

研究室だより

日本原子力研究所 原子核科学研究グループ

篠原 伸夫、大島 真澄

shino@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

oshima@jball4.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

私たちの研究グループでは、原子核の構造や化学的性質を調べることに、またその知識や手法を使って、原子力開発に必要な基礎データを供給すると同時に、新たな応用研究を展開しています。

原子核の構造に関しては、実験と理論の両面から研究を行っています。実験では主に、タンデム加速器施設（タンデム加速器＋超伝導ブースター）に設置した多重ガンマ線検出器 GEMINI（図 1 参照）を用いて、クーロン励起による原子核の電磁氣的性質や、核融合反応を用いた高スピン状態の研究を行っています。レーザー分光実験においても原子の超微細構造の測定から原子や原子核の構造を調べています。原子核理論では、モンテカルロ殻模型計算による核構造の研究を行っています。

放射性廃棄物の安全な処理・処分を目指したマイナー・アクチノイド（MA）の核変換処理研究では、加速器や研究炉を用いて MA の生成消滅過程を明らかにし、将来の MA の核変換処理に役立つ基礎データを取得することを目的としています。

核物理・核化学研究の研究手法を物質の元素・状態分析に応用する研究を合わせて行っています。まず、上述の GEMINI を使った多重ガンマ線分析法を、研究炉や加速器からの中性子と組み合わせた新しい非破壊微量元素分析法を開発し、地質学試料や金属材料試料など様々な試料への応用を図っています。また、陽電子が電子と衝突して消滅する際の陽電子消滅過程を用いた分析法の開発を行っています。以下ではこれらの研究の概要を紹介いたします。



図1：多重ガンマ線検出装置 GEMINI



2. 研究紹介

2.1 原子核構造の実験研究

原子核をクーロン力や核反応によって励起し、その状態から放出されるガンマ線を計測することで、励起準位や遷移強度、原子核の形状といった原子核の構造を調べる研究を行っています。

クーロン励起実験では、原研タンデム・ブースター加速器で原子核を加速し、そのイオンビームを標的核(主に Pb)に入射します。イオンビームのエネルギーを核力が関与しないぎりぎりの値に選ぶと、原子核は純粋に電磁氣的相互作用のみによって 2～数 MeV の励起エネルギーまで励起されますが、その励起プロセスは励起状態の電磁氣的性質によって記述されます。よって、励起プロセスを詳細に解析することにより、全ての励起状態間の ($E1, E2, E3, \dots, M1, M2, \dots$) 電磁転移確率を、核模型に依らずに求めることが出来ます。また、他の手段では導出することが困難な励起状態の電気 4 重極モーメント (Q) や原子核の変形度を知ることができるユニークな特徴があります。

このクーロン励起による完全核分光手法の原理は 10 年以上前に提案されましたが、私たちは調べたい原子核をビームとする projectile excitation を採用し、前方から後方まで大立体角で粒子を位置も含めて検出することによって、これを実用化しました。これには、脱励起に伴って角度依存性を持って放出されるガンマ線を効率よく測定する多重ガンマ線検出装置“GEMINI”、入射粒子の散乱角を精度良く測定する位置感应型粒子線検出器“LUNA”、得られたガンマ線放出強度から電磁氣的転移行列要素を最小自乗フィッティングにより求める計算コード“GOSIA”などの開発が重要な鍵となりました。最近では GOSIA 解析及び次項で紹介する理論計算を高速化するため、並列計算機 HELIOS を導入しています。最近の研究成果としては、偶偶核 $^{70,72,74,76}\text{Ge}$ を系統的に測定し、低励起状態で球形とラグビーボール型変形という 2 つの変形状態が共存していて、中性子数 38～40 間では各々の

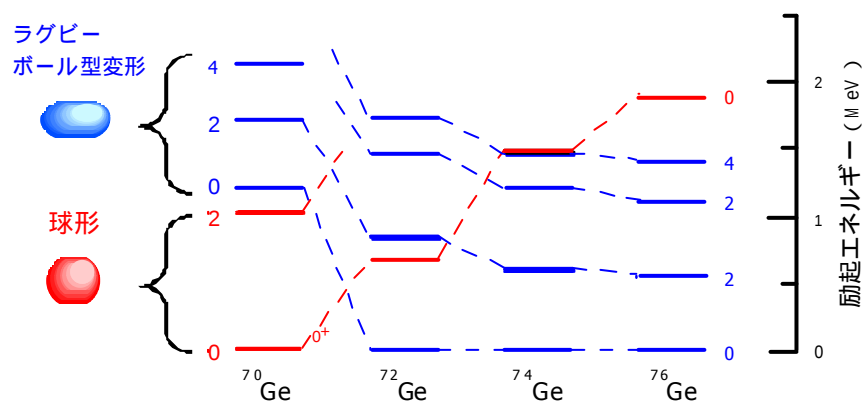


図 2. $^{70,72,74,76}\text{Ge}$ アイソトープの変形状態。両端の数字は核スピンを表す。パリティは全て+。似た内部構造を持つ状態を破線で結んだ。クーロン励起実験により、各アイソトープの基底状態、励起状態は球形とラグビーボール型変形という 2 つの変形状態に分類されることが分かった。

変形を持つ 2 つの 0^+ 準位が逆転していることを明らかにしました(図 2 参照)。 ^{68}Zn 、 ^{78}Se などでも同様の変形共存が見られましたが、面白いことに ^{98}Mo においては、変形度は同じで葉巻型と 3 軸非対称変形が共存していることが分かりました。

核融合反応を用いた高スピン状態の研究では、GEMINI を使ったガンマ線同時計数実験により、様々な特徴を持つ回転バンド構造を明らかに出来ました。質量数 140 領域での強い M1 転移で結ばれる回転バンド (M1 バンド) の発見、質量数 150 と 180 領域で観測された、葉巻型変形の対象軸方向に大きな角運動量成分を持つ回転バンド (high-K バンド) の斜軸回転模型による分析、質量数 180 領域奇奇核での指標逆転現象の系統的な研究等がその代表例です。

コリニアー・レーザー分光は高い精度で原子準位間のエネルギー差を測定することが出来、原子スペクトルの超微細構造 (原子核の電磁気モーメントに基づく原子準位の微細な分離) や同位体シフトの情報が得られます。これより、原子核の電磁気モーメント、核荷電半径の変化などの原子核構造の情報が得られます。原研東海では、原子炉やタンデム加速器などを用いて放射性同位体を製造できる利点を活かして、Pr, Ce, La など軽い希土類元素の放射性同位体に対するコリニアー・レーザー分光を行っています。さらに、強いレーザー光を固体に照射した時に、原子やイオンが放出されるアブレーション過程を高融点元素の高感度分光に応用するために、アブレーションで生成した原子やイオンの振る舞いをレーザー誘起蛍光分光という手法で調べています。

2.2 大規模殻模型理論の進展

“安定核、不安定核を問わず、全ての原子核の性質を微視的に理解したい。” これは原子核構造の理論が目指す、究極の目標の一つです。しかし、原子核の構成要素である核子の数は数百にも及ぶため、ほとんど全ての原子核は核力から出発した厳密なアプローチによって記述することは不可能です。そのため、着目する性質の本質を捉え模型によって原子核構造研究がなされているのが現状であり、今後もこうしたアプローチによって研究がなされていくと思われます。

殻模型は、原子核の殻構造のみを仮定した、いわゆる第一原理に近いアプローチです。しかしながら、その代償として多くの場合非常に巨大な行列の対角化を必要とします。現在の計算機性能ではおよそ一億次元程度までの行列を取り扱うことが可能ですが、それでも鉄より重い原子核のほとんどは殻模型によっては計算不可能です。私たちは東京大学の研究グループらと共同して、モンテカルロ殻模型という新しい計算アプローチによってできるだけ多くの原子核の構造を殻模型によって記述すべく研究を進めています。具体的には、中性子過剰な Na、Mg 同位体では $N=20$ の魔法数が消滅していることが実験的に知られていますが、魔法数消滅を特徴づける基底状態の大きな変形を定量的に再現することに成功しました。さらに、原研タンデム加速器で今後なされるであろう重い短

寿命核ビームを用いた実験と密接に結び付いて、不安定核の新たなパラダイムを構築するのに役立つと期待されます。

2.3 核変換の基礎研究

放射性廃棄物の安全な処理・処分は今後の原子力利用における重要な課題であり、MAの核変換処理研究はその一つです。本研究では、研究炉を用いて放射性廃棄物核種の基礎データを測定しています。寿命の長い核分裂生成物やMAの放射性廃棄物核種について、中性子による核反応を研究して原子核の生成消滅過程を明らかにします。すなわち、長寿命核分裂生成物 (^{134}Cs 、 ^{135}Cs) や MA (^{241}Am 、 ^{243}Am) の中性子捕獲断面積、MA (^{237}Np 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am など) の遅発中性子放出率、核分裂収率及び核分裂断面積を測定してきました。またタンデム加速器を用いて陽子並びに重イオン誘起核分裂反応によるMAの生成消滅過程を明らかにして、将来の核変換処理に役立つ精度と正確さに優れる基礎データを取得することを目指しています。

これまでの ^{241}Am の中性子捕獲断面積及び中性子による核分裂収率の測定では、照射中の中性子捕獲反応で生成する $^{242\text{m}}\text{Am}$ 、 $^{242\text{g}}\text{Am}$ 及び ^{242}Cm 、あるいはこれら核種の核分裂生成物に起因して測定誤差が大きく影響されることがわかりました。測定値を用いてこの影響を補正することで、正確なデータを得ることができます。MAを原子炉で照射すると、様々な核反応が同時に起こります。 ^{241}Am の場合には、試料の同位体組成が時間とともに顕著に変化します。たとえば熱中性子を1年間照射すると、93.3%の ^{241}Am は他のMAや核分裂生成物に核変換することがわかりました。

2.4 核物理・核科学手法を用いた応用研究

(1) 多重ガンマ線分析法による微量分析

前述の GEMINI を用いた多重ガンマ線分析法を、原子炉中性子を用いた放射化分析に応用した新しい微量元素分析法を開発しています。中性子放射化分析は元素定量法として広く用いられていますが、一般に試料中に存在する主要成分の妨害により微量成分の検出が困難になります。本法はガンマ線同時計数を行うことにより、通常の1次元のスペクトルの代わりに2次元マトリクスを得て、1次元法に比べ1,000倍の分解能を達成しました。同時にバックグラウンドも1/1,000以下になるため1,000倍以上の感度を実現できることがわかりました。

JRR-3M(熱・冷中性子ビーム)で気送管照射し、前述の GEMINI を用いて多重ガンマ線測定を行うと、最高1 ppt オーダーの感度で、50元素同時に、(化学分離不要のため)迅速定量出来ることがわかりました。また、多元素を含む定量済み標準試料を同時照射して、ガンマ線強度から定量する比較法によって、(統計誤差を除き)%オーダーの精度が得られました。

多重ガンマ線分析法の応用例をいくつか示します。その一つは地質学試料中のイリジウムの分析です。イリジウムは隕石中に豊富で約 1 ppm 程度含まれていますが、地表中には僅かで約数十 ppt 程度しか存在しません。よって、地質中のイリジウムは地表に飛来した隕石の良い指標となりますが、極微量のイリジウムの分析は大変困難でした。多重ガンマ線分析法では 10 ppt のイリジウムの非破壊分析に成功し、地表でのバックグラウンドレベルの分析を可能にしました。

長寿命放射性ヨウ素 ^{129}I は安定な同位体であるヨウ素 ^{127}I に対して 10^{-11} レベルの分析が現在可能ですが(図3参照)条件を最適化することにより検出限界は 10^{-13} になり、 ^{129}I の長半減期(1570 万年)を利用したメタンハイドレートの年代測定などへの応用が期待されています。

放射化分析での感度は中性子断面積以外に、崩壊半減期やガンマ線分岐比に依存するため、元素により大きく異なります。これに対し、中性子捕獲反応で生成される高励起状態からの(即発)ガンマ線を測定する即発ガンマ線分析はほとんどの元素に適用出来ます。しかし、感度は一般的に放射化分析に比べて劣りますので、多重ガンマ線分析法で感度を改善する試みを KENS(パルス中性子ビーム)及び JRR-3M において行っています。これまでに米に含まれるカドミウムを 0.1ppm の感度で迅速定量出来ることを確かめました。

中性子放射化分析や即発ガンマ線分析における定量精度は、用いる核データに強く依存します。このため、核データの高精度化のための実験も計画しています

(2) 陽電子消滅過程の研究

陽電子は電子の反粒子であり、お互いに引き合って消滅します。その際に放出されるガンマ線を観測することによって、状態分析を行う手法が陽電子消滅法です。このユニークな特徴を生かし、金属や半導体中の欠陥をはじめ、高分子の自由体積や、放射線誘起の活性種の研究など多く

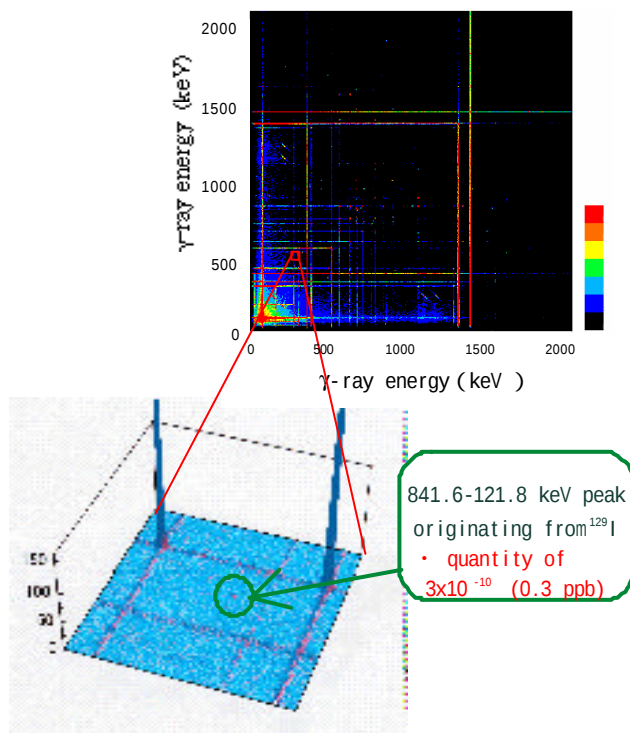


図3：ヨウ素 129 の分析例。上が 2 次元全マトリクス、下は拡大図。

の研究が行われてきました。しかしながら、陽電子の消滅過程ではまだ未解明な部分が多く残されています。陽電子は物質中で、ある確率で電子と結合状態(ポジトロニウム、Ps)を作りますが、これまでポリエチレンなど高分子中の低温域(-100 以下)で見られた非常にゆっくりと Ps が増加する現象は、高分子の物理構造の緩和によると考えられてきました。最近我々は、この現象は、陽電子を試料に入射した際に電離により過剰電子が形成され、その一部が長時間安定に存在するために、陽電子がそれら電子と結合し、Ps 形成を行う為である事を明らかにしました。このように、陽電子を用いた状態分析を高度化するためには、陽電子の物質中における挙動を正確に知ることが重要です。

3. おわりに

原子核研究は原子力開発とともに発展してきて、現在も依然として新型原子炉や核変換などの技術開発のために重要な基礎研究分野ですが、同時に放射線利用が医療などの分野で大きく応用されていることを一例として、その知識や研究手法を応用して社会に直接貢献することが可能であります。地球資源・環境についての考え方、価値観が大きく変動する現在、こうした研究は原子力研究のパラダイムシフトをもたらす可能性があり、我々グループの重要なミッションと考えています。

