

■ 重イオンによる 未知重核の探索



重イオン未知重核研究グループ ■ 池 添 博 ■

1. はじめに

重イオンビームを使った原子核反応では陽子や α 粒子等の軽粒子による反応と異なり、安定領域から大きく離れた存在限界に位置する原子核を合成できる利点がある。また、持ち込む角運動量が大きいため、原子核の高回転状態を励起できる。このような特徴を活かして、原研タンデム加速器からの重イオンビームを使って新しい重い原子核を合成したり、高励起・高回転状態の原子核構造を研究することを目的にした。

2. 重元素の合成

陽子数や中性子数を増やしていくと原子核はどこまで大きくなれるのだろうか。この問いの答えは原子核の殻構造にある。原子核に殻構造がなければ、陽子間のクーロン斥力が大きくなって核分裂に対して不安定になり、原子番号104-106番辺りが原子核の存在の限界になる。殻構造があるために陽子間のクーロン反発力に抗して、より重い原子核が存在できる。それは超重元素（原子番号114、中性子数184）と言われ、鉛208（原子番号82）の次の大きな殻として理論的に予

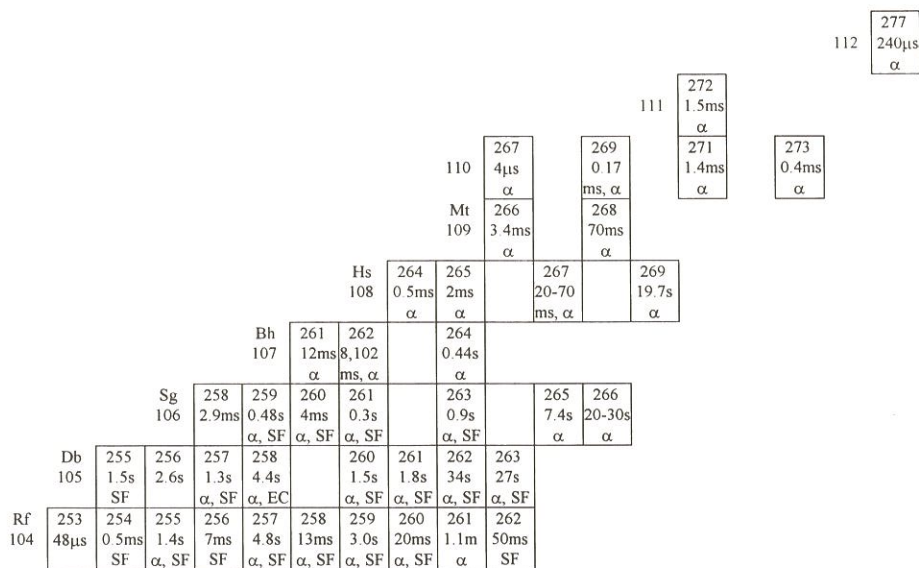


図1 今までに発見されている超アクチノイド核種。

言されている。この超重元素を合成する試みが1970年代から旧ソ連、アメリカやドイツなどで行われてきたが、いまだに成功していない。図1に現在までに知られている超アクチノイド核種を示す。この研究がスタートしたときは、1980年代前半に109番元素までが合成されていたが、1994年になってドイツの重イオン研究所でたて続けに110番と111番が合成された。さらに、1996年に112番元素が合成され、超重元素領域までかなり近づいた。ただ、合成された核種はいずれも中性子数が少ないアイソトープであり、超重元素領域からまだ離れている。

この超重元素は核分裂に対して準安定だが α 崩壊することが予言されているため、この α 線を検出することでその存在が証明される。しかし、この α 線のエネルギーも半減期も未知であるため、娘核や孫核などから放出される一連の α 線をすべて検出して親核を識別する必要がある。すなわち、一連の α 線のどれか（一般的には最後）の α 線（エネルギーおよび半減期）が既知でなければならない。超重元素の崩壊系列に位置する超アクチノイドの崩壊特性はほとんど調べられていないので、ここから調べることに決め、当面の目標を未知核 ^{294}Sg （原子番号106）の合成に置いた（図1参照）。このための実験装置としてタンデム加速器ブースターターゲット室に反跳生成核分離装置（図2）

を、1992年度から3年計画で建設し1995年度に完成した¹⁾。

重イオンビームで標的の薄膜（0.5ミクロン程度）を照射すると、生成核は反跳エネルギーをもって重イオンビームと同じ方向に飛び出す。反跳生成核分離装置は、電場と磁場の組み合わせから構成されており、生成原子核をビームの流れから分離して検出器の位置まで移送する。このとき、不必要な散乱ビームも一緒に移送されて検出器のバックグランドになる。この散乱ビームが検出器に入るのを防ぐために、電場を発生させる電極にスリットを設け、ビームが直接当たらないように工夫した。この工夫で検出器のバックグランドが極めて小さくなり、極微量（生成断面積 $> 10^{-34}\text{cm}^2$ ）の生成核を検出できるようになった。この装置の性能試験を兼ねて行った ^{182}W ターゲットに重イオンビーム ^{32}S を融合させる実験で新アイソトープ ^{209}Th を合成することに成功した²⁾。さらに、 ^{182}W に ^{35}Cl を融合させて、新アイソトープ ^{212}Pa の合成にも成功した³⁾。この成功には、高融点のタンゲステンを薄膜に加工する技術を開発したことも大きかった。

このほか、 ^{206}Ac と ^{217}Pa に新しい α 崩壊準位（核異性体）を発見した⁴⁾。 ^{206}Ac の合成では、わずか数か月の差で新アイソトープの発見を外国（フィンランド）の研究グループに先を越されてしまってくやしい思いを



図2 タンデム加速器ブースター実験室に設置された反跳生成核分離装置。

したが、我々のデータに新しい核異性体が見つかっており論文にまとめている⁵⁾。

未知核²⁶⁴Sgの合成に関して、幾つかの問題点が明らかになった。そのひとつは、合成に使われる²³⁸U + ³⁰Si融合反応の入射エネルギー依存性である。4個の中子が一番よく出るチャンネルに³⁰Siの入射エネルギーを合わせなければならない。このため、少し軽い反応系²³⁰Th + ³⁰Siの融合反応(104番元素に対応)を実験的に詳しく調べ、最適の入射エネルギーを決めた。さらに、ウラン標的がビーム(³⁰Si)による発熱に耐えるようにすることであった。このためにウランを付けたアルミ箔を穴のあいた回転円盤上に貼りつけ、2サイクル/秒程度で回転させながらビームを照射することにした。また、反跳生成核分離装置は通常生成核の質量を分析するモードで使用されるが、このままでは検出効率が小さすぎる(3-4%)。この質量分析を犠牲にすれば検出効率が2倍に上がることに気がついた。質量分析は犠牲にしても、崩壊で出る一連の α 線を検出して親核を知ることが出来ると考えた。さらに、³⁰Siのビーム強度である。タンデム加速器のイオン源を最大限に働かせて、1マイクロアンペアが出るようになった。このような改良を行って長時間実験(一週間連続運転)を何度か行った結果、自発核分裂イベントが見つかった。当初、 α 崩壊の半減期が核分裂の半減期より短いか同程度と予想していたため、 α 崩壊イベントで²⁶⁴Sgを同定することを考えていたが、実験ではどうしても²⁶⁴Sgからの α 線が観測されない。核分裂イベントだけでは親核を同定出来ないため、親核の反跳エネルギーと質量から推論することにした。反跳生成核分離装置の質量分析性能を犠牲にしたため、別の方法(飛行時間法)で質量を測定することにした。この結果、親核の反跳エネルギーと質量は²⁶⁴Sgと一致した。このため、検出された自発核分裂イベントは²⁶⁴Sgの崩壊である可能性が高いと結論し論文を投稿し受理された⁶⁾。

この研究では、より重い元素を順次合成するところまで至らなかった。原子番号がひとつ増える毎に一桁ほど生成断面積が小さくなるいまの融合反応では、もはや限界であろう。何か新しい融合反応を実験・理論の両面から模索する必要があることを痛感した。最近、変形核同士の衝突では、融合確率が大きくなるということが理論的に予想され、この予想を実験的に調べる研

究が先端基礎研究センターの次期テーマとしてスタートした。

3. 変形核の探索

原子核の高励起状態の研究では、原子核の変形状態を研究した。基底状態が球形でも励起状態が変形することがある。これは、原子核の回転でその形がゆがむためである。最近、長軸と短軸の長さの比が2:1の回転楕円体になっている原子核(超変形核)が励起状態で見つかっている。理論的にはさらにこの比が3:1のハイパー変形やバナナ型の変形などが予想されている。このような大きく変形した原子核を探索する目的で、筑波大学と協力してガンマ線検出器を持ち寄り、11台のアンチコンプトンガンマ線検出器からなる多重ガンマ線検出器をタンデム加速器ブースタービームラインに設置した⁷⁾。陽子数と中性子数が似通った原子核である⁶²Znや⁶⁴Znの高回転状態では超変形が予想されていたため、これにねらいを定めた。実験ではスピン16までの準位が測定され、殻模型を使って解析した結果、 $g_{3/2}$ と言う軌道に入る粒子数ですべての準位が説明出来ることが解った⁸⁾。これは、このスピンの値までは球形であることを意味する。その後、アメリカのグループが⁶²Znでより高いスピンの値(18-30)まで観測し、超変形を発見した。彼らは83個の要素から成る多重ガンマ線検出器(ガンマスフェア)を使っており、検出効率をあげることが出来たことが大きい。もう少しのところまで、またしても先を越されてしまった。

この他、ひとつの原子核の励起状態に3つの異なる変形状態が見られる現象を、¹³²Csで観測した⁹⁾。スピン16まで観測したところ、球形核の励起状態の他に、ラグビーボール型変形やパンケーキ型変形が回転バンド構造を形成していることがわかった。

原子核の回転状態を励起するのにクーロン励起がよく使われる。これは入射重イオンが標的の原子核の近くを接触しないで通過する際に、電磁気的な相互作用で標的核を励起する現象である。入射核と標的核のクーロン力が強いほど励起されやすいので、重イオンビームはクーロン励起に最適である。⁹⁰Zrビームで¹⁵⁶Gdをクーロン励起したところ基底バンドの励起の他に、通常では弱く励起される筈のサイドバンドが基底バン

ドと同程度に強く励起されることがわかった¹⁰⁾。同時に行った¹⁵⁷Gdや¹⁷¹Ybではこの現象は見られなかった。クーロン励起の確率は原子核固有の転移確率を使って正確に計算でき、実験値はこの計算値の10倍程度大きかった。入射重イオンを³²Sや⁵⁸Niに変えて行った結果では、作用する電場の強さに比例してサイドバンドの励起確率が大きくなることがわかった。この異常クーロン励起の原因はまだわかっていないが、ガンマ線の誘導放出との関連で研究が発展している。

4. おわりに

以上の他にも重イオンの融合障壁近辺での核子移行反応の研究やニッケル領域の中性子過剰原子核の構造研究が行われ、興味ある現象やいくつかの新しい核異性体が見つかっているが、この報告では割愛した。ここでの成果は大学とのタンデム協力研究で行われたものである。さらに、旧アイソトープ部研究開発課の人々にはマシンタイムなどで多大の支援を頂き、タンデムの運転では加速器管理室にお世話になった。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) H. Ikezoe, Y. Nagame, T. Ikuta, S. Hamada, I. Nishinaka and T. Ohtsuki, Nucl. Instr. and Meth., A376(1996)420.
- 2) H. Ikezoe, T. Ikuta, S. Hamada, Y. Nagame, K. Tsukada, Y. Oura and T. Ohtsuki, Phys. Rev. C54(1996)2043.
- 3) S. Mitsuoka, H. Ikezoe, T. Ikuta, Y. Nagame, K. Tsukada, I. Nishinaka, Y. Oura and Y.L. Zhao, Phys. Rev. C55(1997)1555.
- 4) T. Ikuta, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, K. Tsukada, Y. Nagame, J. Lu and T. Kuzumaki, Phys. Rev. C57(1998)R2804.
- 5) J. Lu, H. Ikezoe, T. Ikuta, S. Mitsuoka, T. Kuzumaki, Y. Nagame, I. Nishinaka, K. Tsukada and T. Ohtsuki, submitted to Eur. Phys. Jour. A.
- 6) H. Ikezoe, T. Ikuta, S. Mitsuoka, Y. Nagame, I. Nishinaka, Y. Tsukada, T. Ohtsuki, T. Kuzumaki and J. Lu., Eur. Phys. Jour. A, in press.
- 7) M. Oshima, K. Furuno, T. Komatsubara, K. Furutaka, T. Hayakawa, M. Kidera, Y. Hatsukawa, M. Matsuda, S. Mitarai, T. Shizuma, T. Saitoh, N. Hashimoto, H. Kasakari, M. Sugawara and T. Morikawa, Nucl. Instr. and Meth. 1988 in press.
- 8) K. Furutaka, T. Hayakawa, H. Nakada, Y. Hatsukawa, M. Kidera, M. Oshima, S. Mitarai, T. Komatsubara, M. Matsuda and K. Furuno, Z. Phys. A358(1997)279.
- 9) T. Hayakawa, J. Lu, K. Furuno, K. Furutaka, T. Komatsubara, T. Shizuma, N. Hashimoto, T. Saitoh, M. Matsuda, Y. Hatsukawa and M. Oshima, Z. Phys. A357(1997)349.
- 10) M. Kidera, M. Oshima, Y. Hatsukawa, K. Furutaka, T. Hayakawa, M. Matsuda, H. Iimura, H. Kusakari, Y. Igari, and M. Sigawara, J. of Phys. Soc. of Japan, Vol.66(1997)285.

