読者の広場 (VI)

核データと私

本稿は、本年 3 月で大学を退職された 4 人の方々に、長年の核データ研究に関する思い出などを書いて頂いたものです。

【編集委員会】

♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣

美しきスペクトルに魅せられて

大阪大学 名誉教授
高橋　亮人
akito@nucl.eng.osaka-u.ac.jp

1. 核融合中性子工学研究の開始

1960 年代末の大学紛争が契機だった。それまで、パルス中性子法による炉物理の基礎研究に取り組んでいた。中性子減速・熱化時間の測定、未臨界度の測定、中性子波伝播、などの研究である。特に、中性子波伝播は私の学位論文のテーマだった。しかし、大学紛争の混乱の中で、“自分の研究は、世の中の何の役に立っているのだろうか？”という疑問が湧いてきたのだった。原子炉は発電プラントとして一応完成していた。炉物理の研究はマンハッタン計画に続くアメリカの原子力開発で、その物理はほぼ完全に解明され体系化されていた。重箱の底をつつくような基礎研究に、むなしさを感じていた。

いろいろ悩んだ末に思いついたのが、核融合炉開発の到来をにらんで、先見的に DT 中性子によるトリチューム増殖・核発熱・材料損傷、などの問題に取り組む「核融合中性子工学」の開始であった。中村知夫、前川洋、関泰、などの原研 FCA のグループも同様な研究を開始していた。アメリカでは、リバーモア研の RTNS-I による実験、ウィスコンシン大の核融合炉設計研究（WUMAK-I）が始まっていた。ドイツでは、カールスルーエとユーリッヒでのリチウムブランケット基礎実験が始まっていた。

阪大手持ちの東芝製 200 keVDT 中性子源を用いて、DT 反応のα粒子と 14MeV 中性子の時間相関を利用する「関連粒子法」で、黒鉛や Li 平板体系からの中性子スペクトルを

測定する実験から手をつけることとした。研究予算は少なかったので、手作りと肉体労働が手段であった。中性子遮蔽体系は、枚方学舎から運んできた一個 60 キロの重コンクリートブロックを学生と積み上げて作った。一番苦労したのは、中性子検出器の作成だった。キシレンに POPOP などを添加してガラス容器に詰めてフォトマルをマウントして、「有機液体シンチ」をつくった。直径 10 インチほどの大型のものでないと中性子統計精度が、不十分だった。大型の手作りシンチでは、中性子とガンマ線の波形弁別が難しかった。結局 2 年以上毎日、波形弁別に取り組んだ。1973 年になって、黒鉛平板を用いて、関連粒子 TOF 法で、前方散乱角度の中性子スペクトルが約 5 メートルの TOF で見え始めた。この炭素の高速中性子散乱スペクトルは、ご存知のように、弾性散乱ピークと三本の非弾性散乱ピークを持つ。初めてこのスペクトルを自分の仕掛けた装置で見たときは、“本当に美しい”と思った。また、量子力学は本当だと思った。これで、速中性子の spectroscopy に病みつきとなってしまった。Li 平板体系のスペクトルを Sn コード（ANISN）計算と比較したとき、あまりに一致しないことに驚いた。Legendre 展開法に問題があり、精密輸送計算が必要であることがわかった。そのためには、二重微分断面積（DDX）を基本データとする計算コードが必要であることがわかった。Ii-関数による厳密解法をみつけて、NITRAN コードをカールスルーエに留学して開発した。しかし、DDX の実験データが不足していたので、既存の評価核データ（ENDF/B-IV、など）では対応できなかった。

この間、日本では科学研究費「核融合特別研究」のもと、百田先生、兵頭先生、椙山先生、住田先生、などが中心となって、中性子工学班が成長していった。供用装置として、新強力 DT 中性子源を建設する機運となった。阪大に「OKTAVIAN」が建設されることとなった。原研にも、「FNS」が建設された。

2. OKTAVIAN による DDX 測定

OKTAVIAN は、1981 年に ns パルスビーム系が完成した。また、回転ターゲット系は 1983 年に完成した。この装置により、以後 20 年ほどにわたり、核融合中性子工学の研究が、国内各大学・研究所、外国機関、との共同研究または、個別研究として展開した。

わたしは、“美しきスペクトルに魅せられた”のだろう、DDX データを可能な元素・同位体についてできるだけ多く測定収集し、理論解析してみたいと思っていた。14MeVDT 中性子が核融合炉内の構成材料に入射すると、いろいろな構成元素同位体と核反応して、二次中性子、二次荷電粒子、二次ガンマ線、を発生する。中性子やガンマ線の炉内輸送は核設計の基本である。また、荷電粒子は、核発熱、材料損傷の出発点である。この 3 種の DDX 基本データを取りきらねばならない。DDX スペクトルは、元素同位体毎に異なった個性ある顔を持っている。特に軽い核との反応では個性が強い。この異なる「顔」を実験の測定で割り出して、その特徴の理由（反応物理メカニズム）を解析するのがた

まらない魅力なのであった。

同時期に、東北大馬場グループという絶好の競争相手が国内に、また国外にもドレスデンやウイーン、リバーモアー、アルゴンヌ、ロスアラモス、などに DDX 測定の競争相手がいた。また、原研核データセンターからの委託研究もいただいた。これらのことが、楽しく長く実験を続けられた、もう一方の理由だったと理解している。

中性子の DDX については、D, Li-6, Li-7, Be-9, B-10, B-11, C-12, N, O, F, Al, Si, S, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Nb, Ag, Ta, Pb, Bi についてのデータがとられ、データ集として OKTAVIAN レポートに製本し関連研究者に配布した。また、電子データとして、NEA-Data-Bank や原研核データセンターに送った。これらのデータは、JENDL-3, ENDF/B-VI, FENDL-1,2, EFF-2 などの国内外の評価者に利用され、核データファイルの向上に大変役立ったと自認している。また、非弾性散乱の前平衡過程、直接過程、などの核反応理論の向上に役立った。

中性子 DDX 測定用には、OKTAVIAN の ns Pulse Target から 8 m の位置に固定角度（約 90 度）TOF-Spectrometer 装置を作った。中性子検出器は、10 インチ径の NE213 であり、今度はメーカーに発注して作成してもらった。2 段階の n-gamma 弁別で、15MeV から 0.3MeV をカバーでき、当時（1983 年）としては、世界最高のエネルギー分解能を誇り、計数率の高い装置となった。OKTAVIAN での DDX データを最初に発表したアントワープ核データ国際会議での、筆者の発表の様子を写真に示す。

写真：アントワープ核データ国際会議（1982 年）において、OKTAVIAN で初測定の DDX データ（リング試料）を発表する筆者

続いて、二次荷電粒子とガンマ線のDDXデータ測定に1987年ごろから取り掛かった。二次荷電粒子については、E-TOF 二次元分析を原理として、直径 1 メートルほどの真空容器内に CsI 検出器とシャドーバー・遮蔽コリメータからなる TOF 型 spectrometer を考案して作成した。Be, Al, Fe, Cu などのデータを測定した。また、2000 年ごろから、原研FNSのペンシルビーム14MeV中性子源を利用したDDX測定共同研究に取り組んでいて、Si-SSDの counter-telescope を用いる測定が有用であることがわかってきたので、この線で後輩たちが実験測定を続けることであろう。

もくろみは完璧にやりとげていないが、2004 年 3 月定年退官となり、実験の現場から離れた。まだ、手は動く気がするのだが。

♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣

核データと私

小林　捷平
k_koba84@tg8.so-net.ne.jp

1. はじめに

筆者が京都大学原子炉実験所に入所した昭和 40 年は、KUR が臨界を迎えて 1 年足らず経った頃であり、丁度 KUR 実験孔／照射場の特性実験として、これらの中性子束／スペクトル測定が計画／実施される頃であった。筆者も、この特性実験に参加することになり、主として放射化箔法による高速中性子測定に従事することとなった。これらの実験の中で標準となる高速中性子場との対比から U-235 や Cf-252 の核分裂スペクトルに関心をもつようになり、原子炉炉心燃料部、核分裂板や U-235 箔を用いた核分裂スペクトルの測定を行った。これらの実験を行う中で、当時では必要となる核データが必ずしも十分ではなく、特にエネルギー依存断面積となると十分な実測データが存在していない状況であった。このような問題がきっかけで、中性子測定のみならずスペクトル平均断面積の測定、これを通してのエネルギー依存断面積の積分評価が始まった。一方、昭和 40 年代中頃より中性子発生装置として原子炉実験所の電子線型加速器（ライナック）が稼動するようになり、その共同利用研究のメンバーとして中性子測定、核データ実験に参加することになった。

本稿では、これらの状況の中から、筆者が関わってきた代表的な実験研究を紹介したい。

2. 放射化断面積

放射化箔法に関する研究では、原子炉炉心内外、U-235 核分裂板、Cf-252 線源等のほか、1/E 中性子場、マクスウェル分布型熱中性子場を用いたスペクトル平均断面積、共鳴積分、熱中性子断面積などの測定を行い、いわゆるドシメトリー関連研究を進めることになった。放射化箔を用いたスペクトル測定では、多数組みの放射化箔データを駆使し、スペクトルをアジャストする手法を導入した解析法により、KUR の一連の実験孔／照射場スペクトルの特性を求め、照射フルーエンスの算出においても重要となるデータを提供することができた。本手法は、近畿大学炉（UTR-KINKI）、中国の研究炉（SPR）などの中性子スペクトルの導出にも活用し、各照射場の設定とその応用に寄与した。また、ドシメトリー研究の分野では、Cf-252 自発核分裂スペクトルや U-235 核分裂スペクトル平均断面積測定に共分散（コバリアンス）法を導入し、実験精度の向上を図ると共に、実験に対する誤差を詳細に評価することによって実測値に対する信頼度向上に寄与することが出来た。[1] こうした手法を取り入れて得られたスペクトル平均断面積は、基準となる実験データとしてドシメトリーファイルデータの積分的評価に活用されている。[2]

3. 原子炉材料に関する群定数評価

1967～1968 年頃になってライナック共同利用も軌道に乗り、その中で一連の原子炉材料に関する群定数評価研究がスタートした。まず最初に鉄を取り上げ、10cm×10cm×50cm の鋼材を積み上げた高さ 90～100cm、横 100cm、奥行き 90cm 位の大きな体系の中央部でパルス状中性子を発生させ、その挙動・輸送現象を 22m の飛行路を用いた中性子飛行時間（TOF）法によって測定した。得られた実験値を測定の基準値とし、ベンチマークデータとして輸送理論に基づく多群の計算結果と比較することにより、鉄に関する中性子断面積、とりわけ鉄の群定数の妥当性を検証することを目的とした。その後も、アルミニウム、ステンレス、ニッケル、チタンなど数知れない原子炉材料集合体中の中性子スペクトル測定と解析研究を実施したが、一連の実験研究の 1 つとして図 1 は酸化トリウムパイル中の中性子スペクトルの測定と解析の結果を示している。[3] MeV 領域ではトリウムの非弾性散乱データに起因すると思われる計算上の差異が見受けられる。

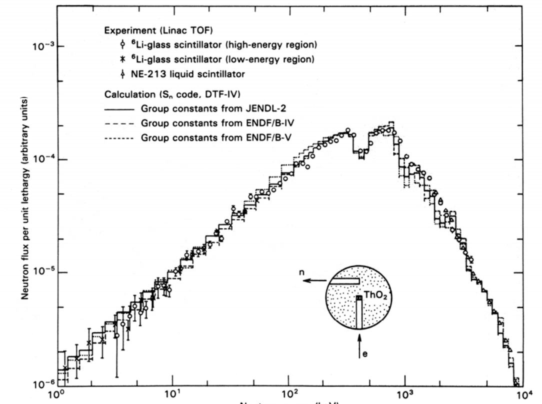


図 1　酸化トリウムパイル中の中性子スペクトル。

4. 鉄フィルターを用いた断面積測定

1973 年（昭和 48 年）には、米国レンスラー工科大学（RPI）より Robert C. Block 教授を原子炉実験所に客員教授としてお迎えし、電子線型加速器を用いた飛行時間分析法と鉄フィルターを組み合わせて得られる準単色の 24keV 中性子ビームを用いた実験が始まった。これは加速器の中性子ビーム中に 30～40cm にもなる分厚い鉄板層を挿入することにより、鉄の全断面積が極小となる 24keV 付近以外の中性子は遮蔽されて極度に透過率が下がるため、いわゆる中性子窓として飛行時間でエネルギー的に弁別された 24keV 中性子ビームを選択的に取り出すことができる。図 2 は、典型的な鉄フィルタービームのエネルギースペクトルの例である。このように鉄フィルター法では、フォアグランド実験と同時にバックグランドレベルが評価できるのみならず、加速器中性子源からのガンマ線バックグランドを抑えることにも効果がある。鉄フィルター法では 24keV のデータが一点得られるのみであるが、フィルタービーム実験の長所を生かした高い精度の定点測定データが取得できる。これらの特長に注目して、炭素、酸素、水素などの軽核を中心とした中性子全断面積に関する精密測定を実施した。[4] その後、鉄フィルター法をトリウムの全断面積測定にも適用し、自己遮蔽効果を取り入れた解析によってトリウムデータの問題点を明らかにしている。[5] また、鉄フィルター法は、後に述べる捕獲断面積測定にも適用され、その特徴を生かした実験研究は核データ実験において有用であった。

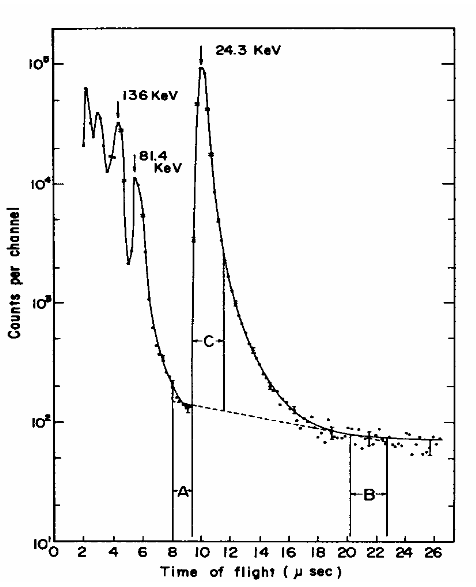
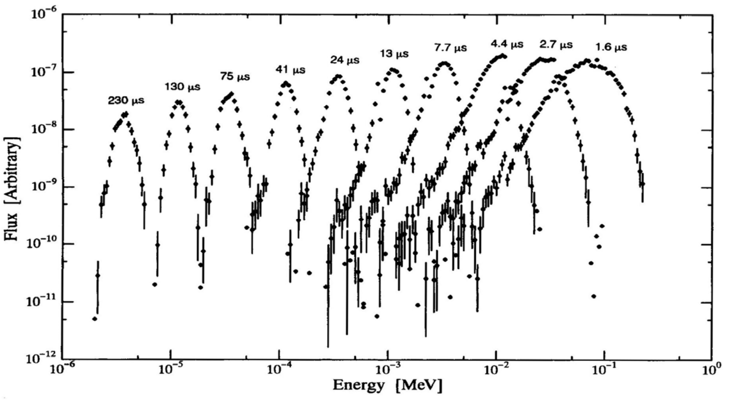


図 2　鉄フィルターの飛行時間スペクトル。A、B はバックグランド領域、C は鉄フィルタービームの信号領域。

5. 鉛スペクトロメータを用いた核データ実験

1991 年（平成 3 年）原子炉実験所に、電子線型加速器と組み合わせて鉛スペクトロメータ（KULS）が設置された。まず、その特性実験（中性子エネルギーと減速時間の関係、エネルギー分解能、中性子束強度／空間分布、スペクトル）を実施し、これと平行して MCNP モンテカルロコードによる特性解析を行った。[6] 図 3 は、KULS にパルス状中性子が打ち込まれた後の時々刻々の中性子挙動を示したもので、中性子がグループをなして時間と共に減速していく様子が見られる。KULS ではエネルギー分解能が半値幅にして 35%前後にもなるが、実験は中性子源から KULS 内数 10cm の位置で実施されるため、通常の飛行時間分析法に比べて中性子束が格段に高く、5m の飛行路をもつ通常の飛行時間



Calculation of time dependent neutron spectra in the Bi hole after the pulsed neutrons were driven into the Ta target.

図3　KULSにパルス中性子を打ち込み後の時々刻々の中性子挙動スペクトル。

分析法に比べれば数千～1万倍にもなる。アクチニド・超ウラン元素などの様に信号／雑音（S/N）比が悪くなる放射性試料や断面積が小さい核種の実験に適している。核分裂断面積測定では断面積値とサンプル量に μg×b≥1 の関係があれば実験が可能になると言われている。

こうした鉛スペクトロメータの特徴に注目して、マイナーアクチニド（MA）や長寿命核分裂生成物（LLFP）核種に関連する核分裂断面積や中性子捕獲断面積測定を実施した。まず、KULSを用いてNp-237の核分裂反応断面積の測定を行い、続いてAm-241, Am-242m, Am-243, Pa-231, Th-229の核分裂断面積、Tc-99, I-129, Np-237等の中性子捕獲断面積を熱中性子から数10keV領域において測定した。実験には、U-235の核分裂断面積を標準とし、電着膜形状にして試料と背中合わせ型の核分裂電離箱を用いた。KULSを用いた測定結果の一例として、図4にNp-237の核分裂断面積の結果を示す。評価値は何れもKULSのエネルギー分解能によってbroadeningされているが、JENDL-3.2以外は我々の測定値[7]と比べると著しく低くなっていることが分かる。他にもAm-243, Pa-231, Th-229などの核分裂断面積についても新たなデータを提供することができた。

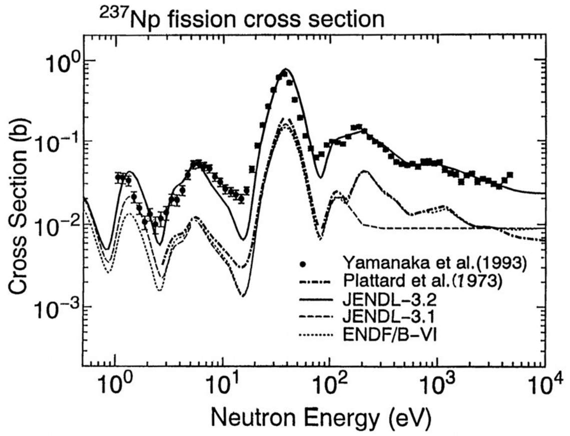


図4　低エネルギー領域におけるNp-237の核分裂断面積。

6. 中性子捕獲断面積測定

1970年代の中頃から、東京工業大学の山室信弘教授が十数年にわたって、京大原子炉

実験所のライナックを用いた中性子捕獲断面積に関する共同研究を推進された。今日の実験所における捕獲断面積測定の基盤は、山室先生のご指導と熱意によるところが大きい。

まず、山室先生を中心に、測定に使う 12.4m 飛行路用実験室、飛行管／コリメーション等の整備を行い、捕獲ガンマ線測定用検出器の開発、その応答特性の測定と解析に続き、数 keV から 100keV 近くまでのエネルギー範囲において Nb, I, Ho, Ta, Th, U などの原子炉材料を対象とした捕獲断面積測定が実施された。当時、TOF 法による捕獲断面積測定では、大型の液体シンチレータを用いることが一般的であったが、それ程場所をとらず扱いも簡便な C_6D_6 検出器が使われるようになった。図 5 は、成果の一例として U-238 の中性子捕獲断面積を示す。[8)] そのうち実験所においても密度が高い $Bi_4Ge_3O_{12}$ シンチレータを組み合わせた検出器系が開発され、絶対測定にも適用できるまでに至った。これらの検出器系を用いて、最近では MA や LLFP 核種の核データ実験を行っている。図 6 は Tc-99 の中性子捕獲断面積の測定結果を示すが、低エネルギー／共鳴領域において捕獲断面積、共鳴パラメータ、共鳴積分など有用なデータを提供することができた。[9)]

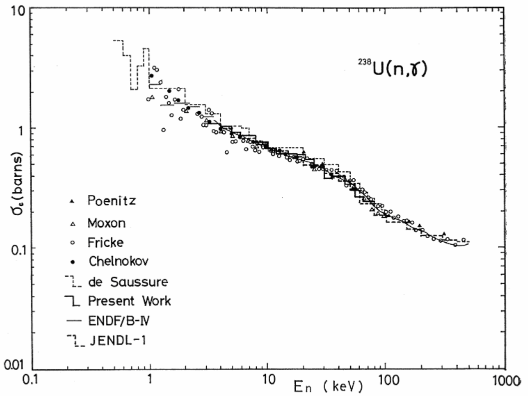


図 5　U-238 の中性子捕獲断面積

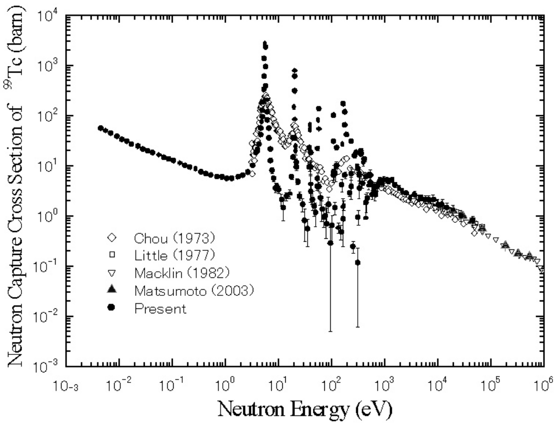


図 6　Tc-99 の中性子捕獲断面積

7. おわりに

原子炉及び加速器を中性子源として、永年にわたり放射化箔法や飛行時間分析法によって進めてきた核データ実験の概要を紹介したが、これらの実験は到底一人で成し得るものではなく、諸先生方を始めとした多くの皆様のご指導とご支援に負うところが大きく、この場をお借りして改めて心より御礼申し上げます。

参考文献

1) K. Kobayashi, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol.19, No.5, 341 (1982).

2) K. Kobayashi, *et al.*, "*JENDL Dosimetry File 99* (*JENDL/D-99*)", JAERI 1344 (2002).

3) K. Kobayashi, *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **99**, 157 (1988).
4) R. C. Block *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol.12, No.1, 1 (1975).
5) K. Kobayashi, *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **65**, 347 (1978).
6) K. Kobayashi *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.* A, **385**, 145 (1997).
7) A. Yamanaka *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol.30, No.9, 863 (1993).
8) N. Yamamuro, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol.17, No.8, 582 (1980).
9) K. Kobayashi, *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **146**, No.2, 209 (2004).

♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣

中性子核データとの悪戦苦闘の記録

東京工業大学　名誉教授
北沢　日出男
kitazawa@es.titech.ac.jp

月日は百代の過客にして、行きかう年もまた旅人なり。これは、「奥の細道」の冒頭の言葉であるが、中性子核データの仕事に関わった約 40 年間は、実に短く感じられ、この仕事を始めた頃がつい昨日のように思い出される。

1963 年に、東工大原子炉工学研究所山室信弘先生の研究室の大学院学生として、^{12}C における高速中性子散乱の実験を始めたのが核データ測定の最初の経験であった。実験は、コッククロフト・ワルトン加速器による 14MeV 中性子を用い、中性子飛行時間法によって散乱中性子を測定するものであった。研究室助手をしておられた神田幸則さんに、懇切丁寧に、徒弟的手法（？）で実験技術の指導を受け、ナノ秒領域の高速計測技術を体得した。最近は、空調の効いた実験室で、半導体素子からなる NIM 規格の高性能パルス回路とデータ処理用コンピュータを用いて実験を行うが、当時は、扇風機による空調と真空管を用いたパルス回路によるものであった。このような実験条件では、一般に、長い計測時間を要する中性子実験では、環境の温度変化による電子回路のシフトのために、精密なデータを得ることは非常に困難であった。また、限られた研究費の中で、同時計数回路や波高－時間変換器など、いくつかの電子回路は手製のものであった。しかしながら、電子回路の修理や検出器の設計・製作に、研究のかなりの時間を費やした経験を通じて、技術に対する貴重な理解を得た。神田さんの放射化法による Zr(n,2n)反応の研究のお手伝いをしたのもこの頃であった。

博士課程では、軽核や重核の(n,α)反応における α 粒子の非統計的放出に興味を持つようになり、$^{12}C(n,\alpha)^{9}Be$ 反応の α 粒子放出を観測した。α 粒子の検出には、CsI(Tl)を用いた。この結晶のシンチレーションパルス出力は高いが、光の放出時間が長いため、ガンマ線バックグランドをできるだけ減らすことが重要である。そのため、歯磨き粉を用いて結晶を薄片に磨き上げた。さらに、この実験では、バックグランドの陽子やガンマ線から α 粒子を弁別する必要があり、今では性能の良いものが容易に手に入る粒子弁別回路を、トランジスターやトンネルダイオードを用いて製作した。このようにして得られた α 粒子の角度分布を、ノックオン過程及び重粒子ストリッピング過程によって解析し、^{12}C の基底状態の α クラスター模型を裏付ける α 粒子換算幅を得て、J. Phys. Soc. Japan に発表した。また、重核 ^{141}Pr, ^{165}Ho, ^{175}Lu, ^{181}Ta, ^{197}Au の 14MeV 中性子(n,α)反応による α 粒子スペクトルを、半導体検出器を用いて計測し、原子核の蒸発理論の予測よりも高い温度の α 粒子放出を観測し、Nucl. Phys.に発表した。

これらの仕事は、中性子核データ研究に対する動機というよりも、むしろ中性子による原子核反応に関する興味から始めたものであった。その後の仕事も、一貫して、中性子を用いた原子核物理の研究にあったと思う。しかしながら、低エネルギー原子核物理学研究が下火になった今では、大学院で原子核工学を専攻し、原子炉工学の基礎理論を学び、このことによって、自分のこれまでの仕事を原子力コミュニティの活動の中に位置付けることができたのは非常に幸いであった。

1965 年頃、シグマ委員会の仕事のお手伝いもしている。東工大物理学教室の助手だった中嶋龍三さんから、「北沢君、中性子散乱核データの図を描くアルバイトをやってくれ」と言われ、雲形定規と曲線定規を渡された。そして、いろいろな原子核の弾性散乱の角度分布を手書きで完成させて中嶋さんに渡し、何がしかのアルバイト料を頂戴した。

“友のなす物理書一冊秋の暮”

中嶋さんが亡くなられたあと、奥様に差し上げた手紙の中で、「現代の錬金術」という中嶋さんの書いた本を頂いたことをお伝えした時の拙い句である。

大学院修了のあと、東芝総合研究所に就職したので、2 年ばかり核データ研究から遠ざかっていた。もっとも、東芝では、科学衛星搭載用の宇宙線検出器の開発を担当し、宇宙 μ 中間子の計測をしていたので、全く核データと無関係な仕事をしていたわけではない。

その後、山室先生の助手に採用して頂き、東工大で核データ研究を続けることができるようになった。14MeV 中性子を利用することができるので、最初に始めたのは、(n,γ)反応によるガンマ線スペクトルの測定である。当時、核子捕獲を経て原子核は E1 巨大共鳴状態へ励起することが、Brown や Clement らによって理論的に予測されていたので、14MeV 中性子の捕獲反応の観測によって、これらの理論の妥当性を調べることにした。そこで、捕獲ガンマ線を薄い鉛板を通すことにより対電子に変換し、これを有機シンチ

レータで検出することによって、捕獲状態からのプライマリーガンマ線を観測する検出器を製作した。この検出器は、付随 α 粒子放出を時間の基準にする中性子飛行時間法を用いて、^{238}U(n,γ)反応の観測に適用された。

この研究と平行して、Clement らの核子の直接－準直接捕獲模型に基づく計算プログラムを完成させた。模型計算によって、次のことが明らかになった。すなわち、(1) 14MeV 中性子によるプライマリー捕獲ガンマ線スペクトルを再現するためには、Lane の対称ポテンシャルの深さを約 200MeV にとる必要があり、この値は核子散乱から決定される値の約 2 倍であること、(2) 模型計算は、放射化法による 14MeV 中性子捕獲断面積の観測値よりかなり小さい値を与える。(1)に関しては、準直接捕獲模型における入射中性子と標的核の E1 振動モードの結合ハミルトニアンとして、核表面の核子との結合だけを考慮していることによるものであり、核内核子との結合が重要であることを示していた。早くからこのことに気づいていたが、ボローニアの Longo らに先を越されてしまい、残念な思いをした。(2)に関しては、それまでの全ての測定値は誤りであることが明らかになった。実験屋は、自分のデータを金科玉条のものとして比較的安易に公表するが、しばしば誤りを犯すということである。核データ評価者への教訓である。これらの結果の一部を、1975 年に東京で開催された EANDC トピカルミーティングで発表した。また、直接－準直接捕獲模型を、変形核へ拡張し、^{238}U(n,γ)反応の計算に適用した結果を、1976 年の Lowell の「中性子と原子核の相互作用に関する国際会議」で報告し、Nucl. Phys.に論文を発表した。当時、米国における中性子を用いた核物理研究者の層の厚さに驚いたのを覚えている。多くの原子核物理学の知識は荷電粒子を用いて得られるので、敢えて困難な中性子実験によって原子核研究をする必要がないということか、日本の中性子核データ・コミュニティへの核物理プロパーの研究者の参加は活発とは言えなかった。原子力エネルギー開発が世界的に厳しい局面に差しかかっている現在、何人かの往年の低エネルギー核物理研究者が、原子力エネルギー開発における中性子核データの重要性を、以前から認識していたかのごとく、積極的に発言するようになった。これは喜ばしいことであるが、奇妙な現象である。

1976 年、東工大原子炉工学研究所に、米国 NEC 社のペレトロン加速器の導入が決定され、織田暢夫先生の原子物理グループと山室先生の中性子グループで加速器の建設が始まった。一守俊寛先生と私が建設を担当した。この加速器は、日本におけるペレトロンの 1 号機であり、トランジスター化されたターミナルパルス装置を備えていた。建設当初、このパルス装置は放電に弱く、トラブル続きで、核データ研究に関する成果は何も出ない状態が続いた。このような状況の 1979 年に、文部省派遣在外研究員として、私の米国デューク大学物理学教室への出張が決まった。助手として採用されたばかりの井頭政之君が、私の留守中、ペレトロンを軌道に乗せ、中性子実験ができるようにするために、孤軍奮闘したようである。

デューク大学のトライアングル大学原子核研究所（TUNL）に滞在した 1 年半は、教育・研究生活の 40 年間の中で、とりわけ充実していた時であった。しかし、米国滞在当初は、楽しいと言うよりもつらい日々であった。度々パーティが開かれるが、英会話が下手で、最初は殆ど雑談に加わることができなかった。南部出身の人達は southern drawl で話し、なお一層、彼らとのコミュニケーションを困難なものにした。そうは言っても、私が絶えず焦燥感を抱いたのは別のことであった。人種の坩堝のような研究所の中で、自分のアイデンティティを確立するために何かをしなければならないという焦りであった。そんなわけで、偏極 MeV 中性子捕獲反応の実験グループに加わった。加速器は 15MeV の負イオンサイクロトロン・インジェクターと FN タンデムからなるサイクログラーフである。

TUNL での最初の仕事は、以前に開発した核子の直接－準直接捕獲模型計算プログラムを、偏極イオンビーム実験データの解析に適用できるように拡張することであった。6 ヶ月ぐらいこの仕事に集中し、計算プログラムを完成させた。ナショナリズムの精神から、このプログラムに、日本名で HIKARI と名付けた。HIKARI は、TUNL で観測された数多くの捕獲反応の分解能を、正しく予測することが確かめられた。それと同時に、研究所のスタッフから共同研究の要請を受け、米国滞在が楽しいものなった。その中で、特に思い出に残っているのは、偏極陽子による $^{30}Si(p,\gamma)^{31}P$ 反応の基底状態遷移に対する b_2 係数の問題である。HIKARI の計算は正の b_2 係数を指示するが、観測値は負である。他の a 係数及び b 係数の観測値は、すべて HIKARI の予測と一致していた。しばらく、理論と実験のこの食い違いについて悩んでいたが、光学ポテンシャルの中のスピン－軌道相互作用ポテンシャルに、虚数ポテンシャルを導入することによってこの問題を解決した。^{31}P の基底状態のスピンとパリティは 1/2+であり、$2s_{1/2}$ の陽子単一粒子軌道の強度が大きい。それゆえ、陽子入射チャンネルにおける光学ポテンシャルのスピン－軌道相互作用が b_2 係数に大きな影響を与えることが分かる。

この結果に基づいて、偏極中性子の $^{28}Si(n,\gamma)^{29}Si$ 反応のガンマ線スペクトルの測定を提案した。実験が始まってしばらくした朝、実験室に出て行くと、「ヒデオ、^{29}Si の基底状態への遷移に対する b_2 係数は、君の予測どおり、負になるよ」と核子捕獲実験グループのボスの Roberson 教授に告げられ、非常に興奮したのを覚えている。しかし、これですべてが解決されたわけではなかった。観測した b_2 係数を説明するためには、実数のスピン－軌道相互作用ポテンシャルと同じくらいの深さの虚数ポテンシャルを仮定する必要があった。このことは容易に受け入れられそうもなかった。今でも、この問題は、私自身の中に、未解決の問題として残っている。TUNL では、この外に、偏極中性子ビームを用いて $^{12}C(n,\gamma)^{13}C$ 反応の励起関数、ガンマ線スペクトル及び分解能を観測し、HIKARI を用いて解析することによって実験データを見事に説明すると同時に、アイソベクトル型の M1 準位を見出し、Phys. Rev.に発表した。

1981 年に帰国した時、いくつかの技術的問題は残っていたが、とにかくペレトロンは実験を開始していた。私自身は、中性子を用いた原子核物理学の研究を考えていた。陽子を用いた実験と競争しても勝ち目はないので、中性子を用いないとできないことをやろうということで、keV エネルギー領域の中性子捕獲反応機構の研究をスタートさせた。井頭君が S/N 比の良いガンマ線検出器を製作してくれたので、井頭君と共同で、幅の広い中性子共鳴準位からのガンマ線の観測を行なうことにした。共鳴幅と反応時間の間に不確定性関係が成立し、幅の広い共鳴準位は、簡単な配位構造から成り立っていると考えられる。また、共鳴準位の原子核構造には、標的核の低エネルギー励起状態の構造が強く反映されるであろう。

このことに着目して、^{13}C, ^{16}O, ^{24}Mg, ^{28}Si, ^{32}S の s, p 波共鳴準位からのガンマ線を観測し、強い単一粒子 E1 電磁遷移（s→p, p→s）を見出した。そして、このような強い電磁遷移は、単一粒子遷移が原子核の E1 振動モードからデカップルするために生ずることを明らかにした。さらに、^{9}Be, ^{24}Mg の d, p 波共鳴準位からの E1 電磁遷移（d→p, p→d）を観測し、これらの遷移は単一粒子遷移の予測よりもかなり弱いことを見出し、これは、芯偏極すなわち標的核の E1 巨大共鳴準位の励起により、中性子の有効電荷が変化するためであることを定量的に示した。また、^{24}Mg, ^{28}Si, ^{32}S のいくつかの幅の広い p 波共鳴からの強い E1 遷移は、粒子－振動結合模型及び非断熱的な粒子－回転結合模型を用いて共鳴準位を記述することにより、かなり良く表現できることを見出した。M1 遷移に対しては、アイソベクトル型のスピン・フリップモードの励起による定量的な説明がなされた。これらの結果は、Nucl. Phys.や Phys. Rev.に発表された。また、第 6 回（ルーバン）と第 8 回（フリブール）の「捕獲ガンマ線分光学と関連トピックスに関する国際シンポジウム」の特別招待講演で、これらの研究成果を報告し、会議のコンクルーディング・リマークの中で取り上げられたのを覚えている。

1980 年代の終わり頃、国立大学の原子力関係の組織、特に大きな予算を運用している付置研究所は、人事交流や研究業績に関して、日本学術会議の批判を受け、厳しい矢面に立たされた。東工大原子炉工学研究所も、ご多分に漏れず改革の渦に巻き込まれ、年取った者から人事の大幅な入れ替えが行われた。私は、1990 年に工学部電気電子工学科へ移り、レーザー生成プラズマを研究の対象にするようになり、中性子核データの仕事から離れることになった。その後、大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻へ移り、停年退官するまで 5 年ほど、プラズマの研究を続けながらペレトロングループと共同研究を行った。この間、^{12}C や ^{16}O の中性子非共鳴捕獲反応データを直接捕獲模型に基づいて解析し、直接過程が原子核のチャンネル領域で起こることから、相互作用ポテンシャルの非局所性を考慮することが重要であることを見出し、Phys. Rev.に発表した。このあと、いささか不本意な幕切れであったが、1999 年 3 月に停年を迎えた。

“紅を残し散り行く寒椿”

その年の 10 月に、防衛大学校の数学物理学教室に採用され、再び中性子核データの仕事に関わることになった。幸いにして、大学院修士課程の学生が私の研究室に入って来たので、学生と一緒に、東工大のペレトロングループと共同で $^{16}O(n,\gamma)^{17}O$ 反応の研究を行った。特に、434keV の幅の広い p 波共鳴準位の近傍における共鳴捕獲と非共鳴捕獲の干渉が実験で観測されたので、これを説明するために、バレンス捕獲模型計算プログラムを開発した。模型計算は、この干渉パターンを見事に再現し、第 11 回（チェコ）の「捕獲ガンマ線分光学と関連トピックスに関する国際シンポジウム」で、この結果を発表した。この仕事を最後に、2004 年 3 月に防衛大学校を停年退官した。

約 40 年間、中性子による原子核反応の研究に携わってきたが、私自身、JENDL-3 の核データ評価で、Al, Si を担当したことを除いて、核データ・コミュニティに貢献したという記憶はない。しかし、人は使命感のみで創造的な仕事をすることができるのであろうか。物理現象を明らかにする喜びや、新しい技術を模索する喜びなくして科学技術の未来を語ることはできないのではないでしょうか。若い人に対する魅力を失いつつある「核データ」や「原子力エネルギー」に、もう一度夢を与える鍵はそんなところにあるのかもしれない。2 度目の停年を迎えた今、為すべきことはなしたと全てを受け入れ、ゆったりとしたペースで、これまでとは少し異なった道を歩み始めています。

♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣

核データ研究と私

九州産業大学　工学部
的場　優
matoba@ip.kyusan-u.ac.jp

核データについては、長年多くの方々と研究を進め、議論を行ってきました。ここでは、背景となった大学時代の勉強の経緯と就職後の活動について概観します。多くの方々と共同研究を行い、その成果は皆で分け合うべき性質のものですが、紙面の都合上、お名前の記述は、若い頃お世話になった先生方のみに限らせていただきます。

1. 学び、研究という仕事へ（1959～1968）

大学（京都）に入学したのは 1959 年です。あれこれ興味を持ちましたが、大学 3 年次物理学科に配属され、研究室訪問実験授業を受けて以来、次第に研究の面白さを知るこ

とになり、特に原子核・素粒子の物理と放射線計測・電子回路に関わる実験技術を勉強しました。4年次の所属研究室は大講座制のようでしたが、木村毅一先生（後に、京都大学原子炉実験所初代所長）の研究室で、おかげで「原子核物理学」について、視野が狭くならず勉強することが出来ました。現在の物理学科で、「原子炉物理学」を勉強することは難しいと思われますが、私はこの分野も岩波の物理学講座「原子爐」（武谷三男著）などの教科書で勉強しました。最近、専門家でも分かっていないなと感じる文章や発言に遭遇することもあり、「臨界の物理を易しく説明するために」等の解説記事を公表しましたが、この時代の勉強が役に立ちました。

学部卒業後、当時工学部の原子力工学系専攻が設置されるのと期を一にして設置されたと思われる原子核理学専攻に入学しました。そこで、隈部功先生（後に、九州大学工学部）に出会い、その後長年ご指導いただきました。M1時代には、共同研究に参加させてもらいました。京都大学化学研究所や東京大学原子核研究所の固定磁場サイクロトロンを使用し、エネルギー約30MeVのα粒子の散乱を、当時やっと使えるようになっていた表面障壁型半導体検出器を使って実験し、「光学模型」、「DWBA」,「集団励起」など、様々な概念を学びました。また、共同研究の大事さを知りました。M2になって、修士論文のテーマとして「コッククロフト加速器からの14MeV中性子による核反応断面積測定」を選び、4πβ線検出器や時間分析器を自作して、各種試料について測定しました。過去のデータは検出効率の決定に問題があり、4π 検出器による測定でかなりよい結果を得ましたが、Al(n,p), (n,α)反応の測定試料に1円硬貨を使うなど、論文にするには不十分な面があったことも事実です。

この時代に原子核理学専攻は廃止され、博士課程は改組後の物理学第二専攻に進学しました。研究テーマとしては、当時建設中であったタンデム型静電加速器による実験を念頭に模索しました。また、D1 から東京大学原子核研究所のグループ（八木浩輔先生、後に筑波大学）に単身で参加させてもらいました。テーマはFM（周波数変調型）サイクロトロンで加速したエネルギー50MeV 領域の陽子による反応を大型スペクトロメータにより測定しようとするもので、このエネルギー領域としては世界最高分解能の実験が実現しかかっていました。世界トップを目指して研究されている研究者に混じって研究できたことは大変うれしかったのですが、装置はともかく、内容は所属研究室で日々行っていることと変わらないことを知り、自信になりました。

博士論文作成のため、タンデム加速器で陽子散乱実験を行うべく、測定器開発を続けましたが、D3 近くになっても加速器が使える状態にならず、α粒子散乱実験で同時に測定できていた(α,t)反応の研究にテーマを変えて論文を書きました。

いずれにしても、14MeV中性子反応断面積と数10MeV領域の直接反応に関する研究から核データ研究に足を踏み入れることになりました。特に 1 粒子移行反応とこれによる核構造の研究に興味を抱きましたが、それらはその後長年の研究テーマになり、現在も

いくつか投稿すべき論文を抱えているような状態です。

2. 九州大学において（1968～2004）

1968年博士課程を終え、九州大学に採用していただき、その後36年間勤めることになりました。最初に配置されたのは応用原子核工学科・専攻でした。研究室では、園田正明、片瀬彬両先生のグループがコッククロフト加速器からの14MeV中性子の飛行時間法散乱実験を精力的に行っておられました。早速参加させていただき、まず「関連α粒子法による飛行時間測定でα粒子検出器を真空フランジごと回転させ中性子検出器を固定」できるように工夫しました。これにより主に次の仕事を行いました。

(1) 中性子検出器を動かさないですむため、飛行距離を長くとれます。そこで、実験室の外に小屋を建て、飛行距離を7.6mまでとり、14MeV中性子散乱実験用としては当時世界最高のエネルギー分解能を有する測定系を実現しました。そして、BiやFeをターゲットに第1励起状態を十分分離したデータを得て、光学模型・DWBA解析、振動パラメータ等について、荷電粒子散乱と同等の議論を行いました。

(2) 中性子検出器を固定出来るため大量の遮蔽が可能になり、バックグラウンドを大幅に減らすことが出来ました。そこで、当時議論が不十分であった連続スペクトル部について、世界で初めて「前平衡模型」を適用して解析を行いました。田村・宇田川両氏は、私たちの論文をきっかけに（研究の動機として引用いただきました）、散乱の連続スペクトル部の解析に初めて2段階直接反応理論の適用を試みられました。

この他、関連α粒子法に半導体検出器のみのカウンターテレスコープを組み合わせて、低バックグラウンド型の中性子入射・荷電粒子放出反応測定系を作り、主に（n,p）反応の2重微分断面積の測定を行い、やはり前平衡模型による解析を行いました。これらの研究で、14MeV中性子の散乱と反応について、直接反応、複合核反応に加えて、前平衡反応過程を取り入れることについて基礎を築くことが出来たと考えています。

研究成果は学会や日本原子力研究所の「核データ」研究会などで発表しましたが、14MeVというエネルギーは当時の核データとしては上限に近く、また測定技術についても、必ずしも中心的な話題にはなりえなかったことも事実です。ところが、その後、核融合ブームがやってきて、14MeV中性子断面積データが脚光を浴びることになり、世の移り変わりの面白さを感じたものです。

1974年から2年間、仏原子力庁サクレー原子核研究センターに客員研究員として出張しました。博士論文のテーマであった(α,t)反応研究を系統的に行っていたのは世界では私たちとサクレーのグループのみであったことから情報交換を行っていたことが縁で招聘していただきました。ところが、彼らは1GeV領域の散乱と反応に興味を移らせていました。核破砕中性子源や加速器駆動原子炉のことを考えていたようでした。解析など分からないことも多く、試行錯誤しつつ、実験し、論文を書いた気がします。

その後、更に、陽子・重粒子線によるがん治療や宇宙用核データも話題になり、核データの概念は大きく変わり始めました。長年手がけてきた荷電粒子核データについても、日本原子力学会でも発表し易くなり、計測技術についても、熱中性子検出や線量測定だけでなく、あらゆる分野が取り上げられるようになりました。また、加速器についても、放射線の利用が我が国の GDP にして 8 兆円を超えているらしいとの調査結果とも相俟って、原子力分野においても正面から取り上げるべきとの機運が広がり、日本原子力学会の一部会として「加速器・ビーム科学部会」を立ち上げ、初代部会長を務めることになりました。この部会は現在順調に活動が続けられています。

これに輪をかけることになったのは、学問ではなく、スリーマイル、チェルノブイルから、美浜、JCO などの事故でした。原子力のあらゆる問題について「原点に立ち戻って考えるべき」といった考えが大きく広がってきたのです。核データ研究については、現在の原子力発電を常に基礎からの支えるとともに、あらゆる問題の中での核データの役割を整理しつつ研究を進めるべきという極めて健全な状態になってきており、現在、全国の多くの方々の良好な協力関係の下で、研究がバランスよく進められているとうれしく思っています。

3. おわりに

原子力系教室での教育と研究では、事故の度に厳しくなる社会の目の中で、学生諸君は高学年になると急に逞しくなり、意欲に満ちた社会人として沢山巣立って行ってくれました。そしていま社会の様々なところで活躍されています。研究を通じた教育としても核データ研究は私にとってかけがえのない存在でした。

九州大学を定年退職しましたが、九州産業大学において活動を継続しています。今後ともよろしくお願いします。