

# 連続エネルギー法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 MVP/GMVP II

## General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods : MVP/GMVP II

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学部門  
核工学・炉工学ユニット核設計技術開発グループ  
長家 康展

これまで我々の研究グループでは、主に高速高精度な炉心計算を目的とした中性子・光子輸送計算モンテカルロコード MVP/GMVP を開発してきた。最近、これまでに行ってきた改良や新機能を取り込んだ MVP/GMVP コードを第 2 版として正式に公開したので、新たに組み込まれた機能を中心に MVP/GMVP コードについて紹介する。

### 1. はじめに

MVP/GMVP コードは原研（現在の原子力機構）で一から独自に開発された中性子・光子輸送計算モンテカルロコードである。MVP は連続エネルギー法に基づくモンテカルロコードで、GMVP は多群法に基づくものである。これらのコードは 1980 年代末頃から、高速高精度な炉心計算を目的として開発が進められ、1994 年に第 1 版<sup>1)</sup> が公開された。その後も適用範囲の拡大と利便性向上のために改良と機能拡張が行われ、最近、第 2 版<sup>2)</sup> として公開した。MVP/GMVP 第 2 版の主な改良点と新たに追加された機能は次の通りである。(1) ENDF-6 形式のファイル 6 (MF=6) を用いて表現された散乱モデルへの対応、(2) 時間依存タリー、(3) ポイントワイズ応答関数を用いた反応率計算、(4) 線源指定法の改良、(5) 任意温度における連続エネルギーモンテカルロ計算、(6) 固有値問題における分散のバイアス評価、(7) 点検出器及び面検出器、(8) 確率論的幾何形状モデル、(9) 炉雑音解析機能（ファインマン- $\alpha$  実験のシミュレーション）、(10) 任意形状の格子棒、(11) 周期境界条件、(12) 標準並列ライブラリ (MPI, PVM) を用いた並列

化、(13) 対応プラットフォームの拡充、(14) 連続エネルギー法による燃焼計算 (MVP-BURN)、その他。本稿では MVP/GMVP コードの特徴と上記新機能のいくつかについて説明する。

### 2. MVP/GMVP コードの特徴

#### 2.1 ベクトル化されたアルゴリズム

MVP/GMVP コードではベクトル型計算機による高速処理に適した「事象駆動型アルゴリズム」を採用している。このアルゴリズムでは、粒子を 1 つ 1 つ追跡していくのではなく、多数の粒子を同時に追跡し、それらの粒子は生成、飛行、衝突といった事象単位で一括して処理される。一方、一つの粒子の起こす事象を逐次追跡し、そのヒストリーが終わった時に次の新しい粒子の追跡を始めるというアルゴリズムは「ヒストリー駆動型アルゴリズム」と呼ばれる。図 1 にこれらアルゴリズムの比較を示す。

事象駆動型アルゴリズムには任意性があり、計算タスクの分割方法や各タスクの処理順序により計算速度が変わってくる。MVP/GMVP では、ベクトル化率を上げるた

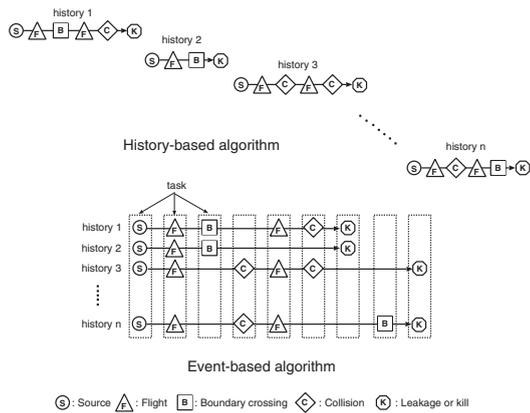


図1 ヒストリー駆動型アルゴリズムと事象駆動型アルゴリズムの比較

めに演算のベクトル長が最も長い事象及び領域から処理を行う「スタック駆動領域選択型アルゴリズム」<sup>3,4)</sup>を採用している。MVP/GMVPにおける事象処理単位である「タスク」とそれらの流れを図2に示す。全ての計算はSource (粒子源) の計算に始まり、Flight (粒子の自由飛行の追跡) に移る。その後はどのタスクが選択されるかはそのタスクを待つ各領域の粒子数によって決まるので前もっては予測できない。各タスクの処理を待つ粒子のプログラム内での粒子番号等を格納した配列は「事象スタック」と呼ばれる。

MVP/GMVPは可能な限りベクトル化が出来るように工夫されていてそのベクトル化率は多くの場合95%以上である。実際、ベクトル計算機上で広範囲の問題に対し10倍以上の高速化を達成している。残念ながら、近年、ほとんどの計算機会社はベクトル計算機の開

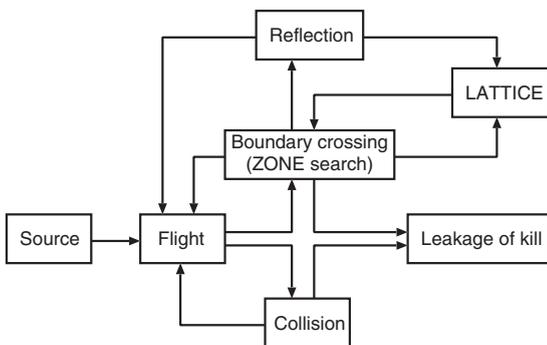


図2 MVP/GMVPコードにおける計算タスク

発をやめてしまい、今では米国Cray社と日本電気だけが開発を行っている。従って、MVP/GMVPコードのこの特徴を活かすことは難しくなっているが、MVP/GMVPコードはスカラー計算機でも動作し、並列計算によって高速化を図ることが可能である。<sup>5,6)</sup>

## 2.2 幾何形状表現

MVP/GMVPコードでは幾何形状の表現法として「組合せ形状表現法」(Combinatorial Geometry)を採用している。この方法では、直方体や球などの予め用意された基本形状を組み合わせることにより、計算体系を構築していく。例えば、半球を表現するには図3に示すように、球と直方体を用いて、球の内側かつ直方体の内側として定義する。

MVP/GMVPでは球(SPH)と直方体(RPP)の他に円柱(RCC、RCL)、円錐台(TRC)、楕円錐台(TRC)、三角柱(WED)、平行六面体(BOX)、正六角柱(RHP、HEX)、任意の四、五、六面体(ARB)、回転楕円体(ELL)、三軸不等楕円体(GEL)、楕円断面のトーラス(ELT)、平面によって区切られた半空間(HAF)、一般二次曲面(GQS)の使用が可能であり、複雑な三次元形状を容易に作成することができる。

また、原子炉の炉心等でよく見られる階層構造を持った繰り返し形状を容易に表現するために、四方格子および六方格子による「多重格子表現の機能」を有している。これは、一つの形状(例えば燃料ピンセルなど)を定

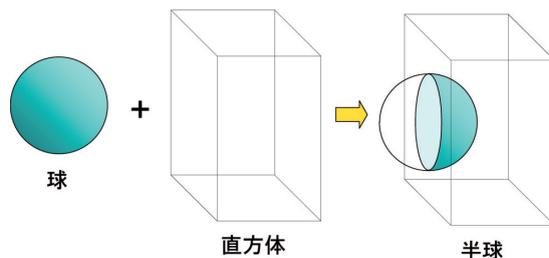


図3 組み合わせ幾何形状

義しておき、これを多数の空間領域に配置することにより、同じ形状が繰り返される形状を表現するものである。図4は多重格子表現によりモデル化されたPWR全炉心体系である。このように多重格子表現をこの機能を用いれば複雑な炉心体系を容易にモデル化することができる。

### 2.3 入力データ形式

MVP/GMVPコードでは入力データの形式でも工夫が凝らされている。図5にMVP入力データの一例(球体系のGodiva炉心における固有値計算)を示す。一般の計算コードなどでは、計算オプションや体系の定義に数字を羅列して入力することが多いが、MVP/GMVPコードではオプションを文字列で入力したり、数値データは名前付データとして入力する。例えば、図5で"NPART (1500000)"となっている部分はヒストリー数を150万ヒストリーとするという入力であり、後からヒストリー数を変更する場合においてもどの入力を変更すればよいのか分かりやすい。

また、MVP/GMVPの入力では"シンボリックパラメータ"と呼ばれる、ユーザが自由に指定できる変数を定義することができる。一番

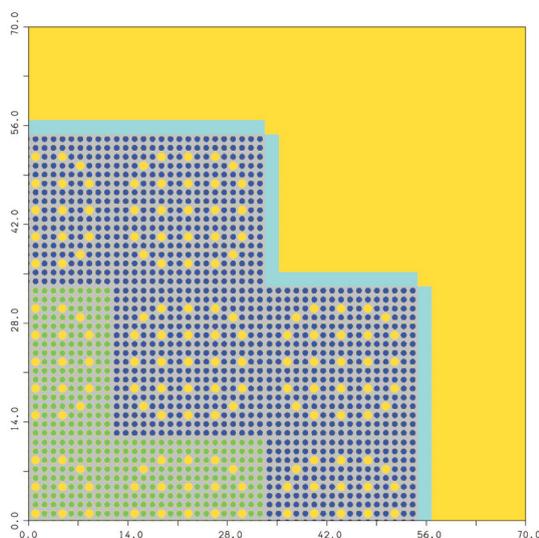


図4 PWR炉心の計算モデル

簡単な例だと、ユーザが後で変更したい複数の領域の物質番号をシンボリックパラメータで指定しておき、ケースに応じて変更するといった使い方が可能である。また、図5に示されているように、密度、濃縮度、原子量から数密度の計算式を定義しておき、その結果を物質指定において用いたりすることもできる。更には、制御棒の位置をシンボリックパラメータで定義しておき、その値を変更するだけで制御棒位置を変更することもできる。

## 3. MVP/GMVP第2版に追加された新機能

MVP/GMVP第2版では最初に述べたように第1版から多くの機能拡張がなされている。ここでは主な機能拡張に限って紹介していくことにする。

### 3.1 確率論的幾何形状モデル

高温ガス炉では燃料として被覆粒子燃料が用いられ、燃料コンパクトやペブル球の中にランダムに配置される。この被覆燃料粒子のランダムな配置による非均質性は炉心特性に非常に大きな影響を及ぼすことが分かっており、正確に評価する必要がある。しかしながら、被覆燃料粒子は燃料コンパクトやペブル球の中に膨大な数が含まれており(例えば、高温工学試験研究炉HTTR<sup>7)</sup>の燃料コンパクト1つには約13000個の被覆燃料粒子が含まれている)、これらの位置をすべて正確に知ることは困難であり、モンテカルロ計算で直接モデル化することは不可能である。そこで、このようなランダムに配置された被覆燃料粒子を取り扱う手法として、確率論的幾何形状モデル<sup>8)</sup>を開発し、MVPコードに取り込んだ。

確率論的幾何形状モデルでは、被覆粒子燃料を含む領域に対して、燃料粒子の体積充填比率で決定される再近接粒子までの距離分布(Nearest Neighbor Distribution, NND)を与え、中性子のランダムウォークの過程で確率的に球状燃料粒子位置を決定していく。

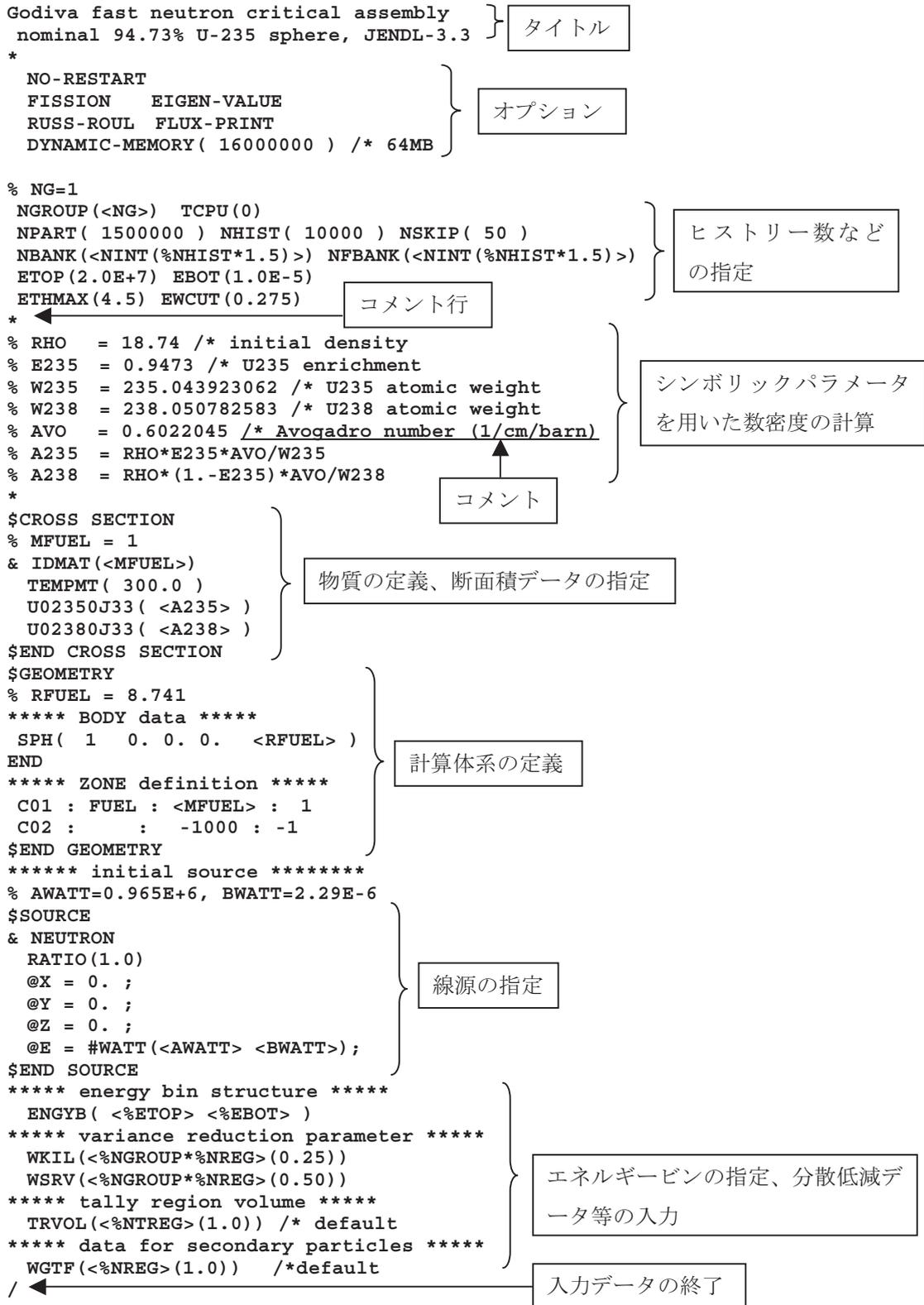


図5 MVP入力データ例

図6は確率論的幾何形状モデルにおける中性子の追跡過程を模式的に示したものである。中性子が被覆燃料粒子の存在する領域 (Stochastic mixture region) に入射するとNNDから被覆燃料粒子の位置を決める。被覆燃料粒子の種類が複数あるときは存在比から確率的に入射する被覆燃料粒子を選択する。被覆燃料粒子に入射した粒子は通常のランダムウォークを繰り返し、被覆燃料粒子の外に出ると再びNNDから被覆燃料粒子の位置を決める。以上の処理を中性子が被覆燃料粒子の存在する領域の外に出るまで繰り返す。このようにして配置された被覆燃料粒子の位置は中性子のヒストリーによってそれぞれ異なったものになるが、中性子の集団から見るとランダムに配置された被覆燃料粒子は確率論的に再現されていることになる。

以上のように確率論的幾何形状モデルを用いることによって、被覆燃料粒子に非均質性を正確に取り扱うことができるが、ユーザはNNDを入力しなければならない。NNDはモンテカルロ充填模擬法による3次元剛体球空間分布計算コードMCRDF<sup>9)</sup>を用いて正確に求めることができるが、計算コストがかかる。MVPコードでは、MCRDFコードでNNDを計算する代わりに、統計的一様性を仮定した次式で定義される解析的NND<sup>8)</sup>も用いることができる。

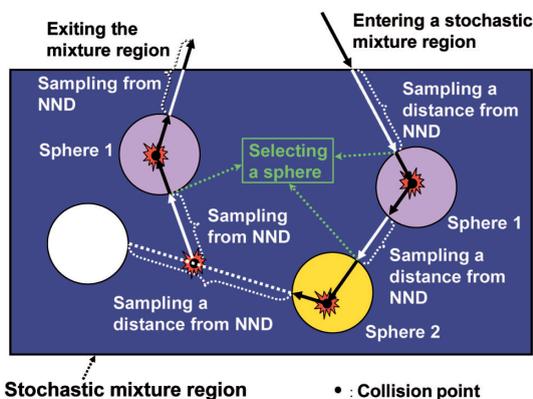


図6 確率論的幾何形状モデルにおける中性子のトラッキング

$$\frac{dNND(r)}{dr} = \frac{3}{2} \frac{f_p}{1-f_p} \exp\left[-\frac{3}{2} \frac{f_p}{1-f_p} r\right] \quad (1)$$

ここで、 $f_p$ は被覆燃料粒子の充填率、 $r$ は球状燃料の直径を単位とする距離を表わす。(1)式で示されるNNDは近似式であるが、充填率を与えるだけで簡便に確率論的幾何形状モデルが使用でき、多くの場合、MCRDFコードによるNNDと同程度の精度の計算結果を与えることが分かっている。<sup>10,11)</sup>

### 3.2 任意温度における連続エネルギーモンテカルロ計算

連続エネルギーモンテカルロ計算で用意されている断面積ライブラリはある温度(通常、室温)において作成されている。しかし、実用炉や高温ガス炉を対象としたモンテカルロ計算では温度に依存した断面積データが必要であり、ユーザが評価済み核データを処理して、必要となるすべての温度の断面積データを作成する必要がある。このモンテカルロ用断面積データを作成する作業は複雑で、計算時間もかかり、ユーザにとって大きな負担となる。そこで、基準ライブラリから容易に任意温度の断面積データを作成できるコードMVPARTを開発するとともに、MVPコードにMVPARTコードの機能を取り込んだ。<sup>12)</sup>

図7はMVPARTコードにおける処理を示したものである。炉心計算で取り扱う中性子のエネルギーは $10^{-5}$ eVから20MeVまでで、こ

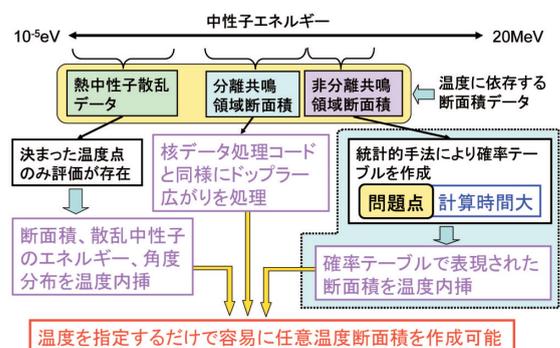


図7 MVPARTコードにおける処理

の範囲で温度に依存する断面積データは熱中性子散乱、分離及び非分離共鳴領域のデータのみであり、MVPARTコードによりこれらの任意温度におけるデータが作成される。熱中性子散乱については決まった温度点のみ評価が存在するので、断面積、散乱中性子のエネルギー、角度分布が温度について内挿される。分離共鳴断面積については核データ処理コードと同様にしてドップラー広がり処理される。MVPARTコードではLICEMコードシステム<sup>13,14)</sup>のSIGMA1コードの機能を利用している。非分離共鳴領域では統計的手法により確率テーブルが作成されるので、確率テーブルで表現された断面積が温度について内挿される。以上のような手法により、ユーザは温度を指定するだけで容易に任意温度の断面積を作成することができる。MVPでは、物質の断面積を指定する際に温度も指定するだけで温度依存の計算が可能となっている。

### 3.3 固有値問題での真の分散の評価

MVP/GMVPコードを始めとする多くのモンテカルロコードによる固有値計算では、統計的相関のある各バッチの計算値を無相関として処理するため、固有値等の分散が理論上過小評価となることが知られている。この過小評価を定量的に評価するために、中性子世代間の相関を考慮した分散を評価する手法が植木らによって提案された。<sup>15)</sup> MVP/GMVPコード第2版では、この手法に従って「真の分散」(real variance)つまり「真の統計誤差」の評価を行い、従来の評価法による統計誤差の計算値が適切なものであるかどうかを判定する機能が追加されている。

MVP/GMVPの物理量の評価は粒子ヒストリーのバッチ（固有値問題では中性子世代に対応）ごとに得られた統計値の平均として定義される。例えば、固有値の場合、

$$k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (2)$$

となる。ここで、 $k_i$ は統計処理の対象となる各バッチでの中性子増倍率で、 $N$ はバッチ数である。独立な複数回の固有値計算で得られる上記の固有値を統計的母集団とする場合の分散値 $\sigma_R^2$ を $k$ の「真の分散」と定義すると、 $\sigma_R^2$ は次式で表わされる。

$$\sigma_R^2 = E[(k - E(k))^2] = E[k^2] - E[k]^2 \quad (3)$$

ここで、 $E[X]$ は統計量 $X$ の期待値を表わす。これに対し、MVPを始めとする多くのモンテカルロコードでは、1回の計算において以下のように標本分散 (sample variance)  $\sigma_S^2$ が評価される。

$$\sigma_S^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (k_i - k)^2 = \frac{1}{N(N-1)} \left( \sum_{i=1}^N k_i^2 - Nk^2 \right) \quad (4)$$

ここで「見かけの分散」 $\sigma_A^2$ をサンプル分散の期待値として定義する。

$$\sigma_A^2 = E[\sigma_S^2] \quad (5)$$

サンプル分散 $\sigma_S^2$ がバイアスのない評価であれば見かけの分散 $\sigma_A^2$ は真の分散 $\sigma_R^2$ に一致する。しかし、標本分散の評価において各バッチの間の相関を無視しているため、一般にはこのようにならない。

真の分散と見かけの分散の差は、 $E[k_i]$ と $E[k_j]$ の値がバッチ $i$ に依存しないという仮定をすると以下のような関係式を導ける。

$$\sigma_A^2 - \sigma_R^2 = - \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{cov}[k_i, k_j] \quad (6)$$

ここで、 $\text{cov}[k_i, k_j]$ は $k_i$ と $k_j$ の共分散である。計算が平衡状態にあるものとするバッチ間共分散の値はバッチの間隔のみに依存すると仮定できる。そこで以下のようなバッチ間隔 $i$ の「真の共分散」 $C_R[i]$ を定義する。

$$C_R[i] = \text{cov}[k_m, k_{m+1}], \quad m = 1, \Lambda, N - i \quad (7)$$

この値で表現した真の分散と見かけの分散の差は以下ようになる。

$$\sigma_A^2 - \sigma_R^2 = - \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (N-i) C_R[i] \quad (8)$$

分散の場合と同様に1回の計算で評価できる以下のような「サンプル共分散」 $C_S[i]$ 、

$$C_S[i] = \frac{1}{N-i-1} \sum_{j=1}^{N-i} (k_j - k)(k_{j+i} - k) \quad (9)$$

及びその母集団平均値としての「見かけの共分散」 $C_A[i]$ を定義する。

$$C_A[i] = E[C_S[i]] \quad (10)$$

これらの3種類の共分散には以下のような関係があることが導かれる。

$$C_R[i] = \frac{N-i-1}{N-i} C_A[i] + \sigma_R^2 - \frac{2}{N(N-i)} \sum_{j=1}^i \left( \sum_{m=1}^{j-1} + \sum_{m=1}^{N-j} \right) C_R[m] + \frac{2i(N-1)}{N(N-i)} (\sigma_R^2 - \sigma_A^2) \quad (11)$$

この式でバッチ間隔と全バッチ数が  $i < N$  の関係にあるとき、

$$C_A[i] - C_R[i] \approx - \sigma_R^2 \quad (12)$$

となる。

これらの関係式をもとにバッチ間相関を考慮した真の分散の推定を以下のような手順で行なう。まず、バッチ間隔  $N_0$  を指定し、これより大きなバッチ間隔に対する共分散を無視出来るものとする。

$$C_A[i] = C_S[i] = C_R[i] \approx 0, \quad i > N_0 \quad (13)$$

この仮定の下に見かけの分散と真の分散の関係式である(8)式及び見かけの共分散と真の共分散の関係の近似式である(12)式を満たす  $\sigma_R^2$  を「真の分散」の推定値として計算する。

ここまでの議論で明らかのように、この手法の有効性は固有値計算のためのバッチ (世

代) 数が十分に多く、また中性子源の分布が基本モードに十分に到達した後のバッチを対象とした統計になっていることを前提としている。このような条件が満たされない計算については、この「真の分散」の推定値は信頼できないことに注意しなければならない。

### 3.4 炉雑音解析機能

炉雑音解析法は原子炉などの未臨界度を測定するためにしばしば用いられる。MVP/GMVPコード第2版では時間領域炉雑音解析法の一つであるFeynman- $\alpha$ 法の機能が導入されている。<sup>16)</sup>この方法ではゲート幅に対する中性子計数分布の分散対平均比(FeynmanのY値)が計算される。この方法は中性子の相関に基づいているので、モンテカルロ法でこの手法を用いるにはアナログモンテカルロシミュレーションを行わなければならない。アナログモンテカルロを実現するために以下のような機能がMVP/GMVPコードに追加されている。

- ・ Terrellによって与えられる分布からの核分裂中性子数のサンプリング。
- ・ 散乱、捕獲、核分裂、吸収が起こったときの中性子の重みをカウントする機能。
- ・ 時間周期境界条件。
- ・ 自発核分裂源からの複数の中性子の発生時刻のサンプリング。

FeynmanのY値を計算するために、MVP/GMVPコードではまず最小ゲート幅に

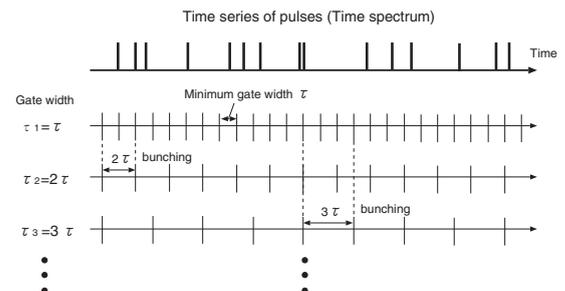


図8 異なるゲート幅に対する時間スペクトル

対応した時間ビンで各検出器タリーに対する時間スペクトルを計算する。得られた時間スペクトルをバンチングすることによって異なるゲート幅に対する時間スペクトルを計算し、それぞれについて平均計数と二乗平均計数を求める (図8参照)。

ゲート幅  $\tau_n$  の平均値計数は

$$\overline{C(\tau_n)} = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n} C_i^{\tau_n} \quad (14)$$

で求め、二乗平均計数は

$$\overline{C^2(\tau_n)} = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n} (C_i^{\tau_n})^2 \quad (15)$$

で求める。ここで、 $N_n$  はゲート幅  $\tau_n$  のバンチングされたスペクトルに対する時間ビンの数で、 $C_i^{\tau_n}$  はゲート幅  $\tau_n$  の  $i$  番目の計数値である。これらの計数値を用いて、Y値は次のように計算することができる。

$$Y(\tau_n) = \frac{\sigma^2(\tau_n)}{C(\tau_n)} - 1 \quad (16)$$

$$\sigma^2(\tau_n) = \frac{N_n}{N_n - 1} \left[ \overline{C^2(\tau_n)} - \overline{C(\tau_n)}^2 \right] \quad (17)$$

Y値の統計誤差はバッチ法によって評価される。

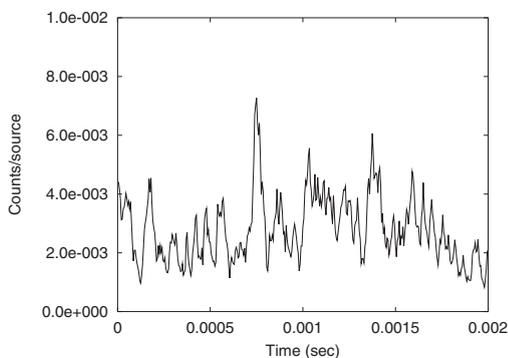
図9にMVPを用いてFCA XIX-3炉心におけるFeynman- $\alpha$ 実験を模擬した結果を示

す。図9(a)は0秒から0.002秒の間で時間周期境界条件を用いて得られた時間スペクトル (1線源粒子に対するカウント数) を示しており、図9(b)はその結果から得られたゲート幅に対するY値のグラフを示している。MVPではこのようにゲート幅の関数としてY値が出力されるので、この曲線をフィッティングすることにより即発中性子減衰定数  $\alpha$  を計算することができる。

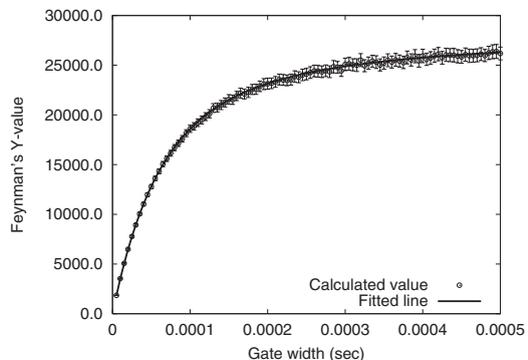
### 3.5 連続エネルギー法による燃焼計算 (MVP-BURN)

近年、様々なタイプの革新炉が提案されており、その炉心設計においては燃焼特性を把握しておくことが重要である。しかしながら、その幾何形状は複雑であり、幾何形状を正確に表現することのできるモンテカルロ法を用いて燃焼計算する手法が注目されている。MVPコード第2版では燃焼計算モジュール (MVP-BURNコード)<sup>17)</sup>が追加されており、革新炉をはじめとする様々な炉心の燃焼解析にMVP-BURNコードを適用することができる。

MVPを用いて燃焼計算を行う仕組みは単純である。図10にMVP-BURNコードの計算フローを示す。まず、前節で述べたようにMVPARTコードを用いて、ユーザが指定した温度における断面積を用意しておく。その断面積を用いてMVPによる定常計算を行い、微視的反応率分布を計算する。微視的反応率分



(a) 時間スペクトル



(b) Y値曲線

図9 FCA XIX-3炉心におけるFeynman- $\alpha$ 実験のシミュレーション

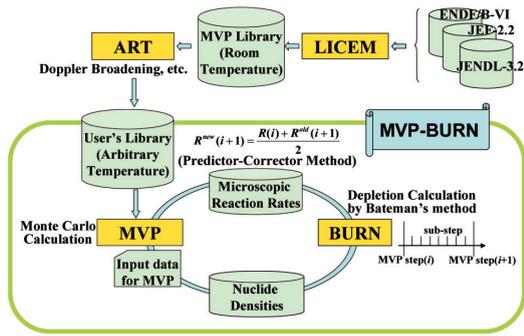


図10 MVP-BURNコードの計算フロー

布が得られれば、燃焼方程式を解くことができ、燃焼時間が経過した後の組成データが得られる。MVP-BURNでは燃焼方程式の解法にBatemanの手法を用いている。その後は組成データを用いて再びMVPコードで微視的反応率分布を計算する。このようにMVP計算と組成変化の計算を繰り返すことによって燃焼計算を行う。

以下にMVP-BURNの主な機能を示す。

- ・ Predictor-Corrector法による燃焼計算 (Gd含む燃焼計算、Pu消滅処理炉の燃焼計算)
- ・ 冷却期間を含む燃焼計算 (PIE解析)
- ・ 制御棒移動やケミカルシムボロン濃度などの体系条件を変化させながらの燃焼計算
- ・ 燃焼期間中の任意の時点からのブランチオフ計算
- ・ 転換比など燃焼依存の任意反応率及び反応

### 率比の計算

上記以外にも燃焼計算で有用な機能が備えられており、詳細はMVP-BURNコードのマニュアル (今年度公開予定) を御覧いただきたい。

図11にMVP-BURNコードを用いて行った燃焼計算 (OECD/NEA/NSC ベンチマーク) の一例<sup>5)</sup>を示す。体系はMOX-BWRの10×10燃料集合体一体で、0から50GWd/tまで燃焼させたときの無限増倍率を計算したものである。MVP-BURNコードの結果は多群法に基づくVMONTの計算結果とよく一致している。

### 4. おわりに

MVP/GMVPコード第2版を公開したのを機に本稿でコードの特徴や新機能について紹介させていただいた。MVP/GMVPコードはこれで開発が終了したのではなく、より使いやすく、機能の充実した炉心解析コードを目指して現在も改良が進められている。現在開発中の機能としては、固有値問題における密度摂動計算機能<sup>18)</sup>、実効遅発中性子割合や中性子世代時間といった動特性パラメータ計算機能、群定数作成機能、高エネルギー粒子輸送計算<sup>16)</sup>があり、これらの機能も将来のバージョンアップで公開していく予定である。更

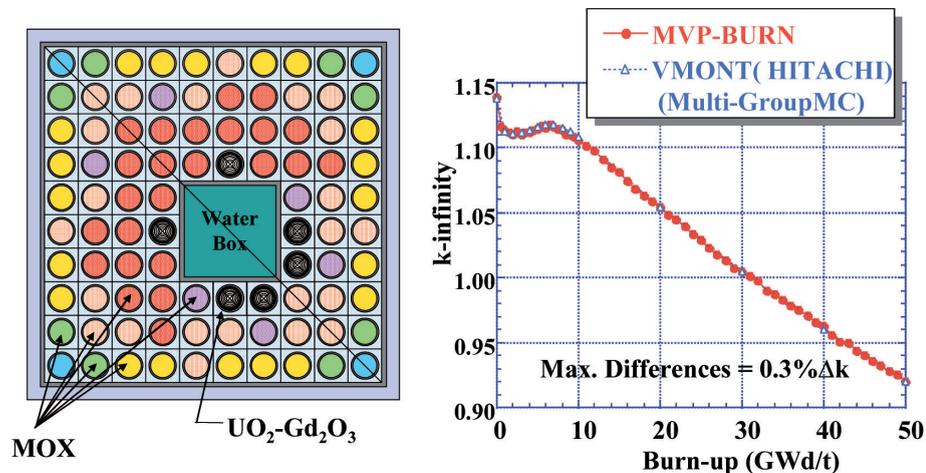


図11 MOX-BWR集合体についてのOECD/NEA/NSCベンチマーク問題

には、固有値問題における核分裂源の収束加速法とその収束判定法、ドップラー反応度計算(温度摂動計算)、動特性計算の手法開発も検討している。

MVP/GMVPコードの開発には現在原子力機構の核設計技術開発グループ森貴正氏、奥村啓介氏、筆者が携わっており、コードへの要望、コメントなどがありましたら、これら開発者の所へ知らせていただきたい。これからもユーザからの情報を基に使いやすいコードへと改良していくつもりである。

最後に、第2版の公開にあたり、当初から開発に携わられてきた中川正幸氏、故佐々木誠氏には多大なる貢献をしていただき、総合技術総合機構の金子邦男氏、清水建設の小迫和明氏には技術的サポートをしていただいた。また、旧原研内及び所外のユーザからは有益な情報を頂いた。ここに感謝の意を表したい。

#### 参考文献

- 1) Mori, T. and Nakagawa, M. : JAERI-Data/Code 94-007 (1994).
- 2) Nagaya, Y, et al. : JAERI 1348 (2005).
- 3) Nakagawa, M. et al. : Nucl. Sci. Eng., **107**, 58 (1991).
- 4) Nakagawa, M. et al. : Prog. Nucl. Energy, **24**, 193 (1990).
- 5) Mori, T. et al. : Monte Calro 2000 Conference, Lisbon, 23-26 October 2000, Proceeding p. 625 (2000).
- 6) Nagaya, Y., et al. : JAERI-Conf 2000-018, pp.80-91 (2001).
- 7) Yamashita, K., et al. : Nucl. Sci. Eng., **122**, 212 (1996).
- 8) Murata, I., et al. : Nucl. Sci. Eng., **123**, 96 (1996).
- 9) Murata, I., et al. : JAERI-Data/Code 96-016 (1996).
- 10) Mori, T., et al. : Trans. Am. Nucl. Soc., **83**, 283 (2000).
- 11) Nagaya, Y., et al. : "Analysis of the HTR-10 Initial Core with a Monte Carlo Code MVP", Physor 2004, April 25-29, 2004 Chicago, Illinois, (2004).
- 12) Mori, T., et al. : M&C99, 27-30 September 1999, Madrid, Spain, pp.987-996 (1999).
- 13) Mori, T., et al. : JAERI-Data/Code 96-018 (1996).
- 14) Mori, T., et al. : JAERI-Data/Code 2004-011 (2004).
- 15) Ueki, T., et al. : Nucl. Sci. Eng., **125**, 1 (1997).
- 16) Mori, T., et al. : Trans. Am. Nucl. Soc., **84**, 45 (2001).
- 17) Okumura, K., et al. : J. Nucl. Sci. Technol., **37**, 128 (2000).
- 18) Nagaya, Y. and Mori, T. : J. Nucl. Sci. Technol., **42**, 428 (2005).