

## 113 番元素発見: 理研 RIBF での超重元素合成

### RIBF ACCELERATORS AND SYNTHESIS OF THE NEW ELEMENT [113]

上垣外修一<sup>#</sup>

Osamu Kamigaito<sup>#</sup>

RIKEN Nishina Center

#### Abstract

The RIKEN collaboration team headed by Dr. Kosuke Morita has been officially recognized by International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) as the discoverer of the element [113], which was synthesized in the RI-Beam Factory (RIBF) of RIKEN Nishina Center. In response to the invitation of the IUPAC, the team proposed a name “nihonium” and a symbol “Nh” for this new element in June, 2016. This paper describes R&D efforts of the RIBF accelerators carried out for the super-heavy element research in RIKEN. A brief summary of the history of the artificial elements is also shown, while focusing on the accelerators that played important roles in the synthesis of the elements.

#### 1. はじめに

2015 年の大晦日、「113 番元素の命名権獲得」というニュースが全国を駆け巡った。理化学研究所の森田浩介氏らの研究グループが 113 番元素の発見者であると国際純正・応用化学連合 (IUPAC) によって認められ、この元素の名前と記号を提案するよう要請されたという報道である[1]。年が明けて間もなく、IUPAC から正式な Technical Report が公表され[2]、長い歴史を持つ元素の周期表に、日本で合成・発見された元素の名前が加えられることになった。研究グループは 6 月に「nihonium (Nh)」を提案し[3]、順調に進めば来年はじめまでには命名される予定である。

この 113 番元素は理研 RI ビームファクトリーの重イオン線形加速器 RILAC を使って合成されたものである。ECR イオン源で生成された  $^{70}\text{Zn}$  イオンを約 5 MeV/u まで加速し、 $^{209}\text{Bi}$  の回転標的に照射して合成、それを気体充填型反跳分離器 GARIS で入射ビームから分離し、焦点面に置かれた位置検出器に埋め込んで  $\alpha$  崩壊を観測した。2003 年 9 月から始まった実験は 2012 年 8 月まで断続的に続けられ、その間に合計 3 例の 113 番元素の合成が確認された。

元素合成の研究は 80 年以上前から欧米を中心に行われてきた。この論文では、これまでの元素合成の歴史と、そこで重要な役割を果たした加速器を解説し、理研での超重元素合成研究の経緯および今後の展望を紹介する。

#### 2. 元素合成の歴史概観

これまで人工的に合成された元素は 29 種類にのぼるが、そのうち 25 種類は加速器を用いて初めて作られている。現在 118 番元素まで、すなわち周期表の第 7 周期までが確認されている。人工元素の中でも超アクチノイド元素 (104 番以上) は特に「超重元素」と呼ばれている。この節では超重元素を含めた元素合成の歴史を振り返る[4][5]。

「元素」はもともと物質の根源を意味する言葉であり、

<sup>#</sup> kamigait@riken.jp

その研究には長い歴史がある。近代的な「化学元素」の概念の確立、周期表の発案、物質の構成要素である原子とその構造の理解などを経て、1930 年代半ばまでに天然元素のほぼ全てが欧州諸国の科学者によって発見された。一方、この頃、原子核反応による「元素の変換」が提案され、ウランより重い元素を人工的に合成する試みが始まった。

これはちょうど加速器の発明・発展とそれを用いた原子核物理学の隆盛の時期と重なる。ローレンスのサイクロトロンを擁していたアメリカは、1950 年代半ばまでに 93 番 (Np) から 101 番 (Md) までの半分以上を含む 8 種類の新元素を次々と合成した。次にアメリカは 1950 年代後半、重イオン線形加速器を建設してさらに重い新元素の合成に挑むが、旧ソ連も大型サイクロトロンを建設し、米ソの重イオン加速器による熾烈な競争が始まった。102 番 (No) から 106 番 (Sg) まではこのような状況のもとで合成された。

1970 年台、旧ソ連でアクチノイド標的を用いない核融合反応が提案され、アクチノイド標的を用いる「Hot Fusion 反応」に対して、「Cold Fusion 反応」と呼ばれた。1976 年にドイツで建設された重イオン線形加速器はこの方法を採用し、1990 年代半ばまでに 107 番 (Bh) から 112 番 (Cn) までを合成した。しかしながら生成断面積は原子番号の増加に伴って急速に減少していき、それ以上の合成は困難と思われた。一方、冷戦終結後のロシアでは、アメリカとの共同研究体制のもと、1978 年に完成した大型 AVF サイクロトロンとアクチノイド標的を用いて、元素合成が活発に行われるようになった。理研での元素合成が本格化したのはこの頃であるが、詳細は後述する。

#### 3. 元素をつくる加速器

加速器、標的の製造、元素の分離と検出に関する様々な技術革新は、新たな元素の合成の原動力となってきた。ここでは元素合成に重要な役割を果たしてきた加速器について解説する。

##### 3.1 アメリカ

前節で触れたように、初期の元素合成で決定的な役割を果たしたのは Berkeley の 60 インチサイクロトロンで

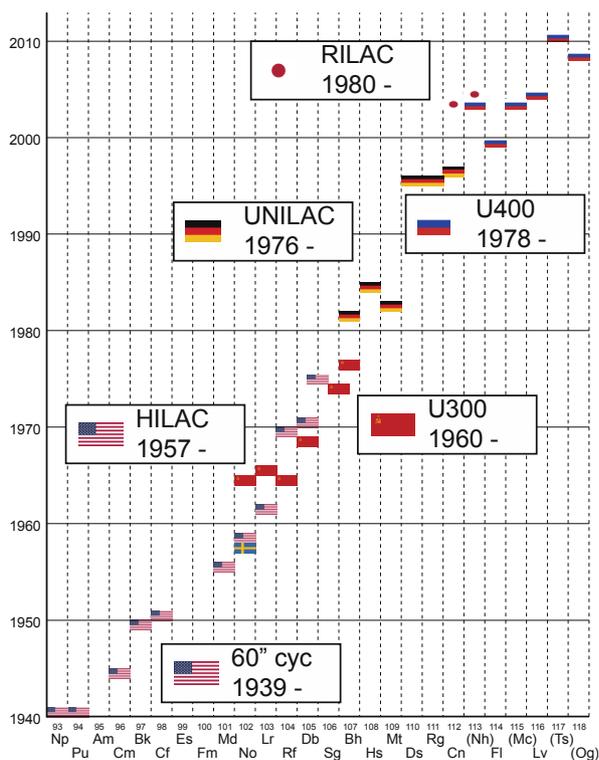


Figure 1: History of the element synthesis based on accelerators. The year of the first claim from the research groups for the discovery of each element is plotted. The data are taken from [4], [13], and [16]. The abbreviations of the accelerators are presented in the text.

あった[6]。研究の中心を担ったのは McMillan、Seaborg、Ghiorso らである。彼らはまずこのサイクロトロンで  $\alpha$  粒子までの軽イオンを加速し、1955 年までに 101 番元素 (Md) までを合成した。

1957 年に Berkeley では重イオン線形加速器 HILAC (Heavy Ion Linear ACcelerator) [7] が建設された。HILAC は 70 MHz の Alvarez 型 DTL を主体としており、アルゴンまでの重イオンを 10 MeV/u まで加速できた。パルスモードではあるものの、Duty Factor は数%から数 10 % と比較的高く、炭素や窒素などの重イオンビームをマイクロアンペア級の強度で加速して 102 番元素 (No) から 105 番元素 (Db) までを合成した。その後 HILAC は 1972 年に SuperHILAC に更新された[8]。ウランまでの全てのイオンを 8.5 MeV/u まで加速可能になったこの加速器は、1974 年に酸素イオンを加速して 106 番元素 (Sg) を合成した。

この時期におけるアメリカの実験では、キュリウムやカリホルニウムといった重いアクチノイド標的が用いられた。1950 年までに加速器で合成・発見された新しい元素が原子炉で製造されるようになり、標的として用いられたのである。アクチノイド標的核と入射核との融合反応で生成される複合核は 40–50 MeV 程度の高い励起状態にあり、複数個の中性子を放出して基底状態に落ちる[5]。この反応は後述する「Cold Fusion 反応」と対比して「Hot Fusion 反応」と呼ばれている。

さて SuperHILAC は 1974 年に Bevatron への入射器としての改造が施され (Bevalac)、Berkeley では高エネルギー重イオンビームを使った原子核物理学実験が行われたが、1992 年に運転を停止した。その後の米国の超重元素研究の中心は、1962 年に稼働開始した 88 インチサイクロトロンに移った[9][10]。

### 3.2 旧ソ連およびロシア

旧ソ連では 1960 年、Dubna にある FLNR において、磁極直径 310 cm、K 値 250 MeV を持つ弱収束型サイクロトロン U300 が建設された[11]。Flerov、Oganessian らは、このサイクロトロンを用いて 102 番 (No) 以降の元素合成実験を行った。

Dubna での実験で用いられていたアクチノイド標的はせいぜいアメリシウムであったが、1974 年、Oganessian らはより安定な原子核同士を融合する「Cold Fusion 反応」を提案し[12]、106 番 (Sg)、107 番 (Bh) の合成を報告した [13]。この反応で生成された複合核は 10–15 MeV 程度の比較的低い励起状態にあり、せいぜい 2 個の中性子を放出して基底状態に落ちる[5]。またこの方法は次に述べるドイツ GSI での新元素合成にも使われた。

その後 Dubna のグループは、磁極直径 400 cm、K 値 625 MeV を持つ 4 セクター AVF サイクロトロン U400 を建設し、1978 年に稼働させた[14]。このサイクロトロンは荷電変換膜を使ってビームを取り出す方式を採用している。1996 年に ECR イオン源が装備されてからビーム強度が大幅に向上し、たとえば  $^{48}\text{Ca}$  ビームの強度は最高 1.4  $\mu\text{A}$  と報告されている[15]。

Oganessian らは 1999 年以来、U400 で大強度  $^{48}\text{Ca}$  ビームを加速し、プルトニウム、キュリウム、カリホルニウム、バークリウムといったアクチノイド標的に照射して、114 番 (Fl) から 118 番までの元素を合成したと報告した。これらの標的の多くはアメリカのグループによって共同研究体制のもと用意されたものである。 $^{48}\text{Ca}$  ビームによる超重元素の生成断面積は Cold Fusion 反応よりも一桁以上大きいものの、生成された原子核は既知核に到達する前に崩壊していた。114 番元素の命名権が 2011 年に露米チームに与えられて以来、それより重い元素の命名権はこれら Hot Fusion 反応を用いて合成した研究チームに与えられている[16][2]。

### 3.3 ドイツ

ドイツ Darmstadt の重イオン研究所 GSI では、1976 年に重イオン線形加速器 UNILAC (UNiversal Linear ACcelerator) を完成させた[17]。当初は 27 MHz の Wideröe 型 DTL で 1.4 MeV/u まで加速し、荷電変換部を経て 108 MHz の Alvarez 型 DTL で 11.4 MeV/u まで、さらに同じ周波数の single gap 共振器で 13 - 17 MeV/u まで加速する構成をとっていた。ウランまでの全てのイオンを加速できるのが特長で、単独実験の他、1989 年に完成したシンクロトロン SIS18 の入射器としても利用されてきた。なお単独運転の場合の Duty Factor は最高 25 % である。

UNILAC では、上で述べた Cold Fusion 反応を使って、Münzenberg、Hoffmann らが 1980 年代に 107 番 (Bh) から 109 番 (Mt) までを合成した。1991 年に、ECR

イオン源と 108 MHz の RFQ および IH 型 DTL を備えた新入射器 HLI が付加されると[18]、増強された金属イオンビームを用いて、1996 年までに 110 番(Ds)から 112 番(Cn)までを合成した。2003 年には 113 番元素の合成を試みたが、低い生成断面積のため確認に至らなかった。2000 年代後半からは、ロシアと同様、アクチノイド標的を用いた Hot Fusion 反応により実験を行っている。

なお、UNILAC は SIS18 の入射器としても改良を重ねており、2000 年には Wideröe 型に代えて 36 MHz の RFQ + IH 型 DTL からなる大電流入射器 HIS が導入された[19]。MEVVA イオン源からのウランビームを、ミリアンペア級のピーク電流で加速している。

以上に述べた元素合成の経緯を、加速器および国名と併せて、Figure 1 に示した。

#### 4. 理研における超重元素合成

この節では理研における超重元素合成計画の経緯を紹介する。更なる詳細はこの計画のリーダー達による解説[20][21][22]をご参照いただきたい。

##### 4.1 理研加速器研究施設

理研で超重元素合成実験が計画されたのは、RI ビームファクトリー (RIBF) [23] の前身である理研加速器研究施設においてである。これは、1980 年に完成した重イオン線形加速器 RILAC (RIKEN Heavy-Ion Linear Accelerator) [24] を入射器とし、1986 年に完成したリングサイクロトロン RRC (RIKEN Ring Cyclotron) [25] を主加速器とする施設で、気体充填型反跳分離器 GARIS は RRC の下流にある E1 という実験室に置かれていた。

ここで RILAC について述べておく。RILAC はサイクロトロン入射器とするため、可変周波数かつ連続 (CW) 運転という、世界で唯一の特長を持ったドリフトチューブ型線形加速器である。6 台の 1/4 波長共振器はショート板の駆動によって 17 MHz から 45 MHz まで周波数を変えることができ、また実効加速電圧は約 16 MV である。RRC を通して GARIS にビームを供給する場合には、低いエネルギーにするため、ほぼ最低周波数で運転することが必要であった。RILAC の完成当初の入射器は Cockcroft-Walton であった。高圧ターミナル上には PIG イオン源が、のちに 8 GHz の ECR イオン源 (Neomafios) が置かれたが、超重元素合成に必要なビーム強度は得られなかった。

そこで、1992 年、超重元素合成実験に大強度ビームを供給すべく、「金属イオン源計画」が立ち上がった[26]。強力な ECR イオン源と、RILAC への入射用 RFQ を開発することが目標であった。その結果、1996 年に、当時世界最高性能の 18 GHz ECR イオン源[27]と、CW 運転可能な可変周波数 RFQ[28]が完成した。

これによって RRC から得られるビーム強度は格段に増え、たとえば 1999 年には 1 pA 以上の  $^{86}\text{Kr}$  ビームを GARIS に供給して、当時話題になった 118 番元素の検証実験を行った[29]。しかしながら本格的な超重元素の合成実験を行うには至らなかった。その理由の一つは、RRC のビームエネルギーが高すぎたことである。RRC の

設計仕様はハーモニクス 9 での運転で、そのときの最低エネルギーは 10 MeV/u である。そこで、GARIS の実験に必要な 5 MeV/u までエネルギーを下げるべく、ハーモニクスを 13 にして加速したが、当時は RF 系が不安定であったうえ、ビームの通過効率が上がらなかった。もう一つの理由は次に述べる RIBF 計画の影響である。

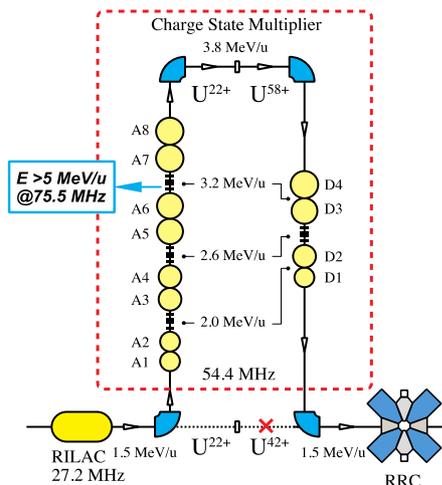


Figure 2: Conceptual drawing of the “Charge-State Multiplier” system.

##### 4.2 RI ビームファクトリー計画と RILAC 増強

上述した「金属イオン源計画」のイオン源と RFQ の建設が始まって間もない 1994 年 5 月、「RI ビームファクトリー計画」が提示された[22][30]。当初の計画は、RILAC と RRC の後段に超伝導リングサイクロトロンを建設し、ウランビームを 150 MeV/u まで加速して RI ビームを発生させるものであった。

計画当初の問題の一つは、ウランビームを荷電変換する際のスピードの不整合であった。Figure 2 を用いて状況を説明する。当時計画していた SRC は、RRC からのビームのスピードを約 2.2 倍にするサイクロトロンであった。最終エネルギーを 150 MeV/u と決めると、上流の加速器のスピードや運転周波数が一意に決まり、RILAC の周波数は 27.2 MHz、エネルギーは 1.5 MeV/u となる。ところが、このエネルギーにおいて炭素膜で荷電変換すると、予想される価数は 42+ となり、低すぎて RRC で受けられない。

そこで考えられたのが Figure 2 に示す「Charge State Multiplier」というシステムである[30]。まず RILAC からのウランビームを 3.8 MeV/u まで加速してから荷電変換する。このエネルギーで予想される価数は 58+ である。これを元と同じ 1.5 MeV/u まで減速すれば、RRC で受けられることになる。検討した結果、加速部分と減速部分をそれぞれ 2 台と 1 台の同一の共振器でユニット化し、4 ユニートを製作すれば、所定の目的を果たせる見通しが立った[31]。そして 1998 年に第 1 ユニートの建設を開始した。RILAC の倍の周波数で動作する、可変周波数 1/4 波長型の 8 ギャップ共振器である。

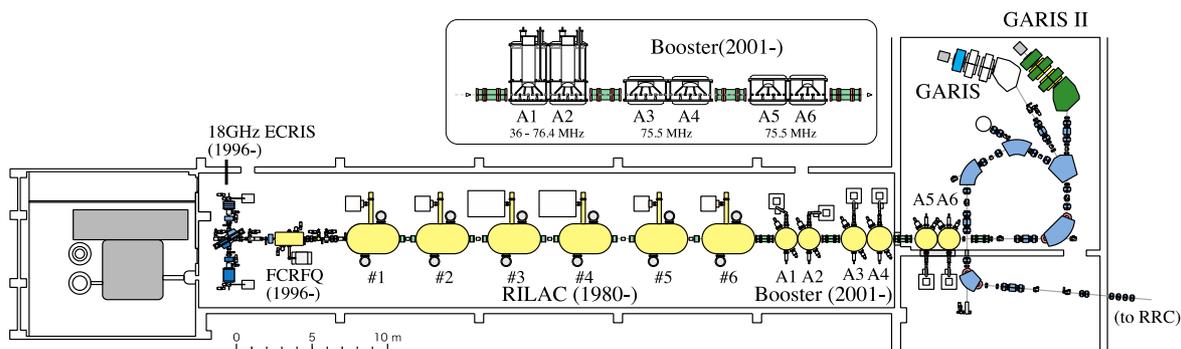


Figure 3: Present configuration of the RILAC facility at RIKEN Nishina Center.

この時点で、Figure 2 に示すように、第 3 ユニットの加速部分までを最高周波数で動かせば、超重元素合成実験に必要なビームエネルギーが得られることは明らかであった。ちょうど当時、RIBF 計画が理研と東京大学原子核科学研究センター (CNS) との共同運営となることになり、その一環として 1999 年、CNS が第 2、第 3 ユニットの加速部分、すなわち固定周波数の共振器 4 台分の建設費用を出資することになった[21][22]。

この決定によって事態は急展開した。理研では直ちに加速共振器 4 台の製作に取りかかるとともに、共振器とビームラインの配置、GARIS の移設、リニアック棟実験室の全面改装などが急ピッチで検討され決定された。当時既に RIBF 棟の建設が始まっていたため、GARIS や共振器など大型装置の搬入経路やスケジュールが大問題であったが、隙間のない工程の間を縫うようにして 2000 年 6 月から搬入が始まり、7 月に設置が完了した[20]。配置図を Figure 3 に示す。その後 CSM 共振器 (いまや RILAC ブースター) の高電力試験や調整を行い、2001 年 5 月に加速試験に成功した[32]。

#### 4.3 RILAC での超重元素合成

加速試験後、ビームの安定化のためのさまざまな改良を行い、2002 年 3 月から新生 GARIS にビームを供給、7 月から本格的な超重元素合成実験が開始された。合成方法は Cold Fusion 反応であり、核子あたり約 5 MeV/u の  $^{58}\text{Fe}$ 、 $^{64}\text{Ni}$  ビームが必要であった。ECR イオン源からは MIVOC 法を用いて約 1  $\mu\text{A}$  の大強度ビームが供給され[33]、翌年の 5 月までに 108 番 (Hs)、110 番 (Ds)、111 番 (Rg) が次々に合成されていった。GARIS チームの計測室は RILAC 制御室の一角にあるため、超重元素が續々と観測される現場を加速器グループも体感することができた。この時期の一連の実験で GSI の結果が確かめられ、合成反応の励起関数が測定された。

113 番新元素の合成実験は 2003 年 9 月に開始された。それに先立ち、 $^{70}\text{Zn}$  の酸化物ロッドでのビーム生成試験が繰り返された[34]。同年 12 月までの実験では合成が確認されず、翌 2004 年 4 月にいったん 112 番 (Cn) に戻って実験を行い、6 月までに 2 例の 112 番元素が確認された。同年 6 月末、RRC の加速共振器に重故障が発生したため、急遽 113 番の実験が再会され、7 月 23 日夕刻に最初のイベントが観測された[35]。翌年 4 月には第 2 例が確認されたが、2011 年の IUPAC Technical Report[16]では命名が認められなかった。第 2

例の観測以降も 113 番元素合成およびその関連実験は断続的に行われ、ついに 2012 年 8 月、第 3 例が観測された。このイベントはそれまでの 2 例と異なり、崩壊鎖中の  $^{262}\text{Db}$  が自発核分裂を起こしておらず、その先の  $^{254}\text{Md}$  までの  $\alpha$  崩壊が確認された[36]。その後命名権の審査が行われ、冒頭の公表につながった。2003 年の実験開始以来、113 番元素の合成のためにビームを供給した日数は 576 日に及んだ。

#### 4.4 RIBF 加速器計画の変遷と現状

ここで、2000 年以降の RIBF 計画の変遷を紹介したい。1999 年、アメリカで大規模な RI ビーム加速器施設「RIA 計画」の検討結果がまとまった[37]。超伝導線形加速器によるマルチチャージ加速を基軸にしたこの計画は、大強度ウランビームを 400 MeV/u まで加速することを想定しており、RIBF 計画を遥かに超える RI ビーム生成能力を目指すものであった。理研では RIA 計画への対抗策が検討された結果、Figure 4 (b) に示すように、RRC と IRC の間に速度を 2 倍にするサイクロトロンを入れ、RILAC を最低周波数で動かすことが提案された[22]。2000 年 5 月のことであった。すなわちこの新サイクロトロン fRC の建設によって CSM は不要になり、しかも SRC でのウランビームのエネルギーは 345 MeV/u まで上げられることになった。

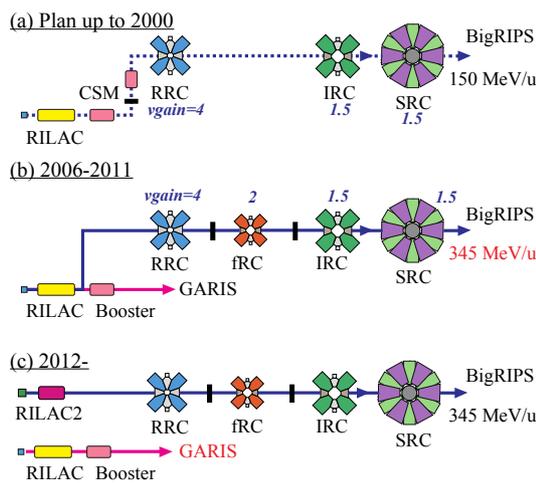


Figure 4: Changes of the RIBF accelerator complex.

その後 RIBF では 2006 年 12 月に超伝導リングサイクロトロン SRC でのビーム加速に成功し、2007 年 3 月にはウランビームが加速された[38]。稼働後もさまざまな改良を加えたが、RF システムやイオン源の長期安定性の向上には、RILAC での長時間運転の経験が活かされた[39]。2012 年には、Figure 4 (c)に示すように、強力な 28 GHz 超伝導 ECR イオン源[40]を備えた新入射器 RILAC2 が稼働し[41]、ヘリウムガス荷電変換器の開発[42]と fRC の増強[43]、新素材グラファイトシートの荷電変換器への導入[44]などを経て、SRC から取り出されるウランビームのパワーは現在までに 4 kW を超えた[45]。

## 5. 今後の展望

次の研究対象は 119 番以降すなわち未踏の第 8 周期の元素である。また、より中性子過剰な領域には原子核が安定になる領域「安定の島」が予想されており、そこに近づく方法を見つけることも大きな課題である[46]。さらに、超重元素のように原子核の電荷が大きくなると、電子の運動に相対論的効果を考慮する必要があり、その元素の化学的性質を予想するのが難しくなる。すなわち、実験的に決めることが必要である。理研でも最近、106 番元素 Sg の化学的性質を調べる実験が行われた[47]。

119 番以降の超重元素を合成するのに、チタンより重い金属イオンビームをキュリウムなどのアクチノイド標的に照射する実験が有力視されている。生成断面積はこれまでより小さくなることが予想されているため、ビーム強度をさらに上げるとともに、標的の耐熱性を向上させる必要がある。また、アクチノイド標的の準備には国際協力も重要になるであろう。

海外では超重元素の研究が一層盛んになっている。Dubna では 2 年以内に新しいサイクロトロン[48]を建設して「超重元素ファクトリー」を稼働させる見込みである。GSI では超重元素専用の超伝導線形加速器を開発中であるし、また Berkeley では 88 インチサイクロトロンに超伝導 ECR イオン源 VENUS を装備して、金属イオンビームの強度増を図っている。フランス GANIL でも完成間近の新施設「Spiral2」において、超重元素合成実験が計画されている[49]。

理研では最近、安定な  $^{48}\text{Ca}$  ビームの開発を行い[50]、2013 年には 2 週間のビームタイムで 5 例の 116 番(Lv)の合成に成功した[51]。また、119 番以降の元素合成に向け、チタンやバナジウムなどの金属イオンビームを開発中である。さらに将来、RILAC を大幅に増強する計画を立てている。現在の 18 GHz ECR イオン源に代えて、28 GHz 超伝導 ECR イオン源を新設するとともに、RILAC の後段部分を超伝導線形加速器に置き換え、加速勾配を上げて低電荷の大強度ビームを加速するという計画である[45]。できるだけ早く建設に着手し、未踏の領域を開拓する原動力にしたいと考えている。

## 謝辞

理研の羽場宏光氏には最終原稿を校閲していただき、さまざまなご教示を賜りました。また、この発表をするにあたり、理研の森田浩介氏、森本幸司氏に資料をいただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] <http://www.nishina.riken.jp/113/>
- [2] P. J. Karol, R. C. Barber, B. M. Sherrill, E. Vardaci and T. Yamazaki, *Pure Appl. Chem.* 88, 139 (2016).
- [3] <http://iupac.org/iupac-is-naming-the-four-new-elements-nihonium-moscovium-tennessine-and-oganesson/>
- [4] 馬場宏, *RADIOISOTOPES* 49, 305 (2000).
- [5] 永目諭一郎, 工藤久昭, 篠原厚, *RADIOISOTOPES* 49, 363 (2000).
- [6] E. O. Lawrence *et al.*, *Phys. Rev.* 56, 124 (1939).
- [7] E. L. Hubbard *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* 32, 621 (1961).
- [8] R. M. Main, *Nucl. Instr. Meth.* 97, 51 (1971).
- [9] H. A. Grunder and P. B. Selph, *Proc. CYCLOTRONS1963* (1963) p. 8.
- [10] D. Wutte *et al.*, *Proc. CYCLOTRONS2001* (2001) p. 445.
- [11] I. A. Shelaev *et al.*, *Proc. CYCLOTRONS1972* (1972) p. 232.
- [12] Y. Oganessian, *Lecture Notes in Physics* 33, 221 (1974).
- [13] Transferrmium Working Group (TWG) of IUPAC and IUPAP, *Pure Appl. Chem.* 65, 1757 (1993).
- [14] G. Gulbekian *et al.*, *Proc. CYCLOTRONS1995* (1995) p. 95.
- [15] B. N. Gikal *et al.*, *Proc. CYCLOTRONS2004* (2004) p. 100.
- [16] R. C. Barber, P. J. Karol, H. Nakahara, E. Vardaci, and E. W. Vogt, *Pure Appl. Chem.* 83, 1485 (2011).
- [17] D. Bohne, *Proc. LINAC76* (1976) p. 2.
- [18] N. Angert *et al.*, *Proc. EPAC'92* (1992) p. 167.
- [19] W. Barth, *Proc. LINAC2000* (2000), p. 1033.
- [20] 加瀬昌之, *日本加速器学会誌* 13, 1 (2016).
- [21] 矢野安重, *日本物理学会誌* 71, 330 (2016).
- [22] 矢野安重, 仁科記念財団 NKZ No. 55 (2015) p. 43.
- [23] Y. Yano, *Nucl. Instr. Meth. B* 261, 1009 (2007).
- [24] M. Odera *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.* 227, 187 (1984).
- [25] H. Kamitsubo, *Proc. CYCLOTRONS1986* (1986) p. 17.
- [26] A. Goto *et al.*, *RIKEN Accel. Prog. Rep.* 28, 163 (1995).
- [27] T. Nakagawa *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* 71, 637(2000).
- [28] O. Kamigaito *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* 70, 4523(1999).
- [29] M. Kase *et al.*, *RIKEN Accel. Prog. Rep.* 33, 4 (2000).
- [30] 矢野安重, 「RI ビームファクトリー加速システム構想」1994年5月21日, 私信.
- [31] O. Kamigaito *et al.*, *Proc. LINAC98* (1998) p. 603.
- [32] O. Kamigaito *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* 76, 013306 (2005).
- [33] M. Kidera *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* 75, 1473 (2004).
- [34] T. Nakagawa *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. B* 254, 337 (2007).
- [35] 森田浩介, *日本物理学会誌* 60, 698 (2005).
- [36] H. Morita *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn* 81, 103201 (2012).
- [37] <http://science.energy.gov/~media/np/nsac/pdf/docs/Isoltaskforcereport.pdf>
- [38] A. Goto *et al.*, *Proc. CYCLOTRONS2007* (2007) p. 3.
- [39] H. Okuno, N. Fukunishi, O. Kamigaito, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2012) 03C002.
- [40] T. Nakagawa *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* 81, 02A320 (2010).
- [41] K. Suda *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. A* 722, 55 (2013).
- [42] H. Imao, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 15, 123501 (2012).
- [43] N. Fukunishi *et al.*, *Proc. CYCLOTRONS2013* (2013) p. 1.
- [44] H. Hasebe, *Proc. HIAT2015* (2015) p. 17.
- [45] O. Kamigaito *et al.*, *Proc. IPAC2016* (2016) p. 1281.
- [46] Y. Oganessian, *Nature* 413, 123 (2001).
- [47] J. Even, A. Yakushev, Ch.E. Düllmann, H. Haba *et al.*, *Science* 345, 1491 (2014).
- [48] G. Gulbekian *et al.*, *Proc. HIAT2015* (2015) p. 30.
- [49] F. Déchery *et al.*, *European Phys. J. A* 51, 66 (2015).
- [50] K. Ozeki *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* 85, 02A924 (2014).
- [51] K. Morita *et al.*, *RIKEN Accel. Prog. Rep.* 47, xi (2014).