

特集：新センターにおける先端基礎研究

新研究グループの紹介

■ 極限重原子核を調べる



極限重原子核の殻構造と反応特性の解明グループ

■ 宮 武 宇 也 ■

1. はじめに

原子核は核力が支配する量子多体系であり、陽子と中性子の組み合わせにより約6000核種が存在すると予測される。その大半が1マイクロ秒から数時間の寿命をもつ短寿命核で、現在まで知られているのは2000種強に過ぎない。最近の加速器及び測定技術の進歩により、存在限界にまで達する原子核の構造や反応機構の研究が可能となった。極限領域の短寿命核研究からは、集団をなす核子の新たな安定性、多体効果が見いだされつつあり、更なる実験的探求と理論の展開が必要となっている。また広範な短寿命核に対する構造・反応機構の情報を元に、宇宙における元素生成や星の

生成・消滅過程の解明を進められる時期が来た。

旧日本原子力研究所では、所の特徴を生かした質量数の大きな重原子核についての実験及び理論的基礎研究が幾つかのグループにおいて進められてきた。新法人発足を期に極限重原子核物理のフロンティアにおける研究をさらに推進するため、これらのグループを統合し、新たに「極限重原子核の殻構造と反応特性解明グループ」が誕生した。

本グループの研究テーマは、(1)極限重原子核の殻構造の解明、(2)極限重原子核の反応特性の解明、(3)天体における重元素生成機構の解明、(4)適用範囲の広い原子核理論の構築からなる。テーマ(1)―(3)の主な研究拠点は東海研究開発センター原子力科学研究所のタンデム実験施設である。本施設には多種類の重イオンビームを供給できるタンデム加速器と超伝導ブースター加速器が稼働している。実験室には高性能の質量分離器 (ISOL) や反跳生成核分離装置 (RMS) などの大型実験装置が整備されている。さらに2001年度から始まったKEKとの研究協力の下、核分裂反応などで生成した短寿命核や高強度重イオンビームによる研究のために短寿命核加速実験装置 (TRIAC) が設置され [1]、2005年度より稼働している (図1)。テーマ(4)は、先端基礎交流棟に設置されたワークステーションクラスターを中心に行われている。どの研究テーマも国内研究者のみならず、ドイツ、ロシア、アメリカ、カナダ、韓国などの国外の研究者との連携的研究の色彩を有している。

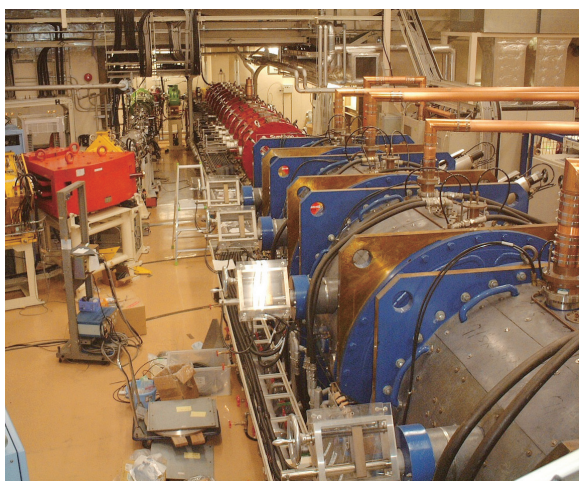


図1 TRIACのSCRFQ (赤色) IH (青色) 線形加速器

2. 研究テーマの紹介

2-1 極限重原子核の殻構造の解明

最近、陽子数112を越える超重核の候補が相次いで発見された[2-4]。質量の重い原子核は何処まで存在しうのかな？ 超重核は陽子間に働くクーロンエネルギーが大きいので原子核の殻効果なしには存在できない。陽子数114、中性子数184が二重閉殻で安定になると考えられているが、陽子数120や126で閉殻になるとの理論予測もある。超重核の殻構造研究から超重核の存在原因を明らかにし、重い原子核の上限を予測できる。

殻構造を記述する原子核の単一粒子軌道は球形核では縮退しているが、変形に伴い分離しエネルギー的に低い軌道が現れる。そこで、この軌道が現れる超ウラン元素を測定し、直接測定が難しい $Z=114$ 、 $N=184$ 領域の閉殻構造を研究する。

実験ではキュリウムなどの標的による核子移行反応で超ウラン原子核の励起状態を生成し、そこからの脱励起 γ 線や内部転換電子を測定する。全核反応の千分の一以下の事象を選択するために、本グループで開発した高分解能 ΔE - E 検出器を用いる。 $^{238}\text{U}+^{18}\text{O}$ 核反応による ^{240}U の脱励起 γ 線スペクトルを図2に示す。原子番号と質量数で散乱粒子を分離し、初めて ^{240}U の回転バンドからの γ 線観測に成功した実験である[5]。さらに高分解能な検出器開発により測定対象を生成率の小さな原子核まで広げる予定である。重イオン核子移行反応を用いた超ウラン元素領域の核構造研究は全く未知の分野であり、新しい研究領域の創成を期待している。

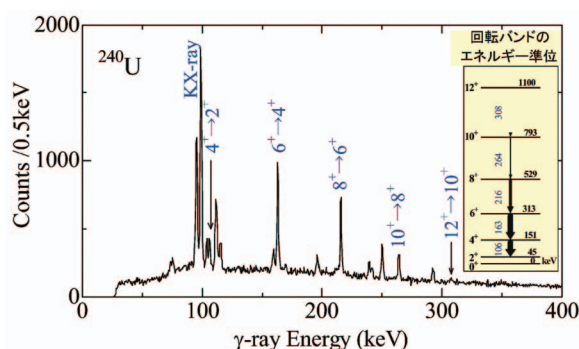


図2 ^{240}U の γ 線エネルギースペクトル。回転バンド特有の規則的 γ 線が見えている。青字は、同定された γ 転移の始・終状態のスピン・パリティを示す。

ている。

並行して精密質量分析による超ウラン元素の核構造研究を進めている。この研究では超ウラン元素をイオン化し質量分離した後トラップしたイオンを熱運動エネルギーレベルにまで冷却し、多重反射飛行時間分析器などによって6~7桁の精度で質量を測定する。質量分離の部分は実績のあるISOLを利用し[6]、超ウラン元素用に高効率のイオン源を新たに開発する。現在、高電場とバッファーガス内でイオンを捕獲・冷却するためのリニアイオントラップ装置を開発中である。超ウラン元素には従来の核種同定法が不可能な自発核分裂する原子核や半減期の長い超重核があり、質量の直接測定による核種同定法は不可欠な技術になるであろう。

2-2 極限重原子核の反応特性の解明

超重核は主に球形核同士の重イオン融合反応で合成されて来たが、融合原子核内の巨大なクーロン斥力によりその殆どが核分裂し、超重核の生成断面積としては、pb程度かそれ以下ときわめて小さい。本グループでは、より多くの超重核合成のための新たな方法として希土類元素やアクチノイド元素のように大きく変形した原子核による密着融合反応機構を探索している。

原子核同士を融合するには、クーロン障壁に抗して接近するためのエネルギーがいる。重い原子核では原子核同士が互いの中に深く侵入するためのエネルギーがさらに必要となる。しかしエネルギーを注ぎ込みすぎると、熱くなりすぎて直ちに核分裂する。互いに矛盾する条件を解決する方法の一つが変形核との密着融合である[7,8]。

変形した原子核の赤道方向から衝突させると融合が促進すると期待される(図3)。これを調べるため重イオンビームを変形核標的に当て融合した重原子核を反跳生成核分離装置(RMS)で分離し、 α 壊変に伴って放出される連続放射線を検出する。この方法で1個の超重元素でも識別できる。衝突エネルギーを細かく変化させ、核変形の向きや原子核内の中性子数などによる融合確率の変化を調べる。

超重核を効率よく合成するには入射核と標的核の選択と同時に、生成確率が最大となる入射エネルギーの選択が重要となる。エネルギーが数MeVずれると生成確率は約1/10に激減する。最適なエネルギー選択に

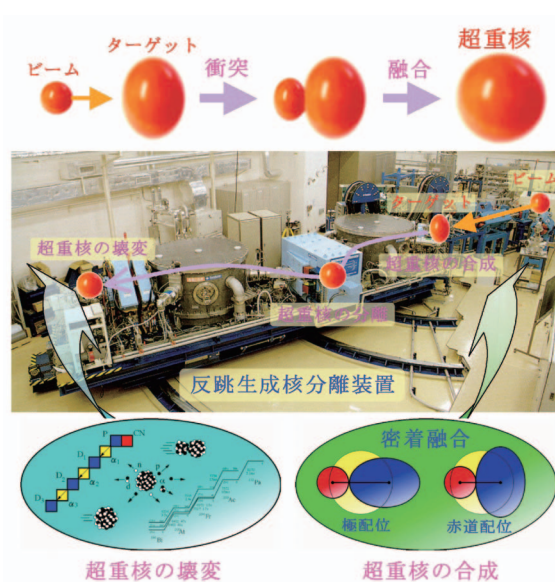


図3 RMSによる変形核による融合反応機構研究

不可欠な融合障壁の位置は実験的に測定されておらず、数MeV程度のばらつきがある理論予測によらざるを得なかった。そこで準弾性散乱断面積の詳細な励起関数測定から融合障壁の位置を実験的に求める画期的な測定を開始した。

変形核による融合反応機構の研究と融合障壁分布の実験的測定から超重核合成への新たな道が開けるものと期待している。

2-3 天体における重元素生成機構の解明

ビスマスよりも重い元素は、高温・高密度な爆発的天体環境下での早い中性子捕獲 (r-過程) によって生成された。最近の天体観測や大規模な元素合成ネットワーク計算の飛躍的進歩により、超新星爆発や中性子星の衝突などの具体的天体事象と結びつけてこの過程を理解する道が見えてきた。キーとなるのは、中性子過剰核が果たす役割の定量的解明にある。これらの核の反応率や崩壊様式、質量といった核物理パラメータを実験的に求める事で、候補となる天体環境での温度や物質密度それらの時間推移などの天体物理パラメータを検証する。

r-過程で生成された元素の存在比分布には質量数が80,130,195の場所にピークがある。これは中性子数

が50,82,126の魔法数をもつ中性子過剰不安定核の中性子捕獲反応が逆反応と平衡状態になり、r-過程の滞留が起こるためである。滞留核の核物理パラメータが実験的に求まれば、存在比ピークの観測値との比較からr-過程の中性子数密度と温度との相関が決まる。80,130の質量数ピークに対する滞留核研究では、この相関はある広がりをもって一致しているが存在比ピークの形状を再現できない事が分かった[9]。本研究ではTRIACからの ^{145}Cs ビームなどを用いた二次核反応により、到達不可能であった質量数195ピークに対応する滞留核の半減期、崩壊様式の測定を目指す。また、80,130の質量数ピークに対する滞留核の中性子捕獲反応率を(d,p)反応から求め、3つの存在比ピーク形成に必要な中性子数密度の時間情報を得る予定である。

先の研究で示された存在比ピーク形状の不一致の原因には、従来の原子核模型が中性子過剰な原子核の性質を予測出来ていない可能性がある。そこで上記の研究に並行してスピン偏極核分光法[10]による滞留核近傍の殻構造研究を始めた。この研究では従来の核分光法で得られる物理量に加えて、励起エネルギー準位のスピン・パリティ決定や核モーメントの測定を行う。図4は2005年に完成したスピン偏極生成・観測装置である。短寿命核を核スピン偏極させる方法には、偏向レーザーによる光ポンピングや、偏極した電子を捕獲させて核偏極に移行させる方法などがあるが、ここでは最も広範な元素を偏極させられる傾斜薄膜法を採用した。現在TRIACによる性能実証試験が進んでいる。

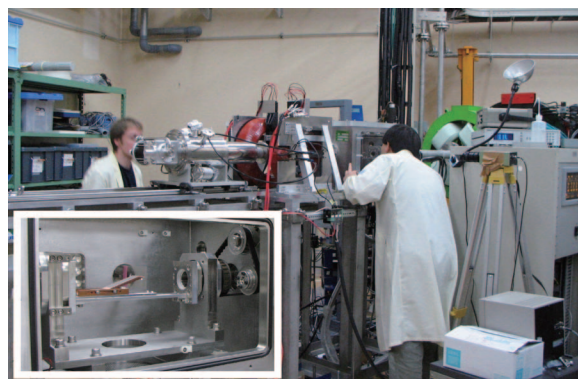


図4 TRIACの実験室に設置された偏極生成・観測装置。白枠囲みは、偏極生成に用いる傾斜炭素薄膜スタック。

2-4 適用範囲の広い原子核理論の構築

短寿命核における殻構造の変化や超変形状態の出現、重元素の多様な崩壊モードの競合は、短寿命核の特殊性を示すと共に原子核全体に対する新たな普遍的理解の必要性を示唆している。そこで実験的課題とも密接に連携しながら、原子核構造の特殊性と普遍性の統一を目指し原子核の殻構造と超重核の安定性に重点を置いた理論研究を進めている。

研究の柱の一つは、超重元素を含む原子核全領域の質量、構造と崩壊の包括的理解の追求にある。 β 崩壊のみの崩壊様式を示す軽い軽・中重核と異なり、重・超重核では多様な崩壊様式が共存する。特に重要なのが核分裂現象で、その理解には基底状態近傍のみならず多次元の大規模変形をも含む原子核エネルギー計算が不可欠である[11]。本グループが計算した ^{289}Ds に対するポテンシャルエネルギー表面の結果を図5に示す。現状では核分裂に至る大きな変形状態の計算ができないなどの制約があるが、今後様々な形状の原子核に大域的に適用可能な理論を確立してエネルギー表面を計算し、それを基に原子核の質量を定量的に予測する。さらに自発核分裂、 α 崩壊、 β 崩壊、陽子放出などに対する部分半減期の計算を系統的に行い、未知原子核やアイソマー、原子核の存在限界の予測を行いたい。

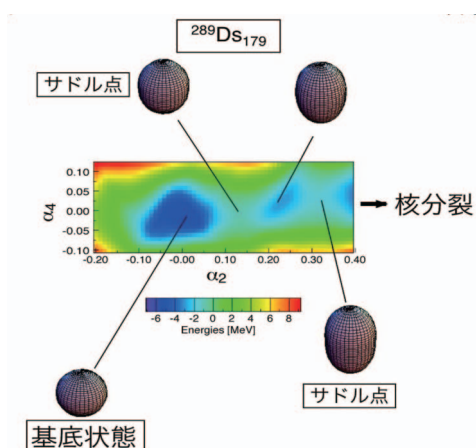


図5 ^{289}Ds に対するポテンシャルエネルギー表面。横軸 α_2 は四重極変形度、縦軸 α_4 は十六重極変形度を示す。 α_2 が正に増える方向に進むのがプロレイト変形(ラグビーボール型)であり、この方向に変形が進み、核分裂が起こる。

一方、極限的状況にある殻構造の変化は未解決の問題である。本グループでは中性子数20近傍の短寿命核領域での変化を殻模型で研究し、特異な構造が出現するメカニズムを追求してきた。一連の研究で、短寿命核における殻構造は核力の性質を反映して安定核のそれから大きく変化することを見出した[12]。このメカニズムによる殻構造の変化は核図表上に広く現れると予言されるが、定量的にはよくわかっていない。そこで殻構造を変化させる微視的メカニズムとしてのテンソル力に着目し、中性子数20領域の殻構造の変化の記述と、中性子数28の魔法数が不安定核領域でどのように生成・消滅するかを理論的に予測する。さらに、その結果の重原子核への適用可能性を前述の質量模型と組み合わせて検討したい。

3. 最後に - 超重元素の科学にむけて -

人類未踏であった極限重原子核の広大な研究領域を原子核物理の立場から切り拓く事が、本グループの研究目的である。そのため、開拓的性質を持つ研究内容には実験装置の不断の進歩・改良が求められる。特に重要なのはTRIACと超伝導ブースター加速器との接続による最先端の実験環境実現である。これにより核分裂片などの中性子過剰な短寿命核ビームや高強度の重イオンビームを用いた核反応を利用して国際的にユニークな研究が進むものと期待している。同時にこれらのビームは、先端基礎研究センターにおいて核化学の立場から極限重原子核領域の探求を行う「核化学的手法による超重元素の価電子状態の解明」グループにとっても重要な研究手段となる。先端基礎研究センターの核物理グループと核化学グループという両輪の研究によって、生まれてまもない超重元素の科学がおおいに進展するものと期待している。

参考文献

- [1] H. Miyatake *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **B204**, 746(2004).
- [2] K. Morita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 2593 (2004).
- [3] Yu. Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. **C72**, 034611(2005).

- [4] Yu. Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. C**70**, 064609(2004).
- [5] T. Ishii *et al.*, Phys. Rev. C**72**, 021301(R)(2005).
- [6] M. Asai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 102502(2005).
- [7] S. Mitsuoka *et al.*, Phys. Rev. C**65**, 054608 (2002).
- [8] K. Nishio *et al.*, Phys. Rev. Lett., **93**, 162701 (2004).
- [9] A.G.W. Cameron, Astro. Space Sci. **82**, 123 (1982).
- [10] H. Miyatake *et al.*, Phys. Rev. C**67**, 014306 (2003).
- [11] 小浦寛之、橘孝博、日本物理学会誌60号 9 月号 717(2005).
- [12] Y. Utsuno *et al.*, Phys. Rev. C**70**, 044307 (2004).

