

会議のトピックス(II)

NRDC (核反応データセンターネットワーク) 2021 年会合

国際原子力機関

原子核科学・応用局理化学部核データ課

大塚 直彦

n.otsuka@iaea.org

1. はじめに

国際核反応データセンターネットワーク(NRDC)は実験核反応データライブラリ EXFOR の作成と配布、評価済核反応データライブラリの配布などについての国際協力の枠組みである。実務担当者が技術的な問題のみを議論する「技術会議」と実務担当者とセンター長が技術的な問題に加えて政治的な問題（たとえば各センターの役割分担や収集対象の変更）も議論する「センター長会議」があり、これらが毎年交互に IAEA の技術会合(Technical Meeting)として実施される。

1970 年 7 月 1 日に EXFOR 書式によるデータ交換が開始されてから 50 年目の節目を迎えることから、その記念式典を含む 5 日間のセンター長会議を昨年 2020 年 5 月 19 日～22 日に予定していた。しかし、コロナウィルスの感染状況が刻々と悪化し、80 歳前後の方々による記念講演の実施が難しくなったことから、2020 年の早い段階で延期を覚悟した。どのタイミングでこれを正式発表するかと悩んでいたところ、「6 月頃までは会議開催はしない」という事務局長の方針が示されたので、すかさず延期の決定を正式に発表したのが 3 月 11 日であった（この直後、3 月 16 日から 5 月 14 日までは職場に立ち入ることすら不可能になってしまった）。

すでに航空券や査証の手配をすませた参加者がいるのではないかと心配したが、航空券代についての相談は一件のみであった。当時、多くの航空会社が航空券の変更や返金に手数料無料で応じていたところ、「アエロフロートはとりあってくれない」とこの参加者はいう。それで、同僚の Charisse Monfero にがんばってもらい、IAEA 側から航空券代をお支払いすることで解決した。

2020 年も後半に入ると Cisco Webex なるシステム使ったビデオ会議（NDS では“Virtual Event”とよんでいる）の開催が IAEA で一般的になってきた。ただ、難壇に並んでいただくはずの年配の方々にネット越しに回顧談を行っていただくのはおもしろくない。他方、技術的な議題はたまる一方、という状況もあり、今年はやむをえず「技術会議」をビデ

オ会議として実施した。

IAEA での Technical Meeting 開催にあたって時間を要する準備の一つが参加者招請の手続きである (IAEA 事務局は会議参加者の候補をあげることができるが、その候補者に招待状を送付するにあたっては加盟国の同意を得なければならない)。1 年延期にともない、この手続きをやりなおさなくてはならないのでは、と心配したが、その必要がなかったのは幸いであった。

ビデオ会議の設定では開催時間の決定が面倒である。データセンターの地理的分布をみると、ウィーンのある中央ヨーロッパ時間(CET)夏時間に対して一番時間が進んでいる日本とは 7 時間、一番時間が遅れているアメリカ東海岸とは 6 時間の時差がある。IAEA の標準勤務時間(8:30-17:30)からのずれが日本とアメリカ東海岸の参加者でおなじになるようにすると 11:00-14:00 (日本では 18:00-21:00、東海岸では 5:00-8:00)、しかしこれでは東海岸の人たちに恨まれそうなので、彼らが一時間余分に寝られるようにウィーン時間で 12:00-15:00 と設定した。同じ国際ネットワークでも核構造・崩壊データ評価者ネットワーク(NSDD)の方は極東とアメリカ西海岸の参加者がいるので時間設定はもっと大変だろう。

この Cisco Webex ビデオ会議システムをうまく操作できるか、ということが会議開催直前まで心配ごととして残った。すでに同じシステムによるビデオ会議に何度も参加していたものの、自分が開催者となると、なにか問題がおきた際に自分で解決しなければならない。そこで会議一週間前に、我が家の 2 台のパソコンのみが参加する自分用練習イベントを開催し、また会議前日には参加予定者がスライド画面の共有などを練習するイベントを開催した。

2. いくつかの話題

以下では本会議での議論のなかから、読者のみなさんに関心をもっていただけたような話題をいくつか選んで紹介する。なお議事録は INDC(NDS)-0829 として刊行されている [1]。

2.1 中性子入射核分裂収率の系統的収集

ここ数年、中性子入射核分裂収率の再評価の機運が高まっており、IAEA でも 2020 年から 2025 年までの予定で“Updating Fission Yield Data for Applications”という協働研究プロジェクト(CRP)を走らせている。EXFOR は、その初期において核分裂収率の格納に重点を置かなかったという歴史的経緯があり、NRDC としてこの機会に核分裂収率の EXFOR への格納率を改善することになった。

格納率の調査のために、NDS は England & Rider と Mills が作成した実験データ集を EXFOR と比較 [2]、NNDC は文献データベース NSR を EXFOR と比較 [3]し、およそ 600

の論文に公刊されている核分裂収率が EXFOR に格納されていないことを確認した。これら未収録の論文の採録を 2019 年の NRDC 会議で割り当てたところ、未収録論文の 57% ほどが今回の会議までの約 2 年の間に EXFOR に収納された。

筆者は NDS を含め各センターから送られてくる EXFOR エントリーのドラフトをレビューする立場にあるが、核分裂収率の導出法は断面積のそれとはかなり異なるものがあり、とくに 1970 年代くらいまでの古い論文と悪戦苦闘することしばしばであった。累積収率 (cumulative yield) と質量収率 (chain yield) の区別、質量収率の導出にあたってまず分収率 (fractional yield) とよばれる物理量を決定する利点など、勉強になることは多かった。

あと気になったのは NNDC から送られてきたエントリーに P.K. Kuroda というアーカンソー大学の日本人らしき人が著者に入った論文のデータが沢山あったこと。たとえば彼が著者に入ったウラン 238 の自発核分裂収率の論文 [4] から起こされた EXFOR エントリーは 9 件もあって、その試料の項目には “1020 g of uranium extracted from a sample of Belgian Congo pitchblende, carefully purified” (ベルギー領コンゴ産の閃ウラン鉱から注意深く抽出された 1020 g のウラン) などとあったりする。このあたりで、Kuroda 氏が天然原子炉の存在を予言されたかの有名な黒田和夫博士であることに気づいた。



写真 会議参加者の集合写真

2.2 重イオンビームのクーロン励起で測定された核分裂収率

ドイツの GSI では 2000 年前後から Karl-Heinz Schmidt 氏らが核破断片を鉛標的に入射させて得られる核分裂片の分布測定を系統的におこない [5]、GSI は現在も同様の測定を

続けている。原子核（重イオン）ビームが相対論的速度で加速されると相対論的収縮の影響で重イオンが生成するクーロン場は移動方向と垂直方向に絞られたものとなる。この重イオンが重い標的核の近くを通過すると、（重心系で考えると容易に想像できるように）入射核と標的核は瞬間的に強い電磁場を受ける。この電磁場による励起で入射ビームを核分裂させて核分裂片収率を測定するのが彼らの方法である。

論文を読み始めた当初は、Schmidt 氏らが同時期に測定していた核分裂片生成断面積 [6] との物理的な違いがよく理解できなかった（核分裂収率に核分裂断面積を乗じると核分裂片生成断面積となる）。Schmidt 氏とのやりとりから、収率の報告にあたっては核力による核分裂の効果をわざわざ取り除き、クーロン励起による核分裂片収率を導出していることが分かった。そこで、EXFOR の利用者の立場からみた場合、得られたデータは $\text{Pb}(^{238}\text{U}, f)$ の核分裂収率として格納するよりは、 $^{238}\text{U}(\gamma, f)$ の核分裂収率として格納するのが適切ではないか、ということで Schmidt 氏との間に意見の一致を見た。ところがこれを本会議にて提案したところ、「重イオン入射は荷電粒子入射反応であり、そこで得られたデータを光核反応データとして収録してしまうのは紛らわしいのではないか」という発言があり、この議題は継続審議の扱いとなった。

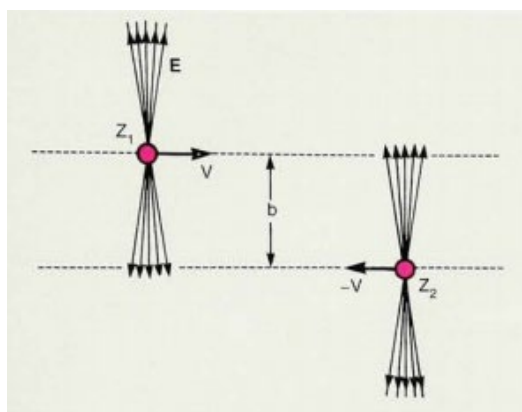


図 ローレンツ収縮した原子核同士の衝突により生じる強い電磁場¹

余談となるが、私が北大で日本の荷電粒子核反応データの EXFOR 採録を行っていたころ、クーロン励起を用いて光核反応を模擬した測定を行い、その結果から直接測定が困難な低エネルギーの荷電粒子捕獲断面積（あるいは宇宙物理学的 S 因子）を導出した実験の論文に数編関わったことがあった。たとえば理研での $\text{Pb}(^8\text{B}, ^7\text{Be}+p)$ の測定を通じた $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ の S 因子の導出 [7]、筑波大での $\text{Au}(^7\text{Li}, t+\alpha)$ などの測定を通じて導出した $^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ の S 因子の導出 [8] などで、勉強不足の私には手ごわい論文であったことを思い

¹ Reproduced from [9], with the permission of the American Institute of Physics

出す。GSI の論文を含め、クーロン励起で誘起される仮想（等価）光子場の考え方をういた論文でよく引用されるのは Bertulani と Baur の仕事で、彼らは Physics Today 誌に非専門家向けの解説記事を書いている [9]。

2.3 ダイニュートロン!?

キエフ国立大学のKadenko氏はハンガリーのATOMKIのサイクロトロンでd+D反応により発生した中性子を金に照射し、 $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$ 反応の閾値以下で ^{196}Au の放射能を検出した。彼はその事象の放射化断面積を“Statistically significant observation of and cross-sections for a new nuclear reaction channel on ^{197}Au with bound dineutron escape”（束縛ダイニュートロン放出を伴う ^{197}Au の新しい核反応チャネルの統計的に有意な観測とその断面積）という題名で公刊した [10]。この論文をEXFORに採録するにあたり、ダイニュートロンのための新しい粒子コード“N2”をEXFORの辞書に追加したいのだが、という相談をウクライナのデータセンター(UkrNDC)のOlena Gritzay女史から受けたのは昨年12月30日であった。

放出された中性子2個を同時計測して2中性子系の不変質量分布のスペクトルを見たらピークが見えた、というような仕事であればまだしも、「(n,2n)反応の閾値以下で生成核の放射能が測定された→中性子2個の束縛状態が存在」という論旨でよく論文が受理されたな〜とおどろいたのが正直なところである。EXFORの辞書に入ったところでダイニュートロンの発見を支持することにはまったくならないが、それにしてもさすがにこの論文のためにダイニュートロンのコードを辞書に入れるのは躊躇された。論文の末尾には“our observations allow us to raise a reasonably justified question about introduction of a new nuclear reaction channel (n, ^2n) into available nuclear data bases and libraries.”（核データベース・ライブラリに対して(n, ^2n)という新たなチャネルを導入しないのか、という問いかけを正当化するのが今回の測定である）とあり、キエフ大学教授からこの論文を受け取ったGritzay女史が使命感にかられたことは容易に想像できた。

この話をどう処理したものかと考えていて、 ^2He を粒子として認めるかが大きな議論となったNRDC会議の話は北大の加藤先生から昔にうかがったことを思い出した。この時は陽子2個の同時測定から導出した残留核の励起スペクトルなど ^2He の存在を示唆する実験が複数あり、この古いNRDC会議では“virtual product”（実験が探している未発見の核種）というカテゴリーの粒子のコードとして“HE2”が認められた。

今回、議場でダイニュートロンの粒子コードの追加を認める雰囲気になってきたので「どうしても必要なのであれば ^2He と同様の考え方でのダイニュートロンの粒子コードの追加も不可能ではなかろう」と発言して話を終わらせようとした。ところが、会議初日からマイクのスイッチを入れることのなかったStanislav Hlaváč氏（スロバキア科学アカデミー物理学研究所前所長）が突然「新粒子発見などという重大なことをこの論文だけ

で認めるわけにはいかん！」と発言、ダイニュートロンの粒子コードの追加提案はあえなく却下となった。

2.4 カールスルーエで測定されたマクスウェル平均断面積の再規格化

カールスルーエ原子核研究センター（KFK、現在はカールスルーエ工科大学 KIT）の Käppeler 氏らが s-process への関心から、温度 25 keV の中性子場を ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 中性子源で模擬し、この中性子場における放射化断面積を系統的に測定したことはよく知られている。彼らはまずこの照射場で金箔を照射し、 ${}^7\text{Be}$ の放射能から入射中性子数を決定したうえで ${}^{197}\text{Au}(n,\gamma){}^{198}\text{Au}$ スペクトル平均断面積の絶対値を決定した [11]。この値は Macklin らがオークリッジのライナックの TOF 測定を通じて導出したスペクトル平均断面積とも 1%ほどの違いで一致した。以降、これを標準として s-process に関連する多数の捕獲反応のスペクトル平均断面積を Käppeler 氏らは測定した。

ところが、GELINA や n_TOF で ${}^{197}\text{Au}(n,\gamma){}^{198}\text{Au}$ のエネルギー依存断面積を測定し、得られた断面積から上述した ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 中性子場のスペクトル平均断面積を導出したところ、永らく用いられてきた標準断面積よりも 5%ほど高い値が得られた [12]。このためにカールスルーエの一連の実験で得られた断面積は再規格化を迫られることとなった。関連する EXFOR エントリーが多数あり、データの再規格化の計算をデータセンターに任せて間違いを起こしてはいけない。Käppeler 氏には再規格化した値をまとめた 400 ページ以上の分厚いレポート [13] を作成してもらったので、そのレポートの掲載値を用いて NEA Data Bank が当該 EXFOR エントリーを改訂していくことがこの会議で決まった。

Käppeler 氏には標準断面積の改訂にともなう再規格化だけではなく、生成核や標的核の崩壊データの改訂に伴う断面積の再規格化もやっていただいた。たとえば ${}^{160}\text{Gd}(n,\gamma){}^{161}\text{Gd}$ (3.7 min) の断面積は娘核の ${}^{161}\text{Tb}$ (6.9 d) の 74.6 keV の γ 線を用いて決定したものであるが、原論文作成時に比べて γ 線の放出確率が 62%減少したために、今回の改訂値は標準断面積改訂による 5%と合わせ、論文掲載値よりも 67%も大きくなった。

2.5 EXFOR の再配布

NRDC の枠外での EXFOR の再配布(repackaging)の問題が 1996 年の NRDC 会議で議論されたことは長谷川明氏による報告 [14] にあるとおりである。この 1996 年の会議では、EXFOR の内容を正確に反映させること、NRDC の貢献を示すこと、再配布される EXFOR のエントリーのバージョン（改訂日時など）を明示することなどを再配布に対して求めることとなった。

EMPIRE 以外に EXFOR を網羅的に同梱した配布物を見る機会が永らくなかったが、最近開始された WPEC の Subgroup 50 (Developing an Automatically Readable, Comprehensive,

and Curated Experimental Reaction Database)は、EXFOR をより使いやすい書式に変換することを目指しており、EXFOR を読みやすい形に変換したものを配布することが予想される。このような流れの中で、再配布にあたっての要件（バージョンの明示、引用・謝辞、再配布元の認定など）をはっきりさせる必要はないか、という問題提起がなされた。これを受け、次回のセンター長会議までに各センターが考え方をまとめることとなった。

2.6 EXFOR データへの DOI の付与

DOI (Digital Object Identifier)はインターネット上の論文等に割り当てられる識別子である。たとえば EXFOR を利用する際に引用する論文の URL はエルゼヴィア社(Science Direct)のサーバでは <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090375214005171> であるが、この URL は将来変わりうる。一方、この論文には 10.1016/j.nds.2014.07.065 という DOI が割り振られており、<https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.065> にアクセスすれば、その時点で論文が公開されているサーバの URL（現在なら上記の Science Direct の URL）に転送されることが保証される。これが DOI の利点である。核データ分野の論文もその多くには DOI が振られている（ちなみに個人的には核データニュースの記事にも DOI を振るといいのではと考えています）が、今回、NNDC は EXFOR のデータセット個々に DOI を振ってもいいのではないかと発言した。

先のカールスルーエの例にもあるように、EXFOR に収録されたデータは改訂される可能性がある。EXFOR エントリーに改訂ごと新たな DOI を振るようになれば、DOI 形式での引用により、引用当時に EXFOR に格納されていたデータを参照することが容易となる。ただし、実際に EXFOR エントリーへの DOI の付与を開始すると、DOI のサーバからの転送先をどのセンターのサーバにするか（各センターとも自分のサーバへのアクセス数が減るのはいやだろう）、転送先で閲覧に供すものを EXFOR のソースファイルにするのか、それを加工したものにするのか、など色々な技術的課題が生じる。米国エネルギー省(DOE)がデータへの DOI 付与に積極的であるせいか、NNDC は来年の NRDC 会議までに DOI の付与を開始したい意向である。一方、NDS は付与前に理解すべきことが多くあると考えていることから、DOI 付与をすぐに開始することには慎重であり、現在両方で議事録での書きぶりの調整をすすめている。

3. おわりに

会議 4 日間のうち 3 日目までは一日 3 時間という限られた時間の中でほぼ予定通りに議題を消化したが、気が緩んだせいか最終日は予定時間を 1 時間も超過してしまった。筆者は会議終了後、IAEA 最寄りの地下鉄駅にて子供が使う「漢字検定」の過去問集を日本語の先生から受けとることになっていたが、会議がなかなか終わらなくてこまった。待ち合わせ時間の 10 分前によく閉会セッションになったので、早口で来年の会議日

程を提案し、参加者に事情を伝えて駅へと走った。運悪く課長の Koning 氏も別件で会議室を離れてしまっており、議長の Pritychenko 氏が閉会の辞を述べて散会、という異例の展開になったことを会議の録画を見て知った次第である。

ビデオ会議形式には乗り気でなかったものの、いざやってみるとビデオ会議にも利点があることを知った。通常の会議ではどうしても議場の一部の人の発言が目立ち、それが結論の方向を決めていきがちである。ところがビデオ会議では一人ずつマイクをオンにしては言いたいことを言ってマイクをオフにする（複数の参加者のマイクがオンになっているとハウリングが起きる）、という形をとるために、色々な人の意見を順番に聞いていくことがやりやすかった（ハウリング予防のために発言者以外のマイクを強制的に切ることもできた）。通常の会議だと集合写真の撮影時間にたまたま議場にいない人が現れるが、ビデオ会議であればそんな人を集合写真に貼り付けるのもとても簡単。

しかし、コーヒブレイクや散会後に 1 対 1 で行うような議論はやはり現地開催の方が便利だ。普段会えない人との再会や食事などは現地に集ってこそその楽しみであり、それが国際協力に対して質の高い貢献をつづけるための動機づけとなっていることも私は重視したい。

今回、日本からは北大の木村真明・多田哲明両氏と原子力機構の岩本修氏に出席いただいた。北大 JCPRG による荷電粒子・光入射反応データの EXFOR への採録についてはここしばらくとりまとめをされていた多田氏が研究で忙しくなり、最近では趙清(Zhao Qing)氏と申承憲(Shin Seungheon)氏が核理論研究の傍らで採録活動の実務を担ってくださっている。アジアの外国人研究者が日本の研究者と協力して日本の加速器施設で測定を実施し、その成果をまとめた論文を出すことは珍しくなく、お二人はそのような外国人実験研究者との円滑なやりとりにも寄与されている。読者のみなさんにも彼らから数値データの送付依頼が舞い込むことかも知れませんが、そのときはよろしくおねがいたします。

4. うめくさ～ウィーンの春の味覚「ベアラウフ」

参考文献がどうしても次ページに送られてしまう。紙面を無断しないよう、コロナウィルスに個人的に少しだけ関連した話題としてベアラウフ(Bärlauch、直訳すると熊葱)のことを書こう。これは日本のギョウジャニンニク（北海道ではアイヌネギともいう）の近縁種である。ラムソン(Ramsons)、といえば聞いたことがある人もいるかもしれない。

3 月、春めいてきたウィーンの森でもっともはやくに地表に顔を出すものの一つがこのベアラウフである。この時期になると毎週末このベアラウフの採集に子供とでかける。当地でも季節の食材としてスパゲッティのソースやスープの具材となるが、我が家ではニラの代用品として餃子の餡に練りこむ。葉を細かく刻み醤油とともに瓶詰めにする。これを数回繰り返すと我が家の餃子 1 年分が賄えるのだ。去年・今年はロックダウンで

週末に遠出などしないので、平年以上によくベアラウフ狩りにでかけた。瓶詰めが十分な本数できたので、試しにおひたしにして食べてみたら、大変に美味であった。間違えてスズランを食べて食中毒をおこす人が絶えないようである。



写真 ウィーンの森でのベアラウフ狩り(2021年3月27日撮影)

参考文献

- [1] N. Otuka and B. Pritychenko (ed.), [INDC\(NDS\)-0829, 2021](#).
- [2] T. Fukuda et al., [EPJ Web Conf. 239 \(2020\) 05013](#).
- [3] B. Pritychenko et al., [EPJ Web Conf. 239 \(2020\) 09003](#).
- [4] たとえば P.K. Kuroda et al., [Nucl. Sci. Eng. 10 \(1961\) 70](#).
- [5] たとえば K.-H. Schmidt et al., [Nucl. Phys. A 665 \(2000\) 221](#).
- [6] たとえば T. Enqvist et al., [Nucl. Phys. A 658 \(1999\) 47](#).
- [7] T. Motobayashi et al., [Phys. Rev. Lett. 73 \(1994\) 2680](#).
- [8] Y. Tokimoto et al., [Phys. Rev. C 63 \(2001\) 035801](#).
- [9] C. Bertulani and G. Baur, [Physics Today Vol. 47 No.3, p.22 \(1994\)](#).
- [10] M. Kadenko et al., [EPL 131 \(2020\) 52001](#).
- [11] W. Ratynski et al., [Phys. Rev. C 37 \(1988\) 595](#).
- [12] C. Massimi et al., [Eur. Phys. J. A 50 \(2014\) 124](#).
- [13] F. Käppeler et al., [INDC\(GER\)-0053, 2021](#).
- [14] 長谷川明、核データニュース No.55 (1996) 1.