



JP0150807

JAERI-Data/Code

2001-027



任意形状の中性子用シンチレータに対する  
応答関数計算コードSCINFUL-CGの開発

2001年10月

遠藤 章・金 ウンジュ・山口 恭弘

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。  
入手の問合わせは、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、お申し越し下さい。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行っております。

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, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

任意形状の中性子用シンチレータに対する応答関数計算コード SCINFUL-CG の開発

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

遠藤 章・金 ウンジュ・山口 恭弘

(2001年8月30日受理)

高エネルギー中性子スペクトル測定等に用いられている有機シンチレータに対する応答関数の計算には、モンテカルロコード SCINFUL が広くが利用されている。しかし、SCINFUL の機能は、円柱形状の NE213 及び NE110 シンチレータに対する計算のみに限定されている。本研究では、SCINFUL を基に、幾何形状指定機能及び高エネルギー中性子に対する輸送計算用の断面積データを新たに組み入れた計算コード SCINFUL-CG を開発した。SCINFUL-CG では、検出器形状の指定に、CG (Combinatorial Geometry) による幾何形状指定機能を拡張した MARS-CG (Multiple Array System Using Combinatorial Geometry) を導入するとともに、CG で定義された領域毎に中性子スペクトルを評価する機能を加えた。また、ガラスシンチレータの主成分である珪素及び酸素、検出器カバーのアルミニウムについて、高エネルギー中性子・陽子ファイル LA150 を用い、100 MeV までの中性子輸送用の断面積データを組み込んだ。SCINFUL-CG の計算結果の妥当性は、SCINFUL 及び MCNP による計算結果との比較並びに中性子照射実験によって確認した。SCINFUL-CG により、任意形状の有機シンチレータに対して、応答関数及び中性子スペクトルを計算することが可能となった。本コードは、高エネルギー中性子スペクトルメータ、中性子モニタの検出器の設計計算等において、有効なツールになることが期待される。

本報告書では、開発したコードの概要を述べるとともに、コードの使用方法について説明する。

Development of SCINFUL-CG Code to Calculate Response Functions of  
Scintillators in Various Shapes Used for Neutron Measurement

Akira ENDO, Eunjoo KIM and Yasuhiro YAMAGUCHI

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

(Received August 30, 2001)

A Monte Carlo code SCINFUL has been utilized for calculating response functions of organic scintillators for high-energy neutron spectroscopy. However, the applicability of SCINFUL is limited to the calculations for cylindrical NE213 and NE110 scintillators. In the present study, SCINFUL-CG was developed by introducing a geometry specifying function and high-energy neutron cross section data into SCINFUL. The geometry package MARS-CG, the extended version of the CG (Combinatorial Geometry), was programmed into SCINFUL-CG to express various geometries of detectors. Neutron spectra in the regions specified by the CG can be evaluated by the track length estimator. The cross section data of silicon, oxygen and aluminum for neutron transport calculation were incorporated up to 100 MeV using the data of LA150 library. Validity of SCINFUL-CG was examined by comparing calculated results with those by SCINFUL and MCNP and experimental data measured using high-energy neutron fields. SCINFUL-CG can be used for the calculations of the response functions and neutron spectra in the organic scintillators in various shapes. The computer code will be applicable to the designs of high-energy neutron spectrometers and neutron monitors using the organic scintillators.

The present report describes the new features of SCINFUL-CG and explains how to use the code.

Keywords: High Energy Neutron, Neutron Detector, Response Function, Organic Scintillator, SCINFUL, Combinatorial Geometry, MARS-CG, Neutron Transport Cross Section, LA150, Lithium Glass Scintillator

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. SCINFUL-CG コードの概要 .....	2
2.1 幾何形状指定機能の拡張 .....	2
2.2 中性子輸送用断面積の追加 .....	3
3. SCINFUL-CG による計算結果の検証 .....	5
3.1 SCINFUL との比較 .....	5
3.2 MCNP-4B との比較 .....	5
3.3 実測による応答関数との比較 .....	6
4. まとめ .....	7
謝 辞 .....	7
参考文献 .....	8
付録 A. SCINFUL-CG のインストール及び使用方法 .....	27
付録 B. SCINFUL の断面積データ .....	59

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Overview of SCINFUL-CG Code .....	2
2.1 Expansion of Geometry Specifying Function .....	2
2.2 Enhancement of Cross Section Data for Neutron Transport Calculation .....	3
3. Verification of SCINFUL-CG .....	5
3.1 Comparison with SCINFUL .....	5
3.2 Comparison with MCNP-4B .....	5
3.3 Comparison with Measured Response Functions .....	6
4. Summary .....	7
Acknowledgements .....	7
References .....	8
Appendix A. Installation and Operation Guide of SCINFUL-CG .....	27
Appendix B. Cross Section Data in SCINFUL .....	59

This is a blank page.

## 1 緒言

強力な核破砕中性子源を用いた物質・生命科学等の基礎研究、高エネルギー粒子を利用した原子核・素粒子物理の研究など、大強度高エネルギー加速器を用いた研究開発が、今後幅広く展開されようとしている。<sup>1-4)</sup> これらの加速器施設においては、加速された粒子が直接入射するターゲット、ビームダンプ等から、様々な種類の高エネルギー二次放射線が発生する。その中でも高エネルギー中性子は透過力が高いため、加速器運転時には、遮へい体を透過してくる広いエネルギー分布を持つ中性子が、施設周辺における主たる被ばく源となる。したがって、大強度高エネルギー加速器施設においては、中性子に対する線量評価のために、中性子スペクトルの評価が極めて重要になる。また、加速器施設の設計に必要な断面積データ等の基礎データ、<sup>5-7)</sup> 遮へい設計及び線量計算用コードの精度評価<sup>8,9)</sup> などに対し、これまでに実験データが不足している 20 MeV 以上におけるデータを取得するための単色中性子源の開発が行われている。<sup>10)</sup> これらの中性子源の利用においても、中性子スペクトルの評価は不可欠である。<sup>11)</sup>

数 10 MeV 以上の中性子に対するエネルギースペクトルの測定には、NE213,\* BC501A†等の有機液体シンチレータを用いた飛行時間法及びアンフォールディング法、反跳陽子型テレスコープなどが用いられている。このうち有機液体シンチレータは、水素含有量が高いため中性子に対する検出効率が高く、また、パルス波形弁別によって中性子と $\gamma$ 線との弁別が可能であることから、最近では、200 MeV を超える高エネルギー中性子に対するスペクトル測定にも利用されている。<sup>12)</sup>

有機液体シンチレータを用いて中性子スペクトルを評価するためには、中性子エネルギーに対するシンチレータの検出効率及び応答関数が必要である。これらを計算により評価するために、SCINFUL コード<sup>13)</sup>、CECIL コード<sup>14)</sup> などのモンテカルロ法に基づく計算コードが開発され、利用されてきた。<sup>15,16)</sup> しかし、これらのコードの機能は、円柱形状の NE213 及び NE110 シンチレータに対する計算に限定されおり、それ以外の形状、材質には対応することができない。したがって、これらの計算コードが、より多様な形状及び材質に対しても適用可能になれば、有機シンチレータを用いた中性子スペクトルメータ、中性子モニタ等の開発において、検出器の設計計算に利用できる有効なツールとなり、その用途は一層拡大することが期待される。

本研究では、有機シンチレータの応答関数計算コード SCINFUL<sup>13)</sup> を基に、任意の形状のシンチレータに対し、応答関数の計算が可能なコードを開発した。さらに、ガラスシンチレータ及びアルミニウムカバーを構成する元素に対し、100 MeV までの中性子輸送用断面積データを導入するとともに、中性子輸送機能を組み込み、有機シンチレータとガラスシンチレータを組み合わせた検出器に対し、検出器内の中性子スペクトルが評価できるようにした。本報告書では、開発したコードの概要及び計算結果の妥当性について述べるとともに、コードの使用方法について説明する。

---

\*Nuclear Enterprises 製

†Bicron 製。BC501A シンチレータの元素組成及び発光特性は、NE213 と同等である。

## 2 SCINFUL-CG コードの概要

本コードは、SCINFUL コード<sup>13)</sup>を基に、これにCG (Combinatorial Geometry) による幾何形状指定機能と、ガラスシンチレータ、アルミニウムカバーの主要元素に対する中性子輸送計算用の断面積を組み入れ、SunOS のUNIX ワークステーション上で動作するように整備したものである。以後、本コードを“SCINFUL-CG”と称する。

SCINFUL は、Oak Ridge 国立研究所の Dickens により、O5S<sup>17)</sup> コードを基に開発されたコードで、NE213 液体シンチレータ及びNE110 プラスチックシンチレータに対し、入射中性子エネルギー 100 keV から 80 MeV までの応答関数を計算することができる。このコードの特徴は、炭素に対して多体崩壊反応モデルを用い、高エネルギー中性子による炭素の複雑な反応過程を考慮している点である。

表 1 に、開発した SCINFUL-CG と SCINFUL の機能をまとめた。SCINFUL-CG では、有機シンチレータ領域 (NE213, NE110) における核反応計算及び計算結果の集計は SCINFUL の機能を用い、新たに幾何形状の指定機能、線源機能、中性子に対する輸送計算機能及び断面積データ、飛跡長タリー機能を加えた。図 1 に、SCINFUL-CG における計算の流れを示す。以下、新たに付加した幾何形状指定機能、中性子輸送機能及び断面積について述べる。

### 2.1 幾何形状指定機能の拡張

表 1 に示すように、SCINFUL の計算体系は、円柱形状の有機シンチレータに限定されている。そこで、任意形状の有機シンチレータや、このシンチレータを他の検出器と組み合わせた場合の応答関数の計算が可能となるように、SCINFUL に CG 形式の幾何形状指定機能を導入した。また、CG により定義された各領域毎に、中性子スペクトルを評価する機能を組み入れた。

CG は、球、直方体、円柱等の単純な形状 (基本形状) を、ブール代数 (AND, OR) を用いて組合せ、複雑な体系を表現する方法である。SCINFUL-CG では、一般の CG を拡張した MARS-CG<sup>18)</sup>を採用した。MARS-CG は、汎用サブルーチンとして独立のパッケージになっているため、コードへの組み込みが容易である。また、CG で表現された形状を Universe として、複数の Universe、あるいは Universe を繰り返し並べた Array を定義することが可能であり、多様な形状を表現できる特徴がある。SCINFUL-CG では、MARS-CG に、DEEP コード<sup>19)</sup> NMTC/JAM コード<sup>20)</sup> で用いられている一般楕円体、斜楕円錐台、トーラス、無限平面及び無限円柱の基本形状を追加した機能を組み込んだ。表 2 に、SCINFUL-CG で利用可能な CG の基本形状をまとめた。

さらに、SCINFUL-CG には、CG により定義された各領域毎に中性子スペクトルの評価が可能となるように、飛跡長タリーの機能を組み込んだ。SCINFUL-CG では、有機シンチレータ以外の領域においては、中性子輸送のみを行い、荷電粒子生成核反応は扱わない。これらの領域においては、飛跡長タリーにより評価される中性子スペクトルに応答関数を乗じることで、反応率等を評価することができる。



## 2.2 中性子輸送用断面積の追加

中性子輸送用断面積の追加は、本コードを著者らが進めている NE213 シンチレータと低速中性子検出用の  $^6\text{Li}$  ガラスシンチレータとを組み合わせた広帯域エネルギー中性子モニタの設計計算<sup>21)</sup>に利用することを目的とし、ガラスシンチレータを構成する珪素 (Si) 及び酸素 (O)、検出器カバーのアルミニウム (Al) を対象に行った。表 3 に追加した材質の組成を示す。これらの材質以外の断面積も、以下の方法に従い同様に追加することが可能である。

断面積データの追加は、SCINFUL で計算可能な中性子エネルギー上限値である 80 MeV までを対象に行った。中性子エネルギー 80 MeV までの断面積として現在利用できるものは、100XS<sup>22)</sup> の 100 MeV までのデータ、LA150<sup>23)</sup> の 150 MeV までのデータがある。ここでは、収録核種数が多く、かつ最新の評価値である LA150 のデータを採用した。表 4 に、LA150 に格納されている断面積データのうち、追加対象とした元素の中性子輸送計算に関するデータをまとめた。この中で、Si については、3 つの同位体のそれぞれの断面積と同位体組成から、輸送計算上、主要な成分となる  $^{28}\text{Si}$  の断面積を用いた。

中性子輸送計算及び反応の種類をサンプリングするために、LA150 のデータを用いて、対象とする元素の全断面積、弾性散乱断面積、弾性散乱外断面積及び (n, xn) 断面積を SCINFUL-CG へ組み込んだ。LA150 では、20 MeV 以上において、SCINFUL が内蔵するチャンネル別の断面積データを取り出すことができない。そのため、弾性散乱外反応は (n, xn) 反応のみを考慮し、Si, Al 及び O からの中性子放出を計算する機能を加えた。

図 2 に、断面積データを追加した SCINFUL-CG における核反応の取り扱いの流れを示す。中性子を輸送する材質が選択されると、その材質の原子個数密度及び中性子エネルギーより、(1) 式から輸送断面積が計算される。

$$\sum_{\text{total}} = \sum_i N_i \sigma_{i,\text{total}} \quad (1)$$

ここで、

$\sum_{\text{total}}$	:	輸送断面積
$i$	:	材質を構成する元素のインデックス (シンチレータ (C, H) 及びガラス (Si, O) はそれぞれ 2 種類、アルミニウムは 1 種類の元素で構成される。)
$N_i$	:	元素 $i$ の原子個数密度
$\sigma_{i,\text{total}}$	:	元素 $i$ の全断面積

である。輸送断面積より求められる平均自由行程が、輸送計算に利用される。次に、(2) 式により、弾性散乱と弾性散乱以外の反応のサンプリングが行われる。

$$P_{i,\text{elastic}} = N_i \sigma_{i,\text{elastic}} / \sum_{\text{total}} \quad (2\text{-a})$$

$$P_{i,\text{non-elastic}} = N_i \sigma_{i,\text{non-elastic}} / \sum_{\text{total}} \quad (2\text{-b})$$

$$1 = \sum P_{i,\text{elastic}} + \sum P_{i,\text{non-elastic}} \quad (2\text{-c})$$

ここで、

$P_{i,\text{elastic}}$	:	元素 $i$ の弾性散乱の確率
$P_{i,\text{non-elastic}}$	:	元素 $i$ の弾性散乱以外の核反応の確率
$\sigma_{i,\text{elastic}}$	:	元素 $i$ の弾性散乱断面積
$\sigma_{i,\text{non-elastic}}$	:	元素 $i$ の弾性散乱外断面積

である。弾性散乱が選ばれた場合には、角度分布が計算される。LA150 では、弾性散乱の角度分布が、SCINFUL で用いられている PL 展開係数で与えられていない。そこで、角度分布は、Si, Al, O のそれぞれの質量数を用い、SCINFUL における C に対する取り扱いと同様の方法 (付録 B.2.1 項参照) により計算する。

一方、弾性散乱以外の反応が選ばれた場合には、(3) 式を用いて中性子放出反応の有無がサンプリングされる。

$$P_{i,(n,xn)} = \sigma_{i,(n,xn)} / \sigma_{i,\text{non-elastic}} \quad (3)$$

ここで、

$P_{i,(n,xn)}$	:	元素 $i$ の中性子放出反応 ((n, xn) 反応) の確率 (多重度)
$\sigma_{i,(n,xn)}$	:	元素 $i$ の (n, xn) 反応の断面積

である。(n, 3n) 反応のように3つの中性子が放出される場合、(n, xn) 反応の断面積は (n, 3n) 反応の3倍になるため、多重度は1を超える場合がある。ここでは、多重度を粒子のウェイトとして扱うことにした。

中性子放出が選択された場合は、放出中性子のエネルギーと角度を求める。LA150 では、(n, xn) 反応による放出粒子のエネルギー分布が、Kalbach 形式で格納されている。しかし、この形式のファイルから、放出粒子のエネルギー分布に関するデータを取り出すプログラムが、まだ整備されていない。そのため、放出中性子のエネルギー分布は、H, C 等の軽元素物質内での中性子輸送について、準単色中性子源を用いて精度検証<sup>8,9)</sup> が行われている HETC<sup>24)</sup> を用いて計算した値を利用することとした。図 3 に、<sup>16</sup>O, <sup>27</sup>Al 及び <sup>28</sup>Si に対し、HETC によって計算した放出中性子のエネルギー分布を示す。また、角度分布は、それぞれの質量数を用い、SCINFUL の非弾性散乱の角度分布の計算方法 (付録 B.2.2 項参照) を適用し評価した。中性子放出反応が選択されなかった場合には、中性子の追跡を終了する。

図 4 - 図 6 に、SCINFUL-CG へ導入した断面積データ等を示す。図に示す断面積は、等レサジー幅で与えられた中性子エネルギーでデータを内挿したものである。<sup>28</sup>Si の 2 MeV 以下の共鳴構造の部分については、ここでは一定として扱った。データは、SCINFUL の H 及び C のデータと同様に、プログラム中に DATA 文で組み込んだ。なお、<sup>16</sup>O, <sup>27</sup>Al 及び <sup>28</sup>Si に対しては、100 MeV までのデータを組み込んだが、SCINFUL に組み込まれている H 及び C の断面積データのエネルギー上限値から、計算可能な入射中性子エネルギーは、80 MeV までに制限される。

### 3 SCINFUL-CGによる計算結果の検証

開発したSCINFUL-CGによる計算結果の妥当性を評価するために、SCINFUL-CGとSCINFUL及びMCNP-4B<sup>25)</sup>による計算結果との比較を行った。また、中性子照射実験により検出器の応答関数を実測し、SCINFUL-CGによる計算値との比較を行った。

#### 3.1 SCINFULとの比較

SCINFUL-CGにおいて、幾何形状指定機能の拡張による影響を確認するために、SCINFUL-CG及びSCINFULを用い、NE213シンチレータの応答関数を計算し、結果を比較した。

図7(a)に示す直径12.7 cm、高さ12.7 cmのシンチレータの平面部に平行ビームが入射する条件で、SCINFULで計算可能な100 keVから80 MeVまでの5種類の入射エネルギーについて計算を行った。SCINFULでは、平行ビーム照射はできないため、線源位置をシンチレータから1,200 cm離し、平行ビームと見なせる条件で計算を行った。

計算結果を図8に示す。SCINFUL-CGで計算された応答関数は、いずれの入射中性子エネルギーにおいても、SCINFULによる計算結果と一致している。これより、幾何形状指定機能を拡張したSCINFUL-CGにおいて、有機シンチレータに対する応答関数計算機能が、正常に機能していることが確認された。

#### 3.2 MCNP-4Bとの比較

SCINFUL-CGに組み込んだ中性子輸送計算機能及びCGで指定された領域における飛跡長タリー機能を確認するために、SCINFUL-CG及びMCNP-4Bを用いて、シンチレータ部におけるスペクトルを計算し、それらを比較した。

計算は、図7に示す2種類の体系に対して行った。まず、NE213シンチレータのみの場合(図7(a))について、NE213シンチレータ領域における中性子スペクトルを計算した。また、図7(b)のように、NE213シンチレータの内部に、直径5.08 cm、高さ5.08 cmのガラスを組み込み、さらに、NE213シンチレータの周囲を厚さ0.16 cmのアルミニウムカバーで囲った体系に対し、NE213及びガラス領域における中性子スペクトルを評価した。MCNP-4Bによる計算では、100XS<sup>22)</sup>の断面積データを用い、飛跡長タリーによって各領域における中性子スペクトルを計算した。

図9に、計算体系1におけるNE213シンチレータ領域の中性子スペクトルを示す。入射中性子エネルギー10 MeVまでは、SCINFUL-CG及びMCNP-4Bにより計算されたスペクトルは、良く一致している。しかし、入射中性子が40 MeVになると、5 MeV以上でそれぞれのスペクトルに違いが見られ、エネルギーがさらに高くなり80 MeVになると、両者のスペクトルの違いは、より顕著になっている。入射中性子が80 MeVの場合、SCINFUL-CGで計算されたフルエンスは、入射エネルギー直下のエネルギー範囲では、MCNPによる計算値より大きく、60 MeV以下では、逆に小さい。

図10には、計算体系2における入射中性子エネルギー40 MeV及び80 MeVに対するNE213シンチレータ領域の中性子スペクトルを示す。ここでは、NE213シンチレータ領域の体積が、ガ

ラス領域の分減少したために、SCINFUL-CG、MCNP-4Bにより計算されたスペクトルは、それぞれ図9に示したNE213シンチレータのみのスペクトルと比べて、フルエンスが僅かに大きくなっている。しかし、ここでも、SCINFUL-CGとMCNP-4Bとのスペクトルには、図9と同様の違いが見られる。SCINFULに格納されている断面積と100XSでは、H及びCに対する全断面積は20 MeV以下では、良く一致している。したがって、これらのスペクトルの違いは、主にSCINFUL-CGとMCNP-4Bの計算における(n, xn)反応に対するエネルギー分布の違いによるものと考えられる。このスペクトルの違いが、NE213シンチレータ領域における発光量分布に及ぼす影響については、3.3節で述べる実験結果との比較を基に検討を行う。

図11に、計算体系2において、入射中性子エネルギー1 MeV及び100 keVに対するガラス領域における中性子スペクトルを示す。SCINFUL-CGとMCNP-4Bにより計算されたスペクトルは、良く一致している。

以上の結果から、SCINFUL-CG及びMCNP-4Bによって計算された中性子スペクトルは、入射中性子エネルギーが数10 MeVを超えると、エネルギー範囲によっては違いが見られるものの、フルエンスは、最大ファクター2程度の範囲内で一致することが判った。したがって、SCINFUL-CGに組み込んだ中性子輸送計算機能及び飛跡長タリーにより、CGで指定された各領域における中性子スペクトルの評価が可能であると判断される。

### 3.3 実測による応答関数との比較

SCINFUL-CGを用いた設計計算により製作した検出器について、中性子照射実験によって応答関数を実測し、SCINFUL-CGによる計算結果との比較を行った。

照射に用いた検出器の構造を図12に示す。本検出器は、直径12.7 cm、高さ12.7 cmのウエル形状のBC501Aシンチレータの中心部分に、直径2.54 cm、高さ2.54 cmの円柱形状の<sup>6</sup>Liガラスシンチレータを組み込み込んだものである。BC501Aシンチレータの発光は、直径5インチの光電子増倍管により、また、<sup>6</sup>Liガラスシンチレータの発光は、アクリル製ライトガイドを通して、直径1.1/8インチの光電子増倍管により、それぞれ検出される。本実験では、ウエル形状のBC501Aシンチレータの応答関数について測定を行った。なお、本検出器の設計過程については、別途詳細に報告する。<sup>26)</sup>

実験は、原研高崎研TIARAの準単色中性子照射施設及び東北大学高速中性子実験室(FNL)において行った。TIARAにおける照射体系を図13に示す。AVFサイクロトロンで加速された陽子を<sup>7</sup>Liターゲットに入射させ、<sup>7</sup>Li(p, n)反応により発生する準単色中性子を用いて照射を行った。ここでは、66 MeVの準単色中性子に対する応答関数を測定した。また、FNLでは、4.5 MVダイナミトロンで加速した重陽子(d)をトリチウムターゲットに入射させ、T(d, n)反応により発生する15 MeVの単色中性子を用いて照射を行った。TIARA、FNLの中性子照射場の詳細な特性については、別途報告されている。<sup>10,27)</sup> いずれの測定においても、n- $\gamma$ 弁別を行い、<sup>28)</sup> 中性子による応答関数を得た。

図14、図15に、それぞれ66 MeV、15 MeV中性子照射で得られた応答関数を、SCINFUL-CGによる計算結果とともに示す。66 MeVにおける応答関数(図14)では、SCINFUL-CGによる計

算値に発光量 27 MeVee にピークが見られ、そこからおよそ 10 MeVee にわたる高発光量側で実験値とのずれが見られる。27 MeVee のピークは  $^{12}\text{C}(n, d)$  反応、その右側の部分は  $^{12}\text{C}(n, pX)$  反応にそれぞれ起因するものである。このずれは、SCINFUL で用いられている p や d の発光量データの問題によるものであり、円柱形状の BC501A シンチレータにおいても、SCINFUL による計算値と実験値には、同程度の違いが見られている。<sup>15)</sup> 一方、15 MeV における応答関数(図 15)では、SCINFUL-CG による計算値は、実験値をほぼ再現している。これは、このエネルギー領域における発光量分布は、そのほとんどが  $\text{H}(n, n)$  による反跳陽子に起因するためである。

以上の実測値との比較の結果から、SCINFUL-CG で計算された BC501A シンチレータに対する応答関数は、SCINFUL とほぼ同等に実験値を再現することが確認された。また、3.1 及び 3.2 節で述べた、SCINFUL 及び MCNP-4B による計算結果との比較と併せ、SCINFUL-CG は、任意形状の NE213 シンチレータに対する応答関数及び検出器内の中性子スペクトルの計算に利用できるコードであると言える。

## 4 まとめ

中性子が入射する任意形状の NE213 及び NE110 シンチレータに対する応答関数、検出器内の中性子スペクトルの計算が可能な SCINFUL-CG コードを開発した。SCINFUL-CG による計算結果の妥当性について、MCNP-4B 等による計算結果との比較、単色中性子源を用いた照射実験により確認を行った。SCINFUL-CG は、SCINFUL がない幾つかの新たな機能を付加したことにより、従来、円柱形状の有機シンチレータの応答関数評価に限定されていた用途から、様々な形状の高エネルギー中性子検出器、液体シンチレータとガラスシンチレータを組み合わせた広帯域中性子モニタの設計等、有機シンチレータを利用した中性子検出器の開発への利用の拡大が期待される。

## 謝 辞

TIARA における中性子照射実験は、原研・大学プロジェクト共同研究「陽子加速器施設における放射線安全性に関する研究」の一環として実施された。実験にご協力下さいました高崎研利用計画課 田中 進氏、東海研外部被ばく防護研究室 高橋 史朗氏、津田 修一氏、佐藤 達彦氏、線量計測技術開発室 吉澤 道夫氏、東北大学 中村 尚司教授、A.H.D. Rasolonatovo 氏、高崎研サイクロトロン管理課の方々にお礼申し上げます。また、FNL ダイナミトロンの運転を担当して下さいました東北大学 馬場 護教授及び研究室の皆様へ感謝いたします。さらに、本コードの整備にご協力下さいました三菱総合研究所 高木 俊治氏、義澤 宣明氏、佐藤 理氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構共同推進チーム. 大強度陽子加速器計画. JAERI-Tech 2000-003 (2000).
- 2) *The European Spallation Source Study, Volume III. The ESS Study*, ESS-96-53-M (1996).
- 3) *National Spallation Neutron Source Conceptual Design Report, Volume I. The NSNS Collaboration*, NSNS/CDR-2/V1 (1997).
- 4) Yano, Y., Goto, A. and Katayama, T. *Overview of RIKEN RI Beam Factory Project*. Proc. 15th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Caen, France, 696-703 (1998).
- 5) Nauchi, Y., Baba, M., Sanami, T., Ibaraki, M., Iwasaki, T., Hirakawa, N., Tanaka, S., Meigo, S., Nakashima, H., Takada, H., Nakamura, T. and Watanabe, Y. *Measurements of  $(n, xp)$ ,  $(n, xd)$  double differential cross sections of carbon and aluminum for 65 and 75 MeV neutrons*. J. Nucl. Sci. Technol., **36**, 143-151 (1999).
- 6) Ibaraki, M., Baba, M., Miura, T., Nauchi, Y., Hirasawa, Y., Hirakawa, N., Nakashima, H., Meigo, S., Iwamoto, O. and Tanaka, S. *Experimental method for neutron elastic scattering cross section measurement in 40-90 MeV region at TIARA*. Nucl. Instr. and Meth., **A446**, 536-544 (2000).
- 7) Ibaraki, M., Baba, M., Miura, T., Nauchi, Y., Hirasawa, Y., Hirakawa, N., Nakashima, H., Meigo, S., Iwamoto, O. and Tanaka, S. *Measurement of elastic scattering cross sections of carbon, silicon, iron, zirconium and lead for 75 MeV neutrons*. J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 1, 683-686 (2000).
- 8) 中根 佳弘. 数 10 MeV 領域中性子の平板ファントム内における線量分布に関する研究. JAERI-Research 2000-003 (2000).
- 9) Nakane, Y. and Sakamoto, Y. *Measurement of absorbed dose distributions in a plastic phantom irradiated by 40- and 65-MeV quasi-monoenergetic neutrons*. Nucl. Instr. and Meth., **A459**, 552-564 (2001).
- 10) Tanaka, S., *et al.* Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research, 342 (1992).
- 11) Baba, M., Nauchi, Y., Iwasaki, T., Kiyosumi, T., Yoshioka, M., Matsuyama, S., Hirakawa, N., Nakamura, T., Tanaka, Su., Meigo, S., Nakashima, H., Tanaka, Sh. and Nakao, N. *Characterization of a 40-90 MeV  ${}^7\text{Li}(p, n)$  neutron source at TIARA using a proton recoil telescope and TOF method*. Nucl. Instr. and Meth., **A427**, 454-465 (1999).
- 12) Nakao, N., Kurosawa, T., Nakamura, T. and Uwamino, Y. *Absolute measurements of the response function of an NE213 organic liquid scintillator for the neutron energy range up to 206 MeV*. Nucl. Instr. and Meth., **A463**, 275-287 (2001).
- 13) Dickens, J.K. *SCINFUL: A Monte Carlo based computer program to determine a scintillator full energy response to neutron detection for  $E_n$  between 0.1 and 80 MeV: Program*

- development and comparisons of program predictions with experimental data.* ORNL-6463 (1988).
- 14) Cecil, R.A., Anderson, B.D. and Madey, R. *Improved predictions of neutron detection efficiency for hydrocarbon scintillators from 1 MeV to about 300 MeV.* Nucl. Instr. and Meth., **161**, 439-447 (1979).
  - 15) Nakao, N., Nakamura, T., Baba, M., Uwamino, Y., Nakanishi, H., Nakashima, H. and Tanaka, Sh. *Measurements of response function of organic liquid scintillator for neutron energy up to 135 MeV.* Nucl. Instr. and Meth., **A362**, 454-465 (1995).
  - 16) Meigo, S. *Measurements of response function and detection efficiency of an NE213 scintillator for neutrons between 20 and 65 MeV.* Nucl. Instr. and Meth., **A401**, 365-378 (1997).
  - 17) Textor, R.E. and Verbinski, V.V. *O5S: A Monte Carlo code for calculating pulse height distributions due to monoenergetic neutrons incident on organic scintillators.* ORNL-4160 (1968).
  - 18) West, J.T. and Emmett, M. B. *MARS: A multiple array system using combinatorial geometry, Vol.3, Section M9.* NUREG/CR-0200 (1984).
  - 19) Yamaguchi, Y. *DEEP code to calculate dose equivalents in human phantom for external exposure by Monte Carlo method.* JAERI-M 90-235 (1990).
  - 20) Niita, K., Meigo, S., Takada, H. and Ikeda, Y. *High energy particle transport code NMTC/JAM.* JAERI-Data/Code 2001-007 (2001).
  - 21) Kim, E., Endo, A. and Yamaguchi, Y. *Development of SCINFUL-CG code to calculate response function of hybrid neutron detectors using scintillators.* Presented at International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2001), Ibaraki, Tsukuba, Japan (2001).
  - 22) Little, R.C. *Summary documentation for the 100XS neutron cross section library (Release 1.0).* LA-UR-96-24 (1995).
  - 23) Chadwick, M.B., Young, P.G., Chiba, S., Frankle, S.C., Hale, G.M., Hughes, H.G., Koning, A.J., Little, R.C., MacFarlane, R.E., Prael, R.E. and Waters, L.S. *Cross-section evaluations to 150 MeV for accelerator driven system and implementation in MCNPX.* Nucl. Sci. Eng., **131**, 293-328 (1999).
  - 24) Yoshizawa, N., Ishibashi, K. and Takada, H. *Development of high energy transport code HETC-3STEP: Applicable to the nuclear reaction with incident energies above 20 MeV.* J. Nucl. Sci. Technol., **32**, 601 (1995).
  - 25) Briesmeister, J.F. Ed. *MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code.* LA-12625-M (1997).
  - 26) 金 ウンジュ, 他. JAERI-Tech, 発表準備中.

- 27) Baba, M., Takada, M., Iwasaki, T., Matsuyama, S., Nakamura, T., Ohguchi, H., Nakao, T., Sanami, T. and Hirakawa, N. *Development of monoenergetic neutron calibration fields between 8 keV and 15 MeV*. Nucl. Instr. and Meth., **A376**, 115-123 (1996).
- 28) Kim, E., Endo, A., Yamaguchi, Y., Yoshizawa, M., Nakamura, T. and Shiomi, T. *Measurement of neutron dose with an organic liquid scintillator coupled with a spectrum weight function*. Submitted to Radiat. Prot. Dosim.
- 29) Spowart, A.R. *Neutron scintillating glasses: Part II*. Nucl. Instr. and Meth., **140**, 19-28 (1977).
- 30) Kuijper, P., Tiesinga, C.J. and Jonker, C.C. *Light attenuation in scintillation counters*. Nucl. Instr. and Meth., **42**, 56-60 (1966).



表 1 SCINFUL-CG と SCINFUL との比較

	SCINFUL-CG	SCINFUL
体系	CG で扱える任意の体系	円柱のみ
領域数	任意 (プログラム中で設定)	1 領域
材質	NE213 NE110 アルミニウム ガラス (組成データは DATA 文としてプログラム中に記述)	NE213 NE110
線源形状	コリメータ有の広がったビーム 照射方向任意の円形平行ビーム 検出器内点等方線源 等方照射	コリメータ有の広がったビーム
線源エネルギー	単色 単色ビン中均一 Maxwellian 分布	単色 単色ビン中均一 Maxwellian 分布
タリー	核反応分布 発光量分布 領域別飛跡長	核反応分布 発光量分布
飛程データ	NE213 NE110 (SCINFUL と同じ)	NE213 NE110 (NE213×0.8546)
発光量データ	NE213 NE110 (SCINFUL と同じ)	NE213 NE110

表 2 SCINFUL-CG で利用できる基本形状

基本形状		基本形状	
① 直方体	RPP	⑨ 一般六面体	ARB
② 球	SPH	⑩ 平行六面体の回転	WED
③ 正円柱	RCC	⑪ くさび形の回転	WPP
④ 正楕円柱	REC	⑫ 一般楕円体	GEL
⑤ 正円錐台	TRC	⑬ 斜楕円錐台	QUA
⑥ 回転楕円体	ELL	⑭ トーラス	TOR
⑦ くさび形	WED	⑮ 無限平面	P
⑧ 平行六面体	BOX	⑯ 無限円柱	C

表 3 材質の組成

材質番号	材質	個数密度 ( $10^{24}$ atoms/cm <sup>3</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
1	NE213	H: 0.04833, C: 0.03984 (H : C = 1.213 : 1)	0.874
2	NE110	H: 0.05237, C: 0.04743 (H : C = 1.04 : 1)	1.032
3	アルミニウム	Al: 0.06022	2.698
4	ガラスシンチ	Si: 0.018215, O: 0.048074	2.674 <sup>29)</sup>

表 4 LA150 に収録されているデータ

## (1) 輸送断面積

- 20 MeV 以下

反応	MF 番号	MT 番号	$^{12}\text{C}$	$^{16}\text{O}$	$^{27}\text{Al}$	$^{28}\text{Si}$ 92.23%	$^{29}\text{Si}$ 4.67%	$^{30}\text{Si}$ 3.10%
全断面積	3	1	○	○	○	○	○	○
弾性散乱	3	2	○	○	○	○	○	○
(n, 2n)	3	16	×	×	○	○	○	○
(n, n3 $\alpha$ )	3	23	×	×	×	×	×	×
(n, np)	3	28	○	×	○	○	○	○
(n, n') 第一励起準位のみ	3	51	○	○	○	○	○	○
(n, $\gamma$ )	3	102	○	○	○	○	○	○
(n, p)	3	103	○	○	○	○	○	○
(n, d)	3	104	○	○	○	○	×	×
(n, t)	3	105	×	×	○	×	×	×
(n, $^3\text{He}$ )	3	106	×	×	×	×	×	×
(n, $\alpha$ )	3	107	○	○	○	○	○	○

○: データあり, ×: データなし

- 20 MeV ~ 150 MeV

反応	MF 番号	MT 番号	$^{12}\text{C}$	$^{16}\text{O}$	$^{27}\text{Al}$	$^{28}\text{Si}$ 92.23%	$^{29}\text{Si}$ 4.67%	$^{30}\text{Si}$ 3.10%
全断面積	3	1	○	○	○	○	○	○
弾性散乱	3	2	○	○	○	○	○	○
弾性散乱外	3	3	○	○	○	○	○	○
(n, xn)	6	5	○	○	○	○	○	○
(n, xp)	6	5	○	○	○	○	○	○
(n, xd)	6	5	○	○	○	○	○	○
(n, xt)	6	5	×	×	○	○	○	○
(n, x $^3\text{He}$ )	6	5	×	×	×	×	×	×
(n, x $\alpha$ )	6	5	○	○	○	○	○	○
(n, x $\gamma$ )	6	5	○	○	○	○	○	○

## (2) 放出粒子の角度分布及びエネルギー分布

反応	MF 番号	MT 番号	$^{12}\text{C}$	$^{16}\text{O}$	$^{27}\text{Al}$	$^{28}\text{Si}$ 92.23%	$^{29}\text{Si}$ 4.67%	$^{30}\text{Si}$ 3.10%
弾性散乱 *1	4	2	○	○	○	○	○	○
(n, xn)*2	6	5	○	○	○	○	○	○

\*1 20 MeV 以下, \*2 20 MeV 以上

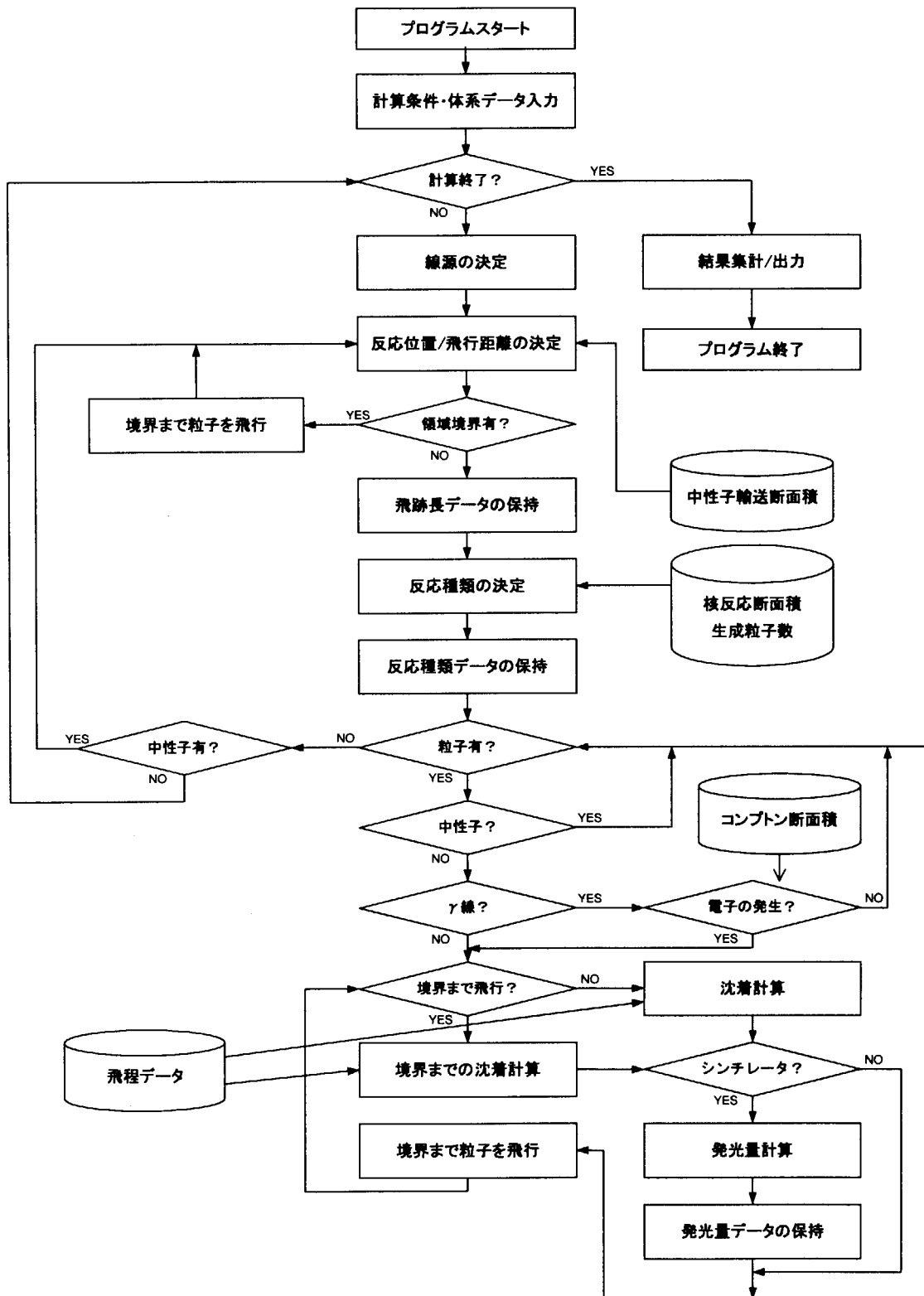


図 1 SCINFUL-CG における計算の流れ

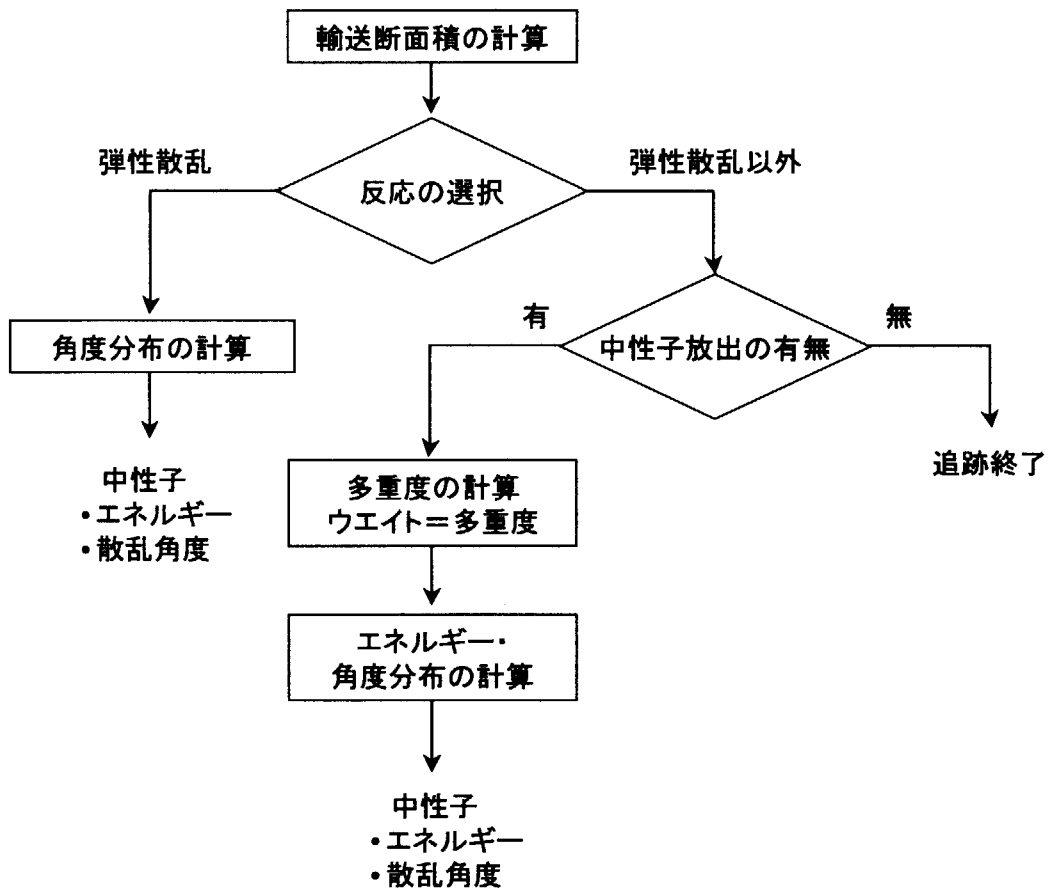


図 2 SCINFUL-CG における中性子輸送及び核反応の計算の流れ

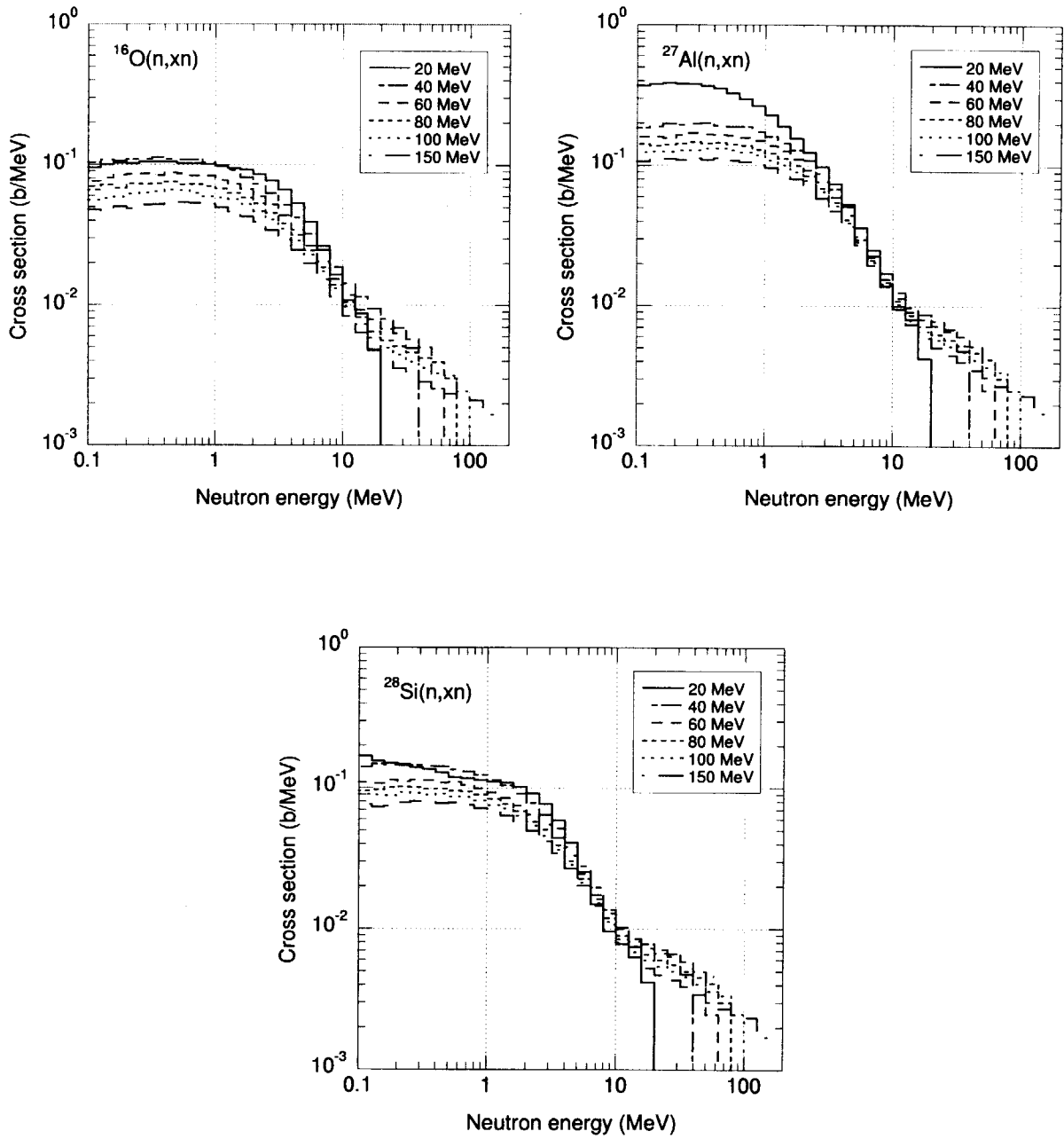


図 3 HETC により計算した (n, xn) 反応の放出中性子のエネルギー分布

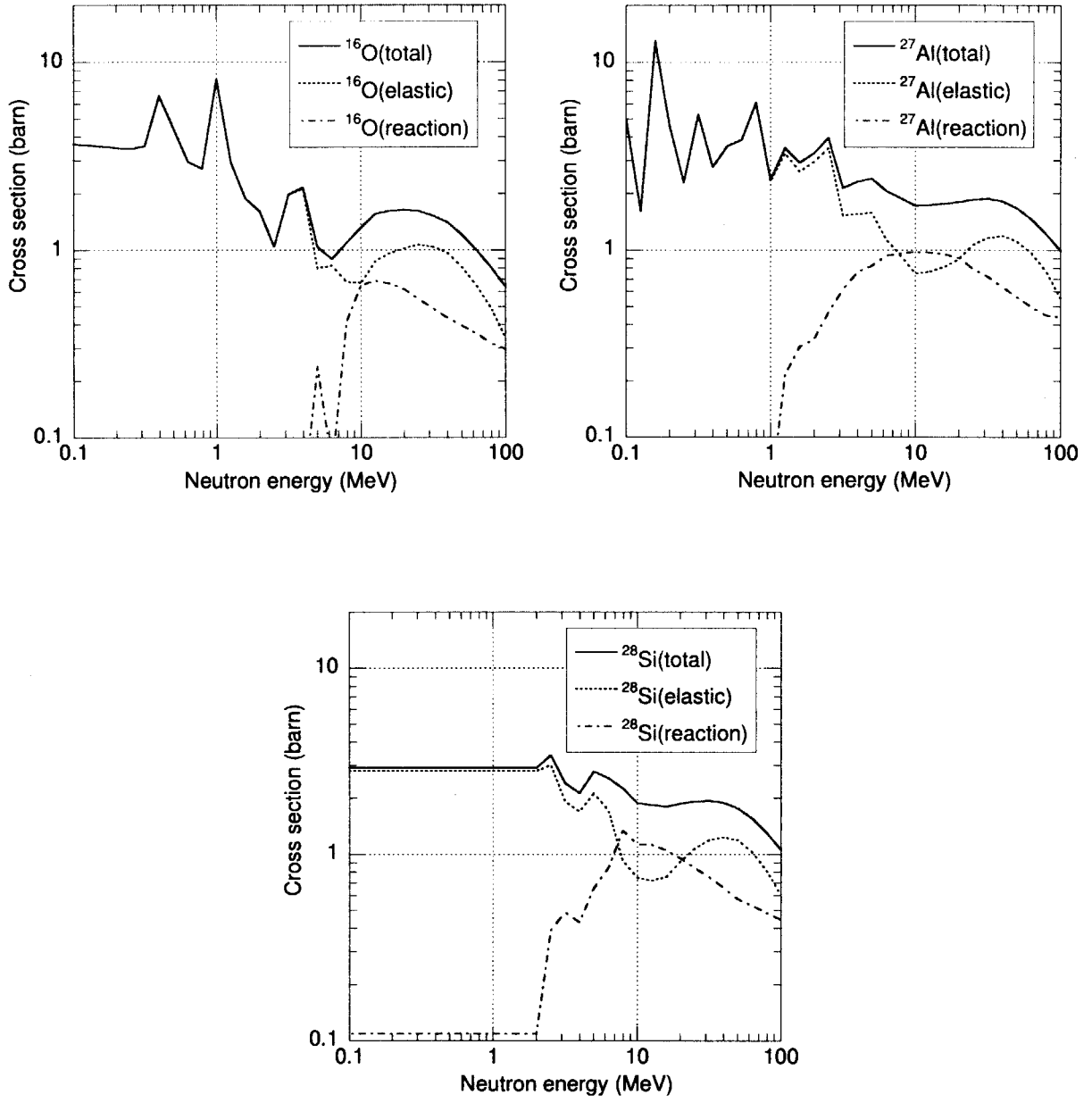


図 4 SCINFUL-CG に導入した断面積

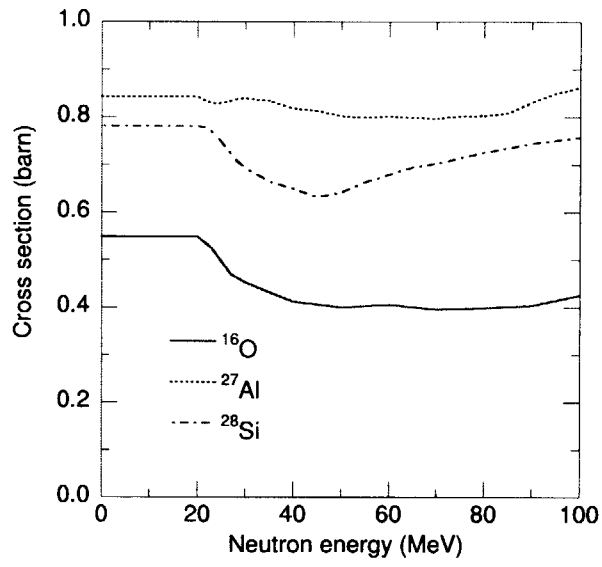


図 5 (n, xn) 断面積

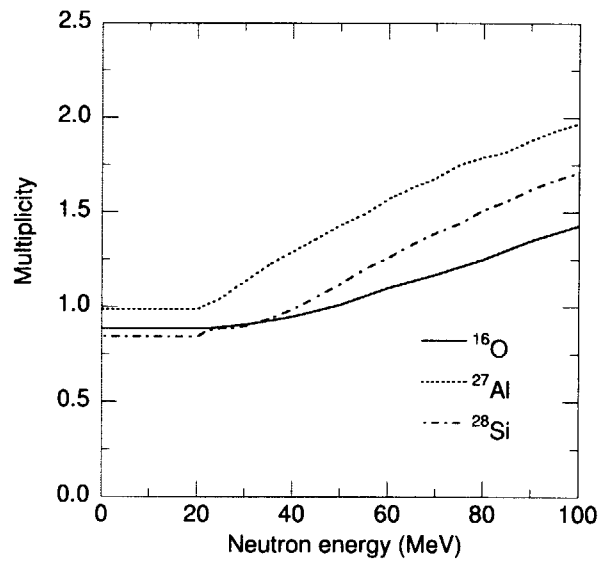


図 6 (n, xn) 反応の多重度



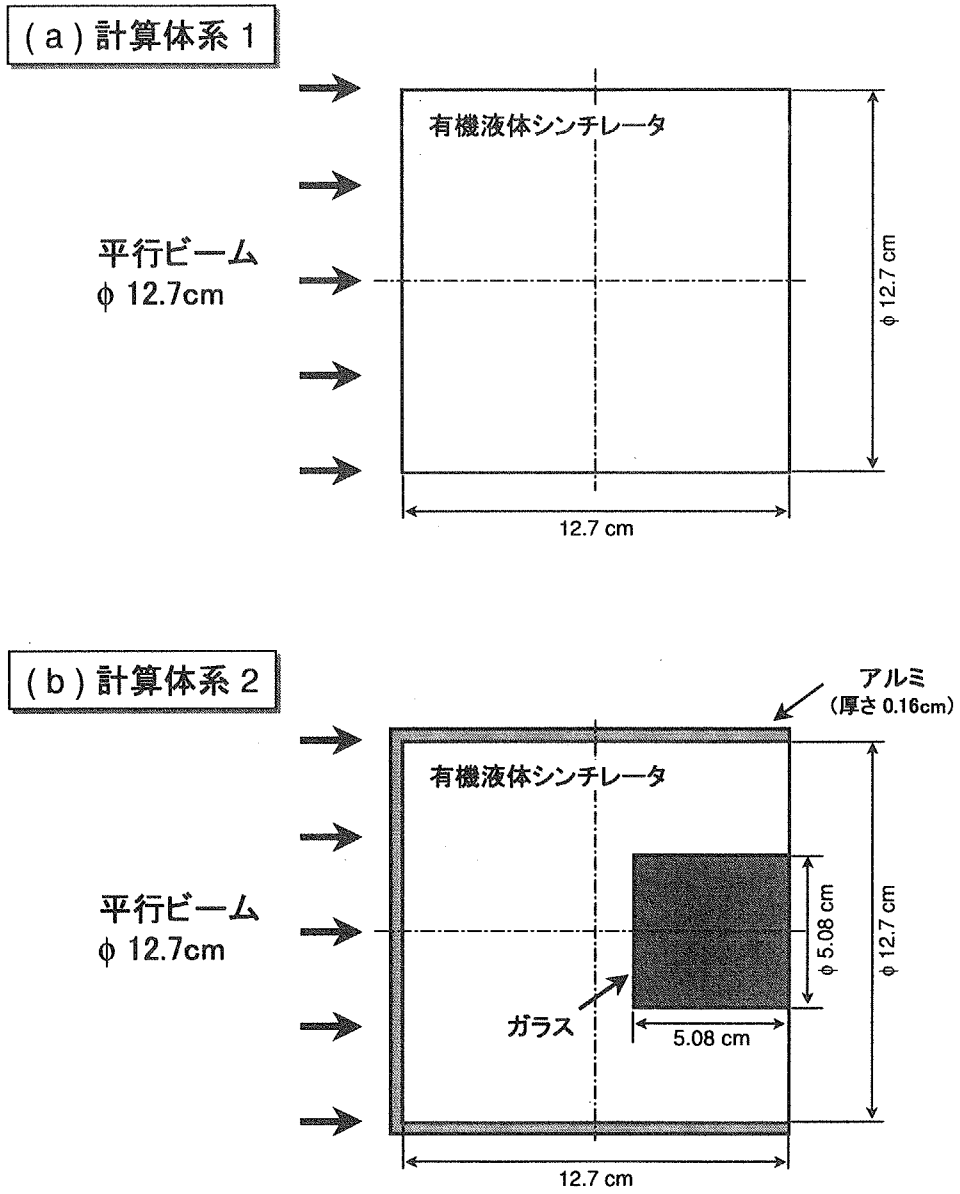


図 7 計算体系

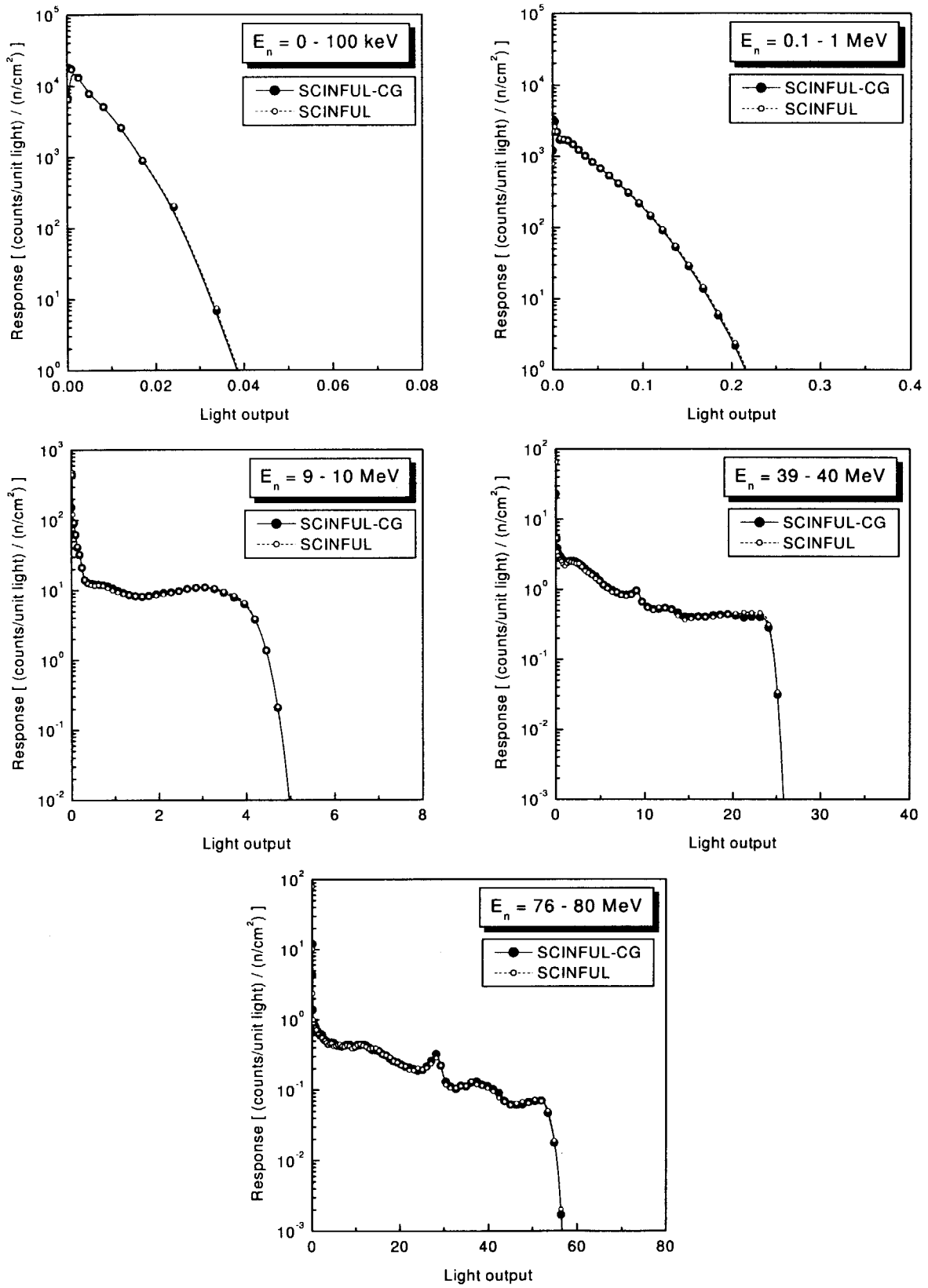


図 8 種々の入射中性子エネルギー  $E_n$  に対する SCINFUL-CG と SCINFUL による応答関数の比較

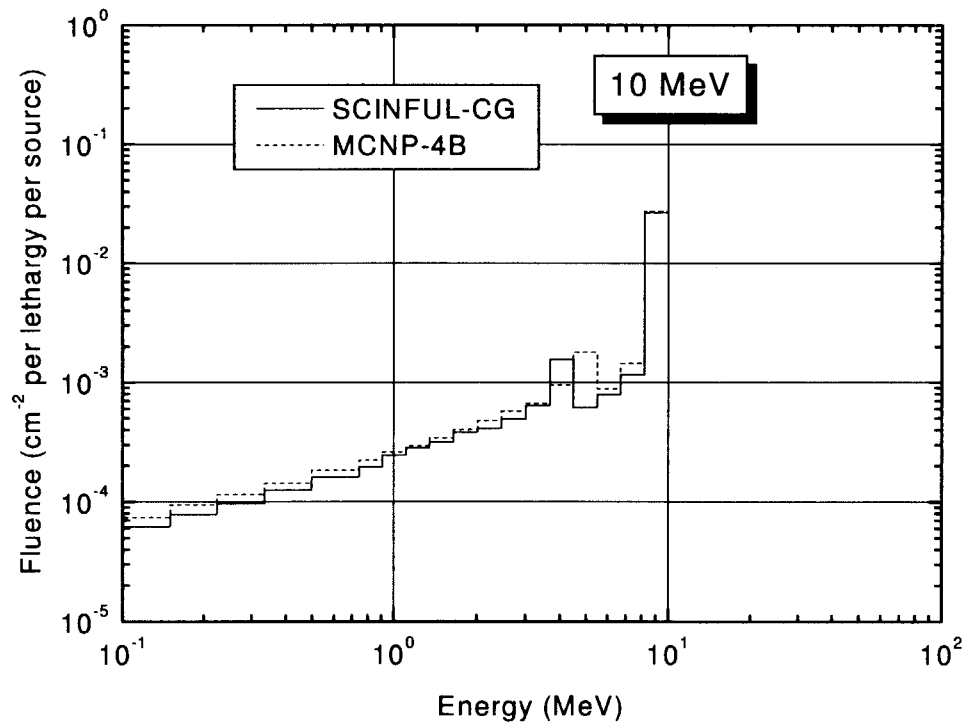
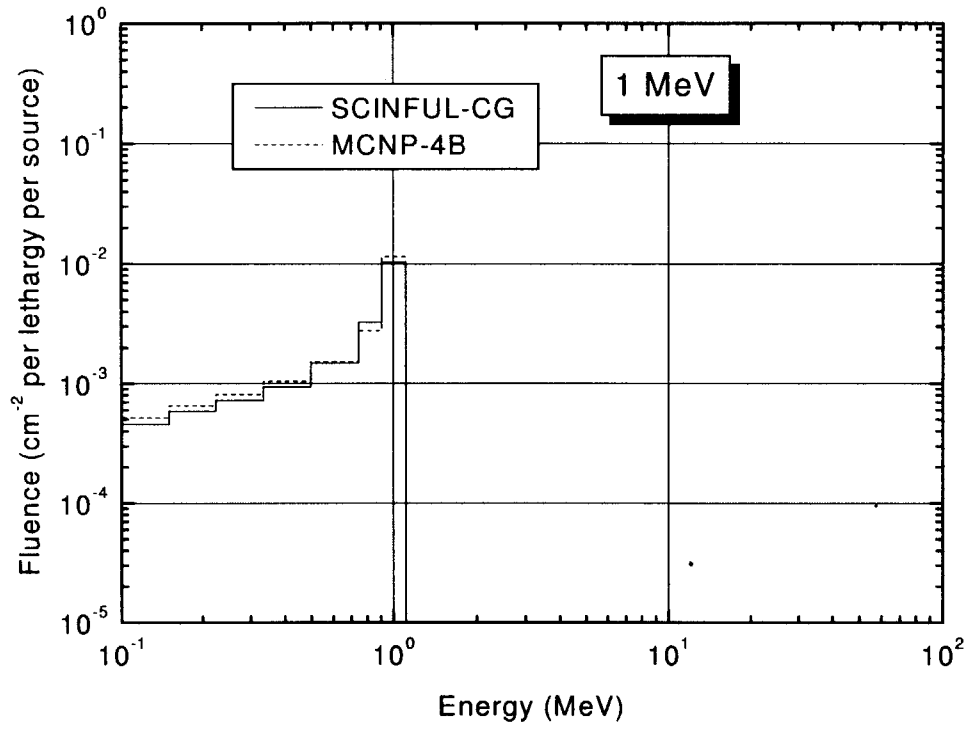


図 9 SCINFUL-CG 及び MCNP-4B による計算体系 1 における NE213 領域のスペクトルの比較 (1/2)

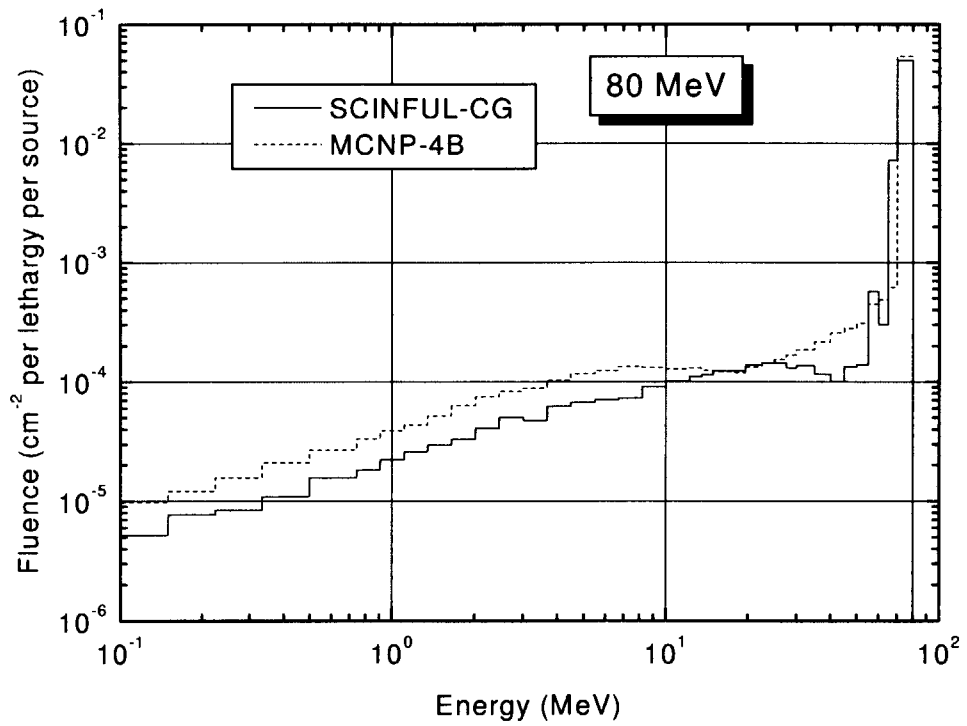
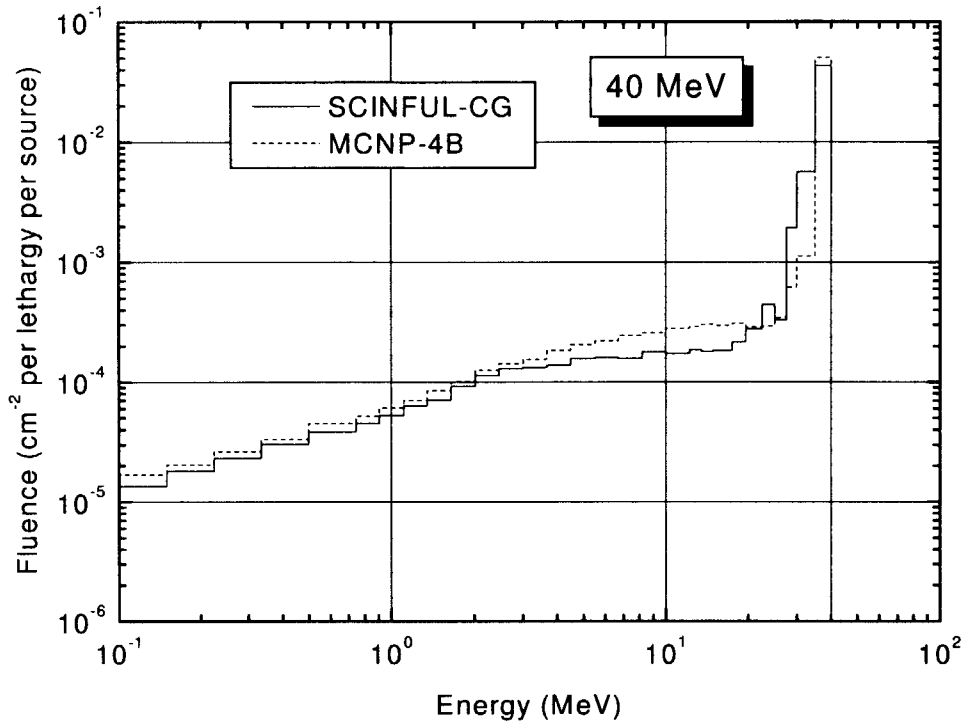


図9 SCINFUL-CG及びMCNP-4Bによる計算体系1におけるNE213領域のスペクトルの比較 (2/2)

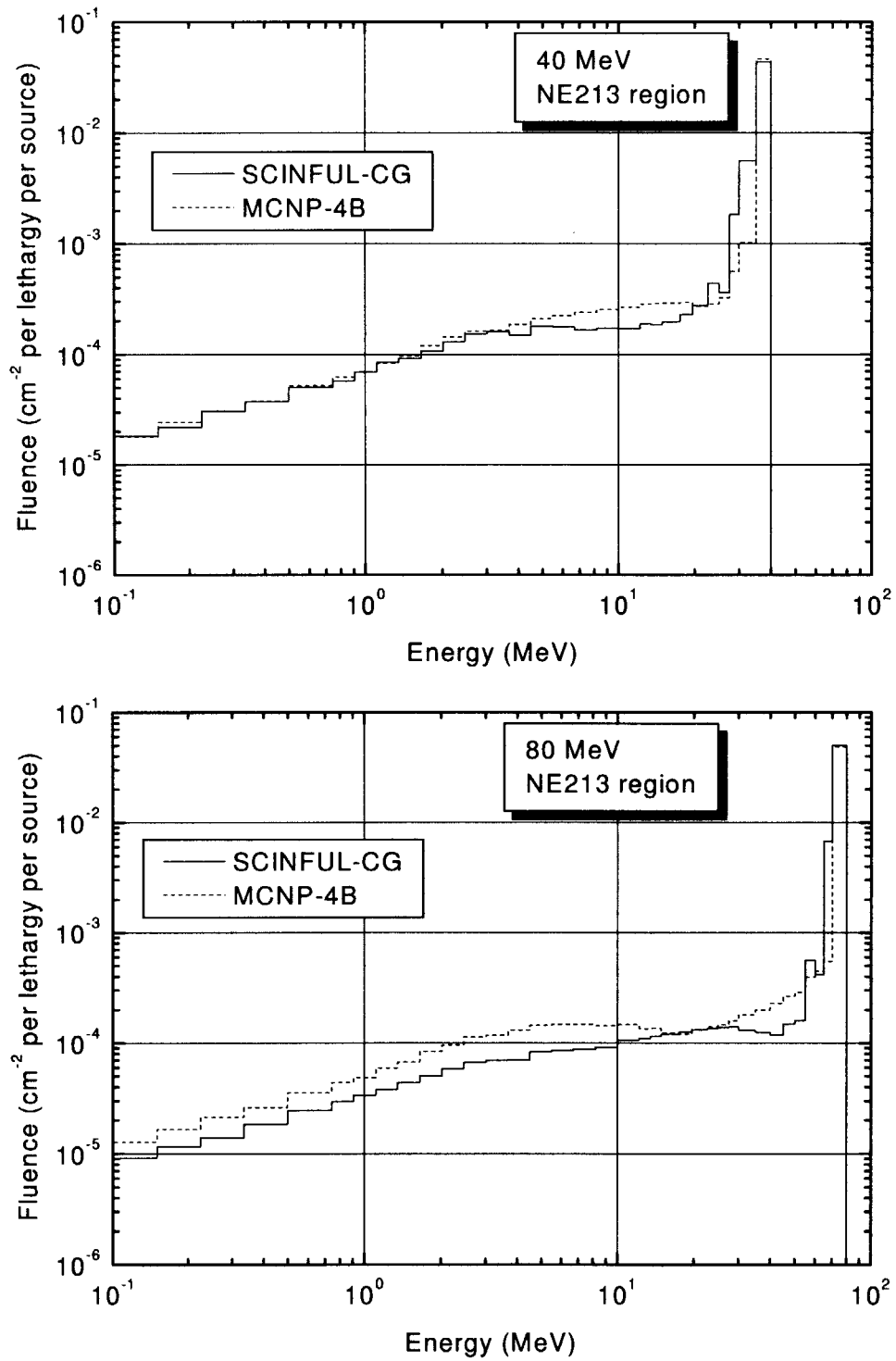


図 10 SCINFUL-CG 及び MCNP-4B による計算体系 2 における NE213 領域のスペクトルの比較

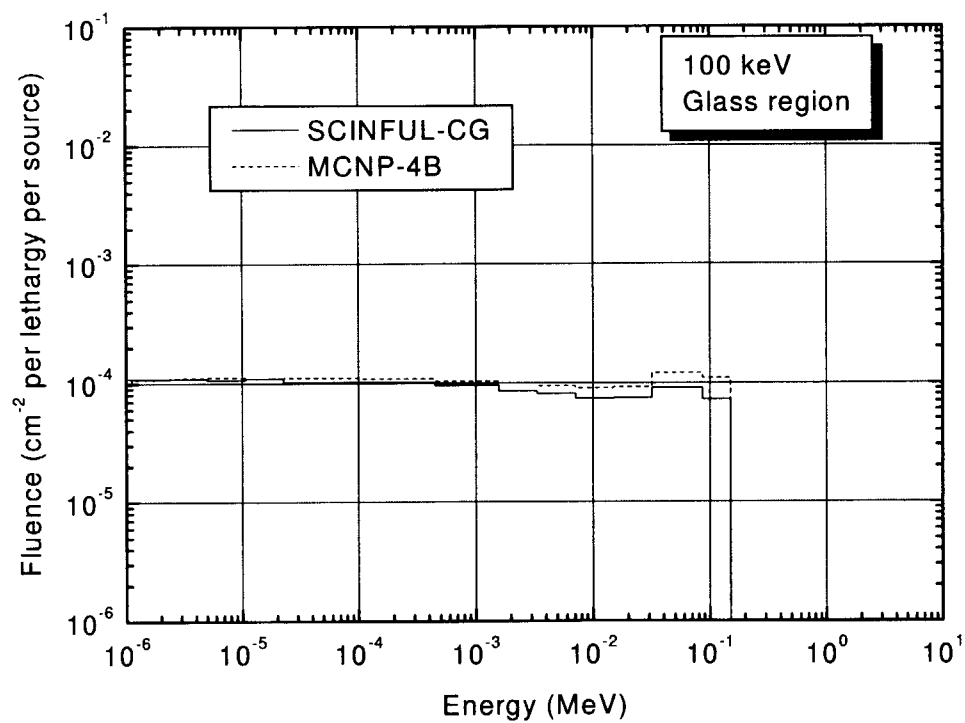
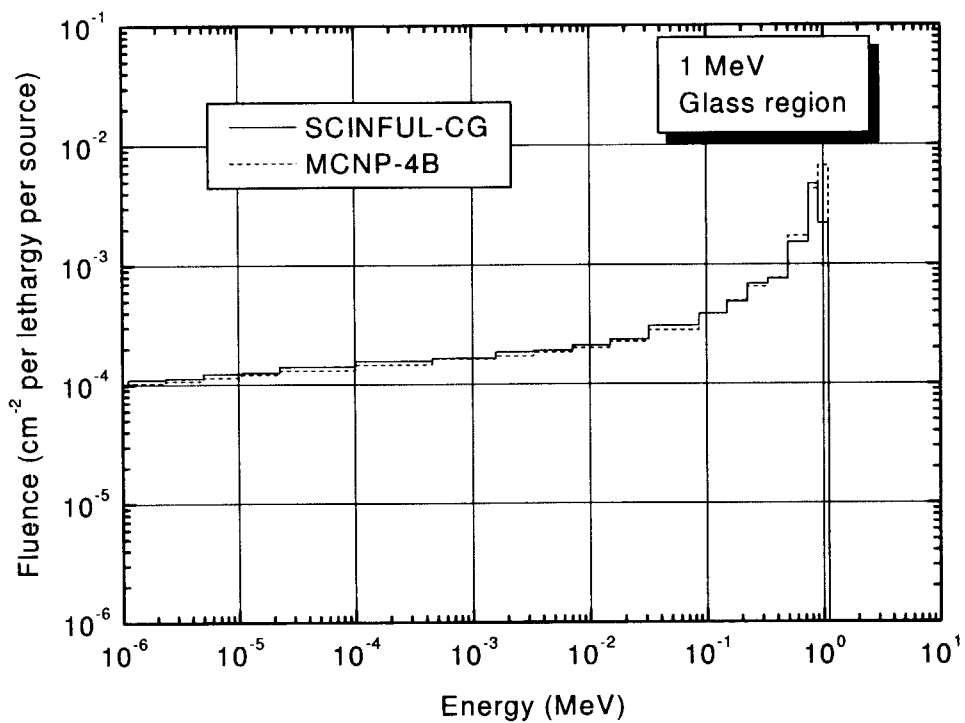


図 11 SCINFUL-CG 及び MCNP-4B による計算体系 2 におけるガラス領域のスペクトルの比較

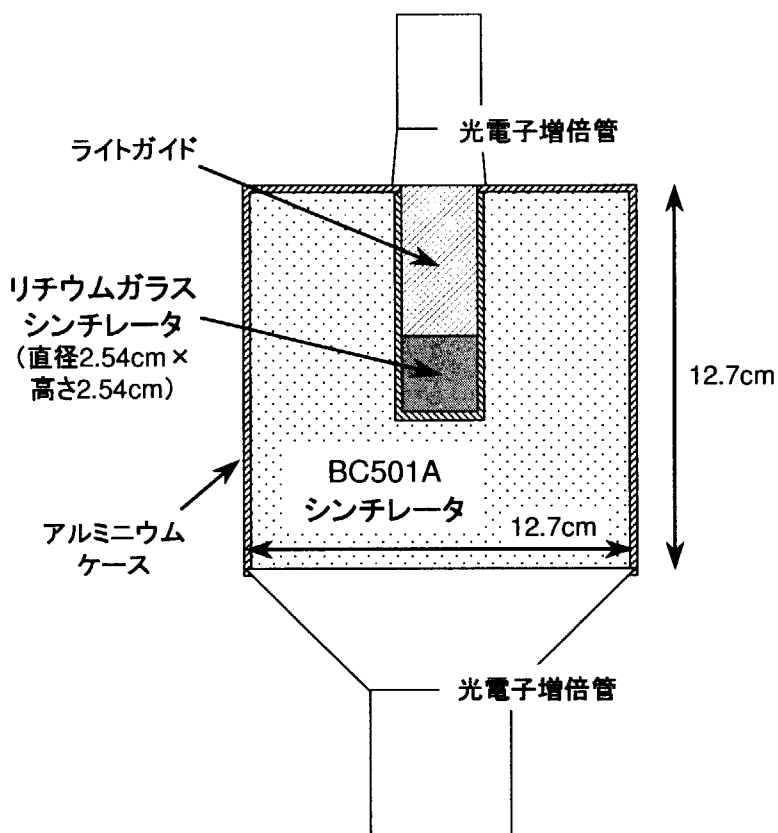


図 12 検出器の構造

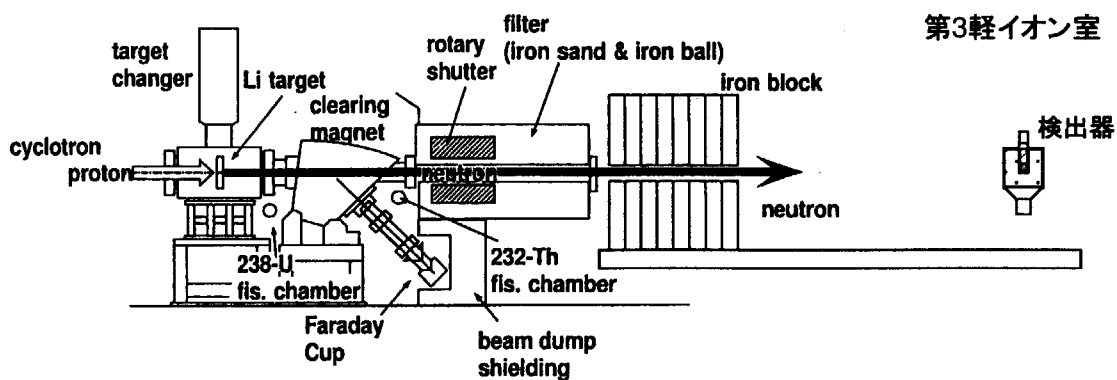


図 13 TIARA における照射体系

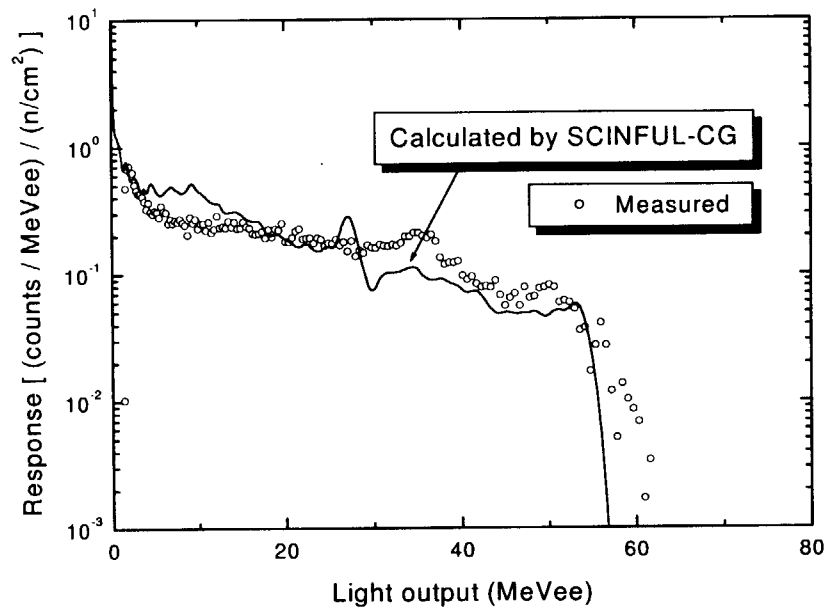


図 14 66 MeV 準単色中性子照射により得られた応答関数

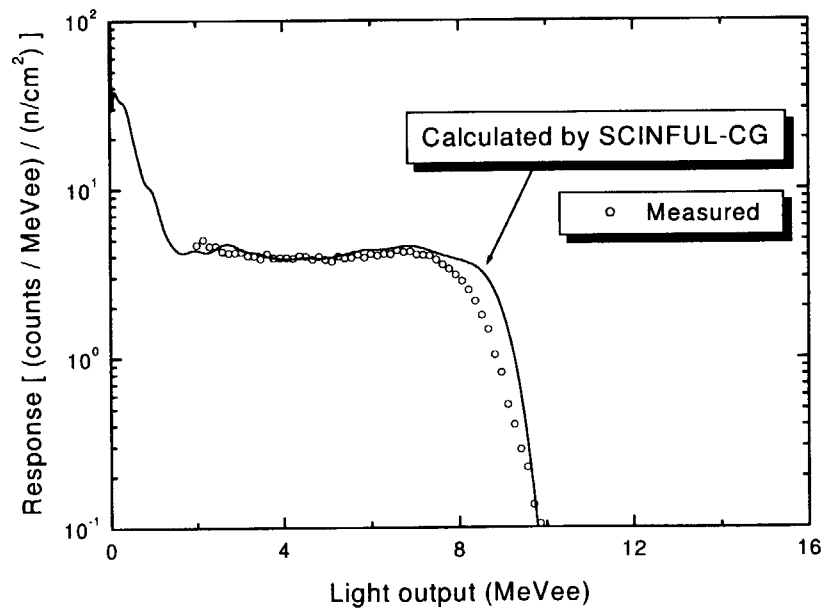


図 15 15 MeV 単色中性子照射により得られた応答関数



## 付録 A SCINFUL-CG のインストール及び使用方法

### A.1 コードのインストール, パラメータの変更

DAT テープに格納してある SCINFUL-CG のファイルを, 以下のコマンドにより UNIX ワークステーション上に展開し, 実行形式ファイル (scinful-cg.exe) を作成する。

```
% tar xvf/dev/rst1
```

\*下線部は, 計算機環境, デバイスごとにより異なるので, 各環境に対応したものにする。  
このコマンドにより, 下記のディレクトリがディスクに展開される。

```
./src      SCINFUL-CG のソースファイル一式
./src/orig SCINFUL (オリジナル版) のソースファイル一式
./samp     SCINFUL (オリジナル版) のサンプル入力データ, 出力データ, 実行シェル例
./test     SCINFUL-CG のサンプル入力データ, 出力データ, 実行シェル例
```

```
% cd src
```

```
% make
```

プログラムファイルを編集した場合は, その変更内容を有効にするために, 以下のコマンドを実行し, 実行形式ファイル (scinful-cg.exe) を更新する必要がある。

```
% cd src
```

```
% make objclean
```

```
% make
```

表 A.1 のパラメータは, param.inc (図 A.1) の値を変更し, 任意に設定することができる。材質については, 表 3 に示すデータが標準として設定されている。材質の指定については, matdat.f (図 A.2) を編集することにより変更が可能である。表 3 の材質番号は, 幾何形状入力カード 4(G) で指定するものである。

## A.2 入力データの作成方法

ここでは、SCINFUL-CGの入力データについて説明する。

カード 1		フォーマット 20A4
番号	変数	内容
(1)	(Title(I), I=1, 20)	: 計算のタイトル, コメント (80 文字まで)

カード 2		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Nhist	: 計算に用いる入射粒子数
(2)	Grho	: シンチレーション光の減衰係数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) (Kuijper et al. <sup>30</sup> 参照)
(3)	Isctyp	: シンチレータの指定 (1=NE213, 2=NE110) (領域別にシンチレータの指定はできない)
(4)	Igflag	: $\gamma$ 線による発光の弁別 (0=弁別しない, 1=弁別する)

カード 3		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Irx	: 算術一様乱数の初期値 (0 の場合は計算機が自動的に設定)

カード 4		内容
番号	変数	内容
	幾何形状指定	: 「A.3 CG 形式の幾何形状入力データの作成方法」を参照

カード 5		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Esourc	: 入射中性子の上限エネルギー (MeV)
(2)	Elow	: 入射中性子の下限エネルギー (MeV)
(3)	Temp	: Maxwellian 分布の場合の平均温度 (MeV) > 0.0 Maxwellian 分布 = 0.0 単一エネルギー (Esourc) < 0.0 Elow - Esourc のエネルギービン内均等分布
(4)	Ecutoff	: 中性子輸送のカットオフエネルギー (MeV)

## カード 6(A)

## フォーマット 自由形式

番号 変数

内容

- 
- |     |      |   |                                      |
|-----|------|---|--------------------------------------|
| (1) | Isrc | : | 線源形状の指定                              |
|     |      |   | = 1 平行ビーム                            |
|     |      |   | = 2 コリメータ有の広がったビーム (Z 軸に<br>平行な場合のみ) |
|     |      |   | = 3 検出器内の点等方線源                       |
|     |      |   | = 11 等方照射                            |

## カード 6(B)

## フォーマット 自由形式

番号 変数

内容

線源情報の指定

Isrc=1 (平行ビーム) の場合

- |     |        |   |                  |
|-----|--------|---|------------------|
| (1) | Xsourc | : | 線源ビーム中心位置の X 座標  |
| (2) | Ysourc | : | 線源ビーム中心位置の Y 座標  |
| (3) | Zsourc | : | 線源ビーム中心位置の Z 座標  |
| (4) | Rsourc | : | 線源ビームの半径         |
| (5) | Usourc | : | 線源ビーム方向の X 軸方向余弦 |
| (6) | Vsourc | : | 線源ビーム方向の Y 軸方向余弦 |
| (7) | Wsourc | : | 線源ビーム方向の Z 軸方向余弦 |

Isrc=2 (コリメータ有の広がったビーム) の場合

- |     |        |   |                                 |
|-----|--------|---|---------------------------------|
| (1) | Xsourc | : | 線源ビーム中心位置の X 座標                 |
| (2) | Ysourc | : | 線源ビーム中心位置の Y 座標                 |
| (3) | Zsourc | : | 線源ビーム中心位置の Z 座標                 |
| (4) | Rsourc | : | コリメータの半径 (Z=0.0 にコリメータがあるとして設定) |

Isrc=3 (検出器内の点等方線源) の場合

- |     |        |   |            |
|-----|--------|---|------------|
| (1) | Xsourc | : | 線源位置の X 座標 |
| (2) | Ysourc | : | 線源位置の Y 座標 |
| (3) | Zsourc | : | 線源位置の Z 座標 |

Isrc=11 (等方照射) の場合

- |     |        |   |              |
|-----|--------|---|--------------|
| (1) | Xsourc | : | 線源中心位置の X 座標 |
| (2) | Ysourc | : | 線源中心位置の Y 座標 |
| (3) | Zsourc | : | 線源中心位置の Z 座標 |
| (4) | Rsourc | : | 線源中心位置からの距離  |

## カード 7

## フォーマット 自由形式

番号 変数

内容

- 
- |     |      |   |   |
|-----|------|---|---|
| (1) | Wbox | : | 発光量のビン幅 (L.U.)<br>(Wbox=0.0 の時は, 最大発光量を 471 で区切ったものに設定) |
|-----|------|---|---|

カード 8(A)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Neng	: 中性子の領域別飛跡長タリーのエネルギービン数

カード 8(B)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	(Eb(i), i=1, neng+1)	: 中性子の領域別飛跡長タリーのエネルギービン境界 (MeV)

カード 9		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	(Volreg(i), i=1, nreg)	: 各領域の体積 (cm <sup>3</sup> )

カード 10		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Ksunit	: 中性子の領域別飛跡長タリー出力の単位 = 0 (/cm <sup>2</sup> /source/group) = 1 (/cm <sup>2</sup> /source/MeV) = 2 (/cm <sup>2</sup> /source/lethargy)

### A.3 CG 形式の幾何形状入力データの作成方法

ここでは、MARS-CG 形式による幾何形状データの入力方法について説明する。

カード 4(A)		フォーマット (A60)
番号	変数	内容
(1)	Title	: 幾何形状に関するタイトル・コメント

カード 4(B)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Ivopt	: (未使用:0 を入力)
(2)	Idbg	: デバッグ印書オプション (>0 ならば印書)
(3)	Ibod	: Body 番号入力オプション (>0 ならば入力)
(4)	Naz	: ある領域に入力可能な Body 数の最大値 (default=5)

カード 4(C) は定義する Body 数繰り返す

カード 4(C)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Itype	: Body 型式識別子 (3 文字。“END” で終了)(表 A.2, 図 A.3 参照)
(2)	Ialp	: ユーザー指定 Body 番号 (Ibod>0 の場合にのみ入力し, それ以外は省略する)
(3)	Body(1:n)	: Body 型式識別子に対応した Body 形状データ (表 A.2, 図 A.3 参照)

カード 4(D) は定義する Body 数繰り返す

カード 4(D)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Ireg	: 任意の領域識別名 (3 文字までで, 最初の文字は英字でなければならない。“END” で終了)
(2)	Ibias(1:n)	: 領域の結び操作子 (OR オペレータを使用する場合には “OR” を入力し, 使用しなければ省略する。図 A.4 参照)
(3)	Jty(1:n)	: 領域を表現する Body 番号 (その領域が Body の内側にあれば +, 外側にあれば - 符号を番号の前に付ける。図 A.4 参照)

カード 4(E)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Iwl(1:n)	: カード 4(D) で定義した順序の領域に対する領域番号

カード 4(F)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Iwu(1:n)	: カード 4(D) で定義した領域に対する Universe 番号 (Array 構造を使用しない通常の Combinatorial Geometry の場合には、全て 0 を入力する)

カード 4(G)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Media(1:n)	: カード 4(D) で定義した領域に対する材質番号 (表 3 参照)。但し、以下の番号は特別な意味を持つ。 = 0           外部ポイド = 1000       内部ポイド (真空) = -1000      Universe の外側境界

カード 4(H) は定義する Body 数繰り返す

カード 4(H)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Nxmax	: X 方向の Array の長さ (Array を使用しない場合は 0)
(2)	Nymax	: Y 方向の Array の長さ
(3)	Nzmax	: Z 方向の Array の長さ

注: Array を使用しない場合でも、カード 4(H) は、Array を使用しないことを明示するために 1 枚必要である。Array とは、直方体の Body で囲まれた領域 (セル: Array または Universe) を、X, Y, Z 方向に任意の個数だけ配列したものを指す (図 A.5, A.6 参照)。ひとつの Array を構成する Body (Array または Universe の境界を表す) の X, Y, Z 方向の長さは、隣同士では同じでなければならない。Array の番号は、カード 4(H) の入力順に付けられる。Universe は、任意の長方形領域であり、その境界を表す直方体領域の原点を原点とする座標系で、その中に含まれる Body の位置は定義される。

Array を使用しない場合は、カード 4(I), 4(J), 4(K) は省略する。

カード 4(I)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Iop	: Array 配列の入力形式オプション = 0 Free Form FIDO 形式 = 1 Do Loop 形式 (KENO 型式) = 2 標準 FIDO 形式 (ANISN 型式)

**IOP=0 の場合**

カード 4(J1)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Nca(1:nxmax, 1:nymax, 1:nzmax, 1:nar)	: X, Y, Z の昇順に Array に含まれるセルの番号を Array の個数 nar 回繰り返して指定する

**IOP=1 の場合**

カード 4(J2)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Ltype	: セル番号
(2)	Ix1	: セルの入る X 方向 Array 位置の最初の番号
(3)	Ix2	: セルの入る X 方向 Array 位置の最後の番号
(4)	IncX	: セルの入る X 方向 Array 位置の増分
(5)	Iy1	: セルの入る Y 方向 Array 位置の最初の番号
(6)	Iy2	: セルの入る Y 方向 Array 位置の最後の番号
(7)	IncY	: セルの入る Y 方向 Array 位置の増分
(8)	Iz1	: セルの入る Z 方向 Array 位置の最初の番号
(9)	Iz2	: セルの入る Z 方向 Array 位置の最後の番号
(10)	IncZ	: セルの入る Z 方向 Array 位置の増分
(11)	Istp	: 入力オプション = 0 次の Array の入力を継続 (カード 4(J2)) を繰り返す) = 1 Array 入力の終了

**IOP=2 の場合**

カード 4(J3)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)		: FIDO 形式で以下のように入力する。 (100+Array 番号)\$ \$ ... T (自由形式 FIDO) または, (100+Array 番号)\$ ... T (固定形式 FIDO)

注: Array に含まれる Universe, または Array 番号を入力する。セルが Universe を表す場合は正の Universe 番号 (カード 4(F)), セルが Array の場合は負の Array 番号 (カード 4(I) の順序) を入力する。セル番号の 0 は, その中がボイドであることを示す。

カード 4(K)		フォーマット 自由形式
番号	変数	内容
(1)	Itu(1:n)	: Universe の型式を, 全ての Universe について指定 (図 A.7 参照) = 0 Simple Universe (内部に含まれる Body が互いに交わらず, 内側から外側に包含関係を持って定義されている) = 1 Combinatorial Universe (Simple Universe 以外)

#### A.4 SCINFUL-CG の実行方法及び出力例

SCINFUL-CG は, 表 A.3 に示す入出力ファイルを使用する。図 A.8 に, SCINFUL-CG を UNIX ワークステーション上で実行させる場合の実行シェル (C-shell) の例を示す。このシェルを使用する場合, 入力データは, 拡張子 “.inp” でファイル名を指定する。例として, 図 A.9 に, 図 7(a) の計算条件の入力ファイルを示す。ファイル名 “case1.inp” の入力データを用い, 次のコマンドにより計算を実行する。

```
% goscinfulcg case1
```

各出力ファイルを, 図 A.10 - 図 A.13 に示す。case1.out (図 A.10) には, 計算体系, 線源, スペクトルビンの境界エネルギー等の入力データの後に, 各反応数の集計, 発光量分布等の計算結果が出力される。case1.pch (図 A.11) には, case1.out の出力中から, 発光量分布の結果のみが取り出され, 書き込まれる。case1.regn (図 A.12) には, CG で定義された領域ごとに中性子スペクトルが出力される。case1.trk (図 A.13) には, 表 A.4 に示す中性子の飛跡に関するデータが書き込まれる。



表 A.1 形状、材質及びエネルギービンに関するパラメータ

	パラメータ名	標準設定値
最大領域数	mxreg	1000
最大材質数	mxmat	10
飛跡長タリーの最大エネルギービン数	mxbin	1000

表 A.3 SCINFUL-CG の入出力ファイル

内容	入出力	機番	拡張子
入力データ	入力	5(標準入力)	.inp
計算結果の出力	出力	6(標準出力)	.out
ログ情報	出力	59	.log
発光量分布計算結果	出力	22	.pch
領域別飛跡長タリー計算結果	出力	32	.regn
中性子飛跡情報	出力	61	.trk

表 A.4 trk ファイルへ出力されるデータ

Column	内容	Column	内容
1	ヒストリ番号	11	粒子の次の位置までの飛行距離
2	ヒストリ中の粒子世代	12	粒子が位置する領域の材質番号
3	粒子の運動エネルギー (MeV)	13	粒子が位置する領域の領域番号
4	粒子の統計的重み	14	粒子の反応の種類 (以下の5種類)
5	粒子の位置の X 座標	1 :	source
6	粒子の位置の Y 座標	2 :	nuclear reaction
7	粒子の位置の Z 座標	3 :	termination by energy cut-off
8	粒子の飛行方向の X 方向余弦	4 :	termination by escape or leakage
9	粒子の飛行方向の Y 方向余弦	7 :	geometry boundary crossing
10	粒子の飛行方向の Z 方向余弦		

表 A.2 MARS の Body 形状データ

Body タイプ	Itype	Ialp*	形状データ					
直方体	RPP		$X_{\min}$	$X_{\max}$	$Y_{\min}$	$Y_{\max}$	$Z_{\min}$	$Z_{\max}$
球	SPH		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$R$		
正円柱	RCC		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$H_x$	$H_y$	$H_z$
			$R$					
正楕円柱	REC		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$H_x$	$H_y$	$H_z$
			$R_{1x}$	$R_{1y}$	$R_{1z}$	$R_{2x}$	$R_{2y}$	$R_{2z}$
正円錐台	TRC		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$H_x$	$H_y$	$H_z$
			$R_1$	$R_2$				
回転楕円体	ELL		$V_{1x}$	$V_{1y}$	$V_{1z}$	$V_{2x}$	$V_{2y}$	$V_{2z}$
			$R$					
くさび形	WED		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$H_{1x}$	$H_{1y}$	$H_{1z}$
			$H_{2x}$	$H_{2y}$	$H_{2z}$	$H_{3x}$	$H_{3y}$	$H_{3z}$
平行六面体	BOX		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$H_{1x}$	$H_{1y}$	$H_{1z}$
			$H_{2x}$	$H_{2y}$	$H_{2z}$	$H_{3x}$	$H_{3y}$	$H_{3z}$
一般六面体	ARB		$V_{1x}$	$V_{1y}$	$V_{1z}$	$V_{2x}$	$V_{2y}$	$V_{2z}$
			$V_{3x}$	$V_{3y}$	$V_{3z}$	$V_{4x}$	$V_{4y}$	$V_{4z}$
			$V_{5x}$	$V_{5y}$	$V_{5z}$	$V_{6x}$	$V_{6y}$	$V_{6z}$
			$V_{7x}$	$V_{7y}$	$V_{7z}$	$V_{8x}$	$V_{8y}$	$V_{8z}$
			各六面の面番号 (4桁の整数)					
平行六面体の回転	BPP		$X_{\min}$	$X_{\max}$	$Y_{\min}$	$Y_{\max}$	$Z_{\min}$	$Z_{\max}$
			$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$			
くさび形の回転	WPP		$X_{\min}$	$X_{\max}$	$Y_{\min}$	$Y_{\max}$	$Z_{\min}$	$Z_{\max}$
			$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$			
一般楕円体	GEL		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$R_{1x}$	$R_{1y}$	$R_{1z}$
			$R_{2x}$	$R_{2y}$	$R_{2z}$	$R_{3x}$	$R_{3y}$	$R_{3z}$
斜楕円錐台	QUA		$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
			$g$	$h$	$Z_1$	$Z_2$		
トーラス	TOR		$X_0$	$Y_0$	$Z_0$	$R$	$a$	$b$
			$F_{xyz}$	$\theta_1$	$\theta_2$			
無限平面 (Hesse の式)	P		$H_x$	$H_y$	$H_z$	$D$		
無限平面 (Y-Z 平面)	PX		$D$					
無限平面 (X-Z 平面)	PY		$D$					
無限平面 (X-Y 平面)	PZ		$D$					
無限平面 (一般化 Hesse の式)	PS		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$H_x$	$H_y$	$H_z$
			$D$					
無限円柱	C		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$H_x$	$H_y$	$H_z$
			$R$					
無限円柱 (中心軸が x 軸方向)	CX		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$R$		
無限円柱 (中心軸が y 軸方向)	CY		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$R$		
無限円柱 (中心軸が z 軸方向)	CZ		$V_x$	$V_y$	$V_z$	$R$		
データの終了	END							

\*Ialp は, Ibod (カード 4(C) の (3)) > 0 のときのみ入力する。

```
c
  parameter (mxdim=40000)
c mxdim : dimension size for common array in MARS
c
  parameter (mxreg=1000)
  parameter (mxmat=10)
c mxreg : maximum number of regions
c mxmat : maximum number of materials
c
  parameter (mxcmp=10)
  parameter (mxelm=10)
c mxcmp : maximum number of composition in a material
c mxelm : maximum number of elements
c
  parameter (mxprt=80)
  parameter (mxitb=124)
c mxprt : maximum number of energy points of proton range table
c mxitb : maximum number of energy points of Light data
c
  parameter (mxstack=1000)
  parameter (mxprob=12)
  parameter (mxlgnd=220, mxcoef=6)
c mxstack : maximum number of stack dimension
c mxprob : maximum number of probability data
c
  parameter(mxbin=1000)
c
c -----
c
  parameter(mxcs=100)
c
```

図 A.1 param.inc のリスト

```

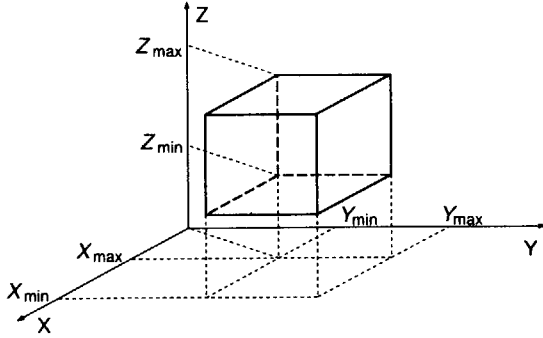
c
  block data matdat
c
  include 'param.inc'
  include 'cm_dens.inc'
c
c
c Nmat : number of materials
c Ncp  : number of composition in the material
c Npb  : element number
c      1 : H
c      2 : C
c      3 : Al
c      4 : Si
c      5 : O
c Apb  : atomic number density (atoms/barn cm)
c
c
c material number
c 1. NE213
c 2. NE110
c 3. Al
c 4. Glass Scintillator
c
c
c      number of materials
c      data Nmat/4/
c
c      "Attenuation" densities for H and C in (atoms/barn)/cm for NE-213
c      based on a density of 0.874 gm/cm**3 and H:C ratio of 1.213
c      Data Ncp(1)/2/
c      Data (Npb(i,1),i=1,2)/1,2/
c      Data (Apb(i,1),i=1,2)/0.04833,0.03984/
c
c      "Attenuation" densities for H and C in (atoms/barn)/cm for NE-110
c      based on a density of 1.032 gm/cm**3 and H:C ratio of 1.104
c      Data Ncp(2)/2/
c      Data (Npb(i,2),i=1,2)/1,2/
c      Data (Apb(i,2),i=1,2)/0.05237,0.04743/
c
c      "Attenuation" densities for Al in (atoms/barn)/cm for Aluminum
c      based on a density of 2.69 gm/cm**3
c      Data Ncp(3)/1/
c      Data (Npb(i,3),i=1,1)/3/
c      Data (Apb(i,3),i=1,1)/0.06022/
c
c      "Attenuation" densities for Si and O in (atoms/barn)/cm
c      for Glass Scintillator NE-908
c      based on a density of 2.674 g/cm**3
c      Data Ncp(4)/2/
c      Data (Npb(i,4),i=1,2)/4,5/
c      Data (Apb(i,4),i=1,2)/0.018215,0.048074/
c
c
  end

```

図 A.2 matdat.f のリスト

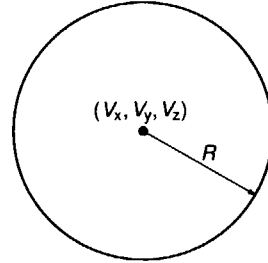
1. 直方体 (RPP)

直方体 (RPP) は、平行六面体の X, Y, Z 座標の最小と最大値で定義される。



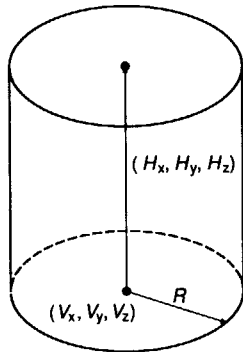
2. 球 (SPH)

球 (SPH) は、中心座標  $(V_x, V_y, V_z)$  と半径  $R$  で定義される。



3. 正円柱 (RCC)

正円柱 (RCC) は、底面の円の中心座標  $(V_x, V_y, V_z)$ 、半径  $R$ 、中心軸  $(H_x, H_y, H_z)$  で定義される。



4. 正楕円柱 (REC)

正楕円柱 (REC) は、底面の楕円と中心軸で定義される。楕円の中心座標は  $(V_x, V_y, V_z)$ 、楕円の長軸及び短軸は、それぞれ、 $(R_{1x}, R_{1y}, R_{1z})$  と  $(R_{2x}, R_{2y}, R_{2z})$  で定義される。中心軸は  $(H_x, H_y, H_z)$  で定義される。

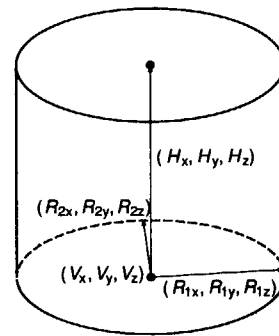
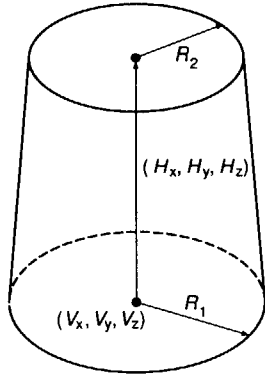


図 A.3 MARS の Body 形状 (1/7)

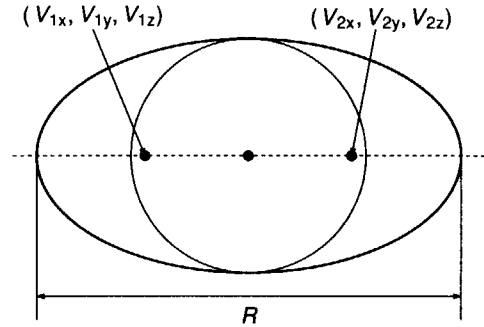
5. 正円錐台 (TRC)

正円錐台 (TRC) は、半径  $R_1$  の底面の円と半径  $R_2$  の上面の円と中心軸で定義される。中心軸の高さ及び方向は  $(H_x, H_y, H_z)$  で定義され、底面の円の中心座標  $(V_x, V_y, V_z)$  から上面の円の中心までを結び、底面、上面とも中心軸で垂直に交わっている。



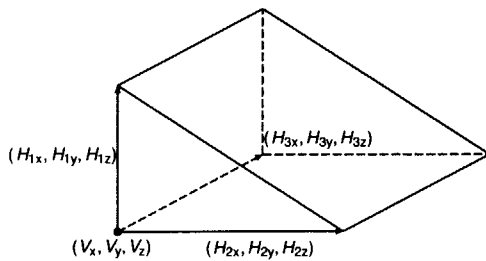
6. 回転楕円体 (ELL)

回転楕円体 (ELL) は、2つの焦点の座標  $(V_{1x}, V_{1y}, V_{1z})$ ,  $(V_{2x}, V_{2y}, V_{2z})$  と、主軸  $R$  の長さで定義される楕円を、主軸を中心に回転したものである。



7. くさび形 (WED)

くさび形 (WED) は、基準となる頂点の座標  $(V_x, V_y, V_z)$  と、その頂点で直交する3辺で定義される。直交する3辺の長さとは、それぞれ  $(H_{1x}, H_{1y}, H_{1z})$ ,  $(H_{2x}, H_{2y}, H_{2z})$ ,  $(H_{3x}, H_{3y}, H_{3z})$  で定義される。



8. 平行六面体 (BOX)

平行六面体 (BOX) は、基準となる頂点の座標  $(V_x, V_y, V_z)$  と、その頂点で直交する3辺で定義される。直交する3辺の長さとは、それぞれ  $(H_{1x}, H_{1y}, H_{1z})$ ,  $(H_{2x}, H_{2y}, H_{2z})$ ,  $(H_{3x}, H_{3y}, H_{3z})$  で定義される。

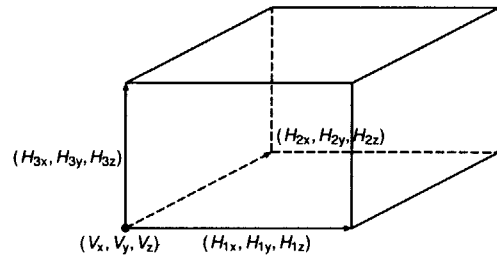
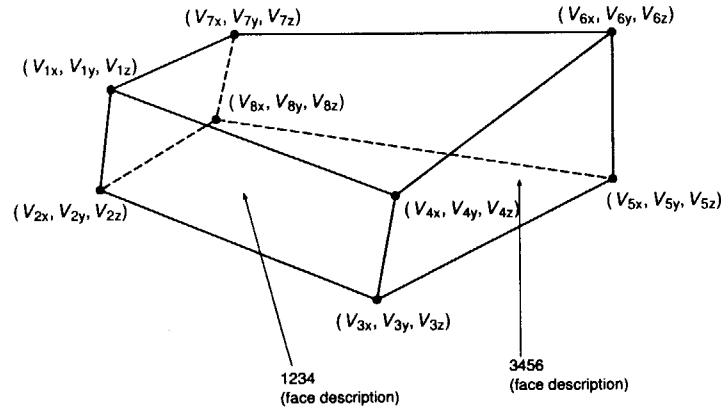


図 A.3 MARS の Body 形状 (2/7)

9. 一般六面体 (ARB)

一般六面体 (ARB) は,  $(V_{1x}, V_{1y}, V_{1z})$  から  $(V_{8x}, V_{8y}, V_{8z})$  の 8 頂点で定義される。6 面は, 各面の頂点の番号右回り, あるいは左回り 4 つ並べた 4 桁の整数によって定義される。



10. 平行六面体の回転 (BPP), くさび形の回転 (WPP)

平行六面体の回転 (BPP) とくさび形の回転 (WPP) は, 3 辺が X 軸, Y 軸, Z 軸に平行な平行六面体 (BOX) とくさび形 (WED) の回転によって得られる Body 形状である。ユーザーは, 3 つの回転角度とともに, 直方体 (RPP) のような平行六面体あるいはくさび形の定義が必要である。1 番目の角度は, Z 軸を中心とした X-Y 平面での回転で, 右回りが正である (第 1 ステップ)。2 番目の角度は, X' 軸を中心とした Y'-Z' 平面での回転で, 右回りが正である (第 2 ステップ)。第 1 ステップで回転した Body は, そのまま 2 番目の角度で回転される。3 番目の角度は, Y'' 軸を中心とした X''-Z'' 平面での回転であり, 左回りが正である。第 2 ステップまでの回転をした Body は, そのまま 3 番目の角度により, Y'' 軸を中心に回転する。上記の手順を, 右図に示す。

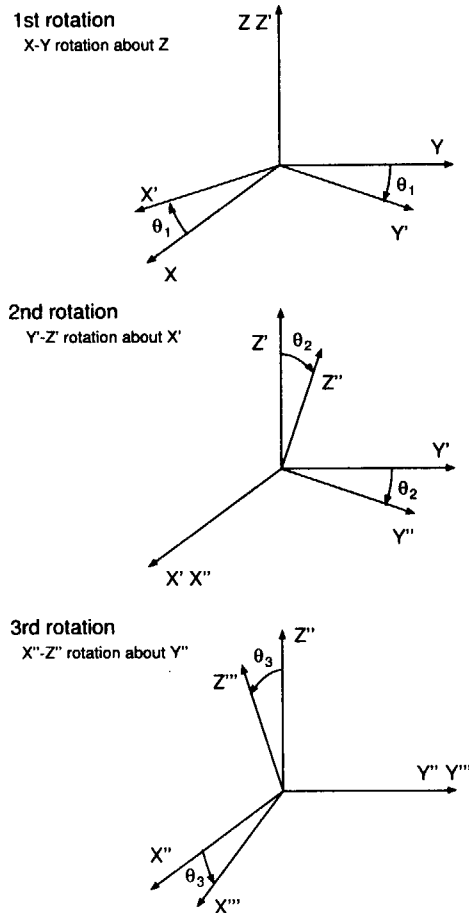
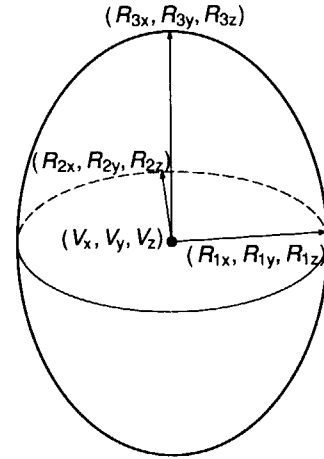


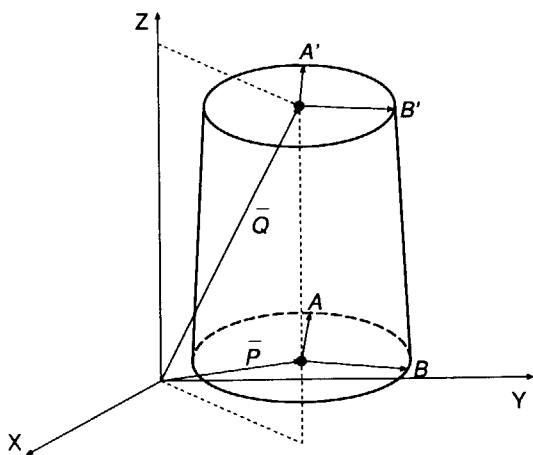
図 A.3 MARS の Body 形状 (3/7)

11. 一般楕円体 (GEL)

一般楕円体 (GEL) は、楕円の中心座標  $(V_x, V_y, V_z)$  と、3つの直交する軸  $(R_{1x}, R_{1y}, R_{1z})$ ,  $(R_{2x}, R_{2y}, R_{2z})$ ,  $(R_{3x}, R_{3y}, R_{3z})$  で定義される。



12. 斜楕円錐台 (QUA)



斜楕円錐台 (QUA) は、X-Y 平面に平行な2つの楕円で定義される。次の数式で表される。

$$(ax + bz + c)^2 + (dy + ez + f)^2 = (gz + h)^2$$

または

$$\left\{ \frac{x + (bz + c)/a}{(gz + h)/a} \right\}^2 + \left\{ \frac{y + (ez + f)/d}{(gz + h)/d} \right\}^2 = 1$$

原点 O と、2つの楕円 P, Q の距離は次のようになる。

$$\bar{P} = \left( -\frac{bZ_1 + c}{a}, -\frac{eZ_1 + f}{d}, Z_1 \right)$$

$$\bar{Q} = \left( -\frac{bZ_2 + c}{a}, -\frac{eZ_2 + f}{d}, Z_2 \right)$$

そして、2つの楕円の最大と最小軸の半分の長さは、次のようになる。

$$(A, B) = \left( \frac{gZ_1 + h}{a}, \frac{gZ_1 + h}{d} \right)$$

$$(A', B') = \left( \frac{gZ_2 + h}{a}, \frac{gZ_2 + h}{d} \right)$$

図 A.3 MARS の Body 形状 (4/7)



13. トーラス (TOR)

トーラス (TOR) は、中心点  $(X_0, Y_0, Z_0)$  から距離  $R$  離れた点を中心とする正楕円の、中心点を中心とした回転で定義される。正楕円の長軸、短軸の長さはそれぞれ  $a$ ,  $b$  で定義され、回転の始まり角度  $\theta_1$  と終わりの角度  $\theta_2$  が与えられる。回転の回転軸の方向は次の  $F_{xyz}$  で指定される。

$F_{xyz}=1$  :  $\theta_1$  と  $\theta_2$  は X 軸のまわりの回転、つまり Y-Z 平面

$F_{xyz}=2$  :  $\theta_1$  と  $\theta_2$  は Y 軸のまわりの角度、つまり X-Z 平面

$F_{xyz}=3$  :  $\theta_1$  と  $\theta_2$  は Z 軸のまわりの角度、つまり X-Y 平面

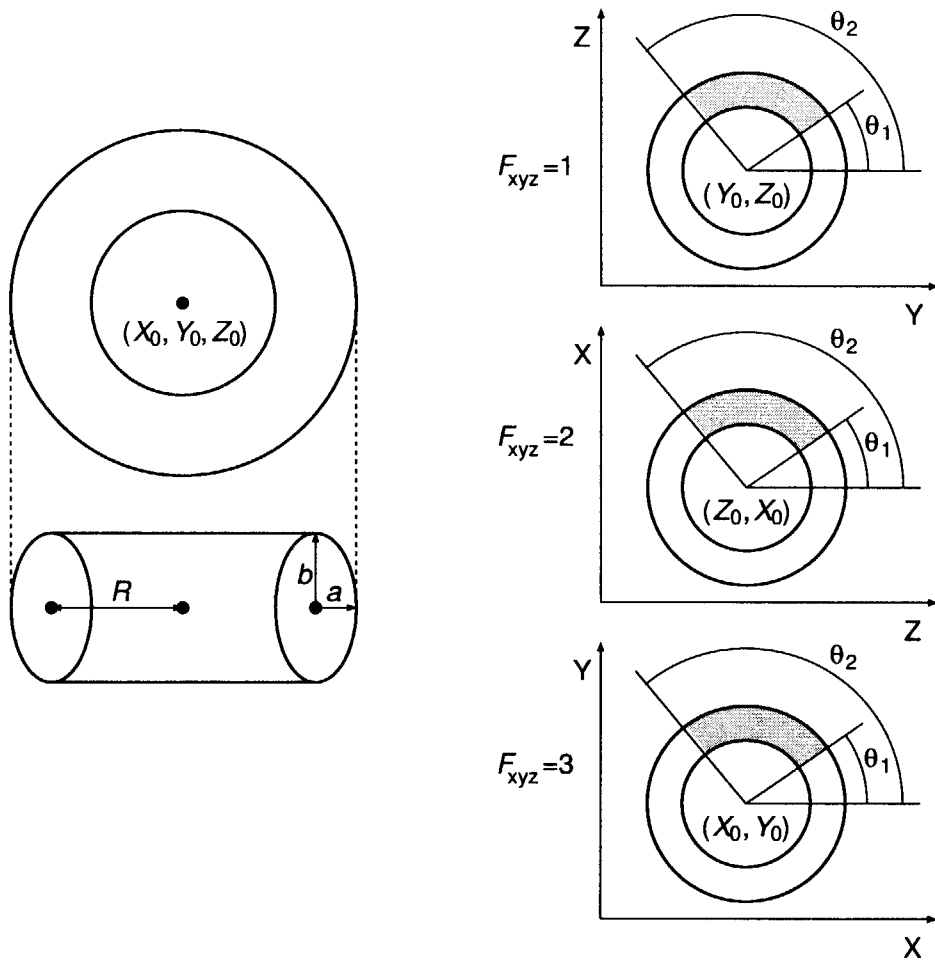
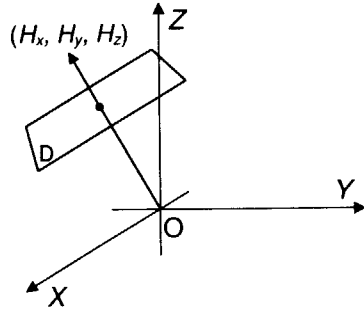


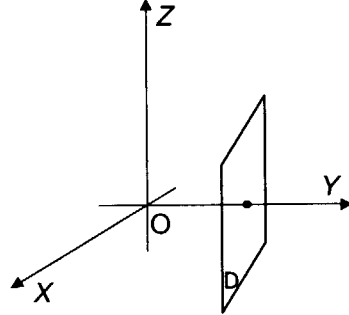
図 A.3 MARS の Body 形状 (5/7)

14. 無限平面

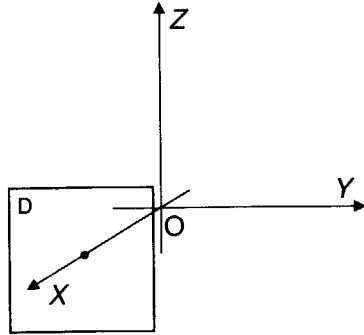
P: 無限平面 (Hesse の式)



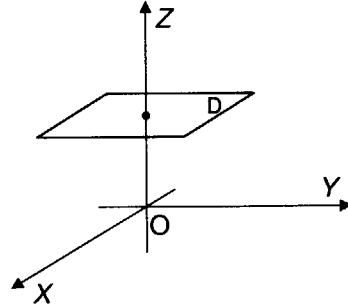
PY: 無限平面 (X-Z平面)



PX: 無限平面 (Y-Z平面)



PZ: 無限平面 (X-Y平面)



PS: 無限平面 (一般化 Hesse の式)

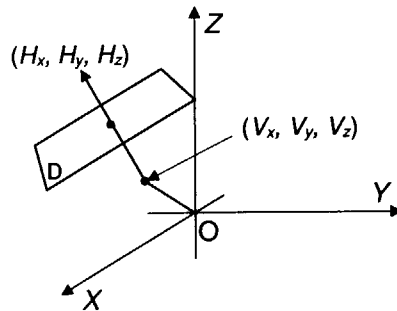
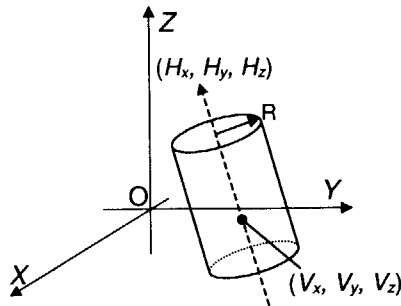


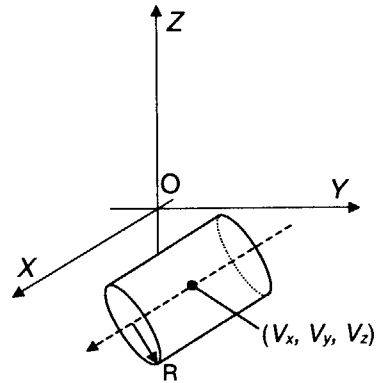
図 A.3 MARS の Body 形状 (6/7)

15. 無限円柱

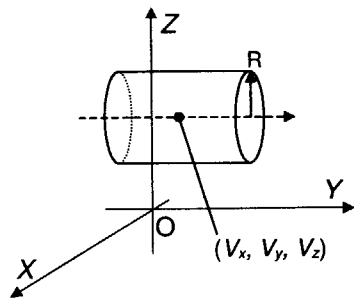
C: 無限円柱



CX: 無限円柱 (中心軸がX軸方向)



CY: 無限円柱 (中心軸がY軸方向)



CZ: 無限円柱 (中心軸がZ軸方向)

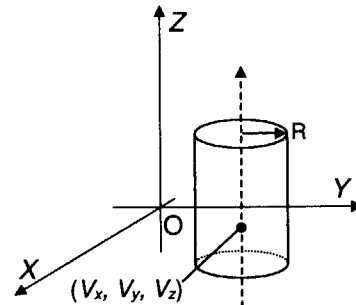


図 A.3 MARS の Body 形状 (7/7)

注: 無限平面 (P, PX, PY, PZ, PS), 無限円柱 (C, CX, CY, CZ) は, 閉じた空間がないため, 球 (RPH) や円柱 (RCC) のように Body の内側 (+), 外側 (-) の指定ができない。そこで, 他の Body と扱いを同じにするため, 下記のように +/- を定める。

形状	+ 方向	- 方向
P	ベクトル $(H_x, H_y, H_z)$ に順方向の半空間	ベクトル $(H_x, H_y, H_z)$ に逆方向の半空間
PX	ベクトル $(1, 0, 0)$ に順方向の半空間	ベクトル $(1, 0, 0)$ に逆方向の半空間
PY	ベクトル $(0, 1, 0)$ に順方向の半空間	ベクトル $(0, 1, 0)$ に逆方向の半空間
PZ	ベクトル $(0, 0, 1)$ に順方向の半空間	ベクトル $(0, 0, 1)$ に逆方向の半空間
PS	ベクトル $(H_x, H_y, H_z)$ に順方向の半空間	ベクトル $(H_x, H_y, H_z)$ に逆方向の半空間
C	円柱の内側	円柱の外側
CX	円柱の内側	円柱の外側
CY	円柱の内側	円柱の外側
CZ	円柱の内側	円柱の外側

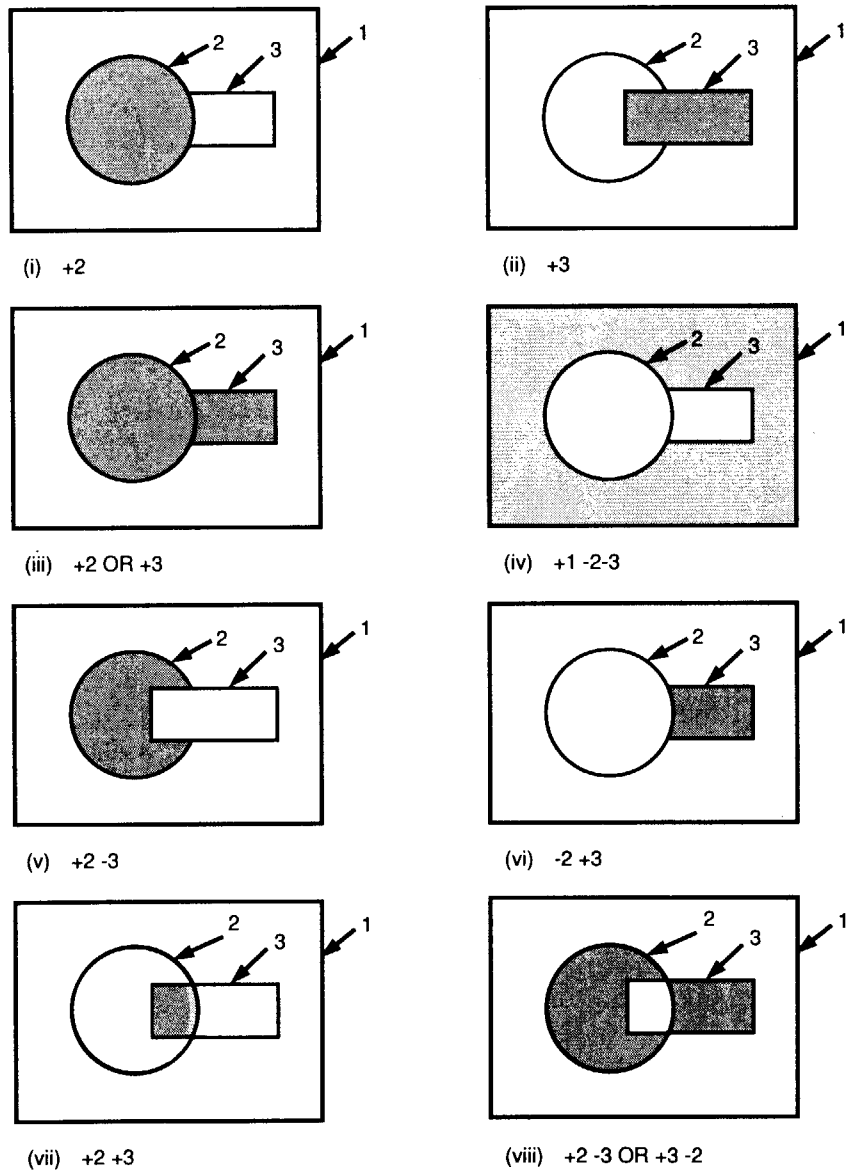


図 A.4 CG 形式の領域記述例 (ブール代数)

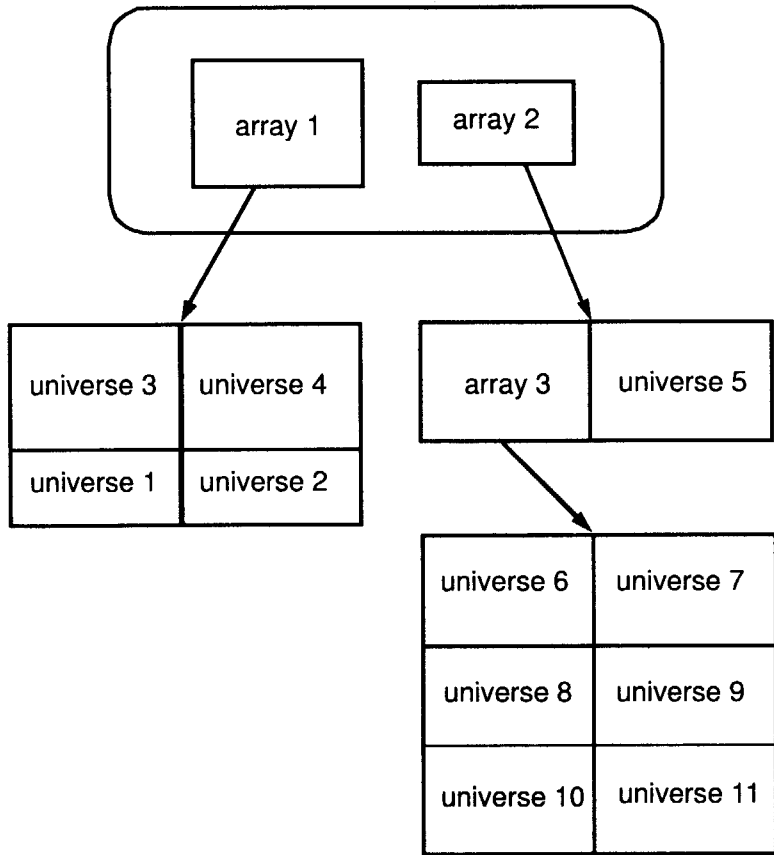
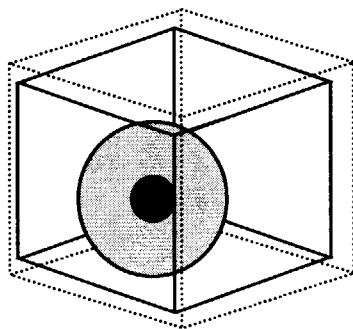
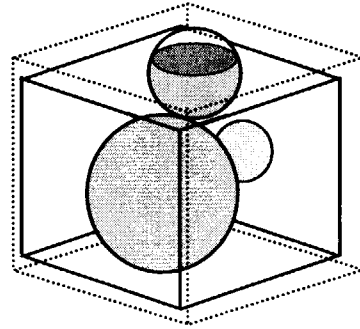


図 A.5 Universe と Array の関係

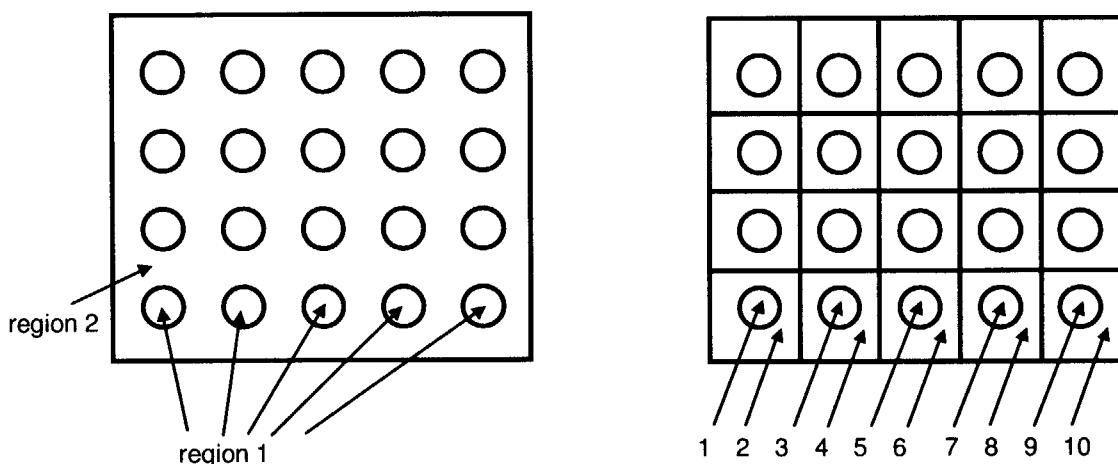
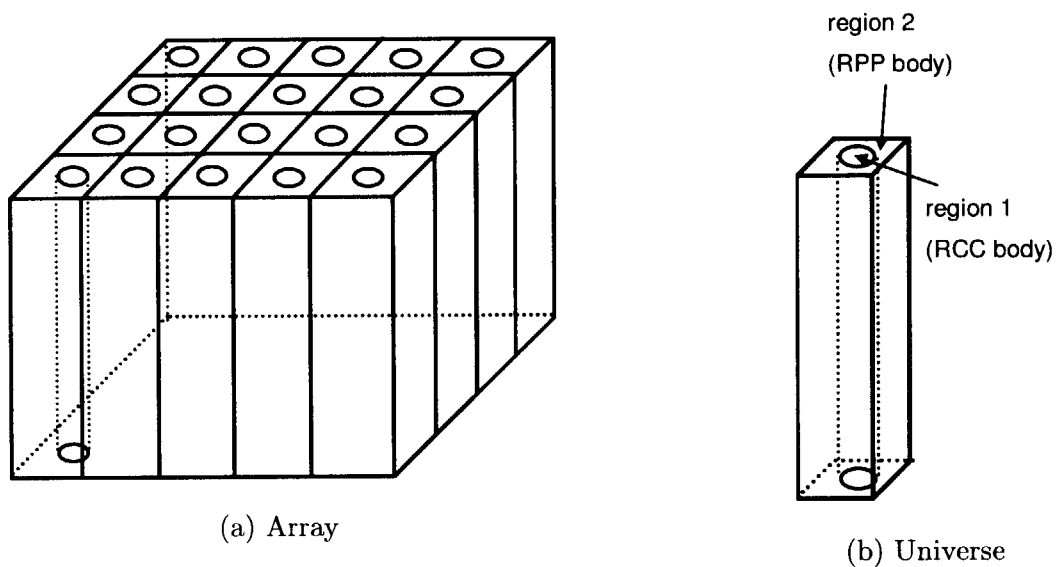


(a) Simple Universe の例



(b) Combinatorial Universe の例

図 A.7 Universe の形式



(c) (b) の Universe を (a) の Array のように繰り返し並べると、領域は2つしか定義できない。

(d) (b) の Universe を、領域番号を変えて定義しながら (a) の Array のように繰り返し並べることができる。

図 A.6 Array と Universe を用いた体系の表現例

```

#!/bin/csh -f
#           C-shell for SCINFUL-CG
#           =====
#           date : 1999.12.20
#
# $1.inp : input data (unit=5)
#
# $1.out : output data (unit=6)
# $1.pch : pulse height distribution output data (unit=22)
# $1.regn : track length tally data (unit=32)
# $1.trk : neutron tracking data (unit=61)
#
#
set SCINFULHOME = /user/scinfulcg

# executable file name
set EXE = SCINFUL-CG.exe

###
switch ($#argv)
case 0:
    echo "Usage : goscinfulcg [inpname]"
    exit
default:
    set inpname = $1
endsw

###
if !(-e $inpname.inp) then
    echo " not found " $inpname.inp "\\!\\!"
    exit
endif

###
if(-e fort.22) rm -f fort.22
if(-e fort.32) rm -f fort.32
if(-e fort.61) rm -f fort.61
if(-e fort.59) rm -f fort.59

if(-e fort.16) rm -f fort.16
if(-e fort.17) rm -f fort.17

$SCINFULHOME/$EXE < $inpname.inp > $inpname.out

rm -f fort.16 fort.17

cat fort.59

rm -f fort.59

if(-e fort.22) mv fort.22 $inpname.pch
if(-e fort.32) mv fort.32 $inpname.regn
if(-e fort.61) mv fort.61 $inpname.trk

exit

```

図 A.8 SunOS 上での SCINFUL-CG の実行シェル例 (goscinfulcg)

NE213 RESPONSE FUNCTION: En=39-40MeV	(card 1)
100000 0.000 1 1	(card 2)
987654321	(card 3)
NE213 CYLINDER	(card 4(A))
0 0 1 0	(card 4(B))
rcc 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 12.7 6.35	(card 4(C))
sph 2 0.0 0.0 0.0 100000.0	(card 4(C))
sph 3 0.0 0.0 0.0 150000.0	(card 4(C))
end	(end of card 4(C))
det +1	(card 4(D))
vac +2 -1	(card 4(D))
out +3 -2	(card 4(D))
end	(end of card 4(D))
1 2 3	(card 4(E))
3*0	(card 4(F))
1 1000 0	(card 4(G))
0	(card 4(H))
40.0 39.0 -1 0.01	(card 5)
1	(card 6(A))
0.0 0.0 -10.0 6.35 0.0 0.0 1.0	(card 6(B))
0.100	(card 7)
44	(card 8(A))
0.0 0.01 0.02 0.05 0.08 0.10	(card 8(B))
0.15 0.20 0.25 0.30 0.40 0.50	(card 8(B))
0.70 1.11 1.35 1.65 2.02 2.46	(card 8(B))
3.01 3.68 4.49 5.49 6.70 8.19	(card 8(B))
10.00 12.20 13.50 14.90 17.50 20.00	(card 8(B))
22.50 25.00 27.50 30.00 35.00 40.00	(card 8(B))
45.00 50.00 55.00 60.00 65.00 70.00	(card 8(B))
80.00 90.00 100.00	(card 8(B))
1.6088e3 4.1888e12 1.4133e16	(card 9)
2	(card 10)

図 A.9 サンプル入力データファイル “casel.inp”

図 7(a) の計算条件の入力ファイル。入射中性子エネルギー  $E_n = 39 - 40$  MeV。各カードの右側に、付録 A.3 及び A.4 節で説明した該当するカード番号を括弧で示した (実際の入力データではエラーとなるため、これらのカード番号は書いてはならない)。



(コードのバージョン, 計算実行日, 計算タイトル, 乱数初期値)

SCINFUL-CG version (for SUN/SPARC)  
 version : 0.3.3  
 2000/Nov/16 (updated)  
 Job data : 2001/ 8/24  
 time : 15h 34m 59s

NE213 RESPONSE FUNCTION: Em=39-40MeV  
 Initial Random Seed = 987654321 (Base 10)

(CG による計算体系の設定)

```

1      NE213 CYLINDER
      ivopt = 0      idbg = 0      body data
rcc 1 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00 1.2700000E+01
    sph 2 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00 1.000000E+05
    sph 3 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00 1.500000E+05
number of bodies 3
length of ipd-array 21

      input zone code zone      body numbers      input zone data
det 1 1 1 1
vac 2 2 2 -1
out 3 3 3 -2
number of input zones 3
number of code zones 3
length of integer array 94

code zone input zone zone data loc. no. of bodies region no. media no. box input zone box code zone
1 1 1 29 1 1 1000 0
2 2 2 28 2 2 1000 0
3 3 3 39 3 3 1000 0

i krl(i) kr2(i)
1 1 1
2 2 2
3 3 3

0      morse region in input zone(i) array (mriz(i), i=1, 3)
0      morse media in input zone(i) array (mmiz(i), i=1, 3)
0      morse universe in input zone(i) array (mbiz(i), i=1, 3)
1 option 0 was used in calculating volumes, for 3 regions
0-set volumes = 1, 1-concentric spheres, 2-slabs, 3-inputvolumes.
reg volumes (cc) used in collisions density and track length estimators.
1
2
3
volume 1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00
array data requires 8 locations, leaving 39805 locations
geom requires 194 locations
    
```

図 A.10 case1.out ファイル (1/5)

(線源条件, 発光量のビン幅, スペクトルのエネルギービン境界値)

```

Upper Energy of Group 40.0000 MeV
Lower Energy of Group 39.0000 MeV
Maxwellian Avg. Temp. -1.0000 MeV
Scintillator Type NE-213
Low-energy Cut-off = 0.0100 MeV
Neutron Beam Source
Position X= 0.000 cm, Y= 0.000 cm, Z= -10.000 cm
Radius R= 6.350 cm
Direction U= 0.000 cm, V= 0.000 cm, W= 1.000 cm
L. U. width parameter -WBOX= 1.0000E-01
Light-attenuation factor is 0.0000/cm

energy group boundaries [MeV] ..... group = 44
1 0.0000E+00 10 3.0000E-01 19 3.0100E+00 28 1.49000E+01 37 4.50000E+01
2 1.0000E-02 11 4.0000E-01 20 3.68000E+00 29 1.75000E+01 38 5.00000E+01
3 2.0000E-02 12 5.0000E-01 21 4.49000E+00 30 2.00000E+01 39 5.50000E+01
4 3.0000E-02 13 7.0000E-01 22 5.43000E+00 31 2.25000E+01 40 6.00000E+01
5 8.0000E-02 14 1.1000E+00 23 6.70000E+00 32 2.50000E+01 41 6.50000E+01
6 1.0000E-01 15 1.35000E+00 24 8.19000E+00 33 2.75000E+01 42 7.00000E+01
7 1.5000E-01 16 1.65000E+00 25 1.00000E+01 34 3.00000E+01 43 8.00000E+01
8 2.0000E-01 17 2.02000E+00 26 1.22000E+01 35 3.50000E+01 44 9.00000E+01
9 2.5000E-01 18 2.46000E+00 27 1.55000E+01 36 4.00000E+01 45 1.00000E+02

region volumes [cm3] ..... region = 3
ksunit = 2 : output unit of spectrum (0/1/2=group/MeV/lethargy)
    
```

図 A.10 case1.out ファイル (2/5)

(各反応数の集計)

No. of Neutrons used= 100000  
 Zero-bias efficiency= 0.497630  
 Subtended Solid angle= 2.003518+00 sr  
 Ne-213 PSD On; No. of photon rejects= 1177

Hydrogen-Collision Depth Distribution in Steps of 0.1\* 12.7 cm  
 Front face → 2337 2596 2576 2533 2504 2436 2384 2219 2038 1805  
 P.M. Tube

NEUTRONS HAVING AT LEAST 1 COLLISION= 49763  
 NEUTRONS HAVING A HYDROGEN COLLISION= 14790  
 NUMBER OF ELASTIC HYDROGEN COLLISIONS= 23700  
 NEUTRONS HAVING ELASTIC C COLLISIONS= 33105  
 NUMBER OF ELASTIC CARBON COLLISIONS= 41416  
 NUMBER OF INELASTIC CARBON COLLISIONS= 2318  
 NEUTRONS HAVING AN (N, ALPHA) COLLISION= 437  
 NEUTRONS HAVING AN (N, N-3ALPHA) COLLISION= 3823  
 Neutrons having (N, Alpha P) Reactions= 97  
 Neutrons having (N, Alpha PN) Reactions= 48  
 Neutrons having (N, Alpha P2N) Reactions= 0  
 Neutrons having (N, 2Alpha PNT) Reactions= 1  
 Neutrons having (N, 2Alpha P2ND) Reactions= 0  
 NEUTRONS HAVING AN (N, P 12-B) COLLISION= 489  
 Neutrons having (N, P ALPHA) Reactions= 94  
 NEUTRONS HAVING AN (N, PN 11-B) COLLISION= 2048  
 Neutrons having (N, PN ALPHA) Reactions= 252  
 Neutrons having an (N, P2N) Reaction= 200  
 Neutrons having (N, P2N ALPHA) Reactions= 1  
 Neutrons with (N, P2N 2ALPHA) Reactions= 0  
 Neutrons having (N, PNT 2ALPHA) Reactions= 17  
 Neutrons having (N, 2PN 11-B) Reactions= 17  
 Neutrons having (N, 2PN 10-B) Reactions= 17  
 Neutrons having (N, 2PN 9-B) Reactions= 0

NEUTRONS HAVING AN (N, D 11-B) COLLISION= 1220  
 Neutrons having (N, D Alpha) Reactions= 186  
 Neutrons having an (N, DN 10-B) Reaction= 618  
 Neutrons having (N, DNP 9-B) Reactions= 6  
 Neutrons having (N, DND 2ALPHA) Reactions= 13  
 Neutrons having (N, DN ALPHA) Reactions= 20  
 NEUTRONS HAVING AN (N, 2N) COLLISION= 1107  
 Neutrons Having an (N, 2NP) Collision= 255

NO. OF COLLISIONS PER COLLIDING NEUTRON= 1.6023  
 COLLISION DISTRIBUTION:  
 50237 33994 10123 2813 1070 487 361 285 197 158 100 60 11 12 13 14 15 16 17 18 19 >19  
 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 >19

NEUTRONS HAVING AN (N, T 10-B) COLLISION= 155  
 Neutrons Having an (N, TP 9-B) Reaction= 212  
 Neutrons Having an (N, TD 2ALPHA) Reaction= 292  
 Neutrons Having an (N, T ALPHA 6-1) Reaction= 135  
 Neutrons Having an (N, TPN 2ALPHA) Reaction= 130  
 Neutrons having an (N, TPD 7-1) Reaction= 0

NEUTRONS HAVING AN (N, 3-He 10-B) REACTION= 154  
 Neutrons having (N, 3-He N 9-B) Reactions= 223  
 Neutrons having (N, 3-He 2N 2Alpha) Reactions= 66  
 Neutrons having (N, 3-He NP 8-Li) Reactions= 0  
 Neutrons having (N, 3-He 2NP 7-Li) Reactions= 0  
 Neutrons having (N, 3-He 2NPT Alpha) Reactions= 0

Number of PHOTON Interactions= 1177  
 Number of Escaped PROTONS = 762  
 Number of Escaped DEUTERONS = 0  
 Number of NEUTRONS below Cutoff= 1671

☒ A.10 case1.out ファイル (3/5)

I	LIGHT RANGE	TOTAL	HYDGN	C-ELAS	INEL	n, alpha	n, 3-He	n, n3a	n, p	n, d	n, t	n, p, X	n, 2n	Gamma Rays	Equivalent Energy (MeV)		Carbon
															Protons	Alpha	
0.0000	-0.0100	95	478	5869	350	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0.0745	0.1054	0.7158
0.0100	-0.0400	25818	1563	33341	1668	7	0	38	0	0	0	0	0	0	0.2037	1.3337	4.5988
0.0400	-0.0900	879	1090	0	0	36	7	109	0	1	0	0	0	0	0.5840	1.9883	4.5988
0.0900	-0.1600	294	790	0	0	12	13	149	0	2	0	4	32	0	0.8718	2.8739	20.4631
0.1600	-0.2500	295	618	0	0	13	21	175	0	9	3	7	26	0	1.1837	3.7798	29.8475
0.2500	-0.3600	363	583	0	0	10	25	176	2	17	4	11	23	0	1.5172	4.7154	39.3317
0.3600	-0.4900	389	529	0	0	8	37	187	2	27	4	25	15	0	1.8608	5.6707	49.4053
0.4900	-0.6400	444	494	0	0	12	35	179	2	32	20	23	20	0	2.2439	6.6444	59.3116
0.6400	-0.8100	452	409	0	0	7	34	176	1	37	23	47	23	0	2.6537	7.6295	69.1827
0.8100	-1.0000	517	436	0	0	5	28	170	1	65	31	50	10	0	3.0914	8.6294	78.3606
1.0000	-1.2100	502	320	0	0	3	34	175	1	58	56	57	10	0	3.5311	9.6407	88.4820
1.2100	-1.4400	583	344	0	0	4	35	188	0	67	82	89	10	0	3.9959	10.6400	98.1121
1.4400	-1.6900	629	323	0	0	5	27	198	1	54	109	89	4	0	4.4966	11.6289	100.0000
1.6900	-1.9500	736	355	0	0	9	22	217	0	67	106	87	3	0	5.0137	12.6667	100.0000
1.9500	-2.2500	741	328	0	0	10	18	241	0	92	92	103	1	0	5.5809	13.6997	100.0000
2.2500	-2.5800	720	398	0	0	18	14	232	1	76	90	109	2	0	6.1803	14.7320	100.0000
2.5800	-2.8900	763	317	0	0	15	19	266	0	73	87	125	1	0	6.7799	15.8581	100.0000
2.8900	-3.2400	714	323	0	0	18	12	230	0	59	66	139	0	0	7.4109	16.9837	100.0000
3.2400	-3.6100	694	274	0	0	14	8	236	4	70	35	130	0	0	8.0577	18.1112	100.0000
3.6100	-4.0000	666	295	0	0	24	0	199	0	63	25	100	0	0	8.7245	19.3302	100.0000
4.0000	-4.4100	680	287	0	0	32	16	151	3	78	17	114	0	0	9.4148	20.5996	100.0000
4.4100	-4.8400	597	398	0	0	24	10	91	1	69	11	119	0	0	10.1286	21.9318	100.0000
4.8400	-5.2900	584	343	0	0	22	4	80	1	56	15	115	0	0	10.8743	23.3558	100.0000
5.2900	-5.7600	498	265	0	0	27	0	35	4	68	5	103	0	0	11.6341	24.8448	100.0000
5.7600	-6.2500	501	317	0	0	32	0	20	5	73	0	97	0	0	12.4266	25.6422	100.0000
6.2500	-6.7500	498	310	0	0	24	0	9	4	65	0	102	0	0	13.2333	27.0813	100.0000
6.7500	-7.2800	448	316	0	0	17	0	6	1	54	0	55	0	0	14.0908	28.3333	100.0000
7.2800	-7.8400	447	308	0	0	16	0	4	10	44	0	72	0	0	14.9786	29.9119	100.0000
7.8400	-8.4100	523	304	0	0	3	0	0	6	83	0	62	0	0	15.8738	31.5044	100.0000
8.4100	-9.0000	539	291	0	0	0	0	0	24	140	0	63	0	0	16.8066	33.0203	100.0000
9.0000	-9.6100	368	310	0	0	0	0	0	16	179	0	58	0	0	17.7311	34.4622	100.0000
10.2400	-10.2600	356	316	0	0	0	0	0	7	179	0	55	0	0	18.6737	35.8361	100.0000
10.8900	-10.9600	333	286	0	0	0	0	0	10	0	0	60	0	0	19.6433	37.4472	100.0000
11.5600	-11.6900	362	295	0	0	0	0	0	37	0	0	13	0	0	20.6345	39.0675	100.0000
12.2500	-12.9600	379	300	0	0	0	0	0	77	0	0	1	0	0	21.6403	40.8779	100.0000
12.9600	-13.6900	325	302	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	22.6782	42.8789	100.0000
13.6900	-14.4400	290	282	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	23.7488	44.7760	100.0000
14.4400	-15.2100	200	277	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	24.8116	46.5326	100.0000
15.2100	-16.0000	291	305	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25.8938	48.3389	100.0000
16.0000	-16.8100	353	341	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27.0111	50.3307	100.0000
16.8100	-17.6400	343	322	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28.1509	52.6869	100.0000
17.6400	-18.4900	383	339	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29.3244	54.5149	100.0000
18.4900	-19.3600	380	327	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30.5237	56.4156	100.0000
19.3600	-20.2500	346	303	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31.7533	58.5701	100.0000
20.2500	-21.1600	375	319	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33.0037	60.8013	100.0000
21.1600	-22.0900	381	330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34.2940	63.1356	100.0000
22.0900	-23.0400	413	373	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35.6085	65.5468	100.0000
23.0400	-24.0100	155	141	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36.9197	67.9339	100.0000
24.0100	-25.0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38.2423	70.3230	100.0000
25.0000	-26.0100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39.5945	72.7194	100.0000
26.0100	-27.0400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40.9731	75.1422	100.0000
27.0400	-28.0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42.3866	78.0655	100.0000

N(Rows) = 52  
 SUM OF COLUMNS = 48586 23632  
 AVG LIGHT/INTERACTING NEUTRON = 3.367705

図 A.10 casel.out ファイル (4/5)

(荷電粒子スペクトル)

1	Charged-particle spectra	Alphas	Deuterons	Protons	Tritons	3-He
0	E-Resp	33	77	27	4	
1	1771	49	183	66	14	
2	2021	84	291	73	16	
3	1504	106	318	87	33	
4	1956	123	288	95	31	
5	1165	141	267	101	33	
6	1974	125	262	90	38	
7	1669	122	267	82	31	
8	555	117	199	65	39	
9	297	125	184	44	43	
10	379	111	193	41	30	
11	299	83	162	37	25	
12	216	73	146	25	18	
13	233	81	142	18	17	
14	188	85	98	9	16	
15	157	78	103	12	10	
16	123	63	89	14	13	
17	109	75	91	13	12	
18	97	72	72	14	18	
19	95	67	75	9	11	
20	66	57	61	3	1	
21	56	49	117	0	0	
22	62	51	117	0	0	
23	42	97	74	0	0	
24	35	127	25	0	0	
25	36	159	0	0	0	
26	31	0	0	0	0	
27	8	0	0	0	0	
28	15	0	0	0	0	
29	7	0	0	0	0	
30	11	0	0	0	0	
31	12	0	0	0	0	
32	0	0	0	0	0	
33	0	0	0	0	0	
	Sums=	1375	2360	3901	925	443
	No(Li ions)=	833				
	No(Be ions)=	1056				
	No(B ions)=	4985				

図 A.10 case1.out ファイル (5/5)



regionwise flux by track length tally [/cm\*\*2/[lethargy/source]

no.	1: region	1.....	volume=	1.60880E+03 [cm**3]	neutron	r_err
reg.	energy [MeV]	flux	neutron	flux	r_err	
1	1	0.000E+00	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	2	0.000E-02	6.993E-06	0.0456	0.0399	
1	3	5.000E-02	8.454E-06	0.0389	0.0389	
1	4	8.000E-02	1.112E-05	0.0494	0.0494	
1	5	1.000E-01	1.078E-05	0.0744	0.0744	
1	6	1.500E-01	1.380E-05	0.0490	0.0490	
1	7	2.000E-01	1.518E-05	0.0569	0.0569	
1	8	3.000E-01	1.679E-05	0.0653	0.0653	
1	9	4.000E-01	2.420E-05	0.0523	0.0523	
1	10	5.000E-01	2.727E-05	0.0552	0.0552	
1	11	7.000E-01	3.669E-05	0.0416	0.0416	
1	12	1.110E+00	4.819E-05	0.0323	0.0323	
1	13	1.350E+00	6.831E-05	0.0444	0.0444	
1	14	1.650E+00	7.439E-05	0.0437	0.0437	
1	15	2.020E+00	9.801E-05	0.0399	0.0399	
1	16	2.460E+00	1.147E-04	0.0383	0.0383	
1	17	3.010E+00	1.292E-04	0.0351	0.0351	
1	18	3.680E+00	1.485E-04	0.0336	0.0336	
1	19	4.490E+00	1.482E-04	0.0351	0.0351	
1	20	5.490E+00	1.490E-04	0.0352	0.0352	
1	21	6.700E+00	1.508E-04	0.0352	0.0352	
1	22	8.190E+00	1.737E-04	0.0368	0.0368	
1	23	1.000E+01	1.705E-04	0.0331	0.0331	
1	24	1.200E+01	1.809E-04	0.0345	0.0345	
1	25	1.350E+01	1.734E-04	0.0474	0.0474	
1	26	1.490E+01	1.877E-04	0.0457	0.0457	
1	27	1.750E+01	2.042E-04	0.0345	0.0345	
1	28	2.000E+01	2.314E-04	0.0360	0.0360	
1	29	2.250E+01	2.926E-04	0.0334	0.0334	
1	30	2.500E+01	4.789E-04	0.0273	0.0273	
1	31	2.750E+01	3.157E-04	0.0371	0.0371	
1	32	3.000E+01	3.636E-03	0.0147	0.0147	
1	33	3.000E+01	5.544E-03	0.0064	0.0064	
1	34	3.500E+01	4.304E-02	0.0015	0.0015	
1	35	4.000E+01	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	36	4.500E+01	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	37	5.000E+01	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	38	5.500E+01	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	39	6.000E+01	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	40	6.500E+01	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	41	7.000E+01	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	42	8.000E+01	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	43	9.000E+01	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1	44	1.000E+02	0.000E+00	0.0000	0.0000	
1		total	7.4567E-03	0.0016	0.0016	

no.	2: region	2.....	volume=	4.18880E+12 [cm**3]	neutron	r_err
reg.	energy [MeV]	flux	neutron	flux	r_err	
2	1	0.000E+00	0.000E+00	0.0000	0.0000	
2	1	0.000E-02	0.000E+00	0.0000	0.0000	

以下、領域2のスペクトル(省略)

図 A.12 case1.regn ファイル

Column No.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	3.9607E+01	1.0000E+00	-1.5180E+00	5.6334E+00	0.0000E+00	-1.0000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+01	6666	2	7
1	3.9607E+01	1.0000E+00	-1.5180E+00	5.6334E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	6666	1	7
1	3.9607E+01	1.0000E+00	-1.5180E+00	5.6334E+00	0.0000E+00	1.2700E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	9.9987E+04	6666	1	4
2	3.9671E+01	1.0000E+00	-3.4514E+00	-3.4514E+00	-1.0000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	6666	2	7
2	3.9671E+01	1.0000E+00	-3.4514E+00	-3.4514E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.2000E+01	6666	1	7
2	3.9671E+01	1.0000E+00	-3.4514E+00	-3.4514E+00	0.0000E+00	1.2700E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	9.9987E+04	6666	1	4
3	3.9711E+01	1.0000E+00	9.9250E-01	5.5609E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+01	6666	2	7
3	3.9711E+01	1.0000E+00	9.9250E-01	5.5609E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.2700E+01	6666	1	7
3	3.9711E+01	1.0000E+00	9.9250E-01	5.5609E+00	0.0000E+00	1.2700E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	9.9987E+04	6666	1	4
4	3.9261E+01	1.0000E+00	-3.5783E+00	2.2466E+00	-1.0000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+01	6666	2	7
4	3.9261E+01	1.0000E+00	-3.5783E+00	2.2466E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.2000E+01	6666	1	7
4	3.9261E+01	1.0000E+00	-3.5783E+00	2.2466E+00	0.0000E+00	1.2700E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	9.9877E+04	6666	2	4
5	3.9213E+01	1.0000E+00	-4.4347E+00	-2.7333E+00	-1.0000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+01	6666	2	7
5	3.9213E+01	1.0000E+00	-4.4347E+00	-2.7333E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.2700E+01	6666	1	7
5	3.9213E+01	1.0000E+00	-4.4347E+00	-2.7333E+00	0.0000E+00	1.2700E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	9.9987E+04	6666	1	4
98	3.944E+01	1.0000E+00	-1.6311E+00	-5.4532E+00	-1.0000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+01	6666	2	7
98	3.944E+01	1.0000E+00	-1.6311E+00	-5.4532E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.2115E+01	6666	1	7
98	3.944E+01	1.0000E+00	-1.6311E+00	-5.4532E+00	0.0000E+00	1.2115E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	8.9246E-01	6666	1	7
99	3.916E+01	1.0000E+00	8.8273E-02	5.6555E-01	-1.0000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+01	6666	2	4
99	3.916E+01	1.0000E+00	8.8273E-02	5.6555E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.2700E+01	6666	1	7
99	3.916E+01	1.0000E+00	8.8273E-02	5.6555E-01	0.0000E+00	1.2700E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	9.9877E+04	6666	1	4
100	3.913E+01	1.0000E+00	-5.1699E+00	-2.8142E+00	-1.0000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+01	6666	2	7
100	3.913E+01	1.0000E+00	-5.1699E+00	-2.8142E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	1.2000E+01	6666	1	7
100	3.913E+01	1.0000E+00	-5.1699E+00	-2.8142E+00	0.0000E+00	1.2000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+00	2.3498E+00	6666	1	7
100	3.749E-01	1.0000E+00	-4.0109E+00	-1.1343E+00	2.5719E+00	2.3498E+00	5.6455E-01	8.1827E-01	1.0818E-01	2.0529E+00	6666	1	7
100	3.749E-01	1.0000E+00	-4.0109E+00	-1.1343E+00	2.5719E+00	2.3498E+00	5.6455E-01	8.1827E-01	1.0818E-01	8.3177E-02	6666	1	7
100	3.749E-01	1.0000E+00	-4.0109E+00	-1.1343E+00	2.5719E+00	2.3498E+00	5.6455E-01	8.1827E-01	1.0818E-01	1.6114E-02	6666	1	7
100	8.825E-02	1.0000E+00	3.9048E+00	-9.7667E-01	2.4728E+00	2.4728E+00	-1.3947E-01	6.0753E-01	-7.8193E-01	1.2948E-01	6666	1	7
100	8.825E-02	1.0000E+00	3.9048E+00	-9.7667E-01	2.4728E+00	2.4728E+00	-1.3947E-01	6.0753E-01	-7.8193E-01	6.3599E-01	6666	1	7
100	3.929E-02	1.0000E+00	-4.3322E+00	1.2770E+00	2.8024E+00	2.8024E+00	9.1235E-01	5.9155E-01	7.9192E-01	4.7113E-01	6666	1	7
100	3.929E-02	1.0000E+00	-4.3322E+00	1.2770E+00	2.8024E+00	2.8024E+00	9.1235E-01	5.9155E-01	7.9192E-01	2.6183E-01	6666	1	7
100	2.560E-02	1.0000E+00	-4.4863E+00	-1.4330E+00	2.6541E+00	2.6541E+00	-3.3637E-01	-4.2053E-01	-8.4257E-01	1.3559E+00	6666	1	7
100	2.426E-02	1.0000E+00	-4.9424E+00	-2.0032E+00	1.5117E+00	1.5117E+00	-3.7512E-01	-6.0158E-01	-7.0517E-01	5.1253E-01	6666	1	7

(途中省略)

図 A.13 case1.trk ファイル



## 付録 B SCINFUL の断面積データ

## B.1 断面積

SCINFUL では、有機シンチレータ中の中性子輸送及び荷電粒子放出の計算を行うために、以下の断面積がコードに内蔵されている。

元素	反応	MF 番号	MT 番号	備考
水素	n + H	3	2	
炭素	弾性散乱	3	2	
	非弾性散乱 第一励起準位のみ	3	51 非弾性散乱全体 4	
	(n, 2n)	3	16	
	(n, n'3 $\alpha$ )	3	23	※
	(n, np)	3	28	※
	(n, p)	3	203	※
	(n, d)	3	204	※
	(n, t)	3	205	※
	(n, $^3\text{He}$ )	3	206	※
(n, $\alpha$ )	3	207		

※残留励起核からの崩壊反応が考慮される。

全断面積 (輸送断面積) は、部分断面積の総和から計算される。中性子エネルギー 20 MeV 以下の断面積については、ほとんどが ENDF/B-V に基づいている。20 MeV 以上については、実験データを基に、SCINFUL の開発者が独自に評価した値が用いられている。実験データの数に限られていることから、20 MeV 以上の断面積については、数点のデータが与えられているに過ぎない。また、 $\gamma$  線散乱断面積 ( $\gamma + \text{H}$ ,  $\gamma + \text{C}$ ) も内蔵されている。中性子の輸送計算では、エネルギーで内挿した断面積の値が用いられる。

図 B.1 に、SCINFUL に内蔵されている断面積と LA150 の断面積との比較を示す。表 4 に示したように、LA150 の MF=3 形式には 20 MeV までのデータが格納されており、20 MeV 以上については、MF=6, MT=5 に生成核種断面積として格納されている。弾性散乱断面積は、SCINFUL 及び LA150 で相互に良く一致している。その他の断面積についても、20 MeV 以下では双方に大きな差は見られない。

## B.2 角度分布

SCINFUL の水素及び炭素の核反応における角度分布の扱いを、以下にまとめる。

### B.2.1 弾性散乱

#### (1) 水素

- 13.7 MeV 以下 : 重心系で等方散乱  
 13.7 MeV ~ 100 MeV : ルジャンドル多項式 (16 エネルギー : 13.7 MeV ~ 100 MeV)  
 O5S のデータを利用

#### (2) 炭素

- 20 MeV 以下 : ルジャンドル多項式 (ENDF/B-V より)  
 20.8, 26, 40 MeV : Meigooni のデータに対する多項式フィット  
 40 MeV 以上 : 40 MeV のデータを利用

### B.2.2 弾性散乱以外

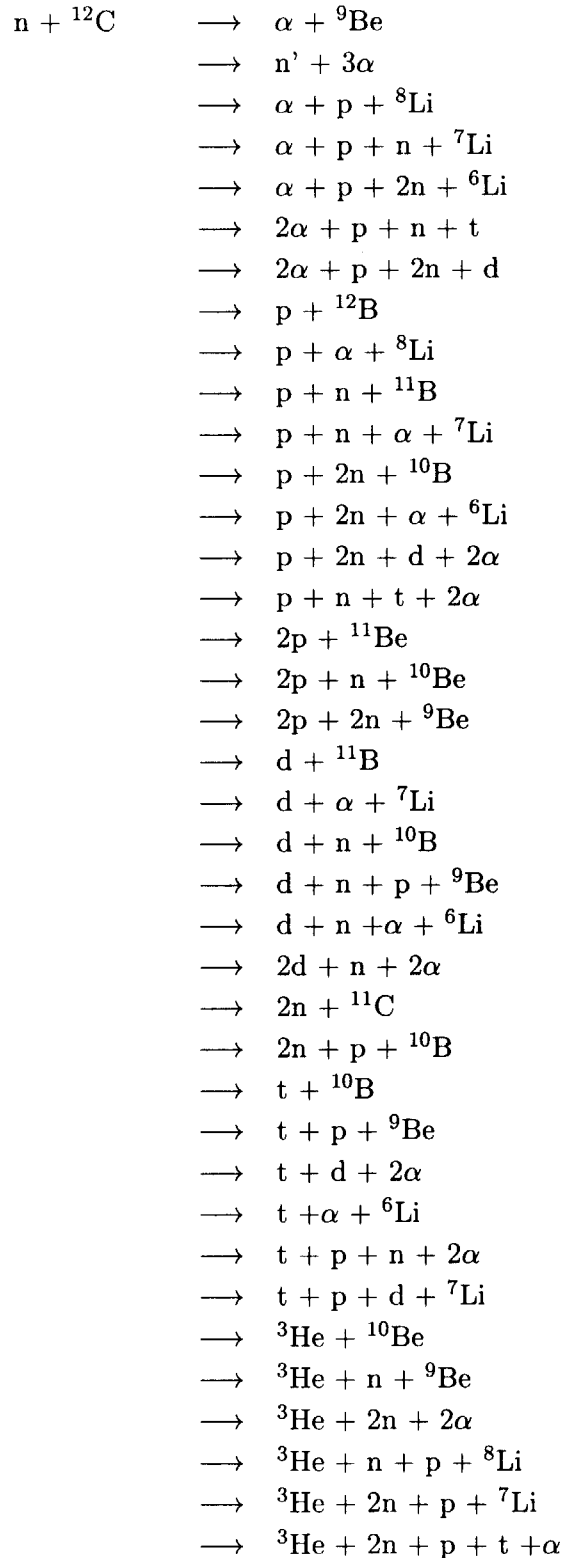
- $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}$   
 第 1 励起準位 : ルジャンドル多項式  
 9.2 MeV ~ 13 MeV (Glasgow 等のデータ)  
 20.8, 26 MeV (Meigooni 等のデータ)
- $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$  : 8 MeV ~ 15.6 MeV は 3 つの実験データから多項式フィット  
 15.6 MeV 以上は 15.6 MeV のデータを利用
- $^{12}\text{C}(n, p)$  : 56 MeV 以上は確率-散乱角のテーブルを利用  
 $^{12}\text{C}(n, d)$  : threshold ~ 56 MeV: 56 MeV のデータを等方散乱に補正
- $^{12}\text{C}(n, t)$  : ルジャンドル多項式  
 $^{12}\text{C}(n, ^3\text{He})$  : Subramanian 等の実験データ 27.4, 39.7, 60.7 MeV より作成
- 他の反応 : 等方放出と仮定

### B.3 エネルギー分布

- n 及び p 放出 : 核反応計算コードによる計算結果より求めた簡易式で放出エネルギーを計算する。
- d, t,  $^3\text{He}$ ,  $\alpha$  : 残留核の励起レベルへの遷移を考慮した上で、放出粒子のエネルギーを計算する。残留核の反跳エネルギーも計算される。

## B.4 残留励起核の崩壊反応

SCINFULでは、炭素と中性子の核反応後の励起した残留核の崩壊反応を考慮した以下の反応が計算される。(n, 2np)と(n, p2n)などのように、最終的に生成される粒子が同一でも、途中の崩壊過程が異なるものは、異なる反応として扱われている。



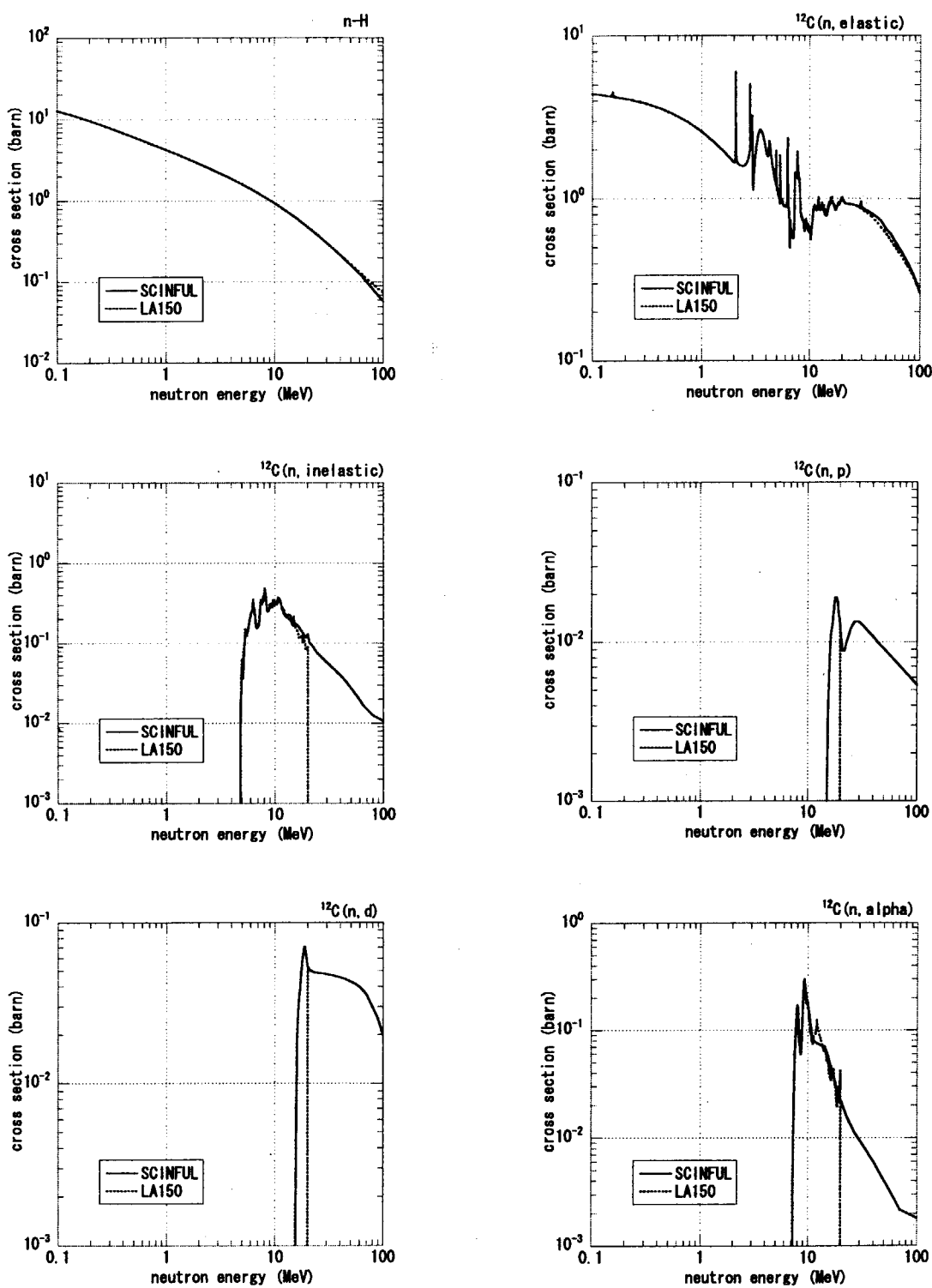


図 B.1 SCINFUL と LA150 の断面積の比較

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
上率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光照射度	ルーメン	lm	cd·sr
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射線量当量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わず場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (= N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))  
動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>6</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

任意形状の中性子用シンチレータに対する応答関数計算コード SCINFUL-CGの開発

**R100**

古紙配合率100%  
白化度70%再生紙を使用しています