

^{238}U 中性子捕獲断面積の評価値について

(九州大学総合理工学研究科) 神田 幸則

1. まえがき

JENDLの ^{238}U の smooth part を担当して来た筆者の喉に常にささっていた骨は、 $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 断面積の問題である。しかし、1991年春 Juelich の核データ国際会議への報告[1]でその骨はとれたと思っている。永年ささっていた大きな骨なので、抜けた後の傷跡の“うずき”はまだ癒えないが、骨がとれた安心感で気楽な原稿を書かせて欲しい。当ニュースに書くのが最もふさわしい内容というか、これにしか書いても通じないかも知れない内容を書きたいと思う。本来、この稿は、1991年10月原子力学会秋の大会特別会合講演の内容を詳しく書くのが目的の筈であるが、学術的な部分は、記録として、日本原子力学会誌に残すこととなったので、こちらには、非学術的とは言わないが、その側面を主体とした記録とすることにしたい。色々な意味で、そんな時期に来ているとの筆者自身の身勝手な認識も、このような内容となった理由である。

2. 歴史的経緯

評価者として $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 断面積を強く意識したのは 20数年前であり、1973年の核データ研究会で取りあげている。この時は、主催者からの依頼を受けて講演したと思うが、どんな主旨の依頼であったかは記憶にない。同報告では、 $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ と (n, n') 両断面積を取りあげており、その点では前述の Juelich 国際会議への報告をまとめる主体となった NEACRP/NEANDC 国際協力評価ワーキンググループと同じテーマである。同報告を読み返してみると、論旨は現在とは違うが、本質的に内容は違っていない。評価は斯くも進歩がないのかともどかしさを感じさえするが、原因は評価値は絶対値を最終目標としているために、要求精度に対応した対処が繰り返し必要なためであると理解している。当時、 $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ は微分測定がある程度存在するのでそれらを基にして評価をすれば要求精度を充たし得る結果を出せるのではないかとの立場をとって、評価法の発展に期待する論旨であった。これに対して $^{238}\text{U}(n, n')$ の方は測定値も少なく、測定のばらつきも大きく、評価それ自身が仲々困難であることを明らかにした。この両者を対比して、評価法を歴史的にみると3段階に分類出来るとして、 (n, n') の方は第1段階、 (n, γ) の方は第2段階に達しており、次の段階に発展させた第3段階の評価法が必要だろうとして、同時評価法を頭に置いた筋立てとしていた。実は、これと全く同じ様な考えをしていたのは Poenitz(ANL) である。彼は1981年の“Conf. on Nuclear Data Evaluation Methods and Procedures, BNL”で、評価法の歴

史を Archaic、Enlightenment、Renaissance の 3 段階に分け、同時評価法の導入部にしていた。同じ分析で同様の結論を独立に出していた事になる。命名法は彼の方が優れていることを認めざるを得ない。しかし、彼は、我々が後で発展させた同時評価法の独立性を認めないような発言をした事がある。この辺を詳しく書くと長くなるので、これ以上は触れないが、要するに、評価方法の改善で $^{235}\text{U}(n, \gamma)$ 断面積の精度をあげようとした事が同時評価法開発の一つの動機であった。しかし、これで直接に問題を解く事は出来なかった。

測定者側の動きも概観しておく。炉物理側が指摘していた非分離共鳴領域での $^{235}\text{U}(n, \gamma)$ 断面積評価値は高めではないかとの問題は、微分測定側をも強く刺激した。Harwell の Moxon[2] は低い値を出した。これで問題は解決したかに思われたが、その後やはり高いのだという測定も現れて、微分測定による解決とはならなかった。ORNL の de Saussure et al.[3] および GA の Fricke et al.[4] の測定が今後の議論に重要である。

JENDL-2 では、Fricke et al. を中心にして評価値を決めた。理由は幾つかあったが、20~50 keV でこの値は Moxon と de Saussure et al. の中間にあることも理由の一つであった。積分テストの結果との比較では非分離共鳴領域で 2~3 % 程度最初出した評価値より低くすれば整合性が良いとの事で、JENDL-2 はその様にして最終値が決まった。JENDL-3 では 50 keV 以上で、重い核の核分裂断面積と同時評価をしたが、それから出た値は微細構造が出て使用には耐えぬものであった。核分裂断面積データに比べて測定データ点が少なく、同時評価法を適用するにはバランスを欠いていた。従って、当初の値は JENDL-2 と余り変わらないものを採らざるを得なかった。JENDL-3 初期データセットでの積分テストは $^{235}\text{U}(n, \gamma)$ 評価値が高いと出た。JENDL-2 と殆ど同様なのに、この様な結果となったのは JENDL-3 初期データの他の断面積との相対的な関係から来るものであった。それから、積分データ測定及び計算のグループとの討論が続いた。JENDL-3 編集グループの立場は積分テストに合う事を強く望んでいた。この間、NEANDC Data Bank に出向していた中島豊氏から JEF の評価過程の情報が詳しく入っていた。種々あった話の中にソ連の Kazakov et al.[5] の測定データが低い値を出しており、JEF-2、および ENDF/B-VI はその値に近いことを伝えて来ていた。筆者は、JEF-2 と ENDF/B-VI との協力関係を十分に理解していなかった。むしろ、JEF は相当に独立性の高いものとの認識が強かった。従って、1988年水戸での核データ国際会議で JEF-2 の ^{235}U 評価担当者である Sowerby との話でどうも理解出来ないものがあつた。我々は JENDL-3 の最終値として最近の測定値採用との理由で Kazakov et al. のデータに合う値を決定した。

1990年 Marseille で、NEANRP/NEANDC 国際協力評価の第 2 回会合が開かれた。この

時、改めて Sowerby と話をしている、JEF-2 と ENDF/B-VI は、 ^{238}U について全く同じとも言えるものである事を知って、全てが氷解した。その後の Sowerby との話は総てが納得行くものであった。それ迄は、両者は独立だとばかり思っていたので、両者の結果が合うのだから、これで良いのだとの押しつけを感じていた。その後の Sowerby and Moxon 両氏からの情報で、理解から確信に変わった。それを基にして、Juelich での $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 評価の報告[1] をまとめた。結局、この報告は、最近出揃った3大評価済み核データファイル ENDF/B-VI、JEF-2、JENDL-3 で殆ど同じ値を与えた結果を、相互に確認し合った内容となった。

3. 最近の評価値

同じ結論に至る筋道は少しずつ違うが、筆者が最も納得出来るのは Sowerby and Moxon の方法である。彼等の仕事は、最初、 $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ の共鳴領域を詳細に解析し直すことから始まった。1982年 Antwerp 核データ国際会議の際の議論を基に、NEANDC に Task Force がつくられた。共鳴パラメータが解析者による違いが大き過ぎるので、国際協力で解析し直すのが目的であった。方針として、解析対象とする実験データを一つにする。この仕事では後述の如く、capture data のみでなしに transmission data も同時に解析する。いずれも、ORELA を使った最近のデータが対象として選ばれた。解析法は shape analysis を採用した。従来は、area analysis が使われていた。shape analysis による capture data と transmission data の同時解析が出来る計算コード REFIT を使っている。この結果、多くの新しい共鳴ピークが確認される。2種類のデータは相補的に新しい共鳴ピークの解析を可能とする。ORELA の データは、この解析法を 10 keV まで応用可能としている。しかし、この解析は多くの作業量を伴うと共に、計算時間を多く費やした様である。この仕事には、NEA Data Bank 出向中、中島 豊氏も直接参加しており、その大変なことを伝えている。この解析では、各ピークの確認精度が向上したため、実験データでバックグラウンドの処理が不十分な場合は解析上矛盾が出て来る。逆に言えば、この解析は実験データのバックグラウンドの処理精度のチェックにもなる。このような解析の結果 ORELA による Macklin et al. のデータから図1の様な結果が得られた。これは、 (n, γ) 断面積の値を修正する必要のあることを示している。これと同様のことを古いデータである de Saussure et al. に適用すると約0.9の補正係数が得られた。この補正をすると、de Saussure et al. の値が低くなるので、Moxon との差が解消して、低い値の方が微分測定としても妥当となる。Linac からの White neutron source を使った $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 断面積測定では、通常 6.7 eV の飽和共鳴を規格化に使って絶対値断面積を求めている。しかし、上記の shape analysis で求められた各共鳴ピークは精度の高い共鳴パラメータ

を与えるので、いずれの共鳴も規格化に使用可能となるので、規格は従来よりも確実である。他方、何故に de Saussure et al. のデータは今に及んでこのような補正が必要となったかであるか、Moxon は中性子エネルギー較正用に入れてある Na 等の試料からの散乱がバックグラウンドとなったと推測している。これはあくまで推測である。この点は Juelich 論文の共著者である ORNL の Weston が同意しなかったので公式の記録とはしなかった。捕獲断面積測定の本バックグラウンド取扱の重要性和、同測定の困難さを示す一例である。

上記の共鳴解析から得られた共鳴パラメータを使って、Poenitz は同時評価法を共鳴領域も含めて適用した。この方法の詳細は不明である。Sowerby and Moxon は文献 6 を引用しているが、これには方法の方針が述べられているのみである。この報告の口頭発表を筆者も会議に出席して聞いていたが、方針以上の内容はないと思った強い印象を記憶している。その際に、評価は生データから出発するのが良いと言って、Geel の実験屋さんから強い反論があった。生データを処理して結果を出すまでが実験だとの主張である。Poenitz は本来実験屋であるが故に、生データの処理には自信があって、このような考えをしたのであろうと思う。事実、Poenitz は生データから同一方針によって異なる測定を補正処理しようとしており、筆者へも情報提供の依頼があった。しかし、その後それを推進したとの報告は無い。それに、 $^{235}\text{U}(n, \gamma)$ の同時評価の詳細提示が無いので、ENDF/B-VI も JEF-2 も最終的に Poenitz を採用していない。Juelich 報告の原案には、Poenitz の同時評価についての Sowerby and Moxon の意見を採用したが Poenitz 自身原案を修正して来た。表現は曖昧になっていた。何故かの理由までは問い合わせていない。

JEF-2 の評価の基になっているもう一つは、Froehner[7] の仕事である。模型式を同時に実験値に合う様に式の中のパラメータを決定している。この論文を我々は詳しく検討した。使用した式は特に独自のものでは無いが、全断面積、 (n, n) 、 (n, n') 、 (n, γ) 断面積を表現する式を用意して、実験値に合う様に調整した、いわゆる同時評価である。問題は (n, γ) の測定値である。27 の実験を使用しているが、これらは補正されている。論文以外に Froehner 自身からの情報提供もあったが、完全な納得は得られなかった。補正後の値は殆ど Kazakov et al. のデータに近付いたとのことであった。彼の論文には Kazakov et al. のデータのみを表示したが、それは代表であって、これのみを使ったのではないと強調されていた。

以上が JEF-2 の評価法である。これは同時に ENDF/B-VI の評価法でもある。

図 2 に最近の評価値と実験値を示す。

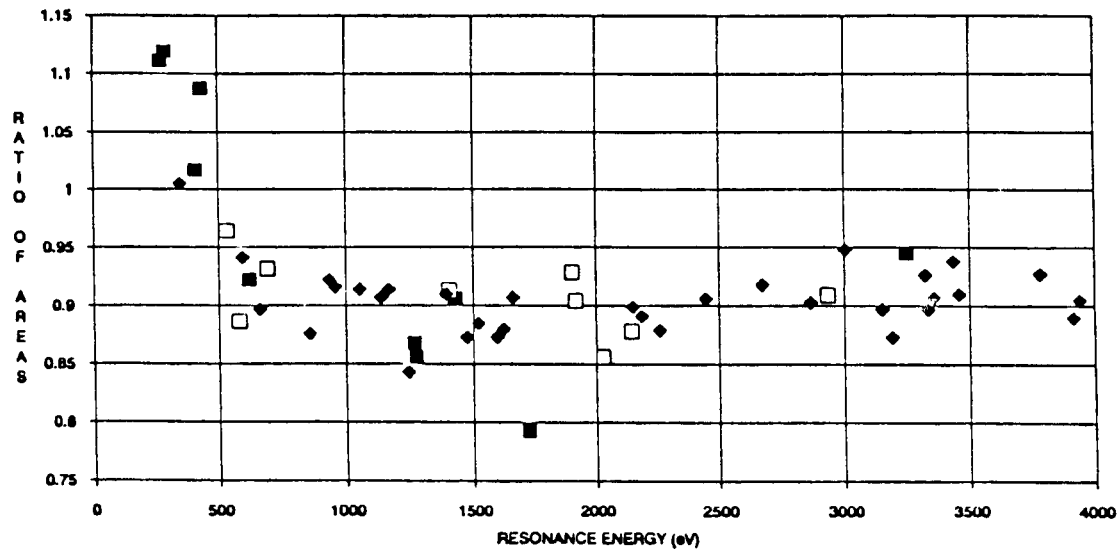
4. あとがき

Juelich での講演には予想通り、従来の測定値をどう考えるかとの質問が出た。これに対する我々の考えは、周囲からの散乱中性子によるバックグラウンドの影響であるとの統一見解で答えている。本当にそうなのかと問いつめられれば一つ一つを説明することは不可能なので、そう思っていると言える丈である。 (n, γ) の様に低エネルギー側で圧倒的に大きな値を持つ中性子断面積の測定では特に困難な問題であるが、中性子の実験には常に付きまとう困難であろう。

$^{235}\text{U}(n, \gamma)$ 断面積の非分離領域に於ける評価値は、今回の報告で国際的最終決着と考えている。

参考文献

1. Y. Kanda, Y. Kikuchi, Y. Nakajima, M.G. Sowerby, M.C. Moxon, F.H. Froehner, W.P. Poenitz and L.W. Weston, "A Report on Evaluated $^{235}\text{U}(n, \gamma)$ Cross Section", Proc. Internat. Conf. on Nucl. Data in Sci. and Technol., Juelich, 1991 (in print)
2. M.C. Moxon, UKAEA Report AERE-R 6074 (1969)
3. G. de Saussure, E.G. Silver, R.B. Perez, R. Ingle and H. Weaver, Nucl. Sci. Eng., 5, 385 (1973)
4. M.P. Fricke et al., Proc. Internat. Conf. Nucl. Data for Reactors, Helsinki IAEA-CN-26/43 (1971) p.265
5. L.E. Kazakov et al. INDC (CCP)-319/L. (1990) p.45
6. W.P. Poenitz, Proc. Advisory Group Mtg on Nuclear Standard Reference Data, IAEA-TECDOC-325, (1985) p.426
7. F.H. Froehner, Nucl. Sci. Eng. 103, 119 (1989)



The ratio of the measured to calculated areas of a selection of resolved resonances in the data of Macklin et al. The solid squares, open squares and diamonds are for resonances with Γ_n values <40 , 40 to 80 and >80 meV respectively.

図-1 共鳴ピーク面積の測定と計算の比較

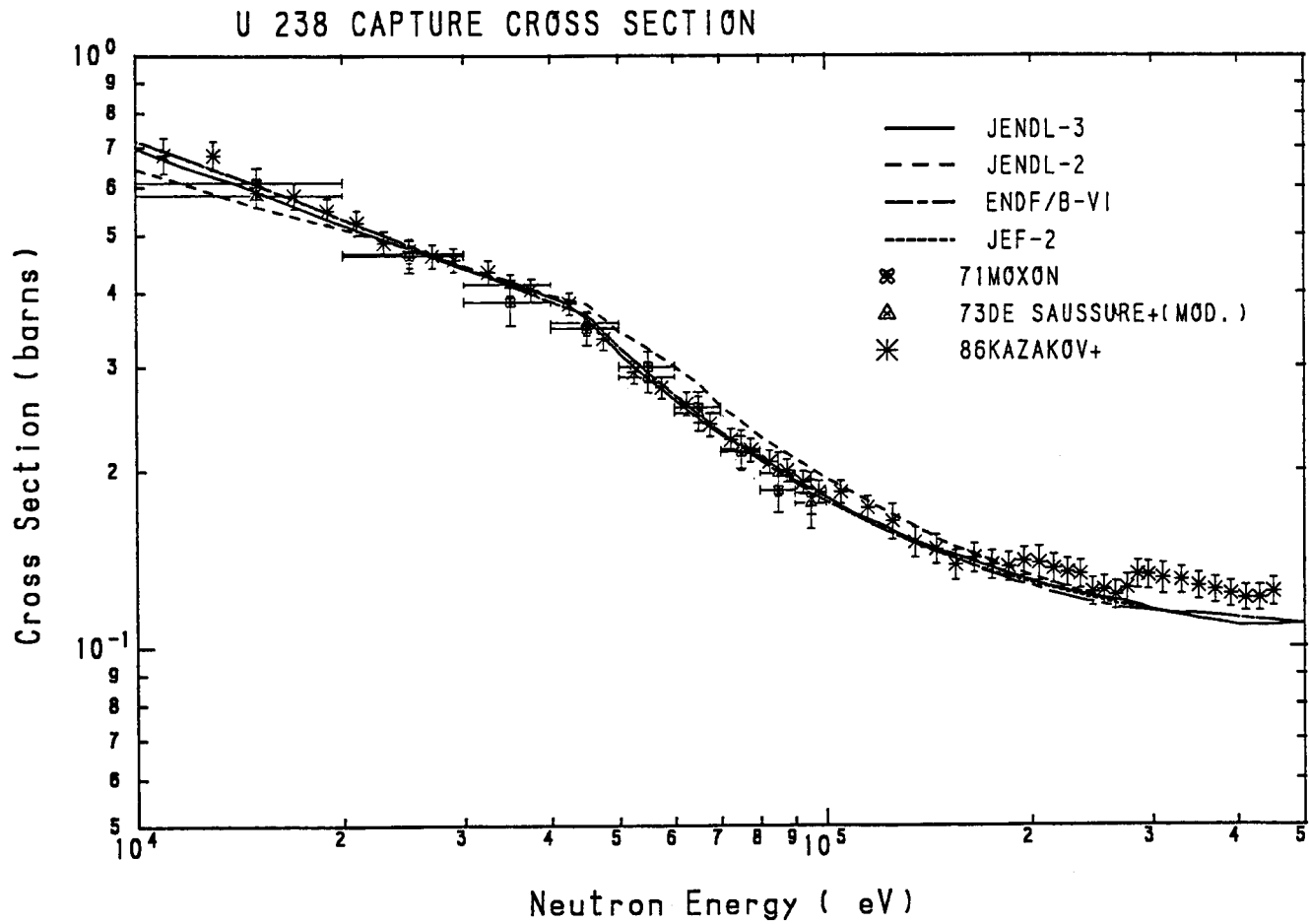


图-2 ^{238}U (n, γ) 断面積