

# 私と放射線・RI との長い系譜



中西 友子  
Tomoko M. Nakanishi

私が初めて RI に触れたのは、修士 1 年の時の  $^7\text{Be}$  ではなかったかと思う。トレーサとして必要だった  $^7\text{Be}$  を当時理研におられた野崎正先生がサイクロトロンで作ってくださり、「ほら」と小さな鉛容器を手渡され、手提げ袋に入れて埼玉県和光市から当時六本木にあった東大物性研に持ち帰ったところ、こんなに放射線量の高いものを手で持ってきたとは、と管理区域を管理されていた堀江絹子助手に言われたことを思い出す。それから半世紀ほど、放射線や RI と密な生活を送ってきたことを綴ってみたい。

## 1. 大学院時代

私の恩師は故本田雅健先生である。先生は当時の私から見れば、「偉大な研究者」、「厳しい科学者」、「深い教養人」と挙げていけばきりが無いほどすべてに通じる知識や教養を備えた人だった。先生は実験室の隅、質量分析計の影にご自分の机を構えていたので、教授室はお茶飲み場であり、徹夜実験の人の休む場所でもあった。研究題材として何をすべきか、については一言も言われず、すべて自分で探さなければならなかった。助手でおられた故源生礼亮さんと相談して何とか  $^{10}\text{Be}$  の半減期を求めることになった。半減期とは元素の個数と放射能の測定値から求まるもので、それぞれ、質量分析と放射能の絶対測定という、それまで本田研究室で培ってきた手法が使える題材であった。

まず問題となるのが、100 万年オーダーの半減期を持つ  $^{10}\text{Be}$  をどうやって作ったら良いかという点

である。半減期が長いものほど原子炉で長時間の照射が必要である。長い照射とは試料中の不純物も十分に放射化されることも意味するので、多量の放射性核種が生成され試料の放射線量が非常に高くなる。その時、源生さんが、かつて JMTR 炉で材料試験として照射した窒化ホウ素 (BN) 片があるはずだと教えてくれたので伺ってみると、大変親切にもいくつか譲っていただけなのである。古い BN 片からの Be の分離、続く、当時田無にあった原子核研究所 (核研) での同位体分離器による  $^9\text{Be}$  と  $^{10}\text{Be}$  の分離によりやっと  $^{10}\text{Be}$  の精製が終わり質量分析と放射能測定が始まった。核研での巨大な装置を使う実験は忘れがたいものだった。故金子条太郎先生が同位体分離器の世話をされていた。イオンソースはどのような形状がいいのか、更に分離される  $^9\text{Be}$  と  $^{10}\text{Be}$  のビームのイオンプラントーション過程等、分離器については何でも先生は熟知されていた。 $\text{BeCl}_2$  をイオン化するためイオンソースには 35 kV の電圧をかける。金網でしっかり囲まれてはいるものの、運転中は近くに寄ると髪の毛が立つよ、と言われた。このイオンソースに取り付けたフィラメントは手作りで、5~6 時間経つとまるで雷が落ちたような大きな音がして切れてしまう。切れるとまた装置を常圧にしてフィラメントを交換する。この交換作業もあるため、金子先生は実験が始まるとずっと徹夜が続くと言われた。

助手の源生さんがまたすごい人だった。東大の中でも抜きん出た鬼才とまで言われる人だった。同位体分離実験が終わるまで何晩でも付き合ってください

り、私は夜 10 時になると帰されたが、翌朝行ってみると実験は継続されていた。

そんなこんなで、今度は物性研での Be の質量分析が始まった。Be は安定同位体が  $^9\text{Be}$  だけなので、2 つ以上の同位体を持つ元素の同位体比測定は意味があるものの、同位体が 1 つしかない元素の同位体比を測定してきた研究者はいない。そこで、どうしたら質量分析が可能かどうかを試すことから始まった。表面電離型の質量分析計だったので、フィラメントは幅 2 mm ほどの Re (レニウム) テープをスポットウェルダと呼ばれる溶接機でホルダーに自分で貼るが、テープの形状は平らがいいのか船型がいいのか等工夫が必要である。研究室では Pb の同位体比を測定している研究者がいて、感度を上げるため、シリカゲルと一緒にサンプルを載せていた。そこで研究室にあった精製済シリカゲルの瓶から取り出して使用してみた。とたんに、本田先生から、「人の禪で相撲をとるな」と言われて慌ててフッ化水素を使ったシリカゲルの精製を行った。質量分析計では何とか Be のピークが得られたものの、放射能測定も大変だった。 $^{10}\text{Be}$  の  $\beta$  線測定である。それも微量なので、測定器を汚さないよう、堀江助手からかなり厳しい注文があった。博士課程も長寿命核種、 $^{91}\text{Nb}$  と  $^{92}\text{Nb}$  の半減期測定に奮闘した。

## 2. 大磯の日米セミナー (1974 年)

大学院時代で忘れられないことは、大磯で開催された放射化学に関する日米セミナーに、大学院生としてお手伝いではあったが参加できたことである。このセミナーは、故木村健二郎先生の古希をお祝いしたセミナーでもあったが、放射化学分野の世界の名高い研究者が一堂に会し、1 週間も缶詰状態で研究会が開催された。本田先生と共同研究をされてきたカリフォルニア大学サンディエゴ校のジェームズ・アーノルド博士のみならず、後にノーベル賞を受賞されたフランク・ローランド博士も来られていた。木村先生は閉会の辞で禅問答を紹介された。何故放射化学の会議が大磯で開かれたのか、その心は Oiso は、Radioisotope の真ん中の 4 文字であり、RI の中心だからだと言われたのにはいたく感動したことを覚えている。その後 20 年ほど経った時、再度ローランド博士とお会いする機会があった。その際、

博士はじっと私の顔を見て、Oiso (大磯) と言われたので驚いた。大磯の日米セミナーでの出会いを覚えていてくれたのである。

## 3. 実験動物中央研究所と日本ゼオン

何とか  $^{91}\text{Nb}$  と  $^{92}\text{Nb}$  の半減期が求まり就職口を探すことになった。男女共同参画等誰も考えていなかった頃のことなのでアカデミックな職はもちろん、女性の博士の就職口など全くなく、困っていたところ、東大工学部の加藤正夫先生が、特色ある研究をしているからと、当時は川崎にあった(財)実験動物中央研究所を紹介して下さった。そしてここで初めて生物試料を扱うことになった。今までの無機試料とは全く異なり、まず、生体試料はいつも活性を失わないように低温に保つことが新鮮だった。実験手法も、遠心分離、電気泳動等、結局は重さと大きさで分けることも新しかった。当時は生物実験には RI を用いることは当たり前であり、ホルモンの測定に  $^{125}\text{I}$  を用いていた。ラジオイムノアッセイであるが、今ではもう蛍光物質を用いることが主流となり、RI はほとんど利用されていない。丁度、製薬会社から来ていた方との共同研究に組み入れられることとなり、私の最初の実験は骨髓細胞から白血球を分化させる物質の精製で始まった。しかししばらくすると、研究所の財政問題のためか、どうも論文を書くような人が次々と辞めていき、動物の世話をする人たちが残って目立つようになった。私も他の職を探さざるを得なくなった。子供を抱えた再度の就職活動であった。ここで役立ったのは放射線取扱主任者の資格だった。

当時国立公衆衛生院におられた故山縣登先生が、日本ゼオン(株)でバイオ研究を始めるに当たり RI 室を設置したいが、主任者が見つからず探していると教えて下さった。そこで、簡単な面接の後、技術開発センターに雇用されることとなった。しかし、今まで主任者の仕事をしたことがなかったので、どうすればいいのか全く分からなかった。そこで、当時東京大学アイソトープ総合センターにおられた故森川尚威先生を尋ねたところ、そのノウハウを詳細に教えていただいた。幸い、会社には環境安全の部署があったので、その人に実務の詳細を伝え、私は数人で始まったバイオグループに所属することに

なった。前職で生物試料を扱っていたのなら、新しいバイオ研究課題を開発できるだろうという会社側の発想だったのだと思う。そこで、まず、バイオ研究の実験室の設計と研究課題探しを始めることとなった。動物細胞の培養室のレイアウトについては、当時の放射線医学総合研究所の故寺島東洋三所長に色々教えていただいた。研究課題の探索にはいくつもの大きな学会に出席し得られた情報を元に、当時研究が始まりかけていた、モノクローナル抗体の作成をターゲットとした。当時獨協医科大学におられた、故高岡聡子先生のご指導の下、肺小細胞癌のモノクローナル抗体作成にテーマは決まったものの、ここから先も肺癌の第一人者だった東京医大の故早田義博教授、東京医科歯科大難治疾患研究所の山本興太郎元所長等、色々な方のお世話になった。

その後、会社の承諾を得て、米国カリフォルニアのローレンスバークレイ研究所の生物化学動態研究所に2年ほど博士研究員として留学することができたが、この間、RI関連で驚いた機器があった。それはカリフォルニア大学サンフランシスコ校に50 cm位の小型の $\gamma$ 線照射器があったことである。遮蔽体の中に $^{60}\text{Co}$ 線源があり、小さな扉を開けて培養している細胞のシャーレを中に入れる。数秒照射させると細胞はいわゆるフィーダーレイヤー（生きているけれども増殖しない状態）として使えるようになる。後に農水省で、食品照射の話が出た際、「電子レンジのように手軽にチンするように $\gamma$ 線で食品を照射できればO-157等心配しなくてもいいのに」、と言われたことを実現できる装置でもあった。米国に行って1年目、会社から今度植物グループを作るので研究を植物に転向してほしいとの指令が来て、急遽、カリフォルニア大学リバーサイド校のトシオ・ムラシゲ教授の特別セミナーを受けさせていただくことになったが、これらを含む会社や米国での活動は紙面の都合上省略する。

## 4. 東大農学部

米国から戻り会社で忙しく実験を展開している時、故森川先生が、東大農学部のアイソトープ施設で助教を探しているという話を紹介してくださった。私が37歳の時であった。植物栄養・肥料学研究室出身の佐々木泰子助手が、ご主人の転勤に伴って退職す

るので後任を探しているとのことだった。ここでも主任者資格が役立った。植物栄養・肥料学研究室におられた熊沢喜久雄教授は植物を扱っているということもあり、とても親切に色々気を配ってくださった。

農学部のRI利用者数は多く、当時は年間延べ10000人を超えていた。次第に色々な人を知るにつれ、RI実験室をより良く使おうという積極的な人たちが多くも分かった。ここの使い方をもっときちんと表示すべきだと張り紙用を書いてきてくれる人もいて、和気あいあいとした雰囲気を知ることになった。

## 5. 放射化分析

大学に入った当初、あまりの研究費の少なさにどうしようかと思っていたが、まずは解決策として共同利用を利用すれば良いのではと考えた。当時の日本原子力研究所では原子炉を使う研究は応募が認められると研究費が付きまた旅費も半分位は出してもらえることが分かった。そこで、まず、かつて行った放射化分析をすることとなった。試料は植物を選んだ。生育過程で植物各組織中の元素濃度がどのように変化するのか、色々調べても1960年ごろの研究結果しか見つからなかった。それも放射化分析ではなく目的の元素を化学分離する手法だった。そこでとりあえず放射化分析をするため、発育の各段階の植物を採取して各組織を切り離しビニル袋に入れて照射を行った。当時いくつかの試料を照射したのだろうか、数千以上だったが、イネ、ダイズ、アサガオ、土壤等、本当にたくさんの試料を照射する日々が続いた。ただ、その結果を並べてみると植物体内での元素濃度の変化には法則があることが分かった。例えばアサガオでは発芽後、1週間の全長10 cmほどの幼植物中には元素ごとに特色のあるプロファイルが存在し、発育段階でもこのプロファイルはきちんと植物全体に広がっていた。何がこのプロファイルを決めるのだろうか。植物の生育には17の元素が必要なが知られている。植物がこれらのイオンを吸収する際にはトランスポータという遺伝子が発現することは研究されているが、各組織の間、また同じ組織でも高さによってこれだけ多様なプロファイルを作りあげているメカニズムは到底知ることはできないだろう。

この間、文科省から、インドネシアとの共同研究をするプロジェクトが降ってきて、インドネシアの色々な大学を回って共同研究者を見つけようとしたが、ほとんどの著名な大学は既に京都大学と長年共同研究をしており、私が見つけれられた研究機関はバタンの原子力研究所だった。ここで知り合った研究員とはその後10年ほどの間、放射化分析をしたり、大きなソルガムの突然変異体を作り上げたり、色々な研究を一緒にすることができた。

## 6. 中性子線イメージング

そんなことで原子炉に通うようになった時、中性子線を照射すると水が見える、しかも水特異的な像が得られると聞き、試しに植物試料の中性子線像を撮ってみた。X線フィルムに写った、生きている切り花の中性子線像はとても美しかったので、色々な種類の花の像を撮るため当時の日本原子力研究所（現在のJAEA）の本館前の花壇からかなり花をいただいた。もちろん、許可を得てのことである。それらの像の写真は今でも家の壁に掛かっている。正確には水素の像であるが、生きている組織の場合には水が見えると言ってもいい、ということは、土壌中の根の周りの水も見られるはずである。最初はアルミ板で作った薄い箱にダイズを生育させながら日を追って中性子線像を撮ったところ、土壌中の根が土を通してはっきり写ることが分かった。土壌中の水分よりも根中の水分量が多いのでコントラストが出るのである。その後、薄い箱ではなく、パイプ状の入れ物に土壌を入れてダイズを育てて根の周りの水の量の変化を調べてみた。すると面白いことには根の表面から1mm以内の根圏と呼ばれるところには水がほとんど写っておらず、空気層があることが分かった。

根が暗闇でどう動きながら生育するかについては、NHK放送技術研究所でsuper HARPカメラを開発された谷岡健吉元所長からこのカメラをお借りして撮影したことがある。イネの場合、根先から5mmほどのところを支点として50分に1回、回転しながら根は育っていた。つまり根は回りながら自分が育っていく穴を掘り、その中に根が伸びていくので、当然、根の周りの土は押しのけられているのである。作物が育つ土壌には空気層と水分層と土

壤マトリックスが大体均等に混合している必要がある。そこで、土壌中、掘られた穴に伸びる根の周りは空気層となり、水分は直接根に接していないことが分かった。ということは、根は水溶液ではなく、水蒸気を吸収しているとしか思えない。それでは金属はどのようにして吸収されているのだろうか。根は金属蒸気を吸収しているのだろうか。

日本原子力研究所での原子炉の実験が続いたためか、J-PARCの設立と運営にご尽力されていた藤井保彦教授（現在は東大名誉教授）の勧めがあり、原研の中性子グループのグループリーダーとなった。そこではどのように中性子線を用いる研究を内外で発展させるか等、原研におられた松林政仁研究員たちと毎週打ち合わせをすることとなった。そのため、毎週、夜中に車を運転して東京から東海へ通う日が続いた。

## 7. リアルタイムRIイメージング

水の可視化の次は、植物がどのように養分を吸収するかのイメージングであった。そのため、各種RIを使ったイメージング装置の開発を始めた。最初は $^{32}\text{P}$ や $^{45}\text{Ca}$ 等を用いたが次第に色々なRIを利用して、リアルタイムで根からどのようにイオンが吸収されて植物体内に広がっていくのが動画として得られるようになってきた。最近では $^{14}\text{CO}_2$ ガスが植物のどこで固定され、それがどう運ばれるかも見えるようになってきている。植物体には光合成により空気中の $^{14}\text{CO}_2$ ガスが固定された後、そのCが通るルートがきちんと決まっておき、各葉の役割も植物体の生育に合わせて炭素の運び先を変えていくことが目に見えるようになった。

植物には一番大切な組織、若い生育組織にまず養分元素や炭素が運ばれていき、その葉が大きくなってきたら、養分の運びは飛ばされて、その上の小さな若い組織へと移っていく。どうやって運び先の若さを知り、次の若い組織を知るのだろうか。

水についても半減期が僅か2分の $^{15}\text{O}$ で標識した水を用いてダイズの莖を調べたところ、導管からはいつも多量の水が水平に漏れ出してそれまで存在していた水を押し出して新しい水に置き換える。 $^{15}\text{O}$ の半減期が極めて短いので長時間実験はできないため、シミュレーションをすると、1cmの莖の中の水の半分が入れ替わるのに20分もかからないことが分かった。

た。どうやって古い水を見分けるのだろうか。また植物の導管は水で満たされているが、根から吸収されて同じこの水を通るイオンの移動速度は各イオンで異なる。それぞれの異なる駆動力は何だろうか。

## 8. 福島原発事故

そうこうしている中、福島での原発事故が起こり、東大農学部多くの先生が現場での放射能汚染調査を始めた。農学部には作物、土壌、森林、動物、河川等環境に関係する各研究分野の専門家がおられ、ほとんどが手弁当で調査研究を今でも続けている。私は事故当時の長澤寛通農学部長から仰せつかり、原発事故による放射性物質の影響の調査に関して、東大農学部の現場における事故の調査プロジェクトの推進役を務めることになった。

福島原発事故の後、現場で放射性セシウムの分布や挙動を調べて驚いたことは、広い範囲で測定される放射性セシウムが地上の作物や土壌等に付着したまま時間と共にほとんど動かないということであった。何か月経っても一旦くっついた箇所にはほとんどが留まっているのである。土壌では放射性セシウムはその表面に留まっている。そこで、この場合、汚染除去の対策としては、基本的に、動かない放射性セシウムがくっついていて表土を除去したり、耕運して下の土と混合させて濃度を低くしたりする処理が必要となる。土壌では放射性セシウムのほとんどが粘土質の細かい粒子に吸着しており、荒い粒子はほとんど汚染されていない。また、その後の調査の中で、土壌の放射性セシウムの吸着力は非常に強く、土壌が存在すれば植物を育成させても放射性セシウムは土壌に残り、特にカリウム施肥を十分にすれば、セシウムはほとんど植物には吸収されないことが、リアルタイム RI 可視化技術を用いることにより明らかになった。

これらの成果は今まで 15 回にわたる一般及び専門家向けの報告会や、5 冊（内 2 冊は日本語の本）の出版を行ってきた。幸い Springer から出版した英語の成書は非常に多いダウンロード数があり（18 万回、12 万回、7 万回）、現場の状況の変化を世界に発信できてきたのではないかと考えている。なお 6 冊目となる Springer からの本は校正段階に入っており近く出版される見込みである。

この間、2014 年から足かけ 9 年間、内閣府原子力委員会で原子力行政にも携わってきた。最後の仕事は委員会でまとめ上げた、放射性医薬品開発に関わるアクションプラン（2022）だった。星薬科大学の学長時代に培った薬学の知識のおかげで、いかに放射線とは別に、放射性医薬品ががんの診断と治療の両面に役立つかを考えることができた。これらの結果も踏まえ、現在は放射線科学の進展に少しでも貢献できるのではと、2023 年 4 月から発足した福島国際研究教育機構 (F-REI) の設立に関わっている。5 年後には 500~600 人規模の大きな研究所になるこの機構で、幅広い研究・教育の中で放射線科学や放射性医薬品の開発が行われることを願っている。

おわりに、今回のこの手記は、私の RI 履歴書ということなので RI や放射線に関係するところを抜き出して書いてみた。前述したように、これまで私が RI や放射線を扱う研究を本格的に進めるに当たり、東大の研究室では田野井慶太郎教授、小林奈通子准教授をはじめ多くの人たちに大変お世話になった。またその他、この文章の中で述べた方々以外の多くの人たちにもご協力やご指導を受けてきた。今まで出会うことができたこれらすべての方々にここで改めて敬意と感謝を表したい。

## 参考文献

- (植物の RI イメージング解析について)
- 1) T.M. Nakanishi, *Springer* (2021)  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-33-4992-6>
  - (福島環境汚染について)
  - 2) 中西友子, 土壌汚染—フクシマの放射性物質のゆくえ (2013)
  - 3) 中西友子, フクシマ土壌汚染の 10 年 (2021)
  - 4) T.M. Nakanishi, *et al.*, *Springer* (2013)  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-4-431-54328-2>
  - 5) T.M. Nakanishi, *et al.*, *Springer* (2016)  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-4-431-55828-6>
  - 6) T.M. Nakanishi, *et al.*, *Springer* (2019)  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-13-3218-0>
  - 7) T.M. Nakanishi, *et al.*, *Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident. Springer—After 10 Years.* Springer (2023 出版予定)
- \* 1, 4~7 は無料で誰でもダウンロードできます。

(東京大学大学院農学生命科学研究科)