

大強度重イオンビームが先導する量子科学フロンティア

① ビジヨンの概要

ウランまでのすべてのイオンを加速する大強度の超伝導線形加速器を開発し、超重元素の『安定の島』に向かう極限原子核を対象とする超重元素科学で世界をリードする。スマート社会の実現とエネルギー問題解決のための研究開発と合わせ、世界的な量子科学フロンティア拠点将我国に構築する。

② ビジョンの内容

【超重元素科学】『安定の島』に向かう超重元素の新たな原子核領域を開拓するとともに、重原子核に固有の現象である核分裂現象の解明を目指す。核分裂は、原子力エネルギー利用の基礎となる現象である。基礎科学においては、核分裂に対する原子核の安定性が超重元素の存在限界を決め、周期表の限界を支配する。また、天体における r-プロセス元素合成の終端で起こる「核分裂リサイクル」は、自然界の元素組成を変化させ、生命の起源にも関わる。本研究では、重原子核どうしの衝突で生じる多核子移行反応によって中性子数の多い原子核を開拓する。着目する領域の原子核は、主に自発核分裂、新現象の発見と新原理の構築を目指す。これにウランビームを供給し、アクチノイド標的核と反応がら数時間から数年にわたる寿命を持つと考えられる位体は、超重元素の化学実験を可能にし、超重元素の軌道の変化を明らかにして、周期表の再構築を行

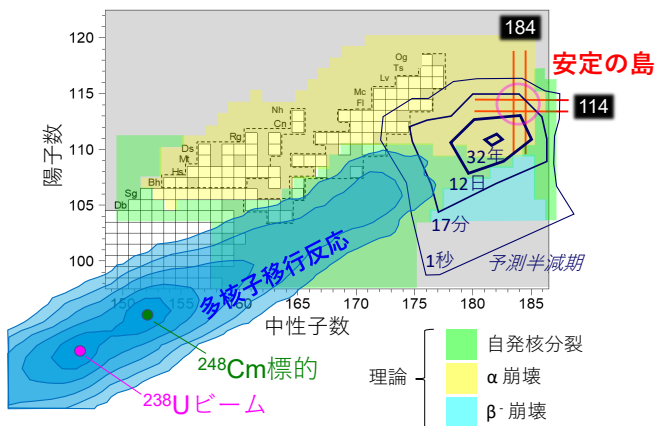


図 1 超重元素の『安定の島』に向かう原子核の生成

拓する。着目する領域の原子核は、主に自発核分裂で崩壊すると考えられ（図1）、新たな核分裂の観測によって、新現象の発見と新原理の構築を目指す。これを実現するため、超伝導線形加速器を開発して大強度のウランビームを供給し、アクチノイド標的核と反応させる。『安定の島』近傍の原子核は、超重元素でありながら数時間から数年にわたる寿命を持つと考えられ、本研究で『安定の島』の特徴を捉える。寿命の長い同位体は、超重元素の化学実験を可能にし、超重元素で顕著に表れる電子の相対論効果、すなわち最外殻電子の軌道の変化を明らかにして、周期表の再構築を行う。

【原子力先端材料科学】大強度重イオンビームにより、喫緊の社会問題の解決を目指す。宇宙線由来の半導体デバイスのソフトエラーを低減することはスマート社会の実現と宇宙開発にとって不可欠である。この問題を解決するため、電子のスピンを活用した「スピントロニクス」デバイスの新たな製法を構築する。磁性体中のスピンの素励起であるスピン波や、その準粒子であるマグノン¹は角運動量の伝搬であり、ジュール熱の原因である電荷の移動を伴わない。したがって、マグノンをキャリアとして用いれば、電子機器の省エネルギー化・高速化が期待できる上、電荷に対するソフトエラーが原理的に生じない「究極の耐放射線素子」が実現される。この「マグノン量子回路」を実現するには、磁性領域／非磁性領域をシャープな境界で隔てるパターンニングを広い範囲で構成する必要があるが、従来の化学的・物理的手法では実現していない。本開発では、大強度重イオンビームによりハイスループットなマグノン量子回路の作製手法を確立し、そのマグノン伝搬や量子回路としての特性を評価して、耐放射線機器の基礎加工技術を確立する。

【原子力エネルギー安全研究】安全な軽水炉によるエネルギーの安定供給を支えるため、事故時の高温下でも水素の発生を抑える事故耐性燃料（ATF）被覆管の早期実現を目指した材料評価技術を確立する。中性子ビームによる照射実験に対し、重イオンビームを用いることで被覆管の物理・化学的安定性を早期に検証できる照射実験設備を実現する。

③ 学術研究構想の名称

大強度重イオンビームが先導する量子科学フロンティア

④ 学術研究構想の概要

理論的に存在できる原子核の数は、6,000～7,000 核種とされているが、人類は、このうち 3,300 程度しか合成していない。そのうちの多くは中性子数の多いアクチノイドから超重元素領域に分布しており、『安定の島』の核構造が存在限界を大きく広げている。本課題は、元素の存在限界の解明を目指して超重元素の新たな領域を開拓するとともに、重元素に固有の現象である核分裂を観測して新たな現象と核分裂過程の解明を行う。核分裂は、変形した原子核の内部構造と原子核の集団的な運動に支配され、量子多体系としてユニークな観

測対象である。これまで核物理は、基底形状での観測によって原子核をモデル化しているが、極端な変形形状を扱う核分裂の知見を統合することで、原子核を包括的に理解する。化学においては、寿命の長い同位体を手にすることで、様々な超重元素分子の合成が可能になり、新たな化学を拓くことになる。

電子の電荷を利用したデバイスは、宇宙線由来のソフトエラーに弱い。また、近年、AI の利用が爆発的に増加し、エネルギー需要を極端に増加させる問題を含んでいる。本研究で道を拓く「スピントロニクス素子」により、エネルギー需要の解決とソフトエラー問題の解決に道を拓く。また、喫緊のエネルギー需要の解決のため原子力エネルギーの安全性を確保する。

⑤ 学術的な意義

(1) 超重元素を対象とした核分裂を解明することは、元素周期表がどこまで延びるか、また宇宙で元素が作られる仕組みの理解につながる。ここで得られる知見は、人類共通の知の財産となる。

(2) 省電力で動作し、かつ耐放射線性の高いスピントロニクス素子の開発は、スマート社会、宇宙開発において、将来の社会基盤を支える技術となる。大強度重イオンビームで実現する超微細加工技術は、他の物理的加工や化学処理では実現しない新たなデバイス作成技術となる。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

多核子移行反応は、中性子数の多い重元素同位体を生成する方法として、世界的に注目されている。この反応で新たな超重元素領域を開拓するには、(1) 大強度の重イオンビーム、(2) 生成核の分離技術、および(3) α 放射性のアクチノイド標的の利用が必要となる。原子力機構(JAEA)では、東海タンデム加速器施設において反跳生成核分離装置を高度化し、(2) の技術を高度化している。また厳格な規制対象となる(3)の利用についても、アインスタイニウム(原子番号 99)試料のイオン照射を実現するなど、他ではできない研究を実現した。また、長寿命の α 射性同位元素の廃棄物を減容処理・処分できる国内唯一の放射性廃棄物施設を有しており、実験で生じる廃棄物の処分まで含め、長期的な戦略で研究を遂行できる。本研究は、タンデム加速器に代わる(1)の大強度超伝導線形加速器を実現することにより、超重元素フロンティアで世界を牽引する。さらに、照射材料の分析や医療用同位体の生成においても、同キャンパスにある「廃棄物安全試験施設」や「燃料試験施設」を利用でき、他では不可能な量子科学国際拠点を築くことができる。

⑦ 社会的価値

超重元素の存在限界を知り、元素の起源を理解することは、物質に対する国民の知的好奇心を高め、若い世代に科学を目指すモチベーションを与える。スピントロニクス技術は、エネルギーの有効利用、スマート社会、宇宙開発にとって重要な技術となる。安全な軽水炉の技術は、資源の乏しい日本にとって重要なエネルギー供給を支える。本提案は、持続可能な開発目標(SDGs)における「エネルギー」「産業と技術革新」等 に貢献するものである。

⑧ 実施計画等について

・実施計画

最初の5年間で、(1) 超伝導線形加速器(イオン源、RFQ、冷凍設備を含む)、(2) 建屋(加速器+実験エリア)、および(3) 実験装置の高度化(反跳生成核分離装置および材料イオン照射装置)を完成させる。5年目から加速器利用をコミュニティに供与するとともに、「超重元素科学」、「原子力先端材料科学」、および「原子力エネルギー安全研究」を実施し、合計10年で成果を挙げる。

・実施機関

日本原子力研究開発機構(国内外の大学・研究機関とも連携)

・総経費 200 億円

・所要経費 (1) 超伝導線形加速器(イオン源、RFQ、冷凍設備) 70 億円、(2) 建屋(加速器+実験エリア) 100 億円、(3) 実験装置の高度化(反跳生成核分離装置および材料イオン照射装置) 10 億円、(4) 運転費・運転維持費 10 億円(2 億円/年)。

⑨ 連絡先

西尾 勝久(日本原子力研究開発機構)