

中性子ストリーミング計算に対する モンテカルロカップリング法の有効性

植木 紘太郎*

Availability of the Monte Carlo Coupling Technique for Three-Dimensional Neutron Streaming Calculation

By

Kohtaro UEKI

Abstract

Two three-dimensional neutron streaming problems are analyzed by using the Monte Carlo coupling technique. One is streaming through a two-legged cylindrical-annular duct and the other is streaming through a slit. The main advantage of breaking the problem into two Monte Carlo calculations is that it is then not necessary to repeat the calculation of neutron transport from the reactor to the pseudo-detector when the duct or the slit configuration is changed. The coupling technique provides a remarkable improvement in both the calculated results and the fractional standard deviations as compared with usual Monte Carlo calculations.

The agreement between the measured reaction rates and the calculated values is quite satisfactory. The calculated values using the coupling technique agree with the measured values within a factor of 2 for $\text{In}(n, n')$ and $\text{Ni}(n, p)$ threshold detectors in the two-legged cylindrical-annular-duct problem, and agree within a factor of 3 with results from cadmium-covered gold activation detectors and from $\text{In}(n, n')$, $\text{Ni}(n, p)$, and $\text{S}(n, p)$ threshold detectors in the slit problem. However, there is a relatively large discrepancy between the calculated and the measured values from the cadmium-covered gold activation detector in the cylindrical-annular-duct problem.

目 次

1. はじめに.....19	3.1 スリットストリーミング問題について25
2. 中性子ストリーミング実験の計算モデルと計算 の 詳細.....21	3.2 二回屈曲二重円環ダクトストリーミング問 題について26
2.1 中性子ストリーミング実験のモデル化21	4. 結 論.....29
2.2 計算の詳細22	謝 辞.....29
3. 考 察.....25	

1. はじめに

確率論を応用したモンテカルロ法は放射線輸送問題を解く非常に有用な手段として、今日広く使われている。

モンテカルロ法の特長は、まず、取り扱う遮蔽形状が複雑でも、あまり気にせずに計算に取り入れることができること、およびボルツマン輸送方程式を近似なしに解くことができる、という二点にある。ここで、モンテカルロ計算の信頼性は求める量の統計誤差(分散)の大小によって判定される。特に深層透過問題では粒子からの求める量への寄与する確率が非常に小さいので、線源から遠く離れた位置に置かれた検出器

* 原子力船舶 原稿受付: 昭和56年12月14日
本論文は米国原子力学会論文集(本文の文献18)に掲載されたものであるが、本手法を国内でより広く利用できるよう和文にしたものである。

付近の粒子の衝突密度を十分得るためには、インポートランスサンプリング等、何らかの技法を採用しなければならない。このような技法を用いることによって、一般に、妥当な結果と標準偏差の低減が得られる。

本報告ではモンテカルロ解析の対象として日本原子力研究所の JRR-4 研究炉を使った二つの中性子ストリーミング実験を選んだ。一つは大きな黒鉛体中につくられた細いスリットの中性子ストリーミング問題¹⁾で、もう一つは大きなスイミングプール中に設置された二脚の二重円環ダクトの中性子ストリーミング問題²⁾である。前者はスリット中性子ストリーミング問題、後者は二脚の二重円環中性子ストリーミング問題と呼ぶことができる。これら二つの実験で形状の特徴は、中性子源からスリットあるいは二重円環ダクトの入口はかなり離れており、しかもその間は水遮蔽体で満されている。線源領域は共に JRR-4 の炉心である。しきい検出器や放射化検出器がこのスリットあるいは二重円環ダクトの中に置かれている。

最近、ダクトストリーミング問題を手際良く解析するために、Tang^{3,4,5)} らはディスクリートオーディネイトコード DOT で求めた event value および point value 関数を、それぞれ粒子の飛程および散乱角をバイアスするためのインポートランス関数とし、厚いコンクリートの中心軸にダクトのある問題の forward モンテカルロ計算に用いる技法を開発した。Ueki と Stevens は⁶⁾モンテカルロコード MORSE¹³⁾ コードで求めた event value および point value 関数を、それぞれ粒子の飛程および散乱角をバイアスするためのインポートランス関数として用いる技法を開発し、Tang らとほぼ同一のダクト問題に適用してその有効性を実証した。さらに、iterative forward-adjoint モンテカルロ法⁷⁾を Tang らと本質的に同一の問題に採用し、良い結果を得ている⁶⁾。これらのモンテカルロ法に係る技法は線源領域から遠く離れた位置の粒子の衝突密度を増加させることを狙ったもので、その結果、標準偏差を低減するためにも有効である。Tang らのコンクリートダクト中性子ストリーミング問題は 14 MeV の高速中性子が円筒底面に一様に分布しており、線源面と円筒底面との間には少しの空間もない。したがって、たとえそのダクトの直径が短かくとも（直径 6 インチ）、いくらかの線源粒子は必ずダクト方向を向くことになる。それなので、ダクトに入る線源粒子の確率は、容易に、線源粒子バイアス法によって増加させることができる。しかし、一般には線源領域と問題と

する領域は接していない。このような場合、飛程バイアスあるいは散乱角バイアスをして、従来の線源領域を含めた全体系を一回の計算で解くモンテカルロ計算（以下一回のモンテカルロ計算と呼ぶ）では満足すべき意味のある結果を得ることは困難であろう。また、ディスクリートオーディネイト法でも通常の角度分点数では満足する結果は得にくい。

最近では大きな複雑形状の問題に対して計算体系を分割し、モンテカルロ法を主体にした計算が行なわれている。Chilton らによって、リブの付いた平板のガンマ線遮蔽効果の解析が行われた^{8,9)}。この方法はまずリブなしの平板について計算し、次にリブの付く面の角度束 (angular flux) を線源条件としてリブの付いた形状の計算を実施する。遮蔽体系をモンテカルロ計算で分割しながら行う、という概念は、FANO 等¹⁰⁾の文献にモンテカルロ計算の相関タイプ (correlated type of Monte Carlo calculation) として紹介されている。また、ディスクリートオーディネイトコード、DOT とモンテカルロコード、MORSE とをカップリングする DOMINO コード¹¹⁾が米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発され、大きな体系や複雑な形状の遮蔽計算に用いられている。この DOMINO コードはエネルギー、空間、および角度フルエンスの累積分布関数 (cumulative distribution function) を用意し、次の MORSE コードの線源のインプットデータを与える。最近、Santro らは¹²⁾、この DOT-DOMINO-MORSE コードシステムを使って、トカマク型核融合炉の中性粒子入射孔の二次元および三次元中性子工学の解析を行い、良い結果を得た。核融合炉の線源領域、即ち、プラズマ領域は二次元の同心多重円環円筒としてかなり良く模擬できる。したがって、線源領域は二次元の DOT コードでも計算できる。また、中性粒子入射孔は一種の真空ダクトであり、線源領域と検出器の置かれた建屋との間を結んでいる。それなので、プラズマ領域で発生した中性子は容易にダクトを通し、建屋内に入る。このような状況はモンテカルロ法の適用の際の難しさを取り除くことになる。

本報告の目的は次のような二点を解決することにある。

- 1) 線源領域も三次元的取り扱いをする。
- 2) ダクトを持った遮蔽体系全体を近似なしに解析する。

本研究におけるモンテカルロカップリング法¹³⁾は MORSE コードを用いたものであり、DOT-DOMINO-

MORSE コードのように複雑な座標軸変換の必要性が全く無いという利点も併せ持っている。

モンテカルロカップリング法による計算は実験値と比較し十分良い一致を示し, fsd (fractional standard deviation) も従来の 1 回のモンテカルロ計算と比較し, 著しく改善される, という点を実証する。第 3 章は 2 つの三次元中性子ストリーミング問題, 計算の手続き, それにカップリング法の考え方について述べる。第 3 章は詳細な計算結果, 計算値と測定値との比較および検討, さらに, カップリング法の特性を内容とし, 最後に得られた結論を第 4 章で述べる。

2. 中性子ストリーミング実験の計算モデルと計算の詳細

2.1 三次元中性子ストリーミング実験の計算モデル

JRR-4 原子炉で実施された 2 つの三次元中性子ストリーミング実験をモンテカルロ解析の対象として選んだ。モンテカルロ計算で採用した計算モデルを Fig. 1 および Fig. 2 に示す。これら 2 つの実験は形状に共通点がある。即ち, 中性子源領域が JRR-4 の炉心であること, その炉心とスリットあるいは円環円筒ダクトの入口との間には水領域があること, さらに, スリットの幅あるいはダクトの直径が細いことの三点である。このような状態にあっては, 従来の 1 回のモン

テカルロ計算では, 炉心で発生した中性子がこの水層を透過してスリットあるいはダクトの入口に達する確率は非常に少ない, と予想される。その結果, 実際的な線源粒子数による 1 回のモンテカルロ計算では, 測定値と比較して良い一致を得ること, また, かなりよい fsd を得ることは困難であると考えられる。モンテカルロカップリング法は実際的な線源粒子数で妥当な値を得ることを狙ったものである。

スリット中性子ストリーミング問題の形状は Fig. 1 のようなものである。JRR-4 の炉心の中央から黒鉛ブロック中のスリットの入口までの距離は 104.5 cm あり, その内訳は, 炉心の部分が 20 cm, 反射体の厚さが 25 cm, アルミ板の厚さが 1.5 cm, 水遮蔽体が 26 cm, そして鉄板の厚さ 32 cm になっている。スリットの大きさは 80×80 cm で, 幅が W cm である。実験は W の幅が 2 通りについて実施されているが, モンテカルロカップリング法ではそのうち W が 1 cm についてのみ解析した。この理由は, モンテカルロカップリング法の有効性はスリットのより細い方を解析することによって, より明瞭になると考えられたからである。スリットの 5 箇所に, カドミウムのカバーをしたものと, カバーの無い金の放射化検出器, マグネシウム, インジウム, それに硫黄のしきい検出器が設置された。

もう 1 つの, 二脚の二重円環円筒中性子ストリーミ

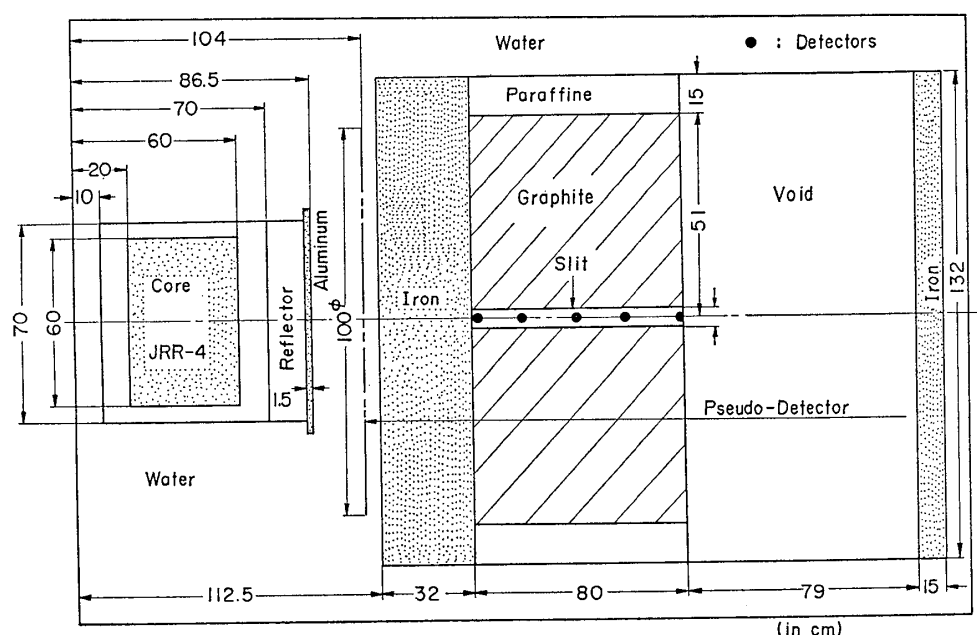


Fig. 1 Calculational model for the JRR-4 slit-streaming experiment. Detector locations shown by solid circles. Dimensions are in centimetres.

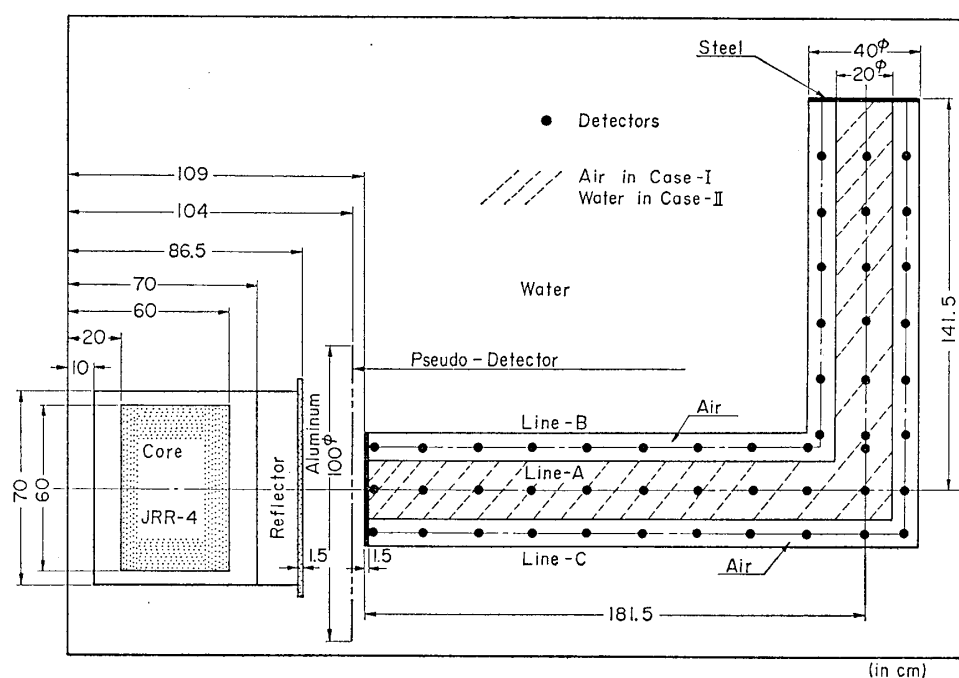


Fig. 2 Calculational model for the JRR-4 two-legged cylindrical-annular-duct streaming experiment. Dimensions are in centimeters.

ング問題の計算モデルは Fig. 2 のようなものである。炉心の中心からダクトの入口までの距離は 69 cm である。その内訳は、炉心が 20 cm、反射体の厚さが 25 cm、アルミ板の厚さが 1.5 cm、それに水遮蔽体の厚さが 22.5 cm である。ダクトは JRR-4 のプール中に設置されている。ダクトの外径は 20 cm で、内径は 10 cm である。二重円環円筒ダクトの中心部は実験ケースⅠは空気で満たされており、実験ケースⅡでは水であった。本報告のモンテカルロ計算は全て実験ケースⅡの形状である。計算で求めた反応率は、カトミウムでカバーした金の放射化検出器、および、インジウム、ニッケル、それにアルミニウムのしきい検出器についてである。

2.2 計算の詳細

モンテカルロカップリングの計算系として、MORSE-to-MORSE カップリングコードシステムを採用した。Fig. 3 に 2 つの三次元中性子ストリーミング実験を解析したモンテカルロカップリング法の流れを示す。

カップリング法の最初のモンテカルロ計算は、Fig. 2 に示したような直径 100 cm の仮想円板検出器 (pseudo-disk detector) における、角度、エネルギー、それに全フルエンスの中性子空間分布を得るために実行される。この仮想検出器は 5 個の等間隔の円環に

分割される。5 個の円環に対する半径方向の全フルエンス分布を Fig. 4 に示す。5 個の円環で最大の全フルエンスは半径が 20~30 cm の第 3 円環に表われており、その後、全フルエンスは半径が大きくなるにつれて次第に減少している。したがって、カップリング法の第 2 のモンテカルロ計算の線源条件を与える最初の計算として、検出器の半径は 50 cm で十分であると判断した。角度、エネルギー、および全フルエンスの確率密度関数 (probability density function, pdf) が手直したルーチンを使った MORSE コードで、各々の円環について、最初の計算で用意される。またサブルーチン SOURCE は第 2 のモンテカルロ計算の境界面 (仮想検出器) から線源粒子を発生できるように、上記の pdf を読み込み保存するように改訂した。また、サブルーチン SDATA は既存の MORSE コードに用意されている SDATA と矛盾なく境界線源条件をモンテカルロ計算に取り入れられるように修正した。

点検出器に対する寄与を表わす CON は、既存の SDATA では次のようになっている。

$$CON = [WATE \cdot \exp(-mfp)] / 4\pi r^2 \quad (1)$$

ここで、

CON = 衝突点からのフルエンスへの寄与

WATE = 衝突した後の粒子の統計的重み

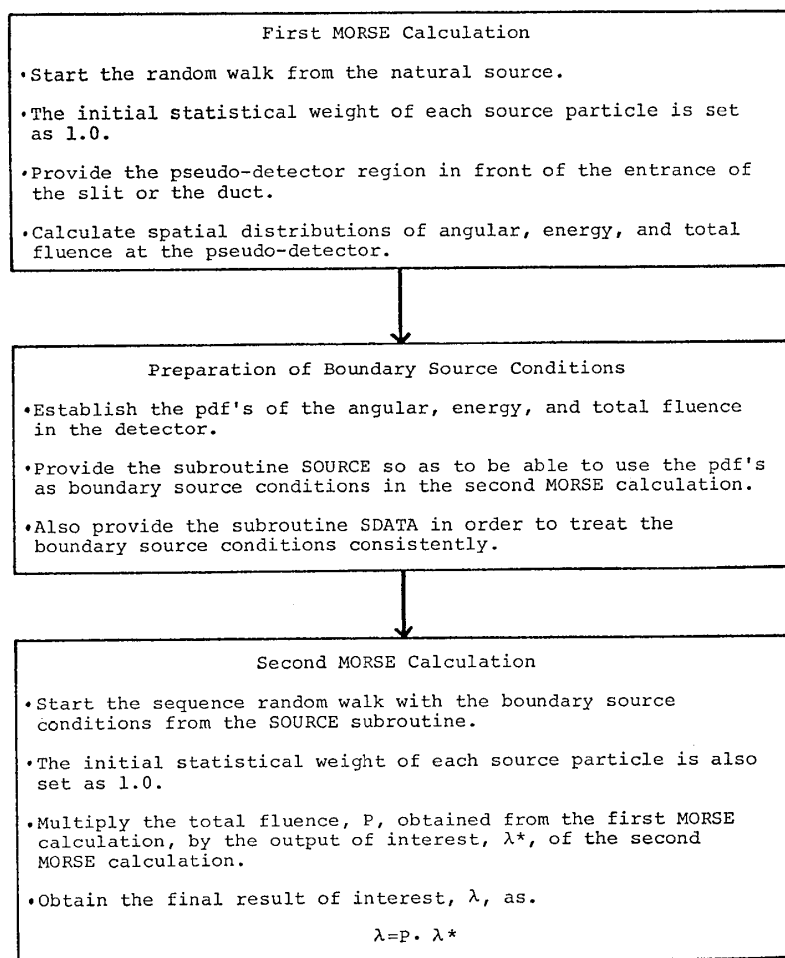


Fig. 3 Calculation sequences of the Monte Carlo coupling technique (MORSE-to-MORSE coupling code system).

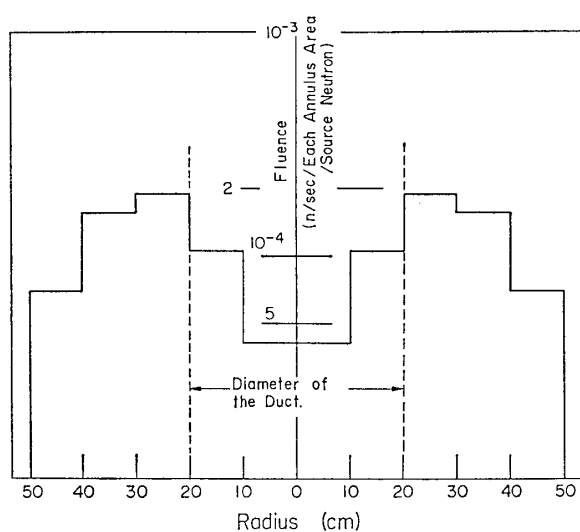


Fig. 4 Radial distribution of total fluence for each annulus of the disk source located at $Z=104$ cm in Fig. 1 or 2.

mfp = 検出器と衝突点間の平均自由行程

r = 検出器と衝突点間の光学的距離

しかしながら、カップリング法の第2のモンテカルロ計算の線源は等方ではなく、極角 (polar angle) について非等方の空間分布をする。したがって、改訂したSDATAのCONは次のように表わされる。

$$\text{CON} = \text{WATE} \cdot \exp(-mfp) \times [P_s(\Delta\theta_i)/(2\Delta\theta_i)(2\pi r^2)^{-1}] \quad (2)$$

ここで、

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1}$$

$P_s(\Delta\theta_i)$ = 粒子が微小間隔、 $\Delta\theta_i$ で表われる確率、

$$\sum_i P_s(\Delta\theta_i) = 1.0$$

θ = 極角

$\Delta\theta_i$ = 本報告のMORSE計算では全て $0.25sr$ とした

第2のモンテカルロ計算は、改訂したサブルーチン、

SOURCE を使って、仮想検出器を境界線源にして粒子の追跡 (random walk) を開始する。この境界線源から発生する中性子の初期の重み (initial statistical weight) は 1.0 を与える。最終的に求める量 (final quantity of interest), λ は第 1 のモンテカルロ計算による仮想検出器のレスポンス (全フルーエンス) に、第 2 の計算による結果を乗じて求める。即ち、

$$\lambda = P \cdot \lambda^* \quad (3)$$

ここで、

P = 最初の計算による仮想検出器の全フルーエンス

λ^* = 第 2 のモンテカルロ計算における検出器の求める量

しきい検出器の反応率は (3) 式を次のように改訂し、計算する。

$$\text{反応率} = S_0 \cdot P \cdot R_p \cdot \lambda^* \quad (\text{reaction/W} \cdot \text{s}) \quad (4)$$

ここで、

S_0 = $W \cdot s$ 当りの線源中性子数

$$= 7.65 \times 10^{10} \text{ n/W} \cdot \text{s}$$

R_p = しきい検出器のレスポンス

$$= \text{反応断面積 (cm}^2\text{)}$$

スリットおよびダクトの実験形状は異なっているが、しかし、中性子線源領域 (JRR-4 の炉心) は Fig. 1 および 2 に示したように全く同一である。したがって、仮想検出器を最初の計算で中性子分布に対しスリットあるいはダクトの影響を受けない位置に設定すれば、その仮想検出器の境界線源条件は第 2 のモンテカルロ計算の共通の線源として採用することができる。本報告では、仮想検出器の中性子空間分布を求めるのに 10,000 個の線源粒子を発生させた追跡を行った。そして、(3) 式の P は仮想検出器に対し、 5.592×10^{-4} (0.108) n/cm^2 であった。括弧内の数字は fsd であり、 0.108 という値は十分良い値である。仮想検出器の位置は Fig. 1 および 2 で炉心から 54 cm の水遮蔽体中にあり、Fig. 1 ではスリットの入口の前に置かれた鉄層より 8.5 cm 炉心寄り、また、Fig. 2 ではダクトの入口から 5 cm 炉心寄りの水中に設置された。したがって、この仮想検出器の中性子空間分布は検出器後方の形状に影響されることなく、共通の境界線源条件として第 2 のモンテカルロ計算に採用できると判断される。

モンテカルロカップリング法の有効性を実証するために、普通の一回のモンテカルロ計算をスリット問題に対し MORSE コードを使って実施した。しかし、一回のモンテカルロ計算では数千ヒストリーの計算で

(112)

はスリット周辺の衝突密度は非常に小さく、評価に耐えられない程の検出器位置があった。カップリング法の第 2 の計算はスリット問題では 8,000 粒子、ダクト問題では 10,000 粒子を境界線源条件にしたがって発生させて追跡した。普通の一回のモンテカルロ計算は 5,000 粒子を発生させて MORSE コードで実施した。

全ての MORSE コードによる計算に使用した群定数について述べる。群数は 15 グループで、ENDF/B-IV (文献 14) を基本ライブラリーにして作成した 100 群のデータを、一次元 ANISN コード¹⁶⁾を組み入れた RADHEAT-V3 コードシステム¹⁵⁾を使って縮約したものである。散乱断面積は全てルジャンドルの展開係数を P_3 まで用意した。また、放射化箔およびしきい検出器の反応断面積の 15 群ライブラリーも同様な手続きで作成した。この 15 群ライブラリーのうち最初の 14 群が MORSE コードでの解析で使用された。第 15 群は熱中性子に対応しているエネルギー群である。

カップリング法の最初の MORSE 計算は、仮想円板検出器の中性子フルーエンス空間分布を求めるために next-event surface crossing estimation を使用する。ダクト問題の第 2 の MORSE 計算ではライン A 上の点検出は Fig. 2 に示すように水の中に置かれている。MORSE コードのサブルーチン RELCOL で採用している点検出器に対する next event estimation は (5) 式のように書かれる。その結果、粒子の衝突が点検出器の非常に近い所で起きたとき next-event estimation には重大な問題が発生する。即ち、 $r \rightarrow 0$ のとき $\text{CON} \rightarrow \text{無限大}$ 、となる。この矛盾を取り除くために、粒子の衝突がの中で起きたときは next-event surface crossing estimation を採用する。この手続きは次のように書き表わせる。

$$\text{CON} = \text{WATA} \cdot \exp(-mfp) \cdot P(\theta)/r^2, \quad r > r_0 \quad (5)$$

$$= \text{WATE} \cdot \exp(mfp) |\vec{n} \cdot \vec{\Omega}| / \text{AREA}, \quad r \leq r_0 \quad (6)$$

ここで、

$P(\theta)$ = 衝突した粒子が点検出器に向うステラジアン当りの確率

$\vec{\Omega}$ = 検出器をよぎるときの粒子の方向

$\vec{n}$ = 粒子が検出器をよぎる点において検出器の面に立てた単位法線ベクトル

AREA = フルーエンスを求める検出器面の面積

(6) 式は (5) 式と一諸にして改訂したサブルーチン

RELCOL に組み込まれる。本報告では半径 r_0 として 1.0 cm, また, AREA の半径 r_a は 2.0 cm が用いられた。スリット問題およびダクト問題の空気は真空として計算したので, 点検出器であっても空気中に置かれたものは水中のような重大な問題は発生しない。粒子の飛程長を伸ばすために, DIREC 関数と exponential transform の係数 PATH を 0.6 とした MORSE 計算を行った。また, ルシアンルーレット (Russian Roulette) が全ての計算に使われた。

3. 計算結果と考察

3.1 スリットストリーミング問題

1つの放射化箔検出器と3つのしきい検出器に対するスリット中性子ストリーミング問題の反応率の計算と実測との比較を Table 1 に示す。スリットの幅は全ての計算で 1 cm である。しかし, スリットの実験では入口に最も近いカドミカバーの金検出器は幅がゼロであった。また, Table 1 には 1 回の MORSE 計算結果も示されている。ここで述べるモンテカルロカッ

プリング計算では, 最初の計算の仮想検出器における fsd は第2の計算に伝播しないものと仮定している。これは, iterative forward-adjoint Monte Carlo 法⁷⁾や, recursive Monte Carlo 法¹⁷⁾でも fsd の伝播を考えていないことに順じたものである。

Table 1 はカドミカバーの金検出器の反応率を示している。この金検出器は熱外中性子 (epithermal neutron) に対しては大きな反応断面積を持っているが, 高速中性子に対しては反応断面積はほとんどゼロである。測定値と比較から, MORSE-to-MORSE カップリング計算で得た値の方が, 普通の 1 回の MORSE 計算による値よりもはるかに一致性が良い事が明白である。1 回の MORSE 計算では全ての検出器の位置で 100 倍程度測定値を下回る反応率になっている。一方, MORSE-to-MORSE カップリング法による計算結果は係数 2 (a factor of 2) 以内で, 全ての検出器位置において一致するという非常に良い値となっている。さらに, カップリング計算は 1 回のモンテカルロ計算に比べ, 線源粒子数の違いを考慮しても fsd が十

Table 1 Comparison of reaction rates between measured, single MORSE, and MORSE-to-MORSE coupling calculations in the slit problem.

(Rates are expressed in reaction/W·s. Slit width is 1 cm except as noted.)

Distance from the Slit Entrance (cm)	Measured	Single MORSE (5000 Histories)		MORSE-to-MORSE Coupling (8000 Histories)	
Cadmium-Covered Gold Detector					
0	1.25 ^a -20 ^b	1.444-22	0.653 ^c	2.354-20	0.551
20	8.50 ^a -21	3.565-22	0.820	2.491-20	0.658
40	1.55-21	1.143-23	0.646	2.002-21	0.467
60	1.80-22	1.853-24	0.663	1.540-22	0.333
80	1.60-23	6.204-25	0.790	3.154-23	0.323
Sulfur Detector					
0	5.30-25	4.861-25	0.707	1.027-24	0.333
20	1.15-25	1.427-25	0.679	1.797-25	0.355
40	2.60-26	1.588-26	0.560	1.874-26	0.350
60	7.20-27	2.905-27	0.651	4.570-27	0.331
80	2.70-27	2.147-27	0.758	1.830-27	0.322
Indium Detector					
0	1.15-24	1.501-23	0.811	3.793-24	0.189
20	3.05-25	4.569-24	0.583	4.851-25	0.227
40	5.40-26	2.754-25	0.634	7.254-26	0.334
60	1.10-26	6.210-26	0.597	2.910-26	0.417
80	3.20-27	6.333-26	0.841	1.623-26	0.444
Magnesium Detector					
0	1.35-26	1.459-28	0.229	1.372-26	0.579
20	4.00-27	2.264-27	0.984	1.087-26	0.567
40	8.50-28	3.664-28	0.972	2.104-27	0.623
60	2.50-28	4.452-29	0.953	4.781-28	0.634
80	1.30-28	6.988-30	0.900	1.475-28	0.600

^aSlit with zero.

^bRead as 1.25×10^{-20} .

^cFractional standard deviation.

分良くなっている。2.2 章で述べたように、1 回のモンテカルロ計算では 5,000 ヒストリー、カップリング計算では 8,000 ヒストリーをそれぞれ追跡した。したがって、カップリング計算では 1 回のモンテカルロ計算と比べ、線源粒子数が多い事によって係数 $1/1.265$ だけ良くなると期待できる。1 回の MORSE 計算ではスリット中の全ての検出器位置で得られた fsd は >0.6 であった。一方、カップリング計算で得られた fsd は $0.3\sim0.65$ であり、期待された係数 $1/1.265$ を上回っている。しかし、金検出器の fsd はまだ十分良いとは言えない。Fig. 1 の黒鉛領域における熱外中性子は多重散乱を経験しているため、その結果、モンテカルロ計算では高速中性子の比較して重みの統計的偏差が大きくなる。

Table 1 にはインジウム検出器に対する反応率も記載されている。インジウム検出器はしきい値が 1.5 MeV であり、3 つのしきい検出器の中で最も低いしきいエネルギーである。実測値と比較して、カップリング法を用いた計算結果は入口から最も遠い 80 cm の位置を除いて、係数 3 以内で一致する。検出器が 80 cm の位置では係数 5 だけ測定値より大きくなっている。一方、普通の 1 回の MORSE 計算ではスリットの入口で係数 8 だけ測定値を下回り、入口から最も遠い 80 cm の位置では逆に 20 倍も大きいという悪い結果に終わっている。カップリング法による計算では fsd は $0.2\sim0.4$ であり、特に最初の 2 箇所の検出器は ~0.2 である。これは、それぞれの位置で 1 回の MORSE 計算に比べ係数 3、および 4 も改良されていることが分る。また、残りの 3 箇所の検出器位置においてもカップリング法を用いることによって、係数 2 だけ fsd が改良されている。

また、しきいエネルギーが 2.7 MeV の硫黄検出器についても Table 1 に示してある。この場合は MORSE-to-MORSE カップリング計算も普通の 1 回の計算も実測値と比較し、全ての検出器位置で係数 2 以内で良い一致を示している。fsd についてはカップリング計算では $0.32\sim0.35$ であるのに対し、1 回の MORSE 計算では $0.56\sim0.76$ と大きい値になっている。したがって、fsd に関する改良は係数 2 であり、勿論、期待できる係数 $1/1.265$ 以上良くなっている。

しきいエネルギーが 7 MeV のマグネシウム検出器の反応率についても Table 1 に集約されている。ウラン-235 の核分裂で 7.0 MeV 以上のエネルギーを持った中性子の発生は非常に少ない。したがって、たとえ

線源エネルギーバイアスを実施しても、このマグネシウム検出器に対する fsd の改良はあまり期待できない。測定した反応率と比較し、1 回の MORSE 計算による結果は最大で 100 倍、最小で 2 倍だけ小さい値になっている。しかし、カップリング計算では実測値に対し全ての検出器位置で係数 2 以内であり、十分満足すべき一致である。fsd はカップリング法の採用によって低減したものの、まだ、全ての計算点で >0.5 である。

以上の考察から次のような事が結論づけられる。

1. カップリング計算で得られた反応率と実測値との一致はスリット中の全ての検出器位置で十分満足できる。
2. また、カップリング法を用いることによって fsd は明らかに改良される。
3. 計算値と測定値との十分良い一致、および fsd の著しい改善はカップリング法によって、スリットの周辺における中性子の衝突密度の実質的増加が得られたことによる。
4. したがって、モンテカルロ計算で優れた fsd とされている 0.1 も、インジウムおよび硫黄のしきい検出器に対しては数万ヒストリーの中性を追跡すれば達成できると予測される。

3.2 二脚の円筒円環ダクトスリーミング問題

二脚の円環円筒ダクト問題の 1 つの放射化箔検出器と 3 つのしきい検出器に対する計算値と測定値との比較を Table 2, 3 および 4 に示す。すでにスリット問題でモンテカルロカップリング法の有効性が実証され、また計算結果と実測値との一致も十分良いことが 3.1 章で明確になった。したがって、このダクト問題では、全ての計算はカップリング法を用いて実施した。

Table 2 はしきいエネルギーが 2.8 MeV のニッケル検出器に対する反応率を示したものである。検出器は Fig. 2 のライン A、即ち、水中に置かれている。表の x, z は検出器の位置であり、 x は第 1 脚の軸に沿っており、は第 2 脚の軸に沿っていて、 x 軸と直角に交わっている。MORSE-to-MORSE カップリング計算によって得られた反応率は、Table 2 から分るように、全ての検出器位置で係数 1.5 以内で非常に良い一致を示している。fsd は $0.18\sim0.64$ である。第 1 脚の最初の 4 つの検出器位置では fsd がおよそ 0.2 である。しかし、その他の位置では $0.27\sim0.64$ と大きい。注目すべきは、最も入口から離れた検出器位置、即ち A-14 におけるニッケルの反応率の実測値との一

Table 2 Comparison of reaction rates between measured and MORSE-to-MORSE coupling calculations in the two-legged cylindrical-annular-duct problem.

Detector Location ^a (cm)			Nickel Detector Reaction Rate (reaction/W·s)		
Line A (in water)	x	z	Measured	MORSE-to-MORSE Coupling (10000 Histories)	
A- 1	3	0	2.47-22	1.939-22	0.179 ^b
2	20	---	2.59-23	2.782-23	0.209
3	40	---	4.53-24	5.737-24	0.240
4	60	---	1.36-24	1.295-24	0.199
5	80	---	5.88-25		
6	100	---	3.39-25	4.221-25	0.430
7	120	---	2.13-25		
8	140	---	1.46-25	9.836-26	0.457
9	160	---	1.18-25	9.639-26	0.508
10	180	---	1.25-25	9.030-26	0.643
11	---	15	3.78-25		
12	---	20	3.76-25	4.227-25	0.270
13	---	40	8.93-27	1.624-26	0.276
14	---	60	1.13-27	1.498-27	0.454

^aAll detector locations were in the plane of Fig.2.

^bFractional standard deviation.

致が、ダクトの入口、即ち A-1 における一致と同程度に良い点である。その結果、カップリング法を用いたことにより、ダクトの中および周辺で高速中性子の適当な衝突密度が得られたものと判断できる。

Table 3 はカドミウムカバーの金放射化検出器、およびインジウム、ニッケル、アルミニウムしきい検出器に対する反応率を集約したものである。これらの検出器は全て Fig. 2 の空気中にある line B 上に置かれている。金検出器に対する計算結果は、第1脚では係数3以内で測定値と一致し、第2脚では係数2以内で良い一致を示している。第1脚の fsd は 0.25~0.38 であり、熱外中性子の fsd としてはかなり良い値であるが、しかし、第2脚中では 0.53~0.65 と大きい。インジウム検出器については計算値は全ての検出器位置で実測値と係数2以内であり、十分満足すべき一致を見ている。第1脚中の fsd は 0.08~0.15 であり十分良い値である。しかし、第2脚では 0.17~0.58 である。第1脚中の fsd が良い理由としては、①境界線源から発生した非散乱中性子の寄与が相対的に大きい

Table 3 Comparison of reaction rates between measured and MORSE-to-MORSE coupling calculations in the two-legged cylindrical-annular-duct problem.

Detector Location ^a (cm)			Reaction Rate (reaction/W·s)		
Line B (in air)	x	z	Measured	MORSE-to-MORSE Coupling (10000 Histories)	

Cadmium-Covered Gold Detector

B- 1	1	15	4.05-20	1.382-19	0.383 ^b
3	40	---	8.07-21	2.333-20	0.254
5	80	---	1.95-21	4.794-21	0.275
7	120	---	6.25-22	1.994-21	0.275
9	160	---	2.55-22	6.163-22	0.324
10	165	20	1.36-22	3.226-22	0.572
11	---	40	2.62-23	4.469-23	0.650
12	---	60	9.50-24	1.786-23	0.546
13	---	80	4.23-23	2.449-24	0.529

Nickel Detector

B- 1	1	15	1.74-22	1.648-22	0.112
3	40	---	2.75-23	4.407-23	0.095
5	80	---	9.06-24	1.400-23	0.146
7	120	---	4.21-24	5.992-24	0.091
9	160	---	2.03-24	3.505-24	0.123
10	165	20	1.69-24	3.621-24	0.167
				(Z=15cm)	
11	---	40	1.98-26	2.243-26	0.403
12	---	60	4.17-27	1.188-26	0.513
13	---	80	2.07-27	1.934-27	0.546

^aAll detector locations were in the plane of Fig.2.

^bFractional standard deviation.

Detector Location ^a (cm)			Reaction Rate (reaction/W·s)		
Line B (in air)	x	z	Measured	MORSE-to-MORSE Coupling (10000 Histories)	

Indium Detector

B- 1	1	15	2.46-22	2.328-22	0.099 ^b
3	40	---	3.54-23	5.153-23	0.083
5	80	---	1.10-23	1.566-23	0.132
7	120	---	4.49-24	6.805-24	0.079
9	160	---	2.24-24	4.233-24	0.107
10	165	20	1.93-24	4.451-24	0.166
				(Z=15cm)	
11	---	40	5.46-26	3.269-26	0.402
12	---	60	1.92-26	1.183-26	0.576
13	---	80		2.050-27	0.541

Aluminum Detector

B- 1	1	15	2.30-24	2.631-24	0.208
3	40	---	3.72-25	9.416-25	0.160
5	80	---	1.31-25	2.859-25	0.209
7	120	---	6.77-26	1.189-25	0.159
9	160	---	3.52-26	6.020-25	0.162
10	165	20	2.81-26	7.790-25	0.294
				(Z=15cm)	
11	---	40	2.03-28	8.314-28	0.821
12	---	60	3.61-29	2.061-28	0.794
13	---	80	8.90-30	3.158-29	0.719

こと、②第1脚の中あるいは周囲で衝突する高速中性子は2~3回くらいの散乱しか経験していない、事が考えられる。したがって、そのような非散乱中性子あるいは高速中性子の重みの統計的分散はモンテカルロ解析では一般的に小さい。ところが、第1脚に入った中性子が第2脚に入射するには、ほとんどの中性子は少なくとも1回その継ぎ目付近で水と相対的に大きな散乱角で散乱しなければならず、その結果、高速中性子でも大部分は中速あるいは熱中性子に減速されてしまう。したがって、第2脚中に置かれた高速中性子に対するしきい検出器への寄与は、カップリング法を使用しても第1脚と比べてかなり小さい。Table 3 にはニッケルおよびアルミニウムしきい検出器についても記載されている。ニッケル検出器に対する計算結果は測定値と比較し、全ての検出器位置で係数2以内であり、非常に良い一致を示している。fsdも第1脚では

0.09~0.15 と良い。しかし、第2脚では0.17~0.55であった。ニッケル検出器に関する一致性とfsdの値は前記のインジウム検出器と同じようである。アルミニウム検出器の計算値は第1脚中では係数2以内で実測値と比較し良い一致を示しているが、第2脚では係数6になっており、測定値との間に開きがある。fsdは第1脚では0.16~0.21で比較的良いが、第2脚中では0.29~0.82と悪くなっている。アルミニウム検出器に対しては、カップリング法を採用しても実測値との一致およびfsdも十分満足するところとまでは至っていない。これは、第3.1章で述べたマグネシウム検出器と同じ理由からである。即ち、 $Mg(n, p)$ 反応に対するしきいエネルギーが7.1 MeVであり、 $Al(n, \alpha)$ 反応は7.7 MeVである。

Table 4 はカドミカバーの金放射化検出器、およびインジウム、ニッケル、それにアルミニウムしきい検

Table 4 Comparison of reaction rates between measured and MORSE-to-MORSE coupling calculations in the two-legged cylindrical-annular-duct problem.

Detector Location ^a (cm)			Reaction Rate (reaction/W·s)		
Line C (in air)	x	z	Measured	MORSE-to-MORSE Coupling (10000 Histories)	

Cadmium-Covered Gold Detector					
C- 1	1	-15	6.83-20	4.246-19	0.576 ^b
3	40	---	1.02-20	1.755-20	0.260
5	80	---	2.26-21	1.245-20	0.407
7	120	---	7.35-22	3.463-21	0.456
9	160	---	3.09-22	1.241-21	0.440
10	180	---	2.40-22	2.782-22	0.611
11	196	---	2.30-22	1.810-22	0.466
12	---	0	1.09-22	2.144-22	0.590
13	---	20	5.92-23	9.630-23	0.666
14	---	40	2.28-23	2.244-23	0.759
15	---	60	9.12-24	2.076-23	0.526
16	---	80	4.21-24	1.700-23	0.608
17	---	100	2.33-24		
18	---	120	1.38-24	1.547-24	0.659

Indium Detector					
C- 1	1	-15	4.64-22	3.534-22	0.164 ^b
3	40	---	6.07-23	6.078-23	0.106
5	80	---	1.75-23	1.549-23	0.090
7	120	---	7.08-24	6.035-24	0.070
9	160	---	3.66-24	3.612-24	0.134
10	180	---	2.68-24	3.196-24	0.103
11	195	---	2.26-24	2.889-24	0.152
12	---	0	2.19-25	2.906-25	0.391
13	---	20	2.05-25	4.245-25	0.326
14	---	40	3.86-26	9.835-26	0.427
15	---	60	1.48-26	2.323-26	0.401
16	---	80	7.63-27	7.016-27	0.444
17	---	100	4.42-27		
18	---	120	2.86-27	3.236-27	0.520

Nickel Detector					
C- 1	1	-15	3.25-22	2.491-22	0.149
3	40	---	5.18-23	5.564-23	0.100
5	80	---	1.56-23	1.310-23	0.097
7	120	---	6.68-24	5.307-24	0.083
9	160	---	3.50-24	3.082-24	0.145
10	180	---	2.37-24	2.813-24	0.109
11	195	---	1.90-24	1.883-24	0.138
12	---	0	1.17-25	1.982-25	0.492
13	---	20	1.46-25	5.937-25	0.414
14	---	40	1.84-26	6.212-26	0.361
15	---	60		2.290-27	0.671

Aluminum Detector					
C- 1	1	-15	3.74-24	3.672-24	0.259
3	40	---	7.31-25	1.313-24	0.140
5	80	---	2.46-25	3.206-25	0.226
7	120	---	1.14-25	1.207-25	0.207
9	160	---	6.31-26	6.506-26	0.217
10	180	---	4.66-26	6.311-26	0.167
11	195	---	3.78-26	2.080-26	0.326
12	---	0	1.01-27	2.286-27	0.653
13	---	20	3.06-27	1.760-27	0.529
14	---	40		3.834-27	0.694

^aAll detector locations were in the plane of Fig.2.

^bFractional standard deviation.

出器の Fig. 2 の line C 上の反応率を示したものである。測定値と比較し、金検出器の反応率は第1脚では最大で係数6大きい、そして line C 上の C-18を除いては、第2脚では最大で係数2だけ大きい。また、fsd は全体に渡って大きく、0.26~0.78 である。測定値に対する一致性および fsd の値は Table 3 の金検出器と同様であった。インジウム検出器の反応率は全ての検出器位置で実測値と係数2以内で、十分良い一致を示している。fsd は第1脚中では 0.07~0.16 と良く、第2脚では 0.33~0.52 と大きくなっている。ここで注目すべき点は、インジウム検出器に対するカップリング計算と測定値とを比較すると、最も遠い C-18 においてダクトの入口、即ち C-1 と同じく、係数1.3 以内で計算値が測定結果に一致することである。C-18 におけるインジウム検出器の反応率は C-1 よりも 10^{-5} 程度小さい。したがって、モンテカルロカップリング法は特に高速中性子のダクトストリーミング問題の解析に推奨できる。ニッケル検出器に対する計算結果も第1脚では係数1.5 以内で非常に良く一致し、第2脚中でも係数3 以内である。fsd は第1脚では 0.08~0.15 であり、第2脚では 0.36~0.49 と大きくなっている。第1脚中のニッケル検出器の fsd は十分満足する値である。アルミニウム検出器の反応率は実測値に対し第1脚では係数2 以内で一致するが、第1脚と第2脚との結合部では係数6 の違いが生じている。それから先の line C 上のアルミニウム検出器に関する実験データはない。fsd は第1脚では 0.14~0.33 であり、結合部では 0.53~0.69 と悪くなっている。

4. 結 論

カップリング法を使用したモンテカルロ計算の最大の利点は、スリットやダクトの形状が変わっても、炉心から仮想検出器までの計算をくりかえす必要がなく、計算時間の節約になる点である。それに加えて、モンテカルロカップリング法はディスリットオーディネイトコードとモンテカルロコードとをカップリングする DOMINO コードで生じたような複雑な座標軸の変換式を取り扱う必要が全くない。したがって、このカップリング法は既存のモンテカルロコードを僅か改訂することによって使うことができる。第2の計算において境界線源条件として使われる中性子空間分布の pdf は、モンテカルロコードの関係ルーチンを僅か修正すれば容易に得られる。そして、境界線源の pdf を読み

込んで、第2の計算で使用するためには、2~3 のサブルーチンを用意すればよい。例えば、MORSE コードでは SOURCE と、もう1つは SDATA である。

カップリング法は純線源 (natural source) とスリットあるいはダクトとの距離が長い場合に適用でき、特に、高速中性子に対し有効なしきい検出器の反応率に対し、非常に満足すべき計算結果をもたらすことを述べてきた。これは、カップリング法の採用によって検出器周辺の中性子衝突密度の実質的な増加によって適切な密度が得られたことによると考えられる。

カップリング法による計算を実施し、以下のような注目すべき結果と結論を得た。

1. MORSE-to-MORSE カップリング計算による反応率は、スリットおよび2脚の円環円筒ダクトの両者とも、およそ 1 MeV 以上の中性子に有効なしきい検出器に対し、十分良い値である。2脚のダクト問題では 10,000 線源ヒストリーを追跡し、インジウムおよびニッケルしきい検出器では係数2 以内で測定値と一致しており、また、スリット問題でも 8,000 線源ヒストリーを追跡し、カドミカバーの金検出器、インジウム、硫黄、およびマグネシウムしきい検出器に対し、一部を除き係数3 以内で良い一致を示した。したがってこの結果から、仮想検出器における中性子分布は正確に第2の MORSE 計算に対し境界線源条件として伝播したものと推定される。

2. さらに、カップリング計算は、特に、ダクトストリーミング問題の第1脚中のボイド領域中に置かれたインジウムおよびニッケル検出器の fsd を 0.1 程度に低減した。

3. スリット問題ではマグネシウム検出器の計算結果がかなり大きく測定値と違っている。ダクト問題では金およびアルミニウム検出器の計算値が実験とかなり大きく違っている。また、ダクト問題の第2脚中では満足できるような fsd を得ることが難かしい。これは、第1脚中に入射した中性子は少なくとも1回、結合部付近の水中で衝突しなければ第2脚の中へ入らないからである。その結果、モンテカルロ解析では第2脚の中およびその周辺における高速中性子の衝突密度を希薄にし、fsd を大きくする。

謝 辞

著者はモンテカルロ MORSE コードで使用した群定数の作成に尽力されたフジタ工業(株)の金野正晴氏、および計算作業をしていただいた NAIG(株)の

林田芳久氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) T. MIURA, K. TAKEUCHI, and T. FUSE, "Measurement and Calculation of Radiation Streaming through Annular Ducts," Report of Ship Research Institute, Vol. 16, No. 6, 329 (1979), in Japanese.
- 2) S. MIYASAKA, S. UCHIDA, and C. SATO, "Neutron Flux Measurements in Straight Air Slots through Graphite Shields," JAERI-M-8686, pp. 99, Japan Atomic Energy Research Institute (1980), in Japanese.
- 3) J. S. TANG, T. J. HOFFMAN, and P. N. STEVENS, "Monte Carlo Shielding Calculations Using Event-Value Path-Length Biasing," Nucl. Sci. Eng., 62, 617 (1977).
- 4) J. S. TANG, T. J. HOFFMAN, and P. N. STEVENS, "Angular Biasing of the Collision Process in Multigroup Monte Carlo Calculations," Nucl. Sci. Eng., 64, 837 (1977).
- 5) J. S. TANG, P. N. STEVENS, and T. J. HOFFMAN, "Methods of Monte Carlo Biasing Using Two-Dimensional Discrete Ordinates Adjoint Flux," ORNL-5414, Oak Ridge National Laboratory (1976).
- 6) K. UEKI and P. N. STEVENS, "Variance Reduction Technique Using Adjoint Monte Carlo Method in Shielding Problem," J. Nucl. Sci. Technol., 16, 117 (1979).
- 7) N. R. BYRN, "Iterative Forward-Adjoint Monte Carlo Solutions of the Boltzmann Transport Equation," Thesis, Georgia Inst. of Technol. (1976).
- 8) D. W. GREEN, E. E. MORRIS, K. PREISS, and A. B. CHILTON, "Shielding Effectiveness of Ribbed Slabs against Gamma Radiation: Part I. Experimental and Theoretical Studies," Nucl. Eng. Des., 32, 359 (1972).
- 9) A. B. CHILTON and E. E. MORRIS, "Shielding Effectiveness of Ribbed Slabs against Gamma Radiation: Part II. Engineering Methods," Nucl. Eng. Des., 23, 367 (1972).
- 10) U. FANO, L. V. SPANCER, and M. J. BERGER, "Penetration and Diffusion of X ray," Handbuch der Physik XXXVIII/2, S. FLUGGE, ed., pp. 660, Springer-Verlag, Berlin, (1959).
- 11) M. B. EMMETT, C. E. BURGART, and T. J. HOFFMA, "DOMINO, A General Purpose Code for Coupling Discrete Ordinates and Monte Carlo Radiation Transport Calculations," ORNL-4853, Oak Ridge National Laboratory (1973).
- 12) R. T. SANTRO, R. A. LILLIE, R. G. ALSMILLER, Jr., and J. M. BARNES, "Two- and Three-Dimensional Neutronics Calculations for the Tokamak Fusion Test Reactor Neutral Beam Injectors," Nucl. Sci. Eng., 70, 225 (1979).
- 13) M. B. EMMETT, "The MORSE Monte Carlo Radiation Transport Code System," ORNL-4972, Oak Ridge National Laboratory (1975).
- 14) M. K. DRAKE, (ed.), BNL-50274 (T-601), Brookhaven National Laboratory (1970); Revised (1974).
- 15) K. KOYAMA, K. MINAMI, Y. TAJI, and S. MIYASAKA, "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma-Ray Group Constants and Analysing Radiation Transport," JAERI-M-7155, Japan Atomic Energy Research Institute (1977).
- 16) W. W. ENGLE, Jr., "A User's Manual for ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering," K-1693, Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant (1967).
- 17) M. GOLDSTEIN and E. GREENSPAN, "A Recursive Monte Carlo Method for Estimating Importance Function Distributions in Deep-Penetration Problems," Nucl. Sci. Eng., 76, 308 (1980).
- 18) K. UEKI, "Three-Dimensional Neutron Streaming Calculations Using the Monte Carlo Coupling Technique," Nucl. Sci. Eng., 79, 253 (1981).