

核物理からその応用へ

—核変換用核データ測定研究を中心に—

茨城大学

原子科学研究教育センター

(元原子力機構)

原田 秀郎

hideo.harada.xc42@vc.ibaraki.ac.jp

1. はじめに

この原稿のきっかけは、編集長である大塚直彦さんの「動燃で核データ測定研究が始まった経緯」、編集委員であり長く共同研究者でもあった中村詔司さんの「なぜ色々な研究に着手したのか」といった疑問にお答えすることでした。これを機会に約40年の研究活動を振り返ってみますと、学生時代に学んだ核物理が、その後の研究の基礎となって、核変換研究、核データ測定研究、そして非破壊測定への応用に進んでいきました。自然な流れであったように思います。この間、国内外の様々な魅力を持つ研究者や支援者と出会う機会に恵まれ、多くのことを学ぶとともに、研究を進めるエネルギーも頂きました。どのようなことを学び、どのようにして研究が進んでいったのか、古い話を中心に、そのいくつかを紹介させていただこうと思います。

2. 核物理

学生時代に学んだ原子核物理が、後の長い研究活動の基礎となりましたので、少し詳しく記載させていただきます。1982年に、卒業研究で東工大（東京工業大学、現東京科学大学）理学部の大沼・笠木研究室の門をたたき、実験核物理を学び始めます。大沼甫さんが教授、笠木治郎太さんが助教授、岸本忠史さんが助手、諫川加代子さんが技官といった顔ぶれで、その後、多くの優秀な方々が助手や技官として入れ替わり着任された研究室です。大沼・笠木研究室では、当時、先生を何々先生と呼んではならず、何々さ

んと呼ぶことになっていました。卵でも研究者としての自覚を持ちなさいということだったと思います。さすがに現在の同窓会では、何々先生と呼んでもいいのですが、当時の雰囲気をお伝えするために、ここではあえて誰々さんと記載しました。

当時、東工大の大岡山キャンパスにはバンデグラフ加速器があり、研究室では、インビームガンマ線分光法を駆使して、 $A=50-60$ 領域の核構造研究に取り組んでいました。卒業研究のテーマは、先生方が準備された複数のテーマから学生が選んでよく、私は、興味があった原子核励起準位の寿命測定を選択しました。卒業論文のタイトルは、「Doppler Shift Attenuation 法による ^{53}Fe 励起準位の寿命測定」です。寿命測定ですので、核データ測定でもあります。この研究を通じて、Ge 検出器の扱いやガンマ線スペクトルの解析、モンテカルロ法、データの不確かさ解析を学んでいきます。放射線計測のノウハウや加速器運転なども先生方について学びます。当時は、丁稚奉公的なスタイルが多少残っており、**実験準備など先生・先輩方のお手伝いをしながら、ノウハウなどを学びとっていくもの**だということを教わりました。1回のマシンタイムは1週間程度、実験は夜通し行われ、最大のビーム電流が得られるよう加速器制御盤に張り付き、マシンタイム中のデータ解析で改善の余地が少しでも見つかりと実験条件を修正するなど、緊張感のあるものでした。マシンタイム中の先生方は真剣で、満足できる条件でデータが取れることを確認するまでは決して休まれることはありませんでした。安定したマシンタイム中は学生の出番ですが、ある夜番時、モニターするガンマ線スペクトルに、前穂高岳（写真 1）にも負けないほど見事な規則性のあるガンマ線ピーク群を観測した際の感動は今でも覚えています。原子核が変形すると現れる回転バンドに由来するガンマ線ピーク群です。関心ある方は、多くの文献にある回転バンドのガンマ線スペクトルと比較してみてください。



写真 1 回転バンドのように美しい規則性ある前穂高岳（2020年10月筆者撮影）

修士課程では、笠木さんのご指導の下、理化学研究所の 160 cm サイクロトロンを用いた重イオン融合反応 $^{98}\text{Mo}(^{16}\text{O}, 4n)$ により、 ^{110}Sn 同位体の高励起状態を生成させ、励起準位の同定やその寿命測定に取り組みました。修士論文のタイトルは、「 ^{110}Sn の励起状態に関する研究」です。助手として赴任された村上健さん、理化学研究所の稲村卓さん、久保敏幸さんらが加わった新しい研究チームの末端に加えていただき、サイクロトロンのビームコース整備から運転まで、多くのことを経験させていただきました。笠木さんと液体シンチレータの発火性など安全性を試験・確認後、中性子検出器も手作りで製作しました。後年役立ったことの中に、実験に用いる真空チェンバーの設計もあります。真空による材料たわみの計算やねじの配置など多くの検討を要し、それをグラフ用紙の図面に落とし込んで、大田区にある町工場で作作してもらいました。この**装置図面作成と町工場との調整経験**が、後述の光核反応用 HHS の開発に大いに役立ちました。

博士課程では、修士課程の研究を発展させ、Sn 同位体の高スピン・高励起状態に回転バンドが存在するか否かを系統的に調べていくこととなります。博士論文のタイトルは、「Sn 同位体の高スピン領域における球形および変形状態の研究」です。Sn 同位体は $Z=50$ の魔法核ですので、低励起状態では球形核と考えられますが、高励起状態では変形した状態の可能性も指摘されていました。初期の実験で、回転バンドらしきガンマ線ピークが観測されたのですが、低励起エネルギー領域に同定された球形準位へどのように崩壊するのか、情報を引き出すには統計が少なすぎました。そのころ、理化学研究所では、郷農晴之さんらが、Ge 検出器の S/N 比を高めるための BGO アンチコンプトンシールドを開発され、本格的なスペクトロメータが完成したばかりでした。ガンマ・ガンマ同時計測の統計は、検出器が 2 台の場合に比べ、5 台になると $_{5}\text{C}_2$ で 10 倍になります。この新しい装置を使わせていただくことにより、データの質と統計が大幅に向上しました。こうして得られた生データから約 400 枚のガンマ線スペクトルを導出し、さらに約百日睨めっこを続け、準位を組み上げました。ガンマ線スペクトルと約百日格闘していたわけですから、周りからはかなり変人と映っていたかもしれません。球形と変形をつなぐカギとなる微弱なガンマ線を本物だと確信できた際の喜びは、ひとしおでした[1]。

このように、Ge 検出器や中性子検出器の扱い、BGO アンチコンプトンシールドの経験、データ解析のためのプログラミング技術、データ解析など、苦勞した経験がなかったら、後に核データ測定を展開することは難しかったと思います。

3. 核変換

核変換研究のために、動燃の客員研究員を兼任されていた郷農さんの紹介で、動燃に採用していただくこととなり、東海村にやってまいりました。1988 年（昭和 63 年）4 月のことです。核変換研究は、原子核物理で学んだことを活かせるテーマとして魅力的に思われました。純粹に物理学として原子核物理に取り組んでいたのですが、核変換と

いう応用研究に惹かれた背景には、学部生時に東工大柔道部の師範としてご指導いただいた斎藤次郎先生の影響もありました。明治末葉期生まれの方で、当時 80 歳を少し超えられていましたが、柔道だけでなく、朱子学の教えなども含め多くのことを教わりました。その中から斎藤先生の著作「鱒の齒軌」[2]にある一節から「この自然現象の疑義を究明、人生に役立たせるのが学問で、之が真理の追求であり、研究であり、吾人に課せられた、重要な責務の一つである。」を引用しておきます。斎藤先生の時代にあった考え方です。

さて、動燃の正式名称は、動力炉・核燃料開発事業団です。核燃料サイクル開発機構へ名称変更の後、原研（日本原子力研究所）と統合して、現在の原子力機構となる組織です。核変換は、私が動燃に配属されたころは、消滅処理という名称でした。原子力学会の専門部会で、かなりの時間をかけて名称変更の議論が行われました。専門部会の議事録が残っているとよいのですが、残念ながら手元には残っていません。『核変換』という名称で魅力はあるのか？と熱く疑問を投げかけられた先達の発言を鮮明に覚えています。核変換研究に取り組み始めた者として、名称変更後も魅力ある研究であるように努力しなければと思いました。

動燃の主力事業は、高速炉を中心とする核燃料サイクルの確立ですが、1987年に先端技術（先端技術の研究主幹は、笹尾信之さん）が加わり、その一テーマとして、核変換研究が始まります。この先端技術の内容は、核データニュース[3]ですでに紹介させていただきましたので、詳細は割愛いたします。当時、核変換は、国家プロジェクトであるオメガ計画（1988年時点では、フェニックスという名称でしたが、1989年にオメガという名称になります）の一部として開始され、配属された動燃の東海事業所では、 ^{137}Cs や ^{90}Sr といった長寿命核分裂生成核種を光核反応で消滅させるための研究が開始されたばかりでした。消滅処理の効率を高めることが当時の課題で、光核反応だけでなく、中性子核反応を含め、様々な核反応の適用可能性を検討していくこととなります。初年度は、核データ測定の準備や電子線加速器施設のプロトタイプ設計も担当しつつ、大きな外部電磁場により原子核の寿命を変化させる方法、クーロン励起により ^{85}Kr のアイソマー準位を励起して短寿命化させる方法など、思いつく限りの方法を探っていました。プロジェクト研究ですが、先端技術という位置づけでしたので、かなり自由に核変換の理論研究をやらせていただきました。大変多くの専門家の方に、手紙や電話、時には直接お伺いし、教えを請いました。電子メールのない時代です。傍若無人な押しかけにも関わらず、多くの方が、懇切丁寧に、また真剣に対応してくださいました。「消滅処理」という魅力あるキーワードのお陰だったかもしれません。ちなみに、オメガとは、Option Making of Extra Gain from Actinides and fission products の頭文字をとったものです。単に消滅だけに留まることなく、消滅処理技術により放射性廃棄物を活用する道を拓くという意図を含んでいるように読めるかと思います。将来を見据えたすばらしい名称ですね。

次章に記載する ^{137}Cs と ^{90}Sr の熱中性子捕獲断面積の測定を行ってまもなくした頃、動燃とブルックヘブン国立研究所(BNL)の高橋博博士との間で核変換理論に関する共同研究が開始されます。動燃の共同研究担当者として BNL に派遣され、核変換理論研究に取り組むこととなりました。着任は 1991 年 3 月、帰国は 1992 年 12 月です。所属は原子核工学部門の原子炉解析部でした。高橋博士は、理論物理の応用に強だけでなく、原子炉工学の専門家でもあります。着任早々 ^{137}Cs や ^{90}Sr を対象とした核変換手法を議論し、両核種とも熱中性子捕獲断面積は小さいという測定結果が得られていましたので、断面積が比較的大きな核融合中性子による(n, 2n)反応を適用する方法を調べていこうということになりました。核融合中性子源として、ミューオン核融合や慣性核融合を用いる概念を高橋博士が提唱され、物理モデルによる概算やモンテカルロ計算による詳細計算を担当させていただきました。ミューオン核融合を用いた核変換システムは、未臨界体系ですが、臨界の計算が入りますので、初めて MCNP を用いました。原子炉工学になじみのない新米研究者を育成するといった教育的配慮もあったと思います。 ^{137}Cs の測定データを MCNP に反映させるため、評価済み核データの作成を手掛けますが、最終的には同部で専門の Arnold Aronson さん(愛称は、Army)にお願いしました。研究打ち合わせは、1日に2回、9時頃と16時頃に行われ、16時の打ち合わせで、その日の進捗結果を議論し、検討課題を指摘いただき、翌日の9時の打ち合わせで、その進捗について議論するという密なものでした。このスピードで研究が進みますので、滞在中に研究論文を複数投稿することができました。



写真2 高橋博博士 (BNL の居室にて 1992 年 12 月筆者撮影)

論文執筆については、図書館に居室のある Woodhead 博士を高橋博士に紹介いただき、どのように推敲すべきか、論文を執筆するたびにご指導いただきました。単に英文の推敲だけでなく、無駄な余白を図から削除することなど、様々な視点からの推敲の考え方を理路整然と説明いただきました。この方の所属は、技術情報部でしたが、このように上手に英語論文の執筆指導をされた方を後にも先にも私は知りません。

研究テーマとしては、核融合中性子を用いる方法の他、核破砕中性子を用いる方法や外部電磁場がつくる原子核位置の電磁場の計算などまで含み、原子炉工学だけでなく、理論物理を実践的に応用する研究手法まで多くのことを学びました[4]。BNL では客員研究員という立場ですので、何の雑用もなく（生後3か月で連れて行った子供の面倒は、それなりにですが）、全ての時間を研究に没頭できる環境は、天国そのものでした。また、BNL には多くの国から研究者が集まりますので、国際的な交流も楽しいものでした。このような機会をいただいた動燃関係者のご尽力と高橋博士のご指導に深く感謝しています。

帰国後の 1996 年頃、スウェーデンで開催された核変換の国際会議でのことです。米国 LANL の Bowman 博士と CERN の Rubbia 博士の激しい討論が記憶に残る会議です。Rubbia 博士は、高速中性子を用いる加速器駆動型未臨界炉を提唱するとともに、共同研究者が ^{99}Tc の熱中性子捕獲断面積を測定するなど CERN で核変換研究を立ち上げます。核データの研究は、今日も n_TOF プロジェクトとして活発ですが、Rubbia 博士はその立ち上げ時に貢献されていました。その会議のコーヒープレイクで、「 ^{99}Tc のデータは動燃で既に測定しています」と博士に話しかけると、即座に CERN の核データ担当者を紹介され、話をするように勧めていただきました。また、帰国後には、Energy Amplifier と命名した核変換システムの CERN Report が更新されるや否や、サイン入りのレポートを国際便で何度か郵送していただきました。著名な研究者ですが、判断・行動が極めて早だけでなく、若手研究者にも丁寧な対応を取られることに感銘した記憶が残っています。双璧の Bowman 博士は、高橋博士のお知り合いで、米国滞在中の会議でお目にかかったことがあると記憶しています。若いころは、光核反応や中性子 TOF による核燃料分析などの研究もされており、私のたどった研究テーマとかなり重なります。新たな研究に取り組むと、必ず Bowman 博士の論文に行き当たるといった具合です。研究テーマの変遷の順番は逆ですが、Bowman 博士の足跡をたどると面白いことがわかるかもしれないと思っています。

4. 放射化法による中性子捕獲断面積の測定

1988 年度には、 ^{137}Cs の光核反応断面積測定や中性子捕獲断面積測定の準備が始まります。光核反応断面積は、東北大学の中村尚司先生を中心に委託研究が行われました。放射性核種を対象とするので、測定は技術的に難しく、放射性核種の扱いに長けた専門

家の手法が駆使されたことを内部の報告会などで伺ったことが印象に残っています。

中性子捕獲断面積の方は、名古屋大学の加藤敏郎先生にご指導いただくこととなりました。この時点で、私は評価済み中性子核データの知識は皆無で、知っていたのは原子核物理で馴染んでいた Table of Isotopes や Nuclear Data Sheets くらいでした。それでも原子核実験の経験があったため、この実験のための装置準備を任されることとなりました。1988年度予算で、当時としては大きな結晶サイズとなる相対検出効率 90%の Ge 検出器やデータ収集のための CAMAC 規格の放射線計測モジュールを整備するための予算をつけていただき、独自の計測システムが翌年早々に完成することになります。このデータ収集プログラムは手作りですが、当時のパソコン PC98 はシングルタスクの OS でしたので、並列処理などせずプログラム通りに動作し、測定時間を厳密に指定できました。また、当時市販のデータ収集系にない繰り返し測定機能を持たせることができました。この Ge 検出器とデータ測定システムを原研研究炉や立教炉、さらに京大炉に持ち込み、放射化法による熱中性子捕獲断面積と共鳴積分値を測定していくこととなります。

最初の対象核種は、 ^{137}Cs です。加藤先生の音頭で、名大、動燃、原研の共同研究が始まります。また、並行して原研の核データセンターを加藤先生と訪問し、長寿命放射性核分裂生成核種の中性子捕獲断面積の現状について教えて頂きました。浅見博士や飯島博士にご対応いただき、不確かさは概ね 50%との情報を得ました。

原子炉での ^{137}Cs 照射と照射サンプル整備は原研、照射後サンプルからのガンマ線測定とデータ解析は動燃が担当しました。原研の関根俊明博士は、放射化学の専門家で、データ解析に用いていた Westcott 記法の文献を教えてくださいました。この共同研究で得られた ^{137}Cs の熱中性子捕獲断面積の結果 0.250 ± 0.013 [b] は、従来の測定値 0.110 ± 0.033 [b] に比べ 2 倍以上大きく、測定の不確かさを大きく超える差異もあり、驚くべき結果でした。次に測定した ^{90}Sr の熱中性子捕獲断面積は、当時の評価値よりも 50 倍以上小さく、消滅処理という観点からは大変ショッキングな結果でした。この 2 核種の測定により、消滅処理のための熱中性子捕獲断面積測定を系統的に進めていく必要性を確信することになります。ちなみに、 ^{137}Cs の結果を日本原子力学会欧文誌の Short note に投稿したのは、実験約 1 か月後の 1990 年 3 月、掲載されたのが同年 6 月です。

少し脱線しますが、当時、原子力分野でも、核データの専門家を除けば、核データに不確かさのあることや、不確かさと誤差の違い、さらに不確かさ情報の整備状況を認識されている研究者・技術者は極めて少なかったように思います。不確かさの認識が高まった現在では、「核データは物理定数であるから、誤差はない」や「大切なのは、不確かさではなく、真値とその誤差である」と考えられる方はいらっしやらないかと思いますが、これは不確かさの影響評価に長年取り組まれた石川眞さんなど先達の成果だと思えます。また、核データを測定する必要性についても、当時の状況認識は今日とかなり異なって

いました。先端技術のある研究評価委員会で、核データ研究の成果を報告した際、「原子力用の核データは、ORNL で全て測定されたのに、なぜ測定する必要があるの？」という質問を投げかけられた米国の評価委員がいらっしました。この方は、核データの専門家ではありませんが、ORNL の ORELA という加速器施設で高速炉用核データはすべて整備されたとの報告を読まれていたのかもしれませんが。広い知識を持たれていた方です。対象核種に限っては、過去の測定状況を把握していましたので、答えには困りませんでした。この当時はまだ俯瞰的に核データ測定の意義を説明することはできませんでした。

次に取り組んだ ^{99}Tc と ^{129}I の測定には、当時、横須賀で稼働していた立教炉を用いました。中村詔司さんの核データニュース記事[5]でも紹介されましたが、100 kW の TRIGA II 型小型研究炉で、たいへん使い勝手のよい研究炉でした。 ^{99}Tc が中性子を捕獲して生成する ^{100}Tc の半減期は 15 秒ですので、かなり忙しい実験です。ストップウォッチを見て照射指示を出す係、照射係、照射サンプル設置係、測定係を、それぞれ加藤先生、原田、緒方良至さん、中村さんが、分担して行ったことを記憶しています。原子炉照射は、炉心の上からタコ糸のついた照射容器を、釣人ようになって、照射位置に出し入れます。この釣り（照射）の師匠は、立教炉の戸村健児先生でした。素手出し入れすることにより、照射時間の精度などについて自信をもてるというメリットがありました。後日核データ関連の国際シンポジウムで、年配のロシアの研究者から「お前が Fisherman をやったのか？」と話しかけられるなど交流する際にも役立ちました。当時の年配のロシア人研究者は、自分で手を動かすことを重視していたように思います。

立教炉の実験でも放射化学を専門とする名大の緒方さんが加わったことにより、サンプル量定量の品質が大いに高まりました。その後、5 MW の京大炉に実験の場が移った後も、放射化学を専門とする山名元先生や藤井俊明さんのご協力を得ることになります。原子炉照射による中性子捕獲断面積の測定を通じ、**分野の異なる研究者との協力が、核データの品質を格段に向上させる鍵である**ことを学びました。1 人の研究者の持っている技術や知識は限られていますので当然のことかもしれませんが、他分野の研究者のニーズを正確に把握し応えてくれる研究者に、次々と巡り合える運も必要ですね。

5. 光核反応断面積の測定

動燃における光核反応断面積の研究については、核データニュースで「光と原子核の反応を超高分解能で調べる」という題目[6]で紹介させていただきましたので、技術の詳細は割愛し、説明していなかったことを補足させていただきます。動燃では、光核反応による核変換をプロジェクト研究として実施していましたので、理論研究を担当していた当方に、その効率をあげる方法を見出すことという課題が与えられていました。本社でプロジェクト全体を統括・推進される立場の方との間で、ホットな議論が繰り返し行

われました。そんな時、郷農さんが研究室にお立ち寄りくださる機会があり、「最近 Ge 検出器を組み合わせたクローバ型検出器やクラスター型検出器がインビームガンマ線分光で使われ始めている」という最新の技術情報を教えていただきました。光核反応とは、一見全く無関係な技術情報です。それからしばらく後、書類を整理するためにしゃがみこんだ拍子に、次のことを思いつきました。「① Ge 検出器を組み合わせることで、光核反応を起こすような高エネルギーガンマ線も高分解能で測定できる、② 高分解能の Ge 検出器であれば、透過法を用いることで超高分解能の測定ができる、③ これまでの光核反応断面積のデータは低いエネルギー分解能の測定であり、高分解能で測定すると大きな断面積ピークを持つ微細構造を観測できるかもしれない」という3つのことが同時に頭に浮かびました。発想を思いつくのは、このようにひょっとしたタイミングのことが多いのではないのでしょうか？このアイデアを検討するため、派遣で来られていた SE の方のかも借り、モンテカルロシミュレーションで実験の成立性や、製作すべき検出器のシミュレーションによる設計、さらに模擬実験のシミュレーションによる検討を徹底的に進めました[7]。当時、設計した装置を作製できるような研究費はなく、また原子カシステムといった競争的資金はない時代でしたが、この予算獲得については、笹尾さんやホットな議論をした本社組織のラインの方より厚いサポートを頂きました。

核変換の処理速度（核反応率）は、

$$R = \sigma \times \Phi$$

で決まります。ここで、核変換に適用する断面積が σ 、照射するビームのフラックスが Φ です。この他にも、核変換反応の競争過程で消費されるエネルギーなども考慮する必要がありますはあるのですが、やはり核変換の基本式は上式です。断面積とフラックスの積が大きいと処理速度は速くなります。早い処理速度を実現するには、大きな断面積の核反応を選び、さらに、その核反応を引き起こすことのできる大強度ビーム発生装置が必要となります。光核反応の微細構造ピークの断面積には大きなもの（その代わり固有幅が狭い）があるかもしれないと考えていましたが、単色ガンマ線発生装置については、よいアイデアがありませんでした。当時、客員研究員であった KEK の佐藤勇先生から「装置は装置の専門家がいるのだから、あなたは微細構造の研究に注力するのがよいのではないか」と助け船となる考え方を頂き、微細構造の測定研究に注力していくことができました。放射化法と同様で、光核反応研究でも多くの人との出会いと会話がなかったら、研究は進まなかったかもしれません。このようにして、色々な助けを得ながら、光核反応を超高分解能で測定するための装置 HHS（高分解能・高エネルギー光子スペクトロメータ）の開発を進めることができました。

この実験には、電子線加速器などガンマ線発生装置が必要となりますので、歴史的に光核反応の研究で有名な東北大の核理研に移られていた核物理の師匠である笠木さんに相談に行ったところ、つくばの電総研（電子技術総合研究所）にレーザー逆コンプトン光

発生装置が稼働しており、そこがよいのではないかとこのサジェスションを頂きました。早速、電総研と共同研究を開始するのですが、その立ち上げには、本社でプロジェクト全体を推進する方が、サポートしてくれました。

HHS を電総研（後に産総研）のビームラインに持ち込むために、研究チームに加わった重留義明さんとともに、鉛遮蔽や HHS 設置台設計などを進め、電総研の野口勉さんのご尽力により無事設置に至りました。電子リングの運転中は、かなりのガンマ線が発生しますので、検出器を守るために鉛遮蔽が必要だったわけです。解説記事[6]の装置図に“LEAD SHIELD”と表示されているものです。鉛遮蔽が設置された翌年、装置責任者である大垣英明さんが米国から帰国され、レーザー逆コンプトン光と HHS を用いたガンマ線透過法の実験が本格化していきます。はじめのターゲットとして ^{18}O を選んだのですが、透過ガンマ線スペクトル中に凹みピークを観測することは容易ではなく、3-4 日間程の実験を何度も繰り返しました。最終的には、0.1%のエネルギー分解能を犠牲にして、データをバックして統計を上げ、さらに ^{16}O 同位体との比を取ることで、やっと ^{18}O の光核反応断面積の微細構造を示すことができました[8]。中々成果を示せない中、大垣さんは常に快く実験にお付き合いくださり、昼夜問わず最大のビームを出してくれました。観測できるはずと理解されていたのか、当時の電総研の研究スタイルだったのか、あるいは私と同じように楽観的だったのか、機会があれば伺ってみたいところです。成果が見通せない実験を何度も何度も繰り返す外部ユーザを支えるのは、並大抵のことではなかったはずです。

ガンマ線による消滅処理のプロジェクトが終了した後、レーザー逆コンプトン光を用いた光核反応の研究を継続するには、新たな意義を示す必要があります。1998 年に組織名も動燃からサイクル機構に、研究室名も、先端技術開発室からシステム設計評価グループに代わります。兼務先として、大洗工学センターの分離変換工学グループは残ります。分離変換工学グループでは、高速炉での核変換を研究していました。「光核反応は、中性子捕獲反応の逆反応だから、これまで放射化法で測定できなかった核種中性子捕獲反応断面積の情報を引き出すのに有効だ」といった説明を行い、何とか継続を認めてもらいました。当時産総研で (γ, n) 反応の測定に取り組まれていた甲南大学の宇都宮弘彰さんと共同研究を開始することとなり、サイクル機構は Se 同位体の担当、甲南大学は Zr と Pd 同位体を担当することとなりました。産総研側はビーム担当ですが、大垣さんが京大に転出され、豊川弘之さんが一人で面倒を見てくださいました。Se 同位体の測定は、北谷文人さんが担当し、最終的に長寿命核分裂生成核種の 1 つである ^{79}Se の高速中性子捕獲断面積の予測まで研究を進めてくれました[9]。少し時間がかかったものの、当初の目的を何とか達成することができました。

少しさかのぼって、産総研のレーザー逆コンプトン光と HHS を用いた研究として、物質中でのガンマ線吸収係数の測定にも着手しました。そのきっかけとなったのは、NIST

の John H. Hubbell 博士からの熱い手紙です。Hubbell 博士は、1995 年に発表した実験手法の論文[6]に興味を持たれ、生涯の研究テーマであるガンマ線吸収係数測定への適用を促すために、手書きの注釈をたくさん記載された様々なレポートを郵送くださいました。1998 年頃のことですが、電子メールではなく、航空便でした。ガンマ線吸収係数データに強い関心を持ち続けておられることが伝わってきました。博士からの情報でガンマ線吸収係数にもまだ測定研究のニーズがあることを知り、検出器材料である Ge と BGO を対象に、測定を行いました[10]。この結果が得られた 2007 年に Hubbell 博士は亡くなられ、結果をご報告できなかったことは悔やまれます。研究にはスピードが大切ですね。

6. 即発ガンマ線分光法と中性子飛行時間法による中性子捕獲断面積の測定

長寿命核分裂生成核種の中には、 ^{93}Zr や ^{107}Pd など放射化法が利用できない核種もあります。また、核変換用核データを系統的に整備するからには、熱中性子捕獲断面積だけでなく、共鳴領域や高速中性子の断面積も大切です。このように系統だった測定を進めるために、京大炉の中性子導管に BGO アンチコインシデンス付 Ge 検出器を設置して、即発ガンマ線分光法による熱中性子捕獲断面積の測定技術開発を進め、また、京大炉の電子線加速器施設にアンチコインシデンス用に整備していた BGO 検出器を TOF 用に転用して持ち込ませていただき、中性子飛行時間(TOF)測定法による微分断面積測定技術の開発を進めていきました。放射化法や光核反応だけでなく、即発ガンマ線分光法や TOF 法の核データ測定技術を並行して進めることができるようになったのは、核変換研究のチームとしての活動が認められ、職員数は少ないものの、博士研究員や国際特別研究員枠はかなり優遇され、総勢 5 名程度で技術開発や断面積測定に取り組めるようになっていたからです。

初代の国際特別研究員は、Oleg Shcherbakov 博士です。Oleg さんは、ロシアのペテルスブルグ核物理研究所(PNPI)に所属する TOF 法による中性子断面積測定の専門家で、1991 年に Julich で開催された核データ国際会議のポスター発表の場で話をしたのが出会いです。その数年後、丁度、動燃で国際特別研究員制度が始まったこと、1991 年にソ連が崩壊しロシアとなったことなどの要因が重なり、招聘に至りました。京大炉の電子線加速器施設でお世話になっていた小林捷平先生が PNPI の所属長をご存じで、PNPI に足を運び所属長に挨拶するにあたり事前情報をいただけたことも幸運でした。Oleg さんは、大変熱心に研究に取り組み、3 年間の滞在中に、中性子自己吸収補正の理論研究、TOF 測定技術開発、 ^{237}Np の TOF 測定で成果を上げられました。大変話好きな方で、PNPI の TOF ビームコースを手作りしたことや日口の文化の差など色々なお話を伺いました。2 代目は、Oleg さんの紹介で、PNPI の Alexander Laptev 博士（愛称は Sasya）に決まりました。サイクル機構になったころです。2 年間の滞在中に、TOF 測定用データ収集系の開発で成果を上げられ、TOF 測定技術開発が進んでいきました。Ge 検出器を適用する

予備試験も京大炉の電子線加速器施設でのマシンタイムの一部で実施させていただきましたが、電子線加速器による中性子源で避けることが難しいガンマフラッシュによる検出器の不感時間がかなり長いのが課題でした。アンチゲート技術によりこの課題を解決するための技術開発は、後年、 LaBr_3 検出器を用いて博士研究員の原かおるさんが完成させました。この他にも、多くの博士研究員の方に研究グループに加わっていただきました。書き出すと止まりそうもありませんので割愛させていただきますが、核データ測定技術開発や核データ測定で多くの成果をあげられました。

即発ガンマ線分光法と中性子飛行時間法については、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) との国際共同研究を立ち上げ、研究グループの若手職員を派遣することにより本技術の人材育成を計りました。ORNL 側の研究代表は、S. Raman 博士です。核データだけでなく、核物理でも知られた研究者で、当時 ORELA (TOF 法により中性子断面積を測定するための電子線線形加速器施設) の施設長も務められていました。大沼先生とも交流があったことから、学生時から面識はあったのですが、国際共同研究の立ち上げは初めての経験です。当時の所属長で経験豊かな馬場務さんにご指導いただくことで、どうにか立ち上げることができました。この国際共同研究立ち上げの経験は、その後、IRMM (欧州共同研究センター JRC の 1 つでベルギーの Geel という町にあります) や CERN との共同研究を立ち上げる際、大変役立ったと思います。

このようにして測定技術・人材が育っていき、測定核種も、核分裂生成核種だけでなくマイナーアクチノイド核種に広がっていきました。動燃・サイクル機構での TOF 測定技術は、後年の原子力システム事業や J-PARC MLF の ANNRI 開発に繋がっていきます。ANNRI 開発については、井頭先生の核データニュース記事[11]などがありますし、私よりもう少しだけ若い世代の方が現役で活躍中ですので、省略させていただきます。これらの大型事業の実現には井頭政之先生、鬼柳善明先生、大島真澄博士、永井泰樹先生が指導的役割を果たされました。開発を担ったのは、JAEA 核変換用核データ測定研究グループのスタッフと博士研究員、参画した大学の若手教員です。私は、プロジェクトの一部である核データ測定の統括を担当させていただき、次の原子力システム事業につながる役割を何とか果たすことができました。ANNRI の完成後、その共同利用開始にあたっては、池田裕二郎博士始め J-PARC スタッフによるご支援をいただいたことを忘れるわけにはいきません。

7. 応用核物理

以上のように、核データ測定にかなりどっぷり浸かってきたのですが、核物理の応用ともいえる TOF 技術による核燃料の非破壊分析に動燃時代より関心を持っていました。それが本格化したきっかけは、当時 JAEA の核セキュリティーセンターに所属していた瀬谷道夫さんとの出会いです。瀬谷さんは、核セキュリティー技術を発掘し、それをプ

ロモーションする業務を担われていた方です。先進的な技術を探して私の研究室を訪問された際、TOF技術による非破壊分析を紹介したところ、関心を持たれ核セキュリティー補助金の1プロジェクトとして組み込むための活動を精力的に行われました。その一環として、私には、国外との共同研究を取り入れるよう打診がありました。たまたまその頃、核変換の情報交換会議に参加した際、ベルギーにあるJRC傘下のIRMM研究所の核データ研究で、サンプルが均一ではなく粒子状であった場合の中性子共鳴パラメータ導出への影響に関する研究が行われていることを知る機会がありました。Peter Schillebeeckxさんの仕事ですが、核変換の会議ですので、彼が所属するディビジョン長が説明されていました。かなりマニアックな技術内容ですが、要点をつかんだ説明をされる方で、すぐに、これは使えるということに気づきました。早速、共同研究先として、IRMMと連絡を取り、共同研究の可能性を探っていくこととなりました。Peterさんにお会いしてみると、核燃料の定量にTOF技術を応用することに大変関心を持っていただき、共同研究計画を、ひざを突き合わせて作り上げていくことができました。このような密な議論は、IAEA主催の核セキュリティー技術に関する3-4日間程の研究会に両名が参加し、コーヒースタンドの合間と会議の後に議論を断続的に行うことができたからです。このように効果的な打ち合わせの機会をアレンジしてくださったのは、瀬谷さんで、コーディネータとしての本領を發揮されました。この技術には、中性子共鳴濃度分析法 (Neutron Resonance Densitometry: NRD) という名称を付けました。技術の進捗などは共同研究者の小泉光生さんらと文献[12]に記載いたしました。技術としては、極めて高精度に核燃料を非破壊で定量できることを実証できた[13]のですが、一方、なかなか技術普及というところまでには行きつきませんでした。その要因の一つに、技術のハードルの高さがあります。Ge検出器を分析に応用できる人材は多くいますが、中性子共鳴分光法の応用となるとハードルが高いですね。先進技術の普及には、専門人材の育成が鍵となることもあることを学びました。

8. 原子力人材の育成

60歳の定年退職後、アジア諸国を対象とする原子力人材育成の業務に講師やコーディネータとして5年程従事しました。日本で開催する原子炉工学のアドバンスコースで、各国の講師となる研究者や教員を育成し、その後、研修生が母国に帰って実施する原子力研修をアドバイザーや講師としてサポートするといった業務です。タイ、フィリピン、バングラデシュ、カザフスタン、マレーシア、モンゴル、インドネシアの各原子力研究所に、何回か足を運びました。当初、原子炉工学全体を講義するほどの知識はなかったのですが、各研修で様々な質問に答える必要があることから、ここに来て、かなり広く原子炉工学を勉強することになりました。教育するといいつつ、実は育ててもらったようなものです。新入職員の頃、もう少し原子炉工学全体を勉強しておけばよかったかな

と思っています。以下は、海外で行った研修終了時の集合写真の一例です。各国の研修生から、どのような人材が育つのか楽しみにしています。



写真3 カザフスタンの核物理研究所 INP にて (2024年4月) [14]

現在は、茨城大学の原子科学研究教育センター(RECAS)という2024年に発足した新しい組織で、所属教員の研究教育を支援する業務を行っています。支援といいつつ、範囲が広く、学ぶことの方が多き毎日です。「原子科学」という言葉は聞きなれないかと思いますが、原子力・量子科学・放射線科学といった広い範囲をカバーし、地域・社会に貢献するものと茨城大学では定義しています。RECAS ホームページ[15]の Member 紹介にあるように、多様な分野の専門家が在籍しています。連携による研究開発と人材育成に積極的な組織ですので、関心をお持ちいただいた場合は、お声がけいただけますと幸いです。

9. おわりに

動燃でどのように核データ測定研究が始まったのか、これは、消滅処理が原点です。加藤敏郎先生と始めた小規模な熱中性子捕獲断面積の測定から始まり、エネルギー範囲や測定対象核種を拡張するための技術開発や、光核反応断面積を超高分解能で測定するための技術開発など、少しずつ範囲を広げ、共同研究者に恵まれて進展していった経緯を記載させていただきました。また、学生時代に学んだ実験核物理がどのように役立ったのか、さらに、研究を進める上で様々な人との出会いがどのように影響していったのかについても、そのいくつかを、蛇足で寄り道しつつ、紹介させていただきました。

振り返ってみますと、もっと系統だった測定研究を展開すべきだった、もっと範囲を広く調査して応用研究を展開すべきだった、もっとリスクを覚悟して尖鋭な研究を追求すべきだった、もっと早く教育にも力を入れるべきだった等々、反省すべき事はたくさんあります。一方、研究を通じて巡り合えた研究者との交流や、難しかった研究課題を乗り越えた経験は、貴重な財産となっています。これから核データ研究に取り組まれる次世代の皆様におかれましては、紹介させていただきました研究の経緯から、何か他山の石となるようなことがありましたら幸いです。新しいテーマにチャレンジし、研究を

大いに楽しまれ、ご活躍されますことを願っております。



参考文献

- [1] 原田秀郎：「Sn 同位体の高スピン領域における球形および変形状態の研究」、博士論文、東京工業大学 (1988).
- [2] 斎藤次郎：「鱈^{ごまめ}の歯軋」、(1984)
- [3] 原田秀郎：「動燃事業団『先端技術開発室』」、核データニュース No.48、p.89 (1994).
- [4] 原田秀郎：海外出張報告書、PNC TN8600 93-002 (1993).
- [5] 中村詔司：「2024 年度核データ部会賞」、核データニュース No.140、p.47 (2025).
- [6] 原田秀郎：「光と原子核の反応を超高分解能で調べる」、核データニュース No.63、p.36 (1999).
- [7] H. Harada and Y. Shigetome, J. Nucl. Sci. Technol., **32**, 1189 (1995).
- [8] H. Harada et al., Phys. Rev. Lett., **80**, 33 (1998).
- [9] 北谷文人：「2015 年度核データ部会賞」、核データニュース No.114、p.44 (2016).
- [10] H. Harada et al., J. Nucl. Sci. Technol., **45**, 1228 (2008).
- [11] 井頭政之：「中性子とガンマ線と」、核データニュース No.117、p.81 (2017).
- [12] 小泉光生他：日本原子力学会誌 **58**, p.563 (2016).
- [13] C. Paradela et al., “NRD Demonstration Experiments at Gelina”, Report 27507 EN (2015).
- [14] INP HP : <https://inp.kz/en/novost/proshel-kurs-yaponskogo-agentstva-po-atomnoj-energii>
- [15] 茨城大学 原子科学研究教育センター ホームページ : <https://www.recas.ibaraki.ac.jp/>