



## $\gamma$ 線スペクトルに美を見出す

日本原子力研究開発機構

大島 真澄

oshima.masumi@jaea.go.jp

私の定年退職に当たり、これまでの研究生活を振り返って、やりたかったこと、実現できたこと、また現在私が研究に対して思っていることなどを紹介したいと思います。

### 1. 核構造基礎研究 (1977~1999)

私は名古屋大学の理学部物理学科、東北大学大学院理学研究科原子核理学専攻を経て、1977年に日本原子力研究所(原研)物理部の核物理第2研究室に特別研究生として来ました。そこには、室長の浅見さん、鹿園さん、河原崎さん、中島さん、大久保さん、また若手のホープの水本さんたちがいて、中性子捕獲断面積実験をやっていたのですが、そのときは私にとって全くの異分野でした。私は東北大学で $\beta\gamma$ 分光をやってきましたので、原研では田村さん、松本さんと一緒に、電子線ライナックで短寿命のRIを作って、その崩壊核分光をやっていました。一方、核データとの繋がりという意味では「評価済み核構造データファイル(ENSDF)」の編集にもこの頃から参加して、後にA=120, 125, 129についてNuclear Data Sheetsにまとめました。ところで、当時は重イオン核物理が黎明期で、原研でもちょうどタンデム加速器の建設が始まり、新たにインビーム核分光研究が出来るということで、ちょうど職員の公募がありましたので、それに応募いたしました。運良く採用試験にパスして、核物理第1研究室に入所しました。ここには田中室長以下、理論の原田さん、核反応実験の竹腰(英子)さん、井出野さん、岩本さんがおられました。私は核構造実験の石井さん達と一緒に、加速器建設の傍ら細々とインビーム実験を始めたわけです。同時期に入った人たちとして、大塚(孝治)さんや、竹内さん、峰原さん、池添さん、花島さんといった人たちがいます。

加速器は当時最先端だったわけですが、実験装置はビームラインとNaIのアンチコンプトンガンマ線検出器が1台だけでした。重イオン核物理の黎明期とは云っても、外国ではNordBallとかEuroGamといった小型多重ガンマ線検出装置が動いている時期でした

ので、それらと競ってインビーム高スピン核分光実験をやったのではとても勝ち目は無い。そこでいろいろ考えた末に、多重クーロン励起を始めました。クーロン励起はもともと Winther と de Boer 達によって 1950 年代に確立した手法でしたが、重イオンを使うと高スピン状態まで励起でき、それも基底バンドが選択的に励起される特徴があります。また、電磁転移確率や電磁気モーメントを導出できるということに着目して、理研の稲村さんや千葉大の草刈さん、千葉工大の菅原さん、九州大の森川さんと一緒に、系統的に希土類の中性子奇核  $^{155,157}\text{Gd}$ ,  $^{161,163}\text{Dy}$ ,  $^{167}\text{Er}$ ,  $^{173}\text{Yb}$  などの回転バンドの研究を行いました。1980 年当時エネルギー準位に現れる指標依存性が理論的に議論され初めていましたが、我々は M1, E2 電磁転移確率にも同様の指標依存性を見出して、国際会議に招待されるなど注目されました。その間に日米核物理協定に基づき Oak Ridge 国立研究所にも行って、C. Baktash 博士や I.Y. Lee 博士といった高スピン状態研究者とも親交を得るとともに、プランジャーを使った核寿命測定の手法をマスターしてきて、クーロン励起に適用して高度化を図りました。また、Rochester 大学の Cline 博士らが、粒子線とガンマ線の角度相関データから 2 MeV 以下の低励起状態間の数 10 個の電磁転移行列要素を一気に決めるというマルチパラメーターの最小自乗解析手法（一名 GOSIA 法）というのを始めました。私はその新しさと有効性に感激して、それを取り入れようと 10 年近く努力しました。しかし、Cline らの元々の方法では、対象核を金属フォイルにしなければならない、軽イオンから重イオンまで 4~5 種類のビームを使う必要がある、また粒子検出器に用いていたシリコン検出器は寿命が短くて、実験中にも何回も交換しなければならないなど、実用上の問題があり、また何よりも解析の GOSIA コードがなかなか入手できないと云った問題がありました。これらを解決するのに数年を要しました。試行錯誤の結果、最終的に対象核をビームにして、固定の鉛ターゲットを使ったこと、浜松フォトニクスの当時新しい位置感応型フォトマルとプラスチックシンチレータを組み合わせた大立体角の粒子検出器を新たに開発したこと、Warsaw 大学の T. Czosnyka (チョスニカ) 博士をリサーチフェローに招へいして、GOSIA コードを導入したことにより、クーロン励起完全核分光手法を完成させることが出来ました。その完成には藤さん、小泉さん、長さん、早川さん、また外部から前述の稲村さん、草刈さん、菅原さん、森川さん、Czosnyka 博士、Zielinska (ジーリンスカ) 博士の尽力が欠かせませんでした。世の中ではあまり知られてはいませんが、今でも私は核変形を理論に依らず実験的に調べることの出来る最も有効な手段として、この手法には完成された美があると感じ、非常に気に入っています。クーロン励起は英語で Coulomb excitation 略して Coulex といいますが、Cool experiment の略でもあると言って悦に入っています。この手法で  $^{66,68}\text{Zn}$ ,  $^{70,72,74,76}\text{Ge}$ ,  $^{78}\text{Se}$ ,  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{98}\text{Mo}$  などの安定核を系統的に調べて、低励起状態における変形共存現象を明らかにし、上記の方々と一緒に一連の共著論文にしました。これらの成果により、藤さん代表の所内有功賞を受賞することが出来ました。我々のこの一連の実験と並行して、米国の GAMMASPHERE

などにおいてもほぼ同様のクーロン励起実験が行われるようになりました。結局突き詰めた結果、同様の手法に落ち着いたわけです。装置の規模では負けましたけれども、手法開発では負けなかったと言えると思います。ビームにした原子核を対象とする点で、RI ビームを用いた不安定核の構造実験に向いており、今後も発展が見込まれます。

この系統的な実験と並行して、いくつか新たな試みを行いました。反跳 RI ビームのクーロン励起、レーザーイオン源及び多重電子線検出器の開発です。まず反跳 RI ビームのクーロン励起は現在では再加速方式で作られた高品質の RI ビームの利用が可能ですが、我々は核反応の *Inverse Kinematics* を利用する方法を用いました。つまり、 $^{70}\text{Ge}$  ビームを  $^9\text{Be}$  に照射し、反跳で得られた  $^{76}\text{Kr}$  の RI ビームを少し離れた位置に置いた Pb ターゲットに照射しました。1 次ビームのバックグラウンドを除くために、1 次反応と 2 次クーロン励起の間の時間差により RI ビームを分離することに成功し、RI ビームのクーロン励起を世界で初めて観測することが出来ました。また、レーザーイオン源の開発では表面電離型の ISOL イオン源にレーザーを導入し、多段階共鳴イオン化により、イオンビームを引き出しました。オフライン実験で収量は%オーダーと少ないものの、世界で初めて原子核の  $Z, A$  を特定したイオンビーム引き出しに成功しました。Copper Vapor Laser (銅蒸気レーザー) という高繰り返しで大強度を実現した当時先進的な、またそれだけに取り扱いが厄介なレーザーを使い、また 2 台の色素レーザーの調整が必要で、レーザーの素地のなかった私は非常な苦勞をしたことを覚えています。イオン源中のプラズマにより中性原子化する効果のため、オンラインでの実用化には到りませんでした。その後競争相手であったユバスキュラ大で効率の改善がなされ、実用化されました。原理開発としては世界的にも我々が早かったと言えます。さらに、多重電子線検出器の開発について紹介します。重核において低エネルギーガンマ線は内部転換電子に転換される確率が大きいので、高スピン核分光実験を進展させるために我々は多重電子線検出装置を開発しました。これはミニオレンジ  $\beta$  線スペクトロメータを発展させたもので、ペルチェ素子で冷却した 32 個の Silicon PIN Photo Diode を使用して、その間の同時計数測定が可能です。同種の検出器はまだなく、可能性は未知のままです。以上の 3 つの手法開発は *Nucl. Instr. Meth.* 論文にまとめましたが、未知重核のテーマの終了とともに中断することになりました。

さて、少し時間が前後しますが、外部の人たちとの協力関係を重視してきて、先ほど紹介しました皆さん以外に、筑波大の古野先生や小松原さん、九州大の郷農先生、御手洗さんとも協力研究実験を実施しておりました。これをベースとして 1990 年頃よりタンデムの後段加速器ブースターの計画に合わせて、本格的なクリスタルボールを建設しようではないかという機運が生まれました。筑波大の検出器を一定期間借り受けて、原研と合わせてミニクリスタルボール GEMINI 計画を立ち上げ、筑波大、千葉大、千葉工大、九大、理研など主要な核分光研究者が参加する国内共同実験を実施しました。こ

の実験を理研のシンポジウムで紹介したところ、当時理研の理事長をされていた有馬先生が気に入られて、是非本格的クリスタルボールを実現してくれということで、強力にサポートして頂きました。実現に後一步というところまで行ったのですが、思わぬ成り行きで実現に至りませんでした。この点は私の努力不足として、有馬先生に本当にお詫びしなければならないことと、今でも申し訳なく思っています。このときに、JAPAN BALL が実現していれば、今の日本の核分光研究も変わっていたのではないかと思ひ、その意味でも非常に残念です。これは私にとっても大きな教訓となりました。

さて、本格的なボールは実現しなかったのですが、その後先端基礎の伊達センター長の支援により 12 台の BGO アンチコンプトン  $\gamma$  線検出器 (BGOACS) からなる GEMINI 装置が原研単独で実現しました。その数年後には筑波大学の古野先生が退官されるに当たり、検出器を有効に使うに欲しいとの申し出を戴き、4 台の BGOACS とさらに 3 台の低エネルギー検出器を加えることで、GEMINI は GEMINI-II にアップグレードされて、現在に至っています。GEMINI、GEMINI-II はクーロン励起やインビーム実験、また後に述べます放射化分析研究に非常に活躍しまして、その技術論文は引用件数に関して機構のトップクラスに入っています。その中でも菅原さん、早川さん、森川さん、井手口さんらによる回転バンドの解析と変形共存現象の解明が顕著です。国内に限らず、中国近代物理研究所の X.H. Zhou 博士、Y.H. Zhang 博士らも回転バンドにおける指標逆転現象や変形共存に関する多くの成果を挙げてくれました。最近でも H21 年にデンマーク Niels Bohr 研究所の Jorgensen らが Icarus に論文発表した地球最古の地層試料分析や、H22 年に東大の井手口さんが Phys. Lett. の論文発表とプレス発表してくれました原子核における日本初めての超変形状態の発見などに活躍しています。GEMINI-II 装置は世界的に見れば中規模の装置ですけれども、これを小泉さん中心で旨く運用したことで国内・国外の多くの方が使ってくれ、核分光分野にそれなりの貢献をすることができました。この経験が JRR-3 や J-PARC での同種の実験装置建設の大きな動機付けとなりました。

## 2. 核データ及び分析化学応用研究 (1999~2010)

さて、これまでは物理部から先端基礎研究センターの未知重核研究グループに所属していましたが、伊達センター長の要請があつて、逆コンプトン  $\gamma$  線核分光研究グループにサブリーダーとして参加しました。これは阪大の江尻さん、藤原さん、中野さん、秋宗さんたちが Spring8 に建設を提案した逆コンプトンによる GeV フォトンの生成というプロジェクトでした。施設の立ち上げまで協力しましたが、3 年目の時に、後に東海研の副所長になられた岩本さんから、基礎から応用まで含めた原子核科学研究グループを立ち上げてくれといわれて、新しく発足した物質科学研究部に移籍しました。以前 Niels Bohr 研究所で初めて見た 2 次元マトリクスからヒントを得て、多重  $\gamma$  線検出法は核種分析にも有用であるとのアイデアを持っていましたが、なかなか実際の適用が出来なかつ

たところ、原子核科学研究グループで篠原さんや初川さんと一緒のグループになって、初めて放射化分析研究をスタートさせることが出来ました。初川さんや藤さんと一緒に始めた多重  $\gamma$  線放射化分析は非常な成功を収めて、所内有功賞、原子力学会技術賞と文部科学大臣賞を頂くことが出来ました。多重ガンマ線検出法は我々以前にも 2 台の NaI、Ge 検出器を用いて試みられていましたが、GEMINI-II という本格装置を用いて初めてその有効性を明らかに出来ました。多重ガンマ線の放出確率などの条件がそろえば、核種分析において分解能と信号対ノイズ比を実効的に約 600 倍改善できることを実証しました。その後、即発  $\gamma$  線分光にも適用できるのではないかと考えて、即発  $\gamma$  線分析 (PGA) を中心的にやられていた海老原先生に相談したところ、ちょうど研究用原子炉 JRR-3 ガイドホールのコールドラインの分岐計画があるということで、中性子利用専門部会へ共同提案していただき、多重即発ガンマ線分析 (MPGA) のビームライン建設を認めていただけました。東大開放研の伊藤先生と連携重点研究の支援により、現在の MPGA ビームラインを製作することが出来ました。検出装置はプロパー予算で数台の検出器を少しずつ整備してきましたが、H16 年度に藤さんが NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) のファンドを獲得し、また H18 年度に下記特会事業の検出器を有効利用し、さらに H19 年度から私が JST (科学技術振興機構) 地域イノベーション総合支援事業育成研究ファンドを獲得して、現在の 12 台の検出器からなる多重即発  $\gamma$  線分析装置 STELLA が建設されました。JST 研究員として参加してくれた村上さんは、多重即発  $\gamma$  線分析のソフト開発と分析法評価に非常に大きな貢献をしてくれました。

また、グループの核変換基礎研究については、篠原さん、初川さんを中心に JRR-3、JRR-4 及びタンデム加速器を用いた放射化法による断面積測定がなされてきました。H14 年度から文科省公募型革新的原子力システム技術開発事業が始まることになり、水本さんに相談されて、核データ測定にはこれまで使われてこなかった高分解能ゲルマニウム検出器を用いた核データ測定を提案しました。同様の提案をサイクル機構の原田さんがしているということで、連携することになりました。また、井頭先生に音頭を取って頂いたことでまとまった形となり、提案して採択されました。これが所謂井頭特会の始まりで、この事業で全立体角 Ge スペクトロメータを開発できました。これは中性子捕獲断面積測定用として世界で初めての Ge 検出器を用いた多重ガンマ線検出装置です。

H17 年 10 月には旧日本原子力研究所と旧核燃料サイクル開発機構が統合された際に、原田さん達のグループ (原田さん、古高さん、北谷さん、中村さん) と一緒になり、原子力科学研究所原子力基礎工学研究部門の核変換用核データ測定研究グループが発足しました。さらに、その最終年度の H17 年度に新しい JST 公募原子力システム研究開発事業が始まるということで、念願だった J-PARC 物質生命科学実験施設 (MLF) に遮蔽体を建設し、上記全立体角 Ge スペクトロメータを設置して核データ測定研究を実施するという計画を検討しましたが、井頭先生は井頭特会の途中のため、永井先生の発案で鬼柳先

生に代表をお願いして、これがまた図に当たり採択され、鬼柳特会が始まりました。これらはごく最近のことで、皆さんご存じの通りであります。鬼柳代表の努力により、H22年3月にこの鬼柳特会が無事終了しました。ここ9年間は、私はこれらの大事業におけるJAEAサイドの代表として事業管理を行うと同時に、測定器開発を担当してきました。特に、特会事業のため事業管理が大変で、無我夢中で週末もかなり潰して文科省・JSTへ対応してきたことも、今となっては良い思い出となりつつあります。H20年12月のJ-PARC MLF施設利用開始とともにビーム実験が本格化し、特に木村さん、水本さん、堀さん、中村さん、片渕さん、金さんの活躍でこれまで困難であった中性子捕獲断面積データの取得が可能になりつつあります。また、特定課題推進員等で参加していただいた原さん、後神さん、太田さん、木野さんの貢献も忘れることが出来ません。J-PARC物質生命科学実験施設BL04に中性子核反応測定装置が完成してH22年5月にプレス発表しましたように、これから当に新しいフェーズに入ろうとしています。原子力機構の第1期中期計画も3月で終了し、私にとってもいろいろな意味で大きな節目になりました。

初めに戻りますけれども、中性子核物理研究は旧原研の物理部において主テーマでありました。電子リニアック施設は残念ながらシャットダウンになってしまいましたが、JRR-3、J-PARCの両施設において核データ測定ビームラインが完成したことによって、中性子核物理研究のテーマを新たに始めることが可能になりました。マイナーアクチニドや長寿命核分裂生成核種の中性子反応断面積測定が新たなテーマですが、考えてみますと即発ガンマ線分光実験も当時からやられていたもので、その元に帰ったと言えます。しかし、J-PARCでの世界最高強度のパルス中性子ビーム施設や当時なかった本格的高分解能多重ガンマ線検出装置など、上記特会事業により優れた実験施設が完成した訳で、世界的に見ても核データ測定、核構造、分析化学研究を行う有利な条件が整いました。私がタンデム加速器施設で実験を始めた時は、実験装置としてビームラインとNaIのアンチコンプトンガンマ線分析器1台だけでしたから、タンデムにしる、JRR-3、J-PARCにしる世界トップクラスの環境を残すことが出来たと自負しています。勿論それらの開発に当たり、多くの方との共同作業があった訳です。

### 3. 最後に

思い出話はこれまでにしまして、最後に、最近私が感じていることを紹介させていただきます。年を取って私も芸術に関心が出てきましたが、最近思うことは科学も芸術も独創性発揮の場として共通しているということです。実験をやって研究成果にまとめるプロセスは、芸術作品を創造するプロセスと似ています。皆さん創造性を発揮して、優れた芸術作品（研究成果）を生み出して欲しいと思います。一方で、研究する上で実験施設や装置が必要ですが、身近なJ-PARC、JRR-3、タンデム施設は、核データ、核構造、核種分析という異なる分野にまたがっていてマシンタイムの調整に手間がかかり、複雑な

装置の維持管理に手がかかり、維持費もかかるわけですから、運営は容易ではありません。内にあってはこれらの装置を旨く運用し、自分たちの成果を出しつつ外部ユーザーにも使って貰うことで装置の善管義務と予算獲得を果たし、また外にあっては自分たちの成果を出すことで装置維持にも貢献する姿勢が必要です。要は、お互いがそれぞれの立場を理解し周囲と良い人間関係を築き協力し合う、お互いに相手の研究を尊重し、また何より自ら優れた研究成果を出すことで、全体に貢献するという意識を持つことが大事だと思います。

以上でタンデム加速器、JRR-3 原子炉、J-PARC 加速器における原子核科学実験施設とそれらを用いた核構造・核データ・分析化学研究について紹介しましたが、勿論これらの建設・維持・管理・実験は以上で紹介させていただいた方々及び施設側の方々のご指導とご支援によるもので、この場を借りて改めて心より御礼申し上げます。現在私は原子力機構の嘱託の身分です。いましばらくは、核データ分野を中心に貢献していきたいと考えていますので、今後ともよろしく願いいたします。