

(2) 学術賞

－ EXFOR データベース編集に係る基礎研究と 核データ国際協力貢献 －

国際原子力機関

原子核科学・応用局核データ課

大塚 直彦

n.otsuka@iaea.org

はじめに

EXFOR [1]は、中性子・荷電粒子（含、重イオン）ならびに光を入射粒子とする実験核反応データ（以下データ）を広く収集したライブラリです。今回の受賞対象は、国際核反応データセンターネットワーク（International Network of Nuclear Reaction Data Centres, NRDC）が40年以上にわたって積み重ねてきた成果の上にあります。また、1955年と1958年にジュネーブで開催された国連主催の「平和のための原子力（Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy）」会議以来、実験データの積極的公開が研究者間の了解事項となっていることもEXFORに計り知れない寄与をしており、日頃からこころよく測定データを提供くださっている方々に、この紙面を借りてお礼を申し上げます。

受賞対象に「編集」という言葉が使われていることを新鮮に感じました。英語なら“compilation”ですが、この単語の定訳はないようです。北大では「採録」という訳語を当てはめていました。NEA Data Bankの前身の片割れである“Centre de Compilation de Donnees Neutroniques”は「中性子データ編集センター」と翻訳されており、「編集」もまた一つの訳語なのでしょう。「収集」でも良いのかも知れません。以下では受賞対象名にならってさしあたり「編集」といたします。

EXFORの編集作業は、大きく(1) データの測定と導出に関する抄録の作成、(2) その抄録とデータの機械可読な形への翻訳、の二つの部分から成り立ちます。あるいは次の段階である「検索システムを通じた提供」を加えても良いかも知れません。編集者（compiler）自身は、その仕事の範疇においてデータを生産することも批判的検討を加えることもありません。むしろ、著者が提供するものを改変することなく中立的立場からファイル化する、ということが重要なのです。これは創造的であることを旨とする研究活動とは大分と

性格を異にします。実際、編集活動自身は論文になり難く、また編集で定職につける機会も極めて低いので、日本に居たころは、こんなことに時間を費やしていても良いものか、と不安になることもたびたびありました。でも、おもしろくてどうにもやめられなかったのです。そういえば、私の院生時代の恩師の大西明先生は、このような実験値収集の楽しみを「ビックリマンシール」集めにたとえておられました（一応注釈しておく「ビックリマンシール」とは「ビックリマン」チョコレートについていたおまけのことです）。また、「社会でもっとも貢献しているのは、お金を供給する銀行員でも、人の命を救う医者でも、有用なものを知らしめるコピーライターでもなく、コンパイラである」という Sol Pearlstein 氏（元 NNDC センター長）の発言[2]にも大いに励まされました。いま、この報告[2]を改めて読み直してみても、彼は EXFOR の編集ではなく ENDF の編集におけるコンパイラの役割を語っていたらしい、と気づきました。しかし、当時の NNDC では新入りの職員はみな EXFOR の編集をやらされた、という話があり、そのことから、彼が EXFOR の仕事を重視していたことが分かります。ともあれ、核物理の測定や評価の結果が論文への公刊に留まらず、そのデータが編集（電算化）され蓄積されることを通じ、「核データ」という分野の仕事が特徴づけられているのではないのでしょうか。

意欲ある編集者を求めて

この分野の人材育成の問題に関しては古くは土橋敬一郎氏、最近では長谷川明氏が記しておられます[3-4]。既に記したように、編集の仕事自身は論文になりがたいこと、またそもそも編集ではそうそう飯が食えないことから、編集の仕事に意欲的な核物理の方をなかなか安定して確保できません。たとえば、西欧や日本など重要な測定拠点を持つ国で得られた中性子入射反応データの編集は NEA Data Bank が責任分担していますが、その前身の一つが「中性子データ編集センター」であるにも関わらず、1990 年代よりロシアのコンサルタントに編集を外注する方法が取られています[4]。彼らには EXFOR を用いた研究経験がないのでユーザーの視点を持ち合わせておらず、従って作成された EXFOR エントリーが公開に至るまで、IAEA でも相当な手間と時間を費やしてレビューをしています。コンサルタントへ謝金が出来高払いであるためどうしても余分な情報が加わってしまいがちで、そのような編集結果との「格闘」については以前にもご報告した通りです[5]。昨年まで Data Bank の担当職員だった Emmeric Dupont 氏は、自ら手を動かして編集しないものの EXFOR 全体の改善に意欲的でした。その彼が復職先の CEA との関係などから昨夏にこの仕事を離れざるを得なかったのは大変に残念でした。北米で測定されたデータに関して、Vicki McLane 女史の退職以降、NNDC に意欲的な担当者がなかなか現れず頭痛の種でしたが、現在は NSR の面倒も見ている Boris Pritychenko 氏が大変に意欲的にやってくれ、また私の IAEA での前任者の Otto Schwerer が NNDC のコンサルタントとして IAEA 送信前のレビューを行ってくれるので、随分と楽になりました。

元 NDS 職員の岡本浩一氏が書かれているように、編集者の意欲の有無が編集結果を左右します[6]。私の場合、加藤幾芳先生が私を 2002 年の NRDC 会議（パリ）[7]に連れていき、口角泡を飛ばす東西陣営間の議論を見せてくださったことは、私のこの分野への意欲を大いにかきたてました。殊に、クルチャトフ研究所の Feliks Chukreev が Nuclear Wallet Card を机にどんどん叩きつけながら NNDC の Vicki McLane に反論する場面は刺激的でした。いずれも故人となりましたが。

一方、アジアには新しい動きもみられます。チャンディーガル訪問記[8]に記したとおり、インドでは Srinivasan Ganesan 氏（図 1）の長年の夢がかない、Department of Atomic Energy (DAE) からの財政援助のもと、Nuclear Data Physics Centre of India (NDPCI) が立ちあがりました。このセンターの目的は、収集・評価など様々な核データの活動をインド各地で活性化することです。毎年、複数のワークショップをインド各地の大学等で開催しています。その一つが、隔年開催の EXFOR 編集のためのワークショップです。インドで得られたデータは 2 年でおおよそ 40 編公刊されることが分かっています。それらが、隔年開催のワークショップで参加者によって一斉に編集されるのです。核データという分野の存在をインドの核物理の研究者に広く知っていただく上でこの活動は有用だと考え、私も積極的に協力しています。



図 1. ラクダに乗る Ganesan と筆者（2011 年 4 月 7 日インド Chandigarh にて）

インドに続いて EXFOR 編集に取り組もうとしているのは中央アジアです。ロシアとウクライナを除くと、カザフスタンとウズベキスタンは旧ソ連諸国の中で核反応データの測定が最も活発です。カザフスタンの元首都であるアルマティ（旧名アルマータ）の核物理研究所のサイクロトロンにて Levkovskij が系統的に測定した陽子入射放射化断面積(励起関数)は、彼の息子が数値データを単行本として出版してくれたおかげで、オリジナルの数値が網羅的に EXFOR にも格納されています。この励起関数は(規格化断面積の更新に由来する再規格化係数 0.75 さえ乗じれば)最新の測定結果とよく一致することが、この分野では広く知られています。このアルマティのサイクロトロンをはじめ、タシケントやアスタナ(旧名アクモラ)などの施設での測定活動がソ連崩壊後の一時期を除いて続けられており、Nurzat Kenzhebaev 氏ほかカザフ国立大学の若手が中心となって、これらの EXFOR への編集を開始しました。

また、これまで編集を網羅的に手掛ける人のいなかった西欧の重イオン入射反応データについては、北大で EXFOR 編集の経験を積んでモンゴルに帰国した Odsuren Myagmarjav さんが、新規に出版されたデータを編集してくれるようになりました。Odsuren さんと同時期に北大で経験を積んでインドに帰国した Vidya Devi さんは、EXFOR 編集に関するインドにおける NDS とのリエゾンとしての役割を開始しつつあります。核データにおけるアジア域間の協力の重要性は核データニュースでも度々強調され、原研核データセンターがアジア各国から研究者を招かれていたことはご承知の通りです。EXFOR 編集に関しては、北大が 2010 年から 3 年間にわたって学術振興会の支援で組織したプロジェクト「アジア地域における原子核反応データ研究開発の学術基盤形成」のもと、札幌(2010)・北京(2011) [9]・浦項(2012)にてワークショップが開催され、アジア域間の関係者の交流が大いに進みました。このシリーズは学振による支援終了後もアルマティ(2013)、ムンバイ(2014)で引き続き開催され、今年は札幌で9月に開催される予定です。

編集は物理屋の仕事か

さて、EXFOR の編集が、論文からのコピー&ペーストで済まないことは拙稿「核データ考古学」[5]でもご紹介したとおりですが、ここでは別のいくつかの例を紹介しましょう。

最初は不安定核が絡む荷電粒子入射反応の共鳴解析に最近広く用いられている、厚い標的方法(thick target method)で得られたデータの編集の話です。この方法は、例えばある共鳴の陽子崩壊 $R \rightarrow p+A$ (A :不安定核)の幅 Γ_p を、陽子標的と不安定核ビーム A との弾性散乱 $p+A \rightarrow R \rightarrow p+A$ を通じて調べるもので、日本では、東大原子核科学研究センター(CNS)の CRIB (Radio-Isotope Beam separator) でこの種の研究が活発に行われています。図 2 に CRIB を用いた ^{17}F の陽子弾性散乱の測定の概要を示します[10]。水素ガス標的に入射した 61.9 MeV の ^{17}F は、ガス標的の中でエネルギーを減衰させつつ様々な入射エネ

ルギーで標的陽子と弾性散乱を起こし、反跳陽子が前方のテレスコープで検出されます。得られた複合核弾性散乱の共鳴構造を図3に示します[10]。

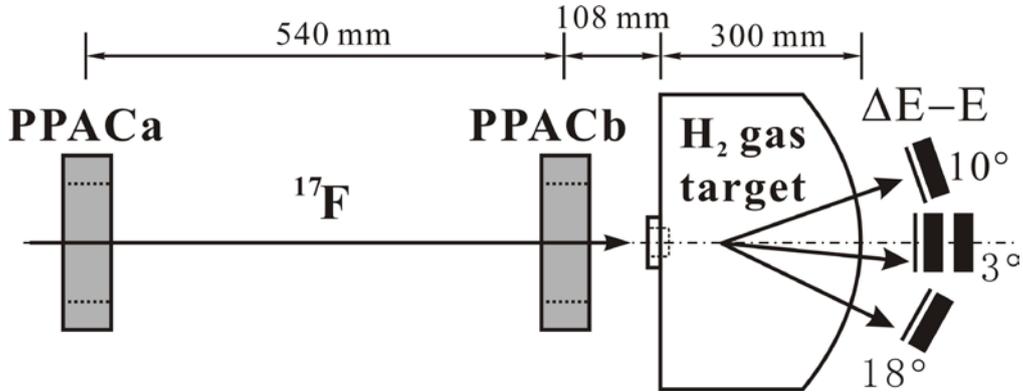


図2. 東大原子核科学研究センター (CNS) のCRIB (Radio-Isotope Beam separator) による ^{17}F の陽子弾性散乱の測定[10]。図は近代物理学研究所 (蘭州) の胡鈞氏のご好意によるもの。

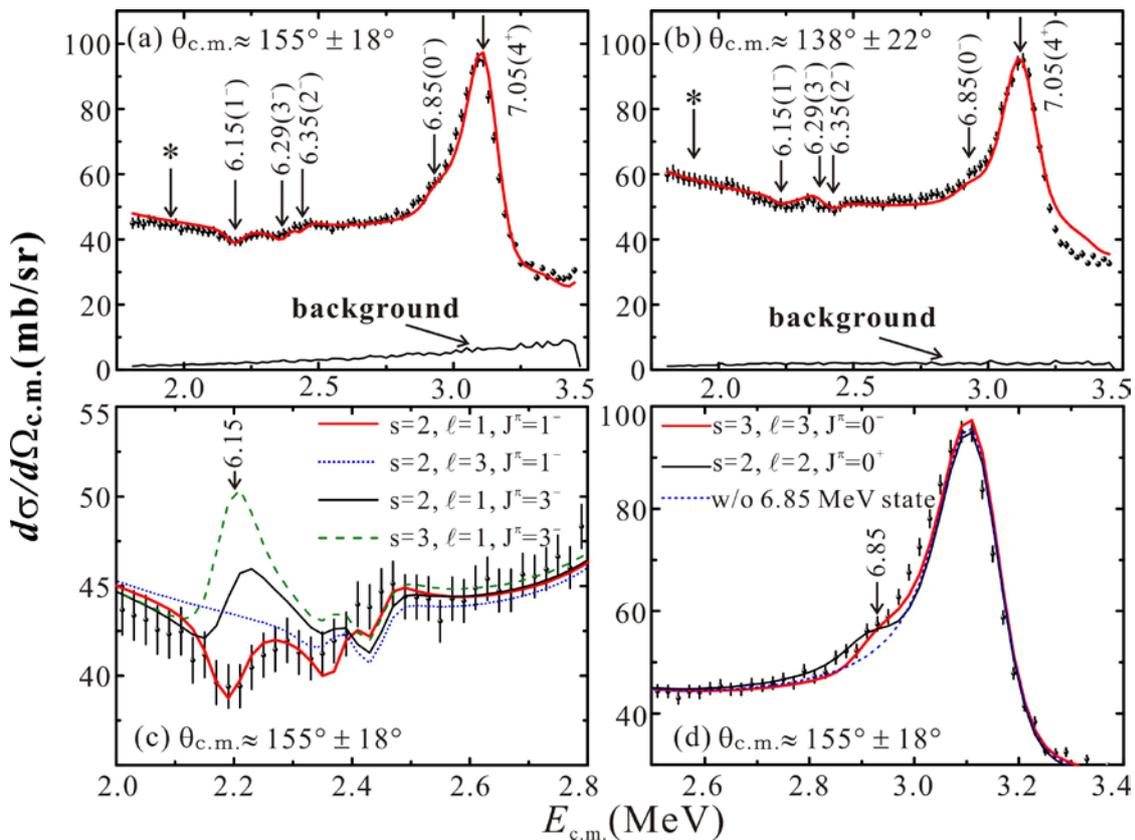


図3. ^{17}F ビームと水素標的の弾性散乱で得られた $^{17}\text{F}(p,p)^{17}\text{F}$ 弾性散乱の励起関数[10]。図は近代物理学研究所 (蘭州) の胡鈞氏のご好意によるもの。これらの共鳴の多くは ENSDF の ^{18}Ne の“Adopted levels”の表でも確認できる。

この図で横軸 $E_{c.m.}$ は複合核共鳴の励起エネルギー E_x を重心エネルギーで現わしたものです。 $E_{c.m.} = E_{lab} m_t / (m_p + m_t) = E_x - S_p$ (E_{lab} は実験室系入射エネルギー、 m_p は入射核の質量、 m_t は標的核の質量、 S_p は複合核の陽子分離エネルギー)。測定の原理を理解していないと、例えば、図 3 を 61.9 MeV の入射エネルギーの ^{17}F が (エネルギー減衰せずに) 陽子標的と反応して得られる放出陽子エネルギー分布である、と間違って解釈することになります。長年 EXFOR に関わってきた Vicki McLane 女史や Otto Schwerer 氏でさえもこの測定原理がなかなか理解してもらえず、この種の論文が編集されるたびに議論が再発して大いに苦労しました。

また、図 3 には角度 θ_{cm} が与えられていますが、これは ^{17}F 入射弾性散乱 $^1\text{H}(^{17}\text{F}, ^{17}\text{F})^1\text{H}$ の実験室系での反跳陽子の散乱角 θ_{lab} を、重心系での (反跳陽子ではなく) ^{17}F の角度に変換したものです。例えば、 $^1\text{H}(^{17}\text{F}, ^{17}\text{F})^1\text{H}$ で $\theta_{lab} \sim 0^\circ$ は実験室系で反跳陽子の前方 (0 度近傍) での測定を意味しますが、これは $^1\text{H}(^{17}\text{F}, ^{17}\text{F})^1\text{H}$ の重心系で後方 ($\theta_{cm} \sim 180^\circ$) に散乱された ^{17}F を測定していることと同等です。これは、陽子を入射粒子とした $^{17}\text{F}(p, p)^{17}\text{F}$ で弾性散乱された陽子を (実験室系でも重心系でも) 後方 (180 度近傍) で測定していることと同等です。 $^1\text{H}(^{17}\text{F}, ^{17}\text{F})^1\text{H}$ と $^{17}\text{F}(p, p)^{17}\text{F}$ いずれの場合も、散乱前後で 2 粒子の速度ベクトルがそれぞれ反転した状況を測定している、ということもできます。しかし、この種の論文ではなぜか θ_{cm} の定義をあらわに記していないことが殆どで、また (文献[10]の場合ではありませんが) 若手の著者の中には θ_{cm} を $^1\text{H}(^{17}\text{F}, ^{17}\text{F})^1\text{H}$ の重心系での反跳陽子の角度と勘違いしている場合も珍しくありません。従って編集者自身が運動学を理解していることが、正しい編集を行う上で非常に重要です。

特定の測定施設で得られたデータの編集に対する留意事項もあります。マクスウェル平均断面積断面積には因子 $2/\pi^{1/2}$ を含むものと含まない二種類の定義があり [11]、前者の方がより一般的だと思われませんが、グルノーブル (ILL) で測定された断面積の報告にはこの因子を含まないものがあるので要注意です (私の知人で MiniINCA プロジェクトの一人が Westcott conversion を知らなかったのには驚かされました)。また、ブダペストの研究炉の冷中性子ビームラインで測定された断面積は、それを $1/v$ 則を用いて熱中性子 (0.0235 eV) の断面積に変換したものが、変換した旨を明記せず論文に報告されている場合が多く、やはり注意を要します。

時には論文とは違う表現で EXFOR にデータを記録せざるを得ない場合があります。最近の一例は、医療用同位体生成の分野でよく報告される、厚い標的の 1 時間照射終了時ビーム電流あたりの放射能 (end-of-bombardment thick target yield) の単位の問題です。この物理量をユーリッヒの人たちが MBq/ $\mu\text{A}\cdot\text{h}$ という単位で出版しているのは誤りではないか、とずっと気になっていました (一時間で 60 km 移動したことを 60 km/h と表現するようなものですから)。そこで、編集時に MBq/ $\mu\text{A}\cdot\text{h}$ を MBq/ μA に置き換えたいのですが、このような変更は EXFOR の編集者にかなりの心理的負担を強めます。長年ユー

リッヒのグループを率いてきた Syed Qaim 氏が筆頭編集者である *Radiochimica Acta* 誌に短いノートを投稿し、査読終了後にも編集者と議論を続けるという経験を初めてしました[12]。EXFOR では飽くまで著者が報告した結果をそのまま記録するというのが原則で、編集者による修正(解釈)を正当化するにはこれくらいしなければだめだ、という話です。

以上の例からも分かるように、編集作業においては、論文に記されていることはもとより、論文に記されていないことについてあれこれ考えをめぐらす必要があります。私を含め編集者の多くはその分野の非専門家であり、著者の助言を請わねばならぬこともままあります。しかし、その場合も、編集者がその分野の測定に関する基礎知識を持つなどして、著者の回答への負担を最小限に抑える配慮が必要です。これが核物理や測定に関する基礎知識が編集者に求められる所以です。以上の話題は、また、ある研究所で得られるデータを、その研究所に近いセンターが責任を持って継続的に編集することの重要性を示しています。

より良い EXFOR を目指して

EXFOR をより良くしていく上で課題と考えていることの中から二点ご紹介したいと思います。

一つは誤差情報の充実です。評価済核データに共分散をつけることの重要性については、原子力への応用との関連でかねてから言われていることです。この実現には、評価の基礎となる実験データにも十分な誤差情報が与えられている必要があります。また実験データの処理に閉じて、共分散情報が重要な役割を果たすことがあります[13]。しかし、誤差(より正確には「不確かさ」)が論文に記されている場合であっても、例えば“Total uncertainty”などのみの説明で、考慮された誤差要因やその要因ごとの内訳が記されていない論文は珍しくありません。データ各点ごとに付与された“Total uncertainty”が計数に由来するものとそうでないものに分けて報告されているだけでも評価の際に便利なのですが、そのような表にはそう頻繁にお目にかかりません。

この問題に関わりはじめたころ、評価における相関の役割が測定研究者にあまり知られていないのか、と考えました。そこで行ったのが、Wolf Mannhart 氏が作成した“Small guide”の復刻[14]であり、Don Smith 氏の手で既に相当部分が一通り書きあがっていた大論文[15]とその要約版[16]への共著者としての参加でした。また、Smith 氏との論文作成を機会に、誤差要因ごとの相関(uncorrelated, fully correlated など)が明示できるように EXFOR 書式を拡張しました。誤差評価の実際は測定の種類によりかなり多様なはずですが、実際 Smith 氏の当初計画ではこの大論文[15]にて様々な測定の専門家にその分野での誤差伝搬の実例を紹介いただく予定でしたが、共鳴領域に関する一編[17]を除き、その出版は実現していません。

私が JENDL-4.0 の主要アクチナイド 6 核種の核分裂断面積の同時評価を行った頃は、

もっぱら原子力応用との関係で測定データに付随する誤差情報に関心を持ってきました。しかし、軽核の **R-matrix** 理論による評価の論文を何度か目にするうちに、原子力応用のための中性子入射反応のみならず、先述した $^{17}\text{F}+p$ の複合核弾性散乱の例のように、宇宙核物理に関する荷電粒子入射反応の共鳴領域の励起関数に関しても同様の話題があることに気付きました。たとえば、最近の IAEA の標準断面積に関する会合[18]で議論された $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ に見られる複合核 ^{17}O の共鳴構造の問題は、私の意識の中ではむしろ恒星内の中性子源反応としての $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ に関連していました。荷電粒子入射反応の共鳴領域の励起関数に関しては、イオンビーム材料解析への応用との関係でも誤差情報の充実が話題となっています。このように、誤差評価の重要性は中性子入射反応データにとどまらぬものとなっています。どのようなデータに詳細な誤差情報が望まれているのかが明確になると、関連分野の測定研究者にとって、より詳細な誤差解析とその報告を行う動機付けになるかも知れません。

誤差情報の充実とともに関心を持っているのは、中性子飛行時間法 (TOF) で得られる TOF スペクトル (具体的には **transmission** や **reaction yield**) の保存です。共鳴パラメータを評価するには、この TOF スペクトルが重要となります。共鳴解析のためにこの種のデータを供給してきた主要測定施設としては、たとえば GELINA (ベルギー)、n_TOF (スイス)、ORELA (アメリカ)、RPI (アメリカ) があげられます。今後 J-PARC もここに加わるのかも知れません。共鳴解析を行う際には、たとえばある施設で得られた **capture yield** を過去に別の施設で得られた **transmission** と同時に解析するなど、過去に得られた TOF スペクトルが活用されることが珍しくありません。しかし、EXFOR における TOF スペクトルの格納状況は、その重要性がかねてから指摘されていたにも関わらず、RPI で得られたものを除き、完全にはほど遠い状況にあります。データのサイズが大きいこと、測定に関する補足情報が十分でない満足いく共鳴解析ができない、などが理由かと想像します。JENDL の共鳴パラメータに海外の評価が多く採用されているのも、このような EXFOR の状況と関係しているのかも知れません。

さて、ある日のこと Peter Schillebeecx 氏がひょいと私の部屋にやってきて、TOF スペクトルの共鳴解析における誤差伝搬の話語りだしまして、これが私と TOF スペクトルのご縁のはじまりでした。測定で得たデータを共分散情報も含めて格納するために、彼らは AGS[19]と呼ばれるデータ格納形式を開発しました。そこでこの形式で与えられた TOF スペクトルを格納できるように EXFOR 書式を拡張し[20]、また、将来の共鳴解析に備えて保存すべき実験条件や応答関数などの情報を議論する会合[21]の開催にも関わりました。

Scillebeecx 氏によれば、今世紀 GELINA で得られた TOF スペクトルは比較的簡単に取り出せるのだそうで、その具体的な手段について彼と相談を進めています。ORELA は施設こそなくなりましたが、ここでの測定経験があり現在も ORNL に勤務する

数少ない（唯一？）の測定研究者を NNDC の Boris Pritychenko 氏とともに「しつこく」口説いた結果、昨年末からデータ保存の話が進みだしました。n_TOF に関しては、このプロジェクトに対する EU の補助が（宇宙核物理ではなく）エネルギー応用のための核データ改善らしいことから（既に査読付論文として公刊されたものについては）TOF スペクトルの入手を楽観していました。しかし、CERN で行われた n_TOF の Board Meeting でこの問題を紹介したにも関わらず、 $^{58}\text{Ni}(n,\gamma)$ と $^{243}\text{Am}(n,\gamma)$ の 2 例を除き capture yield は全く送付されてきません。同僚の Roberto Capote 氏に今月（2 月）末の n_TOF の会議で改めて問題提起してもらおう予定です。ウィーンにて買物の都度付加価値税（20%、ただし食品等は 10%）を納税している私として、この件は納税者の立場からも問題です。以上、色々ありますが、今後 EXFOR が TOF スペクトルの同時解析に活用できるようなものに充実させたい、と考えています。

おわりに

IAEA には“rotation policy”（「7 年ルール」）というものがあります。これは IAEA の科学的知識を常に最新のものとし、また IAEA での勤務経験を出身国の発展に活かす、という趣旨から専門職員（P staff）の最長雇用期間を原則 7 年とするもので、育成に時間を要する査察官を除き、長年かなり厳格に運用されているようです。このため私も今月（2 月）頭にはこの仕事を終える予定でした。しかし、こんな面白い仕事を絶対にやめたくない、という気持ちが（英語もろくにできないにも関わらず）現課長の Robin Forrest 氏に伝わったようで、その気持ちをかなえようという彼の好意と熱意、またそれをくみ取ってくれた IAEA の上層部のおかげで、今後も IAEA に残ってこの仕事を続けることができることになりました。本当にありがたいことです。核工学の土台ともいべき核データの信頼性向上とその平和利用に備え、世界の測定研究者が公開したデータを定まった様式に編集し、24 時間誰でも無償で自由に検索できる EXFOR、その整備は“Atoms for Peace”をスローガンに掲げる IAEA が主体的に関わる事業に極めてふさわしく、今後とも IAEA の職員として、皆さんのお役に立つ仕事をしていきたいと思っています。

一昨年 12 月に理研の羽場宏光氏のご厚意で放射化断面積の測定を経験するまで、私は自然放射線源を用いた学生実験以外、核物理に関する測定らしいことをしたことがありませんでした。「素人」と割り切れれば何でも躊躇なく聞いてみようと思えるもので、日本をはじめ各国の測定研究者の方々には、極めて初歩的なことから随分と多くのことを教わってきました。私の問い合わせに対して多忙にも関わらず時間を費やして対応して下さい方、またこのようなデータ編集事業の重要性を本当に理解し支援して下さい方、そういう方々に出会うとき、この仕事をしていて本当に良かったと思います。また、日々の業務の遂行の上で、日本のような核データ研究の盛んな国の出身でよかった、と感じることも多々あります。謝意を込め、お世話になった方々との色々な話をもっと紹介したかつ

たのですが、それではとても書ききれないということが分かり、最終的に、本稿のような形に落ち着きました。お世話になった皆様のご親切とご支援に改めて感謝いたします。また、今後ともどうぞよろしく願いいたします。本稿の逆運動学の項の作成にあたり、九大の寺西高先生に助言いただきました。

追記：ときどき、EXFOR を論文で引用したいが何を引用すれば良いか、というありがたい問い合わせをいただきます。長年、引用に便利な論文がありませんでしたが、NDS や NNDC の EXFOR 検索ウェブサイトに記されているように、[1]の引用をご提案しています。

参考文献

- [1] N. Otuka et al., Nucl. Data Sheets **120** (2014) 272.
- [2] 深堀智生、核データニュース **74** (2003) 94.
- [3] 土橋敬一郎、核データニュース **9** (1979) 6.
- [4] 長谷川明、核データニュース **94** (2009) 23.
- [5] 大塚直彦・河野俊彦、核データニュース **106** (2013) 72.
- [6] 岡本浩一、核データニュース **36** (1990) 85.
- [7] 長谷川明、核データニュース **73** (2002) 23.
- [8] 大塚直彦、核データニュース **99** (2011) 21.
- [9] 合川正幸、核データニュース **101** (2012) 6.
- [10] J. Hu et al., Phys. Rev. **C90** (2014) 025803.
- [11] 中川庸雄、核データニュース **80** (2005) 128.
- [12] N. Otuka, S. Takács, Radiochim. Acta **103** (2015) 1.
- [13] 小林 捷平、核データニュース **100** (2011) 45.
- [14] W. Mannhart, INDC(NDS)-0588 Rev. (2013); 大塚直彦、核データニュース **99** (2011) 55.
- [15] D.L. Smith, N. Otuka, Nucl. Data Sheets **113** (2012) 3006.
- [16] N. Otuka, D.L. Smith, Nucl. Data Sheets, **120** (2014) 281.
- [17] P. Schillebeeckx et al., Nucl. Data Sheets, **113** (2012) 3054.
- [18] 国枝賢、核データニュース **106** (2013) 10.
- [19] B. Becker et al., J. Instrum. **7** (2012) P11002.
- [20] N. Otuka et al., J. Kor. Phys. Soc. **59** (2011) 1046.
- [21] 木村敦、核データニュース **107** (2014) 12.