

ディビジョン番号	17
ディビジョン名	資源・エネルギー・地球化学・核化学・放射化学

大項目	3. 核化学・放射化学
中項目	3-1. 核化学・放射化学
小項目	3-1-2. 超重核の合成

概要（200字以内）	<p>原子番号が104以上の超重元素は、人工的に合成されてはじめて化学の研究対象となる。それらを合成するためには加速器からの重イオンビームと重い元素の核標的との核融合反応が用いられる。原子番号の増加とともに核融合確率は指数関数的に減少し、合成原子の収率は下がる。研究対象となる原子を少しでも多く合成するためには、大強度のビームと長期のビームタイムが不可欠であり、各研究機関で技術開発がおこなわれている。</p>
現状と最前線	<p>超重元素の物理的、化学的性質を調べるためには、とにかく対象となる原子（核）を合成する必要がある。超重元素核研究の第一の難しさは、その合成量の少なさにあるといえる。また研究対象となる核の大半が短寿命であり、その蓄積は不可能に近い。したがって、「超重核の合成」という場合に、生成された原子を、合成場所から捕集、あるいは検出場所へと迅速に移動させることも「合成」の一部と考えなければならない場合が多い。</p> <p>ここで超重元素の研究を行う現場での典型的収量を示す。研究対象原子の収量は、生成断面積σ、標的の厚さT、ビーム強度I、輸送効率εの積で与えられる。典型的数値は$\sigma = 1 \text{ pb} (10^{-36} \text{ cm}^2)$、$T = 10^{18} / \text{cm}^2$、$I = 6 \times 10^{12} / \text{s}$、$\varepsilon = 0.5$等であり、掛け合わせて$Y = 3 \times 10^{-6} / \text{s}$となり、断面積1 pb（ピコバールン）につき4日に1原子という収量と見積られる。1 nb（ナノバールン）では1時間に11原子という収量である。</p> <p>1. 合成に用いられる反応</p> <p>超重元素の原子核は、現在のところ標的核とビーム核の完全融合反応によって合成されている。大きく分けて、鉛やビスマスといった、陽子数や中性子数が魔法数である非常に安定な核にその相手方となる重イオン($Z=20\sim30$)を照射し低励起状態の複合核（励起エネルギーが12~25 MeV）を通じて合成しようとする方法（Cold Fusion）と、アクチノイド標的にその相手方となる比較的軽い重イオン($Z=10\sim20$)を照射する方法（複合核の励起エネルギーが35~45 MeV、Hot Fusionと呼ばれる）の2つの方法が使われてきた。Cold Fusionにより113番までの元素が合成され[1, 2, 8]、Hot Fusionによって113番から118番までの新元素の合成が報告されている[3, 4]。標的とビームの組み合わせからCold FusionとHot Fusionでは合成される核の中性子数がHot Fusionのほうが大きくなる。Cold Fusionで合成された核はα崩壊を繰り返して既知の核に到達し、新元素としての原子番号と質量数が実験的に決められてきた。一方Hot FusionはCold Fusionよりも長寿命の核を合成できており、^{270}Hsの例にみられるように、化学的研究において重要な反応となっている。</p> <p>2. イオン源と加速器</p> <p>超重元素の合成には重イオンビームを用いた核融合反応が用いられる。このときの入射エネルギーは、ビームと標的の核が正面衝突をした場合に表面同士が接触する程度の‘低い’エネルギーが選択される。反応によっては最適エネルギーの幅が狭い場合があり、そのような場合には慎重なエネルギー設定が重要である。また生成量が非常に少ない場合が多いので大強度のビームが必須となる。</p> <p>重イオン加速器を有し、大強度の重イオンビームの供給が可能である研究施設には、理研仁科センター(RNC)、ロシアのフレロフ核反応研究所(FLNR)、ドイツの重イオン科学研究所(GSI)、アメリカのローレンスバークレー国立研究所(LBNL)、フランスの国立重イオン加速器研究所(GANIL)等が挙げられ、それぞれに超重元素の研究チームがある。大強度の重イオンビームの供給を可能にしたのはECRイオン源の開発によるところが大きい。また理研における重イオン周波数可変RFQ-Linacの開発等、大強度に対応する加速器技術の開発も重要な要素である。</p> <p>3. 反跳分離装置</p> <p>ビーム核と標的核の完全融合によって合成された複合核は、入射ビームと同じ運動量で（従って0°方向に）走り出すが、中性子や陽子、α粒子放出による脱励起過程での反跳と、標的中での標的核との多重散乱</p>

によって横方向の運動量を与えられ、ある角度をもって標的から飛び出す。標的から飛び出した超重核は一般に電離しているが、その荷電状態はある平均値の周りに統計的に分布しており、一つの値をとることはない。また運動エネルギーも軽粒子放出の際の反跳エネルギーの拡がりや標的中でのエネルギー損失の拡がり、標的中で反応を起こした深さの違いによるエネルギー損失の不定性により、ある拡がりを持っている。このように荷電状態、運動エネルギー、放出角度に拡がりをもったイオンを効率よく分離・収集するために用いられるのが反跳分離装置である。

反跳分離装置には大きく、静電場と静磁場を使うもの、ガス入りの静磁場を使うもの、静電場のみを使うものに分けられる。上記に示した、生成された超重元素イオンの諸量の拡がりから真空中の静磁場のみを使うものは効率を大きくすることが困難なため使われていない。静電場と静磁場を使うタイプのもは、速度のみによる分離を行う Wien filter 型のもは、質量分離能力を持たせて分離機によって質量数まで決めてしまおうとする Recoil mass separator 型のもがある。前者には GSI の SHIP、GANIL の LISE、後者には JAEA の RMS 等がある。ガス充填型は FLNR の GFRS、GSI の TASCA、理研の GARIS、LBNL の BGS、UYFL (フィンランドのユヴァスキュラ大) の RITU 等が精力的に稼働中である。また静電場タイプでは FLNR の VASSILISSA が稼働中である。

4. 理研の将来計画

理研仁科センターでの超重元素研究には理研線形加速器 RILAC が使われているが、この加速器は後段のリングサイクロトロン RRC や超電導リングサイクロトロン SRC の入射器としても働いている。超重元素の研究には大強度ビームだけでなく、ある程度長時間のビームタイムも必要である。SRC の建設時期には超重元素研究のために、RILAC をある程度占有できたことで、原子番号 108 から 112 に至る核を合成し、GSI の結果を追試することができ、また 113 番元素の初合成を行うことができた[5-9]。SRC が正に稼働し始めた現状では RILAC を超重元素研究のために占有することは、センターの運営上からも難しい。そこで超重元素研究と SRC での高エネルギー重イオンを用いた研究とを両立させるため、SRC 用の新入射器の導入が検討されている。新入射器が導入されれば再び RILAC を超重元素の探索、核分光、化学的性質の研究のためフル稼働させることが可能となる。また研究の効率化を図るため、特に化学的性質を研究するための新反跳分離装置の導入も検討しており、それらが実現されれば、研究所の外からも核分光研究者、核化学研究者のユーザーを募り、超重元素研究の日本における基幹施設としての役割を果たすことが可能となるであろう。

5. その他の機関の将来計画

GSI では最近 Hot Fusion の一つである $^{238}\text{U}(^{48}\text{Ca}, 3n)$ 反応の追試を行っており、FLNR の結果を再現するものであると報告している[10]。FLNR では $^{244}\text{Pu} + ^{58}\text{Fe}$ 反応による 120 番元素の探索が開始されている。また GANIL ではビーム強度をこれまでの 100 倍 ($100 \text{ p} \cdot \text{A}$) にした後に、これを使って超重元素の研究を行う計画が立ち上がっており、 S^3 と呼ばれる Recoil Separator の概念設計や、標的の冷却方法等の検討が開始されている。

参考文献

- [1] S. Hofmann and G. Münzenberg, Rev. Mod. Phys. **72** (2002) 733.
- [2] S. Hofmann et al., Eur. Phys. J. A **14** (2002) 147.
- [3] Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. C **74** (2006) 044602.
- [4] Yu. Ts. Oganessian et al., Nucl. Phys. A **734** (2004) 109.
- [5] K. Morita et al., Eur. Phys. J. A **21** (2004) 257.
- [6] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 1738.
- [7] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 043201.
- [8] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 2593.
- [9] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 045001.
- [10] S. Hofmann et al., Eur. Phys. J. A **32** (2007) 251.

将来予測と方向性

・ 5 年後までに解決・実現が望まれる課題

理研の線形加速器 (RILAC) 施設を、超重元素研究を主目的とする施設としての完成。

理研 RILAC 施設に超重元素化学研究に特化した反跳分離器の完成。

・ 10 年後までに解決・実現が望まれる課題

重イオンビームの大強度化、 $6 \times 10^{13}/\text{s}$ を達成。

上記ビーム強度に耐える標的の開発。

キーワード

極小断面積、Cold Fusion、Hot Fusion、反跳分離装置

(執筆者：森田浩介)