

# ■ 新核種<sup>233</sup>Amの発見と超重元素合成をめぐる最近の話題

超アクチノイド元素核化学研究グループ ■市川 進一, 永目諭一郎■

## Identification of the New Isotope <sup>233</sup>Am and Recent Topics on the Synthesis of Superheavy Elements

Shin-ichi ICHIKAWA and Yuichiro NAGAME

Research Group for Nuclear Chemistry of Heavy Elements

The new neutron deficient americium isotope <sup>233</sup>Am produced in the <sup>238</sup>U(<sup>6</sup>Li, 6n) reaction has been identified with the JAERI online isotope separator (JAERI-ISOL) coupled to a gas-jet transport system. The half-life is determined to be 3.2 min. An outline of the experiments and the results is presented. The recent topics on the synthesis of superheavy elements are briefly introduced.

### 1. はじめに

これまでに約2500ほどの放射性同位元素(核種)が見いだされており, 現在もその数は増え続けている。また最近では, 原子番号114, 116, 118番の超重元素を確認したという報告もなされている。

これら新核種, 新元素の確認とその核的性質に関する研究は, 原子核の存在限界を明らかにするとともに, 極限領域下での原子核の性質・構造に関する新しい情報をもたらすことが期待される。また, 恒星内における元素合成過程との関わりからも大きな関心が持たれている。このため大型加速器を有する世界の研究機関で, それぞれが特徴ある実験装置の開発を行い, 新核種, 新元素の確認に向けて活発な研究が遂行されている。

このノートでは, 私たちが開発した実験装置を用いて確認した新核種<sup>233</sup>Amの実験結果と, 超重元素合成をめぐる最近の話題について紹介する。

### 2. 研究の背景

これまで確認された原子核(天然に存在する安定同位体を含めて)を一目で確認するには, 核図表とよばれるチャートが便利である。これは, 横軸に中性子数を縦軸に陽子数をとり, 一つ一つの原子核を升目状に記載したものである。出版されている最新の核図表の一つにドイツ, Karlsruhe 研究所が1998年12月に発行したものがあ (原研核データセンターでも4年毎に“核図表”を出版している)。最新版と約20年前の版を見比べてみると, この間に発見された核種の数が分かる。ここで, プルトニウムより重い元素に着目すると, 20年間に発見された核種は39個である。その内訳は, AmからLrのアクチノイド元素領域で17核種, それより重い超アクチノイド元素領域で22核種である。見いだされた39個の内35核種(約90%)は $\alpha$ 線を放出し壊変するか, 自発核分裂する核種である。一方, 主に軌道電子捕獲で壊変(EC壊変)する中性子数が少ないAm, Cm, Bk核領域では, 私たちが1998年に発見<sup>1)</sup>した<sup>236</sup>Amを含めて, わずか3核種の確認がなされただけである。このことは,  $\alpha$ 線または核分裂片の

検出と比較して、EC 壊変に伴い放出される X 線や  $\gamma$  線の検出感度が極めて低く、また質量数の決定もできないため核種の同定が難しいことを示している。しかしこの領域の核種の半減期、壊変様式ならびに壊変前後の質量差は、超重核を含むより重い核種の安定性を理解するために重要視されている。すなわち、重・超重核の質量は、質量既知の核種を基準にし、壊変前後の質量差（壊変に伴い放出される  $\alpha$  線のエネルギー、または  $\beta$  線の最大エネルギーで求まる）を順次決定して求めることができる。しかし、この連鎖は未知または質量差が確認出来ていないこの領域の核種が途中で存在するため途絶えてしまっている。

そこで私たちは、中性子数が少ない Am, Cm, Bk 核の壊変様式を明らかにするとともに、この領域における未知核種の探索を開始した。これまでのところ、 $^{236}\text{Am}$  の発見と半減期の決定、 $^{235}\text{Am}$  の  $\alpha$  壊変と EC 壊変の比ならびに精密な半減期の決定に成功した<sup>2)</sup>。

### 3. $^{233}\text{Am}$ の合成、分離、検出そして発見

新核種の確認実験で最も困難な点は、対象核種の寿命が短く、しかも生成率が小さいことである。このためその確認には迅速で、高効率に目的の核種だけを純粹に取り出す手法を開発することが必要であ

る。私たちは、図 1 に示す、オンライン同位体分離器 (ISOL: Isotope Separator On Line) とガスジェット搬送装置を組み合わせた複合系を開発した<sup>3)</sup>。タンデム加速器からのビームで標的核を照射し、反跳で飛び出してくる生成物をヘリウムガス中で捕獲する。そして、クラスター状の微粒子 ( $\text{PbI}_2$ ) に付着させ、ガスジェットと呼ばれる搬送装置で同位体分離器のイオン源へと迅速に導く。この複合装置の特徴は、多層箔標的のチェンバーを使用できて合成に使える有効な標的核の厚みを増やせることと生成物をより効果的に捕集できることである。イオン源でイオン化された核種は質量分離され、測定系へと導かれ放射線測定によって同定される。これまでのところ、標的チェンバーから測定系までの搬送時間は約 3 秒、Am 同位体の分離効率は 0.3% (ガスジェットの搬送効率 60%, イオン化効率 0.5%) である。

$^{233}\text{Am}$  の場合は、多層箔標的のチェンバーに 21 枚の  $^{233}\text{U}$  標的核 (各標的の厚みは  $100\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) を装着し、エネルギー 63 MeV の  $^6\text{Li}$  イオンビームを照射して合成した。 $^{233}\text{Am}$  は、その生成断面積が約 1 マイクロバーン (1 バーン =  $10^{-24}\text{cm}^2$ ) と見積もられ、主に EC で壊変するがわずかの確率で  $\alpha$  壊変すると予測されている。 $\alpha$  線の検出は、先で述べたように X 線または  $\gamma$  線に比べ、格段に良い S/N 比 (Signal to Noise ratio) で測定することが可能である。そこで、 $\alpha$  線を高い効率

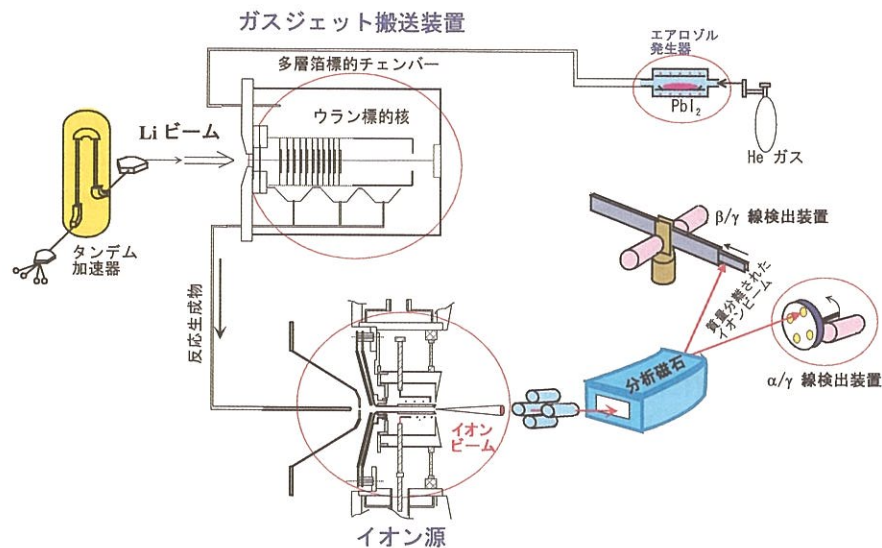


図 1 ガスジェット搬送装置と同位体分離器の構成。

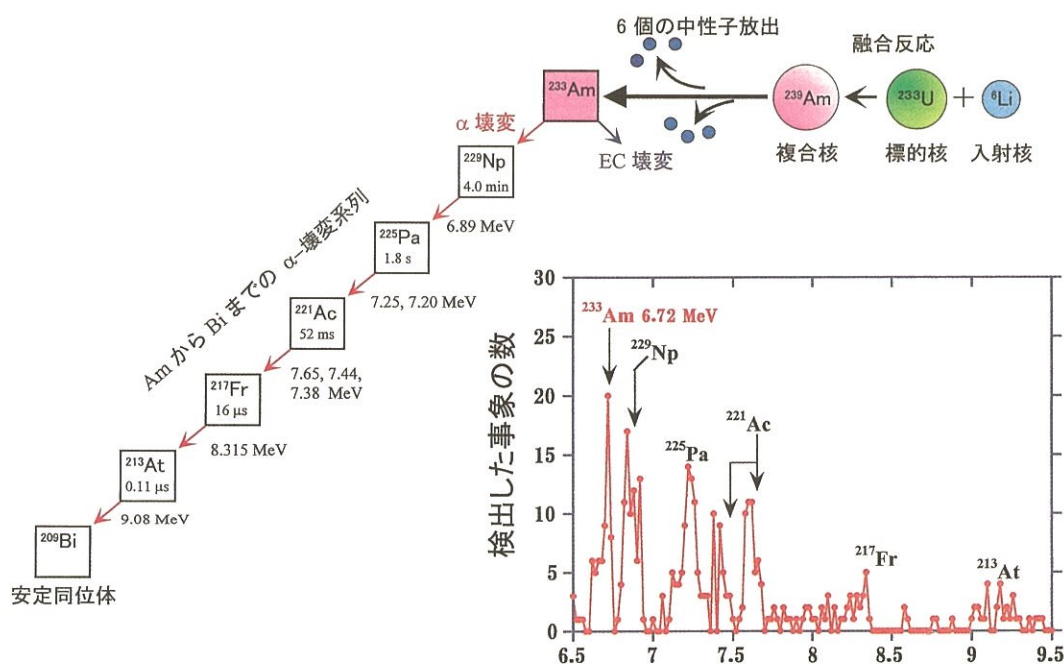


図2 新核種<sup>233</sup>Amの合成と検出した $\alpha$ 線スペクトル。

で連続的に検出する装置を新たに製作し実験に用いた。これは、質量分離され薄い箔にインプラントされた核種を両側から検出器で狭み込む構造になっており、 $4\pi$ に対し、80%の効率を有している。

図2に質量数233で分離したフラクションで検出した $\alpha$ 線スペクトルを、合成反応、<sup>233</sup>Amの $\alpha$ 壊変系列と共に示す。図に示した系列の中で、<sup>229</sup>Npから<sup>213</sup>Atまでの5核種については半減期と放出される $\alpha$ 線のエネルギーが既にわかっている。測定したスペクトルには、これら5核種の壊変に伴い放出される $\alpha$ 線が確認できるとともに、6.72MeVの $\alpha$ 線が新たに確認された。この $\alpha$ 線は、半減期3.2分で減衰していること、質量数233で分離したフラクション中に検出されたことから、<sup>233</sup>Amの崩壊に伴い放出されたものと判断し、新核種と同定した。

#### 4. 超重元素合成をめぐる最近の話題と今後の展望

昨年、原子番号114を超える超重元素合成に関する報道がいくつかなされ、また9月には第1回超アクチノイド元素の化学と物理に関する国際会議(TAN99)がドイツで開催されるなど超重元素科学に新しい扉を開く飛躍の年となった。ここでは原子番号104を超える超アクチノイド元素発見の簡単な歴史と、昨年新たに報告された元素について特に興味ある結果を上記会議の議論を含めて紹介する。

超重元素は、約30年ほど前にその存在が理論的に予想され、なかでも原子番号 $Z=114$ 、中性子数 $N=184$ の二重閉殻構造を持つ核種<sup>298</sup>114は、非常に安定に存在するであろうと指摘された。このため、超重元素合成に不可欠な重イオン加速器の性能向上や検出系の改良を進めつつ、世界の核化学、核物理研究者が競ってその合成を試みてきた。表1に、これまでに報告されている114番元素より重い質量領域の核種を関連する物理量とともに示す。

超重(アクチノイド)元素の合成実験は、1960年代終わりから1970年代半ばにかけて米国のローレンスバークレー国立研究所(LBNL)とロシア(当時ソ連)ドゥブナの合同原子核研究所(JINR)が激しく競い合った。そこでは104から106番元素が発見された。1980年代に入ると、ドイツの重イオン研究所(GSI)が競い合いに参入し、107から109番元素を相次いで発見した。その後GSIでは、1990年代半ばに110から112番元素をいっきに合成し、超重元素合成の分野をリードしてきた。このようにこれまでは約10年間に3元素の割合で超重元素は発見されてきた。昨年は世紀末を迎えてこれまでのペースを一新するかのようになり、JINRで114番元素が、LBNLで116、118番元素が立て続けに合成されたことになる。ふたたび米国とロシアの競い合いのようには見えるが、114番合成実験はJINRと米国ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)との共同研究であり、118番元素合成実験はさらに広い国際協力を通して行われており、時代の流れを感じるこ

表1 これまでに報告されている114番元素より重い質量領域の核種

各 種	半減期	生成核反応	生成断面積	文 献
$^{289}\text{114}$	2–23 s	$^{224}\text{Pu}(^{48}\text{Va}, 3\text{n})$	~ 1 pb	4
$^{287}\text{114}$	$5.5^{+10}_{-2}$ s	$^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3\text{n})$	$2.5^{+3.3}_{-1.6}$ pb	5
$^{293}\text{118}$	$120^{+180}_{-60}$ $\mu\text{s}$	$^{208}\text{Pu}(^{86}\text{Kr}, \text{n})$	$2.2^{+2.6}_{-0.8}$ pb	6
$^{289}\text{116}$	$600^{+860}_{-60}$ $\mu\text{s}$	$^{293}\text{118}$ の $\alpha$ 壊変生成物		6
$^{285}\text{114}$	$580^{+870}_{-250}$ $\mu\text{s}$	$^{289}\text{116}$ の $\alpha$ 壊変生成物		6

ができる。

今回のデータで特に注目すべき2つの点を次に述べる。第一は、 $^{285}\text{114}$  (N=171) と  $^{287}\text{114}$  (N=173) の半減期がそれぞれ580マイクロ秒、5秒と中性子数の増加とともに長くなりさらに、 $^{289}\text{114}$  (N=175) では約30秒もの間存在したことである(半減期としては2–23秒と見積もられている)。この事実は、二重閉殻構造を持つ核種 $^{288}\text{114}$  (N=184) に向けて安定性が増していくことを示唆している。もう一つの驚くべき事実は、 $^{208}\text{Pb}(^{86}\text{Kr}, \text{n})$   $^{293}\text{118}$  反応の生成断面積が2.2ピコバールと予想よりはるかに大きいことである。これは入射核 $^{86}\text{Kr}$ のN=50閉殻と標的核 $^{208}\text{Pb}$ の二重閉殻構造が関与しているともいわれているが、詳細な反応機構はわかっていない。これらに関しては、当然TAN99でも議論の対象となった。118番元素合成に関しては、GSIでも追試の実験が行われているが、現時点ではまだ確認されていないとのことである。一方JINRのデータに関しても、解析上の問題点などが指摘され、今回のデータが必ずしも十分には受け入れられていない状況であった。

今後の計画としては、JINRでは引き続き中性子過剰核の $^{48}\text{Ca}$  ビーム ( $^{287}\text{114}$ ,  $^{289}\text{114}$  の合成に用いた入射核) を用い、いろいろなアクチノイド核を標的にして114–118番元素の合成を目指している。またLBNLでは118番元素の確認実験や $^{208}\text{Pb}(^{87}\text{Rb}, \text{n})$   $^{294}\text{119}$  反応を用いた119番元素の合成などが計画されている。一方GSIでは、安定だと期待される $^{288}\text{114}$  (N=184) 核の合成は既存の安定核ビームを用いては到達できないため、N=184を持つZ=120, 126領域へのアプローチも考えられている。しかし重元素合成のための核反応

機構は、重イオン同士の融合確率、融合した核が核分裂しないで生き残る確率など非常に複雑でいまだによく理解されていない。当センターでも変形した原子核を用いて重元素を合成する計画<sup>7)</sup>が進んでおり、今後の成果が待たれる。

## 5. 謝辞

$^{233}\text{Am}$  に関する研究は、当グループと東京都立大学大学院理学研究科、名古屋大学大学院工学研究科、及び広島大学工学部との共同研究であることを記し、謝意を表します。また、物質科学研究部加速器管理室イオン源グループは、安定した強いLiイオンビームを発生する技術を開発し、実験の成功に大きく寄与したことを記し、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) K. Tsukada et al., Phys. Rec. C 57 (1998) 2057.
- 2) M. Sakama et al., "Extended Abstracts of 1st International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements", Seeheim, Germany, Sept. 26–30, 1999, P–W–4.
- 3) S. Ichikawa et al., Nucl. Instr. Meth. A 374 (1996) 330.
- 4) Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 3154.
- 5) Yu. Ts. Oganessian et al., Nature, 400 (1999) 242.
- 6) V. Ninov et al., Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 1104.
- 7) 池添博, 基礎科学ノート6 (1996) 6.