

## 第5章

# ニホニウムの発見から、次なる元素へ

物質の基本単位である元素を、その性質に基づいて規則的に並べたのが周期表である。科学の基本となる表のひとつであり、それ故に、世界中の教育現場で教えられている。この周期表の113番目の元素が、2017（平成29）年からニホニウム（nihonium）と表記されることになった。元素記号はNhである。

113番元素の命名権を巡っては、熾烈な競争が展開された。森田浩介を中心とする理化学研究所グループのライバルは、森田自身の師匠でもあるロシアのオガネシアン（Y. Ts. Oganessian）をリーダーとするフレロフ研究所グループであった。実際、113番元素と思われる事象の観測は、両グループが抜きつ抜かれつの形で行われた。その結果、2012年の決定的なデータを含む一連の論文で、確実に113番元素の発見と確実に言い切るに足る証拠を出した理研グループに、軍配が上がったのである。

新しい元素という文脈では、1908（明治41）年の小川正孝博士によるニッポニウムがある。ただ元素の原子量を間違えて43番元素としてしまい、幻の元素となっていた。また、1940（昭和15）年には、仁科芳雄博士によるサイクロトロンを用いた実験で93番元素の発見の可能性があったが、残念ながら、発見にまでは至らなかった。したがって、113番元素は日本の新元素発見の歴史にとって「三度目の正直」であった。

理研の研究グループは今、119番以上の第8周期の元素の発見を目指している。これまでの冷たい核融合から熱い核融合の実験に対応するため、新設計のGARIS-IIも開発した。バナジウム・ビームの加速手法も開発済みだ。ただ、衝突現象が起こる確率は、113番元素よりはるかに低い。その中で新元素の発見を目指しつつも、まったく新しい元素合成法、測定法を考案していかなければならない。その意味でも、理研のRIBFで深めてきた原子核の理解と新元素の探索とが結び付く可能性は、十分に考えられる。

### 第1節 ニホニウムの発見

#### きわどかったニホニウムの発見

2017年、ついに日本生まれの元素が周期表に刻まれた。第7周期第13族の原子番号113番「ニホニウムNh」である。このアジア初の快挙は、仁科センターの森田、森本幸司、羽場宏光ら実験を遂行した総勢約50名からなる超重元素研究グループ（文末に参画した研究者たちを列記してある）と、実験を可能にした加瀬昌之、上垣外修一、中川孝秀ら線形加速器RILACグループおよび上叢義朋、福西暢尚、伊藤祥子ら放射線安全グループの知恵と執念の結晶である。

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 ランタノイド	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 アクチノイド	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
拡張元素																	
57 ランタノイド	58 セリウム	59 プロセチウム	60 ネオジム	61 プラタニウム	62 プロメチウム	63 サマリウム	64 ユウロピウム	65 ガドリウム	66 テルビウム	67 ジスプロシウム	68 ホルミウム	69 イタリウム	70 テリウム	71 ルテチウム			
89 アクチノイド	90 トランシウム	91 メタリウム	92 ウラン	93 ネプツニウム	94 プルトニウム	95 アメリシウム	96 キュリウム	97 ベルグムウム	98 カリホルニウム	99 エーベンハウム	100 フェルミウム	101 メンデルシウム	102 ノーボリウム	103 ローレンシウム			

元素周期表

日本では2017年度より教科書に、ニホニウム (Nh) が表記された。



113番元素の名前を決めた会議の後、RIBF棟の仁科博士大サイクロトロン写真の前で  
 左前列より、米田晃、小森有希子、工藤久昭、加治大哉、森田浩介、森本幸司、吉田敦  
 後列左より、長谷部裕雄、山木さやか、大関和貴、門叶冬樹、山口貴之、井手口栄治、鹿取謙二、  
 羽場宏光、大西哲哉 (2016年2月19日)

113番元素の命名権を巡っては、熾烈な競争が繰り広げられた。理研のライバルは、ロシア・フレロフ研究所 (FLNR) のオガネシヤンのグループであった。彼らは114番フレロビウムFlから118番オガネソンOgまでの元素五つを全て周期表に刻み、第7周期を完結させた。森田はこのうちの1996年の114番元素実験に参画し、日本人で初めて新元素発見者になった。

競争がいかに熾烈だったか。国際純正・応用化学連合 (IUPAC) は2015年末、

2004-2012年に森田らが発表した113番元素の発見に関する4編の論文 (K. Morita et al. : *J. Phys. Soc. Jpn.* (2004)、(2007)、(2009)、(2012)) と、2010-2013年にオガネシアンらが発表した113、115、117番元素の発見に関する5編の論文 (Y. T. Oganessian et al. : *Phys. Rev. Lett.* (2010) *Phys. Rev. C* (2011)、*Phys. Rev. Lett.* (2012)、*Phys. Rev. C* (2013)、*Phys. Rev. C* (2013)) を精査して、113番は森田、115番と117番はオガネシアンの発見と認定し、113番については森田に軍配を上げた。もし森田らの2012年の決定的データの論文発表が後1年と少し遅れていたなら、115番と117番の $\alpha$ 崩壊でできる113番の命名権もオガネシアンに取られてしまっていたかも知れないのだ。



ロシア、フレロフ研究所のオガネシアン

118番元素オガネソンはオガネシアンに由来する。

#### 113番元素ニホニウムの合成実験開始から名称決定まで

2003年9月5日	113番元素合成実験開始
2004年7月23日	113番元素を初合成 (71日間照射)
2005年4月2日	2個目の113番元素を合成 (21日間照射)
2012年8月12日	3個目の113番元素を合成 (455日間照射)
2012年10月1日	実験終了 (合計575日間照射)
2015年12月31日	113番元素命名権獲得
2016年2月19日	仁科加速器研究センターにて「113番元素命名会議」 「nihonium (ニホニウム)」、元素記号「Nh」に決定
2016年3月18日	元素名、元素記号をIUPACに申請
2016年11月28日	元素名「nihonium (ニホニウム)」、元素番号「Nh」が正式決定 (11月30日発表)

## 第2節 100年越しの日本発の快挙

### 重イオン加速器の開発競争

これら超ウラン元素の発見競争は、1940年のアメリカ・ローレンス研究所 (LBL) におけるマクミラン (E. M. McMillan) らによる93番ネプツニウムNpの発見で始まった。以来118番オガネソンの発見まで80年近くかかっている。これらは生成確率の極めて小さい核融合反応によって合成され、発見に至ったのだが、それには大強度の重イオンビームが必須であった。すなわち、元素の命名権獲得はいかに大強度の重イオン加速器を開発できたかが成否を決することになり、80年というのはその開発競争でもあった。競争に参画したのは、LBL、FLNR、GSI (ドイツ重イオン研究所) そして理研である。

マクミランらは、低速の中性子をウラン238に吸収させてウラン239に変え、それが $\beta$ 崩壊してできる極微量の新93番元素239を、第3族のランタノイド元素セリウムCeを担体としてウランから化学分離することに成功し、これが最初の超ウラン元素ネプツニウムの発見となった。この実験でマクミランらは、師匠ローレンス (E. O. Lawrence) の発明した世界初のサイクロトロンで加速した大強度の重陽子ビームを使い、それをベリリウムの標的に照射して高速の中性子

を発生させ、さらにパラフィンを通して減速して大強度の低速中性子ビームを得た。低速にしたのは中性子の吸収率を上げるためである。

成功の鍵は二つあった。一つは重陽子の強度がかつてないほど大きかったことであり、もう一つは、マクミランらが93番元素は第3族（後のアクチノイド）に属することに気付いていたことである。

### 三度目の正直

仁科主任研究員は、1937年にローレンスのサイクロトロンを参考にして世界で2台目となるサイクロトロンを完成させ、世界有数の原子核研究施設を財団法人理研に開設した。そのサイクロトロンを用いた実験成果として、マクミランらと同年の1940年、仁科は化学者木村健二郎主任研究員と共著で「新同位元素ウラン237の発見」を発表している。その論文で、発見した同位元素が $\beta$ 崩壊するのを観測したので、93番元素が誕生している可能性を示唆している。しかし、発見には至らなかった。なぜか。

仁科はマクミランらと違って、発生した高速中性子を減速せずウラン238に照射した。そうすると仁科がノックアウト反応とよぶ(n, 2n)反応が起こって新同位元素ウラン237ができることを発見し、さらにそれが $\beta$ 崩壊することまで確認した。これから先が問題で、木村は当時の周期表を眺めて93番元素は第7族に属する（アクチノイドに気付いていなかったのも無理もない）として、その1周期上に位置する75番元素レニウムRe（1925年にドイツで発見）を担体として化学分離を試みたが、当然何も析出しなかったのである。かくして軍配はマクミランに上がった。

核化学者の中には、たとえ正しい担体を使って単離できたとしても、ネプツニウム237の寿命は200万年と長くその放射能は測れなかったのではないかと、いう向きもあるが、仁科のサイクロトロンは理研工作係の発明で主コイル電流の安定化に成功し、ローレンスのサイクロトロンの重陽子ビーム強度をしのぐ世界最高強度を誇っていたので、放射能を測れるくらいのネプツニウム237の生成があった可能性はある。

ちなみに、木村が担体に使ったレニウムは、実は、後に東北帝国大学総長を務めた化学者小川正孝が、1908年に天然のトリアナイトの中から発見したものであった。小川は彼の発見した元素の化合物 $\text{MOCl}_4$ を $\text{MCl}_2$ と間違え、その酸化物との比較によりMの原子量を約100と結論し、この原子量を根拠に新元素を天然には存在しない43番の位置（当時未発見）に置いてしまったため、結局は幻の元素となってしまった。正しい分子式によれば、簡単な計算で原子量は184となって、レニウム（これも未発見だった）である。もし当時の日本にも高性能のX線分光器があれば、質量の計測に頼らず原子番号の同定ができて、小川の命名した「ニッポニウムNp」が最初の日本発の新元素となったはずである。

ということで、森田らの発見は世紀を超えての「三度目の正直」となった。また、命名候補から「ニッポニウム」を外したのは、かつて周期表にニッポニウムNpが登場し、後に幻となったためである。「ジャポニウム」という候補もあったが、



小川正孝博士 提供：東北大学史料館 コペンハーゲン留学中の仁科芳雄（左）と木村健二郎（右）

戦時中のわが国を卑下する「ジャップ」が想起されることからこれも外された。

### LBL、FLNR、GSIの成果

LBLではその後、ローレンスの小サイクロトロンの後継機である大サイクロトロンが本格稼働して、ヘリウムHeからネオンNeまでの軽イオンを高エネルギーかつ大強度で加速できるようになった。マクミランの弟子のシーボーグ（G. T. Seaborg）とその弟子らは、これら軽元素核と原子炉で合成した94番プルトニウムPuから99番アインスタニウムEsまでの超重元素標的核とを、クーロン障壁を少し超えたエネルギーで完全核融合させることに成功し、1974年までに106番シーボーギウムSgまでを発見した。また、ソ連では1957年にFLNRが大サイクロトロンを完成させLBLと同じ方法で、1971年に105番ドブニウムDbを発見した。時に東西冷戦時代で国家威信をかけた発見競争であった。

仁科も1944年にはLBLと同規模の大サイクロトロンを始動させたので、FLNRよりも10年以上早く新元素発見競争に参画できたはずである。しかし、この大サイクロトロンは敗戦直後の1945年11月、「原爆開発に利用する可能性がある」という誤認の下にGHQ（連合国軍最高司令官総司令部）によって破壊されてしまい、新元素発見競争への日本の参画は長い間お預けとなってしまった。その後1967年に新天地の和光で仁科の大サイクロトロンの再来ともいえる第4号サイクロトロンが熊谷寛夫初代サイクロトロン研究室主任研究員の主導で始動した。これはわが国初の重イオン加速器で、その研究目的の一つに「超重元素の発見」が盛り込まれていたが、結局新元素発見への挑戦者は現れなかった。

LBL、FLNRに続いて登場したのは、1975年に始動したGSIの線形加速器UNILACである。アームブルスター（P. Armbruster）とその弟子のミュンツェンベルグ（G. Münzenberg）、ホフマン（S. Hoffman）らは、この線形加速器が発生する世界最大強度の重イオンビーム核と92番鉛Pbまたは93番ビスマスBiの標的核を、LBLやFLNRと違ってクーロン障壁付近のエネルギーで完全核融合させ、1981-1996年に107番ボーリウムBhから112番コペルニシウムCnまでの6個を発見した。

この後に登場するのがFLNRと理研である。

### 第3節 長期間の挑戦を支えたもの

#### 理研のRIBFとGARIS

日本で「超重元素の発見」を本気で言い出したのは、サイクロトロン研究室の野村亨である。彼の提唱で超重元素研究が、上坪宏道2代目主任研究員の主導で1987年に完成したばかりの理研リングサイクロトロン（RRC）で始まることになった。森田は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った。手始めに気体充填型反跳イオン分離器GARISの設計を任せられ、希少な超重元素イベント探査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の収集効率とSN比の高さは113番元素発見につながっている。

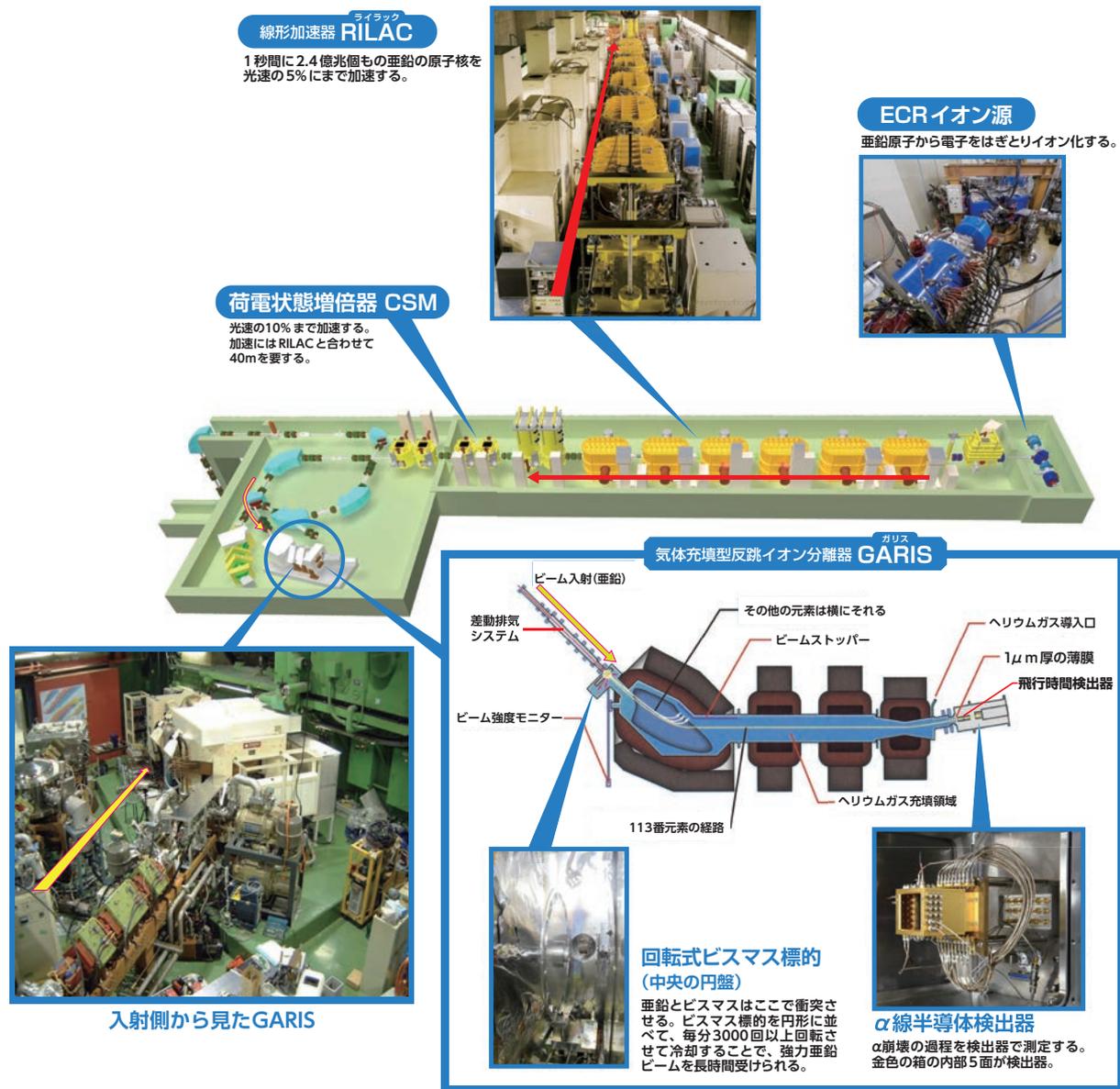
しかしながら、RRCとRILAC（1981年完成）とからなる日本初の本格的な重イオン加速器でも、当時はまだGSIに比べて十分な強度のビームを供給できなかったため新元素合成への挑戦は不可能で、<sup>200</sup>Frなどの新同位元素の発見にとどまった。1999年には、「118番の新元素発見」のニュースがLBLから伝わり、早速追試実験を行った。これが理研における最初の本格的な超重元素の実験であったが、しばらくして「発見はデータ捏造」と判明し、理研の超重元素の実験も暗礁に乗り上げてしまった。かくして「鳴かず飛ばずの15年」が過ぎたのである。

転機は、有馬朗人理事長の後押しで始まった、矢野安重3代目主任研究員の主導によるRIビームファクトリー（RIBF）の建設である。RIBFは、RILAC+RRCの下流にさらに3台の大型リングサイクロトロンを接続して、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にまで加速し、標的核との入射核破碎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、中性子超過剰核領域を探索して元素の起源を解明するというものである。

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の直下流のE1実験室にある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」ということになった。実はこれが僥倖となる。移設先を考えめぐねた末に、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問題があった。それにもかかわらずあえてそうしたのは、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計画を立てていたからである。

#### そして113番元素を合成

ちょうどそのころに、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（放射線研究室主任研究員兼務）と矢野の間に、夢の構想が生まれる。その構想とは、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。この構想は、2000年に蓮實重彦東大総長と小林俊一

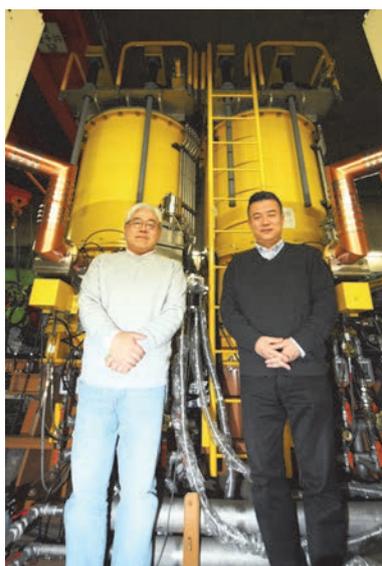


ニホニウムの合成および検知実験の装置群

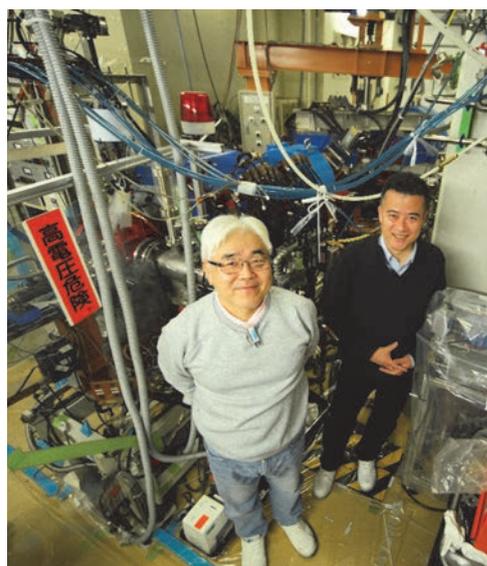
理研理事長の英断により実現する。

こうして共同事業も資金面では首尾よく計画どおりとなったが、大問題があった。GARISの移設が果たしてできるのかである。すでにRIBF加速器棟の建設の真っ最中で、RILAC実験室への搬入口が間もなくふさがれようとしていたからだ。普通は考えないルートで搬送するという奇策を練って、与えられた期間内にこれを成し遂げたのは、建物の構造を知り尽くした加瀬である。もし加瀬の奇策がなければ移設は遅れ、それによって実験開始が2年は遅れたであろうから、113番はオガネシアンのものであるであろう。また、RILAC実験室の限られた空間での放射線遮蔽の増強も難事業で、これを成し遂げたのが、熟練の上叢、福西、伊藤である。

これで「RIBFのための」RILACの大増強が実現した。そのおかげで、超重元素実験に必要な核子当たり5MeV以上のエネルギーで強度が従前より数桁大きい



CSM 上垣外修一 (右)

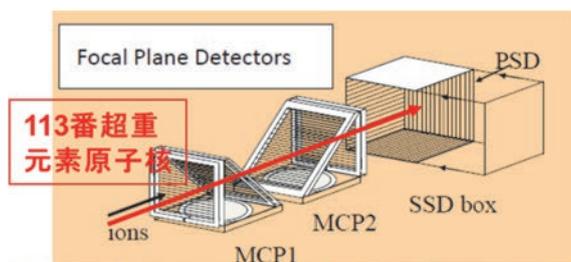


ECRイオン源 中川孝秀 (左)

世界最高強度の重イオンビーム発生装置の発明家たち



GARIS 森田浩介



飛行時間検知型質量分析器 (左)

位置検知型 $\alpha$ 線半導体検出器 (右) 森本幸司

世界最高収集・検出効率の超重元素合成装置の発明家たち

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だ。ビーム強度はやがてGSIやFLNR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った。2004年と2005年に森田らは113番元素の合成イベントを観測した。なお2004年に最初のイベントを観測した直後に、野依良治理事長は「これは科学史上に永久に残る偉業である」と森田らにエールを送った。ニホニウムの快挙は、それ以来の野依理事長の一貫した手厚い支援の賜物であった。

森田は「新超重113番元素の合成」で2005年度の仁科記念賞を受賞したが、授賞理由の末尾には「なお、この実験に向けて加速器チームが100%協力体制を引き、ビーム強度を従来の3桁以上も上げることに成功したことは、今回の実験の成功のもう一つの鍵となっている。この点も付記したい」とある。「折り返し同

軸型・可変周波数RFQの開発」で高エネルギー加速器科学研究会奨励賞を受賞した上垣外と、「大強度ECRイオン源の研究」で同賞・諏訪賞を受賞した中川の知恵の発露は、113番元素発見の要諦である。

その後RIBFをさらに増強するため、2010年、新しい線形加速器がRRCに導入されRILACがGARIS専用になり、「森田GARIS」は世界の超重元素研究者がうらやむ「超重元素実験パラダイス」となった。

森田は仁科記念賞に続いて、単独または森田グループとして数多くの賞——ナイスステップな研究者賞、和光市感謝状、文部科学大臣表彰科学技術特別賞、大分合同新聞文化賞特別賞、ベストチーム・オブ・ザ・イヤー2016、朝日賞、彩の国学術文化功労賞、日本物理学会論文賞特別表彰、HAPPY NEWS PERSON特別賞、星雲賞自由部門、日本学士院賞——を受賞（2015-2017年の受賞）した。



日本学士院賞表彰式（2016年6月27日）提供：日本学士院

### 成功へと導いた二つの要因

GSIをまねた $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Bi} \rightarrow ^{278}\text{Uut} + n$ 反応による113番元素合成実験が成功し、命名権獲得が成就した本質的な要因は、次の二つだと考えられる。一つは、森田らがGSIで発見された108番から112番までの実験を全て再現しようとして、GSIの合成法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、その結果、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だし、その断面積を最大にする「理研でのビームエネルギー」の予測法をひそ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」朝、森田が矢野の部屋にやってきて、感涙にむせびながら握手を求めた。矢野は「これでとうとう森田は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」と直感したという。この時に、113番元素合成で日本初の命名権獲得競争のスタートが切られた。

もう一つは、長期間にわたってただひたすら照射し続ける、森田のいう「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一桁落ちている。さて、113番の断面積を、果たしていくらと見積もるか、矢野は、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20fb（フェムトバーン： $1\text{fb} = 10^{-28}\text{m}^2$ ）と診て、森田にもこの値を予告した。断面積が20fbとすると、実際の実験条件（ビーム強度が $3 \times 10^{12}$ 個/秒、標的厚が $0.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 、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、オガネシアンという強豪のライバルもいる。矢野は、森田の強運にけることになるかと覚悟した。結局、2003年から2012年にわたり執念深く、長期間のビーム照射により、命名権獲得に至る3イベントを観測できた。森田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。

### 大震災を超えて

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わた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なく、いわば「陰の実験」だったからである。

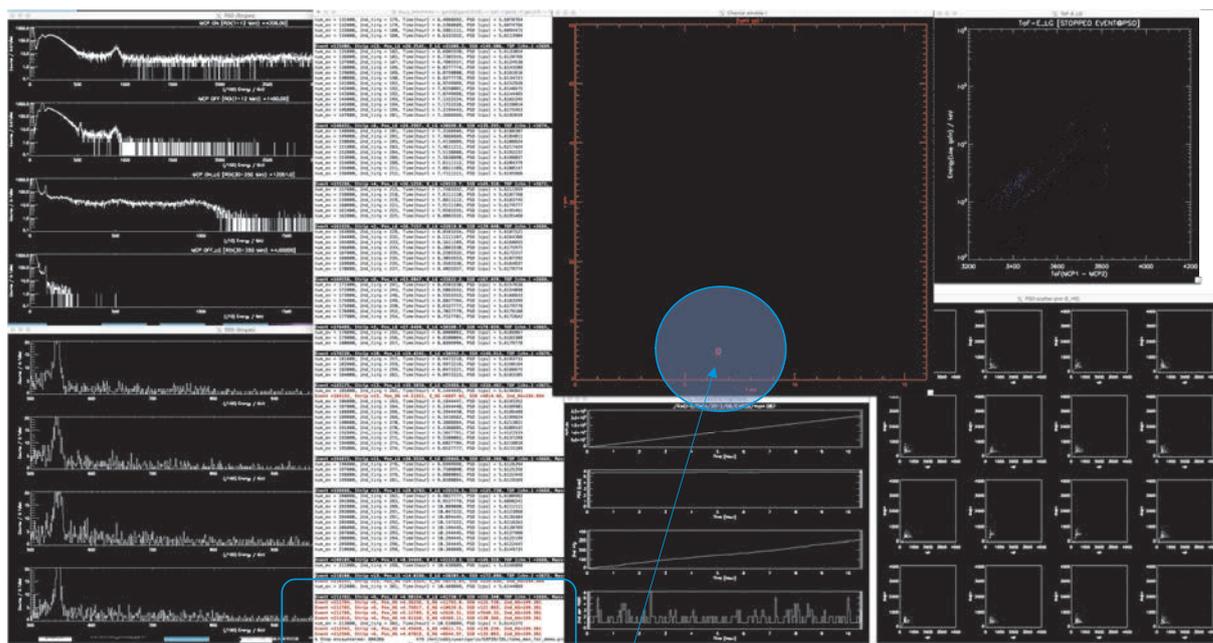
想定外の試練は2011年3月に起きた東日本大震災である。東京電力の原発事故によって関東地区も深刻な電力不足になり、全ての実験の継続ができなくなってしまった。しかしこの時、RIBFのコジェネレーションシステム（CGS）が森田の113番実験を救った。このCGSは大電力を消費するRIBFの環境への影響を少しでも軽減する目的で、藤縄雅の検討結果を基に導入されたものであった。このRIBFのためのCGSが幸いして、東京電力に頼らずに113番実験が継続できた。そして森田らは決定打となる3個目の合成に2012年8月に成功したのである。もしもCGSを導入していなかったら2年間は実験できずに決定打は遅れ、オガネシアンに敗れていたかもしれない。



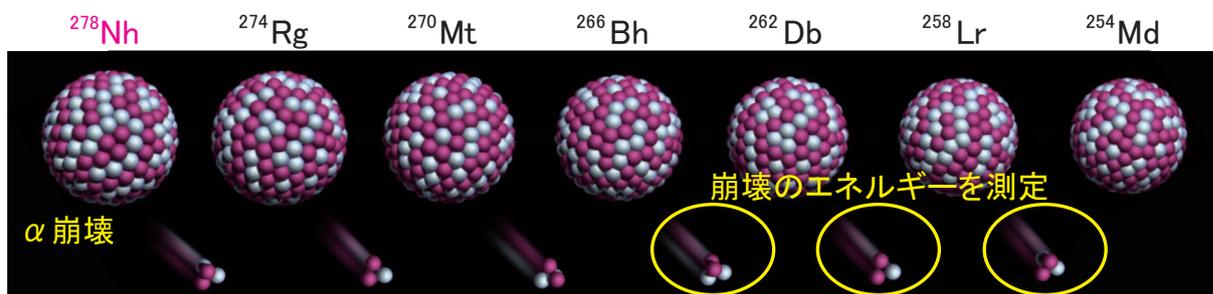
RIBFのコジェネレーションシステム

そういうことで、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」だったが、それは思いのほか大きかったのである。矢野は、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「今、来たら何fb」と尋ねた。「20ちょっとです」という答えなので、そろそろ来るかなと思っていたら、その矢先に、森田から突然に携帯電話があり「森田です」と言ったので、間髪をいれず「来たか」と答えたのであった。3回目に観測した崩壊モードは、 $^{278}\text{Uut}$ の $\alpha$ 崩壊のあと5回 $\alpha$ 崩壊が続いて $^{261}\text{Md}$ に壊変し、それが内殻電子捕獲をして $^{261}\text{Fm}$ となり、さらに $\alpha$ 崩壊して半減期13年の $^{250}\text{Cf}$ 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。ちなみに、この反応断面積は、 $22^{+20}\text{fb}$ であった。

2004年4月2日、モニター画面で待ちに待った第1イベントの到来を見たのは、このシステムを作った森本自身であった。GSIの追試実験で何度もこの瞬間を見てきた森本もさすがに「マウスを操る手の震えを抑えられなかった」。森本には「自信」があった。すぐに森田に「来ましたよ」と伝え、森田がこの快挙を矢野に伝えた。そうして皆で、この日のために用意してあったシャンパンを投げ上げ



質量約280の入射粒子と6個の $\alpha$ 線が、同一の場所に見えている!



113番発見の歴史的瞬間となった第3イベントを捉えたモニター画面

森本が設計した「位置検知型シリコン半導体検出器」が捕らえたアルファ崩壊イベントの連鎖が表示されている。合成された $^{278}\text{Nh}$ が「検出器の同じ場所（青丸内の赤点）」で上図のように次々と6回アルファ崩壊をして $^{254}\text{Md}$ に壊変したというもので、後半3回の $^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow ^{254}\text{Md}$ のアルファ崩壊のエネルギーと寿命が既知の崩壊系列に合致していることから、これを選り出して起源が113番278原子核であることを確認した。

で割って「いざ出陣」となった。決定的な第3イベントまでには10年かかったことになる。

2017年11月13日、このプロジェクトのレールを敷いた上坪が鬼籍に入った。森田を仁科記念賞に推薦したのは上坪である。上坪は、病床にあってニホニウムの朗報を聞き「森田君はよく頑張った」と令嬢に伝えた。さぞかしご満悦であったろう。

## 第4節 次なる元素へ

### 119番以上の新元素探索

これからいよいよ119番以上の第8周期元素の探索が始まる。これら未知の元素の命名権獲得競争は、理研のRIBFとFLNRの超重元素工場（SHE Factory）の一騎打ちとなるだろう。

これまで理研では、生成断面積は小さいが生成された原子核からの崩壊連鎖が既知の原子核に到達する「冷たい核融合」を選択してきた。しかし、119番以降は生成断面積が非現実的に小さくなることが予想されるため、FLNRと同様「熱い核融合」を選択することになる。GARISは「冷たい融合反応」では約80%と非常に高い輸送効率を発揮するが、「熱い融合反応」に対しては、生成物の速度が遅くなることに起因して効率が半減してしまう。そこで、「熱い融合反応」に対しても高い輸送効率を持ち、かつ高いバックグラウンド粒子の分離能力を持つ新しい設計のGARIS-IIが開発され、すでに性能実証実験も終了している。



実戦配備した119番より重い超重元素合成装置GARIS-IIと森田浩介

さらに、119番元素を生成するために不可欠な、バナジウム・ビームを大強度かつ安定して加速する手法も開発済みである。FLNR、RIBF共、重イオンビーム強度ではすでに互角で、「熱い核融合」に必要な非常に高価なアクチノイド標的の調達力も互角とすれば、断面積の大きな新奇な融合反応を編み出さない限り「熱い融合反応」で予想されている断面積は極めて小さく、理研の113番元素と同様、1原子を生み出すのに数百日はかかる実験となることが予想される。これは、とある日に新元素が検出される確率が数百分の1であることを意味する。すなわち、勝負は五分と五分、「どちらの運が強いか」で勝負が決まることになる。

### 新たな挑戦

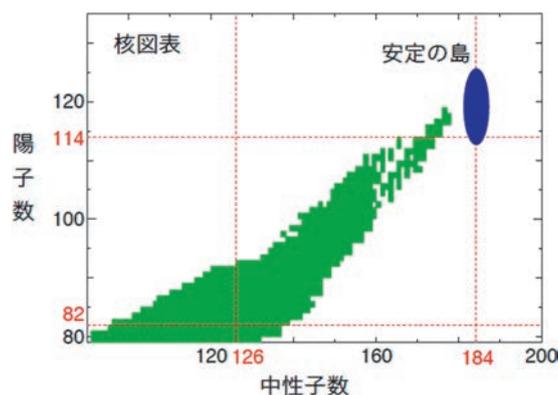
「断面積の大きな新奇な融合反応」については、超重元素の融合反応の専門家により、「核子移行反応」や「中性子過剰ビームを利用する方法」等が検討されているが、いまだ現実的な方法が見いだせていないのが現状である。原子核の反応学について、理論と実験両側面からさらなる理解を深めていく必要がある。

原子核理論は、「安定の島」とよんでいる原子番号と質量数のさらに大きな同位元素領域（一説では、 $Z=114$ 、 $N=184$ もしくは $Z=126$ 、 $N=228$ の周辺）に、超長寿命の原子核が数多く存在することを予言している。もし、これを合成する

ことができれば、1951年のマクミランとシーボーグによるノーベル賞以来の原子核研究史上の大発見となる。

しかしながら、これらは寿命が大変長いが故に、これまでのような既知の $\alpha$ 崩壊系列をさかのぼって原子番号と質量数を決定する手法は使えなくなる。したがって、それらを直接測定する手法の発明が不可欠である。現在検討されている測定手法としては、「生成した原子核の質量を精密に測定する手法」もしくは「生成した原子核の陽子数と中性子数を測定する手法」等が検討されているが、実現するにはさらなる研究開発が必要とされている。

さらに、安定な軽元素と寿命の長いアクチノイド元素の完全核融合による新元素合成の手法も、現実的なビームと標的の組み合わせでは、それぞれの中性子数が足らなくなって二重魔法数核と考えられている ( $Z=114, N=184$ ) や ( $Z=126, N=228$ ) には到達できない。唯一可能性があるのは、融合すると安定の島に届く中性子数を持つ、中性子過剰な二次ビームを開発することであるが、果たしてこのようなビームを加速するシステムが構築できるのか、次世代に委ねられた挑戦である。



「究極の超重原子核—安定の島をめざして—」より転載。  
(日本物理学会誌71 (2016))

このように安定の島への到達は現実的な測定手法だけでなく、現実的な合成手法も見いださなければ実現できないが、この困難な課題に挑む意義はとてつもなく大きい。周期表に新たな元素を記す、もしくは原子核に対する新たな知見を得るというだけでなく、いつの日か、この「安定の島」とよんでいる超長寿命の原子核を、大量に生成する方法を確立することができたならば、その寿命の長さから化学的性質をも知ることができるため、「社会生活に直接貢献可能な新しい元素」となり得る可能性を秘めているといえるのではないであろうか。

初期のRIBF計画で、大小2種類の中性子過剰な原子核を発生させ、二重蓄積リングでそれらを「寄り添い衝突」させて超重元素を合成するという方式が検討されたことがある (第II編第4部第10章参照)。これはつまり「同じ方向に周回する高速の2種類の中性子過剰核ビームを、微小角度で交差させることによって低エネルギーで衝突させ、極微小確率で両者が融合した結果できる超重元素核は、交差の中心線上に高速で飛び出すので、核種の同定が容易」というやり方である。しかし、これには夢のような高ルミノシティ (衝突効率) の二重リングを発明せねばならず、挑戦はしてみたが結局は断念した。仁科センターの次の世代が「大発見」を成し遂げて安定の島の存在を検証し、さらにその先を探索する日が待たれる。

## 二ホニウム実験に参画した研究者たち

森田浩介、森本幸司、加治大哉、秋山隆宏、後藤真一、羽場宏光、井手口栄治、  
Rituparna Kanungo、

鹿取謙治、小浦寛之、工藤久昭、大西哲哉、小沢顕、須田利美、末木啓介、  
HuShan Xu、山口貴之、

米田晃、吉田敦、YuLiang Zhao、菊永英寿、佐藤望、門叶冬樹、大関和貴、  
工藤祐生、住田貴之、

市川隆敏、藤森康幸、笠松良崇、小森有希子、大江一弘、塚田和明、若林泰生、  
田中謙伍、山木さやか、

酒井隆太郎、長谷部裕雄、Minghui Huang、Tianheng Huang、刈谷佳樹、  
増子堯博、眞山圭太、光岡真一、

森谷透、村上昌史、村山裕史、生井沙織、武山美麗