

## 極限原子核のフロンティア開拓 ——ニホニウムとRIビームファクトリー——

本 林 透 (理化学研究所仁科加速器科学研究センター motobaya@riken.jp)

### 原子核フロンティアの開拓

1980年代に始まるRIビーム<sup>\*1</sup>は、原子核の研究に大きな変化と進展をもたらした。理化学研究所(理研)は、いち早くその可能性に着目し、1990年より高速RIビームを用いた実験を始めた。加速器の性能と相まって、軽い不安定原子核のビーム強度は世界を凌駕し、さらに、新しい研究手法を次々に開発することにより、原子核や元素合成の研究に中心的な役割を果たすようになる。

このRIビームによる開拓は、研究の豊かな将来を予感させた。比較的軽い領域に限られていたビーム核種の拡大や、ビームの大強度化を進め、研究の飛躍的發展を図ったのが、2007年に実験研究を開始したRIビームファクトリー(RIBF)<sup>1)</sup>の新施設である(図1)。

軽い中性子過剰核に見られた中性子ハローは、より重い原子核でどう現れるのか、魔法数の異常性は中性子数の大きな領域に一般的に見られるのか、多彩な様相を示す原子核変形の理解に資する新しい現象はあらわれるか、また、どのくらい中性子と陽子の数のバランスを崩すまで原子核でいられるのか、重い元素を作り出すr過程とは、どう起きているのか、関わる不安定原子核の性質はどのようなものか、中性子過剰な核物質の性質と中性子星の生成はどう関わるのか、そうした様々な問いには、開拓された原子核のフロンティアを舞台に多彩な研究を展開することによって、初めて答えることができるだろう。RIBF新施設は、世界に先駆けてその期待に応えるべく建設された、RIビーム生成能力は飛躍的に増大し、現在、世界他施設を凌駕している。例えば、この10年に世界で発見された新同位元素の大部分はRIBFによるもので、100種を超える。<sup>2)</sup>

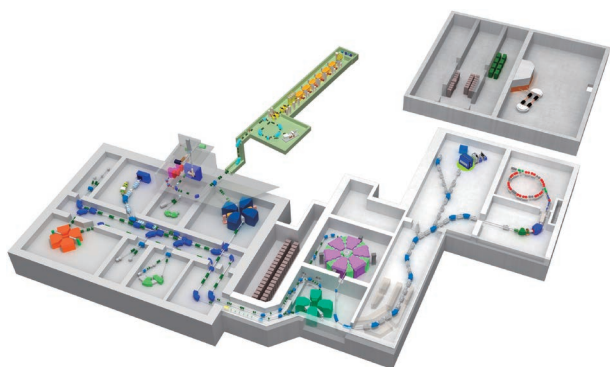


図1 RIビームファクトリー鳥瞰図。

### 超重原子核への挑戦——113番元素ニホニウム

2017年11月末、113番元素の名前がニホニウム(Nh)と決まった。日本で見いだされた初めての新元素である。元素の発見には長い歴史があるが、その人工合成には原子核の陽子の数(原子番号)を変える必要がある。したがって、超重元素への挑戦は大きな陽子数を持つ原子核へのフロンティア開拓、と行うことができる。ニホニウム合成では、RIBFの一部分である線型加速器からの<sup>70</sup>Zn原子核のビームと、標的核<sup>209</sup>Biとの融合反応が用いられた。超重核合成の断面積は非常に小さいため、大強度の重イオンビームは研究の要である。一方強力なRIビームを得るためにも大強度のビームが必要であり、加速器開発の共通の目標となった。

融合を起こさせる条件の設定は「微妙」だが、理研のグループは、112番元素合成までの経験を踏まえ、ビームの運動エネルギーを350 MeVとした。ビームと標的の組み合わせの選択は、「冷たい核融合」<sup>\*2</sup>といわれる考え方によっている。これは、核融合の結果できる原子核(複合核)の励起エネルギーを低く抑えて、中性子放出の際の核分裂を抑制しよう、というものである。複合核生成に続いて起きる $\alpha$ 崩壊の連鎖を観測し、エネルギーが知られている原子核に到達したところで、連鎖を溯って超重核生成が確認される。9年にもわたった実験で、113番元素からの $\alpha$ 崩壊連鎖を3例観測した。

大強度の重イオンビーム、重イオン核融合反応、磁気分析、 $\alpha$ 崩壊連鎖測定など、原子核物理学の様々な技術を駆使し、新元素の生成という物理学、化学上の基本知識の増進に寄与することができた。<sup>3)</sup> 今回の命名で、周期表の第7周期が完成し、119、120番元素と続く次の周期への取り組みが、日本(理研)とロシアで既に始まっている。

### RIビームによる原子核の研究

RIをビームとして二次反応等に利用する可能性は、1950年代から論じられていた。最初のRIビームは、米国バークレー国立研究所で光速の数十%に加速した原子核を、標的の原子核に衝突させることによって得られた。RIBFは、この高速の原子核ビームによる生成法を用いている。<sup>\*3</sup> 以下、理研のRIビームを用いた研究から得られたいくつかの重要な進展を紹介する。

### 原子核の密度は一定でない——中性子ハロー

陽子に比べて中性子が非常に多い<sup>11</sup>Li核等で、二次標的核との反応断面積が急に増大することが最初に観測された。中性子の分布が異常に広がったハロー（キリスト教絵画などに見られる光背）の存在を示す。RIBFでは、新たに<sup>22</sup>Cや、少し重い<sup>31</sup>Ne、<sup>37</sup>Mgなどがハローの性質を持つことがわかった。さらに、クーロン分解測定などを通して<sup>11</sup>Liのハローを構成する2つの中性子が「まとまって」運動することを明らかにした研究はインパクトを与えた。また原子核の変形を伴ったり、有限な角運動量を持つ中性子が関与するなど、従来のハロー現象とは異なる様相も見いだされた。

中性子ハローは、原子核の密度が種類によらずほぼ一定であるという教科書の常識に一石を投じる現象である。<sup>4)</sup> 広い範囲の強力なRIビームにより、様々な実験方法を駆使することも可能となり、ハロー現象の理解が深まってきた。

### 反転の島——魔法数は変わる

中性子数20の魔法性が中性子過剰領域で崩れる、という可能性は1970年代より指摘されていた。この問題に新たな光を当てたのが1990年代から理研で行われた一連の研究である。<sup>5)</sup> 例えば<sup>32</sup>Mg（中性子数20）のRIビームを鉛標的に当て、二次反応としてクーロン励起を起こさせ、その断面積から、この原子核が励起されやすく、魔法数20を持つ核の性質を持たないことが確かめられた。不安定核をビームとし、二次反応によりその核構造を調べる、という逆運動学と呼ばれる手法が確立し、RIビームによる核構造研究の国際的な流れの一つとなった。

その後、RIBFでの研究から、この魔法数「消滅」は中性子数( $N$ ) 8, 20, 28の中性子過剰領域では一般的に起きることがわかった。一方、新たな魔法数が「出現」することもある。 $N=16$ の中性子過剰核や、最近明らかになった<sup>54</sup>Caの $N=34$ などが注目されている。魔法数の消滅は、エネルギーが低いほうから順番に陽子または中性子が軌道を占めてゆく、という通常の配位が変更されることを示しており、それが起きる原子核の領域は「反転の島」(Island of Inversion)と呼ばれる。RIBFでは、クーロン励起のような直接反応だけでなく、電磁モーメントの測定<sup>6)</sup>などによって、網羅的に魔法数の異常を調べる実験研究が行われている。例えば $N=20$ の反転の島の周辺に、大きく変形した原子核の領域が広がっていることもわかってきた。理論研究も進んでおり、教科書的理解を超える現象の本質的な意味が明らかになることを期待したい。

### 宇宙での元素合成に迫る

宇宙での元素合成に関わる原子核反応を実験室で調べる研究は1950年代に始まったが、不安定原子核が関与する爆発的過程の本格研究は、RIビームの独壇場である。1990年代初めに理研で行われたのは、赤色巨星などの中

で<sup>13</sup>Nが陽子を捕獲する過程に関連する<sup>14</sup>Oの高速RIビームによるクーロン分解反応の実験である。仮想光子による逆反応を実現するこの研究の結果は、ほぼ同時に発表されたベルギーの新ルーバン大学による低速<sup>13</sup>Nビームによる実験と一致し、RIビームによる天体核物理研究の有用性を示すことになった。<sup>7)</sup> 一方、天体核反応の直接測定や、燃焼過程に関わる共鳴状態の探索は、東大CNSが理研キャンパスに建設した低エネルギーRIビーム装置CRIB<sup>8)</sup>を用いて進められている。

最近の特筆すべき進展は、RIBFが人類史上初めて $r$ 過程経路核に到達したことである。鉄より重い元素の約半分の量を作り出す $r$ 過程をもたらし天体現象の同定は、最近の中性子星合体からの重力波観測もあり、注目されているが、中性子が非常に多い不安定原子核の中性子捕獲と $\beta$ 崩壊の連鎖がその実体であることには間違いない。あまりに安定線から離れているため、ほとんど手がつけられていなかった核領域の一部にRIBFは達した。既に、 $r$ 過程に関わる原子核の寿命が広く測定され、実験値に基づいて $r$ 過程を研究する時代の幕が開いた。<sup>9)</sup> 元素合成の研究者たちがRIBFからの新しい結果を固唾を飲んで見守る状況が続くはずである。

### おわりに

この30年の原子核物理学の発展を、RIBFでの研究を中心に振り返った。他にも、中性子ハローや魔法数の異常だけではなく、様々な原子核構造の様相が明らかになりつつあり、中性子が過剰な核物質の研究も始まっている。斬新な質量測定用の蓄積リング（希少RIリング）や、電子と不安定核の散乱を実現する電子蓄積リングと自己閉じこめRI標的などが建設中で、原子核研究の発展に大きく寄与することを目指している。研究フロンティアをさらに開拓するため、加速器の増強が計画されている。

### 参考文献

- 1) Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **261**, 1009 (2007).
- 2) 大西哲哉, 久保敏幸, Isotope News **666**, 2 (2009).
- 3) 森田浩介, 日本物理学会誌 **60**, 698 (2005); 矢野安重, 同 **71**, 330 (2016).
- 4) 谷畑勇夫, 小林俊雄, 日本物理学会誌 **45**, 790 (1990); 中村隆司, 同 **66**, 914 (2011).
- 5) 櫻井博儀, 日本物理学会誌 **53**, 41 (1998); 本林 透, 岩崎弘典, 同 **64**, 106 (2009).
- 6) 市川雄一, 上野秀樹, 日本物理学会誌 **68**, 823 (2013).
- 7) 本林 透, 日本物理学会誌 **48**, 364 (1993).
- 8) Y. Yanagisawa et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **539**, 74 (2005); H. Yamaguchi et al., *ibid.* A **589**, 150 (2008).
- 9) 西村俊二, 日本原子力学会誌 **60**, 35 (2018).

(2018年10月19日原稿受付)

\*1 radioactive isotope beam. 言い換えると不安定な原子核のビーム。

\*2 ロシアのフレロフ研究所で作られた原子番号115(Mc), 117(Ts), 118(Og)の元素合成には「熱い核融合」が用いられた。複合核生成確率を重視する。

\*3 入射核破砕反応や衝突誘起核分裂が用いられる。