

## 私の核データ活動

京都大学原子炉実験所

堀 順一

hori@rri.kyoto-u.ac.jp

私は平成 15 年 7 月に京都大学原子炉実験所に助手として赴任いたしました。京都大学原子炉実験所には中心的な実験装置として京都大学研究炉 (KUR) があります。KUR は全国共同利用施設として 40 年近い歴史を持った施設です。私はその KUR の保守・管理を行っている研究炉部に所属しており、原子炉の運転等に携わっています。また、一方では実験施設管理部も兼務しており、「中性子発生装置」と呼ばれる電子 LINAC 施設のスタッフでもあります。研究・教育においては原子力基礎工学研究部門に所属しており、主に電子 LINAC を用いた中性子 TOF 実験による核データ研究と院生実験の指導を行っています。

今回、光栄なことに核データニュースへ新人紹介としての記事を投稿するようのご依頼を頂きましたので、本稿では自己紹介を兼ねてこれまでの私の核データ分野での活動内容を簡単に紹介し、京大炉電子 LINAC の宣伝を交えながら今後の抱負について述べさせていただきますと思います。

私が核データの世界と関わり始めたのは東工大大学院の修士課程に進学した平成 7 年からになります。修士・博士課程を通して井頭政之先生に御指導を仰ぎ、keV 領域の中性子捕獲反応の実験的研究に従事いたしました。東工大にある 3 UH-HC 型ペレット加速器によって加速したパルス陽子ビームによる  ${}^7\text{Li}(p,n)$  反応を中性子源として利用し、試料から放出される捕獲ガンマ線を大型コンプトン抑止型高純度ゲルマニウム検出器システムを用いて測定しました。大型コンプトン抑止型高純度ゲルマニウム検出器は相対検出効率 100%、エネルギー分解能は 1.33 MeV で 1.9keV を有し、周りをコンプトン除去用の環状 NaI (TI) 検出器で囲んであるスペクトロメータです。2s-1d 殻領域の奇-偶核である  ${}^{23}\text{Na}$ 、 ${}^{27}\text{Al}$  の幅の広い共鳴を測定対象として、試料から放出される捕獲ガンマ線を観測し、飛行時間情報と対応させながら、個々の共鳴から放出される捕獲ガンマ線に関するレベルスキームを完成させました。更に、捕獲ガンマ線の絶対強度を測定することにより、

共鳴の部分放射幅、全放射幅を導出し、Valence-capture 模型及び Semi-direct 模型による理論計算を行い、実験値と比較することにより、幅の広い共鳴からの電氣的及び磁氣的な双極子遷移機構についての知見を得ることができました。恩師の井頭先生には大変多くのことを教えていただきました。先生の訓示には「実験にはセンスが大事」、「ケーブルは命」、「加速器の整備は自分の手でやらないと実験は上手くいかない」といった名言が数多くありましたが、今までの 10 年間を通じて、それらの訓示が思い返される場面が何度もありました。そして、核データを提供することへの責任の重さ、厳しさを学ぶことができました。

平成 13 年 4 月から 15 年 6 月までの間、私は原研の博士研究員として核融合中性子工学研究室 (FNS) に在籍し、「核融合構成材料の放射化断面積に関する研究」というテーマに取り組みました。FNS 施設には最大  $4 \times 10^{12}$  n/s の中性子発生量を持つ強力な D-T 中性子源があります。このような施設を使える利点を生かし、核融合炉材料中で起こる荷電粒子逐次反応を経た放射化断面積の測定を行いました。荷電粒子逐次反応というのは、(n,p), (n, $\alpha$ ), (n,d) 反応等から放出された荷電粒子が再び材料中の原子核と反応して引き起こす 2 次的な反応のことです。逐次反応では中性子入射反応では生成し得ない核種、すなわち標的核の原子番号よりも大きな原子番号の核種を生成する点が特徴です。核融合炉構成材料の有力候補である低放射化フェライト鋼 (F82H)、バナジウム、FLIBE (LiF, BeF<sub>2</sub>) 等を対象にして、逐次反応を経た放射化過程によって長半減期核種が生成されることを実験によって実証し、それらの生成に関する実効的な断面積を測定しました。また、水素化合物との接触面では反跳陽子によって逐次反応が顕著に引き起こされることに注目して、核融合炉冷却水配管表面を模擬した実験を行い、配管表面に生成される誘導放射能の深さ分布を測定しました。一方、核融合炉の誘導放射能を計算するために開発された ACT-4 コードに荷電粒子逐次反応、多段階反応計算機能を追加する作業を行いました。荷電粒子逐次反応は中性子と荷電粒子の複合反応であるために、放射化量を概算するためには中性子反応断面積以外にも荷電粒子放出スペクトル、荷電粒子入射反応断面積のデータが必要となります。改良したコードを使って計算した値と実験で得た値を比較することによって荷電粒子データの検証も行えるという積分実験的な意味もある研究でした。他にも、核融合材料照射用に建設が計画されている重陽子加速器施設 IFMIF の構成材料に対する放射化断面積の整備を目的として、22~34 MeV の重陽子入射による放射化断面積測定を高崎研 TIARA 施設にある AVF サイクロトロンを用いて行いました。このように、原研での 2 年 3 ヶ月は、核融合炉開発を目的として、放射化法を用いた実験的研究を中心に核データと関わってきました。また、協力研究を通じて他大学の先生方や核融合分野の方々と共に実験に参加し、研究交流を深めることができたことは私にとって貴重な経験でした。

以上、私がこれまで行ってきた核データ研究について述べました。ここからは現在行っている京大炉電子 LINAC を用いた核データ実験の紹介と今後の抱負について書こうと思います。

京大炉電子 LINAC は 1965 年に設置され、KUR と共に 40 年の歴史を持った全国共同利用研究施設の一つです。年間稼働時間は 2000~2500 時間と多く、利用目的も中性子実験の他に、放射光、RI 製造、電子線照射など多岐に及んでいます。私は中性子実験グループを担当し、全国の共同利用グループの方々と共に実験に参加させていただいています。原研にいたときも感じたことですが、共同利用で来て下さる皆様には色々と教えていただくことが多く、大変ありがたく思っております。

LINAC で 30 MeV まで加速された電子ビームは水冷式の Ta (タンタル) ターゲットに衝突し、ターゲット内で発生する制動放射線によって中性子を発生させます。LINAC では 15 ns から 4  $\mu$ s のパルス幅で、繰り返し周波数は 300Hz まで選択することが可能です。発生した中性子は、Ta ターゲットの周囲を取り囲んだ水減速材によって減速され、熱中性子エネルギー付近にピークを持つマックスウェル分布と  $1/E$  スペクトルからなる中性子束を得ることができます。LINAC には飛行距離 12m と 20m に設けられた測定室へ通ずる二本の中性子飛行管があり、12m 測定室では全吸収型 BGO 検出器と  $C_6D_6$  検出器を使って中性子捕獲反応断面積の測定を行っております。本測定システムでは今のところ 0.005eV から 40keV 程度までの広い範囲での測定が可能です。私の場合、東工大では keV 領域、原研では MeV 領域を中心に行っていた測定を、現在では熱外領域から keV 領域まで拡張したことになります。また、京大炉電子 LINAC には鉛減速スペクトロメータ (KULS) というユニークな実験装置があります。核データニュース No.78 の 13 ページでも紹介されていますように、KULS は  $10 \times 10 \times 20 \text{cm}^3$  の大きさを持つ高純度鉛ブロック 1600 個からなる一辺 1.5m の立方体に組み上げられています。本装置に設けられた実験孔を使えば、中性子源から試料までの距離を数十センチに近づけることができるので、TOF 実験に比べて中性子照射量を格段に稼ぐことができます。これまでに核分裂断面積測定を中心に多くの成果が出ていますが、今後は微量不純物の定量法としての新たなテーマも見つかるのではないかと考えています。これまで紹介しました TOF 及び KULS 装置は、昨年京大炉を退官された小林捷平先生を中心に先人の皆様が築いてこられた貴重な財産です。昨年に小林捷平先生のご業績が日本原子力学会の学術業績賞及び特賞を受賞されたことは皆様のご記憶にも新しいかと思えます。このような輝かしい過去を持つ装置を引き継ぐことになった私は、オリンピックの聖火ランナーになったつもりで、研究の火を絶やさぬよう頑張らねば、という気持ちでおります。

入所して早くも 1 年半が過ぎてしまいましたが、LINAC 施設での経験を少しずつ重ねながら、 $^{129}\text{I}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Zr}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Pd}$  の中性子捕獲断面積の研究に取り組んでまいりました。 $^{129}\text{I}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{107}\text{Pd}$  は長寿命核分裂生成核種 (LLFP) の中でも重要度の高い核種で、これらの核種の分

離変換を研究する上で核データを精度良く測定することが望まれています。 $^{129}\text{I}$ については最終結果をなるべく早く論文に纏めたいと思っております。また、 $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ については、前段階として天然試料の捕獲断面積を測定しましたので、同位体不純物が断面積測定に及ぼす影響の検討にも役立てたいと思っております。これまでの実験で、「堀が LINAC を使うと加速器にトラブルが続出する」という不名誉なジンクスを作ってしまった。特に誤った操作をしたわけではないのですが、加速器は実験者を選ぶのでしょうか。どうやら私は LINAC に嫌われてしまったようです。「クライストロンの交換など加速器の保守作業にもっと汗を流せ！」という LINAC の声を聞いたような気がしました。これからは LINAC にご機嫌を直してもらえるように誠意を持って励みたいと思います。

さて、最後に LINAC を使った今後の研究展開について話題を移します。東工大の井頭先生をリーダーとして、平成 14 年度の文部科学省「革新的原子力システム技術開発公募」事業として「高度放射線測定技術による革新炉用核データに関する研究開発」が採択されて 4 年目を迎える来年度は、原研とサイクル機構が中心に開発した全立体角ゲルマニウムスペクトロメータが LINAC 施設に持ち込まれ、本格的な TOF 実験がスタートします。本実験は飛行距離 10m の位置に設けられた測定室を利用して行います。これまで 10m 測定室は放射化物保管用の部屋として使われていたのですが、レイアウトを大幅に変え、バックグラウンドを低減しつつ質の良い中性子ビームを得られるように改造・整備を行ってようやく測定室らしい姿に生まれ変わりました。測定試料としては  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  の三核種の密封試料の入手の準備を進めています。これらの試料については、本学の化学分析グループと連携しながら同位体組成の分析を自前で行うことも計画しており、これまで以上に高精度な核データを取得することが期待されています。その期待に添えるように、私も微力ながら本プロジェクトの推進に一層の努力をしたいと思っております。



中性子発生装置（電子 LINAC）施設の全景



クライストロン交換作業の様子