

# ■ 反跳生成核分離装置による未知重核の合成

重イオン未知重核研究グループ ■ 池 添 博 ■

## Synthesis of New Heavy Isotopes Using JAERI Recoil Mass Separator

Hiroshi IKEZOE

Research Group for Exotic Heavy Nuclei

Synthesis of new heavy isotopes in the transactinide using JAERI recoil mass separator is discussed. The recoil mass separator has been constructed at the JAERI tandem-booster accelerator. The performance of the recoil mass separator has been tested and the capability of the background suppression is excellent. New isotopes  $^{209}\text{Th}$  and  $^{212}\text{Pa}$  have been synthesized in the fusion reactions of  $^{182}\text{W} + ^{32}\text{S}$  and  $^{182}\text{W} + ^{35}\text{Cl}$ .

### 1. はじめに

核力に起因する原子核の基本的な性質に殻構造がある。原子の場合の電子軌道に似て、核内に陽子や中性子の軌道が考えられ各軌道間にはエネルギーのギャップがある。このエネルギーのギャップが特に大きくなった所まで陽子や中性子が入った原子核は構造的に安定になる。鉛の同位体で質量数 208 の原子核は陽子数が 82、中性子数が 126 の原子核で重い原子核の中では一番安定な構造を持っている。この鉛 208 より重い元素で殻構造的に安定な原子核は陽子数が 114 で中性子数が 184 の原子核と言われている。実際には陽子は電荷を持つので、この電荷を持った核液滴としてのエネルギーがあり、これと殻構造エネルギーを加えた全エネルギーが極小になる原子核領域（原子番号 114、中性子数 170–184）の核を超重元素<sup>1)</sup>という。この超重元素を合成してその核構造を研究することは原子核理論の検証にとっても、また、極めて重い原子核をもつ原子の化学的性質の研究にとっても重要で興味が尽きない。

現在ウランより重い元素は全て人工的に合成されている。最近、ドイツの重イオン研究所で 112 番元素が合成された<sup>2)</sup>。この研究所では今までに 107 番元素から 112 番元素まで重イオンの融合反応を使って合成に成功している。元素合成の目的は、新元素を作りその元素の名付け親になる名誉もあるが、超重元素に少しでも近づくことである。104 番以上の超アクチノイド核は現在までのところ全部で約 40 核種しか作られておらず、核データが不足している。この超アクチノイドの未知核種を合成しその崩壊様式や質量を測定して、超重元素領域に至る原子核の構造を理解することを目的に研究を始めた。ここでは、未知核の合成法と測定法および最近得られた成果について述べる。

### 2. 合成方法

重元素を作る場合は、鉛やビスマスにニッケル等を核融合させる（冷たい核融合）場合とウランやキュリウムなどアクチノイドに硫黄などを核融合させる（熱い核融合）場合がある。冷たい核融合では複合核の励

起エネルギーが10-20 MeV程度であるが、熱い核融合では複合核の励起エネルギーは50-60 MeVになる。一般に複合核を形成する確率は、クーロン斥力がより小さい熱い核融合が冷たい核融合に比べて大きい。一方融合した原子核は励起しているため、いくつかの中性子を放出して脱励起する。この過程は核分裂過程との競争過程であり、励起エネルギーが高くなるほど核分裂の割合が大きくなる。したがって冷たい核融合に比べ熱い核融合の方が核分裂する確率が大きくなり、生き残る確率は小さくなる。現在のところ、重元素合成に関して冷たい核融合と熱い核融合ではどちらが有利であるかは不明である。

脱励起過程で核分裂しないで生き残った生成核は核分裂、アルファ崩壊、ベータ崩壊などを起こして崩壊する。生成核がアルファ崩壊を起こす場合は、親核、娘核、孫核等から放出される一連のアルファ粒子のエネルギーと半減期を測定して生成核の原子番号と質量数を同定する。生成核が即座に核分裂する場合はその半減期を測定して、既存の核データと照らし合わせて生成核の核種を推論する。

### 3. 測定装置

重イオンの融合反応で作られる生成核の量（1日に1個程度）はビーム量（ $10^{12}$ 個/秒）に比べ極めて小さい。ほとんどのビームは核反応しないで標的を通過する。生成核はビームと同じ方向に飛び出すため、大量のビームの流れから1個の生成核を取り出す装置が必要になる。原研のタンデム+ブースター加速器の実験装置として建設された反跳生成核分離装置<sup>3)</sup>は極微量の生成核をビームから分離して測定器に導き生成核の質量数や崩壊特性を測定する装置である。

この装置（図1）は運動エネルギーの違いを利用して生成核とビームを分離する。ビームである入射粒子と標的核が核融合して作られた生成核のエネルギーはビームのエネルギーよりかなり小さい。静電場の中を通過する粒子はエネルギーの違いによって軌道が変わるのを利用して、標的の後ろに静電場の発生装置を置き生成核とビーム粒子を分離する。分離された生成核はエネルギー分布を持ち空間的に広がっているので、静電場の後に2極電磁石を置き粒子を曲げる方向を反

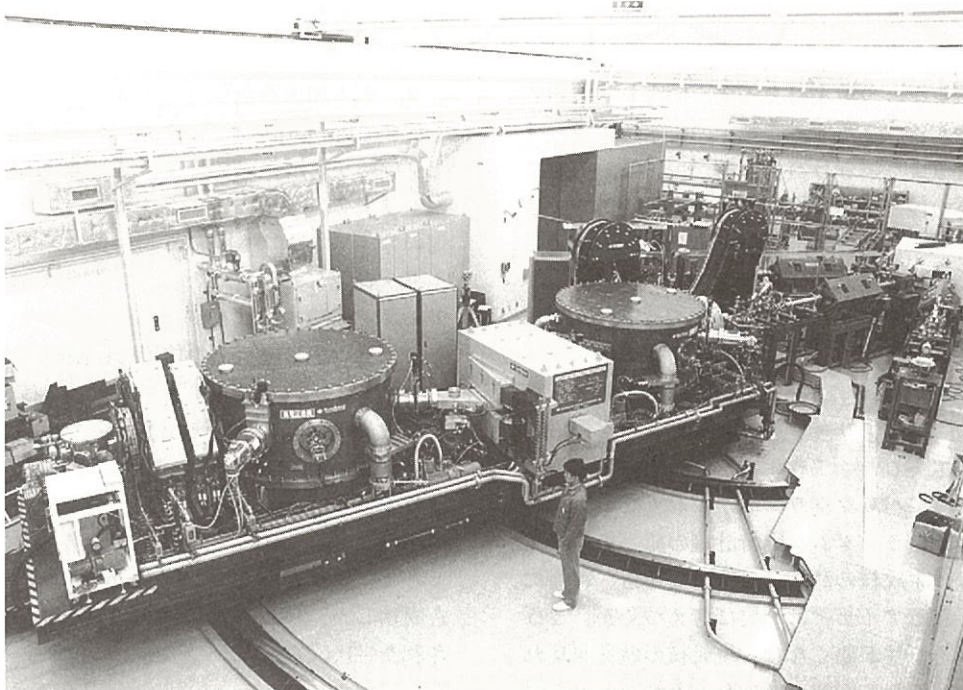


図1 反跳生成核分離装置。電場（丸いタンク）—磁場（四角い箱）—電場（丸いタンク）—の組み合わせから構成されている。右上からビームが入り、生成核は左下の焦点面で測定される。



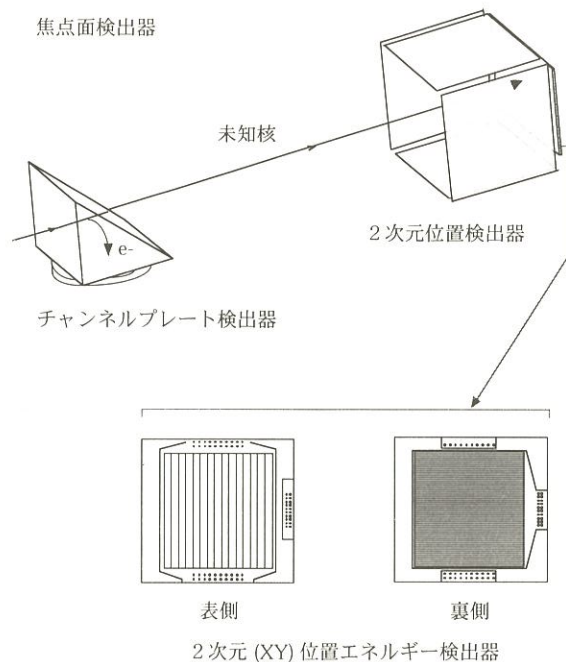


図2 分離された生成核はチャンネルプレート検出器と2次元位置検出器から成る焦点面検出器で測定される。2次元位置検出器は表側15、裏側128のストリップから成っている。

対にしてエネルギー分散を打ち消す。同時に空間的広がりも小さくする。こうすると粒子の質量数によって軌道が変化するようになり質量分散が現れる。実際には2極電磁石の後に第2の静電場を置き、両方でエネルギー分散を消して質量分散を作り出し特定の位置に焦点を結ぶようにしてある。

従来の装置ではビームが静電場をつくる電極に当たって散乱され、それが焦点面に置かれた検出器のバックグランドになっていた。この問題を解決するために、静電場の陽極にスリットをいれビームが直接当たらないように工夫した。こうすることによって従来の装置に比べ格段にバックグランドが少なくなった。この改善によって、ランダムな同時計測の確率を小さくでき、極微量の生成核の測定が可能になった。電極にスリットを入れるアイデアは容易に考えつくが、こうすると電場の一様性が悪くなり、生成核の軌道が乱れ装置の性能が悪くなる問題があった。われわれはこの電場の乱れをスリット部に電場補正用のシムをつけることで解決した。

反跳生成核分離装置で分離された生成核はチャンネルプレート検出器を通過して2次元位置検出器に埋め込まれる(図2)。チャンネルプレート検出器は生成核が飛んできたことを示すためのもので、生成核の崩壊イベントと区別される。崩壊イベントは生成核が検出された位置と同じ位置から信号を出すイベントで、チャンネルプレート検出器の信号がゼロという条件で選別される。測定では発生したイベントの検出器上の位置とエネルギーおよび時刻がイベント毎に記録される。

#### 4. 新アイソトープの合成

反跳生成核分離装置の性能試験および測定系の調整を兼ねて、新アイソトープ $^{209}\text{Th}$ の合成を行った<sup>4)</sup>。この原子核は、トリウム元素の中では一番中性子数の少ない核種で、安定な $^{232}\text{Th}$ から23個も中性子が不足しており、原子核としては存在の境界線に位置している。このような存在の境界線上にある原子核の寿命や崩壊様式の測定は、安定領域で良く成立している原子核理論の検証にとって重要である。理論予想ではこの原子核の寿命は数ミリ秒でアルファ崩壊するものと期待された。

タンデム加速器からの171 MeVの $^{32}\text{S}$ ビームを $^{182}\text{W}$ の薄膜(0.14  $\mu\text{m}$ )に照射し、ビーム方向に飛び出した生成核を反跳生成核分離装置で測定した結果を表1および表2に示す。アクチニウムやラジウムなどの既知のアイソトープも同時に測定されアルファ線のエネルギー較正に利用された。この測定では $^{209}\text{Th}$ からのアルファ崩壊イベントが2個検出された。表1に示したように、検出器上での位置と検出時間が関連した一連のアルファ粒子4個が見つかり、娘核または曾孫核から出る既知のアルファ粒子のエネルギーと半減期から親核が $^{209}\text{Th}$ であることが確認された。この反応による $^{209}\text{Th}$ の生成断面積は約1ナノバーンであった。

さらに、184 MeVの $^{35}\text{Cl}$ で $^{182}\text{W}$ を照射することによって、新アイソトープ $^{212}\text{Pa}$ を3個合成することにも成功した。検出方法は $^{209}\text{Th}$ の場合と同じで、測定された $^{212}\text{Pa}$ のアルファ崩壊のエネルギーと半減期を表2に示す。

106番元素の未知アイソトープ264を $^{238}\text{U}+^{30}\text{Si}$ 融合反応で合成する試みが進行中である。この反応は熱

表 1  $^{209}\text{Th}$  からのアルファ崩壊 ( $^{209}\text{Th} \rightarrow ^{205}\text{Ra} \rightarrow ^{201}\text{Rn} \rightarrow ^{197}\text{Po} \rightarrow ^{193}\text{Pb}$ )。E はアルファ粒子のエネルギー、Time Interval は親核が検出されてから崩壊までの時間を表す。括弧はアルファ粒子のエネルギーの一部が測定されていることを示す。

$\alpha$ decays	Event No. 1		Event No. 2	
	E (MeV)	Time Interval	E (MeV)	Time Interval
$\alpha_1$ from $^{209}\text{Th}$	8.109	2.4 ms	8.060	8.6 ms
$\alpha_2$ from $^{205}\text{Ra}$	7.392	87.5 ms	(1.824)	28.6 ms
$\alpha_3$ from $^{201}\text{Rn}$	(0.074)	3.0 s	(0.487)	8.7 s
$\alpha_4$ from $^{197}\text{Po}$	6.444	27.2 s	6.397	64.2 s

表 2  $^{209}\text{Th}$  と  $^{212}\text{Pa}$  の崩壊アルファ粒子エネルギーと半減期を示す

Nuclei	$E_\alpha$ (MeV)	$T_{1/2}$ (ms)	Reactions
$^{209}\text{Th}$	8.080 (50)	3.8 $^{+6.9}_{-1.5}$	$^{182}\text{W} + ^{32}\text{S}$
$^{212}\text{Pa}$	8.266 (30)	5.1 $^{+6.1}_{-1.9}$	$^{182}\text{W} + ^{35}\text{Cl}$

い核融合反応で、複合核の励起エネルギーは 54 MeV 程度になり、4 n または 5 n 反応がおもな反応になる (n は中性子)。この 106 番の核種では核分裂とアルファ崩壊の確率が同程度で寿命が数秒から 100 秒の間であることが理論的に予想されている。現在までのところ、数十秒の寿命をもつ自発核分裂イベントが 4 個見つかっている。測定された寿命をもつ自発核分裂核は既知の核では該当するものがないが、これを 106 番元

素の未知アイソトープ 264 と同定するには統計が不足しており、さらなる測定が必要である。

以上のように、未知核の測定装置としては世界に誇れるものが完成し、成果が出始めている。超アクチノイドの未知核種の生成断面積は 0.1 ナノバーンから数ピコバーンと予想されるため、タンデム加速器のビーム強度の増強やビームに強い標的の工夫など効率のよい測定を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 池添博：基礎科学ノート No.1 (1994) 8.
- 2) S. Hofmann et al.: Z. Phys., A 354 (1996) 229.
- 3) H. Ikezoe et al.: Nucl. Instr. and Meth., A 376 (1996) 420.
- 4) H. Ikezoe et al.: Phys. Rev., C 54 (1996) 2043.

