



遅発中性子データのレビューと新しい推奨値 —評価国際協力サブグループ 6 報告書—

武蔵工業大学

吉田 正

yos@ph.ns.musashi-tech.ac.jp

1. はじめに

中川編集長から WPEC (評価国際協力ワーキングパーティー) / SG6 (サブグループ 6) の報告書がやっと出たからレビューしろと言われ、私としてはシグマ委員会の遅発中性子 WG リーダーをしていた経緯もあり、お引き受けした。しかし、これが意外な難物であった。報告書は 126 ページで、極端に厚いというわけではないが、添付の CD Rom には、総ページ数 400 をこえる 10 件の関連論文と、550 ページにおよぶ Appendix が収められている。これらの論文は初出が多いうえ、推奨値そのものと密接に関連していて迂闊に読み飛ばせない。幸い正月休みがあったのでなんとか斜め読みし、本稿を書いている次第である。

2. 全体の構成

報告書本体は“Delayed Neutron Data for the Major Actinides”と題されており、D’Angelo と J. Rowlands による、最近の十年間にまとを絞った、しかし広範な現状レビューと、3 つの Appendix からなる。Appendix 1 はロシア Obninsk、Texas A & M 大学、Godiva (まだ健在だったのだ!) における最近の群定数 (後出) 測定値。Appendix 2 は U-235, U-238, Pu-239 の遅発中性子収率 (後出の記号では v_d) の WPEC/SG6 としての推奨値と、推奨に至る経緯の記述。Appendix 3 は SG6 で初めて世に出た 8 群定数 (後出の記号では a_g と λ_g で $g=1 \sim 8$) 及び、それに付随する 16 エネルギー群構造の遅発中性子スペクトル (同じく $\chi_g(E_k)$ で $k=1 \sim 16$) の推奨値となっている。これらは Th-229 の熱核分裂から、U-235, U-238, Pu-239 等を経て、Cf-252 の自発核分裂に至る 33 核分裂システムについて与えられている。推奨値と言う意味では、当然 Appendix 2 と 3 が重要で、Appendix 1 がここに出てくる意味はよく分からない。あとで細述するが、遅発中性子定数の群数を、歴史的伝統的な 6 群でなく、あえて 8 群としたところが大きな特徴であるとともに、また甚だしく意見のわかれるところである。ちなみに、8 群化は SG6 活動後半の影の牽引者 G.D. Spriggs と同氏の

協力者 J. Campbell（ともに Los Alamos）の提案とその仕事に依っている。これにはロシアの Piksaikin（Obninsk）も関わっており、米ロ連携プレーである。

付録の CD Rom は以下のような構成になっている。括弧内は著者とページ数を示す。

Annex 1 臨界実験データを用いた adjustment による U-235, U-238, Pu-239 の遅発中性子収率の評価。(Fort et al. ; 45pages)

Annex 2 遅発中性子時間挙動の測定データのリストとグラフ。全部で 245 セットを数える。(Spriggs & Campbell ; 50 pages)

Appendix A 245 セットのリストで、各セットは、例えば、
199: Pu-239_ther: Thermal Spectrum, 6-groups, Keepin et al. (1957)
のようにごく簡潔に与えられている。(7 pages)

Appendix B 245 セット分の実測値。実測値は核分裂後の経過時間 t の指数関数で展開され、展開係数 a_g と減衰定数 λ_g のセット (群定数と呼ぶ) で与えられている。群数は 2 から 12 までさまざまだが、4~6 群が圧倒的に多く、7 群以上は極めて少数である。また各測定値に基づいて計算された reactivity scale がすべてに付されている。(204 pages)

Annex 3 提案された 8 群の根拠と各群の半減期（あるいは崩壊定数 λ_g ）の決め方の詳細な報告。(Spriggs, Campbell, Piksaikin ; 56 pages)

Appendix A 上記 Annex 2、Appendix A と全く同じ内容。(7 pages)

Appendix B 上記 Annex 2、Appendix B の 245 セット分の群定数実測値が再録され、各セットごとに 8 群でフィットし直した (新 8 群モデルの) abundance (a_g) が表になっている。さらに、新旧モデルによる reactivity scale の計算結果の比較がなされている。(310 pages)

Appendix C 上の Appendix B の 8 群モデルの abundance (a_g) をまとめた表。(15 pages)

Appendix D 測定値統計処理に際しての重みや標準偏差。(9 pages)

Annex 4 8 群モデルの各群に対する遅発中性子のエネルギースペクトル。Hansen-Roach 型の 16 エネルギー群で総和計算法により ENDF/B-VI を用いて計算されている。
(Campbell & Spriggs ; データを含め 191 pages)

Annex 5 今回の SG6 のもう一人の牽引者 Piksaikin を中心とした Obninsk グループ (IPPE, ロシア) からの報告。以下の 6 論文からなる。(67 pages)

Part 1 Measurement of Period, Relative Abundances and Neutron Total Yields of DN's from Fast Neutron Induced Fission of U-235 and Np-237

Part 2 Measurements of the Energy Dependence of the Relative DN Yields Related to Individual Precursors from Neutron Induced Fission of Np-237

Part 3 Characteristics of Delayed Neutrons: Systematics and Correlation Properties

Part 4 Energy Dependence of Relative Abundances and Periods of DN's from Neutron-Induced Fission of U-235, U-238 and Pu-239 in 6- and 8-Group Model Representation

Part 5 Experimental Studies of the Absolute Total DN Yields from Neutron Induced Fission of U-238 in the Energy Range 1-5 MeV

Part 6 Delayed Neutrons as a Probe of Nuclear Charge Distribution in Fission of Heavy Nuclides by Neutrons

以上であるが、最後の Piksaikin ら Obninsk グループの諸論文は、SG6 活動を別にしても重要な論文であると考えられる。

3. SG6 報告の特徴と問題点

ここでおさらいをすると、核分裂核種、例えば U-235 なら U-235 の、一回の核分裂当たりの遅発中性子放出確率が、核分裂後の時間経過 t の関数として与えられれば、原子炉の動特性計算は可能である。従って、これを与えるところまでが核データの範疇であるといえる。この確率は遅発中性子収率 (delayed neutron yield) とも呼ばれ、本稿では $Y(E, t)$ と記す。 E は遅発中性子が持つ運動エネルギーである。 $Y(E, t)$ は、現在 300 核種弱知られている遅発中性子先行核 (beta-delayed neutron emitter あるいは precursor) からの

寄与の和として表 1 の上段のように記述できる。ご承知のように、 $Y(E,t)$ あるいはこれをエネルギー積分した $Y(t)$ の時間依存性を 6 つの指数関数の重ねあわせで表す方法が、原子力の黎明期からほぼ半世紀にわたって定着してきた。この 6 つのグループのそれぞれを**時間群**あるいは単に**群**と呼ぶ。SG6 もこの遅発中性子の多群表現を採用してはいるが（表 1 下段）、すでに述べたように、群数を 6 群から 8 群に拡張している点が従来と大きく異なる。ある時間群に現れる遅発中性子の相対個数 a_g （全体で 1.0 に規格化される）を **abundance** とよび、崩壊定数 λ_g と対をなす。 a_g と λ_g の 6 対の（乃至は 8 対の）セットを**群定数**と呼ぶことはすでに述べた。

表 1 遅発中性子収率 Y の表現

元々の式（全先行核からの寄与の和）	
$Y(E,t) = \sum_{i=1}^{\text{全先行核}} \nu_{di} \cdot \chi_i(E) \cdot e^{-\lambda_i t}$	
ν_{di}	: 先行核 i が放出する遅発中性子数
$\chi_i(E)$	: そのエネルギースペクトル
λ_i	: 先行核 i の崩壊定数
WPEC/SG6 の採用した群表現	
$Y(E_k,t) = \sum_{g=1}^8 \nu_d \cdot a_g \cdot \chi_g(E_k) \cdot e^{-\lambda_g t}$	
ν_d	: いま問題にしている核分裂親核が放出する遅発中性子の総数。
a_g	: 第 g 群に現れる遅発中性子の相対個数（abundance）。歴史的伝統的に、群数は 6 とされてきたが、SG6 はこれを 8 に変更した（本文参照）。
$\chi_g(E_k)$	: 第 g 群に属する先行核が放出する遅発中性子のエネルギースペクトル。ここでは Hansen-Roach の 16 エネルギー群構造のインデックスとなっている。
λ_g	: 第 g 群に属する先行核群を代表する崩壊定数。

1) 遅発中性子収率

表 1 の下段の例のように、ある核分裂システムが与えられたときの遅発中性子収率 ν_d は原子炉の実効遅発中性子割合 β_{eff} を決める上できわめて重要な物理量である。SG6 報告書本文によれば、この値は Fort らの adjustment（付属 CD Rom の Annex 1）及び桜井、岡嶋による adjustment（J. Nucl. Sci. Technol., 39 (2002)19～30）の結果を参照しつつ、表 2 のような値が推奨されている。この表には、参考までに JENDL-3.2 と-3.3 の値も入れてお

いた。

表 2 SG6 の遅発中性子収率 v_d の推奨値と JENDL データとの比較

	WPEC/SG6 推奨値	JENDL-3.2	JENDL-3.3
U-235 (thermal)	0.0162	0.0160	0.01585
U-238 (fast)	0.0465	0.0481	0.04634
Pu-239 (thermal)	0.00650	0.00622	0.00622

2) 新 8 群モデル

Spriggs, Campbell, Piksaikin は、従来の 6 群分割では各群の半減期が主要な先行核の半減期と関係なく設定されているので、モデルとして物理的でないと指摘し、新たな 8 群分割モデルを提案した (Annex 3)。彼等の 8 群モデルでは第 1 群を半減期 55.6 秒の Br-87 に、第 2 群を 24.5 秒の I-137 に、第 3 群を 16.3 秒の Br-88 に対応させ、各群の半減期をそれぞれ 55.6 秒、24.5 秒、16.3 秒と設定した。半減期のより短い第 4 群以下では寄与する先行核の数が急速に増加するので、このような 1 対 1 対応はとれないが、従来の第 5 群をさらに 2 つに分け詳細化した。これらの処置により、群数は従来の 6 群から 8 群に増加した。これによる、長所、短所はいくつかあるが、ここではあまり深入りできない。ただ、従来の動特性コードが全て 6 群を前提に書かれており、6 群ベースの技術遺産はあまりにも大きいことを勘案し、日本は一貫して 6 群モデルを主張し、また JENDL-3.3 でも 6 群構造を採用した。この判断に当たって、遅発中性子 WG では、8 群モデルの提唱者 Spriggs 氏の来日の機会を利用して同氏を WG 会合に招き、意見を行った。議論を重ねたうえでの結論であることを申し添える。

3) 新 8 群モデルの群定数

Spriggs らは収集した群定数測定値（その圧倒的多数は 6 群以下の群数表示で与えられている）の全て、245 セット分を新 8 群モデルで再フィットしている。そのフィッティング結果は Annex 3 の Appendix B に収録されているが、これは全体で 310 ページにもおよんでいる。各群の減衰定数 λ_g は前節のように fix されているから、実質的には、Th-229 の熱核分裂から Cf-252 の自発核分裂に至る 33 種類の核分裂システムについて、abundance ($a_g, g=1\sim 8$)が 245 セット分リストされていると考えればよい。さらにこの 33 種類の核分裂システム毎に、一つずつの abundance のセットが推奨値として報告書本体の Appendix 3 に与えられ、Recommended relative abundances and energy spectra for eight time-group representation, evaluated by Joann Campbell and Gregory Spriggs と題されている。従って、1 つの核分裂システムについて、複数の実験データから一つを選び推奨値としているわけで、複数のデータを重み付け平均するなどの処理をした上で推奨値を決めているわけで

はない。主要 3 核種について、推奨されたデータの一覧を表 3 に付す。多くの測定の中から、いまだに Keepin の古典的な測定が選ばれているということは、やはり驚くべきことである。

表 3 SG6 による群定数測定推奨データ

データの種類	推奨された測定データとその表示に使われた群数
U-235 (thermal)	Thermal spectrum, 6 groups, Keepin, <i>et al.</i> (1957)
U-235 (fast)	0.624 MeV, 8 groups, Piksaikin, <i>et al.</i> (1997)
U-238 (fast)	Fast spectrum, 6 groups, Keepin, <i>et al.</i> (1957)
Pu-239 (thermal)	Thermal spectrum, 6 groups, Keepin, <i>et al.</i> (1957)
Pu-239 (fast)	Fast spectrum, 6 groups, Besant, <i>et al.</i> (1977)

4. おわりに

WPEC/SG6 の活動は、当初の活動計画の範囲をだいぶ逸脱し、最終的には新しい 8 群モデルの提唱というところまで突き進んだ。その主唱者 Spriggs 氏は、数年かけて、約半世紀の間に蓄積された遅発中性子のマイクロレベル測定データを精力的に収集してその数は 245 セットにも及び、さらにその全てを 8 群化した。ロシアの Piksaikin もこれに同調し、最後は米ロ主導でサブグループ活動の幕を閉じたことになる。マイクロレベル測定データ 245 セット中に日本のデータが一件もないことと、最後は米ロの勢いに席卷され SG6 の成果を JENDL-3.3 にあまり生かせなかったことが残念ではある。しかし、マクロレベル測定データ（臨界実験データ）とその解析では、日本の岡嶋・桜井の貢献は大きく、また D'Angelo と J. Rowlands のレビューでは、親松、橘、瑞慶覧、山根、大沢らの日本のアクティビティーはきちんとクレジットされている。将来、例えば JENDL-4 を視野に入れたとき、伝統的な 6 群のままで行くのか、この新しい 8 群に移行するか、早いうちからユーザーの意見も反映しつつ慎重に議論しておく必要があるだろう。