

(2) 学術賞

－原子炉構造材核種における アルファ粒子生成断面積評価手法の開発－

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門
核データ評価研究グループ
國枝 賢

kunieda.satoshi@jaea.go.jp

この度、上記の研究テーマで平成 24 年度原子力学会核データ部会学術賞を頂きました。この場をお借りいたしまして、本研究内容を簡単にご紹介したいと思います。既に 2 編の論文[1,2]が出ていますので、詳しい内容に興味のある方はどうぞそちらもご参照ください。

はじめに

アルファ粒子生成反応は幾つかの稀な原子核を除くと殆どの場合閾値反応で、中性子や陽子による核反応では数 MeV から十数 MeV 程度でオープンになります。弾性散乱や捕獲反応、核子生成断面積といった主要な反応断面積に比べてオーダー的に小さいので、これまで工学上あまり重要視されてこなかったように思います（とは言ってもそれなりに測定データはありますし、我々核データ評価者もできるだけ精度を上げるようにしています）。しかし、長時間あるいは高強度の中性子・陽子照射環境下ではアルファ粒子生成反応も決して侮ることはできません。本内容とは関係ないですが、例えば $^{16}\text{O}(n,\alpha)$ 断面積は原子炉の臨界性に少なからず寄与していることが知られています。また、ご存知のようにアルファ粒子は化学的にはヘリウムですので極低温でない限りガスとして存在します。核融合炉の第一壁等の構造材料に中性子がジリジリと長い間照射されると格子欠陥で生成するボイド中に蓄積して材料を劣化させます。これは ADS のビーム窓材やその他の加速器施設でも同様のことが言えます。従ってアルファ粒子生成断面積は原子力材料を開発・管理する上で一つの基礎データとして重要視されつつあります。さらに、近

年では半導体素子の誤作動（ソフトエラー）の主な原因の一つが、 $(n,x\alpha)$ 反応にあることが明らかになっています。

良く知られているように非共鳴領域の反応断面積は光学模型、前平衡模型及び統計模型の3ステップで評価計算されます。もちろんアルファ粒子生成断面積もそうです。また、中性子や陽子、ガンマ線生成との競争反応ですから、完備性を保証するために全ての断面積を同じコードで同時に評価計算するのが正しいやり方です。実際に各国の核データライブラリでは幾つかの例外を除いてそのように評価されています。近年、評価計算に有用な核反応モデルを備えた評価用計算コード CCONE、TALYS や COH、また系統的な核子-原子核の光学模型ポテンシャルが開発・拡張され、核子生成に対する評価計算の精度は向上しつつあります。しかし、アルファ粒子生成断面積に関しては評価手法に根本的な問題を二つほど残したままとなっていました。一つはアルファ粒子用の光学ポテンシャルの問題です。もちろん、アルファ粒子用光学ポテンシャルは幾つかありますが広域ではありません。また、パラメータを決める際に必要な弾性散乱微分断面積の測定値はクーロン障壁以上のエネルギー領域のみに存在しています。統計模型に必要なポテンシャル透過係数を計算するにはパラメータの内外挿に不確定性があることに注意する必要があります。二つ目の問題は本研究の主テーマである前平衡過程の評価計算手法です。前平衡過程は入射核子エネルギーが約 10~15 MeV を超えると徐々に見えてきます。スペクトルでみると高エネルギー側に裾野を引くことが特徴です。中重核（私の感覚では $A=20\sim 100$ ぐらい）では蒸発過程が主体的となりますから断面積のメジャーな成分とは言えませんが、それでもエネルギーによっては最大で全アルファ生成断面積の 30% 程度の有意な成分となります。また、それより重い核では（クーロン障壁が大きくなるために断面積そのものが相対的に小さくなりますが）、断面積を成分毎に見るとほぼ前平衡です。しかし、これまでの核データ評価計算に用いられてきたのは経験則に基づいた手法であり、特に高エネルギー領域におけるパラメータの内外挿に限界がありました。

そこで本研究では工学的応用を睨みつつ、原子核物理に矛盾の無いアルファ粒子生成断面積・スペクトルの評価手法を開発することを目的としました。ちなみに、この研究は私が平成 22 年 12 月~24 年 6 月の間、ロスアラモス国立研究所に派遣されていた際に行った研究の一つです。

研究内容ダイジェスト

• 計算コード

核反応断面積の計算コードには GNASH を用いました。これは昔、ロスアラモス研究所で開発されたコードです。今や時代遅れとなった感はありますが、これまでの ENDF や JENDL の開発でずいぶん活躍した歴としたコードです。また、私が学生の時から使っていたコードで、ソースプログラムも半分以上解読した経験がありました。このような

理由で GNASH を選びました。

- **核子光学ポテンシャル**

アルファ粒子生成が本研究のテーマですが、これは核子生成との競争過程です。従ってまずは核子に対する光学モデルポテンシャルを記述し、統計モデルで必要な平均場透過係数や前平衡モデルの計算で必要となる逆反応断面積を計算する必要があります。幸いに、以前私は JENDL-4.0 開発の為に光学ポテンシャルの研究を行い、中重核・重核に対する系統的なチャンネル結合ポテンシャルを導出していました。これは keV 領域から約 200 MeV までの全断面積や弾性散乱微分断面積の測定データに基づいて得られたもので、広いエネルギー範囲及び核種範囲に亘って適用できます。またまたチャンス到来ということでこのポテンシャルを用いることにしました。

- **アルファ粒子光学ポテンシャル**

アルファ粒子のポテンシャルに関してはなかなか良いものが無いのが現状でした。適用エネルギーや核種領域に限界がある為です。核子の光学ポテンシャルを使って（フォールディングして）何とかならないものかと考えていましたが、しかし何とも計ったようなタイミングで新たなポテンシャルが公開されました。ルーマニアの核物理研究者 Avrigeanu 女史らの広域ポテンシャルです。以前の彼女らのポテンシャルは高エネルギーでは再現性が良いのですが、低エネルギーへの外挿性があまり良くないことが知られていました。今回の提示された新たなポテンシャルは (α, n) や (α, γ) の測定データも考慮したポテンシャルとなっており、クーロン障壁近傍あるいはそれ以下のエネルギー領域へ拡張されています。迷わずこれを使うことにしました。

- **前平衡モデルにクラスター形成過程を導入**

前平衡過程からの核子生成断面積・スペクトルを計算する為に核データ評価計算でよく用いられるのが励起子モデルです。微視的量子理論ではありませんが、角度分布経験式と連携すれば同等の精度で断面積・スペクトルを計算できます。計算時間も短くて済みますので核データ評価には持ってこいのモデルです。しかしアルファ粒子生成断面積・スペクトルの評価計算には殆どの場合、数々のパラメータを導入した経験的なモデルが用いられます。本研究では岩本-原田により提唱された前平衡クラスター形成モデル（岩本-原田モデル）を GNASH に組み込みました。このモデルはフェルミ面上下にある核子を融合させてクラスターとして放出させるモデルです。また、この融合過程は入射核子衝突後のピックアップであり、原子核表面でのみ起こるという仮定のもとにモデリングされています。実際に GNASH で計算して測定データと比べてみると驚くほどスペクトルの形状を良く再現します。従来の経験的な手法よりも格段に予測精度が向上しまし

た。本研究ではさらに多粒子放出過程も考慮しました。高エネルギー核反応になると、 $(n,x\alpha)$ や $(p,x\alpha)$ 反応でアルファ粒子が出て行くからです。また、クラスターの形成因子の計算には 12 重の多重積分*が必要ですが、岩本-原田のオリジナルの論文で提案されている方法は解析的な近似手法でした。まとも計算するのは当時のコンピューターでは現実的ではなかったのでしょうか。しかし本研究では文明の力を大いに活用し、数値計算で多重積分を計算することにしました。結果は更に良くなりました。とくにスペクトルの形がもっときれいになりました。また、測定データを再現する為に必要なピックアップ半径はオリジナルの方法で 1.1 fm でしたが、改良版の手法では 0.7 fm ぐらいとなります。この値は光学模型などで使うデフーズネスパラメータなんかと近くなるので、面白いなと思いました。しかもこの値は原子核にあまり依存しないようです。

*位置と運動量に関して、動径方向と立体角に関する積分が 3 座標分あるので計 12 重の積分になる。ただし、そのうち半分ぐらいは解析的に行える。

• 測定データとの比較

近年、ロスアラモス国立研究所の中性子科学センター (LANSCE) で数 MeV から約 100 MeV までの連続エネルギー中性子を使って $(n,x\alpha)$ 反応断面積の測定が行われました。原子力構造材として重要な鉄やクロム、ニッケル等に対する測定値です。私は同所でこの実験データに対する比較計算を行いました。実際に比較してみると、これまでの評価値よりも格段に良い精度がえられます。これは光学模型ポテンシャル及び前平衡モデルの改良による効果です。しかし、そう甘くないケースもありました。特にクロムの場合、再現性は確かに向上するのですが最大 30%程度の明らかな不一致が見られました。これは統計模型で必要な準位密度パラメータの問題です。

• 核データライブラリへの反映

この手法を用いた評価計算結果の一部 (クロムや鉄、ニッケルに対する評価計算値) は、米国の最新核データライブラリ ENDF/B-VII.1 や IAEA の核融合炉開発用核データライブラリ FENDL-3.0 に既に反映されています。今後、JENDL や JENDL の高エネルギーファイルにも反映させたいと思っています。

謝辞

ロスアラモス国立研究所の R.C. Haight 氏と河野俊彦氏に感謝いたします。本研究を進める中で有意な助言を頂くと共に実りある議論をすることができました。

参考文献

- [1] “Clustering pre-equilibrium model analysis for nucleon-induced alpha-particle spectra up to 200 MeV”, [S. Kunieda](#), T. Kawano, M. B. Chadwick, T. Fukahori and Y. Watanabe, EPJ Web of Conferences 21, 09003 (2012).
- [2] “Measurement and model analysis of $(n,x\alpha)$ cross sections for Cr, Fe, ^{59}Co , and $^{58,60}\text{Ni}$ from threshold energy to 150 MeV”, [S. Kunieda](#), R. C. Haight, T. Kawano, M. B. Chadwick, S. M. Sterbenz, F. B. Bateman, O. A. Wasson, S. M. Grimes, P. Maier-Komor, H. Vonach, T. Fukahori, Y. Watanabe, *Phys. Rev.* **C85**, 054602 (2012).