

## 2013 年度 核データ部会賞 学術賞

### — 共鳴自己遮蔽効果に対する

### 多群核データライブラリーの影響に係る基礎研究 —

日本原子力研究開発機構

核融合研究開発部門

核融合中性子工学研究グループ

今野 力

konno.chikara@jaea.go.jp

今年度、「共鳴自己遮蔽効果に対する多群核データライブラリーの影響に係る基礎研究」のテーマで、栄えある原子力学会核データ部会学術賞を受賞することができました。共同研究者並びにご指導ご鞭撻をいただいた皆様に深く感謝申し上げます。

読者の皆様の中には、「今さら多群ライブラリーに関する研究で原子力学会核データ部会学術賞レベルの研究があるの？」と思われる方も多いかもかもしれませんので、この場をお借りして、本研究のご紹介をさせていただきます。なお、本研究については参考文献[1]～[3]に詳しく書かれています。ご一読いただければ幸いです。

#### 1. はじめに

核融合、遮蔽の分野でモンテカルロ法による放射線輸送計算コードが主流になっている現在、今さらなぜ多群ライブラリーを研究する必要があるのかと思われるかもしれませんが、コードの簡便さ、短い計算時間、計算結果を大局的に見ることができるという長所もあり、多群ライブラリーを用いた SN 法による放射線輸送計算は、このまま絶滅させてしまうには極めて惜しい計算技術です。

そもそも、なぜ SN 法による放射線輸送計算コードが使われなくなってきてしまったのでしょうか？ 計算機の性能向上によりモンテカルロ法による放射線輸送計算コードの計算時間が大幅に低減できたことがまずあげられますが、後述する多群ライブラリーの間

題を知らずに、不適切な多群ライブラリーを使った SN 法による放射線輸送計算で生じた不正確な結果が短絡的にとらえられ、SN 法による放射線輸送計算には近似が多いからモンテカルロ法による放射線輸送計算と比べて精度が悪いという印象が定着してしまったことが大きな要因であると私は考えています。

私は本研究を通して、SN 法による放射線輸送計算コードでも、正しく作られた多群ライブラリーを使えば、モンテカルロ法による放射線輸送計算コードと遜色ない計算結果を出すことができることを実証しました。今では、これまでの多群ライブラリーの一部を除いてほとんどの多群ライブラリーに問題があったために、SN 法による放射線輸送計算コードを用いた計算は精度が悪いと不当に言われ続けてきたのだらうと思っています。

## 2. 荷重関数の重要性

読者の皆様の多くは、ボンダレンコ法[4]による多群ライブラリーの自己遮蔽補正をご存知かと思います。ボンダレンコ法はちょうど 50 年前にロシアのボンダレンコ等が提唱した多群ライブラリーの自己遮蔽補正法で、ある体系内の中性子スペクトルは体系内の物質の全断面積の逆数に近い形状をしていることに着目して、以下の荷重関数  $W(E)$  を用いて多群ライブラリーを作成する方法で、広く使われています。

$$W(E) = \frac{C(E)}{\sigma_0 + \sigma_t(E)} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_t(E)$  は対象としている共鳴物質の全断面積、 $\sigma_0$  は共鳴物質以外の物質によるバックグラウンド断面積、 $C(E)$  は共鳴の影響を受けない滑らかな中性子スペクトル（例えば  $1/E$  スペクトル）です。さてこの(1)式の荷重関数は正しいでしょうか？ボンダレンコ法の原典である参考文献[4]や通常の炉物理の教科書には(1)式しか書かれていませんが、この式は必ずしも正しくありません。というのは、多群ライブラリーの散乱マトリックスを作成する際には、(1)式ではなく、ルジャンドル多項式の次数  $\ell$  に応じて、以下の荷重関数を使う必要があるからです[5,6]。

$$W_\ell(E) = \frac{C(E)}{[\sigma_0 + \sigma_t(E)]^{\ell+1}} \quad (2)$$

読者の皆様はこのことをご存知だったでしょうか？この(2)式の効果は参考文献[1-3]で具体的に示していますが、30%程度と予想外に大きく、(2)式を使わないと自己遮蔽補正を正しく行うことができません。このことに気がついたのは参考文献[5]を読んだ今から 10 年以上前で、当時、何人もの炉物理、遮蔽のご専門家に(2)式をご存知かどうか伺ったのですが、(2)式を認識されていた方はお一人しかおられませんでした。

### 3. VITAMIN-B6 の問題

前置きが長くなってしまいましたが、本研究の中身について具体的にご説明いたします。本研究は、2000年頃の原子力学会の放射線遮蔽関係の研究専門委員会でのワーキンググループでの活動から始まりました。このワーキンググループの中で、アメリカの ENDF/B-VI から作られた多群ライブラリー VITAMIN-B6 及び 2 次元 SN コード DOT を用いて核燃料輸送キャスクの遮蔽計算をすると、モンテカルロコード MCNP を用いた計算と数十%も異なる中性子束になるということが話題になり、その原因を調べました。20年ほど前に、私は核融合炉用核データライブラリー FENDL-1.0 の多群ライブラリーで使われているバックグラウンド断面積の下限値が大きすぎるため自己遮蔽補正が不十分になり、結果的に中性子スペクトルの過小評価を招くことを指摘し、バックグラウンド断面積の下限値を下げる必要があることを提言しました (FENDL-1.1 以降ではそのようになっています) [7]。今回も、最初はこの問題が原因だろうと目星をつけて研究を行い、実際、VITAMIN-B6 においてもバックグラウンド断面積の下限値が大きく (例えば、純鉄の場合、適切な自己遮蔽補正をするには、0.2 バーンのバックグラウンド断面積に対応する  $^{56}\text{Fe}$  のデータが必要ですが、VITAMIN-B6 の  $^{56}\text{Fe}$  のデータのバックグラウンド断面積の下限値は 1 バーンになっていました)、これが SN 計算結果に影響を与えた原因の一つであることが比較的早い段階で判明しました。しかし問題はこれだけではありませんでした。半年以上検討し続けた結果、多群ライブラリーを作成する時に使われる荷重関数として、 $l$  次 ( $l \geq 1$ ) の散乱マトリックスに対して (1) 式が使われており、これが原因で自己遮蔽補正が適切に行なわれず、SN 計算結果に影響を与えたこと、 $l$  次 ( $l \geq 1$ ) の散乱マトリックスに対して  $l=1$  の (2) 式の荷重関数を使えばこの問題がほとんどなくなることに気がつき、具体的な計算を通してその実証をしました (図 1 参照)。また、これらの問題を適切に対処した多群ライブラリーを使えば、SN コードでも MCNP コードと同等の正しい結果を出すことができることも示しました。この成果をまとめたのが参考文献 [1] です。バックグラウンド断面積、荷重関数の問題とも、分かっただけならば非常に簡単なことで、コロンブスの卵のようなものですが、このことを認識している方は極めて少なく (最近では増えてきましたが)、参考文献 [1] はこれまで不当に低い評価を与えられてきた SN 計算復権の出発点となる論文であると自負しています。

### 4. JSSTD-300 の問題

参考文献 [2] では、日本の標準多群ライブラリー JSSTD-300 に着目し、VITAMIN-B6 と同様の観点で調べました。JSSTD-300 では最小のバックグラウンド断面積は 0 で、バックグラウンド断面積の問題はありませんでしたが、荷重関数の問題は起こっており、更に新たな問題も見つかりました。JSSTD-300 では自己遮蔽補正データをバックグラウンド断面積に対応した f テーブルの形式で与えていますが、弾性散乱の f テーブルのデータ

をそのまま散乱マトリックスにも使っていました。そのため、核種によっては自己遮蔽補正が無茶苦茶になるものもあり、JSSTD L-300 を用いた SN 計算の結果に大きな影響が出てくるのが分かりました (図 2 参照)。参考文献[2]は、これらの問題の影響を一つ一つ丁寧に具体的な計算結果を基に説明したもので、JSSTD L-300 固有の問題ではありますが、非常にユニークな研究論文になっています。

## 5. 最近の多群ライブラリーではどうか？

参考文献[1]、[2]では、多少古いものの、今なお使われている多群ライブラリーを調べてきましたが、参考文献[3]では、2010 年当時、入手できる最新の多群ライブラリーを対象に、バックグラウンド断面積、荷重関数の観点で検討を行いました。その結果、最新の多群ライブラリーでもバックグラウンド断面積、荷重関数が適切でないものが多数あることが判明し、それを具体的な計算結果とともに実証いたしました。アメリカの許認可で使われている SCALE システムに入っている多群断面積にも問題があり (図 3 参照)、このことを 2010 年の SNA+MC2010 の会議に参加された SCALE の開発グループに知らせたところ、非常に真剣に話を聞いていただけました (残念ながら、その後の対応はありませんでしたが)。参考文献[3]は本研究の集大成に当たるもので、今後の多群ライブラリー整備の原典となると思っています。

## 6. 最後に

本研究については、対象とする 3 つの研究論文[1-3]の基になった ISORD5、ND2010、SNA+MC2010 の国際会議で報告するだけでなく、原子力学会、核データ研究会でも発表し、更には放射線遮蔽の専門家の集まりである原子力学会の放射線遮蔽関係の研究専門委員会や OECD/NEA の放射線遮蔽専門家会議でも報告してまいりました。話を聞かれた方は皆、過去の遺物となりつつある多群ライブラリーにこのような問題があり、それがちょっとした修正で解決することに大変驚かれていました。本研究は、核データ部会での研究としては本流から外れたもので、問題の原因も分かっただけならば非常に簡単なことではありましたが、その成果を十分認めていただいたことに重ねて感謝申し上げます。

最後になりますが、今後も、このような核データに関する解析研究のみならず、原子力機構の DT 中性子源 FNS を用いた核データに関する実験的研究を進め、微力ではございますが、核データ分野の研究の進展に貢献してまいりたいと思いますので、ご指導ご鞭撻を何卒宜しくお願いいたします。

## 参考文献

- [1] C. Konno, K. Ochiai, and S. Ohnishi, “Insufficient Self-Shielding Correction in VITAMIN-B6”, Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 1, pp. 32-35 (2011).
- [2] C. Konno, K. Ochiai, and S. Ohnishi, “Insufficient Self-shielding Correction in JSSTD-300”, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 59, pp. 1092-1095 (2011).
- [3] C. Konno, K. Takakura, K. Kondo, S. Ohnishi, K. Ochiai, and S. Sato, “Important Remarks on Latest Multigroup Libraries”, Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 2, pp. 341-345 (2011).
- [4] I.I. Bondarenko (Ed.), “Group constants for nuclear reactor calculations,” Consultants Bureau, New York, (1964).
- [5] R.E. MacFarlane, “TRANSX 2: a code for interfacing MATXS cross-section libraries to nuclear transport codes, LA-12312-MS, Los Alamos National Laboratory, (1993).
- [6] D.E. Cullen, “Nuclear Cross Section Preparation”, in Yigal Ronen (Ed.), “CRC Handbook of Nuclear Reactors Calculations”, Vol. 1, p.13, CRC Press (1986).
- [7] C. Konno, F. Maekawa, and M. Wada, “Influence of Insufficient Background Cross Sections of Some Nuclei in FENDL/MG-1.0”, JAERI-Review 96-012, pp. 22-24 (1996).

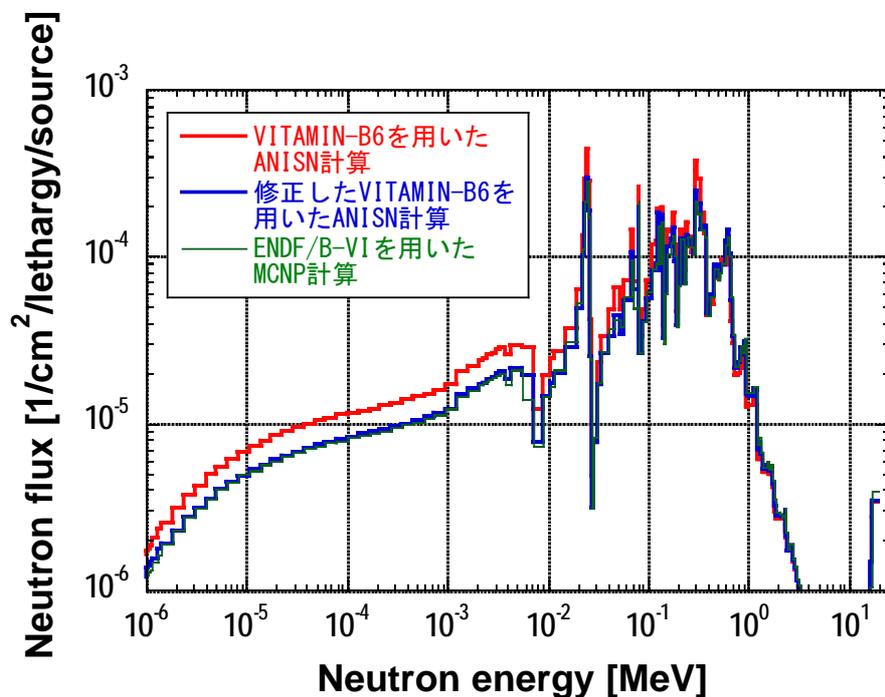


図1 中心に 20MeV の中性子源のある半径 1m の鉄球内の中心から 40cm の位置での中性子スペクトル (VITAMIN-B6 ベース)

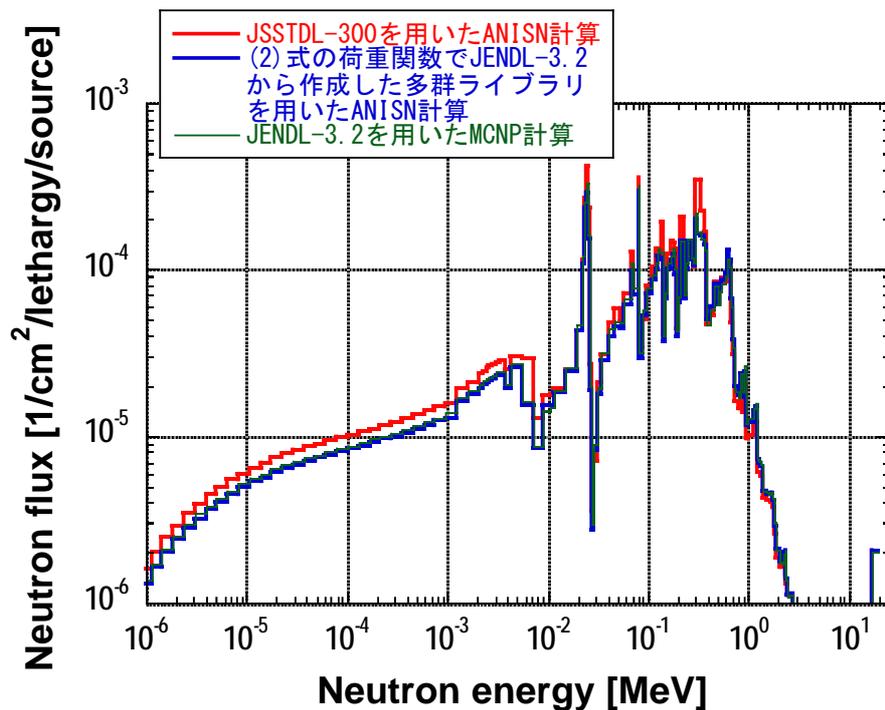


図2 中心に 20MeV の中性子源のある半径 1m の鉄球内の中心から 40cm の位置での中性子スペクトル (JSSTD L-300 ベース)

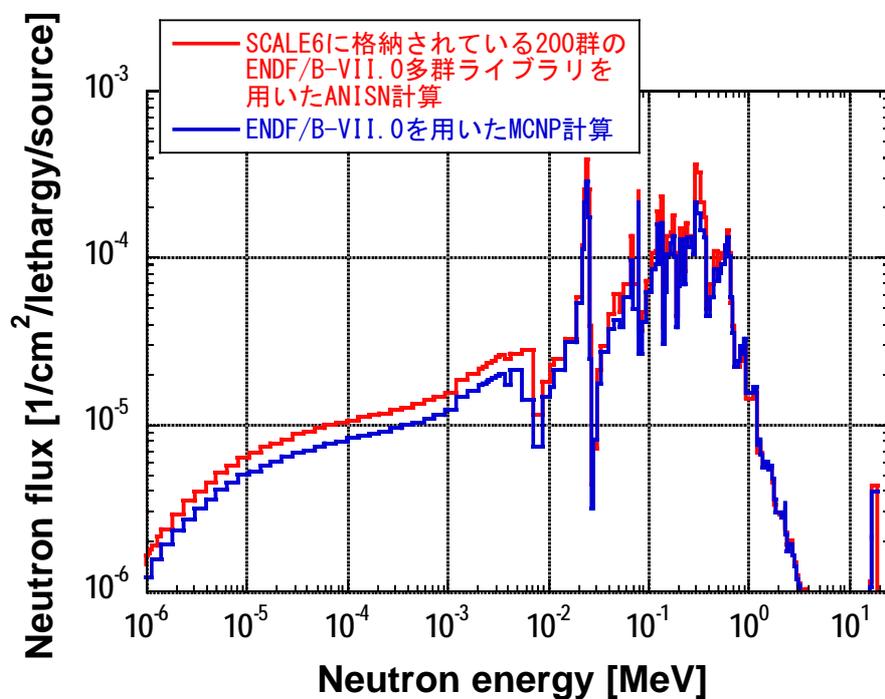


図3 中心に 20MeV の中性子源のある半径 1m の鉄球内の中心から 40cm の位置での中性子スペクトル (SCALE6 ベース)