

JAERI - M  
93-210

高並列分散メモリ型計算機におけるモンテカルロ  
中性子・光子輸送計算コードMCNP 4 の並列化

1993年11月

増川 史洋・高野 誠・内藤 傲孝・山崎 孝男<sup>\*</sup>  
藤崎 正英<sup>\*</sup>・鈴木孝一郎<sup>\*</sup>・奥田 基<sup>\*</sup>

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

JAERI-M 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、お申しこしください。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。

JAERI-M reports are 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, 1993

---

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

高並列分散メモリ型計算機におけるモンテカルロ中性子・光子輸送計算コード  
MCNP 4 の並列化

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

増川 史洋・高野 誠・内藤 健孝

山崎 孝男\*・藤崎 正英\*・鈴木孝一郎\*

奥田 基\*

(1993年10月1日受理)

遮蔽解析計算速度・精度の向上を目的としてモンテカルロ中性子・光子輸送計算コード MCNP 4 の並列化を行い、高並列分散メモリ型計算機 AP1000 においてその性能を評価した。コードを静的・動的に解析し、MCNP 4 の遮蔽計算機能について並列化のアルゴリズムを策定した。効果的な並列化を行うためにヒストリの各 processor element への割当は動的に空いているものへ行うようにしたほか、通信処理の飽和を避けられるように複数ヒストリをまとめてバッチ処理を行えるようにした。サンプルとして 2,000,000 ヒストリで行ったキャスク解析では、512 台構成の AP1000 により約 82 % の並列化効率が得られ、実計算速度としても FACOM M-780 の約 50 倍（推定）の速さが達成できた。

Parallelization of MCNP 4, a Monte Carlo Neutron and Photon  
Transport Code System, in Highly Parallel Distributed  
Memory Type Computer

Fumihiro MASUKAWA, Makoto TAKANO, Yoshitaka NAITO  
Takao YAMAZAKI\*, Masahide FUJISAKI\*, Koichiro SUZUKI\*  
and Motoi OKUDA\*

Department of Fuel Cycle Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 1, 1993)

In order to improve the accuracy and calculating speed of shielding analyses, MCNP 4, a Monte Carlo neutron and photon transport code system, has been parallelized and measured of its efficiency in the highly parallel distributed memory type computer, AP1000. The code has been analyzed statically and dynamically, then the suitable algorithm for parallelization has been determined for the shielding analysis functions of MCNP 4. This includes a strategy where a new history is assigned to the idling processor element dynamically during the execution. Furthermore, to avoid the congestion of communicative processing, the batch concept, processing multi-histories by a unit, has been introduced. By analyzing a sample cask problem with 2,000,000 histories by the AP1000 with 512 processor elements, the 82 % of parallelization efficiency is achieved, and the calculational speed has been estimated to be around 50 times as fast as that of FACOM M-780.

Keywords: Parallel Computer, Monte Carlo, Speedup, Shielding Analysis,  
MCNP

---

\* FUJITSU LIMITED

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. MCNP 4 のプログラム解析 .....	1
2.1 オリジナルソースプログラムに対する変更点 .....	1
2.2 オリジナルプログラムの解析 .....	2
2.3 データ構造 .....	5
2.4 外部ファイルI/O .....	6
2.5 コスト分析結果 .....	7
3. MCNP 4 の並列化 .....	7
3.1 並列化の方針 .....	7
3.2 ホスト側プログラム構造 .....	11
3.3 PE 側プログラム .....	13
3.4 データ通信量の評価 .....	15
3.5 本並列版 MCNP 4 の問題点 .....	18
4. 並列版 MCNP 4 の性能評価 .....	19
5. まとめ .....	23
謝 辞 .....	23
参考文献 .....	23
付録A AP1000における並列版 MCNP 4 使用の手引き .....	24
付録B サンプル問題入力データ .....	27

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Analysis of MCNP 4 Code for Parallelization .....	1
2.1	Modification to the Original Source Program .....	1
2.2	Analysis of the Original Program .....	2
2.3	Structures of COMMON Data .....	5
2.4	External I/O .....	6
2.5	Analyses of the CPU Costs .....	7
3.	Parallelizing the MCNP 4 .....	7
3.1	Strategy for Parallelization .....	7
3.2	Algorithm of Host Processor .....	11
3.3	Algorithm of Processor Elements .....	13
3.4	Cost of Message Passing .....	15
3.5	Controvertible Points in the Parallelized Code .....	18
4.	Performance .....	19
5.	Conclusions .....	23
	Acknowledgements .....	23
	References .....	23
	Appendix A Guidances for the Paralellized MCNP 4 .....	24
	Appendix B Sample Inputs .....	27

## 1. はじめに

中性子や光子等の輸送計算において、モンテカルロ法は、(1) 体系の形状を厳密に表現できる、(2) エネルギーを連続的に取り扱うことができる、と言う点で Sn 法や衝突確率法等の解析的手法よりも優れている。しかしながらモンテカルロ法により得られる解は期待値であり、解の精度は分散あるいは相対誤差で表されるため、精度の高い解を得るためにには分散低減法の使用もさることながら、膨大な粒子数のランダムウォークシミュレーションを行わなければならない。

近年、計算機の発達に伴い、臨界計算及び遮蔽計算の分野でもモンテカルロ法が利用されているものの、前者で問題にされるのが系全体で見た積分量に相当する増倍率（臨界固有値）であるのに対し、遮蔽計算の場合は遮蔽材で隔離された特定の位置における線量率といったような局所的な量であるので、分散の小さい精度の高い解を得るためにには、試行錯誤によって様々な分散低減手法を適切に選択する必要がある。しかし、臨界固有値を求める場合と違って、遮蔽モンテカルロ計算においては 1 つ 1 つの粒子は互いに独立であり、評価される線量は検出器に対する 1 つ 1 つの粒子の寄与の重ね合わせであるので、遮蔽モンテカルロ計算は本質的に並列処理に適している。最近発達の目覚ましい並列計算機の利用による計算の高速化により、遮蔽モンテカルロ計算に伴う分散低減手法の選択やパラメータチューニングの労力は軽減されるであろう。

当研究室では、遮蔽モンテカルロ計算に対する並列計算機の適用性を、MCACE コードの並列化<sup>(1)-(4)</sup>を通じて検討し、並列処理による計算の高速化が有効に行われることを示してきた。本報では、米国ロスアラ莫斯国立研究所で開発された汎用中性子・光子モンテカルロ輸送計算コード MCNP 4<sup>(5)</sup> の遮蔽計算機能について並列化を施し、その並列化性能を検討した結果について報告する。本研究で MCNP 4 を選択した理由は(1) 様々な分散低減法をサポートしており、なおかつ用いた手法が適切に働いているかどうかを判断するための情報が充実していること、(2) MCACE コードはエネルギー多群であるのに対し、連続エネルギーであること、等である。なお、本研究で用いた並列計算機は富士通の MIMD (Multi-Instruction Stream Multi-Data Stream) 型の高並列計算機 AP1000<sup>(6)</sup> である。MCNP 4 は共有メモリ型の並列計算機 CRAY-2 用のプログラムもサポートしているが、AP1000 は分散メモリ型の計算機であり、並列化の方法は詳細においてかなり異なったものとなる。

## 2. MCNP 4 のプログラム解析

### 2.1 オリジナルソースプログラムに対する変更点

MCNP 4 を並列化するためには、先ずプログラムの静的／動的な解析を行い、ホスト／セルプロセッサエレメントがそれぞれ担当すべき処理に応じてプログラムを分割し、適当な通信ルーチンにより、分割したプログラムをデータを介して接続する。但し、並列化に先立って SUN 用のオリジナルソースに対し変更を加えた。以下に理由とともに記す。

- (1) オリジナルコードでは変数の宣言部にインクルード文が使われていなかったために約 70,000 行にもなっていたので、並列化を行う上での便宜を考えてこの部分をインクルード化した。
- (2) 途中結果のプロットの為に CGS ないし GKS のグラフィックライブラリーを参照しているが、

## 1. はじめに

中性子や光子等の輸送計算において、モンテカルロ法は、(1) 体系の形状を厳密に表現できる、(2) エネルギーを連続的に取り扱うことができる、と言う点で Sn 法や衝突確率法等の解析的手法よりも優れている。しかしながらモンテカルロ法により得られる解は期待値であり、解の精度は分散あるいは相対誤差で表されるため、精度の高い解を得るためにには分散低減法の使用もさることながら、膨大な粒子数のランダムウォークシミュレーションを行わなければならない。

近年、計算機の発達に伴い、臨界計算及び遮蔽計算の分野でもモンテカルロ法が利用されているものの、前者で問題にされるのが系全体で見た積分量に相当する増倍率（臨界固有値）であるのに対し、遮蔽計算の場合は遮蔽材で隔離された特定の位置における線量率といったような局所的な量であるので、分散の小さい精度の高い解を得るためにには、試行錯誤によって様々な分散低減手法を適切に選択する必要がある。しかし、臨界固有値を求める場合と違って、遮蔽モンテカルロ計算においては 1 つ 1 つの粒子は互いに独立であり、評価される線量は検出器に対する 1 つ 1 つの粒子の寄与の重ね合わせであるので、遮蔽モンテカルロ計算は本質的に並列処理に適している。最近発達の目覚ましい並列計算機の利用による計算の高速化により、遮蔽モンテカルロ計算に伴う分散低減手法の選択やパラメータチューニングの労力は軽減されるであろう。

当研究室では、遮蔽モンテカルロ計算に対する並列計算機の適用性を、MCACE コードの並列化<sup>(1)~(4)</sup>を通じて検討し、並列処理による計算の高速化が有効に行われることを示してきた。本報では、米国ロスアラモス国立研究所で開発された汎用中性子・光子モンテカルロ輸送計算コード MCNP 4<sup>(5)</sup> の遮蔽計算機能について並列化を施し、その並列化性能を検討した結果について報告する。本研究で MCNP 4 を選択した理由は(1) 様々な分散低減法をサポートしており、なおかつ用いた手法が適切に働いているかどうかを判断するための情報が充実していること、(2) MCACE コードはエネルギー多群であるのに対し、連続エネルギーであること、等である。なお、本研究で用いた並列計算機は富士通の MIMD (Multi-Instruction Stream Multi-Data Stream) 型の高並列計算機 AP1000<sup>(6)</sup> である。MCNP 4 は共有メモリ型の並列計算機 CRAY-2 用のプログラムもサポートしているが、AP1000 は分散メモリ型の計算機であり、並列化の方法は詳細においてかなり異なったものとなる。

## 2. MCNP 4 のプログラム解析

### 2.1 オリジナルソースプログラムに対する変更点

MCNP 4 を並列化するためには、先ずプログラムの静的／動的な解析を行い、ホスト／セルプロセッサエレメントがそれぞれ担当すべき処理に応じてプログラムを分割し、適当な通信ルーチンにより、分割したプログラムをデータを介して接続する。但し、並列化に先立って SUN 用のオリジナルソースに対し変更を加えた。以下に理由とともに記す。

- (1) オリジナルコードでは変数の宣言部にインクルード文が使われていなかったために約 70,000 行にもなっていたので、並列化を行う上での便宜を考えてこの部分をインクルード化した。
- (2) 途中結果のプロットの為に CGS ないし GKS のグラフィックライブラリーを参照しているが、

今回の並列化作業ではグラフィック処理に関してはコメント化して、取り扱わないものとした。

## 2.2 オリジナルプログラムの解析

おおまかな計算の流れを Fig. 2.1 に示す。さらにプログラムのおおまかな構造を、サブルーチン名とその処理概要とともに以下に示す。

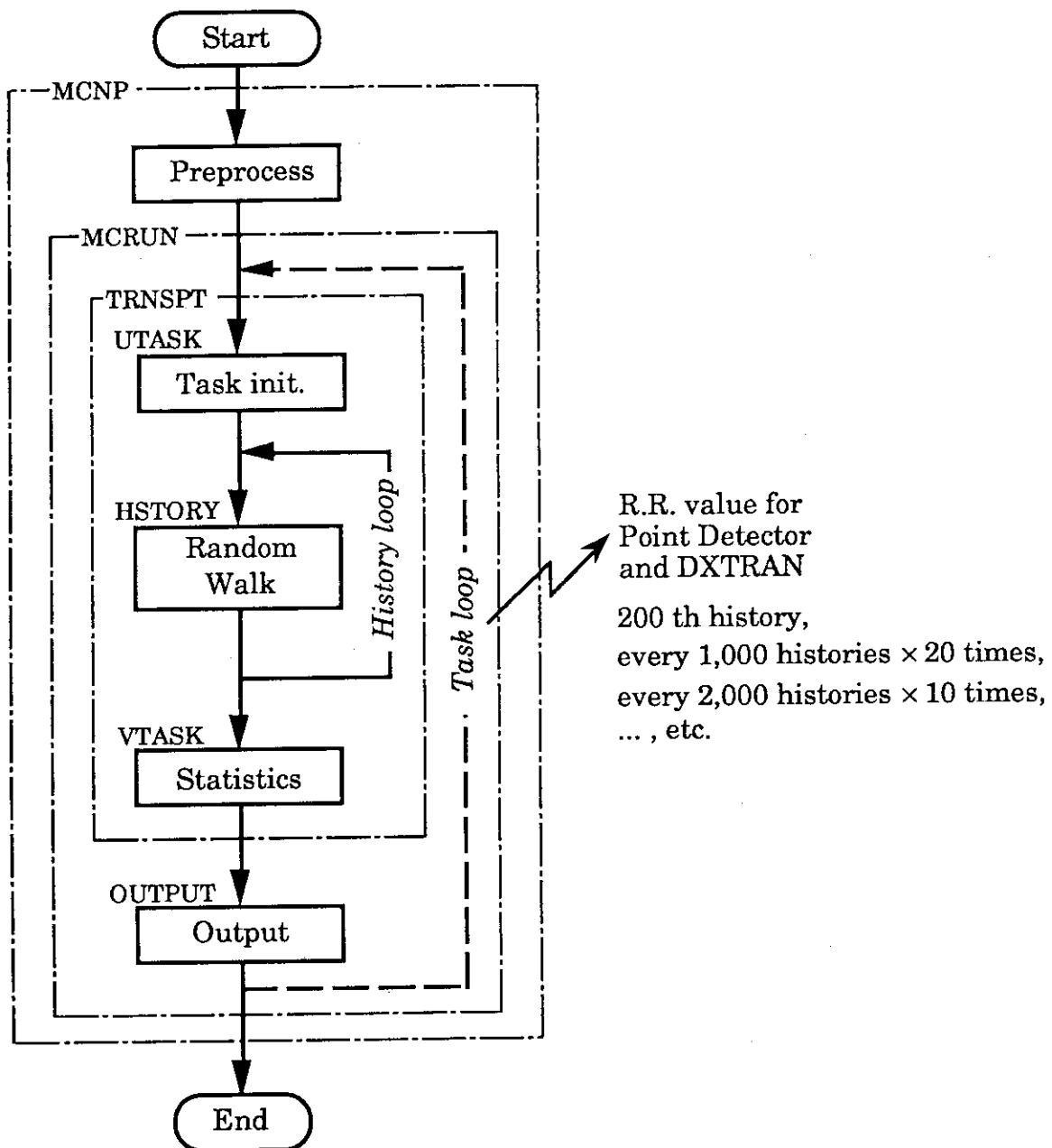


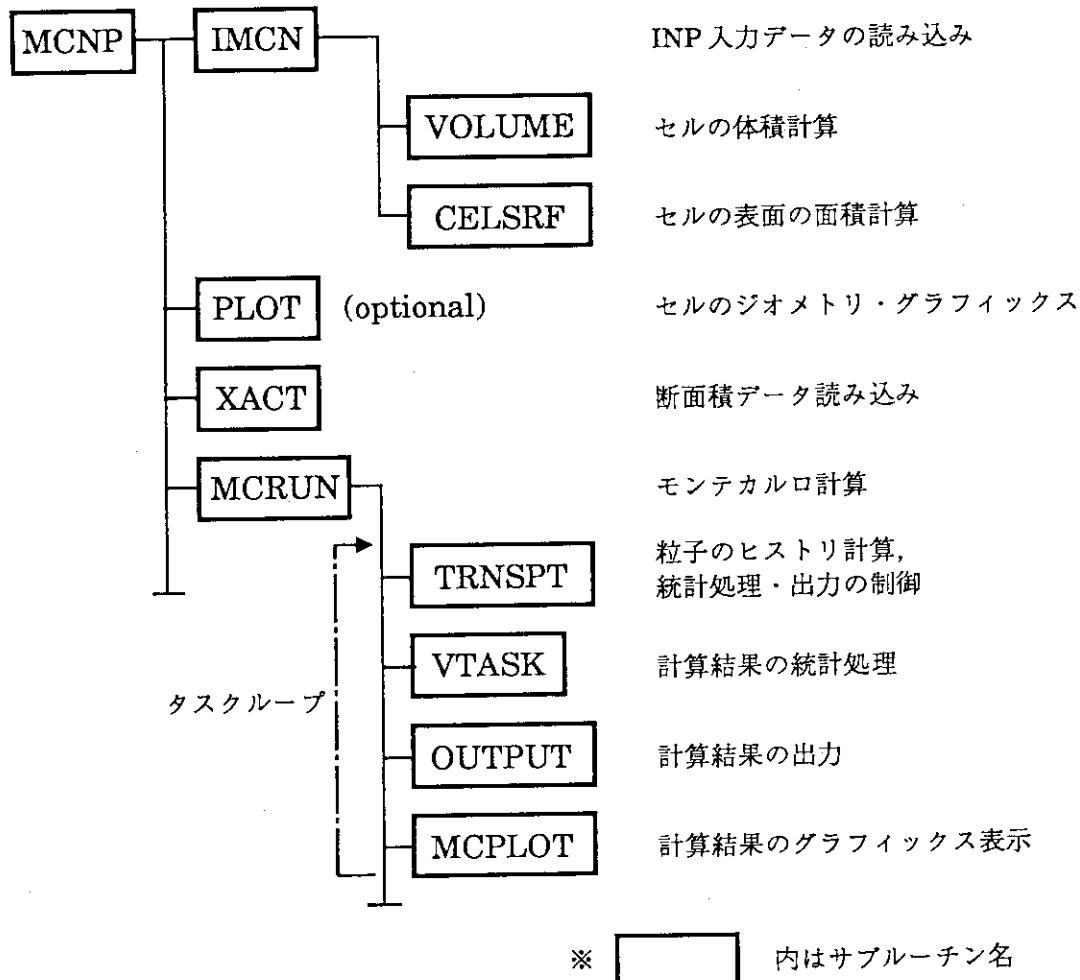
Fig. 2.1 Schematic Flow of the Original MCNP4

### (1) 全体の構造

先ず IMCN ルーチンで INP ファイルから入力データを読み込み、これらのデータの中でセルのジ

オメトリに関する情報をもとにセルの体積・表面積の計算を行い、必要に応じて PLOT ルーチンでこの結果をグラフィック表示する。 次に INP ファイルから読み込んだデータの中でセルを構成する物質に関する情報をもとに、断面積データを読み込む。

## [ 概 要 ]



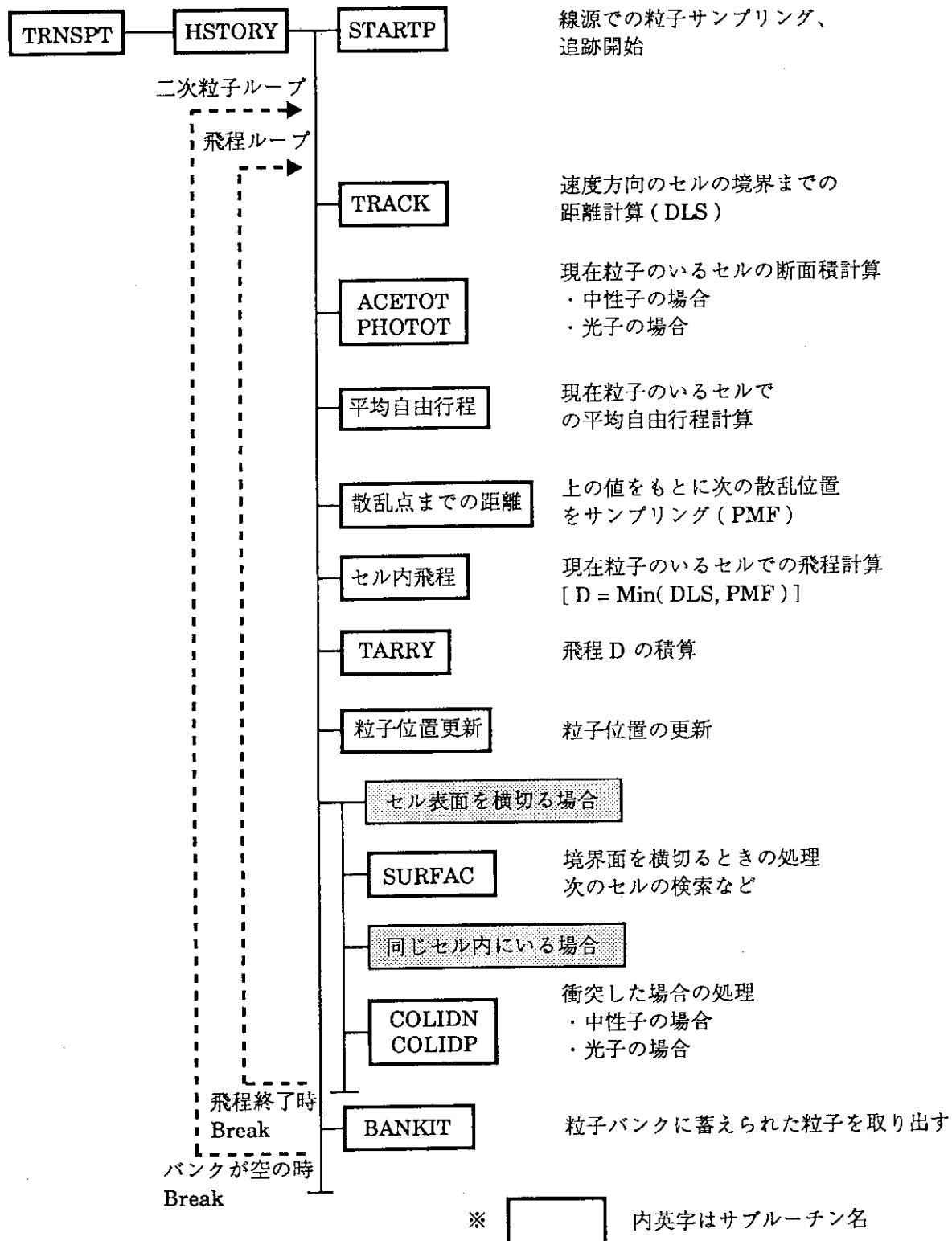
さらに MCRUN ルーチンでモンテカルロ計算を行う。 この部分はヒストリのループと、その外側のタスクループからなる。 タスクループは適当なヒストリー間隔で途中結果の出力、グラフィック表示を行うためのもので、出力の判定を TRNSPT ルーチンで行っている。 またこのループでは、そこまでの計算に基づいて point detector, DXTRAN 面への psudoparticle を飛ばすか否かのロシアンルーレットのしきい値の更新を行い、寄与の小さい psudoparticle の計算を避けるようになっている。 TRNSPT ルーチンで出力の指示があると、ヒストリ計算を中断し、計算の途中経過の集計とその出力、グラフィック処理を行い、次のタスクループへ進む。

## (2) ヒストリループ部分

MCNP では粒子のモンテカルロ計算はヒストリを単位に行われる。 先ず STARTP ルーチンで線源から放出される粒子のエネルギー、速度等のサンプリングが行われ、粒子の追跡が開始される。 次に粒子の速度方向のセルの境界面までの距離 (DLS) が計算される。 次に現在粒子のいるセルの

ミクロ断面積が計算され、この値と原子個数密度から平均自由行程が計算される。さらにこの値から粒子が散乱される位置をサンプリングし、その位置までの距離(PMF)を求める。

## [ 概要 ]



次に DLS と PMF を比較し、小さい方をそのセルでの飛程とし、その積算を行い、DLS の方が小

さい場合には境界面上に粒子が移され、次に入射するセルを検索する。 PMF の方が小さい場合には、粒子はセル内の点に移され、その点で衝突したものとして処理される。

この時点で粒子の追跡が終了した場合（境界面でのインポータンス処理、遮蔽物質による吸収等）粒子バンクの二次粒子の追跡を開始する。終了しない場合は次の飛程の計算を引き続き行う。

### 2.3 データ構造

以下に MCNP 4 に用いられているコモンブロックの概要を示す。

ブロック名	サイズ [Byte]	概要（マニュアル（文献(7)）による）
/FIXCOM/	6064	問題の初期設定を行った後は再定義されないもの
/VARCOM/	5604	粒子のランダムウォークの度に値が変化するもの。リスタートに必要。
/EPHCOM/	452	頻繁に更新されるがリスタートには不要なもの。
/PBLCOM/	1608	粒子をバンクするのに必要なもの。粒子位置、速度等。
/TSKCOM/	9106	タスクループ毎に初期化されるデータ。計算結果の積算のバンク等。

ダイナミックアロケーションコモン：トータル 10 MBytes (インストール時に変更可能)

区分名	概 要
FIXED	/FIXCOM/ と同じ
VARIABLE	/VARCOM/ と同じ
EPHEMERAL	/EPHCOM/ と同じ
TALLIES	モンテカルロ計算結果のバンク
BANK	二次粒子のバンク
X-SECTION	クロスセクション
FORIMCN	IMCN ルーチン (INP ファイル入力) 用
FORPLOT	PLOT ルーチン (計算結果グラフィック) 用
FORMCPLOT	MC PLOT ルーチン (セルのジオメトリー・グラフィック) 用

・区分はソースのコメント（インクルード・ファイル INC\_CM のコモンブロック宣言部）から取つた。

・オーバーレイ構造

IMCN ルーチン用の変数はモンテカルロ計算結果のバンクの変数と、MC PLOT ルーチン用・PLOT ルーチン用の変数は断面積用の変数と先頭アドレスが重なっており、オーバーレイ構造を取っている。

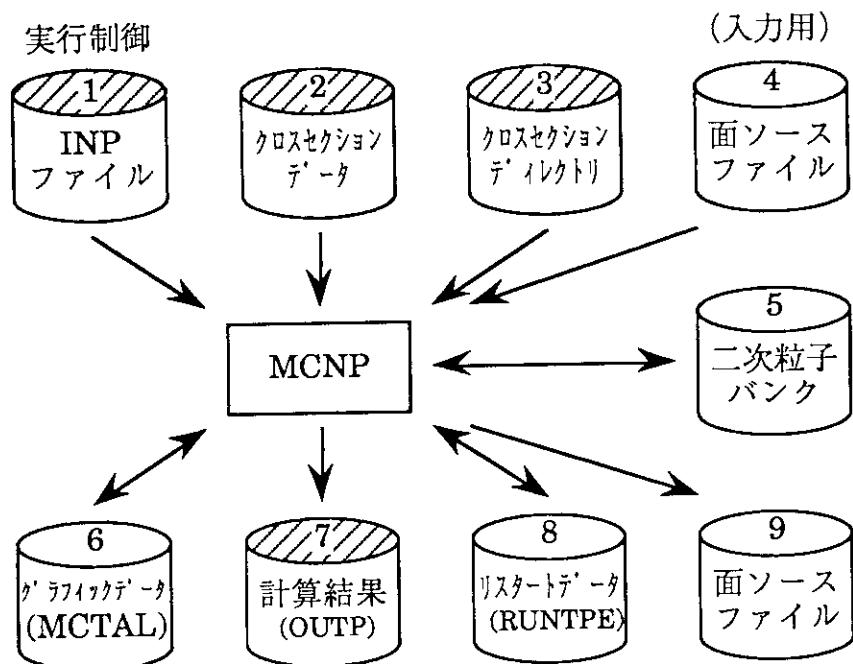
・サンプル問題 1, 3, 4<sup>\*</sup> のダイナミックアロケーションメモリ使用量

サンプル	GENERAL	TALLIES	BANK	CROSS SECTION	TOTAL
1	28,536	11,104	25,612	45,496	110,748
3	44,176	992	25,612	133,336	204,116
4	957,592	5,456	25,612	5,244	993,904

\* : MCNP4 パッケージ付属のサンプルデータ (付録 B 参照)

## 2.4 外部ファイル I/O

外部ファイルの I/O を以下に示す。



※：網かけは必須指定ファイル

これらのうちで必須なのは、1, 2, 3, 7である。（但し3はINPファイルに書き込むことにより省略可） 4は線源が面ソースの場合に用い、線源から粒子が放出される度にこのファイルからデータが読み込まれる。5は二次粒子バンク用のメモリ領域が溢れた場合にアクセスされる。6は計算結果のグラフィックス用で、計算結果の一部をこのファイルに書き込み、グラフィックスを行う時点で再びここからデータが読み込まれる。9は粒子のサンプリングのデータをもとに、新たに面ソースファイルを作成する場合に出力される。

上記以外に初期データの入力部（IMCN ルーチン）、結果の出力部（OUTP ルーチン）等で、スクラッチファイルが用いられる場合がある。

以下に各ファイルの装置番号を示す。（装置番号はインクルードファイル INC\_ZC で宣言されている）

No.	ファイル名	装置番号	No.	ファイル名	装置番号	No.	ファイル名	装置番号
1	INP	IUI =31	5		IUB =60	9	WSSA	IUSW =41
2	任意	IUX =34	6	MCTAL	IUT =45			
3	XSDIR	IUD =35	7	OUTP	IUO =32			
4	RSSA	IUSR =42	8	RUNTP	IUR =33			

## 2.5 コスト分析結果

MCNP オリジナルプログラムの主なサブルーチンのコスト比率（処理時間の割合）を示す。

全体に対する主なサブルーチンのコスト比率（SUN 4/330 で測定）

サンプル サブルーチン	1 (5000 粒子)	3 (10000 粒子)	4 (5000 粒子)
IMCN ・入力データ読み込み ・粒子輸送計算の準備	5.25 %	1.34 %	0.52 %
XACT ・クロスセクションデータ 読み込み	2.22 %	0.94 %	20.29 %
HISTORY 以下 ・粒子輸送計算	88.37 %	97.31 %	78.16 %
TRNSPT その他 ・粒子輸送計算結果の判定, 出力制御 ・計算結果の出力	4.16 %	0.41 %	1.03 %
合 計	100.00 %	100.00 %	100.00 %

以上からヒストリ数 5,000 ~ 10,000 と比較的ヒストリ数の少ない問題であっても、サブルーチン HISTORY 以下のルーチンの占める割合が高いので、並列化による計算の高速化の効果は高いものと期待できる。

## 3. MCNP 4 の並列化

### 3.1 並列化の方針

並列化の方針としては、各ヒストリの独立性を考慮し、各セルプロセッサエレメント（以下 PE）に HISTORY 以下のルーチンの計算を並列に行わせればよい。しかしながら、MCACE コードの並列化の際には、ホスト → PE の通信に要する時間は物理的な通信速度に比べてかなり遅いこと（原因は不明だが、ホスト上で他のプロセスが多数実行されていることも原因の一つであろう）が経験されていた。MCNP を並列化する場合には MCACE コードと同様の方針でホスト / PE に処理を割り当てるが、MCNP には MCACE のように幾つかのヒストリ数をまとめて処理するバッチ処理のループが無いために、ホスト - PE 間の通信回数がヒストリ数 × 2 + α となってしまい、通信処理で飽和を起こすことが予想される。そこで MCNP 4 の並列化では、ホスト - PE 間の通信回数を削減するため

## 2.5 コスト分析結果

MCNP オリジナルプログラムの主なサブルーチンのコスト比率（処理時間の割合）を示す。

全体に対する主なサブルーチンのコスト比率（SUN 4/330 で測定）

サンプル サブルーチン	1 (5000 粒子)	3 (10000 粒子)	4 (5000 粒子)
IMCN ・入力データ読み込み ・粒子輸送計算の準備	5.25 %	1.34 %	0.52 %
XACT ・クロスセクションデータ 読み込み	2.22 %	0.94 %	20.29 %
HISTORY 以下 ・粒子輸送計算	88.37 %	97.31 %	78.16 %
TRNSPT その他 ・粒子輸送計算結果の判定, 出力制御 ・計算結果の出力	4.16 %	0.41 %	1.03 %
合 計	100.00 %	100.00 %	100.00 %

以上からヒストリ数 5,000 ~ 10,000 と比較的ヒストリ数の少ない問題であっても、サブルーチン HISTORY 以下のルーチンの占める割合が高いので、並列化による計算の高速化の効果は高いものと期待できる。

## 3. MCNP 4 の並列化

### 3.1 並列化の方針

並列化の方針としては、各ヒストリの独立性を考慮し、各セルプロセッサエレメント（以下 PE）に HISTORY 以下のルーチンの計算を並列に行わせればよい。しかしながら、MCACE コードの並列化の際には、ホスト → PE の通信に要する時間は物理的な通信速度に比べてかなり遅いこと（原因は不明だが、ホスト上で他のプロセスが多数実行されていることも原因の一つであろう）が経験されていた。MCNP を並列化する場合には MCACE コードと同様の方針でホスト / PE に処理を割り当てるが、MCNP には MCACE のように幾つかのヒストリ数をまとめて処理するバッチ処理のループが無いために、ホスト - PE 間の通信回数がヒストリ数 × 2 + α となってしまい、通信処理で飽和を起こすことが予想される。そこで MCNP 4 の並列化では、ホスト - PE 間の通信回数を削減するため

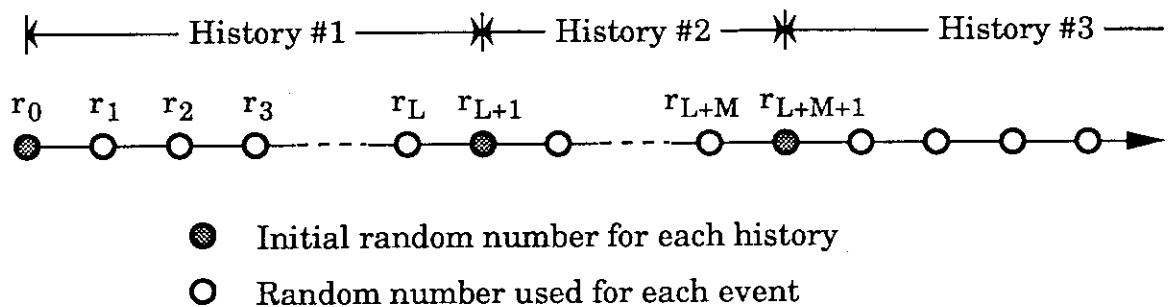
に、PE の 1 つ (PE 0) を事実上のホストとして、各 PE ( $\neq 0$ ) が処理するヒストリ No. の割当とタスクグループにおける PE の同期制御をさせて通信処理のほとんどを PE 間通信に置き換えることにした。

また、2.3 節で示したように MCNP で確保されるダイナミックアロケーションモンは 10 MB (インストール時のデフォルト値) に達するが、実際のメモリ使用量は解く問題に依存し、これよりもかなり小さいこともしばしばあるので、冗長なデータ通信量を減らすために実際に使用されているデータ領域にしほって通信を行うこととした。これにより、並列処理にはいる前の初期データ転送に要する時間を節約することができる。さらにタスクグループにおける集計処理には AP1000 の提供する高速な統計関数 (SUM, MIN, MAX 等) を利用することとした。集計処理が行われるまで、それまでの計算結果が参照されることはないので、各ヒストリの計算終了時に PE0 に送られるのは、計算結果自体ではなく、そのヒストリが正常終了したかどうかを知らせる情報のみである。

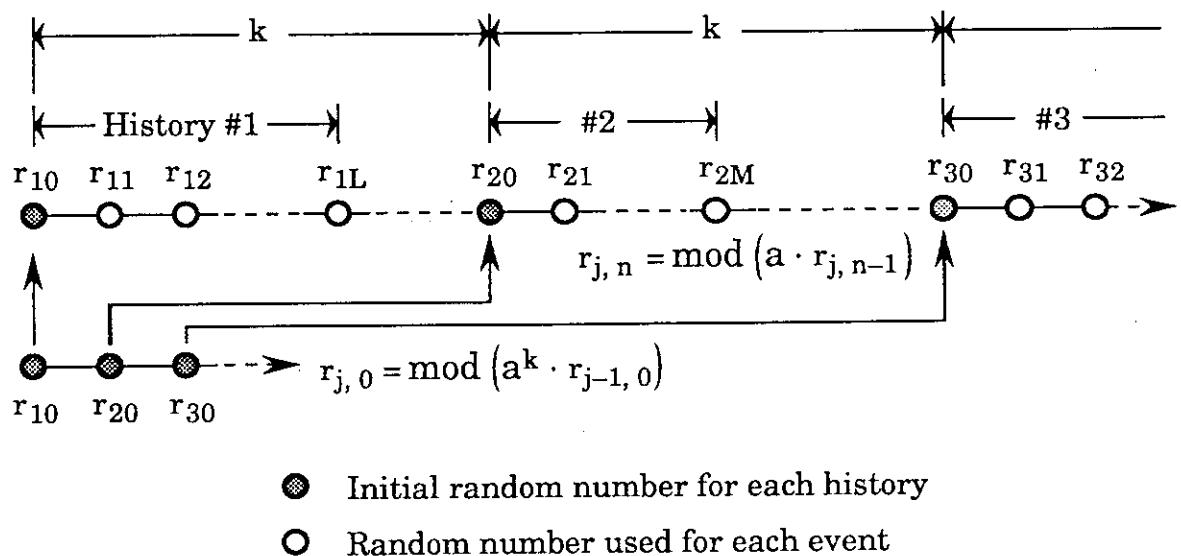
集計処理の頻度は、オリジナル (スカラ版) では最初の 200 ヒストリ、1000 ヒストリからは 1000 ヒストリ間隔で 20 回、その後 20 回毎にヒストリ間隔を倍にしているが、この集計処理の度に PE 間の同期がとられることになる。個々のヒストリの計算コスト (計算するのに要する時間) のばらつきはかなり大きいので、各 PE で次の同期を取るのに均等なヒストリ数の計算を割り付けた場合、ヒストリ数が少ないとこの計算コストのばらつきが平均化されない<sup>(3)</sup>ので、同期による PE のアイドル時間が大きくなる恐れがある。そこで本並列化では、制御 PE (PE0) が各 PE の動作状況を見て、空いている PE に対して次に計算すべきヒストリを割り当てる動的負荷分散の手法を用いている。このことにより PE のアイドル時間は集計処理の間隔に依存せずに合理的に最小に押さえることができる。また上記のような集計処理のタイミングは、AP1000 の様な高並列計算機上で MCNP を実行する場合に必ずしも計算効率の向上には結び付かないで、集計処理を行う最初のヒストリ数と、ヒストリ間隔の初期値はユーザーが入力で与えられるように変更した。また、PE 間通信の頻度を減らせるように、各 PE ( $\neq 0$ ) で 1 ヒストリ実行毎に必ず通信を行うのではなく、数ヒストリ実行の後に通信を行えるようにユーザー入力変数 (一括処理ヒストリ数) を設定した。これは MCACE コードでの 1 パッチ当たりの粒子数に対応しており、パッチ処理のループを MCNP に持ち込んだと考えることもできる。

ヒストリのランダムウォークシミュレーションに用いる乱数は、MCACE の並列化と同様に、各 PE で別個に発生するようにしておかなければならない。(さもなければ使用する乱数を 1 つ 1 つ通信でもって来なければならず、天文学的な回数の通信処理をこなさなければならなくなってしまう。) MCACE やその他の多くのモンテカルロ計算コードでは、あるヒストリの 1 番最後に用いた乱数が次のヒストリで用いる乱数の初期値になっているために、並列化した場合に乱数の使用順序がスカラ計算機上でのそれと一致せず、並列計算機の計算結果とスカラ計算機のそれが同一にならないという問題が生ずる。しかし MCNP コードの場合には前のヒストリで乱数列をどこまで使用したかに拘らず、各ヒストリ毎に用いる乱数の初期値が定数で (MCNP 4 の場合 1 つの乱数列から 152917 個とびとびに) 与えられているので、並列計算機の計算結果とスカラ計算機の計算結果は桁落ち等の問題のない限り基本的に同一となる。(Fig. 3.1)

Fig. 3.2 に並列化した MCNP 4 の計算の流れを示す。図中で (a) ~ (f) は通信箇所 (詳細は § 3.4 参照) である。



#### Random number in conventional Monte Carlo codes



#### Random number in MCNP

Fig. 3.1 Random Number Generation

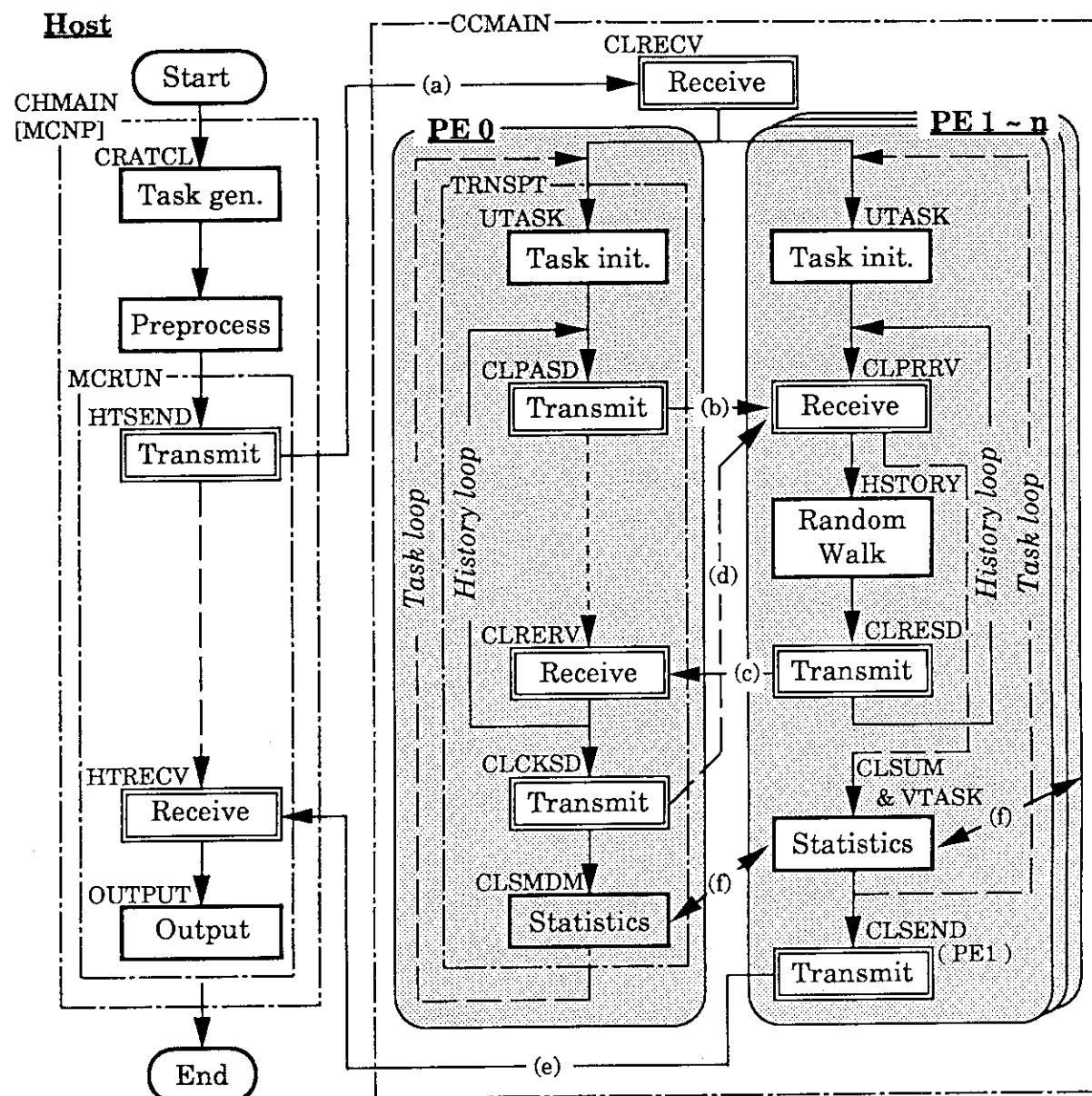
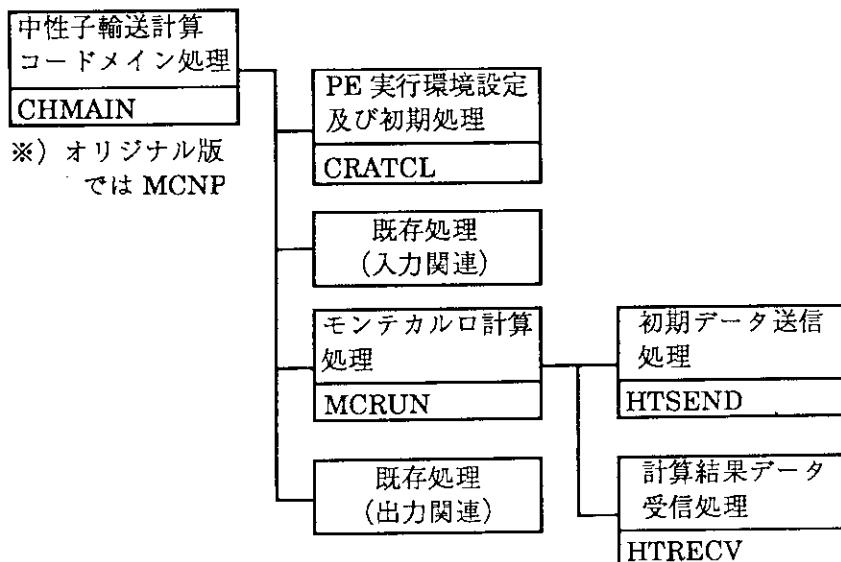


Fig. 3.2 Schematic Flow of Parallelized MCNP4

### 3.2 ホスト側プログラム構造

以下に並列版 MCNP 4 のホスト側プログラムの構造を示す。またホスト側プログラムの新規作成及び変更モジュールとその概要を下表に、ホスト用サブルーチン名リストを Table 3.1 に示す。



新規作成モジュール

No.	モジュール名	CALLER	処理内容
1	CRATCL	MCNP	AP1000 の実行環境の設定及びセルタスクの生成、一括計算ヒストリーフィル数及び集計間隔値の設定
2	HTSEND	MCRUN	初期データ送信
3	HTRECV	MCRUN	中間結果データ、計算結果データの受信

処理変更モジュール

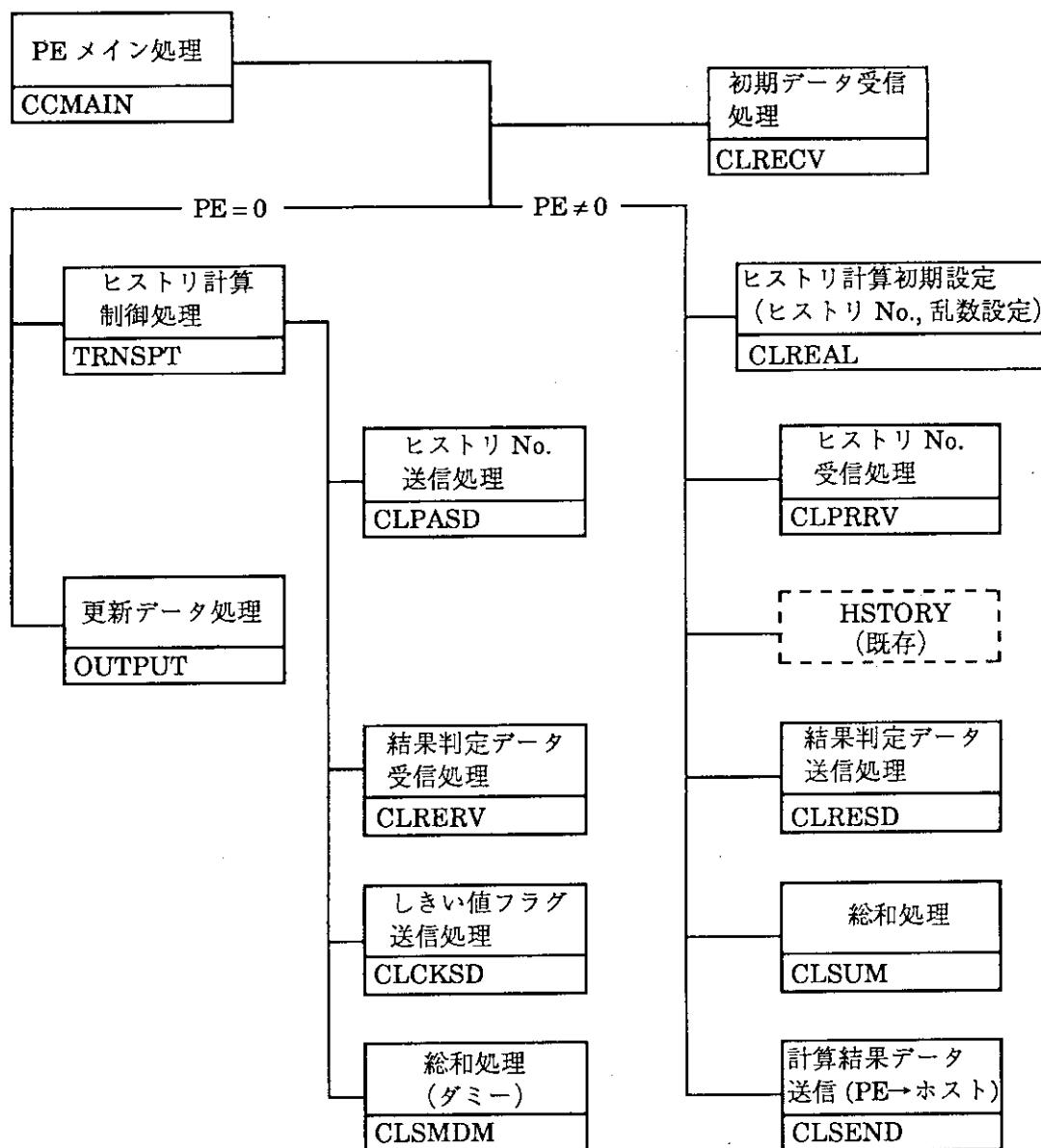
No.	モジュール名	CALLER	処理内容
1	MCNP	----	PROGRAM MCNP を SUBROUTINE 化 (CHMAIN) 、 AP1000 の実行環境の設定及びタスク生成のサブルーチン追加 (CRATCL)
2	MCRUN	MCNP	初期データ送信サブルーチン (HTSEND) の追加、粒子計算制御 (TRN SPT) を PE 側へ移動
3	IMCN	MCNP	集計間隔値 (定常) の設定処理を追加
4	OUTPUT	MCRUN	集計間隔値 (初期) を定数から変数へ変更、FOM の集計処理部分 (ADD TFC) を PE 側へ移動
5	SUMARY	OUTPUT	隣接した 2 つのセルインポータンス又はウインドウのウェイトが 4 倍以上差がある場合の出力処理 (CRTCZE) のコメントアウト及び画面・計算結果 (OUTP) に出力処理を追加
6	OUTWWG	SUMARY	隣接した 2 つのセルインポータンス又はウインドウのウェイトが 4 倍以上差がある場合の出力処理 (CRTCZE) のコメントアウト及び画面・計算結果 (OUTP) に出力処理を追加
7	SETDAS	IMCN	変数 NTBB の PE 間総和をとるための作業領域を追加
8	PTFC	TALLYP	FOM の集計処理部分 (ADDTFC) を PE 側に移動

Table 3.1 Subroutine Name List for Host Computer

No.	Name	No.	Name	No.	Name	No.	Name
1	ABVALS	53	EXTRCT	105	MDECOD	157	RUNTPR
2	ACEFPT	54	FASTIG	106	MGIMPS	158	RUNTPW
3	ACTION	55	FASTIO	107	MGXSPT	159	SCATT
4	ADDTFC	56	FFETCH	108	MIDPNT	160	SCREEN
5	ADVIJK	57	FINDEL	109	MRESET	161	SECND
6	AMATRX	58	FSHORT	110	NAMCHG	162	SETCEL
7	ANGL	59	GETEXM	111	NEWCD1	163	SETDAS
8	ARBOBV	60	GETIDT	112	NEWCRD	164	SFILES
9	AXIS	61	GETLDD	113	NEXTIT	165	SING
10	AXLBL	62	GETXST	114	NORMA	166	SKCODE
11	BACKUP	63	GMGWW	115	NORMH	167	SMEVEV
12	BALK	64	GXAXIS	116	NXTIT1	168	SMHHTR
13	BARPLT	65	GXHOME	117	NXTSYM	169	SPEC
14	BEGONE	66	GXLIMS	118	OLDCD1	170	SPLINS
15	BINLIN	67	GXOFF	119	OLDCRD	171	SPROB
16	BINVAL	68	GXON	120	OUTPUT	172	SQINT
17	BLKDAT	69	GXQUIT	121	OUTWWG	173	SRCSRF
18	BRANG	70	GXSKIP	122	PASS1	174	SREAD
19	BREM	71	HGRAM	123	PBLDAT	175	STATUS
20	BROADN	72	IBLDAT	124	PHOTP	176	STTOP
21	CALCVA	73	IGEOM	125	PIECES	177	STUFF
22	CELNBR	74	IMCN	126	PLIN	178	SUMARY
23	CELPAR	75	INQIRE	127	PLOT	179	TALLOC
24	CELSRF	76	INTER	128	PLOTCN	180	TALLYH
25	CHEKCS	77	INTSEC	129	PLOT2D	181	TALLYP
26	CHEKIT	78	ISHEET	130	PLTDXT	182	TALLYQ
27	CHGMEM	79	ISOURC	131	PLTTITL	183	TAREA
28	CHKCEL	80	ISSRC	132	PLTSRF	184	TEKDVR
29	CHKPRB	81	ITALLY	133	POLHED	185	TIMINT
30	CHQCEL	82	ITALPR	134	PRINV	186	TPEFIL
31	CHRHOL	83	ITEMS	135	PRODHH	187	TRFMAT
32	CKCHAR	84	IWTWND	136	PRSDFT	188	TRFSRF
33	COLINP	85	IXSDIR	137	PRSDST	189	TTYINT
34	CONTR	86	JDECOD	138	PRSSRJ	190	UFILES
35	CPRINP	87	JSOURC	139	PSURF	191	UNIQUE
36	CRSPRO	88	KCALC	140	PTFC	192	VIEWZ
37	CRTCZE	89	KDARG	141	PTIMIN	193	VOIDCD
38	DDDIAG	90	KDATA	142	PTOST	194	VOLUME
39	DOTRCL	91	KSRCTP	143	PTYTYIN	195	VTASK
40	DPLINF	92	LATCON	144	PUTLBL	196	WGTUL
41	DUNLEV	93	LBLOCS	145	PUTNQ	197	WRWSSA
42	DXDIAG	94	LENG	146	QNC7	198	WTCALC
43	EQPBBN	95	LGEVAL	147	QPOL	199	XACT
44	ERF2	96	LIKEBT	148	QUAD	200	XSEC
45	ERPRNT	97	LJUSTI	149	QUART	201	XSGEN
46	ERRBAR	98	LLMEM	150	RANDOM	202	ZAID
47	EXEMES	99	MATMPY	151	RANG	203	ZBLDAT
48	EXMG	100	MCNP	152	RDPROB	204	CRATCL
49	EXORD	101	MCPLOT	153	REGULA	205	HTRECV
50	EXPIRE	102	MCRUN	154	RHODEN	206	HTSEND
51	EXPIRX	103	MCTALR	155	RONGE		
52	EXPUNG	104	MCTALW	156	RUNTPQ		

### 3.3 PE 側プログラム構造

以下に並列版 MCNP 4 の PE 側プログラムの構造を示す。また PE 側プログラムの新規作成及び変更モジュールとその概要を次表に、PE 用サブルーチン名リストを Table 3.2 に示す。



## 新規作成モジュール

No.	モジュール名	CALLER	処理内容
1	CCMAIN	----	PE メイン処理、FOM 計算のための CPU Time の計測集計処理
2	CLRECV	CCMAIN	初期データ受信処理 (ホスト -> PE)
3	CLREAL	CCMAIN	粒子の輸送計算への初期処理、一括計算ヒストリ数によるヒストリ計算実行判定制御、乱数初期値の更新
4	CLPASD	TRNSPT	ヒストリ No. の送信 (PE 0 -> PE ≠ 0)
5	CLPRRV	CCMAIN	ヒストリ No. の受信 (PE 0 -> PE ≠ 0) 、乱数初期値の更新
6	CLSEND	CCMAIN	ヒストリ計算結果判定データの送信 (PE ≠ 0 -> PE 0)
7	CLRERV	TRNSPT	ヒストリ計算結果判定データの受信 (PE ≠ 0 -> PE 0)
8	CLSUM	CCMAIN	輸送計算結果の PE 間総和処理
9	CLKSD	TRNSPT	しきい値フラグ送信 (PE 0 -> PE ≠ 0)
10	CLSEND	CCMAIN	輸送計算結果の送信 (PE (=1) -> ホスト)
11	CLSMDDM	TRNSPT	輸送計算結果の PE 間総和処理 (ダミー)

## 処理変更モジュール

No.	モジュール名	CALLER	処理内容
1	TRNSPT	CCMAIN	ヒストリ No. の決定と送信 (CLPASD) 、ヒストリ計算結果判定データの受信 (CLRERV) 、集計間隔値の変数化としきい値フラグの送信 (CLKSD)
2	UTASK	TRNSPT	タスクデータ初期設定を追加 (KBP = 0, ITASK = 0)
3	TALLYD	STARTP	集計間隔値 (初期) を定数から変数へ置き換えた
4	DXTRAN	STARTP	集計間隔値 (初期) を定数から変数へ置き換えた
5	SECND	TRNSPT	ETIME を CDTIME に変更
6	OUTPUT	CCMAIN	集計間隔値 (初期) を定数から変数へ、データの更新を目的に使用しているので他のサブルーチンをコメントアウト、FOM 値集計のため CPU Time の変数を引数に追加
7	STARTP	HISTORY	PE 側出力ファイルに含まれる最初の 50 ヒストリ分の線源粒子放出情報を他の情報と区別するために、PE 側出力のレコードの先頭にキーを添付
8	ADDTFC	CCMAIN	FOM の計算に用いる CPU Time を CCMAIN で新たに計測・集計した値
	OUTPUT		に変更
9	EXPIRE	ACECAS, ACECOL, ACEGAM, BANKIT, CALCPS, CHKSRC, COLIDK, ELECTR, FINDLV, HISTORY, LEVCEL, LEVCHK, MOVLAT, NEWCEL, ROTASZ, SABCOL, SOURCB, STARTP, SURSRC, TALLY, TALLYD, TALPH, TORUS	オリジナルではエラーが発生した場合そこまでの計算結果を集計し出力するようになっていたが、エラーメッセージのみを出力し、終了フラグを立ててホストヘリターンするように変更
10	INC_ZC	インクルード	PE 側では標準出力 (装置番号 6)

Table 3.2 Subroutine Name List for PEs

No.	Name	No.	Name	No.	Name	No.	Name
1	ACECAS	29	EMAKER	57	MOVLAT	85	TALPH
2	ACECOL	30	ENTWWG	58	NAMCHG	86	TALSHF
3	ACECOS	31	ERGIMP	59	NEWCEL	87	TIMINT
4	ACEFCN	32	ESLOSS	60	OUTPUT	88	TORUS
5	ACEGAM	33	EVENTP	61	PHOTOT	89	TRACK
6	ACENU	34	EXPIRE	62	PRLOST	90	TRANSM
7	ACETBL	35	EXPIRX	63	QPOL	91	TRNSPT
8	ACETOT	36	EXTRAN	64	QUART	92	TTBR
9	ADDTFC	37	FASTIG	65	RANG	93	UPLEV
10	ADVIJK	38	FASTIO	66	REFLEC	94	UTASK
11	ANGL	39	FINDEL	67	ROTAS	95	VTASK
12	BACKUP	40	FINDLV	68	ROTASZ	96	WTGWWG
13	BANKIT	41	FINPHT	69	SABCOL	97	WTMULT
14	BEYOND	42	FORCOL	70	SCAT	98	WTWNDO
15	BREMS	43	GETXS	71	SECND	99	YPBSSP
16	CALCPS	44	HISTORY	72	SMPSRC	100	ZAID
17	CHKCEL	45	ISOS	73	SOURCB	101	CCMAIN
18	CHKSRC	46	ISOSZ	74	SOURCE	102	CLCKSD
19	COLIDK	47	JBIN	75	SOURCK	103	CLPASD
20	COLIDN	48	KLEIN	76	SRCDX	104	CLPRRV
21	COLIDP	49	KNOCK	77	SSMSRC	105	CLREAL
22	DBMIN	50	KXRAY	78	STARTP	106	CLRECV
23	DDDET	51	LEVCEL	79	SUFWRT	107	CLRREV
24	DDDLEV	52	LEVCHK	80	SURFAC	108	CLRESD
25	DOSEF	53	LGEVAL	81	SURSRC	109	CLSEND
26	DUNLEV	54	MGACOL	82	TALLY	110	CLSMDM
27	DXTRAN	55	MGCOLN	83	TALLYD	111	CLSUM
28	ELECTR	56	MGCOLP	84	TALLYX		

### 3.4 データ通信量の評価

並列処理によって計算の高速化を計る場合には、本来スカラー計算機においては必要なかった処理が新たに付け加えられ、そのためにある程度の CPU 時間が費やされることに注意しなければならない。通信処理・同期待ちは、この新たに必要となる処理であるが、ここではいくつかのサンプル問題に対して、各々の通信処理で通信されるデータ量とその頻度を示す。（CPU 時間の評価については 4 章で述べる。）但し、集計処理（同期）の頻度はオリジナルプログラムと同じ初期 200 ヒストリ、1000 ヒストリ間隔であり、一括処理ヒストリ数を 1 としている。

Fig. 3.2 の (a) ~ (e) の通信内容と通信量を示す。

- (a) ・方向：ホスト→PE
  - ・内容：ヒストリ計算に必要とするデータ
  - ・頻度：全処理を通じて一回
  - ・通信量：次のコモンブロックの変数全部

EPHCOM, PBLCOM, TABLES, CHARCM, VARCOM, FIXCOM, TSKCOM, DAC

合計 27,119 + ((LXSS+LXS)×8) bytes

サンプル 1	248,743 bytes
サンプル 3	435,543 bytes
サンプル 4	2,015,183 bytes
キャスク	4,136,055 bytes
スカイシャイン	4,028,111 bytes

- (b) · 方向：PE 0 → PE ( $\neq 0$ )  
· 内容：ヒストリ No. データ  
· 頻度：ヒストリ数分  
· 通信量：RENSND コモンブロックの変数全部  
(/EPHCOM/NST, ヒストリNo., データ集計情報) 合計 68 bytes

- (c) · 方向：PE ( $\neq 0$ ) → PE 0  
· 内容：計算結果フラグ  
· 頻度：ヒストリ数分  
· 通信量：TSKCOM, EPHCOM, VARCOM コモンブロックの変数一部と一括処理ヒストリ数  
/TSKCOM/KDB /EPHCOM/NST /VARCOM/NRRS,NERR,NSA,NPSR NUBAR  
合計 28 bytes

- (d) · 方向：PE 0 → PE ( $\neq 0$ )  
· 内容：乱数値、しきい値フラグ、計算結果判定フラグ  
· 頻度：ヒストリ計算アフォルト；200 個目及び 1000 ヒストリ単位／制御データにより決定  
· 通信量：RENSND コモンブロックの変数全部  
(/EPHCOM/NST,JTFC,CP1,CP2 /VARCOM/NRRS,NERR,NSA,NPSR,RANI,RANJ,  
CTS データ集計情報) 合計 68 bytes

- (e) · 方向：PE → ホスト  
· 内容：最終ヒストリ計算結果データ  
· 頻度：最終ヒストリNo. 1回分  
· 通信量：DAC, PBLCOM, VARCOM, RENRCV のコモンブロックの変数一部  
合計 [((LFSO-LDDM)+(LRKP-LGWW)+(LVCDG-LTFC)+(MXXS/4)×2+(MXF×2)×8]+[(MXA×2)+(LNPW-LNDP)]×4]+4,384 bytes

サンプル 1	12,608 bytes
サンプル 3	11,720 bytes
サンプル 4	18,832 bytes
キャスク	84,540 bytes
スカイシャイン	40,592 bytes

## (f) ・方向：PE - PE 間

- ・内容：計算結果データの集計
- ・頻度：ヒストリ計算デフォルト；200 個目及び 1000 ヒストリ単位／制御データにより決定
- ・通信量：TSKCOM, DAC, VARCOM のコモンブロックの変数の一部

サンプル 1	10,662 bytes
サンプル 3	8,668 bytes
サンプル 4	15,768 bytes
キャスク	77,844 bytes
スカイシャイン	39,168 bytes

## ・総通信量

## (1) ホスト → PE

サンプル 1	(a) × 1 回 =	248,743 bytes
サンプル 3	(a) × 1 回 =	435,543 bytes
サンプル 4	(a) × 1 回 =	2,015,183 bytes
キャスク	(a) × 1 回 =	4,136,055 bytes
スカイシャイン	(a) × 1 回 =	4,028,111 bytes

## (2) PE → ホスト

サンプル 1	(e) × 1 回 =	12,608 bytes
サンプル 3	(e) × 1 回 =	11,720 bytes
サンプル 4	(e) × 1 回 =	18,832 bytes
キャスク	(e) × 1 回 =	84,540 bytes
スカイシャイン	(e) × 1 回 =	40,592 bytes

(3) PE 0 ←→ PE ( $\neq 0$ )

サンプル 1	(b) × 5000 回	+ (c) × 5000 回	+ (d) × 6 回 =	480,408 bytes
サンプル 3	(b) × 10,000 回	+ (c) × 10,000 回	+ (d) × 11 回 =	960,748 bytes
サンプル 4	(b) × 5000 回	+ (c) × 5000 回	+ (d) × 6 回 =	480,408 bytes
キャスク	(b) × 10,000 回	+ (c) × 10,000 回	+ (d) × 11 回 =	960,748 bytes
スカイシャイン	(b) × 10,000 回	+ (c) × 10,000 回	+ (d) × 11 回 =	960,748 bytes

## (4) PE - PE 間

サンプル 1	(f) × 6 回 =	63,972 bytes
サンプル 3	(f) × 11 回 =	95,348 bytes
サンプル 4	(f) × 6 回 =	94,608 bytes
キャスク	(f) × 11 回 =	856,284 bytes
スカイシャイン	(f) × 11 回 =	430,848 bytes

### 3.5 本並列版 MCNP 4 の問題点

#### (1) 外部ファイル I/O

本報で使用した AP1000 の PE は外部 I/O ディスクをもたないため、外部ファイルからの入力はできない（但し出力のみであれば、PE 毎の出力結果を得ることはできる。）。よって HISTORY ルーチン以下でのファイル入力ができないので、以下の 2 つの機能は使用できない。

- a) 面ソースファイルから、線源粒子の放出に関する情報を粒子の放出の度に読み込む機能。
- b) 二次バンク粒子用のファイル I/O：メモリ上の二次粒子バンク用の領域が一杯になった場合にアクセスする。

（現在、64 PE 構成の AP1000 では各 PE で外部 I/O ディスク利用が可能になっているのでこれらの問題は解決することが可能である）

#### (2) 粒子が通過したセル・境界面のリスト

オリジナルコードでは粒子がセル、及び境界面を通過する毎に、そのセル・境界面の番号をリストし、粒子が次に入射するセルを検索する場合などには、先ずこのリストの中から検索を行い、リストの中に見つからなかった場合に全セル・境界面に検索の対象を拡げる方法をとっている。これはおそらく、検索の効率をあげるためにであろうが、このリストの内容は 1 ヒストリー毎に変化するので並列に処理することはできない。しかし、このリストはヒストリの計算結果には影響しないので、本並列化ではこのリストは PE 毎に独立に持たせることとした。このためモンテカルロ計算の初期の段階（ヒストリ数が少ないうち）では検索の効率が多少悪くなる。

#### (3) エラー処理

ヒストリ計算が異常終了した場合、オリジナルプログラムでは、エラー処理ルーチンをコールして、そこまでの計算結果を集計し、出力する。本並列化手法で同様の処理を行うためには、ある PE が異常終了した時点で全 PE の実行を止め、結果をホストで集計しなければならず、プログラムの大幅な修正が必要となる。このため本並列化では、ある PE が異常終了を起こした場合にはエラーフラグのみをホストに帰し、全 PE のプロセスを終了するようにした。

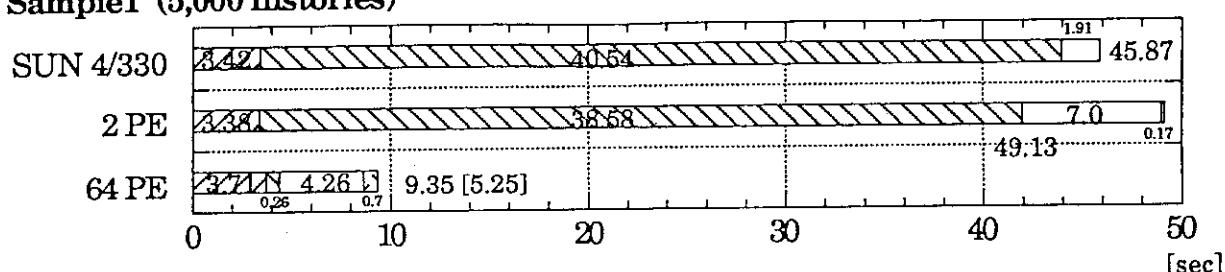
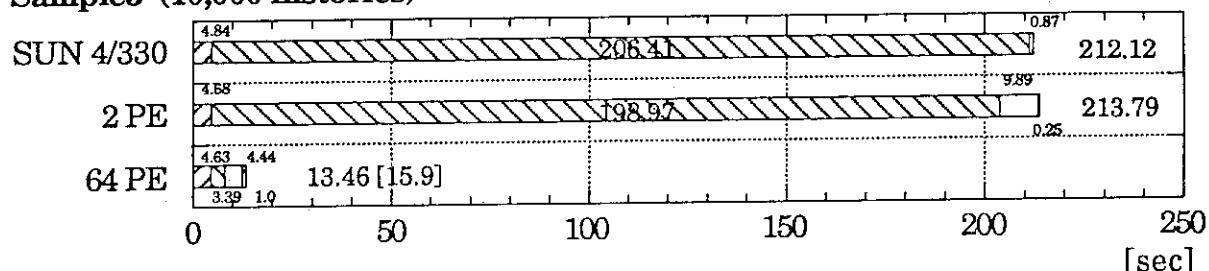
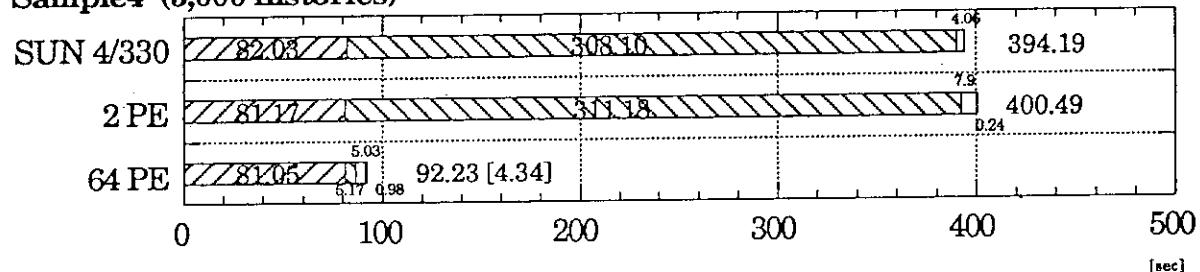
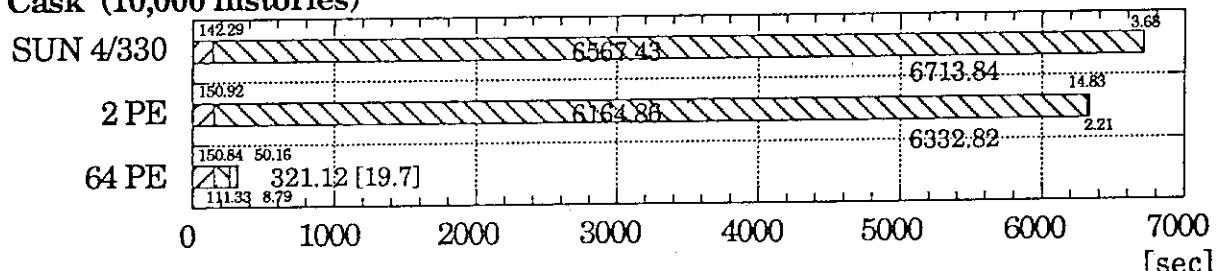
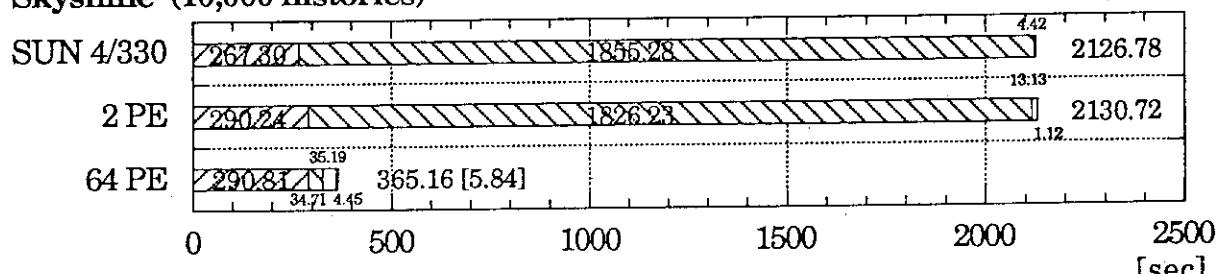
#### 4. 並列版 MCNP 4 の性能評価

並列化した MCNP 4 の性能をデバッグ用のサンプル数題 (5,000 ~ 10,000 ヒストリ) を用いて評価した。AP1000 での計算時間の測定は、1 PE が実質上のホストとして用いられるので、2 台と 64 台 (即ちランダムウォークシミュレーションを実行する PE 数が 1 台と 63 台) の場合について行った。Fig. 4.1 には全体の処理時間の内訳を、SUN 4/330 (AP1000 の PE 単体とほぼ同等の演算性能を持つ) 上でオリジナルプログラム (スカラ版) を実行したときの計算時間とともに示す。Fig. 4.2 には並列化部分の処理時間の内訳を示す。本測定では、スカラ版を並列化した効果のみを調べるために、ヒストリの集計頻度は、オリジナルプログラムと同じ初回 200 ヒストリ、集計間隔の初期値 1000 ヒストリであり、一括処理ヒストリ数を 1 としている。

Fig. 4.1 で SUN 4/330 と AP1000 の 2PE での結果を比べると、両者演算時間に大きな違いはなく、並列化により生ずるオーバヘッドの時間はほとんど無視できることが分かる。2 PE での計算時間と、64 PE での計算時間を比較すると、一番悪いサンプル 4 で 4.34 倍、一番良い キャスクで 19.72 倍の速さで、並列化効率はそれぞれ、6.9 %, 31.3 % である。このように並列化効率の余り上がらなかつた原因は、①並列化できない入力データ・断面積の読み込み等シリアル処理の占める時間が相対的に大きい (サンプル 4、スカイシャイン) 、また Fig. 4.2 を見ると分かるように②2 PE → 64 PE になったことで集計処理と同期待ちの時間が並列処理部分の演算時間の 20 % ~ 50 数 % を占めるようになっており、全ヒストリ数 (5,000 ~ 10,000) に対する集計処理の頻度が多いということが全ケースについて言える。さらに、サンプル 1 については③ヒストリ当たりの輸送計算時間が比較的短いためにヒストリ No. の割当て飽和してしまうのが見られる。このうち、①のシリアル処理の部分と②の相対的な集計頻度に関しては、複雑な遮蔽問題では、実際的な解を得るために数 10 ~ 数 100 万ヒストリの計算を行うことになるので、実用上はそれほど問題ではない。さらに②の集計頻度に関しては、並列版ではユーザーが入力で与えられるようにしているので、これを調整することによって並列化効率を改善することも考えられる。但しその場合には、同じヒストリ数の計算をしても、point detector に対する pseudoparticle のサンプリング頻度が異なってくるために、計算時間と誤差の両方が変化する場合があるので、figure of merit での議論が必要となる。また、③については一括処理ヒストリ数を増やすことで処理の飽和を緩和できるものと考えられる。

Fig. 4.3 には PE 512 台で、キャスクの問題について実際的な解を得るためにヒストリ数を 200 万まで上げた場合の並列化効率の変化を示す。ヒストリ数が増えるに連れて並列化効率が改善されてゆく様子が分かる。ヒストリ数を 200 万計算するのに要した時間は約 49 分でこのときの並列化効率は 81.6 % と高いものであった。(但し、PE 側の並列処理部分のみでの値。入力、断面積データの読み込み等には約 2.5 分を要している。)

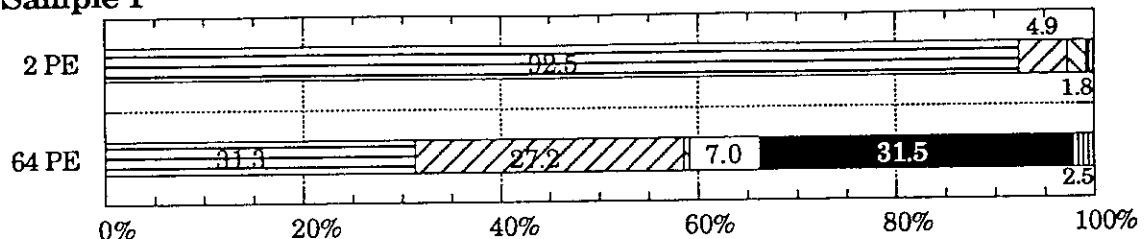
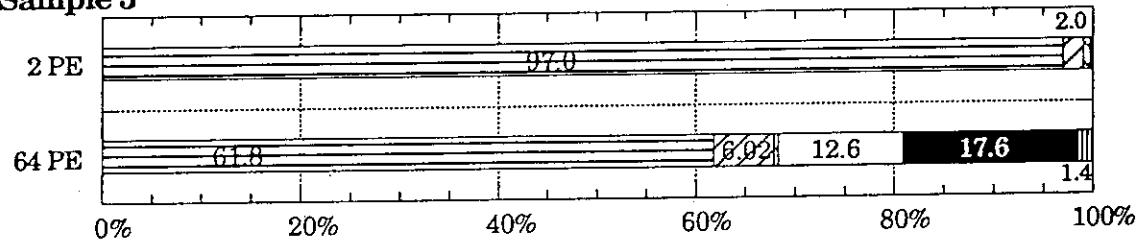
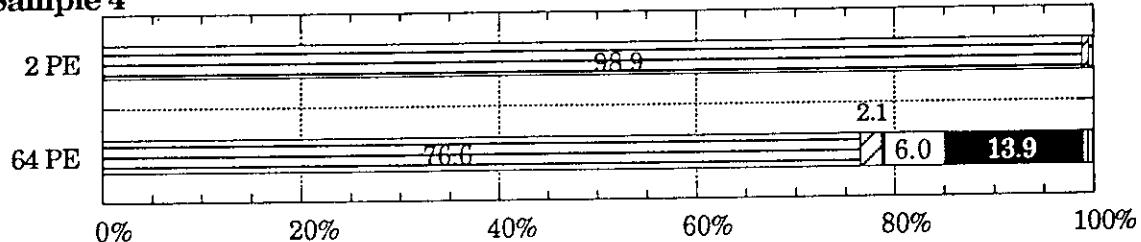
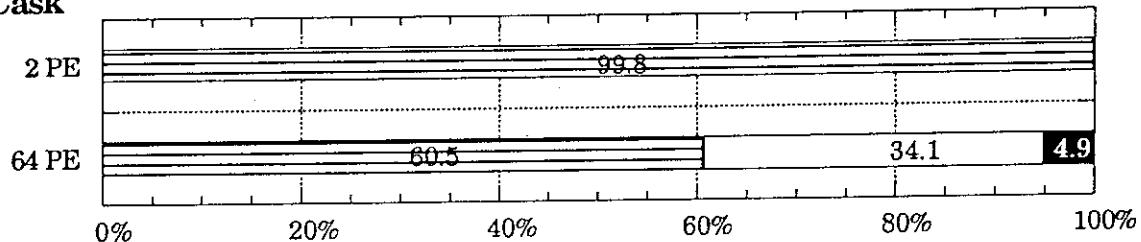
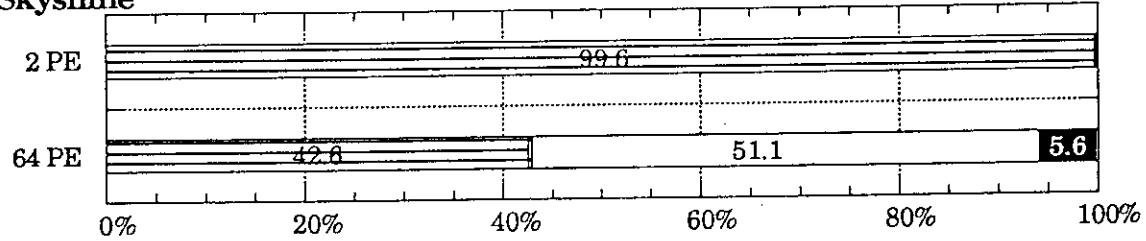
この問題を FACOM M-780 で実行すると、48,000 ヒストリを計算するのに CPU 時間は約 57.7 分であった。これから 200 万ヒストリを計算するのに必要な CPU 時間を推定すると約 40 時間となり、計算機を占有しない限りは、結果を得るのに約一週間を要するであろう。このような従来のスカラ計算機では非常に長い待ち時間をするような計算でも、並列計算機によって実用的な時間で行えるようになったということができる。

**Sample1 (5,000 histories)****Sample3 (10,000 histories)****Sample4 (5,000 histories)****Cask (10,000 histories)****Skyshine (10,000 histories)**

Summation  
 Miscellaneous

Simulate  
 Read input & x-secs

Fig. 4.1 The itemized CPU times

**Sample 1****Sample 3****Sample 4****Cask****Skyshine**

HISTORY       Receive       Transmit  
 Synchronize       Sum       Others

Fig. 4.2 The itemized relative CPU times for the parallelized part

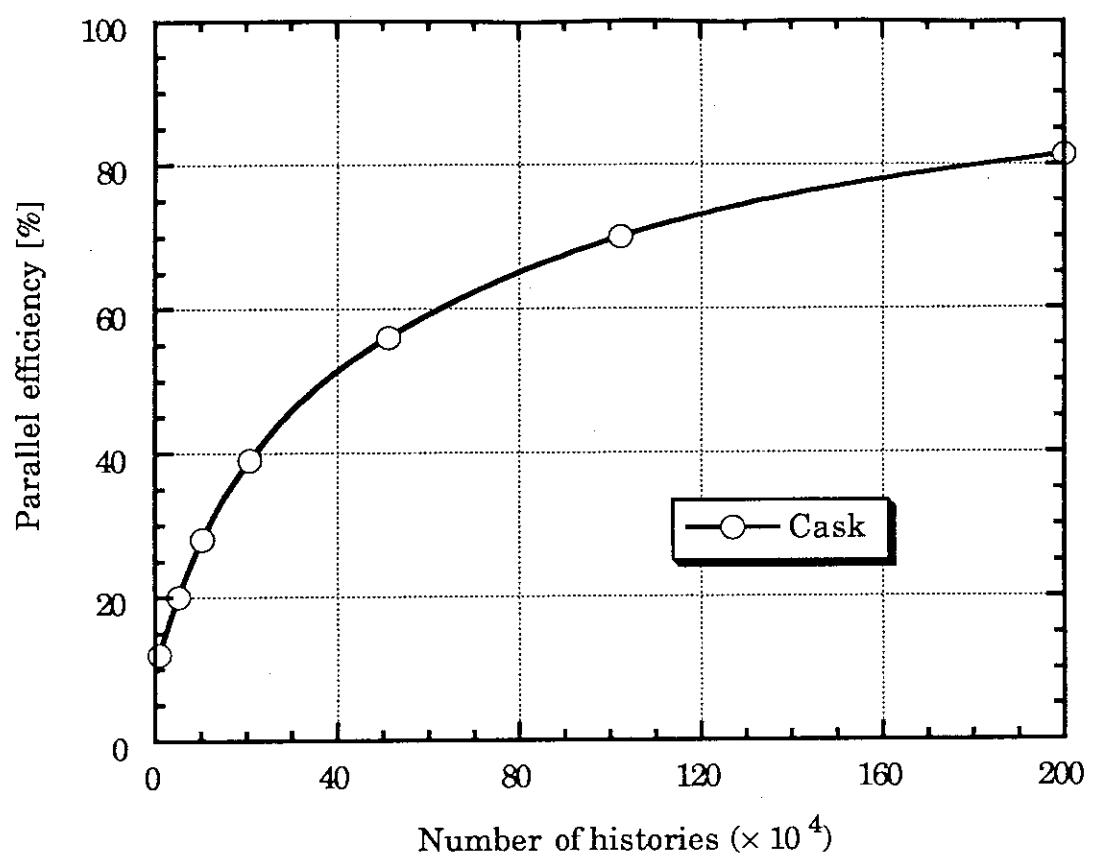


Fig. 4.3 Number of histories vs. Parallel efficiency  
(with 512 processor elements)

## 5.まとめ

モンテカルロ中性子・光子輸送計算コード MCNP 4 を高並列分散メモリ型計算機 AP1000 で実行できるよう並列化して計算速度の高速化を図り、その性能を評価した。5,000 ~ 10,000 ヒストリ程度の小規模なサンプル問題では、集計頻度とそれに伴う同期待ちの全体時間に占める割合が比較的大きく、余り高い並列化効率が得られなかつたが、100 万オーダーのヒストリの計算では、効率の高い並列処理が行われることが示され、実計算時間としても従来のスカラ計算機の数十分の 1 の時間で計算が行えるようになった。今後、より高い並列化効率を達成するためには、一括処理ヒストリ数や集計頻度の効果について、調べてゆかねばならない。

## 謝 辞

本並列版 MCNP4 の作成及び並列計算機 AP1000 の利用に際しては、富士通研究所(株)並列処理研究センターに多大な便宜を図って戴いた。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) Kawazoe, K., et al., JAERI-M 91-066 (1991)
- (2) Takano, M., et al., J. Nucl. Sci. Technol. 28[12], 1143 (1991)
- (3) Takano, M., et al., JAERI-M 92-193 (1992)
- (4) Takano, M., et al., J. At. Energy Soc. Jpn., 34[6], 533 (1992)
- (5) Forster, R.A., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 37[3], 1378 (1990)
- (6) Ishihara, H., et al., IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers, and Signal Processing, May 9 ~ 10 (1991)
- (7) RSIC Documentation for CCC-200/MCNP 4 Code Package (1991)

## 5.まとめ

モンテカルロ中性子・光子輸送計算コード MCNP 4 を高並列分散メモリ型計算機 AP1000 で実行できるよう並列化して計算速度の高速化を図り、その性能を評価した。5,000 ~ 10,000 ヒストリ程度の小規模なサンプル問題では、集計頻度とそれに伴う同期待ちの全体時間に占める割合が比較的大きく、余り高い並列化効率が得られなかつたが、100 万オーダーのヒストリの計算では、効率の高い並列処理が行われることが示され、実計算時間としても従来のスカラ計算機の数十分の 1 の時間で計算が行えるようになった。今後、より高い並列化効率を達成するためには、一括処理ヒストリ数や集計頻度の効果について、調べてゆかねばならない。

## 謝 辞

本並列版 MCNP4 の作成及び並列計算機 AP1000 の利用に際しては、富士通研究所(株)並列処理研究センターに多大な便宜を図って戴いた。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) Kawazoe, K., et al., JAERI-M 91-066 (1991)
- (2) Takano, M., et al., J. Nucl. Sci. Technol. 28[12], 1143 (1991)
- (3) Takano, M., et al., JAERI-M 92-193 (1992)
- (4) Takano, M., et al., J. At. Energy Soc. Jpn., 34[6], 533 (1992)
- (5) Forster, R.A., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 37[3], 1378 (1990)
- (6) Ishihara, H., et al., IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers, and Signal Processing, May 9 ~ 10 (1991)
- (7) RSIC Documentation for CCC-200/MCNP 4 Code Package (1991)

## 5. まとめ

モンテカルロ中性子・光子輸送計算コード MCNP 4 を高並列分散メモリ型計算機 AP1000 で実行できるよう並列化して計算速度の高速化を図り、その性能を評価した。5,000 ~ 10,000 ヒストリ程度の小規模なサンプル問題では、集計頻度とそれに伴う同期待ちの全体時間に占める割合が比較的大きく、余り高い並列化効率が得られなかつたが、100 万オーダーのヒストリの計算では、効率の高い並列処理が行われることが示され、実計算時間としても従来のスカラ計算機の数十分の 1 の時間で計算が行えるようになった。今後、より高い並列化効率を達成するためには、一括処理ヒストリ数や集計頻度の効果について、調べてゆかねばならない。

## 謝 辞

本並列版 MCNP4 の作成及び並列計算機 AP1000 の利用に際しては、富士通研究所(株)並列処理研究センターに多大な便宜を図って戴いた。ここに深く感謝いたします。

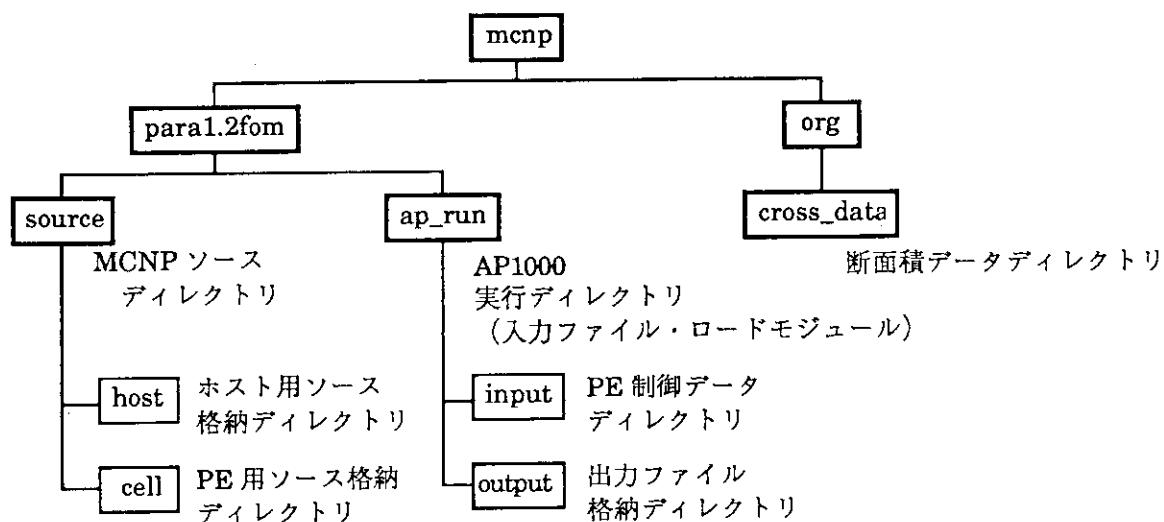
## 参考文献

- (1) Kawazoe, K., et al., JAERI-M 91-066 (1991)
- (2) Takano, M., et al., J. Nucl. Sci. Technol. 28[12], 1143 (1991)
- (3) Takano, M., et al., JAERI-M 92-193 (1992)
- (4) Takano, M., et al., J. At. Energy Soc. Jpn., 34[6], 533 (1992)
- (5) Forster, R.A., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 37[3], 1378 (1990)
- (6) Ishihara, H., et al., IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers, and Signal Processing, May 9 ~ 10 (1991)
- (7) RSIC Documentation for CCC-200/MCNP 4 Code Package (1991)

## 付録 A : AP1000 における並列版 MCNP 4 使用の手引き

#### A.1 並列版 MCNP4 利用時のディレクトリ構成

並列版 MCNP 4 利用時のディレクトリ構成は下図を参考のこと。



## A.2 實行手順

## (0) DATAPATH の設定

実行シェル (go.sh) または go.sh を起動するシェル内で、あるいはロードモジュールを実行するディレクトリのもとで環境変数 DATAPATH に断面積データのパスを指定する。

例：setenv DATAPATH \$HOME/mcnp/org/cross data

831

gn.sh または .cshrc 内

※ \$HOME はユーザのホームディレクトリを表す。

### (1) オンラインでの実行

実行は、ホスト用／セル用ロードモジュール、入力ファイル、ディレクトリ `input`, `output` を含むディレクトリにおいて行う。テープに納められたアーカイブのディレクトリ `para1.2fom/ap_run` には実行のための環境が整っている。並列化版 MCNP 4 の実行には、シェル `gol.sh` を使うのが便利である。実行時の出力は標準出力に出力される。

### ・シェルを使っての実行

`go1.sh` は、入力ファイル名、PE 台数、一括計算ヒストリ数を引数に指定して実行するための実行用シェルである。PE 台数には、2, 4, 8, 16, 32, 64, 512 が指定できる。

- シェル名： go1.sh
  - 使用方法： go1.sh 入力ファイル名 PE台数 1 ↴  
 ↑                   ↑  
 計算に使用する PE台数を指定 一括計算 ヒストリ数

■ 使用例：入力ファイル "A9" を PE 512 台で実行する場合

```
go1.sh A9 512 1 ↴
```

■ 使用上の注意：

①一括計算ヒストリ数に関して

一括計算ヒストリ数は、PE 制御ファイル "cell\*.dat" (\*: PE 台数) に記述されている初期の集計間隔と定常毎の集計間隔の値の両方を割り切れる値でなければならない。PE 制御ファイルは、使用する PE 台数に対応したものがディレクトリ input に用意されている。PE 制御ファイルの書式は後述の"・シェルを用いない実行"を参考のこと。

②リストアートファイル RUNTPE に関して

go1.sh では、計算の終了後にリストアートファイル RUNTPE を削除している。

・シェルを用いない実行

1) 一括計算ヒストリ数を環境変数 PROCESS に設定する。

```
ex.) setenv PROCESS 10 ↴
```

(省いた場合は 1 が設定される)

2) 入力ファイルをファイル "INP" にコピーする。

3) PE 制御ファイル "cell.dat" の内容を修正する（下表を参考）。

4) ホストロードモジュールを実行する。

```
mcnp_host ↴
```

〔cell.dat の書式〕 PE 台数、中間結果の集計間隔を指定する。

行	指定例	機能	設定条件	備考
1	8	X 方向の PE 台数	X×Y>1	
2	8	Y 方向の PE 台数		
3	1000	定常毎の集計間隔	1000 単位	デフォルト値:1000
4	200	初期の集計間隔	100 単位かつ 定常毎の集計 間隔値以内	デフォルト値:200

\* 入力形式はフリーフォーマット

出力ファイルの名前は、オリジナル版同様 OUTP, MCTAL, RUNTPE となる。

(2) バッチジョブによる実行

バッチジョブによって並列版 MCNP 4 を実行するには、capexec コマンドによりバッチキューへ登録を行う。

```
capexec -N PE 台数構成 実行コマンド、及びシェル" ↴
```

■ 使用例：入力ファイル "A9" を PE 512 台で実行する場合

```
capexec -N 512 "go1.sh A9 512 1 > logfile" ↴
```

## (3) 出力ファイル

go1.sh を使用すると、出力ファイル群はディレクトリ output に移動される。output に格納されるファイルの名前は、入力ファイル名、PE 台数、一括計算ヒストリ数が分かるような名前になっている。

OUT(入力ファイル名).cel(PE台数).(一括計算ヒストリ数)	・・・	計算結果 (OUTP)
MCT(入力ファイル名).cel(PE台数).(一括計算ヒストリ数)	・・・	グラフデータ (MCTAL)*
s1(入力ファイル名).cel(PE台数).(一括計算ヒストリ数)	・・・	PE 側計算結果
smp(入力ファイル名).cel(PE台数).(一括計算ヒストリ数)	・・・	PE 側全出力

\* グラフデータは問題によって出力されない場合もある。

## ■例：A9 という入力ファイルを PE 台数 64、一括計算ヒストリ数 1 で実行した場合

```
output/ OUTA9.cel64.1
output/ s1A9.cel64.1
output/ smpA9.cel64.1
```

## A.3 コンパイル・リンク

コンパイル、リンクはホスト、PE のそれぞれのソースディレクトリに格納されているシェルを使用する。

## ・コンパイル

- シェル名： cpl.sh
- 使用方法： cpl.sh ファイル名 ↳
- 使用例： 全ソースファイルをコンパイル  
cpl.sh \*.f ↳

## ・リンク

全てのソースファイルのオブジェクトが完成された後、以下のシェルを実行する。すると、ホスト（或いは PE）のロードモジュールが作成され、ディレクトリ ap\_run に新しく作成されたロードモジュールを移動する。

ap\_run に古いロードモジュールが格納されている場合は置き換えられる。

- シェル名： link.sh
- 使用方法： link.sh ↳

付録 B : サンプル問題入力データ

- B.1 Sample 1
- B.2 Sample 3
- B.3 Sample 4
- B.4 Cask
- B.5 Skyshine

**B.1 Sample 1**

```

PROB1 -- SIMPLE NEUTRON PROBLEM TO TEST SOME BASIC OPERATIONS OF MCNP.
1    1   -2.25   -1   IMP:N=1   $ GRAPHITE BALL
2    2   -8.95   1   -2   IMP:N=1   $ COPPER SHELL
3    0           2   -3   IMP:N=1   $ VOID SPACE
4    0           3       IMP:N=0   $ ZERO-IMPORTANCE OUTSIDE WORLD

1    SO  5
2    SO  7.5
3    SO 10

C    BIASED ISOTROPIC POINT SOURCE AT (0,0,0)
SDEF  ERG D1   VEC 0 1 0   DIR D2   TME D5
SC5  EQUIPROBABLE BIN TREATMENT FOR TIME DISTRIBUTION.
SI5  -50 -10 3I 10 5M
SP5  -41 10
SB5  0 .1 .2 .3 1R .2 .1
SC1  FLAT ENERGY SPECTRUM FROM 1 TO 14.1 MEV.
SI1  1 14.1
SP1  0 1
SC2  DIRECTION IS BIASED TOWARD THE POINT DETECTOR.
SB2  -31 1.5
C
M2    29000.10 1
M1    6012.10C 1
AWTAB 6012. 11.8969
C    XS3  6012.50C 11.8969 RMCCS 0 3 92853 23390 0 0 2.53E-08
PHYS:N  14.2 .01
C
FC1  CURRENT ACROSS THE GRAPHITE-COPPER INTERFACE.
F1:N  1
E1    .1 .5 .8 2 4 12 14.1
C1    -.866 -.5 0 .5 .866 1
EM1  1 5I 7
CM1  8 4I 13
TM5  14 8I 23
T5    -50 -10 3I 10 5M 4M 5M 1.E20
FQ1  C E
FC5  FLUX AT A POINT IN THE VOID JUST OUTSIDE THE COPPER SHELL.
F5:N  0 8 0 0
E5    .1 .5 .8 2 4 12 14.1
C
CUT:N 1.E20 .05 .05 .01 .01
NPS   5000
PRINT
PRDMMP 2J -1
DBCN J 1000 512 513 2J 100 10000 5 $ NON-MULTITASK VERSION.
C    DBCN 6J 100 10000 5 $ DBCN CARD FOR MULTITASK VERSION.

```

**B.2 Sample 3**

```

PROB3 -- MANY FEATURES OF THE GENERAL SOURCE
3      1 -7   -10          $ SOURCE ON SURFACE OF THIS CELL
4      2 -.9  -90 #3 #8 #30    $ CARBON BETWEEN SOURCES AND TALLY
8      3 -3.7 -14 15 -16     $ TALLY HERE
30     4 -1.2 (-21 22 -23 24:-27) -25 26   $ VOLUME SOURCE HERE
40     0 90                  $ ZERO-IMPORTANCE OUTSIDE WORLD

10     SX -50 12
14     PY 31
15     PY 0
16     CY 15
21     PY 30
22     PY -16
23     PX 30
24     PX 25
25     PZ 9
26     PZ -9
27     C/Z 25 30 4
90     SQ 1 4 4 0 0 0 -6400 0 0 0

SC6   A SURFACE SOURCE ON SPHERE 10 AND A CELL SOURCE IN CELL 30.
SDEF  SUR D6  AXS FSUR D61 CEL FSUR D62 X FSUR D63 Y FSUR D64
      Z FSUR D65 VEC FSUR D66 DIR FSUR D67 ERG FSUR D68
      EXT FSUR D69
C     BIASED SAMPLING BETWEEN THE SURFACE AND CELL SOURCES
SI6   L 10 0
SP6   .8 .2
SB6   .3 .7
C     AXS FOR POSITION BIAS ON THE SURFACE
DS61  T 10 4 2 0
C     THE NAME OF THE CELL
DS62  L 0 30
C     SAMPLE X FOR THE CELL COVER
DS63  S 0 73
SI73  20 30
SP73  0 1
C     SAMPLE Y FOR THE CELL COVER
DS64  S 0 74
SI74  -17 36
SP74  0 1
C     SAMPLE Z FOR THE CELL COVER
DS65  S 0 75
SI75  -10 10
SP75  0 1
C     REFERENCE VECTOR FOR DIRECTIONAL BIASING IN THE CELL
DS66  T 0 -3 1 0
C     EXPONENTIAL BIASING IN THE CELL
DS67  S 0 77
SB77  -31 1.5
C     THE SURFACE AND CELL SOURCES HAVE DIFFERENT ENERGY SPECTRA
DS68  S 78 88
SI78  A 7 10 13
SP78  0 1 0
SP88  -3
C     POSITION BIASING ON THE SURFACE
DS69  S 79 0
SI79  -1 .5 .9 1
SP79  C 0 1.5 1.9 2
SB79  C 0 .5 1.2 2
C     MATERIALS

```

M1 26000.11 1  
M2 6012.10 1  
M3 13027.04 1  
M4 1001.04 2 8016.04 1 92238.01 .015  
DRXS  
C TALLY  
F4:N 8  
E4 1 2 4 6 8 12 14  
C MISCELLANEOUS  
IMP:N 1 3R 0  
CUT:N J .0001 .18 .09  
NPS 10000  
PRDMP 2J -1  
PRINT  
NONU  
F14:N 8  
F24:N 8  
FQ14 U E  
FQ24 U E  
FT14 SCX 79  
FT24 SCD  
FU24 6 73 74 75 77 78 79

**B.3 Sample 4**

```

PROB4 -- PHOTONS
1   1 .02 -1      $ URANIUM HYDRIDE BALL WITH POINT SOURCE
2   2 .1 -2 1 3 4 $ URANIUM-LITHIUM SHELL
3   0             2 $ ZERO-IMPORTANCE OUTSIDE WORLD
4   2 .1 -3 5
5   2 .1 -4 6
6   2 .1 -5
7   2 .1 -6

1   SO 10
2   SO 20
3   S -10 2R 2.1
4   S 10 2R 1.1
5   S -10 2R 1.9
6   S 10 2R .9

MODE P
IMP:P 1 1 0 1 1 1M 1M
M1    92000 1 1000 3
M2    92000 1 3000 3
C     MONOENERGETIC ISOTROPIC POINT SOURCE AT (0,0,0)
SDEF  ERG=3  CEL=1
E0    .01 .1 1 5
F6:P  1 2 6 7    $ HEATING TALLY
F5X:P 12 15 1
F4:P  1 2 6 7    $ FLUX TALLY
FQ4  E F
FQ6  F E
FQ5  E D
FQ25 E D
FZ25:P -12 15 -1    -7 7 2
DD    0 100 .01
DD5   -.1
NPS   5000
PRINT -90 -20 -80
PRDMP 2J -1
DXT:P -10 2R 1 2 10 2R 1 1 .01 .005
DXC:P 1 1 0 .9 .9 .1 .1
PD    1 1 0 .1 3R
DD2   0 100 .005 .4M
DE25  .01 8I .1 8I 1 2
DF25 LIN .8 18I .99
PHYS:P .05
CUT:P .1 .01 .5 .2 .8
CF4   4
CF6   5

```

**B.4 Cask**

NEUTRONS THROUGH DRY CASK (3 DIVIDE PARTS NEUTRON-GAMMA PROB.)

C &lt;&lt; ANALYSIS AREA &gt;&gt;

110 0 10 : -11 : 12 IMP:N=0

C &lt;&lt; OUTER AIR WITHOUT TALLY CELL &gt;&gt;

111 1 5.3176E-5 -10 11 -12 21  
#(21 -80 34 -35) \$ INNER TALLY CELL  
#(81 -82 34 -35) \$ OUTER TALLY CELL  
IMP:N=4

C &lt;&lt; INNER AIR AREA &gt;&gt;

112 1 5.3176E-5 -20 11 -12  
#(30 -31 32 -33) \$ SOURCE CELL  
IMP:N=1

C &lt;&lt; SOURCE AREA &gt;&gt;

120 1 5.3176E-5 30 -31 32 -33 IMP:N=1

C &lt;&lt; CASK IRON AREA &gt;&gt;

130 2 8.67774E-2 20 -21 11 -12  
#(40 -41 43 -42 11 -12) \$ POLYETHYLENE PLANE  
50 51 52 53 54 55 56 57 58 59  
60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70  
IMP:N=2 \$ POLYETHYLENE STICKS

C &lt;&lt; POLYETHYLENE PLANE &gt;&gt;

140 3 1.2070E-1 40 -41 43 -42 11 -12 IMP:N=2

C &lt;&lt; POLYETHYLENE STICKS &gt;&gt;

150 3 1.2070E-1 -50 11 -12 IMP:N=2  
151 3 1.2070E-1 -51 11 -12 IMP:N=2  
152 3 1.2070E-1 -52 11 -12 IMP:N=2  
153 3 1.2070E-1 -53 11 -12 IMP:N=2  
154 3 1.2070E-1 -54 11 -12 IMP:N=2  
155 3 1.2070E-1 -55 11 -12 IMP:N=2  
156 3 1.2070E-1 -56 11 -12 IMP:N=2  
157 3 1.2070E-1 -57 11 -12 IMP:N=2  
158 3 1.2070E-1 -58 11 -12 IMP:N=2  
159 3 1.2070E-1 -59 11 -12 IMP:N=2  
160 3 1.2070E-1 -60 11 -12 IMP:N=2  
161 3 1.2070E-1 -61 11 -12 IMP:N=2  
162 3 1.2070E-1 -62 11 -12 IMP:N=2  
163 3 1.2070E-1 -63 11 -12 IMP:N=2  
164 3 1.2070E-1 -64 11 -12 IMP:N=2  
165 3 1.2070E-1 -65 11 -12 IMP:N=2  
166 3 1.2070E-1 -66 11 -12 IMP:N=2  
167 3 1.2070E-1 -67 11 -12 IMP:N=2  
168 3 1.2070E-1 -68 11 -12 IMP:N=2  
169 3 1.2070E-1 -69 11 -12 IMP:N=2  
170 3 1.2070E-1 -70 11 -12 IMP:N=2

C &lt;&lt; TALLY CELLS &gt;&gt;

C \* JUST CAST OUTER POSITION \*

200 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 83 -85 IMP:N=4 VOL=738.3  
201 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 85 -86 IMP:N=4 VOL=738.3  
202 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 86 84 IMP:N=4 VOL=738.3  
203 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 -84 87 IMP:N=4 VOL=738.3  
204 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 -87 88 IMP:N=4 VOL=738.3  
205 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 -88 83 IMP:N=4 VOL=738.3  
206 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 -83 85 IMP:N=4 VOL=738.3  
207 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 -85 86 IMP:N=4 VOL=738.3  
208 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 -86 -84 IMP:N=4 VOL=738.3  
209 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 84 -87 IMP:N=4 VOL=738.3  
210 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 87 -88 IMP:N=4 VOL=738.3  
211 1 5.3176E-5 21 -80 34 -35 88 -83 IMP:N=4 VOL=738.3

C \* 100.0 CM FROM CAST OUTER POSITION \*

220 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 83 -85 IMP:N=4 VOL=3570.

221 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 85 -86 IMP:N=4 VOL=3570.  
 222 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 86 84 IMP:N=4 VOL=3570.  
 223 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 -84 87 IMP:N=4 VOL=3570.  
 224 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 -87 88 IMP:N=4 VOL=3570.  
 225 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 -88 83 IMP:N=4 VOL=3570.  
 226 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 -83 85 IMP:N=4 VOL=3570.  
 227 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 -85 86 IMP:N=4 VOL=3570.  
 228 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 -86 -84 IMP:N=4 VOL=3570.  
 229 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 84 -87 IMP:N=4 VOL=3570.  
 230 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 87 -88 IMP:N=4 VOL=3576.  
 231 1 5.3176E-5 81 -82 34 -35 88 -83 IMP:N=4 VOL=3570.

C \*\*\*\*\* SURFACE DEFFINE \*\*\*\*\*

C << ANALYSIS END SURFACE >>

10 CZ 180.0  
 11\* PZ 0.0 \$ REFRECTION SURFACE  
 12\* PZ 170.0 \$ REFRECTION SURFACE

C << CASK SURFACE >>

20 CZ 30.0  
 21 CZ 70.0

C << SOURCE SURFACE >>

30 CZ 25.0  
 31 CZ 28.5  
 32 PZ 45.0  
 33 PZ 95.0  
 34 PZ 60.0  
 35 PZ 80.0

C << POLYETHYLENE BOARD SURFACE >>

40 CZ 46.7  
 41 CZ 52.6  
 42 P -11.43 1.0 0.0 0.0  
 43 P 0.4663 1.0 0.0 0.0

C << POLYETHYLENE RODS SURFACE >>

50 C/Z -4.24 45.80 2.95  
 51 C/Z -9.79 52.39 2.95  
 52 C/Z -12.59 44.24 2.95  
 53 C/Z -19.25 49.70 2.95  
 54 C/Z -20.50 41.18 2.95  
 55 C/Z -28.06 45.32 2.95  
 56 C/Z -27.72 36.70 2.95  
 57 C/Z -35.91 39.39 2.95  
 58 C/Z -33.99 30.99 2.95  
 59 C/Z -42.53 32.12 2.95  
 60 C/Z -39.11 24.22 2.95  
 61 C/Z -47.71 23.76 2.95  
 62 C/Z -42.89 16.61 2.95  
 63 C/Z -51.26 14.59 2.95  
 64 C/Z -45.21 8.45 2.95  
 65 C/Z -53.07 4.92 2.95  
 66 C/Z -46.00 0.00 2.95  
 67 C/Z -53.07 -4.92 2.95  
 68 C/Z -45.21 -8.45 2.95  
 69 C/Z -51.26 -14.59 2.95  
 70 C/Z -42.89 -16.61 2.95

C << THETA DIRECTION TALLY SURFACE >>

80 CZ 71.00 \$ 1.0 CM FROM CASTER  
 81 CZ 169.50 \$ 100.0 CM FROM CASTER  
 82 CZ 171.50  
 83 PY 0.0 \$ 0.0 DEG X-DIREC.  
 84 PX 0.0 \$ 90.0 DEG X-DIREC.  
 85 P -0.577 1.0 0.0 0.0 \$ 30.0 DEG X-DIREC.  
 86 P -1.732 1.0 0.0 0.0 \$ 60.0 DEG X-DIREC.

```

87 P 1.732 1.0 0.0 0.0 $ 120.0 DEG X-DIREC.
88 P 0.577 1.0 0.0 0.0 $ 160.0 DEG X-DIREC.

MODE N P
C DEBUG OF GEOMETRY
C VOID
C << SOURCE DEFINITION >> CF-252
SDEF ERG D3 $ WATT FISSION SPECTRUM
POS 0.0 0.0 45.0 $ CYLINDER SOURCE
RAD D1 EXT D2
AXS 0.0 0.0 1.0
SI1 25.0 28.5
SI2 0.0 50.0
SP3 -3 1.205 2.926
C << ENERGY BIN MULTIPLIER >>
EM0 2.4E12 5R
C << ENERGY BIN FOR TALLING >>
E0 2.0E-5 0.1 1.0 5.0 10.0 20.0
C << TIME BIN FOR TALLING (UNIT MIRI SECOND) >>
T0 0.1E5 10.0E5 100.0E5 1000.0E5
C << CELL TALLY OF THETA DIRECTION >>
F14:N 203 204 205 206
F14C 0.0 CM FROM CASTER ( POLYETHYLENE RODS ) NEUTRONS
C << NEUTRON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS REM/HR>>
DE14 2.50E-8 1.00E-7 1.00E-6 1.00E-5 1.00E-4 1.00E-3
      1.00E-2 1.00E-1 5.00E-1 1.00E+0 2.50E+0
      5.00E+0 7.00E+0 1.00E+1 1.40E+1 2.00E+1
DF14 3.67E-6 3.67E-6 4.46E-6 4.54E-6 4.18E-6 3.76E-6
      3.56E-6 2.17E-5 9.26E-5 1.32E-4 1.25E-4
      1.56E-4 1.47E-4 1.47E-4 2.08E-4 2.27E-4
F24:N 207 208 209 210
F24C 0.0 CM FROM CASTER ( CAST IRON ) NEUTRONS
C << NEUTRON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>
DE24 2.50E-8 1.00E-7 1.00E-6 1.00E-5 1.00E-4 1.00E-3
      1.00E-2 1.00E-1 5.00E-1 1.00E+0 2.50E+0
      5.00E+0 7.00E+0 1.00E+1 1.40E+1 2.00E+1
DF24 3.67E-6 3.67E-6 4.46E-6 4.54E-6 4.18E-6 3.76E-6
      3.56E-6 2.17E-5 9.26E-5 1.32E-4 1.25E-4
      1.56E-4 1.47E-4 1.47E-4 2.08E-4 2.27E-4
F34:N 200 201 202 211
F34C 0.0 CM FROM CASTER ( POLYETHYLENE BOARD ) NEUTRONS
C << NEUTRON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>
DE34 2.50E-8 1.00E-7 1.00E-6 1.00E-5 1.00E-4 1.00E-3
      1.00E-2 1.00E-1 5.00E-1 1.00E+0 2.50E+0
      5.00E+0 7.00E+0 1.00E+1 1.40E+1 2.00E+1
DF34 3.67E-6 3.67E-6 4.46E-6 4.54E-6 4.18E-6 3.76E-6
      3.56E-6 2.17E-5 9.26E-5 1.32E-4 1.25E-4
      1.56E-4 1.47E-4 1.47E-4 2.08E-4 2.27E-4
F44:N 223 224 225 226
F44C 100.0 CM FROM CASTER ( POLYETHYLENE RODS ) NEUTRONS
C << NEUTRON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>
DE44 2.50E-8 1.00E-7 1.00E-6 1.00E-5 1.00E-4 1.00E-3
      1.00E-2 1.00E-1 5.00E-1 1.00E+0 2.50E+0
      5.00E+0 7.00E+0 1.00E+1 1.40E+1 2.00E+1
DF44 3.67E-6 3.67E-6 4.46E-6 4.54E-6 4.18E-6 3.76E-6
      3.56E-6 2.17E-5 9.26E-5 1.32E-4 1.25E-4
      1.56E-4 1.47E-4 1.47E-4 2.08E-4 2.27E-4
F54:N 227 228 229 230
F54C 100.0 CM FROM CASTER ( CAST IRON ) NEUTRONS
C << NEUTRON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>
DE54 2.50E-8 1.00E-7 1.00E-6 1.00E-5 1.00E-4 1.00E-3
      1.00E-2 1.00E-1 5.00E-1 1.00E+0 2.50E+0

```

	5.00E+0	7.00E+0	1.00E+1	1.40E+1	2.00E+1	
DF54	3.67E-6	3.67E-6	4.46E-6	4.54E-6	4.18E-6	3.76E-6
	3.56E-6	2.17E-5	9.26E-5	1.32E-4	1.25E-4	
	1.56E-4	1.47E-4	1.47E-4	2.08E-4	2.27E-4	
F64:N	220	221	222	231		
F64C	100.0	CM FROM CASTER ( POLYETHYLENE BOARD ) NEUTRONS				
C	<< NEUTRON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>					
DE64	2.50E-8	1.00E-7	1.00E-6	1.00E-5	1.00E-4	1.00E-3
	1.00E-2	1.00E-1	5.00E-1	1.00E+0	2.50E+0	
	5.00E+0	7.00E+0	1.00E+1	1.40E+1	2.00E+1	
DF64	3.67E-6	3.67E-6	4.46E-6	4.54E-6	4.18E-6	3.76E-6
	3.56E-6	2.17E-5	9.26E-5	1.32E-4	1.25E-4	
	1.56E-4	1.47E-4	1.47E-4	2.08E-4	2.27E-4	
C	<< CELL TALLY OF THETA DIRECTION >>					
F74:P	203	204	205	206		
F74C	0.0	CM FROM CASTER ( POLYETHYLENE RODS ) PHOTONS				
C	<< PHOTON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS REM/HR>>					
DE74	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15
	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.8
	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	2.8
	3.25	3.75	4.25	4.75	5.0	5.25
	5.75	6.25	6.75	7.5	9.0	11.0
	13.0	15.0				
DF74	3.96E-6	5.82E-7	2.90E-7	2.58E-7	2.83E-7	3.79E-7
	5.01E-7	6.31E-7	7.59E-7	8.78E-7	9.85E-7	1.06E-6
	1.17E-6	1.27E-6	1.36E-6	1.44E-6	1.52E-6	1.68E-6
	1.98E-6	2.51E-6	2.99E-6	3.42E-6	3.82E-6	4.01E-6
	4.41E-6	4.83E-6	5.23E-6	5.60E-6	5.80E-6	6.01E-6
	6.37E-6	6.74E-6	7.11E-6	7.66E-6	8.77E-6	1.03E-5
	1.18E-5	1.33E-5				
F84:P	207	208	209	210		
F84C	0.0	CM FROM CASTER ( CAST IRON ) PHOTONS				
C	<< PHOTON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>					
DE84	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15
	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.8
	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	2.8
	3.25	3.75	4.25	4.75	5.0	5.25
	5.75	6.25	6.75	7.5	9.0	11.0
	13.0	15.0				
DF84	3.96E-6	5.82E-7	2.90E-7	2.58E-7	2.83E-7	3.79E-7
	5.01E-7	6.31E-7	7.59E-7	8.78E-7	9.85E-7	1.06E-6
	1.17E-6	1.27E-6	1.36E-6	1.44E-6	1.52E-6	1.68E-6
	1.98E-6	2.51E-6	2.99E-6	3.42E-6	3.82E-6	4.01E-6
	4.41E-6	4.83E-6	5.23E-6	5.60E-6	5.80E-6	6.01E-6
	6.37E-6	6.74E-6	7.11E-6	7.66E-6	8.77E-6	1.03E-5
	1.18E-5	1.33E-5				
F94:P	200	201	202	211		
F94C	0.0	CM FROM CASTER ( POLYETHYLENE BOARD ) PHOTONS				
C	<< PHOTON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>					
DE94	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15
	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.8
	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	2.8
	3.25	3.75	4.25	4.75	5.0	5.25
	5.75	6.25	6.75	7.5	9.0	11.0
	13.0	15.0				
DF94	3.96E-6	5.82E-7	2.90E-7	2.58E-7	2.83E-7	3.79E-7
	5.01E-7	6.31E-7	7.59E-7	8.78E-7	9.85E-7	1.06E-6
	1.17E-6	1.27E-6	1.36E-6	1.44E-6	1.52E-6	1.68E-6
	1.98E-6	2.51E-6	2.99E-6	3.42E-6	3.82E-6	4.01E-6

	4.41E-6	4.83E-6	5.23E-6	5.60E-6	5.80E-6	6.01E-6
	6.37E-6	6.74E-6	7.11E-6	7.66E-6	8.77E-6	1.03E-5
	1.18E-5	1.33E-5				
F104:P	223	224	225	226		
F104C	100.0	CM FROM CASTER ( POLYETHYLENE RODS ) PHOTONS				
C	<< PHOTON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>					
DE104	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15
	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.8
	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	2.8
	3.25	3.75	4.25	4.75	5.0	5.25
	5.75	6.25	6.75	7.5	9.0	11.0
	13.0	15.0				
DF104	3.96E-6	5.82E-7	2.90E-7	2.58E-7	2.83E-7	3.79E-7
	5.01E-7	6.31E-7	7.59E-7	8.78E-7	9.85E-7	1.06E-6
	1.17E-6	1.27E-6	1.36E-6	1.44E-6	1.52E-6	1.68E-6
	1.98E-6	2.51E-6	2.99E-6	3.42E-6	3.82E-6	4.01E-6
	4.41E-6	4.83E-6	5.23E-6	5.60E-6	5.80E-6	6.01E-6
	6.37E-6	6.74E-6	7.11E-6	7.66E-6	8.77E-6	1.03E-5
	1.18E-5	1.33E-5				
F114:P	227	228	229	230		
F114C	100.0	CM FROM CASTER ( CAST IRON ) PHOTONS				
C	<< PHOTON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>					
DE114	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15
	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.8
	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	2.8
	3.25	3.75	4.25	4.75	5.0	5.25
	5.75	6.25	6.75	7.5	9.0	11.0
	13.0	15.0				
DF114	3.96E-6	5.82E-7	2.90E-7	2.58E-7	2.83E-7	3.79E-7
	5.01E-7	6.31E-7	7.59E-7	8.78E-7	9.85E-7	1.06E-6
	1.17E-6	1.27E-6	1.36E-6	1.44E-6	1.52E-6	1.68E-6
	1.98E-6	2.51E-6	2.99E-6	3.42E-6	3.82E-6	4.01E-6
	4.41E-6	4.83E-6	5.23E-6	5.60E-6	5.80E-6	6.01E-6
	6.37E-6	6.74E-6	7.11E-6	7.66E-6	8.77E-6	1.03E-5
	1.18E-5	1.33E-5				
F124:P	220	221	222	231		
F124C	100.0	CM FROM CASTER ( POLYETHYLENE BOARD ) PHOTONS				
C	<< PHOTON FLUX-TO-DOSE RATE CONVERSION FACTORS >>					
DE124	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15
	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.8
	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	2.8
	3.25	3.75	4.25	4.75	5.0	5.25
	5.75	6.25	6.75	7.5	9.0	11.0
	13.0	15.0				
DF124	3.96E-6	5.82E-7	2.90E-7	2.58E-7	2.83E-7	3.79E-7
	5.01E-7	6.31E-7	7.59E-7	8.78E-7	9.85E-7	1.06E-6
	1.17E-6	1.27E-6	1.36E-6	1.44E-6	1.52E-6	1.68E-6
	1.98E-6	2.51E-6	2.99E-6	3.42E-6	3.82E-6	4.01E-6
	4.41E-6	4.83E-6	5.23E-6	5.60E-6	5.80E-6	6.01E-6
	6.37E-6	6.74E-6	7.11E-6	7.66E-6	8.77E-6	1.03E-5
	1.18E-5	1.33E-5				
C	<< MATERIAL DIFFINITION >>					
M1	8016	1.1199E-5	\$ 0	AIR		
	7014	4.1977E-5	\$ N			
C	TOTAL		5.3176E-5			
M2	6012	1.24591E-2	\$ C			
	14000	2.92679E-3	\$ SI			
	12000	1.08898E-4	\$ MG			
	26000	7.12826E-2	\$ FE			

C TOTAL 8.67774E-2  
M3 6012 4.01709E-2 \$ C POLYETHYLENE  
1001 8.05275E-2 \$ H  
C TOTAL 1.2067E-1  
C << WEIGHT CUTOFF PRAM >>  
CUT:N 1000.0E5 \$ TIME CUTOFF  
0.0 \$ ENERGY CUTOFF  
-0.50 -0.25  
C << NUMBER OF SOURCE >>  
NPS 200000  
C << CPU TIME >>  
CTME 1800.0

**B.5 Skyshine**

EXPERIMENTAL ARRANGEMENT OF THE KANSAS SKYSHINE WITH CO-60

1	2	3.2960E-2	1	-2	-3					\$LEAD
2	1	4.9651E-5	7	-8	-17	18	23	-24	(-1:2:3)	\$AIR
3	4	7.2033E-2	4	-5	-14	21	23	-24		\$CONCRETE
4	4	7.2033E-2	5	-6	-14	21	23	-24		\$CONCRETE
5	4	7.2033E-2	6	-7	-14	21	23	-24		\$CONCRETE
6	4	7.2033E-2	8	-9	-14	21	23	-24		\$CONCRETE
7	4	7.2033E-2	9	-10	-14	21	23	-24		\$CONCRETE
8	4	7.2033E-2	10	-11	-14	21	23	-24		\$CONCRETE
9	4	7.2033E-2	11	-12	-14	21	23	-24		\$CONCRETE
10	4	7.2033E-2	12	-13	-14	21	23	-24		\$CONCRETE
11	4	7.2033E-2	7	-8	-14	15	23	-24		\$CONCRETE
12	4	7.2033E-2	7	-8	-15	16	23	-24		\$CONCRETE
13	4	7.2033E-2	7	-8	-16	17	23	-24		\$CONCRETE
14	4	7.2033E-2	7	-8	-18	19	23	-24		\$CONCRETE
15	4	7.2033E-2	7	-8	-19	20	23	-24		\$CONCRETE
16	4	7.2033E-2	7	-8	-20	21	23	-24		\$CONCRETE
17	4	7.2033E-2	4	-11	-14	21	24	-25		\$CONCRETE
18	4	7.2033E-2	4	-11	-14	21	25	-26		\$CONCRETE
19	1	4.9651E-5	11	-13	-14	21	24	-26		\$AIR
20	3	3.5707E-2	-23	22	-32					\$SOIL
21	1	4.9651E-5	(23	-27)	(-4 : 13 : 14 : -21 : 26)					\$AIR
22	1	4.9652E-5	23	-28	27					\$AIR
23	1	4.9651E-5	23	-29	28					\$AIR
24	1	4.9651E-5	23	-30	29					\$AIR
25	1	4.9651E-5	23	-31	30					\$AIR
26	1	4.9651E-5	23	-32	31					\$AIR
27	0		32 :	-22						\$OUT WORLD

1	PZ	130.0	\$
2	PZ	150.0	\$
3	CZ	75.0	\$
4	PX	-215.5	\$
5	PX	-185.0	\$
6	PX	-154.5	\$
7	PX	-124.0	\$
8	PX	124.0	\$
9	PX	154.0	\$
10	PX	185.0	\$
11	PX	215.5	\$
12	PX	246.0	\$
13	PX	276.5	\$
14	PY	215.5	\$
15	PY	185.0	\$
16	PY	154.5	\$
17	PY	124.0	\$
18	PY	-124.0	\$
19	PY	-154.5	\$
20	PY	-185.0	\$
21	PY	-215.5	\$
22	PZ	-150.0	\$
23	PZ	0.0	\$
24	PZ	229.0	\$
25	PZ	239.5	\$
26	PZ	250.0	\$
27	SO	15500.0	\$
28	SO	30000.0	\$
29	SO	45000.0	\$
30	SO	60500.0	\$
31	SO	80000.0	\$

32 SO 100000.0 \$

WWE:P 0.05 15.0 \$  
 WWN1:P 1.0 1.0 \$  
     0.02 0.10 0.50 0.50 0.10 0.02 0.002 0.0002 \$  
     0.02 0.10 0.50 0.50 0.10 0.02 \$  
     0.50 0.25 0.01 0.1 \$  
     1.0E-1 5.0E-2 2.5E-2 1.0E-2 5.0E-3 2.5E-3 -1 \$  
 C WEIGHT WINDOW FOR GAMMA-RAY  
 WWN2:P 1.0 1.0 \$  
     0.01 0.05 0.25 0.25 0.05 0.01 0.005 0.0005 \$  
     0.01 0.05 0.25 0.25 0.05 0.01 \$  
     0.25 0.050 0.005 0.01 \$  
     1.0E-2 5.0E-3 2.5E-3 1.0E-3 3.5E-4 7.5E-5 -1 \$  
 WWP:P 5 3 5 0 0 \$  
 C ISOTROPIC POINT SOURCE AT (0,0,198.0)  
 C ENERGY OF 1.332 KEV AND 1.172 KEV  
 MODE P \$  
 SDEF ERG D1 POS 0 0 198.0 \$  
 SI1 L 1.172 1.332 \$  
 SP1 1.0 1.0 \$  
 SB1 1.0 1.0 \$  
 C  
 M1 1000.0P 0.00014 \$  
     6000.0P 0.00014 \$  
     7000.0P 0.78748 \$  
     8000.0P 0.21224 \$  
 C AIR (4.9651E-5)  
 M2 82000.0P 1.00000 \$  
 C LEAD (3.2960E-2)  
 M3 1000.0P 0.18568 \$  
     8000.0P 0.56572 \$  
     13000.0P 0.04901 \$  
     14000.0P 0.15963 \$  
     20000.0P 0.01456 \$  
     19000.0P 0.01081 \$  
     26000.0P 0.01460 \$  
 C SOIL  
 M4 1000.0P 0.07936 \$  
     8000.0P 0.60984 \$  
     12000.0P 0.00091 \$  
     13000.0P 0.00318 \$  
     14000.0P 0.26432 \$  
     20000.0P 0.03296 \$  
     26000.0P 0.00943 \$  
 C CONCRETE (7.20334E-2)  
 C F5Z:P 100.0 3000.0 75.0 \$  
 C F15Z:P 100.0 5000.0 75.0 \$  
 C F25Z:P 100.0 7000.0 75.0 \$  
 F35Z:P 100.0 10000.0 75.0 \$  
 C F45Z:P 100.0 15000.0 75.0 \$  
 C F55Z:P 100.0 20000.0 75.0 \$  
 C F65Z:P 100.0 30000.0 75.0 \$  
 C F75Z:P 100.0 40000.0 75.0 \$  
 C F85Z:P 100.0 50000.0 75.0 \$  
 C F95Z:P 100.0 60000.0 75.0 \$  
 C F105Z:P 100.0 70000.0 75.0 \$  
 E0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.8 \$  
     1.0 1.5 2.0 \$  
 EM0 2.83-4 1.91-4 2.71-4 3.73-4 5.38-4 \$  
     7.54-4 9.46-4 1.13-3 1.38-3 1.69-3 \$  
     2.16-3 2.77-3 \$

C  
CUT:P J .025           \$ ENERGY CUTOFF AT .025 MEV.  
NPS      100000           \$ RUN 100000 HISTORIES.  
CTME     30              \$ LIMIT 5 MIN.  
DBCN    987654321       \$ INITIAL RANDOM NUMBER  
PRINT                    \$ PRINT ALL POSSIBLE OUTPUT FOR EASIER DEBUGGING.