

■ 超重核の量子状態を実験的に特定する —102番元素 ^{257}No の γ 線核分光—

核化学的手法による超重元素の価電子状態の解明グループ 浅井 雅人

Experimental assignments of quantum states in superheavy nuclei - γ spectroscopy of ^{257}No , the element 102

Masato ASAI

Research group for Electronic states in super-heavy elements by radiochemical techniques

decay of ^{257}No has been studied by means of α - γ and α - e (internal conversion electron) coincidence spectroscopy. Excited states in the daughter nucleus ^{253}Fm have been established for the first time, and spin-parities and neutron single-particle configurations of the ground state of ^{257}No as well as the excited states in ^{253}Fm have been assigned experimentally. These experimental data will allow us to reveal the shell structure of superheavy nuclei.

1. はじめに

原子核の液滴模型によると、陽子の数が100個を超えるような非常に重い原子核は、多数の陽子間のクーロン反発力により核分裂に対して不安定となり、安定に存在することができない。一方、原子核には、原子の場合の希ガスのように、ある特定の陽子数・中性子数において陽子や中性子の軌道が満たされて閉殻となり安定性を増す性質があり、そのような殻効果によって陽子の数が100個を超える原子核でもかろうじて存在を保つことができる。(このような原子核をここでは超重核と呼ぶ。) どれほど重い原子核まで安定に存在し得るか、どの程度安定であるかは、原子核の殻構造と密接に関係している。

超重核の研究はこれまで、超重核を人工的に合成し存在を確認すること、どの程度安定であるかを明らかにすることが第一の目的であった。これは、超重核を合成することが非常に困難であるという実験的な制約によるところが大きく、例えば最近発見された113番元素の場合、約100日間の実験でたった1個の原子核しか観測されていない[1]。そのため多くても数個

から百個程度の原子核を観測する実験しか行うことができず、崩壊半減期や自発核分裂半減期、線エネルギーなど安定性に関する僅かな情報しか得ることができないのが現実であった。

一方、原子核構造を調べる場合、線核分光などの手法を用いて原子核の基底状態や励起状態の構造を詳しく調べることが非常に有効である。特に殻構造は、奇質量数の原子核に観測される陽子や中性子の一粒子軌道準位のエネルギー間隔や順序に直接的に現れる。従って、もし超重核の励起状態を線核分光などの手法を用いて詳しく調べ、一粒子軌道準位のエネルギー間隔や順序を実験的に明らかにできれば、超重核の殻構造を直接的に明らかにすることができる。このような手法は軽い原子核においては一般的であるが、超重核領域においては超重核を大量に合成することが困難なためほとんど行われていない。特に陽子数101、中性子数153を超える領域では線核分光実験は全く行われておらず、基底状態や励起準位のエネルギー、スピン・パリティ、一粒子軌道配位など量子状態を特定できるような情報は一つも明らかでない。

本研究では α - γ 同時計数法及び α - 内部転換電子同

時計数法を用いて、陽子数 102, 中性子数 155 の原子核であるノーベリウム 257 (^{257}No) の崩壊を詳しく調べ、 ^{257}No 及び娘核 ^{253}Fm の基底状態及び励起準位のエネルギー・スピン・パリティ、 γ 粒子軌道配位を初めて実験的に決定することに成功したので紹介する [2]

2. 実験手法及び結果

超重核の α 核分光実験においては、できる限り多くの超重核を合成すること、合成した超重核を迅速且つ高効率に測定装置まで搬送し、高い検出効率で α 線と γ 線を同時測定することが必要である。本研究ではアクチノイド標的を照射できる原子力機構 (東海) のタンデム加速器を使用することで、 $^{248}\text{Cm} (^{13}\text{C}, 4n)$ 反応により ^{257}No を合成した。アクチノイド標的を用いる反応系は、比較的高い生成確率で中性子数の多い超重核を合成できるという特徴がある。 ^{257}No は半減期 25 秒で崩壊するため、ガスジェット搬送法と呼ばれる手法を用いて生成核を照射位置から測定位置まで迅速に搬送した [3]。図 1 にその概念図を示す。標的から反跳脱出した高エネルギーの核反応生成物はヘリウムガス中に捕獲され、連続的なガスの流れによって約 20 m の距離を 1 秒以内に搬送され、回転円盤上の薄膜に吹き付けられる。測定は、薄膜を 2 台の Si 検出器と 2 台の Ge 検出器で挟み込むことで、 α 線に対して 80%、低エネルギーの γ 線に対して 30% の高効率で行い、約

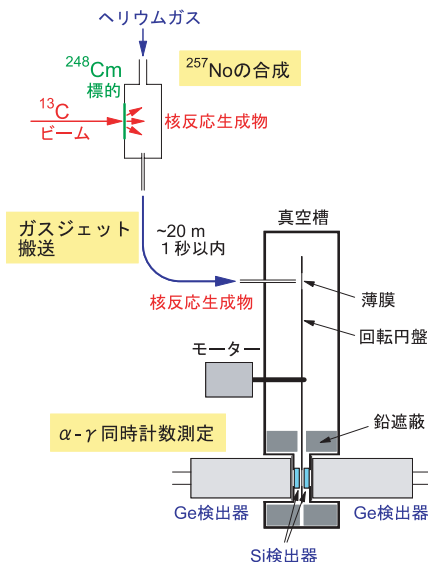


図 1 ^{257}No の α 核分光実験の概念図
 ^{248}Cm 標的に ^{13}C ビームを照射してできる核反応生成物は、ガスジェット搬送法により約 20 m の距離を 1 秒以内に搬送され、回転円盤上の薄膜に捕集される。捕集された試料は円盤の回転により測定位置に運ばれ、2 台の Si 検出器と 2 台の Ge 検出器によって α 線と γ 線の同時計数測定が行われる。

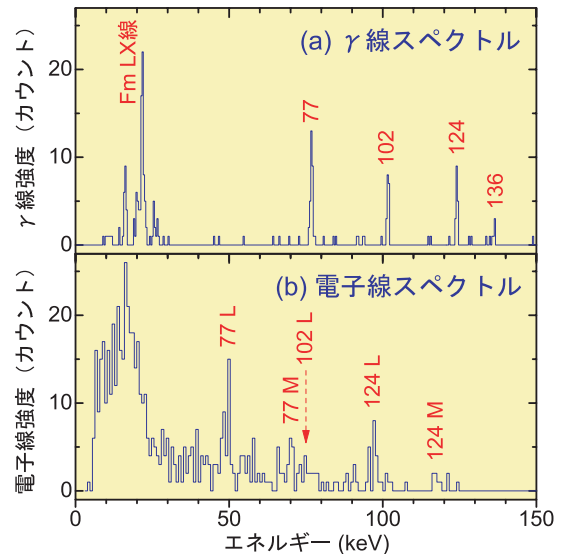


図 2 α 線との同時計数によって観測された ^{257}No の γ 線と内部転換電子のスペクトル
(a) γ 線スペクトル。エネルギーの値が書かれたピークが ^{257}No の γ 線。(b) 内部転換電子のスペクトル。数字は対応する γ 遷移のエネルギー、アルファベットは L 電子 M 電子などの内部転換電子の種類を表す。

5000 個の ^{257}No の α 線を検出し、それと同時計数する γ 線を観測した。図 2 (a) に観測された γ 線のスペクトルを示す。 ^{257}No の崩壊に伴う 4 本の γ 線を初めて観測することができた。

一方、内部転換電子の測定では、核反応で生成する大量の α 線放出核種が電子線測定の妨害となり、また自己吸収の少ない線源を作成する必要があるため、オンライン同位体分離装置 (ISOL) [4] を用いて ^{257}No の同位体分離をおこなった。この実験では、ガスジェット搬送した核反応生成物を ISOL の中の表面電離型熱イオン源に直接導入し、一価の正イオンにイオン化して 30 kV の静電場で加速したのち、分析電磁石を用いて質量分離した。質量分離した ^{257}No は Si 検出器の表面に打ち込まれ、周りに配置した別の 3 台の Si 検出器と合わせて合計 80% の検出効率で α 線と内部転換電子を同時計数測定した。イオン化効率の低さから分離効率は 0.4% と低かったが、時間をかけることで最終的に約 1000 個の ^{257}No の α 線を検出し、それと同時計数する内部転換電子を図 2 (b) のように観測した。77 keV と 124 keV の γ 遷移に対応する電子線のはっきりと観測されており、 α 線との強度比からこれらが M1 遷移であることが分かった。

3. ^{257}No 及び娘核 ^{253}Fm の核構造

図 3 (a) に今回の結果を基に構築した ^{257}No の崩壊

図を示す。娘核 ^{253}Fm の基底状態のスピンのパリティは既知であり、 $1/2^+$ [620] という一粒子軌道配位をとる。(数字は一粒子軌道を表す量子数。)一方、124 keV 準位は、M1遷移によって基底状態へ脱励起することから $1/2^+$ か $3/2^+$ のスピンのパリティを持つことが分かり、また崩壊の選択則から親核 ^{257}No の基底状態と同じ配位を持つ一粒子軌道準位であることが分かる。これらの条件から、124 keV 準位と ^{257}No の基底状態は $3/2^+$ [622] という一粒子軌道配位をとることが初めて明らかになった。

^{257}No の崩壊については過去に線測定のみ行われており、その結果を基に推定されデータブック[5]に掲載されている崩壊図(図3(b))は、今回の結果とかなり異なる。両者を比較すると、第一にこれまで基底状態へ遷移すると思われていた 8320 keV の遷移が、励起状態への遷移であることが明らかになった。また、8270 keV の遷移は存在せず、8220 keV の線と 50 keV の電子が同時に検出器に入ることで見れるサムピークであることが確かめられた。準位のスピンのパリティにも大きな違いが見られた。図3(b)では、 ^{257}No の基底状態のスピンのパリティが $7/2^+$ となっているが、この値は同じ中性子数を持つ軽い核の系統性から類推されたもので、実験的な根拠はない。本研究により、 ^{257}No の基底状態のスピンのパリティは同じ中性子数を持つ ^{255}Fm や ^{253}Cf とは異なり、 $3/2^+$ であることが初めて明らかになった。このことは陽子の数が増えるにつれて $7/2^+$ [613] という中性子の一粒子軌道と $3/2^+$ [622] という一粒子軌道のエネルギー順序が逆転していることを示しており、殻構造を明らかにする上で重要な成果である。

4. まとめと今後

核分光及び内部転換電子核分光によって、 ^{257}No の基底状態及び娘核 ^{253}Fm の励起準位のエネルギー・スピンのパリティ、一粒子軌道配位を初めて実験的に決定した。その結果、 ^{257}No の基底状態の中性子軌道配位は同じ中性子数を持つ ^{255}Fm や ^{253}Cf の基底状態とは異なることが明らかとなり、一粒子軌道のエネルギー順序の逆転が起きていることが分かった。

今回紹介したのは ^{257}No の結果だけであるが、現在他のノーベリウム同位体や更に重い原子核である ^{261}Rf の核分光実験を行っており、超重核領域の一粒子軌道のエネルギー間隔や順序を次々と明らかにしつつある。これらの原子核は、線核分光実験によって研究がなされた最も重い原子核であり、超重核の核構造研究の最先端であると言われている。また、線核分光によりスピンのパリティや一粒子軌道配位を実験的に特定できたことで、理論計算との比較・検討も初めて意味あるものとなり、超重核の核構造研究は今後新たな段階に進むものと思われる。

参考文献

- [1] K. Morita et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 73, 2593 (2004)
- [2] M. Asai et al.: Phys. Rev. Lett. 95, 102502 (2005)
- [3] Y. Nagame et al.: J. Nucl. Radiochem. Sci. 3, 85 (2002)
- [4] S. Ichikawa et al.: Nucl. Instrum. Methods B 187, 548 (2002)
- [5] Table of Isotopes, 8th ed., edited by R. B. Firestone and V. S. Shirley (Wiley, New York, 1996)

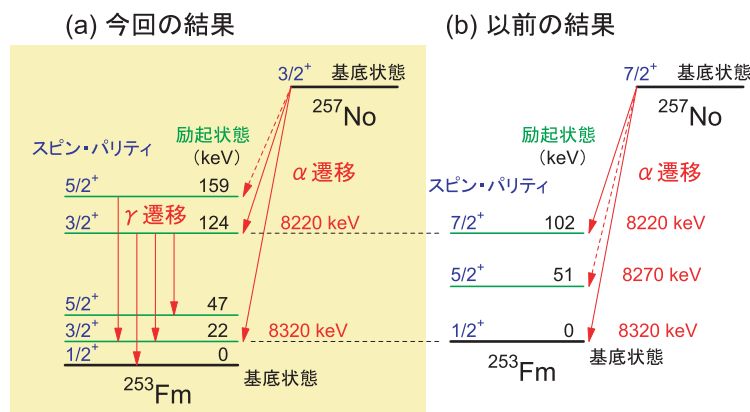


図3 ^{257}No の崩壊図
 (a) 今回の実験により得られた崩壊図。(b) 線測定の結果のみを基に推定して得られた以前の崩壊図。