

超重元素への挑戦

和田 隆 宏*

Challenge to synthesis of superheavy elements

Takahiro WADA

1. はじめに

理工系の皆さんであればどこかで元素の周期表を目にしているだろうが、最新の周期表には元素がいくつ載っているか知っているだろうか。2016年11月30日に原子番号113の元素がニホニウム（英語名 nihonium, 元素記号 Nh）と命名された。言うまでもなく、ニホニウムの名前は日本の国名に由来している。命名したのは、森田浩介を中心とする理化学研究所のグループである。元素の命名権を得たのは、アジアの国として初めてであり、この分野の研究者として誇りである。このとき同時に原子番号115, 117, 118の3つの元素も、それぞれモスコビウム (Mc)、テネシン (Ts)、オガネソン (Og) と命名された。これらは、超重元素と呼ばれる短寿命の元素である。メンデレーエフは、元素の性質に規則性があることに着目して周期表を考案したが、当時は原子の構造は未知であった。現代では、元素の化学的性質は電子の数によって決まることがわかっている。電子の数は原子核の正電荷とつりあうように決まるから、結局、原子核に含まれる陽子の数が鍵となる。つまり、新しい元素を作るといのは、新しい原子核を作ることなのである。

このトピックスでは、超重元素合成の歴史やどのような困難があり、それを如何に克服したかを紹介した後、原子核反応の立場から超重元素の合成について述べる。超重元素合成という最先端の科学や原子核物理に、少しでも興味を持ってもらえれば幸いである。

2. 原子核の安定性

原子の中心にあつてその質量のほとんどを占める原子核は、正電荷をもつ陽子と電氣的に中性な中性子から構成されており、核力によって結合している。陽子と中性子は総称して核子と呼ばれる。原子番号は陽子数と等しく、陽子と中性子の数を足したものは質量数と呼ばれる。また、原子番号が同じで中性子数のみ異なるものを同位体という。原子核は元素名の左上に質量数、左下に原子番号を入れて表す。例えば原子番号82(Pb)で質量数208の原子核は $^{208}_{82}\text{Pb}$ と表す。本稿では、「重い原子核」という表現がたびたび現れる。「重い」とは質量数が多いことを意味するが、一般に原子番号が大きいほど質量数も大きくなるため、「重い原子核」とは原子番号の大きい原子核という意味である。超重元素は、原子番号104以上のものを指す。

地球に自然に存在する元素のうちもっとも重いのは原子番号92のウランである。さらに言えば、安定な同位体が存在するのは原子番号82の鉛までである。重い原子核が不安定になるのは、正の電荷を持つ陽子の間に働く静電斥力のためである。中間子論で表される核力は、短距離力で隣り合った核子の間にしか働かないのに対し、静電斥力（クーロン力）は、長距離力で原子核内の全ての陽子の間に働くため、原子番号が大きくなると相対的に斥力の効果が強くなり、原子核の結合が弱くなるのである。静電斥力のため、鉛より重い原子核はアルファ粒子（ ^4_2He ）を放出するアルファ崩壊によって原子番号のより小さい原子核に変換する。さらに、原子番号が100近くになると電荷が約半分の子の原子核に別れる自発核分裂という現象も現れる。超重元素を作るといのは静電斥力との戦いであ

る。超重元素を作ろうとしても分裂して壊れてしまうのである。

核力が短距離力であることの帰結をもう少し考えてみよう。原子核の中心付近では、核子は別の核子で取り囲まれており、核力による引力は最大限働く。これに対して原子核の表面付近では、表面の外側には核子が存在しないため、核力による結合はその分弱くなる。これは、液体の表面で分子間力による結合エネルギーが小さくなるのと同様である。液体は、結合エネルギーを大きくするため表面積をなるべく小さくしようとする。これが表面張力の正体である。原子番号が小さくて核子数も少ない（軽い）原子核では、原子核の表面付近に存在する核子の割合が大きく、そのため結合エネルギーは小さくなる。原子番号が大きくなるに連れて、表面付近にある核子の割合は小さくなり結合エネルギーは大きくなるが、一方、陽子間の静電斥力が強まることは、結合エネルギーに不利になる。結果として、核子あたりの結合エネルギーは原子番号が26から28くらいでもっとも大きくなる。地球の核（コア）は鉄（原子番号26）やニッケル（原子番号28）からなるが、鉄がふんだんにあるのは原子核の安定性によるのである。

原子核の安定性を考える上で、もうひとつ大切な要素がある。それは、ミクロな系は量子力学によって支配されるということである。量子力学の重要な特徴のひとつとして、系のエネルギーが飛び飛びの値に限られることがある。元素が周期的に似た性質を示すのは、電子が取りうるエネルギーが飛び飛びの値になることに由来している。電子や核子はフェルミ粒子と呼ばれ、同じ量子状態を取れるのはひとつの粒子に限られる。電子や核子はスピンという内部自由度を持っているため同じ空間状態（「軌道」）を占められるのは2個までとなる。例として酸素原子を考えてみよう。電子が取りうる飛び飛びの状態としては、エネルギーの低い順に1S, 2S, 2P 状態がある。このうち、1S と2S はそれぞれ1つの空間状態、2P は3つの空間状態を持っており、酸素原子は8個の電子を持つから1S と2S に2個ずつ入り、残り4個が2P に入ることになる。2P にはさらに電子が2個入ることができるため、酸素は2価の陰イオンになりやすいという性質を持つ。原子番号16の硫黄では、1S, 2S, 2P, 3S までが $2+2+6+2=12$ 個の電子で占められ、残り4個の電子は3P 状態に入ることになる。これは、酸素で2P 状態に4個の電子が入ることと類似しており、両者はよく似た化学的性質を示すことになる。次に酸素の原子核について見てみよう。原子核の中の核子が取りうる状態は、エネルギーの低い方から0s, 0p で1s, 0d はそれより高

いエネルギーを持っている。酸素の同位体のうちもっとも安定でかつ多く存在するのは ^{16}O である。陽子は0s 状態に2個、0p 状態は3つの空間状態があるので6個入り、これで丁度8個となる。中性子も同様である。このように、状態をすべて埋め尽くした場合を閉殻と呼ぶ。原子の場合に閉殻構造を持つ He や Ne が安定なのと同じように、 ^{16}O は陽子、中性子の両方が閉殻となるので非常に安定である。閉殻構造を持つ原子核を魔法核、閉殻となる核子数を魔法数と呼ぶ。陽子の魔法数は、2, 8, 20, 28, 50, 82、中性子の場合にはこれに126が加わる。 ^{208}Pb は、陽子が82個、中性子が126個で共に魔法数であり特に安定である。このことは、後に重要となる。

陽子の魔法数は82の鉛まで知られているが、その次の魔法数はいくつになるだろうか。鉛を超える重い元素は不安定であることはすでに述べたが、もし新しい魔法数が強い閉核であればその周辺の元素は安定ないしは非常に長寿命になるかも知れない。これを「安定の島」という。鉛から先の不安定な海の中に浮かんだ島を想像して欲しい。1960年代に、このような予想がなされ、次の陽子魔法数を目指して超重元素合成への挑戦が始まった¹⁾。これには研究者の執念や国家の威信がからみ、面白い物語となっている。

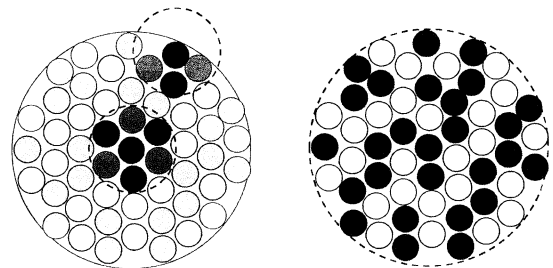


図1 核力と静電気力の違い：核力はすぐ隣の核子のみ関わる、このため中心付近と表面付近では関与する粒子の数が異なる（左）。静電気力は核内のすべての陽子が関与する（右）。点線は力の範囲を表わし、濃色の核子が結合エネルギーに関わる。

3. 超ウラン元素の合成

地球に存在する元素で、もっとも原子番号が大きいのは92番のウランであると先に述べた。現在の周期表には93番から118番までの元素が記載されているが、これらは全て人工的に合成されたものである。これらの元素はどのような方法で作られたのであろうか。これには大きく分けて二つの方法がある。

第一の方法は、原子核に中性子を吸収させて、ベータ崩壊（原子核内の中性子が陽子に変換して原子番号

が1つ増え、同時に電子と反電子ニュートリノを放出する現象)によって原子番号を増やすものである。中性子はクーロン力の影響を受けないので、標的原子核に容易に近づけるのが利点である。原子炉内には強い中性子束が存在し、ウランを出発点として中性子吸収とベータ崩壊を繰り返すことで、超ウラン元素(アクチノイドに属する)が次々と合成される。正確には、超ウラン元素を作るのは $^{238}_{92}\text{U}$ であり、同位体の $^{235}_{92}\text{U}$ は中性子を吸収すると核分裂してエネルギーを放出する。この方法の特徴は、マクロ量(アボガドロ数程度)の超ウラン元素ができることである。原子番号100のフェルミウム(Fm)は短時間で壊れてしまうため、この方法で原子番号100以上の元素を作ることはできない。

第二の方法はもっと直感的である。原子番号を増やすには、原子核に陽子を付け加えればよい。例えば、アルファ粒子を標的核と衝突・融合させる方法があるが、原子核間に働く静電斥力のため、超ウラン元素の合成に用いるには、大きいエネルギーを持つアルファ粒子が必要であった。これを可能にしたのがサイクロトロン加速器の発明である。最初にサイクロトロンを手にしたアメリカは、中性子吸収反応で作った比較的長寿命のアクチノイド核を標的としてアルファ粒子融合反応によって96番から101番までの超ウラン元素を合成した。102番以降の元素は、より原子番号の大きい原子核(ホウ素、炭素など)を入射粒子とすることで合成される。時は冷戦時代であり、アメリカに対抗するソ連はモスクワ近郊のドブナにあるフレロフ原子核反応研究所において105番元素を合成し、ドブニウム(Db)と名づけた。一方、アメリカは106番元素を、超重元素研究の中心人物で当時存命であったシーボルクにちなんでシーボーギウム(Sg)と命名するなど、国家の威信をかけた競争もみられた²⁾。

4. 冷たい融合と熱い融合

超重元素を合成するには、加速器を用いて入射核となる重イオンを光速の10分の1程度まで加速し、これを標的核に衝突させ両者を融合させる。しかし、入射核と標的核の電荷の積が大きくなるにつれて新元素の生成断面積は指数関数的に小さくなることが明らかになり、107番以降の元素合成には新しい方法が必要とされた。簡単に言うと、融合してできる原子核(複合核と呼ばれる)の励起エネルギーが大きくなり、冷却する間に核分裂で壊れる割合が増えて、超重元素として残らなくなってしまったのである。

ここで用いられたのが、 $^{208}_{82}\text{Pb}$ や $^{209}_{83}\text{Bi}$ という魔法核(共に中性子数が魔法数の126)を標的とし、結合エネ

ルギーが大きい鉄(Fe)の近傍の重イオンを入射核とすることで複合核の励起エネルギーを小さく抑えるという方法である。励起エネルギーが小さいため「冷たい融合」と呼ばれている。ドイツの重イオン科学研究所がこの方法を用いて、107番から112番までの新元素の合成に成功した³⁾。これらの元素はいずれもドイツにちなんで名づけられている。冷たい融合は、複合核の励起エネルギーを抑えるには大変有効であるが、一方、入射核と標的核の電荷の積が大きいため、融合する確率が小さくなるという欠点を持っている。融合確率は電荷の積が大きくなるほど指数関数的に減少するため、より重い超重元素の合成には限界が見えていた。

次に考えられたのは、アクチノイド核を標的核とし、入射核として $^{48}_{20}\text{Ca}$ という特別な原子核を用いるものであった。 $^{48}_{20}\text{Ca}$ は天然にわずかに存在し、主要な同位体 $^{40}_{20}\text{Ca}$ に比べて中性子が8個も多い。このことが励起した複合核が冷却するときに有利に働くのである。また、冷たい融合の反応系に比べて入射核と標的核の電荷の非対称性が大きいため、電荷の積は小さくなり融合において有利になる。この方法は、冷たい融合に比べて複合核の励起エネルギーが大きくなるため「熱い融合」と呼ばれるが、 $^{48}_{20}\text{Ca}$ が二重魔法核であることから励起エネルギーは極端に大きくならないという特徴も持つ。アクチノイド核と $^{48}_{20}\text{Ca}$ は、いずれも大変高価かつ希少な材料であるが、アメリカとロシアの共同研究により両方がそろい、熱い融合が実現した。アメリカはアクチノイド核を先に述べた中性子吸収の方法で作り、ロシアは $^{48}_{20}\text{Ca}$ を天然Caから質量分離法により収集した。こうして共同チームは、 $^{48}_{20}\text{Ca}$ ビームをプルトニウム(Pu)からカリホルニウム(Cf)までのアクチノイド標的核に照射して114番から118番の新元素の合成に成功した⁴⁾。115番(リバモリウム)と117番(テネシン)がアメリカにちなんだ名前になり、114番(フレロビウム)、116番(モスコビウム)、118番(オガネソン)がロシアにちなんだ名前であるのは共同研究であることをよく示している。冷戦時代の宿敵が今回は手を結んだのである。

5. 理化学研究所での113番元素の合成

113番元素は、理化学研究所において冷たい融合の方法で合成された⁵⁾。以下でそれについて少し詳しく述べよう。

ドイツで冷たい融合による元素合成が行われていた頃、理化学研究所でも超重元素合成の計画が進んでいた。冷たい融合では、超重元素の原子番号が増えるに連れて合成される確率(断面積と呼ばれる)が指数関

数的に小さくなることが経験的に知られていた。確率（断面積）が小さいということは、それだけ多くの反応を起こさなければ目的の超重元素は得られない。参考のために、断面積の大きさを数値で表してみよう。原子核反応の断面積はバーン ($1\text{b}=10^{-24}\text{cm}^2$) を単位として表される。標的に衝突する断面積の日安として、例えば、鉛原子核の断面の大きさは1b程度である。これに対して108番のハッシウム (Hs) を冷たい融合反応で合成する反応断面積は約100pb (ピコバーン $=10^{-12}\text{b}$) である。超重核合成がいかに確率の小さい現象かわかるだろう。さらに、110番のダームスタチウム (Ds) では反応断面積は約10pb、112番のコベルニシウム (Cs) では約1pbとなる。ハッシウムの合成に比べてコベルニシウムでは100倍の時間がかかることになる。113番の場合、奇数番の元素の断面積は偶数番に比べて小さいことから、その断面積は0.1pb程度と予想された。これを解決するために、理化学研究所が開発したのがガス充填型反跳核分離装置 GARIS である。

ドイツで合成された107番から112番の超重元素は寿命がミリ秒程度と大変短く、できた元素（原子核）が何であるかを同定するために特別な装置が必要であった。これが反跳核分離装置である。高速の重イオンと融合してできた超重元素原子核（超重核）は標的から飛び出す。このときの速さは運動量保存則から決まるため、電場と磁場を組み合わせることで粒子を選別できる。目的の超重核ができたかどうかは、超重核の崩壊（主にアルファ崩壊）を測定して確かめるのだが、衝突反応では完全に融合しない反応が多数起こるため、完全に融合した粒子のみを選別しないと崩壊粒子を検出する検出器のスループットを超えてしまうのである。分離装置の性能が超重核の同定の精度を決めると言うてよい。ドイツで用いられた分離装置は装置内を真空にしたものであったが、理化学研究所ではこれに希薄（100Pa程度）なヘリウムガスを封入することで効率を高めることに成功した。

理化学研究所が用いた実験系は $^{209}\text{Bi}({}^{70}\text{Zn}, \text{n}) {}^{278}\text{Nh}$ である。これはBi標的にZn（亜鉛）のビームを衝突させ、できた複合核から中性子 (n) が1つ放出されて最後に113番元素が残る反応を意味している。冷たい融合では複合核の励起エネルギーが小さいため、中性子を1つ放出するだけで十分に冷却される。実験は2003年9月に開始され、最初の ^{278}Nh 候補の事象は2004年7月23日に観測された。Znイオンの加速には大強度のビームを作ることのできる線形加速器 (RILAC) が用いられ、この間に衝突したZnイオンの数は 1.7×10^{19} 個であった。また、ビーム衝突による

発熱で標的 (Bi) が融解するのを防ぐため、回転式標的（16枚の扇型標的を円盤上に並べて、これを高速回転させる）を用いた。では、どうやって未知の113番元素ができたことを確かめるのだろうか。反跳核分離装置によって選別された粒子は半導体検出器に導かれそのまま埋め込まれる。検出器直前の飛行時間計測装置によって粒子の速度を測定して粒子のおおよその質量を見積もり、検出器との時間相関を取ることによって検出された事象が埋め込まれた超重元素からのものであることを確かめる。こうして余計な信号を取り除いた後、超重元素の崩壊で放出されたアルファ粒子のエネルギーを測定する。アルファ崩壊のエネルギーは親核によって変わるので、既知の原子核に行き着けば同定できる。崩壊の最後が自発核分裂になることもあるが、分裂した破片のエネルギーを測定することで分裂した核の原子番号が推定できる。こうして、最後に崩壊した核の原子番号がわかることで、最初の超重核の原子番号を確定できるのである。より詳しくは、理化学研究所のホームページ <https://www.nishina.riken.jp/113/index.html> を見てほしい。

一例のみでは正式な発見とは認められないので、実験は続けられた。二番目の候補事象は2005年4月2日で1回目と同じく、4度のアルファ崩壊の後、Db（原子番号105）が自発核分裂で崩壊するというものであった。二つ目の事象の観測に要したZnイオンの数は 4.5×10^{19} 個であった。さらに三番目の候補事象が得られたのは長い時間を経て、2012年8月12日である。この事象ではアルファ崩壊は6度続いたが、 ^{262}Db は約50%の確率でアルファ崩壊と自発核分裂に分岐するため、予想されていた崩壊様式が得られたことになる。3つの事象を得るのに要したZnイオンの総数は 1.4×10^{20} 個であり、反応断面積は0.02pbと見積もられた。予想の5分の1という小ささで、この実験の困難さを示している。

ニホニウムという命名には後日談がある。日本は「にほん」とも「にっぽん」とも発音される。ニッポニウムも候補となりえたのだが、使えない理由があったのである。約100年前、当時は原子番号43番と75番の元素が未発見であった。後に東北大学総長を務めた小川正孝はトリウム鉱石から未知の元素の単離に成功した。彼はこれが原子番号43番の元素であると考えて1908年に発表し、ニッポニウムと命名したのである。後にこれが誤りであったことがわかり、ニッポニウムは幻に終わってしまった。一度登録された名称を使うことができないという制限のためニッポニウムを113番元素に使うことはできなかったのである。日本は英語ではJapanであるからジャポニウムという命名も

考えられた。しかし、森田は日本語の発音にこだわってニホニウムを選んだとのことである。

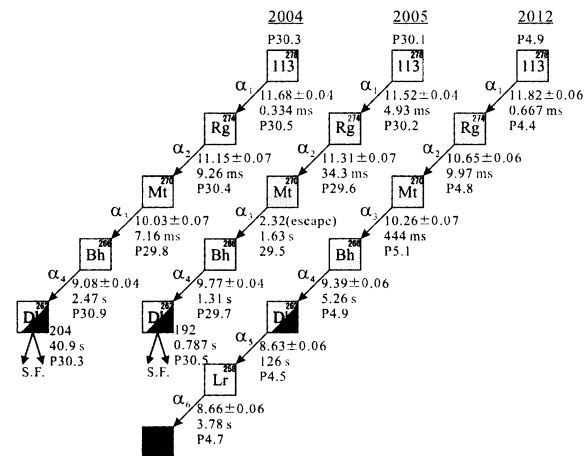


図2 理化学研究でのニホニウム合成における崩壊チェーン

6. 原子核反応としての超重元素合成

これまで述べたように、超重元素を合成するには適当な入射核と標的核の組み合わせで大きな原子番号を持つ複合核を作り、それが超重原子核として生き残る必要がある。図3にこの概要を示す。これは大まかにいえば、入射チャネルのクーロン障壁を乗り越えて接触するまでの過程、接触直後の大きく変形した核が平衡変形近くの安定領域に至る融合過程、励起した超重複合核が再分裂をかくぐって生き残る脱励起過程に分けられる。図に表したように、接触後すぐに再分離する準核分裂、励起複合核が再分裂する融合分裂などの枝分かれがある。超重元素合成においては、実は枝分かれと呼んだ過程がメインであり、超重元素合成に至るのはほんの一部にしか過ぎない。したがって、準核分裂過程を理解することが、超重元素合成過程を理解する上で不可欠となる。結果として、超重元素の合成断面積 σ_{SHE} は以下のように3つの因子の積として与えられる。

$$\sigma_{\text{SHE}} = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E_{\text{CM}}} \sum_J (2J+1) P_{\text{Stick}}^J(E_{\text{CM}}) P_{\text{Fus}}^J(E_{\text{CM}}) P_{\text{Surv}}^J(E^*)$$

ここで、 μ は換算質量、 E_{CM} は重心系での衝突エネルギー、 E^* は複合核の励起エネルギーである。また、 J は角運動量子数である。一つ目の因子 P_{Stick}^J は、入射核と標的核がクーロン障壁を越えて接触する確率を与えており、古典力学的には入射エネルギーがクーロン障壁より大きければ接触し、小さければ接触しない

というものである。二つ目の因子 P_{Fus}^J は、二つの原子核が接触してできる2中心形状を持つ原子核が平衡変形近くの形状に至る確率、つまり融合確率を表している。三つ目の因子 P_{Surv}^J は、励起状態にある超重複合核が脱励起過程で核分裂を免れる確率で生き残り確率と呼ばれ、中性子放出と核分裂の競合により決まる。

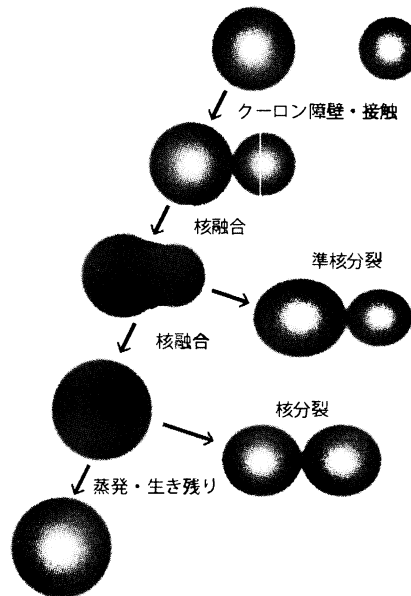


図3 超重元素合成反応過程の模式図

超重元素の合成断面積が非常に小さい理由は、融合確率と生き残り確率がどちらも小さいことである。融合確率が小さいのは接触した後コンパクトな形状に至ろうとする傾向（核力による表面張力）と二つに分裂しようとする傾向（静電斥力）の競合において静電斥力が優勢となるためである。さらに、二つの核が接触した後は、異なる核に属する核子同士の衝突により、元々持っていた相対運動のエネルギーが急速に散逸してしまってコンパクトな形状に向かう原動力が失われるため、超重元素の合成では準核分裂の確率が大きくなるのである。このように、重い原子核どうしの融合反応で融合確率が小さくなる現象は、融合障害と呼ばれている。接触時の静電斥力の強さは入射核と標的核の電荷の積に比例するので、融合確率もこの積によって変化すると考えてよい。生き残り確率が小さいのは、分裂と中性子放出の競合において分裂が優勢となるためである。超重核では分裂に対する障壁は低く、中性子の放出に要するエネルギー（中性子の結合エネルギー）に比べても小さい。このため、競合において分裂が優勢となり生き残り確率は小さくなるのである。励起エネルギーが大きくなれば、冷却するのに多くの中性子を放出する必要があるため、生き残り確率はよ

り小さくなる。

入射エネルギーを大きくすると融合確率の点では有利である。一方、複合核の励起エネルギーが大きくなるため脱励起において核分裂する割合が増加し、生き残り確率は小さくなる。冷たい融合では、放出される中性子はせいぜい1個であり、入射エネルギーを大きくしたとき融合確率が増える効果より、生き残り確率が減る効果の方が大きいため、入射エネルギーは主に衝突時のクーロン障壁によって決定される。これに対して熱い融合では、放出される中性子は3~4個であり、最適入射エネルギーも少し幅がある。これは、融合確率の増加と生き残り確率の減少が競合するためと考えられる。この入りやすさ(融合確率)と出やすさ(分裂確率)の競合という考え方は、次に述べる揺動散逸動力学では自然に取り入れられ、超重元素合成の過程を理解するのに役立つ⁶⁾。

7. 揺動散逸動力学

多くの自由度が関与する運動において、少数の自由度がゆっくり運動する一方で、多数の自由度は非常に速く運動し、したがって急速に熱平衡に達しているという状況は、様々な系で普遍的に見られる。この例として、いわゆるブラウン運動がある。ブラウンは破裂した花粉から流出し水面に浮遊した微粒子が不規則な運動をすることを発見し、様々な状況でその運動を観察した。この運動は、質量の大きい微粒子に質量のはるかに小さい多数の水分子が衝突を繰り返すことで生じる。微粒子は、多数の水分子との衝突で平均的にはエネルギーを失い(散逸)、時としてエネルギーの大きい分子との衝突でエネルギーを得る(揺動、ゆらぎ)。両者にはどのような関係があるのだろうか。アインシュタインは1905年にブラウン運動に関する理論を発表し⁷⁾、ゆらぎと摩擦との間の関係式として $D=kT/\gamma$ を与えた。ここで、 D は拡散係数、 γ は摩擦係数、 T は温度、 k はボルツマン定数である。その後ブラウン運動を記述する「運動方程式」がランジュバンによって与えられた⁸⁾。

$$m \frac{du}{dt} = -\gamma u + R(t)$$

ここで、 m はブラウン粒子の質量、 u はその速度である。 $R(t)$ はランダム力と呼ばれる不規則な力で、平均値が0で、相関が $\langle R(t)R(t') \rangle = 2\gamma kT\delta(t-t')$ である正規乱数として与えられる。すなわち、ブラウン粒子に対する摩擦力が強いほど、揺らぎも大きいことを示している。このように、摩擦力(エネルギー散逸)の強さと熱的なランダム力(揺動力)の強さの相関を結びつ

ける関係は揺動散逸定理と呼ばれる。

重い原子核の融合や分裂では、すべての核子(自由度)が関与する中で、原子核の形状というごく少数の自由度の時間変化を考えることになり、上で述べた揺動散逸動力学で記述するのに適している。ランジュバン方程式は、個々のブラウン粒子の運動を記述するもので、実際に意味があるのはその分布である。融合・分裂反応を揺動散逸動力学で記述するには、その過程に現れる原子核の形状を十分に取り込んだパラメータ空間を設定しなければならない。これを記述する運動方程式は、多次元ランジュバン方程式となる。融合過程を多次元ランジュバン方程式で扱くと、ランダム力によって様々な軌跡が描かれる。超重核合成反応では、平衡変形付近のポテンシャルのポケットに入る軌跡は少数で、多くの軌跡は接触後すぐにポケットとは逆向きに動いて分裂に至る。これが準核分裂であり、反応時間は 10^{-21} 秒のオーダーである。残りの軌跡はポケットに向かうが、 10^{-20} 秒のオーダーを経てもポケットに入らず結局分裂してしまう軌跡も存在する。有友らは、超重核領域では従来の準核分裂以外により深部まで到達しても、なお平衡変形領域に至らずに再分裂するメカニズムが存在する可能性を指摘し、これを深部準核分裂と呼んでいる⁹⁾。超重元素領域の核融合過程を理解するに当たって、準核分裂は最も重要なプロセスだと言える。

8. おわりに—第8周期の超重元素の合成に向けて

119番以降の元素は、周期表の第8周期に属すると考えられる。しかし、これまでの方法の延長ではその合成は難しい。「冷たい融合」は生き残り確率を上げるために大変有効な方法であったが、融合阻害による生成断面積の減少が著しく、少なくとも現在の装置では113番元素がその終着点であろう。 $^{48}_{20}\text{Ca}$ を用いる「熱い融合」は、118番元素までを合成できたが、120番元素を作るには原子番号100(Fm)の標的が必要となるのに対し、マクロ量のFm同位体を得るのは極めて困難である。一方、入射核として原子番号22のTiなどを用いると、 $^{48}_{20}\text{Ca}$ での中性子過剰度や魔法数のメリットがなくなり、生成断面積の減少が予想される。新しい方法として、融合反応でなく移行反応を用いるという手法もあるが、まだまだ基礎実験を行っている段階である。このように、118番元素の合成は、超重核合成のひとつの到達点であり、これから先に進むには新しい手法やより強力な実験機器が必要とされる。超重核合成への挑戦は、まだまだ続いているのである。

参考文献

- 1) Myers, W. D. and Swiatecki, W. J., Nuclear masses and deformations, Nucl. Phys., 81, 1-60 (1966); Nilsson, S. G., Tsang, C. F., Sobiczewski, A., Szymanski, Z., et al., On the nuclear structure and stability of heavy and superheavy elements, Nucl. Phys. A., 131, 1-66 (1969)
- 2) Seaborg, G. T. and Loveland, W. D., The elements beyond Uranium, John Wiley and Sons, New York (1990)
- 3) Hofmann, S. and Munzenberg, G., The discovery of the heaviest elements, Rev. Mod. Phys., 72, 733-767 (2000); Hofmann, S., Hesberger, F. P., Ackermann, D., Munzenberg, G., et al., New results on elements 111 and 112, Eur. Phys. J. A, 14, 147-157 (2002)
- 4) Oganessian, Yu. Ts., et al., Synthesis of nuclei of the superheavy element 114 in reactions induced by ^{48}Ca , Nature, 400, 242-245 (1999); Experiments on the synthesis of element 115 in the reaction $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, xn)^{291-x}\text{115}$, Phys. Rev. C, 69, 021601 (2004); Phys. Rev. C, 72, 034611 (2005); Synthesis of the isotopes of elements 118 and 116 in the ^{249}Cf and $^{245}\text{Cm}+^{48}\text{Ca}$ fusion reactions, Phys. Rev. C, 74, 044602 (2006); Synthesis of a New Element with Atomic Number $Z=117$, Phys. Rev. Lett., 104, 142502 (2010)
- 5) Morita, K., Morimoto, K., Kaji, D., Akiyama, T., et al., Experiment on the synthesis of element 113 in the reaction $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}\text{113}$, J. Phys. Soc. Jpn., 73, 2593-2596 (2004)
- 6) Aritomo, Y., Wada, T., Ohta, M. and Abe, Y., Diffusion mechanism for synthesis of superheavy elements, Phys. Rev. C, 55, R1011-R1014 (1997)
- 7) Einstein, A., Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, Ann. Phys., 17, 549-560 (1905)
- 8) Langevin, P., On the theory of Brownian motion, C.R. Acad. Sci. (Paris), 146, 530 (1908)
- 9) Aritomo, Y. and Ohta, M., Dynamical calculation for fusion-fission probability in superheavy mass region, where mass symmetric fission events originate, Nucl. Phys. A., 744, 3-14 (2004)