

# ニホニウムとその次の元素へ…



出席者 桜井 弘<sup>1)</sup>  
 篠原 厚<sup>2)</sup>  
 小浦 寛之<sup>3)</sup>  
 上垣外 修一<sup>4)</sup>  
 森本 幸司<sup>5)</sup>  
 羽場 宏光<sup>6)</sup>  
 司会 延與 秀人<sup>7)</sup>

【2017年8月22日（火）開催】



**延與（司会）** 本日はお集まりいただき、どうもありがとうございます。まずは自己紹介、新元素研究に関する研究紹介をお願いします。

私はセンター長としてこの研究に携わったわけですが、非常にインプレッシブだったのは、2017年3月の命名記念式典をやったとき、野依さん<sup>\*1</sup>が、延與と川合<sup>\*2</sup>がやらせろと言うから、分からないでお金を付けた、もしあのとき付けていなかったらこの日は来なかった、そう思うと責任をものすごく感じると。私も似たようなものを感じながらやってきて、この日が来て本当によかったと思っています。

**桜井** 桜井と申します。私は薬学の出身で、アイソトープは使わせていただくという経験しかありません。

- 1) 京都薬科大学名誉教授
- 2) 大阪大学大学院理学研究科 化学専攻
- 3) 日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター重元素核科学研究グループ
- 4) 理化学研究所仁科加速器研究センター加速器基盤研究部
- 5) 理化学研究所仁科加速器研究センター超重元素研究グループ超重元素分析装置開発チーム
- 6) 理化学研究所仁科加速器研究センター応用研究開発室 RI 応用チーム
- 7) 理化学研究所仁科加速器研究センター

<sup>\*1</sup> 野依良治氏：理化学研究所理事長（2003～2015年）  
<sup>\*2</sup> 川合眞紀氏：表面化学研究室主任研究員（2001～2004年）、理研理事を経て、現在、自然科学研究機構分子科学研究所長

ん。最初はいわゆるトレーサとして硫黄や炭素等を使っていました。セレンの研究をやらないといけないことになりましたが、セレンのアイソトープは当時無かったので、中性子放射化分析に移り、いろいろと経験させていただきました。その後、縁あって今日いらっしゃっている羽場先生に亜鉛、バナジウムといったトレーサをつくっていただいて、お仕事をさせていただきました。基本的に生物無機化学という分野で研究しています。よろしくをお願いします。

**篠原** 大阪大学理学研究科の篠原といいます。私は核化学、放射化学という分野で、実は今日のテーマ、超重元素といわれる領域は核化学の昔からの大テーマです。昔は天然にあると言って探していました。私が学生のときもそれをしていたので、ずっと因縁のあるテーマで、当たればノーベル賞と言われていました。ニホニウムに関しては、研究室のスタッフや卒業生等がグループに加わって寄与しています。放射化学としては当然ですが、科学全体としても非常に大きな発見ではないかと思っています。今日は楽しみにしています。

**小浦** 原子力機構の小浦です。原子核理論の研究をしています。僕が学位を取ったのは2000年ですが、2001年から理研に3年ほどいて、ちょうどそのとき113番元素の実験で森田さん<sup>\*3</sup>と協力してと

<sup>\*3</sup> 森田浩介氏：九州大学大学院理学研究院教授並びに理化



桜井 弘 氏

というのが直接の超重元素研究の経緯です。

もともとは、原子核は陽子と中性子の組み合わせでできている、それがあらゆる組み合わせでどういう性質を持つかということ調べていました。しかし森田さんとの縁で、超重元素の研究にどっぷり浸かることになりました。その後の研究も超重元素を中心とした研究になったのは、そういった縁があったからだと思います。

いま振り返ってみると、2000年の頃は非常に小さい規模での超重元素の理研のグループでしたが、この進展は感慨深いものがあります。

僕は超重核の「安定性の島<sup>\*4</sup>」の研究をしています。原子核はどこまで存在するのか、また宇宙の中で存在しうることかといったことに興味を持って研究を進めてきました。今日は楽しい座談会になることを期待しています。

**上垣外** 上垣外と申します。理研 RI ビームファクトリーの加速器の開発を行っています。原子核物理の世界では、加速器を開発する人と、それを使って実験する人が別のグループになっているのですが、私も大学院時代は加速器を使って原子核物理の実験をやっていました。

超重元素とのかかわりですが、25年前に原子核物理で学位を取ったとき、理研で超重元素のために線形加速器リニアックを増強するという計画があ



篠原 厚 氏

り、ポスドクとして雇ってもらいました。ですから加速器の開発をすることになったきっかけが超重元素の実験でした。当時、超重元素といってもどういう実験をするのか、また加速器のこと自体も全く知らなかったのですが、理研は加速器に関して長い歴史があり、就職してからいろいろな先輩に教えてもらいながら開発してきました。今日は楽しみにしています。

**森本** 仁科センター超重元素分析装置開発チームの森本です。私はいま森田さんと一緒に超重元素の実験をやっていますが、大学院では原子核の実験ではなく、人工衛星を使った宇宙の観測で学位をとりました。その後は東大宇宙線研究所エアシャワー研究グループで研究を行いました。その後、1998年に理研の谷畑勇夫先生の研究室に入れていただいて原子核実験に関する研究を始めました。

1999年、アメリカのバークレーの研究所で、118番元素が予想よりもはるかに高い生成断面積で見たという報告が出ました。当時、理研に森田さんのつくったGARIS<sup>\*5</sup>があり、そのGARISを使えば同じ実験ができるということで、すぐに追試をしようという話が持ち上がりました。そのとき一緒にやりませんかという話があり、そこから超重元素の研究をさせていただくことになりました。

最初は新元素といってもどうなるか見通しが私にはよく分からなかったのですが、ドイツやロシア等の研究状況を見ながらやっていくうちに、“113番、勝てるかもしれない”と思えるようになり、実験が

学研究所仁科加速器研究センター超重元素研究グループリーダー

<sup>\*4</sup> 超重元素は重くなるほど寿命が短くなるが、安定の島領域の原子核の寿命は、量子力学的な効果によって極めて長くなると予想。

<sup>\*5</sup> 気体充填型反跳核分離装置 (GARIS)



小 浦 寛 之 氏

ますます楽しくなって、最後は名前を取るところまで来たわけです。この研究をさせていただききっかけをいただいた方々に感謝したいと思います。これからも頑張りたいと思いますので、よろしくお願ひします。

**羽場** 理化学研究所の仁科加速器研究センターRI応用チームの羽場と申します。私が理研に入所したのは2002年です。ニホニウムの実験が開始されたのが2003年からですので、私は非常にタイミングよく理研に入所したことになります。

私の専門は核化学です。ニホニウムのような新しい元素が発見されたとき、その元素がどのような化学的な性質を持っているか？ということ、化学者にとって一番基本的な興味です。理研の加速器は世界で最もたくさんの種類の元素をつくれる性能を持っています。私は加速器を用いて超重元素のRIをつくり、その性質を調べるという研究をしています。

ほかにも核医学や生物学などの研究に使えるRIの製造技術を開発しながら、所内外の先生方にRIを提供して一緒にいろいろな応用研究を展開しています。どうぞよろしくお願ひいたします。

### —ニホニウム発見秘話—

**延與** ここからはニホニウム発見秘話をテーマに進めていきたいと思ひます。センター長になって、2例目\*6が出てきたところで、命名権の優先権を申請

\*6 2005年4月2日に2例目発見。



上垣外 修 一 氏

しましたがダメでした。3例目を出そうとやっていたところに、2011年の大震災があった。加速器運転なんてとんでもないみたいな雰囲気がある中、“これだけは”と言って、GARISの研究だけはさせていただいた。2012年も同じようなことを言って理事長に頼みに行きました。私はこれで出なければ実験を止めるのかなと思っていたら3例目の合成が確認できました\*7。こんなことならもっと早く止めようと言っておけばよかった(笑)。そんなことを思っていたのですが、1例\*8、2例目の頃はどうか。

**森本** 1例目は80日\*9ぐらいだったので、そんなに長くは感じなかった。ちょうどそろそろ来ないかなというときに来たような感じで。

**小浦** 振り返ると、運がよかったですね。2002年、最初の113番元素合成実験のキックオフ会合を覚えているのですが、その時0.6ピコバーン\*10でエスティメートしていたんです。そうすると数か月に1回ぐらいというので、ちょうどいい感じでした。2例目までは。われわれの予想どおりという印象は最初ありました。その後は大変でした、全然出ませんでしたからね。

**延與** 外から見ていると、どんな感じだったのか。1例、2例目から3例目、実験をやっているほうはひっちゃきですが。

**篠原** あれだけ出ないのに、よく続けてやらせて

\*7 2012年8月12日に3例目発見。

\*8 2004年7月23日に1例目を発見。

\*9 2003年9月の実験開始からビーム照射日数で80日目。

\*10 核反応のしやすさは原子核を的と見立て、その断面の面積の大小で表現する。その単位がバーン。1バーンはおよそウランの原子核の断面積に相当する。1ピコは $10^{12}$ の意味。



森本幸司氏

もらえたぐらいの感じです。われわれは加速器の実験をやっているのですが、ビームタイムを取るのもなかなか大変で、それをずっと結果の出ないまま続ける。外からいろいろと言葉が飛んできたと思います。条件がどうか。でもそこは森田さんですよ。どしどし構えて、すばらしいなという気がしました。ずっと期待しながら待っていた感じはあります。だから3番目は、ついに来た、しかも最後まできれいに……。

**延與** 桜井先生はどうでしたか。

**桜井** 私は文部科学省が出している“一家に1枚周期表”<sup>\*11</sup>の企画協力を携わっていたのですが、1例目、2例目が出たとき、周期表の113番元素に日の丸の旗を入れました(笑)。しかし賛否両論でした。日の丸の旗を降ろすかどうかというところで何とか頑張っていました。ついに3例目を迎えました。ようやくバンザイ、途中で消さなくてよかったなと思いました(笑)。

**延與** いま全部を振り返ってみると、初めに113番元素をつくったのは日本ではないことになりました。初めに確証を得たのはわれわれだけ。命名権をどこに与えるかには恣意が働かざるをえない。

**小浦** ロシア<sup>\*12</sup>のグループは2004年2月ですね。

**延與** 初めにロシアがダイレクトにつくった。でもあの事象では確証が得られないと思います。われわれのほうがいいデータだと思ったら、われわれの発見も2例目まででは認めてもらえなくて、3例目で



羽場宏光氏

やっと決着が付いた。われわれはロジカルには負けないはずですが、つらい時期ではあったと思います。

**森本** 1例目が出る前に、ロシアから115、113の報告が既知の核に繋がっていないとはいえ報告されていたので、あれがどのように取り扱われるのか気になっていました。

**桜井** ある学会で森田さんとお話をする機会がありまして、どうなんですかとたずねましたら、いま論文を一生懸命書いていて、これが通ればたぶん大丈夫だろうとのお返事をいただきました。自信を持っていいですねと更にたずねましたら、いいと思いますよとおっしゃったので、本当によかったなと思っています。

**延與** 崩壊系列の確からしさで勝負をするならわれわれは勝つけれども、遡って初めの113と言われるとややこしいことになる。われわれは物理屋なので、系列が決まったかどうかを重要視していただいても、そうではないことを言う人も多かったですね。どこでもいいんだよ、113番つくったところなら、そういう話もあった。割とピリピリしていた7年間でしたね。

振り返って、あの当時、発見の状況がいろいろあって、ほかは熱い核融合に行っているときに、冷たい核融合<sup>\*13</sup>に固執する、その判断はどうだったの

<sup>\*13</sup> <sup>208</sup>Pb や <sup>209</sup>Bi の標的原子核に重い鉄近傍の原子核を衝突させる「冷たい核融合反応」に対して、アクチノイド元素の標的核に <sup>48</sup>Ca 等の比較的軽い原子核を衝突させるものを「熱い核融合反応」と呼ぶ。この「熱い」、「冷たい」とは、衝突によって生じる複合核と呼ばれる中間状態の励起エネルギーの大きさに因る。理研は <sup>70</sup>Zn と <sup>209</sup>Bi を衝突・融合させる冷たい核融合反応という手法を用い続けた。

<sup>\*11</sup> <http://stw.mext.go.jp/series.html>

<sup>\*12</sup> ドゥブナ合同原子核研究所



延 與 秀 人 氏

ですか。

**森本** 2000年、新しい元素を見つける計画を森田さんが練られているとき、熱い核融合はロシアで114、112が見えていたのですが、そこまで既知の核にたどり着いていないものは名前が1例も付いていなかった。既知に繋がらなければ難しいのではないかと読んだのです。生成断面積の小さい冷たい核融合でもなんとか1個か2個は行けそう。それだったら観測できる個数は少ないかもしれないけれども、既知の核にしっかり繋げて命名権を取るという作戦を選択したわけです。異論を言う人はいなかった。

**小浦** 問題はドイツとどう戦うか。ロシアは認定されないというつもりで、ドイツとの勝負に勝てるかというのに集中していました。

**森本** 当時はそうですね。いまはロシアとの戦い。当時、ロシアは114、112を出していたのですが、GSI<sup>\*14</sup>もまだ頑張っている時代で、112を出して、次に冷たい核融合で113をやると言っていた。

われわれは112、113と順番にやろうと思っていたのですが、ドイツが始めるというので、112をすっ飛ばして、113に。

**小浦** われわれは常にドイツとの勝負、向こうは真空型反跳核分離装置で、こちらは気体充填型で、どちらの性能がいいとか、ビームが倍出ているとか、GSIに勝てそうだというので自信を持ちつつというところがありましたね。

**森本** そうですね。当時はドイツを強く意識して

いた。

**延與** 加速器側のプレッシャーはどんなものだったのですか。

**上垣外** それは相当なものです（笑）。リニアックで実験を始める前に、リングサイクロトロンが1986年に完成していて、GARISはその目玉の1つだったのですが、ビーム強度が少なすぎて満足な実験ができなかった。1996年、新しいイオン源と入射器をつくり、これでビーム強度が増えたので、99年、先ほど森本さんがおっしゃった118番の検証実験をやりました。そのときクリプトンのビームを出したのですが、リングサイクロトロンのビームはエネルギーが高すぎて、無理やり低くする運転をしました。

そのあと東大のCNS<sup>\*15</sup>が和光に来ることになったので、東大の協力のもとでリニアックのエネルギーを上げて、リニアックにGARISを移設し、そこで実験することになりました。それが2001年です。2002年からリニアック単独で、何か月という長期間の実験ができるようになった。これが非常に大きかったのではないかと思います。

原子核の実験というのは当時、長くてもせいぜい1週間ぐらいの実験だったと思います。しかし超重元素になると1か月以上ビームを出し続けられない。実際、リニアック棟に移設したGARISにビームを供給し始めると、リニアックの性能ぎりぎりのところで運転しましたから、10日に1回ぐらい大故障して、その度に真空を開けて中を修理して。

**延與** イオン源のほうですか。

**上垣外** いいえ、加速キャビティです。RF電流のコンタクトをとっている部分が溶ける。1つ溶けると、全部ほとんど同じ構造をしていますから、全部開けて、全部修理して、電圧を上げて、またどこか壊れてということ。2002年の秋はずっとやっていて、そのうちだんだん安定に加速できるようになってきた。イオン源のほうも初めは連続2週間ぐらいだったかと思いますが、そのうちにもっと長期間ビームを出せるようになって、本格的に実験ができるようになりました。

印象に残っているのは、森田さんのグループがすぐ隣で実験していて、108番から始まったと思うの

\*14 ドイツのダルムシュタットにある重イオン科学研究所

\*15 原子核科学研究センター

ですが、合成が確認できるとすぐに、その崩壊チャートを実験室の壁に、加速器の人が見えるように貼ってくれる。そうすると「いま出た！」ということで、オペレーターもやる気になる（笑）。ビームをとにかく出し続けるのだと、気分も盛り上がりました。

**森本** 113番のときも、ビームをすごく細かく調整してくれて。ビーム強度は上下するのですが、ちょっと下がってきたらすぐ調整して。きめ細かい調整をしていただきました。

**上垣外** 僕は1例目と2例目のときは家に帰った後でそのニュースを知りました（笑）。5年前の3例目のときは土曜日だったのですが、たまたま理研に来たら、森田さんが呆然と計測室に座っている。当日は加速器を運転していなかったのですが、「その前のデータを見直していたら、ちょうどそれらしいデータがある、しかも $\alpha$ 崩壊を4回した後で、核分裂していないようだ」ということで、その現場を見て非常に感激しました。

**延與** ビームを出す方とビームを受ける方がいるわけですが、羽場さんはターゲット製作の苦勞が結構あったと思います。飛散させたりなんかしていたんじゃないですか。

**羽場** ニホニウムをつくるターゲットはビスマスで、これは天然に大量にある元素で、真空蒸着法でつくることができます。この材料に関しては、万が一飛散しても、すぐにつくり直して実験できます。われわれがニホニウムの実験をしていく上で、 $\alpha$ の壊変鎖が107番元素のポーリウム、105番元素のドブニウムといった既知の元素の原子核にしっかりと繋がっていくことを証明しないといけないという1つの重要な課題がありました。

1例目と2例目の発見をした後、IUPACにわれわれが113番元素を発見したと主張するのですが、既知の原子核に結び付いていないという厳しい判定を下されました。それは当時107番元素のポーリウムが1原子しか発見されていなくて、ポーリウムの原子核のデータがはっきりしていなかった。そこで、113番元素からの壊変鎖が繋がるポーリウムの信頼性のあるデータを自ら取ろうということになりました。

113番元素の壊変鎖の途中にあるポーリウムをどうやってつくるかということ考えたときに、ちょうど森田さんが、113番元素の命名権を取るという

ことと、超重元素の化学的性質を調べるということで特別推進の大きな科研費を獲得してくださって、これでキュリウム248という超ウラン元素の標的物質を調達することができました。そのとき日本アイソトープ協会には大変お世話になりました（笑）。これは学術利用なので、限られた予算内で最大限の量を販売してくださいとお願いして入れていただいた。それもあって、いまの命名権獲得があると思うのですが、原子番号96番のキュリウムと11のナトリウムを合わせて原子番号107のポーリウムをつくる。ポーリウムのデータを補強して、1原子しかなかったものを30原子ぐらいまでにして、われわれの113番元素の壊変鎖が間違いなくポーリウム、更に105番元素ドブニウムに繋がっていくということをしかりと確認することができたということです。

このキュリウムという標的物質が非常に貴重で、当時購入した分量は7mgです。科研費を最大限に使って買ったのですが、7mgというと、水滴1滴よりも少ないぐらいの量で（笑）、それを何回も繰り返し返して使う、再生しては使う、減らさないように使うということを丁寧にやってきて、ポーリウムのデータを取りました。

**延與** 緊張感が高い。なくすと何億円ですよね（笑）。熱い核融合を始めると、電気代より標的代の方が高いみたいな話になる。ところで、現場では1つ目の事象の 때가1番興奮したのではないですか。

**森本** 1つ目が見つかったときは、森田さんがソフトで計測室におられて、私は夕方になって家に帰ろうと思って、森田さんに声をかけに計測室に入ったところ、現在取っているデータをオンラインで解析し113番が来たら画面に窓が開くようなプログラムが仕掛けてあったのですが、それがぽつと開いていた。

**小浦** チャンスウィンドウと言っていましたね。

**森本** 条件を厳しくしておくとも何も開かないのでつまらない（笑）。たまに開くのですが、たいいてい見たら偽物だとすぐ分かる。そのときは見た瞬間、本物だと分かりました。 $\alpha$ 線だったら $\alpha$ 線の印、113番の重さのものだったらその印が出るようにしてあった。それが見事に同じ場所にぽつぽつぽつぽつと出ていて、見た瞬間、「来た！」と。そのときは、しびれる感じでした。

**延與** 何で3例目のとき、チャンスウィンドウは開かなかったのですか。

**森本** 2例目までの実験と3例目の実験の間に、実験装置で変更した部分があります。GARISはヘリウムガスで充填しているのですが、検出器のところはマルチチャンネルプレートを使っているの、薄い膜で切り離して高真空にする。その真空の切り離し膜に、 $1\mu\text{m}$ という厚さのマイラー膜を使っていたのですが、それを $0.5\mu\text{m}$ の膜に替えた。それは膜が薄いほど113番が膜を通ったときの散乱が少ないので、より検出効率が上がる。膜を薄くしたのに、オンラインモニターで113番元素が到来したかの判定を計算する式に、 $1\mu\text{m}$ のままのパラメータを入れていた。実際、膜が薄くなったから、エネルギー損失が少なく、少しエネルギーが高い状態で検出器に打ち込まれたので判定から外れてしまって、オンライン解析には引っかけられなかった。

オンラインだけでデータを見ていたわけではなくて、必ずたまったデータをもう1回細かく見てチェックしている。当時、お盆休みの期間で、データがたまっていた。そのチェックされていないデータを当時の理科大の大学院生が一つひとつ解析していたら見つけた。

**延與** あの日には僕もたまたま理研にいて、興奮しました。娘と何かの約束があったのですが「お父さん、ちょっと発見があったから帰れない」と言ったら、「えっ、113番が出たの?」と言われた(笑)。ああ、娘も期待していたんだと。

命名プロセスはどうだったのですか。

**森本** 名前を決めるときは、森田さんが日にちを決めて。その日に集まれるコラボレーターは全員集まって。名前はもう決めていたのではないのとよく聞かれるのですが、グループ内ではこれにしようという話は一切していなかった。ジャポニウムプロジェクトというのは出ていましたが、どうしようということで、ホワイトボードにいくつか候補が挙がりました。

**延與** 森田さんから、割とすんなり決まりましたと。篠原さんは、ニホニウムという命名を聞いてどうお感じになりましたか。

**篠原** ああそうかと思いましたよ。ジャポニウムとよく言われていたけど、ジャパンは日本語ではなくて英語を日本語にしたわけで、ニッポニウムは1

回出たのでだめだ。そうすると何かなと思って、ニホニウムは、聞いたときには、なるほどという気はしました。

**延與** 桜井さんはどうでしたか、ニホニウムという名前を聞いたとき。

**桜井** 私はすごくいい名前だと思いました。ニッポニウムというより、ニホニウムは柔らかい感じですが。ただ、ナイホニウムと呼ばれるのではないかと懸念される人がいたのですが、これは固有名詞ですから、ニホニウムでいいのではないかと思いました。

**小浦** 研究会でも皆、ニホニウムと言っていますね。聞いた限りでは、ナイホニウムと言う外国の人はいません。

**延與** ニホンという名称を知っている外国人は非常に少ないのでよかったです。皆、ジャパンは知っているし“ニッポンチャチャチャ”と騒ぐから、ニッポンは聞いたことがあるけど、ニホンがオフィシャルな名前の1つだにご存じの方は少ない。あと思ったのですが、いい名前だなと。

そのときのインパクトはどうですか。離れたところにいらっしやると。

**篠原** 周期表に日本の名前が付くと、小学校、中学校の授業や、いろいろなところで出てくるわけで、教育というか、理科教育に対する効果が大きいと思います。

**桜井** インパクトは大きかったですね。小学生や中学生の教育の中では、元素の名前はあまり出てきませんが、そこにお父さん、お母さんが加わって、話題になったということがすごく大きかったと思います。ハヤブサのときのような感じでした。あそこまでは大きさではなかったのですが、それに近いインパクトはありました。

**延與** 命名権の連絡<sup>\*16</sup>が来たときも、大晦日。あの日の朝5時頃にたたき起こされた。理事長は奈良から、森田さんは九州から。夕方4時に会見をセットして、大変なことになったけれど紅白のニュースに間に合う(笑)。良かったと。元旦の新聞にも載って、本当にうれしかったですね。紅白を見ていた友人が気づいて、お前出ていたよな、よかったじゃんみたいな話で、視聴率が衰えたとはいえ、紅白の影

<sup>\*16</sup> 2015年12月31日、IUPACから認定の通知を受け、当日理研ではプレスリリースを行ったが、NHKでは紅白歌合戦の途中のニュース番組で取り上げた。

響はたいしたものだと（笑）。ほかにエピソードがあったら。

**上垣外** 2003年、GSIが113番の実験を始めようとなりました。9月の初めだったと思いますが、こっちも1日でも早くと言って加速器を立ち上げたのですが、その途端に猛烈な雷雨になって、かなり長い時間停電してしまいました。森田さんと2人でリニアック棟の前に立って、雨を見ながら「いや、よく降るね」と（笑）。先が思いやられる気がしました。

**桜井** 113番元素がつくられたときの崩壊の系列が、2回目は途中まででしたが、3回目は非常にきれいに崩壊しています。あの実験的な違いはどのようなところにあるのですか。

**延與** 羽場さんは、3つ目が来るときは必ず、6つ\*<sup>17</sup>行くと予言していましたね（笑）。

**羽場** 1回目と2回目はよく似た壊変鎖でした。113番元素からの $\alpha$ 壊変が4回続いて、105番元素のドブニウムになり、それが核分裂するという現象を見ていたのです。このドブニウムの質量数が262のものは、50%ぐらいの確率で核分裂して、50%ぐらいの確率で $\alpha$ 壊変することが分かっていました。

1回目と2回目はドブニウムが自発核分裂していました。50%の確率で $\alpha$ 壊変するということだったので、自発核分裂が2回起こっていれば、次の1回は $\alpha$ 壊変するだろう（笑）。3回とも自発核分裂を観測する確率は8分の1になるので、非常に少ないだろう。そう予測していたら3回目は期待通り $\alpha$ 壊変して、更に103番元素になり、103番元素も $\alpha$ 壊変するということが知られていたのです、やはり103番元素も $\alpha$ 壊変してくれて、101番元素のメンデレビウムまで6回の $\alpha$ 壊変を観測することができたわけです。

**延與** ほぼ予測のとおりになってよかったですね。

**篠原** 確率論どおりで。

**桜井** それが最終的に認定される非常に大きなエビデンスになったのですね。

**延與** ボーリウムの実験結果と三例目が6回行ったというこの2つで、文句無しということだったの

でしょうね。

**小浦** 核分裂で原子番号と中性子の数の同定というのは実験的に難しいですからね。 $\alpha$ 崩壊であればより曖昧さが無いというところはあったので、そういう意味ではよかったかもしれません。

**延與** 小浦さんのエピソードは。

**小浦** 1発目は7月23日に見つかったのですが、僕は7月24日の土曜日がシフトで、朝の9時頃に起きたら、様子が違う。あ、そうだったのというのがあの翌日でした。後で経緯を聞いて、よかったな。ついに来たな。そういう意味での確信は持てた。だから僕も見つかる前に、見つかったらびっくりはしない、ただうれいと思うだろうと言っていて、ついに来てくれたかと。断面積からしても $\alpha$ エネルギーにしてもある程度の予想の範囲で、「ついに」という感じがありました。

**延與** 3例目が来るまでは、あの長期間、どういう気持ちでいたのですか。

**小浦** 2004年に1例目があって、2005年に2例目があったから、ここまでいい感じでした。次が来なかったとき、ふと思ったのは、その前の2002年の夏に実施したダームスタチウム合成実験です。このとき実験が木曜日に始まって、金曜日にいきなり見つかって、月曜日にも見つかった。しかしその後ずっと見つからないということがありました。物理研究というのは統計の範囲で運だな。統計は嘘をつかないけれども、どこに偏るかということで、左右される。

僕はそれをダームスタチウム実験で実感したので、113番に関して、大丈夫だろうという楽観主義的な感じでした。サイエンスとして自分たちがイベントツールなものを手に入れたという自信は持っていて、判定はお任せするという感じを僕は持っていました。もちろん理研の立場ではそれは許されない。

**篠原** 待っている間、不安はなかったですか。

**小浦** イベントに関する不安はあまりなかった。核物理としての冷静さみたいなものを持っていました。3例目は、また統計の範囲での運が出るなという見方はしていましたね。その意味では、自信は持っていました。

最初か最初でないかというのもあったのですが、IUPACはサイエンティフィックに見てくれるとこ

\*<sup>17</sup> 最初の2つの113番元素の原子核 (<sup>278</sup>113) は $\alpha$ 崩壊を4回繰り返して、原子番号111の<sup>274</sup>Rg、109の<sup>270</sup>Mt、107の<sup>266</sup>Bh、105の<sup>262</sup>Dbで核分裂。ところが、3つ目の崩壊連鎖では、<sup>262</sup>Dbが $\alpha$ 崩壊し、既知の原子核である原子番号103の<sup>258</sup>Lr、101の<sup>254</sup>Mdまで到達。

ろもあるのかなと考えたりして。例えば104番元素はいまラザホージウムという名前になっていますが、ソビエト連邦は1960~70年代、クルチャトビウムという名前を論文のタイトルに付けるぐらいキャンペーンを張っていた時期がありました。歴史的にもソ連のほうが先だったという感じですが、裁定の結果、ラザホージウムという名前に落ち着いた。

何が何でも最初の事象で取るのか、それともサイエンスとして妥当な十分なデータが出たら取るのか。僕らとしては適切にジャッジの基準をつくってくれたという理解で見えていましたので、その意味で、よかったなと。せめぎ合ったところではありませんけどね。

**延與** 当時、われわれも、共同命名しなさいと言われたらどうしよう。そうなるのではないかとそれなりの権威の人が言っていることもありましたが。こっちの気持ちは、そんなことは考えたくもない(笑)。われわれは一生懸命アピールする以外にないのですが、そういうドキドキ感はありましたね。

#### —そしてその次の元素へ—

**延與** そろそろ今後の展望についてお話を。まず上垣外さんですね。ビームが出なければ始まらない(笑)。

**上垣外** 次は119番、120番ということで、合成確率が小さくなっていく、つまりビームをもっと長期間安定に出さないといけなくなる、そのための加速器の改造、イオン源の新設などを行っています。超重元素の実験というのはとにかく大強度のビームを長時間安定に供給し続けるという、加速器の本質的な性能勝負みたいなどころがあるので、加速器の開発もやりがいがあります。

あともう1つ、われわれの生きがいは実験者のターゲットを破るということです(笑)。ターゲットが持たないからビームを減らしてくださいと言われたらわれわれの勝ち、ビームが足りませんと言われたら負けということですからずっとやってきましたので、それを今後もやり続けようと思います。最近、報道発表もされましたが、119番元素のためにはバナジウムのビームが必要で、最近われわれのイオン源でビーム強度が非常にたくさん出ることが分かり、近々実験に供給できるのではないかと思います。

**延與** 挑まれましたが、受ける側はどうですか。

**羽場** ニホニウムは冷たい核融合反応といって、鉛やビスマスを標的とする方式でやってきたのですが、119番以降は熱い核融合反応と呼ばれるもので、アクチノイドの元素の高放射性の標的を使わないといけない。すなわち、超ウランの人工元素を標的にして用いないといけないと考えられています。キュリウム、バークリウム、カリホルニウムといった元素が標的となります。

残念ながら、わが国には超ウラン元素を人工的に作り出す高密度の中性子の原子炉がないので、外国のロシアやアメリカでつくられた超ウラン元素を輸入して、それを標的にしていかないといけない。高額で購入できるものでなくなってきていて、つくれるところも限られている。今後、どうやって標的物質を入手していくかが非常に重要になっています。

ロシア、アメリカの研究グループは120番元素、ドイツのグループは119、120番元素の実験を開始している状況です。われわれも例えばアメリカのオークリッジ国立研究所等と共同研究をして、アクチノイドの元素の標的を入手して実験を進めていかねばならない。そして貴重な物質をととても大事に使っていかないといけない。

だから受け止める側としては、標的を壊してしまうわけにいかないで、限られた量の標的物質で、どうやって効率的に大強度のビームを受け止めるかという標的の冷却の技術の開発、更にリサイクルの技術の開発を行いながら、加速器側に負けないように実験を進めていきたいと考えています。

**延與** 測定器はどうですか。

**森本** 測定器も、熱い核融合を使ってビーム強度も上がってくると、検出器にやってくるバックグラウンドとなる粒子が増えてきます。いかに新元素をきれいにとらえるか、本来の信号とバックグラウンドの粒子をいかに精度、信頼度を持って分離してデータを出すかということに注意して、あとは長期にわたってやるので、安定性も重視して準備したいと思っています。

**延與** 周期表の8列目に行くことについて、化学者の立場からどうですか。

**桜井** 全く未知のことですからね。医療の分野から見ますと、新しいものをつくっていただいて、予

期せぬ医療分野での応用、例えば、テクネチウム-99m からスタートしたがんの診断、治療等に見られますように、実際に使えるものが発見されますよう、ぜひ頑張ってくださいと思います。

**篠原** おっしゃるとおりで、化学にとって元素が増えるのはものすごく大きいことです。1つの元素で化学が広がる。

話題を拡張するようですが、ニホニウムの話で、こういう分野への関心が社会的にも高まっています。もちろん理研で119、120をつくってほしいのですが、波及効果というか、周りの分野、桜井先生がおっしゃられた医学利用等、社会的なインパクトが大きくて、広く言うと放射線、原子力とも繋がるベースの技術です。これを機会に、このベースをアップする雰囲気をつくっていききたい。

いま私も核医学とかかわって研究しているのですが、 $\alpha$ 線を使った治療等が始まって、製造しにくい核種を要請されることもあるわけです。そうすると1番の問題は、人ですね。アクチノイド等の非密封の放射性物質をケミカルに扱える人材が少ない。理研には羽場さんがいるから、いいのですが、他にそういう人が日本にいるかという、あまりいないですね。

あと環境、設備等も当然ですが、もっと深刻なのは、実験しようとしても、ターゲットが無い。キュリウムやバークリウムにかかわらず、同位体は、これは日本アイソトープ協会の範疇にもなりますが、全部輸入、国内でつくらない。買ったほうが安いからつくらないと閣議決定されて技術が途絶えてしまった。日本原子力研究所にRI製造部があったのですが、なくなってしまいました。このようなベース固めから日本としては進めない、こういう分野の将来は非常に厳しい。応用面は医学利用等沢山あるのですが、社会的な問題等もあって、例えば原子炉を廃炉するとき、扱える人がいるかという話になってくるわけです。

今回の件はポジティブな話題なので、うまく利用して、そういう環境をアップするのと人材をいい方向に持っていく機会にできたらと思っています。私は大学にいますので、特に人材育成を含め進めたい。それをやらないと、119、120、もっと先のことを考えると続かない。

**延與** いまやっている加速器の強化というのは、デュアルパーパス（二つの目的）になっていて、1

つは119、120番元素ですが、もう1つのほうに羽場さんは。

**羽場** 先ほど桜井先生からRIの医学利用という話も出てきましたが、ニホニウムのような新しい元素をつくれる高性能の加速器は、これまで入手できなかったようなRIを実用のレベルでつくることができます。加速器技術の進歩によって、新しい元素の発見はもちろんですが、その副産物として、これまで利用できなかったRIが、核医学等の応用に利用できるようになってきます。

篠原先生が先ほど $\alpha$ 線によるがん治療とおっしゃっていましたが、まさにニホニウムに向けたりニアックのアップグレードが行われれば、 $\alpha$ 粒子というビームを世界断トツの強度で発生させることができるようになります。これまで日本が持っているサイクロトロンは何十基分のビームをこのリニアック1基分から発生できて、例えばアスタチンという元素のRIを実用レベルで医学利用などに使えるようになります。まさに新元素合成、発見の基礎からやりつつも、その基礎をやることによって生まれてくるものが非常に大きいのではないかと考えています。

**延與** いろいろな加速器が協力して日本全国のRI製造をカバーできるみたいな話もあって、非常にいいのではないですか。篠原さんの言っている方向に。

**篠原** ある意味で、そうですね。

**延與** では、純粋な物理学の興味として、元素はどこまでありますか（笑）。

**小浦** まず安定性の島から行きたいのですが、ニホニウムは、陽子の数が113、中性子の数が165という構成でした。寿命（正確には半減期）は1.4ミリ秒。

この寿命は短いのですが、中性子を大きくしていくと、寿命はもっと長いのではないかという予測が1960年代頃からされています。それは陽子の数が114、中性子の数が184の原子核で、これは二重魔法数核と呼ばれているのですが、これを中心とした領域の原子核に、寿命が億年単位の原子核が存在するのではないかという予想が当初されました。その後、そこまで長くないだろうということで、現在の理論計算では300年ぐらいの予測を出しています。

超重元素を探索する意義は、1つはどれだけ原子

番号が増えて、存在しうるのか。もう1つは超重元素の安定性の島の長寿命の原子核が存在するのではないか。ウラン238は45億年で、それより上に行くと寿命がどんどん短くなっていくのですが、超重元素の安定性の島では、何百年、うまくいって何万年の寿命の原子核であったら、それがマテリアルとして手に入るのではないかと、という夢のような可能性を探求することが超重元素研究のもう1つの目標ではないかと思っています。

近い将来なのか遠い将来なのか分かりませんが、「これがダームスタチウムの超重元素です。光沢があります」といった話ができれば非常にうれしいと思ったりはします。

いま実験では119, 120を狙っていますが、旧来の方法だと、124番, 126番元素くらいで検出器まで飛んでくる最中に壊れてしまう寿命と予想されるので、見つけるのはそれくらいまでではないかと思っています。

もう1つ、中性子の数を非常に増やしていくと、陽子の数とのバランスで、安定なところをつくり出すことができるという予測を立てることができます。陽子の数が164, 中性子の数が308というのが次の二重閉殻になるのですが、そこまで行くと、次の超重核の安定性の島の領域が出てくる。寿命は、僕の見積もりでは、4分とか短いのですが、そこがおそらく存在しうる最後であろうと考えています。

この数値は荒唐無稽かというところ、例えば中性子星のクラストと呼ばれているところに原子核の塊が混在している領域を見積もることができます。そのときの質量数が400~500で、いま言った164, 308と同程度です。これは物理で言うと、クーロン力と核力とのバランスで決まってくるのですが、そのへんがわれわれの物質を構成している原子核というものの究極ではないかと考えています。理論屋としては、そんなところまで行くのかな、実験としてわれわれ人類が手にすることができるのかなという夢を持っていたりします。

**延與** rプロセス<sup>\*18</sup>ではいけないのですか。

<sup>\*18</sup> rプロセスは、速い中性子捕獲とβ崩壊との連鎖によって、sプロセスと共に鉄より重い中性子捕獲過程元素の起源である。太陽系等、宇宙における鉄よりも重い元素の半分の量の起源であり、天然で超寿命なアクチノイドを作る唯一の過程のこと。

**小浦** rプロセスという、ほんの数秒間で中性子をたくさん吸って重たい原子核、超重元素をつくらうというメカニズムがあるのですが、超新星爆発では1秒程度しか爆発期間がないので、いわゆる超重元素114あたりで止まってしまうぐらいの時間しか稼げない。ただ、中性子星の合体みたいなメカニズム、これはずいぶん長くひたすら供給できて、中性子数が300ぐらいまで進んでも、妨げる物理は今のところないので、そういったものができる可能性があると考えています。だからいまの話に答えて言うと、あるかもしれませんね。ただ、それを測定するのは大変ですね。

**篠原** それはいつも疑問で、人類は百十何番元素を、宇宙の中で昔できていて再発見しただけなのか、新たに創ったのか。ディスカバリーなのか、クリエーションなのか。

**小浦** そこにたどり着くまでに核分裂の島みたいなものがあるので、そこまで行く前に、別の核分裂のメカニズムで、われわれのつくったニホニウムというところをたどっていないと見積もっています。

理研のニホニウムはできていないと思います。宇宙の自然の摂理として、それができるという可能性は見だしにくい。初めてというのはそのとおりではないかと現時点では思っています。

**延與** アメリカ大陸は、発見したと言うんですよ。ずっとあっても、その時に発見したと言っていいのではないですか。

森田さんは、合成して、それを発見したとおっしゃいますね。それが正確だと。でも新聞に書くと、合成して発見というのはインパクトがない。

また、いまのところ周期表でニホニウムはあの場所がいいんですね。化学的にほかに行ってしまう可能性は少しあるのではないかと考えているのですが。

**篠原** たぶん113はあの場所がいい。

**小浦** 103番のローレンシウムの最後の軌道がp軌道で、他の3族元素とは異なるという実験の結果が出ているので、周期表が第7周期でも少し崩れつつある。

**延與** 第8周期では崩れるのでしょうか。

**篠原** 第9周期はたぶん崩れます。第8周期は崩れかけているというのか、108でも最外殻の電子配置が変わっている可能性がありますから、化学的性質

は周期性から逸脱する可能性はあります。

**小浦** 周期表の形が変わるかもしれません。

**篠原** 化学として面白いのは、もちろんそれがどうなるかというのと、1個の原子に対する化学的な研究というのが超重元素の特徴的で、羽場さんや我々も、それをやっているわけです。そこが他の化学とは違うところです。絶えず原子も変わっていきませんが、そのへんもしっかり押さえていかないと化学として発展できない。面白いテーマが沢山ありますね。

**延興** 話も尽きないのですが、そろそろ皆さんの最後の一言、今日思われたことなどを。

**上垣外** かなり長いこと、超重元素のための加速器にかかわってきましたので、今回のニホニウムの命名は本当にうれしかったし、これからも新しい世界が開けるような加速器をつくっていきたいと思っています。

**小浦** 図らずもというか、僕の研究のスタートから理研の超重元素の研究にかかわることができたのは、まず個人的に非常にうれしく、いい日本のサイエンスの場面を見ることができたという意味で、感慨深いという言い方が1番良いような気がします。こういうチャンスにはなかなか巡り合えるものではないので、いろいろなものが揃ったすてきな時間を過ごさせていただいた。しかもハッピーエンドで終わったというところも含めて、非常にいい機会をいただいたような気がします。こういう思いを次の世代の人も味わってほしい。今回のニホニウムは僕の友達なり周りの人にも興味を持ってもらっているので、それが広がって、こういった分野に興味を持つ若い人たちや一般の人がどんどん出てほしいと思っています。

**桜井** 今日はニホニウムに関して、日頃とても聞けないようなリアルなお話を聞かせていただいて、大変いい勉強になりました。これを若い世代にどうつないでいくかというのはものすごく大きい問題だと思います。

私は子どもたちから大学院生までいろいろな場でお話をさせていただいているのですが、例えばニホニウムは物として存在していると捉えている子どもたちがすごく多いのです。それはコンピュータの中にしかないよと言いますと、なあんだとがっかりします。しかし、それが化学の原点なので、これからどんどんつくっていけば、「安定の島」が理論的に

計算されているから、そのうち物として皆が見られるものができるかもしれないよ、そういうことを目指して研究されているよと伝えていきます。

例えば、キュリー夫人がピッチブレンドを1tほど使って塩化ラジウムを100mgをようやくつかんで、それが原子量の決定に繋がったということは皆よく知っています。それはモルの世界、アボガドロの世界。ところが、ニホニウムはアトムの世界です。全然違う世界です。元素を同じ面で説明しますと、皆が混乱してしまいます。私は、アボガドロの世界とモルの世界をきっちり見て、周期表の中で、ここまではモルの世界、アボガドロの世界で、ある原子番号から上はアトムの世界で、とても見ることはできないよと説明しています。それを見るようにするのは、これからの君たちが頑張るのだとエールを送っています。周期表の見方を教えるというのはものすごく難しい時代になったと思っています。先生方はリアルな体験を持っていらっしゃるから、いろいろなところでご講演されるとき、そういうところをきっちり教えていただけると、これからの若い人たちをうまくリードできるのではないかとというのが私の印象です。

**延興** 僕は、2002年に初めてのイベントを見たとき、まだ自分の子どもは小さかったので、子どもが学校で今日ニホニウムを習ったよと言ったら、それはお父さんの研究所でできたと言うのが夢だった。命名権が来た時には、子どもは既に大きくなってしまっていた(笑)。うれしかったのは、去年の2月の母校の入試問題で、ニホニウムのつくり方という問題を出したという話を校長さんから聞いた。そのときはいろいろな意味で恩返しのできたな、これにかかわれてよかったなと感じました。

**篠原** 私は分野的に非常に近くて、化学は研究としてやっているのですが、ニホニウムの製造の際には、すぐ横で森田さんの実験をいつも見ていて、一緒に興奮させていただいて、1個目のときはすぐにメールが来て非常に喜んだ記憶があります。

この研究は授業で割とネタに使うのですが、次も含めて面白い研究に仕上げていく。若い人が興味を持つような研究をしないと、学生が将来どうするか選ぶときに、研究室に来なさいと言っても来ない。だから頑張って面白くていい研究をする。それを学生が見たら、優秀な学生はちゃんと来ます。

話を聞いていると大変ですが、理研から次の計画が提案され進めているというのは、人材育成というか、先のことを考えてもいい方向だと思います。応援していますので、よろしくお願いします。

**森本** 私はニホニウムをつくる実験にリニアックの加速器にGARISを持ってきたところから携わらせていただいたのですが、自分たちで実験をつくり上げて行って、結果を出して、それが元素の周期表に1つ名前が入った。それも大変うれしいことですが、自分たちだけではなく、周りの人たちが本当に喜んでくれているのがよく分かって、研究者にとってこんな幸せなことはないと感じているのが1つです。この研究のインパクトの大きさを痛感したので、今後の研究もしっかりやらないと。

それと若い人たちに自分たちの何を伝えなければいけないかということをもっと考えて、そういう機会ではしっかりと伝えたいと思います。

**延與** では、真打ちの羽場さん。

**羽場** 桜井先生が「一家に1枚」の周期表をおつくりになっていますが、あれは非常にきれいな周期表で、それぞれの元素について写真やイラストで応用例が出ています。もちろんニホニウムに関しては、その性質もわからない状況ですから応用例は無いのですが。元素は地球やわれわれの体など、すべてのものをつくっている。それをうまく使いこなせれば、人類はどんどん豊かになっていく、便利になっていくものだと思います。

くものだと思います。

元素はいま118種類ありますが、その3分の1は放射性の元素、すなわちRIです。RIを人類がちゃんと使いこなせるようになれば、もっといろいろなものをつくり出していけるのではないかと考えています。テクネチウムは80年ぐらい前に周期表の空白のところを埋めようとセグレらが加速器を使ってつくり出した43番の元素ですが、いまでは核医学の診断では欠くことができないものになっていて、年間100万件近い診断が行われ、ほかにもいろいろな応用が見つかって、人類の役に立っている。また人類がつくり出した2つ目の新しい元素のアスタチンも発見から80年近く経っているのですが、これからの癌の治療に期待されている元素です。

新しい元素を発見して、その性質を調べて、それを応用していくというのは、我々核化学、放射化学者にとって非常にいいテーマです。そういったものを取り扱える、またつくれる環境にいまいるということ非常にありがたいと思っています。理研の加速器を使って、核化学、放射化学の研究を今後も展開していければ、ニホニウムがいつか社会の役に立つ、テクネチウムのように80年後でいいので、その頃に何か世界を変えていければいいなと思っています。

**延與** 今日は、いろいろな意味から、さまざまなお立場から面白いお話をお聞かせいただきまして、どうもありがとうございます。(拍手)

## 特別寄稿 新元素探索実験の困難さ

森田 浩介

(九州大学大学院理学研究院教授・理化学研究所仁科加速器研究センター超重元素研究グループリーダー)

ニホニウム(Nh)と命名されました113番元素の探索において筆者らが一番苦労したのは、「新元素の探索実験は事象が起こる確率が極端に小さいため、何かが起こるまでに大変時間がかかる」ということです。言い換えますと、「通常の実験中には、ほとんど何も起こらない」ということです。それに加えて、実験システムは、何千ものパーツによって構成されていますが、実験期間中、それらすべてが正常に働いていなくては実験が成立しないのです。それゆえ、何も変化が起こらない状況の中で、いかに全システムを長期間安定に働かせるかということに非常に神経を使いました。実験者達は長期間に涉り成果を見ないままに緊張を強いられたのです。大学院生の中には在籍中に1つの事象も観測しなかった方もありました。

このように、大勢の共同研究者に長期間の精神的緊張を強いることを求めなければならないことが、筆者らにとって辛いところでした。しかし、世界中の成果をあげてきた研究チームは皆、この苦痛を乗り越えてきたのだと奮起し、この長い実験を遂行してきたのです。

