

JAERI-Data/Code
2002-023



JP0350016



多群拡散摂動計算コード
PERKY (2002年版)

2002年12月

飯島 進・岡嶋 成晃

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。

入手の間合わせは、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、お申し越してください。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, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

多群拡散摂動計算コード
PERKY (2002 年版)

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部
飯島 進・岡嶋 成晃

(2002 年 11 月 5 日受理)

高速炉体系における核特性解析を目的として、多群拡散理論に基づく摂動計算コード PERKY を開発した。PERKY は、高速炉の炉心を 2 次元および 3 次元体系で記述した計算モデルにおいて、多群拡散理論に基づく摂動計算により反応度値を計算する。さらに、核特性解析における動特性パラメータとして、実効遅発中性子割合、即発中性子寿命および FCA 実験において反応度の測定に使用する基準反応度 (ρ_0) を絶対単位 ($\Delta k/k$) に変換する係数を計算する。

JAERI-Data/Code 2002-023

Multi-group Diffusion Perturbation Calculation Code
PERKY (2002)

Susumu IJIMA and Shigeaki OKAJIMA

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

(Received November 5, 2002)

Perturbation calculation code based on the diffusion theory "PERKY" is designed for nuclear characteristic analyses of fast reactor.

The code calculates reactivity worth on the multi-group diffusion perturbation theory in two or three dimensional core model and kinetics parameters such as effective delayed neutron fraction, prompt neutron lifetime and absolute reactivity scale factor (ρ_0 to $\Delta k/k$) for FCA experiments.

Keywords: Perturbation Calculation Code, Diffusion Theory, Reactivity Worth, Kinetic Parameter

目 次

1. PERKY の概要	1
2. 入力データ	3
2.1 入力データの構成	4
2.2 前処理プログラム JOINT の入力データ	5
2.3 PERKY の入力データ	5
2.4 基準反応度の計算	17
3. プログラムの概要	18
3.1 オーバーレイ構造	18
3.2 サブルーチンの作業内容	18
3.3 データファイルとその役割	19
4. 計算式の概要と出力項目	21
4.1 反応度値の計算	21
4.1.1 拡散理論に基づく摂動計算式	21
4.1.2 中性子漏洩成分の計算	23
4.1.3 摂動計算式の分母、 I_p の計算	26
4.1.4 反応度値出力形式の選択	27
4.1.5 核種ごとの反応度値の計算	28
4.2 実効遅発中性子割合の計算	28
4.3 即発中性子寿命の計算	29
4.4 基準反応度の計算	29
5. まとめ	30
謝辞	30
参考文献	30
Appendix-A : データファイルの配列	31
Appendix-B : JFS3、70 群定数と SLAROM による実効断面積の作成手順	40
Appendix-C : 入力データのサンプル	44

Contents

1. Introduction	1
2. Input Data	3
2.1 Input Data Requirements	4
2.2 Input Data of JOINT	5
2.3 Input Date of PERKY	5
2.4 Input Data of Absolute Reactivity Scale Factor	17
3. General Information of Program	18
3.1 Over-lay Structure	18
3.2 PERKY Subroutines	18
3.3 Data Ffiles	19
4. Calculation Equation and its Result	21
4.1 Reactivity Worth Calculation	21
4.1.1 Multi-group Perturbation Equation Based on Diffusion Theory	21
4.1.2 Treatment of Neutron Leakage Term	23
4.1.3 Denominator λ_p in Perturbation Equation	26
4.1.4 Output Option of Reactivity Worth	27
4.1.5 Isotopic Reactivity Worth	28
4.2 Effective Delayed Neutron Fraction	28
4.3 Prompt Neutron Lifetime	29
4.4 Absolute Reactivity Scale Factor	29
5. Summary	30
Acknowledgement	30
Reference	30
Appendix-A : Data Files	31
Appendix-B : Effective Cross Section Preparation Flow by JFS3 Group Constants and SLAROM Code	40
Appendix-C : Sample Problem	44

1. PERKY の概要

高速増殖炉の炉物理特性の解析を目的として計算コードシステム“EXPARAM”の開発を進めており、このシステムの一環として多群拡散理論に基づく摂動計算コード PERKY⁽¹⁾を開発した。PERKY は、高速炉の炉心を 2 次元および 3 次元体系で記述した計算モデルにおいて、多群拡散理論に基づく摂動計算により反応度価値を計算する。さらに、核特性計算における動特性パラメータとして、実効遅発中性子割合、即発中性子寿命および FCA 実験において反応度の測定に使用する基準反応度 (ρ_0) を絶対単位 ($\Delta k/k$) に変換する係数を計算する。以下に PERKY の使用方法および使用上の制約について述べる。

[PERKY の計算に必要な入力データ]

PERKY の入力データとして、

- 1) 燃料組成ごとの実効断面積
- 2) 中性子束および随伴中性子束

を準備する必要がある。中性子束と随伴中性子束は、拡散理論に基づく体系計算コード“POPLARS⁽²⁾”の計算結果を使用する。空間領域や空間メッシュなど計算体系に関する情報も POPLARS で設定した値と同じものとなるので、PERKY の計算を念頭におき、POPLARS の計算モデルを作成する必要がある。

[1 次摂動計算および厳密摂動計算の選択]

- 1) 1 次摂動計算 (摂動前と摂動後の体系で、中性子束は変化しないものと近似した計算)
- 2) 厳密摂動計算 (摂動による中性子束の変化を考慮した計算)

のいずれかを選択する。厳密摂動計算では、摂動前の体系の随伴中性子束と摂動後の体系の中性子束を使用するので、POPLARS の計算を 2 度行う必要がある。

[ミクロ断面積およびマクロ断面積を用いた反応度価値の計算]

反応度価値の計算では

- 1) ミクロ断面積と原子数密度を用いた核種ごとの反応度価値の計算
- 2) マクロ断面積を用いた空間領域ごとの反応度価値の計算

のいずれかを選択する。

核種ごとの反応度価値の計算では、通常計算に加えて、単位原子数 (10^{24} atoms / cm^3) あたりの反応度価値の計算が可能である (4.1.5 参照)。

マクロ断面積を用いた反応度価値の計算では、高速炉体系での中性子の非等方拡散を考慮し、方向依存拡散係数を用いて中性子漏洩項を計算することができる。

[PERKY の摂動計算における核分裂スペクトル χ_g]

PERKY の計算では摂動による核分裂スペクトル χ_g の変化は考慮されず、摂動前と摂動後の体系において核分裂スペクトルは変化しないものとする。

ミクロ断面積を用いた核種ごとの反応度価値の計算では、核種ごとの核分裂スペクトルを用いた計算が可能である。その他の燃料組成ごとの反応度価値、実効遅発中性子割合および即発中性子寿命の計算では、体系全体で1種類の核分裂スペクトルを使用する。体系計算コード POPLARS で採用している燃料組成ごとの核分裂スペクトルは、PERKY では導入していない。

本報告書では、次の2章で PERKY の入力データについて述べ、3章でプログラムの構造と入出力ファイルの役割について述べる。4章では、摂動論による反応度価値の計算式および動特性パラメータの計算式について記述する。また、Appendix-A に入出力ファイルのデータ配列、Appendix-B に実効断面積の作成手順、そして、Appendix-C に入力データのサンプルを載せる。

2. 入力データ

PERKY の計算では、実効断面積、中性子束、随伴中性子束および体系寸法等の計算体系に関する情報を入力データとして読み込む。計算に必要なこれらのデータの概要およびプログラム内での取り扱いについて、以下に述べる。

(1) 実効断面積

実効マクロ断面積は、摂動前と摂動後の体系に存在するすべての燃料組成について用意する必要がある。一方、実効ミクロ断面積は、反応度値を計算する領域の燃料組成についてのみ準備すればよい。PERKY による計算に先立ち実効断面積を PDS ファイル（あるいはダイレクトアクセスファイル）に編集し、入力データとする。

[実効マクロ断面積]

実効マクロ断面積には、“組成番号”を与え識別する。この時、同じ燃料組成の断面積であっても、温度等について異なる条件で計算したものについては、別の番号を与えて区別する必要がある。

計算モデルでは、中性子束を計算した空間メッシュ点ごとに組成番号が付加されており、これらのデータは POPLARS の値が、そのまま PERKY に引き継がれる。

PERKY の計算では、同一の組成番号を与えたメッシュ点の集団を1つのゾーンとして区分し、実効遅発中性子割合や反応度値の計算結果はゾーンごとに集計され出力される。このとき、空間的に連続しない離れた場所であっても、同じ組成番号を与えたところは、同一ゾーンとして処理されるので、摂動計算に先立つ体系計算の段階から組成番号の指定方法について注意する必要がある。

[実効ミクロ断面積]

実効ミクロ断面積には、物質番号を与え識別する。実効ミクロ断面積のデータファイルには原子数密度が含まれており、断面積の値が同じであって原子数密度が異なる場合、別の物質番号を与える必要がある。

物質番号と組成番号とを対応させ、ある空間メッシュ点に適用するミクロ断面積を指定する。この場合、同じ物質番号を複数の組成番号と対応させることも可能である。

(2) 中性子束と随伴中性子束および計算体系に関するデータ

厳密摂動計算をおこなう場合、摂動前の体系の随伴中性子束と摂動後の体系の中性子束を計算に用いる。中性子束および随伴中性子束は、体系計算コード“POPLARS”の出力結果を直接読み込む。

2.1 入力データの構成

計算条件等のデータは、書式付きデータファイルに準備され、実効断面積、中性子束および計算体系の空間メッシュ等のデータは PDS (あるいはダイレクトアクセスファイル) に準備される。そして、これらのデータは前処理プログラム“JOINT⁽³⁾”により編集され、PERKY の入力データとなる。以下に入力データの構成を示す。

JOINT の入力データ

JOINT 用入力データ	
PERKY の入力データ	
1) タイトル 行 (18A4)	
2) 計算条件の指定	<ul style="list-style-type: none"> ・セクション 001 ; 計算条件設定 ・セクション 002 ; ミクロ断面積の入力 ・セクション 003 ; マクロ断面積の入力 ・セクション 004 ; 計算項目の選択 ・セクション 005 ; 実効遅発中性子割合の計算条件 ・セクション 006 ; 即発中性子寿命の計算条件 ・セクション 007 ; 単位原子数あたりの反応度値の計算条件 ・セクション 008 ; 反応度値の計算条件
3) “999 行” (カラム 1~3 に 999 を入力)	<ul style="list-style-type: none"> ・連続計算の区切りを示す
4) “ブランク行”	<ul style="list-style-type: none"> ・すべての計算の終わりを示す

[連続計算]

連続計算の場合、JOINT の入力データは最初のケースのみ必要である。また、計算体系に関する情報、中性子束および随伴中性子束は最初のケースで入力した値をそのまま保存し、全ケースを通じて使用する。ただし、1 次摂動計算に続いて厳密摂動計算を行う場合、中性子束は摂動後のものに変更される。

マクロ断面積およびミクロ断面積は全ケースで使用するものを、最初のケースで入力しておく必要がある。

最初のケースの入力データの終了を”999 行”で示した後、次のケースのタイトル行を続ける。連続計算での 2 ケース目以降、セクション 001 は前のケースと変更がある場合のみ入力し、セクション 002 と 003 は、最初のケースの値をそのまま使用するので入力しない。そして、セクション 004 を入力し、それに対応するセクション 005~008 を入力する。連続計算でなく単独ケースの場合でも、“999 行”は必要である。そして、全ての計算の終了はブランク行により示される。

2.2 前処理プログラム JOINT の入力データ

#1-1 (A8, 59X, 2I1)

NUM12 (1~8) ; PERKY
 KD1(68~68) : JOINT で編集された断面積のプリント
 0 ; 出力しない
 1 ; 出力する
 KD2(69~69) : PDS ファイルから読み込んだ (JOINT で編集する前の)
 断面積のプリント
 0 ; 出力しない
 1 ; 出力する

#1-2 (A6, 4X, A6)

NAMID (1~6) ; PDS ファイルから読み込む断面積のうち代表的な1つのメン
 バー名を指定する。
 NAMPRE (11~16) ; 断面積を作成したプログラム名 (6文字の英数字: 例 SLAROM)

(注) #に続くカッコ内 (例; A5) は入力データの書式を示し、入力データに付記された
 カッコ内の数字 (例; 1~ 5) は、データを入力するカラム欄を示す。

2.3 PERKY の入力データ

(1) セクション 001: 計算条件の指定

#1-1 (I3) : 001

#1-2 (24I3) 計算条件

NFLX (1~3) ; 摂動前の体系の中性子束と随伴中性子束を入力するファイルの
 指定。
 1 中性子束と随伴中性子束を1つのファイル (I/O ユニット 1) から
 入力
 2 中性子束と随伴中性子束を別々のファイル (I/O ユニット 1 と 3)
 から入力
 KMAX (4~6) ; エネルギー群数
 IBX (7~9) ; ブランク
 MAIMAX (10~12) ; 計算に使用する全組成の数 (連続計算の場合、全ケースで使用する
 摂動前の体系と摂動後の体系の組成の数を合計した値)
 IRZM (13~15) ; 計算体系
 0 3次元 X-Y-Z
 1 2次元 R-Z

- 1 2次元 X-Y
- IOPE (16~18) ; 厳密摂動計算の指定
 0 (連続計算の全ケースを通じて) 厳密摂動計算は行わない。
 1 厳密摂動計算を行う。
 (I/O ユニット 23 から摂動後の体系の中性子束を入力)
- IFAE (19~21) ; 中性子束および随伴中性子束のプリント出力
 0 出力しない
 1 出力する
- ISAF (22~24) ; メッシュ点ごとの領域体積と表面積のプリント出力
 0 出力しない
 1 出力する
- ICOM (25~27) ; 反応度値の出力形式を選択

反応度値の計算では、核分裂、捕獲吸収、散乱等について、核反応ごとの成分が計算される。核反応ごとの成分の出力形式を ICOM により選択する。摂動計算式および出力形式の詳細は第 4 章参照。

ICOM = 0

$$\begin{aligned}
 \text{Total removal:} & \quad - \left(\sum_g \delta \Sigma_{a,g} \phi_g^* \psi_g + \sum_g \psi_g \delta \Sigma_{sr,g} \phi_g^* \right) \\
 \text{Scattering source:} & \quad + \sum_g \psi_g \sum_{g' \neq g} \delta \Sigma_{s,g' \rightarrow g} \phi_{g'}^* \\
 \text{Fission source:} & \quad + \frac{1}{k_{eff}^*} \sum_g \chi_g \psi_g \sum_{g'} \delta v \Sigma_{f,g'} \phi_{g'}^*
 \end{aligned}$$

ICOM = 1

$$\begin{aligned}
 \text{Capture:} & \quad - \sum_g \delta \Sigma_{c,g} \phi_g^* \psi_g \\
 \text{Scattering:} & \quad - \sum_g \phi_g^* \sum_{g' \neq g} \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g'} (\psi_g - \psi_{g'}) \\
 \text{Fission:} & \quad + \frac{1}{k_{eff}^*} \sum_g \chi_g \psi_g \sum_{g'} \delta v \Sigma_{f,g'} \phi_{g'}^* - \sum_g \delta \Sigma_{f,g} \phi_g^* \psi_g
 \end{aligned}$$

ICOM = 2

$$\text{Capture: } - \sum_g \delta \Sigma_{c,g} \phi_g^* \psi_g$$

$$\text{Fission: } - \sum_g \delta \Sigma_{f,g} \phi_g^* \psi_g$$

$$\text{Scattering: } - \sum_g \phi_g^* \sum_{g' \neq g} \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g'} (\psi_g - \psi_{g'})$$

$$\text{Fission source: } + \frac{1}{k_{\text{eff}}} \sum_g \chi_g \psi_g \sum_{g'} \delta v \Sigma_{f,g'} \phi_{g'}^*$$

なお、中性子漏洩成分は ICOM = 0 ~ 2 で同じ値を出力する。

(2) セクション 002 : ミクロ断面積の入力

(マクロ断面積のみ使用する場合は、このセクションを省略)

#2-1 (I3) : 002

#2-2 (3I3) :

NFMIC (1~3) ; 必ず 1 を指定

NCMIC (4~6) ; 常に 0

IPRINT (7~9) ; ミクロ断面積のプリント出力

0 出力しない

1 出力する

#2-3 (24I3) :

MATMAX (1~3) ; ミクロ断面積を入力する物質の数

MAT1T (4~6) ; 常に 0

JZERO (7~9) ; 常に 0

MACT (10~12) ; 常に 0

MAT(I) (13~) ; 物質番号 (MAT(I), I=1, MATMAX)

#2-4 ~ #2-6 を物質の数 (MATMAX) だけ繰り返す

#2-4 (2I3) : 物質番号と核種数

IREG (1~3) ; 物質番号

NONC (4~6) ; IREG で指定した物質に含まれる核種の数

#2-5 (A6,4X,A4) : PDS ファイルの指定

NAM12 (1~6) ; メンバー名の先頭の 6 文字

NAMP (11~14) ; (データを作成したコード名の最初の 4 文字 : 例 SLAR)

#2-6 (18I4) : ファイルに含まれるの核種のコード番号

(NUMC (I), I=1, NONC)

#2-7 (12(2I3)) : 組成番号と物質番号の対応をとる。組成の数 (MAIMAX) だけ入力。

IREGN1 (1~3) ; 組成番号 1

MAT (4~6) ; 組成番号 1 に対応する物質番号

IREGN2 (7~9) ; 組成番号 2

MAT (10~12) ; 組成番号 2 に対応する物質番号

(繰り返し)

IREGNM ; MAIMAX 番目の組成番号

MAT ; MAIMAX 番目の組成番号に対応する物質番号

実効ミクロ断面積を準備していない組成については、物質番号として “ 0 ” を入力する。

(3) セクション 003 : マクロ断面積の入力

#3-1 (I3) : 003

#3-2 (3I3) :

NFMAC (1~3) ; 必ず 1 を指定

NCMAC (4 ~ 6) ; 常に 0

IPRINT (7 ~ 9) ; マクロ断面積のプリント出力

0 出力しない

1 出力する

#3-3 (24I3)

MAIMAX (1~3) ; 入力する組成数の合計 (#1-2 で入力した値を再度指定)

MAA1T (4~6) ; 常に 0

MXXX (7~9) ; ブランク

MAACT (10~12) ; 常に 0

(MAA(I), I=1, MAIMAX) ; 入力したマクロ断面積の組成番号を指定する。

#3-4 (A6,4X,A4) : 核分裂スペクトル χ_g を PDS ファイルから入力

NUM12 (1~6) ; PDS ファイルのメンバー名の先頭から 6 文字

NAMP (11~14) ; χ_g を作成したプログラム名の最初の 4 文字 (例 SLAR)

#3-5 (24I3) : 断面積の指定

KMAX (1~3) ; エネルギー群数

IDS1 (4~6) ; 減速散乱の群数

NUP (7~9) ; 上方散乱の群数

MODC1 (10~12) ;

0 等方拡散係数を使用する ($D = 1/(3 \Sigma_D)$)

1 方向依存拡散係数を使用する (指定方法-1)

$$D_1 = 1/3 (D_{\perp} + 2D_{//})$$

$$D_2 = D_{//}$$

$$D_3 = D_{\perp}$$

(注) 板状セル計算による方向依存拡散係数では、 $D_{//}$ は物質板配列に平行方向、そして D_{\perp} は直角方向の拡散係数を表す。

2 方向依存拡散係数を使用する (指定方法-2)

$$D_1 = 1/3 (2D_{\perp} + D_{//})$$

(D_2 、 D_3 は指定方法-1と同じ)

3 方向依存拡散係数を使用する (指定方法-3)

$$D_1 = 1/2 (D_{\perp} + D_{//})$$

(D_2 、 D_3 は指定方法-1と同じ)

-1 等方拡散係数を使用する。輸送断面積から $D=1/(3 \Sigma_{tr})$ を求める。

MODC2 (13~15) ; 常に 0

MODC3 (16~18) ; 常に 0

IXDCT (19~21) ; D_x (3次元 X-Y-Z 体系および2次元 X-Y 体系)

D_r (2次元 R-Z 体系)

の拡散係数として

1 D_1 を使用する

2 D_2 を使用する

3 D_3 を使用する

IYDCT (22~24) ; D_y (3次元 XYZ 体系と2次元 XY 体系)

D_z (2次元 R-Z 体系)

の拡散係数として

1 D_1 を使用する

2 D_2 を使用する

3 D_3 を使用する

IZDCT (25~27) ; D_z (3次元 X-Y-Z 体系)

の拡散係数として

1 D_1 を使用する

2 D_2 を使用する

3 D_3 を使用する

Σ_D と Σ_{tr} に関しては、Appendix-B を参照のこと。

#3-6 (A6,4X,A4) : 断面積のメンバー名を指定する。

NAM12 (1~6) ; PDS ファイルのメンバー名の先頭から 6 文字

NAMP (11~14) ; 断面積を作成した計算コード名の最初の 4 文字

#3-6 を組成の数 (MAIMAX) だけ繰り返す。

方向依存拡散係数など入力で指定した断面積の編集は、” JOINT “により行われる。

(4) セクション 004 : 計算項目の指定

#4-1 (I3) : 004

#4-2 (I3)

NCAL (1~3) ;

1 実効遅発中性子割合 (セクション 005)

2 即発中性子寿命 (セクション 006)

3 単位原子数あたりの反応度価値 (セクション 007)

4 1 次摂動計算による反応度価値 (セクション 008)

5 厳密摂動計算による反応度価値 (セクション 008)

(5) セクション 005 : 実効遅発中性子割合の計算

#5-1 (I3) : 005

#5-2 (I2I6) :

KMAX (1~3) ; エネルギー群数

NUDF (4~6) ; Delayed family の数

NUNC (7~9) ; 遅発中性子のデータを準備した核種の数

MCC (N) (10~) ; 核種のコード番号 (MCC(N), N=1, NUNC)

遅発中性子に関するファイル形式は Appendix-A に示す。

(6) セクション 006 : 即発中性子寿命の計算

#6-1 (I3) : 006

#6-2 (6E12.0) : レサジーで表示した各エネルギー群の下端の値

(UL (K), K=1,KMAX)

#6-3 (F6.0) : 基準反応度を計算する場合のみ入力する。

DTIM (1~6) ; 出力倍増時間 (sec)

(7) セクション 007 : 単位原子数あたりの反応度価値の計算

マイクロ断面積の入力が必要。3次元 X-Y-Z 体系では、反応度価値を計算する空間領域を X-Y 面単位で指定、順次 Z-方向に移動する。計算結果はプリント出力の他に I/O ユニット 30 および 32 に出力される (ファイル形式は Appendix-A に示す)。

#7-1 (I3) : 007

#7-2 (3I3,10I6) :

IPCL (1~) ; 摂動計算の分母 I_p の計算方法を指定

0 ミクロ断面積を使用して計算する

1 マクロ断面積を使用して計算する (推奨値)

反応度価値はマイクロ断面積を用いて計算するが、 I_p の計算はマクロ断面積を指定することが可能

マイクロ断面積を使用する場合、体系内のすべての組成番号に対応したマイクロ断面積および核種ごとの核分裂スペクトルが必要

NCYC (4~6) ; 3次元 X-Y-Z 体系において、反応度価値を計算する X-Y 面の数
(2次元計算では 1)

NUMAX1 (7~9) ; 反応度価値を計算する核種数 (≤ 9)

NUCL1 (10~) ; 核種のコード番号 (NUCL1 (M), M=1, NUMAX1)

[ミクロ断面積を用いて I_p を計算する場合の核分裂スペクトルの指定]

- 1) 核種ごとの値を入力 (#7-3 ~ #7-4 による入力)
- 2) セクション 003 で入力した核分裂スペクトルを核分裂を起こす全ての核種に適用する (#7-5 による入力)

のどちらかを選択する。核種ごとの核分裂スペクトルを入力する場合、#7-3 ~ #7-4 を核種数だけ繰り返し、空白行によりデータの終了を示す。

PERKY の計算では、 ^{238}U や ^{240}Pu を含め核分裂を起こす核種が体系内に 2 核種以上有ると想定している。上記選択は、カラム 5~8 が

- 1) ブランクならば #7-3
- 2) コード番号の入力ならば #7-5

による入力であることをプログラムが自動的に判定する。

1) 核種ごとの値を入力する場合

#7-3 (I4) :

MCODE (1~4) ; 核種のコード番号

#7-4 (A6,4X,A4) : PDS ファイルから核種ごとの核分裂スペクトルを入力

NAM12 (1~6) ; PDS ファイルのメンバー名の先頭から 6 文字

NAMP (11~14) ; χ^m_g を作成した計算コード名の先頭から 4 文字

2) セクション 003 で入力した値を核分裂を起こす全ての核種に適用する場合

#7-5 (10I4) : 核分裂性核種のコード番号

体系内の核分裂を起こす核種全てのコード番号を、指定する必要がある (^{238}U や ^{240}Pu を含む)。

#7-6 (5I3) : 反応度値を計算する空間領域を指定

NPLN (1~3) ; 3次元 X-Y-Z 体系において、反応度値を計算する X-Y 面の Z-方向の位置を指定 (2次元体系では 1 を指定)

MLFT (4~6) ; 反応度値を計算する X-Y 面 (R-Z 面) の左端のメッシュ点

MRIT (7~9) ; 同じく右端のメッシュ点

MTOP (10~12) ; 同じく上端のメッシュ点

MBOT (13~15) ; 同じく下端のメッシュ点

X-Y-Z 体系の計算では、反応度値を計算する X-Y 平面の数 (NCYC) だけ、#7-6 の入力を繰り返す。

(8) セクション 008 : 1 次摂動および厳密摂動計算による反応度価値の計算

8-1 (I3) : 008

8-2 (24I3) :

IMCAL (1~3)	:	断面積の選択
0		ミクロ断面積を用い核種ごとの反応度価値を計算
1		マクロ断面積を用いゾーンごとの反応度価値を計算
IPAR (4~6)	:	常に 1
IPCAL (7~9)	:	摂動計算式の分母 I_p の計算方法を指定
0		ミクロ断面積を使用
1		マクロ断面積を使用 (推奨値)

ミクロ断面積を用いた反応度価値の計算においてもマクロ断面積による I_p 計算を指定することが可能

ミクロ断面積を使用する場合、体系内のすべての組成番号に対応したミクロ断面積および核種ごとの核分裂スペクトルが必要

IRMAX (10~12) ; 反応度価値を計算するゾーンの数 (≤ 19)IREG (13~) ; 反応度価値を計算するゾーンの摂動前の組成番号
(IREG(I), I=1, IRMAX)

2次元 X-Y 体系の計算において必要な軸方向バックリングを入力

(2次元 X-Y 体系以外では、#8-3～#8-5の入力を省略する)

2次元 X-Y 計算では、Z-軸方向の中性子漏洩を疑似吸収項として扱い、軸方向バックリングを用いた計算を行う。

$$-\sum_g \delta D_{z,g} \cdot B_{\perp}^2 \phi_g^* \psi_g$$

バックリングの入力は、次の3つの方法から選択する。

- (1) 全エネルギー群で平均した値
(#8-3による入力)
- (2) エネルギー依存バックリングを入力データで指定し入力
(#8-3、#8-4による入力)
- (3) 各エネルギー群ごとの値を PDS ファイルから入力
(#8-3、#8-5による入力)

入力方法を選択し、ゾーンの数だけ入力を繰り返す。そして、ブランク行により入力の終了を示す。

#8-3 (I3, E12.0) : 全エネルギー平均のバックリングを入力

MATN (1~3) ; ゾーン番号

B2AV (4~15) ; バックリングの値

*バックリングの値をブランクとすることにより、プログラムはエネルギー依存バックリングが入力されると自動的に判断する (#8-4が必要)

*ゾーン番号に負の記号を付けることにより、プログラムはエネルギー依存バックリングが PDS ファイルから入力されると自動的に判断する (#8-5が必要)

#8-4 (6E12.0) : MATN で指定したゾーンのエネルギー依存バックリングの値

(B2(K), K=1, KMAX)

#8-5 (A6,4X,A4)

NAM12 (1~6) ; PDS ファイルのメンバー名の先頭から6文字

NAMP (11~14) ; ファイルを作成した計算プログラム名の最初の4文字

核分裂スペクトル χ_g を PDS ファイルから入力

(セクション 003 で指定した核分裂スペクトルを再度入力)

#8-6 (A6,4X,A4) : 核分裂スペクトル χ_g

NUM12 (1~6) ; PDS ファイルのメンバー名の先頭から6文字

NAMP (11~14) ; χ_g を作成したプログラム名 (例 SLAR)

#8-7 ~ #8-11 は、ミクロ断面積を使用した核種ごとの反応度価値の計算にのみ必要な入力

#8-7 (12I6) :

NUMAX2 (1~6) ; 反応度価値を計算する核種の数 (≤ 20)

NUCL2(N) (7~) ; 核種のコード名 ((NUCL2(N), N=1, NUMAX2)

[核種ごとの核分裂スペクトルを指定]

核分裂を起こす全ての核種の核分裂スペクトルを指定する。

1) 核種ごとの値を入力

2) #8-6 で指定した値を全核種に適用する方法

のどちらかを選択できる。PERKY では、核分裂を起こす核種は体系内に 2 種類以上あることを想定しており、次のカードのカラム 7~12 が空白かコード番号かにより、選択された入力をプログラムが自動的に判断する。

1) 核種ごとの値を入力する場合

#8-8 (I6) ; 核分裂を起こす核種のコード番号

#8-9 (A6,4X,A4) : 核分裂スペクトル χ_g

NUM12 (1~6) ; PDS ファイルのメンバー名の先頭から 6 文字

NAMP (11~14) ; χ_g を作成したプログラム名 (例 SLAR)

この入力を核分裂を起こす核種の数だけ繰り返し、空白行で入力の終了を示す。

2) 全核種に #8-6 で指定した値を適用する場合

#8-10 (12I6) :

NUCLB(N) ; 核分裂を起こす核種のコード番号

(NUCLB(N), N=1, NMAX)

(注) 空白行は必要ない。

#8-11 (3I3/ (I6, 2E12.5)) : 摂動計算を行うゾーンの摂動前と摂動後の組成番号
および核種ごとの原子数密度

MATN1 (1) (1~3) ; 摂動計算を行う 1 番目のゾーンの摂動前の組成番号

MATP1 (1) (4~6) ; " 摂動後の組成番号

NPMAX (1) (7~9) ; 指定したゾーンにおいて反応度価値を計算する核種の数
(\leq NUMAX2)

(改行)

NUCLP (1,1) (1~6) ; 1 番目の核種のコード番号

DENN (1,1) (7~18) ; 摂動前の原子数密度

DENP (1,1) (19~30) ; 摂動後の原子数密度

(改行)

NUCLP (2,1) (1~6) ; 2 番目の核種のコード番号

DENN (2,1) (7~18) ; (繰り返し)

DENP (2,1) (19~30) ;

.....

MATN1 (2) (1~3) ; 摂動計算を行う 2 番目のゾーンの摂動前の組成番号

MATP2 (2) (4~6) ; (繰り返し)

NPMAX (2) (7~9) ;

NUCLP (1,2) (1~3) ; (繰り返し)

DENN (1,2) (7~18) ;

DENP (1,2) (19~30) ;

#8-11 の入力を反応度値を計算するゾーンの数 (IRMAX) だけくり返す。

マイクロ断面積のデータファイルには原子数密度も入っているが、ここで、再度、原子数密度を入力する必要がある。ただし、摂動前と摂動後の両方の原子数密度に 0.0 を入力すると、データファイルに入っている原子数密度が自動的にセットされる。

また、特殊な計算として、同じマイクロ断面積を用い、原子数密度のみを変化させた反応度値の計算も可能である。この計算では MATN1、MATP1 に同じ組成番号を指定する。

* ミクロ断面積を使用する反応度値計算用入力終了

マクロ断面積を使用したゾーンごとの反応度値の計算に必要な入力

#8-12 (12(2I3))

(MATN2(I), MATP2(I), I=1, IRMAX)

MATN2 (I) ; 反応度値を計算する I 番目のゾーンの摂動前の組成番号

MATP2 (I) ; " 摂動後の組成番号

* 反応度値計算用入力終了

2.4 基準反応度の計算

FCA 実験において使用する基準反応度 (ρ_0) を絶対単位 ($\Delta k/k$) に変換する係数を求める。ここでは実験で得られた出力倍増時間と PERKY で求める実効遅発中性子割合および即発中性子寿命の値を入力データとして、動特性方程式に基づいた計算が行われる。

この計算では実効遅発中性子割合の計算と即発中性子寿命の計算を連続計算して実行する必要がある。それぞれの計算を単独で行う場合とはセクション 004 と 006 の入力形式が異なることに注意する必要がある。

(1) 連続計算の最初のケース (実効遅発中性子割合の計算)

(タイトル行等必要な入力に加えて、以下の入力を行う)

セクション 004: 計算項目の指定

#4-1 (I3) : 004

#4-2 (I3) :

NCAL (1~3) ; -1 を指定 (負の値とすることに注意)

セクション 005: 実効遅発中性子割合の計算

#5-1 (I3) : 005

#5-2 (I2I6) :

KMAX (1~3) ; エネルギー群数

NUDF (4~6) ; Delayed family の数

NUNC (7~9) ; 遅発中性子のデータを準備した核種の数

MCC(N) (10~) ; 核種のコード番号 (MCC(N), N=1, NUNC)

“999 行” (カラム 1~3 に 999 を入力) で連続計算の区切りを示す

(2) 連続計算の 2 番目のケース (即発中性子寿命の計算)

(タイトル行等必要な入力に加えて、以下の入力を行う)

セクション 004: 計算項目の指定

#4-1 (I3) : 004

#4-2 (I3) :

NCAL (1~3) ; -2 を指定 (負の値とすることに注意)

セクション 006: 即発中性子寿命の計算

#6-1 (I3) : 006

#6-2 (6E12.0) : レサジーで表示した各エネルギー群の下端の値
(UL (K), K=1, KMAX)

#6-3 (F6.0) :

DTIM (1~6) ; 出力倍増時間 (sec)

“999 行” (カラム 1~3 に 999 を入力)

3. プログラムの概要

3.1 オーバーレイ構造

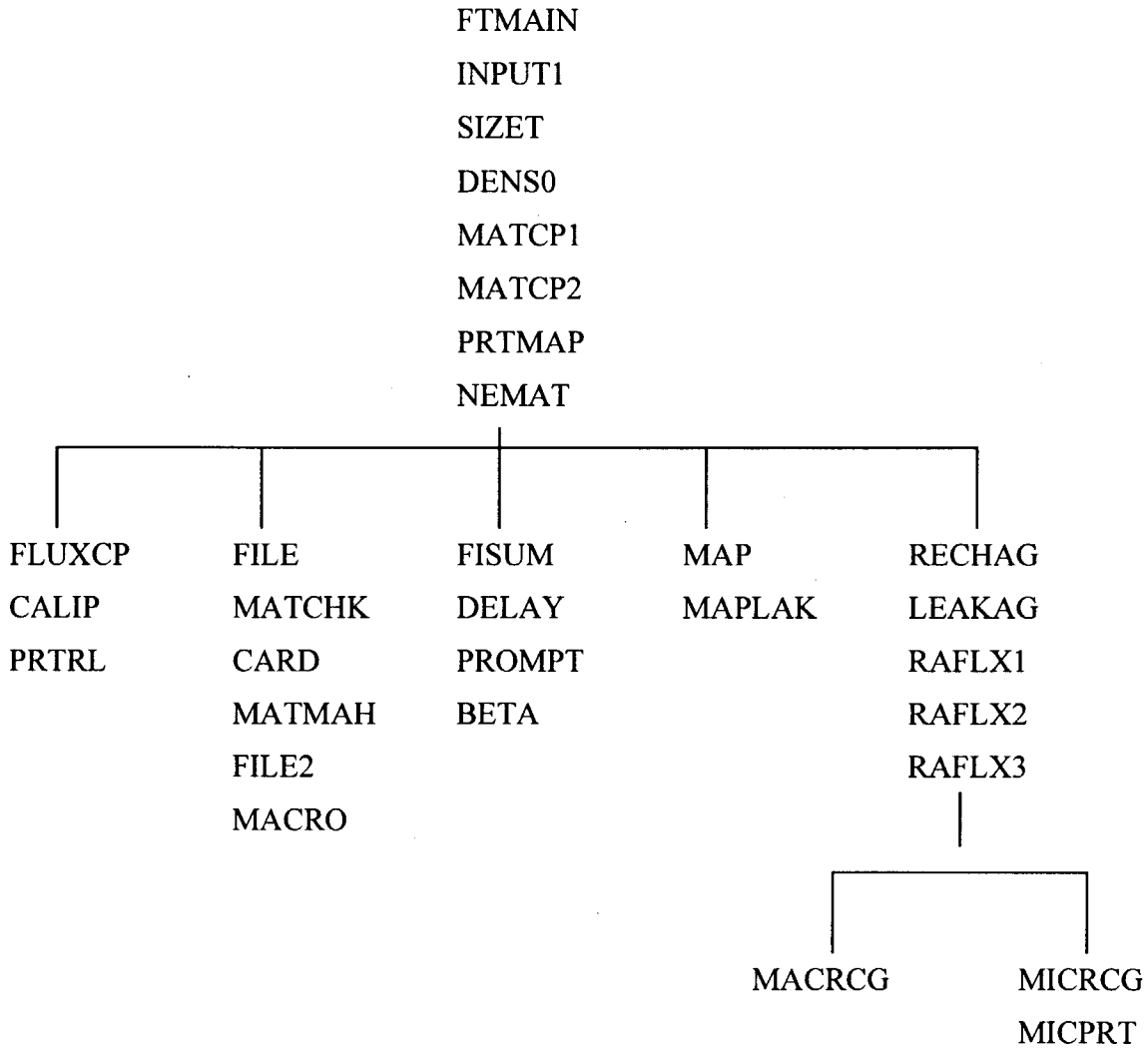


Fig. 3.1 Recommended overlay structure for PERKY

3.2 サブルーチンの作業内容

- | | |
|--------|---|
| MAIN | 計算のメモリーを確保する |
| INPUT1 | 入力データの読み込みと計算の全体の流れをコントロールする。 |
| SIZEX | メモリーの使用量をチェックする。 |
| DENS0 | マイクロ断面積とともに入力した原子数密度をチェックし、 10^{-7} 以下の数値 |

を 0.0 に修正する。

MATCP1	計算体系の情報を読み込む。
MATCP2	組成番号と物質番号の対応をとる。
PRTMAP	計算体系の組成番号を出力する。
NEMAT	計算体系の空間メッシュごとの組成番号と物質番号の対応をチェックする。
FLUXCP	中性子束および随伴中性子束を入力する。
CALIP	反応度値計算用の I_p 計算を行う。
PRTRL	出カルーチン
FILE	ミクロ断面積入力ファイルの制御
MATCHK	ミクロ断面積の物質番号のチェック
CARD	ミクロ断面積の入力
MATMAH	データファイルからのミクロ断面積の入力
FILE2	マクロ断面積入力データファイルの制御
MACRO	マクロ断面積の入力
FISUM	遅発中性子割合および即発中性子寿命計算用の I_p 計算
DELAY	遅発中性子割合の計算
PROMPT	即発中性子寿命の計算
BETA	動特性方程式に基づく反応度単位の換算係数
MAP	単位原子数あたりの反応度値の計算
MAPLAK	単位原子数あたりの反応度値の漏洩項の計算
RECHAG	反応度値計算の制御
LEAKAG	反応度値計算の漏洩項の計算
RAFLX1	中性子束および随伴中性子束のデータ制御 (1)
RAFLX2	中性子束および随伴中性子束のデータ制御 (2)
RAFLX3	中性子束および随伴中性子束のデータ制御 (3)
MACRCG	マクロ断面積を使用した反応度値の計算
MICRCG	ミクロ断面積を使用した反応度値の計算
MICPRT	ミクロ断面積を使用した反応度値の計算の出力制御

3.3 データファイルとその役割

各ファイルのデータ配列は、Appendix-A に記述する。

機器番号

- 1 このファイルから計算体系の情報と中性子束、随伴中性子束を入力する。このフ

ファイルは POPLARS の計算結果として得られる。

(Appendix-A の A.7 のファイル；常に必要)。

- 2 Scratch unit, 入力した中性子束の再編集を行う (常に必要)。
- 3 Scratch unit, 入力した随伴中性子束の再編集を行う (常に必要)。
- 4 Scratch unit, 入力した計算体系を再編集する (常に必要)。
- 8 マクロ断面積入力用ファイル (Appendix-A の A.5 のファイル)
- 10 Scratch unit, 入力したマクロ断面積を編集する。
- 11 ミクロ断面積入力用ファイル (Appendix-A の A.6 のファイル)
- 13 Scratch unit, ミクロ断面積を編集する。
- 14 Scratch unit (常に必要)
- 15 Scratch unit (常に必要)
- 16 Scratch unit (常に必要)
- 17 随伴中性子束 Ψ 入力用のファイル。機器番号 1 から随伴中性子束を入力しない場合に、このファイルから入力する。そのデータ配列を以下に示す。
- Record 1 DO 20 K =, KMAX
 READ(17) DUMMY
 20 CONTINUE
 - Record 2 READ(17)
 - Record 3 DO 30 K =1, KMAX
 READ(17) ((Ψ (J, I, KB), J=1, JMAX), I=1, IMAX), KB=1, KBMAX)
 30 CONTINUE
- 18 Scratch unit (常に必要)
- 19 Scratch unit (常に必要)
- 21 遅発中性子データファイル (Appendix-A の A.8 のファイル)
- 22 Scratch unit (常に必要)
- 23 厳密摂動計算用データファイル；機器番号 1 のファイルと同じ形式で摂動体系の中性子束を入力する。
- 30 単位原子数あたりの反応度値の計算結果出力用ファイル。
- 32 単位原子数あたりの反応度値のエネルギー成分の出力ファイル
- 35 マクロ断面積を用いた反応度値の計算結果の出力ファイル
- 36 ミクロ断面積を用いた反応度値の計算結果の出力

4. 計算式の概要と出力項目

4.1 反応度値の計算

4.1.1 拡散理論に基づく摂動計算式

この節では、摂動に伴う反応度変化（反応度値）の計算式を拡散方程式および随伴方程式から導出する。

摂動前の体系における拡散理論に基づく随伴方程式

$$-\nabla D_g \nabla \psi_g + (\Sigma_{a,g} + \Sigma_{sr,g}) \psi_g = \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'} \psi_{g'} + \frac{\nu \Sigma_{f,g}}{k_{eff}} \sum_{g'} \chi_{g'} \psi_{g'} \quad (4.1.1)$$

この式に摂動後の体系の中性子束 ϕ_g^* をかけ、全エネルギー群で加算することにより次の式を得る（以後、*印は摂動後の体系の値を表す）。

$$-\sum_g \phi_g^* \nabla D_g \nabla \psi_g + \sum_g (\Sigma_{a,g} + \Sigma_{sr,g}) \phi_g^* \psi_g = \sum_g \phi_g^* \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'} \psi_{g'} + \frac{1}{k_{eff}} \sum_g \nu \Sigma_{f,g} \phi_g^* \sum_{g'} \chi_{g'} \psi_{g'} \quad (4.1.2)$$

さらに、この式を次のように変形する。

$$\frac{1}{k_{eff}} = \frac{1}{\sum_g \nu \Sigma_{f,g} \phi_g^* \sum_{g'} \chi_{g'} \psi_{g'}} \left[-\sum_g \phi_g^* \nabla D_g \nabla \psi_g + \sum_g (\Sigma_{a,g} + \Sigma_{sr,g}) \phi_g^* \psi_g - \sum_g \phi_g^* \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'} \psi_{g'} \right] \quad (4.1.3)$$

摂動後の体系における拡散方程式

$$-\nabla D_g^* \nabla \phi_g^* + (\Sigma_{a,g}^* + \Sigma_{sr,g}^*) \phi_g^* = \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}^* \phi_{g'}^* + \frac{\chi_g^*}{k_{eff}^*} \sum_{g'} \nu \Sigma_{f,g'}^* \phi_{g'}^* \quad (4.1.4)$$

この式に摂動前の体系の随伴中性子束 ψ_g をかけ、全エネルギー群で加算することにより次の式を得る。

$$-\sum_g \psi_g \nabla D_g^* \nabla \phi_g^* + \sum_g \psi_g (\Sigma_{a,g}^* + \Sigma_{sr,g}^*) \phi_g^* = \sum_g \psi_g \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}^* \phi_{g'}^* + \frac{\sum_g \psi_g \chi_g^*}{k_{eff}^*} \sum_{g'} \nu \Sigma_{f,g'}^* \phi_{g'}^* \quad (4.1.5)$$

ここで、摂動により断面積は次のように変化するものとする。また、核分裂スペクトル χ_g は摂動前後で変化しないとする ($\chi_g = \chi_g^*$)。

$$D_g^* = D_g + \delta D_g$$

$$\Sigma_{a,g}^* = \Sigma_{a,g} + \delta \Sigma_{a,g}$$

$$\Sigma_{sr,g}^* = \Sigma_{sr,g} + \delta \Sigma_{sr,g}$$

$$\Sigma_{s,g \rightarrow g'}^* = \Sigma_{s,g \rightarrow g'} + \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g'}$$

$$\nu \Sigma_{f,g}^* = \nu \Sigma_{f,g} + \delta \nu \Sigma_{f,g}$$

これらの値を (4.1.5) 式に代入すると、各項は次のように記述できる。

[左辺の第1項]

$$\begin{aligned}\sum_g \psi_g \nabla D_g^* \nabla \phi_g^* &= \sum_g \psi_g \nabla D_g \nabla \phi_g^* + \sum_g \psi_g \nabla \delta D_g \nabla \phi_g^* \\ &= \sum_g \psi_g \nabla D_g \nabla \phi_g^* + \sum_g \nabla \delta D_g \psi_g \nabla \phi_g^* - \sum_g \delta D_g \nabla \psi_g \nabla \phi_g^*\end{aligned}$$

[左辺の第2項]

$$\sum_g \psi_g (\Sigma_{a,g}^* + \Sigma_{sr,g}^*) \phi_g^* = \sum_g \psi_g \Sigma_{a,g} \phi_g^* + \sum_g \psi_g \delta \Sigma_{a,g} \phi_g^* + \sum_g \psi_g \Sigma_{sr,g} \phi_g^* + \sum_g \psi_g \delta \Sigma_{sr,g} \phi_g^*$$

[右辺の第1項]

$$\sum_g \psi_g \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}^* \phi_{g'}^* = \sum_g \psi_g \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g' \rightarrow g} \phi_{g'}^* + \sum_g \psi_g \sum_{g' \neq g} \delta \Sigma_{s,g' \rightarrow g} \phi_{g'}^*$$

[右辺の第2項]

$$\frac{\sum_g \chi_g \psi_g}{k_{eff}^*} \sum_{g'} \nu \Sigma_{f,g'}^* \phi_{g'}^* = \frac{\sum_g \chi_g \psi_g}{k_{eff}^*} \left(\sum_{g'} \nu \Sigma_{f,g'} \phi_{g'}^* + \sum_{g'} \delta \nu \Sigma_{f,g'} \phi_{g'}^* \right)$$

以上の式と (4.1.3) 式から、摂動による反応度変化 (反応度価値) を求める。

$$\begin{aligned}\frac{1}{k_{eff}} - \frac{1}{k_{eff}^*} &= \frac{1}{\sum_g \nu \Sigma_{f,g} \phi_g^* \sum_{g'} \chi_{g'} \psi_{g'}} \\ &\times \left[- \sum_g \nabla \{ D_g \phi_g^* \nabla \psi_g - D_g \psi_g \nabla \phi_g^* \} + \sum_g \nabla \delta D_g \psi_g \nabla \phi_g^* - \sum_g \delta D_g \nabla \psi_g \nabla \phi_g^* \right. \\ &\quad - \sum_g \psi_g \delta \Sigma_{a,g} \phi_g^* \\ &\quad - \sum_g \psi_g \delta \Sigma_{sr,g} \phi_g^* - \sum_g \phi_g^* \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'} \psi_{g'} + \sum_g \psi_g \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g' \rightarrow g} \phi_{g'}^* + \sum_g \psi_g \sum_{g' \neq g} \delta \Sigma_{s,g' \rightarrow g} \phi_{g'}^* \\ &\quad \left. + \frac{\sum_g \chi_g \psi_g \sum_{g'} \delta \nu \Sigma_{f,g'} \phi_{g'}^*}{k_{eff}^*} \right] \tag{4.1.6}\end{aligned}$$

右辺の分子第1行の中性子漏洩成分および第3行の中性散乱成分について、さらに詳しく述べる。

[第1行：中性子漏洩成分]

これまで式を簡素に記述するため体積積分を省略してきたが、あらためて体積積分を考慮し、これを面積分に変換すると中性子漏洩成分を次のように記述することができる。

$$-\int_s ds \sum_g A \{ D_g \phi_g^* \nabla \psi_g - D_g \psi_g \nabla \phi_g^* \} + \int_s ds \sum_g A (\delta D_g \psi_g \nabla \phi_g^*)$$

$$-\int_v d\bar{r} \sum_g \delta D_g (\nabla \psi_g \cdot \nabla \phi_g^*)$$

さらに、境界面では $-\frac{D_g \nabla \psi_g}{\psi_g} = -\frac{D_g \nabla \phi_g^*}{\phi_g^*}$ が成り立ち、 $\delta D_g = 0$ となることから、中性子漏洩成分では、

$$-\int_v d\bar{r} \sum_g \delta D_g (\nabla \psi_g \cdot \nabla \phi_g^*)$$

のみが残る。

[第3行：中性子散乱成分]

第2項と第3項は、全エネルギーで加算するとすべて相殺されてなくなり、第1項と第4項が残る。

以上の結果を整理すると、摂動による反応度の変化は次の式であらわされる。

$$\frac{1}{k_{eff}} - \frac{1}{k_{eff}^*} = \frac{1}{\sum_g \nu \Sigma_{f,g} \phi_g^* \cdot \sum_{g'} \chi_{g'} \psi_{g'}}$$

$$\times \left[-\sum_g \delta D_g \nabla \psi_g \cdot \nabla \phi_g^* - \sum_g \delta \Sigma_{a,g} \phi_g^* \psi_g - \sum_g \psi_g \delta \Sigma_{sr,g} \phi_g^* + \sum_g \psi_g \sum_{g'=g} \delta \Sigma_{s,g' \rightarrow g} \phi_{g'}^* \right. \tag{4.1.7}$$

$$\left. + \frac{1}{k_{eff}^*} \sum_g \chi_g \psi_g \sum_{g'} \delta \nu \Sigma_{f,g'} \phi_{g'}^* \right]$$

厳密摂動計算による反応度値は、(4.1.7)式により $\frac{\delta k}{k k^*}$ を求める。

1次摂動計算では、摂動後の中性子束 Φ_g^* を摂動前の中性子束 Φ_g に替え、また、右辺 [] 内の第5項の k^* を k に置き換える近似を行い反応度値を求める。

実際の計算では、(4.1.7)式の右辺の各項は計算体系内の空間メッシュ点ごとに計算され、空間メッシュ点の体積を乗じた値（空間積分された値）が算出される。

4.1.2 中性子漏洩成分の計算

3次元 X-Y-X 体系および2次元 R-Z 体系を例にとり、中性子漏洩成分の演算方法につ

いて具体的に述べる。

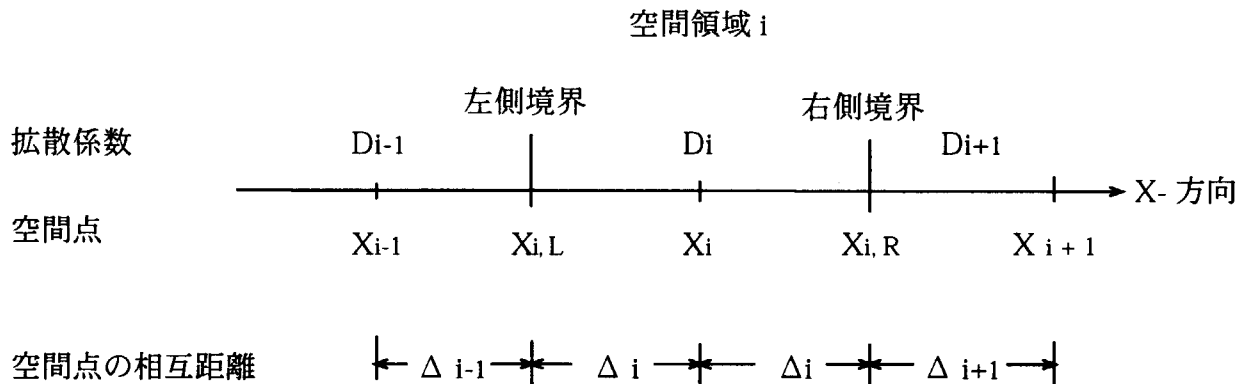
(1) 3次元 X-Y-Z 体系での計算

中性子漏洩項は、3次元 X-Y-Z 体系において、次のように記述される。

$$-\int_V \bar{dr} \sum_g \delta D_g (\nabla \psi_g \cdot \nabla \phi_g^*) = \left[\int \left(\delta D_x \frac{\partial \phi_g^*}{\partial x} \frac{\partial \psi_g}{\partial x} + \delta D_y \frac{\partial \phi_g^*}{\partial y} \frac{\partial \psi_g}{\partial y} + \delta D_z \frac{\partial \phi_g^*}{\partial z} \frac{\partial \psi_g}{\partial z} \right) dx dy dz \right] \quad (4.1.8)$$

体系中のメッシュ点 i をとりまく空間領域（空間領域 i と表記）における中性子漏洩項の具体的な演算を次に述べる。

[X-方向の中性子漏洩項：(4.1.8) 式の右辺の第1項]



$$\int \frac{\partial \phi^*}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial x} dx dy dz : \Delta_y \cdot \Delta_z \left[\frac{1}{\Delta_i} \frac{1}{\left(1 + \frac{D_i^* \Delta_{i-1}}{D_{i-1}^* \Delta_i}\right) \left(1 + \frac{D_i \Delta_{i-1}}{D_{i-1} \Delta_i}\right)} (\phi_i^* - \phi_{i-1}^*) (\psi_i - \psi_{i-1}) + \frac{1}{\Delta_i} \frac{1}{\left(1 + \frac{D_i^* \Delta_{i+1}}{D_{i+1}^* \Delta_i}\right) \left(1 + \frac{D_i \Delta_{i+1}}{D_{i+1} \Delta_i}\right)} (\phi_i^* - \phi_{i+1}^*) (\psi_i - \psi_{i+1}) \right] \quad (4.1.9)$$

$$\Delta_x = \frac{1}{2} \int dx$$

$$\Delta_y = \int dy$$

$$\Delta_z = \int dz$$

空間領域 i の右側が外部境界 (black boundary) の場合、(4.1.9) 式のカッコ内の第 2 項は次のようにあらわされる。

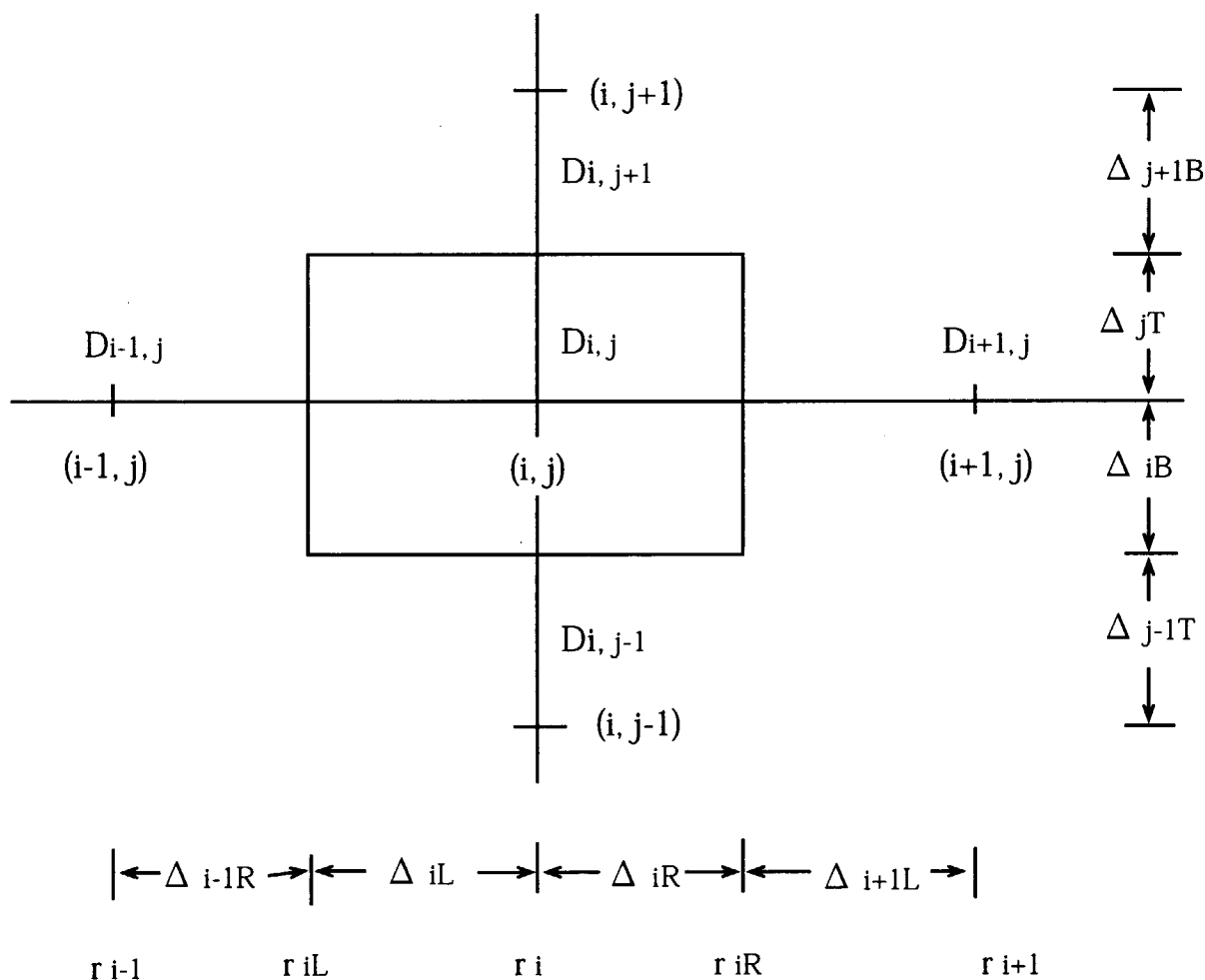
$$\frac{1}{\Delta_i \left(1 + \frac{D_i^*}{\Delta_i C_s}\right)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{D_i}{\Delta_i C_s}\right)} \phi_i^* \psi_i \quad (4.1.10)$$

この式で、 C_s は外部境界定数である (PERKY では、標準値として 0.4692 を内蔵している)。Y-方向および Z-方向についても同様に記述される。

(2) 2次元 R-Z 体系での計算

体系中の空間領域 i における中性子漏洩項について述べる。

$$-\int_V \bar{d}r \sum_g \delta D_g (\nabla \psi_g \cdot \nabla \phi_g^*) = - \left[\int \left(\delta D_r \frac{\partial \phi_g^*}{\partial r} \frac{\partial \psi_g}{\partial r} + \delta D_z \frac{\partial \phi_g^*}{\partial z} \frac{\partial \psi_g}{\partial z} \right) r dr dz \right] \quad (4.1.11)$$



[R-方向の中性子漏洩項]

$$\int \frac{\partial \phi^*}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial r} r dr dz :$$

$$\Delta_z \left[\frac{1}{\Delta_{iL}} \frac{1}{\left(1 + \frac{D_{i,j}^* \Delta_{i-1R}}{D_{i-1,j}^* \Delta_{iL}}\right) \left(1 + \frac{D_{i,j} \Delta_{i-1R}}{D_{i-1,j} \Delta_{iL}}\right)} (\phi_{i,j}^* - \phi_{i-1,j}^*) (\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}) \times \frac{1}{2} (r_i + r_{iL}) \right. \quad (4.1.12)$$

$$\left. + \frac{1}{\Delta_{iR}} \frac{1}{\left(1 + \frac{D_{i,j}^* \Delta_{i+1L}}{D_{i+1,j}^* \Delta_{iR}}\right) \left(1 + \frac{D_{i,j} \Delta_{i+1L}}{D_{i+1,j} \Delta_{iR}}\right)} (\phi_{i,j}^* - \phi_{i+1,j}^*) (\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}) \times \frac{1}{2} (r_{iR} + r_i) \right]$$

ここで

$$\Delta_z = \Delta_{jT} + \Delta_{jB}$$

[Z-方向の中性子漏洩項]

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} r dr dz :$$

$$\frac{1}{2} (r_{iR}^2 - r_{iL}^2) \left[\frac{1}{\Delta_{jB}} \frac{1}{\left(1 + \frac{D_{i,j}^* \Delta_{j-1T}}{D_{j-1}^* \Delta_{jB}}\right) \left(1 + \frac{D_{i,j} \Delta_{j-1T}}{D_{j-1} \Delta_{jB}}\right)} (\phi_{i,j}^* - \phi_{i,j-1}^*) (\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}) \right. \quad (4.1.13)$$

$$\left. + \frac{1}{\Delta_{jT}} \frac{1}{\left(1 + \frac{D_{i,j}^* \Delta_{j+1,B}}{D_{j+1}^* \Delta_{jT}}\right) \left(1 + \frac{D_{i,j} \Delta_{j+1,B}}{D_{j+1} \Delta_{jT}}\right)} (\phi_{i,j}^* - \phi_{i,j+1}^*) (\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}) \right]$$

$$\int r dr dz = \frac{1}{2} (r_{i,R}^2 - r_{i,L}^2) \Delta_z$$

4.1.3 摂動計算式の分母、Ip の計算

(4.1.7) 式の右辺の分母は摂動計算式の分母と呼ばれ、Ip であらわされる (この値は、体系計算コード“POPLARS”で随伴中性子束を計算した場合にも、LAMBDA(PHI* M PHI)として表示される)。

ミクロ断面積を用いて I_p を計算する場合、計算体系に含まれる全ての核分裂を起こす核種の中性子生成断面積 ($\nu \sigma_f$) や 核分裂スペクトル (χ_g) が必要となる。核種ごとのデータは、膨大な量となるので、その複雑さを避けるため、ミクロ断面積を用いて核種ごとの反応度値を計算する場合でも、マクロ断面積を使用して I_p 計算を行うことが可能である。

ミクロ断面積を用いた I_p 計算式

$$I_p = \sum_m \sum_i V_i N_{i,m} \sum_g \nu \sigma_{f,i,m,g} \phi_{i,g}^* \sum_{g'} \chi_{g',m} \psi_{i,g'} \quad (4.1.14)$$

m: 核種

i: 体系内の空間点

V_i : 空間点 i に代表される空間領域の体積

マクロ断面積を用いた I_p 計算式

$$I_p = \sum_i V_i \sum_g \nu \Sigma_{f,i,g} \phi_{i,g}^* \sum_{g'} \chi_{g'} \psi_{i,g'} \quad (4.1.15)$$

実効遅発中性子割合と即発中性子寿命の計算では、マクロ断面積を用いて I_p を計算する。

4.1.4 反応度値出力形式の選択

これまで述べてきたように、反応度値は (4.1.7) 式により計算される。この計算において、入力データ、セクション 001 の #1-2 でパラメータ ICOM を指定することにより、反応度値の出力形式を選択することができる。摂動計算式とこの出力形式の関係について述べる。

- 1) (4.1.7) 式の右辺の [] 内の第 2 項は吸収断面積の項であるが、これを核分裂断面積と捕獲吸収断面積の項に分けて出力することが可能である。
- 2) (4.1.7) 式の右辺の [] 内の第 3 項と第 4 項は中性子散乱断面積を含んでいる。両者を併せると随伴中性子のエネルギー勾配を含む項として、次のように記述することができる。

$$-\sum_g \phi_g^* \sum_{g' \neq g} \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g'} (\psi_g - \psi_{g'}) \quad (4.1.16)$$

ただし、この式を導くにあたっては、(n, 2n) 反応による散乱後の中性子数の増加を無視し、散乱除去断面積と散乱マトリックスの和が一致すると近似する必要がある。

$$\Sigma_{sr,g} = \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'}$$

高速炉体系におけるナトリウムボイド反応度効果は、中性子散乱項が主要な反応度成分

となる。反応度効果の物理的な解釈を行う上で、反応度値を (4.1.16) 式の形で処理すると都合がよいことから、PERKY ではそのような出力形式を準備した。

4.1.5 核種ごとの反応度値の計算

核種ごとの実効マクロ断面積を実効ミクロ断面積と原子数密度の積として求め、摂動前と摂動後の値の差を取り、断面積の変化量を算出する。

$$\delta\Sigma_{x,m} = N_m^* \sigma_{x,m}^* - N_m \sigma_{x,m} \quad (4.1.17)$$

この値を摂動計算式 (4.1.7) 式の断面積の変化量の項に代入し、核種ごとの反応度値を計算する。

ここで摂動前と摂動後でミクロ断面積は変化せず、原子数密度だけが変化したとすると、

$$\delta\Sigma_{x,m} = \delta N_m \cdot \sigma_{x,m} \quad (4.1.18)$$

と書くことが出来る。単位原子数密度あたりの反応度値の計算 (NCAL=3) は、 $\delta N_m = 1.0 \times 10^{24}$ atoms / cm³ として求めた値を (4.1.7) 式に代入することに行われる。

4.2 実効遅発中性子割合の計算

$$\beta_{eff} = \sum_m \sum_i \sum_j \frac{V_i \sum_g \chi_{D,j,g}^m \psi_{i,g} N_i^m \sum_{g'=1}^{g \max} \nu_{D,j}^m \sigma_{f,i,g'}^m \phi_{i,g}}{\sum_i V_i \sum_{g=1}^{g \max} \chi_g \psi_{i,g} \sum_{g'=1}^{g \max} \nu \Sigma_{f,i,g'} \phi_{i,g'}} \quad (4.2.1)$$

- m : 核分裂をおこした核種
- i : 原子炉内の空間点
- j : 遅発中性子の組の番号
(通常、先行核の半減期により 6 組に分けられる)
- g : エネルギー群
- V_i : 空間点 i における空間領域の体積
- $\chi_{D,j}$: エネルギー群 g に放出される遅発中性子の割合
- ϕ : 中性子束
- ψ : 随伴中性子束
- N : 原子数密度
- σ_f : 核分裂断面積
- ν_D : 放出される遅発中性子の数

4.3 即発中性子寿命の計算

$$l_g = \frac{\sum_i V_i \frac{1}{v_g} \phi_{i,g} \psi_{i,g}}{\sum_i V_i \sum_{g=1}^{g \max} \chi_g \psi_{i,g} \sum_{g'=1}^{g \max} v \Sigma_{f,i,g'} \phi_{i,g'}} \quad (4.3.1)$$

$$v_g = 2.2409 \times 10^9 \left(e^{\frac{U_{g-1}}{2}} + e^{-\frac{U_g}{2}} \right)$$

$$U_g = \sum_{g'=1}^g \Delta U_{g'}$$

v_g : エネルギー群 g の平均中性子速度

U_g : エネルギー群 g のエネルギー下限のレサジー値

4.4 基準反応度の計算

反応度方程式に基づき、基準反応度 (ρ_0) から絶対値 ($\Delta k/k$) への換算計算を行う。

$$\Delta k/k = \frac{\omega l_p}{1 + \omega l_p} + \frac{\omega}{1 + \omega l_p} \sum_{m=1}^{\max} \sum_{j=1}^6 \frac{\beta_{j,m}}{\omega + \lambda_{j,m}} \quad (4.4.1)$$

$T = 1/\omega$ として

$$\Delta k/k = \frac{l_p}{T} + \sum_{m=1}^{\max} \sum_{j=1}^6 \frac{\beta_{j,m}}{1 + \lambda_{j,m} T} \quad (4.4.2)$$

T : ペリオド (sec)、倍増時間 (DTIM) から $T = \text{DTIM} / \ln 2$ で計算。

l_p : 即発中性子寿命 (sec)

$\lambda_{j,m}$ (L. Tomlinson の評価値⁽⁴⁾) をコードに内蔵)

	DATA RAMD/	0.0129, 0.0311, 0.134, 0.331, 1.26, 3.21,	Pu-239
1		0.0129, 0.0313, 0.135, 0.333, 1.36, 4.04,	Pu-240
2		0.0128, 0.0299, 0.124, 0.352, 1.61, 3.47,	Pu-241
3		0.0127, 0.0317, 0.115, 0.311, 1.40, 3.87,	U-235
4		0.0132, 0.0321, 0.139, 0.358, 1.41, 4.02,	U-238

5. まとめ

摂動計算コード“PERKY”を開発してから約25年が経過した。PERKYの入力データとなる中性子束を計算する体系計算コード“POPLARS”を開発したのを機に、PERKYについても長年の使用経験に基づいて修正されたものをまとめ、新たにPERKY(2002年版)を作成することとした。PERKYで使用する多群拡散摂動計算式は最初のものとは変わらないが、動特性方程式に基づく基準反応度の計算が新たに加えられた。また、PERKYが内蔵していたデータファイルの編集機能を外し、入力データの簡素化を図った。これは、最近の計算機環境において、複数のファイルを1本化するなどの編集機能が整っていることを反映させたものである。

今回整備したPERKYは、高速炉核特性計算コードシステム“EXPARAM”を構成するプログラムとしてより使いやすいものとなるよう、データの系統的な受け渡しが行えるなどの改良が加えられている。

謝 辞

PERKYを開発して以来、高速炉実験装置(FCA)の実験解析を中心とした使用経験を基にプログラムの改良を行ってきた。実験解析およびプログラムの修正作業で助言および協力をいただいたFCA関係者に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 飯島 進、他：“PERKY”,JAERI-M 6993 (1977)
- (2) 飯島 進、加藤 雄一、高崎 謙一：多群拡散計算コード“POPLARS”(2002年、JAERI-Data/Code 公刊予定)
- (3) 中川 正幸、阿部 純一、佐藤 若英：“高速炉の核特性解析コードシステム”JAERI-M 83-066 (1983).
- (4) Tomlinson,L.:“Delayed neutron from fission”,AERE-R 6993(1972).

Appendix-A データファイルの配列

(A.1) 単位原子数あたりの反応度値の計算結果のデータ配列を以下に示す。

```

• Record 1    WRITE(30) NCYC, NUMAX1, IRSH, JMAX, IMAX, KBMAX, MATMAX,
              1(MATNSH(IS),IS = 1, 50), (MCCNSH(IS),IS = 1, 50),
              2(MCCSH(IIS,IS),IS = 1, 10),ISS=1, 50),
              3(ANNSH(IIS,IS),IS = 1, 10),ISS=1, 50)

• Record 2    WRITE(30) (X(J),J = 1, JMAX), (Y(I),J = 1, IMAX), (Z(KB),KB = 1, KBMAX)

• Record 3    DO 100 KBSH=1, KBMAX
              WRITE(30) (MAPSH(JM,IM),JM = 1, JMAX),IM=1, IMAX)
              100 CONTINUE

• Record 4    DO 200 IN=1, NCYC
              DO 200 N=1, NUMAX1
              WRITE(30) NPLN(IN),MEMAX, NUCL1(N)
              1(MEPTX(IK), MEPTY(IK), C(IK), F(IK), S(IK), DNL(IK),
              2DL(IK), DELK(IK), IK=1, MEMAX)
              200 CONTINUE

```

NCYC	反応度値を計算する面の総数（2次元計算では1）
NPLN(IN)	面の番号
NUMAX1	反応度値を計算する核種数
IRSH	ダミー
MATMAX	組成の数
MEMAX	計算したメッシュ点の総数
JMAX	X-方向のメッシュ数
IMAX	Y-方向のメッシュ数
KBMAX	Z-方向のメッシュ数
MEPTX(IK)	X-方向の点
MEPTY(IK)	Y-方向の点
C(IK)	捕獲反応項
F(IK)	核分裂項
S(IK)	散乱項
DNL(IK)	非漏洩項
DL(IK)	漏洩項
DELK(IK)	$\Delta K/K$

MAPSH 計算体系の空間メッシュごとの組成番号
 X(J)、Y(I)、Z(KB) 中性子束計算点
 KMAX エネルギー群数
 JMAX X-方向のメッシュ数
 IMAX Y-方向のメッシュ数
 KBMAX Z-方向のメッシュ数
 MATMAX Material の数

(A.2) 反応度値分布のエネルギーブレイクダウン結果の出力ファイル
 (セクション7の計算、IUNIT=32)

```

• Record 1      WRITE(32) NCYC, NUMAX1, KMAX, JMAX, IMAX, KBMAX, MATMAX
• Record 2      DO 400 IN=1, NCYC
                 WRITE(32) NPLN(IN), MEMAX,X), (MEPTX(I),I=1, MEMAX)
                 DO 100 N=1, NUMAX1
                 DO 30 KC=1, MEMAX
                 WRITE(32) KC, NUCL1(N), (CWG(IG),IG=1, KMAX),
                 1(FWG(IG),IG=1, KMAX), (SWG(IG), IG=1, KMAX),

```

2次元体系計算

```

                 DO 40 KG=1, MEMAX
                 WRITE(32)(DWG(IG),IG=1,KMAX)
                 40 CONTINUE

```

3次元体系計算

```

                 DO 50 IG =1, KMAX
                 WRITE(32)(DWG(IG),IG=1, MEMAX)
                 50 CONTINUE
                 100 CONTINUE
                 400 CONTINUE

```

NPLN(IN) ; 面の番号
 MEMAX ; 計算したメッシュ点の総数
 NUMAX1 ; 反応度を計算する核種数

MEPTX(IK) ; X-方向の点
 MEPTY(IK) ; Y-方向の点
 NUCL1(N) ; 核種のコード番号
 C(IK) ; 捕獲反応項
 F(IK) ; 核分裂項
 S(IK) ; 散乱項
 DNL(IK) ; Non-Leakage 項
 DL(IK) ; Leakage 項

(A.3) マクロ断面積を用いた反応度価値の計算結果の出力ファイル

```

• Record 1      WRITE(35) ICOM, IRMAX, KMAX
                DO 200 IR=1, IRMAX
                WRITE(35) IR, IREG(IR)
                DO 100 K=1, KMAX
  
```

#ICOM=0 の場合

```

                WRITE(35) K, TIG(K), SIG(K), YIG(K), BIG(K), ANLIG(K),
                1XLIG1(K), YLIG(K), ZLIG1(K), ALIG(K), SUMIG(K)
                100 CONTINUE
                WRITE(35) (TI(N),N=1,10)
                200 CONTINUE
  
```

#ICOM=1 の場合

```

                WRITE(35) K, FIG(K), CIG(K), SIG(K), BIG(K), ANLIG(K),
                1XLIG1(K), YLIG(K), ZLIG1(K), ALIG(K), SUMIG(K)
                100 CONTINUE
                WRITE(35) (TI(N),N=1,10)
                200 CONTINUE
  
```

#ICOM=2 の場合

```

                WRITE(35) K, YIG(K), FFIG(K), CIG(K), SIG(K), BIG(K),
                1ANLIG(K), XLIG1(K), YLIG(K), ZLIG1(K), ALIG(K), SUMIG(K)
                100 CONTINUE
  
```

WRITE(35) (TI(N), N=1, 11)

200 CONTINUE

ICOM 出力の指定 (セクション1で入力)
 IRMAX 反応度値を計算したゾーンの数
 KMAX エネルギー群数
 IREG(IR) ゾーンの組成番号
 TI(N) 反応度値の合計

#ICOM=0 の場合

K エネルギー群
 TIG(K) Total Removal 項
 SIG(K) 散乱項
 YIG(K) Yield 項
 BIG(K) バックリング項
 ANLIG(K) 非漏洩項の集計値
 XLIG1(K) X(R)-Leakage 項
 YLIG1(K) Y(Z)-Leakage 項
 ZLIG1(K) Z-Leakage 項
 ALIG(K) Leakage 項の集計値
 SUMIG(K) 反応度値の集計値

#ICOM=1 の場合

FIG(K) 核分裂項
 CIG(K) 捕獲反応項
 SCIG(K) 散乱項

[他は ICOM=0 と同じ]

#ICOM=2 の場合

FFIG(K) 核分裂項
 SCIG(K) 散乱項

[他は ICOM=0 と同じ] と同じ

(A.4) ミクロ断面積を用いた反応度値の計算結果の出力

- Record 1 WRITE(36) KMAX, NUMAX2, IRMAX, IREG1, IPAR
- Record 2 WRITE(36) (IREG(I), I=1, IRMAX), (NUCL2)(N), N=1, NUMAX2)

DO 210 I=1, IRMAX

WRITE(36) IREG(I)

WRITE(36) (NUCL2(N), (RWC(N, J), J=1, KMAX), TOT(N), N=1, NUMAX)

(以下、同一書式で捕獲、核分裂および散乱の順に出力し、さらに次の項を書き込む。

- (i) 散乱マトリックス
- (ii) yield
- (iii) D*B2(Buckling)
- (iv) non-leakage (total + scattering matrix + yeild + D*B2)
- (v) X(R)方向の leakage
- (vi) Y(Z)方向の leakage
- (vii) Z 方向の leakage (3次元のみ)
- (viii) total leakage
- (ix) $\Delta k/k$

Record 3 WRITE(36) ((COMPT(K,L), L=1,13),k=1,KMAX),(TX(L),L=1,13)

COMPT(K,L) : 群毎に加算された反応度価値

TX(L) : 群毎、核種毎に加算された反応度価値

- L =1 ; 全反応
- =2 ; 捕獲
- =3 ; 核分裂
- =4 ; 散乱
- =5 ; 散乱マトリックス
- =6 ; yield
- =7 ; D*B2
- =8 ; non-leakage
- =9 ; X(or R)-leakage
- =10 ; Y(or Z)-leakage
- =11 ; Z-leakage(only 3-dimensional cal.)
- =12 ; total leakage
- =13 ; $\Delta k/k$

210 CONTINUE

#Record 4 WRITE(36) (IREG(I), (SUMNI(N, I),N=1, NUMAX2), I=1, IRMAX)

SUMNI(N,I) : 核種ごとの反応度価値

#Record 5 WRITE(36) (SUM(N),N=1,NUMAX2)

SUM(N) : 反応度価値の和

#Record 6 WRITE(36) ((COMPT(K,L),L=1,13),K=1,KMAX),(TX(L),L=1,13)

エネルギー群毎の反応度価値

KMAX	エネルギー群
NUMAX2	核種の数
IRMAX	ゾーンの数
IREG1	計算した反応度価値の項目数 (標準値 13)
IREG(I)	ゾーンの組成番号
NUCL2(I)	核種のコード番号

(A.5) マクロ断面積入力データファイル

(1) 等方拡散係数を使用する場合

DO 10 M=1, MMAX

DO 10 K=1, KMAX

10 READ(IO) KK,MM,D, Σ_a , $\nu\Sigma_f$,($\Sigma_s^{KK \rightarrow KX}$,KX=1,KMAX), Σ_f , Σ_c , Σ_s

(2) 異方拡散係数を使用する場合

DO 10 M=1, MMAX

DO 10 K=1, KMAX

10 READ(IO) KK,MM,D₁, Σ_a , $\nu\Sigma_f$,D₂,D₃ ($\Sigma_s^{KK \rightarrow KX}$,KX=1,KMAX), Σ_f , Σ_c , Σ_s

D, D1, D2, D3 : 拡散係数

Σ_a : 吸収断面積 (以下の式で求めるので、散乱マトリックスが(n, 2n)反応を含む場合、本来の吸収断面積とは異なる値となる。

$$\Sigma_a^k = \Sigma_r^k - \sum_{kx=1}^{k \max} \Sigma_s^{k \rightarrow kx}$$

$\nu \Sigma_f$: 生成断面積

Σ_f : 核分裂断面積

Σ_c : 捕獲吸収断面積

Σ_s : 散乱断面積 (ただし、自群散乱には $1-\mu$ の補正がなされている)。

(A.6) ミクロ断面積のデータファイル

```

READ (IO) (MATN(J), J=1, 51)
MATN1=MATN(1)
DO 20 M=1, MATN1
  READ(IO) DUMMY
  READ(IO) KMAX, IDDS1, NCW,
    (MCC(N), N=1, NCW), (ANN(N), N=1, NCW)
  DO 10 K=1, KMAX
10 READ(IO) (SD(N), N=1, NCW), (ST(N), N=1, NCW),
    (DUMMY(N, I), N=1, NCW), I=1, 3), (SFN(N), N=1, NCW),
    (DUMMY(N, I), N=1, NCW), I=1, 5), (SF(N), N=1, NCW),
    (SC(N), N=1, NCW), (DUMMY(N), N=1, NCW),
    (SIJ(J, N), J=1, IDDS1), N=1, NCW)
20 CONTINUE

```

MATN(1) : 物質の数
MATN(2)~ : 物質番号
KMAX : エネルギー群数
IDDS1 : 減速散乱のエネルギー群 (自群散乱を含む)
NCW : 核種の数
MCC(N) : 核種のコード番号
ANN(N) : 原子数密度
SD(N) : $\bar{\sigma}_D = \{ f_i \sigma_i - (\bar{\sigma}_i - f_e \sigma_e) \} (1 - \bar{\mu}) + \bar{\sigma}_i - f_e \sigma_e$
ST(N) : $\bar{\sigma}_i = f_c \sigma_c + f_f \sigma_f + f_e \sigma_e + f_{in} \sigma_{in} - \sigma_{s,g \rightarrow g}$
SFN(N) : 生成断面積
SF(N) : 核分裂断面積
SC(N) : 捕獲吸収断面積
SIJ(J, N) : 散乱マトリックス

(A.7) 中性子束および体系情報ファイル (POPLARS の出力)

```

READ (IO) (T (L), L=1,36) DUX,JMAX,IMAX,KBMAX,DUX,DUX,KMAX,IRNMAX
READ (IO) (DJ (J), J=1, JMAX), (DI (I), I=1, JMAX), (DKB (KB), KB=1, KBMAX)
READ (IO) (DFJ (J), J=1, JMAX), (DFI (I), I=1, IMAX), (DFKB (KB), KB=1, KBMAX)
READ (IO) DUX, DUX,  $k_{\text{eff}}$ , (IBOUN (L), L=1,6)
DO 15    KB=1, KBMAX
DO 10    I=1, IMAX
10 READ (IO) (NXTR 1 (J), J=1, JMAX)
15 CONTINUE
DO 25 K=1, KMAX
DO 20 KB=1, KBMAX
20 READ (IO) (( $\phi$  (J, I, KB), J=1, JMAX), I=1, IMAX)
25 CONTINUE
DO 30 NZ=1, IRNMAX
30 READ (IO) NZONE, ( $\Phi$  (K,NZ), K=1, KMAX),VOL (NZ)
DO 45 K=1, KMAX
DO 40 KB=1, KBMAX
40 READ (IO) (( $\Psi$  (J, I, KB), J=1, JMAX), I=1, IMAX)
45 CONTINUE

```

T (L) ; タイトル (任意の英数字)

DUX ; 未使用データ (1.0)

JMAX ; x 方向のメッシュ数

IMAX ; y 方向のメッシュ数

KBMAX ; z 方向のメッシュ数

KMAX ; エネルギー群数

IRNMAX ; 計算モデルのゾーンの数

DJ (J),DI (I),DKB (KB) ; X、Y、Z それぞれの方向について、中心から各メッシュ領域境界までの距離 (cm)

DFJ (J),DFI (I),DFKB (KB) ; X、Y、Z それぞれの方向について、中心からメッシュ点までの距離(cm)

k_{eff} ; 実効増倍率

IBOUN (L) ; 計算モデルの X 方向、Y 方向および Z 方向の境界条件

NXTR1 (J) ; 各メッシュ領域の組成番号

ϕ (J,I,KB) ; 中性子束 (2次元計算では倍精度、3次元計算では単精度)

Φ (K,NZ) ; ゾーンごとの平均中性子束
 Ψ ; 随伴中性子束 (2次元計算では倍精度、3次元計算では単精度)
 VOL ; ゾーンごとの体積

(A.8) 遅発中性子計算用入力データファイル

```

    READ (IO) KMAX
    DO 15 KB=1, KBMAX
    DO 10 I=1, IMAX
10  READ (IO) MNCC (N), NUDF
15  CONTINUE
    DO 25 N=1, NUNC
    READ (IO) ((DNUF (K, JD, N), K=1, KMAX), JD=1, NUDF)
    READ (IO) ((DXKAI (K, JD, N), K=1, KMAX), JD=1, NUDF)
25  CONTINUE
  
```

MNCC(N) ; 遅発中性子を出す核種のコード番号
 DNUF (K, JD, N) ; $v_{D,j,g}^m$
 DXKAI (K, JD, N) ; $\chi_{D,j,g}^m$

Appendix-B JFS3、70 群定数と SLAROM による実効断面積の作成手順

燃料板および模擬物質の配列を考慮した板状セルモデルにおいて、体系計算に使用するセル平均実効断面積を作成する手順について述べる。実効断面積の作成は、群定数セット JFS3 および計算コード SLAROM を用いて行い、作成手順は大きく 2 つの部分に別けられる。最初に燃料板および模擬物質板ごとに、その中に含まれる核種ごとの実効マイクロ断面積が SLAROM に組み込まれた計算コード EXPANDA のルーチンを利用して準備される。次に、セル内の中性子束空間分布が衝突確率法により計算され、この中性子束を重み関数として、反応率を保存するかたちで断面積の平均化が行われる。

(1) 燃料板および模擬物質ごとの実効マイクロ断面積の作成

燃料板および模擬物質板に含まれる核種ごとの実効マイクロ断面積は自己遮へい因子 f_x と無限希釈断面積の積として計算される。

$$\bar{\sigma}_x = f_x \sigma_x^{\infty} \quad (\text{B.1})$$

JFS3 群定数セットは自己遮へい因子の表 (f-テーブル) を内蔵しており、次に示すバックグランド断面積をパラメータとして f-テーブルの値を内挿することにより、自己遮へい因子が求められる。

[核燃料核種 (重核) のバックグランド断面積]

$$\sigma_{0,k}^n = \sigma_{0,k}^{*n} + \frac{S_k}{4N_k^n V_k} \frac{a(1-C)}{1+(a-1)C} \quad (\text{B.2})$$

$$\sigma_{0,k}^{*n} = \sum_{m \neq n} N_k^m \sigma_{t,k}^m / N_k^n$$

S_k, V_k : 領域 k の表面積および体積

N_k^m : 領域 k、核種 m の原子数密度

C : ダンコフファクタ

a : ベル (レビン) ファクタ

[中重核のバックグランド断面積]

構造材および冷却材などの中重核の自己遮へい因子の計算には、セル平均のバックグランド断面積がもちいられる。

$$\sigma_0^n = \sum_{m \neq n} N^m \sigma_t^m / N^n \quad (\text{B.3})$$

[実効マイクロ断面積]

自己遮へい因子と無限希釈断面積から、次式により各種実効マイクロ断面積が計算される。

$$\bar{\sigma}_t = f_c \sigma_c + f_f \sigma_f + f_e \sigma_e + f_{in} \sigma_{in} \quad (B.4)$$

$$\bar{\sigma}_D = \{ f_t \sigma_t - (\bar{\sigma}_t - f_e \sigma_e) \} (1 - \bar{\mu}) + \bar{\sigma}_t - f_e \sigma_e \quad (B.5)$$

$$= (1 - \bar{\mu}) f_t \sigma_t + \bar{\mu} (f_c \sigma_c + f_f \sigma_f + f_{in} \sigma_{in})$$

$$\bar{\sigma}_{tr} = f_c \sigma_c + f_f \sigma_f + f_e \sigma_e (1 - \bar{\mu}) + f_{in} \sigma_{in} \quad (B.6)$$

$$\bar{\sigma}_s^{g \rightarrow g} = f_e \sigma_e (1 - \bar{\mu}) - f_r \sigma_r + \bar{\sigma}_{in}^{g \rightarrow g} \quad (B.7)$$

$$\bar{\sigma}_s^{g \rightarrow g+1} = f_r \sigma_r + \sigma_{in}^{g \rightarrow g+1} \quad (B.8)$$

Suffix

t; total cross section

c; capture cross section

f; fission cross section

e; elastic scattering cross section

in; inelastic scattering cross section

D; transport cross section for diffusion coefficient calculation

tr; transport cross section

s; scattering cross section

r; removal cross section in elastic scattering

高速炉の炉心では水素に代表される軽い核種を含まないことから、散乱による中性子の減速は少ない。そのため、70群程度の群構造では、弾性散乱の結果中性子は自群と(g+1)群に散乱され、(B.8)式が成立する。

(2) セル平均実効断面積の計算

衝突確率法により計算されたセル内の中性子束空間分布を重み関数として、断面積の平均化が行われる。

[ミクロ断面積の平均化]

$$\sigma_x^g = \frac{\sum_k \sigma_{x,k}^g N_k \phi_k^g V_k}{\sum_k N_k V_k} \times \frac{\sum_k \phi_k^g V_k}{\sum_k V_k} \quad (B.9)$$

(SLAROMのマニュアルの記述に誤りがあるので注意)

[マクロ断面積の平均化]

$$\Sigma_x^g = \sum_k \Sigma_{x,k}^g \phi_k^g V_k / \sum_k \phi_k^g V_k \quad (B.10)$$

[拡散係数の選択]

拡散係数は輸送断面積の逆数として求められる。

$$D_h^g = \left(\sum_i \sum_j \phi_i^g V_i P_{i,j,h}^g / \Sigma_{x,j}^g \right) / \left(3 \sum_i \phi_i^g V_i \right) \quad (\text{B.11})$$

この式で、 $P_{i,j}$ はセル内の領域 (i, j) の衝突密度

Σ_x は次に説明する ICASE で選択される輸送断面積

hは Benoist の式に基づく衝突確率の方向成分

(B.5)式および(B.6)式はいずれも輸送断面積を定義しているが、(B.5)式では(B.12)式で求めた全断面積の自己遮へい因子が使用されるのにたいして、(B.6)式では核分裂や捕獲吸収反応など個々の核反応の自己遮へい因子が使用される。自己遮へい因子は次の式で計算されるが、全断面積による自己遮へい因子が核データの処理の観点からより高い計算精度となると考えられることから EXPARAM では、(B.5)式から求めた拡散係数を標準値として使用する。

この場合

$$\bar{\sigma}_{tr} = f_c \sigma_c + f_f \sigma_f + f_e \sigma_e (1 - \bar{\mu}) + f_{in} \sigma_{in}$$

$$\bar{\sigma}_D \neq f_c \sigma_c + f_f \sigma_f + f_e \sigma_e (1 - \bar{\mu}) + f_{in} \sigma_{in}$$

となり、輸送断面積としてのバランスは取れないことになる。 σ_D は拡散方程式で精度良い計算を行うための断面積と考える必要がある。なお、輸送計算では断面積のバランスを厳密に取る必要があることから、SLAROMが輸送計算用に出力する輸送断面積は、(B.6)式の値である。

$$f_i = \frac{1}{\sigma_i^\infty} \left[\frac{\int \phi dE}{\int \frac{1}{\sigma_i} \phi dE} \right] \quad (\text{B.12})$$

[(n, 2n)反応と吸収断面積の変更処理]

拡散計算では、total removal cross section(Suffix: TR、大文字により輸送断面積 tr と区別)

$$\sigma_{TR}^g = \sigma_a^g + \sigma_{sr}^g \quad (\text{B.13})$$

Suffix

a; absorption cross section

sr; scattering removal cross section

が必要である。EXPARAM では、コードの中で σ_{TR} を

$$\sigma_{TR}^g = \sigma_a^g + \sum_{g' \neq g} \sigma_s^{g \rightarrow g'} \quad (\text{B.14})$$

として計算する。(n, 2n)反応を含んでいる場合には、

$$\bar{\sigma}_{sr}^g \leq \sum_{g' \neq g} \sigma_s^{g \rightarrow g'} \quad (\text{B.15})$$

となることから、(B.14)式では σ_{TR} を正しく求められない。これは、散乱除去断面積がエネルギー群 g で散乱する中性子の数（自群散乱を除く）を数える物理パラメータであるのに対して、散乱マトリックスは散乱の結果下のエネルギー群に落ちていく中性子の数を数える物理パラメータであるためである。

EXPARAM の計算では、(A.14)式で σ_{TR} を正しい値とするため、吸収断面積の値を(B.15)式の左辺と右辺の差だけ差し引いた値として入力することに注意する必要がある。

$$\sigma_a^{*,g} = \sigma_a^g - \left(\sum_{g' \neq g} \sigma_s^{g \rightarrow g'} - \sigma_{sr}^g \right) \quad (\text{B.16})$$

この吸収断面積の処理は、入力データの前処理コード JOINT で行われる。

Appendix-C 入力データのサンプル

厳密摂動計算による反応度価値の計算

PERKY

T2##D SLAROM

FCA XVII-1 XYZ70G.SODIUM VOID WORTH.3*3 1-2Z VOID EXACT PER.

001

1 70 18 0 1 0 0 2

003

1 0 0

18 18 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

T2##D SLAROM

70 29 0 1 0 1 2 3 3

T2##D SLAROM

T2##D SLAROM

SB##D SLAROM

PD##D SLAROM

UD##D SLAROM

SCR#D SLAROM

NUB SLAROM

DUB SLAROM

MTX SLAROM

T2##D SLAROM

T2##D SLAROM

T2##D SLAROM

T2##D SLAROM

T2##D SLAROM

T2##D SLAROM

T2##D SLAROM

T2##D SLAROM

T2V#D SLAROM

004

5

008

1 1 1 2 1 10

T2##D SLAROM

1 18 10 18

999

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
物質の量	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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 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 ²
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	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射量	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

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

(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、ヘクタ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す場合に限り表2のカテゴリリーに分類されている。
- E C閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ 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/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

- 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)
 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

多群拡散振動計算コードPERKY (2002年版)



古紙配合率100%
白紙度70%再生紙を使用しています