2つの原子核に崩壊する過程があります。本研究では、融合確率を決定する方法を見出すことを目標としました。複合核の多くは核分裂で崩壊します(融合-核分裂)。この融合-核分裂で生成される核分裂片と、準核分裂による核分裂片の特徴を区別することができれば、両者の収率から融合確率を決定できると考えました。 ^{238}U などアクチノイド原子核はラグビーボール型に変形して

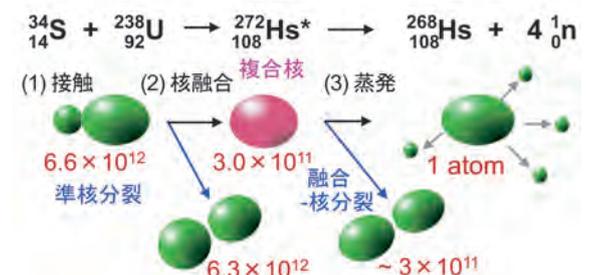


図1 重イオン核融合反応による超重原子核の生成過程の例。硫黄34とウラン238の反応の例を示す。複合核(CN)のほとんどは核分裂で崩壊する。図中の数字は、1つの超重原子核を合成する場合の各反応経路のイベント数を表しており、本研究で決定した[1]。

います。このため、核融合反応に及ぼす原子核の変形効果を明らかにする必要があります。

2. 研究の経緯

^{238}U はラグビーボール型に変形しているため、入射原子核の衝突の向きに応じてクーロン障壁の高さが異なります。図1では、先端部に原子核が衝突していますが、この場合クーロン障壁が低く、このため低い衝突エネルギーでも接触して反応が起こることは分かっていました[2]。しかし、この先端部への衝突で核融合が起こるか否かは $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 反応でさえ明確な結論が出されず、2000年ごろまで議論が続いていました。私たちは原子力機構のタンデム加速器を用いて $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ の核融合反応で生成されるフェルミウム同位体 ($^{250,249,248}\text{Fm}$) の断面積を決定し、先端部衝突でも核融合反応が主な反応チャンネルであることを明らかにしました[3]。

次に、酸素より重い入射核の反応を調べることにしました。 ^{30}Si や ^{34}S イオンを ^{238}U の先端部に衝突させる場合、赤道面衝突に比べてクーロン障壁がおよそ15MeV低くなるため、低い衝突エネルギーでも衝突が起きます。核融合がおこれば、同程度に低い励起エネルギーの複合核が生成できるので、蒸発する中性子を抑え、中性子数が1つまたは2つ多い超重元素の同位体が合成できると考えました。一方、2000年ごろから、フレロフ研究所は ^{48}Ca ビームとアクチノイド原子核との反応で原子番号112を超える原子核の合成に成功しており、しかも生成断面積

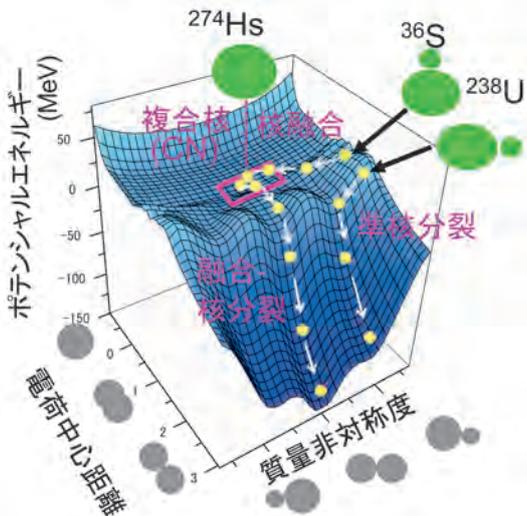


図2 ^{274}Hs のポテンシャルエネルギーを質量非対称度と電荷中心距離に対して示した。2つの異なる核分裂経路（融合-核分裂と準核分裂）の例を示す。複合核 (CN) の形状に到達すれば、核融合となる。

が当初の予測よりはるかに大きいものでした。これを理解する上でも、アクチノイド原子核を用いた反応を解明する意義が大きいと言えます。

3. 研究の内容

図2は ^{36}S と ^{238}U の反応で生成される原子核 ^{274}Hs のポテンシャルエネルギー面を表しています。原子核の殻効果のため、ポテンシャル面は原子核形状に対して複雑に変化し、この構造は核融合反応に影響を与えます。図には2つの反応の進み方を示しています。ひとつは、赤道面に衝突し、複合核 (CN) の形成に至る経路です。複合核の多くは、質量対称な谷を通過して分裂すると考えられます（融合-核分裂）。一方、先端部から衝突する場合、複合核から離れた位置に接触点があるので、質量非対称な道筋を通過して準核分裂が起こりやすいと推測できます。このように、核融合と準核分裂の割合は、核分裂片の質量数分布を測定すれば決定できます。

実験は、原子力科学研究所にあるタンデム加速器施設で行いました。図3に実験配置を示します。加速ビームを ^{238}U の薄膜標的に照射し、反応で生成する2つの核分裂片を位置検出可能な多芯線比例計数管 (MWPC: Multi-Wire Proportional Counter) で同時計測し、核分裂片の質量数を決定しました。

図4は、 ^{30}Si , ^{31}P , ^{36}S , ^{40}Ar , ^{48}Ca ビームを ^{238}U 標的に照射して得た質量数分布の結果です[4, 5]。反応ごとに示した4つの分布は、上から下に向かって衝突エネルギーを下げたことを意味します。図の右の挿絵は、衝突エネルギーとクーロン障壁の高さに関係づけています。



図3 タンデム加速器施設に設置した核分裂実験装置

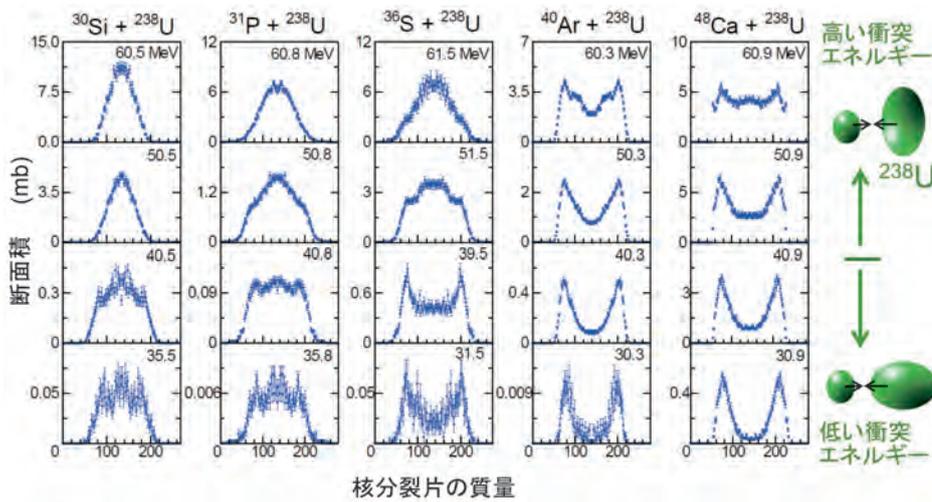


図4 核分裂片の質量数分布
 図中の数字は、核融合が起こった場合の複合核の励起エネルギー (MeV) を表す。縦軸を核分裂片の生成断面積で表してある。

$^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 反応では、高い衝突エネルギーで質量対称な分布を示す一方、低エネルギー衝突で非対称な核分裂成分が成長しています。これは図2に示したように、赤道面衝突だと融合確率が高く、先端部衝突で準核分裂への崩壊が多いことを表しています。衝突エネルギーに対する質量対称・非対称成分の変化はすべての反応系で観測され、核融合反応に及ぼす標的の変形効果を明らかにしました。一方、複合核の励起エネルギーを固定して5つの反応を比べると、入射核が重いほど非対称成分の割合が大きくなります。これは反応が始まって強いクーロン斥力のために融合が阻害されることを表しています。ただし ^{48}Ca は ^{40}Ar よりも融合しやすいように見えます。解析では、融合確率は図2に示す衝突点近傍のポテンシャルエネルギー曲面の形状に依存することが分かってきました。

実験データを考察するために、フレロフ研究所と協力してモデル計算を行いました[6]。原子核形状の時間発展を揺動散逸理論により計算しました。ブラウン運動と対比して考えると、水面の花粉が水分子から受けるランダム力は、原子核全体の形状が原子核を構成する核子の運動の影響を受けることに対応します。また、原子核形状の変化率に応じた摩擦力を受けます。水面の花粉と異なるのは、図2に示したようなポテンシャルエネルギー勾配の影響を受けることです。原子核の形状を追跡し、最終的に2つの核分裂片が生成されるまで計算を行いました。計算では、ウラン原子核の変形の効果を取り入れました。このモンテカルロ計算において、軌道が複合核の形状に到達してから核分裂するものを融合-核分裂と定義し (図2)、それ以外を準核分裂と定義しました。計算結果を図5に示します。

計算結果は、 $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ と $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ の反応を良く再現しています。図には、計算による融合-核分

裂のスペクトルも示しました。このスペクトルの全体に占める割合が融合確率を与えます。融合-核分裂は質量対称な分布を有しており、 $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ と $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ とともに同じ形状です。一方、実験データに現れる非対称分裂成分は準核分裂と言えます。 $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ に比べて $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ の融合確率はかなり低下することが分かりました。

アクチノイド原子核を用いた超重元素の合成実験は、図5の (a) や (b) に相当する高いエネルギー領域で行われてきました。その理由は、縦軸の読みからわかるように、これより低いエネルギーではクーロン障壁のために断面積が急激に低下すること、また、このようなエネルギー領域での核融合過程が不明なため、この領域で時間をかけて実験を行うのが危険だったためです。しかし、図5に示す実験と解析は、低い反応エネルギーでも融合確率が存在することを示唆しています。例えば、 $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ の図5の (c) に相当する衝突エネルギーでの融合確率

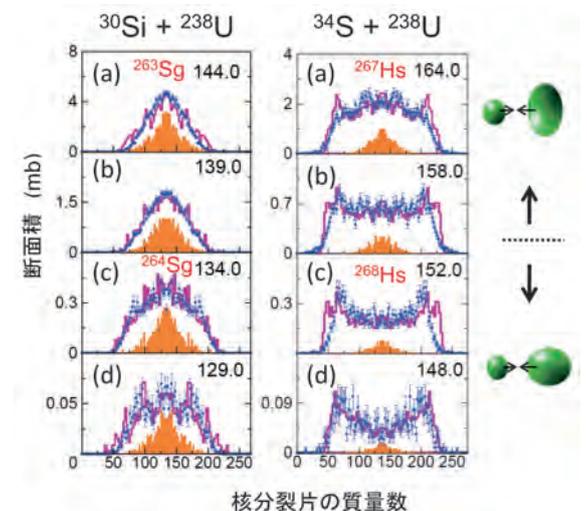


図5 揺動散逸理論による計算 (ヒストグラム) と実験値 (誤差付のデータ点)
 複合核を形成した後に核分裂するものを塗りつぶしたヒストグラムで示す。図の数値は重心系での衝突エネルギー E_{cm} を表す。

は4.9%です。統計モデル計算を行うと、このエネルギーでは4つの中性子を蒸発する確率が最も高く、この結果 ^{268}Hs を断面積0.3 pbで合成できると与えます。同様に、 $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ の(c)に相当するエネルギーを用いれば11 pbで ^{264}Sg が合成できます。この値は、世界屈指の加速器を用いれば合成可能な値です。

私たちは、ドイツ・重イオン研究所(GSI)で実際にビームタイムを取得することでこれら原子核の合成を試みました。この計画は、2004年の11月から1年間、筆者がGSIに原子力留学をする機会を与えられたことから始まります。GSIは、それまで鉛やビスマスを標的原子核とするいわゆる‘冷たい核融合反応’で107から112番までの新元素の合成を行った実績があります。一方、滞在当初、GSIはアクチノイド原子核を標的とする反応に方向転換しており、 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 反応で112番元素の合成を行うことが最初の目標となっていました。 ^{238}U 標的を用いるという互いの目標が一致し、 $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ とその後の $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反応のマシントimeを取得するに至りました。これら実験を行うため、大強度(1particle μA 程度)のシリコンおよび硫黄ビームが必要となります。私たちの実験プロポーザルを受けGSIはこれらの大強度ビームを開発し、実験が可能になりました。実験では、SHIPと呼ばれる反跳核分離装置を用いて行いました。 $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 反応において、重心系エネルギー($E_{\text{c.m.}}$)144.0 MeVで既知の原子核 ^{263}Sg の α 崩壊を3事象観測し、続いてエネルギーを133.0 MeVに下げて照射し、新同位体 ^{264}Sg の自発核分裂を3事象観測しました[7]。生成断面積としてそれぞれ67 pbと10 pbを得ました。これらの衝突エネルギーは図5の(a)と(c)に相当しますが、生成断面積から求めた融合確率と、図5で得た融合確率は誤差内で一致しました。同様に、 $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反応において、 $E_{\text{c.m.}}=163.0$ MeVで既知の原子核 ^{267}Hs の α 崩壊を1事象観測し、続いて152.0 MeVで新同位体 ^{268}Hs の α 崩壊を1事象観測しました[1]。それぞれの断面積1.8 pbおよび0.54 pbも同様に、質量数分布の測定と解析に一致しました。

4. 成果の意義と波及効果

118番元素を超える超重元素の合成実験など、現在ではアクチノイド原子核を標的に用いることがほとんどです。これは、断面積が大きいこと、冷たい核融合反応に比べて中性子数の多い原子核が生成され、このうちいくつかの同位体はシングルアトム化学を行うのに十分長い寿命を持っているなどの理由

によります。一方、超重元素領域には未知の原子核が多く残っており、開拓されている途中です。インビームの核分裂実験による融合確率の評価は、数時間程度の照射実験で完了することから、原子核の合成実験を計画する上で有用な方法と言えます。

通常の核分裂研究では、複合核からの核分裂を取り扱います。一方、準核分裂を調べることにより、図2に示す質量非対称な道筋の存在が明らかとなりました。これは、極端に変形した原子核における核子のエネルギー準位構造に由来するものです。重イオン入射核分裂反応は、これを理解するための唯一の方法と言えます。

ここでは詳しく述べませんが、 ^{268}Hs の α 崩壊エネルギー(9.48 MeV)は、中性子数162で閉殻構造をとるとする理論に一致しました[1]。新しい原子核を合成することは、構造を明らかにすることに直結します。

一連の結果は、複数の原著論文の他、International Nuclear Physics Conference (INPC2010) [5] を含むいくつかの招待講演を受ける成果となりました。

5. 今後の予定

図5の(d)に示すエネルギー領域で照射をすれば、3つの中性子蒸発過程(3n)による超重原子核の生成が可能で、その断面積は4nチャンネルとほぼ等しいと予測されます。これら3n, 4nチャンネルを用い、複数のアクチノイド原子核との反応の組み合わせにより、多くの新同位体が合成できます。より軽い入射核を用いた $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ 反応で ^{271}Hs (3n)が合成されており[8]、これも本研究の成果がアイデアとして用いられています。

また、超重元素のほか、安定核に比べて陽子や中性子の数が多い原子核を対象とした研究を進めています。最近、陽子過剰核で核分裂を調べ、新たな構造の出現が見えてきました。

参考文献

- [1] K. Nishio *et al.*, Phys. Rev. C **82**, 024611 (2010).
- [2] D.J. Hinde *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 1295 (1995).
- [3] K. Nishio *et al.*, Phys. Rev. Lett. **25**, 162701 (2004).
- [4] K. Nishio *et al.*, Phys. Rev. C **77**, 064607 (2008), K. Nishio *et al.*, Phys. Rev. C **82**, 044604 (2010).
- [5] K. Nishio *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **312**, 082007 (2011).
- [6] Y. Aritomo *et al.*, Phys. Rev. C **85**, 044614 (2012).
- [7] K. Nishio *et al.*, Eur. Phys. J. A **29**, 281 (2006).
- [8] J. Dvorak *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 132503 (2008).