

JAERI-Research

96-015



確率的形状モデルを用いた連続エネルギー
モンテカルロ法による不規則配列球状燃料体系の解析

1996年3月

村田 黜*・森 貴正・中川正幸・板倉洋文**

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 株原子力資料サービス

確率的形状モデルを用いた連続エネルギーモンテカルロ法による
不規則配列球状燃料体系の解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

村田 黙*・森 貴正・中川 正幸

板倉 洋文**

(1996年2月21日受理)

多数の球状燃料体がランダムに配列する体系を確率的幾何形状モデルを用いることにより、連続エネルギーモンテカルロ法を用いて取り扱う手法を開発し、高温ガス炉臨界実験装置VHTRCの解析に適用した。本手法を、汎用モンテカルロコードMCNPコードに組み込みMCNP-CFPコードを作成した。本報は、MCNP-CFPの概要、使用方法並びに解析結果について述べたものである。

MCNP-CFPで用いた方法では、粒子の飛行方向に沿って球状燃料体の最近接粒子分布(NND)を用いて確率的に球状燃料体をサンプリングし、これを設置することにより幾何形状をそのつど決めて行く。本手法は、以下の2つの方法によりその妥当性を確認した。①サンプリング時にtrack length estimatorと直接評価法により被覆燃料粒子(CFP)のインベントリを計算し所定の充填率が得られることを示す。②CFPのサンプリングアルゴリズムの妥当性を確認するために、規則配列体系に対する臨界計算を行い、 k_{∞} が従来の幾何形状表現法を用いた場合と一致することを示す。またさらに、本手法をVHTRCにおける臨界実験結果の解析に使用し、実験結果と比較することによりその有効性を確認する。

本研究で提案された手法はモデルに近似が少なく、多数のランダムに分布する球状燃料体の幾何形状を確率的に取り扱うことで計算を可能にした点で全くユニークな方法である。今後、ベクトル化及び並列化による高速計算の実現とも相まって、特にHTGRの分野において核及び遮蔽設計で幅広く使用されることが期待される。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

* 大阪大学

** 株式会社 CSK

Continuous Energy Monte Carlo Calculations
for Randomly Distributed Spherical Fuels Based on Statistical Geometry Model

Isao MURATA*, Takamasa MORI, Masayuki NAKAGAWA
and Hirofumi ITAKURA **

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 21, 1996)

The method to calculate neutronics parameters of a core composed of randomly distributed spherical fuels has been developed based on a statistical geometry model with a continuous energy Monte Carlo method. This method was implemented in a general purpose Monte Carlo code MCNP, and a new code MCNP-CFP had been developed. This paper describes the model and method how to use it and the validation results.

In the Monte Carlo calculation, the location of a spherical fuel is sampled probabilistically along the particle flight path from the spatial probability distribution of spherical fuels, called nearest neighbor distribution (NND). This sampling method was validated through the following two comparisons: (1) Calculations of inventory of coated fuel particles (CFPs) in a fuel compact by both track length estimator and direct evaluation method, and (2) Criticality calculations for ordered packed geometries. This method was also confirmed by applying to an analysis of the critical assembly experiment at VHTRC.

The method established in the present study is quite unique so as to a probabilistic model of the geometry with a great number of spherical fuels distributed randomly. Realizing the speed-up by vector or parallel computations in future, it is expected to be widely used in calculation of a nuclear reactor core, especially HTGR cores.

Keywords: Spherical Fuel, Random Distribution, Nearest Neighbor Distribution,
Ordered Close Packing, Continuous Energy Monte Carlo Method, HTGR,
Statistical Geometry Model

* Osaka University
** CSK corporation

目 次

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1.はじめに | 1 |
| 2.不規則配列球体系のモデル化手法 | 4 |
| 2.1 幾何形状のモデル化法 | 4 |
| 2.2 NND分布計算法 | 6 |
| 3.連続エネルギーモンテカルロコードへの応用 | 16 |
| 3.1 MCNP-CFP | 16 |
| 3.2 改良サブルーチンの概要 | 16 |
| 4.モデル化手法の検証 | 22 |
| 4.1 球状燃料体のインベントリチェック | 22 |
| 4.2 規則配列充填体系の臨界計算 | 23 |
| 5.VHTRCにおける臨界実験結果の解析 | 27 |
| 5.1 VHTRC臨界実験 | 27 |
| 5.2 解析条件 | 27 |
| 5.3 実効増倍率と二重非均質効果の比較 | 28 |
| 6.まとめ | 34 |
| 謝 辞 | 34 |
| 参考文献 | 35 |
| 付録 A MCNP-CFPコードの入力データとジョブ制御文 | 37 |
| 付録 B MCNP-CFP検証計算の入力データ | 42 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Tracking Method of Randomly Distributed Geometry | 4 |
| 2.1 Modeling of Randomly Distributed Geometry | 4 |
| 2.2 Calculation Method of Nearest Neighbor Distribution | 6 |
| 3. Implementation to Continuous Energy Monte Carlo Code | 16 |
| 3.1 MCNP-CFP Code | 16 |
| 3.2 Subroutines Revised from Original MCNP | 16 |
| 4. Validation of the Method | 22 |
| 4.1 Inventory Check of Spherical Fuels | 22 |
| 4.2 Criticality Calculation of Ordered Packing Geometries | 23 |
| 5. Analysis of Critical Assembly Experiment | 27 |
| 5.1 Criticality Experiment at VHTRC | 27 |
| 5.2 Calculation | 27 |
| 5.3 Comparison of Effective Multiplication Factor and Double Heterogeneity Effect of Fuels | 28 |
| 6. Summary | 34 |
| Acknowledgement | 34 |
| References | 35 |
| Appendix A Input Data Format and Job Control Statements | 37 |
| Appendix B Input Data of Validation Calculations | 42 |

List of tables

- Table 4.1 CFP inventory check calculation results
Table 4.2 Infinite multiplication factors for ordered packing lattices
Table 5.1 Major specifications of VHTRC
Table 5.2 Comparison of effective multiplication factors of VHTRC-1 core
Table 5.3 Comparison of reactivity effect of CFPs in a fuel compact
Table B.1 MCNP cell data corresponding to Figs.B.1 and B.3

List of Figures

- Fig.1.1 Spherical type fuels
- Fig.2.1 Sampling timing of spherical fuel in the MCNP-CFP code
- Fig.2.1 NNDs necessary for VHTRC core calculation by MCNP-CFP
- Fig.2.3 Basic concept in sampling CFPs at the compact boundary surface
- Fig.2.4 Schematic arrangement in interference of CFP with surface
- Fig.2.5 Comparison of radial distribution functions
(packing is nearly RCP except P-Y equation)
- Fig.2.6 Comparison of probability density of NND between MCRDF calculation and theoretical method
- Fig.2.7 Radial distribution function in cross section
- Fig.3.1 Flow of particles in MCNP-CFP calculation
- Fig.4.1 Geometry model for inventory check calculation (cylindrical geometry)
- Fig.5.1 Conceptual figure of VHTRC
- Fig.5.2 Calculation model of VHTRC-1-3 core compared with the cross section of the real geometry
- Fig.5.3 Calculation model of VHTRC-1-4 core compared with the cross section of the real geometry
- Fig.A.1 Sample input for statistical geometry model
- Fig.A.2 Job control statement for MCNP-CFP calculation
- Fig.B.1 Example of input data for inventory calculation of spherical fuels in cylindrical system with MCNP-CFP
- Fig.B.2 Example of input data for criticality calculation of ordered packed geometry (cubic lattice) with MCNP-3B
- Fig.B.3 Example of input data for criticality calculation of ordered packed geometry with MCNP-CFP

1. はじめに

H T G R は大変高い出口冷却材温度を狙った原子炉である。このため、燃料は UO_2 の燃料核をセラミックで被覆した球状の燃料体 (Coated fuel particle(CFP)) を用い、高温による FP の放出を防いでいる。CFP を含む燃料体には Fig. 1.1 に示す 2 つのタイプが知られている。日本で建設中の H T G R である高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor(H T T R))⁽¹⁾ で採用されているコンパクトタイプの燃料と、ドイツの Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor(A V R)⁽²⁾ で採用されているボールタイプ燃料である。両者とも球状燃料体である CFP を黒鉛のマトリックスで焼結して製造された燃料体を用いている。前者は、CFP と燃料コンパクトにより二重非均質構造を形成している。一方、後者は CFP とそれを多数含むボール燃料体並びにボール燃料体が積み上げられた炉心により二重非均質構造を構成している。両タイプとも、多数の球状燃料体を含むことから拡散や S_N 近似、また多群モンテカルロコードにより解析を実施する場合には近似モデルにより群定数を準備する必要がある。

球状燃料体の取扱方法については今までにいくつかの研究が実施してきた。土橋と後藤⁽³⁾ は Percus-Yevick 方程式から得られた R D F (radial distribution function) を用いることによりランダムに配置された粒子の効果を考慮し、黒鉛マトリックス中に存在する CFP の実効共鳴吸収効果について研究した。この方法は S R A C コードシステム⁽⁴⁾ に応用された。Lieberoth と Stojadinovic⁽⁵⁾ はペブルベッド炉心の中性子の拡散の問題を研究した。彼らは理論的な形式で D/D_H (D : 拡散係数、 D_H : 均質拡散定数) を導き、球状燃料体を積み上げたモックアップ実験結果と比較した。Segev と Caner⁽⁶⁾ は、元々 C A N D U タイプのクラスタ燃料の共鳴吸収を取り扱うために開発された機能を改良することにより、二重非均質構造を持つペブルベッド燃料の均質化断面積を計算できるようにした。また、実機の炉心の設計へも応用されている。原研が建設中である H T T R の核設計では、燃料コンパクト内に多数の CFP を含んでいることから、1 次元セル燃焼コード DELIGHT⁽⁷⁾ により燃料要素の群定数を作成し、3 次元拡散コード CITATION-1000VP⁽⁸⁾ により炉心解析を実施している。A V R では、均質化された炉心の平均群定数を用いて拡散コードにより炉心核計算を実施している⁽⁹⁾。上記のように、球状燃料体を持つ炉心の群定数や拡散係数などの物理量は、従来の近似的方法により計算することができる。しかし、ランダムに分布する球状燃料体を直接取り扱う輸送コードは現在存在しない。

連続エネルギーモンテカルロ法はこのような燃料形態を正確に取り扱うための最も有力な手段であると考えられる。連続エネルギーモンテカルロコードは以下の優れた特徴を持つ。3 次元構造が詳細に取り扱える。そして中性子とガンマ線の物質との衝突を詳細に取り扱える。さらに、ポイントワイズ断面積を使用しているため、断面積の準備段階においてスペクトル計算に仮定を用いる必要がない。また、最近、計算機の性能の改

善もあり、連続エネルギーモンテカルロコードは粒子輸送の幅広い分野で使用され始めている。しかし、このように様々な特徴を持つ連続エネルギーモンテカルロコードもHTRやAVR等で使用されている球状燃料体で構成されている炉心の解析は大変困難でありほとんど不可能であった。

その主な理由は以下の通りである。(1)球状燃料の位置が明らかにできないし、たとえ分かったとしても極めて多数の球状燃料体をモデル化することは非現実的である。(2)連続エネルギーモンテカルロコードは、ポイントワイズ断面積を用いるところに特徴を有しており、多群計算のように球状燃料体領域に対する実効断面積を導入できない。

最近、この問題に対し、球状燃料体の配置を確率的に取り扱うモンテカルロ法により正確に計算できることが示された⁽¹⁰⁾。本報は、その基本的な手法の詳細、その手法が組み込まれたモンテカルロコード(MCNP-CFP)の概要と使用方法及び検証結果について述べる。

まず、2章では、不規則に配列した球体系のモデル化方法について述べる。3章では、本手法を組み込んだモンテカルロコードについてその概要と使用方法を説明する。4章と5章では、本手法の検証結果を示す。

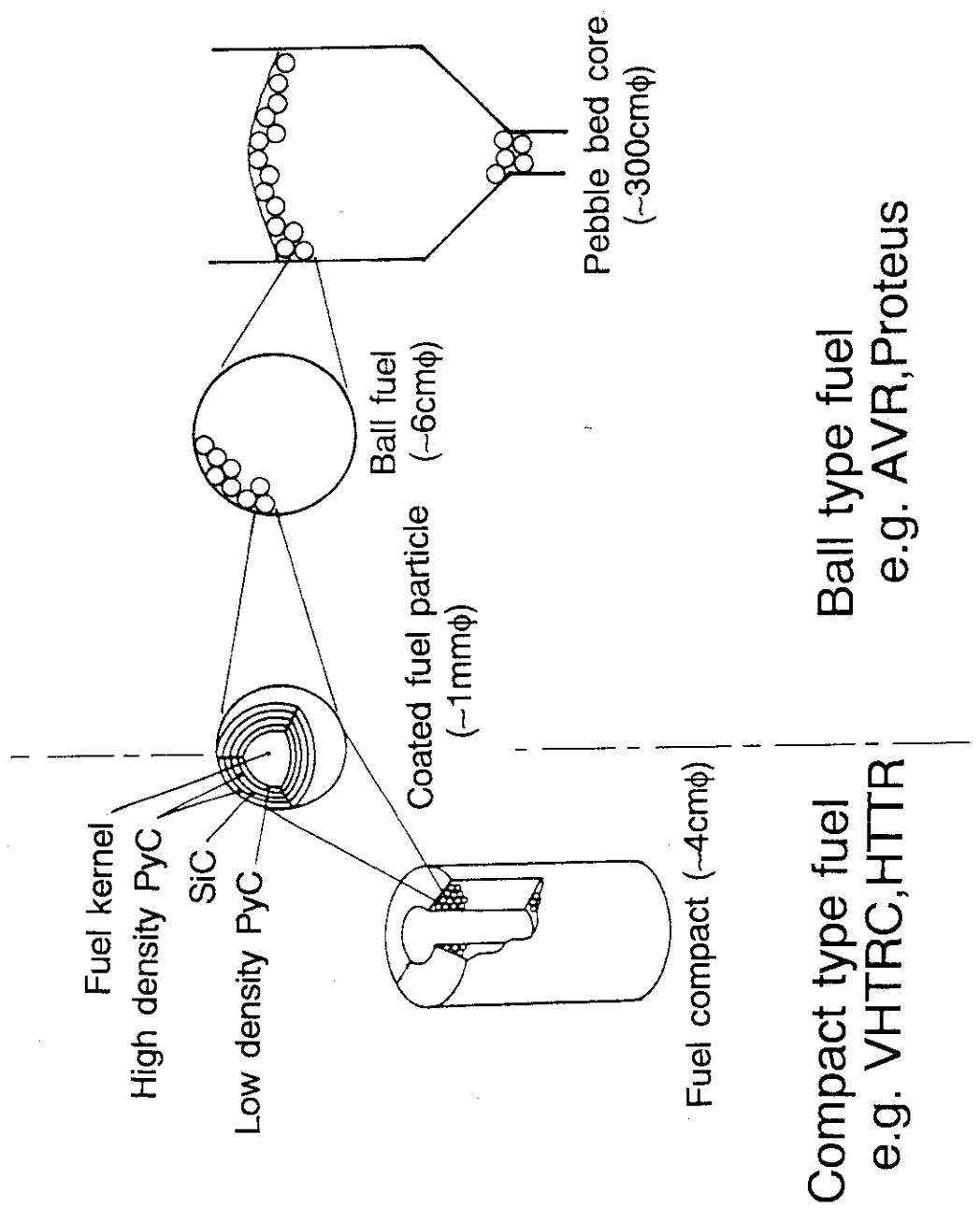


Fig.1.1 Spherical type fuels

2. 不規則配列球体系のモデル化手法

2.1 幾何形状のモデル化法

非常に多くの球状燃料体（以下 CFP と呼ぶ）が全くランダムに分布している燃料要素（以下コンパクトと呼ぶ）内の粒子（以下体系内を輸送している中性子、ガンマ線などを単に'粒子'と呼ぶ）の輸送を連続エネルギーモンテカルロ法により、正確にモデル化するにはどうすればよいであろうか。モンテカルロ計算では、粒子は一般に CFP を出ると黒鉛中を飛行し、やがて次の CFP に入射する。輸送計算では、これを繰り返すこととなる。基本となる方法は、粒子の輸送に従って粒子の飛行方向前方のある場所に次々に確率的に CFP を配置するというものである。それでは、この時に CFP を配置して行くには、どのような分布を用いればよいだろうか。必要な確率分布は次に設置される CFP の位置情報を与える分布になっている必要がある。設置される CFP は粒子の CFP への入射位置及び入射角度から決定できる。従って、入射位置の現在の位置からの距離に対する確率分布と CFP 入射角度分布を用意すれば良い。当然、その分布によりサンプリングした結果は、実際のコンパクト内の CFP の配置と充填率を再現しないなければならない。これらの分布を用いたサンプリング方法であるが、粒子のモンテカルロ計算過程では、幾何形状のうち被覆燃料粒子（CFP）については粒子の輸送軌跡に沿ってその都度設置される。粒子が CFP が存在する領域に入ったなら、CFP に入射すべき場所が最近接粒子分布（NND）により決定され、入射角度がコサイン分布からサンプルされる。これらの値を用いて、次の CFP の絶対位置が決定される。Fig. 2.1 に示すように、CFP のサンプリングは、

- ①粒子がちょうど CFP の存在する領域（燃料コンパクト）に入射したとき、
- ②粒子が CFP からでてきたとき、
- ③CFP が存在する領域で粒子が物質と衝突したとき（この場合に、飛行粒子、例えば中性子が $(n, 2n)$ 反応等により複数の粒子に分裂したら、余分の粒子の情報を一時配列に保存しておき、現在の粒子の計算終了後に再開する。この粒子をバンク粒子、またこの粒子の情報の一時保存のことをバンクと呼ぶ）、
- ④バンク粒子がバンクから取り出されたとき（つまり、 $(n, 2n)$ 反応等で発生し新たな粒子の計算を再開するとき）、

それぞれ実施される。③と④はサンプリングの点では同じことであることから、以下に示す 3 種類の NND を準備する必要がある。

- (1) NND 1 : 粒子は CFP の表面から余弦分布でスタートする。余弦分布とするのは、粒子が球にランダムに入射する時の入射角度と出射角度分布が共に余弦分布となるためである。
- (2) NND 2 : 粒子はマトリックス内からスタートする。但し、厳密にはマトリックス内で一様ではなく、マトリックス中の衝突密度に依存することになる。

従って、マトリックスの全断面積を考慮し、1回目の散乱位置からの粒子のスタートとしている。なお、一般的にCFPを含むコンパクトタイプの燃料の場合、マトリックスの全断面積 Σ が $1(1/cm)$ を超えない限り、マトリックス中で一様にスタートする場合の分布とほとんど変わらない。

(3) NND3：粒子は燃料コンパクトの表面からスタートする。但し、境界面と干渉している球も有効としているため、最終的な分布はNND2を計算する手法でマトリックス内から一様にスタートした場合の分布と全く同じものとなる。

NND2とNND3の分布は、極端にマトリックスの全断面積が大きい場合を除けば、ほぼ同じ分布になる。一例として、Fig. 2.2に原研にある高温ガス炉臨界実験装置VHTRC⁽¹¹⁾の燃料コンパクトのNND分布を示す。VHTRCの燃料コンパクトの黒鉛マトリックスの全断面積は $0.4(cm^{-1})$ 程度であり、NND2とNND3はほぼ同じである。

次に、モンテカルロコード内でこれらの分布を用いて具体的にどのようにしてCFPのサンプリングを行うのかについて説明する。コンパクト表面付近のCFPの配置の様子をFig. 2.3に示す。図に示すように、粒子がCFPが存在する領域に入射したとき、2つのサンプリング手順AとBが考えられる。ケースBはコンパクトの境界面と干渉しているCFPの中からコンパクト内に入射する場合であり、NND3には境界と干渉しているCFPについても考慮して作成されているため、ケースBを考慮する必要があるわけである。実際には、全てのCFPが燃料コンパクト内に存在することから、図の(b)で示されたCFPは燃料コンパクトを模擬するため計算から除外され、従って、NNDを求めるときの充填率はこのことを考慮し、コンパクト体積とコンパクト表面からCFPの半径分だけ取り除いた体積との比だけ大きくする必要がある。ケースBをコンパクトの境界面でサンプリングすると（つまりケースAと同様の方法でサンプリングすると）当然サンプリング後の充填率は過大評価となる。以上の考察から、CFPのサンプリングは次のようにして実施した。

粒子がCFPが存在する領域に入射すると、ケースBとAは充填率に相当する確率とその残りの確率でそれぞれ起こる。従って、まずそれぞれの確率でAとBのケースを選択する。ケースAの場合は、境界面でNND3を用いてCFPをサンプリングする。一方ケースBの場合は境界面から0.75半径だけコンパクト内に入った場所においてNND1によりサンプリングする。つまり、ケースBでは干渉している球を出たCFPの表面（図のP点）で新たにCFPをサンプリングすることとなるため、NND1を使うべきであり、さらにCFP内の任意の位置からCFPの表面までの平均距離は0.75半径になるため、この分だけコンパクト内に入った場所においてサンプリングを実施する必要がある。

設置された CFP と領域を分ける境界表面との干渉を回避するため、CFP が設置されたとき以下のチェックを実施する (Fig. 2.4 参照)。

(1) $D_I < D_{LS}$ のチェック

D_I : 現在の粒子位置から CFP 上の入射する位置までの距離

D_{LS} : 現在の粒子位置から飛行方向上の境界サーフェスまでの距離

(2) CFP の中心が現在粒子が存在する領域内にあることのチェック

(3) $DMN > RAD$ のチェック

DMN : CFP の中心から現在の領域を構成するサーフェスまでの最短距離

RAD : CFP を構成する球殻の最大半径

(1) のチェックに引っかかった場合、飛行粒子は CFP が存在する粒子の存在する領域の外の領域に出ることとなる。(2) もしくは(3) のチェックに引っかかった場合には、設置しようとした CFP を透過した位置から再サンプリングする。このサンプリング方法によりあらゆる複雑な境界面を持つセルにおいて所定の充填率を再現することができる。設置する CFP は NND からサンプリングした入射位置と余弦分布からサンプリングした入射角度からその絶対座標での設置位置を決定する。

2.2 NND 分布計算法

連続エネルギーモンテカルロコードでコンパクト内の CFP の幾何形状のサンプリングを実施するとき、最も重要な問題はコンパクト内の CFP の最近接粒子分布 (Nearest Neighbor Distribution (NND)) を評価することである。NND は、ある場所から距離 r までに初めて他の球に入射する確率で定義される。残念ながら炉物理の分野ではそのような問題は研究されてこなかったため、以下の 3 つの手法を参考に、等しい大きさの多数の剛体球の充填について検討した。

(1) アモルファス材料の物性研究において、その原子構造の近似モデルとして使用されているランダム充填模擬

(2) 液体の分子の性質を研究するために用いられる液体の状態方程式

(3) 一様統計分布

(1) の方法は剛体球の充填を相互作用無しの条件で模擬計算するものである。2 番目の方法は Percus-Yevick (P-Y) 方程式^(1,2) としてよく知られている分子内の相互作用を考慮した液体の状態方程式を用いることにより充填粒子の統計的な情報を得るものである。3 番目の方法は剛体球が空間に統計的に一様にある充填率で存在しているという条件のみから数学的に NND を導くものである。2 番目もしくは 3 番目の手法を用いれば解析的な形で NND を評価することが簡単になるが、参考文献 (10) の結果によると (1) の方法が最も信頼度が高いことが明らかになっている。方法 (1) による NND は 3 次元剛体球充填模擬コード (MC RDF)^(1,0) によって計算することができる。ただし、HTT

R等で使用されている低い充填率の燃料コンパクトに対しては、製造工程を考慮した充填模擬が必要であることも明らかになっている。詳細は参考文献(10)に詳しいが、以下に、具体的に(1)の方法を選択した根拠について説明する。

Fig. 2.5はP-Y方程式から計算した径方向分布関数(Radial distribution function(RDF))をX線の干渉関数から求めたNi-P合金のRDFと比較したものである。合金の原子構造は原子を剛体球に見立ててランダムに充填した状態に近いことが知られている。RDFは半径 $r \sim r + dr$ の球殻内の単位体積当たりの球の中心の平均数として定義されるものである。この比較から明らかなように、両者の間には大きな差が見られる。コンパクト内のCFP間では無視できる分子間の相互作用力をP-Y方程式では考慮していることが原因であると考えられる。Fig. 2.5には、一番目の手法すなわちMCRDFで計算したRDFも示したが、この結果は実験値と良く一致している。Fig. 2.6には3番目の手法で計算したNNDの微分値をMCRDFの計算結果と比較して示した。3番目の手法によるNNDの微分値は次式により求められる。詳細は文献⁽¹⁰⁾に詳しい。

$$\frac{dNND(r)}{dr} = 3/2 \cdot \frac{f_p}{1-f_p} \cdot \exp(-3/2 \cdot \frac{f_p}{1-f_p} \cdot r)$$

ここで、rは直径単位の距離、 f_p は充填率。

図から分かることおり、MCRDFによる単純な充填(充填方法A: 次に説明する模擬充填後半径を減少させることを行わない)ではごく中心球に近い場所を除いてほぼ両者の手法による評価結果は一致している。一方、高い充填率(~Random close packing(RCP); ランダムな剛体球充填の上限充填率)に模擬充填後、球の半径を減少させることにより充填率を調整した場合(充填方法:B)、2直径程度の距離までかなり大きな相違が見られる。Fig. 2.5の比較からもわかるとおり、参照球状燃料体近傍の充填模擬はMCRDFにより正確に行えていることが予想されるのでNNDの微分値に対しても、3番目の手法が統計的にスミアされた結果を示しているのに対し、MCRDFの結果は、参照球近傍の構造を忠実に再現する分布を与えているものと判断できる。以上のことと、後に説明するとおり、充填方法Bで充填することが最もコンパクト内の充填状態を再現することが分かっており、また、輸送計算ではある球状燃料体(参照球状燃料体)をできた粒子の多くはそれに隣接する球状燃料体に入射すること等を考慮すると、3番目の手法で作成したNNDでは誤差が大きく使用できないことが分かる。

燃料コンパクト内の球状燃料体は低い充填率(ここでは、HTTRで用いられている燃料コンパクトの充填率30%を使うこととする)で充填されている。そこで、MCRDFにより単純な30%充填状態を模擬計算で求め(上記充填方法A)、その充填状態が、実際のコンパクト内の球状燃料体の充填を再現しているかを2次元RDFの比較により考察した。2次元RDFはある基準となる平面に垂直な高さ $2r$ の円柱殻内に存在する単位体積当たりの球の平均数である。Fig. 2.7は、原研にあるOG-L-1で照射試験に使

用された、C F P を30%含んだ燃料コンパクトの断面写真^(1,3)から作った2次元R D Fを充填模擬コードによる計算結果と比較して示した。測定の精度を考慮すると、図の第1ピーク位置のみが比較に使用できる。比較の結果、単なる30%の充填では、ピーク位置が一致せず、C F P の充填を模擬できないことが分かった。一致しない原因は、コンパクトの製造方法に起因している。

H T G Rにおけるコンパクトは次のような手順で作られている。まず、C F P を炭素でオーバーコートする。そのC F P を容器に注ぎ、圧縮成形する。最後に、焼結されてできあがる^(1,4)。この状況を以下のような手順で再現した。

1) R C P 計算

(圧縮前の容器中に充填されたオーバーコートC F P の模擬)

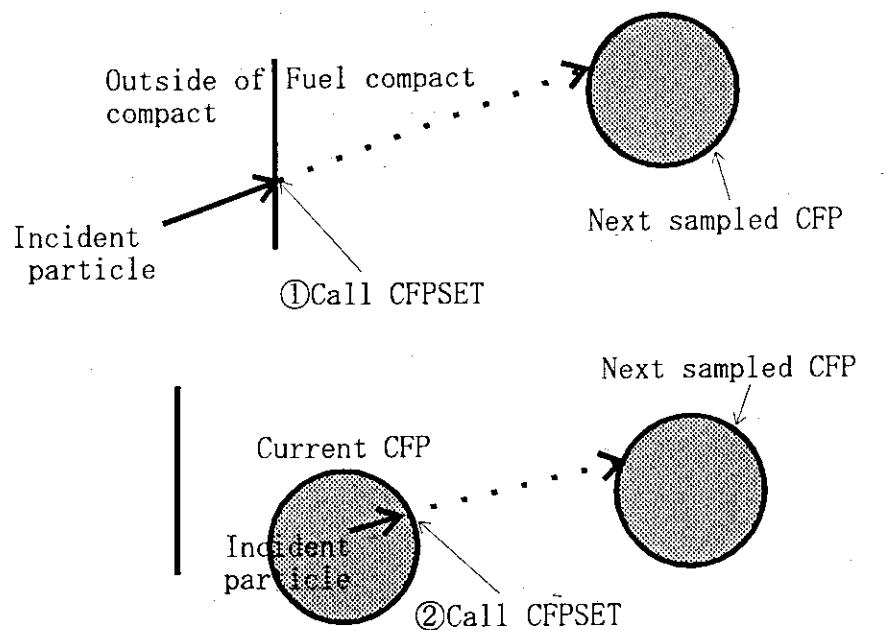
2) 容器内のC F P 充填率の半径を減らすことによる調整

(圧縮成形後の焼結の模擬)

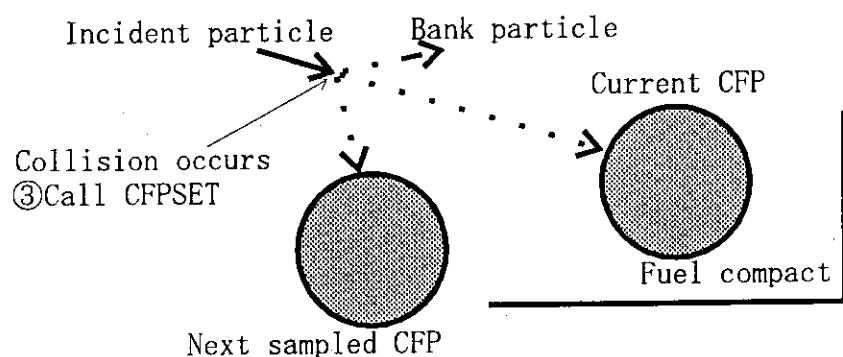
この時、手順1)と2)の充填球の半径と充填率を d_1 、 f' 及び d_0 、 f とすると、両者の関係は次式で表せる。

$$d_1 = d_0 \cdot (f' / f)^{(1/3)}$$

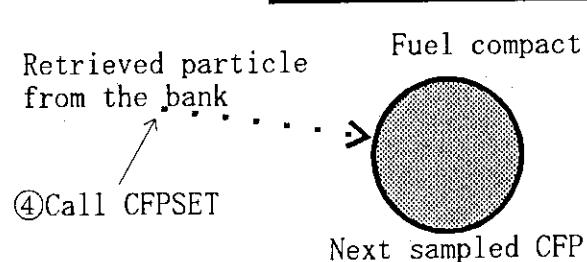
この時のピーク位置は d_1/d_0 となることから、できるだけ高充填率に充填してから半径を減らしC F P 間がより広がるようにする方が、より図のピーク位置を実験に近づけることができる事が分かる。この手順により作成した2次元R D FをFig. 2.7に示した。図から、上記の手順で作成することにより2次元R D Fの第1ピークの位置はほぼ実験結果と一致するようになることが分かった。



(a) In case a neutron just reaches the region in which CFPs exist



(b) In case of banking the secondary neutron



(c) In case of retrieving a neutron from the bank

Fig.2.1 Sampling timing of spherical fuel in the MCNP-CFP code

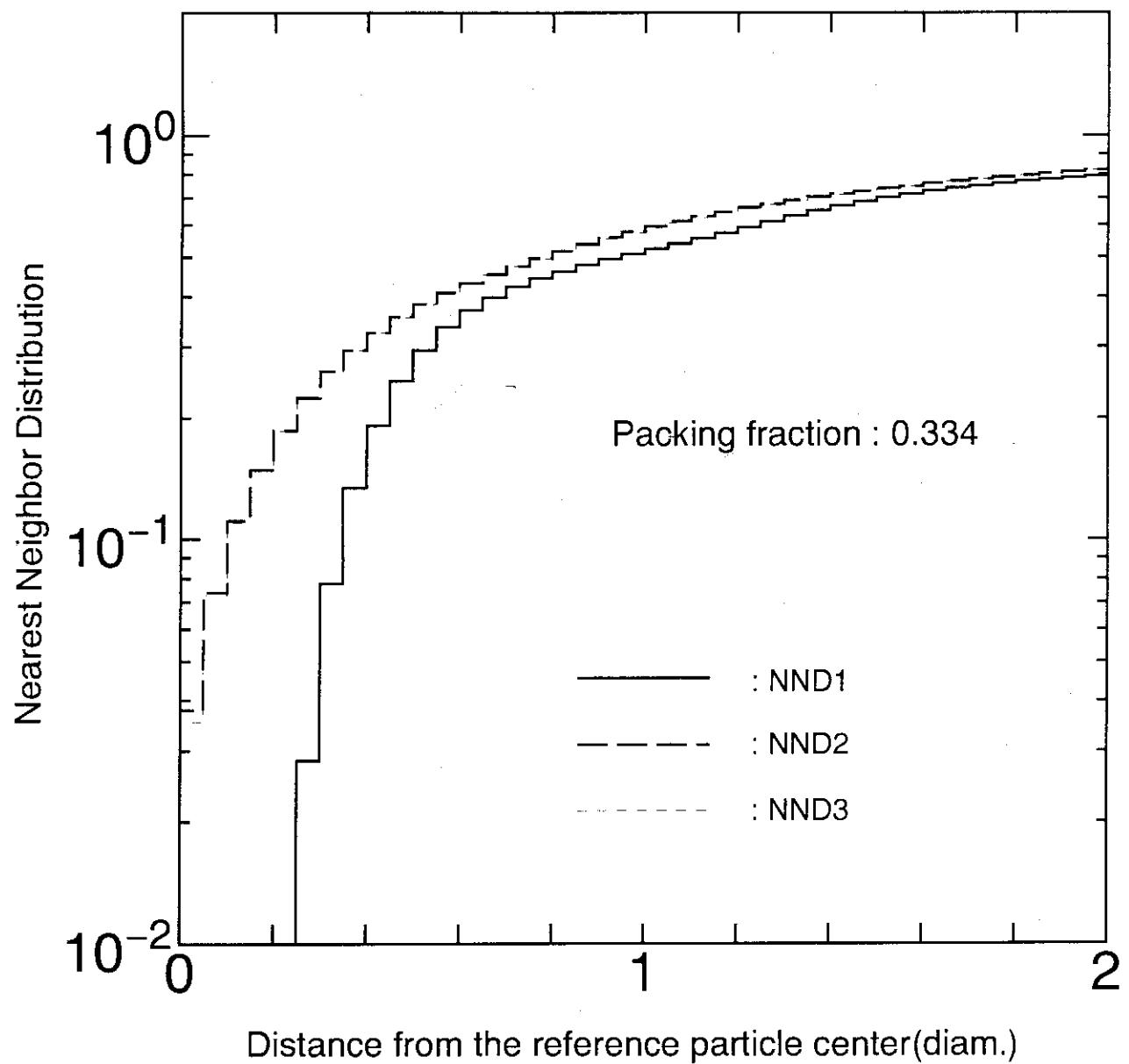


Fig.2.2 NNDs necessary for VHTRC core calculation by MCNP-CFP

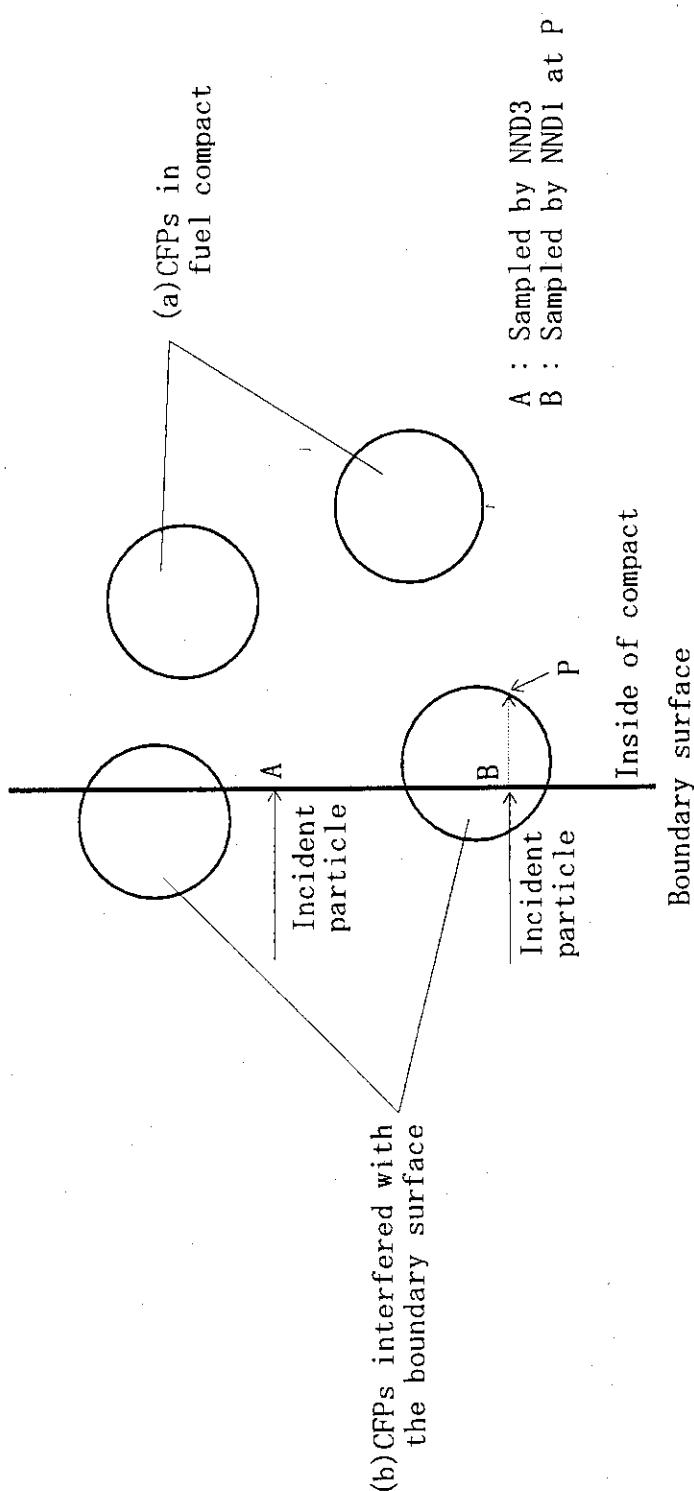


Fig.2.3 Basic concept in sampling CFPs at the compact boundary surface

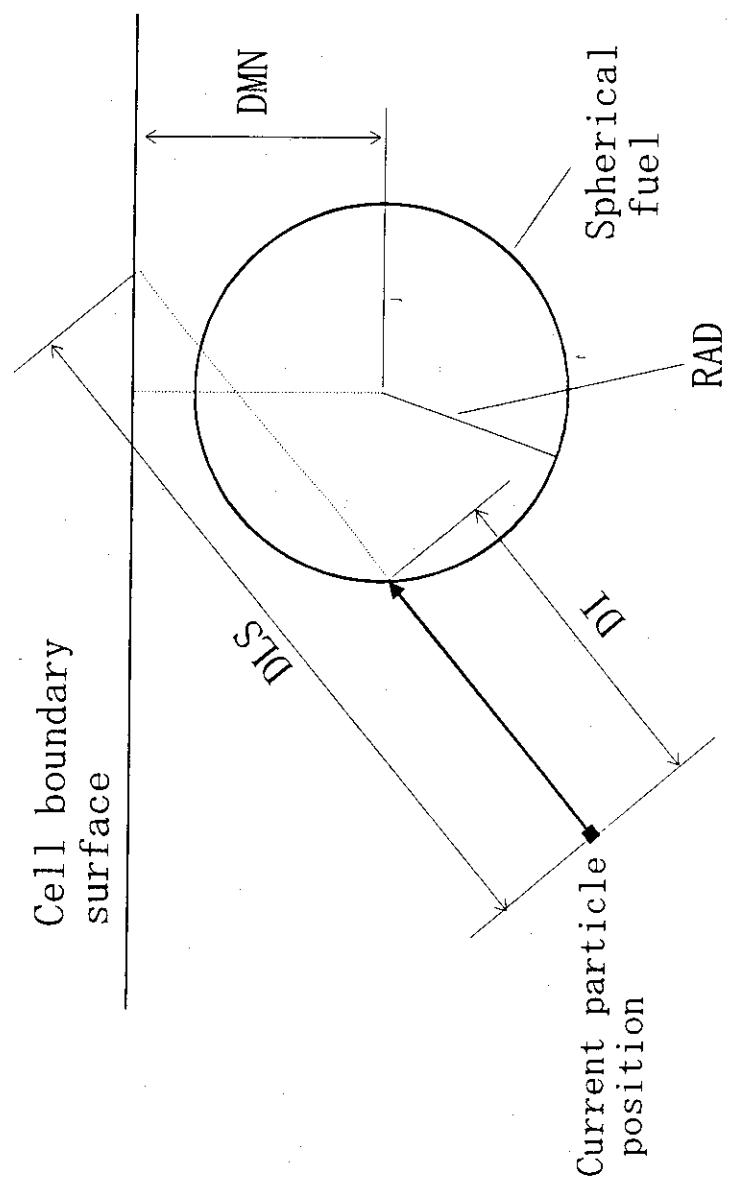


Fig.2.4 Schematic arrangement in interference of CFP with surface

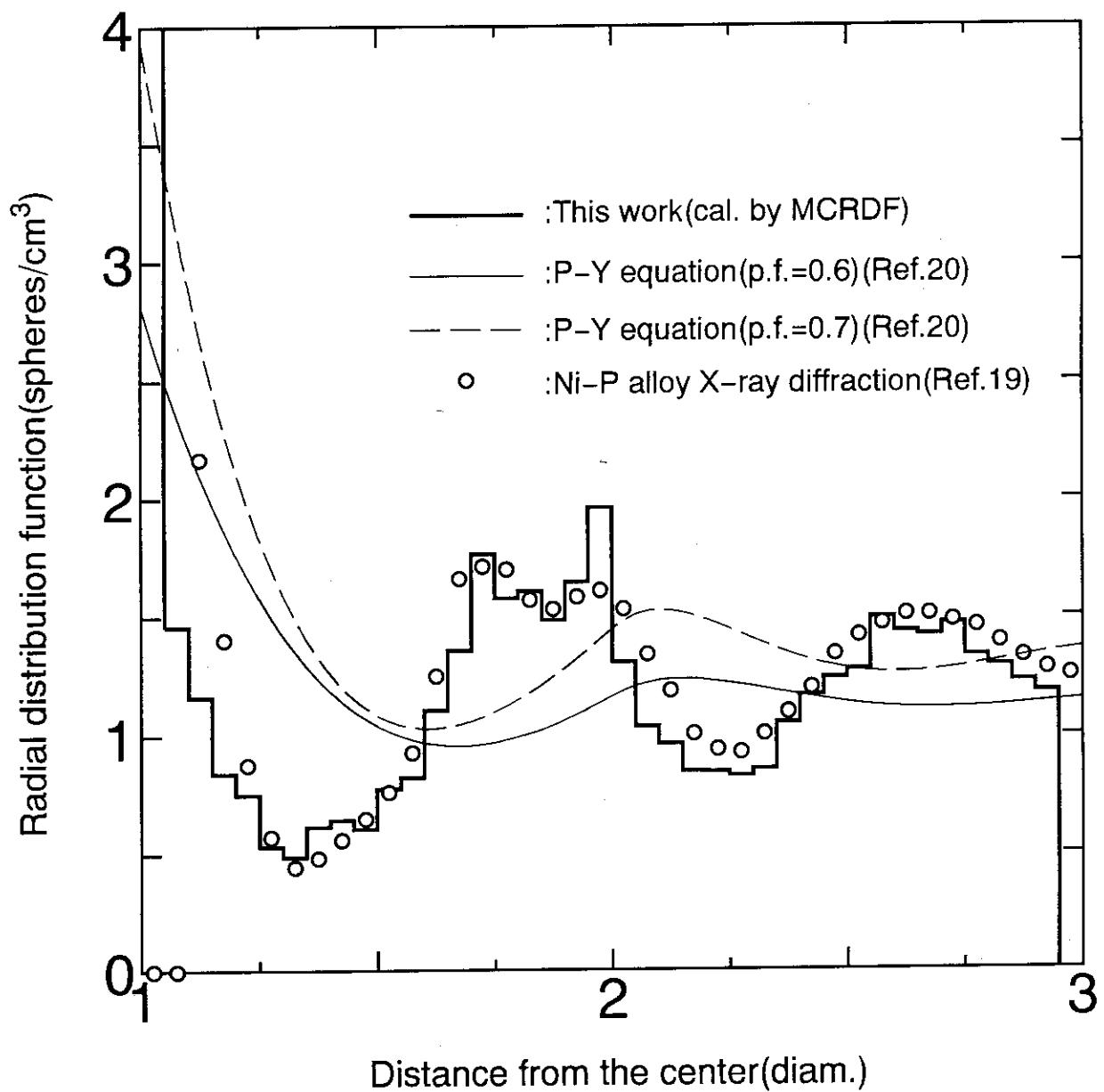


Fig.2.5 Comparison of radial distribution functions
(packing is nearly RCP except P-Y equation)

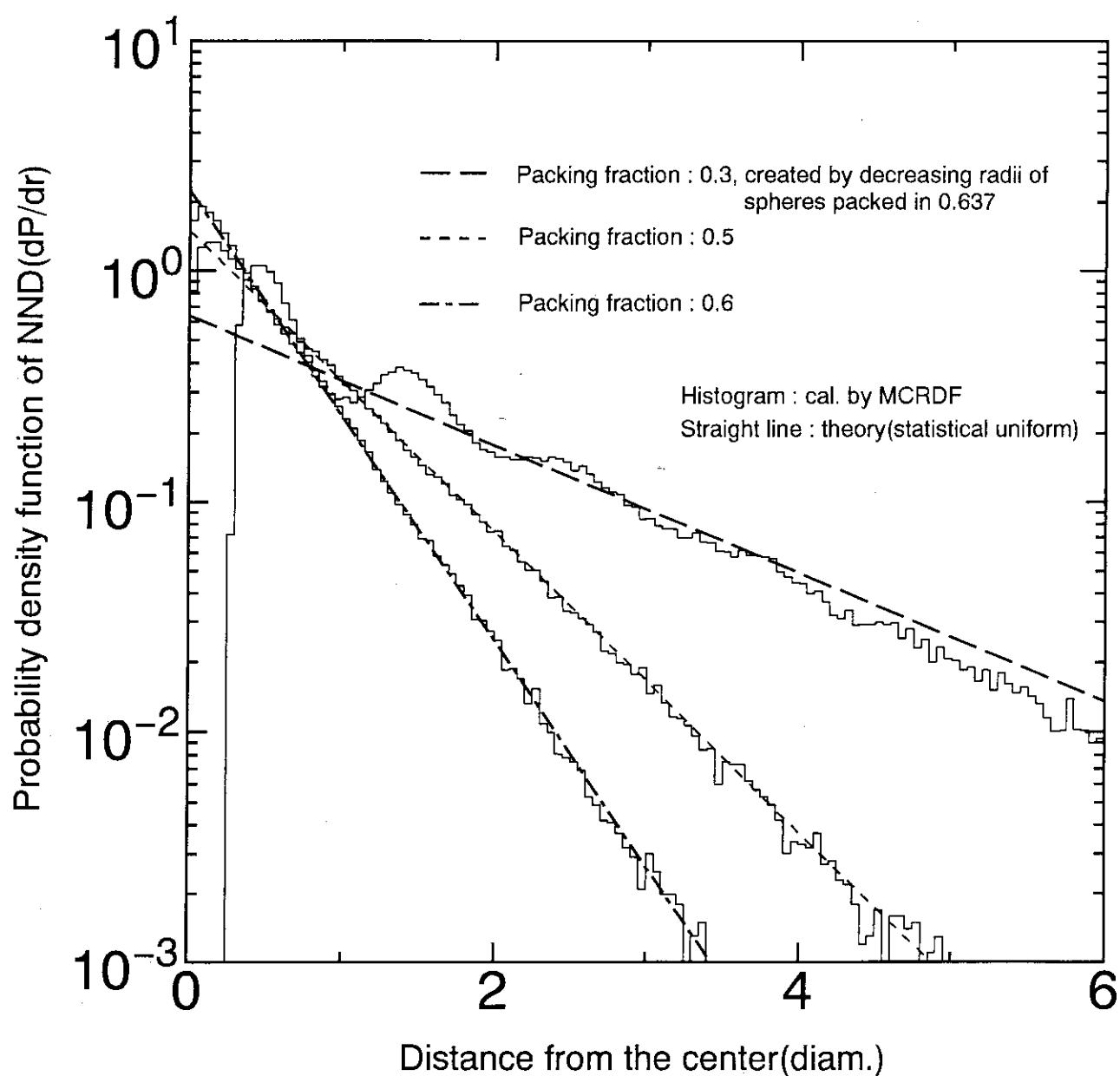


Fig.2.6 Comparison of probability density of NND between
MCRDF calculation and theoretical method

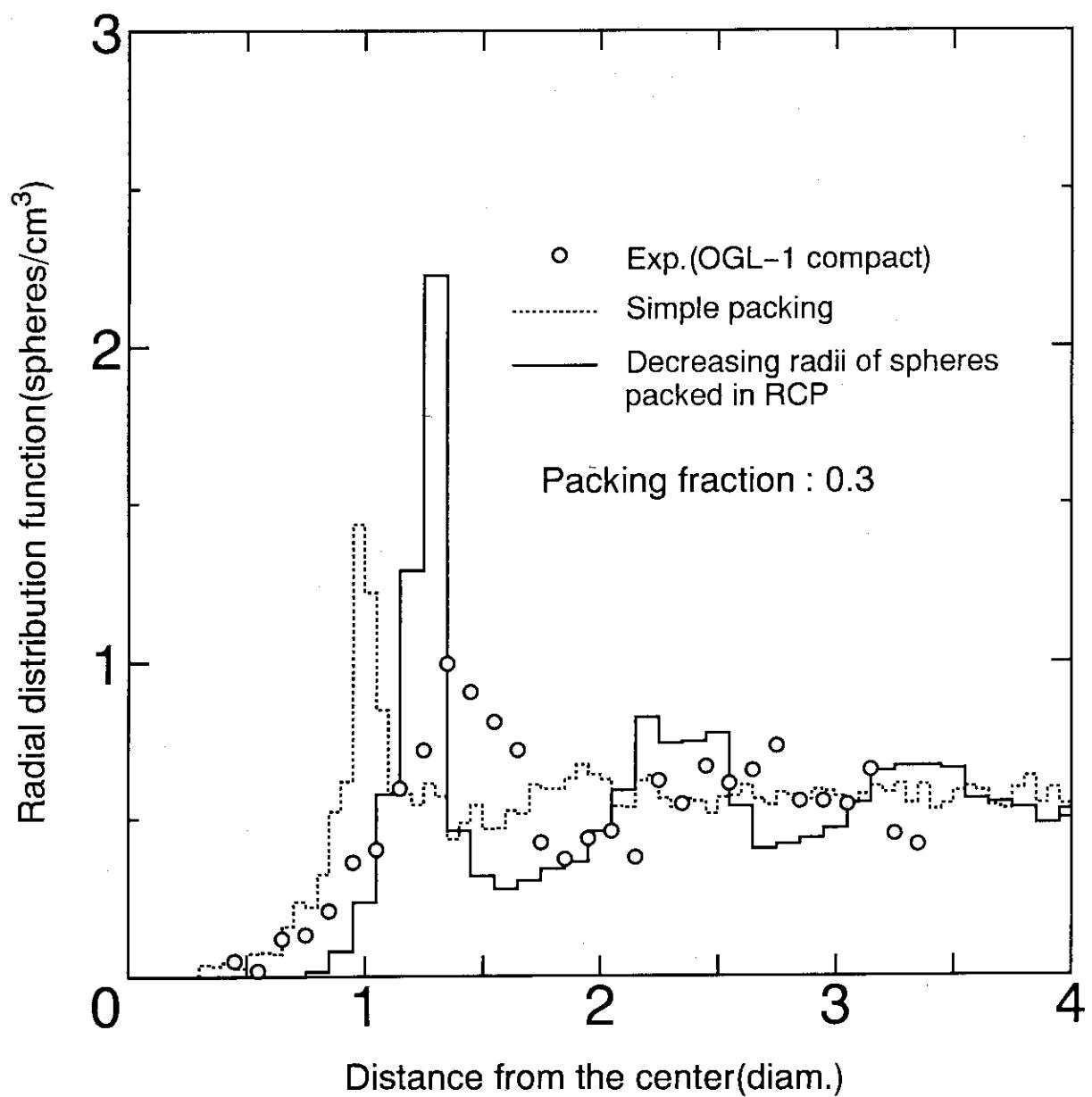


Fig.2.7 Radial distribution function in cross section

3. 連続エネルギーモンテカルロコードへの応用

球状燃料体の取扱い手法は3次元汎用モンテカルロコードMCNP-3B⁽¹⁵⁾に組み込んだ。MCNPは1977年に米国ロスアラ莫斯国立研究所において中性子とガンマ線の詳細な輸送計算を可能にすることを目的に開発された3次元の連続エネルギーモンテカルロコードである。このコードの特徴としては、汎用性が高い、3次元のモデル化が可能、連続エネルギー処理が可能、中性子及びガンマ線の輸送を取り扱える、時間依存計算が可能、多数の分散低減法が準備されている、等が挙げられる。

本章では、MCNPを改良し球状燃料体を確率的にサンプリングする手法を組み込んだコードMCNP-CFPについて説明する。

3.1 MCNP-CFP

本手法を組み込んだコードMCNP-CFPの主要な改良点は、バンク粒子がCFP内で発生した場合のCFPの位置等の配列データの出し入れに対するルーチンとCFPを新たに設置する場合の処理のためのルーチンである。追加インプットデータは燃料コンパクト中のCFPに対するNNNDとCFPが存在する場所を示すフラグデータである。

3.2 改良サブルーチンの概要

今回改良した箇所に関するアルゴリズムをFig. 3.1に示す。MCNP-CFPのサブルーチンの内4つ(SOURCK, COLIDK, BANKIT, HSTORY)を改良した他、新たに4つ(CFPINT, CFPSET, CFPPOS, CFPNND)のサブルーチンを作成、追加した。変更分の内2つは臨界計算用のルーチンであり、1つはバンク粒子の処理ルーチン、そしてもう1つはメインの粒子の輸送を扱うルーチンである。追加の4サブルーチンは全てCFPを設置する場合の処理ルーチンとなっている。なお、変更サブルーチンとしては挙げていないが、メインルーチンであるMCNP内にCFPINTをコールする文を一行追加している。

(1) コモン変数

MCNP-CFPで新たに追加したコモン変数は次の通りである。

```
COMMON /CFPCM/XXB(NBMX*5) :
    YYB(NBMX*5) : ] バンク粒子がCFP内で発生した場合のCFP位置
    ZZB(NBMX*5) :
    SRCXYZ(3, 4500) : 臨界計算用ソース粒子位置に対応したCFP位置
    NXYXB : バンク粒子のうちCFP内で発生したもののは総数
    NCFP(1000) : セルの属性（付録A参照）
    NLAY : CFPを構成するサーフェスの数
    NCLL(5) : CFPのセル番号（NLAYに対応）
    JSU0 : CFPの最外殻サーフェス番号
```

RDMX : C F P の外径

COMMON /CFP2/IAI : TRACKルーチンで境界までの距離計算時に C F P を考慮するかどうかのフラグ

JSFL : TRACK及びCFPNNDルーチンで最短距離の境界サーフェス番号

KSFL : JSFLのサーフェスタイプ番号

IDI : 未使用

DI : 粒子の現在位置から C F P 入射位置までの距離

ICLO : サンプリング時に使用する N N D の区別因子

COMMON /ACCPRB/NBND(3) : N N D の群数 (NND3, NND2, NND1の順)

WBND(3) : N N D のメッシュ幅 (直径単位)

APRB(1000, 3) : N N D データ

FP : 充填率 (N N D 3用データ)

(2) サブルーチン概要

改良した 4 つのサブルーチン (SOURCK, COLIDK, BANKIT, HSTORY) と新たに作成追加した 4 つのサブルーチン (CFPINT, CFPSET, CFPPOS, CFPNNND) についてその概要 (改良ルーチンについては改良した箇所のみ) を説明する。

1) SOURCK

追加機能 : 臨界計算ソース位置に対応した C F P の設置

Called : STARTP

主要変数 : IXAK : 臨界計算用ソース配列FS0のポインタ (内部変数)

MSRK : FS0配列の個数 (内部変数)

KCY : サイクル数 (内部変数)

LCA : セル番号とLJAを結びつけるポインタ

LJA : セルを構成するサーフェス番号

LSC : SCF と LJA を結びつけるポインタ

SCF : サーフェスデータ用配列 (内部変数)

サブルーチン詳細: 第 1 サイクルを除き COLIDK ルーチンで記憶した C F P の位置をロードする。第 1 サイクルについては、KSRC カードで入力された核分裂ソース位置を中心として C F P を設置する。

2) COLIDK

追加機能 : 核分裂が起こった場合の C F P 位置のセーブ

Called : COLIDK

主要変数 : 無し

サブルーチン詳細: C F P を用いている計算で核分裂が生じた時、C F P の場所をセーブする。

3) BANKIT

追加機能 : CFP 内でバンク粒子が生じた場合の CFP 位置のセーブとロード

Called : HSTORY他多数

主要変数 : 無し

サブルーチン詳細: バンク粒子が発生した場合、その場所が CFP 内の時、粒子情報のセーブと同時に CFP 位置をセーブする。また、バンク粒子をバンク配列から取り出す場合、粒子の場所が CFP 内である場合に、同時に CFP 位置もロードしその場所に CFP を設置する。

4) HSTORY

追加機能 : 輸送中必要に応じて CFP 設置ルーチンをコールする

Called : TRNSPT

主要変数 : 無し

サブルーチン詳細: HSTORY ルーチンは 1 粒子の発生から消滅までを計算するルーチンであるが、その粒子の輸送中に Fig. 2.1 に示すタイミングが発生したときに CFP 設置ルーチンをコールする。

5) CPPINT

主要機能 : CFP 計算のための初期化

Called : MCNP

主要変数 : NODT : セルの属性データの数

MXA : セルの総数 (内部変数)

NCL : セル番号 (内部変数)

サブルーチン詳細: 基番 10 からセルの属性データを読み込み、CFP を特定後、CFP を構成するサーフェスの数、その直径等を割り出す。また、NND 分布を基番 9 より読み込む。

6) CFPSET

主要機能 : CFP を設置する

Called : HSTORY

主要変数 : XXX0 :
 YYY0 :] 粒子の座標の待避
 ZZZ0 :

JAP : 次に横切る予定であるサーフェスの番号 (内部変数)

JAP0 : JAP の待避

DLS : 粒子の現在位置からサーフェスを横切るまでの距離 (内部変数)

DLS0 : DLS の待避

DI2 : サンプリングされた CFP 入射位置までの距離

DX :
 DY :
 DZ : } サンプリング位置から CFP 中心までのベクトル

JCSK : CHKCEL ルーチンの状態変数 (CHKCEL ルーチン参照)

サブルーチン詳細: 使用する NND によりサンプリング位置のオフセットを設定する。飛行方向のサーフェスまでの距離を計算し、CFPPOS ルーチンによる CFP サンプリング結果との比較により設置できるかどうかを判断する。さらに、CFP が設置されるセルを構成するサーフェスと干渉しないかどうかを、CFPNND ルーチンによる CFP 中心から最近接サーフェスまでの距離と CFP の半径を比較することにより判断する。

これらの判定をすべてパスしたとき、CFP を設置する。なお、粒子の位置はパスするしないに関わらずサンプリング以前の位置から変えない。

7) CFPPOS

主要機能 : CFP の位置をサンプリングする

Called : CFPSET

主要変数 : RD : RDMX と同じ

DI : サンプリング位置から CFP 入射位置までの距離

ICLX : ICL0 と同じ

TH : 余弦分布からランダムサンプリングされた角度

他は略 (極座標における座標変換による計算のための変数)

サブルーチン詳細: NND 分布から入射位置をサンプリングし、さらに余弦分布から入射角度分布をサンプリングする。両者から CFP の設置位置を計算する。

8) CFPNND

主要機能 : 現在いるセルから最も近いサーフェスまでの距離の計算を実施する

Called : CFPSET

主要変数 : 距離の計算部分以外は TRACK ルーチンと同じであるため省略

サブルーチン詳細: TRACK ルーチンと同様にセルを構成する全てのサーフェスまでの最短距離を計算し、最も近いものを選択する。従って、本ルーチンは TRACK ルーチンの距離計算部分のみを全て最短距離計算プログラムに置き換えたものとなっている。

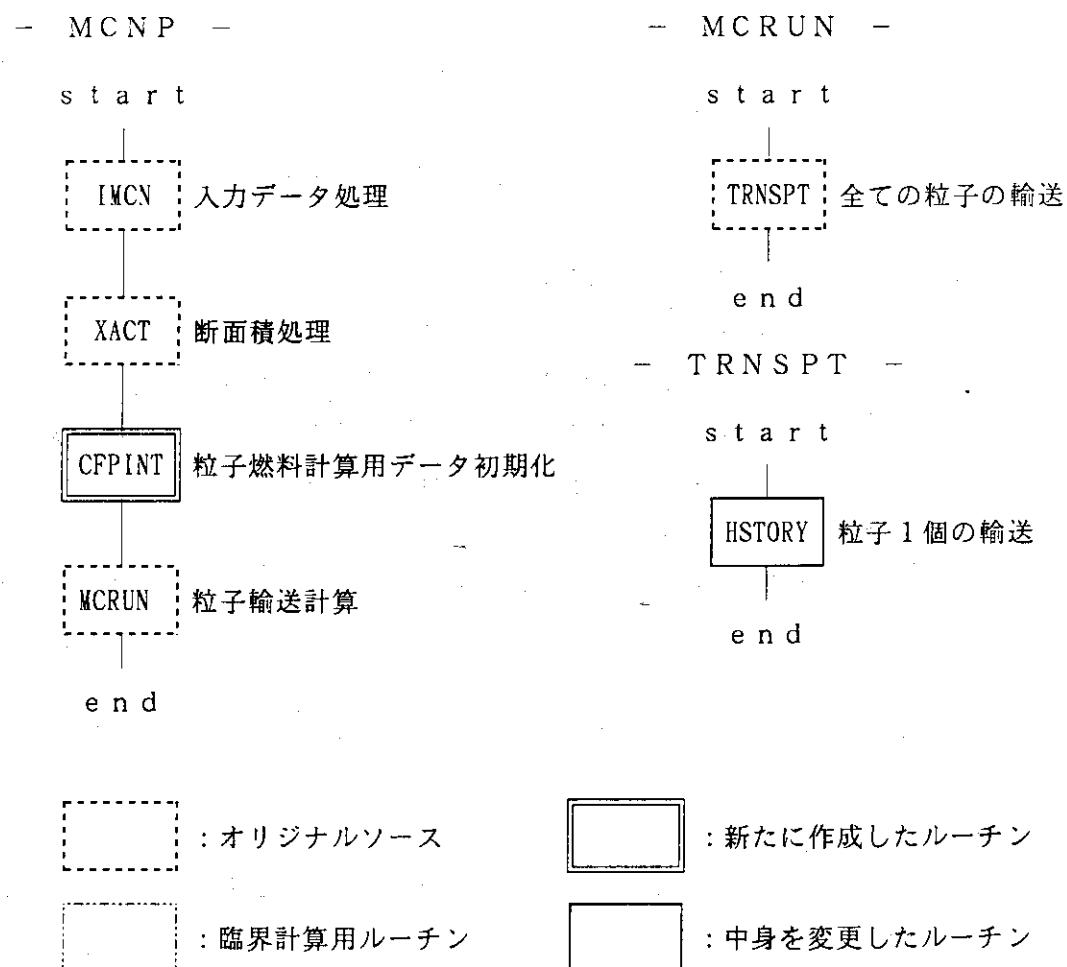


Fig.3.1 Flow of particles in MCNP-CFP calculation (1/2)

- HISTORY -

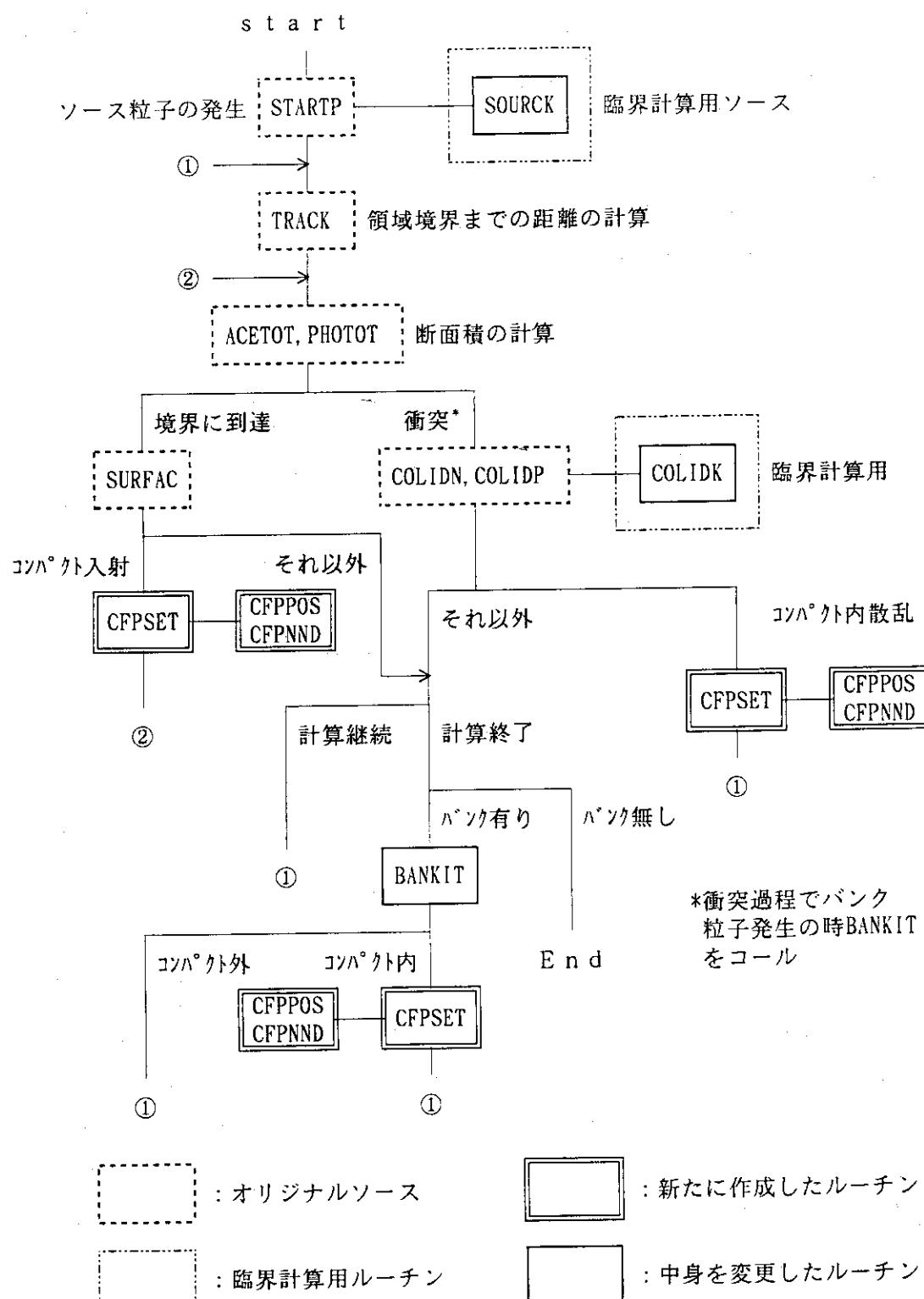


Fig.3.1 Flow of particles in MCNP-CFP calculation (2/2)

4. モデル化手法の検証

M C N P - C F P コードに用いたモデル化手法は、以下の 2 つの計算によりその妥当性が確認された。

(1) 球状燃料体のインベントリチェック

N N D 分布の精度を確認することを主な目的に、Track length estimatorと直接評価法を用い、燃料コンパクト中の C F P がサンプリング後所定の充填率で設置されているかどうかを確認した。

(2) 規則配列充填体系臨界計算

C F P のサンプリングのアルゴリズムの妥当性の確認を主な目的に、規則配列充填体系の臨界計算を実施した。

4.1 球状燃料体のインベントリチェック

良く知られているとおり、モンテカルロコードが持つ計算機能の内、Track length estimator (T L E) を用いることにより簡単に形状の体積の確認を行うことができる。本研究では、この方法を応用し燃料コンパクト内に設置される C F P により占められる全体積を計算し、それが与えられた充填率となることを確認した。ただし、TLEは統計誤差を十分に小さくするには時間がかかるのでここでは充填率を、設置された C F P の個数から直接評価する方法を採用した。この方法により、サンプリングされた C F P のインベントリを評価し、その結果を比較することにより、評価された N N D が所定の充填率を再現するかどうかを確認することができる。

具体的な方法は次の通りである。

対象とした体系形状は、その代表長（球の直径や立方体の一辺）が球状燃料体の直径の 10 倍程度になるように設定した。この比は、原研で建設中の高温ガス炉 H T T R の燃料として用いられている C F P の直径と燃料コンパクトの実効中性子透過厚さの比であると同時に、2.1節で述べた充填率の補正がまだ大きく、領域境界の影響が十分現れる比であり、最も検証するに適していると判断した。それぞれの形状は、Fig. 4.1 に示すように真空空間内に唯一それのみを置き、外部に体系モデル全体を十分に照射できる大きさを持った平行ビームの面線源を設置する。参考までにインベントリ計算のために使用した M C N P - C F P への入力データを付録 B に示す。球状燃料体の体積割合は次式により評価できる。

$$\text{充填率} = \frac{2/3 \cdot d_{\text{CFP}} \cdot N_{\text{ent}}}{N_{\text{pop}} \cdot L_{\text{ave}}}$$

d_{CFP} : 球状燃料体の直径

N_{ent} : 球状燃料体に入射した回数 (= 球状燃料体が設置された回数)

N_{pop} : 球状燃料体を含む体系へ入社した粒子数

L_{ave} : 球状燃料体を含む体系の平均透過長 (=体系の体積/線源面への体系の投影面面積(3次元体系))

また、単1方向点線源を用いることによって、1次元インベントリの評価も可能である。この場合、上式において、 L_{ave} は体系透過長となる。1次元インベントリチェックは3次元インベントリチェックに先立って、実施しており、設定した充填率と一致することを確かめた上で3次元チェックに移っている。

インベントリのチェック計算は平面、球、円柱などの基本形状に対して実施した。それぞれの基本形状に対する計算結果をTable 4. 1に示す。全てのケースにおいて計算された充填率は設定値(exact value)と相対誤差0.1%以内で一致しており、使用したNN D及びそれを用いたサンプリングは正確に確率的な幾何形状モデルを表現していることが確かめられた。

4.2 規則配列充填体系の臨界計算

M C N P - C F P コードの妥当性を球状燃料体が不規則に充填されている体系に対して直接検証することは、このような体系を正確に取り扱うことのできる手法が他にないために困難である。しかし、本研究で提案している手法は不規則に配列している球状燃料体の体系のみではなく、規則的に配列している球状燃料体の体系に対しても、M C R D F コードにより予め N N D 分布を作成しておけば適用することができる。また、球状燃料体が規則的に配列している体系は、当然通常のモンテカルロコードを用いることにより直接正確に幾何形状を与えて計算することができる。そこで、規則的配列を持つ体系を対象として、従来のモンテカルロコードとの比較を行った。

具体的な計算方法は次の通りである。

規則配列充填としては、面心立方格子(FCC)と単純立方格子(UCL)を用いた。オリジナルMCNPを用いた計算及びMCNP-CFPを用いた計算の入力データを参考までに付録Bに示す。この例は単純立方格子の場合であるが、オリジナルMCNPによる計算では、単位格子が4つ積み重なった体系を構成し、周囲を反射条件としている。MCNP-CFPによる計算では、十分大きい立方体の体系を考えその中に球状燃料体を設置することで無限体系を模擬している。また、マトリックス内での散乱が発生した場合の処理のアルゴリズムのチェックも兼ねるため、マトリックスとして黒鉛が存在する場合の計算も実施した。

計算結果をTable 4. 2に示す。単純立方格子と面心立方格子について黒鉛マトリックス有り無しの場合についても計算した。本表より、2つのコードによる実効増倍率は大変良い一致を示し、サンプリングアルゴリズム等を含めたの本手法及びMCNP-CFPコードの妥当性が確認された。

Table 4.1 CFP inventory check calculation results

| Surface type | Packing fraction | | Relative difference (%) | Geometry ^d |
|--------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|---|
| | Exact value ^a | Calculation | | |
| Plane | 0.2187 | 0.2185 ± 0.0003^b | -0.09 | $100 \times 100 \times 100 \text{ (cm)}$ |
| Sphere | 0.2187 | 0.2186 ± 0.0004^c | -0.09 | $r=50\text{cm}$ |
| Cylinder | 0.2187 | 0.2185 ± 0.0004^b | -0.05 | $r=50\text{cm} \text{ by } 100\text{cm-long}$ |
| Cone | 0.1215 | 0.1216 ± 0.0004^b | +0.08 | $r=32\text{cm} \text{ by } 50\text{cm-long}$ |

^aThe value is equal to $0.3 \times f$, where f is a correction factor for the wall interference effect.

^bThe NND was calculated for the packing after decreasing the radius of CFPs packed in RCP.

^cThe NND was calculated for the packing of CFPs packed in 30%.

^dThe CFP radius is 5cm.

Table 4.2 Infinite multiplication factors for ordered packing lattices

| Lattice* | Unit cell dimension (cm) | Matrix material | Infinite multiplication factor | |
|---------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------|
| | | | Original code | MCNP-CFP |
| Cubic | 6 | Graphite | 1.146 ± 0.002 | 1.148 ± 0.002 |
| | | — | 1.105 ± 0.001 | 1.107 ± 0.002 |
| Face centered cubic | 8.48 | Graphite | 1.140 ± 0.002 | 1.141 ± 0.002 |
| | | — | 1.102 ± 0.002 | 1.105 ± 0.003 |

*Calculation conditions are as follows;

- 1) The packing fraction is adjusted to 0.3 by reducing the radii of spherical fuels packed in face centered cubic and cubic lattices.
- 2) The fuel contains 10% enriched UO_2 .

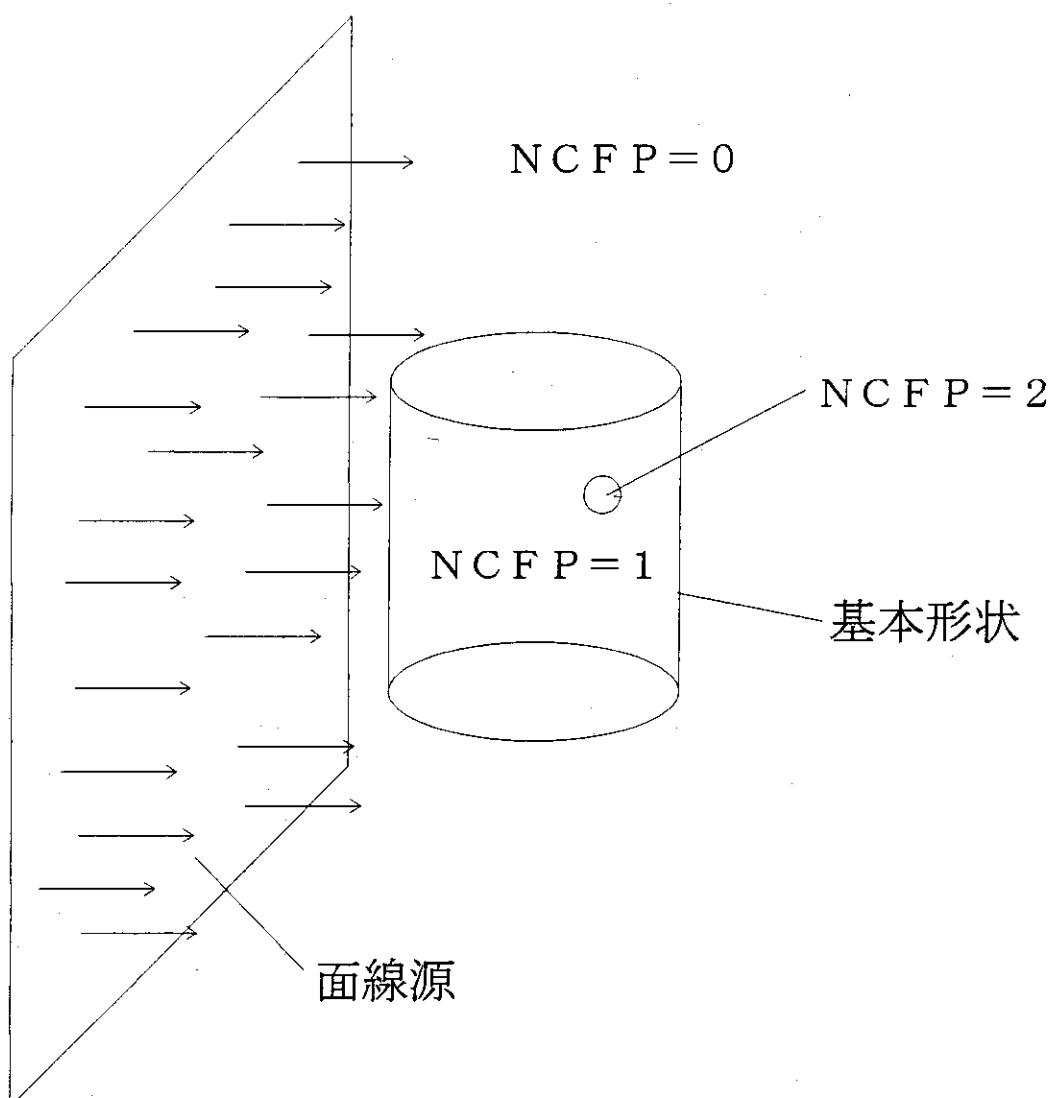


Fig.4.1 Geometry model for inventory check calculation (cylindrical geometry)

5. VHTRCにおける臨界実験結果の解析

本手法は、臨界実験装置による臨界データの解析によりその妥当性が確認することができる。臨界実験としては、我が国唯一の被覆燃料粒子（CFP）を用いた高温ガス炉臨界実験装置VHTRC⁽¹¹⁾を用いて行われた。

5.1 VHTRC臨界実験

VHTRCは日本原子力研究所にある分割タイプの臨界実験装置であり、2つの部分、すなわち固定側と移動側から構成されている。移動側は固定側に動かすことにより体系を臨界にすることができる。VHTRCの外観の概略をFig. 5.1に示す。また、Table 5.1にVHTRCの主要諸元を示す。集合体は6角形状をしており、面間距離2.4m、高さ2.4mである。燃料要素は内側に装荷されており、燃料を覆うように黒鉛の反射体が配置されている。燃料要素は、やはり6角形状の黒鉛ブロックに燃料ピンを装荷するようになっており、燃料ピンは円柱状の黒鉛シースに20個の燃料コンパクトが詰められている。本解析で対象したVHTRC-1炉心にはB-4型燃料と呼ばれる燃料コンパクトが用いられており、コンパクト内には、BISOタイプの被覆がなされた4%の低濃縮UO₂カーネルを用いたCFPが充填されている。実験の詳細については、参考文献(16)を参照されたい。

解析に用いたVHTRC-1炉心の1つであるVHTRC-1-3炉心はB-4型燃料ピンを280本装荷されている炉心である。また、VHTRC-1-4炉心には264本の燃料ピンが装荷されている。これらの炉心の燃料装荷図をFig. 5.2と5.3にそれぞれ示す。

5.2 解析条件

体系は、燃料コンパクトまで考慮し、できるだけ3次元的に正確にモデル化した。VHTRC-1-3及びVHTRC-1-4炉心の計算モデルを実構造の断面と比較した結果をFig. 5.2と5.3に示す。燃料コンパクト内のCFPについては、本手法によるサンプリングを行うため、ある1つのコンパクト内に1つだけモデル化してある。CFPは被覆層を持つので全ての被覆層をモデル化した。解析に必要なNNDはMCRDコードにより求めた。2.2節で述べたとおり燃料コンパクト内のCFPについてはその製造工程を模擬したやり方でNNDを計算する必要がある。VHTRCの燃料コンパクトについては、黒鉛のオーバーコートを施されたCFPの充填率をほぼRCP状態である63.5%に充填し、ついで圧縮成型後焼結する過程を、充填率が33.4%になるように半径を減少させる手順でNNDを求めた。33.4%は2.2節で述べた境界とCFPが干渉する効果の補正により得られたものである。このNNDを用いることでサンプリング後のコンパクト内のCFPの充填率はちょうど30%となる。VHTRC用のNNDをFig. 2.2に示す。使用した核データはENDF/B-IV、JENDL-3.1及び3.2である。計算は日本原子力研究所のF

ACOM VP-2600で実施した。ヒストリー数は1バッチ1000ヒストリの120サイクルで行い、計算時間は約3時間かかった。

5.3 実効増倍率と二重非均質効果の比較

臨界計算結果をTable 5.2にまとめた。両炉心の解析結果は概ね実験値と一致していることがわかる。核データ別に見ると、ENDF/B-IVとJENDL-3.1が良い一致となっているが、JENDL-3.2を用いた結果はかなり大きめの値となっている。核データ間の相違は有意なものであり、その原因是、体系の大部分を占める黒鉛の核データが異なっていることは考えにくく、また熱中性子の散乱カーネルは全て同じものを使用していることから、JENDL-3.2のウランの断面積データに若干の問題があると考えざるを得ない。

Table 5.2には均質化した体系に対するモンテカルロコードによる計算結果も示した。この計算は、コンパクト内をスマアしたものであり、MCNP-CFPによる計算結果と比較することによりCFPの非均質効果による反応度効果を知ることができる。VHTRC-1-4炉心の非均質効果は約1% $\Delta k/k$ であり、他の計算手法による結果との比較をTable 5.3に示した。1つは土橋他⁽¹⁷⁾による1次元格子計算による4種類の近似計算結果でありも、もう1つはSRACコードシステムによる格子計算コードと拡散コードによる全炉心計算による評価結果⁽¹⁸⁾である。3者の計算結果はほぼ一致していることがわかる。この結果から、

従来の手法の二重非均質体系取り扱い法はほぼ妥当であることがわかる。本手法の統計誤差は十分に小さいとは云えないが、非均質反応度も求めることができた。さらにヒストリー数を増やすことにより、さらに信頼度の高い解が得られる。

Table 5.1 Major specifications of VHTRC

| Items | Specification |
|---------------------------------|--------------------|
| Thermal power (W) | 10 |
| Maximum core temperature (°C) | 210 ^a |
| Core height (m) | 2.4 ^b |
| Core diameter (m) | 1.75 |
| Number of fuel columns | 24 |
| Number of control columns | 7 |
| Number of total columns | 31 |
| Fuel element | Prismatic, CFP |
| Fuel compact O.D. (mm) | 36 |
| I.D. (mm) | 18 |
| Height (mm) | 36 |
| ²³⁵ U enrichment (%) | 2, 4 |
| Moderator | Prismatic graphite |

^aThe core is heated by electric heater.^bThe maximum number of fuels is loaded.

Table 5.2 Comparison of effective multiplication factors of VHTRC-1 core

| Case | Nuclear Data Library | Effective multiplication factor | | | Difference(Δk) | Code |
|---------------------|----------------------|---------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------|----------|
| | | VHTRC-1-4 | VHTRC-1-3 | VHTRC-1-4 | | |
| This work | ENDF/B-IV | 1.0098 ± 0.0033 | 0.9941 ± 0.0027 | 0.0045 | -0.0029 | MCNP-CFP |
| | JENDL-3.1 | 1.0110 ± 0.0030 | 0.9984 ± 0.0030 | 0.0057 | 0.0014 | |
| | JENDL-3.2 | 1.0121 ± 0.0032 | 1.0097 ± 0.0030 | 0.0068 | 0.0127 | |
| Monte Carlo(homo.)* | ENDF/B-IV | 0.9993 ± 0.0024 | — | -0.0105 ^b | — | MCNP-3A |
| Experiment | — | 1.0053 | 0.9970 | — | — | — |

^aExact 3-dimensional calculation except smearing the number density in a fuel compact.^bDifference from this work with ENDF/B-IV.

Table 5.3 Comparison of reactivity effect of CFPs in a fuel compact

| Case | Double heterogeneity effect (% $\Delta k/k$) | Condition |
|---|--|--|
| Present work | 1.0 | Calculated by MCNP-CFP |
| Infinite cell calculation ⁽¹⁷⁾ | 0.84~1.08 | Predicted by 4 different approximation methods |
| Core calculation ⁽¹⁸⁾ | 0.90 | Calculated by SRAC ⁽⁴⁾ |

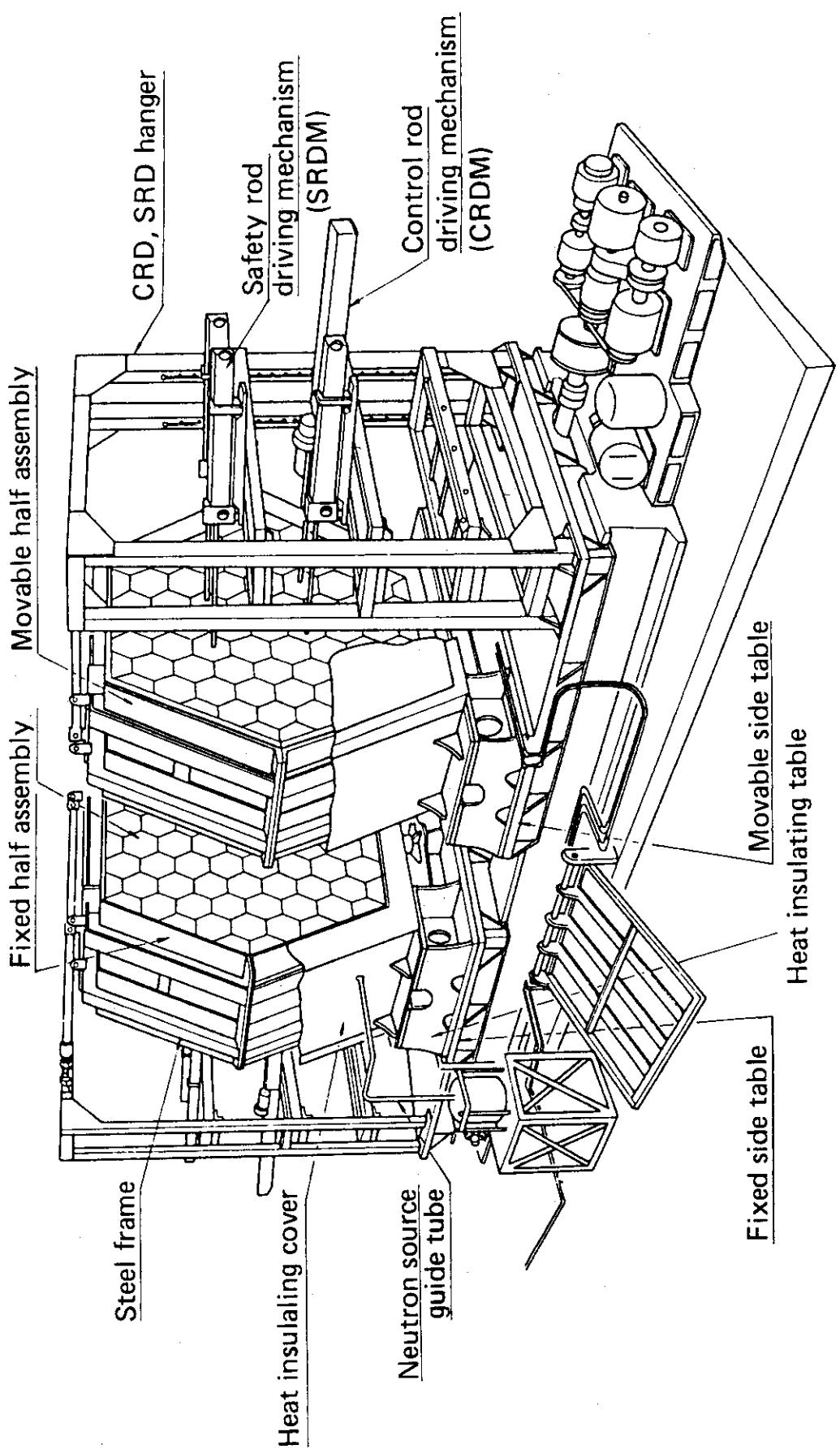
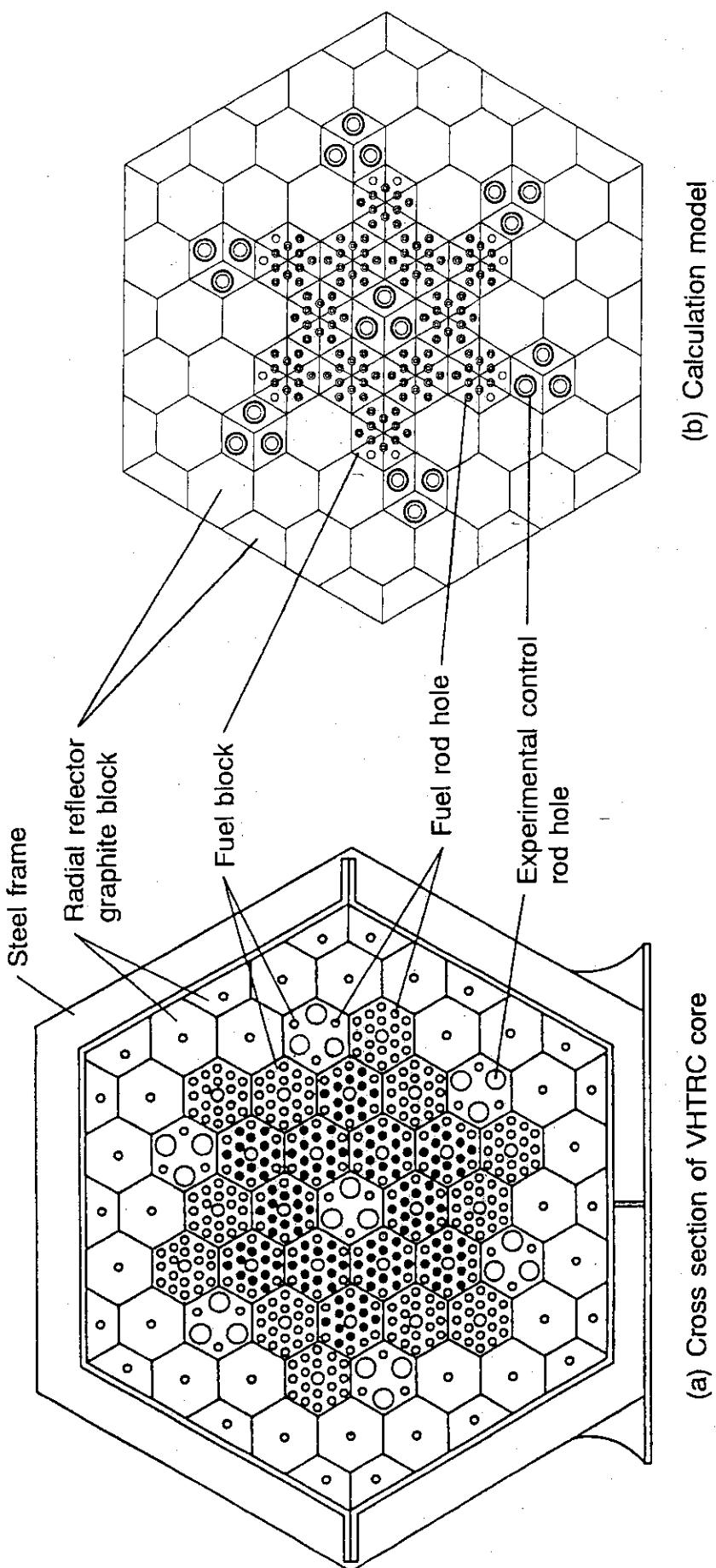


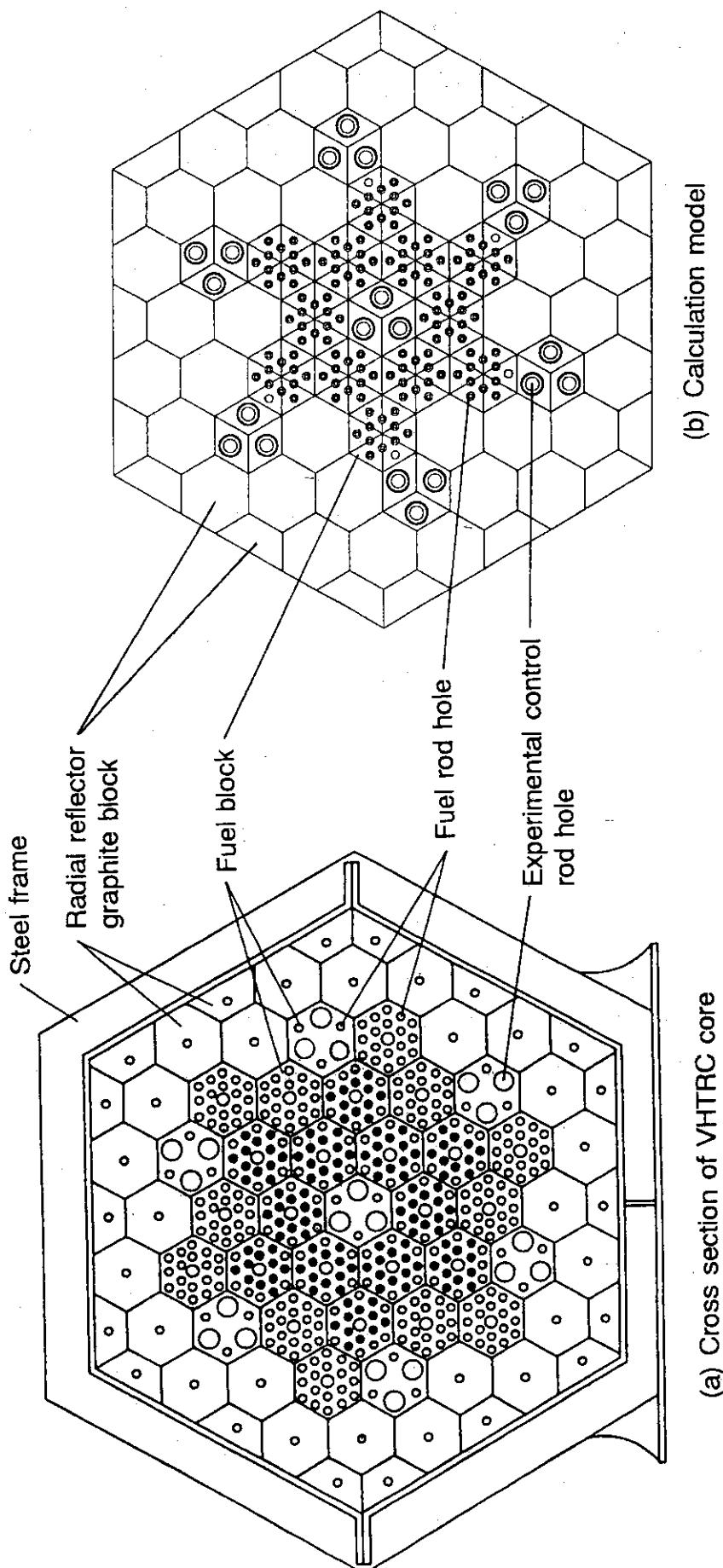
Fig.5.1 Conceptual figure of VHTRC (11)



(a) Cross section of VHTRC core

(b) Calculation model

Fig.5.2 Calculation model of VHTRC-1-3 core compared with the cross section of the real geometry



(a) Cross section of VHTRC core

(b) Calculation model

Fig.5.3 Calculation model of VHTRC-1-4 core compared with the cross section of the real geometry

6.まとめ

連続エネルギーモンテカルロ法により多数の球状燃料体がランダムに配列する体系を確率的幾何形状モデルを用いることにより取り扱う手法を開発した。基本的な取扱手法は、粒子の輸送に沿って球状燃料体の空間分布すなわちNNDを用いて確率的に球状燃料体を設置するものである。本手法を、汎用モンテカルロコードMCNPコードに組み込みMCNP-CFPコードを作成した。

本手法の妥当性は以下の方法により確認された。

- ①モンテカルロ法によりCFPのインベントリを計算し、サンプリング時に所定の充填率だけCFPが設置されていることを確認した。
- ②規則配列体系に対する臨界計算から、CFPのサンプリングアルゴリズムの妥当性を確認した。

本手法は、さらに臨界実験結果の解析に使用し、実験結果と比較することによりその有効性を確認した。

本研究で確立された手法はモデルに近似が無く、多数のランダムに分布する球状燃料体の幾何形状を確率的に取り扱うことで計算を実現した点でユニークな方法である。今後、ベクトル化及び並列化による高速計算の実現とも相まって、特にHTGRの分野において核及び遮蔽設計で幅広く使用されることが期待できる。

謝　　辞

本報をまとめるに当たり、御指導いただいた高温工学試験研究炉開発部長田中利幸氏、高温工学試験研究炉開発部次長塩沢周策氏、原子炉工学部次長土橋敬一郎氏並びに高温工学試験研究炉開発部HTTR原子炉開発室長代理新藤隆一氏に深く感謝いたします。

6. まとめ

連続エネルギーモンテカルロ法により多数の球状燃料体がランダムに配列する体系を確率的幾何形状モデルを用いることにより取り扱う手法を開発した。基本的な取扱手法は、粒子の輸送に沿って球状燃料体の空間分布すなわちNNDを用いて確率的に球状燃料体を設置するものである。本手法を、汎用モンテカルロコードMCNPコードに組み込みMCNP-CFPコードを作成した。

本手法の妥当性は以下の方法により確認された。

- ①モンテカルロ法によりCFPのインベントリを計算し、サンプリング時に所定の充填率だけCFPが設置されていることを確認した。
- ②規則配列体系に対する臨界計算から、CFPのサンプリングアルゴリズムの妥当性を確認した。

本手法は、さらに臨界実験結果の解析に使用し、実験結果と比較することによりその有効性を確認した。

本研究で確立された手法はモデルに近似が無く、多数のランダムに分布する球状燃料体の幾何形状を確率的に取り扱うことで計算を実現した点でユニークな方法である。今後、ベクトル化及び並列化による高速計算の実現とも相まって、特にHTGRの分野において核及び遮蔽設計で幅広く使用されることが期待できる。

謝 辞

本報をまとめるに当たり、御指導いただいた高温工学試験研究炉開発部長田中利幸氏、高温工学試験研究炉開発部次長塩沢周策氏、原子炉工学部次長土橋敬一郎氏並びに高温工学試験研究炉開発部HTTR原子炉開発室長代理新藤隆一氏に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) S.Saito et al.: "Design of High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR)," JAERI-1332(1994).
- (2) R.Shulten et al., Atomwirtsch. Atomtech., 11, 218(1966).
- (3) K.Tsuchihashi and Y.Gotoh, Nucl. Sci. Eng., 58, 213(1975).
- (4) K.Tsuchihashi, Y.Ishiguro, K.Kaneko and M.Ido, "Revised SRAC Code System," JAERI-1302(1986).
- (5) J.Lieberoth and A.Stojadinovic, Nucl. Sci. Eng., 76, 336(1980).
- (6) M.Segev and M.Caner, Nucl. Sci. Eng., 112, 43(1992).
- (7) R.Shindo, K.Yamashita and I.Murata, "DELIGHT-7; One Dimensional Fuel Cell Burnup Analysis Code for High Temperature Gas-cooled Reactor(HTGR)," JAERI-M 90-048(1990).
- (8) H.Harada and K.Yamashita, "The Reactor Core Analysis Code CITATION-1000VP for High Temperature Engineering Test Reactor," JAERI-M 89-135(1989).
- (9) W.Drechsel, G.Ivens and A.Schatz, Atomwirtsch. Atomtech., 11, 265(1966).
- (10) I.Murata, T.Mori, M.Nakagawa et al. :"MCRDF: Three Dimensional Monte Carlo Hard Sphere Packing Simulation code," to be published in JAERI-Data/Code (1996). See also, I.Murata, T.Mori, and M.Nakagawa :"Continuous Energy Monte Carlo Calculations of Randomly Distributed Spherical Fuels in HTGRs Based on Statistical Geometry Model," to be published in Nucl. Sci. Eng. (1996).
- (11) H.Yasuda et al., "Construction of VHTRC(Very High Temperature Reactor Critical Assembly)," JAERI-1305(1986).
- (12) J.K.Percus and G.J.Yevick, Phys. Rev., 110, 1(1957).
- (13) K.Fukuda, Private communication.
- (14) K.Fukuda et al., "Research and Development of HTGR Fuels," JAERI-M 89-007 (1989).
- (15) J.Briesmeister, "MCNP-3B Newsletter," Los Alamos National Laboratory(1988).
- (16) K.Yamashita, R.Shindo, I.Murata and T.Watanabe, "Accuracy Investigation of Nuclear Design Method for High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR) Based on VHTRC Experimental Data," JAERI-M 88-245(1988).
- (17) K.Tsuchihashi, Y.Ishiguro and K.Kaneko, J. Nucl. Sci. Technol., 22(1), 16(1985)
- (18) F.Akino, Private communication.

- (19) G. S. Cargill III, J. Appl. Phys., 41, 2248 (1970).
- (20) G. J. Throop and R. J. Bearman, J. Chem. Phys., 42(7), 2408 (1965).

付録A MCNP-CFPコードの入力データとジョブ制御文

(1) 入力データ

球状燃料体を取り扱う場合に必要な入力データは球状燃料体の形状等のデータ（これは、MCNPオリジナルの入力データ（FT31）、NNDデータ（FT09）及びセルの属性データ（FT10）がある。以下にそれぞれについて説明する。

1) 球状燃料体の形状等の入力

球状燃料体の形状等の入力は、通常のMCNPの入力基番である31番より入力する。今、Fig.A.1に示すような球状燃料体を含む体系を解析する場合を考える。球状燃料体は3層から構成され、セル1、2及び3にランダムに含まれているとする。このとき、セル及びサーフェスデータは次のようになる。

セルデータ

| | | |
|---|----------------------|-------|
| 1 | 6 -5 -7 <u>12</u> | b) 参照 |
| 2 | 6 -5 -8 <u>12</u> | |
| 3 | 6 -5 -9 <u>12</u> | |
| 4 | 1 -3 4 -2 6 -5 7 8 9 | |
| 5 | -10 | a) 参照 |
| 6 | 10 -11 | |
| 7 | 11 -12 | |
| 8 | -1: 3: -4: 2: -6: 5 | |

サーフェスデータ

| | | |
|----|--------------|-------|
| 1 | PY 0 | |
| 2 | PX 10 | |
| 3 | PY 30 | |
| 4 | PX 0 | |
| 5 | PZ 10 | |
| 6 | PZ 0 | |
| 7 | C/Z 5 5 4 | |
| 8 | C/Z 5 15 4 | |
| 9 | C/Z 5 25 4 | |
| 10 | S 5 5 5 0.01 | c) 参照 |
| 11 | S 5 5 5 0.02 | |
| 12 | S 5 5 5 0.03 | |

球状燃料体のセルサーフェスデータ入力での注意点は次の通りである。

- a) 球状燃料体が複数の層を持つ場合、セルの指定は必ず内側から行う
- b) 球状燃料体が設置される可能性のあるセルの指定には、必ず球状燃料体の最外殻構成球より外側であることを示す入力を行う
- c) 球状燃料体の構成球のサーフェス指定は必ず S (一般球) で行う

2) NNDデータの入力

2.1に述べたとおり、NNDは3種類入力する必要がある。入力は、NND3、NND1、NND2の順に行う。入力フォーマットを以下に示す。

| 入力順 | フォーマット | 説明 |
|-----|--------------|--|
| 1 | (I5, 2F10.0) | NBND(1) : NNDの群数 WBND(1) : 1群の幅 FP : 充填率 |
| 2 | (E12. 0) | APRB(I, 1), I=1, NBND(1) : NND3のデータ |
| 3 | (I5, F10. 0) | NBND(2) : NNDの群数 WBND(2) : 1群の幅 |
| 4 | (E12. 0) | APRB(I, 2), I=1, NBND(2) : NND1のデータ |
| 5 | (I5, F10. 0) | NBND(3) : NNDの群数 WBND(3) : 1群の幅 |
| 6 | (E12. 0) | APRB(I, 3), I=1, NBND(3) : NND2のデータ |

3) セル属性データ入力

輸送計算時にMCNP-CFPが、どのセルに粒子がきたときに球状燃料体を設置するかという判断を行うためのデータが必要である。これがセル属性データである。セル属性データは各セル毎に与えられ、そのセルが、球状燃料体を含むのかまた、球状燃料体そのものであるかなどを判断するためのデータである。以下に、データの入力フォーマットを示す。

| 入力順 | フォーマット | 説明 |
|-----|--------|---|
| 1 | (*) | NODT : セル属性データの入力個数 (=セルの入力数) |
| 2 | (10I5) | NCFP(I), I=1, NODT : セル属性データ 0 : 球状燃料体を含まない通常のセル 1 : 球状燃料体を含むセル 2 : 球状燃料体である |

(2) ジョブ制御文

日本原子力研究所の大型計算機FACOM-VP2600で計算するためのジョブ制御文をFig. A.

2に示す。基番31以降はオリジナルM C N P の入出力ファイルである。FT06はデバック用の出力ファイルである。その他の入出力ファイルは次の通りである。

| 基番 | I/O | 説明 |
|-------|-------|---------------|
| 9 | READ | NN Dデータ |
| 10 | READ | セル属性データ |
| 11 | READ | 本バージョンでは使用しない |
| 12-15 | DUMMY | — |

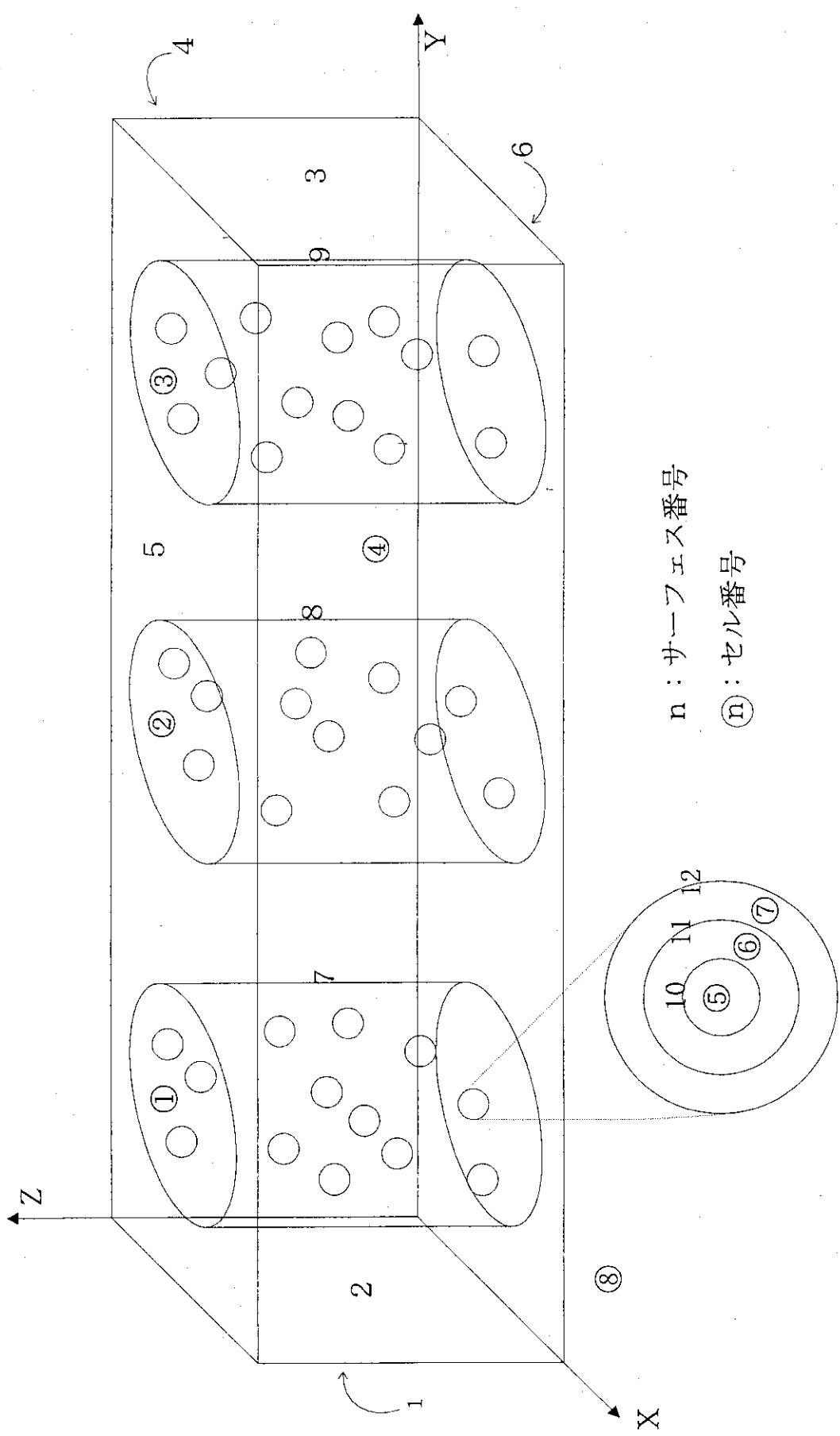


Fig.A.1 Sample input for statistical geometry model

```

-INC JCH4506                               00000100
T.14 C.8 W.6 I.10                         00000200
OPTP PASSWORD=MCNP,CLASS=8                 00000300
//JOBLIB DD DISP=SHR,DSN=J4506.MCNP3B.V4.NODEBUG.TMCCS.LOAD 00000400
//MCNP EXEC PGM=M3BV43C                   00000500
//*OBLIB DD DISP=SHR,DSN=J4506.MCNP3B.V41A.LOAD             00000600
//*CNP EXEC PGM=M3BV43B                   00000700
//*OBLIB DD DISP=SHR,DSN=J7119.MCNP3B.V32.LOAD             00000800
//*CNP EXEC PGM=M3BV37B                   JCL FOR VHTRC-1-4 00000900
//SUBSYS DD SUBSYS=(VPCS,'SIZE=(000000K,00M)')           00001000
/*      FOR HTTR BASED ON B-IV AND JENDL-3.1            00001100
//*T35F001 DD DISP=SHR,DSN=J4506.XSDIR2.B.DATA,LABEL=(,,,IN) 00001200
//*T34F001 DD DISP=SHR,DSN=J4506.BMCCS2.B.DATA,LABEL=(,,,IN) 00001300
/*      FOR JENDL-3                            00001500
/*FT35F001 DD DISP=SHR,DSN=J4506.MCNP4.FSXDIR.STD2,LABEL=(,,,IN) 00001600
/*FT34F001 DD DISP=SHR,DSN=J0000.FSXLIB3.R3.DATA,LABEL=(,,,IN) 00001700
/*      FOR JENDL-3                            00001701
/*FT35F001 DD DISP=SHR,DSN=J4506.MCNP4.FSXDIR.STD2,LABEL=(,,,IN) 00001702
/*FT34F001 DD DISP=SHR,DSN=J4506.FSXLIB3.DATA,LABEL=(,,,IN)   00001703
/*      FOR BMCCS2                            00001710
//FT35F001 DD DISP=SHR,DSN=J4506.MCNP4.FSXDIR.STD2,LABEL=(,,,IN) 00001720
//FT34F001 DD DISP=SHR,DSN=J4506.MCNP.BMCCS2.DATA,LABEL=(,,,IN) 00001730
/*      S(A,B) FILE AND PHOTON X-SEC FILE        00001740
//FT63F001 DD DISP=SHR,DSN=J4506.MCNP.TMCCS2.DATA,LABEL=(,,,IN) 00001800
//FT64F001 DD DISP=SHR,DSN=J4506.MCPL2.DATA,LABEL=(,,,IN)     00001810
/*
//*T33F001 DD UNIT=WK10,DISP=NEW,SPACE=(TRK,(100,10))       00002000
//*T33F001 DD DSN=J4506.FT33B.DATA,DISP=SHR                00002100
//FT33F001 DD DSN=J4506.FT33B.DATA,                         00002200
//      SPACE=(TRK,(50,50)),UNIT=TSSWK2,                  00002300
//      DCB=(BLKSIZE=19004,LRECL=19000,DSORG=PS,RECFM=VBS), 00002400
//      DISP=(NEW,CATLG,DELETE)                           00002500
//*T38F001 DD UNIT=WK10,DISP=NEW,SPACE=(TRK,(100,10))       00002600
//*T38F001 DD DSN=J4506.FT38B.DATA,DISP=SHR                00002700
//FT38F001 DD DSN=J4506.FT38B.DATA,                         00002800
//      SPACE=(TRK,(50,50)),UNIT=TSSWK2,                  00002900
//      DCB=(BLKSIZE=19004,LRECL=19000,DSORG=PS,RECFM=VBS), 00003000
//      DISP=(NEW,CATLG,DELETE)                           00003100
//FT58F001 DD DUMMY                                     00003200
//FT59F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FBA,LRECL=137,BLKSIZE=19043) 00003300
//*T32F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FBA,LRECL=137,BLKSIZE=19043) 00003400
//*T32F001 DD DUMMY                                     00003500
//FT32F001 DD DSN=J4506.FT32B.DATA,UNIT=TSSWK2,SPACE=(TRK,(20,20)), 00003600
//      DCB=(RECFM=FBA,BLKSIZE=13700,LRECL=137),DISP=(NEW,CATLG,DELETE) 00003700
//*T06F001 DD DUMMY                                     00003800
//FT06F001 DD DSN=J4506.FT06B.DATA,UNIT=TSSWK2,SPACE=(TRK,(20,20)), 00003900
//      DCB=(RECFM=FBA,BLKSIZE=13700,LRECL=137),DISP=(NEW,CATLG,DELETE) 00004000
//FT31F001 DD DSN=J4506.M.CNTL(VHTRR6),DISP=SHR          00004200
//*T31F001 DD DSN=J4506.M.CNTL(CKCODE),DISP=SHR          00004300
//*T09F001 DD DSN=J4506.MCNP3B.V41A.DATA(LGAN334B),DISP=SHR 00004400
//*T09F001 DD DSN=J4506.J7119.NND334X.CFP.DATA,DISP=SHR  00004500
//FT09F001 DD DSN=J4506.NND.DATA(F334F334),DISP=SHR       00004600
//FT10F001 DD DSN=J4506.J7119.MCNP3B.V41A.DATA(VHTRCFP1),DISP=SHR 00004700
//FT11F001 DD DSN=J4506.NND.EXACT.DATA,DISP=SHR          00004800
//FT12F001 DD DUMMY                                     00004900
//FT13F001 DD DUMMY                                     00005000
//FT14F001 DD DUMMY                                     00005100
//FT15F001 DD DUMMY                                     00005200

```

Fig.A.2 Job control statement for MCNP-CFP calculation

付録B MCNP-CFP検証計算の入力データ

(1) 球状燃料体のインベントリチェック

球状燃料体のインベントリチェック計算のための入力データの例Fig. B. 1に示す。この体系は、大きな球の内部に設置された直径100cm高さ100cmの円柱であり、その内部に直径10cmの球を1つモデル化してある。線源はSDEFカードにより平行ビームを設定している。インベントリチェック計算は、マテリアル無しで行うため、計算時間はきわめて少なく、通常数分程度の計算で十分な精度が得られる。

Table B. 1にセル属性データを示す。

(2) 規則配列充填体系臨界計算

規則配列充填体系臨界計算のための入力データの例をFig. B. 2及びB. 3に示す。この場合には、オリジナルMCNPとMCNP-CFPのための2種類の入力データが必要となる。図は共に単純立法格子のデータであるFig. B. 2はオリジナルMCNPのための入力データであり、8つの1/8球（半径約2.51cm）が立方体（一辺6cm）の8つの角に存在する形状となっている。立方体を構成する6つのサーフェスは全て反射条件としており、無限体系を模擬している。一方、MCNP-CFPの入力データでは、球をその大きさ（半径2.51cm）に比べ十分に大きい立方体（一辺1000cm）内に1個モデル化してある。この立方体内で確率的に球がサンプリングされることとなる。大きな立方体としているのは、壁効果による充填率の減少を無視できる程度に抑えるためである。当然、立方体を構成するサーフェスは反射条件としている。

Table B. 1にセル属性データを示す。

Table B.1 MCNP cell data corresponding to Figs.B.1 and B.3

| Fig. | セルの数 NODT | セル属性データ | | | | | |
|-----------|--------------|---------|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Fig. B. 1 | 6 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Fig. B. 3 | 2 | 1 | 2 | | | | |

```

CFP INVENTORY CHECK CALCULATION (CYLINDER)          00000100
1      0   -9   10  -11   2                         IMP:N=1
2      0   ( 9: -10: 11)  -1   4                   IMP:N=1
3      0   1                           IMP:N=0
4      0   -2                           IMP:N=1
5      0   ( 9: -10: 11)  -1   3  -4             IMP:N=1
6      0   ( 9: -10: 11)  -1   -3               IMP:N=1
                                              00000200
                                              00000300
                                              00000400
                                              00000500
                                              00000600
                                              00000700
                                              00000800
                                              00000900
                                              00001000
                                              00001100
                                              00001200
                                              00001300
                                              00001400
                                              00001500
                                              00001600
                                              00001700
                                              00001800
                                              00001900
                                              00002000
                                              00002100
                                              00002200
                                              00002300
                                              00002400
                                              00002500
                                              00002600
                                              00002700
                                              00002800
                                              00002900
                                              00003000
                                              00003100
                                              00003200
                                              00003300
                                              00003400
                                              00003500
                                              00003600
                                              00003700
                                              00003800
                                              00003810
                                              00003900
                                              00004000
                                              00004100
                                              00004200
                                              00004300
                                              00004400
                                              00004500
                                              00004700
                                              00004800
                                              00004900
                                              00005000
                                              00005100
                                              00005200
                                              00005300
                                              00005400
                                              00005500
                                              00005600
                                              00005700
                                              00005800
                                              00005900
                                              00006000
                                              00006100
                                              00006200
                                              00006300
                                              00006400
                                              00006500
                                              00006600
                                              00006700
                                              00006800

C
C     FIXED SOURCE CALCULATION           MAYBE CHANGE
C
SDEF    SUR=3 POS=-55. 0. 0. RAD=D1 WGT=3.141592E4 DIR=1.
C     UNIFORM DISTRIBUTION IN AREA
C     MAYBE CHANGE
SI1     0.      100.0
SP1     -21 1
C
C     TALLY SPECIFICATION
C     3CM-RADIUS*9CM-LONG
C     VOL    2.544686E2 5J
C     3CM-RADIUS*4.5CM-LONG
C     VOL    1.272345E2 5J
C     INV=C CUBIC CASE
C     MAYBE CHANGE
C     VOL    3.92699E5      5J
VOL     7.853982E5      5J
F2:N     4
FS2     -5 -6 -7 -8
SD2     3.1416E2 9.4248E2 1.5708E3 2.1991E3 1.
F4:N     1
F24:N    4
C
MODE     N
C     NPS    20000
C     DBCN   2J 3 3
CTME    2.
C     CUTOFF CARDS
PHYS:N   14.918   0.00
CUT:N    J  0  0
C
IDUM     4J  0  0      1  1
C     IDUM     4J  0  1  5000  1
C     SPHERE   CYLINDER
C     PLANE    OUTSIDE INSIDE OUTSIDE INSIDE
C     10CM-RADIUS
RDUM     7J 1.0 1.0
C     CYLINDER 6C-DIAM * 9CM OR 4.5CM
C     RDUM    1.7321  1.74543 1.71907 1.74543 1.71907
C     ORIGINALS
C     RDUM    1.7321  1.7784  1.7107  1.7784  1.7107
C     RDUM    1.001
C     RDUM    1.0268
LOST     10
PRINT

```

Fig.B.1 Example of input data for inventory calculation of spherical fuels in cylindrical system with MCNP-CFP

```

CUBIC LATTICE CRYSTAL WITH REFLECTIVE BOUNDARY CONDITION      BU3
  1   1   -1.78    -1   3   -2   4   -5   6   7   8   9   10
                                                 11   12   13   14 IMP:N=1  BU3
  2   2   -11.7    -1   4   -5   -7 IMP:N=1  BU3
  3   2   -11.7    -1   4   6   -8 IMP:N=1  BU3
  4   2   -11.7    -1   -5   -2   -9 IMP:N=1  BU3
  5   2   -11.7    -1   6   -2   -10 IMP:N=1  BU3
  6   2   -11.7    4   -5   3   -11 IMP:N=1  BU3
  7   2   -11.7    -5   -2   3   -12 IMP:N=1  BU3
  8   2   -11.7    6   4   3   -13 IMP:N=1  BU3
  9   2   -11.7    6   -2   3   -14 IMP:N=1  BU3

*1   PX     3          BU3
*2   PY     3          BU3
*3   PX    -3          BU3
*4   PY    -3          BU3
*5   PZ     3          BU3
*6   PZ    -3          BU3
  7   S     3   -3   3   2.50978385  BU3
  8   S     3   -3   -3  2.50978385  BU3
  9   S     3   3   3  2.50978385  BU3
 10  S     3   3   -3  2.50978385  BU3
 11  S    -3   -3   3  2.50978385  BU3
 12  S    -3   3   3  2.50978385  BU3
 13  S    -3   -3   -3  2.50978385  BU3
 14  S    -3   3   -3  2.50978385  BU3

MODE      N
M1       6012.44    1.0          BU3
M2       92235.44    0.1          BU3
C        KCODE 2000    1.0          5  150  BU3
KCODE   2000    1.0          5  100  BU3
KSRC    2.9  2.9  2.9          BU3
PHYS:N  14.918    0          BU3
CUT:N   J     0     0          BU3
IDUM    4J     0          BU3
PRINT

```

Fig.B.2 Example of input data for criticality calculation of ordered packed geometry (cubic lattice) with MCNP-3B

```

CRYSTAL ( WITH MCNP.CFP )
  1   1   -1.78    -1   3   -2   4   -5   6   7           IMP:N=1  BUCLC2
  2   2   -11.7    -7           IMP:N=1  BUCLC2
*1   PX     1000.          BUCLC2
*2   PY     1000.          BUCLC2
*3   PX    -1000.          BUCLC2
*4   PY    -1000.          BUCLC2
*5   PZ     1000.          BUCLC2
*6   PZ    -1000.          BUCLC2
  7   S     0.00001 0.00001 0.00001 2.50978385  BUCLC2

MODE      N
M1       6012.44    1.0          BUCLC2
M2       92235.44    0.1          BUCLC2
KCODE   1000    1.0          5  100  BUCLC2
KSRC    0     0     0          BUCLC2
PHYS:N  14.918    0          BUCLC2
CUT:N   J     0     0          BUCLC2
IDUM    4J     0          BUCLC2
RDUM    1.732051          BUCLC2
LOST    1000          BUCLC2
PRINT

```

Fig.B.3 Example of input data for criticality calculation of ordered packed geometry with MCNP-CFP