

JAERI - M

82-193

プログラムELISによる ${}^6\text{Li}$ -ガラスおよび
 ${}^{10}\text{B}$ -NaI検出器の効率計算

1982年12月

杉本 昌義・水本 元治

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section
Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

プログラム ELIS による ${}^6\text{Li}$ -ガラスおよび
 ${}^{10}\text{B}$ -NaI 検出器の効率計算

日本原子力研究所東海研究所物理部

杉本昌義 ・ 水本元治

(1982 年11月22日受理)

${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータおよび ${}^{10}\text{B}$ -NaI 検出器の相対検出効率を計算により求めるためモンテ・カルロ・プログラム ELIS (a program to calculate the Efficiency of Li - glass Scintillators) を作成した。これらの検出器は日本原子力研究所の電子線形加速器 (原研リニアック) において中性子捕獲断面積測定を行う際に入射中性子束の測定のため使用されている。計算は ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応には JENDL-1, ${}^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ 反応には ENDF/B-V といった核データ・ライブラリの標準断面積に基づいて行われ、通常用いられるモンテ・カルロ手法により検出器系全体, 例えば ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータと光電子増倍管窓のガラス, における多重散乱効果を考慮している。計算結果は統計的には 2~3% 以内の信頼性があると考えられるが, 全体的な誤差の主な原因は計算に使用している標準断面積データの誤差ないしはその一般化である共分散にある。

ここでは断面積データ・ファイルのつくり方と相対効率の計算手法を述べた後, 計算結果の誤差について議論する。

JAERI-M 82-193

The Calculation of the Efficiency of ${}^6\text{Li}$ -Glass and
 ${}^{10}\text{B}$ -NaI Detectors by the Program ELIS

Masayoshi SUGIMOTO and Motoharu MIZUMOTO

Division of Physics, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 22, 1982)

The Monte Carlo program ELIS was developed to obtain relative efficiencies of a ${}^6\text{Li}$ -glass scintillator and a ${}^{10}\text{B}$ NaI detector, which were used as the incident neutron detectors in the measurements of neutron radiative capture at the Japan Atomic Energy Research Institute electron linear accelerator (JAERI linac). The calculation is based on the standard cross sections in the evaluated nuclear data files, such as JENDL-1 for ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ reaction and ENDF/B-V for ${}^{10}\text{B}(n,\alpha\gamma)$ reaction, and takes into account the multiple scattering effect in the detector system, e.g. the ${}^6\text{Li}$ -glass scintillator and the photomultiplier window, using the conventional Monte Carlo technique. The calculated results are reliable within a few percents in a statistical meaning. However, the total uncertainties of the results are mainly due to the uncertainties or the covariances of the standard cross sections used in the calculation. This report describes the procedures of the preparation of the cross section data file and the calculational method of the relative efficiency, and discusses the uncertainties of the obtained results.

Keywords : Monte Carlo Program, ${}^6\text{Li}$ -glass Scintillator,
 ${}^{10}\text{B}$ -NaI Detector, Relative Efficiency, Covariances,
Incident Neutron Detectors, Cross Section

目 次

1. はじめに	1
2. 計算に用いる中性子断面積ファイル	2
3. 効率計算におけるモンテ・カルロ法	6
3.1 入射点の決定	6
3.2 衝突を起こす位置の選択	7
3.3 反応型と核種の選択	8
3.4 散乱方向の選択	9
3.5 体系内の行路長の決定	9
3.6 検出効率	10
3.7 注意事項	11
4. プログラムの構成	12
5. プログラムの実行例	14
5.1 ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータ	14
5.2 減速材つき ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータ	15
5.3 ${}^{10}\text{B}$ -NaI 検出器	16
6. 効率の計算結果と議論	29
7. おわりに	36
謝 辞	36
参考文献	37
付録 A ELISの入力方法	38
付録 B LIBELAの使用法	40
B. 1 入力方法	40
B. 2 断面積ファイルの作成形式	43
B. 3 入力例	44
B. 4 多準位ブライト・ウィグナー式	48
付録 C 効率計算結果の誤差推定のための処理プログラム	51
付録 D ${}^6\text{Li}$ -ガラスおよび ${}^{10}\text{B}$ -NaI 検出器の効率を与えるファンクション・ プログラム	55

Contents

1.	Introduction	1
2.	The neutron cross section file for the calculation	2
3.	The Monte Carlo method in the efficiency calculation	6
3.1	Determination of the incident point	6
3.2	Selection of the position of neutron collision	7
3.3	Choice of the reaction type and nuclear species	8
3.4	Choice of the scattering direction	9
3.5	Determination of the path lengths in the system	9
3.6	Detection efficiency	10
3.7	Remarks	11
4.	Structure of the program	12
5.	Executorial runs	14
5.1	A ^6Li -glass scintillator	14
5.2	A ^6Li -glass scintillator with moderator	15
5.3	A ^{10}B -NaI detector	16
6.	Results of the calculated efficiencies and discussion	29
7.	Conclusion	36
	Acknowledgement	36
	References	37
Appendix		
A.	Input scheme of ELIS	38
B.	Manual of LIBELA	40
B.1	Input scheme	40
B.2	Format of the cross section data file	43
B.3	An example of the input data	44
B.4	Multi-level Breit-Wigner formula	48
C.	The processing program to estimate the uncertainties for the calculated efficiency	51
D.	List of the function programs giving the efficiency of ^6Li -glass and ^{10}B NaI detectors	55

1. はじめに

日本原子力研究所の120 MeV電子線形加速器（原研リニアックと略称）を用いたeVから数百keV領域における中性子捕獲断面積測定では入射中性子束を測定するために ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータおよび ${}^{10}\text{B}$ -NaI検出器を併用している。¹⁾ これらの検出器の効率をモンテ・カルロ法により計算する目的でELIS (a program to calculate the Efficiency of Li-glass Scintillators)を作成した。同じような目的でおこなわれた計算として文献2)があるがこのプログラムの特徴は使用する断面積ファイルの作成法に多様性をもたせたことと、多重層から成る体系を考慮していることにある。プログラムは、中性子が入射してから着目する反応（中性子検出を可能にする粒子またはガンマ線を放出するという意味で「放出反応」とよぶ）が生ずる時点までをモンテ・カルロ法で追跡する手法をとる。放出反応は ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータの場合 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応、 ${}^{10}\text{B}$ -NaI検出器は ${}^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ 反応である。プログラムが使用する断面積データは一定のエネルギー間隔または一定の間隔比で与えられた各エネルギー点における放出反応断面積・散乱断面積・吸収断面積から成る。対象とする体系は単層または多層の円板形をしており、入射中性子は円板中心に向かい円形で一様なビーム状にしぼられていると仮定する。この時ビームが円板面からはみ出さない範囲ならば斜めに一定角度で入射してもかまわない。多層円板の場合各層が密着している必要はなく、間が空いているならばその部分を真空層か空気層とする。

ELISで用いる断面積ファイルの作成専用プログラムとしてLIBELA(cross section library of elastic scattering and absorption)を用意した。ファイルはENDF/Bフォーマットのデータや共鳴パラメータのカード入力から作成され、必要とする各反応の巨視的断面積を各層、各エネルギー点ごとに計算したものがディスク上に保存される。

断面積ファイルに関しては2章で説明する。3章ではモンテ・カルロ・プログラムELISについて述べ4章にプログラム構成を示す。5章はELISの使い方を実行例をもとに解説しており、6章に ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータおよび ${}^{10}\text{B}$ -NaI検出器の効率計算の結果を述べる。

ELIS, LIBELAの入力データの揃え方は付録A, Bを参考にしていきたい。

付録Cは検出効率の誤差推定のための処理プログラム、付録Dは計算結果をファンクション・プログラム化したものであり任意の中性子エネルギーにおける相対効率を両対数の線形内挿または多項式近似で求めている。

2. 計算に用いる中性子断面積ファイル

ELISを実行するに先立って計算に必要な放出反応断面積・散乱断面積・吸収断面積を各核種、各エネルギー点ごとに求めておかなければならない。計算した断面積データ・ファイルは一定の形式にしたがってディスク・ファイルとして登録され、ELISの実行時にこれを介してデータが引き出される。ファイル作成のためのプログラムLIBELAの入力データの揃え方、作成したファイルの内容形式および実行例リストは付録Bで述べる。本章ではファイル化する際の断面積の計算方法を説明する。

任意の核種 i の全断面積 $\sigma_{tot,i}$ は

$$\sigma_{tot,i} = \sigma_{n,i} + \sigma_{a,i} \quad (2.1)$$

で表わされる。ここで $\sigma_{n,i}$ は散乱断面積、 σ_a は広義の吸収断面積である。核種 k が放出反応を起こすと考えると、 $\sigma_{e,k}$ を放出反応断面積として、

$$\sigma_{tot,k} = \sigma_{n,k} + \sigma_{a,k} + \sigma_{e,k} \quad (2.2)$$

と書ける。 $\sigma_{a,k}$ は放出反応を除く吸収断面積である。

吸収断面積を計算の便宜上さらに分ける必要がある場合は別の核種名で吸収断面積だけのファイルをつくればよい。

(2.1)、(2.2)の σ_n 、 σ_a 、 σ_e を計算する方法として次のふたつから選択ができる。

- (I) 任意のエネルギー点における断面積値を入力データとして与える。ファイル用のデータはそれらの間の両対数の一次内挿で求める。
- (II) 共鳴パラメータ（共鳴エネルギー、中性子巾、吸収巾、スピン統計因子等）を用いて多準位ブライト・ウィグナー式からまず全断面積を求め、散乱断面積はこの値から単準位ブライト・ウィグナー式による吸収断面積を差し引く。この計算手法は文献3)によっており、詳しい計算式は付録B. 4に示す。

ファイル化する断面積は各層における各核種の巨視的断面積データであり、中性子エネルギーを E とすると、

$$S_{c,j}(E) = \sum_{i=1}^{NUCNUM} S_{c,i(j)}(E) = \sum_{i=1}^{NUCNUM} n_{i(j)} \sigma_{c,i}(E) \quad (2.3)$$

と表わされる。 c は反応の型、 j は層の種類、 $n_{i(j)}$ は j 層における核種 i の単位体積当たりの個数、 $NUCNUM$ は核種総数である。データ・ファイルには $S_{c,i(j)}$ と $S_{c,j}$ が付録B. 2に示したような形式で書き込まれている。Fig. 2.1-3に付録B. 3にある入力により作成したデータ・ファイルをプロットしたものを示す。この例は6.4mm厚の ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータに関するものでFig. 2.1は ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{27}\text{Al}$ をFig. 2.2は ${}^{24}\text{Mg}$ 、 ${}^{28}\text{Si}$ 、 ${}^{140}\text{Ce}$ の全断面積、Fig. 2.3は ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応断面積とシンチレータの全断面積を比較したものである。この図に示した1-250keVの範囲では ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 以外の反応とくに散乱が大勢を占めており、 ${}^6\text{Li}$ ガラス・シンチレータのこのエネルギー領域の効率多重散乱効果の影響が大きいことを示

峻している。

最後に、いくつかファイル作成上の注意点を述べておく。第一はエネルギー間隔の与え方に関するものである。ELISではファイルにあるエネルギー点以外の断面積データは計算時間を短縮するため一次内挿で求めているのでエネルギーに対する変動が激しい共鳴近傍等の領域で精密な計算を行う場合は十分にせまいエネルギー間隔でファイルをつくって実行する。第二はファイルの最小エネルギーの指定に関するものである。モンテ・カルロ計算では中性子エネルギーが入力で指定したエネルギー・カットオフに達すると追跡を打ち切るようになっている。同じファイルを異なる入射エネルギーに使用する場合はファイルの最小エネルギーと計算時のエネルギー・カットオフの関係に注意を払う必要がある。

Table 2.1に5章, 6章で用いた ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータ, 光電子増倍管の窓(ガラス) ${}^{10}\text{B}$ サンプルの構成核種の密度(10^{24} atom/cm³)を示しておく。

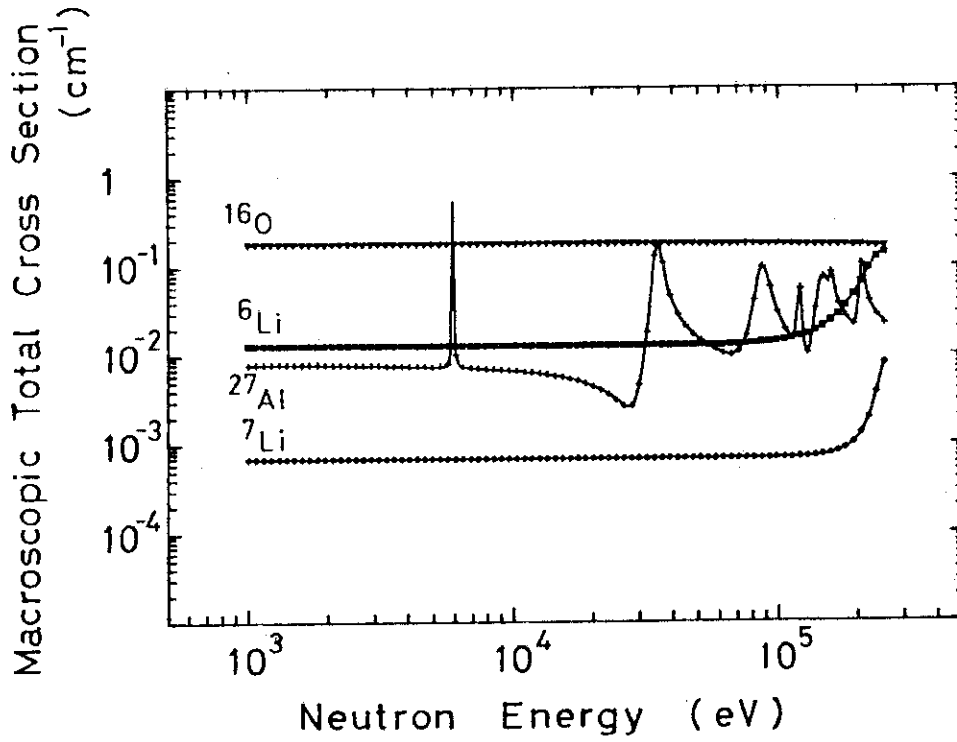


Fig. 2.1 Calculated macroscopic total cross sections for ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{16}\text{O}$ and ${}^{27}\text{Al}$ in the ${}^6\text{Li}$ -glass scintillator.

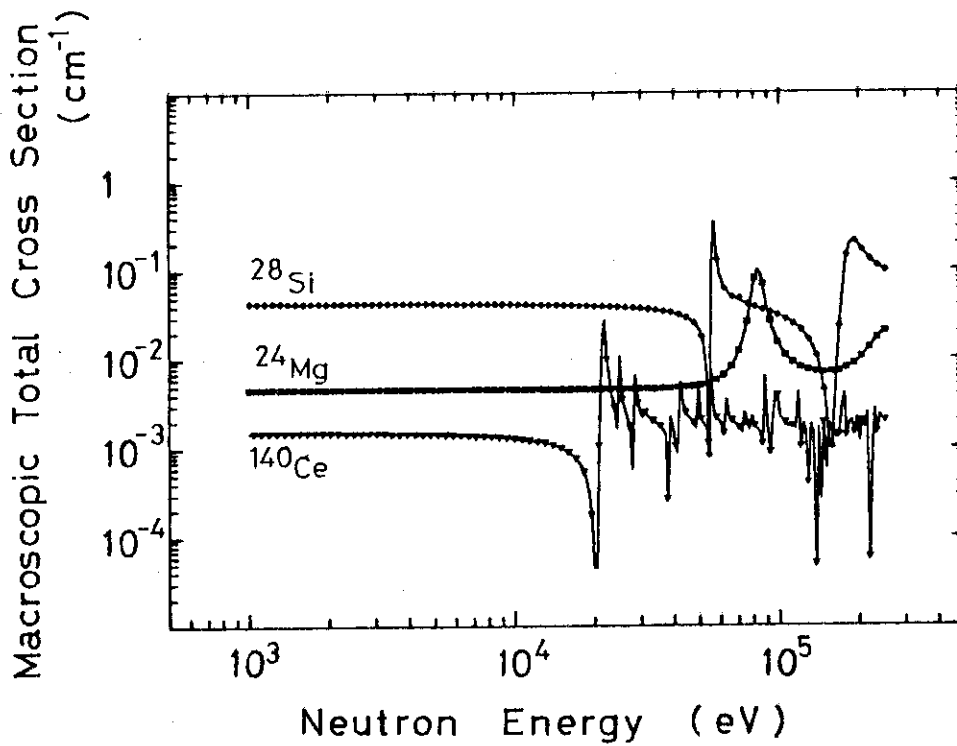


Fig. 2.2 Same as Fig. 2.1, but for ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$ and ${}^{140}\text{Ce}$.

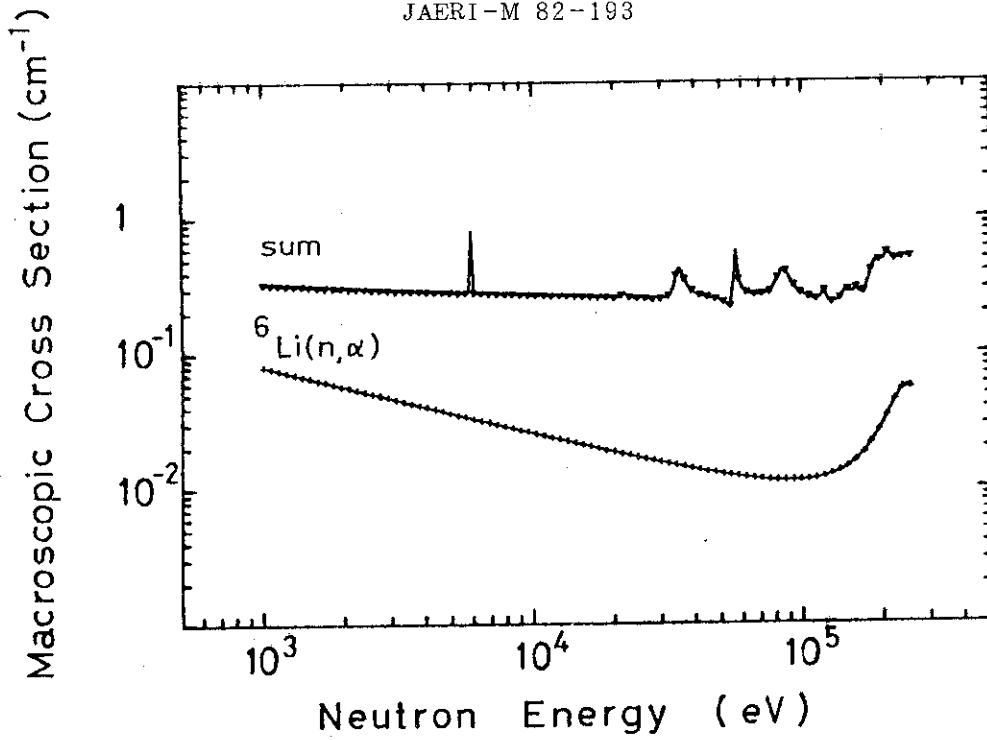


Fig. 2.3 Calculated macroscopic cross sections for the ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ reaction (+) and the summed total cross section of the ${}^6\text{Li}$ -glass scintillator (∇).

Table 2.1 Nuclear contents of a): a ${}^6\text{Li}$ -glass scintillator, b): a photomultiplier window and c): a ${}^{10}\text{B}$ sample.

nuclei	a) ${}^6\text{Li}$ -glass scintillator	b) photomultiplier window	c) ${}^{10}\text{B}$ sample
${}^6\text{Li}$	0.0171 *)	-	-
${}^7\text{Li}$	0.0007	-	-
${}^{16}\text{O}$	0.0467	0.0456	-
${}^{24}\text{Mg}$	0.0014	-	-
${}^{27}\text{Al}$	0.0053	0.0006	-
${}^{28}\text{Si}$	0.0140	0.0182	-
${}^{140}\text{Ce}$	0.0003	-	-
${}^{10}\text{B}$	-	0.0010	0.0581
${}^{11}\text{B}$	-	0.0040	0.0048
${}^{23}\text{Na}$	-	0.0017	-

*) 10^{24} atoms/cm³

3. 効率計算におけるモンテ・カルロ法

ELISでは、入射点の決定、衝突を起こす位置、反応型の選択および散乱方向にランダム・サンプリングの方法を適用している。3.1から3.4までこれらのサンプリングの方法について説明する。3.5から3.7ではそれぞれ散乱中性子の体系内における行路長、相対効率を算出するための式、若干の注意事項について述べる。

3.1 入射点の決定

Fig. 3.1のように多層内板の中心に向けて一様な円形のビームが一定角度で入射すると考える。座標は円板中心を原点とし円板面上に x , y 軸をとり z 軸は厚さ方向にとる。Fig. 3.2はビーム断面上の座標 (x', y') と円板面上における入射点 (x_0, y_0) との関係を表わしている。入射角を θ とすると、

$$\begin{cases} x_0 = x' / \cos \theta \\ y_0 = y' \end{cases} \quad (3.1)$$

が成り立つ。入射点のサンプリングは最初 (x', y') を

$$x'^2 + y'^2 < r^2, \quad (3.2)$$

$$\text{ただし } -r < x' < r,$$

$$0 < y' < r,$$

を満たすようにランダムに選ぶ。次に(3.1)を用いて (x_0, y_0) を求める。 $y' < 0$ の場合は体系の対称性から $y' > 0$ の場合に帰着される。

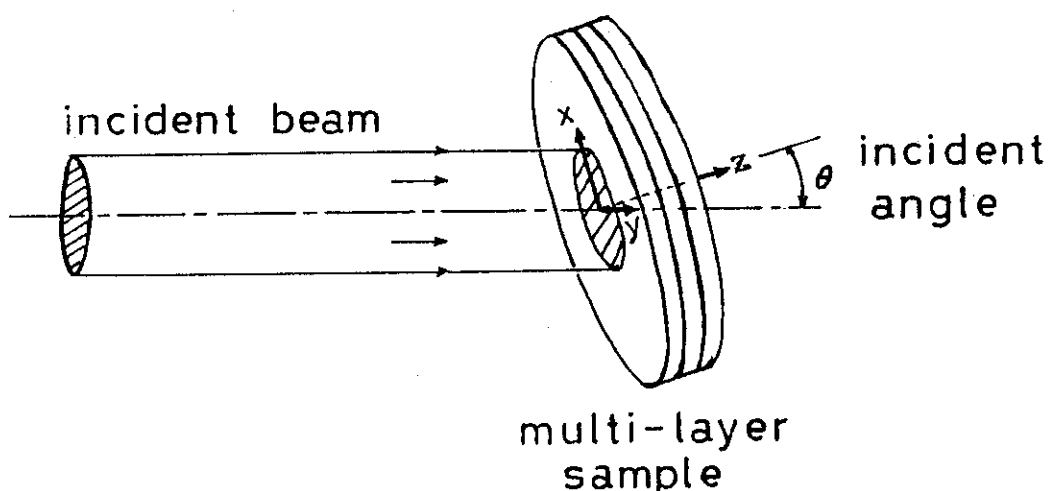


Fig. 3.1 Geometrical arrangement of the sample irradiated by neutron beam.

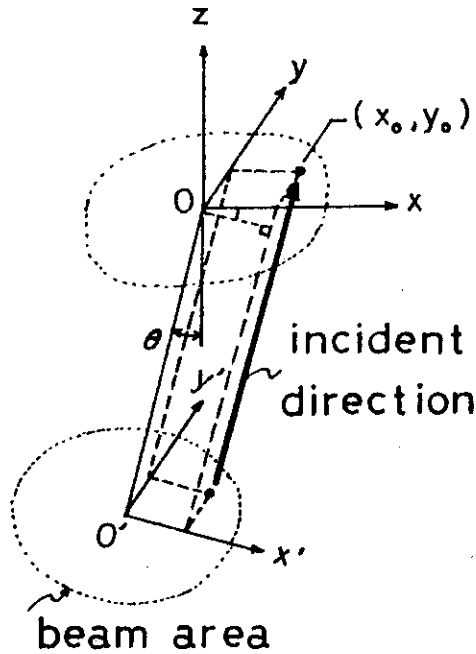


Fig. 3.2 Relationship between x,y coordinates of the point in the beam and those of the incident point on the sample surface.

3.2 衝突を起こす位置の選択

多層系の層の番号を k ($= 1, 2 \dots K$) で表わし, 厚さを d_k , 巨視的全断面積を $S_{t,k}$ とする。入射エネルギーを E_0 とすると透過率は

$$T(E_0) = \exp \left\{ - \sum_{k=1}^K S_{t,k}(E_0) \cdot d_k \right\} \quad (3.3)$$

であり, $1 - T(E_0)$ の確率で衝突を起こす。衝突を起こすまでの距離を p とすると, p までの透過率 T_p は,

$$\begin{cases} 1 \geq T_p > \exp(-S_{t,1} \cdot d_1) & (1=1 \text{ の場合}) \\ \exp \left\{ - \sum_{k=1}^{l-1} S_{t,k} \cdot d_k \right\} \geq T_p > \exp \left\{ - \sum_{k=1}^l S_{t,k} \cdot d_k \right\} & (1 \geq 2 \text{ の場合}) \end{cases} \quad (3.4)$$

のどれかを満たし, この時 l は p の位置する層の番号を与える。上式の対数をとると

$$\begin{cases} 0 \leq -\log T_p < S_{t,1} \cdot d_1 & (1=1) \\ 0 \leq \left\{ -\log T_p - \sum_{k=1}^{l-1} S_{t,k} \cdot d_k \right\} < S_{t,l} \cdot d_l & (1 \geq 2) \end{cases} \quad (3.5)$$

を得る。衝突位置を選択するにはまず T_p を $[0, T(E_0)]$ の間で一様に選び, (3.5) を満

たす l を求めたうえで

$$\begin{cases} p = -\log T_p / S_{t,l} & (l=1) \\ p = -(\log T_p + \sum_{k=1}^{l-1} S_{t,k} \cdot d_k) / S_{t,l} + \sum_{k=1}^{l-1} d_k & (l \geq 2) \end{cases} \quad (3.6)$$

から p を決める。衝突位置の座標は

$$\begin{cases} x = x_0 + p \sin \theta \\ y = y_0 \\ z = p \cos \theta \end{cases} \quad (3.7)$$

と表わされる。2回目以後の衝突については、3.5で述べる体系内の各層の通過距離 D_k (k は通過の順に番号をつけかえる) から透過率

$$T(E) = \exp \left\{ - \sum_k S_{t,k}(E) D_k \right\} \quad (3.8)$$

を求め、 $0 \leq \xi \leq 1$ で一様に発生させた乱数が $T(E)$ より小さい時次の衝突を起こすと考える。

$T(E)$ 以上の場合は体系外に出たものとして追跡を終える。次の衝突点は出発点 (x, y, z) 、方向ベクトル (u, v, w) 、および ξ から次式により求める。

$$\begin{cases} x' = x + p \cdot u \\ y' = y + p \cdot v \\ z' = z + p \cdot w \end{cases} \quad (3.9)$$

ここで通過距離 p は

$$p = -(\log \xi + \sum_{k=1}^{l-1} S_{t,k} \cdot D_k) / S_{t,l} + \sum_{k=1}^{l-1} D_k$$

であり、 l は

$$\begin{cases} 0 < -\log \xi < S_{t,l} \cdot D_l & (l=1) \\ 0 < \left\{ -\log \xi - \sum_{k=1}^{l-1} S_{t,k} \cdot D_k \right\} < S_{t,l} \cdot D_l & (l \geq 2) \end{cases}$$

を満たす。

3.3 反応型と核種を選択

衝突を起こした層番号に対応する層種 j の巨視的部分断面積をファイルから引き出し放出反応の有無に応じて

$$S_{t,j} = S_{n,j} + S_{a,j} \quad (3.10)$$

$$S_{t,j} = S_{n,j} + S_{a,j} + S_{e,j} \quad (3.11)$$

のいずれかを適用して、どの反応型が起こったかをランダムに決める。散乱と吸収については各核種からの寄与

$$S_{c,i(j)}/S_{c,j} = S_{c,i(j)} / \sum_{i'=1}^{\text{NUCNUM}} S_{c,i'(j)} \quad (c = n, a) \quad (3.12)$$

に応じてどの核種による散乱，吸収であるかをランダムに決める。

放出反応が起こった場合はその時刻と位置および中性子エネルギーを保存して終了する。吸収反応の場合は反応を起こした核種と層番号を記録する。散乱の時に限り 3.4 へ進みヒストリを続行する。

3.4 散乱方向の選択

すべての散乱は重心系で等方的であると仮定する。散乱の方位角を θ_c ，回転角 ϕ_c とすると $\cos \theta_c$ を $[0,1]$ の間で一様にとり， ϕ_c は $[0, 2\pi]$ で一様にとる。実験室系の散乱角 (ϑ , φ) は

$$\begin{cases} \cos \vartheta = (1 + A \cos \theta_c) / (A^2 + 2A \cos \theta_c + 1)^{1/2} \\ \varphi = \phi_c \end{cases} \quad (3.13)$$

から求める。A は中性子に対する質量比である。散乱後の中性子エネルギー E' は散乱前のエネルギーを E として，

$$E' = [(A^2 + 2A \cos \theta_c + 1) / (A + 1)^2] E \quad (3.14)$$

と書ける。特に水素による散乱の場合は (3.13)，(3.14) は簡略化され

$$\begin{cases} \cos \vartheta = \sqrt{\xi} \\ \varphi = \phi_c \\ E' = \xi E \end{cases} \quad \xi \text{ は } [0,1] \text{ 一様散乱} \quad (3.15)$$

となる。散乱前後の方向ベクトル (u, v, w) (u', v', w') は

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cos \varphi - \sin \varphi & \sin \vartheta \cos \varphi \\ \cos \vartheta \sin \varphi & \cos \varphi & \sin \vartheta \sin \varphi \\ -\sin \vartheta & 0 & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

という変換にしたがう。

散乱後のエネルギー E' が入力で指定するエネルギー・カットオフ (Appendix A の Card 8. EDMIN1) 以下である時はヒストリを終了する。

3.5 体系内の行路長の決定

体系内の点 (x, y, z) から (u, v, w) 方向への全行路長は各層における行路長 D_k の和である。(x, y, z) が第 k 層の点であるとする D_k は

$$\min \left\{ \frac{1}{w} [(\text{第 } k \text{ 層の進行方向の境界 } z \text{ 座標}) - z], D \right\} \quad (3.17)$$

D : 円板側面までの距離で次の方程式の解

$$(x + D \cdot u)^2 + (y + D \cdot v)^2 = R^2 \quad (3.18)$$

R : 円板の半径

から決まる。D_k が D より小さいと隣りの層 (w の正負に応じて k + 1 または k - 1) も横断する。その距離は (3.17) の [……] 内を (その層の進行方向の境界 z 座標) - (その層の進行逆方向の境界 z 座標) でおきかえて同様な計算をすれば求めることができる。k は両端の層に達するかまたは D_k が D に等しくなるまで順次増減していく。

3.6 検出効率

プログラムが計算しているのは放出反応の発生数であるので、これから絶対効率を求めるには反応の結果発生した粒子・ガンマ線を検出する過程の効率がわからなければならない。⁶Li-ガラス・シンチレータや ¹⁰B-NaI についてはこの効率は数百 keV 以下の中性子についてはほぼ一定であるとみなされるので相対効率を問題にする場合は省略してよい。入射エネルギー E における相対検出効率 η は

$$\eta(E) = \sum_m Y_m(E) / Y_0 \quad (3.19)$$

と表わされる。Y₀ は入射中性子数、Y_m は m 回目の衝突で放出反応を起こした数である。上式を透過率 T と巨視的断面積 S で表現すると、

$$\eta(E) = \frac{Y_1}{Y_0} + \frac{Y_2}{Y_0} + \dots$$

$$\frac{Y_1}{Y_0} = \sum_k \left\{ \frac{k}{j} (1 - T_j(E)) \right\} \frac{S_{e,j}(E)}{S_{t,j}(E)} \quad (3.20)$$

$$\frac{Y_2}{Y_0} = \sum_k \left\{ \frac{k}{j} (1 - T_j(E)) \right\} \frac{S_{n,j}(E)}{S_{t,j}(E)} \left\langle \sum_i \left\{ \frac{1}{i} (1 - T_i(E')) \right\} \frac{S_{e,i}(E')}{S_{t,i}(E')} \right\rangle$$

$$\vdots \quad (3.21)$$

$$T_j(E) = \exp \left\{ - S_{t,j}(E) d_j \right\}$$

となる。〈 …… 〉 は散乱後のエネルギー E' (または散乱方向) についての平均操作である。k, l は層の番号を表わし、i, j は層の種類を表わしている。特に単層の場合は

$$\frac{Y_1}{Y_0} = (1 - T(E)) \frac{S_e(E)}{S_t(E)} \quad (3.22)$$

$$\frac{Y_2}{Y_0} = (1 - T(E)) \frac{S_n(E)}{S_t(E)} \left\langle (1 - T(E')) \frac{S_e(E')}{S_t(E')} \right\rangle \quad (3.23)$$

$$\vdots$$

$$T(E) = \exp \left\{ - S_t(E) d \right\}$$

となる。(3.20) から (3.23) で最初の衝突に対して平均操作がないのは厚さ一定の体系に一定エネルギーのビームが入射するという前提に立っていることによる。

3.7 注意事項

ELISは非弾性散乱を正しく扱うようになっていない。断面積ファイルには吸収断面積として取り入れることができるが非弾性散乱後に放出反応が生ずる確率が無視できないような核種、エネルギー領域での計算には特別な注意を払う必要がある。

4. プログラムの構成

プログラムは大きく分けるとデータの入力部、モンテ・カルロ計算部、結果の出力部から構成され、Fig. 4.1に全体のブロック図を示す。データ入力はひとつはモンテ・カルロ計算用のパラメータでありカード入力による。もうひとつはLIBELAプログラムで作成した断面積ファイルでサブルーチンLIBINにて入力をおこなう。種々の定数や初期値の設定の終了後サブルーチンWRINPは入力パラメータをリスト出力する。モンテ・カルロ計算を実際におこなうのはサブルーチンSIMULAであり最終結果はサブルーチンOUTFILで出力される。この時点で利用者が独自に結果を再編集することも考えられサブルーチンGEOMETはそのひとつの例である。以下に各サブルーチンの機能をまとめておく。

サブルーチン名

LIBIN	LIBELAにより作成した断面積ファイルから計算に必要な断面積データを入力する。(ファイルの作成法や形式は付録Bを参照)
WRINP	入力データならびに初期値設定後のデータのリスト出力をおこなう。
SIMULA	3章で説明したモンテ・カルロ計算をおこなう。
MATRIX	(3.16)式の方角ベクトルの変換を計算する。
RANDA2	3.1にしたがって入射点の決定をおこなう。
PAIRRN	3.4で説明した重心系における散乱方向 θ_c , ϕ_c をサンプリングする。
RANDOM	[0,1]一様乱数を発生する。
OUTFIL	モンテ・カルロ計算の結果をリスト出力する。
GEOMET	結果に対する再編集のため利用者が追加するサブルーチン。ここでは放出反応発生位置に対する幾何的効率の依存性の評価をおこなっている。

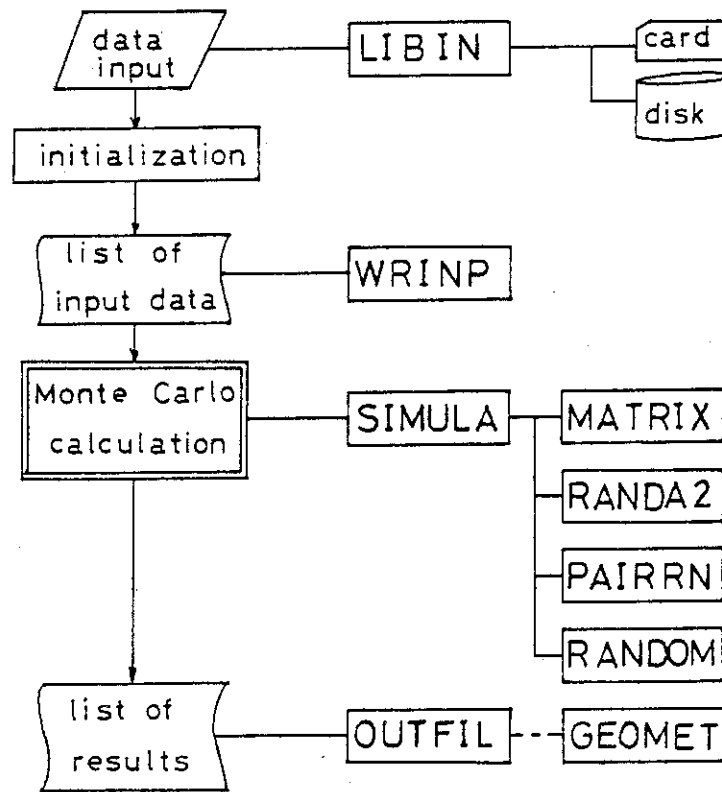


Fig. 4.1 Flow diagram of the program ELIS.

5. プログラムの実行例

入力データの揃え方は付録Aを参照することにしてここではいくつかの例をもとに使い方を解説する。

5.1 ${}^6\text{Li}$ - ガラス・シンチレータ

${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータ(6.25mm厚)中で放出反応の ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応が発生する割合と場所を調べる。計算に使用した断面積ファイルはTable 2.1にある組成から付録B. 3に示す入力データを用意して作成した。Fig. 5.1~3は中性子エネルギーが100 keVと220 keVの時の入力データ及び実行結果のリストである。出力リストには計算内容を表わすタイトルと断面積ファイルの内容、入力データがまず示される。Fig. 5.1の最下段にあるのが断面積ファイルの内容をまとめたものでこれはファイル作成時の出力リスト(Fig. B. 2の上段)と同じものである。その上にある2行は検出効率を求める際に重要であり、それぞれOVERALL TRANSMISSION …は(3.3)式の $T(E_0)$ MACROSCOPIC CROSS SECTION …は(3.3)式の $S_{i,k}(E_0)$ を表わしている。すなわち、検出効率は

$$\eta(E) = (1 - T(E_0)) \frac{\text{DETECTED PARTICLES}}{\text{PRIMARY INTERACTION}} \quad (5.1)$$

から求められる。PRIMARY INTERACTIONとDETECTED PARTICLESはそれぞれ全ヒストリ数と放出反応の発生数であり、Fig. 5.2に検出効率(図中RELATIVE EFFICIENCY)ともども示されている。他に吸収反応の発生数(ABSORPTION EVENTS)、体系外へ逃れたもの(LEAKAGE)、指定した衝突回数以上の衝突を1ヒストリ中に行なったもの(COLLISION OVER TIMES)、中性子が減速されて使用している断面積ファイルのエネルギー下限をこえてしまったもの(ENERGY RANGE OVER)を示している。次のEDIT OF EACH TYPE VS. TIMES OF COLLISIONは放出反応(EMIT)吸収反応(ABS)そして体系から逃げたもの(LEAK)がそれぞれ何回目の衝突で発生したかを表わす。特にEMIT欄は6章で述べる効率の計算結果に対する誤差の推定の時に重要となる。次にEDIT OF CAPTURE EVENTは吸収反応がどの核種で起こったかを表わしている。3.6でふれたように吸収反応として非弾性散乱を含めた場合にはその寄与が無視できるものであるかどうかをこの出力結果から判定する必要がある。EDIT OF EACH TYPE VS. LAYER NO.は多層系の場合それぞれの層における放出反応(EMISSION)、吸収反応(ABSORPTION)、衝突回数オーバー(OVER TIMES)、減速によるエネルギー下限オーバー(RANGE OVER)を表わしている。Fig. 5.2下段のEDIT OF DISTRIBUTION …は放出反応が発生した時刻とその時の中性子エネルギーについて2次元で表現したものである。Fig. 5.3上段は発生位置に対する3次元分布を表わしている。X, Y座標は体系の外径を等分割し、負方向から順に番号を付けたものである(Fig. 3.1参照)。Fig. 5.3下段は中性子エネ

ルギーが220 keVの時の結果の初めの部分を示したもので後半は省略した。計算時間はヒストリを5万として約13秒(M-200型計算機使用)であった。

Fig. 5.4は上の計算結果のうち一定時間内におけるエネルギー分布をグラフにしたものである((a)は入射エネルギー100 keV, (b)は220 keV)。横軸はレサジー $u = \log(E_0/E)$ である。 E_0 は入射エネルギー、 E は ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応を起こした時の中性子エネルギーである。実線のヒストグラムはビーム入射から0~5 nsecに多重散乱の後反応した数 I を最初の衝突による反応数 I_0 で割り単位レサジー当たりの値に換算したものである。破線は同様に5~10 nsecにおける反応数の比を表わす。したがって、それぞれヒストグラムの面積全体が多重散乱の大きさに相当している。0~5 nsecの間の中性子エネルギーは平均90 keVであり入射時点からそれほど大きく減速をしないうちに反応が起きたことに対応している。一方5~10 nsecに発生したものは多重回の散乱によって減速をうけた中性子による影響で全体にエネルギーが下がっている。同様なことは入射エネルギー220 keVの場合についてもいえるが100 keVと比べ中性子の速度が速いため5~10 nsecの寄与がより小さくなっている。このような反応発生の時間分布は検出器固有の時間分解能に直接的な影響を与えるものであり、中性子飛行時間法におけるエネルギー分解能を検討する場合に重要な情報のひとつになる。

5.2 減速材つき ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータ

5.1と同じ ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータの直前に5mm厚さのポリエチレン減速材をとりつけたものを考える。文献(2)にあるように減速材をつけると1~100 keV領域の検出効率が増加しエネルギー依存性も ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータだけの時よりもなだらかになる。Fig. 5.5~7は実行時の入力データと結果を示す。断面積ファイルは5.1で使用したものにポリエチレンの成分である ${}^1\text{H}$ と ${}^{12}\text{C}$ を加えて作成した。入射エネルギーは100 keVでありこの時の透過率 $T(E_0)$ ((3.3)式)は減速材のために47.23%に下がっている。Fig. 5.6の効率をみると ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータだけの時の値0.84%より5割大きい1.28%になっている。これが多重散乱によるものであることはFig. 5.6下段のエネルギーと時刻の2次元分布のすそが低エネルギーの方向にまで伸びており時間遅れの大きいものが多いことからわかる。この結果をグラフにしたのがFig. 5.8(a)である。実線は多重散乱による寄与が中性子エネルギー ($u = \log(E_0/E)$) で表現)についてどう分布しているかを表わし破線は発生時刻についての分布を表わしている。Fig. 5.4と比べかなり低エネルギーまで広く分布し、時間分布も数十nsecまで広がっていることがわかる。Fig. 5.8(b)は散乱回数 m の分布である。縦軸は $m=0$ 、すなわち、最初の衝突で反応を起こしたもの I_0 について規格化している。実線は減速材つき ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータを表わし $m=1$ の寄与も $m=0$ と同程度に大きいことがわかる。破線の ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータだけの場合と比べ多重散乱の影響がかなり大きいことがはっきりする。両者を比較する際には

${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータ単層

$$I/I_0 = a^{-m}$$

(5.2)

減速材つき⁶Li-ガラス・シンチレータ

$$I/I_0 = 1 \quad , \quad m \leq m_0 \quad (5.3)$$

$$(ab)^{m_0-m} \quad , \quad m > m_0$$

という表現を用いると便利である。a, b, m₀は体系によって決まる定数である。Fig. 5. 8 (b)からは a = 0.2, b = 0.25, m₀ = 1.8 が得られる。上の関係式(5.2)は、6章で効率の計算結果に対する誤差を議論する際の基本式となるものである。

5.3 ¹⁰B-NaI 検出器

¹⁰B-NaI 検出器とは、¹⁰B (濃縮同位元素) を容器につめたものを中性子ビーム中におき¹⁰B (n, αγ) 反応で発生する 488 keV のガンマ線をビームから外れた所においた NaI(Tl) シンチレータで測定する検出器である。原研リニアックで使用している¹⁰B-NaI 検出器は 1 mm 厚のアルミニウム容器中に 93% 濃縮の¹⁰B を 19 mm 厚になるようにつめたもので Table 2. 1(c) に示すような組成になっている。アルミニウム容器は角型であるが計算上は円板に換算する。¹⁰B サンプルはビームに対して 45 度傾いており、サンプル中心から 15 mm 離れた所に 12.5 cm 直径、5 cm 厚の NaI(Tl) (応用光研製) を設置している。

Fig. 5.9 ~ 11 に入射エネルギー 900 keV の計算例を示す。入力データの下から 3 行目の 15. と 127. は NaI(Tl) の幾何効率を計算するためにサブルーチン GEOMET (4 章参照) に送られるパラメータであり、それぞれサンプル中心までの距離 (cm) と NaI(Tl) シンチレータの前面の面積 (cm²) を表わす。アルミニウム-ボロン-アルミニウムの 3 層系とみなす。この時全体の透過率は 61.16% であり効率は 37.2% である。この値は¹⁰B サンプル中での (n, αγ) 反応発生効率であり、NaI(Tl) 検出器の幾何検出効率や光電ピーク効率は考慮されていない。

Fig. 5.11 最終行の EFFECTIVE ... はサブルーチン GEOMET が計算した実効的幾何効率であり、各発生点に対応する幾何効率を平均化した量となっている。Fig. 5.12 に¹⁰B サンプル内の (n, αγ) 反応の発生時間分布を示す。(a), (b) は入射ビーム径 4 cm で入射エネルギーがそれぞれ 120, 250 keV の場合、(c), (d), (e) は入射ビーム径 6 cm, 入射エネルギーが 500, 700, 950 keV の場合の結果である。分布の立ち上がりは¹⁰B サンプルの 45 度傾斜面に達するまでの時間差の現われである。立ち下がり部はサンプル中の多重散乱の影響でゆるやかに減衰している。入射エネルギーが高くなるにつれサンプル内での平均自由行程が短くなり分布は対称形に近くなっていく。これらの計算結果から分布の半値巾 (FWHM) を求めて図にしたものが Fig. 5.13 である。実線、破線はそれぞれビーム径 4 cm, 6 cm の結果を E^{-0.5} の直線で表現したものであり、

$$FWHM = 7.23 l_{eff} / \sqrt{E_0} \quad (5.4)$$

からビーム径 D に対応した実効厚さ l_{eff} が決まる。Fig. 5.13 の結果から l_{eff} を D の一次式で表わすと

$$l_{eff} = 1.1 + 0.7 D \quad (5.5)$$

となる。FWHM がサンプルの傾きだけで与えられるならば l_{eff} ∝ D となるはずなので実際の FWHM には中性子がサンプル内で多重散乱を起こす効果がきいていることがわかる。

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
RELATIVE EFFICIENCY OF LI-6 GLASS SCINTILLATOR
SINGLE LAYER, 0.625 CM, INCIDENT ENERGY= 100 KEV.
  1
  0      1 50000      10      30      10
  1
  0.625
100000.      0.0      3.0      5.55      0.0      0.0
1000.      250000.      0.05      0.0
  10      5      4
RELATIVE EFFICIENCY OF LI-6 GLASS SCINTILLATOR
SINGLE LAYER, 0.625 CM, INCIDENT ENERGY= 220 KEV.
  0
220000.      0.0
  
```

```

===== RELATIVE EFFICIENCY OF LI-6 GLASS SCINTILLATOR
===== SINGLE LAYER, 0.625 CM, INCIDENT ENERGY= 100 KEV.
  
```

MONTE CARLO CALCULATION FOR SINGLE LAYER WHICH THICKNESS IS 0.6250 (CM)

```

NAME OF COMPONENTS AND THEIR ATOMIC DENSITY (ATOMS/BARN*CM)
LI-6    LI-7    O-16    MG-24    AL-27    SI-28    CE-140
0.01710 0.00070 0.04670 0.00140 0.00530 0.01400 0.00030
  
```

```

INCIDENT PARTICLES ENERGY : 0.1000E+06 (EV) (ANGLE : 0.0 (RADIAN) ,
SAMPLE RADIUS : 5.5500 (CM)
TOTAL NUMBER OF PRIMARY INTERACTION IN THE SAMPLE : 50000
MAXIMUM NUMBER OF TRACING FOR SCATTERING EVENTS : 10
  
```

```

EDITTING PARAMETERS
ENERGY SCALE : DIMENSION= 30 MIN. ENERGY 0.1000E+04 MAX. ENERGY 0.2500E+06
TIME SCALE : DIMENSION= 10 TIME DURATION 0.5000E-01 INITIAL DELAY 0.0
  
```

```

EDITTING PARAMETERS FOR VOLUMETRIC DISTRIBUTION
X - AXIS 10
Y - AXIS 5
Z - AXIS 4
  
```

```

OVERALL TRANSMISSION IN THE SAMPLE IS 84.440 (PERCENT)
MACROSCOPIC CROSS SECTIONS FOR INCIDENT PARTICLES ARE 0.2706E+00
  
```

*****MACROSCOPIC CROSS SECTIONS LIBRARY FOR 6-LI GLASS SCINTILLATOR

```

ORIGINAL INPUT LIBRARY
: NUMBER OF NUCLEAR SPECIES 7
NUMBER OF ENERGY POINTS 250
MIN. ENERGY OF LIBRARY(EV) 0.1000E+04
MAX. ENERGY OF LIBRARY(EV) 0.2500E+06
TEMPERATURE (K) 300.0
NUMBER OF KIND OF MODERATOR 0
ENERGY POINTS ARE EQUI-LETHAGY ? 1
  
```

Fig. 5.1 Example run; a ⁶Li-glass scintillator.

TOTAL EVENTS ; PRIMARY INTERACTION 50000
 DETECTED PARTICLES 2706
 ABSORPTION EVENTS 7
 LEAKAGE 47287
 COLLISION OVER TIMES 0
 ENERGY RANGE OVER 0
 RELATIVE EFFICIENCY 8.4213E-01 (PERCENT)

EDIT OF EACH TYPE VS. TIMES OF COLLISION

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EMIT	2171	413	97	19	5	1	0	0	0	0
ABS	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
LEAK	0	35568	8898	2168	513	103	30	6	1	0

EDIT OF CAPTURE EVENT

NUCLIDE	LI-6	LI-7	O-16	MG-24	AL-27	SI-28	CE-140
	0	0	0	1	4	2	0

EDIT OF EACH TYPE VS. LAYER NO.

NO.	1
EMISSION	2706
ABSORPTION	7
OVER TIMES	0
RANGE OVER	0

EDIT OF DISTRIBUTION FOR EMISSION EVENTS VS. TIME AND ENERGY

TIME (MICRO SEC)	0.0	0.0050	0.0100	0.0150	0.0200	0.0250	0.0300
ENERGY RANGE (EV)							
0.1000E+04	0.9300E+04	0	0	0	0	0	0
0.9300E+04	0.1760E+05	0	0	0	0	0	0
0.1760E+05	0.2590E+05	0	0	0	0	0	0
0.2590E+05	0.3420E+05	0	0	0	0	0	0
0.3420E+05	0.4250E+05	0	1	0	0	0	0
0.4250E+05	0.5080E+05	2	0	1	0	0	0
0.5080E+05	0.5910E+05	7	3	1	0	0	0
0.5910E+05	0.6740E+05	3	5	0	0	0	0
0.6740E+05	0.7570E+05	25	13	6	1	1	0
0.7570E+05	0.8400E+05	77	9	2	1	1	0
0.8400E+05	0.9230E+05	173	42	8	0	1	0
0.9230E+05	0.1006E+06	2304	11	8	0	0	0
0.1006E+06	0.1089E+06	0	0	0	0	0	0
0.1089E+06	0.1172E+06	0	0	0	0	0	0
0.1172E+06	0.1255E+06	0	0	0	0	0	0
0.1255E+06	0.1338E+06	0	0	0	0	0	0

Fig. 5.2 (continued)

DISTRIBUTION FOR EMISSION EVENTS VS. POSITION COORDINATES

Z POSITION = 0.0 TO 0.1563 (CM)

X NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	2	1	43	66	58	51	55	41	2	0
Y= 2	0	0	19	56	77	59	53	21	1	1
Y= 3	0	0	1	13	39	26	18	0	0	0
Y= 4	0	0	0	0	2	1	2	0	0	0
Y= 5	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0

Z POSITION = 0.1563 TO 0.3125 (CM)

X NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	1	2	47	57	64	48	37	35	1	0
Y= 2	0	1	13	53	50	53	51	16	1	0
Y= 3	1	1	1	12	27	39	15	1	0	0
Y= 4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
Y= 5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0

Z POSITION = 0.3125 TO 0.4688 (CM)

X NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	0	1	45	73	59	52	61	37	1	2
Y= 2	0	0	9	62	47	48	49	15	0	0
Y= 3	1	0	0	16	38	33	11	2	0	0
Y= 4	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0
Y= 5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0

Z POSITION = 0.4688 TO 0.6250 (CM)

X NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	0	0	40	68	75	60	61	30	1	0
Y= 2	1	0	11	68	49	57	50	14	1	0
Y= 3	0	0	1	9	24	36	12	1	0	0
Y= 4	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
Y= 5	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0

$E_0 = 220 \text{ keV}$ の計算

=====
 RELATIVE EFFICIENCY OF LI-6 GLASS SCINTILLATOR
 SINGLE LAYER, 0.625 CM, INCIDENT ENERGY= 220 KEV.
 =====

MONTE CARLO CALCULATION FOR SINGLE LAYER WHICH THICKNESS IS 0.6250 (CM)

NAME OF COMPONENTS AND THEIR ATOMIC DENSITY (ATOMS/BARN*CM)
 LI-6 LI-7 O-16 MG-24 AL-27 SI-28 CE-140
 0.01710 0.00070 0.04670 0.00146 0.00530 0.01400 0.00030

INCIDENT PARTICLES ENERGY : 0.2200E+06 (EV) (ANGLE : 0.0 (RADIAN)
 SAMPLE RADIUS : 5.5500 (CM)
 TOTAL NUMBER OF PRIMARY INTERACTION IN THE SAMPLE : 50000
 MAXIMUM NUMBER OF TRACING FOR SCATTERING EVENTS : 10

EDITTING PARAMETERS
 ENERGY SCALE ; DIMENSION= 30 MIN. ENERGY 0.1000E+04 MAX. ENERGY 0.2500E+06
 TIME SCALE ; DIMENSION= 10 TIME DURATION 0.5000E+01 INITIAL DELAY 0.0

EDITTING PARAMETERS FOR VOLUMETRIC DISTRIBUTION
 X - AXIS 10
 Y - AXIS 5
 Z - AXIS 4

OVERALL TRANSMISSION IN THE SAMPLE IS 73.837 (PERCENT)
 MACROSCOPIC CROSS SECTIONS FOR INCIDENT PARTICLES ARE 0.4853E+00

省略

Fig. 5.3 (continued)

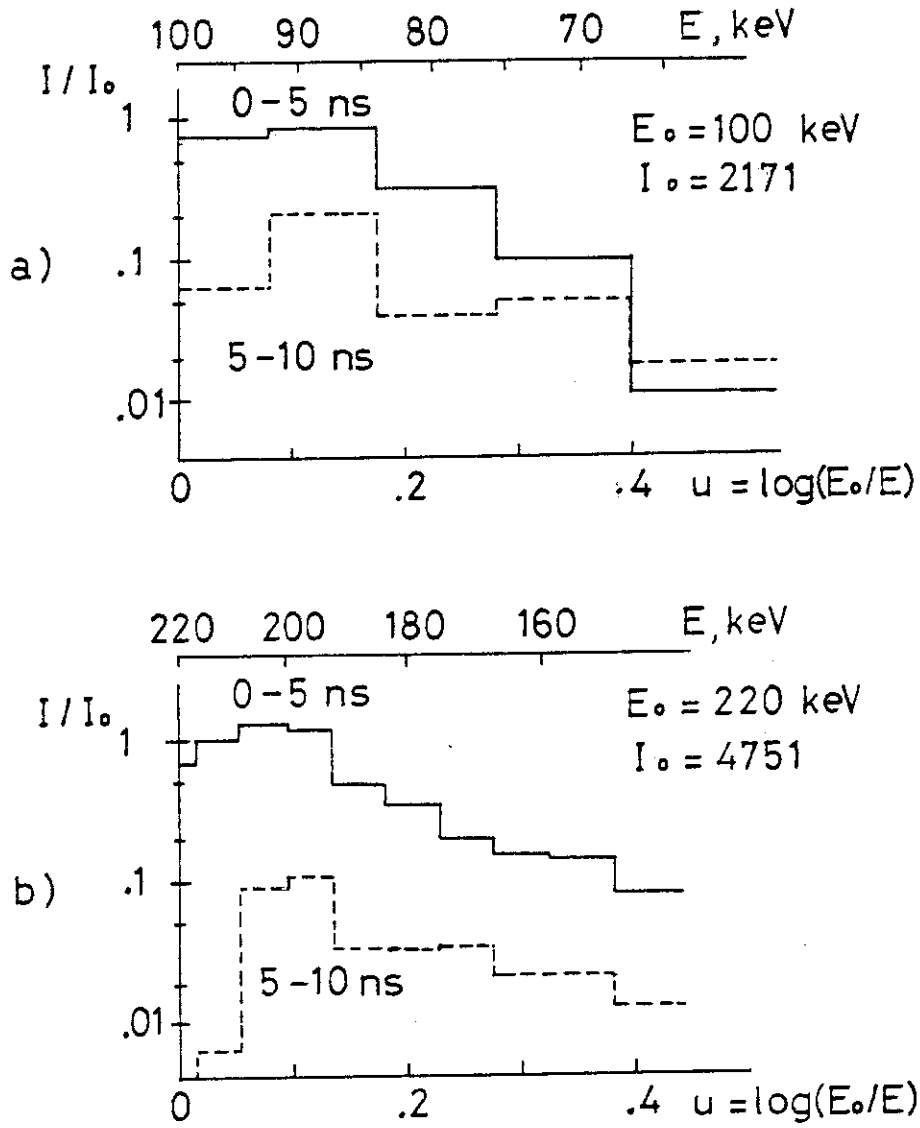


Fig. 5.4 Energy distributions of the emission events after elastic scattering for the two definite time regions.

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

RELATIVE EFFICIENCY OF ⁶LI-6 GLASS SCINTILLATOR AND MODERATOR(POLYETHYLENE).
 SCINTILLATOR=0.635 CM THICKNESS, AND MODERATOR=0.5 CM. AT 100 KEV ENERGY.

2									
1	2500000	10	30	10					
2	1								
0.5		0.635							
100000.	0.0		3.0		5.55	0.0		0.0	
1000.		101000.	0.1		0.0				
10	5	6							

===== RELATIVE EFFICIENCY OF ⁶LI-6 GLASS SCINTILLATOR AND MODERATOR(POLYETHYLENE). =====
 ===== SCINTILLATOR=0.635 CM THICKNESS, AND MODERATOR=0.5 CM. AT 100 KEV ENERGY. =====

MONTE CARLO CALCULATION FOR MULTI LAYER SYSTEM WHICH NUMBER OF KIND IS 2 AND NUMBER OF

NO.	NAME OF COMPONENTS AND THEIR ATOMIC DENSITY (ATOMS/BAHN*CM) IN EACH KIND									
	LI-6	LI-7	O-16	MG-24	AL-27	SI-28	CE-140	H-1	C-12	
1	0.01710	0.00070	0.04670	0.00140	0.00530	0.01400	0.00030	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.07740	0.03870	

THICKNESS OF EACH LAYER

ID. NO.	2	1
(CM)	0.5000	0.6350

INCIDENT PARTICLES ENERGY : 0.1000E+06 (EV) (ANGLE : 0.0 (RADIAN) , BEAM SPOT :
 SAMPLE RADIUS : 5.5500 (CM)
 TOTAL NUMBER OF PRIMARY INTERACTION IN THE SAMPLE : 500000
 MAXIMUM NUMBER OF TRACING FOR SCATTERING EVENTS : 10

EDITTING PARAMETERS

ENERGY SCALE ; DIMENSION=	30	MIN. ENERGY	0.1000E+04	MAX. ENERGY	0.1010E+06	ENER
TIME SCALE ; DIMENSION=	10	TIME DURATION	0.1000E+00	INITIAL DELAY	0.0	TI

EDITTING PARAMETERS FOR VOLUMETRIC DISTRIBUTION

X - AXIS	10
Y - AXIS	5
Z - AXIS	6

OVERALL TRANSMISSION IN THE SAMPLE IS 47.232 (PERCENT)
 MACROSCOPIC CROSS SECTIONS FOR INCIDENT PARTICLES ARE 0.2706E+00 0.1157E+01

*****MACROSCOPIC CROSS SECTION LIBRARY FOR 6-LI GLASS AND POLYETHYLENE LAYERS.

ORIGINAL INPUT LIBRARY

: NUMBER OF NUCLEAR SPECIES	9
NUMBER OF ENERGY POINTS	250
MIN. ENERGY OF LIBRARY(EV)	0.1000E+04
MAX. ENERGY OF LIBRARY(EV)	0.2500E+06
TEMPERATURE (K)	300.0
NUMBER OF KIND OF MODERATOR	1
ENERGY POINTS ARE EQUI-LETHAGY ?	1

Fig. 5.5 Example run; a ⁶Li-glass scintillator with moderator.

TOTAL EVENTS : PRIMARY INTERACTION 500000
 DETECTED PARTICLES 12161
 ABSORPTION EVENTS 67
 LEAKAGE 436049
 COLLISION OVER TIMES 597
 ENERGY RANGE OVER 51126
 RELATIVE EFFICIENCY 1.2834E+00 (PERCENT)

EDIT OF EACH TYPE VS. TIMES OF COLLISION

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EMIT	3495	3426	2350	1441	752	382	180	87	33	15
ABS	11	23	17	7	4	3	1	1	0	0
LEAK		0218186108915		56209	28736	13671	6222	2631	1085	392

EDIT OF CAPTURE EVENT

NUCLIDE	LI-6	LI-7	O-16	MG-24	AL-27	SI-28	CE-140	H-1	C-12
	0	0	0	6	42	5	0	14	0

EDIT OF EACH TYPE VS. LAYER NO.

NO.	1	2
EMISSION	0	12161
ABSORPTION	14	53
OVER TIMES	528	69
RANGE OVER	50628	498

EDIT OF DISTRIBUTION FOR EMISSION EVENTS VS. TIME AND ENERGY

TIME (MICRO SEC)	0.0	0.0100	0.0200	0.0300	0.0400	0.0500	0.0600
ENERGY RANGE (EV)							
0.1000E+04	0.4333E+04	195	570	415	287	161	99
0.4333E+04	0.7667E+04	227	323	166	86	25	9
0.7667E+04	0.1100E+05	224	226	51	23	3	1
0.1100E+05	0.1433E+05	227	175	31	6	2	0
0.1433E+05	0.1767E+05	229	95	27	4	2	0
0.1767E+05	0.2100E+05	220	59	8	5	0	0
0.2100E+05	0.2433E+05	198	58	11	2	0	1
0.2433E+05	0.2767E+05	182	30	7	1	1	0
0.2767E+05	0.3100E+05	180	34	5	1	0	0
0.3100E+05	0.3433E+05	205	32	2	0	0	0
0.3433E+05	0.3767E+05	153	19	3	0	0	0
0.3767E+05	0.4100E+05	165	10	3	0	0	0
0.4100E+05	0.4433E+05	126	10	1	0	0	0
0.4433E+05	0.4767E+05	149	11	1	0	0	0
0.4767E+05	0.5100E+05	162	7	2	0	0	0
0.5100E+05	0.5433E+05	144	13	1	0	0	0
0.5433E+05	0.5767E+05	105	11	0	0	0	0
0.5767E+05	0.6100E+05	110	11	1	0	0	0
0.6100E+05	0.6433E+05	113	7	2	0	0	0
0.6433E+05	0.6767E+05	117	4	0	0	0	0
0.6767E+05	0.7100E+05	134	7	1	0	0	0
0.7100E+05	0.7433E+05	139	5	1	0	0	0
0.7433E+05	0.7767E+05	121	10	0	0	0	0
0.7767E+05	0.8100E+05	168	7	0	0	0	0
0.8100E+05	0.8433E+05	154	3	0	0	0	0
0.8433E+05	0.8767E+05	240	16	0	0	0	0
0.8767E+05	0.9100E+05	294	13	0	0	0	0
0.9100E+05	0.9433E+05	292	10	0	0	0	0
0.9433E+05	0.9767E+05	176	0	0	0	0	0
0.9767E+05	0.1010E+06	3612	1	0	0	0	0

Fig. 5.6 (continued)

DISTRIBUTION FOR EMISSION EVENTS VS. POSITION COORDINATES

		Z POSITION = 0.0 TO 0.1892 (CM)									
X NO.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

		Z POSITION = 0.1892 TO 0.3783 (CM)									
X NO.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

		Z POSITION = 0.3783 TO 0.5675 (CM)									
X NO.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	7	11	66	121	149	136	137	77	6	2	
Y= 2	1	7	31	96	111	110	125	43	8	3	
Y= 3	2	1	9	47	71	81	35	14	1	1	
Y= 4	0	1	3	4	11	5	3	3	0	0	
Y= 5	0	0	0	2	5	1	0	1	0	0	

		Z POSITION = 0.5675 TO 0.7567 (CM)									
X NO.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	3	17	218	327	308	320	310	179	33	6	
Y= 2	8	19	108	250	293	315	272	103	15	7	
Y= 3	1	13	21	96	176	195	98	33	10	1	
Y= 4	0	3	4	14	32	23	20	13	0	0	
Y= 5	0	0	0	4	10	4	5	1	0	0	

		Z POSITION = 0.7567 TO 0.9458 (CM)									
X NO.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	5	30	159	275	275	308	261	186	32	10	
Y= 2	5	19	101	239	244	280	262	105	24	5	
Y= 3	1	10	34	98	164	186	89	22	15	2	
Y= 4	0	7	8	12	26	40	15	9	2	0	
Y= 5	0	0	5	3	6	8	7	1	0	0	

		Z POSITION = 0.9458 TO 1.1350 (CM)									
X NO.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y= 1	8	29	169	265	249	248	216	128	23	8	
Y= 2	2	24	88	206	212	262	193	70	12	8	
Y= 3	1	13	30	72	138	167	80	27	10	3	
Y= 4	0	5	17	20	32	23	20	13	3	0	
Y= 5	0	0	3	8	10	7	5	3	0	0	

Fig. 5.7 (continued)

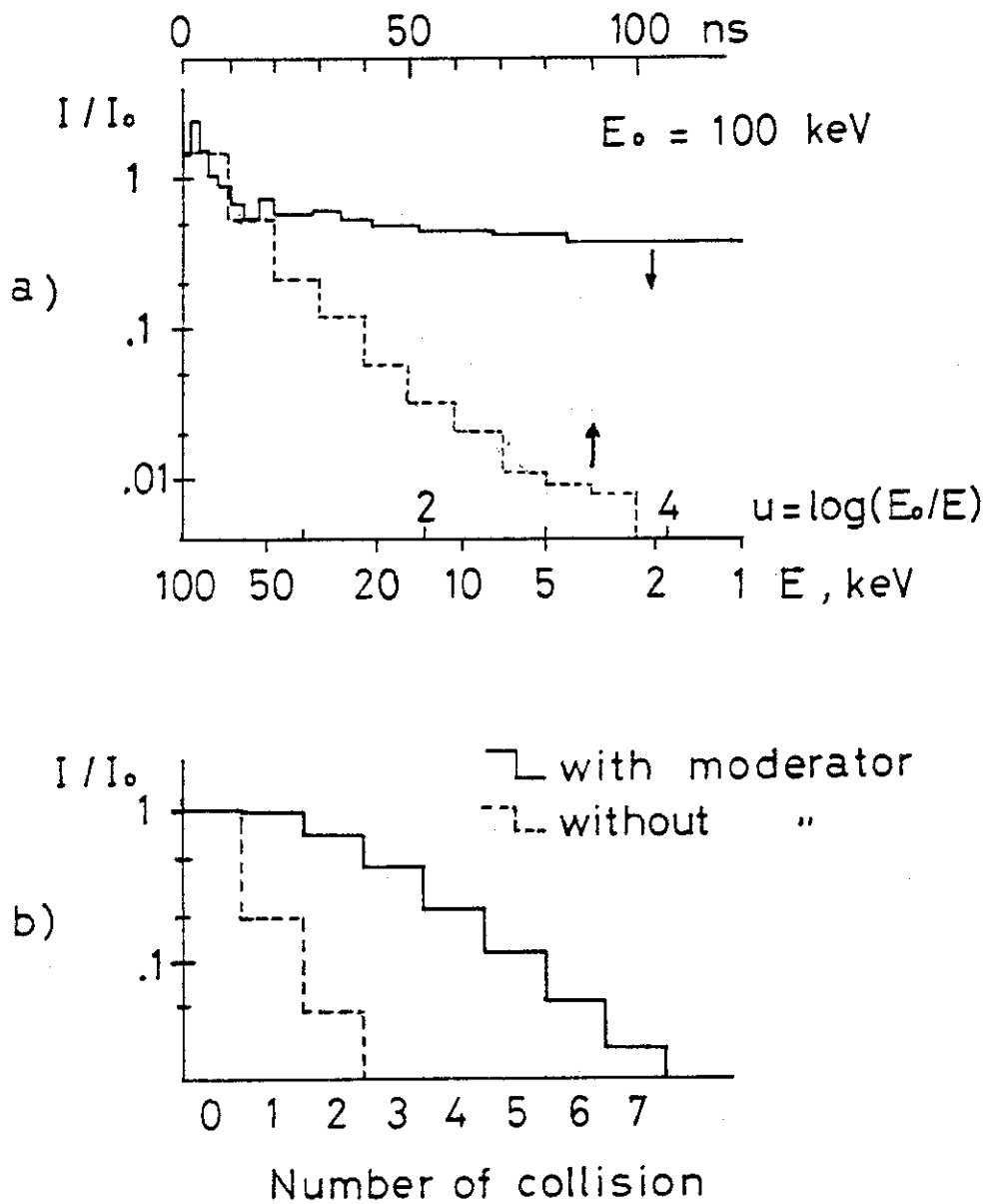


Fig. 5.8 a) Energy and time distributions of the emission events after elastic scattering.
 b) Distributions of the multiply scattered events with and without the moderator.

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

RELATIVE EFFICIENCY OF B-10 NAI DETECTOR BY MONTE CARLO CALCULATION

1	3	20000	10	30	20		
2	1	2					
0.1		1.9		0.1			
900000.		45.		3.0		8.0	15.
100000.		1000000.		.03		.01	
20	10	3					127.

===== RELATIVE EFFICIENCY OF B-10 NAI DETECTOR BY MONTE CARLO CALCULATION =====

MONTE CARLO CALCULATION FOR MULTI LAYER SYSTEM WHICH NUMBER OF KIND IS 2 AND NUMBER OF

NAME OF COMPONENTS AND THEIR ATOMIC DENSITY (ATOMS/BARN*CM) IN EACH KIND

NO.	B-10	B-11	AL-27
1	0.05810	0.00481	0.0
2	0.0	0.0	0.00530

THICKNESS OF EACH LAYER

ID. NO.	2	1	2
(CM)	0.1000	1.9000	0.1000

INCIDENT PARTICLES ENERGY : 0.9000E+06 (EV) (ANGLE : 0.7854 (RADIAN) , BEAM SPOT : 8.0000 (CM)
 SAMPLE RADIUS : 20000
 TOTAL NUMBER OF PRIMARY INTERACTION IN THE SAMPLE : 10
 MAXIMUM NUMBER OF TRACING FOR SCATTERING EVENTS : 10

EDITTING PARAMETERS
 ENERGY SCALE ; DIMENSION= 30 MIN. ENERGY 0.1000E+06 MAX. ENERGY 0.1000E+07
 TIME SCALE ; DIMENSION= 20 TIME DURATION 0.3000E+01 INITIAL DELAY 0.10000E-01

EDITTING PARAMETERS FOR VOLUMETRIC DISTRIBUTION
 X - AXIS 20
 Y - AXIS 10
 Z - AXIS 3

OVERALL TRANSMISSION IN THE SAMPLE IS 61.157 (PERCENT)
 MACROSCOPIC CROSS SECTIONS FOR INCIDENT PARTICLES ARE 0.1811E+00 0.1816E-01

***** MACRO. CROSS SECTION LIBRARY FOR CALC. EFFICIENCY OF 10-B NAI DET. UP TO 1

ORIGINAL INPUT LIBRARY

NUMBER OF NUCLEAR SPECIES	3
NUMBER OF ENERGY POINTS	250
MIN. ENERGY OF LIBRARY (EV)	0.1000E+06
MAX. ENERGY OF LIBRARY (EV)	0.2000E+07
TEMPERATURE (K)	300.0
NUMBER OF KIND OF MODERATOR	1
ENERGY POINTS ARE EQUI-LETHAGY ?	0

Fig. 5.9 Example run; a ¹⁰B NaI detector.

TOTAL EVENTS : PRIMARY INTERACTION 20000
 DETECTED PARTICLES 1916
 ABSORPTION EVENTS 810
 LEAKAGE 17273
 COLLISION OVER TIMES 0
 ENERGY RANGE OVER 1
 RELATIVE EFFICIENCY 3.7212E+00 (PERCENT)

EDIT OF EACH TYPE VS. TIMES OF COLLISION

	1	2	3	4	5	6	7	8	8	9	10
EMIT	985	464	236	134	57	28	8	3	1	0	0
ABS	513	180	76	28	8	3	1	1	0	0	0
LEAK	0	11454	3809	1341	413	157	70	19	4	6	

EDIT OF CAPTURE EVENT

NUCLIDE	B-10	B-11	AL-27
	810	0	0

EDIT OF EACH TYPE VS. LAYER NO.

NO.	1	2	3
EMISSION	0	1916	0
ABSORPTION	0	P10	0
OVER TIMES	0	0	0
RANGE OVER	0	1	0

EDIT OF DISTRIBUTION FOR EMISSION EVENTS VS. TIME AND ENERGY

TIME (MICRO SEC)	0.0075	0.0090	0.0105	0.0120	0.0135	0.0150	0.0165	0.0180
ENERGY RANGE (EV)								
0.1000E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1300E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1600E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1900E+06	0	0	0	0	0	0	1	0
0.2200E+06	0	0	0	3	1	0	1	0
0.2500E+06	0	0	0	0	2	1	1	0
0.2800E+06	0	0	0	1	3	5	1	2
0.3100E+06	0	0	0	1	3	5	1	2
0.3400E+06	0	0	1	1	3	2	3	2
0.3700E+06	0	0	1	2	2	7	5	0
0.4000E+06	0	0	2	5	6	6	3	2
0.4300E+06	0	0	5	4	8	5	7	12
0.4600E+06	0	1	3	8	7	10	9	4
0.4900E+06	0	1	3	4	7	9	2	2
0.5200E+06	1	2	2	7	10	3	5	1
0.5500E+06	0	0	4	10	8	6	2	2
0.5800E+06	0	5	6	12	5	10	0	1
0.6100E+06	1	7	20	16	22	8	9	4
0.6400E+06	0	8	18	25	25	7	4	1
0.6700E+06	0	6	19	29	18	3	2	4
0.7000E+06	1	11	17	14	10	3	5	0
0.7300E+06	0	4	16	17	7	8	3	5
0.7600E+06	3	8	21	7	8	1	5	3
0.7900E+06	0	8	15	16	6	5	4	1
0.8200E+06	0	6	14	11	2	5	0	0
0.8500E+06	0	6	6	6	5	2	0	0
0.8800E+06	60	315	378	229	16	0	0	0
0.9100E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9400E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9700E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9700E+07	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 5.10 (continued)

DISTRIBUTION FOR EMISSION EVENTS VS. POSITION COORDINATES

X NO.	Z POSITION = 0.0 TO 0.7000 (CM)										11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	3	4	5	6	7	8	9	10												
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 2	1	1	4	4	4	4	4	10	20	18	25	21	26	23	18	4	0	1	0	0
Y= 3	1	0	4	4	4	4	4	10	20	18	25	21	26	23	18	4	0	1	0	0
Y= 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

X NO.	Z POSITION = 0.7000 TO 1.4000 (CM)										11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	3	4	5	6	7	8	9	10												
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 2	0	1	1	3	3	14	25	23	22	22	22	22	26	24	14	17	18	15	13	1
Y= 3	0	0	0	2	1	19	21	23	23	20	16	16	22	21	21	14	5	1	1	0
Y= 4	0	0	1	2	2	2	4	8	8	18	15	16	22	21	6	4	1	1	1	0
Y= 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

X NO.	Z POSITION = 1.4000 TO 2.1000 (CM)										11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	3	4	5	6	7	8	9	10												
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 2	0	1	1	2	12	10	17	13	13	20	17	16	16	15	15	10	12	6	0	0
Y= 3	0	0	0	2	4	5	12	7	11	15	13	13	14	14	17	17	7	2	1	1
Y= 4	0	0	0	2	4	2	8	18	10	10	16	11	15	15	8	16	1	1	3	1
Y= 5	0	0	1	0	0	0	2	5	7	7	11	16	9	4	2	3	1	0	0	0
Y= 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Y= 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y= 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

EFFECTIVE GEOMETRICAL EFFICIENCY = 0.865694E-01

Fig. 5.11 (continued)

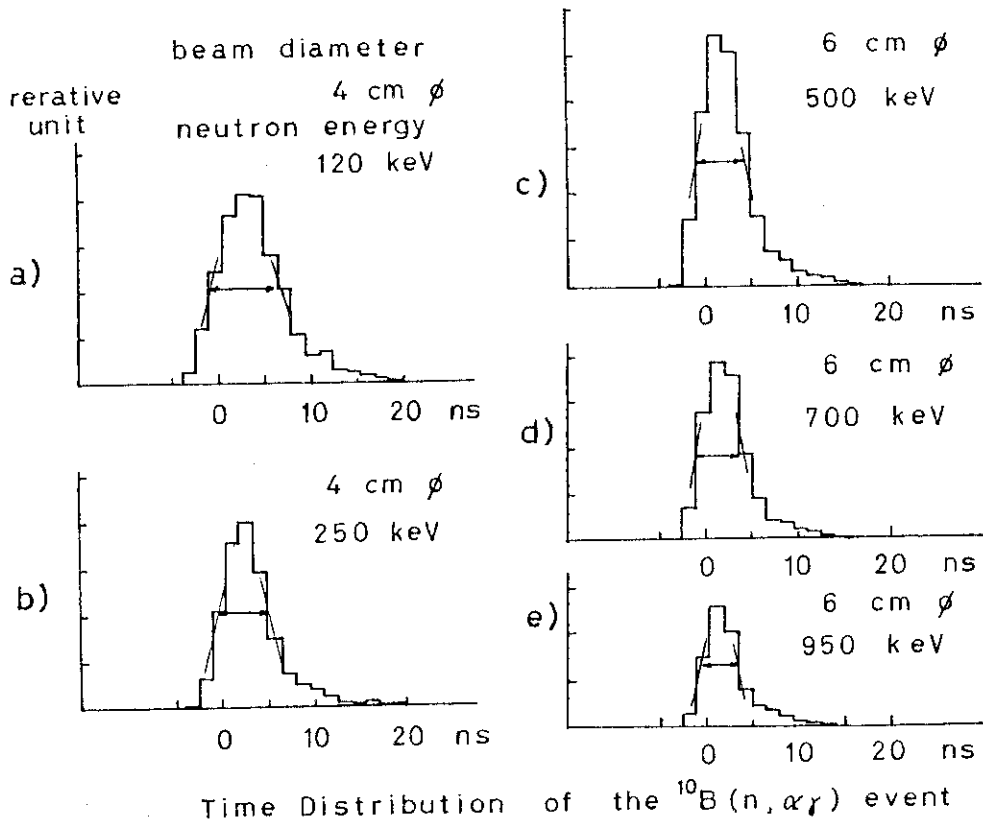


Fig. 5.12 Time distributions of the $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ reaction events. Arrows show the FWHM of the time distributions.

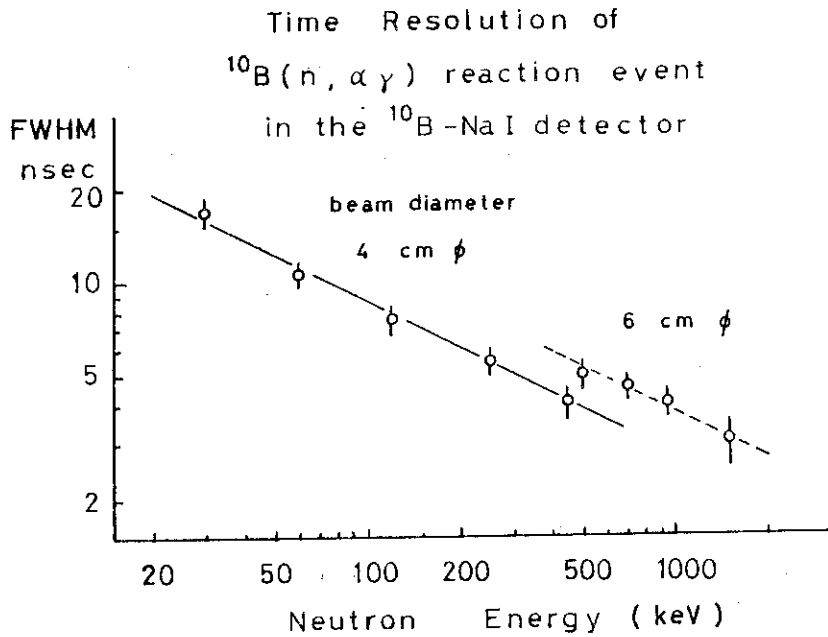


Fig. 5.13 Obtained time resolutions (FWHM) versus the incident energies.

6. 効率の計算結果と議論

前章までに述べた方法を用いて原研リアックでkeV領域の中性子平均捕獲断面積を測定する際に使用されている中性子束検出器 $4 \frac{3}{8} \phi \times \frac{1}{4}$, ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータおよび ${}^{10}\text{B}$ -NaI 検出器の相対効率の計算を行った。エネルギー範囲は ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータは 1 eV - 500 keV, ${}^{10}\text{B}$ -NaI 検出器は 25 eV - 1 MeV である。前者の場合特にシンチレータをマウントしている光電子増倍管の窓(ガラス)による後方散乱に注意を払った。組成はすでに Table 2.1 に示しておいた。Fig. 6.1 は計算結果のプロットであり計算点の間は両対数の内挿でつないである。図中実線で示したのはそれぞれ ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応 ($n\sigma_\alpha$), ${}^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ 反応 ($n\sigma_{\alpha\gamma}$) の巨視断面積である。 ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータの効率は eV ~ 10 keV では $n\sigma_\alpha$ と大きく違わないが, ${}^{10}\text{B}$ -NaI 検出器の効率は keV 以下で頭打ちとなる。これは低エネルギーの中性子に対し ${}^{10}\text{B}$ サンプルがブラックになっているためである。 ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータの 30 - 100 keV には細かな構造がみられる。この原因はシンチレータ及び光電子増倍管の窓をつくっているガラス中の ${}^{28}\text{Si}$ および ${}^{27}\text{Al}$ のシャープな共鳴による多重散乱がきいていることによる。

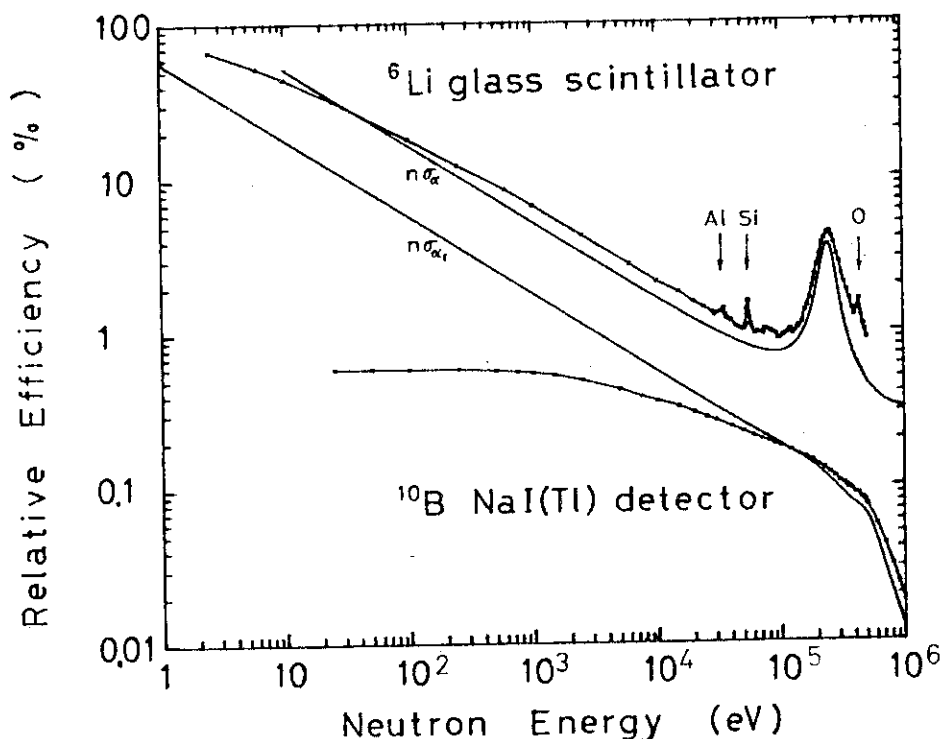


Fig. 6.1 Results of the calculated relative efficiencies of the ${}^6\text{Li}$ -glass scintillator and the ${}^{10}\text{B}$ NaI detector. The solid curves $n\sigma_\alpha$ and $n\sigma_{\alpha\gamma}$ represent the macroscopic cross sections for the ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ and the ${}^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ reactions, respectively. The Abscissa of the cross sections are in arbitrary scale.

計算結果に対する誤差はモンテ・カルロ法のサンプリングの問題に起因する統計的なものと手法上の問題による固有のものが考えられる。たとえば、散乱を重心系で等方であると仮定した点、幾何形状が正確に扱われていない場合の問題点が後者の例として考えられる。しかしこのような誤差は相対効率として考える場合にはその大部分が相殺されると考えられ、結果として一番問題となるのは使用した断面積データがもっている誤差及び体系の厚さ (nuclei/cm²) の誤差である。3.7で述べた式 (3.22), (3.23) から相対効率は

$$\eta = (1-T) \frac{S_e}{S_t} + (1-T) \frac{S_n}{S_t} (1-T') \frac{S_e'}{S_t'} + \dots \quad (6.1)$$

と書ける。散乱によるエネルギー損失が大きくなり、断面積あるいはその比 S_e/S_t , S_n/S_t が多重散乱過程を通じてほぼ一定であるとみなされる時、第2項以下の透過率 T' は平均的な量 \tilde{T} で置き換えられ、

$$\eta = (1-T) \frac{S_e}{S_t} \cdot \frac{1}{1-X} \quad (6.2)$$

$$X = (1-\tilde{T}) (S_n/S_t) \quad (6.3)$$

と表わすことができる。(6.3)式は実際の効率が(5.2)式のような関係式で表現できる場合に妥当なものといえる。中性子束検出器に用いているふたつの検出器については確かに(5.2)式が成り立っている。 S_e を $n\sigma_e$ と書き直し、検出効率の誤差(標準偏差)を $\Delta\eta$ で表わすと、

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{-\Delta T}{1-T} + \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta\sigma_e}{\sigma_e} - \frac{\Delta S_t}{S_t} + \frac{\Delta X}{1-X} \quad (6.4)$$

となる。基準値を η_0 にとって相対検出効率 η/η_0 の誤差を考えると

$$\frac{\Delta(\eta/\eta_0)}{(\eta/\eta_0)} = \frac{-\Delta T}{1-T} + \frac{\Delta T_0}{1-T_0} + \frac{\Delta\sigma_e}{\sigma_e} - \frac{\Delta\sigma_{e_0}}{\sigma_{e_0}} - \frac{\Delta S_t}{S_t} + \frac{\Delta S_{t_0}}{S_{t_0}} + \frac{\Delta X}{1-X} - \frac{\Delta X_0}{1-X_0} \quad (6.5)$$

と書ける。ここで添字 0 は η_0 に関する量であることを表わす。体系の厚さを d とすると透過率

$$T = \exp(-S_t d), \quad T_0 = \exp(-S_{t_0} d) \quad (6.6)$$

の誤差は

$$\Delta T/T = -S_t \Delta d - d \Delta S_t, \quad \Delta T_0/T_0 = -S_{t_0} \Delta d - d \Delta S_{t_0} \quad (6.7)$$

となる。(6.3)式より X の誤差は

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{-\Delta \tilde{T}}{1-\tilde{T}} + \frac{\Delta S_n}{S_n} - \frac{\Delta S_t}{S_t} \quad (6.8)$$

と書ける。 \tilde{T} の誤差は(6.7)と同様の式

$$\Delta \tilde{T}/\tilde{T} = -\tilde{S}_t \Delta d - d \Delta \tilde{S}_t \quad (6.9)$$

で表わすことにする。

いま, $\tilde{S}_t \propto S_t$ を仮定すると

$$\frac{\Delta \tilde{S}_t}{\tilde{S}_t} = \frac{\Delta S_t}{S_t} \quad (6.10)$$

である。この式と

$$\tilde{S}_t = \log \tilde{T}/d \quad (6.11)$$

を(6.9)式に適用すると,

$$\Delta \tilde{T}/\tilde{T} = \log \tilde{T} (\Delta S_t/S_t + \Delta d/d) \quad (6.12)$$

(6.7), (6.8), (6.12)より(6.5)は

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(\eta/\eta_0)}{(\eta/\eta_0)} = & \frac{T \log T}{1-T} \left(\frac{\Delta S_t}{S_t} + \frac{\Delta d}{d} \right) + \frac{T_0 \log T_0}{1-T_0} \left(\frac{\Delta S_{t_0}}{S_{t_0}} + \frac{\Delta d}{d} \right) + \frac{\Delta \sigma_e}{\sigma_e} - \frac{\Delta \sigma_{e_0}}{\sigma_{e_0}} - \frac{\Delta S_t}{S_t} + \frac{\Delta S_{t_0}}{S_{t_0}} \\ & + \frac{X}{1-X} \left\{ \left(\frac{-\tilde{T} \log \tilde{T}}{1-\tilde{T}} - 1 \right) \left(\frac{\Delta S_t}{S_t} + \frac{\Delta d}{d} \right) + \left(\frac{\Delta S_n}{S_n} + \frac{\Delta d}{d} \right) \right\} \\ & - \frac{X_0}{1-X_0} \left\{ \left(\frac{-\tilde{T}_0 \log \tilde{T}_0}{1-\tilde{T}_0} - 1 \right) \left(\frac{\Delta S_{t_0}}{S_{t_0}} + \frac{\Delta d}{d} \right) + \left(\frac{\Delta S_{n_0}}{S_{n_0}} + \frac{\Delta d}{d} \right) \right\} \quad (6.13) \end{aligned}$$

となる。

ΔS_t , ΔS_n は ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータと ${}^{10}\text{B}$ -NaI とでは扱いを変える必要がある。前者は多種類の核種から成っているのでそれぞれの誤差の間で互いに相殺し合うことが考えられ, $\frac{\Delta S_t}{S_t}$, $\frac{\Delta S_n}{S_n}$ はほぼ $\Delta n/n$ とみなしてよいだろう。n は ${}^6\text{Li}$ の単位体積当たりの核種数である。残りの核種についてもその $(\Delta n/n)$ は ${}^6\text{Li}$ の値とほとんど等しい(組成比の誤差は無視できるほど小さい)と考える。一方 ${}^{10}\text{B}$ -NaI は ${}^{10}\text{B}$ が大部分を占めているので ${}^{10}\text{B}$ の n, σ_t , σ_n だけを考え,

$$\frac{\Delta S_t}{S_t} = \frac{\Delta \sigma_t}{\sigma_t} + \frac{\Delta n}{n}, \quad \frac{\Delta S_n}{S_n} = \frac{\Delta \sigma_n}{\sigma_n} + \frac{\Delta n}{n} \quad (6.14)$$

とする。

${}^6\text{Li}$ ガラス・シンチレータの場合

$$\frac{\Delta(\eta/\eta_0)}{(\eta/\eta_0)} = P_n \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta d}{d} \right) + \frac{\Delta \sigma_e}{\sigma_e} - \frac{\Delta \sigma_{e_0}}{\sigma_{e_0}} \quad (6.15)$$

${}^{10}\text{B}$ -NaI 検出器の場合

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(\eta/\eta_0)}{(\eta/\eta_0)} = & P_n \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta d}{d} \right) + \frac{\Delta \sigma_e}{\sigma_e} - \frac{\Delta \sigma_{e_0}}{\sigma_{e_0}} + P_t \frac{\Delta \sigma_t}{\sigma_t} - P_{t_0} \frac{\Delta \sigma_{t_0}}{\sigma_{t_0}} \\ & + P_x \frac{\Delta \sigma_n}{\sigma_n} - P_{x_0} \frac{\Delta \sigma_{n_0}}{\sigma_{n_0}} \quad (6.16) \end{aligned}$$

ここで

$$P_n \equiv -\frac{T \log T}{1-T} + \frac{T_0 \log T_0}{1-T_0} + \frac{X}{1-X} \left(\frac{-\tilde{T} \log \tilde{T}}{1-\tilde{T}} \right) - \frac{X_0}{1-X_0} \left(\frac{-\tilde{T}_0 \log \tilde{T}_0}{1-\tilde{T}_0} \right) \quad (6.17)$$

$$P_t \equiv -\frac{T \log T}{1-T} - 1 + \frac{X}{1-X} \left(\frac{-\tilde{T} \log \tilde{T}}{1-\tilde{T}} - 1 \right) \quad (6.18)$$

$$P_x \equiv \frac{X}{1-X} \quad (6.19)$$

である。\$P_{t_0}\$, \$P_{x_0}\$は(6.18), (6.19)の\$X\$, \$T\$, \$\tilde{T}\$を\$X_0\$, \$T_0\$, \$\tilde{T}_0\$とする。

(6.15), (6.16)から相対標準誤差は(nd)を\$n'\$と表わすと、\$^6\$Li-ガラス・シンチレ-タに対して

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta(\eta/\eta_0)}{(\eta/\eta_0)} \right)^2} = \left\{ P_n^2 \left(\frac{\Delta n'}{n'} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \sigma_e}{\sigma_e} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \sigma_{e_0}}{\sigma_{e_0}} \right)^2 - 2 \frac{\text{COV}(\sigma_e, \sigma_{e_0})}{\sigma_e \sigma_{e_0}} \right\}^{1/2} \quad (6.20)$$

\$^{10}\$B-NaI検出器に対して

$$\begin{aligned} \sqrt{\left(\frac{\Delta(\eta/\eta_0)}{(\eta/\eta_0)} \right)^2} = & \left\{ P_n^2 \left(\frac{\Delta n'}{n'} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \sigma_e}{\sigma_e} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \sigma_{e_0}}{\sigma_{e_0}} \right)^2 - 2 \frac{\text{COV}(\sigma_e, \sigma_{e_0})}{\sigma_e \sigma_{e_0}} \right. \\ & + P_x^2 \left(\frac{\Delta \sigma_n}{\sigma_n} \right)^2 + P_{x_0}^2 \left(\frac{\Delta \sigma_{n_0}}{\sigma_{n_0}} \right)^2 - 2 \frac{\text{COV}(\sigma_n, \sigma_{n_0})}{\sigma_n \sigma_{n_0}} \\ & + 2 P_t \left[\frac{\text{COV}(\sigma_e, \sigma_t)}{\sigma_e \sigma_t} - \frac{\text{COV}(\sigma_{e_0}, \sigma_t)}{\sigma_{e_0} \sigma_t} \right] \\ & - 2 P_{t_0} \left[\frac{\text{COV}(\sigma_e, \sigma_{t_0})}{\sigma_e \sigma_{t_0}} - \frac{\text{COV}(\sigma_{e_0}, \sigma_{t_0})}{\sigma_{e_0} \sigma_{t_0}} \right] \\ & + 2 P_x \left[\frac{\text{COV}(\sigma_e, \sigma_n)}{\sigma_e \sigma_n} - \frac{\text{COV}(\sigma_{e_0}, \sigma_n)}{\sigma_{e_0} \sigma_n} \right] \\ & - 2 P_{x_0} \left[\frac{\text{COV}(\sigma_e, \sigma_{n_0})}{\sigma_e \sigma_{n_0}} - \frac{\text{COV}(\sigma_{e_0}, \sigma_{n_0})}{\sigma_{e_0} \sigma_{n_0}} \right] \\ & + 2 P_t P_x \frac{\text{COV}(\sigma_t, \sigma_n)}{\sigma_t \sigma_n} - 2 P_t P_{x_0} \frac{\text{COV}(\sigma_t, \sigma_{n_0})}{\sigma_t \sigma_{n_0}} \\ & \left. - 2 P_{t_0} P_x \frac{\text{COV}(\sigma_{t_0}, \sigma_n)}{\sigma_{t_0} \sigma_n} + 2 P_{t_0} P_{x_0} \frac{\text{COV}(\sigma_{t_0}, \sigma_{n_0})}{\sigma_{t_0} \sigma_{n_0}} \right\}^{1/2} \quad (6.21) \end{aligned}$$

となる。ここで $(\Delta A)^2$ は確率変数Aの分散を、 $\text{Cov}(A, B)$ はAとBの間の共分散を表わしている。(6.20), (6.21)式の導き方を拡張すれば (η/η_0) の実なるエネルギー間の相関(共分散行列)を求めることもできる。

(6.20)式において、もしも $\Delta\sigma_e/\sigma_e$ がエネルギー依存性をもってなければ最初の項だけが残る。つまり $\frac{1}{V}$ 依存性をもった反応断面積 σ_e に関しては(6.20)は

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta(\eta/\eta_0)}{(\eta/\eta_0)}\right)^2} = P_n \sqrt{\left(\frac{\Delta n'}{n'}\right)^2} \quad (6.22)$$

となる。 ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータの10 keV以下の領域はちょうどこの例に相当する。

以上の議論から効率計算結果の誤差を正しく評価するには使用した標準断面積の誤差(及び共分散)がよくわかっていなければならない。本章の計算結果は ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応はJENDL-1,⁴⁾
 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ 反応はENDF/B-V⁵⁾によっている。また、相対検出効率 (η/η_0) の誤差は基準点 η_0 の設定によっても変化する。原研リアックの中性子束測定の場合は ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータの規準は数十 eV 以下のところにおくことが多い。この時10~100 keVでの誤差は1%程度となる。 ${}^{10}\text{B}$ -NaI検出器は10~20 keVで ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータの測定結果につながる場合が多くこのエネルギーで規格化すると、50 keVで1.2%, 100 keVで1.8%, 200 ~ 500 keVで約3%となる。Fig. 6.2に ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{109}\text{Ag}$ の平均捕獲断面積の測定に際して用いた基準値(${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータに対して ${}^{107}\text{Ag}$ の測定時に16.3 eV, ${}^{109}\text{Ag}$ の測定時に30.4 eV, ${}^{10}\text{B}$ -NaI検出器に対しては15 keV)に対する相対効率の相対誤差を示す。これらは(6.20), (6.21)式を共分散の形に拡張した式から計算したもので ${}^{10}\text{B}$ の (n, n) , (n, α) , $(n, \alpha\gamma)$ 反応の共分散はENDF/B-V⁵⁾から引用している。参考のため付録Cに計算処理プログラムを示す。使用法はプログラム・リストのコメント文を参照されたい。

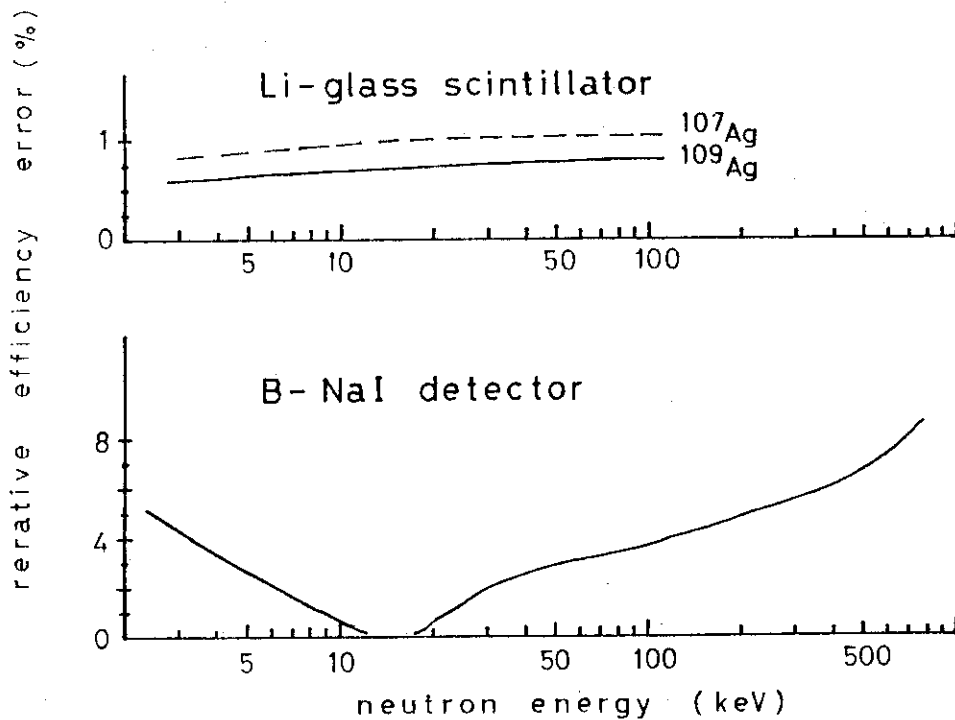


Fig. 6.2 Relative uncertainties of the relative efficiencies, normalized at 16 eV (upper dashed line), 30 eV (upper solid line) and 15 keV (lower) in the case of the ^{107}Ag and ^{109}Ag capture measurements.

原研リニアックの中性子束の測定例として Fig. 6.3 に ^6Li -ガラス・シンチレータによるものを示した。入射電子は 120 MeV, 80 ns 中, くり返し 150 Hz, ターゲットはボロン入りポリエチレンで囲んだ水冷のタンタル板集合体¹⁾である。フィルタとして BN, Pb, Na, Al (Na の容器) がはいっているため随所に共鳴構造がみられる。測定点までの飛行距離は 5.632 m である。Fig. 6.4 は ^{10}B -NaI 検出器による測定例であり, 入射電子は 30 ns 中くり返し 300 Hz に変わっている。飛行距離は 5.598 m である。Fig. 6.3, 6.4 は測定の分解能が異なるので細かな構造は若干の違いをみせているものの 1~100 keV での一致は極めてよい。さらに高いエネルギーでは ^6Li -ガラス・シンチレータの効率計算における断面積の精度, モンテ・カルロ法で用いた重心系等方散乱の仮定などの問題があって計算結果の誤差は (6.22) 式による評価値よりもっと大きくなっていると考えられる。したがって原研リニアックでの中性子束測定は 100 keV 以下は ^6Li -ガラス・シンチレータで 10 keV 以上から ~MeV までは ^{10}B -NaI 検出器を用いるという組み合わせをとっている¹⁾。

これらの検出器の計算結果は効率を求めるためのファンクション・プログラムの中に組み込まれて使用されており, そのリストを付録 D に示した。

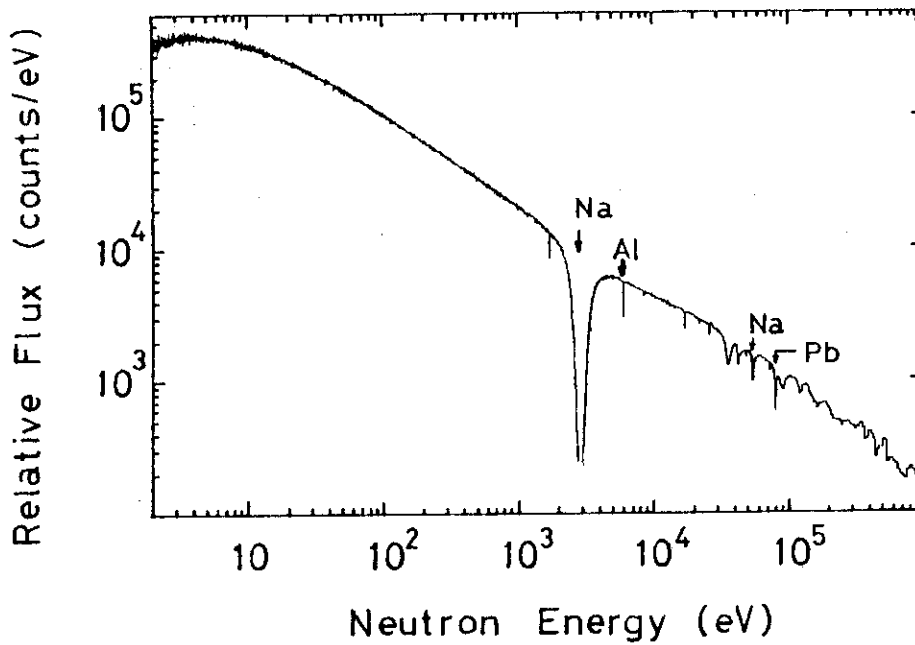


Fig. 6.3 Neutron flux from the JAERI linac neutron target measured by the 0.64 cm thick ^6Li -glass scintillator at 56.32 m flight path.

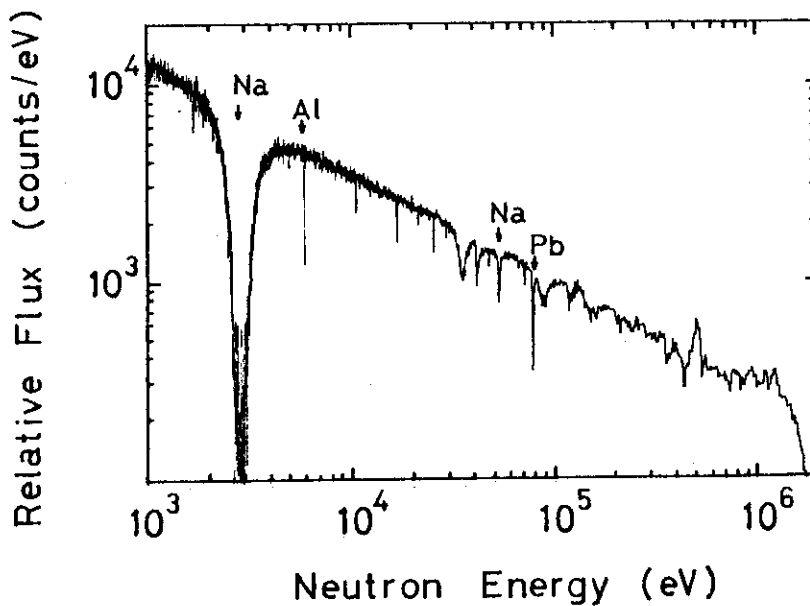


Fig. 6.4 Neutron flux from the JAERI linac neutron target measured by the ^{10}B NaI detector at 55.98 m flight path.

7. おわりに

ELISは ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータの検出効率計算を主な目的としてつくられたものであるが、以下に述べる諸点に注意すれば他の用途に使用することができる。実際に中性子捕獲断面測定においてサンプル中での捕獲ガンマ線の減衰の補正に応用している⁶⁾。ELISによる計算の特徴、および制限事柄は、

(1) 円板多重層体系を扱う。

円板形でない体系も等価な形に置き換えて実行する。多層の場合間隔が離れているならばその部分は真空層と考えて断面積ファイルをつくり計算する。

(2) 入射ビームは円形の断面をもつ一様な直進する粒子である。

入射ビームに対し体系は傾いてもよいがビーム径が体系外にはみ出さない範囲にあるようにする。

(3) モンテ・カルロ法は重みを用いない、アナログ・モンテ・カルロである。

(4) 目的とする反応、すなわち放出反応が発生した時刻、場所及びその時の中性子エネルギーによる分布が計算結果として出力される。

といった点である。

ELIS-LIBELAを用いて原研リニアックにおける中性子束検出器 ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータと ${}^{10}\text{B}$ -NaI検出器の効率を計算した結果はFig. 6.1に示した。断面積測定の上で入射中性子束の決定は重要な鍵を握るもののひとつであるので、より高精度のまたより高いエネルギー領域での入射中性子スペクトル測定を行うために、他のいろいろな検出器との相互比較をしていく予定である⁷⁾。

謝 辞

ELISの命名者でありその原版の作成に御尽力された高エネルギー研の浅見明教授に多大なる感謝の意を表したいと思います。本計算は著者のひとりである杉本が核融合特研生として在所中に行われたものでその間研究遂行のうえでいろいろと有益な御指導をいただいた東北大の椋山一典教授に深く感謝いたします。中島豊氏、河原崎雄紀氏、古田悠氏、大久保牧夫氏の方々からはプログラムの作成や結果の検討の際に適切な助言をいただくことができたことを感謝いたします。

田中茂也核物理第2研究室室長には原稿を読んでいただきましたことを感謝いたします。

7. おわりに

ELISは ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータの検出効率計算を主な目的としてつくられたものであるが、以下に述べる諸点に注意すれば他の用途に使用することができる。実際に中性子捕獲断面測定においてサンプル中での捕獲ガンマ線の減衰の補正に応用している⁶⁾。ELISによる計算の特徴、および制限事柄は、

(1) 円板多重層体系を扱う。

円板形でない体系も等価な形に置き換えて実行する。多層の場合間隔が離れているならばその部分は真空層と考えて断面積ファイルをつくり計算する。

(2) 入射ビームは円形の断面をもつ一様な直進する粒子である。

入射ビームに対し体系は傾いてもよいがビーム径が体系外にはみ出さない範囲にあるようにする。

(3) モンテ・カルロ法は重みを用いない、アナログ・モンテ・カルロである。

(4) 目的とする反応、すなわち放出反応が発生した時刻、場所及びその時の中性子エネルギーによる分布が計算結果として出力される。

といった点である。

ELIS-LIBELAを用いて原研リニアックにおける中性子束検出器 ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータと ${}^{10}\text{B}$ -NaI検出器の効率を計算した結果はFig. 6.1に示した。断面積測定の上で入射中性子束の決定は重要な鍵を握るもののひとつであるので、より高精度のまたより高いエネルギー領域での入射中性子スペクトル測定を行うために、他のいろいろな検出器との相互比較をしていく予定である⁷⁾。

謝 辞

ELISの命名者でありその原版の作成に御尽力された高エネルギー研の浅見明教授に多大なる感謝の意を表したいと思います。本計算は著者のひとりである杉本が核融合特研生として在所中に行われたものでその間研究遂行のうえでいろいろと有益な御指導をいただいた東北大の楢山一典教授に深く感謝いたします。中島豊氏、河原崎雄紀氏、古田悠氏、大久保牧夫氏の方々からはプログラムの作成や結果の検討の際に適切な助言をいただくことができたことを感謝いたします。

田中茂也核物理第2研究室室長には原稿を読んでいただきましたことを感謝いたします。

References

- 1) M.Mizumoto, Nucl. Phys. A357, 90 (1981) (^{147}Sm and ^{149}Sm).
M.Sugimoto, Doctor Thesis, Tohoku University, Sendai, Japan (1981) (^{107}Ag and ^{109}Ag).
- 2) J.M.Neill, D.Huffman, C.A.Preskitt and J.C.Young, Nucl. Instr. and Meth. 82, 162 (1970).
- 3) G.de Saussure, D.K.Olsen and R.B.Perez, ORNL TM-6286 (1978).
- 4) S.Igarasi et al., Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version-1, JENDL-1, JAERI 1262 (1979).
- 5) ENDF/B Summary Documentation, BNL-NCS-17541 (ENDF-201), 3rd Edition (ENDF/B-V), edited by R.Kinsey, available from the National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, N.Y. (July 1979).
- 6) M.Sugimoto, unpublished.
- 7) M.Mizumoto, to be published.

付録 A ELISの入力方法

Card	Name	Format	Column	Meaning
1]	ITITLE	20A4	1-80	計算内容の表題
2]				
3	LINPUT	I6	1-6	断面積ファイルの機番
4	MDRATR	I6	1-6	(多層系の層の種類) - 1 (最大2)
	NMESH	"	7-12	多層系の層数 (最大15)
	MAXIN	"	13-18	ヒストリ数
	MAXTRS	"	19-24	追跡する散乱の最大回数 (最大30)
	MEDIT1	"	25-30	エネルギー分布分割点(最大60)
	MEDIT2	"	31-36	時間分布分割点 (最大60)
5	IDENT(I)	I6	1-6	(I=1, NMESH)
	:	:	:	多層系を構成する各層の種類を番号1, 2, 3で指定する。1は放出反応を起こす核が含まれる層, 2, 3はそれ以外の層に対する分類を表わす。これらの番号付けと断面積ファイルの内容との対応はファイル作成時に行われている。
6	THICK(I)	I6	1-6	(I=1, NMESH) 各層の厚さ (cm).
7	ENERGY	E12.4	1-12	入射中性子エネルギー (eV).
	ANGLE	"	13-24	ビーム入射角 (度).
	RMAX	"	25-36	入射ビーム半径 (cm).
	RADIUS	"	37-48	円板体系の半径 (cm).
	DUMMY 1	"	49-60	サブルーチン GEOMET の入力パラメータ
	DUMMY 2	"	61-72	
8	EDMIN1	E12.4	1-12	エネルギー・カットオフ (eV).
	EDMAX1	"	13-24	エネルギー分布の最大点 (eV).
	TLAST	"	25-36	時間分布最終点 (μ sec).
	TIMINI	"	37-48	初期遅れ時間 (μ sec).
9	MNX	I6	1-6	X軸方向分割点 (最大50)
	MNY	"	7-12	Y軸正 " (最大25)
	MNZ	"	13-18	Z軸 " (最大10)

エネルギー・ビーム入射角だけを変えて計算するには上に続けてCard 1, 2とCard (7+8)
ENERGY, ANGLE, TLAST, TIMINI (4E124)の3枚を入力させる。

付録 B LIBELAの使用法

B. 1 入力方法

Card	Name	Format	Column	Meaning
1	TITLE	20A4	1-80	ファイルの表題
2	NUCNUM	I6	1-6	核種数 (最大15)
	MAXEP	"	7-12	エネルギー点数(最大500)
	EMIN	E12.4	13-24	エネルギー最小値(eV).
	EMAX	"	25-36	エネルギー最大値(eV).
	TEFF	"	37-48	サンプルの実効温度(K).
	MDRATR	I3	49-51	(多層系の層の種類)-1 (最大2)
	LUPDT	"	52-54	ファイルをアップ・デートする場合 旧ファイルの機番
	EL	E12.4	55-66	多準位ブライト・ウィグナー式(B. 4参照)でピケット・フェンスモデルの最小エネルギー値(eV).
	EH	"	67-78	上と同じく最大エネルギー値(eV).
	LP	I1	79	=1の時核種それぞれについて断面積をリスト出力する。=0は出力しない。
	LET	I1	80	=1の時エネルギー間隔を等レサジーにとり=0の時等間隔にとる。
3	ANAM	A7	1-7	核種名
	IEMI	A1	8	放出反応の断面積データの入力方法を略号(註*に説明)で指定
	IABS	"	9	IEMIと同様吸収反応について略号で指定
	ISCA	"	10	IEMIと同様散乱反応について略号で指定
	AMAS	E10.4	11-20	質量(a. m. u.).
	TATM(K)	"	21-30	(K=1, KM), KM=MDRATR+1
		∴	∴	各層の種類別に核種数密度(10^{24} cm ⁻³)を与える。
	AHAT	"	(10*MDRATR+) 31-40	effective scattering radius (10^{-12} cm).

RN	E1 0.4	(10*MDRATR+)	核半径 (10 ⁻¹² cm).
		41-50	
DEL	"	(")	ドップラー巾の温度に依存する因子を除く係数 (eV).
		51-60	

このカードはNUCNUM枚用意しておき、それぞれの直後には略号^{註*}で指定した方式にしたがってデータ・カードを続ける。その後にはレゾナンス・カード群^{註**}を続けて置いてもよい。

4	NPRINT	I 6	1-6	≠0の時作成したファイルの内容をリスト出力。
	NFILE	"	7-12	作成するファイルの機番。
	EP1	E1 2.4	13-24	NPRINT<0の時ファイルの一部だけを出力する際のエネルギー下限 (eV).
	EP2	"	25-36	同上 エネルギー上限 (eV).

註* IEMI, IABS, ISCAを使用する略号として以下に説明するJ, C, A, N, U, Gのいずれかひとつを指定できる。

i) J: ENDF/Bフォーマットでつくられたディスク・ファイルを介して入力する。Card 3の次に次の詳略入力情報を読ませる必要がある。

Name	Format	Column	Meaning
EJND1	E1 2.5	1-12	入力するエネルギー範囲下限 (eV).
EJND2	"	13-24	同上 上限 (eV).
INFIL	I 6	25-30	入力ファイル機番。
KSKIP	"	31-36	最初読み飛ばすべきレコード数。

ここでいうENDF/Bフォーマットのファイルとは次に述べるような形式のデータを書式なしでディスク・ファイルに書込んだものをさしている。

ii) C: ENDF/Bフォーマットのカードから入力する。

Name	Format	Column	Meaning
ABUF(1)	E1 1.5	1-11	[エネルギー (eV), 断面積 (b)] のペアが3個。
⋮		⋮	
ABUF(6)	"	56-66	
MAT	I 4	67-70	} 未使用
MF	I 2	71-72	
MT	I 3	73-75	最終カードだけ=0とする。
ISEQ	I 5	76-80	未使用

これらのカードが終了後次の1/vパラメータ・カードを付加する。

Name	Format	Column	Meaning
PARA(1)	E1 1.5	1-11	$\left. \begin{array}{l} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right\} \sigma_{1/v} = \sum_{i=1}^4 \text{PARA}(i) \left(\frac{1}{\sqrt{4}} \right)^i$
PARA(2)	"	"	
PARA(3)	"	"	
PARA(4)	"	34-44	

iii)A : ファイルのアップ・デートの時、Cと同じ形式で入力し計算した値を旧ファイルの値に足し合わせる場合に使用する。

iv)N : 断面積ファイルの内容をクリアする。ただしアップ・デートの場合は旧ファイルの値がそのまま残る。

v)b (ブランク) : データ・カードは不要。レゾナンス・カード群^{**} だけから断面積を計算する。IEMIの場合にはこの核種は放出反応を起こさないことを意味する。

vi)G : IEMIに対して用いる。吸収反応そのものを放出反応とみなしてファイルが作られる。データ・カードは不要。レゾナンス・カード群^{**} だけから断面積を計算する。

註** レゾナンス・カード群は

i) スピン・カードと ii) レゾナンス・パラメータ・カードの2種類のカードから次のように構成する。

{	スピン・カード (1枚)
	レゾナンス・パラメータ・カード (複数)
	ブランク・カード (レゾナンス・パラメータ・カードの最後)
{	スピン・カード
	レゾナンス・パラメータ・カード
	ブランク・カード
⋮	
{	ブランク・カード (データの最後)

i) スピン・カード : 複合核スピン状態 J に対応して1枚ずつ指定する。

Name	Format	Column	Meaning
LJ	I 6	1- 6	入射中性子角運動量
INT	"	7-12	= 1 の時 resonance-resonance interference を考慮する。
GST	E1 2.4	13-24	スピン統計因子
FR	"	25-36	= 1. とおくとこのカードの角運動量におけるポテンシャル散乱を計算する。
STRF	"	37-48	中性子強度関数 ($\times 10^{-4}$)
GNA	"	49-60	平均中性子巾 (eV)
GAV	"	61-72	平均共鳴巾 (eV)

ii) レゾナンス・パラメータ・カード

Name	Format	Column	Meaning
EO	E12.4	1-12	共鳴エネルギー (eV)
GG	"	13-24	捕獲巾 (eV)
GN	"	25-36	中性子巾 (eV)

(「スピン・カード」のGSJに角符号をつけておいて、GNには中性子 Γ_n の代わり $g\Gamma_n$ を入力することもできる。)

Card 3のAHATはレゾナンス・カード群から断面積を求める際、ポテンシャル散乱の大きさを与える量である(B.4参照)。AHATがはっきりしない場合、レゾナンス・カード群の最後のブランクカードのColumn 25-36と37-48にそれぞれE12.4で基準にしたいエネルギー(eV)とその点における全断面積(b)を指定しておくことに合うようにAHATを調節してくれる。

ファイル作成時の注意点として次の3点をあげておく。

- 1) 最初に作成する時は放出反応を起こす核種を先頭にもってくる。
- 2) アップ・デートによるファイル修正時Card 3のTATMをブランクしておくこと旧ファイルからその核種が削除される。
- 3) アップ・デートにより放出反応の変更をする時はまず変更対象核種を2)により削除した後、新しい核種についてのカード入力を行う。

B. 2 断面積ファイルの作成形式

Record No	Contents (non-formated)
1	TITLE (20)
2	NUCNO, MAXEP, EMIN, EMAX, TEFF, MDRATR, LET (新規作成時は NUCNO = NUCNUM)
3	(ANAME(I), AMASS(I), (ATOM(I, K), K=1, KM), I=1, NUCNO) (KM=MDRATR+1. 新規作成時 ATOM=ATM)
4	(ENERG(I), (TOTAL(I, K), TSCAT(I, K), TABS(I, K), K=1, KM), EMIT(I), I=1, NUCNO) ENERG : エネルギー (eV). TOTAL : macroscopic total cross section (cm ⁻¹) TSCAT : macroscopic scattering " (") TABS : macroscopic absorption " (") EMIT : macroscopic emission " (")
5	((((SCAT(I, J, K), I=1, MAXEP), J=1, NUCNO), K=1, KM) : 核種, 層別のmacroscopic scattering cross section (cm ⁻¹)
6	(AABS(I, J, K) 同上)

: 核種, 層別のmacroscopic absorption cross section
(cm^{-1}).

B. 3 入力例

Fig. B. 1は ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータ用の断面積ファイルを作成した際に用いた入力データである(一部省略した部分があり図中…で示している)。Card 1のタイトルに続きCard 2でシンチレータの主成分である ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{140}\text{Ce}$ の7核種について250点エネルギー点を取り, 1から250 keVまで等レサジーで計算を行うことを指定している。Card 3は, 7枚あるが図ではそのうち4枚だけが示されている。最初にLI-6, LI-7, AL-27, O-16とあるカードがそれらである。LI-6のデータはIEMI=C, ISCA=Cより放出反応, 散乱反応ともにカード入力によることを指定している。IABS=ブランクでレゾナンス・カード群もないので ${}^6\text{Li}$ の吸収反応はここでは考慮していない。LI-7はIEMI, IABS, ISCAがすべてブランクでありレゾナンス・カード群により断面積が計算される。最初のスピン・カードは角運動量1, スピン統計因子0.875の共鳴準位について計算することを表わす。次のレゾナンス・パラメータ・カードは257 keVの共鳴($\Gamma_r = 70\text{MeV}$, $\Gamma_n = 32\text{keV}$)を指定している。 $1/v$ パラメータを指定している例としてAL-27のIABS=Cでデータ・カードそのものはブランクであるがその後に(0. 0.2 0. 0.)というカードがありこれにより吸収反応として $0.2/\sqrt{E}$ (b)が考慮される。図中最終行はCard 4であり, それぞれリスト出力とファイル出力を行うことを示している。

Fig. B. 2に実行結果のリストを示す。Fig. B. 3はCard 2でLP=1とおいた時のリスト例である。

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
MACROSCOPIC CROSS SECTIONS LIBRARY FOR 6-LI GLASS SCINTILLATOR
  7 250 1000. 250000. 300. 0 0 0. 0. 01
LI-6 C C 6. .0171 .224
1.00000+ 3 4.70500+ 0 2.00000+ 3 3.32975+ 0 4.00000+ 3 2.36025+ 01031 3107 66
6.50000+ 3 1.85838+ 0 1.00000+ 4 1.50700+ 0 1.50000+ 4 1.24194+ 01031 3107 67
2.00000+ 4 1.08650+ 0 2.50000+ 4 9.82573- 1 3.00000+ 4 9.07620- 11031 3107 68
...
...
2.48000+ 5 3.26047+ 0 2.49000+ 5 3.24536+ 0 2.50000+ 5 3.22770+ 01031 3107 87
0. 0. 0. 0.
1.00000+ 3 7.55887- 1 2.00000+ 3 7.54302- 1 4.00000+ 3 7.52091- 11031 3 2 15
6.50000+ 3 7.50072- 1 1.00000+ 4 7.47944- 1 1.50000+ 4 7.45773- 11031 3 2 16
...
...
2.48000+ 5 7.96861+ 0 2.49000+ 5 7.97285+ 0 2.50000+ 5 7.97031+ 01031 3 2 36
0. 0. 0. 0.
LI-7 7. .0007 .32
  1 .875 1.
 257000. .01 32000.
  1 .38
1350000. .1 1140000.
  0 .25 1.
3400000. .1 8500000.
AL-27 C 27. .0053 .532
  0. 0.2 0. 0.
  0 1 .42 1.
 34590. 5. 3000.
 202000. 5. 14500.
 387000. 5. 4000.
...
...
O-16 16. .0467 .55
  0 1. 1.
  1 2. 1.
 440000. 2.7 45000.
  2 2. 1.
1000000. 2.7 96000.
  1 1
  1

```

Fig. B.1 Example run of LIBELA; Input data.

*****MACROSCOPIC CROSS SECTIONS LIBRARY FOR 6-LI GLASS SCINTILLATOR*****

NEW LIBRARY INPUT

: NUMBER OF NUCLEAR SPECIES 7
 NUMBER OF ENERGY POINTS 250
 MIN. ENERGY OF LIBRARY(EV) 0.1000E+04
 MAX. ENERGY OF LIBRARY(EV) 0.2500E+06
 TEMPERATURE (K) 300.0
 NUMBER OF KIND OF MODERATOR 0
 MIN. ENERGY OF FENCE LIMIT 0.0
 MAX. ENERGY OF FENCE LIMIT 0.0
 ENERGY POINTS ARE EQUI-LEITHAGY 7 1

NUCLIDE NO. 1 ANAME(LI-6) : INPUT CONTROL (C C) MASS RATIO = 6.000 ATOMIC DENSITY = 0.1710E-01

INPUT CARD = 23 I/V PARAMETERS = 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 ===== NUMERICAL DATA POINTS AND 1/V FACTORS =====
 MIN. ENERGY = 0.10000E+04 MAX. ENERGY = 0.25000E+06

INPUT CARD = 23 I/V PARAMETERS = 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 ===== NUMERICAL DATA POINTS AND 1/V FACTORS =====
 MIN. ENERGY = 0.10000E+04 MAX. ENERGY = 0.25000E+06

NUCLIDE NO. 2 ANAME(LI-7) : INPUT CONTROL () MASS RATIO = 7.000 ATOMIC DENSITY = 0.7000E-03

COMMON PARAMETERS : EFFECTIVE SCATTERING LENGTH 0.3200E+00 (10**-12 CM)
 NUCLEAR RADIUS 0.3151E+00 (10**-12 CM)
 DOPPLER WIDTH 0.1215E+00 (EV)

RESONANCE PARAMETERS IN J-SEQUENCE

SEQ.NO	ANG.MOMENTUM	LEVEL-LEV.INT.	G-FACTOR	POT.CONTRIR.	STRENGTH FUNC.	AVR. NEUTRON REDUCED WIDTH	AVR. REACTION WIDTH
1	0	0.8750	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
NUMBER OF RESONANCES = 1 ***** ENERGY (EV) REACTION WIDTH (EV) NEUTRON WIDTH (EV) *****							
					0.2570E+06	0.7000E-01	0.3200E+05

RESONANCE PARAMETERS IN J-SEQUENCE

SEQ.NO	ANG.MOMENTUM	LEVEL-LEV.INT.	G-FACTOR	POT.CONTRIR.	STRENGTH FUNC.	AVR. NEUTRON REDUCED WIDTH	AVR. REACTION WIDTH
2	0	0.3800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NUMBER OF RESONANCES = 1 ***** ENERGY (EV) REACTION WIDTH (EV) NEUTRON WIDTH (EV) *****							
					0.1350E+07	0.1000E+00	0.1140E+07

RESONANCE PARAMETERS IN J-SEQUENCE

SEQ.NO	ANG.MOMENTUM	LEVEL-LEV.INT.	G-FACTOR	POT.CONTRIR.	STRENGTH FUNC.	AVR. NEUTRON REDUCED WIDTH	AVR. REACTION WIDTH
3	0	0.2500	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
NUMBER OF RESONANCES = 1 ***** ENERGY (EV) REACTION WIDTH (EV) NEUTRON WIDTH (EV) *****							
					0.3400E+07	0.1000E+00	0.8500E+07

Fig. B.2 (continued); Output list(i).

FINAL RESULTS OF MACROSCOPIC CROSS SECTIONS											
NU	ENERGY(EV)	(TOTAL	TARS	TSCAT) * KM	EMIT					
1	0.1000E+04	0.3280E+00	0.4950E-04	0.2475E+00	0.8046E-01	2	0.1022E+04	0.3271E+00	0.4897E-04	0.2475E+00	0.7957E-01
3	0.1045E+04	0.3263E+00	0.4844E-04	0.2475E+00	0.7869E-01	4	0.1069E+04	0.3254E+00	0.4791E-04	0.2475E+00	0.7783E-01
5	0.11093E+04	0.3245E+00	0.4740E-04	0.2475E+00	0.7697E-01	6	0.1117E+04	0.3237E+00	0.4688E-04	0.2475E+00	0.7612E-01
7	0.1142E+04	0.3228E+00	0.4638E-04	0.2475E+00	0.7529E-01	8	0.1168E+04	0.3220E+00	0.4588E-04	0.2475E+00	0.7446E-01
9	0.1194E+04	0.3211E+00	0.4538E-04	0.2475E+00	0.7364E-01	10	0.1221E+04	0.3203E+00	0.4490E-04	0.2474E+00	0.7283E-01
11	0.1248E+04	0.3195E+00	0.4441E-04	0.2474E+00	0.7203E-01	12	0.1276E+04	0.3187E+00	0.4394E-04	0.2474E+00	0.7123E-01
13	0.1305E+04	0.3179E+00	0.4346E-04	0.2474E+00	0.7045E-01	14	0.1334E+04	0.3171E+00	0.4300E-04	0.2474E+00	0.6968E-01
15	0.1364E+04	0.3163E+00	0.4254E-04	0.2474E+00	0.6891E-01	16	0.1395E+04	0.3156E+00	0.4208E-04	0.2474E+00	0.6815E-01
17	0.1426E+04	0.3146E+00	0.4163E-04	0.2473E+00	0.6740E-01	18	0.1458E+04	0.3141E+00	0.4118E-04	0.2474E+00	0.6666E-01
19	0.1491E+04	0.3133E+00	0.4074E-04	0.2473E+00	0.6593E-01	20	0.1524E+04	0.3126E+00	0.4031E-04	0.2473E+00	0.6520E-01
21	0.1558E+04	0.3118E+00	0.3988E-04	0.2473E+00	0.6448E-01	22	0.1593E+04	0.3111E+00	0.3945E-04	0.2473E+00	0.6377E-01
243	0.2140E+06	0.4942E+00	0.2314E-04	0.4533E+00	0.4084E-01	244	0.2184E+06	0.4848E+00	0.1808E-04	0.4403E+00	0.4421E-01
245	0.2237E+06	0.4872E+00	0.4391E-04	0.4391E+00	0.4814E-01	246	0.2287E+06	0.4839E+00	0.1257E-04	0.4424E+00	0.5155E-01
247	0.2339E+06	0.4984E+00	0.1094E-04	0.4441E+00	0.5427E-01	248	0.2391E+06	0.5034E+00	0.9841E-05	0.4475E+00	0.5593E-01
249	0.24445E+06	0.5043E+00	0.8989E-05	0.4480E+00	0.5629E-01	250	0.2500E+06	0.5008E+00	0.8342E-05	0.4456E+00	0.5520E-01

NUCLIDE NO. 1 ANAME(LI-6) ; INPUT CONTROL (C C) MASS RATIO = 6.000 ATOMIC DENSITY = 0.1710E-01										
INPUT CARD =	23	NUMERICAL DATA POINTS AND I/V FACTORS				MIN. ENERGY =	0.10000E+04	MAX. ENERGY =	0.25000E+06	
I/V PARAMETERS =	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
INPUT CARD =	23	NUMERICAL DATA POINTS AND I/V FACTORS				MIN. ENERGY =	0.10000E+04	MAX. ENERGY =	0.25000E+06	
I/V PARAMETERS =	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					

CALCULATED MICROSCOPIC CROSS SECTIONS											
(ENERGY(EV),	FMISSION/SCATTERING	CROSS SECTION)									
0.1000E+04	0.4705E+01	0.7559E+00	0.1022E+04	0.4653E+01	0.7558E+00	0.1045E+04	0.4602E+01	0.7558E+00	0.1069E+04	0.4551E+01	0.7558E+00
0.1093E+04	0.4501E+01	0.7557E+00	0.1117E+04	0.4452E+01	0.7557E+00	0.1142E+04	0.4403E+01	0.7556E+00	0.1168E+04	0.4354E+01	0.7556E+00
0.1194E+04	0.4306E+01	0.7555E+00	0.1221E+04	0.4259E+01	0.7555E+00	0.1248E+04	0.4212E+01	0.7554E+00	0.1276E+04	0.4166E+01	0.7554E+00
0.1305E+04	0.4120E+01	0.7553E+00	0.1334E+04	0.4075E+01	0.7553E+00	0.1364E+04	0.4030E+01	0.7552E+00	0.1395E+04	0.3985E+01	0.7552E+00
0.1426E+04	0.3942E+01	0.7551E+00	0.1458E+04	0.3894E+01	0.7551E+00	0.1491E+04	0.3855E+01	0.7550E+00	0.1524E+04	0.3813E+01	0.7550E+00
0.1588E+04	0.3771E+01	0.7549E+00	0.1593E+04	0.3730E+01	0.7549E+00	0.1629E+04	0.3689E+01	0.7548E+00	0.1665E+04	0.3648E+01	0.7548E+00
0.1703E+04	0.3608E+01	0.7547E+00	0.1741E+04	0.3568E+01	0.7547E+00	0.1780E+04	0.3529E+01	0.7546E+00	0.1820E+04	0.3490E+01	0.7546E+00
0.1861E+04	0.3452E+01	0.7545E+00	0.1902E+04	0.3414E+01	0.7544E+00	0.1945E+04	0.3376E+01	0.7544E+00	0.1989E+04	0.3339E+01	0.7543E+00
0.2033E+04	0.3303E+01	0.7543E+00	0.2079E+04	0.3266E+01	0.7542E+00	0.2125E+04	0.3230E+01	0.7541E+00	0.2173E+04	0.3195E+01	0.7541E+00
0.2222E+04	0.3160E+01	0.7540E+00	0.2272E+04	0.3125E+01	0.7539E+00	0.2322E+04	0.3091E+01	0.7539E+00	0.2375E+04	0.3057E+01	0.7538E+00

Fig. B.3 (continued); Output list(ii).

B. 4 多準位ブライト・ウィグナー式

LIBELAにおけるレゾナンス・パラメータからの断面積計算は全断面積については多準位ブライト・ウィグナー式を用い吸収断面積については単準位ブライト・ウィグナー式を用いている。計算手法は米国オークリッジ国立研究所でつくられたプログラムSIOB⁽³⁾と同一である。以下にその計算式をまとめておく。

$$\sigma(E) = \sum_l \sigma^l(E) \quad : l \text{ は角運動量} \quad (1)$$

全断面積 (単準位ブライト・ウィグナー式)

$$\begin{aligned} \sigma_{\frac{1}{2}}^l(E) = & (2l+1) \frac{4\pi}{k^2} \sin^2 \phi_l \\ & + \frac{\pi}{k^2} \sum_J g_J \sum_r \frac{\Gamma_{nr} [\Gamma_r \cos 2\phi_l - 2(E'_r - E) \sin 2\phi_l]}{(E'_r - E)^2 + \frac{1}{4}\Gamma_r^2} \end{aligned} \quad (2)$$

吸収断面積

$$\sigma_a^l(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_J g_J \sum_r \frac{\Gamma_{nr} \Gamma_{ar}}{(E'_r - E)^2 + \frac{1}{4}\Gamma_r^2} \quad (3)$$

$$E'_r = E_r + \Delta_r \quad : E_r \text{ は共鳴エネルギー}$$

$$\Delta_r = \frac{S_l(|E_r|) - S_l(E)}{2P_l(|E_r|)} \Gamma_{nr}(|E_r|)$$

: Γ_r は全巾, $\Gamma_r = \Gamma_{nr}(E) + \Gamma_{ar}$

: Γ_{nr} 中性子巾, $\Gamma_{nr} = \frac{\Gamma_{nr}(|E_r|)}{P_l(|E_r|)} P_l(E)$

: Γ_{ar} 吸収巾

ここで P_l , S_l , ϕ_l はそれぞれ透過係数, シフト係数, 位相のずれであり, Tableに $l=0$ から 3 までの式を示した。J は複合核スピン g_J はスピン統計因子 $g_J = (2J+1)/2(2I+1)$, I はターゲット・スピンである。k は入射中性子の波数。

全断面積 (多準位ブライト・ウィグナー式)

$$\begin{aligned} \sigma_{\frac{1}{2}}^l(E) = & \{ \sigma_{\frac{1}{2}}^l(E) \text{ (2式)} \} \\ & + \frac{\pi}{k^2} \sum_J g_J \sum_r \sum_{s \neq r} \frac{\Gamma_{nr} \Gamma_{ns} [(E'_r - E)(E'_s - E) + \frac{1}{4}\Gamma_r \Gamma_s]}{[(E'_r - E)^2 + \frac{1}{4}\Gamma_r^2] [(E'_s - E)^2 + \frac{1}{4}\Gamma_s^2]} \end{aligned} \quad (4)$$

$$= \{ \sigma_{\frac{1}{2}}^l(E) \text{ (2式)} \}$$

$$+ \frac{\pi}{k^2} \sum_J g_J \sum_r \frac{\Gamma_{nr} [\Gamma_r G_r - 2(E'_r - E) H_r]}{(E'_r - E)^2 + \frac{1}{4}\Gamma_r^2} \quad (5)$$

$$G_r = \sum_{s \neq r} \Gamma_{ns}^0 \frac{g_{rs}}{g_{rs}^2 + d_{rs}^2}$$

$$H_r = \sum_{s \neq r} \Gamma_{ns}^0 \frac{d_{rs}}{g_{rs}^2 + d_{rs}^2}$$

$$\Gamma_{ns}^0 = \Gamma_{ns} (|E_s|) / P_1 (|E_s|)$$

$$g_{rs} = (\Gamma_r + \Gamma_s) / 2$$

$$d_{rs} = E'_r - E'_s$$

(4), (5)式の第2項は共鳴準位間の干渉を表わしている。場合によりさらに遠くの準位からの寄与もとり入れる必要があるならばピケット・フェンス・モデルによってそれを考慮することができる。

$$\sigma_1^{\downarrow}(E) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_J [(2l+1) 2 \sin^2 \phi_1 + g_J P_J] \quad (6)$$

$$P_J = \sum_r \Gamma_{nr} [G_r U_r - H_r V_r] + F_2(\Gamma) \cos 2\phi_1 + F_1 \sin 2\phi_1$$

$$G_r = \cos 2\phi_1 + P_1(E) \sum_{s \neq r} \Gamma_{ns}^0 \frac{g_{rs}}{g_{rs}^2 + d_{rs}^2} + F_2(\Gamma + \Gamma_r)$$

$$H_r = \sin 2\phi_1 + P_1(E) \sum_{s \neq r} \Gamma_{ns}^0 \frac{d_{rs}}{g_{rs}^2 + d_{rs}^2} + F_1$$

$$U_r = \frac{\frac{1}{2} \Gamma_r}{(E'_r - E)^2 + \frac{1}{4} \Gamma_r^2}$$

$$V_r = \frac{E'_r - E}{(E'_r - E)^2 + \frac{1}{4} \Gamma_r^2}$$

$$F_1 = S \cdot P_1(E) \log \left(\frac{E_H - E + \epsilon D}{E - E_L + \epsilon D} \right)$$

$$F_2(\Gamma) = S \cdot P_1(E) \frac{E_H - E_L + D}{(E_H - E + \frac{1}{2} D)(E - E_L + \frac{1}{2} D)} \cdot \frac{\Gamma}{2}$$

$$\epsilon = (1 - e)^{-1}$$

ここでSは中性子強度関数, E_H , E_L はピケット・フェンスをはるエネルギー上限と下限, Dは平均準位間隔である。

Table Penetration factor P_1 , shift factor S_1 and phase shift ϕ_1 ($l=0, 1, 2, 3$)

l	P_1	S_1	ϕ_1
0	0	ρ	$\hat{\rho}$
1	$-\frac{1}{1+\rho^2}$	$\frac{\rho^3}{1+\rho^2}$	$\hat{\rho} - \tan^{-1} \hat{\rho}$

$$2 \quad -\frac{18+3\rho^2}{9+3\rho^2+\rho^4} \quad \frac{\rho^5}{9+3\rho^2+\rho^4} \quad \hat{\rho} - \tan^{-1} \frac{3\hat{\rho}}{3-\hat{\rho}^2}$$

$$3 \quad -\frac{675+90\rho^2+6\rho^4}{225+45\rho^2+6\rho^4+\rho^6} \quad \frac{\rho^7}{225+45\rho^2+6\rho^4+\rho^6} \quad \hat{\rho} - \tan^{-1} \frac{\hat{\rho}(\hat{\rho}-15)}{6\hat{\rho}^2-15}$$

$\left[\begin{array}{ll} \rho = k a & a : \text{チャンネル半径} \\ \hat{\rho} = k \hat{a} & \hat{a} : \text{実行散乱半径} \end{array} \right]$

付録 C 効率計算結果の誤差推定のための処理プログラム

```

ISN   SINO.  SOURCE STATEMENT
***** PROGRAM TO PROCESS THE COVAIANCE MATRIX ELEMENTS OF THE *****
C*     RELATIVE EFFICIENCY OF NEUTRON FLUX DETECTORS, 6-LI GLASS *
C*     SCINTILLATOR AND 10-B NAI DETECTOR.  EFFICIENCIES ARE *
C*     CALCULATED BY MONTE CARLO PROGRAM, ELIS.  (DEC. 1980) *
C**** INPUT DATA : M ... NUMBER OF ENERGY GROUP (SIZE OF COVARIANCE *
C*     MATRIX). *
C*     : LOB ... =0 FOR 6-LI GLASS SCINTILLATOR, *
C*     :           =1 FOR 10-B NAI DETECTOR. *
C*     : INORM ... NORMALIZATION POINT (ENERGY GROUP NO.) *
C*     OF THE RELATIVE EFFICIENCY. *
C*     : TIN(I) ... TRANSMISSION OF THE INCIDENT NEUTRONS *
C*     IN THE ENERGY GROUP I. *
C*     : TMU(I) ... AVERAGE TRANSMISSION IN THE MULTIPLE *
C*     SCATTERING PROCESS IN THE DETECTOR. *
C*     : XX(I) ... MULTIPLE SCATTERING FACTOR. *
C*     CCCCC TIN, TMU AND XX ARE T, T-WAVE AND X IN EQ. (6.2) AND (6.3) IN THE *
C*     CCCCC DOCUMENTATION OF ELIS.  (AUG. 1982) *
C*     : VARN ... SQUARED-ERROR (VARIANCE) OF THE DETECTOR *
C*     THICKNESS. *
1     DIMENSION TIN(30), TMU(30), XX(30)
2     DIMENSION PX(30), PN(30), PT(30)
3     DIMENSION COV(30,30), COVI(30,30)
4     READ(5,1) M, LOB, INORM
5     1 FORMAT( 16I5 )
6     IO = INORM
7     IF(INORM.EQ.0) IO=1
8     READ(5,2)(TIN(I), I=1,M)
9     READ(5,2)(TMU(I), I=1,M)
10    READ(5,2)(XX(I), I=1,M)
11    2 FORMAT( 8E10.4 )
12    C ERROR SENSITIVITY FACTORS CALC.
13    DO 100 I=1,M
14    C FOR XX ... SCATTERING CROSS SECTION
15    PX(I) = XX(I)/(1.-XX(I))
16    C FOR PN ... SAMPLE THICKNESS
17    T1= -ALOG(TIN(I))
18    T1= T1*TIN(I)/(1.- TIN(I))
19    T2 = -ALOG(TMU(I))
20    T2= T2*TMU(I)/(1.- TMU(I))
21    PN(I)= T1 + PX(I)*T2
22    C FOR TIN ... TOTAL CROSS SECTION
23    PT(I)= PN(I) - 1.-PX(I)
24    100 CONTINUE
25    C
26    PNU= PN(10)
27    DO 110 I=1,M
28    PN(I)= PN(I)-PNU
29    DO 110 J=1,M
30    COVI(I,J)=0.0
31    110 COV(I,J) = 0.0
32    C
33    READ(5,2) VARN
34    IF(VARN.LE.0.) GO TO 200
35    DO 150 I=1,M
36    K= I
37    DO 150 J=1,K
38    150 COV(I,J)= PN(I)*PN(J)* VARN

```

```

ISN      SINO.   SOURCE STATEMENT
33      200 CONTINUE
C      INPUT COVARIANCE FILE FOR REACTION CROSS SECTION
34      CALL COVINP ( COV, M )
35      DO 220 I=1,M
36      K=I
37      DO 220 J=1,K
38      ADD= COV(I,J)-COV(I,10)-COV(J,10)+COV(10,10)
39      COVI(I,J)= COVI(I,J) + ADD
40      220 CONTINUE
C      FOR 6-LI GLASS, THE PROCEDURE IS TERMINATED AT THIS LINE,
C      UNCERTAINTY ANALYSIS IS FOLLOWED TO EQ. (6.20) IN THE DOCUMENT.
41      IF(LOB.EQ.0) GO TO 500

C
C      INPUT COVARIANCE FILE FOR TOTAL CROSS SECTION
42      CALL COVINP ( COV, M )
43      DO 230 I=1,M
44      K=I
45      DO 230 J=1,K
46      ADD= PT(I)*PT(J)*COV(I,J)-PT(I)*PT(10)*COV(I,10)
      &      -PT(J)*PT(10)*COV(J,10)+PT(10)*PT(10)*COV(10,10)
47      COVI(I,J)= COVI(I,J) + ADD
48      230 CONTINUE
C      INPUT COVARIANCE FILE FOR SCATTERING CROSS SECTION
49      CALL COVINP ( COV, M )
50      DO 240 I=1,M
51      K=I
52      DO 240 J=1,K
53      ADD= PX(I)*PX(J)*COV(I,J)-PX(I)*PX(10)*COV(I,10)
      &      -PX(J)*PX(10)*COV(J,10)+PX(10)*PX(10)*COV(10,10)
54      COVI(I,J)= COVI(I,J) + ADD
55      240 CONTINUE
C      INPUT COVARIANCE FILE FOR (REACTION * TOTAL)
56      CALL COVINP ( COV, M )
57      DO 250 I=1,M
58      K=I
59      DO 250 J=1,K
60      ADD= PT(I)*((COV(J,I)-COV(10,I)) +PT(J)*(COV(I,J)-COV(10,J))
      &      -PT(10)*(COV(I,10)+COV(J,10)-2.*COV(10,10)))
61      COVI(I,J)= COVI(I,J) + ADD
62      250 CONTINUE
C      INPUT COVARIANCE FILE FOR (REACTION * SCATTERING)
63      CALL COVINP( COV,M)
64      DO 260 I=1,M
65      K=I
66      DO 260 J=1,K
67      ADD= PX(I)*((COV(J,I)-COV(10,I)) +PX(J)*(COV(I,J)-COV(10,J))
      &      -PX(10)*(COV(I,10)+COV(J,10)-2.*COV(10,10)))
68      COVI(I,J)= COVI(I,J) + ADD
69      260 CONTINUE
C      INPUT COVARIANCE FILE FOR (SCT, TOTAL)
70      CALL COVINP ( COV, M )
71      DO 270 I=1,M
72      K=I
73      DO 270 J=1,K
74      ADD= PT(I)*PX(J)*COV(I,J)+PT(J)*PX(I)*COV(J,I)
      &      -PT(I)*PX(10)*COV(I,10)-PT(J)*PX(10)*COV(J,10)
      &      -PT(10)*PX(I)*COV(10,I)-PT(10)*PX(J)*COV(10,J)

```

```

ISN      SINO.  SOURCE STATEMENT
      &      +2.*PT(10)*PX(10)*COV(10,10)
75      COV(I,J) = COV(I,J) + ADD
76      COV(I,J) = COV(I,J) + ADD
77      270 CONTINUE
      C
      C*****      OUTPUT THE FINAL RESULTS      *****
78      500 CONTINUE
79      WRITE(6,301) M ,LOB, INORM
80      301 FORMAT( 1H1,/,/,5X,'COVARIANCES FOR REL.EFF.CALC.',/,/,11X,'GROUP ='
      & ,15,/,11X,'LI-6 GLASS(0) OR B-10 NAI (1)',13,/,11X,'NORMALIZ.POIN
      &T',15,' GROUP' )
81      WRITE(6,302) VARN
82      302 FORMAT(/,11X,'VARIANCE (REL) OF THICKNESS =',E10.4 )
83      WRITE(6,303) (TIN(L),L=1,M)
84      WRITE(6,304) (TMU(L),L=1,M)
85      WRITE(6,305) (XX(L),L=1,M)
86      WRITE(6,306) (PN(L),L=1,M)
87      WRITE(6,307) (PT(L),L=1,M)
88      WRITE(6,308) (PX(L),L=1,M)
89      303 FORMAT( /6X,'TIN .. INPUT=',10E11.4, 4(/,19X,10E11.4) )
90      304 FORMAT( /6X,'TMU .. INPUT=',10E11.4, 4(/,19X,10E11.4) )
91      305 FORMAT( /6X,'XX .. INPUT=',10E11.4, 4(/,19X,10E11.4) )
92      306 FORMAT( /6X,'PN SENST. N =',10E11.4, 4(/,19X,10E11.4) )
93      307 FORMAT( /6X,'PT SENST. ST=',10E11.4, 4(/,19X,10E11.4) )
94      308 FORMAT( /6X,'PX SENST. SN=',10E11.4, 4(/,19X,10E11.4) )
95      K1= 1
96      310 CONTINUE
97      K2= K1+ 9
98      IF(K2.GT.M) K2=M
99      WRITE(6,205) (K,X=K1,K2)
100     205 FORMAT(  /,11X,10(3X,[5,3X,'*']) )
101     DO 320 I=1,M
102     IF(I.LT.K1) GO TO 320
103     IF(I.GT.K2) GO TO 330
104     K2M = I
105     WRITE(6,206) I,(COV(I,J),J=K1,K2M)
106     GO TO 320
107     330 WRITE(6,206) I,(COV(I,J),J=K1,K2)
108     206 FORMAT(2X,15,4X,10(E12.4) )
109     320 CONTINUE
110     K1=K2+1
111     IF(K1.LE.M) GO TO 310
112     STOP
113     END

```

* PROGRAM BYTE LENGTH 3310(13072)

ISN	SINO.	SOURCE STATEMENT
1		SUBROUTINE COVINP (COV,M)
2		DIMENSION COV(30,30) , STD(30) , STDC(30)
3		WRITE(6,360)
4	360	FORMAT(' INPUT OF RELATIVE COVARIANCES OR CORRELATION AND REL.STD. & DEVIATIONS')
5		DO 200 I=1,M
6		DO 200 J=1,M
7		COV(I,J)= 0.0
8	200	CONTINUE
9		READ(5,2) (STD(I),I=1,M)
10		IF(STD(I).LE.0.0) RETURN
11		READ(5,2) (STDC(I),I=1,M)
12		IF(STDC(I).GT.0.0) GO TO 201
13		DO 202 I=1,M
14	202	STDC(I)= STD(I)
15	201	CONTINUE
16		DO 210 I=1,M
		C C C K=I
		II=I+1
17		READ(5,2) (COV(J,II),J=1,K)
18		READ(5,2) (COV(I,J),J=1,M)
19	210	CONTINUE
20		WRITE(6,351) (STD(I),I=1,M)
21	351	FORMAT(/,11X,'REL.ST.DEV. IN PCT.',5(/,21X,11E10.4))
22		WRITE(6,352) (STDC(I),I=1,M)
23	352	FORMAT(11X,'REL.ST.DEV. (COLUMN)',5(/,21X,11E10.4))
24		DO 350 I=1,M
25		WRITE(6,353) I,(COV(I,J),J=1,M)
26	353	FORMAT(1X,13,12X,10E11.4,4(/,16X,10E11.4))
27	350	CONTINUE
28		DO 211 I=1,M
29		DO 211 J=1,M
30	211	COV(I,J)= COV(I,J)*STD(I)*STDC(J)*1.E-4
31	2	FORMAT(8E10.4)
32		RETURN END

* PROGRAM BYTE LENGTH 0510(01296)

付録 D ^6Li -ガラスおよび ^{10}B -NaI 検出器の効率を与えるファンクション・プログラム

```

ISN   SINO.  SOURCE STATEMENT
1     FUNCTION SNA(E)
      C     DETECTOR EFFICIENCY CALCULATION BY ELIS 79/9/1
      C     REVISID ON 79/9/19
      C     THE 4 3/8" THICK LI-6 GLASS SCINTILLATOR WITH P.M. GLASS
2     COMMON /AA/X(80),Y(80)
      C     ENERGY IN KEV      AND EFFI. IN PERCENT
3     DATA X/20., 24., 28., 29.5, 30., 32., 33., 34., 35., 36., /
      *     37., 38., 40., 42., 44., 46., 48., 50., 52., 54., /
      *     55., 55.5, 56., 56.5, 57., 58., 59., 60., 62., 64., /
      *     66., 70., 73., 76., 80., /
      *     84., 88., 92., 96., 101., 106., 110., 116., 121., 123., /
      *     127., 133., 139., 143., 152., 160., 167., 175., 183., 188., /
      *     192., 201., 210., 220., 231., 242., 253., 265., 277., 290., /
      *     304., 318., 333., 349., 366., 383., 400., 420., 440., 455., /
      *     470., 485., 500., 1000., 5000. /
4     DATA Y/1.5580, 1.4390, 1.3300, 1.2667, 1.300, /
      *     1.277, 1.273, 1.328, 1.332, 1.275, /
      *     1.225, 1.187, 1.160, 1.135, 1.110, /
      *     1.082, 1.055, 1.028, 1.012, 1.030, /
      *     1.075, 1.392, 1.380, 1.200, 1.130, /
      *     1.050, 1.025, 1.015, 1.005, 0.995, /
      *     0.97650, 0.97317, 0.95220, 1.0203, 1.0038, /
      *     0.98696, 0.96183, 0.94672, 0.89194, 0.89016, /
      *     0.92616, 0.94543, 0.97335, 1.0144, 1.0055, /
      *     0.94944, 0.98271, 1.0379, 1.0696, 1.1355, /
      *     1.3380, 1.4414, 1.5984, 1.9096, 2.1017, /
      *     2.2796, 2.6409, 3.0126, 3.6462, 3.8938, /
      *     4.2012, 4.2900, 3.9850, 3.6299, 3.0729, /
      *     2.7450, 2.2849, 2.0200, 1.7895, 1.5856, /
      *     1.3696, 1.2405, 1.3431, 1.5658, 1.2259, /
      *     1.0861, 0.98324, 0.88455, 0.32, 0.13 /
5     IF(E.LE.20000.) GO TO 100
6     IF(E.GT.20000..AND.E.LT.5000000.) GO TO 300
7     SNA=0.001
8     RETURN
9     100 AX=ALOG(E)
10    AY=-0.0842-0.3015*AX-0.0114*AX*AX
11    SNA=EXP(AY)
12    RETURN
13    300 AX=E/1000.
14    DO 400 I=1,80
15    IF(AX.GE.X(I),AND.AX.LT.X(I+1)) GO TO 500
16    400 CONTINUE
17    500 AXX=ALOG(AX)
18    X2=ALOG(X(I+1))
19    X1=ALOG(X(I))
20    Y2=ALOG(Y(I+1))
21    Y1=ALOG(Y(I))
22    C2=X2-AXX
23    C1=AXX-X1
24    AY=(C1*Y2+C2*Y1)/(C1+C2)
25    SNA=0.01*EXP(AY)
26    RETURN
27    END

```

```

ISN   SINO.  SOURCE STATEMENT
1     C      FUNCTION SNB(E)
      C      DETECTOR EFFICIENCY CALCULATION BY ELIS 81/6/13
      C      B10(NAI) DETECTOR
      C      ENERGY IN KEV,   EFFI IN PERCENT
2     COMMON /BB/X(60),Y(60)
3     DATA X/.025,0.50 ,1. ,2. ,4. ,6. ,8. ,10. ,15. ,20. ,
*     25. ,30. ,40. ,50. ,60. ,70. ,80. ,90. ,100. ,120. ,
*     140. ,160. ,180. ,200. ,225. ,250. ,275. ,300. ,325. ,340. ,
*     350. ,360. ,375. ,400. ,425. ,450. ,465. ,480. ,490. ,500. ,
*     550. ,600. ,650. ,700. ,750. ,800. ,900. ,1000. ,1200. ,1400. ,
*     1500. ,1600. ,1800. ,2000. ,2500. ,3000. ,3500. ,4000. ,4500. ,5000. /
4     DATA Y/0.5872 ,0.57020 ,0.55070 ,0.5084 ,0.4520 ,
*     0.4112 ,0.3822 ,0.3586 ,0.3178 ,0.2910 ,
*     0.2660 ,0.2500 ,0.2242 ,0.2051 ,0.1915 ,
*     0.1817 ,0.1708 ,0.1630 ,0.1574 ,0.1454 ,
*     0.1360 ,0.1293 ,0.1228 ,0.1172 ,0.1093 ,
*     0.1035 ,0.09568 ,0.08852 ,0.08462 ,0.08125 ,
*     0.07859 ,0.07885 ,0.07610 ,0.07155 ,0.06987 ,
*     0.06549 ,0.06429 ,0.06215 ,0.05973 ,0.05825 ,
*     0.04956 ,0.04145 ,0.03507 ,0.02992 ,0.02577 ,
*     0.02007 ,0.01548 ,0.01198 ,0.009272 ,0.007883 ,
*     0.008381 ,0.009495 ,0.01402 ,0.01403 ,0.01193 ,
*     0.008941 ,0.007837 ,0.01046 ,0.01087 ,0.007484 /
5     IF( E.LE.25.) GO TO 100
6     IF( E.LT.5.E6 ) GO TO 300
7     SNB= 0.007484*0.01
8     GO TO 200
9     100 SNB = 0.5872 * 0.01
10    GO TO 200
11    300 AX=E/1000.
12    DO 400 I=1,60
13    IF(AX.GE.X(I).AND.AX.LT.X(I+1)) GO TO 500
14    400 CONTINUE
15    500 AXX=ALOG10(AX)
16    X2=ALOG10(X(I+1))
17    X1=ALOG10(X(I))
18    Y2=ALOG10(Y(I+1))
19    Y1=ALOG10(Y(I))
20    C2=X2-AXX
21    C1=AXX-X1
22    AY=(C1*Y2+C2*Y1)/(C1+C2)
23    SNB=10.**AY*0.01
24    200 RETURN
25    END

```

* PROGRAM BYTE LENGTH 02B0(U0688)