

■ 変形した重い原子核の融合



変形核重元素合成研究グループ ■ 池 添 博 ■

1. はじめに

原子核には原子と似て殻構造があり、閉殻（核子が殻がいっぱいになった状態）は球形で陽子や中性子は互いに硬く結合している。現在、陽子には6つ、中性子には7つの大きな殻が知られている。これ以外の殻として、理論計算では、陽子数が114で中性子数が184も閉殻を成すと予言されている。この原子核は超重元素¹⁾と呼ばれ、核分裂に対し準安定である。この超重元素は自然界には見つからず、重イオンの核融合反応によって人工的に合成する試みが1980年代より続いているが、まだ成功していない。今までに合成された一番重い元素は112番である²⁾。陽子数はもう一步のところまで来たが、中性子数が160程度であり、超重元素の領域から20個程度少ない。合成の最大の問題は重イオンの融合断面積が極めて小さい（1ピコバアン以下）ことである。この値は、ビーム強度が世界最大規模の加速器で、1ヶ月間実験を行って約1個合成されるというものであり、より重い元素の合成は極めて困難といわれている。この困難な状況を打ち破ることはできないものか。

従来の合成方法は、鉛やビスマスを標的にニッケルや亜鉛などの重イオンを核融合させる“冷たい融合”と、超ウラン元素の標的にカルシウムなどの重イオンを核融合させる“熱い融合”であった。“冷たい融合”では複合核の励起エネルギーが10–20MeVで小さいため複合核が核分裂しにくく、生き残る確率が高い。その反面、複合核を作る確率は小さい。この方法では、中性子を多く含む寿命の長い原子核の合成は困

難である。これに対して“熱い融合”は中性子数の多い複合核を作るが、励起エネルギーが40–50MeVと高く、核分裂してしまい生き残る確率は小さくなる。上述の112番元素が“冷たい融合”法で合成され、“熱い融合”法で110番元素が0.4ピコバアンの断面積で合成されている³⁾。“冷たい融合”も“熱い融合”もそれぞれ利点、欠点があり、どちらが有利とは云えないが、どちらも融合断面積は極めて小さい。また融合のメカニズムもまだ完全には理解されていないのが現状である。

重イオンの融合反応に変形という新しい視点を持ち込むことで、従来の方法に代わる第3の超重元素合成法を探ることがこの研究の目的である。

2. 重イオンの融合

原子核同士を融合させるためには、電氣的斥力に抗して二つの原子核が近づき、核表面が接触する必要がある。この様子を模式的に図1の(1)に示した。電氣的斥力ポテンシャルと核力の引力ポテンシャルの和で融合障壁Aが形成される。入射エネルギーが障壁より高ければ(aの場合)、入射波は障壁を越えて内部に入り込み二つの原子核は融合する。しかし、入射波が障壁Aを乗り越えられないエネルギー(cの場合)では融合は起きない。ところが障壁の高さは一定ではなく、標的核や入射核の励起構造に依存して分布しており、障壁の高さよりもエネルギーが低いbのような場合でも、入射波の一部は障壁を通過できることが次第に明らかになってきた。

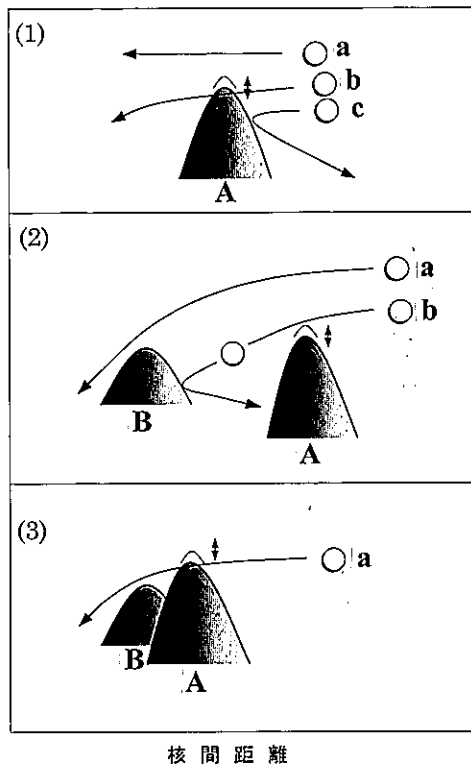


図1 重イオン間の融合の模式図。横軸は核間距離をあらわし、縦方向はポテンシャルエネルギーをあらわす。(1) - (3)の説明は本文参照。

標的核と入射核の原子番号の積 $Z_T Z_P$ が1800以下では図1の(1)の描像で良いが、1800以上になると図1の(2)に示したように、2つの障壁を考えなければならなくなる。第1の障壁Aを通過した波は原子核の中で内部自由度の励起により、運動エネルギーを失いながら進入するが、内部にある第2の障壁Bを通過できなければね返されて複合核を形成できない(bの場合)。したがって、aの場合のように入射エネルギーを大きくする必要がある。これをエキストラプッシュ現象という。 $Z_T Z_P$ が大きくなると融合に必要な入射エネルギーも急激に大きくなる。入射エネルギーが大きくなると複合核の励起エネルギーも大きくなる。励起エネルギーが大きくなると、核温度が高くなって核の殻構造が消滅し、核分裂障壁が低くなって核分裂してしまう。むやみに入射エネルギーを上げるわけにはいかない。

図1の(3)のように障壁Aと障壁Bの距離が近い場合は事情が変わってくる。すなわち、障壁Aを超えた波はエネルギーの損失が小さい間に障壁Bを乗り越えることが可能になる。障壁Bの位置は複合核の性質で決まるが、障壁Aの位置は二つの原子核の接触する位置で決まる。大きく変形した原子核を標的にすれば、衝突する角度によっては接触する距離を短くできる。変形核を使う理由はここにある。

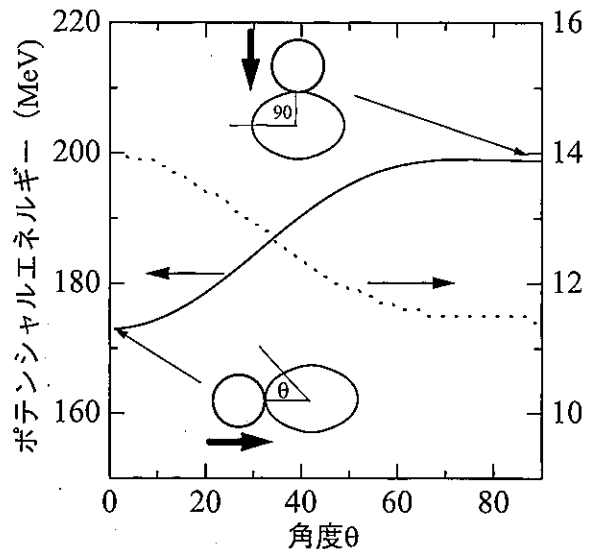


図2 変形核 ^{154}Sm と入射核 ^{60}Ni の衝突の際の障壁の高さと核間距離を変形核に対する衝突の角度の関数として表したものの。

図2に代表的な変形原子核 ^{154}Sm に球形核 ^{60}Ni を衝突させたときの障壁(図1の障壁Aに対応)の高さと核間距離を変形核の対称軸に対する衝突角度の関数として示した。図には ^{154}Sm の変形の様子も示した。変形した原子核の長軸側(0度)で衝突すると、障壁の高さは低いが核間距離は大きい。これに対して、変形核の短軸側(90度、赤道部)で衝突すると、障壁は高くなるが核間距離は短い。どちらの場合に、融合する確率が高くなるだろうか。変形原子核を使った今までのデータは入射核が ^{40}Ar や ^{48}Ca までで図1の(1)の描像が成立する組み合わせであった(すなわち、融合確率は角度に依存しなかった)。 $Z_T Z_P$ が1,800以上の詳細なデータは少ない。

3. 変形核の密着融合

標的核と入射核が共に変形している場合は、衝突によっては核間距離の短いコンパクトな配置を取ることがある(図3の5)。この場合は、変形核の対称軸が十字に交わるような形状で衝突する。原子核同士が最大に密着して接触した状態で、図1の(3)の場合のように、障壁Aが障壁Bに接近しているため、融合する可能性が高いと考えられる。ラグビーボール型に変形した核でも赤道部の出っ張った核(例えば図2に示した ^{154}Sm)よりは、赤道部のへこんだ核の方が密着度が高くなるだろう。 ^{180}Hf や ^{186}W は赤道部のへこんだラグビーボール型の原子核であり、これに ^{90}Zr や ^{110}Pd などを衝突させることで密着融合の条件がそろう。

この他に、原子核の構造が核融合にどのように関係しているかも重要である。殻構造が強くて大きなエネ

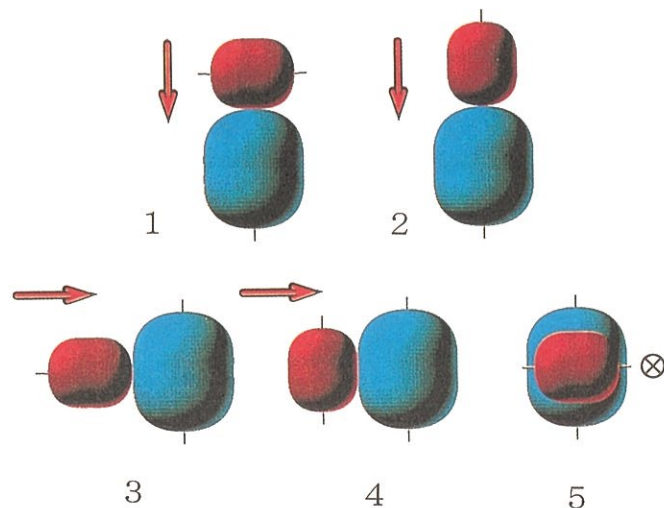


図3 ラグビーボール型に変形し赤道部のくびれた原子核同士の衝突パターン。矢印は衝突の方向を示す。原子核の対称軸を線で表してある。5番目のパターンを密着融合と呼ぶ(図は参考文献4から引用)。

ラグジーギャップのある原子核同士は、衝突しても互いに励起しにくく、運動エネルギーを失わないで深く進入し、図1の(3)の配置になれる可能性がある⁴⁾。また、原子核同士が接近中に原子核間で核子(主に中性子)の移行がおきると融合が促進されるとも云われている。

4. 実験手法

実験には加速器からの重イオンビームを使用する。原研タンデム加速器と超伝導ブースターは各種の重イオンを加速でき、ビームの広がりも小さくエネルギーも自由に変えることができる。この重イオンビームを希土類元素などの変形核に照射し、融合確率が入射核のエネルギーにどのように依存するか調べる。変形核もラグビーボール型からパンケーキ型など各種あり、変形の形、大きさ、向きなどの効果を調べる。 $Z_T Z_P$ の大きな反応ほど融合断面積が小さくなるので、比較的 $Z_T Z_P$ の小さい反応系からとりかかる。融合に関係した核子移行反応の強さの系統的な測定も行う。

四年前に建設した反跳生成核分離装置は、融合反応で生成される原子核の質量数を選択的に測定できる。また散乱ビームに起因する不要なバックグラウンドを減少し、感度の良い測定が可能になった。これまでに未知核 ^{209}Th や ^{212}Pa の合成に成功し、シーボルギウムの合成でも威力を発揮した^{1, 5)}。準備はすでに整っている。 ^{154}Sm に ^{60}Ni や ^{150}Nd に ^{76}Ge を融合させる実験がいま始まっている。

参考文献

- 1) 池添 博, 基礎科学ノート Vol.5, No.2(1998) 26.
- 2) S. Hofmann et al., Z. Phys. A354(1996)229.
- 3) Yu. A. Lazarev et al., Phys. Rev. C54(1996) 620.
- 4) P. Möller and J. R. Nix, Proceedings of "Tours Symposium on Nuclear Physics III", AIP 425 (1998)5.
- 5) H. Ikezoe et al., Eur. Phys. J. A2(1998)379.