

原子力学会炉物理部会・核データ部会企画セッション

(5) 核データ測定と核データ評価の誤差

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

馬場 護

babam@cyric.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核データは原子力における基盤的なデータベースであり、社会との関わりは原子炉や原子力システムの設計を通じて、如何に安全性と経済性の向上に貢献するかという面においてであると考えられる。原子力システムの核特性予測には、モデル化や計算手法に伴う誤差と計算に用いる核データに起因する誤差が伴うが、近年のコンピュータと計算手法の進歩により計算に伴う誤差の割合が減少し、核データ誤差の占める割合が支配的になりつつある^{1,2)}。そのため、核データの誤差に起因する原子力システムの特性予測の不確かさを定量的に評価することが必要となるが、それには誤差の大きさ（分散）とともにそれらの相関（共分散）の情報が必要となる。このような事情により、核データの誤差そのものを低減するとともに、誤差を共分散を含めてきちんと評価し、かつベンチマークなどを通じて品質保証を行うことが対社会的責任として認識されるようになってきた¹⁾。

核データは、実験データと理論から“真”の値とその誤差を推定し、データの推定・補完を行う評価作業を通じて完結したファイルとして提供される。通常、核データに要求される精度は極めて高く、理論の予測精度を大きく超えているために、絶対値、誤差ともに実験値によって支配されるのが一般的であり、核データの精度向上には評価手法とともに実験データの質を高めることが本質的といえる。

この報告では、核データの誤差の現状と核データ誤差の主要因である実験データの精度向上の方策について述べる。

2. 核データ誤差の現状

2.1 JENDL-3.3 における共分散データ

JENDL においては、最近公開された Version 3.3 において、共分散ファイルが付加された。共分散ファイルは ENDF/B、JEF においては、以前から与えられていたが、質的に評

価の高い JENDL で共分散ファイルが利用可能になったことで、設計誤差の評価や設計マージンの精度の高い評価に大いに寄与するものと期待される。

Fig. 1, 2 に JENDL-3.3 共分散データの例を示す。Fig.1 は、 ^{235}U の中性子入射核分裂断面積の共分散を示す。これによって誤差の大きさとデータ間の相関が分かる。低エネルギー部と高エネルギー部分で誤差が大きいこと、あまり強くはないがエネルギー間でデータに相関のあることが分かる。また Fig. 2 には ^{235}U と ^{239}Pu の中性子核分裂断面積の相関が示されている。一般に核分裂断面積は ^{235}U を標準とする相対測定によって求められることから、明瞭な相関関係が見られる。

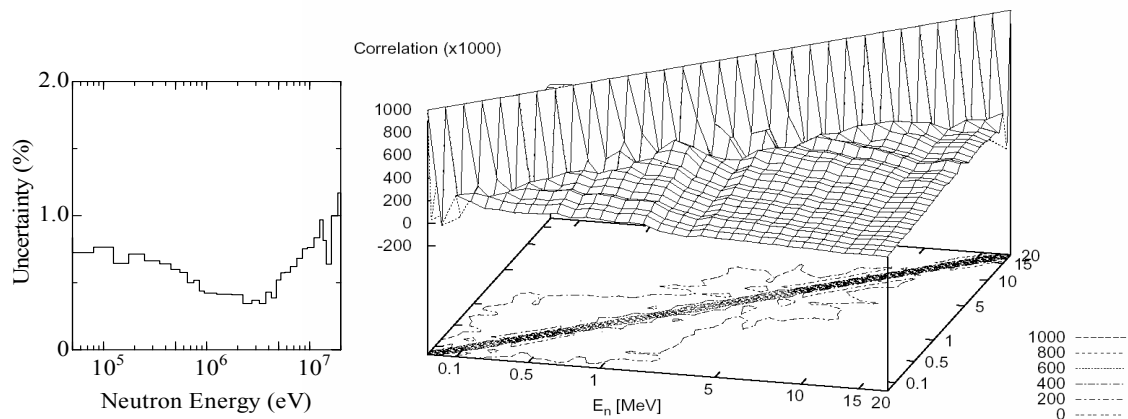


Fig.1: JENDL-3.3 の ^{235}U 核分裂断面積における分散（左）とエネルギー間の相関（右）

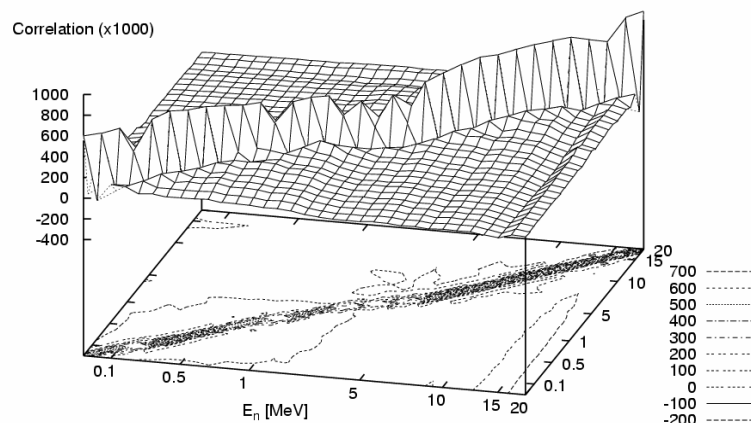


Fig.2: $^{235}\text{U}(n,f)$ (横軸) と $^{239}\text{Pu}(n,f)$ (縦軸) 断面積の相関係数

2.2 核データの不確かさ

核データは原子炉の臨界性から核燃料サイクル、核融合、加速器など多方面に亘って利用されるが、最も基本的な例の 1 つとして、臨界性に係わるデータの比較を Fig. 3 と Table 1 に示す。Fig. 3 は高濃縮ウラン水溶液体系についての臨界計算の比較であり、データが古い adjustment の前には ENDF/B-V, JENDL-3.2, ABBN-93 による計算には 1% を超える不確かさがある。この中で、JENDL-3.2 では燃料組成比にあまりよらずに、0.4% 程度の安定した不確かさになっていることが注目される。最近の version でこの誤差はかなり改善されているが、ファイル間及び計算値実験値の間にはまだ有意な差があるのが現状である²⁾。

Table 1 には ^{241}Am の臨界質量に対する核データファイル間の計算結果を示す。Metal、Oxide いずれの場合も 30% 程度の差がある。これは、 $^{242\text{m}}\text{Am}$ 、 ^{243}Am などの場合も同様であり、マイナーアクチニドの場合は依然として大きな誤差が存在していることを示す。この原因は次節で述べるように、実験が困難で評価の基礎となる実験データそのものの誤差が大きいためである。

加速器駆動システム (ADS) や宇宙関連の高エネルギー領域データでは不確かさはもっと大きい。最終的に誤差をどこまで低減すべきかは核データのみでは決まらないが、誤差は安全性へのマージンを大きくして経済性に跳ね返るので、誤差低減は核データ活動の強い動機付けとなり得る。また、放射線損傷やソフトエラーも広い意味で安全性に関わる問題であり、その機構や素過程の解明も核データ・炉物理分野の守備範囲事項として、誤差・信頼度を議論できる段階までに高める必要がある。

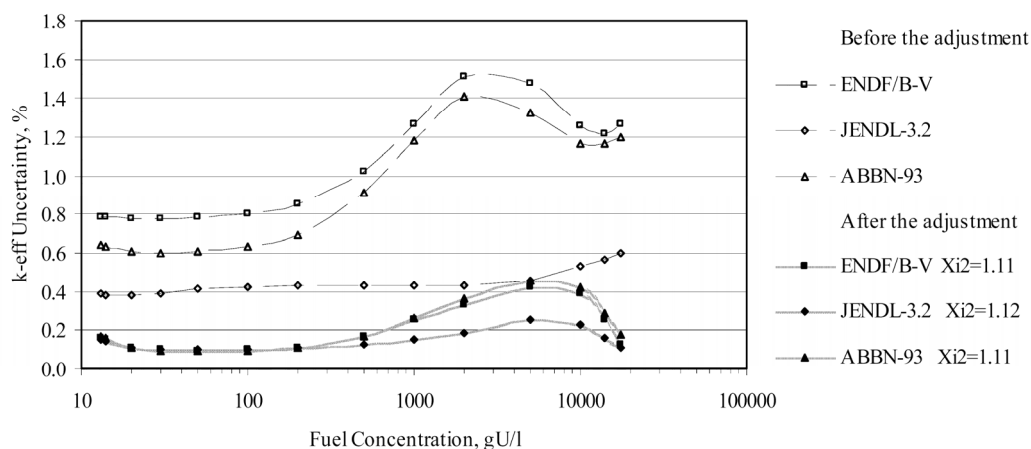


Fig 3: 高濃縮ウラン水溶液体系についての臨界計算の不確かさ ²⁾

Table 1: 各種データファイルによる ²⁴¹Am 臨界質量の計算値 ²⁾

Chemical form	Reflector	Critical mass (kg)						
		MONK				MCNP		
		UKNDL	JEF-2.2	ENDF/B-VI	JENDL-3.2	JEF-2.2	ENDF/B-VI	JENDL-3.2
Metal $\rho = 13.66$ g/cm ³	Bare	56.4	75.7	88.0*	76.1	73.3	57.7	73.7
	Water	50.9	68.3	79.9*	69.2	65.8	52.0	66.7
	Steel	33.6	42.4	51.8*	45.4	40.9	33.8	43.6
Dioxide $\rho = 11.69$ g/cm ³	Bare	98.2	132	161*	135	129	94.6	131
	Water	92.0	124	151*	125	120	87.6	123
	Steel	65.4	86.0	109*	91.4	83.9	62.4	89.0

*MONK results for ENDF/B-VI are subject to error

3. 核データにおける誤差の原因とその対策

断面積 σ は、通常次式で求められる： $\sigma = R / (N \times \phi)$ 。従って断面積の誤差は、反応率 R 、ターゲット原子数 N 、入射中性子束 ϕ の誤差によって決まる。

マイナーアクチニドの場合は、試料自身が強いアルファ放射体であり自発核分裂を伴うため、バックグラウンドが多く R の誤差すなわち σ の誤差を小さくすることが困難である。これを解決するには、バックグラウンドを凌駕するイベント数を稼ぐことが必要であり、バックグラウンドの抑制と強力な中性子束の実現が最も重要である。

他方、原子炉の安全性に重要なドップラー反応度の場合には、低エネルギー中性子による (n, γ) 反応についての正確な共鳴構造の情報が必要であり、高いエネルギー分解能の実験が必須である。そのため、高エネルギー分解能の TOF 装置が開発され、多くの共鳴断面積が明らかになったが、最近の ORELA での ²³⁸U (n, γ) 断面積の実験結果は、Table 2 に示

すように全体に数%程度高い値となっており、データにまだ改善の余地のあることを示している^{2,3)}。

今後の核データの主要な課題は、より高いエネルギー分解能の追求とともにマイナーアクチニドなど放射性の強い少量のサンプルから如何に信頼度の高いデータを得るか^{4,5)}であると言える。上述のように、その解決には、強力な中性子束が必要であり、またサンプルイベントをバックグラウンドからの的確に識別できる測定手法が必要である。

前者が CERN で進められている n_TOF プロジェクト⁶⁾や JPARC における断面積測定計画であり、後者の 1 つが「革新的原子力システム」プロジェクトで進められている多重 γ 線検出システムである⁵⁾。両者の組み合わせによる実験は次世代への大きなステップを刻むものと期待される。n_TOF プロジェクトにおいては、CERN の 24 GeV 陽子シンクロトロンを用いた強力な核破砕中性子源と 200 m 程度の長い飛行距離を用いて、数 eV から 200 MeV 程度までの中性子入射核分裂、捕獲などの断面積を高いエネルギー分解能で求めることが可能であり、マイナーアクチニドや核分裂生成物に対する実験が精力的に進められている⁶⁾。また、米国 LANL (Los Alamos National Laboratory) LANSCE/WNR⁷⁾においては 800 MeV の陽子ビームによる核破砕反応を中性子源として、数 100 keV から 400 MeV 程度の範囲で高いエネルギー分解能の実験を行っている。最近、鉛スペクトロメータを設置し、核破砕中性子源を導入することによって極めて高い中性子束を実現し、²³⁵mU 等希少核種の断面積の測定を行っている⁸⁾。日本においては、京大炉において鉛スペクトロメータを用いてマイナーアクチニドに関する系統的な測定が行われ、JENDL-3 の評価に大きく貢献した。これらはいずれも、強力中性子源の威力を示している。

バックグラウンドの抑制に関しては二つのアプローチがあげられる。核分裂の場合はアルファ粒子バックグラウンドと自発核分裂が問題となる。後者に対しては中性子強度の増強が必要であるが、アルファ粒子に対しては核分裂片との阻止能の違いを利用して弁別する方法が挙げられる⁴⁾。また、捕獲反応の場合は、“真”の捕獲の場合には γ カスケードによって γ 線間の相関が存在することを利用して γ 線バックグラウンドを除去することの有効性が示されている⁵⁾。従って捕獲に伴う多重 γ 線を多重 γ 線検出システムで計測し、 γ 線の相関に基づいて“真”の事象を選別することができる。これが多重 γ 線検出システムを用いたアクチニド捕獲断面積の高精度測定の原理であり、そのための検出器開発が現在進められている⁵⁾。

強力中性子源とこうした検出器システムの組み合わせによってアクチニドのみならず、核変換や宇宙核物理学等で必要とされる不安定核ターゲット核データにも大いに寄与すると考えられる。

4. まとめ

核データと社会との接点である誤差について、現状と今後の課題を概観した。

JENDL-3.3 において共分散データが提供され、また実験においても誤差を低減するための努力がなされており、その成果を取り入れることによって、誤差の低減ひいては設計マージンの低減やより合理的な安全設計が可能になると期待される。

Table 2 Average ^{238}U neutron cross sections in the energy range 1 keV to 10 keV;
(a) ENDF/B-VI, (b) present evaluation.

Energy Range keV	Capture b		Elastic b	
	(a)	(b)	(a)	(b)
1 - 2	1.87	1.94	21.68	22.25
2 - 3	1.36	1.41	21.57	22.12
3 - 4	1.15	1.20	19.82	20.36
4 - 5	0.88	0.89	14.79	15.03
5 - 6	0.90	0.90	14.20	14.38
6 - 7	0.87	0.88	16.66	16.37
7 - 8	0.68	0.74	13.79	14.07
8 - 9	0.63	0.65	15.03	15.71
9 -10	0.65	0.71	13.07	13.89
1 -10	1.00	1.04	16.73	17.12

参考文献

- 1) 「核データニュース」No.77(2004) p.31
- 2) 「核データニュース」No.77(2004) p.48
- 3) 「核データニュース」No.77(2004) p.56
- 4) A. Michaudon (Ed.): Nuclear Fission and Neutron-induced Fission Cross Section, Pergamon Press
- 5) M. Igashira et al.: ND2004, Abstract 162
- 6) Tasson-Got et al.: ND2004 Abstract 440, 434
- 7) P. Lisowski : ND2004 Abstract 631
- 8) R. Haight : ND2004 Abstract 154, 528