

JAERI - M
88-241

FNS 高速水冷ターゲットのD-T中性子源特性の実験

1988年12月

池田裕二郎・大山 幸夫・深堀 智生
前川 洋・中村 知夫

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 Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 榎高野高速印刷

FNS 高速水冷ターゲットのD-T中性子源特性の実験

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

池田裕二郎・大山 幸夫・深堀 智生⁺

前川 洋・中村 知夫

(1988年11月7日受理)

D-T中性子源は核融合ニュートロニクス実験の基礎でありその特性を明らかにすることは実験及び解析精度を高めるために重要である。核融合ブランケット積分実験のためにFNS加速器の80°ビームライン端に設置した高速水冷ターゲットアセンブリーは、強い入射重陽子電流による高い生成熱を除去するために複雑かつ密な構造材により構成されている。従ってターゲットから放出される中性子スペクトル及び角度分布は、ターゲット構造によって影響されていることが予想される。このために、一連の積分実験に先立ち中性子源特性の実験を行った。放出中性子の角度分布を水平、垂直及び軸に垂直な面上で放射化法より、また水平面上の角度分布を2重回転台を用いたNE213検出器によって測定した。更に、ターゲットを中心とした角度依存中性子スペクトルをTOF法により求めた。実験結果は、ターゲットアセンブリーの構造を考慮し、 ${}^3\text{T}(d, n){}^4\text{He}$ の核反応力学の観点から検討された。その結果、ターゲットアセンブリーの構造が中性子放出特性に大きな影響を与えることが明らかになった。

本実験データは、中性子源解析計算の妥当性の検証に用いられる。

Experiments on D-T Neutron Source Characteristics of
An FNS High Speed Water Cooled Target

Yujiro IKEDA, Yukio OYAMA, Tokio FUKAHORI⁺, Hiroshi MAEKAWA
and Tomoo NAKAMURA

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 7, 1988)

The D-T neutron source is essential for the fusion neutronics experiments and it is of importance to characterize the source conditions in order to perform the experiment as well as analysis with high accuracy. A fast water cooled D-T target system at the end of the 80° beam line of FNS accelerator was installed for the fusion blanket integral experiments. The target assembly has a rather complex and tight structure in order to reduce high heat production due to high incident d^+ beam current at the target position. It is expected that the target structure influences the neutron spectrum and angular distributions of the neutrons emitted from the assembly. Prior to successive blanket neutronics experiments, measurements has been carried out on the source characteristics. The angular distribution of the neutron fluxes on horizontal, vertical and axial planes were measured with the foil activation technique. The angular distribution was also measured by an NE213 scintillation counter using a dual rotatable deck. The angle dependent neutron spectra around the target were obtained with TOF technique. Experimental results were discussed on the basis of the nuclear reaction kinematics for ${}^3T(d,n){}^4He$ by taking the target structure into account. As a result, it was proved that the structure of the assembly affects significantly the neutron emission character. The experimental data obtained will be used for verification of analytical calculation of D-T source.

Keywords: D-T Neutron Source, Fusion Blanket Neutronics, Target Assembly, Foil Activation, NE213 Scintillation Counter, Angular Flux Distribution, TOF Technique

+ Department of Physics

目 次

1. 序 論	1
2. 高速水冷ターゲットの概要	2
3. D-T中性子の発生	2
4. 実験方法	3
4.1 放射化法による中性子角度分布の測定	3
4.2 NE 213シンチレーション検出器による中性子角度分布の測定	4
4.3 TOFによる角度依存スペクトルの測定	4
5. 実験結果	5
5.1 放射化法による結果	5
5.2 NE 213検出器による結果	7
5.3 TOF法によるスペクトル測定の結果	7
6. 検 討	9
6.1 放出中性子角度分布	9
6.2 角度依存中性子スペクトル	10
7. 結 論	11
謝 辞	12
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of the fast water cooled	2
3. D-T neutron generation	2
4. Experimental Procedure	3
4.1 Measurement of neutron angular flux distribution by foil activation technoque	3
4.2 Measurement of neutron angular flux distribution by NE 213 scintillation counter	4
4.3 Measurement of angle dependent neutron spectrum by the TOP technique	4
5. Experimental Results	5
5.1 Results of foil activation	5
5.2 Results of NE213	7
5.3 Results of TOF	7
6. Discussion	9
6.1 Angular distribution of emitted neutron flux	9
6.2 Angle dependent neutron spectra	10
7. Conclusion	11
Acknowledgements	12
References	13

1. 序 論

D-T核融合炉のニュートロニクスの研究では、主に加速器を用いた1.4 MeV中性子源により実験が行われている。¹⁻⁶⁾ 一般に、加速器を用いて中性子を発生させる場合、加速粒子の種類、エネルギー、強度に応じ、ターゲット上での発熱を十分除去できる冷却能を持ったターゲットアセンブリーが必要である。その構造は、ターゲット物質、冷却媒体、冷却能力により異なる。特に、トリチウム金属ターゲットを用いてD-T中性子を発生させる場合、ターゲット温度が150℃を越えると急激にトリチウムが気相に放出される。⁷⁻⁸⁾ トリチウムの逸散は、中性子生成率を低下させ定常的な中性子束照射を行う上での障害となる。従って、ターゲット表面温度は厳しく制限することが望ましい。更に詳細に検討すれば、ターゲット部の電氣的絶縁の有無、寸法的制約、真空ポンプ系の配置などにより構造は変化する。一般に、ターゲット近傍の構造は単純であることが望ましいが上述した要求を満足するには、各々の仕様に応じた構造体は不可欠である。

ターゲット上で発生した中性子は、ターゲットアセンブリー構成物質と相互作用（弾性、非弾性散乱、吸収反応等）し、測定領域に入射する中性子の強度及びスペクトルと、入射する粒子とターゲット核との反応力学で予想される値⁹⁾との間に実際的な差が生ずる。このことは、加速器を用いた中性子源を基準として、測定量を計算値と比較評価する場合、計算に用いる中性子源として単純なモデルを採用できないことを意味する。特に、ターゲットを中心とした角度依存のある測定量の評価において、ターゲット構造体の影響は無視できない。従って、実験値に対する解析精度を向上させるためには、あらかじめ、使用するターゲットからの中性子放出特性（中性子束角度分布並びにスペクトル分布）を実験的に求め、それを解析計算の入力とする必要がある。

核融合炉ブランケットニュートロニクス研究用、強力D-T中性子(FNS)が設置され⁹⁾、一連のブランケット模擬体系を用いた積分実験を目的として、高速水冷トリチウムターゲットアセンブリーが設計製作された。^{10,11)} ターゲットの構造は、重陽子ビーム（最大加速エネルギー；40.0 KeV, 最大入射電流；3 mA）によるターゲット上での発熱率1.2 KWを十分に除去し、ターゲット表面温度を低くおさえるために、冷却効率の良い水冷方式とした。また、アセンブリーは、ターゲットが3次元球形ブランケット模擬体系中心位置に挿入できるように寸法的制約を受けている。

本レポートでは、一連のブランケット積分実験に先立って行った高速水冷ターゲットからのD-T中性子放出特性実験について述べる。実験は以下の3項目について行った。

- 1) 放射化法による放出中性子角度分布,
- 2) NE 213 シンチレーション検出器による放出中性子角度分布,
- 3) 中性子飛行時間法 (Time of Flight; TOF) による放出中性子角度依存スペクトル。

次章以下に、高速水冷ターゲットの概要、D-T中性子の発生、実験方法、実験結果及び検討について述べる。

2. 高速水冷ターゲットの概要

高速水冷ターゲットは、核融合ブランケット模擬積分実験を行うために設計、製作された。^{10,11)} ターゲットは、無酸素銅バックングに蒸着したチタン層にトリチウムを吸蔵したものをを用いている。ターゲットを装着したアセンブリーは、FNS第1ターゲット室に導かれた80°ビームライン端に設置されている。このターゲット上に、最大電流3mA、最大加速電圧400KVの直径15mmに制限された重陽子ビームが入射し、最大、 5×10^{11} n/secのD-T中性子発生が予想される。この場合最大1.2KW/secの熱がターゲット上で発生する。この発熱を効率良く除去しターゲット表面温度を150°C以下に保ち、トリチウムのターゲットからの放出を極力小さくするために、最も効率の良い水冷方法を採用した。

ターゲットアセンブリーの形状、寸法は、ブランケット模擬球体系実験を行うために、体系を組込んだ格子管集合体の中心にターゲット中心が位置し、かつ、ビームラインを導くために挿入孔の断面が、単位格子管断面積内におさまるように制約されている。単位格子管断面は、55mm×55mmの正方形をしている。上記の熱除去性能及び寸法制約を考慮し製作された水冷ターゲットアセンブリーの断面及び正面図をFig. 1に示す。アセンブリーは、2重角管構造を採用し、外側角管寸法50mm×50mm、内側角管寸法35mm×35mm、角管部の長さ1,200mmで、2つの角管に狭まれた空間を上下にしきり上部より純水（イオン交換水）を圧力1Kg/cm²で供給する。水は、ターゲット背面に設けた約1mmの空間を通過し下部へ流出する。背面空間が1mmと狭い理由は、そこでの流速を上げて熱除去効率を高めることにある。水の圧力によってターゲット押え板の脱離防止のために、厚さ7mmのSUS304鋼を4本のネジによってターゲット角管部に固定してある。ビームラインの高さは床から1.8mである。加速器ビームチャンネルとアセンブリーは、回転フランジ及びベローズを用いて連結し、アセンブリーの基部（連結端）は、専用の支持架台に固定されている。角管を含め、主なアセンブリー構成材はSUS304鋼で、この他にターゲット近傍には、ターゲットバックング用無酸素銅（35mm×35mm×4mm）ネオプレン製バックングリングが存在する。

3. D-T中性子の発生

ターゲット上で ${}^3\text{T}(d, n){}^4\text{He}$ の反応により発生するD-T中性子のエネルギー及び放出強度角度分布は、ターゲットに入射する重陽子エネルギーによって変化する。^{9,12)} 標的核である ${}^3\text{T}$ は、銅バックングに蒸着されたチタンにTi対 ${}^3\text{T}$ 比が1.5~2.0の割合で吸着分布している。使用したターゲットのTi層の厚さは8mg/cm²でエネルギー400KeVの重陽子のTi層中の飛程1.2mg/cm²より十分大きい。従って入射重陽子はTi層でのエネルギー損失により、入射初期エネルギー（最大400KeV）から0まで分布する。Fig. 2にTi層の厚みを考慮した重陽子反応エネルギー分布を示す。実際の実験で用いた入射エネルギー338KeVの場合の平均反応エ

2. 高速水冷ターゲットの概要

高速水冷ターゲットは、核融合ブランケット模擬積分実験を行うために設計、製作された。^{10,11)} ターゲットは、無酸素銅バックングに蒸着したチタン層にトリチウムを吸蔵したものをを用いている。ターゲットを装着したアセンブリーは、FNS第1ターゲット室に導かれた80°ビームライン端に設置されている。このターゲット上に、最大電流3mA、最大加速電圧400KVの直径15mmに制限された重陽子ビームが入射し、最大、 5×10^{11} n/secのD-T中性子発生が予想される。この場合最大1.2KW/secの熱がターゲット上で発生する。この発熱を効率良く除去しターゲット表面温度を150°C以下に保ち、トリチウムのターゲットからの放出を極力小さくするために、最も効率の良い水冷方法を採用した。

ターゲットアセンブリーの形状、寸法は、ブランケット模擬球体系実験を行うために、体系を組込んだ格子管集合体の中心にターゲット中心が位置し、かつ、ビームラインを導くために挿入孔の断面が、単位格子管断面内におさまるように制約されている。単位格子管断面は、55mm×55mmの正方形をしている。上記の熱除去性能及び寸法制約を考慮し製作された水冷ターゲットアセンブリーの断面及び正面図をFig. 1に示す。アセンブリーは、2重角管構造を採用し、外側角管寸法50mm×50mm、内側角管寸法35mm×35mm、角管部の長さ1,200mmで、2つの角管に挟まれた空間を上下にしきり上部より純水（イオン交換水）を圧力1Kg/cm²で供給する。水は、ターゲット背面に設けた約1mmの空間を通過し下部へ流出する。背面空間が1mmと狭い理由は、そこでの流速を上げて熱除去効率を高めることにある。水の圧力によってターゲット押え板の脱離防止のために、厚さ7mmのSUS304鋼を4本のネジによってターゲット角管部に固定してある。ビームラインの高さは床から1.8mである。加速器ビームチャンネルとアセンブリーは、回転フランジ及びベローズを用いて連結し、アセンブリーの基部（連結端）は、専用の支持架台に固定されている。角管を含め、主なアセンブリー構成材はSUS304鋼で、この他にターゲット近傍には、ターゲットバックング用無酸素銅（35mm×35mm×4mm）ネオプレン製バックングリングが存在する。

3. D-T中性子の発生

ターゲット上で ${}^3\text{T}(d, n){}^4\text{He}$ の反応により発生するD-T中性子のエネルギー及び放出強度角度分布は、ターゲットに入射する重陽子エネルギーによって変化する。^{9,12)} 標的核である ${}^3\text{T}$ は、銅バックングに蒸着されたチタンにTi対 ${}^3\text{T}$ 比が1.5~2.0の割合で吸着分布している。使用したターゲットのTi層の厚さは8mg/cm²でエネルギー400KeVの重陽子のTi層中の飛程1.2mg/cm²より十分大きい。従って入射重陽子はTi層でのエネルギー損失により、入射初期エネルギー（最大400KeV）から0まで分布する。Fig. 2にTi層の厚みを考慮した重陽子反応エネルギー分布を示す。実際の実験で用いた入射エネルギー338KeVの場合の平均反応エ

エネルギー 160 KeV から D-T 中性子エネルギー及び放出強度角度分布を計算し Table 1 及び Fig. 3 に重陽子ビーム方向 (0°) を 1.0 とした相対強度角度分布を示す。発生中性子のエネルギースペクトルは、反応重陽子エネルギーに依存している。Fig. 4 に 0°, 90° 及び 130° 方向に放出される中性子スペクトルを示す。前方、及び後方での広がり重陽子の Ti 層中でのエネルギー分布に依存しているが 90° 方向は、反応力学では放出中性子エネルギーの重陽子エネルギー依存は少く、単色に近いスペクトルを示している。

4. 実験方法

4.1 放射化法による中性子角度分布の測定

4.1.1 放射化反応及び箔

放射化法により高速水冷ターゲットで発生した D-T 中性子放出角度分布を測定した。放射化反応として、14 MeV 近傍の断面積が精度良く評価されている $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 、及び $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ を用いた。各々の断面積の値はそれぞれ 14.1 MeV 中性子に対し、124 及び 110 ミリバーン¹³⁾ で反応生成核である ^{24}Na 及び ^{56}Mn の半減期は、それぞれ 15.02 及び 2.579 時間¹⁴⁾、放出ガンマ線のエネルギーは、1368 及び 847 KeV である。これらの反応は、照射時間、中性子強度、生成核の飽和放射能強度、測定位置分解能、箔の重量、測定位置の数、測定時間、ガンマ線検出器の検出効率等を考慮して選択した。

放射化箔の形状寸法は、直径 10 mm、厚さ 1 mm の円形箔で、鉄、アルミニウムの順で 1 対にした。各々の箔の純度は 99.9% 以上であった。対試料はターゲット中心に対し 3 次元的に、水平面、垂直面及び入射重陽子ビーム軸に直角な面上の半径 1.5 cm の周上に 15° 間隔で、水平、垂直面で 165° から -165° まで、直角面で 360° 合計 65 対配置した。この試料を 3 次元的に配置するために、厚さ 1 mm、幅 20 mm の A1 板で製作した支持架台を用いた。Fig. 5 に模式的な試料配置を示す。

4.1.2 中性子照射条件

FNS 加速器で 338 KeV に加速した重陽子ビーム (~2 mA) を高速水冷ターゲットアセンブリーに装着したトリチウムターゲット (25 Ci) に入射させ $^3\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反応で発生する D-T 中性子により放射化箔試料の照射を行った。照射時間は 5 時間で照射中にターゲットで発生した中性子は、表面障壁型シリコン検出器による随伴 α 粒子計数法により測定した。¹⁵⁾ その時の時間平均中性子発生率は、 1.32×10^{11} n/秒であった。中性子発生率は、加速条件の変動による入射重陽子ビーム電流の変動及びトリチウムターゲットの消耗により一般に一樣ではない。この変動は、随伴 α 粒子を 1 分間毎にサンプリングして求めた。Fig. 6 に、照射中の相対変動を示す。この相対値を用いて、 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 及び $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反応生成核の飽和生成量係数の補正を行った。この補正係数は中性子束が一樣である場合 (時間平均中性子束を仮定した場合) に対する補正量として与えられる。その結果、 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ の場合、4.9%、 ^{27}Al

エネルギー 160 KeV から D-T 中性子エネルギー及び放出強度角度分布を計算し Table 1 及び Fig. 3 に重陽子ビーム方向 (0°) を 1.0 とした相対強度角度分布を示す。発生中性子のエネルギースペクトルは、反応重陽子エネルギーに依存している。Fig. 4 に 0°, 90° 及び 130° 方向に放出される中性子スペクトルを示す。前方、及び後方での広がり重陽子の Ti 層中でのエネルギー分布に依存しているが 90° 方向は、反応力学では放出中性子エネルギーの重陽子エネルギー依存は少く、単色に近いスペクトルを示している。

4. 実験方法

4.1 放射化法による中性子角度分布の測定

4.1.1 放射化反応及び箔

放射化法により高速水冷ターゲットで発生した D-T 中性子放出角度分布を測定した。放射化反応として、14 MeV 近傍の断面積が精度良く評価されている $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 、及び $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ を用いた。各々の断面積の値はそれぞれ 14.1 MeV 中性子に対し、124 及び 110 ミリバーン¹³⁾ で反応生成核である ^{24}Na 及び ^{56}Mn の半減期は、それぞれ 15.02 及び 2.579 時間¹⁴⁾、放出ガンマ線のエネルギーは、1368 及び 847 KeV である。これらの反応は、照射時間、中性子強度、生成核の飽和放射能強度、測定位置分解能、箔の重量、測定位置の数、測定時間、ガンマ線検出器の検出効率等を考慮して選択した。

放射化箔の形状寸法は、直径 10 mm、厚さ 1 mm の円形箔で、鉄、アルミニウムの順で 1 対にした。各々の箔の純度は 99.9% 以上であった。対試料はターゲット中心に対し 3 次的に、水平面、垂直面及び入射重陽子ビーム軸に直角な面上の半径 1.5 cm の周上に 15° 間隔で、水平、垂直面で 165° から -165° まで、直角面で 360° 合計 65 対配置した。この試料を 3 次的に配置するために、厚さ 1 mm、幅 20 mm の A1 板で製作した支持架台を用いた。Fig. 5 に模式的な試料配置を示す。

4.1.2 中性子照射条件

FNS 加速器で 338 KeV に加速した重陽子ビーム (~2 mA) を高速水冷ターゲットアセンブリーに装着したトリチウムターゲット (25 Ci) に入射させ $^3\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反応で発生する D-T 中性子により放射化箔試料の照射を行った。照射時間は 5 時間で照射中にターゲットで発生した中性子は、表面障壁型シリコン検出器による随伴 α 粒子計数法により測定した。¹⁵⁾ その時の時間平均中性子発生率は、 1.32×10^{11} n/秒であった。中性子発生率は、加速条件の変動による入射重陽子ビーム電流の変動及びトリチウムターゲットの消耗により一般に一樣ではない。この変動は、随伴 α 粒子を 1 分間毎にサンプリングして求めた。Fig. 6 に、照射中の相対変動を示す。この相対値を用いて、 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 及び $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反応生成核の飽和生成量係数の補正を行った。この補正係数は中性子束が一樣である場合 (時間平均中性子束を仮定した場合) に対する補正量として与えられる。その結果、 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ の場合、4.9%, ^{27}Al

(n, α) ^{24}Na の場合、0.7%補正となった。

4.1.3 ガンマ線の測定

照射後、5時間冷却し、箔を取り出し $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 及び $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 反応による生成核 ^{24}Na 及び ^{56}Mn の崩壊によりガンマ線 ($^{24}\text{Na}; 1368 \text{ KeV}$, $^{56}\text{Mn}; 847 \text{ KeV}$) の測定を $60 \text{ cm}^3 \text{ Ge(Li)}$ 検出器 (分解能 1.75 KeV ; ^{60}Co の 1332 KeV ガンマ線の半値幅) を用いて行った。測定時間は、ガンマ線のピーク面積が 10^4 を越えるように、冷却中の放射能の減衰を考慮し適宜延長した。しかし、 ^{56}Mn は半減期が 2.579 時間と短いために、後半に測定したピーク面積の統計は約 10^3 程度になった。

4.2 NE 2 1 3 シンチレーション検出器による中性子角度分布の測定

4.2.1 中性子検出系

放出中性子角度分布の測定を直径 50.8 mm × 長さ 50.8 mm の NE 2 1 3 液体シンチレーション検出器を用いて行った。検出器を厚さ 430 mm 以上の Li_2CO_3 入りパラフィン遮蔽体の中に置き、中性子をビーム状に検出するための前にコリメータを検出器とターゲットの間に設けた。コリメータの内径は 126 mm であった。遮蔽体及び前コリメータは、FNS 第1ターゲット室に設置されている2重回転式ゴニオメータ-架台上に配置されターゲットを中心として入射重陽子ビーム方向を 0° として、 0° から 105° の角度の測定範囲を有する。検出器中心とターゲット中心の間の距離は、 7630 mm であった。Fig. 7 に第1ターゲット室内における検出器、遮蔽体、前コリメータ並びに回転架台の配置を示す。中性子放出角度分布測定点は、 0° から始まり 5° 間隔で合計 22 点であった。

4.2.2 中性子測定

FNS 加速器により 350 KeV に加速された重陽子ビーム (直流 $10 \mu\text{A}$) をトリチウムターゲットに入射させ、D-T 中性子を発生させて各角度毎に中性子束を NE 2 1 3 検出器で測定した。測定中のターゲットでの中性子発生量は、随伴 α 粒子計数法で測定した。中性子発生に伴う2次ガンマ線の寄与を除くために、NE 2 1 3 検出器出力パルスの粒子の種類による立上り時間の差による、中性子-ガンマ線 ($n-\gamma$) 弁別を行い、かつ、検出器で設定したしきい値以上の中性子による反跳陽子数を計数した。各角度に対する測定時間は全て 1000 秒とした。

4.3 TOF法による角度依存スペクトルの測定

4.3.1 検出系

ターゲットから放出される D-T 中性子の角度依存スペクトルを TOF¹⁶⁾ 法によって測定した。中性子検出器として、4.2 と同じ NE 2 1 3 検出器を用いた。飛行時間の時間原点信号は、FNS 加速器のパルス運転モードで加速された重陽子の通過をターゲット近傍におかれた静電誘導型のビーム検出器によって得た。検出器は 4.2 と同様に回転ゴニオメータ-上の遮蔽体に置いた。

また、同様に前コリメータを用い中性子束を制限した。(Fig. 7 参照)

4.3.2 TOFによるスペクトル測定

TOF法による中性子スペクトル測定は、以下に示すパルス運転条件で行った。

- i) 加速エネルギー : 350 KeV
- ii) パルス幅 : 3~5 nSec
- iii) 繰返し周波数 : 8 μSec
- iv) ピーク電流値 : ~10 mA

ターゲットに対する測定角度は、入射重陽子ビーム方向を0°とし、0°, 30°, 45°, 60°, 90°及び105°の6点で各角度での測定時間は3,000秒であった。測定に用いた回路系のブロック図をFig. 8に示す。バックラウンド測定は、検出器コリメータに遮蔽棒を挿入してフォアグラウンド測定と同一条件で行った。測定中のターゲット上での中性子発生量は、4.1及び4.2と同様に随伴のα粒子計数法により測定した。

5. 実験結果

5.1 放射化法による結果

ターゲットを中心とした放射化反応の反応率は以下に示す式より導出した。

$$R = \frac{\lambda \cdot C \cdot A}{W \cdot NA \cdot a \cdot b \cdot \mu \cdot \epsilon f \cdot S \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_i}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_c} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_m}) \cdot Sa \cdot Y} \dots\dots\dots(1)$$

ここで

- R : 反応率 (1/sec)
- λ : 崩壊定数 (1/sec)
- C : γ線ピークカウント
- A : 原子量 (g)
- W : 箔重量 (g)
- NA : アボガドロ数
- a : 同位体自然存在比
- b : γ線放出確率
- μ : γ線吸収係数
- εf : γ線検出効率
- S : 照射中の中性子束強度の変動による (1 - e^{-λ·ti}) の補正係数
- ti : 照射時間
- tc : 冷却時間
- tm : 測定時間

また、同様に前コリメータを用い中性子束を制限した。(Fig. 7 参照)

4.3.2 TOFによるスペクトル測定

TOF法による中性子スペクトル測定は、以下に示すパルス運転条件で行った。

- i) 加速エネルギー : 350 KeV
- ii) パルス幅 : 3~5 nSec
- iii) 繰返し周波数 : 8 μSec
- iv) ピーク電流値 : ~10 mA

ターゲットに対する測定角度は、入射重陽子ビーム方向を0°とし、0°, 30°, 45°, 60°, 90°及び105°の6点で各角度での測定時間は3,000秒であった。測定に用いた回路系のブロック図をFig. 8に示す。バックラウンド測定は、検出器コリメータに遮蔽棒を挿入してフォアグラウンド測定と同一条件で行った。測定中のターゲット上での中性子発生量は、4.1及び4.2と同様に随伴のα粒子計数法により測定した。

5. 実験結果

5.1 放射化法による結果

ターゲットを中心とした放射化反応の反応率は以下に示す式より導出した。

$$R = \frac{\lambda \cdot C \cdot A}{W \cdot NA \cdot a \cdot b \cdot \mu \cdot \epsilon f \cdot S \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_i}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_c} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_m}) \cdot Sa \cdot Y} \dots\dots\dots(1)$$

ここで

- R : 反応率 (1/sec)
- λ : 崩壊定数 (1/sec)
- C : γ線ピークカウント
- A : 原子量 (g)
- W : 箔重量 (g)
- NA : アボガドロ数
- a : 同位体自然存在比
- b : γ線放出確率
- μ : γ線吸収係数
- εf : γ線検出効率
- S : 照射中の中性子束強度の変動による (1 - e^{-λ·t_i}) の補正係数
- t_i : 照射時間
- t_c : 冷却時間
- t_m : 測定時間

Sa : サムピークによる γ 線数え落しの補正

Y : 中性子発生率 (/sec)

上式により求めた各反応率を半径 15 cm の位置に規格化し、測定面毎に Table 2(1)~2(3) に示す。測定値の誤差は、上式に含まれる項が互いに独立と仮定し次式より求めた。

$$\epsilon^2 = \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon f}{\epsilon f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mu}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot \Delta t_i}{1 - e^{-\lambda \cdot t_i}}\right)^2 + (\lambda \cdot \Delta t_c)^2 + \left(\frac{\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t_m} \cdot \Delta t_m}{1 - e^{-\lambda \cdot t_m}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda} + t_c - t_i \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} - t_m \cdot e^{-\lambda \cdot t_m} \cdot \Delta \lambda\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_a}{S_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y}{Y}\right)^2 \dots \dots \dots (2)$$

ここで

r : ターゲットと箔の間の実測値

上式の内、時間と崩壊定数に関する項は他の項に比べて誤差が小さいので寄与を無視した。また、自然存在比、 γ 線放出確立も用いた値を基準とすることにして、その誤差を無視した。更に箔重量も測定誤差が 0.1 % 以上であるために無視した。以下に誤差が大きいものについて推定される範囲を示す。

- $\frac{\Delta C}{C}$: $\pm 0.6 \sim 8 \%$
- $\frac{\Delta r}{r}$: $\pm 1.2 \%$
- $\frac{\Delta \epsilon f}{\epsilon f}$: $\pm 2.5 \%$
- $\frac{\Delta \mu}{\mu}$: $\pm 1.0 \%$
- $\frac{\Delta S_a}{S_a}$: $\pm 1.5 \%$ (^{24}Na に対してのみ)
- $\frac{\Delta S}{S}$: $\pm 1.0 \%$ { $^{56}\text{Fe} (n, p) ^{56}\text{Mn}$ }
- : $\pm 0.5 \%$ { $^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$ }
- $\frac{\Delta Y}{Y}$: $\pm 3 \%$

反応率の誤差は、これ等の誤差の和として与えられ 4.6 ~ 9.2 % の範囲に分布している。この分布は γ 線のピークカウンターの統計に依存している。

(1) 式により求められた反応率の角度分布を Fig. 9(1)~9(3) にその誤差と共に示す。

次に、半径 15 cm における中性子束 $\phi(\theta)$ は得られた反応率と反応断面積を用いて

$$\phi(\theta) = \frac{R(\theta)}{\sigma(\theta)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$R(\theta)$: θ 方向の反応率 (/sec)

$\sigma(\theta)$: θ 方向の中性子エネルギーに対する反応断面積 (cm²)

で与えられる。

反応断面積 $\sigma(\theta)$ は、ENDF-B-V ドシメトリファイル¹³⁾中の $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 及び $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ の値を用いた。角度依存中性子エネルギーは 3 章の計算結果を用いた。角度に対応する中性子エネルギーと断面積を Table 3 に示す。式(3)によって得られた中性子束は、 0° 方向を 1.0 に規格化し、各測定面毎に Table 4(1)~4(3) 及び Fig.1 0(1)~1 0(3) に示す。

(ビームに垂直な面では、ターゲット直上の値を 1.0 に規格化した。) Fig.1 0(1), 1 0(2) の実線で示された曲線は、3 章の D-T 反応力学から計算された中性子束の非等方性を表している。

5.2 NE 2 1 3 検出器による結果

ターゲットからの放出中性子相対角度分布は、波高弁別レベルを一定に設定した NE 2 1 3 シンチレーション検出器の積分数の各角度に対する相対比として求めた。波高分布データから FORIST コード¹⁷⁾により、中性子スペクトルをアンフォールドすることにより、任意のしきい値以上の積分計数値が得られる。Fig. 1 1 にエネルギー 4.8 MeV (1.6 5 Na 発光量単位) に弁別レベルを設定した場合の相対角度分布を示す。このしきい値は、ターゲットから放出される中性子スペクトルは、1.4 MeV にピークがあり積分値が放出角度によって大きな影響を受けないとして設定した。また、D-T 中性子エネルギーは、放出角度に対し 1.3~1.5 MeV の間で変化するが、NE 2 1 3 の検出効率はこのエネルギー範囲では一定である。各角度での積分中性子束は、随伴 α 粒子計数値で規格化し、更に重陽子ビーム方向を 0° として、この方向での値を 1.0 として相対角度分布とした。Fig. 1 1 に示された実線は、D-T 反応力学から求めた放出中性子束非等方分布を示す。(平均反応重陽子エネルギー 1.5 0 KeV 及び 2.0 0 KeV について示す) 測定値の誤差は、主として積分中性子束の統計誤差と随伴 α 粒子による規格化に起因する。

5.3 TOF 法によるスペクトル測定の結果

TOF 法により測定されたターゲットから検出器までの中性子飛行時間は、次の相対論による変換式からエネルギーに換算した。

$$E_n = 939.553 \left[\left\{ 1 - 1.126496 \left(\frac{L}{t} \right)^2 \right\}^{-1/2} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで

E_n : 中性子運動エネルギー (MeV)

L : 中性子飛行距離 (m)

t : 中性子飛行時間 (n.sec)

ターゲットから放出された中性子スペクトルは、次の(5)式で表される。

$$\phi_s(\Omega, E_n) = \frac{C(E_n)}{\epsilon(E_n) \cdot \Delta\Omega \cdot Y_n \cdot T_n(E)} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

$\phi_s(\Omega, E_n)$: 中性子エネルギーが E_n , 放出角度 Ω の中性子束
(n/sr・MeV・Source)

$C(E_n)$: エネルギー E_n の計数值

$\epsilon(E_n)$: E_n に対する検出効率

$\Delta\Omega$: 検出器を見込む立体角

T_n : ターゲット上で測定中に発生した中性子総量

Y_n : 空気中の中性子の減衰計数

上式の検出効率 $\epsilon(E_n)$ は、用いたNE 213 検出器について、モンテカルロ法を用いた計算から求めた。また、 $n-r$ 弁別のために生ずるしきい値付近での中性子損失を計算から求めることは不可能であるため、しきい値付近の検出効率は ^{252}Cf の核分裂スペクトルを用いて測定し相対効率を求めてモンテカルロ法の結果と結合して求めた。得られた検出効率の相対的な誤差は2~3%、しきい値付近で3~5%と考えられる。

スペクトルのエネルギー分解能は、近似的に次式で表現される。

$$R(E-E') = A \cdot e^{-(E-E')^2 / 2 \cdot \sigma(E)^2} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

$$\delta(E) = 0.0277 \Delta t \cdot E^{3/2} / L$$

Δt = 時間分解能 [FWHM] (n, sec)

E = 中性子エネルギー (MeV)

時間分解能は、測定毎に若干の変化があり、各角度に対する値を下表に示す。

測定角度	0°	30°	45°	60°	90°	105°
Δt (FWHM)n・s	3.7	9.3	5.4	5.4	3.7	5.4

測定値の誤差は以下の通りである。

$$\epsilon(E_n) \leq \pm 3\%$$

$$\Delta\Omega < \pm 0.5\%$$

$$Y_n \pm 3\%$$

$$T_n(E) 0\%$$

得られた各測定角度に対する放出中性子スペクトルをFig. 12(1)～12(6)に、また、数値データをTable 5(1)～5(6)に示す。

また各々のスペクトルから1, 2及び10 MeV以上の積分中性子束の角度分布をFig.13に示す。各値は随伴の粒子法から求めた中性子発生率を 4π で除したものを1.0に規格化して示されており、実際の角度分布に対応している。

6. 検 討

6.1 放出中性子角度分布

$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 及び $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反応のD-T中性子が支配的なスペクトル場での実行的しきい値エネルギーは、それぞれ ~ 6 MeV及び ~ 7 MeVにあり、測定した中性子束角度分布は、このしきい値以上の積分中性子束分布を示す。

Fig. 10(1), 10(2)に示した水平面及び垂直面上の分布では、実験値は、角度の増加にとまない反応力学による計算値より小さくなり、 30° 近傍から急激に減衰する。 60° 付近で 0° 方向に対し75%の値になる。水平面と垂直面の実験値の比較では、分布の傾向は類似しているが、 $100^\circ \sim 150^\circ$ の範囲で若干、水平面の値が小さくなっている。また、両者とも左右、上下方向の対称性が $45^\circ \sim 105^\circ$ の範囲で失われている。ターゲットアセンブリーの構造は、ターゲット中心に対し対称である。この非対称の原因として、放射化箔支持架台の据付位置及び軸が若干、正規の位置からずれていたと考えられる。特に 90° 方向の測定では、箔がターゲットディスクの内側を見込むか外側を見込むかにより、放出中性子が通過する実行的散乱吸収体の厚みが極端に変わることに、測定中性子束の差が強調される。また、ターゲット上での重陽子ビームスポットの位置がターゲットディスク中心から外れている場合も分布の非対称の原因となる。箔の位置は、ターゲットから約15cmの位置で重陽子ビーム中心が0.5cmずれていた場合、左右、上下の相対する 90° 方向での中性子束は、最大14%の差が生ずる。従って分布の非対称は、ビーム条件によっても大きく影響を受ける可能性がある。しかしながら左右、上下の値の平均をとることについて、ほぼ実際の分布を見ることが出来る。

更に分布を見ると、 120° 近傍で実験値が計算値より低く、 165° 方向では極端に小さな値を示している。Fig. 14にターゲットアセンブリーの水平及び垂直断面上の主な構成材料とターゲット中心から各測定への角度方向を示す。中性子が通過する構成物質の厚さが最大となるのは $45^\circ \sim 60^\circ$ 方向であり、水平と垂直では水冷溝の構造が異なる。実験値の $45^\circ \sim 60^\circ$ の範囲での減衰は、この実行的な構成材の厚さによる中性子の散乱吸収が原因と考えられる。逆に実験値が $90^\circ \sim 105^\circ$ の範囲で、ほぼ計算値と一致しているのは、Oリング用の溝が空間となり構成材厚が小さく、散乱の影響が少ないためと考えられる。実験値の 165° 方向の急激な低下は、SUS304管及び水層のターゲットから見たこの方向の実効的な厚みが急激に増加するためと考えられる。厚さは 150° 方向に対し 165° 方向では、約2倍になる。また水平面での 120° 方向におけるわずかな実験値の減衰は、SUS304層がその近傍と比較して薄くなって

得られた各測定角度に対する放出中性子スペクトルをFig. 12(1)～12(6)に、また、数値データをTable 5(1)～5(6)に示す。

また各々のスペクトルから1, 2及び10 MeV以上の積分中性子束の角度分布をFig.13に示す。各値は随伴の粒子法から求めた中性子発生率を 4π で除したものを1.0に規格化して示されており、実際の角度分布に対応している。

6. 検 討

6.1 放出中性子角度分布

$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 及び $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反応のD-T中性子が支配的なスペクトル場での実行的しきい値エネルギーは、それぞれ ~ 6 MeV及び ~ 7 MeVにあり、測定した中性子束角度分布は、このしきい値以上の積分中性子束分布を示す。

Fig. 10(1), 10(2)に示した水平面及び垂直面上の分布では、実験値は、角度の増加にともない反応力学による計算値より小さくなり、 30° 近傍から急激に減衰する。 60° 付近で 0° 方向に対し75%の値になる。水平面と垂直面の実験値の比較では、分布の傾向は類似しているが、 $100^\circ \sim 150^\circ$ の範囲で若干、水平面の値が小さくなっている。また、両者とも左右、上下方向の対称性が $45^\circ \sim 105^\circ$ の範囲で失われている。ターゲットアセンブリーの構造は、ターゲット中心に対し対称である。この非対称の原因として、放射化箔支持架台の据付位置及び軸が若干、正規の位置からずれていたと考えられる。特に 90° 方向の測定では、箔がターゲットディスクの内側を見込むか外側を見込むかにより、放出中性子が通過する実行的散乱吸収体の厚みが極端に変わることに、測定中性子束の差が強調される。また、ターゲット上での重陽子ビームスポットの位置がターゲットディスク中心から外れている場合も分布の非対称の原因となる。箔の位置は、ターゲットから約15cmの位置で重陽子ビーム中心が0.5cmずれていた場合、左右、上下の相対する 90° 方向での中性子束は、最大14%の差が生ずる。従って分布の非対称は、ビーム条件によっても大きく影響を受ける可能性がある。しかしながら左右、上下の値の平均をとることについて、ほぼ実際の分布を見ることができる。

更に分布を見ると、 120° 近傍で実験値が計算値より低く、 165° 方向では極端に小さな値を示している。Fig. 14にターゲットアセンブリーの水平及び垂直断面上の主な構成材料とターゲット中心から各測定への角度方向を示す。中性子が通過する構成物質の厚さが最大となるのは $45^\circ \sim 60^\circ$ 方向であり、水平と垂直では水冷溝の構造が異なる。実験値の $45^\circ \sim 60^\circ$ の範囲での減衰は、この実行的な構成材の厚さによる中性子の散乱吸収が原因と考えられる。逆に実験値が $90^\circ \sim 105^\circ$ の範囲で、ほぼ計算値と一致しているのは、Oリング用の溝が空間となり構成材厚が小さく、散乱の影響が少ないためと考えられる。実験値の 165° 方向の急激な低下は、SUS304管及び水層のターゲットから見たこの方向の実効的な厚みが急激に増加するためと考えられる。厚さは 150° 方向に対し 165° 方向では、約2倍になる。また水平面での 120° 方向におけるわずかな実験値の減衰は、SUS304層がその近傍と比較して薄くなって

いることを反映していると考えられる。逆に水平及び垂直平面の分布の非対称から、実効的なターゲット中心位置を推定できる。水平面の分布から中心より上から見て左、垂直面から上にずれていると考えられる。

Fig. 10 (3)の重陽子ビーム軸に垂直な面上の分布では、反応力学では等方分布が予想されるが、測定値は、ターゲットアセンブリー構造により強く影響を受けている。 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 及び $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ の相対分布は良く一致している。図のA, B, C, D, 点は、ターゲット直上を 0° とした場合の $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ 及び 315° 方向に対応する。各点に対応する実験値は、隣接する値より減少している。これは、この角度方向に対応するアセンブリー構造体の実効的厚みが角管構造のための他の角度により増加しており、放出中性子の散乱吸収が大きいためと考えられる。全体の分布では、 $100^\circ \sim 320^\circ$ の範囲で 0° に対し実験値は $30\% \sim 40\%$ 低い値を示しており、これは箔取付面の軸のずれ及び重陽子ビーム位置の不確実性に起因するものと考えられる。この結果から上方でビーム方向に対し後側に、下方で前側にこの面がずれていたことが判断できる。また、C, D点の値が、A, B点の値より低いことから、ターゲットを正面から見て右側が後方に、左側が前方に傾いていた面を形成していたと考えられる。このことは、水平及び垂直面の分布の考察と一致する。

Fig. 11に示したNE213検出器による相対角度分布は、放射化法の水平面における分布に対応する。この図では、中性子束は 30° 付近から計算値と比較して減衰し始め、 $60^\circ \sim 70^\circ$ にかけて急減し計算値の 80% の値になっている。値は、 75° 方向で若干上昇し 80° 方向で最も低くなり、 90° 方向で急激に立上り計算値と一致する。 145° 及び 150° のデータは、独立した実験から得られたものである。¹⁸⁾ この分布における 60° 近傍の減衰及び 90° 方向での立上りは、ターゲットアセンブリー構造体の実効的厚みの変化による中性子の散乱吸収の変化に対応しており、放射化法における考察と同様して説明できる。

6.2 角度依存中性子スペクトル

測定したスペクトルのD-Tピークエネルギーは、 0° 方向で 14.9MeV 、 90° 方向で 14.2MeV が観測され、反応力学から得られる各々 14.96MeV 、 14.10MeV と良い一致を示しスペクトルの角度依存性が正しく測定されていることを示している。

Fig. 12(1)~12(3)に示した $0^\circ, 30^\circ$ 及び 45° 方向の中性子スペクトルにみられるD-Tピークの高エネルギー側への裾引きは、TOF測定で時間原点として用いたパルス信号波形の歪みによると考えられる。測定中のパルス分解能は、前章で示したように $4 \sim 5\text{ns}$ (FWHM)であったが、即発ガンマ線によって観測したパルス波形は非対称であった。この原因として、加速器のパルス運転におけるレンズ系パラメータ調整の不適合が考えられる。使用した高速水冷ターゲットは、本来パルス運転時に使用することを考慮した設計ではないため、オシロスコープによる波形観測だけでは正しくビーム調整することは難しい。

$60^\circ, 90^\circ, 105^\circ$ 方向のスペクトルにおいては、D-Tピークの低エネルギー側への裾引きが見られる。これは、実際の中性子の構造体による散乱成分と源中性子パルス波形の非対称による寄与の重畳の結果と考えられる。

放出角度が 0° 、 30° 及び 45° のスペクトルでは、D-D中性子による2~3 MeV近傍のピークが顕著に観測された。D-D中性子は、入射重陽子のチタン層への埋込みによる自己ターゲットの形成により ${}^2\text{D}(d, n){}^4\text{He}$ 反応から発生する。D-D中性子強度は、ターゲット使用履歴に依存し、通常は $\sim 10 \text{ mA}\cdot\text{hr}$ で埋込重陽子は飽和する。放出角度が 60° 以上のスペクトルでは、顕著なピークは見られない。これはD-D中性子の放出角度分布が、この角度領域で急激に減少するためである。⁹⁾

Fig. 13 に示した1.0、2.0及び10.0 MeV以上の積分中性子束角度分布では、 30° 付近から値が減衰し始め 60° 方向で最も低い値となる。この傾向は、放射化法及びNE213検出器による角度分布と一致する。また、10 MeV以上の積分値がD-T反応による直接成分とすると、この値は、1 MeV以上の全積分中性子束に対し約85%になる。これは、DT直接成分がターゲットアセンブリ構造体により散乱吸収により減衰したことに対応し、積分値の差に当る中性子束は、その散乱成分に相当する。

また、 0° 方向のスペクトルの10 MeV以上の中性子束と随伴 α 粒子法から求めた 0° 方向の中性子束の比は0.89となり、11%が散乱吸収により失われていることを示している。

7. 結 論

高速水冷ターゲットのD-T中性子放出角度分布及び角度依存中性子スペクトルを ${}^{56}\text{Fe}(n, p){}^{56}\text{Mn}$ 、 ${}^{27}\text{Al}(n, \alpha){}^{24}\text{Na}$ を用いた放射化法、NE213液体シンチレーション検出器による計数及びTOF法により測定した。得られた測定データの検討結果を以下に示す。

- 1) ターゲットから放出されるD-T中性子の角度分布データは、測定法によらずにターゲットアセンブリ構造に強く影響されることを示した。その影響は、発生中性子が通過する実効的な構造体の厚さに依存し、反応力学から計算した値に比べて $60^\circ \sim 90^\circ$ 方向で約35%低い値を示した。
- 2) D-T中性子ピークエネルギーは、放出角度により変化し、反応力学による計算値と測定値は良く一致した。
- 3) 10 MeV以上のエネルギーをもつD-T中性子束は、1 MeV以上の全中性子束に対し約85%と観測され、構造体による散乱吸収の大きいことを示した。
- 4) ターゲットアセンブリから放出される 0° 方向のD-T中性子束の11%がターゲットアセンブリ構造体で吸収及び散乱される。

以上の結果から、高速水冷ターゲットの中性子源としての特性、すなわち中性子スペクトル及び中性子強度角度分布がターゲットアセンブリ構造に強く依存していることが明らかとなった。

核融合ニュートロニクスでは実験に用いる中性子源の特性を高い精度で評価することが有効な実験解析を行う上で不可欠である。一般に解析では、使用するターゲット構造の詳細なモデル化によりモンテカルロ法によって計算された中性子角度分布及びスペクトルの値を中性子源としている。本実験結果は、この中性子源解析計算の妥当性の検証に用いられる。

放出角度が 0° , 30° 及び 45° のスペクトルでは, D-D中性子による2~3 MeV近傍のピークが顕著に観測された。D-D中性子は, 入射重陽子のチタン層への埋込みによる自己ターゲットの形成により ${}^2\text{D}(d, n){}^4\text{He}$ 反応から発生する。D-D中性子強度は, ターゲット使用履歴に依存し, 通常は $\sim 10 \text{ mA}\cdot\text{hr}$ で埋込重陽子は飽和する。放出角度が 60° 以上のスペクトルでは, 顕著なピークは見られない。これはD-D中性子の放出角度分布が, この角度領域で急激に減少するためである。⁹⁾

Fig. 13 に示した1.0, 2.0及び10.0 MeV以上の積分中性子束角度分布では, 30° 付近から値が減衰し始め 60° 方向で最も低い値となる。この傾向は, 放射化法及びNE213検出器による角度分布と一致する。また, 10 MeV以上の積分値がD-T反応による直接成分とすると, この値は, 1 MeV以上の全積分中性子束に対し約85%になる。これは, DT直接成分がターゲットアセンブリ構造体により散乱吸収により減衰したことに対応し, 積分値の差に当る中性子束は, その散乱成分に相当する。

また, 0° 方向のスペクトルの10 MeV以上の中性子束と随伴 α 粒子法から求めた 0° 方向の中性子束の比は0.89となり, 11%が散乱吸収により失われていることを示している。

7. 結 論

高速水冷ターゲットのD-T中性子放出角度分布及び角度依存中性子スペクトルを ${}^{56}\text{Fe}(n, p){}^{56}\text{Mn}$, ${}^{27}\text{Al}(n, \alpha){}^{24}\text{Na}$ を用いた放射化法, NE213液体シンチレーション検出器による計数及びTOF法により測定した。得られた測定データの検討結果を以下に示す。

- 1) ターゲットから放出されるD-T中性子の角度分布データは, 測定法によらずにターゲットアセンブリ構造に強く影響されることを示した。その影響は, 発生中性子が通過する実効的な構造体の厚さに依存し, 反応力学から計算した値に比べて $60^\circ \sim 90^\circ$ 方向で約35%低い値を示した。
- 2) D-T中性子ピークエネルギーは, 放出角度により変化し, 反応力学による計算値と測定値は良く一致した。
- 3) 10 MeV以上のエネルギーをもつD-T中性子束は, 1 MeV以上の全中性子束に対し約85%と観測され, 構造体による散乱吸収の大きいことを示した。
- 4) ターゲットアセンブリから放出される 0° 方向のD-T中性子束の11%がターゲットアセンブリ構造体で吸収及び散乱される。

以上の結果から, 高速水冷ターゲットの中性子源としての特性, すなわち中性子スペクトル及び中性子強度角度分布がターゲットアセンブリ構造に強く依存していることが明らかとなった。

核融合ニュートロニクスでは実験に用いる中性子源の特性を高い精度で評価することが有効な実験解析を行う上で不可欠である。一般に解析では, 使用するターゲット構造の詳細なモデル化によりモンテカルロ法によって計算された中性子角度分布及びスペクトルの値を中性子源としている。本実験結果は, この中性子源解析計算の妥当性の検証に用いられる。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり、FNS加速器の運転保守に携わられた原研原子炉工学部炉物理施設管理室の草野譲一、沓掛忠三及び田中滋の諸氏に感謝します。

尚、本報告書のうち、放射化法に関する部分は、著者のうちの1人（深堀智生）が1981年の夏季実習で行った研究成果によることを付記します。

参 考 文 献

1. Herzing R., et al. : " Experimental and Theoretical Investigations of Tritium Production in a Controlled Thermonuclear Reactor Blanket Model, " Nucl. Sci. & Engi., 60, 169 (1976)
2. Bachman H., et al : " Neutron Spectra and Tritium Production Measurements in a Lithium Sphere to Check Fusion Reactor Blanket Calculations, " Nucl. Sci. & Engi., 67, 74 (1978)
3. Gemmendinger A., Ragan C. E. and Wallance J. M. : " Tritium Production in a Sphere of ^6LiD Irradiated by 14 MeV Neutrons, " Nucl. Sci. & Engi., 70, 274 (1979)
4. Fritsher U., Kappler F. and Rusch D. : " Tritium Production Measurement in a Lithium Metal Sphere with New Technique in Neutron Source Strength Determination, " Nucl. Instr. & Methods, 153, 563 (1978)
5. Nakamura T., et al, : " Integral Experiments on Lithium Oxide Spherical Assembly with Graphite Reflector and on Duct Streaming, " Proc. 3rd IAEA Technical committee Meeting and Workshop on Fusion Reactor Design and Technology, Tokyo, Oct. 5-16 (1981)
6. Nakamura T. et al., : " Present Status of the Fusion Neutronics Source (FNS), " Proc. 4th Symp. on Accelerator Sci. & Technol., RIKEN, Saitama, Japan, Nov. 24-26, 155 (1982)
7. Green L., ; " Review of Integral Fusion Blanket Neutronic Experiments, " Proc. 4th Topical Meeting on the Technol. of Controlled Nucl. Fusion, (1980)
8. Benveniste J., : " Information on the Neutrons Produced in the $^3\text{H(d,n)}^4\text{He}$ Reaction, " UCRL-4266, (1965)
9. Liskien H. and Paulsen A. : Nucl. Data Table, 11, 569 (1973)
10. Seki M., et al., : J. Nucl. Sci. Technol., 16 838 (1979)
11. Ogawa M., et al., : " A water-cooled Target of a 14 MeV Neutron Source : Design and Experiments, " JAERI-M 8424, (1979)
12. Yamaguchi S., Oyama Y. and Maekawa H., : " Calculation of Anisotropy Correction Factor for Determination of D-T Neutron Yield by Associated α -Particle Method, " JAERI-M 84-109 (1984)
13. ENDF/B-V Dosimetry Files, Mod. 2, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, (1978)

14. C. M. Lederer and V. S. Shirley (edited) : " Table of Isotopes, " 7th Edition, John Eiley and Sons, Inc., New York (1978)
15. Maekawa H., et al : " Neutron Yield Monitors for the Fusion Neutronics Source (FNS), " JAERI-M 83-219 (1983)
16. Oyama Y. and Maekawa H., " Measurements of Angle-Dependent Neutron Spectra from Lithium-Oxide Slab Assembly by Time-Of-Flight Method, " JAERI-M 83-195, (1983)
17. FORIST Spectra Unfolding Code, Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge National Laboratory, PST-92 (1975)
18. Tanaka S., et al., : " A Benchmark Experiment on D-T Neutrons and Secondary Gamma-Rays Streaming Through a Concrete Bent Duct, " JAERI-M 82-130, (1982)

Table 1 Anisotropic factor of emitted D-T neutron intensity

Angle (degree)	Neutron Energy (MeV)	Anisotropic * Factor
0	14.96	1.000
15	14.92	0.998
30	14.84	0.993
45	14.71	0.985
60	14.53	0.974
75	14.32	0.962
90	14.10	0.949
105	13.88	0.936
120	13.68	0.924
135	13.50	0.914
150	13.36	0.906
165	13.28	0.902
180	13.25	0.899

Incident deuteron energy : 338 keV

Mean deuteron energy in the target : 160 keV

* The value at the angle 0° is normalized to be 1.0

Table 2(1) Angular distribution of reaction rates at 15 cm
from the target on the horizontal plane

Angle (degree)*	Reaction rate (/source neutron/atom) (\pm %)	
	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$
-165	2.650×10^{-29} (4.6)	3.138×10^{-29} (4.7)
-150	3.101 (4.6)	3.742 (4.7)
-135	3.123 (4.7)	3.661 (4.8)
-120	3.119 (4.7)	3.749 (4.8)
-105	3.273 (4.7)	3.825 (4.8)
- 90	2.567 (4.7)	3.102 (4.8)
- 75	2.664 (4.7)	3.159 (4.8)
- 60	2.583 (4.7)	3.028 (4.8)
- 45	2.784 (4.7)	3.290 (4.7)
- 30	3.008 (4.6)	3.586 (4.7)
- 15	3.174 (4.6)	3.798 (4.7)
0	3.212 (4.6)	3.775 (4.7)
15	3.164 (4.6)	3.744 (4.7)
30	3.188 (4.6)	3.766 (4.7)
45	2.818 (4.7)	3.318 (4.7)
60	2.712 (4.6)	3.178 (4.7)
75	2.852 (4.6)	3.348 (4.7)
90	3.406 (4.6)	3.990 (4.7)
105	3.305 (4.6)	3.906 (4.7)
120	3.116 (4.6)	3.692 (4.7)
135	3.057 (4.6)	3.694 (4.7)
150	2.908 (4.7)	3.376 (4.7)
165	2.001 (4.7)	2.400 (4.7)

* The angle of 0° means the direction of d^+ beam.

Table 2(2) Angular distribution of reaction rates at 15 cm
from the target on the vertical plane

Angle(degree)*	Reaction rate (/source neutron/atom) (±%)	
	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$
-165	2.692×10^{-29} (4.8)	3.194×10^{-29} (4.7)
-150	3.268 (4.8)	3.927 (4.7)
-135	3.216 (4.8)	3.939 (4.7)
-120	3.384 (4.8)	4.059 (4.7)
-105	3.502 (4.7)	4.225 (4.7)
- 90	3.525 (4.7)	4.183 (4.7)
- 75	2.989 (4.7)	3.569 (4.7)
- 60	2.963 (4.7)	3.372 (4.7)
- 45	2.760 (4.7)	3.300 (4.7)
- 30	3.234 (4.7)	3.757 (4.7)
- 15	3.207 (4.7)	3.795 (4.7)
0	3.212 (4.6)	3.775 (4.7)
15	3.197 (4.7)	3.808 (4.7)
30	3.097 (4.7)	3.726 (4.7)
45	2.910 (4.7)	3.449 (4.7)
60	2.560 (4.7)	2.972 (4.7)
75	2.789 (4.7)	3.283 (4.7)
90	2.689 (4.7)	3.248 (4.7)
105	3.398 (4.7)	3.917 (4.7)
120	3.131 (4.7)	3.850 (4.7)
135	3.214 (4.7)	3.866 (4.7)
150	3.252 (4.7)	3.842 (4.7)
165	2.942 (4.7)	3.381 (4.7)

* The angle of 0° means the direction of d^+ beam

Table 2(3) Angular distribution of reaction rates at 15 cm
from the target on the axial plane**

Angle(degree)*	Reaction rate (/source neutron/atom) ($\pm\%$)	
	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$
0	3.525×10^{-29} (4.7)	4.183×10^{-29} (4.7)
15	3.794 (4.8)	4.475 (4.6)
30	3.543 (4.8)	4.223 (4.6)
45	3.410 (4.9)	4.049 (4.6)
60	3.380 (4.9)	4.031 (4.6)
75	3.637 (4.9)	4.250 (4.6)
90	3.406 (4.6)	3.990 (4.7)
105	3.294 (4.9)	3.862 (4.6)
120	2.953 (5.0)	3.568 (4.6)
135	2.613 (5.1)	3.122 (4.6)
150	2.622 (5.3)	3.101 (4.6)
165	2.523 (5.4)	3.149 (4.6)
180	2.689 (4.7)	3.248 (4.6)
195	2.600 (5.5)	3.067 (4.6)
210	2.455 (5.8)	2.910 (4.6)
225	2.169 (6.3)	2.825 (4.7)
240	2.450 (6.5)	2.857 (4.7)
255	2.324 (7.2)	3.034 (4.7)
270	2.567 (4.7)	3.102 (4.8)
285	2.642 (7.4)	3.248 (4.7)
300	2.692 (7.9)	3.209 (4.7)
315	2.394 (9.1)	3.047 (4.7)
330	2.965 (9.2)	3.584 (4.7)
345	3.078 (9.3)	4.061 (4.7)

* The angle of 0° indicate the direction to just above the target from the target center.

** Axial plane perpendicular to the d^+ beam direction.

Table 3 Cross sections of $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ and $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$

Angle (degree)	Energy (MeV)	Cross Section (mbarn)*	
		$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	$^{27}\text{Al}(N,\alpha)^{24}\text{Na}$
0	14.96	100	114
15	14.92	101	114
30	14.84	102	115
45	14.71	104	117
60	14.53	106	119
75	14.32	108	121
90	14.10	110	124
105	13.88	111	126
120	13.68	112	127
135	13.50	112	128
150	13.36	113	128
165	13.28	112	128

* Data taken from ENDF/B-V dosimetry file

Table 4(1) Relative angular flux distribution on horizontal plane

angle(degree)	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$		$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$		theory*
	R	L	R	L	
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
15	0.978	0.975	1.006	0.992	0.998
30	0.918	0.973	0.942	0.989	0.993
45	0.834	0.843	0.849	0.856	0.985
60	0.758	0.796	0.769	0.807	0.974
75	0.768	0.822	0.788	0.836	0.962
90	0.782	0.964	0.756	0.972	0.949
105	0.918	0.927	0.920	0.940	0.936
120	0.867	0.867	0.871	0.878	0.924
135	0.868	0.850	0.885	0.872	0.914
150	0.854	0.801	0.883	0.797	0.906
165	0.734	0.554	0.740	0.566	0.902

* Calculation based on ref-11)

R : direction to the right by looking from upper part

L : direction to the left by looking from upper part

Table 4(2) Relative angular flux distribution on vertical plane

angle(degree)	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$		$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$		theory*
	U	D	U	D	
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
15	0.988	0.986	1.005	1.009	0.998
30	0.987	0.945	0.987	0.978	0.993
45	0.826	0.871	0.852	0.890	0.985
60	0.870	0.752	0.856	0.754	0.974
75	0.861	0.804	0.892	0.819	0.962
90	0.998	0.761	1.019	0.791	0.949
105	0.982	0.953	1.017	0.943	0.936
120	0.940	0.870	0.965	0.916	0.924
135	0.894	0.893	0.929	0.912	0.914
150	0.900	0.896	0.927	0.906	0.906
165	0.746	0.815	0.754	0.798	0.902

* Calculation based on ref-11)

U : direction to the upper side of the center

D : direction to the lower side of the center

Table 4(3) Relative angular flux distribution on axial plane

angle (degree)*	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$
0 (top)	1.0	1.0
15	1.076	1.070
30	1.005	1.010
45	0.967	0.968
60	0.959	0.964
75	1.032	1.016
90 (right)	0.966	0.954
105	0.934	0.923
120	0.838	0.853
135	0.741	0.746
150	0.715	0.753
180 (bottom)	0.763	0.777
195	0.737	0.733
210	0.696	0.696
225	0.615	0.651
240	0.695	0.383
255	0.659	0.725
270 (left)	0.728	0.742
285	0.749	0.776
300	0.764	0.767
315	0.679	0.729
330	0.841	0.857
345	0.873	0.971

* The angle of 0° indicates the direction to just above the target

Table 5(1) Numerical data of neutron spectrum at 0° measured by TOF

Angle = 0°

J	ENERGY	FLUX	ERROR	J	ENERGY	FLUX	ERROR
1	0.2000			51	10.2000	4.073E-04	0.593E-01
2	0.4000	2.740E-06	0.602E+00	52	10.4000	4.125E-04	0.610E-01
3	0.6000	4.513E-04	0.829E+00	53	10.6000	3.973E-04	0.651E-01
4	0.8000	4.066E-03	0.417E-01	54	10.8000	3.726E-04	0.632E-01
5	1.0000	4.772E-03	0.183E-01	55	11.0000	3.865E-04	0.630E-01
6	1.2000	4.390E-03	0.142E-01	56	11.2000	4.494E-04	0.553E-01
7	1.4000	4.437E-03	0.133E-01	57	11.4000	4.820E-04	0.523E-01
8	1.6000	4.062E-03	0.137E-01	58	11.6000	4.680E-04	0.557E-01
9	1.8000	3.672E-03	0.141E-01	59	11.8000	4.850E-04	0.540E-01
10	2.0000	3.304E-03	0.149E-01	60	12.0000	5.501E-04	0.436E-01
11	2.2000	3.024E-03	0.157E-01	61	12.2000	5.817E-04	0.477E-01
12	2.4000	2.615E-03	0.173E-01	62	12.4000	6.350E-04	0.450E-01
13	2.6000	2.720E-03	0.169E-01	63	12.6000	6.938E-04	0.438E-01
14	2.8000	3.279E-03	0.153E-01	64	12.8000	7.643E-04	0.417E-01
15	3.0000	4.044E-03	0.133E-01	65	13.0000	9.690E-04	0.365E-01
16	3.2000	4.049E-03	0.140E-01	66	13.2000	1.092E-03	0.352E-01
17	3.4000	1.947E-03	0.211E-01	67	13.4000	1.284E-03	0.326E-01
18	3.6000	1.449E-03	0.253E-01	68	13.6000	1.585E-03	0.292E-01
19	3.8000	1.278E-03	0.275E-01	69	13.8000	2.132E-03	0.250E-01
20	4.0000	1.183E-03	0.284E-01	70	14.0000	3.467E-03	0.195E-01
21	4.2000	1.102E-03	0.296E-01	71	14.2000	7.073E-03	0.136E-01
22	4.4000	1.044E-03	0.303E-01	72	14.4000	1.549E-02	0.908E-02
23	4.6000	9.301E-04	0.340E-01	73	14.6000	2.910E-02	0.659E-02
24	4.8000	9.357E-04	0.337E-01	74	14.8000	4.314E-02	0.539E-02
25	5.0000	9.031E-04	0.341E-01	75	15.0000	5.058E-02	0.496E-02
26	5.2000	8.012E-04	0.364E-01	76	15.2000	4.943E-02	0.500E-02
27	5.4000	8.027E-04	0.350E-01	77	15.4000	4.071E-02	0.548E-02
28	5.6000	6.423E-04	0.415E-01	78	15.6000	2.982E-02	0.638E-02
29	5.8000	6.047E-04	0.435E-01	79	15.8000	2.045E-02	0.766E-02
30	6.0000	5.891E-04	0.435E-01	80	16.0000	1.454E-02	0.906E-02
31	6.2000	5.847E-04	0.440E-01	81	16.2000	1.106E-02	0.104E-01
32	6.4000	5.406E-04	0.463E-01	82	16.4000	8.293E-03	0.120E-01
33	6.6000	5.083E-04	0.478E-01	83	16.6000	5.934E-03	0.142E-01
34	6.8000	4.742E-04	0.489E-01	84	16.8000	4.136E-03	0.170E-01
35	7.0000	4.947E-04	0.500E-01	85	17.0000	2.712E-03	0.210E-01
36	7.2000	4.584E-04	0.531E-01	86	17.2000	1.711E-03	0.264E-01
37	7.4000	4.821E-04	0.534E-01	87	17.4000	1.118E-03	0.326E-01
38	7.6000	4.541E-04	0.536E-01	88	17.6000	8.194E-04	0.384E-01
39	7.8000	4.477E-04	0.567E-01	89	17.8000	5.930E-04	0.448E-01
40	8.0000	4.378E-04	0.583E-01	90	18.0000	4.600E-04	0.510E-01
41	8.2000	3.465E-04	0.684E-01	91	18.2000	3.650E-04	0.575E-01
42	8.4000	3.834E-04	0.611E-01	92	18.4000	2.953E-04	0.635E-01
43	8.6000	3.400E-04	0.688E-01	93	18.6000	1.970E-04	0.777E-01
44	8.8000	3.395E-04	0.685E-01	94	18.8000	1.686E-04	0.847E-01
45	9.0000	3.531E-04	0.671E-01	95	19.0000	1.477E-04	0.913E-01
46	9.2000	3.230E-04	0.702E-01	96	19.2000	9.557E-05	0.112E+00
47	9.4000	3.613E-04	0.660E-01	97	19.4000	7.733E-05	0.124E+00
48	9.6000	3.462E-04	0.696E-01	98	19.6000	6.596E-05	0.135E+00
49	9.8000	3.870E-04	0.627E-01	99	19.8000	5.811E-05	0.149E+00
50	10.0000	3.592E-04	0.680E-01	100	20.0000	3.786E-05	0.181E+00

\$ % error = ERROR x 100

Table 5(2) Numerical data of neutron spectrum at 30° measured by TOF

Angle = 30°

J	ENERGY	FLUX	ERROR	J	ENERGY	FLUX	ERROR
1	0.2000			51	10.2000	3.694E-04	0.762E-01
2	0.4000	2.948E-06	0.595E+00	52	10.4000	3.701E-04	0.771E-01
3	0.6000	1.192E-03	0.355E+00	53	10.6000	4.178E-04	0.687E-01
4	0.8000	3.941E-03	0.490E-01	54	10.8000	4.057E-04	0.715E-01
5	1.0000	4.635E-03	0.220E-01	55	11.0000	3.506E-04	0.822E-01
6	1.2000	5.010E-03	0.167E-01	56	11.2000	4.606E-04	0.658E-01
7	1.4000	4.309E-03	0.161E-01	57	11.4000	4.983E-04	0.639E-01
8	1.6000	4.036E-03	0.164E-01	58	11.6000	5.424E-04	0.592E-01
9	1.8000	3.613E-03	0.169E-01	59	11.8000	5.732E-04	0.575E-01
10	2.0000	3.332E-03	0.176E-01	60	12.0000	5.563E-04	0.581E-01
11	2.2000	3.045E-03	0.186E-01	61	12.2000	5.950E-04	0.582E-01
12	2.4000	2.244E-03	0.195E-01	62	12.4000	6.337E-04	0.545E-01
13	2.6000	2.748E-03	0.198E-01	63	12.6000	7.843E-04	0.484E-01
14	2.8000	3.479E-03	0.176E-01	64	12.8000	8.648E-04	0.463E-01
15	3.0000	3.810E-03	0.169E-01	65	13.0000	1.036E-03	0.421E-01
16	3.2000	2.685E-03	0.206E-01	66	13.2000	1.187E-03	0.398E-01
17	3.4000	1.616E-03	0.277E-01	67	13.4000	1.619E-03	0.338E-01
18	3.6000	1.489E-03	0.290E-01	68	13.6000	2.874E-03	0.253E-01
19	3.8000	1.302E-03	0.316E-01	69	13.8000	5.656E-03	0.181E-01
20	4.0000	1.115E-03	0.346E-01	70	14.0000	1.118E-02	0.129E-01
21	4.2000	1.093E-03	0.355E-01	71	14.2000	1.931E-02	0.975E-02
22	4.4000	1.049E-03	0.356E-01	72	14.4000	2.781E-02	0.809E-02
23	4.6000	9.383E-04	0.390E-01	73	14.6000	3.342E-02	0.735E-02
24	4.8000	9.464E-04	0.392E-01	74	14.8000	3.467E-02	0.720E-02
25	5.0000	8.847E-04	0.409E-01	75	15.0000	3.294E-02	0.736E-02
26	5.2000	7.141E-04	0.463E-01	76	15.2000	2.934E-02	0.777E-02
27	5.4000	7.514E-04	0.441E-01	77	15.4000	2.623E-02	0.818E-02
28	5.6000	6.702E-04	0.458E-01	78	15.6000	2.291E-02	0.872E-02
29	5.8000	6.215E-04	0.504E-01	79	15.8000	1.925E-02	0.948E-02
30	6.0000	5.560E-04	0.537E-01	80	16.0000	1.514E-02	0.106E-01
31	6.2000	5.281E-04	0.541E-01	81	16.2000	1.163E-02	0.121E-01
32	6.4000	5.088E-04	0.566E-01	82	16.4000	8.675E-03	0.141E-01
33	6.6000	4.587E-04	0.605E-01	83	16.6000	6.289E-03	0.165E-01
34	6.8000	4.781E-04	0.590E-01	84	16.8000	4.554E-03	0.194E-01
35	7.0000	4.461E-04	0.606E-01	85	17.0000	3.341E-03	0.227E-01
36	7.2000	4.612E-04	0.610E-01	86	17.2000	2.382E-03	0.268E-01
37	7.4000	4.591E-04	0.624E-01	87	17.4000	1.801E-03	0.308E-01
38	7.6000	4.251E-04	0.661E-01	88	17.6000	1.407E-03	0.348E-01
39	7.8000	4.222E-04	0.676E-01	89	17.8000	1.120E-03	0.390E-01
40	8.0000	4.042E-04	0.699E-01	90	18.0000	8.566E-04	0.447E-01
41	8.2000	3.845E-04	0.732E-01	91	18.2000	6.385E-04	0.517E-01
42	8.4000	3.311E-04	0.825E-01	92	18.4000	5.168E-04	0.577E-01
43	8.6000	3.273E-04	0.788E-01	93	18.6000	4.068E-04	0.653E-01
44	8.8000	3.519E-04	0.764E-01	94	18.8000	2.775E-04	0.734E-01
45	9.0000	3.398E-04	0.802E-01	95	19.0000	2.409E-04	0.848E-01
46	9.2000	3.337E-04	0.813E-01	96	19.2000	1.934E-04	0.933E-01
47	9.4000	3.660E-04	0.760E-01	97	19.4000	1.472E-04	0.108E+00
48	9.6000	3.350E-04	0.798E-01	98	19.6000	1.040E-04	0.128E+00
49	9.8000	3.709E-04	0.765E-01	99	19.8000	8.963E-05	0.139E+00
50	10.0000	3.762E-04	0.760E-01	100	20.0000	7.527E-05	0.155E+00

\$ % error = ERROR x 100

Table 5(3) Numerical data of neutron spectrum at 45° measured by TOF

Angle = 45°

J	ENERGY	FLUX	ERROR	J	ENERGY	FLUX	ERROR
1	0.2000			51	10.2000	3.838E-04	0.891E-01
2	0.4000	3.798E-06	0.546E+00	52	10.4000	3.423E-04	0.988E-01
3	0.6000	4.994E-04	0.295E+00	53	10.6000	3.660E-04	0.906E-01
4	0.8000	4.121E-03	0.572E-01	54	10.8000	3.803E-04	0.832E-01
5	1.0000	4.827E-03	0.263E-01	55	11.0000	3.654E-04	0.969E-01
6	1.2000	4.896E-03	0.207E-01	56	11.2000	3.820E-04	0.894E-01
7	1.4000	4.159E-03	0.201E-01	57	11.4000	4.760E-04	0.795E-01
8	1.6000	3.929E-03	0.204E-01	58	11.6000	4.794E-04	0.793E-01
9	1.8000	3.662E-03	0.206E-01	59	11.8000	4.446E-04	0.809E-01
10	2.0000	3.188E-03	0.222E-01	60	12.0000	6.249E-04	0.670E-01
11	2.2000	2.973E-03	0.231E-01	61	12.2000	6.546E-04	0.675E-01
12	2.4000	2.619E-03	0.250E-01	62	12.4000	7.641E-04	0.611E-01
13	2.6000	2.810E-03	0.239E-01	63	12.6000	8.372E-04	0.578E-01
14	2.8000	3.329E-03	0.222E-01	64	12.8000	9.954E-04	0.532E-01
15	3.0000	2.729E-03	0.248E-01	65	13.0000	1.229E-03	0.476E-01
16	3.2000	1.707E-03	0.323E-01	66	13.2000	1.535E-03	0.428E-01
17	3.4000	1.478E-03	0.356E-01	67	13.4000	2.448E-03	0.339E-01
18	3.6000	1.288E-03	0.384E-01	68	13.6000	4.805E-03	0.241E-01
19	3.8000	1.159E-03	0.411E-01	69	13.8000	1.007E-02	0.167E-01
20	4.0000	1.048E-03	0.437E-01	70	14.0000	2.127E-02	0.115E-01
21	4.2000	1.078E-03	0.434E-01	71	14.2000	3.221E-02	0.933E-02
22	4.4000	9.111E-04	0.472E-01	72	14.4000	4.055E-02	0.828E-02
23	4.6000	8.327E-04	0.505E-01	73	14.6000	4.176E-02	0.814E-02
24	4.8000	8.057E-04	0.525E-01	74	14.8000	3.683E-02	0.864E-02
25	5.0000	7.502E-04	0.549E-01	75	15.0000	2.943E-02	0.964E-02
26	5.2000	8.006E-04	0.526E-01	76	15.2000	2.150E-02	0.112E-01
27	5.4000	6.860E-04	0.568E-01	77	15.4000	1.538E-02	0.132E-01
28	5.6000	6.105E-04	0.591E-01	78	15.6000	1.074E-02	0.158E-01
29	5.8000	6.374E-04	0.602E-01	79	15.8000	7.464E-03	0.189E-01
30	6.0000	5.173E-04	0.681E-01	80	16.0000	5.224E-03	0.225E-01
31	6.2000	5.373E-04	0.658E-01	81	16.2000	3.927E-03	0.259E-01
32	6.4000	5.069E-04	0.690E-01	82	16.4000	3.121E-03	0.291E-01
33	6.6000	4.722E-04	0.717E-01	83	16.6000	2.434E-03	0.329E-01
34	6.8000	4.671E-04	0.735E-01	84	16.8000	1.982E-03	0.365E-01
35	7.0000	4.498E-04	0.743E-01	85	17.0000	1.650E-03	0.400E-01
36	7.2000	4.490E-04	0.747E-01	86	17.2000	1.386E-03	0.436E-01
37	7.4000	3.888E-04	0.834E-01	87	17.4000	1.173E-03	0.472E-01
38	7.6000	4.094E-04	0.812E-01	88	17.6000	1.016E-03	0.508E-01
39	7.8000	4.148E-04	0.834E-01	89	17.8000	7.724E-04	0.582E-01
40	8.0000	3.416E-04	0.928E-01	90	18.0000	6.193E-04	0.650E-01
41	8.2000	3.384E-04	0.961E-01	91	18.2000	4.954E-04	0.728E-01
42	8.4000	3.265E-04	0.992E-01	92	18.4000	3.874E-04	0.821E-01
43	8.6000	3.549E-04	0.922E-01	93	18.6000	2.705E-04	0.995E-01
44	8.8000	3.029E-04	0.100E+00	94	18.8000	2.429E-04	0.104E+00
45	9.0000	3.169E-04	0.101E+00	95	19.0000	2.137E-04	0.111E+00
46	9.2000	3.093E-04	0.102E+00	96	19.2000	1.268E-04	0.146E+00
47	9.4000	3.300E-04	0.980E-01	97	19.4000	1.235E-04	0.146E+00
48	9.6000	3.134E-04	0.101E+00	98	19.6000	1.100E-04	0.154E+00
49	9.8000	3.346E-04	0.975E-01	99	19.8000	6.744E-05	0.197E+00
50	10.0000	3.429E-04	0.980E-01	100	20.0000	4.473E-05	0.248E+00

\$ % error = ERROR x 100

Table 5(4) Numerical data of neutron spectrum at 60° measured by TOF

Angle = 60°

J	ENERGY	FLUX	ERROR	J	ENERGY	FLUX	ERROR
1	0.2000			51	10.2000	3.649E-04	0.494E-01
2	0.4000	7.220E-07	0.206E+01	52	10.4000	3.624E-04	0.493E-01
3	0.6000	2.384E-04	0.101E+01	53	10.6000	3.915E-04	0.485E-01
4	0.8000	1.821E-04	0.401E+00	54	10.8000	4.439E-04	0.444E-01
5	1.0000	1.239E-03	0.331E-01	55	11.0000	4.753E-04	0.446E-01
6	1.2000	2.427E-03	0.170E-01	56	11.2000	4.622E-04	0.464E-01
7	1.4000	2.741E-03	0.142E-01	57	11.4000	5.909E-04	0.401E-01
8	1.6000	2.959E-03	0.134E-01	58	11.6000	6.849E-04	0.372E-01
9	1.8000	2.787E-03	0.135E-01	59	11.8000	7.920E-04	0.349E-01
10	2.0000	2.522E-03	0.142E-01	60	12.0000	1.061E-03	0.300E-01
11	2.2000	2.407E-03	0.148E-01	61	12.2000	1.299E-03	0.273E-01
12	2.4000	2.289E-03	0.151E-01	62	12.4000	1.786E-03	0.230E-01
13	2.6000	2.153E-03	0.157E-01	63	12.6000	2.635E-03	0.184E-01
14	2.8000	2.071E-03	0.161E-01	64	12.8000	3.872E-03	0.151E-01
15	3.0000	1.643E-03	0.187E-01	65	13.0000	5.463E-03	0.127E-01
16	3.2000	1.490E-03	0.196E-01	66	13.2000	7.046E-03	0.112E-01
17	3.4000	1.361E-03	0.210E-01	67	13.4000	9.495E-03	0.964E-02
18	3.6000	1.192E-03	0.230E-01	68	13.6000	1.217E-02	0.853E-02
19	3.8000	1.140E-03	0.233E-01	69	13.8000	1.527E-02	0.764E-02
20	4.0000	1.045E-03	0.242E-01	70	14.0000	1.957E-02	0.676E-02
21	4.2000	9.339E-04	0.268E-01	71	14.2000	2.433E-02	0.604E-02
22	4.4000	8.880E-04	0.271E-01	72	14.4000	2.980E-02	0.544E-02
23	4.6000	8.147E-04	0.288E-01	73	14.6000	3.434E-02	0.505E-02
24	4.8000	7.911E-04	0.284E-01	74	14.8000	3.419E-02	0.505E-02
25	5.0000	7.669E-04	0.299E-01	75	15.0000	2.802E-02	0.556E-02
26	5.2000	7.087E-04	0.314E-01	76	15.2000	1.721E-02	0.706E-02
27	5.4000	6.510E-04	0.326E-01	77	15.4000	8.265E-03	0.101E-01
28	5.6000	5.969E-04	0.348E-01	78	15.6000	3.239E-03	0.160E-01
29	5.8000	5.684E-04	0.360E-01	79	15.8000	1.034E-03	0.285E-01
30	6.0000	5.307E-04	0.364E-01	80	16.0000	2.528E-04	0.573E-01
31	6.2000	4.914E-04	0.394E-01	81	16.2000	5.249E-05	0.126E+00
32	6.4000	4.840E-04	0.397E-01	82	16.4000	9.477E-06	0.296E+00
33	6.6000	4.483E-04	0.431E-01	83	16.6000	3.291E-06	0.502E+00
34	6.8000	4.384E-04	0.442E-01	84	16.8000	2.455E-06	0.581E+00
35	7.0000	4.023E-04	0.476E-01	85	17.0000	4.034E-07	0.257E+01
36	7.2000	3.664E-04	0.496E-01	86	17.2000		
37	7.4000	3.836E-04	0.492E-01	87	17.4000		
38	7.6000	3.631E-04	0.511E-01	88	17.6000		
39	7.8000	3.431E-04	0.533E-01	89	17.8000		
40	8.0000	3.352E-04	0.538E-01	90	18.0000		
41	8.2000	3.327E-04	0.557E-01	91	18.2000		
42	8.4000	3.427E-04	0.536E-01	92	18.4000		
43	8.6000	3.274E-04	0.553E-01	93	18.6000		
44	8.8000	3.572E-04	0.512E-01	94	18.8000		
45	9.0000	3.427E-04	0.561E-01	95	19.0000		
46	9.2000	3.250E-04	0.546E-01	96	19.2000		
47	9.4000	3.372E-04	0.534E-01	97	19.4000		
48	9.6000	3.221E-04	0.535E-01	98	19.6000		
49	9.8000	3.459E-04	0.531E-01	99	19.8000		
50	10.0000	3.317E-04	0.530E-01	100	20.0000		

$$\% \text{ error} = \text{ERROR} \times 100$$

Table 5(5) Numerical data of neutron spectrum at 90° measured by TOF

Angle = 90°

J	ENERGY	FLUX	ERROR	J	ENERGY	FLUX	ERROR
1	0.2000			51	10.2000	4.781E-04	0.573E-01
2	0.4000			52	10.4000	4.820E-04	0.572E-01
3	0.6000			53	10.6000	5.165E-04	0.555E-01
4	0.8000	1.866E-04	0.453E+00	54	10.8000	5.966E-04	0.522E-01
5	1.0000	1.154E-03	0.446E-01	55	11.0000	6.295E-04	0.511E-01
6	1.2000	2.260E-03	0.235E-01	56	11.2000	6.919E-04	0.490E-01
7	1.4000	2.499E-03	0.199E-01	57	11.4000	8.193E-04	0.447E-01
8	1.6000	2.663E-03	0.189E-01	58	11.6000	9.731E-04	0.413E-01
9	1.8000	2.503E-03	0.191E-01	59	11.8000	1.165E-03	0.377E-01
10	2.0000	2.370E-03	0.196E-01	60	12.0000	1.552E-03	0.327E-01
11	2.2000	2.179E-03	0.206E-01	61	12.2000	2.427E-03	0.260E-01
12	2.4000	2.237E-03	0.204E-01	62	12.4000	3.513E-03	0.214E-01
13	2.6000	1.888E-03	0.224E-01	63	12.6000	5.238E-03	0.174E-01
14	2.8000	1.602E-03	0.246E-01	64	12.8000	7.610E-03	0.145E-01
15	3.0000	1.489E-03	0.261E-01	65	13.0000	1.008E-02	0.126E-01
16	3.2000	1.351E-03	0.274E-01	66	13.2000	1.339E-02	0.109E-01
17	3.4000	1.247E-03	0.292E-01	67	13.4000	1.852E-02	0.931E-02
18	3.6000	1.181E-03	0.303E-01	68	13.6000	2.575E-02	0.791E-02
19	3.8000	1.036E-03	0.324E-01	69	13.8000	3.633E-02	0.667E-02
20	4.0000	9.846E-04	0.334E-01	70	14.0000	4.961E-02	0.572E-02
21	4.2000	8.959E-04	0.357E-01	71	14.2000	5.444E-02	0.544E-02
22	4.4000	7.891E-04	0.383E-01	72	14.4000	4.131E-02	0.623E-02
23	4.6000	8.205E-04	0.376E-01	73	14.6000	2.125E-02	0.865E-02
24	4.8000	8.043E-04	0.374E-01	74	14.8000	7.631E-03	0.144E-01
25	5.0000	6.499E-04	0.435E-01	75	15.0000	1.924E-03	0.286E-01
26	5.2000	6.433E-04	0.437E-01	76	15.2000	4.704E-04	0.575E-01
27	5.4000	6.098E-04	0.451E-01	77	15.4000	8.137E-05	0.138E+00
28	5.6000	5.740E-04	0.470E-01	78	15.6000	1.689E-05	0.328E+00
29	5.8000	5.962E-04	0.458E-01	79	15.8000	9.091E-06	0.418E+00
30	6.0000	5.528E-04	0.477E-01	80	16.0000	3.828E-06	0.627E+00
31	6.2000	5.027E-04	0.512E-01	81	16.2000	2.730E-06	0.742E+00
32	6.4000	4.920E-04	0.528E-01	82	16.4000	2.681E-06	0.749E+00
33	6.6000	4.751E-04	0.540E-01	83	16.6000	1.995E-06	0.868E+00
34	6.8000	4.425E-04	0.577E-01	84	16.8000	3.947E-07	0.366E+01
35	7.0000	4.455E-04	0.589E-01	85	17.0000		
36	7.2000	4.037E-04	0.608E-01	86	17.2000		
37	7.4000	4.219E-04	0.607E-01	87	17.4000		
38	7.6000	3.401E-04	0.697E-01	88	17.6000		
39	7.8000	3.654E-04	0.666E-01	89	17.8000		
40	8.0000	3.770E-04	0.660E-01	90	18.0000		
41	8.2000	3.358E-04	0.709E-01	91	18.2000		
42	8.4000	3.494E-04	0.704E-01	92	18.4000		
43	8.6000	3.633E-04	0.665E-01	93	18.6000		
44	8.8000	3.619E-04	0.689E-01	94	18.8000		
45	9.0000	3.499E-04	0.697E-01	95	19.0000		
46	9.2000	3.682E-04	0.676E-01	96	19.2000		
47	9.4000	3.718E-04	0.654E-01	97	19.4000		
48	9.6000	3.938E-04	0.630E-01	98	19.6000		
49	9.8000	4.237E-04	0.631E-01	99	19.8000		
50	10.0000	5.114E-04	0.551E-01	100	20.0000		

\$ % error = ERROR x 100

Table 5(6) Numerical data of neutron spectrum at 105° measured by TOF

Angle = 105°

J	ENERGY	FLUX	ERROR	J	ENERGY	FLUX	ERROR
1	0.2000			51	10.2000	4.090E-04	0.461E-01
2	0.4000			52	10.4000	4.695E-04	0.426E-01
3	0.6000	2.821E-04	0.851E+00	53	10.6000	5.016E-04	0.421E-01
4	0.8000	3.324E-05	0.209E+01	54	10.8000	5.552E-04	0.392E-01
5	1.0000	1.228E-03	0.331E-01	55	11.0000	6.405E-04	0.376E-01
6	1.2000	2.275E-03	0.175E-01	56	11.2000	7.180E-04	0.359E-01
7	1.4000	2.636E-03	0.144E-01	57	11.4000	9.153E-04	0.313E-01
8	1.6000	2.871E-03	0.135E-01	58	11.6000	1.330E-03	0.253E-01
9	1.8000	2.697E-03	0.136E-01	59	11.8000	1.265E-03	0.218E-01
10	2.0000	2.569E-03	0.139E-01	60	12.0000	2.782E-03	0.178E-01
11	2.2000	2.550E-03	0.142E-01	61	12.2000	4.413E-03	0.141E-01
12	2.4000	2.599E-03	0.140E-01	62	12.4000	6.273E-03	0.118E-01
13	2.6000	2.047E-03	0.160E-01	63	12.6000	8.754E-03	0.991E-02
14	2.8000	1.812E-03	0.172E-01	64	12.8000	1.174E-02	0.856E-02
15	3.0000	1.644E-03	0.185E-01	65	13.0000	1.480E-02	0.763E-02
16	3.2000	1.474E-03	0.196E-01	66	13.2000	1.857E-02	0.682E-02
17	3.4000	1.434E-03	0.202E-01	67	13.4000	2.424E-02	0.598E-02
18	3.6000	1.274E-03	0.219E-01	68	13.6000	3.088E-02	0.531E-02
19	3.8000	1.232E-03	0.221E-01	69	13.8000	3.850E-02	0.476E-02
20	4.0000	1.132E-03	0.229E-01	70	14.0000	4.454E-02	0.444E-02
21	4.2000	1.043E-03	0.249E-01	71	14.2000	4.217E-02	0.454E-02
22	4.4000	9.946E-04	0.252E-01	72	14.4000	2.974E-02	0.539E-02
23	4.6000	8.966E-04	0.270E-01	73	14.6000	1.535E-02	0.749E-02
24	4.8000	9.222E-04	0.259E-01	74	14.8000	5.704E-03	0.122E-01
25	5.0000	8.630E-04	0.277E-01	75	15.0000	1.561E-03	0.233E-01
26	5.2000	7.553E-04	0.301E-01	76	15.2000	3.630E-04	0.485E-01
27	5.4000	7.566E-04	0.297E-01	77	15.4000	8.675E-05	0.981E-01
28	5.6000	6.445E-04	0.330E-01	78	15.6000	2.472E-05	0.183E+00
29	5.8000	6.480E-04	0.331E-01	79	15.8000	3.689E-06	0.701E+00
30	6.0000	6.132E-04	0.333E-01	80	16.0000	6.156E-06	0.382E+00
31	6.2000	5.749E-04	0.357E-01	81	16.2000	2.032E-06	0.632E+00
32	6.4000	5.652E-04	0.361E-01	82	16.4000	1.698E-06	0.692E+00
33	6.6000	5.224E-04	0.391E-01	83	16.6000	1.748E-06	0.632E+00
34	6.8000	4.947E-04	0.408E-01	84	16.8000	8.552E-07	0.975E+00
35	7.0000	4.999E-04	0.414E-01	85	17.0000	2.827E-07	0.347E+01
36	7.2000	4.808E-04	0.419E-01	86	17.2000	1.326E-06	0.159E+01
37	7.4000	4.377E-04	0.451E-01	87	17.4000		
38	7.6000	3.920E-04	0.483E-01	88	17.6000		
39	7.8000	4.074E-04	0.476E-01	89	17.8000		
40	8.0000	3.728E-04	0.501E-01	90	18.0000		
41	8.2000	3.998E-04	0.493E-01	91	18.2000		
42	8.4000	3.763E-04	0.502E-01	92	18.4000		
43	8.6000	3.721E-04	0.508E-01	93	18.6000		
44	8.8000	3.904E-04	0.482E-01	94	18.8000		
45	9.0000	3.497E-04	0.550E-01	95	19.0000		
46	9.2000	3.844E-04	0.491E-01	96	19.2000		
47	9.4000	3.880E-04	0.488E-01	97	19.4000		
48	9.6000	4.026E-04	0.468E-01	98	19.6000		
49	9.8000	3.963E-04	0.487E-01	99	19.8000		
50	10.0000	4.033E-04	0.472E-01	100	20.0000		

\$ % error = ERROR x 100

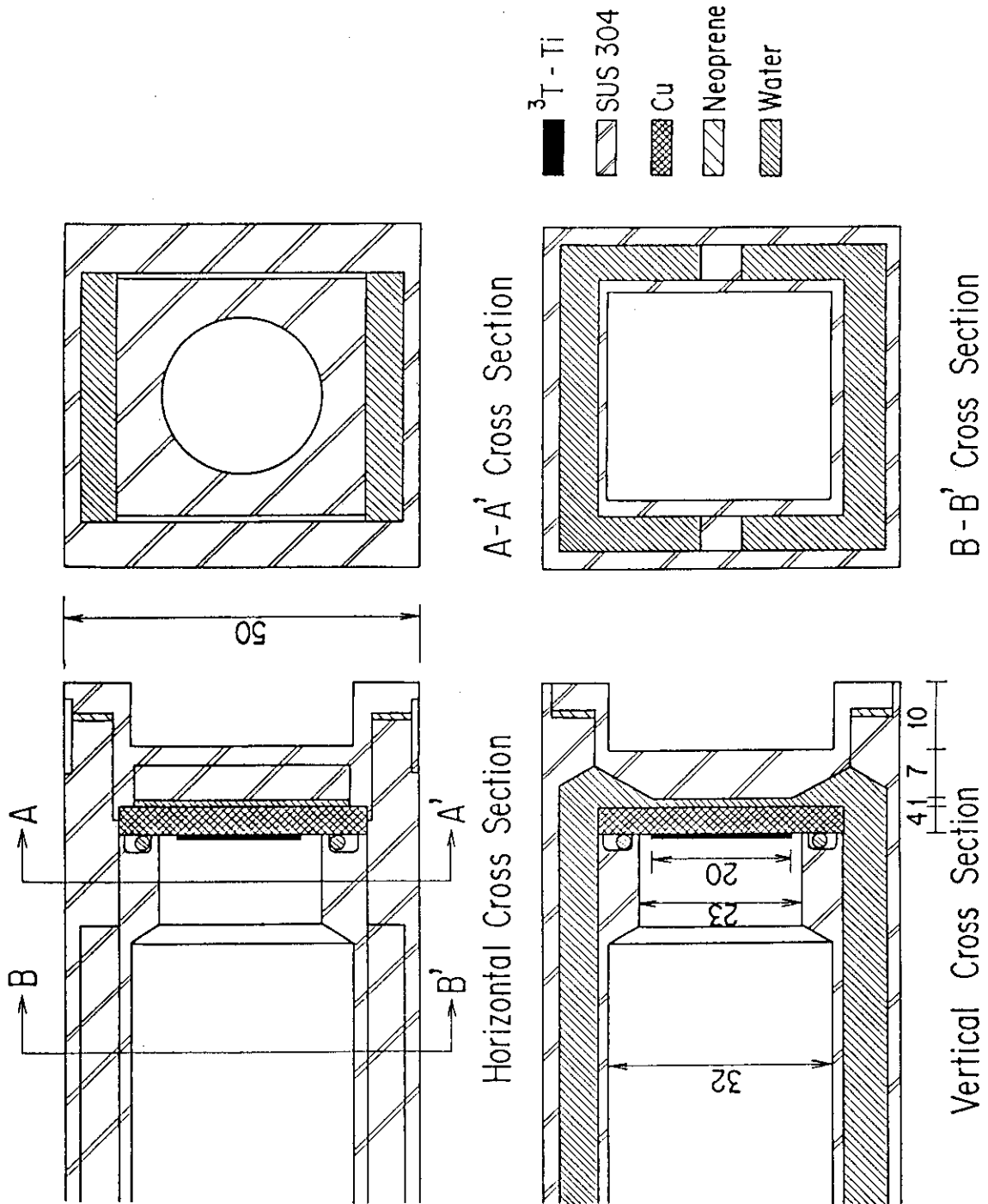


Fig. 1 Cross Sections of the water cooled target assembly.

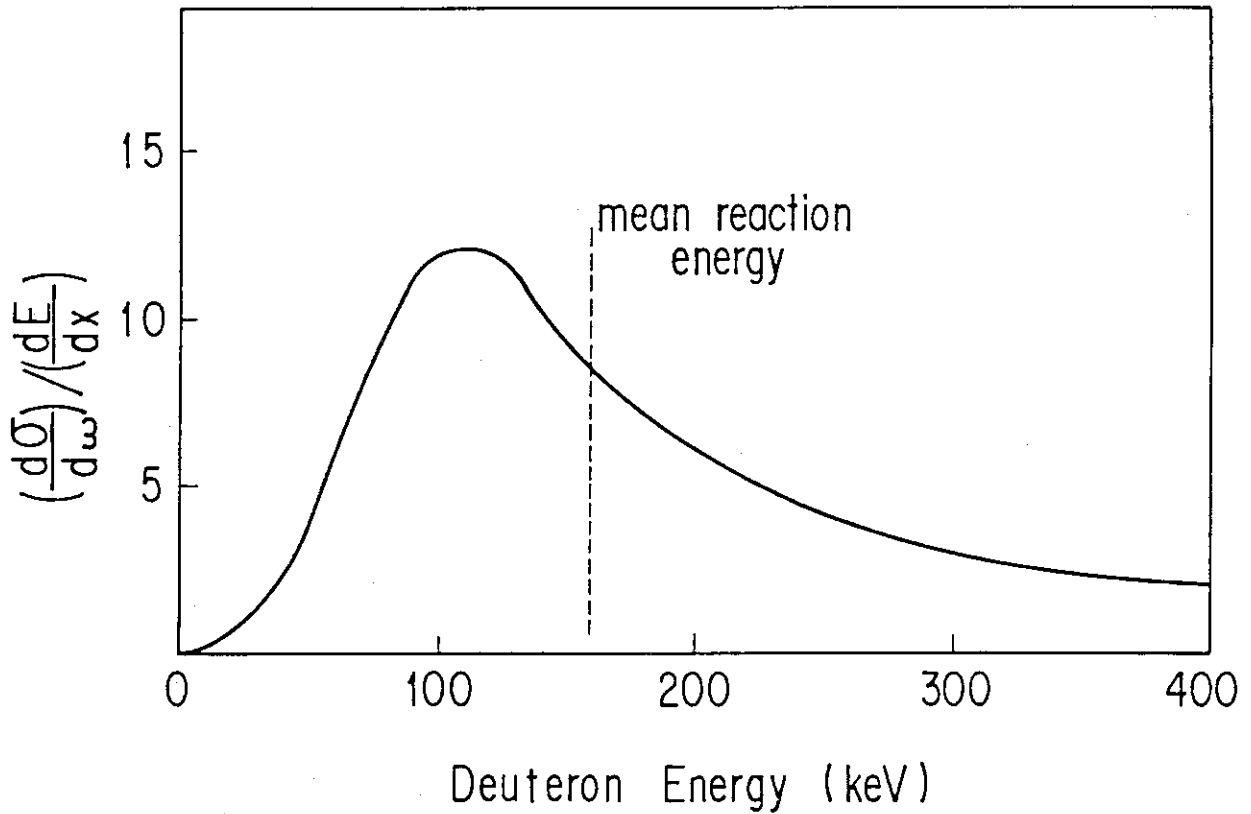


Fig. 2 Energy distribution of deuteron in the titanium layer at 338 keV incident d^+ energy.

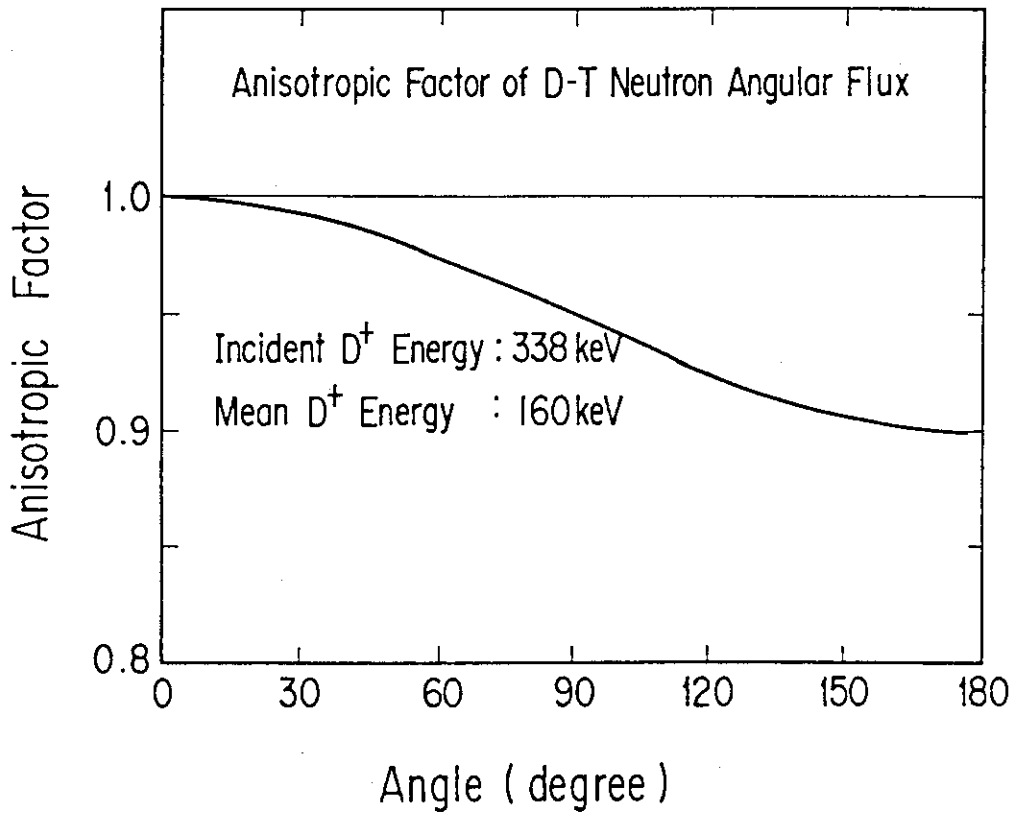


Fig. 3 Anisotropic factor of the D-T neutron with respect to the emission angle.

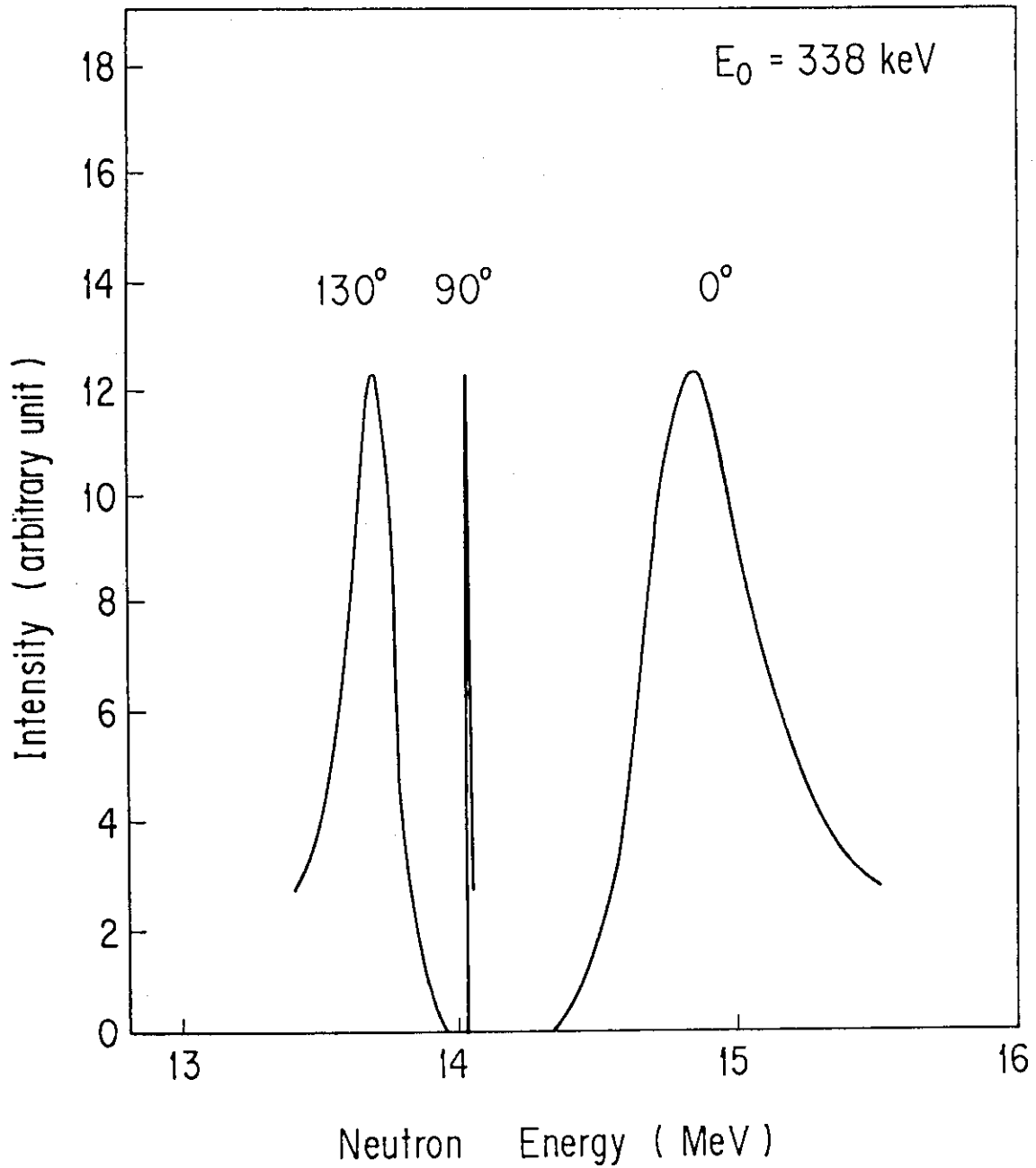


Fig. 4 Calculated spectra of neutrons emitted to 0° , 90° and 130° with respect to the incident d^+ beam direction. The calculation is based on the reaction kinematics.

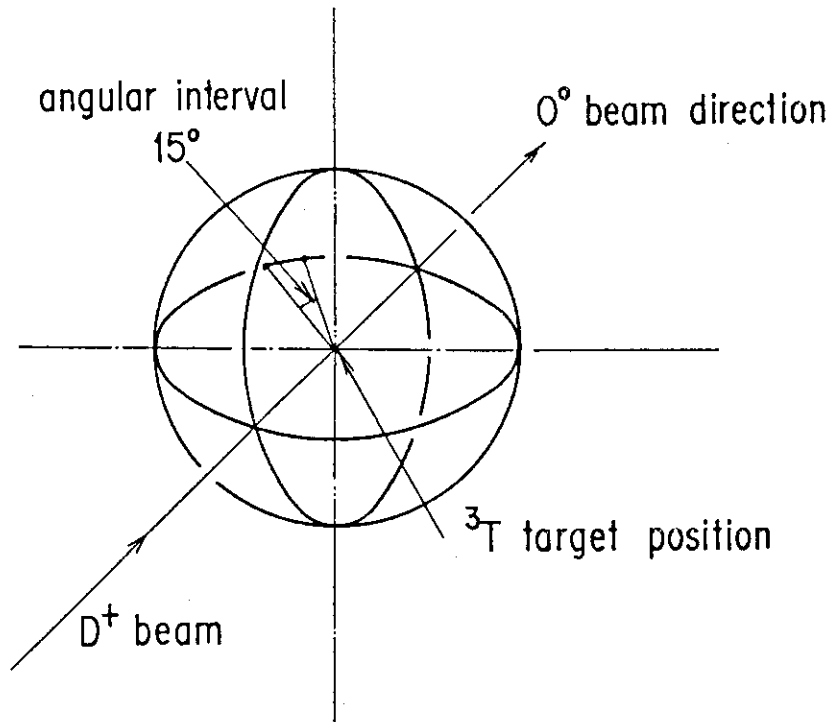


Fig. 5 Schematic drawing of the three dimensional mapping of the activation foils.

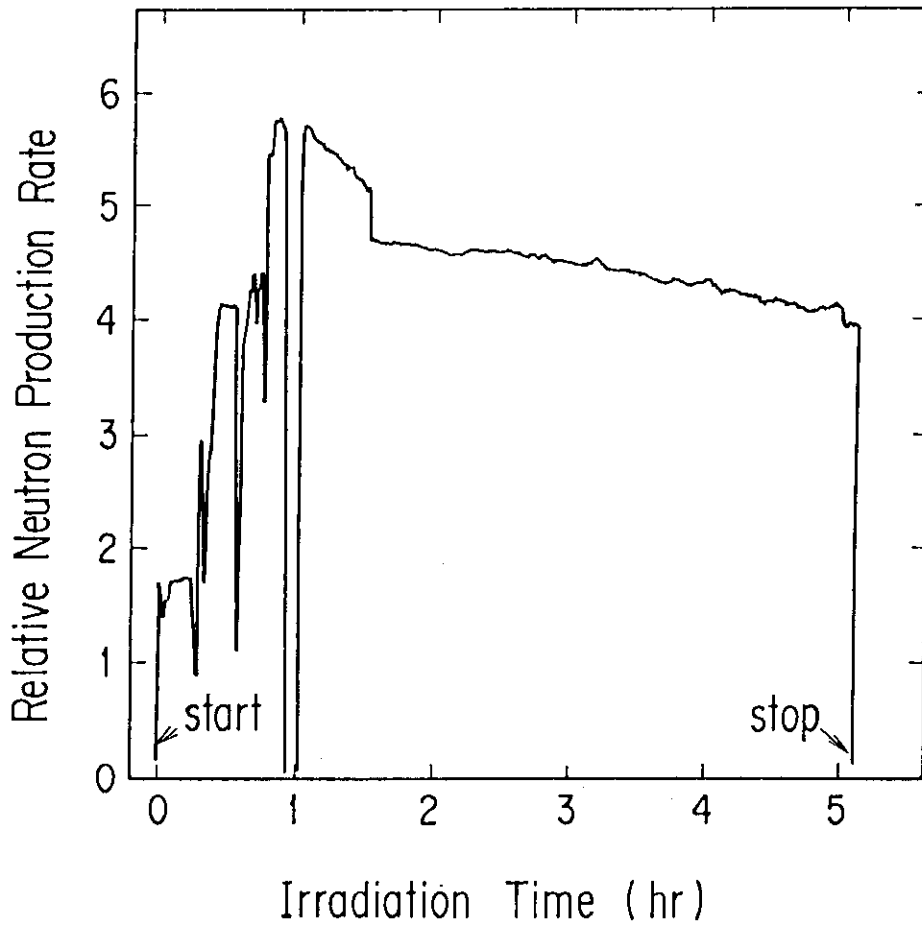


Fig. 6 Irradiation pattern for the foil activation measurements.

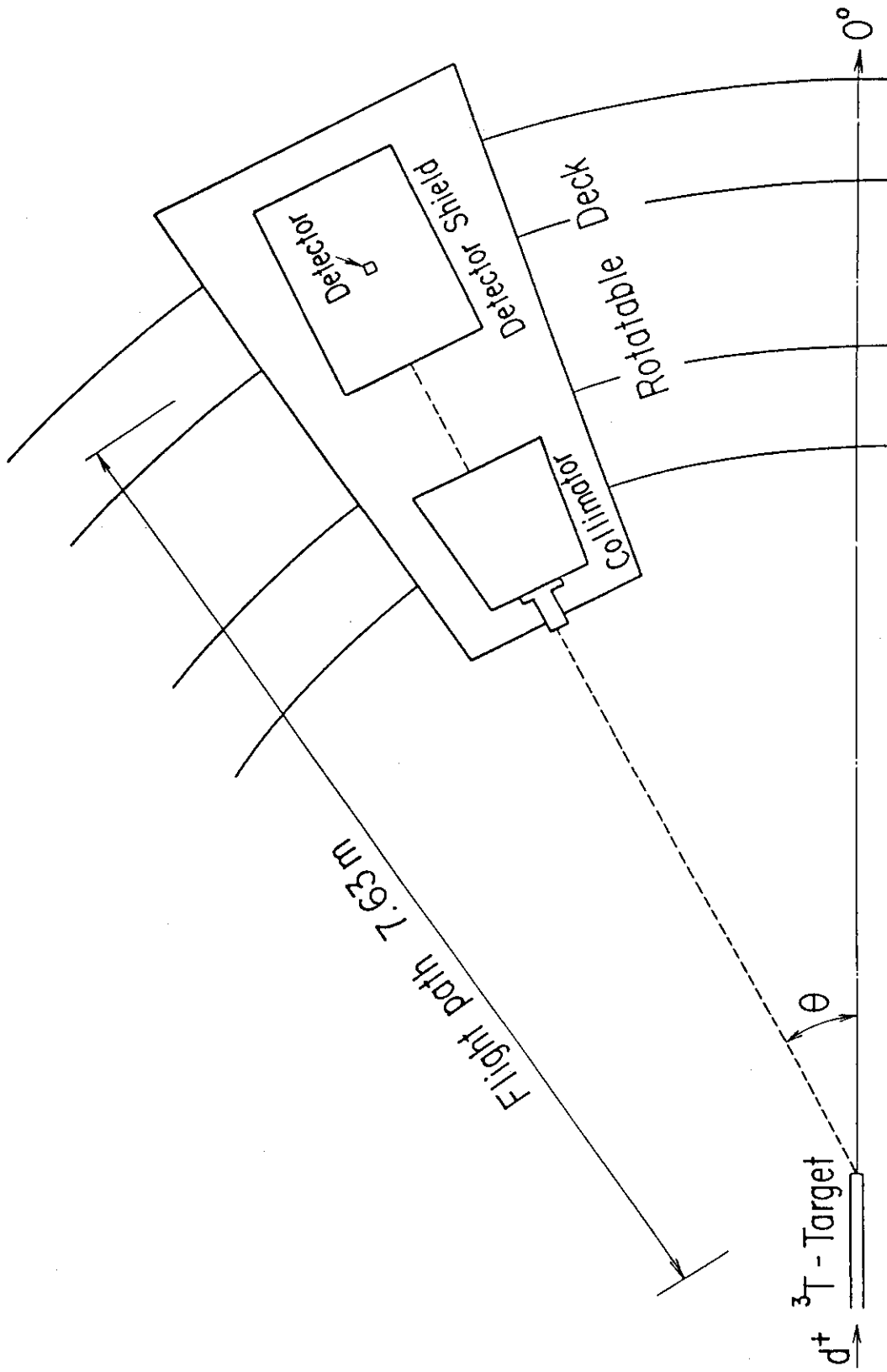


Fig. 7 The detector configuration for the angular flux distribution by NE213 and TOF measurement.

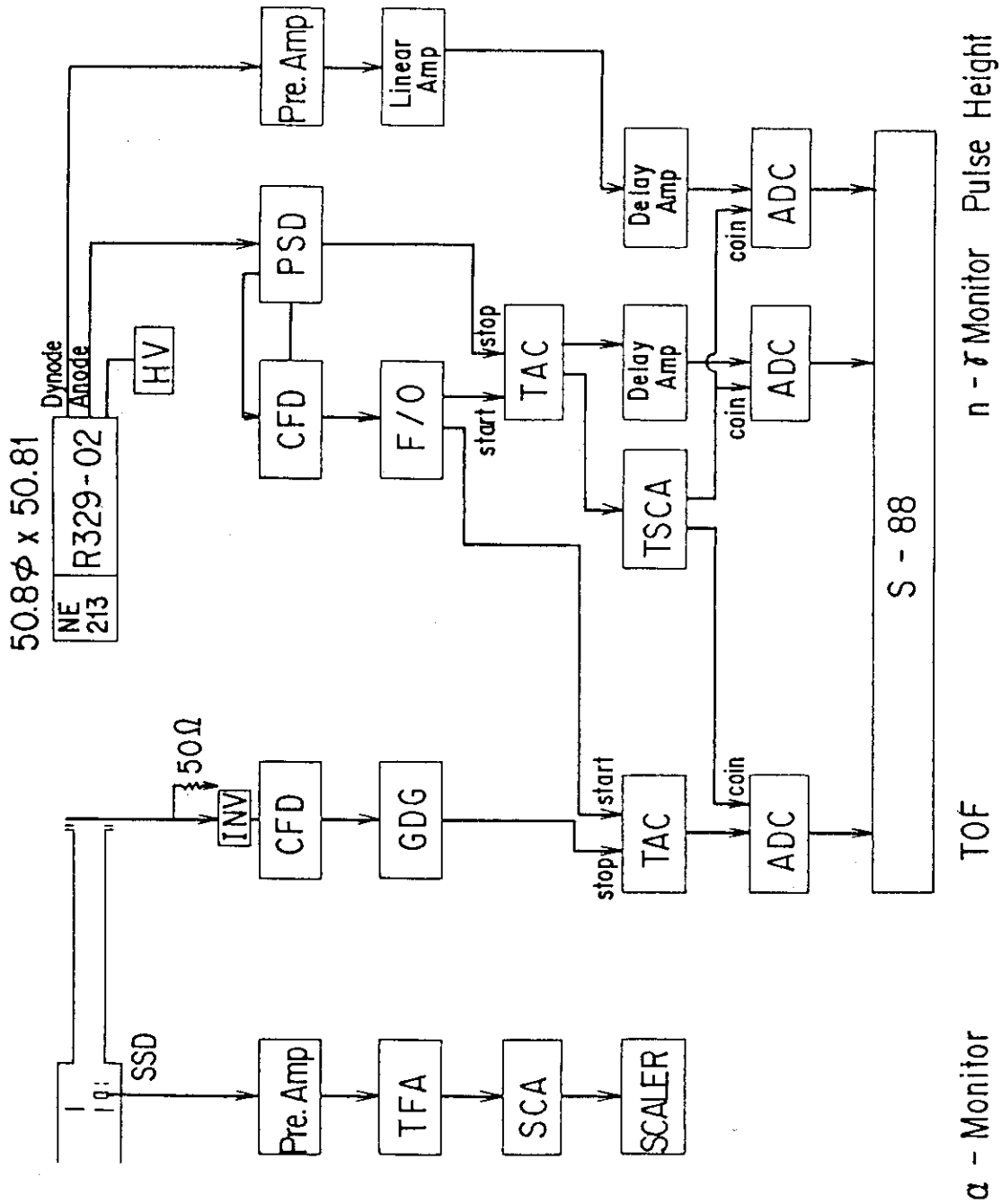


Fig. 8 Block diagram of circuit employed in the TOF measurement.

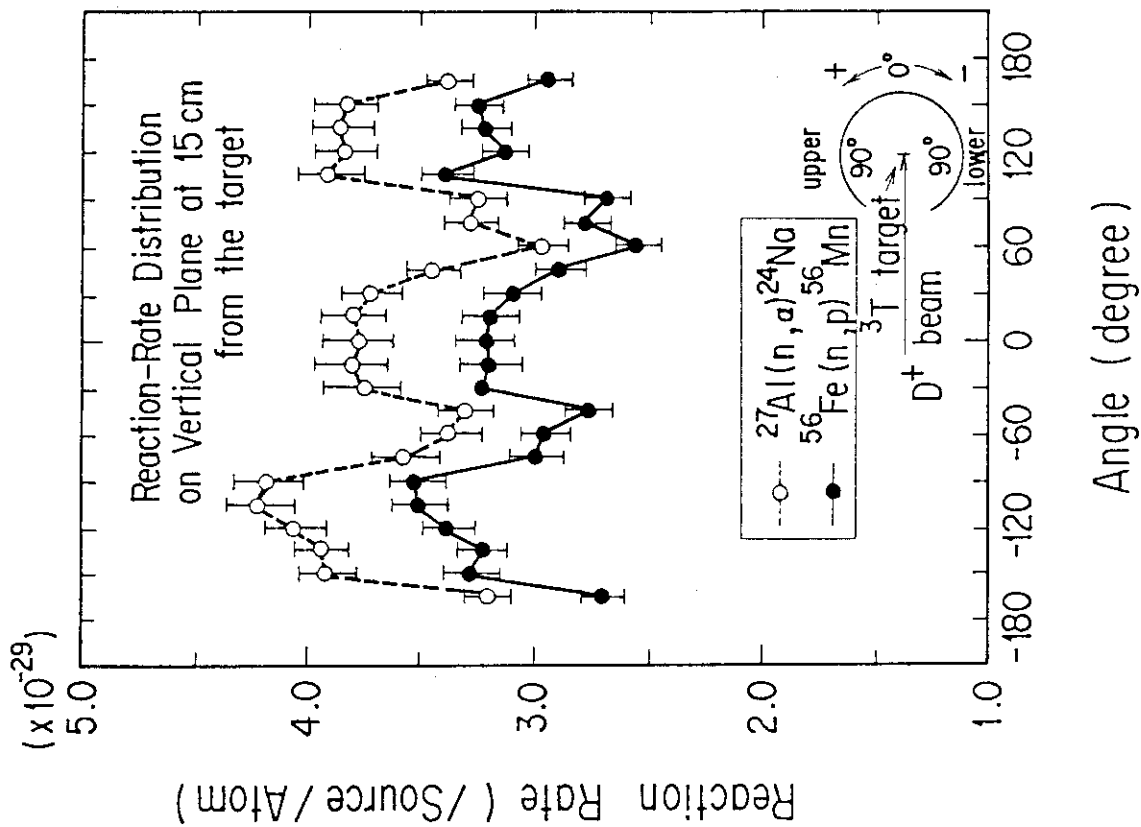


Fig. 9(2) Reaction-rate distributions for $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ and $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ on the vertical plane.

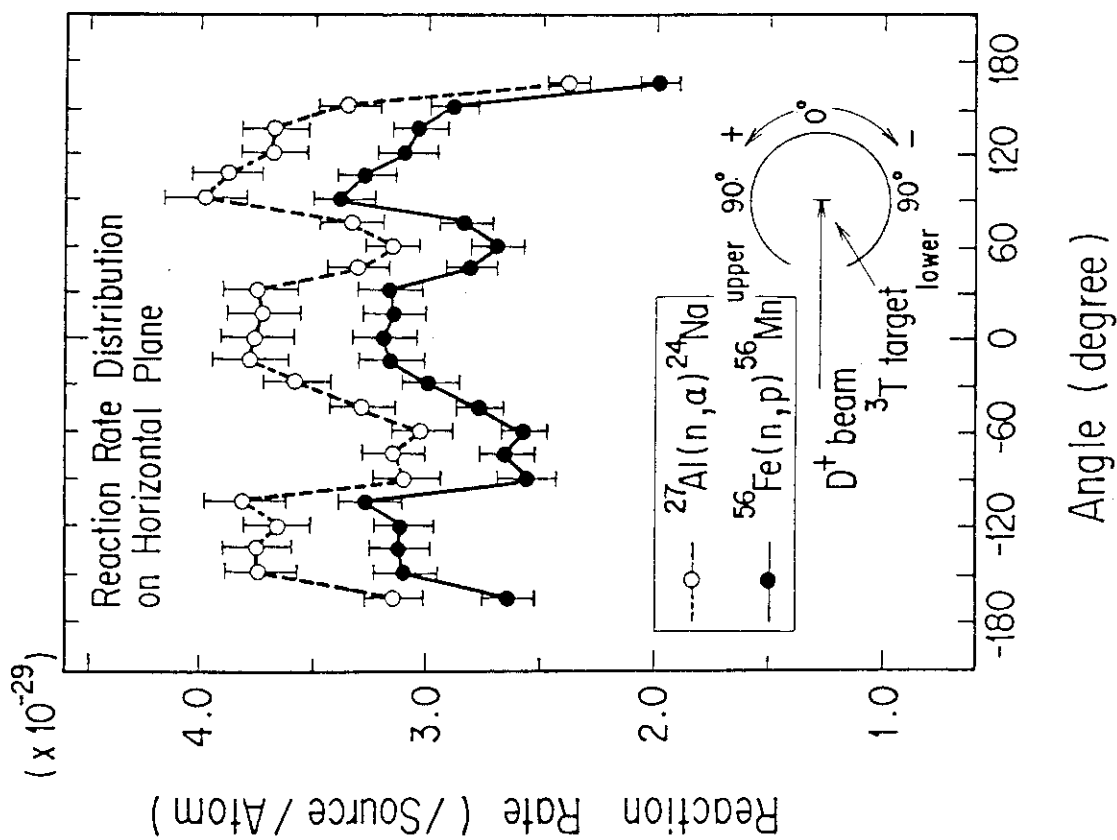


Fig. 9(1) Reaction-rate distributions for $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ and $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ on the horizontal plane.

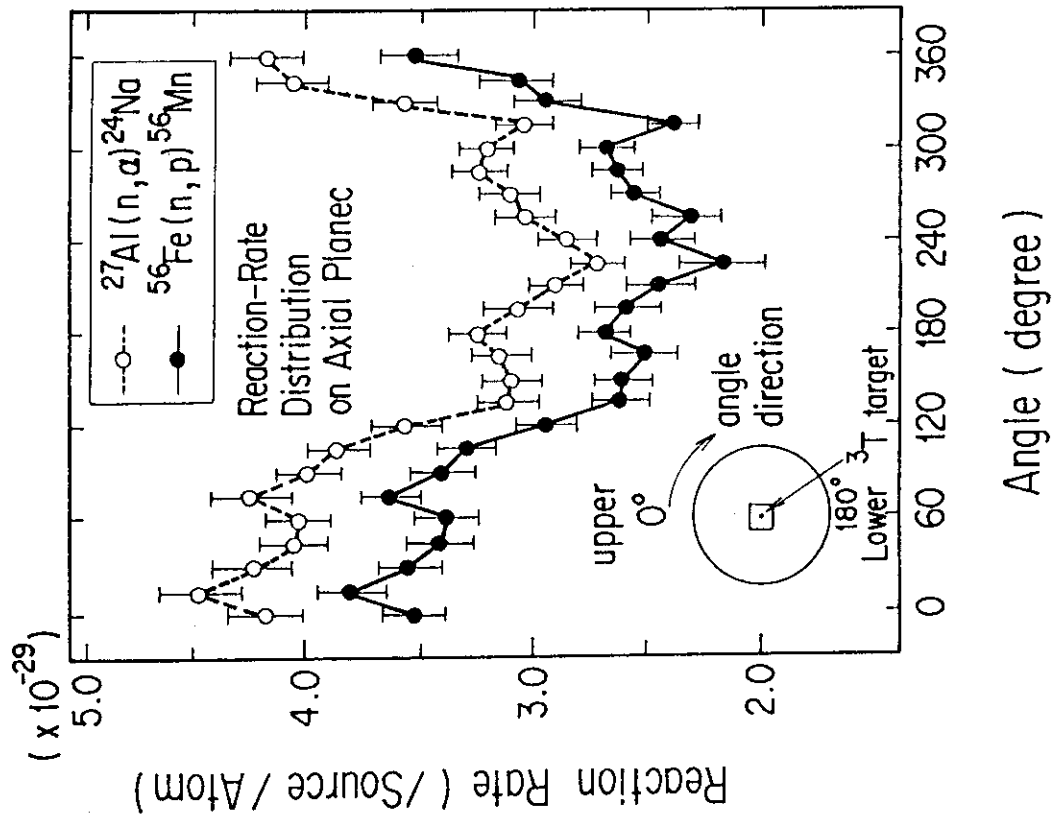


Fig. 9(3) Reaction-rate distributions for $27\text{Al}(n, \alpha)24\text{Na}$ and $56\text{Fe}(n, p)56\text{Mn}$ on the axial plane perpendicular to d^+ beam direction.

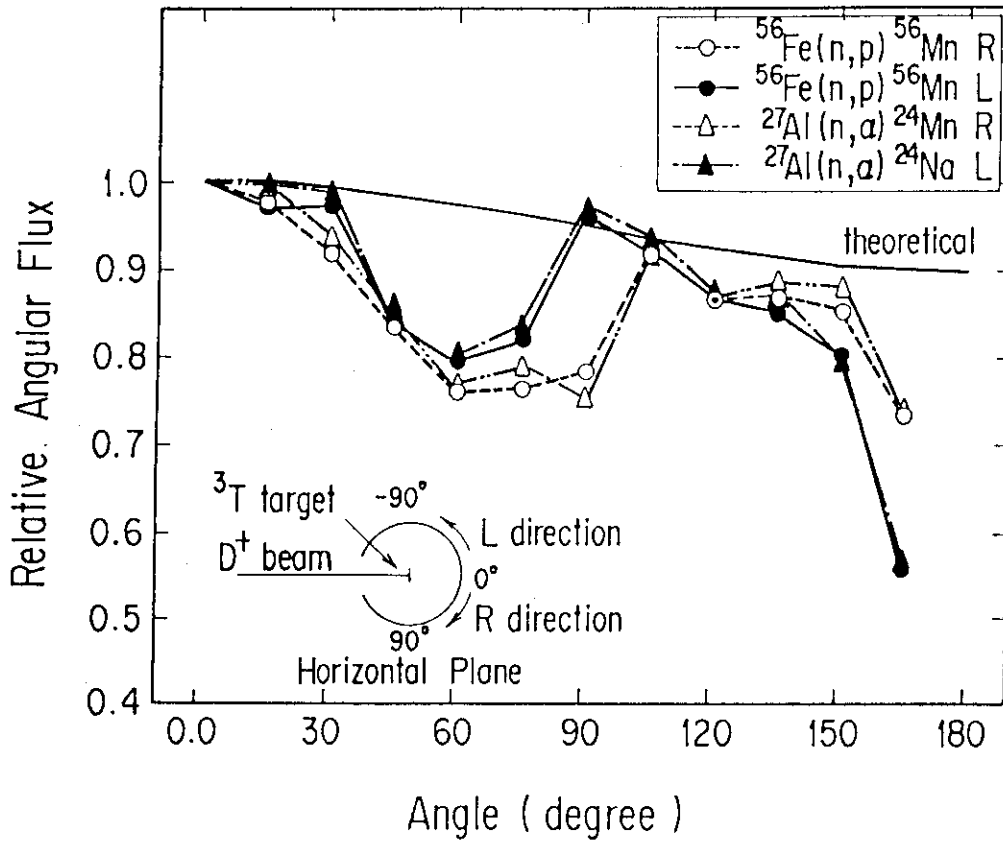


Fig. 10(1) Relative angular neutron flux on the horizontal plane derived from the foil reaction data.

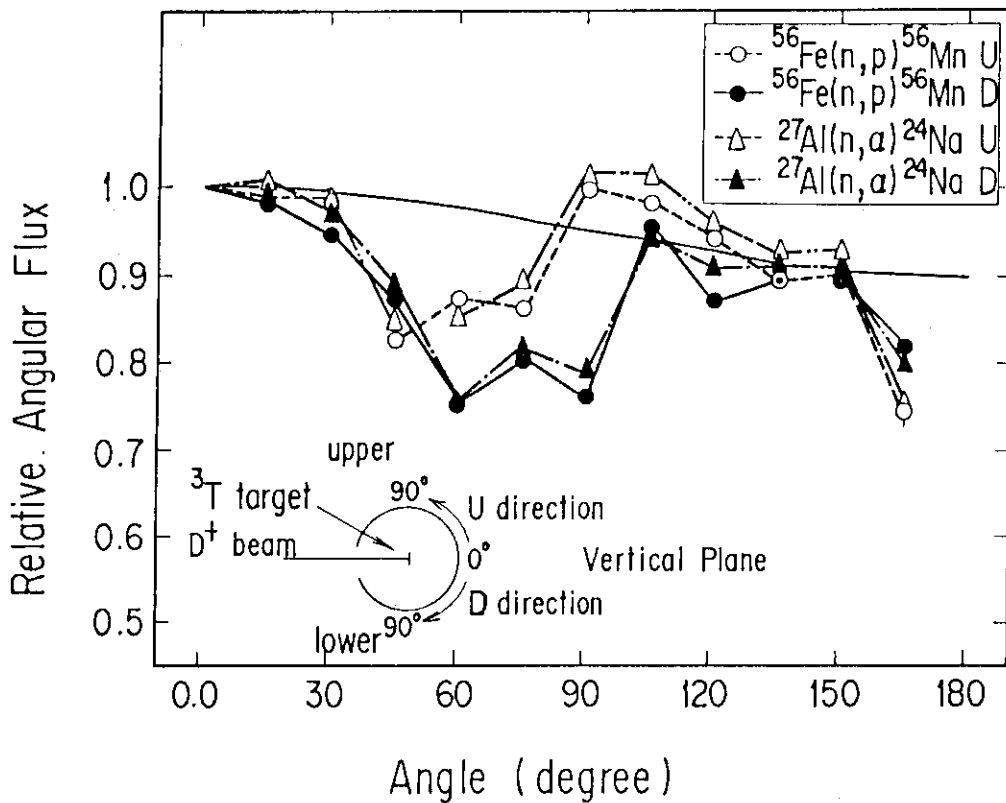


Fig. 10(2) Relative angular neutron flux on the vertical plane derived from the foil reaction data.

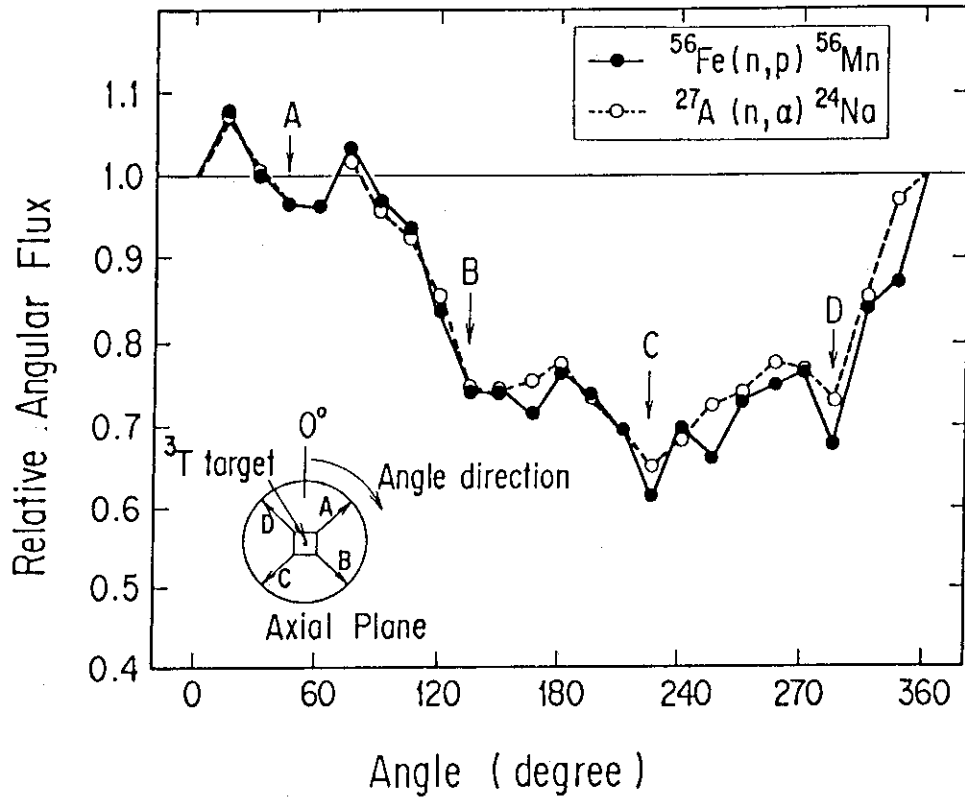


Fig. 10(3) Relative angular neutron flux on the axial plane derived from the foil reaction data.

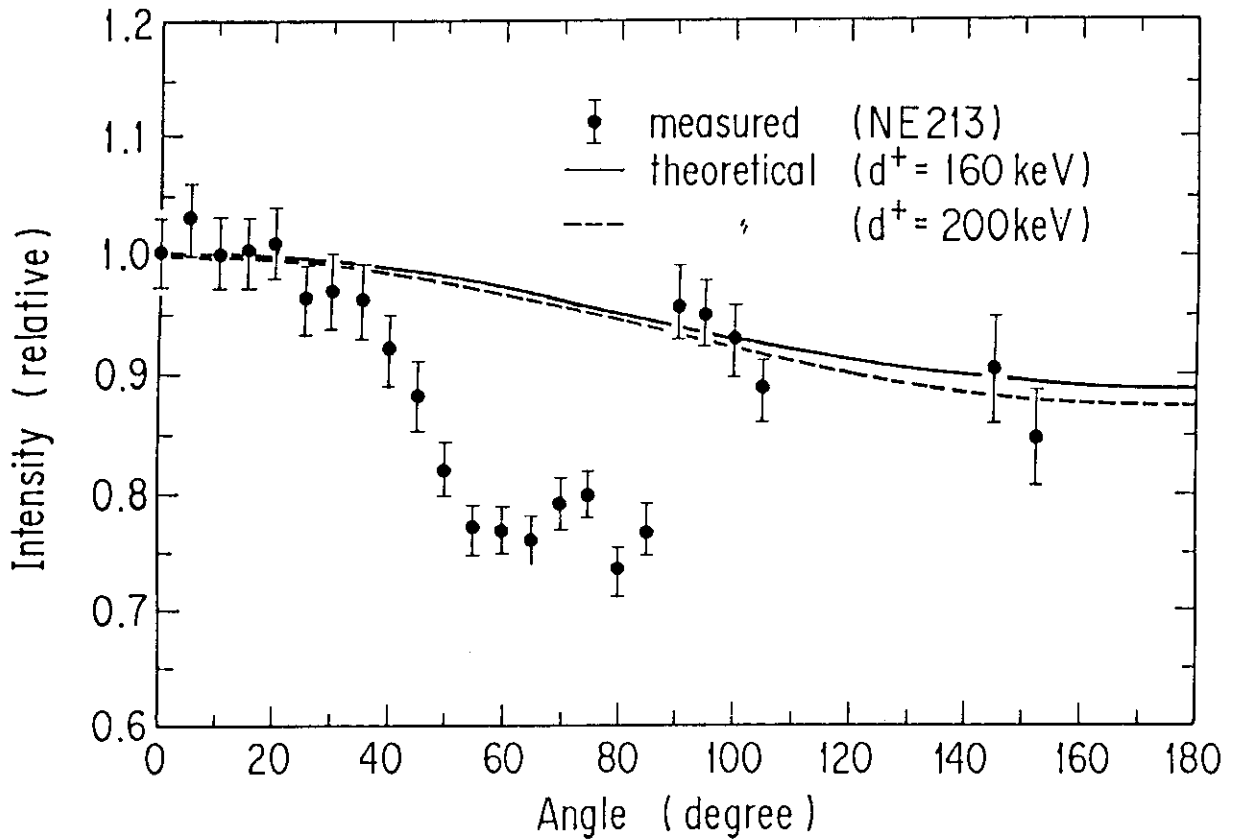


Fig. 11 Relative angular neutron flux distribution measured by NE213 detector.

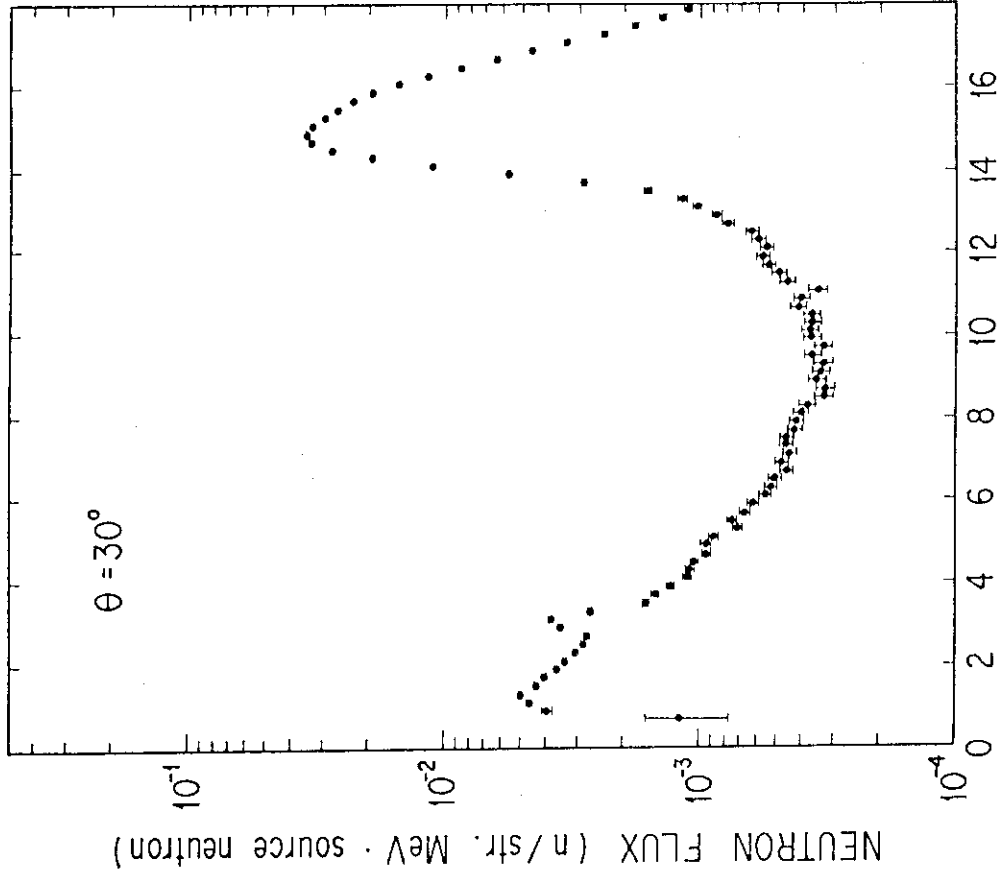


Fig.12(2) Neutron spectrum at 30° direction measured by TOF technique.

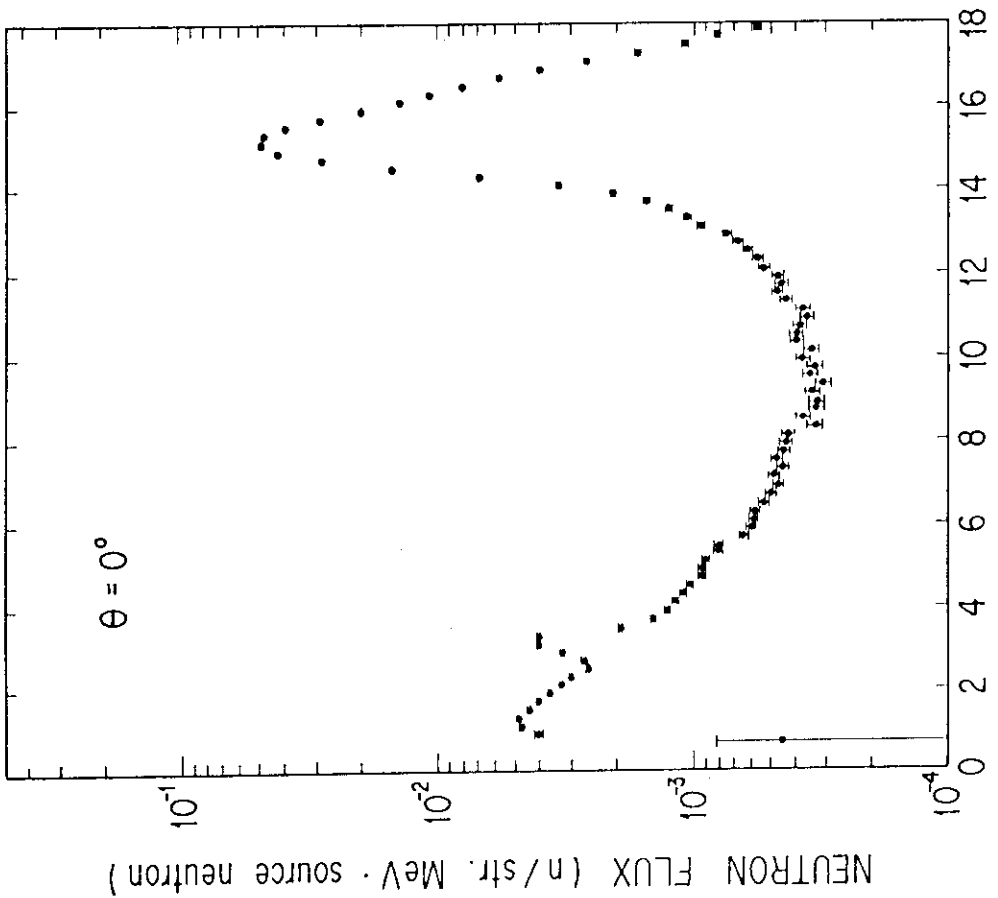
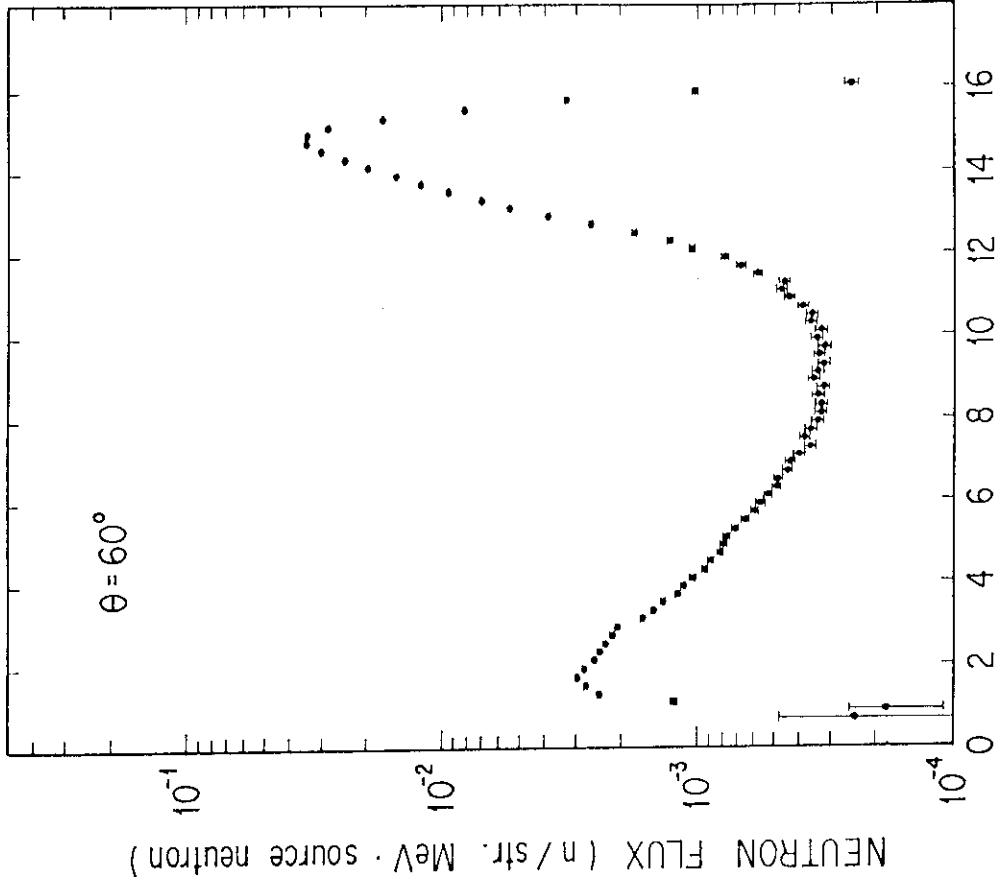
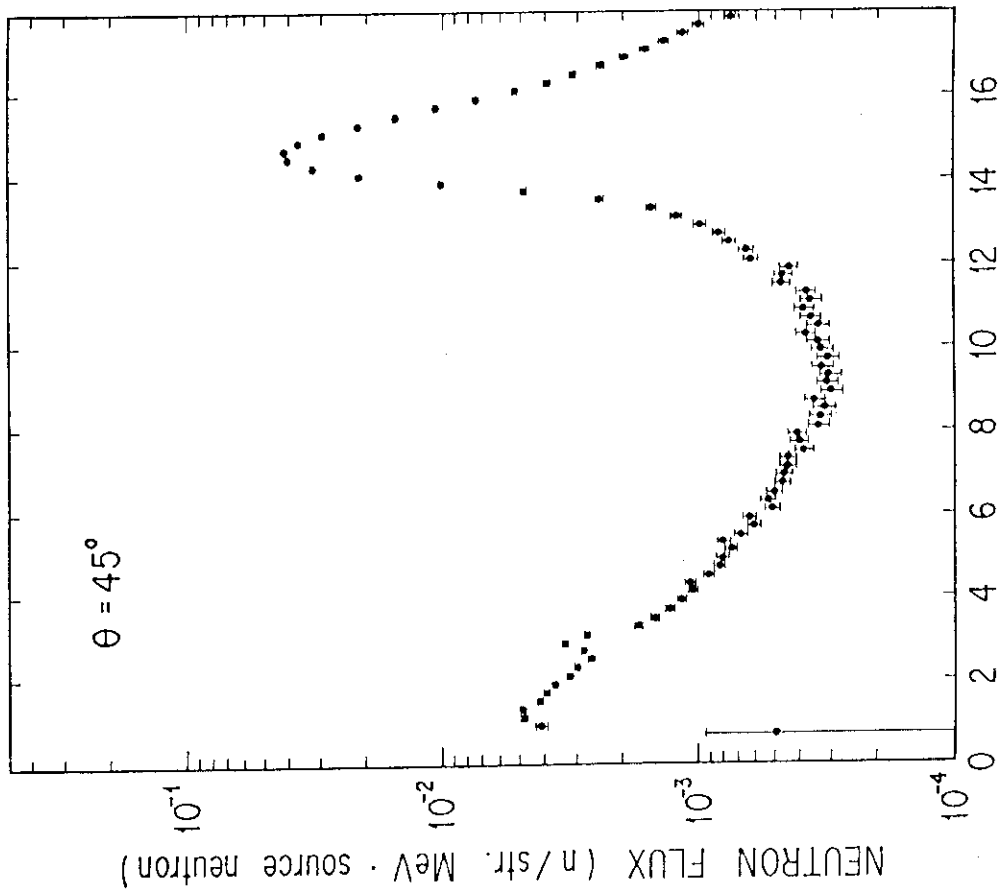


Fig.12(1) Neutron spectrum at 0° direction measured by TOF technique.



NEUTRON ENERGY (MeV)

Fig. 12(4) Neutron spectrum at 60° direction measured by TOF technique.



NEUTRON ENERGY (MeV)

Fig. 12(3) Neutron spectrum at 45° direction measured by TOF technique.

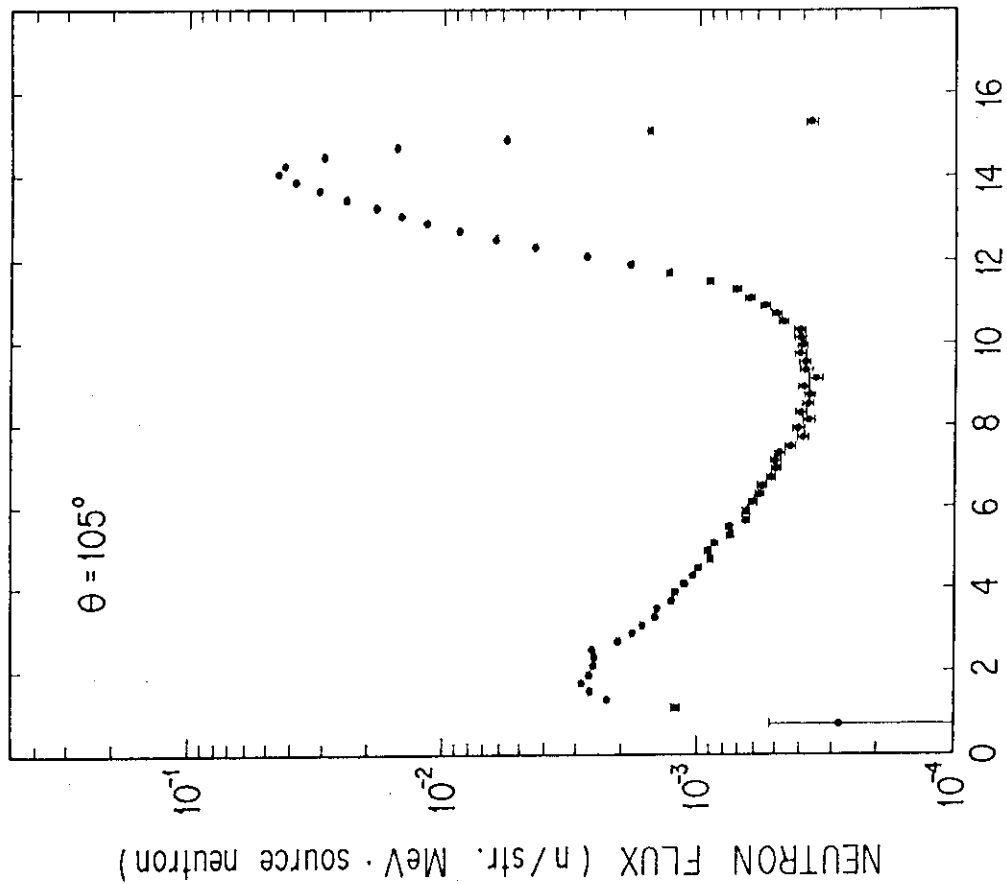


Fig. 12(6) Neutron spectrum at 105° direction measured by TOF technique.

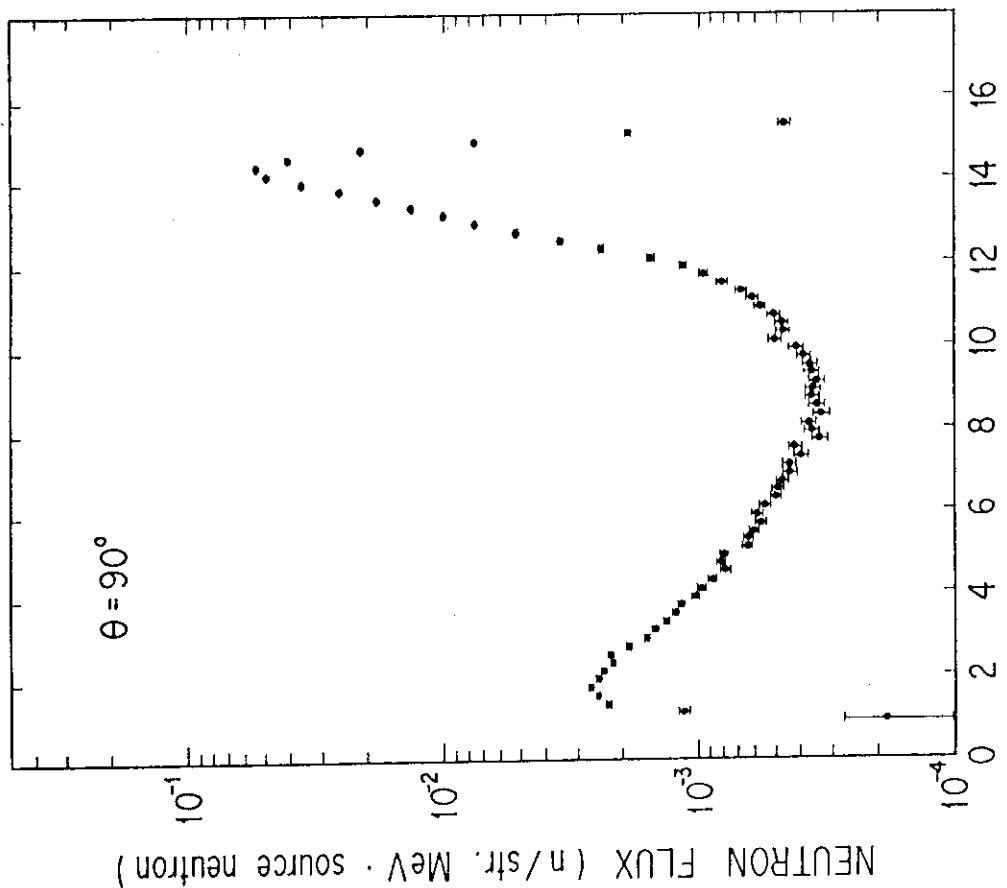


Fig. 12(5) Neutron spectrum at 90° direction measured by TOF technique.

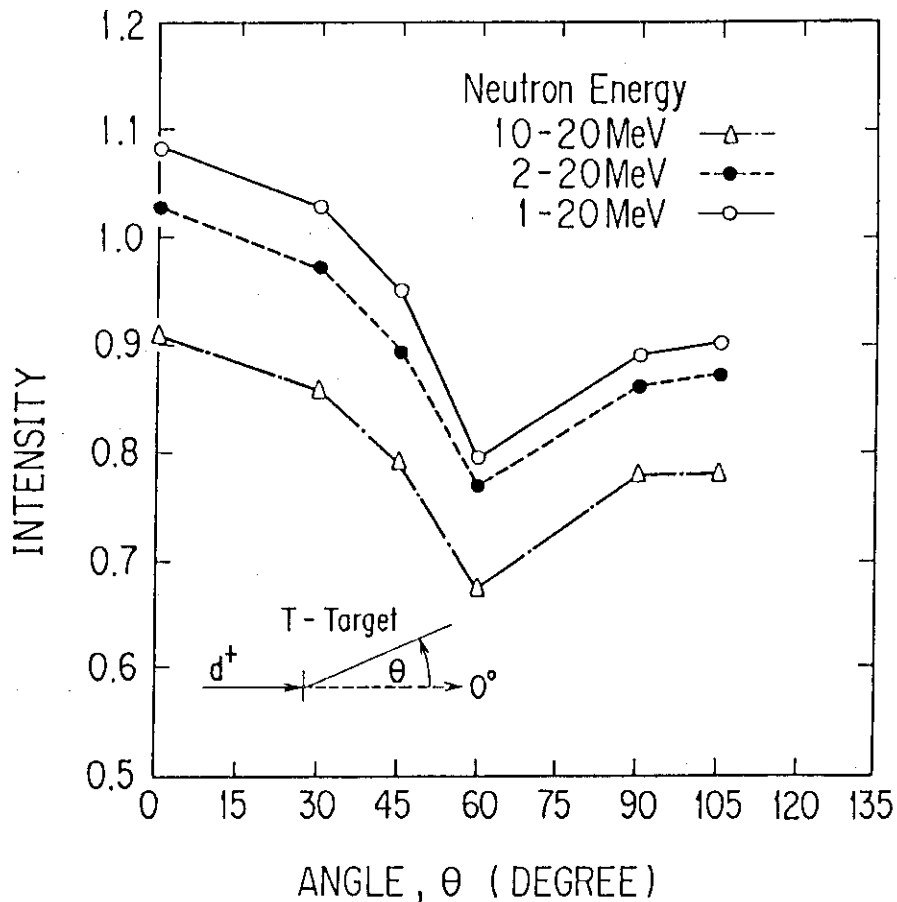


Fig. 13 Integrated neutron angular flux distributions derived from the TOF spectra.

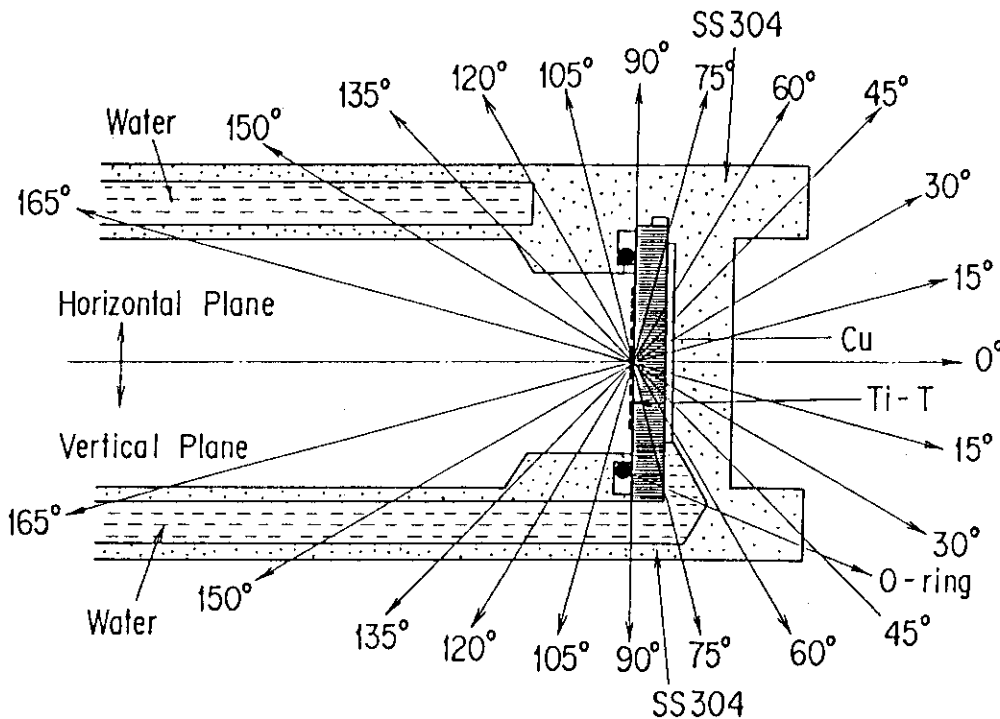


Fig. 14 Cross section of the target assembly and composition.