

日本発、アジア初の快挙

113番元素ニホニウム 発見の軌跡



国立研究開発法人理化学研究所（以下、理研）をはじめとする日本の研究グループが発見した113番元素「nihonium(ニホニウム)」(元素記号Nh)。日本発、アジア初の新元素発見という歴史的偉業はどのように達成されたのか。そしてニホニウムはどんな未来を切り拓くのか。ニホニウム発見の軌跡をたどり、元素探索がもたらす可能性を探る。

自然界に存在しない超重元素を合成する

元素周期表は年々拡張している。1869年にロシアのドミトリ・メンデレーエフが提唱した元素周期表には原子番号1番水素(H)から82番鉛(Pb)まで、そして1871年に発表した第二周期表には天然で最も重い92番ウラン(U)まで掲載されたが、まだ空欄が残っていた。ウランまでの元素は自然界に安定して存在するため、一部の例外を除き次々に発見されたが、全てを埋めるためには1930年代の加速器の登場を待つ必要があった。

93番ネプツニウム(Np)以降の重元素は自然界には存在せず、人工的に合成することで、その存在が確認されてきた。特に104番ラザホージウム(Rf)以上の超重元素は、生成量が極端に少なく、化学的性質の分析結果だけで新元素の合成を証明することは難しい。さらに超重元素は全て不安定で、より安定な元素へと短時間で崩壊してしまう性質を持つ。そのため新元素の合成を証明するためには、その元素が崩壊連鎖を起こして既知の原子核へ到達していることの確認が重要になる。

現在の新元素探索は、加速された重イオンビームを標的核に照射し、融合(重イオン核融合)させることで、新元素を合成する手法が主流となっている。重イオン核融合は、照射する核と標的に用いる核の組み合わせにより、さらにHot fusion(熱い核融合)反応とCold fusion(冷たい核融合)反応の2つの手

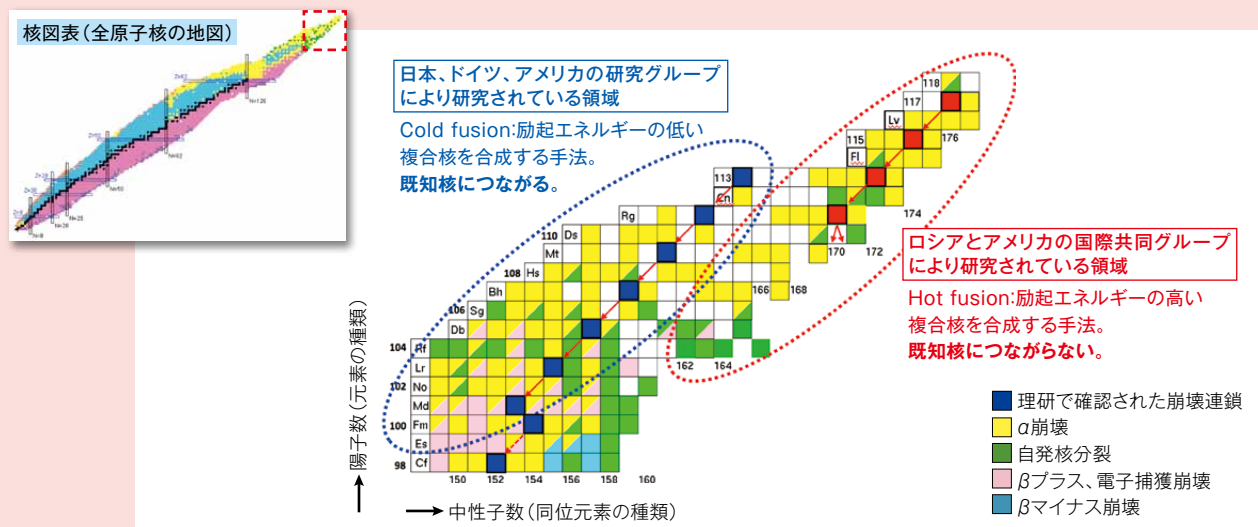
法に分類される(図1)。今回の113番元素の合成にあたって、合成された核の α 崩壊が既知の核に到達する可能性が高いことを重視して、Cold fusion反応を採用した。

亜鉛とビスマスの原子核を衝突させる

113番元素の合成の原理は数字の上では単純だ。30番亜鉛(Zn)の原子核と83番ビスマス(Bi)の原子核を衝突させ、融合させれば $30 + 83 = 113$ 番元素が出来上がる。難しい点は原子核の大きさが1兆分の1cmと余りにも小さくほとんど衝突しないこと、たとえ衝突したとしても融合する確率が100兆分の1と大変小さいことだ。1兆分の1cmだから狙うことは不可能なため、大量の亜鉛原子核をビームにしてビスマスに当て続けた。

理研の実験は2003年9月に始まり、2004年7月23日に1つ目の113番元素が合成された。これを確認するためには、新元素の陽子数が113個であることを証明すれば良いのだが、数えられない。そこで原子核から α 粒子(ヘリウムの原子核で原子番号2、質量数4)が放出される現象を観測して、証明した(図2)。新元素から3秒間のうち次々と4個の α 粒子が放出され、約40秒後には核分裂を起こした。4個目の α 粒子のエネルギーは既知のボーリウム同位体(Bh:原子番号107、質量数266)が出す α 粒子のエネルギーとほとんど同じだった。したがって、ドブニ

●核図表上で見る超重元素の合成(図1)



ウム同位体 (Db: 原子番号105、質量数262) に至るまで4回の α 崩壊を起こした原子核は、1回の α 崩壊によって原子番号は2減ることから、 $105 + 2 + 2 + 2 + 2 = 113$ 番元素だったに違いないと結論付けられる。

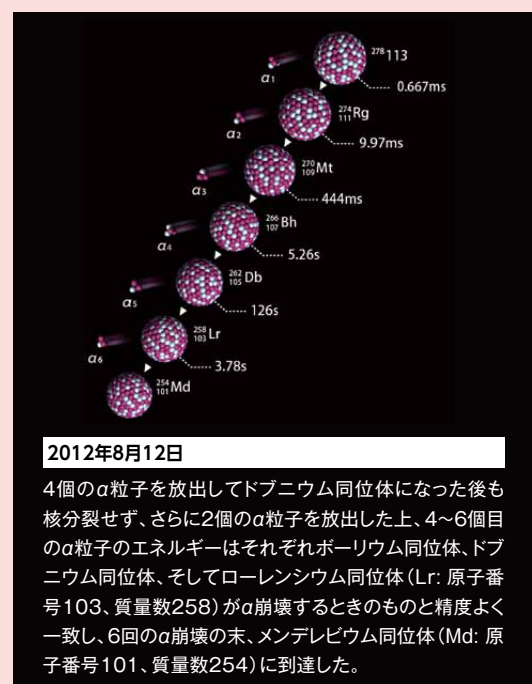
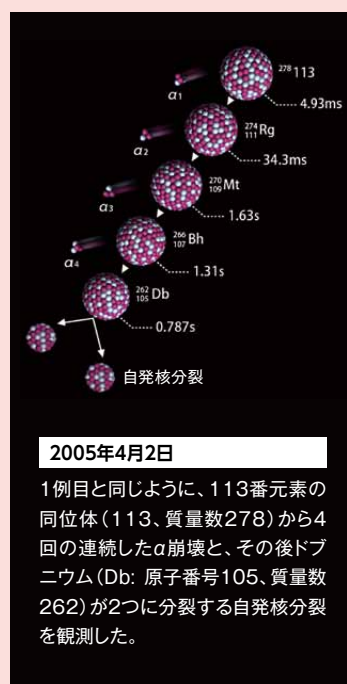
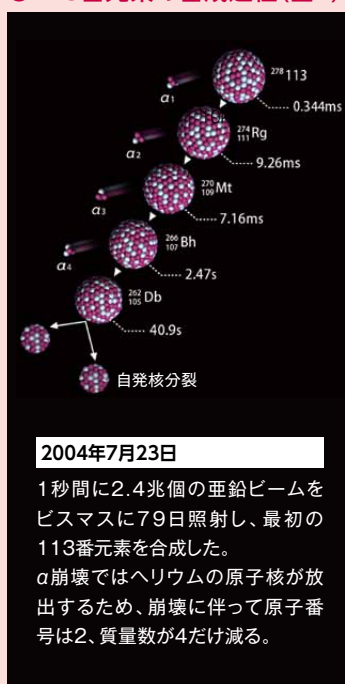
たった1例では信頼性は高くない。さらに実験は続き、2005年4月2日に2つ目を確認した際には、1つ目と同様の4回の α 崩壊後、核分裂を観測した。崩壊連鎖は既知の核であるボーリウム同位体に到達している。しかしながら報告例の統計が2例では少ない。核分裂をせずに6回の α 崩壊を観測できれば、決定的

な証拠となる。さらに実験は続き、2012年8月12日とうとう3つ目を観測することに成功した。

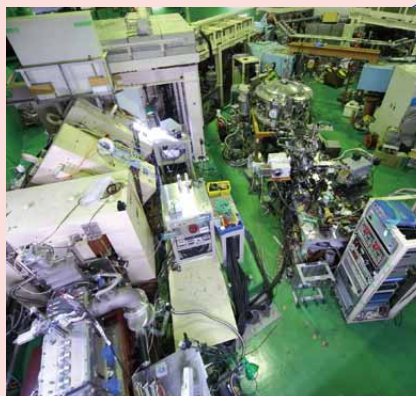
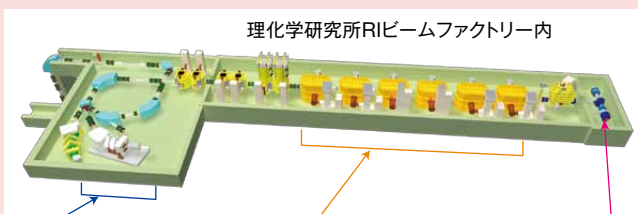
新元素探索の熾烈な国際競争

一方、理研の研究の同時期に、ロシアとアメリカの共同研究グループが、カルシウム同位体 (Ca: 原子番号20、質量数48) のビームを、アメリシウム同位体 (Am: 原子番号95、質量数243)、

●113番元素の合成過程(図2)



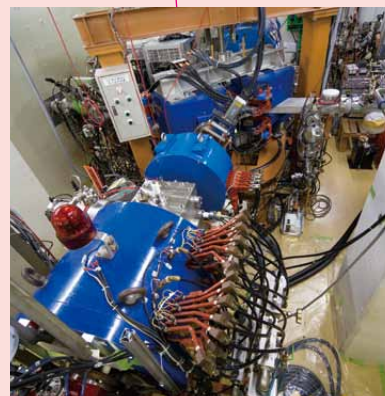
●ニホニウムを合成した装置群(図3)



気体充填型反跳分離器GARIS



線型加速器RILAC



ECRイオン源

バークリウム同位体 (Bk:原子番号97、質量数249)、カリホルニウム同位体 (Cf:原子番号98、質量数249) に照射する実験を行い、115、117、118番元素を合成し、またそれらが連鎖崩壊していく過程を捉えたことで、113番元素を含む4つの新元素発見を主張していた。その実験結果は、合成例が多いものの、どれも崩壊後に既知の同位体に至っていないという問題点があった。

新元素発見に関わる審議は国際純正・応用化学連合と国際純粋・応用物理学連合が推薦する5人で構成された合同作業部会JWP (Joint Working Party) で行われる。113番元素の発見の審議は、2007年から始まった。日本は2004年と2005年の113番元素の合成成功をもって発見を主張したが、2回の合成成功では統計が少ないことや既知核への到達が確立されていないなどの理由から、当時は発見の主張は不十分であるとされた。

JWPはその後、2012年に再度113番元素の発見の審議を始めた。そこで日本は2例の合成成功に加えて、2009年に成功したボーリウム同位体の合成によって113番元素合成時の崩壊経路を別の合成過程からも確認できたこと、2012年に合成した113番元素が既知の原子核である101番メンデレビウム (Md) に到達したことをもって、発見を主張した。これが認められ、今回の発見者認定に至った。

最初の超ウラン元素である93番ネプツニウムが1940年に発見されて以降、アメリカとロシア、ドイツが激しい競争を繰り広げてきた。93番から103番ローレンシウム (Lr) まではすべてアメリカが発見し、104番ラザホージウム (Rf) から106番シーボー

ギウム (Sg) まではアメリカとロシアが争い、107番ボーリウム (Bh) から112番コベルニシウム (Cn) まではすべてドイツが発見してきた。そして、今回の113番発見により欧米諸国以外に初めて命名権が与えられた。熾烈な国際競争の末、元素周期表に日本発、アジア初の元素が加わった。

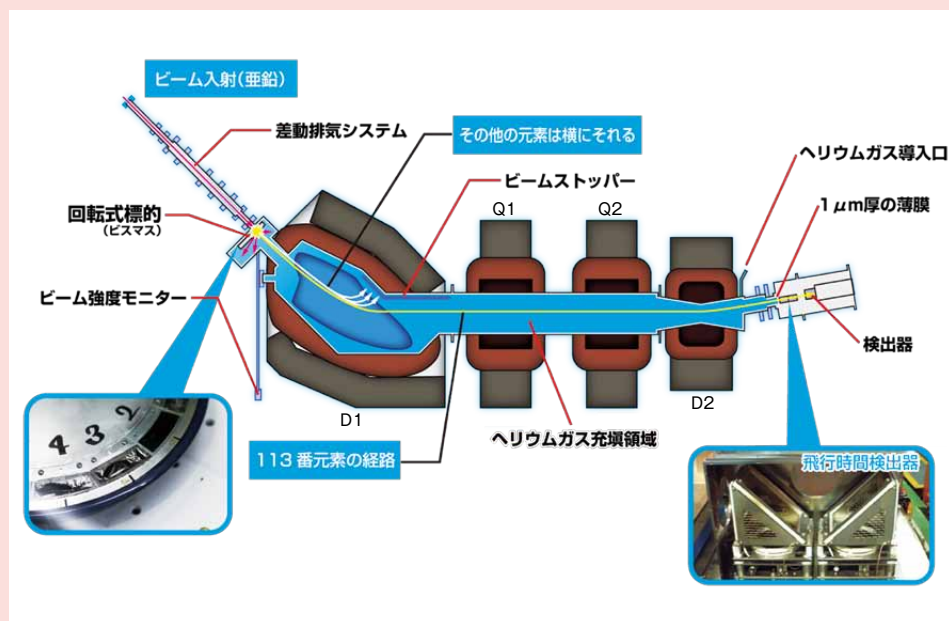
113番元素は日本にちなんでニホニウム (Nh) と名付けられたのと同時に、115、117、118番元素も新元素として認定され、115番元素はロシアのモスクワ州にちなんでモスコビウム (Mc)、117番元素はアメリカのテネシー州にちなんでテネシン (Ts)、118番元素はロシアの物理学者ユーリイ・オガネシアンにちなんでオガネソン (Og) と命名された。これで元素周期表は第7周期まで全て埋まった。

日本の科学技術力を世界に示した装置群

113番元素の合成を成功に導いた実験は、理研の重イオン加速器施設RIビームファクトリーの重イオン線形加速器RILACや、気体充填型反跳分離器GARISと呼ばれる装置を用いて行われた(図3)。

GARISは当初、理研リングサイクロトロンRRCと組み合わせられ、超重元素合成の研究が行われ、放射性同位元素の85番アスタチン (At)、86番ラドン (Rn)、87番フランシウム (Fr) の新同位体を発見した。しかし超重元素の融合反応にはRRCでは加速可能な最低エネルギーが高すぎることから、より最適なエネルギーかつより大強度のビーム供給が渴望された。そこで18GHz-ECR

●GARISの仕組み(図4)



GARISは4つの電磁石の磁力を利用して、目的とするイオンを計測上妨害となる荷電粒子から分離して検出器へと集める働きをしている。双極子電磁石(D1、D2)は分離の役割、四重極電磁石(Q1、Q2)は収束の役割を果たす。四重極電磁石は中心から遠ざかるに従って磁場が強くなるように製作されているため、発散して中心から外れた粒子をビーム軌道中心方向へ曲げて集めることができ、ビームを細く絞ることができる。

イオン源、周波数可変RFQ加速器、CSM加速器が、RILACの最高エネルギー向上と大強度ビーム化への対策として開発された。GARISはRILAC照射室へ移設され、同時に各電磁石間距離が最適化され収集効率の改善がなされ、大強度重イオンビームを利用した効率の高い超重元素探索を可能にした。このような経緯を経て、RILACとGARISを利用して113番元素の実験装置が整備された。

113番元素合成の実験で、世界最高のビーム強度を誇るRILACは、1秒間に2.4兆個もの亜鉛原子を光速の10%まで加速し、ビスマスの標的に照射した。しかし、このビームは強力過ぎるため、厚さ1万分の5mmのビスマス標的に穴を開けてしまう。そこで同じ場所にビームを当て続けないように、標的を円盤上に並べ3,000回転/分以上で回し、1カ所に続けて当たるのを避けた。

このような工夫をしても113番元素が合成されるのは、非常に稀なことだ。そのうえ合成できても大量の亜鉛ビームに混じってしまい、その中から113番元素だけを選び分けなければならない。あたかも浜辺の砂の中から一粒のダイヤモンドを探し出す役割を果たしたのが、GARISだった。

GARISは電磁石で粒子の進路を曲げて113番元素を選び分けた(図4)。電磁石の鉄心材に純鉄を使うことで高磁束密度、高透磁率、低保磁力を図った。GARIS内にヘリウムガスを充填することでガスと衝突して電荷が平均的な分布を持つようになる。そうすることで、標的から反跳した時点での電荷状態によらずに検出系へ高効率で輸送することができるようになった。

これらの装置はいずれも日本の研究者が自ら設計し、日本

の企業が実現したものだ。113番元素発見は日本の科学技術力の高さを世界に示す好事例にもなった。

究極の超重元素を求めて

超重元素の領域では原子核が持つ大きな核電荷によって電子軌道が大きく変化し(相対論的効果)、軽い元素の周期性からは予測もつかないユニークな性質の出現が理論的に予測されている。1個の原子を取り扱う究極の微量元素分析技術を開発し、新しく発見された元素の化学的性質や電子構造を実験的に解明することは、今後の化学の重要なテーマとなる。

日本の研究グループは、理研を中心とした国際共同研究のもと、第8周期元素である119番以上の原子番号を持った新元素の探索に挑戦する。119番、120番を合成するためには、96番キュリウム(Cm)といったアクチノイドを標的にし、23番バナジウム(V)や24番クロム(Cr)のビームが必要だと考えられている。

超重元素の先には「安定の島」と呼ばれる未知の領域があるとされている。この領域にある原子核の寿命は、量子力学的な効果によって極めて長くなると予想されている。安定の島に至る道筋を見つけ出し、約1万種類あるとされる原子核の地図と言える核図表上の新領域を開拓する元素探究が続けられている。

●取材協力 理化学研究所 仁科加速器研究センター
●文 杉山 香里