

超重元素

森本、浅井、加治

July 20, 2011

概説

超重元素合成実験において、より大きい原子番号の元素が発見されるに伴い、原子核は一体どこまで存在するのであるかという疑問が生じるのは自然な事である。質量公式の一つである KTUY による原子核の存在限界についての予測は、図 1 に示されているように超重核研究の対象領域が広大に広がっている事を示している。現在周期表上で名前が決定している元素は 112 個あり、118 番元素までの生成が報告されている。しかしながら、日本国で発見された元素は未だ一つもなく我国発の命名権取得が強く期待されている。人類が到達しうる最も重い原子番号を有する原子核を人工的に合成し核種同定する試み(新元素探索)は、超重核合成研究における最大の挑戦である。本研究領域では、まず新元素探索を主軸とし新同位体の探索および原子核構造を明らかにするような合成実験を推し進めるべきであると考え。特に、 $Z=126$, $N=228$ に二重閉殻構造構造がある事が予測されており、比較的寿命の長い "安定の島" が存在する可能性がある。この "安定の島" に到達する事が、超重元素合成においての長期的な目標となる。

(図 1. 小浦さんの図)

浅井さんによる超重核核分光研究の概説

1-1. 超重核の合成

新元素 (国内初の命名権取得)

2004, 2005 年に報告された 113 番元素の合成に関する報告は、国内初の元素命名権取得に向けて極めて近いものである。中性子と陽子数が球形魔法数近傍である安定性の高い ^{209}Bi を標的とした重イオン融合反応 (コールドフュージョン) $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}113$ によって合成された原子核は、 α 崩壊連鎖が既知核へ到達することをもって実験的に原子番号と質量数の両方が決定された。これまでは、他機関による追試をもって元素の命名権が認定されてきているが、113 番元素に関しては、生成断面積が極めて小さいため、他研究機関での再現実験は事実上困難である。しかしながら、IUPAP と IUPAC から結成される委員会 (JWP) は、同一研究機関からの実験であってもデータに "High degree of

internal redundancy and of the highest quality”があれば評価すると報告しているため、まずはこの基準のクリアを目指す必要がある。2009年、娘核 ^{266}Bh および ^{262}Db の壊変特性を調査し113番元素同定の検証を深めた事により、残るは原子核 $^{278}113$ の観測を増やす事が必要とされている。

113番元素を超える超重核の合成

これまで、GSIおよび理研において主にコールドフュージョンを用いた実験、主にDubnaにおいてホットフュージョンを用いた実験がなされてきた。特にコールドフュージョンを用いた新元素の探索は、生成した核の崩壊が既知の核につながるという利点があるが、その生成断面積の小ささにより現在の実験手法にブレークスルーが無い限り限界に到達している。ただし、これまでより1桁以上の大強度ビームを用いる実験を可能にすることで、 $^{208}\text{Pb}(^{86}\text{Kr},n)^{293}118$, $^{209}\text{Bi}(^{86}\text{Kr},n)^{294}119$ 反応等、既知核への到達が可能な超重核を合成し、新元素発見とする事が出来る可能性は残されている。しかしながら、今後は生成断面積の観点からホットフュージョンを用いた新元素探索に主軸を移して行く必要があると考えられる。アクチノイドを標的とした重イオン融合反応(ホットフュージョン)によって、中性子過剰領域の超重核を合成することが可能である。変形魔法数 ($N=162$, $Z=108$) ならびに理論的に予測されている球形魔法数 ($Z=114, 120$ or 126 , $N=184$) 近傍領域の超重核を合成出来ることから、原子核構造研究の観点からも興味深い。現在理化学研究所では、ホットフュージョンを用いた超重元素合成実験に特化した性能を持つ反跳核分離装置 (GARIS-II) が開発され、超重核探索を行うための準備がなされている。今後は、このGARIS-IIを利用した新元素探索ならびに核構造研究が推進される予定となっている。例えば、人類未踏の120番元素の超重核合成 $^{248}\text{Cm}(^{54}\text{Cr},xn)^{302-x}120$ が検討されている。

しかしながら、ホットフュージョンで合成された核種は、中性子過剰であるが故にその崩壊が既知核へ到達する事が困難であり、実験的に原子番号と質量数を同定する事が出来ない。さらには、超重核の”安定の島”へ近づくにつれて超寿命となっていけば、崩壊を待たずとも原子核の原子番号と質量数を直接測定する手法 (ΔE - E 法, GARIS+IGISOL 法, GARIS+TRAP 法, 特性X線観測) の開発が求められる。今後、広大な超重核領域の研究を推し進めるためには、これら原子番号と質量数を直接測定する手法の開発が急務であると考えられる。

超重核の核分光

超重元素合成実験において、より大きい原子番号の元素が発見されるに伴い、原子核は一体どこまで存在するのであろうかという疑問が生じるのは自然な事である。質量公式の一つであるKTUYによる原子核の存在限界の予測では、図1に示すように陽子数13*,

中性子数 3^{**} に至る広大な領域で原子核が存在できることを示している。陽子数が 103 を超える原子核は陽子間の強いクーロン反発力により核分裂に対して不安定となり、原子核の殻構造による安定化によってかろうじてその存在を保っている。従って超重核の存在は本質的に殻構造に依存しており、その存在限界と安定性は陽子と中性子の軌道の閉殻の位置と強さに大きく依存する。超重核の殻構造については多くの理論的研究が行われており、 $Z = 114 \sim 126$, $N = 172 \sim 184$ あたりに球形閉殻が存在すると予想されているが、その正確な位置や強さは理論によって様々に異なり、まったく確立されていない。

超重核の実験的研究は、新元素の探索という熾烈な国際競争の下で強力に推進されてきた。これまでに 118 番元素までの合成が報告されており、現在 119, 120 番元素の発見に向けて各国・各研究所で激しい競争が行われている。日本においても現在 113 番元素の同定・命名権取得に向けて実験が行われているが、その後は 120–126 番元素の発見に向けて更なる加速器・実験装置等の増強を行っていくべきである。

新元素の合成はそれ自体が重い原子核の存在と安定性の証明であり、新元素の観測によって得られる寿命や α 崩壊エネルギーの値は、閉殻の位置や強さを明らかにする良い指標となる。また、超重核の生成断面積の値は核分裂障壁の高さと良い相関があり、そこから超重核の殻構造に関する情報を得ることができる。新元素の探索競争によって $Z = 114 \sim 126$, $N = 172 \sim 184$ 領域の超重核に関する実験データが得られれば、自ずとこの領域の殻構造を明らかにすることができる。

一方、分光学的手法で超重核の基底状態や励起準位のエネルギー、スピン・パリティ、一粒子軌道配位を明らかに出来れば、より直接的且つ定量的に超重核の殻構造を明らかにできる。現在、 α 崩壊核分光と isomer- γ 核分光により 106 番元素まで核分光実験が行われているが、収量さえ増やすことができれば同じ手法で $Z = 114$ 近傍核の核分光実験も可能である。 $Z = 114 \sim 120$ 領域の球形閉殻近傍の殻構造を直接核分光実験により明らかにすることを今後強力に推進すべきである。

更に、 α 崩壊や核異性体の崩壊などに頼らずに、超重核の基底状態のスピン・パリティや一粒子軌道配位、原子質量、変形度などを直接観測することができれば、超重核の殻構造を明らかにする上で極めて有用である。超重核を対象としたレーザー分光やイオントラップ、 g ファクターや Q モーメント測定など、究極感度の実験技術の開発も追求すべきである。

新元素の合成は、新「超重原子核」の合成という意味だけでなく、文字通り新「元素」の合成でもある。超重元素研究の発展は、原子核物理研究に留まらず、超重「原子」の物理や、超重元素の「化学」にも新たな展開をもたらす。特に 123 番元素あたりから現れる人類未踏の g 電子系の化学は極めて興味深い研究テーマである。

必要とする実験装置

新元素 ($Z = 120-126$) 探索や $Z = 114-120$ 超重核の核分光実験を強力に推進するためには、超重核の生成量を 1-2 桁増強することが必須である。現在 113 番元素の同定実験を行っている理化学研究所の重イオン線形加速器 RILAC とガス充填型反跳核分離装置 GARIS の組み合わせは、世界で最も生成断面積が小さい超重核を合成・検出できる装置ではあるが、ビーム量を一桁以上増強し、年間 365 日のマシンタイムを占有できるようになれば、超重核の研究は一気に進むであろう。

ビーム強度の一桁以上増強と、そのビーム強度に耐える標的の開発が、今後 5~10 年の最大の開発課題である。更にマシンタイム占有のために、安価に長時間連続運転が可能な超重元素合成専用加速器の新設が強く望まれる。安価であれば複数台同時運転も可能になり、年間 730 日以上のマシンタイムも不可能ではない。

キーワード

- $Z=120-126$ の新元素合成
- $Z=114-126$, $N=172-184$ 閉殻の全貌解明
- $Z=114$ 領域核の直接核分光実験
- ビーム強度 1 桁以上増強、標的開発