

全吸収検出器を用いた長寿命核異性体の高感度検出及び寿命測定法の開発

A New Technique for Highly-Sensitive Detections and Half-Life Determinations of Long-Lived Nuclear Isomers by Using a Total Absorption Detector

浅井 雅人 超重元素核化学研究グループ

Masato Asai Research Group for Nuclear Chemistry of Superheavy Elements



- β 崩壊で励起される長寿命の核異性体を高感度で検出する新しい測定方法を考案しました。
- この方法は、他の方法では測定が極めて困難な数十マイクロ秒(μs)から数十ミリ秒の核異性体の寿命測定に特に有効です。
- この方法を用いて、 ^{162}Gd 及び ^{165}Gd の励起準位に存在する核異性体の半減期を、86.4 μs 及び585 μs と初めて決定することに成功しました。
- We developed a new technique to detect the existence of long-lived isomers populated via the β decay with a great sensitivity.
- This technique has an advantage in measuring half-lives especially in the range of a few tens μs to a few tens ms, which is extremely difficult for other general techniques.
- Using this technique, we determined, for the first time, the half-life of the isomer in ^{162}Gd as 86.4 μs and that in ^{165}Gd as 585 μs .

概要

原子核の構造や性質を調べる際に、励起準位に存在する核異性体に着目して研究を行うことは非常に効果的です。しかし、 β 崩壊で励起される核異性体のうち寿命が数十マイクロ秒 (μs) 以上のものを検出することは実験的に極めて困難です。本研究では、そのような長寿命核異性体を高感度で検出し且つ寿命を決定する新しい測定方法を考案し、未知核異性体の探索と寿命測定に適用しました。

本研究は、原子力機構先端基礎研究センター（佐藤哲也、塚田和明、長江大輔）、同研究炉加速器管理部（長 明彦、乙川義憲）、名古屋大学（柴田理尋教授、林 裕晃助教）、東北大学（篠塚 勉准教授等）との共同研究で行われました。また、原子力機構の平成20年度「萌芽研究」課題成果のひとつでもあります。

1. 研究の背景

原子核は、原子核を構成する陽子と中性子の数に依存して様々な構造や形状、性質を示します。これ

らの性質は、原子核の励起準位の構造に特徴的に現れます。励起準位の中でも比較的長い寿命を持つものは核異性体と呼ばれ、その存在は、ひとつの原子核の中に特異的な角運動量状態や変形状態が存在することを示しています。従って、核異性体の存在や性質を明らかにすることで、原子核構造に関する多くの物理的知見が得られます。

核異性体の寿命が数十 μs 以下の場合、核異性体に遷移する β 線と脱励起する γ 線を同時計数測定し、その時間差を記録することによって、非常に感度よく核異性体を検出し且つ寿命を決定することができます。一方、寿命が数十 μs 以上になると、偶然同時計数事象が増大し、通常の同時計数法では核異性体を検出することが極めて困難になります。

本研究では、大型のBGO検出器（用語1）2台で構成される全吸収検出器を用いて、他の方法では測定が極めて困難な数十 μs から数十ミリ秒 (ms) の寿命を持つ長寿命核異性体を高感度で検出し且つ寿命を決定する方法を新たに開発し、未知核異性体の探索と寿命測定に適用しました。

2. 研究の経緯

全吸収検出器とは、図1のように大型のBGO検出器2台で線源を挟み込み、 β 崩壊に伴って放出される β 線や γ 線をほぼ100%の効率で全エネルギー吸収測定する検出器で、元々は毎秒数個の生成量しかない短寿命核の β 崩壊Q値（用語2）を高効率に測定する目的で開発されたものです [1,2]。この全吸収検出器が、数 μ s以上の寿命を持つ核異性体の検出に極めて高い感度を有することに気付いたのが、この研究の発端です。

全吸収検出器では、 β 崩壊によって放出されるすべての β 線と γ 線が全エネルギー吸収されるため、 γ 線は同時に吸収される連続分布の β 線とエネルギー的に加算されてピークとして観測されず、エネルギースペクトルは図2(a)のような連続分布になります。一方、娘核の励起準位に数 μ s以上の寿命を持つ核異性体があると、核異性体からの脱励起 γ 線は β 線とは時間的に遅れて吸収されるため、核異性体の励起エネルギーに相当するピークとして観測されます。図2(b)は、全吸収検出器で測定したユーロピウム同位体 ^{162}Eu の β 崩壊のエネルギースペクトルですが、 β 線の連続成分に加えて、1449 keVに明瞭なピーク成分が観測されています。このピーク成分は、図2(b)右図のように長寿命の核異性体が娘核に存在することを示しています。更に、このピーク事象と直前に検出された β 線吸収事象との時間差を測定すれば、核異性体の寿命を決定できます。

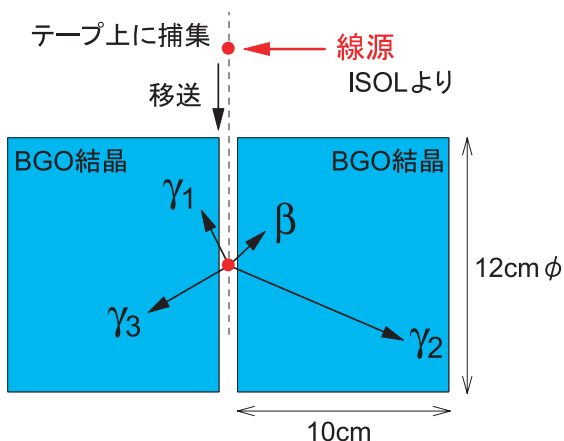


図1 全吸収検出器の概念図。
Fig.1 Schematic drawing of the total absorption detector.

全吸収検出器は100%に近い検出効率を持つため、核異性体起源のピーク事象の前に必ず β 線吸収事象が記録されており、線源強度を小さくすれば偶然同時計数の影響をほとんど受けずにミリ秒オーダーの寿命を決定することができます。検出効率が極めて大きいため、線源強度を数Bq程度（1Bq = 毎秒1個の崩壊率）にまで下げても測定が可能なことも、この手法の大きな特徴です。

そこで、この手法を ^{162}Eu 、 ^{165}Eu の β 崩壊で励起される半減期が未知の長寿命ガドリニウム核異性体 ^{162m}Gd 、 ^{165m}Gd の寿命測定に適用し、有効性を検証しました。

3. 研究の内容

^{162}Eu （半減期10.6秒）と ^{165}Eu （2.7秒）は、原子力機構のタンデム加速器を用いてウラン標的に32 MeVの陽子ビームを照射して、ウランの陽子誘起核分裂によって合成しました。核分裂で生成する数百種類に及ぶ大量の原子核の中から目的とする ^{162}Eu あるいは ^{165}Eu のみを迅速に（1秒以内で）取り出すため、生成物をオンライン同位体分離装置

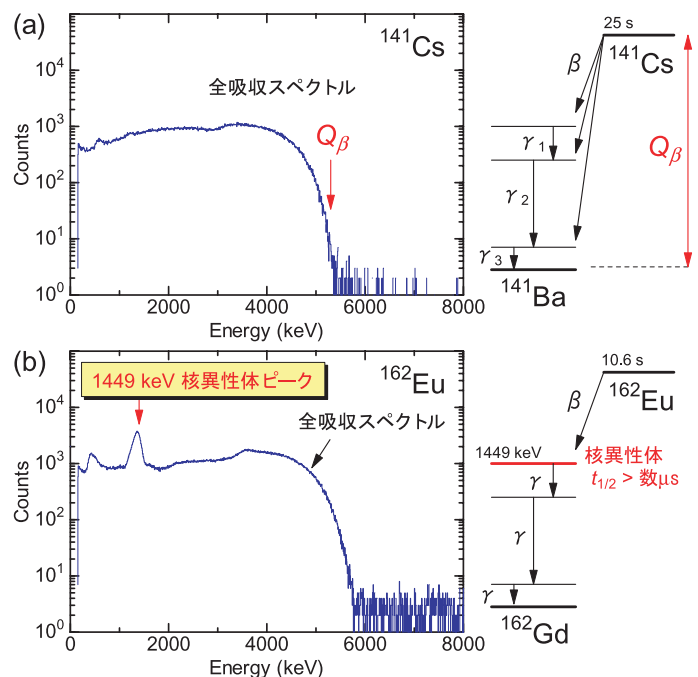


図2 (a) 全吸収検出器で測定したセシウム同位体 ^{141}Cs の β 崩壊のエネルギースペクトル。(b) 同、 ^{162}Eu のスペクトル。
Fig.2 (a) Energy spectrum measured with the total absorption detector for the β decay of ^{141}Cs . (b) Same as (a) but for ^{162}Eu .

(ISOL) を用いてイオン化・質量分離し、テープ上に捕集しました。捕集された線源は、一定時間毎にテープを移動させることで全吸収検出器の中心位置に運ばれ、放出されるβ線やγ線を全エネルギー吸収測定しました。ミリ秒オーダーの時間差の計測には通常の同時計数法が適用できないため、すべての検出事象に分解時間5ナノ秒の時間情報を付加して測定データを記録しました。

^{162}Eu については核異性体起源のピークが明瞭に観測されているので、その直前に検出された高エネルギー事象をβ線検出事象と見做してβ線とγ線の検出時間差を求めると、図3(a)のような崩壊曲線が得られました。半減期86μsの成分が明瞭に観測されており、わずか2時間の測定で100μsオーダーの長寿命核異性体の寿命を決定できることを実証しました。一方、崩壊曲線には半減期が7.7msの長い成分も観測されていますが、これは偶然同時計数に由来する成分であり、計数率90 cps (cps = counts per second) の相関関係のない2つの事象の検出時間差をプロットすると、このような崩壊曲線が描けます。計数率の影響を調べるため線源強度を1/3程度に下げて測定したところ、偶然同時計数成

分は減少し、長い成分の半減期も約20msと3倍程度に長くなりましたが、核異性体起源の崩壊曲線の半減期は変わりませんでした。異なる3条件で測定した結果の平均から、 ^{162}Gd の1449 keV核異性体の半減期を $86.4 \pm 1.1 \mu\text{s}$ と初めて決定することができました。

^{165}Eu の測定では線源強度が数Bqと非常に弱いので、30 cps程度の天然放射線由来のバックグラウンド事象に隠されてスペクトル上では図4(a)のように核異性体ピークは全く確認できませんでした。ところが190~290 keVのエネルギーを持つ事象のみを選んで直前のβ線事象との検出時間差を求めると、図3(b)のような半減期の短い成分が観測されました。そこで、今度は逆に検出時間差が10~1250μsと3210~4450μsの事象のみを選んでγ線スペクトルを作成すると、10~1250μsのスペクトルのみにも明瞭な核異性体ピークが現れました(図4(b)(c))。この結果、娘核 ^{165}Gd の267 keV準位が半減期 $585 \pm 31 \mu\text{s}$ の長寿命核異性体であることを初めて明らかにし、本手法がミリ秒オーダー未知核異性体の探索と寿命測定に極めて有効であることを実証しました。

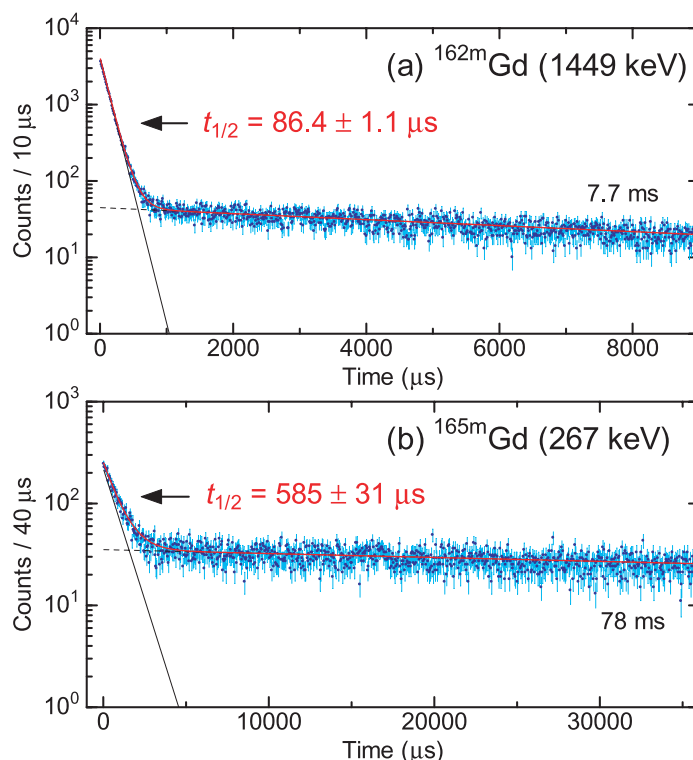


図3 (a) β線とγ線の検出時間差から作成した ^{162}Gd の1449 keV核異性体の崩壊曲線。(b) 同、 ^{165}Gd の265 keV核異性体の崩壊曲線。
Fig.3 (a) Decay curve for the 1449 keV isomer in ^{162}Gd derived from measured time intervals between β and γ detections. (b) Same as (a) but for the 265 keV isomer in ^{165}Gd .

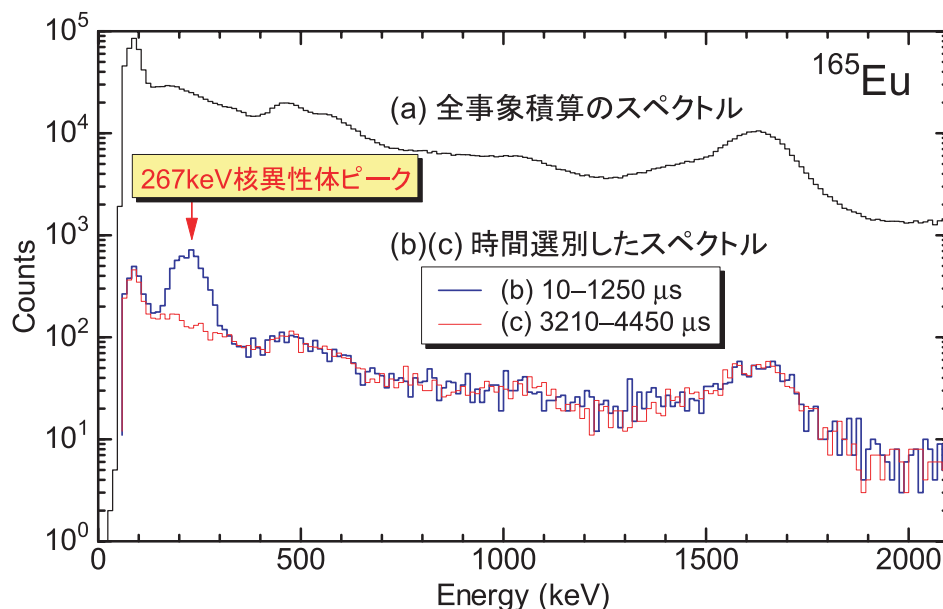


図4 全吸収検出器で測定した ^{165}Eu の β 崩壊のエネルギースペクトル。(a) 全事象積算のスペクトル。(b) β 線と γ 線の検出時間差が10～1250 μs の事象のみを選別したスペクトル。(c) 3210～4450 μs で選別したスペクトル。

Fig.4 (a) Energy spectrum measured with the total absorption detector for the β decay of ^{165}Eu : (a) accumulated for all the events, (b) selected for the events with a 10-1250 μs time interval, (c) selected for the events with a 3210-4450 μs time interval.

4. 成果の意義と波及効果

全吸収検出器が μs 以上の寿命を持つ核異性体の検出に極めて高い感度を有すること、未知核異性体の探索に極めて有効であること、他の方法では困難なミリ秒オーダー核異性体の寿命測定に特に有効であること、線源強度が数Bqの短寿命核に対しても本手法が適用可能であること、などを初めて提唱し、実証しました。

^{162}Gd , ^{165}Gd の励起準位の構造や核異性体の存在は、本研究を含む一連の我々の研究によって初めて明らかにされたものです。本研究で測定した ^{162}Gd , ^{165}Gd 核異性体は、回転楕円体に変形(4重極変形)した原子核に特徴的に現れる「K核異性体」と呼ばれるもので、核異性体の寿命から求められる γ 遷移の抑止係数は原子核の4重極変形の硬さを示す指標となります。今回得られた ^{162}Gd , ^{165}Gd 核異性体の抑止係数は、周辺のEr, Yb, Hf, W等の同位体に存

在するK核異性体の抑止係数より一桁以上大きく、希土類核の中でもこのGd周辺が最も4重極変形が硬いことを示唆する結果が得られました。

5. 今後の予定

この測定方法は、基本的に β 崩壊するすべての原子核に適用できます。今後は核分裂で生成する多くの不安定原子核に対して系統的に未知核異性体探索や寿命測定を行い、原子核構造を明らかにしていきたいと考えています。

参考文献

- [1] M. Shibata, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **459**, 581 (2001).
- [2] H. Hayashi, *et al.*, Eur. Phys. J. A **34**, 363 (2007).

用語の説明

1. BGO検出器

$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 結晶で製作されたシンチレーション検出器。比重が大きく、原子番号の大きいBiやGeを主成分とするため、高エネルギー γ 線に対する検出効率が極めて高い検出器です。

2. β 崩壊 Q 値(Q_β 値)

β 崩壊によって放出される全エネルギー値。親核と娘核の質量差に相当し、図2(a)のように β 線のエネルギースペクトルの最大値から実験的に決定できます。