

JAERI - M

82-086

高速中性子散乱実験用遮蔽系に関する  
バックグラウンド解析

1982年7月

高橋 英明\*・山内 良麿・梶山 一典\*\*  
田中 茂也

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。  
入手の間合わせは、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、お申しこしてください。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 いばらき印刷㈱

高速中性子散乱実験用遮蔽系に関するバックグラウンド解析

日本原子力研究所東海研究所物理部

高橋 英明\*・山内 良麿

梶山 一典\*\*・田中 茂也

(1982年6月22日受理)

原研タンデム加速器中性子ターゲット室において高速中性子散乱実験に使用される検出器遮蔽系に関するバックグラウンド解析を3次元のモンテカルロコードを用いて行った。遮蔽の対象となる中性子のエネルギーは最大で40 MeVである。従ってこのエネルギーの中性子に対しても十分な遮蔽能力を持ち、S/N比の良い中性子測定を可能にする遮蔽系の設計が要求される。

contributon fluxを用いた詳細な設計解析を行うことにより、検出器に入ってくる種々のバックグラウンドの成因とその量が追求され、この遮蔽系で用いられるシャドーバーおよびコリメーターの最適の形状が求められた。これは十分にS/N比の良い遮蔽系を与えるものである。

---

\* 東北大学工学部, 現在 三菱総合研究所

\*\* 東北大学工学部

Background Analysis on a Detector Shield System for  
Fast Neutron Scattering Experiments

Hideaki TAKAHASHI\*, Yoshimaro YAMANOUTI, Kazusuke SUGIYAMA\*\*  
and Shigeya TANAKA

Division of Physics, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June 22, 1982)

A detector shield system for fast neutron scattering experiments to be installed in the JAERI tandem accelerator building has been designed using three-dimensional Monte Carlo calculations. The energy range of incident neutrons taken in the design calculations is up to 40MeV. It is required to construct the detector shield system which can shield these high energy background neutrons effectively to perform neutron scattering experiments with good S/N ratio.

By performing design analysis in detail using contribution flux, the origins and the quantities of various background components to the detectors have been pursued, and the optimum shapes of the shadow bar and the collimator channel in the shield system have been obtained.

Keywords: Three-dimensional Calculation, Neutron Transport, Detector Shield, Collimator, Shadow Bar, Contribution Flux, Monte Carlo Method, 40 MeV Neutron, Fast Neutron, Background Analysis

---

\* Tohoku University, Present Address; Mitsubishi Research Institute Inc.

\*\* Tohoku University

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 検出器遮蔽系の設計にあたって考慮すべき事項 .....	2
3. 計算コードおよび断面積ライブラリー .....	3
4. 初期計算 .....	4
4.1 検出器遮蔽系 .....	4
4.2 計算体系 .....	4
4.3 source neutron に起因するバックグラウンド .....	6
4.4 sample-scattered neutron に起因するバックグラウンド .....	10
4.5 初期計算結果から得られた設計のための指針 .....	10
5. 複雑な形状の体系での計算 .....	16
5.1 体系形状の考慮 .....	16
5.2 source neutron に起因するバックグラウンド .....	19
5.3 sample-scattered neutron に起因するバックグラウンド .....	19
6. 検出器遮蔽系の体系形状の決定 .....	23
6.1 最終的な体系の形状 .....	23
6.2 最終体系におけるバックグラウンド中性子スペクトルの計算 .....	24
6.2.1 計算に用いた中性子源 .....	24
6.2.2 バックグラウンドを考えるについての基準値 .....	25
6.2.3 計算結果 .....	26
7. 結 論 .....	37
謝 辞 .....	37
参考文献 .....	38

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Design criteria for the detector shield system .....	2
3. Computer codes and cross section library .....	3
4. Preliminary calculations .....	4
4.1 The detector shield system .....	4
4.2 Geometrical structure for calculations .....	4
4.3 Background neutrons due to source neutrons .....	6
4.4 Background neutrons due to sample-scattered neutrons .....	10
4.5 Results of the preliminary calculations and design policy .....	10
5. Calculations for complicated geometrical structure .....	16
5.1 Consideration on geometrical structure .....	16
5.2 Background neutrons due to source neutrons .....	19
5.3 Background neutrons due to sample-scattered neutrons .....	19
6. Determination of geometrical structure for the detector shield system .....	23
6.1 Final geometrical structure .....	23
6.2 Calculations of background neutron spectra for final geometrical structure .....	24
6.2.1 Neutron source used in calculations .....	24
6.2.2 Standard for background neutrons .....	25
6.2.3 Results of calculations .....	26
7. Conclusions .....	37
Acknowledgment .....	37
References .....	38

## 1. 序 論

原研タンデム加速器を用いることによって、中性子エネルギー領域 10 ~ 40 MeV の高速中性子実験が可能であり、この高いエネルギー領域での系統的な高速中性子実験を行うために現在実験装置の整備が進められている。20 MeV 以上のエネルギー領域では陽子、重陽子などの荷電粒子による核反応の実験データが数多く得られているのに比べて、高速中性子に関する系統的な実験の報告はこれまでほとんど見られないのが現状である。これは高速中性子実験に適した性能を持つ加速器が少なかったこと、高エネルギー領域での高速中性子の測定技術が極めて難しいことがその主な原因と考えられる。核物理学的に中性子核反応メカニズム、核子光学ポテンシャルの系統性、中性子を用いた核構造の研究が極めて重要であるにもかかわらず今後組織的な研究を進めるべき分野として残されている状態にある。

近年 10 MeV 以上のエネルギー領域における中性子断面積データの必要性が、核融合炉のブランケット核設計、核融合炉材料の開発、加速器による増殖、核廃棄物処理や核医学の分野で不可欠のデータとして、高まりつつある。1977年に“Symposium on Neutron Cross Sections from 10 to 40 MeV”と題する第1回目の国際会議が Brookhaven National Laboratory において開催されたのに引き続き<sup>1)</sup>、1980年5月には関心あるエネルギー領域は 10 ~ 50 MeV とさらに引き上げられ、第2回の国際会議が開催されたこと<sup>2)</sup>はその重要性が多く研究者に認識されたことによる。

入射中性子エネルギーが 10 MeV を越えて、高くなるにつれて中性子核反応の微分断面積は、数 MeV 領域でのそれに比べて、一般に小さくなり、また中性子検出器を使用する場合には、その検出効率も低下する。従って大型の中性子検出器を使用しなければならない。一方バックグラウンド中性子のエネルギーは高くなるので中性子検出器の遮蔽はより厳重に行うことが必要になる。高速中性子散乱実験において精密なデータを得るためには中性子バックグラウンドレベルの低い測定系を確立することが重要であり、考えられる種々のバックグラウンド中性子を有効に遮蔽しうる検出器遮蔽系の設計を行うことが必要である。従来 15 MeV 以下のエネルギー領域での中性子実験における使用を目的として製作された他の実験施設のもの<sup>3), 4)</sup>と比較し、より厳しい条件の下で設計解析を行った上で検出器遮蔽系の製作が行わなければならない。このような検出器遮蔽系を設計するためには遮蔽系各部分の遮蔽効果、検出器への影響を正確に把握する必要がある。このような複雑な体系に就いてはモンテカルロ法による計算が最適である。このような要求に従い、本研究では原研タンデム加速器を用いた高速中性子散乱実験に使用される検出器遮蔽系のバックグラウンド解析を、モンテカルロ法によって行った。

## 2. 検出器遮蔽系の設計にあたって考慮すべき事項

検出器遮蔽系の設計を行うにあたり、以下にあげる方針を取ることにした。

- a) room scattered neutron を十分に減衰させること。
- b) シャドーバーにより direct neutron を十分に減衰させること。
- c) シャドーバーおよびコリメーター体系によって散乱されて検出器に到達する中性子を小さくおさえること。
- d) 空気散乱によって検出器に到達する中性子を小さくおさえること。

今までの高速中性子散乱の実験に使用されるコリメーターの設計について2, 3の報告が見られるが<sup>3, 4)</sup>いずれも15 MeV以下のエネルギー領域に関するもので、そのままでは現在の遮蔽系の設計に役立てられるような情報は与えてくれない。ここで設計しようとする遮蔽系は10～40 MeVのエネルギー領域での実験に使用されるものであり、中性子の性質からこれ以下のエネルギーの場合と比較して、はるかに遮蔽の条件は厳しいものとなることが予想され、従って詳細な解析を加えた設計を行うことが必要である。

上記a)のroom scattered neutronを考えるにあたっては、中性子ターゲット室内における床、壁、天井などからの散乱中性子バックグラウンドについての見積が必要であるが、これはすでに筆者らによって行われ、報告されている。<sup>5)</sup>

b)～d)を考えるにあたってはシャドーバーの形状およびコリメーター先端、内壁の形状が問題になり、バックグラウンド発生の原因としては次のようなものがあげられる。

- ① source neutron のシャドーバー透過によるもの
- ② source neutron のシャドーバー散乱によるもの
- ③ source neutron のコリメーター体系散乱によるもの
- ④ source neutron の空気散乱によるもの
- ⑤ sample scattered neutron のシャドーバー散乱によるもの
- ⑥ sample scattered neutron のコリメーター体系散乱によるもの
- ⑦ sample scattered neutron の空気散乱によるもの

これらは“バックグラウンドの中性子源”として考えられる。最適シャドーバーおよびコリメーターの形状、配置の決定を行うためにはこれら種々の原因から成るバックグラウンド成分について定量的に詳細な評価を加えることが必要である。



### 3. 計算コードおよび断面積ライブラリー

通常の輸送計算コードでは、次の式で表わされる Forward Boltzmann Transport Equation を解くことにより、外部線源  $S$  が与えられたときの粒子のフラックス分布  $\phi$  が求められる：

$$\begin{aligned} \Omega \cdot \nabla \phi(\mathbf{r}, E, \Omega) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \phi(\mathbf{r}, E, \Omega) \\ = \int \int \Sigma_s(\mathbf{r}, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(\mathbf{r}, E', \Omega') dE' d\Omega' + S(\mathbf{r}, E, \Omega) \end{aligned} \quad (1)$$

これがいわゆる forward 問題である。ここで  $\Sigma_t$ 、 $\Sigma_s$  はそれぞれ巨視的な全断面積、散乱断面積、 $\Omega$  は方向をきめる単位ベクトルである。しかしながらこのフラックス分布のみから興味のある検出器に対して大きな寄与を示す重要な領域を見分け、そして最も効果的な遮蔽体の配置を決定することは、特に複雑な形状の問題においては困難である。一方、Adjoint Boltzmann Transport Equation を解く adjoint 問題ではまず体系内に検出器を置き、体系内の各点にある単位強度の線源からのこの検出器への寄与を求める。この“きき方”の分布が adjoint flux  $\phi^*$  である。それは次式を解くことによって求められる：

$$\begin{aligned} -\Omega \cdot \nabla \phi^*(\mathbf{r}, E, \Omega) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \phi^*(\mathbf{r}, E, \Omega) \\ = \int \int \Sigma_s(\mathbf{r}, E \rightarrow E', \Omega \rightarrow \Omega') \phi^*(\mathbf{r}, E', \Omega') dE' d\Omega' + S^*(\mathbf{r}, E, \Omega) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで  $S^*$  は adjoint の source であり、検出器のレスポンスを用いる。ここで線源から発生した粒子のうち実際に検出器に応答を与えるものみの分布が何らかの方法で求められればこのような粒子の分布は非常に明快地検出器に向かう粒子の道筋を与えることになり、有効な遮蔽法を考える上できわめて有用な情報となる。このような粒子は Williams らに従って “contribution” と呼ばれ、contribution flux  $\phi$  は次式で表わされる<sup>6)</sup>：

$$\psi(\mathbf{r}) = \int \int \phi(\mathbf{r}, E, \Omega) \phi^*(\mathbf{r}, E, \Omega) dE d\Omega \quad (3)$$

検出器遮蔽系の設計計算においてはバックグラウンドの源となる領域を見分けることが必要であり、このためには上記のような特性を持った粒子である contribution の分布を求めることが必要である。本研究の設計計算では、3次元体系においてこの contribution flux の算出を行うことができる MORSE-3C コード<sup>7)</sup>を用いた。これは汎用モンテカルロ計算コード MORSE-CG<sup>8)</sup>を基に作成したものである。また計算に用いられる断面積ライブラリーには、60 MeV までのエネルギー範囲を含む DLC-58<sup>9)</sup>を使用した。

## 4. 初期計算

### 4.1 検出器遮蔽系

中性子検出器は散乱サンプルから8 mの距離に設置され、大きさ20 cm  $\phi$   $\times$  35 cmのNE-213液体シンチレーターを4本たばねて用いることが予定されている。サンプルと中性子源との距離は13.5 cm、サンプルの大きさは最大で直径3.5 cm、高さ4 cmである。room background についての計算結果<sup>5)</sup>から、これを十分に遮蔽するためにはパラフィン50 cmの厚さの検出器主遮蔽体に加えて、床に入射し散乱されてくる中性子をおさえるための前部遮蔽体が必要であることが明らかにされた。これらにコリメーターおよびシャドーバーが加わったものが全体の検出器遮蔽系となる。従ってここではシャドーバーおよびコリメーターの形状、配置のoptimization が計算の目的となる。図1に検出器遮蔽系の概略図を示す。コリメーターおよびシャドーバーの基本的な形状は作図法から定めることができる。作図法からだけでは定めることが不可能であり、設計計算を行う必要があるような問題となるのはコリメーターおよびシャドーバーの各稜の長さ、シャドーバーにおける点A、Bの位置、コリメーター先端の位置C、および内壁形状をダブルコーンにする場合の点Dの位置である。計数率を上げ、測定時間を短縮する目的のために中性子検出器はかなり大きなものが用いられ、このことによっても検出器遮蔽はより困難なものとなる。従ってバックグラウンドを極力小さくするためには上記の点の最適な位置を定めることが重要となる。

### 4.2 計算体系

まず考えられるバックグラウンド中性子の発生源について予備的な情報を得ることを目的として適当なコリメーター体系を設定し、計算を行うことにした。シャドーバーの先端に切り込みを入れること(図1のAB面を作ること)やコリメーターをダブルコーン形状にすることは次の段階で考慮することにした。計算体系を図2によって説明する。検出点はD1、D2、D3の3点を取り、各検出点位置での中性子バックグラウンドを求める他、シャドーバーについては領域をS1～S8の8領域、コリメーターについては領域をC1～C12の12領域に分け、各々の領域でのforward flux, adjoint flux および contribution flux の算出を行った。以下第5章までの計算においては遮蔽系の設計にあたって必要とされる種々の基本的な情報を得るために中性子源は35～40 MeVのエネルギー巾にわたって一様に分布するとし、等方角分布を持つとして計算を行った。非等方角分布を持つ中性子源に対する考察は第6章で行うことにする。また、初期計算では、検出器設置角度が30°の場合についての計算のみを行った。体系を構成する材料はシャドーバーとコリメーターは鉄として計算を行った。

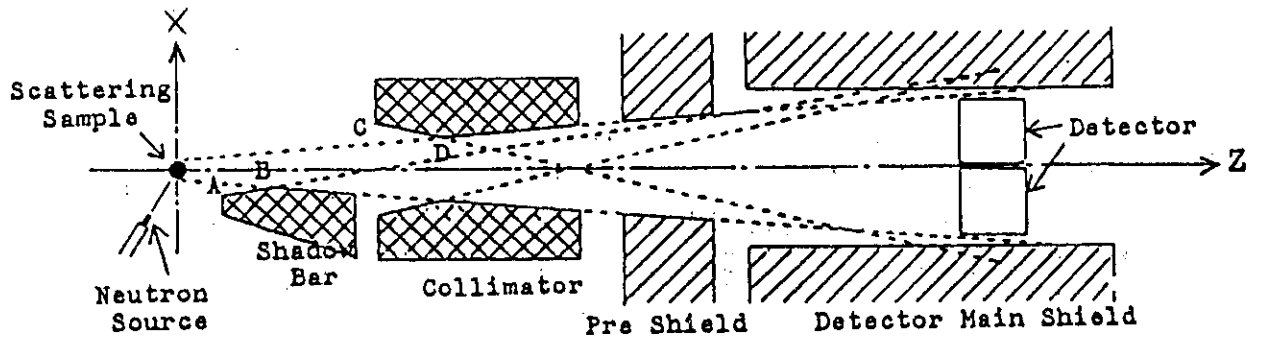


Fig.1 General view of the detector shield system

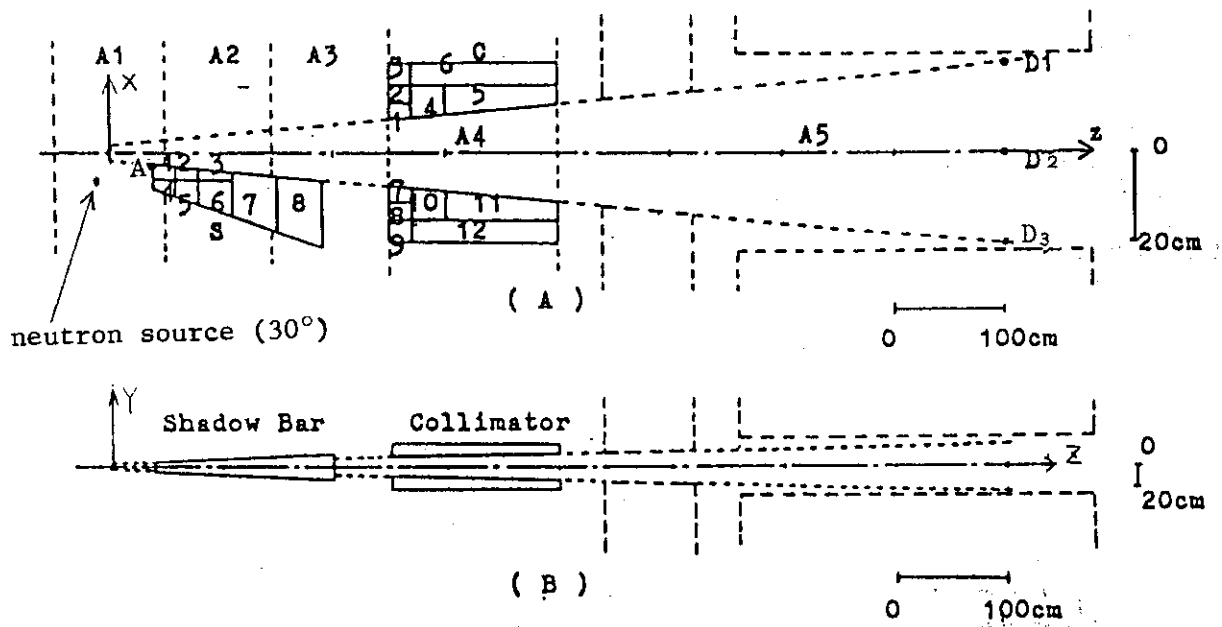


Fig.2 Geometrical arrangement for the initial calculations.

- (A) Plane view
- (B) Vertical view

### 4.3 source neutron に起因するバックグラウンド

バックグラウンド中性子としてはまず第2章で示した①～④のように、中性子源で発生したものが直接透過してくるもの、およびシャドーバー、コリメーター、空気等によって散乱されてくるものが考えられる。各々のバックグラウンド源からの寄与およびこれらの和を図3に示す。図3の(a), (b), (c)はそれぞれ、図2に示した検出点のうちD1, D2, D3の位置での計算値である。図3の横軸はサンプルの中心からシャドーバー先端位置A点までの距離のz-成分(図2参照)であり、これを10～60 cmの範囲で動かしてバックグラウンドの変化を見ている。縦軸のバックグラウンド中性子束は4.49 MeV以上のエネルギーを持つバックグラウンド中性子の中性子束であり、1 mb/srの断面積測定の際に予想されるフォアグラウンド中性子の収率に対する相対値であって、縦軸の1 mb/srで表わされる中性子束は $1.26 \times 10^{-2}$  n/cm<sup>2</sup>·secに対応する。(6.2.2参照)。

これらの図から、シャドーバーをサンプルから遠ざけるにつれてコリメーター入口に中性子源からの中性子が衝突する機会が増え、その結果コリメーターが散乱体として寄与し始めることがわかる。この影響は番号が大きい検出点ほどトータルバックグラウンドに占める割合が大きい。またD1の検出点ではdirect neutronによる寄与も大きくなる。空気散乱によるものはシャドーバー位置および検出器番号による大きな変化はないが、シャドーバーがサンプルに近い場合の方が空気領域が一部隠されるため、バックグラウンドはわずかに減少する。次にシャドーバー先端位置Aのz-成分がサンプルから40 cmの場合におけるシャドーバーおよびコリメーターの各小領域でのforward flux, adjoint flux, および contribution fluxの分布を図4および5に示す。それぞれD1, D2の検出点に対するものである。領域の区分は図2に示したとおりである。今図4を例に取ってみると、(c)図からシャドーバー先端のS1領域が体積が小さいにもかかわらず検出点D1に対して大きなバックグラウンド線源領域となっていることがわかる。S1領域とS4領域とを比較した場合、(a)図に見られるようにforward fluxはほとんど差がないにもかかわらず(c)図のcontribution fluxには1桁以上の違いがある。これはこれらの領域でのadjoint flux(すなわちimportance)に大きな違いがあるためであることが(b)図からわかる。contribution fluxはforward fluxとadjoint fluxの積で表わされ、従ってこの場合にはadjoint fluxの大きさに依存することになる。逆にS2領域になるとadjoint fluxは大きいにもかかわらずforward fluxの減衰が大きく影響してcontribution fluxは減少する。コリメーターの各領域についての各々の値も同様にして考えられる。結局contribution fluxの最も大きな領域すなわちバックグラウンドに対して最も大きな寄与を示す領域は、adjoint fluxが大きくかつforward fluxも大きなS1領域となる。図5の検出点D2に対する各々のfluxの値も同様にして考えられる。

これらの全バックグラウンドのタイムスペクトルを図6に示す。この図から、これらのバックグラウンドはタイムスペクトル中にはほぼ1本のピークとして現われることが明らかとなる。

これらのバックグラウンド中性子はバックグラウンド測定によって、原理的にタイムスペクトルから差引くことができるものである。

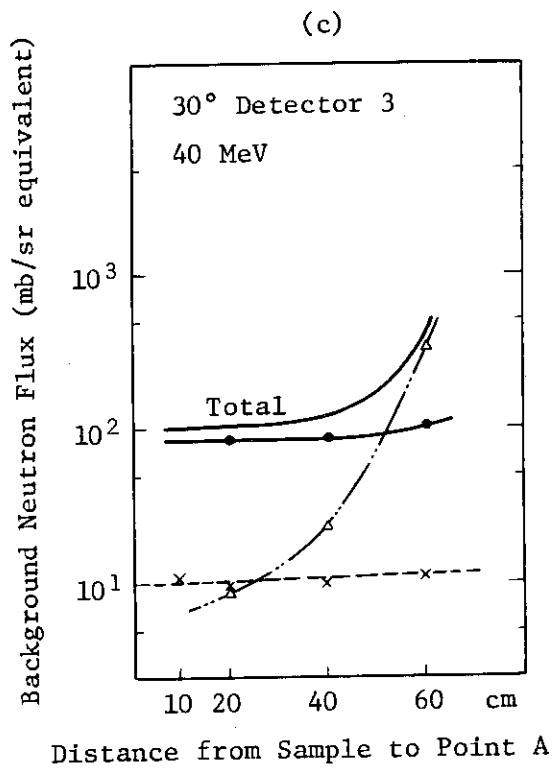
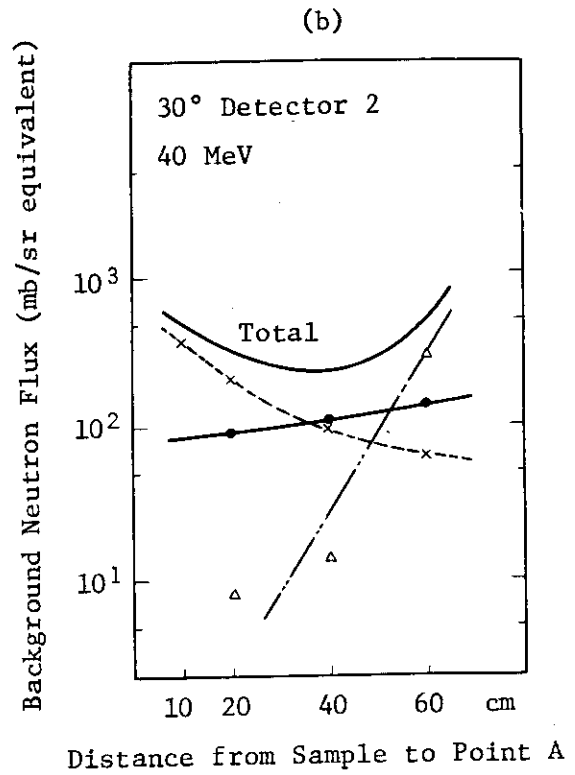
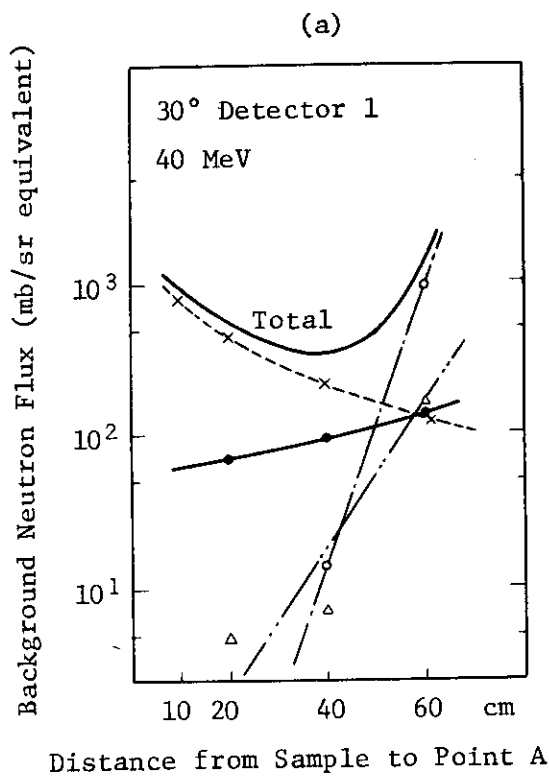
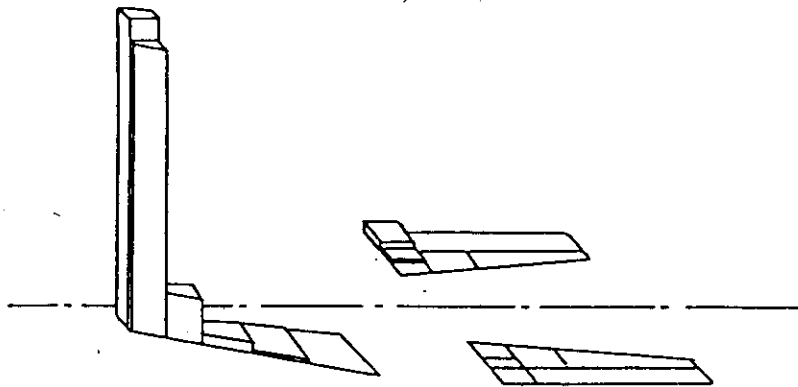
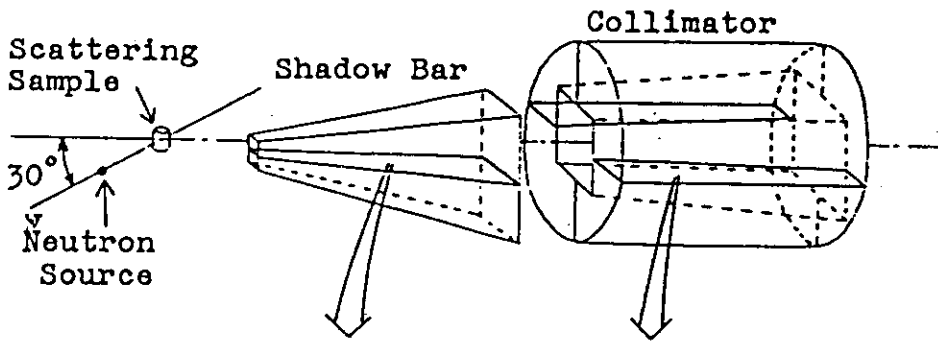
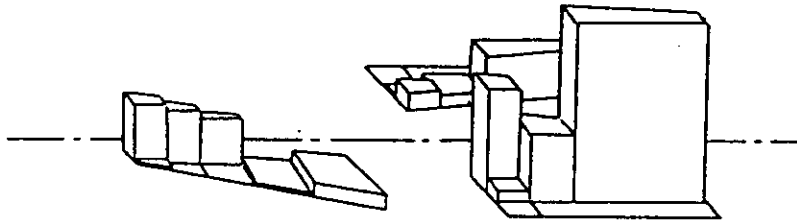


Fig. 3 Contributions to the background flux. The flux represented by 1 mb/sr on the ordinate corresponds to  $1.26 \times 10^{-2}$  n/cm<sup>2</sup> sec. See text 6.2.2.

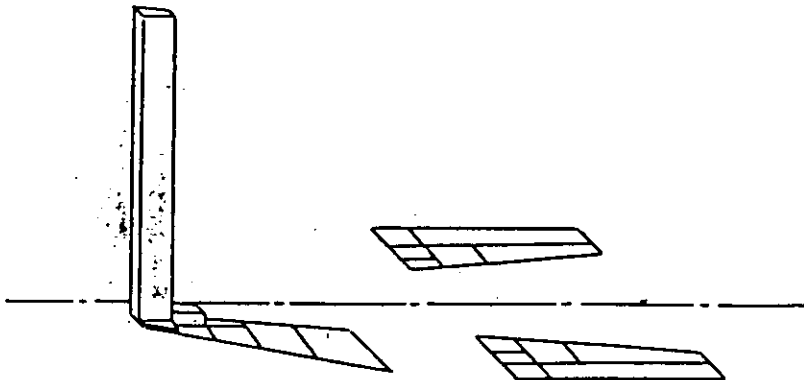
- x--- Shadow bar scattering
- Δ--- Collimator scattering
- Air scattering
- Direct neutron-yield  
This is negligible in the cases of Fig. 3(b) and 3(c).



(a) Forward Flux Distribution

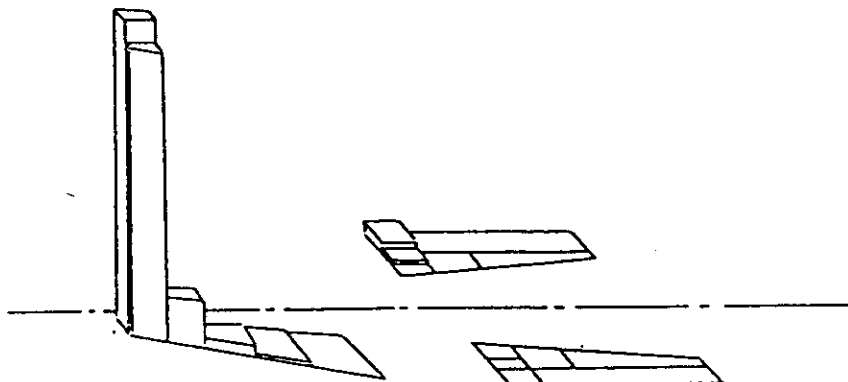
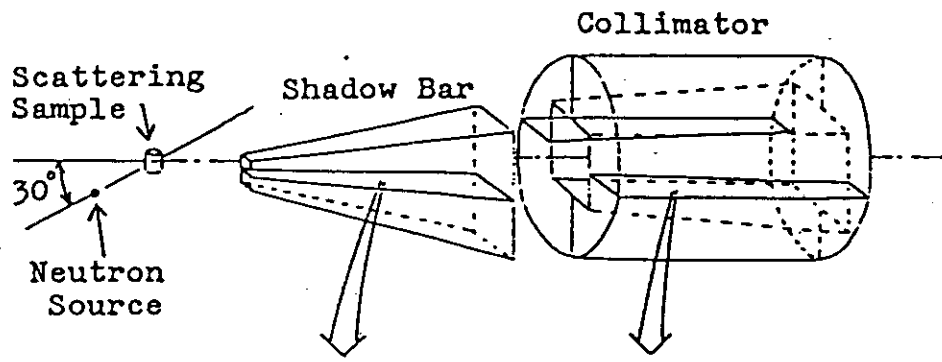


(b) Adjoint Flux Distribution for Detector 1

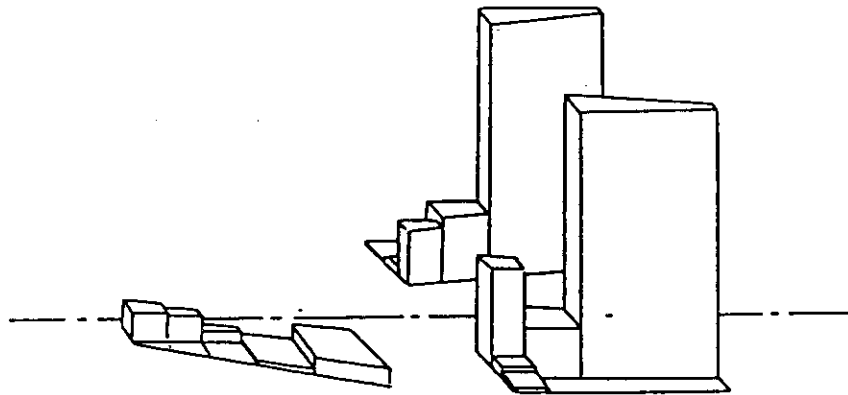


(c) Contribution Flux Distribution for Detector 1

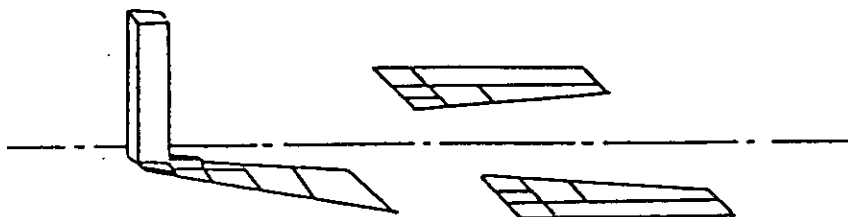
Fig.4 Region-dependent distributions of forward flux, adjoint flux and contribution flux for detector 1.



(a) Forward Flux Distribution



(b) Adjoint Flux Distribution for Detector 2



(c) Contribution Flux Distribution for Detector 2

Fig.5 Region-dependent distributions of forward flux, adjoint flux and contribution flux for detector 2.

#### 4.4 sample-scattered neutron に起因するバックグラウンド

他に考えられるバックグラウンドの原因として、第2章の⑤～⑥のように1度サンプルで検出器方向外に散乱された中性子がシャドーバー、コリメーターまたは空気によって再び散乱を受け、その結果検出器に向かうものがあげられる。これらの各々の散乱源からの寄与およびその和を図7に示す。横軸はサンプルの中心とシャドーバー先端A点の距離のz-成分を表わす。縦軸は、サンプルで散乱された中性子が35～40 MeVのエネルギーを持ち、かつ等方分布を示すものとした場合に、検出器に直接入射する中性子の量に対する相対値である。空気散乱によるものおよびコリメーターからの散乱によるものは検出点の位置による変化はほとんどない。シャドーバーでの散乱からの寄与は検出点番号が大きくなるにつれて減少し、D3の検出点では空気散乱やコリメーター散乱に比較してほとんど無視できる量となる。

シャドーバー先端位置がサンプルから40 cmの場合におけるシャドーバーおよびコリメーターの各領域でのforward flux, adjoint flux および contribution flux の分布を図8, 9に示す。それぞれ検出点D1, D2に対するものである。予想されるように, contribution flux はS1領域で最も大きく,あとはサンプルからの距離に依存して徐々に減少する。これらのバックグラウンドのタイムスペクトルを図10に示す。これもタイムスペクトル中に1本の大きなピークを形成することがわかる。このバックグラウンドのピークはサンプルによって散乱された中性子が形成するピークと同じ時間位置に生じ,大きさはこの約1/100となる。

#### 4.5 初期計算結果から得られた設計のための指針

これらの初期計算の結果から,最終的な体系を決定していく上で有用な以下の情報が得られた。

- ① シャドーバーをサンプルに近づけすぎるとシャドーバーが大きなバックグラウンド源として寄与する散乱体となり, またシャドーバーを遠ざけていくと中性子源からの中性子はシャドーバーではあまり減衰されることなくコリメーターに衝突し, その結果コリメーターが大きなバックグラウンド源として寄与する散乱体として働く。この体系の場合シャドーバー先端の最適位置はサンプルから40 cmのところである。
- ② シャドーバーによる中性子源からの中性子の散乱では, シャドーバーの先端部それも検出器が直接見ている比較的小体積の部分が大きく寄与している。この結果から, 先端部の形状を考えることによって先端部での散乱に起因するバックグラウンドをほぼ無視できる程度にまで減衰させることができればシャドーバーによるバックグラウンドをこの場合よりも1桁程度さらに小さな値まで減らすことが可能であることが予見される。
- ③ source neutron のコリメーター散乱が原因となって生ずるバックグラウンドは, 簡単な計算によると, 中性子源からの中性子がシャドーバーを15 cm以上通過してからコリメーター部分に衝突するようにシャドーバーの形状, 配置を定めてやることにより, ほとんど問題にならない量にまで減衰する。
- ④ 上記②, ③の考慮を行ってシャドーバーおよびコリメーターからのバックグラウンドを減少させた場合には, 空気散乱によるバックグラウンドが最も優勢なものとして残ってくるこ



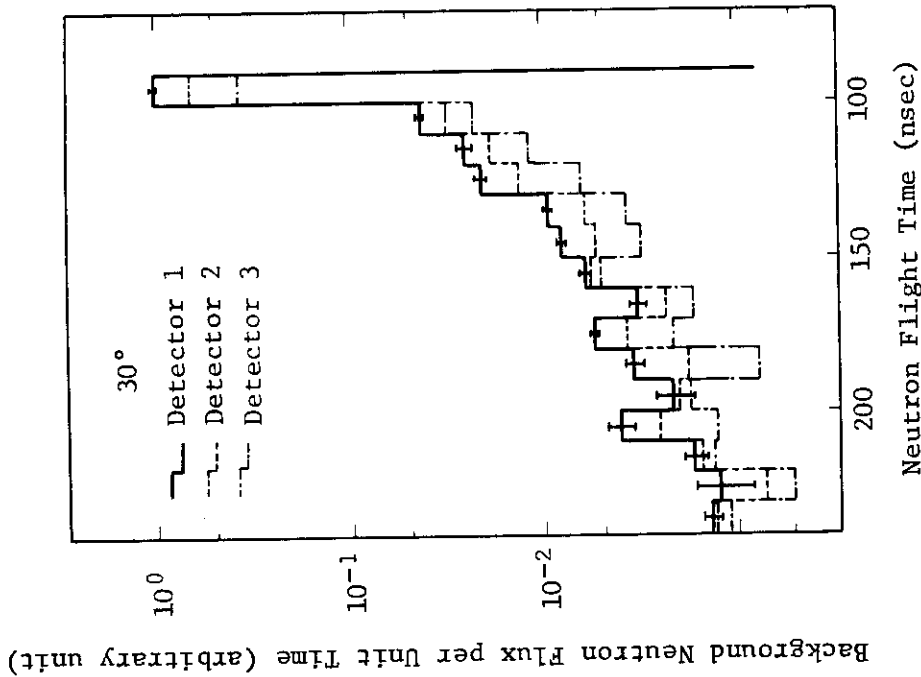


Fig. 6 T-O-F spectra of background neutrons transmitted through the shadow bar and scattered by the shadow bar and the collimator.

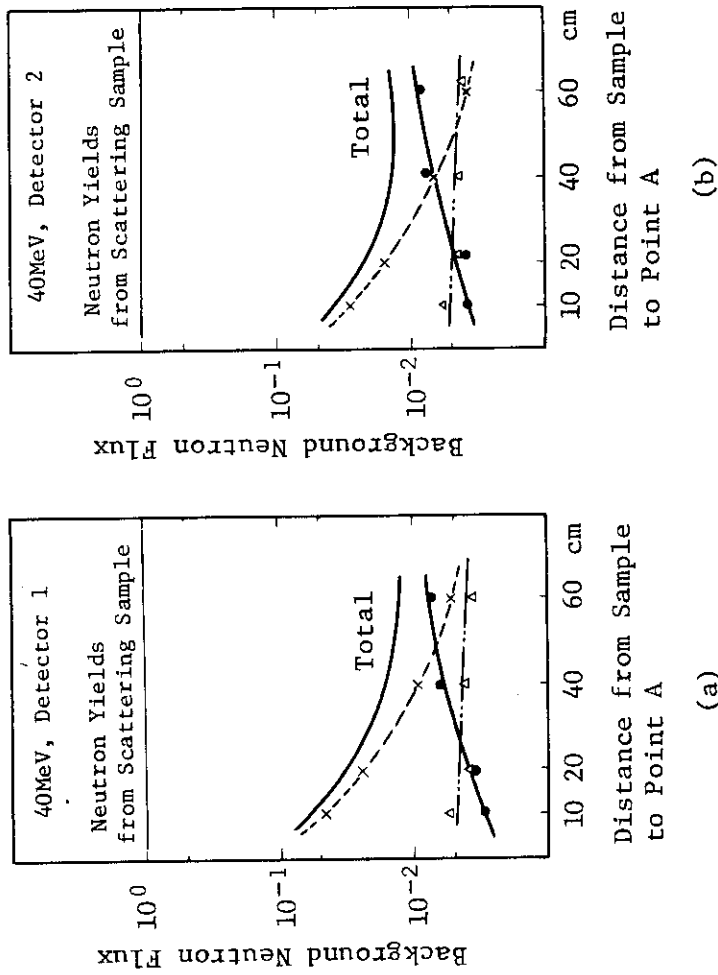
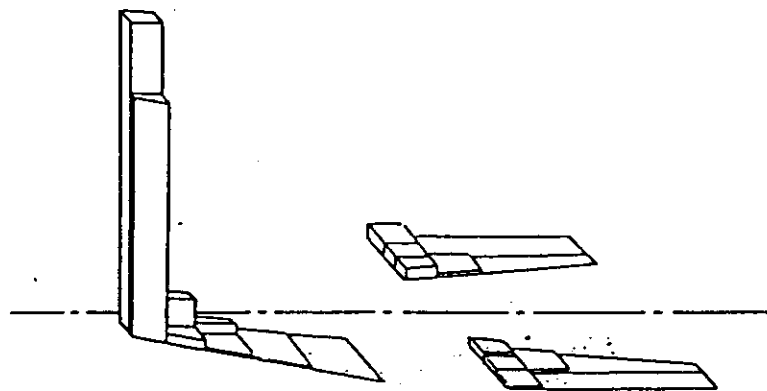
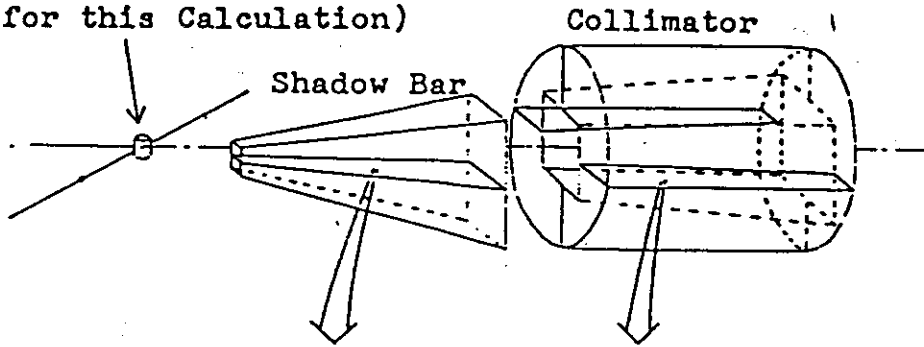


Fig. 7 Contributions to the background flux due to sample-scattered neutrons.

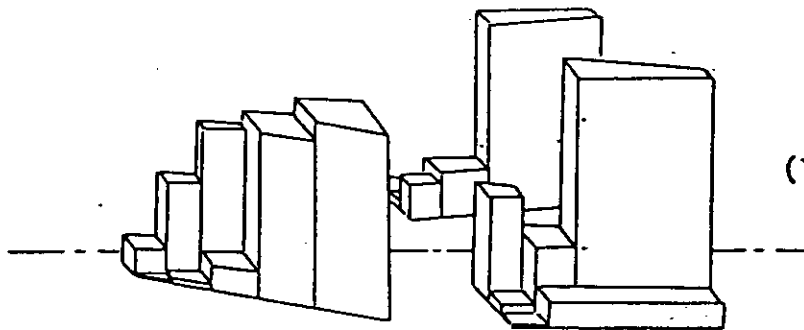
---x--- Shadow bar scattering  
 -o- Collimator scattering  
 —o— Air scattering

The background neutron flux in the ordinate is relative to the foreground flux.

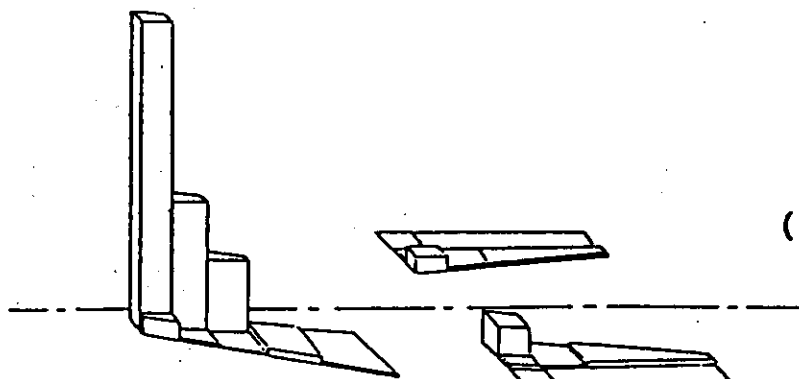
Scattering Sample  
 (Source Position  
 for this Calculation)



(a) Forward Flux  
 Distribution



(b) Adjoint Flux  
 Distribution  
 for Detector 1



(c) Contribution Flux  
 Distribution  
 for Detector 1

Fig.8 Region-dependent distributions of forward flux, adjoint flux and contribution flux due to sample-scattered neutrons for detector 1.

Scattering Sample

(Source Position  
for this Calculation)

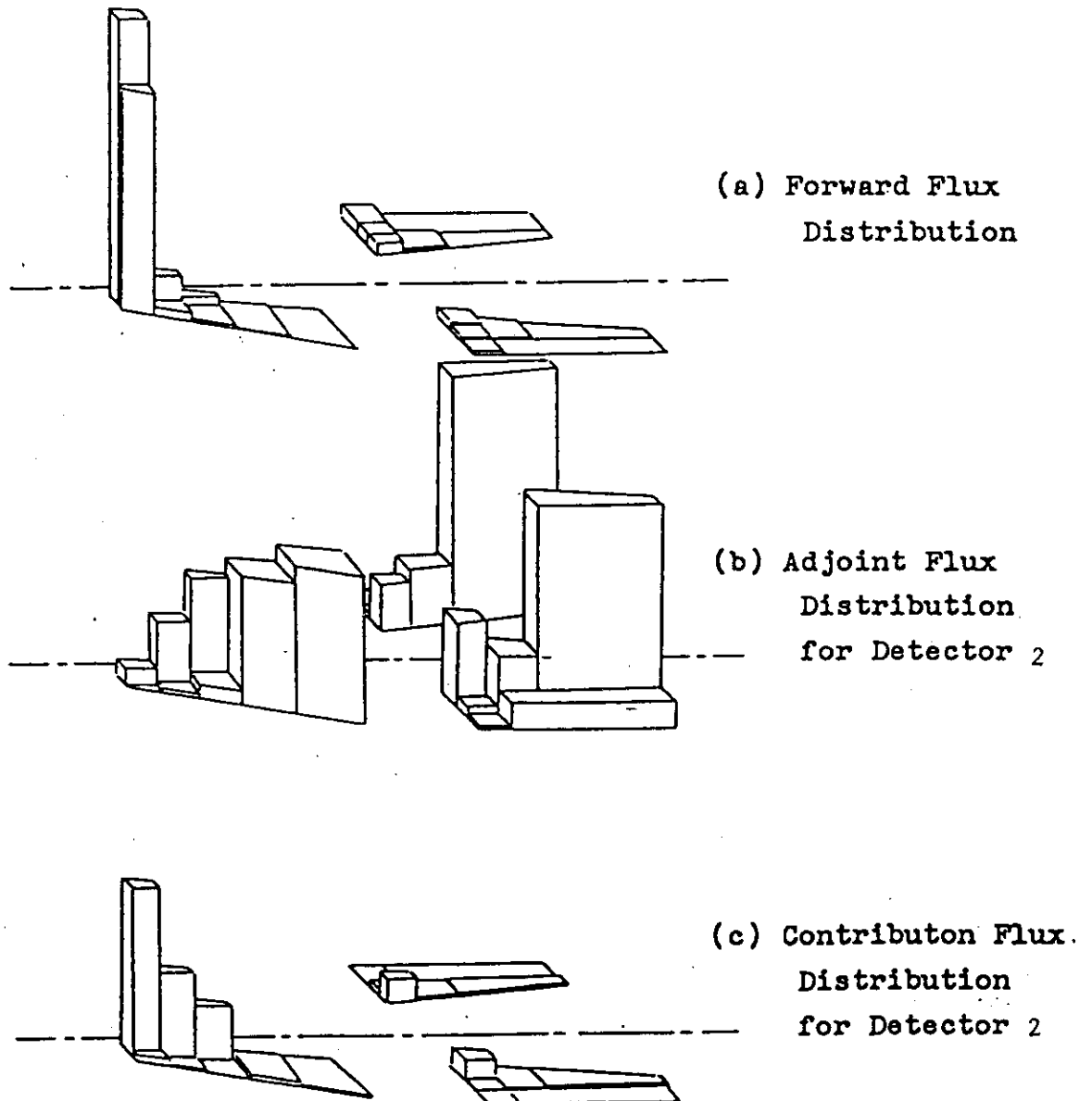
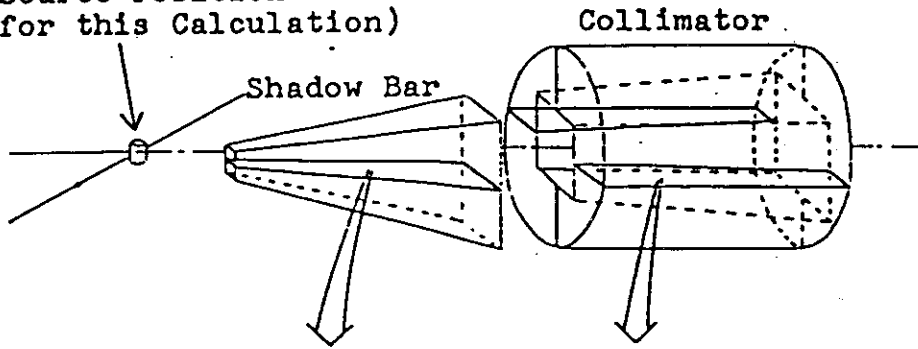


Fig.9 Region-dependent distributions of forward flux, adjoint flux and contribution flux due to sample-scattered neutrons for detector 2.

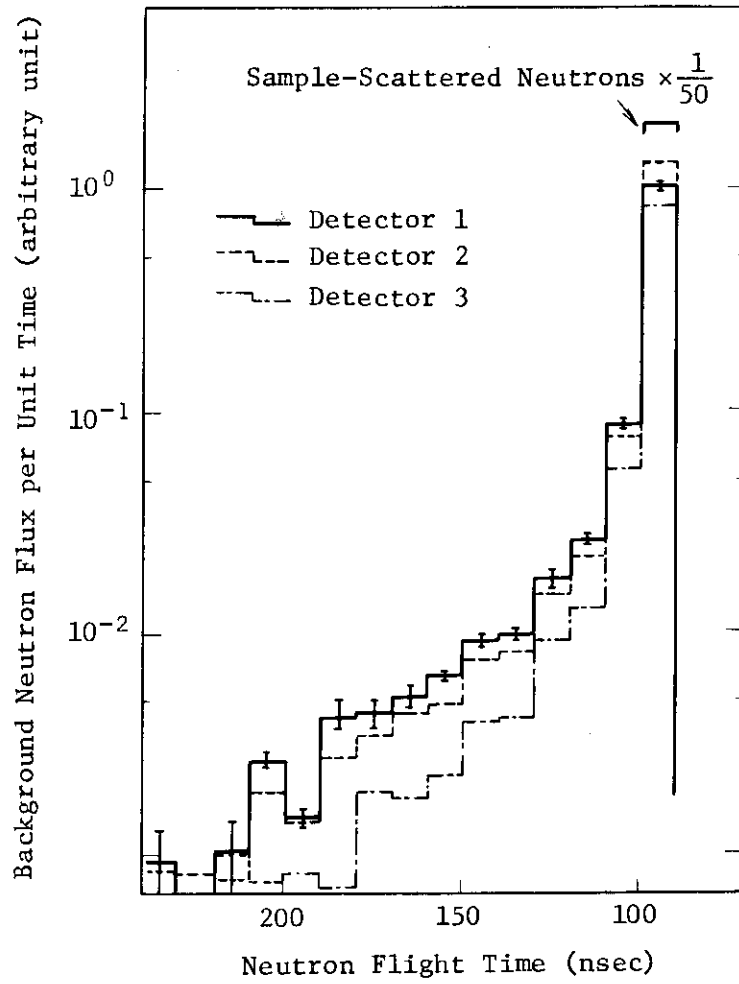


Fig. 10 T-O-F spectra of background neutrons due to sample-scattered neutrons.

とが予想される。これを減少させるには検出器がコリメーターの開口部を通して見る空気の体積を減らすということが必要である。このためにはコリメーター入口の大きさを小さくすることが必要であり、従ってコリメーター先端の位置を極力サンプルに近づけなければならない。しかしながらシャドーバーの長さがある程度長く取る必要があること、またコリメーター入口部分をシャドーバーによって中性子源からある程度隠してやる必要性があることから、サンプルとコリメーター先端位置の間の距離には限度がある。作図法により、ここで用いられる予定の検出器系においてはコリメーター先端位置をサンプルからの距離 80 cm のところまで近づけるのが限界である（この距離は検出器およびサンプルの大きさ、中性子源とサンプルの距離、サンプルから検出器までの距離に依存する）。

- ⑤ direct neutron ( $e^{-\Sigma_t x}$  で減衰する成分) は中性子源からの中性子がシャドーバーを 50 cm 以上通過するようにシャドーバー形状を設定すれば問題にならない量まで減衰する。
- ⑥ sample scattered neutron に起因するものを考えた場合、予想される通りサンプルに近いシャドーバー領域での散乱に起因するバックグラウンドが優勢である。このバックグラウンドを実際の中性子測定量の 2% 以下とするためにはシャドーバー先端位置（検出器が直接見る部分の先端位置）をサンプルから 30 cm 以上離すことが必要である。
- ⑦ source neutron, sample scattered neutron とも、コリメーター散乱によるバックグラウンド中性子の量は、シャドーバーおよびコリメーターの配置によりかなり小さくおさえることができ、従ってコリメーターの材料の違いによって全バックグラウンドの値に大きな変化は生じない。
- ⑧ これらのバックグラウンド中性子はその径路の途中で大きくエネルギーを変えることは稀であり、従ってバックグラウンド中性子のタイムスペクトルは 1 本の大きなピークを形成することになる。一方、room background のタイムスペクトルはこのピーク位置の下に、時間的にかなり広がりを持つスペクトルとして現われる<sup>5)</sup>。これらより、バックグラウンド中性子のタイムスペクトルはその成因を異にした 1 本のピークと連続スペクトルから形成される。

## 5. 複雑な形状の体系での計算

### 5.1 体系形状の考慮

初期計算によって得られた情報を基にして、検出器設置角度  $30^\circ$  の場合についてさらにバックグラウンドを低減させるために、シャドーバーおよびコリメーター形状に考慮を加えて体系を設定した。まず、問題となる図1中のA, B, Cの各点について次のように固定とした。

- ① コリメーター先端位置Cの $z$ 座標はサンプルから80 cmのところとする。これは空気散乱によるバックグラウンドを小さくするためである。
- ② シャドーバーB点の $z$ 座標はサンプルから35 cmとする。これはsample scattered neutronのシャドーバー散乱によって生ずるバックグラウンドを減らすためであり、コリメーター先端位置との関係からこれ以上B点を後方には下げられない。
- ③ シャドーバーA点の $z$ 座標は0 cmとする。(4節の議論におけるA点は、ここではB点に対応していることに注意)これはB, C点を上記のように定めた場合、シャドーバーのdirect neutronの透過距離を50 cm以上取るために必要な位置であり、またコリメーター入口に衝突する成分を減衰させるためにもこの程度前方に出す必要がある。ここで次の3つの事項が問題として残される。
  - ④ シャドーバー先端のA点が中性子源およびサンプルにかなり近いことから、中性子源→シャドーバー→サンプル→検出器という径路によるバックグラウンド増加の懸念
  - ⑤ A点の $x$ 座標(サンプルの中心を原点とし、 $z$ 軸に直角な座標、図2または図12を見よ)の移動によるバックグラウンドの変化。すなわちA点のoptimization
  - ⑥ コリメーター入口形状(ダブルコーンとするかどうか)の検討

まず④の問題についての検討を目的とし、シャドーバーのみの体系について計算を行った。A点の $x$ 座標を-4.0 cmとし、 $z$ 座標を-5.0, 0.0, 5.0 cmと変化させた場合における、シャドーバーによってサンプル方向に散乱される中性子のエネルギースペクトルを図11に示す。図ではサンプルの位置における中性子源からの中性子束を単位に取ってある。これより、サンプルに直接入射する中性子源からの中性子に比べてこのシャドーバー散乱によるバックグラウンドはかなり小さく、 $z > -0.5$  cmの範囲ならば問題にならない量であると判断された。以後の計算においては $z = 0.0$  cmとして計算を進める。

計算体系を図12に示す。図12(a)はコリメーター部分、図12(b)はシャドーバー部分についてのものである。それぞれ小領域に分けてある。次に問題となるのは前記⑤のA点の $x$ 座標であり、これを調べるために-5.0~-3.0 cmの範囲で変化させ、バックグラウンド増減への影響を見た。

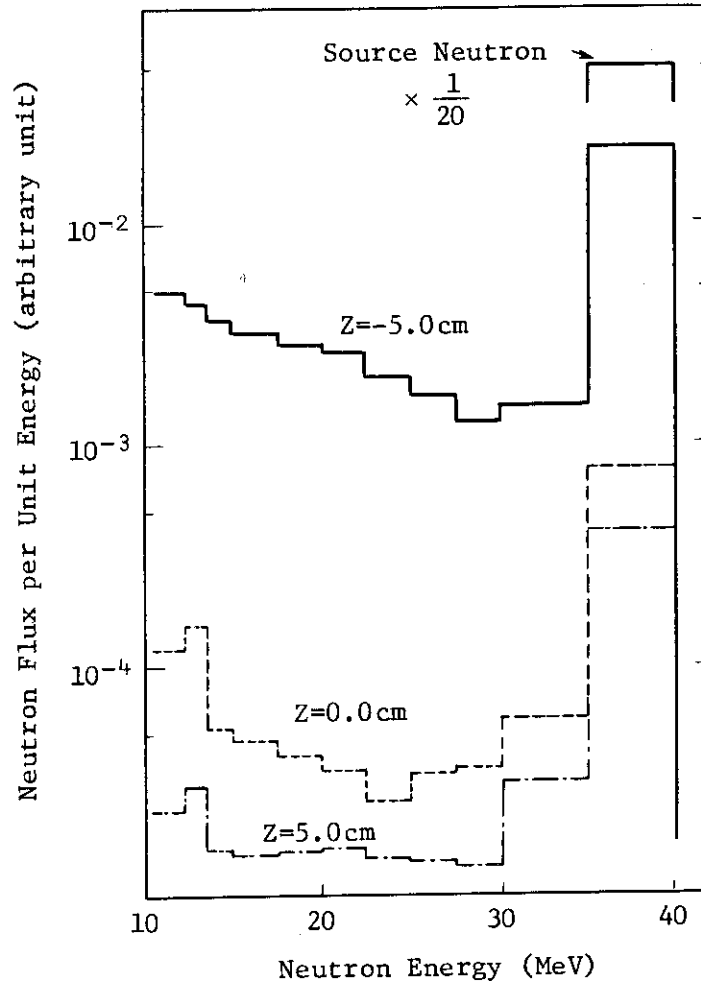
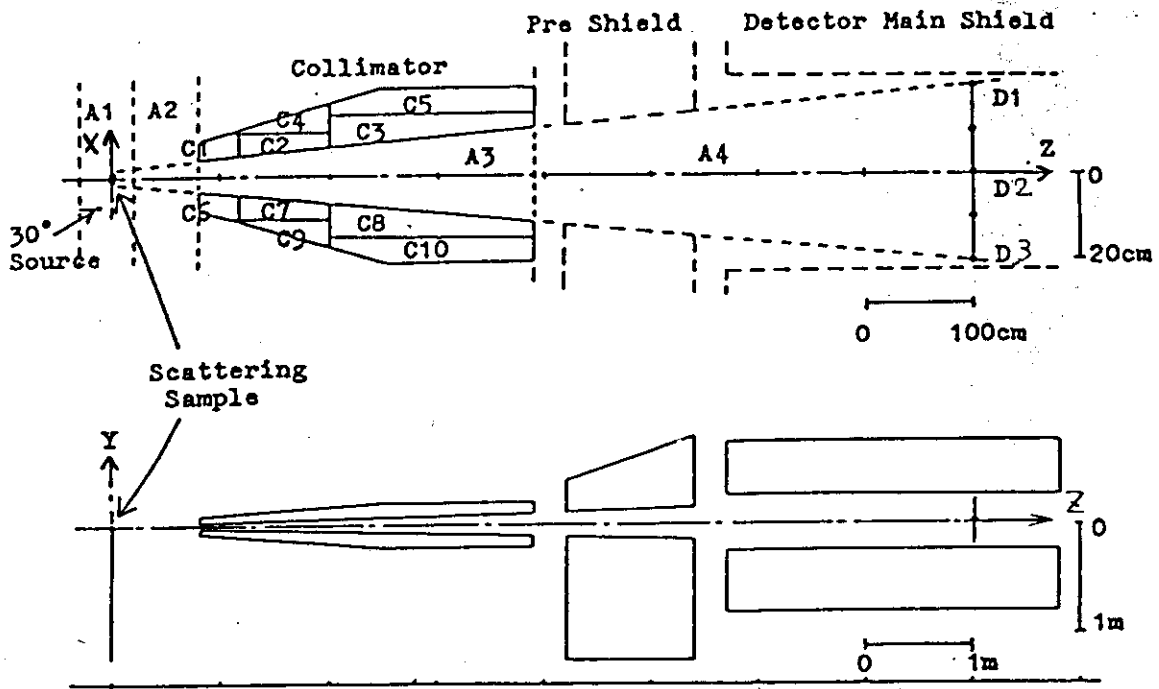
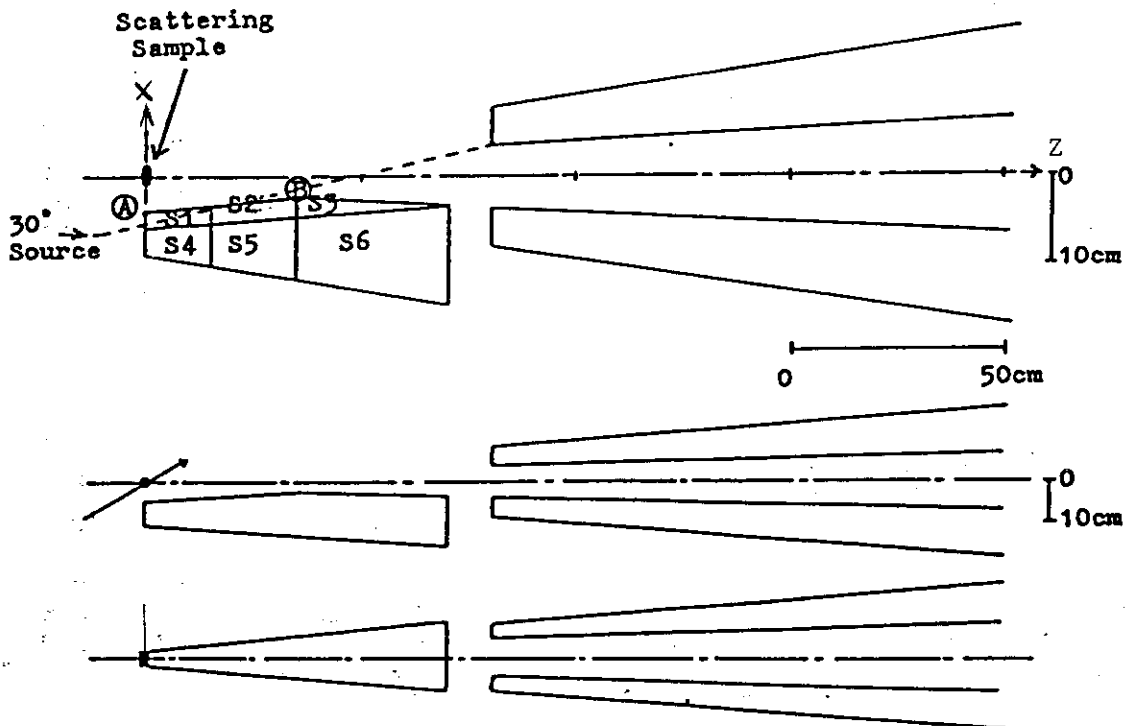


Fig. 11 Spectral distributions of shadow bar scattered-neutrons incident on the scattering sample. The neutron flux per unit energy on the ordinate is relative to the flux from the neutron source.



(a)



(b)

Fig.12 Arrangement of neutron detector shield system.  
 (a) Collimator and detector shield tank.  
 (b) Shadow bar.



## 5.2 source neutron に起因するバックグラウンド

シャドーバー先端A点のx座標を移動させた場合の全バックグラウンド中性子束の変化を図13に、また検出点D1, D2, D3に対するシャドーバー, コリメーター, および空気による散乱の寄与を図14に示す。A点が検出器端とB点を結んだ線上にある場合, A点のx座標は-3.6 cmであり, これよりもx座標が大きくなると検出点D1はAB面を見始めることになり, バックグラウンドは急増する。またx座標が小さくなるにつれて検出点D3でのバックグラウンドが増加するが, これはコリメーター入口に当る中性子の増加によるものである。x座標が-4.0 cmの場合は中性子源からの中性子はシャドーを約20 cm透過した後コリメーター入口に入射している。また-4.5 cmの場合は約16.5 cmの透過となっている。全バックグラウンドが最低となる場合のA点のx座標は-4.5 ~ -4.0 cmである。この位置は, 検出器端とB点を結んだ線上よりも0.5 cm以上外側であり, 中性子源からコリメーター入口まで16 cm以上のシャドーバー透過距離をもつ。

次に, A点のx座標が-4.0 cmの場合における各小領域からのバックグラウンドを図15に示す。D1, D2, D3などの検出点においても空気散乱によるバックグラウンドが最も優勢であり, 全体の70%近くを占めている。それも中性子源に近い領域のA1, A2が大きく寄与している。次に寄与が大きいのは検出点D3ではコリメーターからのものであることがわかる。コリメーターの小領域の中で実際に寄与が大きいのは, 全検出点に対してC1とC2である。

これらのバックグラウンドのTOFスペクトルを図16に示す。バックグラウンドは1つのピークを形成して現われることがわかる。初期計算体系の場合すなわち図6と比較すると, この場合にはピークとピーク以外の連続成分との比は若干小さくなる。

## 5.3 sample-scattered neutron に起因するバックグラウンド

B点のz座標を35 cm, A点のx座標を-4 cmとした場合のsample scattered neutron に起因するバックグラウンドは, 計算の結果フォアグラウンド成分に比べて検出点D1, D2, D3でそれぞれ2.4%, 2.2%, 1.5%となり, 十分に小さいものと言える。検出点D1に対する各領域からの寄与の割合を図17に示す。他の検出点でもこれとほぼ同じような分布を示す。コリメーターからのものが全体の60%近くを占めている。これをさらに減少させるためには入口形状をダブルコーンにすることや, コリメーター出口を広げることにより, 内壁がサンプルを直接見ないようにテーパを大きくしてやることが考えられるが, 入口をダブルコーンにすることによってはコリメーター開口部が必然的に大きくなり, その結果source neutron に起因するバックグラウンドのうちの空気散乱によるものが増加することが考えられる。内壁のテーパを大きくしてやることも, これによってそれほど顕著にバックグラウンドが改善されるわけではなく, これらのことを考えると特にコリメーター入口および内壁の形状に考慮を加える必要はないといえる。これらのバックグラウンド中性子のTOFスペクトルは図18のようになる。

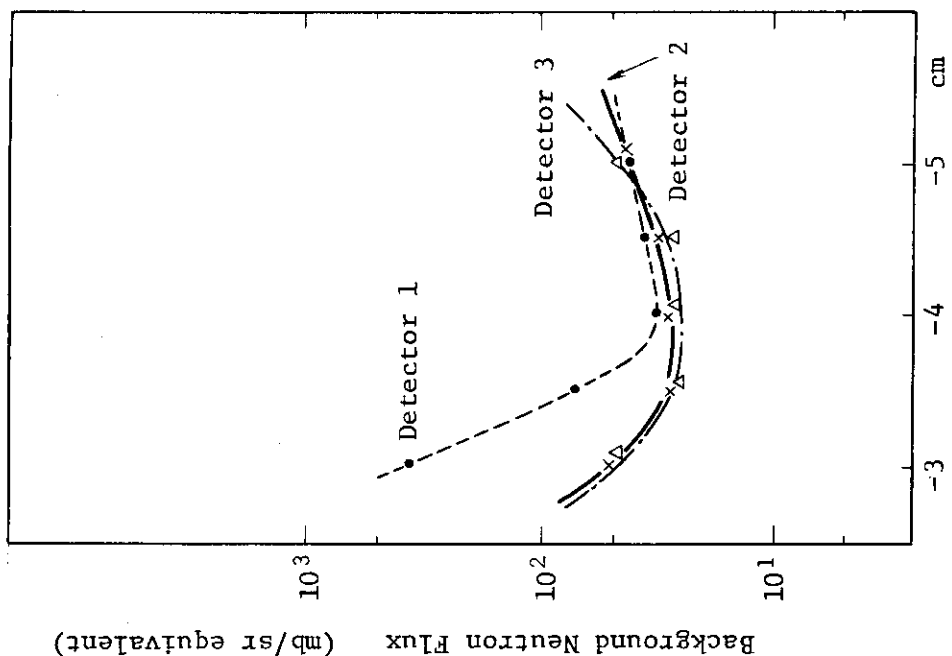
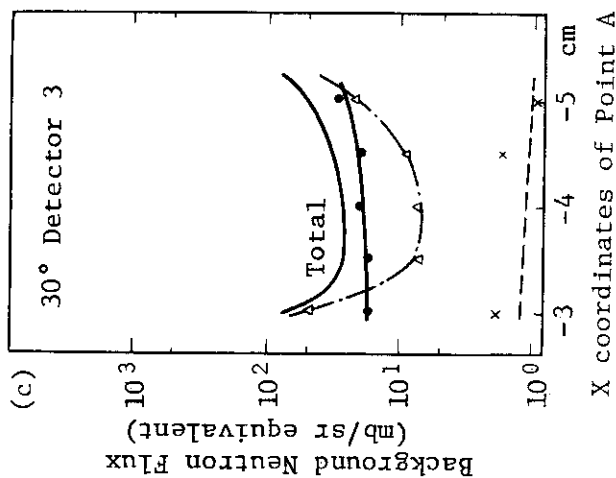
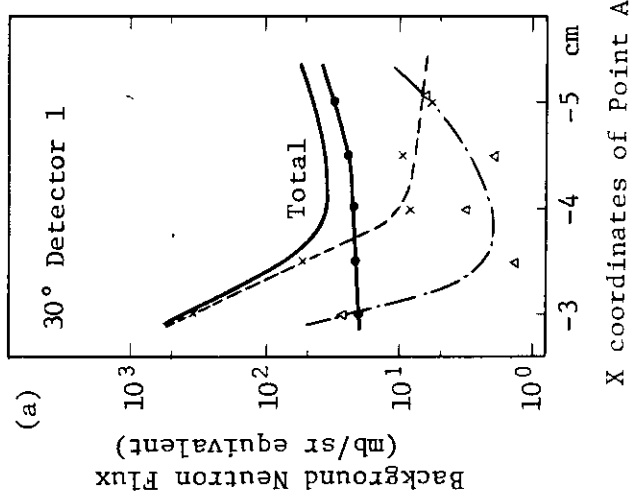
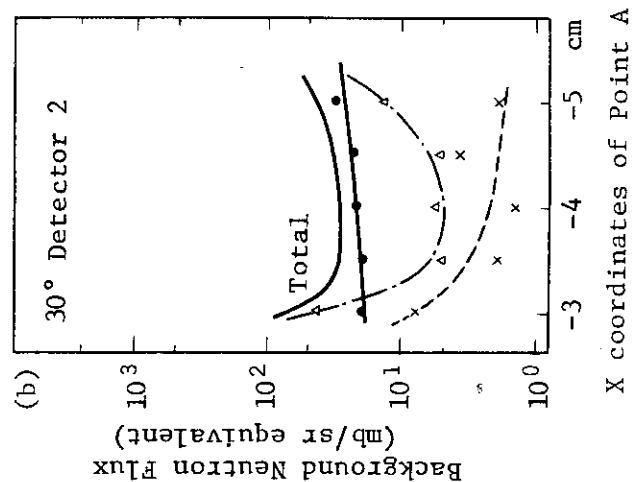


Fig. 13 Variation of total background neutron flux which is dependent on the geometry of shadow bar.

Fig. 14 Contributions to the background flux. The flux represented by 1 mb/sr on the ordinate corresponds to  $1.26 \times 10^{-2}$  n/cm<sup>2</sup>.sec. See text 6.2.2.

- x- Shadow bar scattering
- A- Collimator scattering
- Air scattering

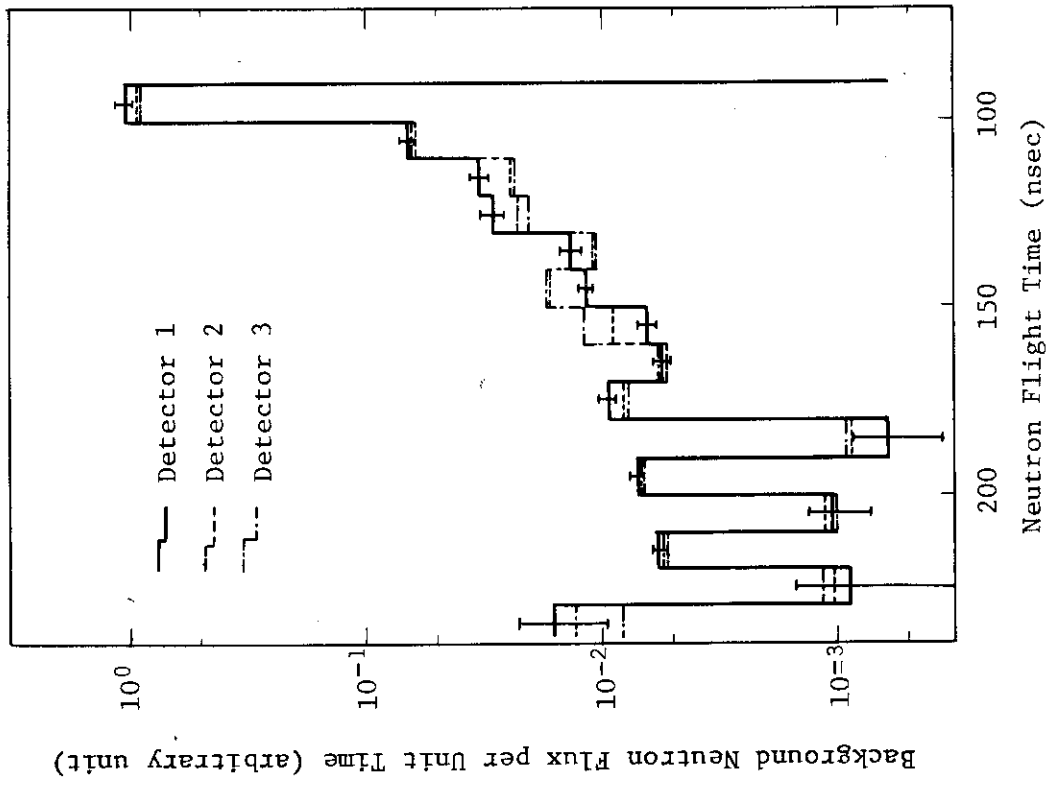


Fig. 16 T-O-F spectra of background neutrons transmitted through the shadow bar and scattered by the shadow bar and the collimator.

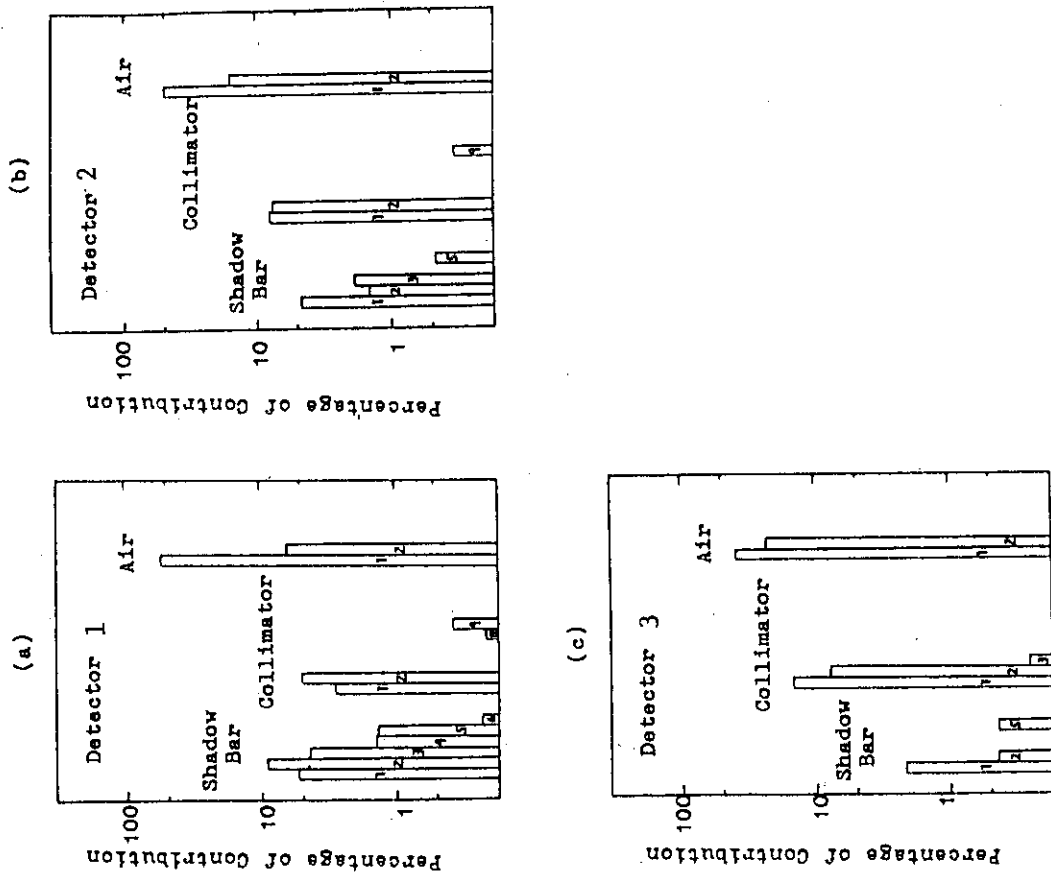


Fig.15 Percentage of region contributions to the total background neutron flux.

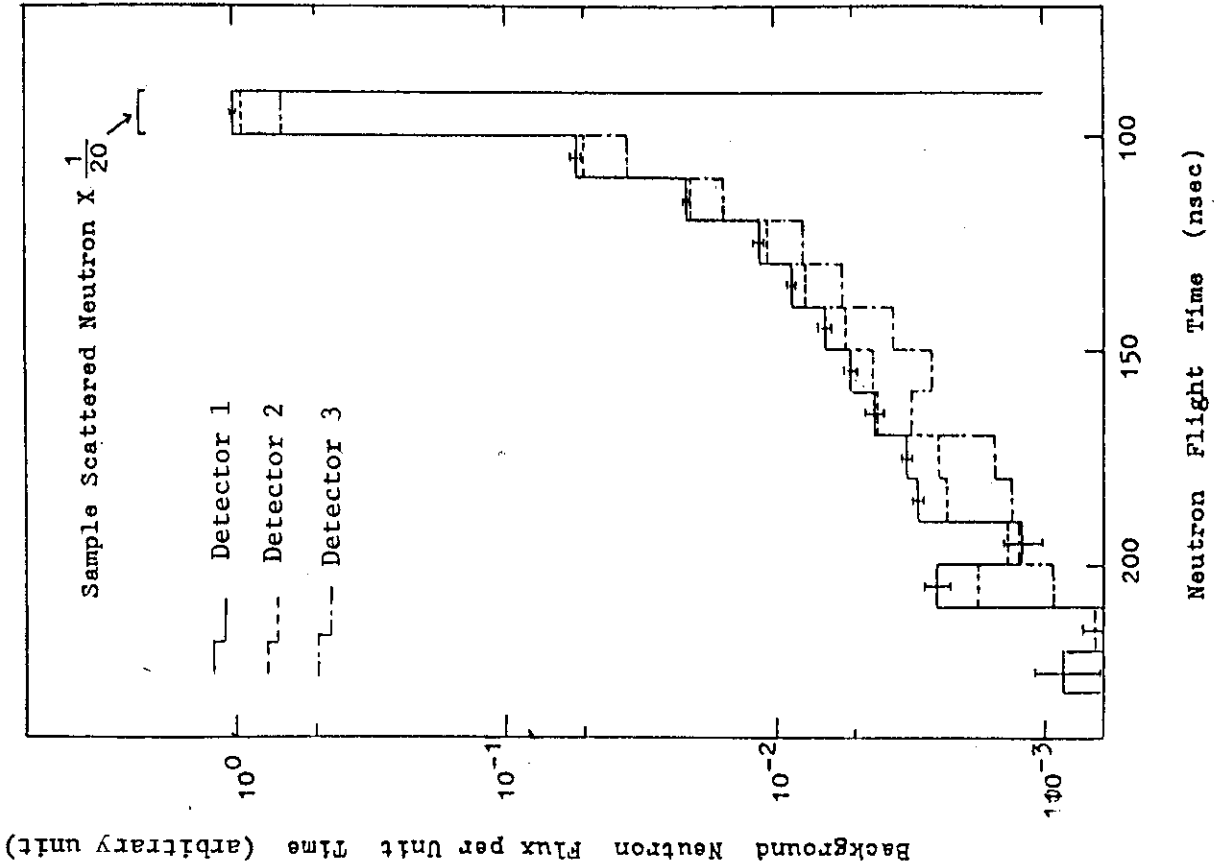


Fig. 18 T-O-F spectra of background neutrons due to sample-scattered neutrons

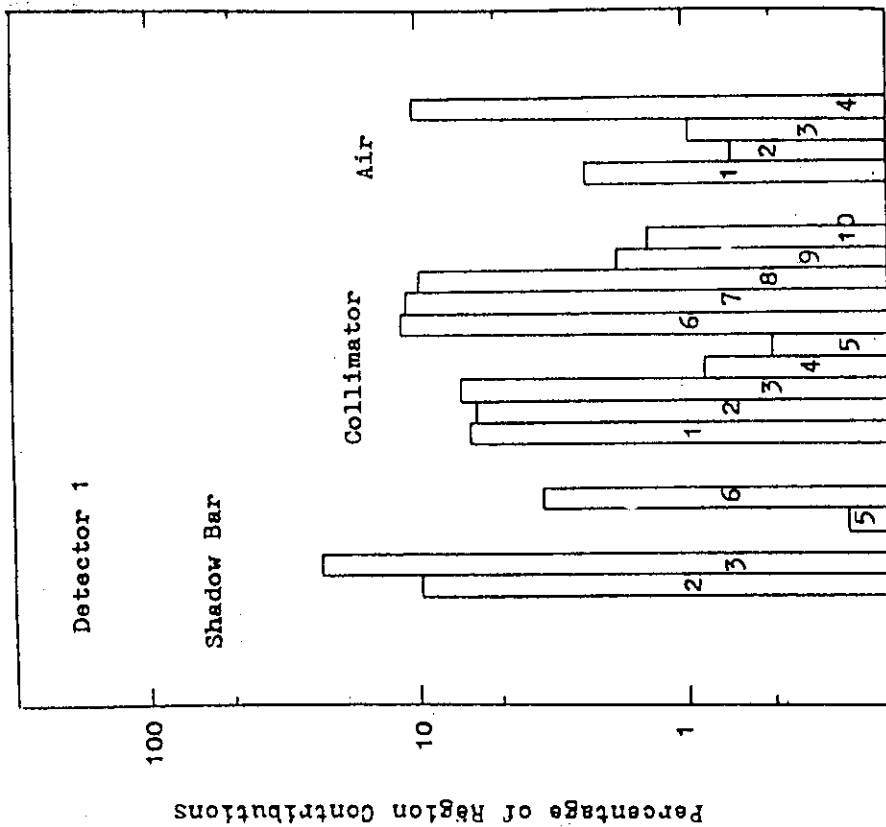


Fig. 17 Percentage of region contributions to the total background neutron flux due to sample-scattered neutrons. Numbers show the region numbers in Fig. 12.

## 6. 検出器遮蔽系の体系形状の決定

### 6.1 最終的な体系の形状

これまでの解析によって得られたさまざまな情報を基に、最終的な検出器遮蔽系の形状の決定を行った。図19にその概略図を示す。従来の高速中性子散乱実験に用いられている一般的な遮蔽系と比較し、大砲の砲身の様な細長く、しかもかなりサンプル近くまで突き出したコリメーターを持っていること、および床からの散乱中性子を遮蔽する目的で前部遮蔽体を置いていることが特徴としてあげられる。またシャドーバーは散乱角度によって4種類の異なる形状のものを用い、位置の微調整が可能なものとなっている。

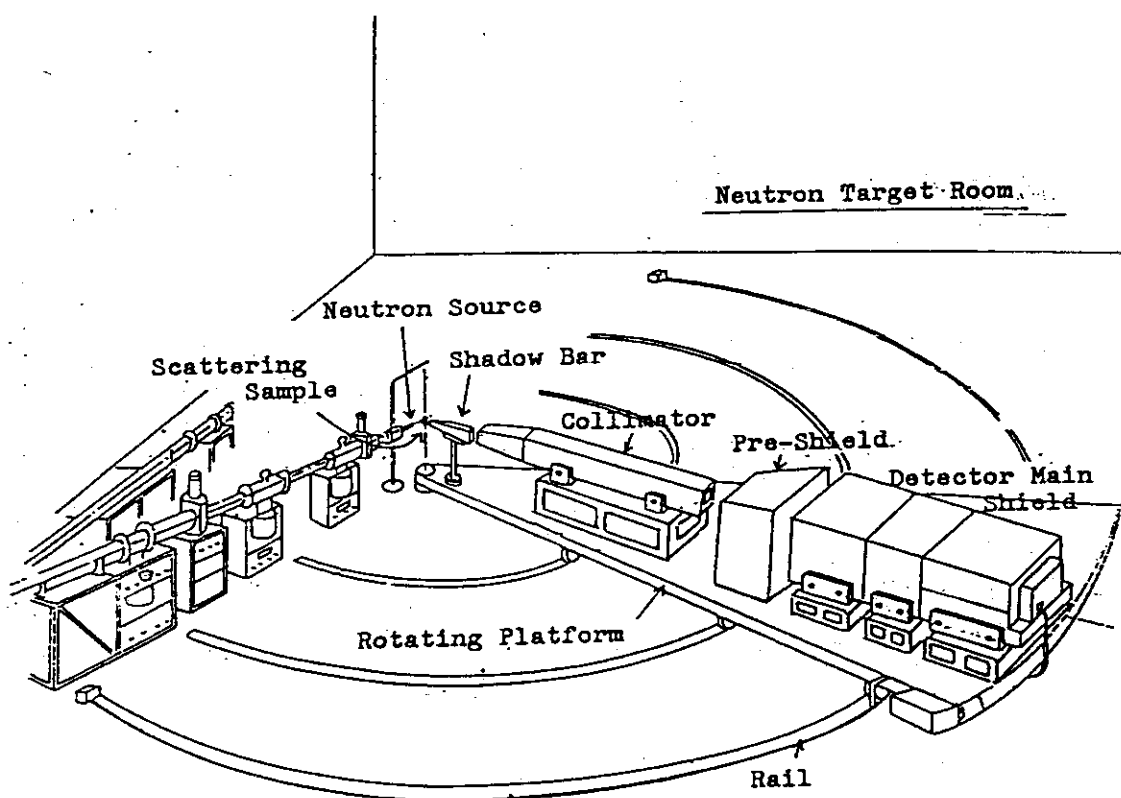


Fig.19 General view of the T-0-F facility

これらから構成される検出器遮蔽系は、機能的にも大きく4つに分けられる。すなわち、シャドーバーは中性子源からの direct neutron を減衰させる機能、コリメーターは中性子源中性子の空気散乱に起因するバックグラウンドを減少させる機能、前部遮蔽体は中性子源から床に入射するものを、また床で散乱された中性子を減衰させる機能、そして検出器主遮蔽体はバルクシールドの機能を持つ。

## 6.2 最終体系におけるバックグラウンド中性子スペクトルの計算

## 6.2.1 計算に用いた中性子源

これまでの計算においては、中性子源は 35 ~ 40 MeV の単色かつ等方分布を持つものとして計算を行ってきた。しかしながら、実際の中性子散乱実験においては中性子源として  $D(d, n)$  反応や  ${}^7\text{Li}(p, n)$  反応を用いることが予定されており、これらの反応によって発生する中性子は非等方的角度分布をもち、核反応運動学的に中性子エネルギーの角度依存性をもつ。ここでの計算においては中性子源として  $D(d, n)$  反応を想定し、入射重陽子エネルギーが 40 MeV の場合における線源条件を次の様に定めた。

## ① 中性子エネルギーの角度依存性について

これは核反応運動学的に決定される。入射重陽子エネルギーが 40 MeV の場合に放出される中性子のエネルギー角度依存性は図 20 の実線のようになる。これに対し、計算における線源のエネルギー分布はヒストグラムで示した分布を持つものとした。

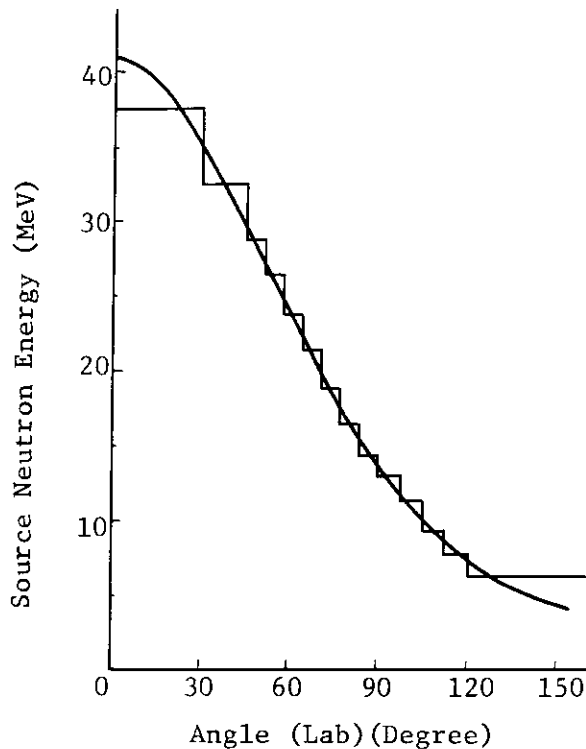


Fig. 20 Angular dependence of neutron energies generated from the  $D(d, n){}^3\text{He}$  reaction.  
( $E_d = 40 \text{ MeV}$ )

## ② 中性子強度の角度分布について

入射重陽子エネルギーが 15 MeV を越えると、角度分布についてのデータはなくなる。図 21 に入射重陽子エネルギーが 10 MeV および 13.8 MeV の場合の  $D(d, n)$  反応の断面積の角度分布を示す。<sup>10, 11)</sup> エネルギーが高くなるにつれて前方ピークが大きくなり、後方角度での断面積は減少する傾向をもつことから、ここでの線源の角度分布は、図 21 におけるヒストグラム

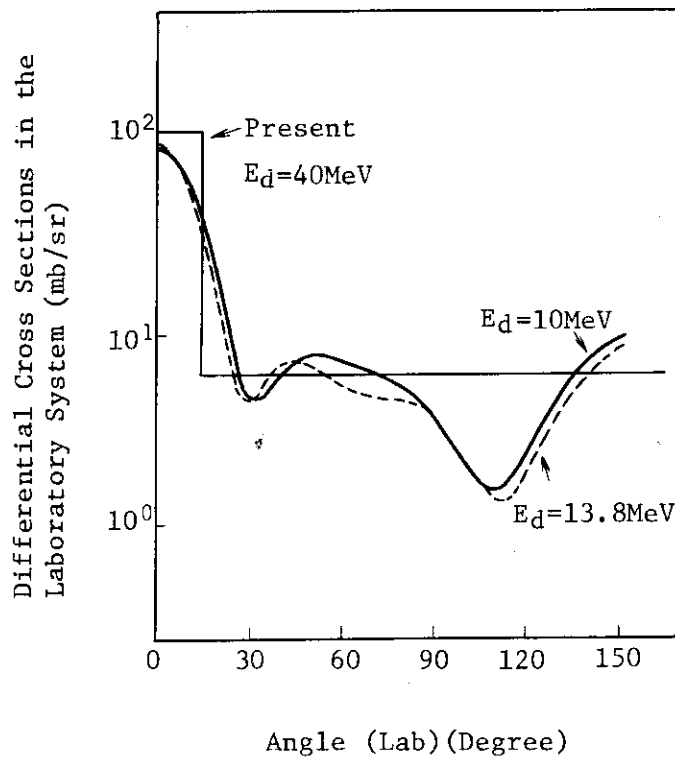


Fig. 21 Angular distribution for the  $D(d,n)^3He$  reaction. The histogram in the figure is employed in the present calculations.

のような分布をもつものとした。 $^7Li(p,n)$  反応についても、同様にエネルギーの高いところでは角度分布についてのデータはないが、 $D(d,n)$  反応と比べて著しい違いはないものと思われる。

#### 6.2.2 バックグラウンドを考えるについての基準値

発生したバックグラウンドを定量的に評価するにあたっての基準値として、実際の高速中性子散乱断面積の測定において予想される散乱中性子の収率を取った。サンプルによって散乱された中性子の収率  $S$  ( $n/cm^2 \cdot sec$ ) は次の式で表わされる。

$$S = I \Omega [1 - \exp(-N\sigma_T)] \cdot [\sigma_S(\theta) / \sigma_T] / r^2$$

ここで  $I$  = 中性子源強度 ( $n/sec \cdot sr$ )

$\Omega$  = サンプルが中性子源に対してはる立体角 ( $sr$ )

$N$  = サンプル中の原子数 ( $\times 10^{24}$  nuclei /  $cm^2$ )

$\sigma_T$  = サンプル核種の中性子全断面積 (barns)

$\sigma_S(\theta) / \sigma_T$  = サンプル中での衝突を起こした中性子が  $\theta$  方向の単位立体角中に散乱される割合

$r$  = サンプルと検出器の距離 (cm)

いまサンプルに炭素を用いる場合を考え、中性子源強度を  $I = 1.0 \times 10^9$  (n/sec·sr), サンプルの大きさを  $2.5 \text{ cm } \phi \times 4 \text{ cm}$ , 中性子源とサンプルの距離を  $13.5 \text{ cm}$ , サンプルと検出器の距離を  $800 \text{ cm}$ , サンプルの原子密度を  $8.0 \times 10^{22} \text{ n/cm}^3$ , 中性子全断面積を  $1.0 \text{ barn}$  とし  $1 \text{ mb/sr}$  の微分断面積をもつ反応によって放出される中性子の測定を行ったとすると、この時に測定の対象となる中性子の収率  $S$  は

$$S = 1.26 \times 10^{-2} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$$

となる。次に示す計算結果においては、この値を基準値として取ることにした。

### 6.2.3 計算結果

図 22～24 に検出器設置角度  $30^\circ$  の場合に、それぞれ使用されるシャドーバーの形状および配置, source neutron によるバックグラウンド中性子のタイムスペクトル, sample scattered neutron によるバックグラウンド中性子のタイムスペクトルを示す。計算上の検出器位置は 3 点を取り、それぞれの座標は D 1 (20.0, 0.0, 800.0), D 2 (0.0, 0.0, 800.0), D 3 (-20.0, 0.0, 800.0) である。図 23 の縦軸は、6.2.2 で定めた量の中性子が  $10 \text{ n sec}$  の時間中で検出されるときの値に対する相対値である。図 24 の縦軸はフォアグラウンド中性子の 1% の量に対する相対値である。ここで sample scattered neutron の線源のエネルギーとしては、炭素の弾性散乱によって検出器方向に散乱される中性子をもつエネルギーを取った。

検出器設置角度  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ , および  $120^\circ$  における同様の図を図 25～33 に示す。また図 34 は各々の角度における source neutron による全バックグラウンド中性子数およびこのうち空気散乱によるもの、コリメーターとシャドーバー散乱によるものを示したものである。横軸は検出器の設置角度を表わし、縦軸のバックグラウンド中性子数は、 $1 \text{ mb/sr}$  の断面積をもつ反応からのフォアグラウンド中性子数に対する相対値である。

最終的なバックグラウンド中性子数は、これらの source neutron によるものと、sample scattered neutron によるものとが加わったものになる。今  $40 \text{ MeV}$  中性子に対する炭素の微分散乱断面積を  $30^\circ$  で  $300 \text{ mb/sr}$ ,  $60^\circ$  で  $50 \text{ mb/sr}$ ,  $90^\circ$  で  $10 \text{ mb/sr}$ ,  $120^\circ$  で  $5 \text{ mb/sr}$  と仮定し、最終的なバックグラウンド中性子のタイムスペクトルを求めてみる。ただし sample scattered neutron としては、弾性散乱によってサンプルから放出される中性子によって生ずるバックグラウンドのみを考えた。他の反応の断面積は弾性散乱に比較してかなり小さいことが予想され、従って大きな影響はないものと思われる。その他の測定条件は 6.2.2 節で述べたものと同じにとることとする。

それぞれの検出器設置角度の場合におけるバックグラウンド中性子のタイムスペクトルおよび弾性散乱からのフォアグラウンドを図 35～38 に示す。バックグラウンド中性子のうち破線で表わされた部分は source neutron によるものであり、バックグラウンド測定を行うことによって除去可能な成分である。また表 1 にはこれらのバックグラウンドの時間についての積分値、およびそれぞれの体系領域からの寄与、これらのフォアグラウンドに対する割合を示す。

全バックグラウンドは、測定対象となるサンプルからの弾性散乱による中性子の収率に比べて十分に小さい。また図 35～38 には  $^{12}\text{C}$  の第 1 励起状態に対する非弾性散乱による中性子が検



出される位置も示した。この非弾性散乱中性子が検出される時間位置でのバックグラウンドレベルは  $30^\circ$  で  $1.2 \text{ mb/sr}$  の断面積相当、 $60^\circ$  では  $0.5 \text{ mb/sr}$  相当、 $90^\circ$  以上では  $0.1 \text{ mb/sr}$  相当以下となり、十分に低い値といえる。またこの非弾性散乱による sample scattered によって生ずるバックグラウンドも、この図においては無視できるほど小さな値となることが予想される。(非弾性散乱中性子ピークの3%以下)。さらに低いエネルギーの中中性子が検出される時間領域では、これらのバックグラウンドレベルは一層低くなる。

ここで示した計算値は  $10 \text{ nsec}$  の時間巾おきのタイムスペクトルの計算値である。このことから、基準値として取ったフォアグラウンド中性子も、弾性散乱によるピークおよび非弾性散乱によるピークともに  $10 \text{ nsec}$  の時間分解能を持って検出されるものとして上記の議論を行って来た。しかし、実際の実験においては時間分解能はこれよりもはるかに良く、フォアグラウンドのピークは数  $\text{n sec}$  の巾を持つものと予想される。このことは、フォアグラウンド成分のうちピークを持って現われるものはより鋭いピークを示すことになり、従ってこのピークとバックグラウンドレベルとの差は、ここで示したものよりも大きくなることが予想される。逆に連続スペクトルとして検出される中性子においてはフォアグラウンド成分とバックグラウンドレベルとの差はより小さくなる。しかしながら連続スペクトルを示すような反応からの中性子はエネルギーが低く、飛行時間の大きな領域に現われる。この時間領域ではバックグラウンドレベルは  $0.01 \text{ mb/sr} \sim 0.1 \text{ mb/sr}$  相当 ( $10 \text{ n sec}$  巾で) とかなり低くなっており、従ってこのような中性子に対しても  $S/N$  比の良い測定が可能であるといえる。

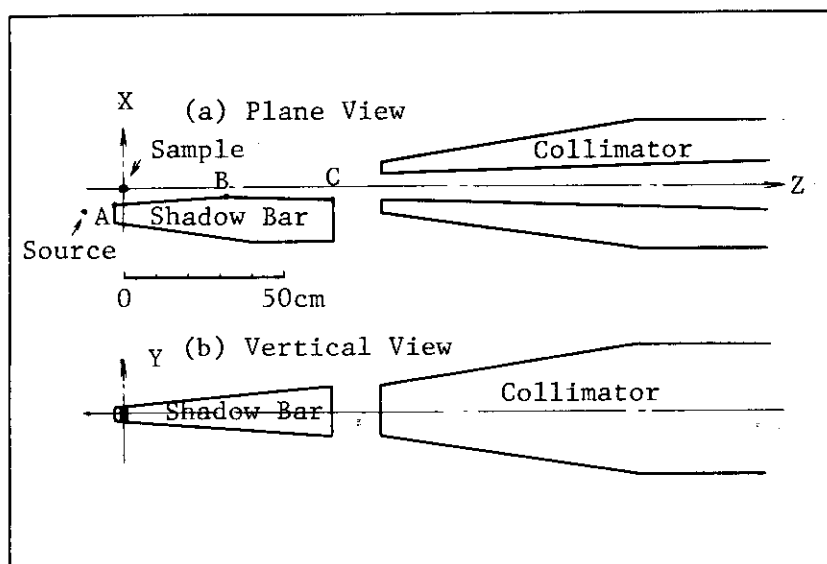


Fig. 22 Geometrical arrangement for 30 degree scattering. The coordinates for the points A, B and C are as follows: A(-4.5, ±2.0, -3.0), B(-2.6, ±4.7, 30.0), C(-3.6, ±7.5, 65.0).

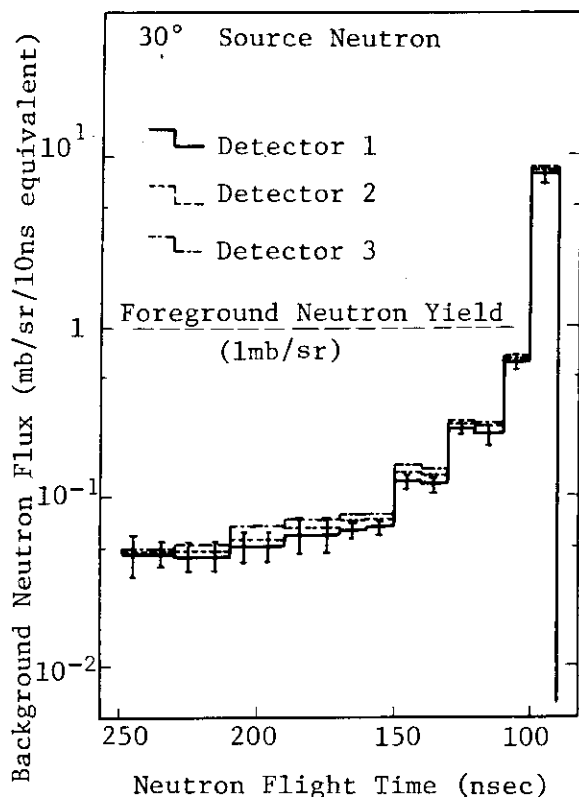


Fig. 23 T-O-F spectra of background neutrons due to source neutrons.

The flux represented by 1mb/sr on the ordinate corresponds to  $1.26 \times 10^{-2}$  n/cm<sup>2</sup> sec. See text 6.2.2.

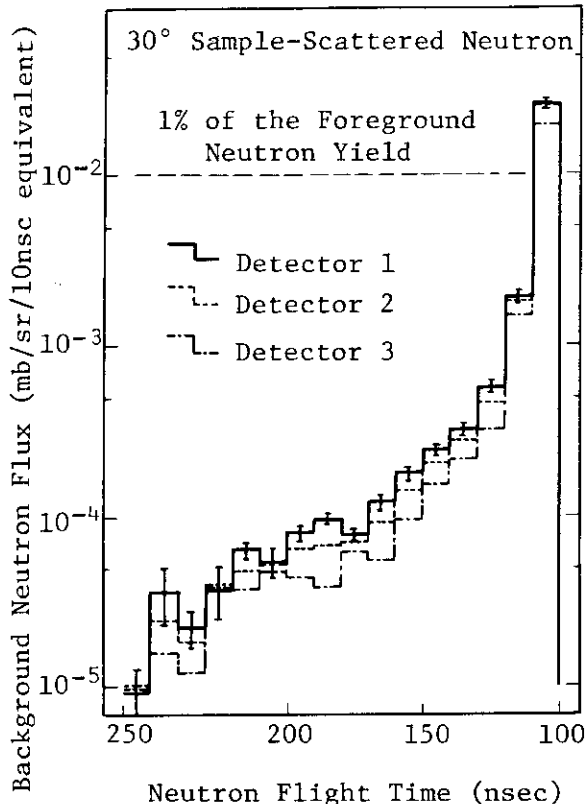


Fig. 24 T-O-F spectra of background neutrons due to sample-scattered neutrons.

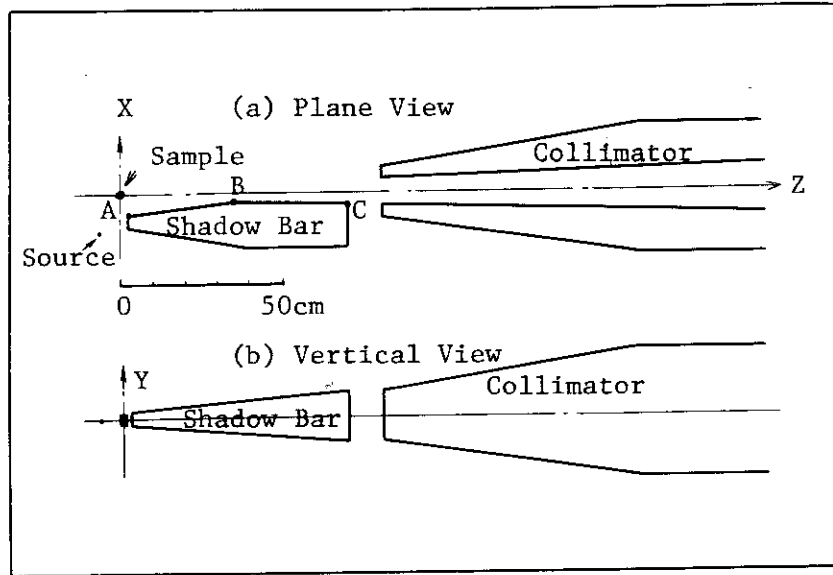


Fig. 25 Geometrical arrangement for 60° scattering  
 The coordinates for the points A,B and C are as follows:  
 $A(-6.5, \pm 2.0, 2.0), B(-2.9, \pm 5.1, 40.0), C(-3.8, \pm 7.5, 70.0)$ .

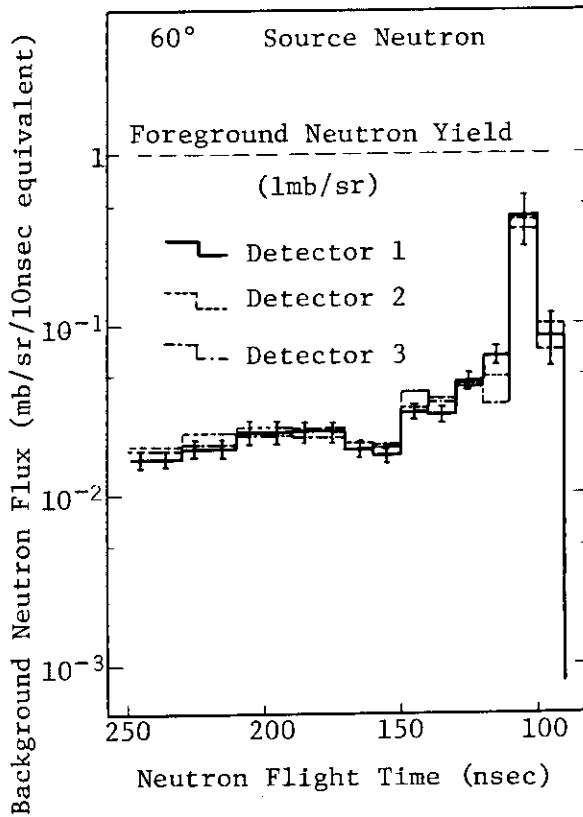


Fig. 26 T-O-F spectra of background neutrons due to source neutrons.

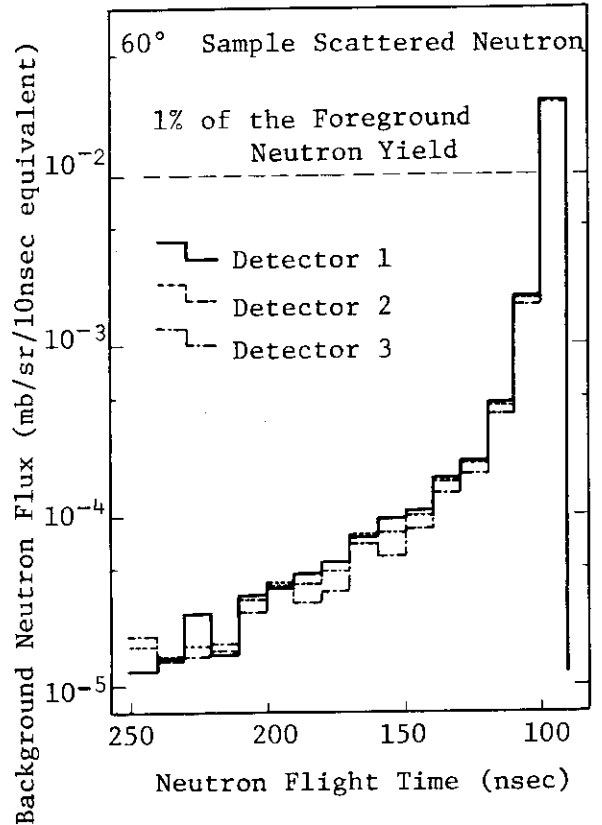


Fig. 27 T-O-F spectra of background neutrons due to sample-scattered neutrons.

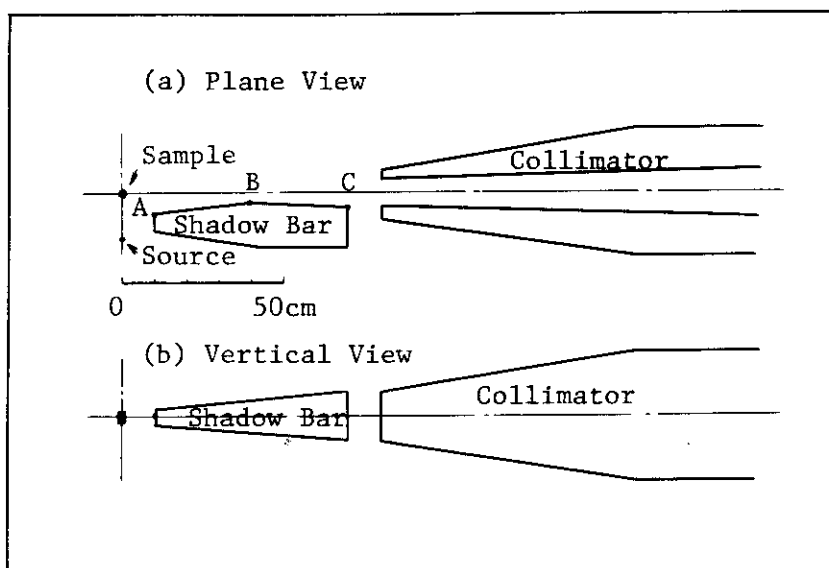


Fig. 28 Geometrical arrangement for 90° scattering  
 The coordinates for the points A,B and C are as follows:  
 $A(-6.0, \pm 2.65, 10.0), B(-2.9, \pm 5.1, 40.0), C(-3.8, \pm 7.5, 70.0)$ .

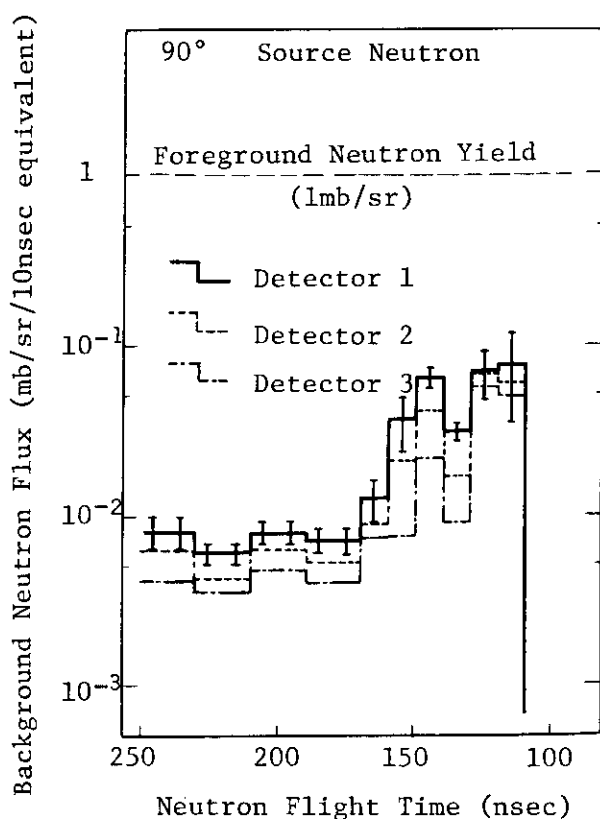


Fig. 29 T-O-F spectra of background neutrons due to source neutrons

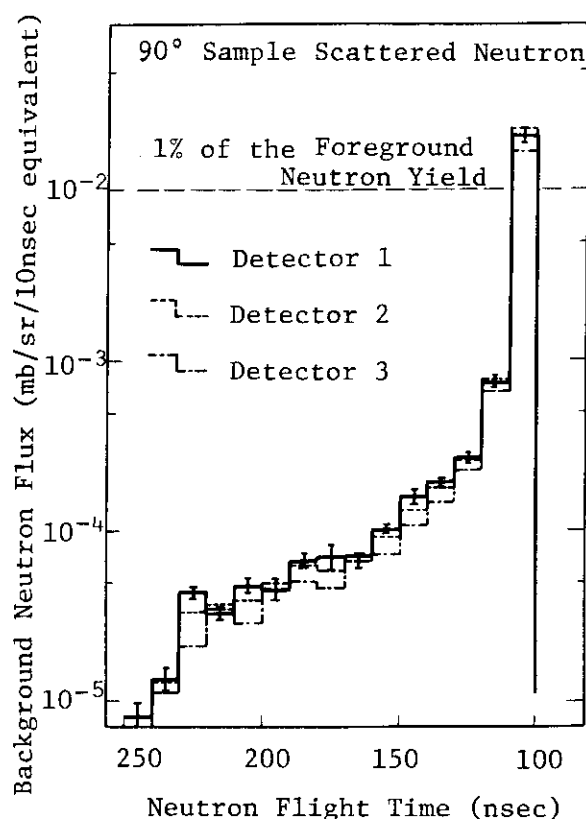


Fig. 30 T-O-F spectra of background neutrons due to sample-scattered neutrons

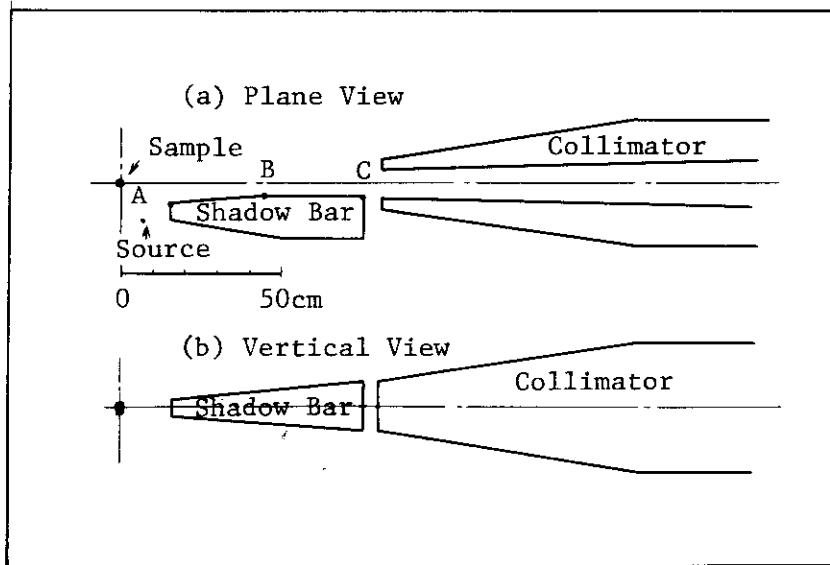


Fig. 31 Geometrical arrangement for 120° scattering  
 The coordinates for the points A,B and C are as follows:  
 A(-6.2, ±2.65, 15.0), B(-3.1, ±5.1, 45.0), C(-3.9, ±7.5, 75.0)

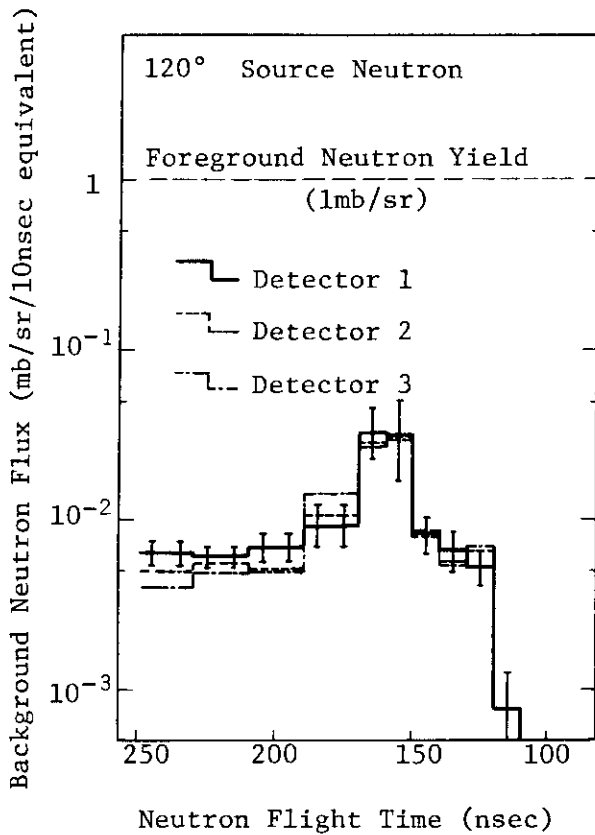


Fig. 32 T-O-F spectra of background neutrons due to source neutrons

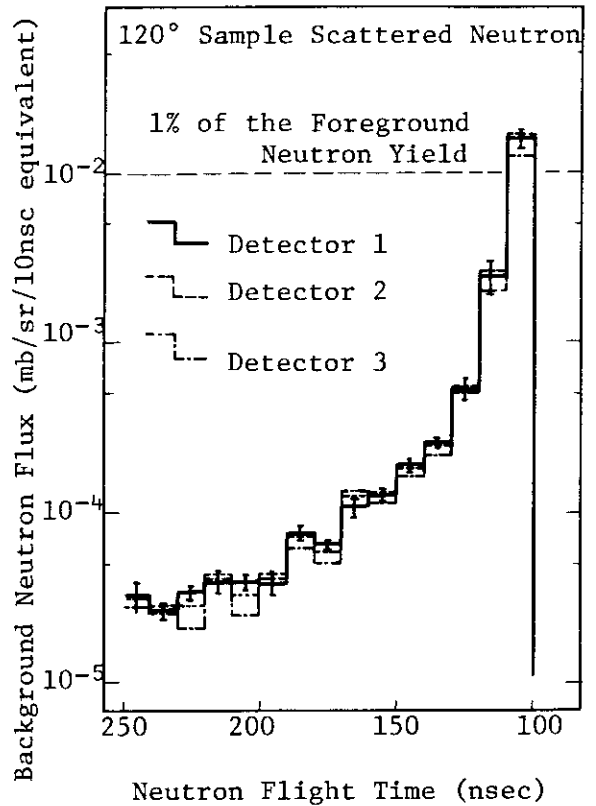


Fig. 33 T-O-F spectra of background neutrons due to sample-scattered neutrons

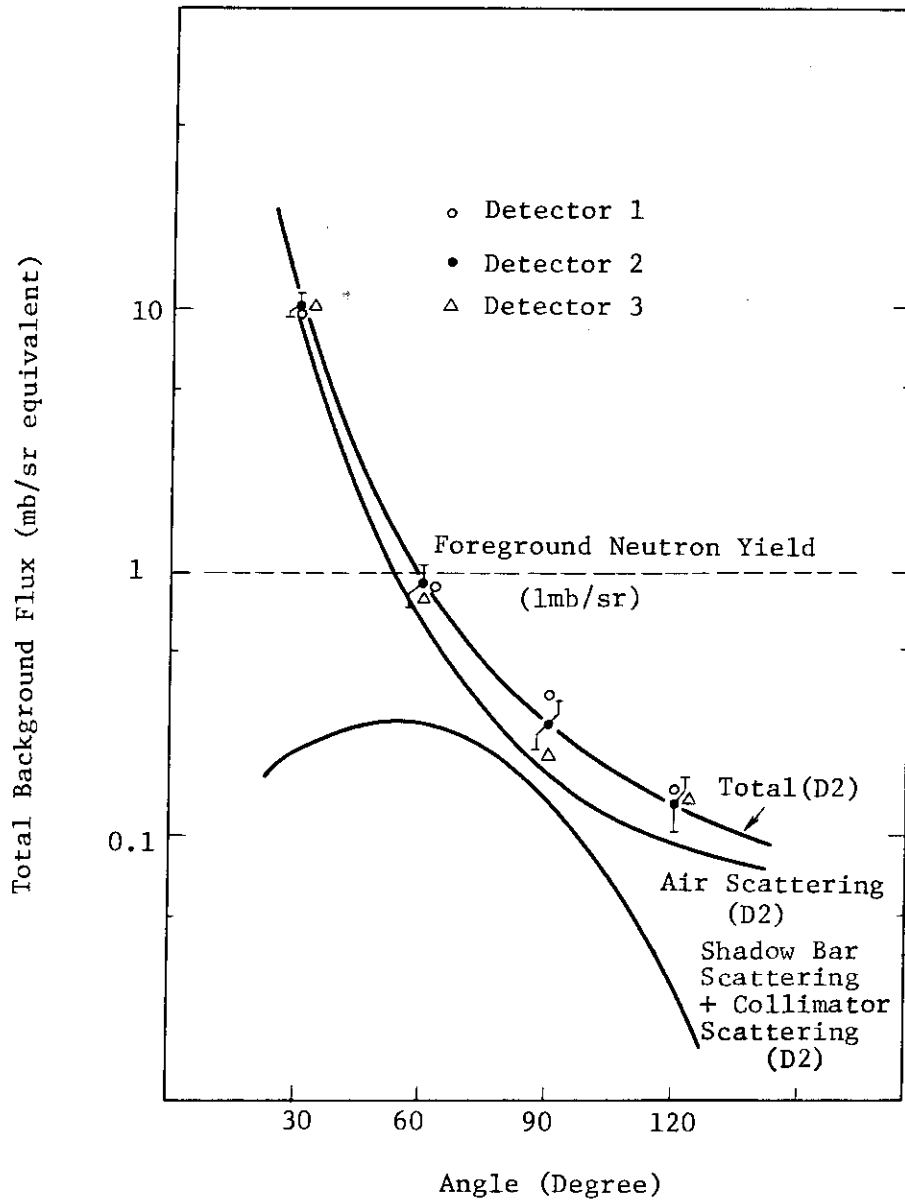


Fig. 34 Total background neutron flux induced by source neutrons.

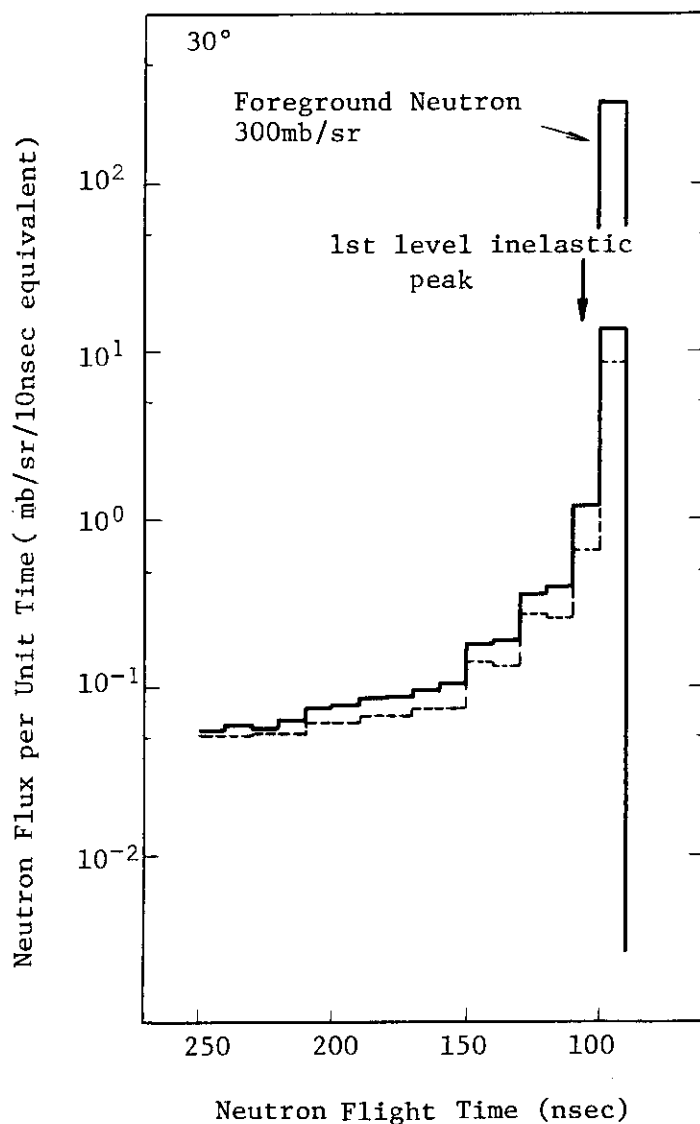


Fig. 35 T-O-F spectra of total background neutrons represented by cross section equivalent (solid line). The flux represented by 1 mb/sr corresponds to  $1.26 \times 10^{-2} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ . See text 6.2.2. The dashed line shows the background component originating from source neutrons. The arrow indicates the position of detection of inelastic neutrons from the 1st excited state of  $^{12}\text{C}$ .

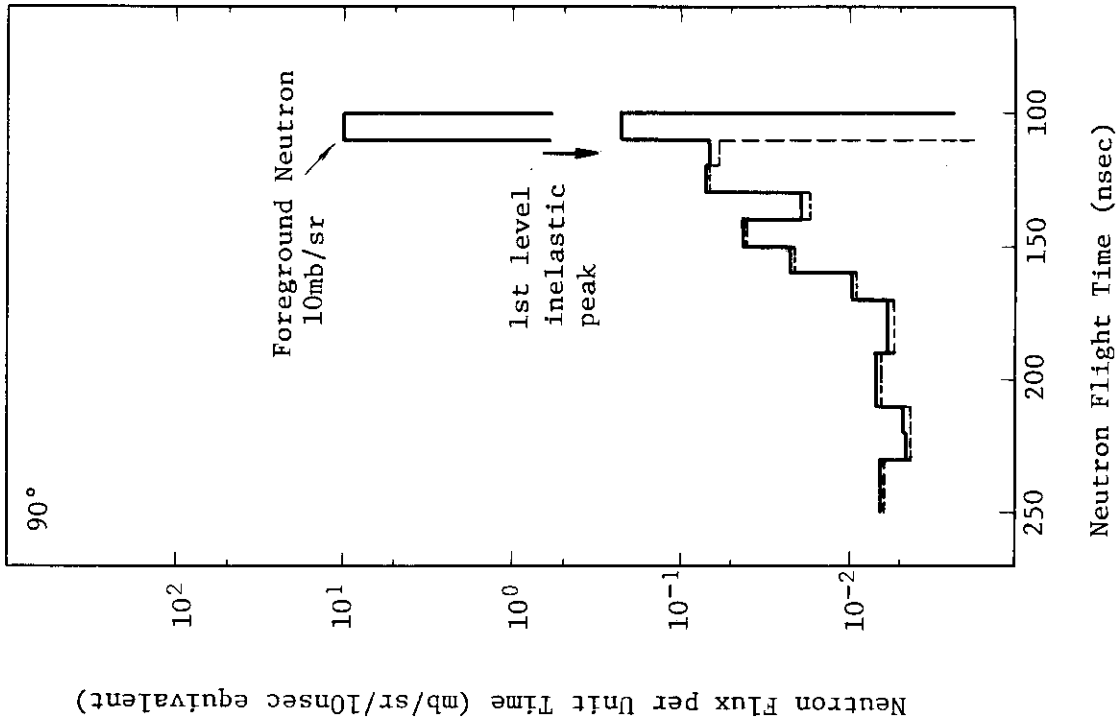


Fig. 37 T-O-F spectra of total background neutrons at 90 degree.

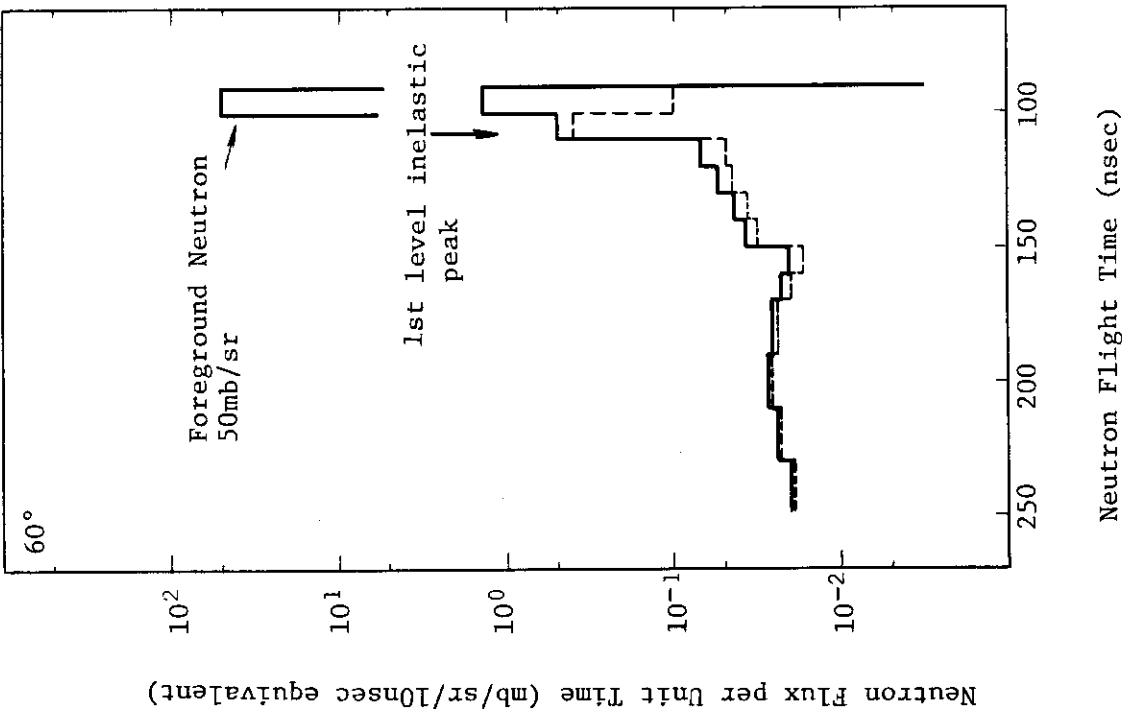


Fig. 36 T-O-F spectra of total background neutrons at 60 degree.



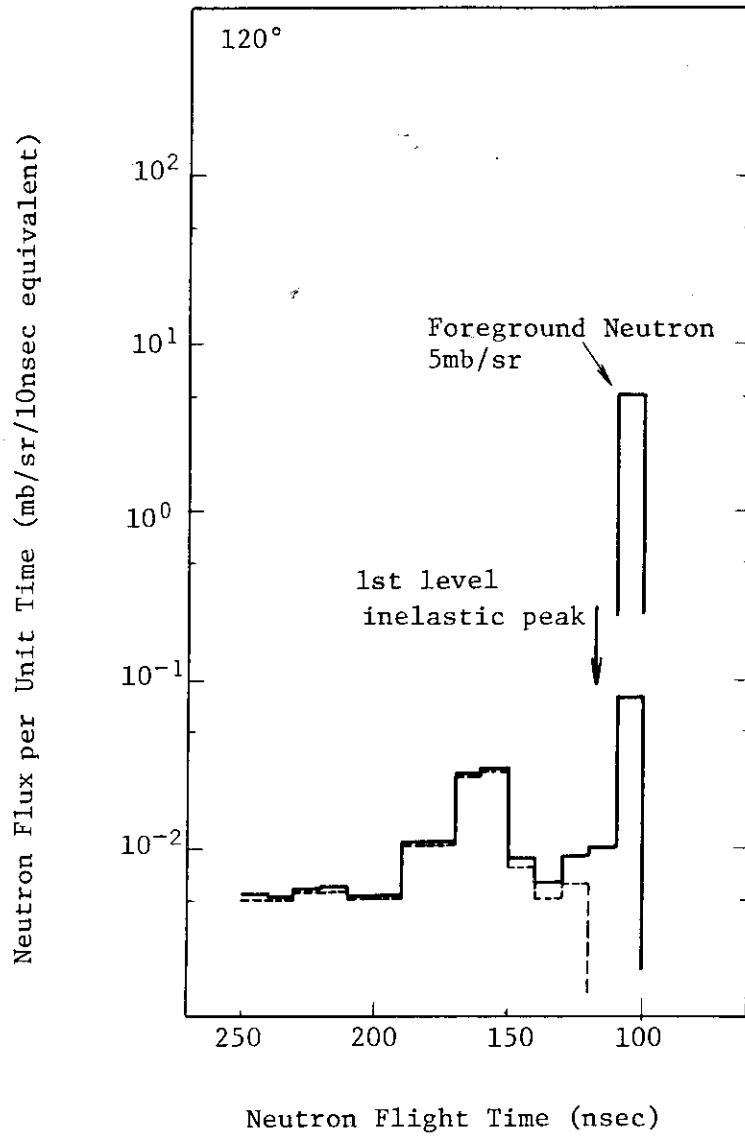


Fig. 38 T-O-F spectra of total background neutrons at 120 degree.

Table 1

Angle	Foreground Neutron Yield (mb/sr eq.)	Background Source	Detector No.	Background Neutron Yield (mb/sr eq.)				Background Foreground (%)
				Air	Shadow Bar	Collimator	Total	
30°	300	Source Neutron	1	9.0	0.3	0.4	9.7	3.2
			2	9.6	0.1	0.9	10.6	3.5
			3	9.4	0.0	1.2	10.6	3.5
		Sample Scattered Neutron	1	0.9	4.0	3.9	8.8	2.9
			2	1.5	2.5	4.5	8.5	2.8
			3	1.4	0.7	4.3	6.4	2.1
		Total	1	9.9	4.3	4.3	18.5	6.2
			2	11.1	2.6	5.4	19.1	6.4
			3	10.8	0.8	5.5	17.0	5.7
60°	50	Source Neutron	1	0.61	0.07	0.22	0.90	1.8
			2	0.65	0.03	0.24	0.92	1.8
			3	0.58	0.01	0.22	0.81	1.6
		Sample Scattered Neutron	1	0.52	0.31	0.67	1.49	3.0
			2	0.52	0.19	0.75	1.46	2.9
			3	0.23	0.06	0.73	1.02	2.0
		Total	1	1.13	0.38	0.89	2.39	4.8
			2	1.17	0.22	0.99	2.38	4.8
			3	0.81	0.07	0.95	1.83	3.7
90°	10	Source Neutron	1	0.17	0.14	0.05	0.36	3.6
			2	0.15	0.06	0.06	0.27	2.7
			3	0.11	0.01	0.07	0.19	1.9
		Sample Scattered Neutron	1	0.06	0.05	0.11	0.22	2.2
			2	0.09	0.03	0.12	0.24	2.4
			3	0.05	0.01	0.12	0.18	1.8
		Total	1	0.23	0.19	0.16	0.58	5.8
			2	0.24	0.09	0.18	0.51	5.1
			3	0.16	0.02	0.19	0.37	3.7
120°	5	Source Neutron	1	0.12	0.02	0.01	0.15	3.0
			2	0.12	0.01	0.01	0.14	2.8
			3	0.12	0.00	0.02	0.14	2.8
		Sample Scattered Neutron	1	0.03	0.02	0.05	0.10	2.0
			2	0.03	0.01	0.06	0.10	2.0
			3	0.02	0.01	0.05	0.08	1.6
		Total	1	0.15	0.04	0.06	0.25	5.0
			2	0.15	0.02	0.07	0.24	4.8
			3	0.14	0.01	0.07	0.22	4.4

## 7. 結 論

原研タンDEM加速器高速中性子散乱実験装置の整備にあたって、検出器遮蔽系のうち最も重要な部分であるシャドーバーおよびコリメーターの設計を目的として3次元モンテカルロ法によるバックグラウンド解析を行った。従来40 MeVというかなり高いエネルギーの中性子の散乱実験が行われた例は極めて少なく、検出器遮蔽系の設計においても、これまで測定が行われている15 MeV以下の中性子の場合と比べてかなり遮蔽のための条件は厳しくなることが予想され、従って詳細なバックグラウンド解析を行うことが必要とされた。ここでは複雑な体系の各部分によるシールド効果、検出器への散乱の影響を forward flux, adjoint flux, および contribution flux を用いて計算し、検出器遮蔽系について最適の形状を決定した。この体系で考慮すべき主な中性子バックグラウンドは空気散乱, source neutron のシャドーバー透過, シャドーバーによる散乱, およびコリメーターによる散乱である。これらの内で、図15からわかるように、最適形状のもとでは、空気散乱の影響が一番大きい割合を占めることがわかる。サンプルサイズ  $2.5 \text{ cm } \phi \times 4 \text{ cm}$  の炭素による高速中性子散乱実験を考えた場合、遮蔽の難しい前方角度  $30^\circ$  を例にとりて考えると、弾性散乱ピークが現われる位置におけるバックグラウンドレベルは  $14 \text{ mb/sr}$  の散乱断面積に相当する量になる。しかしながら、実際の散乱断面積がこの角度で数  $10 \text{ mb/sr}$  に達することを考慮すると、高速中性子散乱実験装置として十分に使用に耐えることが期待できる。40 MeVという高いエネルギーにおいて今回はじめて行われた解析で得られた種々の情報は他の実験施設においても役立つものであり、又ここで用いたモンテカルロ法による遮蔽解析の手法は高速中性子実験装置のような他の複雑な体系の遮蔽を考える上で広く応用できる有力な方法と言えるであろう。

## 謝 辞

日本原子力研究所物理部長 原田吉之助氏には、研究の遂行に関して格別にお世話になったので、ここに感謝の意を表します。

## 7. 結 論

原研タンデム加速器高速中性子散乱実験装置の整備にあたって、検出器遮蔽系のうち最も重要な部分であるシャドーバーおよびコリメーターの設計を目的として3次元モンテカルロ法によるバックグラウンド解析を行った。従来40 MeVというかなり高いエネルギーの中性子の散乱実験が行われた例は極めて少なく、検出器遮蔽系の設計においても、これまで測定が行われている15 MeV以下の中性子の場合と比べてかなり遮蔽のための条件は厳しくなることが予想され、従って詳細なバックグラウンド解析を行うことが必要とされた。ここでは複雑な体系の各部分によるシールド効果、検出器への散乱の影響を forward flux, adjoint flux, および contribution flux を用いて計算し、検出器遮蔽系について最適の形状を決定した。この体系で考慮すべき主な中性子バックグラウンドは空気散乱, source neutron のシャドーバー透過, シャドーバーによる散乱, およびコリメーターによる散乱である。これらの内で、図15からわかるように、最適形状のもとでは、空気散乱の影響が一番大きい割合を占めることがわかる。サンプルサイズ  $2.5\text{ cm } \phi \times 4\text{ cm}$  の炭素による高速中性子散乱実験を考えた場合、遮蔽の難しい前方角度  $30^\circ$  を例にとりて考えると、弾性散乱ピークが現われる位置におけるバックグラウンドレベルは  $14\text{ mb/sr}$  の散乱断面積に相当する量になる。しかしながら、実際の散乱断面積がこの角度で数  $10\text{ mb/sr}$  に達することを考慮すると、高速中性子散乱実験装置として十分に使用に耐えることが期待できる。40 MeV という高いエネルギーにおいて今回はじめて行われた解析で得られた種々の情報は他の実験施設においても役立つものであり、又ここで用いたモンテカルロ法による遮蔽解析の手法は高速中性子実験装置のような他の複雑な体系の遮蔽を考える上で広く応用できる有力な方法と言えるであろう。

## 謝 辞

日本原子力研究所物理部長 原田吉之助氏には、研究の遂行に関して格別にお世話になったので、ここに感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) BNL-NCS-50681, Symposium on Neutron Cross Sections from 10 to 40 MeV, Brookhaven National Laboratory (1977)
- 2) BNL-NCS-51245, Symposium on Neutron Cross Sections from 10 to 50 MeV, Brookhaven National Laboratory (1980)
- 3) Glasgow, D.W., Velkley, D.E., Brandenberger, J.D., McEllistrem, M.T., Henncke, H.J. and Breitenberger, D.V.: Nucl. Instrum. Method 114, 521 (1974)
- 4) Schlegel-Bickmann, D., Dietze, G. and Schölermann, H.: Nucl. Instrum. Method 169, 517 (1980)
- 5) Takahashi, H., Yamanouti, Y., and Sugiyama, K.,: JAERI-M 9614 "Estimation of Neutron Backgrounds at Neutron Target Room in JAERI 20MV Tandem Accelerator Facility" (1981) (in Japanese)
- 6) Williams, M.L., and Engle, Jr., W.W.: Nucl. Sci. Eng. 62, 92 (1977)
- 7) Takahashi, H.: Doctor Thesis, Tohoku University, Sendai, Japan (1982)
- 8) Emmett, M.B.: ORNL-4972 (1975)
- 9) Alsmiller, R.G., and Barish, J.: Nucl. Sci. Eng. 69, 378 (1979)
- 10) Liskien, H. and Paulsen, A. Nuclear Data 11, 569 (1973)
- 11) Brolley, J.E. and Fowler, J.L., "Fast Neutron Physics," Interscience Publishers, New York, p.731 (1960)