

JAERI 1226

## 核分裂生成物の炉定数

(FP炉定数作成ワーキング・グループ最終報告書)

---

1973年3月

---

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

## 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

天野 恵（製造部）	野村 末雄（材料試験炉部）
石原 豊秀（東海研究所長付）	原田吉之助（物理部）
磯 康彦（企画室）	平田 実穂（動力炉開発管理室）
大西 寛（原子炉化学部）	深沢 邦武（研究炉管理部）
小幡 行雄（物理部）	堀田 寛（高崎研・研究部）
桂木 学（原子炉工学部）	三井田純一（原子炉工学部）
菊池 武雄（燃料工学部）	山崎彌三郎（原子炉工学部）
柴田 長夫（技術情報部）	

入手（資料交換による）、複製などのお問合せは、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)

Hiroshi Amano Kunitake Fukasawa Kichinosuke Harada Mitsuho Hirata  
Hiroshi Hotta Toyohide Ishihara Yasuhiko Iso Satoru Katsuragi  
Takeo Kikuchi Junichi Miita Sueo Nomura Yukio Obata  
Hiroshi Onishi Nagao Shibata Yasaburo Yamazaki

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

## 核分裂生成物の炉定数

(FP 炉定数作成ワーキング・グループ最終報告書)

日本原子力研究所 東海研究所 シグマ研究委員会

坂田 肇\* 永山 哲\*\* 大竹 嶽\*\*\*  
松延 広幸\*\*\*\* 斎藤 麗一\*\*\*\*\*

(1972年8月30日受理)

### 要旨

熱中性子炉の燃焼度計算に用いる核分裂生成物(FP)の多数群の炉定数セットを、以下の手順で作成した。  
(1) 約190個のFP核種について熱中性子断面積、共鳴パラメータ、共鳴積分値が、主としてBNL-325から収集された。これらを評価したのち、熱中性子領域30群、高速中性子領域54群の断面積セットが編集された。また崩壊定数、核分裂収率のデータも収集された。(2)編集された核データをもとに $10^{12}$ ,  $10^{13}$ および $10^{14}n/cm^2\cdot sec$ の各中性子束レベルにおいて、 $2\times 10^7sec$ までの照射過程を追跡し、蓄積された約330のFP核種の原子密度を求めた。この結果を用いて熱中性子炉の燃焼度計算において重要となる核種が選定された。(3)特に重要な $\beta$ -崩壊系列に属する8つのFP核種( $^{105}Rh$ ,  $^{113}Cd$ ,  $^{135}Xe$ ,  $^{149}Sm$ ,  $^{151}Sm$ ,  $^{155}Eu$ ,  $^{156}Gd$ および $^{157}Gd$ )を除いて、残りのFP核種は3つの擬核分裂生成物(PFP)にグループ化された。(4)上述の結果にもとづき、中性子束レベルおよび照射時間の関数として、最終的にPFPの多数群の炉定数が作成された。なおこの研究は、シグマ研究専門委員会炉定数専門部会FP炉定数作成ワーキング・グループで実施されたものである。

\* 動力炉・核燃料開発事業団

\*\* 日本原子力発電会社

\*\*\* 富士電機製造株式会社

\*\*\*\* 住友原子力工業株式会社

\*\*\*\*\* 北海道大学

# Group Constants of Fission Products for Thermal Reactor

## (Final Report of FP Working Group)

Hajime SAKATA\*      Satoshi NAGAYAMA\*\*      Iwao OHTAKE\*\*\*  
Hiroyuki MATSUNOBU\*\*\*\*      Keiichi SAITO\*\*\*\*\*

Japanese Nuclear Committee  
Tokai Research Institute  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received 30 August 1972)

### Summary

The present report, continued from the previous two reports, is a final paper concerning group constants of fission products for thermal reactor.

Concerning the burn-up analysis in the thermal reactor, a set of the multi-group constants of fission products (FP) has been studied on the following items.

- (1) The data of thermal neutron absorption cross sections, resonance parameters and resonance integrals are mainly collected from BNL-325 for about 190 nuclei. A set of 30 and 54 group constants for thermal and fast neutron energy regions is compiled after the above data have been evaluated. Fission yields and decay constants for the FP nuclides are also complied from various literatures.
- (2) The build-up amounts of about 330 FP nuclides hav been respectively calculated for the neutron flux levels of  $10^{12}$ ,  $10^{13}$ , and  $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>·sec, and irradiation time up to  $2 \times 10^7$  sec. From these results, the important FP in burn-up calculation are determind.
- (3) Each FP nuclide is classified into one of the three groups on pseudo fission products (PFP) except for nuclei such as  $^{105}\text{Rh}$ ,  $^{113}\text{Cd}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{155}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Gd}$  and  $^{167}\text{Gd}$ . These excluded nuclei belong to the important  $\beta$ -decay chains.
- (4) Based on the results described in (1), (2) and (3), a library of PFP's multi-group constants has been made as a function of the neutron flux level and irradiation time. The study has been performed as the activity of FP working group in Reactor Constant Subcommittee, Japanese Nuclear Data Committee.

---

\* Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp.

\*\* Japan Atomic Power Company

\*\*\* Fuji Electric Co. Ltd.

\*\*\*\* Sumitomo Atomic Energy Industries, Ltd.

\*\*\*\*\* Hokkaido University

## 目 次

1. まえがき	1
2. 核分裂生成物核種の核データ	3
2. 1 中性子断面積	3
2. 2 収率および崩壊定数	3
3. 核分裂生成物核種の崩壊	5
3. 1 崩壊チェインの追跡	5
3. 2 重要核種の選定	7
4. 擬核分裂生成物の炉定数	8
4. 1 擬核分裂生成物へのグループ化	8
4. 2 中性子照射による巨視的熱中性子断面積の変化	9
4. 3 炉定数の作成	12
5. 作成した炉定数の使用法	20
6. あとがき	23
文 献	23
附 錄 A. 計算コード	24
A. 1 GROUP	24
A. 2 FIT	24
A. 3 FPPARA	25
附 錄 B. データ・ファイル	27

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Nuclear data of fission products.....	3
2. 1	Neutron absorption cross sections .....	3
2. 2	Fission yields and decay constants .....	3
3.	Decay of fission products .....	5
3. 1	Pursuit of decay chain .....	5
3. 2	Selection of important nuclides .....	7
4.	Group constants of pseudo fission products.....	8
4. 1	Grouping into pseudo fission Products .....	8
4. 2	Irradiation time and flux dependence of macroscopic cross sections .....	9
4. 3	Production of group constants.....	12
5.	Directions for the use of the group constants .....	20
6.	Concluding remarks .....	23
	References .....	23
	Appendix A. Calculation codes .....	24
A. 1	GROUP .....	24
A. 2	FIT .....	24
A. 3	FPPARA .....	25
	Appendix B. Data File .....	27

# 1. まえがき

近年多くの動力炉の運転実績が得られており、原子炉の燃焼度の測定データの蓄積と、経験によるその解析方法の改良、計算機の大容量化などにより、燃焼度の計算精度の向上のための努力が各国においてなされている。これに伴なって燃焼度計算に用いられる核分裂生成物(Fission Products, FP)の炉定数として、より信頼度の

高いものの整備が重要となってきた。シグマ研究専門委員会炉定数専門部会でもこの問題を取り上げ熱中性子炉用のFP炉定数を作成することを目的として昭和42年8月からFP炉定数作成のワーキング・グループを発足させ、その作業を行なってきた。

現在燃焼度計算コードに用いられている代表的なFP

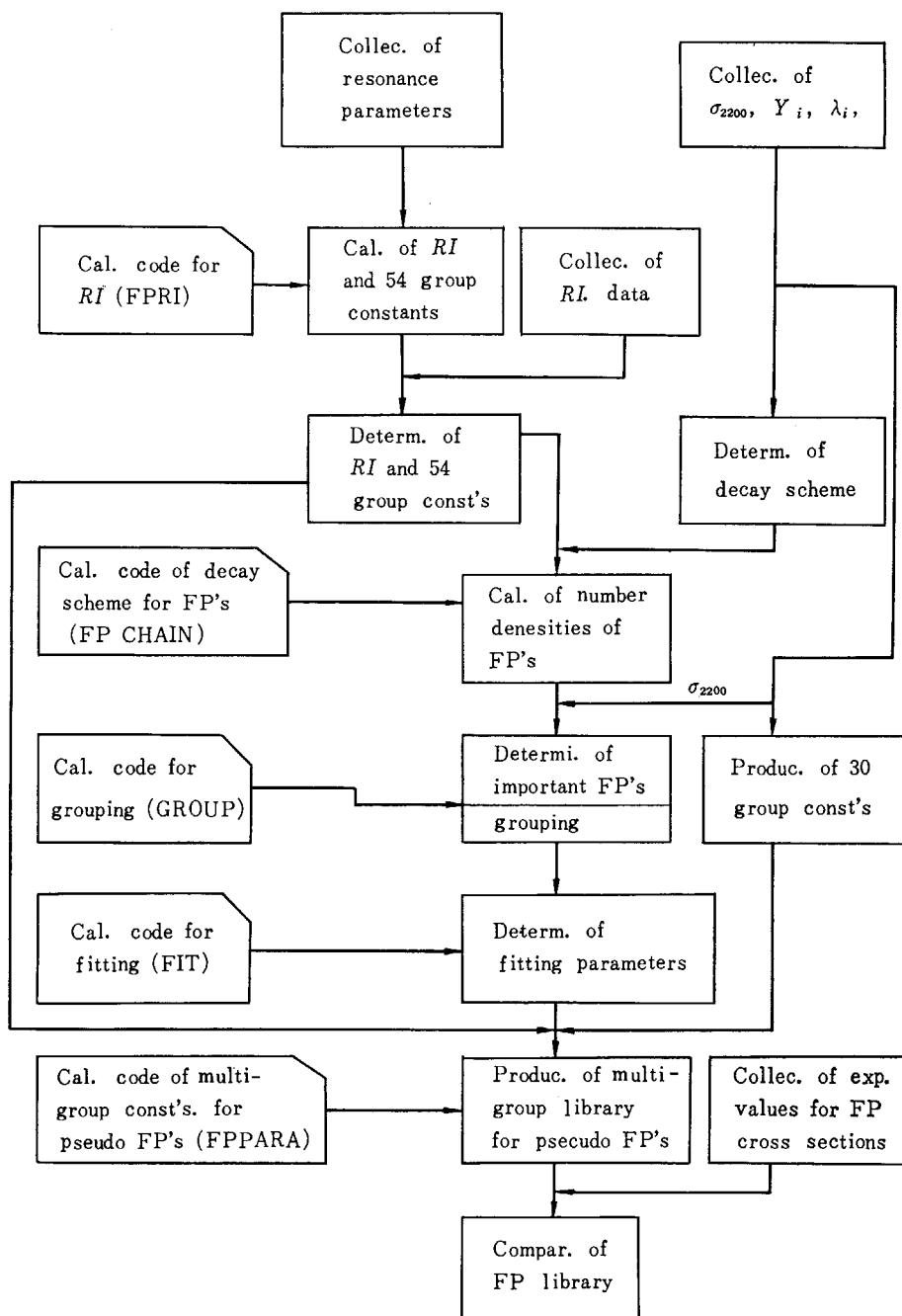


Fig.1 Process of group constants production for FP's

炉定数セットの大部分は、擬核分裂生成物 (Pseudo Fission Products, PFP) としてまとめられたものである。われわれはこれまでに用いられているものの得失や燃焼度計算コードとの関連を調べた結果、重要な 8 つの FP 核種を除いて、残りの核種を 3 核種の PFP にまとめる方式を採用した。それらの PFP の炉定数は照射時間、中性子エネルギーおよび中性子束レベルに対する依存性を考慮して、高速中性子領域を 54 群、熱中性子領域を 30 群に組分けした多群群の炉定数セットに整備された。PFP にまとめる方法には、多数の FP 核種の断面積とその収率の大きさを基準にしてまとめる方法と、ある炉型を考え、中性子照射過程での核種の崩壊と中性子の吸収による密度変化を取り入れて分類する方法があるが、われわれはより実際の現象にそくしていると考えられる後者の方法を採用した。

FP 炉定数作成のプロセスは、

- (1) 各 FP 核種の中性子断面積、崩壊定数および核分裂での収率などの核データの収集、評価
- (2) 照射に伴う FP 核種の密度変化を求める FP 核種

#### の崩壊チェインの追跡

- (3) 重要な FP 核種の決定とグループ化 (PFP)
- (4) PFP 炉定数セットの作成

である。上述のプロセスをフローチャートにして Fig.1 に示す。

われわれの作成した FP 炉定数セットは、重要な FP 核種崩壊チェインとして、従来から燃焼度計算コードのなかで個別に崩壊チェインが追跡されていた  $^{135}\text{Xe}$  と  $^{149}\text{Sm}$  のほかに、 $^{106}\text{Rh}$ ,  $^{113}\text{Cd}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{155}\text{Eu}$ ,  $^{159}\text{Gd}$  や  $^{157}\text{Gd}$  を加え、さらに残りの約 300 核種を 3 つの PFP にまとめたものである。これらの多群炉定数セットでは各エネルギー群毎にその中性子照射の依存性も検討、評価されている。

本報告書では、既に詳細に発表されている中間報告書<sup>(1)(2)(3)</sup>の概略を第 2, 3 章に記述し、第 4 章以下に PFP の炉定数セットの作成、評価並びに使用法について詳細に記述してある。本研究報告書は、FP 炉定数作成作業の研究成果をまとめた最終報告書である。

## 2. 核分裂生成物核種の核データ

### 2.1 中性子断面積

核分裂生成物として取扱う核種は、原子番号 (Z) が 32～68 の範囲のものでその数は約 450 にも及ぶ。しかし現状では、総ての核種についての断面積の測定値は存在せず、われわれが収集、評価し、整備できた数は 193 核種である。作成された各 FP 核種の断面積セットは、エネルギー領域を熱中性子および高速中性子の 2 領域に分け、前者の領域では 30 群 (THERMOS 型)、後者では 54 群 (MUFIT 型)とした多群断面積セットである。なお、われわれは熱中性子炉を対象としているため、(n, γ) 反応以外の核反応は無視した。

熱中性子エネルギー領域では次章で述べる崩壊チェインの追跡の結果にもとづき、重要な FP 核種について断面積のエネルギー依存性を調べた。熱中性子エネルギー領域に共鳴レベルをもち、燃焼計算で特に重要と考えられるもの、すなわち  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{113}\text{Cd}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{143}\text{Nd}$ ,  $^{145}\text{Nd}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Gd}$  および  $^{157}\text{Gd}$  の 11 核種は、非  $1/v$  型とし、残りの核種は  $1/v$  型のエネルギー依存性の吸収断面積をもつものとした。この結果、 $1/v$  型では  $\sigma_a(2200 \text{ m/sec})$  の値、非  $1/v$  型では 30 群の各エネルギー一点の値を BNL-325 2nd ed. Suppl. No. 2 を主体とし、ENDF/A, ENDF/B, GA-2451 および GA-2113 などの文献から引用して評価し、各 FP 核種の断面積セットを作成した。

高速中性子エネルギー領域では共鳴レベルパラメータにもとづき無限希釈の共鳴積分の計算値 ( $RI_{\text{cal}}$ ) を求め、実験値や DRAKE の編集値などと比較して評価し、妥当と考えられる共鳴積分値 ( $RI$ ) を定めたのち、多群断面積セットが作られた。共鳴積分の計算においては、分離共鳴レベル領域では BREIT-WIGNER の一準位公式、非分離共鳴レベル領域では統計理論により計算された微視的断面積 ( $\sigma_a(E)$ ) を求め、次式で共鳴積分値を求めた。

$$RI = \int_{E_c}^{10 \text{ Mev}} \sigma_a(E) \frac{1}{E} dE \quad (2.1)$$

使用した定数のうち分離レベル領域の共鳴レベルパラメータは BNL-325 の値を用いた。非分離レベル領域では、S-波および P-波を考慮し、レベル間隔や Strength Function などの統計的レベルパラメータは SETH,

NEWSON および GARRISON & ROOSE などが報告している値を選択して用いた。なおレベル幅の変動の平均値は PORTER-THOMAS 分布で計算した。

最終的な共鳴積分値の決定に当って、(1) 共鳴パラメータや共鳴積分値の測定値が少ないとこと、(2) 測定値の間に著しいばらつきが見られること、(3) 計算値と測定値との間には、共鳴パラメータの値から理解し難いほど大きな違いが見られること、などの問題に直面した。このような現状では、一意的な決定は困難であるが、われわれは次のような評価基準をおいて、各 FP 核種の共鳴積分値を定めた。

- (1) 計算値と測定値との一致がよい場合には計算値を採用。
- (2) 計算値と測定値との差が大きい場合
  - (a) 年代の新しい測定値か、または測定値の単純平均を採用。
  - (b) 測定値が小さく、しかも計算値との違いが共鳴パラメータの値からは理解し難いときには計算値を採用。
- (3) 計算値または測定値の何れか一つしかない場合には、それを採用。
- (4)  $\sigma_a(2, 200 \text{ m/sec})$  の値しか求められていない場合には、断面積を  $1/v$  型として共鳴積分値を計算。
- (5) 近傍の (A, Z) 核の共鳴積分値から判断して、前述の (3), (4) の選択が不合理と考えられるときには、近傍の核の値を採用。

しかし上述の基準で処理できない数十個の核種に対しては著者達の予測値を用いた。

この結果得られた各 FP 核種の熱中性子断面積および共鳴積分値は報告書 No. 2<sup>(1)</sup> に報告されている。また作成された多群断面積セットは、データ・ファイルのテーブル (附録 B 参照) に収録されている。

### 2.2 収率および崩壊定数

熱中性子による  $^{235}\text{U}$  の核分裂の際、放出される FP 核種の収率分布は古くより測定され、多くの実験データがある。しかしそれらのデータの間にはなお若干の違いがあり、全収率分布にわたって矛盾のない値を評価したものはまだない。一方  $^{239}\text{Pu}$  および  $^{241}\text{Pu}$  の収率分布の実験データの数は少なく、 $^{235}\text{U}$  に比してその精度も劣る。

われわれはこれらの実験データを調査し、検討した結果、RIDER *et al.* (1967) の値を採用することにした。なお多くの収率分布のデータは放射化分析で測定されているため、半減期の非常に短い核分裂直後の各核種の値は無視されているが、原子炉の燃焼度計算においては放射化分析で得られた収率分布の値を用いることで十分であると考える。

燃焼過程で問題となる各 FP 核種の崩壊は、主として  $\beta$ -崩壊である。したがってわれわれはこの崩壊定数のデータも数多くの文献より収集評価し、その値を決定した。

本研究で使用した収率および崩壊定数の値は報告書 No. 1<sup>(2)</sup> に既に示してあるが、附録 B で述べるデータ・ファイルのテープにも収録されている。

### 3. 核分裂生成物核種の崩壊

#### 3.1 崩壊チェインの追跡

原子炉の燃焼度解析では FP 核種の巨視的断面積の照射時間変化、すなわち FP 核種の蓄積量の時間変化を考慮せねばならない。このためには照射過程で FP 核種が中性子の吸収や  $\beta$ -崩壊により他の核種に変わること、いわゆる崩壊チェインを追跡することが必要となる。FP 核種の数は数百にも及ぶが、その核データが判っているものは高々半分であること、および崩壊していく過程も複雑であることから、正確に崩壊チェインを解くことは非常に難しい。そこでわれわれは各 FP 核種の断面積の大きさ、収率、崩壊形式とその崩壊定数、最大  $2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  の照射を受けるものとして、どこまでの崩壊を追跡すべきかなどの諸点を考慮して、各 FP 核種毎に崩壊チェインを決定した。

作成されたこの崩壊チェインでは、断面積値の小さいものや半減期の短いものを無視して簡単化が図られたが、なお複雑であるため、それを数値計算で解くにはあまりにも多くの微分方程式を必要とする。この問題を解決するために計算手法と関連させて崩壊チェインの基本形(Fig.2 参照)を決め、これを“セグメント・チェイン<sup>(2)</sup>”と定義して複雑なチェインをセグメント・チェインに分割した。しかしすべてを基本形で表示することができない

いため、それ以外の崩壊は上述の微分方程式の解析解を初期値として数値積分法で計算する方法をとった。このような計算方法に基づき各 FP 核種の崩壊チェインを追跡し、中性子の照射の各ステップでの核種密度を計算するコード・FPCHAIN が作成された。このコードを使用する場合、断面積には Westcott 形式が採用されている。

ウラン燃料の燃焼に伴い放出される FP 核種のうち約 330 核種の密度変化の計算が、FPCHAIN により下記の条件のもとに行なわれた。

- (1) 中性子束レベル :  $10^{12}, 10^{13}$  および  $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$
- (2) 照射時間 : 最大  $2 \times 10^7 \text{ sec}$
- (3) 中性子スペクトラム・パラメータ (Westcott スペクトラム) :  $300^\circ\text{K}$  (熱中性子温度)  
0.08(熱外中性子インデックス)

また次章以下で述べる PFP の炉定数の作成の際には、TABLE 1 に示す核種の  $\beta$ -崩壊チェインは、後述(§ 4.1)の理由で燃焼度計算コードで別個に取扱うことにして、これらの崩壊チェインの計算では除外された。この結果、各 FP 核種の照射による密度変化が求められ、 $10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  の中性子束レベルにおけるそれぞれの時間変化の傾向により Rapid Saturation, Slow Saturation および Non-saturation の 3 つのグループに分類された。Fig. 3～5 に 3 つのグループに属する FP 核種の密度変化の 1 例を示した。また、これらの最終結果はデータ・ファイル(附録 B 参照)のテープに収録されている。

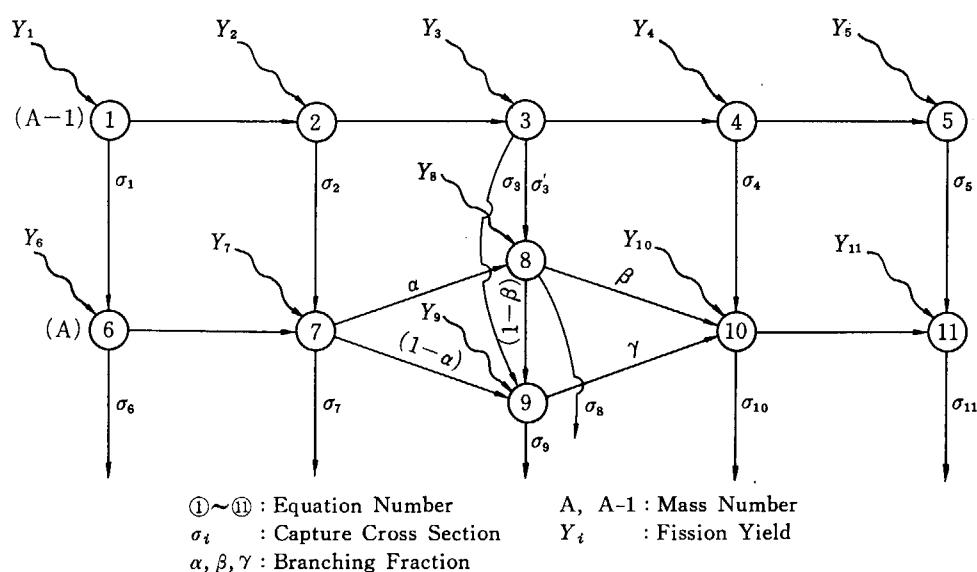
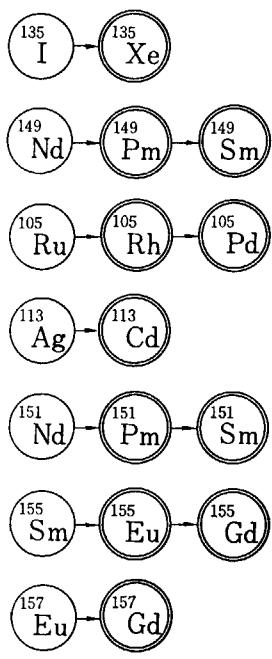


Fig. 2 Fission product decay scheme

TABLE 1 Decay scheme removed from pseudo FP's



(○) : Produced nuclides by thermal fission.

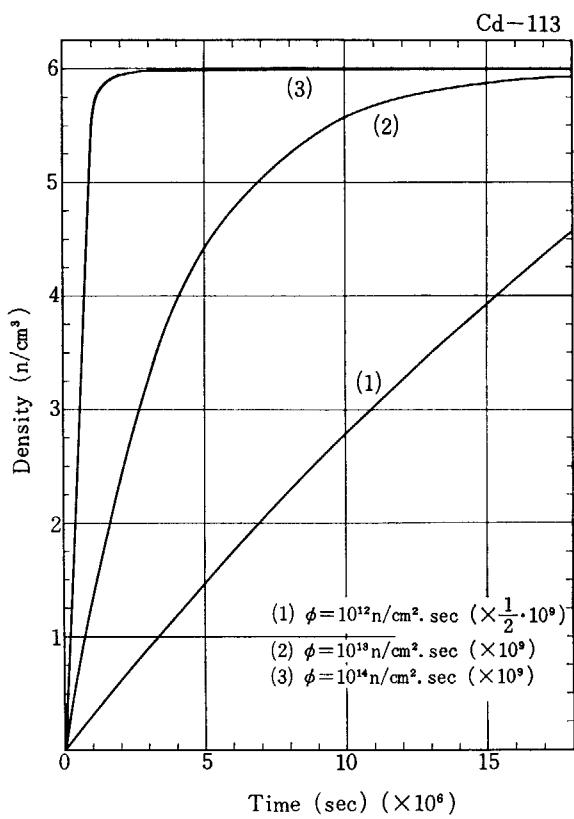


Fig. 4 Slowly saturating nuclide

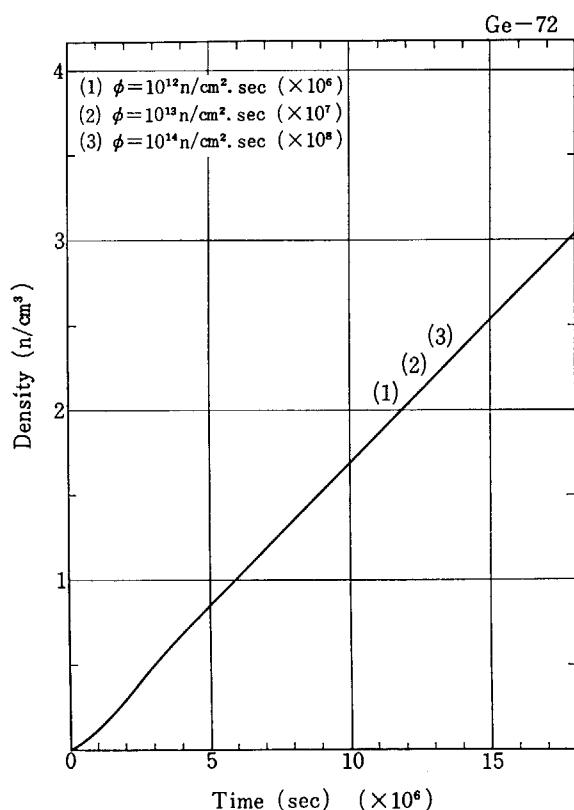


Fig. 3 Non-saturating nuclide

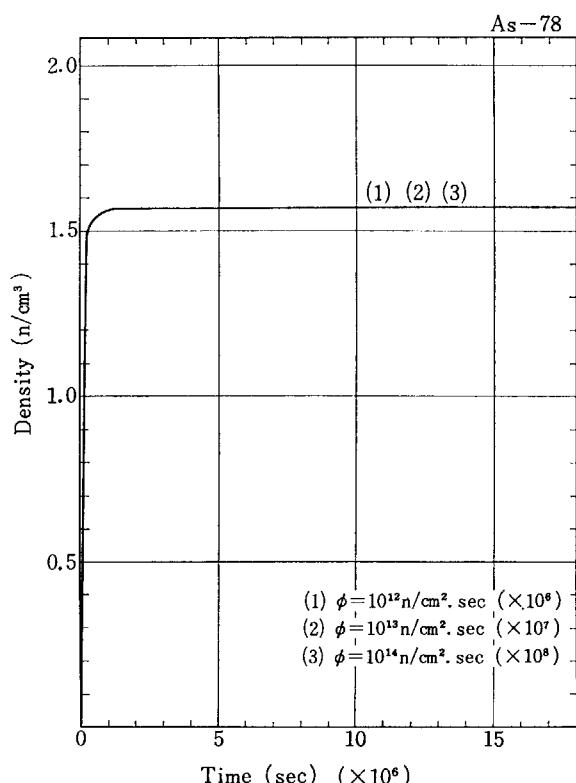


Fig. 5 Rapidly saturating nuclide

### 3. 2 重要核種の選定

中性子束レベル  $10^{13} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  における照射過程での FP 核種の密度 ( $N$ ) の計算結果と、その断面積 ( $\sigma$ ) との積  $N\sigma$  なる量に着目し、燃焼度計算の精度に影響を与える核種、すなわち重要核種の選定を行なった。重要核種の判定基準を  $N\sigma \geq 10^{-18} \text{cm}^{-1}$  と定め、照射量も考慮して TABLE 2 に示す重要な核種が選定された。この TABLE には WALKER および ENDF/B (GARISON & ROOS) の結果も比較のため示してある。

TABLE 2 によれば、われわれの選定した核種は、幾つかの FP 核種を除いて他の著書のものとほぼ同一の結果が得られている。しかし異なった核種が選ばれている原因は、WALKER<sup>(4)</sup>の場合には、崩壊チェインの追跡の計算方法の仮定、すなわち断面積が未知の核種について、その前後の核種断面積の値が大きい場合にはその断面積の未知の核種の断面積を 1,000 barn とし、その崩壊チェインに属するものを重要核種としている。他方、われわれは断面積の未知の核種についてはその断面積の値を零として計算した結果である。また ENDF/B の場合には、崩壊チェインの追跡を行なわず、単に初期核分裂時の収率を断面積の大小を考慮して選ばれた結果によるものと考える。

TABLE 2 Important FP nuclides

Present Result					Walker's Recommend					ENDF/B	
<sup>85</sup> Kr	<sup>87</sup> Kr	<sup>97</sup> Mo	<sup>99</sup> Tc	<sup>100</sup> Ru	<sup>87</sup> Kr	<sup>95</sup> Zr	<sup>95</sup> Nb	<sup>95</sup> Mo	<sup>99</sup> Tc	<sup>95</sup> Mo	<sup>99</sup> Tc
<sup>101</sup> Ru	<sup>103</sup> Rh	<sup>104</sup> Rh	<sup>105</sup> Rh	<sup>102</sup> Pd	<sup>103</sup> Ru	<sup>105</sup> Ru	<sup>103</sup> Rh	<sup>105</sup> Rh	<sup>105</sup> Pd	<sup>103</sup> Rh	<sup>113</sup> Cd
<sup>105</sup> Pd	<sup>113</sup> Cd	<sup>129</sup> I	<sup>135</sup> I	<sup>131</sup> Xe	<sup>109</sup> Ag	<sup>113</sup> Cd	<sup>131</sup> I	<sup>135</sup> I	<sup>131</sup> Xe	<sup>131</sup> Xe	<sup>133</sup> Cs
<sup>133</sup> Xe	<sup>135</sup> Xe	<sup>133</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs	<sup>140</sup> Ba	<sup>135</sup> Xe	<sup>133</sup> Cs	<sup>136</sup> Cs	<sup>139</sup> La	<sup>141</sup> Ce	<sup>135</sup> Xe	<sup>143</sup> Nd
<sup>139</sup> La	<sup>141</sup> Ce	<sup>141</sup> Pr	<sup>143</sup> Pr	<sup>143</sup> Nd	<sup>143</sup> Pr	<sup>145</sup> Nd	<sup>147</sup> Nd	<sup>147</sup> Pm	<sup>148</sup> Pm	<sup>145</sup> Nd	<sup>147</sup> Pm
<sup>144</sup> Nd	<sup>146</sup> Nd	<sup>147</sup> Pm	<sup>148</sup> Pm	<sup>148m</sup> Pm	<sup>148m</sup> Pm	<sup>149</sup> Pm	<sup>151</sup> Pm	<sup>147</sup> Sm	<sup>148</sup> Sm	<sup>149</sup> Sm	<sup>151</sup> Sm
<sup>149</sup> Pm	<sup>148</sup> Sm	<sup>149</sup> Sm	<sup>150</sup> Sm	<sup>151</sup> Sm	<sup>149</sup> Sm	<sup>150</sup> Sm	<sup>151</sup> Sm	<sup>152</sup> Sm	<sup>153</sup> Sm	<sup>152</sup> Sm	<sup>153</sup> Eu
<sup>151</sup> Eu	<sup>155</sup> Eu				<sup>153</sup> Eu	<sup>154</sup> Eu	<sup>155</sup> Eu	<sup>157</sup> Eu	<sup>157</sup> Gd	<sup>155</sup> Gd	<sup>157</sup> Gd

## 4. 擬核分裂生成物の炉定数

### 4.1 擬核分裂生成物へのグループ化

既に述べた如く、現在の大部分の燃焼度計算コードで使用されている FP 核種は幾つかの PFP にまとめられている。これら PFP にまとめるには、照射時間によるその FP 核種の密度変化と断面積のエネルギー依存性とが似ているものと同一のグループに組分けられる方法が

よいが、グループの数が多くなるとグループ化の意味がなくなる。

したがって照射過程での各 FP 核種の密度変化と断面積のエネルギー依存性の何れもが類似している少数のグループに分けることが望ましいが、これは可成り難しい問題である。特に熱中性子エネルギー領域の断面積のエネルギー依存性が似ていることはほとんど期待できないことから、幾つかの FP 核種をまとめて 1 つの FP として扱う場合に、自から制限が加わることは避けられない。要は取扱いが首尾一貫していて、使用が簡単である

TABLE 3 Classification of FP nuclides

Classification	Nuclide									
Pseudo FP-1 (Chain 1)	$^{135}\text{I}$ $^{135}\text{Xe}$									
Pseudo FP-2 (Chain 2)	$^{149}\text{Nd}$ $^{149}\text{Pm}$ $^{149}\text{Pm}$									
Pseudo FP-3 (Chain 3)	$^{105}\text{Ru}$ $^{105}\text{Rh}$									
Pseudo FP-4 (Chain 4)	$^{118}\text{Ag}$ $^{118}\text{Cd}$									
Pseudo FP-5 (Chain 5)	$^{151}\text{Nd}$ $^{151}\text{Pm}$ $^{151}\text{Sm}$									
Pseudo FP-6 (Chain 6)	$^{155}\text{Sm}$ $^{155}\text{Eu}$ $^{155}\text{Gd}$									
Pseudo FP-7 (Chain 7)	$^{157}\text{Eu}$ $^{157}\text{Gd}$									
Pseudo FP-9 (Rapid saturation)	$^{77}\text{Ge}$	$^{78}\text{Ge}$	$^{77}\text{As}$	$^{78}\text{As}$	$^{79}\text{Se}$	$^{83}\text{Se}$	$^{84}\text{Se}$	$^{83}\text{Br}$	$^{84}\text{Br}$	$^{83}\text{Kr}$
	$^{88}\text{Kr}$	$^{88}\text{Rb}$	$^{89}\text{Rb}$	$^{90}\text{Rb}$	$^{91}\text{Rb}$	$^{92}\text{Rb}$	$^{91}\text{Sr}$	$^{92}\text{Sr}$	$^{93}\text{Sr}$	$^{94}\text{Sr}$
	$^{92}\text{Y}$	$^{93}\text{Y}$	$^{94}\text{Y}$	$^{97}\text{Zr}$	$^{97}\text{Nb}$	$^{99}\text{Mo}$	$^{101}\text{Tc}$	$^{107}\text{Rh}$	$^{109}\text{Pd}$	$^{111}\text{Pd}$
	$^{112}\text{Pd}$	$^{111}\text{Ag}$	$^{112}\text{Ag}$	$^{113}\text{Ag}$	$^{114}\text{Ag}$	$^{115}\text{Ag}$	$^{116}\text{Cd}$	$^{117}\text{Cd}$	$^{118}\text{Cd}$	$^{117}\text{In}$
	$^{118}\text{In}$	$^{119}\text{In}$	$^{121}\text{Sn}$	$^{125}\text{Sn}$	$^{126}\text{Sn}$	$^{127}\text{Sn}$	$^{122}\text{Sb}$	$^{126}\text{Sb}$	$^{127}\text{Sb}$	$^{128}\text{Sb}$
	$^{129}\text{Sb}$	$^{130}\text{Sb}$	$^{131}\text{Sb}$	$^{132}\text{Sb}$	$^{127}\text{Te}$	$^{129}\text{Te}$	$^{131}\text{Te}$	$^{132}\text{Te}$	$^{133}\text{Te}$	$^{134}\text{Te}$
	$^{131}\text{I}$	$^{133}\text{I}$	$^{134}\text{I}$	$^{135}\text{I}$	$^{136}\text{I}$	$^{133}\text{Xe}$	$^{138}\text{Cs}$	$^{139}\text{Cs}$	$^{139}\text{Ba}$	$^{140}\text{Ba}$
	$^{141}\text{Ba}$	$^{142}\text{Ba}$	$^{143}\text{Ba}$	$^{140}\text{La}$	$^{141}\text{La}$	$^{142}\text{La}$	$^{143}\text{La}$	$^{143}\text{Ce}$	$^{145}\text{Ce}$	$^{146}\text{Ce}$
	$^{143}\text{Pr}$	$^{146}\text{Pr}$	$^{147}\text{Nd}$	$^{149}\text{Nd}$	$^{151}\text{Nd}$	$^{151}\text{Sm}$	$^{153}\text{Sm}$	$^{155}\text{Sm}$	$^{156}\text{Sm}$	$^{157}\text{Eu}$
	$^{157}\text{Gd}$	$^{161}\text{Gd}$								
Pseudo FP-10 (Slow saturation)	$^{81}\text{Se}$	$^{89}\text{Sr}$	$^{91}\text{Y}$	$^{95}\text{Zr}$	$^{103}\text{Rh}$	$^{113}\text{Cd}$	$^{141}\text{Ce}$	$^{155}\text{Eu}$	$^{155}\text{Gd}$	$^{160}\text{Tb}$
Pseudo FP-11 (Non-saturation)	$^{72}\text{Ge}$	$^{73}\text{Ge}$	$^{74}\text{Ge}$	$^{75}\text{Ge}$	$^{76}\text{Ge}$	$^{78}\text{As}$	$^{76}\text{As}$	$^{76}\text{Se}$	$^{77}\text{Se}$	$^{78}\text{Se}$
	$^{80}\text{Se}$	$^{82}\text{Se}$	$^{79}\text{Br}$	$^{80}\text{Br}$	$^{81}\text{Br}$	$^{82}\text{Br}$	$^{80}\text{Kr}$	$^{82}\text{Kr}$	$^{84}\text{Kr}$	$^{85}\text{Kr}$
	$^{86}\text{Kr}$	$^{87}\text{Kr}$	$^{86}\text{Sr}$	$^{88}\text{Sr}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{85}\text{Rb}$	$^{86}\text{Rb}$	$^{87}\text{Rb}$	$^{89}\text{Y}$	$^{90}\text{Y}$
	$^{90}\text{Zr}$	$^{91}\text{Zr}$	$^{92}\text{Zr}$	$^{93}\text{Zr}$	$^{94}\text{Zr}$	$^{96}\text{Zr}$	$^{95}\text{Mo}$	$^{97}\text{Mo}$	$^{98}\text{Mo}$	$^{99}\text{Tc}$
	$^{100}\text{Ru}$	$^{101}\text{Ru}$	$^{102}\text{Ru}$	$^{104}\text{Ru}$	$^{105}\text{Ru}$	$^{106}\text{Ru}$	$^{103}\text{Rh}$	$^{104}\text{Rh}$	$^{105}\text{Rh}$	$^{106}\text{Rh}$
	$^{102}\text{Pd}$	$^{105}\text{Pd}$	$^{106}\text{Pd}$	$^{107}\text{Pd}$	$^{108}\text{Pd}$	$^{109}\text{Ag}$	$^{110}\text{Ag}$	$^{110}\text{Cd}$	$^{111}\text{Cd}$	$^{112}\text{Cd}$
	$^{114}\text{Cd}$	$^{116}\text{Cd}$	$^{115}\text{In}$	$^{117}\text{Sn}$	$^{118}\text{Sn}$	$^{119}\text{Sn}$	$^{120}\text{Sn}$	$^{123}\text{Sn}$	$^{124}\text{Sn}$	$^{121}\text{Sb}$
	$^{123}\text{Sb}$	$^{124}\text{Sb}$	$^{125}\text{Sb}$	$^{122}\text{Te}$	$^{123}\text{Te}$	$^{124}\text{Te}$	$^{125}\text{Te}$	$^{126}\text{Te}$	$^{128}\text{Te}$	$^{130}\text{Te}$
	$^{127}\text{I}$	$^{129}\text{I}$	$^{132}\text{I}$	$^{131}\text{Xe}$	$^{132}\text{Xe}$	$^{134}\text{Xe}$	$^{136}\text{Xe}$	$^{133}\text{Cs}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{135}\text{Cs}$
	$^{136}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{136}\text{Ba}$	$^{137}\text{Ba}$	$^{138}\text{Ba}$	$^{139}\text{La}$	$^{140}\text{Ce}$	$^{142}\text{Ce}$	$^{141}\text{Pr}$	$^{144}\text{Pr}$
	$^{143}\text{Nd}$	$^{144}\text{Nd}$	$^{145}\text{Nd}$	$^{146}\text{Nd}$	$^{148}\text{Nd}$	$^{147}\text{Pm}$	$^{148}\text{mPm}$	$^{148}\text{Pm}$	$^{149}\text{Pm}$	$^{147}\text{Sm}$
	$^{148}\text{Sm}$	$^{150}\text{Sm}$	$^{152}\text{Sm}$	$^{154}\text{Sm}$	$^{153}\text{Eu}$	$^{154}\text{Eu}$	$^{156}\text{Eu}$	$^{154}\text{Gd}$	$^{156}\text{Gd}$	$^{158}\text{Gd}$
	$^{159}\text{Gd}$	$^{159}\text{Tb}$	$^{161}\text{Tb}$	$^{160}\text{Dy}$	$^{161}\text{Dy}$					

ことであろう。

われわれは熱中性子炉を対象にしていることを考慮し、まず熱中性子エネルギー領域での断面積が非 $1/v$ 型のエネルギー依存性をもつ TABLE 1 に示した崩壊チェインに含まれる重要な FP 核種を除外し、大部分を $1/v$ 型とした残りの FP 核種について、その照射時間による密度変化が似ているものを 1 つの PFP にグループ化することにした。この密度変化の似た FP 核種の選定基準としては、前章で述べた FP 核種の崩壊チェインの追跡で得られた分類の結果が採用された。この方法により FP 核種の総ての崩壊チェインは、7 つのチェイン (FP-1～FP-7) と 3 つの PFP のグループ (FP-9～FP-11) の計 10 個に分けられた。各 PFP に属する FP 核種は TABLE 3 に示してある。FP-9～FP-11 の PFP の照射時間による密度変化は、それぞれ §3.1 で分類された Rapid Saturation, Slow Saturation および Non-saturation に対応している。

TABLE 3 のうち FP-1～FP-7 は、前章に述べた如く燃焼度計算コードで直接 FP 核種の照射時間による密度変化を計算するため、これらに属する FP 核種の炉定数は個別に用意されている。他方 PFP である FP-9～FP-11 の炉定数の作成に関しては次章以下で述べられるが、その前段階としてこれら各々の PFP の巨視的熱中性子断面積

$$\Sigma_0(\phi, t) = \sum_i N_i(\phi, t) \cdot \sigma_i(2200 \text{ m/sec}) \quad (4.1)$$

を求めた。ここで

$N_i(\phi, t)$  : 中性子束レベル ( $\phi$ )、照射時間 ( $t$ ) における  $i$ -核種の密度

$\sigma_i(2200 \text{ m/sec})$  :  $i$ -核種の微視的熱中性子断面積 ( $E_0=0.0253 \text{ eV}$ )

$\phi$  :  $v_0=2,200 \text{ m/sec}$  における中性子束レベル ( $=nv_0$ ) であり、 $i$  は各 PFP に属する FP 核種の種類を表わす。

上式にもとづき、 $\Sigma_0(\phi, t)$  を求めるため計算コード GROUP (附録 A.1 参照) が作成され、 $10^{12}$ ,  $10^{13}$  および  $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  の中性子束レベルをパラメータとして  $\Sigma_0(\phi, t)$  の計算が行なわれた。この結果は Fig. 6～Fig. 11 のグラフの点線で示してあるが、これらの  $\Sigma_0(\phi, t)$  の関数形表示については次節で述べる。

なお前章に述べた崩壊チェインの追跡から PFP へのグループ化までの過程では、通常の燃焼計算コードが  $^{135}\text{Xe}$  および  $^{149}\text{Sm}$  の属するチェインを別扱いしていることから、この 2 つのチェインを除外し残りの FP 核種を PFP にグループ化することも試みた。しかしこの分類方法では、例えば  $^{113}\text{Cd}$  の如く中性子束レベルが大きくなると、この核種の照射時間による密度変化の様子が Non-saturation から Rapid saturation になり、この核種を含む PFP の断面積の誤差が大きくなることが明らかになった。これらのこととも考慮して、われわれは最終的に TABLE 3 に示す分類方法を採用することにした。

## 4.2 中性子照射による巨視的熱中性子断面積の変化

熱中性子炉において蓄積される FP 核種は、前章に述べた如く幾つかの重要な核種を除いては、3種類の PFP の何れかに組分けされる。これら PFP の巨視的断面積の中性子エネルギー、中性子束レベルおよび照射時間の依存性は、計算機の容量が十分大きければ、総てのデータをそのまま何らかの形式で貯蔵し、必要な都度、燃焼度計算コードで読み取ればよいが、これは実際問題として容易なことではない。

上述の問題点を考慮し、現状に合わせて、巨視的熱中性子断面積  $\Sigma_0$  を関数形で表わす方法をわれわれは採用した。すなわち PFP の  $\Sigma_0$  のエネルギー依存性は、照射時間と共に変化せず、単にその相対的な  $\Sigma_0$  の大きさのみが変化すると近似し、中性子エネルギー  $E_0=0.0253 \text{ eV}$  ( $v_0=2200 \text{ m/sec}$ ) における巨視的断面積  $\Sigma_0$  の照射時間依存を後に示す (4.5) 式の関数形で表わしている。燃焼度計算コードで PFP を実際の照射時間に合わせて再現するという方法でこの PFP の断面積は表わされる。

中性子束レベルに依存しない断面積セットを作成するために、 $\Sigma_0$  の照射時間依存性も中性子束レベルに依存しない形で再現する方法を試みた。しかしこの方法では採用した  $\Sigma_0$  のフィッティングの結果がフィッティング前の  $\Sigma_0$  の値と比較して誤差が大きいため注), 各中性子束レベル毎にそれぞれ異なったフィッティング・パラメータを選ぶ方法を採用することにした。

FP 核種の密度  $N$  の照射時間変化を表わす微分方程式は次のようになる。

$$\frac{d}{dt} N(t) = \Sigma_f \phi y - (\lambda + \sigma_a \phi) N(t) \quad (4.2)$$

ここで

$\Sigma_f$  : 巨視的核分裂断面積 ( $\text{cm}^{-1}$ )

$\phi$  : 中性子束 ( $\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ )

$y$  : 核分裂当りの生成率

$\lambda$  : 崩壊定数 ( $\text{sec}^{-1}$ )

$\sigma$  : 微視的断面積 ( $\text{cm}^{-2}$ )

である。(4.2) 式の一般解は次のようになる。

$$N(t) = \frac{\Sigma_f y \phi}{\lambda + \sigma \phi} \{1 - e^{-(\lambda + \sigma \phi)t}\} \quad (4.3)$$

(4.3) 式の両辺に微視的断面積  $\sigma$  を乗ずると、FP 核

注)  $\Sigma_0$  を中性子レベル  $\phi$  と照射時間  $t$  との積のみの関数と見做してよい場合には、フィッティング・パラメータは  $\phi$  に無関係に定まる。しかし実際には、われわれが採用している  $\phi$  と  $t$  の範囲では仮定した関数形が簡単であるため、 $\phi$  に対して独立にフィッティングすると誤差が大きくなる。

種の巨視的断面積  $\Sigma_0$  の照射時間依存性を表わす次の式が得られる。

$$\Sigma_0(t) = \frac{\sum_j y \sigma \phi}{\lambda + \sigma \phi} \{1 - e^{-(\lambda + \sigma \phi)t}\} \quad (4.4)$$

そこで3種類の PFP の巨視的断面積  $\Sigma_0$  の時間変化を再現するフィッティングの式として、次の式を採用した。

$$\begin{aligned} \Sigma_{0j} &\equiv \Sigma_{0j}(\phi, t) \\ &= \frac{\sum_j \hat{Y}_j \hat{\sigma}_j \phi}{\hat{\lambda}_j + \hat{\sigma}_j \phi} \{1 - e^{-(\hat{\lambda}_j + \hat{\sigma}_j \phi)t}\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここで

$t$ : 照射時間 (sec)

$\hat{Y}_j, \hat{\lambda}_j, \hat{\sigma}_j$ : フィッティング・パラメータ

$j$ :  $j$  グループの PFP (FP-9, 10, 11)

である。 (4.4) 式と (4.5) 式を比較してみると、フィッティング・パラメータ  $\hat{Y}_j, \hat{\sigma}_j, \hat{\lambda}_j$  はそれぞれ PFP の生成率、微視的断面積、および崩壊定数に対応した物理的次元を有する量になっている。

各 PFP について、各中性子束レベル毎に算出されている断面積の照射時間依存性を、再現するフィッティングパラメータ  $\hat{Y}_j, \hat{\sigma}_j, \hat{\lambda}_j$  の値を最小自乗法で求める計算を行なった。しかし2つの非線型パラメータ  $\hat{\sigma}_j$  および  $\hat{\lambda}_j$  を含む3個のパラメータを同時に定めるのは困難であ

ることから、非線型パラメータの一つである崩壊定数  $\lambda$  を零と考えることにした。この場合 (4.5) 式は次のように簡単になる。

$$\Sigma_{0j}(\phi, t) = \sum_j \hat{Y}_j (1 - e^{-\hat{\lambda}_j \phi t}) \quad (4.6)$$

したがって各中性子束レベル ( $10^{12}, 10^{13}$  および  $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>·sec)に対して、3種類の PFP のフィッティング・パラメータを効率良く決定するための計算コード「FIT」を作成し、計算を行なった。(附録 A2 参照)

フィッティング・パラメータを求める計算の過程で、(4.6) 式にさらに定数項  $C$  (cm<sup>-1</sup>) を付加した次式を用いると、フィッティングの精度が一層良くなる事が判明した。

$$\Sigma_{0j}(\phi, t) = \sum_j \hat{Y}_j (1 - e^{-\hat{\lambda}_j \phi t}) + C_j \quad (4.7)$$

しかし (4.7) 式のように定数項  $C$  を付加すると、照射時間  $t=0$ において物理的には零になるべき  $\Sigma_0(\phi, 0)$  が  $C$  の値を有する事になり、不自然な結果となるが、PFP の  $\Sigma_0(\phi, t)$  をより精度良く再現することに重点を置いたので、(4.7) 式のようなフィッティングの式も採用することにした。

$\Sigma_f = 1 \text{ cm}^{-1}$  として、「FIT」コードを用いて得られた各 PFP の  $\Sigma_0(\phi, t)$  のフィッティング・パラメータ  $\hat{Y}, \hat{\sigma}$

TABLE 4 Fitting Parameter

	FP-No.	$\hat{\sigma}$ (cm <sup>2</sup> )	$\sum_j \hat{Y}^*(\text{cm}^{-1})$	Constant (cm <sup>-1</sup> )
$\phi = 10^{12}$ (n·cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> )	FP-9	2.430159 -19	8.916115 -5	6.095669 -6
	FP-10	2.333852 -19	7.539365 -6	-1.548757 -8
	FP-11	-8.561036 -21	-4.379500 -3	-1.251412 -5
	FP-9	2.671504 -19	9.434363 -5	0.0
	FP-10	2.326829 -19	7.526546 -6	0.0
	FP-11	-1.407808 -20	-2.492810 -3	0.0
$\phi = 10^{13}$ (n·cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> )	FP-9	7.836471 -20	2.043055 -4	6.027956 -5
	FP-10	2.335579 -20	7.533650 -5	-1.539714 -7
	FP-11	-8.903662 -22	-4.428774 -2	-1.596254 -4
	FP-9	9.835316 -20	2.637713 -4	0.0
	FP-10	2.328574 -20	7.520915 -5	0.0
	FP-11	-1.558195 -21	-2.335507 -2	0.0
$\phi = 10^{14}$ (n·cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> )	FP-9	7.182834 -21	1.659093 -3	2.641392 -4
	FP-10	2.352795 -21	7.477005 -4	-1.432423 -6
	FP-11	-3.338618 -22	-1.160718 -2	-1.612722 -3
	FP-9	8.226587 -21	1.918723 -3	0.0
	FP-10	2.346213 -21	7.465117 -4	0.0
	FP-11	-3.908492 -22	-9.230964 -2	0.0

\*  $\Sigma_f = 1 \text{ cm}^{-1}$

および  $C$  の値を TABLE 4 に示す。また、これらのパラメータを用いて計算した  $\Sigma_0(\phi, t)$  が可成り良い精度で再現されている様子を Fig. 6～Fig. 11 に示した。

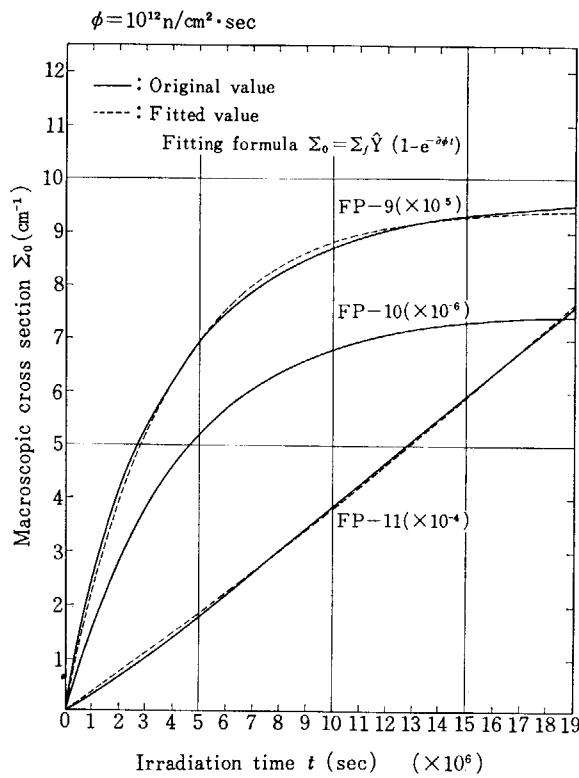


Fig. 6 Time dependent macroscopic cross section of pseudo-FP

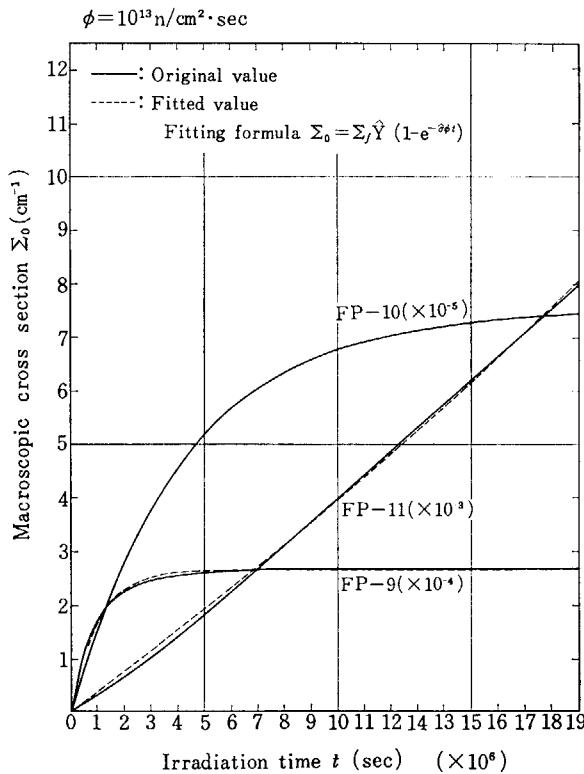


Fig. 7 Time dependent macroscopic cross section of pseudo-FP

なお、フィッティング式の使用制限は  $2 \times 10^7 \text{ sec}$  迄である。

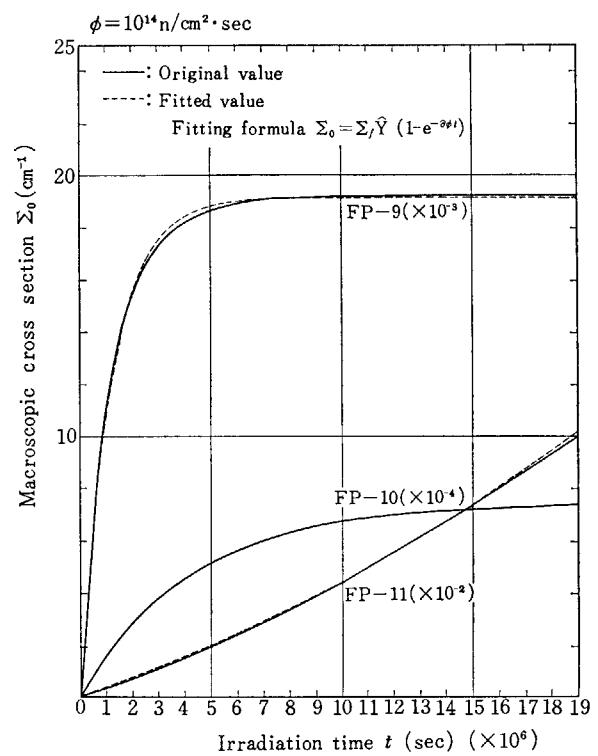


Fig. 8 Time dependent macroscopic cross section of pseudo-FP

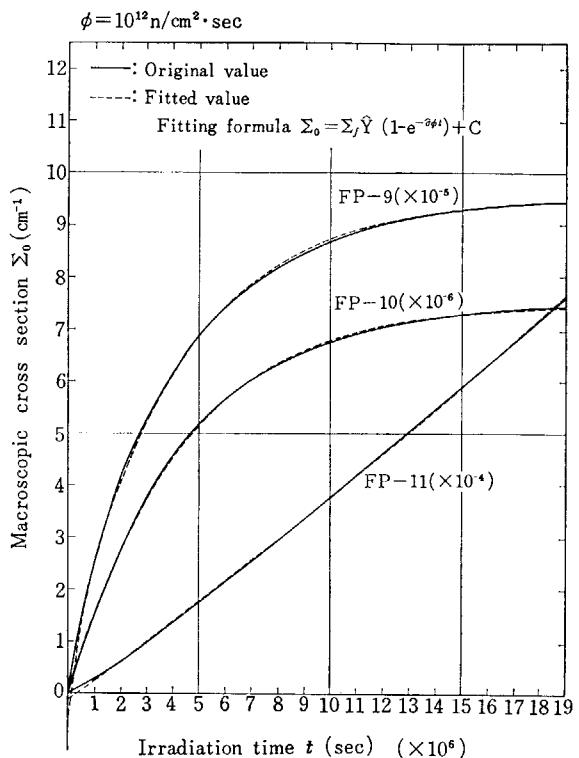


Fig. 9 Time dependent macroscopic cross section of pseudo-FP

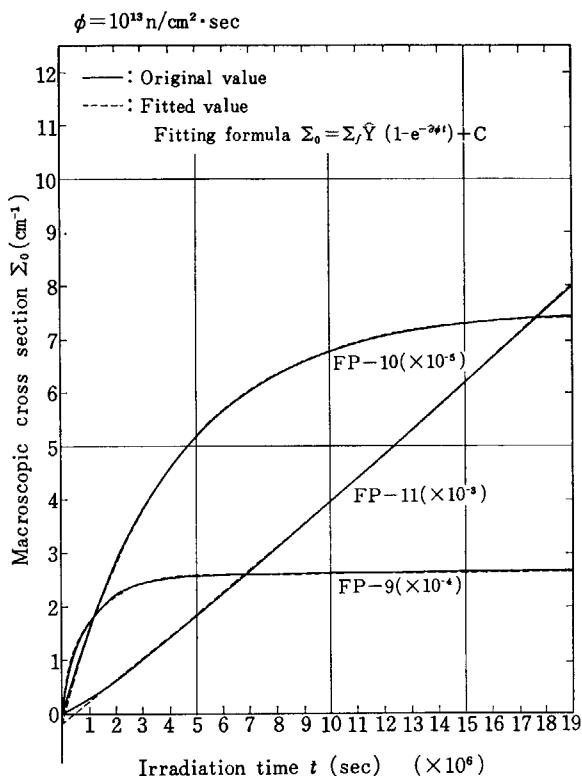


Fig. 10 Time dependent macroscopic cross section of pseudo-FP

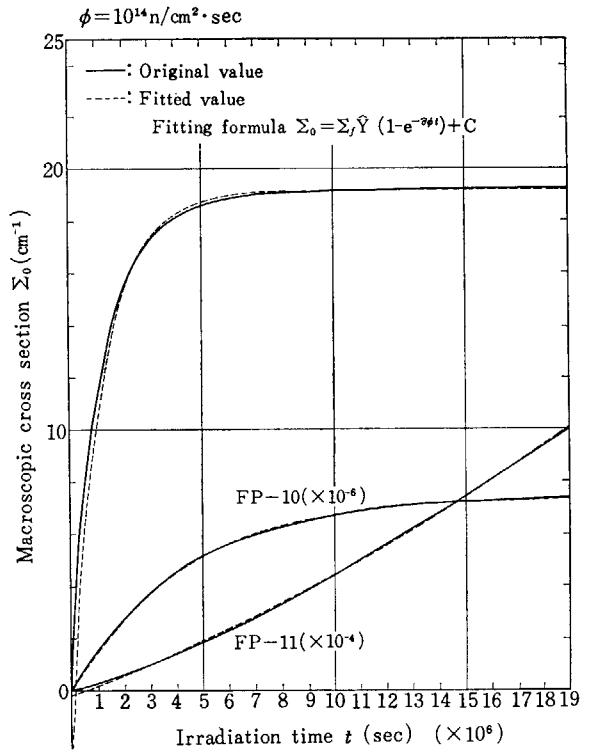


Fig. 11 Time dependent macroscopic cross section of pseudo-FP

### 4.3 炉定数の作成

FP-9, 10 および 11 の 3 つの PFP のグループに分類された約 330 の FP 核種の断面積は、§2 で述べた如く、高速中性子領域では 54 群、熱中性子領域では 30 群の多群吸収断面積セットとして既に準備されている。したがって照射に伴って変化する PFP の巨視的断面積の中性子エネルギー依存性を考慮して、以下に述べる方法で各 PFP の多群炉定数セットが作成された。

$j$ -グループの PFP の中性子エネルギー  $g$ -群の巨視的断面積  $\Sigma_{jg}(\phi, t)$  を、前節で求めた熱中性子断面積  $\Sigma_{0j}(\phi, t)$  で規格化して表わすと

$$\begin{aligned}\Sigma_{jg}(\phi, t) &= \text{Sum}_i N_i(\phi, t) \cdot \sigma_{ig}, \quad i=1 \sim l \\ &= \Sigma_{0j}(\phi, t) \cdot R_{jg}(\phi, t)\end{aligned}\quad (4.8)$$

となる。ここで  $\phi$  は中性子束レベル、 $t$  は照射時間である。また  $N_i$  と  $\sigma_{ig}$  はそれぞれ  $j$ -グループに属する FP 核種  $i$  の密度とエネルギー群  $g$  における微視的断面積であり、 $R_{jg}$  は多群規格化定数である。われわれは前節で述べた如く、 $10^{12}$ 、 $10^{13}$  および  $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  の各中性子束レベルのそれぞれに対して炉定数セットを作成する方法を採用することにした。多群規格化定数をさらに次の如く表わす。

$$R_{jg}(\phi, t) = \hat{R}_{jg}(\phi) \cdot f_{jg}(\phi, t) \quad (4.9)$$

(4.9) 式で  $\hat{R}_{jg}(\phi)$  は  $R_{jg}(\phi, t)$  を時間的に平均した値、

$$\hat{R}_{jg}(\phi) = \frac{\text{Sum}_m R_{jg}(\phi, tm)}{M}, \quad m=1 \sim M \quad (4.10)$$

であり、中性子束レベルのみの関数である。ここで  $M$  は計算分点の数である。また  $f_{jg}(\phi, t)$  は  $\hat{R}_{jg}$  からのずれを表わす因子（補正因子）である。

$$f_{jg}(\phi, t) = \frac{R_{jg}(\phi, t)}{\hat{R}_{jg}(\phi)} \quad (4.11)$$

(4.8)～(4.11) 式の関係にもとづき、既に求められている  $N_i(\phi, t)$ 、 $\sigma_{ig}$  および  $\Sigma_{0j}(\phi, t)$  の値を用いて、導かれる  $\hat{R}_{jg}$  と  $f_{jg}(\phi, t)$  および  $\Sigma_{0j}$  が、われわれが作成する PFP の炉定数である。この計算を行なうために、PFP の多群炉定数を求める計算コード FPPARA が作成された。（付録 A3 参照）

FPPARA を用いて得られた  $\hat{R}_{jg}$  の熱中性子領域と高速中性子領域の各群の数値を TABLE 5 と TABLE 6 に示した。またこれらの値をプロットしたグラフが Fig. 12～Fig. 17 である。同様に補正因子  $f_{jg}$  の値は Fig. 18～Fig. 23 に示されている。

$f_{jg}$  の値は、もしある PFP のグループに属する FP 核種の微視的断面積の中性子エネルギー依存性が全く同じであり、しかも巨視的熱中性子断面積  $\Sigma_{0j}(\phi, t)$  のフィ

TABLE 5 Normalized Group Constants,  $\hat{R}^g$ , in Thermal Energy Region

Group	lower (ev) energy	$\phi = 10^{12}$ (cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> )			$\phi = 10^{13}$ (cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> )			$\phi = 10^{14}$ (cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> )		
		FP-9	FP-10	FP-11	FP-9	FP-10	FP-11	FP-9	FP-10	FP-11
1	2.528 -4	9.017026	1.005576 +1	1.027329 +1	9.622931	1.005580 +1	1.045996 +1	1.000369 +1	1.005596 +1	1.012102 +1
2	1.012 -3	4.486138	5.002927	4.921503	4.787587	5.002946	5.049713	4.977023	5.003027	4.993831
3	2.277 -3	2.985836	3.359795	3.318654	3.186471	3.329807	3.399064	3.312554	3.329861	3.354713
4	4.048 -3	2.240298	2.498374	2.445273	2.390836	2.498383	2.511713	2.485337	2.498423	2.492164
5	6.325 -3	1.793390	1.999983	1.938568	1.913898	1.999991	1.993210	1.989628	2.000023	1.975750
6	9.107 -3	1.493737	1.665811	1.615725	1.594110	1.665817	1.660789	1.657186	1.665844	1.643910
7	1.240 -2	1.280332	1.427822	1.382747	1.366364	1.427827	1.421108	1.420249	1.427850	1.403422
8	1.619 -2	1.120495	1.249572	1.208632	1.155787	1.249577	1.241983	1.243102	1.249597	1.224074
9	2.049 -2	9.960669 -1	1.110744	1.075480	1.062934	1.110748	1.104041	1.104993	1.110766	1.081501
10	2.530 -2	8.963406 -1	9.955962 -1	9.786239	9.565708 -1	9.966001 -1	1.002111	9.944205	9.996161 -1	9.737037 -1
11	3.061 -2	8.148950 -1	9.067684 -1	8.757938	8.696524 -1	9.087719 -1	8.984670 -1	9.040630 -1	9.087864 -1	8.725549 -1
12	3.643 -2	7.469710 -1	8.330197 -1	8.012458	7.971642 -1	8.330229 -1	8.217043 -1	8.287065 -1	8.330363 -1	7.944108 -1
13	4.275 -2	6.894686 -1	7.688932 -1	7.405312	7.357979 -1	7.688962 -1	7.585724 -1	7.649120 -1	7.689085 -1	7.273313 -1
14	4.959 -2	6.402304 -1	7.139829 -1	6.857537	6.825251 -1	7.139857 -1	7.022581 -1	7.102861 -1	7.139971 -1	6.705861 -1
15	5.692 -2	5.975867 -1	6.664268 -1	6.406931	6.377419 -1	6.664293 -1	6.556281 -1	6.629761 -1	6.664400 -1	6.223892 -1
16	6.517 -2	5.584824 -1	6.228178 -1	6.059154	5.960100 -1	6.228202 -1	6.187747 -1	6.195330 -1	6.228302 -1	5.840228 -1
17	7.484 -2	5.211196 -1	5.811510 -1	5.594586	5.561366 -1	5.811532 -1	5.719638 -1	5.781419 -1	5.811625 -1	5.376164 -1
18	8.612 -2	4.858266 -1	5.417923 -1	5.221461	5.184721 -1	5.417944 -1	5.336894 -1	5.389871 -1	5.418031 -1	4.990854 -1
19	9.918 -2	4.526684 -1	5.048367 -1	4.841135	4.831071 -1	5.048387 -1	4.949447 -1	5.022228 -1	5.048467 -1	4.610126 -1
20	1.140 -1	4.222980 -1	4.709454 -1	4.532733	4.506746 -1	4.709472 -1	4.625654 -1	4.685069 -1	4.709547 -1	4.287665 -1
21	1.312 -1	3.935653 -1	4.389028 -1	4.235039	4.200111 -1	4.389044 -1	4.314194 -1	4.366302 -1	4.389115 -1	3.984329 -1
22	1.525 -1	3.650887 -1	4.071458 -1	3.939360	3.896211 -1	4.071474 -1	4.006082 -1	4.050377 -1	4.071539 -1	3.683350 -1
23	1.794 -1	3.369821 -1	3.758014 -1	3.615401	3.596258 -1	3.758028 -1	3.676407 -1	3.738555 -1	3.758088 -1	3.376192 -1
24	2.124 -1	3.093542 -1	3.449909 -1	3.332912	3.301415 -1	3.449922 -1	3.384307 -1	3.432046 -1	3.449977 -1	3.093120 -1
25	2.546 -1	2.825557 -1	3.151053 -1	3.025241	3.015423 -1	3.151065 -1	3.072534 -1	3.134737 -1	3.151115 -1	2.811739 -1
26	3.081 -1	2.568547 -1	2.864435 -1	2.771412	2.741142 -1	2.864446 -1	2.809485 -1	2.849604 -1	2.864492 -1	2.562780 -1
27	3.760 -1	2.325088 -1	2.592931 -1	2.515067	2.481324 -1	2.592941 -1	2.546513 -1	2.579305 -1	2.592982 -1	2.313800 -1
28	4.618 -1	2.098004 -1	2.339688 -1	2.307896	2.238981 -1	2.339697 -1	2.327557 -1	2.327573 -1	2.339734 -1	2.103784 -1
29	5.702 -1	1.888077 -1	2.105578 -1	2.139683	2.014948 -1	2.105586 -1	2.143620 -1	2.105619 -1	2.105619 -1	1.92034 -1
30	7.066 -1	1.695961 -1	1.891330	1.988936 -1	1.809922 -1	1.891337 -1	1.975008 -1	1.891363 -1	1.891363 -1	1.759702 -1

TABLE 6 Normalized Group Constants,  $\hat{R}^g$ , in Fast Energy Region

Group	Lower (ev) Energy	$\phi = 10^{12}$ (cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> )			$\phi = 10^{13}$ (cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> )			$\phi = 10^{14}$ (cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> )		
		FP-9	FP-10	FP-11	FP-9	FP-10	FP-11	FP-9	FP-10	FP-11
1	7.788 +6	6.722887 -8	0.0	4.986292 -5	1.786237 -7	0.0	5.073648 -5	2.485853 -7	0.0	4.399878 -5
2	6.065 +6	8.558044 -8	0.0	6.298824 -5	2.275506 -7	0.0	6.40983 -5	3.165070 -7	0.0	5.561683 -5
3	4.724 +6	1.099921 -7	0.0	8.072831 -5	2.925148 -7	0.0	8.214750 -5	4.068798 -7	0.0	7.128791 -5
4	3.679 +6	1.385635 -7	0.0	1.014058 -4	3.685727 -7	0.0	1.031898 -4	5.126907 -7	0.0	8.955714 -5
5	2.865 +6	1.785958 -7	0.0	1.303055 -4	4.751606 -7	0.0	1.325598 -4	6.609790 -7	0.0	1.150938 -4
6	2.231 +6	2.240195 -7	0.0	1.629549 -4	5.961512 -7	0.0	1.658269 -4	8.293152 -7	0.0	1.439507 -4
7	1.738 +6	2.830176 -7	0.0	2.052157 -4	7.533443 -7	0.0	2.088363 -4	1.048031 -6	0.0	1.813096 -4
8	1.353 +6	3.670945 -7	0.0	2.652971 -4	9.774123 -7	0.0	2.699836 -4	1.359807 -6	0.0	2.344313 -4
9	1.052 +6	4.607148 -7	0.0	3.318148 -4	1.227051 -6	0.0	3.376846 -4	1.707194 -6	0.0	2.932668 -4
10	8.299 +5	5.681888 -7	0.0	4.078135 -4	1.513779 -6	0.0	4.150393 -4	2.105224 -6	0.0	3.605150 -4
11	6.393 +5	7.271228 -7	0.0	5.200686 -4	1.937886 -6	0.0	5.293002 -4	2.696459 -6	0.0	4.598658 -4
12	4.979 +5	9.069717 -7	0.0	6.463748 -4	2.418110 -6	0.0	6.578728 -4	3.364662 -6	0.0	5.717169 -4
13	3.877 +5	1.146777 -6	0.0	8.146310 -4	3.058673 -6	0.0	8.291550 -4	4.256487 -6	0.0	7.207745 -4
14	3.020 +5	1.402366 -6	0.0	9.931400 -4	3.741910 -6	0.0	1.010891 -3	5.207624 -6	0.0	8.790408 -4
15	2.352 +5	1.753740 -6	0.0	1.239826 -3	4.681411 -6	0.0	1.261027 -3	6.515552 -6	0.0	1.096940 -3
16	1.832 +5	2.150626 -6	0.0	1.513562 -3	5.743190 -6	0.0	1.540699 -3	7.993839 -6	0.0	1.340573 -3
17	1.426 +5	2.586446 -6	0.0	1.819594 -3	6.909656 -6	0.0	1.852309 -3	9.617994 -6	0.0	1.612338 -3
18	1.111 +5	3.219708 -6	0.0	2.181747 -3	8.604323 -6	0.0	2.219303 -3	1.197755 -5	0.0	1.928247 -3
19	8.652 +4	3.813681 -6	0.0	2.586908 -3	1.019449 -5	0.0	2.631403 -3	1.419174 -5	0.0	2.285779 -3
20	6.738 +4	4.544281 -6	0.0	3.098999 -3	1.214988 -5	0.0	3.152367 -3	1.691436 -5	0.0	2.740149 -3
21	4.087 +4	5.834671 -6	0.0	3.975764 -3	1.560147 -5	0.0	4.042829 -3	2.171979 -5	0.0	3.511213 -3
22	2.479 +4	7.871866 -6	0.0	5.057447 -3	2.104319 -5	0.0	5.599401 -3	2.929434 -5	0.0	4.854445 -3
23	1.503 +4	1.041252 -5	0.0	7.496483 -3	2.781498 -5	0.0	7.619041 -3	3.871704 -5	0.0	6.598650 -3
24	9.119 +3	1.345947 -5	0.0	1.010495 -2	3.591654 -5	0.0	1.026681 -2	4.998574 -5	0.0	8.869781 -3
25	5.531 +3	4.541993 -3	1.914158 -3	1.449672 -2	1.264967 -2	1.914269 -3	1.441720 -2	1.732920 -2	1.076334 -2	1.915336 -3
26	3.355 +3	1.320089 -2	4.119248 -3	2.419684 -2	3.675091 -2	4.119575 -3	2.354563 -2	5.034311 -2	4.122751 -3	1.520374 -2
27	2.035 +3	2.188116 -2	6.400858 -3	3.711219 -2	6.991213 -3	6.401402 -3	3.593009 -2	8.343945 -2	6.406687 -3	2.244455 -2
28	1.234 +3	3.059079 -2	8.780325 -3	5.134722 -2	8.515558 -2	8.781085 -3	4.967821 -2	1.166488 -1	8.788481 -3	3.073013 -2

29	7.485 + 2	3.933598 - 2	1.128570 - 2	6.789913 - 2	1.094988 - 1	1.128668 - 2	6.576523 - 2	1.499951 - 1	1.129619 - 2	4.088802 - 2
30	4.540 + 2	4.813093 - 2	1.355234 - 2	1.028564 - 1	1.339810 - 1	1.395353 - 2	1.006167 - 1	1.835327 - 1	1.39516 - 2	6.740389 - 2
31	2.754 + 2	5.698856 - 2	1.682681 - 2	1.660590 - 1	1.586385 - 1	1.682822 - 2	1.641950 - 1	2.173114 - 1	1.684197 - 2	1.180997 - 1
32	1.670 + 2	6.587728 - 2	1.996737 - 2	1.833416 - 1	1.833880 - 1	1.996901 - 2	1.801421 - 1	2.512138 - 1	1.998487 - 2	1.254914 - 1
33	1.301 + 2	3.622628 - 2	1.126470 - 2	2.050598 - 1	1.008442 - 1	1.126570 - 2	2.052462 - 1	1.381339 - 1	1.127433 - 2	1.575583 - 1
34	1.013 + 2	3.848524 - 2	1.218521 - 2	3.382191 - 1	1.071233 - 3	1.218617 - 2	3.411469 - 1	1.467327 - 1	1.219543 - 2	2.682053 - 1
35	7.899 + 1	4.075272 - 2	1.316364 - 2	1.416018 - 1	1.134382 - 1	1.316465 - 2	1.391490 - 1	1.553828 - 1	1.317445 - 2	1.015043 - 1
36	6.144 + 1	4.302516 - 2	1.420792 - 2	2.708673 - 1	1.197952 - 1	1.420899 - 2	2.739218 - 1	1.640964 - 1	1.421932 - 2	2.255691 - 1
37	4.785 + 1	4.534130 - 2	1.532698 - 2	5.139246 - 1	1.262135 - 1	1.532810 - 2	5.196786 - 1	1.728816 - 1	1.533897 - 2	4.086331 - 1
38	3.727 + 1	4.765323 - 2	1.653018 - 2	4.041904 - 1	1.326815 - 1	1.653136 - 2	3.929764 - 1	1.817472 - 1	1.654726 - 2	3.091558 - 1
39	2.902 + 1	4.999249 - 2	1.782946 - 2	9.445120 - 2	1.392153 - 2	1.783070 - 2	9.148414 - 2	1.907008 - 1	1.784265 - 2	5.895786 - 2
40	2.260 + 1	6.062142 - 2	1.933707 - 2	1.328177 - 1	1.680817 - 1	1.923836 - 2	1.305609 - 1	2.307788 - 1	1.925085 - 2	9.361929 - 2
41	1.760 + 1	5.479723 - 2	2.076767 - 2	4.193288 - 1	1.525357 - 1	2.076902 - 2	4.229118 - 1	2.089335 - 1	2.078205 - 2	3.488195 - 1
42	1.371 + 1	5.725325 - 2	2.243789 - 2	9.438635 - 1	1.593366 - 1	2.243930 - 2	9.495218 - 2	2.182466 - 1	2.245288 - 2	7.889543 - 1
43	1.068 + 1	5.967640 - 2	2.426567 - 2	1.310795	1.662181 - 1	2.426714 - 2	1.312268	2.276931 - 1	2.428126 - 2	1.078447
44	8.315	6.235918 - 2	2.627263 - 2	5.857081 - 2	1.736876 - 1	2.627416 - 2	5.492849 - 2	2.379370 - 1	2.628883 - 2	2.464310 - 2
45	6.476	6.494532 - 2	2.848229 - 2	1.141885	1.809032 - 1	2.848388 - 2	1.148013	2.478237 - 1	2.849910 - 2	8.889399 - 1
46	5.043	6.758900 - 2	3.092148 - 2	5.937392	1.882813 - 1	3.092313 - 2	5.959128	2.579334 - 1	3.093891 - 2	4.907446
47	3.928	7.030908 - 2	3.362129 - 2	1.882719 - 1	1.958738 - 1	3.362301 - 2	1.854539 - 1	2.683378 - 1	3.363935 - 2	1.334363 - 1
48	3.059	7.311141 - 2	3.661582 - 2	9.424276 - 2	2.036978 - 1	3.661759 - 2	8.891214 - 2	2.790604 - 1	3.663450 - 2	4.475306 - 2
49	2.382	7.603319 - 2	3.994404 - 2	9.225926 - 2	2.117313 - 1	3.994588 - 2	8.799580 - 2	2.900428 - 1	3.996336 - 2	4.435151 - 2
50	1.855	7.895132 - 2	4.365301 - 2	5.199594 - 2	2.200134 - 1	4.365491 - 2	4.807569 - 2	3.014194 - 1	4.367297 - 2	2.028754 - 2
51	1.440	3.922428 - 4	0.0	3.605645 - 2	1.057678 - 3	0.0	3.714463 - 2	1.474394 - 3	0.0	3.579350 - 2
52	1.125	4.466399 - 4	0.0	1.251796	1.204359 - 3	0.0	1.206019	1.678866 - 3	0.0	9.436088 - 1
53	8.337 - 1	5.073890 - 4	0.0	3.373232 - 1	1.368169 - 3	0.0	3.281827 - 1	1.907215 - 3	0.0	2.771134 - 1
54	6.251 - 1	5.940319 - 4	0.0	1.170851 - 1	1.601800 - 3	0.0	1.135855 - 1	2.232395 - 3	0.0	9.025365 - 2

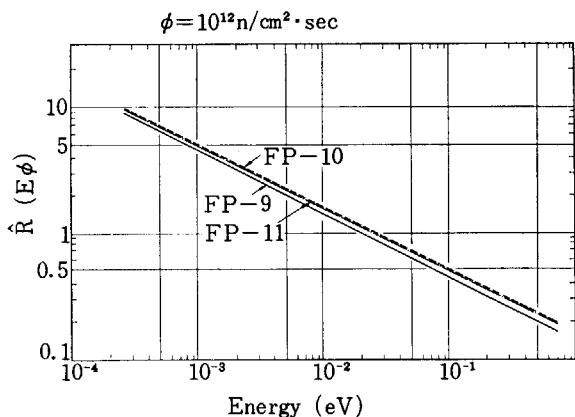


Fig. 12 Normalized group constants in thermal region

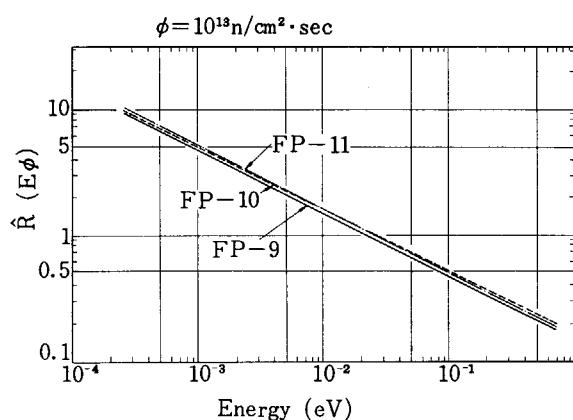


Fig. 13 Normalized group constants in thermal region

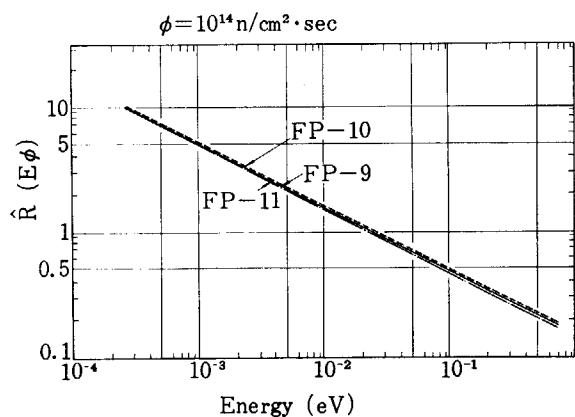


Fig. 14 Normalized group constants in thermal region

ツッティングの精度が良ければ、原理的には総てのエネルギー群において  $f_{f^g}=1$  になるべきものである。熱中性子領域では、ほとんどの FP 核種の断面積が  $1/v$  型であると仮定したことから、Fig. 18～Fig. 19 で明らかな如く、FP-9 と FP-10 については 1 に近い値となっているが、低エネルギーで 1 よりずれているのはフィッティングの精度が悪いことに基因している。しかし Fig. 20 に示す FP-11 では、熱中性子領域に共鳴吸収をもつ FP-11 核種を含んでいるため、 $f_{11}^g$  はエネルギー依存性を示している。しかしこれら共鳴吸収をもつ FP 核種はその断面積

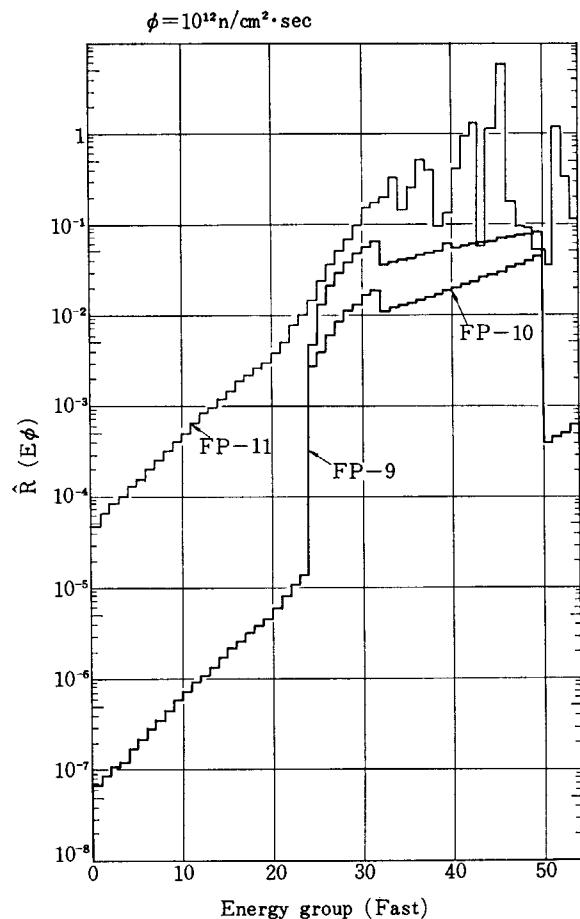


Fig. 15 Normalized group constants in fasts region

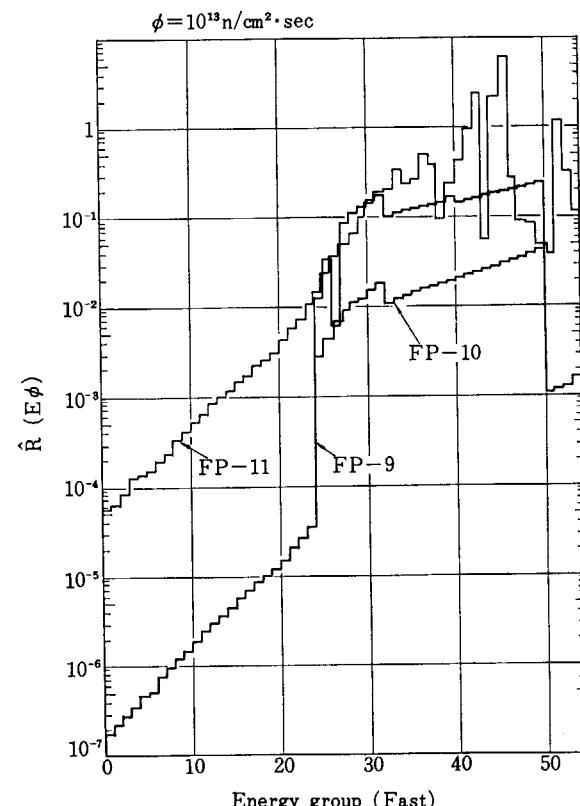


Fig. 16 Normalized group constants in fasts region

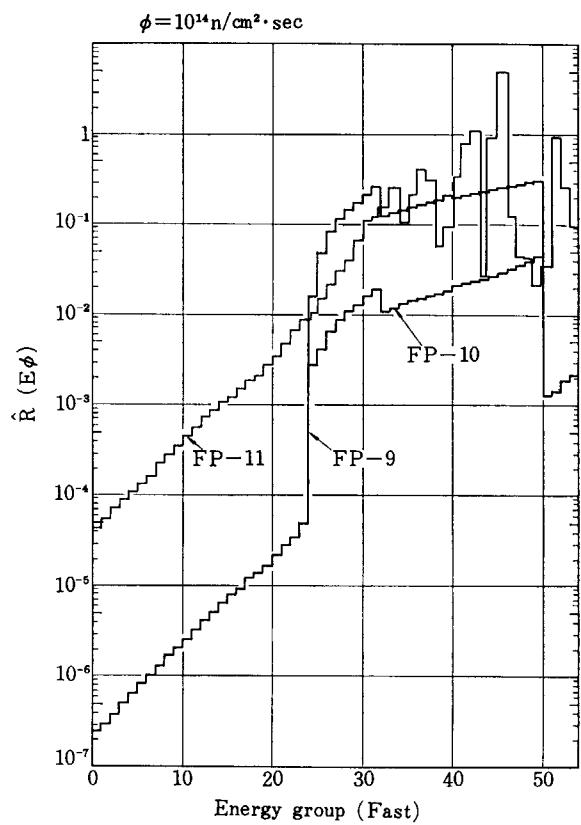


Fig. 17 Normalized group constants in fasts region

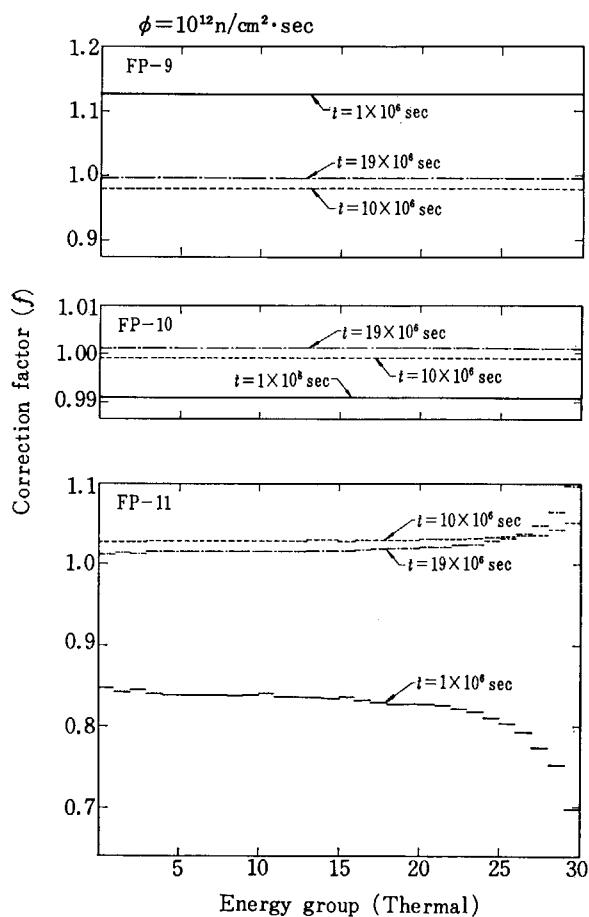


Fig. 18 Correction factor in thermal region

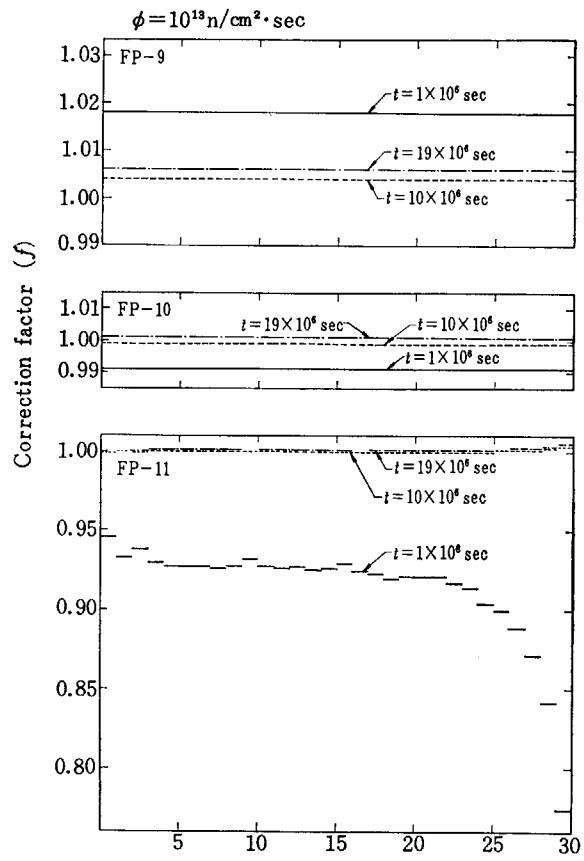


Fig. 19 Correction factor in thermal region

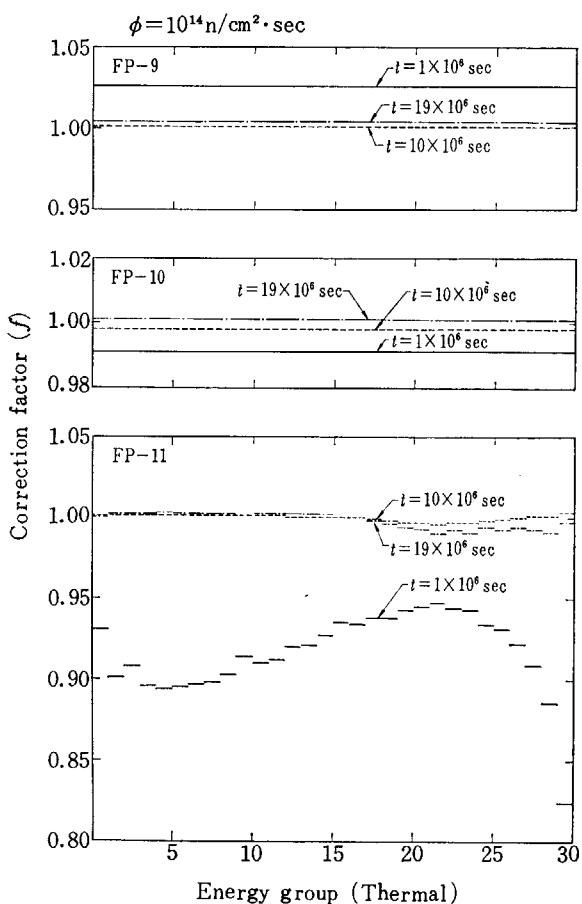


Fig. 20 Correction factor in thermal region

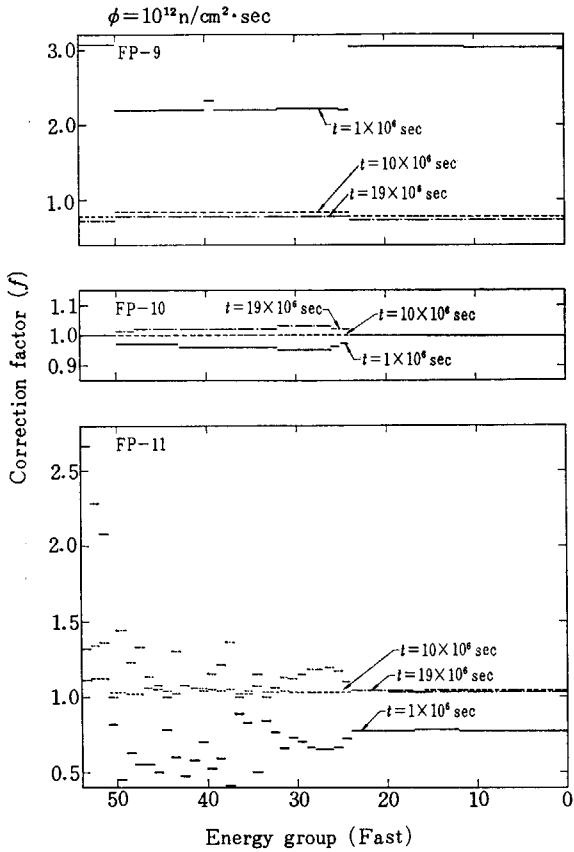


Fig. 21 Correction factor in fast region

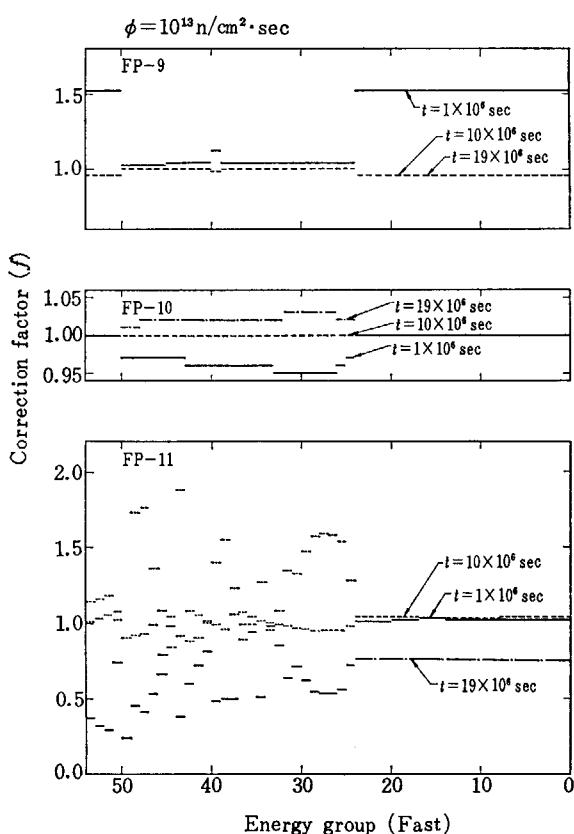


Fig. 22 Correction factor in fast region

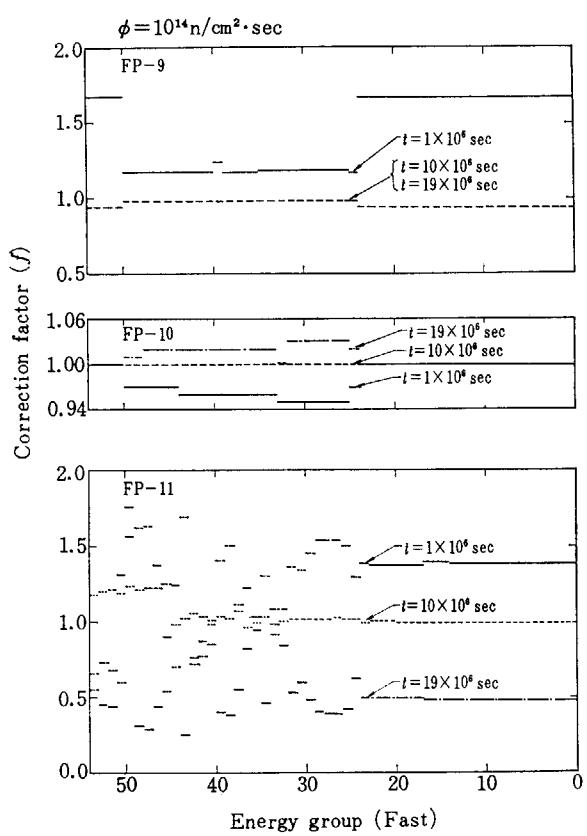


Fig. 23 Correction factor in fast region

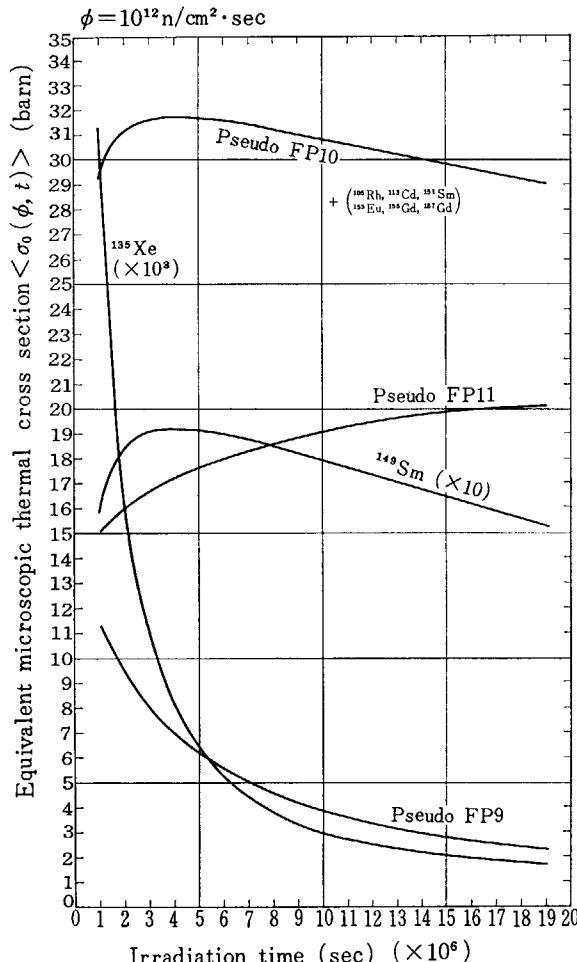


Fig. 24 Equivalent microscopic thermal cross sections of fission products

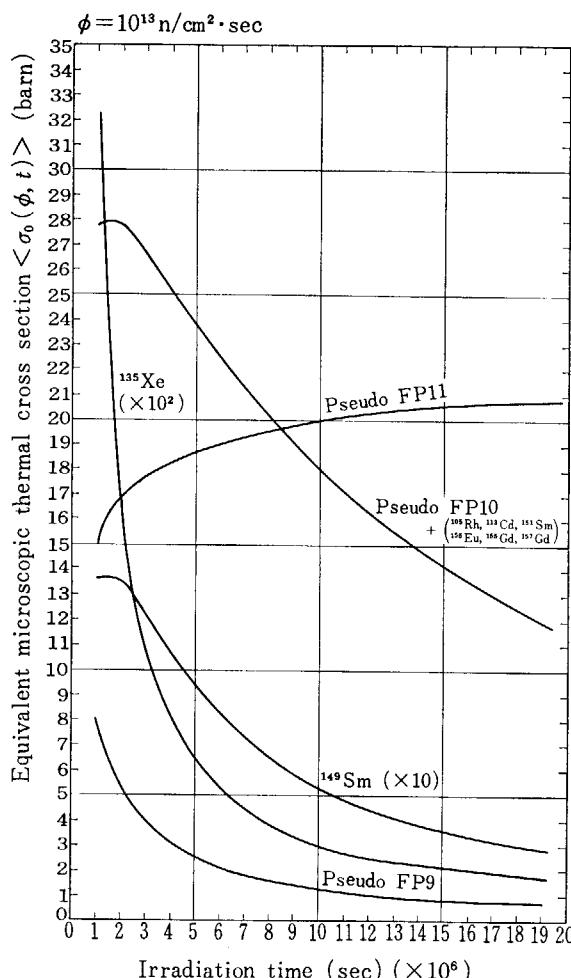


Fig. 25 Equivalent microscopic thermal cross sections of fission products

値が大きいことや、半減期の短かいことから、照射が進むとこれらのFP核種の寄与は小さくなり、 $f_{11}^g$ の値も1に近づく。

一方高速中性子領域においては、各FP核種はそれぞれが固有の共鳴吸収のレベルをもつたため、その断面積のエネルギー依存性は異なっている。したがって Fig. 21～Fig. 23 に示される如く、 $f_f^g$ の値が1より大幅にずれているものが多い。このことは特にFP-11で顕著になっている。しかし、われわれが対象としている炉型は熱中性子炉であることから、高速中性子領域の断面積の誤差が、反応度など原子炉の燃焼核特性の推定により与える影響は小さい。このため実用上では高速中性子領域の $f_f^g$ の値を熱中性子領域での値とともに、 $f_f^g \approx 1$ と近似することができる。

われわれの作成したFP-9～11の3つのPFPの炉定数の数値は、付録Bで述べるデータ・ファイルに総て収録されている。さらにPFPのグループから除外した。TABLE 1 に示すFP-1～7までの崩壊チェインに属するFP核種の多群の断面積、崩壊定数、収率など必要なデータもまた前述のデータ・ファイル(付録B)に収録されている。

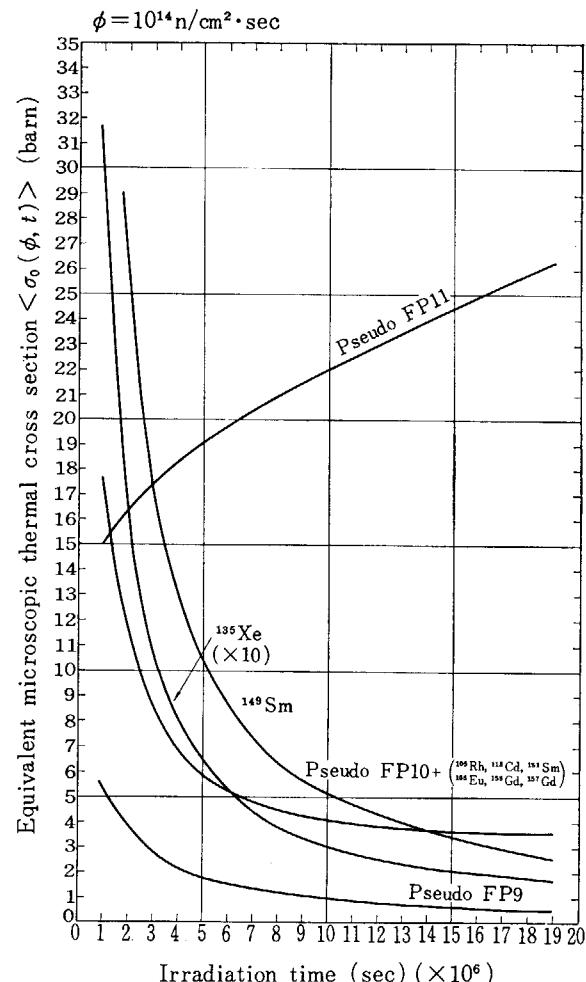


Fig. 26 Equivalent microscopic thermal cross sections of fission products

熱中性子に対する各PFPの断面積  $\sum_0$  は巨視的断面積で与えられているがPFPを1つのFP核種と見做したとき、その断面積が如何なる大きさで如何なる照射時間変化を示すかを知るには、FP核種1ヶに規格化された等価的な微視的断面積にて表わすと便利である。すなわち、核分裂当たり通常2個のFP核種が生れること、および巨視的核分裂断面積  $\sum_f$  は  $1.0 \text{ cm}^{-1}$ 、中性子レベル  $\phi$  は一定である条件を用いると、FP核種の密度の総和  $N_{\text{FP}}$  は次のようになる。

$$N_{\text{FP}} = 2 \cdot \phi \cdot t \quad (4.12)$$

したがって等価的な微視的断面積は

$$\langle \sigma_{0j}(\phi, t) \rangle = \frac{\sum_{0j}(\phi, t)}{N_{\text{FP}}} = \frac{\sum_{0j}(\phi, t)}{2\phi t} \quad (4.13)$$

の関係を用いて算出することができる。

(4.13)式を用いて求めた  $\langle \sigma_{0j}(\phi, t) \rangle$  の照射時間変化を Fig. 24～Fig. 26 に示した。これらの結果から、Fig. 24 の中性子束レベルが低い場合 ( $\phi = 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ) には、 $^{135}\text{Xe}$  による吸収効果が非常に大きく、他のFP核種の吸収効果は無視できる。一方、中性子束レベルが  $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  になると、 $^{135}\text{Xe}$  の効果よりもむしろ、PFPの吸収のほうが大きくなることが明らかになった。

## 5. 作成した炉定数の使用法

作成された PFP の炉定数をライブラリーとして、熱中性子炉の燃焼度計算を行なう場合には、従来の燃焼度計算コードに対して以下に述べる修正を施すことが必要となる。なお作成された炉定数は、全て  $nv_0$  ( $v = 2200 \text{ m/sec}$ ) で定義された中性子束レベル  $\phi$  での値である。

(1) TABLE 1 の FP-1~7 の崩壊チェインに含まれる重要な FP 核種は、それぞれのチェインの崩壊過程を微分方程式で表示し、ある照射の時点で各 FP 核種の密度を解析的に求め、次の段階の燃焼度計算の入力データとする。この方法は、通常用いられている燃焼度計算コードで  $^{135}\text{Xe}$  とか  $^{149}\text{Sm}$  などの重要核種に対して用いている計算手法と全く同じであるが、計算するチェインの数が多くなっているため、微分方程式を解く関数サブルーチンを追加せねばならない。この計算に必要な諸定数は総て付録Bのデータ・ファイルに収納されている。

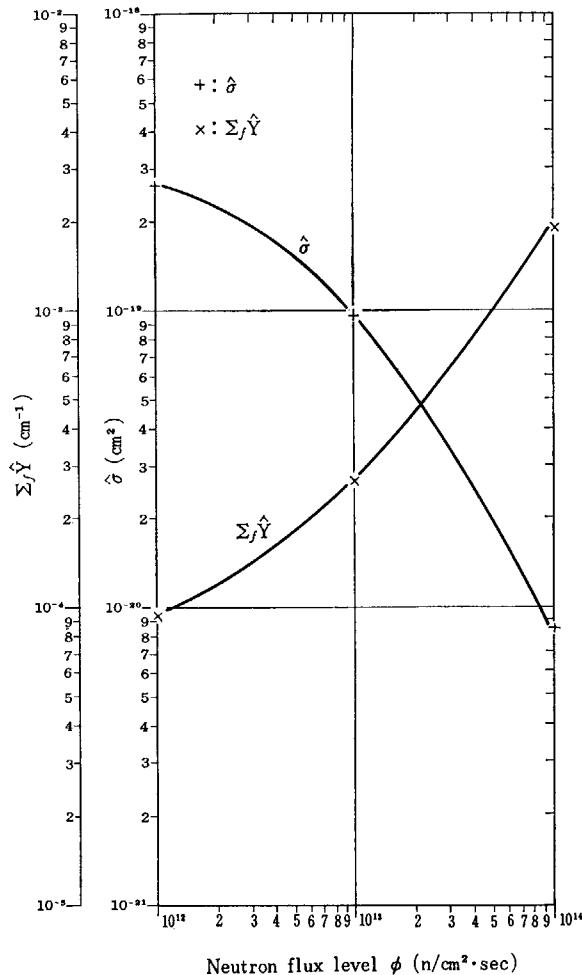


Fig. 27 Fitting parameter (FP-9)

(2) FP-9, 10 および 11 の 3 つの PFP の炉定数  $\Sigma_f^g(\phi, t)$  は、ライブラリーとして用意されている  $\Sigma_{0j}^g(\phi, t)$ ,  $\hat{R}_j^g(\phi)$  および  $f_j^g(\phi, t)$  の値を用い、

$$\Sigma_f^g(\phi, t) = \Sigma_{0j}^g(\phi, t) \cdot \hat{R}_j^g(\bar{\Phi}) \cdot f_j^g(\bar{\Phi}, t) \cdot \Sigma_j(\phi, t) \quad (5.1)$$

で求められる。すなわち  $\Sigma_{0j}$  は  $\Sigma_j = 1.0 \text{ cm}^{-1}$  として求められているため、(5.1) 式で示す如く、実際の燃焼度計算で得られる  $\Sigma_j(\bar{\Phi}, t)$  の値を乗じて  $\Sigma_f^g$  を求めねばならない。なお (5.1) 式中の  $f_j^g$  の値は前節で述べた如く、熱中性子炉では、

$$f_j^g(\phi, t) \approx 1 \quad (5.2)$$

と近似できるから、

$$\Sigma_f^g(\phi, t) = \Sigma_{0j}^g(\phi, t) \cdot \hat{R}_j^g(\phi) \cdot \Sigma_j(\phi, t) \quad (5.3)$$

を用いて算出してもよい。

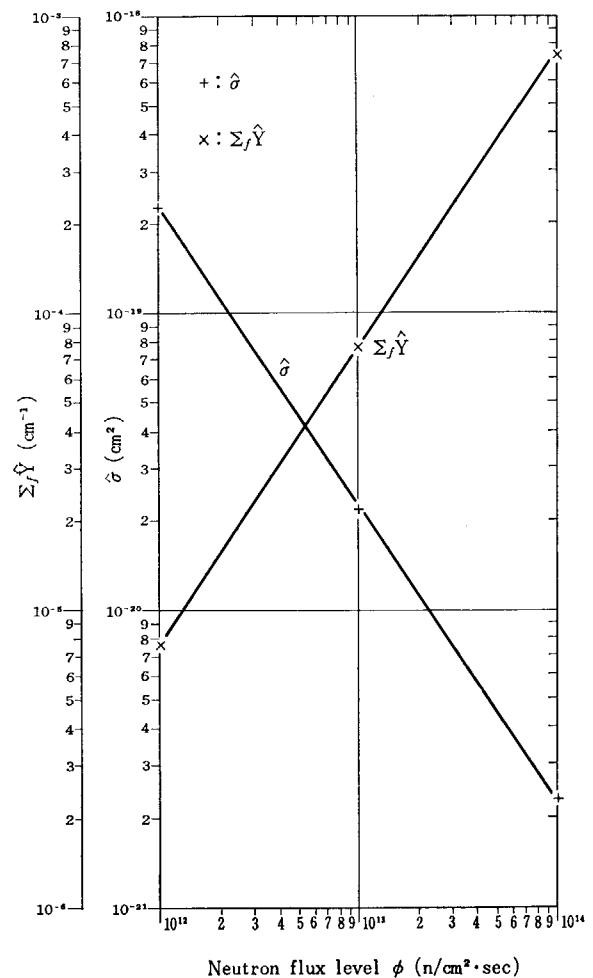


Fig. 28 Fitting parameter (FP-10)

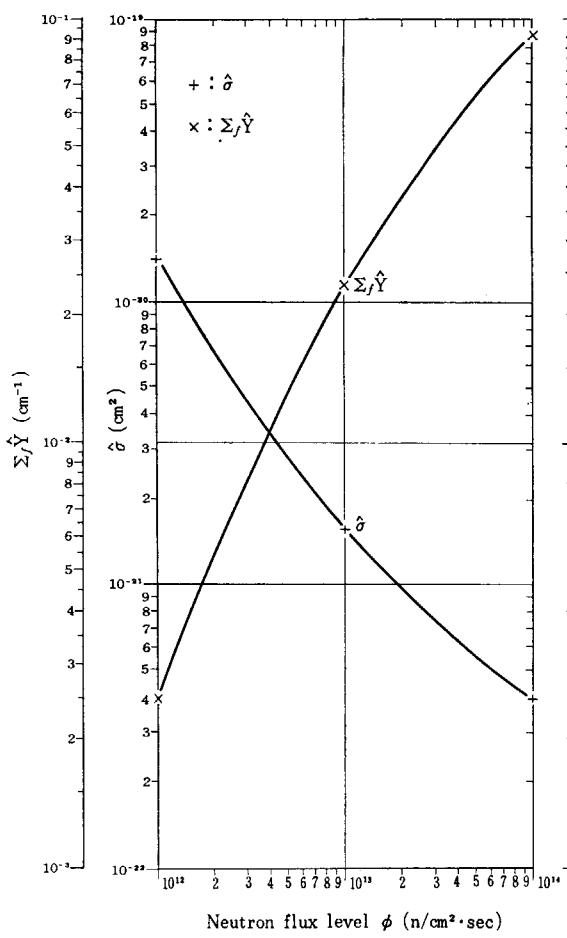


Fig. 29 Fitting parameter (FP-11)

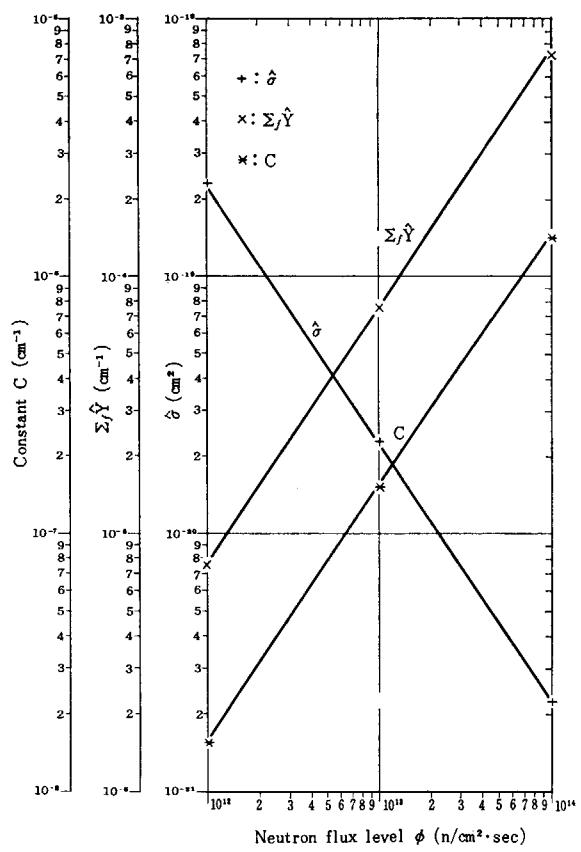


Fig. 31 Fitting parameter (FP-10)

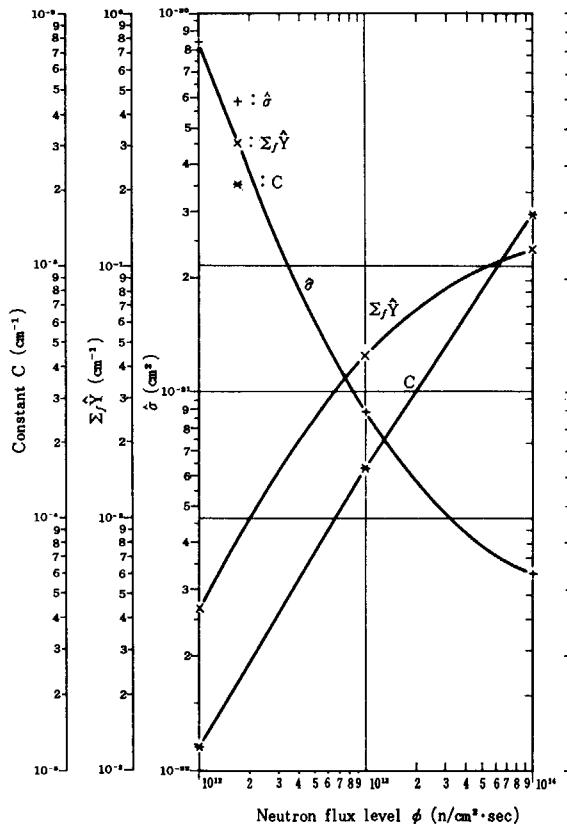


Fig. 30 Fitting parameter (FP-9)

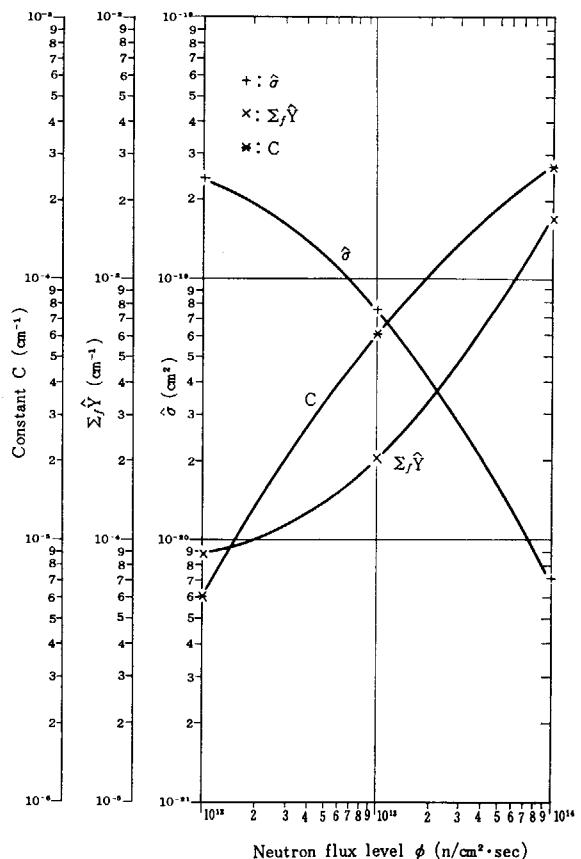


Fig. 32 Fitting parameter (FP-11)

TABLE 7 Interporation Constant of Fitting Parameter

Fitting Parameter Interporation Constant		Method 1, Eq. (4.6)		Method 2, Eq. (4.7)							
		$\hat{\sigma}$ (cm <sup>2</sup> )	$\sum_f \hat{Y}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\hat{\sigma}$ (cm <sup>2</sup> )	$\sum_f \hat{Y}$ (cm <sup>-1</sup> )	C (cm <sup>-1</sup> )					
FP-9	a	-3.21801	-1	2.07635	-1	-2.73155	-1	2.74743	-1	-1.76743	-1
	b	7.61105	+0	-4.74436	+0	6.33737	+0	-6.50847	+0	5.41372	+0
	c	-6.35665	+1	2.30076	+1	-5.53284	+1	3.44889	+1	-4.47287	+1
FP-10	a	1.47591	-3	-1.45451	-3	1.43414	-3	-1.47422	-3	-1.44128	-2
	b	-1.03657	+0	1.03604	+0	-1.03553	+0	1.03653	+0	1.35778	+0
	c	-6.40690	+0	-1.73464	+1	-6.41206	+0	-1.73487	+1	-2.20279	+1
FP-11	a	1.77655	-1	-1.87413	-1	2.78478	-1	-2.93208	-1	-5.06221	-2
	b	-5.39729	+0	5.65702	+0	-7.94490	+0	8.33506	+0	2.37125	+0
	c	1.93337	+1	-4.35001	+1	3.51706	+1	-6.01573	+1	-2.60681	+1

(3) 作成された炉定数は  $\phi = nv_0$  で定義された各中性子束レベル  $10^{12}, 10^{13}$  および  $10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  の値であるため、燃焼度計算の際の中性子束レベルをこれに合わせて使用せねばならない。したがってこれらの中間の中性子束レベルで使用する場合には、次の方法で中間レベルにおける  $\sum_{ij}(\phi, t)$  を求めればよい。

§ 4 の TABLE 4 に示した中性子束レベルの 3 つの点、すなわち  $10^{12}, 10^{13}$  および  $10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  に対して得られているフィッティング・パラメータを中性子束の関数としてプロットしたのが Fig. 27～Fig. 32 である。このグラフから中間の中性子束レベル  $\phi$  でのパラメータの値を求めれば、(4.6) 式から  $\sum_{ij}(\phi, t)$  が計算できる。しかし燃焼の過程で中性子束レベルが変化する場合には、次の内挿公式を用いてパラメータを求めるのが便利である。

$$\gamma(\phi) = a\phi^2 + b\phi + c \quad (5.4)$$

ここで  $a, b, c$  は定数で、TABLE 7 に示されている。ここで

$$\varphi = \log_{10} \phi \quad (5.5)$$

$$\gamma = \log_{10} \Gamma \quad (5.6)$$

であり、 $\Gamma$  はフィッティング・パラメータ  $\hat{\sigma}, \hat{Y}$  または  $C$  のいずれかを表わす。したがって所要の中性子束レベルでの  $\gamma$  の値が得られたら、パラメータ  $\Gamma$  を次式により決定する。

$$\Gamma = 10^\gamma \times S_{gn} \Gamma \quad (5.7)$$

ただし

$$S_{gn} \Gamma = 1 \quad ; \quad \Gamma > 0 \\ = -1 \quad ; \quad \Gamma < 0$$

である。例えば TABLE 4 で FP-9 のフィッティングパラメータはすべての符号は正であるから、内挿点におけるパラメータも正である。一方 FP-10 および FP-11 のパ

ラメータで負の符号をもつものは、その内挿点の符号も負となる。

(4) § 4.3 で定義された等価的な PFP の微視的断面積  $\langle \sigma_{ij}(\phi, t) \rangle$  を用いる場合は、各中性子束レベルに応じて (4.13) 式および (5.1) 式により、 $j$  群の巨視的断面積は次式により求められる。

$$\begin{aligned} \sum_f^g(\phi, t) &= N_{FP} \sigma_f^g(\phi, t) \\ &= \langle \sigma_{ij}(\phi) \rangle \cdot \hat{R}_f^g(\phi) \cdot f_f^g(\phi, t) \cdot N_{FP}(\phi, t) \end{aligned} \quad (5.9)$$

ここで  $N_{FP}$  は燃焼度計算コードで得られる全部の FP の生成量の総和である。

(5) 燃焼度計算コードで熱中性子の平均の速さ  $v$  に対応した中性子束レベル  $\bar{\phi}$  または中性子密度を用いる場合には、 $v_0 = 2,200 \text{ m/sec}$  に対応した中性子束レベルを

$$\phi = \bar{\phi} \cdot \frac{v_0}{v} \quad (5.10)$$

から求め、この  $\phi$  に対するフィッティング・パラメータ  $\hat{\sigma}, \hat{Y}$  および  $C$  を決めたのち、巨視的断面積  $\sum_{ij}(\phi, t)$  を (4.6) 式または (4.7) 式で計算する。

(5.1), (5.3) および (5.9) 式で求められた  $g$ -群の多群断面積  $\sum_f^g(\phi, t)$  が燃焼度計算コードで使用されている巨視的断面積であり、これを中性子スペクトル  $\phi(E)$  を重みにして平均したもの、すなわち

$$\bar{\sum}_f^g(\phi, t) = \frac{\int \sum_f^g(\phi, E) \cdot \phi(E) \cdot dE}{\int \phi(E) dE} \quad (5.11)$$

が通常定義される実効断面積である。

われわれの作成した炉定数を用いて燃焼度計算を行なう場合には、上述した (1)～(5) の点を考慮して燃焼度計算コードに手を加えることが必要である。なお熱中性子炉では補正因子  $f_f^g(\phi, t)$  の寄与はほとんど無視できるため  $f_f^g = 1.0$  とするとプログラムが簡単となる。

## 6. あとがき

核分裂生成物の核データの信頼度を高めることは、燃焼の進んだ原子炉の核特性を精度よく推定できるようにするために重要である。しかも FP 核種の核データは燃焼度計算コードのライブラリーとして、計算コードと一緒に使用されるものであるので、実用的にはそれらの計算コードに使用し易い形式にまとめられていなければならない。われわれはこの要求にこたえるため、ワーキング・グループを組織し、数年にわたって FP の炉定数の作成作業を行ない、その研究成果を本報告書にまとめた。

FP 核種の数が多いこと、全部の FP 核種の断面積が必ずしも求められないこと、さらに照射の過程で FP 核種が複雑な挙動を示すことなどのため、作成の過程で多くの問題に直面したが、核物理やが物理の知識、経験にもとづき矛盾のない炉定数を作成することができた。しかし共鳴積分の計算における非分離領域の共鳴パラメータの値、共鳴積分値の決め方、FP 核種密度の時間変化を決める崩壊チェインの追跡計算で Wescott 型の中性子スペクトルを仮定したこと、断面積の未知の FP 核種についてはその値を零としたことなど、いくつかの仮定が採用されているため細かい点についてはなお検討を必要とする問題が残されている。

作成された炉定数は  $^{235}\text{U}$  を核燃料とする熱中性子炉用のもので、現在核計算に多く用いられている THERMOS 型および MUFT 型のエネルギー・グループ構造をもつものである。したがってこの炉定数セットの使用範囲は自ら限定されるが、他の種類の燃料を使用するもの

とか、エネルギーの組分けの違うものに対する炉定数を作成する場合にも、われわれが確立したプロセスや、収集した核データなどが非常に役立つものと考える。

作成した炉定数セットはもちろん、FP 核種に関するデータ、データの計算や処理に用いる計算コードなど、作成作業の過程で整備された総ての情報はシグマ研究委員会に保管されているので、多くの方々に大いに活用されることを希望する。

多年にわたって実施された本作業に関し、シグマ研究専門委員会の関係者の御協力を感謝します。

### References

- 1) IIJIMA S., KOBAYASHI T. and SAKATA H.: Neutron Absorption Cross Section of Fission Product; JAERI 1206 (1971) (in Japanese)
- 2) SAKATA H., NAGAYAMA S. and OTAKE I.: Study for Decay Chain of Fission Products, JAERI 1194 (1970) (in Japanese)
- 3) SAKATA H., et al.: Fission Product Cross Section for the Thermal Reactor. Proceeding of the 3rd Conf. on Neutron Cross Section and Technology, CONF-710301, 133 (1971)
- 4) WALKER W.H.: Private Communication

## 附録 A. 作成した計算コード

FP 炉定数の作成の過程で作成された計算コードのうち、核種の共鳴積分を計算する FPRI, 崩壊チェインを追跡し、密度を計算する FPCCHAIN コードについては既に報告されている。ここでは本報 § 4 以下の作業に関連して作成した計算コードを説明する。

### A.1 GROUP

このコードは、最大 350 種の FP 核種を、最大 15 種類の PFP にグループ化を行なう。すなわち各 PFP に属する FP の核種密度の総和および各核種のある中性子エネルギー点における微視的断面積と密度の積の総和、すなわち PFP の巨視的断面積がリストおよびカードとして出力される。組分けの方法は 5 つまで同時に処理できる。たとえば  $^{151}\text{Sm}$  を第 1 の組分けでは、Non-Saturation のグループに第 2 の組分けでは、Slow-Saturation のグループに組み入れる場合、それぞれのグループに属する他の FP 核種の種類が同じであっても組分けは 2 方法となる。

入力データの形式は、以下の通りである。

(1) カード入力

# 01 Format (Ib)

NNN # 20 カードの総数、最大 350

# 02 Format (20X, A6, 32X, E12.5) NNN 枚  
必要

TNAME 核種名

S 2200 重みにする微視断面積の値

# 10 Format (12A6) ALAB 問題名

# 11 Format (8I6)

NFLUX Density Tape (次節参照) に貯えられている核種密度を算出する時、用いられた中性子束レベルの種類、最大 3

NUC Density Tape に貯えられている核種総数、最大 350

ID Density Tape に貯えられている核種密度を算出する時、用いられた時間分点の総数、最大 20

NUCP (I) I=1, 5

I 番目の組分け法における擬核分裂生成物の総数、最大 15. NUCP (I) をゼロとすると、I 番目の組分けは行な

わない。

# 12 Format (A6, 5I6) NUC 枚必要

FNAME 核種名

IGR (I) I=1.5

I 番目の組分け法において、FNAME で指定された核種は、IGR (I) の値に対応する番号の擬核分裂生成物として分類される。IGR (I) の最大値は 15

# 13 Format (E12.5) NFLUX 枚必要

FLUX 中性子レベルの値

(2) Density Tape

各核分裂生成物の密度を、次の形のカードに用意し、テープ (Density Tape) に貯える。

# 100 Format (A6) ダミー・カード

# 101 Format (A6)

XNAME 核種名

# 102 Format (6CE12.5, 1X)

(E(K), Y(K), K=1, 1X)

K 番目の時間分点における時間の値、その時の核種密度を隣り合わせて、ひと組にし、合わせて ID 組用意する。

以上 #100, #101, #102 のデータ・カードを、まず 1 番目の中性子束レベルについて、NUC 組用意し、ついで、2 番目, …, NFLUX 番目の中性子束レベルにおけるデータ・カードを順次積み重ねる。

### A.2 FIT

このコードは PFP の中性子束レベル  $\phi$  および照射時間  $t$  の依存性を考慮した巨視的熱中性子断面積  $\Sigma_o(\phi, t)$  を表わす (4.5) 式に含まれるフィッティング・パラメータ  $\delta$ ,  $\hat{Y}$  および定数項  $C$  を求めるものである。本コードの入力データは GROUP コードで計算された  $\Sigma_o(\phi, t)$  であり、算出したパラメータとそれらの値を用いた場合のフィッティングの誤差がリストで出力される。本コードは IBM 360-75 用に作成されており、選択によって IBM 763 型 CALCOMP プロッタを用い、GROUP コードの出力データ（オリジナルデータ）とフィッティングした計算値とをプロットと、両者の比較をグラフで行なうことが可能である。

以下にカードによる入力データの形式を示す。

# 01 Format (3I5, 4F10.7)

NCASE 計算するケースの数  
NCOUNT 収束回数  
N オリジナルデータの数, 最大 19  
ALFH  $\delta\phi t = an (t = n \times 10^6 \text{sec})$  とおき  
 $\exp(-\delta\phi t) = \exp(-an)$  の式中の  
 $\exp(-a) = x$  を変数とし, その変化量.  
 $\Delta x$  の値として, 第 1 回目のフィッティングの際に採用する値 ( $=0.05$ )  
SEALF 第 2 回目以後のフィッティングのときの  
 $\Delta x$  の値 ( $=0.001$ )  
SRPR 第 2 回目以後のフィッティングの過程で  
 $\Delta x$  を小さくしていく定数 ( $=0.1$ )  
BJAD フィッティングの収束条件 ( $=1 \times 10^{-6}$ )

# 02 Format (3F 10.7, I5)

FAI 中性子束レベル  $\phi$  の値  
TIME 燃焼時間の単位 ( $=1 \times 10^6 \text{sec}$ )  
SIUNIT 巨視的断面積  $\Sigma_0(\phi, t_i)$  のオリジナルデータの桁数 ( $=10^J$ )  
EP PFP の番号

# 03 Format (8F 10.7)

GROUP の出力データ (オリジナルデータ) である  $\Sigma_0(\phi, t_i)$  を  $i=1$  から順にカードにパンチする。

### A.3 FPPARA

このコードは, 本文 §4.3 に述べた方法で, PFP の多群定数  $\hat{R}_j(\phi)$  および補正因子  $f_j$  を算出する。 $\hat{R}_j$  および  $f_j$  はカードの形ででも出力できる。速中性子に対するこれらのデータは, エネルギーの高い方から低い方へ, 一方熱中性子に対するものは, 低い方から高い方へ配列されている。入力データおよびその形成は次の通りである。

(1) カードによる入力データ

# 01 Format (I6)

NVC #02 カードの総数, 最大 350

# 02 Format (A6, 5I6)

FNAME 核種名

IGR (I) 上記核分裂生成物がどの擬核分裂生成物に属するかを指定する。( $I=1, 5$ )

このカードは GROUP コードの入力カード #12 と同じもので良い。

# 03 Format (2I6)

NSET 作成すべき擬核分裂生成物の多群定数セットの総数

ID 照射時間分点の総数 ( $\leq 20$ )

# 04 Format (2I6)

NPEP 擬核分裂生成物番号

ICARD 上記生成物の多群定数をカードででも出力する場合は, 0 以外の値を入れる。

# 05 Format (6E 12.5)

SIGO (I) #04 カードで指定された擬核分裂生成物の  $E = 0.0253 \text{eV}$  における巨視的断面積の値, 照射時間順に並べる。( $I=1, ID$ ) このデータは, FIT コードの出力として得られる。

# 04, # 05 カードは一組にして合わせて NSET 組用意する。

(2) 磁気テープによる入力データと, そのフォーマット

次の 2 種類のデータセットをそれぞれ磁気テープに貯え, 入力する。

(i) 核分裂生成物の各エネルギー群における断面積の値 (これが貯えられているテープを C・テープと呼ぶ)

(ii) 核分裂生成物の各中性子束レベル, 照射時間点における密度の値 (これを D・テープと呼ぶ)

C・テープにおける核分裂生成物の総数は, D・テープのものより多くともよい。ただし, D・テープの核種に対応する C・テープ中の核種の現われる順序は, D・テープ中の順序と同じにしておく必要がある。

C・テープは GROUP コードを使用する時に作られたテープに貯えるデータおよびそのフォーマットは, 以下の通りである。

# 301 Format (3I6)

NCROSF 高速中性子エネルギー領域の群数 ( $\leq 55$ )

NCROST 熱中性子エネルギー領域の群数 ( $\leq 55$ )

JTYPE 核分裂生成物の組み分け方法の指定番号

# 302 Format (I6)

INCF 速中性子群の断面積セットが用意されている核種の総数

# 303 Format (A6)

FNAME 核種名

# 304 Format (6E 12.5)

SDATA (J) 高速中性子群における上記核種の断面積の値 (単位 barns)

$J=1, NCROSF$

# 303, # 304 のデータ・カードはひと組にし, 合わせて INCF 組用意する。次に

# 305 Format (6E 12.5)

E (K) 熱中性子群におけるエネルギーの値 (単位 eV)

$K=1, NCROST$

# 306 Format (I6)

INCT 熱中性子群の断面積が用意されている核

種の総数

# 307 Format (A6, I6, E12.5)

TNAME 核種名

ICTYPE 上記核種が、 $1/v$ -則に従う場合はゼロ、  
そうでない場合は 1 とする。

US エネルギー 0.0253 eV の場合の断面積  
の値 (単位 barns)

K=1, NCROST

# 307, # 308 のデータ・カードは、ひと組にし合わせて INCT 組用意する。

なお、# 304, # 308 カードにおける各核種の断面積の  
値は、高速中性子群、熱中性子群とも、エネルギーの低  
い方から高い方へ配列するようとする。

## 附録 B. データファイル

FP 炉定数の作成作業で得られたデータを整理し、テープに収納したデータファイルは、次のような構成である。

### 1. ファイル No.1

このファイルには PFP 核種を原子番号の順序に配列し、個々の FP 核種に関する下記のデータが収納されている。

- (1) その核種が属する PFP のグループの番号
- (2) 崩壊定数、収率 ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  および  $^{241}\text{Pu}$  の順), 热中性子吸収断面積 ( $\sigma_a(2, 200 \text{ m/sec})$ ), 共鳴積分値
- (3) 高速中性子領域 54 群の断面積
- (4) 热中性子領域 30 群の断面積
- (5) 分離領域および非分離領域の共鳴パラメータ
- (6)  $10^{12}$ ,  $10^{13}$  および  $10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  の各中性子束レベルにおいて、照射時間とそのときの存在量（密度）

### 2. ファイル No.2

このファイルにはグループ化された PFP に関する下記のデータがファイルされている。

- (1) 巨視的热中性子断面積  $\Sigma_0(\phi, t)$  のフィッティングパラメータ
- (2) 各中性子束レベル毎に高速中性子領域、热中性子領域でそれぞれ 54 群および 30 群の規格化炉定数  $\hat{R}_f^g(\phi)$
- (3)  $\hat{R}_f^g(\phi)$  を  $R_f^g(\phi, t)$  に変換する補正係数  $f_f^g(\phi, t)$
- (4) 重要な崩壊チェインに含まれる  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{I}$ ,  $^{149}\text{Na}$ ,  $^{149}\text{Pm}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{105}\text{Rh}$ ,  $^{105}\text{Ru}$ ,  $^{113}\text{Ag}$ ,  $^{113}\text{Cd}$ ,  $^{151}\text{Na}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{155}\text{Sm}$ ,  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Eu}$ ,  $^{157}\text{Gd}$  の崩壊定数、収率、高速中性子および热中性子領域の各々の多群炉定数

なお、このテープはシグマ研究委員会に保管されている。