

神出鬼没の断裂中性子

IAEA「アクチニドの核分裂即発中性子スペクトル」に関する 第1回研究協力会議(RCM)の報告

近畿大学理工学部

大澤 孝明

ohsawa@ele.kindai.ac.jp

2010年4月6～9日にウィーンのIAEA本部で標記の会議が開かれた。これは、2008年11月に開催された諮問委員会(CM)の勧告が認められて、3年間の予定で開始された計画(CRP)の第1回会議である。世話人は核データセクションのR. Capote Noy氏、今回の出席者は、計算評価側からP. Talou氏(USA)、A. Tudora氏(ルーマニア)、V. Maslov氏(ベラルーシ)、Shu Neng Chuan氏(舒能川、中国)、大澤(日本)、実験側からF.-J. Hambsch氏(EU)、A. Vorobyev氏(ロシア)、T. Granier氏(フランス)、炉物理・感度解析側からI. Kodeli氏(スロベニア)、G. Manturov氏(ロシア)、S. Ganesan氏(インド)、そしてコンサルタントの資格でN. Kornilov氏(ロシア、現在はアメリカ・オハイオ大学滞在)が参加した。加えて、IAEAでEXFORの核分裂即発中性子スペクトル(prompt fission neutron spectra、以下ではPFNSと略記)データを見直す仕事を始めている大塚直彦氏もEXFORのデータの現状をレビューした結果を報告した。

会議は「実験的測定」、「モデル化と不確かさ解析」、「ベンチマーク解析」の順に進められた。

1. 実験的測定

- Granier氏(Bruyère-le-Châtel)は、Los AlamosのLANSCEを用いた共同研究で実施した即発中性子の平均エネルギーを入射エネルギー200 MeVまで一貫して測定した結果を紹介した。(n,xnf)反応の閾値あたりに凹みが見られ、これはpre-fission neutronによるものであると説明された。ただし、このデータからはスペクトルに関する情報は得られない。

- Vorobyev氏(サンクトペテルブルク)は、 ^{252}Cf の自発核分裂の中性子スペクトルを基準として、 ^{235}U のエネルギー分布と角度分布を測定した結果を報告した。解析結果によ

ると、断裂の瞬間にネック部から放出される断裂中性子（scission neutron、以下では SCN と略記）の割合は 5 %以下であり、核分裂片の重心系における非等方性係数 A_2 は 0.02～0.08 程度であるとした（彼らの非等方性係数 A_2 は中性子の重心系エネルギーに比例するとされているので、通常の係数 b とは異なることに注意）。筆者には妥当な結果と思えた。

● Kornilov 氏（ロシア）は、重要な 2 つの問題があり、第 1 は「Los Alamos (Madland-Nix) model では実験データを説明できない」こと、第 2 は「熱中性子誘起核分裂と 0.5 MeV 中性子誘起核分裂のスペクトルの差が説明できない」ことだという。

Kornilov 氏と Maslov 氏は、以前から ^{235}U の 0.5 MeV 以下のソフト成分が従来よりも高いとする Starostov (Nefedov と表示される) 氏のデータが正しく、Madland-Nix (以下、M-N と略記) とよく一致する Johansson (Studsvik) 氏のデータは誤りだとして、これを根拠に M-N モデルはダメだと主張してきた。その繰り返しである。そして次式(1)で表される“three-source model”が最も正確なモデルだとする。

$$N(E) = (1-\alpha)^{\frac{1}{2}}[W_{AL}(E) + W_{AH}(E)] + \frac{\alpha}{\nu} E \left\{ \frac{\zeta}{T_1^2} \exp\left(-\frac{E}{T_1}\right) + \frac{1-\zeta}{T_2^2} \exp\left(-\frac{E}{T_2}\right) \right\} + \alpha(\nu-1)W_{A-1}(E)/\nu \quad (1)$$

ここで、 $W(E, T_L, \alpha E_L)$, $W(E, T_H, \alpha E_H)$ は 2 つの核分裂片からの蒸発中性子であり、Watt 型の式で表される。次の Weisskopf-Ewing 型の 2 つの項は、断裂時にくびれた核のネック部から放出される SCN であり、最後の項が SCN 放出後の分裂片から蒸発する中性子であるという。SCN に高エネルギーと低エネルギーの 2 種類がある、というだけでもビックリだが、さらに驚いたことに、核分裂のうち 40 %が SCN を伴う分裂であり、中性子数でいうと 25 %が SCN だという。出席者の間から、驚きと「まさか」という気持ちが入り交じった声があがったのは当然である。

この Kornilov 氏の議論は、筆者にはまったく納得できないものであった。そもそも、(1)式のように補正項満載・調整パラメータ満載の式で測定データにフィットしたものと、M-N モデル計算値を比べて、後者の方が 0.5 MeV 以下で Starostov 氏の測定値と一致しないからという理由で、M-N モデルは間違いだと断定するのは速断に過ぎる。比較するのなら、まず、補正項を除いた「純粋の Watt 型」と「純粋の M-N 型」を比較すべきである（実はこれは Madland 氏自身がすでにやっている）。M-N モデルは、励起した核分裂片が中性子を出して cooling していく過程での核温度変化を考慮した式であり、Watt の式は cooling を考慮しない核温度一定のモデルであって関数型は固定されている。物理的に見て Watt 型の方が優れているという理由があるとは思えない。即発中性子の 25 %が SCN だというのも、要するに(1)式で Starostov 氏の実験データにフィットしようとする $\alpha = 0.25$ にとらなければならないというだけの話である。これまで中性子の角度分布を含めて SCN の

問題を論じてきた Blinov 氏や Wagemans 氏の検討[1]と比べて明らかに荒っぽい議論である。第 2 の問題点「熱中性子誘起核分裂と、0.5 MeV 中性子誘起核分裂のスペクトルの差が説明できない」というのも、現在の測定データの精度で議論できることではない。

この話を聞きながら筆者は、出来の悪い学生の御都合主義丸出しのレポートを読まされているような気分になった。意図的な論点づくりと作為的な議論。そんなアホな理屈があるか、という感じである。

● Hambsch 氏 (IRMM) は、ブダペストの研究炉で実施した $^{252}\text{Cf(sf)}$ を基準とした $^{235}\text{U(n,f)}$ のスペクトルの測定結果について報告した。このデータは、スペクトルのソフト成分については Starostov 氏と Johansson 氏のいずれのデータが正しいかを判断できるものではないが、それより上のエネルギーでは Starostov 氏のデータに近いようにも見える。

2. モデル化と不確かさ解析

● Talou 氏 (LANL) は、核分裂片からの中性子蒸発を Monte Carlo Hauser-Feshbach 法で計算した結果を報告した。初期分裂片の質量(A)と全運動エネルギー(TKE)の 2 次元分布から出発してシミュレーションを行うものである。この方法では、初期核分裂片の全励起エネルギー(TXE)とその分配をいかに推定するかが勘所である。Talou 氏は、軽・重分裂片の核温度比 $R_T = T_L/T_H$ を変えて PFNS と、分裂片質量の関数としての中性子数 $\bar{\nu}(A)$ 、及び中性子数頻度分布 $P(\nu)$ を計算して測定値と比較した結果を示した。

結果は単純ではない。PFNS の高エネルギー成分を合わせるには $R_T = 1.4$ が良く (こうすれば軽分裂片の核温度が高くなるのでこれは理屈に合う)、 $\bar{\nu}(A)$ の鋸歯状の構造を説明するには $R_T = 1.2$ がベストであり、 $P(\nu)$ の分布に最も近いのは $R_T = 1.0$ の場合である。励起エネルギーの分配を最も敏感に反映するのは $\nu(A)$ だから、筆者は $R_T = 1.2$ あたりが Standard-2 モード (分岐比 80 %) に対する値としては妥当ではないかと思う。Standard-2 モードの重分裂片は $N = 86$ の subshell 領域近傍にあるため (B.D. Wilkins *et al.*[2] の shell 補正項のマップを参照)、重分裂片の変形エネルギーは小さいと思われるので、物理的におかしくはない。Talou 氏の計算結果では重心系での中性子運動エネルギー $\varepsilon(A)$ が全般に低めに出る傾向があるところを見ると、核温度の絶対値が低すぎるのではないかとと思われるので、このあたりをもう少し検討すべきかもしれない・・・というのが筆者の感想。方法論としては、未完成ではあるが、精度がもう少し良くなれば、確率的方法は、核分裂という複雑な過程を解明する上で有力なアプローチになるものと思う。核分裂現象自体が stochastic な過程だからである。Talou 氏はまた、PFNS の評価値の不確かさの定量化、評価値とその不確かさのベンチマークテストについても言及した (が、ここでは割愛させていただく)。

● Tudora 氏（ブカレスト大学）は、さまざまな核分裂片のペアを最大 300 組まで考えて、個々のスペクトルを M-N モデルで計算し、その重み付け平均をとるという Point-by-Point (PbP) 法で計算した結果を示した。この方法は、多数の核分裂片ペアを考慮する点では現実の物理を正確に反映するという長所があるが、入力する point における全運動エネルギーをどのように推定するかが問題だろうと思った。筆者の質問に対して、「それは経験式で推定するしかない」という返事だった。予想通りである。おそらくその経験式の信頼度がこの方法の成否の鍵であろう。これで核分裂片の励起エネルギーが左右されるからである。

● Maslov 氏（Minsk）は、PFNS の測定データと Kornilov-Maslov の式を重ね合わせた図を次々に出してきて、自分たちの(1)式が一番良いと主張した。この式に含まれる 10 数個のパラメータを調整すれば実験データによく合うというだけの話である。これは 2 年前の話と全く同じで、物理的妥当性についての議論が不足しており、新味は感じられなかった。パラメータの決め方についての Talou 氏の質問に対して、「最適な“golden parameters”が存在する」と答えていたが、その根拠や数値は言わない。まるで「秘伝の術」である。多数の論文を書き、いろいろな国際会議に欠かさず出席して、自らの研究の公開に努めているが、どの論文を読んでも肝心なことはわからない仕組みになっている。数週間前にも「最新のすばらしい結果」のグラフをメールで送ってきたが、どのパラメータをどういう理由でどのように変えたかについては何も言及しない。たぶん golden parameters を上回る platinum parameters を発見したのであろう。慶賀の至りである。

● 筆者は、“Physics-based Calculation of the Prompt Neutron Spectrum”と題した報告をおこなった。Kornilov-Maslov のようにフィッティングのために 10 数個のパラメータを調整したり、根拠の不確かな SCN 項を導入したりする（筆者はこれを *fitting-for-the-sake-of-fit approach* または *ad hoc fitting approach* と呼ぶ）のではなく、今日の fission physics の知見を踏まえ、できるだけ物理に即した（“*Stick to physics !*”）モデルを作りたい、というのが筆者の願いである。

筆者の言う Multimodal M-N モデルとは、

- ① マルチモード核分裂モデルの考え方を導入し、
- ② shell 効果を考慮した Ignatyuk 超流動モデルによる準位密度を使い、
- ③ $\bar{\nu}_L$ と $\bar{\nu}_H$ の非同等性を考慮し、
- ④ 2 つの分裂片の核温度の非等温を許容する、

というのが基本的な考え方である。

今回はこれに加えて、

- (A) SCN の可能性、

(B) 核分裂片の重心系における中性子放出の非等方性、
(C) 核分裂片の加速途中での中性子放出、
について検討した結果を報告した。

(A)の SCN については、その存在割合と核温度 T を変えて Multimodal M-N モデル計算値に加えた結果を示した。図 1 には存在割合を 3 % と仮定し、その核温度を $T = 0.3$ MeV、 0.4 MeV、 0.5 MeV と仮定した場合の結果を示した。1 MeV 以下の低エネルギー成分が増強され、逆に 1 MeV 以上の高エネルギー成分が減少することがわかる。Starostov (Nefedov) 氏のデータ (緑色) との一致は改善される方向である (念のため、筆者は Starostov 氏が正しく、Johansson 氏のデータが誤りだとは断言できないと思っている。また、筆者の計算では、Kornilov-Maslov のように SCN に 2 つの成分があるとは仮定していない)。

仮に Starostov 氏のデータが正しいと指定しても、Kornilov 氏のように 25 % もの SCN を仮定する必要はなく、わずか 3 % の SCN があれば十分であり、5 % では多すぎるぐらいである。これは Voronyev 氏の実験データとも、従来の見解とも一致する。やはり SCN が 25 % という説は、Watt 型スペクトルの欠陥をしわ寄せしたための便宜的な数値であろうと思わざるをえない。

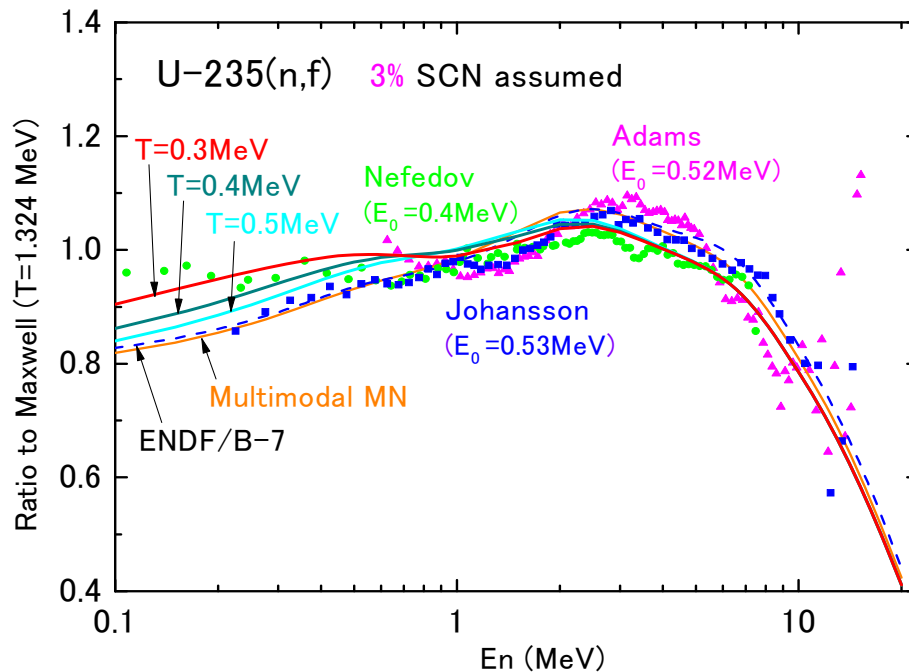


図 1. Multimodal M-N モデル計算値に、3 % の SCN の存在を仮定した計算値。
Maxwell 型スペクトルに対する比の形で表示してある。

(B)の核分裂片の重心系における中性子放出の非等方性とは、核分裂片が $7\sim 8\hbar$ という大きな角運動量をもつため、分裂片の進行方向に対して 0° 方向及び 180° 方向への中性子放出が強められるという説である。筆者は

$$b = W(0^\circ)/W(90^\circ) - 1 \quad (2)$$

で定義される非等方性パラメータを変化させて計算してみた。その結果を図 2 に示す。いずれの場合も、 b が大きいほど、 $E < 0.6$ MeV の低エネルギー成分と $E > 4$ MeV の高エネルギー成分を増強し、中間部を減少させるという結果になった。予想通りである。

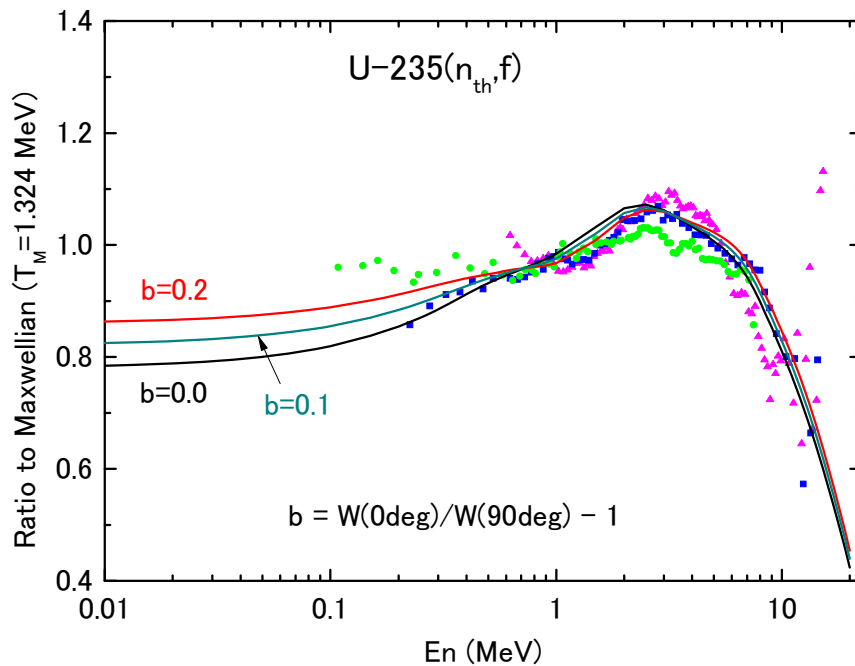


図 2. Multimodal M-N モデルに、中性子放出の重心系非等方性を考慮した計算結果。

(C)の核分裂片の加速途中での中性子放出があれば、蒸発中性子が核分裂片から受け取る運動量が小さくなるという kinematical な理由により、中性子スペクトルの低エネルギー成分を強めることになる。計算結果から見ると、その大きさは予想したほど大きくはないようだが（スペースの関係でグラフは省略、文献[3]参照）、核分裂片からの中性子放出時間は、励起エネルギーと中性子結合エネルギーにかなり大きく依存するので、核分裂片の加速時間との競合については、もう少し詳細な検討が必要であろう。

以上のように、(A)、(B)、(C)のいずれも、スペクトルのソフト成分を増強する効果があるという結論である。つまり、M-N モデルは間違っているという Kornilov 氏の主張とは反対に、M-N モデルに、もし必要ならば、適切な物理的効果を加味すれば、無理な仮定をしなくても Starostov 氏の実験データとの一致を改善することは可能なのである。

筆者のこの発表に対して、Kornilov 氏と Maslov 氏はどう反応するのかに注目していたが、彼らは一言も発しなかった（やっぱりネ☺）。

3. ベンチマーク解析

● Kodeli 氏（Jozef Stefan Inst., Ljubljana）は、OECD/NEA でおこなった PFNS のベンチマーク解析の結果を報告した。これは熱中性子炉（KRITZ）と高速炉（SNEAK）の臨界実験と VENUS-3 遮蔽ベンチマーク実験結果を、既存の PFNS 評価値と共分散を使って解析したものである（Kodeli 氏からもらった文献が[4,5]である）。

この中に、Kornilov の式に含まれるパラメータを測定データに合うように最適化したという式が出てくる。筆者はこれを見て呆れてしまった。Kornilov 氏が自ら“three-source model”と名付けた公式が、いつの間にか“one-source model”：

$$N_K(E)=[W(E, T_L, \beta_{E_L})+W(E, T_H, \beta_{E_H})]/2 \quad (3)$$

に化けているのである[4]。見られるように、Watt 型の蒸発項 $W(E, T_i, \beta_{E_i})$ が 2 つあるのみで、華々しく喧伝された 25 %もの SCN は影も形もなくなり、SCN 放出後の蒸発を表すという項もない。そして結論は「Kornilov の式が一番良く一致する」である。当たり前だろ、この積分データに合うようにパラメータを調整し直したのだから。^{注1)}

高速炉の中性子スペクトルのピーク近傍のエネルギーを持つので、これを考慮しないと高速炉の設計もできないとまで言っていた SCN 項は、必要がなくなったので捨てたわけだ。チャーリー・ブラウンなら“Good grief!”（やれやれ！）と慨嘆する場面であろう。

実はこの後、Maslov 氏が示した 6 MeV におけるスペクトルのフィッティング式からも SCN 項は姿を消していた。質問に対して、6 MeV では SCN は存在しないのだという答えだった。SCN とは、都合によって姿を現したり消滅したりする神出鬼没のトリックスター的存在であるらしい。筆者のような凡庸な頭の持ち主には理解不能としかいいようがないが、本人たちは恬として頓着する気配もない。“That was then, this is now”（あれはあれこれはこれ；あれは部下の責任、自分には責任はない）というお得意のロジックである。PFNS の微分データと比較するときには SCN の重要性を説き、積分的検証をおこなう段になると、SCN はアマテラス大神よろしく天の岩屋にお隠れになるのである。Maslov 氏が ISTC 資金で JENDL-3.3 用のマイナーアクチノイドの PFNS の評価計算をおこなった時には M-N モデル（の一番単純なバージョン）を使用しておきながら、今は M-N モデルを親の仇のように非難していることも、同じロジックで正当化される。不思議な神話的世界である。チャーリー・ブラウンなら“Sigh!”と溜息を漏らすかもしれない。

● Kornilov 氏も Maslov 氏も political な思惑で行動するタイプの人物に思えた。ND2010 国

^{注1)} この点を指摘した筆者に対して、R. Capote 氏は、「Kornilov の式として(3)式を使ったことは論文の共著者すべての合意に基づくものではない」と釈明してきた。そうでしょう、そうでしょう☺。

際会議（韓国）では、種々のファイルのベンチマークテストの結果に対して、自分たちの評価値を使って検証すべきだ、とねじ込んでいた。IAEA のサイトにある Minsk (Maslov) ファイルは（このファイルの存在自体が奇妙だが）、誰も使おうとしないので、何とかベンチマークテストに使わせようという戦略のように、筆者の目には映った。

● なお、Kornilov 氏は、PFNS には核分裂過程におけるパリティ保存則の破れが影響しているという新（珍？）説を述べ、偏極陽子ビームによる核分裂の研究をすべきだ、と主張していた。SCN 25 %説につづいて、一見「学問的」な説を持ち出してトピックを作り、資金とポストの延長を図ろうとする企て、と見た。これまた筆者の僻目か。“Good grief”

4. EXFOR の PFNS データの整備

EXFOR で PFNS のデータを検索すると、多数のデータが引っかかってくるが、その中で実際に使えるものはきわめて少ない。データ自体が玉石混淆ということもあるが、その他、

- (1) 広いエネルギー範囲をカバーするデータが少ない。
- (2) 重要な測定の数値データが入っていない。
- (3) 同一人物が同一装置で測定したいくつもの run のデータが無造作に入っているが、どう違うのか、どれを信用していいのかわからない。
- (4) ターゲットの寸法や散乱中性子に対する補正が不十分なものもある。
- (5) 標準データの典拠や誤差の性格が不明確。

などいろいろな理由がある。その他、 $v(A, TKE)$ (TKE ごとの鋸歯状曲線) など、マルチパラメータ測定の結果は、それ自体は炉物理計算に使う量ではないが、モデル計算の入力や検証に有用なので入れてほしいとの要望もあった。現在収録されているデータの整理と新しいデータの収録フォーマットの検討は IAEA の大塚直彦氏を中心に進められることになった。

5. 「右目で物理を、左目で工学を見る」

これは、筆者がかねてから核データ研究を行う上で、自分の信条としてきたことである。原子核工学と原子核物理は相隣り合う分野である。それぞれが自分の needs と seeds をおのおの原動力として進んできた。工学上の問題を、より基本的な物理の問題として検討すれば、そこから解決の示唆が得られるかもしれない（実際、筆者が、変形核の集団運動状態の直接励起による非弾性散乱の重要性に気がついたのは、院生時代に木村逸郎先生が進められていた ThO_2 球状体系の中性子スペクトルの測定実験に参加させていただいた際に、スペクトルの低エネルギー部分に不一致があることに気づき、その原因を

考えていたことが契機になった)。もしかすると、見逃されていた物理の問題がそれをきっかけに展開するかもしれない、という期待もある。それが、研究に面白さと魅力を添えていたと思う。これが「物理と工学のクロスオーバー研究」の本来の意義でもあると思う。

PFNS の研究もこの道を踏襲してきた。初期の頃は、Maxwell 型、Watt 型、あるいはそれらの複数の組み合わせで測定データをフィットすることから始まった。しかし、原子核の大変形集団運動の研究 (S.G. Nilsson, A. Bohr, B. Mottelson, ...) と並行して fission physics の実験と理論が進展するに伴い、核分裂における質量・エネルギーの分配、緩和過程、励起核からの中性子放出についての洞察が得られるようになった。IAEA で「核分裂における中性子放出の物理」(1989) [6]、「核分裂過程における中性子放出の核データ」(1991) [7] の 2 度の諮問会議 (CM) が開かれた背景には、このような研究の動向をふまえ、PFNS 研究も、fitting から物理的視点からの研究に進むべきという判断があったと思う。この 2 つの会議に出席した筆者にはその空気が感じられた (余程の KY でなければ、誰もがそれを感じていたと思う)。実際、Hauser-Feshbach 型アプローチ、Complex cascade evaporation モデル等が (ついでに、筆者の「非等温 M-N モデル」も) この場で議論され、SCN に関する検討も行われた。

最近、Kornilov-Maslov がやっていることはその真逆である。*Fitting for the sake of fit*。何でもフィットしさえすればいいという立場。暴言をあえてすれば「人類から猿への逆進化」。しかも、神出鬼没の SCN をめぐる猿芝居というオマケつき。

核データ研究において、多項式による (半) 経験的フィッティングや「パラメータ学」parameterology (Reffo の用語?) が大きな役割を果たしたことは事実であるし、今後も有力な方法であり続けるだろう。しかし、それから脱皮する可能性が視野に入っている時にそこに留まることは、学問進化への逆行である。況んや政略的奇行に於いてをや。^{注2)}

6. この CRP の課題

この CRP の最終目標は、アクチニド核種の PFNS を分担して評価を行い、それをまとめて IAEA にファイルを作ることである。それに向けて、標準スペクトルのポイントデータと平滑化データの整備、評価の基準となる実験データセットの整備、モデル計算の入力データとそれに対する感度解析、情報交換のための web site の創設などが、この会議で取り決められた。次回の CRP 会合は 2011 年 11 月頃、ウィーンまたはインドのムンバイで開催することになった (ムンバイは S. Ganesan 氏の提案)。

^{注2)} 最近、ボルドーの Carjan 氏と LANL の Talou 氏らが断裂を瞬時近似で扱って、SCN 割合を計算すると最大 25% という値が得られたと報告している。これはちゃんとした物理の理論に基づく計算だからにも怪しむことはない。ND2010 で Carjan 氏と議論した時に、「今後、くびれの部分から放出された中性子が、生まれる直前の核分裂片に衝突して再吸収される確率を評価することが必要ですね」という点で同じ意見だった。

以上、多分に筆者の僻目が入った報告になったことにご寛恕を乞う。ついでに私的な感想を言わせていただければ、CRP が特定の押しの強い人物の思惑に左右・攪乱されるのは、国際的事業において珍しくないこととは言え、やはり適切を欠くと思う。政略的思惑から離れて、もう少し広い学問的スコープの中で議論したかった、と思った次第。妄言多謝。

参考文献

- [1] C. Wagemans (*ed.*): *The Nuclear Fission Process*, CRC Press (1991)を参照。
- [2] B.D. Wilkins, E.P. Steinberg and R.R. Chasman: *Phys. Rev.* **C14**, 1832 (1976)
- [3] 松本敦史、大澤孝明: 日本原子力学会 2009 年秋の大会、J12
- [4] I. Kodeli, A. Trkov, R. Capote, Y. Nagaya, V. Maslov: *Nucl. Inst. Methods*, **A610**, 540 (2009).
- [5] Y. Nagaya, I. Kodeli, G. Chiba, M. Ishikawa, *ibid.*, **A603**, 485 (2009)
- [6] H. D. Lemmel (*ed.*): *INDC(NDS)-220* (1989)
- [7] S. Ganesan (*ed.*): *INDC(NDS)-251* (1991)