

# CBZのチュートリアル（応用編）

千葉豪

2024年10月16日

このテキストでは、CBZのチュートリアルの応用編ということで、

- 多群断面積データの表示
- 中性子増倍に関する情報の取り出し
- 中性子束エネルギースペクトルの表示
- 二次元円筒系の計算（二次元デカルト座標系の計算にも応用可能）

について説明する。

## 1 多群断面積データの表示

多群断面積ライブラリ CBZLIB に格納されている多群微視的（無限希釈）断面積や、媒質クラス Medium の多群（実効）断面積の値を表示する方法について説明する。

### 1.1 CBZLIB を用いた多群微視的断面積の表示

多群断面積ライブラリは XSLibrary クラスが保持しており、XSLibrary クラスの ShowCrossSectionData1D メソッドにより多群（無限希釈）断面積を画面に出力することが可能である。このメソッドの引数は対象とする核種の ID である<sup>1</sup>。以下に U-233 の無限希釈断面積を画面に表示させるプログラムの例を示す。

Listing 1: XSLibrary クラスの多群無限希釈断面積の画面表示例

```

1 // xs library
2 string libdir("../CBGLIB/j4.70g.iwt7/");
3 XSLibrary xslib(libdir,"N-ENERGY");
4 string filename[]={
5     "U233","U234","U235","U238","Pu239",
6     "Pu240","Pu241","Pu242","Ga000",
7 };
8 xslib.ReadFile(9,libdir,filename);
9
10 xslib.ShowCrossSectionData1D(922330);

```

また、以下に XSLibrary クラスの ShowCrossSectionData1D メソッドの出力例を示す。一番目の欄の数値が、そのエネルギー群の上限エネルギーを示す。

Listing 2: XSLibrary クラスの多群無限希釈断面積の画面表示例

```

1 #
2 # 1D-data stored in GroupDataSet
3 #
4 #E_up    total    (n,2n)    fission    capture    nu        mu        elastic    chi
5 1.000e+07 6.076e+00 6.186e-01 1.759e+00 1.339e-03 3.662e+00 8.397e-01 2.930e+00 7.086e-03
6 7.788e+06 6.734e+00 3.488e-01 1.397e+00 9.810e-04 3.377e+00 8.488e-01 3.616e+00 1.823e-02
7 6.065e+06 7.469e+00 3.237e-02 1.041e+00 1.169e-03 3.122e+00 8.476e-01 4.259e+00 4.080e-02
8 4.724e+06 7.880e+00 0.000e+00 1.108e+00 2.945e-03 2.950e+00 8.244e-01 4.578e+00 7.009e-02
9 3.679e+06 7.863e+00 0.000e+00 1.183e+00 9.021e-03 2.823e+00 7.747e-01 4.461e+00 9.857e-02
10 2.865e+06 7.562e+00 0.000e+00 1.265e+00 2.313e-02 2.725e+00 6.990e-01 4.027e+00 1.180e-01
11 2.231e+06 7.141e+00 0.000e+00 1.285e+00 4.353e-02 2.651e+00 6.102e-01 3.637e+00 1.223e-01
12 1.738e+06 6.799e+00 0.000e+00 1.246e+00 6.573e-02 2.592e+00 5.417e-01 3.475e+00 1.136e-01
13 1.353e+06 6.723e+00 0.000e+00 1.202e+00 8.793e-02 2.546e+00 5.057e-01 3.623e+00 9.750e-02

```

### 1.2 媒質クラス Medium を用いた多群実効断面積の表示

同様に、媒質の多群実効断面積も Medium クラスのメソッドを用いて画面に出力することが出来る。巨視的断面積を出力する場合は ShowMacroCrossSection1D メソッドを用いる。このメソッドには引数は不要である。また、微視的断面積を出力する場合は ShowMicroCrossSection1D メソッドを用いる。このメソッドは、引数として、対象とする核種の MAT 番号を指定する。

### 1.3 例題

課題 1.1 : U-235 について、核分裂断面積、中性子捕獲断面積、弾性散乱断面積、核分裂スペクトルを図示せよ。また、各々の反応断面積の特徴を述べよ。

<sup>1</sup>核種の原子番号を A、質量数を Z、励起レベルを L（基底状態はゼロ）とすると、ID は  $A \times 10000 + B \times 10 + L$  で計算される整数となる。例えば、U-233 は原子番号が 92、質量数が 233、励起レベルがゼロ（基底状態）なので「922330」となり、Am-242m は原子番号が 95、質量数が 242、励起レベルが 1 なので「952421」となる。

課題 1.2 : U-235、U-238、Pu-239 の核分裂断面積を図示せよ。また、これらの違いについて述べよ。

課題 1.3 : U-235、U-238、Pu-239 の核分裂あたりの発生中性子数を図示せよ。この値の入射中性子エネルギー依存性と、核種間の違いについて述べよ。

## 2 中性子増倍に関する情報の取り出し

原子炉における中性子増倍の詳細を知るためのメソッドが CBZ の全ての中性子輸送（拡散）ソルバーに実装されている<sup>2</sup>。

中性子増倍に関する情報を取り出すメソッドの使用例を以下に示す。

Listing 3: 中性子増倍に関する情報を取り出すメソッドの使用例

```
1 real k2=snr_fwd.CallIgen();
2 snr_fwd.GetNeutronMultiplicationInfo(k2);
```

GetNeutronMultiplicationInfo メソッドを実行する前には、予め CallIgen メソッドにより中性子輸送（拡散）方程式を解いておく必要がある。また、GetNeutronMultiplicationInfo メソッドの引数には、CallIgen メソッドで計算した、その体系の実効増倍率を与える必要がある。

なお、このメソッドを用いる場合には、媒質を示す Medium クラスのインスタンスが微視的断面積の情報を持っている必要がある。一般的には、作成した Medium クラスのインスタンスを一度ファイルに書き出し、前進（随伴）方程式を計算する際に再度ファイルから読み出すという操作を行うが、Medium クラスのインスタンスをファイルに書き出す際に微視的断面積の情報を加えるためには、特別なオプションを立てる必要がある（「チュートリアル」の 7.1.3 節を参照のこと）。

GetNeutronMultiplicationInfo メソッドの出力例を以下に示す。

Listing 4: GetNeutronMultiplicationInfo メソッドの出力例

```
1 #
2 # Keff contribution normalized by fission yield
3 #
4 # Total absorption      : 0.4313912
5 # Total n2n yield      : 0.001219141
6 # Total leakage        : 0.5698279
7 #
8 # (Averaged nu-value : 2.604821)
9 #
10 # Energy contribution of fission neutrons
11 #
12 # Fast range (>100keV) : 0.9525308
13 # Intermediate range (>0.625eV) : 0.04746923
14 # Thermal range (<0.625eV) : 4.030056e-10
15 #
16 # AVG fission Eng. : 977435.9 [eV]
17 # Eng. Corr. to the AVG neutron lethargy causing fission : 843946.7 [eV]
18 # Eng. Corr. to the AVG neutron lethargy : 886660.3 [eV]
19 #
20 # Nuclide-wise fission contribution
21 #
22 # U234 0.008334215
23 # U235 0.9827495
24 # U238 0.008916291
25 #
26 # Nuclide-wise absorption contribution
27 #
28 # U234 0.009206514
29 # U235 0.9792500
30 # U238 0.01154344
31 #
```

「Keff contribution normalized by fission yield」では、中性子の損失に対する吸収と漏洩の寄与割合を示している（「n2n yield」についてはここでは無視してよい）。

「Energy contribution of fission neutrons」では、核分裂反応を起こしている中性子のエネルギー領域毎寄与を示している。この例では核分裂の 95% が高速中性子（100eV 以上）により生じていることになる。また、「energy corresponding to the average neutron lethargy causing fission」（出力例では「Eng. Corr. to the AVG neutron lethargy causing fission」）は核分裂を起こす中性子の平均エネルギーを示す。

「Nuclide-wise fission contribution」「Nuclide-wise absorption contribution」はそれぞれ核分裂、吸収反応に対する核種別の寄与を示す。

<sup>2</sup>この記述は厳密には正しくない。ABEMIE コードを除いた CBZ の全ての中性子輸送、拡散ソルバーのクラスは、基本クラス GeneralSystem を継承しており、中性子増倍に関する情報を取り出すメソッドはこの基底クラス GeneralSystem に実装されている。

課題 2.1 : Godiva、Flatop-25 について、核分裂反応を起こしている中性子のエネルギー領域毎寄与を計算し、両者の差異について述べよ。

課題 2.2 : Godiva、Flatop-25 について、核分裂反応に対する核種別の寄与を計算し、両者の差異について述べよ。

### 3 中性子束エネルギースペクトルの表示

CBZ の大部分の中性子輸送、拡散ソルバー<sup>3</sup> は、計算で得られた中性子束エネルギースペクトルを表示する機能を有する。

媒質毎の平均（積分）中性子束エネルギースペクトルは ShowIntegratedFlux メソッドにより画面に表示することが出来る。このメソッドに与える引数は、対象とする媒質の ID である。また、メッシュID で出力する範囲を指定することも可能であり、この場合は ShowIntegratedFluxMeshID メソッドを用いる。このメソッドは引数としてふたつの整数が必要であり、例えば ShowIntegratedFluxMeshID(0, 10) とすると、0 番目から 10 番目のメッシュの平均（積分）中性子束エネルギースペクトルが出力される。

中性子束エネルギースペクトルの出力例を以下に示す。一つ目の欄の数値がエネルギー群の上限エネルギーを、二つ目の欄の数値が中性子束を、三つ目の欄の数値が中性子束をエネルギー群のレサジー幅で割ったものを、それぞれ示す。

Listing 5: 中性子束エネルギースペクトルの出力例

```

1 #
2 # Integrated neutron flux (medium ID : 0)
3 #
4 # E_up      Flux      Flux/lethargy
5 1.0000e+07 1.9908e-02 7.9631e-02
6 7.7880e+06 5.0143e-02 2.0057e-01
7 6.0653e+06 1.0946e-01 4.3785e-01
8 4.7237e+06 1.8537e-01 7.4147e-01
9 3.6788e+06 2.5924e-01 1.0370e+00
10 2.8650e+06 3.1178e-01 1.2471e+00
11 2.2313e+06 3.4148e-01 1.3659e+00
12 1.7377e+06 3.5657e-01 1.4263e+00
13 1.3534e+06 3.6971e-01 1.4788e+00
14 1.0540e+06 3.9182e-01 1.5673e+00

```

中性子束のエネルギースペクトルをプロットする場合は中性子エネルギーを横軸にとるが、一般的には対数軸とする。この場合は、中性子束は「単位レサジーあたり」のものを用いる必要がある<sup>4</sup>。ちなみに、CBZ で高速炉解析に用いている 70 群構造では、最下群以外のエネルギー群のレサジー幅は全て 0.25 となっている（等レサジー幅）。

また、中性子束エネルギースペクトルは、あるエネルギー範囲（エネルギー群）の積分量であるため、ヒストグラムとして表示すべきである。中性子束エネルギースペクトルのプロット例を Fig. 1 に示す。

課題 3.1 : Godiva の中心位置、表面位置、中心と表面の中間位置での中性子スペクトルを図示し、比較せよ。また、違いが現れる原因を述べよ。

課題 3.2 : Godiva の中心位置の中性子スペクトルと U-235 の核分裂スペクトルを図示し、比較せよ。また、違いが現れる原因を述べよ。

課題 3.3 : Flattop-25 の中心位置、炉心燃料と反射体の境界位置、反射体表面位置での中性子スペクトルを図示し、比較せよ。また、違いが現れる原因を述べよ。

課題 3.4 : Godiva と Flattop-25 の中心位置での中性子スペクトルを比較せよ。また Flattop-25 の中心位置、炉心燃料と反射体の境界位置、反射体表面位置での中性子スペクトルを図示し、比較せよ。また、違いが現れる原因を述べよ。

<sup>3</sup>厳密に言うと、「GeneralSystem クラスを継承しているソルバークラス」となる。

<sup>4</sup>レサジー（lethargy）はエネルギーに対応する物理量であり、基準のエネルギーを  $E_0$  とした場合、エネルギー  $E$  に対応するレサジー  $u$  は  $u = \ln(E_0/E)$  で定義される。Lethargy は「不活発」のような意味を持っており、基準エネルギーに対して中性子のエネルギーが小さくなると、中性子は「不活発となる」と見做せるため、レサジーの値は大きくなる。エネルギー領域  $[E_b, E_u]$  に対応するレサジー領域は  $[\ln(E_0/E_b), \ln(E_0/E_u)]$  となる。また、このエネルギー領域のレサジー幅は、 $\ln(E_0/E_b) - \ln(E_0/E_u) = \ln(E_b/E_u)$  で与えられる。

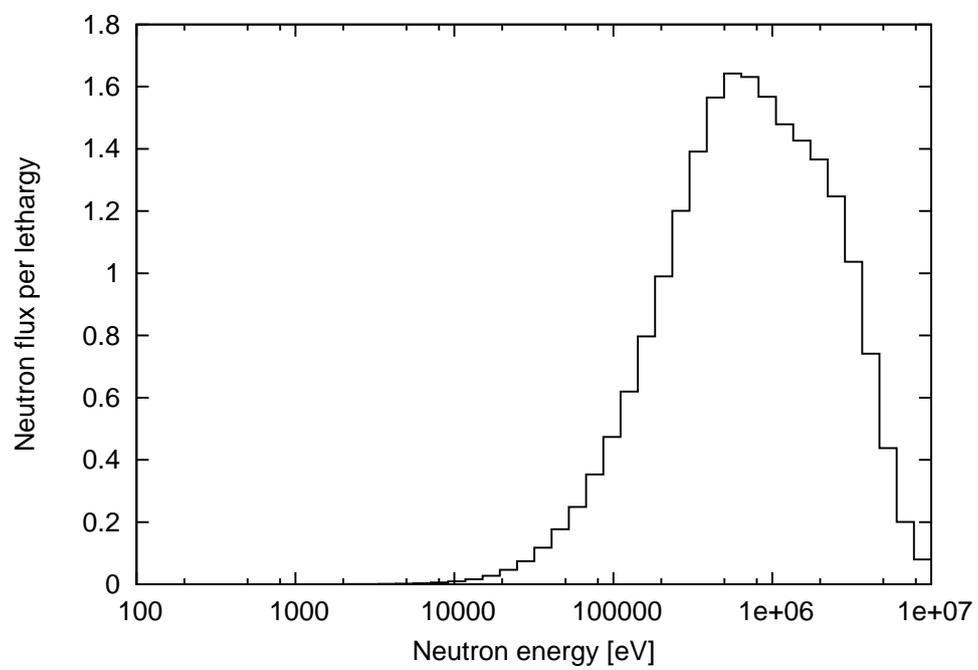


Fig. 1: 中性子束エネルギースペクトルのプロット例

## 4 二次元円筒系の計算

チュートリアルでは一次元球系の計算方法について説明したが、ここでは二次元円筒体系での方法について説明する。

体系を構成する媒質の実効断面積の計算はチュートリアルで述べた通りである。

二次元円筒体系の情報は、球体系と同様に `CartMeshInfo` クラスで作成する。作成例を以下に示す。

Listing 6: `CartMeshInfo` クラスによる二次元円筒体系の記述例

```

1 // +++ CartMeshInfo
2 CartMeshInfo cmi;
3 real xl[]={30., 20.};
4 real yl[]={50., 150., 1.905, 10.16};
5 int xm[]={10,7};
6 int ym[]={15,50,1,3};
7 int mat[]={
8     3,4,
9     0,1,
10    2,1,
11    2,2
12 };
13 cmi.PutMeshInfo(2,4,xm,ym,xl,yl,mat,"width");
14 cmi.PutBoundaryCondition
15 ("Reflective","Vacuum","Vacuum","Vacuum");
16 cmi.ReconstructCoarseMesh(5.,5.,5.);

```

また、この例が対象としている体系の図を Fig. 2 に示す。

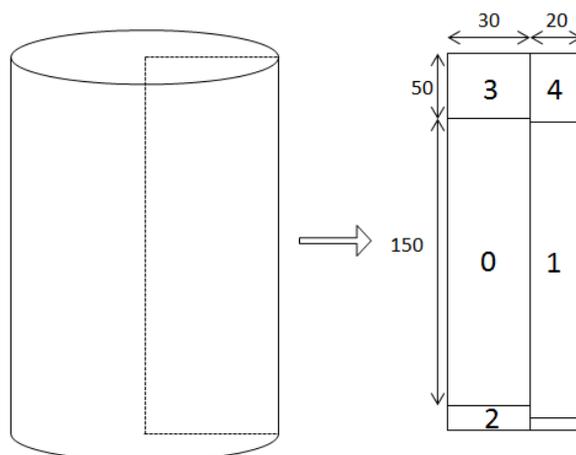


Fig. 2: 二次元円筒系の体系図

この例では、径方向（R方向）が二分割、高さ方向（Z方向）が四分割されている円筒体系を記述しており、系に含まれる媒質の種類数は5である（`int` 型配列 `mat` に含まれる数が0から4までであることから分かる）。R、Z方向の各分割領域の幅は配列 `xl`、`yl` で、各領域のメッシュ分割数は配列 `xm`、`ym` で指定している。この例では、半径50cmの円筒内部に半径30cmの円筒が配置されていると考えればよい。また、各分割領域が対応する媒質のIDは配列 `mat` で指定し、それらを `CartMeshInfo` クラスの `PutMeshInfo` メソッドでインスタンス `cmi` に与えている。この場合、`PutMeshInfo` メソッドの引数の一つ目と二つ目はそれぞれR方向、Z方向の領域分割数を示す。境界条件は `PutBoundaryCondition` メソッドで与えるが、そのメソッドの引数は一つ目がR方向の左側（必然的に `Reflective` になる）、二つ目がR方向の右側、三つ目がZ方向の上側、四つ目がZ方向の下側に対応する。最終行の `ReconstructCoarseMesh` メソッドは粗メッシュ分割有限差分加速（Coarse Mesh Finite Difference Acceleration）のための設定であり、この例のように設定すればよい。

円筒座標系の中性子輸送方程式とその随伴式はソルバー `SNRZ` により計算する。`SNRZ` の使い方は基本的に `SNR` と同様である。`SNRZ` を用いた感度の計算例を以下に示す。

Listing 7: 二次元円筒体系の感度計算例

```
1  int dim=2;
2  int group=107;
3  int mednum=5;
4  int pl=0;
5  int sn=4;
6
7  SNRZQuadrature quad(pl);
8  quad.PutLevelSymmetric(sn);
9
10 SNRZSystem testa(dim,group,mednum);
11 for(int i=0;i<mednum;i++){
12     testa.AddMedium(med[i]);
13 };
14 testa.PutCartMeshInfo(&cmi,"Cylinder");
15 testa.PutPL(pl);
16 testa.PutGeneralOption(opta);
17 testa.SetQuadrature(&quad);
18 testa.PutWriteFlux();
19 real k1=testa.CallGen();
20
21 SNRZSystem test(dim,group,mednum);
22 for(int i=0;i<mednum;i++){
23     test.AddMedium(med[i]);
24 };
25 test.PutCartMeshInfo(&cmi,"Cylinder");
26 test.PutPL(pl);
27 test.PutGeneralOption(opt);
28 test.SetQuadrature(&quad);
29 test.PutWriteFlux();
30 real k2=test.CallGen("cmfd");
31
32 int nucnum=5;
33 int nucid[]={902320,922340,922350,922380,130270};
34
35 SensitivityData sens=testa.CalSensitivityNew(&test,k1,nucnum,nucid);
36 sens.PutName("hct021_1","keff","jendl-4");
37 sens.WriteFile("./","sns.hct021_1");
```