

会議のトピックス(I)

国際核反応データセンターネットワーク(NRDC)

2022 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)の2022年の会合を6月14日～17日の4日間の会期でウィーンのIAEA本部にて開催した。コロナ感染拡大の影響で2020年の年会が開催できず、2021年の年会は仮想会議として開催、本年は3年ぶりに現地開催となった。NRDC会合はセンター長が参加してネットワークの運営に関する課題と技術的な課題の両方を討論する「センター長会議」と技術的課題のみを討論する「技術会合」が毎年交互に開かれてきた。しかし、コロナ感染拡大やウクライナ情勢から全13センター長が揃っての討論を実施することが難しく、昨年に引き続き今年もセンター長の出席を要しない技術会合としての開催となった。参加者は23名、その内訳はアメリカ1、インド1（遠隔参加）、ウクライナ1（遠隔参加）、カザフスタン1、韓国2（うち1名は遠隔参加）、日本2、ハンガリー1、ロシア6（遠隔参加）、NEA1、IAEA7である。

2. 話題

以下では読者の関心をひく可能性があるいくつかの話題について報告を行う。議事録はINDC(NDS)-0857 [1]として刊行されているので、ほかの話題や発表資料に関心のある方はそちらを参照されたい。

2.1 EXFOR 採録実績

各センターはそれぞれの国・地域で測定された特定の入射粒子(中性子・荷電粒子・光)の反応データの採録を担当している。表1に前回会合以降にEXFORに登録されたエントリー数をまとめる。日本で測定された中性子入射反応データのうちJAEAに関連するものの採録をJAEAが試験実施しているが、これはNEA DBのエントリー数に含まれてい

る。KazMon はデータセンターに所属していないカザフスタンとモンゴルの採録者の採録統計である。彼らはカザフスタンで測定された荷電粒子入射反応データと西欧で測定された重イオン入射反応データ（NEA の採録対象外）の採録をそれぞれ担当している。

表 1 NRDC2021 会合以降に登録された新規 EXFOR エントリー数
(n: 中性子入射反応のみ、c: 荷電粒子入射反応のみ、g: 光入射反応のみ)

ATOMKI	CDFE	CJD	CNDC	CNPD
ハンガリー(c)	ロシア(g)	ロシア(n)	ロシア(c)	中国(n+c)
7	11	12	28	21
JCPRG	KazMon	KNDC	NDPCI	NDS
日本(c+g)	カザフ・蒙(c)	韓国	インド	残りの国
21	14	13	55	50
NEA DB	NNDC	UkrNDC		
西欧(n+c)	米・カナダ	ウクライナ		
103	198	18		

2.2 中性子入射核分裂収率の採録進捗

中性子入射核分裂収率は従来 EXFOR には網羅的には採録されてこなかった。その理由として、評価活動が断面積評価とは独立にアメリカ (England ら) やイギリス (Mills ら) のグループで実施されてきたこと、またこれらの評価者が独自の実験データベースをもっていることが挙げられる。しかし、JENDL-5 公開にあたって日本独自の初の網羅的な評価がなされたことにも見られるように、昨今、新たな評価活動が活発となっている。IAEA でも 2020 年から 6 か年で当該データの評価のための共同研究事業 (CRP) を実施しており、これに呼応する形で IAEA では実験データベースに関する専門家会合を 2019 年に開催し、また NNDC の Pritychenko が NRDC を代表して上記の CRP に参加している。

NRDC では Pritychenko が文献データベース NSR との比較から EXFOR に漏れている実験論文の一覧を作成した [2]。同時期、文科省原子力人材育成等推進事業「グローバル原子力人材育成ネットワークによる戦略的原子力教育モデル事業」の大学連合の枠組で福田貴斉氏 (早稲田大) がインターンとして NDS に赴任された [3] ので、前述した米英の評価者が作成した実験データベースと EXFOR の比較結果をまとめていただいた [4]。NNDC と NDS の調査結果から重複を除いた最終的な EXFOR 採録候補論文の一覧を作成したところ、最終的に 604 件の論文に掲載されているデータを新たに EXFOR に採録する必要が判明した。これらの論文の採録分担が 2019 年の NRDC 会合で決められたが、本会合までの約 2 年間にその 84% ほどの採録が完了したことが報告された。

2.3 準位エネルギーの誤入力の分析

NRDC では EXFOR に入力されている情報を外部のデータベースとの照合し、誤採録の修正に役立っている。たとえば、EXFOR に格納されている半減期と ENSDF の半減期を比較した結果、基底状態と準安定状態の関係が両者で反転している事例が多数あることが 2016 年の NRDC 会合で議論された。昨年末から今年頭にかけて、前述した文科省の大学連合事業により清水亮輔氏 (北海道大) がインターンとして 3 か月間赴任されたので、彼に軽粒子入射反応データの EXFOR エントリーに入力されている準位エネルギー (E-LVL) を反応計算パラメータライブラリ RIPL-3 に収録されている準位エネルギーと比較してもらった。その結果 416 件の修正が必要であることが判明した。もっとも多かったのはエネルギーの単位の誤入力で、他にも、数値自身や反応式の誤入力、 γ 線の放出エネルギーを誤って準位エネルギーとして入力している場合などが目についた。

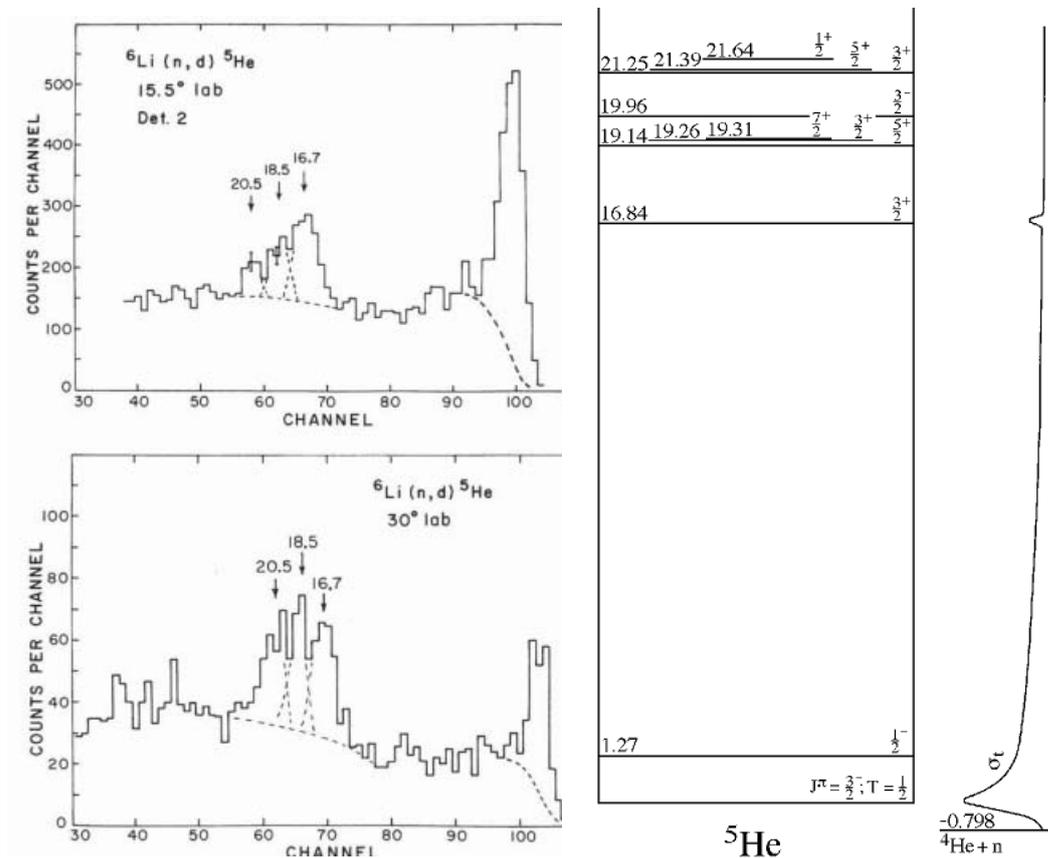


図 1 ${}^6\text{Li}(n,d){}^5\text{He}$ のスペクトル [5] (左、出版社転載許可済) と ${}^5\text{He}$ の準位図 [6] (右)

一筋縄でいかないのは軽い不安定核であり、図 1 に示した ${}^5\text{He}$ もその一例である。この図の左側に示されているのは Crocker Nuclear Laboratory での測定 [5] で得られた ${}^6\text{Li}(n,d){}^5\text{He}$ の重陽子スペクトルで、ここから著者らは重陽子の微分核断面積を ${}^5\text{He}$ の 4

つの状態 ($E_x=0, 16.7, 18.5, 20.5$ MeV) について報告している。他方、2002 年の TUNL の $A=5$ の評価 [6] では基底状態の上に 1.27 MeV と 16.84 MeV の状態があることになっている。すなわち測定で見られた 16.7 MeV の状態はそれに近い状態が TUNL の評価で確認されていることになる。ところが RIPL-3 には ^5He の励起状態は一切入っていない。RIPL-3 に入っている準位の情報は基本的に ENSDF からとられているはずなので、ENSDF 評価の国際協力調整を担当している同僚の Vivian Dimitriou に聞いたが彼女もよく分からないとのことだった。そこで、TUNL の評価グループの責任者の John Kelley に聞いたところ、この核は束縛状態がなく、 $n+\alpha$ で得られる共鳴状態も極めて幅が広いために、評価結果 [6] にある励起状態を ENSDF に採用しなかった、ということであった。TUNL のグループが Nucl. Phys. A に公刊した評価結果は必ず ENSDF に入ると思っていたが、話はそう単純ではないらしい。

2.4 非弾性散乱の寄与を含む弾性散乱断面積

重い核の中にはウラン 238 (45 keV) やトリウム 232 (49 keV) のように第一励起状態の準位が非常に低いものがあり、この準位幅以上の分解能の検出器を用いなければ、弾性散乱の寄与だけを実験的に取りだすことは難しい。

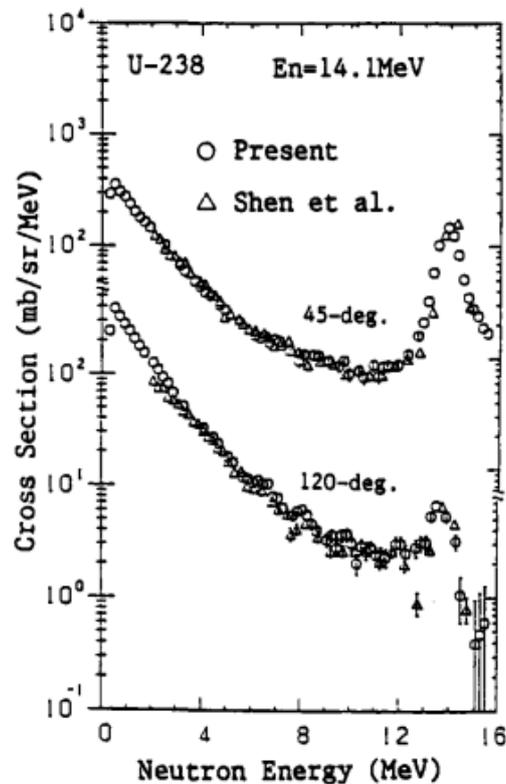


図2 $^{238}\text{U}(n,n+x)$ 放出中性子二重微分断面積の例 (出版社転載許可済) [7]

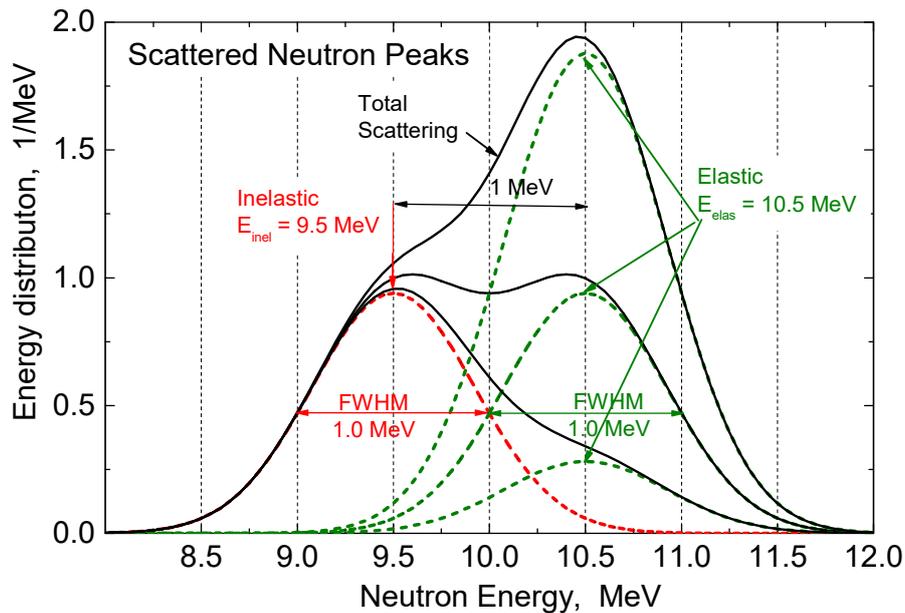


図 3 半値全幅(FWHM)が 1.0 MeV の分解能の検出器で得た弾性散乱と 1 MeV にある励起状態への非弾性散乱の中性子スペクトルの模式図 [8]

図 2 はそのような放出中性子スペクトルの一例であるが、第一励起状態をはじめとする低い励起状態の寄与を除いて弾性散乱の成分のみをモデル計算などを用いずに抜き出すことは不可能である。他方、図 3 にあるように基底状態と第一励起状態の準位エネルギー差が検出器の分解能(FWHM)と同程度であればガウス分布でフィットするなどして弾性散乱の成分を取り出すことが可能である。

重核の中性子散乱断面積は炉物理への応用の観点から重要であり、その評価のもととなる測定値が正しく EXFOR に入っているべきだが、非弾性散乱の寄与が除き切れていない散乱断面積が弾性散乱断面積として EXFOR に格納されている場合が多数ある問題が同僚の Roberto Capote から長年に渡って指摘されていた。この観点からの EXFOR の現状分析には中性子検出の知識が必要であり、測定経験が皆無の筆者はこの問題をずっと先送りしてきた。昨年、中性子放出断面積の TOF 測定の経験があり、また EXFOR にも詳しい Stanislav Simakov がこの分析を引き受けることに同意してくれた。そこで、Capote と相談して、弾性散乱断面積として EXFOR に登録されているものの中で、(1)入射エネルギー 1.5 MeV 以上、(2)第一励起状態のエネルギー 200 keV 以下、(3)標的質量数 40 以上、の 3 つの条件を満たす 234 件のデータセットを Simakov 氏に分析してもらった。彼の分析によれば半数強の 127 件については非弾性散乱の寄与が含まれていることが本会議で報告された。なお、各データセットに対する分析結果の詳細が本会議の報告書に付録として収録されている [8]。

2.5 EXFOR ファイルの利用者向け書式とインターフェース (API) の開発

現在、EXFOR 利用者の多くは各データセンターが維持管理するウェブ検索サイトにて条件を入力してデータの一覧を取得、そこで欲しいデータを選択して、数値データをダウンロードするなり作図するなりしている。数値データを EXFOR のソースファイルの形式で入手した場合、これを利用者各自が用途に応じてさらに処理する必要がままある。そこで、大量の数値データを扱う EXFOR 利用者の中には EXFOR のソースファイルをウェブサイト上で C4 (Computational Format) [9]、あるいはこれを拡張した C5 という書式に変換し、これをダウンロードして用いている人も多い。例えば WPEC の Subgroup 30 “Quality Improvement of the EXFOR Database”では EXFOR を網羅的に C4 に変換した XC4 ライブラリの分析により、当方の課長の Arjan Koning が当時 NEA Data Bank にいた Emmeric Dupont とともに EXFOR 誤採録の洗い出しに大きく貢献した [10]。

その後、ENDF 書式の XML (GND) への変換の試みなどに感化され、EXFOR の機械可読化を高めるべく従来の 80 カラム書式を XML で置き換えよう、という意見が出たこともあった。しかし、データ収集のやりやすさという観点からは現行の EXFOR 書式は完成度が高く、これをあえて新しいものに置き換えるとデータ収集の効率を落とす懸念がある。そこで、データの収集は従来の書式で行い、他方で利用者に対しては従来の書式で収集されたデータを機械可読化がより高い書式に変換して提供するのが良いのではないか、というのがここ 10 年ほどの NRDC の立場である。

このような利用者向けデータ書式やインターフェース (API) を開発するために NEA WPEC はサブグループの一つとして SG50 “Developing an automatically readable, comprehensive and curated experimental reaction database”を立ち上げた。その概要には核データニュース No.127 に報告がある [11]。この SG50 は図 4 のように EXFOR から 3 段階の変換を予定しており、そこでは機械可読化を高めるために候補とあがっているのが JSON 形式への変換である。SG50 の幹事である Amanda Lewis と Denise Neudecker に問い合わせたところ、現在まだ仕様書を作成している段階ということであり、今回の NRDC 会議への報告は見送ることになった。

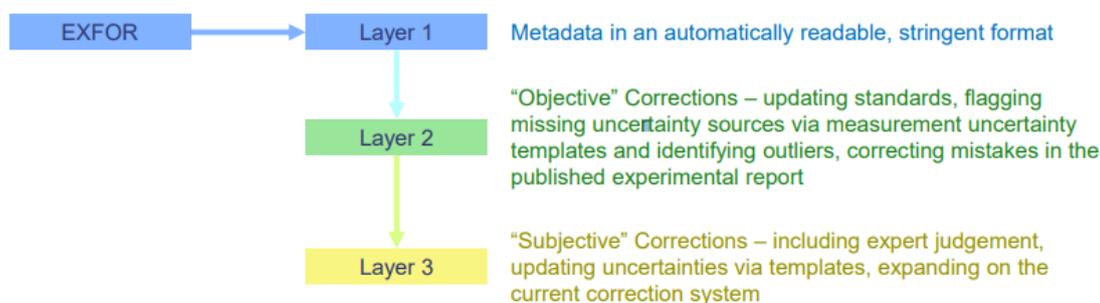


図 4 WPEC SG50 で検討されている EXFOR のデータ変換のフロー [12]

IAEA の Georg Schnabel は SG50 開始以前から EXFOR の読み出しツールを開発しており、その成果は ND2019 の報告 [13] にもあるが、現在は Python ベースの JSON 形式への変換ツール EXFOR-parserpy の開発を通じて SG50 に寄与している。なお、彼は ENDF 向けの姉妹ツールとして ENDF-parserpy の開発も進めているようである。

今回の会議では JSON 形式への変換とは別方向での開発を進めている Viktor Zerkin から SG50 に関連する報告があった。彼は、EXFOR を SQL 形式に変換し、利用者が SQL や Python、Fortran など好みの言語でこの SQL 形式のデータを読みだし、加工・作図することを考えている。検索機能が充実した SQL で個々のニーズにきめ細かに対応できるのがこの方法の利点である。彼はこれまでも EXFOR を SQL 形式に変換し、ウェブなどを通じて提供してきたが、数値データは従来 BLOB と呼ばれるバイナリ形式で扱われていて、ある EXFOR データセットの特定のデータ点を抜き出すことは不可能であった。新たに配布が開発された SQL 形式 (X4Pro) [14] では各データ点が個別のデータセットとして扱われており、このために特定の条件を満たすデータ点の抽出・加工することが可能である。

図 5 はその X4Pro の利点を示す一例である。EXFOR では角度微分断面積を積分した結果がルジャンドル係数の 0 次係数として高次の係数とともに一つのデータセットとして格納されている場合があり、従来この 0 次係数のみを機械的に抜き出して断面積として活用することは難しかった。しかし X4Pro を用いることで 0 次係数だけを取り出し、それに 4π を乗じることで、断面積として格納されているほかの測定結果と併せて加工・作図することが可能となったことが分かる。筆者も最近ではウェブ検索の代わりにこの X4Pro から SQL を用いてコマンドラインでデータを引き出す機会が増えてきた。

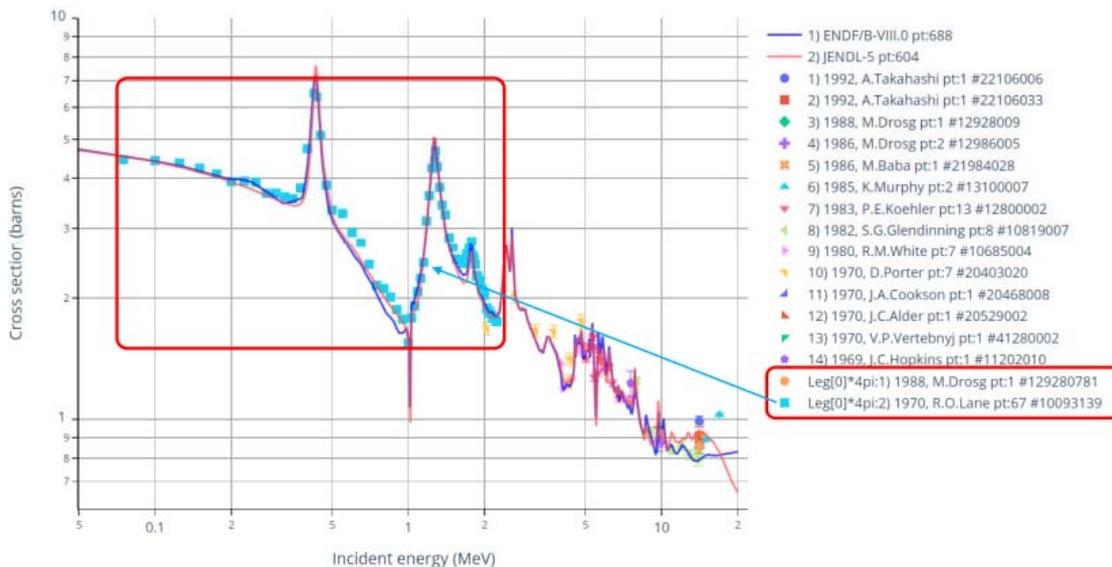


図 5 EXFOR から X4Pro で抜き出した $^{11}\text{B}(n,n_0)^{11}\text{B}$ 断面積 [15]。赤枠で示された部分にある低エネルギー領域 (2 MeV 以下) の二つの測定結果 (Drosg, Lane) は EXFOR に格納されているルジャンドル係数のうち 0 次のを抜き出し 4π を乗じて図示。

以上に紹介したような EXFOR-parserpy や X4Pro による EXFOR ファイルの変換を通じ、EXFOR に格納されている情報がより高度に活用されることは EXFOR の国際協力調整の任にある筆者としても大変に望ましく、今後の発展に期待しているところである。なお本稿執筆時点(2022 年 11 月 12 日)では X4Pro の SQL ファイルの試用版が <https://nds.iaea.org/cdroms/> よりダウンロード可となっている。パッケージにあるデータベース(db)ファイルを無料のソフト“DB Browser for SQLite” (<https://sqlitebrowser.org/>)で開くことでデータベースの内容閲覧や SQL 文の実行が容易にできる。またコマンドライン上で SQL 文を実行すればバッチ処理などより高度な利用が可能である。

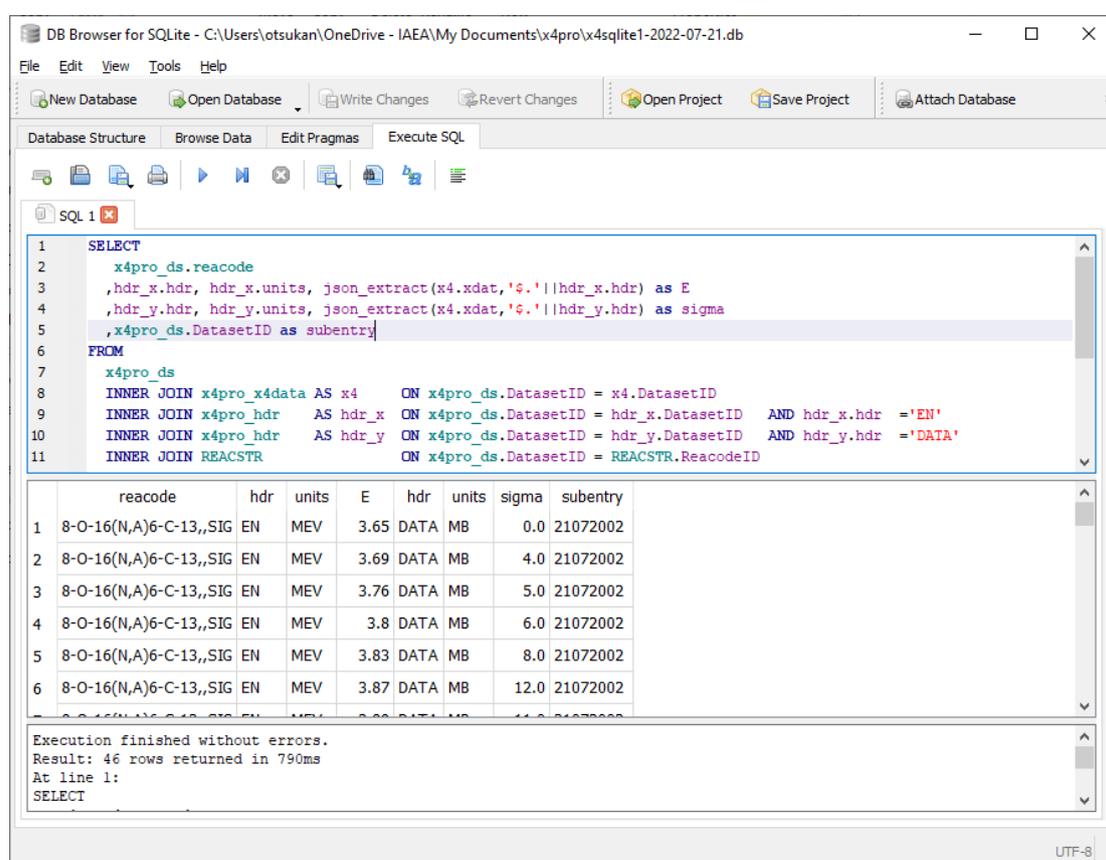


図6 DB Browser for SQLite 上で X4Pro から $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ の断面積を抽出

3. おわりに

本会議の準備を始めた 2021 年秋頃から、コロナの感染が落ち着いた(日常になった?) こともあり、会議参加者を再び IAEA 本部で見かけるようになってきた。仮想会議では極東とアメリカの参加者双方にとって都合の良い会議時間を設定しがたく、また規約の策定などは参加者が対等の立場で満足がいくまで議論を深めることが大切である。そこで、今回は遠隔参加を極力排した現地開催にこだわった。帰国時に隔離が要請される中国の

現地参加がかなわないのは想定内だったが、ウクライナ侵攻は会議の準備開始時には全くの想定外であった。ロシアのセンターはいずれもかなり早い段階で遠隔参加希望を伝えてきた。ウクライナのセンターは当初は現地参加希望であった。しかし、航空便がなく、キエフ～ウィーンの夜行列車も会議時には通しでの運行を中断、更にキエフではガソリンも手に入りにくいということで、ウクライナのセンターも遠隔参加となった。

アジア地域に関しては中国とインドのセンターの現地参加がかなわなかったのが残念であったが、他方、韓国からは Young Ouk Lee 氏に変わってセンター長になられた Do Heon Kim 氏と採録担当者の Sung Chul Yang 氏の両名の参加がかない喜ばしいことであった。日本からは北大の Seung Heon Shin 氏が参加された。Shin 氏は会議の翌週も滞在され、日本の荷電粒子入射反応データの EXFOR エントリーの仕事に従事された。加えて NRDC の準メンバーであるカザフスタンからは Timur Zholdybayev 氏が参加された。

会議開催中は天候に恵まれ、郊外のホイリゲの庭(Schanigarten)での夕食会は 1 リットルのワインのフラスコが次々と空となるほどの盛り上がりで店を出たのは 23 時を過ぎ、飲料代は予算超過となり、その分は筆者の持ち出しになってしまった。

次回の NRDC 会議はセンター長も出席する形式での現地開催を 2023 年 5 月 9 日～12 日に予定している。

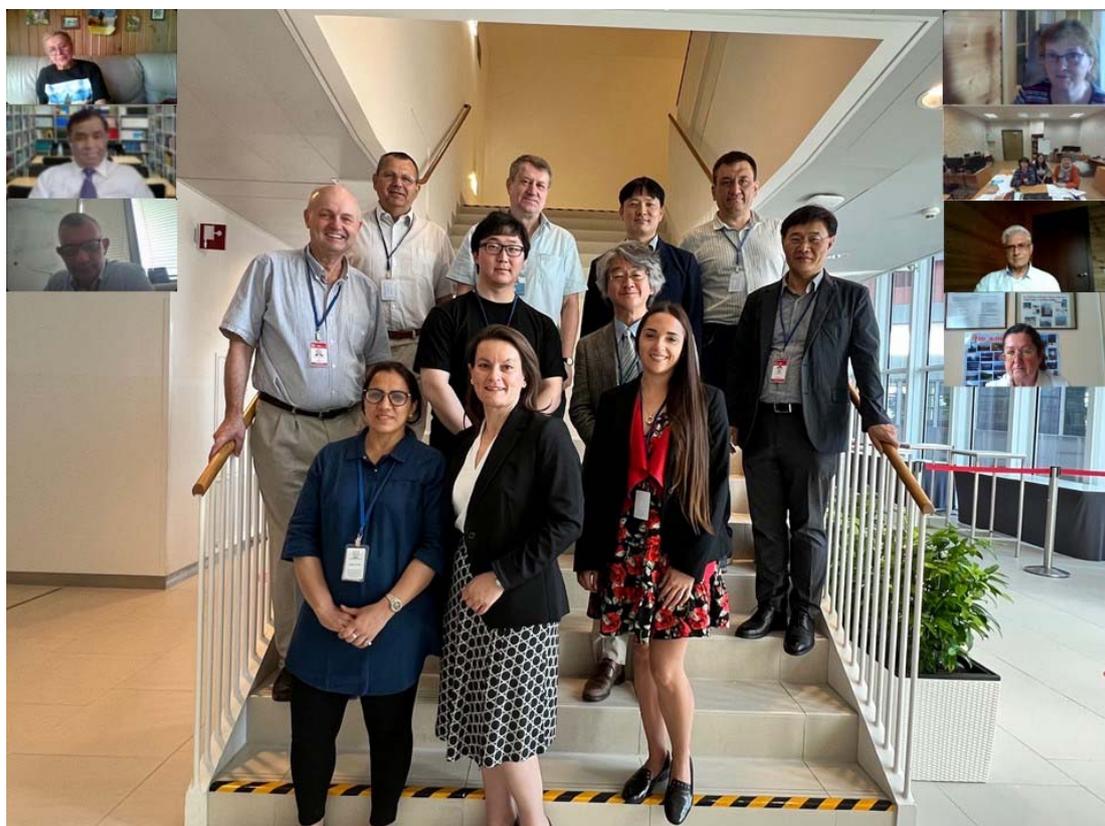


図 7 集合写真



図 8 夕食会

参考文献

- [1] N. Otuka, S. Takács (eds.), INDC(NDS)-0857, International Atomic Energy Agency, 2022.
- [2] B. Pritychenko et al., EPJ Web Conf. **239** (2020) 09003.
- [3] 三成映理子・福田貴斉、日本原子力学会誌 **61** (2019) 871.
- [4] T. Fukuda et al., EPJ Web Conf. **239** (2020) 05013.
- [5] F.P. Brady et al., Phys. Rev. **C16** (1977) 31.
- [6] TUNL evaluation (2002), “Energy Levels of Light Nuclei, A = 3 - 20”, Nuclear Data Evaluation Project, Triangle Universities Nuclear Laboratory. D.R. Tilley et al., Nucl. Phys. A **708** (2002) 3.
- [7] M. Baba et al., J. Nucl. Sci. Technol. **27** (1990) 601.
- [8] S. Simakov, N. Otuka, Appendix G of Ref. [1].
- [10] E. Dupont et al., J. Kor. Phys. Soc. **59** (2011) 1333.
- [11] 岩本修ほか、核データニュース **127** (2020) 1.
- [12] A. Lewis, D. Neudecker, A. Koning., “Status of WPEC SG50”, 33rd Meeting of the Working Party on international Nuclear Data Evaluation Co-operation, Virtual Meeting, 14 May 2021.
- [13] G. Schnabel, EPJ Web Conf. **239** (2020) 16001.

[14] V. Zerkin, “X4Pro – universal, fully relational EXFOR database”, to be published in EPJ Web Conf. as the Proceedings of the 15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022), 24-29 July 2022.

[15] V. Zerkin, “X4Pro – fully relational EXFOR database”, Technical Meeting on the International Network of Nuclear Reaction Data Centres, Vienna, Austria, 14-17 June 2022.