

JAERI-Data/Code  
96-037



モンテカルロ法による核燃料集合体  
燃焼計算コード  
—MKENO-BURN—

1996年12月

内藤俊孝・須山賢也・増川史洋・松本 潔・黒澤正義・金子俊幸\*

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

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

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 株原子力資料サービス

モンテカルロ法による核燃料集合体燃焼計算コード

— MKENO-BURN —

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

内藤 傲孝・須山 賢也・増川 史洋

松本 潔・黒澤 正義・金子 俊幸\*

(1996年11月20日受理)

近年の BWR 燃料集合体のような非均質性が強い体系において燃焼計算を精度よく行うには、  
非均質な効果を考慮して中性子スペクトルを正確に評価する事が重要である。

MKENO-BURN は、3次元モンテカルロ計算コード MULTI-KENO と、一次元燃焼計算コード UNITBURN の燃焼計算ルーチンを組み合せた燃焼計算コードである。

すなわち、MKENO-BURN は、MULTI-KENO により 3次元体系における中性子スペクトルを計算して1群断面積を作成し、任意の領域の燃焼計算を行う。これによって、3次元体系での燃焼計算が可能である。

本レポートは、MKENO-BURN の一般的記述と入力データの説明からなっている。

Burnup Code for Fuel Assembly by Monte Carlo Code

— MKENO-BURN —

Yoshitaka NAITO, Kenya SUYAMA, Fumihiro MASUKAWA,  
Kiyoshi MATSUMOTO, Masayoshi KUROSAWA and Toshiyuki KANEKO\*

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

(Received November 20, 1996)

The evaluation of neutron spectrum is so important for burnup calculation of the heterogeneous geometry like recent BWR fuel assembly.

MKENO-BURN is a multi dimensional burnup code that based on the three dimensional monte carlo neutron transport code "MULTI-KENO" and the routine for the burnup calculation of the one dimensional burnup code "UNITBURN".

MKENO-BURN analyzes the burnup problem of arbitrary regions after evaluating the neutron spectrum and making one group cross section in three dimensional geometry with MULTI-KENO. It enables us to do three dimensional burnup calculation. This report consists of general description of MKENO-BURN and the input data.

Keywords: MKENO-BURN, Monte Carlo Method, Burnup Calculation, Fuel Assembly, MULTI-KENO, UNITBURN

---

\* Japan Research Institute, LTD.

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.計算方式 .....	3
2.1 計算の流れ .....	3
2.2 体 系 .....	3
2.3 群 定 数 .....	6
2.3.1 自己遮蔽因子 .....	6
2.3.2 ダンコフ係数 .....	8
2.4 MULTI-KENO による中性子輸送計算の解法 .....	9
2.4.1 基礎式の表現 .....	9
2.4.2 MULTI-KENO を組み込む際の変更 .....	12
2.5 UNITBURN による燃焼計算 .....	12
3.計算コードの構成 .....	16
3.1 構成の概要 .....	16
3.2 プログラムの詳細 .....	26
3.2.1 シンボル・テーブル .....	26
3.2.2 整合配列 .....	32
3.2.3 ファイルの詳細 .....	32
4.計算環境 .....	36
4.1 UNIX を OS とする計算機上での実行 .....	36
4.2 リスタート計算 .....	37
5. MKENO-BURN INPUT DESCRIPTION .....	38
謝 辞 .....	65
参考文献 .....	66
付 錄	
A-1 計算例-PWR ピンセル体系に対する計算 .....	68
A-1.1 入力データ .....	68

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Calculation Method .....	3
2.1 Flow of Calculation .....	3
2.2 Geometry .....	3
2.3 Group Constants .....	6
2.3.1 Self Shielding Factor .....	6
2.3.2 Dancoff Correction Factor .....	8
2.4 Method of Calculation of Neutron Transport Equation in MULTI-KENO .....	9
2.4.1 Basic Equation .....	9
2.4.2 Modification of MULTI-KENO .....	12
2.5 Burnup Calculation by UNITBURN .....	12
3. Constitution of Code .....	16
3.1 General Constitution .....	16
3.2 Details of Code .....	26
3.2.1 Table of Symbols .....	26
3.2.2 Adjustable Array .....	32
3.2.3 Details of Files .....	32
4. Environment of Calculation .....	36
4.1 Execution on UNIX Machine .....	36
4.2 Restart Calculation .....	37
5. MKENO-BURN INPUT DESCRIPTION .....	38
Acknowledgment .....	65
References .....	66
Appendix	
A-1 Example of Calculation-PWR Pin Cell .....	68
A-1.1 Input Data .....	68

## 1 はじめに

原子炉内の核燃料の燃焼を計算するコードは今までに数多く開発されてきている。それらのコードは、燃料棒セルの燃焼計算コード、燃料集合体セルの燃焼計算コード及び炉心燃焼計算コードに分類される。燃料棒セル燃焼計算コードと燃料集合体セル燃焼計算コードは、多くの場合結合して使用される。すなわち、燃料集合体中には、多くの種類の燃料棒が含まれるが<sup>1</sup>、それら各種の燃料棒について、等価セル計算を行い、その結果求まる中性子束のエネルギー及び空間分布を用いて燃料棒セル平均巨視的断面積を求める。さらに、この断面積を用いて燃料集合体内の中性子束を計算し、各燃料棒の燃焼分布を求める。以上が現在通常に行われている燃料集合体セル燃焼計算の方法である。

この方法で特に問題となる点は、燃料棒セル計算を行うに当たって境界条件を如何に設定するかということである。着目する燃料棒が強い吸収材を含んだり、近傍に強い吸収材を含む物質があったり、減速材領域がある場合には、燃料棒セルの境界条件の設定が困難である。一方、近年計算機の発達が目覚ましく、モンテカルロ法に基づく中性子輸送計算コードが実用の段階に至っている。また、並列計算機の発達は、モンテカルロ法による計算時間を大幅に短縮させることができ、今後モンテカルロ法により現実的な時間で炉内の中性子束分布や出力分布を算出することが容易になってくる。モンテカルロ法を用いれば、複雑な幾何形状も形状の近似なしに計算できるようになり、燃料集合体のような燃料棒の配列の系を取り扱えるようになる。以上の事から、モンテカルロコードを使用する事で、計算を行う形状を正確に取り入れた燃焼計算コードの開発が、現実のものとなってきていると考えられる。本レポートは、そのような考えに基づいた、モンテカルロ中性子輸送計算コードと燃焼計算コードを組み合わせた燃焼計算コードシステムの開発について述べる。

本システムの構想は 10 年近く前から存在し、実際に使用されてきたが、開発当時は大型計算機上でバッチジョブを投入して稼働させるしかなく、大型計算機に付きものの ファイル I/O の制限、そしてなによりも CPU 時間の制限によって使い易いコードとはならなかった。そのために、開発が遅れていたのであるが、近年低価格化と高速化が著しく、今後の計算コード開発において主に使用されると考えられる、Engineering Work Station (EWS) 上で稼働す

<sup>1</sup>特に BWR 燃料集合体では、X-Y 方向の濃縮度分布に加えて Z 軸方向にも、濃縮度分布が付けられており、設計が複雑になっている

るようとした事により、それらの制限から解放された。またこの事は本コードが EWS を使用している他の多くの研究開発機関においても使用される機会を増す事にもつながる。

中性子輸送計算用モンテカルロ計算コードとして多くの計算コードが開発されているが、固有値問題の中性子輸送計算を行うことのできる公開コードの代表的なものとして KENO-IV[1] がある。このコードは臨界安全関連の分野で広く使用されてきたコードである<sup>2</sup>。ただし、KENO-IV コードは、BWR の場合のように制御棒が燃料棒の並びとずれているような形状の表現が困難であるので、KENO-IV を改良した MULTI-KENO コード [2] を用いることとした。また、燃焼計算のルーチンは、原研で開発された単位燃料棒セルに対する燃焼計算コード UNITBURN[3] を利用した。そして、計算に用いる多群定数ライブラリは、原研で整備した MGCL (Multi-Group Constant Library)[4, 5] を使用している。

本レポートでは、計算コードの概要とその入力マニュアルを提供する。

---

<sup>2</sup> 開発当時は KENO-IV が最新であった。現在では KENO-Va や KENO-VI が利用可能である。

## 2 計算方式

### 2.1 計算の流れ

計算の流れの概要を Fig. 2.1 に示す。計算を行うに当たって必要な情報は、計算対象に関する体系情報、中性子群定数情報、及び燃焼計算のための運転履歴である。体系情報としては、幾何形状情報と各領域の核種組成情報がある。以上の情報を用いて、MKENO-CHK モジュールによって前処理を行い、MGCL-KB というワークファイルを作成しておく。そして、それを用いて MKENO-BURN モジュールを実行する。MKENO-BURN の中では、中性子輸送計算をモンテカルロコード MULTI-KENO により行い、その結果求まる領域毎の中性子束分布を用いて、領域毎の中性子反応率を計算し、出力分布及び燃焼に伴う核種組成の変化を計算する。

### 2.2 体系

体系情報は MULTI-KENO コードの要求に合わせて与える必要がある。この際の特徴は、計算対象をいくつかの SUPER-BOX とよばれる領域に分割し、さらにこの SUPER-BOX を複数の BOX とよばれる小領域に分割することである。SUPER-BOX 内の BOX は、Fig. 2.2 に示すように X-Y 面について、X 軸及び Y 軸に平行な直線で分割されなければならない。もちろん、MULTI-KENO コードは 3 次元コードなので、Z 方向の分割に対する情報も必要である。

BOX 内はさらにいくつかの ZONE とよばれる最小領域に分割される。通常、燃料集合体及びセル計算においては、減速材、燃料被覆管及び燃料に分割されるが、燃料領域内の燃焼度分布による核種組成の分布を求める場合には、燃料領域をさらに多くの ZONE に分割する必要がある。一例として燃料中に中性子吸収材のガドリニアを入れる場合が挙げられる。ガドリニアは中性子吸収断面積が特に大きいため、燃料表面近傍のガドリニウムと熱中性子の反応が燃焼初期には特に大きく、燃焼の進行に伴い、中性子との反応が燃料棒の中心へ移行してゆく。このような現象を追跡するためには、燃料領域を細かく分割して燃焼計算を行う必要がある。以上の計算には各領域内核種組成を指示する必要がある。

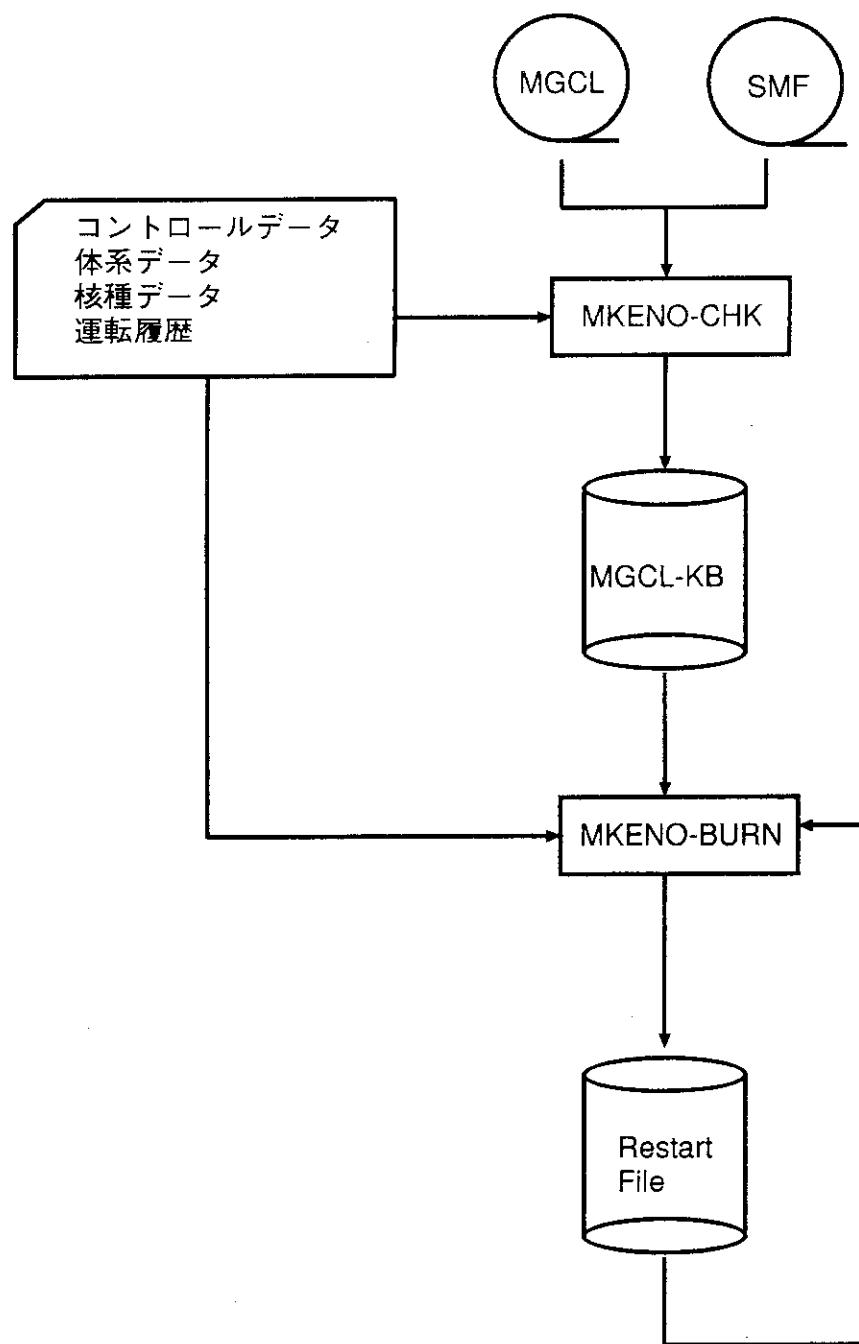


Figure 2.1: MKENO-BURN の計算の流れ

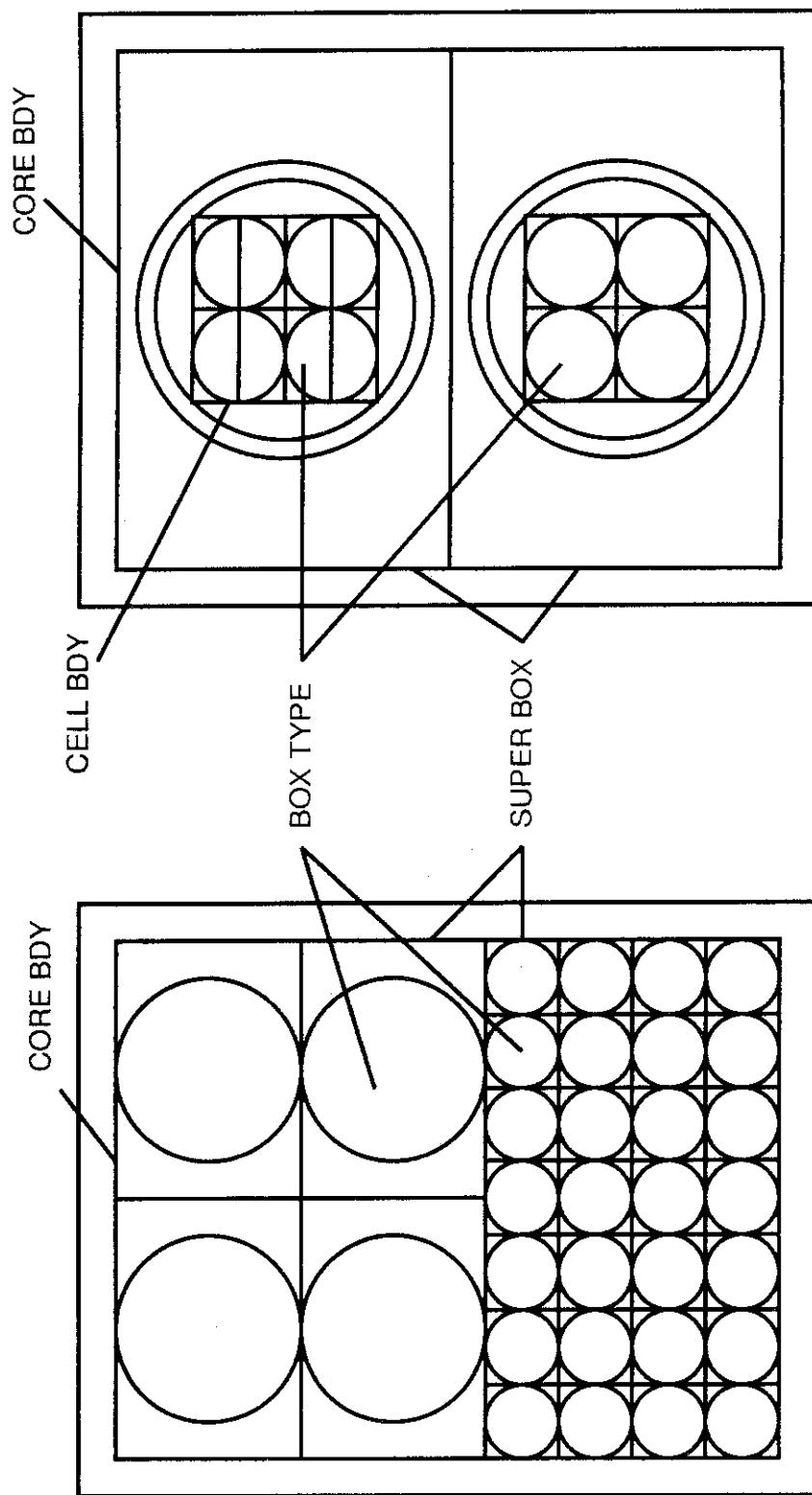


Figure 2.2: MKENO-BURN に入力する幾何形状情報

## 2.3 群定数

### 2.3.1 自己遮蔽因子

中性子輸送計算のためには、各領域内の核種個数密度に応じて、巨視的断面積を算出する必要がある。核種個数密度は、燃焼の進行に伴って変化するので、燃焼ステップ毎に巨視的断面積を更新しなければならない。巨視的断面積は実効微視的断面積と核種個数密度の積として表現される。

微視的断面積としては、原研で整備された 26 群の MGCL (Multi-Group Constant Library)[4] を用いる。この 26 群 MGCL(MGCL-J3(G26))[5] は、核データライブラリ JENDL-3[6] を MGCL-ACE コードシステム [5] で処理して作成したものである。MGCL は、核種毎、反応毎の無限希釈多群断面積、Bondarenko タイプの自己遮蔽因子

$$f(\sigma_0, T)$$

等を内蔵している。ここで、 $\sigma_0$  はバックグラウンド断面積であり、式 (2.1) で表現される。

$$\begin{aligned} \sigma_{0j} &= \frac{1}{N_j} \left( \sum_{i \neq j} N_i \sigma_t^i + g(C) \frac{(1 - C)}{l} \right) \\ g(C) &= \frac{a}{1 + (a - 1)C} \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここで、

$N_j$  核種  $j$  の個数密度

$\sigma_t$  全断面積

$l$  燃料の光学的平均弦長

$C$  ダンコフ係数

$a$  ベル補正因子 [7]

実効微視的断面積は式 (2.2) で表現される。

$$\sigma_{eff}^j = \sigma_\infty^j \cdot f(\sigma_0^j, T) \quad (2.2)$$

ここで、 $\sigma_\infty^j$  は無限希釈断面積である。

$\sigma_\infty^j$  は燃焼に伴った変化はしないが、 $\sigma_0^j$  が変化するので、 $\sigma_{eff}^j$  も燃焼に伴って変化する。燃焼に伴う実効微視的断面積の変化は式 (2.1) 及び式 (2.2) を用いて計算する。

自己遮蔽因子  $f(\sigma_0, T)$  は  $\sigma_0$  及び温度  $T$  をパラメータとしたテーブル (f-table) で与えられており,  $\sigma_0$  が  $0, 10^{-1}, 1, 10, 30, 10^2, 300, 10^3, 3 \times 10^3, 10^4, 10^5, 10^8$  の 12 点で与えられる。また温度  $T$  は  $300K, 540K, 900K, 1200K, 2400K$  の 5 点である。

式 (2.1) により算出された  $\sigma_0$  を用いて自己遮蔽因子を次のように f-Table を内挿して求め る。 $\sigma_0$  の変化に伴う自己遮蔽因子は式 (2.3) で表現できると仮定する。

$$f(\sigma_0) = C \tanh(D(\log \sigma_0 + E)) + F \quad (2.3)$$

$\sigma_0$  が 0 及び  $\infty$  のとき,  $f$  の値は次のようになる。

$$\begin{aligned} f(0) &= -C + F \\ f(\infty) &= C + F \end{aligned} \quad (2.4)$$

したがって,

$$\begin{aligned} F &= \frac{f(\infty) + f(0)}{2} \\ C &= \frac{f(\infty) - f(0)}{2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

となる。

$\sigma_0$  が  $\sigma_{01}$  と  $\sigma_{02}$  の間にあるとすると,  $D$  及び  $E$  は,  $(\sigma_{01}, f_1)$  及び  $(\sigma_{02}, f_2)$  を通るように以下の式で定められる。

$$D = \frac{\tanh^{-1}((f_2 - F)/C) - \tanh^{-1}((f_1 - F)/C)}{\log(\sigma_{02}/\sigma_{01})} \quad (2.6)$$

$$E = \frac{\tanh^{-1}((f_1 - F)/C)}{D} - \log(\sigma_{01}) \quad (2.7)$$

以上の  $C, D, E$  及び  $F$  を用いて、式 (2.3) から  $f(\sigma_0)$  を求める。

f-Table の温度内挿は、次の式を用いて行う。

$$\begin{aligned} f(T) &= f(T_1)(f(T_2)/f(T_1))L(T) \\ L(T) &= \log(T/T_1)/\log(T_2/T_1) \end{aligned} \quad (2.8)$$

ただし、 $T_1 < T < T_2$

f-Table の内挿に関しては、温度内挿を先に行い、 $\sigma_0$  内挿をその後に行っている。また、二次元データの散乱マトリクスについては、温度内挿、 $\sigma_0$  内挿いずれも行っていない。中性子散乱については、全散乱断面積  $\sigma_s$  と散乱マトリクス  $M(g, g')$  との積として次式のように表現している。

$$\sigma_s(g, g') = \sigma_s(g) \cdot M(g, g') \quad (2.9)$$

$\sigma_s(g)$  については、温度及び  $\sigma_0$  の内挿を行っている。 $M(g, g')$  については、MGCL 中に含まれる温度テーブルで、最も近い温度データを使用する。

### 2.3.2 ダンコフ係数

式(2.1)におけるダンコフ係数は、減速材中にある燃料の配列において、中性子が一様かつ等方に発生すると考えて、燃料で発生した中性子が燃料および減速材中でも一度も衝突することなく他の燃料表面に到達する確率である。このダンコフ係数は、燃料表面から余弦分布にしたがって発生した中性子が減速材中において一度も衝突する事なく他の燃料表面に到達する確率として以下の式で表される[8][9]。

$$C = \frac{\int_S \int_{\Omega(n \cdot \Omega > 0)} (n \cdot \Omega) \exp(-\Sigma_m R(S, \Omega)) dS d\Omega}{\int_S \int_{\Omega(n \cdot \Omega > 0)} (n \cdot \Omega) dS d\Omega} \quad (2.10)$$

ここで、

- |                |                    |
|----------------|--------------------|
| $R(S, \Omega)$ | 燃料表面間の距離           |
| $\Sigma_m$     | 減速材の全断面積           |
| $n$            | 燃料表面外向き法線方向の単位ベクトル |
| $\Omega$       | 中性子の単位速度ベクトル       |
| $dS$           | 燃料表面積の微少要素         |

解析的な式を使用する方法として深井の式([10])や Sauer による研究[11]があるが、本 MKENO-BURN においてはモンテカルロ法に基づいた方法を使用する。モンテカルロ法によってダンコフ係数を求める計算コードに MCDAN[12] がある。

このコードは、棒状燃料の正方格子配列および球状燃料にたいして適用可能である。しかしながらこのコードでは、

1. 燃料棒の軸方向への中性子の飛行が考慮されていない。
2. 燃料領域を表わす円あるいは球内の半径方向に一様乱数を使用して中性子発生点を決めているが、これによって燃料表面から余弦分布する保証は無い。

と言う問題点が指摘されている[13]。そこで、それらに対する修正と燃料棒が考えている体系の端に置かれている場合についても計算可能なように修正されたプログラム DANKE[13]を MKENO-BURN に組みこみ、それによってダンコフ係数を計算する事とした。

## 2.4 MULTI-KENO による中性子輸送計算の解法

### 2.4.1 基礎式の表現

MULTI-KENO で使用されている計算方式の概要を紹介する。このコードは、KENO-IV を基にして開発されており、基本的な解法は同じである。

Boltzmann の中性子輸送方程式は、次のように書かれる。

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(X, E, \Omega, t)}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \Phi(X, E, \Omega, t) + \Sigma_t(X, E, \Omega, t) \cdot \Phi(X, E, \Omega, t) = S(X, E, \Omega, t) + \int_{E'} \int_{\Omega'} \Sigma_s(X, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega, t) \cdot \Phi(X, E', \Omega', t) d\Omega' dE' \quad (2.11)$$

ここで、

$\Phi(X, E, \Omega, t)$ : 時刻  $t$  に、位置  $X$  において、方向  $\Omega$  の単位立体角について、エネルギー  $E$  における単位エネルギー当りの、エネルギー  $E$  に対応する速度  $v$  で移動している中性子束（中性子 /  $\text{cm}^2 / \text{sec}$ ）。

$\Sigma_t(X, E, \Omega, t)$ : 時刻  $t$ 、方向  $\Omega$ 、位置  $X$  における、媒体の巨視的全断面積 ( $\text{cm}^{-1}$ )。

$\Sigma_s(X, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega, t)$ : 方向  $\Omega'$ 、エネルギー  $E'$  から方向  $\Omega$ 、エネルギー  $E$  への散乱についての、位置  $X$  における媒体の巨視的微分散乱断面積 ( $\text{cm}^{-1}$ )。

$S(X, E, \Omega, t)$ : 方向  $\Omega$  の単位立体角、エネルギー  $E$  における単位エネルギー当りの、位置  $X$ 、時刻  $t$  において発生する中性子（中性子 /  $\text{cm}^2/\text{sec}$ ）。ただし、散乱によるソースを除く。

外部中性子源, 散乱, 核分裂による寄与を,  $q(X, E, \Omega, t)$  とおき, 物質が等方である事を仮定して多群化した形式で書くと, 以下の式(2.12)のように変形できる。

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \Phi_g(X, \Omega, t)}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \Phi_g(X, \Omega, t) + \Sigma_{t_g}(X) \Phi_g(X, \Omega, t) = q_g(X, \Omega, t) \quad (2.12)$$

ここで,  $\Sigma_{t_g}(X)$  は, 以下の式で表わされる。

$$\Sigma_{t_g}(X) = \frac{\int_{\Delta E_g} \Sigma_t(X, E) \Phi(X, E, \Omega, t) dE}{\int_{\Delta E_g} \Phi(X, E, \Omega, t) dE} \quad (2.13)$$

時間に依存しない場合を想定しているので, 式(2.12)から  $\Phi_g$  は以下のように表現される。

$$\Phi_g(X, \Omega) = \int_0^\infty q_g(X - R\Omega, \Omega) \exp \left( - \int_0^R \Sigma_{t_g}(X - R'\Omega) dR' \right) dR \quad (2.14)$$

この時点で問題は固有値問題となって, 外部中性子源が無ければ, 中性子源の項  $q_g$  は以下で表される。

$$q_g(X, \Omega) = \sum_{g'} \int \Phi_{g'}(X, \Omega') \Sigma_s(X, g' \rightarrow g, \Omega' \cdot \Omega) d\Omega' + \frac{1}{k} Q'_g(X, \Omega) \quad (2.15)$$

ここで,  $\Sigma_s(X, g' \rightarrow g, \Omega' \cdot \Omega)$  は,

$$\Sigma_s(X, g' \rightarrow g, \Omega' \cdot \Omega) = \frac{\int_{\Delta E_g} \int_{\Delta E_{g'}} \Sigma_s(X, E' \rightarrow E, \Omega' \cdot \Omega) \Phi(X, E', \Omega') dE' dE}{\int_{\Delta E_{g'}} \Phi(X, E', \Omega') dE'} \quad (2.16)$$

また,  $Q'_g(X, \Omega)$  は核分裂による中性子源の項であって, 以下の式で表わされる。

$$Q'_g(X, \Omega) = \frac{1}{4\pi} \sum_{g'} \int_{\Omega'} d\Omega' \Phi_{g'}(X, \Omega') \chi(X, g' \rightarrow g) \nu_{g'}(X) \Sigma_{f_{g'}}(X) \quad (2.17)$$

よって, 式(2.15)と式(2.17)を式(2.14)に代入して変形すると,

$$\begin{aligned}
\Phi_g(X, \Omega, t) = & \int_0^\infty dR \exp \left( - \int_0^R \Sigma_{t_g}(X - R' \Omega) dR' \right) \cdot \\
& \left\{ \sum_{g'} \frac{1}{k} \int_{\Omega'} \nu_{g'}(X - R\Omega) \Sigma_{f_{g'}}(X - R\Omega) \chi(X - R\Omega, g' \rightarrow g) \Phi_{g'}(X - R\Omega, \Omega') \frac{d\Omega'}{4\pi} + \right. \\
& \left. \sum_{g'} \int_{\Omega'} d\Omega' \Sigma_{t_{g'}}(X - R\Omega) \Phi_{g'}(X - R\Omega, \Omega') \frac{\Sigma_s(X - R\Omega, g' \rightarrow g, \Omega' \cdot \Omega)}{\Sigma_{t_{g'}}(X - R\Omega)} \right\}
\end{aligned} \tag{2.18}$$

となる。KENO コードでは式(2.18)を以下のように変形して使用している。

$$\begin{aligned}
& \frac{\nu_g(X) \Sigma_{f_g}(X)}{\Sigma_{t_g}(X)} \Sigma_{t_g}(X) \Phi_{g,n}(X, \Omega) = \\
& \frac{\nu_g(X) \Sigma_{f_g}(X)}{\Sigma_{t_g}(X)} \Sigma_{t_g}(X) \int_0^\infty dR \exp \left( - \int_0^R \Sigma_{t_g}(X - R' \Omega) dR' \right) \cdot \\
& \left\{ \frac{1}{k} \sum_{g'} \int_{\Omega'} d\Omega' \frac{\nu_{g'}(X - R\Omega) \Sigma_{f_{g'}}(X - R\Omega)}{\Sigma_{t_{g'}}(X - R\Omega)} \chi(X - R\Omega, g' \rightarrow g) \Sigma_{t_{g'}}(X - R\Omega) \Phi_{g',n-1}(X - R\Omega, \Omega') \frac{1}{4\pi} \right. \\
& \left. + \sum_{g'} \int_{\Omega'} d\Omega' \Sigma_{t_{g'}}(X - R\Omega) \Phi_{g',n}(X - R\Omega, \Omega') \frac{\Sigma_s(X - R\Omega, g' \rightarrow g, \Omega' \cdot \Omega)}{\Sigma_{t_{g'}}(X - R\Omega)} \right\}
\end{aligned} \tag{2.19}$$

ここで,  $n$  は  $n$  番目の世代を示している。この式を解くことによって, KENO コードは体系の増倍率や反応率をもとめる。

尚, KENO コードでは, 散乱後の中性子は全て  $P_1$  近似における平均角度の方向へ行くと仮定している。すなわち,

$$\begin{aligned}
\Sigma_s(\mu) &= \sum_{n=0}^l C_n P_n(\mu) \\
&= C_0 + C_1 \mu
\end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
\bar{\mu}_{i,j,k} &= \frac{\int_{-1}^1 \mu \Sigma_{s_{i,j,k}}(\mu) d\mu}{\int_{-1}^1 \Sigma_{s_{i,j,k}}(\mu) d\mu} \\
&= \frac{C_1}{3C_0}
\end{aligned} \tag{2.21}$$

$\bar{\mu}_{i,j,k}$  は, 物質  $k$  においてエネルギー群  $i$  から  $j$  に散乱する中性子の平均の散乱角度を表わしている。

### 2.4.2 MULTI-KENO を組み込む際の変更

MULTI-KENO を本 MKENO-BURN に組み込むに当たり、以下の修正を行った。これは、不必要的メモリの使用を減少させるためである。

1. MULTI-KENO のリスタート機能は使用できない。これは、MKENO-BURN の MAIN モジュールに燃焼度毎のリスタート機能を持たせているためである。
2. 一般形状入力を削除した。これは、一般形状処理部分及び処理ルーチンを削除したためである。
3. 大型機用の作図処理機能を削除した。
4. 入出力機番について、入力 ( $5 \rightarrow 95$ )、出力 ( $6 \rightarrow 96$ ) と変更した。
5. 中性子束分布、固有値、漏洩量をファイルへ出力するように変更した。
6. モジュール間の作業領域を共通にするため、作業領域を引数で渡すようにした。

### 2.5 UNITBURN による燃焼計算

燃焼計算は、UNITBURN[3] のルーチンを利用して行う。解く方程式は次の式である。

$$N_i = -\lambda_i N_i^0 + Y_i + \sum_{j \neq i} \alpha_{j \rightarrow i} \lambda_j N_j \quad (2.22)$$

ここで、

- |                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| $N_i$                      | 核種 $i$ の新しい個数密度             |
| $\lambda_i$                | 核種 $i$ の崩壊係数                |
| $N_i^0$                    | 核種 $i$ の燃焼前の個数密度            |
| $Y_i$                      | 核種 $i$ の核分裂による生成量           |
| $\alpha_{j \rightarrow i}$ | 核種 $j$ の崩壊により 核種 $i$ へ行く分岐比 |

ただし、 $Y_i$  は以下の式を用いて計算する。

$$Y_i = \sum_{j=1}^{J F M A X} \Gamma(j, i) \cdot N_j \cdot \sigma_{fj} \cdot \Phi \cdot 10^{-26} \quad (2.23)$$

ここで、

JFMAX = 7 (U,Pu の 7 核種)

 $\Gamma(j, i)$  核種  $j$  が核分裂して生成される核種  $i$  の核分裂収率 (%) $\Phi$  絶対中性子束 $\sigma_{fj}$  核種  $j$  の核分裂断面積また,  $\lambda_i$  は以下のように求めている。

$$\begin{aligned}\lambda_i &= \lambda_i^* + \lambda_i^N \\ \lambda_i^N &= \sigma_{ci} \cdot \Phi \cdot *10^{-24}\end{aligned}\quad (2.24)$$

ここで,

 $\lambda_i^*$  入力された崩壊定数 $\sigma_{ci}$  核種  $i$  の中性子捕獲断面積 $\alpha_{j \rightarrow i}$  は以下の 2 つの場合に分けて求めている。(1) 核種  $j$  の核種  $i$  への移行が,  $(n, \gamma)$  反応によらない場合 (入力データでは, IFLAG1 および IFLAG2 が 0 の場合)

$$\alpha_{j \rightarrow i} = \alpha_{j \rightarrow i}^* \cdot \frac{\lambda_j^*}{\lambda_j} \quad (2.25)$$

(2) 核種  $j$  の核種  $i$  への移行が,  $(n, \gamma)$  反応による場合 (入力データでは, IFLAG1 または IFLAG2 が 1 の場合)

$$\alpha_{j \rightarrow i} = \alpha_{j \rightarrow i}^* \cdot \frac{\lambda_j^N}{\lambda_j} \quad (2.26)$$

ただし,  $\alpha_{j \rightarrow i}^*$  は入力された核種  $j$  から核種  $i$  への分岐比である。

式 (2.23) 及び 式 (2.24) 式で使用する核分裂及び中性子捕獲断面積は、その領域の中性子エネルギー・スペクトルを用いて 1 群断面積に縮約したものである。モンテカルロ法によって求められた中性子束は、各領域毎に平均される。

$$\Phi_R^g = \frac{\sum_{M \in R} \Phi_M^g V_M}{\sum_{M \in R} V_M} \quad (2.27)$$

この  $\Phi_R^g$  を用いて微視的断面積は、少数群に縮約される。

$$\sigma_x^g = \frac{\sum_{g \in G} \sigma_x^g \Phi_x^g}{\sum_{g \in G} \Phi_x^g} \quad (2.28)$$

ここで,  $\sigma_x$  は  $\sigma_a, \sigma_f, \nu\sigma_f, \sigma_t, \sigma_{tr}$  を意味する。ただし,

$$\sigma_{tr} = \sigma_t - \sum_{g'} P_1(g \rightarrow g') / 3 \quad (2.29)$$

である。また,  $P_0, P_1$  の縮約は次の式で行う。

$$\sigma_{G1 \rightarrow G2} = \frac{\sum_{g_1 \in G_1} \left( \sum_{g_2 \in G_2} \sigma_{g_1 \rightarrow g_2} \right) \cdot \Phi^{g1}}{\sum_{g_1 \in G_2} \Phi^{g1}} \quad (2.30)$$

領域毎の微視的断面積の縮約は次の式による。

$$\sigma_R = \frac{\sum_{z \in R} N_z \sigma_z \Phi_z V_z \sum_{z \in R} V_z}{\sum_{z \in R} N_z V_z \sum_{z \in R} \Phi_z V_z} \quad (2.31)$$

Table 2.1 に MKENO-BURN で取り扱っている核種を示す。ここには、アクチニド核種 31 種と核分裂生成核種 32 種及び疑似核種 (Lumped FP) の計 64 核種が示されている。Th-230 ~ Cm-245 までのアクチニド核種の崩壊データには、JDDL[14] が用いられており、MKENO-BURN のアクチニド核種生成崩壊チェーンに取り込まれている反応を Table 2.2から Table 2.6に、生成崩壊チェーンを Fig. 2.3 に示す。

核分裂により発生する生成物 (FP) の核種の数は、2000 余りの多くになる。これらの核種の生成崩壊量を原子炉の炉心計算の際求めるることは、不可能に近い。そこで、原子炉の燃焼計算では、中性子の反応度に大きく影響する核種のみを計算の対象とし、その他の FP はまとめて Lumped FP として擬似核種にする。FP は原子炉の中では中性子吸収材として作用する。吸収量の多い核種は、燃焼の進行に伴って変化する。これらを検討し、反応度効果の大きな核種を含む燃焼チェーンを選定する。選定された FP の燃焼チェーンを Fig. 2.3 に示す。この中で、Lumped FP は仮想的な核種であり、中性子吸収については  $1/v$  断面積を仮定している。また、中性子散乱については、天然 Mo と同じとしている。

Table 2.1: MKENO-BURN で取り扱う核種

No.	Nuclide	No.	Nuclide	No.	Nuclide
1	Th-230	32	Gd-155	63	Eu-155
2	Th-232	33	Gd-156	64	LUMP-FP
3	Pa-231	34	Gd-157		
4	Pa-233	35	Gd-158		
5	U-232	36	Tc-099		
6	U-233	37	Ru-102		
7	U-234	38	Rh-103		
8	U-235	39	Rh-105		
9	U-236	40	Cd-113		
10	U-237	41	I-131		
11	U-238	42	Xe-131		
12	Np-237	43	Xe-135		
13	Np-238	44	Cs-133		
14	Pu-236	45	Cs-134		
15	Pu-237	46	Ce-144		
16	Pu-238	47	Nd-143		
17	Pu-239	48	Nd-144		
18	Pu-240	49	Nd-145		
19	Pu-241	50	Nd-146		
20	Pu-242	51	Pm-147		
21	Pu-243	52	Pm-148		
22	Pu-244	53	Pm-148m		
23	Am-241	54	Pm-149		
24	Am-242	55	Sm-148		
25	Am-242m	56	Sm-149		
26	Am-243	57	Sm-150		
27	Cm-241	58	Sm-151		
28	Cm-242	59	Sm-152		
29	Cm-243	60	Sm-153		
30	Cm-244	61	Eu-153		
31	Cm-245	62	Eu-154		

### 3 計算コードの構成

#### 3.1 構成の概要

MKENO-BURN コードは, Fig. 3.1に示すように、大別すると 2つのステップに分けられている。第 1 ステップ (MKENO-CHECK) では入力データの編集およびチェックを行い、第 2 ステップ (MKENO-BURN) では燃料集合体内のミクロ・マクロ断面積の計算、モンテカルロ計算、燃焼計算および縮約計算を行う<sup>3</sup>。

#### 第 1 ステップ (MKENO-CHECK)

##### INPUT

入力データは、体系の幾何形状データ、体系内の構成核種と個数密度、多群定数ライブラリ、エネルギー群に関する情報である。このモジュールでは、入力データの処理、基本変数のアドレス計算、MGCL のコア内への入力処理及び入力データのプリントアウトを行う。

##### KENO-INPUT

INPUT で読み込んだ体系データのチェックを行う。

##### MGCL 処理

MGCL,SMF ファイルから微視的断面積と散乱マトリックスを読み込み、MKENO-BURN 用の MGCL ファイル (MGCL-KB) を作成する。

#### 第 2 ステップ (MKENO-BURN)

##### INPUT

入力データは、体系の幾何形状データ、体系内の構成核種と個数密度、多群定数ライブラリ、エネルギー群、燃焼計算及び縮約計算に関する情報である。このモジュールでは、入力データの処理、基本変数のアドレス計算、MGCL のコア内への入力処理及び入力データのプリントアウトを行う。

##### MGCL 処理

体系内の各核種の個数密度、温度から、微視的断面積、巨視的断面積を計算する。

##### MULTI-KENO

---

<sup>3</sup> このように、2 ステップ となっているのは、モンテカルロ計算のための体系入力データが複雑なため、体系データのチェックプログラムが本体プログラムとは独立して作成されていたためである。

Table 2.2: MKENO-BURN で取り扱う actinide 同位体反応 -1

親核種	娘核種	反応
Pa-230	Th-230	$\beta^+$ , EC
U-234	Th-230	$\alpha$
U-235	Th-231	$\alpha$
Th-230	Th-231	( $n, \gamma$ )
Th-232	Th-231	( $n, 2n$ )
U-236	Th-232	$\alpha$
Th-232	Th-233	( $n, \gamma$ )
U-238	Th-234	$\alpha$
Pa-231	Pa-230	( $n, 2n$ )
Th-231	Pa-231	$\beta^-$
U-231	Pa-231	$\beta^+, EC$
Np-235	Pa-231	$\alpha$
Pa-231	Pa-232	( $n, \gamma$ )
Pa-233	Pa-232	( $n, 2n$ )
Th-233	Pa-233	$\beta^-$
Np-237	Pa-233	$\alpha$
Th-234	Pa-234	$\beta^-$
Pa-234m	Pa-234	IT
Pa-233	Pa-234	( $n, \gamma$ )
Th-234	Pa-234m	$\beta^-$
Pa-230	U-230	$\beta^-$
Pu-235	U-231	$\alpha$
U-232	U-231	( $n, 2n$ )
Pa-232	U-232	$\beta^-$
Pu-236	U-232	$\alpha$
U-233	U-232	( $n, 2n$ )
Pa-233	U-233	$\beta^-$

Table 2.3: MKENO-BURN で取り扱う actinide 同位体反応-2

親核種	娘核種	反応
Pu-237	U-233	$\alpha$
U-232	U-233	$(n, \gamma)$
U-234	U-233	$(n, 2n)$
Pa-234m	U-234	$\beta^-$
Pa-234	U-234	$\beta^-$
Pu-238	U-234	$\alpha$
U-233	U-234	$(n, \gamma)$
U-235	U-234	$(n, 2n)$
Np-235	U-235	$\beta^+, EC$
Pu-239	U-235	$\alpha$
U-234	U-235	$(n, \gamma)$
U-236	U-235	$(n, 2n)$
Np-236	U-236	$\beta^+, EC$
Pu-240	U-236	$\alpha$
U-235	U-236	$(n, \gamma)$
U-237	U-236	$(n, 2n)$
Pu-241	U-237	$\alpha$
U-236	U-237	$(n, \gamma)$
U-238	U-237	$(n, 2n)$
Pu-242	U-238	$\alpha$
U-237	U-238	$(n, \gamma)$
U-238	U-239	$(n, \gamma)$
Pu-244	U-240	$\alpha$
Pu-235	Np-235	$\beta^+, EC$
Am-240	Np-236	$\alpha$
Np-237	Np-236	$(n, 2n)$
Np-237	Np-236m	$(n, 2n)$

Table 2.4: MKENO-BURN で取り扱う actinide 同位体反応 -3

親核種	娘核種	反応
U-237	Np-237	$\beta^-$
Pu-237	Np-237	$\beta^+$
Am-241	Np-237	$\alpha$
Np-238	Np-237	( $n, 2n$ )
Am-242m	Np-238	$\alpha$
Np-237	Np-238	( $n, \gamma$ )
U-239	Np-239	$\beta^-$
Am-243	Np-239	$\alpha$
Np-238	Np-239	( $n, \gamma$ )
U-240	Np-240	$\beta^-$
Pu-236	Pu-235	( $n, 2n$ )
Np-236	Pu-236	$\beta^-$
Cm-240	Pu-236	$\alpha$
Pu-237	Pu-236	( $n, 2n$ )
Cm-241	Pu-237	$\alpha$
Pu-236	Pu-237	( $n, \gamma$ )
Pu-238	Pu-237	( $n, 2n$ )
Np-238	Pu-238	$\beta^-$
Cm-242	Pu-238	$\alpha$
Pu-237	Pu-238	( $n, \gamma$ )
Pu-239	Pu-238	( $n, 2n$ )
Np-239	Pu-239	$\beta^-$
Cm-243	Pu-239	$\alpha$
Pu-238	Pu-239	( $n, \gamma$ )
Pu-240	Pu-239	( $n, 2n$ )
Np-240	Pu-240	$\beta^-$
Am-240	Pu-240	$\beta^+$

Table 2.5: MKENO-BURN で取り扱う actinide 同位体反応 -4

親核種	娘核種	反応
Cm-244	Pu-240	$\alpha$
Pu-239	Pu-240	$(n, \gamma)$
Pu-241	Pu-240	$(n, 2n)$
Cm-245	Pu-241	$\alpha$
Pu-240	Pu-241	$(n, \gamma)$
Pu-242	Pu-241	$(n, 2n)$
Am-242	Pu-242	$\beta^+$
Pu-241	Pu-242	$(n, \gamma)$
Pu-243	Pu-242	$(n, 2n)$
Pu-242	Pu-243	$(n, \gamma)$
Pu-244	Pu-243	$(n, 2n)$
Pu-243	Pu-244	$(n, \gamma)$
Pu-244	Pu-245	$(n, \gamma)$
Am-241	Am-240	$(n, 2n)$
Pu-241	Am-241	$\beta^-$
Cm-241	Am-241	$\beta^+$
Am-242m	Am-241	$(n, 2n)$
Am-242	Am-241	$(n, 2n)$
Am-242m	Am-242	IT
Am-241	Am-242	$(n, \gamma)$
Am-243	Am-242	$(n, 2n)$
Am-241	Am-242m	$(n, \gamma)$
Pu-243	Am-243	$\beta^-$
Cm-243	Am-243	$\beta^+$
Am-242m	Am-243	$(n, \gamma)$
Am-242	Am-243	$(n, \gamma)$
Am-243	Am-244	$(n, \gamma)$

Table 2.6: MKENO-BURN で取り扱う actinide 同位体反応 -5

親核種	娘核種	反応
Am-243	Am-244m	(n, $\gamma$ )
Pu-245	Am-245	$\beta^-$
Cm-241	Cm-240	(n, 2n)
Cm-242	Cm-241	(n, 2n)
Am-242	Cm-242	$\beta^-$
Cm-241	Cm-242	(n, $\gamma$ )
Cm-243	Cm-242	(n, 2n)
Cm-242	Cm-243	(n, $\gamma$ )
Cm-244	Cm-243	(n, 2n)
Am-244m	Cm-244	$\beta^-$
Am-244	Cm-244	$\beta^-$
Cm-243	Cm-244	(n, $\gamma$ )
Cm-245	Cm-244	(n, 2n)
Am-245	Cm-245	$\beta^-$
Cm-244	Cm-245	(n, $\gamma$ )

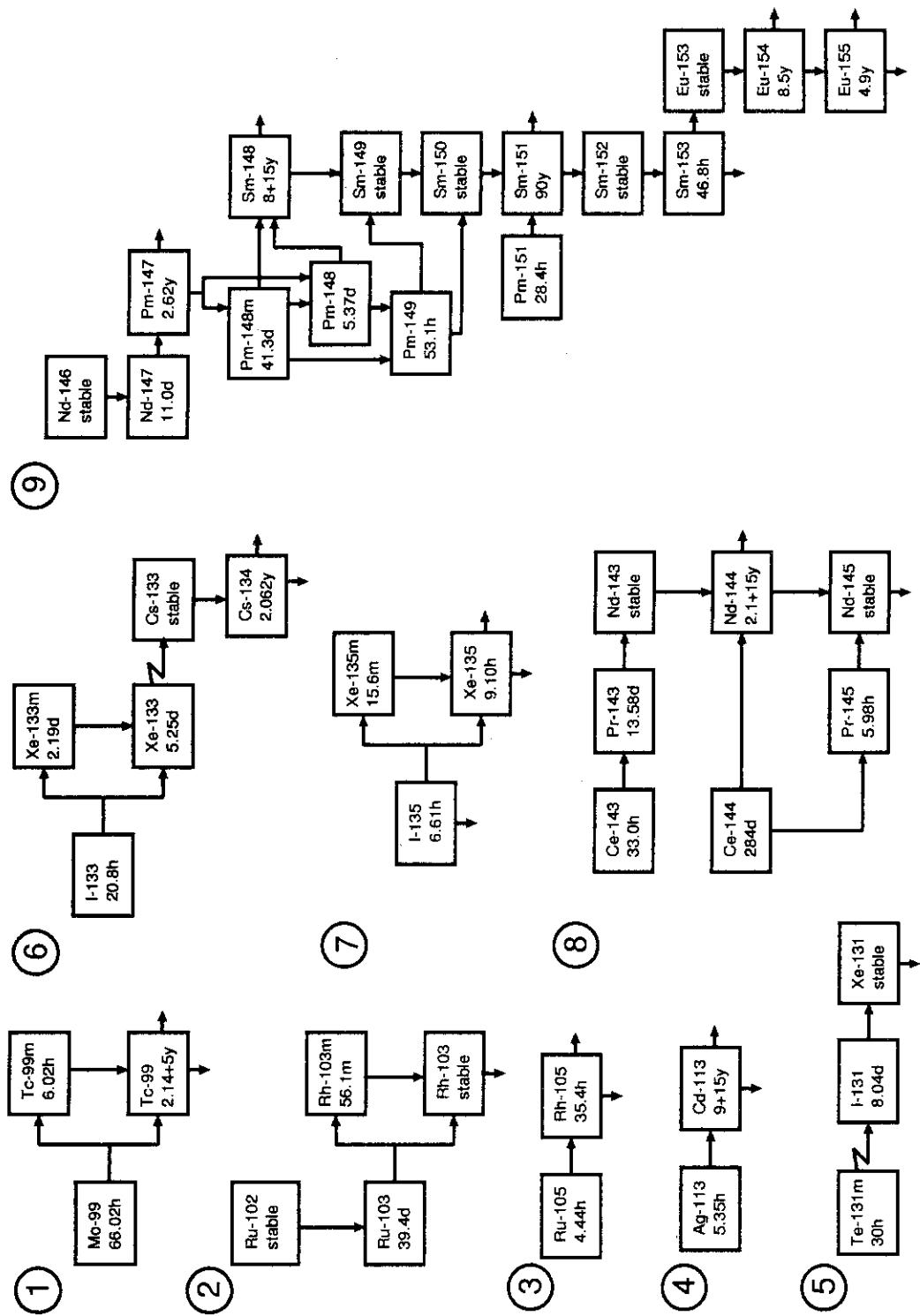


Figure 2.3: MKENO-BURN で取り扱われる FP の生成経路

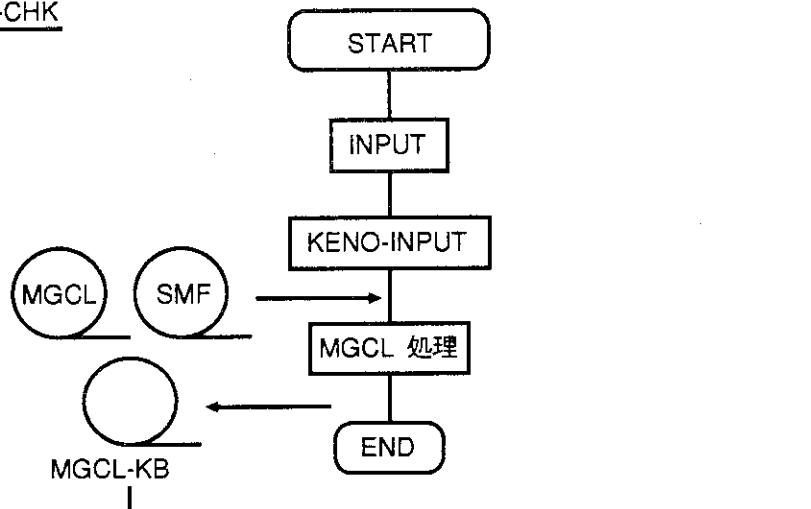
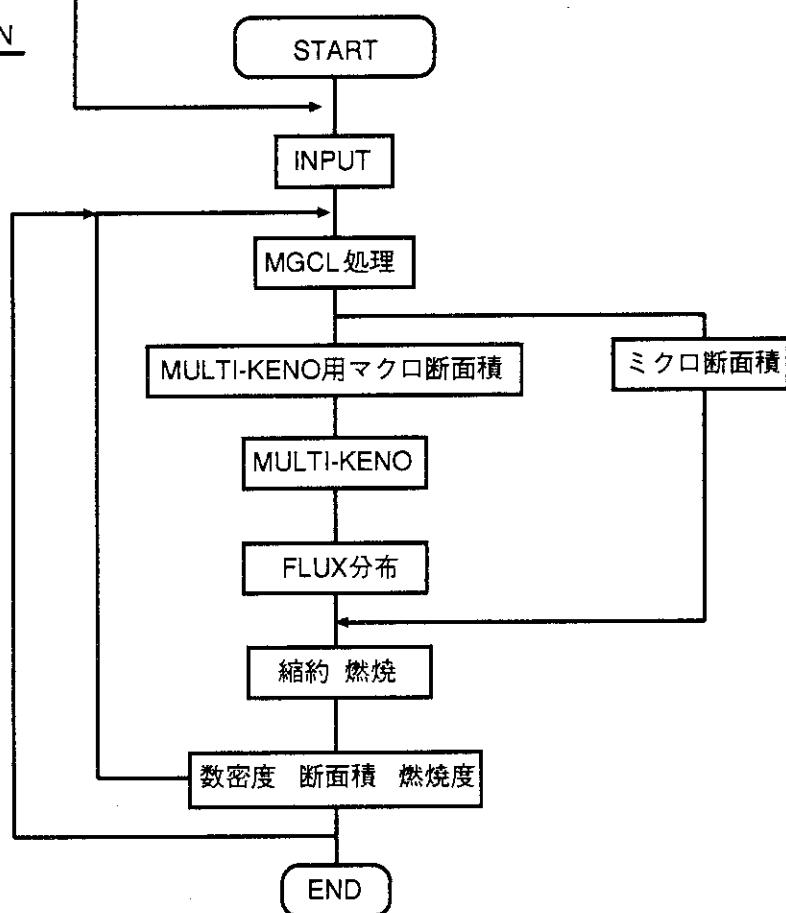
MKENO-CHKMKENO-BURN

Figure 3.1: MKENO-BURN での処理フロー

モンテカルロ法計算で、体系内の中性子束分布及び固有値を 計算する。

### 縮約 燃焼

中性子束分布を用いて、微視的及び巨視的断面積の縮約計算を行う。また、燃焼計算により、各核種の個数密度の変化、燃焼度分布等を計算する。最後にステップ 1 及びステップ 2 で使用されるファイルの一覧を、それぞれ Table 3.1, Table 3.2 に示す。

Table 3.1: MKENO-CHECK で使用するファイル

UNIT No.	内容
5	入力
6	出力
11	MGCL 300k
12	MGCL 560k
13	MGCL 900k
14	MGCL 1200k
15	MGCL 2100k
18	KENO 用 file(dummy)
21	SMF 300k
22	SMF 560k
23	SMF 900k
24	SMF 1200k
25	SMF 2100k
42	albedo library
43	KENO WTAVG library for automatic refractor option
50	MGCL-KB
95	KENO 用 input(dummy)
96	KENO 用 output(dummy)

Table 3.2: MKENO-BURN で使用するファイル

UNIT No.	内容
1	KENO 用 MGCL 中間ファイル (dummy)
5	入力
6	出力
8	出力 (dummy)
15	flux, $k_{inf}$ , Volume(dummy)
18	KENO 用ファイル (dummy)
28	出力 (dummy)
41	KENO 用マクロ断面積 (dummy)
42	albedo library
43	KENO WTAVG library for automatic refractor option
50	MGCL-KB
51	Write Restart Data file
52	Read Restart Data file
60	KENO 用ミクロ断面積 (dummy)
73	FP 核種用 FPGS ライブライ
61	KENO 用ファイル (dummy)
95	KENO 用 input(dummy)
96	KENO 用 output(dummy)

### 3.2 プログラムの詳細

MKENO-BURN コードのコントロール変数である COMMON テーブルと、整合配列及び基本的なファイルの詳細を以下に紹介する。

#### 3.2.1 シンボル・テーブル

MKENO-BURN コードで使用される COMMON 領域の内容を記す。ただし、以下に示す COMMON 領域は、MKENO モジュール以外のところで使用されているものである。

MKENO モジュール用の COMMON 領域については、MULTI-KENO コードのマニュアル [2] を参照されたい。

/ /	作業領域
/INTEGR/	プログラム制御用整数型データ
/REAL /	プログラム制御用実数型データ
/KEY /	ファイル出力用キーデータ
/PRTOPT/	プリント・オプション
/PRTOP2/	個数密度出力用
/PRTOP3/	Power 分布出力用
/IDNUC /	燃焼核種 ID テーブル
/CHAIN /	燃焼核種チェーン・テーブル
/DATAB /	燃焼計算用データ

以下はステップ 1 (体系データ・チェック・モジュール) で必要な COMMON 領域である。

/ENERGY/	エネルギー群テーブル
/FPTAB /	燃焼核種の f-Table, SMF を持つオプション
/MGCLIO/	MGCL, SMF の I/O 番号

以上の COMMON 領域で用いられている COMMON 変数の内容を Table 3.3 から Table 3.15 に示す。

Table 3.3: 名前無し COMMON

変数	内容
LIMIT	作業領域の大きさ
A(LIMIT)	作業領域

Table 3.4: COMMON /INTEGER/

変数	内容
IBURN	燃焼ステップ数
IGM	エネルギー群数
IGF	高速群エネルギー群数
IGT	熱群エネルギー群数
IGFEW	少数群エネルギー群数
IFTTM	$\sigma_0$ テーブル最大値
MTEMPX	MGCL ライブラリ内の温度点最大値
NSTOP	f-table iteration の打ち切り数
JUP	上方散乱エネルギー群数
JDOWN	下方散乱エネルギー群数
LGG	散乱マトリックスの Legendre 数 +1
JSMAX	燃焼核種数
IRV	ミクロマクロ断面積の計算
JFMAX	核分裂収率用テーブルの核種数
IZM	Zone 数
MAXR	Region 数

Table 3.5: COMMON /REAL/

変数	内容
EPSI	f-table 内挿判定値
EPSL	f-table 内挿判定値
FH(5)	Dancoff 補正計算用データ

Table 3.6: COMMON /KEY/

変数	内容
KEY0(1)	レコード長 -1
KEY0(2)	fuel rod ID
KEY0(3)	出力 ID
KEY0(4)	減速材温度 ID
KEY0(5)	燃料温度 ID
KEY0(6)	ボイド率 ID
KEY0(7)	減速材ボロン温度 ID
KEY0(8)	Albedo ID
KEY0(9)	燃焼度 ID
KEY0(10)	レコード種別 ID

Table 3.7: COMMON /PRTOPT/

変数	内容
IPOPT(1)	初期入力データ
IPOPT(2)	数密度テーブル
IPOPT(3)	flux
IPOPT(4)	zone 每の少数组ミクロ断面積
IPOPT(5)	region 每の少数组ミクロ断面積
IPOPT(6)	マクロ断面積
IPOPT(7)	MGCL 関連情報
IPOPT(8)	燃焼計算関連情報
IPOPT(9)	Leakage 情報
IPOPT(10)	出力分布マップ

Table 3.8: COMMON /PRTOPT2/

変数	内容
MRG	出力する zone 数
NRG	zone 番号

Table 3.9: COMMON /PRTOP3/

変数	内容
MSBX	マップ出力の Super Box 数
NSBX	Super Box 番号

Table 3.7: COMMON /PRTOPT/

変数	内容
IPOPT(1)	初期入力データ
IPOPT(2)	数密度テーブル
IPOPT(3)	flux
IPOPT(4)	zone 每の少数组ミクロ断面積
IPOPT(5)	region 每の少数组ミクロ断面積
IPOPT(6)	マクロ断面積
IPOPT(7)	MGCL 関連情報
IPOPT(8)	燃焼計算関連情報
IPOPT(9)	Leakage 情報
IPOPT(10)	出力分布マップ

Table 3.8: COMMON /PRTOPT2/

変数	内容
MRG	出力する zone 数
NRG	zone 番号

Table 3.9: COMMON /PRTOP3/

変数	内容
MSBX	マップ出力の Super Box 数
NSBX	Super Box 番号

Table 3.10: COMMON /IDNUC/

変数	内容
ICODE	燃焼核種の核種 ID
MICID	ミクロ断面積存在フラグ
IDORD	核種 ID オーダーテーブル

Table 3.11: COMMON /CHAIN/

変数	内容
NAME	燃焼核種 ID
NUM1	燃焼核種 ID
NUM2	燃焼核種 ID
IFLG1	NUM1 から $(n, \gamma)$ 反応で生成されるか
IFLG2	NUM2 から $(n, \gamma)$ 反応で生成されるか
NTAB1	核種 ID テーブルとの対応表
ALP1	NUM1 からの分岐比
ALP2	NUM2 からの分岐比
RAMDA	崩壊定数
GAMMAX	核分裂収率
NUM	燃焼核種数

Table 3.12: COMMON /DATAB/

変数	内容
POWER	線出力密度 × pin の長さ
UMASS	燃料棒中の U, Pu の全質量
VK	U, PU 7 核種の K-Value

Table 3.13: COMMON /ENERGY/

変数	内容
EDB	26 群エネルギー境界値
UBD	レサジー幅

Table 3.14: COMMON /FPTAB/

変数	内容
JFPTB	FP 核種の MGCL 作成用パラメータ

Table 3.15: COMMON /MGCLIO/

変数	内容
MGCL	MGCL-KB ファイルの IO unit 番号
MGL(5)	MGCL の IO unit 番号
MSM(5)	SMF の IO unit 番号
TEMPTB(5)	MGCL および SMF の温度テーブル

### 3.2.2 整合配列

整合配列（名前なし COMMON）の大きさは SUBROUTINE ALOCAT 内の A(LIMIT) でセットされ、その先頭部分は、Table 3.16 に示すように主コントロール用となっている。IAMAX より後ろは各モジュールの作業領域として用いられる。また、同図の中に示された JTAB は、MGCL をメモリ上で処理するために、核種毎のパラメータや各断面積のアドレス等を保存するテーブルである。Table 3.17 にその内容を示す。

### 3.2.3 ファイルの詳細

MKENO-BURN コードで使用するファイルのうち、重要なものについてその詳細を記す。

#### マクロライブラリ用中間ファイル (UNIT 1)

FT01 は、MGCL より KENO 用マクロライブラリを作成するための中間ファイルである。この FT01 が必要な理由は、MGCL と KENO 用マクロライブラリとでは散乱項の並びが異なるためである。

#### KENO 用マクロライブラリ (UNIT 41)

#### リストアート・ファイル (UNIT 51)

MKENO-BURN コードで計算された結果を出力するファイルであり、リストアートのときは UNIT=52 として用いられる。Table 3.18 に各レコードの詳細を示す。

#### MGCL-KB ファイル (UNIT 50)

MGCL-KB は、MKENO-CHK で作成されて、MKENO-BURN で使用される。ファイル形式は、MGCL と SMF を結合したものである。

#### FPGS Library(UNIT 73)

FPGS Library は、FP 核種の燃焼チェーンを与えるために使用される。すなわち、Fig. 2.3 に示す FP 核種の崩壊定数や集積核分裂収率をあたえるために使用される。

#### ミクロ・マクロ断面積ファイル (UNIT 60)

FT60 は MGCL ライブラリを処理して作成された燃焼・縮約計算用のミクロ断面積である。

Table 3.16: 整合配列

先頭 Address	変数名	内容
LBURN	BURN(IBURN+1)	燃焼ステップ数
LTEMP	TEMP(IZM)	ZONE 毎の温度
LDNF	NDNF(IZM)	Dancoff 補正フラグ
LNUNUM	NUNUM(IZM)	zone 内核種数
LNUADD	NUADD(IZM)	核種テーブルアドレス
LDENTB	NDENTB(3, $\sum_i^{izm} NUNUM(i)$ ) DENTB(3, $\sum_i^{izm} NUNUM(i)$ )	核種テーブル
LREGB	NREGB(IZM)	燃焼領域フラグ
LCONDE	JCONDE(2,IGFEW)	エネルギー群縮約テーブル
LCONDRL	JCONDRL(IZM)	zone-region 対応テーブル
LMRTAB	MRTAB(IM)	mesh-zone 対応テーブル
LVOLM	VOLM(IM)	mesh 体積
LVOLR	VOLR(IZM)	zone 体積
LKAI	KAI(IGM)	$\chi$ の値
LJKAI	JKAI(IZM)	$\chi$ 分布フラグ
LNMAXA	NAMAX(MAXR)	region 内核種数
LUM	UM(IZM)	zone 毎の U, Pu 初期量
LBZ	BZ(IZM,2)	zone 毎の燃焼度
LDENA	DENA(2, $\sum_i^{IZM} NUNUM(i)$ )	核種テーブル
LEBD	EBD(IGM+1)	エネルギー境界値
LUBD	UBD(IGM+1)	レサジー幅
LJTAB	JTAB(NUCM,23)	MGCL 用データ保存
LSGO	23*3+(12+5*2)*(NUCM-28)+100	$\sigma_0$ 温度テーブル
LSGX	SGX(X), X=LDENT-LSGX	$\sigma_\infty$ , f-table, $\sigma_{gg}$ 断面積
LDENT	DENT(2,NUCM2)	平均数密度テーブル
IAMAZ	—	各モジュール作業領域

Table 3.17: JTAB(NUCM,23) の内容

NO.	変数名	内容
1	NUCID	核種 ID
2	NUC2	散乱マトリックス参照核種 ID
3	LSGO	$\sigma_0$ と温度テーブルの先頭アドレス
4	LSGX	$\sigma_\infty$ , f-table, $\sigma_{gg'}$ の先頭アドレス
5	IFTM	$\sigma_0$ の数
6	ITM	1 次元データの温度点数
7	ITMT	2 次元データの温度点数
8	JE	$\sigma_e$ の有無 0/1 ; 無 / 有
9	JC	$\sigma_c$ の有無 0/1 ; 無 / 有
10	JNUF	$\sigma_f, \nu\sigma_f$ の有無 0/1 ; 無 / 有
11	JIN	$\sigma_{in}$ の有無 0/1 ; 無 / 有
12	JN2N	$\sigma_{n2n}$ の有無 0/1 ; 無 / 有
13	JFTC	$f_c$ の有無 0/1 ; 無 / 有
14	JFTF	$f_f$ の有無 0/1 ; 無 / 有
15	JFTT	$f_t$ の有無 0/1 ; 無 / 有
16	JFTE	$f_e$ の有無 0/1 ; 無 / 有
17	LG	散乱マトリックスの次数
18	IFSC	$\sigma_e$ マトリックスの有無 0/1 ; 無 / 有
19	IFIN	$\sigma_{in}$ マトリックスの有無 0/1 ; 無 / 有
20	IFN2N	$\sigma_{n2n}$ マトリックスの有無 0/1 ; 無 / 有
21	LFT	f-table のエネルギー群数の大きさ
22	LSM	$\sigma_{in}, \sigma_{n2n}$ マトリックスのエネルギー群の大きさ
23	LSGXM	$\sigma_e(P_0)$ マトリックスの先頭アドレス

## 領域毎の多群フラックス (UNIT 15)

FT15 は領域メッシュ毎の多群フラックスライブラリであり、その内容は リスタートファイルのレコード ID 21 と同様である。

Table 3.18: リスタートファイルレコード種別

No.	ID	内容
1	1	初期データ, 体系データ
2	11	zone 每の初期数密度
3	12	region 每の初期数密度
4	14	Geometry, Box, SuperBox 每の Leakage 情報
5	15	zone 每の Leakage と吸収の情報
6	16	縮約された Leakage と吸収量
7	21	領域メッシュ毎の多群 flux
8	22	zone 每の少数群 flux
9	23	region 每の少数群 flux
10	101 ~ 100+IZM	zone 每の少数群ミクロ断面積
11	201 ~ 200+MAXR	region 每の少数群ミクロ断面積
12	301	zone 每の少数群マクロ断面積
13	302	region 每の少数群マクロ断面積
14	511	zone 每の燃焼後の数密度
15	512	region 每の燃焼後の数密度
16	600	zone 每の燃焼後の数密度

## 4 計算環境

### 4.1 UNIX を OS とする計算機上での実行

MKENO-BURN の実行環境は、UNIX を OS とする計算機では非常に簡単な shell script で記述可能である。

以下に例を示す。JDDL と ランプ FP のデータが /usr/jaerilib 以下に、MGCL ライブライアリが /usr/mgcl 以下の directory にあると仮定している。ただし、MGCL に関しては温度点ごとに別のファイルになっているので指定が複雑である。そして最終的に MGCL-KB ファイルが作成されて、MKENO-BURN が実行されている。

```
#!/bin/csh

echo 'date' LINKING FILES FOR MKENOCHK AND MKENOBURN
setenv JLIBDIR /usr/jaerilib
setenv MGCLDIR /usr/jaerilib/mgcl/j32g26
setenv EXEC      /usr/mkено

#
# MGCL Libraries
#
ln -s $MGCLDIR/mgcl300.data fort.11
ln -s $MGCLDIR/mgcl560.unitb.j32.g26      fort.12
ln -s $MGCLDIR/mgcl900.unitb.newfpj32.g26 fort.13

#
# SMF Libraries
#
ln -s $MGCLDIR/smf300n.data fort.21
ln -s $MGCLDIR/smf560.unitb.j32.g26      fort.22
ln -s $MGCLDIR/smf900.unitb.newfpj32.g26 fort.23

#
# JDDL ACTINIDE
#
ln -s $JLIBDIR/jddl/jddlwrt/jri92.jddlact.new3.data fort.49

#
# FPGS
#
ln -s $JLIBDIR/fpgs-new/fort.50 fort.73

#
# LUMPED FP
#
ln -s $JLIBDIR/newlumpedfp/unitburn.pwrlfp.j32.data fort.90

#
# run of MKENOCHK
#
echo 'date' RUN MKENOCHK
```

```
$EXEC/chk/mkenochk < $1 > $1.out
echo 'date' END OF MKENOCHK
#
# run of mkenoburn
#
echo 'date' RUN MKENOBURN
$EXEC/burn/mkenoburn < $1 >> $1.out
echo 'date' END OF MKENOBURN
```

#### 4.2 リスタート計算

計算時間が問題となるモンテカルロ計算を、多数行う必要があるために、リスタート計算を可能にしている。以下にそのための shell script を示すが、ここでは、上の shell script ですべての file が symbolic link されていることを仮定している。

```
#!/bin/csh

echo 'date' RESTARTING MKENOBURN
setenv EXEC      /home5/codes/mkeno

echo 'date' SET RESTART FILE
# move wrote restart file to read restart file
mv fort.51 fort.52

#
# run of mkenoburn
#
echo 'date' RUN MKENOBURN
$EXEC/burn/mkenoburn < $1 > $1.out
echo 'date' END OF RESTARTED MKENOBURN
```

## 5 MKENO-BURN INPUT DESCRIPTION

Information required to execute the MKENO-BURN computer program includes job control cards and input data. Because job control cards are facility-dependent, they are presented in the case of FACOM-M780 as an example.

### Card No. 0 Title Card

1 20A4 TITLE(I) : Contains title only.

### Card No. 1 Restart Option

0 A ICH(I) : 'RESTART'

1 I IRESET : = 0 for initial run.  
= 1 for restart run.

2 R BDEN : Burnup value at restart (MWD/T) = BURN(1)

### Card No. 2 Key Data for Output File

0 A ICH(I) : 'KEY'

1 I KEY0(1) : Record length (the Value is set in the program.)

2 I KEY0(2) : Fuel rod ID

3 I KEY0(3) : Power ID

4 I KEY0(4) : Moderator temperature ID

5 I KEY0(5) : Fuel temperature ID

6 I KEY0(6) : Void fraction ID

7 I KEY0(7) : ID of Boron density of moderator

8 I KEY0(8) : Albedo ID

9 I KEY0(9) : Burnup ID (for each run)

### Card No. 3 Print Option

A ICH(I) : 'PRINT'

1 I IPOPT(1) : Print option for initial input data  
 = 0 ; no print out  
 = 1 ; print out

Following options should be input in the same way.

2 I IPOPT(2) : For number density table.

3 I IPOPT(3) : For neutron flux.

4 I IPOPT(4) : For microscopic cross-section (zone-wise, few group).

5 I IPOPT(5) : For microscopic cross-section (region-wise, few group).

6 I IPOPT(6) : For macroscopic cross-section (zone-and region-wise, few group).

7 I IPOPT(7) : For information about MGCL.

8 I IPOPT(8) : For information about burnup calculation.

9 I IPOPT(9) : For information about leakage.

10 I IPOPT(10) : For power distribution.

#### **Card No.4 Option for Number Density Output**

(Omit if IPOPT(2)≠1.)

A ICH(I) : 'PLT.ZONE'

1 I MRG : Maximum number of zone to be output about number density. If  
 MRG = 0, output for all zone.  $1 \leq \text{MRG} \leq \text{IZM}$

#### **Card No. 4-1 Zone Number for Number Density Output**

(Omit if IPOPT(2)≠1.)

1 I NRG(1) : Zone number to be output.

2 I NRG(2) : Zone number to be output.

MRG I NRG(MRG) : Zone number to be output.

#### **Card No. 5 Option for Power Distribution Output**

Omit if IPOPT(10)≠1 .

0 A CH(I) : 'SBOX.MAP'

1 I SBX : Number of superbox to be output for Power distribution. 1 < MSBX < SBOX

### **Card No. 5-1 Zone Number for Power Distribution Output**

Omit if IPOPT(10)≠1 .

1 I NSBX(1) : Zone number to be output.

2 I NSBX(2) : Zone number to be output.

MSBX I NSBX(MSBX) :Zone number to be output.

### **Card No. 6 Integer Data**

Parameters should be separated by one or more blanks. A new card may be started after any parameter.

0 A ICH(I) : 'INTEGER'

1 I IBURN : Number of burnup steps to be executed in this run.

2 I NBA : Number of Generations.

3 I NPB : Number of neutrons per distribution.

4 I NSKIP : Number of generations to be skipped.

5 I IGM : Number of energy groups.

6 I IGF : Number of energy groups which belong to the fast neutron group.  
 IGF = IGM - IGT. IGT : Number of energy groups which belong to the thermal neutron group.

7 I IGFEW : Number of reduced energy group.

8 I IGN : Number of down-scatters.

9 I IZM : Number of zones.

**10 I KREFM** : Total number of geometry cards. Note : It is a same number of the regions which are generated by the automatic reflector option, the CELL BOUNDARY cards, and the CORE BOUNDARY cards, whether calculated by the automatic reflector option or entered separately. None of the REFLECTOR cards from the automatic reflector option, SUPERBOX cards and BOX TYPE cards and BOX TYPE cards is counted. All other geometry cards must be counted.

**11 I SBOX** : Number of SUPER BOX types. Note : SBOX must be zero for a single unit. A single unit is a configuration that does not have to be enclosed in a cube or cuboid and can not be stacked into array.

**12 I SBXMAX** : Number of units in the x direction of the super box array. A value must be entered for a single unit problem, but it is not used.

**13 I SBYMAX** : Number of units in the y direction of the super box array. A value must be entered for a single unit problem, but it is not used.

**14 I SEZMAX** : Number of units in the z direction of the super box array. A value must be entered for a single unit problem, but it is not used.

**15 I NMAT** : Number of input cross-section sets.

**16 I MATT** : Number of mixtures.

**17 I NMIX** : Number of mixing table entries.

**18 I NTEMPX** : Maximum number of temperature points in the MGCL library.

**19 I NSTOP** : Maximum number of iterations to converge f-table.

**20 I NTAPE** : Number of input cross-section sets(=NMAT).

**21 I NXX** : Specified albedo-k option. Note : Albedo can not be used for a single pin unit problem.

= 0 : No albedo or k to be used.

= 1 : Uses specular reflection (k). Note : This option consists of mirror image reflection, multiplying the weight (WT) by the absolute value of the reflector constant (card 9) for that case, and leaving the energy unchanged. NXX=1 can not be used for a problem that utilize both specular reflection and differential albedos.

= 2 : Read differential albedos from cards or page. If a combination of differential albedos and specular reflection are to be used, NXX must be 2.  
 = 3 : Use differential albedos from the previous case. Can not be used in the first case following an "END CASE" card. Note : Differential albedos can not be used for an adjoint problems.

**22 I NSCH** : Search type.

= 0 : No search.  
 = 1 : Search on dimension.  
 = 2 : Search on the number of units (array search). Use only when SBOX=1 (on card 6 No.11).  
 = 3 : Search on dimensions using a small number of generations, NBA1 (on card 8 No.4-a). Once convergence has been achieved, an additional search is made using the number of generations. This option enables the user to minimize the hazards of a poor starting guess and yet still obtain a significant number of histories in a relatively shorter time interval than required if run uses NSCH=1 .

**23 I LIST** : Supplies print flags to the MULTI-KENO. (Four-digit number)

Thousands digit:

= 0 : Print all macroscopic cross-sections.  
 = 1 : Print only macroscopic 1-D cross-sections.  
 = 2 : Do not print any macroscopic cross-sections.

Hundreds digit:

= 0 : Do not print array unit interaction matrix.  
 = 1 : Print array unit interaction matrix. Use only when MATRIX (on Card 6 No.30) is 1 or 3 .

Tens digit:

= 0 : Edit neutron balance table for each superbox and summary.  
 = 1 : Edit neutron balance table for outer cell boundary plug option 0 .  
 = 2 : Edit neutron balance table for all regions and summary.

Units digit:

= 0 : Do not print input cross section from tape.  
 = 1 : print input cross sections.

Note : For example, assume your wish to print cross sections inputted, macroscopic cross sections and the array unit interaction matrix but not region dependent fissions absorptions, then LIST = 0101 .

**24 I NOXS** : Specifies whether to reuse macro cross section and/or the geometry description of the preceding case(Two-digit number).

Tens digit:

= 0 : Read new geometry.  
 = 1 : Use geometry from the preceding case. However, the mixed box orientation data must be read again when SBOX (on Card 6 No.11) is greater than 1 .

Units digit:

= 0 : Read new cross sections. = 1 : Use cross sections of the preceding case. The units digit of NADJ (on Card 6, No.28) must be same as in the preceding case. Note : For example, to use cross- secions of the preceding case and new geometry, NOXS=01. To read new cross sections and to use the geometry of the preceding case, NOXS=10 .

**25 I NTYPST** : The type of starting distribution to be used.

= 0 : Flat distributions over the overall array dimensions, in fissile material only.

= 1 : Cosine distributions over the overall array dimensions, in fissile material only. Not applicable for single-unit.

= 2 : Arbitrary fraction started in fissile material in unit (X,Y,Z), the rest started in fissile material with cosine distribution, over the array, about unit (X,Y,Z). Not applicable for single-unit. Here,  $1 < X < \text{SBXMAX}$ ,  $1 < Y < \text{SBYMAX}$ ,  $1 < Z < \text{SBZMAX}$  .

= 3 : All distributions are started at position (x,y,z) in cm, in unit (X,Y,Z).

= 4 : All distributions are started at position (x,y,z) in cm, with all units of box type NBOXST (Card 18) being equally probable. Not applicable for single-unit problems.

= 5 : Flat distributions in fissile material in units of super box type NBOXST (Card 18). Not applicable for single-unit prblms.

= 6 : Starting distribution is arbitrarily input. This is an only way that neutrons can be started in the reflector of the array. Note : NTYPST must be 0, 3 or 6 for a single unit problem. If any other value is specified, it will be run as a start type is zero.

**26 I NFIX** : Neutron trace flag.

< 0 : Neutrons are traced to  $| \text{NFIX} |$  th fission neutrons.

= 0 : Only initially generated neutrons are traced.

> 0 : Neutrons are traced to disappearance.

**27 I NFDE** :Fission density flag.

= 0 : Fission densities will be calcualted.

$\neq 0$  : Fission densities will not be calculated.

28 I NADJ : Adjoint / forward flag.

= 0 : A forward calculation will be done.

≠ 0 : An adjoint calculation will not be done.

29 I NXCTUE : Option for logical device number for cross-section library.

= 0 : Logical device number, XSECS, is set to 41 for the MULTI-KENO cross-section library and 4 for AMPX cross-section library.

≠ 0 : Logical device number for the input cross-section library, XSECS, is set equal to the absolute value of NXCTUE.

30 I MATRIX : Flag for input velocities and matrix calculations.

Tens digit:

= 0 : Read energy and lethargy from tape and calculate velocities.

= 1 : Read velocities from cards.

= 2 : Use velocities from the previous case.

Note : NADJ (on Card 6, No.28) must be same for both cases. Velocities are used to calculate lifetime and generation times. Lifetimes and generation times are incorrect if a differential albedo reflector is used (Ref. NXX on Card 6, No.21).

Units digit:

= 0 : No matrix keff will be calculated.

= 1 : Matrix keff by array unit will be calculated.

= 2 : Matrix keff by box type will be calculated.

= 3 : Matrix keff by both array unit and box type will be calculated.

Note : The keff and co-factor keff will be printed. If the unit interaction matrix is to be printed, LIST ( on Card 6, No.23) must include a 1 in the hundreds digit.

31 I NPST : Position of  $\sigma_t$  if ANISN format cross sections are read from cards. NPST=0 if cross-sections other than ANISN are to be used.

32 I NPSGG : Position of  $\sigma_{gg}$  if ANISN format cross sections are read from cards. NPSGG=0 if cross-sections other than ANISN are to be used.

33 I LGG : Degree of scattering + 1 .

34 I LFT : Expansion length of f-table ( $\leq$ IGH).

35 I LSM : Expansion length of SMF(in, n2n) ( $\leq$ IGM).

36 I MSGO : Number of  $\sigma_0$  points.

37 I JENDL : Type of MGCL Library  
 = 3 MGCL-J3  
 = 4 MGCL-IV

**Card No. 7 Real Number Data**

Parameters are separated by one or more blanks.

A ICH : 'REAL'

1 R TMAX : Maximum CPU time (minute) to be allowed for executing one burn-up step. If the execution could not complete within TMAX, the execution would be terminated. NOT effective in current version.

2 R POWER : Total power of the system to be executed (W).

3 R EPSI : Convergence criterion #1 of f-table.

4 R EPSL : Convergence criterion #2 of f-table.

Note : Convergence criterion of f-table is usually 0.0001 .

Following Card 8 - Card 20 are same as MULTI-KENO input data Card 3 - Card 14 and Card 18 respectively.

**Card No. 8 Search Parameters**

Omit if NSCH = 0 (Card 6, No.22).

1 R CONSTK : Desired keff for a search problem.

2 I NSIG : Maximum number of standard deviations keff may be from CONSTK for the search completion.

3 I NUMBR : If NSCH=1 or 2 (Card 6, No.22), NUMBR is the maximum number of iterations which the search will run. If NSCH=3, NUMBR is the number of iterations allowed for coarse convergence.

Whether to entry or to omit remaining parameters in this card depends on NSCH (Card 6, No.22).

If NSCH=1:

Remaining parameters should be omitted.

If NSCH=2:

4 I NBXMA : Maximum number of units that will be allowed in the X direction during an array search.

5 I NBYMA : Maximum number of units that will be allowed in the Y direction during an array search.

6 I NBZMA : Maximum number of units that will be allowed in the Z direction during an array search.

If NSCH=3:

4 I NBA1 : The number of batches to be run to achieve coarse convergence.  
(See the explanation of NSCH=3 (Card 6, No.22).)

5 I NUMBBRF : The number of batches to be run to achieve coarse convergence. (See the explanation of NSCH=3 (Card6, No.22).) If coarse convergence is not achieved, fine convergence would not be attempted.

### Card No. 9 Reslector Constants

Omit if NXX=0 (Card 6, No.21).

1 R REFCST(1) : Reflector constant for +x Face of the array.

2 R REFCST(2) : Reflector constant for -x Face of the array.

3 R REFCST(3) : Reflector constant for +y Face of the array.

4 R REFCST(4) : Reflector constant for -y Face of the array.

5 R REFCST(5) : Reflector constant for +z Face of the array.

6 R REFCST(6) : Reflector constant for -z Face of the array.

Note : Reflector constant should be the POSITIVE albedo ID for the faces using DIFFERENTIAL ALBEDOS, the NEGATIVE albedo ID for the faces using SPECULAR ALBEDOS, and zero for faces having no albedo treatment. SPECULAR ALBEDOS may be used on some faces and DIFFERENTIAL ALBEDOS on other faces in problems where the use of DIFFERENTIAL ALBEDOS has been indicated in NXX (Card 6, No.21). The absolute value of the reflector constant entered for specular albedo is the fractional return for the face. The value of the reflector constant is the albedo ID for differential albedo.

**Card No. 10 Neutron Velocities**

Omit if the Tens Digit of MATRIX (Card 6, No.5)  $\neq$  1 .

1 R VEL(1) :Neutron velocity (cm/sec) for the 1st energy group.

2 R VEL(2) :Neutron velocity (cm/sec) for the 2nd energy group.

IGM R VEL(IGM) : Neutron velocity (cm/sec) for the IGM-th energy group.

**Card No. 11 Mixing Table**

Omit if the Units Digit of NOXS (Card 6, No.24) is not 0 .

1 I KKA : Mixture ID number.  $1 \leq KKA \leq MATT$  (Card 6, No.16)

2 I NMA : Nuclide ID number. A negative nuclide ID number indicates that the fission spectrum for the nuclide will be used for the mixture KKA. A negative nuclide ID must be specified in each mixture that contains fissionable material.

3 R RHOA : Number density (atoms/barn).  $RHOA > 0.0$  .

Repeat, starting with KKA, for each nuclide. Each set of KKA, NMA, RHOA is a mixing table entry. Note : There must be NMIX (Card 6, No.17) sets of entries.

**Card No. 12 Cross-section Data**

Omit if the Units Digit of NOXS (Card 6, No.24) is not 0 and  $NTAPE \geq NMAT$  (Card 6, No.20 and No.15).

(NMAT-NTAPE) decks of cross-section data should be entered. Each deck consists of the cards, 12(a), 12(b) and 12(c), sequentially described as follows. Note : Cross-section data must be formatted.

**Card No. 12(a)**

1 7A4,A3 XST : Nuclide identification.

2 I1 IORDER :

= 0 : P0 component only.

= 1 : P1 is present.

**Card No. 12(b) P0 and P1 Cross-section Sets**

First enter the P0 component for all energy groups. Next, If IORDER=1 (Card 12, No.2), enter the P1 component for all energy groups. Note : Both the P0 and P1 components must be entered in either KENO or ANISN format described under A and B below. All cross- section sets from cards must be entered in the same format for a given problem. One is KENO FORMAT, entry only if NPST=0 (Card 6, No.6), another is ANISN FORMAT, enter only if NPST $\neq$ 0 (Card 6, No.6).

A. KENO FORMAT (6E12.5) (Enter only if NPST=0 (Card 6, No.6))

Group	Data						
1	$\sigma_a$	$\nu\sigma_f$	$\sigma_t$	$\sigma_{1 \rightarrow 1}$	$\sigma_{1 \rightarrow 2}$	..	..
2	$\sigma_a$	$\nu\sigma_f$	$\sigma_t$	$\sigma_{2 \rightarrow 2}$	$\sigma_{2 \rightarrow 3}$	..	..
3	$\sigma_a$	$\nu\sigma_f$	$\sigma_t$	$\sigma_{3 \rightarrow 3}$	$\sigma_{3 \rightarrow 4}$	..	..
J=NGP-NDS+1	$\sigma_a$	$\nu\sigma_f$	$\sigma_t$	$\sigma_{J \rightarrow J}$	$\sigma_{J \rightarrow J+1}$	..	..
J+1	$\sigma_a$	$\nu\sigma_f$	$\sigma_t$	$\sigma_{J+1 \rightarrow J+1}$	$\sigma_{J+1 \rightarrow J+2}$	..	$\sigma_{J+1 \rightarrow NGP}$
NGP	$\sigma_a$	$\nu\sigma_f$	$\sigma_t$	$\sigma_{NGP \rightarrow NGP}$	$\sigma_{NGP \rightarrow NGP-1}$	..	$\sigma_{NGP \rightarrow J}$

where the terms are defined as follows:

$\sigma_a$  Absorption cross section (barns)

$\nu$  Neutron / fission

$\sigma_f$  Fission cross section (barns)

$\nu\sigma_f$   $\nu \times \sigma_f$

$\sigma_t$  Total cross section (barns)

$\sigma_{i \rightarrow j}$  Scattering cross section from group i to group j (barns)

NGP Number of energy group

NDS Number of down scatters

J NGP-NDS+1

B. ANISN FORMAT (Entry only if NPST  $\neq$  0)

ANISN expects a table of cross sections for each group, g, of each material in the following format.

Field Number	Format	Function of Parameter
1	R	Activity
2	R	Activity
NPST-2	R	Absorption
NPST-1	R	Nu fission
NPST	R	Total
NPST+1	R	$\sigma_{g+NUS \rightarrow g}$ Upscatter
NPSGG-1	R	$\sigma_{g+1 \rightarrow g}$
NPSGG	R	$\sigma_{g \rightarrow g}$
NPSGG+1	R	$\sigma_{g-1 \rightarrow g}$ Downscatter
IHM	R	$\sigma_{g-NDS \rightarrow g}$

Note : NUS = NPSGG - NPST. NDS is the number of groups of down scatter. NPST is the position of SIGtotal. NPSGG is the position of  $\sigma_{g \rightarrow g}$ . IHM = NPSGG + NDS - 1 . Thus the parametrs NPST, NPSGG, and IHM completely describe the format of the cross-section. If there are no activity cross- sections, NPST = 3 . If there is no upscatter NPSGG = NPST + 1 . If there is no downscatter, IHM = NPSGG (i.e., a one-group problem). If there is upscatter, ANISN will compute a total upscatter cross-section for each group of each material and place that cross-section in position IHM +1 . The activity cross- sections are ignored by KENO.

### Card No. 12(c) Fission Spectrum

FORMAT(6E12.5) (Enter only if  $\nu\sigma_f \neq 0$  for at least one energy group. There must be NGP entries.)

### Card No. 13 Geometry Cards and Weights

Omit if the tens digit of NOXS  $\neq 0$  (Card 6, No.24) )

As described below in detail, starting in column 1 on a new card, enter the geometry word, followed by at least two blanks. Then the mixture number, dimensions and weights are entered, separated by one or more blanks. This information may be carried over to a new card after any entry. The geometry type must ALWAYS start in column 1 . A weight for each energy group must follow each geometry card (except SUPER BOX, BOX TYPE or REFLECTOR cards, which are not counted as geometry cards).

**Card No. 13(a) Super Box Type Card**

Omit if SBOX = 0 (Card 6, No.11)

1 A : 'SUPER BOX' Followed by at least two blanks.

2 I IS : Super box number.  $1 < SI < SBOX$

3 I NBOX : The number of box types in the super box I.

4 I NBXMAX : The number of units in the x direction of the array constructed by box types.

5 I NBYMAX : The number of units in the y direction of the array constructed by box types.

6 I NBZMAX : The number of units in the z direction of the array constructed by box types.

**Card No. 13(b) Box Type Card**

Omit if NBOX = 0 (Card 13(a), No.3). If NBOX = 1, a Box Type Card may be entered but is not necessary.

1 A : 'BOX TYPE' followed by at least two blanks.

2 I IB : Box number.  $1 < I < NBOX$

**Card No. 13(c) Geometry Card**

All geometry words start in Col. 1.

1 A FGEOM : Geometry type followed by two or more spaces.

Note : GEOM may be no more than 12 characters long. FGEOM may be one of the following and must be left adjusted :

CUBE : has  $+X = +Y = +Z$  and  $-X = -Y = -Z$ . The  $+X$  dimension need not equal the  $-X$  dimension of the cube; i.e., the origin need not be the center of the cube.

CUBOID : is a rectangular parallelepiped and may be described anywhere relative to the origin.

SPHERE : must be centered about the origin.

CYLINDER : has its length described along the Z axis and its center line must lie on the Z axis.

XCYLINDER: has its length described along the X axis and its center line must be lie on the X axis.

YCYLINDER : has its length described along the Y axis and its center line must be lie on the Y axis.

HEMISPHERE : must have its flat portion centered about the origin at Z = 0.0 and exists only in the positive Z direction.

HEMISPHERE(B)(C) : must have its flat portion centered about the origin at (C) = 0.0 and exists only in the BC direction (B = + or -, C = X, Y, or Z). For example, 'HEMISPHERE+Z' is the same as the previously described 'HEMISPHERE' and 'HEMISPHERE-Z' is the mirror image of 'HEMISPHERE+Z', therefore existing only in the negative Z direction.

(B)HEMICYL(C)(D) : is a half cylinder whose axis is the B axis (B = X, Y, or Z) and exists only in the CD direction (C = + or -, D = X, Y, or Z). (Examples: 'ZHEMICYL+X', 'YHEMICYL-Z' 'XHEMICYL+Y').

Starting two or more spaces after the geometry word, the following data is entered, separated by one or more blanks. A new card may started after any entry.

2 I MAT : Mixture number. (enter a zero for a void)

3 R XX(1) : Radius for sphere, cylinders, hemispheres, hemicylinders, +x dimension for cube, cuboid, or general region.

4 R XX(2) : -x dimension for cube, cuboid, or general region, +z for cylinder, +x for x cylinder, +y for y cylinder, + length for hemicylinder, omit XX(2) for a sphere or hemisphere.

5 R XX(3) : +y dimension for cuboid or general region, -z for cylinder, -x for x cylinder, -y for y cylinder, - length for hemicylinder, omit XX(3) for a sphere, hemisphere, or cube.

6 R XX(4) : -y dimension for cuboid or general region.

7 R XX(5) : +z dimension for cuboid or general region.

8 R XX(6) : -z dimension for cuboid or general region.

Note : Omit XX(4), XX(5), and XX(6) for all other geometry types except CORE(or CELL) BDY.

9-1 R WTAVG(1) : The weight which is given a neutron that survives Russian roulette for the first energy group. Enter a value for each energy group. Enter a weight of 0.5 or 0.0 for all regions within the core. If a value of 0.0 is entered it is defaulted to 0.5 within the code. Weights for some commonly used reflector material are in ORNL-TM-4660 (see ref. [1]).

**9-2 R WTAVG(2)** :The weight which is given a neutron that survives Russian roulette for the second energy group.

**9-IGM R WTAVG(IGM)** :The weight which is given a neutron that survives Russian roulette for the last (= IGM-th, Card 6, No.5) energy group.

Repeat the card(s) 13(a), 13(b), 13(c) sequence until SBOX super box types, each of which contains VBOX box types, have been described. Super boxes and boxes must be numbered sequentially starting with 1.

Note : The last geometry card for each box type must be a cube or cuboid.

### **Card No. 13(C1) Core (or CELL) Boundary Card**

Core (or CELL ) boundary must be cuboid. Enter only if there are additional regions external to the core. This card is needed only if one or more cards 13(C2) are used.

**1 A** : 'CORE BDY', or 'CELL BDY' starting Col.1, followed by two or more blanks.

**2 I MAT** :Mixture number (usually zero).

**3 R XX(1)** : +x dimension for a cuboid or cube.

**4 R XX(2)** :-x dimension for a cuboid or cube.

**5 R XX(3)** :+y dimension for a cuboid, zero for a cube.

**6 R XX(4)** :-y dimension for a cuboid, zero for a cube.

Note : These dimensions must fit tightly arround the array.

**7-1 R WTAVG(1)** :The weight for the first energy group. Enter a value for each energy group even though they are not used.

**7-2 R WTAVG(2)** :The weight for the second energy group.

**7-IGM R WTAVG(IGM)** : The weight for the last (= IGM-th, Card 6, No.5) energy group.

### **Card No.13(C2) Reflector Geometry Card**

**1 A** : 'FGEOM',starting Col.1, followed by two or more blanks.

**2 I MAT** :Mixture number (usually zero).

3 R XX(1) :+x dimension for a cuboid or cube.

4 R XX(2) :-x dimension for a cuboid or cube.

5 R XX(3) :+y dimension for a cuboid, zero for a cube.

6 R XX(4) :-y dimension for a cuboid, zero for a cube.

Note : These dimensions must fit tightly around the array.

7-1 R WTAVG(1) : The weight for the first energy group. Enter a value for each energy group even though they are not used.

7-2 R WTAVG(2) :The weight for the second energy group.

7-IGM R WTAVG(IGM) :The weight for the last (= IGM-th, Card 6, No.5) energy group.

Repeat the above card sequence untill all reflector regions have been described.

### **Card No. 13(C3) Automatic Reflector Card**

Reflector must be cuboid. This card can be entered in the place of a core boundary card (in which case it calculates the core boundary and fills in any remaining regions) or it may be entered at any point external to the core boundary card (it then just fills in any remaining cuboidal regions). It must never be intenal to any other geometry type. Use only one Automatic Reflector card per problem.

Note : All regions generated by the automatic reflector option must be counted in KREFM (Card 6, No.10).

Enter only if the automatic reflector option is to be exercised for putting an external reflector around an array.

1 A : 'REFLECTOR', starting in Col. 1, followed bu two or more blanks.

2 I MAT :Mixture number of the material comprising the reflector.

3 R XX(1) :The reflector thickness in the +x direction. Non-negative number only.

4 R XX(2) :The reflector thickness in the -x direction. Non-negative number only.

**5 R XX(3)** :The reflector thickness in the +y direction. Non-negative number only.

**6 R XX(4)** :The reflector thickness in the -Y direction. Non-negative number only.

**7 R XX(5)** :The reflector thickness in the +z direction. Non-negative number only.

**8 R XX(6)** :The reflector thickness in the +z direction. Non-negative number only.

**9 I IDWT** : The ID of the appropriate set of WTs to be read from library. If IDWT is less than 10, the weights will be read from cards. (See Card(s) 10.)

Note : Do NOT enter weights for the REFLECTOR card. They are automatically provided through reading IDWT.

### **Card No. 14 Position of Super BOX**

#### **Card No. 14-1 Mixed Box Oriented Card**

Omit if  $NBOX \leq 1$  (Card 13(a), No.3). The first field contains the box type, followed by three sets of three fields that are treated like FORTRAN DO loops, followed by a field that indicates whether another set of mixed box data is to be read. The arrangement of boxes may be considered as consisting of a three-dimensional matrix of box type numbers, with the box position increasing in the positive X, Y, and Z directions, respectively. Each set of mixed box orientation data consists of the following parameters, separated one or more blanks.

**1 I LTYPE** : The box type.  $0 < LTYPE \leq NBOX$  (Card 13(a), No.3)

**2 I IX1** :The starting point in the X direction.  $1 \leq IX1 \leq NBXMAX$  (Card 13(a), No.3)

**3 I IX2** : The ending point in the X direction.  $1 \leq IX2 \leq NBXMAX$

**4 I INCX** : The number of boxes by which increments are made in the positive X direction.  $1 < INCX \leq NBXMAX$

**5 I IY1** :The starting point in the Y direction.  $1 \leq IY1 \leq NBYMAX$  (Card 13(a), No.4)

6 I IY2 : The ending point in the Y direction.  $1 \leq IY2 \leq NBYMAX$

7 I INCY : The number of boxes by which increments are made in the positive Y direction.  $1 \leq INCY \leq NBYMAX$

8 I IZ1 : The starting point in the Z direction.  $1 \leq IZ1 \leq NBZMAX$  (Card 13(a), No.5)

9 I IZ2 : The ending point in the Z direction.  $1 \leq IZ2 \leq NBZMAX$

10 I INCZ : The number of boxes by which increments are made in the positive Z direction.  $1 \leq INCZ \leq NBZMAX$

11 I ISTP : Indicates whether to read another set of mixed box orientation data.

= 0 : read another set of data.

$\neq 0$  : do not read any more mixed box orientation card.

An important feature of this type of data description is that if any portion of an array is defined in a conflicting manner, the last card to define that portion will be the one that determines the array's box type configuration. To utilize this feature, one can fill an entire array with the most prevalent box type and then superimpose the other box types in their proper places to accurately describe the array. The last set of mixed box orientation data must have a nonzero entry in the last field.

Repeat this card until box orientation of all super boxes have been described. This card must be entered in the super boxes sequence.

### Card No. 14-2 Mixed Super Box Oriented Card

Omit if  $SBOX \leq 1$  (Card 6, No.11). This card must be entered in the same manner as Card 14-1.

1 I LTYPE : The super box type.  $0 < LTYPE \leq SBOX$  (Card 6, No.11)

2 I IX1 : The starting point in the X direction.  $1 \leq IX1 \leq SBXMAX$  (Card 6, No.12)

3 I IX2 : The ending point in the X direction.  $1 \leq IX2 \leq SBXMAX$

4 I INCX : The number of boxes by which increments are made in the positive X direction.  $1 \leq INCX \leq SBXMAX$

5 I IY1 : The starting point in the Y direction.  $1 \leq IY1 \leq SBYMAX$  (Card 6, No.13)

6 I IY2 : The ending point in the Y direction.  $1 \leq IY2 \leq SBYMAX$

7 I INCY : The number of boxes by which increments are made in the positive Y direction.  $1 \leq INCY \leq SBYMAX$

8 I IZ1 : The starting point in the Z direction.  $1 \leq IZ1 \leq SBZMAX$  (Card 6, No.14)

9 I IZ2 : The ending point in the Z direction.  $1 \leq IZ2 \leq SBZMAX$

10 I INCZ : The number of boxes by which increments are made in the positive Z direction.  $1 \leq INCZ \leq SBZMAX$

11 I ISTP : Indicates whether to read another set of mixed super box orientation data.

= 0 : read another set of data

. ≠ 0 : do not read any more mixed super box orientation card.

The data of this type of card have same features as Card 14-1. The last set of mixed super box orientation data must have a nonzero entry in the last field.

### **Card No. 15 Reflector Weights from Cards**

Omit if IDWT  $\geq 10$  (Card 13(c3), No.9).

1 12A1 WTTITL : Name of material being used for the reflector weights.

2 I IDWTT : Weight ID number (usually the ID number that will be put on the library, but may be anything. The code automatically sets it equal to the value of IDWT (Card 13(c3), No.9).

3 I ISUBST : Number of sets of weights associated with this IDWTT.  
Usually one since you need read in only 1 set of weights.

4 R THICK : The thickness in cm of each weighting region of interval.

5 I NUMINC : The number of intervals in the set of weights.  
(NUMINC\*THICH = maximum thickness for which weights are given.)

6 I NGPWT : The number of energy groups for this set of weights. NGPWT = NGP

7-1 R WTAVG(1,1) : The weight average for the first interval and the first energy group.

7-2 R WTAVG(2,1) : The weight average for the second interval and the first energy group.

7-NUMINC R WTAVG(NUMINC,1) : The weight average for the NUMINC-th interval and the first energy group.

7-NUMINC\*NGPWT R W :TAVG(NUMINC,NGPWT)

The weight average for the NUMINC-th interval and the NGPWT-th energy group.

Note : If ISUBST is greater than 1, the data "THICK" through "WTAVG(I,J)" must be repeated ISUBST times.

#### **Card No. 16 Generalized Geometry Description Card**

If any. But This Genaralized Geometry option is suppressed.

#### **Card No. 17 Albedo Deck**

Omit if NXX  $\neq$  2 (Card 6, No.21).

Albedo data must be formatted. It consists of the following cards:

##### **Card No. 17-1**

1 18A4 ATITLE : Title card for the albedo deck.

##### **Card No. 17-2**

1 E12.5 WTCOS(1) : The product of the fractional solid angle and the cosine of the polar angle for the first polar angle.

2 E12.5 W :TCOS(2) The product of the fractional solid angle and the cosine of the polar angle for the second polar angle.

NANG E12.5 WTCOS(NANG) : The product of the fractional solid angle and the cosine of the polar angle for the NANG-th polar angle. NANG is the number of polar angles and for the existing KENO Albedo is 4.

##### **Card No. 17-3**

1 E12.5 PLIM(1) : The cosine of the angular bound for the first polar angle.

2 E12.5 PLIM(2) : The cosine of the angular bound for the second polar angle.

NANG E12.5 PLIM(NANG) :The cosine of the angular bound for the NANG-th polar angle.

**Card No. 17-4**

1 E12.5 CPOL(1) : The cosine of the first polar angle.

2 E12.5 CPOL(2) :The cosine of the second polar angle.

NANG E12.5 CPOL(NANG) :The cosine of the NANG-th polar angule.

**Card No. 17-5**

1 E12.5 SPOL(1) :The sine of the first polar angle.

NANG E12.5 SPOL(NANG) :The sine of the NANG-th polar angule.

**Card No. 17-6**

1-NANG\*NGP\*NANG\*NGP 18A4

((((A(I,J,K,L),L=1,NANG),J=1,NGP),K=1,NANG)L=1,NGP) The albedo data in hexidecimal form and represents the relative angular return tables for input angle and energy.

**Card No. 18 Data for Special Start Options**

Omit if NTYPST<2 (Card 6, No.25).

if NTYPST=2:

Enter the X, Y, Z coodinates (in terms of boxes) of the box about which the starting distribution is given.

1 I NBXS :The X index of the box.

2 I NBYS :The Y index of the box.

3 I NBZS :The Z index of the box.

**4 R FX** : The fraction of neutrons to be started as spike in box (NBXS, NBYS, NBZS) of the array.

if NTYPST=3:

Enter the X, Y, Z indices (in terms of boxes) of the box where the neutrons will be started as a spike at the coordinates x, y, z in that box.

**1 I NBXS** : The X index of the box.

**2 I NBYS** : The Y index of the box.

**3 I NBZS** : The Z index of the box.

**4 R TFX** : The x coordinate of the spike in box (X, Y, and Z).

**5 R TFY** : The y coordinate of the spike in box (X, Y, and Z).

**6 R TFZ** : The z coordinate of the spike in box (X, Y, and Z).

if NTYPST=4:

Enter the box type in which the neutrons will be started at the point (x, y, z).

**1 I NBOXST** : The box type in which the neutrons will be started.

**2 R TFX** : The x coordinate of the point at which the neutrons will be started in the box type NBOXST.

**3 R TFY** : The y coordinate of the point at which the neutrons will be started in the box type NBOXST.

**4 R TFZ** : The z coordinate of the point at which the neutrons will be started in the box type NBOXST.

if NTYPST=5:

Enter the box type in which the neutrons will be started.

**1 I NBOXST** : The box type in which the neutrons will be started.

if NTYPST=6:

**1 I LFIN** : Final neutron to be started at this point. The first LFIN must be > 1. (The first neutron at this point is the one following the previous LFIN.) Points are read until LFIN=NPB (Card 6, No.3), the number of neutrons per batch.

2 I NBXS :The X index of the box.

3 I NBYS :The Y index of the box.

4 I NBZS :The Z index of the box.

5 R TFX : The x coordinate of the point.

6 R TFY : The y coordinate of the point.

7 R TFZ : The z coordinate of the point.

For example, assume there are 50 neutrons in a generation, and you wish to start the first five neutrons in box (1,1,1) at x=1.0, y=0.0, z=0.0 ; the next 25 neutrons in box (1,2,1) at x=1.0, y=0.0, z=2.0 ; and the remaining neutrons in box (1,2,2) at x=1.2, y=1.2, z=1.5. Then the input card could be entered as follows:

5 1 1 1 1.0 0.0 0.0 30 1 2 1 1.0 0.0 2.0 50 1 2 2 1.5 1.5 1.5

### Card No. 19 Search Constants

#### Omit if NSCH=0 (Card 6, No.22):

The physical significance of a search constant may be described as a proportionality constant. For a dimension search, the search constant (CONS) is proportional to the relative change in dimension ( $XX_{new} - XX_{old}$ )/ $XX_{old}$  divided by the change in k-effective ( $k_{new} - k_{old}$ ) where  $XX_{old}$  is the dimension that yielded a k-effective of  $k_{new}$ . The search constant is positive if k-effective increases as the dimension increases and negative if k-effective decreases as the dimension increases.

#### If NSCH = 1 or 3 (Card 6, No.22):

Enter one set for each geometry region, and in corresponding order. There will be one entry on a card for a sphere or hemisphere, three entries for a cylinder, xcyylinder, and six entries for a cube, cuboid or general region. Each entry corresponds to a dimension and tells how that dimension will be altered. A value of zero means that dimension will be unchanged. Note : Zero should ALWAYS be entered for a general region because a search cannot be made for a general region.

1 R CONS(1) : Search constant for the radius of a sphere, hemisphere, cylinder, xcyylinder, ycyylinder, hemicylinder, +x dimension of cube or cuboid.

2 R CONS(2) : Search constant for +z of cylinder, +x of xcyylinder, +y of ycyylinder, +x of xhemicylinder, +y of yhemicylinder, +z of zhemicylinder, -x dimension of cube or cuboid.

**3 R CONS(3)** : Search constant for -z of cylinder, -x of xcylinder, -y of ycylinder, -x of xhemicylinder, -y of yhemicylinder, -z of zhemicylinder, +y dimension of cube or cuboid.

**4 R CONS(4)** : Search constant for -y dimension of cube or cuboid.

**5 R CONS(5)** : Search constant for +z dimension of cube or cuboid.

**6 R CONS(6)** : Search constant for -z dimension of cube or cuboid.

Note : If NSCH = 1 or 3 and the problem contains a reflector that is maintain its thickness even if the unit spacing changes, simply enter zeros for all six search constant for each of the core boundary and reflector regions. The core will automatically calculate the new core boundary and maintain proper reflector thickness and weightings.  
If NSCH = 2 (Card 6, No.22):

Enter only one set. There will be three entries; one for each coordinate direction of the array. The number of units in a given direction will be changed by an integer multiple of the search constant specified. For any array search, the search constant for a given direction represents the minimum number of units by which the array size can be changed in that direction. The change in the number of units in each direction maintains the proportionality of search constants stated for those directions. The search constant is positive if k-effective increases as the array size increases.

**1 R CONS(1)** : Search constant for changing the number of units in the X direction.

**2 R CONS(2)** : Search constant for changing the number of units in the Y direction.

**3 R CONS(3)** : Search constant for changing the number of units in the Z direction.

## Card No. 20 The Last Card of KENO

**0 A** : 'END KENO' This card is optional and comes after the last card of the last case. No more data will be read after this card has been encountered.

**Card No. 21 Burnup Step Input**

0 A ICH(I) : 'BURN'

1 R BURN(1) : The first burnup step value (MWD/t)

2 R BURN(2) : The second burnup step value (MWD/t)

N R BURN(N) : The N-th burnup step value (MWD/t) N = IBURN + 1  
(Card 6, No.1)**Card No. 22 Zone Temperature**

0 A ICH(I) : 'TEMP'

1 R TEMP(1) : Temperature of the zone 1 (K).

2 R TEMP(2) : Temperature of the zone 2 (K).

IZM R TEMP(IZM) : Temperature of the zone IZM (Card 6, No.9) (K).

**Card No. 23 Data for Dancoff Correction**

0 A ICH(I) : 'DANCOFF'

1 R FH(1) : Rod pitch (cm).

2 R FH(2) : Rod inner radius (cm).

3 R FH(3) : Rod outer radius (cm).

4 R FH(4) : Macroscopic cross section for the clad region at epithermal energy

5 R FH(5) : Macroscopic cross section for the moderator region at epithermal energy

**Card No. 24 Flag for Dancoff Correction Calculation**

0 A ICH(I) : 'DAN.FLG'

1 I NDNF(1) : Flag of Dancoff Correlation Calculation for the zone 1.

= 0 : not fule or homogeneous fuel

= 20 : square(central region or infinity array)

= 21 : square(outer region of finite array)

= 22 : square(corner of finite array)

2 I NDNF(2) : Flag of Dancoff Correlation Calculation for the zone 2.

IZM I NDNF(IZM) : Flag of Dancoff Correlation Calculation for the zone IZM.

Card No.25 - No.28 should be omitted for the restart run.

### **Card No. 25 Nuclide Data**

#### **Card No. 25-1**

0 A ICH(I) :'NUCLIDE'

1 I MAXDAT :The number of input cases of nuclide data.

Card No.25-2 - No.25-3 should be repeated MAXDAT times.

#### **Card No. 25-2**

1 I IS :Zone ID

2 I IE :Last zone ID

3 I NUCM :The number of nuclides

#### **Card No. 25-3**

This card should be repeat NUCM times.

1 I NUCID : Nuclide ID

2 R DEN : Number density(atoms/barn·cm)

### **Card No. 26 Burn-up Zone Flag**

0 A ICH(I) :'BURN.REG'

1 I JREGB(1) : Burn-up zone flag for the zone 1.

= 0 : Non burn-up.

= 1 : Burn-up.

2 I JREGB(2) : Burn-up zone flag for the zone 2.

IZM I JREGB(IZM) :Burn-up zone flag for the zone IZM.

**Card No. 27 Energy Groups Reduction Table**

0 A ICH(I) :'EGY.COND'

1 I JCOND(1,1) : Number of the first energy group for the reduced energy group No.1.

2 I JCOND(2,1) : Number of the last energy group for the reduced energy group No.1.

2IGFEW-1 I JCOND(1,IGFEW) :Number of the first energy group for the reduced energy group No.IGFEW.

2IGFEW I JCOND(2,IGFEW) :Number of the last energy group for the reduced energy group No.IGFEW.

**Card No. 28 Zone-Region Table**

0 A ICH(I) :'REG.COND'

1 I JCOND(R(1) : Number of the region corresponding to the zone 1.

2 I JCOND(R(2) : Number of the region corresponding to the zone 2.

IZM I JCOND(R(IZM) :Number of the region corresponding to the zone IZM.

**Card No. 29 Kai Distribution(Fission Spectrum) Data**

0 A ICH(I) :'KAI'

1 R F :KAI(1)

2 R F :KAI(2)

IGM R F :KAI(IGM)

**Card No. 30 Fission Flag**

0 A ICH(I) : 'JKAI'

1 I J :KAI(1) Fission flag for zone 1.

= 0 : Non fission region.

= 1 : Fission region.

2 I JKAI(2) : Fission flag for zone 2.

IZM I JKAI(IZM) : Fission flag for zone IZM.

### 謝辞

MKENO-BURN の開発の過程において、以下の方々からの助力を頂いた。まず、開発の構想に当たっては、電力中央研究所の三村昌弘、松村哲夫両氏の助言を頂いた。初期のプログラミングでは、大興電子通信株式会社の中山光雄氏に助力頂いた。また、改良・整備の段階では、原研に出向されていた北海道電力株式会社の稻村実氏及び北陸電力株式会社の高田保氏の助力を頂いた。以上の方々に、著者一同の深甚なる感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] L.M. Petrie, et al. "KENO-IV An Improved Monte Carlo Criticality Program". *ORNL-4938*, 1975.
- [2] Y. Naito, et al. "MULTI-KENO : A Monte Carlo Code for Criticality Safety Analysis". *JAERI-M 83-049*, 1983.
- [3] Y. Naito, M. Inamura, F. Masukawa, and Y. Okuda. "UNITBURN: A Computer Code for Burnup Calculation of a Unit Fuel Cell". *JAERI-M 90-019*, 1990.
- [4] Y. Komuro, H. Tsunoda, J. Sakurai, Y. Komuro, H. Tsunoda, and J. Sakurai. "Neutron cross section data in multigroup constant library MGCL for criticality safety analysis". *JAERI-M-87-092*, July 1987.
- [5] Y. Komuro, H. Okuno, Y. Naito, H. Oda, M. Nagai, Y. Okuda, T. Sakai, and M. Shiota. "Generation and Verification of the Multigroup Constants Library MGCL-J3 for Nuclear Criticality Calculations". *JAERI-M-93-190*, September 1993.
- [6] K. Shibata, T. Nakagawa, T. Asami, T. Fukahori, T. Narita, S. Chiba, M. Mizumoto, A. Hasegawa, Y. Kikuchi, Y. Nakajima, and S. Igarasi. "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version-3". *JAERI-1319*, 1990.
- [7] Y. Ronen, editor. "*CRC Handbook of Nuclear Reactors Calculations*", Vol. 1. CRC Press, Inc., Florida, 1981.
- [8] W. Rhothenstein. "Collision Probabilities and Resonance Integrals for Lattices". *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 7, pp. 162–171, 1960.
- [9] G. I Bell and S. Glasstone. "*Nuclear Reactor Theory*". Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1970.
- [10] Y. Fukai. "New Analytical Formula for Dancoff Correction for Cylindrical Fuel Lattices". *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 9, pp. 370–376, 1961.
- [11] A. Sauer. "Approximate Escape Probabilities". *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 16, pp. 329–335, 1963.
- [12] J. P. McNeece, T. J. Trapp, and J. K. Thompson. "MCDAN – A Monte Carlo Computer Code for Calculating the Dancoff Correction Factor for Spheres and Rods". *PNL-3086*, 1979.

- [13] H. Okuno and Y. Komuro. "DANKE: A Monte Carlo Computer Program for Calculating the Dancoff Correction Factor for Spheres, Rods and Slabs". *JAERI-M 94-049*, 1994.
- [14] Y. Naito, T. Hara, H. Ihara, and J. Katakura. "Development of Nuclear Decay Data Library JDDL and Nuclear Generation and Decay Calculation Code COMRAD". *JAERI-M 86-121*, 1986.

## 付 錄

## A-1 計算例 - PWR ピンセル体系に対する計算

## A-1.1 入力データ

計算例として、初めに PWR 単一ピンセル体系に対する計算例を示す。この計算は一般に行われている単一ピンセル体系における燃焼計算の例であって、もっとも基本となる計算と言える。

```

PWR PIN GEOMETRY BURNUP PROBLEM 33,000 MWD/THM          00000100
RESTART 0 0.0 /                                         00000200
KEY 1 1 198853 560 900 0 0 0 1 /                         00000300
PRINT 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 /                           00000400
PLT.ZONE 0 /                                         00000500
SBOX.MAP 1 /                                         00000600
1 /                                         00000700
INTEGER                                         00000800
 1   110  100  10  26  11  1  26  4   8           00000904
 1 1 1 1 3(4)      5 10 4                         00001000
 1 0 2010 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 26 11 12      3/        00001100
REAL                                         00001200
 60.0 7.24223E+4 1.E-4 1.E-4 / POWER             00001300
 4*-1.0 2*0.0                         00001400
 1  -1 1.0                         00001500
 2  2 1.0                          00001600
 3  3 1.0                          00001700
 4  4 1.0                          00001800
SUPER BOX 1      2  1 1 3                         00001900
BOX TYPE 1                                         00002000
CYLINDER 1  0.4647  182.1  -182.1                  26*0.5  00002100
CYLINDER 2  0.563   182.1  -182.1                  26*0.5  00002200
CUBOID 3  0.744  -0.744  0.744  -0.744  182.1  -182.1  26*0.5  00002300
BOX TYPE 2                                         00002400
CUBOID 4  0.744  -0.744  0.744  -0.744  15.0   -15.0  26*0.5  00002500
CELL BDY 0  0.744  -0.744  0.744  -0.744  212.1  -212.1  26*0.5  00002600
CUBOID 0  0.744  -0.744  0.744  -0.744  212.1  -212.1  26*0.5  00002700
CORE BDY 0  0.744  -0.744  0.744  -0.744  212.1  -212.1  26*0.5  00002800
CUBOID 0  0.744  -0.744  0.744  -0.744  212.1  -212.1  26*0.5  00002900
 2  1 1 1  1 1 1  1 3 1  0                         00003000
 1  1 1 1  1 1 1  2 2 1  1                         00003100
END KENO                                         00003200
BURN 0.0      3000.0 /                         00000000
TEMP 900.0 3(560.0) /                         00003400
DANCOFF 1.626 0.53975 0.62611 0.7 1.487 / BENCHMARK 00003503
CDANCOFF 1.488 0.4647 0.563 0.0 1.487 / PICH,PELETR,FUEL,R,CROSS2,CROSS1 00003603
DAN.FLG 20 3(0) /                           00003702
CC NUCLIDE DATAS                               00003800
NUCLIDE 3 /                                         00003900
 1  1 5 / FUEL(3.203W%) ASS.:D03            00004000
3080160 4.6436E-2 / D-16                      00004101
3922340 6.7277E-6 / U-234                    00004201

```

3922350	7.5287E-4	/ U-235	00004301		
3922360	2.5512E-6	/ U-236	00004401		
3922380	2.2456E-2	/ U-238	00004501		
2 2 1	/ FUEL CLAD		00004600		
3400000	3.7950E-2	/ ZY-4	00004701		
3 4 4	/ MODER.(WITH 500PPM BORON)		00004800		
3010010	4.7682E-2	/ H-1	00004901		
3050100	3.9004E-6	/ B-10	00005001		
3050110	1.5990E-5	/ B-11	00005101		
3080160	2.3871E-2	/ O-16	00005201		
BURN.REG	1 3(0)	/	00005300		
EGY.COND	1 26	/	00005400		
REG.COND	4(1)	/ WHOLE ASSEMBLY	00005500		
KAI			00005600		
1.0164E-1	5.8507E-1	2.8078E-1	2.7502E-2	4.5649E-3	00005700
3.5259E-4	8.6268E-5	19(0.0)	/	00005800	
JKAI			00005900		
1 3(0)	/		00006000		

上の入力に続くリスタート用の入力ファイルをの例を示す。

PWR PIN GEOMETRY BURNUP PROBLEM	33,000 MWD/THM	00000100
RESTART	1 3000.0 /	00000200
KEY	1 1 198853 560 900 0 0 0 2 /	00000300
PRINT	1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 /	00000400
PLT.ZONE	0 /	00000500
SBOX.MAP	1 /	00000600
1 /		00000700
INTEGER		00000800
1 110 100 10 26 11 1 26 4 8		00000904
1 1 1 1 3(4) 5 10 4		00001000
1 0 2010 0 0 0 0 0 0 0 0 2 26 11 12 3/		00001100
REAL		00001200
60.0 7.24223E+4 1.E-4 1.E-4 / POWER		00001300
4*-1.0 2*0.0		00001400
1 -1 1.0		00001500
2 2 1.0		00001600
3 3 1.0		00001700
4 4 1.0		00001800
SUPER BOX	1 2 1 1 3	00001900
BOX TYPE	1	00002000
CYLINDER	1 0.4647 182.1 -182.1	26*0.5 00002100
CYLINDER	2 0.563 182.1 -182.1	26*0.5 00002200
CUBOID	3 0.744 -0.744 0.744 -0.744 182.1 -182.1	26*0.5 00002300
BOX TYPE	2	00002400
CUBOID	4 0.744 -0.744 0.744 -0.744 15.0 -15.0	26*0.5 00002500
CELL BDY	0 0.744 -0.744 0.744 -0.744 212.1 -212.1	26*0.5 00002600
CUBOID	0 0.744 -0.744 0.744 -0.744 212.1 -212.1	26*0.5 00002700
CORE BDY	0 0.744 -0.744 0.744 -0.744 212.1 -212.1	26*0.5 00002800
CUBOID	0 0.744 -0.744 0.744 -0.744 212.1 -212.1	26*0.5 00002900
2 1 1 1 1 1 1 1 0		00003000
1 1 1 1 1 1 2 2 1 1		00003100
END KENO		00003200
BURN	3000.0 6000.0 /	00000000
TEMP	900.0 3(560.0) /	00003400

DANCOFF	1.626	0.53975	0.62611	0.7	1.487	/	BENCHMARK	00003503
DAN.FLG	20	3(0)	/					00003702
BURN.REG	1	3(0)	/					00005300
EGY.COND	1	26	/					00005400
REG.COND	4(1)		/ WHOLE ASSEMBLY					00005500
KAI								00005600
	1.0164E-1	5.8507E-1	2.8078E-1	2.7502E-2	4.5649E-3			00005700
	3.5259E-4	8.6268E-5	19(0.0)	/				00005800
JKAI								00005900
	1	3(0)	/					00006000