

DCHAIN：放射性ならびに安定核種の
生成崩壊解析コード

1977年3月

JAERI レポート

この報告書は、日本原子力研究所で行なわれた研究および技術の成果を研究成果編集委員会の審査を経て、不定期に刊行しているものです。

研究成果編集委員会

委員長 山本賢三(理事)

委員

赤石 準 (保健物理安全管理部)	佐々木吉方 (研究炉管理部)
朝岡 卓見 (原子炉工学部)	佐藤 一男 (動力炉開発・安全性研究管理部)
天野 恕 (製造部)	田川 博章 (原子炉化学部)
石塚 信 (動力試験炉部)	田中 正俊 (核融合研究部)
石原 豊秀 (安全管理室)	長崎 隆吉 (燃料工学部)
伊藤 太郎 (企画室)	能沢 正雄 (安全工学部)
大内 信平 (材料試験炉部)	浜口 由和 (物理部)
大森 栄一 (技術情報部)	原田吉之助 (物理部)
岡下 宏 (原子炉化学部)	平田 実穂 (動力炉開発・安全性研究管理部)
小幡 行雄 (核融合研究部)	堀田 寛 (研究部)
栗山 将 (開発試験場)	

入手(資料交換による)、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会情報サービス事業部(茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI Report

Published by the Japan Atomic Energy Research Institute

Board of Editors

Kenzo Yamamoto (Chief Editor)

Jun Akaishi	Hiroshi Hotta	Masao Nozawa	Kazuo Sato
Hiroshi Amano	Toyohide Ishihara	Yukio Obata	Hiroaki Tagawa
Takumi Asaoka	Makoto Ishizuka	Hiroshi Okashita	Masatoshi Tanaka
Yoshikazu Hamaguchi	Taro Ito	Eiichi Ohmori	
Kichinosuke Harada	Isamu Kuriyama	Shinpei Ouchi	
Mitsuho Hirata	Ryukichi Nagasaki	Yoshikata Sasaki	

Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to the Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki-ken, Japan.

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 科学図書印刷株式会社

DCHAIN: 放射性ならびに安定核種の生成崩壊 解析コード

日本原子力研究所東海研究所

田 坂 完 二

1976 年 11 月 8 日受理

原子炉において考慮する必要があるあらゆる種類の崩壊系列を取扱い得る Bateman 法による核種の生成崩壊解析コード「DCHAIN」を開発した。Bateman 法は Matrix Exponential 法と比較して、(1) 計算精度がよく、(2) 計算機の所要コアメモリーが少なくすむ、という特長がある反面、Bateman 法に基づく在来の方法においては、(1) 取扱える崩壊系列の種類が限定され、(2) 循環形式の崩壊系列は取扱えないという欠点があった。本コードは Bateman 法に基づくコード「FP-S」を改良し上記の 2 点の欠点を克服したものであり、以下の特長をもっている。

- (1) 崩壊および中性子核反応によるあらゆる種類の核壊変を統一的に取扱うことができる。
- (2) 各核種の崩壊系列をコード内で自動的に組立てる。これに必要な入力データは各核種の親核種名、親核種の崩壊（または反応）の種類および分岐比である。また各核種は核種名で識別するためライブラリー中での核種の配列順序は任意である。
- (3) 循環形式の崩壊系列も近似的ではあるが精度よく取扱われる。
- (4) 崩壊系列中に同じ崩壊定数があっても正しく計算を行うことができる。
- (5) 線型化された各崩壊系列の先頭核種には累積収率を与えられ、崩壊系列の長さを短く制限しても精度よく各核種の生成量を計算することができる。
- (6) 各タイムステップ毎に出力、中性子束、中性子スペクトル、核分裂核種毎の核分裂反応率割合および核分裂エネルギーを変更することができる。
- (7) 核データライブラリーから任意の核種のみ選び出してその生成量を計算することができる。
- (8) 変数のディメンションが可変であり、核種数、崩壊系列の長さなどに対する制限が少ない。

現在、1170 核種の核分裂生成物に対する核データライブラリーが整備されており、半減期、崩壊系列、中性子反応断面積、核分裂収率、および崩壊エネルギーのデータが収納されている。DCHAIN コードは各核種の生成量と崩壊熱の計算に便利に作られているが、崩壊熱以外の γ 線スペクトルなどの計算も DCHAIN コードによる各核種の生成量を基に FPGAM コードにより行うことができる。

DCHAIN: Code for Analysis of Build-up and Decay of Nuclides

Kanji Tasaka

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

Received November 8, 1976

DCHAIN is a one-point depletion code which solves the coupled equations of radioactive growth and decay for a large number of nuclides by the Bateman method. A library of nuclear data for 1170 fission products has been prepared for providing input data to this code. The Bateman method surpasses the matrix exponential method in computational accuracies and in saving computer storage for the code. However, most existing computer codes based on the Bateman method have shown serious drawbacks in treating cyclic chains and more than a few specific types of decay chains. The present code has surmounted the above drawbacks by improving the code FP-S, and has the following characteristics:

- (1) The code can treat any type of transmutation through decays or neutron induced reactions.
- (2) The code constructs the decay scheme of each nuclide in the code and breaks it up into linear chains. Nuclide names, decay types and branching ratios of mother nuclides are necessary as the input data for each nuclide. Order of nuclides in the library is arbitrary because each nuclide is distinguished by its nuclide name.
- (3) The code can treat cyclic chains by an approximation.
- (4) The code performs calculation even if two nuclides with equal decay constants exist in a chain.
- (5) Cumulative fission yield is used for the top nuclide in each linear chain so that the abundance of each nuclide can be calculated accurately even if the chain length is limited.
- (6) Power, neutron flux, neutron spectrum, and fission ratio and fission energy of each fissile nuclide can be varied for each time step.
- (7) Abundances can be calculated for the selected nuclides in the nuclear data library.
- (8) The code uses variable dimension arrays and there is little limitation in number of nuclides or length of a chain.

A library of the nuclear data has been prepared for 1170 fission products, including the data for half-lives and decay schemes, neutron absorption cross sections, fission yields, and disintegration energies. While DCHAIN is used to compute the compositions, radioactivity and decay heat of fission products, the gamma-ray spectrum of fission products can be computed also by a separate code FPGAM using the compositions obtained from DCHAIN.

目 次

1. はじめに	1
2. 基本方程式と解法	2
2.1 線型の崩壊系列と Bateman の一般解	2
2.2 核分裂による生成項がある場合	3
2.3 分岐, 合流の取扱い	4
2.4 中性子反応による崩壊系列の取扱い	4
2.5 崩壊系列中に同じ崩壊定数が存在する場合の取扱い	4
2.6 循環形式の崩壊系列の取扱い	5
3. 計算コード	6
3.1 サブルーチン	6
3.2 可変ディメンション変数	7
3.3 磁気テープおよびディスク	9
4. 核データライブラリー	9
5. 入力, 出力形式	12
5.1 入力形式	12
5.2 出力形式	15
6. 計算例	16
7. 結 語	23
謝 辞	24
参考文献	25
付録 1 FORTRAN List of DCHAIN Code	(マイクロフィッシュ)
付録 2 Nuclear Data Library of Fission Products	(")
付録 3 Decay Schemes of Fission Products	(")
付録 4 Output List of the Sample Calculation	(")

Contents

1. Introduction.....	1
2. Fundamental equations and analytical method	2
2. 1 Bateman solution for linear chain	2
2. 2 Treatment of fission source term.....	3
2. 3 Treatment of complex chain.....	4
2. 4 Treatment of neutron reaction.....	4
2. 5 Treatment of two isotopes with equal decay constants in a chain	4
2. 6 Treatment of cyclic chain	5
3. Computer code	6
3. 1 Subprograms	6
3. 2 Variable dimension arrays.....	7
3. 3 Magnetic tapes and disks	9
4. Nuclear data library.....	9
5. Input and output formats	12
5. 1 Input format	12
5. 2 Output format	15
6. Sample calculation.....	16
7. Concluding remarks	23
Acknowledgment	24
References	25
Appendices (Microfiches)	
App. 1 FORTRAN List of DCHAIN Code	
App. 2 Nuclear Data Library of Fission Products	
App. 3 Decay Schemes of Fission Products	
App. 4 Output List of the Sample Calculation	

1. はじめに

原子力エネルギーを安全にかつ経済的に利用するためには、原子炉における核分裂生成物 (FP) やアクチニド核種などの放射性核種および安定核種の生成量を正確に把握しておくことが必要である。この原子炉中における核種の生成と崩壊はよい近似で一次の定数係数の常微分方程式により記述することが出来る。この連立方程式の解法には Bateman 法^{1)~4)}と Matrix Exponential 法^{5)~7)}のおもに2つの方法があり、DCHAIN コードは前者の Bateman の方法にのっとっている。

Matrix Exponential 法は連立一次常微分方程式 ((2.1) 式参照) をマトリックスを使って次のように表示し、

$$\dot{N} = AN, \quad (1.1)$$

N = 核種の生成量のベクトル,

A = 壊変マトリックス,

各核種の生成量を初期値ベクトル $N(0)$ と Matrix Exponential の積として求めるものである。すなわち

$$N = \exp(At)N(0), \quad (1.2)$$

ここで

$$\exp(At) = I + At + \frac{(At)^2}{2!} + \dots = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(At)^m}{m!}. \quad (1.3)$$

この方法のおもな問題点は、Matrix Exponential の計算のために計算機の膨大なコアメモリーを必要とする点と、計算精度が不十分であることの2点である。Matrix Exponential 法による代表的コード ORIGIN⁸⁾においてはコアメモリーを節約するため、壊変マトリックスのうち零でないもののみを保存し、そのマトリックス上の位置の指定を2つのベクトルで行っている。さらに、Matrix Exponential の計算を繰返し公式を使って行いメモリーの節約を行っている。第2の精度上の問題は、短寿命核種の存在と関連して壊変マトリックスの固有値に非常に大きな値が存在することによって、そのため ORIGIN コードでは短寿命核種は平衡状態にあると仮定し、それ以外の核種の生成量を Matrix Exponential 法を適用して計算し、短寿命核種自身の生成量は Bateman 法により計算している。また (1.3) 式の Matrix Exponential の値は無級数で与えられるので、その精度は項数に依存する。

Bateman 法は崩壊系列を線型の崩壊系列に分解し、線型の崩壊系列に対する Bateman の一般解を重ねあわせ、各核種の生成量を計算するものである。Bateman 法は Matrix Exponential 法と比較して計算精度がよく、計算機のコアメモリーの必要量が少ないという長所があ

る反面、取扱いうる壊変形式および崩壊系列の種類が限定されるという短所があった。また循環形式の崩壊系列は取扱えなかった。

DCAHIN コードは精度がよく、コアメモリーが小さくてすみ、しかも短寿命核種も長寿命核種も統一的に取扱える Bateman 法の利点をいかし、各核種の生成量を計算するコードで、FP-S⁹⁾ プログラムに以下の項目の改良を加え、上記の Bateman 法の欠点を克服したものである。

1) FP-S では取扱えなかった中性子反応による核壊変を取扱えるようにした。

2) FP-S では取扱える崩壊系列は15種類に限定されていたが、任意の崩壊系列が取扱えるようにした。循環形式による崩壊系列も近似的ではあるが精度よく取扱うことが出来る。

3) 崩壊系列中に同じ崩壊定数の核種が存在しても正しく計算を行うことが出来るようにした。

4) FP-S では固定されていた原子炉出力、核分裂エネルギー、各核分裂核種の核分裂割合を各タイムステップごとに変えられるようにした。

5) 核データライブラリーから任意の核種のみ選び出して、その生成量を計算することが出来るようにした。線型化された各崩壊系列の先頭核種には累積収率が与えられ、崩壊系列の長さを短く制限しても精度よく各核種の生成量を計算することが出来る。

6) 変数のディメンションを可変としたので、核種数、崩壊系列の長さなどに対する制限が少なくなった。

DCHAIN コードは核種の生成崩壊を解析するコードであり、現在 FP に対する核データライブラリーが整備されている。各核種の生成量および全 FP の崩壊熱は DCHAIN コード自身で計算でき、FP の γ 線スペクトルは DCHAIN コードにより求められた各核種の生成量をもとに別のプログラム⁹⁾で計算するようになっている。燃料などのアクチニド核種の核データライブラリーは目下作成中である。

なお核種の生成崩壊の解法としては Bateman 法および Matrix Exponential 法以外にも、各核種の生成量とその崩壊系列に含まれる核種の指数減衰の項の和として、

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^k C_{ij} e^{-\lambda_j t}, \quad (1.4)$$

と表わし、その係数 C_{ij} を順次求めていく方法もある⁹⁾。しかし (1.4) 式は本質的には Bateman の解と等価である。

2. 基本方程式と解法

原子炉系における核分裂生成物 (FP), 燃料核種, および構造材核種の生成崩壊は, 核分裂収率の項による生成, 核種の崩壊に基づく当該核種の生成崩壊, および中性子反応による生成崩壊から成り立っており, その方程式は次のように表わされる²⁾.

$$\begin{aligned} \frac{dN_i}{dt} = & \gamma_i F(t) + \sum_j f_{j \rightarrow i} \lambda_j N_j(t) \\ & + \sum_k g_{k \rightarrow i} \sigma_k \phi(t) N_k(t) \\ & - (\lambda_i + \sigma_i \phi(t)) N_i(t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここで, $F(t)$: 時刻 t における核分裂反応率,

γ_i : 核種 i の核分裂収率,

$f_{j \rightarrow i}$: 核種 j の単位崩壊あたりの核種 i の生成量,

λ_j : 核種 j の崩壊定数,

$$\lambda_j = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.6931}{T_{1/2}}, \quad T_{1/2}: \text{半減期}$$

$g_{k \rightarrow i}$: 核種 k が中性子と反応するたびに生成される核種 i の量,

σ_k : 核種 k の平均ミクロ中性子反応断面積,

$\phi(t)$: 時刻 t における中性子束.

(2.1) 式は核種の原子個数の時間変化の割合を表わす式であり, 右辺の第1項は核分裂による核種 i の生成率を表わしている. 核分裂収率 γ_i は核分裂核種に依存するのはもちろんのこと, 複合核の励起エネルギーにも依存するので入射中性子スペクトルによっても変化する. 核分裂収率が問題となるのはおもに核分裂生成物 (FP) であるが, 三体核分裂に関連してトリチウム (T) も核分裂収率をもっている. アクチノイド核種の生成量の計算においてはこの項は無視される. 第2項および第3項は, それぞれ他の核種の崩壊および中性子反応により核種 i が生成される割合を表わしている. また, 第4項は核種 i が崩壊および中性子反応により単位時間あたりに無くなる割合を表わしている.

(2.1) 式において γ_i , $F(t)$, $g_{k \rightarrow i}$, σ_k および $\phi(t)$ は時間依存の量であるが, その時間変化は比較的ゆるやかであり, ある一定の時間範囲では一定と近似することができる. そうすると (2.1) 式は定数係数の連立一次常微分方程式となり, 解析的に解くことが出来る. また解の重ね合わせを行うことが出来る.

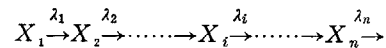
本コードにおいては (2.1) 式の解を Bateman の式を重ね合わせることによって求めている. すなわち各核種の初期値のみを考慮する場合と, 核分裂による生成を考慮する場合について別々に取り扱い, 2つの解を加え合

わせて生成崩壊方程式の一般解を求める. 初期値のみによる崩壊方程式の解は Bateman の一般解¹⁾ によって与えられる. また核分裂による生成の項は Bateman の一般解を照射時間にわたって時間積分した形として求められる.

Bateman の式は任意の長さの線型の崩壊系列に対して解析解として表わされるので, どんなに β 崩壊系列が長くても, またどんなに複雑に分岐していても, それを線型の崩壊系列に分解し, それぞれの系列について独立に計算した後解を重ね合わせることによって容易に一般解を求めることが可能である.

2.1 線型の崩壊系列と Bateman の一般解

つぎのような n 段の線型の崩壊系列を考える.



ここで X_i は放射性核種であり, λ_i はその崩壊定数である. ただし X_n は安定核種であってもよく, その場合には λ_n は零となる. この場合 X_i に対する (2.1) 式の崩壊方程式は次式のように簡単になる.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (i=1), \quad (2.2a)$$

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i N_i + \lambda_{i-1} N_{i-1} \quad (i \geq 2). \quad (2.2b)$$

X_1 の初期値が N_1^0 で, 他の核種の初期値がすべて零の場合の (2.2) 式の一般解は Bateman により次のように与えられている.

$$N_i(t) = N_1^0 \sum_{j=1}^i d_j e^{-\lambda_j t}, \quad (2.3a)$$

$$d_j = 1 \quad (i=1), \quad (2.3b)$$

$$d_j = \frac{\prod_{k=1}^{i-1} \lambda_k}{\prod_{k=1}^i (\lambda_k - \lambda_j)} \quad (i \geq 2), \quad (k \neq j) \quad (2.3c)$$

(2.3) 式は崩壊系列の長さが i で先頭核種にのみ初期値がある場合の解であり, Bateman 関数 b_i により

$$N_i(t) = N_1^0 b_i(t; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i), \quad (2.4a)$$

$$b_i(t; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i) = \sum_{j=1}^i d_j e^{-\lambda_j t}, \quad (2.4b)$$

と書きなおすことが出来る. 2番目以後の核種も零でない初期値をもっている場合には崩壊系列の長さを1つず

つ短くしていった(2.4)式を加え合わせればよい。したがってこの場合の解は

$$N_i(t) = \sum_{k=1}^i N_k^0 b_{i-k+1}(t; L_1, L_2, \dots, L_{i-k+1}),$$

$$L_j = \lambda_{j+k-1}, \tag{2.5}$$

となる。

2.2 核分裂による生成項がある場合

原子炉中における核分裂生成物の生成量を考える際には崩壊のみならず核分裂による生成項を考えなければならない。この場合、線型の崩壊系列中の*i*番目の核種に対する生成崩壊方程式は(2.1)式から次のようになる。

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i N_i + \lambda_{i-1} N_{i-1} + \gamma_i F. \tag{2.6}$$

(2.6)式において核分裂による生成項 $\gamma_i F$ が不在の場合の一般解はすでに(2.5)式によって与えられている。

核分裂による生成項は以下のように考えればよい。

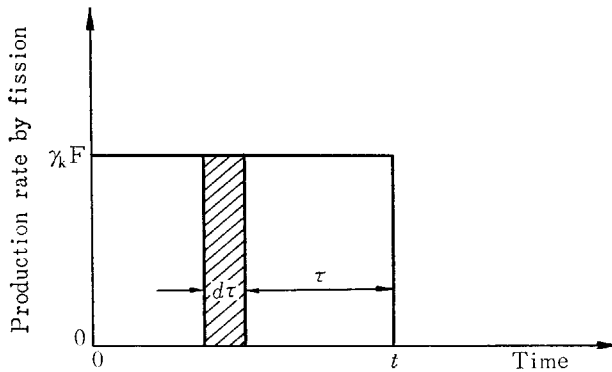


Fig. 2.1 Production rate of nuclide *k* by fission.

Fig. 2.1において $d\tau$ の時間に生成される核種 *k* の量は $(\gamma_k F d\tau)$ であり、時刻 *t* までの冷却時間は τ である。したがって、時間 $d\tau$ の間における核分裂による核種 *i* の時刻 *t* における生成量への寄与は、(2.5)式において核種 *k* の初期値に $(\gamma_k F d\tau)$ を代入し、冷却時間を τ とすることにより、

$$N_i(t) = \sum_{k=1}^i (\gamma_k F d\tau) b_{i-k+1}(\tau; L_1, L_2, \dots, L_{i-k+1}),$$

$$L_j = \lambda_{j+k-1},$$

と与えられる。したがって、時刻零から時刻 *t* まで照射し続けた場合には上式を $\tau=0$ から $\tau=t$ まで積分すればよく、時刻 *t* における核種 *i* の生成量は

$$N_i(t) = \sum_{k=1}^i \left(\gamma_k F \int_0^t d\tau \right) b_{i-k+1}(\tau; L_1, L_2, \dots, L_{i-k+1}),$$

$$L_j = \lambda_{j+k-1}, \tag{2.7}$$

となる。したがって核分裂による生成項と初期値と両方

ある場合の(2.6)式の一般解は、(2.5)式と(2.7)式を加え合わせて、

$$N_i(t) = \sum_{k=1}^i \left[N_k^0 b_{i-k+1}(t; L_1, L_2, \dots, L_{i-k+1}) + \gamma_k F \int_0^t d\tau b_{i-k+1}(\tau; L_1, L_2, \dots, L_{i-k+1}) \right],$$

$$L_j = \lambda_{j+k-1} \tag{2.8}$$

となる。Bateman 関数が(2.4b)式のごとく指数関数の和で表現されるため、その時刻零から *t* までの積分関数 B_i も容易に以下のごとく求まる。

$$B_i(t; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i) = \sum_{j=1}^i d_j \frac{1 - e^{-\lambda_j t}}{\lambda_j}. \tag{2.9}$$

この積分 Bateman 関数を使うことにより(2.8)式は以下のごとく書き直すことが出来る。

$$N_i(t) = \sum_{k=1}^i \left[N_k^0 b_{i-k+1}(t; L_1, L_2, \dots, L_{i-k+1}) + \gamma_k F B_{i-k+1}(t; L_1, L_2, \dots, L_{i-k+1}) \right],$$

$$L_j = \lambda_{j-k+1}. \tag{2.10}$$

DCHAIN プログラムにおいては照射履歴はタイムステップに分割して表わされ、各タイムステップごとに出力、中性子スペクトルおよび核分裂エネルギーを変更することが出来る。

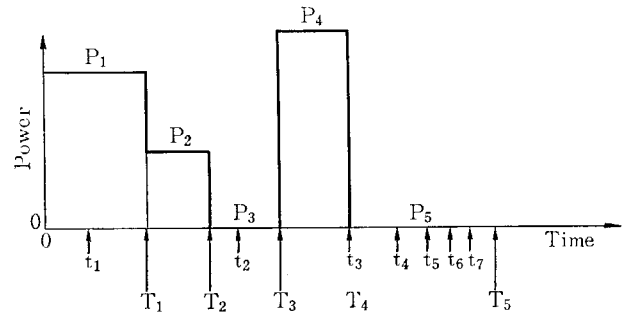


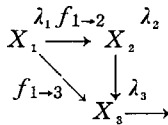
Fig. 2.2 Power history.

Fig. 2.2 の例の場合タイムステップの境界を示すのが T_1, T_2, \dots, T_5 であり、後述のインプットに際しては各タイムステップの時間間隔として $T_1, (T_2 - T_1), (T_3 - T_2), \dots, (T_5 - T_4)$ が入力される。また各核種の生成量を計算しアウトプットする時刻は照射履歴とは別個に入力される。上図の例において、 t_1, t_2, \dots, t_7 がアウトプット時刻である。各タイムステップの境界の時刻においてはアウトプットの有無に関係なく各核種の生成量が計算され、次のタイムステップにおける生成量を計算する時の初期値とされる。上図の例においては、時刻 t_1 における生成量は時刻零における値を初期値として計算される。時刻 t_2 における生成量は、まず時刻 T_1 および T_2 における生成量を順次計算し、 T_2 における生成量を初期値としておきかえ、冷却時間を $(t_2 - T_2)$ として計算される。同様に t_3, t_4, \dots における生成量は T_4 に

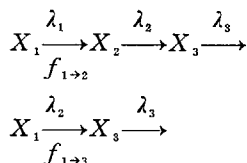
おける値を初期値とし、冷却時間をそれぞれ、 $(t_1 - T_1)$, $(t_2 - T_2)$, ...として計算される。アウトプット時刻はタイムステップ内の時刻である必要があり、上図の例においては $t_1 \leq T_1$ であることが必要である点に注意する必要がある。

2.3 分岐, 合流の取扱い

崩壊系列が単純な線型の系列でなく、分岐と合流がある場合には崩壊系列を単純な線型の系列に分解してそれぞれの解を求め、のちにそれらの解を加え合わせればよい。各核種の崩壊系列は DCHAIN コード内で自動的に組立てられ、その線型の崩壊系列への分解も同時にコード内で行われる。各核種の崩壊系列データとして必要なのは各核種の親核種(複数)の名前、崩壊形式および分岐比である。



上図の崩壊系列において、分岐比 f_{1-2} , f_{1-3} はそれぞれ核種 X_1 が崩壊して X_2 および X_3 になる割合を表わし、 $f_{1-2} + f_{1-3} = 1$ である。DCHAIN コードは上図の崩壊系列を以下の2本の線型の崩壊系列に分解する。



そしてそれぞれの線型の崩壊系列を解き、 X_3 の生成量は両者の和として与えられる。ただし、この場合には分岐比を考慮する必要がある。

(2.10) 式の線型の崩壊系列に対する解において、いま仮にすべての核種に分岐があり核種 k の崩壊により核種 $(k+1)$ が生成する分岐比を $f_{k \rightarrow k+1}$ とすると、核種 i の生成量は

$$\begin{aligned}
 N_i(t) = & \sum_{k=1}^i \left(\prod_{j=k}^{i-1} f_{j \rightarrow j+1} \right) \{ N_k^0 b_{i-k+1}(t; L_1, L_2, \dots, \\
 & L_{i-k+1}) + \gamma_k F B_{i-k+1}(t; L_1, L_2, \dots, L_{i-k+1}) \}, \\
 & L_j = \lambda_{j+k-1}, \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

となる。したがって上図の例においては2本の崩壊系列に対して(2.11)式をそれぞれ別個に適用し、それぞれの解を加え合わせることで X_3 の生成量が求められる。

2.4 中性子反応による崩壊系列の取扱い

(2.1) 式から明らかなごとく、中性子反応における反応率 $\sigma_k \phi(t)$ は崩壊定数 λ_j に対応し、 $g_{k \rightarrow i}$ は分岐比 $f_{j \rightarrow i}$ と等価であると考えることが出来る。したがって中性子反応による崩壊系列を解くためには

$$\sigma_k \phi(t) \longrightarrow \lambda_k^*, \quad (2.12a)$$

$$g_{k \rightarrow i} \longrightarrow f_{k \rightarrow i}^*, \quad (2.12b)$$

の置きかえを行い、普通の崩壊の場合と同じ取扱いをすればよい。また核種 k が中性子反応と同時に崩壊もする場合には、

$$\lambda_k + \sigma_k \phi(t) \longrightarrow \lambda_k^*, \quad (2.13a)$$

$$f_{k \rightarrow i} \frac{\lambda_k}{\lambda_k^*} + g_{k \rightarrow i} \frac{\sigma_k \phi(t)}{\lambda_k^*} \longrightarrow f_{k \rightarrow i}^*, \quad (2.13b)$$

と置きかえ、崩壊のみの場合と同じ取扱いをすればよい。(2.12a) 式および(2.13)式における σ_k は核種 k の平均中性子反応断面積であり、核データライブラリーに収納されている多群断面積 σ_k^i および入力データである中性子スペクトル $\Phi^i(t)$ から

$$\sigma_k = \frac{\sum_i \sigma_k^i \Phi^i(t)}{\sum_i \Phi^i(t)}, \quad (2.14)$$

と与えられる。(2.12) 式、(2.13) 式において等価崩壊定数 λ_k^* および等価分岐比 $f_{k \rightarrow i}^*$ は単純な崩壊の場合と異なり、平均中性子反応断面積 σ_k および中性子束 $\phi(t)$ の時間依存に応じて、各タイムステップごとに変化する点に注意すべきである。 λ_k^* および $f_{k \rightarrow i}^*$ は各タイムステップごとにコード内で再計算される。また(2.13b) 式において、核種 k の崩壊および中性子反応により同一の核種 i が生成する場合はまれであり、普通は $f_{k \rightarrow i}$ か $g_{k \rightarrow i}$ かどちらか一方の項しか存在しない。

2.5 崩壊系列中に同じ崩壊定数が存在する場合の取扱い

崩壊系列中に同じ崩壊定数の核種が存在する場合、(2.3c) 式の Bateman 関数の係数 d_j が不定となり定義できない。したがって Bateman の式によっては核種の生成量を計算することは出来ない。しかしこの場合にも Bateman 関数 b_i およびその積分関数 B_i を以下に示すように拡張して定義することにより、線型の崩壊系列における核種 i の生成量を(2.11)式により求めることが出来る。いま線型の崩壊系列における l 番目の核種と m 番目の核種の崩壊定数が等しいとした場合、Bateman 関数 b_i およびその積分関数 B_i は次式で定義される。

$$b_i(t; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, m}}^i d_j e^{-\lambda_j t} - \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, m}}^i d_j \right) e^{-\lambda_i t} + \frac{\prod_{j=1}^{i-1} \lambda_j}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i, m}}^i (\lambda_j - \lambda_i)} \cdot t e^{-\lambda_i t}, \quad (2.15)$$

$$B_i(t; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, m}}^i d_j \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_j t}}{\lambda_j} - \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, m}}^i d_j \right) \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{\lambda_i} + \frac{\prod_{j=1}^{i-1} \lambda_j}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i, m}}^i (\lambda_j - \lambda_i)} \cdot \frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{\lambda_i} - t e^{-\lambda_i t} \right). \quad (2.16)$$

ここで d_j は (2.3 b), (2.3 c) 式で与えられる係数である。

いま例として以下の崩壊系列を考える。

$$X_1 \xrightarrow{\lambda_1} X_2 \xrightarrow{\lambda_2} X_3 \text{ (stable)}$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda, \quad \lambda_3 = 0$$

$$N_1(0) \neq 0, \quad N_2(0) \neq 0, \quad N_3(0) \neq 0$$

核種 X_1, X_2 の崩壊定数が等しく、核種 X_3 は安定核種である。核種 X_1, X_2, X_3 の初期値をそれぞれ $N_1(0), N_2(0), N_3(0)$ とした時、冷却時間 t における各核種の原子数は (2.11), (2.15) 式から以下のごとく与えられる。

$$N_1(t) = N_1(0)b_1(t; \lambda),$$

$$= N_1(0)e^{-\lambda t},$$

$$N_2(t) = N_1(0)b_2(t; \lambda, \lambda) + N_2(0)b_1(t; \lambda),$$

$$= N_1(0)\lambda t e^{-\lambda t} + N_2(0)e^{-\lambda t},$$

$$N_3(t) = N_1(0)b_3(t; \lambda, \lambda, 0) + N_2(0)b_2(t; \lambda, 0)$$

$$+ N_3(0)b_1(t; 0),$$

$$= N_1(0)(1 - e^{-\lambda t} - \lambda t e^{-\lambda t}) + N_2(0)(1 - e^{-\lambda t})$$

$$+ N_3(0).$$

上式の解を加え合わせると、

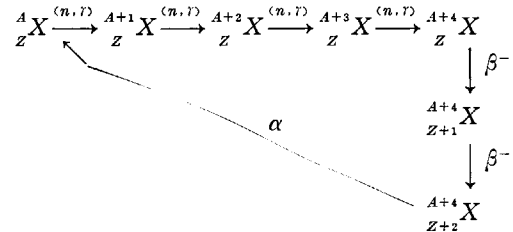
$$N_1(t) + N_2(t) + N_3(t) = N_1(0) + N_2(0) + N_3(0),$$

となり原子数が保存されていることが分かる。

2.6 循環形式の崩壊系列の取扱い

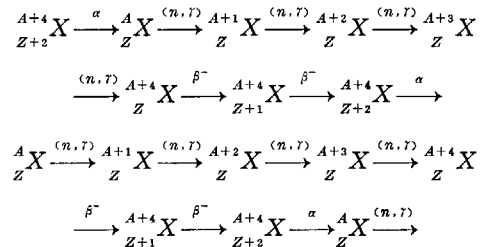
循環形式の崩壊系列とはある核種の壊変から始まって、またもとの核種が生成されるような崩壊系列のことである。自然崩壊のみによってはこの循環形式の崩壊系列は形成されない。核反応と自然崩壊が組合わさると循

環形式の崩壊系列が形成されることがある。たとえば以下に示すように4回の中性子捕獲反応と2回の β^- 崩壊および1回の α 崩壊は循環形式の崩壊系列を構成する。



このような場合には、線型の崩壊系列に対するものである Bateman の式を直接適用することが出来ない。

そこで DCHAIN コードにおいては各核種に対する崩壊系列を組立て、それを線型の崩壊系列に分解していく過程において、各線型の崩壊系列を構成する核種と同じ核種が親核種として現われた場合にはそこでその線型の崩壊系列をうち切る。このことは循環形式の崩壊系列を線型の崩壊系列で近似することに相当する。上図の例において、 ${}^{A+4}_{Z+2} X$ および ${}^A_Z X$ に対する崩壊系列はそれぞれ以下のごとくなり、どの核種に対しても崩壊系列の長さは同じである。



このように循環形式の崩壊系列を線型の崩壊系列で近似することによる誤差は、タイムステップを短くすることにより充分小さく出来ることが数値計算で確かめられている。循環形式の崩壊系列を構成する各核種の等価な半減期

$$T_{1/2}^* = \frac{\ln 2}{\lambda^*} = \frac{0.6931}{\lambda^*}$$

のうち最も長いものを基準とし、その1/3のタイムステップ間隔で3タイムステップの計算をした場合、生成量の誤差は0.3%以下であった。循環形式の崩壊系列の形成には α 崩壊と中性子捕獲反応が関与する場合が多く、その対応する等価な半減期には非常に長いものが含まれている場合が多い。したがって本方法による近似の誤差は小さく、各核種の生成量を精度よく計算できると考えられる。また上図の例でも明らかのごとく、線型化された崩壊系列の先頭核種と最後の核種の半減期は必然的に等しくなり、2.5 節で述べた取扱いが必要となる。この崩壊系列から半減期の等しい先頭核種を取り除いて系列の最後の核種の生成量を計算した場合には、計算精度は急に悪くなる。

3. 計算コード

DCHAIN コードは主プログラムと9つのサブルーチンから構成されており、その計算の流れを Fig. 3.1 に示す。各核種の生成量の計算はサブルーチン ONPWR と FN とで行われる。サブルーチン FN は線型崩壊系列に対する Bateman の解 [(2.11) 式] を計算し、サブルーチン ONPWR は各核種の崩壊系列を組立てると同時にそれを線型の崩壊系列に分解する。また取扱い核種に関するループも ONPWR の中で行われる。サブルーチン FPDH は計算の流れをコントロールし、出力時間および計算ケースに関する繰返し計算を行う。計算ケースが変わるとサブルーチン SETN において各核種の生成量の零セットが行われる。FPDH から呼び出されるその他のサブルーチン FYCI, INPUT, OUTPUT, DCHT はそれぞれ累積核分裂収率から独立核分裂収率の計算、入力データの出力、各核種の生成量の出力、および崩壊熱の計算と出力を行う。また核データライブラリーの修正をとまなう繰返しループは MAIN プログラムにおいて行われる。MAIN プログラムから呼び出される DEDIT は核データライブラリーの作成および修正を行うサブルーチンである。

各サブルーチンの簡単な説明は 3.1 節で行う。DCHAIN コードではおもなディメンションの大きさは可変となっており、各ディメンションの大きさを制御変数と

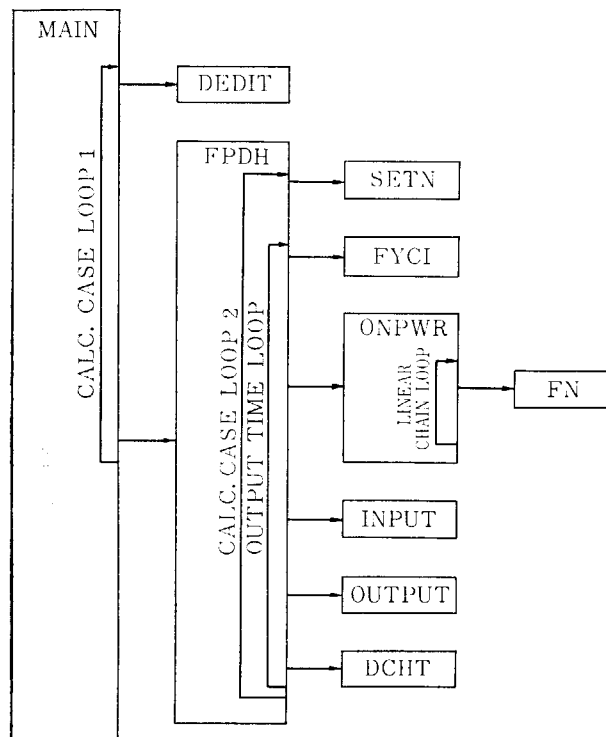


Fig. 3.1 Logical flow diagram of DCHAIN.

もに 3.2 節に示す。3.3 節では DCHAIN コードの計算に必要なディスク、磁気テープなどの Logical unit について述べる。

DCHAIN コードは原研においては FACOM 230/75 システムで計算可能なようにディスクに収納されており、そのファイル名は次のようになっている。

```
$ DLIEDRUN RFILENAME=J2035.DCHAIN2A
```

なおコードのソースリストを Appendix 1 に示す。

3.1 サブルーチン

MAIN

MAIN は計算の流れを制御するプログラムである。また DCHAIN はディメンションが可変のコードであり、計算に必要なコアメモリーの大きさを MAIN の中で計算する。必要なコアメモリーの大きさのうちわけについては後に述べる。

DEDIT

核データライブラリーの作成および修正を行う。MAIN から呼び出される。

FPDH

各核種の生成量を計算するための流れのコントロールを行う。MAIN から呼び出される。

SETN

変数の初期値を設定するためのサブルーチンである。FPDH から呼び出される。

FYCI

各核種の独立核分裂収率を累積核分裂収率から計算する。FPDH から呼び出される。

ONPWR

各核種の崩壊系列を組立て、それを線型の崩壊系列に分解する。そして各線型崩壊系列の解を FN で求め、それらを加え合わせて各核種の生成量を計算する。FPDH から呼び出される。

FN

ONPWR から呼び出され、線型崩壊系列に対する Bateman の解を計算する (第 2 章の (2.11), (2.15), (2.16) 式参照)。

INPUT

入力データをプリンターに出力する。FPDH から呼び出される。

OUTPUT

各核種の生成量を原子数および C_i 単位でプリンター

に出力する。またそれぞれの総和も出力する。FPDH から呼び出される。

DCHT

各核種の生成量をもとに全核種による崩壊熱を計算しプリンターに出力する。また崩壊熱に対する各核種の寄与率を計算し、1%以上の寄与をする核種を出力する。FPDH から呼び出される。

3.2 可変ディメンション変数

DCHAIN は可変ディメンションのコードであり、MAIN で計算される所要コアメモリーの総和のうちわけは以下のようにになっている。所要コアメモリーの大きさは核データライブラリーの作成および修正を行う DEDIT ルーチンと、各核種の生成量を計算する FPDH

ルーチンとで異なり、それぞれ別個に以下に示す。

DEDIT ルーチン

制御変数名

- NNUM 核データライブラリーに含まれる核種数
- NCARD 核データライブラリーを修正するためのカード枚数
- NGS 中性子反応断面積の群数 (27)
- NFIS 核分裂収率の種類数 (10)
- NPAR 各核種に対し許される親核種の最大数 (6)
- ISC 中性子反応をする核種の数 (100)

以上の制御変数は入力データとして与えられ、それをもとに可変ディメンションの変数に対するコアメモリーの大きさは以下のごとく与えられる。

変数	変数名	先頭番地	所要メモリー
ELM	核種名	L 1	NNUM * 2
RAMDA	崩壊定数	L 2	NNUM
UNIT	半減期の単位	L 3	NNUM
SGC	反応断面積の有無	L 4	NNUM
Q	崩壊の Q 値	L 5	NNUM
EBB	β 線崩壊熱	L 6	NNUM
EGG	γ 線崩壊熱	L 7	NNUM
GAMMAX	核分裂収率	L 8	NNUM * NFIS
PBIC	分岐比	L 9	NNUM * NPAR
CAR	—	L 10	(NCARD+1) * 10
SC	中性子反応断面積	L 101	NGS * ISC
NCH	親核種数	L 11	NNUM
NBIC	崩壊形式	L 12	NNUM * NPAR
MOTH	親核種名	L 133	NNUM * NPAR * 2
NSC	中性子反応をする核種番号	L 131	ISC

以上の DEDIT ルーチンでの可変ディメンションの変数に対する所要総コアメモリーは

$$MXX = NNUM * (NFIS + 4 * NPAR + 9) + ISC * (NGS + 1) + 10 * (NCARD + 1), \quad (3.1)$$

となる。

FPDH ルーチン

各核種の生成量を計算し、崩壊熱を求める FPDH ルーチンにおける制御変数 (入力データ) および各可変デ

ィメンション変数の所要コアメモリーの大きさは以下のようにになっている。

制御変数名

- NMAX 取扱い核種数
- NPAR 各核種の親核種の最大数
- NFIS 核分裂収率の種類
- LCHA 線型崩壊系列の最大長さ
- NCHA 各核種に対する線型崩壊系列の最大数
- NIRR 照射冷却履歴のタイムステップの最大数
- NOUT 計算結果を出力する時刻の最大数

変数	変数名	先頭番地	所要メモリー
RAMDA	崩壊定数	L 1	NMAX
GAMMA	特別の核分裂収率	L 2	NMAX
AN	各核種の原子数	L 3	NMAX
ANO	原子数の初期値	L 4	NMAX

A	各核種の崩壊率	L 5	NMAX
C	各核種のキューリー数	L 6	NMAX
SGC	反応断面積の有無	L 7	NMAX
TEMP	崩壊定数の一時保存	L 8	NMAX
PHIL ^a	λ/λ^*	L 9	NMAX
PHIC ^a	$\sigma\phi/\lambda^*$	L 10	NMAX
EBB	β 線崩壊熱	L 11	NMAX
EGG	γ 線崩壊熱	L 12	NMAX
Q	崩壊の Q 値	L 13	NMAX
ELM	核種名	L 14	NMAX * 2
PHAI	分岐比	L 15	NMAX * NPAR
PBIC ^a	等価の分岐比	L 16	NMAX * NPAR
GAMMAX	核分裂収率	L 17	NMAX * NFIS
R	線型系列の崩壊定数	L 18	LCHA
G	線型系列の核分裂収率	L 19	LCHA
P	線型系列の分岐比	L 20	LCHA
DNO	—	L 21	LCHA
PHI	崩壊系列中の核種の分岐比	L 22	NCHA * LCHA
TBND	タイムステップの境界時間	L 23	NIRR
PWR	原子炉出力	L 24	NIRR
FYT	核分裂割合の変更の有無	L 25	NIRR
TBIN	タイムステップの長さ	L 26	NIRR
GX	核分裂割合	L 27	NIRR * NFIS
TIME	プリントアウト時間	L 28	NOUT
TMIN	同上 (日, 時, 分, 秒の単位別)	L 29	NOUT * 4
GAMX	平均核分裂収率	L 30	NMAX
SC	中性子反応断面積	L 301	NGS * ISC
SP	中性子スペクトル	L 302	NGS
SCW	一群中性子反応断面積	L 303	NIRR * ISC
FS	中性子スペクトル読み込みの有無	L 304	NIRR
FLUX	中性子束	L 305	NIRR
FMR	各タイムステップの 1W あたりの核分裂反応率	L 306	NIRR
NCH	核種ごとの親核種数	LI 1	NMAX
MOTH	親核種名	LI 2	NMAX * NPAR * 2
NBIC	崩壊形式	LI 3	NMAX * NPAR
JX	線型系列中の核種番号	LI 4	LCHA
JJ	線型系列中の核種番号	LI 5	LCHA
KSTP	ONPWR の内部変数	LI 6	NCHA
LONG	線型系列の長さ	LI 7	NCHA
LL	ONPWR の内部変数	LI 8	NCHA
NSCH	崩壊系列中の核種番号	LI 9	NCHA * LCHA
NPN	親核種番号	LI 91	NMAX * NPAR
NSC	中性子反応をする核種番号	LI 92	ISC

a 2.4 節参照

以上の FPDH ルーチンの可変ディメンション変数の
所要コアメモリーの総量は

$$\begin{aligned} \text{MXX} = & \text{NMAX} * (17 + 4 * \text{NPAR} + \text{NFIS}) \\ & + \text{LCHA} * (6 + 2 * \text{NCHA}) + \text{ISC} * (1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \text{NGS} + \text{NIRR}) + \text{NIRR} * (10 + \text{NFIS}) \\ & + \text{NGS} + \text{NOUT} * 5, \end{aligned} \quad (3.2)$$

となる。

現在, DCHAIN コードで許される可変ディメンショ

ンに対するコアメモリーは 100K まであり、計算に必要な総コアメモリーは 128K である。

3.3 磁気テープおよびディスク

DCHAIN コードによる計算に必要なロジカルユニットは以下のようにになっている。

ロジカルユニット番号	内 容
1	核データライブラリー
2	核データライブラリーの作成および修正ユニット
5	カード入力
6	プリンター出力
7	カード出力
12	各核種の生成量の出力

上記のユニットのうちユニット番号 5, 6, 7 は計算機の入出力ユニットである。また第 1 ユニットの計算に使われる核データライブラリーのためのユニットであり、第 2 ユニットの核データライブラリーを作成したり、第 1 ユニットの核データライブラリーを修正したりするためのユニットである。第 1 ユニットのフォーマットは次のようになっている。各変数名の説明に関しては 3.2 節の可変ディメンション変数の項を参照されたい。

ロジカルユニット 1 および 2 のテープフォーマット
 WRITE(NLI) NMAX, ISC, NFIS, NPAR
 WRITE(NLI) ((ELM(L, N), L=1, 2),
 RAMDA(N), SGC(N), Q(N),
 EBB(N), EGG(N),
 (GAMMAX(N, M), M=1,
 NFIS), NCH(N), (NBIC(N, M),
 (MOTH(L, N, M), L=1, 2),
 PBIC(N, M), M=1, NPAR),
 N=1, NMAX)
 WRITE(NLI) (NSC(N), (SC(I, N), I=1, NGS),
 N=1, ISC)

また第 12 ユニットの DCHAIN による各核種の生成量を出力するためのユニットであり、作成されたファイルをもとに別個のコードで γ 線スペクトルなどの計算を行うことが出来る。第 12 ユニットのフォーマットは入力データの IDISK で異なり、以下のようになっている。

ロジカルユニット 12 のテープフォーマット
 IDISK=1 の時
 WRITE(12) (AN(N), A(N), N=1, NMAX)
 IDISK=2 の時
 WRITE(12, 1500) ((ELM(K, N), K=1, 2),
 A(N), N=1, NMAX)
 1500 FORMAT (7 (A 2, A 4, E 12.5))

4. 核データライブラリー

DCHAIN コードの核データライブラリーとしては核分裂生成物 (FP) の生成量および崩壊熱を計算するためのものが整備されている。アクチニド核種に対する核データライブラリーはもっか作成中である。核データライブラリーの作成および修正も DCHAIN コードにより行われる。核種の識別を核種名で行うのでライブラリーの中における核種の配列順序は任意である。

FP の生成量および崩壊熱を計算するために必要な核データは第 2 章の (2.1) 式から明らかごとく、以下の 3 項目である。

- (1) 崩壊データ
 - a. 崩壊定数 (または半減期)
 - b. 崩壊系列
 - c. 崩壊エネルギー
- (2) 中性子断面積
- (3) 核分裂収率

(1) の c の崩壊エネルギー以外の核データは個々の FP の生成量を計算するために必要なものであり、(1)

の c の崩壊エネルギーは各核種の生成量をもとに FP の崩壊熱を計算するために必要な核データである。(3) の核分裂収率は FP 以外の核種に対しては不要である。ただし FP に対しては (2) の中性子断面積として問題となるのは中性子捕獲反応のみであるが、アクチニド核種に対してはその他に核分裂、(n, 2n) 反応などが必要となる。

FP の核データライブラリーには現在 1,170 核種が含まれており、そのリストを Appendix 2 に示す。また各質量数の核種に対する崩壊系列を Appendix 3 に示す。核データライブラリーの入力形式については第 5 章において詳しく述べるが、ライブラリーテープのフォーマットに関しては第 3 章の 3.3 節においてすでに述べた。Appendix 2 に示したライブラリーの出力形式はカードの入力形式とも、磁気テープのフォーマットとも異なり以下のごとくなっている。

ライブラリーデータは核種ごとに与えられており、各核種のデータは 4 行~11 行のデータで与えられている。

第1行目には核種番号, 核種名, 崩壊定数 (1/sec), 中性子断面積データの有無 (1.0=有, 0.0=無), 崩壊の Q 値 (MeV), 単位崩壊あたりの β 線崩壊熱 (MeV) および γ 線崩壊熱 (MeV) の合計7つのデータが与えられている. 核種名は普通, 元素名 (2文字) と質量数 (3桁の数字) で表わされる. たとえば ^{137}Cs は CS 137 となり, ^{137}Ba の準安定状態は質量数の後に M をつけ BA 137 M となる. また2番目の準安定状態がある場合には質量数の後に N をつける. 次に崩壊の Q 値であるが, 当該核種が β^- 崩壊のみならず β^+ 崩壊および軌道電子捕獲による崩壊も行う場合には, それぞれの崩壊の Q 値に分岐比を乗じて加え合わせた値が, 崩壊の Q 値として与えられる.

第2行目, 第3行目には10種類の核分裂に対する当該核種の累積核分裂収率が与えられている. 10種類の核分裂収率に対応する核分裂核種および入射中性子エネルギーは順次以下のようにになっている.

1. ^{235}U (熱中性子)
2. ^{235}U (核分裂中性子)
3. ^{235}U (14 MeV 中性子)
4. ^{238}U (核分裂中性子)
5. ^{238}U (14 MeV 中性子)
6. ^{239}Pu (熱中性子)
7. ^{239}Pu (核分裂中性子)
8. ^{241}Pu (熱中性子)
9. ^{233}U (熱中性子)
10. ^{232}Th (核分裂中性子)

第4行目には崩壊系列に関するデータが示されており, 親核種の崩壊形式 (番号), 親核種名, 分岐比の3つのデータを対にして親核種の数だけ繰返し与えられている. 1つの核種に対し最大6個まで親核種を与えることが出来る. 親核種の数6個の場合にはデータは2行になる. また崩壊形式番号と崩壊形式との対応は以下のようにになっている.

崩壊形式番号	崩壊形式
1	β^- 崩壊
2	Isomeric transition
3	中性子反応
4	β^+ 崩壊 and/or 軌道電子捕獲
5	α 崩壊
6	遅発中性子放出

第5行目以下には中性子反応断面積が与えられている. ただし第1行目の中性子断面積の有無の指定が0.0 (無) の場合にはこのかぎりではない. FP に対しておもに問題となる中性子反応は捕獲反応のみであり, FP の核データライブラリーで与えられているのも中性子捕獲断面積である. 群数は27である. 1群から25群までは高速炉系に対するものであり ABBN タイプ¹¹⁾の群

構造である. また26群, 27群は熱中性子炉体系に対するものであり, 26群には共鳴積分, 27群には2200m/sec の中性子に対する断面積がそれぞれ与えられている. 共鳴積分の下限エネルギーは0.5 eV にとった.

つぎに各核データの出典, および既知のデータがない場合の推定法を以下に示す. 既存のFPの核データライブラリー¹²⁾は新しい測定結果に基づく ENDF/B-IV のデータを考慮し大幅に改訂した.

まず(1)のaの崩壊定数であるが, 既知のデータは MEEK-RIDER の評価値¹³⁾を使った. 崩壊定数が未知の場合には β 崩壊の Q 値から推定した⁴⁾. そのため核種の奇偶性および質量数を考慮して, 以下の6つの場合に対して崩壊定数と Q 値との相関関係を既知の崩壊定数を使って求めた.

$$a. \text{ odd } A \leq 115; \log \lambda = 6.5 \log Q - 6.0, \quad (4.1 a)$$

$$b. \text{ odd } A > 115; \log \lambda = 6.7 \log Q - 6.0, \quad (4.1 b)$$

$$c. \text{ even } A \leq 115(\text{odd-odd}); \\ \log \lambda = 8.4 \log Q - 8.4, \quad (4.1 c)$$

$$d. \text{ even } A > 115(\text{odd-odd}); \\ \log \lambda = 9.5 \log Q - 8.8, \quad (4.1 d)$$

$$e. \text{ even } A \leq 115(\text{even-even}); \\ \log \lambda = 4.5 \log Q - 4.2, \quad (4.1 e)$$

$$f. \text{ even } A > 115(\text{even-even}); \\ \log \lambda = 5.2 \log Q - 4.4. \quad (4.1 f)$$

崩壊定数は Q 値, 核種の奇偶性, 質量数のみならず, 親核種と娘核種のスピン, パリティにも本来依存するものである. (1+) のスピン, パリティの (odd-odd) 核は他の (odd-odd) 核と異なる相関関係を示す⁴⁾. しかし崩壊定数が未知の核種に対してスピン, パリティが分かっているとは普通考えられず, 崩壊定数を推定するための相関関係を求めるに際しては, スピンとパリティの効果は無視した. 崩壊定数の既知の核種は比較的寿命の長い核種であり, 短寿命の約300核種の崩壊定数を Q 値との相関関係をもとに推定した. また β 崩壊の Q 値も未知の場合にはそれらは MYERS-SWIATECKI¹⁴⁾ の質量公式を使って推定した. 彼等の質量公式には閉殻効果も考慮されている.

(1)のbの崩壊系列および(3)の核分裂収率に関しても既知のデータに対しては崩壊定数同様 MEEK-RIDER¹³⁾ のデータを採用した. 崩壊系列と核分裂収率をともに MEEK-RIDER のデータとすることにより, 累積収率から簡単に独立収率を計算することが可能となる. また中性子捕獲反応による壊変系列を考慮したのは熱中性子炉体系または高速炉体系で大きな中性子捕獲断面積と累積核分裂収率をもつ59核種に対応するものであり, これらの核種を TABLE 4.1 に示す.

(1)のcの各核種の単位崩壊あたりの β 線崩壊熱 (b_i) および γ 線崩壊 (g_i) に関してはおもに ENDF/

TABLE 4.1 Neutron capture cross sections of 59 nuclides

No.	Nuclide	$\sigma_{2200}^{a)}$ (b)	RI ^{b)} (b)	$\sigma_{eq}^{c)}$ (BWR) (b)	$\sigma_{av}^{d)}$ (LMFBR) (b)
1	⁷⁸ Se	40.0	55.48	41.10	0.3833
2	⁸⁵ Kr	1.66	1.8	1.61	0.0388
3	⁸⁷ Kr	—	—	—	—
4	⁹⁰ Sr	0.8	0.9	0.78	0.0110*
5	⁹³ Zr	1.34	33.3	7.67	0.1999*
6	⁹⁵ Mo	14.5	105.0	31.9	0.3099*
7	⁹⁷ Mo	2.2	13.0	4.25	0.3228*
8	⁹⁹ Tc	17.7	340.0	81.3	0.5548*
9	¹⁰⁰ Ru	5.8	11.2	6.59	0.1818
10	¹⁰¹ Ru	3.34	85.0	17.0	0.7145*
11	¹⁰² Ru	1.30	4.1	1.80	0.2146*
12	¹⁰³ Rh	146.0	1100.0	329.5	0.6637*
13	¹⁰⁴ Ru	0.47	4.6	1.3	0.1761*
14	¹⁰⁴ Rh	40.0	0.0	30.0	—
15	¹⁰⁵ Ph	16000.0	15800.0	15160.0	0.2426
16	¹⁰⁵ Pd	14.0	90.0	28.5	0.7619*
17	¹⁰⁶ Ru	0.146	2.6	0.630	0.0886*
18	¹⁰⁷ Pd	10.0	120.0	31.5	0.7537*
19	¹⁰⁸ Pd	12.2	250.0	59.2	0.1818
20	¹⁰⁸ Ag	91.0	1450.0	358.0	0.8438*
21	¹¹³ Cd	19910.0	365.6	15006.0	0.4221
22	¹¹⁵ In	202.0	3300.0	811.5	0.4520
23	¹²¹ Sb	6.255	200.0	44.7	0.4777
24	¹²³ Sb	4.33	140.0	31.2	0.2747
25	¹²⁷ I	6.2	147.0	34.1	0.5703
26	¹²⁹ I	27.0	36.0	27.5	0.4695*
27	¹³¹ Xe	90.0	870.0	241.5	0.4098*
28	¹³³ Xe	190.0	52.25	153.0	0.1047
29	¹³³ Cs	29.0	415.0	105.0	0.5072*
30	¹³⁴ Cs	140.0	87.97	122.6	0.5740
31	¹³⁵ Xe	2.65×10 ⁶	7634.0	1.99×10 ⁶	0.0059
32	¹³⁵ Cs	8.7	62.0	18.9	0.3049*
33	¹³⁷ Cs	0.11	0.59	0.20	0.0214*
34	¹³⁹ La	9.0	12.2	9.19	0.0400
35	¹⁴⁰ Ba	1.6	13.6	3.92	0.0688
36	¹⁴¹ Ce	29.0	0.48	21.8	0.1452
37	¹⁴¹ Pr	11.5	14.1	11.4	0.1832
38	¹⁴³ Pr	89.0	190.0	105.0	0.3989
39	¹⁴³ Nd	325.0	140.0	272.0	0.3364*
40	¹⁴⁴ Ce	1.0	2.6	1.3	0.0568*
41	¹⁴⁴ Nd	3.6	5.0	3.7	0.0965*
42	¹⁴⁵ Nd	42.0	240.0	79.5	0.4106*
43	¹⁴⁶ Nd	1.4	3.2	1.7	0.1257
44	¹⁴⁷ Pm	182.0	2300.0	597.0	1.205*
45	¹⁴⁷ Sm	68.2	714.0	194.0	1.353*
46	¹⁴⁸ Pm	2000.0	43980.0	10300.0	3.643
47	¹⁴⁸ Sm	2.7	27.0	7.4	0.3586
48	¹⁴⁹ Pm	1400.0	927.0	1235.0	3.348
49	¹⁴⁹ Sm	41500.0	3454.0	31820.0	2.246*
50	¹⁵⁰ Sm	102.0	310.0	139.0	0.4433
51	¹⁵¹ Sm	15000.0	3300.0	11900.0	2.322*
52	¹⁵¹ Eu	9200.0	3300.0	7560.0	—
53	¹⁵² Sm	206.0	3000.0	755.0	0.4392

TABLE 4.1 (つづき)

No.	Nuclide	$\sigma_{2200}^{a)}$ (b)	RI ^{b)} (b)	$\sigma_{eq}^{c)}$ (BWR) (b)	$\sigma_{av}^{d)}$ (LMFBR) (b)
54	¹⁵³ Eu	390.0	1635.0	619.5	2.581*
55	¹⁵⁴ Eu	1500.0	1240.0	1373.0	2.987
56	¹⁵⁵ Eu	4040.0	3218.0	3674.0	2.357*
57	¹⁵⁶ Eu	481.0	1258.0	612.4	0.0675
58	¹⁵⁸ Gd	2.5	61.0	14.0	0.3105
59	¹⁵⁹ Tb	25.5	430.0	105.0	1.575

- a) Thermal neutron capture cross section for 2200 m/sec neutrons
 - b) Resonance integral of neutron capture reaction
 - c) Thermal neutron equivalent capture cross section in BWR
 - d) Average neutron capture cross section in LMFBR
- * Based on JNDC evaluation

B-IV のデータを採用した。ENDF/B-IV にないデータに関しては次式で与えた⁴⁾。

$$b_i = \sum_{k=1}^K p_k^i E_{\beta, av}^{i, k}, \quad (4.2 a)$$

$$g_i = \sum_{k=1}^K p_k^i (Q_i - E_{\beta, max}^{i, k}). \quad (4.2 b)$$

ここで K は β 線の種類の数であり、 p_k^i 、 $E_{\beta, max}^{i, k}$ 、 $E_{\beta, av}^{i, k}$ はそれぞれ核種 i から放出される k 番目の β 線の分岐比、最大エネルギーおよび平均エネルギーを表わしている。最大エネルギーと平均エネルギーとの差はニュートリノにより運び去られるエネルギーに対応している。各 β 線の平均エネルギーと最大エネルギーとの比はクーロン効果を考慮して正しく計算された¹⁵⁾。(4.2) 式に必要な Q 値、 β 線エネルギーおよび β 線分岐比のデータはおもに Tables of Isotopes, Sixth Edition¹⁶⁾ からとられ、Nuclear Data Sheets¹⁷⁾ により補足された。

β 線エネルギーのみが既知で β 線分岐比が未知の場合には β 線分岐比はみな等しいと仮定して (4.2) 式が適用された。また β 線エネルギーと β 線分岐比の両方とも未知の場合には、DCHAIN コードの中で β 線崩壊熱 b_i 、 γ 線崩壊熱 g_i とともに Q 値の 0.29 倍の値にとられる。

(2) の中性子断面積は 1~25 群の高速炉体系に対するものと、26, 27 群の熱中性子炉体系に対するものとに分けて考えることができる。高速炉体系に対しては JNDC の FP 中性子断面積¹⁸⁾ がとられた。TABLE 4.1 に示された 59 核種のうち 28 核種が JNDC 自身の評価値であり、この 28 核種で全 FP の中性子捕獲反応の 80% 以上を占める。残りの 31 核種は JNDC ライブラリーでは COOK¹⁹⁾ の評価値が使われているが、ここでは ENDF/B-IV のデータを採用した。JNDC では目下さらに数多くの FP 核種 (総計 96 核種) の中性子断面積の評価が行われており、評価が完了した段階ですべて JNDC 自身による評価値に置きかえる予定である。

熱中性子炉体系に対する第 26 群の共鳴積分としては BNL-325²⁰⁾ のデータがおもに採用された。BNL-325 がない核種に対しては JNDC の計算値が使われた。共鳴積分の下限エネルギーは 0.5 eV である。また第 27 群の熱中性子断面積 (2200 m/sec 値) としては JNDC の評価値が採用された。熱中性子炉体系においては中性子捕獲反応率すなわち等価崩壊定数 λ^* (2.4 節参照) は熱中性子等価断面積 σ_{eq} と熱中性子束 ϕ_{th} の積として

$$\lambda^* = \sigma_{eq} \cdot \phi_{th}, \quad (4.3)$$

と与えられる。熱中性子等価断面積はコード内で

$$\sigma_{eq} = A \cdot \sigma_{2200} + r \cdot RI, \quad (4.4)$$

と与えられる。ここで A は 0.5 eV 以下のエネルギーの熱中性子に対する平均中性子捕獲断面積 σ_{th} と 2200 m/sec の中性子に対する値 σ_{2200} との比であり、熱中性子スペクトルに依存する量である。熱中性子温度を T_n (°K) とし、 $1/v$ 吸収体と仮定した場合 A は

$$A = \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{T_0}{T_n}}, \quad T_0 = 293.16^\circ\text{K}, \quad (4.5)$$

と与えられる。また (4.4) 式における r は Epithermal Index (単位レサジーあたりの共鳴領域中性子束/熱中性子束) を表わし、RI は中性子捕獲反応に対する共鳴積分を示す。熱中性子炉体系においてはこの r と A がそれぞれ 26 群、27 群の中性子スペクトルとして入力さ

れる。1~25 群の中性子スペクトルは零である。また (4.3) 式から明らかなごとく、中性子束としては 0.5 eV 以下のエネルギーの熱中性子束の積分値

$$\phi_{th} = \int_0^{0.5\text{eV}} \phi(E) dE, \quad (4.6)$$

が入力される。逆に高速炉体系に対しては中性子スペクトルは 1 群から 25 群まで入力され、26 群、27 群は零である。また中性子束としては全エネルギー範囲にわたる積分中性子束が入力される。

BWR 体系 ($r=0.2$, $A=0.75$) における熱中性子等価捕獲断面積、および電気出力 1000 MWe 規模の LM-FBR に対する 1 群平均中性子捕獲断面積を比較して TABLE 4.1 に示す。TABLE 4.1 には σ_{2200} および RI も示されている。

現在、原研においては FP の核データライブラリーはディスクおよび磁気テープに収納されており、それぞれのファイル名は以下のようになっている。

\$ DISKTO F 01, J 2035. FPLIBE 0

\$ TAPE F 01, J 2035. FPLIBE 0, OLD, 010811

また改訂前の FP 核データライブラリー¹²⁾ に対応するディスクおよび磁気テープのファイル名はそれぞれ以下のごとくなっている。

\$ DISKTO F 01, J 2035. FPLIBT

\$ TAPE F 01, J 2035. FPLIBT, OLD, 001142

5. 入力, 出力形式

5.1 入力形式

原子炉系における FP やアクチニドなどの各核種の生成量を計算するためには、各核種の核データと原子炉の運転条件に関するデータが必要である。それに応じてコードの入力データも核データに関する部分と運転条件データに関する部分に大きく分けられる。核データはライブラリーとして磁気テープに納められているものを使うのが普通であり、通常の計算において必要となるのは原子炉の運転条件に関するデータのみである。しかし、DCHAIN コードには核データライブラリーの作成および修正機能も組込まれており、その入力形式も合わせて以下に示しておく。

なお核データライブラリーの修正を伴わない一般的な場合において必要な入力データは以下で述べるデータのうち、I のコントロールカードの Card type 1 と IV の計算条件および運転データの Card type 7~17 とであり、標準的な入力データカードの構成は次のようになる。

I. コントロールカード

Card type 1

II. 計算条件および運転条件データ

Card type 7, 8, 9

Card type 10~17

Card type 10~17

.....

Card type 9 で指定した計算ケース数だけ繰返す。

I. コントロールカード

(1) Card type 1 (7 I 5)

1. IOPT 計算全体のコントロール

=0 ライブラリー (Logical unit 1) は修正せず計算のみ行う、

=1 ライブラリーを作成する (Logical unit 2),

- =2 ライブラリーを作成し (Logical unit 2) 計算を行う,
 =3 ライブラリーを修正する(Logical unit 1 に修正前のライブラリーをつけ, Logical unit 2 に修正したライブラリーを納める磁気テープをつける),
 =4 ライブラリーを修正し, 修正したライブラリーを使って計算する.
2. NADD 核種数
 IOPT=0 の時 NADD は無視される
 IOPT=1, 2 の時 NADD はライブラリーの核種数
 IOPT=3, 4 の時 NADD はライブラリーに追加される核種の数
3. NCARD ライブラリーを修正するカードの枚数. IOPT=3, 4 の場合以外は不要.
4. NGS 中性子断面積の群数. 入力データが零の場合にはコード内で 27 にセットされる.
5. ILIS ライブラリーの出力オプション
 =0 出力しない,
 =1 出力する.
6. NFIS 核分裂収率の種類数. (IOPT=1, 2 の時必要)
7. NPAR 各核種に対して許される親核種の数
 の最大数. (IOPT=1, 2 の時必要)

II. 核データライブラリー作成のための入力データ

IOPT=1, 2 の場合以外は不要.

I の Card type 1 で指定した NADD 回だけ以下の (1)~(5) データを繰返し入力する.

- (1) Card type 2 (A 6, E 12.0, 5 X, A 1, E 12.0)

核種名と崩壊定数

1. ELM 核種名
2. RAMDA 崩壊定数 (1/sec) または半減期
3. NU 半減期の単位
 =ブランク RAMDA は崩壊定数 (1/sec)
 =S RAMDA は半減期 (sec)
 =M RAMDA は半減期 (min)
 =H RAMDA は半減期 (hour)
 =D RAMDA は半減期 (day)
 =Y RAMDA は半減期 (year)
4. SGC 中性子反応断面積の有無
 =0.0 無
 =1.0 有

- (2) Card type 3 (6 E 12.0)

核分裂収率

1. (GAMMAX (I), I=1, NFIS) 累積核分裂収率

(%)

第4章で述べた核データライブラリーにおいては NFIS=10 であり以下の核分裂に対する累積収率が当該 FP 核種に対して与えられている.

- I=1 ^{235}U の熱中性子核分裂
- I=2 ^{235}U の高速中性子核分裂
- I=3 ^{235}U の 14 MeV 中性子による核分裂
- I=4 ^{238}U の高速中性子核分裂
- I=5 ^{238}U の 14 MeV 中性子による核分裂
- I=6 ^{239}Pu の熱中性子核分裂
- I=7 ^{239}Pu の高速中性子核分裂
- I=8 ^{241}Pu の熱中性子核分裂
- I=9 ^{233}U の熱中性子核分裂
- I=10 ^{232}Th の高速中性子核分裂

- (3) Card type 4 (I 6, 3 (I 6, A 6, E 6.0)/6 X, 3 (I 6, A 6, E 6.0))

崩壊系列

1. NCH ≤ NPAR 親核種の数
2. NBIC 親核種の当該核種への崩壊形式
 =1 β^- 崩壊
 =2 Isomeric transition
 =3 中性子反応
 =4 β^+ 崩壊または軌道電子捕獲
 =5 α 崩壊
 =6 中性子放出
3. MOTH 親核種名
4. PBIC 分岐比, NBIC ≠ 3 の場合は親核種が自然崩壊するたびに当該核種の生成される割合, NBIC = 3 の場合は親核種が中性子反応をするたびに当該核種の生成される割合.

NCH 回 NBIC, MOTH, PBIC を繰返し入力する. NCH ≤ 3 の場合はカードは1枚のみ.

- (4) Card type 5 (3 E 12.0)

崩壊エネルギー

1. Q 当該核種の崩壊の Q 値 (MeV)
2. EBB 単位崩壊あたりの β 線崩壊熱 (MeV)
3. EGG 単位崩壊あたりの γ 線崩壊熱 (MeV)

- (5) Card type 6 (6 E 12.0)

中性子断面積

1. (SC (I), I=1, NGS) 当該核種の全中性子反応多群断面積 (b)

III. 核データライブラリー修正のための入力データ

IOPT=3, 4 の場合以外は不要.

I の Card type 1 で指定した NADD 回だけ追加核種の核データを入力する. フォーマットは II の Card type 2~6 と同じ.

その後, I の Card type 1 で指定した NCARD 枚

だけライブラリーデータの修正を行う。任意の核種の任意のデータを任意の順序で修正することが出来る。フォーマットは II の Card type 2~6 と同じであるが、73 カラム以後に核種名と Card type に関する情報を入力する必要がある。73~78 カラムには修正する核種の核種名をフォーマット (A6) で入力し、79~80 カラムにはフォーマット (I2) で Card type を指定する数字 NN を入力する。NN と Card type の対応は以下のようになっている。

- NN=1 Card type 2 (核種名と崩壊定数)
 NN=2 Card type 3 (核分裂収率) の 1 枚目のカード
 NN=3 Card type 3 (核分裂収率) の 2 枚目のカード
 NN=4 Card type 4 (崩壊系列) の 1 枚目のカード
 NN=14 Card type 4 (崩壊系列) の 2 枚目のカード
 NN=5 Card type 5 (崩壊エネルギー)
 NN=16, 26, 36……
 Card type 6 (中性子断面積) の 1, 2, 3, ……枚目のカード

IV. 計算条件および運転条件データ

IOPT=1, 3 の場合は不要

(1) Card type 7 (10 I5)

所要コアメモリー指定カード

1. NNUO 計算する核種数
 =0 ライブラリーに収納されている全核種の生成量を計算する。
 ≠0 NNUO 個の核種の生成量を計算する
2. LCHA 線型に分解した崩壊系列の長さの最大値
3. NCHA 線型に分解した崩壊系列の数の最大値
4. NIRL 照射履歴のタイムステップ数の最大値
5. NOUT 生成量を計算して出力する回数の最大値
6. KCODE=0
7. NC 1 }
 8. NC 2 }

核データライブラリー中の NC1 番目から NC2 番目までの核種の生成量を計算する。NNUO =0 の場合は不要。またこのオプションを使うためには NNUO=NC 2-NC 1+1 であることが必要。ただし NNUO≠0, NC 2=0 の場合には次の Card type 8 において、解析を行う NNUO 個の核種名を入力することが必要。

(2) Card type 8 (8 (A 6, 3 X))

取扱い核種名

NNUO≠0, NC 2=0 の場合以外は不要

1. (ELM (I), I=1, NNUO) 取扱い核種名

(3) Card type 9 (2 I 6)

1. ICASE 計算ケース数。以上で述べた Card type 1~8 のデータは固定し、以下の Card type 10~17 のデータをもとに行う計算が1ケースの計算に相当する。

2. KFYC=1

(4) Card type 10 (18 A 4)

タイトルカード

1. (THEME (I), I=1, 18) この計算ケースのタイトル

(5) Card type 11 (10 I 6, E 12.5)

計算条件指定カード

1. ITB 照射冷却履歴のタイムステップ数
2. IDISK 各核種の生成量を計算して出力する回数
3. IDISK 原子数および放射能を磁気テープまたはディスクへ出力するためのオプション
 =0 出力しない
 =1 原子数と放射能を Logical unit 12 へ出力する
 =2 核種名と放射能を Logical unit 12 へ出力する (フォーマットに関しては 3.3 節参照)

4. IDATA=0

5. INIT 初期原子数の読み込みオプション

=0 初期原子数はすべて零とする

=1 初期原子数を読み込む

6. IDCH 崩壊熱の計算オプション

=0 計算しない

=1 計算する

=2 計算すると同時に崩壊熱に 1% 以上の寄与をもつ核種を出力する

7. ISPC =0

8. INDT 各核種の原子数および放射能の出力オプション

=0 出力する

=1 出力しない

9. ITOP =0 No effect

=1 長時間照射の後の短い冷却時間における計算を精度よく行うためのオプション。出力時刻のうちその冷却時間に対応する部分を秒単位で入力することが必要 (Card type 16 参照)。

10. ICS =0

11. FLX 中性子束。高速炉系では全中性子束、熱中性子炉系では 0.5 eV 以下の熱中性子束。

≥ 0 中性子束 (n/cm²·sec)

< 0 中性子束 = |FLX| × PWR(I),

PWR(I) = 出力 (Card type 12 参照)

(6) Card type 12 (8 E 10.5)

照射履歴. Card type 12 から以下で述べる Card type 15 までの情報を ITB 回 (Card type 11 参照) 繰返し入力する.

1. TBIN (I, 1) (day)
2. TBIN (I, 2) (hr)
3. TBIN (I, 3) (min)
4. TBIN (I, 4) (sec)

照射 (または冷却) の各タイムステップの時間間隔. day, hr, min, sec の任意の単位を組み合わせることができる.

5. PWR(I) ≥ 0 I 番目のタイムステップの出力 (W)

< 0 タイムステップのトップにおいて瞬時照射(|PWR(I)| W·sec) を行う.

6. FYT 核分裂割合の読み込みオプション. (Card type 13 参照)

=0.0 前のタイムステップのままの値を使い, 読み込まない.

=1.0 読み込む.

7. FE 核分裂エネルギー読み込みオプション. (Card type 14 参照)

=0.0 読み込まない. 前のタイムステップのままの値を使う. 最初のタイムステップから入力がずっとない場合には核分裂エネルギーとしては 201.4 MeV* がとられる.

=1.0 読み込む.

8. FS 中性子スペクトル読み込みオプション. (Card type 15 参照)

=0.0 読み込まない.

=1.0 読み込む. (コード内でスペクトルの規格化をする)

=-1.0 読み込む. (コード内ではスペクトルの規格化はしない. 熱中性子炉系に対するオプション)

(7) Card type 13 (10 E 8.3)

核分裂割合. FYT=0.0 の場合は入力する必要なし.

1. (GX (I, M), M=1, NFIS) 核分裂割合. Card type 3 で与えられた NFIS 種類の核分裂の各割合. 合計 1 になることが必要.

(8) Card type 14 (10 E 8.3)

核分裂エネルギー. FE=0.0 の場合は入力不要.

1. (FME (M), M=1, NFIS) 核分裂エネルギー (MeV). Card type 3 の説明で述べた NFIS 種類の核分裂に対応する核分裂エネルギー.

(9) Card type 15 (6 E 12.5)

中性子スペクトル, FS=0.0 の場合は入力不要

1. (SP (J), J=1, NGS) 中性子スペクトル. NGS は Card type 1 で入力された群数であり, 群の分割のしかたは Card type 6 の中性子断面積と同じであることが必要 (第 4 章参照).

(10) Card type 16 (4 E 10.5)

計算時刻. IT 回 (Card type 11 参照) 繰返し入力する.

1. TMIN (K, 1) (day)
2. TMIN (K, 2) (hr)
3. TMIN (K, 3) (min)
4. TMIN (K, 4) (sec)

各核種の生成量を計算し出力する時刻. day, hr, min, sec の任意の単位を組み合わせることができる点は Card type 12 の TBIN と同じであるが, 入力するのが照射履歴のトップを基準とする時刻であり, 時間間隔でない点が異なっている.

(11) Card type 17 (3 (A 6, E 12.0, 2 X))

初期原子数, INIT $\neq 1$ の場合は不要

1. IE (N) 初期原子数を読み込む核種名
 2. ANI (N) 核種 IE (N) の初期原子数
- IE (N) と ANI (N) を必要なだけ任意の順序で入力する. Card type 17 の初期原子数データの終りはカードの 1 カラム目から *E を入力して識別する.

Card type 10 から Card type 17 までのデータを ICASE 回繰返し入力し, ICASE の計算が終了すると再び I のコントロールカードの入力にもどりの計算が行われる.

5.2 出力形式

(1) ライブラリー修正データ (IOPT=3, 4 (Card type 1) の場合のみ)

(2) ライブラリー (ILIS=1 (Card type 1) の場合のみ)

(3) 照射履歴および生成量の計算時刻

(4) 生成量を計算する核種の核種名, 崩壊定数, 核分裂収率および親核種の数の一覧表

(5) 各核種の原子数および放射能の計算結果およびそれらの総和 (INDT=1 の場合は出力しない)

(6) β 線崩壊熱および γ 線崩壊熱の総量およびそれらの原子炉出力に対する割合 (IDCH=0 の場合には出力しない)

(7) 崩壊熱に 1% 以上の寄与をする核種の出力 (IDCH $\neq 2$ の場合には出力しない)

(5), (6), (7) が IT 回 (Card Type 11) 繰返し出力される.

* これは原子炉の出力と核分裂反応率の換算を 1W が 3.1×10^{10} fission/sec に対応するとして行うことに相当する.

6. 計 算 例

DCHAIN コードの計算例として、²³⁵U の熱中性子核分裂による FP の崩壊熱を計算した結果を以下に示す。瞬時照射の場合と 1 年照射の場合につき 0~10⁹ 秒の冷却時間における崩壊熱が計算されている。核データライ

ブラリーの修正は行わず、ライブラリーに含まれる全核種の生成量が計算されている。ただし瞬時照射の場合の出力は崩壊熱のみであり、個々の核種の生成量は出力しないオプションとなっている (INDT=1)。また 1 年照

TABLE 6.1 Input data for sample calculation

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
0 0 0 0 0 0 0
0 20 20 10 100 0 0 0
 2 1
DECAY HEAT CALCULATION FOR U-235 (TH), INSTANTANEOUS IRRADIATION
1 35 0 0 0 1 0 1 0 0 0.0
1.0+10 -201.7 1.0 1.0 0.0
1.0
201.7 201.7 201.7 203.0 203.0 210.6 210.6 212.0 200.0 192.0
0.0
1.0-02
2.0-02
5.0-02
1.0-01
2.0-01
5.0-01
1.0
2.0
5.0
1.0+01
2.0+01
5.0+01
1.0+02
2.0+02
5.0+02
1.0+03
2.0+03
5.0+03
1.0+04
2.0+04
5.0+04
1.0+05
2.0+05
5.0+05
1.0+06
2.0+06
5.0+06
1.0+07
2.0+07
5.0+07
1.0+08
2.0+08
5.0+08
1.0+09
DECAY HEAT CALCULATION FOR U-235 (TH), ONE-YEAR IRRADIATION
2 2 0 0 0 2 0 1 0 3.0+14
365.0 201.7 1.0 1.0 -1.0
1.0
201.7 201.7 203.0 203.0 210.6 210.6 212.0 200.0 192.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.2 0.75
1.0+10
365.0 0.0
365.0 1.0+09
.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
    
```

射の場合は各核種の生成量が出力されるが、出力量を制限するため冷却時間は0秒と10⁹秒のみに限定されている。入力データおよび出力データのリストをそれぞれTABLE 6.1 および Appendix 4 に示す。また原研において FACOM 計算機により計算する場合のコントロールカードをTABLE 6.2 に示す。

改訂されたFPの核データファイルによる各核種の崩

壊熱を0~10⁹秒の冷却時間にわたって計算した結果をTABLE 6.3~6.5 に示す。TABLE 6.3, 6.4, 6.5 はそれぞれ瞬時照射, 1年照射, 無限照射(10⁹ day) に対する結果に対応する。瞬時照射は1核分裂に対する結果である。1年照射および無限照射は1 fission/sec の核分裂反応率に対する結果であり、中性子捕獲反応による壊変は考慮されていない。

TABLE 6.2 Control cards for DCHAIN code

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8
1  #NO          F798,

                                           C,2/CORE 128
                                           P,0/PCH   0
                                           T,4/TIME  5M
                                           W,1/PAGE  80
                                           /ROSA-3

2 VM #GJOB      1012035,TASAKA.K,931,01
3 VM #DLIEDRUN  RFNAME=J2035.DCHAIN2A
4 VM #DISKTO    F01,J2035,FPLIB0
5 VM #DISK      F02
6 VM #DISK      F12
7 VM #DATA
8  #JEND
    
```


TABLE 6.3 (2)

TC(SEC)	RADIATION	U235T	U235F	PU239T	PU239F	U238F	U233T	TH232F	PU241T
5,00E+03	BETA	5,8027E-05	5,7361E-05	4,9014E-05	5,0117E-05	5,4149E-05	5,8261E-05	6,6553E-05	5,0049E-05
	GAMMA	8,8731E-05	8,5964E-05	7,4488E-05	7,5634E-05	8,1248E-05	8,3958E-05	9,1677E-05	7,8437E-05
	BETA+GAMMA	1,4676E-04	1,4332E-04	1,2350E-04	1,2575E-04	1,3540E-04	1,4222E-04	1,5823E-04	1,2845E-04
1,00E+04	BETA	2,4180E-05	2,3628E-05	1,8340E-05	1,8574E-05	2,0950E-05	2,5833E-05	2,9626E-05	1,8160E-05
	GAMMA	3,6039E-05	3,4632E-05	2,8379E-05	2,8910E-05	3,1995E-05	3,4745E-05	3,6442E-05	3,0110E-05
	BETA+GAMMA	6,0218E-05	5,8260E-05	4,6719E-05	4,7485E-05	5,2945E-05	6,0579E-05	6,6068E-05	4,8269E-05
2,00E+04	BETA	1,1119E-05	1,0888E-05	8,1705E-06	8,1543E-06	9,4022E-06	1,2312E-05	1,3781E-05	7,5480E-06
	GAMMA	1,2291E-05	1,1935E-05	9,8531E-06	9,8635E-06	1,0962E-05	1,2880E-05	1,2928E-05	9,7030E-06
	BETA+GAMMA	2,3410E-05	2,2824E-05	1,8024E-05	1,8018E-05	2,0364E-05	2,5192E-05	2,6709E-05	1,7251E-05
5,00E+04	BETA	3,6715E-06	3,5878E-06	2,8792E-06	2,8412E-06	3,1833E-06	3,8518E-06	3,9977E-06	2,6148E-06
	GAMMA	3,2927E-06	3,2413E-06	2,9962E-06	2,9962E-06	3,1127E-06	3,3848E-06	2,8931E-06	2,8445E-06
	BETA+GAMMA	6,9642E-06	6,8290E-06	5,9208E-06	5,8374E-06	6,2960E-06	7,2366E-06	6,8908E-06	5,4594E-06
1,00E+05	BETA	1,2395E-06	1,2107E-06	1,0958E-06	1,0781E-06	1,1389E-06	1,2210E-06	1,1392E-06	1,0333E-06
	GAMMA	1,3561E-06	1,3442E-06	1,3412E-06	1,3214E-06	1,3174E-06	1,3518E-06	1,0186E-06	1,2511E-06
	BETA+GAMMA	2,5956E-06	2,5549E-06	2,4370E-06	2,3995E-06	2,4563E-06	2,5728E-06	2,1577E-06	2,2843E-06
2,00E+05	BETA	3,9193E-07	3,8676E-07	3,8797E-07	3,8188E-07	3,8534E-07	3,8027E-07	3,2591E-07	3,7568E-07
	GAMMA	5,4801E-07	5,3458E-07	5,8521E-07	5,7784E-07	5,5967E-07	5,6285E-07	4,0282E-07	5,4307E-07
	BETA+GAMMA	9,3994E-07	9,4134E-07	9,7318E-07	9,5972E-07	9,4500E-07	9,4312E-07	7,2873E-07	9,1875E-07
5,00E+05	BETA	1,1034E-07	1,1002E-07	1,1156E-07	1,1061E-07	1,1122E-07	1,1132E-07	1,0158E-07	1,0993E-07
	GAMMA	2,0334E-07	2,0822E-07	2,2381E-07	2,2263E-07	2,1535E-07	2,1304E-07	1,7103E-07	2,1288E-07
	BETA+GAMMA	3,1368E-07	3,1824E-07	3,3538E-07	3,3324E-07	3,2658E-07	3,2436E-07	2,7261E-07	3,2281E-07
1,00E+06	BETA	5,5880E-08	5,5211E-08	5,1659E-08	5,1272E-08	5,2754E-08	5,7870E-08	5,9964E-08	5,1290E-08
	GAMMA	1,0195E-07	1,0239E-07	1,0676E-07	1,0569E-07	1,0387E-07	1,0538E-07	9,9065E-08	1,0437E-07
	BETA+GAMMA	1,5783E-07	1,5760E-07	1,5842E-07	1,5696E-07	1,5662E-07	1,6325E-07	1,5903E-07	1,5566E-07
2,00E+06	BETA	2,8573E-08	2,7858E-08	2,3867E-08	2,3617E-08	2,5333E-08	3,0052E-08	3,4586E-08	2,3855E-08
	GAMMA	4,5284E-08	4,4473E-08	4,5175E-08	4,4219E-08	4,4268E-08	4,5826E-08	4,8137E-08	4,4757E-08
	BETA+GAMMA	7,3857E-08	7,2331E-08	6,9043E-08	6,7836E-08	6,9602E-08	7,5878E-08	8,2722E-08	6,8612E-08
5,00E+06	BETA	1,0346E-08	1,0042E-08	7,9360E-09	7,8934E-09	8,8857E-09	1,1037E-08	1,3310E-08	7,9087E-09
	GAMMA	1,2576E-08	1,2402E-08	1,2403E-08	1,2015E-08	1,2366E-08	1,2101E-08	1,1771E-08	1,1510E-08
	BETA+GAMMA	2,2921E-08	2,2444E-08	2,0339E-08	1,9909E-08	2,1251E-08	2,3138E-08	2,5081E-08	1,9419E-08
1,00E+07	BETA	4,7031E-09	4,5793E-09	3,8471E-09	3,8535E-09	4,2567E-09	4,8788E-09	6,1975E-09	4,0776E-09
	GAMMA	5,0664E-09	5,0437E-09	4,7257E-09	4,5749E-09	4,8373E-09	4,7671E-09	4,1373E-09	4,1052E-09
	BETA+GAMMA	9,7695E-09	9,6230E-09	8,5728E-09	8,4284E-09	9,0939E-09	9,6459E-09	1,0335E-08	8,1827E-09
2,00E+07	BETA	2,0079E-09	1,9745E-09	2,0913E-09	2,0970E-09	2,1181E-09	1,9074E-09	2,7185E-09	2,4683E-09
	GAMMA	1,6511E-09	1,6434E-09	1,4732E-09	1,4337E-09	1,5134E-09	1,5804E-09	1,4018E-09	1,3060E-09
	BETA+GAMMA	3,6590E-09	3,6180E-09	3,5645E-09	3,5307E-09	3,6314E-09	3,4879E-09	4,1203E-09	3,7743E-09
5,00E+07	BETA	6,2430E-10	6,2360E-10	8,5285E-10	8,5984E-10	7,8821E-10	5,4486E-10	8,6834E-10	1,0820E-09
	GAMMA	9,7769E-11	1,0027E-10	1,4361E-10	1,4589E-10	1,2285E-10	9,6229E-11	1,0129E-10	1,6499E-10
	BETA+GAMMA	7,2207E-10	7,2387E-10	9,9646E-10	1,0057E-09	9,1106E-10	6,4109E-10	9,6963E-10	1,2469E-09
1,00E+08	BETA	1,9844E-10	1,9815E-10	2,7166E-10	2,7583E-10	2,4762E-10	1,8365E-10	2,6999E-10	3,4351E-10
	GAMMA	3,4270E-11	3,5426E-11	5,5790E-11	5,6721E-11	4,5243E-11	3,6692E-11	3,8315E-11	6,4021E-11
	BETA+GAMMA	2,3271E-10	2,3356E-10	3,2745E-10	3,3255E-10	2,9286E-10	2,2035E-10	3,0830E-10	4,0753E-10
2,00E+08	BETA	6,2607E-11	6,0499E-11	4,8722E-11	4,9370E-11	5,2328E-11	6,8993E-11	8,3591E-11	5,2480E-11
	GAMMA	2,5079E-11	2,5154E-11	2,9974E-11	2,9443E-11	2,6130E-11	2,7859E-11	2,7760E-11	3,0272E-11
	BETA+GAMMA	6,7686E-11	8,5654E-11	7,8696E-11	7,8813E-11	7,8457E-11	9,6852E-11	1,1135E-10	8,2753E-11
5,00E+08	BETA	4,0642E-11	3,8455E-11	1,8943E-11	1,8780E-11	2,5344E-11	4,7096E-11	5,4309E-11	1,5290E-11
	GAMMA	1,9506E-11	1,9204E-11	2,1104E-11	2,0180E-11	1,9099E-11	2,1373E-11	2,1663E-11	2,0885E-11
	BETA+GAMMA	6,0148E-11	5,7659E-11	4,0047E-11	3,8959E-11	4,4442E-11	6,8469E-11	7,5972E-11	3,6176E-11
1,00E+09	BETA	2,7303E-11	2,5810E-11	1,2688E-11	1,2554E-11	1,6977E-11	3,1580E-11	3,6218E-11	1,0222E-11
	GAMMA	1,3518E-11	1,3280E-11	1,4548E-11	1,3864E-11	1,3200E-11	1,4777E-11	1,5017E-11	1,4420E-11
	BETA+GAMMA	4,0822E-11	3,9090E-11	2,7235E-11	2,6418E-11	3,0177E-11	4,6357E-11	5,1235E-11	2,4642E-11

TABLE 6.4 (1) Decay heat (MeV/sec) after irradiation for one year at constant rate of 1 fission/sec

TC(SEC)	RADIATION	U235T	U235F	PU239T	PU239F	U238F	U233T	TH232F	PU241T
0,0	BETA	6,4017E+00	6,3883E+00	5,1324E+00	5,2046E+00	6,3048E+00	5,0246E+00	7,5746E+00	6,4679E+00
	GAMMA	6,0262E+00	6,0046E+00	4,7802E+00	4,8939E+00	7,8234E+00	4,8458E+00	7,2169E+00	5,9152E+00
	BETA+GAMMA	1,2428E+01	1,2393E+01	9,9125E+00	1,0098E+01	1,6128E+01	9,8704E+00	1,4792E+01	1,2383E+01
1,00E-02	BETA	6,3925E+00	6,3788E+00	5,1271E+00	5,1995E+00	6,2869E+00	5,0203E+00	7,5632E+00	6,4585E+00
	GAMMA	6,0194E+00	5,9974E+00	4,7763E+00	4,8901E+00	7,8077E+00	4,8429E+00	7,2075E+00	5,9078E+00
	BETA+GAMMA	1,2412E+01	1,2376E+01	9,9035E+00	1,0090E+01	1,6099E+01	9,8632E+00	1,4771E+01	1,2366E+01
2,00E-02	BETA	6,3834E+00	6,3695E+00	5,1219E+00	5,1945E+00	6,2692E+00	5,0160E+00	7,5519E+00	6,4492E+00
	GAMMA	6,0126E+00	5,9904E+00	4,7726E+00	4,8863E+00	7,7922E+00	4,8400E+00	7,1981E+00	5,9005E+00
	BETA+GAMMA	1,2396E+01	1,2360E+01	9,8945E+00	1,0081E+01	1,6061E+01	9,8560E+00	1,4750E+01	1,2350E+01
5,00E-02	BETA	6,3569E+00	6,3423E+00	5,1067E+00	5,1797E+00	6,2178E+00	5,0035E+00	7,5189E+00	6,4221E+00
	GAMMA	5,9928E+00	5,9699E+00	4,7616E+00	4,8754E+00	7,7473E+00	4,8316E+00	7,1710E+00	5,8794E+00
	BETA+GAMMA	1,2350E+01	1,2312E+01	9,8683E+00	1,0055E+01	1,5965E+01	9,8351E+00	1,4690E+01	1,2301E+01
1,00E-01	BETA	6,3150E+00	6,2993E+00	5,0825E+00	5,1562E+00	6,1371E+00	4,9836E+00	7,4668E+00	6,3792E+00
	GAMMA	5,9618E+00	5,9377E+00	4,7442E+00	4,8579E+00	7,6768E+00	4,8183E+00	7,1283E+00	5,8459E+00
	BETA+GAMMA	1,2277E+01	1,2237E+01	9,8268E+00	1,0014E+01	1,5814E+01	9,8019E+00	1,4599E+01	1,2229E+01
2,00E-01	BETA	6,2987E+00	6,2214E+00	5,0381E+00	5,1127E+00	7,9910E+00	4,9469E+00	7,3719E+00	6,3006E+00
	GAMMA	5,9058E+00	5,8800E+00	4,7126E+00	4,8259E+00	7,5502E+00	4,7941E+00	7,0508E+00	5,7851E+00
	BETA+GAMMA	1,2144E+01	1,2101E+01	9,7506E+00	9,9387E+00	1,5541E+01	9,7410E+00	1,4423E+01	1,2086E+01
5,00E-01	BETA	6,0538E+00	6,0336E+00	4,9278E+00	5,0038E+00	7,6408E+00	4,8549E+00	7,1405E+00	6,1080E+00
	GAMMA	5,7728E+00	5,7434E+00	4,6352E+00	4,7465E+00	7,2506E+00	4,7352E+00	6,8637E+00	5,6376E+00
	BETA+GAMMA	1,1827E+01	1,1777E+01	9,5629E+00	9,7503E+00	1,4891E+01	9,5901E+00	1,4004E+01	1,1746E+01
1,00E+00	BETA	5,8298E+00	5,8080E+00	4,7898E+00	4,8656E+00	7,2236E+00	4,7373E+00	6,8562E+00	5,8722E+00
	GAMMA	5,6157E+00	5,5833E+00	4,5402E+00	4,6469E+00	6,8996E+00	4,6625E+00	6,6366E+00	5,4591E+00
	BETA+GAMMA	1,1446E+01	1,1391E+01	9,3300E+00	9,5126E+00	1,4123E+01	9,3994E+00	1,3493E+01	1,1333E+01
2,00E+00	BETA	5,5211E+00	5,4995E+00	4,5939E+00	4,6672E+00	6,6698E+00	4,5643E+00	6,4565E+00	5,5489E+00
	GAMMA	5,4030E+00	5,3678E+00	4,4065E+00	4,5047E+00	6,4404E+00	4,5571E+00	6,3209E+00	5,2163E+00
	BETA+GAMMA	1,0924E+01	1,0867E+01	9,0004E+00	9,1718E+00	1,3110E+01	9,1214E+00	1,2777E+01	1,0765E+01
5,00E+00	BETA	4,9846E+00	4,9670E+00	4,2407E+00	4,3076E+00	5,7949E+00	4,2360E+00	5,7497E+00	5,0034E+00
	GAMMA	5,0352E+00	4,9968E+00	4,1636E+00	4,2459E+00	5,7312E+00	4,3534E+00	5,7716E+00	4,8080E+00
	BETA+GAMMA	1,0020E+01	9,9638E+00	8,4043E+00	8,5535E+00	1,1526E+01	8,5894E+00	1,1521E+01	9,8114E+00
1,00E+01	BETA	4,5060E+00	4,4927E+00	3,9095E+00	3,9707E+00	5,0954E+00	3,9197E+00	5,1220E+00	4,5239E+00
	GAMMA	4,7022E+00	4,6615E+00	3,9303E+00	3,9997E+00	5,1837E+00	4,1467E+00	5,2884E+00	4,4483E+00
	BETA+GAMMA	9,2082E+00	9,1542E+00	7,8397E+00	7,9704E+00	1,0279E+01	8,0665E+00	1,0410E+01	8,9722E+00
2,00E+01	BETA	3,9923E+00	3,9818E+00	3,5310E+00	3,5844E+00	4,3894E+00	3,5635E+00	4,4632E+00	3,9965E+00
	GAMMA	4,3166E+00	4,2745E+00	3,6492E+00	3,7041E+00	4,6222E+00	3,8886E+00	4,7512E+00	4,0372E+00
	BETA+GAMMA	8,3089E+00	8,2564E+00	7,1801E+00	7,2885E+00	9,0117E+00	7,4521E+00	9,2145E+00	8,0337E+00
5,00E+01	BETA	3,3105E+00	3,3007E+00	2,9808E+00	3,0183E+00	3,4988E+00	3,0623E+00	3,6221E+00	3,2600E+00
	GAMMA	3,7229E+00	3,6835E+00	3,2028E+00	3,2347E+00	3,8392E+00	3,4597E+00	3,9666E+00	3,4171E+00
	BETA+GAMMA	7,0333E+00	6,9842E+00	6,1837E+00	6,2530E+00	7,3380E+00	6,5220E+00	7,5887E+00	6,6771E+00
1,00E+02	BETA	2,8177E+00	2,8085E+00	2,5478E+00	2,5742E+00	2,8887E+00	2,6774E+00	3,0436E+00	2,7089E+00
	GAMMA	3,2457E+00	3,2116E+00	2,8321E+00	2,8499E+00	3,2566E+00	3,0882E+00	3,3681E+00	2,9353E+00
	BETA+GAMMA	6,0634E+00	6,0200E+00	5,3799E+00	5,4241E+00	6,1453E+00	5,7656E+00	6,4117E+00	5,6442E+00
2,00E+02	BETA	2,3810E+00	2,3722E+00	2,1429E+00	2,1640E+00	2,3714E+00	2,3168E+00	2,5573E+00	2,2252E+00
	GAMMA	2,8059E+00	2,7765E+00	2,4819E+00	2,4930E+00	2,7499E+00	2,7217E+00	2,8471E+00	2,5173E+00
	BETA+GAMMA	5,1870E+00	5,1487E+00	4,6247E+00	4,6570E+00	5,1213E+00	5,0385E+00	5,4044E+00	4,7424E+00
5,00E+02	BETA	1,8997E+00	1,8878E+00	1,6826E+00	1,7005E+00	1,8345E+00	1,8908E+00	2,0549E+00	1,7084E+00
	GAMMA	2,3282E+00	2,2995E+00	2,0895E+00	2,0977E+00	2,2356E+00	2,2893E+00	2,3220E+00	2,0915E+00
	BETA+GAMMA	4,2279E+00	4,1874E+00	3,7721E+00	3,7982E+00	4,0701E+00	4,1801E+00	4,3769E+00	3,7999E+00
1,00E+03	BETA	1,5823E+00	1,5664E+00	1,3713E+00	1,3844E+00	1,4948E+00	1,5969E+00	1,7386E+00	1,3723E+00
	GAMMA	2,0067E+00	1,9760E+00	1,8059E+00	1,8114E+00	1,9102E+00	1,9784E+00	1,9797E+00	1,8019E+00
	BETA+GAMMA	3,5890E+00	3,5424E+00	3,1772E+00	3,1957E+00	3,4050E+00	3,5753E+00	3,7183E+00	3,1742E+00
2,00E+03	BETA	1,2907E+00	1,2712E+00	1,0889E+00	1,0947E+00	1,1876E+00	1,3238E+00	1,4491E+00	1,0765E+00
	GAMMA	1,6766E+00	1,6460E+00	1,5060E+00	1,5071E+00	1,5830E+00	1,6583E+00	1,6306E+00	1,4973E+00
	BETA+GAMMA	2,9673E+00	2,9172E+00	2,5949E+00	2,6018E+00	2,7706E+00	2,9821E+00	3,0797E+00	2,5738E+00

TABLE 6.4 (2)

TC(SEC)	RADIATION	U235T	U235F	PU239T	PU239F	U238F	U233T	TH232F	PU241T
5,00E+03	BETA	9,7499E-01	9,5564E-01	8,0396E-01	8,0206E-01	8,7544E-01	1,0183E+00	1,1109E+00	7,8360E-01
	GAMMA	1,2432E+00	1,2211E+00	1,1275E+00	1,1226E+00	1,1728E+00	1,2449E+00	1,1754E+00	1,1053E+00
	BETA+GAMMA	2,2181E+00	2,1768E+00	1,9314E+00	1,9247E+00	2,0483E+00	2,2632E+00	2,2863E+00	1,8889E+00
1,00E+04	BETA	7,9332E-01	7,7726E-01	6,5873E-01	6,5422E-01	7,1245E-01	8,3016E-01	8,9472E-01	6,3693E-01
	GAMMA	9,6221E-01	9,5039E-01	8,9931E-01	8,9058E-01	9,2011E-01	9,7799E-01	8,8932E-01	8,6332E-01
	BETA+GAMMA	1,7555E+00	1,7277E+00	1,5580E+00	1,5448E+00	1,6326E+00	1,8082E+00	1,7840E+00	1,5003E+00
2,00E+04	BETA	6,3306E-01	6,2059E-01	5,3989E-01	5,3467E-01	5,7573E-01	6,5514E-01	6,9613E-01	5,2305E-01
	GAMMA	7,5197E-01	7,4766E-01	7,3407E-01	7,2320E-01	7,3360E-01	7,6783E-01	6,7294E-01	6,9273E-01
	BETA+GAMMA	1,3850E+00	1,3683E+00	1,2740E+00	1,2579E+00	1,3093E+00	1,4230E+00	1,3691E+00	1,2158E+00
5,00E+04	BETA	4,4324E-01	4,3473E-01	3,9737E-01	3,9341E-01	4,1419E-01	4,4861E-01	4,7195E-01	3,9398E-01
	GAMMA	5,7161E-01	5,7106E-01	5,7960E-01	5,7035E-01	5,6865E-01	5,7689E-01	5,9302E-01	5,4648E-01
	BETA+GAMMA	1,0149E+00	1,0058E+00	9,7697E-01	9,6375E-01	9,8285E-01	1,0255E+00	9,6497E-01	9,4046E-01
1,00E+05	BETA	3,3663E-01	3,3065E-01	3,0914E-01	3,0648E-01	3,1938E-01	3,4020E-01	3,6450E-01	3,1243E-01
	GAMMA	4,6786E-01	4,6868E-01	4,8022E-01	4,7243E-01	4,6915E-01	4,7254E-01	4,0955E-01	4,5349E-01
	BETA+GAMMA	8,0449E-01	7,9933E-01	7,8936E-01	7,7891E-01	7,8853E-01	8,1274E-01	7,7404E-01	7,6592E-01
2,00E+05	BETA	2,6771E-01	2,6306E-01	2,4480E-01	2,4319E-01	2,5409E-01	2,7307E-01	3,0469E-01	2,5097E-01
	GAMMA	3,8332E-01	3,8411E-01	3,9362E-01	3,8707E-01	3,8528E-01	3,8721E-01	3,4722E-01	3,7300E-01
	BETA+GAMMA	6,5103E-01	6,4717E-01	6,3841E-01	6,3026E-01	6,3937E-01	6,6028E-01	6,5192E-01	6,2402E-01
5,00E+05	BETA	2,1037E-01	2,0610E-01	1,8645E-01	1,8558E-01	1,9634E-01	2,1653E-01	2,5582E-01	1,9400E-01
	GAMMA	2,8935E-01	2,8808E-01	2,9037E-01	2,8467E-01	2,8661E-01	2,8919E-01	2,7428E-01	2,7625E-01
	BETA+GAMMA	4,9970E-01	4,9418E-01	4,7681E-01	4,7025E-01	4,8294E-01	5,0572E-01	5,3011E-01	4,7024E-01
1,00E+06	BETA	1,7265E-01	1,6862E-01	1,5001E-01	1,4943E-01	1,5957E-01	1,7786E-01	2,1854E-01	1,5815E-01
	GAMMA	2,1830E-01	2,1594E-01	2,1392E-01	2,0875E-01	2,1260E-01	2,1522E-01	2,0999E-01	2,0255E-01
	BETA+GAMMA	3,9096E-01	3,8457E-01	3,6393E-01	3,5818E-01	3,7217E-01	3,9309E-01	4,2853E-01	3,6070E-01
2,00E+06	BETA	1,3444E-01	1,3115E-01	1,1686E-01	1,1660E-01	1,2499E-01	1,3779E-01	1,7492E-01	1,2543E-01
	GAMMA	1,5152E-01	1,4968E-01	1,4580E-01	1,4167E-01	1,4609E-01	1,4682E-01	1,4142E-01	1,3532E-01
	BETA+GAMMA	2,8596E-01	2,8083E-01	2,6267E-01	2,5827E-01	2,7108E-01	2,8461E-01	3,1634E-01	2,6075E-01
5,00E+06	BETA	8,6776E-02	8,4901E-02	8,0360E-02	8,0495E-02	8,4618E-02	8,6721E-02	1,1554E-01	9,0027E-02
	GAMMA	8,1386E-02	8,0903E-02	7,6401E-02	7,4148E-02	7,7613E-02	7,7300E-02	6,9280E-02	6,8077E-02
	BETA+GAMMA	1,6816E-01	1,6580E-01	1,5676E-01	1,5464E-01	1,6223E-01	1,6402E-01	1,8482E-01	1,5810E-01
1,00E+07	BETA	5,6993E-02	5,6063E-02	5,9415E-02	5,9615E-02	6,0101E-02	5,4449E-02	7,7116E-02	6,9983E-02
	GAMMA	4,4025E-02	4,3869E-02	4,0519E-02	3,9454E-02	4,1276E-02	4,1940E-02	3,7127E-02	3,6177E-02
	BETA+GAMMA	1,0102E-01	9,9932E-02	9,9933E-02	9,9069E-02	1,0138E-01	9,6389E-02	1,1424E-01	1,0616E-01
2,00E+07	BETA	3,3387E-02	3,3128E-02	4,0929E-02	4,1140E-02	3,9205E-02	3,0011E-02	4,6030E-02	5,0646E-02
	GAMMA	1,4986E-02	1,4993E-02	1,4779E-02	1,4564E-02	1,4530E-02	1,4452E-02	1,3561E-02	1,4199E-02
	BETA+GAMMA	4,8373E-02	4,8120E-02	5,5708E-02	5,5704E-02	5,3735E-02	4,4463E-02	5,9391E-02	6,4845E-02
5,00E+07	BETA	1,3621E-02	1,3621E-02	1,8945E-02	1,9143E-02	1,7362E-02	1,2005E-02	1,8853E-02	2,4098E-02
	GAMMA	1,8056E-03	1,8718E-03	3,0355E-03	3,1023E-03	2,4851E-03	1,8245E-03	1,9793E-03	3,5949E-03
	BETA+GAMMA	1,5427E-02	1,5492E-02	2,1981E-02	2,2245E-02	1,9847E-02	1,3829E-02	2,0832E-02	2,7693E-02
1,00E+08	BETA	4,7786E-03	4,7573E-03	6,2721E-03	6,3762E-03	5,7618E-03	4,5481E-03	6,4621E-03	7,8573E-03
	GAMMA	9,9103E-04	1,0185E-03	1,5129E-03	1,5299E-03	1,2416E-03	1,0754E-03	1,1025E-03	1,6918E-03
	BETA+GAMMA	5,7696E-03	5,7758E-03	7,7850E-03	7,9060E-03	7,0033E-03	5,6235E-03	7,5646E-03	9,5491E-03
2,00E+08	BETA	1,8531E-03	1,7832E-03	1,3110E-03	1,3252E-03	1,4606E-03	2,0687E-03	2,4760E-03	1,3576E-03
	GAMMA	7,7574E-04	7,7602E-04	9,0822E-04	8,8884E-04	7,9694E-04	8,6133E-04	8,5911E-04	9,1034E-04
	BETA+GAMMA	2,6289E-03	2,5592E-03	2,2192E-03	2,2140E-03	2,2575E-03	2,9300E-03	3,3351E-03	2,2679E-03
5,00E+08	BETA	1,2652E-03	1,1970E-03	5,8917E-04	5,8401E-04	7,8845E-04	1,4661E-03	1,6901E-03	4,7529E-04
	GAMMA	6,0800E-04	5,9847E-04	6,5750E-04	6,2848E-04	5,9517E-04	6,6603E-04	6,7525E-04	6,5081E-04
	BETA+GAMMA	1,8732E-03	1,7954E-03	1,2467E-03	1,2125E-03	1,3836E-03	2,1321E-03	2,3653E-03	1,1261E-03
1,00E+09	BETA	8,5049E-04	8,0397E-04	3,9526E-04	3,9109E-04	5,2886E-04	9,8365E-04	1,1280E-03	3,1847E-04
	GAMMA	4,2144E-04	4,1402E-04	4,5352E-04	4,3220E-04	4,1150E-04	4,6069E-04	4,6816E-04	4,4955E-04
	BETA+GAMMA	1,2719E-03	1,2180E-03	8,4879E-04	8,2329E-04	9,4036E-04	1,4443E-03	1,5961E-03	7,6802E-04

TABLE 6.5 (1) Decay heat (MeV/sec) after infinite irradiation (10^6 days) at constant rate of 1 fission/sec

TC(SEC)	RADIATION	U235T	U235F	PU239T	PU239F	U238F	U233T	TH232F	PU241T
0,0	BETA	6,5118E+00	6,4946E+00	5,2216E+00	5,2942E+00	8,4001E+00	5,1409E+00	7,7226E+00	6,5662E+00
	GAMMA	6,0689E+00	6,0469E+00	4,8289E+00	4,9411E+00	7,8670E+00	4,8919E+00	7,2636E+00	5,9649E+00
	BETA+GAMMA	1,2581E+01	1,2542E+01	1,0051E+01	1,0235E+01	1,6267E+01	1,0033E+01	1,4986E+01	1,2531E+01
1,00E-02	BETA	6,5025E+00	6,4851E+00	5,2163E+00	5,2891E+00	8,3821E+00	5,1366E+00	7,7111E+00	6,5568E+00
	GAMMA	6,0620E+00	6,0397E+00	4,8251E+00	4,9373E+00	7,8513E+00	4,8889E+00	7,2542E+00	5,9575E+00
	BETA+GAMMA	1,2565E+01	1,2525E+01	1,0041E+01	1,0226E+01	1,6233E+01	1,0026E+01	1,4965E+01	1,2514E+01
2,00E-02	BETA	6,4934E+00	6,4758E+00	5,2111E+00	5,2841E+00	8,3645E+00	5,1323E+00	7,6998E+00	6,5476E+00
	GAMMA	6,0552E+00	6,0327E+00	4,8214E+00	4,9336E+00	7,8358E+00	4,8861E+00	7,2448E+00	5,9502E+00
	BETA+GAMMA	1,2549E+01	1,2508E+01	1,0033E+01	1,0218E+01	1,6200E+01	1,0018E+01	1,4945E+01	1,2498E+01
5,00E-02	BETA	6,4669E+00	6,4486E+00	5,1959E+00	5,2693E+00	8,3131E+00	5,1198E+00	7,6668E+00	6,5204E+00
	GAMMA	6,0355E+00	6,0122E+00	4,8104E+00	4,9226E+00	7,7909E+00	4,8776E+00	7,2177E+00	5,9291E+00
	BETA+GAMMA	1,2502E+01	1,2461E+01	1,0006E+01	1,0192E+01	1,6104E+01	9,9975E+00	1,4885E+01	1,2450E+01
1,00E-01	BETA	6,4250E+00	6,4056E+00	5,1718E+00	5,2458E+00	8,2323E+00	5,0999E+00	7,6147E+00	6,4775E+00
	GAMMA	6,0044E+00	5,9801E+00	4,7930E+00	4,9052E+00	7,7204E+00	4,8644E+00	7,1750E+00	5,8956E+00
	BETA+GAMMA	1,2429E+01	1,2386E+01	9,9648E+00	1,0151E+01	1,5953E+01	9,9643E+00	1,4790E+01	1,2373E+01
2,00E-01	BETA	6,3487E+00	6,3277E+00	5,1273E+00	5,2023E+00	8,0862E+00	5,0632E+00	7,5199E+00	6,3989E+00
	GAMMA	5,9485E+00	5,9223E+00	4,7613E+00	4,8732E+00	7,5939E+00	4,8402E+00	7,0975E+00	5,8348E+00
	BETA+GAMMA	1,2297E+01	1,2250E+01	9,8886E+00	1,0076E+01	1,5680E+01	9,9034E+00	1,4617E+01	1,2234E+01
5,00E-01	BETA	6,1638E+00	6,1399E+00	5,0170E+00	5,0934E+00	7,7360E+00	4,9712E+00	7,2885E+00	6,2063E+00
	GAMMA	5,8155E+00	5,7857E+00	4,6840E+00	4,7938E+00	7,2942E+00	4,7813E+00	6,9104E+00	5,6873E+00
	BETA+GAMMA	1,1979E+01	1,1926E+01	9,7010E+00	9,8872E+00	1,5030E+01	9,7525E+00	1,4199E+01	1,1894E+01
1,00E+00	BETA	5,9398E+00	5,9143E+00	4,8791E+00	4,9552E+00	7,3189E+00	4,8536E+00	7,0042E+00	5,9705E+00
	GAMMA	5,6584E+00	5,6256E+00	4,5890E+00	4,6942E+00	6,9432E+00	4,7085E+00	6,6833E+00	5,5089E+00
	BETA+GAMMA	1,1598E+01	1,1540E+01	9,4681E+00	9,6494E+00	1,4262E+01	9,5622E+00	1,3687E+01	1,1479E+01
2,00E+00	BETA	5,6311E+00	5,6058E+00	4,6831E+00	4,7567E+00	6,7651E+00	4,6806E+00	6,6044E+00	5,6472E+00
	GAMMA	5,4456E+00	5,4101E+00	4,4553E+00	4,5519E+00	6,4840E+00	4,6032E+00	6,3676E+00	5,2660E+00
	BETA+GAMMA	1,1077E+01	1,1016E+01	9,1385E+00	9,3087E+00	1,3249E+01	9,2838E+00	1,2972E+01	1,0913E+01
5,00E+00	BETA	5,0946E+00	5,0733E+00	4,3299E+00	4,3972E+00	5,8901E+00	4,3523E+00	5,8977E+00	5,1017E+00
	GAMMA	5,0778E+00	5,0392E+00	4,2124E+00	4,2931E+00	5,7749E+00	4,3994E+00	5,8183E+00	4,8577E+00
	BETA+GAMMA	1,0172E+01	1,0112E+01	8,5423E+00	8,6903E+00	1,1665E+01	8,7517E+00	1,1716E+01	9,9594E+00
1,00E+01	BETA	4,6160E+00	4,5990E+00	3,9987E+00	4,0603E+00	5,1907E+00	4,0360E+00	5,2700E+00	4,6222E+00
	GAMMA	4,7448E+00	4,7038E+00	3,9790E+00	4,0470E+00	5,2273E+00	4,1928E+00	5,3351E+00	4,4980E+00
	BETA+GAMMA	9,3609E+00	9,3028E+00	7,9777E+00	8,1072E+00	1,0418E+01	8,2288E+00	1,0605E+01	9,1202E+00
2,00E+01	BETA	4,1023E+00	4,0882E+00	3,6202E+00	3,6740E+00	4,4847E+00	3,6798E+00	4,6112E+00	4,0949E+00
	GAMMA	4,3592E+00	4,3169E+00	3,6979E+00	3,7513E+00	4,6659E+00	3,9347E+00	4,7979E+00	4,0869E+00
	BETA+GAMMA	8,4616E+00	8,4050E+00	7,3182E+00	7,4253E+00	9,1506E+00	7,6145E+00	9,4091E+00	8,1818E+00
5,00E+01	BETA	3,4205E+00	3,4070E+00	3,0701E+00	3,1079E+00	3,5941E+00	3,1786E+00	3,7701E+00	3,3584E+00
	GAMMA	3,7655E+00	3,7258E+00	3,2516E+00	3,2819E+00	3,8828E+00	3,5058E+00	4,0133E+00	3,4668E+00
	BETA+GAMMA	7,1860E+00	7,1328E+00	6,3217E+00	6,3898E+00	7,4769E+00	6,6844E+00	7,7833E+00	6,8252E+00
1,00E+02	BETA	2,9277E+00	2,9148E+00	2,6371E+00	2,6638E+00	2,9839E+00	2,7937E+00	3,1916E+00	2,8072E+00
	GAMMA	3,2884E+00	3,2539E+00	2,8809E+00	2,8972E+00	3,3003E+00	3,1343E+00	3,4148E+00	2,9850E+00
	BETA+GAMMA	6,2161E+00	6,1687E+00	5,5180E+00	5,5610E+00	6,2842E+00	5,9280E+00	6,6064E+00	5,7923E+00
2,00E+02	BETA	2,4911E+00	2,4785E+00	2,2321E+00	2,2535E+00	2,4666E+00	2,4331E+00	2,7052E+00	2,3235E+00
	GAMMA	2,8486E+00	2,8189E+00	2,5307E+00	2,5403E+00	2,7936E+00	2,7677E+00	2,8938E+00	2,5670E+00
	BETA+GAMMA	5,3397E+00	5,2973E+00	4,7627E+00	4,7939E+00	5,2602E+00	5,2009E+00	5,5990E+00	4,8905E+00
5,00E+02	BETA	2,0097E+00	1,9941E+00	1,7718E+00	1,7901E+00	1,9298E+00	2,0071E+00	2,2029E+00	1,8067E+00
	GAMMA	2,3709E+00	2,3419E+00	2,1383E+00	2,1450E+00	2,2793E+00	2,3354E+00	2,3687E+00	2,1412E+00
	BETA+GAMMA	4,3806E+00	4,3360E+00	3,9102E+00	3,9350E+00	4,2090E+00	4,3425E+00	4,5716E+00	3,9479E+00
1,00E+03	BETA	1,6924E+00	1,6727E+00	1,4605E+00	1,4739E+00	1,5900E+00	1,7132E+00	1,8865E+00	1,4706E+00
	GAMMA	2,0494E+00	2,0184E+00	1,8547E+00	1,8587E+00	1,9538E+00	2,0244E+00	2,0264E+00	1,8516E+00
	BETA+GAMMA	3,7417E+00	3,6911E+00	3,3152E+00	3,3326E+00	3,5439E+00	3,7377E+00	3,9130E+00	3,3223E+00
2,00E+03	BETA	1,4007E+00	1,3775E+00	1,1781E+00	1,1843E+00	1,2829E+00	1,4401E+00	1,5971E+00	1,1748E+00
	GAMMA	1,7193E+00	1,6884E+00	1,5548E+00	1,5544E+00	1,6267E+00	1,7043E+00	1,6773E+00	1,5470E+00
	BETA+GAMMA	3,1200E+00	3,0659E+00	2,7329E+00	2,7386E+00	2,9095E+00	3,1445E+00	3,2743E+00	2,7218E+00

TABLE 6.5 (2)

TC(SEC)	RADIATION	U235T	U235F	PU239T	PU239F	U238F	U233T	TH232F	PU241T
5,00E+03	BETA	1,0850E+00	1,0619E+00	8,9318E-01	8,9162E-01	9,7069E-01	1,1346E+00	1,2589E+00	8,8193E-01
	GAMMA	1,2858E+00	1,2635E+00	1,1762E+00	1,1699E+00	1,2165E+00	1,2910E+00	1,2221E+00	1,1551E+00
	BETA+GAMMA	2,3708E+00	2,3254E+00	2,0694E+00	2,0615E+00	2,1871E+00	2,4255E+00	2,4809E+00	2,0370E+00
1,00E+04	BETA	9,0333E-01	8,8356E-01	7,4795E-01	7,4377E-01	8,0770E-01	9,4645E-01	1,0427E+00	7,3525E-01
	GAMMA	1,0049E+00	9,9271E-01	9,4809E-01	9,3785E-01	9,6373E-01	1,0241E+00	9,3602E-01	9,1303E-01
	BETA+GAMMA	1,9082E+00	1,8763E+00	1,6960E+00	1,6816E+00	1,7714E+00	1,9705E+00	1,9787E+00	1,6483E+00
2,00E+04	BETA	7,4306E-01	7,2687E-01	6,2909E-01	6,2421E-01	6,7096E-01	7,7142E-01	8,4408E-01	6,2135E-01
	GAMMA	7,9464E-01	7,8998E-01	7,8285E-01	7,7047E-01	7,7722E-01	8,1388E-01	7,1963E-01	7,4243E-01
	BETA+GAMMA	1,5377E+00	1,5168E+00	1,4119E+00	1,3947E+00	1,4482E+00	1,5853E+00	1,5637E+00	1,3638E+00
5,00E+04	BETA	5,5321E-01	5,4098E-01	4,8652E-01	4,8290E-01	5,0939E-01	5,6486E-01	6,1985E-01	4,9222E-01
	GAMMA	6,1426E-01	6,1336E-01	6,2837E-01	6,1760E-01	6,1226E-01	6,2293E-01	5,3970E-01	5,9617E-01
	BETA+GAMMA	1,1675E+00	1,1543E+00	1,1149E+00	1,1005E+00	1,1216E+00	1,1878E+00	1,1595E+00	1,0884E+00
1,00E+05	BETA	4,4654E-01	4,3684E-01	3,9822E-01	3,9591E-01	4,1450E-01	4,5640E-01	5,1231E-01	4,1060E-01
	GAMMA	5,1049E-01	5,1096E-01	5,2896E-01	5,1966E-01	5,1273E-01	5,1856E-01	4,5620E-01	5,0316E-01
	BETA+GAMMA	9,5702E-01	9,4780E-01	9,2718E-01	9,1557E-01	9,2723E-01	9,7496E-01	9,6852E-01	9,1375E-01
2,00E+05	BETA	3,7750E-01	3,6915E-01	3,3374E-01	3,3248E-01	3,4908E-01	3,8918E-01	4,5236E-01	3,4896E-01
	GAMMA	4,2590E-01	4,2634E-01	4,4231E-01	4,3425E-01	4,2882E-01	4,3319E-01	3,9388E-01	4,2267E-01
	BETA+GAMMA	8,0341E-01	7,9549E-01	7,7606E-01	7,6674E-01	7,7790E-01	8,2236E-01	8,4620E-01	7,7163E-01
5,00E+05	BETA	3,1983E-01	3,1185E-01	2,7498E-01	2,7446E-01	2,9094E-01	3,3233E-01	4,0303E-01	2,9147E-01
	GAMMA	3,3178E-01	3,3018E-01	3,3893E-01	3,3172E-01	3,3001E-01	3,3504E-01	3,2078E-01	3,2374E-01
	BETA+GAMMA	6,5161E-01	6,4203E-01	6,1391E-01	6,0618E-01	6,2095E-01	6,6737E-01	7,2381E-01	6,1721E-01
1,00E+06	BETA	2,8158E-01	2,7384E-01	2,3787E-01	2,3762E-01	2,5353E-01	2,9319E-01	3,6500E-01	2,5478E-01
	GAMMA	2,6053E-01	2,5782E-01	2,6227E-01	2,5559E-01	2,579E-01	2,6086E-01	2,5629E-01	2,5183E-01
	BETA+GAMMA	5,4211E-01	5,3166E-01	5,0013E-01	4,9321E-01	5,0932E-01	5,5405E-01	6,2129E-01	5,0662E-01
2,00E+06	BETA	2,4231E-01	2,3532E-01	2,0339E-01	2,0346E-01	2,1768E-01	2,5218E-01	3,1991E-01	2,2041E-01
	GAMMA	1,9335E-01	1,9116E-01	1,9374E-01	1,8810E-01	1,8889E-01	1,9207E-01	1,8736E-01	1,8420E-01
	BETA+GAMMA	4,3566E-01	4,2648E-01	3,9713E-01	3,9156E-01	4,0657E-01	4,4425E-01	5,0727E-01	4,0460E-01
5,00E+06	BETA	1,9170E-01	1,8614E-01	1,6312E-01	1,6357E-01	1,7375E-01	1,9851E-01	2,5645E-01	1,8030E-01
	GAMMA	1,2223E-01	1,2139E-01	1,2330E-01	1,1955E-01	1,1941E-01	1,2159E-01	1,1430E-01	1,1591E-01
	BETA+GAMMA	3,1393E-01	3,0753E-01	2,8642E-01	2,8312E-01	2,9317E-01	3,2010E-01	3,7076E-01	2,9621E-01
1,00E+07	BETA	1,5763E-01	1,5302E-01	1,3655E-01	1,3702E-01	1,4396E-01	1,6247E-01	2,1206E-01	1,5317E-01
	GAMMA	8,3735E-02	8,3211E-02	8,6115E-02	8,3556E-02	8,1872E-02	8,5131E-02	8,1077E-02	8,2645E-02
	BETA+GAMMA	2,4136E-01	2,3623E-01	2,2266E-01	2,2058E-01	2,2583E-01	2,4760E-01	2,9313E-01	2,3582E-01
2,00E+07	BETA	1,2712E-01	1,2320E-01	1,0874E-01	1,0916E-01	1,1441E-01	1,3201E-01	1,7138E-01	1,2204E-01
	GAMMA	5,3430E-02	5,3046E-02	5,8669E-02	5,6942E-02	5,3628E-02	5,6406E-02	5,6041E-02	5,8760E-02
	BETA+GAMMA	1,8055E-01	1,7625E-01	1,6741E-01	1,6610E-01	1,6804E-01	1,8842E-01	2,2742E-01	1,8080E-01
5,00E+07	BETA	9,4674E-02	9,1014E-02	6,9101E-02	6,9315E-02	7,6396E-02	1,0282E-01	1,2665E-01	7,3023E-02
	GAMMA	3,8588E-02	3,8200E-02	4,4104E-02	4,2595E-02	3,9280E-02	4,2095E-02	4,2829E-02	4,4808E-02
	BETA+GAMMA	1,3326E-01	1,2921E-01	1,1321E-01	1,1191E-01	1,1568E-01	1,4492E-01	1,6948E-01	1,1783E-01
1,00E+08	BETA	7,6601E-02	7,2943E-02	4,3973E-02	4,3902E-02	5,3405E-02	8,6765E-02	1,0171E-01	4,1078E-02
	GAMMA	3,6100E-02	3,5621E-02	3,9916E-02	3,8317E-02	3,5864E-02	3,9549E-02	4,0085E-02	3,9868E-02
	BETA+GAMMA	1,1270E-01	1,0856E-01	8,3888E-02	8,2218E-02	8,9270E-02	1,2631E-01	1,4180E-01	8,0947E-02
2,00E+08	BETA	6,6207E-02	6,2684E-02	3,1975E-02	3,1703E-02	4,2026E-02	7,6357E-02	8,7742E-02	2,6479E-02
	GAMMA	3,3278E-02	3,2750E-02	3,6032E-02	3,4432E-02	3,2602E-02	3,6446E-02	3,6956E-02	3,5701E-02
	BETA+GAMMA	9,9484E-02	9,5434E-02	6,8008E-02	6,6135E-02	7,4628E-02	1,1280E-01	1,2470E-01	6,2180E-02
5,00E+08	BETA	5,1917E-02	4,9093E-02	2,4394E-02	2,4128E-02	3,2474E-02	5,9954E-02	6,8616E-02	1,9755E-02
	GAMMA	2,6690E-02	2,6226E-02	2,8732E-02	2,7389E-02	2,6064E-02	2,9184E-02	2,9646E-02	2,8472E-02
	BETA+GAMMA	7,8607E-02	7,5319E-02	5,3127E-02	5,1517E-02	5,8538E-02	8,9138E-02	9,8262E-02	4,8227E-02
1,00E+09	BETA	3,5178E-02	3,3265E-02	1,6620E-02	1,6430E-02	2,2065E-02	4,0570E-02	4,6333E-02	1,3493E-02
	GAMMA	1,8529E-02	1,8203E-02	1,9935E-02	1,8996E-02	1,8088E-02	2,0256E-02	2,0580E-02	1,9755E-02
	BETA+GAMMA	5,3706E-02	5,1468E-02	3,6554E-02	3,5426E-02	4,0153E-02	6,0826E-02	6,6913E-02	3,3248E-02

7. 結 語

DCHAIN コードは核種の生成崩壊を解析するコードであり、各核種の生成量と同時に全核種の生成原子数、放射能、崩壊熱などが計算される。また生成核種の γ 線スペクトルなども DCHAIN による各核種の生成量をもとに計算することが可能である。

DCHAIN コードにおいては各核種の生成量の計算は線型崩壊系列に対する Bateman の解を繰返し使うことにより解析的に行われる。本コードにより原子炉において考慮する必要のあるあらゆる種類の崩壊および核反応を統一的に取扱うことが出来る。中性子以外の粒子との反応による生成崩壊も、中性子断面積、中性子束、中性子スペクトルのかわりにそれぞれ問題としている入射粒子に対する断面積、粒子束、粒子のエネルギースペクトルを入力することにより解析することが可能である。また既存の Bateman の方法においては取扱いうる崩壊系列の種類が数種類に限定されるという欠点があったが、

各核種の崩壊系列をコード内で自動的に組立てるようにコードを改良したので、いかに複雑な崩壊系列も取扱うことが可能となり、それに応じて核データライブラリーのフォーマットも簡潔となった。たとえば Bateman 法に基づいた既存の方法では循環形式の崩壊系列を取扱うことは不可能であったが、これを近似的に取扱いうるように改良した。現在、核分裂生成物に対する核データライブラリーが整備されており、アクチニド核種に対する核データライブラリーを準備中である。

なお、ENDF/B フォーマットのファイルから DCHAIN 用の核データライブラリーを作成するプログラム DAMD、DCHAIN コードの核データライブラリーからカード出力およびプリントを行うプログラム TACA、および核データライブラリーから崩壊系列を組立てプリントアウトするプログラム TREE については別稿において述べる予定である。

謝 辞

DCHAIN コードの作成に伴うプログラミングならびに FP 核データライブラリーの改訂を行って下さった CRC 社の井原均氏、および草稿の検討を行って下さ

った燃料安全第2研究室の武田常夫氏に感謝致します。また本研究の遂行にあたり種々の御配慮をいただいた安全工学第1研究室長の斯波正誼氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) BATEMAN H. : *Proc. Cambridge Phil.Soc.* **15**, 423(1910)
- 2) ENGLAND T. R. : "CINDER—A One-Point Depletion and Fission Product Program", WAPD-TM-334(1964)
- 3) GUMPRECHT R. O. : "Computer Code RIBD", *Trans. Am. Nucl. Soc.* **12** (1), 141 (1969)
- 4) TASAKA K. and SASAMOTO N. : "FP-S : Program for Calculation of Atomic Density for Each Fission Product Nuclide", JAERI 1198 (1971)
- 5) PEASE L. : "DEEMS, A Fortran Program for Solving the First Degree Coupled Differential Equations by Expansion in Matrix Series", TDSI-49 (1963)
- 6) BALL S. J. and ADAMS R. K. : "MATEX, A General Purpose Digital Computer Program for Solving Ordinary Differential Equations by the Matrix Exponential Method", ORNL-TM-1933 (1967)
- 7) BELL M. J. : "ORIGEN—The ORNL Isotope Generation and Depletion Code", ORNL-4628 (1973)
- 8) TASAKA K. : "Computer Program FPGAM for Calculating Gamma-Ray Spectrum of Fission Products", JAERI-M6898 (1977)
- 9) ALEXANDER P., *et al.* : "Computer Analysis of Fission Data", *Nucl. Instr. Method*, **86**, 99 (1970)
- 10) TAKEDA T. : "Calculation of the Radionuclide Yields in Complex-Decay, Activation, and Fission in a Given Time (Code CODAC)", JAERI-M 6148 (1975)
- 11) ABAGYAN L. P. *et al.* : "Group Constants for Nuclear Reactor Calculations", Consultants Bureau, New York (1964)
- 12) TASAKA K. : "Nuclear Data for Calculation of Decay Power of Fission Products", JAERI-M 5997 (1975)
- 13) MEEK M. E. and RIDER B. F., "Compilation of Fission Product Yields", NEDO-12154-1 (1974)
- 14) MYERS W. D. and SWIATECKI W. J., "Nuclear Mass and Deformations", *Nucl. Phys.*, **81**, 1 (1966)
- 15) ROSE M. E. : "The Theory of Allowed β -Decay", in "Beta and Gamma-Ray Spectroscopy", edited by K. SIEGBAHN, North-Holland Publishing Company (1955)
- 16) LEDERER C. M., HOLLANDER J. M. and PERLMAN I. : "Tables of Isotopes, Sixth Edition," John Wiley & Sons, Inc. (1968)
- 17) Nuclear Data Sheets, Academic Press
- 18) KIKUCHI Y., HASEGAWA A., NISHIMURA H., TASAKA K. : "Fission Product Fast Reactor Constants System of JNDC", JAERI 1248 (1976)
- 19) COOK J. L. : "Fission Product Cross Sections", AAEC/TM-549 (1969)
- 20) MUGHABGHAB S. F. and GARBER D. I. : "Neutron Cross Sections," BNL-325 (1973)