

■重イオンの融合反応を探る

変形核重元素合成研究グループ ■池添 博■

Dependence of Heavy-Ion Fusion on Nuclear Deformation and Shell Structure

Hiroshi IKEZOE

Research Group for Heavy-Ion Fusion of Deformed Nuclei

Heavy-ion fusion reaction has been used to synthesize superheavy elements. Recently, several new elements have been produced by heavy-ion fusion reactions. The production rate, however, is extremely small and reached an experimental limit. In order to improve the production rate, the fusion mechanism between heavy-ions has to be investigated in detail. We report the dependence of heavy-ion fusion on nuclear deformation and shell structure. We found that the compact touching shape between spherical projectile and deformed target promotes fusion. The shell closure of the neutron number 82 gives a large effect to the fusion reaction $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$, while the fusion cross-section for the reaction $^{82}\text{Se}+^{134}\text{Ba}$ is almost hundreds times smaller than that for the reaction system $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$.

1. はじめに

原子核の内部では陽子や中性子がいくつかの軌道上を運動している。スピンを持った粒子が軌道運動するため、軌道とスピンの相互作用で殻構造が形成される。殻が陽子又は中性子で満たされると結合エネルギーの大きな安定な原子核ができる。現在までにヘリウム元素の殻から鉛元素の殻まで7つの大きな殻が知られている。これより外側の殻として超重元素の殻（陽子数は114,120,126などの理論予想があるが中性子数は184）が予言されているが、まだ発見されていない。超重元素の探索及びその核的性質の研究は原子核研究の大きな課題になっている。

超重元素の合成には重イオン同士の融合反応が使われる。今までにドイツ重イオン研究所（GSI）で107番元素から112番元素までの合成に成功している。最近ロシア（Dubna）で114番元素および116番元素の合成が

報告され超重元素の領域に手が届くようになってきた。これらの合成に使われた融合反応では合成する元素が重くなるにつれて融合確率が小さくなり、合成の限界に達している（生成量が1個/月程度）。より重い元素を合成するためには大強度ビームを供給できる加速器の開発と新しい融合反応が強く求められている。

原子核同士を融合させるには正に帯電した原子核間に働くクーロンポテンシャルと核力ポテンシャルの和で作られるポテンシャル障壁を乗り越えるに十分な運動エネルギーで衝突させる必要がある。軽い原子核同士（原子番号の積 $Z_1 \times Z_2$ が1800以下）の衝突ではポテンシャル障壁を越えれば自然に2つの原子核は融合し複合核が形成される。ところが重い原子核同士（ $Z_1 \times Z_2 > 1800$ ）ではポテンシャル障壁を越えても多くは融合せず、多数の核子を交換した後再び分離してしまう。この過程は次のように考えられる。まずポテンシ

ポテンシャル障壁を越えた後、2つの原子核の核表面が接触して急速に運動エネルギーが減衰する。その後、くっつきあった原子核はそれぞれの核の変形度、質量数、中心間距離などの変数で決まる多次元ポテンシャル面内を運動する。ここではポテンシャルエネルギーの低い方向に運動し、多くは核分裂経路に落ちて再分離する。この運動で内部にある複合核の核分裂障壁を通過すると原子核同士は融合し複合核が形成されることが考えられる。

複合核は一般に励起した状態で形成される。励起した軽い複合核の場合、軽粒子（中性子、陽子、 α 粒子等）とガンマ線を放出して生成核ができる。重い複合核では脱励起過程で主に中性子放出と核分裂が競争する。核分裂確率は励起エネルギーが大きくなると大きくなる。核分裂すると超重元素は作れないので、複合核の励起エネルギーをできるだけ小さくおさえる必要がある。

以下では、原子核同士の融合反応に核変形や殻構造がどのように影響しているかを実験的に調べた結果を述べる。

2. 融合反応への核変形の影響

入射核や標的核が回転楕円体をしていると、典型的な2種類の衝突が考えられる。そのひとつは長軸（対称軸）側で衝突する場合で、ポテンシャル障壁は低いが、2つの原子核の中心間距離は最大である。もうひとつは短軸側（赤道部分）で衝突する場合で、ポテンシャル障壁は高いが、2つの原子核の中心間距離は最短である。原子核同士が接触した後、多次元ポテンシャル面内を運動しながら複合核の核分裂障壁を乗り越えることが融合することの条件とすれば、接触点での中心間距離は短い方が得である。これは、重い複合核の場合、核分裂障壁の位置（サドル点）は原子核同士が接したときの中心間距離にくらべて短い位置（より内部）にあり、接触点がサドル点から離れるとそれだけサドル点に近づき難くなるためである。このことは変形した原子核同士の密着融合として理論的に考察されている¹⁾。変形した原子核同士の対称軸が十字型にクロスする向きで衝突（密着融合）すると、接触点がサドル点により接近しているため融合しやすいと考えられている。

この予想を実験的に調べるため、変形した原子核 ^{154}Sm や ^{150}Nd に原研タンデム加速器ブースターで加速された球形核を衝突させて融合反応を測定した²⁾。図1の挿入図に示したように、ポテンシャル障壁の高さは変形核の対称軸と入射粒子の進行方向で定義される衝突角度に依存する。入射エネルギーを低い側から高い側に変化させると、衝突角度がゼロ度から始まって順次衝突角度の大きな衝突が反応に関与してくる。低エネルギー側では複合核の励起エネルギーが低いため軽粒子の放出数が少なく、相対的に重い原子核ができる。入射エネルギーが高くなると励起エネルギーも高くなるため複合核からの軽粒子放出数も増え、相対的に軽い原子核ができる。この性質を利用して入射エネルギー毎の生成核種を測定し、生成断面積の衝突角度依存性を求めた。

生成核は独自に設計した反跳生成核分裂装置で測定した。この装置は電場と磁場を組み合わせた装置で、生成核がビーム方向に放出される性質を利用して生成核をビームから分離し、焦点面検出器で生成核の崩壊

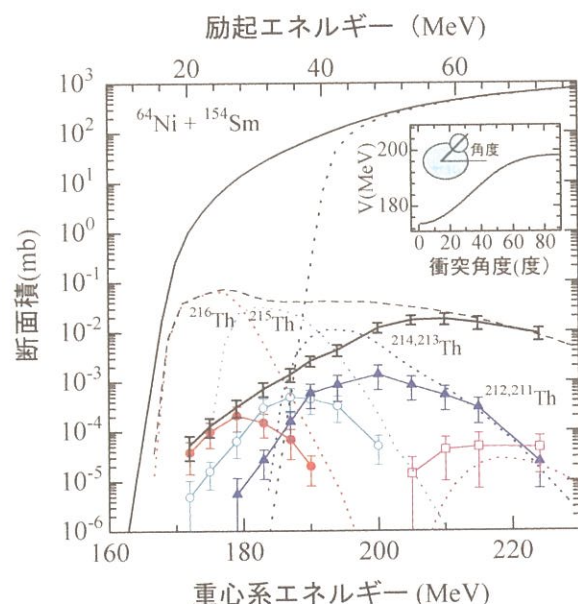


図1 $^{64}\text{Ni}+^{154}\text{Sm}$ 融合反応の生成核断面積。●： ^{216}Th ，○： ^{215}Th ，▲： ^{214}Th と ^{213}Th の和，□： ^{212}Th と ^{211}Th の和。点線は計算値。誤差付きの実線は生成核すべての和で破線はその計算値。実線は融合断面積の計算値。挿入図は衝突角度毎のポテンシャル障壁を表す。

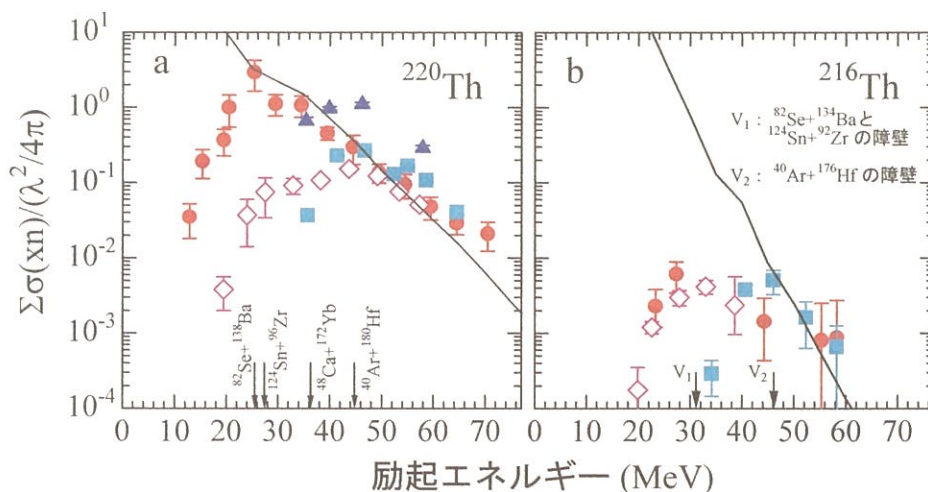


図2 中性子放出のみで生成される生成核断面積の励起エネルギー依存性。●： $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$ (左図), $^{82}\text{Se}+^{134}\text{Ba}$ (右図), ◇： $^{124}\text{Sn}+^{92}\text{Zr}^{5)}$ (左図), $^{124}\text{Sn}+^{96}\text{Zr}^{5)}$ (右図), ■： $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{Hf}^{4)}$ (左図), $^{40}\text{Ar}+^{176}\text{Hf}^{4)}$ (右図), ▲： $^{48}\text{Ca}+^{172}\text{Yb}^{5)}$ (左図)。

を測定する。崩壊の様子から生成核種が決定され、崩壊数から生成断面積が得られる。

$^{64}\text{Ni}+^{154}\text{Sm}$ 融合反応の結果を図1に示した。理論予想では ^{154}Sm の長軸側で ^{64}Ni が融合したとき ^{216}Th や ^{215}Th が生成される。実験ではこの理論値を2桁下回る生成量しか検出されなかった。入射エネルギーが上昇するにつれて実験値は理論値に近づき、 ^{154}Sm の赤道部分と ^{64}Ni が衝突するエネルギー領域(195MeV以上)では実験値と理論値はほぼ一致する。このことから、変形核の長軸側で衝突したときはポテンシャル障壁を越えても融合しにくい短軸側ではポテンシャル障壁を越えれば融合することがわかった。このことを支持する実験結果が $^{76}\text{Ge}+^{150}\text{Nd}$ 融合反応でも得られた。

これらの実験結果は密着融合の考えを支持するものである。変形核を標的に使う事で、球形核の場合よりは接近した衝突が実現でき、ポテンシャル障壁を越えた後の融合過程でサドル点を越えやすくなると考えられる。現在、この方法を超重元素の合成に適用するため、変形核 ^{170}Yb に ^{82}Se を融合させて104番元素Rfを合成する実験を始めている。

3. 融合反応への閉殻の影響

重イオンの融合確率が閉殻(殻が陽子又は中性子で満たされた状態)の外にある陽子数や中性子数に依存することは、以前から知られていた。最近、Oganessianらによって、 $^{136}\text{Xe}+^{86}\text{Kr}$ 系と $^{130}\text{Xe}+^{86}\text{Kr}$ 系の融合反応が測定され、中性子数82で閉殻構造をしている ^{136}Xe を使った方が閉殻でない ^{130}Xe の場合よりも生成断面積が2-3桁大きい事が報告された³⁾。これは、今までに

見られなかった同位体の違いによる大きな効果である。この現象を調べるために我々は $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$ 系と $^{82}\text{Se}+^{134}\text{Ba}$ 系の融合反応を測定した(図2)。 ^{138}Ba は中性子数82の閉殻構造をしているが ^{134}Ba は閉殻ではない。同じ複合核を形成する他の反応系の結果と比較するために、生成断面積を $\lambda^2/4\pi$ で規格化してある。ここで λ はドブロイ波長である。図に示した実線は複合核の脱励起過程を統計モデルで計算した結果である。図2aに見られるように、4つの異なる反応系とも高い励起エネルギーで生成断面積は一致する。 $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$ 系の場合、低い励起エネルギーで生成断面積が減少するのはポテンシャル障壁(図中の矢印)のためである。 $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{Hf}$ 系⁴⁾についてもポテンシャル障壁で生成断面積の折れ曲がりが見られる。 $^{48}\text{Ca}+^{172}\text{Yb}$ 系⁵⁾は全体に生成断面積が大きい、やはりポテンシャル障壁近辺で生成断面積の減少が見られる。これら3つの反応系はポテンシャル障壁を越えれば完全に融合することを示している。一方 $^{124}\text{Sn}+^{96}\text{Zr}$ 系⁵⁾はポテンシャル障壁よりも高いエネルギー領域から生成断面積の減少が見られる。これは積 $Z_1 \times Z_2$ が1800以上になる反応系に特有の現象である。 $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$ 系の場合、積 $Z_1 \times Z_2$ は1904で大きいにもかかわらずこのような傾向は見られない。一方、図2bに示した $^{82}\text{Se}+^{134}\text{Ba}$ 融合反応の場合は、 $^{124}\text{Sn}+^{92}\text{Zr}$ 系と同じようにポテンシャル障壁よりも高いエネルギーから生成断面積が減少し、 $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$ 系にくらべ100分の1程度になっている。すなわち、 $^{82}\text{Se}+^{134}\text{Ba}$ 融合反応の場合は、積 $Z_1 \times Z_2$ が1800を越えて大きくなるにつれて融合確率が減少するという通常の傾向に良く合っている。

このように、 $^{86}\text{Kr}+^{136}\text{Xe}$ 融合反応で観測された生成

断面積の増大が $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$ 融合反応でも観測され、中性子数82の閉殻の原子核を使用した反応系の融合確率が大きいことがわかった。Oganessianらはこの現象を殻構造が強く反映される殻分裂と関連して議論している。すなわち、 $^{136}\text{Xe}+^{86}\text{Kr}$ 反応系で作られる複合核 ^{222}Th は低励起エネルギーで質量分割に関して対称分裂するものと非対称分裂するものが共存している。非対称核分裂する分裂片の組み合わせの中心は原子番号54と36にある。一方、 $^{136}\text{Xe}+^{86}\text{Kr}$ 融合反応で作られる ^{210}Th にはそのような非対称分裂は起きない。 ^{136}Xe と ^{86}Kr の反応系では核分裂の逆過程を経由して融合反応が進行したと考えている。 $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$ 系の場合の複合核 ^{220}Th も非対称分裂する可能性が大きい³が、 $^{82}\text{Se}+^{134}\text{Ba}$ 系の複合核は ^{216}Th であるので非対称分裂の可能性はない。 $^{82}\text{Se}+^{134}\text{Ba}$ 系と $^{82}\text{Se}+^{138}\text{Ba}$ 系で得られた融合反応の結果は核分裂過程との関連を一層強く示唆するものといえる。

低エネルギーの核分裂では、分裂片が全く励起しないコールド核分裂が知られている。核分裂が原子核の大きな変形を伴う集団運動であることを考えると、この分裂過程での変形のエネルギーが分裂片に移行され

ないという点で特異な核分裂現象である。このコールド核分裂過程を2つの分裂片から逆にたどる事が可能ならば、2つの原子核を励起させないでサドル点まで近づける事ができるのかもしれない。

以上述べたように、超重元素を合成するためのより融合しやすい原子核同士の組み合わせを探す場合、反応系の核変形や殻構造を考慮する事が大事である。この研究が超重元素の合成に新たな道を開くものと期待している。

参考文献

- 1) A. Iwamoto et al., Nucl. Phys. A596 (1996) 329.
- 2) S. Mitsuoka et al., Phys. Rev. C62 (2000) 054603; K. Nishio et al., Phys. Rev. C62 (2000) 014602; Nishio et al., Phys. Rev. C63 (2000) 044610.
- 3) Yu. Ts. Oganessian et al., JINR, E7-97-206, Dubna, 1997, p62.
- 4) H.-G. Clerc et al., Nucl. Phys. A419 (1984) 571.
- 5) C.-C. Sahm et al., Nucl. Phys. A441 (1985) 316.

