

JAERI-M

5643

しきい検出器による速中性子スペクトル  
測定法

1974年3月

田中 俊一・沓掛 忠三

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

しきい検出器による速中性子スペクトル測定法

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

田中 俊一・沓掛 忠三<sup>†</sup>

(1974年2月9日受理)

本報告書は、しきい検出器を用いて速中性子スペクトルを測定する方法について集約したもので、しきい検出器の選択の規準、それにもとづいて選んだしきい検出器の諸特性（半減期、分岐比、ガンマ線スペクトル、反応断面積等）、および測定値から速中性子スペクトルを得る方法（Unfolding）としてR D M M法<sup>1)</sup>とIterative法<sup>2), 3)</sup>について述べた。

さらに、しきい検出器によりJ R R - 4炉心内照射孔の速中性子スペクトルを測定し、実験誤差、反応断面積、Unfoldingにともなう種々の計算条件について検討した。また、一次元S<sub>n</sub>コード（A N I S N）<sup>4)</sup>による計算値とスペクトルを比較することにより、しきい検出器による速中性子スペクトル測定法の妥当性、問題点をあきらかにした。

<sup>†</sup> 東海研究所研究炉管理部

Fast Neutron Spectrum Measurement with the Threshold  
Detectors

Shun-ichi TANAKA

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

and

Chuzo KUTSUKAKE

Division of Research Reactor Operation, Tokai, JAERI

(Received February 9, 1974)

The method of obtaining fast neutron spectrum with the threshold detector is described, including criteria for choosing threshold detectors and the properties (half life, branching ratio, gamma-ray spectrum, threshold reaction cross section, etc.). The relative deviation minimization method and iterative method for unfolding are also explained.

To evaluate the validity, the fast neutron spectrum in an irradiation hole of JRR-4, JAERI, was obtained with the threshold detectors; and the experimental error, cross sections, and conditions for unfolding were examined.

The results obtained were compared with those by one-dimensional  $S_n$  code ANISN, in an attempt to reveal the propriety of fast neutron spectrum measurement with the threshold detectors and the problems involved.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. しきい検出器の特性 .....	1
3. 中性子スペクトル解析法 .....	2
3. 1 R D M M 法 .....	2
3. 2 Iterative 法 .....	3
3. 3 しきい反応断面積 .....	4
4. 速中性子スペクトル測定と検討 .....	5
4. 1 実験と解析 .....	5
4. 2 計算との比較 .....	6
5. 結論 .....	6
謝辞 .....	7
参考文献 .....	7

## 1. まえがき

しきい反応を利用した中性子束の測定は、原子炉を中心とした多くの実験に利用されてきた。なかでもしきいエネルギーの異なる数種類のしきい検出器を用いて速中性子スペクトルを測定する方法は、比較的簡便な中性子スペクトル測定法として古くから多くの研究がなされている。<sup>5)</sup>

しきい検出器の特長は

- I) ガンマ線に対する感度がないため、原子炉のように強いガンマ線の混在する場所で用いられる,
  - II) 検出器が小型の積分型検出器であり、放射線場を大きく乱すこともなく、また取扱いが簡単である,
  - III) 反応生成物からの放射線（ガンマ線またはベータ線）の測定が容易である,
  - IV) 検出器は比較的安価で容易に入手できる,
  - V) 温度依存性がなく、高温でも利用できる,
- ことなどがある。

しかし、これらの多くの利点にもかかわらず、実際にしきい検出器で速中性子スペクトルを測定するにあたっては少なからず問題が残されている。

例えば

- I) 中性子に対する感度が小さいので、中性子強度の大きい場所でしか使えない,
- II) しきい反応による生成核種の放射能の絶対測定が難かしい,
- III) しきい反応の反応断面積が必要な精度で知られているものが少ない,
- IV) しきい反応による反応生成物の強度（反応率）から速中性子スペクトルを得る方法（Unfolding）の相違、ないしは計算の種々の条件により得られるスペクトルに差異が生ずることなどがある。これらの問題について、これまでにも個々に検討されてきたが、これらを全体的に考慮したしきい検出器による速中性子測定法についての研究は非常に少ない。

こゝでは、以上のこととを考慮し、筆者らが選択したしきい検出器の物理的、核的特性について検討を加えた結果を集約し、さらにこれらのしきい検出器を用いた速中性子スペクトル測定の一一般的な方法について述べる。また実際の応用例として、原研、JRR-4（スイミングプール型原子炉、最大出力2.5MW）の照射孔（T-パイプ）内の速中性子スペクトルを測定し、反応断面積、Unfoldingの方法とその計算条件、しきい検出器の数と種類等について検討した。さらに一次元S<sub>n</sub>コード（ANISN）を用いて、T-パイプの速中性子スペクトルを求め、しきい検出器により実験的に得られた速中性子スペクトルと比較検討し、しきい検出器法に含まれる問題点などを明らかにした。

## 2. しきい検出器の特性

速中性子スペクトル測定用としてのしきい検出器は、先にも述べたように、次のような特性

## 1. まえがき

しきい反応を利用した中性子束の測定は、原子炉を中心とした多くの実験に利用されてきた。なかでもしきいエネルギーの異なる数種類のしきい検出器を用いて速中性子スペクトルを測定する方法は、比較的簡便な中性子スペクトル測定法として古くから多くの研究がなされている。<sup>5)</sup>

しきい検出器の特長は

- I) ガンマ線に対する感度がないため、原子炉のように強いガンマ線の混在する場所で用いられる,
  - II) 検出器が小型の積分型検出器であり、放射線場を大きく乱すこともなく、また取扱いが簡単である,
  - III) 反応生成物からの放射線（ガンマ線またはベータ線）の測定が容易である,
  - IV) 検出器は比較的安価で容易に入手できる,
  - V) 温度依存性がなく、高温でも利用できる,
- ことなどがある。

しかし、これらの多くの利点にもかかわらず、実際にしきい検出器で速中性子スペクトルを測定するにあたっては少なからず問題が残されている。

例えば

- I) 中性子に対する感度が小さいので、中性子強度の大きい場所でしか使えない,
- II) しきい反応による生成核種の放射能の絶対測定が難かしい,
- III) しきい反応の反応断面積が必要な精度で知られているものが少ない,
- IV) しきい反応による反応生成物の強度（反応率）から速中性子スペクトルを得る方法（Unfolding）の相違、ないしは計算の種々の条件により得られるスペクトルに差異が生ずることなどがある。これらの問題について、これまでにも個々に検討してきたが、これらを全体的に考慮したしきい検出器による速中性子測定法についての研究は非常に少ない。

こゝでは、以上のこと考慮し、筆者らが選択したしきい検出器の物理的、核的特性について検討を加えた結果を集約し、さらにこれらのしきい検出器を用いた速中性子スペクトル測定の一般的な方法について述べる。また実際の応用例として、原研、JRR-4（スイミングプール型原子炉、最大出力2.5MW）の照射孔（T-パイプ）内の速中性子スペクトルを測定し、反応断面積、Unfoldingの方法とその計算条件、しきい検出器の数と種類等について検討した。さらに一次元S<sub>n</sub>コード（ANISN）を用いて、T-パイプの速中性子スペクトルを求め、しきい検出器により実験的に得られた速中性子スペクトルと比較検討し、しきい検出器法に含まれる問題点などを明らかにした。

## 2. しきい検出器の特性

速中性子スペクトル測定用としてのしきい検出器は、先にも述べたように、次のような特性

を有していることが望ましい。

- i) 反応断面積がよく知られており、かつその断面積が大きいこと、
- ii) 反応生成物の半減期は、その放射線測定が十分行える程度であること、
- iii) 反応生成物の放射線は、容易にかつ精度良く絶対測定できること、
- iv) しきい検出器として、高純度のものが安価でかつ容易に入手できること、
- v) 必要な種々の定数がよく知られていること、
- vi) 測定の対象とするエネルギー領域内において、しきい検出器のしきいエネルギーがその領域内にできるだけ均等に分布するようを種類であること。

Table 1 は以上のこと考慮して筆者らが選んだしきい検出器の種類、形状、純度、母核種の天然存在比<sup>6)</sup> および生成核種の半減期<sup>6)</sup> で、Table 2 は個々のしきい反応による反応生成物の放射線測定に利用した gamma 線エネルギー<sup>6)</sup> とその分岐比 (Branching ratio)<sup>6)</sup> および Ge (Li) 半導体検出器に対する gamma 線の全エネルギーピークの絶対効率を示めしている。一般に有限の体積をもつ線源の絶対測定を実験的に得るのは難しい。しかし、しきい検出器法による中性子スペクトル測定では絶対測定の精度が Unfolding により得られる速中性子スペクトルに大きな影響をおよぼすため絶対測定を精度良く行なうことが重要である。そこで Table 2 に示した絶対効率は "pos. 1" についてモンテカルロ計算によって求め<sup>7)</sup>、他の position についてはこれを用いて実験的に測定したものである。Fig. 1 はモンテカルロ計算を行なったしきい検出器 (Source) と Ge (Li) 半導体検出器の関係をあらわしている。なお Table 2 の position を示す Z<sub>0</sub> は Fig. 1 に示したように Ge (Li) 半導体検出器の上端からしきい検出器の下端までの距離である。このようにして得た絶対効率の誤差は 5% 以下と考えられる。

Fig. 2 はしきい検出器の gamma 線測定に用いた測定回路のブロックダイヤグラムで、Fig. 3 から Fig. 11 は JRR-4 の T - バイブ内で照射した各しきい検出器の gamma 線スペクトルを Ge (Li) 半導体検出器で測定した結果である。

### 3. 中性子スペクトル解析法

しきい検出器によって得られた反応率から速中性子スペクトルを計算する方法 (Unfolding) として、現状のところ Relative Deviation Minimization Method (R D M M 法) と Iterative 法 (くり返し法) が最も広く利用されている。これらの方法について簡単に概説する。

#### 3.1 R D M M 法<sup>1)</sup>

未知の速中性子スペクトルを  $\phi(E)$  とし、 $\phi(E)$  は次のような級数展開で表わされると仮定する。

$$\phi(E) = w(E) \sum_{k=1}^n a_k \psi_k(E) \quad (1)$$

を有していることが望ましい。

- i) 反応断面積がよく知られており、かつその断面積が大きいこと、
- ii) 反応生成物の半減期は、その放射線測定が十分行える程度であること、
- iii) 反応生成物の放射線は、容易にかつ精度良く絶対測定できること、
- iv) しきい検出器として、高純度のものが安価でかつ容易に入手できること、
- v) 必要な種々の定数がよく知られていること、
- vi) 測定の対象とするエネルギー領域内において、しきい検出器のしきいエネルギーがその領域内にできるだけ均等に分布するような種類であること。

Table 1 は以上のこと考慮して筆者らが選んだしきい検出器の種類、形状、純度、母核種の天然存在比<sup>6)</sup> および生成核種の半減期<sup>6)</sup> で、Table 2 は個々のしきい反応による反応生成物の放射線測定に利用した gamma 線エネルギー<sup>6)</sup> とその分岐比 (Branching ratio)<sup>6)</sup> および Ge (Li) 半導体検出器に対する gamma 線の全エネルギーピークの絶対効率を示めしている。一般に有限の体積をもつ線源の絶対測定を実験的に得るのは難しい。しかし、しきい検出器法による中性子スペクトル測定では絶対測定の精度が Unfolding により得られる速中性子スペクトルに大きな影響をおよぼすため絶対測定を精度良く行なうことが重要である。そこで Table 2 に示した絶対効率は "pos. 1" についてモンテカルロ計算によって求め<sup>7)</sup>、他の position についてはこれを用いて実験的に測定したものである。Fig. 1 はモンテカルロ計算を行なったしきい検出器 (Source) と Ge (Li) 半導体検出器の関係をあらわしている。なお Table 2 の position を示す Z<sub>0</sub> は Fig. 1 に示したように Ge (Li) 半導体検出器の上端からしきい検出器の下端までの距離である。このようにして得た絶対効率の誤差は 5% 以下と考えられる。

Fig. 2 はしきい検出器の gamma 線測定に用いた測定回路のブロックダイヤグラムで、Fig. 3 から Fig. 1.0 は JRR-4 の T-パイプ内で照射した各しきい検出器の gamma 線スペクトルを Ge (Li) 半導体検出器で測定した結果である。

### 3. 中性子スペクトル解析法

しきい検出器によって得られた反応率から速中性子スペクトルを計算する方法 (Unfolding) として、現状のところ Relative Deviation Minimization Method (R D M M 法) と Iterative 法 (くり返し法) が最も広く利用されている。これらの方法について簡単に概説する。

#### 3.1 R D M M 法<sup>1)</sup>

未知の速中性子スペクトルを  $\phi(E)$  とし、 $\phi(E)$  は次のような級数展開で表わされると仮定する。

$$\phi(E) = w(E) \sum_{k=1}^n a_k \psi_k(E) \quad (1)$$

ここで  $n$  展開項数

$a_k$  = 級数展開係数

$\psi_k(E)$  = 多項式

$w(E)$  = 重み関数

R D M M 法は、最小自乗法の考え方にもとづき  $\phi(E)$  の最良の近似値として、次式において  $Q$  を最小にする級数展開係数  $a_k$  を決めるに帰結される。

$$Q = (t; a_1, a_2, \dots, a_t) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{A_i - \int \sigma_i(E) \phi(E) dE}{A_i} \right] \quad (2)$$

ここで  $A_i = i$  番目のしきい検出器の反応率

$\sigma_i = i$  番目のしきい検出器の断面積

$t =$  展開項数 ( $1, 2, \dots, n$ )

また右辺の分子内の積分は、計算によって得られる  $i$  番目のしきい検出器の反応率に相当する。

R D M M 法にもとづいた解析コードとして、LUNA-5<sup>8)</sup> が開発されている。LUNA-5 は  $0.1 \text{ MeV}$  から  $1.8 \text{ MeV}$  の領域で一連の反応率から速中性子スペクトルを得ることを目的としたもので、展開級数として、Lagurre, Chebyshev および Hermite の多項式が利用できる。重み関数としては、 $w(E) = \exp(-\alpha E)$ :  $\alpha = \text{定数}$ 、または Watt の式、 $w(E) = 0.453 \exp(-E/0.965) \sinh(\sqrt{2.290}E)$  が用いられる。なお、LUNA-5 の各しきい反応断面積は  $0.1$  から  $1.8 \text{ MeV}$  の範囲で、 $0.1 \text{ MeV}$  幅の群定数として入力される。

### 3.2 Iterative 法<sup>2), 3)</sup>

未知のスペクトルを  $\phi(E)$  とし、 $k$  番目の iteration によって得られる中性子スペクトルを  $\phi^k(E)$  とすると、 $i$  番目のしきい検出器の  $j$  番目のエネルギーグループでの反応率  $A_{ij}^k$  は次式で表わされる。

$$A_{ij}^k = \int_{E_j}^{E_{j+1}} \sigma_{ij}(E) \phi^k(E) dE \quad (3)$$

$E_j$  から  $E_{j+1}$  のエネルギー範囲で、しきい反応断面積  $\sigma_{ij}(E)$  は平均の断面積  $\sigma_{ij}$  で代表されると、(3)式は次のように書きかえられる。

$$A_{ij}^k = \sigma_{ij} \int_{E_j}^{E_{j+1}} \phi^k(E) dE = \sigma_{ij} \phi_j^k \quad (4)$$

ここで、重み関数  $w_{ij}^k$  を次のように定義する。

$$w_{ij}^k = \frac{A_{ij}^k + A_{ij-1}^k}{2 A_i^k} \quad (5)$$

また、 $i$  番目のしきい検出器の全エネルギー領域における反応率  $A_i^k$  は次式で表わされる。

$$A_i^k = \sum_j A_{ij}^k \quad (6)$$

一方、 $i$  番目のしきい検出器の測定値（反応率）を  $A_i^{\text{expt}}$  とし、 $R_i^k$  と  $C_j^k$  をそれぞれ次のように定義する。

$$R_i^k = A_i^{\text{expt}} / A_i^k \quad (7)$$

$$C_j^k = \sum_i w_{ij}^k \ln R_i^k / \sum_i w_{ij}^k \quad (8)$$

以上のことから、 $k+1$  番目の  $\phi_j^{k+1}$  ( $E$ ) は、(8)式から得られる  $C_j^k$  を用いて次式で計算される。

$$\phi_j^{k+1} (E) = \phi_j^k \exp (C_j^k) \quad (9)$$

このようにして、iteration を繰り返すまで行なわれる。

Iterative 法による解析コードとして S A N D - II<sup>2)</sup> がある。現在筆者らが利用している S A N D - II は F A C O M 2 3 0 - 6 0 用に整備したもので、0.1 から 1.8 MeV のエネルギー領域を対象としている。S A N D - II での収束条件  $\epsilon$  は次式で与えられる。

$$\epsilon = \sqrt{\sum_i (\varepsilon_i^{\text{expt}} / A_i^{\text{expt}})^2} \quad (10)$$

ここで  $\varepsilon_i^{\text{expt}}$  =  $i$  番目のしきい検出器の実験誤差

$A_i^{\text{expt}}$  =  $i$  番目のしきい検出器の測定値（反応率）  
なお S A N D - II では、各しきい反応断面積は 0.1 から 1.8 MeV の範囲で 0.1 MeV 幅の群定数として入力される。

### 3.3 しきい反応断面積

しきい検出器の反応断面積は、前述したように Unfolding に際して L U N A - 5 や S A N D - II の入力データとして用いられ、測定値（反応率）と同様、その精度は得られる速中性子スペクトルに大きな影響をおよぼす。これまでいくつかのしきい検出器についてはその反応断面積の研究も比較的良く行なわれてきたが、必ずしもすべてのしきい検出器について、反応断面積の評価が確立されていないのが現状である。

Fig. 1 1 から Fig. 2 4 は代表的なしきい検出器について、S A N D - II ライブライ <sup>1</sup>， E N D F / B - I, E N D F / B - II, B N L - 3 2 5<sup>9)</sup> および B r e s e s t i et al.<sup>10)</sup> にそれぞれ収録されている反応断面積を比較したものである。図からわかるように、反応断面積はそれぞれ評価済みの値であるにもかゝわらず相当の差が認められる。

## 4. 速中性子スペクトル測定と検討

### 4.1 実験と解析

先に述べたしきい検出器による速中性子スペクトル測定法を検討するために、JRR-4のT-パイプ内の速中性子スペクトルを $^{115}\text{In}$ (n, p),  $^{238}\text{U}$ (n, f),  $^{46}\text{Ti}$ (n, p),  $^{47}\text{Ti}$ (n, p),  $^{64}\text{Zn}$ (n, p),  $^{54}\text{Fe}$ (n, p),  $^{24}\text{Mg}$ (n, p)および $^{27}\text{Al}$ (n,  $\alpha$ )の8種類のしきい検出器を用いて測定し次のような点について検討した。

- i) LUNA-5, SAND-IIによる速中性子スペクトルの相違,
- ii) Unfoldingに際しての、LUNA-5, SAND-IIそれぞれの計算条件(多項式、

展開項数、重み関数、初期スペクトル、(くり返し数)の違いによる速中性子スペクトルの相違,

iii) それぞれのコードにおいて異なる反応断面積を用いた時の速中性子スペクトルの相違,

iv) しきい検出器の数を変えた時の速中性子スペクトルの相違。

Fig. 25-1 と Fig. 25-2 は T-パイプ近傍の配置を示めしている。T-パイプは JRR-4 炉心の燃料要素に隣接し設置されている照射孔の一つで、格子栓 2-V に位置している。個々のしきい検出器は Fig. 25-2 に示めしたように燃料要素の下端から 24.5 mm の位置で、1 mm 厚の Cd ケースに入れて照射した。照射中の原子炉出力等の変動はモニタとして 10 mm × 10 mm の金箔を、しきい検出器の照射位置より 45 mm 下の位置で同時に照射することにより補正した。照射した各しきい検出器は Table 2 に示めしたエネルギーのガンマ線強度を測定し、Table 1 と 2 の各種定数を用いて反応率を求めた。

このようにして求めた一連の反応率を用いて、検出器の数、しきい反応断面積、あるいは LUNA-5, SAND-II の各種計算条件を変えて得た T-パイプの速中性子スペクトルを Fig. 26 から Fig. 3-2 に示めす。なおこれらの図において "set-1" で示めず断面積は SAND-II ライブラリィより採ったもので、この中で、 $^{24}\text{Mg}$ (n, p) と  $^{54}\text{Fe}$ (n, p) について、SAND-II ライブラリィと比較的相違の大きい ENDF/B-I および Bresesti のそれと入れかえたものを "set-2" として示めした。(Fig. 18, Fig. 21 参照)

Fig. 26 から Fig. 3-0 は LUNA-5 による Unfolding の結果を示めている。Fig. 26 は重み関数を変えた時、Fig. 27 は多項式の種類を変えた時、また Fig. 28 は断面積を set-1) と set-2) を変えた時のスペクトルへの影響を示めすもので、多項式の相違、断面積の相違による影響はこの場合さ程大きくあらわれてないが重み関数の影響は大きい。また Fig. 29 は前述の 8 種類のしきい検出器のうち  $^{238}\text{U}$ (n, f) を除いた時、 $^{238}\text{U}$ (n, f) と  $^{64}\text{Zn}$ (n, p) を除いた時に得られるスペクトルの変化で、3 MeV 以下と 10 MeV 以上の領域に差があらわれている。

Fig. 3-0 から Fig. 3-2 は SAND-II による Unfolding の結果である。Fig. 3-0 はスペクトルの初期値による変化で、くり返し数が 10 回と 20 回の時のスペクトルを示めしている。Fig. 3-1 と Fig. 3-2 は Fig. 28 と Fig. 29 の場合と同様、断面積セットを入れかえた時、しきい検出器の数をかえた時、それぞれのスペクトルの変化を示めしたものである。

これらの図から S A N D - II では、初期値の影響は大きいが、断面積の相違、しきい検出器の数の相違によるスペクトルへの影響は小さいことがわかる。

#### 4.2 計算との比較

4.1で述べた速中性子スペクトル測定の結果は、LUNA-5, SAND-IIいずれにおいても計算条件などからUnfoldingにより得られるスペクトルに影響をおよぼすことが明らかにされた。

このため、測定した速中性子スペクトルの妥当性を調べるため、一次元  $S_n$  コード (ANISN)<sup>4)</sup> の計算値との比較を行なった。

ANISN 計算では、幾何形状を Fig. 3-3 に示めすように炉心中心を原点とし、かつ炉心、反射体領域と同体積をもつ球体系で近似した。計算は黒鉛反射体のある場合 (Case-1) と反射体がなく炉心の周囲が水の場合 (Case-2) について行なった。使用した群定数は D L C - 2 C<sup>11)</sup> ライブライアリイである。DLC-2C ライブライアリイは END F / B - II から作成された ANISN 型群定数で、15 MeV から 0.1 MeV までを 0.1 レサジ、それ以下を 0.25 レサジ間隔で 100 群に分割されている。計算は 60 群まで行なった。散乱のルジャンドル展開は 8 項までとり、ガウスの角度分点は  $S_{18}$  をとった。

Fig. 3-4 は LUNA-5, SAND-II によって得たスペクトルと ANISN によって得た、T バイブ中心位置の上記 2 ケースの速中性子スペクトルを比較したものでかなり良い一致を示めしている。

### 5. 結論

以上のことから、しきい検出器により速中性子スペクトルを測定するにあたっての留意すべき点、問題点をまとめると次のようになる。

- I) しきい検出器の物理的、核的定数(同位体存在比、分岐比、半減期)の精度についての検討はこゝではなされてないが、 $^{115m}\text{In}$  の 0.335 MeV ガンマ線の分岐比と  $^{238}\text{U}$  や  $^{232}\text{Th}$  の核分裂生成物収率(Fission yield)のエネルギー依存性については、現在あるデータは不十分で、精度の面からさらに検討を要すると思われる。
- II) しきい反応の断面積について、こゝで行なった速中性子スペクトル測定の結果 (Fig. 2-8, Fig. 3-1 参照) からはさ程大きな影響は見られなかったが、最も基本的定数であり、Fig. 1-1 から Fig. 2-4 に示めしたように評価済みデータ間ににおいてさえ相当の差があることなどからも今後の歴史課題である。
- III) LUNA-5 により Unfolding を行なう場合、多项式の種類は Laguerre, Chebyshev, Hermite のいずれを用いても良いが、重み関数は Unfolding に際し、スペクトルの概要を与えるものでその影響も大きい。したがってスペクトルの形を予測し、適切な関数形を用いる必要がある。また展開項数はスペクトルに振動をきたさぬ範囲でできるだけ多い方が良いと考えられる。

これらの図から S A N D - II では、初期値の影響は大きいが、断面積の相違、しきい検出器の数の相違によるスペクトルへの影響は小さいことがわかる。

#### 4.2 計算との比較

4.1 で述べた速中性子スペクトル測定の結果は、L U N A - 5, S A N D - II いずれにおいても計算条件などが少なからず Unfolding により得られるスペクトルに影響をおよぼすことが明らかにされた。

このため、測定した速中性子スペクトルの妥当性を調べるために、一次元  $S_n$  コード (ANISN)<sup>4)</sup> の計算値との比較を行なった。

ANISN 計算では、幾何形状を Fig. 3-3 に示めすように炉心中心を原点とし、かつ炉心、反射体領域と同体積をもつ球体系で近似した。計算は黒鉛反射体のある場合 (Case-1) と反射体がなく炉心の周囲が水の場合 (Case-2) について行なった。使用した群定数は D L C - 2 C<sup>11)</sup> ライブライアリイである。DLC - 2 C ライブライアリイは END F / B - II から作成された ANISN 型群定数で、15 MeV から 0.1 MeV までを 0.1 レサジ、それ以下を 0.25 レサジ間隔で 100 群に分割されている。計算は 60 群まで行なった。散乱のルジャンドル展開は 8 項までとり、ガウスの角度分点は  $S_{18}$  をとった。

Fig. 3-4 は L U N A - 5, S A N D - II によって得たスペクトルと ANISN によって得た、T ニバイプ中心位置の上記 2 ケースの速中性子スペクトルを比較したものでかなり良い一致を示めしている。

### 5. 結論

以上のことから、しきい検出器により速中性子スペクトルを測定するにあたっての留意すべき点、問題点をまとめると次のようになる。

- I) しきい検出器の物理的、核的定数(同位体存在比、分岐比、半減期)の精度についての検討はこゝではなされてないが、 $^{115m}\text{In}$  の 0.335 MeV ガンマ線の分岐比と  $^{238}\text{U}$  や  $^{232}\text{Th}$  の核分裂生成物収率(Fission yield)のエネルギー依存性については、現在あるデータは不十分で、精度の面からさらに検討を要すると思われる。
- II) しきい反応の断面積について、こゝで行なった速中性子スペクトル測定の結果 (Fig. 2-8, Fig. 3-1 参照) からはさ程大きな影響は見られなかったが、最も基本的定数であり、Fig. 1-1 から Fig. 2-4 に示めしたように評価済みデータ間ににおいてさえ相当の差があることなどからも今後の歴史課題である。
- III) L U N A - 5 により Unfolding を行なう場合、多项式の種類は Laguerre, Chebyshev, Hermite のいずれを用いても良いが、重み関数は Unfolding に際し、スペクトルの概要を与えるものでその影響も大きい。したがってスペクトルの形を予測し、適切な関数形を用いる必要がある。また展開項数はスペクトルに振動をきたさぬ範囲でできるだけ多い方が良いと考えられる。

- IV) S A N D - II では、スペクトルの初期値の与え方が重要で、L U N A - 5 の場合と同じくスペクトルの概要を予想してできるだけ実際のスペクトルに近い初期スペクトルを与えることが望ましい。またくり返し数が必要以上に多くなると測定値や断面積などに含まれる誤差が強調され望ましくないスペクトルになる。筆者らの実験解析の経験から 10 ないし 20 回程度が適当と考えられる。
- V) しきい検出器の数はできるだけ多い方が良い。ただし測定対象とするエネルギー領域で、しきい検出器のしきいエネルギーが平均に分布するようにその種類を選択しなければならない。このことは今回の測定に用いた 8 種類のしきい検出器のしきいエネルギーがすべて 1 MeV から 10 MeV の範囲にあるため、L U N A - 5, S A N D - II いずれの場合にも III), IV) で述べた Unfolding の際の影響が 10 MeV 以上で大きくなっていることからも推測される。ただ 10 MeV 以上のしきいエネルギーをもつしきい反応は、断面積が良くわかっているものが少ないと、断面積の大きさが小さいこと、原子炉などでは 10 MeV 以上の中性子束の強度が小さいことなどから、一般にはその利用が困難であるが、Unfolding にともなう任意性を少くするために欠かすことができないと考えられる。
- VI) A N I S N による計算結果との比較は、これまでに述べた速中性子スペクトル測定法についての目安を与えている。すなわち 10 MeV 以下の範囲では、ここで利用した 8 種類のしきい検出器で妥当なスペクトルが得られること、一方 10 MeV 以上のスペクトル測定には前述したようにさらに高いしきいエネルギーを持ったしきい検出器を加える必要があること、また筆者らが用いた各種の定数、測定方法が適当であることなどが明らかである。

### 謝 辞

本研究を行なうに当って、A N I S N の利用をはじめ多くのご指導をいただいた遮蔽研究室長宮坂駿一氏、S A N D - II の利用の便宜を計っていた船舶技術研究所の三浦俊正氏、J R R - 4 での実験にあたって協力をいたいた研究炉利用課の渡辺智美氏にこゝで深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) C. Di Cola and A. Rota, Nucl. Sci. and Eng., 23, 344 (1965)
- 2) W. N. McElroy, S. Berg, T. Crockett, and R. G. Hawkins,  
AWRL-TR-67-41, 1-4 (1967)
- 3) E. Linn Draper, Nucl. Sci. and Eng., 46, 22 (1971)
- 4) Ward W. Engle, Jr., K-1693 (1967)
- 5) W. L. Zijp, RCN-37 (1965)
- 6) C. M. Lederer and J. H. Hollander, "Table of Isotope" sixth edition  
, John Wiley & Sons, Inc., (1968)
- 7) S. Tanaka, JAERI-M 5148 (1973) (in Japanese)
- 8) T. Matui and T. Yamada, JAERI-memo 3000 (1968) (in Japanese)
- 9) BNL-325 Supplement Second Edition

- IV) S A N D - II では、スペクトルの初期値の与え方が重要で、L U N A - 5 の場合と同じくスペクトルの概要を予想してできるだけ実際のスペクトルに近い初期スペクトルを与えることが望ましい。またくり返し数が必要以上になると測定値や断面積などに含まれる誤差が強調され望ましくないスペクトルになる。筆者らの実験解析の経験から 10ないし 20 回程度が適当と考えられる。
- V) しきい検出器の数はできるだけ多い方が良い。ただし測定対象とするエネルギー領域で、しきい検出器のしきいエネルギーが平均に分布するようにその種類を選択しなければならない。このことは今回の測定に用いた 8 種類のしきい検出器のしきいエネルギーがすべて 1 MeV から 10 MeV の範囲にあるため、L U N A - 5, S A N D - II いずれの場合にも III), IV) で述べた Unfolding の際の影響が 10 MeV 以上で大きくなっていることからも推測される。ただ 10 MeV 以上のしきいエネルギーをもつしきい反応は、断面積が良くわかっているものが少ないこと、断面積の大きさが小さいこと、原子炉などでは 10 MeV 以上の中性子束の強度が小さいことなどから、一般にはその利用が困難であるが、Unfolding にともなう任意性を少くするために欠かすことができないと考えられる。
- VI) A N I S N による計算結果との比較は、これまで述べた速中性子スペクトル測定法についての目安を与えている。すなわち 10 MeV 以下の範囲では、ここで利用した 8 種類のしきい検出器で妥当なスペクトルが得られること、一方 10 MeV 以上のスペクトル測定には前述したようにさらに高いしきいエネルギーを持ったしきい検出器を加える必要があること、また筆者らが用いた各種の定数、測定方法が適当であることなどが明らかである。

### 謝 辞

本研究を行なうに当って、A N I S N の利用をはじめ多くのご指導をいただいた遮蔽研究室長宮坂駿一氏、S A N D - II の利用の便宜を計っていただいた船舶技術研究所の三浦俊正氏、J R R - 4 での実験にあたって協力をいたいた研究炉利用課の渡辺智美氏にこゝで深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) C. Di Cola and A. Rota, Nucl. Sci. and Eng., 23, 344 (1965)
- 2) W. N. McElroy, S. Berg, T. Crockett, and R. G. Hawkins,  
AWRL-TR-67-41, 1-4 (1967)
- 3) E. Linn Draper, Nucl. Sci. and Eng., 46, 22 (1971)
- 4) Ward W. Engle, Jr., K-1693 (1967)
- 5) W. L. Zijp, RCN-37 (1965)
- 6) C. M. Lederer and J. H. Hollander, "Table of Isotope" sixth edition  
, John Wiley & Sons, Inc., (1968)
- 7) S. Tanaka, JAERI-M 5148 (1973) (in Japanese)
- 8) T. Matui and T. Yamada, JAERI-memo 3000 (1968) (in Japanese)
- 9) BNL-325 Supplement Second Edition

- IV) S A N D - II では、スペクトルの初期値の与え方が重要で、L U N A - 5 の場合と同じくスペクトルの概要を予想してできるだけ実際のスペクトルに近い初期スペクトルを与えることが望ましい。またくり返し数が必要以上に多くなると測定値や断面積などに含まれる誤差が強調され望ましくないスペクトルになる。筆者らの実験解析の経験から 10 ないし 20 回程度が適当と考えられる。
- V) しきい検出器の数はできるだけ多い方が良い。ただし測定対象とするエネルギー領域で、しきい検出器のしきいエネルギーが平均に分布するようにその種類を選択しなければならない。このことは今回の測定に用いた 8 種類のしきい検出器のしきいエネルギーがすべて 1 MeV から 10 MeV の範囲にあるため、L U N A - 5, S A N D - II いずれの場合にも III), IV) で述べた Unfolding の際の影響が 10 MeV 以上で大きくなっていることからも推測される。ただ 10 MeV 以上のしきいエネルギーをもつしきい反応は、断面積が良くわかっているものが少ないと、断面積の大きさが小さいこと、原子炉などでは 10 MeV 以上の中性子束の強度が小さいことなどから、一般にはその利用が困難であるが、Unfolding にともなう任意性を少くするために欠かすことができないと考えられる。
- VI) A N I S N による計算結果との比較は、これまで述べた速中性子スペクトル測定法についての目安を与えている。すなわち 10 MeV 以下の範囲では、ここで利用した 8 種類のしきい検出器で妥当なスペクトルが得られること、一方 10 MeV 以上のスペクトル測定には前述したようにさらに高いしきいエネルギーを持ったしきい検出器を加える必要があること、また筆者らが用いた各種の定数、測定方法が適当であることなどが明らかである。

### 謝 辞

本研究を行なうに当って、A N I S N の利用をはじめ多くのご指導をいただいた遮蔽研究室長宮坂駿一氏、S A N D - II の利用の便宜を計っていただいた船舶技術研究所の三浦俊正氏、J R R - 4 での実験にあたって協力をいただいた研究炉利用課の渡辺智美氏にこゝで深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) C. Di Cola and A. Rota, Nucl. Sci. and Eng., 23, 344 (1965)
- 2) W. N. McElroy, S. Berg, T. Crockett, and R. G. Hawkins, AWRL-TR-67-41, 1-4 (1967)
- 3) E. Linn Draper, Nucl. Sci. and Eng., 46, 22 (1971)
- 4) Ward W. Engle, Jr., K-1693 (1967)
- 5) W. L. Zijp, RCN-37 (1965)
- 6) C. M. Lederer and J. H. Hollander, "Table of Isotope" sixth edition, John Wiley & Sons, Inc., (1968)
- 7) S. Tanaka, JAERI-M 5148 (1973) (in Japanese)
- 8) T. Matui and T. Yamada, JAERI-memo 3000 (1968) (in Japanese)
- 9) BNL-325 Supplement Second Edition

- 10) A. M. Bresestis, M. Bresestis, A. Rota, R. A. Rydin, and L. Lesca,  
*Nucl. Sci. and Eng.*, **40**, 331 (1970).
- 11) RSIC DATA LIBRARY DLC-2/99GNE ORNL-TM-3049 (1971)

Table 1 Properties of threshold detectors

threshold reaction	geometry of detector	purity (%)	isotope abundance (%)	half life
$^{115}\text{In}(n,n')$ $^{115m}\text{In}$	$10^\phi \times 5^t$	99.99	95.57	4.5 hr.
$^{238}\text{U}(n,f)$ $^{97}\text{Zr}$ - $^{97m}\text{Nb}$	$10^\phi \times 0.001''t$	99.958	$^{235}\text{U} < 400\text{PPM}$	17.0 hr. *
$^{232}\text{Th}(n,f)$ $^{97}\text{Zr}$ - $^{97m}\text{Nb}$	$10^\phi \times 0.002''t$	99.885	100.0	17.0 hr. *
$^{46}\text{Ti}(n,p)$ $^{46}\text{Sc}$	$10^\phi \times 5^t$	99.9	7.32	83.9 d.
$^{47}\text{Ti}(n,p)$ $^{47}\text{Sc}$	$10^\phi \times 5^t$	99.9	73.99	3.43 d.
$^{58}\text{Ni}(n,p)$ $^{58}\text{Co}$	$10^\phi \times 5^t$	99.9	67.76	71.3 d.
$^{64}\text{Zn}(n,p)$ $^{64}\text{Cu}$	$10^\phi \times 5^t$	99.9	48.89	12.8 hr.
$^{24}\text{Mg}(n,p)$ $^{24}\text{Na}$	$10^\phi \times 5^t$	99.9	78.6	15.0 hr.
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$ $^{24}\text{Na}$	$10^\phi \times 5^t$	99.9	100.0	15.0 hr.
$^{58}\text{Ni}(n,2n)$ $^{57}\text{Ni}$	$10^\phi \times 5^t$	99.9	67.76	36.0 hr.
$^{54}\text{Fe}(n,p)$ $^{54}\text{Mn}$	$10^\phi \times 5^t$	99.9	5.84	303 d.

\*  $^{97}\text{Zr}$

Table 2 Properties of threshold detectors and absolute efficiencies of the characteristic gamma-ray from these

threshold reaction	measured gamma-ray energy (MeV)	branching ratio (%)	absolute efficiency to Ge(Li)			
			pos.1 *	pos.2 **	pos.3 ***	pos.4 ****
$^{115}\text{In}(n,n')$ $^{115m}\text{In}$	0.335	50.0	$7.2 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-2}$
$^{238}\text{U}(n,f)$ $^{97}\text{Zr}$ - $^{97}\text{Nb}$	0.747	92.0	$2.4 \times 10^{-4}$	—	$6.2 \times 10^{-4}$	—
$^{232}\text{Th}(n,f)$ $^{97}\text{Zr}$ - $^{97}\text{Nb}$	0.747	92.0	$2.4 \times 10^{-4}$	—	$6.2 \times 10^{-4}$	—
$^{46}\text{Ti}(n,p)$ $^{46}\text{Sc}$	0.889	100.0	$2.9 \times 10^{-4}$	—	$2.9 \times 10^{-3}$	$9.3 \times 10^{-3}$
$^{47}\text{Ti}(n,p)$ $^{47}\text{Sc}$	0.160	73.0	$1.5 \times 10^{-3}$	—	$1.8 \times 10^{-2}$	$6.9 \times 10^{-2}$
$^{58}\text{Ni}(n,p)$ $^{58}\text{Co}$	0.810	99.0	$3.2 \times 10^{-4}$	—	$3.4 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-2}$
$^{64}\text{Zn}(n,p)$ $^{64}\text{Cu}$	0.511 1.34	38.0 0.5	$5.3 \times 10^{-4}$ $2.0 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-3}$ —	$5.5 \times 10^{-3}$ —	$1.8 \times 10^{-2}$ —
$^{24}\text{Mg}(n,p)$ $^{24}\text{Na}$	2.754	100.0	$9.4 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-4}$	$9.2 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-3}$
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$ $^{24}\text{Na}$	2.754	100.0	$9.4 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-4}$	$9.2 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-3}$
$^{58}\text{Ni}(n,2n)$ $^{57}\text{Ni}$	0.511	92.0	$5.3 \times 10^{-4}$	—	$5.3 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-2}$
$^{54}\text{Fe}(n,p)$ $^{54}\text{Mn}$	0.835	100.0	$3.2 \times 10^{-4}$	—	$3.7 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-2}$

\*  $Z_O = 18.25 \text{ cm}$     \*\*  $Z_O = 9.25 \text{ cm}$     \*\*\*  $Z_O = 4.25 \text{ cm}$     \*\*\*\*  $Z_O = 1.25 \text{ cm}$

In  $^{238}\text{U}(n,f)$  and  $^{232}\text{Th}(n,f)$  reactions, the absolute efficiencies with Pb absorber of 0.5 cm thickness are shown

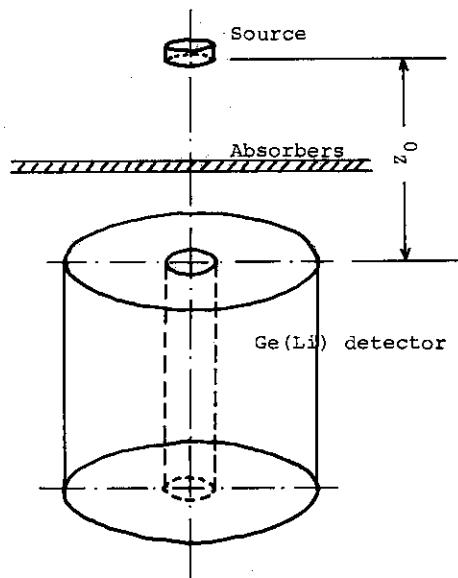
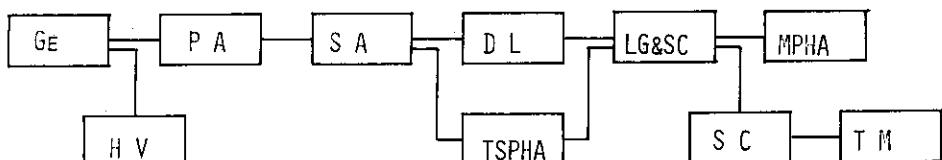


Fig.1 Schematic arrangement of threshold detector  
and Ge(Li) detector used to Monte-carlo  
calculation



- GE : Ge(Li) semi-conductor detector
- P A : pre-amplifier
- S A : spectroscopy amplifier
- D L : delay line
- LG&SC : linear gate and slow coincidence
- MPHA : multi-channel pulse height analyzer
- H V : high voltage power supply
- TSPHA : timing single channel pulse height analyzer
- S C : scaler
- T M : timer

Fig.2 Block diagram for gamma rays measurements of threshold detectors

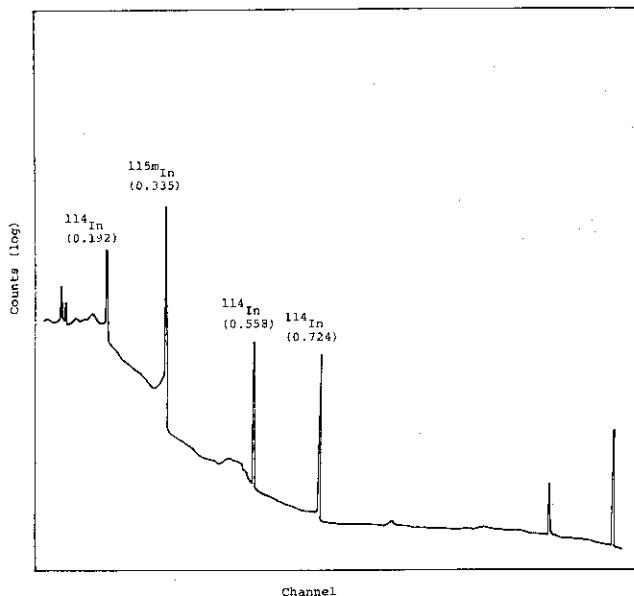


Fig.3 A typical gamma rays spectrum from In  
cooling time = about 20 hr.

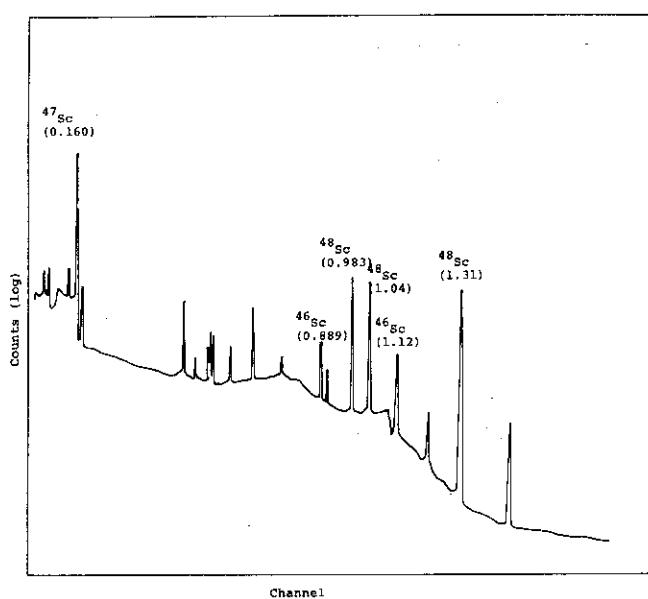


Fig.4 A typical gamma rays spectrum from Ti  
cooling time = about 1 day

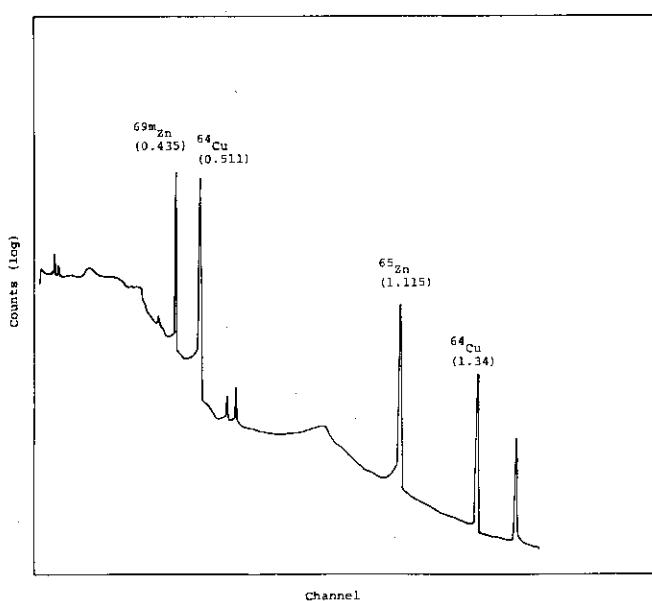


Fig.5 A typical gamma rays spectrum from Zn  
cooling time = about 1 day

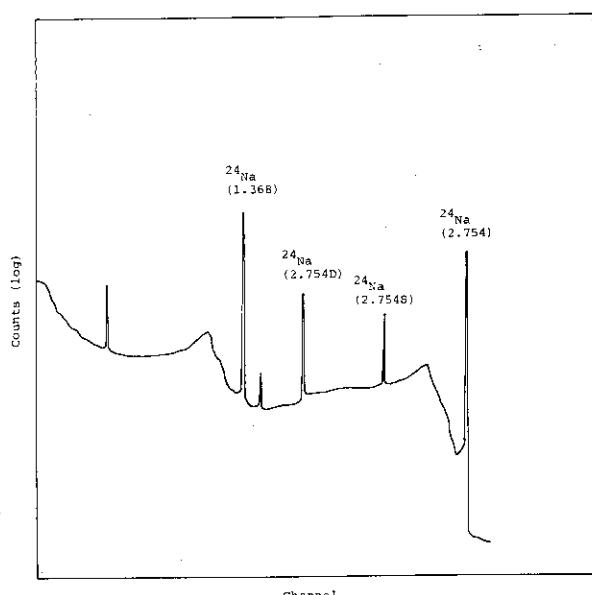


Fig.6 A typical gamma rays spectrum from Mg  
cooling time = about 1 day

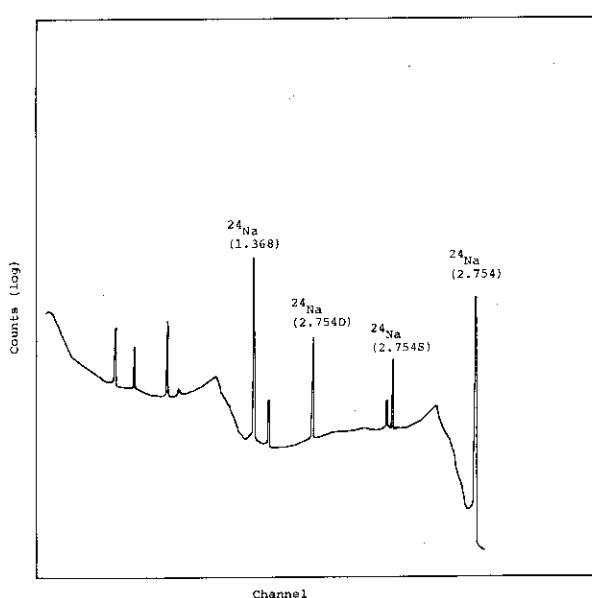


Fig.7 A typical gamma rays spectrum from Al  
cooling time = about 1 day

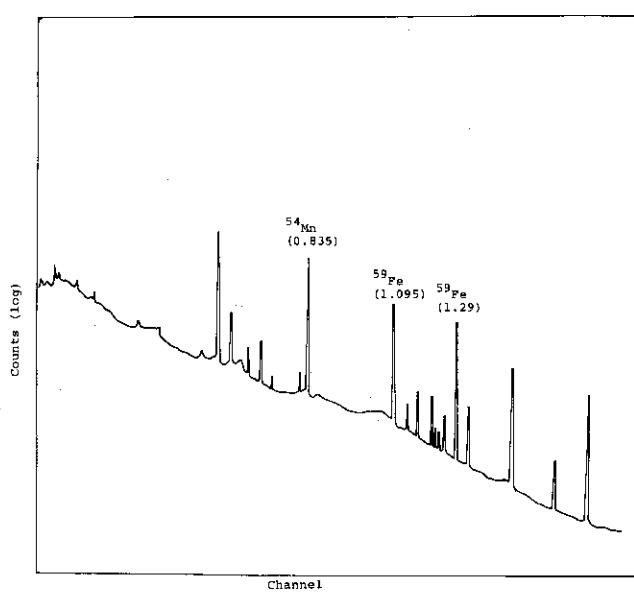
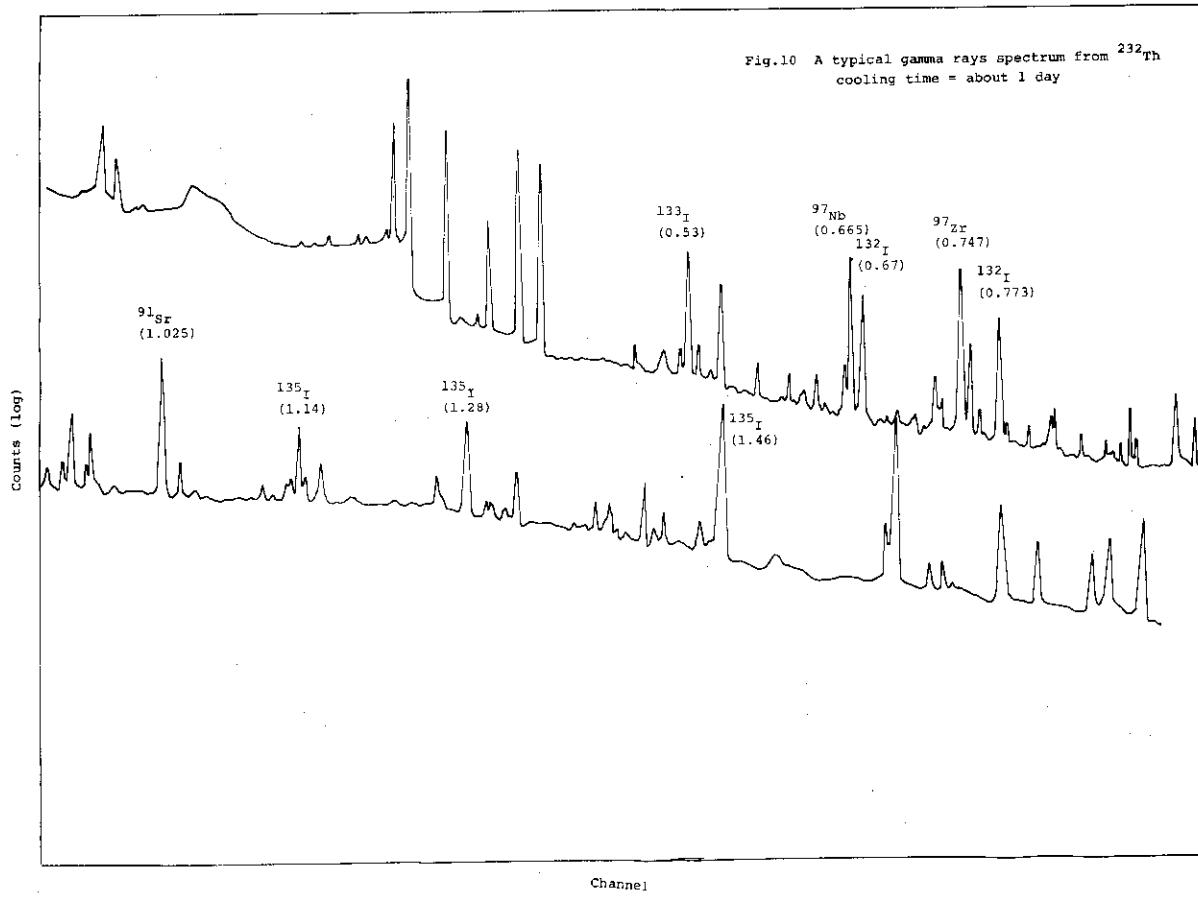
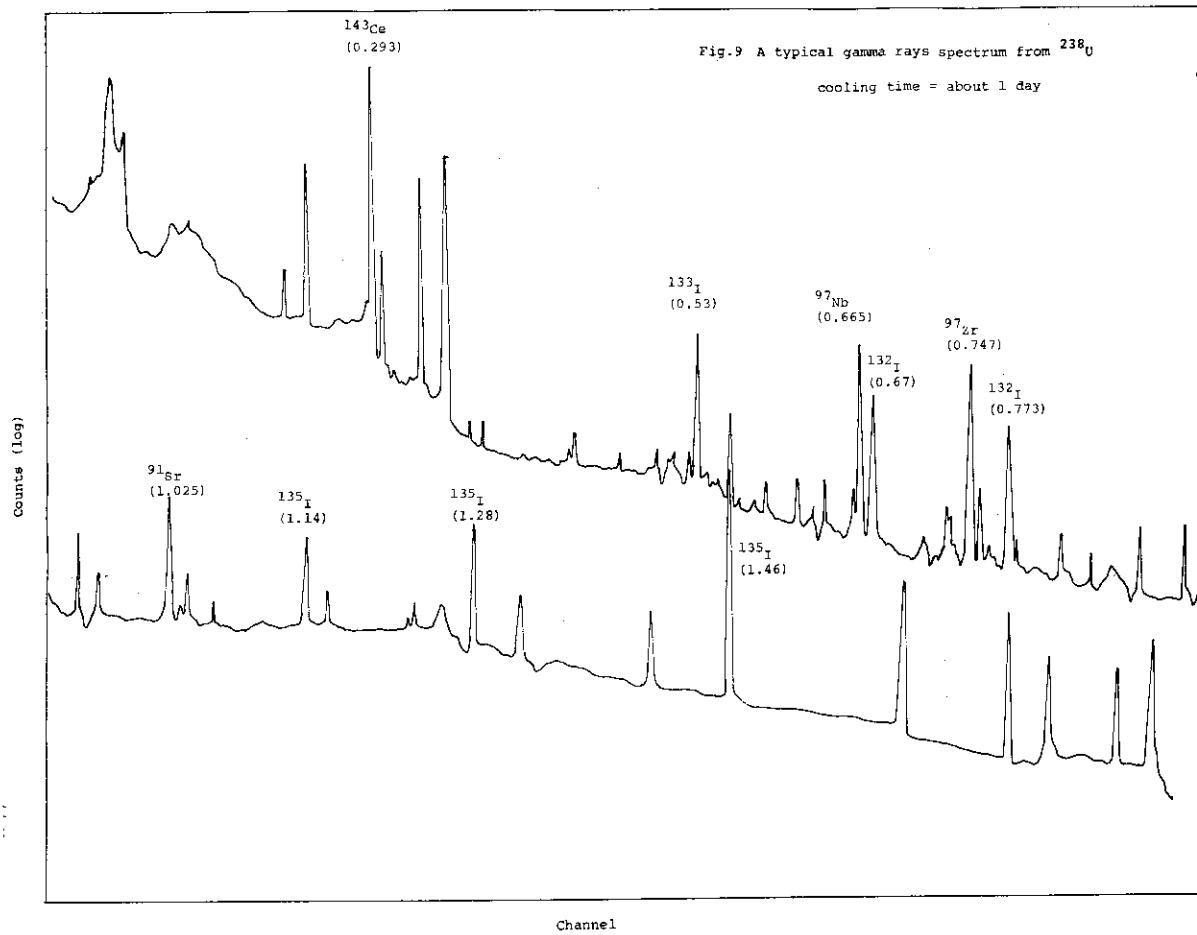
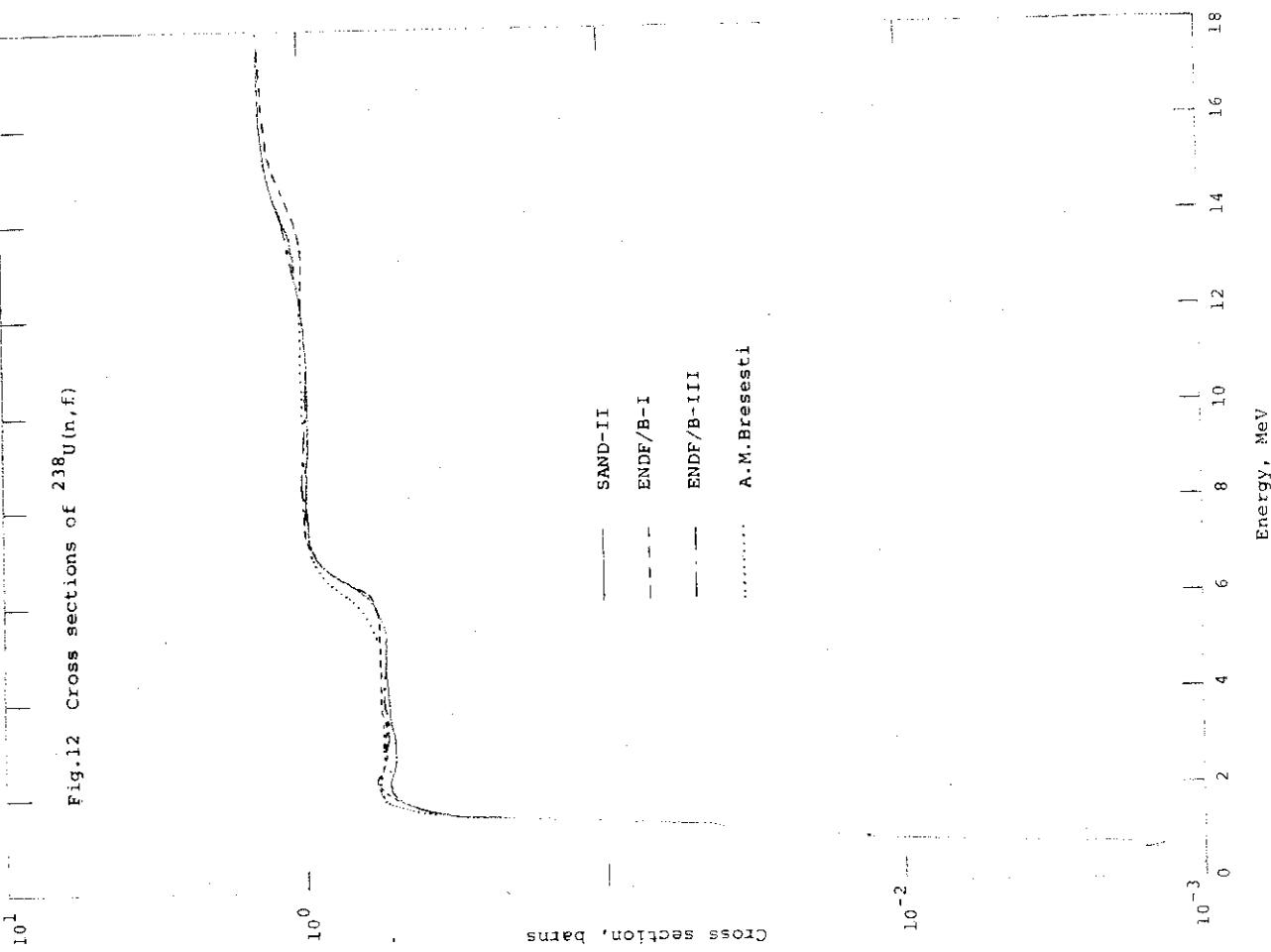
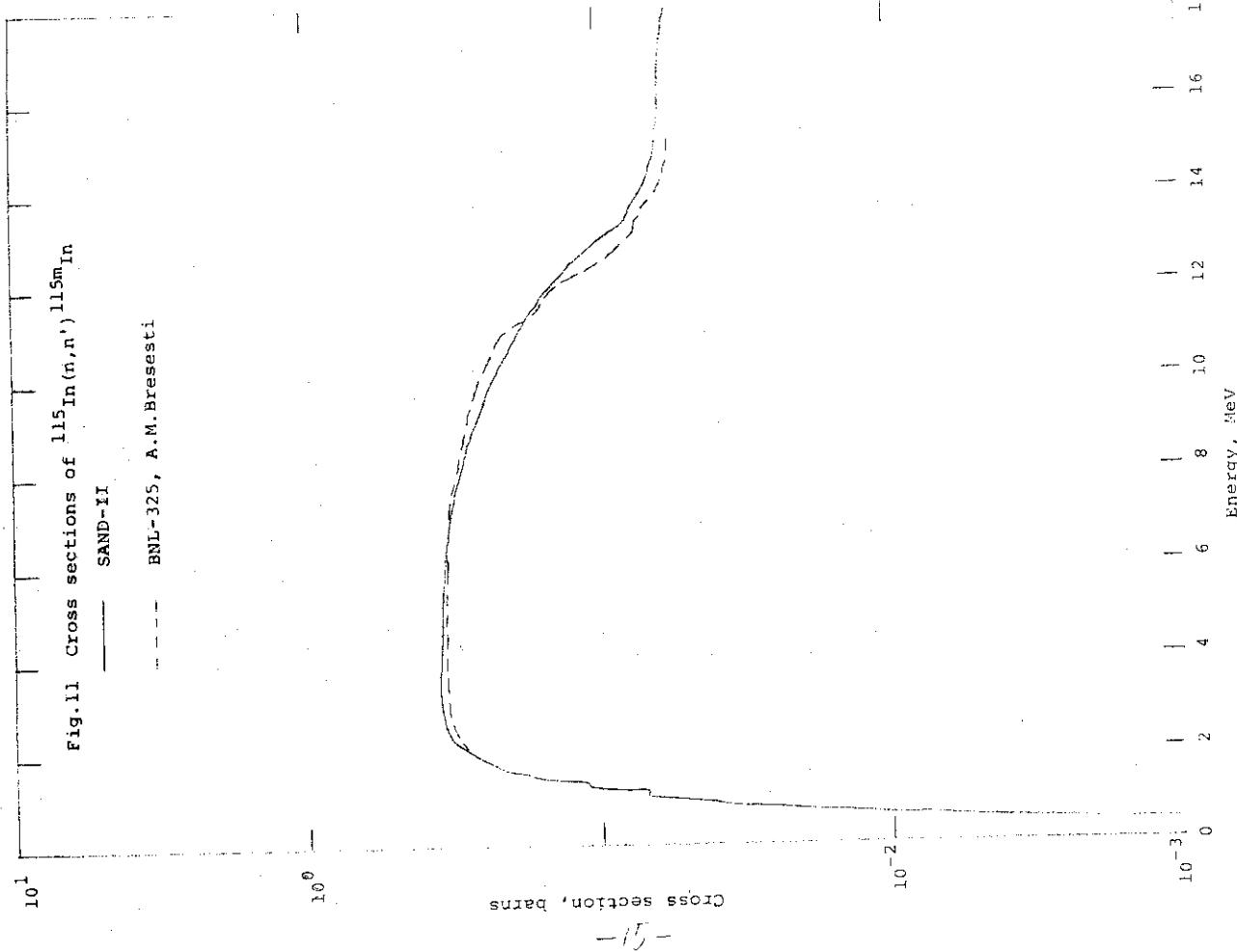
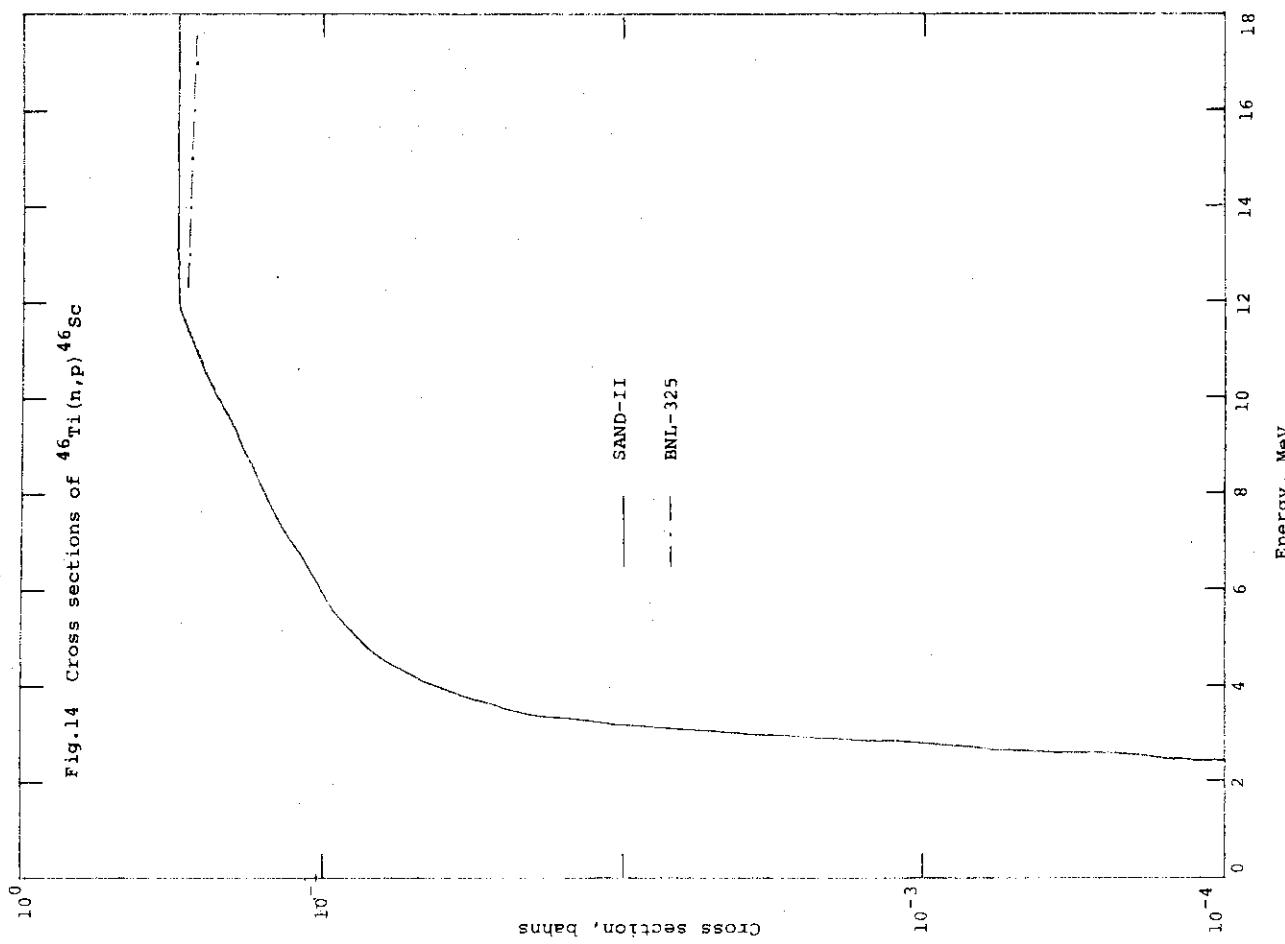
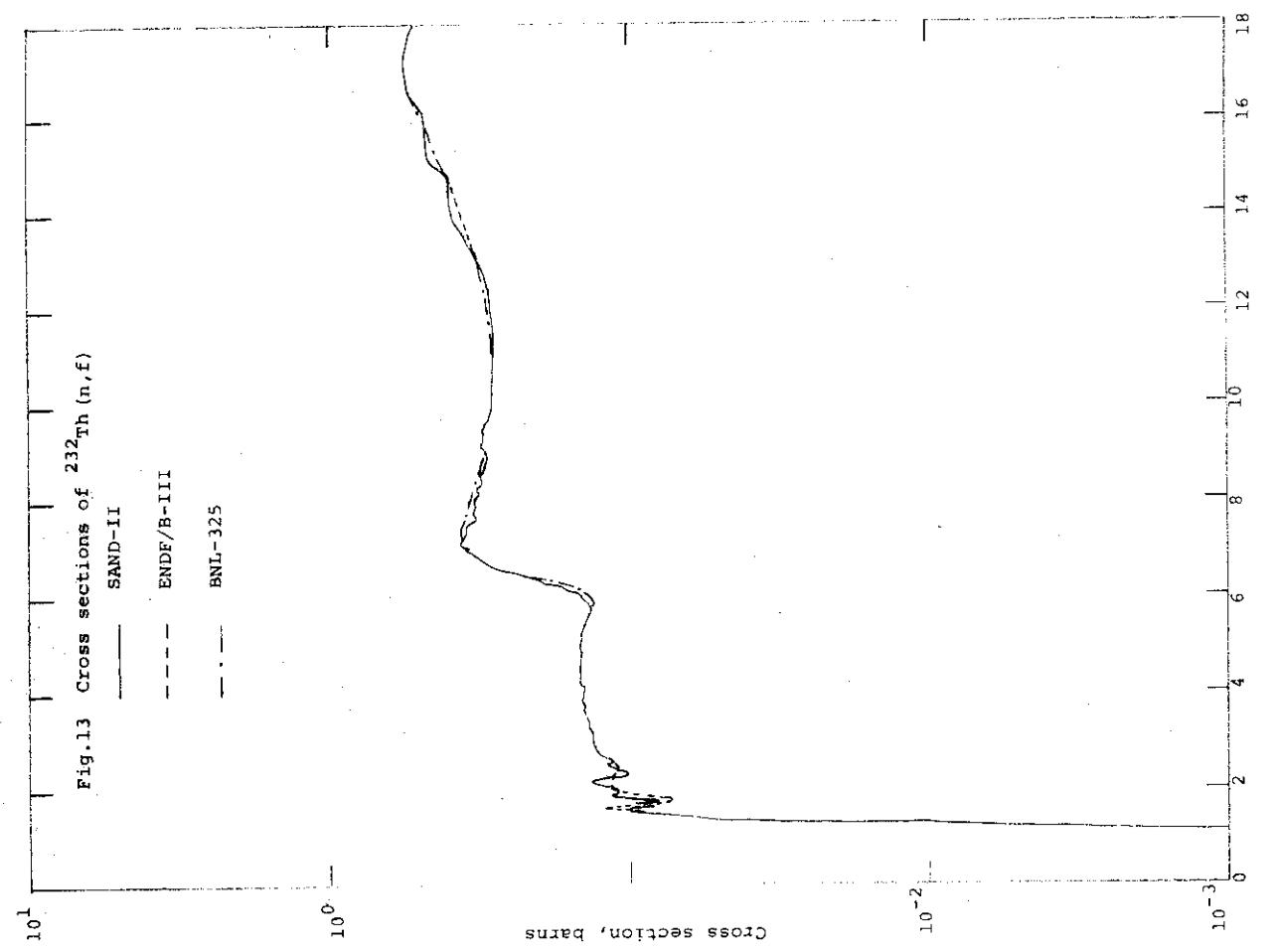


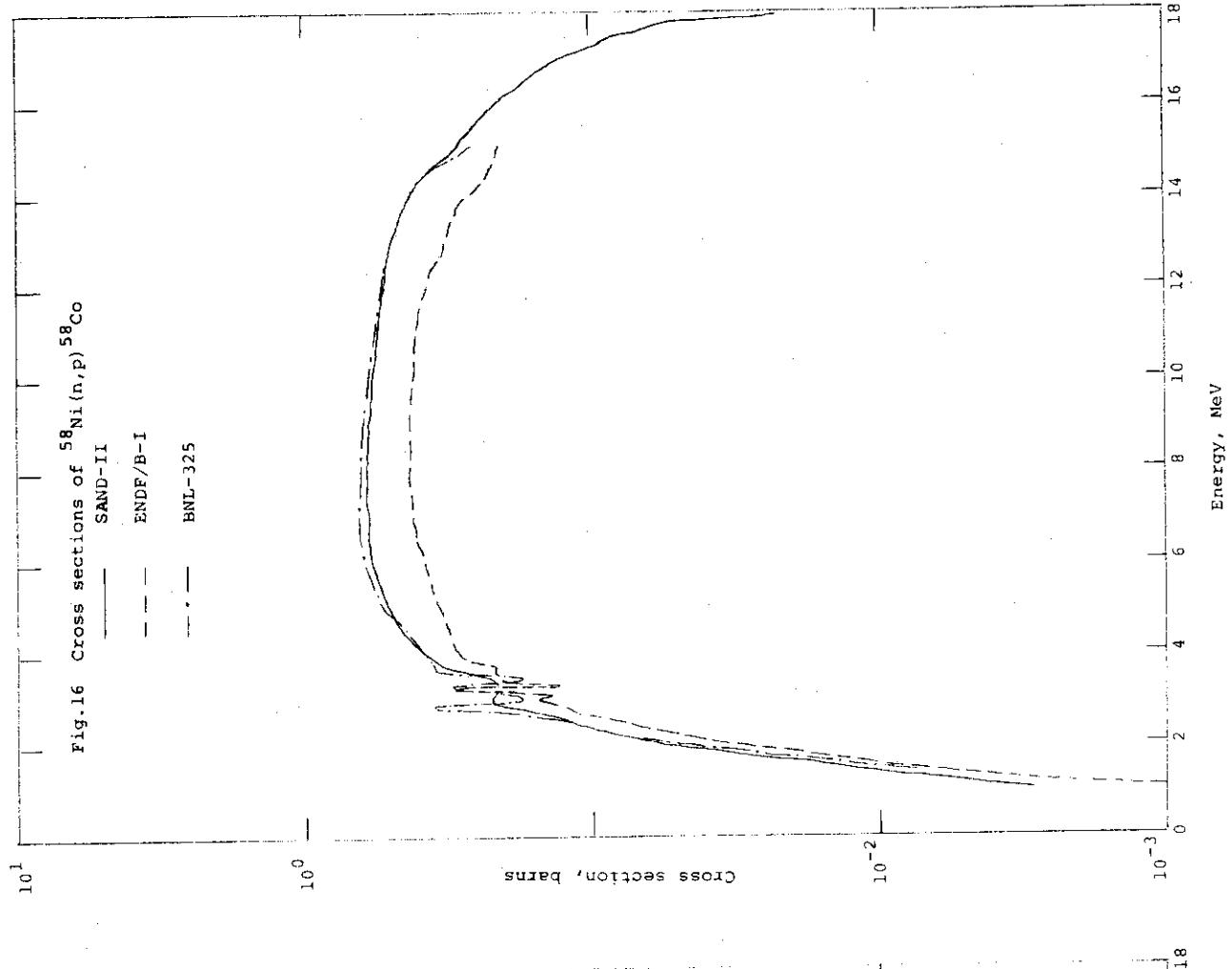
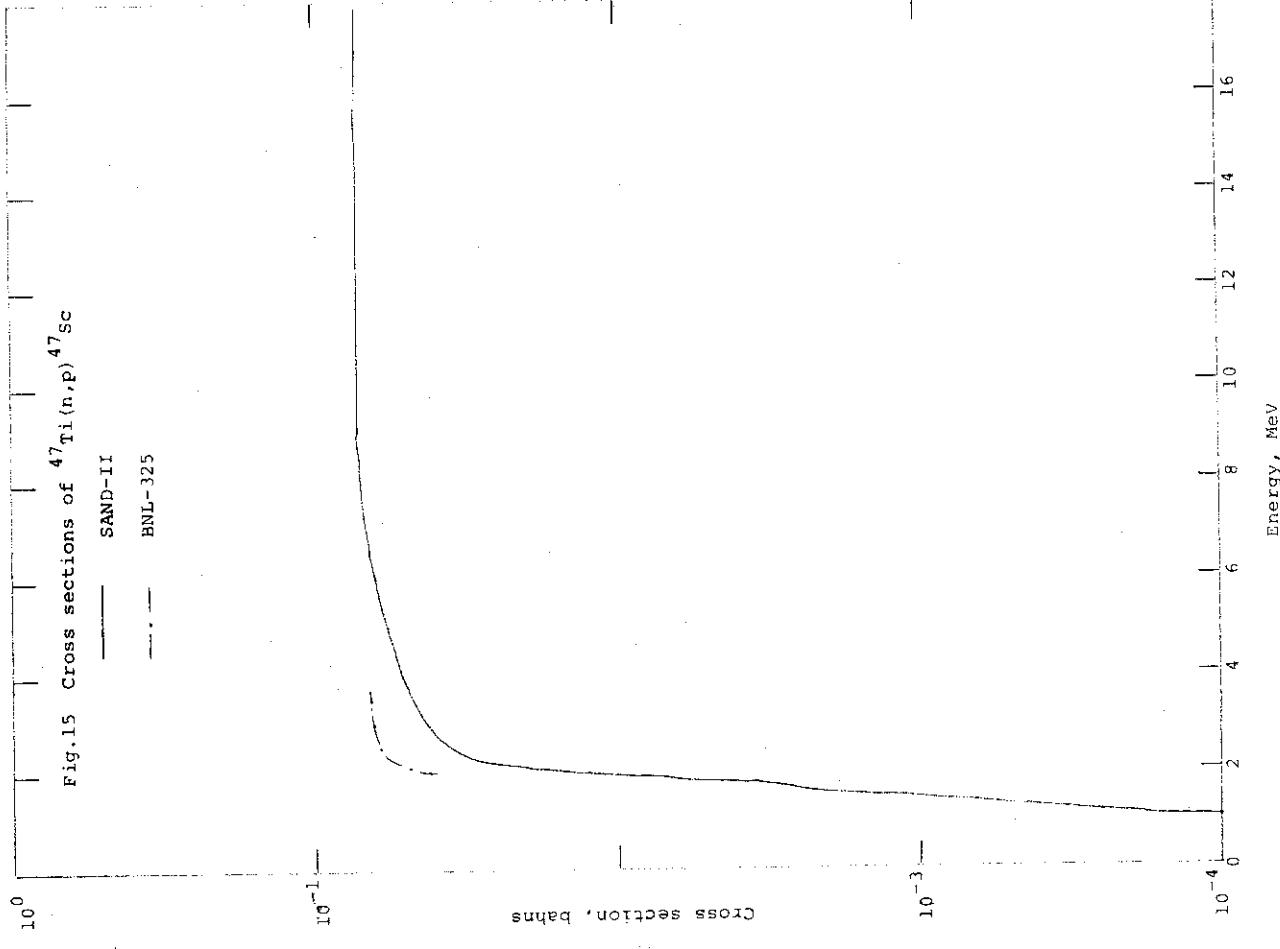
Fig.8 A typical gamma rays spectrum from Fe  
cooling time = about 2 days

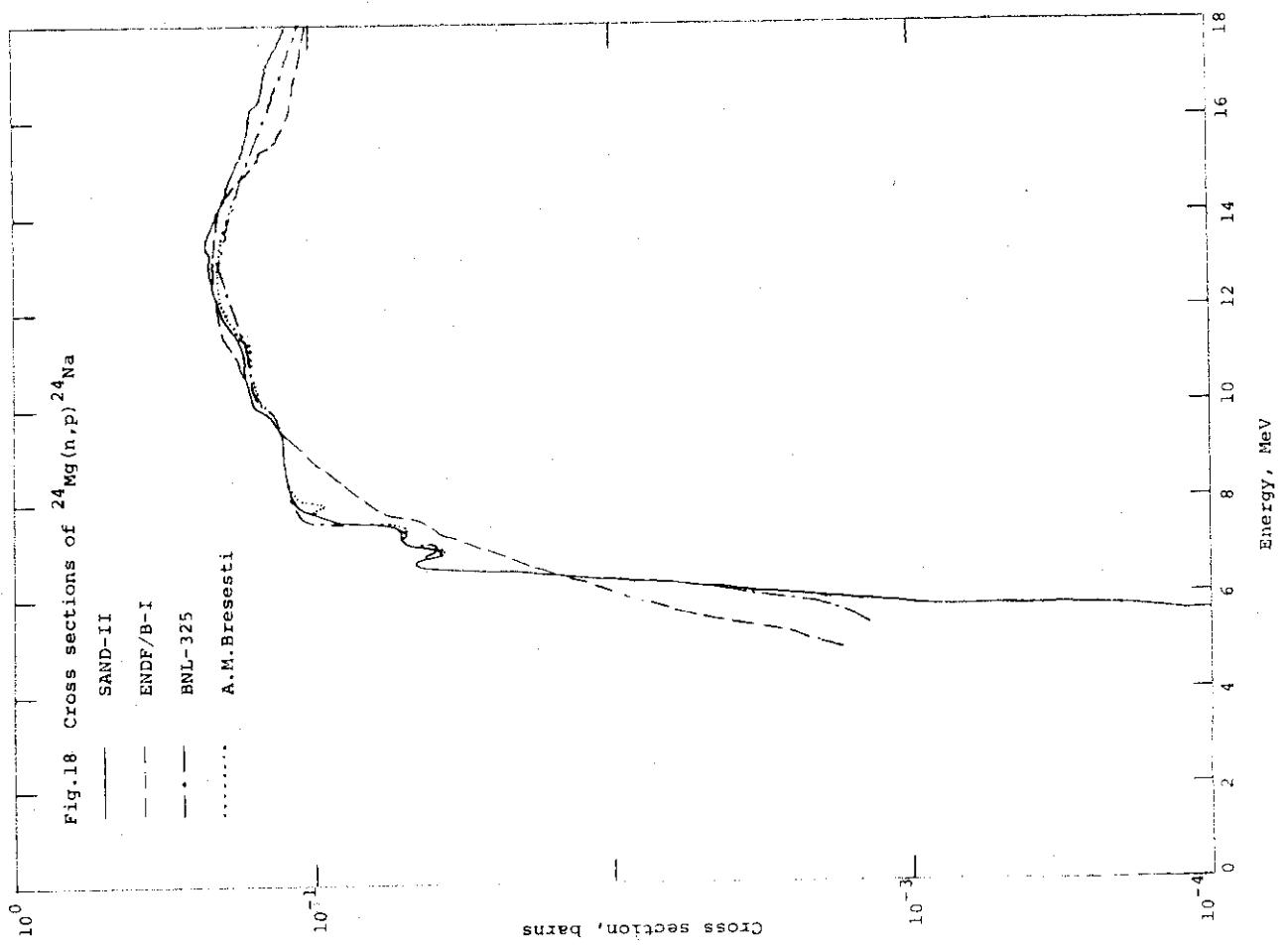
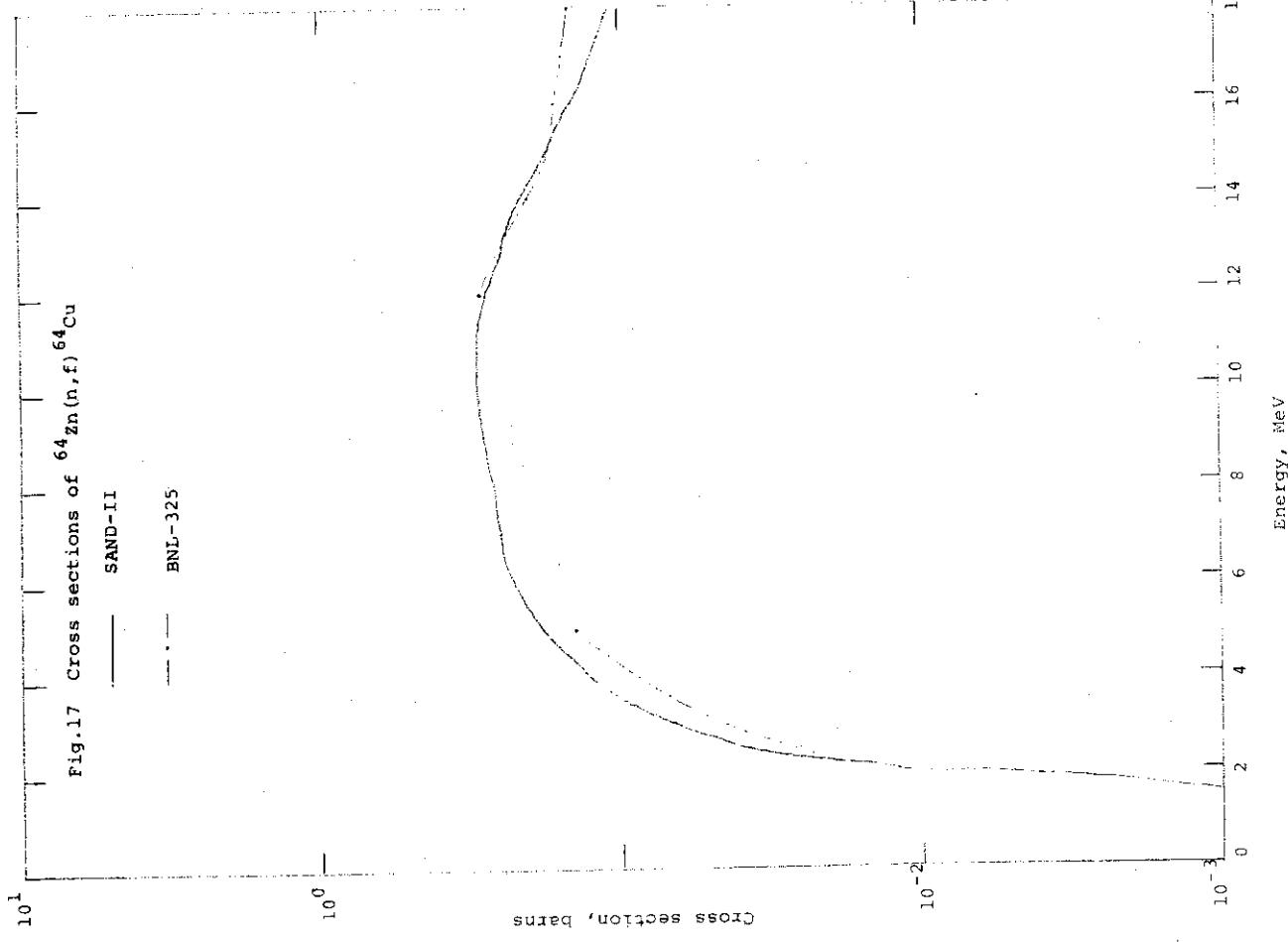
JAERI-M 5643

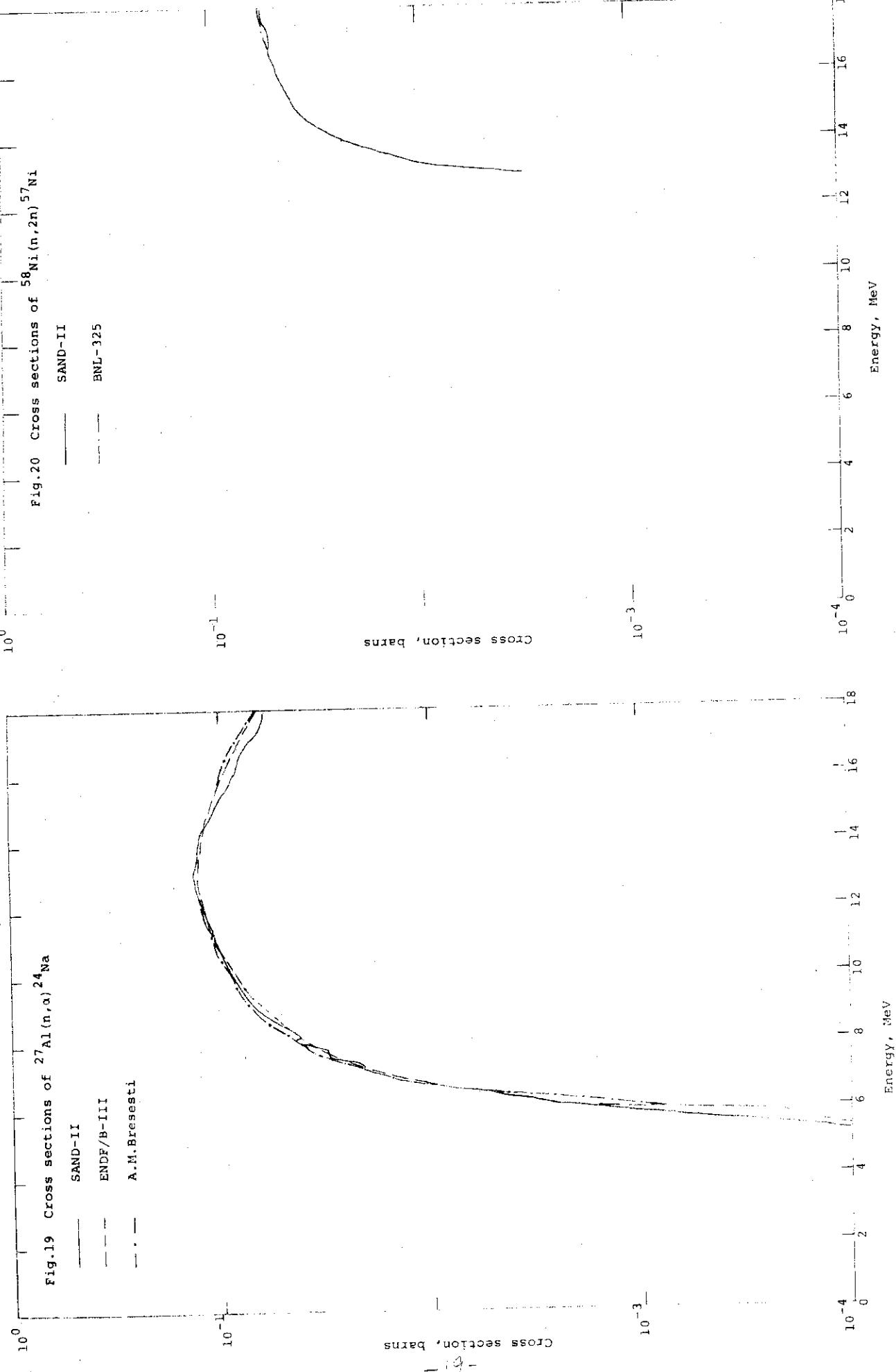


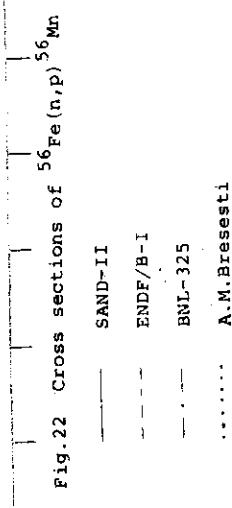
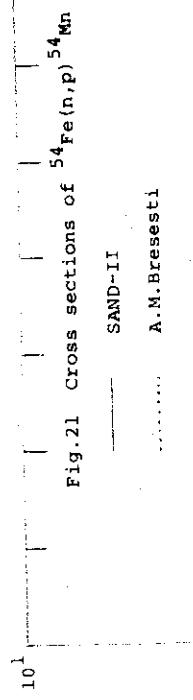




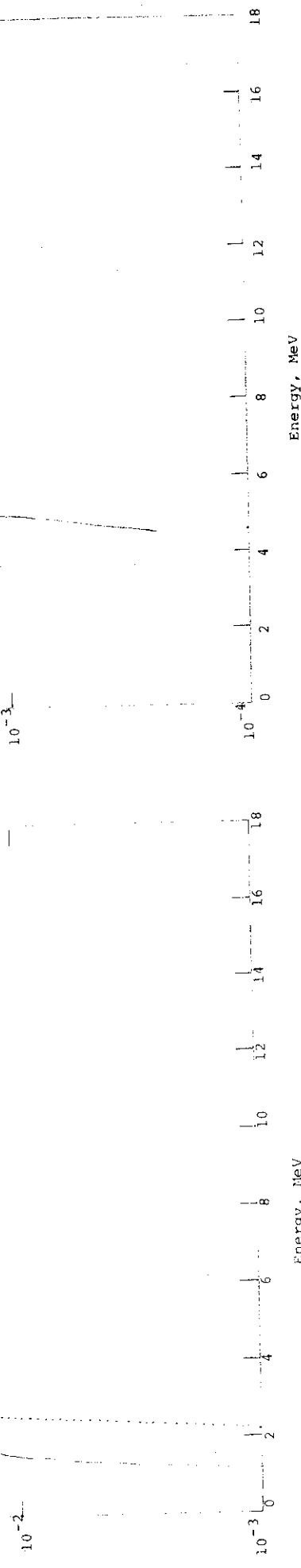






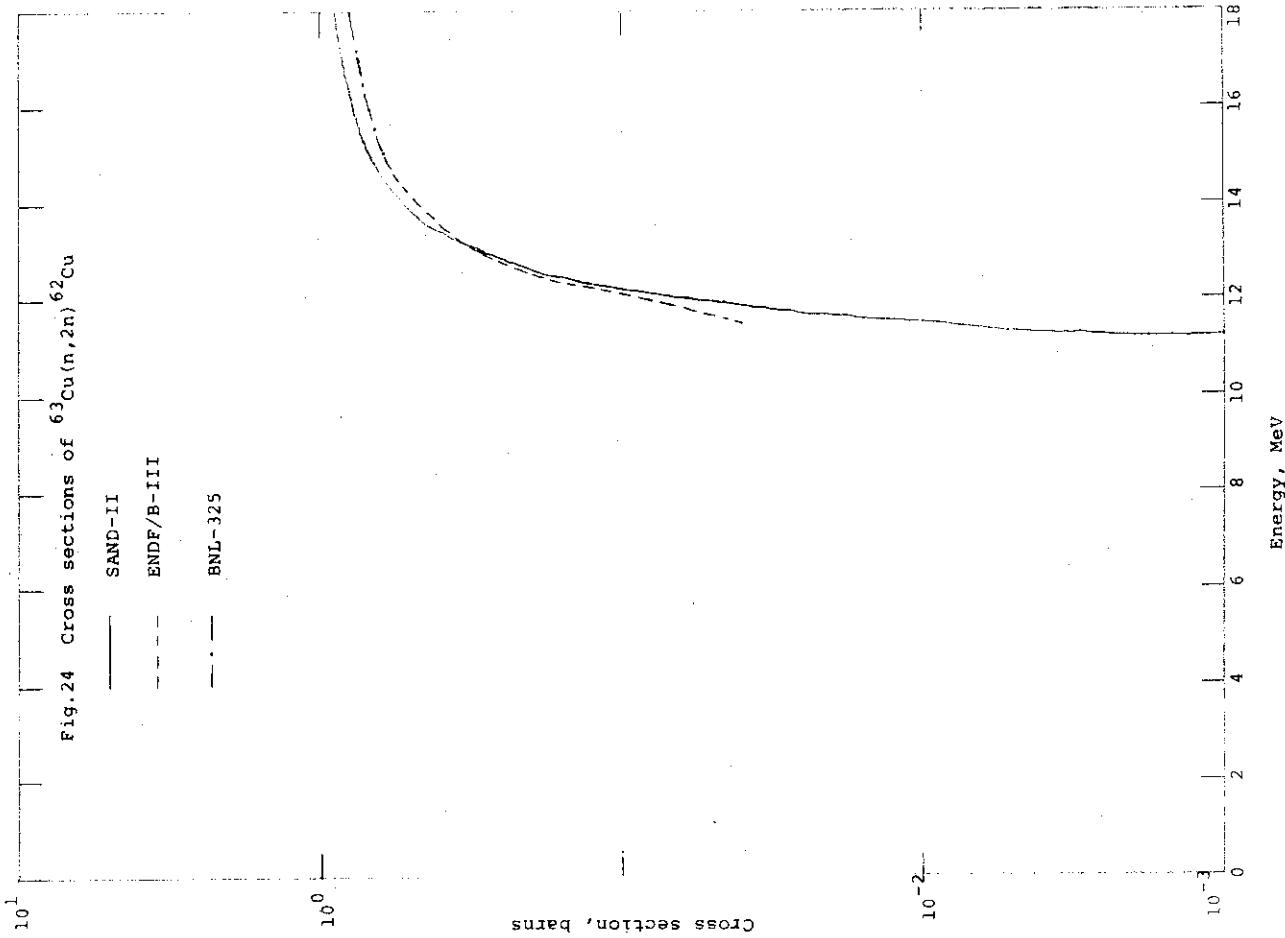
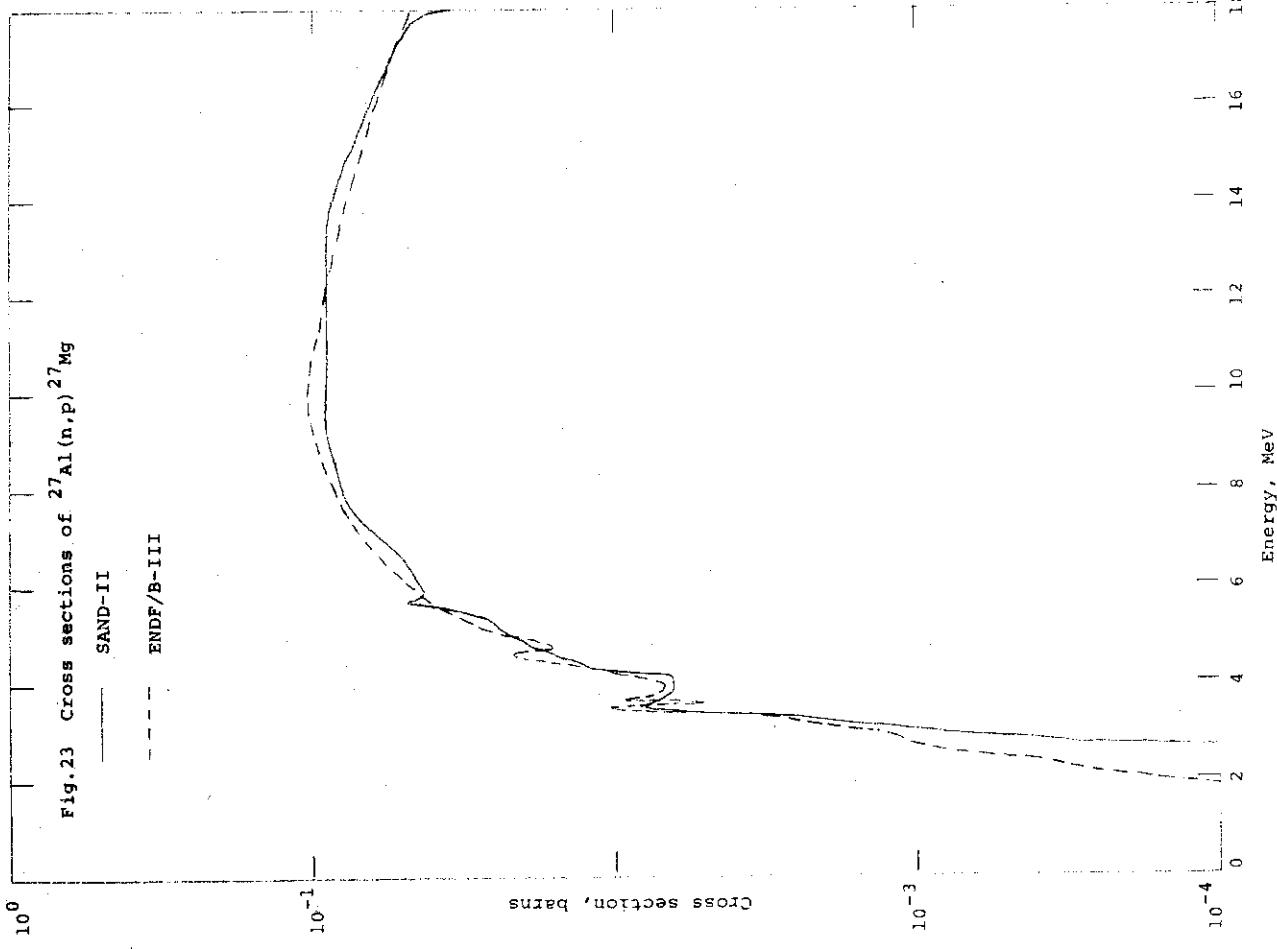


Cross section, barns



Cross section, barns

Energy, MeV



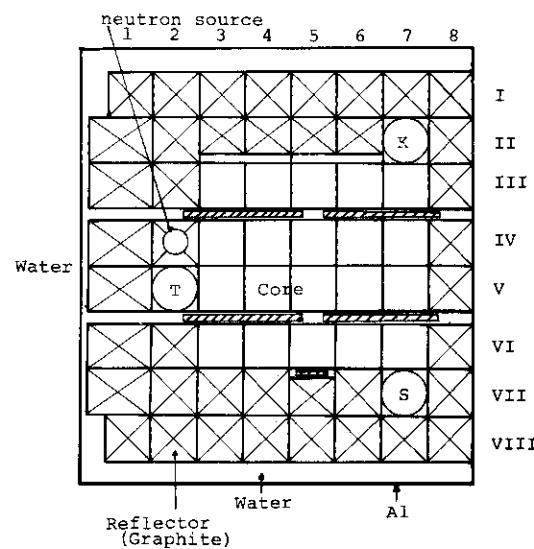


Fig. 25-1 Configuration of JRR-4 core

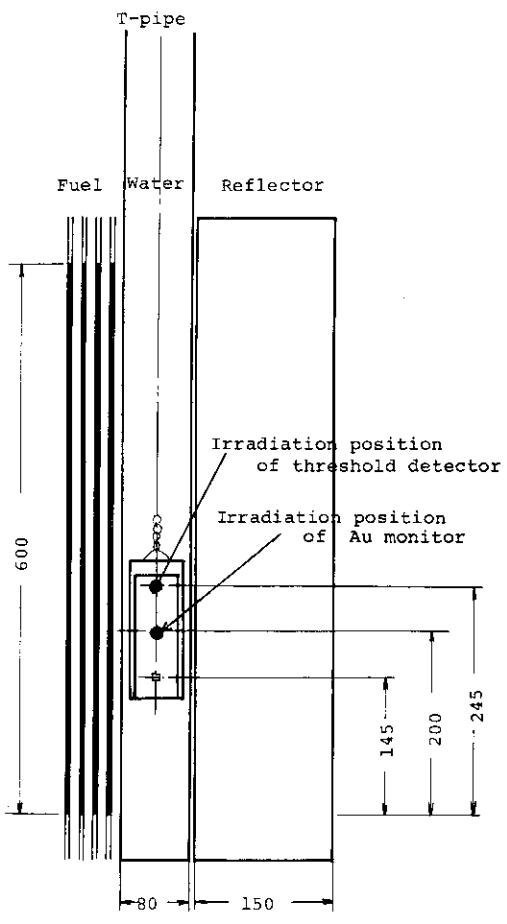
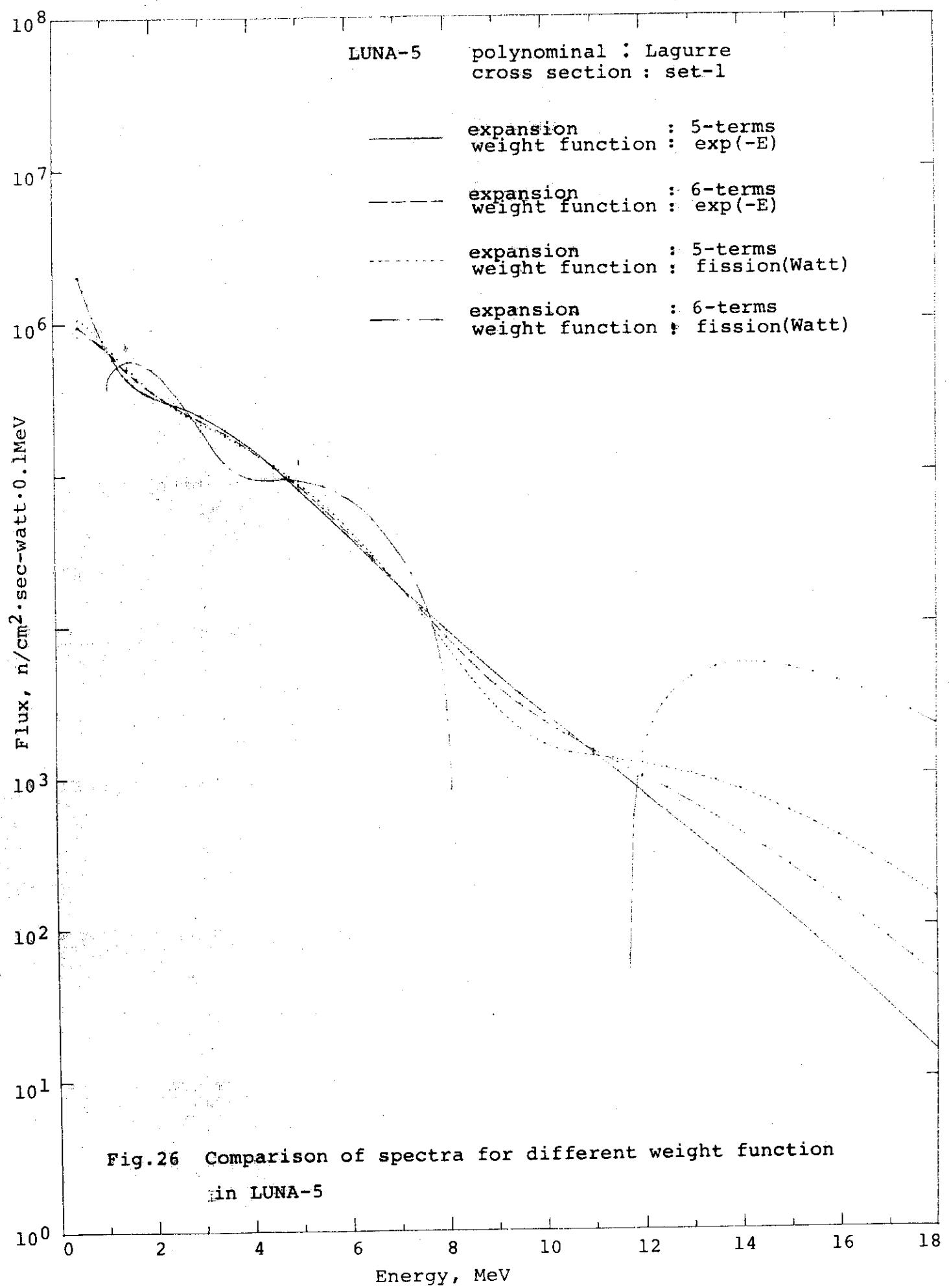
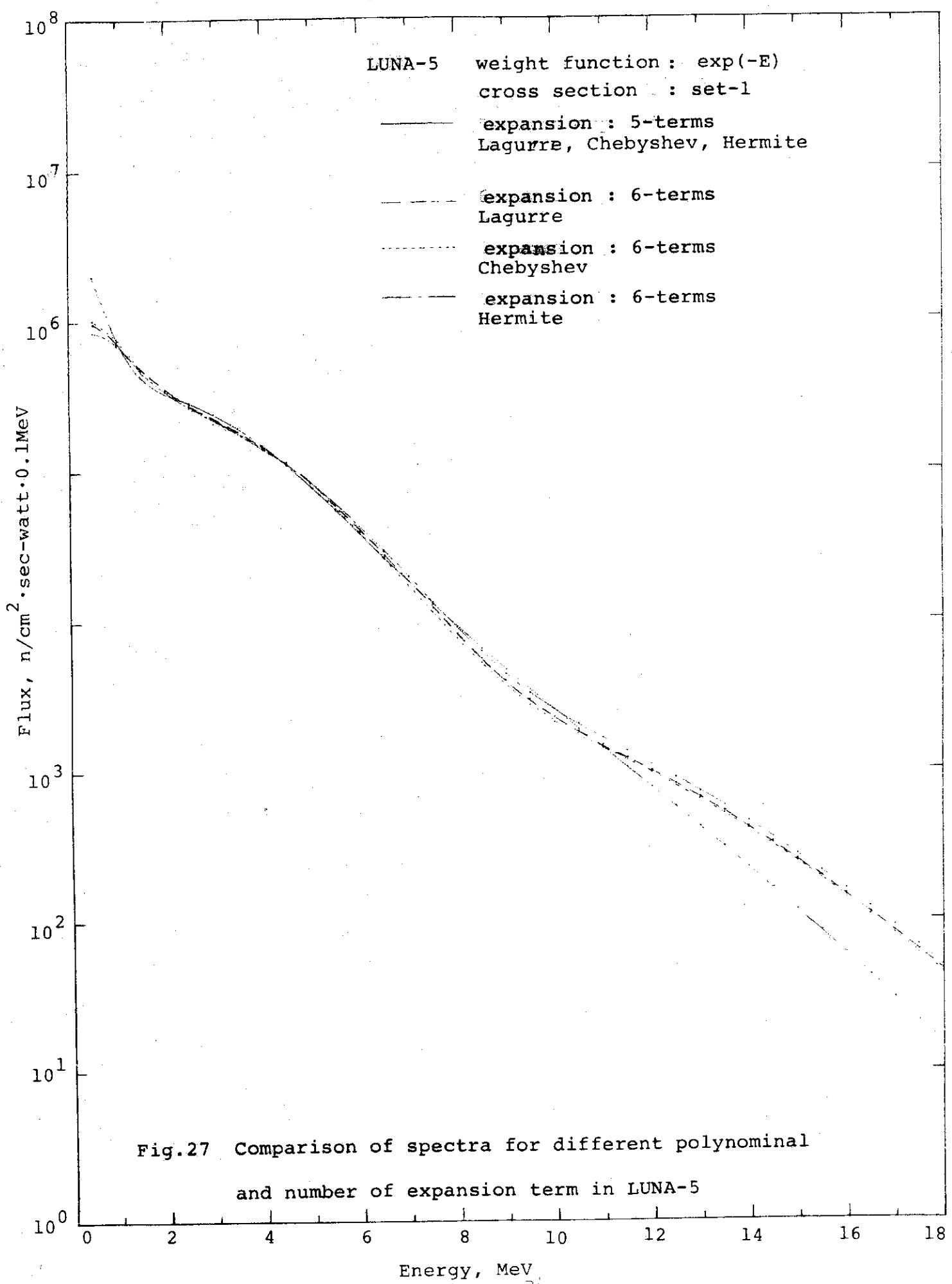
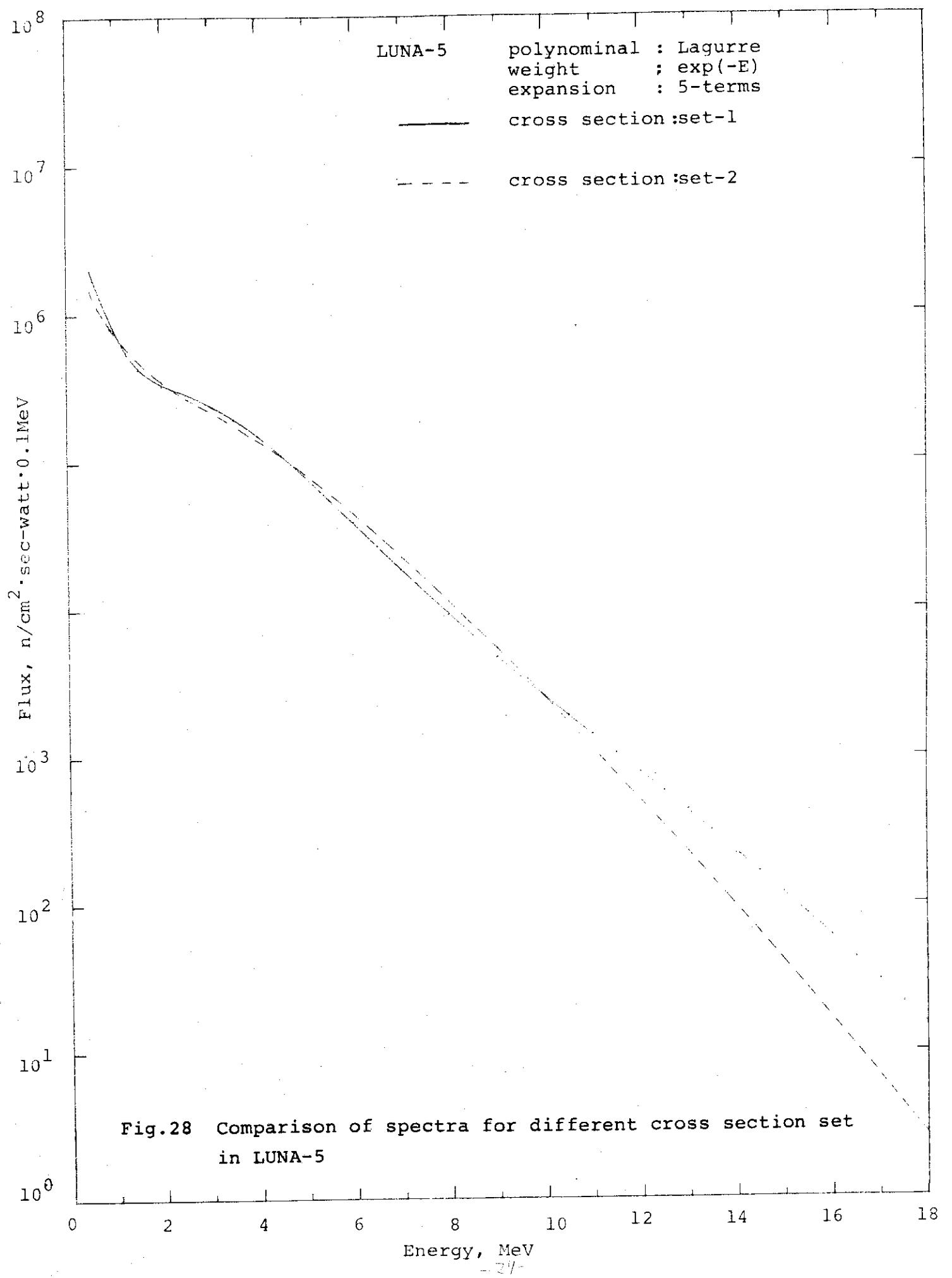
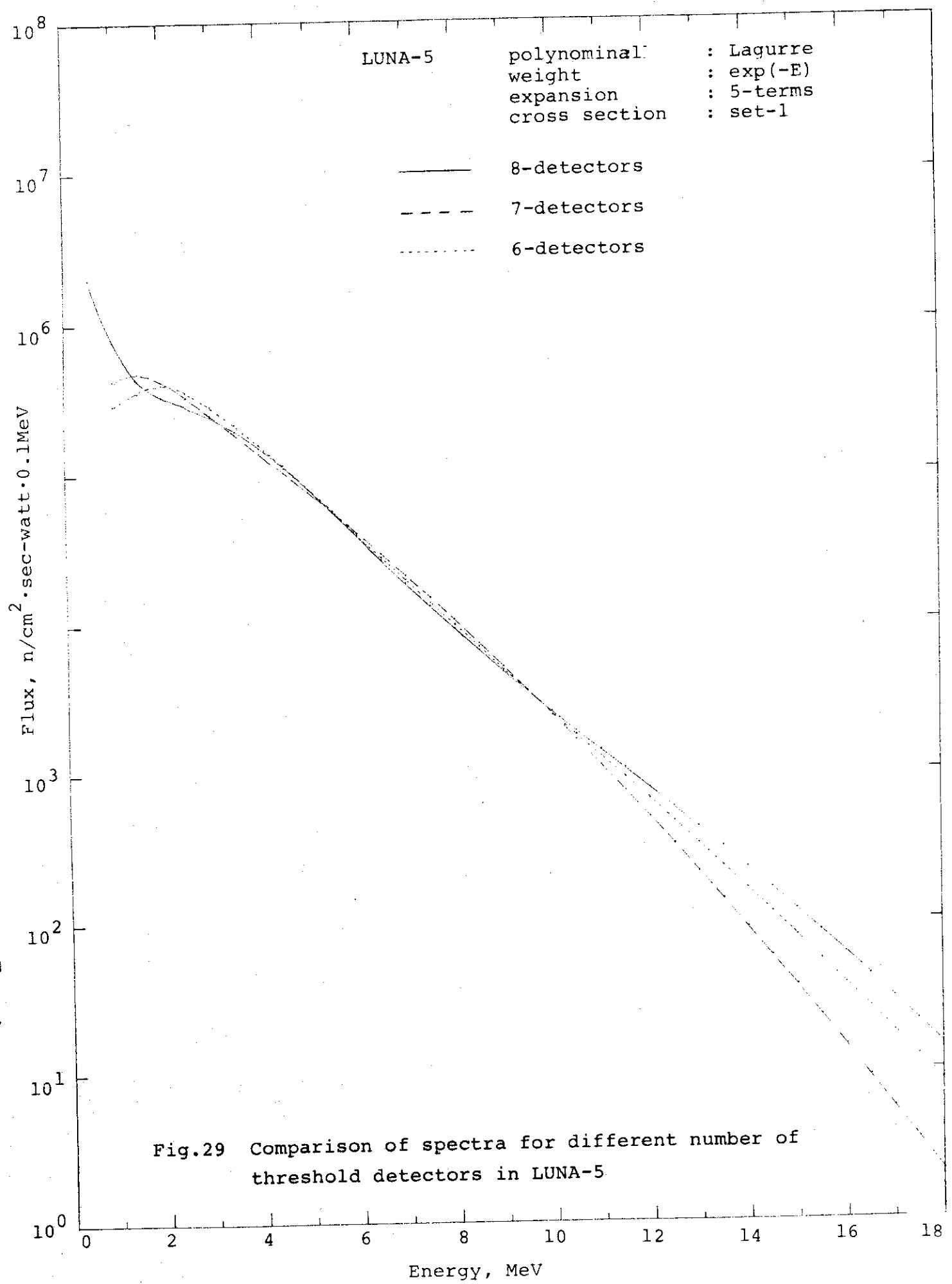


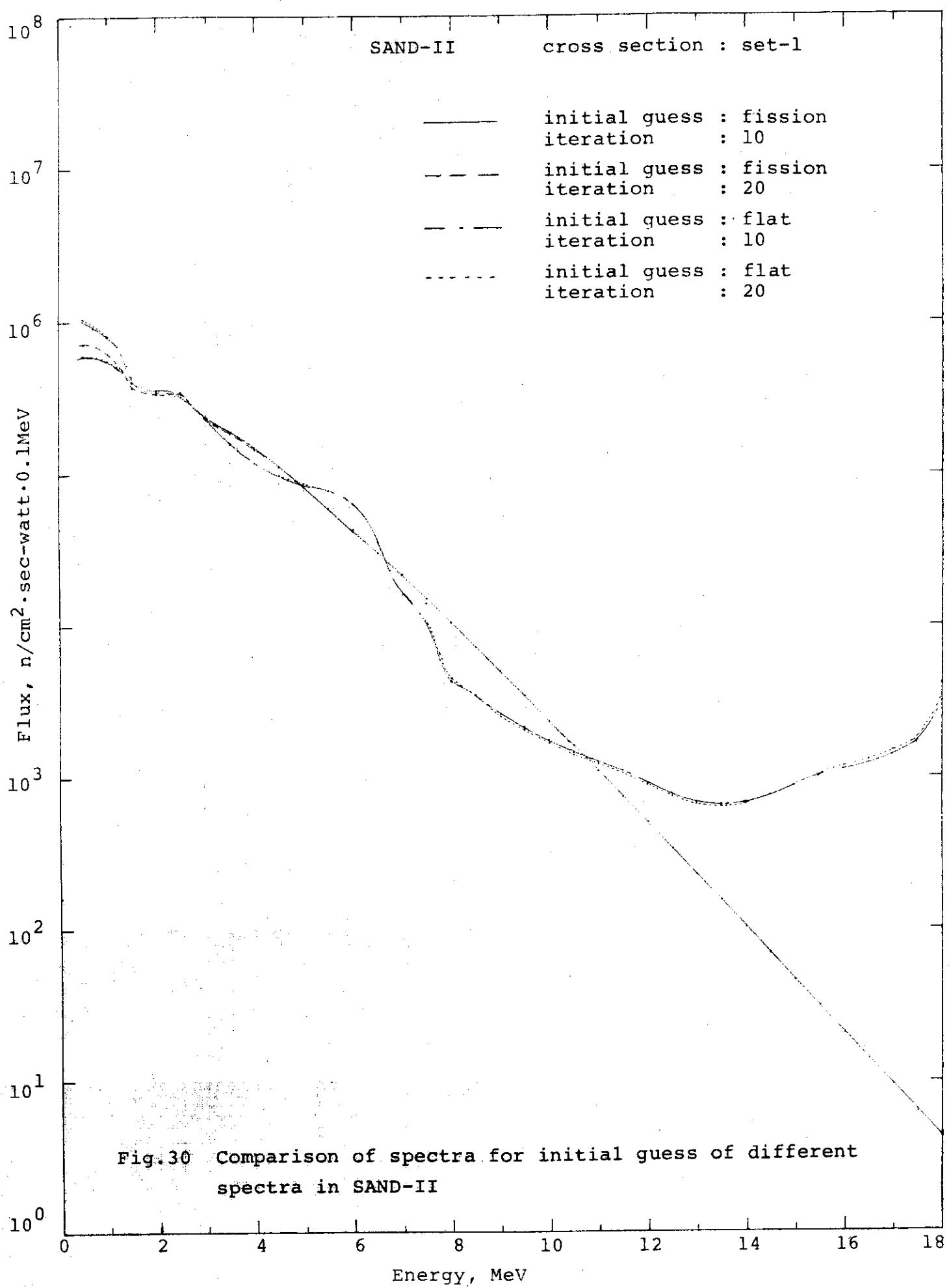
Fig. 25-2 Schematic diagram of the T-pipe at JRR-4

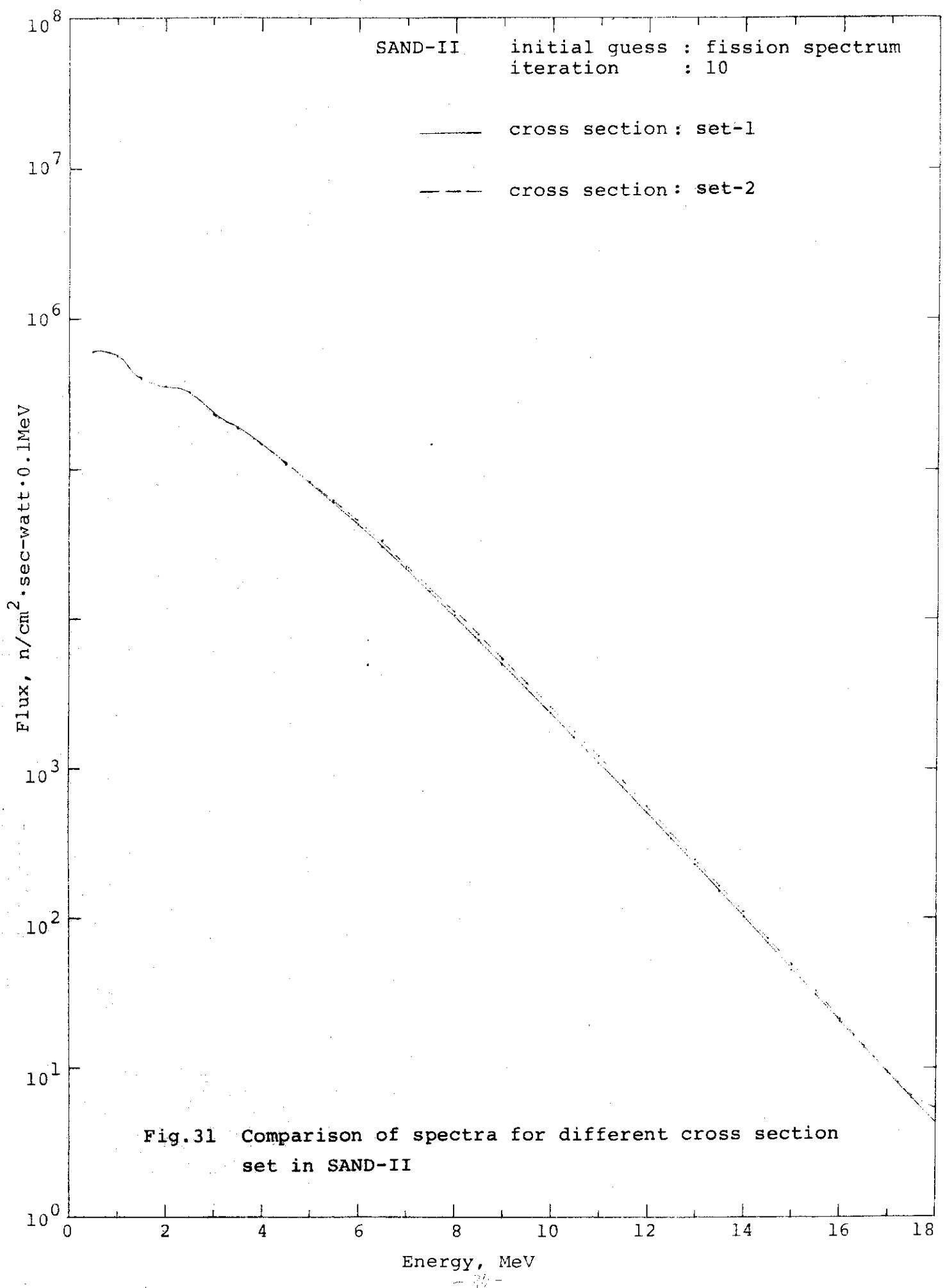


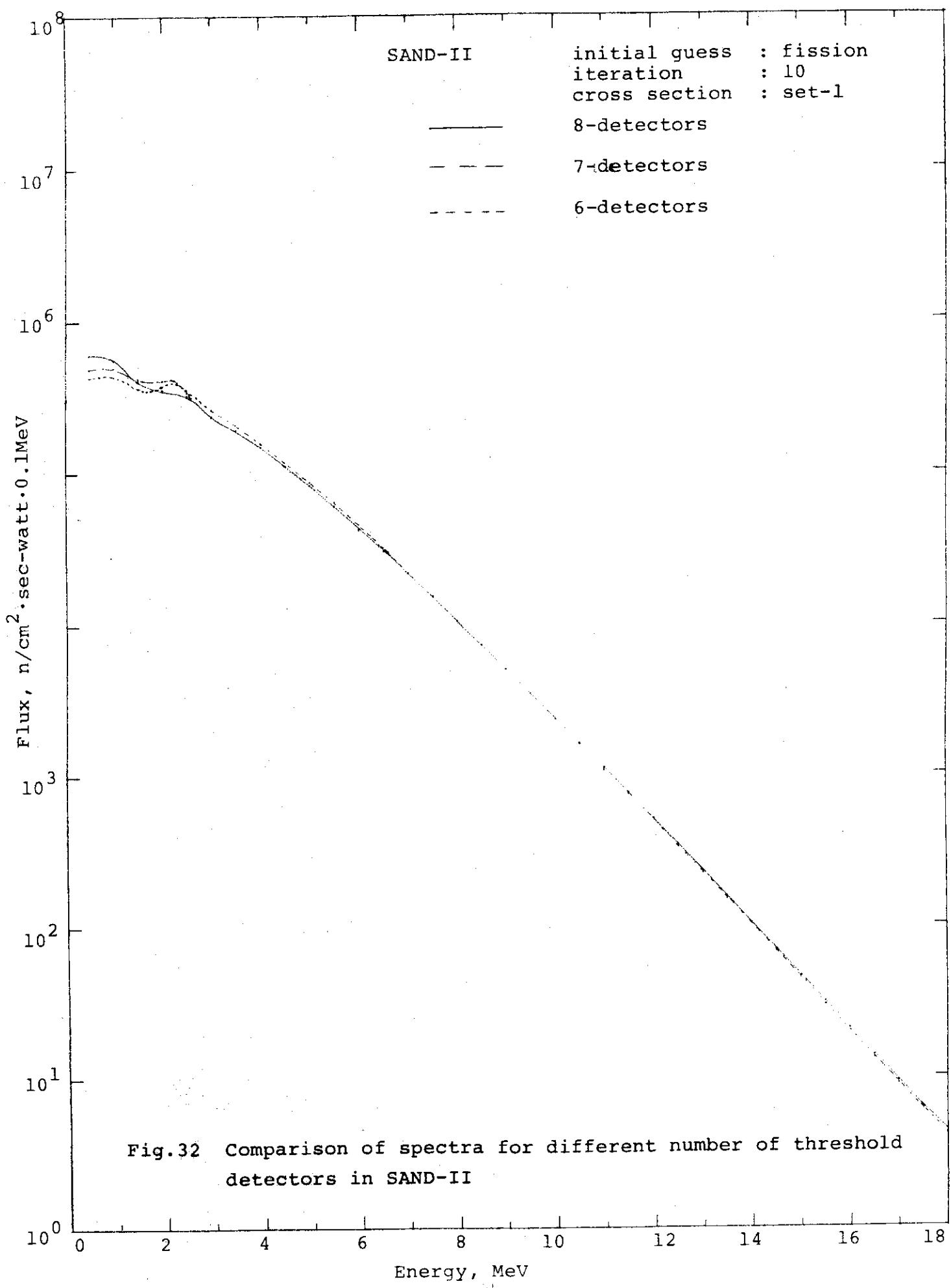


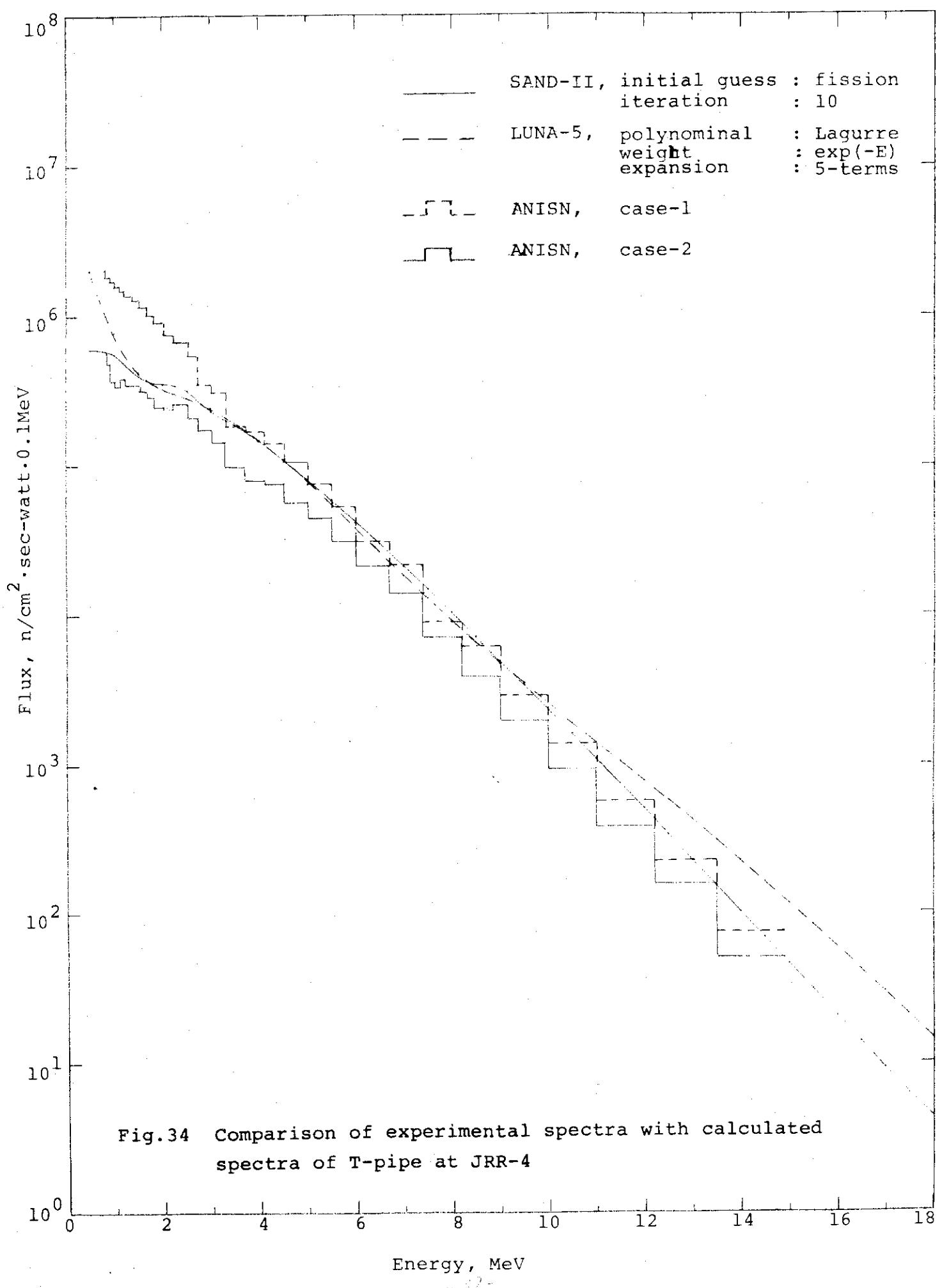




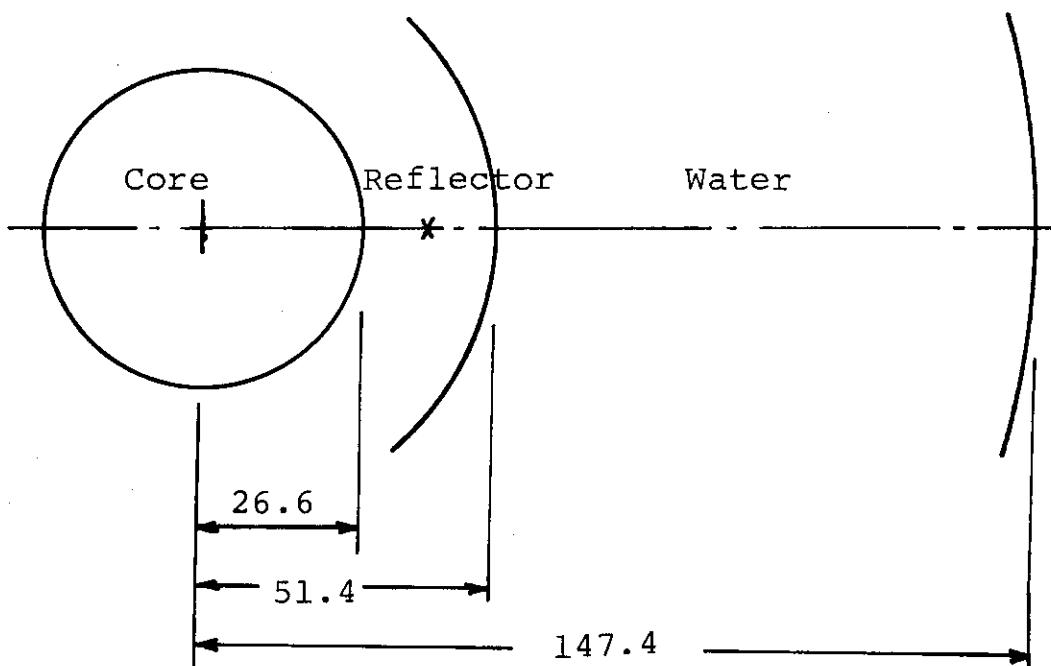








Case-1



Case-2

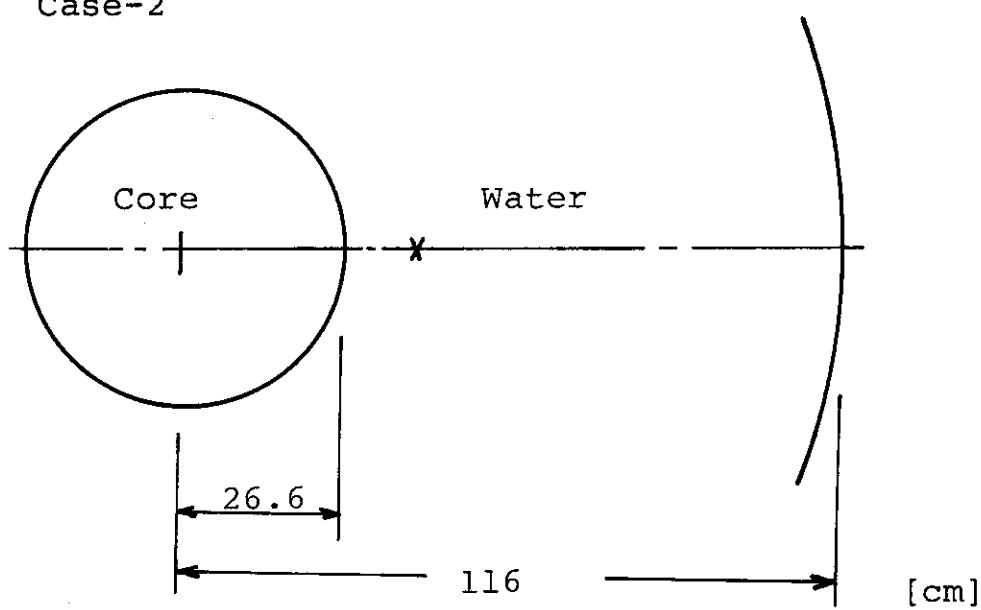


Fig.33 Configurations for calculation with  
one-dimensional SN code (ANISN)