

核データ考古学 Nuclear Data Archaeology

国際原子力機関 核データ課

大塚 直彦

n.otsuka@iaea.org

ロスアラモス国立研究所 理論部門

河野 俊彦

kawano@lanl.gov

1. 緒言

MIT の教授、A. Kerman 氏とワイングラスを傾けつつ談笑していた時の話です。原子核理論の高名な方ではありますが、以下親しみも込めて Arthur と呼ばさせていただきます。大昔の出来事、Arthur が R. Feynman から「この論文原稿をチェックしてくれ」と数十枚の手書き（タイプライター？）原稿を渡されたそうです。複雑な角運動量が絡む面倒な計算で、数ヶ月がかりで結果が正しい事を確認したら、「それあげるから、計算を拡張して論文にしていよいよ」と言われたとか。

Feynman の未発表の論文原稿です。今ならオークションに出したら良い値が付くんじやないか、というのは浅ましい河野が Arthur に伝えた率直な感想ですが、残念ながらこの原稿は引越しのどさくさで失われてしまったんだとか。

理論にしる実験にしる、古くは全て紙の上に記録されたものであり、公表されなければ Feynman の論文のように永久に失われてしまうものがあります。核データの世界にも、そんな淘汰をくぐり抜けて現代に残ったデータが少なからず存在するようです。これを発掘して利用者に供するのは、核データ研究の特殊な一面でもあり、これを**核データ考古学** (Nuclear Data Archaeology) と呼びます。拙稿は、皆さんが普段垣間見ることの少ない核データ考古学における発掘・分類作業を紹介するものです。

2. 核データの発掘

2.1 $^{241}\text{Am}(n,2n)$ 測定データ

EXFOR に掲載されていないような、非公開実験データが存在します。レポート等でグラフにひっそりと点があるものの、あくまで Private Communication のようなデータであったり、何か理由があって正確な数値を表に出したくない場合であったり。 ^{241}Am の(n,2n)

反応断面積の 14 MeV 近傍での測定値で Gancarz という名前を見ることがあります。この測定値は New Mexico の Los Alamos で発掘されました。

データは実験グループのログブックに手書きで記載されていたものかもしれません。河野が入手したのは図 1 のコピーで、無造作に 241.4 という数字が書かれています。常識的に考えて単位は mb でしょう。でもそれ以上の情報はありません。れっきとした測定データであることは記録から分かりますが、素性の追求はここまでです。おそらくデータは何かのプロジェクトの一環として測定されたもので、当時は敢えて論文として公表するというアカデミックな空気は少なかったのでしょうか。

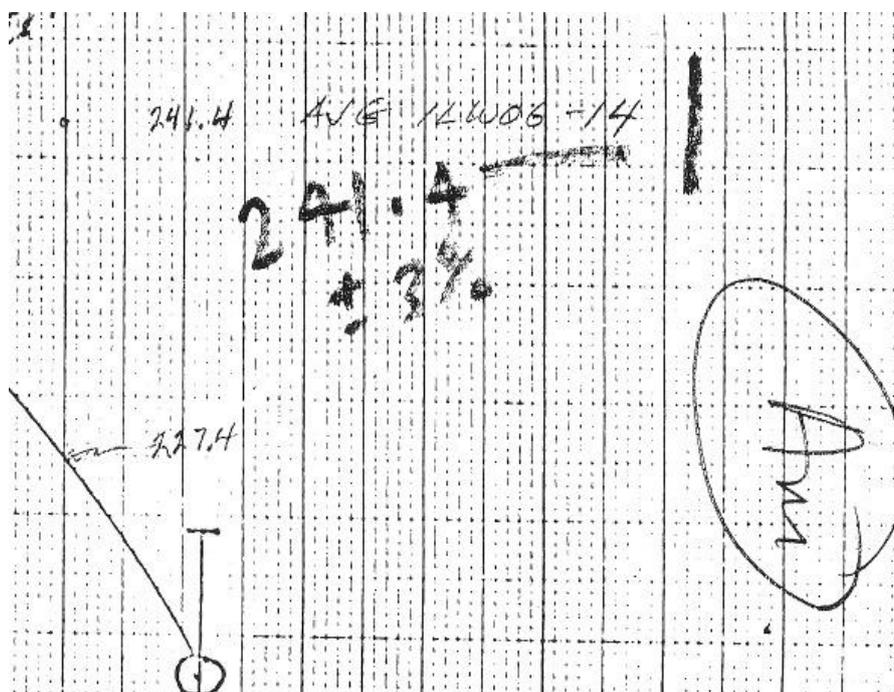


図 1: Gancarz らによる $^{241}\text{Am}(n,2n)$ 測定データ。出典不明。

2.2 $^{241}\text{Am}(n,\gamma)$ 反応による異性体生成率

^{241}Am 関連で、もう一件発掘されたデータがあり、それは(n, γ)反応で生成する異性体の生成率で、Dovbenko らが高速炉で測定したものです。こちらは EXFOR には掲載されている (EXFOR 41560) が、元の情報が曖昧かつ原論文の入手が困難であったもの。原論文のコピーを取り寄せてみたらロシア語でしたので、ロシア人の友人に頼んで簡単に訳してもらったのですが、コピーも不鮮明、数式は手書きとあって、今ひとつ要領を得ません。

ところがこの論文を英訳したものが JAERI (当時) の図書館にあったのです。文献番号に LA-TR というナンバーが振られており、どうやら Los Alamos で翻訳されたものらしい。当の LANL の書庫には存在せず、日本で論文が発見されたという変な話です。

2.3 J.L. Kammerdiener の二重微分断面積測定データ

中性子二重微分断面積実験データとして、東北大学の馬場先生らによる測定値がよく知られていますが、アクチノイドデータとしては ^{238}U のみです。実はかねてから ^{235}U と ^{239}Pu のデータがあるらしいことは、一部の間で知られていました。J.L. Kammerdiener が学位論文にまとめたものですが、残念ながら一般論文として公開されておらず、EXFOR への登録もありませんでした。

この学位論文をスキャンしたものが LANL にあったのですが、数値データの表は記載されていません。NNDC に依頼して、PDF の図からデータをデジタル化してもらい、ようやくデータが EXFOR として本年公開されました (EXFOR 14329)。ただスキャンデータの質があまり良くなく、図が歪んでいたり、途中で紙が動いてしまったようなページも存在します。40 年も前の学位論文なので原本入手は困難、これが best effort かと諦めておりました。

さて夏のある日のこと、自分のオフィスを整理していた Phil Young が古いレポートの山をどさっと置き「欲しければあげよ」。なんとその山の中から実物が発掘されたのです (図 2)。他のレポート類も古いものばかりです。核データ考古学にとって、こういう人のオフィスは絶好の発掘現場なのかもしれません。引退前あるいは転職時に蔵書の整理をお考えの方、是非とも大塚に一声おかけください。

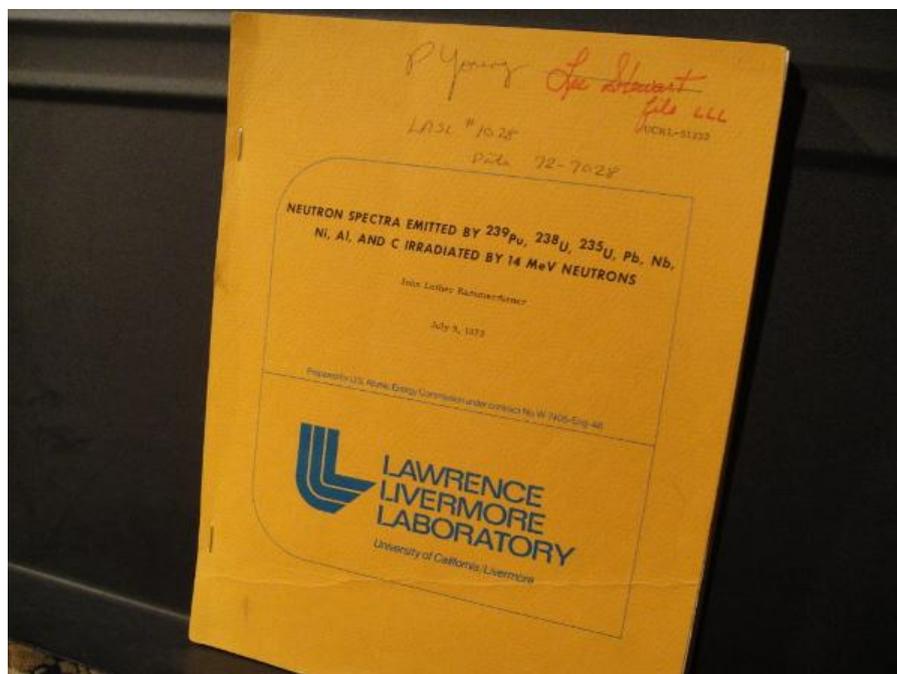


図 2: J.L. Kammerdiener の学位論文, UCRL-51232, (1972)

2.5 学位論文漁り

微分断面積は論文には図しか掲載されないことが多く、デジタイザで論文から読み取った数値が EXFOR に入っていることが (特に荷電粒子入射データには) 多いものです。2006 年に「研究成果公開促進費」という特殊な科研費の配分を受け、学位論文の付録に時々数値データが表の形で掲載されていたことを知っていた大塚は、学生の手を借りてそんな数値を EXFOR に保存することを思いつきました。

これを実現するために、まず肝心の学位論文を探す必要がありました。幾つかの大学の核物理・核化学の研究室にお邪魔し、さらには国立国会図書館に籠って学位論文を片っ端から当たり、それらしい付録を複写しては北大 (JCPRG) に送りました。入力・照合こそ学生に依頼できたものの、論文一件ごと、入力箇所とその方法を指示し、またできあがったものを EXFOR の書式に取り込み IAEA に送信する、というマネジメントだけでも大変な労力でした。

青木保夫先生 (筑波大) や坂口治隆先生 (京大) などは一貫して学位論文の付録に取得データ (微分断面積、偏極分解能) を保存する方針を取られ、坂口先生以下で取得されたデータは紀要として活字にされた形でも保存されていました。おかげで、これらの先生の指導下で学位論文のテーマのために取得された大量の数値データが、このプロジェクトを通じて EXFOR に格納されました。当時、退官を目前にされていた青木先生は、研究室の書架からでてきた手書きの数値メモや OHP シートなど大量に送ってくださり、デジタイズされた数値と置き換えられないか、公刊論文の図などと一枚一枚見比べたものです。

2.6 京大理学部で戦時研究 (F 研究) によって得られたウランの熱中性子核データ

原子核に関する戦時研究としては帝国陸軍が理研に依頼し仁科芳雄を中心に実施されたいわゆる「二号研究」がよく知られていますが、帝国海軍が京大理学部で依頼し荒勝文策を中心に実施された「F 研究」について、最近政池明先生 (京大) が科研費基礎研究 A「旧日本植民地・占領地関係資料ならびに原爆関係資料のアーカイブ学的研究」の一環で、調査成果を原子核研究 55 巻 1・2 号と 57 巻 1・2 号の 4 回にわたってまとめられました。以下の記述はこの論文をもとにしたものです。

この F 研究は、原爆のための応用研究というよりは基礎科学的な色彩が強く、掲載資料の中には核データ関係者が読んでも興味深いものが数多くあります。EXFOR には終戦以前の日本の測定結果として、野中到らの γ 線生成断面積など 3 つのエントリーがありますが、その EXFOR にも CINDA にも登録されていない荒勝研究室で得られた核データについて、政池論文から抜粋したものを以下にまとめておきます：

- 萩原篤太郎 (Rev. Phys. Chem. Jpn. **13** (1939)145), $U(n_{th},f) v=2.6$
- 荒勝文策・花谷暉一、木村毅一 (会議メモ 1945 年 6 月作成)、 $U(n_{th,abs})=4.0\pm 2.1$ barn

- 荒勝文策、花谷暉一（会議メモ 1945 年 6 月作成）、 $U(n_{th},f)=2.9\pm 0.2$ barn (${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ との比測定); $v=2.4\pm 0.5$

最後の 2.4 は Jean Frédéric Joliot らによって得られていた $v\cdot\sigma(n_{th},f) = 7.0\pm 1.4$ b（荒勝・花谷メモにはこの出典については触れられていない）を京大で得た核分裂断面積 2.9 ± 0.2 b で割って得たもので、現在の値と比べても遜色ありません。核分裂断面積の値自身は低いのですが、このメモで引用されている H.L. Anderson et al. (Phys. Rev. **55**, 511 (1939)) の測定値も 2 b とやはり現在の値に比べて相当に低いです。いずれの測定とも Ra+Be あるいは Rn+Be 中性子をパラフィンで減速して用いていますが、その減速が不十分だったのかも知れません。政池論文によれば、この測定研究を主導した当時大学院生の花谷氏は徴兵されずに京大で測定研究を続けられたものの、原爆による残留放射能測定で広島の大野陸軍病院に滞在の折、枕崎台風による土石流で海中に押し流され殉職されたようです。なお「会議メモ」とは 1945 年 7 月 21 日に京大・海軍による琵琶湖ホテル会議で配布されたメモのことです。荒勝文策の残した史料は京大総合博物館に保管されることになったとのことです。

2.7 レニングラード・ドレスデン協力による ${}^{235}\text{U}(n,f)$ の絶対断面積測定

レニングラード（現サンクトペテルブルク）のラジウム研究所（KRI）とドレスデン工科大学（TUD）では、両者のコッククロフト-ウォルトン加速器による D-D 中性子源や D-T 中性子源を用いて ${}^{235}\text{U}(n,f)$ の断面積を測定する国際協力を 1980 年代に行いました。一連の測定は、入射中性子と同時に生成される反跳荷電粒子を測定する随伴粒子法（associated particle method）を用いた絶対測定でした。データは改訂が繰り返され、表 1 に示すように相当数の EXFOR エントリーが作られました。このうち影を施した欄の数値は「改訂値で置き換えられた（Superseded）」というフラグが立っており評価者は無視できますが、それでも互いに独立の扱いとなっている測定値がまだ多数あります。ドレスデン工科大学からこの測定に参加していた Rolf Arlt が 1983 年頃に IAEA の原子力安全・セキュリティ局に移った事情もあり、大塚の前任者の Otto Schwerer もこの件を良く覚えていました。

同じ測定グループが行った一連の測定から公刊された複数のデータが存在する場合、その改訂過程を把握し、同一の測定で得られた複数（例えば改訂前後）のデータが評価に採用されぬようにするのはデータセンターの重要な役割の一つです。ところがこの国際協力の場合、旧ソ連と旧東ドイツはそれぞれ CJD（オブニンスク）と NDS が担当センターであったうえ、東西ドイツ統一時に旧東ドイツの管轄が NEA DB に移ったという事情が加わり、それが改訂過程の追跡を難しくしていたようです。

表 1: EXFOR に記録された KRI+TUD による $^{235}\text{U}(n,f)$ の 1.9 MeV~18.8 MeV の断面積(b)。影の中に記された数値は改訂値で置き換え (Superseded) と明示されているもの。

著者	出版	EXFOR	1.9	2.4	2.6	4.5	8.5	14.7	18.8
I.D.Alkhazov+	1983	40911.002			1.214		1.801	2.086	
C.M.Herbach+	1985	30706.003				1.057			1.999
S.S.Kovalenko+	1985	30706.002				1.057			
S.S.Kovalenko+	1985	30559.002			1.215				
S.S.Kovalenko+	1985	30558.002					1.801		
S.S.Kovalenko+	1985	30475.002						2.085	
V.I.Shpakov	1986	40927.003	1.26			1.057			1.999
I.D.Alkhazov+	1988	41013.003			1.215	1.057	1.801	2.085	1.999
I.D.Alkhazov+	1988	41013.004			1.238	1.093	1.853	2.094	2.065
K.Merla+	1991	22304.006			1.240			2.096	
K.Merla+	1991	22304.002				1.094	1.855		2.068
V.A.Kalinin+	1991	41112.002	1.28	1.27					

2.8 隕石の宇宙化学のための高エネルギー陽子入射放射化断面積

Hannover 大学を退職した Rolf Michel 先生は宇宙線由来の元素生成に関心を持たれ、TSL (Uppsala)、IPN (Orsay)、LANL、SATURNE (Saclay) などの加速器を用い、数十 MeV から 2.6 GeV までの陽子入射放射化断面積の測定と隕石のモックアップの 4π 照射を行いました。1980 年代から 20 年近く続けられた測定の成果 (1997 年の論文によれば 547 標的・生成物からの 15000 点近くの断面積) が「必要以上に」完璧な形で EXFOR に保存されています。測定・解析の進捗は Progress Report として数値テーブル込みで INDC(GER) レポートで順次報告されましたが、そのプレリミナリな掲載値と学术论文に公刊された確定値とを互いに独立に採録したため、多数の重複採録が生じてしまいました。

この陽子入射放射化断面積の重複採録の分析は 40 編近い論文を巻き込むもので、反応の数が膨大なためにその解析作業は反応ごとの作図では非効率であり、専用のプログラムを書いて解析しました。その結果、1000 点を超えるデータ点が重複採録の候補としてあがりました。ところが論文を調べるにつれ、同じエネルギーで複数回測定された反応があることが分かり、似たようなデータ点があってもかならずしも重複とは言い切れないことから、話はややこしくなりました。

Michel に相談したところ、環境修復のためのガイドライン改訂のワーキンググループのために彼がたまたま IAEA に滞在することが分かり、(本稿脱稿直前の今週) 昼食時や夕刻に頻繁に彼の会議室を訪問しては、評価者が用いるべきではないデータ点の選定に関する助言を得ました。その作業中に彼の口からたまたま「これは **Archaeology** だね」という言葉が出ましたから、この一節を本稿に加えることにしました。

一連のデータの EXFOR への格納は、ロシアの Kurchatov 研究所が NEA Data Bank の外注を受けて行いました。ソ連崩壊 (1991 年) 前後のこの時期、ロシアの研究者は非常に生活に困窮していたようで、この重複採録の原因はそこにあるのではないか、と思っていたのですが、彼も同様の印象を持っていたようです。似たような事情で発生したと思われる EXFOR の重複問題が OKTAVIAN で取得された中性子入射放射化断面積にあることが判明しており、1 年以上にわたり、河出清先生 (名大) とそのお弟子の方々の手を煩わせながら、EXFOR から削除すべきデータの選定を進めているところです。

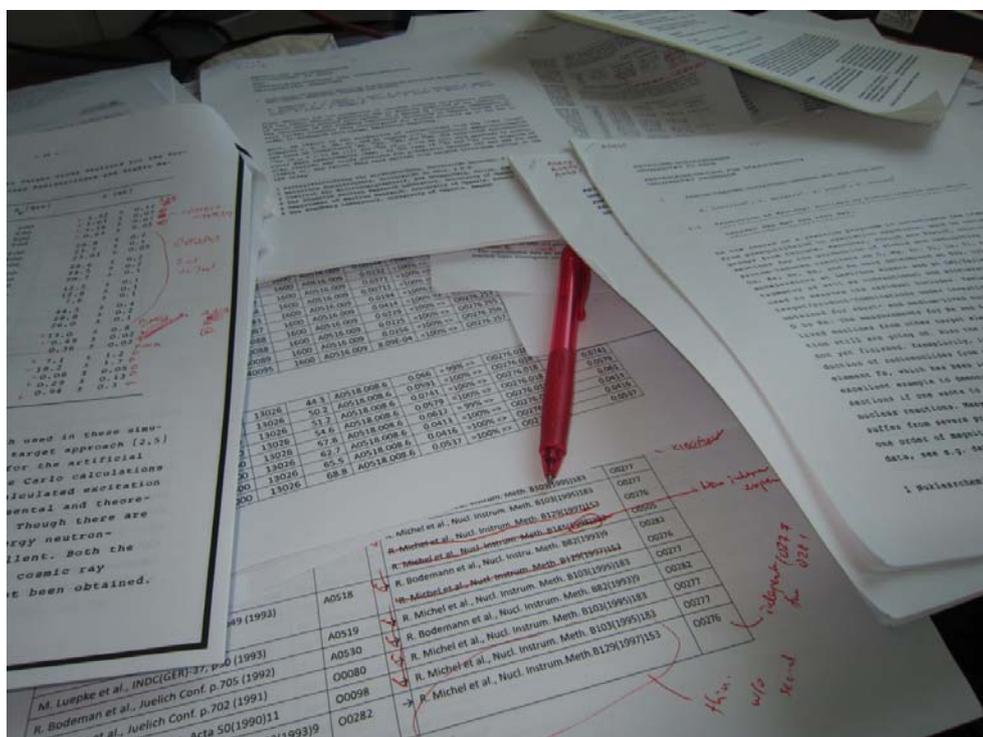


図 4: Michel らの放射化断面積の測定・改訂履歴を調べるための「発掘現場」

3. 核データの分類

3.1 偏極データ

EXFOR にデータを格納する際に頭を悩ませることの一つは、著者の語法と EXFOR の語法が必ずしも一致しないことです。不弾性散乱断面積 (non elastic scattering cross section) として EXFOR に記録すべき「非弾性散乱断面積」(inelastic cross section)、捕獲断面積と記録すべき「吸収断面積」(absorption cross section) などは、かつて中性子データの採録者が注意すべき典型例だったそうです。

この種の問題でもっともよく悩ませられるのが偏極量の分類です。偏極量は、断面積ほどには頻繁に評価に登場しませんが、(ベクトル) 偏極分解能はスピン軌道相互作用項の評価や軽核の R-matrix 解析に用いられるようです。重陽子のようにスピンの 1 以上の粒子では 2 階以上のテンソル偏極量が登場し、標的・入射粒子・放出粒子・残留核のそれぞれの何階の偏極に注目するかにより、さまざまな偏極量が定義されます。厄介なのはその表記法が流儀により様々なことです。例えば A(a,b)B で a から b への偏極移行を表す物理量 (Wolfenstein parameter) は、ある流儀では D_{mm} 、別の流儀では K'_{γ} と記されます。最初の流儀では K は a から B への偏極移行を記す記号として用いられるなど状況は複雑です。

星崎憲夫先生 (元京大) が 7 つの流儀を表にまとめたものが物理学会の英文誌のサプリメントとして出版されたのですが、今では入手が困難なのでこれを最近 EXFOR の採録マニュアル (LEXFOR) に再録しました。よく知られた偏極分解能 (Analyzing power) A_{γ} も、古い論文では偏極 (Polarization) P として報告されていることもあり、とにかくこの種の偏極量は著者の記法に頼らず測定系や定義式を良く調べるのが重要になり、それだけに採録も面倒です。

3.2 「即発断面積」

核分裂関連で即発・遅発という言葉は放出される中性子や γ 線に対してよく用いられますが、EXFOR の辞書に「即発断面積」という物理量があることに (確か 14 msec の $^{241m2}\text{Am}$ について調べていて) 気づき、一体どんな物理量なのかを調べてみました。どうやら 1960 年代から 1970 年代にかけて、Dubna の研究所 JINR の創立者として知られる Flerov などを中心に自発核分裂の測定を通じて短寿命核異性体の存在を確認することが流行ったようです。これらの測定研究では、生成された短寿命核異性体の自発核分裂事象数 (例えば $^{243}\text{Am}(n,2n)^{241m2}\text{Am}(sf)$) を通常の核分裂の事象数 (例えば $^{243}\text{Am}(n,f)$) との比で報告することが多く行われました。この際、分母に当たる通常の核分裂を、分子の自発核分裂と明確に区別するため、この比を論文で “normalized to prompt fission cross section” と説明されており、EXFOR でも

$$((95\text{-AM-243(N,2N)95-AM-241-M2,,SIG)/(95-AM-243(N,F),PR,SIG))$$

のようにわざわざ分母に PR (prompt) をつけて記録したようです。実際のところ分子 (自発核分裂) の事象数は分母の事象数に比べて典型的には 0.1%あるいはそれ以下なので、この PR を今後は省略することが最近決まりました。ちなみに ENSDF ではこの 14 msec の自発核分裂の分岐比はほぼ 100%ということになっており、自発核分裂と異性体の生成は等価という仮定を支持しています。

3.3 French Factor

J. Frehaut らによる $^{238}\text{U}(n,2n)$ 反応断面積は、ファクタをかけて補正する必要があることが知られています。かつて H. Vonach が係数 1.07 を提案し Freaut もそれを認めた、という記述は Vonach の論文に残されています (H. Vonach et al., Nucl. Sci. Eng. **106** (1990) 409)。

実験データが論文にまとめられた後に問題が見つかり、データ修正が必要になるのは、少々厄介な問題です。実験者自らがそれを認めた場合、EXFOR の SUBENT として新たに掲載することができますが、Frehaut のような場合、実験者本人が改定値を公表しない限り修正されることはありません。つまり化石化してしまったデータは、永久にそのまま残ることを意味します。

逆に、上の例のように実験グループが自らのデータに異なる補正を施し、それらが独立した実験データとして EXFOR に格納されてしまう場合もあります。実験データに施される補正係数は多岐にわたりますが、極稀に意味不明なものも存在するようです。都市伝説として語られているのが、とある測定データに記述された French Factor。これくらい補正しとけば、万事上手く行くというフランス的予定調和なのでしょうか。こういう補正係数は Fudge Factor とも呼ばれます。これが本当に存在するのかどうか、発掘チームは確認を急いでいるところです。

ちなみに LANL の測定には TDRC と呼ばれる有名な補正係数があります。LANSCE のビームラインに一部地表を飛ぶ場所があり、そのすぐそばにアライグマが生息しています。彼らがビームを横切る瞬間、中性子ビームが遮断されますので、この補正が必要です。これを Time-Dependent Raccoon Correction と呼びます。時間依存なのは、アライグマが夜行性であることに起因しているようです。

3.4 非弾性散乱

中性子非弾性散乱の実験データとして、散乱された中性子を測定したものと、励起された標的核からの γ 線を測定したものがあります。何れも非弾性散乱プロセスには変わり無いのですが、測定された断面積は全く異なります。 γ 線測定の場合、入射中性子がその準位を直接励起したのか、あるいはさらに高いエネルギー準位が最初に励起され、 γ 崩壊によってその準位が生成されたのか、区別することができません。これが原因で ^{238}U 非弾性散乱断面積の混乱が起きたことがあります。

1979 年、Knoxville での国際会議で D.K. Olsen らが ^{238}U 非弾性散乱の γ 線生成断面積測

定を報告しています。このデータそのものは EXFOR のエントリー 10909 として格納されています。しかし彼らは、この γ 線生成断面積を離散準位非弾性散乱断面積に直した図を論文に掲載しているのです。この換算は原理的には可能ですが、そのためには準位に出入りする γ 線を漏れなく把握する必要があり、結果として大きな誤差を伴う可能性があります。1990 年に公開された JENDL-3.1 は、この Olsen らの実験データを用いて評価されたため、例えば第 6 励起準位 (732 keV) への非弾性散乱断面積に 5 MeV で 140 mb という大きな断面積が与えられています。ちなみに JENDL-4.0 でのこの値は 15 mb です。

Olsen らの実験データの場合、 γ 線生成断面積だけが EXFOR に格納されていますので、彼らが換算した非弾性散乱データと評価値が比較されることはまずありません。でももし彼らの非弾性散乱データが EXFOR の SUBENT として格納されていたら、実験データと評価値の差について、評価者は何度も説明する羽目になりそうです。

4. 結言

EXFOR データベースで栄えあるエントリー番号 10001 番を得たのは、R.W. Hockenbury らによる捕獲断面積測定の実験 (Phys. Rev. **178**, 1746, (1969)) です。データベースには、さらに古い測定値も格納されており、J.R. Dunning らによる 1935 年の論文 (Phys. Rev. **48**, 265, (1935)) が最も古いデータを格納したエンタリのようです。この論文のタイトルは “Interaction of neutrons with matter” という、現在なら本一冊分の内容をカバーしそうなものですが、熱領域と高速領域での中性子全断面積を多くの標的核に対して測定したものです。EXFOR エントリー番号 12634 に記載された数値は、例えば炭素の熱領域 (正確なエネルギーは与えられていません) 中性子全断面積が 4.1 b (評価済み核データライブラリの熱中性子断面積は 4.74 b)、鉄の場合だと 12 b (同じく 14.6 b) と、80 年前の測定値とは思えない精度の数値が並んでいます。さらに驚くことに、この論文の出版は J. Chadwick による中性子の発見からたったの 3 年後です。

爾来 EXFOR は、Phys. Rev.などの原子核物理関連の学術雑誌から研究所の報告書、学位論文など様々な公刊物 (時には private communication) に掲載された実験データを編集しつつ発展してきました。EXFOR の大きなベクトルは現在を志向し、最新の技術を用いた測定値をいち早く公開するものです。でもその影には過去を俯瞰し、重要でありながら諸般の事情により表舞台に出ることの無かったデータを発掘する地道な作業が存在します。私達が名付けた「核データ考古学」は、膨大な電子データに埋もれたデータを発掘し、系統分類するものです。限られたテキストファイルの行間に、語られない多くの言葉があることが、ほんの僅かでも皆さんに伝われば幸いです。