

話 題

新元素 (Z=113) 発見の原動力となった加速器

加瀬 昌之*

Accelerators as a Driver of the Super-Heavy Element (Z=113) Discovery

Masayuki KASE*

Abstract

Three Super-Heavy nuclei (Z=113), which were synthesized from 2004 to 2012 by the RIKEN group led by Dr. K. Morita, were internationally recognized as a new element on the periodic table in December 2015, and the right to name the element was given to the group. This result could be done not only by the efficient experimental device, GARIS, but also by the very powerful heavy-ion accelerator, RILAC, which provided an intense 5.5 MeV/u ^{70}Zn beam to GARIS. The improved RILAC could drive this Super-Heavy element (Z=113) discovery as long as a net duration of 575 days, and, finally, deliver a total dose of 1.4×10^{20} particles of ^{70}Zn on the ^{209}Bi target, until the three events were detected.

1. はじめに

昨年の大晦日から今年の元旦にかけて「日本が発見した 113 番元素が国際的に認められ、命名権が与えられる」とのニュースがとびかった。かねてより同新元素の発見の申請を出していた理化学研究所（理研）の超重元素研究グループ宛に 12 月 31 日の早朝に国際純正・応用化学連合 (IUPAC) からメール回答があり「申請された 113 番元素を新元素と認定し、その名称と元素記号を提案するように要請する」とのことであった。大晦日夕方のプレス発表となり、めでたく年末年始の大ニュースとなった。113 番元素は、同時並行して米ロ共同研究グループからも申請が出されていたが、それを退けて日本グループに軍配があり、日本初の快挙となったのである。

その超重元素研究グループの主宰者は森田浩介氏（九州大学教授・理研仁科加速器研究センターグループディレクター）で、彼が理研に専任していた、2004 年から 2012 年にかけて、気体充填型反跳同位体分離器（GARIS: Gas-filled Recoil Ion Separator, 通称ガリスと称し理研では超重元素探索実験の通称となっている）を用いて、理

研重イオンリニアック (RILAC) の ^{70}Zn ビームを使い、成し遂げた成果である。その背景には、研究グループの製作した実験装置 GARIS の性能と実験戦略もさることながら、正味 575 日間という異例に長い実験期間、最高強度のビームを出し続けた加速器の役割も大きい。この超重元素創成の研究は、かつては、理研の重イオン加速器プロジェクトの最上位に掲げられた重要な研究テーマであった。ところが、理研が次に推し進めた RI ビームファクトリーのプロジェクトの影になった時期があった。その後いくつかの幸運に恵まれ、そして再び咲いて今日の快挙に至った。まさに先を予測できない「筋書きのないドラマ」であったといえる。

2. 筋書きがあった頃

1970 年代に理研では新たな重イオン加速器の建設が進められ、まず第一段目の入射器として理研重イオンリニアック (RILAC)¹⁾ が 1980 年に完成した (図 1 中 RILAC #1 ~ #6)。RILAC は後段加速器としてサイクロトロンを意識して設計されたもので、周波数可変型であり CW モード運転を基調にしていたことがその特徴であった。

* 理化学研究所仁科加速器研究センター RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
(E-mail: mkase@riken.jp)

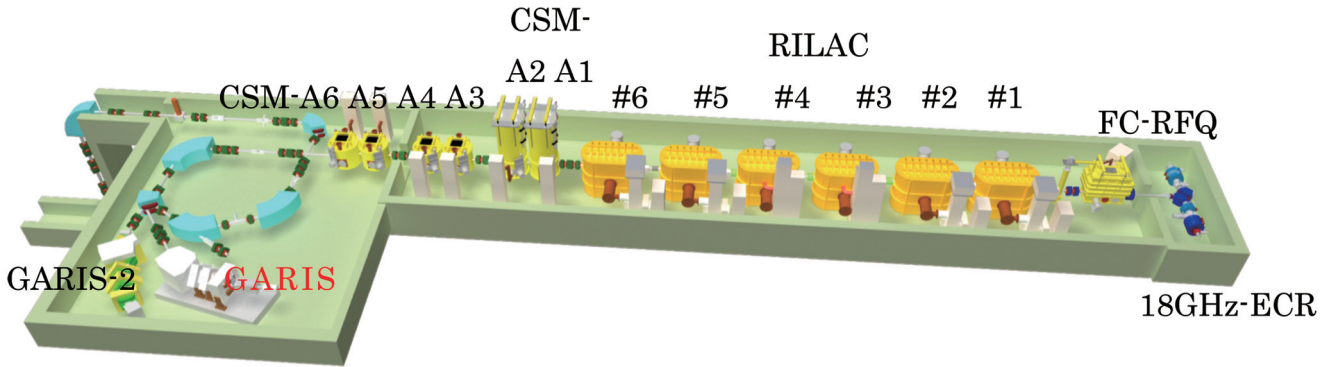


図1 RILAC 全体の鳥瞰図。現在の様子。描図：理研仁科センター 宮内成真氏。

軽イオンから重イオンまでの効率的な加速が可能であるが、単独では、原子核実験にはエネルギー不足であった。後段の加速器の理研リングサイクロトロン²⁾ (RRC：国内初の分離セクター型サイクロトロン、K値 540 MeV) は、1981年から建設が始められ1986年に完成した。その頃、GARISプロジェクトには「筋書き」はあった。この間一連のプロジェクトには、常に「超重元素の創成」研究は、研究テーマのトップに掲げられた。その甲斐あってRRCの最初の大型実験設備としてGARIS予算はすぐに認められ設計建設が開始された。

1987年に完成したRRCからビーム供給が始まり、10-40 MeV/核子の重イオンの加速が可能になり、本格的な原子核実験が行われるようになった。GARIS³⁾も完成して、希少超重元素イベント探査に不可欠の極低バックグラウンドが実現した(図2)。そして装置はRRCに近い大強度ビーム実験に最も有利な一等地(E1実験室)に鎮座した。

3. RIビーム隆盛

さてRRCの二番目の入射器であるAVFサイクロトロンが1989年に完成し比較的軽いイオン(質量~40)までのエネルギーが100 MeV/核子付近にアップグレードされて、GARISの「筋書き」は、あやしくなる。RIビームの時代に突入したのである。GARISに続く二台目の大型実験装置RIPS(Riken Projectile fragment Separator)がE6実験室に作られると、飛行分離型RI生成により多彩なRIビームの効率的生成が可能であることがわかり、本格的二次反応実験が頻繁にE6実験室で行われるようになり数々の成果をもたらした。

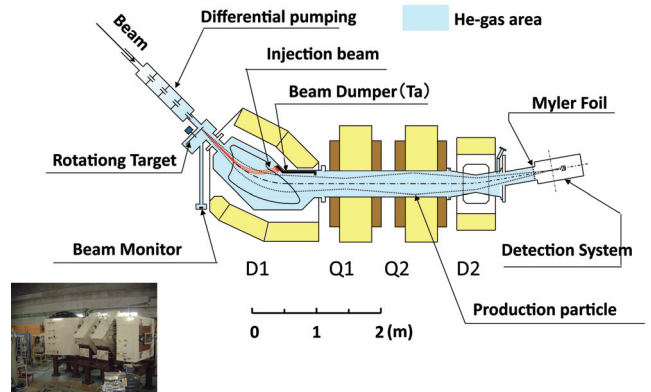


図2 GARIS 平面図。左下はE1にあった頃の写真。

RIビーム物理の世界的拠点が理研にできたのである。AVF-RRCの運転が主流となり、E1実験室の長期のGARIS実験は制限されることになる。

その後RIビームのブームは、ますます拡大し、より重いRIビーム生成へ向けて、RIビームファクトリー(RIBF)のプロジェクトが1994年頃提案された。これはRRCの後段に新しい巨大リングサイクロトロンを複数台作る大プロジェクトで、GARISはますますスミに追いやられることになる。

4. ビームエネルギー問題

実は、GARIS実験には、当初より一つの問題があった。超重元素合成のための核融合反応に必要なとされるビームエネルギーが6 MeV/核子以下とRRC設計最低エネルギーの値よりはるかに低いことであった。それに対して加速器はRRCのハーモニックス(サイクロ内一周に入るバンチ数: RILAC入射の場合9が設計値)を調整することで応じた。加速器屋としてはつらい仕事であるが、RRCのハーモニックスを10, 11, 12と上げるに従って約20%ずつ低いエネルギーのビームを

供給した。しかし本格的超重元素実験には満たされず、 ^{200}Fr など5種類の新同位元素の発見にとどまった。

RI ビームのブームは、ますます拡大の現実味が増す中、唯一 GARIS に光明がさしたことといえば、この頃 RILAC の「ビーム大増強計画」が始動したことである。1993 年に RILAC の上流の改造の補正予算が認められ、18 GHz-ECR イオン源⁴⁾ (図3) と低エネルギー部に新たな RFQ⁵⁾ (図1: 図中 FC-RFQ) の開発が行われた。これによりイオン源でのビーム強度も改善され、ビームの種類も多彩になった。またこれまで悪かったビーム通過率が大幅に改善しさらなるビーム強度拡大につながった。これにより GARIS にとって実験実現の可能性が出てきた。18 GHz-ECR によりこれまでより多価のイオン (例えば $^{86}\text{Kr}^{10+}$) が有効になり、そのために RILAC-RRC-GARIS の実験に関しては、RILAC の後段のストリッパーが不要となった。これにより GARIS ターゲットに $1\ \mu\text{A}$ の Kr ビーム供給が可能となった。しかしこの運転では、RILAC の後半の加速タンクをオフにして、60 m に及ぶビームラインを低エネルギーで輸送し、RRC をハーモニクス 13 で加速する。ビームがかなり不安定であり、また全く非効率であった。それにもかかわらず、 $^{86}\text{Kr}^{10+}$ ビームを使って GARIS で初めて超重元素合成実験が1999年に2週間程度行われた。これは、先に米国 LBL で行われた超重元素合成実験の検証のために行われた。

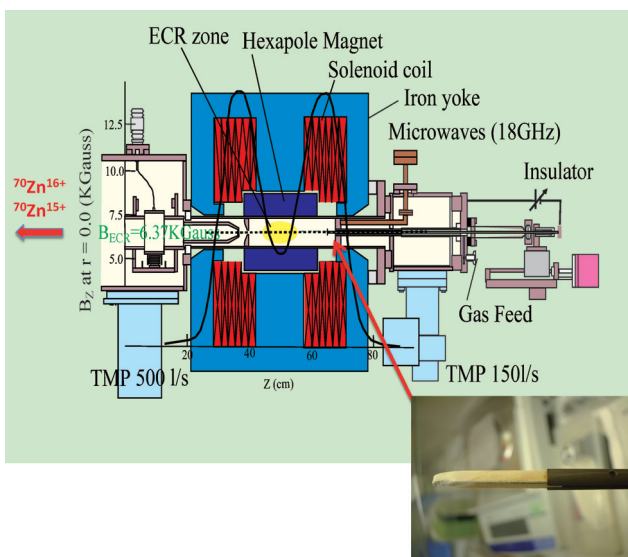


図3 18 GHz-ECR イオン源。右下は、亜鉛をプラズマに挿入させるセラミックロッド。

めに行われた。

5. RILAC のエネルギーブースター

その当時 RIBF 計画推進でウランビームの大強度化において頭の痛い問題の一つは、RILAC 出口で 1MeV/核子 以下の低エネルギーでの荷電変換が行われることである。その場合ストリッパー自体の寿命問題もさることながら最も収量を多く得られる価数が RRC の受け入れ可能条件から遠く外れていることになり大部分のビームが損失することが大きな問題であった。単純に RILAC のエネルギーを上げればよいのであるが、RRC の入射半径を大きくする必要があり構造的に不可能である。そこで提案されたのが多価化器 (Charge-State Multiplier : CSM)⁶⁾ という奇妙な装置である。RILAC の出口のビームを一旦加速して荷電変換をしてその後減速して RRC の入射条件に満たすというものである。三つのユニットからなり、それぞれ二つの加速空洞と一つの減速空洞からなる。RILAC 出口 1.1 MeV/核子 のウランビームを CSM 第1ユニットとして 1.4 MeV/核子 まで上げビームロスを下げ、第3ユニットまで設けると 2.1 MeV/核子 となりビームロスが最低となる設計だ。注目すべきは第3ユニットのエネルギーである。これは、RILAC 基本周波数に対しての値で周波数を 75.5 MHz にすると実に GARIS の所望するエネルギーにぴったりなのである。まず補正予算で第1ユニットの製作が認められ加速器 A1, A2 と減速器 D1 をフルスペック (周波数可変型) で製作した (図1: 図中 CSM-A1, A2 & 図4)。

そして、GARIS のエネルギーに到達するには、第2, 3ユニットの四つの加速空洞 (A3, A4 & A5, A6) が必要だった。もう一つの頭の痛い問題として、RI ビームファクトリーへのビーム輸送ルートがあった。仁科記念棟の東側にできる新しい建物へ RRC 出口から新しいビームラインを作らなければならない。GARIS のある E1 実験室から 90 度偏向して東側へ送り仁科棟の外に出るルートが自然であり適当とおもわれるが、そこには、GARIS の本体が障害物として鎮座しているのである。

そして遂に大決断が下される。GARIS を仁科棟 E1 実験室よりリニアック棟へ移設する事とする。RILAC のエネルギーは CSM の第2, 3ユニッ

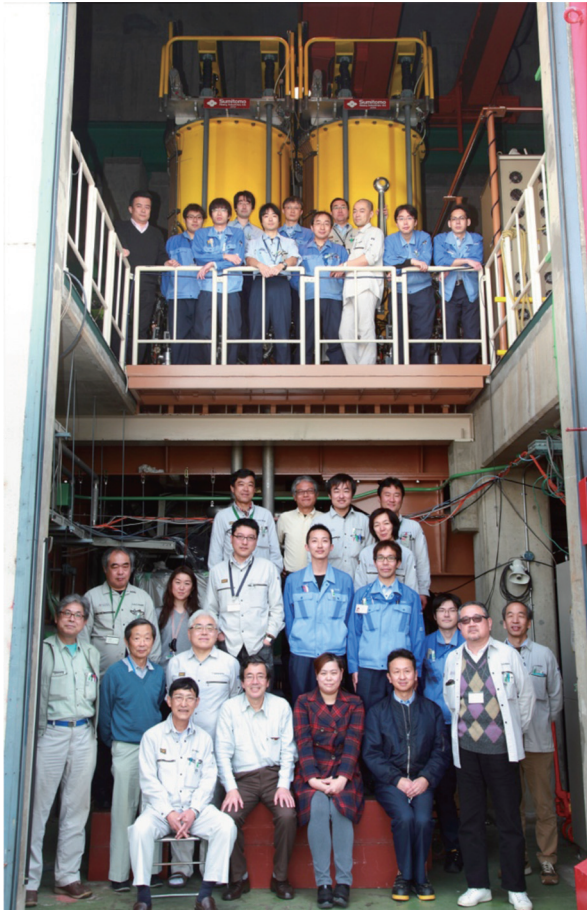


図4 加速器のスタッフ&オペレータ。背景は多価化器 CSM-A1 (左) と CSM-A2 (右)。
撮影：理研仁科センター 宮内成真氏。

トの一部加速空洞部分 (A3 ~ A6) だけ、それも周波数固定型 (GARIS の要求エネルギーに合わせて 75.5 MHz) として製作してブースターとして加速部分だけをしかも GARIS 専用として先取りする形である。複雑なチューナー部分を省略することで安価にできる。折しもその当時東京大学原子核科学研究センター (東大 CNS) の理研への移転が議論されていた。それに伴い「RILAC 大増強」の共同事業プロジェクトを立ち上げ東大 CNS の移設整備予算から四台の加速空洞 CSM-A3 ~ A6 製作費用を出していただくことになった。これより理研の超重元素研究プロジェクトは東大 CNS と理研の共同事業となる。

6. GARIS の移設

しかしこの決断はぎりぎりのタイミングで下されたのである。時はまさしく RIBF の加速器棟の建設着工と同時であった。もしリニアック棟の東

側に建築に伴う根切り工事 (深さ 26 m) が始まったら、リニアック大照射室に搬入ルートがなくなり 3 年間は少なくとも搬入を待つことになる。なんとか根切り工事着工を遅らせる要望をし、そればかりか 60 トンの GARIS 装置を運搬するルートの地盤改良も同時に依頼する必要がある。GARIS のある仁科棟の大奥 E1 実験室からゲーム「倉庫番」よろしく、一つ一つ障害となる装置を撤去しながら進まなければならない。しかも東大 CNS が GARIS 運搬ルートの E2 実験室に大型実験装置 (PA : Particle Analyzer) を田無より移設しようとしていた。その搬入寸前に同室をすり抜けなければならない。そしてさらに複数の部屋を経由して GARIS はやっと仁科棟出口へ進んだ。

GARIS をリニアックの照射室に設置するには問題が山積していた。E1 実験室のある仁科棟は、天井と壁が 2 m 以上の厚さの巨大建築物であるのに、リニアック棟は、30 ~ 60 cm 壁厚の建物である。60 トンの GARIS 装置を置くための床耐荷重対策をまずやらなければならない。放射線遮蔽壁増強はかなり難航した。管理区域の境界の許容線量値をクリアするためにコンクリートで厚さ 1 m の壁が必要とされた。大照射室全体の壁を厚くするのは、構造上困難であったので GARIS 周りの壁厚を 1 m に補強した。天井も 30 cm と薄いので、ビームライン及び実験装置の上部に檜を組んでコンクリートブロックをかぶせる方法で行われた。実際ビームを出してトライ&エラーで部分遮蔽を積み増し、2001 年 4 月から法改正 (許容値が厳しくなる) 寸前にぎりぎりの値でクリアできた。

一方、CSM-A3 ~ A6 の四つの加速空洞は、チューナーが無い状態で周波数 75.5 MHz に固定されて、CSM-A2 の後ろに並べて据えつけられた (図 1 : 図中 CSM-A3, A6)。2001 年初夏、超重元素実験の準備がすべて整ったのである。RIBF プロジェクト推進という名目ではあったが、理研の RILAC が、今やドイツの重イオン研究所 (GSI) のリニアック、ロシア Flerov 研究所のサイクロトロンと並び、文字通り世界最高性能の加速器となった。

7. GARIS 実験の本格始動

実験を始めるにあたって実験グループは、GSI

で行った同種の合成実験の結果を慎重に検証することから始め、断面積と入射エネルギーの評価を慎重に行った。原子番号 108, 110, 111, 112 と再現実験から始め、その結果、エネルギーは核子当たり 5.04 MeV と決められた。RILAC はサイクロトロンとは違い周波数変更せずにエネルギーの微調は、最終キャビティーの電圧位相調整で簡便に行える。

これで準備万端、113 番元素合成実験が始まる。ちょうどその時期にドイツ GSI で最後の挑戦ともいふべき、同じ 113 番元素合成実験が行われたがほどなく終了した。イオン源は 18 GHz-ECR でセラミックロッド法でプラズマに亜鉛を導入する。ターゲットが $460 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ と比較的厚く通過する過程でのエネルギーロスがあるので 2% ぐらいの確かさが必要になるそうだ。ターゲットは円板に 16 個長方形をしたターゲットを並べた。ターゲットは $460 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の厚さのビスマスでバックアップの $60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ のカーボン箔の上に蒸着されている。3000 rpm で回転させて、ビームがターゲットの枠に当たらないように回転に同期して 20% 程度チョップする。フルビーム (1 pμA) で照射し続けると 10 日前後でターゲットを円板ごと交換する。時々実験者より、「もう少しビームを弱めて下さい」と声が掛かる。加速器の勝利の瞬間である (けっしてうれしくない勝利だが)。

数々の「強運」に恵まれ、待望の 113 番元素が実験開始から数ヶ月後 2004 年 7 月 23 日⁷⁾ に見つかる。そして程なく二つ目の 113 番元素が 2005 年 4 月 2 日⁸⁾ に検出された。これにより実験チームは完全な上げ潮となる。実験を主導した森田研究員は、理研の准主任研究員となり超重元素研究室を始動しやがて仁科記念賞の受賞が決まる。そしてさらなる研究のためより重い新元素に狙いをさだめた新実験装置 GARIS2 の科研費が認められた。また同時にさらなるビーム強度改善のため超伝導 ECR イオン源のミラーコイルが開発に踏み切れた。これは現在 RIBF のウランビーム供給のための重要なイオン源となっている。やっと GARIS の成果で RIBF へ恩返しのできた格好だ。

一方命名権については二つの新元素について申請はするものの、結果は、その二つとも既知の原子核に到達する寸前に自発核分裂をしている点 (図 5: 図中左と真ん中の崩壊チェーン) が弱点で、既知の原子核に到達するイベントを探し続けるように提言を受ける。113 番元素の実験は、三つ目のイベントを目指して続けられることになった。

8. 三つ目のイベント

三つ目の 113 番元素合成はなかなかうまくいかなかった。一方 RIBF も完成し 2007 年からコ

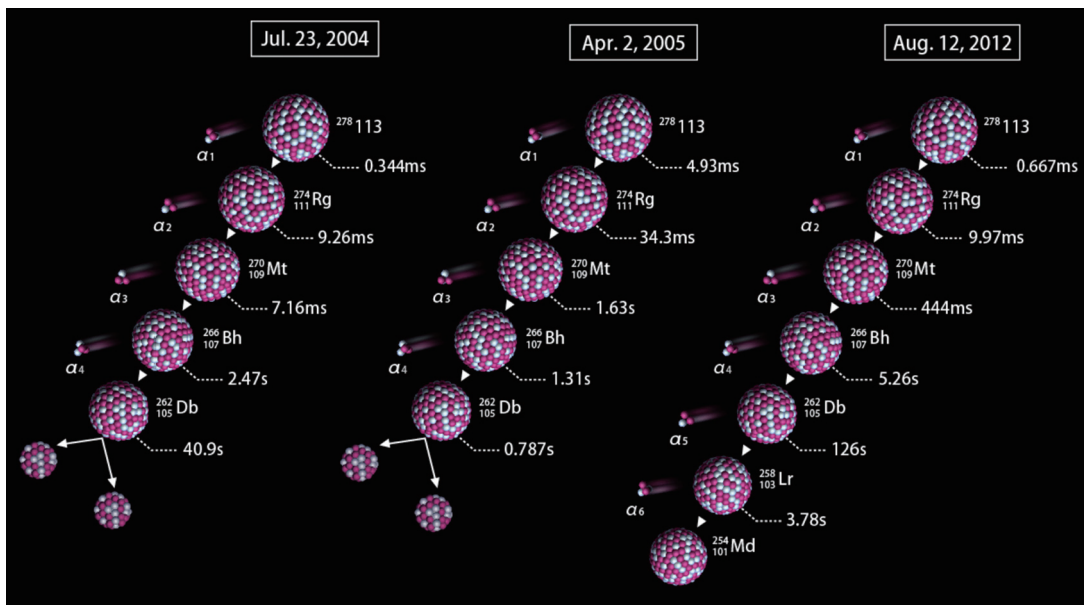


図 5 三つのイベントの崩壊チェーン。一つ目と二つ目は、 ^{262}Db まで四回 α 崩壊して、その後自発核分裂している。三つ目は、六回 α 崩壊して既知核である ^{254}Md まで到達している。
イラスト：理研広報室提供。

ミッションが始まり、この年はさすが GARIS 実験は、ほとんどできなかった。その後も RILAC は、基本的に RIBF の入射器に使われたので、以前ほどビームタイムは自由にならなかった。しかし、ウランのビーム強度増強のため RILAC2 (超伝導 28 GHz-ECR イオン源 + RFQ + 三台の DTL) が設置された。RILAC2 は、ウランビーム専用の入射器であるので RIBF 実験にはほとんど RILAC2 が入射器として使われ、そのお陰で RILAC は、再びほとんど GARIS 専用マシンとなり制限はあるものの実験を続けることができた。

2011 年 3 月 11 日、大震災があり、加速器と実験装置の被害は、幸いにビームラインの真空リーク数カ所で済んだ。回復に時間はかからなかった。地震後東電の電力制限が続き、RIBF の運転は、停止を余儀なくされたが、GARIS 実験は、都市ガスを燃料とするコージェネレーションシステム (CGS) の発電電力 6500 kW を用い、続行された。

イオン源での生成される Zn イオン価数を 16+ から 15+ に変更した。少しでも多くのビームを安定に得るためである。ターゲット円板の回転数であるが、3000 rpm だったのを、ライン周波数と同期の可能性があるので 3300 rpm へ変更を要請した。

オペレータコンソールと実験計測室と距離が 10 m と近く、家族的な関係で実験を推し進められた。お互い声を掛け合うことができた。これも驚異的に長い実験をスムーズに進められた一因だろう。オペレータ 1 人、実験担当者 1 人という体制で膨大な時間が経った。

いつまでたってもやってこなかった三つ目の 113 番元素は、2012 年 8 月 12 日にやってきた⁹⁾。期待通り今度は、六回の α 崩壊を繰り返して、途中で自発核分裂せずに、既知の核である ^{254}Md まで到達している (図 5: 右の崩壊チェーン)。この点が今回の命名権獲得の切り札となった。結局 RILAC が供給した粒子数は、トータル 1.4×10^{20} 個で、総照射時間は、正味 575 日に及んだ。これは、ターゲットの枠にあたらないように 20% ビームをチョップしていることを考慮に入れて、RILAC は平均 0.56 pμA のビームを出し続けたことになる。

9. 今後の展望

今後の超重元素合成であるが、次は Z=119, 120 を狙うそうである。現在研究グループより加速器側に開発要請されているビームは、 ^{50}Ti , ^{51}V , ^{54}Cr である。イオン源チームが 18 GHz-ECR イオン源で開発中である。ターゲットに ^{248}Cm を用いるそうだ。今後はビーム強度とターゲットの耐久性が問題になるであろう。

この実験の原動力であった加速器 RILAC と実験装置 GARIS の主要部分の製作は住友重機械工業(株)が担当した。難しい注文に応じて機械設計製作をし、そして数々の難工事をこなしてくれて、感謝に堪えない。しかし、すでに一部は 30 年を越す老朽化したマシンである。RILAC のいくつかの共振器は修理不能な真空リークを抱えている。共振器内の銅・鉄のクラッド鋼が関係する溶接の問題であり修理は難しい。いくつかの共振器がこのため真空度が十分に上がらない。今後はこの RILAC と Flerov 研究所の新サイクロトロンが超重元素実験の加速器のライバル関係になるであろう。しかしこれからの「筋書き」もまたない。

さて最後に注目の新元素 (Z=113) の元素名及び元素記号であるが、命名権は理研研究チームに与えられた。チームで合議の上で決めることになり、提案は近く手紙で IUPAC に提出されるということだ。基準を満たすかどうかの審査を受けて無事機関雑誌に掲載された時点で確定となる。「筋書き」どおりにいけば、一年ぐらいで名前が決まるとのこと。どのような名前になるか楽しみである。

参考文献

- 1) M. Odera et al., Nucl. Instr. & Meth., 227 (1984) 187.
- 2) Y. Yano, Proc. 12th Int. Conf. on Cyclo. & Appl., Berlin, (1989) 13.
- 3) D. Kaji et al., Nucl. Instr. and Meth., A590 (2007) 198.
- 4) T. Nakagawa et al., NIM B, 226 (2004) 392.
- 5) O. Kamigaito et al., Jpn. J. Appl. Phys. 34 (1995) 5799.
- 6) O. Kamigaito et al., Proc. 26th LINAC Meet., Tsukuba, (2001) 43.
- 7) K. Morita et al., J. Phys. Soc. of Japan, 73 (2004) 2593.
- 8) K. Morita et al., J. Phys. Soc. of Japan, 76 (2007) 045001.
- 9) K. Morita et al., J. Phys. Soc. of Japan, 81 (2012) 103201.