

元素の新しいつくり方を探る

光岡 真一 極限重原子核研究グループ

自然界に存在する最も重い元素はウラン鉱石にごく微量に含まれるプルトニウム(94番元素)だが、人類はさらに重い元素を次々につくり出してきた。どこまで重い元素が存在し得るのか。その探求は現在も激しい国際競争の下で進められている。2004年、日本の理化学研究所(理研)が113番元素を合成したという報告は、記憶に新しい。重い元素をつくるには、強く反発し合う重い原子核同士を近づけて融合させなければならない。「その反応過程に面白い現象が潜んでいるんです」と、光岡真一研究副主幹は言う。日本原子力研究開発機構(JAEA)が世界に誇るタンデム・ブースター加速器を駆使して、光岡研究副主幹たちは重い原子核同士が融合する反応メカニズムを探っている。

新しい元素をつくるには

「一般の人たちにとって、原子核の世界は分かりづらくとっつきにくい面があり、その面白さを伝えるのはなかなか難しいのですが……」。こう語り始めた光岡研究副主幹は現代の錬金術師、元素のつくり方を研究している。「とにかく、重い原子核同士はなかなか融合してくれません。それが新しい元素をつくるときの最大の問題です」

そもそも原子核は、陽子と中性子からなる。文字通り中性子は電氣的に中性だが、陽子はプラスの電荷を帯びている。原子核に含まれている陽子の数が原子番号だ。そして、原子番号ごとに元素名が付けられている。原子番号が104以上の元素を「超重元素」、その原子核を「超重核」と呼ぶ。現在は、111番元素までが人工的に合成され、国際的に承認されて名前が付けられている。112番元素以上については、合成したという報告はあるが、まだ正式に確認・承認

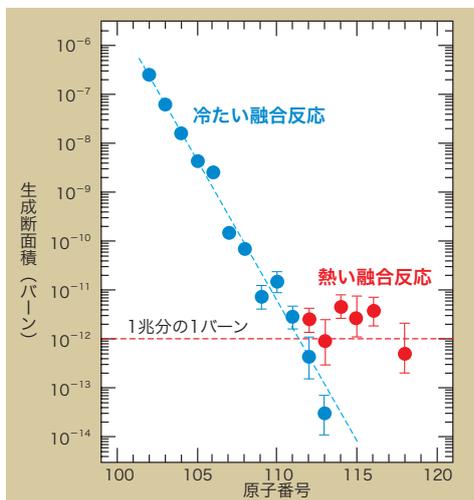
されていない。

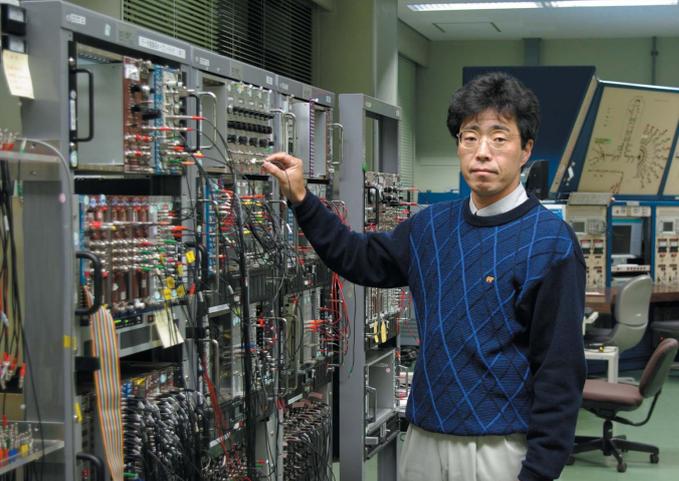
新しい元素をつくることは、より陽子数の多い超重核をつくることにほかならない。例えば、理研では30番元素の亜鉛と83番元素のビスマスの原子核を融合させて、113番元素をつくり出した。そのために、1秒間に2兆5000億個という強度の亜鉛イオンビームを、ビスマスに80日間照射し続けて、やっと1個の113番元素を生み出した。重い原子核の融合は、それほど起きにくい反応なのだ。

原子核を融合させるには、まず2つの原子核を近づける必要がある。しかし、重い原子核は陽子数が多く電荷が大きいため、2つの原子核同士は強く反発し合う。その反発力(クーロン力)に打ち勝って原子核同士を近づけるには、一方の原子核(入射核)を加速して、もう一方の原子核(標的核)に衝突させなければならない。「しかし、入射核のスピードをあまり速くし過ぎて衝突させると、融合しても熱くなり過ぎて、すぐに分裂してしまいます。私たちは、融合するちょうどよいスピードで衝突させる実験を行い、その融合反応の過程を調べています[1]」

軽い原子核同士の場合には、反発力に打ち勝って衝突すると、2つの原子核は融合して一体化した丸い「複合核」をつくる。「でも、重い原子核同士の場合には、必ずしも複合核をつくらずに、再び分離してしまうことの方が多いのです。さらに、分離せずに複合核ができたとしても、複合核は高温状態なので、ほとんどが核分裂して壊れてしまいます。中性子などを放出して複合核が冷却され、最終的に超重核として生き残る確率はごくわずかです。だから超重核をつくるのは難しいのです」

図1 超重核の生成断面積
冷たい融合反応は、合成する元素の原子番号が増えるに従って合成確率が下がる。一方、熱い融合反応による112～118番元素の合成確率は、原子番号が増えてもあまり下がらないと報告されている。





光岡 真一 (みつおか しんいち)

1966年、広島県生まれ。Ph.D. 1994年、九州大学大学院理学研究科博士課程修了。大阪大学教務補佐員を経て、1996年、日本原子力研究所先端基礎研究センター研究員。2004年より現職。専門は実験原子核物理。

方法が主流となり始めた。

原子力発電にも使われるウランやプルトニウムのような核分裂しやすい元素を用いる熱い融合反応で、なぜ超重核ができる確率が高いのか。その反応メカニズムを、世界に先駆けてすでに2000年ごろから提唱していた研究者たちがいる。それが光岡研究副主幹たちの研究グループだ。

冷たい融合反応と熱い融合反応

超重核の合成には、主に2つの方法が用いられてきた。1つは理研が113番元素の合成に用いた方法で、非常に安定な鉛やビスマスの原子核を標的核にして、ニッケルや亜鉛の原子核をぶつける方法だ。この反応でつくられる複合核は比較的“冷たい”状態で、1個程度の中性を放出して冷却され、超重核となる。この方法は“冷たい融合反応”と呼ばれ、ドイツの重イオン研究所(GSI)を中心に、1980年代から107～112番元素の合成が行われた。

一方、ウラン(92番元素)やプルトニウムのような非常に重い原子核に、カルシウム(20番元素)のような比較的軽い原子核をぶつける方法は、“熱い融合反応”と呼ばれる。この反応でつくられる複合核は“熱い”状態で、中性子を3～5個程度放出しないと冷却されない。現在までに、ロシアのフレロフ核反応研究所(FLNR)を中心とする研究グループは、熱い融合反応により112～116番および118番元素をつくり出したと発表している。

冷たい融合反応では、原子番号が1つ増えるごとに、超重核の合成確率(生成断面積)が数分の1から約10分の1ずつ下がる傾向がある(図1)。つまり、合成に要する時間が数倍から約10倍かかる。例えば、113番元素の場合、合成確率は合成の限界に近いといわれる1兆分の1バーンという値をはるかに下回る。世界最強のビーム強度を誇る理研の線形加速器ライラックRILACでも、3年間で延べ300日以上衝突実験で、合成できた113番元素は2個である。同じ方法でさらに重い元素をつくろうとすると、数年以上に及ぶ実験が必要となるだろう。冷たい融合反応で、さらに新しい元素をつくるのは、非常に困難だ。

一方、熱い融合反応による112～118番元素の合成確率は1兆分の1バーン前後で、原子番号が増えてもあまり下がらないと報告されている(図1)。新しい元素をつくる研究は今、熱い融合反応を用いる

「密着融合」の提唱

「冷たい融合反応の標的核に用いるビスマスや亜鉛は、球形の原子核です。一方、熱い融合反応に用いるウランやプルトニウムは変形しているんです」と光岡研究副主幹は説明する。ウランやプルトニウムは、ラグビーボールのような形をしているのだ。そこに軽い原子核が衝突する場合を考えてみよう(図2上)。先端部と赤道面に衝突する場合を比較すると、原子核の中心間の距離は、先端部に衝突する場合の方が長い。原子核同士に働くクーロン力は距離が長いほど小さくなるので、先端部では遅いスピードでも衝突する。一方、赤道面への衝突は、距離が短くなるのでクーロン力が大きく働き、速いスピードでしか衝突しない。

「しかし、いったん赤道面で衝突が起きると、融合して超重核になりやすいのです。それは、冷たい融合反応のように球形の原子核同士の衝突よりも、衝突したときの形状がコンパクトだからです(図2)。

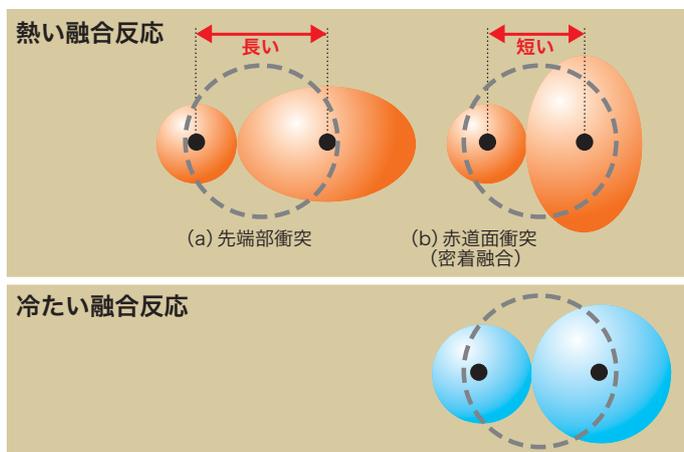


図2 密着融合 ラグビーボール形の原子核を標的核とする熱い融合反応では、赤道面衝突のときにコンパクトな形で原子核同士が密着するため、冷たい融合反応による球形の原子核同士の衝突よりも、一体化した丸い複合核をつくる確率が高いと考えられる。



図3 タンデム加速器建家と加速器本体のイメージ図 地上約45メートルの建家にタンデム加速器が設置されている。そこで生み出された原子核ビームの加速エネルギーを、超伝導ブースターにより2～4倍に増強する。

コンパクトな形で“密着”するので、一体化した丸い複合核をつくる確率が高い——これが熱い融合反応で112～118番元素領域の合成確率が高い理由の一つだと、私たちは考えています」

光岡研究副主幹たちは、ウランやプルトニウムのような変形した原子核を標的核にした反応を、「密着融合」と名付けている。最近では、ロシアのフレロフ核反応研究所の研究グループも、自分たちの実験を説明する際、光岡研究副主幹たちの密着融合の研究成果を引用している。

タンデム・ブースター加速器

先端部と赤道面での衝突反応の違いを調べるために、ラグビーボール形の原子核の向きをコントロールして衝突させることは、実験的に難しい。ただし、入射核の速さによって、衝突時の変形核の向きを推定することができる。光岡研究副主幹たちは、入射核の速さを細かく変化させながら、サマリウム（62番元素）などの変形した原子核に衝突させ、合成確率がどう変化するかを調べた。そして、赤道面の衝

突で合成確率が高くなることを突き止め、密着融合を実験的に確認したのだ[2]。「私たちは、タンデム・ブースター加速器（図3）と反跳生成核分離装置（図4）を用いて密着融合の実験を行いました。このような実験が行える研究所は、世界的に見ても限られています」と光岡研究副主幹は言う。

JAEA東海研究開発センターにあるタンデム・ブースター加速器は、世界最大級のタンデム加速器に超伝導ブースターを連結させることで加速エネルギーを2～4倍に増強し、重い原子核同士の融合反応を引き起こすことができる。その最大の特長は、加速する原子核の速さ（ビームエネルギー）を短時間で正確に変化させることができる点だ。

加速器には、さまざまな種類がある。ビームエネルギーから見ると、低エネルギーのタンデム加速器や線形加速器、中・高エネルギーのサイクロトロン加速器、そして高エネルギーのシンクロトロン加速器がある。現在、JAEAと高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同で建設を進めている大強度陽子加速器施設「J-PARC」は、シンクロトロン加速器だ。

より高エネルギーの加速器でなければ、新しい科学が切り開けないかという、決してそうではない。それぞれの加速器の特長を生かした実験が行われている。例えば、光岡研究副主幹たちによる密着融合の実験は、原子核同士がちょうど融合するレベルのビームエネルギーを短時間で正確に変化させることができるというタンデム・ブースター加速器の特長により、初めて可能となった。「タンデム・ブースター加速器では、ビームエネルギーの大きさを変えるのに数十分しかかかりませんが、サイクロトロン加速器などでは数時間はかかるでしょう」

タンデム・ブースター加速器は、エネルギー的にも、空間的に広がり小さい高品質のビームを生み

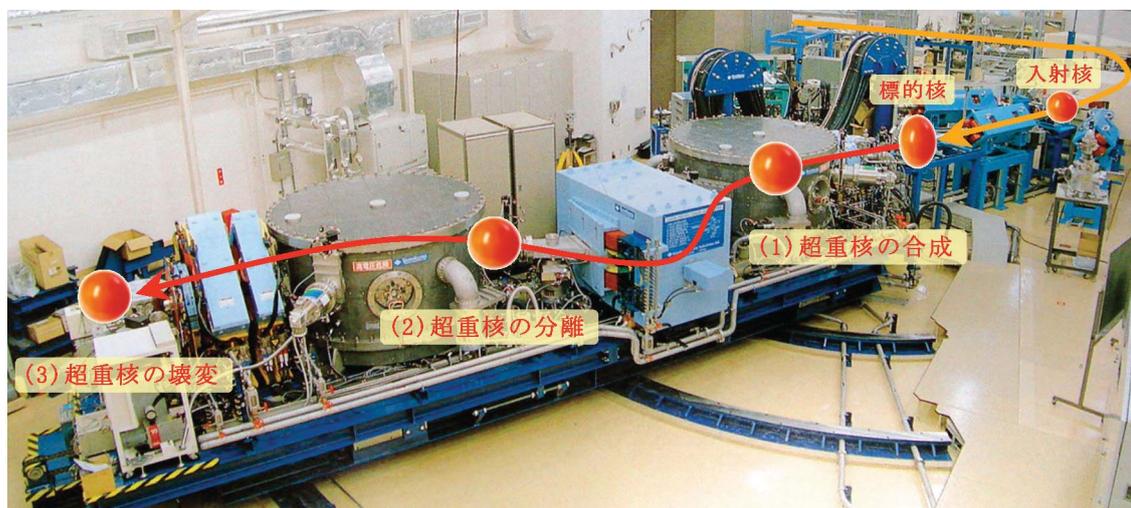


図4 反跳生成核分離装置 タンデム・ブースター加速器からの入射核ビームを標的核に衝突させ、合成された超重核を反跳生成核分離装置で分離し、超重核が壊れていく様子を測定する。

出せるという特長もある。これらの特長を生かして、原子核の物理的な研究だけでなく、化学や物性などさまざまな研究が、タンデム・ブースター加速器を用いて行われている。

謎の多い原子核の世界

光岡研究副主幹たちは、密着融合の実証実験をさらに進めている。最近、酸素やシリコンの原子核をウラン原子核に衝突させることで、100番元素（フェルミウム）や106番元素（シーボルギウム）の合成に成功した[3]。そして現在は、ドイツの重イオン研究所との共同研究により、硫黄とウランを用いて108番元素、カルシウムとウランで112番元素を密着融合で合成する実験を進めている。さらには、ニッケルとウランの反応で120番元素という新しい元素をつくる実験も始まっている。

いったい、何番元素までが存在し得るのか。「それは、“魔法数”によって変わってきます」と光岡研究副主幹は言う。ウランのように陽子数の多い原子核は、プラスの陽子同士に働く反発力で分裂しやすい。「さらに電荷が大きい超重元素が存在し得るのは、原子の中の電子と同じように、原子核にも殻構造があるからです」

原子の中の電子は「電子殻」の中を回っていて、それぞれの電子殻に入ることができる電子数は決まっている。電子殻が電子で満たされると「閉殻」となり、その元素は化学的に安定となる。電子を放出したり、受け取ったりという化学反応が起こりにくくなるのだ。ヘリウムやネオンなど希ガスが化学的に不活性なのは、電子が閉殻状態だからだ。

同じように、原子核の中を回る陽子や中性子も殻構造を持ち、閉殻で安定する。すでに知られている原子核では、陽子や中性子の数が2、8、20、28、50、82、および126(中性子のみ)で閉殻となり安定化する。これらの数が魔法数だ。

ただし、陽子や中性子の数が多い超重核の領域で、この魔法数がどうなっているのかわかっていない。理論的には、次の閉殻は中性子では184、陽子では114～126の間にあると推測されている。その魔法数によって、どこまで重い元素が存在し得るのかも決まるのだ。実際に新しい超重核を合成して魔法数を確かめ、殻構造を明らかにすることは、原子核物理における最大の課題となっている。

さらに、すでに知られている重い原子核同士の反応にもわかっていないことが多い。超重核の反応過程にかかわる陽子と中性子の合計数は300個弱だ。



タンデム・ブースター加速器のビームエネルギーを調整する光岡研究副主幹

「しかし、この数百個からなる原子核の世界は“有限多体系”といわれる複雑系で、よく分からないこと、今日紹介した密着融合のような面白い現象がたくさんあるのです。原子核の世界の魅力を少しは感じてもらえたでしょうか？」

光岡研究副主幹たちは、重い元素をつくるさらに新しいメカニズムも検討し始めている。「中性子が陽子より極端に多い“中性子過剰核”を用いると、超重核の合成確率が高くなるかもしれません。中性子過剰核の表面には中性子がたくさんあって、その中性子がいわば“のり”の働きをすることによって、融合に有利に働く可能性があるのです」

最近、タンデム加速器施設では、中性子過剰核のように自然界には存在しない寿命が短い原子核をビームとして加速するTRIA^{トリアック}C加速器も稼働し始めた。世界的にもユニークな加速器を駆使して、原子核という謎の多い世界の探求が精力的に続けられている。
(取材・執筆:立山 晃)

●参考文献

- [1] “Barrier distributions derived from quasielastic backscattering of ^{48}Ti , ^{54}Cr , ^{56}Fe , ^{64}Ni , and ^{70}Zn projectiles on a ^{208}Pb target”, S. Mitsuoka, H. Ikezoe, K. Nishio, K. Tsuruta, S. C. Jeong, and Y. Watanabe, Phys. Rev. Lett. 99, 182701 (2007).
- [2] “Effects of neutron number and nuclear deformation on complete fusion of $^{60,64}\text{Ni} + ^{154}\text{Sm}$ near the Coulomb barrier”, S. Mitsuoka, H. Ikezoe, K. Nishio, K. Satou, and J. Lu, Phys. Rev. C 65, 054608 (2002).
- [3] “Evidence of complete fusion in the sub-barrier $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ reaction”, K. Nishio, H. Ikezoe, Y. Nagame, M. Asai, K. Tsukada, S. Mitsuoka, K. Tsuruta, K. Satou, C. J. Lin, and T. Ohsawa, Phys. Rev. Lett. 93, 162701 (2004).

Exploring novel method for heavy element synthesis
Shin-ichi Mitsuoka
Research Group for Physics of Heavy Nuclei

Beyond the heaviest element in nature, Plutonium (the atomic number $Z=94$), heavier elements have been produced artificially. How heavy elements can exist? Searching for new elements at the end of the periodic table is one of hot topics in nuclear physics. Superheavy elements ($Z>104$) have been synthesized by fusing heavy nuclei with accelerating nuclear beams. Dr. Mitsuoka and his colleagues have been experimentally explored the mechanism of fusion reactions between heavy nuclei by using JAEA-Tokai Tandem-Booster Accelerator.