

本資料は2003年12月25日付で訂正・追加区分、
変更する。

[技術情報室]

プルトニウム燃料遮蔽計算用中性子・ガンマ線結合 40群断面積セット“PSL-40”ライブラリの開発

Neutron-Gamma Coupled 40 Group Cross-Section Set “PSL-40”
for Plutonium Fuel Shielding Calculation

1979年7月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

この資料は、社内における検討、周知を目的

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

プルトニウム燃料遮蔽計算用中性子・ガンマ線結合
40群断面積セット“PSL-40”ライブラリの開発



実施責任者 湯本 録 三*
報告者 松本 忠 邦*
笹島 秀 吉*
上川 紘**
深野 宜 伸**

期間： 1977年8月～1979年6月

目的： プルトニウム燃料を取扱う核燃料施設の遮蔽計算を実施するにあたり、必然的に含まれてくるアメリカウム-241からの低エネルギー・ガンマ線の効果を輸送計算コード等を通して正確に評価できる中性子・ガンマ線結合標準断面積セットを開発する。

要旨： プルトニウム新燃料を取扱う、転換あるいは加工施設では、グローブ・ボックス等の遮蔽は鉛ガラスを使用しており金属鉛厚で数ミリ程度にしか相当しないし、集合体等の取り扱いでは、特別の遮蔽等は使用しない。これらの場合には、被ばく線量に大きく寄与するのは、 Pu^{241} が崩壊して生じる Am^{241} からのソフト・ガンマ線である。使用済燃料等を想定して作成されている既存の断面積セットでは、誤差が大きく実用上問題があり、種々の暫定的な方法でその問題に対処していた。

これらの問題を解決して、かつ使いやすい標準断面積ライブラリを用意しておく、手間も計算時間も節約することができる。もちろん従来のライブラリの機能は保存しなければならない。この主旨で新ライブラリ“PSL-40”を開発した。本ライブラリは中性子22群、ガンマ線18群、合計40群からなっており、中性子吸収による2次ガンマ線発生も評価可能である。また、ライブラリの形式は、既存のDLC-23C (Cask) ライブラリ等と同様であり、ANISNコード・タイプの輸送計算コードで使用可能である。ここでは、本ライブラリの作成方法と使用方法の説明ならびに他の計算例との比較によるデータ処理の妥当性の確認を行った。

*) プルトニウム燃料部設計課

***) センチュリ・リサーチ・センタ (株)

目 次

I	はじめに	1
II	PSL-40 ライブラリ・セットの概要	2
II.1	エネルギー群構成	2
II.2	群定数のデータ・ソースと処理コード	4
II.3	核種の選定	5
II.4	縮約スペクトル	5
II.5	ライブラリの形式	7
III	データ処理（作成方法）	8
III.1	中性子データの処理	8
III.2	ガンマ線データの処理	12
III.3	2次ガンマ線データの処理	13
III.4	中性子断面積とガンマ線断面積の結合	15
III.5	線量率変換係数の作成	17
IV	計算例の検討	18
IV.1	計算モデル	18
IV.2	計算結果	21
V	使用方法	39
VI	参考文献	45
付録 1.	処理コードの概説	51
付録 2.	エネルギー群分けの基本的な考え方	63
付録 3.	エネルギー群分けのための参考データ集	71

I. はじめに

原子力発電をとりまく核燃料サイクルの過程において、転換施設、加工工場等の設計に当って「プルトニウム」からの放射線被曝線量率を評価する事は非常に重要な課題となる。この被曝線量率の計算については、計算手法のみならず、その線質に応じた群定数を用意しておく事も肝要であり、また使用に際して簡便さが要求される。この事から、今回プルトニウム燃料核種からの放射線の線質に合わせ、かつ通常使用される遮蔽材、構造材核種をとりそろえた。群定数ライブラリー・セットを作成する事とした。

この場合特に考慮したのは、エネルギー群分けである。プルトニウム新燃料では通常取扱いに於いて Am^{241} からのソフト・ガンマの寄与が大きいので、それを正確に評価することが最も重要なこととなる。そのために、ライブラリー作成作業を開始する前に、中性子およびガンマ線の線源スペクトルの調査および既成ライブラリーのエネルギー群分け例等の調査を行った。そのときの参考データを付録3に示している。また、それらを参考にして今回作成するライブラリー・セット(PSL-40)のエネルギー群分けを決定したが、そのときの基本的な考え方のメモを付録2に示す。

本ライブラリーを使っての実測値の解析等の検証作業も1部終了しているが、それは別途報告することとして、本報告書ではPSL-40ライブラリーの作成方法と使用方法および他のライブラリー・セットによる計算値との比較によるデータ処理上の基本的なエラーのないことの確認までを報告するものとする。

II. P S L - 40ライブラリセットの概要

まず最初に、このライブラリ・セットを作成するに当たって設定した主な諸元をTable II. 1 に示す。

Table II.1 PSL-40 ライブラリ・セットの主な諸元

放射線	群数	PL次数	データ・ソース	処理コード	縮約スペクトル
中性子線	22	P3迄	GGC4ライブラリ	GAM-2 GATHER-2	乾燥系と溶液系の2種類
ガンマ線	18	P3迄	MUGライブラリ	MUG	$\phi(E)$ 一定
2次ガンマ線 (生成)	22→18	-	POPOP4ライブラリ	POPOP-4	-

個々の諸元について、それぞれ以下に述べる。

II.1 エネルギー群構成

このライブラリ・セットは中性子線 22 群、ガンマ線 18 群としこれらを 2 次ガンマ線で結合した 40 群ライブラリ・セットとなっている。このように決定するまでの参考データを付録 2, 付録 3 に示している。

i) 中性子線

中性子線の群構成については、上限エネルギー 14.92 MeV, 下限エネルギー 0.001 eV とし、この間を 22 群に分割している。この分割に際しては、燃料体核種からの中性子線強度が 1~2 MeV 近辺である事を考慮して、それ以下が幾分かまかく分割された群構成となっている。この群構造を Table II.2 に示す。

ii) ガンマ線

ガンマ線の群構成については上限エネルギー 10 MeV, 下限エネルギー 0.01 MeV とし、この間を等レサジー巾で 18 分割している。この群構造を Table II.2 に示す。

Table II.2 PSL-40 エネルギー群構造

中性子線		ガンマ線	
PSL-40 群番号	上限エネルギー (eV)	PSL-40 群番号	上限エネルギー (MeV)
1	1.492E+7	1	1.000E+1
2	1.000E+7	2	6.813E+0
3	6.703E+6	3	4.642E+0
4	4.966E+6	4	3.162E+0
5	4.066E+6	5	2.154E+0
6	3.012E+6	6	1.468E+0
7	2.466E+6	7	1.000E+0
8	1.827E+6	8	6.813E-1
9	1.353E+6	9	4.642E-1
10	9.072E+5	10	3.162E-1
11	6.081E+5	11	2.154E-1
12	4.076E+5	12	1.468E-1
13	1.111E+5	13	1.000E-1
14	1.503E+4	14	6.813E-2
15	3.355E+3	15	4.642E-2
16	5.830E+3	16	3.162E-2
17	1.013E+2	17	2.154E-2
18	2.902E+1	18	1.468E-2
19	1.068E+1	*	1.000E-2
20	3.059E+0		
21	1.125E+0		
22	4.140E-1		
*	1.000E-3		

* 下限エネルギー

II.2 群定数のデータ・ソースと処理コード

PSL-40 ライブラリ・セットの作成に用いたデータ・ソースおよびその処理コードは、それぞれ1体となっている事からここでそれらの概要について記述する。データ処理の詳細は次章で述べる。なお処理コードについては付録1で概説されている。

i) 中性子線データ

中性子断面積はGGC-4 ライブラリ⁽¹⁾と称されているものから処理されている。これは高速中性子領域のGAM-2⁽²⁾ライブラリと、熱中性子領域のGATHER-2⁽³⁾ライブラリが結合されたものである。

これらのデータ処理に際してはGGC-4⁽¹⁾コードを用いて、熱群カット・オフエネルギーを0.414 eVとし、高速群ではGAM-2ライブラリを、熱群ではGATHER-2ライブラリをそれぞれデータ・ソースとしている。

このGGC-4コードおよびそのライブラリは次の様な特長を有している。

- ①高速群、熱群共、核種の数が豊富である。
- ②データ自身ENDF-B/IIを基本としていると見られ、比較的信頼性が高いと判断される。
- ③データ処理については高速群と熱群が結合された状態で出力される。
- ④高速群では非等方散乱項がP3迄処理可能である。
- ⑤群定数をANISN⁽⁷⁾コードの入力形式で出力する事ができる。

ii) ガンマ線データ

ガンマ線データは、通常ガンマ線群定数作成によく用いられるMUGライブラリ⁽⁴⁾を使用している。データ処理についてもMUG⁽⁴⁾コードを用いている。これらのコードおよびライブラリは次の様な特長をもっている。

- ①核種の数が豊富である。
- ②ガンマ線データがポイントエネルギーで内蔵されており、エネルギー群数最大100群迄処理可能である。
- ③非等方散乱項(P_L)も最大12迄得る事が可能である。
- ④群定数をANISN⁽⁷⁾コードの入力形式で出力する事ができる。

iii) 2次ガンマ線データ

2次ガンマ線収率データについては最近よく使用されているPOPOP-4ライブラリを使用している。そのデータ処理に際しては、GGC-4で得られた中性子吸収断面積を入力し、POPOP-4コードを通して2次ガンマ線発生群定数の作成を行なっている。このコードおよびライブラリは次の様な特長をもっている。

- ①各種の中性子反応データが収録されている。
- ②約50核種のデータが用意されており、今回対象としている核種がほぼ含まれている。
- ③作成された群定数がANISNコードの入力形式で出力される。

IV) 線量率変換係数

中性子線に対する線量率変換係数は米国 OAKRIDGE 国立研究所から発表されている遮蔽計算用ライブラリ DLC-23C⁽⁸⁾ 通称「CASKライブラリ」から採取している。

ガンマ線に対する線量率変換係数はMUGライブラリに内蔵されているデータより作成している。

PSL-40ライブラリ・セットの線量率変換係数として作成されたものは次章のTable III. 6に示されている。

II.3 核種の選定

今回作成したPSL-40ライブラリには燃料体核種として7核種、構造材、遮蔽材としては通常よく使用される25核種を選定し、合計32核種を内蔵させた。もちろん必要に応じ核種を追加する事も容易に可能である。

これらの核種一覧表は、Table II.3に掲げた。

II.4 縮約スペクトル

i) 中性子断面積の縮約

中性子スペクトルは、特に燃料体の形態に大きく依存しており燃料製造過程に於いても、いくつかの形態がとられる。そこで、これらの形態を最も典型的な2つの形態、すなわち乾燥系と溶液系の2種に分けて、それぞれのスペクトルを選定して縮約断面積を作成した。

従って、中性子断面積は各核種共それぞれ2種類の群定数をもち、核種I.D番号により使い分ける事になっている。

ii) 1次ガンマ線の縮約

ガンマ線スペクトルについても、線源の種類や遮蔽体の構成等に大きく依存するが典型的なものを選定するのは、かえって実用性に乏しくなる恐れがある。従って今回は、縮約スペクトルとして、エネルギーに対して一定値の線束を用いた。

Table II.3 PSL-40収録核種

H	水素
Be	ベリリウム
B	ホウ素
C	炭素
N	窒素
O	酸素
F	フッ素
Na	ナトリウム
Mg	マグネシウム
Al	アルミニウム
Si	ケイ素
K	カリウム
Ca	カルシウム
Ti	チタニウム
Cr	クロム
Mn	マンガン
Fe	鉄
Ni	ニッケル
Cu	銅
Zr	ジルコニウム
Mo	モリブデン
Cd	カドミウム
Ta	タンタル
W	タングステン
Pb	鉛

U-235	} ウラン ^{注)}
U-238	
Pu-238	} プルトニウム ^{注)}
Pu-239	
Pu-240	
Pu-241	
Pu-242	

注) ガンマ線断面積は同位体の区別は無視している。

II.5 ライブラリの形式

この種の遮蔽計算用ライブラリ（断面積の形で内蔵）は、通常輸送計算を前提として作成され、このPSL-40も同様である。

この輸送計算には、1次元輸送コードであるANISNが最もよく使用されており、このPSL-40ライブラリ・セットも、ANISNコードのためのライブラリ処理用補助プログラムを使用できる形式（通称ANISN形式）を採用している。

本ライブラリの使用法については後章(V)で述べる。

Ⅲ. データ処理（作成方法）

この章では実際に、データ・ライブラリからそれぞれの処理コードを通して群定数を作成した過程について述べる。

このデータ処理は次の5つの部分から構成されている。

- ① 中性子断面積の作成
- ② ガンマ線断面積の作成
- ③ 2次ガンマ線生成断面積の作成
- ④ 線量率変換係数の作成
- ⑤ 中性子断面積とガンマ線断面積の結合

これらの処理過程およびデータの流れをブロック・チャートとしてまとめたものを Fig 3.1 に示す。以下この項目に沿って説明する。

なお、この作業を実施するに際して取扱われるデータの量が多く、処理過程での人的操作の誤りを生ずる可能性が考えられた。そこで極力人的操作を削減する事とし、すべて計算機からの出力量（テープあるいはカード形式）がそのまま次の処理工程の入力として扱える様な方式を採用した。

Ⅲ.1 中性子線データ処理

この処理過程ではPSL-40ライブラリ・セットの中性子断面積を作成すると同時に、2次ガンマ線断面積計算のための反応断面積（ $n-\gamma$ 反応， $n-f$ 反応）の計算も同時に行なっている。

ここで処理された中性子断面積は次にガンマ線断面積と結合されPSL-40となる。また γ 線発生の為の反応断面積は2次ガンマ線生成断面積作成の入力量として用いられる事になる。

i) データ・ソースと処理コード

中性子断面積は、データ・ソースとしてGGC-4ライブラリを採用し、スペクトル計算および縮約計算にはGGC-4コードを用いている。

ii) スペクトル計算

中性子スペクトルは前にも記した通り、燃料体の形態として乾燥系と溶液系の2種類を想定して計算している。

実際の計算モデルとしては乾燥系ではPuO₂粉体を採用し、溶液系ではPu+水系を採用した。この2つのモデルによる計算体系及び計算条件は Table Ⅲ.1 にまとめた。

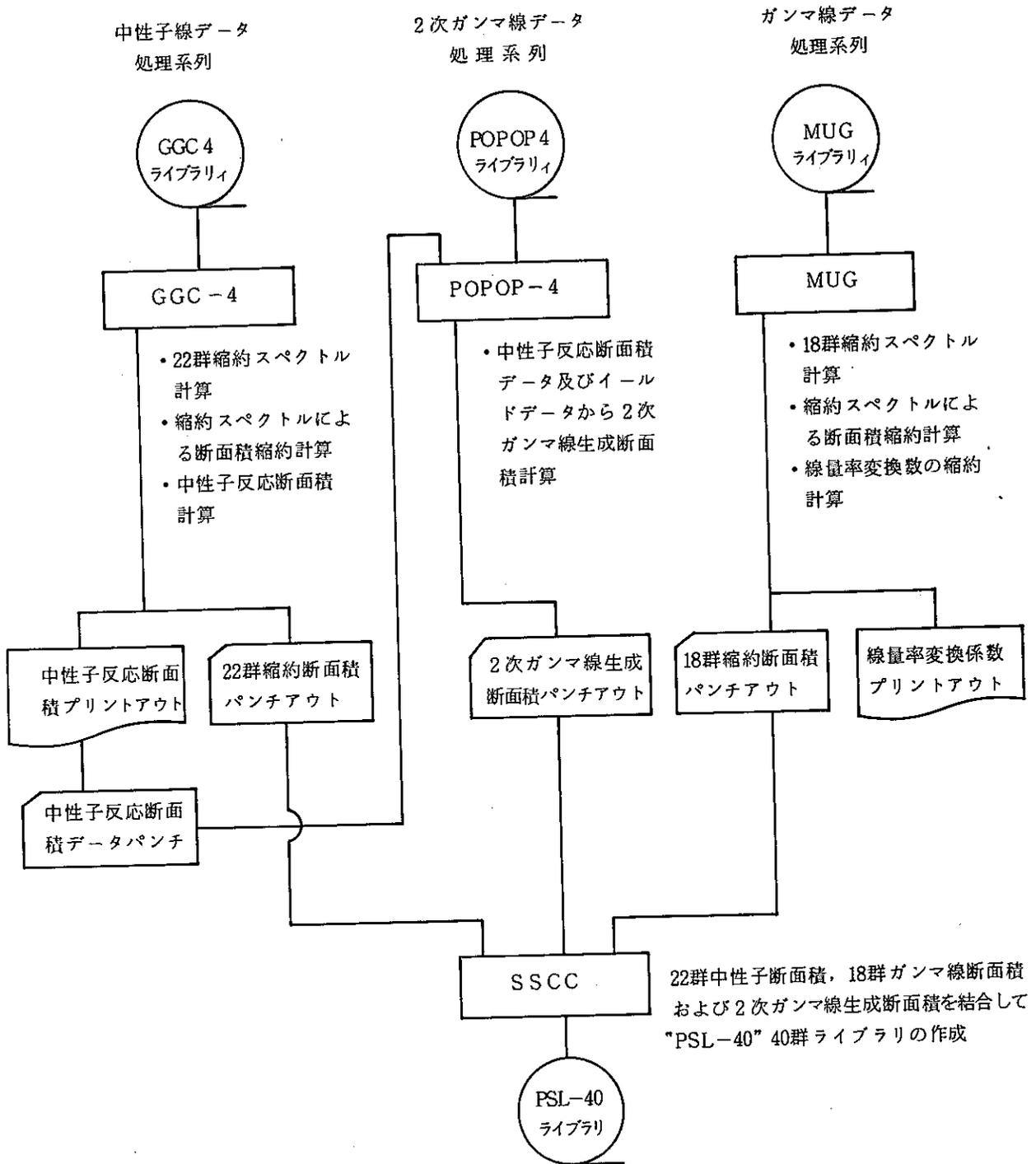


Fig. 3.1 PSL-40 ライブラリ・セット作成過程とデータの流れ

Table III 1 PSL-40での中性子断面積作成のためのスペクトル計算モデル
(処理コード: GGC-4)

計算条件	乾燥系	溶液系
燃料形態	PuO ₂ 粉体系 4 g PuO ₂ /cc + 5 w/o H ₂ O	Pu-水系 250 g Pu/ℓ + H ₂ O
原子数密度 (10 ²⁴ /cc)		
Pu-239	8.4435 E-3	5.9847 E-4
Pu-240	4.4254 E-4	3.1367 E-5
H	1.3372 E-2	6.5954 E-2
O	2.4458 E-2	3.2977 E-2
Pu 同位体組成・ バックリング 形状 Flux 計算法 共鳴計算核種	(乾燥系, 溶液系共通)	
	Pu 239 : 95 w/o Pu 240 : 5 w/o	
	0.0	
	平板モデル	
	B ₃ 近似	
	U238, Pu 240, Pu 242	

III) 縮約計算

GGC-4 コード内で行なわれている中性子断面積の縮約計算は次式によっている。

$$\sigma^I = \sum_{i \in I} \sigma^i \cdot \phi^i / \sum_{i \in I} \phi^i$$

$$\sigma^{I \rightarrow J} = \sum_{i \in I} \phi^i \cdot \sum_{j \in J} \sigma^{i \rightarrow j} / \sum_{i \in I} \phi^i$$

ここで, i, j : 詳細群 index

I, J : PSL-40での群index

σ : 反応断面積 (σ_a, σ_f 等)

σ^{ij} : 散乱断面積

ϕ : 中性子束

縮約群構成については前章でも述べたが, ここで再びまとめると **Table III.2** の様になる。

Table III.2 中性子断面積縮約群とデータ・ライブラリ

エネルギー領域	PSL 40での群	ソース・ライブラリと群	上限/下限エネルギー
高速中性子領域	1群~21群	GAM 2 ライブラリ 1~99群	14.92 Mev ~ 0.414 ev
熱中性子領域	22群	GATHER-2 ライブラリ 1~44群	0.414 ev ~ 0.001 ev

尚, PSL-40のエネルギー群構造はすでに前章の **Table II.2** に示している。

IV) 核分裂スペクトルの縮約

また、ここでPSL-40の群構造でのPu-239の核分裂中性子スペクトルを用意した。これをTable III.3に掲げた。これは、PSL-40を用いて中性子増倍がある場合の実際の中性子線被曝線量率を計算する際に必要となるものである。

Table III.3 PSL-40の群構造でのPu-239の核分裂中性子スペクトル*

Group	Fission Fraction
1	1.19783 E-3
2	1.42311 E-2
3	3.96858 E-2
4	4.86723 E-2
5	1.07098 E-1
6	8.81984 E-2
7	1.41679 E-1
8	1.35100 E-1
9	1.48740 E-1
10	1.05998 E-1
11	6.91602 E-2
12	8.49005 E-2
13	1.53379 E-2
14	0.0
15	0.0
16	0.0
17	0.0
18	0.0
19	0.0
20	0.0
21	0.0
22	0.0

* GAM-2 ライブラリ・データより算出

V) 2次ガンマ線発生核反応断面積

GGC-4コードでは、それぞれの核種について $(n-\gamma)$ 反応断面積が縮約された形で出力される。今回の作業ではこれを中性子の2次ガンマ線発生断面積としてPOPOP-4コードへの入力としている。ただし共鳴核種については、この $(n-\gamma)$ 反応断面積が単独で出力されないため、中性子捕獲断面積 σ_c をこれに代用した。

また核分裂核種についてはFission- γ が発生する事から核分裂断面積も2次ガンマ線発生断面積としてPOPOP-4コードへ送られる。

VI) 出力量

中性子断面積としてPSL-40に組込まれるものは次の4種の断面積である。

- σ_a ; 吸収断面積
- $\nu\sigma_f$; 中性子発生断面積
- σ_t ; 全断面積
- σ_L^{ij} ; 遷移断面積

この遷移断面積の非等方散乱項はP3迄用意されている。但し熱中性子群(PSL-40では第22群)についてはP1迄しかデータがないため、P2, P3の項は0となっている。

III.2 ガンマ線データ処理

このデータ処理はPSL-40ライブラリ・セットのガンマ線断面積を作成するものである。ここで処理されたガンマ線断面積は、次に中性子断面積と結合されPSL-40となる。

i) データ・ソースと処理コード

ガンマ線断面積は、データ・ソースとしてMUGライブラリを、またその縮約処理コードとしてMUGコードを採用している。

ii) 縮約計算

MUGライブラリが内蔵している断面積はポイント・エネルギー毎に与えられており、今回用いた縮約スペクトルは一定線束(エネルギーには依存しない)である事から、断面積のエネルギー区間での積分は台形積分となっている。

縮約群は上限エネルギー10 Mev, 下限エネルギー0.01Mevとしこの間を等レサジー巾で18分割している。この群構造はすでに前章のTable II.2に示している。

iii) 出力量

ガンマ線断面積として出力されるものは以下の通りである。

σ_a 吸収断面積

σ_t 全断面積

σ^{ij} 遷移断面積

この遷移断面積の非等方散乱項は P3 迄用意している。

また MUG ライブラリでのデータは同位体の区別がないため燃料体核種での同位体はすべて同じ値となっている。

III.3 2次ガンマ線データ処理

このデータ処理は PSL-40 ライブラリ・セットにおける 2次ガンマ線生成断面積の作成部分に当る。

ここでは、先に GGC-4 コードで計算された中性子のガンマ線発生核反応断面積と POPOP-4 ライブラリがもっている 2次ガンマ線収率データと組合わされ中性子とガンマ線とを結ぶ 2次ガンマ線生成断面積が作成される。

i) データ・ソースと処理コード

2次ガンマ線生成断面積のデータ・ソースとしては、前にもふれた通り、中性子によるガンマ線発生核反応断面積は GGC-4 ライブラリから、また各反応に対してのガンマ線収率データは POPOP-4 ライブラリからもってきている。

これらのデータ処理には POPOP-4 コードを用いている。

ii) 断面積と収率の結合

すべての核種についてガンマ線発生中性子断面積として $\sigma(n-\gamma)$ が用意されており、POPOP-4 ライブラリでの $(n-\gamma)$ 反応によるガンマ線発生収率がそれぞれの核種で組合わされている。ただし POPOP-4 ライブラリでは燃料体核種のうち Pu 238, Pu 239, Pu 241, Pu 242 の 4 核種は $n-\gamma$ 収率が収録されていない。このため Pu 239, Pu 241 は U235 の収率を代用し、Pu 238, Pu 242 については Pu 240 の収率を代用した。

また核分裂核種については fission- γ を考慮するため、核分裂断面積 σ_f と fission- γ 収率が組合わされている。但し POPOP-4 ライブラリでの fission- γ 収率データは U235 しか収録されておらず、他の核分裂核種についてはこれで代用した。また酸素については $n-\gamma$ 反応が無い (GGC 4 ライブラリ) ため 2次ガンマ線発生には寄与していない事になっている。

各核種の中性子断面積とガンマ線収率の組合せを **Table III.4** に示した。

Table III.4 中性子反応断面積と2次ガンマ線収率との組合せ

核種	収率データ		中性子データ
	データI.D.	反応	
H	10101	N- γ	N- γ
Be	40101	"	"
B	50103	"	"
C	60102	"	"
N	70102	"	"
O*	—	—	無し
F	90102	N- γ	N- γ
Na	113101	"	"
Mg	120101	"	"
Al	130103	"	"
Si	140104	"	"
K	190102	"	"
Ca	200103	"	"
Ti	220101	"	"
Cr	240104	"	"
Mn	250101	"	"
Fe	260110	"	"
Ni	280104	"	"
Cu	290104	"	"
Zr	400102	"	"
Mo	420103	"	"
Cd	480102	"	"
Ta	731107	"	"
W	740112	"	"
Pb	820102	"	"

核種	収率データ		中性子データ
	データI.D.	反応	
U-235	925101	N- γ	N- γ
	925806	Fis- γ	Fission
U-238	925806	"	"
	928112	N- γ	Capture
Pu-238	925806	Fis- γ	Fission
	940102	N- γ	N- γ
Pu-239	925101	"	"
	925806	Fis- γ	Fission
Pu-240	925806	"	"
	940102	N- γ	Capture
Pu-241	925101	"	N- γ
	925806	Fis- γ	Fission
Pu-242	925806	"	"
	940102	N- γ	Capture

*酸素はn- γ 反応が無いためこの組合せは存在しない。

Ⅲ.4 中性子断面積とガンマ線断面積の結合処理

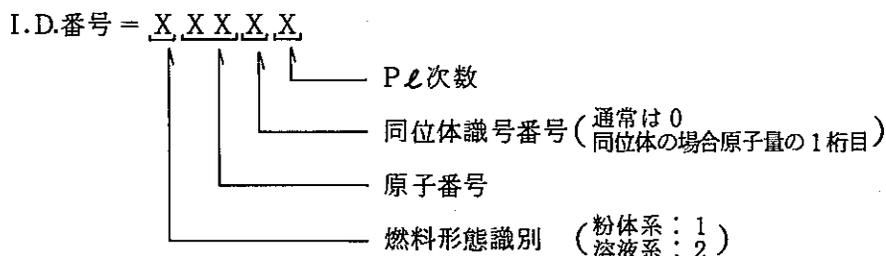
ここで、これまでに作成した22群中性子断面積、18群ガンマ線断面積および2次ガンマ線生成断面積を結合し、40群PSL-40ライブラリ・セットにまとめ上げる事になる。

実際のデータ処理については計算部分はなく、それぞれ入力された断面積を再編集するのが主たる処理内容である。従って、その処理に関して特別に記述する必要もないと思われるが、その概略を記すと次の様な処理内容になる。

- ① PSL-40の第1群から第22群に中性子断面積をはめ込む。
- ② PSL-40の第23群から第40群に18群ガンマ線断面積をはめ込む。
- ③ 中性子群（1～22群）からガンマ線群（23～40群）への遷移（減速散乱）断面積として2次ガンマ線生成断面積をはめ込む。

i) 核種のI.D.番号

PSL-40として出来上がったライブラリには、次の様な規則で各核種に5桁のI.D.番号を割り当てている。



核種I.D.番号表は、Table III.5 に示した。

ii) ライブラリの形式

各核種は上記のI.D.番号の小さいものから順にTapeに収録されている。

また書込方式はANISNコードの補助プログラムであるRETRIEVALコードが直接読込可能な様に、断面積はカード・イメージの形で書かれている。

Table III.5 核種 I. D. 表

Nuclide	粉 体 系				溶 液 系			
	P0	P1	P2	P3	P0	P1	P2	P3
H	10100	10101	10102	10103	20100	20101	20102	20103
Be	10400	10401	10402	10403	20400	20401	20402	20403
B	10500	10501	10502	10503	20500	20501	20502	20503
C	10600	10601	10602	10603	20600	20601	20602	20603
N	10700	10701	10702	10703	20700	20701	20702	20703
O	10800	10801	10802	10803	20800	20801	20802	20803
F	10900	10901	10902	10903	20900	20901	20902	20903
Na	11100	11101	11102	11103	21100	21101	21102	21103
Mg	11200	11201	11202	11203	21200	21201	21202	21203
Al	11300	11301	11302	11303	21300	21301	21302	21303
Si	11400	11401	11402	11403	21400	21401	21402	21403
K	11900	11901	11902	11903	21900	21901	21902	21903
Ca	12000	12001	12002	12003	22000	22001	22002	22003
Ti	12200	12201	12202	12203	22200	22201	22202	22203
Cr	12400	12401	12402	12403	22400	22401	22402	22403
Mn	12500	12501	12502	12503	22500	22501	22502	22503
Fe	12600	12601	12602	12603	22600	22601	22602	22603
Ni	12800	12801	12802	12803	22800	22801	22802	22803
Cu	12900	12901	12902	12903	22900	22901	22902	22903
Zr	14000	14001	14002	14003	24000	24001	24002	24003
Mo	14200	14201	14202	14203	24200	24201	24202	24203
Cd	14800	14801	14802	14803	24800	24801	24802	24803
Ta	17300	17301	17302	17303	27300	27301	27302	27303
W	17400	17401	17402	17403	27400	27401	27402	27403
Pb	18200	18201	18202	18203	28200	28201	28202	28203
U-235	19250	19251	19252	19253	29250	29251	29252	29253
U-238	19280	19281	19282	19283	29280	29281	29282	29283
Pu-238	19480	19481	19482	19483	29480	29481	29482	29483
Pu-239	19490	19491	19492	19493	29490	29491	29492	29493
Pu-240	19400	19401	19402	19403	29400	29401	29402	29403
Pu-241	19410	19411	19412	19413	29410	29411	29412	29413
Pu-242	19420	19421	19422	19423	29420	29421	29422	29423

III.5 線量率変換係数の作成

この線量率変換係数はPSL-40ライブラリ・セットの中でも独立に存在するものであり、ここでその作成方法について述べる。

中性子線に対する線量率変換係数は米国 OAKRIDGE 国立研究所から発表されている遮蔽計算用ライブラリ DLC-23 C⁽⁸⁾ 通称「CASK」に記載されている値から内挿して求めている。

ガンマ線に対する線量率変換係数は MUG ライブラリに内蔵されているものから、ガンマ線断面積と同様な手法により PSL-40 の群構造に合わせて縮約されたものである。

ここで作成された線量率変換係数は Table III.6 に掲げた。

Table III.6 線量率変換係数

中性子線		ガンマ線	
群	$\left(\frac{\text{mrem/hr}}{\text{n/sec-cm}^2}\right)$	群	$\left(\frac{\text{mR/hr}}{\text{Photon/sec-cm}^2}\right)$
1	1.810 E-1	1	8.346 E-3
2	1.471 E-1	2	6.134 E-3
3	1.400 E-1	3	4.674 E-3
4	1.350 E-1	4	3.536 E-3
5	1.300 E-1	5	2.671 E-3
6	1.250 E-1	6	2.009 E-3
7	1.250 E-1	7	1.464 E-3
8	1.280 E-1	8	1.051 E-3
9	1.350 E-1	9	7.202 E-4
10	1.270 E-1	10	4.800 E-4
11	9.800 E-2	11	3.094 E-4
12	4.650 E-2	12	1.940 E-4
13	1.150 E-2	13	1.330 E-4
14	5.200 E-3	14	1.310 E-4
15	4.320 E-3	15	2.112 E-4
16	4.680 E-3	16	4.465 E-4
17	4.680 E-3	17	9.874 E-4
18	4.500 E-3	18	2.232 E-4
19	4.320 E-3		
20	4.140 E-3		
21	3.960 E-3		
22	3.780 E-3		

IV：計算例の検討

この章では、今回作成したPSL-40ライブラリ・セットの確認計算の方法およびその結果について記述する。

確認計算の方法として、以前に実施されたプルトニウム転換施設における混合機からの被曝線量率計算を同一モデルで、このPSL-40ライブラリ・セットを用いて解き、それらの結果を比較検討する方法を採用した。

計算手法は混合機の軸方向を1次元輸送計算コードANISNで解いている。対象とした放射線は中性子線およびガンマ線であり、中性子線については燃料体中での増倍を考慮し、ガンマ線については2次ガンマ線を考慮した。

前回の計算で用いた群定数セットは、中性子線と2次ガンマ線に関してはCASKライブラリをそのまま用い、1次ガンマ線に関してはMUGライブラリから導出した15群セットを用いている。参考データとしてCASKライブラリの群構造が付録3.5.4および付録3.6.4に示されている。またこの時のガンマ線15群の群構造は付3.5.5に示されている。

IV.1 計算モデル

この計算モデルは先にも述べた通り、以前に実施したプルトニウム転換施設設計時の混合機からの被曝線量計算の1次元モデルをそのまま採用した。

以下このモデルについて説明する。

1) 形状

この1次元モデルは短い円筒型（円盤状）の混合機をその中心軸方向に、混合機の中心から混合機室の外までを板状（SLAB）モデルとして取扱ったものである。

その時の構造とメッシュ設定をFig 4.1に示す。

領域番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
材 質	PuO ₂ 粉 体	ステン レ ス	空 気	ボロン ポリエ チレン	カドミ ウム	ステン レ ス	空 気	アクリ ライ ト	ボロン ガラ ス	鉛 ガラ ス	空 気
領域巾(cm)	2.5	5.0	7.5	5.0	0.2	0.2	29.0	1.0	2.0	1.0	346.6
メッシュ数	5	5	7	5	3	3	11	3	5	3	20

→ 平板の厚さ方向

Fig. 4.1 混合機線量率計算形状

ii) 材質組成

この計算で用いた各材質の組成を Table IV.1 に示す。

Table IV.1 混合機線量率計算における各材質の組成

材 質	核 種	原子数密度 ($n \times 10^{24}/\text{cc}$)	材 質	核種	原子数密度 ($n \times 10^{24}/\text{cc}$)
PuO ₂ 粉体 $\rho = 0.8 \text{ (g/cc)}$	O ¹⁶	3.546 E-3	アクリライト $\rho = 1.19 \text{ (g/cc)}$	H	5.7334E-2
	Pu-238	2.130 E-5		C	3.5834E-2
	Pu-239	9.614 E-4		O	1.4334E-2
	Pu-240	4.400 E-4	ボロン入り ガラス $\rho = 2.65 \text{ (g/cc)}$	B	1.3543E-3
	Pu-241	2.366 E-4		O	4.1114E-2
	Pu-242	1.047 E-4		Na	2.8325E-3
		Si		1.6772E-2	
SUS-304 $\rho = 8.03 \text{ (g/cc)}$	C	3.2240E-4	K	5.0827E-3	
	Si	3.4448E-3	鉛ガラス $\rho = 4.36 \text{ (g/cc)}$	B	4.4807E-4
	Cr	1.8137E-2		O	4.1439E-2
	Mn	1.3204E-3		Na	4.2365E-4
	Fe	5.8382E-2		Si	1.4857E-2
	Ni	7.8254E-3		K	1.1150E-3
		Ca		2.3411E-4	
空気 $\rho = 0.0013 \text{ (g/cc)}$	N	4.2434E-5	Pb	6.4707E-3	
	O	1.1427E-5			
ボロン入りポリ エチレン $\rho = 1.09 \text{ (g/cc)}$	H	3.5448E-2			
	B	5.6574E-3			
	C	3.5339E-2			
	O	8.4862E-3			
カドミウム $\rho = 8.642 \text{ (g/cc)}$	Cd	4.6305E-3			

iii) 線 源

PuO₂ 粉体からの放射線強度は中性子線, ガンマ線共PURSEコード⁽⁹⁾により計算された値を使用している。

中性子線線源強度は 629.19 (neutrons/sec-cm³) であり, エネルギーは 1.0 Mevに固定している。

ガンマ線線源強度は Table N.2 に示した。

Table N.2 PuO₂ 粉体からのガンマ線強度

PSL-40 群	ガンマ線線源強度 (Photons/sec-cm ³)
1~3	0.0
4	1.5032E+2
5	9.3151E+2
6	4.6370E+3
7	1.6426E+4
8	7.3087E+4
9	9.9260E+4
10	7.7557E+5
11	1.6471E+6
12	4.4213E+6
13	3.1472E+6
14	1.6489E+8
15	2.2550E+6
16	2.0175E+5
17~18	0.0

IV) 計算条件

1次元輸送計算時の主な計算条件は下記の通りである。

計算形状	平板
境界条件	中心：反射条件 外側：真空条件
非等方散乱項	P _ℓ , ℓ=1
角度分点	S _n , n=8
中性子増倍	Pu-239の核分裂中性子スペクトルを入力し Outer iterationによって増倍を考慮している。

Ⅳ.2 計算結果

ここでは、線量率の空間分布および中性子、ガンマ線スペクトルの計算結果の各ライブラリセット間の比較を行い、さらに主要核種の断面積を直接各ライブラリ・セット間で比較し、本ライブラリ・セット(PSL-40)の作成におけるデータ処理にエラーのなかったことを検討確認する。

ⅰ) 線量率空間分布の比較

1次元輸送計算の結果から、主要な空間点での中性子線およびガンマ線の線量率を

Table Ⅳ.3 にまとめた。

またこれらの線量率空間分布の各ライブラリによる比較を、中性子線については **Fig 4.2** にガンマ線については **Fig4.3** にそれぞれ掲げた。

ⅱ) 中性子、ガンマ線スペクトルの比較

中性子線およびガンマ線のスペクトルに関しては、燃料体、第2領域の SUS, それに最外の空気の3点について、それぞれ使用したライブラリ毎に下記に示した図に掲げた。

放射線スペクトル	使用ライブラリ	図番号
中性子線スペクトル	PSL-40(乾燥系)	Fig. 4.4
	PSL-40(溶液系)	Fig. 4.5
	CASK	Fig. 4.6
ガンマ線スペクトル	PSL-40(乾燥系)	Fig. 4.7
	PSL-40(溶液系)	Fig. 4.8
	MUG(15群セット)	Fig. 4.9*

* MUG(15群セット)での値は2次ガンマ線を含んでいない。

Table IV.3 混合機周辺での線量率分布

計 算 点		中性子線線量率 (mrem/hr)			ガンマ線線量率 (mrem/hr)		
		PSL-40		CASK	PSL-40 ^{*)}		MUG (15群セット)
		乾 燥 系	溶 液 系		乾 燥 系	溶 液 系	
燃料体	中心	1.64E+3	1.65E+3	1.62E+3	6.48E+3	6.48E+3	6.73E+3
	外側	1.58E+3	1.59E+3	1.58E+3	5.40E+3	5.40E+3	5.53E+3
SUS	内側	1.38E+3	1.39E+3	1.37E+3	9.36E+2	9.37E+2	9.03E+2
	外側	5.81E+2	5.85E+3	5.65E+2	4.44E+1	4.46E+2	4.13E+1
空気	中央	5.10E+2	5.13E+3	4.90E+2	3.45E+1	3.48E+2	3.38E+1
ボロン入り	内側	4.47E+2	4.48E+2	4.26E+2	3.34E+1	3.36E+1	3.27E+1
ポリエチレン	外側	1.73E+2	1.73E+2	1.61E+2	2.39E+1	2.42E+1	2.34E+1
カドミウム	内側	1.55E+2	1.55E+2	1.45E+2	2.09E+1	2.11E+1	2.04E+1
	外側	1.52E+2	1.52E+2	1.41E+2	1.79E+1	1.81E+1	1.73E+1
SUS	内側	1.50E+2	1.50E+2	1.39E+2	1.73E+1	1.75E+1	1.66E+1
	外側	1.46E+2	1.46E+2	1.35E+2	1.63E+1	1.66E+1	1.57E+1
空気	中央	1.45E+2	1.45E+2	1.33E+2	1.61E+1	1.63E+1	1.55E+1
アクリライト	内側	1.38E+2	1.38E+2	1.27E+2	1.59E+1	1.61E+1	1.52E+1
	外側	1.18E+2	1.18E+2	1.07E+2	1.52E+1	1.54E+1	1.45E+1
ボロン入り ガラス	内側	1.12E+2	1.12E+2	1.01E+2	1.45E+1	1.47E+1	1.38E+1
	外側	8.46E+1	8.45E+1	7.73E+2	1.07E+1	1.09E+1	1.01E+1
鉛ガラス	内側	7.69E+1	7.68E+1	7.06E+1	8.54	8.69	7.97
	外側	6.11E+1	6.10E+1	5.66E+1	5.63	5.74	5.12
空気	内側	5.68E+1	5.67E+1	5.29E+1	5.15	5.25	4.66
	中央	5.64E+1	5.63E+1	5.24E+1	5.14	5.24	4.65
	外側	5.14E+1	5.13E+1	4.75E+1	4.99	5.09	4.51

*) 乾燥系と溶液系に差があるのは、2次ガンマ線の発生量の差による。
断面積自身は、両者の区別をしていない。

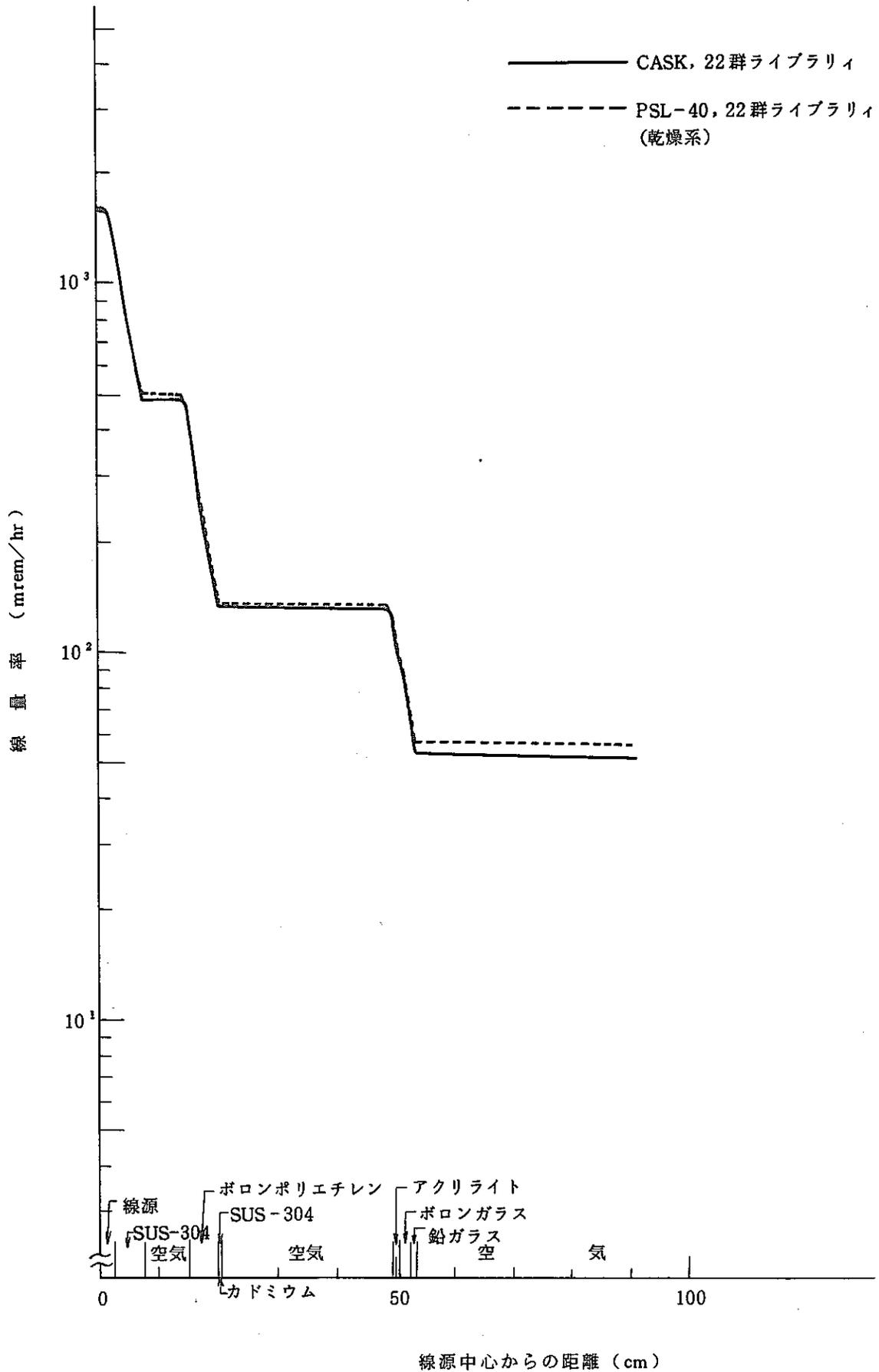


Fig. 4.2 混合機周辺の中性子線線量率分布

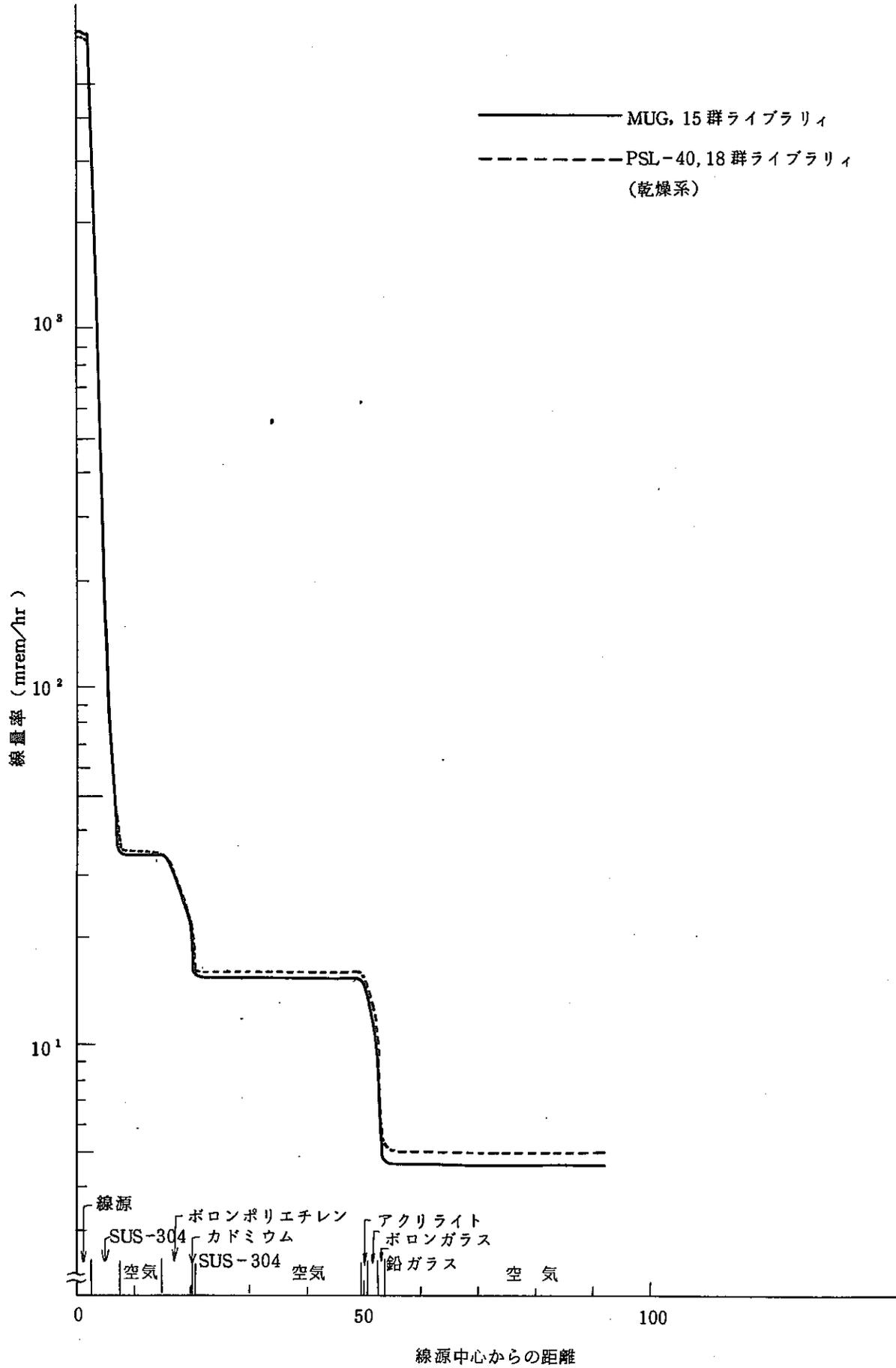


Fig. 4.3 混合機周辺のガンマ線線量率分布



Fig. 4.4 NEUTRON FLUX SPECTRUM - PSL-40 LIB. POWDER

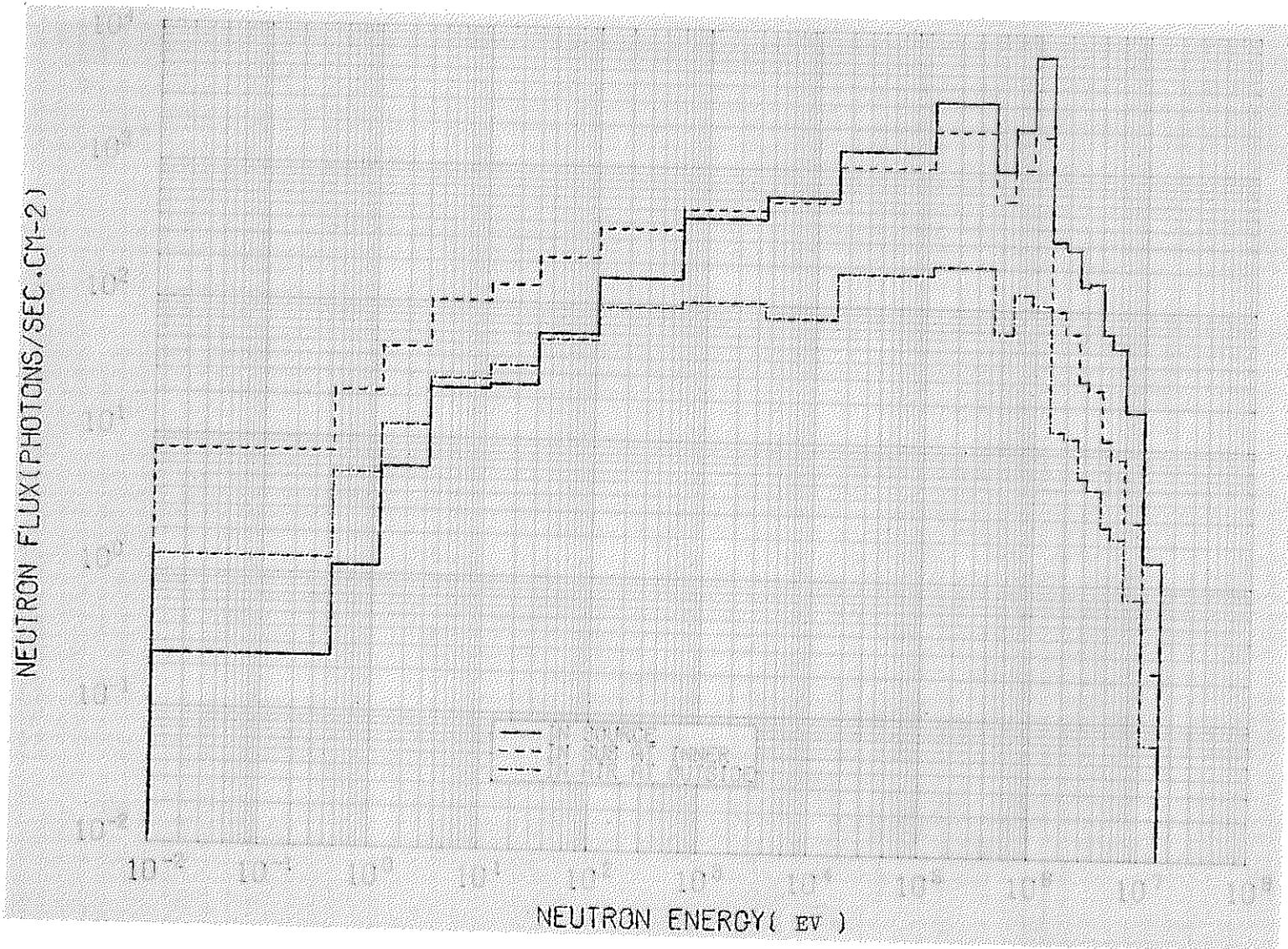


Fig. 4.5 NEUTRON FLUX SPECTRUM - PSL-40 LIB. LIQUID

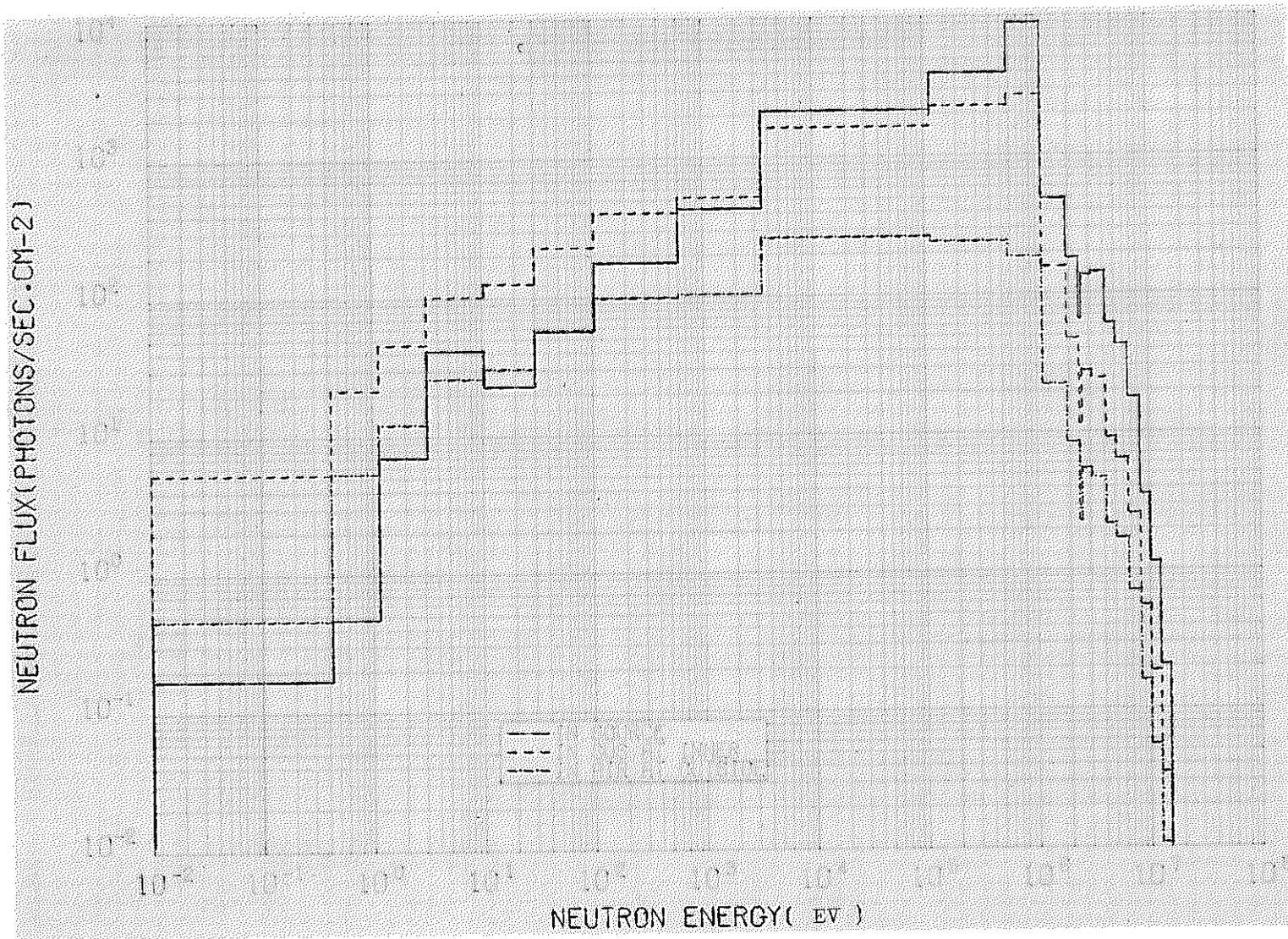


Fig. 4.6 NEUTRON FLUX SPECTRUM - CASK LIB

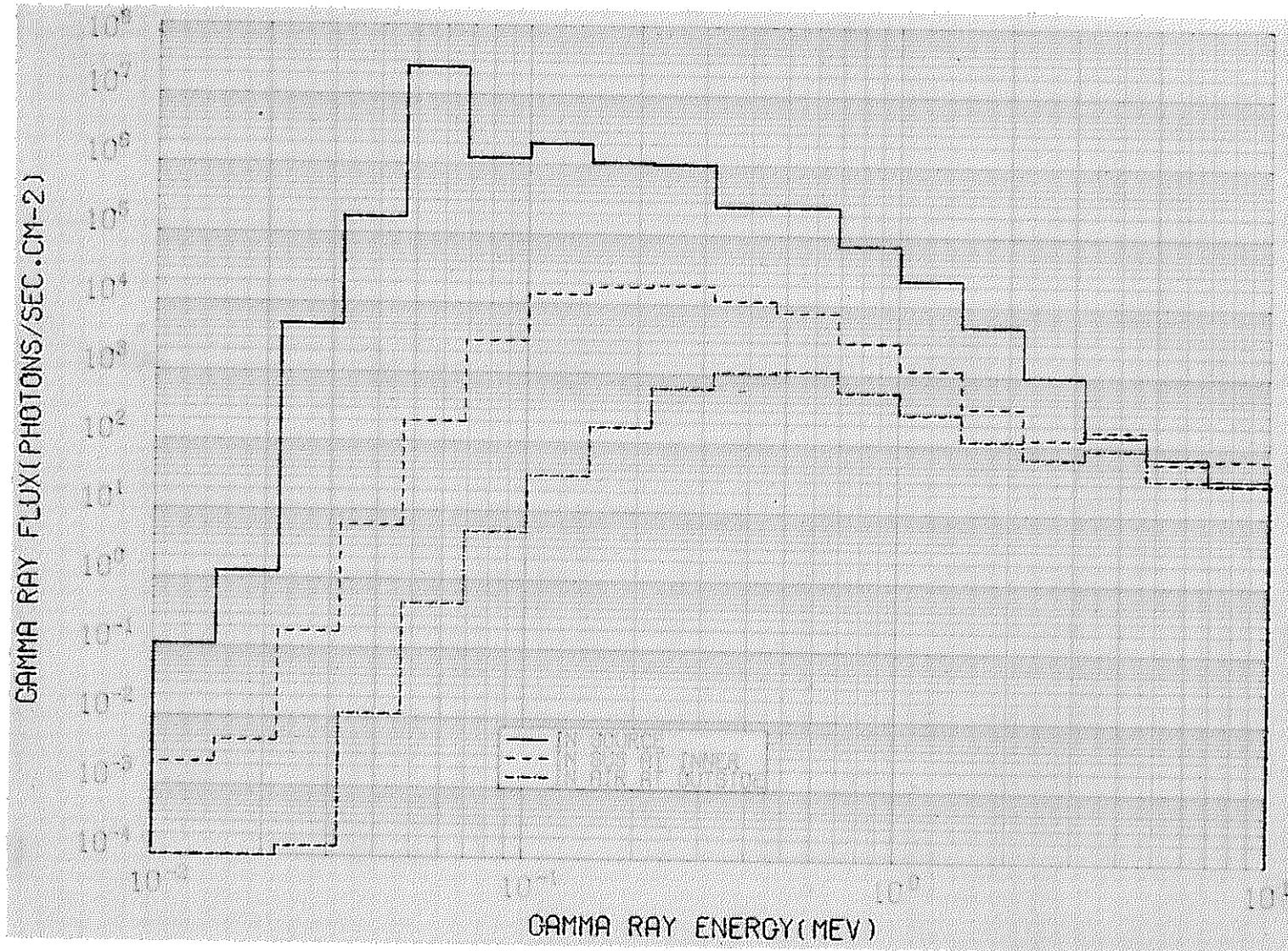


Fig. 4.7 GAMMA RAY FLUX SPECTRUM - PSL-40 LIB. POWDER

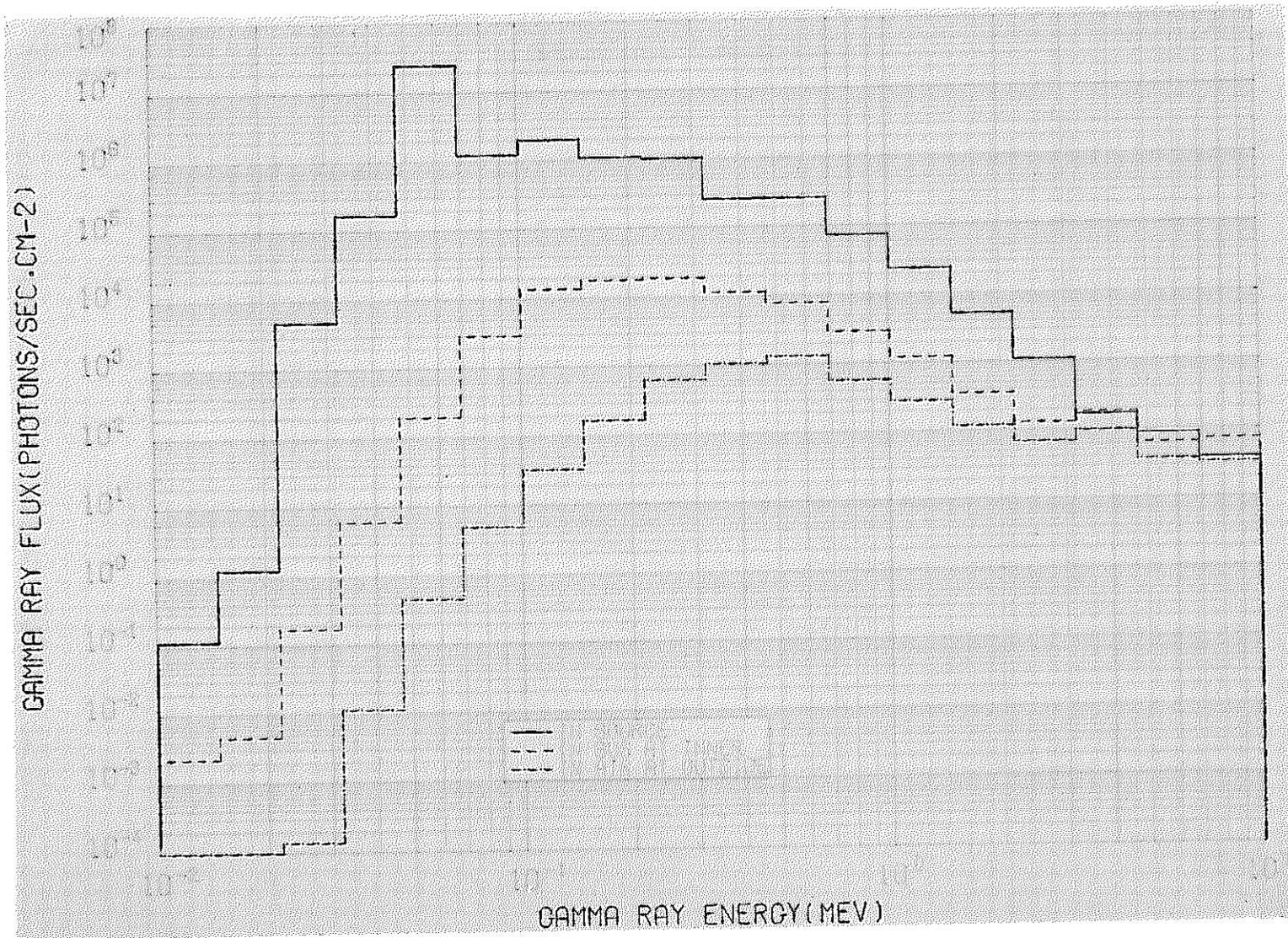


Fig. 4.8 GAMMA RAY FLUX SPECTRUM - PSL-40 LIB. LIQUID

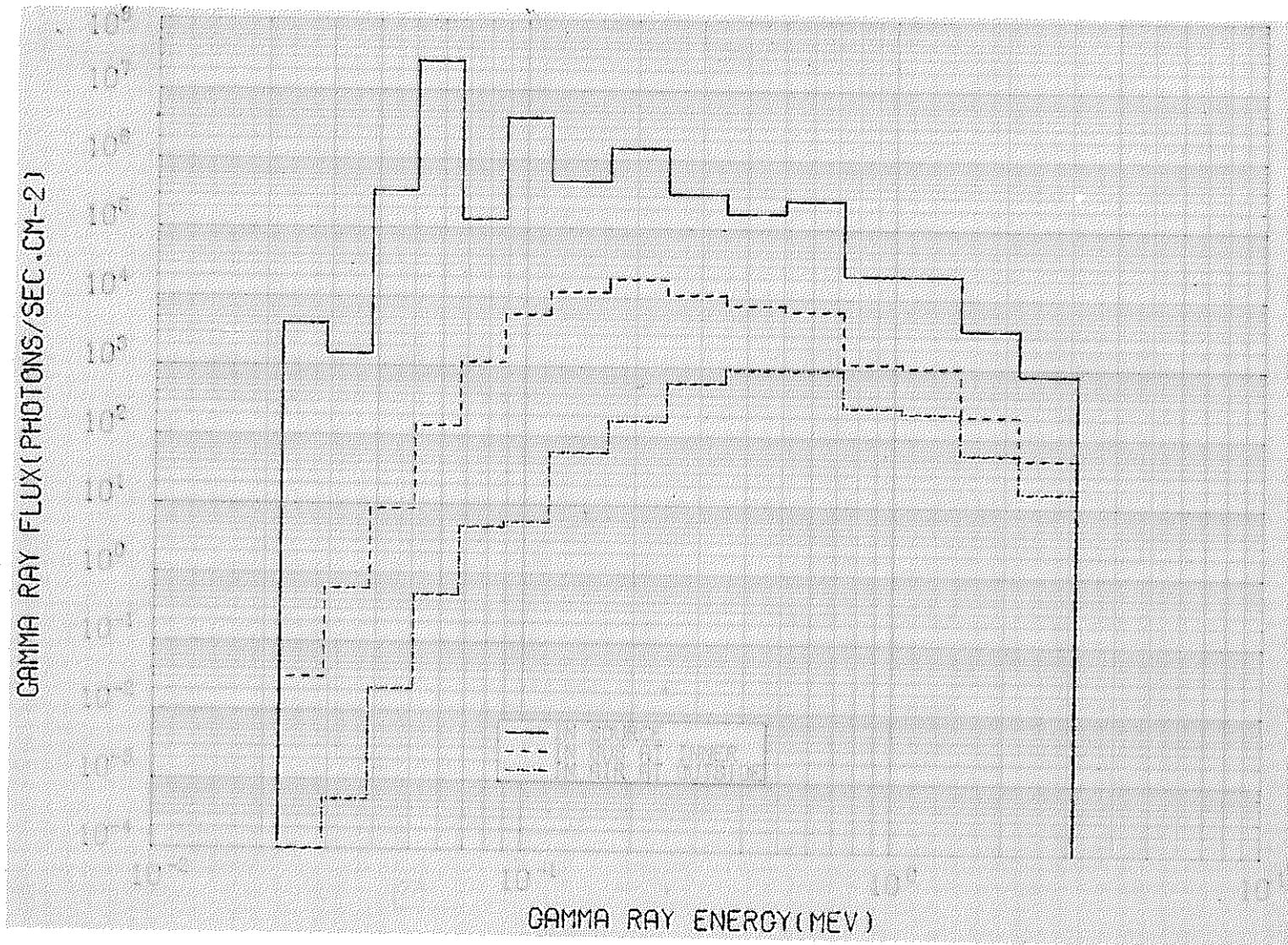


Fig. 4.9 GAMMA RAY FLUX SPECTRUM - MUG (15 GROUP)
(2次ガンマ線は含まない。)

iii) 断面積セットの比較

またここでPSL-40ライブラリ・セット(Powder用, Liquid用)とCASKライブラリ・セットでの断面積を酸素, 鉄, Pu-239について直接比較プロットし, 下記の図に掲げた。

酸素の中性子全断面積比較図は		Fig. 4. 10
鉄の	"	Fig. 4. 11
Pu-239の	"	Fig. 4. 12

酸素のガンマ線全断面積比較図は		Fig. 4. 13
鉄の	"	Fig. 4. 14
Pu-239の	"	Fig. 4. 15

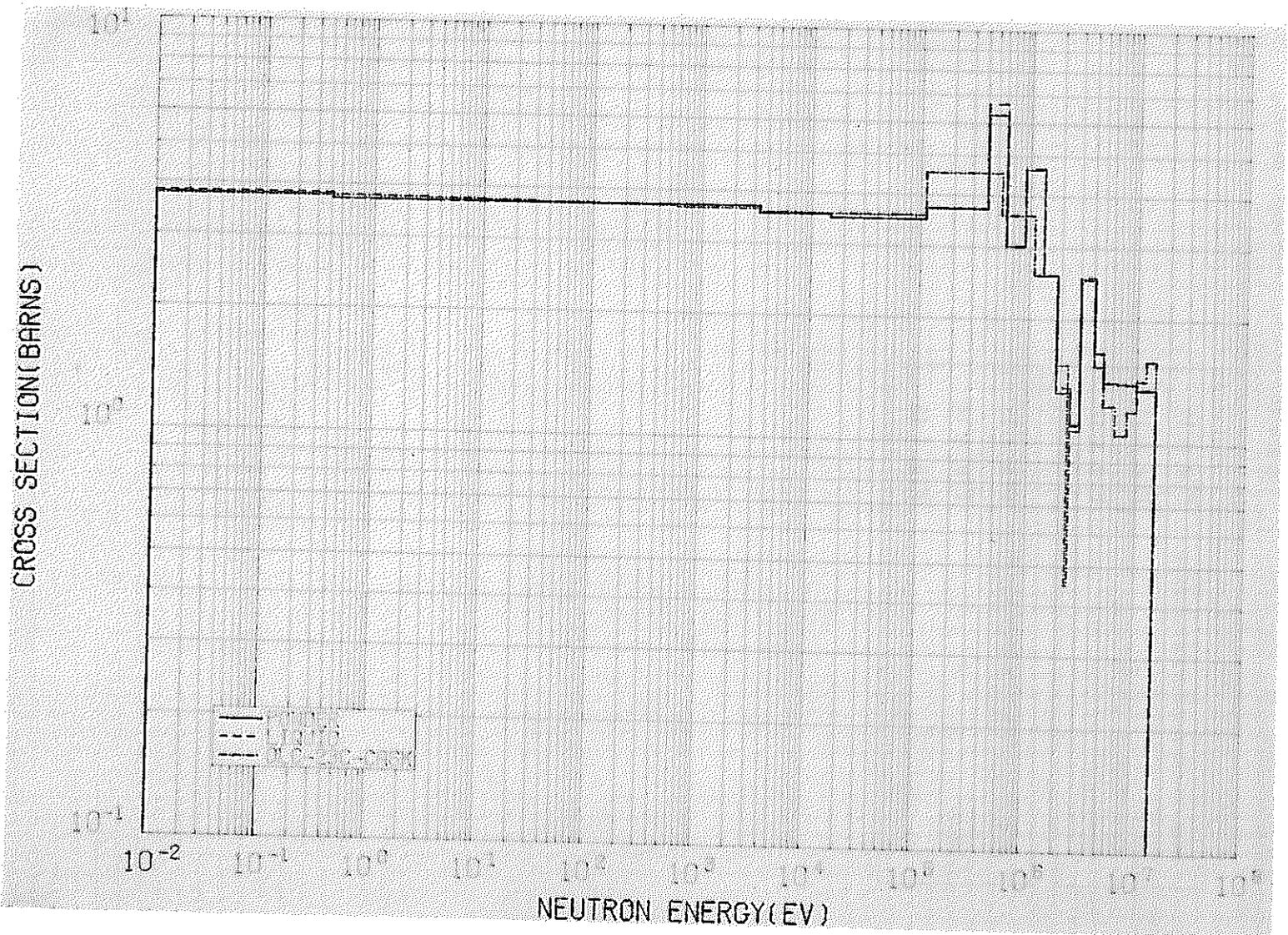


Fig. 4.10 NEUTRON TOTAL CROSS SECTION - OXYGEN

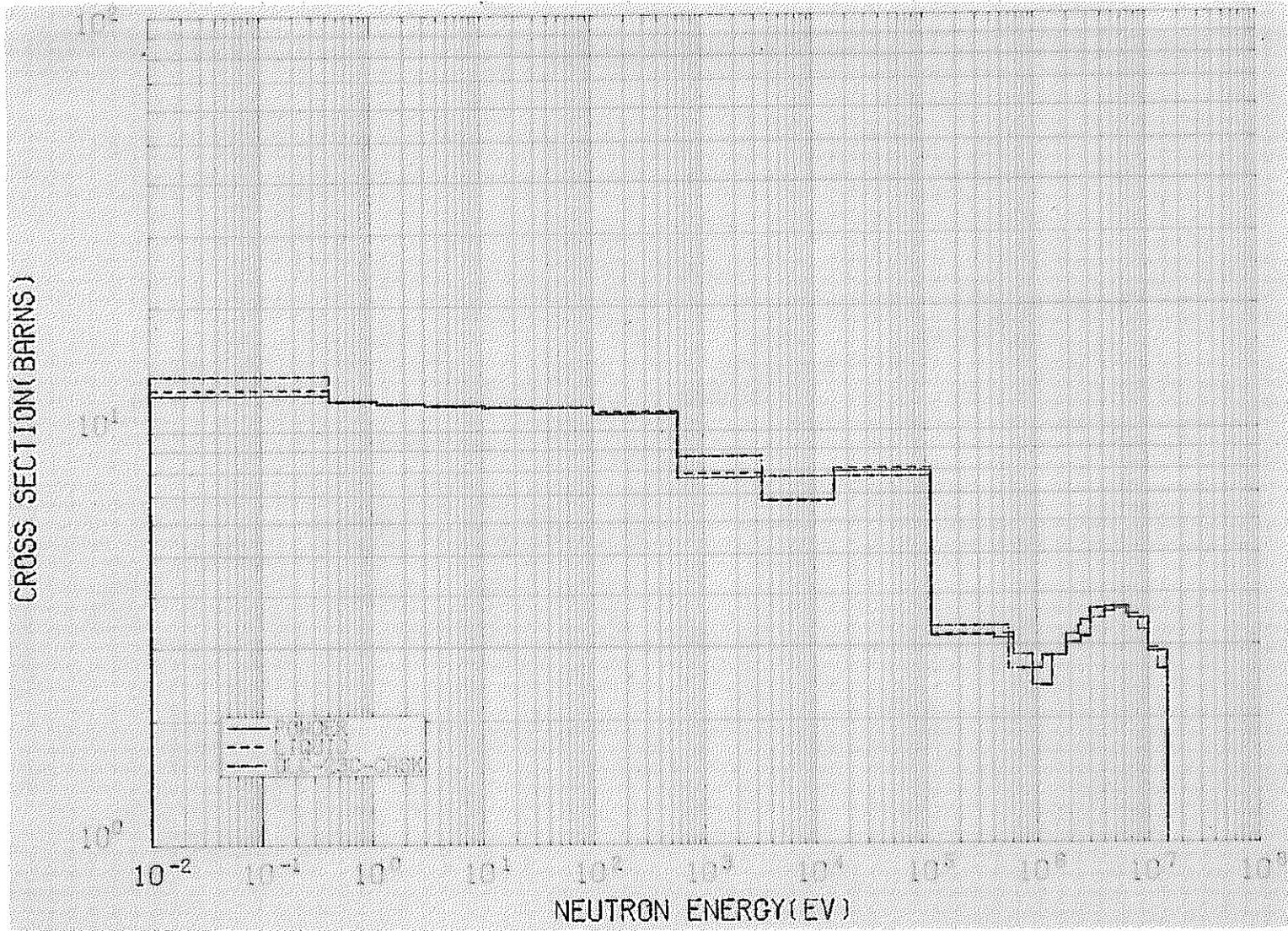


Fig. 4.11 NEUTRON TOTAL CROSS SECTION - IRON

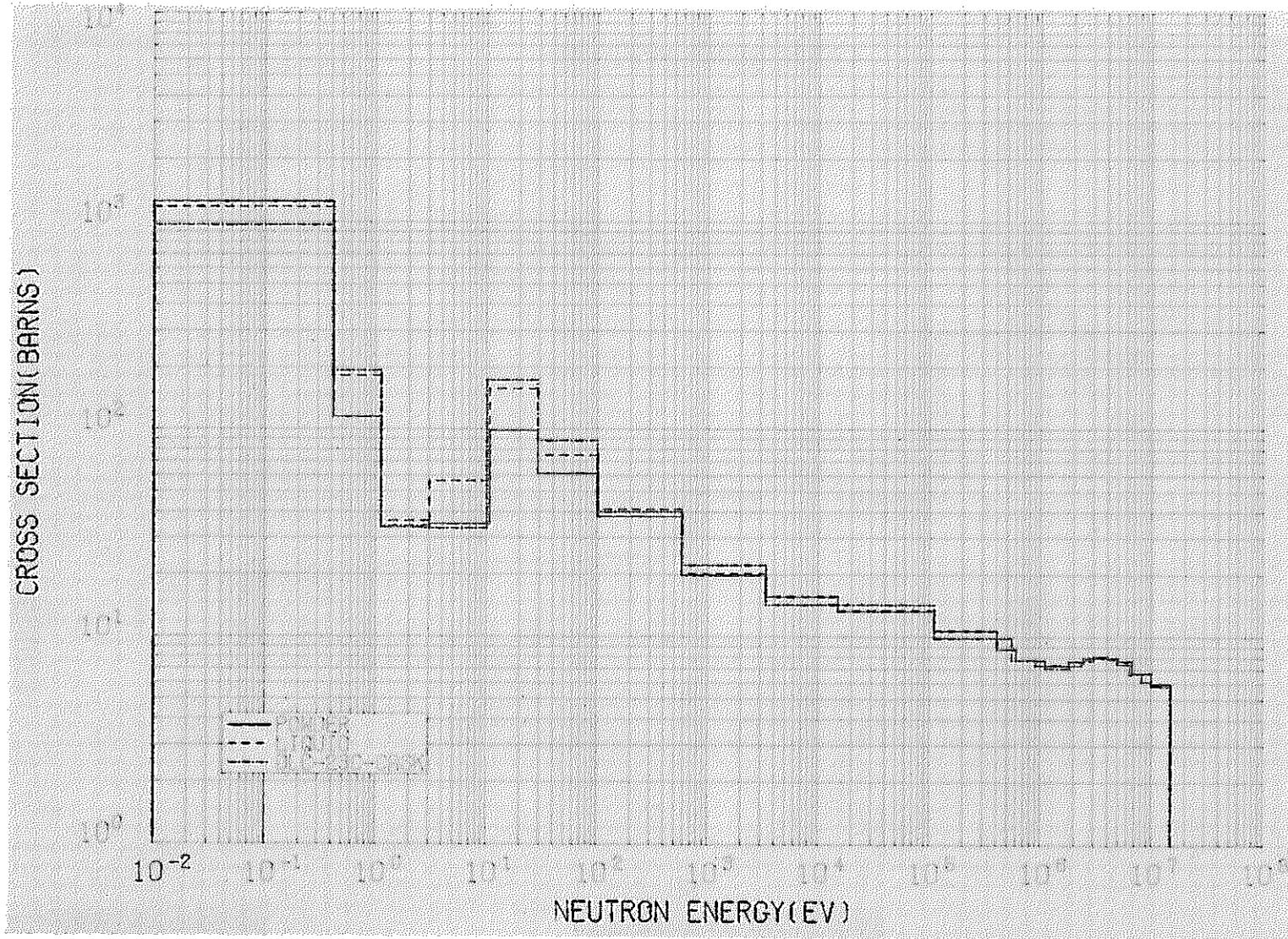


Fig. 4.12 NEUTRON TOTAL CROSS SECTION - PLUTONIUM-239

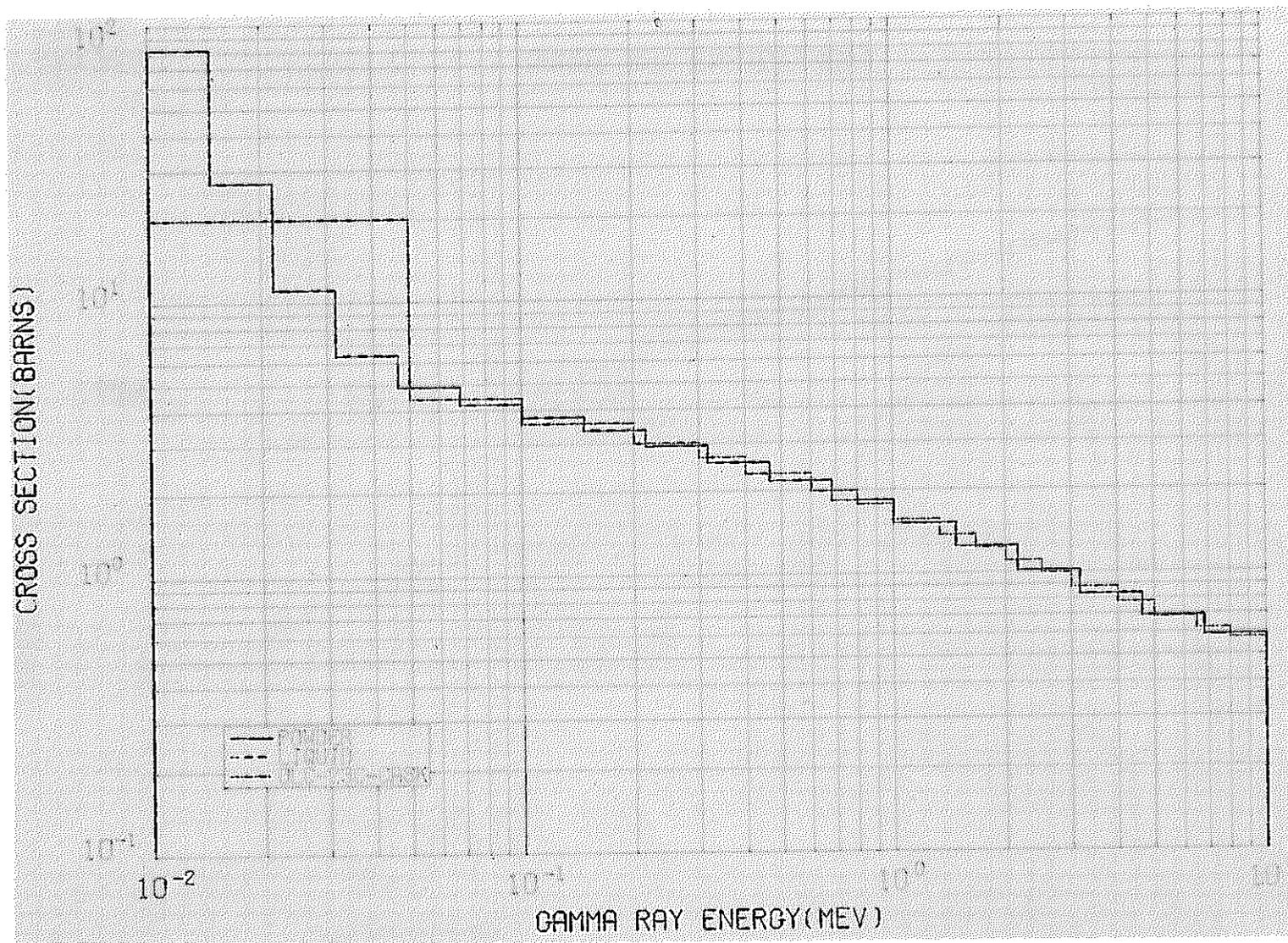


Fig. 4.13 GAMMA RAY TOTAL CROSS SECTION - OXYGEN

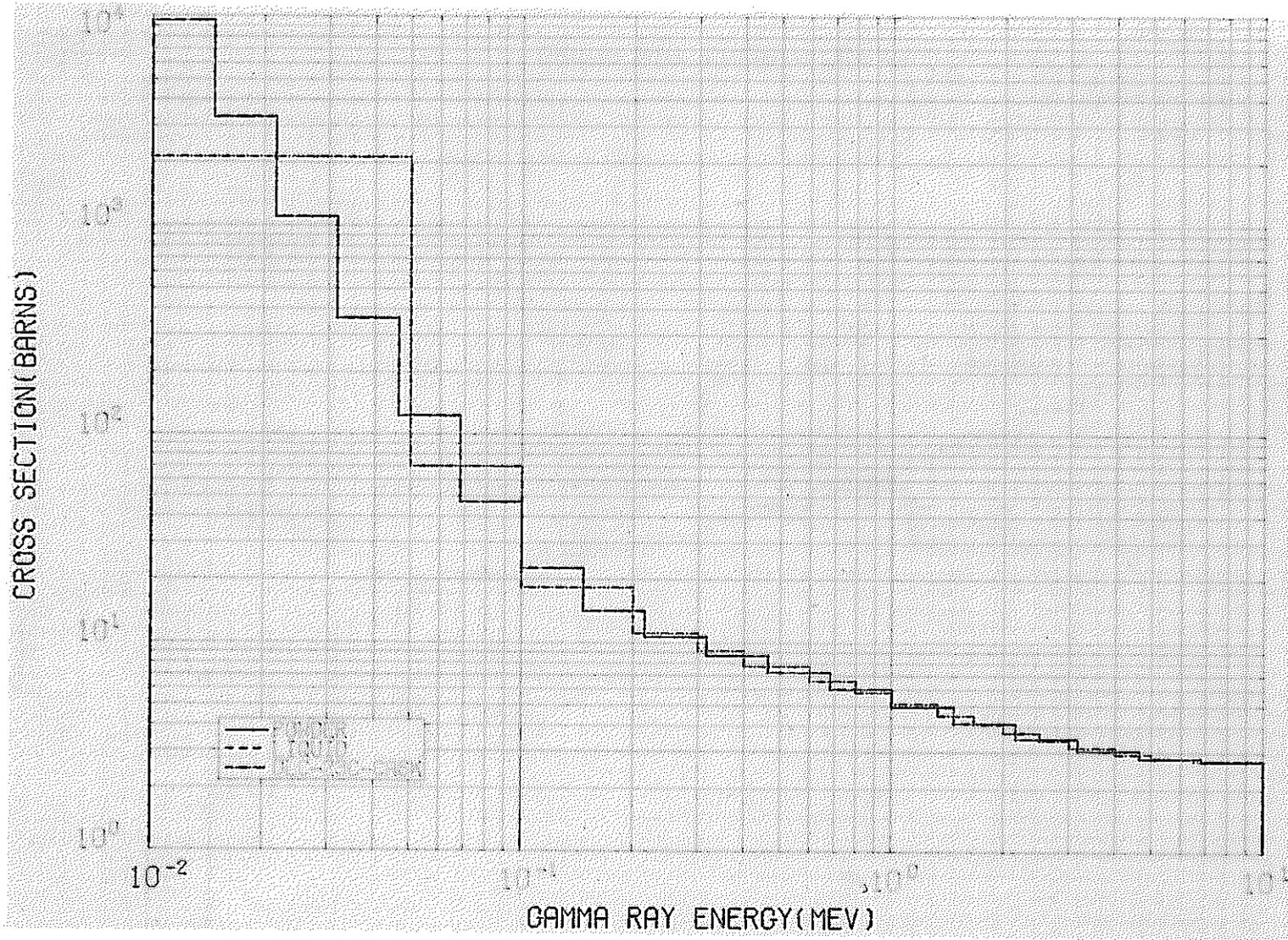


Fig. 4.14 GAMMA RAY TOTAL CROSS SECTION - IRON

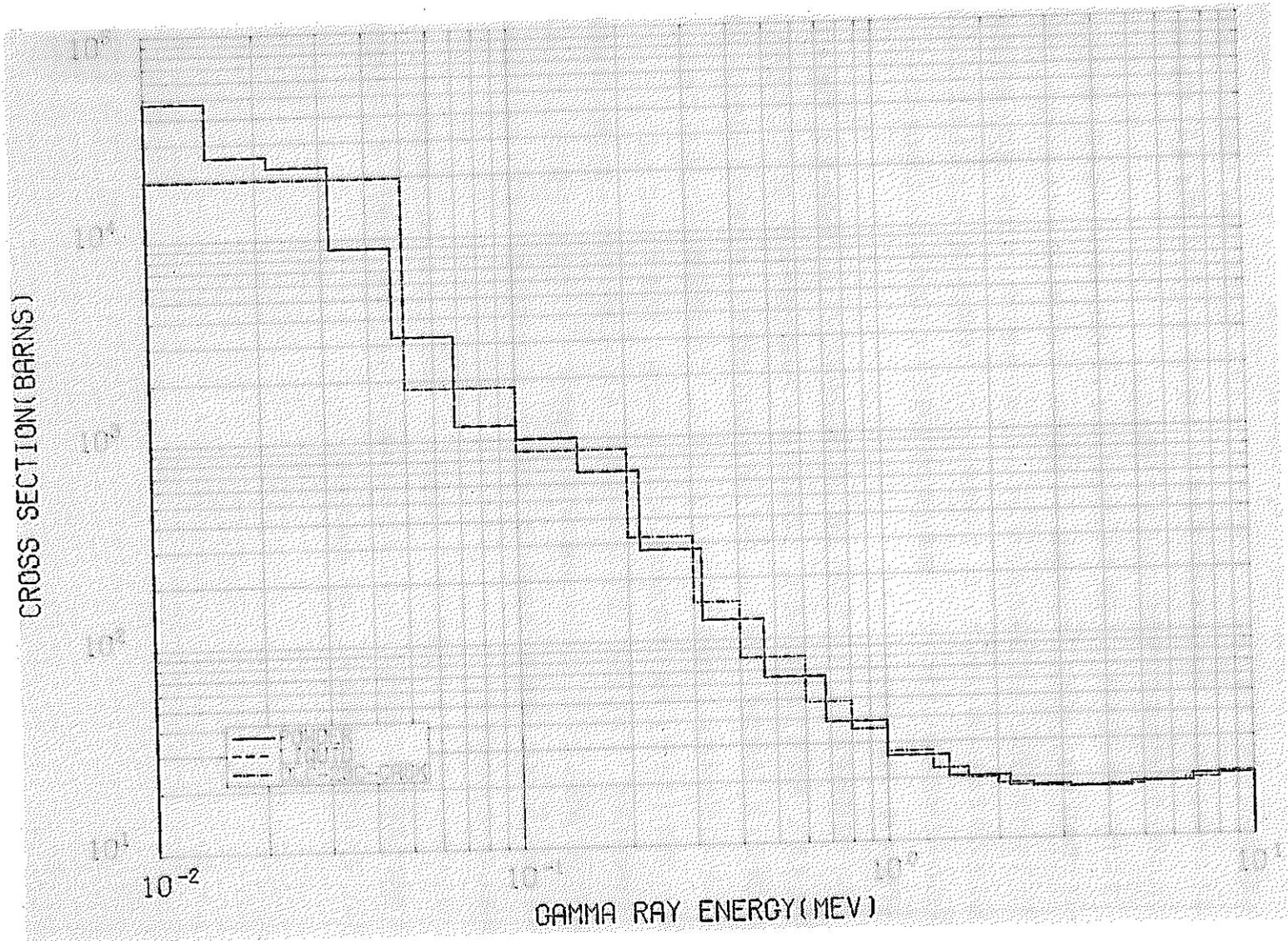


Fig. 4.15 GAMMA RAY TOTAL CROSS SECTION - PLUTONIUM-239

IV) 検 討

まず中性子線線量率分布についてみると、乾燥系ライブラリと溶液系ライブラリの違いは殆どみられない。この事は群構造の設定で最も被曝線量率に影響するとみられる1~2 MeV付近を幾分細かく分割した事によるものと思われる。スペクトル分布も1 MeVでは乾燥系と溶液系は全く一致しており、100 KeV付近で多少異なった様相を呈している (Fig. 4.4, Fig. 4.5)。これは明らかに燃料体の共鳴吸収によるものと思われる。

またPSL-40とCASKとを比較すると全点にわたってPSL-40の方が幾分高い値を示している (Table IV.3)。傾向としては燃料体から外側に向けてその差は徐々に大きくなり、アクリライトの外側で最も大きく10%の差となっている。更に外側に向けては逆に減少し最外領域である空気中では約7%となっている。この現象については群構造の違いによるものではないかと思われるが実際はよく解らない。酸素と鉄の断面積をみても差があるとも思われない (Fig. 4.10, Fig. 4.11)。

ガンマ線線量率分布についても中性子線と同じ傾向を示している (Table IV.3, Fig. 4.2, Fig. 4.3)。乾燥系と溶液系の差は、この場合2次ガンマ線の差である。従ってこの差が小さい (最大2%) のは当然とも言える。PSL-40とMUG 15群セットを比較するとMUG-15群セットの方が全体的によく減衰する傾向となっている。これは断面積は同じMUGであることから、原因は2次ガンマ線が群構造の違いによるものであろうとまでしか言えない。

全体的にみて、このCASK-MUGセットを使用した場合に較べてPSL-40は最大10%程線量率で高く評価している。これはこの種の計算 (遮蔽計算) としてはよい一致を示したとみるべきであろう。また、線量率で全般的に高く評価しているのは安全設計等に於いては安全側に評価しているとも言える。

以上の事からライブラリ作成上のデータ処理にエラーはなく、このPSL-40は目的としたPu施設の遮蔽計算に充分使えるものであろうと判断されるが、今後、実測データとの比較等を行い、さらに信頼性の確認をしてゆく必要がある。

V. 使用方法

PSL-40ライブラリ・セットは、従来のDLC断面積シリーズ（CASKライブラリ・セットも含まれる）と同様、カードに打込まれるのと同じ形式でTapeに書かれている。

従って次元輸送計算コードであるANISNによって読み込まれる前に通常の前処理が、補助プログラムであるRETRIEVALコードやTAPEMAKERコードによって行なわれる事になる。

この処理過程を図に示すとFig. 5.1の様になる。

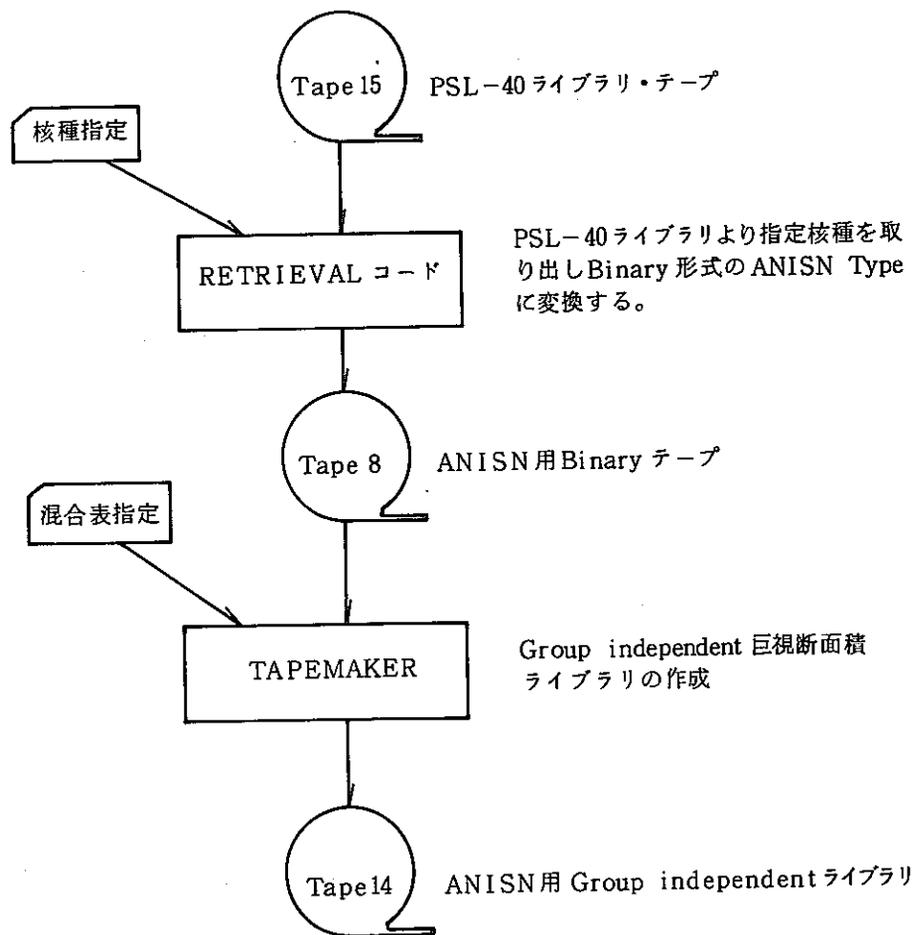


Fig. 5.1 ANISN ライブラリの前処理過程

これらの処理を通して、Tape 14 に得られたデータ・ライブラリが ANISN コードで現実に読み込まれる事になる。

ところが実際にはこの処理の間にある Tape 8 でも ANISN コードは読む事が出来る。しかしこの場合、ANISN コード内で巨視的断面積の作成を行なう事になり、また使用コア・メモリも増加する事からあまり実用的ではない。従って普通はこの RETRIEVAL と TAPEMAKER の両コードによる処理がなされる。

以下この両コードでの処理方法についてのべる。

V.1 RETRIEVAL コードによるライブラリ処理方法

この RETRIEVAL コードは次の様な機能をもっている。

- ①原ライブラリより指定されたデータを選択する。
- ②選択されたデータを指定された形式に従って編集し出力する。

現実的には原ライブラリより使用する核種のデータを取り出し、バイナリー形式で出力させるのが一般的な使用例である。

今回作成された PSL-40 ライブラリのテープの中に、この RETRIEVAL コードも内蔵させその使用に当たっての便宜を計った。

このコードの使用方法は下記の通りである。

i) I/O 仕様

原テープ	UNIT No.15	(PSL-40 ライブラリ)
出力テープ	UNIT No.8	(ANISN. バイナリ・ライブラリ)
入力データ	UNIT No.5	(カード・リーダー)

ii) 入力データ形式

核種指定は 1 核種について 1 枚のデータ・カードが必要であり、指定したい核種の数だけカードを入力する。データの入力形式は Table V.1 に従う。また、入力データ例を Table V.2 に示した。

Table V.1 RETRIEVAL コードの入力形式

データ No	入力 変数名	Col.	Format	入力説明
1	MATNO	1~5	I 5	核種 I.D 番号 但し上 4 桁 (P _L 次数の桁を除いて入力する)
2	LORDER	6~10	I 5	必要とする P _L 次数 (≤ 3)
3	N	11~15	I 5	原ライブラリ・テープのユニット番号 通常は 15 に固定している。
4	IREW	16~20	I 5	原ライブラリ・テープの巻戻し指定 1: 巻戻 0: 巻戻しない MATNO を小さい順に指定すれば最初 に 1 回だけ巻戻しすればよい
5	MODE	21~25	I 5	出力形式指定 0: ANISN カード形式でパンチされる 1: 印刷される 2: ANISN・バイナリ形式でテープに 書きだす 3: DTF-W カード形式でパンチされる 4: 全断面積が印刷される 5: 全断面積が印刷, パンチされる 通常は 2 が入力される。

Table V.2 RETRIEVAL コードの入力データ例

1010	3	15	1	2
1040	3	15	0	2
1050	3	15	0	2
1060	3	15	0	2
1070	3	15	0	2
1080	3	15	0	2
1090	3	15	0	2
1110	3	15	0	2
1120	3	15	0	2
1130	3	15	0	2
1140	3	15	0	2
1190	3	15	0	2
1200	3	15	0	2
1220	3	15	0	2
1240	3	15	0	2
1250	3	15	0	2
1260	3	15	0	2
1280	3	15	0	2
1290	3	15	0	2
1400	3	15	0	2
1420	3	15	0	2
1480	3	15	0	2
1730	3	15	0	2
1740	3	15	0	2
1820	3	15	0	2
1925	3	15	0	2
1928	3	15	0	2
1948	3	15	0	2
1949	3	15	0	2
1940	3	15	0	2
1941	3	15	0	2
1942	3	15	0	2

V.2 TAPEMAKERコードによるライブラリ処理方法

このTAPEMAKERコードは次の様な機能をもっている。

- ①断面積データを再編集し群依存性をもたない形式に変換する。
- ②混合表を入力して巨視的断面積を作成する。

この機能はANISNコード自身も有しているが、物質数が多い場合、あるいは P_L 次数やエネルギー群数が多い場合には断面積の占める記憶容量が大きくなり実用性に乏しくなる。この事からANISNコードでの輸送計算に先がけて、この処理を施す方がより实际的である。

このコードの使用方法は下記の通りである。

i) I/O仕様

入力ライブラリ・テープ	UNIT	No. 8 (ANISN・バイナリ・ライブラリ)
出力ライブラリ・テープ	UNIT	No. 14 (Group independent テープ)
入力データ	UNIT	No. 5 (カード・リーダー)

ii) 入力形式

入力カードは最初の1枚以外はANISNコードでの入力量である混合表(Mixing Table. 10\$, 11\$, 12*)がそのまま使用されている。従ってここでは詳細な説明は省略した。

以下入力順に沿って入力形式を記述する。なお、入力例をTable V. 3に示した。

① Integer Parameter カード (Format 12I 6)

IGM	エネルギー群数 (PSL-40の場合は40を入力)
ITH	σ_t の位置 (" 3を入力)
IHS	$\sigma_{g \rightarrow g}$ の位置 (" 4を入力)
IHM	断面積テーブルの長さ (PSL-40場合は43を入力)
MS	混合テーブルの長さ
MCR	断面積がカード入力される核種の数
MTR	" テープ入力される核種の数
MT	混合物質の数
ITH	0 : Forward 計算 1 : Adjoint 計算
IPRT	0 : 断面積は印刷されない 1 : 混合物質のみ断面積が印刷される 2 : すべての断面積が印刷される

② 10 \$ カード (Format : FIDO 形式)

混合テーブルに於ける混合物番号 (番地) をその組成の数だけそれぞれ入力する。

③ 11 \$ カード (Format : FIDO 形式)

混合テーブルに於ける各混合物に対する組成番号 (順番号) をそれぞれ入力する。

④ 12 * カード (Format : FIDO 形式)

各混合物に対して、それぞれの組成の原子数密度を入力する。

⑤ 13 \$ カード (Format : FIDO 形式)

断面積がテープより入力される核種の I. D. 番号を入力する。

⑥ 14 * カード (Format : FIDO 形式)

断面積がカードで入力される核種の I. D. 番号を入力する。

Table-V.3 TAPEMAKERコードの入力例

	40	3	4	43	88	0	128	16	0	1
10\$										
3R	129	3R		130	6R		131	6R		132
2R	135	2R		136	8R		137	8R		138
8R	141	8R		142	8R		143	8R		144
11\$										
		0		1		21				
		0		2		22				
		0		109		113		117		121
		0		110		114		118		122
		0		17		21				125
		0		18		22				126
		0		97						
		0		98						
		0		13		41		57		61
	69			81						65
	0			14		42		58		62
	70			82						66
	0			109		113		117		121
	0			110		114		118		122
	0			1		21		109		113
	121			125						117
	0			2		22		110		114
	122			126						118
	0			1		21		109		113
	121			125						117
	0			2		22		110		114
	122			126						118
12*										
0.0		0.06671		0.03335						
0.0		0.06671		0.03335						
0.0		5.05985-5		1.33525-3		6.27205-4		3.74757-4		1.24402-4
0.0		5.05985-5		1.33525-3		6.27205-4		3.74757-4		1.24402-4
0.0		3.962 -5		1.067 -5						
0.0		3.962 -5		1.067 -5						
0.0		3.29625-2								
0.0		3.29625-2								
0.0		3.20103-4		1.71115-3		1.57129-2		1.74959-3		5.62374-2
9.8231 -3		1.25233-3								
0.0		3.20103-4		1.71115-3		1.57129-2		1.74959-3		5.62374-2
9.8231 -3		1.25233-3								
0.0		5.05989-6		1.33525-4		6.27205-5		3.74757-5		1.24402-5
0.0		5.05989-6		1.33525-4		6.27205-5		3.74757-5		1.24402-5
0.0		0.06334		0.031666		5.05989-5		1.33525-3		6.27205-4
3.74757-4		1.24402-4								
0.0		0.06334		0.031666		5.05989-5		1.33525-3		6.27205-4
3.74757-4		1.24402-4								
0.0		0.066373		0.033182		5.05989-6		1.33525-4		6.27205-5
3.74757-5		1.24402-5								
0.0		0.066373		0.033182		5.05989-6		1.33525-4		6.27205-5
3.74757-5		1.24402-5								
13\$\$										
100	101	102	103	200	201	202	203	300	301	302
303	400	401	402	403	500	501				
502	503	600	601	602	603	700	701	702	703	800
801	802	803	900	901	902	903				
1000	1001	1002	1003	1100	1101	1102	1103	1200	1201	1202
1203	1300	1301								
1302	1303	1400	1401	1402	1403	1500	1501	1502	1503	1600
1601	1602	1603								
1700	1701	1702	1703	1800	1801	1802	1803	1900	1901	1902
1903	2000	2001								
2002	2003	2100	2101	2102	2103	2200	2201	2202	2203	2300
2301	2302	2303								
2400	2401	2402	2403	2500	2501	2502	2503	2600	2601	2602
2603	2700	2701								
2702	2703	2800	2801	2802	2803	2900	2901	2902	2903	3000
3001	3002	3003								
3100	3101	3102	3103	3200	3201	3202	3203			
T										

VI. 参 考 文 献

1. J. Adir, K. D. Lathrop.; Theory of Methods Used in The GGC-4 Multigroup Cross Section Code, Gulf General Atomic Project 1100, Oct. 1. 1968
2. J. S. Dudek: GAM-II, A B₃ Code for The Calculation of Fast Neutron Spectra and Associated Multigroup Constants, General Atomic Report, GA-4265, 1963
3. C. V. Smith, H. A. Vieweg: GATHER-II., An IBM-709 Code for The Calculation of Thermal Neutron Spectra and Associated Multigroup Constants, General Atomic Report, GA-4132, 1963
4. J. R. Knight, F. R. Mynatt: MUG, A Program for Generating Multigroup Photon Cross Section, CTC-17, Jan. 20. 1970
5. W. E. Ford, III, D. H. Wallace: POPOP4, A Code for Converting Gamma-Ray Spectra to Secondary Gamma-Ray Production Cross Section, CTC-12, Mar. 1969
6. W. E. Ford, III: The POPOP4 Library of Neutron-Induced Secondary Gamma-Ray Yield and Cross Section Data, CTC-42, Sept. 1970
7. Revised WANL ANISN Program User's Manual, WANL-TMI-1967, Apr. 1969
8. CASK 40 Group Coupled Neutron and Gamma-Ray Cross Section Data, DLC-23C, Oct.1973
9. R. Yumoto et al.: PURSE, A Plutonium Radiation Source Code, PNCT852-78-13, Oct. 1978.

付録1. 処理コードの概説

付録1.1 GGC-4 コードの概説

付録1.2 MUG コードの概説

付録1.3 POPOP-4 コードの概説

付録1.1 GGC-4 コードの概説

1. 概 要
2. 特 徴
3. 計 算 式
4. 参 考 文 献

GGC-4

1. 概要

GGC-4⁽¹⁾は少数群あるいは多群(≤50)の中性子断面積を作成するプログラムである。このプログラムでは、高速中性子領域での計算と、熱中性子領域での計算は分離して行なわれる。高速中性子領域でのスペクトル計算および縮約計算にはGAM-2⁽²⁾が用いられており、99群の専用ライブラリが用意されている。熱中性子領域でのスペクトル計算および縮約計算にはGATHER-2⁽³⁾が用いられており、101群の熱群ライブラリが用意されている。スペクトル計算は高速中性子領域、熱中性子領域共空間的には0次元で取扱われており、PnあるいはBn近似で解かれる。

出力される断面積は、高速群断面積と熱群断面積を結合した形式で与えられる。

2. 特徴

熱中性子領域の上限エネルギーが2.38 eVと高くとられており、高速中性子領域との結合エネルギー点は種々選択可能である。出力される断面積カードは、標準的な拡散コードおよび輸送コードの入力としてそのまま利用できる。またライブラリ・データの処理に関する補助プログラム群が用意されており、その使用、更新に際しての便宜が計られている。

3. 計算式

中性子スペクトルはPnあるいはBn近似で解かれる。例えば、良く用いられるB₁方程式をエネルギー群表示で書き改めると、

$$\begin{aligned} \frac{B^2}{|B|} \phi_i^{(1)} + \sum_i^t \phi_i^{(0)} &= \sum_j \sum_{ij}^{(0)} \phi_j^{(0)} A_j + Q_i^{(0)} \\ -|B| \phi_i^{(0)} + 3 r_i \sum_i^t \phi_i^{(1)} &= 3 \sum_j \sum_{ij}^{(1)} \phi_j^{(1)} A_j + Q_i^{(1)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで

$Q_i^{(0)}$: 核分裂中性子源 (高速群計算の場合)
減速中性子源の第0次成分 (熱群計算の場合)

$Q_i^{(1)}$: 減速中性子源の第1次成分 (")

A_j : 第j群のエネルギー巾

$$r_i : \left(\frac{\sum_i^t}{B} \right)^2 \cdot A_{00} \left(\frac{\sum_i^t}{B} \right) / 3 \left[1 - A_{00} \left(\frac{\sum_i^t}{B} \right) \right]$$

$$A_{00}(y) = \frac{1}{y} \tan^{-1}(y)$$

となる。この(1)式で $r_i = 1$ とおけば、これはP₁方程式となる。

高速中性子領域では上方散乱がない事から、(1)式は第1群から、 $\phi^{(0)}$ 、 $\phi^{(1)}$ に関する連立方程

式として順に解かれる。B₂, B₃方程式についても $\phi^{(0)}$, $\phi^{(1)}$, $\phi^{(2)}$ あるいは $\phi^{(3)}$ についての連立方程式となり同様に解かれる。

熱中性子領域については上方散乱が存在する。従って、この解法は、 $\phi^{(0)}$, $\phi^{(1)}$ に初期値を与え反復計算を行なう事によって求めている。

4. 参考文献

- (1) J. Adir, K. D. Lathrop, Theory of Methods used in the GGC-4 Multigroup Cross Section Code. GA-9021, 1968.
- (2) Joanou, G. D. and J. S. Dudek, GAM-II, A B₃ Code for the Calculation of Fast Neutron Spectra and Associated Multigroup Constants", GA-4265, 1963.
- (3) Joanou, G. D., C. V. Smith, and H. A. Vieweg, "GATHER-II, An IBM-7090 Code for the Calculation of Thermal Neutron Spectra and Associated Multigroup Constants", GA-4132, 1963.

付録1.2 MUGコードの概説

1. 概 要
2. 特 徴
3. 計 算 式
4. 参 考 文 献

MUG

1. 概要

MUG⁽¹⁾はSn輸送計算のためのガンマ線多群断面積を作成するプログラムである。散乱断面積はクライン-仁科の式により計算される。吸収断面積はOGRE⁽²⁾ライブラリからの光電効果ならびに電子対生成に関するデータより作成される。この吸収断面積は入力する事も可能である。これらの断面積は指定したエネルギー群構造に従って平均化され出力される。

このプログラムは米国オークリッジ国立研究所の支援のもとに、米国ユニオン・カーバイド社によって開発され1970年に発表された。

2. 特徴

出力される散乱断面積の定義として、Energ-Flux に対するものと Number-Flux に対するものと、どちらか選択する事ができる。吸収断面積については常にEnerg-Flux に対する吸収として取扱われる。

エネルギー群構造は最大100群迄、散乱断面積のルシャンドル展開項は最大P₁₂迄処理可能である。

またこれらの断面積の出力形式はSn輸送計算コードであるANISNあるいはDOTに直接入力可能なものとなっている。

このプログラムは断面積のほかに、線量率変換係数を、入力された群構造に従って出力する機能も備えている。

3. 計算式

クライン-仁科の式から、ガンマ線の遷移断面積は次式で与えられる。

$$\sigma_{SL}(\bar{\nu}, \bar{\nu}') = \pi r^2 \int_{\nu_1}^{\nu_2} \phi(\nu) \int_{\nu'_1}^{\nu'_2} \frac{\nu'}{a\nu^2} \left[\frac{\nu'}{\nu} + \frac{\nu}{\nu'} - \frac{2}{a} \left(\frac{\nu}{\nu'} - 1 \right) + \frac{1}{a^2} \left(\frac{\nu}{\nu'} - 1 \right)^2 \right] \cdot \begin{cases} 1 & : \frac{\nu}{1+2a} \leq \nu' \leq \nu \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} P_L \left(1 + \frac{1}{a} - \frac{\nu}{a\nu'} \right) d\nu' d\nu / \int_{\nu_1}^{\nu_2} \phi(\nu) d\nu \quad (1)$$

ここで

- r : $\frac{e^2}{m_0 \cdot c^2}$
- e : 電子の電荷
- m₀ : 静止電子の質量
- c : 光速
- h : プランクの定数

$$a : \frac{h \cdot \nu}{m_0 \cdot c^2}$$

$$\nu : \text{入射光子の周波数}$$

$$\nu' : \text{散乱光子の周波数}$$

$$\phi : \text{ガンマ線束}$$

$P_L(x)$: 第L次のルジャンドル函数

この(1)式は、シンプソン法による2重積分の数値解法を用いて計算される。ここで算出される断面積は1電子当りのEnergy-Fluxに対するものであり、これに原子番号を乗じて1原子当りの断面積として変換される。また指定によっては、更にNumber-Fluxに対する断面積に換算される。これは(1)式を ν'/ν で除する事によって得られる。光電効果における消滅光子は通常0.511 Mevの2個の等方散乱光子に変るものとして散乱断面積に加算される。

光電効果ならびに電子対生成による吸収断面積は

$$\sigma_a(\bar{E}) = \frac{1}{E_2 - E_1} \int_{E_1}^{E_2} \sigma_a(E) dE \quad (2)$$

によって導出される。この2)式の積分は、OGREデータを対数内挿して得られる個々のエネルギー点における断面積を数値積分して求められる。

出力される吸収断面積は、エネルギー吸収項の和として次式で定義されたものである。

$$\bar{\sigma}_a = \bar{\sigma}_{pp} \cdot (\bar{E} - 1.02 \text{ Mev}) + \bar{\sigma}_{pe} \cdot \bar{E} + \sum_{E'} \sigma_{NF}(E, E') \cdot (\bar{E} - \bar{E}')$$

ここで $\bar{\sigma}_{pp}$: 電子対生成の平均断面積

$\bar{\sigma}_{pe}$: 光電効果の平均断面積

\bar{E}, \bar{E}' : 入射, 散乱光子の平均エネルギー

$\sigma_{NF}(E, E')$: 0次モーメントの光子遷移断面積

4. 参考文献

- (1) J.R.Knight, F.R.Mynatt, MUG, A Program for Generating Multigroup Photon Cross Section, CTC-17, Jan. 1970.
- (2) Penny, S.K., Trubey, D.K., and Emmett, M.B., OGRE, A Monte Carlo System for Gamma-Ray Transport Studies, Including an Example (OGRE-P 1) for Transmission through Laminated Slabs, April, 1966 (ORNL-3805).

付録1.3 POPOP-4 コードの概説

1. 概 要
2. 特 徴
3. 計 算 式
4. 参 考 文 献

POPOP-4

1. 概要

POPOP-4⁽¹⁾は中性子との反応により発生する2次ガンマ線のエネルギースペクトルを、中性子・ガンマ線の結合断面構造上のスペクトルに変換する計算プログラムである。ガンマ線のスペクトルが中性子の反応当りの強度として与えられている場合は変換されたスペクトルに入力された中性子反応断面を乗じて2次ガンマ線の生成断面を作成する。

このプログラムは米国オークリッジ国立研究所で開発され、1969年に発表されたものである。また同研究所から報告されている中性子・ガンマ線結合ライブラリ「DLC23/CASK」⁽²⁾の作成に用いられている。

2. 特徴

POPOP-4は2次ガンマ線発生の核データとしてPOPLIB⁽³⁾ライブラリを用意している。

POPOP-4の入力は、中性子・ガンマ線結合断面用のエネルギー構造、中性子の反応断面等よりなる。出力は2次ガンマ線の生成断面である。これは中性子、ガンマ線の遷移(減速散乱)断面の結合部分として用いられるものである。

3. 計算式

POPLIBライブラリに収録されている2次ガンマ線生成率に関するデータは、入射中性子のエネルギー、発生ガンマ線のエネルギーをパラメータとして与えられている。入力された中性子・ガンマ線の結合断面で要求されているエネルギー構造は、POPLIBライブラリ上のエネルギー構造とは無関係である。POPOP-4では結合エネルギー構造に原ライブラリの2次ガンマ線の生成率を変換する計算が行なわれる。

計算は次の様な手順で行なわれる。まず2次ガンマ線の生成率は結合断面の中性子エネルギー構造に変換される。この生成率は中間生成率(Intermediate Yield)と呼ばれる。実際の変換は線型内挿法であり、例えば、

$$YY_{jk} = Y_{ik} \cdot \frac{E_{ju}^{RN} - E_{iL}^{GN}}{E_{ju}^{RN} - E_{jL}^{RN}}$$

但し、 $E_{iu}^{GN} \geq E_{ju}^{RN}$ 、 $E_{ju}^{RN} > E_{iL}^{GN} \geq E_{jL}^{RN}$ の時であり、かつ

Y_{ik} : 原ライブラリ上の第*i*群中性子の反応による第*k*群ガンマ線の生成率。

E_{iu}^{GN} 、 E_{iL}^{GN} : 原ライブラリ上の第*i*中性子エネルギー群の上、下限エネルギー。

E_{ju}^{RN} 、 E_{jL}^{RN} : 新結合断面上の第*j*中性子エネルギー群の上、下限エネルギー。

YY_{jk} : 第*j*中性子群(結合断面)の反応により発生する第*k*群(原ライブラリ)ガンマ線の中間生成率。

である。

次に YY_{jk} を結合断面積のガンマ線エネルギー群に変換する。この時も、中性子と同様に線形内挿法で行なわれる。

4. 参考文献

- (1) W.E. Ford, III, D.H. Wallace, POPOP-4, A code for Converting Gamma-Ray Spectra to Secondary Gamma-Ray Production Cross Section, CTC-12, Mar. 1969.
- (2) RSIC DATA LIBRARY. DLC-23/CASK.
- (3) RSIC DATA LIBRARY. DLC-12/POPLIB.

付録2. エネルギー群分けの基本的な 考え方(メモ)

付録2. エネルギー群分けの基本的な考え方(メモ)

中性子およびガンマのエネルギー群分けにおいては、以下の2点を主として考慮した。

(1) エネルギー・スペクトル

(問題点) ・ 遮へい計算では、遮へい体の存在によって必然的にエネルギー・スペクトルが場所によって大きく違う。したがって、どこのスペクトルに基づいて「群分け」および「重みづけ」をするかが問題となる。

(考え方) ・ 線源領域のスペクトルを尊重する。(中性子もガンマも)

・ 線源は、Puを主体と考える。(完全な汎用性は遮へいライブラリには無理というのが定説のようである。)

(2) 遮へい材(自己を含む)の断面積のエネルギー依存性

(問題点) ・ ガンマ線の質量吸収係数については「エッジ」が存在して、その前後で大きく変化する。

・ 中性子については、共鳴吸収領域が存在し、実効散乱断面積によって共鳴積分が大きく変化する。

(考え方) ・ できるだけ、大きな吸収係数をもつ核種の「エッジ」の位置に、エネルギー分点を合せたい。しかし、すべての核種について考慮すると多数になる。したがって今回は無理して合せることはしない。

・ DCL-23(cask)ライブラリ等に比べて、低エネルギー・ガンマを重視するという観点から、高エネルギー領域をそれらに比べて粗くし、低エネルギー領域では細かくする。その結果として、10 KeV~10 MeVの間を「等レサージ幅」で切ることにした。

・ 中性子については2種類のスペクトルで縮約するので、共鳴領域を細かくするということはやらない。

以上の考慮により、中性子線およびガンマ線の「エネルギー群分け」を表1のように決定した。他のライブラリとの比較を図1(中性子)および図2(ガンマ線)に示す。

表1 PSL-40, PSL-18エネルギー群分け

中性子線			ガンマ線		
PSL-40 Group No	上限エネルギー	PSL-18 Group No	PSL-40 Group No	上限エネルギー	PSL-18 Group No
1	14.92 MeV	1	1	10.00 MeV	1
2	10.00 "		2	6.813 "	
3	6.703 "	2	3	4.642 "	
4	4.966 "		4	3.162 "	2
5	4.066 "		5	2.154 "	
6	3.012 "	3	6	1.468 "	
7	2.466 "		7	1.000 "	3
8	1.827 "	4	8	681.3 KeV	
9	1.353 "		9	464.2 "	4
10	907.2 KeV	5	10	316.2 "	
11	608.1 "		11	215.4 "	5
12	407.6 "	6	12	146.8 "	
13	111.1 "	7	13	100.0 "	6
14	15.03 "		14	68.13 "	
15	3.355 "	8	15	46.42 "	7
16	583.0 eV		16	31.62 "	
17	101.3 "		17	21.54 "	8
18	29.02 "	9	18	14.68 "	
19	10.68 "		*	10.00 "	
20	3.059 "				
21	1.125 "				
22	0.414 "	10			
*	0.001 "				
				$\Delta x = 0.3838$ (等レサージ幅)	

(* 下限エネルギー)

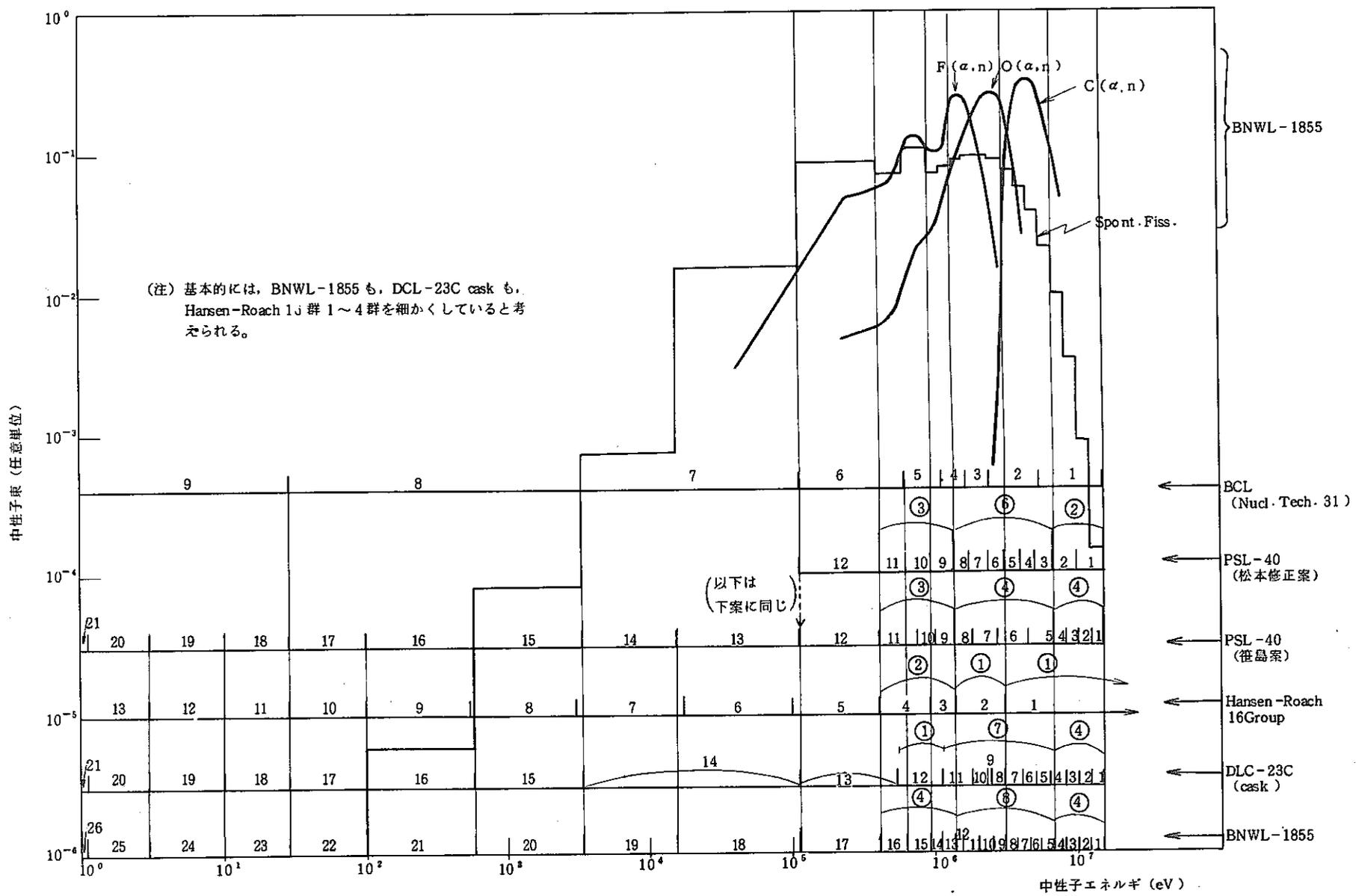


図 1. 中性子源スペクトルの比較とエネルギー・メッシュの比較

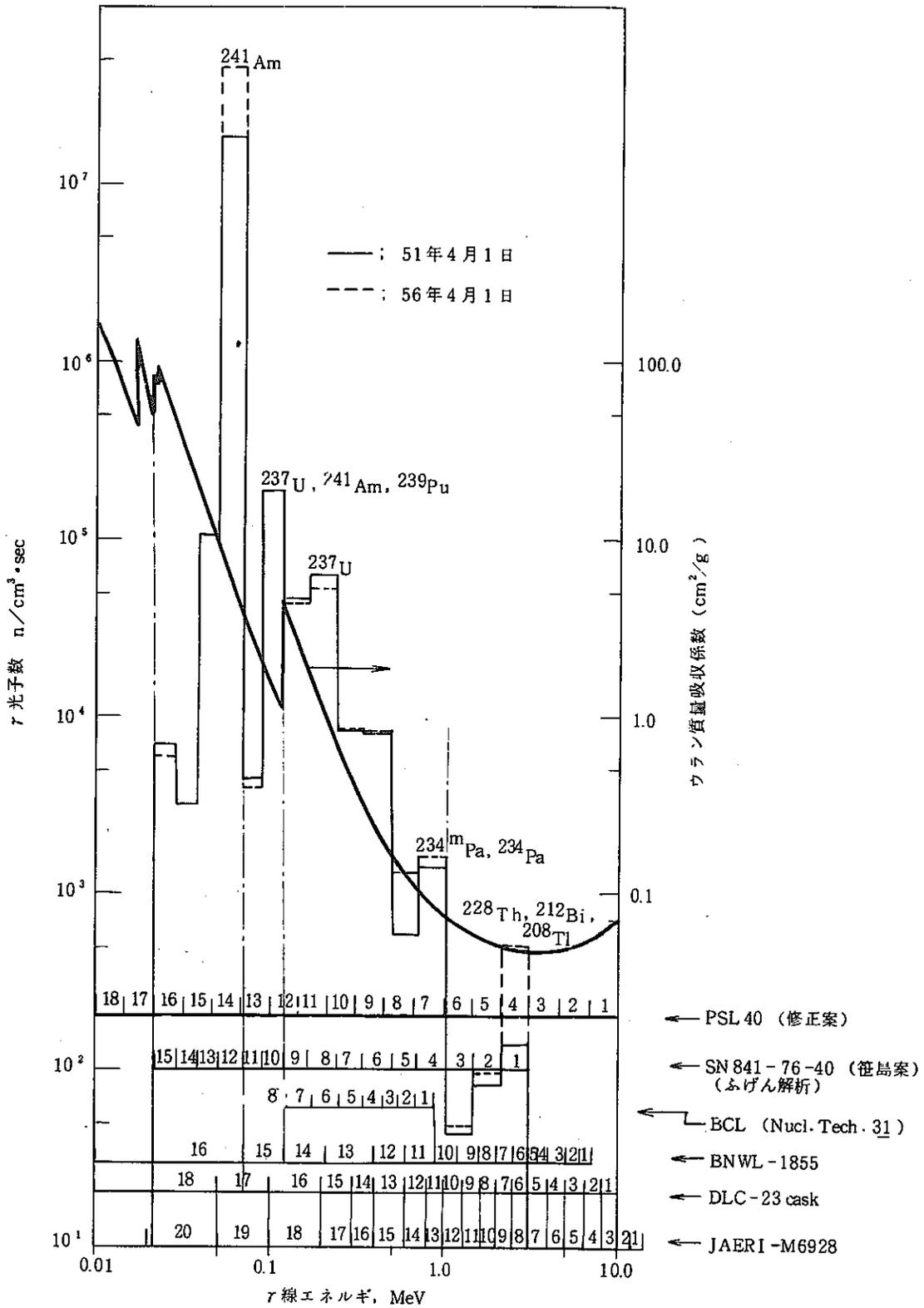


図2. ガンマ線スペクトルと吸収係数およびエネルギー・メッシュの比較

(「ふげん」燃料の γ 線エネルギー・スペクトル)

付録3. エネルギー群分けのための参考 データ集

付録3.1 ガンマ線質量吸収係数

付録3.2 PuO_2 のガンマ線源スペクトルの例

付録3.3 PuO_2 等の中性子線源 スペクトルの例

付録3.4 PuO_2 粉体系の中性子スペクトルの計算例
(臨界計算結果より引用)

付録3.5 ガンマ線エネルギー群分けの例

付録3.6 中性子線エネルギー群分けの例

付録3.1 ガンマ線質量吸収係数

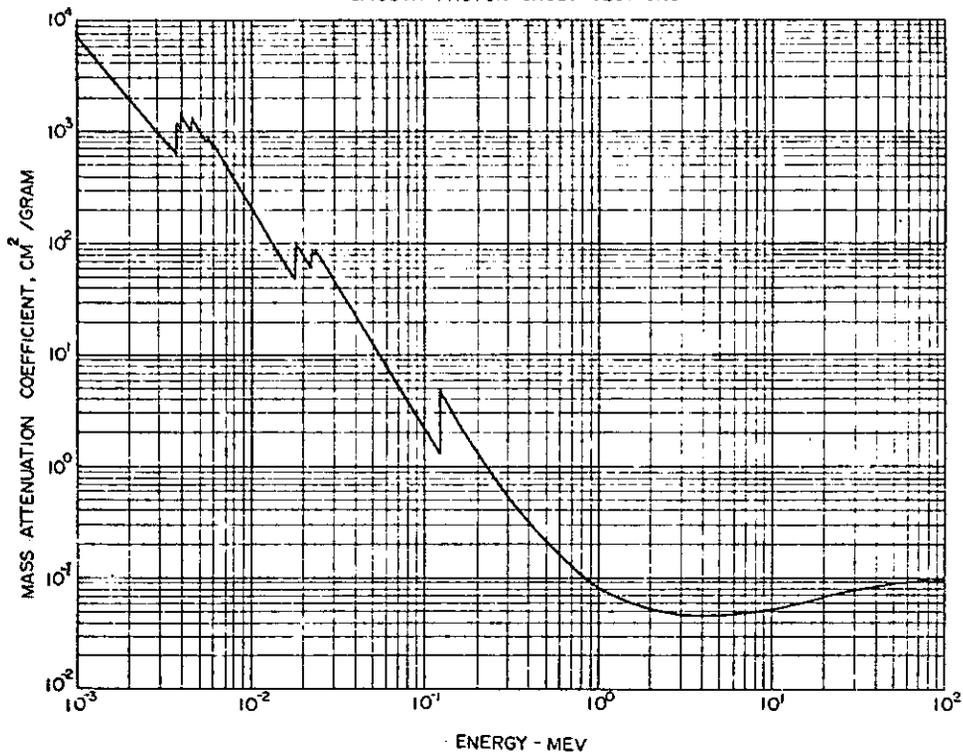
付3.1.1 ウ ラ ン

付3.1.2 プルトニウム

付3.1.3 ジルカロイ - 2

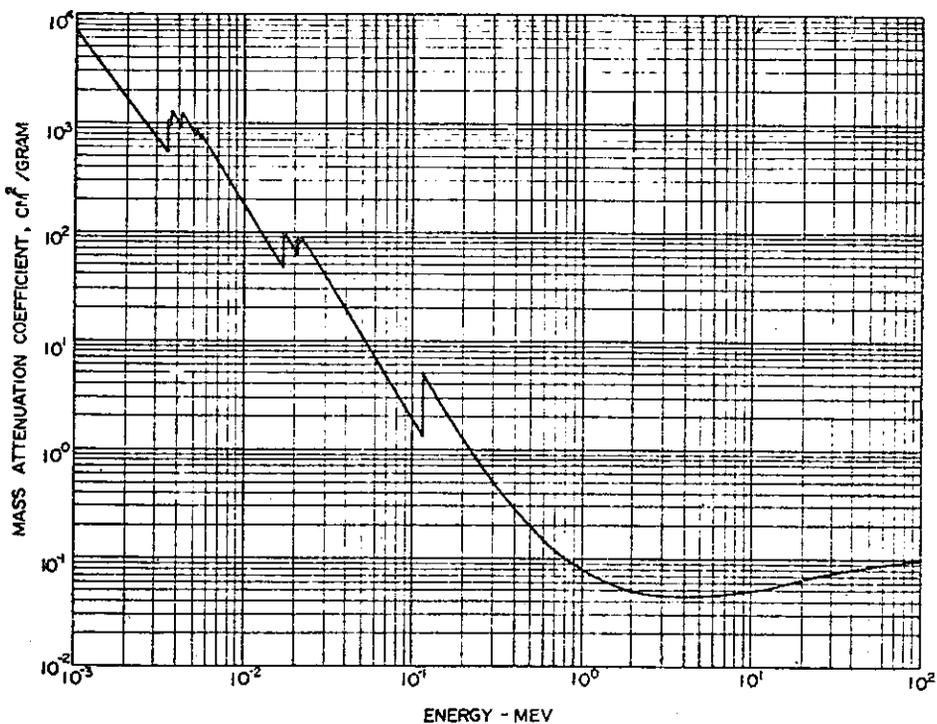
付3.1.4 空 気

TOTAL ENDF/B MATERIAL NO. 94
SMOOTH PHOTON CROSS SECTIONS

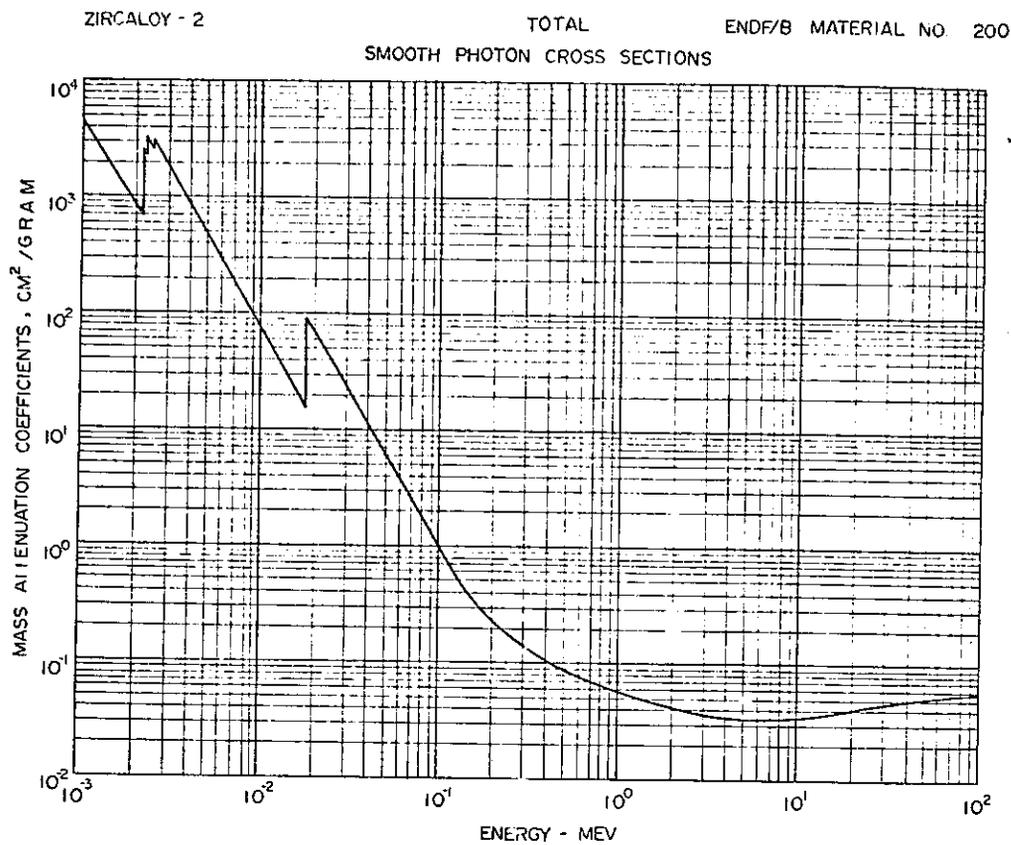


付 3. 1. 1 ウランのγ線質量吸収係数

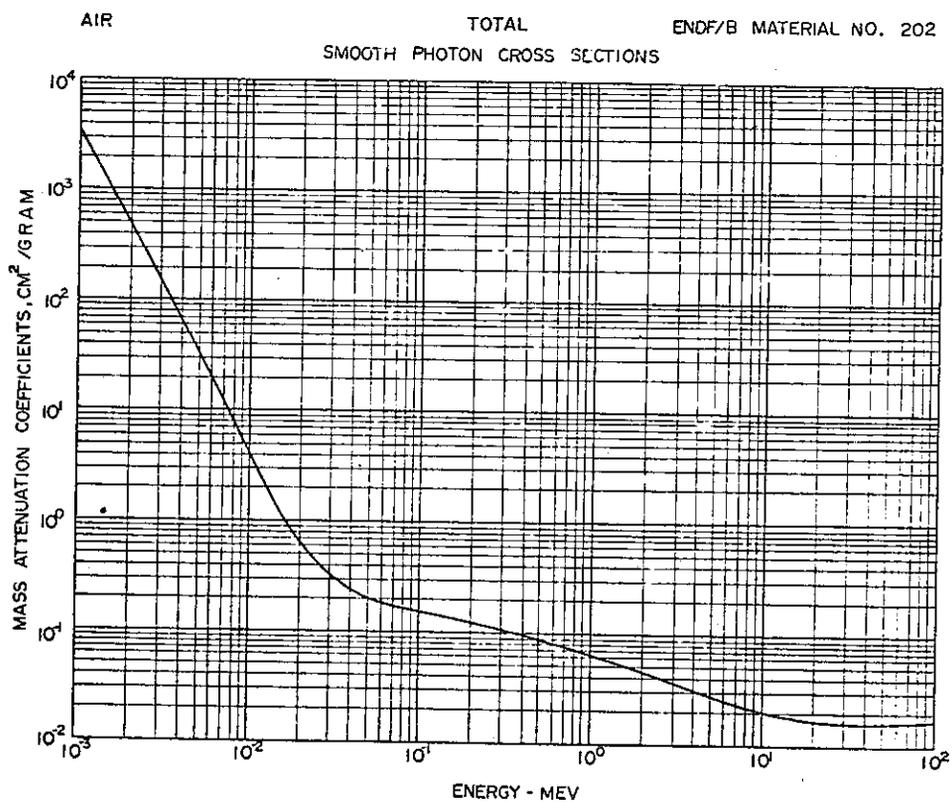
TOTAL ENDF/B MATERIAL NO. 92
SMOOTH PHOTON CROSS SECTIONS



付 3. 1. 2 プルトニウムのγ線質量吸収係数

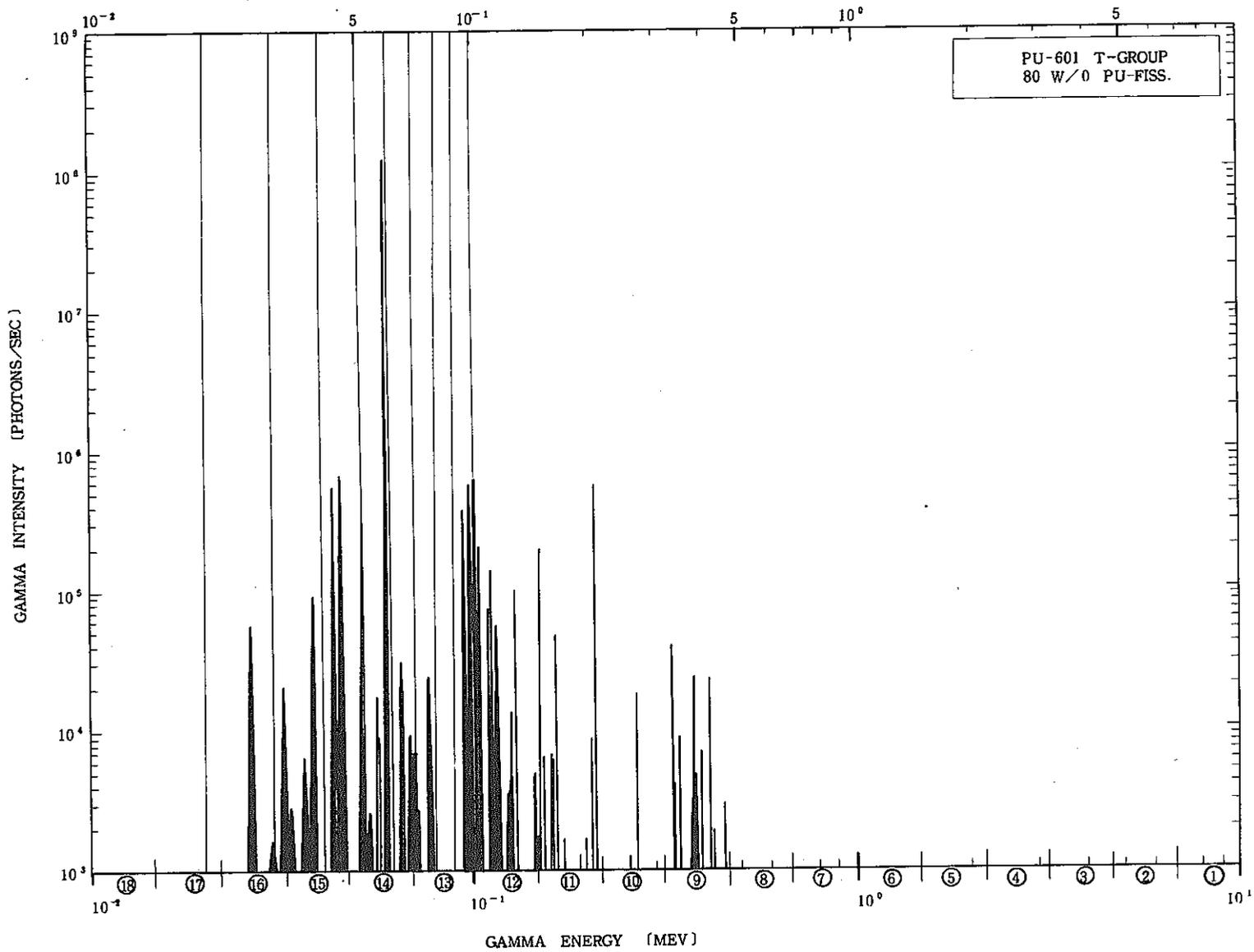


付 3. 1. 3 ジルカロイ - 2 の γ 線質量吸収係数



付 3. 1. 4 空気の γ 線質量吸収係数

付録3.2 PuO₂のガンマ線源 スペクトルの例



付録3.3 PuO_2 等の中性子線源 スペクトルの例

付3.3.1 100群スペクトルの例

付3.3.2 27群スペクトルの例

付3.3.3 10群スペクトルの例

付 3. 3. 1 100 群スペクトルの例 (エネルギー群分けは, 付 3. 6. 1 参照)

GROUP	Spont. Fiss. Fraction	α -n Fraction	Fiss. Fraction (from GGC4)
	Pu238	Pu238	Pu239
1	0.1100649E-03	0.0	0.5062300E-04
2	0.2540762E-03	0.0	0.1350500E-03
3	0.5349130E-03	0.0	0.3214900E-03
4	0.1035850E-02	0.0	0.6906600E-03
5	0.1859341E-02	0.0	0.1352600E-02
6	0.3115371E-02	0.0	0.2437300E-02
7	0.4903685E-02	0.0	0.4074398E-02
8	0.7293127E-02	0.0	0.6366700E-02
9	0.1030320E-01	0.0	0.9362798E-02
10	0.1389229E-01	0.0	0.1303700E-01
11	0.1795603E-01	0.0	0.1728500E-01
12	0.2233556E-01	0.0	0.2193000E-01
13	0.2683423E-01	0.0	0.2674200E-01
14	0.3123908E-01	0.3264194E-01	0.3147300E-01
15	0.3534393E-01	0.6144436E-01	0.3587800E-01
16	0.3896707E-01	0.8098096E-01	0.3974600E-01
17	0.4196696E-01	0.9104240E-01	0.4291600E-01
18	0.4424851E-01	*0.9341192E-01	0.4528300E-01
19	0.4576584E-01	0.9032124E-01	0.4680400E-01
20	0.4651846E-01	0.8379167E-01	*0.4748800E-01
21	*0.4654339E-01	0.7541293E-01	0.4738800E-01
22	0.4590857E-01	0.6633103E-01	0.4658800E-01
23	0.4470074E-01	0.5730812E-01	0.4519400E-01
24	0.4301801E-01	0.4881181E-01	0.4331800E-01
25	0.4096260E-01	0.4109706E-01	0.4107600E-01
26	0.3863259E-01	0.3427109E-01	0.3857500E-01
27	0.3612071E-01	0.2834886E-01	0.3591300E-01
28	0.3350684E-01	0.2328606E-01	0.3317600E-01
29	0.3086254E-01	0.1900996E-01	0.3043300E-01
30	0.2824412E-01	0.1543179E-01	0.2774200E-01
31	0.2569766E-01	0.1246114E-01	0.2514600E-01
32	0.2325766E-01	0.1001080E-01	0.2267700E-01
33	0.2094929E-01	0.8000936E-02	0.2035800E-01
34	0.1878844E-01	0.6360184E-02	0.1820000E-01
35	0.1678477E-01	0.5026646E-02	0.1621100E-01
36	0.1494172E-01	0.3947075E-02	0.1439100E-01
37	0.1325859E-01	0.3076465E-02	0.1273700E-01
38	0.1173092E-01	0.2376954E-02	0.1124300E-01
39	0.1035218E-01	0.1817092E-02	0.9899601E-02
40	0.9113774E-02	0.1370768E-02	0.8697599E-02
41	0.8006312E-02	0.1016514E-02	0.7626399E-02
42	0.7019706E-02	0.7366950E-03	0.6675102E-02
43	0.6143905E-02	0.5169036E-03	0.5833101E-02
44	0.5368821E-02	0.3453754E-03	0.5089801E-02
45	0.4684739E-02	0.0	0.4435401E-02
46	0.4082501E-02	0.0	0.3860600E-02
47	0.3553502E-02	0.0	0.3356600E-02
48	0.3089747E-02	0.0	0.2915600E-02
49	0.2683907E-02	0.0	0.3530300E-02
50	0.5248774E-02	0.0	0.4948501E-02
51	0.3667149E-02	0.0	0.3451400E-02
52	0.2552835E-02	0.0	0.2399400E-02
53	0.1772108E-02	0.0	0.1663800E-02
54	0.1227438E-02	0.0	0.1151400E-02
55	0.8487203E-03	0.0	0.7956401E-03
56	0.5860690E-03	0.0	0.5491299E-03
57	0.4042787E-03	0.0	0.3786499E-03
58	0.2786510E-03	0.0	0.0
59	0.1919402E-03	0.0	0.0
60	0.1321471E-03	0.0	0.0
⋮	⋮	⋮	⋮
100	0.0	0.0	0.0
TOTAL	0.1009390E+01	0.100 E+01	0.9999962E+00

(* : スペクトルのピークの位置)

付 3.3.2 27 群スペクトルの例 (BNWL-1855, 1975)
 (エネルギー群分けは, 付 3.6.2 参照)

Neutron Source Spectra

Group No.	Spontaneous Fission	(α, n) Spectra				
		PuO ₂	PuF ₄	PuC	PuBe	Pu(NO ₃) _n
1	1.502×10^{-4}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	8.866×10^{-4}	0.0	0.0	0.0	0.009	0.0
3	3.455×10^{-3}	0.0	0.0	0.0	0.0746	0.0
4	9.806×10^{-3}	0.0	0.0	0.0451	0.137	0.0
5	2.151×10^{-2}	0.0	0.0	0.169	0.105	0.0
6	3.830×10^{-2}	0.0	0.0	0.322	0.162	0.0
7	5.748×10^{-2}	0.026	0.0	0.317	0.133	0.026
8	7.534×10^{-2}	0.133	0.0	0.146	0.145	0.133
9	8.834×10^{-2}	0.254	0.015	0.0006	0.097	0.254
10	9.477×10^{-2}	0.232	0.100	0.0	0.050	0.232
11	9.466×10^{-2}	0.159	0.198	0.0	0.027	0.159
12	8.935×10^{-2}	0.089	0.246	0.0	0.012	0.089
13	8.023×10^{-2}	0.049	0.114	0.0	0.012	0.049
14	6.965×10^{-2}	0.026	0.094	0.0	0.009	0.026
15	1.068×10^{-1}	0.020	0.123	0.0	0.020	0.020
16	6.962×10^{-2}	0.006	0.061	0.0	0.006	0.006
17	8.513×10^{-2}	0.005	0.046	0.0	0.0	0.005
18	1.555×10^{-2}	0.0	0.003	0.0	0.0	0.0
19	7.494×10^{-4}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	8.237×10^{-5}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	5.972×10^{-6}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	3.950×10^{-7}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	5.556×10^{-8}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	1.352×10^{-8}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	1.902×10^{-9}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	4.242×10^{-10}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	1.218×10^{-10}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(Total)		(0.999)	(1.0)	(0.9997)	(0.9986)	(0.999)

- (Ref) • Brackenbush & Faust, Neutron Spectra of Plutonium Compounds, Part I: He-2, Li-6 Spectrometer Measurements, BNWL-1262 (1970)
- Lessor & Sohenter, Neutron Spectra From (α, n) Reactions in Plutonium Compounds Calculated From Hauser-Feshbach Reaction Theory, BNWL-B-109 (1971)

付 3.3.3 10 群スペクトルの例
 [Nucl. Tech. 31 p 244 (1976)]

(Normalized to 1 n/s)

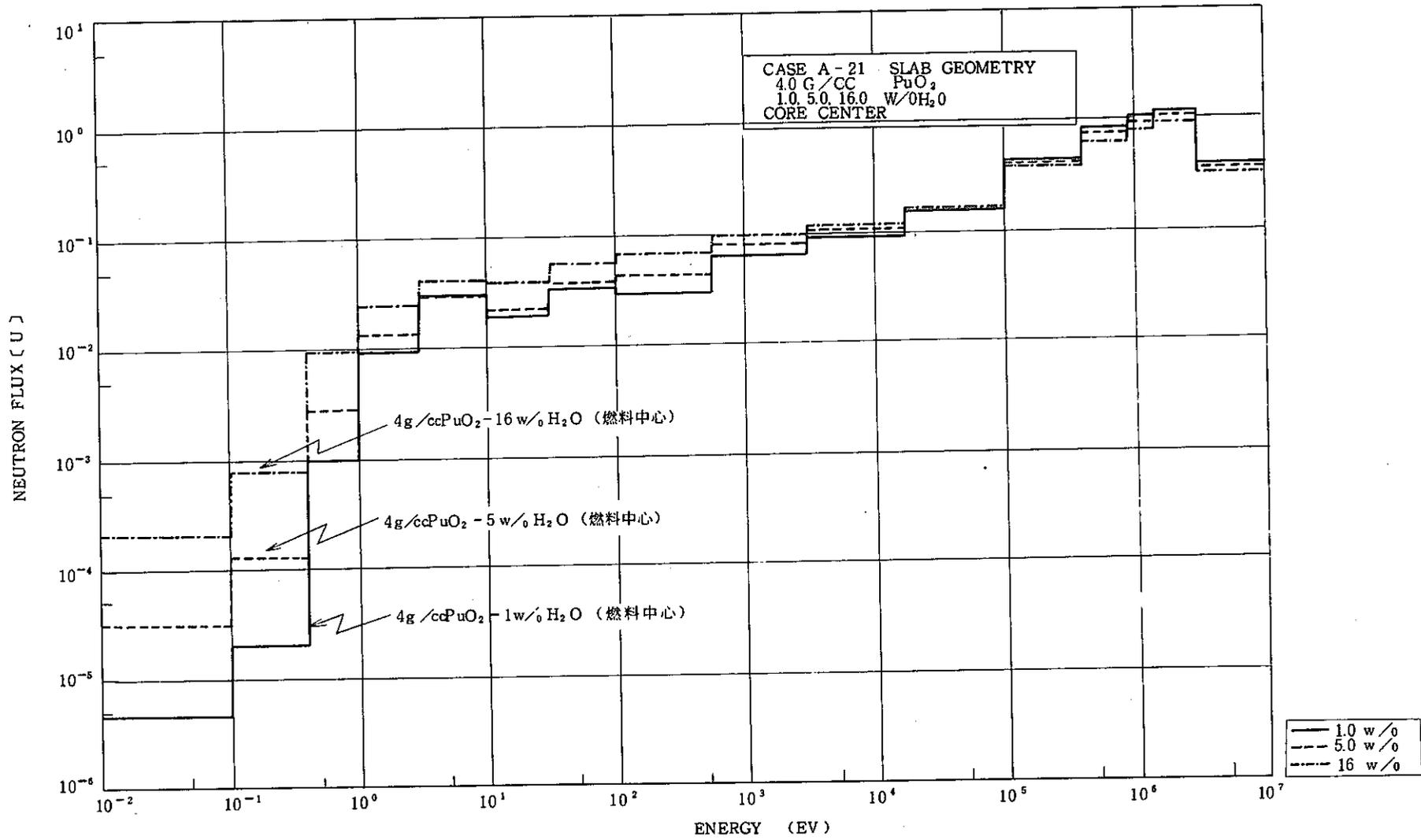
Group ^{*)}	Plutonium Fission	Mixed-Oxide Fission	Mixed-Netrates Fission	Fluoride (a,n)
1	0.0555	0.0288	0.0176	0
2	0.2689	0.4654	0.5487	0.0140
3	0.1823	0.2269	0.2453	0.2425
4	0.1580	0.1022	0.0786	0.3523
5	0.1697	0.0906	0.0572	0.3082
6	0.1428	0.0742	0.0453	0.0831
7	0.0226	0.0118	0.0072	0
8	0.0002	0.0001	0.0001	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0

*) エネルギー群分けは、付 3.6.3 参照

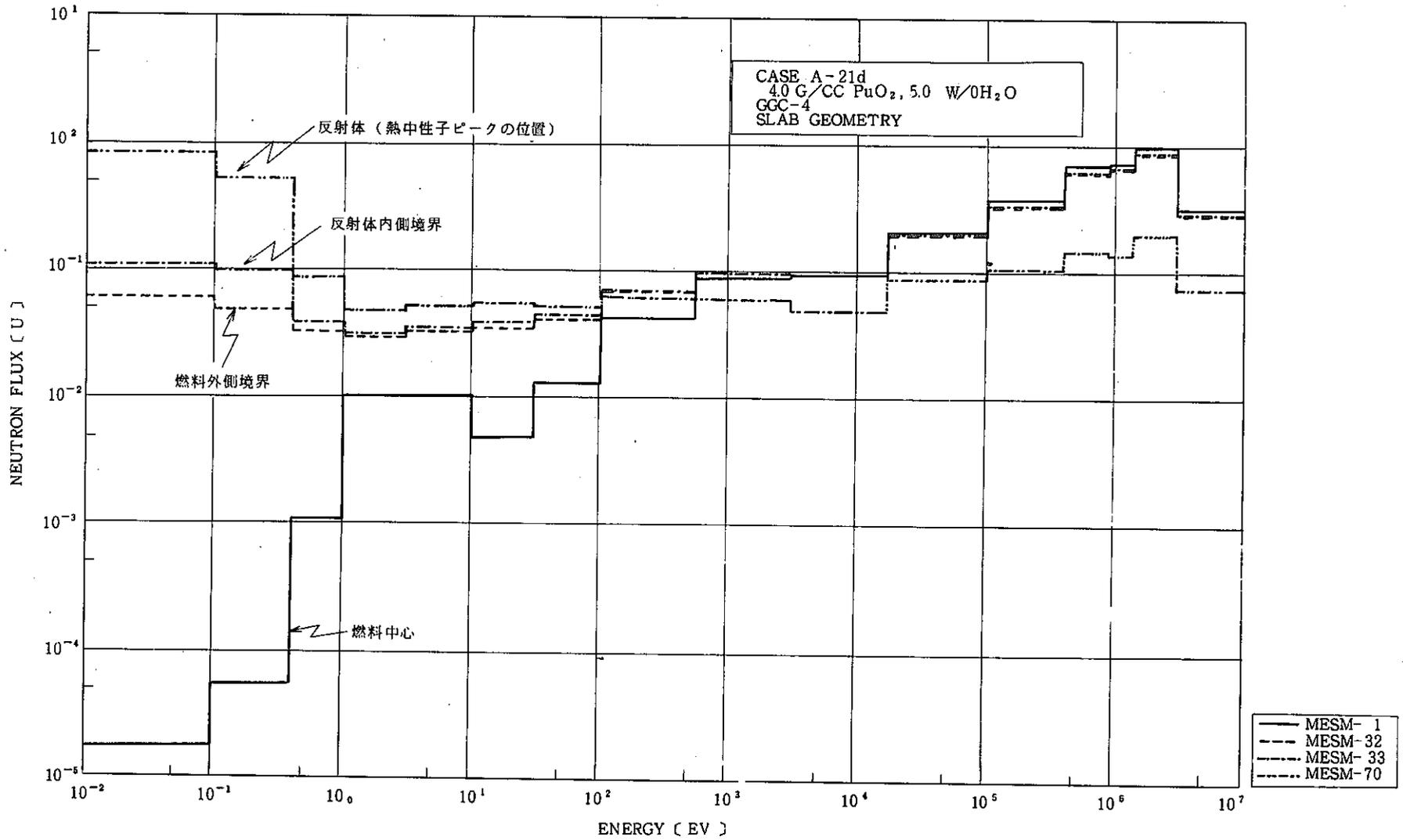
付録3.4 PuO₂粉体系の中性子 スペクトルの計算例 (臨界計算結果から引用)

付3.4.1 H₂O/PuO₂重量比の中性子スペクトルに与える効果の例

付3.4.2 H₂O反射体の中性子スペクトルに与える効果の例



付 3.4.1 水対燃料重量比の中性子スペクトルに与える効果の例 (PuO₂ 粉体系, Hansen-Roach ライブラリ 16 群臨界計算より)



付 3. 4. 2 反射体のスペクトルに与える効果の例 (PuO₂ 粉体系, GGC-4 ライブラリ 16 群臨界計算より)

付録3.5 ガンマ線エネルギー群分けの例

付3.5.1 原 研 の 例

付3.5.2 バッテル・ノースウェスト・ラボの例

付3.5.3 バッテル・コロンバス・ラボの例

付3.5.4 DLC-23C(Cask)ライブラリの例

付3.5.5 PNC15群群分けの例

付 3.4.1 原研の例〔JAERI-M 6928〕

< GAMMA GROUP >

GROUP	ENERGY RANGE	
1	1.4000E+07	1.2000E+07
2	1.2000E+07	1.0000E+07
3	1.0000E+07	8.0000E+06
4	8.0000E+06	6.5000E+06
5	6.5000E+06	5.0000E+06
6	5.0000E+06	4.0000E+06
7	4.0000E+06	3.0000E+06
8	3.0000E+06	2.5000E+06
9	2.5000E+06	2.0000E+06
*) 10	2.0000E+06	1.6600E+06
11	1.6600E+06	1.3300E+06
12	1.3300E+06	1.0000E+06
13	1.0000E+06	8.0000E+05
14	8.0000E+05	6.0000E+05
15	6.0000E+05	4.0000E+05
16	4.0000E+05	3.0000E+05
17	3.0000E+05	2.0000E+05
18	2.0000E+05	1.0000E+05
19	1.0000E+05	5.0000E+04
20	5.0000E+04	2.0000E+04 **)

*) DLC-23C (Cask) ライブラリに同じ。

**) ただし、最下限エネルギーは DLC-23C では、 1.0×10^4 eV となっている。

付 3.4.2 バッテル・ノースウェスト・ラボの例
〔BNWL-1855 (1975)〕

< Gamma Energy Group Structure >

No.	Upper Energy (eV)
1	7.0×10^6
2	6.0×10^6
3	5.0×10^6
4	4.0×10^6
5	3.5×10^6
6	3.0×10^6
7	2.5×10^6
8	2.0×10^6
9	1.6×10^6
10	1.2×10^6
11	0.9×10^6
12	0.6×10^6
13	0.4×10^6
14	0.21×10^6
15	0.12×10^6
16	0.07×10^6
(17)	0.01×10^6

付 3.4.3 バッテル・コロンバス・ラボの例
 [Nucl. Tech. 31 P244 (1976)]

< Eight-Group Gamma-Ray Spectra >

Group	En. Limits (MeV)	Photon/(g s)			
		$^{241}\text{Am} + ^{237}\text{U}$	Clean WR	3-yr-old WR	3-yr-old RG
1	0.09 -0.125	6.16×10^7	9.41×10^4	1.46×10^5	3.28×10^6
2	0.125-0.175	8.53×10^6	2.04×10^5	2.11×10^5	1.68×10^6
3	0.175-0.25	7.95×10^7	1.70×10^4	8.46×10^4	1.47×10^6
4	0.25 -0.35	8.60×10^6	2.94×10^4	3.67×10^4	1.75×10^5
5	0.35 -0.45	1.67×10^6	9.71×10^4	9.85×10^4	8.88×10^4
6	0.45 -0.55	5.50×10^4	4.22×10^3	4.27×10^3	3.55×10^3
7	0.55 -0.70	5.03×10^5	1.42×10^3	1.84×10^3	1.04×10^4
8	0.70 -0.90	2.83×10^5	6.15×10^2	8.55×10^2	1.44×10^4

付 3.5.4 DLC-23C (Cask) ライブラリの例

ガンマ線	
Group No	Upper Energy
1	10.0 MeV
2	8.0 "
3	6.5 "
4	5.0 "
5	4.0 "
6	3.0 "
7	2.5 "
8	2.0 "
9	1.66 "
10	1.33 "
11	1.00 "
12	800.0 KeV
13	600.0 "
14	400.0 "
15	300.0 "
16	200.0 "
17	100.0 "
18	50.0 "
*	10.0 "

*) 最下限エネルギー

付録3.6 中性子線エネルギー群分けの例

付3.6.1 原 研 の 例

付3.6.2 バッテル・ノースウェスト・ラボの例

付3.6.3 バッテル・コロンバス・ラボの例

付3.6.4 DLC-23C(Cask)ライブラリの例

付3.6.5 Hansen-Roach16群ライブラリの例

付 3. 5. 5 ガンマ線15群セットのエネルギー群構造

(PNC-SN841-76-40)

ガンマ線	
Group No	Upper Energy
1	3.10 MeV
2	2.151 "
3	1.493 "
4	1.036 "
5	719.0 KeV
6	499.0 "
7	346.0 "
8	240.0 "
9	167.0 "
10	115.6 "
11	87.5 "
12	66.3 "
13	50.2 "
14	38.0 "
15	28.8 "
*	21.8 "

*) 最下限エネルギー

付 3.6.1 原研の例〔JAERI-M6928〕

<これはGAM-IIのものと同じである。>

GROUP	ENERGY RANGE		GROUP	ENERGY RANGE	
1▲① ₁	1.4918E+07	1.3499E+07	51	8.6617E+04	6.7379E+04
2	1.3499E+07	1.2214E+07	52	6.7379E+04	5.2475E+04
3	1.2214E+07	1.1052E+07	53	5.2475E+04	4.0868E+04
4	1.1052E+07	1.0000E+07	54	4.0868E+04	3.1828E+04
⑤ ₂	1.0000E+07	9.0484E+06	55	3.1828E+04	2.4788E+04
6	9.0484E+06	8.1873E+06	56	2.4788E+04	1.9305E+04
7	8.1873E+06	7.4082E+06	57	1.9305E+04	1.5034E+04
8	7.4082E+06	6.7032E+06	⑤⑧ ₁₄	1.5034E+04	1.1709E+04
⑨ ₃	6.7032E+06	6.0653E+06	59	1.1709E+04	9.1188E+03
10	6.0653E+06	5.4881E+06	60	9.1188E+03	7.1017E+03
2▲11	5.4881E+06	4.9659E+06	61	7.1017E+03	5.5308E+03
⑫ ₄	4.9659E+06	4.4933E+06	62	5.5308E+03	4.3075E+03
13	4.4933E+06	4.0657E+06	63	4.3074E+03	3.3546E+03
⑭ ₅	4.0657E+06	3.6788E+06	8▲⑭ ₁₅	3.3546E+03	2.6126E+03
15	3.6788E+06	3.3287E+06	65	2.6126E+03	2.0347E+03
16	3.3287E+06	3.0119E+06	66	2.0347E+03	1.5846E+03
⑰ ₆	3.0119E+06	2.7253E+06	67	1.5846E+03	1.2341E+03
18	2.7253E+06	2.4660E+06	68	1.2341E+03	9.6112E+02
3▲⑱ ₇	2.4660E+06	2.2313E+06	69	9.6112E+02	7.4852E+02
20	2.2313E+06	2.0190E+06	70	7.4852E+02	5.8295E+02
21	2.0190E+06	1.8268E+06	⑰ ₁₆	5.8295E+02	4.5400E+02
⑳ ₈	1.8268E+06	1.6530E+06	72	4.5400E+02	3.5357E+02
4▲23	1.6530E+06	1.4957E+06	73	3.5357E+02	2.7536E+02
24	1.4957E+06	1.3534E+06	74	2.7536E+02	2.1445E+02
㉑ ₉	1.3534E+06	1.2246E+06	75	2.1445E+02	1.6702E+02
26	1.2246E+06	1.1080E+06	76	1.6702E+02	1.3007E+02
5▲27	1.1080E+06	1.0026E+06	77	1.3007E+02	1.0130E+02
28	1.0026E+06	9.0718E+05	⑱ ₁₇	1.0130E+02	7.8893E+01
㉒ ₁₀	9.0718E+05	8.2085E+05	79	7.8893E+01	6.1442E+01
30	8.2085E+05	7.4274E+05	80	6.1442E+01	4.7851E+01
31	7.4274E+05	6.7206E+05	81	4.7851E+01	3.7267E+01
32	6.7206E+05	6.0810E+05	82	3.7267E+01	2.9023E+01
6▲⑳ ₁₁	6.0810E+05	5.5023E+05	9▲㉓ ₁₈	2.9023E+01	2.2603E+01
34	5.5023E+05	4.9787E+05	84	2.2603E+01	1.7603E+01
35	4.9787E+05	4.5049E+05	85	1.7603E+01	1.3710E+01
36	4.5049E+05	4.0762E+05	86	1.3710E+01	1.0677E+01
㉔ ₁₂	4.0762E+05	3.6883E+05	⑳ ₁₉	1.0677E+01	8.3153E+00
38	3.6883E+05	3.3373E+05	88	8.3153E+00	6.4760E+00
39	3.3373E+05	3.0197E+05	89	6.4760E+00	5.0435E+00
40	3.0197E+05	2.7324E+05	90	5.0435E+00	3.9279E+00
41	2.7324E+05	2.4724E+05	91	3.9279E+00	3.0590E+00
42	2.4724E+05	2.2371E+05	㉕ ₂₀	3.0590E+00	2.3824E+00
43	2.2371E+05	2.0242E+05	93	2.3824E+00	1.8554E+00
44	2.0242E+05	1.8316E+05	94	1.8554E+00	1.4450E+00
45	1.8316E+05	1.6573E+05	95	1.4450E+00	1.1254E+00
46	1.6573E+05	1.4996E+05	㉖ ₂₁	1.1254E+00	8.7642E-01
47	1.4996E+05	1.3569E+05	97	8.7642E-01	6.8256E-01
48	1.3569E+05	1.2277E+05	98	6.8256E-01	5.3158E-01
49	1.2277E+05	1.1109E+05	99	5.3158E-01	4.1399E-01
7▲㉗ ₁₃	1.1109E+05	8.6617E+04	10▲㉘ ₂₂	4.1399E-01	1.0000E-03

(注) ○印は、PSL-40 (松本修正案) エネルギー境界と対応 (GGC-4はこの群分けで縮約する)

▲印は、Battelle Columbus Lab. 方式に対応 (Nucl. Tech. 31 (P244) 1976)

(コメント) ※▲印は、PSL-40 (22群) をさらに縮約する場合の参考になる。

※ほとんどのライブラリは、GAM IIタイプの等レサージ幅のエネルギーメッシュを縮約した形になっている。

付 3. 6. 2 バッテル・ノースウェスト・ラボの例 [BNWL-1855 (1975)]

Neutron Energy Group Structure

Group No.	Upper Energy (ev)
1	14.620×10^6
2	12.210×10^6
3	10.000×10^6
4	8.187×10^6
5	6.703×10^6
6	5.488×10^6
7	4.493×10^6
8	3.679×10^6
9	3.012×10^6
10	2.466×10^6
11	2.019×10^6
12	1.553×10^6
13	1.353×10^6
14	1.108×10^6
15	9.072×10^5
16	6.081×10^5
17	4.076×10^5
18	1.119×10^5
19	1.503×10^4
20	3.355×10^3
21	5.829×10^2
22	1.013×10^2
23	2.902×10^1
24	1.068×10^1
25	3.059
26	1.125
27	.4139

*) GAM-II の 2 群づつを 1 群にしている。
($\Delta u = 0.2$)

付 3.6.3 バッテル・コロンバス・ラボの例 [Nucl. Tech. 31 P244 (1976)]

Tin-group Neutron Energy Structure

Group	Eave (MeV)	Eupper (MeV)	Elower (MeV)	Flux/Dose Conversion [mrem/h per n/(cm ² s)]
1	10.2	①-14.91	5.488	0.147
2	3.98	⑪- 5.488	2.466	0.129
3	2.06	⑲- 2.466	1.653	0.128
4	1.38	⑳- 1.653	1.108	0.137
5	0.858	㉓- 1.108	0.6081	0.127
6	0.360	③③- 0.6081	0.111	0.067
7	0.0572	⑤⑩- 0.111	3.355×10^{-3}	0.020
8	1.69×10^{-3}	⑥④- 3.355×10^{-3}	2.902×10^{-5}	0.0043
9	1.47×10^{-5}	⑧③- 2.902×10^{-5}	4.140×10^{-7}	0.0043
10	2.07×10^{-7}	⑩⑩- 4.140×10^{-7}	0	0.0037

(対応するGAM-II fine group No.)

付 3. 6. 4 DLC-23C (Cask) ライブラリの例

中性子線		
Group No	Upper Energy	
1	14.9	MeV
2	12.2	"
3	10.0	"
4	8.18	"
5	6.36	"
6	4.96	"
7	4.06	"
8	3.01	"
9	2.46	"
10	2.35	"
11	1.83	"
12	1.11	"
13	550.0	KeV
14	110.0	"
15	3.35	"
16	583.0	eV
17	101.0	"
18	29.0	"
19	10.1	"
20	3.06	"
21	1.12	"
22	0.414	"
*	0.01	"

*) 最下限エネルギー

付 3.6.5 Hansen - Roach 16 群臨界計算用ライブラリの例
 (LAMS-2543)

SIXTEEN GROUP SPECIFICATIONS

	<u>Group</u>	<u>En. Range</u>	<u>Δu</u>	<u>v (cm/shake)</u>	<u>Fission Spectrum</u>
6 ←	1	3 - ∞ mev		28.5	0.204
5 ←	2	1.4 - 3 mev	0.762	19.9	0.344
4 ←	3	0.9 - 1.4 mev	0.442	14.7	0.168
3 ←	4	0.4 - 0.9 mev	0.811	11.0	0.180
2 ←	5	0.1 - 0.4 mev	1.386	6.7	0.090
1 {	6	17 - 100 kev	1.772	2.70	0.014
	7	3 - 17 kev	1.735	1.14	0
	8	0.55 - 3 kev	1.696	0.480	0
	9	100 - 550 ev	1.705	0.206	0
	10	30 - 100 ev	1.204	0.101	0
	11	10 - 30 ev	1.099	0.0566	0
	12	3 - 10 ev	1.204	0.0319	0
	13	1 - 3 ev	1.099	0.0179	0
	14	0.4 - 1 ev	0.916	0.0109	0
	15	0.1 - 0.4 ev	1.386	0.00606	0
	16	Thermal (0.025)		0.00218	0

↑ 6群の場合