

放射線工学部会セッション

放射線遮蔽ハンドブックに基づく初心者のための遮蔽設計
Shielding design for beginners based on a Handbook of Radiation Shielding

(2) 核データライブラリと断面積ライブラリ

(2) Nuclear data library and cross section library

*今野 力¹¹原子力機構

1. はじめに

放射線遮蔽設計では、Sn コード（ANISN、DORT、TORT、等）やモンテカルロコード（MCNP、PHITS、等）を用いた放射線輸送計算が行われる。放射線輸送計算では核反応の断面積、核反応で発生する粒子の角度エネルギー分布、等のデータベースである核データライブラリが必要になる。ここでは、放射線遮蔽設計の観点から、核データライブラリ、核データライブラリから作られた放射線輸送計算コードで使う断面積ライブラリを概説し、及びそれらを使う上での注意点について紹介する。

2. 核データライブラリ

核データライブラリは、主に 10^{-5} eV から 20MeV までの中性子による核反応に関するデータ（核反応断面積、放出粒子（2 次粒子）の角度分布・エネルギー分布、等）をまとめたデータベースで、ENDF-6 フォーマットで記述されている。 γ 線と元素との反応断面積、核構造、崩壊データのデータベースや、最近では、20MeV 以上のデータや荷電粒子入射、光核反応のデータベースもある。ここでは、放射線遮蔽設計で最もよく使われる中性子の核データライブラリについて述べる。

核データライブラリは日本、米国、ヨーロッパ等で独自に作成され、それぞれ、JENDL、ENDF/B、JEFF 等と呼ばれている。核データライブラリは原子核反応理論計算および核反応測定データをもとに編纂されるが、それぞれの編者が最も良いと「評価」した核データを格納するため、JENDL、ENDF/B、JEFF は必ずしも同じデータが格納されているとは限らない。そのため、使う核データライブラリによって放射線輸送計算結果が変わりうる。また、ENDF-6 フォーマットの核データライブラリをそのまま放射線輸送計算コードで使うことはできないため、ユーザーは放射線輸送計算コードで使うことができる断面積ライブラリを核データ処理コードで作って使うか、公開されている断面積ライブラリを使う必要がある。

3. 断面積ライブラリ

断面積ライブラリは使う放射線輸送計算コードにより大きく分けて 2 つの形式がある。一つはモンテカルロコードで使う連続エネルギーライブラリで、もう一つは Sn コードで使う多群ライブラリである。連続エネルギーライブラリの形式は米国 LANL の ACE ファイル（例えば、FSXLIB-J33、PHITS 付属 JENDL-4.0 ACE ファイル、等）がよく使われている。多群ライブラリの主な形式には、米国 LANL の MATXS ファイル（MATXSLIB-J33、MATXSLIB-J40、等）と米国 ORNL の AMPX ファイル（VITAMIN-B6、VITAMIN-B7、等）の 2 つがある。これらの断面積ライブラリは公開されているので、ユーザーはそれらを入手して使うことになる。なお、ACE ファイルはそのままモンテカルロコードで使うことができるが、MATXS、AMPX ファイルはそのままでは Sn コードで使えないため、Sn コードで使える多群ライブラリにするコード（MATXS ファイルでは TRANSX コード、AMPX ファイルでは SCALE あるいは SCAMPI コード）も使う必要がある。

4. 放射線輸送計算での注意点

核データライブラリのデータ自体に問題があつて放射線輸送計算に問題が生じる場合もあるが、それは極めて少ない。放射線輸送計算で生じる問題の多くは断面積ライブラリに起因する。特に、自己遮蔽補正が不

可欠である多群ライブラリには注意が必要である。以下、多群ライブラリで注意すべき点を述べる（詳細は参考文献参照）。

4.1 多群ライブラリの問題

多群ライブラリ MATXS、AMPX ファイルに入っている多群断面積は、以下の PN 形式の多群ボルツマン方程式（簡単のために、1次元平板の場合を記述）の PN 断面積である。

$$\mu \frac{\partial}{\partial x} \psi_g(\mu, x) + \sum_{\ell=0}^N \frac{2\ell+1}{2} P_\ell(\mu) \sigma_{\ell t g}^{PN}(x) \psi_{\ell g} = \sum_{\ell=0}^N \frac{2\ell+1}{2} P_\ell(\mu) \sum_{g'} \sigma_{\ell g \leftarrow g'}^{PN}(x) \psi_{\ell g'} + S_g(\mu, x),$$

$$\sigma_{\ell t g}^{PN} = \frac{\int_g \sigma_t(E) W_\ell(E) dE}{\int_g W_\ell(E) dE}, \sigma_{\ell g \leftarrow g'}^{PN} = \frac{\int_g dE \int_{g'} \sigma_\ell(E' \rightarrow E) W_\ell(E') dE'}{\int_{g'} W_\ell(E') dE'}, W_\ell(E) = \frac{C(E)}{[\sigma_0 + \sigma_t(E)]^{\ell+1}},$$

ここで、 μ は散乱角の余弦、 $\psi_{\ell g}$ は g 群の ℓ 次のルジャンドル中性子束、 $P_\ell(\mu)$ は ℓ 次のルジャンドル多項式、 $S_g(\mu, x)$ は g 群の外部中性子源、 σ_t は全断面積、 σ_ℓ は散乱断面積、 $C(E)$ は滑らかな関数、 σ_0 はバックグランド断面積、 $W_\ell(E)$ は断面積を群平均する時の ℓ 次の荷重関数。あまり知られていないが、荷重関数の分母に $\ell+1$ 乗がついているため、後述する問題が生じる。また、適切に自己遮蔽補正を行うためには対象としている物質のバックグランド断面積より小さいバックグランド断面積が必要で、その断面積が多群ライブラリにないと自己遮蔽補正が適切に行われないので使うべきではない。例えば、天然組成の鉄では ^{56}Fe のバックグランド断面積として0.1 barn程度が必要であるが、VITAMIN-B6、VITAMIN-B7では一番小さいバックグランド断面積が1 barnであるため適切な自己遮蔽補正はできない。また、MATXS ファイルでも一番小さいバックグランド断面積が1 barnのものがあ、そのようなMATXS ファイルでも適切な自己遮蔽補正はできない。

これもあまり知られていないが、Sn コードで使う多群断面積はPN断面積ではなく、以下のSN形式の多群ボルツマン方程式（簡単のために、1次元平板の場合を記述）のSN断面積である。

$$\mu \frac{\partial}{\partial x} \phi_g(\mu, x) + \sigma_g^{SN}(x) \phi_g(\mu, x) = \sum_{\ell=0}^N \frac{2\ell+1}{2} P_\ell(\mu) \sum_{g'} \sigma_{\ell g \leftarrow g'}^{SN}(x) \phi_{\ell g'} + S_g(\mu, x).$$

説明は省略するが、SN断面積はPN断面積から以下の式で作ることができる。

$$\sigma_{\ell g \leftarrow g'}^{SN} = \sigma_{\ell g \leftarrow g'}^{PN} \text{ for } g' \neq g,$$

$$\sigma_{\ell g \leftarrow g}^{SN} = \sigma_{\ell g \leftarrow g}^{PN} - \sigma_{\ell t g}^{PN} + \sigma_g^{SN}.$$

自群散乱断面積がSN断面積とPN断面積が異なることがわかる。この第2式を変形すると、

$$\sigma_{\ell g \leftarrow g}^{SN} = \sigma_{\ell g \leftarrow g}^{PN} - (\sigma_{\ell t g}^{PN} - \sigma_{0 t g}^{PN}) - \Delta_g^N,$$

$$\sigma_g^{SN} = \sigma_{0 t g}^{PN} - \Delta_g^N,$$

と書ける。ここで、 σ_g^{SN} は任意に選ぶことができ（輸送近似と呼ぶ）、いくつかの選び方がある。一番簡単なのは $\Delta_g^N = 0$ つまり $\sigma_g^{SN} = \sigma_{0 t g}^{PN}$ とする Consistent-P 近似で、

$$\sigma_{\ell g \leftarrow g}^{SN} = \sigma_{\ell g \leftarrow g}^{PN} - (\sigma_{\ell t g}^{PN} - \sigma_{0 t g}^{PN}),$$

$$\sigma_g^{SN} = \sigma_{0 t g}^{PN},$$

となる。以下、この式で説明する。この第1式の右辺第2項 $(\sigma_{\ell t g}^{PN} - \sigma_{0 t g}^{PN})$ が0であれば、SN断面積はPN断面積と同じになるが、先に記述したように荷重関数の分母に $\ell+1$ 乗がついているため、右辺第2項 $(\sigma_{\ell t g}^{PN} - \sigma_{0 t g}^{PN})$ は $\ell \neq 0$ では0にならず、SN断面積はPN断面積とは異なる。

PN断面積からSN断面積を作るコードは、MATXS ファイルではTRANSXコード、AMPX ファイルではSCALEあるいはSCAMPIコードである。MATXS ファイルでは、分母に $\ell+1$ 乗がついている荷重関数（但し、 $\ell \geq 1$ で分母に2乗がついている荷重関数）を用いているため、TRANSXコードではPN断面積と異なるSN断面積が計算される。但し、自己遮蔽補正の影響が小さい場合は、荷重関数の分母の効果は小さくなるため、SN断面積はほとんどPN断面積と同じになる。一方、AMPX ファイルでは、分母に $\ell+1$ 乗がついていない荷重関数を用いているため、 $\sigma_{\ell t g}^{PN} = \sigma_{0 t g}^{PN}$ で第1式の右辺第2項 $(\sigma_{\ell t g}^{PN} - \sigma_{0 t g}^{PN})$ は0になり、SCALEあるいは

SCAMPI コードで PN 断面積をそのまま SN 断面積にしている。また、AMPX ファイルでは弾性散乱の自己遮蔽補正をそのまま散乱断面積にも適用しているという問題もある。

4.2 AMPX 多群ライブラリの問題の影響

上述した AMPX ファイルの種々の問題の影響を示すために、半径 1m の鉄球の中心に 20MeV の等方点中性子源がある簡単なモデルで一次元 Sn コード ANISN とモンテカルロコード MCNP で球内の中性子スペクトルを計算した。多群ライブラリは VITAMIN-B7 と比較のために MATXSLIB-J40 を、ACE ファイルは多群ライブラリに対応したものを使用した。結果を図 1、2 に示す。VITAMIN-B7 を用いた ANISN 計算は MCNP 計算と 30% 程度異なった。一方、MATXSLIB-J40 を用いた ANISN 計算は MCNP 計算とよく一致した。

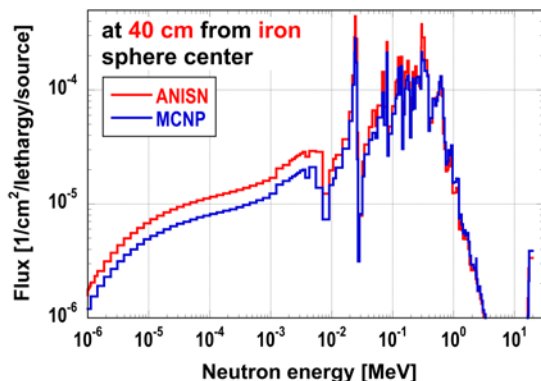


図 1 鉄球中心から 40cm での中性子スペクトル (VITAMIN-B7)

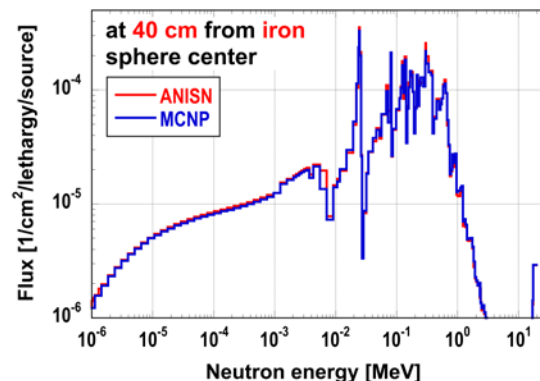


図 2 鉄球中心から 40cm での中性子スペクトル (MATXSLIB-J40)

5. まとめ

放射線遮蔽設計の観点から、核データライブラリ、断面積ライブラリを概説した。断面積ライブラリのうち、特に、自己遮蔽補正が必須である多群ライブラリには以下の注意が必要である。

- 下限値の十分小さいバックグランド断面積
- ルジャンドルの次数を考慮した荷重関数
- 散乱断面積の自己遮蔽補正を適切に行う

AMPX ファイルは上記の点で問題があるので、Sn コードを用いた放射線遮蔽設計を行う際には、MATXS ファイルを使うことを推奨する（但し、バックグランド断面積が適切なものを使うこと）。

参考文献 C. Konno et al., Prog. Sci. Technol., 1 (2011) 32-35、C. Konno et al., Prog. Sci. Technol., 2 (2011) 341-346

MATXS ファイルに関する補足

MATXS ファイルはアスキーファイルで公開されているが、TRANSX コードはバイナリの MATXS ファイルしか読み込むことができない。そのため、入手した MATXS ファイルは TRANSX コード付属の BBC コードでバイナリの MATXS ファイルに変換する必要がある。また、TRANSX コードには致命的なバグがあるので、IAEA から公開されている (<https://www-nds.iaea.org/fendl20/transx-patches.htm/>) 以下のパッチを当てた TRANSX コードを使うこと。このバグの影響については、C. Konno et al., Proc. RPSD2018, “EFFECT OF IAEA PATCH FOR TRANSX2.15”参照。

Patch 1. to increase the insufficient array size (2 lines)

```
*d up14.4
```

```
maxds=5+12*(n1+1)
```

*Chikara Konno¹

¹Japan Atomic Energy Agency