

## MCNP 事始め

— サルにもわかる? MCNP —

住友原子力工業 (株)

山野 直樹

yamano@sae.co.jp

### 1. はじめに

核データの利用に関係する計算コードの一つとして MCNP コードの紹介を本誌に寄稿するよう、シグマ委員会主査の吉田正氏より依頼され、毎度のとおり気軽にお引き受けしたものの、いざ書き始める段になってどのような切り口で紹介すべきか悩んでしまった。ご承知の通り MCNP は米国ロスアラモス国立研究所が開発したモンテカルロ法による放射線輸送計算コードであり、現在世界中で業界標準の名声を得ている有名な計算コードである。その機能や使用法についての紹介記事や解説は随所で述べられている。それらの繰り返しでは読者の興を満足しないであろう。さりとて、あまりくだけた解説では国会図書館にも献本されている本誌の品位に相応しくないの、他の解説記事ではあまり触られていないと思われる、モンテカルロ法の基本的な考え方を中心とした MCNP の使用上の留意点と、断面積ライブラリーで使われる核データの内部表現について、これから MCNP を使い始める方にも容易に理解できるように、できる限り平易に述べたいと思う。

### 2. MCNP™ とは

MCNP™ とは A General Monte Carlo N-Particle Transport Code の頭文字を採用した、米国ロスアラモス国立研究所が登録商標(Trade Mark)を有する放射線輸送計算コードである。N-particle の“N”は Neutral の略で中性子や光子を意味する。バージョン 4 では制動輻射 X 線や蛍光 X 線などを計算するために、電子の輸送計算も取扱うようになった。ただ、電子の輸送計算部分は有名な ITS TIGER コードから導入した部分が主体なので、開発者達としては、中性子とガンマ線の計算に重点を置いて開発した意味を Neutral に込めているように思われる。個人的な話で恐縮であるが、筆者自身が MCNP を認識したのは東京で開催された第 6 回遮蔽国際会議(1983)であったと記憶している。その頃筆者は RADHEAT-V4 の開発に携わっており、群定数の根本問題である共鳴の

自己遮蔽因子(Self-Shielding factor)のエネルギー・空間依存性に対して良い表現法はないものか頭を悩ませていたので、連続エネルギー(continuous energy)表現の MCNP の登場には少なからず驚いた。

連続エネルギー表現とは、数千～数万点のエネルギー点に対する断面積を直接参照する非常に単純な方法であり、MCNP はエネルギー群表示の問題点を根本的に解決した輸送計算コードである。散乱の角度依存性は、阪大の高橋亮人氏が最初に提唱された DD X(Energy-Angle Double Differential Cross Sections)を、筆者達と同様な等確率角度 3 2 分点に平均する方法で表現した。この頃の MCNP はバージョン 2B の改良版で、計算機資源が潤沢でなかった日本では、モンテカルロ輸送計算法の権威である運輸省船舶技術研究所(船研)の植木紘太郎氏がいち早く注目していたが、一般の研究者・技術者はもっぱら決定論的な輸送計算コードを利用しており、モンテカルロ法による輸送計算コードとしては米国オークリッジ国立研究所が開発した MORSE-CG や KENO コードが利用されていた。当時の汎用大型計算機では、メモリー、ハードディスクや CPU 時間等の計算機資源を大量に消費する MCNP は簡単に取扱えなかった。残念ながら当時の我々には、今日の計算機の急速な進展は予想できず、10年後を想定して MCNP を開発したロスアラモスの開発者達には先見の明があったわけである。MCNP は80年代半ばにはバージョン 3B、90年代に入るとバージョン 4A と改良が進んだ。国内でも90年代の初めになると、日本原子力研究所(原研)の核融合中性子工学研究室の前川洋氏、大山幸夫氏、小迫和明氏が中心となって JENDL-3.1 をベースとした FSXLIB-J3 と呼ばれる MCNP 用断面積ライブラリーが整備された。シグマ委員会では Shielding 積分テストワーキンググループ(WG)や Fusion Neutronics 積分テスト WG において、遮蔽積分テストに MCNP3B/4A を用いてベンチマーク問題の計算を行い、JENDL-3.1/3.2 や JENDL-Fusion File の検証作業を実施している。(現在では、JENDL-3.2 をベースとした FSXLIB-J3R2 や JENDL-Fusion File をベースとした FSXLIB-JFF が利用可能である)

しかしながら、MCNP が国内の技術者に急速に広まったのは、原研が1992年6月から96年3月までの4年間に実施した「遮蔽安全性実証解析」の成果が大きい。この作業では、MCNP4A と上記の FSXLIB-J3 を使って、基本的なベンチマーク問題による精度確認、再処理施設などの核燃料取扱施設を対象とした典型的な施設問題に対する遮蔽安全性を検討した。この作業では、様々な遮蔽形状に MCNP を適用するための使用法、特に分散低減法や検出器 (モンテカルロ法では estimator とか tally と呼ぶ) の選択と設定法について詳細に検討した。その結果、MCNP の計算精度と適用性は非常に優れたものであることが実証された。その後、原研ではこの成果を受けて、原子力コード委員会の原子力コード評価専門部会に「MCNP 使用経験」ワーキンググループを組織して、1996年度から97年度の2年間、MCNP4B の使用経験をまとめて

いる。これらの成果である報告書は、MCNP の普及に役立つと言う点と、実際の再処理施設の許認可に係る遮蔽安全性を補完したと言う点で極めて有益なものであり、MCNP 事始めとしては良い導入書であると思われる。

MCNP の機能や使用方法については、数 cm 厚さのマニュアル等に詳述されているため、ここでは幾つかの特徴についてのみ紹介する。

- ・代表的なワークステーションや DOS-V パソコンで使える。

MCNP は UNIX ベースの OS 上で稼動するように基本設計がなされているので移植性が高い。DOS-V パソコンでも、OS を Linux 等に入れ替え GNU の gcc と g77 をインストールした環境で支障なく動作する。MCNPLOT の図を表示するには、X-Window の X11R5 以上の Xlib と対応する Motif をインストールすれば良い。近頃のパソコンは 5 年以上前の数百万円のワークステーションより倍以上速いので、筆者の知人は趣味のパソコンで MCNP を知的ゲームとして楽しんでおられる。

- ・複雑な三次元幾何形状が設定できる。

MCNP の幾何形状の定義は、必要な平面や曲面(surface)を予め入力しておき、幾つかの面で囲まれた領域をセル(cell)として設定する。三次元 CAD 等の洗練された入力方法と比べるとやや原始的な設定方法ではあるが、lattice、fill、universe、trcl などのコマンドで、燃料集合体のような同じ寸法の部品を組み合わせて炉心全体を定義するなど、かなり複雑な体系を設定できる。その一例として、図 1 に示すような建屋の集合も(少々根気さえあれば)比較的容易に定義できる。

- ・線源条件と検出器が簡単に設定できる。

実用的な線源と検出器の機能が組みこまれており、これらの機能を組み合わせて、実用的な問題に対する条件設定が簡単にできる。MORSE など従来のモンテカルロコードは線源や検出器ルーチンはユーザー作成が半ば常識であった。

- ・核データの選択が容易である。

MCNP では上記のセル毎に物質を定義するが、物質の組成入力で核データを任意に選択できる。ドシメトリー反応断面積等に ENDF/B 書式の MT 番号を直接指定するなど設定が容易である。

- ・連続エネルギーモンテカルロ法である。

エネルギーの群構造表示と異なり、数千~数万点のエネルギーに対する断面積を直接参照するので、群構造における分離共鳴の自己遮蔽因子の問題点を回避できる。(現在用いられている Bondarenko が提唱した分離共鳴の自己遮蔽因子はエネルギーと物質組成のみに依存した近似であり、実際には空間依存性がある)

- ・群定数を用いた随伴計算と簡単な摂動計算機能がある。

群定数が用意できれば、簡単に随伴(Adjoint)計算が可能である。また、バージョン 4B では物質の原子個数密度を変化させた摂動計算機能が付加された。ただし、この摂

動計算では断面積の変化に伴う全断面積が保存されないので、微小変化の検討に留めておく必要がある。

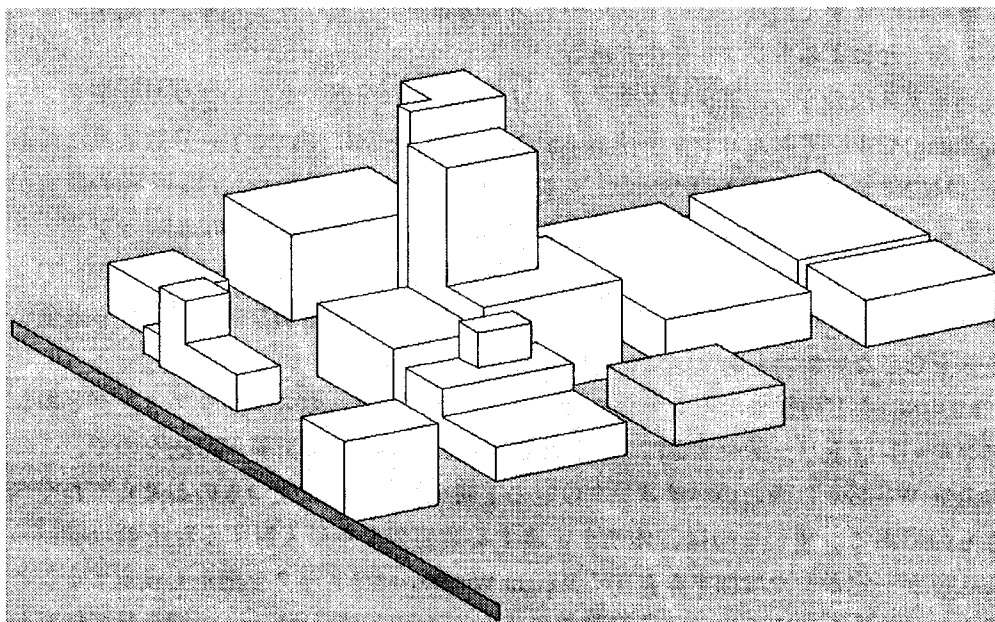


図1 MCNPによる幾何形状設定例

(本図は幾何形状設定の参考例であり実際の建屋配置とは異なる)

### 3. アナログ・モンテカルロと非アナログ・モンテカルロ

モンテカルロ法には、アナログ法(直接シミュレーション)と非アナログ法があるが、一般には、有名な Buffon's needle (ビュッフォンの針) 問題が確率論の教科書に良く記述されており、イメージとして理解しやすいため、モンテカルロ法と言えばアナログ法を想起する初心者が多いのが事実である。しかしながら、期待する事象が非常に稀にしか起こらない実規模体系の輸送計算問題では、アナログ法は實際上ほとんど役に立たない。そのため、MCNP を始めとする積分型ボルツマン輸送方程式を解く実用的な計算コードは、例外なく非アナログモンテカルロ法を採用している。

非アナログ法では、基本的にシミュレーションする粒子は重み(Weight)を持ち、体系内で散乱や吸収される過程によってその重みが減少していく。1粒子の追跡が終了するのは、計算体系外(Outside World と呼ぶ)に達するか、設定されたある時間やエネルギーに達した時点となる。この非アナログ法によるモンテカルロ計算を効率良く行うためには、インポートランスサンプリングが必須である。インポートランスサンプリングとは分散低減のために適したインポートランス関数を選定することを意味し、そのため

バイアス法(分散低減法)と呼ばれる人工的な方法を用いて、問題に適したインポートンス関数を設定し、より関心のある領域(位相空間)でより多くのランダムウォークが行われるように配慮して、意味のある解を最終的に得る。初心者が MCNP を使うときに最初につまずくのは、このインポートンス関数を設定しなかったり、不適切な設定をしたことによるトラブル発生である。

バイアス法のうち、アナログや非アナログと簡単に分類できないスプリットティング(splitting)やルシアンルーレット(Russian Roulette)は非常に使いやすい分散低減法であり、MCNP のみならず MORSE など一般的なモンテカルロコードには必ずその設定ができる。MCNP の特徴は、この両者の設定を組み合わせた Weight Window インポートンスと呼ばれる機能があり、従来は個別に設定していたスプリットティングとルシアンルーレットパラメータを併せて設定できる。もちろん、不適切な値を設定すると全く意味をなさない場合もあり注意が必要である。

MORSE などの従来のモンテカルロコードでも、これらのスプリットティングとルシアンルーレットパラメータを注意して設定すれば、効率良い計算が可能なので、この Weight Window は両者のパラメータ設定の手間を省くのに役立つものと考えておくべきものである。重要なのは、体系を定義する幾何学セルに入射する粒子の collision density が一定かやや増加するように Weight Window パラメータを細かく設定することであり、そのためには MCNP の計算結果である Activity in each cell の欄を見て何度か調整するうちに、適当な値を設定することが可能となる。

ただし、注意すべきことは、粒子の重みが大きく変化する物質を含む幾何学セルは細かく分割して、Weight Window パラメータを少しずつ変化させるように考慮することである。初心者ほど幾何学セルをスマートに定義して、セル総数を必要数よりかなり少なく設定してしまう傾向にあり、最適パラメータを設定できずに失敗する。MCNP の幾何学セルの定義は、最初は見た目のスマートさよりも、むしろ多すぎるくらいに設定して、地道に Weight Window パラメータを調整した方が、結果的に早く所要の結果にたどり着くようである。

その他のバイアス法としては、線源バイアス、散乱角確率バイアス、飛程長バイアス、指数変換、強制衝突(DXTRAN)等があるが、線源バイアスを除いて、ランダムウォークをかなり人工的に変えることを忘れてはならない。しかしながら、有効なバイアス法を積極的に用いなければ効果的でない場合もある。残念ながら、ある程度の経験を積まなければ、最適なバイアス法は決められないのが現状であろう。明確な分散低減法の選定や設定基準が確立していない現状では、バイアス法の設定は簡単にはできない。

バイアス法ではないが、分散低減法の特殊な適用例として、ssw と ssr を組み合わせた bootstrap(接続)計算も非常に大きな体系や減衰が著しい場合には有効に用いること

ができる。

#### 4. 検出器(Estimator または tally)の選択

MCNP には検出器として、実際に粒子が通過した事象(イベント)を計数する検出器と、粒子が衝突したそれぞれの点から検出点まで到達するであろうと考える仮想的な事象を算出する検出器がある。前者には Surface Current tally(F1)、Surface Flux tally(F2)、Track length tally(F4)等があり、後者は Point detector tally(F5)である。これらの検出器は、それぞれ特徴があり、物質中で有効なもの、ボイド中でも有効なもの、平均的なフルーエンスを与えるもの、その点のみのフルーエンスを与えるもの、など問題に適したものを選択する必要があることは言うまでもなく、前節で述べたバイアス法の採用と合わせて適切な検出器を設定することが重要である。必要な検出機能が組み込まれていない場合は、既存の検出器ルーチンを変更したり、tallyx サブルーチンを自作してコンパイルリンクする必要もありうる。自作するのは、検出器ルーチンのみならず、線源ルーチンの場合もあり、source や srcdx サブルーチンで特殊な線源条件を設定することもある。

#### 5. Forward と Adjoint

一般に、放射線輸送問題を解くのは、線源から粒子を発生させ、検出器への寄与を計算する Forward 計算である。ボルツマン輸送方程式にはその随伴形式があり、その随伴方程式を解くことは、検出器から逆に粒子を発生させて線源に対する寄与を求めることと等価であり、これが Adjoint 計算である。MCNP はこの随伴方程式を連続エネルギーではなく、群定数を用いることによって解くことができる。随伴計算の最大のメリットは、線源機器が多数存在し、検出器がごく少数(例えば1点)のような問題であり、このような問題の場合は、Forward 計算より Adjoint 計算の方がはるかに早く信頼性のある結果が得られる。また、上述したインポートランスサンプリングで設定するパラメータが不明の場合、Adjoint 計算を予め行って、幾何学セルのそれぞれの随伴束を求めて、それから求めた分散低減パラメータを用いて Forward 計算を行うことが有効な場合がある。線源機器が多数で様々な配置であり、どの線源機器が検出点に最も寄与するか予め予想がつかない問題などは非常に有効である。MCNP とは関係ないが、英国の AEA Technology(UK AEA の民間セクター)が開発している MCBEND コードは、この Adjoint 計算を行って、Forward 計算の分散低減パラメータを内部で自動的に設定する機能があり、連続エネルギーの Adjoint 計算も可能となっている。残念ながら、MCBEND は AEA Technology のソフトウェア製品であるため、使用権を購入しなければならないが、この事例のように、問題によっては Adjoint 計算の有利さがあることを決して忘れてはならない。

## 6. MCNP 計算の信頼性

いつも説明に困るのは、MCNP で計算された結果が、どの程度信頼性を持つかを問われた時である。MCNP4A や 4B になって、各 tally 毎に、fsd, fom, vov, slope など 10 種類の統計チェック項目が出力されるようになった。これらの項目の全てを満足することは場合によって十分ありうるが、一部しか満足しない場合の方が多いことを知っておく方が良い。ましてや、全部を満足していても、まったく見当外れの値が得られる場合が無きしもあらずと聞くと、初心者は頭を抱えてしまう場合が多い。モンテカルロ法は、ヒストリー数を増やすと中心極限定理に従って、相対誤差がどんどん小さくなる一方、系統誤差については何ら情報が得られないことに注意する必要がある。分散低減法の使い方を誤ると、正解でない値にどんどん収束する可能性も十分ありうる。限られたヒストリーによる有限な母集団からサンプリングして検出器への寄与を計算するのがモンテカルロ法であるため、サンプリングが妥当であるかの検討は、上述した Activity in each cell の情報を良く見て、必要かつ十分な粒子が各セルに到達しているかどうかを判断する以外に方法はない。また、目的とする検出器の途中で仮想的な検出器をいくつか配置して、それらの分布をプロットして確認するなどの地道な方が極めて有効である。計算機の性能が昔より大幅に向上した分だけ、これらの検討には時間をかけて慎重に行うことが望ましい。

## 7. MCNP のバージョンアップ

最新情報では MCNP4C が 2000 年の前半に公開される予定である。仕様や機能の詳細は現時点では不明であるが、アナウンスされているものを以下に示す。

### ・ Macrobodyes

マクロボディと呼ばれる Combinatorial-like Geometry の設定が可能。

### ・ Superimposed Importance

インポートランスサンプリングのためにセルを分割する必要がなくなったとのことで、計算する幾何形状とインポートランスサンプリングの幾何形状を独立に設定できるようになったと思われる。

### ・ Enhanced photon/electron physics

MCNP4A 及び 4B では電子の輸送と電子・光子の結合計算が行えるようになっているが、制動輻射と電子輸送の物理モデルの改良が行われたようである。

### ・ Unresolved Resonance Treatment

MCNP は連続エネルギーモンテカルロコードなので、分離共鳴は正しく処理されることは既に述べた。非分離共鳴領域とは、実際には多くの共鳴が存在し、各々の共鳴が実際には完全に重なっていないため、自己遮蔽効果が重要であるが、実験のエネル

ギー分解能の制限から、個々の共鳴パラメータを決定することができない特殊なエネルギー領域である。実効断面積の算出には共鳴反応の統計分布を考慮すると共に、ドップラー効果や共鳴の重なりを考慮する必要がある。このように、非分離共鳴領域では何らかのエネルギー平均化処理をした実効断面積が算出されるので、その値を point-wise 断面積として直接表現できない。そのため、MCNP4A や 4B では非分離共鳴領域の実効断面積は無限希釈断面積をそのまま流用する近似を用いている。MCNP4C では、乱数を用いて仮想的なラダー(格子)を発生させて共鳴反応の統計分布を計算し、probability table lookup によって参照する処理が付加されたものと思われる。ただし、全ての核種に対して非分離共鳴領域の断面積が与えられるわけではなく、<sup>235,238</sup>U、<sup>239</sup>Pu などの幾つかの重要核種に限られているものと思われる。

- ・ Perturbations extended to criticality and automatic corrections for cross-section dependent tallies
- ・ Cumulative Tallies, Delayed Neutrons,  $\alpha$  Eigenvalues
- ・ PC Enhancements  
Digital Visual Fortran, Lahey F90, XLIB, Winteracter graphics に対応し、パソコンへの移植性が拡張された。
- ・ Parallelization enhancements  
6,000CPU までの並列化アーキテクチャに対応した。

その他にも光中性子反応も計算できるように改良中であるとの情報がある。

MCNP4C の公開に向けての Workshops 2000 がロスアラモス(3/21-24, 5/23-26)、ロンドン(4/10-14)、シュツットガルト(7/3-7)など各地で開催予定である。因みにロスアラモスのコースでは、参加費\$1,800(前払いの場合 \$300 discount)であり、初日の夕食はご招待で、本コース参加者には、RSICC に支払う MCNP4C コード入手費用の\$310 discount の特典付きなど至れり尽せりである。興味のある方は WWW ページ << <http://www.solutionsbyhq.com/mcnpinfo.html> >> を参照されたい。

## 8. 核データの内部表現

MCNP4B で用いられる断面積ライブラリーに核データがどのような形で処理されて組み込まれているかを紹介する。

### 8. 1 XSDIR ファイル

MCNP4B は先ず xsdir と呼ばれるディレクトリ情報等を格納した 1 レコード 80 文字のテキストファイルを読む。データはスペースで区切られる free format で記述されており、基本的に 3 種類のセクションに分類される。1 つは DATAPATH セクションで、最初のカラムから datapath または DATAPATH が記述され、このセクションが存在する



場合は、断面積データが実際に格納されているファイルのパスをこのパス名から検索する。2つめは最初のカラムから ATOMIC WEIGHT RATIOS が記述されているセクションで、ZAID と呼ばれる ZZAAA と AWR の組み合わせとなる。ここで、ZZ は原子番号、AAA は質量数、AWR は atomic weight ratio をそれぞれ意味する。3つめは最初のカラムから DIRECTORY と記述されたセクションで、ここに断面積データを実際に格納しているファイル名と格納形式等の情報が与えられる。一行には断面積の格納形式によって、7個から10個のデータが与えられ、もし一行が80文字を超える場合は、+マークによって次行以降を継続行として指定する。格納されるデータの意味は以下の通りである。

1. Zaid name(10 文字以内)      核種/元素と断面積ファイルの種類の識別名  
ZZZAAA.nnC (continuous-energy neutron),  
ZZZAAAAnnD (discrete-reaction neutron), ZZZAAAAnnY (dosimetry),  
XXXXXX.nnT (thermal  $S(\alpha, \beta)$ ), ZZZ000.nnP (continuous-energy photon),  
ZZZAAA.nnM (neutron multigroup), ZZZ000.nnG (photon multigroup),  
ZZZ000.nnE (continuous-energy electron).
2. Atomic weight ratio      原子核の質量を中性子の質量で除した値。
3. File name(8 文字以内) 断面積データファイル名。
4. Access route(70 文字以内)      断面積データファイルの検索パス。0は無指定。
5. File type      1(sequential ascii)または2(direct-access binary)
6. Address      File type=1: 断面積データの開始行、  
File type=2: 開始レコード位置を示す。
7. Table length      制御セクションを除いた実際の断面積テーブルのワード数。
8. Record length      direct-access ファイルの1レコードの長さ。  
File type=1 の時は無意味なので0が設定される。
9. Number of entries per record      File type=1 の時は参照しないので0が設定され、  
File type=2 の時は1レコードに存在するデータの数。  
通常は512。
10. Temperature      断面積データの温度を MeV 単位で与える。

## 8. 2 断面積ファイル

断面積ファイルは2種類の格納形式があり、1つは sequential ascii ファイルで、テキスト形式のデータであり、もう1つは direct-access binary ファイルである。ascii 形式は異機種間の移植性を考慮して用意されている形式で、通常は MAKXSU ユーティリティコードを使って direct-access ファイルに変換する。MCNP は XSDIR ファイルの File type を参照して、対応したファイル形式に従ってデータを読み込む。それ

それぞれの形式のファイルの先頭には、制御セクションとして、格納されているデータの種類と数などが定義されている NXS と JXS 配列がある。NXS は 16 個、JXS は 32 個のデータより成っており、断面積データの種類に対応した各種データの有無、格納数および相対アドレス位置等の情報が与えられている。

MCNP はこれらの制御情報を基に、所要のデータブロックを検索し、そのブロックの情報に対応したデータを指定された別ブロックから読み込んで用いる。

反応名について、total, absorption, elastic, average heating number などは決められたファイルの位置に格納され、それ以外の反応は MT=51 の様に ENDF/B 書式の MT 番号で識別されている。これらのデータは全て point-wise データであり、エネルギーと断面積の値のセットで与えられる。MT 番号のうち ENDF/B 書式では定義されておらず、MCNP が独自に拡張しているものがあり、1000 以上の MT 番号がそれに相当している。この拡張は離散ガンマ線生成反応を指定するために用いられ、例えば(n,  $\gamma$ )反応で複数の離散ガンマ線が生成される時に、102001, 102002, 102003, ....., 102040 の様に元となる反応の MT 番号(102)に 1000 を掛けて、生成されるガンマ線毎の識別番号 1, 2, 3, ....., 40 を加えた値で表現する。

エネルギー、角度分布のデータについては、LAW=1 などの ENDF/B 書式で定義された分布形式(LF 番号または Law 番号)に対応したデータが格納されている場合と表形式で与えられている場合がある。表形式で与えられた角度分布は 33 等確率角度分点における cumulative probability の形式で与えられる。LAW 番号で与えられたデータは MCNP 内部で分布式の定義に従って展開して用いる。表 1 に MCNP で処理可能な LAW 番号と ENDF/B 書式の Law(LF)番号との対応を示す。

表 1 MCNP で処理できる ENDF/B 書式の Law(LF)番号

| LAW | contents   |
|-----|--|
| 1   | Tabular Equiprobable Energy Bins (ENDF Law LF=1)                     |
| 2   | Discrete Photon Energy   |
| 3   | Level Scattering (ENDF Law LF=3)                                     |
| 4   | Continuous Tabular Distribution (ENDF Law LF=1)                      |
| 5   | General Evaporation Spectrum (ENDF Law LF=5)                         |
| 7   | Simple Maxwell Fission Spectrum (ENDF Law LF=7)                      |
| 9   | Evaporation Spectrum (ENDF Law LF=9)                                 |
| 11  | Energy Dependent Watt Spectrum (ENDF Law LF=11)                      |
| 12  | Energy Dependent Fission Spectrum (Madland and Nix) (ENDF Law LF=12) |
| 22  | Tabular Linear Functions (UK Law 2)                                  |
| 24  | UK Law 6   |
| 44  | Kalbach-87 Distribution (ENDF-6 Law =1, LANG=2)                      |
| 66  | N-Body Phase-Space Distribution (ENDF-6 Law=6)                       |
| 67  | Laboratory Angle-Energy Law (ENDF-6 Law=7)                           |

断面積ファイルに格納されているデータの種類と形式は、断面積の物理的内容の違

い(continuous か multigroup か neutron か photon かなど)で異っており、参照されるデータブロックも異なる。制御配列 NXS や JXS には、それぞれのデータブロックの大きさや相対アドレス位置の情報が入っているので、データの種類に対応したデータブロックの先頭位置を検索し、所定の数だけデータを読み込む処理が繰り返される。各データの種類に対応した物理データと参照すべきデータブロック名を表2～表6にそれぞれ示した。なお、電子に関するデータ格納書式は MCNP4B のマニュアルに記載されていないので省略した。

表2 断面積ファイルのデータと参照データブロック(Continuous, Discrete Neutron)

| type                      | reaction  | referred block | condition  |
|---------------------------|---|----------------|--|
| reaction                  | $\sigma t(E), \sigma a(E), \sigma el(E), \sigma ave(E)$ | [ESZ]          | always   |
|                           | $\nu$ prompt(E), $\nu$ total(E)                         | [NU]           | JXS(2)≠0   |
|                           | $\sigma mt(E)$ (mt=[MTR])                               | [SIG,LSIG]     | NXS(4)≠0   |
|                           | $\sigma n\gamma mt(E)$ (mt=[MTRP])                      | [SIGP,LSIGP]   | NXS(6)≠0   |
|                           | $\sigma n\gamma tot(E)$                                 | [GPD]          | JXS(12)≠0  |
| angular distribution      | $\sigma el(E_i, \mu k), k=1,3,3$                        | [AND,LAND]     | always   |
|                           | $\sigma mt(E_i, \mu k), k=1,3,3$ (mt=[MTR])             | [AND,LAND]     | NXS(5)≠0,<br>LOCB <sub>i</sub> ,LC <sub>j</sub> ≠0 |
|                           | $\sigma n\gamma mt(E_i, \mu k), k=1,3,3$ (mt=[MTRP])    | [ANDP,LANDP]   | NXS(6)≠0,<br>LOCB <sub>i</sub> ,LC <sub>j</sub> ≠0 |
| energy/angle distribution | Fmt(En, En') (LAW=1, mt=[MTR])                          | [DLW,LDLW]     | NXS(5)≠0   |
|                           | Fmt(En, En', $\mu$ ) (LAW=3, mt=[MTR])                  | [DLW,LDLW]     | NXS(5)≠0   |
|                           | Pmt(En, En') (LAW=4, mt=[MTR])                          | [DLW,LDLW]     | NXS(5)≠0   |
|                           | Fmt(En, En') (LAW=7, mt=[MTR])                          | [DLW,LDLW]     | NXS(5)≠0   |
|                           | Fmt(En, En') (LAW=9, mt=[MTR])                          | [DLW,LDLW]     | NXS(5)≠0   |
|                           | Fmt(En, En') (LAW=11, mt=[MTR])                         | [DLW,LDLW]     | NXS(5)≠0   |
|                           | Pmt(En, En', $\mu$ ) (LAW=44, mt=[MTR])                 | [DLW,LDLW]     | NXS(5)≠0   |
|                           | Pmt(En, En', $\mu$ ) (LAW=67, mt=[MTR])                 | [DLW,LDLW]     | NXS(5)≠0   |
|                           | Fmt(En, E $\gamma$ ') (LAW=2, mt=[MTRP])                | [DLWP,LDLWP]   | NXS(6)≠0   |
|                           | Fmt(En, E $\gamma$ ') (LAW=4, mt=[MTRP])                | [DLWP,LDLWP]   | NXS(6)≠0   |
|                           | E $\gamma$ (k, En <sub>i</sub> ), k=1,2,0, i=1,3,0      | [GPD]          | JXS(12)≠0  |

表3 断面積ファイルのデータと参照データブロック(Dosimetry)

| type     | reaction                  | referred block | condition |
|----------|---------------------------|----------------|-----------|
| reaction | $\sigma mt(E)$ (mt=[MTR]) | [SIGD,LSIGD]   | NXS(4)≠0  |

表4 断面積ファイルのデータと参照データブロック(Thermal S( $\alpha, \beta$ ))

| type                      | reaction                            | referred block | condition                            |
|---------------------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------------------|
| reaction                  | $\sigma_{in}(E)$                    | [ITIE]         | always                               |
|                           | $\sigma_{el}(E)$                    | [ITCE]         | JXS(4) $\neq$ 0                      |
| angular distribution      | $\mu_{el}(k, E), k=1, NXS(6)+1$     | [ITCA]         | JXS(4) $\neq$ 0,<br>NXS(6) $\neq$ -1 |
| energy/angle distribution | $\mu_{in}(k, E, E'), k=1, NXS(3)+1$ | [ITXE]         | always                               |

表5 断面積ファイルのデータと参照データブロック(Continuous Photon)

| type                | reaction   | referred block | condition       |
|---------------------|--|----------------|-----------------|
| reaction            | $\sigma_{inc}(E), \sigma_{coh}(E), \sigma_{pe}(E), \sigma_{pp}(E)$ | [ESZG]         | always          |
| scattering function | FFinc(i), i=1,21   | [JINC]         | always          |
| form factor         | FFINTcoh(i), i=1,55  | [JCOH]         | always          |
|                     | FFcoh(i), i=1,55   | [JCOH]         | always          |
| fluorescence data   | e(i), i=1, NXS(4)  | [JFLO]         | NXS(4) $\neq$ 0 |
|                     | $\phi(i), i=1, NXS(4)$   | [JFLO]         | NXS(4) $\neq$ 0 |
|                     | Y(i), i=1, NXS(4)  | [JFLO]         | NXS(4) $\neq$ 0 |
|                     | F(i), i=1, NXS(4)  | [JFLO]         | NXS(4) $\neq$ 0 |
| heating             | Have(E)  | [LHNM]         | always          |

表6 断面積ファイルのデータと参照データブロック(Multigroup Neutron, Photon)

| type                      | reaction  | referred block                               | condition                            |
|---------------------------|---|--|--------------------------------------|
| reaction                  | $\sigma_t(E)$   | [TOT,ERG]                                    | JXS(2) $\neq$ 0                      |
|                           | $\sigma_f(E)$   | [FISS,ERG]                                   | JXS(3) $\neq$ 0                      |
|                           | $\nu_{prompt}(E), \nu_{total}(E)$                     | [NU,ERG]                                     | JXS(3) $\neq$ 0                      |
|                           | $\chi(E)$   | [CHI,ERG]                                    | JXS(3) $\neq$ 0                      |
|                           | $\sigma_a(E)$   | [ABS,ERG]                                    | JXS(6) $\neq$ 0                      |
|                           | SPOW(E)   | [STOP,ERG]                                   | JXS(7) $\neq$ 0                      |
|                           | MOMTR(E)  | [MOM,ERG]                                    | JXS(8) $\neq$ 0                      |
|                           | $\sigma_{mt}(E), (mt=[MTED])$                         | [XSEC,ERG]                                   | NXS(4) $\neq$ 0,<br>JXS(4) $\neq$ 0  |
| energy distribution       | $\sigma(E_n, E_n')$ (primary particle)                | [P0,POL]                                     | JXS(13) $\neq$ 0                     |
|                           | $\sigma(E_n, E_\gamma')$ (secondary particle)         | [P0,POL,IPT,ERG2L,ERG2,SANG2,NLEG2]          | NXS(8) $\neq$ 0,<br>JXS(13) $\neq$ 0 |
| energy/angle distribution | $\sigma(E_n, E_n', \mu, k)$ (primary particle)        | [PN,XPNL,PNL,XPN]                            | JXS(13) $\neq$ 0                     |
|                           | $\sigma(E_n, E_\gamma', \mu, k)$ (secondary particle) | [PN,XPNL,PNL,XPN,IPT,ERG2L,ERG2,SANG2,NLEG2] | NXS(8) $\neq$ 0,<br>JXS(13) $\neq$ 0 |

## 9. おわりに

MCNP の紹介と、断面積ライブラリーで使われる核データの内部表現について、できる限りわかり易く述べたつもりであるが、決定論的手法に慣れ親しんでいるとモンテカルロ法のイメージが理解しにくいことも事実である。しかし、臨界事故の被曝評価には MCNP4B と JENDL-3.1/3.2 が即座に使用された事実からも MCNP の信頼性が十分高いことが理解できるであろう。

ロスアラモスは MCNP の成功によって、DOE を始めとする多くのスポンサーを獲得している。そのため、優秀な学生が世界中から自然に集まってくる。一つの成功が次の優れた研究者を育むといったサイクルが形成されているように感じられる。MCNP の高エネルギー拡張路線である MCNPX の開発も順調に進んでいると聞いている。MCNPX の  $\beta$  ユーザーは LA150 ファイルをベースとした断面積ライブラリーが使えるので、日本での  $\beta$  版認定ユーザーも多い。もちろん、このライブラリーは MCNP4B でも同様に取扱える。

2000 年を迎えて、MCNP コードマニュアルの編者である、ロスアラモスの Judith Briesmeister 女史が MCNP4C の旗を掲げて世界中を行脚する姿を想像すると頭が下がる思いがするが、MCNP Corporation とも称される勢力は Microsoft や AEA Technology と同じ道を歩もうとしているのであろうか。ロスアラモスはコンサルタント契約を結べば、MCNP の使用に関して電子メールで丁寧にサポートしてくれるとも聞いている。上述した Workshops 2000 などは日本人顔負けの企画であり、今後もユーザーは世界に広がるのは容易に予想できる。

日本人にとってこの手の企画立案は得意な筈であるが、なぜ先を越されるのであろうか。ロスアラモスにしても MCNP が事実上の世界標準になるまでには 20 年の歳月を開発に注いでいる。彼らにしても、決して中途半端な意気込みではないことがわかる。我々には、彼らのような明確な戦略と熱意があるのだろうか。もう一度初心に戻って考え直す必要があるように思える。

拙稿が読者の眼にとまって、MCNP に興味を感じて頂ければ筆者にとって望外の喜びである。なお、本稿をまとめるにあたり参考文献を付すべきところであるが、引用できない文献もあるため興味のある方は筆者までお問い合わせ願えれば幸いです。

(追記) 原子力学会では「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会が活動しており、MCNP の使用法についても検討されている。活動に興味のある方は、事務局の桜井淳氏(原研)にお問い合わせ下さい。

2000 年 1 月 10 日記