

## 新元素探索の最適な入射エネルギー

超重核合成での核子-核子間の相互作用を研究するために、気体充填型反跳核分離装置 GARIS を用い、 $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ ,  $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ ,  $^{48}\text{Ca}+^{248}\text{Cm}$  反応系の準弾性散乱を測定した。実験結果と、チャンネル結合計算との比較から、入射核・標的核の励起状態、障壁透過以前の中性子移行の効果によって障壁が分布を持つことがわかった。球形である  $^{208}\text{Pb}$  標的を用いた反応系では、障壁分布の最大値の位置は蒸発残留核の断面積のピークと相関をした。一方で、アクチノイド変形標的核である  $^{248}\text{Cm}$  を用いた  $^{48}\text{Ca}+^{248}\text{Cm}$  反応系では、蒸発残留核の断面積のピークは、障壁分布の高エネルギー側の位置と相関し、Side collision での融合によって蒸発残留核の断面積が増大していることがわかった。

これまで、国立研究開発法人理化学研究所(以下理研)の森田らのグループは 3 個の 113 番元素の合成に成功した(Journal of the Physical Society of Japan の 2004 年 10 号、2007 年 4 号と 2012 年 10 号に掲載)。その成果に対し、国際純正・応用化学連合と国際純粋・応用物理学連合は新元素の命名の優先権を与えた。森田グループの提案を受け、113 番元素は「ニホニウム」と命名された。また現在までに、ロシアのフレロフ核反応研究所のオガネシアン博士らのグループによって 118 番までの元素の合成が報告され、118 番までの全ての元素に名前が付けられている。

新元素探索などの生成断面積(生成確率に相当)が小さく未知である核の合成では、入射エネルギー(原子核同士の衝突速度に比例)が最も重要なパラメーターであり、その決定が難しい。 $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$  の場合(図 1 左下)、最適な入射エネルギーである  $E_{c.m.} = 175.5 \text{ MeV}$  から 1.6% ずれた  $E_{c.m.} = 178.3 \text{ MeV}$  で実験を行うと断面積は最適な場合に比べ 35.2% に減少する。入射エネルギー以外の実験条件が同じであれば、入射エネルギーが最適な場所から僅か 1.6% ずれると 1 個の原子核を合成するのに 2.8 倍の時間がかかることを意味する。113 番元素の合成のように約 200 日に 1 個という非常に小さい断面積の原子核の合成実験においては、この差は非常に大きい。

これまで理研グループではドイツの GSI 研究所のホフマン博士らのグループによって行われてきた 108-112 番元素の合成実験の追実験を行い、その最適入射エネルギーの系統性から 113 番元素の合成実験の最適入射エネルギーを決めてきた。119 番や 120 番元素の探索では、「114-118 番までの合成に使われてきた  $^{48}\text{Ca}$ +アクチノイド標的の組み合わせによる合成」から、「 $^{50}\text{Ti}$ ,  $^{51}\text{V}$ ,  $^{54}\text{Cr}$ +アクチノイド標的の組み合わせ」

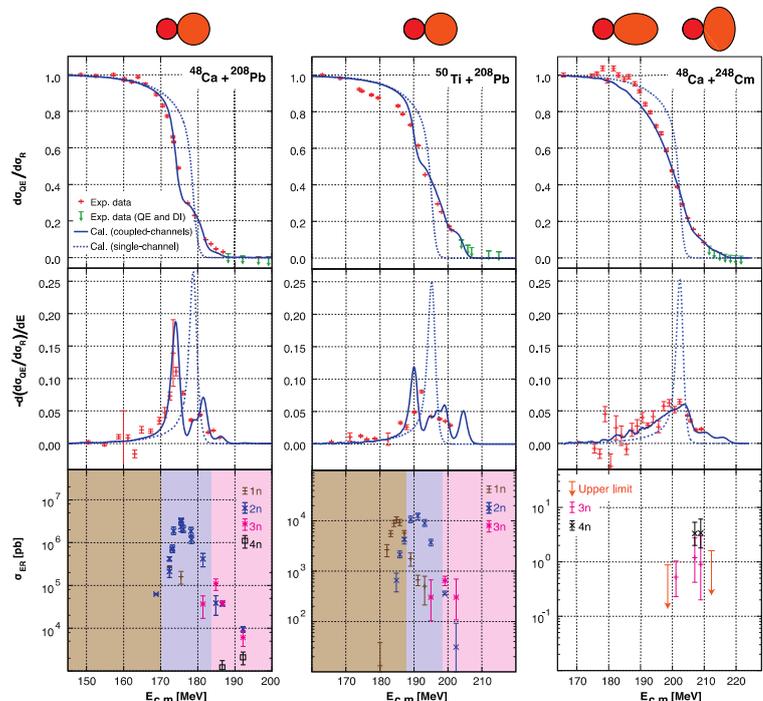


図 1. 準弾性散乱とラザフォード散乱の断面積の比(上)と障壁分布(中)、蒸発残留核の断面積(下)。

に変わるため、これまでの理研のように先行研究の最適入射エネルギーの系統性からそれを検討することができない。

そこで理研グループは反応機構を理解した上で最適な入射エネルギーを探る研究を行った。超重核の生成過程は3段階に分けられる。(1)トンネル効果によってクーロン障壁を越え原子核同士が接触する過程があり、その断面積を $\sigma_{\text{cap}}$ とする。(2)複合核を形成する過程があり、その確率を $P_{\text{CN}}$ とする。(3)脱励起過程で軽粒子を放出し核分裂せずに生き残る過程があり、その確率を $P_{\text{surv}}$ とする。(1)から(3)の積によって蒸発残留核の生成断面積 $\sigma_{\text{ER}}$ が与えられ、蒸発残留核の測定により原子核の合成を確認する。理研グループは(1)のクーロン障壁での反射率測定に相当する実験を行った。

準弾性散乱とラザフォード散乱の比(クーロン障壁での反射率に相当)を、入射エネルギーを変えながら測定し(図1上段)、その1階微分を取ることによってクーロン障壁の分布を導出した(図1中段)。理論計算との比較から、それらの障壁分布の形成には、融合過程での原子核の励起状態や少数の核子移行反応の効果、原子核の変形の効果も寄与していることを明らかにした。また、その障壁分布と蒸発残留核の生成断面積 $\sigma_{\text{ER}}$ の励起関数(図1下段)との比較から、二重閉殻構造で球形である $^{208}\text{Pb}$ を使った $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ ,  $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ の反応系では、障壁分布の最大値の位置と $\sigma_{\text{ER}}$ のピーク位置がよく相関することがわかった。変形アクチノイド標的核を用いた $^{48}\text{Ca}+^{248}\text{Cm}$ 反応系では、 $\sigma_{\text{ER}}$ のピーク位置は障壁分布の高いエネルギー側の位置と相関することがわかった。これは変形標的核を使った際に2核間の重心間距離が最も接近する「Side collision」の向きでの融合によって蒸発残留核の生成断面積が増大していることを明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の2018年1号に掲載された。

理研グループは、チタン(原子番号22)やバナジウム(原子番号23)、クロム(原子番号24)とキュリウム(原子番号96)やカリホルニウム(原子番号98)の組み合わせで、119番や120番の新元素の合成に挑戦し続ける。さらにその先には二重閉殻構造による長寿命の超重核が形成すると予想されている「安定の島」の発見も期待される。今後は、この成果で明らかになった反応機構の理解をさらに深めるとともに、新元素の合成などにこの知見が生かされることを期待する。

## 原論文

### Determination of Fusion Barrier Distributions from Quasielastic Scattering Cross Sections towards Superheavy Nuclei Synthesis

Taiki Tanaka, Yoshihiro Narikiyo, Kosuke Morita, Kunihiro Fujita, Daiya Kaji, Kouji Morimoto, Sayaka Yamaki, Yasuo Wakabayashi, Kengo Tanaka, Mirei Takeyama, Akira Yoneda, Hiromitsu Haba, Yukiko Komori, Shinya Yanou, Benoit Jean-Paul Gall, Zouhair Asfari, Hugo Faure, Hiroo Hasebe, Minghui Huang, Jumpei Kanaya, Masashi Murakami, Atsushi Yoshida, Takayuki Yamaguchi, Fuyuki Tokanai, Tomomi Yoshida, Shoya Yamamoto, Yuki Yamano, Kenyu Watanabe, Satoshi Ishizawa, Masato Asai, Ryuji Aono, Shin-ichi Goto, Kenji Katori, and Kouichi Hagino

*J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 014201 (2018).

問合せ先：田中泰貴 (理化学研究所仁科加速器研究センター/九州大学大学院)

森田浩介 (理化学研究所仁科加速器研究センター/九州大学大学院)