

RI ビームファクトリーの高度化による重元素科学の躍進

① 計画の概要

理化学研究所「RI ビームファクトリー」(RIBF) は2007年の稼働開始以降、世界最高強度のRI ビームを供給し、魔法数の異常性の発見など、数多くの成果を上げている。また宇宙重元素合成過程(r-過程)研究においても、これまで取得が不可能だった実験データを大量に蓄積し、革命的な状況を生み出している(図1参照)。本計画ではRIBFを高度化し、現状のRI ビームをさらに大強度にすることにより、「RI ビームを用いた新同位元素生成」を可能とする。これにより現施設では到達できない超ウラン元素の中性子過剰領域にまで研究範囲を拡大する。RIBFで端緒を開いた魔法数研究とr-過程研究の領域を大きく拡大するとともに、超重元素領域で魔法数を二つもつ「安定の島」に到達する方法を探求する。

超重元素研究では、熱い融合反応を利用して中性子過剰な領域の118番を超える超重元素の発見を目指す。これらの未知元素の探索には本提案で実現する大強度一次ビームが必須である。これらの超重元素は「安定の島」近傍に位置するため、その寿命等の測定を通じ、この領域の魔法数効果を調べることが可能となる。本計画の高度化を欧米で建設中の次世代RI ビーム施設が性能を発揮しはじめる2025年頃に完了させることにより原子核物理学における我が国の先導的地位をさらに高めたい。本計画は、日本の原子核研究を代表する四機関、理研、阪大核物理研究センター、KEK素粒子原子核研究所・和光原子核科学センター、東大原子核科学研究センターが有機的に連携し、研究を推進する。国際的学術コミュニティと緊密な連携をもって計画を推進する。

② 学術的な意義

RIBFは原子核物理学の新時代を拓いている。中重核領域までの中性子過剰核を生成し、新現象の発見と新しい原子核描像の構築、宇宙での重元素合成過程(r-過程)研究などを推進し、多くの優れた成果を上げている。これまでに魔法数の異常性、新奇ハロー核、テトラ中性子などが発見され、これら特異な性質は、中性子過剰核の弱束縛性に加え、多体力効果によると指摘されている。r-過程については、中性子星合体からの重力波とそれに伴う元素合成が観測されたことにより、従前の理論を基盤とした研究から、実験データによる定量的な議論へと進展しつつあり、革命的な状況を生み出している。本計画では中性子スキンなど特異な性質を持つ中性子過剰核を大強度RI ビームとして用いる核反応により、未開拓な領域の同位元素を生成する「RI ビームを用いた新同位元素生成」を提案する。これにより中性子過剰領域を超ウラン元素まで開拓することができ、RIBFで端緒を開いた魔法数研究とr-過程研究を拡大して、重い中性子過剰核を包含する新しい原子核描像の構築とr-過程の全貌解明、すなわち元素の起源の完全解明に向けて飛躍的に研究を発展させる。

本計画で拡大する中性子過剰核をガンマ線分光や精密測定などを利用して調べ、中性子数 $N=58, 90$ での新魔法数探索、 $N=50, 82, 126$ の魔法数の健在性を調べ、r-過程に関連する核データの取得、中性子捕獲反応、核分裂研究などを展開する。113番元素発見により日本初の命名権を獲得した超重元素研究は、熱い融合反応を利用して中性子過剰な領域の118番を超える超重元素の発見を目指す。これらの超重元素研究により超重元素領域での魔法数効果を調べることが可能となる。二重魔法数が生み出す「安定の島」に迫り、そこに到達する反応法を探求する。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

2007年より本格始動したRIBFは、2019年現在、世界の他施設の100~1000倍以上のRI ビーム生成能力を誇っている。一方欧米では現RIBF施設を越える性能を目指して新施設の建設が進んでいる。

RI ビームを供給できる施設としては、In-flight型とISOL型に大別される。欧米で建設されているCERN・HIE-ISOLDEやフランス・SPIRAL2はISOL型で、RI ビームの最大エネルギーは核子当たり5 MeV程度であり、また強度はRI 元素の化学的性質に大きく依存する。In-flight型では米国・FRIB、ドイツ・FAIRが挙げられ、核子当たり数100MeVのビームが供給できる。RIBFはIn-flight型の施設であり、すべての元素のRIを供給できることに加え、本計画の高度化により核子あたり5~20MeV程度の低速RI ビームや超低速RI ビーム(全エネルギーで30keV以下)を強化する。これにより、各国の計画が完成した後も、強度では世界に匹敵し、エネルギー範囲では世界を遥かに凌駕するRI ビームの利用が可能となり、引き続き原子核物理学分野で世界を先導することができる。

④ 実施機関と実施体制

国立研究開発法人理化学研究所・仁科センターは本計画の全体に関わる基盤整備および研究立案の責任を担う。国内外の研究機関との連携体制を構築し、本計画を推進する。現在のRIBF施設の運営法を踏襲し、国際評価委員会、国際研究課題採択委員会などを通じて、研究計画の議論・立案を行い、内外学術コミュニティと緊密な連携をもって計画を推進する。本計画を共同提案する阪大核物理研究センター、KEK素粒子原子核研究所、東大原子核科学研究センターとの間で四者協議会を発足させ、責任を分掌し、全体計画の実施・運営を進める。

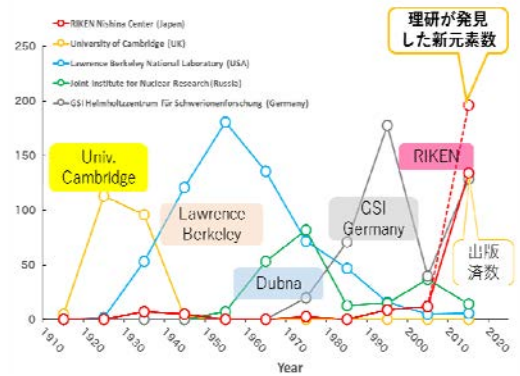


図1 各10年毎の施設別・新同位体発見数

阪大核物理研究センターは次世代高分解能ガンマ線検出器の開発を担当する。重元素領域の分光研究には必要不可欠の検出器であり、安定の島近傍核を含む不安定核の核分光研究を展開する。その実現のため、理研・仁科センターと相互に分室を開設し、強い連携のもと国内外の研究コミュニティのイニシアチブをとる。

KEK 素核研は理研・仁科センターとの連携研究のもと、本計画で高度化を行う元素選択型質量分離器(KISS)をRIBFに設置している。2014年にはKEK 和光原子核科学センターを開設し、KISS 実験プログラム全体の運営を担当している。さらに超低速RI生成装置(SLOWRI)や多重反射型飛行時間測定器(MRTOF)を含む超低速短寿命核供給施設全般の高度化を担当し、重元素領域の精密核分光を展開する。

東大原子核科学研究センターは2000年よりその活動の拠点を理研和光キャンパスに置いて活動しており、高分解能スペクトロメータSHARAQ、低エネルギーRIビーム生成装置CRIB、RI減速器OEDOをRIBFに設置、既に多くの成果を上げている。ビームイオン源や加速器高度化においても理研との共同運営を行って来た。本計画においては、世界的にも未開拓な低いエネルギー領域のRIビームを供給、これによる研究を推進する。

⑤ 所要経費

本計画は、既に実施済みであるRIBF加速器入射系の一部超伝導化と理研リングサイクロトロンの高周波系増強を最大限に生かし、新方式であるビームリサイクル技術に基づく荷電変換等長リングを導入することにより、一次ビームの強度の増強を図るものである(図2参照)。また、ビーム強度の増強に適応するため、既存のRIBF加速器の高周波系と、RIビーム生成分離装置のビームダンプ及び放射線遮蔽の増強が必要である。内訳を下記に示す。

【理研担当分】総額(初期投資):100億円

・RIビーム発生系

荷電変換等長リング1 1台 30億円

荷電変換等長リング2 1台 35億円

超伝導リングサイクロトロン高周波系

および取り出し系増強:26億円

RIビーム生成分離装置遮蔽増強:9億円

なお、建設後の年間運営費は40億円を想定している。

【連携研究機関担当分】総額(初期投資):40億円

【KEK素粒子原子核研究所担当分】

・KISSアップグレード、高純度RI分光ライン

【東大原子核科学研究センター担当分】

・OEDO高度化、反応生成物分析器、アクティブ標的

【阪大核物理研究センター担当分】

・次世代高分解能ガンマ線検出器

⑥ 年次計画

本計画は、欧米垂で建設中の次世代RIビーム施設が性能を発揮しはじめる2025年頃に完成・稼働させる予定である。これにより、日本の加速器施設が、世界の原子核物理学研究を引き続き先導することとなる。さらに本計画では、低速RIビームを利用した新しいプログラムを展開することにより、未知の研究領域を開拓する。

ビームを発生する加速器系の具体的な年次計画は以下のとおりである。

2020年度:超伝導リングサイクロトロン高周波系改修開始。

2022年度:荷電変換等長リング2製造開始。

2024年度:荷電変換等長リング1製造開始、RIビーム生成分離装置遮蔽増強着手。

2025年度:400pAでの運転開始

2028年度:2000pAでの運転開始

本計画の目玉は荷電変換等長リングの発明である。新しく作成する荷電変換リングの設計は着実に進行している。大強度RIビーム発生系の標的・遮蔽および既存加速器の高周波系の改造・更新については設計方針が確定しており、年次計画通りに高度化を行う目途が立っている。

⑦ 社会的価値

113番元素ニホニウムの命名は、日本の基礎科学研究の金字塔であり、日本国民に広く祝福された大ニュースとなった。本計画によって118番を超える新元素の発見を行い国民の付託に応えたい。この加速器増強は、現在その効用が有望視されている α 崩壊核アスタチン等を核医薬品に応用する道も開く。

社会応用面においては、原子核研究は原子力研究の根本的な基礎基盤を担うものである。2011年の東日本大震災で起こった福島原子力発電所の事故は、原子核基礎研究を推進しているコミュニティの社会貢献を再考する契機となった。これまで放射性廃棄物の減容と資源化を目指した長寿命核分裂片の反応研究を行い、2018年度21世紀発明賞受賞という評価を受けた。本計画では、将来の実用化に向けた核反応データの蓄積を進める。

⑧ 本計画に関する連絡先

延興 秀人(理化学研究所・仁科加速器科学研究センター)

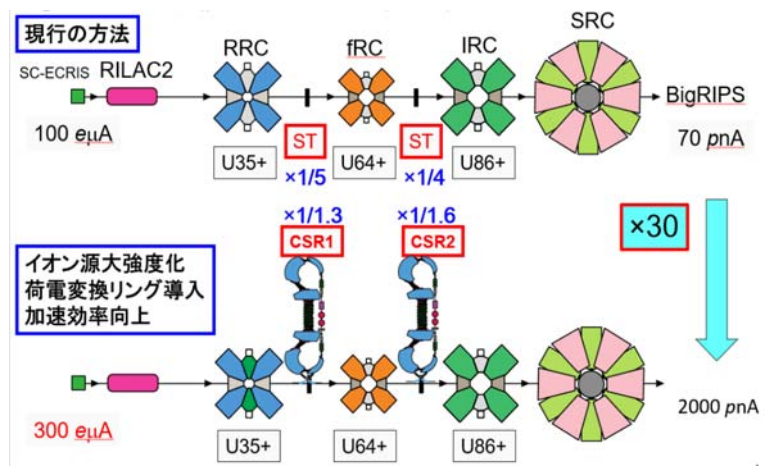


図2 荷電変換リング等導入、30倍の強度達成