

いかにして森田浩介らは113番元素の命名権を獲得したか

矢野安重 (理研仁科センター yvano@riken.jp)

このたび森田浩介氏 (九州大学教授, 理化学研究所仁科加速器研究センター・グループディレクター) の率いる研究グループが, 「113番元素の発見者」として国際純正応用化学連合 (IUPAC) によって認定され, 新元素の名前と記号を提案するよう要請を受けた。日本が発見した元素が初めて周期表に加わることになるのである。森田氏らの発見の場となった理研RIビームファクトリー (RIBF) の建設者として誠に喜びに堪えない。IUPACは今回, ロシアFlerov研究所のYuri Oganessian氏 (超重元素研究の世界的重鎮で森田氏の師匠でもある) が率いる研究グループを, 115, 117, 118番元素の発見者とも認定した。Oganessian氏の知恵と執念にも心から敬意と祝意を表したい。彼らはHot Fusionという合成法で114番から118番元素までをすべて発見したことになる。一方, 森田氏らはCold Fusion法を用いた。113番元素はこの合成法で発見した最も重い元素となった。理研とFlerov研のこれらの発見によって周期表の第7周期が完結した。

理研で「超重元素」を本気で言い出したのは, 上坪宏道氏主宰のサイクロトロン研究室にいた野村亨氏である。彼の提唱で超重元素研究が, 1987年に完成したばかりの理研リングサイクロトロン (RRC) で始まった。この分野では米ソ欧に後塵を拝していた当時の日本にとっては夢のまた夢のような研究課題であった。森田氏は1984年に野

村グループに弟子入りし, 彼の超重元素人生が始まる。まず手始めに気体充填型反跳イオン分離器GARIS^{*1}の設計を任せられ, 希少超重元素イベント探索には不可欠の極低バックグラウンドを実現した。この理研GARISのS/N比の高さが今回の成果につながっている。しかしながら, RRCとRILAC (前段の線型加速器: 1981年完成) とからなる日本初の本格的重イオン加速器でも当時はまだ十分な強度のビームを供給できなかったために, 高性能のGARISがめざす超重元素合成への挑戦は不可能であった。

大きな転機は, 有馬朗人理事長時代に始まったRIBFの建設である。RIBFとは, RILAC+RRCの下流に3台の大型リングサイクロトロン (総重量13,000トン) を接続して, 全元素にわたる世界最大強度の連続重イオンビームを世界最高エネルギーまで加速し, 標的核との入射核破砕反応や核分裂反応によって世界に冠絶する大強度のRIビームを生成する施設である。研究の目玉は, 中性子過剰核領域を探索してウランの起源を原子核レベルで解明するというものである。RIBFは, 2007年の本格運転開始以来今までに, 145種類もの中性子過剰な新同位元素を発見し, 原子核物理学の定説を覆す発見やウランの起源に迫る発見に至っている。

このRIBFの設計の最終段階で, RRCと新設のリングサイクロトロンをつなぐビーム輸送ラインの敷設経路が問題になった。検討の結果は, RRCの直下流にあるGARISを通過して敷設せざるを得ないので「GARISをどこかに移設せよ」ということになってしまったのだ。実はこれが僥倖となる。そこで移設先を考えあぐねた末に, RILACの実験室に移設することにした。しかしRILACのビームエネルギーは低くて超重元素実験はできないという根本的な問題があった。それにも関わらず敢えてそう決断したのは, RIBFの目標性能を達成するために, 近い将来, 最上流のRILACのエネルギーとビーム強度を増強するという計画を立てていた

からである。

ちょうどその頃に東大原子核科学研究センター (CNS) の次期計画を模索していた石原正泰センター長との間に夢の構想が生まれる。それは, 東大CNSを理研和光に移転してRIBFの共同運営体制をつくるというものであった。そして最初の共同事業としてRILACを大増強しようと考えたのだ。この構想は早期に現実となった。蓮實重彦東大大学長と小林俊一理研理事長の英断により理研和光への東大CNSの移転が決まり, くだんの共同事業も首尾よく計画通りとなったのである。

これで「RIBFのための」RILACの大増強が実現した。そのお陰で超重元素実験に必要な核子当たり5 MeV以上のエネルギーで強度が従来より数桁大きい重イオンビームを「RILACのGARIS」に供給できることにもなったのである。ビーム強度はやがて超重元素合成で大先輩のドイツ重イオン研究所GSIの線型加速器やFlerov研のサイクロトロンを抜いた。かくして新元素発見実験がやっと現実味を帯びることになる。これらは, 森田氏が引き寄せた強運だと思っている。その後RIBFを更に増強するため, 2010年, 新しい線型加速器がRRCに導入されRILACがGARIS専用になるという強運が次に訪れ, 「森田GARIS」は世界の研究者がうらやむ「超重元素実験パラダイス」と相成った。

私は, 113番実験が成功し命名権獲得が成就した本質的な要因は, 次の二つだと考えている。一つは, 森田氏らがGSIで発見された108番から112番までの実験をすべて再現しようとして, Cold Fusion合成法^{*2}での完全核融合反応率 (断面積) のビームエネルギー依存性 (励起関数) を系統的に測定した結果, エネルギーの設定を2%間違えると融合反応が起こらないことと, GSIの論文にあるエネルギーでは反応断面積が最大にならないことを見出し, Cold Fusionの断面積を最大にする「理研でのビームエネルギー」の予測法を「密かに」確立したことである。一連の追試実験の終盤に「112番が来た」

^{*1} Gas-filled Recoil Ion Separator. ビームの原子核と標的の原子核が融合して前方に反跳する超重元素同位体を, バックグラウンドとなる大量の軽い反応生成物から磁場によって分離する装置。磁極間にはヘリウムガスを充填する。超重元素同位体は標的通過後の荷電状態によって軌道が一旦分散してしまうが, 充填したガス分子との衝突で飛行中に荷電状態が変化して次第に軌道が変わり, 最終的に平衡電荷で決まる同一の焦点に80%近く集まる。森田氏によると1958年, B. L. CohenとC. B. Fulmerが発明した。

朝、森田氏が私の部屋にやってきて、感涙にむせびながら握手を求めた。私は「これでとうとう森田氏は113番の最適エネルギーを決められる超重元素合成術師になったのだ」と直感した。この時に、113番元素合成で日本初の命名権獲得への挑戦の火蓋が切られたのだと思う。

もう一つは、長期間に亘ってただひたすら照射し続ける、森田氏のいう「愚直」な実験が「できた」ことである。GSIの再現実験の結果を眺めると108番から112番まで1番増すごとに断面積がほぼ1桁落ちている。さて、113番の断面積は果たしていくらと見積もるか。私自身は、統計誤差の大きな一連のデータを眺めて外挿し、虚心坦懐に20 fbと診た。森田氏にもこの値を予告しておいた。断面積が20 fbとすると、実際の実験条件（ビーム強度が 3×10^{12} 個/秒、標的厚が 0.5 mg/cm^2 、検出効率0.8）では、113番の崩壊モードを1イベント観測するのに約160日という気の遠くなる長期の照射実験になってしまう。いつ来るかは、ポアソン分布のどこかである。命名権獲得ともなれば、3イベントは要るだろうし、Oganessian氏という強豪のライバルもいる。私は、時の運というか、森田氏の強運にかけることになるなど覚

悟した。結局、命名権獲得に至る3イベントを2003年から2012年にわたる執念深く長期間のビーム照射により観測できた。「森田氏のエネルギー設定は全くもって絶妙であった」ということになる。この113番実験は、一度始めたら命名権獲得まで止めるわけにはいかない大事業ではあるが、結果としてこれほどまで長期に亘って実験続行が許容されたのは、森田グループの実験がRIBFにおいては比較的小規模で、新規の設備投資も加速器運転の電気代もさほどでもなく、いわば「陰の実験」だったことが功を奏したのだと思う。

113番実験の成功は、RIBFをRIビームの発生能力で世界に冠絶させる「行きがけの駄賃」だったのだけれど、稼いだ駄賃は思いのほか大きく、国民の皆様にも多少は恩返しできたのではないかと、私自身は思っている。

思い返せば、3回目のイベントが来た2012年の夏、RILACの計測室に立ち寄って、シフト中の若い研究者に「いま来たら何fb」と尋ねたら「20ちょっとです」と言うのでそろそろ来るかなと思っていたら、その矢先に、森田氏から突然に携帯電話があり「森田です」と言ったので、私は間髪をいれず「来たか」と答えた。3回目に関測した崩壊モードは、 $^{278}_{113}\text{Uut}$ の α 崩壊のあと5回 α 崩壊が続いて $^{254}_{101}\text{Md}$ に壊変し、それが内殻電子捕獲をして $^{254}_{100}\text{Fm}$ となり、さらに α 崩壊して半減期13年の $^{250}_{98}\text{Cf}$ に至ったというもので、113番発見の揺るぎない根拠となった。これを見て私は、森田氏らの命名権獲得を確信した。因みに、このCold Fusion反応断面積は、 $22^{+20}_{-13} \text{ fb}$ であった。

ところで、今まで日本には元素発見のチャンスはなかったのだろうか。1909年のChem. News誌に掲載された

F. Loringの論文には、新元素Nipponium Npが周期表の43番（現在のTc）の位置に載っている。発見者は小川正孝元東北大学総長である。吉原賢二東北大学名誉教授によれば、小川氏はこの時新元素75番（現在のRe）を実は発見していたのだけれども、分子式 MOCl_4 を MCl_2 と間違えてMの原子量を約100と結論し、この質量を根拠にNipponiumを43番の位置に置いてしまっただけで、結局日本発見の元素とはならなかった。さらに、1940年、旧理研の仁科芳雄博士らは日本初のサイクロトロンを使って新同位元素 ^{237}U を発見し、その β 崩壊でできる93番の新元素 $^{237}_{93}$ （現在のネプツニウム Np）を生成したが、盟友の核化学者木村健二郎博士が当時の周期表を見てこの新元素が第7族にあると思い込み、同族のRe（小川正孝博士が逃したNipponium）を担体としたために沈殿分離できなかった。当時、仁科博士らは、この元素が第3族のアクチノイド系列であることを知らなかったのも無理もなかったが、新元素発見のチャンスを再び逃してしまった。つまり森田氏らの発見が「三度目の正直」となったのである。

今後、世界の超重元素研究の実験場は核化学を含め、理研仁科センターのRILACとFlerov研の新サイクロトロンに集約されるだろう。森田氏らがOganessian氏らを良きライバルとして更なる新元素探索へ向けて健闘されんことを祈りたい。最後に、野依良治前理事長の終始一貫した手厚い支援が今回の快挙に欠かせなかったことを、ここに記しておきたい。

（2016年2月6日原稿受付）

*2 今回の113番合成の場合は、 $^{70}_{30}\text{Zn}$ （ビーム）+ $^{209}_{83}\text{Bi}$ （標的） $\rightarrow$ $^{279}_{113}\text{Uut}$ （完全融合複合核） $\rightarrow$ $^{278}_{113}\text{Uut}$ （GARISで検出）+ nという反応で、完全融合してできる励起した $^{279}_{113}\text{Uut}$ から中性子を1個だけ蒸発させて冷却し $^{278}_{113}\text{Uut}$ を合成する方法。ただし、この反応を最大確率で起こさせるクーロン障壁ごく近傍の $^{70}_{30}\text{Zn}$ ビームのエネルギーは正確には分かっていない。この反応の決定的な利点は、これで超重元素が合成された後、 α 崩壊を繰り返すと、まず間違いなく $^{278}_{113}\text{Uut}$ であると言えることである。森田氏によると、この合成法の発明者はOganessian氏が1974年、新元素合成に応用したのはG. Münzenberg氏らGSIのグループだそうである。