

JAERI-Tech
2000-041



JP0050557



熱中性子線照射場における検出器固定用
ジグ材料の熱中性子散乱線の評価

2000年5月

清水 滋・根本 久*・黒沢 浩二*・吉澤 道夫

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

熱中性子線照射場における検出器固定用ジグ材料の熱中性子散乱線の評価

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

清水 滋・根本 久*・黒沢 浩二*・吉澤 道夫

(2000年4月25日受理)

熱中性子線の照射場においてフルエンス率の基準測定及び放射線測定器の校正を行う場合には、検出器を固定用ジグ及び固定台を用いて照射位置にセットして実施する。この場合、水素原子を含んだ材料は、多くの熱中性子散乱線を発生させ、照射場の基準測定や放射線測定器の校正に影響を与える。本研究では、固定用ジグ及び固定台として一般的に用いられる7種類の平板材料について、各材料から発生する熱中性子散乱線の特性を実験及び計算により明らかにし、散乱線が低減できる材料の選定と使用条件を決定した。測定には、2インチの球形BF₃比例計数管を用いた。熱中性子散乱線の評価には、材料の大きさ、厚さを変化させたときの散乱割合（散乱線フルエンス率と入射した一次線フルエンス率との比）を求めた。また、放射線測定器の校正に用いる固定用ジグからの散乱線の寄与を評価し、校正に用いる固定用ジグの適性条件について調査した。熱中性子散乱線フルエンス率は、水素原子の含有量が多いアクリル及びパラフィンの40cm×40cm平板の場合には、厚さ5cmを超えると飽和に達して130%の散乱割合となり、実験材料の中で最も大きな値となった。固定用ジグの散乱割合の測定結果から、発泡スチロールやアルミニウムを薄い厚さにして用いることで、検出器への散乱線の寄与を1%以下に低減できることがわかった。これらの評価結果を熱中性子線の基準測定及び校正に適用させることにより、校正精度を一層向上させることができる。

Experimental Evaluation of Scattered Thermal Neutrons from Various
Jig Materials for use in Fixing Detectors for the Calibration

Shigeru SHIMIZU , Hisashi NEMOTO * , Koji KUROSAWA *
and Michio YOSHIZAWA

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

(Received April 25, 2000)

Some jigs to fix detectors are used when radiation measuring instruments are calibrated or reference fluence rates are measured in thermal neutron irradiation fields. In this case, scattered thermal neutrons from the jigs, in particular, which contain hydrogenous materials, may affect the results of the calibration and measurements.

In this study, scattered thermal neutrons were measured and calculated to clarify the characteristics of the thermal neutron scattered from various materials which are frequently used for the jigs. A spherical BF_3 -counter of 2-inches in diameter was used in the experiment. Ratios of the fluence of scattered neutrons to primaries (hereinafter, scattering ratio) were evaluated as a function of thickness and size of the materials, as well as the distance from the surface of the materials. The scattering ratios of the jigs that were actually-used in the calibration were also measured in order to select appropriate materials and thickness for the jigs.

It was found that the scattering ratios were saturated with increase of thickness and size of the materials. The higher values were observed in the case of PMMA and paraffin since these materials contain more number of hydrogen atoms than the others. The saturated value was obtained 130% for PMMA and paraffin with the thickness of more than 5cm and the size of 40cm \times 40cm. The results for the actually-used jigs show that the thinner plate of styrofoam and aluminum reduces the scattering ratio to the value of less than 1%.

The obtained data will be useful to improve the accuracy of the calibration of thermal neutron detectors and the measurement of reference fluence rates in thermal neutron irradiation fields.

Keywords : Thermal Neutron , Scattering , Scattered Thermal Neutron from Materials,
Thermal Neutron Cross Section , Calibration

* : Institute of Radiation Measurement

目 次

1. 序 論	1
2. 実験に用いた材料及び熱中性子断面積	2
2.1 固定用ジグ材料	2
2.2 熱中性子に対する断面積	2
3. 測定方法	4
3.1 熱中性子照射場	4
3.2 熱中性子散乱線評価のための測定方法	4
4. 結果及び考察	6
4.1 材料の厚さと熱中性子散乱線フルエンス率の関係	6
4.2 材料の大きさと熱中性子散乱線フルエンス率の関係	7
4.3 材料表面からの距離と熱中性子散乱線フルエンス率の関係	8
4.4 固定用ジグ材料からの熱中性子散乱線フルエンス率の評価	8
5. 結 論	10
参考文献	11
付録A. モンテカルロ計算による解析結果と実験値との比較	29

Contents

1. Introduction	1
2. Materials used in the Experiments and Thermal Neutron Cross Sections	2
2. 1 Materials of Fixing Jig	2
2. 2 Cross Sections for Thermal Neutron	2
3. Measurement Methods	4
3. 1 Thermal Neutron Irradiation Field	4
3. 2 Measurement to Estimate Scattered Thermal Neutron Fluence from Materials	4
4. Results and Discussion	6
4. 1 Relationship between Scattered Thermal Neutron Fluence Rate and Material Thickness	6
4. 2 Relationship between Scattered Thermal Neutron Fluence Rate and Material Size	7
4. 3 Relationship between Scattered Thermal Neutron Fluence Rate and Distance from Materials	8
4. 4 Estimation of Scattered Thermal Neutron Fluence Rate from Detector Fixing Jigs	8
5. Conclusions	10
References	11
Appendix A. Comparison between Measured Results with Calculations using Monte Carlo Simulation	29

1. 序 論

熱中性子線の照射場において金箔によるフルエンス率の基準測定または放射線測定器の校正等を行う場合には、基準検出器や校正する放射線測定器を固定ジグ及び固定台を用いて照射位置にセットして測定を行う。この場合、水素原子を含んだ材料を固定ジグとして用いると熱中性子散乱線が発生し、照射場のフルエンス率の基準測定や放射線測定器の校正に影響を与えてしまう。

本研究では、固定用ジグの材料として一般的に用いられる7種類の平板材料に熱中性子線を照射し、熱中性子線が平板材料に入射して材料中から入射面側に発生する熱中性子散乱線フルエンスの特性を各材料毎に実験により明らかにし、散乱線の影響を評価すると共に、散乱線を低減できる材料の選定を行った。

測定には、日本原子力研究所東海研究所放射線標準施設棟第4照射室の黒鉛パイルによる熱中性子照射設備^{1), 2)}を利用し、検出器として2インチの球形BF₃比例計数管を用いた。熱中性子散乱線の評価では、材料の大きさ、厚さ及び材料の表面からの距離を変化させたときの散乱割合、即ち散乱線フルエンス率と入射した一次線フルエンス率との比を求めた。測定は、材料の表面中心部で行った。また、放射線測定器の熱中性子線の校正に用いる固定台及び固定ジグの寸法を模擬した材料からの散乱線フルエンス率も評価した。

測定では、照射場に寄与している室内散乱線や黒鉛パイル内の中性子線源(²⁵²Cf)からの速中性子が材料中で熱化した成分等の目的外の熱中性子線を分離し、熱中性子の一次線が材料に入射して発生する熱中性子散乱線フルエンス率を精密に測定した。

これらの結果をもとに、照射場のフルエンス率の基準測定や放射線測定器の校正に用いる検出器の固定用ジグ及び固定台からの散乱線の寄与を評価し、校正に用いる材料の適性について調査した。

2. 実験に用いた材料及び熱中性子断面積

2.1 固定用ジグ材料

検討した固定用ジグ及び固定台の材料は、発泡スチロール及びバルサ、校正用テーブルの材料に使用しているポリメチルメタクリレート（以下「アクリル(PMMA)」という。）、アルミニウム及びステンレス、並びに中性子線の吸収材として用いるパラフィン及びシリコンゴムの7種類であり、形状はいずれも平板である。

シリコンゴムは、アスク社製(SM型)で熱中性子吸収断面積が大きいボロン(^{10}B)を約16%の重量組成で混入した物質である。バルサは、中南米に分布するパンヤ科で木材の一種であり、比重が約0.1と軽量で、重さのわりには強く、切削・加工が極めて容易であるため、放射線検出器を固定するジグとして使用されている。発泡スチロールは、バルサよりさらに軽量(比重約0.01)で、材料として最も軽く放射線に対する散乱線の発生が極めて低いため、放射線検出器の固定ジグとして良く使用されている。これら7種類の平板材料の元素組成及び密度をTable 1に示す。

材料の寸法は、材料の厚さ及び材料表面から検出器までの距離による散乱線の変化を調べる実験では、縦・横40cmの正方形で厚さが物質によって最小0.1cmから最大8cmまでのものを使用した。材料の大きさの散乱線影響を調査する実験ではアクリル材を用い、上記の他に縦・横の寸法が20cm、10cm、5cmの正方形を使用した。

実際の校正に使用する固定用ジグ及び固定台を模擬した材料からの熱中性子散乱線の評価では、縦・横40cmの固定台と幅3cm×長さ30cmの固定用ジグを用いて、アクリル、アルミニウム及び発泡スチロール等の材料を使用した。

2.2 熱中性子に対する断面積

各材料の実験による熱中性子散乱線フルエンス率測定値と材料の熱中性子断面積を比較して散乱線の発生要因を検討するために、各材料の熱中性子エネルギー0.025eV($2,200\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)における巨視的断面積の計算を行った。

計算では、材料の元素組成から各元素の原子個数密度(N : cm^{-3})を(1)式により計算し、これと各元素の吸収断面積(σ_a)又は散乱断面積(σ_s)との積で各元素の巨視的断面積(巨視的吸収断面積: Σ_a 、巨視的散乱断面積: Σ_s 、巨視的全断面積: Σ)を算出した。なお、吸収断面積及び散乱断面積は、文献3の値を引用した。

$$N^I = \frac{\rho}{A} \times N_A \times K \quad \text{----- (1)}$$

N^I : 元素 I の原子個数密度 (cm^{-3})

ρ : 物質の密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

A : 物質の原子量又は分子量(g)
 N_A : アボガドロ数
 K : 1分子中の元素 I の数

$$\Sigma = \Sigma_a + \Sigma_s = \sigma_a^I \cdot N^I + \sigma_s^I \cdot N^I \quad \text{----- (2)}$$

Σ : 元素 I の熱中性子巨視的全断面積 (cm⁻¹)
 Σ_a : 元素 I の熱中性子巨視的吸收断面積 (cm⁻¹)
 Σ_s : 元素 I の熱中性子巨視的散乱断面積 (cm⁻¹)
 σ_a^I : 元素 I の熱中性子吸収断面積 (barn)
 σ_s^I : 元素 I の熱中性子散乱断面積 (barn)

物質が複数の原子及び分子で形成された化合物の巨視的断面積は、各元素の巨視的断面積を計算してこれらを合算して求めた。また、散乱線の発生のしやすさを表す指標となる材料の散乱・吸収断面積比 (Σ_s / Σ_a) 及び平均自由行程 ($1 / \Sigma$) を計算した。

複数の元素で構成されるシリコンゴム及びステンレスの重量組成は、シリコンゴムが、H:18%、O:17.3%、B:15.7%、Si:30.3%、C:30.2%で、ステンレスが SUS304 の Fe:74%、Cr:18%、Ni:8% である。バルサの元素組成は、バルサが木材の一種であることから、文献4による木材の C₁₅H₂₁O₁₀ の実験式を引用して上記の計算を行った。各材料の吸収断面積、散乱断面積、巨視的断面積、散乱・吸収断面積比及び平均自由行程等の計算結果を Table 1 に示す。

巨視的吸収断面積 (Σ_a) は、ボロンを B₄C の元素組成で混入したシリコンゴムが 79 cm⁻¹ と圧倒的に大きく、ステンレスが約 0.3 cm⁻¹ であり、発泡スチロールが約 0.0003 cm⁻¹ と最も小さな値を示した。

巨視的散乱断面積 (Σ_s) は、シリコンゴムが 4.3 cm⁻¹ と最も大きく、アクリルとパラフィンが約 3 cm⁻¹ であり、発泡スチロールが 0.033 cm⁻¹ と最も小さな値となった。巨視的吸収断面積と巨視的散乱断面積の総和である巨視的全断面積 (Σ) は、シリコンゴムが 83.3 cm⁻¹ と最も大きく、アルミニウムが約 0.1 cm⁻¹、発泡スチロールが約 0.03 cm⁻¹ と最も小さな値となった。

平均自由行程は、発泡スチロールが最も長く 30.3 cm、シリコンゴムが最も短い 0.012 cm となった。散乱・吸収断面積比は、アクリル、パラフィン及びバルサが最も大きく約 163、シリコンゴムが最も小さく 0.05 となった。

材料からの熱中性子の散乱線は、散乱・吸収断面積比が大きく、しかも平均自由行程が短い物質から多く発生する。従って、以上の計算結果から、今回の実験に用いた材料では、アクリルとパラフィンが多くの散乱線が発生し、シリコンゴムは熱中性子を良く吸収し散乱線がほとんど発生しないことが推定できる。

3. 測定方法

3.1 熱中性子照射場

種々の材料による熱中性子散乱実験は、放射線標準施設棟第4照射室に設置されている直方体の黒鉛パイル(164cm×150cm×高さ116cm)による熱中性子照射設備を用いて、Fig. 1に示す照射場Ⅰ及びⅡで実施した。照射場Ⅰは、黒鉛パイルの表面より28cm奥に ^{252}Cf 線源(1.96GBq, $2.07 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ (1990.12.4))をセットして、パイル表面より距離150cm、高さ68cmの位置とした。照射場Ⅱは、黒鉛パイルの表面より82cm奥に ^{252}Cf 線源をセットして、同パイル表面より距離50cm、高さ53cmの位置とした。照射場Ⅰは、各材料の大きさ、厚さ及び距離に対する熱中性子散乱線の実験に用いた。一方、照射場Ⅱは、実照射用の固定台及び固定ジグからの熱中性子散乱線の試験に用いた。

各照射場の熱中性子に対する一次線フルエンス率と室内散乱線フルエンス率の測定は、Fig. 4に示す球形BF₃比例計数管及び測定回路を使用して行った。計数率からフルエンス率への換算係数(cm^{-2})は、熱中性子等方基準照射場²⁾で測定した。照射場の一次線フルエンス率は、検出器から見て黒鉛パイル表面の一次線の発生面が隠れる位置にCd板(8cmφ)をセットして室内等からの散乱線の計数率(室内散乱線計数率)を測定し、Cd板をセットしないときの計数率からこの室内散乱線計数率を差し引くことにより求めた。さらに、検出器の回りの各方向にCd板(40cm×40cm)をセットして測定を行い、検出器の位置に寄与している室内散乱線フルエンス率の各方向毎の強度を求めた。これらの結果をTable 2に示す。

Table 2より、室内散乱線フルエンス率の一次線フルエンス率に対する割合は、照射場Ⅰが21%、照射場Ⅱが26%であった。

本研究では、これらの室内散乱線による寄与を分離して、一次線フルエンス率を評価し、材料からの散乱線フルエンス率を精密に求める手法を検討した。その評価方法を3.2項に述べる。

3.2 熱中性子散乱線評価のための測定方法

熱中性子線の計数率の測定は、検出器にLND社製2708型BF₃比例計数管(2"球形、ガス圧:200mmHg)とDAVIDSON社製2056型多重波高分析器とを組み合わせた熱中性子測定装置で行った。これらの測定系ブロックダイヤグラムをFig. 2に示す。 γ 線やノイズ波高の信号を除去するため、ディスクリレベル(50ch)を設定した。比例計数管の波高分布を多重波高分析器に記録し、ROI設定(100~1023ch)により全計数率を求めた。

本測定装置の計数率から熱中性子フルエンス率への換算係数(f)は、当黒鉛パイルの熱中性子等方基準照射場²⁾において得られた 0.780 cm^{-2} を用いた。

熱中性子が材料表面に入射したときの一次線フルエンス率(ϕ_p)及び材料前面に散乱される散乱線フルエンス率(ϕ_{ms})は、室内散乱線及び速中性子成分の材料中での熱化や材料からの反射などの目的外の散乱成分を下記の方法で分離し評価した。測定方法をFig. 3及びFig. 4に示す。測

定は、材料と2種類のCd板(8cmφおよび40cm×40cm)の有無により、以下の5つの条件で行った。

- ①：材料を置かない場合
- ②：検出器前面に8cmφのCd板を置いた場合
- ③：検出器前面に40cm×40cmのCd板を置いた場合
- ④：検出器後方に材料を置いた場合
- ⑤：材料を置いて検出器前面に40cm×40cmのCd板を置いた場合

$$\phi_p = f \cdot N_{th} \text{ ----- (3)}$$

$$\phi_{ms} = f \cdot N_{thm} \text{ ----- (4)}$$

$$N_{th} = N_t - N_{Cd8\phi} \text{ ----- (5)}$$

$$N_{thm} = (N_{tm} - N_t) - (N_{Cd40} - N_{Cd}) \text{ ----- (6)}$$

但し、 $N_t = N_{th} + N_{ths} + N_f \text{ ----- (7)}$

$$N_{Cd8\phi} = N_{ths} + N_f \text{ ----- (8)}$$

$$N_{Cd} = N_{ths'} + N_f \text{ ----- (9)}$$

$$N_{tm} = N_{th} + N_{ths} + N_{thm} + N_f + N_{(f-th)m} + N_{fm} \text{ ----- (10)}$$

$$N_{Cd40} = N_{ths'} + N_f + N_{(f-th)m} + N_{fm} \text{ ----- (11)}$$

- f : フルエンス率換算係数 (cm^{-2})
- N_{th} : 熱中性子一次線の計数率 (s^{-1})
- N_{thm} : 材料からの熱中性子散乱線の計数率 (s^{-1})
- 測定結果
 - N_t : 材料を置かない全計数率 (s^{-1})
 - $N_{Cd8\phi}$: 検出器前面に8cmφのCd板を置いた計数率 (s^{-1})
 - N_{Cd} : 検出器前面に40cm×40cmのCd板を置いた計数率 (s^{-1})
 - N_{tm} : 検出器後方に材料を置いた全計数率 (s^{-1})
 - N_{Cd40} : 材料を置いて検出器前面に40cm×40cmのCd板を置いた計数率 (s^{-1})
- 散乱成分
 - N_{ths} : 熱中性子の室内散乱の全計数率 (s^{-1})
 - N_f : 速中性子による計数率 (s^{-1})
 - $N_{(f-th)m}$: 速中性子が材料中で熱化して入射側に出る計数率 (s^{-1})
 - $N_{ths'}$: 前方床散乱を除く室内計数率 (s^{-1})
 - N_{fm} : 材料表面で反射される速中性子の計数率 (s^{-1})

(7)～(11)式は、これら5種類の計数率を中性子線の各成分に分けて表したものである。これらを組み合わせることにより、(5)式及び(6)式を用いて一次線及び材料からの散乱線の計数率を評価できる。さらに、(5)式及び(6)式で得られた計数率にフルエンス率換算係数(f)を乗じることにより((3)式及び(4)式参照)、一次線フルエンス率(ϕ_p)及び材料からの散乱線フルエンス率(ϕ_{ms})を評価し、 ϕ_{ms}/ϕ_p の比を材料からの熱中性子散乱割合として表した。

4. 結果及び考察

4.1 材料の厚さと熱中性子散乱線フルエンス率の関係

本試験では、縦・横40cmの正方形の材料の面中心とBF₃比例計数管の中心が一致するように設置し、各材料の厚さを物質によって最小0.1cmから最大8cmまで変化させて、3.2項の評価方法に従って、各材料の厚さ毎の散乱線の計数率を求めた。この散乱線計数率と一次線計数率の比を材料からの熱中性子散乱割合として求めた。同一の検出器を用いているため、この計数率の比は、フルエンス率の比と等しい。試験の概略図をFig. 5に示す。使用した材料は、アルミニウム、ステンレス、アクリル、パラフィン、発泡スチロール、バルサ及びシリコンゴムの7種類である。

熱中性子散乱割合と材料の厚さとの関係についての実験結果をFig. 7に示す。図より、パラフィンとアクリルからの散乱線フルエンス率は、ほぼ同じ散乱割合を示した。また、パラフィンとアクリルの厚さが3cmを超えると材料からの熱中性子散乱線の割合が130%で飽和状態になる。この割合は、他の材料に比べて最も大きな割合となった。パラフィンとアクリルの場合、材料の表面に発生する熱中性子散乱線は、厚さ5cm以内の材料中で散乱した成分が主に寄与していることになり、それ以上の厚さでは材料中で吸収を受け、表面まで到達する散乱線がほとんどないと考えられる。また、同材料の熱中性子散乱割合と厚さを比較すると、厚さが0.5cmで飽和値の52%、同様に1cm厚さで75%、2cm厚さで93%となり、厚さ0.5cm以内から半分以上の散乱線が発生していることがわかった。

発泡スチロールの散乱割合は、2cm厚さで4%、6cm厚さで10%である。これは、アルミニウムの同じ厚さに対して1/4程度低い。ステンレスやバルサの散乱割合は、発泡スチロールの同じ厚さに対して10倍高い値を示した。B₄Cを混入したシリコンゴムの散乱割合は3cm厚さ以下で1.5%であり、計測誤差を考慮すると無散乱状態に近く、本実験に用いた材料の中で最も小さな値となった。

中性子の衝突と次の衝突との間の平均自由行程は巨視的全断面積(Σ)の逆数で表すことができ、1回の衝突で散乱と吸収のどちらが起りやすいかは散乱・吸収断面積比(Σ_s/Σ_a)で表せる。従って、材料から発生する熱中性子散乱線は、この平均自由行程が短く、散乱・吸収断面積比が大きいほど材料中での散乱回数が多くなり、散乱線は多くなる。また、巨視的吸収断面積が小さいほど材料中の熱中性子散乱線の吸収が少ないので、材料表面に到達する散乱線は多くなる。これらの値の計算結果を各材料毎にTable 1に示す。

以上の結果から、各材料からの熱中性子散乱線フルエンス率の発生割合は、シリコンゴムを除きTable 1の巨視的散乱断面積(Σ_s)の大きさの順に多く発生したことがわかった。シリコンゴムの巨視的散乱断面積が4.33cm⁻¹と比較的大きいが、ボロンが約16%混入されており、巨視的吸収断面積が79cm⁻¹とさらに大きいため、散乱線の発生が無視できることがわかった。また、材料の元素組成が類似しているアクリル、パラフィン、バルサ及び発泡スチロールは、厚さが同じ場合には物質の密度にほぼ比例した散乱割合を示した。

材料中の平均衝突回数は材料の厚さを平均自由行程で除して求められる。この平均衝突回数と実験により求めた熱中性子散乱割合との関係を Fig. 8 に示す。

Fig. 8 より、平均衝突回数が5回以上の材料厚さになると、入射側に発生する熱中性子散乱線は飽和状態になることがわかった。それ以下の平均衝突回数では、べき乗関数で散乱線が変化することが確認できた。また、アクリルとパラフィンは、平均衝突回数及び平均自由行程がほぼ等しいため、実験値は同じ散乱割合を示したことがわかる。

4.2 材料の大きさと熱中性子散乱線フルエンス率の関係

本試験における材料としては、熱中性子巨視的散乱断面積の大きいアクリルを用いた。材料の縦・横の寸法は、40cm×40cm、20cm×20cm、10cm×10cm 及び 5cm×5cm の4種類とし、各寸法の厚さを最小0.1cm から最大 5cm まで変化させることができる材料を用意した。これらの材料をBF₃ 比例計数管の真後ろに密着して置き、材料の大きさ及び厚さを変化させて、4.1 項と同様の評価方法で材料からの熱中性子散乱線の計数率を測定し、一次線に対する散乱線の割合を求めた。試験の概略図を Fig. 5 に示す。

アクリル平板の大きさに対する熱中性子散乱割合の関係を Table 3 及び Fig. 9 に示す。Fig. 9 より、どの大きさも材料の厚さが 3cm を超えると散乱割合が飽和状態になり、各大きさのアクリル板の飽和値は、40cm×40cm との相対値で表すと、20cm×20cm が0.87、10cm×10cm が0.55、5cm×5cm が0.25であった。この結果から、40cm 正方形の材料において、散乱中性子は、20cm×20cm の領域で87%発生しており、表面積がこれ以上大きくなってもアクリル平板の中心部表面近傍に到達する散乱線は余り増加しないことがわかった。これは、材料中で散乱した熱中性子が検出器に到達するまでの距離が大きくなり、しかもその距離の間の材料中で吸収を受けるため、寄与する割合が少なくなるためと考えられる。このことは、アクリル平板の表面積と熱中性子の散乱割合の関係を示した Fig. 10 からわかる。Fig. 10では、散乱割合は、どの厚さに対しても表面積が 25cm² (5cm×5cm) から400cm² (20cm×20cm) まで急激に増加し、これ以上になると鈍化する傾向を示している。

Table 3 のデータから各平板寸法に対する散乱割合の近似式を求めると、散乱割合は飽和値に対してほぼ同じ関数形で増加していることがわかった。これらの平均的な近似式は、熱中性子の散乱割合を S、飽和値を N、厚さを d (cm) とすると、 $S = N \cdot (1 - 0.88 e^{-0.1d})$ となった。厚さ3cm の場合は、飽和値に対して97%の散乱割合となり、厚さ5cm では飽和値に対して100%の散乱割合となったが、厚さ 0.2cm でも29%の散乱割合を示し、アクリルは薄い厚さにおいても多くの散乱線が発生することがわかった。

本実験においては、熱中性子照射場に混在している熱中性子線以外の寄与を分離するため、種々の補正を行っている。これらの補正による測定結果の妥当性を検証するため、材料の大きさと厚さに関して、付録Aに示すモンテカルロ計算コードによる熱中性子散乱のシミュレーションを行い、実験値との比較を行った。この結果、材料の大きさ及び厚さの変化に対する熱中性子散乱割合の傾向は、実験値と計算値が良く一致し、測定評価の妥当性が検証された。

4.3 材料表面からの距離と熱中性子散乱線フルエンス率の関係

本試験では、厚さを一定にした材料の表面とBF₃比例計数管の中心間距離を2.5cmから最大80cmまで変化させて、距離変化に対する材料からの散乱線の減弱の状況を、4.1項と同様の評価方法を用いて求めた。また、各材料の厚さを変えたときの減弱も同様の方法で求めた。材料の縦・横の寸法は40cm×40cmである。試験の概略図をFig. 5に示す。使用した材料は、アクリル、ステンレス、バルサ、アルミニウム及び発泡スチロールの5種類である。

各材料の厚さを一定としたときの材料表面からの距離の変化に対する散乱割合を、Fig. 11～Fig. 16に示す。

材料からの距離に対する熱中性子散乱線の減弱は、同じ材料において厚さが変化しても同じ割合で低下した。また、材料表面からの距離が5cm以内の領域では、散乱割合が余り変化しないことが確認できた。これは、材料全体から一様な散乱線が発生しているため、材料表面との距離が少し変化しても散乱線の寄与が変化しないためと考えられる。距離による減弱は、材料表面から約40cm離れると2.5cmのときの散乱割合に対して各材料共に約1/10に低下した。

Fig. 16には、各材料の実験で最も薄い材料の減弱特性をまとめて示す。この図より、発泡スチロールとアルミニウムの散乱割合が最も少なく、距離が20cm以上離れると散乱線の寄与が1%以下になることがわかった。散乱の多いアクリルやバルサでは、散乱線の寄与を1%以下にするためには、材料の厚さを薄くすると共に距離を50cm以上離す必要があり、至近距離になると20～30%の散乱線が寄与してしまう。従って、放射線測定器の固定用ジグとしては、使用に適さない材料であることがわかった。

4.4 固定用ジグ材料からの熱中性子散乱線フルエンス率の評価

サーベイメータや個人線量計などの放射線測定器の熱中性子線の校正は、Fig. 6のような固定用ジグや固定台を用いて実施する。各種の材料について、これらの固定用ジグや固定台の実際の形状における熱中性子散乱線フルエンス率の割合を評価した。

実験に用いた照射場は、Fig. 1に示す照射場Ⅱを使用した。²⁵²Cf線源設置位置が黒鉛パイル表面までの黒鉛の厚さが82cmと厚いため、ほとんどの速中性子線が熱中性子化されている。従って、本実験では、BF₃比例計数管の周辺から寄与している室内散乱線が、各試験ともに同じフルエンス率であるとし、3.2項(5)式より一次線の計数率を求め、固定用ジグ及び固定台をセットしたときの計数率から一次線計数率及び室内散乱線計数率を差し引くことにより材料の散乱計数率を求めた。これと一次線計数率との比（フルエンス率の比と等価）を固定用ジグ及び固定台の熱中性子散乱線の割合とした。

固定台からの散乱線の評価では、縦・横40cm×40cmの固定台平板の表面中心部から20cm上方の位置にBF₃比例計数管を設置し、各材料ごとに平板の厚さを変えて熱中性子散乱線の割合を求めた。使用した材料は、アクリル、ステンレス、バルサ、アルミニウム及び発泡スチロールの5種類である。

固定用ジグからの散乱線の評価では、幅3cm ×長さ30cmの板状ジグをBF₃比例計数管の真後ろに設置し、各材料ごとに平板の厚さを変えて熱中性子散乱線の割合を求めた。使用した材料は、アクリル、アルミニウム及び発泡スチロールの3種類である。

固定台や固定用ジグを実際の照射を模擬した状態にセットし、材料の厚さを変えたときの熱中性子散乱線フルエンス率の変化を調べた実験結果を Fig. 17～ Fig. 18に示す。

Fig. 17より、固定台からの散乱線については、検出器と材料との距離を20cmにしても、アクリル、バルサ、ステンレスが多くの散乱線を発生し、固定する測定器の重量に耐える限界の厚さまで薄くしても2～3%の散乱線が発生する。一方、発泡スチロールやアルミニウムは散乱線の発生が少なく、散乱割合を0.5%以下にするには、発泡スチロールが1cm厚さ以下の、アルミニウムが0.5cm厚さ以下の平板を使用すれば良いことがわかった。

Fig. 18より、検出器の固定ジグからの散乱線は、アクリルが厚さ1cmで約20%、0.2cm厚さにおいても約10%の散乱割合を示し、実験に用いた材料の中で最も多くの散乱線を発生した。同様にアルミニウム及び発泡スチロールでは、アルミニウムの1cm厚さ以下及び発泡スチロールの4cm厚さ以下においては共に1%以下の散乱割合となり、両者の散乱割合は少ないことがわかった。また、3種類の材料について厚さを同じにして比較すると、発泡スチロールはアクリルに対して1/200、アルミニウムに対して1/10、アルミニウムはアクリルに対して1/20の散乱割合を示した。また、散乱割合を0.5%以下にするには、アルミニウムが0.3cm以下、発泡スチロールが3cm以下の厚さを使用すると良いことがわかった。一方、アクリルは0.2cmでも10%の散乱線が発生し、固定用ジグとして使用に適さない材料であることがわかった。

上記の結果から、熱中性子線照射場の基準フルエンス率の値付け及び個人線量計の校正には、固定ジグとして0.3cm厚さ以下のアルミニウムか3cm厚さ以下の発泡スチロールを使用し、固定台には1cm厚さ以下の発泡スチロールか0.5cm厚さ以下のアルミニウムを用い、さらに線量計と固定台の距離を20cm以上離すことで両者の全体の散乱割合を1%以下に低減できることが明らかになった。また、固定ジグ及び固定台として不適合な材料としては、アクリル、バルサ、ステンレスであることが実験により判明した。

5. 結 論

本試験では、材料に入射した熱中性子線が材料中での散乱により入射側に出てくる熱中性子散乱線フルエンス率の一次線フルエンス率に対する散乱割合を、材料の厚さ、大きさ及び材料表面からの距離の3種類の条件に対して調査した。また、実際に熱中性子照射場のフルエンス率の基準測定またはサーベイメータや個人線量計などの放射線測定器を校正する場合に用いる固定台及び固定用ジグからの散乱割合を評価し、散乱の少ない適合材料を選定した。これらの調査結果から以下の結論を得た。

- (1) 材料の厚さを変えた場合、散乱線フルエンス率と一次線フルエンス率の比(散乱割合)は、巨視的全断面積及び平均衝突回数がほぼ等しいアクリルとパラフィンが全く同じ傾向を示し、5cm以上の厚さで130%の飽和値を示すことが明らかになった。このことから、個人線量計の校正では、中性子線の場合は γ (X)線の校正用ファントムのJ I S規格⁵⁾に準拠した40cm×40cm×15cm厚さのスラブファントムの表面に線量計を固定して実施しているが、熱中性子の校正にはファントムの厚さが5cmあれば十分であることがわかった。
- (2) B₄Cを混入したアスク社製SM型シリコンゴムは、熱中性子を良く吸収し、散乱線の発生がほとんどなく、熱中性子の遮蔽や散乱の防止に使用する材料として優れていることがわかった。
- (3) 材料の大きさに対する散乱割合の変化を調べた結果、飽和値を1としたときの厚さに対する相対的变化は、材料の表面積の大きさが異なっても同一形式の近似式で表せることがわかった。また、平板の表面積に対する散乱割合は、厚さに無関係に400cm²まで大きく増加し、それ以上の表面積では鈍化して飽和に達する傾向が得られた。
- (4) 材料からの距離による散乱線フルエンス率の減弱試験では、材料の組成や厚さに無関係に距離が5cmまでは散乱線の寄与の割合は大きく変化しないこと、その後、距離を40cmまで遠ざけることで1/10に低下できることが明らかになった。散乱線の多い材料は、薄くして距離を40cm以上離すことで散乱線の寄与を1%程度にでき、散乱線の少ない発泡スチロールやアルミニウムは、薄くすれば距離20cmでも散乱線の寄与を1%以下にできることが明らかになった。
- (5) 固定台や固定用ジグを実際の校正時を模擬した状態にセットしたときの散乱線フルエンス率の測定から、固定台及び固定用ジグに薄い発泡スチロールやアルミニウムを用いることで、固定台及び固定用ジグ全体からの散乱割合を1%以下にできることが明らかになった。従って、放射線測定器の校正に用いる固定台や固定用ジグに適した材料は発泡スチロールとアルミニウムであり、アクリル、パルサ及びステンレスは材料として適さないことが判明した。

本試験により、種々の材料からの熱中性子散乱線の発生及び材料から離れたときの減弱特性等を定量的に明らかにできた。試験結果に基づき、放射線測定器の校正に用いる固定台や固定用ジグに適した材料を使用することにより、材料からの散乱線フルエンス率が低減でき、校正精度を向上させることができる。これらの結果は、放射線測定器の校正の場合だけでなく、研究用原子炉に設定されているサーマルコラムを用いた熱中性子照射実験などにおける熱中性子フルエンス率の測定にも応用できる。

参 考 文 献

- 1) 浅野芳裕, 吉田 真 ; 「測定器校正用熱中性子場の製作と特性試験」保健物理 19, (1984)
- 2) 浅野芳裕 ; 「校正用熱中性子照射場の開発」JAERI-M84-156, p155 (1984)
- 3) 杉 輝夫 ; (財) 原子力弘済会「原子炉物理演習」(1973)
- 4) 右田伸彦, 他編集 ; 「木材化学(上)」p65 共立出版(株) (1968)
- 5) 日本規格協会 ; JIS Z 4331 「X・ γ 線及び β 線個人線量計校正用ファントム」(1995)

Table 1 Specification of materials and cross sections for thermal neutrons

Material	Density (g/cm ³)	Absorption cross section σ_a (barn)	Scattering cross section σ_s (barn)	Macroscopic cross section (cm ⁻¹)			Mean free path $1/\Sigma$ (cm)	Ratio of cross sections Σ_s/Σ_a	
				Absorption Σ_a	Scattering Σ_s	Total Σ			
① Styrofoam (C ₈ H ₈)	0.013	2.68	434	3.3E-4	0.033	0.033	30.3	3030	100
② Balsa (C _{1.5} H _{2.1} O _{1.0})	0.08	0.70	115	9.3E-4	0.153	0.154	6.5	1075	165
③ Paraffin (C ₂₀ H ₄₂)	0.90	7.37	1183	0.015	2.44	2.46	0.41	66.7	163
④ Silicon rubber (C ₂ H ₆ SiO+B ₂ C)	1.1	3040	333	79.0	4.33	83.3	0.012	0.013	0.05
⑤ PMMA (C ₅ H ₈ O ₂)	1.2	2.67	428	0.019	3.09	3.11	0.32	52.6	163
⑥ Aluminium	2.7	0.24	1.4	0.014	0.084	0.098	10.2	71.4	6.0
⑦ Stainless (Fe, Cr, Ni)	8.0	10.2	31.5	0.24	0.86	1.10	0.91	4.2	3.6

Table 2 Primary and room-scattered thermal neutron fluence rate in the thermal neutron irradiation fields

Thermal neutron irradiation fields		Irradiation field I		Irradiation field II		
Thermal neutron fluence rate ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Primary	535		478		
	Scattered	112		122		
	Total	647		600		
Measured count rate and scattering ratio	Primary	686 s^{-1}	Scattering ratio *	613 s^{-1}	Scattering ratio *	
	Scattered neutrons	Forward	81 s^{-1}	0.12	128 s^{-1}	0.21
		Backward	44 s^{-1}	0.06	11 s^{-1}	0.02
		Top and bottom	11 s^{-1}	0.02	10 s^{-1}	0.02
		Right and left	8 s^{-1}	0.01	7 s^{-1}	0.01
	Total	144 s^{-1}	0.21	156 s^{-1}	0.26	

* : Ratio of count rate between scattered and primary neutrons.

Table 3 Dependence of scattered thermal neutrons on the size of PMMA slab

Thickness of material d: (cm)	Count rate and scattering ratio for various material size											
	5 × 5 cm (25 cm ²)		10 × 10 cm (100 cm ²)		20 × 20 cm (400 cm ²)		40 × 40 cm (1600 cm ²)					
	Count rate (s ⁻¹)	Ratio *1	Count rate (s ⁻¹)	Ratio	Count rate (s ⁻¹)	Ratio	Count rate (s ⁻¹)	Ratio	Count rate (s ⁻¹)	Ratio	Count rate (s ⁻¹)	Ratio
0.1	44	0.064	65	0.095	127	0.19	149	0.22	—	—	—	—
0.5	120	0.17	236	0.34	385	0.56	468	0.68	—	—	—	—
1.0	159	0.23	342	0.50	530	0.77	639	0.93	—	—	—	—
2.0	186	0.27	415	0.60	677	0.99	—	—	—	—	—	—
3.0	209	0.30	461	0.67	715	1.04	855	1.25	—	—	—	—
4.0	214	0.31	457	0.67	732	1.07	—	—	—	—	—	—
5.0	215	0.31	473	0.69	747	1.09	866	1.26	—	—	—	—
Expression	0.31(1-0.82e ^{-1.1d})*2		0.69(1-0.91e ^{-1.1d})		1.1(1-0.90e ^{-1.2d})		1.3(1-0.92e ^{-1.3d})					

*1 : Ratio of count rate between scattered and primary neutrons.

*2 : d ; Material thickness in cm.

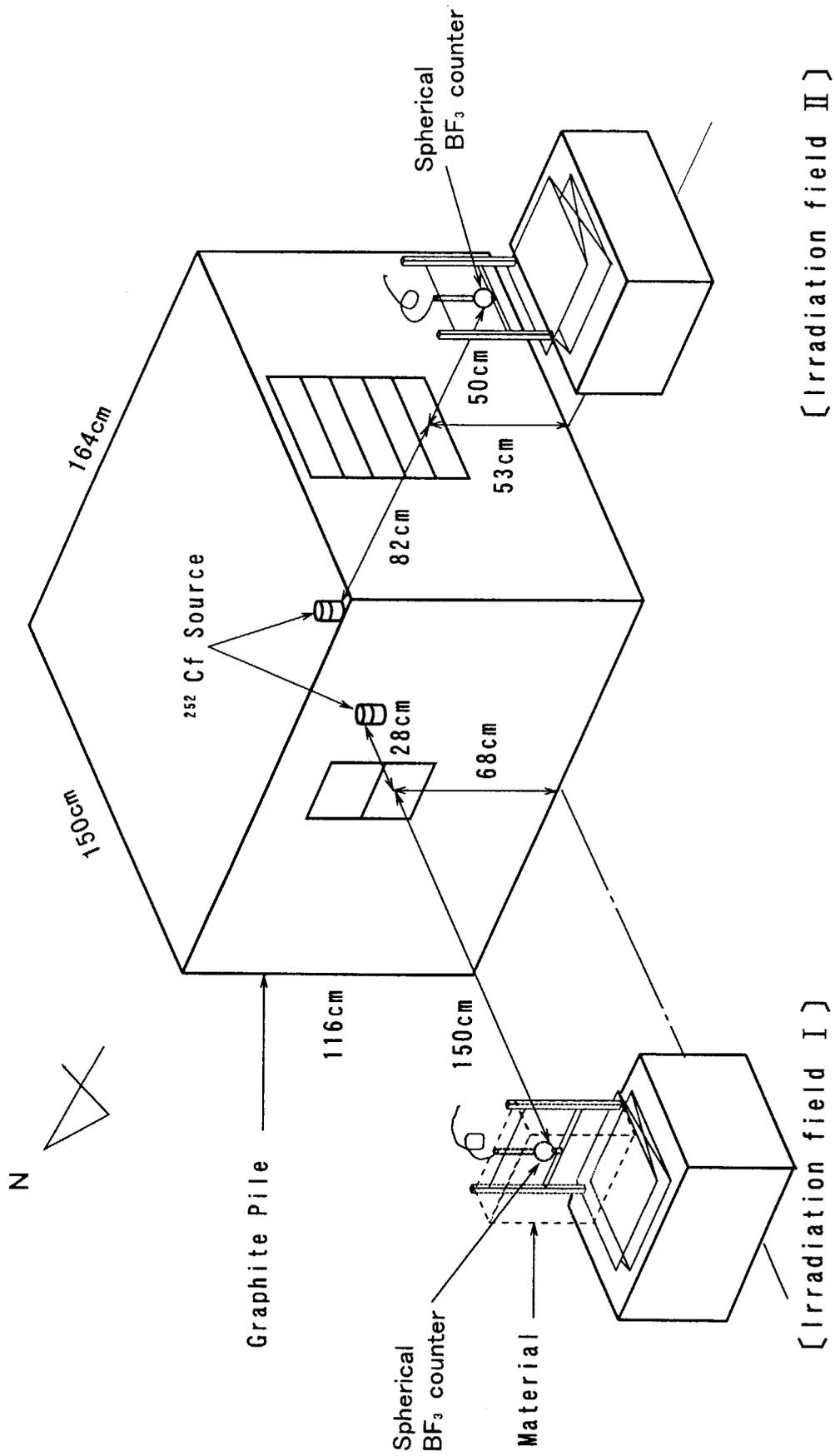


Fig.1 Sketch of thermal neutron irradiation fields used in the experiment

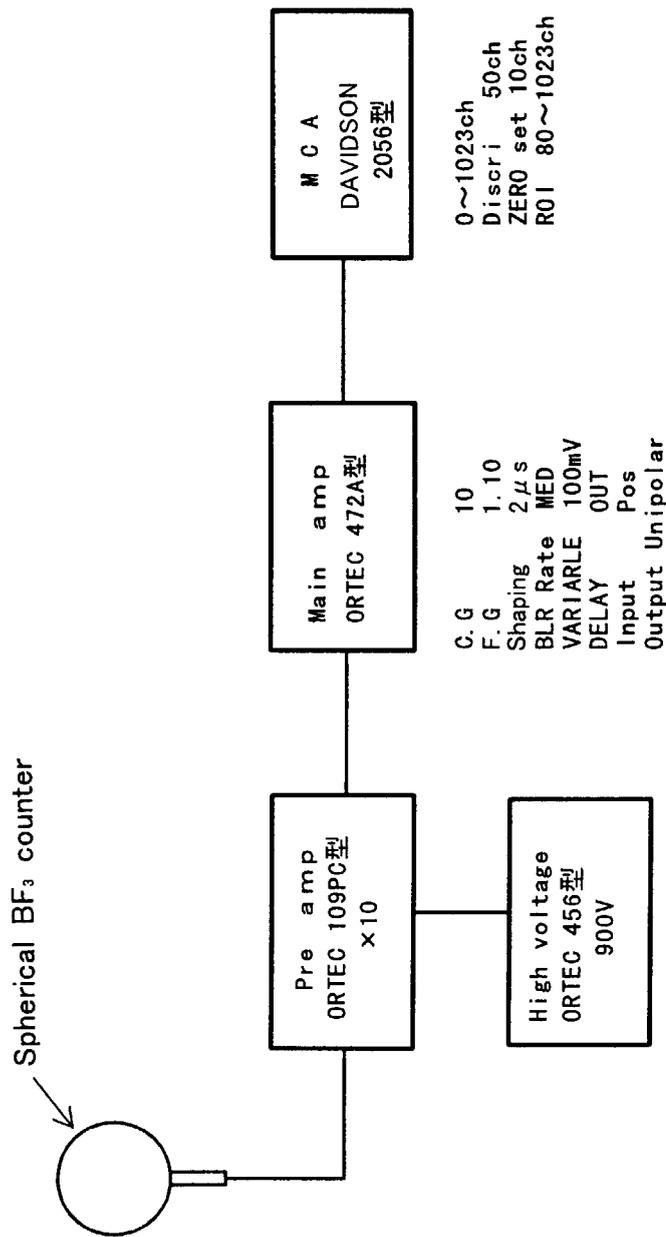
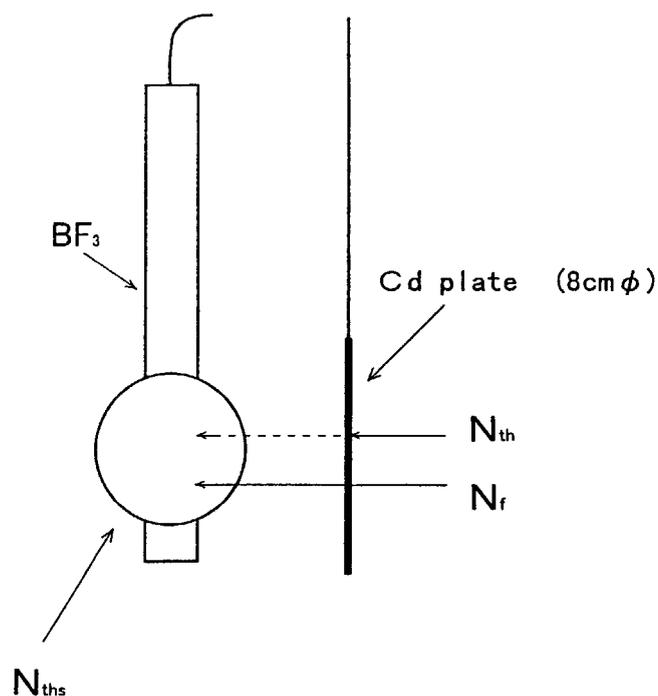


Fig.2 Block diagram of thermal neutron measurement system



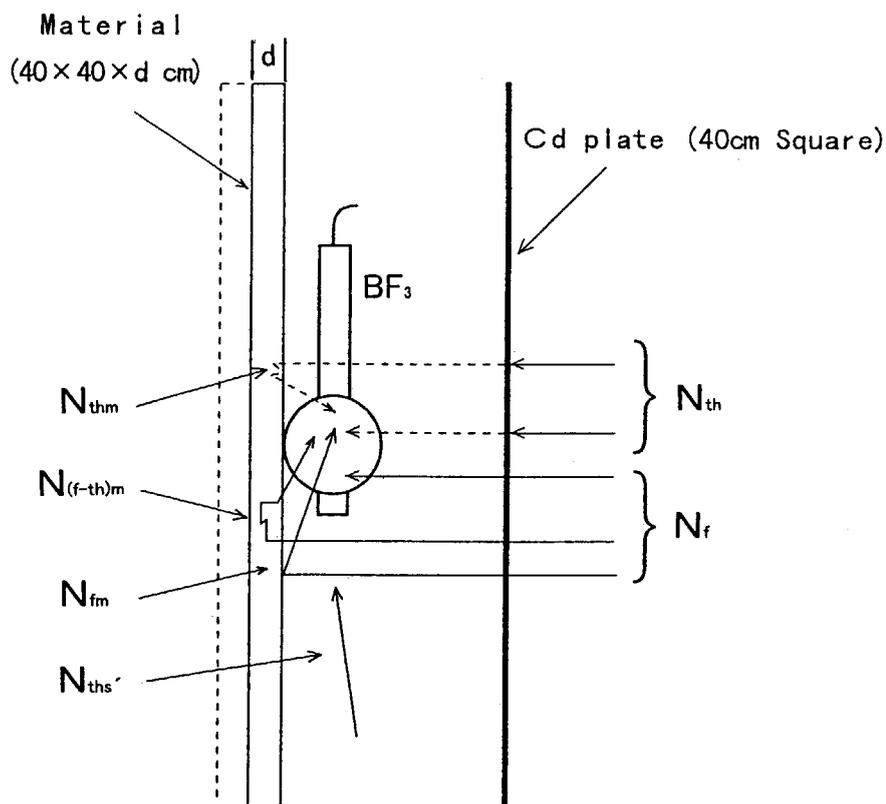
N_{th} : Primary thermal neutron from graphite pile

N_r : Fast neutron from graphite pile

N_{ths} : Thermal neutron scattered in the room

The broken line shows the thermal neutron through cadmium plate.

Fig.3 Conceptual view of the measurement of primary and room scattered neutrons in the thermal neutron irradiation fields



N_{th} : Primary thermal neutron from graphite pile

N_f : Fast neutron from graphite pile

N_{thm} : Thermal neutron scattered by the material

$N_{(f-th)m}$: Thermal neutron due to slow-down of fast neutron in the material

N_{fm} : Fast neutron scattered on the material

$N_{ths'}$: Thermal neutron scattered in the room, except floor scattering on the right hand side of cadmium plate

The broken line shows the thermal neutron through cadmium plate.

Fig.4 Conceptual view of the measurement of scattered thermal neutrons from materials

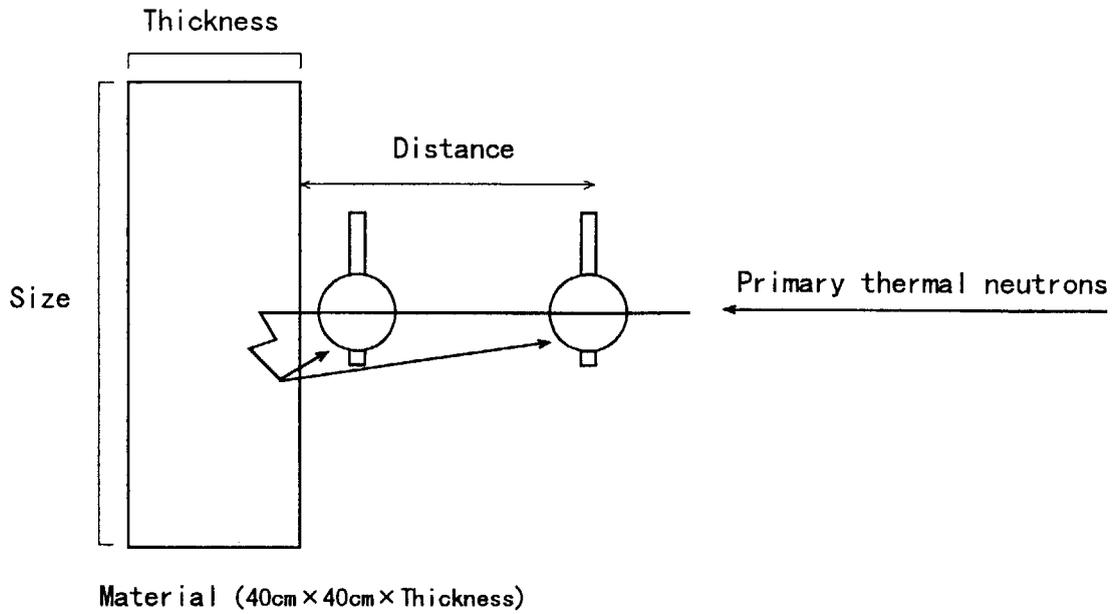


Fig.5 Conceptual view of thermal neutron measurements to investigate the effect of material size, thickness and the distance between material and detector to thermal neutron scattering.

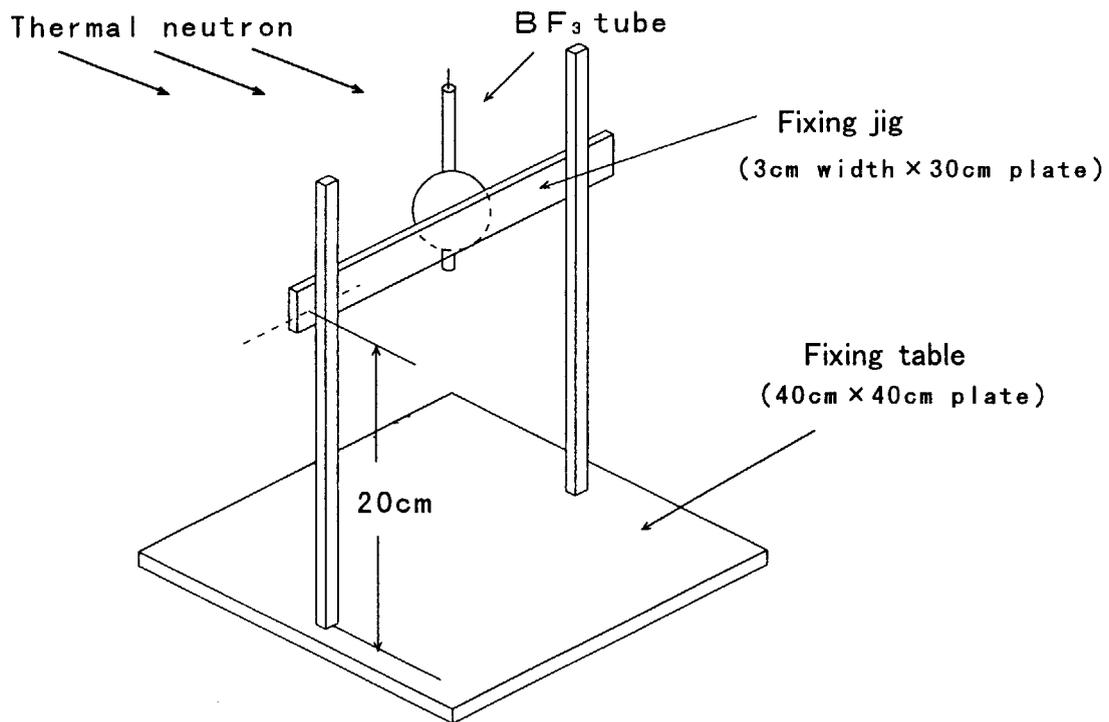


Fig.6 Measurement of scattered thermal neutrons from detector-fixing jig and table

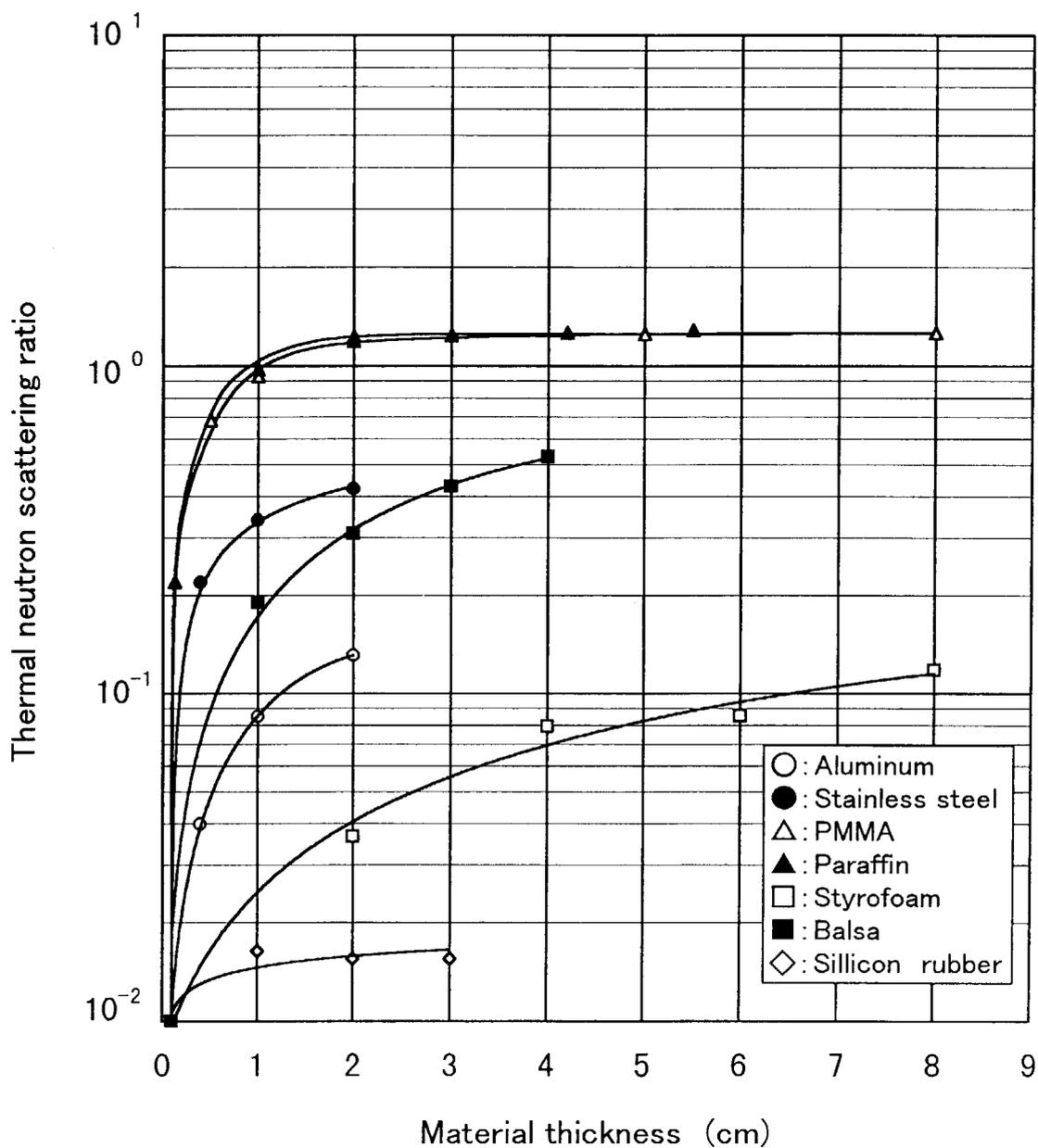
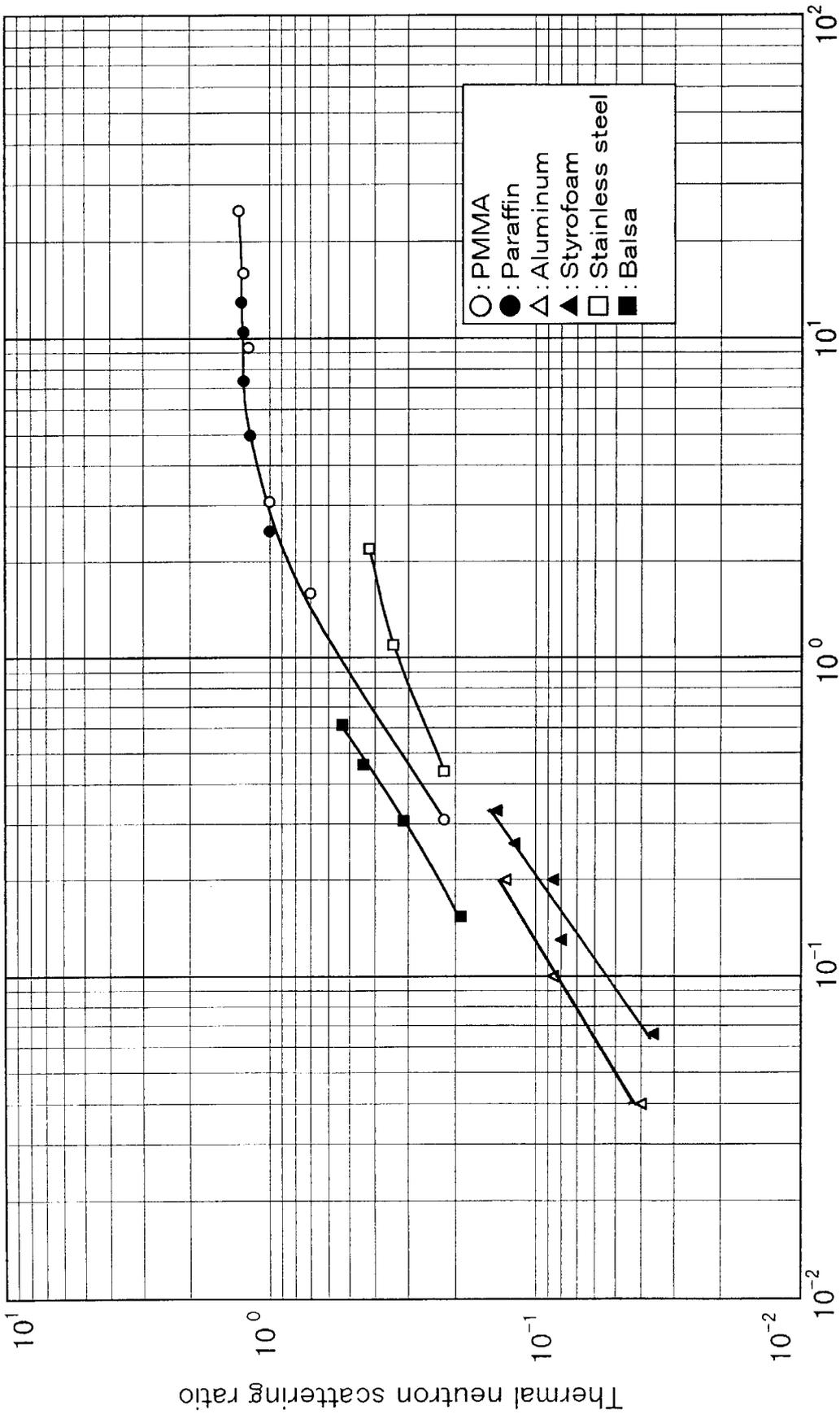


Fig.7 Characteristics of scattered thermal neutrons for the thickness of various materials



Mean number of collisions (Thickness/mean free path: $\Sigma \cdot d$)
 Fig. 8 Relationship between mean number of collisions and scattering ratio for various materials

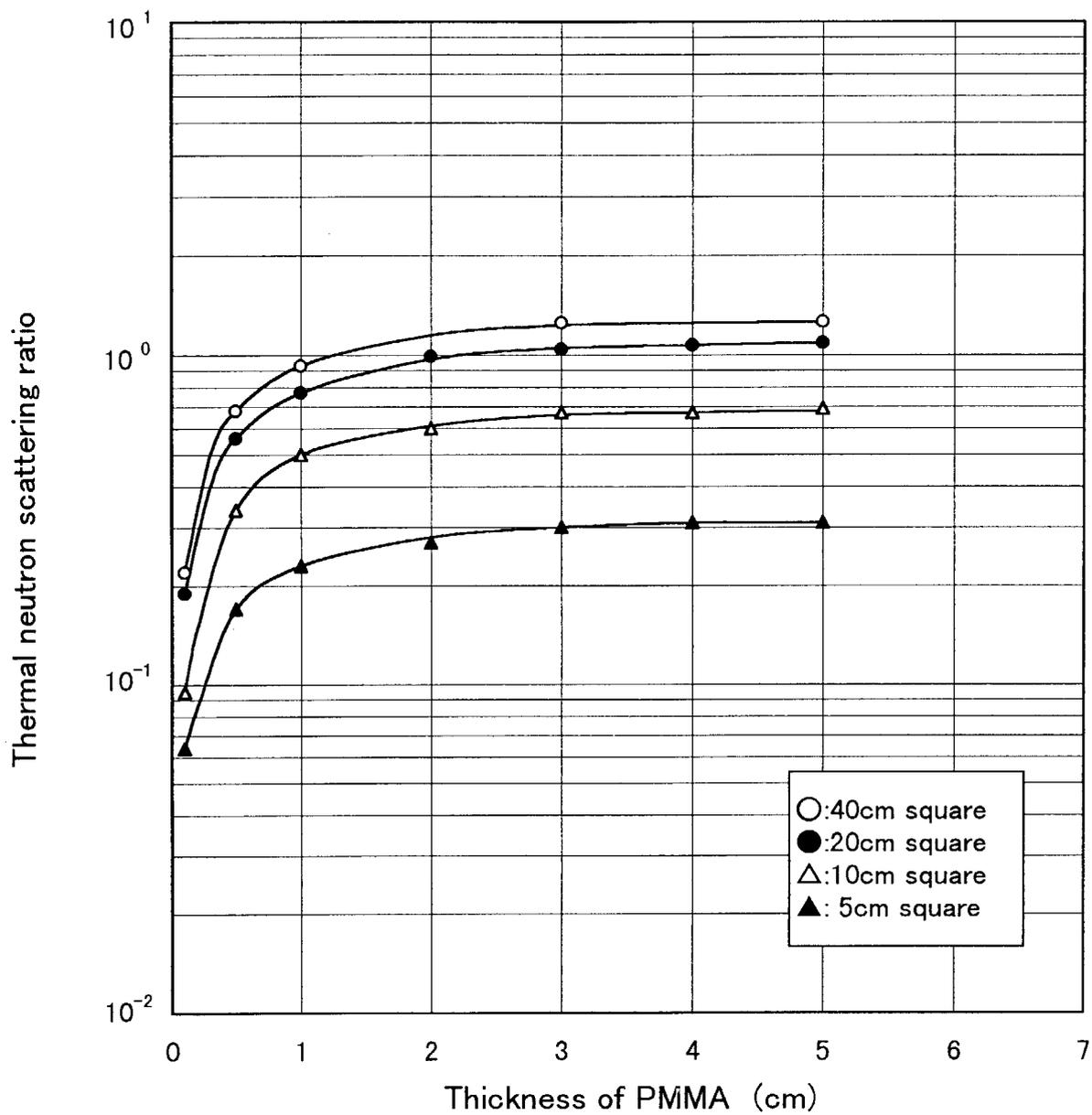


Fig.9 Characteristics of scattered thermal neutrons for various sizes of PMMA

(Saturation values are ○:1.3, ●:1.1, △:0.69 and ▲:0.31)

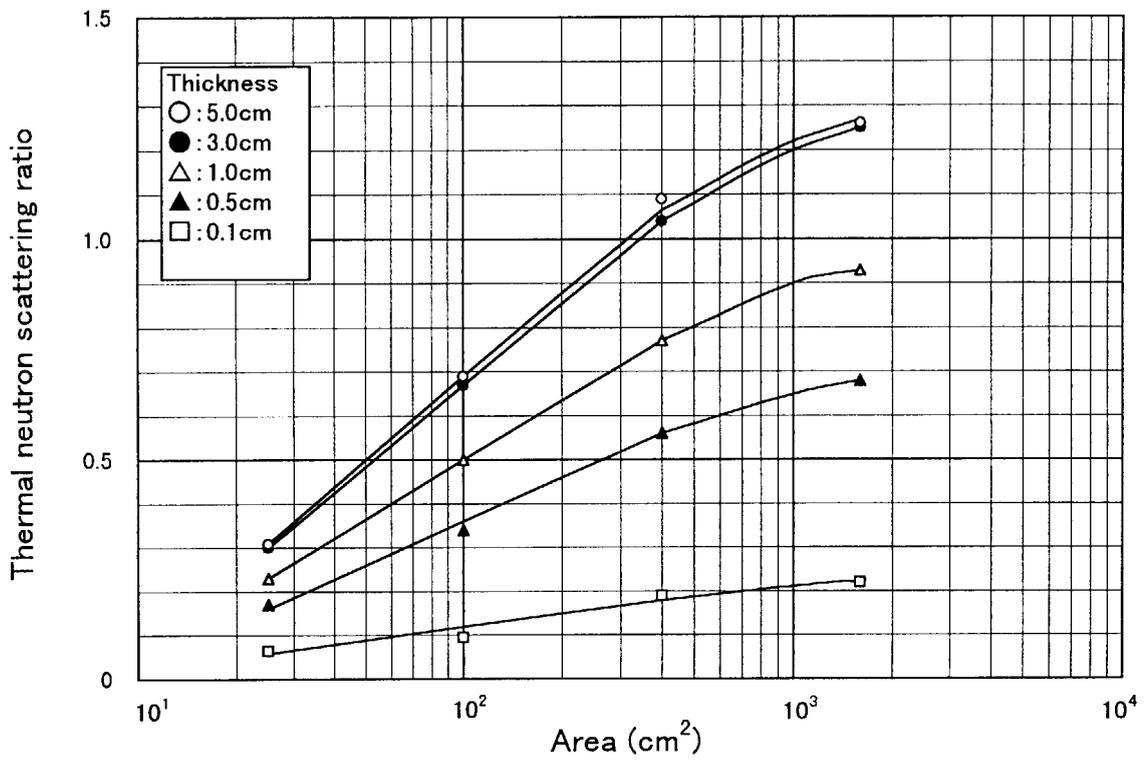


Fig.10 Relationship between thermal neutron scattering ratio and area of PMMA plate

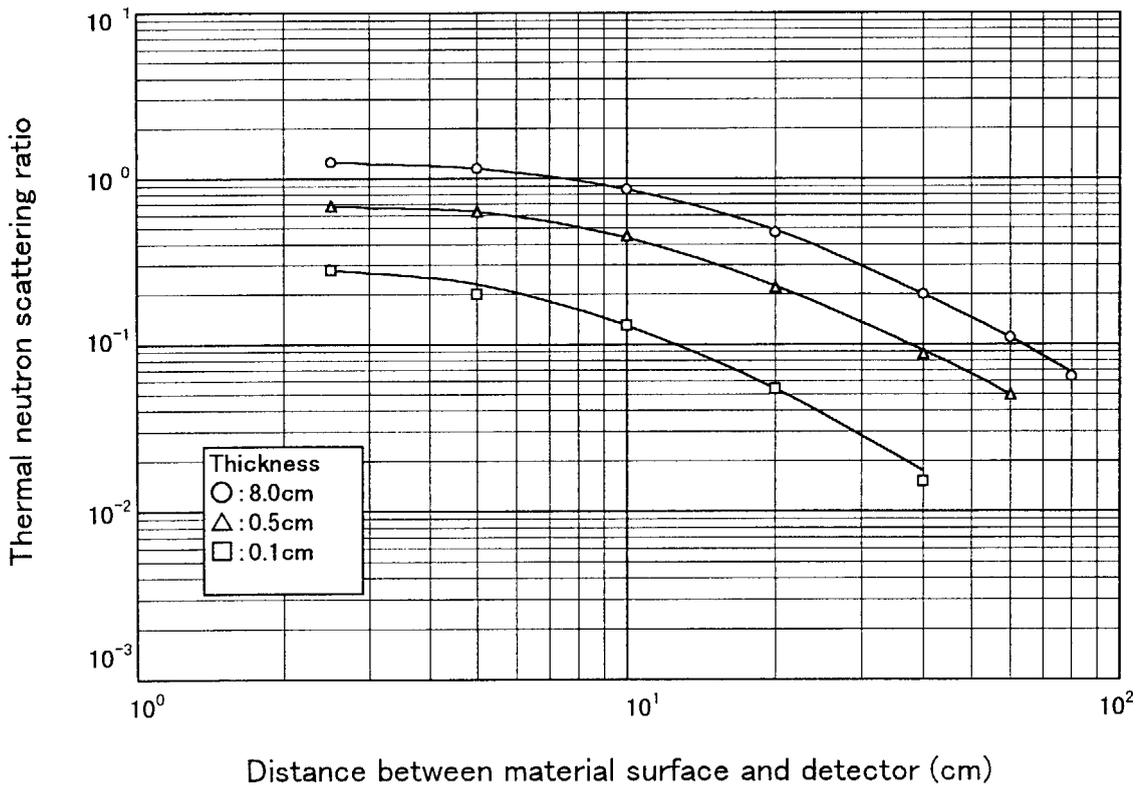


Fig.11 Relationship between thermal neutron scattering ratio and distance from PMMA plate

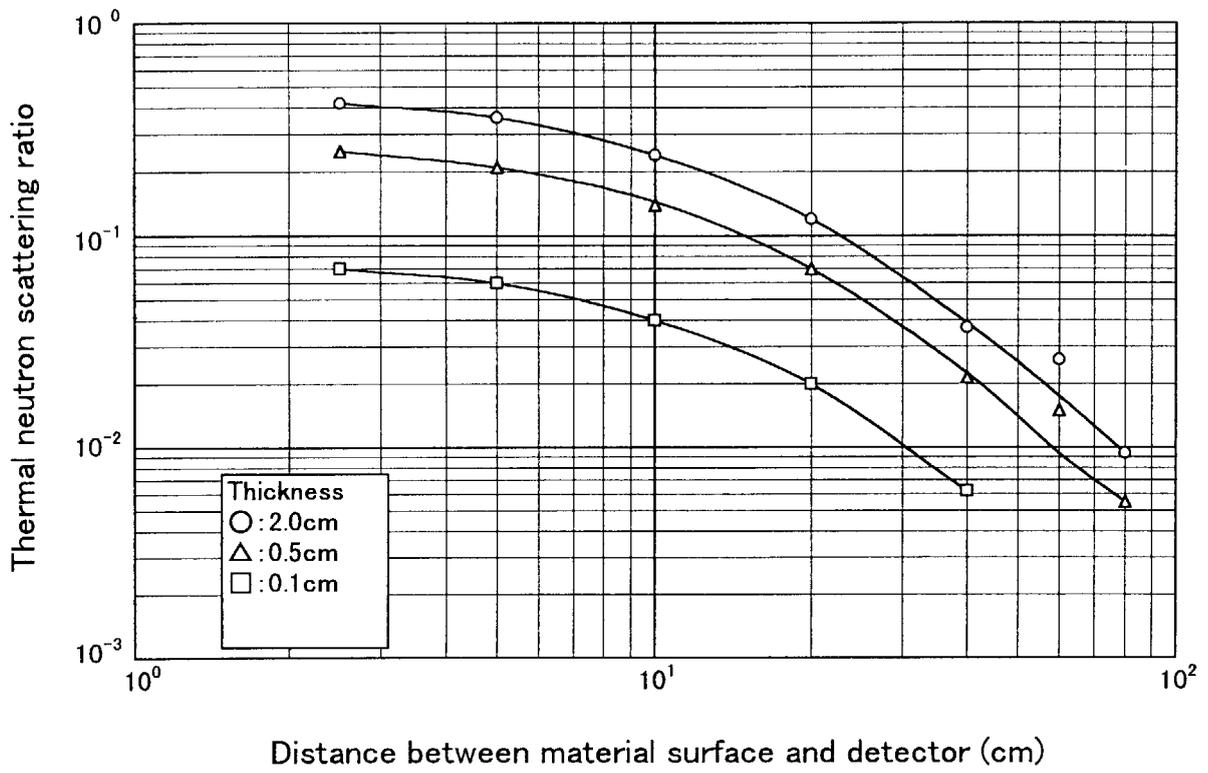


Fig.12 Relationship between thermal neutron scattering ratio and distance from stainless steel plate

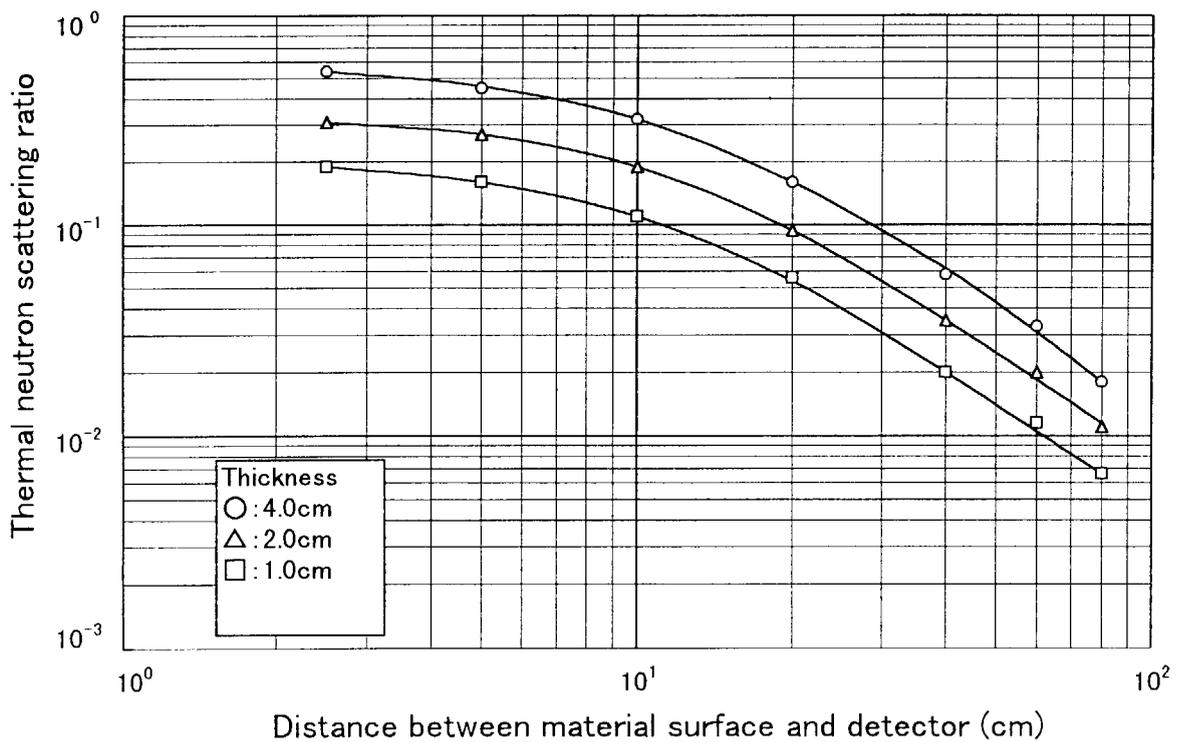


Fig.13 Relationship between thermal neutron scattering ratio and distance from balsa plate

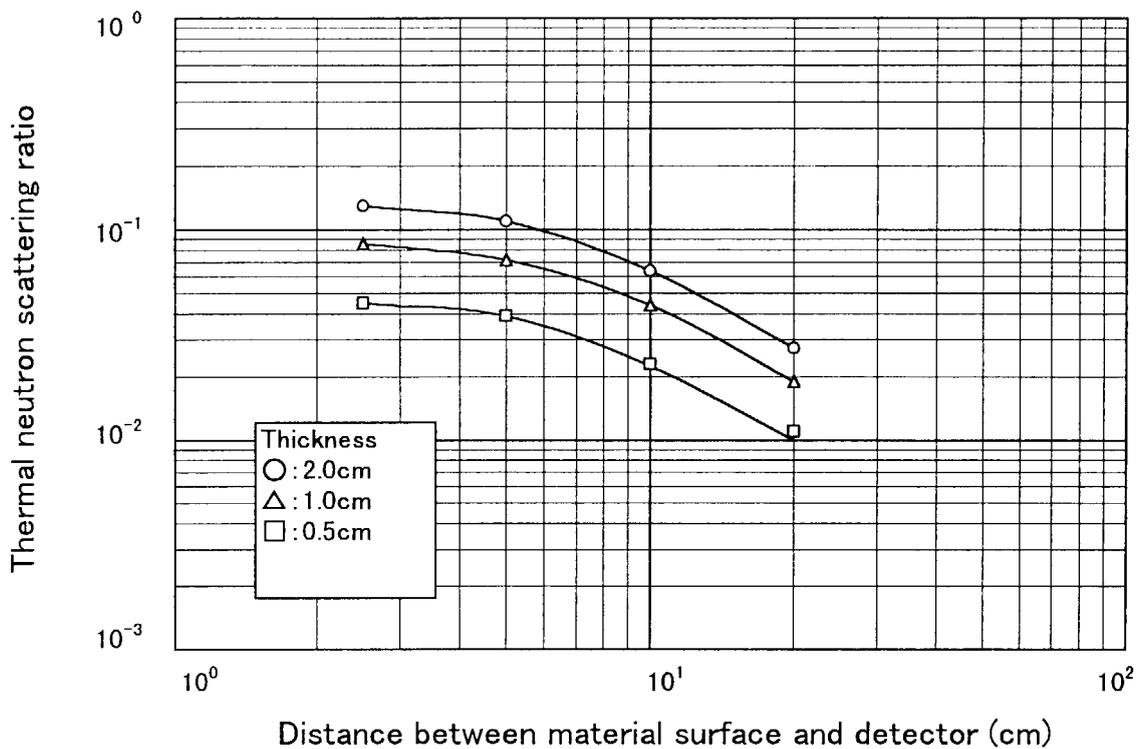


Fig.14 Relationship between thermal neutron scattering ratio and distance from aluminum plate

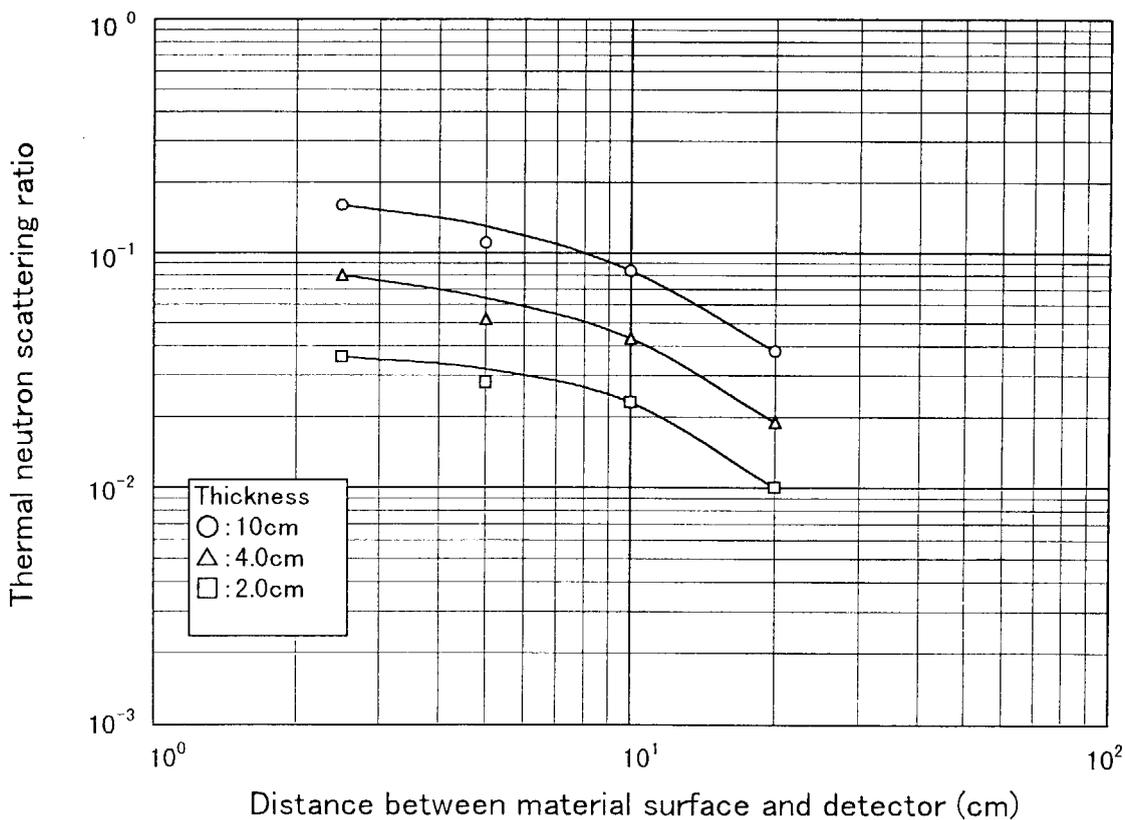


Fig.15 Relationship between thermal neutron scattering ratio and distance from styrofoam plate

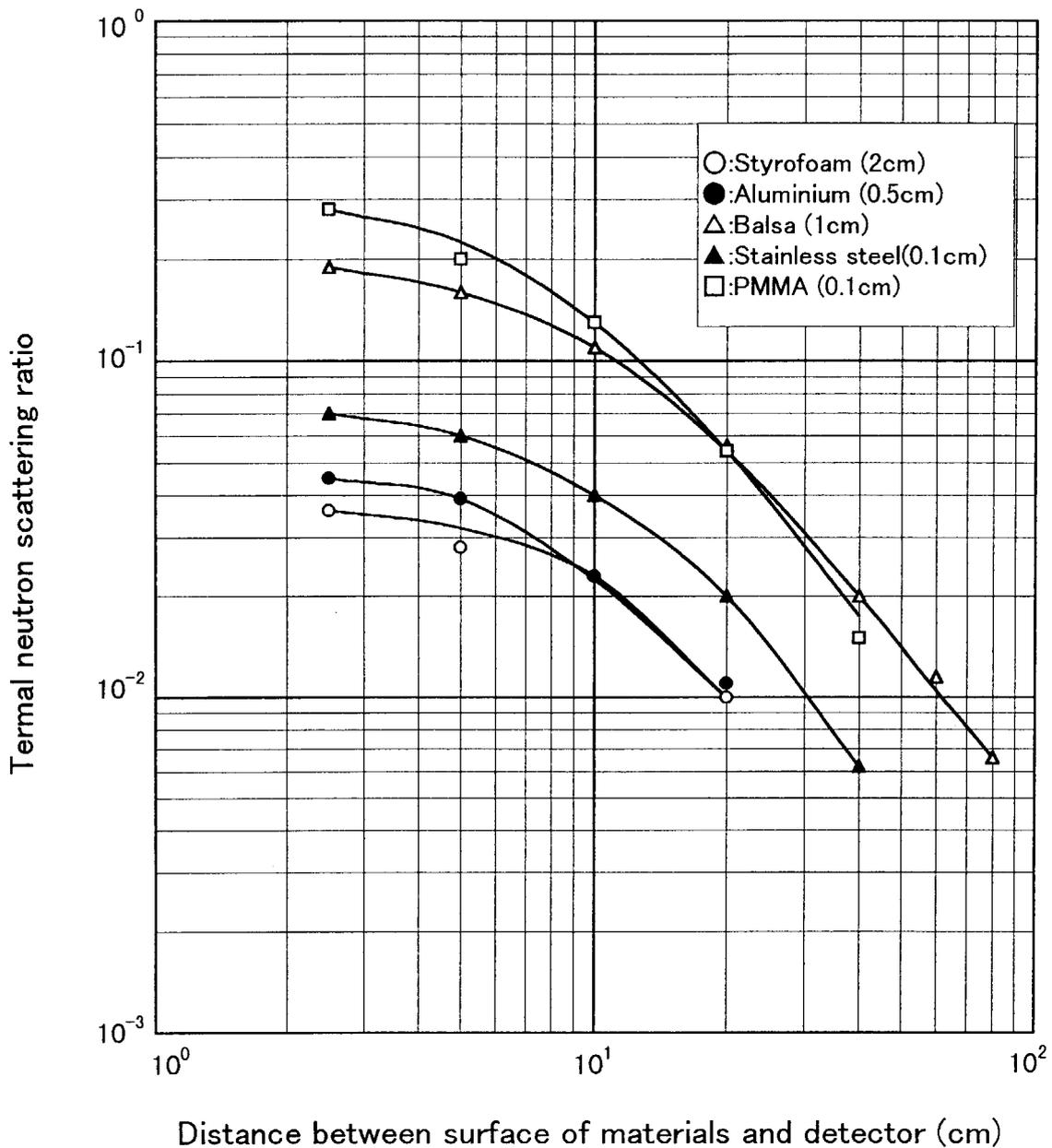


Fig.16 Thermal neutron scattering ratio as a function of surface-to-detector distance for the thinnest material in the experiment

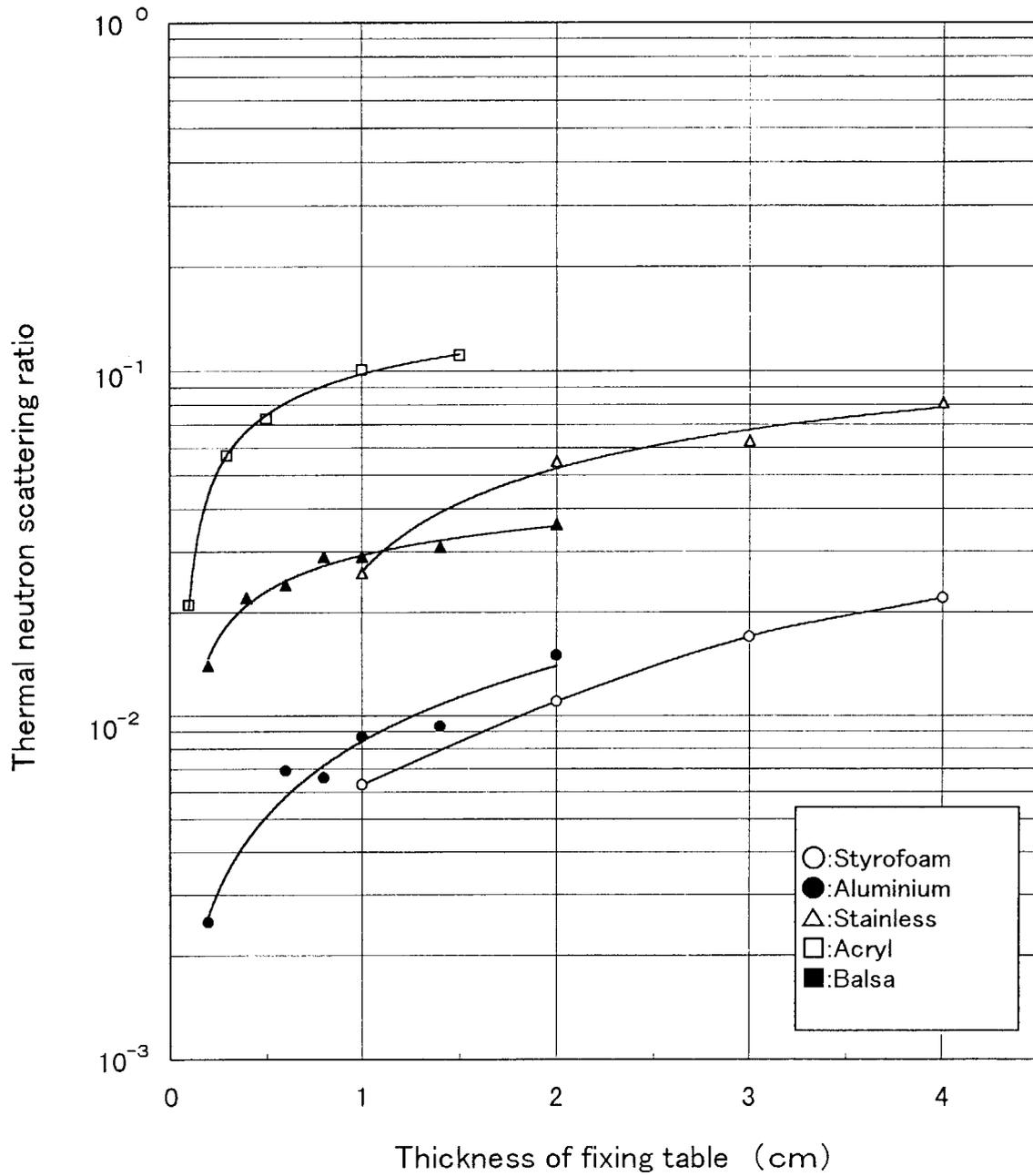


Fig.17 Relationship between thermal neutron scattering ratio and thickness of fixing table

(The size of table is 40cm Square)

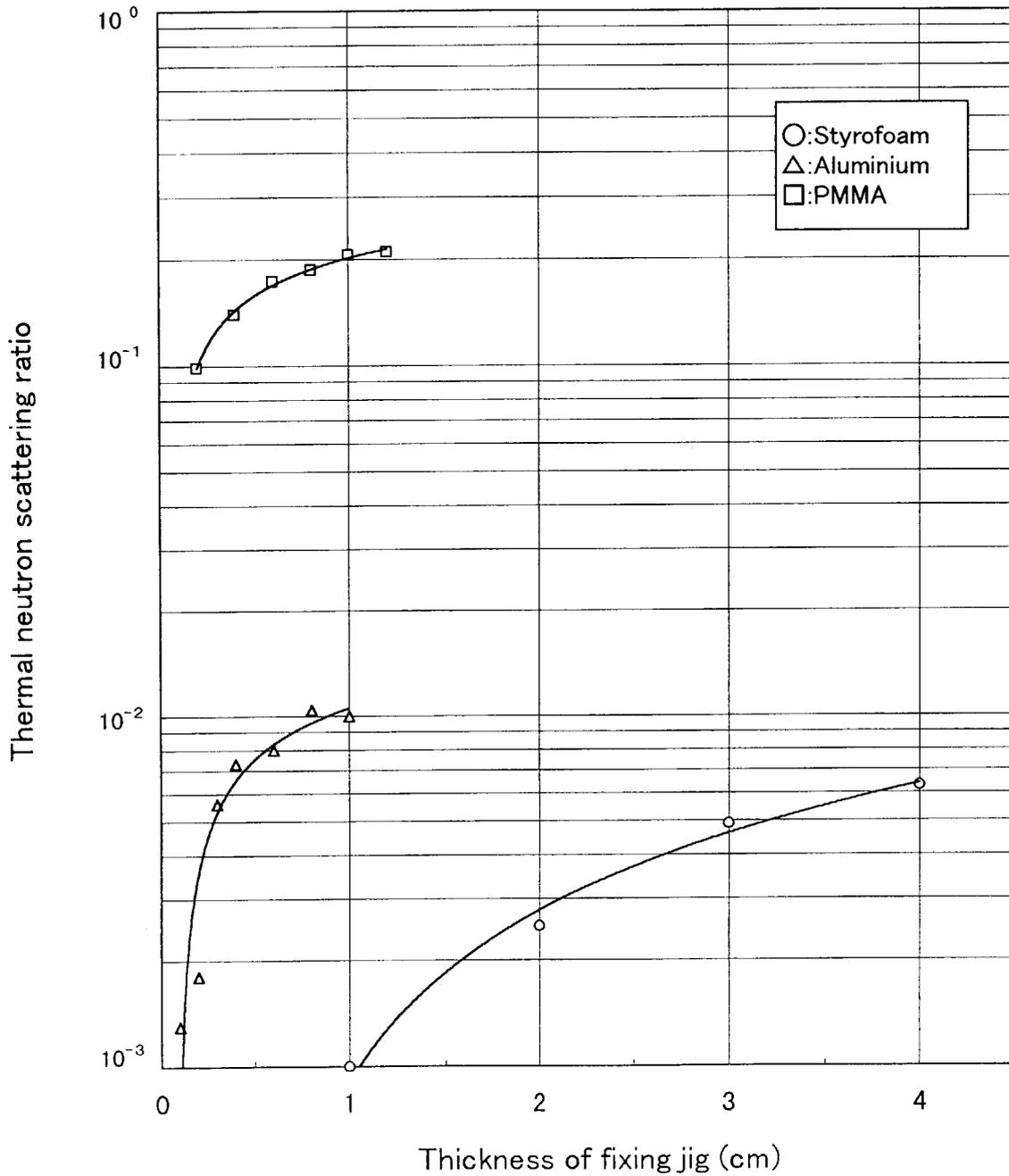


Fig.18 Relationship between thermal neutron scattering ratio and thickness of fixing jig
 (The size of jig plat is 3cm × 30cm)

付録A. モンテカルロ計算による解析結果と実験値との比較

本文の実験においては、熱中性子照射場に混在している熱中性子線以外の寄与を分離するために種々の補正を行っている。これらの補正による測定結果の妥当性を検証するために、アクリル平板体系についてモンテカルロ計算コード MCNP-4A を用いた熱中性子散乱のシミュレーションを行い、本文中の実験値との比較を行った。

A. 1 計算コード及び計算条件

計算には、三次元連続エネルギーモンテカルロ輸送計算コード MCNP-4A¹⁾ を用いた。中性子反応断面積ライブラリーは JENDL-3.2²⁾ に基づく MCNP 用ライブラリー FSXLIB-J3R2³⁾ を用い、熱中性子の散乱を計算する際に重要な、分子結合エネルギーを考慮した熱中性子散乱断面積データ $S(\alpha, \beta)$ として、ENDF-269ライブラリー⁴⁾ を用いた。

計算体系は以下のとおりである。アクリル平板の大きさ、組成及び密度は実験用材料と同じとし、アクリル平板に一樣に熱中性子の平行ビームを入射させた。熱中性子のエネルギー分布は、室温(27℃)におけるマックスウェル分布とした。アクリル中の水素原子に対する $S(\alpha, \beta)$ のデータがないため、ポリエチレンに対する $S(\alpha, \beta)$ を用いた。アクリル平板の周辺媒質は、乾燥空気(サイズ: 70cm × 70cm × 70cm)である。評価用検出器(tally)として、実験で用いた BF₃ 検出器とほぼ同じ体積の立方体(4cm × 4cm × 4cm、媒質は空気)をアクリル平板の中央に表面から 0.5cm 離して設置した。これは、アクリル表面と検出器中心間の距離を実験と同じ 2.5cm にするためである。評価用検出器の種類は、フルエンス評価用の cell-tally(飛跡長評価子)である。

アクリル平板に入射する熱中性子フルエンス(一次線のフルエンス)は、アクリル平板領域を真空にした条件で計算して評価した。これは、空気の散乱による影響を含めて一次線のフルエンスを評価するためである。

計算は、アクリル平板の縦・横の寸法を測定時と同じ 5cm × 5cm、10cm × 10cm、20cm × 20cm 及び 40cm × 40cm の 4 種類とし、それぞれの寸法に対して厚さを 0.1cm から 8.0cm まで変化させて行った。

ヒストリー数は、一次線と散乱線を合わせた全フルエンスの相対標準偏差が 0.5% ~ 1% の範囲になるように設定した。しかし、散乱線フルエンスは一次線を差し引いて求めるため、アクリル平板の厚さが薄く散乱線が少ない条件では誤差は大きくなる。このため、散乱線としての評価誤差は、約 1% ~ 7% である。

A. 2 解析結果及び実験値との比較

モンテカルロ計算により得られたアクリル平板の大きさと厚さを変化したときの平板材料の中心部表面近傍に到達する熱中性子散乱割合の解析結果を Table A. 1 に示す。また、同表には、実験値及び計算値/実験値の比を合わせて示す。

モンテカルロ計算においても、実験と同様、各寸法の熱中性子散乱割合は 8cm 厚さの飽和値に対して大きさによらずほぼ同じ関数で増加した。これらの平均的な近似式は、本文中の4.2項と同様に散乱割合をS、飽和値をN、厚さをd (cm)とすると、 $S = N \cdot (1 - 0.94 e^{-1.0d})$ となった。各寸法の飽和値は、40cm × 40cm との相対値で表すと、20cm × 20cm が 0.87, 10cm × 10cm が 0.58, 5cm × 5cm が 0.24であった。

本文中の4.2項の測定結果と比較すると、計算による各寸法の散乱割合は10cm × 10cm 寸法の平板が約15%実験値より高い値を示したが、全体で-10% ~ +20%以内の範囲で一致している。特に、20cm × 20cm 及び40cm × 40cm については1%~8%以内で良く一致した。また、40cm × 40cm の飽和値を1としたときの他の寸法の飽和値の相対値も両者は良く一致した。よって、測定評価の妥当性が検証された。

参 考 文 献

- 1) J. F. Briesmeister, Ed. ; LA-12625-M, 「MCNP-A General Monte Carlo Code for N-Particle, Version 4A」 Los Alamos National Laboratory (1993)
- 2) T. Nakagawa, et al. ; J. Nucl. Sci. Technol. , 32, 1259 (1995)
- 3) K. Kosako et. al. ; JAERI-Data/Code 94-020, 「FSXLIB-J3R2: A Continuous energy Cross Section Library for MCNP based on JENDL-3. 2」 (1994)
- 4) J. U. Koppel and D. H. Houston ; GA-8744, Revised (ENDF-269), 「Reference Manual for ENDF Thermal Neutron Scattering Data」, General Atomics

Table A.1 Comparison of scattering ratios between calculation and experiment for various sizes of PMMA

Thickness of material d: (cm)	Scattering ratio											
	5 x 5 cm			10 x 10 cm			20 x 20 cm			40 x 40 cm		
	C* ¹	M* ²	C/M	C	M	C/M	C	M	C/M	C	M	C/M
0.1	0.049	0.064	0.77	0.111	0.095	1.17	0.17	0.19	0.89	0.223	0.22	1.01
0.5	0.19	0.17	1.12	0.405	0.34	1.19	0.578	0.56	1.03	0.684	0.68	1.01
1.0	0.27	0.23	1.17	0.584	0.50	1.17	0.828	0.77	1.08	0.964	0.93	1.04
2.0	0.315	0.27	1.17	0.72	0.60	1.20	1.03	0.99	1.04	1.19	—	—
3.0	0.323	0.30	1.08	0.763	0.67	1.14	1.11	1.04	1.07	1.28	1.25	1.02
4.0	0.325	0.31	1.05	0.779	0.67	1.16	1.14	1.07	1.07	1.32	—	—
5.0	0.326	0.31	1.05	0.784	0.69	1.14	1.16	1.09	1.06	1.34	1.26	1.06
8.0	0.327	0.31	1.05	0.788	0.69	1.14	1.17	1.09	1.07	1.35	1.30	1.04
Expression	0.33(1-0.86e ^{-1.4d})* ³			0.79(1-0.87e ^{-1.1d})			1.17(1-0.84e ^{-0.95d})			1.35(1-0.83e ^{-0.95d})		

* 1 : C ; Calculated with MCNP.

* 2 : M ; Measured.

* 3 : d ; Material thickness in cm.

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オンクストローム	Å
バ	b
バ	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (= N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
エネルギー	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
仕事	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
熱量	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²³
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

熱中性子線照射場における検出器固定用シグ材料の熱中性子散乱線の評価