

RIビームファクトリーが切り拓く不安定核の物理



櫻井 博儀

理化学研究所仁科加速器科学研究センター
sakurai@ribf.riken.jp

陽子、中性子で構成されている原子核の核構造と核反応の研究は、近年の加速器・実験技術の進歩により飛躍的に発展している。約1万種の原子核が存在すると予想されており、その内、自然に安定に存在する安定核は約300種、人類がこれまで生成した不安定核(RI)は約3,300種である。理化学研究所・重イオン加速器施設「RIビームファクトリー(RIBF)」のRI生成能力は、2007年に施設が稼働した後、世界トップであり、新たに発見されたRIは200を超えている。RIBFで供給される大強度のRIビームを利用した世界最先端の実験研究が行われている。

大強度のRIビームは、「超伝導リングサイクロトロン(SRC)」で加速された重イオンを標的に照射し、重イオンを核反応で壊すことによってつくられる。様々な反応生成物はビームとほぼ同じ速度をもって前方に放出され、標的の下流に配置した「RIビーム生成装置(BigRIPS)」で、研究対象のRIを収集・分離し、実験装置へと輸送される。SRCの加速エネルギーとBigRIPSの性能は、ウランイオンの核分裂反応で生成したRIを効率よく収集できるように決定されている。その理由は、ウランは陽子に比べて中性子が過剰なため、中性子過剰なRIが生成されやすいからである。

RIBFが完成する前、原子核物理学の教科書に書かれてある二つの常識、「魔法数」と「飽和性」は、軽い中性子過剰な不安定核の諸性質が調べられるようになると、不安定核では通用しないことがわかってきた。これらの常識は、安定核やその近傍の不安定核の研究によって確立しており、「魔法数」は原子核にも原子と同様に殻軌道が存

在し、閉殻になる陽子数、中性子数が魔法数である。「飽和性」により、原子核の密度は、質量数に依らずほぼ一定で、原子核の半径は、質量数の3分の1乗でスケールする。RIBFで開拓される未知の不安定核領域での核構造研究が進められており、理論と実験が協働して新たな常識を確立することに挑戦している。

不安定核は、宇宙での元素合成過程においても重要な役割を担う。短寿命の不安定核が大きな役割を担う過程は、r-過程である。rはrapidを意味し、数秒程度で鉄からウランに至る元素合成が進むと考えられている。r-過程が起こる場所は、超新星爆発や中性子星合体である。r-過程の天体モデル計算には、未知の中性子過剰核の諸性質に関するデータが必要であり、RIBF完成前は原子核の理論計算による予想値データのみであった。RIBF完成後、初めてr-過程に関与する中性子過剰核を人工的に生成し、その性質を調べることが可能となり、r-過程の研究が展開されている。

この他、中性子星の構造や重力波解析に必要な中性子物質の状態方程式の研究も注目を集めており、これに関連した“原子番号0の原子核”の研究、三体核力、重イオン衝突実験の研究がRIBFで行われている。また、RIビームとして高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命のRIを選択することで、廃棄物処理に関連した反応研究も展開されている。

上記のようにRIビームがカバーする研究テーマは幅広い。RIBFの増強により重い元素の領域を新たに開拓し、核分裂などの新たな反応データを取得する計画も議論されている。

用語解説

超伝導リングサイクロトロン(SRC)：

RIBFの重イオン加速器群のなかの最終段の加速器で、超伝導電磁石を利用したリングサイクロトロン型としては世界初。水素からウランまでのすべての元素を核子あたり345 MeVまで加速できる。ウラン238のイオンを加速した場合、全運動エネルギーは82 GeVで、国内の加速器で最大である。



RIビーム生成装置(BigRIPS)：

加速された重イオンビームを標的に照射して生成した、ビームとほぼ同じ速度で進む反応生成物を収集・分離し、RIビームとして供給する装置。RIビームのエネルギーは核子あたり200-250 MeV。超伝導四重極電磁石を採用することで、核分裂生成物の約半分を収集することができる。この装置の下流に3台の磁気スペクトロメータが配置されており、核反応を利用した研究が推進されている。

