



2000-034



「モンテカルロ計算夏季セミナー」実施報告

2001年2月

桜井 淳・久米 悅雄・谷田部 茂・前川 藤夫
山本 俊弘・長家 康展・森 貴正・植木 紘太郎・内藤 健孝

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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 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（〒319-1195 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 Research Information Division,
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-
gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

「モンテカルロ計算夏季セミナー」実施報告

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター

桜井 淳・久米 悅雄⁺¹・谷山部 茂⁺¹・前川 藤夫⁺²

山本 俊弘⁺³・長家 康展⁺⁴・森 貴正⁺⁴・植木 紘太郎^{*1}・内藤 健孝^{*2}

(2000年12月8日受理)

日本原子力学会「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会主催「モンテカルロ計算夏季セミナー」は、2000年7月26-28日に日本原子力研究所東海研究所で実施された。参加者は大学・研究機関・企業から111名にもおよび盛況であった。初級コースではノート型パソコンにMCNP-4B2及び附属ライブラリ、入力例をインストールし、モンテカルロ法基礎理論から演習まで行った。このようなセミナーは日本では最初の試みであるため、ここに実施概要及び講義、インストール、計算演習の内容について報告する。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白根白方2-4

+¹ 計算科学技術推進センター

+² 中性子科学研究中心

+³ 燃料サイクル安全工学部

+⁴ エネルギーシステム研究部

*¹ 船舶技術研究所

*² 株式会社

Report of “Monte Carlo Calculation Summer Seminar”

Kiyoshi SAKURAI, Etsuo KUME⁺¹, Shigeru YATABE⁺¹, Fujio MAEKAWA⁺²,
Toshihiro YAMAMOTO⁺³, Yasunobu NAGAYA⁺⁴, Takamasa MORI⁺⁴, Kohtaro UEKI *¹
and Yoshitaka NAITO *²

Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura,Naka-gun,Ibaraki-ken

(Received December 8, 2000)

“Monte Carlo Calculation Summer Seminar”, which was sponsored by “Research Committee on Particle Simulation with Monte Carlo Method” in Atomic Energy Society of Japan, was held in 26-28 July 2000 at Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute. The participator is 111 persons from universities, Research Institutes and Companies. In the beginner course, the lecture of fundamental theory of Monte Carlo Method and the installation to the note-type personal computer of MCNP-4B2 and attached libraries, sample input were performed. As the seminar is first attempt in Japan, the general review and lecture, installation, exercise calculation were summarized in this report.

Keywords : Monte Carlo Calculation,Summer Seminar,Lecture,Fundamental Theory,
Installation,Note-type Personal Computer,MCNP-4B2

⁺¹ Center for Promotion of Computational Science and Engineering

⁺² Center of Neutron Science

⁺³ Department of Fuel Cycle Safety Research

⁺⁴ Department of Nuclear Energy System

*¹ Ship Research Institute

*² Nippon Advanced Information Service

目次

1.	実施概要	1
	桜井 淳、久米 悅雄、谷田部 茂、前川藤夫、山本俊弘、長家康展	
2.	特別講演	
	2.1 モンテカルロ計算への期待	11
	内藤倣孝	
3.	モンテカルロ法基礎理論	
	3.1 モンテカルロコードの物理的・数学的方法とその利用技術	25
	植木 紘太郎	
4.	MCNP-4B 断面積ライブラリ	47
	前川藤夫、桜井 淳	
5.	MCNP-4B のパソコンへのインストール実習	79
	谷田部 茂、久米 悅雄、桜井 淳	
6.	例題入力による計算演習	
	6.1 例題入力による計算演習 1－臨界計算	103
	桜井 淳	
	6.2 例題入力による計算演習 2－中性子深層透過	115
	前川藤夫、植木 紘太郎	
7.	問題設定及び計算	125
	桜井 淳、植木 紘太郎	
8.	成果及び課題	129
	桜井 淳、森 貴正、植木 紘太郎	
	謝辞	130
	付録 参加者リスト	131

Contents

1.	General Review -----	1
	Kiyoshi SAKURAI, Etsuo KUME , Shigeru YATABE, Fujio MAEKAWA, Toshihiro YAMAMOTO,Yasunobu NAGAYA	
2.	Special Lecture	
	2.1 Expectation to Monte Carlo Calculation-----	11
	Yoshitaka NAITO	
3.	Fundamental Theory of Monte Carlo Method	
	3.1 Physical and Mathematical Method of Monte Carlo Code and Its Application Technique-----	25
	Kohtaro UEKI	
4.	MCNP-4B2 Cross Section Library-----	47
	Fujio MAEKAWA, Kiyoshi SAKURAI	
5.	Installation Exercise to Personal Computer of MCNP-4B2-----	79
	Shigeru YATABE, Etsuo KUME , Kiyoshi SAKURAI	
6.	Calculation Exercise with Example _Inputs	
	6.1 Criticality-----	103
	Kiyoshi SAKURAI	
	6.2 Neutron Deep Penetration-----	115
	Fujio MAEKAWA, Kohtaro UEKI	
7.	Problem and Calculation-----	125
	Kiyoshi SAKURAI, Kohtaro UEKI	
8.	Result and Subject-----	129
	Kiyoshi SAKURAI, Takamasa MORI,Kohtaro UEKI	
	Acknowledgement-----	130
	Appendix Participator List-----	131

1. 実施概要

桜井 淳、久米悦雄、谷田部 茂
前川藤夫、山本俊弘、長家康展

日本原子力研究所東海研究所

sakurai@melody.tokai.jaeri.go.jp kume@brian.tokai.jaeri.go.jp yatabe@consult.tokai.jaeri.go.jp
fujio@fushp.tokai.jaeri.go.jp yamamoto@melody.tokai.jaeri.go.jp nagaya@mike.tokai.jaeri.go.jp

日本原子力学会「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会(第6回)において、幹事のひとり(桜井)から「モンテカルロ計算夏季セミナー」の提案がなされ、最初のセミナーを2000年7月下旬に実施することが承認された。すぐに実行委員会(桜井、久米、山本、長家、原研計算科学技術推進センターから谷田部)を組織して準備に取りかかった。

初期の段階では、初級コースに、①EGS4 コース、②MVP コース、③MCNP コース、④NMTC /JAERI コースを検討した。①については今後も高エネルギー物理学研究所で継続的に実施、②についてはパソコン版が整備されていないばかりか全体がまだ開発途上であること、独自のユーザー講習会構想があること、④についてはパソコン版を作成するためには最低半年の準備が必要となることがわかった。

結局、第1回は③だけで暫定的にスタートし、第2回から他のコースも増やして行く方針で対応することにした。まず4月中旬につきのような案内を日本原子力学会のメーリングリストに掲載していただき、さらに『日本原子力学会誌』2000年4月号及び5月号にも掲載していただいた。

原研東海で実施することにしたのは、最初の試みであり、技術的な問題が生じた場合でも計算科学技術推進センターからのサポートが得やすいこと、講師の大部分が原研東海に所属していること等による。

「モンテカルロ計算夏季セミナー」参加者募集の案内

日本原子力学会「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会は下記要領で「モンテカルロ計算夏季セミナー」を開催いたします。参加希望者は期日までにお申し込みください。

1 日時 2000年7月26日(水)-28日(金)

3 場所 日本原子力研究所東海研究所研究JRR-1セミナー室

4 募集コース・人数

○初級コース 約30名 無経験者対象。理工系の大学生・大学院生でモンテカルロ計算に興味を持っている人及び将来その方面に進みたい人。企業・研究機関で将来、業務・研究で必要とする人。モンテカルロ計算に興味を持っているすべての人。その他、参加したい人。講師 同研究専門委員会委員。モンテカルロ計算基礎論の 講習(26日)後、参加者各自持参したノート型パソコン(OSとしてWINDOWS95か98搭載、CD機能有、数百Mbytesの空領域有)に実行委員会がすべて調整したCD収納のMCNP-4Bセット・例題入力をMS-DOSでワンタッチインストールし、例題入力で演習問題を計算してモンテカルロ計算の基礎的事項の把握ができるようにする(27日)。問題設定してその入力を作成・実行・最適解を算出できるようにする(28日)。なお当日、日本原子力研究所計算科学推進センター所属の同研

究専門委員会委員のサポート体制有り。MS-DOS のコマンドをまったく知らないてもすべてうまく行くように実行委員会で調整・マニュアル化しておきますので気軽にご参加ください。セミナーでは経験及びノウハウの継承に重点を置く。なお今回は暫定的に MCNP-4B だけだが、将来、初級コースに数種類のコード別のコースを設けることにより他にない特徴を出して行きたいと考えている。

○中級コース 若干名 業務・研究で数年程度の経験者対象。講師 同研究専門委員会委員。特定問題に対して集中討論形式。

○上級コース 若干名 業務・研究で 10 年以上の経験者及びモンテカルロ計算法の研究者対象。講師 同研究専門委員会委員。特定問題に対して集討論形式。

④応募締切日 2000 年 6 月 30 日(金)

⑤参加費 初級コース:テキスト代他 10000 円、中級・上級:無料。

⑥宿泊施設 参加者各自確保。

⑦申込先・連絡先 桜井淳(日本原子力研究所臨界安全研究室、同研究専門委員会幹事)

(TEL 029-282-5224、E-mail sakurai@melody.tokai.jaeri.go.jp)

実行委員会を開催し、ノート型パソコンに連続エネルギーテンテカルロ計算コードシステム MCNP-4B2(附属ライブラリ含む)をインストール及び実行する最も簡単な方法を検討し、CD の作成及びインストール・実行をくり返した(次項の議事録参照)。技術的な問題はすべてクリアできたと判断している。

メーリングリストに掲載された直後に 50 通の問い合わせのメールがあり、反響の大きさに驚いた。結局、締切日の 6 月 30 日にはつぎに示す 48 機関 111 名にも達した。その後もさみだれ式に約 20 名から申し込みがあったが、会場の収容限界を考慮し、やむをえずすべてお断りした。特に原研及びサイクル機構からの申し込みが多く、大学、研究機関、企業と広範囲に渡り申し込みがあった。従来の臨界・遮蔽だけでなく、被曝、計測、核物質管理等、モンテカルロ計算の新たな分野への広がりを実感できた。

48 機関 111 名 : 原子力エンジニアリング 2、原子力安全技術センター 1、東大 2、川崎重工業 1、サイクル機構 12、シーティーアイ 2、清水建設 1、情報システム研 1、エンジニアリング開発 2、東洋エンジニアリング 1、原研 11、電力中研 3、東芝 9、日本総研 1、石川島播磨重工業 2、サイエンスソリューションズ 1、原子力システム 3、三菱重工業 4、武藏工大 2、東工大 4、日立エンジニアリング 1、日立 1、九大 2、日本ニュクリアフュエル 1、名大 3、放医研 2、富士電機 3、KCS2、核管センター 2、三菱電機 2、核融合研 1、北大 4、MRI システム 1、福山大 1、個人 1、産技短大 1、神戸製鋼 1、原燃工 2、中部電力 1、東電 1、東電ソフト 4、茨城県立医療大 1、京大原子炉 2、東京ニュークリア 2、CSD2、三菱マテリアル 1、応用量子研 1、三井造船 1。

参加者募集に当たり時間割及び講師に関する情報は一切公表しなかった。しかし問い合わせが殺到したため、まだ締め切り前であったが、6 月 20 日にメールで全員につきのようなアナウンスを行った。

「モンテカルロ計算夏季セミナー」参加者各位殿(第 1 回アナウンス)

- ① 問題を的確に把握していただくため、下記、第 3 回及び第 4 回モンテカルロ計算夏季

セミナー実行委員会議事録、参加費振込先、アンケート、セミナー内容及び時間割をお送りいたします。アンケートは当日の技術的混乱を避けるため必ず 7/10 までご提出ください。指定条件を満たすパソコンをお持ちでない方は申し出てください。原研計算科学技術推進センターに数台の予備がありますので、それを一時的に貸与いたします。

②セミナー当日、東海研正門詰所で入門手続き済ませてください。正門から会場の JRR-1 セミナー室まで徒歩 5 分です。

③日本原子力学会には 83 名の委員・常時参加者からなる「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会がありますが、夏季セミナー参加予定者の中で本委員会に常時参加者として参加したい方は遠慮せずに申し出てください。ただし日本原子力学会会員の条件がありますので非会員の方は会員手続きをお願いします。

④本セミナーでは各自持参のパソコンを利用した実習がありますので、技術的トラブルが発生しないよう、指定条件は必ず守るようにご協力ををお願いいたします。

⑤セミナー開催のために事前に準備・投資しますので、当日欠席しても参加費は返却できません。あらかじめご了承ください。

⑥本セミナーは「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会の委員有志によるボランティア活動です。小人数で 110 名規模の講義・実習を担当するため、また最初のセミナーであるため、行き届かないことがあります。参加者の皆様にはご迷惑をおかけするかも知れませんが、皆様のご協力をいただき、ぜひ成功させたいと願っております。

第 3 回モンテカルロ計算夏季セミナー実行委員会議事録

日時 2000.04.21 13:00-15:00

場所 原研東海 TCA 会議室

出席者 山本、久米、谷田部(原研情報システム管理課)、桜井

議題

1. 夏季セミナー参加申し込み状況報告

桜井

学会メーリングリストに、4/13、参加者募集案内を掲載した。直後に 51 通の申し込み・質問のメールを受信した。すでに初級コース定員の 30 名を超えており、締め切り期限の 6 月いっぱいまでは 50 名に達するものと推定される。なおいまのところ、中級コース 2 名、上級コース 0 名。全体的には反響の大きさに驚いている。このような内容の夏季セミナーの開催は社会的にも時期的にも的確な判断であったと思われる。特に原研とサイクル機構からの申し込みが多くかった。東大大学院生 M が 1 名、武藏工大大学院 M1 と M2 の 2 名の申し込みもあった。サイクル機構・企業では放射線管理・核物質管理分野でモンテカルロ計算に期待しているように感じられる。

2. MCNP-4B PC(DOS)版の作成・実行・問題点の報告

久米・谷田部

MCNP-4B PC(DOS)版を作成した。原研計算相談室の EWS(Sun Ultra60)、PC(Pentium III 600MHz, Pentium III 500MHz, Pentium II 450MHz, Pentium MMX 233MHz, Pentium 133MHz)でセミナー用入力例(①TCA ウラン炉心、②FNS 鉄体系クリーンベンチマーク実験、③FNS 黒鉛体系漏洩中性子スペクトル測定実験、④OKTAVIAN 銅球からの漏洩中性子スペクトル測定実験、⑤OKTAVIAN シリコン球からの漏洩ガンマ線スペクトル測定実験)を利用して試計算し、相互比較、差異・問題点の摘出を行った。

①CPU : PC では 10-91min. であった。ヒストリー数が多いためであり、実際の演習ではもう 1-2 枠少なくして実行することを考えており、どの PC でも数分で処理でき、参加者に作業上の差が生じるとは思えない。念のために参加者が確定したら各自の PC 機種・性能の確認を行い、当日問題が生じないよう、問題把握に努める必要がある。

②計算結果の差 : Pentium II 450MHz と Pentium MMX 233MHz の差を比較した。有効数字 6 枠の最後の桁が 1 度の差であり、これまでの例、経験、実用上の判断例からして、まったく問題ないと思われる。

③異常終了例：NEC PC-98 シリーズのシステムではロードモジュールが計算途中で異常終了した。原因究明中。問題回避のため、参加者には PC-AT 互換機を指定することにする。

④容量：入力例実行に必要な核種だけファイル化した断面積ライブラリを用意すればすべてを入れても 50Mbytes に収まる。しかし参加者がそのまま持ち帰り、一般的な問題の計算ができるように JENDL-3.2 に基づく 293K の 340 核種断面積ライブラリを最初からインストールしておいた方が便利であり、その方針で対応する。推定計 150Mbytes 必要。参加者には事前にこのことを伝えておく必要がある。なお MCNP-4B の正式な持ち帰りができるように RIST には参加者・所属機関名を記した名簿を提出し、事前に許可を得ておく必要がある。

3. 今後の予定

つきの会合を 5 月下旬に予定する。各自 PC にインストール・実行し、特に全入力例について、問題が生じないことを確認する。セミナー講師は担当部分のテキストのドラフト原稿を作成し、報告する。ワンタッチでインストール・実行可能なようにプログラムを作成し、当日のためのわかりやすい取り扱いマニュアルも作成する。6 月いっぱいテキスト最終原稿を完成させ、セミナー後、すぐに JAERI-Review として刊行する。実行委員会としての作業進捗状況は予定通りである。

第 4 回モンテカルロ計算夏季セミナー実行委員会議事録

日時 2000.05.25 15:00-16:30

場所 原研東海 TCA 会議室

出席者 山本、矢田部(原研情報システム管理課)、桜井

議題

1. 参加申し込み状況報告

桜井

5/25 現在、初級 70 名、中級 5 名である。6/30 締め切りであるため、まだまだ増加傾向にあり、会議室の電源容量からしてパソコン 100 台が限度である。初級の定員が 30 名であったため、当日の対応が大変になった。そのため、当日、原研科学技術計算推進センターからもうひとり協力していただけたことになった。私もできるだけ講義担当から外れ、現場監督に努めるつもりである。

2. 作成 CD の枚数について

桜井

MCNP-4B ロードモジュール、核種ディレクトリ、バイナリ形式 340 核種 293K 断面積ライブラリ、熱中性子散乱則ライブラリ、ガンマ線相互作用断面積ライブラリ、MCNP-4B 入力例をパス切り済み収録した CD を参加者の数だけ作成する。いまのところインストールには 40 分かかる。これはバイナリ形式 340 核種 293K 断面積ライブラリの読み込みに時間がかかるためである。いまのままで時間がかかり過ぎるため、インストール時間を 5 分以内にできるようにプログラムを変更して対応する。約 100 枚の CD に収録するには 1 カ月かかる。なおインストールは C ドライブでも D ドライブでも対応できるようにプログラムを作成し、指定できるようにしておく。

3. インストール実習・実行・結果確認

桜井

手順：CD ドライブに CD をセット、インストーラにより 1 回のキー操作でインストール完了(5 分弱)、mcnp の実行に数回のキー操作で完了できる。最も簡略化した mcnp インストール・mcnp 実行形式になっている。CD セット、インストール、mcnp 実行まで 5 分以下で完了する。mcnp ファイルには、MCNP-4B ロードモジュール、核種ディレクトリ、バイナリ形式 340 核種 293K 断面積ライブラリ、熱中性子散乱則ライブラリ、ガンマ線相互作用

断面積ライブラリ、5つのMCNP-4B入力、それぞれに対応する略記号を付けたファイルが作成されている。実行するにはMS-DOSプロンプトにしてバッチ処理する。まずcd ¥mcnpでmcnpファイルへ。つぎにmcnp name=入力ファイルネーム xsdir=XSDIR2で断面積を指定して改行すれば実行する。どの入力も1万ヒストリ程度であれば数分で計算が完了し、mcnpファイル内に計算結果(入力ファイル名にoの記号が付く)とリストア用ファイル(入力ファイル名にrの記号が付く)が作成される。計算結果のファイルを開いて結果確認。たとえばつきに入力の一部を変更してあるファイル名で保存、つぎにその入力で実行。くりかえし計算することにより、入力法、結果の変化の把握等、モンテカルロ計算の初步的理解ができるようになる。つぎに与えられた問題の入力を作成するには入力例を部分的に変更し、実行すればよい。

参加者はつきの「アンケート」に記入しメールで回答してください。①年齢、②モンテカルロ法放射線輸送計算の文献を読んだことの有無、③放射線輸送計算経験の有無、④MCNP利用経験の有無・年数、⑤持参予定のPC機種・処理性能・空容量、⑥講師に期待すること⑦インストールしたMCNP-4Bを持ち帰り継続的利用予定の有無。

一部省略

【MCNPマニュアルの入手方法(各自用意すること)】

1. <http://www-xdiv.lanl.gov/XCI/PROJECTS/MCNP/manual.html>にアクセスします。
 2. 最新のMCNP-4Cのマニュアルになっておりますが、最後のファイルがMCNP-4Bですから、そのpdfと書いてあるところをクリックするとダウンロードされます。なお内容を読むにはソフトのacrobat readerが必要です。マニュアルは約500頁。当日は約150頁の「Chapter 3. Description of MCNP Input」をご持参ください。
-

参考資料

会場 JRR-1セミナー室

夏季セミナー初級時間割・担当

7月26日(水) モンテカルロ基礎理論(各テーマ10分の質疑応答含む)

1. 植木「開催あいさつ」10:00-10:10
 2. 内藤 講演「モンテカルロ計算への期待」10:10-11:00
 2. 植木「モンテカルロ計算の基礎理論」11:00-12:00
 3. 植木「エスティメータ」13:30-14:30
- コーヒーブレイク 14:30-14:45
4. 植木「分散低減法」14:45-16:00
 5. 植木「MCNP-4B入力」16:00-17:00

-参加者は終了後、入力について翌日のために準備のこと-

7月27日(木) 全体把握(各テーマ10分の質疑応答含む)

1. 前川・桜井「MCNP-4B断面積ライブラリ」10:00-11:00
2. 久米・谷田部・桜井「MCNP-4Bのパソコンへのインストール実習」11:00-12:00
3. 桜井・植木・久米・谷田部「例題入力による計算演習1-臨界」13:30-14:00
4. 前川・植木・桜井・久米・谷田部「例題入力による計算演習2-中性子深層透過」

14:00-15:00

コーヒーブレイク 15:00-15:15

5. 桜井・植木「問題設定－臨界・遮蔽」15:15-17:00

-参加者は終了後、入力作成について翌日のために準備のこと-

7月28日(金) 各自入力作成・実行(各テーマ10分の質疑応答含む)

1. 桜井・植木「入力作成・計算－臨界」 10:00-11:00

2. 植木・桜井「入力作成・計算－遮蔽」 11:00-12:00

3. 植木・桜井「結果の比較」 13:30-15:00

コーヒーブレイク 15:00-15:15

4. 桜井・植木「自由討論・反省会」 15:00-17:00

5. 桜井「閉会あいさつ」 17:00-17:10

会場 原研東海・研究2棟2階221会議室

中級コース時間割・担当

7月27日(木)

1. 植木「自由討論－遮蔽」 10:00-12:00

2. 森「自由討論－臨界・炉心」 13:00-15:00

講義及び演習を行うに当たり、講師の把握事項とすべく、参加者にはアンケートの提出を義務づけた。つぎに集約結果を示す。

①年齢構成

20-29 41名

30-39 30名

40-49 11名

50-59 7名

60-69 2名

②モンテカルロ文献読んだ経験の有無

あり 45名

なし 46名

③輸送計算の経験の有無

あり 45名

なし 41名

④MCNP 計算経験の有無

あり 16名

なし 75名

⑤パソコン機種 ここでは略。

⑥講師への要望

- 他の類似コードとの比較や安全評価に用いる上での留意点など実用を考慮した解説。
- MORSE-CG と MCNP の具体的な相違点の説明、情報の提供、MCNP のより多くの解析例の紹介、要領のよいモデル化法・入力作成法。
- 今後の勉強のためのキーワードになるような話。
- 質疑応答しやすいような雰囲気に。
- 自分のパソコンで確実にサンプル計算プログラムが動作することを期待。
- 実習の時間をできるだけ多くとって実地で学べればよい。
- 初心者にも理解できるようなセミナーになることを期待。
- MCNP の理解を深めたい。
- MCNP のパラメータ設定は難解と聞いておりますが、主要パラメータ毎の物理的意味と結果に対して与える影響の度合いを知りたい。
- 初心者の質問にも快い対応を期待。
- 初心者にもわかりやすい言葉での講義を期待。
- 断面積ライブラリにどのような反応が含まれ、どのような計算結果が出せるのか。
- 計算対象を想定しやすいような題材の講義を期待。
- モンテカルロ計算の有効な利用方法・問題点、MVP とのちがいなどについての解説。
- ニュアルの解説でなく、わかりやすく解説された日本語テキストでの講義。
- 計算実習の他、モンテカルロ計算の効率的な利用方法や問題点の解説。
- WW など分散低減法と結果の妥当性の評価についての使用経験を踏まえての講義。
- 共鳴吸収による自己遮蔽効果に着目した解析方法や汎用ライブラリにない核種の編集方。
- 講義には最近のトピックスや経験で得られたノウハウなども交えて。
- 事後の知識の増殖が可能な程度に一般性と実用性を兼ね備えた指導を期待。
- MCNP が一通り扱えるような技術の伝授を期待。
- 基礎から応用まで幅広い講義を期待。
- 加速器 BNCT に関心があるので触れて欲しい。
- 空間メッシュ切りのノウハウを勉強したい。
- 輸送計算教科書以上で論文以下の解説。
- MCNP の機能拡充・改善点の解説。
- 丁寧な指導。
- モンテカルロ法の基礎的な概念。
- MCNP の最も得意とするところ、陥りやすい誤り、なぜ許認可に採用されていないのか、採用されるようにするにはどうしたらよいのかなど。
- MCNP の全体構成とサブルーチン機能の説明。
- 理論よりも実際使用のための技術的な話に重点を置いて欲しい。
- セミナー終了後も相談に乗っていただきたい。
- 正しく効率的な使用方法、評価法を学びたい。
- MCNP を利用して自分で計算ができるようになりたい。
- モンテカルロの基礎的文献を教えてください。
- PWR 集合体のインプットが欲しい。
- 聞き取りやすい声、読みやすい板書、見やすい OHP。

⑦継続使用予定の有無

あり 82 名
なし 7 名
未定 2 名

アンケートの結論

- ①年齢は 20-30 代が多い。
- ②モンテカルロ文献通読は半数。
- ③輸送計算経験は半数。
- ④MCNP 使用経験者はごくわずかで、なしと考えてよい。
- ⑤講師への要望としては、基礎的事項をわかりやすく。
- ⑥パソコンについて、アンケート提出者の 91 名は問題なし(ただし画面が小さいため出力結果が見づらいものもある)。
- ⑦継続利用予定あり。

2. 特別講演

This is a blank page.

2.1 モンテカルロ計算への期待

内藤淑孝

株式会社ナイス ynaito@nais.ne.jp

1. シミュレーション論

1.1 大規模シミュレーション時代の到来

1.2 微分法と積分法

2. MCNP 開発の意義

2.1 MCNP 開発の歴史

2.2 MCNP 開発の歴史的意味

2.3 原子力コード委員会でのモンテカルロコードの検討

3. モンテカルロ計算の困難な問題

4. 今後への期待

1. シミュレーション論

1.1 大規模シミュレーション時代の到来

(1) 20世紀の初頭までに物理現象を対象としたシミュレーションが数式の形式で開発された。例

「ニュートン力学」、「ナビエ・ストークスの方程式」、「シュレーディンガーの波動方程式」、「ボルツマンの粒子輸送方程式」、「アインシュタインの相対性原理」、「マックスウェルの電磁方程式」等々。

(2) 近年、計算機の発達により数値シミュレーションが盛んになる。

安全性の評価、原爆実験、設計、性能評価等々にシミュレーション計算が重要な役割を担いつつある。

(3) それに対隨して、計算精度の確認（又は把握）が重要になる。このため、「ベンチマーク実験」が行われ、計算コードが「精度評価」される。この結果は、ベンチマーク実験体系と「良く似た体系」については適用できるとされる。

以上述べた、「ベンチマーク実験」、「計算精度評価」、「良く似た体系」等の定義を明確にしておく必要がある。

従来、流体力学で用いられてきた「相似則」の代りに、計算コードが使用されるようになってきている。

(4) 関係式で使用される「定数」と「関係式」が独立するようになってきた。また、大規模計算が可能になってきたため、①定数の精度の影響を分離して示すことができるようになった、②素過程のみを仮定して、全体の運動を記述できるようになってきている。

1.2 微分法と積分法

物理方程式は微積分方程式である。これを数値的に解くのに、微分法と積分法がある。微分法は差分法として計算コード化されている。積分法の代表的なものの一つがモンテカルロ法である。差分法とモンテカルロ法をどのように使い分けるかは、今後の重要な課題である。どのような場合にどちらが有効か？差分法の誤差とモンテカルロ法の標準偏差との関連について検討するのも有意義と思う。（図差分法との優劣；参照）。

2. MCNP 開発の意義

2.1 MCNP 開発の歴史

1940年代前半に Fermi は統計サンプリング法を用いて中性子減速の研究をしている。

1940年代の後半から 1950年代の初めにかけてモンテカルロ法による粒子輸送の論文が多くてた。MCNP で使用されている乱数発生法は当時の論文を参考にしている。

1953年に原子力の平和利用が宣言され、また、計算機が普及始めた。

1963年に粒子輸送の最初のモンテカルロコード MCS が書かれた。

1965年に MCS は MCN となり、3次元形状を独立したライブラリーを用いて解けるようになった。

1973年に MCN はガンマ線コード MOG と合体し中性子・ガンマ結合コード MCNG となった。

1977年に MCNG は光子計算コード MCP と合体して MCNP となった。

1983年に MCNP3 が国際的に配布された。

1980年代に MCNP3A 及び 3B がでた。

1990年に UNIX 版の MCNP 4 がでて、連続減速モデルの計算ができるようになった。

1993年に MCNP4A がでて、新光子ライブラリー、ENDF/B6 を取り扱えるようになった。

現在までに約 400 人年がつぎ込まれている。

2.2 MCNP 開発の歴史的意味

(1) 精度の良い近似

3次元幾何形状を精度良く近似できる。連続エネルギーの計算ができる。

誤差の要因が核データに絞られる。計算誤差の限界が把握できる。

(2) 粒子輸送の汎用計算

中性子、光子、電子を取り扱うことができる。

臨界・遮蔽計算のみでなく、原子炉、核破碎炉、加速器、核融合炉等の設計にも適用できる。

(3) 汎用定数ライブラリーの使用

計算コードと定数ライブラリーを分離している。

定数ライブラリーの評価を通して、他の分野にも貢献できる。

2.3 原子力コード委員会でのモンテカルロコードの検討

1983-1990年：モンテカルロコード KENO の評価、臨界計算用 JACS システムの開発。

臨界計算にモンテカルロ法が有効であることを示した。

1991-1995年：MCNP を用いた遮蔽計算

遮蔽計算にもモンテカルロ法が使用できることを示した。

1996-本日 : MCNP 使用経験 WG, 機能拡充 WG, 並列化 WG の活動が進められた。

モンテカルロ法の展開と整備が進められている。

3. モンテカルロ計算の困難な問題

(1) 臨界計算における問題（固有値問題）

弱結合体系：固有値の収束が悪い。

(2) 遮蔽計算における問題

深層透過：評価点でのサンプル数が小さい。

(3) 微小反応度計算

固有値の標準偏差の中に反応度が隠れてしまう。

摂動計算が有効

(4) 時間依存計算（燃焼計算）

誤差の伝播が発散する場合と収束する場合が明確でない。

4. 今後への期待

(1) 自動バイアス法の開発、並列計算アーキテクチャーの開発整備

(2) 原子炉解析、摂動計算、動特性計算、ノイズ解析コードの検証・整備

(3) 高エネルギー粒子、荷電粒子の取り扱いコードの整備

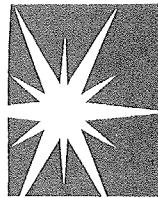
(4) 多粒子系（自己充足場）を計算するコードの開発整備

(5) 量子力学の解法、高分子特性計算コードの開発整備

(6) 社会現象、経済動向解明等多因子分析（複雑系）への適用

(7) 誤差の要因の分析と計算だけで評価できる論理体系の確立。

モンテカルロ計算への期待
添付 OHP 原稿
(モンテカルロ法夏期セミナー用)



計算値を用いた未臨界度の測定 …「積分実験」の役割についての考察…

(株)ナイス 内藤淑孝 原研 山本俊弘 桜井淳

(1)ことの起り

- ①計算機による大量データ処理時代の到来
- ②複雑系への相似則の適用→新相似則
- ③安全性の実証も計算機の助けが必要になる。

⇒設計・安全評価を計算で行う論理体系の構築

(2)誤差推定の2つの方法

- ①同一体系の他の量に対する計算誤差から着目量に対する計算誤差を推定する(計算誤差間接推定法)
- ②近い体系のベンチマーク問題に対する計算誤差から着目系に対する計算誤差を推定する(相似則)。

(3)現在までの報告の経緯

- ①計算誤差間接推定法の考え方と適用例(1-4)
- ②相似則の導入(5) ③ベンチマーク問題(6)
- ④積分実験の役割(7)

計算値を用いた未臨界度の推定(VI)

——相似則(Similitude)の導入——

原研 内藤 淳孝 山本 俊弘 桜井 淳

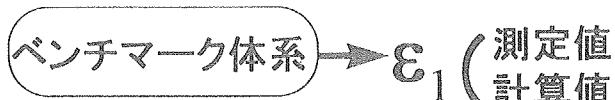
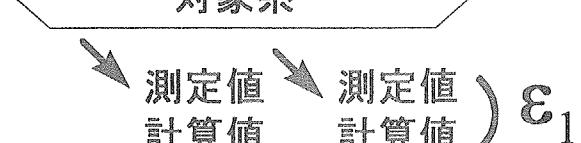
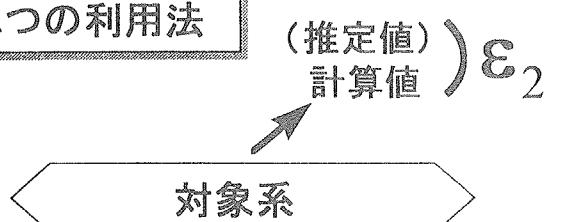
計算誤差間接推定法の二つの利用法

I. 一つの対象系に適用

測定値に対する計算誤差から
推定値に対する計算誤差を推定

II. 二つの対象系に適用

ベンチマーク体系に対する計算誤差
から実体系に対する計算誤差を推定



単純な系に対する表現形式

I. シミュレーション誤差の表現

系 A_0 をシミュレーションする演算子を A 、このシミュレーション誤差を δA とする。

$A_0 X_0 = S, \quad AX = S, \quad X = (I - \varepsilon)X_0, \quad A = A_0 + \delta A$ とする。

→ $\varepsilon = I - A^{-1}A_0 = A^{-1}\delta A$ (関数 X の誤差演算子 ε とシミュレーション演算子 A の誤差との関連)

シミュレーションが完全なら $A = A_0 \Rightarrow \varepsilon = 0 \Rightarrow X = X_0$

臨界実験解析の例

二つの体系 A_1 と A_2 における関数 X の誤差は $\varepsilon_1 = A_1^{-1}\delta A_1, \quad \varepsilon_2 = A_2^{-1}\delta A_2$
関数の誤差の平均に相当する汎関数 $\bar{\varepsilon}$ は

$$\bar{\varepsilon}_1 = \left\langle X_1^* F \varepsilon_1 X_{01} \right\rangle = \left\langle X_1^* F (X_{01} - X_1) \right\rangle = \frac{S}{1 - k_{01}} - \frac{S}{1 - k_1} = \frac{S}{\rho_1} - \frac{S}{\rho_{01}}$$

$$\bar{\varepsilon}_2 = \left\langle X_2^* F \varepsilon_2 X_{02} \right\rangle = \left\langle X_2^* F (X_{02} - X_2) \right\rangle = \frac{S}{1 - k_{02}} - \frac{S}{1 - k_2} = \frac{S}{\rho_2} - \frac{S}{\rho_{02}}$$

二つの関係が相似関係にあると、

$$\bar{\varepsilon}_1 = \left\langle X_1^* F P^{-1} \varepsilon_2 P X_{01} \right\rangle = \left\langle X_1^* F P^{-1} \varepsilon_2 X_{02} \right\rangle = \left\langle X_2^* F \varepsilon_2 X_{02} \right\rangle = \bar{\varepsilon}_2$$

→ 即ち、 $(1/\rho_1 - 1/\rho_{01}) = (1/\rho_2 - 1/\rho_{02})$

『二つの系の間に相似関係があると相対誤差の平均値が等しくなり、二つの系は反応度の逆数について上記関係が成立する。』

A_1 がベンチマーク体系で A_2 が実体系とすると、ベンチマーク体系の反応度誤差と実体系の計算値から体系の真の反応度 ρ_{02} が求まる。

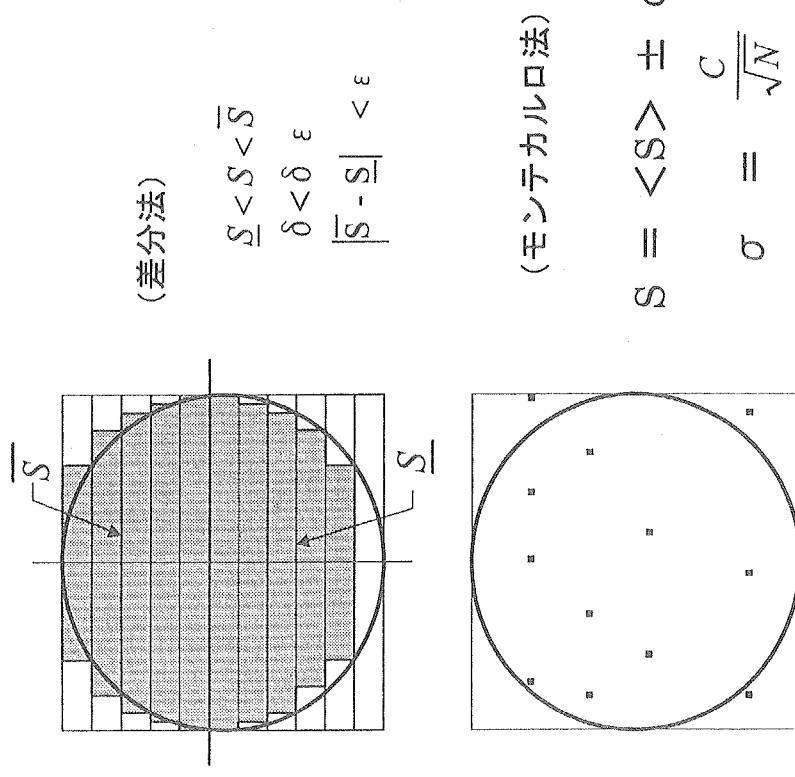
今後の課題

- (1) 実例を用いて、相似側や誤差の距離を検討する。
- (2) (1)の検討を通して「ベンチマーク問題」の有効性についての評価基準を求める。
- (3) 計算結果の誤差を評価する一般的論理を構築する。

2. 差分法との優劣

どのような場合にモンテカルロ法は差分法より優位になるか？

(例 1) 円の面積の計算



精度を上げるために、メッシュ数を増大させる場合と試行回数を増大させる場合がある。どちらの演算回数が少なくて済むか、 $\varepsilon - \delta$ 方式と標準偏差 σ の方式の関連を検討する必要がある。

MCNP使用経験WGの活動 (JAERI-Review 96-001)

- (1) MCNP用ポイントワイズ断面積の編集(前川藤夫)
- (2) 核融合炉体系の中性子及びガンマ線輸送計算(I)(前川藤夫)
- (3) 核融合炉体系の中性子及びガンマ線輸送計算(II)(佐藤聰)
- (4) 加速器駆動消滅処理システムの概念設計(佐々敏信)
- (5) JMTRの炉心計算(長尾美春)
- (6) TCAにおける即発中性子減衰定数の計算(山本俊弘他)
- (7) 臨界安全解析(荒川拓也、桜井淳)
- (8) 被曝評価のための中性子及びガンマ線輸送計算(山口恭弘)
- (9) 遮蔽体系の中性子及びガンマ線輸送計算(I)(増川史洋)
- (10) 遮蔽体系の中性子及びガンマ線輸送計算(II)
 - ①Weight Window Generatorの適用性(植木紘太郎)
 - ②ETNA中性子ストリーミングベンチマーク実験解析(松本誠弘)

Nippon Advanced Information Service Ltd.

1. 臨界計算が困難な体系

固有値の近い2つの体系が弱結合した系の臨界計算は困難である。

(例1) $k_{\text{eff}} = 0.999$ の系1と $k_{\text{eff}} = 0.990$ の系2が

図1.1のように弱結合した場合の臨界計算

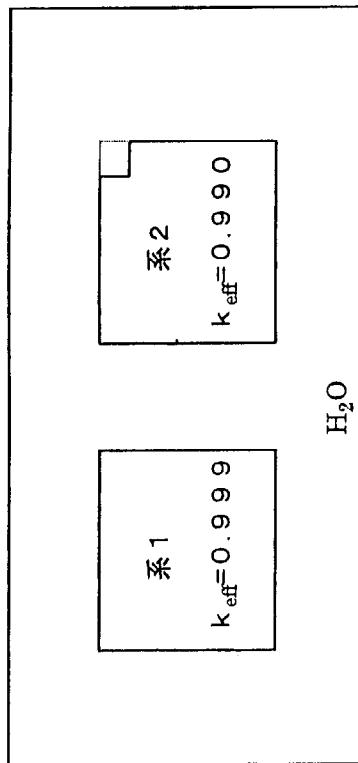


図 1.1

Initial Guess Power



図 1.2

Final Power



図 1.3

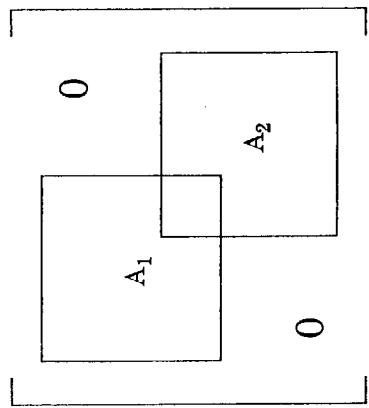
初期中性子分布を図1.2のように仮定して計算すると、最終的に

図1.3の中性子発生分布になる。それまでに多くの計算時間を要する。

(例 2) 燃焼の結果、燃料の上下端部の核分裂性物質の濃度が

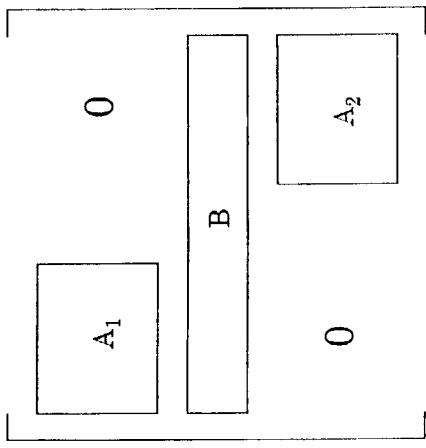
高くなっている場合の臨界計算

(例 1)



A_1 と A_2 が部分空間を作れば、最大固有値は
マトリクス A_1 と A_2 の大きいほうの固有値となる。

(例 2)



中性子発生分布
核分裂性物質濃度分布

(例2) 単純な体系は差分法が有利

3. 計算誤差の伝播

- 解が標準偏差を伴って表現されるので、 $t = t_0$ の時のひが
- $t = t_1$ の解にどのように影響するか？
- 非線型性との関連で検討する必要がある。
- 原子炉中の燃料の燃焼計算もこの一つの例である。

This is a blank page.

3. モンテカルロ法基礎理論

This is a blank page.

3.1

モンテカルロコードの物理的・数学的方法とその利用技術

Physical and Mathematical Method of the Monte Carlo and Its Utilization Method

船舶技術研究所

Ship Research Institute

植木 紘太郎

Kohtaro Ueki

e-mail : ueki@srimot.go.jp

I. モンテカルロ法ではボルツマン輸送方程式を積分型

現出密度方程式 (Integral Emergent Particle Density
Equation) にして解く。

I.1 ボルツマン輸送方程式のフォワードモード現出密度方
程式は次のように書かれる。

$$x(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) = s(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$$

$$C(\bar{r}, \bar{\Omega}' \rightarrow \bar{\Omega}, E' \rightarrow E) T(\bar{r}' \rightarrow \bar{r}, \bar{\Omega}, E') X(\bar{r}', \bar{\Omega}', E')$$

ここで、

\bar{r} : 位置ベクトル、

$\bar{\Omega}$: 方向ベクトル、

E : 粒子エネルギー、

$T(\bar{r}' \rightarrow \bar{r}, \bar{\Omega}, E')$: 輸送核、

$C(\bar{r}, \bar{\Omega}' \rightarrow \bar{\Omega}, E' \rightarrow E)$: 衝突核、

$S(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$: 線源項、

$X(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$: 現出粒子密度、

輸送核、

$$T(\bar{r}' \rightarrow \bar{r}, \bar{\Omega}, E) = \int dR \sum_t (\bar{r}, E) e^{-\beta(\bar{r}, R, \bar{\Omega}, E)}$$

衝突核、

$$C(\bar{r}, \bar{\Omega}' \rightarrow \bar{\Omega}, E' \rightarrow E) = \int dE \int d\bar{\Omega} \frac{\sum_s (\bar{r}, \bar{\Omega}' \rightarrow \bar{\Omega}, E' \rightarrow E)}{\sum_t (\bar{r}, E')}$$

$$= \int dE \int d\bar{\Omega} \frac{\sum_s (\bar{r}, E')}{\sum_t (\bar{r}, E')} \cdot \frac{\sum_s (\bar{r}, \bar{\Omega} \rightarrow \bar{\Omega}, E' \rightarrow E)}{\sum_s (\bar{r}, E')}$$

ここで、

$$\beta(\bar{r}, R, \bar{\Omega}, E) = \int_0^R \sum_t (\bar{r} - R, \bar{\Omega}, E) dR'$$

Σ_t : 巨視的全断面積、

Σ_s : 巨視的散乱面積、

I.2 ボルツマン輸送方程式のアジョイントモード現出仮想

粒子密度方程式 (integral emergent adjunction

particle density equation) は次のように書かれる。

$$G(\bar{r}, \hat{\Omega}, E) = p^*(\bar{r}, \hat{\Omega}, E) +$$

$$C(\bar{r}, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}, E' \rightarrow E) T(\bar{r}' \rightarrow \bar{r}, \hat{\Omega}', E') G(\bar{r}', \hat{\Omega}', E')$$

ここで、

$$\hat{\Omega} = -\bar{\Omega}$$

$G(\bar{r}, \hat{\Omega}, E)$: 現出仮想粒子、

$P^*(\bar{r}, \hat{\Omega}, E)$: 応答関数 (エネルギーflux、反応率、

線量当量率、等)、

$$\iiint P^*(\bar{r}, \hat{\Omega}, E) X(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) d\bar{r} d\bar{\Omega} dE$$

$$= \iiint G(\bar{r}, \hat{\Omega}, E) S(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) d\bar{r} d\bar{\Omega} dE$$

II. 期待値法と評価子

エスティメータは問題依存であり選択肢が多い方が良い。

- ① 衝突密度エスティメータ
- ② 飛程長エスティメータ
- ③ 面交差エスティメータ
- ④ 点検出器エスティメータおよび
円環エスティメータ
- ⑤ NESXE (Next Event Surface Crossing
Estimator)

期待値法 (Expected Value Method) はランダムウォークする過程で評価子 (estimator) を使って粒子の検出器への寄与を計算する手法である。従って、期待値法はランダムサンプリング法と決定論的手法の結合であると考えてよい。いくつかの評価子と粒子の寄与 C_w を求める計算式について述べる。

II.1 衝突密度評価子 (collision density estimator)

遮蔽体中の小体積を δV 、衝突前の粒子の重みを W'_t とすれば、フルーエンスに対する衝突当たりの寄与は次のように書かれる。

$$C_t = W'_t / \delta V / \Sigma_t$$

このフルエンスの推定は体積 δV の平均である。

II.2 飛程長評価子 (track length estimator)

飛程長評価子は小体積 δV の粒子の飛程長を計算し、体積 δV で割って寄与を求める。

$$C_w = L / \delta V$$

ここで、

$$L = \sum_i W_t' \cdot \ell_i$$

ℓ_i = δV 中における i 番目の飛程長

この評価子は体積 δV をボイド (真空) 中に設けることができる。

飛程長評価子の概念図を第 1 図に示す。

II.3 表面交差評価子 (surface crossing estimator)

フルエンスを求めようとする面積を A とすれば、面積で平均化したフルエンスが得られる。1 回の粒子が交差当たり寄与する量は次のような。

$$C_w = \frac{W_t}{A \cdot |\bar{n} \cdot \bar{\Omega}|}$$

この評価子では、grazing angle, $|\bar{n} \cdot \bar{\Omega}| \rightarrow 0.0$ に近づくと、 $C_w \rightarrow \infty$ になるという問題がある。このときは、

$$|\bar{n} \cdot \bar{\Omega}| \leq 0.01 \text{ の場合 } |\bar{n} \cdot \bar{\Omega}| = 0.005$$

のようにして、問題を解決する方法がある。

II.4 NESXE(next event surface crossing estimator)

(次期面交差評価子)

先に述べた面交差評価子は粒子が実際に面を交差したとき初めて寄与が計算できた。しかし、粒子が次の衝突する以前に面をよぎる確率を使っても寄与を推定することができる。

$$C_w = \frac{W_t \cdot e^{-\eta}}{A \cdot |\bar{n} \cdot \bar{\Omega}|}$$

衝突から現出した粒子が与えられた面方向を向いていなければ C_w ゼロになる。もし、衝突点が閉じた面の中にあれば、必ず 1 つの寄与がある。また、もし衝突が閉じた面の外であれば、寄与の数は（ゼロ、1 あるいは 2）粒子の方向ベクトル $\bar{\Omega}$ に依存する。この評価子も SXE と同様な方法によって $C_w \rightarrow \infty$ になる問題を解決している。

次期面交差子の概念図を第 2 図に示す。

II.5 点検出器評価子 (point detector estimator)

この評価子は正にその点 \bar{r} に対する粒子の寄与を推定する。

$$C_w = W_t \cdot e^{-\eta} \cdot f(\bar{r}, \bar{\Omega}' \rightarrow \bar{\Omega}, E' \rightarrow E) / R^2$$

ここで

$f(\bar{r}, \bar{\Omega}' \rightarrow \bar{\Omega}, E' \rightarrow E)$ はエネルギー E' の粒子が \bar{r} で衝突し、 $\bar{\Omega}'$ から $\bar{\Omega}$ のまわりの単位立体角中に散乱される確立。等方散乱の場合 $f = 1/4\pi$ になる。MCNP コードでは「モンテカルロ法による光子、中性子の輸送計算」の point detector estimator に対する計算法によって再度 f を求めるので、かなりの計算時間を要する。R=衝突点と検出器間の距離

この評価子では $R \rightarrow 0$ のとき、 $C_w \rightarrow \infty$ になり、非常に大きな分散が発生する。

この問題を解決するためこれまでいくつかの方法が提案されているが、衝突点が半径 1 cm の小球中に入ったときは、NESXE によって C_w を計算するという方法もある。MCNP コードでは除外半径 R_0 (radios of exclusion)を入力、

この中では衝突確率密度を別途計算し、 C_w を求めている。

以上 5 つの評価子を紹介したが、問題に応じ適切な評価法を採用することによって、分散の低減と効率的な計算が可能になる。

点検出器評価子の概念図を第 3 図に示す。

III. セルは微にいり細にいり

セルは微にいり細にいり丹念に分割すると良い。何故ならば、Weight Window boundary はセル毎に与えられるものである。

モンテカルロコード MCNP における Weight Window Importance はスプリッティングとルシアンルーレットの組み合わせであり、その概念を第四図に示す。

IV. 深層透過問題

適切な Weight Window Importance を採用することにより、十分な衝突密度が得られる。

V. Weight Window Importance の採用により深層透過問題は解決

VI. バイアスは程々に

$$W_b \cdot P_b \equiv W_n \cdot P_n$$

ここで、 W_n = 自然確率に対する重み、

W_b = バイアス確率に対する重み、

P_n = 自然確率、

P_b = バイアス確率、

VII. ストリーミング問題は根が深い

ダクトやボイドを通過してきた粒子の重みは、衝突回数が少ないので、線源として発生した時に与えられた重みとほとんど同じである。一方、物質中を何回も衝突を繰り返して来た粒子の重みは非常に小さくなっている。そして、線源から遠く離れたダクトやボイドの出口付近に置かれた検出器(Estimator)には、このように重みの大きく異なった粒子が入射することになる。その結果、モンテカルロ法によるところの中心極限定理により必然的に相対標準偏差(fsd : fractional standard deviation)が大きくなり、計算結果の信頼性が失わることになる。

VIII. MCNP コードの Cell Flagging カードは 利用価値が高い

Cell Flagging カードを用いることにより、粒子の飛跡や経路が同定できる。例として、遮蔽体中に多数のダクトがあり、そのうちの一本のダクト出口に検出器を置く。そして、各ダクトの線源側の入り口に Cell Flagging カードを設定すると、検出器の置かれたダクトの出口に対し、どのダクトの入り口からどれだけの寄与があったかが求められる。

IX. モンテカルロ計算の信頼性

MCNP コードは米国のロスアラモス国立研究所で開発された連続エネルギーモンテカルロコードである。MCNP 3Bまでのバージョンでは中性子、光子および中性子-光子の輸送計算が行えるようになっていたが、MCNP 4A になってさらに電子の輸送計算が出来るようになり、中性子-光子-電子の結合計算や、Bremsstrahlung（制動輻射）の取り扱いが可能になった。

また、MCNP 4A になってモンテカルロ法固有の統計処理についても、従来の相対誤差評価に新たに幾つかのチェック項目を加え、モンテカルロ計算の信頼性を裏付ける新しい評価機能を設けている。

モンテカルロ計算結果の信頼性は FSD (fractional standard deviation) が小さいことが一応の目安であるが、MCNP 4A では以下に示す 10 項目のチェックポイントが設けられているので、ユーザはそれに従って結果の信頼性を評価することを薦める。

IX.1 MCNP 4A コードの項目の統計量チェック

(1) 平均値について

(i) 項目 1.

平均値(\bar{x})がヒストリーナンバー(N)の関数として単調に増加したり、減少したりしないこと。

$$\text{平均値 } \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

ここで、 x_i 番目のヒストリーによってある Tally Bin (エネルギー bin、角度 bin 等) に記録される量。

(2) 相対誤差 (RE) について

(ii) 項目 2.

相対誤差 (Relative Error) が Point Detector Tally では 0.05 以下、それ以外 (Surface Crossing Tally 等) では 0.10 以下であること。

(iii) 項目 3 .

相対誤差はヒストリー数が増加するにつれてほぼ単調に小さくなること。

(iv) 項目 4 .

相対誤差 (RE) はヒストリー数 (N) の関数としてほぼ $\frac{1}{\sqrt{N}}$ で小さくなること。

ここで、RE は次のように表される。

$$RE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - 1}{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 / N} \right]^{1/2}$$

(3) VOV (Variance of Variance) について

(v) 項目 5 .

VOV はどの Tally でも 0.10 以下であること。

(vi) 項目 6 .

VOV はヒストリー数の関数としてほぼ単調に小さくなること。

(vii) 項目 7 .

VOV はヒストリー数 (N) の関数としてほぼ $\frac{1}{N}$ で小さくなること。

$$VOV = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^4}{\left\{ \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \right\}^2} - \frac{1}{N}$$

(4) FOM (Figure of Merit)について

(viii) FOM はヒストリー数に関係なく一定であること。

(ix) FOM はヒストリーの関数として単調に増加したり減少したりしないこと。

$$FOM = \frac{1}{R^2 T}$$

ここで R は相対誤差、T は計算に要した時間

(5) 確率分布関数 (PDF) : $f(x)$ について

(x) Tally に記録された量の確率分布関数 $f(x)$ の最終的スロープが 3以上であれば、完全なサンプリングが行われたものと見なせる。

ここで $f(x)$ の x は Tally Bin に記録される量である。

MCNP 4A では次のようにして $f(x)$ のスロープをつくる。

まず、Tally 記録値 x_i と x_{i+1} の間の平均値 $f(\bar{x}_i)$ は次式のように定義される。

$$f(\bar{x}_i) = \frac{\text{number of history scores in } i^{\text{th}} \text{ score bin}}{N(x_{i+1} - x_i)}$$

ここで、 $x_{i+1}=1.2589x_i, 1.2589$ は $10^{-0.1}$ であり、1 衍当たり

10 個の等間隔 Log bin があることになる。

今、 $f(x)$ のべき乗スロープを $1/x^n$ の n であると定義する。そうすると、 $f(x)$ を無限まで外挿したとき、 2 次モーメント $\int_{\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx$ が存在するためには x を記録する最大ヒストリーにおける Tally Bin 25~200 ポイントについての推定スロープが 3 以上必要とする。

X. テスト問題

第 5 図に示す Test Problem 1 は厚さ 50 cm の水層を分割せずに 1 セルとして計算する。線源は 2 MeV の点等方線源が水層の 50 cm 前方におかれている。

一方、第 6 図に示す Test Problem 2 は幾何形状および線源条件は第 5 図と同じであるが、水層を 10 cm ずつ 5 分割し、図に示すように、各層ごとに Weight Window Boundary を指定し、入力する。

第 5 図および第 6 図にしたがって入力した計算した結果を相互比較する事によって、分散低減法として MCNP コードが推奨するところの、Weight Window Importance の有効性を理解する。

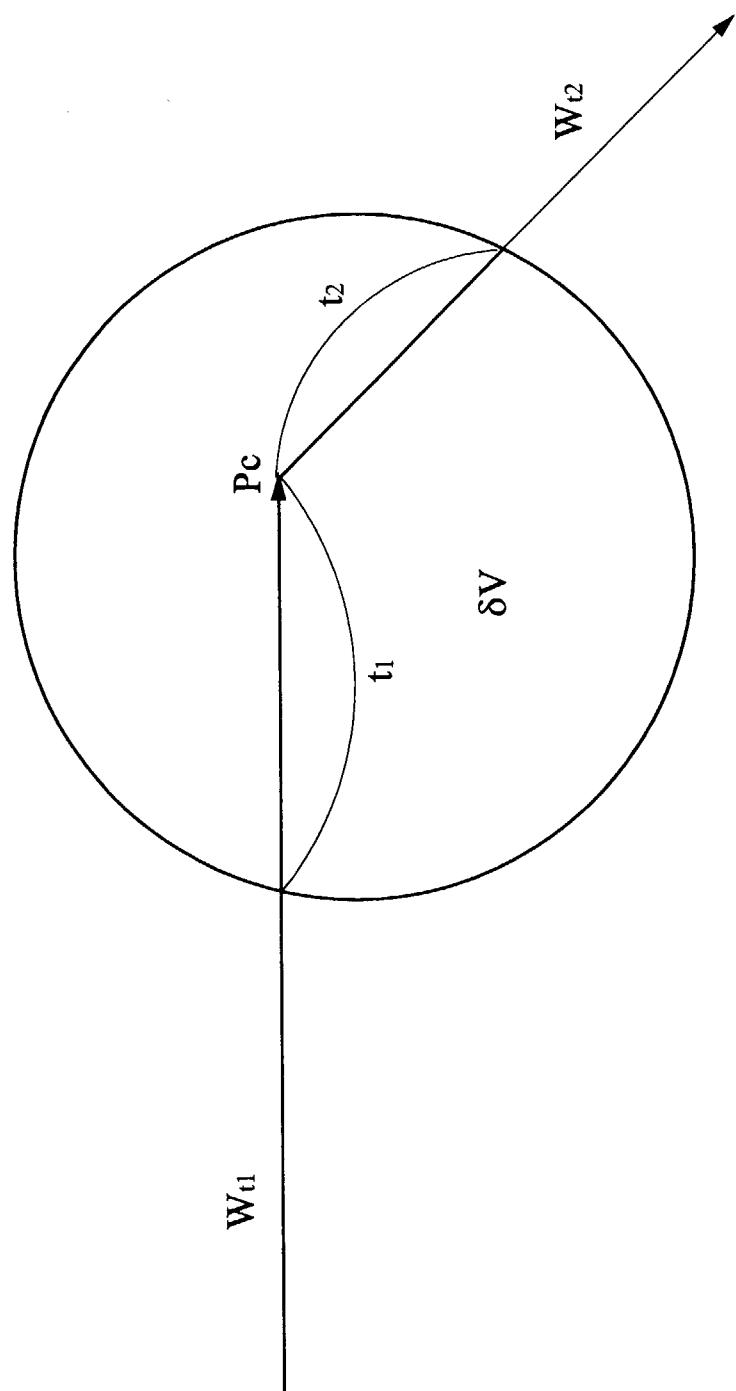


Fig. 1 Concept of Tracklength Estimator (TLE)

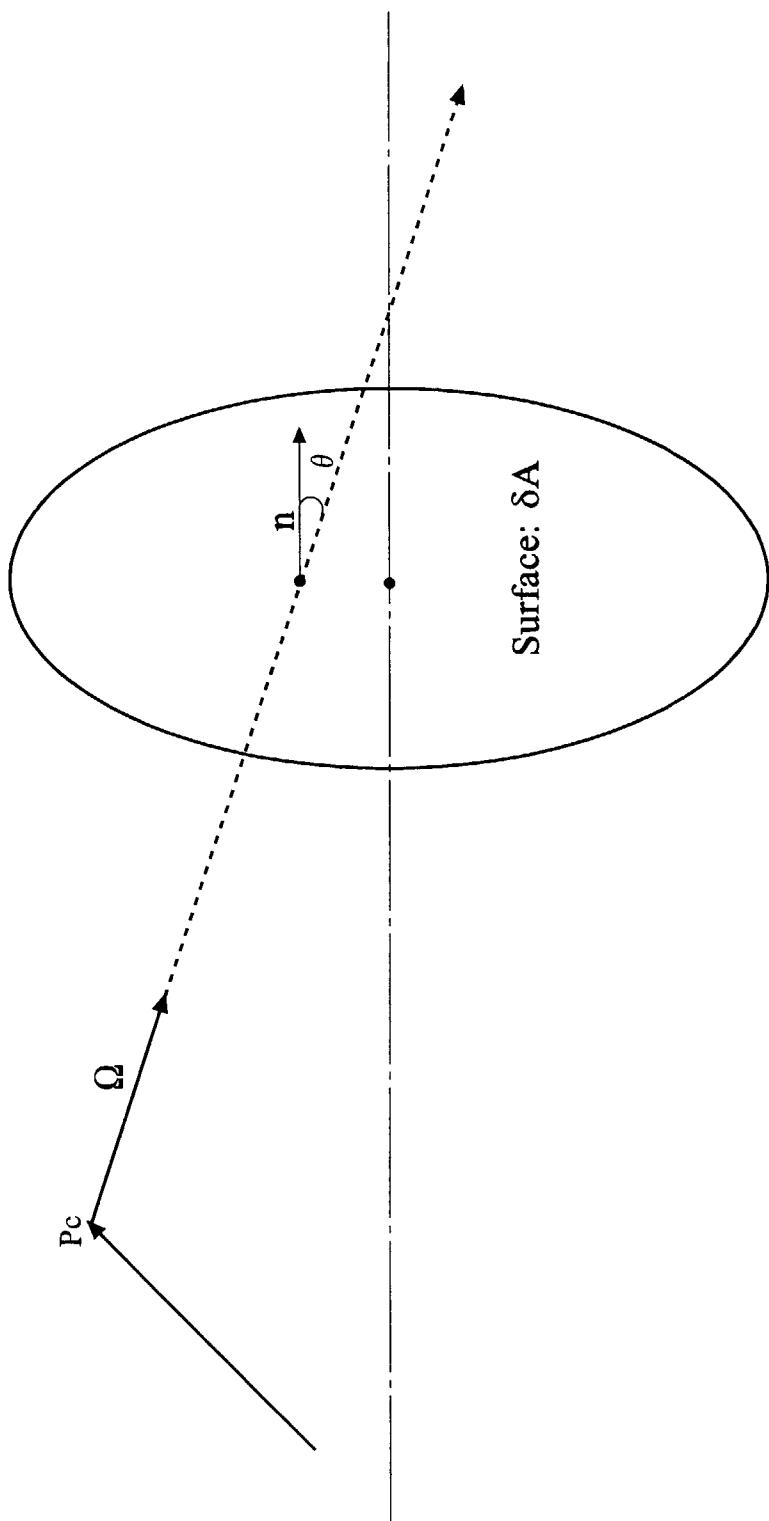


Fig. 2 Concept of NESXE (Nest Event Surface Crossing Estimator) : $\cos \theta = n \cdot \Omega$

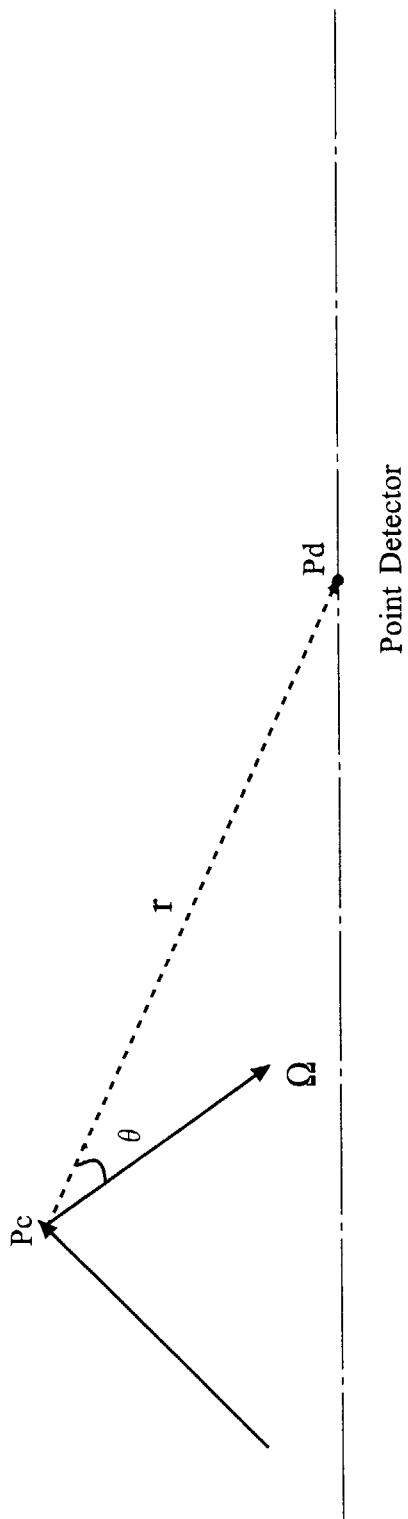


Fig. 3 Concept of Point Detector Estimator

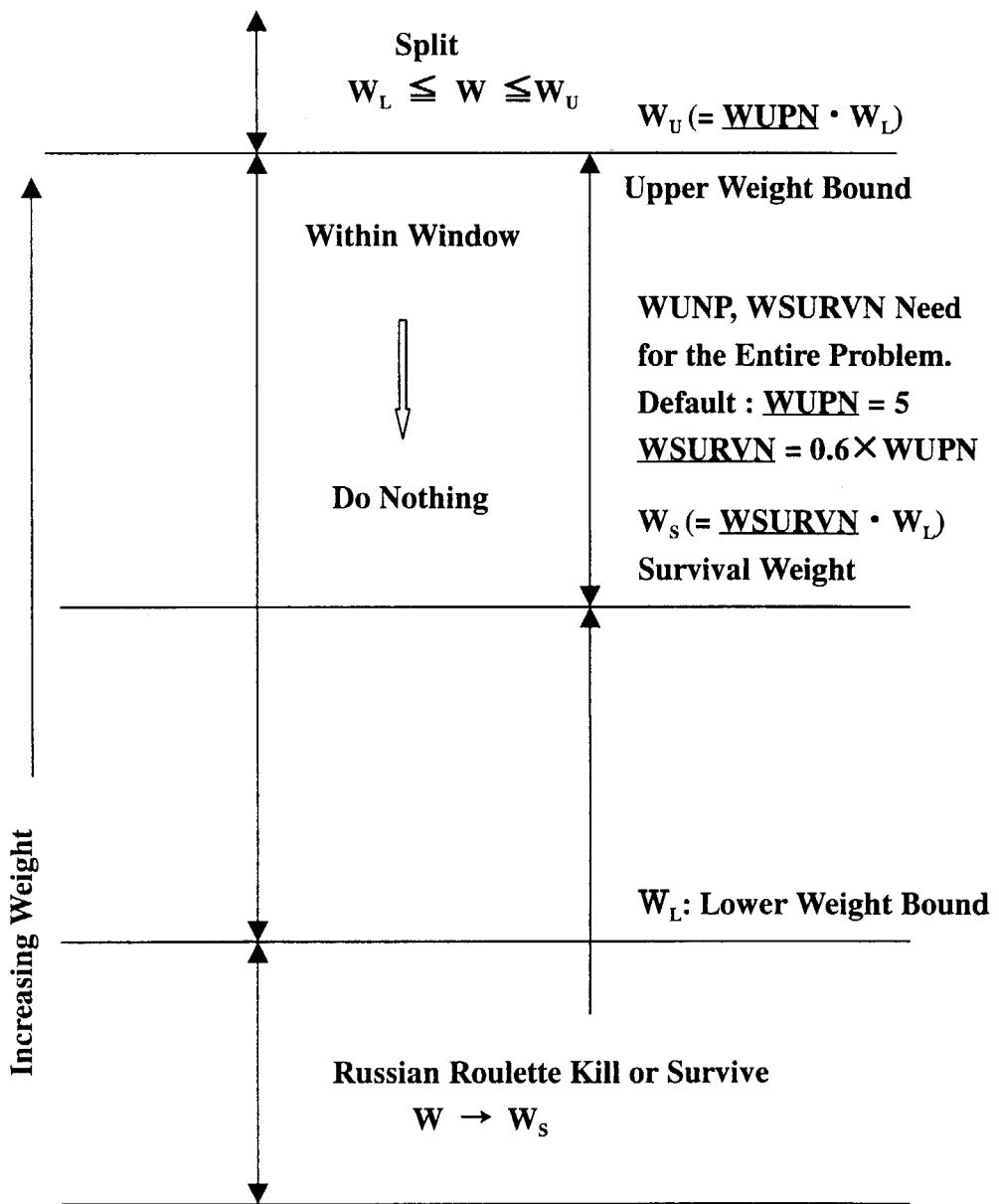


Fig. 4 Concept of the Weight Window Importance.

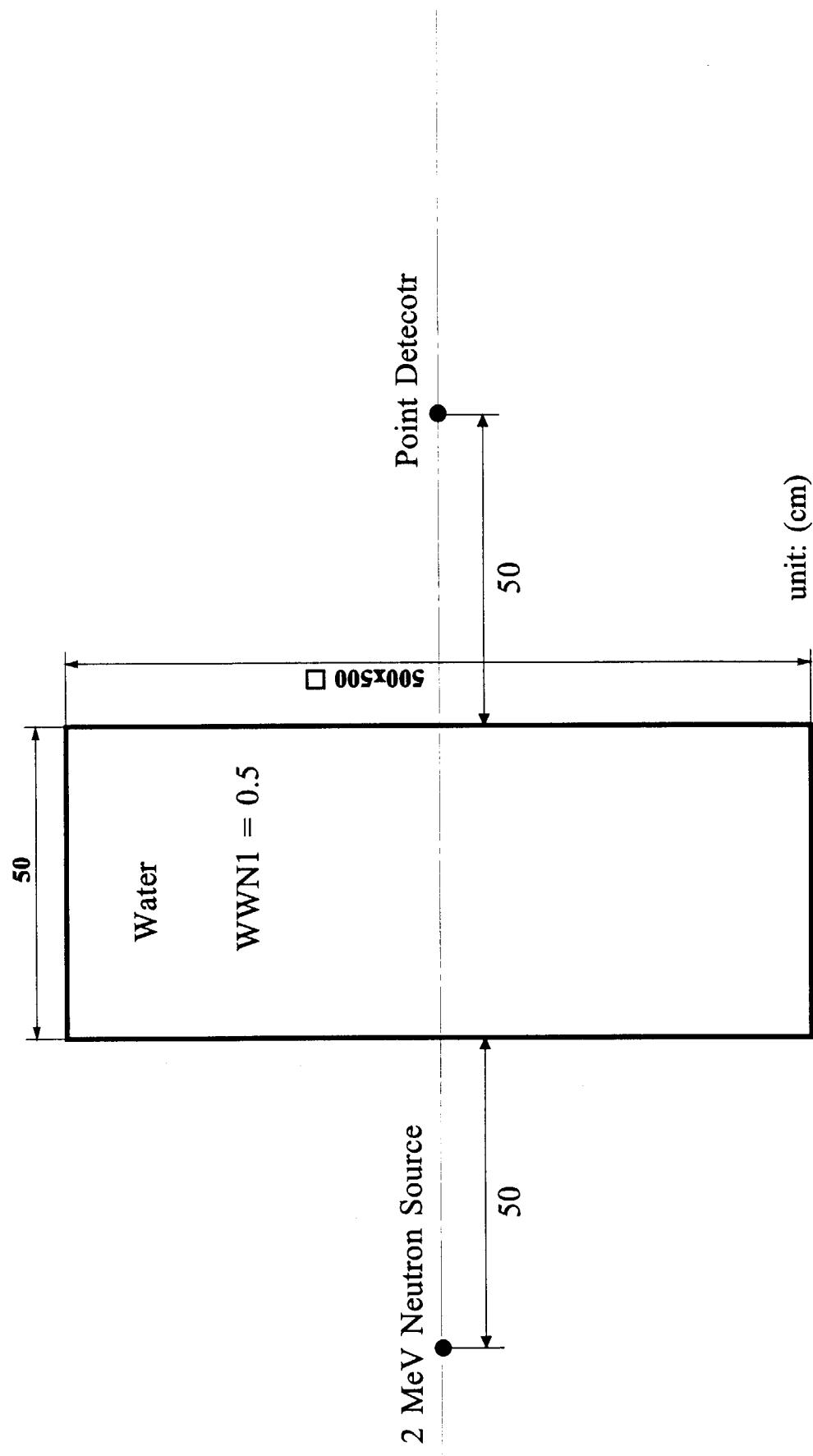


Fig. 5 MCNP Test Problem 1.

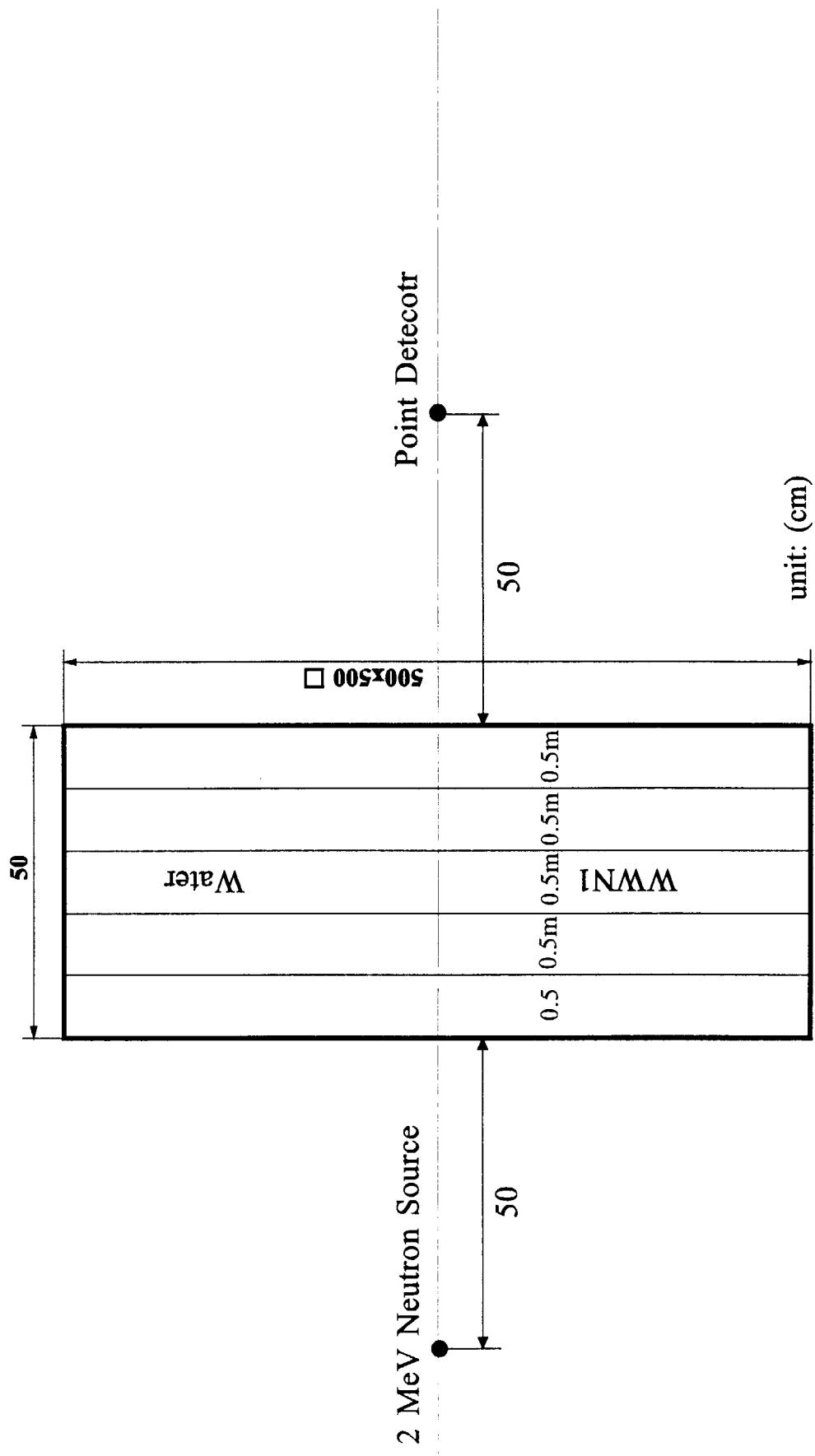


Fig. 6 MCNP Test Problem 2.

4. MCNP-4B 断面積ライブリ

This is a blank page.

MCNP-4B 断面積ライブラリ

前川 藤夫

日本原子力研究所 東海研究所 中性子科学研究センター 中性子工学グループ

E-mail: fujio@fnshp.tokai.jaeri.go.jp

桜井 淳

日本原子力研究所 東海研究所 燃料サイクル安全工学部 臨界安全研究室

E-mail: sakurai@flute.tokai.jaeri.go.jp

1 断面積データの概要

1.1 中性子・光子輸送計算に必要な断面積データ

モンテカルロ法による中性子・光子輸送計算にはどのような断面積データが必要かを考える。1つの中性子がある物質中を進むとき、ある確率でその物質を構成する原子核と核反応を起こす。この核反応を起こす確率に対応するものが核反応断面積と呼ばれる量であり、核反応を起こす地点を決定するのはすべての種類の核反応の断面積を合計した全断面積である。全断面積が大きければ比較的短い距離を進んだ地点で核反応を起こし、小さければその逆である。中性子が核反応を起こす地点が決まると、次にどの核反応が起こるかを選ぶ必要がある。そこで、弾性散乱、非弾性散乱、核分裂反応等の部分断面積が必要である。散乱や核分裂反応等の核反応後に2次中性子が生成する場合、これらの2次中性子のエネルギーはいくらで、どの方向へ放出されるかを選ぶために、2次中性子のエネルギー分布及び角度分布と呼ばれるデータが必要になる。また核分裂反応の場合には、1反応あたりの生成中性子数(ν値)のデータが必要になる。これら中性子輸送に必要なデータ、つまり全断面積、部分断面積、核分裂のν値、2次中性子のエネルギー分布及び角度分布を総称して、中性子輸送断面積と呼ぶ。

中性子-光子(γ線やX線)結合問題を考える場合には、中性子が引き起こす核反応によって生成する2次γ線に関する断面積データが必要となる。具体的には、核反応によりどのエネルギーのγ線がどの方向に何本放出されるかを決定するのに必要なデータである。なお、厳密にはγ線が原子核と反応して2次中性子を放出する核反応(光核反応)も存在する。光核反応は、電子線加速器や放射光施設のように電子及び光子が一次ビームである場合には重要である。しかし、核分裂炉や核融合炉の場合のようにそもそも中性子が多数存在する場合には、光核反応により生成する2次中性子の数は相対的に極めて少なく、ほとんどの場合において無視できる。また MCNP-4B¹⁾や MVP²⁾をはじめとする多くの輸送計算コードでは現在、光核反応は取り扱うことが出来ない。

次に、中性子ー光子結合問題あるいは光子単独の問題において、光子輸送断面積が必要になる。これには光子と原子との3大相互作用である光電効果、コンプトン散乱、電子対生成等の断面積が含まれる。

光子は原子との相互作用を介してコンプトン電子や電子・陽電子対等の電子を生成する。一方、電子は原子との相互作用により制動X線あるいは特性X線を発生する。特に、高速電子が原子番号の大きい原子でできた物質中を通過する場合にこれらのX線は顕著になる。このため、より厳密な光子輸送計算では電子の輸送計算まで含めて考える必要があり、ここで電子の輸送断面積も必要になる。MCNP-4B では電子の輸送まで考慮した光子輸送計算が可能である。

この他、熱エネルギー以下の中性子の散乱を厳密に取り扱う場合には、熱中性子S(α , β)テーブルと呼ばれる断面積データが必要である。中性子のエネルギーが高い場合には、周辺の原子核の影響を考えることなく、中性子はある一つの原子核と核反応を起こすと考えればよい。しかし中性子のエネルギーが熱エネルギー程度にまで低下すると、結晶構造を持つ物質とは中性子の波動性により干渉性散乱（ブラッグ散乱）を起こすようになる。また分子として他の原子と化学結合している原子は自由原子とは見なせなくなり、分子運動を励起する反応が起こる。こうした熱エネルギー以下の中性子の厳密な取り扱いに必要なデータが、熱中性子S(α , β)テーブルである。

最後に、中性子に対するドシメトリー反応断面積あるいは放射化反応断面積と呼ばれるものがある。ドシメトリー反応断面積とは、ある中性子場においてある核反応の反応率を測定することによりその場の中性子束を求める時に使われる断面積であり、熱中性子束を測定する時の $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 反応断面積がその代表例である。ドシメトリー反応断面積ライブラリには、断面積が良く調べられていて、同時に測定の容易な核反応が厳選され、また多くの場合誤差データと共に収納されている。一方の放射化反応断面積とは、ある中性子場にある物質を置いた時に、その材料がどれだけ放射化されるかを計算するときに使われる反応断面積である。放射化反応断面積ライブラリには、原則として起こりうるすべての核反応の断面積が網羅されている。これら2種類の断面積は物理的には全く同種のものであるが、使用目的によって異なった名前で呼ばれている。これらの断面積には、2次中性子のエネルギー・角度分布や核分裂の ν 値等のデータが含まれておらず、中性子輸送計算には使えない。

1.2 評価済み核データファイル

輸送計算を行うには、考えようとしているすべてのエネルギー範囲において、すべての核反応に対する断面積データが必要である。しかし実験では、ある特定のエネルギーでしか断面積が測定できなかったり、全く同一のエネルギーでも実験者によって測定値が異なる

ったり、あるいは核反応の種類によっては測定そのものが不可能な場合がある。そこで、利用可能な断面積の測定値を収集して図示し、最も妥当と思われる断面積曲線を描いたり、理論計算の助けを借りて断面積を推定したりしながら、輸送計算に必要な断面積データ式を揃える作業が行われる。これを「核データの評価」と呼び、できあがった断面積データの集合を「評価済み核データファイル」あるいは「評価済み断面積ライブラリ」と呼ぶ。

以下、現在利用可能な最近の評価済み断面積ファイルにはどのようなものがあるか、実例を挙げながら述べる。

中性子輸送断面積

中性子が引き起こす核反応の断面積は核種ごとの個性が非常に強く、その評価は容易ではない。このため、日本、米国、ヨーロッパ連合（EU）、ロシアなど世界各国において、精力的に評価済み核データの整備が進められてきた。

日本では原研の核データセンター及びシグマ研究委員会を中心となり、Japanese Evaluated Nuclear Data Library^{3, 4)} (JENDL) と呼ばれる核データライブラリが長年にわたり整備されてきた。核分裂、核融合、遮蔽等の多くの分野での使用を目的としたJENDL の第3版、JENDL-3³⁾が 1989 年に公開された。その後2度の改訂があり、1990 年に JENDL-3.1、1994 年には JENDL-3.2⁴⁾が公開された。JENDL-3.2 には原子番号 1 の水素から 100 のフェルミウムまで、原子力分野で必要な 340 核種について断面積データが与えられている。断面積データの精度向上の努力は現在でも続けられており、2001 年の完成を目指し JENDL-3.3 の評価が進行中である。一方、JENDL 特殊目的ファイルの 1 つとして、JENDL 核融合ファイル⁵⁾ (JENDL Fusion File) が 1999 年に公開された。これは核融合炉を対象とした計算をより良い精度で行うために特別に評価された核データファイルであり、水素-1 からビスマス-83 までの 92 核種に対して断面積データが与えられている。一部の核種を除き、JENDL 核融合ファイルのデータの大部分は JENDL-3.2 のデータと類似しているが、最大の違いは2次中性子のエネルギー・角度分布の表現に2重微分断面積を採用している点である。核融合炉で発生する 14-MeV 中性子が原子核により散乱された場合、中性子エネルギーが高いために2次中性子のエネルギーと角度が互いに相関を持つ。このため JENDL-3.2 が採用しているような従来の単微分断面積、つまりエネルギー微分断面積と角度微分断面積で2次中性子を表現するには限界がある。2重微分断面積ではエネルギー角度相関を持った2次中性子のエネルギー・角度分布を精度良く表現できる。

米国では断面積評価ワーキンググループにより Evaluated Nuclear Data File⁶⁾ (ENDF) が作成されてきた。1979 年には第5版である ENDF/B-V が、1991 年には第6版である ENDF/B-VI が公開された。1991 年 10 月出版のドキュメントによれば、原子番号 1 の水素から 99 のアインスタニウムまで 309 の核種に対して断面積データが

与えられている。なお、ENDF/B-VI では核種ごとにデータの更新が行われており、更新されたものから ENDF/B-VI.1 や ENDF/B-VI.2 のようにサブバージョン管理番号を付して順次公開されている。

その他、EU、ロシア、中国等でも評価済み核データファイルの作成が進められている。EU では Joint European File (JEF) あるいは European Fusion File (EFF) が作成されている。ロシアでは BROND ライブラリ、中国では Chinese Evaluated Nuclear Data Library (CENDL) が作成されている。

これら国や地域ごとの断面積評価活動とは独立に、国際原子力機関 (IAEA) では核融合分野での使用を主目的とした Fusion Evaluated Nuclear Data Library^{7, 8)} (FENDL) の作成を進めている。これは IAEA が独自に核データの評価を行っているものではなく、JENDL, ENDF/B, BROND, EFF の中から核種ごとに優れたデータを選びすぐつるものである。中性子輸送断面積では、1994 年には第 1 版である FENDL/E-1.0⁷⁾ が公開され、1998 年初めには第 2 版である FENDL/E-2.0⁸⁾ が公開された。表 1 に FENDL/E-2.0 に収納されている核種とデータの出典の一覧を示す。核融合目的であるためにウラン等のアクチノイドは含まれていないが、核融合以外の遮蔽や保健物理の分野でも十分使用可能である。

表 1 FENDL/E-2.0 収納核種及びデータの出典。

Material	Origin of Data	MAT #	Material	Origin of Data	MAT #	Material	Origin of Data	MAT #
H-1	ENDF/B-VI.1	125	Si-29	ENDF/B-VI.5	1428	Ni-58	ENDF/B-VI.1	2825
H-2	BROND-2.1	102	Si-30	ENDF/B-VI.5	1431	Ni-60	ENDF/B-VI.1	2831
H-3	ENDF/B-VI.0	131	P-31	ENDF/B-VI.0	1525	Ni-61	ENDF/B-VI.1	2834
He-3	ENDF/B-VI.1	225	S-nat	ENDF/B-VI.0	1600	Ni-62	ENDF/B-VI.1	2837
He-4	ENDF/B-VI.0	228	Al-nat	ENDF/B-VI.0	1700	Ni-64	ENDF/B-VI.1	2843
Li-6	ENDF/B-VI.1	325	K-nat	ENDF/B-VI.0	1900	Cu-63	ENDF/B-VI.2	2925
Li-7	ENDF/B-VI.0	328	Ca-nat	JENDL-3.1	3200	Cu-65	ENDF/B-VI.2	2931
Be-9	JENDL-FF	425	Ti-nat	JENDL-3.1	3220	Ga-nat	JENDL-3.2	3100
B-10	ENDF/B-VI.1	525	V-51	JENDL-FF	2328	Zr-nat	JENDL-FF	4000
B-11	ENDF/B-VI.0	528	Cr-50	ENDF/B-VI.1	2425	Nb-93	JENDL-FF	4193
C-12	JENDL-FF	625	Cr-52	ENDF/B-VI.1	2431	Mo-nat	JENDL-FF	4200
N-14	JENDL-FF	725	Cr-53	ENDF/B-VI.1	2434	Sn-nat	BROND-2.1	5000
N-15	BROND-2.1	720	Cr-54	ENDF/B-VI.1	2437	Ta-181	JENDL-3.1	3731
O-16	JENDL-FF	825	Mn-55	JENDL-3.1	3251	W-nat	JENDL-FF	7400
F-19	ENDF/B-VI.0	925	Fe-54	ENDF/B-VI.1	2625	Au-197	ENDF/B-VI.1	7925
Na-23	JENDL-3.1	3111	Fe-56	EFF-3	2631	Pb-206	ENDF/B-VI.0	8231
Mg-nat	JENDL-3.1	3120	Fe-57	ENDF/B-VI.1	2634	Pb-207	ENDF/B-VI.1	8234
Al-27	EFF-3	3131	Fe-58	ENDF/B-VI.1	2637	Pb-208	ENDF/B-VI.0	8237
Si-28	ENDF/B-VI.5	1425	Co-59	ENDF/B-VI.1	2735	Bi-209	JENDL-3.1	3831

以上にあげた中性子輸送断面積は通常、核分裂や核融合などの計算に必要な 10^{-5} eV から 20MeV までの中性子エネルギーに対して断面積データが与えられている。20MeV 以上の高エネルギー領域については利用可能なデータが大幅に制限されるが、最近の高エネルギー加速器施設への応用を主目的として、現在各国において精力的にデータの整備が進められている。日本ではエネルギー範囲を 3GeV にまで拡張した JENDL 高エネルギーファイル⁹⁾の評価作業が進められている。また、米国 LANL では 150MeV までの断面積ライブラリ LA150¹⁰⁾の作成を進めており、1999 年現在で 15 元素 34 核種についてデータが公開されている。

2次 γ 線生成断面積

中性子反応による 2 次 γ 線生成断面積は、JENDL-3.2、JENDL 核融合ファイル、ENDF/B-VI、FENDL/E-2.0 等の中性子輸送断面積と同時に評価済み核データに与えられる。しかし、2 次 γ 線生成断面積の評価は中性子輸送断面積の評価よりも遅れて開始されたこと、また中性子輸送断面積よりも重要度が一段低かったことなどから、すべての核種の中性子輸送断面積に必ず 2 次 γ 線生成断面積が付随しているわけではなく、核種によっては 2 次 γ 線生成断面積が与えられていないものもあるので注意を要する。JENDL-3.2 では、340 核種中 2 次 γ 線生成断面積が与えられているのは 66 核種にとどまるが、通常の核分裂炉の遮蔽、核融合炉設計等の計算で使われる主要核種にはデータが与えられており、実際の計算において 2 次 γ 線生成断面積が無いために困ることはあまりない。

光子輸送断面積

光子と物質との 3 大相互作用である光電効果、コンプトン散乱、電子対生成を中心に断面積が与えられている。最近 MCNP の光子輸送断面積ライブラリ MCPLIB02 は、米国の Lawrence Livermore National Laboratory で作成された Evaluated Photon data Library¹¹⁾ (EPDL)に基づいて作成されており、原子番号 1~94 の原子について 1keV~100GeV のエネルギー範囲でデータが与えられている。

電子輸送断面積

MCNP ライブラリ EL では、原子番号 94 までの原子について、1GeV までのデータを与えている。制動X線生成断面積と制動X線のエネルギー分布、X線生成確率、K 吸收端エネルギーと蛍光収量、電子の阻止能と飛程、電子の角度偏向を考慮する Goudsmit-Saunderson 理論用パラメータ及び電子のエネルギー損失のゆらぎ評価のための Landau-Blunck-Leisegang 理論用パラメータが含まれている。

熱中性子S(α, β)テーブル

熱中性子S(α, β)テーブルとして現在モンテカルロ法輸送計算コードMCNP及びMVPで利用可能なデータは、すべて米国の ENDF/B のデータに基づいている。1969 年に ENDF/B-III 用として原子炉材料を対象に室温以上で評価されたデータが MCNP 用 TMCCS ライブライアリとして利用可能である。このライブライアリには、室温以上の軽水中の水素、重水中的重水素、ポリエチレン中の水素、ベンゼン、金属ベリリウム、酸化ベリリウム、黒鉛、水素化ジルコニウム中の水素及びジルコニウムについてデータが与えられている。また 1993 年に LANL の MacFarlane により ENDF/B-VI.2 用に評価¹²⁾されたデータの中から 6 種の減速材物質（固体メタン、液体メタン、液体水素（パラ及びオルソ）、液体重水素（パラ及びオルソ））について、MCNP の THERXS ライブライアリとして S(α, β) テーブルが利用可能である。

ドシメトリー断面積及び放射化断面積

日本のドシメトリー断面積としては、61 ドシメトリー反応を収納した JENDL Dosimetry File 91¹³⁾ が 1991 年に公開された。また、データの改訂及び追加が行われた JENDL Dosimetry File 99 (67 反応収納) が 1999 年に公開された。放射化断面積では、233 核種について 1,246 の放射化反応を網羅した JENDL Activation File 96¹⁴⁾ が 1996 年に公開された。

一方 IAEA の FENDL では、58 ドシメトリー反応を収録した FENDL/DS-2.0 及び一部の不安定核までを含む 739 核種について 13,006 の放射化反応を網羅した FENDL/A-2.0¹⁵⁾ を公開している。

ここであげた断面積ライブライアリのエネルギーの上限はすべて 20MeV である。

データの入手先

1.2 節で述べた評価済み核データファイルの主なものは、以下のホームページからダウンロード可能である。

日本原子力研究所 核データセンター JENDL ライブライアリ

http://wwwndc.tokai.jaeri.go.jp/index_J.html

国際原子力機関 核データセクション FENDL ライブライアリ

<http://ripcnt01.iaea.org/nds/databases/fendl/FENDL.htm>

米国ロスアラモス国立研究所 T2 グループ ENDF ライブライアリ

<http://t2.lanl.gov/cgi-bin/nuclides/endind>

1.3 連続エネルギー断面積と群定数

離散化座標輸送計算コードとの対比において、モンテカルロ法輸送計算コードの優れた特徴の1つとして、連続エネルギー（ポイントワイズ）断面積による計算が可能なことがあげられる。図1は $^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$ 反応のポイントワイズ断面積及び群断面積の比較である。実際の断面積はポイントワイズ断面積のように滑らかな曲線を描くのに対し、群断面積ではあるエネルギー範囲ごとに平均化した断面積であるため、ヒストグラム形状となる。図1の群断面積は10⁻⁵eV～20MeVのエネルギー範囲を640群に細かく分割しているにも関わらず、非常に細かな断面積の共鳴構造を十分には表現出来ていないことが分かる。この表現の精密さにより、連続エネルギー断面積による計算の方が群断面積による計算よりも一般に精度が良い。MCNP及びMVPでは、連続エネルギー断面積の使用が可能である。

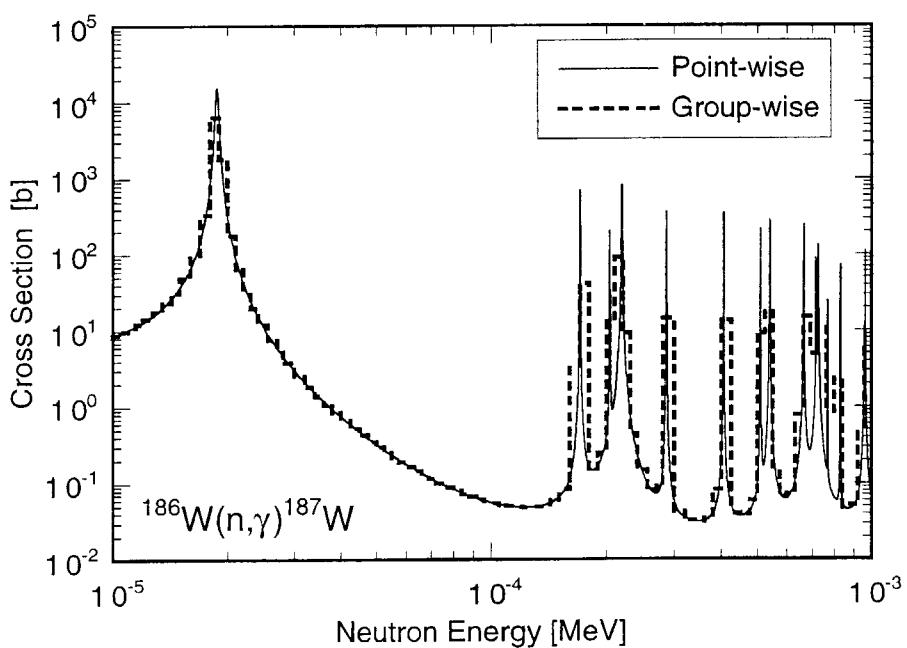


図1 ポイントワイズ断面積と群断面積の例.

2 MCNP 用断面積ライブラリ

2.1 NJOY による断面積処理

連続エネルギーモンテカルロ法輸送計算コード MCNP¹⁾は米国ロスアラモス国立研究所 (Los Alamos National Laboratory, LANL) で開発が続けられており、全世界的に広く使われている。MCNP では ENDF や JENDL 等の評価済み核データファイルの断面積データをもとに輸送計算を行うが、評価済み核データファイルのデータをそのまま計算に使用するのは効率的ではない。例えば軽核以外の核種の全断面積、弾性散乱断面積、核分裂断面積には分離共鳴が存在するが、多くの評価済み核データファイルではこれを共鳴パラメータの形で表現しており、輸送計算を行うにはこのパラメータから実際の断面積に変換しなければならない。またこれら断面積の共鳴の幅には温度依存性（ドップラー効果）があり、通常 0 度K で与えられている評価済み核データファイルのデータを室温等の実際の温度に変換しなければならない。別の例では、弾性散乱や離散非弾性散乱により生成する 2 次中性子の角度分布は通常ルジャンドル関数で表現されており、核データファイルにはルジャンドル多項式の係数が最大 20 次まで与えられている。そこで、モンテカルロ計算を行いやすいように、この係数から角度分布の表現を表形式に変換する必要がある。

こうした事情により、ほぼすべての輸送計算コードでは、評価済み核データファイルのデータをそのコードが取り扱いやすい形式に変換した断面積ライブラリを事前に準備しておき、計算にはこの断面積ライブラリを使用する。MCNP の場合には、LANL で開発が進められている断面積処理コード NJOY¹⁶⁾ を用いて評価済み核データファイルを ACE (A Compact ENDF) 形式と呼ばれる断面積ライブラリに変換したものを使用する。

図 2 に NJOY の入力データの 1 例 (JENDL-3.2 の銅のデータ用) を示す。主な処理は以下のとおりである。

reconr	共鳴パラメータからポイントワイズ断面積を作成
broadr	与えられた温度に対する共鳴のドップラー拡張
heatr	エネルギーバランス法による平均発熱係数の計算
thermr	熱中性子の散乱断面積の計算
acer	ACE 形式で断面積を出力

これは中性子輸送断面積の処理例であるが、もしも 2 次 γ 線生成断面積が含まれていれば自動的に処理が行われ、中性子輸送断面積と組み合わせた 1 つのデータファイルとして出力される。以上の処理によって、ある 1 つの核種のポイントワイズ断面積が作成される。

```
0
5
*moder*
20 -21
*reconr*
-21 -22
*pendf tape for Cu-0 from JENDL-3.2* /
2900 3 /
.005 /
*Cu-0 from JENDL-3.2* /
*processed by the NJOY nuclear data processing system* /
0 /
*broadr*
-22 -23
2900 1 0 0 0 /
.005 /
300.
0 /
*heatr*
-21 -23 -24
2900 /
*thermr*
0 -24 -23
0 2900 8 1 1 0 1 221 0
300.
.005 4.6
*group*
-21 -23 0 -25
2900 3 2 3 0 1 1 1 /
*Cu-0 from JENDL-3.2* /
300.
1.0e10
16 /
0 /
0 /
*acer*
-21 -23 -25 26 27 /
1/
*njoy for Cu-0 JENDL-3.2*/
2900 300. /
0.01 /
/
*stop*
```

図2 JENDL-3.2 の銅を処理した時の NJOY コードの入力データの一例.

2.2 データの形式と保守管理

NJOY コードによりある 1 つの核種の MCNP 用 ACE 形式断面積を作成すると、その断面積の属性を 1 行に集約したディレクトリファイル (xsdir) が同時に作成される。新たに作成した断面積ファイル、あるいは他から入手した MCNP 用断面積ライブラリは、それまでに使用していた断面積ライブラリと同時に使うことができる。この場合、それまで MCNP を実行するときに使用していた xsdir ファイルに、新たに付け加える xsdir の情報（1 核種 1 行の部分のみ）を追加すればよい。詳細は MCNP マニュアル¹⁾ Appendix F-II “xsdir - Data Directory File” に記載されている。

MCNP コードには makxsf という名の断面積編集プログラムが附属しており、MCNP コードをインストールすれば自動的に makxsf もインストールされる。makxsf を使えば簡単な入力で MCNP 用 ACE 形式断面積の保守管理が行えるため、非常に有用なプログラムである。使用方法は MCNP マニュアル¹⁾ Appendix C-IV “Converting Cross-Section Files with makxsf” に記載されている。makxsf は通常、以下の様な場合に使用する。

1. Type-1 (テキスト形式) から Type-2 (バイナリ形式) への変換
この変換でファイル容量を約 1/5 にできるため、ライブラリを計算機に常駐させておくときに有効である。
2. Type-2 (バイナリ形式) から Type-1 (テキスト形式) への変換
他種の計算機にライブラリを移植したり、ライブラリ内の数値データを閲覧するときに行う。
3. 複数の ACE 形式断面積データ（例えば NJOY で出力される核種ごとのデータ）を 1 つのファイルにまとめる。
4. 多くの核種に対する断面積データが含まれている大きなライブラリから、ある特定の核種のデータだけを抜き出して、小さなライブラリを作成する。

2.3 断面積データの実例

ここでは、MCNP ライブラリ中の断面積データの実例をいくつか示す。図 3、4 は連続エネルギー断面積の例である。図 3 は鉄の第 1 励起レベル（正確には鉄-57 の第 1 励起レベル）を励起する非弾性散乱反応断面積、図 4 は鉄の中性子捕獲反応断面積である。図 5 は 14MeV 中性子が鉄の原子核と弾性散乱反応を起こした時に放出される 2 次中性子の角度分布である。図中に Nuclear Data と示したのはオリジナルの JENDL-3.2 に与えられているデータであり、ルジャンドル多項式で表現された滑らかな曲線であるのに対し、MCNP ライブラリでは図中にヒストグラムで示したような 32 等確率角度 bin で表現され

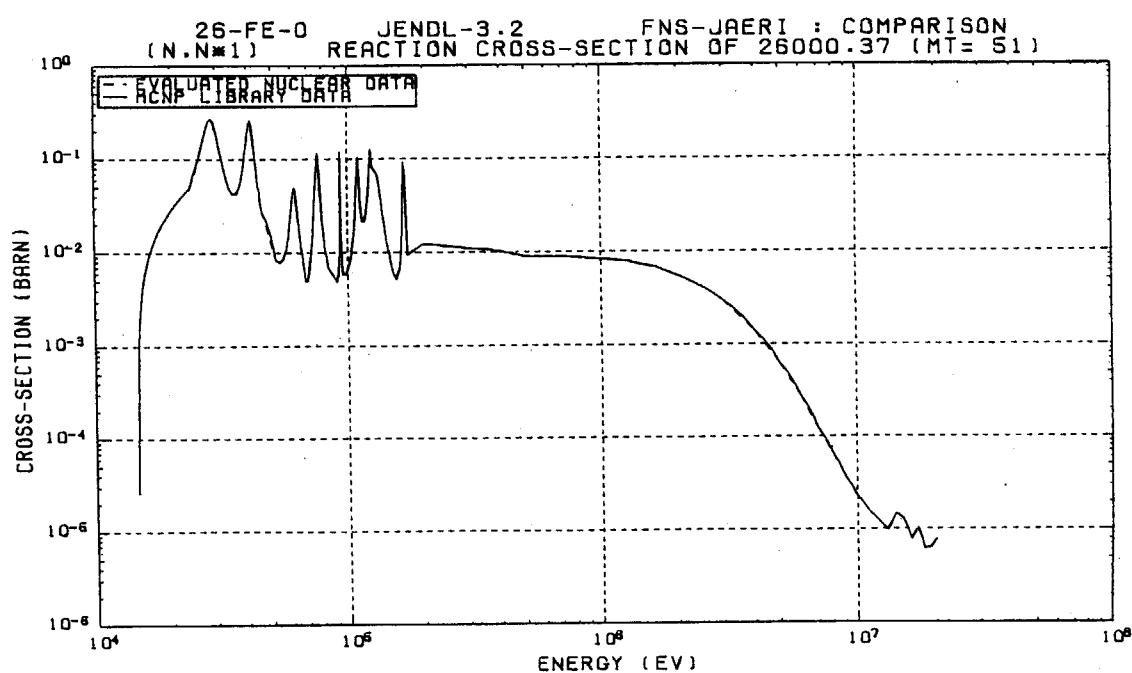


図 3 MCNP ライブライリ中の断面積データの一例（中性子反応断面積-1）。

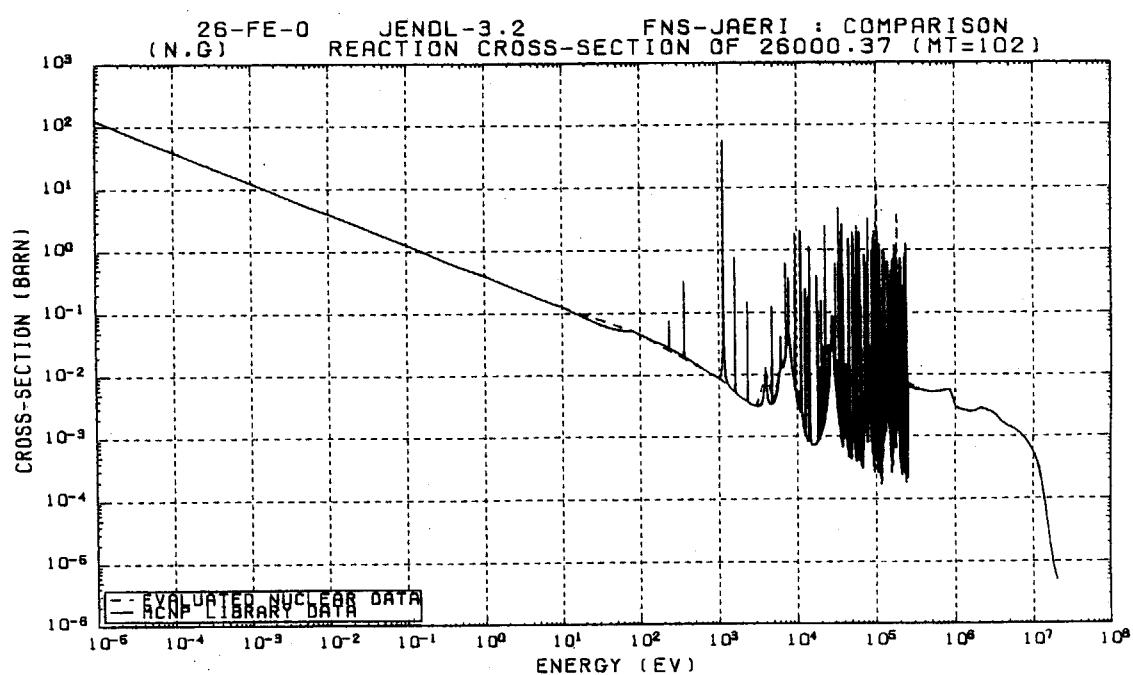


図 4 MCNP ライブライリ中の断面積データの一例（中性子反応断面積-2）。

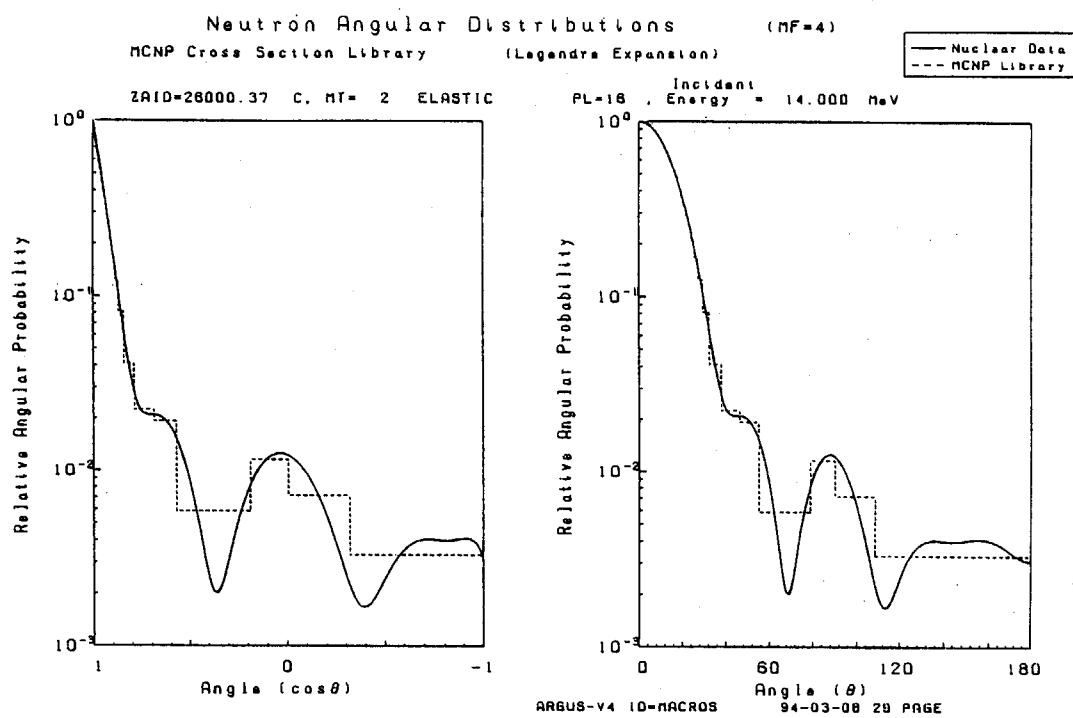


図 5 MCNP ライブライアリ中の断面積データの一例（2次中性子の角度分布）。

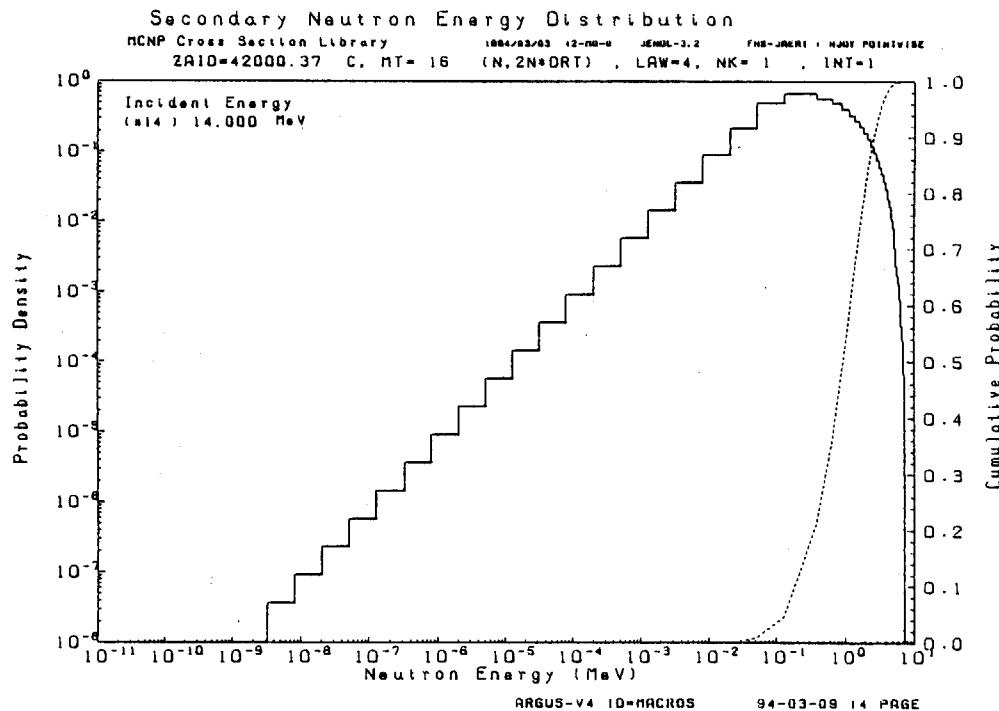


図 6 MCNP ライブライアリ中の断面積データの一例（2次中性子のエネルギー分布-1）。

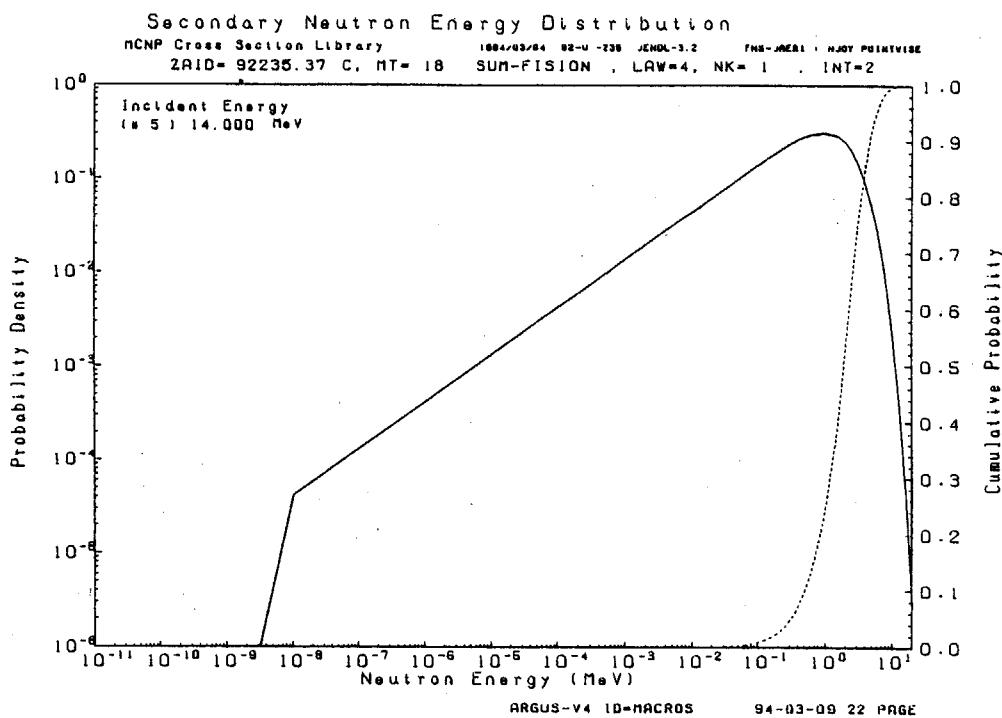


図 7 MCNP ライブライリ中の断面積データの一例（2次中性子のエネルギー分布-2）。

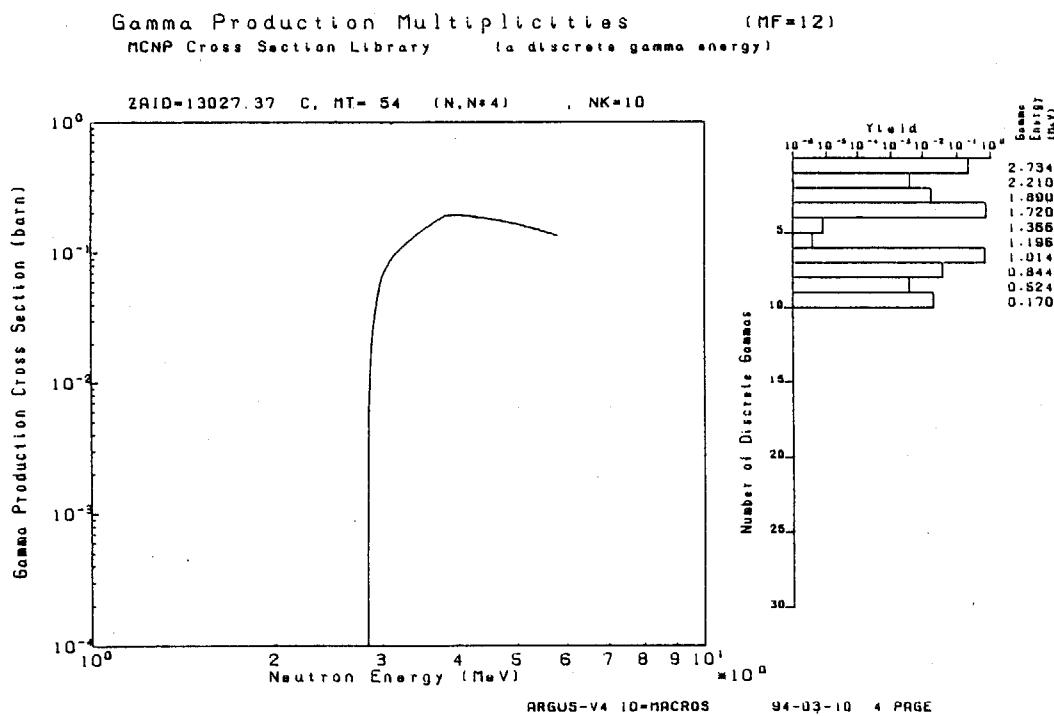
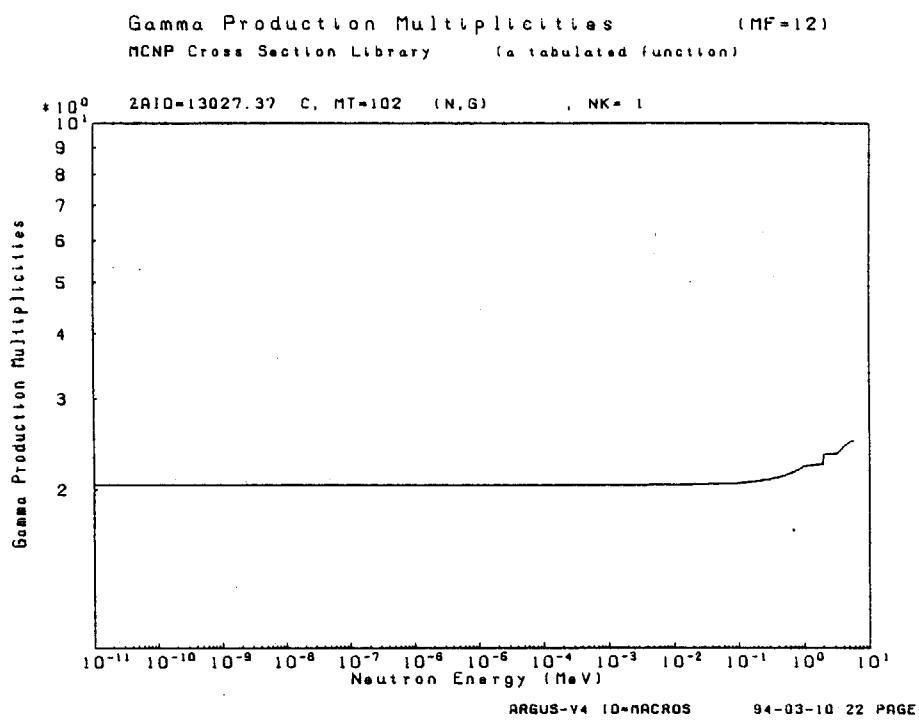
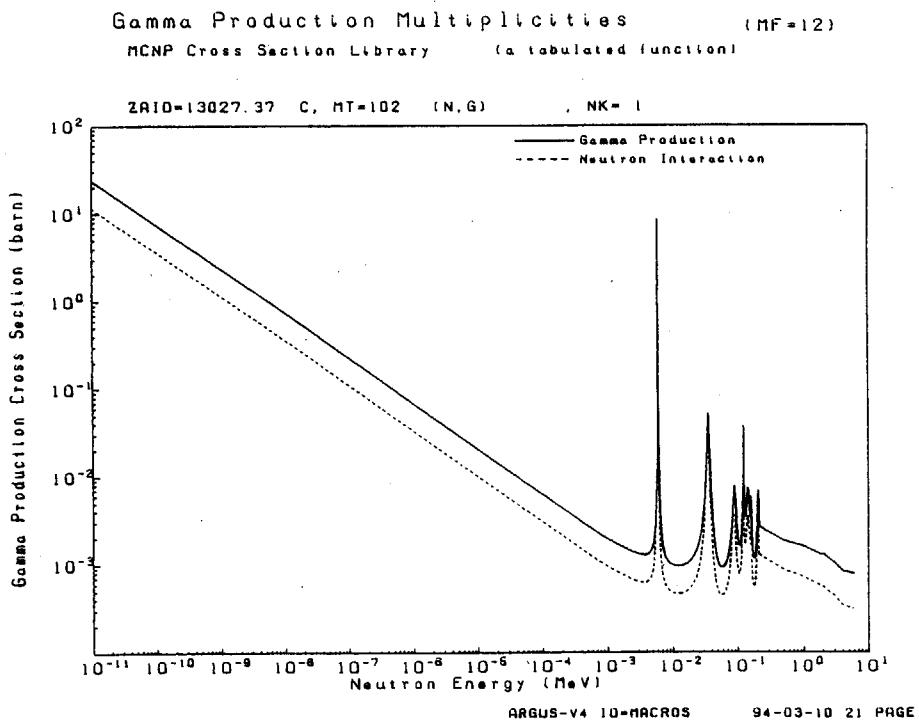


図 8 MCNP ライブライリ中の断面積データの一例（離散 γ 線生成断面積）。

図 9 MCNP ライブラリ中の断面積データの一例 (γ 線多重重度).図 10 MCNP ライブラリ中の断面積データの一例 (γ 線生成断面積-1).

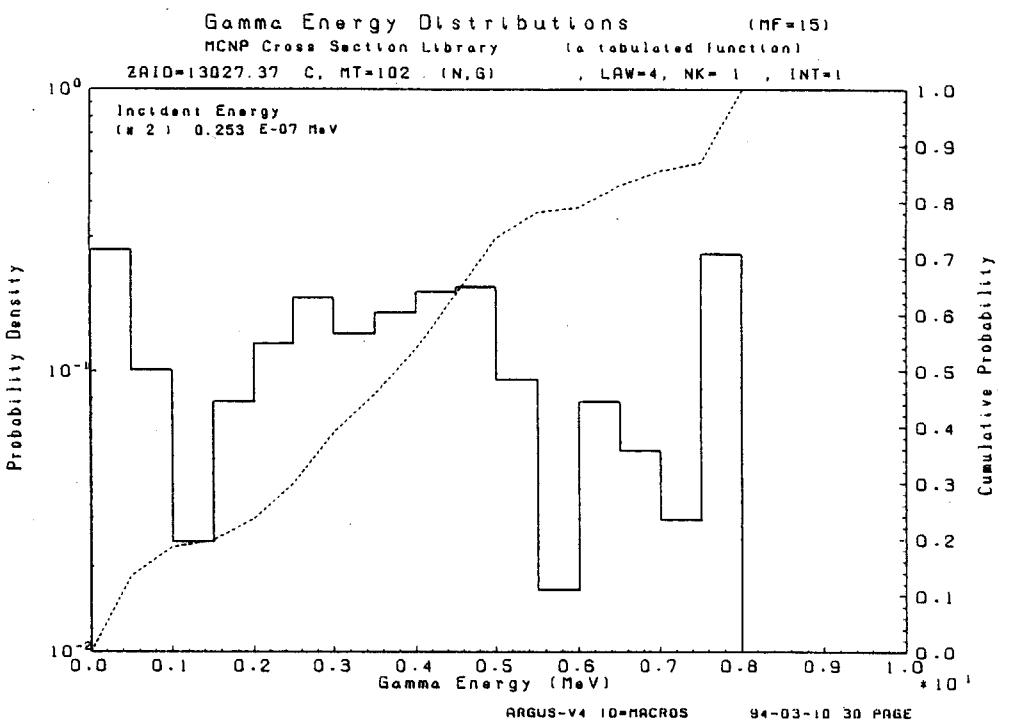


図 11 MCNP ライブライリ中の断面積データの一例（2次γ線スペクトル-1）

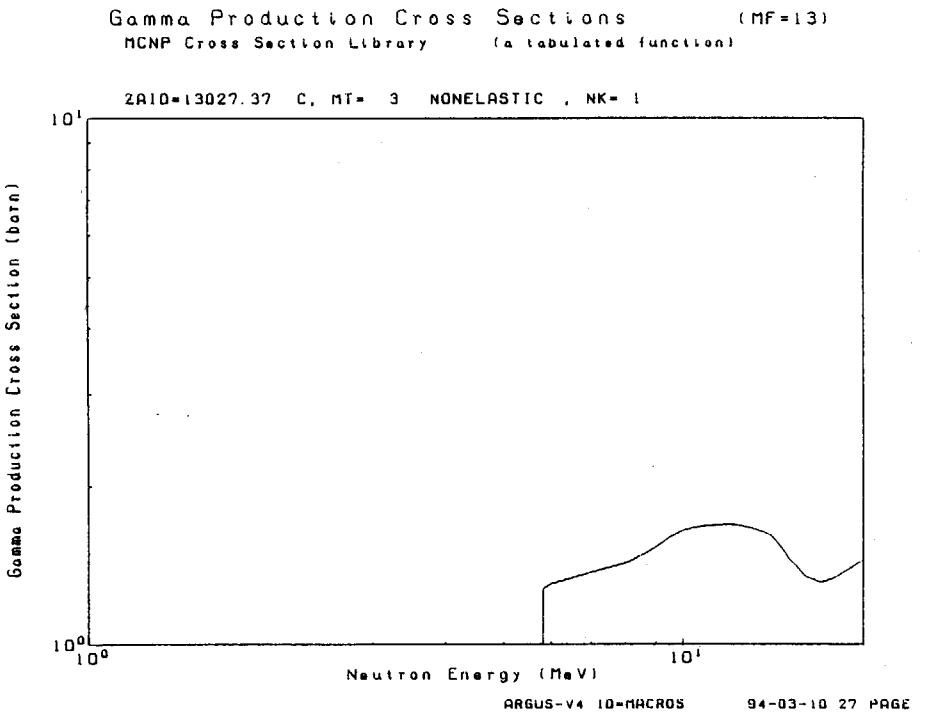


図 12 MCNP ライブライリ中の断面積データの一例（γ線生成断面積-2）。

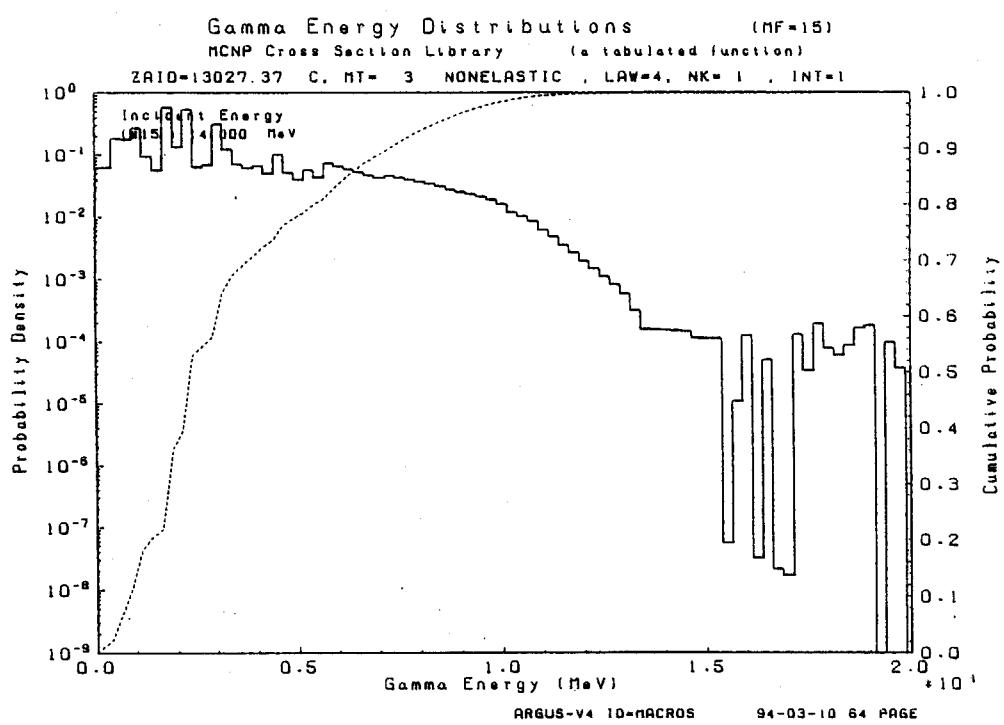


図 13 MCNP ライブラリ中の断面積データの一例（2次γ線スペクトル-2）。

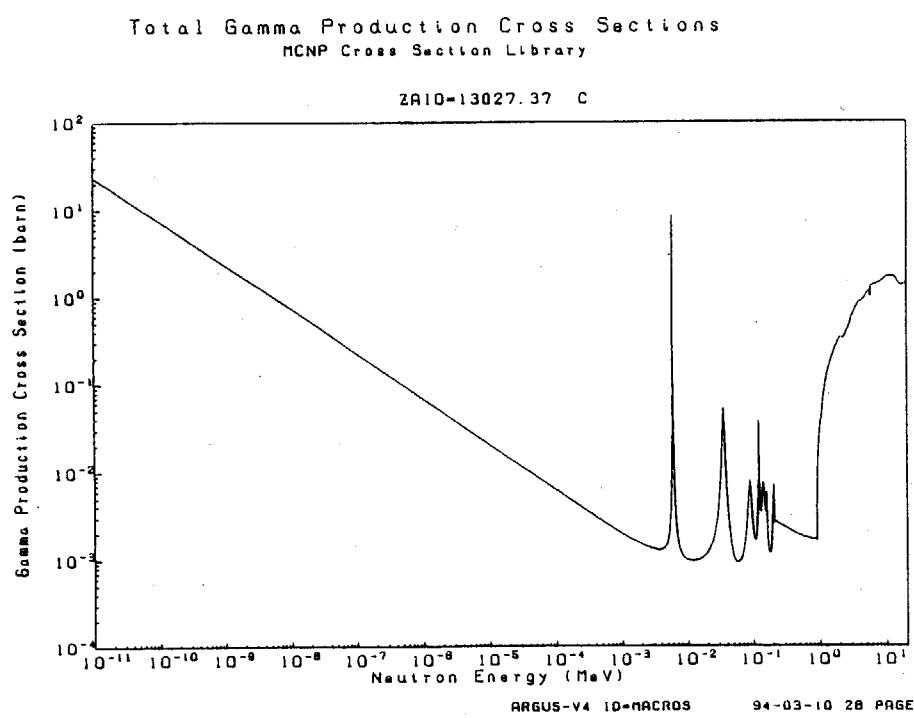


図 14 MCNP ライブラリ中の断面積データの一例（2次γ線生成断面積-3）。

ている。図 6、7 は 2 次中性子のエネルギー分布の例である。図 6 は 14MeV 中性子によるモリブデンの(n,2n)反応による 2 次中性子、図 7 はやはり 14MeV 中性子によるウラン-235 の核分裂反応で放出される核分裂中性子のエネルギースペクトルである。

次に、2 次 γ 線に関する断面積を示す。図 8 はアルミの第 4 励起レベルを励起する非弾性散乱反応による γ 線生成断面積（図の左側）と、それに伴って放出される 2 次 γ 線の収量である。この非弾性散乱反応が 1 回起こると、図の右端に示されているエネルギーの γ 線が棒グラフで示された割合で放出される。図 9 はアルミの原子核による中性子捕獲反応が起こったときに何本の γ 線が放出されるか（ γ 線多重重度）を示した図である。図 10 は図 9 の値を $^{27}\text{Al}(n, \gamma)$ 反応断面積（破線）に乘じ、 $^{27}\text{Al}(n, \gamma)$ 反応による 2 次 γ 線生成断面積（実線）としたものである。図 11 中のヒストグラムは、熱中性子により $^{27}\text{Al}(n, \gamma)$ 反応が引き起こされたときに放出される 2 次 γ 線スペクトルである。図 8~10 では入射中性子エネルギー約 6MeV 以下の範囲でしかデータが与えられていない。これは、実際の JENDL-3.2 のアルミのデータでは、約 6MeV を境にして 2 次 γ 線データの表現方法が異なっているためである。約 6MeV 以下では個々の核反応に対して 2 次 γ 線データを与えており、約 6MeV 以上ではすべての γ 線生成反応をまとめて表現している。図 12 は約 6MeV 以上 20MeV までの γ 線生成断面積である。図 13 は 14MeV 中性子がアルミの原子核と核反応を起こした時に放出される 2 次 γ 線のエネルギースペクトルである。図 14 は $10^{-11} \sim 20\text{MeV}$ のエネルギー範囲における γ 線生成断面積を示している。約 1MeV 以下では(n, γ) 反応が唯一の γ 線生成反応であるが、約 1MeV 以上からしきい反応による γ 線生成が起こり始め、断面積が急激に大きくなっていく様子が読み取れる。

以上のように、MCNP ライブラリには中性子-光子結合計算に必要な様々な断面積データが収納されている。

2.4 利用可能ライブラリ

表 2 に 1999 年末現在で利用可能な主な MCNP 用断面積ライブラリをまとめた。Data Type の欄に区分を示したが、上から連続エネルギー中性子断面積、同光子断面積、同電子断面積、熱中性子 S(α, β)断面積、及びドシメトリー/放射化断面積である。

一般の中性子-光子輸送計算では、日本独自の核データであり、かつ収納核種数の充実している JENDL-3.2 に基づくライブラリを使用するのが良い。核融合への応用では、JENDL Fusion File や FENDL/E-2.0 から作成したライブラリが適している。光子輸送断面積、電子輸送断面積及び熱中性子 S(α, β)断面積については、表 2 にある MCNP に附属のライブラリ以外に選択肢はない。

表2 主なMCNP用断面積ライブラリ(1999年末現在) .

Library Name	Original Data	Number of Data	File Size in Type-1 Format	Temperature [Kelvin]	Data Type [#]
FSXLIB-J3 ¹⁷⁾	JENDL-3.1	116	150 MB	300	c
FSXLIB-J3R2 ¹⁸⁾	JENDL-3.2	340	328 MB	293	c
FSXLIB-JFF ¹⁹⁾	JENDL-Fusion File	82	120 MB	300	c
FSXJ32A ²⁰⁾	JENDL-3.2	340	600 MB	293	c
FSXJ32B ²⁰⁾	JENDL-3.2	340	576 MB	600	c
FSXJ32C ²⁰⁾	JENDL-3.2	340	562 MB	900	c
FSXJ32D ²⁰⁾	JENDL-3.2	340	553 MB	1200	c
FSXJ32E ²⁰⁾	JENDL-3.2	340	545 MB	1500	c
FSXJ32F ²⁰⁾	JENDL-3.2	340	535 MB	2000	c
FENDL/MC-2.0 ²¹⁾	FENDL/E-2.0	57	150 MB	300	c
ENDF60 ¹⁾	ENDF/B-VI	122	184 MB	294	c
RMCCS ¹⁾	ENDF/B-V	67	41 MB	294	c
LA-150 Lib ¹⁰⁾	LA-150	34	158MB	300	c
100XS ²²⁾	Los Alamos Evaluation	9	18 MB	300	c
MCPLIB1 ¹⁾	ENDF, etc.	94	1 MB	—	p
MCPLIB02 ¹⁾	EPDL	94	3 MB	—	p
EL ¹⁾	etc.	94	1 MB	—	e
TMCCS ¹⁾	Los Alamos Evaluation	42	1 MB	300 - 2000	t
THERXS ¹⁾	ENDF/B-III	6	12 MB	22 - 100	t
FSXDOS-J3 ¹⁹⁾	JENDL Dosimetry File 91	42	8 MB	—	y
ACTXS1 ²³⁾	FENDL/A-2.0	739	74 MB	—	y
LLLDO ¹⁾	ACTL	374	3 MB	—	y

c: continuous energy neutron cross section

p: continuous energy photon cross section

e: continuous energy electron cross section

t: thermal S(α, β) cross section

y: dosimetry & activation cross section

ドシメトリー断面積としては、JENDL Dosimetry File 91 に基づくライブラリが利用可能である。放射化断面積ライブラリとしては FENDL/A-2.0 に基づく ACTXS1 と MCNP 附属の LLLDOS 等が利用可能であるが、MCNP 附属の断面積データは 1980 年以前に評価されたものがほとんどであるため、1990 年代後半に作成された ACTXS1 の使用が推奨される。

20MeV 以上の高エネルギー中性子の輸送計算を行う場合には、利用可能ライブラリは

150MeVまでのLA-150及び100MeVまでの100XSの2つに限られる。なお、MCPLIB02とELの上限エネルギーはそれぞれ100GeV, 1GeVであり、通常の使用には十分耐えられる。

表2に示した連続エネルギー中性子輸送断面積の多くは室温(293K~300K)においてドップラー効果による断面積の拡張処理が行われている。しかし、炉心温度が数百度にまで達する核分裂炉の臨界計算を行う場合や、さらに1500度や2000度にまで達する事故時の解析を行う場合には、高温で断面積処理を行ったライブラリが必要となる。そこで、JENDL-3.2を293, 600, 900, 1200, 1500及び2000Kの6温度点について処理したライブラリ²⁰⁾(FSXJ32A~FSXJ32F)が作成された。また、これ以外の任意の温度点においてユーザーが容易に断面積ライブラリを作成できる、MCNPライブラリ自動編集システムautonj²⁰⁾が作成された。

2.5 MCNP用断面積ライブラリの問題点

非分離共鳴断面積の自己遮蔽

断面積の分離共鳴領域においては、ポイントワイズ断面積では個々の共鳴を正確に表現しているために正確な計算が可能である。しかし非分離共鳴領域においては、共鳴の間隔が密であるためにはや個々の共鳴を分離できず、核データには平均的な断面積が与えられるようになる。分離共鳴領域の断面積を群定数化するときと同じように、非分離共鳴領域における断面積として平均的な値を使用する場合には、断面積の自己遮蔽補正係数を乗じて実効断面積を求める必要がある。しかし現在のNJOY-MCNPのシステムではこの自己遮蔽補正係数を考慮することが出来ず、過大な非分離共鳴領域の断面積を使った計算になっている。

オランダECNのHogenbirkはこの非分離共鳴領域の断面積の自己遮蔽効果に対して定量的な評価を行っている。^{24, 25)}自己遮蔽効果を考慮しない通常のMCNP計算結果と、自己遮蔽効果を考慮した特別なMCNP計算の結果を比較し、その差が調べられた。その結果、Fe-56で構成される遮蔽体に14-MeV中性子を打ち込んだときの深さ500mmの位置において、自己遮蔽効果を考慮した計算は考慮しない場合に比べて1MeV付近の中性子束を最大3倍に与え、同様にステンレス鋼(SUS316)では約1.2倍に与えることが指摘された。また、U-238の非分離共鳴の自己遮蔽効果による違いでは、典型的な熱中性子炉の実効増倍係数を0.1%程度変化させ、高速炉ではこの変化はより大きくなるとしている。

なお、非分離共鳴断面積の自己遮蔽効果についてはMVPコードでは既に考慮できるようになっている。また、MCNPではバージョン4Bまでではこの効果を考慮できないが、バージョン4Cからは考慮できるようになる予定である。

発熱係数 (KERMA 係数)

MCNP ライブラリの中性子輸送断面積には、核発熱計算用の断面積、いわゆる KERMA (Kinetic Energy Release in Materials) 係数が内蔵されており、MCNP の f6 タリー、あるいは f2 や f4 タリーと fm カードとの併用により中性子による核発熱を計算することが出来る。KERMA 係数の計算方法にはエネルギーバランス法と直接法があり、直接法によればほぼ妥当な KERMA 係数を計算することができる。しかし歴史的経緯により、MCNP ライブラリでは精度の悪いエネルギーバランス法による KERMA 係数を採用しているため、MCNP により中性子による核発熱を計算する時には注意を要する。一般に、エネルギーバランス法による KERMA 係数には以下の欠点を有する。

- (1) おおもとの評価済み核データファイルのデータがエネルギー的に矛盾している場合、KERMA 係数も不自然な値をとる。
- (2) おおもとの評価済み核データファイルのデータに 2 次 γ 線データが含まれていない場合、KERMA 係数は過大に計算される。
- (3) 重核になるほど精度が低下する傾向がある。

図 15～17 に、JENDL Fusion File の鉄、スズ、鉛のデータから作成した KERMA 係数の比較を示す。エネルギーバランス法のものは実際に MCNP ライブラリに内蔵されているものであり、直接法のものは NJOY コードの Kinematic 法により計算したものである。

図 15 の鉄の場合、15MeV 以上で両者間の差が目立つ。JENDL Fusion File のスズのデータには 2 次 γ 線データが含まれていないため、図 16 のエネルギーバランス法による KERMA 係数は妥当と思われる直接法の値と比べてかなり大きな値となっている。鉛のような重核では図 17 のように、エネルギーバランス法による KERMA 係数は部分的に負の値をとるなどかなり不自然な曲線を描いている。

中性子による核発熱を計算する場合、この問題点を十分に認識しておく必要がある。直接法による KERMA 係数が利用可能な場合、MCNP でまず中性子スペクトルを求め、これに直接法による KERMA 係数を乗じて核発熱を計算するのが良い。

なお、この問題は中性子反応による KERMA 係数のみに関係しており、光子についても同様に MCNP コードにより核発熱が計算できるが、光子の場合には信頼できる計算結果が得られる。

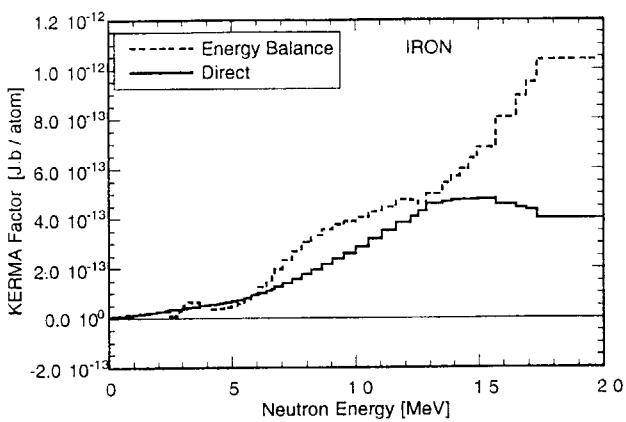


図 15 JENDL Fusion File、鉄のデータの KERMA 係数の比較.
(エネルギーバランス法 (MCNP ライブライ) 及び直接法.)

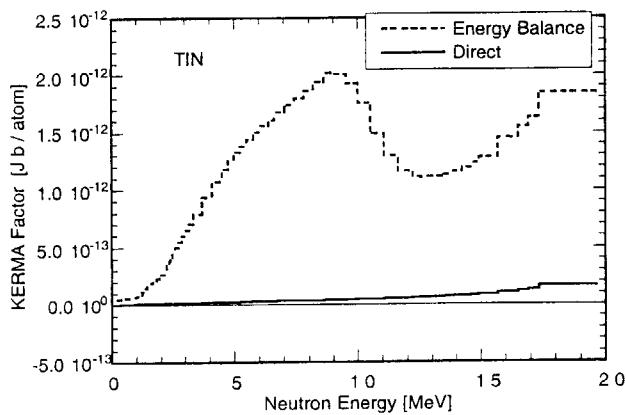


図 16 JENDL Fusion File、スズのデータの KERMA 係数の比較.
(エネルギーバランス法 (MCNP ライブライ) 及び直接法.)

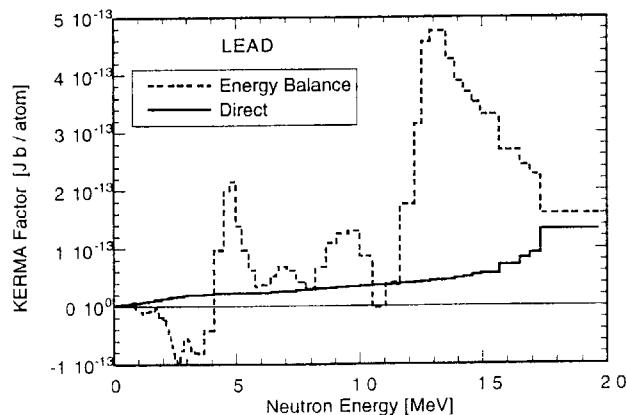


図 17 JENDL Fusion File、鉛のデータの KERMA 係数の比較.
(エネルギーバランス法 (MCNP ライブライ) 及び直接法.)

2.7 節の参考文献

- 1) Briesmeister J. F. (Ed.): "MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B", LA-12625-M (1997).
- 2) 森貴正、中川正幸: "MVP/GMVP 連続エネルギー法及び他群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード", JAERI-Data/Code 94-007 (1994).
- 3) Shibata K., et al.: "JENDL-3: Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3", JAERI-1319 (1990).
- 4) Nakagawa T., et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 Revision-2: JENDL-3.2", J. Nucl. Sci. Technol., 32, pp. 1259–1271 (1995).
- 5) Chiba S., Fukahori T., Yu B. and Kosako K: "Evaluation of the Double-Differential Cross Sections of Medium-Heavy Nuclei for JENDL Fusion File", JAERI-Conf 96-005, pp. 45–54 (1996).
- 6) Rose R. F. and Dunford C. L. (Ed.): "ENDF-102 Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF-6", BNL-NCS-44945 (1990).
- 7) Ganesan S. and McLaughlin P. K., "FENDL/E Evaluated Nuclear Data Library of Neutron Nuclear Interaction Cross-Sections and Photon Production Cross-Sections and Photon-Atom Interaction Cross Sections for Fusion Applications Version 1.0 of May 1994", IAEA-NDS-128, International Atomic Energy Agency (1995).
- 8) Pashchenko A. B. and Wienke H.: "FENDL/E-2.0 Evaluated Nuclear Data Library of Neutron-Nucleus Interaction Cross Sections and Photon Production Cross Sections and Photon-Atom Interaction Cross Sections for Fusion Applications", IAEA-NDS-175, International Atomic Energy Agency (1998).
- 9) Fukahori T.: "Status of JENDL High Energy File – Evaluation Method, Tools, Specification, Release Procedure, etc. –", JAERI-Conf 98-016, pp. 37–42 (1998).
- 10) Chadwick M. B., et al.: "Cross-Section Evaluation to 150 MeV for Accelerator-Driven Systems and Implementation in MCNPX", Nucl. Sci. Eng. 131, pp. 293–328 (1999).
- 11) Cullen D. E., et al.: "Tables and Graphs of Photon-Interaction Cross Sections from 10 eV to 100 GeV Derived from the LLNL Evaluated Photon Data Library (EPDL)", Lawrence Livermore National Laboratory report UCRL-

- 50400, Vol. 6 (1989).
- 12) MacFarlane R. E.: "New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release2", Los Alamos National Laboratory report (1994).
 - 13) Nakazawa M., et al.: "JENDL Dosimetry File", JAERI 1325 (1991).
 - 14) Nakajima Y.: "Status of the JENDL Activation File", JAERI-Conf 96-008, pp. 50-55 (1996).
 - 15) Pashchenko A. B., et al.: "FENDL/A-2.0 Neutron Activation Cross Section Data Library for Fusion Applications", IAEA-NDS-173 (1998).
 - 16) MacFarlane R. E., Muir D. W. and Boicourt R. M.: "The NJOY Nuclear Data Processing System", LA-9303-M (ENDF-324) (1982).
 - 17) 小迫和明、大山幸夫、前川洋: "FSXLIB-J3: JENDL-3 に基づく MCNP 用連続エネルギー断面積ライブラリー", JAERI-M 91-187 (1991).
 - 18) Kosako K., Maekawa F., Oyama Y., Uno Y. and Maekawa H.: "FSXLIB-J3R2: A Continuous Energy Cross Section Library for MCNP Based on JENDL-3.2", JAERI-Data/Code 94-20 (1994).
 - 19) Kosako K.: "Present Status of Cross Section Libraries", JAERI-Conf 96-005, pp. 55-62 (1996).
 - 20) 前川藤夫、桜井淳、小迫和明、久米悦雄、川崎信夫、野村靖、内藤倣孝: "MCNP ライブライ自動編集システム autonj の開発", JAERI-Data/Code 99-048 (1999).
 - 21) Wienke H. and Herman M.: "FENDL/MG-2.0 and FENDL/MC-2.0 The Processed Cross-section Libraries for Neutron Photon Transport Calculations", IAEA-NDS-176 (March 1997).
 - 22) Little R. C.: "Summary Documentation for the 100XS Neutron Cross Section Library (Release 1.0)", LA-UR-96-24 (October 1995).
 - 23) Pashchenko A. B. and Wienke H.: "FENDL2/A-MCNP, FENDL2/A-VITJ_E and FENDL2/A-VITJ_FLAT -The Processed FENDL-2 Neutron Activation Cross-section Data Files-", IAEA-NDS-174 (March 1997).
 - 24) Hogenbirk A.: "UNR A Code for Processing Unresolved Resonance Data for MCNP", ECN-R-94-020, Energiederzoek Centrum Nederland (1994).
 - 25) Hogenbirk A.: "Why Self-Shielding Is Needed in MCNP-Calculations", ECN-RX-94-069, Energiederzoek Centrum Nederland (1994).

2.7 節 付 錄

MCNP 断面積の保守管理および反応率計算にとって有用な事項を付録として示す。

- MCNP 断面積ライブラリの構造
- MAKXSF による断面積ライブラリの管理
- 断面積ライブラリの追加方法
- ドシメトリー断面積を用いた反応率計算方法 (fm カード)

○ MCNP 断面積ライブラリの構造

断面積そのものの情報を含む本体（複数）と、データの所在を示す xsdir ファイル（1 個）からなる。

```
$ ls -l /home/MCNP/lib/
-r--r--r-- 1 user    users  65826816 May 30 1997 FSXLJ3R2      本体
-r--r--r-- 1 user    users 27039744 May 30 1997 FENDLMC1      本体
-r--r--r-- 1 user    users  577536 Dec 12 1997 mcplib022      本体
-rw-r--r-- 1 user    users  320300 Jul 21 14:28 xsdir          xsdir
```

xsdir ファイルの中身（1 核種1行）

```
datopath=/home/MCNP/lib/
atomic weight ratios
 1  1.000000
1000 0.999317 1001 0.999167 1002 1.996800 1003 2.990140
2000 3.968217 2003 2.990120 2004 3.968219
3000 6.881312 3006 5.963450 3007 6.955733
```

(原子の存在比テーブル、中略)

```
97000 244.947835 97245 242.961106 97246 243.954859 97247 244.947835
97248 245.941911 97249 246.935298
98000 248.922674 98249 246.935164 98250 247.928114 98251 248.922674
98252 249.916107
```

```
directory
1001.37c .999167 FSXLJ3R2 0 2   1  2422 2048 512 2.5300E-08
1002.37c 1.997000 FSXLJ3R2 0 2   7  6376 2048 512 2.5300E-08
2003.37c 2.990120 FSXLJ3R2 0 2  21  3176 2048 512 2.5300E-08
2004.37c 3.968200 FSXLJ3R2 0 2  29  3319 2048 512 2.5300E-08
3006.37c 5.963450 FSXLJ3R2 0 2  37 14049 2048 512 2.5300E-08
```

(FSXLJ3R2 用テーブル、中略)

```
99254.37c 251.905000 FSXLJ3R2 0 2 32113 4198 2048 512 2.5300E-08
99255.37c 252.899000 FSXLJ3R2 0 2 32123 4656 2048 512 2.5300E-08
100255.37c 252.899000 FSXLJ3R2 0 2 32134 3971 2048 512 2.5300E-08
1001.00c .999170 FENDLMC1 0 2 1 3484 2048 512 2.5852E-08
1002.00c 1.996800 FENDLMC1 0 2 9 2704 2048 512 2.5852E-08
1003.00c 2.990140 FENDLMC1 0 2 16 3338 2048 512 2.5852E-08
2003.00c 2.989032 FENDLMC1 0 2 24 2834 2048 512 2.5852E-08
```

(FENDLMC1 用テーブル、中略)

```
82208.00c 206.190000 FENDLMC1 0 2 12833 112054 2048 512 2.5852E-08
83209.00c 207.185000 FENDLMC1 0 2 13053 76602 2048 512 2.5852E-08
1000.02p .999317 mcplib022 0 2 1 623 2048 512 .0000E+00
2000.02p 3.968217 mcplib022 0 2 4 623 2048 512 .0000E+00
```

(mcplib022 用テーブル、中略)

```
93000.02p 235.011799 mcplib022 0 2 277 761 2048 512 .0000E+00
94000.02p 241.967559 mcplib022 0 2 280 767 2048 512 .0000E+00
```

○ MAKXSF による断面積ライブラリの管理

MCNP-4C マニュアル Appendix C-IV (ページ C-14)

プログラム :	makxsf	(MCNP 付属)
入力ファイル :	specs	(ファイル名固定)
出力ファイル :	tprint	(ファイル名固定、実行前に古いファイルを削除)

(例 1)

Type-2 (バイナリ) 形式の FXDOSJ32 ライブラリ全体を Type-1 (テキスト) 形式に変換

----- 入力データ (specs) はじまり -----

```
xsdir  xsdir.dos
FXDOSJ32 FSXDOS32 1
```

----- 入力データ (specs) おわり -----

xsdir	既存の xsdir ファイル
xsdir.dos	変換後のライブラリに対応する xsdir ファイル名 (8 文字以内、任意)
FXDOSJ32	既存の断面積ライブラリ (Type-2)
FSXDOS32	変換後の断面積ライブラリ (Type-1) (8 文字以内、任意)
1	Type-1 の指定

(例 2)

FSXLIB-J3R2 から、Fe-54 の断面積データのみを抜きだし、Type-1 (テキスト) 形式で出力

----- 入力データ (specs) はじまり -----

```
xsdir  xsd_Fe54
      FSX_Fe54  1
```

26054.37c

----- 入力データ (specs) おわり -----

xsdir	既存の xsdir ファイル
xsd_Fe54	変換後のライブラリに対応する xsdir ファイル (8 文字以内、任意)
FSX_Fe54	変換後の断面積ライブラリ (Type-1) (8 文字以内、任意)
1	Type-1 の指定
26054.37c	Fe-54 の指定

○ 断面積ライブラリの追加方法

現在 FSXLJ3R2、FENDLMC1、mcplib022 の3ライブラリが使える状態で、さらに FSXNEW ライブラリを追加する場合

```
$ ls -l /home/MCNP/lib/
-r--r--r-- 1 user  users 65826816 May 30 1997 FSXLJ3R2      既存
-r--r--r-- 1 user  users 27039744 May 30 1997 FENDLMC1    既存
-r--r--r-- 1 user  users 1234667 Jul 26 11:08 FSXNEW      追加
-r--r--r-- 1 user  users 577536 Dec 12 1997 mcplib022    既存
-rw-r--r-- 1 user  users 320300 Jul 21 14:28 xsdir      既存
-r--r--r-- 1 user  users 115 Jul 27 00:20 xsdirnew    追加
```

xsdirnew ファイルの中身

```
1001.00c 0.999170 FSXNEW 0 2 1 3484 2048 512 2.5852E-08
1003.00c 2.990140 FSXNEW 0 2 9 3338 2048 512 2.5852E-08
```

FSXNEW ライブラリには、水素-1 (1001.00c) & 水素-3 (1003.00c) のデータが含まれている。既存の xsdir ファイルをエディタで編集し、xsdirnew の2行を追加する。

編集前の xsdir ファイルの中身

```
datapath=/home/MCNP/lib/
atomic weight ratios
 1 1.000000
1000 0.999317 1001 0.999167 1002 1.996800 1003 2.990140
2000 3.968217 2003 2.990120 2004 3.968219
3000 6.881312 3006 5.963450 3007 6.955733
```

(原子の存在比テーブル、中略)

```
95000 240.973348 95241 238.986019 95242 239.980121 95243 240.973348
96000 244.947884 96242 239.979418 96243 240.973356 96244 241.966119
96245 242.960245 96246 243.953373 96247 244.947884
96248 245.941272
97000 244.947835 97245 242.961106 97246 243.954859 97247 244.947835
97248 245.941911 97249 246.935298
98000 248.922674 98249 246.935164 98250 247.928114 98251 248.922674
98252 249.916107
```

directory

```
1001.37c .999167 FSXLJ3R2 0 2 1 2422 2048 512 2.5300E-08
1002.37c 1.997000 FSXLJ3R2 0 2 7 6376 2048 512 2.5300E-08
```

2003.37c	2.990120	FSXLJ3R2	0	2	21	3176	2048	512	2.5300E-08
2004.37c	3.968200	FSXLJ3R2	0	2	29	3319	2048	512	2.5300E-08
3006.37c	5.963450	FSXLJ3R2	0	2	37	14049	2048	512	2.5300E-08

(FSXLJ3R2 用テーブル、中略)

99254.37c	251.905000	FSXLJ3R2	0	2	32113	4198	2048	512	2.5300E-08
99255.37c	252.899000	FSXLJ3R2	0	2	32123	4656	2048	512	2.5300E-08
100255.37c	252.899000	FSXLJ3R2	0	2	32134	3971	2048	512	2.5300E-08
1001.00c	.999170	FENDLMC1	0	2	1	3484	2048	512	2.5852E-08
1002.00c	1.996800	FENDLMC1	0	2	9	2704	2048	512	2.5852E-08
1003.00c	2.990140	FENDLMC1	0	2	16	3338	2048	512	2.5852E-08
2003.00c	2.989032	FENDLMC1	0	2	24	2834	2048	512	2.5852E-08

(FENDLMC1 用テーブル、中略)

82208.00c	206.190000	FENDLMC1	0	2	12833	112054	2048	512	2.5852E-08
83209.00c	207.185000	FENDLMC1	0	2	13053	76602	2048	512	2.5852E-08
1000.02p	.999317	mcplib022	0	2	1	623	2048	512	.0000E+00
2000.02p	3.968217	mcplib022	0	2	4	623	2048	512	.0000E+00

(mcplib022 用テーブル、中略)

93000.02p	235.011799	mcplib022	0	2	277	761	2048	512	.0000E+00
94000.02p	241.967559	mcplib022	0	2	280	767	2048	512	.0000E+00

編集後の xsdir ファイルの中身

```
datapath=/home/MCNP/lib/
atomic weight ratios
    1    1.000000
 1000    0.999317    1001    0.999167    1002    1.996800    1003    2.990140
 2000    3.968217    2003    2.990120    2004    3.968219
 3000    6.881312    3006    5.963450    3007    6.955733
```

(原子の存在比テーブル、中略)

95000	240.973348	95241	238.986019	95242	239.980121	95243	240.973348
96000	244.947884	96242	239.979418	96243	240.973356	96244	241.966119
		96245	242.960245	96246	243.953373	96247	244.947884
		96248	245.941272				
97000	244.947835	97245	242.961106	97246	243.954859	97247	244.947835
		97248	245.941911	97249	246.935298		
98000	248.922674	98249	246.935164	98250	247.928114	98251	248.922674

98252 249.916107

directory

```
1001.00c 0.999170 FSXNEW 0 2 1 3484 2048 512 2.5852E-08
1003.00c 2.990140 FSXNEW 0 2 9 3338 2048 512 2.5852E-08
1001.37c .999167 FSXLJ3R2 0 2 1 2422 2048 512 2.5300E-08
1002.37c 1.997000 FSXLJ3R2 0 2 7 6376 2048 512 2.5300E-08
2003.37c 2.990120 FSXLJ3R2 0 2 21 3176 2048 512 2.5300E-08
2004.37c 3.968200 FSXLJ3R2 0 2 29 3319 2048 512 2.5300E-08
3006.37c 5.963450 FSXLJ3R2 0 2 37 14049 2048 512 2.5300E-08
```

(FSXLJ3R2 用テーブル、中略)

```
99254.37c 251.905000 FSXLJ3R2 0 2 32113 4198 2048 512 2.5300E-08
99255.37c 252.899000 FSXLJ3R2 0 2 32123 4656 2048 512 2.5300E-08
100255.37c 252.899000 FSXLJ3R2 0 2 32134 3971 2048 512 2.5300E-08
1001.00c .999170 FENDLMC1 0 2 1 3484 2048 512 2.5852E-08
1002.00c 1.996800 FENDLMC1 0 2 9 2704 2048 512 2.5852E-08
1003.00c 2.990140 FENDLMC1 0 2 16 3338 2048 512 2.5852E-08
2003.00c 2.989032 FENDLMC1 0 2 24 2834 2048 512 2.5852E-08
```

(FENDLMC1 用テーブル、中略)

```
82208.00c 206.190000 FENDLMC1 0 2 12833 112054 2048 512 2.5852E-08
83209.00c 207.185000 FENDLMC1 0 2 13053 76602 2048 512 2.5852E-08
1000.02p .999317 mcplib022 0 2 1 623 2048 512 .0000E+00
2000.02p 3.968217 mcplib022 0 2 4 623 2048 512 .0000E+00
```

(mcplib022 用テーブル、中略)

```
93000.02p 235.011799 mcplib022 0 2 277 761 2048 512 .0000E+00
94000.02p 241.967559 mcplib022 0 2 280 767 2048 512 .0000E+00
```

“directory” の後の任意の場所に、xsdir 情報を追加する。

○ ドシメトリー断面積を用いた反応率計算方法 (fm カード)

Analysis of FNS Iron slab with MCNP4B+JENDL-3.2 1998

(中略)

```

c ****
c * material specification cards *
c ****
c --- Iron
m1 26000.37c 0.083508 12000.37c 0.000727 14000.37c 0.000249
    25055.37c 0.000716
c --- air
m2 7014.37c 3.8810-5   8016.37c 1.0400-5
c --- materials for reaction rate
m3 5010.03y 1.0 $ B-10(n,alpha)
m4 13027.03y 1.0 $ Al-27(n,alpha)
m5 22000.03y 1.0 $ Ti-nat((n,x)Sc-48)
m6 25055.37c 1.0 $ Mn-55(n,gamma)
m7 26056.03y 1.0 $ Fe-56(n,p)
m8 28058.03y 1.0 $ Ni-58(n,2n)      & Ni-58(n,p)
m9 30064.03y 1.0 $ Zn-64(n,p)
m10 40090.03y 1.0 $ Zr-90(n,2n)
m11 41093.03y 1.0 $ Nb-93(n,2n)Nb-92m
m12 49115.03y 1.0 $ In-115(n,n')In-115m
m13 79197.03y 1.0 $ Au-197(n,gamma)
m14 92235.03y 1.0 $ U-235(n,fission)
c ****
c * tally specification cards *
c ****
fc02 ---- neutron reaction rate      surface r=4cm
f02:n 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
    13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
    23 24 25 26 27 28 29 30 31
fs02 -41
fq02 s e f m
e02 16.0
fm02 (1)          (1 1 1)  (1 1 2)  (1 1 102)
        (1 3 107)  (1 3 207)  (1 4 107)  (1 5 212)  (1 6 102)
        (1 7 103)  (1 8 16)   (1 8 103)  (1 9 103)  (1 10 16)
        (1 11 16)  (1 12 51)  (1 13 102) (1 14 18)

```

(後略)

fm カード : MCNP-4C マニュアル Chapter 3-87

(規格化係数 物質番号 反応 MT 番号)

(1 3 107) $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反応
 (1 13 102) $^{197}\text{Au}(\text{n},\gamma)^{198}\text{Au}$ 反応

5. MCNP-4B のパソコンへのインストール実習

This is a blank page.

MCNP-4B のパソコンへのインストール実習

谷田部茂・久米悦雄

日本原子力研究所 計算科学技術推進センター 情報システム管理課

yatabe@consult.tokai.jaeri.go.jp

kume@brian.tokai.jaeri.go.jp

桜井淳

日本原子力研究所 東海研究所 燃料サイクル安全工学部 臨界安全研究室

sakurai@flute.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

本節では、MCNP-4B のパソコンへのインストール実習で実際に使用したテキストについて、以下に紹介する。

処理性能の優れたワークステーションやパソコンの急速な普及にともない、計算科学分野におけるモンテカルロ計算の拡大が著しい。日本原子力学会「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会では、モンテカルロ計算を計算手法の標準的手法にすべく、積極的な委員会活動を行ってきた。その活動の中から次世代を担う人材を養成する必要性が提案され、今年度から毎年夏、同専門委員会主催の「モンテカルロ計算夏季セミナー」を開催することにした。本セミナーの特徴は、モンテカルロ基礎論の講義のみならず、各自持参のノート型パソコンによるモンテカルロコード及び付属ライブラリのインストール、原研の研究者が計算に利用した入力例による計算実行をとおして、計算感覚を習得することができる。基礎知識がなくてもインストールや計算実行が誰にでも簡単にこなせるように、本マニュアルを作成した。作業を進める上で有用な内容構成になっており、ぜひ活用していただきたい。

2. MCNP4B2 のインストール

2000年夏季セミナー用に配布されたCD-ROM（以下、単にCD-ROMと略）から、実習環境をPCにインストールするためには、手動で該当ファイルをコピーするか、あるいはインストーラを利用しても、該当ファイルをPCにコピーする必要があります。

今回作成したCD-ROMは、PCに挿入されると自動実行用のバッチファイルが起動されるようになっており、ほとんどの環境では、このインストーラを利用してファイルをコピーすることができます。本節では、先ずこのインストーラを利用して実習環境をコピーする方法¹を解説した後に、手動で実習環境をコピーする方法を説明します。

2.1 インストーラによるMCNPのインストール

CD-ROMをPCに挿入した場合、自動的に画面が切り替わり全画面でインストールプログラムが起動します。環境によっては、インストールプログラムが自動的に起動しない場合があります。その場合は、タスクバーの[スタート]から[ファイル名を指定して実行]を選択し、CD-ROMドライブのsetupdos.batを指定して実行して下さい。例えば、CD-ROMドライブがD:の場合は以下のように

¹ インストール時にコピーするファイルについては、「2.2 手動で任意のディレクトリにインストールを行う場合」に記載します。

なります。

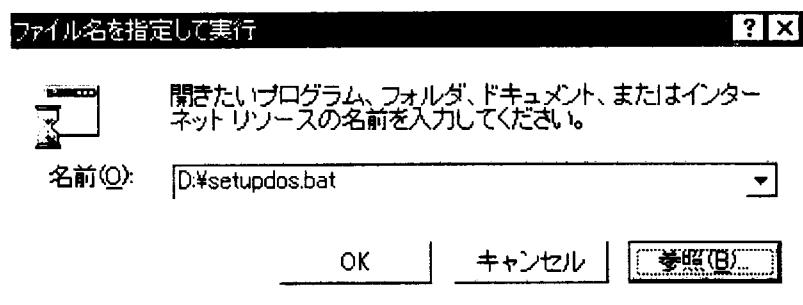
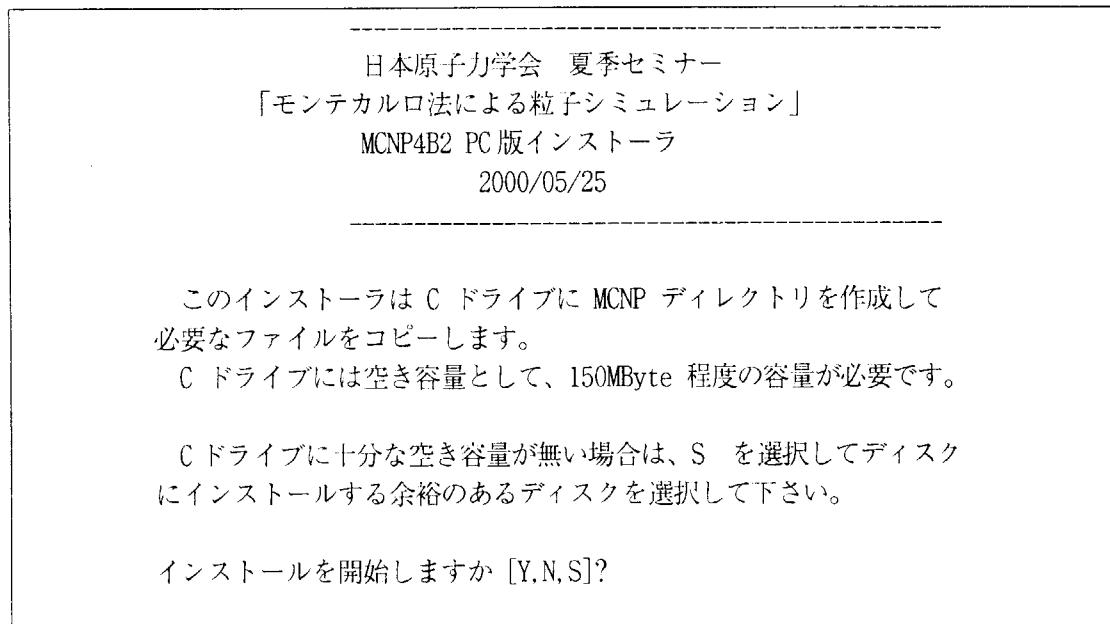


図 1 プログラムの実行

`setupdos.bat` が起動すると、画面が MS-DOS モードの全画面表示に切り替わり以下のようない画面となります。



標準的なインストール(C ドライブの ¥MCNP ディレクトリへのインストール)では、ここで Y キーを押してインストールを開始します。Y キーを押して標準的なインストールを開始した場合は、「2.1.3 インストールの開始」へ進んで下さい。

C ドライブに空き領域が無いなどの理由(事前に各ドライブの空き容量を把握しておいて下さい。また、インストーラは、インストール先として指定されたドライブに ¥MCNP と言うディレクトリを作成し²、そのディレクトリにファイルを上書きコピーしますので、必要があればインストール前にバックアップを行って下さい)で Y キー以外の選択を行う場合には、以下の項目を参照して下さい。

- ・ S キーの場合 「2.1.1 デフォルト・ドライブ以外へのインストール」
- ・ N キーの場合 「2.1.2 インストールの中止」

² MCNP ディレクトリが事前に作成されている場合は、内容を確認し必要があればバックアップを行って下さい。

これ以外（例えば別ドライブの、別なディレクトリへインストールするなど）のインストールを行う場合には、「2.2 手動で任意のディレクトリにインストールを行う場合」を参照して下さい。

2.1.1 デフォルト・ドライブ以外へのインストール

インストーラに用意されている、デフォルト以外のドライブを選択するには、「インストールを開始しますか？」という問い合わせに対してSキーを押します。キーを押すと以下のプロンプトが表示されます。

どのディスクにインストールしますか[C,D,E,F,G,H,I]?

本インストーラでは、C ドライブから I ドライブまでが選択の範囲となっていますので、該当するドライブ名を入力して下さい。例えば I ドライブにインストールするには I キーを押します。

I: がインストール先のドライブとして選択されました。

ドライブを選択すると、選択したドライブのメッセージが表示されます。このあと、再度

インストールを開始しますか[Y,N,S]?

と問い合わせがあるので、このままでよければYキーを押してインストールを開始します。

2.1.2 インストールの中止

「インストールを開始しますか」という問い合わせに対して、N キーを押すとインストールが中止されます。別のディレクトリなどにインストールを行う場合には「2.2 手動で任意のディレクトリにインストールを行う場合」を参照して下さい。

2.1.3 インストールの開始

インストールを開始すると以下のようなメッセージを表示します。

ただいま、ファイルを I:\MCNP へコピーしています。
ファイルのコピー中は、DOS プロンプトからフォーカスを外さないで下さい。コピー作業は最長 5 分程度かかります(環境による)。

ファイルのコピー作業が終了すると、「コピー作業が終了しました」と言うメッセージが表示され

ますので、ENTER キーを押してインストール作業を終了して下さい。

このインストーラは、起動されると DOS プロンプトの全画面モードで起動されるように設定されています。しかし、利用しているシステムの設定によっては DOS プロンプトの全画面表示ではなく、ウインドウでの動作になる場合があります。その場合は、インストーラが動作しているウインドウからフォーカス(標準の画面デザインで、ウインドウ上部が青くなっている状態：次頁図2参照)を外さないで下さい。 フォーカスが外れると、動作が途中で止まってしまいコピー作業が終了しません。

フォーカスのあるウインドウは、ウインドウの上部が青くなっています（標準状態）。

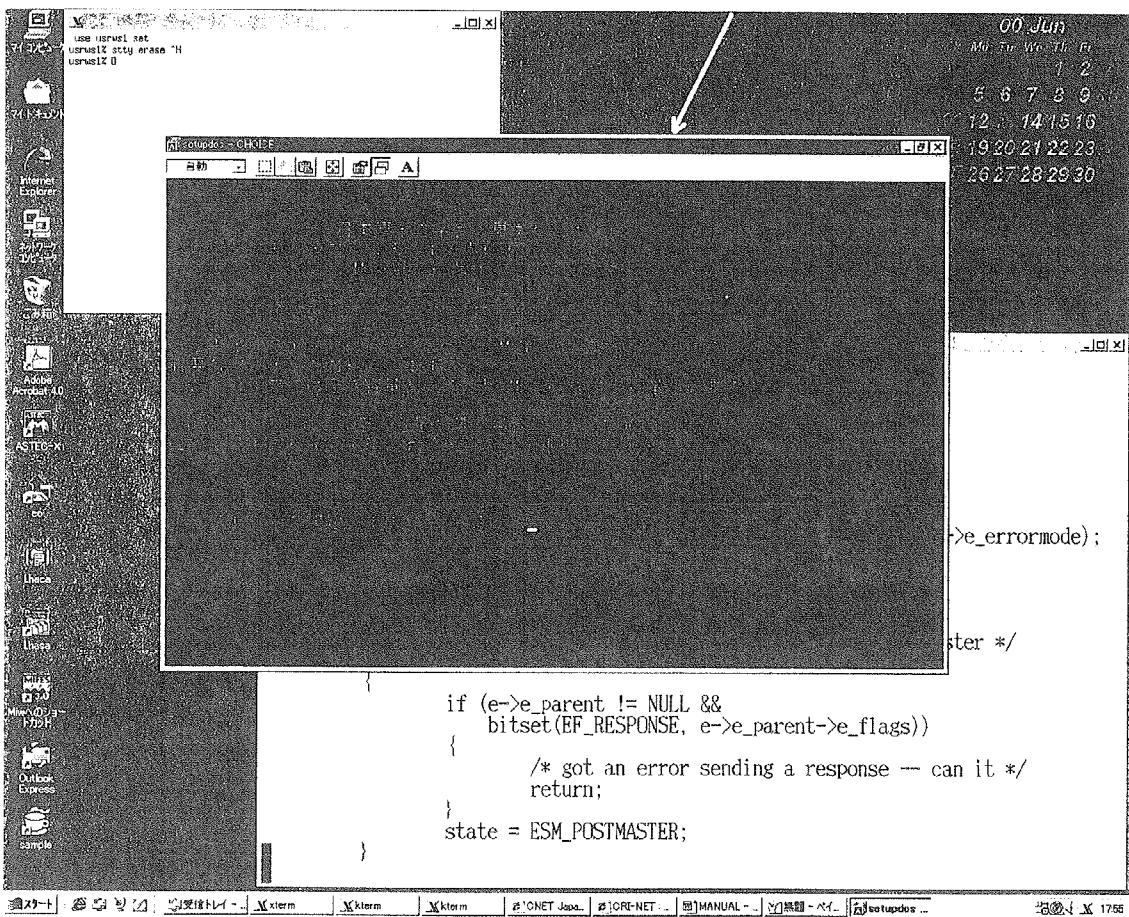


図 2 ウィンドウのフォーカス状態

2.2 手動で任意のディレクトリにインストールを行う場合

ここでは、MCNP4B2をCD-ROMからユーザの任意のディレクトリにコピーする場合の説明をします。なお、今回の実習で必要となるファイルは以下の通りです。

実行ファイルとライブラリ

Mcnp¥bin¥mcnp.exe	MCNP 実行ファイル
Mcnp¥code1ib¥xsdir2	ディレクトリファイル
Mcnp¥code1ib¥Fsxj32a2	バイナリ版断面積ライブラリ
Mcnp¥code1ib¥Fsxdos-2	〃
Mcnp¥code1ib¥Mcplib-2	〃
Mcnp¥code1ib¥Tmccs-2	〃
Mcnp¥code1ib¥El-2	〃

実習に使用する入力データ

Mcnp¥Input_data¥C_1	FNS 黒鉛体系漏洩中性子スペクトル測定実験
Mcnp¥Input_data¥Cu_1	OKTAVIAN 銅球からの漏洩中性子スペクトル測定実験
Mcnp¥Input_data¥Fe_1	FNS 鉄体系クリーンベンチマーク実験
Mcnp¥Input_data¥Fp18	TCA ウラン炉心
Mcnp¥Input_data¥Sig1	OKTAVIAN シリコン球からの漏洩 γ 線スペクトル測定実験
Mcnp¥Input_data¥Sin1	Sig1 におけるターゲット γ 線の計算

例としてDドライブのProgram Files フォルダ³の下にMCNP フォルダを作成して実習に使用するファイルをコピーする方法を解説します。先ず、タスクバーの[スタート]の中の[プログラムファイル]から、エクスプローラを起動します。

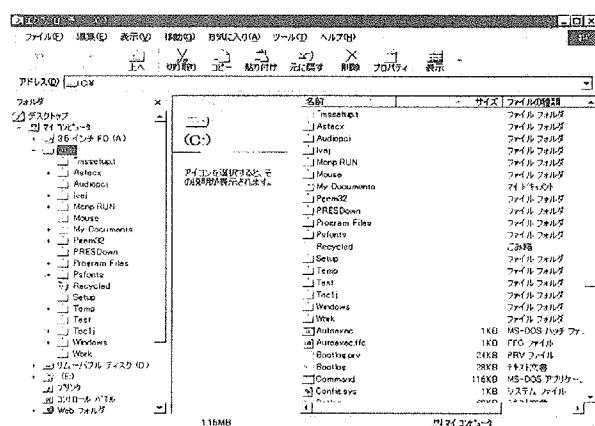


図 3 エクスプローラ

次に、「Program Files」中にMCNPをコピーするフォルダを作成します。フォルダを作成するには、

エクスプローラが起動したら(左図)、エクスプローラ・ウインドウの中の左側にある「フォルダ」の中の「Program files」の部分をダブルクリックします。すると、「Program Files」フォルダが選択されて、中のディレクトリ及びファイルなどが展開された形で表示されます。

もし、表示されるフォルダやファイルの数が多くて、「Program Files」フォルダが表示されていない場合は、「フォルダ」右側のスライドバーを動かして「Program Files」フォルダを表示させます。

³ DOS ではディレクトリ、Windows GUI ではフォルダと呼んでいますが両方とも同じ物です。

「Program Files」フォルダが開いている状態(図4：次印部分参照) フォルダマークが開いた状態で、フォルダの中身が展開されていることで[ファイル]の[新規作成]から[フォルダ]を選択します。

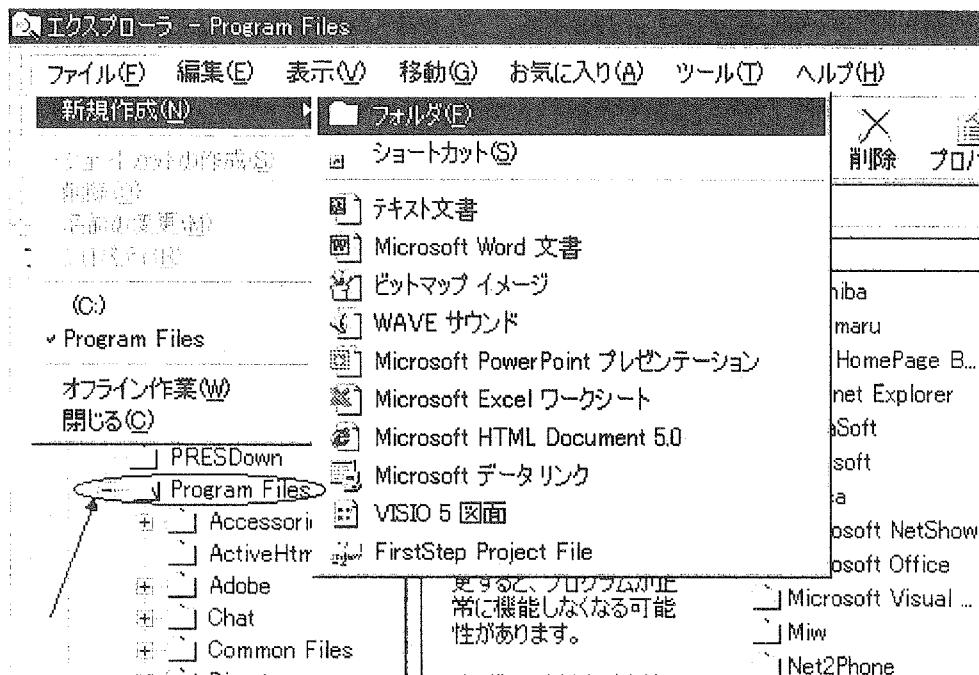


図4 フォルダの作成

フォルダが作成されると、エクスプローラ右側の最下行に、「新しいフォルダ」と言う名称でフォルダが作成されます⁴。初期状態での「新しいフォルダ」は、フォルダ名の部分が四角で囲まれ、フォルダ名が青く反転表示されています。この状態で、フォルダの名称を変更することができます。

最下行が隠れている場合、右側のスライドバーを利用して最下行を表示します。このとき、「新しいフォルダ」が作成されていて、名称部分が四角く囲まれて反転表示されていない場合は、マウスで「新しいフォルダ」を選択し(青く反転表示される)、その状態でマウスを右クリックしてメニューを出し、そのメニューの中の「名前の変更」を選択することで、四角く囲まれた青反転状態にすることができます。



図5 新規のフォルダ

この状態で、バックスペースキーを押すと「新しいフォルダ」の文字が削除されますので、その

⁴ 「新しいフォルダ」が既にある場合は、「新しいフォルダ (2)」等の名称で作成されます。

部分にキーボードから「MCNP」と入力し、フォルダの名称を変更します。

受け側のフォルダの作成が終了したら、CD-ROM からファイルを選択してコピーします。

コピーするファイルを指定するには、「エクスプローラ」左側の「フォルダ」右側にあるスライドバーを操作して CD-ROM の部分を表示させます(この時、MCNP4B2 CD-ROM が装置にセットされていること)。つぎに、「フォルダ」中の CD-ROM アイコンをマウスでダブルクリックし展開します。展開すると MCNP フォルダが表示されますので、このフォルダのアイコンもダブルクリックします。すると、「bin」「codelib」「Conseq」「Input_data」の 4 つのフォルダが表示されます。この中から、前で「今回の実習で必要となるファイル」として指定したファイルを、先に作成した「Program Files」の「MCNP」フォルダにコピーします。⁵

ここでは、例として codelib 中のファイルを先に作成したフォルダにコピーする方法を説明します。他のファイルをコピーする場合も手順は同じですので割愛します。

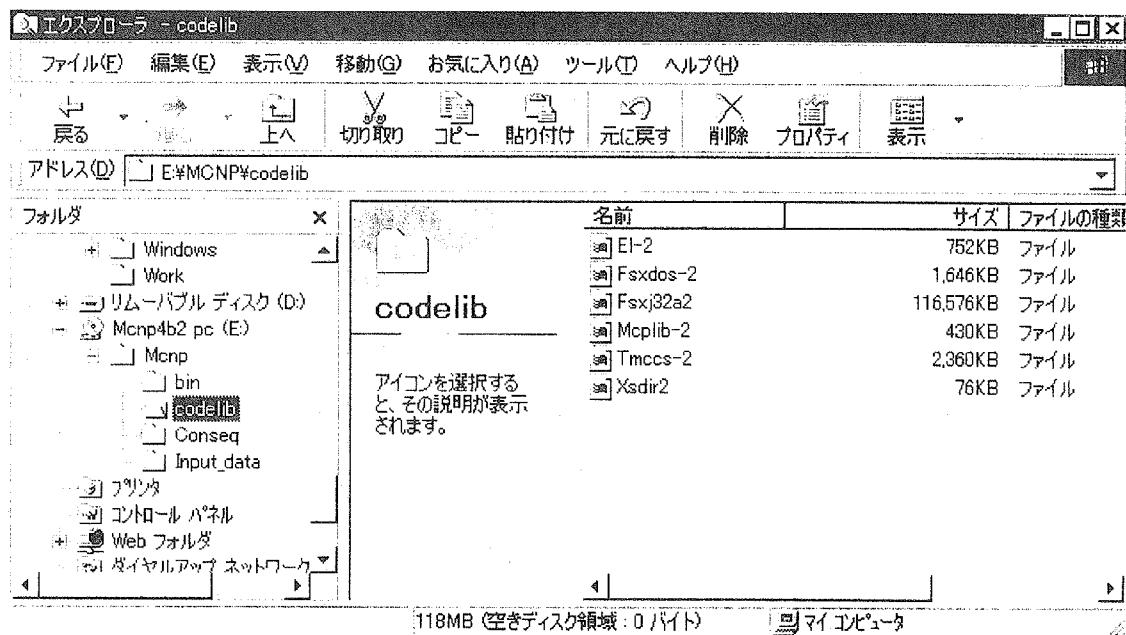


図 6 codelib フォルダ

codelib フォルダまでの選択が終わると、エクスプローラは上図のようになります。ここで、コピーするファイルを選択します。

コピー対象の 6 ファイルを一度に選択するには、先頭の EL-2 をクリックして、ファイル名を反転させます。次に shift キーを押しながら最後の Xsdir2 をクリックします。すると 6 ファイル全部が青く反転し選択されます。この状態で、[編集] の [コピー] を選択します(次頁図 7)。この操作が終了したら、「Program Files」の「MCNP」フォルダを選択して表示させた後、エクスプローラ中の右側で、マウスの右ボタンをクリックしメニューを表示させます。そのメニュー中の[貼り付け]を選択することで、CD-ROM 中で選択したファイルを「Program Files」フォルダの「MCNP」フォルダへコピーすることが出来ます(次頁図 8)。

同様の手順で、指定したそれぞれのファイルをコピーして下さい。

⁵ 前に説明した “Mcnp\codelib\xsdir2” は、CD-ROM ドライブの MCNP フォルダのサブフォルダである codelib フォルダにある xsdir2 ファイルということになります。

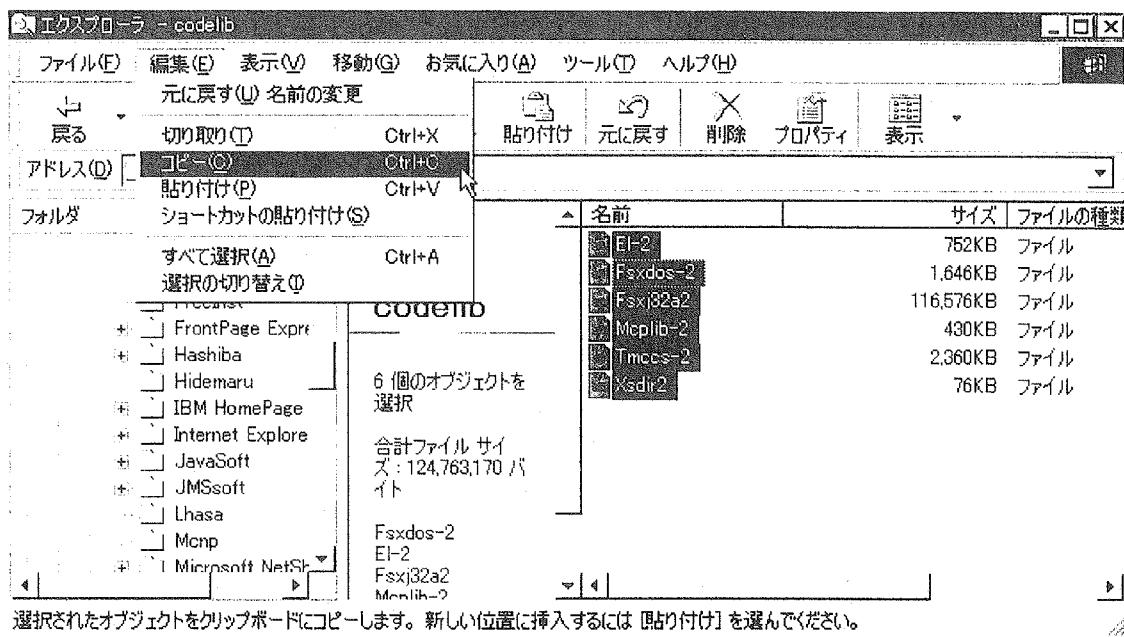


図 7 ファイルの選択とコピー

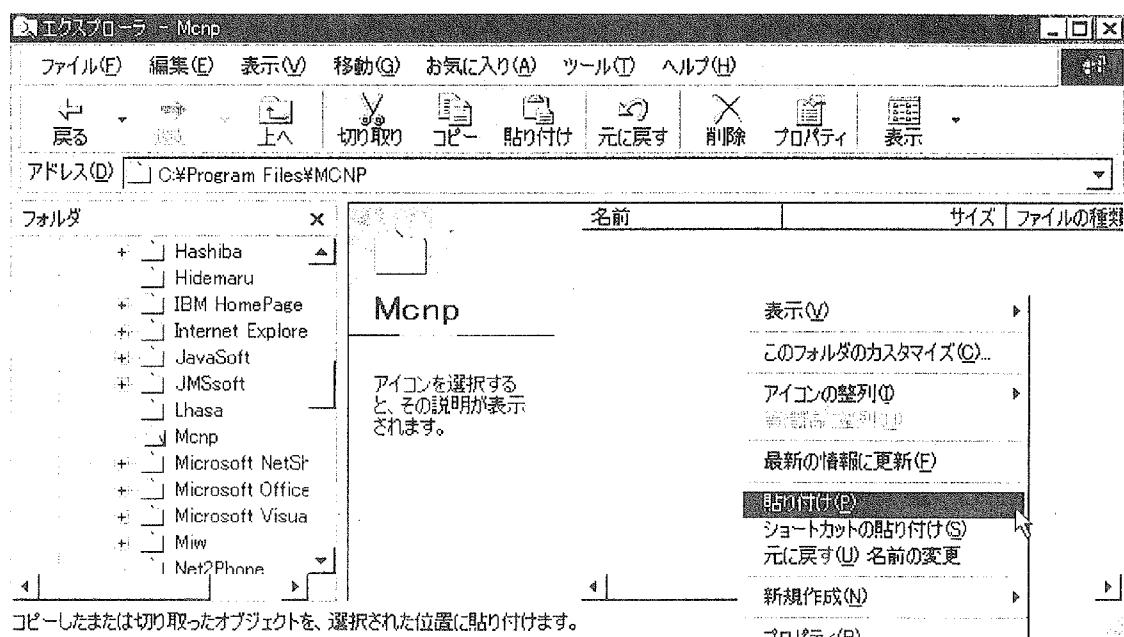


図 8 ファイルの貼り付け

3. MCNP の実行

3.1 MS-DOS プロンプトの起動とディレクトリの移動

今回使用する MCNP4B2 は DOS アプリケーションなので、GUI インターフェースを備えていません。そのため、MS-DOS プロンプト上で操作する必要があります。

MS-DOS プロンプトを起動するには、[タスクバー]の[スタート]の[プログラム]の中から。[MS-DOS プロンプト]を選択することで起動できます。WindowsNT では、同様の機能を持ったプロンプトが[タスクバー]の[スタート]の中の[コマンドプロンプト]として登録されています。

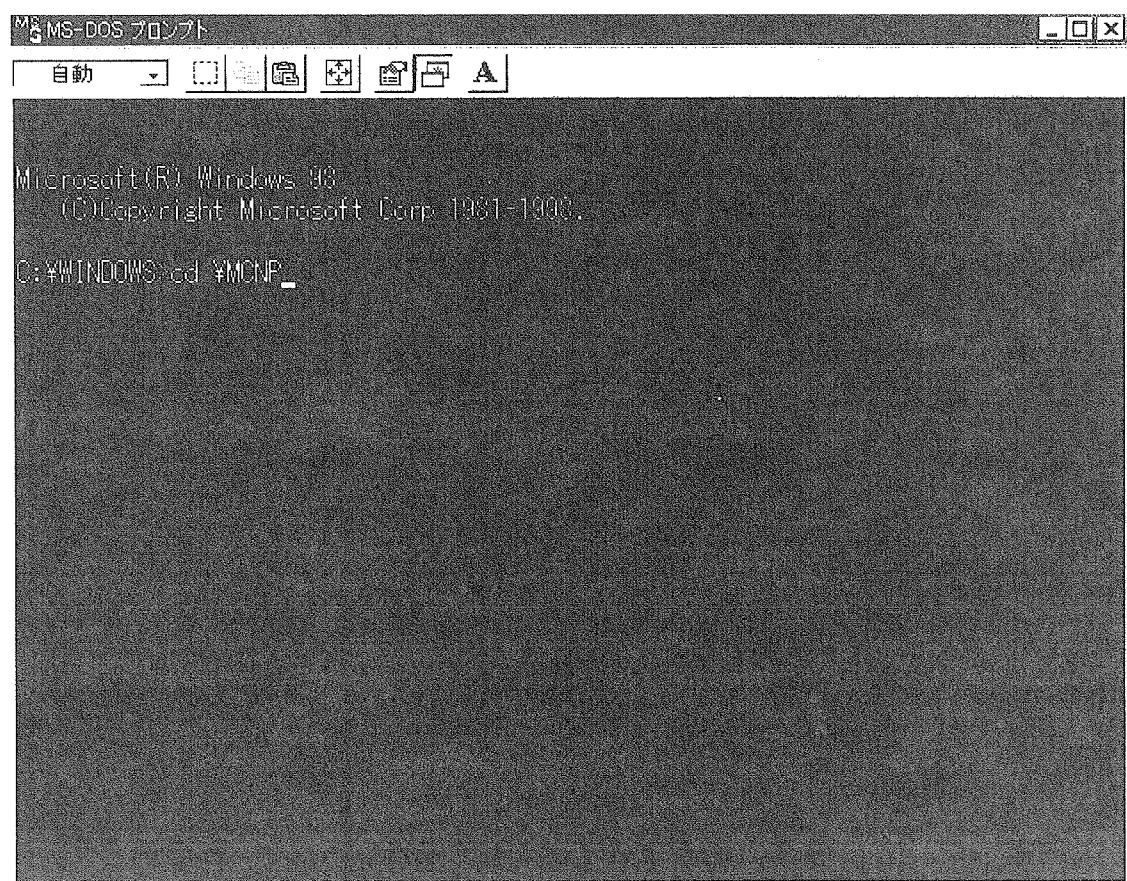


図 9 MS-DOS プロンプト

MS-DOS プロンプト(以下、単にプロンプトと略)が起動されたら、cd コマンドを使用して、MCNP のインストールされているディレクトリへ移動します。インストーラを利用して初期設定でインストールを行った場合、MCNP をインストールしたディレクトリは C:\MCNP となっているので、プロンプトに対して以下のように入力します(プロンプト起動時のディレクトリは ¥Windows となっています)。

```
C:\WINDOWS> cd \MCNP
```

なお、インストール時に初期設定以外のディレクトリにインストールを行った場合には、インストールしたディレクトリにカレントディレクトリを変更して下さい。また、インストール時にドライブ番号を初期設定以外に変更してインストールを行っている場合には、\$MCNPに移動する前にカレントドライブを変更して下さい。カレントドライブの変更方法は、プロンプトに対して、<ドライブ名>: とします。例えば、インストールドライブを I ドライブに変更していたとすると、コマンドは以下のようになります。

```
C:\WINDOWS> I:
```

ディレクトリ(及びドライブ)が適切に変更できれば、MCNP を実行することができます。

3.2 MCNP の実行

MCNP で、例えば C_1 の入力データを計算させるには、プロンプトに対して以下のように入力します (入力ファイル名、ディレクトリファイル名は、大文字で指定して下さい)。

```
C:\MCNP> mcnp name=C_1 xsdir=XSDIR2
```

この場合、入力ファイルである C_1 を name に指定し、断面積ライブラリ(FSXJ32A2)のディレクトリファイルである XSDIR2 を xsdir に指定します。なお今回収録した入力データで使用する、mcnp に対するオプションは、name 及び xsdir のみです。

mcnp の実行時の注意点ですが、プロンプトをウインドウとして実行している場合には、計算実行中はプロンプトのウインドウからフォーカスを外さないで下さい。そのウインドウにフォーカスが戻るまで、計算が途中で中断されてしまいます。

こう言った状態を回避する方法の一つに、プロンプトを全画面(プロンプトのみの画面)として実行する方法があげられます。この方法を利用するには、プロンプトにフォーカスがある状態で Alt キーを押しながら、Enter キーを押します。一瞬、画面が消えますが、直ぐに全画面がプロンプトの状態に移行します。この状態から Windows に戻すには、再度 Alt キーを押しながら Enter キーを押して下さい。

3.3 計算終了後に出来されるファイル

今回収録した入力ファイルを MCNP で計算させると、計算終了後に 4 種類のファイルが作成されます(入力ファイルの末尾に o, r, m, s がついたもの)。但し、今回収録した入力データでは、o ファイルと r ファイルは必ず作成されますが、入力データ中に、作成の指定が無いデータでは、m ファイル及び、s ファイルは作成されません。なお、これらのファイルは以下ののような意味を持っています。

- o (計算結果ファイル)
- r (リスタートファイル:バイナリ)
- m (tally 出力ファイル)
- s (tecode source distribution:バイナリ)

今回の実習では、o ファイルを参照するため、それ以外の出力ファイルは、入力データの計算終了後、削除してしまっても差し支えありません。

例えば、C_1 を計算した場合 C_1o, C_1r の各ファイルが出来ますが、実行結果は C_1o とな

りますので、このファイルを参照して下さい。

なお、同じ入力データを再計算する場合は、出力されたファイルを全て削除するか、ファイル名を変更しないと、MCNPが異常終了し再計算されませんので注意が必要です。

3.4 MCNPの実行時オプションについて

MCNP DOS 版のオプションは、前述した name, xsdir 以外にもいくつかのオプションが存在します。ここでは、MCNP 実行時の便宜を図るためのオプションとして、特に、同じ入力データを用いて再計算させるときに古い出力ファイルを消去せずに済むように、出力ファイルを指定する実行時オプションを以下に記します。

- | | |
|-----------------|-----------|
| ● o ファイルを指定する場合 | o=<ファイル名> |
| ● r ファイルを指定する場合 | r=<ファイル名> |
| ● m ファイルを指定する場合 | m=<ファイル名> |
| ● s ファイルを指定する場合 | s=<ファイル名> |

例えば、C_1 の計算を実行した場合、出力されるファイルは o 及び r ファイルなので(出力されるファイルについては下表を参照)前者を clofil 後者を clrfil と言うファイル名で出力する場合の実行方法は以下のようになります。

```
C:\MCNP> mcnp name=C_1 o=clofil r=clrfil xsdir=XSDIR2
```

以下に各入力データを実行した場合に出力されるファイルの一覧を示します。

表 1 入力データ計算時に作成されるファイル

入力データ名	説明	出力ファイル
C_1	FNS 黒鉛体系漏洩中性子スペクトル測定実験	o, r
Cu_1	OKTAVIAN 銅球からの漏洩中性子スペクトル測定実験	o, r
Fe_1	FNS 鉄体系クリーンベンチマーク実験	o, r, m
Fp18	TCA ウラン炉心	o, r, m, s
Sig1	OKTAVIAN シリコン球からの漏洩 γ 腺スペクトル測定実験	o, r, m
Sin1	Sig1 におけるターゲット γ 線の計算	o, r, m

3.5 ファイル名設定時の制限

MCNP 4B2 で使用するファイルにファイル名を設定する場合には条件があり、また DOS のファイル名の制限もあるので、ここで簡単に説明します。先ず、MCNPの入出力ファイル名の長さの制限ですが、最大8文字となります。 DOS であれば、拡張子を利用する場合がありますが、拡張子を使用した場合、その拡張子の “.” も 1 文字とカウントします。また、DOS では拡張子が 3 文字までと決められていますので、拡張子を利用する場合のファイル名の最大は ファイル名 4 文字、拡張子 3 文字となります。なお、拡張子の文字数を減らすことによって、ファイル名を増やすことができます (例: output.o 等)。

4. 計算結果ファイルの確認・入力ファイルの修正

本章は、実行結果ファイルを閲覧するためにWindows上のツール(エディタなど)を使う方法を簡単に紹介します。そのため、このようなWindows上のツールの操作に慣れている場合には本章を読み飛ばして頂いても、差し支えありません。

MCNPの入力データやあるいは結果ファイルでバイナリ形式以外のものは、プロンプト上のmoreコマンドを利用して簡単に閲覧することが出来ます。閲覧だけではなく、修正も行う場合はエディターを利用してファイルを編集する必要があります。ここでは、プロンプト上でmoreコマンドを利用した結果ファイルの閲覧方法を紹介した後、Windowsに標準で付属してくるテキストエディターであるワードパッドの簡単な使用方法を紹介します。なお、エディターに関してはここで紹介するものにこだわる必要はありませんので、何か使い慣れたエディターがあればそちらを利用して下さい。

4.1 計算結果ファイルの確認

計算結果やインプットデータをプロンプト上で確認する最も簡単な方法は、moreコマンドを利用する方法です。moreコマンドを利用するには、コマンドに続けてファイル名を指定します。例えば、入力データC_1をプロンプト上で閲覧するには次のようにします。

```
C:\MCNP> more C_1
```

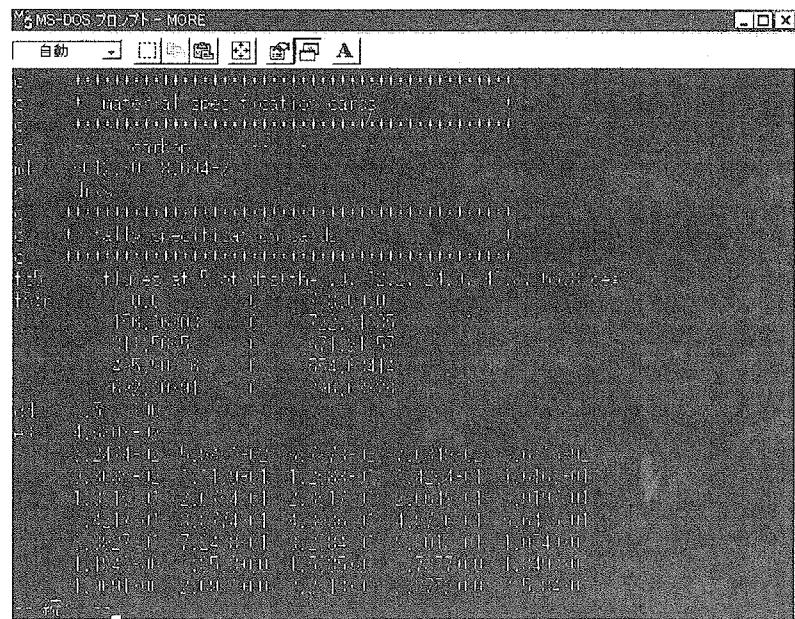


図 10 moreコマンドを利用したファイルの閲覧

moreコマンドは、1ページ分の出力が画面上に表示される毎に“―― 続く――”と言うメッセージを表示して停止します。このメッセージが表示されたら、Enterキーを押下すると、次の

1ページ分が表示されます。途中で終了させるには q キーを押します。なお、一行が折り返されて見づらい場合には、エディターを利用して閲覧して下さい。

4.2 入力ファイルの修正

ファイルを編集するには、エディターを利用します。本稿では、エディターとして、Windows に標準でインストールされているワードパッドを利用した方法を紹介します(出力されたファイルサイズが大きいと、メモ帳では編集ができないため)。

先ず、ワードパッドは Windows アプリケーションであるため、Alt+Enter を利用してプロンプトを全画面で利用している場合は、再度 Alt+Enter で Windows 画面に切り替えます。

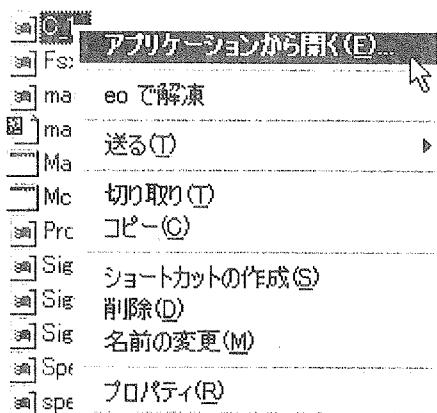


図 11 ファイルの修正 1

1. 入力ファイルを編集するには、エクスプローラからファイルを選択します(ここでは、C:\)。
2. ファイルを選択したら、マウスの右ボタンを押し、メニューを表示させます(図 11)。
3. メニューの中の[アプリケーションから開く]を選択して下さい。
4. [アプリケーションから開く]を選択すると図 12 の画面が表示されます。
5. 「ファイルを開くアプリケーションの選択」のスクロールバーを動かして、下の方にある[WORDPAD]を選択して[OK]ボタンを押して下さい。

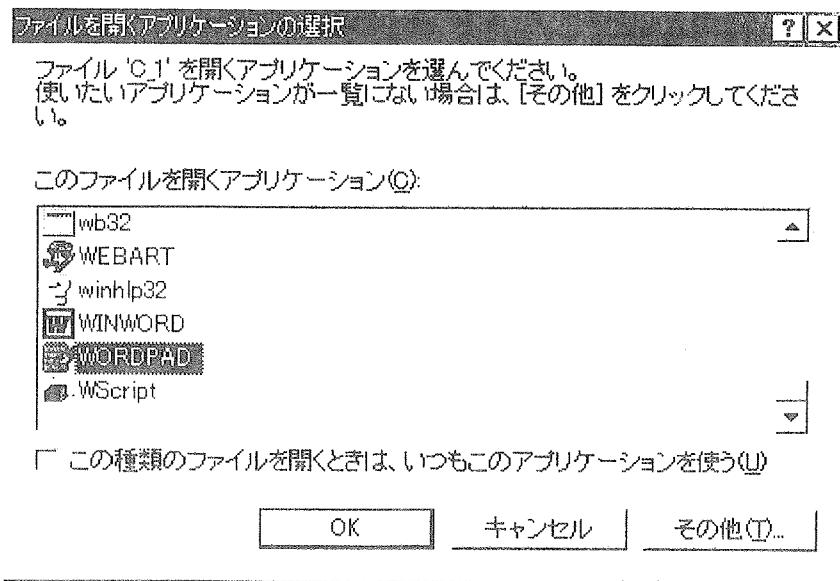


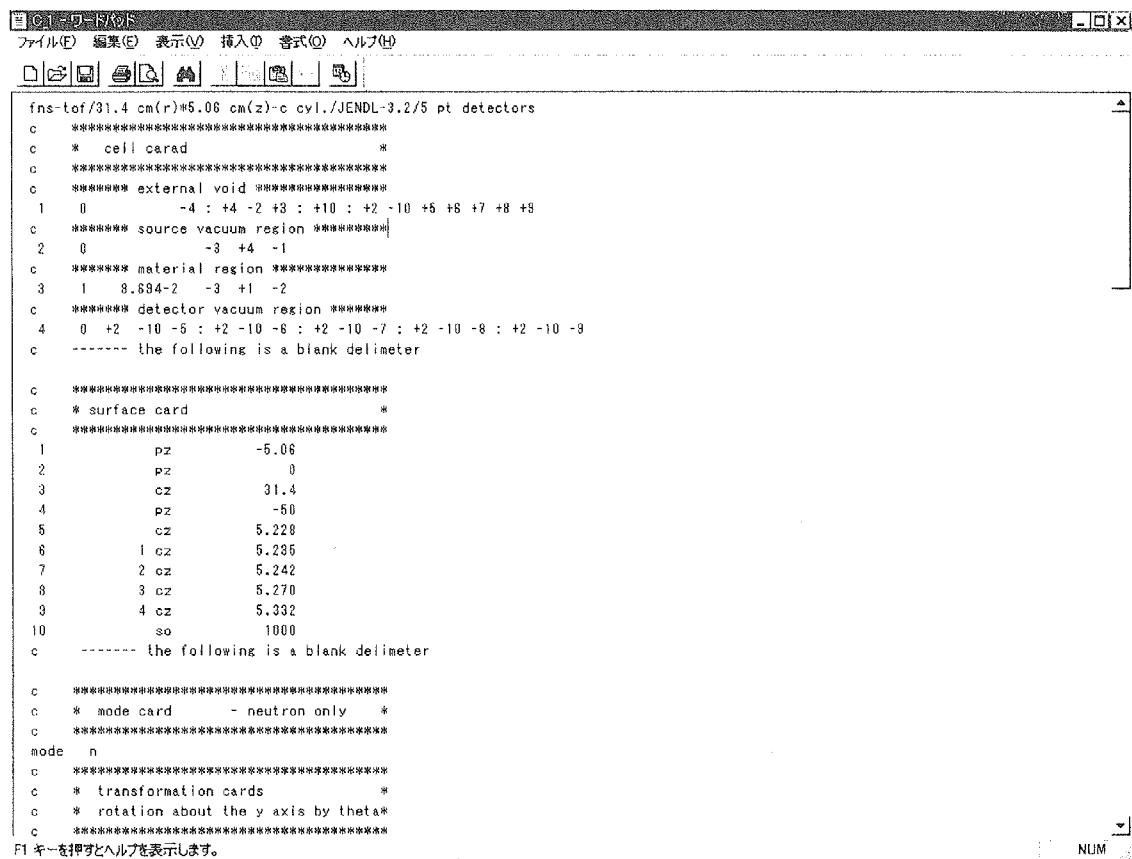
図 12 ファイルの編集 2

なお、図 12 で、"この種類のファイルを開くときは、いつもこのアプリケーションを使う"と言

うメッセージ部分のチェックボックスにチェックがついている場合には、そのチェックを(マウスクリックをして)外して下さい。

チェックを付けたままワードパッドを起動してしまうと“関連づけ”が行われてしまい、関係の無い他のファイルでもワードパッドが起動してしまうことがあります。

6. 選択されたファイルが読み込まれた状態でワードパッドが起動します。



```

fns-tof/31.4 cm(r)*5.06 cm(z)-c cyl./JENDL-3.2/5 pt detectors
c ****
c * cell carad *
c ****
c ***** external void ****
1 0 -4 : +4 -2 +3 : +10 : +2 -10 +5 +6 +7 +8 +9
c ***** source vacuum region ****
2 0 -3 +4 -1
c ***** material region ****
3 1 8.694-2 -3 +1 -2
c ***** detector vacuum region ****
4 0 +2 -10 -6 : +2 -10 -8 : +2 -10 -7 : +2 -10 -8 : +2 -10 -9
c ----- the following is a blank delimiter

c ****
c * surface card *
c ****
1 P2 -5.06
2 P2 0
3 cz 31.4
4 P2 -50
5 cz 5.229
6 1 cz 5.235
7 2 cz 5.242
8 3 cz 5.270
9 4 cz 5.302
10 so 1000
c ----- the following is a blank delimiter

c ****
c * mode card - neutron only *
c ****
mode n
c ****
c * transformation cards *
c * rotation about the y axis by theta*
c ****

```

図 13 ワードパッド

ワードパッド内で、テキストを自由に編集することができます。ワードパッドは、Windows アプリケーションなので、Windows のアプリケーションを操作したことのあるユーザであれば比較的簡単に操作を行うことが出来ます。

MCNP 4B2 の出力は、連続帳票（1 ライン約 137 文字）を意図して作成されているため、出力個所によっては、ワードパッドのデフォルトの画面では表示しきれません。その場合は、ウインドウ右上の[最大化ボタン]を押します（次頁図 14 参照）。ウインドウを最大化状態から元に戻すには再度[最大化ボタン]（「元のサイズに戻す」に変わっています：次頁図 15 参照）を押します。ここで、[最小化ボタン]を押すと、ウインドウを閉じて[タスクバー]に格納することができます（再表示するには、タスクバーの該当のアイコンをマウスでクリックする）。また、終了ボタンを押すとウインドウを終了することが出来ます（終了動作に関しては後述）。

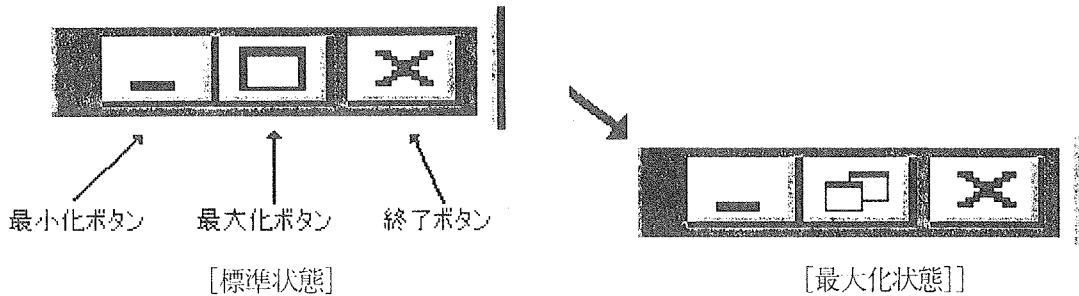


図 14 ウィンドウの最大化と最小化

最大化状態でも MCNP4B2 の出力が表示できない場合は、ウィンドウ下部のスクロールバーを操作することによってウィンドウの右側に隠れている部分を簡単に表示することができます(この操作は、右端が隠れている行でカーソルの “→” キーを押すことでも可能です)。

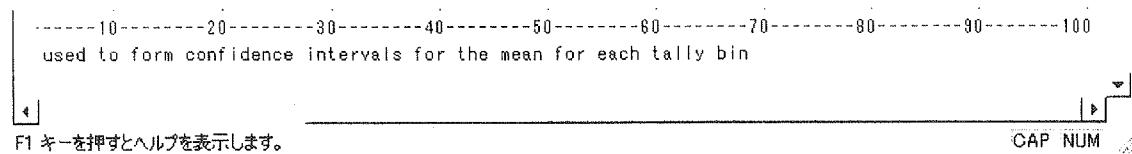


図 15 ツールバーを右に移動させた場合の例

以下に、ワードパッドで使用するその他の命令のいくつかを説明します。ただし、ここで説明するワードパッドの操作方法は、以下の基本的な操作方法のみとします。

- 4.2.1 ワードパッドの起動方法（ファイルを最初から読み込ませずに起動する方法）
- 4.2.2 ワードパットへのファイルの読み込み
- 4.2.3 ワードパッドの終了方法とファイルのセーブ
- 4.2.4 ワードパッド内文書の検索方法
- 4.2.5 編集の取り消し

4.2.1 ワードパッドの起動方法

ワードパッドは、[タスクバー]の[スタート]の[プログラム]の[アクセサリ]の中から[ワードパッド]を選択することで起動できます。

4.2.2 ワードパッドへのファイルの読み込み

ワードパッドへのファイルの読み込みは、[ファイル]から[開く]を選択して行います(図 16 参照)。

選択すると、「開く」のサブウィンドウ(図 17)が出力されるので、そのウィンドウでファイルを指定してワードパッド内に読み込みます。このとき、次頁の条件がありますので、確認して下さい。

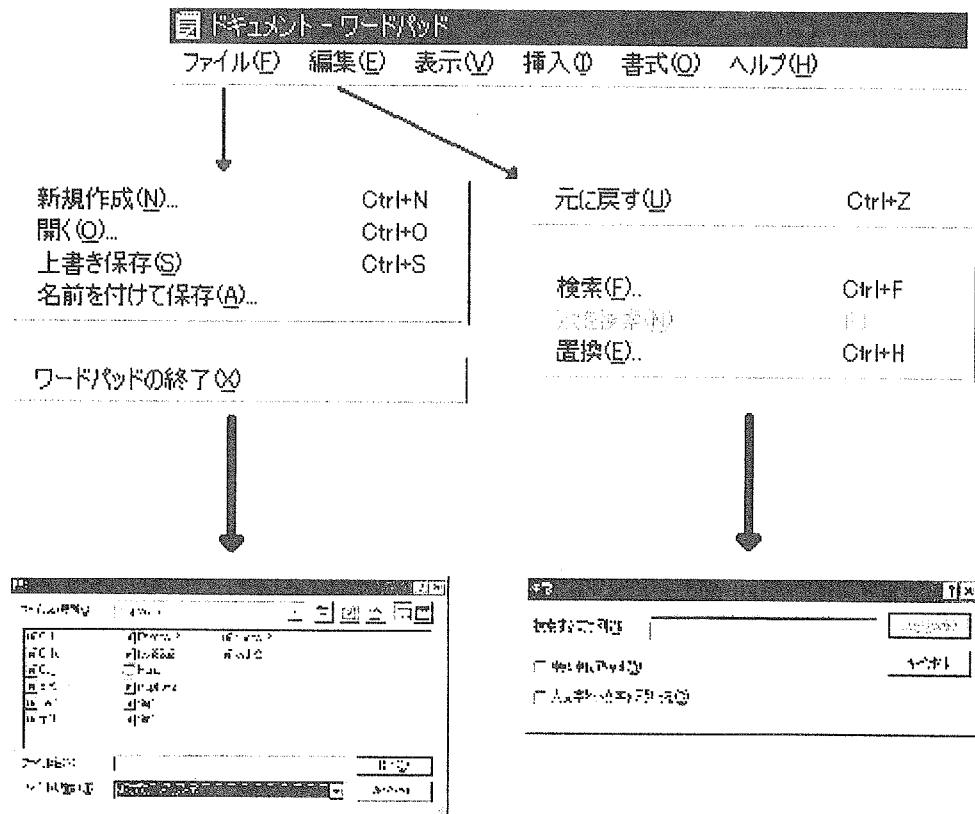


図 16 ワードパッドのコマンド

● ファイルの場所

“ファイルの場所”項目で、MCNPをインストールしたディスクの[MCNP]ディレクトリとなっているかどうか確認して下さい。もし、ディレクトリが異なっていた場合には編集対象ファイルが存在するディレクトリに変更して下さい。変更方法は、“ファイルの場所”項目の右側にある▼をマウスでクリックし、[ドライブ]→[ディレクトリ]の順に選択します。

● ファイルの種類

“ファイルの種類”は「すべてのファイル(*.*）」として下さい。基本的に、MCNPの出力ファイルは拡張子をもたないので、この状態にしないと出力ファイルを表示させることはできません。“ファイルの種類”的変更方法は、“ファイルの種類”項目の右側にある▼をマウスでクリックし該当の項目をマウスで選択します。もし、「すべてのファイル(*.*）」が出力されていない場合は、スクロールバーを移動させてみてください。「すべてのファイル(*.*）」はメニューの下のほうにあります。

全ての指定が終わると、編集対象ファイルが表示されるので、マウスで該当のファイルをクリックしてワードパッド内にファイルを読み込みます。

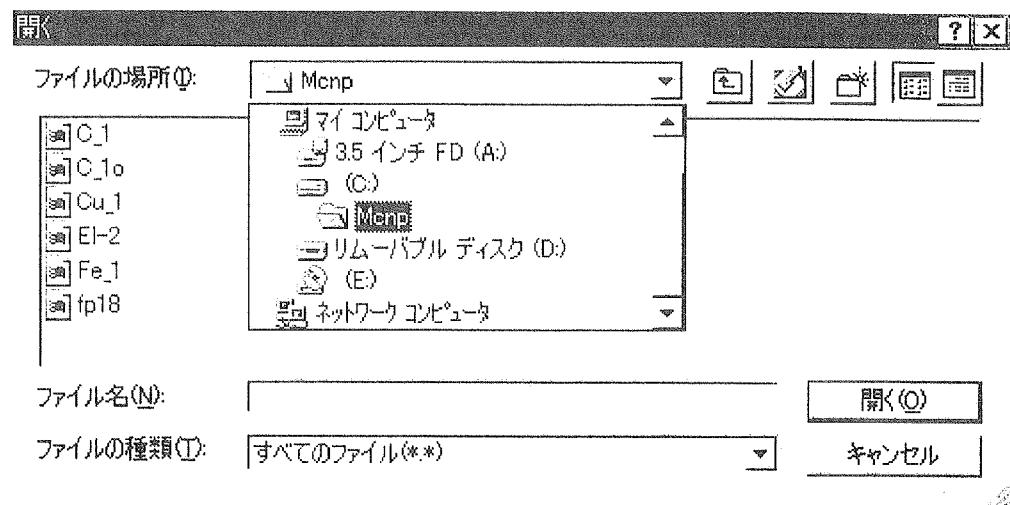


図 17 「開く」サブウインドウ

4.2.3 ワードパッドの終了方法とファイルのセーブ

ワードパッドの保存には、“上書き保存”及び“名前を付けて保存”があります(図15参照)。“上書き保存”は、開いている既存の文書を名前を変更せずに保存する場合に使用します⁶。そのため、編集中のファイルを別の名前で保存したい場合(編集中のファイルを変更せずに残したい場合等)は“名前を付けて保存”を使用します。

“上書き保存”ではファイル名が指定(既にファイルを選択して読み込んである場合など)されていれば自動的に保存されるため説明は割愛して、ここでは“名前を付けて保存”を説明します。

“名前を付けて保存”を選択すると、次頁図18のサブウインドウが表示されます。まず、このサブウインドウで、“保存する場所”項目で、MCNP をインストールしたディスクの[MCNP]ディレクトリとなっているかどうかを確認して下さい。もし、ディレクトリが異なっていた場合にはファイルを保存したいディレクトリに変更して下さい。変更方法は、“保存する場所”項目の右側にある▼をマウスでクリックし、[ドライブ]→[ディレクトリ]の順に選択します。

次に、“ファイルの種類”項目が、「テキスト ドキュメント」となっているかどうかを確認して下さい。“ファイルの種類”的変更方法は、“ファイルの種類”項目の右側にある▼をマウスでクリックし該当の項目をマウスで選択します。もし、「テキスト ドキュメント」が出力されない場合は、スクロールバーを移動させてみてください。「テキスト ドキュメント」はメニューの中程にあります。「テキスト ドキュメント」以外を指定した場合には、出力したファイルがMCNP プログラムで読み込めなくなる可能性があるので注意が必要です。

ファイルを保存するディレクトリとファイルの種類が決定したら、“ファイル名”項目に任意のファイル名を入力します。ファイル名が正しければ保存ボタンをクリックして下さい。

この方法で保存されたファイルは“.txt”という拡張子が付いています。MCNP の入力ファイルを使う場合この拡張子は削除する必要がありますので、「2.2 手動で任意のディレクトリにインストールを行う場合」の8ページの辺りを参考にして拡張子を削除して下さい。

⁶ 編集中の文書に名前がついていない場合は“名前を付けて保存”と同じになりますが、「My Documents」ディレクトリに“ドキュメント”と言う名称で、Word の文章として保存しようとするので注意が必要です。

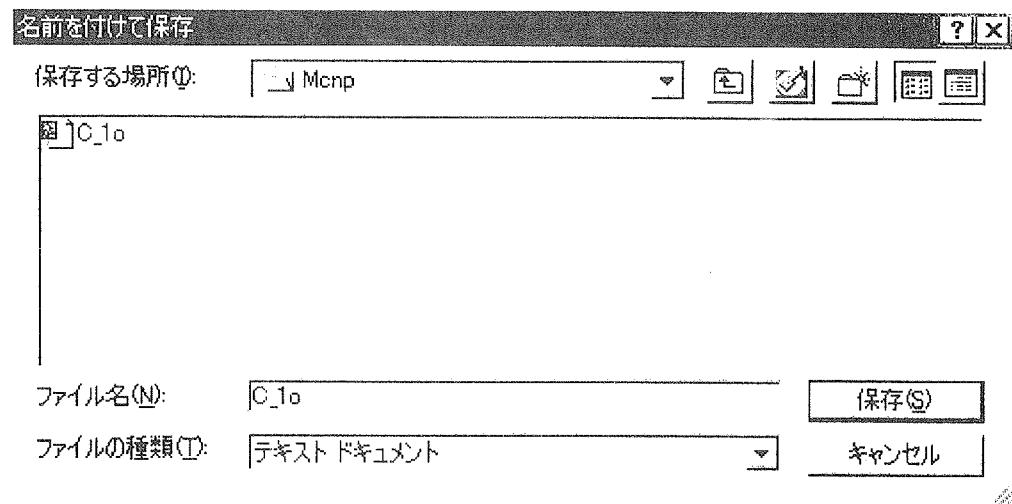


図 18 「名前を付けて保存」サブウィンドウ

ワードパッドの終了方法は、「ファイル」から「ワードパッドの終了」を選択します(図 16 参照)。このとき、ワードパッド内のデータが、既に保存されていて変更されていなければそのまま終了します。もし、最後に保存を行った後更にファイルを編集したか、あるいは未編集の場合は下図のような確認ウインドウが表示されます(このウインドウは、C_1o を編集中のものです)。

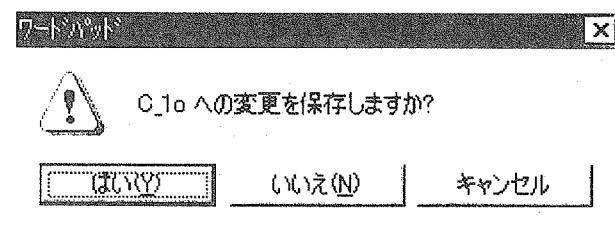


図 19 確認ウインドウ

ここで、[はい]を選択すると保存されて終了します。[いいえ]を選択すると保存せずに終了します。[キャンセル]を選択した場合は、ワードパッドの終了がキャンセルされます。なお、ファイル名が未設定の場合に[はい]を選択すると、“名前を付けて保存”と同じ動作となります。

4.2.4 ワードパッド内文書の検索方法

文書内のある特定の文字列を検索するには、ワードパッドの検索機能を利用します。ワードパッドの検索機能は、[編集]→[検索]で利用することができます(図 16 参照)。

検索を指定すると次頁図 20 のようなウインドウが開きます。このウインドウの“検索する文字列”の項目に検索する文字列を入れて、ウインドウ右側の[次を検索]ボタンを押すと、指定した文字列を検索することが出来ます。

最初に検索された文字列が、ユーザが意図したものではない場合には、再度[次を検索]ボタンを押します。すると、次の該当する文字列が検索されます。

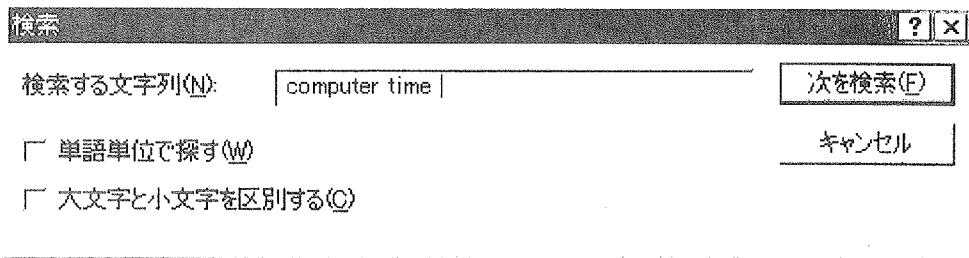
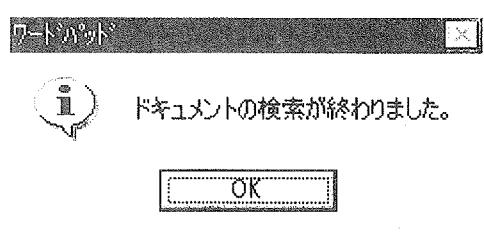


図 20 「検索」サブウインドウ

検索のオプションとして、“単語単位で探す”と“大文字と小文字を区別する”というオプションを利用することができます。“単語単位で探す”オプションをチェックすると、指定した文字列が単語として独立していなければ検索対象とはなりません。例えば、検索文字列として“time”を指定した場合、“What time is it now”の中の“time”は検索されませんが、“What time is it now”の“time”は検索対象となります。



検索が、最終行まで到達した場合図21のようなメッセージが表示されますが、[ok]ボタンを押すことで、ファイルの先頭から再検索を行うことが出来ます。

図 21 最終行へ到達

4.2.5 編集の取り消し

[編集]の[元に戻す]をクリックすると、直前の編集を元に戻すことができます。

5. トラブルシューティング

インストール時

- CD-ROM を挿入しても、インストール画面が表示されない。

お使いのシステムがCD-ROMの自動起動をサポートしていない可能性があります。タスクバーの[スタート]から[ファイル名を指定して実行]を選択し、お使いのCD-ROM ドライブの setupdos.bat を指定して実行してみて下さい。

- いつまでたってもインストール（コピー作業）が終了しない。

コピー作業はマシンの性能に依存しますので、マシンによってはしばらく時間がかかる場合があります。また、プロンプトの全画面ではなく、ウインドウ化したプロンプトでインストールを行っている場合は、インストーラが起動しているプロンプトのウインドウにフォーカスがあるかどうかを確認して下さい。

- “ディレクトリの指定が違います。”というエラーが表示される。

このエラーが表示された場合は、移動しようとしたディレクトリがありませんので、次のコマンドを利用して、MCNP ディレクトリが作成されているかどうかを確認して下さい。（ファイルとディレクトリの一覧が表示されます）。

```
C:\WINDOWS> cd ..
C:\> dir /p
```

- “無効のドライブ指定です。”というエラーが出力される。

このエラーが表示された場合には、指定したディスクが存在しません。再度インストールしたドライブを確認して下さい。

実行時

- fatal err.

- cross-section directory file xsdir2 dos not exist.

ディレクトリファイルが見つかりません。Xsdir2 ファイルがコピーされているかどうか確認して下さい。

- xx cross-section tables are missing from xsdir2.

エラーメッセージ以下に示された断面積ライブラリが無いか、入力データで使用するデータが、断面積ライブラリの中にみつかりません。対処方法としては、以下の方法が考えられます。

1. 断面積ライブラリファイルがコピーされているかどうか確認して下さい。
2. 入力ファイル中のライブラリ指定 (mで開始される行) を変更していないかどうかを

マスタと比較して確認して下さい。

- **name=xxx fails. xxxo already exists.**
実行しようとした入力データの o ファイルが既に存在します。xxxo ファイルを削除してから再度実行してください。
- **name=xxx fails. xxxr already exists.**
実行しようとした入力データの r ファイルが既に存在します。xxxr ファイルを削除してから再度実行してください。
- **name=xxx fails. xxxm already exists.**
実行しようとした入力データの m ファイルが既に存在します。xxxm ファイルを削除してから再度実行してください。
- **input file XXXX does not exist.**
入力データが見つかりません。name に指定したファイルが存在するかどうか確認して下さい。若しくは、ファイル指定が小文字なら大文字で指定してみて下さい。
- “コマンドまたはファイル名が違います。”
実行ファイル（多分 MCNP）が存在しません。ディレクトリを確認するか、もしくは MCNP.EXE があるかどうか確認して下さい。

【ファイル命名規則に関する追加事項（重要）】

MCNP4B2 では、ファイル名が 8 文字しか扱えないため、出力ファイル名の命名規則(入力データ名に o や r 等の 1 文字を加える)の関係から、出力されるファイルを指定しない場合、入力データ名に 8 文字以上のファイル名を使用できないことは、「3. MCNP の実行」で述べました。ここでは、追加情報として、拡張子を利用した入力ファイルを利用して、出力されるファイルを指定しない場合について説明します。

この場合、拡張子の文字数(“.” 以降)は DOS の制約のため 2 文字以内となりますので注意して下さい。つまり、ファイル名は “ファイル名（4 文字以内）・拡張子（2 文字）” となります。これは拡張子を利用する場合、出力ファイルの o や r は、拡張子の最後に付加される仕様となっているためです。もし、3 文字の拡張子をつけてしまうと、エラーで異常終了してしまいます。DOS の仕様で、ファイル名の “の左右は別扱いとなるため、ファイル名の全体が 7 文字以内でも、出力されるファイルを指定しない場合、この条件(拡張子は、2 文字以内)が適用されますので注意して下さい。

6. その他（補足事項等）

6.1 バイナリ版断面積ライブラリの作成方法

MCNP 4B2において、断面積ライブラリはテキスト版・バイナリ版共に利用が可能ですが、今回は CD-ROM の容量の都合もあり、テキスト版（340 核種の MCNP 用ライブラリ）のライブラリをそのままの形で添付することが出来ませんでした。ただし、圧縮した形で 340 核種の MCNP 用断面積ライブラリとそのディレクトリファイルを収録してありますので、そのファイルを解凍することによってテキスト版の断面積ライブラリを使用することが出来ます⁷。

MCNP では、このテキスト版断面積ライブラリはよくバイナリファイルに変換して利用されます。この、断面積ライブラリの「テキスト ⇔ バイナリ」変換を行うためのソフトウェアが、CD-ROM に収録した makxsf⁷です。

このプログラムを利用して断面積ライブラリの変換を行う場合、同一のディレクトリに断面積ライブラリとそのディレクトリファイルを置いて、変換の条件を示す SPECS ファイルを作成して変換を行います。makxsf プログラムは、SPECS ファイルを読み込みその条件に合わせて変換を行い、変換された断面積ライブラリとディレクトリファイルを作成します。

ここでは、例として fsxj32a1(テキスト版)から fsxj32a2(バイナリ版)に変換を行った場合の SPECS ファイルの例を示します。

XSDIR1 XSDIR2	【ディレクトリファイル名称の指定】
FSXJ32A1 FSXJ32A2 2	【断面積ファイル及び変換タイプの指定】

SPECS ファイルには幾つかの条件があります。

- ファイル先頭は XSDIR1 XSDIR2 (ディレクトリファイル、テキスト[XSDIR1]、バイナリ[XSDIR2])であり、その間は 1 スペース以上空けること。
- 2 行目に空行を入れないこと。
- ファイル先頭に記述した順番で断面積ライブラリを指定すること。その間に 1 スペース以上空けること。
- 断面積ライブラリ記述行の最後に 1 スペース以上空けた後で、変換形態を入れること。
 - 1 : バイナリ → テキスト変換
 - 2 : テキスト → バイナリ変換

6.2 参考文献

- 1) J.F. Briesmeister, Ed., "MCNP-A General Monte Carlo N-Partical Transport Code. Version 4B," LA-1265-M(March 1997).
- 2) 前川藤夫, 桜井淳, 野村靖 他 4 名, "MCNP ライブラリ自動編集システム autonj の開発" JAERI-Data/Code 99-048(November 1998)

⁷ テキスト版の断面積ライブラリ及び makxsf プログラムは、自動的にインストールされません。このプログラムを利用する場合は、CD-ROM から任意のディレクトリにコピーして利用して下さい。収録ディレクトリに関しては、CD-ROM の README ファイルを参照して下さい。

6. 例題入力による計算演習

This is a blank page.

6.1 例題入力による計算演習1-臨界計算

桜井 淳

日本原子力研究所 東海研究所

sakurai@melody.tokai.jaeri.go.jp

MCNP-4Bのマニュアル

ロスアラモス国立研究所研究報告書LA-12625-M(Nov.1993)

MCNPとはMonte Carlo N-Particle Transport Codeの略。NPは最初Neutron and Photonの略、その後、X線や制動放射の計算機能が追加されたため、N-Particleという表現により中性粒子の総称。

プログラム 4万行(サブルーチン350)、世界100施設で1000人のユーザー

開発の歴史

- | | |
|------|---|
| 1963 | ロスアラモス国立研究所で最初の汎用中性子輸送モンテカルロコードMCS |
| 1964 | 後続コードMCN |
| 1973 | ガンマ線計算モンテカルロコードMCG |
| 1977 | MCNとMCGの統合による汎用モンテカルロコードMCNG、後にMCNP(ガンマをホトンにした) |
| 1983 | MCNP-3 |
| 1986 | MCNP-3A |
| 1990 | MCNP-4 電子輸送、蛍光X線、制動放射 |
| 1993 | MCNP-4A |
| 1997 | MCNP-4B 摂動計算機能、高エネルギー計算機能 |
| 2000 | MCNP-4C 非分離共鳴処理に確率テーブル断面積 |

ロスアラモスは4月にリリースしたが、日本ではまだ利用されていない従来の断面積は読みこめないため、新たにJENDL-3.3から汎用断面積ライブラリを編集しなければならない(原研で編集中)、MCNP-4Cは非分離共鳴処理に確率テーブル断面積を導入してより厳密な断面積処理

とりあえず第2章で基礎的物理、第3章で入力法を把握、暇な時に第5章で出力情報の詳細な解説。

第1章 予備情報

第2章 幾何形状、データ、物理及び数学

断面積	中性子、光子及び電子相互作用データ、熱中性子散乱則データS (α 、 β)
物理	粒子ウェイト、粒子トラック、中性子相互作用、光子相互作用、相互作用
タリー	ポイント、トラックレンジス、サーフエスクロッシングエスティメータ等
統計	確度と精度(FSD、 1σ)、フィギューオブメリット(FOM、 1σ 計算誤差の2乗)

	に分で表した計算時間を掛けたものの逆数でこれが大きいほどよい)
FSD	計算結果の判断基準
0.5-1.0	問題外
0.2-0.5	数ファクターの不確定
0.1-0.2	十分な信頼性でなくなお疑問
<0.10	信頼性高い
<0.05	特にポイントエスティメータの場合、信頼性高い
分散低減	①エネルギーカットオフ ②タイムカットオフ ③スプリッティングとロシアンルーレット ⑤ウエイトカットオフ ⑥ウエイトウインド(MCNPで最初に導入された用語、実質的には③に近い) ⑦指數変換 ⑧潜在吸收 ⑨強制散乱
臨界計算	最終的な中性子実効増倍率 k_{eff} は、散乱、吸収及びトラックレンジングエスティメータの共分散加重組み合わせエスティメータで評価

例えば吸収エスティメータによる k_{eff} の評価はバッチ当たりの全核分裂中性子期待値 $w_i [\sum f \nu \sigma_i / \sum f \sigma_T]$ の平均、個々の定義式はマニュアル参照

$$k_{eff}(\text{collision}) = 1/N \sum w_i [\sum f \nu \sigma_i / \sum f \sigma_T]$$

σ_i : ミクロ核分裂断面積 f : アトミックフラクション
 σ_T : ミクロトータル断面積 N : ヒストリー数

$$k_{eff}(\text{absorption}) = 1/N \sum w_i \nu [\sigma_i / (\sigma_A + \sigma_F)]$$

σ_A : ミクロ吸収断面積

$$k_{eff}(\text{track length}) = 1/N \sum w_i d \rho \sum f \nu \sigma_i$$

d : 最終事象からのトラックレンジング
 ρ : セルの原子密度

臨界固有値問題の設定はKCODEカードで定義し、バッチ当たりのヒストリー数、 k_{eff} 推定値、スキップするバッチ数、全バッチ数の順に入力する

個々のバッチにつき、指定された中性子スペクトルでのソース中性子は等方的に発生され、ランダムウォーク、ただし核分裂は吸収として処理される

核分裂中性子の初期空間分布はKSRCかカードで設定することもでき、個々の点の三次元座標を入力、ただしその点がボイドやゼロインポータンスのところであってはならない

第3章 入力

①一般的記述

必要に応じて	メッセージブロック及びブランクターミネータ
必ず必要	タイトルカード
必ず必要	セルカード及びブランクターミネータ
必ず必要	サーフェスカード及びブランクターミネータ
必ず必要	データカード及びブランクターミネータ
必要に応じて	コメントカード

②問題型カード

必ず必要	ただし中性子計算ではMODE Nを指定しなくてもデフォルト 例えばMODE N P MODE P MODE E MODE P E MODE N P E
------	--

③幾何形状カード

必要に応じて	VOL
必要に応じて	AREA
必要に応じて	U
必要に応じて	TRCL
必要に応じて	LAT
必要に応じて	FILL
必要に応じて	TRn

④分散低減カード

必ず必要	IMP ウエイトウインドが使われない場合には必ず入れる
必要に応じて	PWT
必要に応じて	EXT
必要に応じて	VECT
必要に応じて	FCL
必要に応じて	WWE
必ず必要	WWN インポータンスが使われない場合には必ず入れる
必要に応じて	WWP
必要に応じて	WWG
必要に応じて	WWGE
必要に応じて	PDn
必要に応じて	DXC
必要に応じて	BBREM

⑤線源仕様カード

必要に応じて	SDEF
必要に応じて	SIn
必要に応じて	SPn
必要に応じて	SBn
必要に応じて	DSn
必要に応じて	SCn

必要に応じて	SSW
必要に応じて	SSR
必要に応じて	KCODE
必要に応じて	KSRC

⑥タリー仕様カード

必要に応じて	F _n α
必要に応じて	FC _n
必要に応じて	En
必要に応じて	T _n
必要に応じて	C _n
必要に応じて	FQ _n
必要に応じて	FM _n
必要に応じて	D _n /DF _n
必要に応じて	EM _n
必要に応じて	TM _n
必要に応じて	CM _n
必要に応じて	CF _n
必要に応じて	SF _n
必要に応じて	FS _n
必要に応じて	SD _n
必要に応じて	FUn
必要に応じて	TF _n
必要に応じて	DD
必要に応じて	DXT
必要に応じて	FT _n

⑦物質仕様カード

必要に応じて	M _m
必要に応じて	DRXS
必要に応じて	TOTNU
必要に応じて	NONU
必要に応じて	AWTAB
必要に応じて	XSn
必要に応じて	VOID
必要に応じて	PIKMT
必要に応じて	MGOPT

⑧エネルギー、サーマルカード

必要に応じて	PHYS:N
必要に応じて	PHYS:P
必要に応じて	PHYS:E
必要に応じて	ESPLT
必要に応じて	TMP
必要に応じて	THTME
必要に応じて	MT _m

⑨問題カットオフ

必要に応じて	CUT:N
必要に応じて	CUT:P
必要に応じて	CUT:E
必要に応じて	EPLT
必要に応じて	NPS
必要に応じて	CTME

⑩ユーザー配列

必要に応じて	IDUM
必要に応じて	RDUM

⑪周辺カード

必要に応じて	PRDMP	
必要に応じて	LOST	幾何形状定義の不完全性から生じる行方不明粒子数、デフォルトでは10個
必要に応じて	DBCN	初期擬似乱数(奇数値)、指定なければデフォルト値 整数 I_n の擬似乱数シーケンス $I_n = \text{mod}(MI_n, 2^{48})$ 、ここで $\text{mod}()$ はMinを 2^{48} で割った整数の剰余

DBCNでMを与える(デフォルトは $5^{19}=19073486328125$)

擬似乱数は $R_n = 2^{-48} I_n$

個々のヒストリーの初期擬似乱数は $I_{n+s} = \text{mod}(Ms, 2^{48})$

MCNPでのペリオドは $P=2^{46}=7.04 \times 10^{13}$

必要に応じて	FILES
必要に応じて	PRINT
必要に応じて	M PLOT
必要に応じて	PTRAC

第4章 例題

第5章 出力

附録 指定できる中性子スペクトルとID、中性子断面積核種とID、熱中性子散乱則データ
 $S(\alpha, \beta)$ と温度依存ID

原研軽水型臨界実験装置TCAの臨界計算(軽水炉燃料棒18×18正方配列体系)

10万ヒストリーで200分(FMV 300MHz)

よって演習は1万ヒストリーで20分(参加者パソコンで10-40分のバラツキ)

そのため、サイクル当たり1000ヒストリー、1スキップ、全11サイクル

なお10万ヒストリーの計算結果は下記の通りです(プリントアウトで最終結果の部分)。

the final estimated combined collision/absorption/track-length keff = 1.00162 with an estimated standard deviation of 0.00213

the estimated 68, 95, & 99 percent keff confidence intervals are 0.99949 to 1.00375, 0.99738 to 1.00587, and 0.99599 to 1.00725

the final combined (col/abs/tl) prompt removal lifetime = 7.1482E-05 seconds with an estimated standard deviation of 2.5974E-07

以下、例題入力解説

```

file name=fp18
c    critical water level 75.000(cm)
c    lattice pitch   1.956(cm);u(2.6)o2
c    reflect water  30.000(cm)
c    セミナーコメント MCNP定義している単位 cm,MeV,shakes(10-8),n/cm3,barns,g/cm3
c
c    cell cards
c
1  7.040860e-2      -7       10      -12      imp:n=1 u=1
c    ウランペレトの全個数密度
2  5.587000e-2      7      -8      10      -12      imp:n=1 u=1
c    アルミ被覆管
3  1.002000e-1          8      10      -11      imp:n=1 u=1
c    水
4  0                  8      11      -12      imp:n=1 u=1
c    水上部で燃料簿の外側のボイド空間
5  0          1      -2      3      -4      5      -6      imp:n=1 u=2 lat=1
        fill=-17:0 -17:0  0:0
        1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

```

```

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
6   0           21 -22  23 -24  25 -26  imp:n=1      fill=2
c  セミナーコメント 18×18領域
c
c  lat=1はその行で定義した6面立方格子(Lat=2は8面の6角柱)
c  fill=-17:0 -17:0 0:0はlat=1をX方向18個、Y方向18個、Z方向ゼロ個配列
c  どのように定義するかは自由であり、fill=0:17 0:17 0:0でもよいが、そうすると
c  si1 1のところも定義を合わせなければならない
c  その下の表示はlat=1の実際のX-Y配列 u=1を18×18
c  fill=2はその行で定義された空間にlat=1を配列することの意
c
7  3 1.002000e-1 #6 (31 -32  33 -34  35 -36) imp:n=1
c  セミナーコメント 水反射体
8  0           #6 #7                         imp:n=0
c  セミナーコメント outer world 6,7セル以外の領域の意
c  セミナーコメント
c  物質番号 1立方cm当たり24乗単位で表示した全体個数密度 セル定義 インポータンス
c

c
c  surface cards (origin x=0.9780 y=0.9780 z=0.0)
c  parallelpiped
1  px    0.00000
2  px    1.95600
3  py    0.00000
4  py    1.95600
5  pz    0.00000
6  pz    144.15000
c  セミナーコメント px-x面,py-y面,pz-z面の表示 つぎの数字は面の座標
c
c  cylinder
c
7  c/z  0.9780 0.9780 0.6251
8  c/z  0.9780 0.9780 0.7085
c  z方向シリンダー x,y,r
c
c  critical water level= 75.000(cm)

```

```

10   pz    0.0
c   燃料棒下端
11   pz    75.00
c   臨界水位
12   pz    144.15
c   燃料棒上端
c
c   pitch* 18=35.20800(cm)
c   (35.20800*35.20800*144.15)
c   parallelpiped
21   px    0.00001
c   セミナーコメント なぜ0.00000となっていないか
22   px    35.20799
c   セミナーコメント なぜ35.20800となっていないか
23   py    0.00001
24   py    35.20799
25   pz    0.00001
26   pz    144.14999
c   セミナーコメント なぜ144.15000となっていないか
c
c   water reflect= 30.000(cm)
c   parallelpiped
31   px    -29.99999
c   セミナーコメント なぜ-30.00000となっていないか
32   px    65.20799
33   py    -29.99999
34   py    65.20799
35   pz    -29.99999
36   pz    74.99999
c   セミナーコメント なぜ75.00000となっていないか

c
c   data cards
c
mode n                      $ transfort neutrons only
c   中性子計算は指定しなくてもデフォルトになっている
c   material cards
c
c   u(2.6)o2 pellet
m1  92235.80c 6.086e-4          $ u-235
    92238.80c 2.255e-2          $ u-238
    8016.80c 4.725e-2          $ h
c   セミナーコメント 核種ID(JENDL-3.2をautonjで処理して作成した293Kの中性子断面積、80c
c   はZAIのID部分、cはcontinuousの意) 個々の核種の個数密度
c   al cladding (with an air gap)
m2  13027.80c 5.587e-2          $ al

```

```

c
c   water(300k)
m3    1001.80c 6.677e-2          $ h for 19 doc
      8016.80c 3.339e-2          $ o
mt3   lwtr.01t
c     セミナーコメント熱中性子散乱則データID、lwtrの1はエル
c
c     energy bins; hansen-roach structure
e0    1.0e-7 4.0e-7 1.0e-6 3.0e-6 1.0e-5 3.0e-5 1.0e-4 5.5e-4 3.0e-3
      1.7e-2 0.1 0.4 0.9 1.4 3.0 20.0
c
c   tallies
f4:n  1 2                      $ ave flux in cell 1 and 2
c     セミナーコメント  トラックレンジスエスティメータ
c     臨界固有値問題ではエネルギーBINやエスティメータを定義する必要ない
c
c   criticality cards
c
c     kcode 10000 1.0 10 110
kcode 1000 1.0 1 11
c     臨界カード サイクル当たりのヒストリーフレーム数 推定増倍率 スキップサイクル数 全サイクル数
c     臨界固有値問題では自動的にトータルレートが使われるが、それ以外ではTOTNUカードを入れなければ即発射が入ってしまう
sdef cel=d1 erg=d2 rad=d3 ext=d4 pos=0.9780 0.9780 0 axs=0 0 1
c     一般線源カード(ソースパラメータ) cel:スタートのセル、cel=d1は下のsi1とsp1の条件で、
c     erg:エネルギー(デフォルト14MeV)、erg=d2は下のsp2の条件で、
c     rad:POS,あるいはAXSからの径方向距離、rad=d3は下のsi3とsp3の条件で、ext: AXS沿いの
c     POSからの距離、ext=d4下のsi4とsp4の条件で、pos:ポジションサンプリングの基準座標(デフォルト0 0 0)、axs: radやextに対する基準ベクトル
si1  l
c     エル ディスクリート
c     線源情報カード
       6:5(-17 -17  0):1  6:5(-17 -16  0):1  6:5(-17 -15  0):1
       6:5(-16 -17  0):1  6:5(-16 -16  0):1  6:5(-16 -15  0):1
       6:5(-15 -17  0):1  6:5(-15 -16  0):1  6:5(-15 -15  0):1
       6:5(-14 -17  0):1  6:5(-14 -16  0):1  6:5(-14 -15  0):1
       6:5(-13 -17  0):1  6:5(-13 -16  0):1  6:5(-13 -15  0):1
       6:5(-12 -17  0):1  6:5(-12 -16  0):1  6:5(-12 -15  0):1
       6:5(-11 -17  0):1  6:5(-11 -16  0):1  6:5(-11 -15  0):1
       6:5(-10 -17  0):1  6:5(-10 -16  0):1  6:5(-10 -15  0):1
       6:5(- 9 -17  0):1  6:5(- 9 -16  0):1  6:5(- 9 -15  0):1
       6:5(- 8 -17  0):1  6:5(- 8 -16  0):1  6:5(- 8 -15  0):1
       6:5(- 7 -17  0):1  6:5(- 7 -16  0):1  6:5(- 7 -15  0):1
       6:5(- 6 -17  0):1  6:5(- 6 -16  0):1  6:5(- 6 -15  0):1
       6:5(- 5 -17  0):1  6:5(- 5 -16  0):1  6:5(- 5 -15  0):1
       6:5(- 4 -17  0):1  6:5(- 4 -16  0):1  6:5(- 4 -15  0):1

```

6:5(-3 -17 0):1	6:5(-3 -16 0):1	6:5(-3 -15 0):1
6:5(-2 -17 0):1	6:5(-2 -16 0):1	6:5(-2 -15 0):1
6:5(-1 -17 0):1	6:5(-1 -16 0):1	6:5(-1 -15 0):1
6:5(0 -17 0):1	6:5(0 -16 0):1	6:5(0 -15 0):1
6:5(-17 -14 0):1	6:5(-17 -13 0):1	6:5(-17 -12 0):1
6:5(-16 -14 0):1	6:5(-16 -13 0):1	6:5(-16 -12 0):1
6:5(-15 -14 0):1	6:5(-15 -13 0):1	6:5(-15 -12 0):1
6:5(-14 -14 0):1	6:5(-14 -13 0):1	6:5(-14 -12 0):1
6:5(-13 -14 0):1	6:5(-13 -13 0):1	6:5(-13 -12 0):1
6:5(-12 -14 0):1	6:5(-12 -13 0):1	6:5(-12 -12 0):1
6:5(-11 -14 0):1	6:5(-11 -13 0):1	6:5(-11 -12 0):1
6:5(-10 -14 0):1	6:5(-10 -13 0):1	6:5(-10 -12 0):1
6:5(-9 -14 0):1	6:5(-9 -13 0):1	6:5(-9 -12 0):1
6:5(-8 -14 0):1	6:5(-8 -13 0):1	6:5(-8 -12 0):1
6:5(-7 -14 0):1	6:5(-7 -13 0):1	6:5(-7 -12 0):1
6:5(-6 -14 0):1	6:5(-6 -13 0):1	6:5(-6 -12 0):1
6:5(-5 -14 0):1	6:5(-5 -13 0):1	6:5(-5 -12 0):1
6:5(-4 -14 0):1	6:5(-4 -13 0):1	6:5(-4 -12 0):1
6:5(-3 -14 0):1	6:5(-3 -13 0):1	6:5(-3 -12 0):1
6:5(-2 -14 0):1	6:5(-2 -13 0):1	6:5(-2 -12 0):1
6:5(-1 -14 0):1	6:5(-1 -13 0):1	6:5(-1 -12 0):1
6:5(0 -14 0):1	6:5(0 -13 0):1	6:5(0 -12 0):1
6:5(-17 -11 0):1	6:5(-17 -10 0):1	6:5(-17 -9 0):1
6:5(-16 -11 0):1	6:5(-16 -10 0):1	6:5(-16 -9 0):1
6:5(-15 -11 0):1	6:5(-15 -10 0):1	6:5(-15 -9 0):1
6:5(-14 -11 0):1	6:5(-14 -10 0):1	6:5(-14 -9 0):1
6:5(-13 -11 0):1	6:5(-13 -10 0):1	6:5(-13 -9 0):1
6:5(-12 -11 0):1	6:5(-12 -10 0):1	6:5(-12 -9 0):1
6:5(-11 -11 0):1	6:5(-11 -10 0):1	6:5(-11 -9 0):1
6:5(-10 -11 0):1	6:5(-10 -10 0):1	6:5(-10 -9 0):1
6:5(-9 -11 0):1	6:5(-9 -10 0):1	6:5(-9 -9 0):1
6:5(-8 -11 0):1	6:5(-8 -10 0):1	6:5(-8 -9 0):1
6:5(-7 -11 0):1	6:5(-7 -10 0):1	6:5(-7 -9 0):1
6:5(-6 -11 0):1	6:5(-6 -10 0):1	6:5(-6 -9 0):1
6:5(-5 -11 0):1	6:5(-5 -10 0):1	6:5(-5 -9 0):1
6:5(-4 -11 0):1	6:5(-4 -10 0):1	6:5(-4 -9 0):1
6:5(-3 -11 0):1	6:5(-3 -10 0):1	6:5(-3 -9 0):1
6:5(-2 -11 0):1	6:5(-2 -10 0):1	6:5(-2 -9 0):1
6:5(-1 -11 0):1	6:5(-1 -10 0):1	6:5(-1 -9 0):1
6:5(0 -11 0):1	6:5(0 -10 0):1	6:5(0 -9 0):1
6:5(-17 -8 0):1	6:5(-17 -7 0):1	6:5(-17 -6 0):1
6:5(-16 -8 0):1	6:5(-16 -7 0):1	6:5(-16 -6 0):1
6:5(-15 -8 0):1	6:5(-15 -7 0):1	6:5(-15 -6 0):1
6:5(-14 -8 0):1	6:5(-14 -7 0):1	6:5(-14 -6 0):1
6:5(-13 -8 0):1	6:5(-13 -7 0):1	6:5(-13 -6 0):1
6:5(-12 -8 0):1	6:5(-12 -7 0):1	6:5(-12 -6 0):1

6:5(-11 -8 0):1	6:5(-11 -7 0):1	6:5(-11 -6 0):1
6:5(-10 -8 0):1	6:5(-10 -7 0):1	6:5(-10 -6 0):1
6:5(-9 -8 0):1	6:5(-9 -7 0):1	6:5(-9 -6 0):1
6:5(-8 -8 0):1	6:5(-8 -7 0):1	6:5(-8 -6 0):1
6:5(-7 -8 0):1	6:5(-7 -7 0):1	6:5(-7 -6 0):1
6:5(-6 -8 0):1	6:5(-6 -7 0):1	6:5(-6 -6 0):1
6:5(-5 -8 0):1	6:5(-5 -7 0):1	6:5(-5 -6 0):1
6:5(-4 -8 0):1	6:5(-4 -7 0):1	6:5(-4 -6 0):1
6:5(-3 -8 0):1	6:5(-3 -7 0):1	6:5(-3 -6 0):1
6:5(-2 -8 0):1	6:5(-2 -7 0):1	6:5(-2 -6 0):1
6:5(-1 -8 0):1	6:5(-1 -7 0):1	6:5(-1 -6 0):1
6:5(0 -8 0):1	6:5(0 -7 0):1	6:5(0 -6 0):1
6:5(-17 -5 0):1	6:5(-17 -4 0):1	6:5(-17 -3 0):1
6:5(-16 -5 0):1	6:5(-16 -4 0):1	6:5(-16 -3 0):1
6:5(-15 -5 0):1	6:5(-15 -4 0):1	6:5(-15 -3 0):1
6:5(-14 -5 0):1	6:5(-14 -4 0):1	6:5(-14 -3 0):1
6:5(-13 -5 0):1	6:5(-13 -4 0):1	6:5(-13 -3 0):1
6:5(-12 -5 0):1	6:5(-12 -4 0):1	6:5(-12 -3 0):1
6:5(-11 -5 0):1	6:5(-11 -4 0):1	6:5(-11 -3 0):1
6:5(-10 -5 0):1	6:5(-10 -4 0):1	6:5(-10 -3 0):1
6:5(-9 -5 0):1	6:5(-9 -4 0):1	6:5(-9 -3 0):1
6:5(-8 -5 0):1	6:5(-8 -4 0):1	6:5(-8 -3 0):1
6:5(-7 -5 0):1	6:5(-7 -4 0):1	6:5(-7 -3 0):1
6:5(-6 -5 0):1	6:5(-6 -4 0):1	6:5(-6 -3 0):1
6:5(-5 -5 0):1	6:5(-5 -4 0):1	6:5(-5 -3 0):1
6:5(-4 -5 0):1	6:5(-4 -4 0):1	6:5(-4 -3 0):1
6:5(-3 -5 0):1	6:5(-3 -4 0):1	6:5(-3 -3 0):1
6:5(-2 -5 0):1	6:5(-2 -4 0):1	6:5(-2 -3 0):1
6:5(-1 -5 0):1	6:5(-1 -4 0):1	6:5(-1 -3 0):1
6:5(0 -5 0):1	6:5(0 -4 0):1	6:5(0 -3 0):1
6:5(-17 -2 0):1	6:5(-17 -1 0):1	6:5(-17 0 0):1
6:5(-16 -2 0):1	6:5(-16 -1 0):1	6:5(-16 0 0):1
6:5(-15 -2 0):1	6:5(-15 -1 0):1	6:5(-15 0 0):1
6:5(-14 -2 0):1	6:5(-14 -1 0):1	6:5(-14 0 0):1
6:5(-13 -2 0):1	6:5(-13 -1 0):1	6:5(-13 0 0):1
6:5(-12 -2 0):1	6:5(-12 -1 0):1	6:5(-12 0 0):1
6:5(-11 -2 0):1	6:5(-11 -1 0):1	6:5(-11 0 0):1
6:5(-10 -2 0):1	6:5(-10 -1 0):1	6:5(-10 0 0):1
6:5(-9 -2 0):1	6:5(-9 -1 0):1	6:5(-9 0 0):1
6:5(-8 -2 0):1	6:5(-8 -1 0):1	6:5(-8 0 0):1
6:5(-7 -2 0):1	6:5(-7 -1 0):1	6:5(-7 0 0):1
6:5(-6 -2 0):1	6:5(-6 -1 0):1	6:5(-6 0 0):1
6:5(-5 -2 0):1	6:5(-5 -1 0):1	6:5(-5 0 0):1
6:5(-4 -2 0):1	6:5(-4 -1 0):1	6:5(-4 0 0):1
6:5(-3 -2 0):1	6:5(-3 -1 0):1	6:5(-3 0 0):1
6:5(-2 -2 0):1	6:5(-2 -1 0):1	6:5(-2 0 0):1

```

6:5( -1 -2 0):1 6:5( -1 -1 0):1 6:5( -1 0 0):1
6:5( 0 -2 0):1 6:5( 0 -1 0):1 6:5( 0 0 0):1
sp1   1 323r
c   線源確率カード rはrepeatの意
c
sp2   -3
c   ワット型核分裂スペクトル指定
si3   h 0.0 0.6251
sp3   -21 1
c   燃料棒横方向分布 一定 なお0.6251はウランペレット半径
si4   0.0 144.15
sp4   -21 0
c   燃料棒縦方向分布 一定
prdmp j -100 1 3
c   セミナーコメント プリント及びダンプサイクル
print
c   計算結果の出力 情報が膨大なため、不要な情報項目を指定して削除可

```

演習問題

- ① 各部の寸法をわずかに変えてみる。特に水位。 $\beta_{\text{eff}}=0.00752$ とすると、 $\rho=(k_{\text{eff}}-1)/k_{\text{eff}}$
ドル反応度 ρ/β_{eff}
- ② ウランの個数密度を変えてみる。
- ③ 被覆管のアルミの個数密度を変えてみる。
- ④ 減速材の水の個数密度を変えてみる。

6.2 例題入力による計算演習 2 - 中性子深層透過

前川 藤夫

日本原子力研究所 東海研究所 中性子科学研究センター 中性子工学グループ

E-mail: fujio@fnshp.tokai.jaeri.go.jp

植木 紘太郎

運輸省 船舶技術研究所 原子力技術部 放射性物質輸送研究室

E-mail: ueki@srimot.go.jp

1. FNS 鉄体系実験の概要

本節では、原研 FNS の 14-MeV 中性子源施設で行われた鉄遮蔽体系におけるベンチマーク実験 [1-4] の解析を 1 例としてとりあげ、中性子の深層透過問題の解説を行う。

図 1 に実験体系を示す。体系は直径 1000mm、厚さ 950mm の円柱状で、14-MeV 中性子を発生する D-T 中性子源から 200mm の位置に設置されている。体系側面から中心軸に向けて様々な放射線検出器挿入用の実験孔が開けられており、この実験孔を利用して体系内の中心軸上に沿って中性子スペクトル、反応率や γ 線スペクトル等の諸量が測定されている。

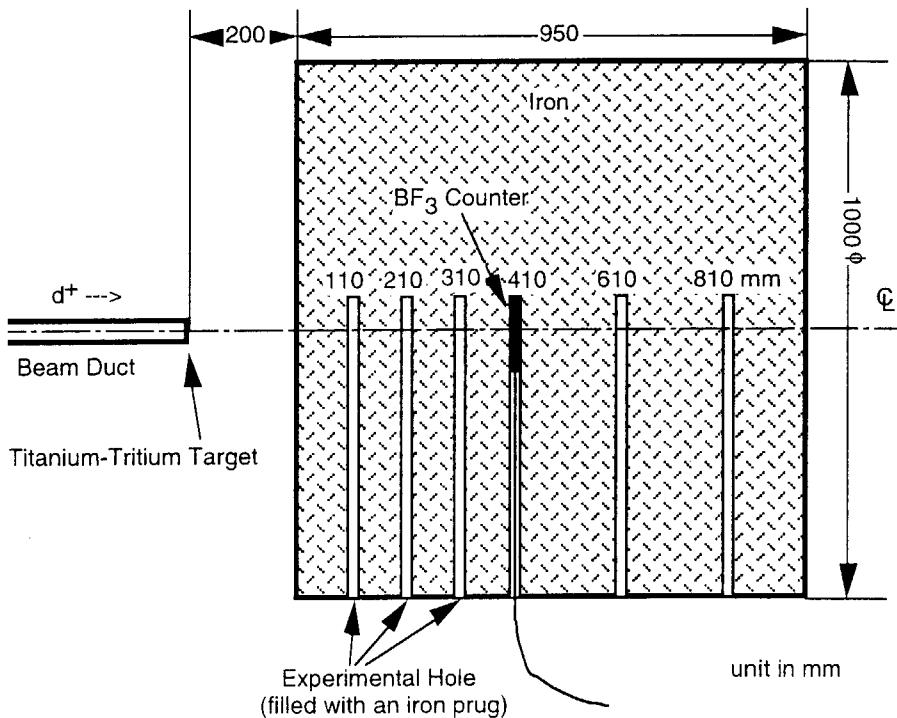


図 1 原研 FNS 鉄ベンチマーク実験体系.

図2, 3に実験値と MCNP 計算値の比較の例を示す。図2は中性子スペクトル、図3は γ 線スペクトルで、記号は実験値、線で示したもののがいくつかの核データライブラリを使用した MCNP 計算値である。

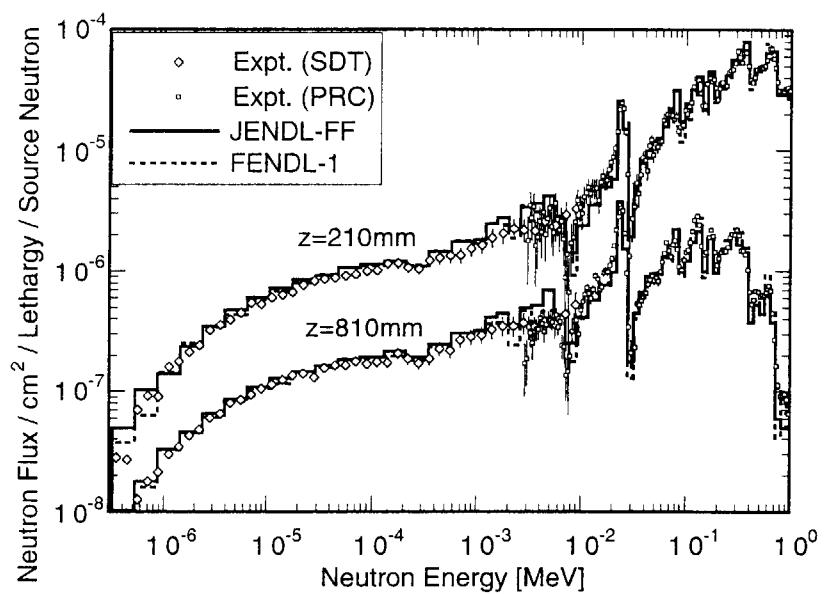


図2 FNS 鉄ベンチマーク実験、深さ 210, 810mm における中性子スペクトルの比較.

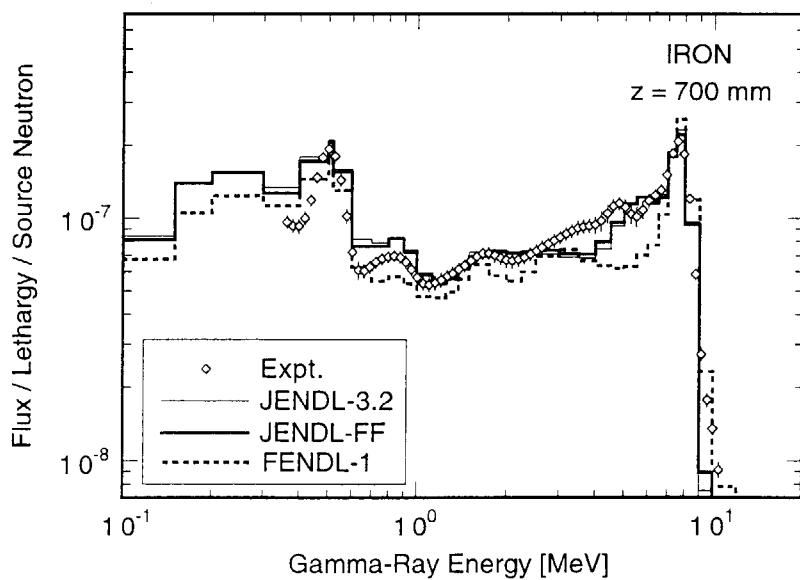


図3 FNS 鉄ベンチマーク実験、深さ 700mm における γ 線スペクトルの比較.

2. 入力データとその説明

以下に、計算で使用した入力データを示す。

Analysis of FNS Iron slab with MCNP4B+JENDL-3.2 1998			
c	*****		タイトル
c	* cell card for Iron Assembly	*	セルカード
c	*****		
c	**** air region ****		
1	2 4.9210-5 (+1 -2 -42) : (+2 -3 +41 -42)	\$ source void	
3	2 4.9210-5 +2 -3 -41	\$ cell detector	
c	**** test region ****		
4	1 8.5182-2 +3 -4 -42	\$ 0.0 - 1.5 cm	
5	1 8.5182-2 +4 -5 -42	\$ 1.5 - 2.5 cm	
6	1 8.5182-2 +5 -6 -42	\$ 2.5 - 4.0 cm	
7	1 8.5182-2 +6 -7 -42	\$ 4.0 - 5.0 cm	
8	1 8.5182-2 +7 -8 -42	\$ 5.0 - 6.5 cm	
9	1 8.5182-2 +8 -9 -42	\$ 6.5 - 10.0 cm	
10	1 8.5182-2 +9 -10 -42	\$ 10.0 - 11.0 cm	
11	1 8.5182-2 +10 -11 -42	\$ 11.0 - 11.5 cm	
12	1 8.5182-2 +11 -12 -42	\$ 11.5 - 20.0 cm	
13	1 8.5182-2 +12 -13 -42	\$ 20.0 - 21.0 cm	
14	1 8.5182-2 +13 -14 -42	\$ 21.0 - 21.5 cm	
15	1 8.5182-2 +14 -15 -42	\$ 21.5 - 30.0 cm	
16	1 8.5182-2 +15 -16 -42	\$ 30.0 - 31.0 cm	
17	1 8.5182-2 +16 -17 -42	\$ 31.0 - 31.5 cm	
18	1 8.5182-2 +17 -18 -42	\$ 31.5 - 40.0 cm	
19	1 8.5182-2 +18 -19 -42	\$ 40.0 - 41.0 cm	
20	1 8.5182-2 +19 -20 -42	\$ 41.0 - 41.5 cm	
21	1 8.5182-2 +20 -21 -42	\$ 41.5 - 50.0 cm	
22	1 8.5182-2 +21 -22 -42	\$ 50.0 - 51.5 cm	
23	1 8.5182-2 +22 -23 -42	\$ 51.5 - 60.0 cm	
24	1 8.5182-2 +23 -24 -42	\$ 60.0 - 61.0 cm	
25	1 8.5182-2 +24 -25 -42	\$ 61.0 - 70.0 cm	
26	1 8.5182-2 +25 -26 -42	\$ 70.0 - 71.5 cm	
27	1 8.5182-2 +26 -27 -42	\$ 71.5 - 80.0 cm	
28	1 8.5182-2 +27 -28 -42	\$ 80.0 - 81.0 cm	
29	1 8.5182-2 +28 -29 -42	\$ 81.0 - 90.0 cm	
30	1 8.5182-2 +29 -30 -42	\$ 90.0 - 91.5 cm	
31	1 8.5182-2 +30 -31 -42	\$ 91.5 - 95.0 cm	
c	**** rear air region ****		
32	2 4.9210-5 +31 -32 -41	\$ cell detector	
33	2 4.9210-5 +31 -32 +41 -42	\$	
c	**** external void ****		
34	0 -1 : +32 : +42	\$	
c	----- blank delimiter		
c	*****		面カード
c	* surface card *		
c	*****		
1	pz -21.0 \$ Source		
2	pz -2.0 \$ keV		
3	pz 0.0 \$ foil, TLD		
4	pz 1.5 \$ MeV, NE-g		
5	pz 2.5 \$ foil, TLD		
6	pz 4.0 \$ MeV		
7	pz 5.0 \$ foil		
8	pz 6.5 \$ MeV, NE-g		
9	pz 10.0 \$ foil, TLD, g-spec		
10	pz 11.0 \$ keV, eV		

```

11      pz      11.5 $ MeV, NE-g
12      pz      20.0 $ foil, TLD
13      pz      21.0 $ keV, eV
14      pz      21.5 $ MeV, NE-g
15      pz      30.0 $ foil, TLD, g-spec
16      pz      31.0 $ keV, eV
17      pz      31.5 $ MeV, NE-g
18      pz      40.0 $ foil, TLD
19      pz      41.0 $ keV, eV
20      pz      41.5 $ MeV, NE-g
21      pz      50.0 $ foil, TLD, g-spec
22      pz      51.5 $ MeV
23      pz      60.0 $ TLD
24      pz      61.0 $ keV, eV
25      pz      70.0 $ foil, TLD, g-spec
26      pz      71.5 $ MeV, NE-g
27      pz      80.0 $ TLD
28      pz      81.0 $ keV, eV
29      pz      90.0 $ TLD
30      pz      91.5 $ NE-g
31      pz      95.0 $ TLD
32      pz      97.0 $ keV
c
41      cz      4.0
42      cz      50.0
43      cz      10.0
c      ----- blank delimiter

c ****
c * mode card *
c ****
mode n p                                中性子・光子輸送の指定
c ****
c * variance reduction cards           *
c ****
ext:n  0      0      0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z
       0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z
       0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z   0.1z
       0      0      0
wwe:n  1.0e-3 1.0    5.0    10.0   16.0
wwp:n  5      3      5      0      0
wwn1:n $ for eV neutrons
       1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1
       5.0e-2 2.0e-2 1.0e-2 0.7e-2 0.5e-2
       0.3e-2 0.2e-2 1.0e-3 1.0e-3 1.0e-3
       1.0e-3 1.0e-3 1.0e-3 1.0e-3 1.0e-3
       1.0e-3 1.0e-3 1.0e-3 7.0e-4 5.0e-4
       3.0e-4 2.0e-4 1.0e-4 1.0e-4 1.0e-4
       1.0e-4 1.0e-4 1.0e-4 -1
wwn2:n $ for keV neutrons
       1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1
       5.0e-2 3.0e-2 2.0e-2 1.4e-2 1.0e-2
       1.0e-2 1.0e-2 1.0e-2 1.0e-2 1.0e-2
       1.0e-2 1.0e-2 1.0e-2 1.0e-2 1.0e-2
       1.0e-2 1.0e-2 1.0e-2 7.0e-3 5.0e-3
       3.0e-3 2.0e-3 1.0e-3 1.0e-3 1.0e-3
       1.0e-3 1.0e-3 1.0e-3 -1
wwn3:n $ for 1-5MeV neutrons
       1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1
       5.0e-2 5.0e-2 5.0e-2 2.0e-2 2.0e-2
       2.0e-2 1.0e-2 5.0e-3 5.0e-3 3.0e-3
       2.0e-3 2.0e-3 1.0e-3 5.0e-4 5.0e-4
       2.0e-4 1.0e-4 5.0e-5 2.0e-5 1.0e-5
       5.0e-6 2.0e-6 1.0e-6 1.0e-6 1.0e-6
       1.0e-6 1.0e-6 1.0e-6 -1

```

```

wwn4:n $ for 5-13 MeV Neutrons
 1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1
 5.0e-2 5.0e-2 5.0e-2 1.5e-2 1.5e-2
 1.5e-2 5.0e-3 1.5e-3 1.5e-3 6.4e-4
 3.2e-4 3.2e-4 1.6e-4 8.0e-5 8.0e-5
 4.0e-5 2.0e-5 1.0e-5 5.0e-6 2.5e-6
 1.2e-6 6.0e-7 3.0e-7 3.0e-7 3.0e-7
 3.0e-7 3.0e-7 3.0e-7 -1
wwn5:n $ for 14 MeV Neutrons
 1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1 8.5e-2
 7.0e-2 5.0e-2 4.0e-2 3.0e-2 2.0e-2
 1.0e-2 5.0e-3 1.5e-3 1.5e-3 5.0e-4
 1.5e-4 1.5e-4 5.0e-5 1.5e-5 1.5e-5
 6.4e-6 3.2e-6 1.6e-6 8.0e-7 4.0e-7
 2.0e-7 1.0e-7 5.0e-8 5.0e-8 5.0e-8
 5.0e-8 5.0e-8 5.0e-8 -1
wwe:p 100.0
wwp:p 5 3 5 0 0
wwnl:p $ for gamma-rays
 1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1 1.0e-1
 5.0e-2 5.0e-2 5.0e-2 2.0e-2 2.0e-2
 2.0e-2 1.0e-2 7.0e-3 7.0e-3 5.0e-3
 3.0e-3 3.0e-3 2.0e-3 1.4e-3 1.4e-3
 1.0e-3 7.0e-4 5.0e-4 3.0e-4 2.0e-4
 1.0e-4 7.0e-5 5.0e-5 5.0e-5 5.0e-5
 5.0e-5 5.0e-5 5.0e-5 -1
c ****
c * source specification cards * 線源定義カード
c ****
sdef erg=d1 pos=0 0 -20 vec=0 0 1 dir=d2 wgt=1.1261
sb2 -31 4.0
sil 1.0010-11 3.2241-07
 5.3156-07 8.7640-07 1.4449-06 2.3826-06 3.9278-06
 6.4758-06 1.0677-05 1.7603-05 2.9023-05 4.7850-05
 7.8891-05 1.3007-04 2.1455-04 3.5357-04 5.8293-04
 9.5110-04 1.2341-03 1.5846-03 2.0346-03 2.6125-03
 3.3546-03 4.3073-03 5.5307-03 7.1016-03 9.1186-03
 1.1709-02 1.5034-02 1.9304-02 2.1874-02 2.4787-02
 2.8087-02 3.1827-02 3.6065-02 4.0867-02 4.6308-02
 5.2474-02 5.9461-02 6.7378-02 7.6349-02 8.6515-02
 9.8035-02 1.1109-01 1.2588-01 1.4264-01 1.6163-01
 1.8315-01 2.0754-01 2.3517-01 2.6649-01 3.0197-01
 3.4217-01 3.8774-01 4.3936-01 4.9786-01 5.6415-01
 6.3927-01 7.2438-01 8.2084-01 9.3013-01 1.0540+00
 1.1943+00 1.3533+00 1.5335+00 1.7377+00 1.8498+00
 1.9691+00 2.0961+00 2.2313+00 2.3752+00 2.5284+00
 2.6914+00 2.8650+00 3.0498+00 3.2465+00 3.4559+00
 3.6787+00 3.9160+00 4.1686+00 4.4374+00 4.7236+00
 5.0282+00 5.3525+00 5.6978+00 6.0652+00 6.4564+00
 6.8728+00 7.3161+00 7.7879+00 8.2902+00 8.8249+00
 9.3940+00 9.9999+00 1.0157+01 1.0317+01 1.0480+01
 1.0645+01 1.0812+01 1.0983+01 1.1156+01 1.1331+01
 1.1510+01 1.1691+01 1.1875+01 1.2062+01 1.2252+01
 1.2445+01 1.2641+01 1.2840+01 1.3042+01 1.3248+01
 1.3456+01 1.3668+01 1.3883+01 1.4102+01 1.4324+01
 1.4550+01 1.4779+01 1.5012+01 1.5248+01 1.5488+01
sp1 0.0 1.5142-07
 2.2732-09 4.2225-09 7.4848-09 1.4264-08 8.3975-08
 1.8398-07 2.2450-07 1.3922-07 1.6817-07 2.9754-07
 3.8068-06 3.0541-06 2.2612-06 6.9372-06 7.2049-06
 8.7622-06 7.8013-06 1.4320-05 1.1820-05 1.6544-05
 1.4791-05 1.7624-05 2.8404-05 2.4899-05 3.7633-05
 4.4237-05 4.6320-05 6.1572-05 3.7185-05 5.3362-05
 4.4831-05 5.0292-05 5.7202-05 6.9230-05 8.0602-05
 8.3190-05 9.7450-05 1.0531-04 1.2632-04 1.4874-04

```

```

1.7906-04 3.7225-04 4.9933-04 5.3824-04 6.0762-04
7.0593-04 8.0965-04 9.5392-04 1.0785-03 1.2232-03
1.3867-03 1.5803-03 1.6473-03 1.8238-03 2.0605-03
2.2042-03 2.3040-03 2.5211-03 2.5709-03 2.5872-03
2.5765-03 2.7699-03 2.8528-03 2.5945-03 1.3898-03
1.4298-03 1.3270-03 1.3489-03 1.3820-03 1.4312-03
1.3760-03 1.4329-03 1.4558-03 1.3518-03 1.4053-03
1.2861-03 1.2741-03 1.1711-03 1.1937-03 1.0563-03
1.0018-03 8.8451-04 7.9827-04 7.9293-04 7.5872-04
6.9228-04 6.2956-04 5.1710-04 5.0750-04 5.1007-04
4.1280-04 3.5649-04 9.0768-05 8.2287-05 9.2862-05
9.1407-05 9.3708-05 7.9567-05 8.8737-05 8.7841-05
1.1227-04 1.6798-04 1.5985-04 1.6563-04 2.1025-04
4.1363-04 7.4899-04 7.8183-04 5.1771-04 4.5938-04
4.6458-04 9.1020-04 2.6083-03 9.5007-04 5.1474-03
3.0897-02 2.3565-01 4.0901-01 2.2296-01 1.4419-01
c ****
c * material specification cards * 物質定義カード
c ****
c --- Iron
m1 26000.38c 0.083508 12000.38c 0.000727 14000.38c 0.000249
25055.38c 0.000716
c --- air
m2 7014.38c 3.8810-5 8016.38c 1.0400-5
c --- materials for reaction rate
m3 5010.03y 1.0 $ B-10(n,alpha)
m4 13027.03y 1.0 $ Al-27(n,alpha)
m5 22000.03y 1.0 $ Ti-nat((n,x)Sc-48
m6 25055.38c 1.0 $ Mn-55(n,gamma)
m7 26056.03y 1.0 $ Fe-56(n,p)
m8 28058.03y 1.0 $ Ni-58(n,2n) & Ni-58(n,p)
m9 30064.03y 1.0 $ Zn-64(n,p)
m10 40090.03y 1.0 $ Zr-90(n,2n)
m11 41093.03y 1.0 $ Nb-93(n,2n)Nb-92m
m12 49115.03y 1.0 $ In-115(n,n')In-115m
m13 79197.03y 1.0 $ Au-197(n,gamma)
m14 92235.03y 1.0 $ U-235(n,fission)
c ****
c * tally specification cards * タリーカード
c ****
fc02 ---- neutron reaction rate surface r=4cm
f02:n 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
23 24 25 26 27 28 29 30 31
fs02 -41
fq02 s e f m
e02 16.0
fm02 (1) (1 1 1) (1 1 2) (1 1 102)
(1 3 107) (1 3 207) (1 4 107) (1 5 212) (1 6 102)
(1 7 103) (1 8 16) (1 8 103) (1 9 103) (1 10 16)
(1 11 16) (1 12 51) (1 13 102) (1 14 18)
fc12 ---- neutron energy spectrum (decade) surface r=4cm
f12:n 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
23 24 25 26 27 28 29 30 31
fq12 s f e
fs12 -41
e12 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1e+0 1e+1 2e+1
fc24 ---- neutron energy spectrum (decade) cell
f24:n 3 32
e24 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1e+0 1e+1 2e+1
fc32 ---- neutron energy spectrum surface r=4cm
f32:n 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
23 24 25 26 27 28 29 30 31

```

```

fs32 -41
fc44 ---- neutron energy spectrum      cell
f44:n 3 32
fc102 ---- gamma-ray energy spectrum    surface r=4cm
f102:p 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
   13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
   23 24 25 26 27 28 29 30 31
fs102 -41
fq102 s m e f
e102 1.0000-02 2.0000-02 3.0000-02 4.5000-02 6.0000-02
   8.0000-02 1.0000-01 1.5000-01 2.0000-01 3.0000-01
   4.0000-01 5.0000-01 5.2000-01 6.0000-01 7.0000-01
   8.0000-01 9.0000-01 1.0000+00 1.1300+00 1.2500+00
   1.3800+00 1.5000+00 1.7500+00 2.0000+00 2.2500+00
   2.5000+00 3.0000+00 3.5000+00 4.0000+00 4.5000+00
   5.0000+00 5.5000+00 6.0000+00 6.5000+00 7.0000+00
   7.5000+00 8.0000+00 9.0000+00 1.0000+01 1.2000+01
   1.4000+01
c -----
fq0  s m e f
e0  1.0010-11 3.2241-07
  5.3156-07 8.7640-07 1.4449-06 2.3823-06 3.9278-06
  6.4758-06 1.0677-05 1.7603-05 2.9023-05 4.7850-05
  7.8891-05 1.3007-04 2.1445-04 3.5357-04 5.8293-04
  9.6110-04 1.2341-03 1.5846-03 2.0346-03 2.6125-03
  3.3546-03 4.3073-03 5.5307-03 7.1016-03 9.1186-03
  1.1709-02 1.5034-02 1.9304-02 2.1874-02 2.4787-02
  2.8087-02 3.1827-02 3.6065-02 4.0867-02 4.6308-02
  5.2474-02 5.9461-02 6.7378-02 7.6349-02 8.6515-02
  9.8035-02 1.1109-01 1.2588-01 1.4264-01 1.6163-01
  1.8315-01 2.0754-01 2.3517-01 2.6649-01 3.0197-01
  3.4217-01 3.8774-01 4.3936-01 4.9786-01 5.6415-01
  6.3927-01 7.2438-01 8.2084-01 9.3013-01 1.0540+00
  1.1943+00 1.3533+00 1.5335+00 1.7377+00 1.8498+00
  1.9691+00 2.0961+00 2.2313+00 2.3752+00 2.5284+00
  2.6914+00 2.8650+00 3.0498+00 3.2465+00 3.4559+00
  3.6787+00 3.9160+00 4.1686+00 4.4374+00 4.7236+00
  5.0282+00 5.3525+00 5.6978+00 6.0652+00 6.4564+00
  6.8728+00 7.3161+00 7.7879+00 8.2902+00 8.8249+00
  9.3940+00 9.9999+00 1.0157+01 1.0317+01 1.0480+01
  1.0645+01 1.0812+01 1.0983+01 1.1156+01 1.1331+01
  1.1510+01 1.1691+01 1.1875+01 1.2062+01 1.2252+01
  1.2445+01 1.2641+01 1.2840+01 1.3042+01 1.3248+01
  1.3456+01 1.3668+01 1.3883+01 1.4102+01 1.4324+01
  1.4550+01 1.4779+01 1.5012+01 1.5248+01 1.5488+01
c ****
c * problem cutoff cards *                                カットオフカード
c ****
phys:n 16.0 0.0
phys:p 30.0 1 0
phys:e 30.0 1 1 1 1 1 1 1
cut:n 0 1.0e-11 -0.5 -0.25 0
cut:p 0 0.0099 -0.5 -0.25 0
nps 1000000
ctme 1000000
c ****
c * peripheral crads *                                その他のカード
c ****
prdmp 1000000 200000 1 1
lost 10 10
print

```

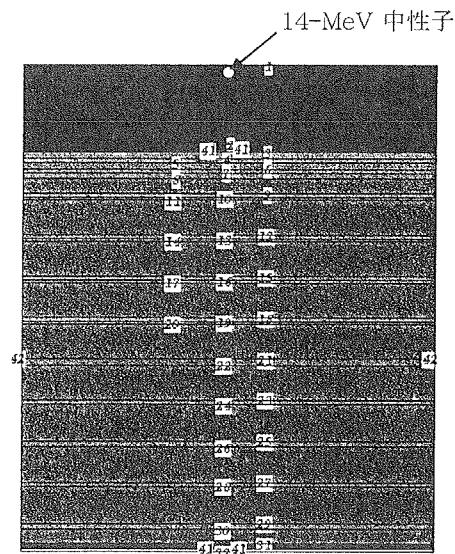


図4 面番号と物質組成。

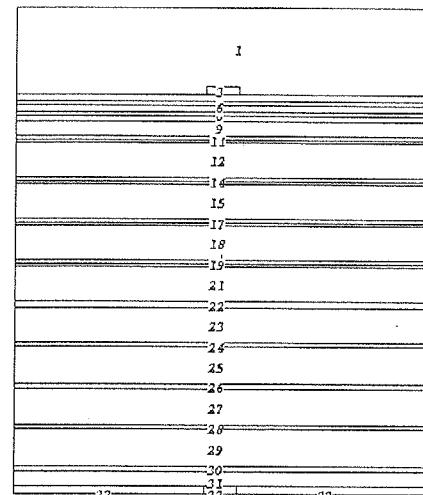


図5 セル番号。

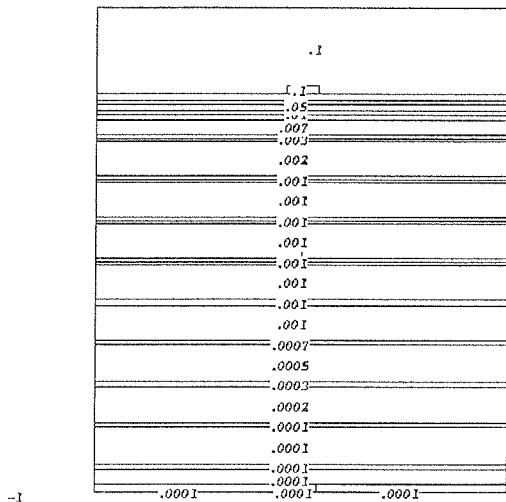
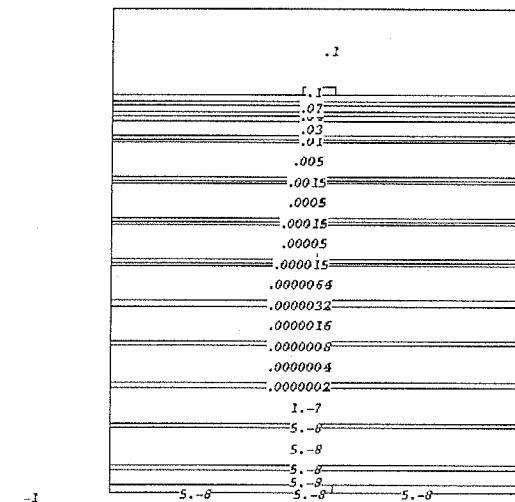
図6 1 keV 以下の中性子に対するウエイト
カットオフパラメータ。図7 10 MeV 以上の中性子に対するウエイト
カットオフパラメータ。

図4～図7には、先に示した入力データをもとに、MCNPのプロット機能を利用して作図した体系図を示す。作図の都合上、図1の体系を時計回りに90度回転させてある。図の上端中央付近に14-MeV中性子源があり、そこで発生した中性子は図の下方向に向かって透過していく。一部の数字が重なっていて読みとれない部分もあるが、これらの図は入力データの理解には役立つであろう。

図4には面番号と各セルの物質が色分けされており、上端と下端の濃度の濃い部分が空気、中央の濃度の薄い部分が鉄である。図5はセル番号である。セルは、中性子の透過方向に対して垂直に分割してある。実験で検出器が置かれたすべての位置に面検出器を設定したために、厚さの薄いセルがいくつか見られる。

分散低減にはウェイトウインドウを主に使用している。wwe:nカードでウェイトウインドウパラメータを与える中性子のエネルギー境界を定義しており、1keV以下、~1MeV、~5 MeV、~10MeV、10MeV以上の5領域に分けてある。それぞれのエネルギー領域に対するウェイトウインドウパラメータはwwn1:n～wwn5:nカードで与えられており、wwn1:n、wwn5:nの場合のパラメータをそれぞれ図6、図7に示してある。体系深部に進むに従ってウェイトカットオフの値を小さく設定し、また減衰の激しい14MeV中性子に対してはパラメータの変化の度合いを強めてある。ちなみにこれらのパラメータは試行錯誤により決定したが、MCNPのウェイトウインドウジェネレータを用いるのが有効であろう。ただしこの場合でも、エネルギー境界やセルの境界はユーザーがあらかじめ設定する必要がある。

線源定義カードでは、(0, 0, -20)の位置にある点状線源から放出される中性子を表現している。エネルギースペクトルはsi1(エネルギーBIN)とsp1(各BINの確率)で表されている。実際の線源はほぼ等方に中性子を発するが、計算では体系のある方向により多くの中性子を発生させるために線源角度バイアスを適用しており、sdefカードのvec, dir及びsb2カードで定義している。sdefカード、wgtパラメータの値は、結果の規格化のために使用している。

物質カードでは、m1(鉄)、m2(空気)のみを実際の輸送計算で使用している。m3～m14までは実験で測定された反応率を計算するためのもので、体系を構成する物質とは無関係だが、後のタリーカードのところで使用している。

タリーカードでは、実験で測定された諸量との比較が行いやすいように6個のタリーを設定している。f02は反応率、f12, f24は各エネルギー領域ごとの中性子束、f32, f44は中性子スペクトル、f102は γ 線スペクトルである。f02, f12, f32, f102は面検出器である。実験では、検出器は円柱状体系の中心軸付近に置かれている。これを考慮するため、fsカードで面41(半径4cmの円筒)の内側のみを分離してタリー領域として設定している。

カットオフカードでは、phys:p, phys:eカードにおいて電子輸送を全く考慮しないオ

プションを採用している。光子輸送計算において電子輸送を考慮しないとき、計算結果の正確さが多少失われ、MCNP はワーニングを発する。しかし、電子輸送まで含めて計算すると、計算時間が数倍以上に増大することがあり、また多くの場合に電子輸送が光子の計算結果に与える影響は無視できる。このため、電子輸送を考慮しないことは計算時間の節約に対して有効である。ただし、電子輸送を考慮しないと計算結果が変わることは常に意識しておき、必要であれば確認をする必要である。

参考文献

- 1) Oishi K., Ikeda Y., Konno C. and Nakamura T.: "Measurement and Analysis of Neutron Spectra in a Large Cylindrical Iron Assembly Irradiated by 14 MeV Neutrons" , Proc. 7th International Conference Radiation Shielding, Bournemouth, United Kingdom, Sept. 12-16, 1988, pp. 331-340, United Kingdom Atomic Energy Authority, Winfrith and the Organization for Economic Cooperation and Development, Nuclear Energy Agency (1988).
- 2) Konno C., Ikeda Y., Kosako K., Oyama Y., Maekawa H., Nakamura T. and Bennet E. F.: "Measurement and Analysis of Low Energy Neutron Spectrum in a Large Cylindrical Iron Assembly Bombarded by D-T Neutrons" , Fusion Eng. Des., 18, 297 (1991).
- 3) Maekawa F. and Oyama Y.: "Measurement of Neutron Energy Spectra below 10 keV in an Iron Shield Bombarded by D-T neutrons and Benchmark Test of Recent Evaluated Nuclear Data Libraries from 14 MeV Down to 1 eV" , Nucl. Sci. Eng., 125, 205 (1997).
- 4) Maekawa F., Oyama Y., Konno C., Wada M. and Ikeda Y.: "Measurement of Gamma-Ray Spectra and Heating Rates in Iron and Stainless Steel Shields Bombarded by Deuterium-Tritium Neutrons and Validation of Secondary Gamma-Ray Data in Evaluated Nuclear Data Libraries" , Nucl. Sci. Eng., 126, 187 (1997).

7. 問題設定及び計算

桜井 淳

日本原子力研究所東海研究所

sakurai@melody.tokai.jaeri.go.jp

植木紘太郎

船舶技術研究所

ueki@srimot.go.jp

臨界問題

三次元座標原点に半径 $R(\text{cm})$ の仮想物質がある。それは、密度 18.7g/cm^3 であり、水素 0.10、ウラン-235 0.10、ウラン-238 0.80 からなる。ただし仮想物質の外はインポータンスがゼロとする。

①臨界になる R を求めよ。

②仮想物質内の中性子スペクトルをトラックレングスエスティメータ(F4)で求めよ。

③仮想物質表面の中性子スペクトルをサーフェイスクロッシングエスティメータ(F2)で求めよ。

④上記ふたつの中性子スペクトルの特徴を述べよ。

仮想物質の外側を厚さ 5cm のベリリウムで一様に覆った時、臨界になる R を求めよ。ただしベリリウムの個数密度は 1.2287E-01 、ベリリウムの外側のインポータンスはゼロとする

遮蔽問題

第 3 章の図-5 及び-6 参照。

現状把握及び計算上達の方法論

モンテカルロ法の基礎理論を学ぶには MCNP-4B のマニュアルが最もよいように思える。特に第 2 章「幾何、データ、物理及び数学」の章末には 92 編の論文・報告書が引用されているので参考になる。日本のモンテカルロ研究の現状についてはつぎの『原子力誌』「談話室」2000 年 10 月号の内容が簡潔でわかりやすい。モンテカルロ法研究の現状は文献(3)(4)、モンテカルロ法基礎理論は文献(8)、様々な専門分野における計算例及び全入力リストは文献(1)(2)に記されている。特に初心者はいきなり文献(1)(2)(3)(4)(8)から入っても十分に理解できるものと思われる。

上記の臨界問題は最も簡単な例である。この計算条件に留まらず、仮想物質の部分を様々な濃縮度のウランにしたり、様々な富化度のプルトニウムにしたり、また反射体の部分を水等、他の材質で置き換えて計算するとよいだろう。それにより臨界量や中性子スペクトルがどのように変化するか、炉物理的の考察をお勧めする。体系を立方体にして同様の計算をくり返すのもよい演習になる。

上記の遮蔽問題も最も簡単な例である。①この問題では線源は 2MeV の単色中性子であるが、Watt 型中性子スペクトルにしたり、14MeV 核融合中性子スペクトルにしたり、②水の厚さを 1、1.5、2 メートルにして、③水だけでなく、代表的な遮蔽材である鉄やコンクリートについても計算するとよい。①②③の様々な組み合わせで興味深い計算ができる。どのような体系で、どのくらいの中性子エネルギーで、どの遮蔽体で、どのエスティメータで、どのくらいの計算時間がかかるか、様々な計算を行うことにより経験的に学ぶ以外にない。50 センチの遮蔽体の計算は容易だが、計算のおもしろさは約 1 メートル以上から味わえる。

計算者の努力により、上記のふたつの簡単な例題から、様々な計算条件に変えて行くことにより、わずか半年で一般的な研究に利用可能な計算ができるようになるものと思われる。ノート型パソコンが利用できることにより、職場だけでなく、自宅、通勤途中でも計算条件を変更して実行できるため、上達するのが早いだろう。上達するには継続的に経験を積み重ねる以外にない。

原子力誌「談話室」2000年10月号

モンテカルロ研究の方法論と組織論

日本原子力研究所 桜井 淳
船舶技術研究所 植木紘太郎
(株)ナイス 内藤淑孝

日本にモンテカルロ研究の大きな流れを作るために、いくつかの新しい試みを行った。関係者の協力をいただくために、ここに全体構想を示し、今後の課題を明らかにしておきたい。

年度	実施(計画)事項
1996	原子力コード研究委員会原子力コード評価専門部会「MCNP 使用経験」WG 設置・活動
1997	同 WG 活動
1998	「MCNP 使用経験」WG を「モンテカルロシミュレーション」WG に改名(MCWG) 原子力コード研究委員会主催第1回「モンテカルロシミュレーション」研究会開催(参加者120名) 日本原子力学会「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会設置(83名)
1999	同部会「MCNP 高温ライブラリ作成」WG 設置
2000	MCWG の成果-モンテカルロ計算教科書『モンテカルロ計算ガイドライン』完成 「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会延長手続き 同委員会主催第1回「モンテカルロ計算夏季セミナー」開催(参加者110名)
2001	同委員会主催アジア圏を含む150名規模の準国際会議(第2回「モンテカルロシミュレーション」研究会)開催
2002	第2期モンテカルロ研究専門委員会構想
2004	同委員会主催150名規模の国際会議(第3回「モンテカルロシミュレーション」研究会)開催

まず、1996年度に日本原子力研究所の原子力コード研究委員会原子力コード評価専門部会に国内の主なMCNP計算担当者を集めて、「MCNP 使用経験」ワーキンググループ(WG)を設置した。そして、臨界、遮蔽、炉心、被曝、高エネルギー、核融合中性子等、原子力分野におけるモンテカルロ計算の現状を調査検討した^{⑪)}。

議論は分散低減法の適用状況に集中した。やはり遮蔽計算での適用例が優れており、他の分野においては必ずしもベストソリューションになっているとは言いがたい状況であった。ただしITERの遮蔽計算には注意が払われていた。臨界計算の単純な固有値問題では分散低減法に注意を向ける必要はほとんどないことがわかった。パルス中性子法のシミュレーションでは遮蔽計算並みの分散低減法の適用が欠かせないことがわかった。熱中性子体系では、低エネルギー中性子の散乱シミュレーションに計算時間が費やされ、分散低減法の適用によるメリットはあまり生きてこない。

計算体系の空間依存最適ウエイトを推定するためのMCNPに内臓されているWWG(weight window generator)は、まだ一般性がなく、計算者の経験やノウハウに依存しなければならないことがわかった。

今ではモンテカルロ計算に高速のワークステーションやパソコンが自由自在に利用できるため、必ずしも分散低減法に神経質になる必要はなく、とにかく物理的に正しい結果を得ること

が先決である。ただし筆者の一人、植木は、計算機依存型でなく、計算技術依存型のモンテカルロ計算の必要性をくり返し強調した。

筆者の一人、桜井は、原研の机上のノート型パソコンのみならず、自宅の2台のパソコンにも MCNP-4B 及び汎用ライブラリをインストールし、詳細な炉物理理論の研究やモンテカルロ計算法の研究に利用している。それらはいずれも原研の大型計算機並みの処理能力を持っている。個人でもこのようなことが可能な時代になった。

1998 年度には MCNP のみならず、MVP 等すべてのモンテカルロコードを対象とすべく、「MCNP 使用経験」WG の名称を「モンテカルロシミュレーション」WG に改名した。そして、それまでの調査検討結果に新たな話題を加え、原子力コード研究委員会主催の第1回「モンテカルロシミュレーション」研究会を開催した³⁾⁴⁾。参加者は 120 名と盛況であった。

さらにその年、日本原子力学会に「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会を設置した。委員及び常時参加者は 83 名に達した。学会内では最も大きな専門委員会になった。専門委員会の設置は、日本のモンテカルロ関係者の活動の中心を原研から学会に移すためであった。そのため、専門委員会は、「モンテカルロシミュレーション」WG が母体になっている。

1999 年度には同部会に「MCNP 高温ライブラリ作成」WG を設置し、それまでの汎用ライブラリの 340 核種を対象に、JENDL-3.2 から、293、600、900、1200、1500、2000K の断面積を編集し、編集システム autonj と共に公開した⁵⁾。新たに開発した autonj では従来の 100 分の 1 の時間で編集できるようになった。同年度には「モンテカルロシミュレーション」WG が設置目的を達したため⁶⁾⁷⁾、解散し、学会での活動に一本化した。

2000 年度には「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会の延長手続きを行った。また、「モンテカルロシミュレーション」WG の 4 年間の活動成果をモンテカルロ計算教科書『モンテカルロ計算ガイドライン』⁸⁾にまとめ、原研の研究報告書として公開した。

また、「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会主催による第1回「モンテカルロ計算夏季セミナー」を原研で開催した(詳細は改めて報告)⁹⁾。参加者は、定員 30 名に対し、大学、原研、サイクル機構、企業等から 110 名にもおよび、予想外の人数であった。参加者にはノート型パソコンを持参していただき、実行委員会が作成した CD から MCNP-4B システムをワンタッチインストール後、直ちに例題入力で実行するようにした。なお、第1回目は、全体調整の関係上、MCNP-4B のみだったが、今後は他の複数のモンテカルロコードのコースも設けたい。次世代を担うモンテカルロ計算者を養成すべく、責任を果たしたい。

非分離共鳴領域の取り扱いに確率テーブル断面積を導入した MCNP-4C の公開にともない、それまでの断面積ライブラリが読み込めないため、autonj を利用して JENDL-3.3 から高温ライブラリを作成すべく、すでに解散した「MCNP 高温ライブラリ作成」WG のメンバーが中心になり、まずその編集の妥当性を評価するために、autonj で JENDL-3.2 を処理し、ベンチマーク実験解析を行い、2001 年 3 月に公開予定の JENDL-3.3 を待って一気に処理することを計画している。確率テーブルの作成処理に時間がかかり、従来に比べ、10 倍にも達する見込みである。

「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会は、2001 年 5 月 24-25 日に東京大手町の三菱総合研究所で、アジア圏を含む 150 名規模の第2回「モンテカルロシミュレーション」研究会を開催すべく、準備中である。今回、5 件の招待講演の他は、発表テーマを広く公募することにした。アジア圏を含めたのは、日本のモンテカルロ研究の成果を広く公開するためであり、また相互協力体制を築くためである。すでにそのようなことを実施している核データ研究会からの情報は参考になった。プロシーディングは同専門委員会の成果物として学会から刊行予定である。

同専門委員会は、150 名規模の第3回「モンテカルロシミュレーション」研究会を 2004 年に開催する予定である。それを国際会議にしたいと考えている。我々は、核データや炉物理、臨界、遮蔽の国際会議同様、モンテカルロ研究での世界統一された定期的な国際会議の必要性を感じ、第3回「モンテカルロシミュレーション」研究会はそのような意味を持たせた国際会議としたいと考えている。

組織面と資金面の関係で原研との共催を検討している。これらの計画を実現するために、関係者のご協力をお願いいたします。

参考文献

- 1) 内藤淑孝、桜井 淳編:原子力研究におけるMCNPの使用経験、JAERI-Review 97-003(1997).
 - 2) 桜井 淳、山本俊弘編: 原子力研究におけるMCNPの使用経験(II)-分散低減法の検討、JAERI-Review 98-010(1998).
 - 3) 原子力コード研究委員会原子力コード評価専門部会:第1回「モンテカルロシミュレーション研究会」報文集、JAERI-Conf(投稿中).
 - 4) 植木紘太郎、森 貴正、桜井 淳、中川正幸、内藤淑孝:モンテカルロ法による中性子・光子輸送シミュレーションの現状、原子力誌、Vol.41、No.6、pp.614-627(1999).
 - 5) 前川藤夫、桜井 淳、小迫和明、久米悦雄、川崎信夫、野村靖、内藤淑孝:MCNPライブラリ自動編集システム autonj、JAERI-Data/Code 99-048(1999).
 - 6) 桜井 淳、山本俊弘編: 原子力研究におけるモンテカルロシミュレーション、JAERI-Review 99-013(1999).
 - 7) 原子力コード研究委員会原子力コード評価専門部会: 原子力研究におけるモンテカルロシミュレーション(II)、JAERI-Review(投稿中).
 - 8) 桜井 淳、内藤淑孝、植木紘太郎、山本俊弘、増川洋史、長家康展、佐藤 聰、山下清信、松本誠弘、星 正治、樋口健二、野村 靖:モンテカルロ計算ガイドライン-モンテカルロ法による中性子・光子輸送シミュレーション、JAERI-Review(投稿中).
 - 9) 桜井 淳、植木紘太郎、久米悦雄、矢田部 茂、前川藤夫、森 貴正、内藤淑孝:第1回「モンテカルロ計算夏季セミナー」実施報告、JAERI-Review(投稿中).
-

8. 成果及び課題

桜井 淳、森 貴正

日本原子力研究所東海研究所

sakurai@melody.tokai.jaeri.go.jp mori@mike.tokai.jaeri.go.jp

植木 紘太郎

船舶技術研究所

ueki@srimot.go.jp

予定通り実施した。原研でいちばん大きなセミナー室にも関わらず、混雑し、イモを洗うような状況だった。パソコン107台起動の光景はめったに見られない。感激した。インストール及び試計算、演習も予定通りだった。最終日にも途中で帰る人はわざがにすぎず、最後まで会場はいっぱいになっており、参加者の皆さんのがいかに熱心であったか実感することができた。

反省点がいくつかある。企画及び準備、実施が一部の関係者に偏ってしまった。単なる講演ならば楽だったのだが、パソコンでの演習があったため、作業量が多くなり、大変な作業だった。また3日間ぶっ続けの現場作業も大変だった。今回のセミナーは、通常研究会の倍の作業量であり、今後はこのような規模のセミナーの開催は非常に難しいように感じた。

パソコンの機種・性能については事前に注意を喚起していたが、当日、パソコンが壊れていることに気づいた人がいた。

入門・受付時間を7/26 9:35-9:55に限定するというアナウンスを事前にしていたにも関わらず、当日25名のルール違反があった。セミナー実施担当者の人数が少ないと、他に手がかかり、担当者は1時間も2時間も正門で受付ができる状況ではなかった。そのため受付時間を限定したつもりだったのだが。

原研内の同研究専門委員会委員に講師の依頼を行ったが、当日のスケジュール等の関係で、なかなか調整がつかず、特定の人に負担を強いる結果になってしまった。ボランティアでの対応をお願いしたのも反省材料かも知れない。初級コースの時間割は、今後、部分的改善で対応できるものと思う。

今回、中級コース5名の申し込みがあり、2名については経験年数が不足していたため、お断りした。上級コースの申し込みはゼロだった。今回、中級コースの現実的申し込み数が推定できなかつたため、様子を見るために計4時間の自由討論としたが、やはりノート型パソコンを持参していただき、計算しながら討論を深めるやり方が好ましいように感じた。参加者から提起された中級コースの主要討論テーマは、①「常陽」中性子照射場の照射条件評価について(MCNP、固定源問題、分散低減法)、②相互干渉系における周りの水の最適密度について(臨界安全)、③輸送容器の臨界安全解析におけるモデル化について(バスケット外側-容器内側のモデル化、水とアルミの比較)、④未臨界度の深い場合のkeff計算精度について

(未臨界増倍系における中性子源からの中性子の増倍効果の評価法)、⑤臨界安全解析におけるモンテカルロ計算(中性子源分布)の収束について、⑥遮蔽の許認可にMCNPを使う場合のFSDの扱い等である。

今後、中級及び上級コースにおいても、初級とは時期をずらせ3日間、内容豊富な時間割を決め、質の高い議論を展開したいと考えている。

今回は、①中性子の計算(臨界及び深層透過)のみだったが、今後は、②光子(100MeV)、③電子(100MeV)、④中性子-光子結合計算、⑤光子-電子結合計算、⑥中性子-光子-電子結合計算も考慮したいと考えている。深層透過計算におけるウエイト・ウインドウ・ジエネレータ(WWG)機能の利用の仕方についても欠かせないように感じた。セミナー後、桜井は②③④⑤⑥及び深層透過計算におけるWWG機能の検討を行い、どのような講義及び演習内容が分かりやすいか、今後のために資料を作成した。3年計画くらいで上級コースまで整備できればと考えている。

今回、痛感したことは、セミナーにおいて次世代を担うモンテカルロ計算者・研究者を養成する前に、面倒見が良く、教育熱心で実力派のモンテカルロ講師を養成する必要性を痛感した。今後は、大学、研究機関、企業から講師を募り、名実ともに all Japan で対応したいと考えている。

謝辞

日本原子力研究所東海研究所副所長の早田邦久氏には本セミナー実施に当たりご指導・ご協力をいただきました。ここに記し感謝の言葉としたい。

初回の夏季セミナーにも関わらず、このように盛大に開催することができた。参加者及びすべての関係者に感謝したい。まだまだ小さな第一歩だが、モンテカルロ法が計算のリファレンスに成長するまで、微力ながらご奉仕したい。

付録 参加者リスト

日本原子力学会「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会主催
 「モンテカルロ計算夏季セミナー」
 参加希望者（受付順）

初級コース

01) 杉村直紀	原子力エンジニアリング	nsugimura@nelt.d.co.jp
02) 吉田昌弘	原子力安全技術センター	yoshida@nustec.or.jp
03) 桜井敏春	東大院 M(資料のみ)	sakura@flanker.q.t.u-tokyo.ac.jp
04) 中尾 誠	川崎重工業	nakao_m@khi.co.jp
05) 吉田忠義	サイクル機構	yoshichu@tokai.jnc.go.jp
06) 栗原 治	サイクル機構	okuri@tokai.jnc.go.jp
07) 金井克太	サイクル機構	kkanai@tokai.jnc.go.jp
08) 東條 志	シーティーアイ	tohjoh@chance.cti.co.jp
09) 磯部武志	シーティーアイ	takeshi@chance.cti.co.jp
10) 露木 陽	東芝	akira.tsuyuki@toshiba.co.jp
11) 大石晃嗣	清水建設	oishi@sit.shimz.co.jp
12) 桜井 裕	情報システム研	sakura@pa2.so-net.ne.jp
13) 安部晋司	エンジニアリング開発	abesin@edc.atom.hq.mhi.co.jp
14) 小林達夫	エンジニアリング開発	kobayashi@edc.atom.hq.mhi.co.jp
15) 辻 政俊	東洋エンジニアリング	tsujim@ga.toyo-eng.co.jp
16) 白川利久	原研	shira@jpsnews1.tokai.jaeri.go.jp
17) 丸山 創	サイクル機構	maruyama@tokai.jnc.go.jp
18) 中島真司	サイクル機構	nkj.m@tokai.jnc.go.jp
19) 工藤政彦	サイクル機構	masa1022@tokai.jnc.go.jp
20) 泥谷雅之	原子力エンジニアリング	mhijiya@nelt.d.co.jp
21) 渡部直人	電力中研	watabe@criepi.denken.or.jp
22) 三浦康彦	サイクル機構	y.miura@tokai.jnc.go.jp
23) 龍井孝信	東芝	takanobu1.a.kamei@glb.toshiba.co.jp
24) 飯塚弘之	CSD	iizuka@csd.co.jp
25) 林 浩子	日本総研	h-hayashi@osa.sci.jri.co.jp
26) 荒井秀幸	石川島播磨重工業	hideyuki_arai@ihi.co.jp
27) 岩下充成	石川島播磨重工業	mitsushige_iwashita@ihi.co.jp
28) 辞退 6/23		
29) 程衛英	サイエンスソリューションズ	cheng@ssil.com
30) 牧野 徹	原子力システム	makino@nesi.co.jp
31) 谷口 洋	三菱重工業	taniguti@ncore.kobe.mhi.co.jp
32) 古作泰雄	原研	kosakuy@fusion.naka.jaeri.go.jp
33) 津田修一	原研	tsuda@frs.tokai.jaeri.go.jp
34) 辞退 7/13		
35) 佐藤篤司	武藏工大院M1	mtetsuo@atom.musashi-tech.ac.jp
36) 早川信博	武藏工大院M2	mtetsuo@atom.nusashi-tech.ac.jp
37) 高橋史明	原研	taka@frs.tokai.jaeri.go.jp
38) 澤田哲生	東工大	tetsuo@nr.titech.ac.jp
39) 久保田 勇	日立エンジニアリング	l_kubota@psg.hitachi-hec.co.jp
40) 中塙 亨	原研	nakatuka@jpsnews1.tokai.jaeri.go.jp
41) 熊谷直己	日立	kuma@erl.hitachi.co.jp
42) 若林源一郎	九大	gensan@nucl.kyushu-u.ac.jp
43) 船越一宏	九大	funa@nucl.kyushu-u.ac.jp

44)菅原雅敏	日本ニュクリアファエル	masatoshi.sugawara@GNF.com
45)細見憲治	東芝	kenji.hosomi@toshiba.co.jp
46)堀木幹夫	名大	m-horiki@nucl.nagoya-u.ac.jp
47)中野高志	放医研	nakano@nirs.go.jp
48)田原義壽	三菱重工業	tahara@atom.hq.mhi.co.jp
49)嶋田昭一郎	原研	shimada@jpsrews1.tokai.jaeri.go.jp
50)鈴木敏和	富士電機(資料のみ)	suzuki-toshikazu@fujielectric.co.jp
51)上田 治	富士電機	ueda-osamu@fujielectric.co.jp
52)松本 嶽	富士電機	matsumoto-iwao@fujielectric.co.jp
53)大野浩之	KCS	hirohno@gw.kcscorp.co.jp
54)菊池 司	東芝	tsukasa.kikuchi@toshiba.co.jp
55)森木保幸	東芝	yasuyuki.moriki@toshiba.co.jp
56)竹澤伸久	東芝	nobuhisa.takezawa@toshiba.co.jp
57)錢谷桂太	東大学部学生	zenitani@soil.en.a.u-tokyo.ac.jp
58)井上慎一	核管センター	inoue@jnmcc.or.jp
59)村尻昌浩	核管センター	murajiri@jnmcc.or.jp
60)辞退 6/23		
61)西沢博志	三菱電機	nishizw@con.sdl.melco.co.jp
62)西浦竜一	三菱電機(資料のみ)	nishiura@sen.sdl.melco.co.jp
63)八木理公	原研	yagi@jrr3sep2.tokai.jaeri.go.jp
64)茅野栄一	原研	chino@sarl.tokai.jaeri.go.jp
65)山西弘城	核融合研	yamanisi@nifs.ac.jp
66)小野 壮	北大院	ono@roko.qe.eng.hokudai.ac.jp
67)来住正人	MRI システム	kurusumi@mrisys.co.jp
68)八幡直樹	三菱重工業	naoki_yahata@n.trdc.mhi.co.jp
69)佐川宏幸	福山大	sagawa@fuee.fukuyama-u.ac.jp
70)足立宗久	東電ソフトウエア	pac48040@mail.wics.ne.jp
71)林 大和	東芝	yamato.hayashi@toshiba.co.jp
72)広田正行	産技短大(資料のみ)	hirota@cit.sangitan.ac.jp
73)加島武一郎	東工大院 M1	00m19090@nr.titech.ac.jp
74)今村 友	東工大院 M2	99m36059@nr.titech.ac.jp
75)辞退 6/29		
76)下条 純	神戸製鋼	j.shimojyo@engnet.kobelco.co.jp
77)牧原康裕	名大院 M2	makihara@avocet.nucl.nagoya-u.ac.jp
78)中 亮太郎	名大院 M2	同上
79)金山勇一郎	原燃工	kanayama@nfi.co.jp
80)辞退 6/23		
81)山田琢馬	北大院 M 1	sawamura@eng.hokudai.ac.jp
82)八巻辰二	北大院 M1	同上
83)前田茂貴	サイクル機構	maeda-s@oec.jnc.go.jp
84)望月弘樹	原研	mochi@cyclone.tokai.jaeri.go.jp
85)大村昌樹	三菱重工業	masaki_omura@kind.kobe.mhi.co.jp
86)樋口真史	サイクル機構	masashi@tokai.jnc.go.jp
87)田村俊幸	東芝	toshiyuki.tamura@toshiba.co.jp
88)渡辺将人	中部電力	Watanabe.Masato@chuden.co.jp
89)中島正義	サイクル機構	nakaji@tokai.jnc.go.jp
90)白井更知	サイクル機構	shirai@tokai.jnc.go.jp
91)堀田亮年	東電ソフト	hotta@tsi.co.jp
92)前田 正	東電ソフト	maeda@tsi.co.jp
93)町田秀夫	東電ソフト	machida@tsi.co.jp

94)高谷暁和	サイクル機構	takaya@tokai.jnc.go.jp
95)辞退 6/23		
96)辞退 6/23		
97)佐藤 齊	茨城県立医療大	satoh@ipu.ac.jp
98)茶谷 浩	京大原子炉	chatani@rri.kyoto-u.ac.jp
99)河村真一郎	東芝	shinichiro.kawamura@toshiba.co.jp
100)延原文祥	東京ニュークリア	nobuhara@tokyo-nucl.co.jp
101)奥村愛一郎	電力中研	okumura@criepi.denken.or.jp
102)柳下拓也	電力中研	yagisita@criepi.denken.or.jp
103)伊藤慶昭	CSD	y_ito@csd.co.jp
104)在間直樹	三菱マテリアル	zaim@mmc.co.jp
105)仙波太郎	原研	sen@oarai.jaeri.go.jp
106)高橋 聰	原燃工	S-TAHASI@nfi.co.jp
107)山本修二	京大炉	yamamoto@rri.kyoto-u.ac.jp
108)辞退 7/5		
109)藤井克治	KCS	kafujii@gw.kcscorp.co.jp
110)辞退 6/30		
111)富永 洋	応用量子研	tominagh@nifty.com
112)松本哲郎	東工大	tetsuro@nr.titech.ac.jp
113)辞退 7/11		
114) 岩崎誠司	原子力システム	iwasaki@fugen.t-hq.jnc.go.jp
115)大林由英	北大	oba@ndf.meme.hokudai.ac.jp
116)福村明史	放医研	fukumura@nirs.go.jp
117)杉 輝夫	個人	sugiteru@d3.dion.ne.jp

中級コース

01)辞退 7/11		
02)深作泰宏	原子力システム	fukasaku@nesi.co.jp
03)関根 隆	サイクル機構	sekine@oec.jnc.go.jp
04)寺田明彦	三井造船	tera@mes.co.jp
05)辞退 7/13		

This is a blank page.

「モンテカルロ計算夏季セミナー」実施報告