

50 年余りに亘り携わってきた RI に係わる仕事



柴田 徳思
Shibata Tokushi

1. はじめに

筆者は、小中高等学校ではほとんど勉強はせず、しかし将来は理系の研究者になりたいと考えていた。研究者になるには勉強しなければなれないと思っていたが、なぜか勉強はしていなかった。また貧乏だったので、国立大学以外は経済的に無理で、国立大学を受けたが、不合格となり、1年間浪人をして（浪人生活の時に初めて勉強したという感じ）、千葉大学の文理学部物理科に入学し、その後、大阪大学（以下「阪大」という）大学院理学研究科修士課程物理学科に進学した。当時の阪大理学部での原子核の研究では、若槻哲雄先生、山部昌太郎先生、杉本健三先生が講座を担当しておられた。3教授とも菊池正士先生のお弟子さんで、3講座合同で運営されていた。筆者は、若槻先生の研究室に入り、修士の研究テーマが β 線スペクトロメータの改良で、吉沢康和先生の指導で研究を進めたときに初めて RI を用いたのが RI 使用の始めである。

2. 放射線測定器の開発と実験

(1) β スペクトロメータの改良

当時、放射線の測定で γ 線には NaI(Tl) 検出器を用いていたが、エネルギー分解能は ^{137}Cs の 662 keV の γ 線に対して約 7% で、 γ 線と競合して放出される内部転換電子を磁気分析器で測定する方が分解能では優れていた。このためにいろいろな磁気分析器が用いられていた。

若槻研にあった磁気分析器は、鉛直軸に対称な磁場を持ち、鉛直軸からの距離 r に対して磁場の強度が $1/r$ で減少する磁場で、線源から出た電子線の鉛直方向と水平方向に広がった軌道が $\sqrt{2}\pi$ ラジアンで収束する二重収束型のスペクトロメータであっ

た。このスペクトロメータは水平方向の角度について一次近似では収束しているが、二次近似では収束していないので、電子線の軌道中に部分的に補正磁場を入れて収束させるというものである。補正磁場は極薄い銅板で補正に必要な形をコイル状にして作り磁場の強さは電流で調節する。 $1/r$ で減少する磁場で二次の近似計算を行えば補正磁場の形状は出るが、実際の磁場がどの程度ずれているかは簡単には分からない。そこで、線源から少し離れたところに 3 か所に小さい円形の穴をあけたスリットを用いてそこを通る電子線の軌道を、収束点とその前後の 3 か所で写真フィルム撮影する方法を取った。電子線として用いたのは ^{137}Cs の 662 keV の内部転換電子で、フィルムを置いた 3 か所で像が撮れる。像を撮るには強い線源が要るので理学部の原子核研究施設の非密封 RI 使用施設で保管していた 100 mCi の線源から 1 mCi を取り点線源として用いた。この時の線源づくりは、井上 光さん、福島昭三さんに教えてもらった。この研究は同僚の田谷君と行い、筆者の名前も入った最初の論文として発表することができた。

(2) インビーム核分光学

原子核の研究で大きな進展をもたらしたのは、1960 年代に森永晴彦氏が発明したインビーム核分光学である。それまでの原子核構造は、RI から放出される γ 線や内部転換電子の測定により励起準位、そのスピン、パリティを決定することにより研究されていた。森永氏らは、バックグラウンドからの γ 線をできるだけ減らす工夫をして、ビーム照射中にターゲットから発生する γ 線を NaI(Tl) 検出器で測定して、 ^{160}Dy の回転バンド $10^+ \rightarrow 8^+ \rightarrow 6^+ \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+$ の転移に伴う γ 線を発見しインビーム分光学を発明した。当時、ビーム照射中はバックグラウンドを含む多種多様な γ 線が放出されるので、 γ 線を測定し

ても核構造の知見が得られると考えた研究者はいなかった。

筆者が博士課程の学生だった時期に、阪大に江尻宏泰先生が山部研の助教授として赴任された。筆者は、江尻先生に協力し、阪大理学部のサイクロトロンを用いてインビーム分光学法を用いた様々な実験を進め、同時に測定器の開発を行った。測定器は、ほとんど江尻先生の発案だった。最初に開発した測定器は、空間的に2次元で収束させてエネルギーも収束させ半導体検出器でエネルギーを決定するという装置 (TESS) であった。その後ビーム軸に対し 180° と 90° を同時に測定できる装置 (AGNES), NaI(Tl) 結晶を組み合わせた高エネルギー γ 線測定用測定装置 (HERMES) 等を開発し、阪大核物理研究センターでインビーム核分光法を用いて核構造と核反応の研究を行った。

(3) 二重ベータ壊変, ハイパー核の研究

二重ベータ壊変の実験では ELEGANTS-I から ELEGANTS-V まで様々な測定器の開発を行い、ニュートリノで有名なカミオカンデと同じトンネルの異なる場所に ELEGANTS-V を設置して実験をした。また、KEK の 12 GeV 陽子シンクロトロンを用いて π 中間子ビームラインで (π, K) 反応で作ることのできるハイパー核の研究のために π -K スペクトロメータを開発し、ハイパー核の実験を行った。筆者が阪大から東大原子核研究所 (以下「核研」という) に移ってから、橋本 治さんと超伝導のスペクトロメータ SKS の開発と実験を行った。

3. 施設の解体や除染

(1) 阪大旧理学部

中之島の理学部が大阪市から借地していた関係で、大阪市に変換するという事態になった。その時の理学部長は音在清輝先生であった。中之島の理学部は、以前にラジウム線源からラドンガスを細い金製パイプに詰めて両端を閉じた舌癌の治療に用いる治療具の細工をしていた小部屋があり、入り口は封鎖してあった。内部に α 放射核の汚染が僅かに残っていることが分かっていた。また、理学部の非密封 RI 実験室の排水パイプが壁を通して排水槽に繋がっていて建物を壊さないと取り出せないことから、両端を蓋した状態で残っていた。それらを処理

しないと大阪市に変換できないという事情があり、音在先生と共にこの処理に携わった。汚染の状況をスミヤテストで測定し、汚染箇所をすべて削り取るという作業を、当時の千代田保安用品(株)へ依頼し行った。その他の場所も心配なので、サーベイメータで全館チェックし、僅かにバックグラウンドを超える箇所があり、すべて削り取るという作業を行い、かなり気の張る作業だったが、無事に大阪市へ返還した。

(2) 核研の解体

核研は日本学術会議の勧告に基づき 1955 年に東京大学附置の全国共同利用研究所として発足し、1997 年に高エネルギー物理学研究所、核研、東京大学理学部附属中間子科学研究センターを改組統合し、高エネルギー加速器研究機構が発足するまでの 43 年間にわたり全国共同利用研究所として多くの研究者を育成し、多くの成果を挙げた。

電子シンクロトロン及びサイクロトロン施設の廃止については参考文献¹⁾に記載されている。

核研を閉鎖するに当たっては、近隣住民との理解を得て進める必要があり、住民説明会を重視して、事あるごとに説明会を開いて状況の説明を行った。

平成 11 年 8 月 1 日住民説明会

近隣住民へ開催案内を出して行われた最初の説明会で、当時田無キャンパスには東大宇宙線研、物性研、KEK 田無分室が置かれていたので、田無キャンパス内研究組織の移転計画について説明した。

平成 12 年 8 月 20 日説明会

田無地区解体撤去工事説明会で、1) 建物解体・撤去工事、2) 放射線管理区域の解除等、3) 建物解体撤去後の管理及び売却処分について説明した。

平成 12 年 9 月 10 日説明会

放射線事業所廃止に向けた作業状況説明会で、1) 放射線施設の種類と廃止に向けて必要な作業、2) 各施設作業結果のまとめ、3) 事業所全体の放射線測定結果のまとめ、4) 廃止へのスケジュールを説明した。この説明会の目的の 1 つは、管理区域内で RI 実験室から排水貯留槽への排水管下の土壌から微量な放射能が検出されたこと、及び RI 実験室の管理区域外の使用されていない一般排水の排水柵及び排水管並びにその下の土壌から

微量の¹³⁷Csが検出されたことを住民に説明することであった。

平成12年10月22日住民説明会

放射線事業所廃止に伴う除染処理の中間報告説明会で、RI実験室の床下土壌からトリチウム汚染が確認された件の説明をした。説明会の趣旨はRI実験室内の地下貯蔵庫底部から貯蔵庫1では1.6kBq/g、貯蔵庫2では6.2kBq/gの汚染が発見され、地下貯蔵庫周辺のコンクリート床下の土壌から最大440Bq/gの汚染が発見されたことであった。トリチウム汚染の除去は土壌試料を採取し液体シンチレーションカウンタで測定する必要がある、サーベイメータによる調査と比較するとかなり時間がかかるため、管理区域解除のスケジュールが長引く可能性を説明した。

平成13年2月25日住民説明会

東京大学田無キャンパスの放射線事業所廃止に伴う除染処理及び建物解体・撤去工事等の説明会では、1)放射線事業所廃止について、2)有害物質に関する土壌調査について、3)建物解体工事について説明した。1)放射線事業所廃止について、では、a)放射線施設の種類と廃止に向けて必要な作業、b)各施設作業結果のまとめ、c)事業所全体の放射線測定結果のまとめ、d)除染工事の経過、e)放射線事業所廃止へのスケジュールを説明した。2)土壌調査では、有害物質による汚染調査結果と汚染土壌の対策を説明した。このうちc)、d)、e)は以下の通りであった。

c) 事業所全体の放射線測定結果のまとめ：
1) 敷地周辺の地表面の放射線：測定点数60点、
2) 建物周辺の放射線：測定点数164点、3) 敷地内道路の地表面の放射線：測定点数76点、4) 建物内の放射線：測定点数約2,000点、5) 敷地内の汚水ますの調査：測定点数82箇所の360点、
6) 敷地内の雨水ますの調査：測定点数27箇所の127点測定値のいずれも0.1μSv/h以下で汚染は検出されず。7) ポンプ室内のタンクの調査：雨水ポンプ室及び汚水ポンプ室内のタンクから採取したスラッジの放射能測定で汚染は検出されず。8) 浅い地下水：地下貯蔵庫から3m以上の離れた領域で土壌試料を採取した地下水（地下3m）にはトリチウムは観測されず。また、管理区域の外側で試掘した井戸からの地下水（地下10m）：

トリチウムは検出されず。住民説明会の際に提供された井戸水：トリチウムは検出されず。9) 深い地下水：東大農場の井戸（地下40m）：トリチウムは検出されず。

d) 除染工事の経過：1) ¹³⁷Csの除染：屋外の排水管、排水桝の下部20~30cmの領域に微量な汚染が見いだされた。配管に添って実験室周辺部を全て掘り返し汚染土壌の回収を行った。9月末に終了。2) トリチウムの除染：9月末のRI実験室の最終汚染検査の際に、地下貯蔵庫の底部にトリチウムの汚染が発見された。そこで実験室内外25箇所について地下5mまでのボーリング調査を実施した。調査結果をもとに、実験室下部の土壌撤去作業を11月から1月にかけて行った。汚染土壌はすべて取り除きドラム缶に詰め、日本アイソトープ協会（以下「協会」という）に引き渡し、3月末に完了の予定である。

e) 放射線事業所廃止へのスケジュール：平成13年1月中旬に除染作業を完了し、2月中旬までにドラム缶への収納作業を終えた。3月末までに廃棄物を引き渡す予定。その後、放射線事業所廃止届を提出する。

以上のような住民説明会で理解を得ながら撤去作業は進められた。平成13年3月31日付で文部科学省に放射線事業所廃止届を提出した。その後、建屋の解体、杭等の引き抜きを行い更地化し、キャンパス全体の土壌調査を行い放射性汚染の無いことを確認し、有害物質に関する土壌調査と汚染土壌の掘削撤去を行った。また、西東京市による土壌調査が行われて、汚染の無いことが確認され、現在は西東京市の憩いの森公園となっている。

4. J-PARCの放射線対策

当時核研では大型ハドロン計画が検討されていた。この計画は、大強度陽子ビームを用いた核反応で、中性子、 π 中間子、K中間子を発生させ、それらをビームとして使い、核物理や物性物理、生命科学等の研究に用いる計画であった。我が国では、このような大強度の陽子ビームを扱った経験は無く、放射線対策を新たに構築する必要があり、そのため教授を公募していた。これに応募し、核研に就任することになった。

J-PARCの放射線対策で必要な事項のうち重要課題の1つは、中性子遮蔽で厚いコンクリートを透過したときの中性子の減弱率であった。モンテカルロコードにより計算は可能であったが、実験値が無かったので、実験する必要を感じていた。当時、大強度陽子ビームは、英国のRutherford Appleton LaboratoryのISIS施設で800 MeV, 180 μ Aであった。ISIS施設では陽子ビームを厚い遮蔽に囲まれた内部のターゲットに照射して中性子を発生させ、冷中性子源として用いられていた。ターゲットステーションの天井部分に追加のコンクリート遮蔽あるいは鉄遮蔽を積み重ねて中性子の減弱距離を測定した。減弱距離の測定はそれまでも行われていたが、非常に厚い遮蔽を通った後での減弱距離を得られれば遮蔽計算に対する信頼性が上がる。追加遮蔽の上に試料を置き、その試料の放射化で中性子束の減弱を調べる方法で、 $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$ 反応で生じる ^{11}C 生成量から求める方法を用いた。その実験中に ^{209}Bi を用いて放射化量を測定したところ、 $^{209}\text{Bi}(n, 4n)$ 反応から $^{209}\text{Bi}(n, 10n)$ 反応まで測定できることを発見し、新しい測定法を確立することができた。

J-PARCは、陽子リニアック及び3 GeVシンクロトロンと実験施設はJAEAが担当し、50 GeVシンクロトロンと実験施設をKEKが担当した。施設建設前はKEKはつくばで、JAEAは東海で作業をせざるを得なく、KEKの施設はKEKのグループが、JAEAの施設はJAEAのグループが放射線対策に当たった。KEKの放射線グループは大型加速器の放射線管理に経験が深く、JAEAの放射線グループは原子炉など放射性物質の管理に経験が深く、2つのグループの経験を生かすために、メンバーのシャッフルが望ましいとは考えていたが、筆者がJ-PARCの放射線管理の責任者を務めている間には、残念ながら実現できなかった。

5. 日本学術会議における活動

日本学術会議の体制は、20期に大きく変わった。それまでは210名の会員と約2,000名の研究連絡委員会委員で構成されていた。現在は210名の会員と約2,000名の連携会員で構成されている。私が原子力基礎研究連絡委員会の委員となったのは平成3年10月で、平成9年6月まで研究連絡委員を務め、

平成9年7月から平成18年7月まで第4部会員を務めた。引き続き平成18年8月から連携会員を務め現在も連携会員を務めている。この間、筆者が研究連絡委員会あるいは分科会の委員長をしていて発出した対外報告や提言は以下のとおりである。1) 放射性同位元素、核燃料物質を使用する研究の推進について(16期)、2) 原子力の利用に伴う安全確保の体制について(17期)、3) 放射性同位元素の利用の推進について(17期)、4) 国立大学法人における放射性同位元素・放射線発生装置・核燃料物質等の管理について(18期)、5) 獣医療における核医学利用の推進について(19期)、6) 我が国における放射性同位元素の安定供給体制について(20期)、7) 放射線作業員の被ばくの一元管理について(21期)、8) 研究用原子炉の在り方について(22期)、9) 大学等における非密封放射性同位元素使用施設の拠点化についてである。3)は、PET診断に用いられる短寿命4核種について一定時間後に放射線規制から外すべきという報告で、この報告が契機となり、一定期間保管後にPET4核種で汚染された放射性廃棄物を規制から除外することが可能になった。6)は、多くの診断に用いられる $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は ^{99}Mo の壊変で得られる。 ^{99}Mo は半減期が66時間と短いにもかかわらず、外国の原子炉で製造されたものが100%輸入されている。原子炉の故障や航空路のトラブル等で輸入できない場合を考えると、国産化を検討すべきだという内容である。この提言の発出1年後にカナダの炉が故障して輸入が途絶え大きな問題となった。内閣府に官民検討会が設置され、国産化が議論された。

6. その後のRIに関連する活動

J-PARCを退職してから協会に勤務し、現在は、(株)千代田テクノ大洗研究所に勤務している。協会に勤めているころから、日本における放射性医薬品の開発が気になっていた。日本にはいろいろな種類の加速器が稼働していて、多くの種類のRIの製造が可能であるにもかかわらず、放射性医薬品の開発は停滞していると思う。1つの原因は、加速器を持つ組織の研究者と核医学分野の研究者が合同して議論する場が無いことだと考えていて、協会にいるころから議論の場ができないかと考えてきた。協会

では部会の統合を含めた検討がなされていて、大いに期待している。千代田テクノル大洗研の活動の中で放射性医薬品用の RI の製造に係る活動がある。千代田テクノルでは ^{99}Mo の国産化に向けた活動を行っており、前節で述べた官民検討会の結論を受けて JAEA の照射炉 JMTR で $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ 反応による製造の開発を行ってきた。この方法では比放射能が小さく、これまで用いられてきたアルミナカラムを用いた方法は使えない。このため溶媒抽出法を用いて、放射化試料 500 g から $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を取り出す分離装置の開発を行ってきた。残念ながら JMTR の廃炉が決定され、現在は頓挫している。QST との共同研究で加速器を用いた ^{99}Mo の製造法の研究及び

加速器で製造できる RI のうち ^{67}Cu の製造法を開発している。 ^{64}Cu は半減期 12.7 時間で PET 診断薬に用いることができる。 ^{67}Cu は半減期 61.7 時間で 400 keV 前後の β 線と 185 keV の γ 線を放出するので SPECT による診断が可能で β 線による治療が可能である。 ^{64}Cu と ^{67}Cu を同時に服用すれば直後は PET 診断で鮮明な画像が取れ、その後 SPECT でがん組織の消長が分かる。今後の発展に大いに期待している。

参考文献

- 1) 榎本和義, デコミショニング技報, 第 39 号 (2009 年 3 月)