

加速器・放射線との 50 余年



馬場 護
Baba Mamoru

1. はじめに

筆者にとって加速器や放射線と関わるきっかけは、東北大学物理学科3年の時、大学祭の展示公開でシンクロトロンの説明を担当したことであった。4年の研究室配属の際もバンデグラフ加速器を有する森田研究室を選び、以来50余年にわたって加速器と放射線に付き合うことになった。森田研では加速器を用いた原子核物理実験を教わりつつ、イオンの荷電変換実験にも取り組んだ。D1終了後の1970年、森田先生の紹介で工学部の原子核工学科（現量子エネルギー工学科）の助手になり、以後、静電加速器とサイクロトロンを用いて中性子核データや放射線計測、中性子場の開発、ビーム応用等に携わった。主な足取りを振り返ってみる。

2. 東北大学工学部時代

原子核工学科では百田研究室（炉物理）の所属で、高速炉体系での中性子スペクトルと中性子核データの測定が研究テーマであった。前者は自作の表面障壁型 Si 検出器を用いて高効率の ^6Li サンドウィッチカウンターを製作して順調に進んだが、後者は外部施設を借用しての実験で進展ははかばかしくなく、自前の装置が欲しいと考え始めた頃、学科で申請していた高速中性子実験室（FNL）の建設予算が認められ、その建設に加わるようになった。

2-1 高速中性子実験室（FNL）

中性子発生装置は米国 RDI 社（当時）製の 4.5 MV ダイナミトロンというシングルエンドの静電加速器で、中性子 TOF 用に大電流イオン源とナノ秒パルス化装置を搭載していた。

予定より遅れて大学が引き取ったが、加速器本体、特にイオン源とパルス化装置はなかなか予定どおりに動かず、まずは加速器を軌道に乗せることが最優先課題であった。この頃、米国アルゴンヌ国立研究所が一足先に同規模のダイナミトロンを導入して改良に成功していたので、百田先生は同所の友人ラングスドルフ博士をアドバイザーとして招聘された。同氏の滞在は3か月のみであったが、彼の詳細なアドバイスは非常に有益で技術スタッフの努力と相まって加速器は次第に安定となり、筆者らも実験に取り組めるようになった。同氏は中性子物理の世界的な研究者でもあり、研究の面でも多くを学んだ。

このように、加速器にはかなり苦労させられたが、順調に動けば自由度が大きく、落ち着いて研究に取り組める等、苦労を補って余りあるものだったと思う。また、加速器トラブルの際は、施設間での経験の共有が有益で、精神的な支えにもなってくれた。

2-2 中性子散乱実験

FNL は名前のとおり高速中性子実験を目的とし、筆者は TOF 法を用いて中性子の核反応、特に2次中性子の散乱角ごとのエネルギースペクトル（二重微分断面積：DDX）の実験に取り組むこととした。中性子 DDX は核融合炉や中性子応用に重要である

が、実験データは 14 MeV と中重核に限られていた。筆者は先を行く欧米諸国や旧ソ連邦の後塵を拝するのは避けたいとの思いから、手薄な数 MeV の領域での Be, Li 等の軽核から実験を始めた。

しかし、いざ実験を始めてみると、良質の DDX データを得るには、2 次中性子を広いエネルギー範囲にわたって高いエネルギー分解能で測定する必要がある、それには中性子ターゲットや検出器、測定回路、遮蔽系及び実験データの補正法等、多くの課題があることが分かってきた。無謀にもいきなり最も難しい実験に取り組むことになったが、乗りかけた船と覚悟を決め、学生諸君に分担してもらいながら課題に取り組んだ。一歩ずつではあるが改善を進め、1978 年英国での国際会議で Be に関する DDX 実験の結果を発表するところまでこぎつけた。この実験中に米国から Be の DDX に関する論文が出て出鼻をくじかれたりもしたが、幸いこの発表は好意的に受け止められ研究を続ける元氣を得た。

その後、手法の改善を図りながら核種とエネルギー点を拡大し、1990 年代半ばまでに、 ${}^6\text{Li}$ から ${}^{238}\text{U}$ までの約 30 核種について、0.55 MeV から 18 MeV までの種々の中性子エネルギーにおいてデータを取得した¹⁻³⁾。これらのデータは比較的良好なエネルギー分解能でほぼスペクトル全体をカバーしていたので、国内外で核データの評価や核反応モデルの検証に利用された。こうした系統的 DDX データは世界初でもあり、松山成男氏（現東北大学教授）と共に 1995 年度原子力学会特賞を受賞した。

こうした成果を得るには様々な工夫が必要であったが特に重要だったのは、1) 中性子発生ターゲットの改良、2) 中性子検出器 (NE213) の高速化と $n \cdot \gamma$ 弁別の改良、3) 複数ディスクリレベルによる時間分解能の向上、4) ポストチョッパーによるパルス幅の改善⁴⁾、5) 14 MeV 中性子用実験体系の採用、6) 多重散乱・サンプル依存バックグラウンドの補正法の開発、等であった。2), 3) は後のサイクロトロンでの実験にも非常に有効であり、4) は加速器本体に手を加えずにパルス幅を改善する試みで 2), 3) と相まってエネルギー分解能を飛躍的に改善した。5) はダイナミトロンで 14 MeV 専用加速器以上のエネルギー分解能を得るために、14 MeV 中性子の場合 97.5 度方向への中性子を用いる方式であり、

実験配置が面倒になるものの効果は非常に大きかった。

これらはまさにコロンブスの卵で、分かってみれば当たり前のことにも見えたが、1 つの課題を解決すると次の課題が見えるという具合で、着実に物事を進めることの大切さを学んだ貴重な経験だった。

また、この間、融合特定研究やトリウム炉に関する特別科学研究費から種々の支援を受けられたことや、大阪大学に建設された強力 14 MeV 中性子源での高分解能 DDX データに刺激されて研究を加速することができたこと等の幸運にも恵まれた。こうした中で、キャッチアップ状態を脱し世界のトップグループとしての自信を持てるようになった。

2-3 グリッド電離箱とブラッグカーブカウンター

DDX 実験が軌道に乗ってきた 1980 年代半ばごろ、研究室のゼミでグリッド電離箱（以下 GIC）は測定試料に対してほぼ 4π の立体角を持ち、陽極からエネルギー、陰極から放出角度に関する情報が得られることを知った。新しいテーマを考え始めた時期だったので、GIC を用いて (n, α) 反応の実験に取り組むことを考えた。 (n, α) 反応はターゲットを厚くできないため実験は難しく、重要性にもかかわらずデータは貧弱であった。

そこで、14 MeV 中性子による α 粒子（ ~ 20 MeV）までを測定すべく、学生の伊藤伸夫氏（現 J-PARC センター）と 10 気圧までの高耐圧 GIC を設計・製作して実験を始めた。しかし、Ar ガスでのテストは順調だったものの、本命の Xe ガスでは動作が不安定で実用に耐えなかった。原因はなかなか特定できなかったが、Xe ガスの電子流動速度が小さいために電荷収集が不純物に阻害されるためと推測し、検出器の浄化とガス出し、ガスの純化を丹念に進めたところ、ようやくほぼ満足できる安定性と分解能を達成することができた⁵⁾。

これによって、数 MeV の閾エネルギーから 14 MeV までの中性子について (n, α) 反応 DDX のデータを Fe, Ni, Cr, Cu 等の構造材核種⁶⁾と C, N, O 等の生体構成元素について得ることができた。後者は測定法を工夫して、薄膜ではなくガス状の試料を用いて得たデータである。この縁で (n, α) 反応に関する IAEA（国際原子力機関）の専門家会議（RCM）を 1995 年、東北大学で開催した。

なお、ガス試料を用いた実験で中性子ビームの形状を知る必要が生じ、CH₂ 箔とイメージングプレートと組み合わせた方法を試みた。解像度は不十分ながらも実用に耐える画像を得ることができ、コンバーターを変えてサイクロトロンでも利用できた。

GIC で、グリッド・陽極間距離を陰極・グリッド間距離より十分狭めると、陽極信号の形状がその粒子のブラッグカーブを反転したものになり、ブラッグカーブカウンター (BCC) として利用できる。BCC の波形信号を解析すると、粒子のエネルギーと電荷、質量を単一の検出器で求めることが可能となり、後にサイクロトロンの実験で重粒子の測定に利用した。

2-4 中性子校正場の開発とその利用

1986 年、サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) に中村尚司先生が着任され、FNL での単色中性子を中性子検出器の特性試験に使いたいというお話があり、中性子のエネルギーや強度、バックグラウンド等、場の特性測定を中村研と共同で進めた。中性子束の測定には、検出効率がよく分かっていて広いエネルギー範囲に対応できる平行平板型の ²³⁵U 核分裂計数管 (FC) を用い、もう 1 種の検出器とのダブルチェックを行った。新たなエネルギー点も加えて、8 keV から 15 MeV の 7 エネルギー点について値付けを行い⁷⁾、利用に供した。

この中性子場は、中村研の他、国内の研究機関や検出器メーカーに利用された。当時、国内の第 1 次標準場は電子技術総合研究所 (現産業技術総合研究所) に設置されており、FNL は第 2 次標準場という位置づけであった。

なお、15 MeV 中性子の値付けには反跳陽子テレスコープ (PRT) を用いたが、相反する検出効率とエネルギー分解能の両立を図るため、陽子ラディエータと陽子検出器を位置敏感型として、0 度近傍の反跳事象を選別する方法を試み有効性を確認した。

3. TIARA サイクロトロンでの実験

1980 年代末頃に日本原子力研究所高崎研究所 (現量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所) で建設中のイオン照射研究施設 (TIARA) に 40~90 MeV の ⁷Li(p, n) 単色中性子発生装置を設置する

計画が進められていた。中高エネルギー加速器の遮蔽ベンチマーク実験を目的としたもので、筆者も中性子束測定の担当として、プロジェクトに加わるようになった。

そこで、FNL で経験のある PRT の試験を始めたが、20 MeV 以上の領域では陽子検出器を中性子ビームから遮蔽する必要のあることが分かった。そこで、陽子検出器を中性子ビーム軸上に置いてシャドーパーで遮蔽し、アニュラー形状の CH₂ 板をシャドーパー周辺に置くアニュラージオメトリーなる配置を考えた。この配置では検出効率とエネルギー分解能を高く保つことができる。TOF 法を併用することで 40~90 MeV 陽子に対する中性子束と中性子スペクトルを導出した⁸⁾。この値は遮蔽ベンチマーク実験はじめ、中性子検出器の校正や中性子による放射化等この場を用いた実験の基準として用いられた。

4. CYRIC へ

1999 年 10 月、CYRIC に移り放射線管理研究部を担当することになった。CYRIC⁹⁾ はサイクロトロンの多目的共同利用を目的とする学内共同教育研究施設で、理学 (x2)、薬学、医学、工学の分野からなる学際的組織である。CYRIC では理工学分野と共に PET を用いた生命科学の共同利用研究が活発に進められていた。放射線管理研究部は工学研究科の協力講座になっており、それまで担当していた学生・院生も一緒に移籍できたので、研究を継続する上で誠に幸いであった。

CYRIC は放射線管理に関する東北大学の元締役でもあり、放管は CYRIC のみならず学内全般の放射線管理、教育訓練等の学内の調整や対外的な窓口も担当した。このため、大学等放射線施設協議会や規制当局への大学側窓口等の対外的な役割も担っていた。学内放射線管理の実務は放射線管理室が担ってくれたが、学内での RI のトラブル等の際は窓口として胃の痛い場面も少なくなかった。こうした時に全国の放射線関連機関や主任者部会等との繋がりがあことは有益で救いでもあった。

また、当時は 2004 年の国立大学法人化を控えていた時期であったので、全学の安全管理体制の変更等についての学内の調整や大学側との折衝等様々な作業が必要であった。放射線障害防止法の大規模な

改正への対応とも重なり、2000年代初頭は多忙な時期であった。

筆者がCYRICに異動した当時、大型サイクロトロンの更新とPET用小型サイクロトロンの新設、周辺装置の更新等が最終段階にあり、ほどなく実験を開始することができた。新サイクロトロンはTIARAと同じ住友重機械930型で軽重イオンを加速でき、ビームの間引き装置、ビームスウィンガーと中性子TOF設備を完備していた⁹⁾。そこで、筆者は1)サイクロトロンビームによる中性子生成、フラグメント($Z \geq 3$ の2次粒子)生成、放射化等の核反応データ、2)サイクロトロンのビームを用いた加速器BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)の開発と半導体素子の照射試験、及び3)放射線計測法の高度化の3つを研究の柱に据えた。3)ではフラッシュADCを用いたデジタル信号処理手法の導入と応用、高速ガスカウンターや放射線分布測定法の開発、医療に伴う被ばく線量評価等を進めた。

4-1 中性子核反応データの測定研究

ビームスウィンガーとTOF設備を用いて、20~70 MeV領域での(p,n)、(d,n)反応による中性子の角度ごとエネルギースペクトルを系統的に測定した。このTOFシステムは実に強力で、スペクトル全体を良好なエネルギー分解能でカバーした新しい質のデータを得ることができた^{10,11)}。データは、加速器BNCTの設計で用いるTa, W(p,n)反応や核融合炉材料試験中性子源IFMIF設計用の^{nat}Li, C, Fe, Cu等の(d,n)反応¹¹⁾を含み、反応モデルの改良にも利用された。

また、2-3に述べたブラッグカーブカウンター(BCC)の波形信号にデジタル信号処理法を適用して、粒子のエネルギー、電荷、質量を導出する方法を開発し、エネルギー・TOF法を組み合わせることで、数10 MeVの陽子、中性子による^{6,7}Li, ^{7,8}Be等のフラグメントのスペクトルデータを初めて求めることができた^{12,13)}。このデータは4-3で述べる宇宙線中性子による半導体素子の誤作動(ソフトエラー)の原因として関心が持たれていたものである。この研究で、萩原雅之氏(高エネルギー加速器機構(KEK))、佐波俊哉氏(同)と共に平成22年度日本原子力学会論文賞を受賞した。

4-2 サイクロトロンBNCTの設計研究

BNCTは原子炉中性子を用いて行われていたが、立地や中性子エネルギーの最適化、他の治療法との併用等の観点から加速器ベースのBNCTが要望されてきた。低エネルギー加速器を用いた計画がいくつか進められたが、ターゲットや中性子発生量の問題から実現に至っていなかった。

筆者らは数10 MeV以上の陽子を用いれば中性子発生効率が大幅に高まることに着目し、CYRICの新サイクロトロンを含む既存の加速器を前提に、シミュレーションと実験によって設計研究を進めた。正常組織に損傷を与える高速中性子成分を抑制しつつ深部腫瘍や非開頭での治療のために熱外中性子を 10^9 個 $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 以上の強度で得ることが鍵であった。

検討の結果、~30 MeV以上の陽子をTa, W等の重核ターゲットに入射させ、90度近傍への中性子を、Fe減速材と熱外中性子場用に多用されているFLUENTALという中性子整形体で減速することで条件を満足でき、更に垂直入射等治療にも有利となることを示した¹⁴⁻¹⁶⁾。この設計では、ビームの飛程より薄いターゲットを用いてターゲットの熱負荷を低減すると共に熱的・機械的安全性も確認し¹⁵⁾、更に減速材の模擬体系を用いた実験でシミュレーション結果を確認した。これらの成果は、CYRIC他研究部、医学系研究科、三菱重工グループとの共同研究によって可能となったが、特に当時大学院生であった米内俊佑氏(現放射線医学総合研究所)によるところが極めて大きい。これらの成果にもかかわらず、実用化プロジェクトの実現の前に退職となってしまったことは返す返すも残念である。

加速器BNCTとしては、京都大学複合原子力研究所等で開発が進められていたシステムが2020年医療機器及び医薬品の製造販売承認を取得し、部分的ながら治療の保険適用が認められたとのことである。このシステムもやはりサイクロトロンのビームを用いるもので、長年の努力に敬意を表すると共に、日本独自の技術として更なる発展を期待したい。

4-3 半導体素子のイオン・中性子照射試験

イオン照射試験は宇宙関連企業の友人からCYRICの軽重イオンビームを宇宙用半導体素子の試験に使えないかという話から始まった。大気中照射を目指して共同研究を始めた。素子を破壊しない程度の弱

く一様なビームを得るために、ビームの整形機器とモニター、電流計測器等を整備し、加速器グループの協力を得て、陽子から Xe までの軽重各種イオンによる照射を実現し、試験に提供した。

また、半導体素子の高密度化によって宇宙線起源中性子による誤作動（ソフトエラー）が地上レベルでも問題となっており、CYRIC で中性子照射試験の希望が寄せられていた。 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 中性子を用いて 30~70 MeV 領域での照射試験を第 5 ターゲット室で開始したが、試験効率を上げるために、中性子強度の大幅な増大が望まれるようになった。

4-4 大強度 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 中性子源の整備¹⁷⁾

前述の事情により、当時空いていたビームポートを利用して大強度の ${}^7\text{Li}(p,n)$ 中性子源を新しく設置する計画を立てた。測定器研究部の岡村弘之教授（故人）の全面的協力を得て、世界トップの中性子強度を実現し照射試験の効率を大幅に高めることができた。これは、固定遮蔽体厚さを最小限として中性子強度を稼ぎ、必要に応じて遮蔽を追加・変更できるようにモジュール構造を採用することで可能となった。当初の遮蔽体で十分な質も達成でき、またモジュール構造によって荷電粒子による照射も可能となる等、特色あるビームコースとなったのは幸いである。

4-5 放射線計測の高度化

進展が目覚ましく実用域に入っていた高速フラッシュ ADC (FADC) を導入して、波形データを収集して解析することで、波高信号だけでは不可能な多様な情報を得るデジタル信号処理手法 (DSP) を開発すると共に、検出器自体を高速化して核融合プラズマや大強度パルスビームの計測に必要な MHz 以上の高速計数等の実現を目的とした。これらは筆者が参加した特定領域科研費等で要請された課題でもあった。

検出器としては、平行平板型雪崩検出器 (PPAC) をベースに、位置敏感型やマイクロメガ型を新たに製作し、基本特性を測定し、実用化を進めた。

DSP 手法に関しては、BCC の波形データの収集と解析を実用化すると共に、シンチレータを用いた $n\cdot\gamma$ 弁別やパイルアップ信号とノイズの識別・除去等の処理をソフト的に可能とした。当時、高速フ

ラッシュ ADC はまだかなり高価であったが、信号処理における新たな可能性を開いたように思う。

医療に伴う被ばくの評価でもいくつかの成果があったが、筆者が事務局を仰せつかった PEM（乳房用 PET）の開発プロジェクトでは、実質的な貢献ができず、申し訳なく残念であった。

5. 退職後の 10 余年と福島第一原発事故等

2008 年 3 月に東北大学を定年退職したが、残務もあって 3 年ほどは大学に通い、国内外の学会や会議等にも出席した。そろそろ一区切りをつけようと思っていた時に、東日本大震災と福島第一原子力発電所事故が起こった。

筆者にとって福島原発事故は大きな衝撃であり、その後の生活でも大きな比重を占めた。5~6 月は福島の原子力災害現地対策本部に足を運び、事故対応の状況を目の当たりにした。初夏頃からは一般市民や小中高生、教員等を対象に事故と放射線について講演や出前授業を行う機会が多くなった。

当時、ネットやメディアでは、「放射線は少なくとも害がある」、「低線量被ばくの影響は分からない」等の意見が幅をきかせ、放射線の影響を懸念する声があふれていた。このような状況で何をどう伝えるべきか、考えさせられた。筆者なりの結論は、原子・原子核ではなく身近なレントゲン写真から話を始めて、自然放射線と人体の修復力や免疫力に触れ、少しずつの被ばくの影響は少ないことを述べるという流れで説明しようということであった。言葉と題材を選びながらであるが、小学校低学年から大人まで、この流れで話を進めた。幾分でも伝わったことを願いたい。

福島原発事故から約 2 年半後の 2013 年 10 月、茨城県東海村の J-PARC センターに勤務することになった。J-PARC では同年 5 月、装置の誤作動でごく微量ながら放射性物質が施設外へ漏洩し、運転停止を余儀なくされており、事故からの回復の支援が筆者に与えられた任務であった。事故原因は「リスク評価と対応策が不十分だったこと」と分析され、安全管理体制の見直しと安全文化の定着が基本的課題であった。安全文化は一見当たり前のことながら、結局は安全意識の定着度の問題となるが、日本の大学や研究機関で安全意識が十分でなかったことは否

定できない。そのため、この面で先行している欧米の研究施設や国内企業の努力を参考に、安全の担保に向けて日常の行動を点検する毎日で、筆者も最先端の研究に触れながら、多くのことを学んだ。

2015年に仙台に戻り、以前と同じように学協会に参加し海外出張もこなしながら、出前授業や講演を行った。また、福島で住宅内外の放射線量を測定して結果を説明する活動にも新しく参加した。この中で住民から聞いた話には身につまされるものが多いこともあり、事故影響の深刻さを改めて感じた。また、多くの人が楽しみにしている山菜やキノコの多くが、食材の放射性物質基準のために食卓に載せられなくなっており、早急に改められるべきものと感じた。福島事故については、海外や国際会議でも話をする機会があったが、台湾国立大学での食材汚染に関するシンポジウムは、懐疑派の消費者団体を招待し、また日本からの輸入食品による内部被ばくを詳細に検討し μSv オーダーと評価した報告等、ユニークな取組みが印象的であった。近年このような機会はめっきり少なくなったが、風化のためではなく復興の進展によるものであることを願いたい。

昨今はコロナ禍で様々な活動が抑えられており、一日も早い終息を切に願う。

6. おわりに

振り返ると随分いろいろなことに手を染めてきたと思う。中には筆者は単にアイデアを出しただけというものも少なくないが、このような多くに関われたのも人と環境に恵まれたからに他ならず、お名前を割愛させていただいた方々を含め、お世話になった方々に心から感謝申し上げたい。中でも、研究室で一緒に苦勞してくれた学生諸君の協力には感謝しかない。多くの優秀な学生諸君に恵まれたことは大

学教員冥利に尽きるもので、これによって新しいことに取り組むことができたと思う。

また、研究者になり立ての頃から右肩上がり時代のとなり、研究費や機会等に恵まれたことも非常に幸運であった。現在は逆の厳しい状況と聞すが、研究教育は国の礎であり、優先的に対処されることを切望したい。

最後に今回の機会を与えていただいた本誌編集委員会に、毎号の興味ある記事と共に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) S. Chiba, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **22**(10) 771-787 (1985)
- 2) M. Baba, *et al.*, *ibid.*, **27**(7), 601-616 (1990)
- 3) M. Baba, *et al.*, *ibid.*, **31**(8), 757-767 (1990)
- 4) S. Matsuyama, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, **A348**, 34-40 (1994)
- 5) N. Ito, *et al.*, *ibid.*, **A337**, 474-485 (1994)
- 6) M. Baba, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **31**(7), 745-747 (1994)
- 7) M. Baba, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods.*, **A376**, 115-123 (1996)
- 8) M. Baba, *et al.*, *ibid.*, **A428**, 454-465 (1999)
- 9) 織原彦之丞, *Isotope News*, **722**, 42-46 (2014)
- 10) T. Aoki, *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **146**, 200-208 (2004)
- 11) M. Hagiwara, *et al.*, *Fusion Sci. Technol.*, **48**, 1320-1328 (2005)
- 12) M. Hagiwara, *et al.*, *Radiat. Prot. Dosim.*, **126**, 104-108 (2007)
- 13) M. Hagiwara, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **49**, No 5-6, 571-587 (2012)
- 14) S. Yonai, *et al.*, *Med. Phys.*, **30**(8), 2021-2030 (2003)
- 15) S. Yonai, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**(5), 378-383 (2008)
- 16) Y. Tahara, *et al.*, *ibid.*, **43**(1), 9-19 (2006)
- 17) M. Baba, *et al.*, *Radiat. Prot. Dosim.*, **126**, 13-17 (2007)

(東北大学名誉教授)