【基盤研究（S）】

短寿命原子核の網羅的質量測定による重元素の起源研究の展開

研究代表者	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授 和田　道治（わだ　みちはる）　研究者番号:50240560
研究課題情報	課題番号：22H04946　研究期間：2022年度～2026年度 キーワード：質量測定、ｒ－過程、短寿命原子核、MRTOF質量分光器

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

太陽系には、水素からビスマスまでの81種の安定な元素と、トリウム・ウランのような放射性元素が存在し、それぞれの同位体を含めるとおよそ255余種の原子核があるが、その存在比は大きく異りその理由は自明では無い（図１）。とりわけ鉄より重い元素は、太陽のような普通の恒星内での融合反応では生成することができず、爆発的な過程によるエネルギーの供給が必要である。具体的には中性子を吸収して出来た短寿命原子核がベータ崩壊して原子番号を一つずつ上げることでより重い元素が生成される。この中性子捕獲の速さが千年程度の遅い中性子捕獲過程（s-過程）と１秒程度の速い中性子捕獲過程（r-過程）があり、それぞれ特徴的な原子核存在比のピークを形成する。ｓ-過程は安定核に沿って進行するため実験的にもほぼ理解されているが、r−過程は実験的に発見さえされていない短寿命原子核を経るため未知の領域にある。r-過程の経路は、その経路付近の原子核の質量（より具体的には質量の差分から得られる中性子分離エネルギー）によって決まる。とりわけ経路の中性子魔法数の地点にある滞留点は、白金やテルルのピークの源であり、その魔法数性を最も明確に示すのは質量の二階差分から得られる殻空隙エネルギー(ΔS2n)である。

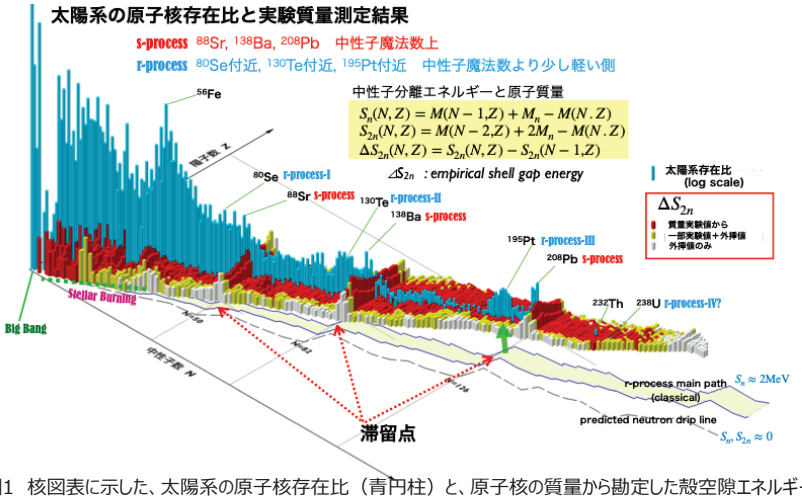

図1　核図表に示した、太陽系の原子核存在比（青円柱）と、原子核の質量から勘定した殻空隙エネルギー（角柱）

●網羅的質量測定の実験技術

元素合成過程の実験的解明には関与する千核種以上の短寿命原子核の網羅的質量測定が最も重要である。それを実現するためには既存の施設・技術では到底不可能であり、新しい技術に基づいた装置を開発する必要があった。これまでの研究によって理化学研究所の加速器施設RIBFのGARIS、BigRIPS-SLOWRI、およびKEKの装置であるKISSの３箇所の短寿命核ビーム供給源において、それぞれのビームをイオントラップに捕集するRFカーペットガスセル装置と、短寿命核イオンの質量を能率よく精密測定するMRTOF（多重反射形飛行時間測定式質量分光器）を整備しいよいよ網羅的測定が実行可能になった。

●MRTOFによる質量測定例

MRTOF質量分光器は、一対の静電ミラーからなる装置で、イオントラップに捕集した短寿命核イオンをバンチで入射し、ミラー間を数100回往復させた後、引き出して検出器で飛行時間を精密に測定する。その精密な飛行時間を参照イオンの飛行時間と比較することによって質量を決定できる。10ミリ秒程度の飛行時間で質量分解能100万を達成しており、他の方式の質量測定装置を含めても世界一の性能である。
この質量分光器は、同時に多数のイオンの質量測定を実行すること可能であり、元素の化学特性に依らずに高速Riビームをイオントラップに捕集できるRFカーペットガスセル装置と合わせることで、極めて高い能率で網羅的質量測定を実行できる。

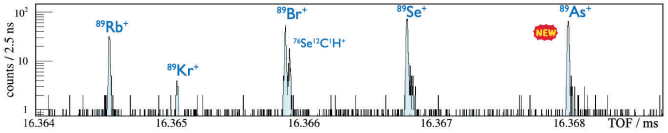

図2　BigRIPS-SLOWRI施設で測定した89Asとその同重体イオンの飛行時間スペクトル

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●中性子魔法数の成立範囲の検証

中性子数N=50, 82, 126の魔法数がより中性子過剰な領域、すなわちr−過程の経路に近いところでも成立しているかを網羅的質量測定によって検証する。軽い原子核では魔法数の破れや別の中性子数での出現が観測されており、r-過程起因ピークの起源の直接的な検証になる。また新たな準魔法数が見いだせれば、希土類元素ピークなどの起因の解明になる。

●質量公式の確度向上

白金やウランの領域では、実験的にr−過程経路まで達するのは依然として難しい。そのためできるだけ中性子過剰な原子核の質量を精密に測定することによって、その先の質量公式による予言の確度を大幅に向上でき、r−過程のネットワーク計算の確度を圧倒的に高めることが期待できる。

●超重元素（ニホニウム）の質量測定

現在発見されている超重元素同位体は、ベータ安定線の反対側にあるため、r−過程では生成されないが、中性子過剰な超重元素同位体からさらにその先にあると期待されている「安定の島」までr−過程が達している可能性がある。それを確かめるにはこの極めて中性子数が大きな領域での準魔法数の有無が大きく寄与するとされており、超重元素の質量測定はその発見に繋がる。

ニホニウムにはロシアで発見された中性子がより多い同位体がある。これは日本で発見されたニホニウムと異なり、α崩壊の連鎖が既知の原子核に繋がっていないため、同定の確度が低いとされている。Z=114以降の元素は全て同じ系列に属しており、それらの新元素の原子番号の正確な確認のために、ニホニウムの精密質量測定を計画している。

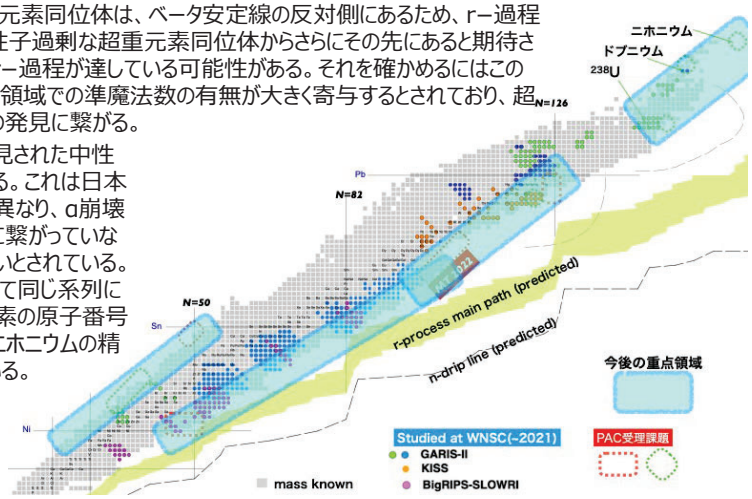

図3　核図表に印した準備研究で測定した400余の原子核と、これから質量測定する領域

ホームページ等	https://research.kek.jp/group/wnsc/