

会議のトピックス(IV)

## GRE@T-PIONEER 核データコースに参加して

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](mailto:n.otsuka@iaea.org)

“The best place in the world to eat paella”という触れ込みで Oscar Caebellos 氏からスペインのバレンシア工科大学(UPV)で開催される GRE@T-PIONEER 核データコースに誘われたのは昨年(2022年)4月末のこと。さっそくバレンシアの位置を地図で調べました。開催期間は11月14日～18日の5日間、私以外にはフランスの Luiz Leal (IRSN)と Ian Hill (NEA)の両氏が招待講師ということでした。5日間のコースを4人で分担するのであれば夏休みのうちになんとか準備できるだろう、と考えて招待をありがたくお受けしました(実際には教材のほぼ全てを Cabellos 氏が用意してくれました)。

GRE@T-PIONEER は Graduate Education Alliance for Teaching the Physics and safety Of Nuclear Reactors (原子炉物理・原子炉安全に関する大学院教育連合)の略で、2020年11月から3か年計画のプロジェクトとして EU (Euratom)の Horizon 2020 という枠組みで採択されたものです。その概要については既に小浦さんが先号の ND2022 報告(アウトリーチ・教育)で紹介されてます [1]。私が参加したのはこの枠組みで開催される6つのコースのひとつ“Nuclear data for energy and non-energy applications”(原子力と非原子力のための核データ)です。9月頭に2週間ほどの参加申込期間が設定され、定員50人(現地参加20人、遠隔参加30人)のところ、90人の申し込みがありました。ちなみに現地参加者の旅費・滞在費はいずれも自己負担です。EUが開催を支援するにも関わらず参加者の出身国を問わないというのが面白いところで、アジアからは日中韓の受講希望者がいずれも遠隔参加枠で採用されました。

このプロジェクトが開催するコースの大きな特徴としてアクティブ・ラーニング(能動的学習)が挙げられます。受講生はコース開催前に、教科書(ハンドブック)の各章に対応した(1)ビデオ講義(10分ほど)を視聴してクイズに回答、(2)更に教科書に目を通してクイズに回答することが求められます。ここで少なくとも半数のビデオを視聴し、半数のクイズに回答することがコースへの参加条件で、最初の選考を通った50人のうち日韓の参加者全てを含む10人がここで脱落しました。当日のコースの受講が許可されたのは40

人（現地参加 13 人、遠隔参加 27 人）で、うち学部生 8 人、院生（修士）23 人、院生（博士）9 人でした。ちなみにクイズ自身は出欠確認の意味合いが強い簡単なもので、たとえば次のようなものでした：

Select the correct option for correct statements:

- (i) The NuDat3.0 is a search-plot tool for nuclear structure and decay data
- (ii) The SIGMA web-interface was designed to plot ENDF data for different evaluations
- (iii) The JAEA Plotting Tool is developed to plot ENDF data for different evaluations

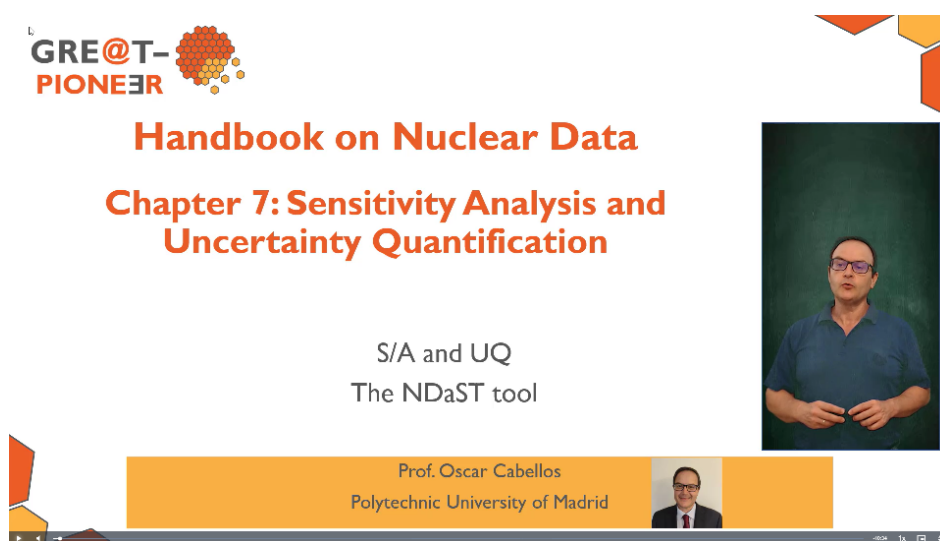


図 1 ビデオ講義の画面の一例

今回のコースの教科書は全て Cabellos 氏の筆によるもので、以下の 10 章からなっています：

1. Nuclear data for nuclear applications（応用のための核データ、70 ページ）
2. The experimental nuclear data（実験核データ、43 ページ）
3. Evaluated Data Libraries（評価済データライブラリ、55 ページ）
4. Nuclear data visualization tools（核データ可視化ツール、24 ページ）
5. Tools for processing nuclear data（核データ処理ツール、84 ページ）
6. Benchmarking and validation（ベンチマークと検証、37 ページ）
7. Sensitivity analysis and uncertainty quantification（感度解析と不確かさ定量、29 ページ）
8. Nuclear data adjustment methodologies（核データ調整法、22 ページ）

9. Nuclear data needs (核データのニーズ、16 ページ)

10. Overview of international organizations (国際機関の概要、13 ページ)

各章末には例題がついており、また上述したビデオやクイズもそれぞれの章ごとに用意されていました。例えば、実験核データを学ぶ 2 章ではウラン 235 の熱中性子断面積の測定値群からその平均を導出するなど、(一般化最小二乗法を含む) 最小二乗法の例題が複数ありました。核データ処理を学ぶ 5 章はそのほとんどが NJOY の各モジュールの処理内容の説明でした。モジュール RECONR の例題の一つは JEFF-3.2 の  $^{105}\text{Rh}$  の共鳴パラメータ (s 波の正負各一本ずつの共鳴が単一準位ブライト・ウィグナー公式 SLBW で入っている) から断面積を再構成するというもので、回答例はエクセルで解く方法と NJOY で処理する方法が紹介されていました。RECONR を使った例題としては、共鳴が一本だけ入っている仮想的な ENDF ファイルを用いて軌道角運動量を 0 と 1 にした場合で共鳴前後の断面積のエネルギー依存性がどう変わるか、NJOY で断面積を再構成し JANIS で図示して調べる、という例題もありました。ベンチマークと検証を学習する 6 章では、JEFF-3.3 を MIT が作成しているモンテカルロ輸送コード OpenMC 用に処理し、これを用いて Jezebel の実効増倍率を OpenMC で計算する例題がありました。

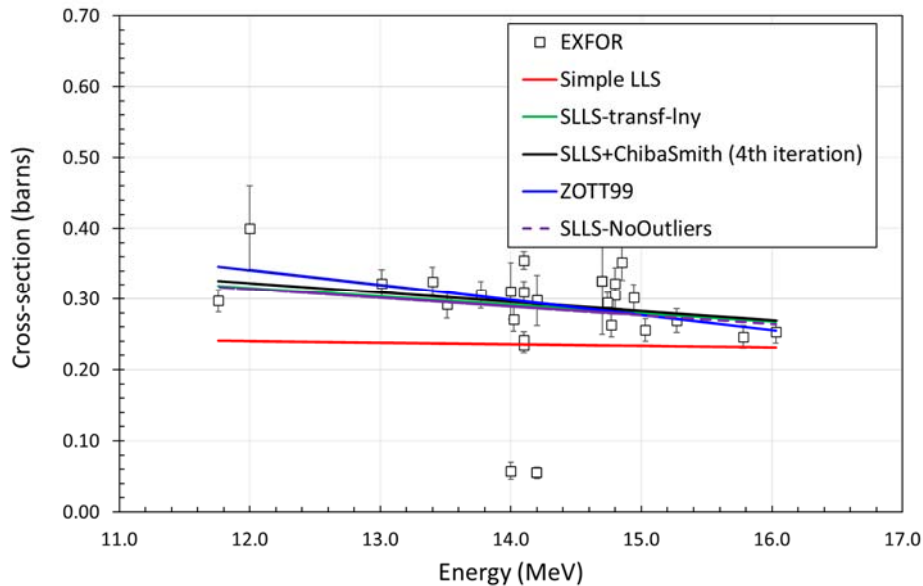


図 2  $^7\text{Li}(n,n')^4\text{He}$  断面積評価の例題に対する通常最小二乗法、対数変換、千葉スミス法のエクセルでの回答例。ZOTT99 はエクセルでなく Douglas Muir のツールの解。

このような各種コードを活用した授業を整備する上ではコードの入手や実行環境の整備が課題になりますが、NJOY や OpenMC が誰でも入手できること、WSL (Windows

Subsystem for Linux)の出現で Windows 利用者でも Linux 環境が簡単に整備できるようになったことで、この種の例題の整備がやりやすくなったように思います。NEA が整備した EXFOR/ENDF の検索・図示ツール JANIS、国際評価済臨界安全ベンチマーク実験データベース ICSBEP の実験値・計算値・感度係数を検索できるツール DICE やこれを用いて核データの共分散を誤差伝搬させるツール NDaST も活用されましたが、これらはネットワーク上で動く Java ツールということで、NEA から起動ファイルを入手すれば、インストールの問題などに出くわさずに使うことができました。

実用的なプログラム演習がその入出力も含めて整備されている点は今回の教科書の特筆すべきところで、教科書本文のみならず例題を入出力とともに収集・整備された Cabellos 氏の労力に頭が下がる思いがしました。コース開催前に参加者が例題にどの程度取り組んだのかはよく分かりませんでした。教室ではプログラムを実行する上で生じた問題などについて参加者同士での議論が活発に行われてました。

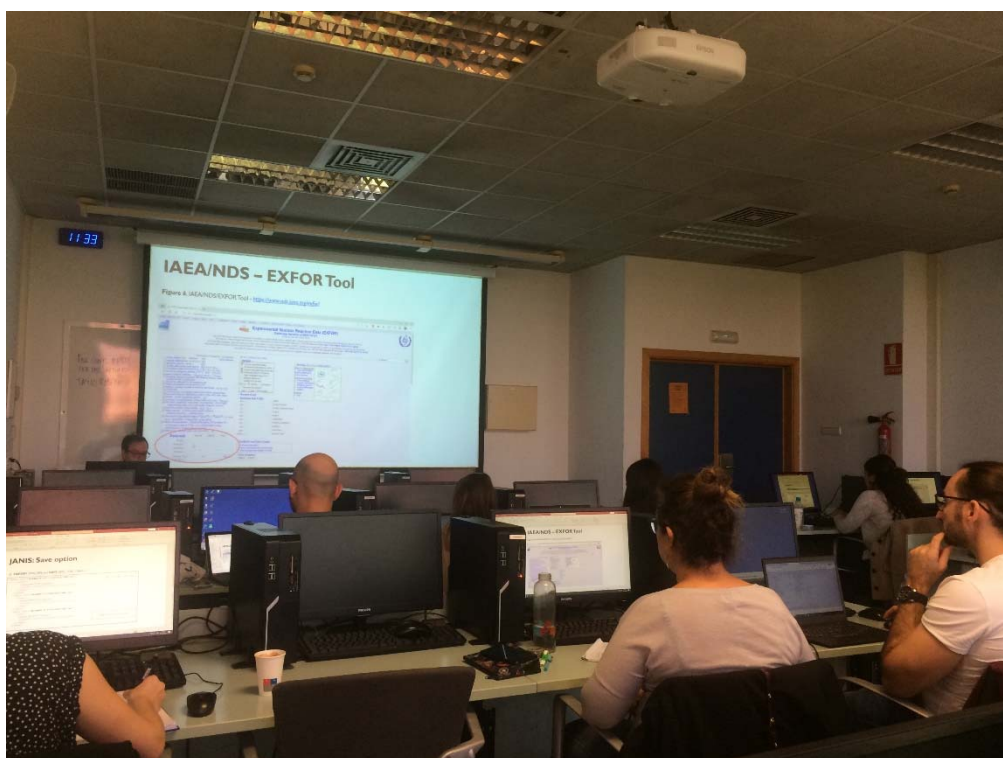


図3 教室の雰囲気 (11月14日)

私自身はいわゆる「核データパイプライン」におけるのうちの処理以降については殆ど経験がなく、実習時間中の参加者からの質問にある程度は対応できるようにしよう、と思い、8月の後半あたりから1か月ほどかけ、例題を含めて教科書全章に目を通しました。教科書の中では様々な処理を扱う5章を読破するのが最も時間がかかり、中でも非分離

共鳴の処理モジュール PURR を紹介する一節はよく理解できぬままに終わってしまいました。教科書の英文はスペイン人らしい書きぶりが散見され、そんなところも結構楽しませてもらいました（“Especial”という単語が英語にあることを知りませんでした）。英語は私も不得手だし殆ど推敲しませんでした。数式など細かいところの誤植をあれこれ指摘するなどして教科書の改善にそれなりに貢献したつもりであります。



図4 滞在中に気について飲んだビール「サン・ミゲル エスぺシャル」

Cabellos 氏と私は大学から 3 km ほど離れた「芸術科学都市」(Ciudad de las Artes y las Ciencias) に宿をとり、ここと会場であるバレンシア工科大学との間を毎日タクシーで往復しました。かつてバレンシアを流れていたトゥリア川 (Riu Túria) が洪水防止の観点から付け替えられた跡地に整備されたのがこの芸術科学都市で、オペラ劇場・博物館・水族館などを用途とする奇抜な形の現代建築が並んでいました。他にもアーチを川に向けてわざと傾けた橋が架かっていたり、美術館が無料だったり、バレンシアには芸術文化に関する公共事業に出費を惜しまない気風があるのかもしれませんが。宿は海辺からもさほど離れておらず、霧に覆われたウィーンから青空広がるバレンシアに到着した日は T シャツに着替えて砂浜までの散歩を楽しみました。気温は 25 度ほどで、砂浜を歩いていると少数ながら水着で海に入っている人が目につきました。





図5 芸術科学都市（左側は科学博物館）

授業は毎日朝 9 時から夕方 17 時 30 分まで、大学の講義棟にて開催されました。教科書のごく一部を選んで講義・演習する形式で、ところどころで出席確認を兼ねて講義に関するクイズが出され、参加者はそれに対する回答をウェブに入力しました。講義・演習は殆ど Cabellos 氏の担当で私は時々コメントする程度でしたが、招待講師の 3 名もそれぞれ持ち時間をいただいて一回ずつ講義を行いました。

最終日を除いて、午後の最後の 40 分ほどはグループに分かれ、特定のテーマに関する報告資料を作成して発表しました。与えられたテーマは以下の通りです：

- 1 日目 **The role of nuclear data and ND needs**：原子力・非原子力それぞれで必要とされている核データについて NEA の HPRL (High Priority Request List)などを参考に例を挙げて報告する。
- 2 日目 **The performance and feedback for JEFF-3.3**：JEFF-3.3 の性能や反響について例を挙げて報告する
- 3 日目 **Processing codes**：FRENDY と SANDY からいずれかを選び、入手・コンパイルを試み、その潜在的な用途について報告する。
- 4 日目木曜 **Sensitivity analysis – NDAST**：NEA のツール DICE から特定のベンチマークを選択し、基準ライブラリから別ライブラリに変更した場合に実効増倍率がどのように変化するか、核データの不確かさがどう影響するかを報告する。

現地参加者のみならず遠隔参加者までグループ分けしてこの課題に取り組ませるのはちょっと酷ではないかと思いましたが、みなさんそれなりのものを限られた時間で仕上げ発表されるので感心することしきりでした。今回のコースの中ではこのグループ学習・報告の部分が大変だったという声が複数あり、最終日（金曜）はこの課題をやらずにおひらきと知ってほっとしていた参加者もおられました。

昼食は毎日参加者全員で教室の近くにあるカフェテリアにでかけました。7.90 ユーロ（1100 円ほど）の定食は料理が 2 皿（1 皿目は米料理・麺類・スープなど、2 皿目は肉・魚料理）に冷たい飲み物と食後のコーヒーが付きです。普段ウィーンの職場で私が摂る昼食（通勤時にスーパーで買うパン 2 個＋バナナ）よりかなり豪華ですが、お得感がありどれもおいしいので、毎日この定食を食べました。



図 6 「本日の定食」。この日は米料理(Arroz)とイカ(Pota)を食べました。

最終日の午後は GRE@T-PIONEER 全体を統括されているチャルマース大学（スウェーデン）の Christophe Demazière 氏が講評をされ、またコースの全体構成についてアンケート調査がありました。回答をまとめたものを後日いただきましたが、網羅的な教科書と実践的な例題に対する高い評価が目立ちました。一方で、教科書の内容のうち講義で取り上げられる部分がかかなり限定されておりこれは開催期間が短いからではないか、という声もありました。あと予想されたことですが、遠隔参加の方からは時差で参加しにくいこ

と、現地参加者の間でなされる議論が聞き取りにくいことなどが指摘されました。コース3日目には現地のバレンシア工科大の人たちが夕食会を企画してくれ、これもとても楽しかったのですが、同じような一体感を熱心に参加している遠隔参加者と得られないのは残念でした。

ヨーロッパの修士課程の大学院生は一年間に 60 ECT (=European Credit Transfer and Accumulation System、ヨーロッパ単位互換評価制度)を履修するのが一般的だそうで、このコースを無事履修された方々には 3 ECT が授与されたようです。及第者には成績が 5 段階評価でつきました。現地参加者の成績の方が圧倒的に良かったのですが、これは致し方ないように思います。本コースは今回一度限りの開講というのが当初予定でしたが、教程のさらなる改良のために来年も開講する可能性があるようです。また、本コースに関連して今年(2023年)1月～3月に以下の3か所での測定実習が開講されます：

- ドレスデン工科大 (AKR-2 炉)：放射化、透過率、反応度
- スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (CROCUS 炉)：放射化、反応度
- ブダペスト工科経済大学 (BME 炉)：放射化、ドップラー効果



図7 夕食会。左側手前から Jan Malec 氏 (IJS、スロベニア)・筆者・Ian Hill 氏 (NEA)、右側手前から Arturo Vivancos 氏 (UPV、スペイン)・Cabellos 氏

本稿を書いている原子力学会 2021 年秋の大会の企画セッション『シグマ』調査専門委員会 2019、2020 年度活動報告」で核データ分野の人材育成に関する報告がなされていることを思い出しました。講演報告 [2] ではシグマ委員会が構想している教科書について以下の3つの可能性が挙げられています：



1. 物理的な記述の正確さを重視し数式を駆使したもの
2. マニュアル的なもの（計算コードのマニュアルの付録など）
3. 数式をなるべく使わない読み物的なもの

今回用いられた教科書は二番目の要素も併せもつ三番目の構成に近いと感じます。コースに参加した主な顔ぶれは核データの利用者であり、今回の Cabellos 氏の教科書の書きぶりも実に適切ではなかったかと思えます。たとえば共鳴公式を導出するためには散乱の量子論から始めなければなりません、今回の教科書では ENDF や NJOY の共鳴領域に関わる物理量や概念を説明するための必要最小限の数式を列挙するにとどめてました（これはこれで面倒な作業だと思います）。「いつも R 行列ってなんだろうと思って勉強をはじめただけど続かないんだよね～」といった向学心旺盛な参加者の発言もありましたが、このような勉強はさしあたり既存の専門書に委ねれば良いように思います。



図8 コース終了時の記念写真

初めてのバレンシア滞在でしたので、金曜の午後はコース終了後に旧市街を見て回りました。美術館を見てからサンタ・マリア大聖堂（Catedral de Santa María）前の広場でみると、11月も後半というのにほとんどの食堂はまだ屋外にテーブルを出していました。大小さまざまなギターを持った人たちがテーブルを囲んでいて、彼らの歌声を耳にしてスペインらしい気分になりました。翌日は中央市場（Mercat Central）に出かけ、棘がついたままのウニをはじめ、新鮮な魚介類が並んでいるのをうらやましく眺めました。ウナギはスペインではもっぱら稚魚をオリーブオイルやニンニクと煮込んで食べるものだと思ってましたが、この市場には成魚が生きたまま売られていて、注文を受けると目打ちなどせず頭を落としてました。あと特に目についたのがカラスミ（Huevas）。ボラだけではなくタラやマグロなど色んな魚の卵のカラスミが並んでました。スペインの在留邦人の中にはこれをたらこのようにお茶漬けやパスタに入れて食べる人もいます。値段は日本よりも若干安く、私も買おうかどうかと店頭で右往左往しまし

たが、体によくないような気がして買うのをよしました。ボラの卵からこういうものを作ろうという発想が洋の東西を問わず現れるのは面白いですね。



図9 中央市場に陳列された各種カラスミ

表1 コース当日参加者国別内訳

	中	ECU	FIN	仏	独	伊	日	MAR	POL
遠隔	5	1	2	1	1	3	0	1	1
現地	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	韓	SVK	SVN	西	スイス	蘭	英	米	合計
遠隔	0	1	0	6	0	1	2	2	27
現地	0	1	1	6	1	0	2	0	13

ECU: エクアドル、FIN: フィンランド、MAR: モロッコ、POL: ポーランド、SVK: スロバキア、SVN: スロベニア

#### 参考文献

- [1] 小浦寛之：科学と技術のための核データ国際会議(ND2022)「教育・アウトリーチ」、核データニュース No. 133、p. 44 (2022).
- [2] 片渕竜也：『シグマ』調査専門委員会 2019、2020 年度活動報告「2 核データ分野の人材育成」、核データニュース No. 130、p. 22 (2021).