

## WPEC Subgroup 35 Scattering Angular Distribution in the Fast Energy Range

Los Alamos National Laboratory

Theoretical Division

河野 俊彦

[kawano@lanl.gov](mailto:kawano@lanl.gov)

### 1. 緒言

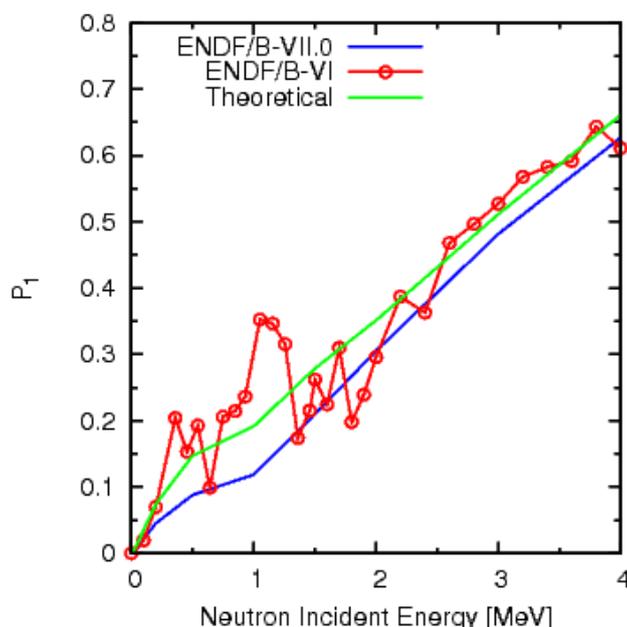
中性子弾性散乱の角度分布が中性子輸送計算に比較的高い感度を持つ場合があることは以前から石川氏ら (JNC, 当時) に指摘されていた。例えば小型の臨界体系において中性子が後方散乱される確率が上がれば体系からの漏洩が減少するため、実効増倍率計算値が増加することは理解できるが、海外の核データコミュニティにおいてもこれが認識されるようになったのは比較的最近のことである。石川氏らによって実効増倍率以外の種々の核特性に対する散乱角度分布 (実際には平均余弦) の感度が計算されており、応用上 Na, Fe, U 等主要核種の散乱角度分布を詳細に検討する必要があることが分かってきた。

2010年、Paris で開催された WPEC 本会議において Subgroup 35 (以下 SG35) の設置が承認され、私が纏め役を仰せつかることとなった。幸い多くの研究者に興味を持って頂き、実験・理論・評価・ベンチマークを含んだ国際協力体制となっている。日本からは JAEA と北大が SG35 に参加している。

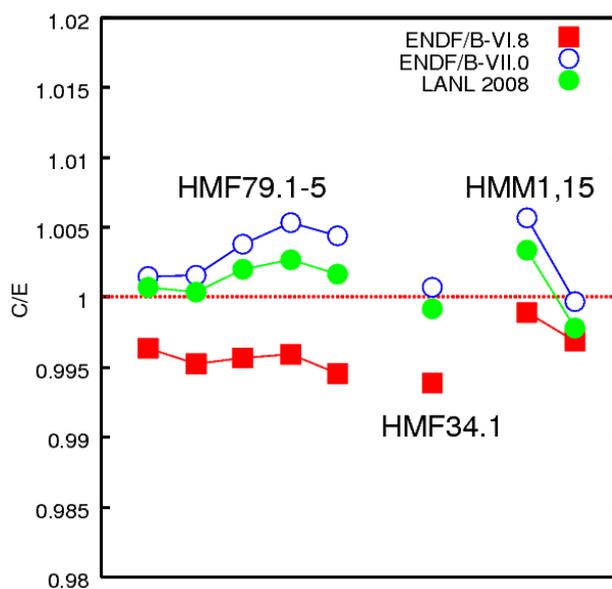
### 2. 評価の現状と問題点

高速領域での散乱角度分布の厳密な評価は、二つの理由から容易では無い。keV 中性子入射の散乱実験データは複合核弾性散乱からの成分が主であり、重心系で 90 度対称な角度分布となる。その中に僅かな形状散乱の成分が含まれ、これが前方・後方の非対称成分を生む。この形状散乱成分は光学模型によって計算されるが、このような低エネルギー領域での計算は、(1) ポテンシャルパラメータが一般に高エネルギー側からの外挿であり、(2) 結果はエネルギー平均されたものである。軽核及び中重核では keV~MeV 領域で断面積に局所な構造が見られ、これは光学模型では再現できない。

例として **Fig. 1** に  $^{48}\text{Ti}$  の弾性散乱角度分布を Legendre 展開した時の  $P_1$  成分を示す。これは弾性散乱の平均余弦に相当する量である。また **Fig. 2** は Ti 反射体付き臨界体系に対するベンチマークテストの結果で、その横軸は反射体厚み等が異なる体系を示す。



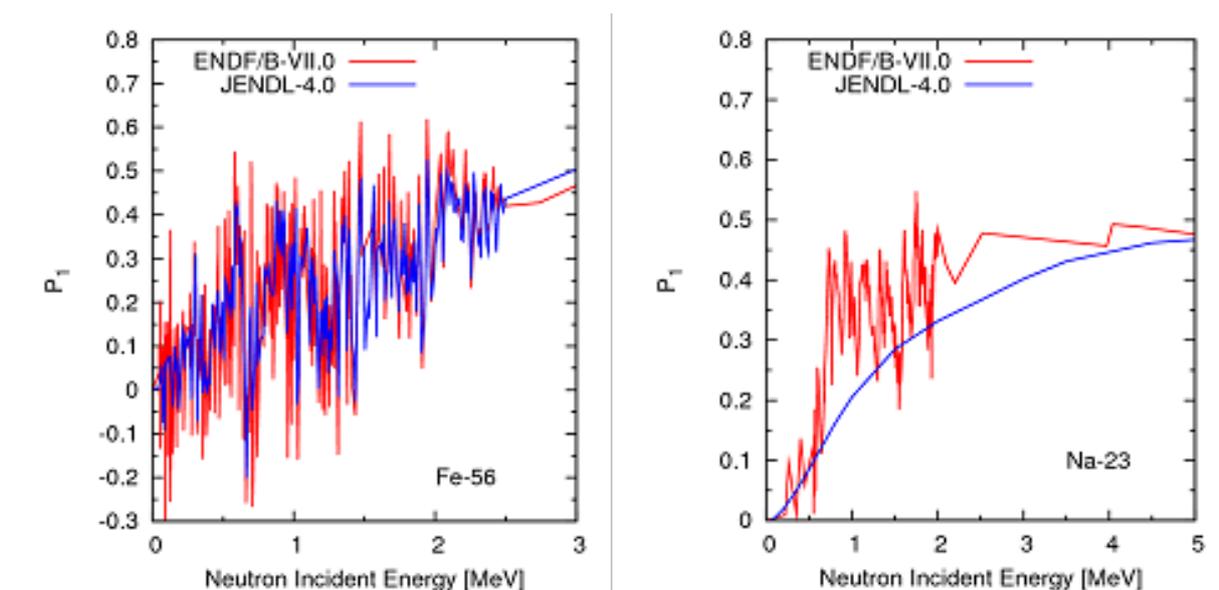
**Fig. 1:**  $^{48}\text{Ti}$  の弾性散乱角度分布の  $P_1$  成分。青は ENDF/B-VII.0 (JENDL-3.3 と同一)、緑は Koning-Delaroche ポテンシャルによる計算値、赤は ENDF/B-VI の値であり、実験値に基づいた評価値。



**Fig.2:** Ti 反射体を含む高速中性子臨界体系に対するベンチマークテストの結果。横軸は異なる体系に対応し、反射体厚さ等が異なる。

ENDF/B-VI では系統的に過小評価、ENDF/B-VII.0 (JENDL-3.3 と同一) では過大評価となっている。与えられている  $P_1$  成分に着目すると、**Fig. 1** の Theoretical と書かれた線は Koning-Delaroche ポテンシャルによる計算値であり、ENDF/B-VII.0 の角分布はそれに比べて前方性が弱い。すなわち計算上では、反射体をすり抜けていく中性子を少なく見積もることになる。他方、ENDF/B-VI (B-V と同一) の評価は実験データに直接基づくものであり、そこに見られる局所的な構造は光学模型では再現できない。ENDF/B-VII.1 では角度分布を B-V に戻すことにしたが、問題はこのデータが非常に古く、詳細な情報が得られないことである。SG35 内で調査した結果、このような実験データに基づくデータファイルが幾つか存在することが分かった。JENDL-4.0 の  $^{51}\text{V}$  の角度分布は JEFF を採用していると書かれているが、実際これも実験データに基づいて A.B. Smith が ENDF/B-VI 用に評価したものである (但しこの評価値は「比較的」新しく、1988 年のものである)。なお、角度分布データによって改善した Ti のベンチマークテストであるが、主要重核の核データをほんの僅かに変化させるだけでも改善するとの報告があったことを付け加えておく。

構造材および軽核領域のもう一つの留意点として、分離共鳴領域が比較的高い中性子エネルギーまで伸びていることが挙げられる。この場合、原理的には弾性散乱角度分布は共鳴パラメータから一意的に決定される。ENDF-6 フォーマットでは角度分布を共鳴パラメータから計算するためのオプションが用意されているが、現在公開されている NJOY ではこのオプションを利用できない。弾性散乱角度分布に現れる共鳴構造をデータファイルに与えるには、分離共鳴から計算した角度分布をファイルに格納するか、あるいは実験データから直接得られた角度分布を評価値として採用する他ない。例として JENDL-4.0, ENDF/B-VII.0 に格納されている  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{23}\text{Na}$  の角度分布  $P_1$  成分を **Fig. 3** に示す。



**Fig. 3:** JENDL-4.0, ENDF/B-VII.0 に格納されている  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{23}\text{Na}$  の角度分布  $P_1$  成分。

### 3. SG35 活動の現状

SG35 では Na, Fe, U を対象とし、以下の項目を活動目標として掲げている。

1. 散乱角度分布を評価するための手法の確立
2. 角度分布のデータの精度が重要となる積分データの確認
3. 新しい評価値を提供し、また実験グループに対して新たな測定を提案

以下に SG35 内で行われた報告を簡単に紹介する。

CEA/Cadarache では Na, Al, Fe を対象に、評価とベンチマークテスト両面からこの問題に取り組んでいる。Fe の角度分布を共鳴パラメータから計算して局所的な変動を取り入れた場合と、光学模型による平均値計算を比較し、局所変動が中性子実効増倍率に与える影響を計算している。Na の場合、R 行列解析が行えるエネルギー領域よりも局所変動が上に広がっているために Fe と同様な検討は行えないが、実験データに基づく ENDF の評価値 (Fig. 3) を光学模型で平均的に再現させれば比較的良好な結果が得られるようである。

IRMM/Geel からは、 $^{23}\text{Na}$  非弾性散乱断面積測定の結果が報告されている。また、他の実験データを含めた SAMMY による共鳴解析を行い、散乱の平均余弦を SAMMY の結果から計算した場合と、実験データから直接求めた場合の比較を行っている。

SG35 の活動に関連して、Zr と Na の評価が BNL で進行中である。Zr の弾性散乱角度分布が TRIGA 炉ベンチマークに対して大きな感度を持つことが報告されており、この角度分布を ENDF/B-VII.2 に向けて改訂する。Na の新しい評価値はベンチマークテストを常に改善するとは限らないようで、現状では ENDF に含まれておらず、検討中である。

ORNL では  $^{56}\text{Fe}$  の共鳴解析が進行中である。新しい非弾性散乱の実験データを解析に含めることにより、共鳴領域の上限が 850 keV から 2 MeV に拡張されている。

散乱断面積および角度分布に対して大きな感度をもつベンチマーク体系について JAEA と北大が検討を行っている。現在報告されているのは、LANL の小型高速炉心体系である Godiva, Flattop-235、FCA の X-1, X-2 炉心、常陽の Mk-I, Mk-II 炉心である。FCA での結果で興味深いのは、2% しか存在しない  $^{57}\text{Fe}$  の弾性散乱の平均余弦が比較的大きく影響していることである。

### 4. 結言

SG35 の活動の概略を報告した。高速領域における角度分布の評価値を、実験に基づいたものを採用するのか、共鳴パラメータから計算すべきか、あるいは光学模型計算で十分なのかの検討が、ベンチマークテストの結果を元に進められている。新しい Fe, Na の

共鳴パラメータが Geel と ORNL で評価されており、今後主要核データライブラリにとって重要なデータとなることが期待される。さらに弾性・非弾性散乱実験も計画されている。また処理コード内部で共鳴パラメータから角度分布を計算するオプションは、NJOY2010 から利用可能であることが報告されている。

ここ数年 SG35 以外でも関連する活動が活発になっており、2010 年には Strasbourg で弾性散乱・非弾性散乱の国際会議 WINS2010 が開催され、さらに今年 9 月には WINS2012 が Boston で開かれた。アメリカでは中性子散乱測定が一旦消滅してしまったが、昨今の角度分布データの重要性が再認識されていることから、核データ生産力を維持する意味で今回の WINS を主催している。

昨年、IAEA が主要重核の高速領域での散乱・捕獲断面積に関する専門家会議を開催した。この会議の報告は IAEA のレポート INDC-NDS-0597 として出版されている。Jezebel のような比較的単純な体系に対するベンチマークテストでは、どのライブラリを用いても実効増倍率 1.0 を与えることが知られているが、実際に計算で使われている断面積を検討すると、ENDF、JEFF、JENDL の間ではかなりの相違があるのが分かる。とくに JEFF の  $^{239}\text{Pu}$  非弾性散乱断面積は、他のライブラリの数値と大きく異なっており、取りも直さずどこか別の核データがこの差異を吸収していることを意味する。これは主に断面積そのものの問題であるが、複合核から放出される中性子の弾性・非弾性チャンネルへの振り分けは、計算される角度分布へも影響する。また多くの場合、非弾性散乱断面積は統計模型計算の結果がそのままファイルに格納されるため、模型計算の精度がそのまま評価値の精度に反映されることになる。変形度の大きな重核に対する統計模型計算は、さらに高精度化する必要があるだろう。

近年の核データの高精度化においてしばしば鍵となるのは、直接測定が困難で、模型計算で評価された物理量である。核分裂即発中性子スペクトルや非弾性散乱断面積、SG35 が取り組んでいる高速領域の弾性散乱角度分布はその好例で、理論計算の精度が重要となる。核データ評価の分野では既に語り尽くされた感のある Hauser-Feshbach 統計理論であるが、SG35 ではこの理論を今一步進める必要があるであろう。

以上