技術資料

モンテカルロセミナー実施報告

2000年7月～2002年7月, 日本原子力研究所

桜井 淳^{1,*}, 久米 悦雄¹, 前川 藤夫¹, 野尻 一郎²*Contribution to the Monte Carlo Seminars, July 2000–July 2002, JAERI*

Kiyoshi SAKURAI, Etsuo KUME, Fujio MAEKAWA and Ichiro NOJIRI

For the Seminars, the authors had prepared a lecture note and a textbook for the continuous energy Monte Carlo method. In the Shielding Safety Analysis and High Energy Calculation Seminars, proposals were presented on a means of evaluating the weight window method. For all the Monte Carlo Calculation Seminars, a neutron cross section library covering 340 nuclides with 293K had been compiled from JENDL-3.2. Also for the Calculation Seminars, inputs of benchmark problems had been prepared for checking the calculation methods.

KEYWORDS: Monte Carlo, seminars, lecture note, textbook, continuous energy, weight window, neutron cross section, library, JENDL-3.2, benchmark problems

I. はじめに

MCNP¹⁾やMVP²⁾などの汎用連続エネルギーモンテカルロコードの公開に伴い, モンテカルロ計算に関心を持つ人たちが多くなってきた。しかし, いくつかの実施上の制限から, 実際に計算している人たちは少ないと推定される。そこで潜在的可能性を最大限に引き出すため, いまの原子力分野における専門別需要を考慮し, このセミナーに参加するだけで関連ソフト一式のパソコンへのインストールから実用的な計算まで実施できるようになることを目指した。

2000年7月から2002年7月までの約2年間, 日本原子力学会「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会主催の「モンテカルロ計算夏季セミナー」1回, 「モンテカルロ基礎理論セミナー」3回, 「モンテカルロ法による核燃料サイクル施設の未臨界安全セミナー」7回, 「モンテカルロ法による遮蔽安全解析セミナー」5回, 「MCNPXによる高エネルギー中性子遮蔽安全解析セミナー」1回を実施した。計算コードには世界的に利用されているMCNPを利用した。

セミナーの特徴は, 連続エネルギーモンテカルロ教科書の作成および利用, 計算に直結した理論の解説, 業務や研究にすぐに役立つ実用的計算法の演習, 特に中性子深層透過の計算で重要となる分散低減法 (variance reduction technique) のひとつであるウェイトウィンドウ法 (weight

window method : ww)¹⁾に必要なエネルギー・空間依存ウェイト下限値の最適推定法の解説と計算演習を実施したことである。

II. 各種セミナー実施内容

1. モンテカルロ基礎理論セミナー

セミナーでは, 体系化された教科書を配布しないと狙いどおりの効果が期待できないため, 「モンテカルロ基礎理論セミナー講義ノート」³⁾および連続エネルギーモンテカルロ教科書「モンテカルロ計算ガイドライン—モンテカルロ法による中性子・光子輸送シミュレーション」⁴⁾を編集し, 講義した。

この連続エネルギーモンテカルロ教科書は, MCNPやMVPのような汎用連続エネルギーモンテカルロコードを効果的に利用するための教科書である。これまでにモンテカルロ法に関わる教科書は, 世界で数多く出版されているが, 汎用連続エネルギーモンテカルロコードの具体的な内容や炉物理理論, 中性子断面積ライブラリー, 光子断面積ライブラリー, 熱中性子散乱則の具体的な記述がないため, 一般的な理論を勉強するにはよい教科書となるものの, それらの計算コードを効果的に利用するには不十分であった。MCNPやMVPのマニュアルには, 利用者にとって有用な情報が多く含まれているが, 基礎的な炉物理理論が省略されているため, その分野に詳しい利用者にとっては問題ないものの, 初心者には計算コードをブラックボックスとして利用するおそれが生じる。そのため連続エネルギーモンテカルロ教科書が欠かせない。

分散低減法で特によく利用するのは, ww, 指数変換法, 線源バイアス法であるが, 中でもwwは重要である。第1図はwwの考え方を示したものである。 W_L は

¹ 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)

² 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nucl. Cycle Develop. Inst.)
(2002年11月20日受理; 2003年2月6日査読通過)

* 著者連絡先: Tel. 029-282-5492, Fax. 029-282-6560,
E-mail: sakurai@melody.tokai.jaeri.go.jp

第1図 ウェイトウインドウ法概念図

ユーザーが与えるウェイト下限値である。ただし $W_s = 3W_L$ および $W_u = 5W_L$ の3と5はデフォルト値であるが、ユーザーが任意に与えることもできる。

粒子のウェイトが W_u より大きなものは、エネルギーと方向を保存しながら、 W/W_s 個(ただし W_s は第1図のサバイバルウェイト)の粒子にスプリッティング(splitting)され、個々の粒子には W_s のウェイトが与えられる。ただし W/W_s 個が整数なら話は単純だが、そうでない場合には、その個数 N は整数 N_1 と半端な残り N_2 に分けて取り扱われ、次に乱数 ξ を発生させ、 $\xi \leq N_2$ ならば $N_1 + 1$ の粒子になり、 $\xi > N_2$ ならばそれがキルされて N_1 個だけになる。

粒子のウェイトが W_L より小さければ、ロシアンルーレット(russian roulette)が開始され、発生させた乱数 ξ よりもサバイバル確率 $\eta = W/W_s$ が大きければ($\xi \leq \eta$)、その粒子には W_s のウェイトが与えられサバイバルされるが、逆に小さければ($\xi > \eta$)キルされる。

スプリッティングやロシアンルーレットをとおして、ウェイトのプラスマイナスは保存されている。中性子のエネルギーは、ユーザーの判断で任意数 n のエネルギービンに分割され、また計算体系には一般論からすれば m 個の空間(セル)が考えられるため、そのような場合には、計算体系には $n \times m$ 個の ww が設定されることになる。体系によって異なるが、実際の計算では数10から数1,000にも及ぶ。

ここで問題となるのがウェイト下限値の推定法である。ウェイト下限値の設定の仕方によっては計算時間に数倍から極端な場合には数100倍も差が表れる。そのようなデモンストレーション計算については、MCNPのウェイトウインドウジェネレータ(weight window generator: wwg)機能を利用し、モンテカルロ法による遮蔽安全解析セミナーおよびMCNPXによる高エネルギー中性子遮蔽安全解析セミナーの中性子鉄円柱深層透過問題の解析をとおして実施した。MCNPの wwg では、随伴(adjoint)計算を実行しておらず、輸送計算の結果の簡単な処理により、各セルのインポートランス(importance)を推定し、ウェイト下限値はそれに逆比例するとして求めている。

2. モンテカルロ法による核燃料サイクル施設の未臨界安全セミナー

最近のパソコンは、高速度・大容量になっており、ひと昔前の大型コンピュータ並みの性能を備えている。OSとしてWINDOWSを搭載しており、広く普及している。初心者が具体的にモンテカルロ計算に入って行けない原因のひとつとして関連ソフトを首尾よくインストールできないことが挙げられる。そのためロスアラモス国立研究所(LANL)で整備した最新版MCNP-4C2コードパッケージ(DOS版)およびJENDL-3.2から293 Kで編集した340核種からなるMCNP専用中性子断面ライブラリーをパス切りしてCDに収め、WINDOWS 95, 98, ME, 2000, XP対応のオートインストーラで2分以内にすべての関係ソフト(MCNP-4C2ロードモジュール)およびデータ類(統合断面ディレクトリー、中性子断面ライブラリー(0~20 MeV)、熱中性子散乱テーブル $S(\alpha, \beta)$ 、光子相互作用断面ライブラリー(0~100 GeV)、電子相互作用断面ライブラリー(0~100 GeV)をインストールできるようにした。各セミナーに対応したMCNP入力例も収めた。

データ類をすべてテキスト形式で収めた場合1 Gbytesに達する。その場合、インストールおよび計算が実行できない可能性が生じる。そのため、データ類は、統合断面ディレクトリーおよびMCNP入力例を除き、すべてバイナリー形式にすることにより、全体のファイル容量が250 Mbytes以下になるように圧縮し、パソコンで現実的に確保可能な大きさとした。

MCNPを利用した臨界固有値問題で最も簡単な計算例は、3次元空間の座標原点に半径 R (cm)の水・濃縮ウラン均質混合物が置かれた体系である。線源は座標原点に置かれたWatt型核分裂スペクトルである。インポートランスサンプリング法(Importance sampling method)にはセルインポートランス(cell importance)を利用した。水・濃縮ウラン均質混合物のインポートランスは1とし、外側のボイド部分はゼロとした。

最初に与えた計算条件で臨界となる半径を求めた。次に、半径 R (cm)の水・濃縮ウラン均質混合物の外側に厚さ5 cmの金属ベリリウムの反射体を設けたとき、臨界

半径がどのように変化するか、最初の入力を修正し、計算した。このとき、ベリリウム領域のインポートランスは1、その外側はボイドでゼロとした。この場合には水のほかに金属ベリリウムの $S(\alpha, \beta)$ を追加しなければならない。次に、トラックレングスエスティメータ (track-length estimator: TLE) で各物質内の平均的な中性子スペクトルを計算した (全計算セミナーの全問題に対しても以下同様)。

水・濃縮ウラン均質混合物質に混ざった水の量や反射体の厚さにより、中性子スペクトルがどのように変化し、臨界半径がどのように変化するかを検討した。体系の寸法や個数密度をひとつずつわずかに変化させたとき、固有値 (中性子実効増倍率 k_{eff}) がどの程度変化するかも検討した (全計算セミナーの全問題に対しても以下同様)。体系がいくぶん複雑になっているが、考え方は同じであるため、最初の問題の意味が理解できれば、次の4つの問題も容易に理解できる。

最初の例題だけ点線源にしたが、臨界計算では体系にもよるが、線源条件を体積線源 (核分裂性物質の存在する領域全体) で与えないと正確な k_{eff} が得られないことがあり、十分に注意しなければならない。以下の例題ではすべて体積線源にしたが、複数のポイント線源にした条件でも計算し、両者の差を検討した。

2番目の入力例は、JCO 沈殿槽を最も簡単な円筒形状でモデル化したものである。実際の構造材 (SUS304)、円筒寸法が入力してあり、臨界事故時に近い条件を再現している。容器内のインポートランスは1とし、外側はボイドでゼロとした。入力例は臨界条件にした。まず臨界を確認し、次に液位を変化させたとき、 k_{eff} がどのように変化するか検討した。次に沈殿槽の外径を1/2、高さを3倍にした円筒に臨界量と同量の溶液を入れたときの k_{eff} を計算した。 $k_{\text{eff}}=0.80$ となり、これにより同じ組成の同じ量の溶液でも形状が変わることにより、中性子の漏洩量の関係から、 k_{eff} が著しく変化することがわかる。最初の入力例を修正し、円筒容器周囲に実際と同じ形状の冷却水ジャケットをモデル化し、中性子の反射の割合と k_{eff} の変化を検討した。

3番目の入力例は、核燃料サイクル開発機構・東海再処理工場のウラン溶液 (240 gU/l, 3wt%U, 3 mol/l) 貯蔵タンクを最も簡単な円筒形状でモデル化したものである。実際の構造材 (SUS304L)、円筒寸法が入力してある。容器内のインポートランスは1とし、外側はボイドでゼロとした。この問題は、先の問題の容器を大きくし、組成の異なる溶液を入れただけであり、基本的には同じと考えてよい。実際の安全審査では、タンク全体を水没させても $k_{\text{eff}} \leq 0.95$ となることを確認しているが、セミナーではそこまではやらず、各自の演習問題とした。タンクの液位を変化させたとき、 k_{eff} がどのように変化するか検討した。できるだけ入力を簡単にするため、この問題と次の問題では溶液部を複数のセルに分割していないが、結果が変わらないことは確認した。

4番目の入力例は、サイクル機構・東海再処理工場のプルトニウム溶液 (250 gPu/l) 貯蔵タンクを最も簡単な中空円筒状槽形状でモデル化したものである。実際の構造材 (SUS304L)、中空円筒状槽寸法が入力してある。容器内のインポートランスは1とし、外側はボイドでゼロとした。ウラン溶液貯蔵タンクと異なる点は、単純な円筒容器ではなく、中性子が漏洩し易い中空の円環容器になっており、中空内面には熱中性子を吸収させるための厚さ1mmのカドミウム板が一樣に施されていることである。実際の安全審査ではタンク全体を水没させても $k_{\text{eff}} \leq 0.95$ となることを確認しているが、セミナーでは、各自の演習問題とした。この場合もタンクの液位を変化させたとき、 k_{eff} がどのように変化するか検討した。

5番目の入力例は、日本原子力研究所の軽水減速軽水冷却型臨界実験装置 TCA (Tank-type Critical Assembly) で組まれた軽水炉燃料棒18×18正方配列体系の臨界ベンチマーク実験問題である⁵⁾。ウラン濃縮度は2.6 wt%である。燃料棒有効長は144.15 cmである。そのような燃料棒が1.956 cmのピッチで18×18に正方配列されている。燃料棒はタンク内の上下支持格子板で固定され、実験時にはタンクの底から減速材・冷却材の軽水が供給される。この臨界ベンチマーク実験問題を MCNP で計算すると $k_{\text{eff}} = 1.00238 \pm 0.00088$ となり、確度および精度ともよい計算がなされていることがわかる。±の数字の表示法は、コードにより異なり、統計的相対誤差を Δk_{eff} で表示する場合と百分率で表示する場合があり、MCNPの最終結果は前者である。水位を変化させて k_{eff} の増減の程度を検討した。この体系では、体積線源でなく少数のポイント線源にすると、臨界で k_{eff} が2%も小さくなる。この計算演習をとおして線源条件の重要性を強調した。

最初の4つの計算時間は、300 MHzのパソコンを利用すると、10万ヒストリーで数分以内であり、セミナーの教材としてはやり易かった。軽水炉燃料棒配列の計算は10万ヒストリーで20分であった。研究用として実際に計算するときには、少なくとも100万ヒストリー、理想的には1,000万ヒストリーで計算しているが、セミナーでは考え方を重視したため、ヒストリー数を上げた精度の高い計算は各自の演習問題とした。

3. モンテカルロ法による遮蔽安全解析セミナー

このセミナーでは、未臨界セミナーでインストールしたソフトのほか、次の5つの遮蔽セミナー専用入力例を用意した。

最初の入力例は、最も簡単な体系例として、座標原点に置かれた半径30 cmの鉄球の中心に14 MeVの中性子源のある場合である。インポートランスサンプリング法にはwwを利用した。次に、その入力でwwgの機能を生かしてより適切なエネルギー・空間依存のウェイト下限値を算出し、そのウェイト下限値を入力に利用して再計算するこ

とにより、計算時間が1/40になることを確認した。次に、鉄球を厚さ5 cmの同心球に6分割し、wwgで適切なウェイト下限値を算出して再計算すると、計算時間がさらに数分の1に減少し、これによってモデル化やウェイト下限値の選び方によって計算時間に大幅な差が生じることを確認した。TLEで求めた中性子スペクトルの相対誤差および計算全体の効率指標 (figure of merit : FOM) を確認し、計算結果の妥当性と効率性の検討ができるようにした。

2番目の入力例(ベンチマーク実験解析用厳密入力)は、14 MeV 中性子の1 m 鉄円柱の深層透過ベンチマーク実験問題である⁶⁾。鉄円柱はあらかじめ軸方向に厚さ数 cm に分割しており、ウェイト下限値は最適推定値が入力してある。ヒストリー数を変化させて深層透過問題における計算時間の感覚を把握できるようにした。線源から最も離れたセルにTLEを設定し、中性子スペクトルを計算した。この問題では、さまざまな深さでの中性子スペクトルや各種反応率の測定値が存在するため、各自の計算法の妥当性を検証することができる。

3番目の入力例は、14 MeV 中性子の1 m コンクリート円柱の深層透過問題である。この入力例では、コンクリートはあらかじめ厚さ数 cm に分割してあるが、ウェイト下限値には2番目の入力例のものがそのまま入力してある。そのためコンクリートに対しては最適値になっていない。そのまま計算し、次にwwgで適切なウェイト下限値を算出して再計算すると、計算時間が1/300になることを確認した。

その原因としてセミナーでは、炉物理的解釈を含め、次のような説明をした。中性子のウェイトを W 、媒質の巨視的中性子散乱断面積を Σ_s 、巨視的中性子全断面積を Σ_T とすれば、散乱後のウェイト W' は、最初のウェイトに Σ_s/Σ_T を掛けた値($W' = W \cdot \Sigma_s/\Sigma_T$)になる。コンクリートの密度は鉄の約1/3であり、またコンクリート構成原子の割合を考慮した中性子断面積は鉄ほど大きくない。そのため、コンクリートでは、中性子エネルギーにもよるが、1 mの深層透過でもウェイトの変化は鉄より数桁少ないことが推定される。そのことを両者の最適ウェイト下限値を比較して確認する。例えば、0~0.001 eVの中性子に対し、約1 mの深さのセルに当たるセル番号31のウェイト下限値は、鉄では 1.0×10^{-4} であるが、コンクリートでは 3.0×10^{-3} となっている。10~16 MeVの中性子に対して、鉄では 5.0×10^{-8} 、コンクリートでは 7.0×10^{-3} となり、コンクリートのウェイト下限値は鉄の140,000倍となる。よって鉄のウェイト下限値をそのまま利用すると、コンクリートの場合には1/30~1/140,000のウェイト下限値を使用していることになり、ウェイトの低い中性子のシミュレーションに時間を費やしていることになる。ウェイト下限値の推定を的確に行うためには、wwgの結果を媒質と透過距離ごとに整理し、ウェイト下限値の変化の割合を

把握しておくことである。セミナー参加者には、すべての計算問題に対し、このように関係核種の中性子断面積から計算結果の炉物理的解釈まで説明し、中性子のモンテカルロシミュレーションが自然と頭に浮かぶようにした。

4番目の入力例は、Watt型中性子スペクトルの中性子による1 m 鉄円柱の深層透過問題である。5番目の入力例は、Watt型中性子スペクトルの中性子による1 m コンクリート円柱の深層透過問題である。問題3から5までの問題をとおして、物質依存および中性子スペクトル依存の最適なウェイト下限値の重要性を示した。

中性子深層透過の計算は精度を上げようとする時間がかかる。wwgによるウェイト下限値の算出では、よい値を得るためには、体系にもよるが、数時間かそれ以上もかかるため、その場では計算できず、あらかじめ計算しておいた値を使用した。最初の問題を的確に理解できれば、他の問題はまったく同じ考え方で計算できる。

現状では、wwgで適切なウェイト下限値を得るために、その初期値をどうするか、その際、セルをどう分割するのか、エネルギービンはどう区切るか、エスティメータがいろいろなセルに置かれている場合、どの位置に着目し、wwg用エスティメータを設定するのか、ストリーミング問題には適用できないなどの未解明問題が残されている。例えば、深層透過問題では、wwgで得られたウェイト下限値を用いた計算を行い、その結果を見て、各セルにおいて十分な衝突数が得られるようにチューニングし、次の計算に用いるというような利用法もある。

ウェイト下限値の推定において、次の経験式が提案されている⁷⁾。 $W_m = W_0 f^{m-1}$ 、ここで、 W_m : m 番目のセルにおけるウェイト下限値、 W_0 および f : 物質やその厚さや粒子のエネルギーに依存する因子で、鉄に対しては、 $E < 0.007$ MeV に対し $W_0 = 0.64$, $f = 0.75$, 0.007 MeV $< E < 0.72$ MeV に対し $W_0 = 0.25$, $f = 0.6$, $0.72 < E < 17.5$ MeV に対し $W_0 = 0.10$, $f = 0.5$ である。引用文献には明記されていないが、セルの厚さは5 cm程度である。他の遮蔽材についてはまだ定められていない。経験式は一部のエネルギーの低い範囲で比較的良好合うが、全体的には差が大きい。鉄の計算で重要なエネルギー範囲は0.007~0.72 MeV および 0.72~17.5 MeV である。このセミナーの最初の鉄球6分割問題に対し、経験式の推定値をwwgの推定値で割った値は1から1/100になる。初心者にはこのような状況でも有用とされている⁸⁾。

幾何形状のセル分割法は、遮蔽材中の中性子の平均自由工程(mean free path)を目安にすればよく、エネルギーにもよるが、凝集体では数 cm 程度と記憶しておけばよい。ウェイト値は勘や経験で決めても悪くないが、初心者には無理な話である。第1次近似としては、適当なウェイト下限値を設定し、空間・エネルギー依存のwwgを機能させ、再計算を行って的確なウェイト値と思われる値を推定する。深層透過のような通常の問題でもwwgの利用には

限界があり, ウェイト下限値を求めるエスティメータをどのセルに設定するかによっても値が大幅に変わり, また特定セルの特定エネルギービンで物理的に矛盾するゼロウェイト下限値や極端に大きなウェイト下限値になることもある。ヒストリー数を上げるに従いゼロウェイト下限値の数を減らせるが, 数時間かそれ以上計算しても完全になくすることはできない。

セミナーでは, 第2次近似として wwg で算出したウェイト下限値をそのまま利用したが, 一般的にはゼロウェイト下限値の部分だけ計算者の判断でチューニングする必要がある。いちばん単純な方法は, 前後の値が物理的に考えて不自然でなければ, 同じ値を入れることである。ただし wwg で算出した的確と思われる推定値でも, 実際に中性子スペクトルの計算値の統計相対誤差を詳細に検討し, ウェイト値を部分的に調整して再計算をして改善の様子をきめこまかに検討する第3次近似としてのチューニング操作が必要になる。初心者がここまでやるのは無理だが, 徐々に詳細な問題把握ができるようになるにつれ, ごく自然にチューニング操作ができるようになる。

的確なウェイト下限値を推定する方法はひとつではなく, いくつかの方法がある。wwg は便利な反面, 設定する wwg 用エスティメータのセル依存性がある。そのため, より厳密には MCNP で多群中性子断面積ライブラリーを使って随伴計算 (adjoint calculation) をする必要がある。炉心計算でインポートサンプリング法としてセルインポートスになれている参加者は, ww 採用に伴うウェイト下限値の推定に抵抗を示したが, どちらが簡単かは経験により左右されることを強調し, 最初の大雑把な推定値すら入力できない場合には, 空間・エネルギー・依存のウェイト下限値をすべてゼロに設定し, デフォルト値を利用することを勧めた。デフォルト値にすると小さいウェイト下限値が設定されるため, 計算時間がかかるが, 初心者がスタートするにはひとつの具体策になる。経験を積むことにより, 次のステップに移行できる。

4. MCNPX による高エネルギー中性子遮蔽安全解析セミナー

このセミナーでは, 未臨界セミナーでインストールしたソフトのほか, 高エネルギー中性子断面積ライブラリーおよび専用入力例を用意した。

計算者が常に把握しておかなければならないことは, 計算体系核種の中性子断面積のエネルギー依存性である。これまでの経験から参加者は, 0~20 MeV については比較的良好に把握しているものの, 20~150 MeV, あるいはそれ以上のエネルギーについては, まったく予備知識を持っていないことがわかった。セミナーでは, まず MCNPX⁹⁾ について, 次に LANL が開発した LA150 高エネルギー中性子断面積ライブラリー¹⁰⁾, 特に計算体系の核種である鉄の中性子断面積について説明し, 計算した中性子スペク

トルの形が物理的に考えて, 妥当であるか否か, 質問して理解の様子を確認した。

このセミナーのねらいは wwg の使いこなしに置いている。ただし中性子エネルギーが 150 MeV まで拡張されているため, それに応じた計算感覚や物理的解釈, 計算の妥当性の判断ができるようにした。

計算体系のひとつは遮蔽セミナーの最初の問題と同じだが, 中性子エネルギーが 150 MeV まで拡張してある。中性子のピークがきれいに表現できるようにエネルギービンの設定に工夫を要する。もうひとつの入力例は, TIARA/JAERI 68 MeV 中性子鉄平板深層透過ベンチマーク実験¹¹⁾解析用の入力作成の参考にするため, 遮蔽安全解析セミナーの2番目の入力例を利用したが, 入射中性子を 68 MeV の単色中性子とし, wwg や中性子スペクトルのエネルギービンなども 150 MeV まで拡張してある。中性子のピークがきれいに表現できるようにエネルギービンの設定に工夫を要する。ここまで準備しておけば, 初心者でも TIARA/JAERI 68 MeV 中性子鉄平板深層透過ベンチマーク実験問題の入力作成も可能となる。このセミナーでは, できるだけ各自で入力を作成し, 試行錯誤しながらでも, よい結果が出せるようにした。

教材の確認のために事前に条件を変えて計算したが, 従来の 20 MeV までの計算の数倍も時間がかかることや wwg のセル依存性がより大きくなることから, ウェイト下限値のチューニングがかえって面倒になることがわかった。事前に計算しておき, 結果をうまく教材に組み込んでおかないと, 1日のセミナーでは効果を上げることができないことがわかった。セミナーでは, 最初に線源から最も離れたセルに wwg 用エスティメータを設定して得たウェイト下限値を利用して計算し, 中性子スペクトルの各エネルギービンの統計相対誤差を見ながら, 誤差の大きなエネルギービンのウェイト下限値をチューニングしながら, このような試行錯誤を繰り返した。次に, wwg 用エスティメータを供試体の中間のセルに設定して, 同様の操作を繰り返した。チューニングは, 特別な数値修正作業ではなく, 基礎的な炉物理の知識と計算結果の中性子スペクトルに対する的確な解釈ができれば, 誰にでもできることを示した。このセミナーでも遮蔽セミナー同様, ウェイト下限値にデフォルト値を利用する方法も示した。

III. ま と め

セミナーで行った特徴的事項は次のとおりである。

- (1) 理論セミナーでは, 独自に編集した連続エネルギーモンテカルロ教科書を採用し, 実際の計算に役立つ講義内容とした。
- (2) 未臨界セミナーでは, 実際の核燃料サイクル施設の計算を実施した。遮蔽セミナーと高エネルギーセミナーでは, ウェイト下限値の的確な評価法が身に付くように理論と計算演習を実施した。

- (3) 3つの計算セミナーの教材には、JENDL-3.2から編集した293 Kの340核種の汎用中性子断面積ライブラリーを採用し、一般的な計算にも対応できるようにした。
- (4) 3つの計算セミナーには、いずれもひとつずつ、研究に使用している世界でも代表的なベンチマーク実験問題を含め、計算法の検証が可能にようにした。
- (5) 3つの計算セミナーでは、モンテカルロ法をまったく知らない初心者でも、この講義および計算演習により、ひとりでの確かな計算ができるようにすることができた。
- (6) セミナー参加者との質疑応答を繰り返し、講義や教材に含まれていた曖昧さを排除し、確実な内容に改善した。

— 参考文献 —

- 1) F. Briesmeister, Ed., *MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C*, LA-12625-M, (2000).
- 2) 森 貴正, 中川正幸, MVP/GMVP 連続エネルギー及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード, JAERI-Data/Code 94-007, (1994).
- 3) 桜井 淳, モンテカルロ基礎理論セミナー講義ノート, (2002).
- 4) 桜井 淳, 山本俊弘編著, モンテカルロ計算ガイドライン—モンテカルロ法による中性子・光子輸送シミュレーション, JAERI-Rev. 2002-004, (2002).
- 5) H. Tsuruta, et al., *Critical Sizes of Light-Water Moderated UO_2 and PuO_2-UO_2 Lattices*, JAERI 1254, (1977).
- 6) K. Oishi, et al., "Measurement and analysis of neutron spectrum in a large cylindrical iron assembly irradiated by 14 MeV neutrons", *Proc. 7th Int. Conf. Radiation Shielding*, p. 331~340 (1988).
- 7) K. Ueki, A. Ohashi, M. Kawai, *Nucl. Sci. Technol.*, No. 30, 339 (1993).
- 8) K. Ueki, Private communication, (2002).
- 9) H. G. Hughes, et al., *Status of the MCNPTM/LCSTTM Merger Project*, LA-UR-98-559, (1998).
- 10) M. B. Chadwick, et al., *Nucl. Sci. Eng.*, No. 131, 293 (1999).
- 11) H. Nakashima, et al., *Nucl. Sci. Eng.*, No. 124, 243 (1996).