論文

密度減少法で作成したウェイトウィンドウによる モンテカルロ計算分散低減に関する研究

佐藤 聡^{1,*}, 西谷 健夫²

A Study on Variance Reduction of Monte Carlo Calculation with Weight Window Generated by Density Reduction Method

Satoshi SATO^{1,*} and Takeo NISHITANI²

¹Fusion Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirane, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

²Fusion Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 801 Mukouyama, Naka-shi, Ibaraki 311-0102, Japan

(Received September 13, 2006 and accepted in revised form January 5, 2007)

Huge calculation time is required to evaluate neutron flux behind a shield in very large scale and complicated geometry such as a nuclear fusion reactor by Monte Carlo calculation. The density reduction method is proposed as a new methodology for the weight window generator on the variance reduction method to reduce calculation time in the present study. Calculation time can be drastically reduced by applying the density reduction method. It can be concluded that this method is very useful for the shielding calculation of very large scale and complex geometry such as a fusion reactor.

KEYWORDS: Monte Carlo calculation, variance reduction method, weight window, density reduction method, MCNP, shielding calculation, fusion reactor

I. はじめに

中性子輸送計算に関するボルツマン方程式を、モンテカルロ法で計算することにより、正確な幾何形状を有する計算モデルを用いて、中性子束を計算できる。モンテカルロ法による計算では、評価する位置にタリーを設置し、中性子束を評価する。したがって、統計誤差の小さい中性子束の計算解を得るには、タリーに、多くの中性子が到達することが必要である。核融合炉では、中性子線源領域であるプラズマを取り囲むように、ブランケット、真空容器、超伝導トロイダルコイル等が設置される。核融合炉のような大規模で複雑な体系の場合、例えば超伝導トロイダルコイルに十分な数の中性子が到達するには、多大な計算時間あるいは非現実的な計算時間を必要とする¹⁾。なぜならば、ブランケットや真空容器が厚い遮蔽体であり、深層透過問題を解くのに加えて、形状が大規模であるため、局所的な位置には粒子が集まり難いためである。

非アナログモンテカルロ法では、中性子のウェイトを制

御することにより、タリーに寄与しない位置での中性子輸送計算の処理数を減らし、無駄な計算を減らすことにより、計算時間を減らすことが可能である。空間ごとにインポートランスと呼ばれる値を設定することにより、ウェイトを制御できる。さらに、より有効にウェイトを制御する方法として、ウェイトウィンドウ法がある。ウェイトウィンドウ法とは、空間およびエネルギーごとに値を設定し、有効にウェイトを制御することにより、各々の中性子のウェイトを揃えて分散を低減させる手法である。これらの手法において、適切にインポートランスやウェイトウィンドウ(ウェイト下限値と上限値)を設定することにより、核融合炉のような大規模で複雑な計算形状において、多数の中性子をタリーで計測することが可能となる^{1,2)}。

核融合炉遮蔽設計では、セルの数が数千とある大規模で複雑な計算形状であり、各々のセルに、手動で有効なインポートランスやウェイトウィンドウを設定することは、非現実的である。現在世界で広く用いられているモンテカルロ計算コード MCNP³⁾には、自動的に有効なウェイトウィンドウを作成する機能として、ウェイトウィンドウジェネレータ(WWG)が備わっている。WWGでは、モンテカルロ計算に基づき、タリーへの各空間およびエネルギーごとの中性子の寄与を計算することにより、ウェイトウィンド

¹ ㈱日本原子力開発機構 核融合研究開発部門(東海駐在)

² ㈱日本原子力開発機構 核融合研究開発部門

* Corresponding author, E-mail: sato.satoshi92@jaea.go.jp

ウを作成している。核融合炉遮蔽設計計算においても、WWGを用いて、ウェイトウィンドウを作成している^{1,2)}。WWGの適用により、数千もある各々のセルに、自動的にウェイトウィンドウを設定することが可能となり、現実的な時間での計算が可能となる。しかしながらWWGによりウェイトウィンドウを作成するためには、タリーに中性子が到達する必要がある。核融合炉のような大規模で複雑な体系の場合、タリーに中性子が到達し、WWGにより有効なウェイトウィンドウを作成するにも、多大な計算時間や非現実的な計算時間を要する。そこで本研究では、有効なウェイトウィンドウの作成法として、密度減少法を提案し、有効性を検討する。

II. 計算手法

本研究で提案する密度減少法とは、遮蔽体の原子個数密度を一様に減少させることにより、仮想的に遮蔽体の厚さを薄くし、短い時間でタリーに中性子を到達させ、WWGによりウェイトウィンドウを作成することを可能とさせる方法である。密度減少によりウェイトウィンドウを作成後、原子個数密度をもとの値に置換し、作成したウェイトウィンドウを用いて計算することにより、計算時間を大幅

に短縮させる。**Figure 1**に、本研究で提案する密度減少法の計算手法を示す。あわせて、核融合炉遮蔽計算で用いられている標準的WWG法の計算手法も示す。破線枠内で囲んだ手法が標準的WWG法で、二点鎖線枠内で囲んだ手法が密度減少法である。標準的WWG法の詳細は以下のとおりである。

- (1) 計算形状を作成する。
 - (2) 評価位置にタリーを設置し、WWG用のターゲットとしてタリーを指定する。
 - (3) 体系全体で均一なインポートランスを設定して、モンテカルロ計算を行う。
 - (4) WWGによりウェイトウィンドウを作成する。
 - (5) 作成したウェイトウィンドウを用いて、モンテカルロ計算を行う。
 - (6) タリーでの中性子束等を計算する。
- 密度減少法の詳細は以下のとおりである。

- (1) 計算形状を作成する。
- (2) 原子個数密度を、体系全体で一様に減少させる。密度減少比係数を m とする。例えば、密度を一様に0.5倍に減少する場合は $m=0.5$ である。
- (3) 評価位置にタリーを設置し、WWG用のターゲット

Fig. 1 Methodology of the standard WWG method and the density reduction method

トとしてタリーを指定する。

(4) 体系全体で均一なインポートランスを設定して、モンテカルロ計算を行う。

(5) WWGによりウェイトウィンドウを作成する。

(6) 原子個数密度を、体系全体で一様に増加させる。密度増加比係数を n とする。例えば、密度を一様に1.5倍に増加する場合は $n=1.5$ である。密度増加比係数 n は $1/m$ 以下の値とする。すなわち $mn \leq 1$ である。

(7) 作成したウェイトウィンドウを用いて、モンテカルロ計算を行う。

(8) 上記(5)~(7)の処理を繰り返す。密度増加比係数 n を順次増加させ、 $mn=1$ となるまで本操作を繰り返す。例えば、 $m=0.5$ の場合、 $n=1.5, 1.8, 2$ と順次増加させ、最終的に $mn=1$ となるようにする。

(9) タリーでの中性子束等を計算する。

最適な密度減少比係数は、遮蔽体厚さや材質、計算形状、評価位置等に大きく依存する。核融合炉遮蔽計算の場合、高速中性子、例えば1 MeV以上のエネルギーの中性子のみを計算して、そのほかの計算は削除すること(エネルギーカットオフ)により、計算時間を大幅に短縮させることが可能である。したがって最適な密度減少比係数を求める方法として、暫定的に高エネルギー中性子に関して有効な密度減少比を、エネルギーカットオフを用いて減少比に対するパラメータ計算により求めた後、その密度減少比を初期値として、全エネルギーの中性子に関して減少比に対するパラメータ計算を行うことが有効である。

III. ベンチマーク計算

高さ2 m、幅2 m、厚さ1.5~2 mのSUS/H₂O遮蔽体に対して、DT中性子を照射し、非バイアス計算(ウェイトウィンドウを使用せずに均一なインポートランスでの計算)、標準的WWG法、密度減少法を用いて、中性子輸送計算を行い、各々の手法での計算時間を比較した。計算コードとしてMCNP-4C、核データライブラリーとしてFENDL-2.0⁴⁾を用いた。以下の2とおりのモデルに対して、計算時間を比較した。

(1) 均質モデル。SUSとH₂Oの比率は7:3。

(2) 非均質モデル。7 cm厚さのSUS層、3 cm厚さのH₂O層が交互に繰り返されているモデル。

Figure 2に非均質モデルの計算形状を示す。点中性子源を遮蔽体中心から10 cm離れた位置に設置し、14 MeVエネルギーを有する中性子を等方に発生させ、タリーを遮蔽体の背面に設置して、全エネルギーで積算した中性子束を計算した。遮蔽体中のセルは、深さ方向に、均質モデルの場合5 cmごと、非均質モデルの場合、SUS層、水層を各層1セルごとに分割している。タリーは、飛跡長評価法(track length estimator)を用いて、遮蔽体背面の体積平均(2 m×2 m×5 cm)の中性子束を評価した。計算はCompaq AlphaStation DS20E(クロック周波数500 MHz)を用

Fig. 2 Calculation geometry for heterogeneous shield

いて行った。標準的WWG法および密度減少法では、2段階の計算を行った。標準的WWG法では、「II. 計算手法」で述べた(1)~(3)の処理をステップ1、(4)~(6)をステップ2とする。密度減少法では、(1)~(4)の処理をステップ1、(5)~(9)をステップ2とする。ここでは、(6)の処理で $n=1/m$ とし、(8)の処理による繰り返し処理は行わない。標準的WWG法および密度減少法とも、ステップ1では、WWGによりウェイトウィンドウを作成することが目的であり、そのためにはWWG用のタリーで中性子を計測することが必要である。ここでは、1時間ごとに計算を行い、タリーで中性子を計測できるまでの時間を求めた。本研究の計算モデルでは、タリーに中性子が到達すると、すべてのセルを中性子が通過しており、各々のセルに対して、WWGによりウェイトウィンドウが作成される。ステップ2では、各々のセルに対して、作成されたウェイトウィンドウを適用した。ステップ2では、fsdが0.1以下の計算結果を得ることができる計算時間を求めた。

IV. 結果

Table 1に厚さ1.5 mの遮蔽体(均質モデル)の場合の非バイアス計算、標準的WWG法、密度減少法の結果を示す。密度減少法は、減少比 $m=0.8$ のときの結果である。fsdが0.1以下の計算結果を得るのに、標準的WWG法ではステップ1とステップ2の合計で15~16時間、密度減少法では2時間である。一方、非バイアス計算では、200時間の計算時間でfsdが0.36であり、0.1以下のfsdの計算結果を得るのには、2,500時間以上必要であることが予想される。したがって、標準的WWG法あるいは密度減少法を適用することにより、非バイアス計算に比べて、各々、150倍、1,200倍以上、計算時間の短縮が可能である。また密度減少法では、標準的WWG法に較べて、7倍以上、計算時間の短縮が可能である。

Figure 3に均質モデルの場合の遮蔽体厚さを関数とした標準的WWG法に対する密度減少法の高効率率 R を示

Table 1 Calculation results by uniform importance, the standard WWG method, the density reduction method for 1.5 m thick homogeneous shield, and comparison of calculation time for each method

		Calculation time	Total neutron flux	fsd
Uniform importance calculation		200 h	1.7×10^{-8} n/cm ² /sn ^{a)}	0.3559
Standard WWG method	Step-1	15 h	1.6×10^{-8} n/cm ² /sn	1.0000
	Step-2	16 min	1.4×10^{-8} n/cm ² /sn	0.0279
Density reduction (DR) method	Step-1	1 h	1.5×10^{-6} n/cm ² /sn	0.6102
	Step-2	1 h	1.4×10^{-8} n/cm ² /sn	0.0276

^{a)}sn : source neutron.

Fig. 3 Ratio of calculation time by the standard WWG method to that by the density reduction method

す。高速化率 R は、以下の式を用いて評価している。

$$R = (C_{S1} + C_{S2}) / (C_{D1} + C_{D2}).$$

C_{S1} は標準的 WWG 法でのステップ 1 の計算時間、 C_{S2} はステップ 2 の計算時間、 C_{D1} は密度減少法でのステップ 1 の計算時間、 C_{D2} はステップ 2 の計算時間である。密度減少法では、標準的 WWG 法に較べて、1.6 m の遮蔽体の場合で 10 倍、1.7 m の遮蔽体の場合で 30 倍、計算速度が高速化している。遮蔽体の厚さが増加するにつれて、密度減少法による高速化率が增加する。2 m の遮蔽体の場合では、標準的 WWG 法では、ステップ 1 において 240 時間の計算時間でも中性子束を計測することができないのに対し、密度減少法ではステップ 1 で 1 時間、ステップ 2 で 20 時間、合計 21 時間で fsd が 0.1 以下の中性子束を計算することが可能であった。

Table 2 に非均質モデル (厚さ 1.7 m の遮蔽体) の場合の標準的 WWG 法、密度減少法の結果を示す。密度減少法は、減少比 $m=0.7$ のときの結果である。fsd が 0.1 以下の計算結果を得るのに、標準的 WWG 法ではステップ 1 とステップ 2 の合計で 28~29 時間、密度減少法では 4 時間

Table 2 Calculation results by the standard WWG method and the density reduction method for 1.7 m thick heterogeneous shield, and comparison of calculation time for each method

		Calculation time	Total neutron flux	fsd
Standard WWG method	Step-1	28 h	2.7×10^{-8} n/cm ² /sn	1.0000
	Step-2	7 min	5.9×10^{-10} n/cm ² /sn	0.0903
Density reduction (DR) method	Step-1	3 h	8.7×10^{-7} n/cm ² /sn	1.0000
	Step-2	1 h	6.2×10^{-10} n/cm ² /sn	0.0928

である。非均質モデルにおいても、均質モデル同様、密度減少法を適用することにより、標準的 WWG 法に較べて、7 倍以上、計算速度が高速化している。

V. 考 察

標準的 WWG 法では、セルの数が数千とある核融合炉遮蔽設計計算のような大規模で複雑な計算形状に対しても、有効なウェイトウィンドウを作成することが可能である。しかしながら、大規模で複雑な計算形状の場合、WWG によりウェイトウィンドウを作成すること自体に多大な計算時間が必要である。一方密度減少法では、作成するウェイトウィンドウの有効性は、実際のものと原子個数密度が異なるため、標準的 WWG 法に較べて劣るものの、仮想的に遮蔽体厚さを薄くして計算して作成するために、短い時間でウェイトウィンドウを作成することができる。標準的 WWG 法では、現実的な時間では計算できないような問題でも、密度減少法を適用することにより計算が可能となる。

最適な密度減少比係数は、遮蔽体厚さ等により異なり、本研究のベンチマーク問題では 0.6~0.8 である。密度減少比係数をこれより小さな値にすると、ステップ 1 とステップ 2 の実効的な遮蔽体厚さの違いが大きく異なるため、ステップ 1 で作成されるウェイトウィンドウの有効性が低下する。密度減少比係数を小さくする場合、Fig. 1 で示すように、ステップ 2 で、密度増加比係数を順次増加させると有効である。2 m 厚さの遮蔽体に対して、3 段階の計算を行い、2 段階の計算と計算時間との比較を行った。3 段階の計算では、ステップ 1 では $m=0.6$ 、ステップ 2 では $n=4/3$ ($mn=0.8$)、ステップ 3 では $n=5/3$ ($mn=1$) とし、2 段階の計算では、ステップ 1 で $m=0.6$ 、ステップ 2 で $n=5/3$ ($mn=1$) とした。計算結果を **Table 3** に示す。表中の Density とは、 mn の値である。3 段階の計算では、合計 2 時間 12 分の計算時間で、fsd が 0.1 以下の中性子束を計算することが可能であり、2 段階の計算による計算時間 21 時間に比べて、約 1 桁計算時間を短縮化している。一方、標準的 WWG 法では、ステップ 1 において、240 時間の計算時間でも、中性子束を計測できず、したがって、3 段階の密度減少法を適用することによ

Table 3 Comparison of calculation time between results by the 3- and 2-step density reduction methods for 2 m thick homogeneous shield

		Density (mn)	Calculation time	Total neutron flux	fsd
Three step DR method	Step-1	0.6	1 h	6.2×10^{-7} n/cm ² /sn	0.7072
	Step-2	0.8	1 h	5.1×10^{-9} n/cm ² /sn	0.0403
	Step-3	1.0	12 min	2.6×10^{-11} n/cm ² /sn	0.0992
Two step DR method	Step-1	0.6	1 h	6.2×10^{-7} n/cm ² /sn	0.7072
	Step-2	1.0	20 h	2.9×10^{-11} n/cm ² /sn	0.0977

て、標準的 WWG 法に比べて、2 桁以上計算時間を短縮している。非常に厚い遮蔽体で密度減少比係数 m が小さい場合、多段階での密度減少法を適用することが、計算速度高速化において有効であるといえる。

VI. 結 論

核融合炉のような大規模で複雑な体系を、モンテカルロ法により計算する場合の分散低減手法に関して有効なウェイトウィンドウを作成する手法として、密度減少法を提案した。DT 中性子照射に対する 1.5 m 厚の SUS/水遮蔽体問題では、非バイアス計算に比べて1,200倍、標準的な WWG 法に比べて7倍以上、計算速度が高速化してい

る。遮蔽体が厚くなるに従って、高速化の度合いは大きくなり、2 m 厚の遮蔽体では、標準的な WWG 法に比べて2桁以上、計算速度が高速化している。本研究で提案している密度減少法は、大規模で複雑な問題を計算するのに非常に有効な手法であることを実証した。核融合炉遮蔽設計に対し、非常に有用な手法であると結論付けることができる。

本研究の遂行に当たり有益なコメントを戴きました、関昌弘、関 省吾、高津英幸の各氏に心より謝意を表します。

— 参考文献 —

- 1) S. Sato, H. Iida, "Monte Carlo analyses for ITER NBI duct by 1/4 Tokamak model," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Supple. 1**, 258 (2000).
- 2) S. Sato, H. Iida, T. Nishitani, "Evaluation of shutdown gamma-ray dose rates around the duct penetration by three-dimensional Monte Carlo decay gamma-ray transport calculation with variance reduction method," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 1237 (2002).
- 3) J. F. Briesmeister (ed.), *MCNP-A General Monte Carlo N-particle Transport Code, Version 4C*, LA-13709, Los Alamos National Laboratory (2000).
- 4) M. Herman, *Report on an IAEA Consultant' Meeting on Validation and Improvement of the FENDL-2.0 Transport Sublibraries*, IAEA (NDS)-395, IAEA (1999).