

JAERI-Research
2000-019



JP0050332



JRR-3M冷中性子実験孔C2-3における
中性子スペクトル及び中性子束の測定

2000年3月

川端祐司*・海老沢徹*・田崎誠司*・鈴木正年・曾山和彦

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

JRR-3M 冷中性子実験孔 C2-3 における中性子スペクトル及び中性子束の測定

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

川端 祐司*・海老沢 徹*・田崎 誠司*・鈴木 正年・曾山 和彦[†]

(2000年2月16日受理)

研究用原子炉 JRR-3M においては、従来考えられていた冷中性子よりさらに長波長中性子を利用した新しい実験が提案されるようになってきた。このような傾向に対応するため、より長波長領域までの中性子スペクトル測定及び中性子束測定を冷中性子実験孔(C2-3)において行った。中性子スペクトルの測定は、飛行時間法と $\theta - 2\theta$ 法を併用することにより、波長 4.5nm まで測定した。これは、従来測定されていたスペクトルの波長領域を、大きく長波長方向に拡大するものである。その結果、この範囲では急激なスペクトル変化はなく、この領域の中性子が利用可能であることが確認された。また、金箔放射化法による中性子束絶対測定の結果は 2.3×10^8 n/cm²/s となった。約10年前の JRR-3M 建設当時の特性測定の結果と比較すると、測定位置が原因と考えられる以上の差異はなく、中性子導管の経年劣化による中性子スペクトル及び中性子束への影響はほとんどないことが確認された。

東海研究所：319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

[†] 中性子科学研究センター

* 京都大学原子炉実験所

Neutron Spectrum and Flux of the Cold Neutron Beam Port (C2-3) in JRR-3M

Yuji KAWABATA*, Toru EBISAWA*, Seiji TASAKI*,
Masatoshi SUZUKI and Kazuhiko SOYAMA⁺

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

(Received February 16, 2000)

Neutron beam research in JRR-3M has been promoted and novel experiments using quite very low energy neutrons are proposed in these days. To cope with these new demands, the neutron spectrum and the flux at the end of the cold neutron beam (C2-3) were measured. Both of the time of flight method and the θ - 2θ method were used to measure the spectrum in the very long wavelength range until 4.5nm. It showed the possibility of the very low energy neutron application. The neutron flux was also measured by the gold foil activation method and it is 2.3×10^8 n/cm²/s. These measured results shows the agreements with the results of the commissioning test of JRR-3M about 10 years ago. The aged deterioration of the cold guide tube is not found out.

Keywords : Neutron Spectrum, Neutron Flux, JRR-3M, Cold Neutron Guide Tube, Very Low Energy Neutron

⁺ Center for Neutron Research

* Research Reactor Institute, Kyoto Univ.

目次

1. はじめに	1
2. TOF 測定	1
2. 1 測定条件	1
2. 2 ダイレクトビーム中心線の決定	2
2. 3 TOF スペクトル	4
3. 多層膜モノクロメータを用いた $\theta - 2\theta$ 測定	11
3. 1 モノクロメータ特性測定	11
3. 2 $\theta - 2\theta$ 測定条件	12
3. 3 スペクトル測定結果	12
4. 絶対中性子束測定	14
5. スペクトル及び中性子束評価	15
6. 中性子束及びスペクトルの経年変化	18
7. まとめ	19
謝辞	20
参考文献	20

Contents

1. Introduction	1
2. Time of Flight Spectrum Measurement	1
2.1 Measurement Condition	1
2.2 Center Line of Direct Beam	2
2.3 TOF Spectrum	4
3. $\theta - 2\theta$ Spectrum Measurement with Multilayer Monochromator	11
3.1 Measurement of Monochromator Reflectivity	11
3.2 $\theta - 2\theta$ Measurement Parameters	12
3.3 $\theta - 2\theta$ Spectrum	12
4. Absolute Neutron Flux	14
5. Measured Results of Neutron Spectrum and Neutron flux	15
6. Aged Deterioration of Neutron Flux and Spectrum	18
7. Concluding Remarks	19
Acknowledgements	20
References	20

This is a blank page.

1. はじめに

JRR-3M は多目的用研究炉として建設され¹⁾、1990年に臨界を迎えて以降、幅広く利用されてきている²⁾。熱中性子及び冷中性子を利用する中性子導管群を設置し^{3,4)}、広いビームホールを有する点が利用上の大きな特徴であり、特に中性子ビーム利用では世界でも有数の研究センターとして大きな成果を挙げてきた⁵⁾。

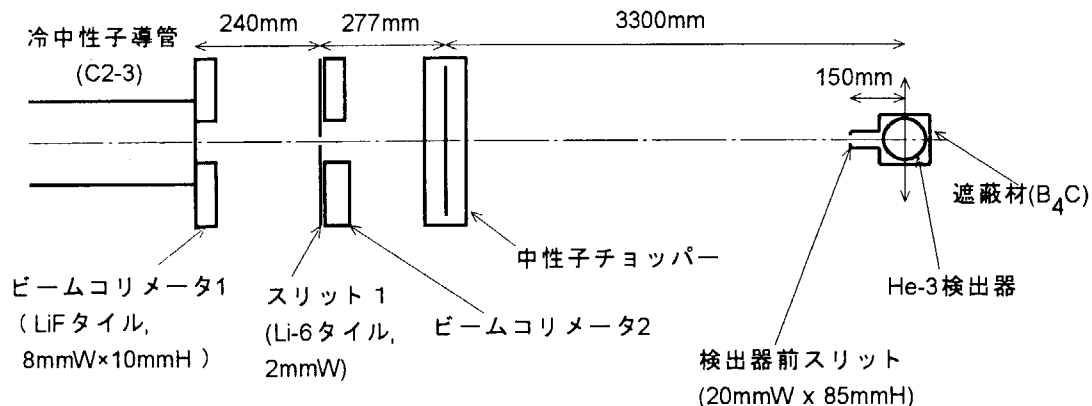
JRR-3M 臨界直後に全施設の特性測定が行われ、その一環として熱中性子導管実験孔 (T2-4) 及び冷中性子導管実験孔 (C2-3) の中性子束及び中性子スペクトル測定が行われた⁶⁾。その後、利用が開始されて約10年を迎え、従来考えられていた領域よりも長波長の中性子利用が提案されるようになったことや中性子導管等の経年変化を調べることを目的として、再度、冷中性子導管末端である C2-3 実験孔における中性子スペクトル及び中性子束を測定することとした。

中性子スペクトル測定では、まず飛行時間(TOF)法によってスペクトル全体を俯瞰した後、多層膜モノクロメータを利用した $\theta-2\theta$ 法によって、より精度の良い長波長領域の測定を行った。また、中性子束の絶対値を測定するために金箔放射化法を行った。

2. TOF 測定

2. 1 測定条件

JRR-3M C2-3 実験孔から得られる中性子ビームのスペクトルを飛行時間(TOF)法で測定した。実験配置を第1図に示す。導管出口直後には、必要以外の中性子を吸収し、周辺のバックグラウンドを下げるため⁷⁾LiF タイルによるコリメータ1を中性子導管出口中心部分に設置した。これにより、ビームサイズは $8\text{mmW} \times 10\text{mmH}$ に制限される。その240mm 下流に、入射中性子ビームを絞るための2mmのスリットを設置した。さらにバックグラウンドを下げるために、中性子通過幅を十分に広げたコリメータ2を置いた。



第1図 飛行時間(TOF)法によるスペクトル測定配置

スリットから 277 mm 下流に中性子チョッパーを設置し、冷中性子ビームのパルス化を行った。チョッパーはロータ直径 450 mm であり、スリットは幅 1mm、長さ 30 mm で扇形に加工されている。測定時の回転数は 3000rpm であり、発生する中性子パルスは、幅 1.4×10^{-5} sec, 50Hz である。また、中性子飛行距離となるチョッパー・検出器間距離は 3300 mm である。検出器を取り囲んで B₄C の遮蔽があり、さらに入射部には、周辺から回り込んでくるバックグラウンド中性子を遮蔽するために幅 20 mm、高さ 85 mm、長さ 150mm のカドミニウム製筒を取り付けた。

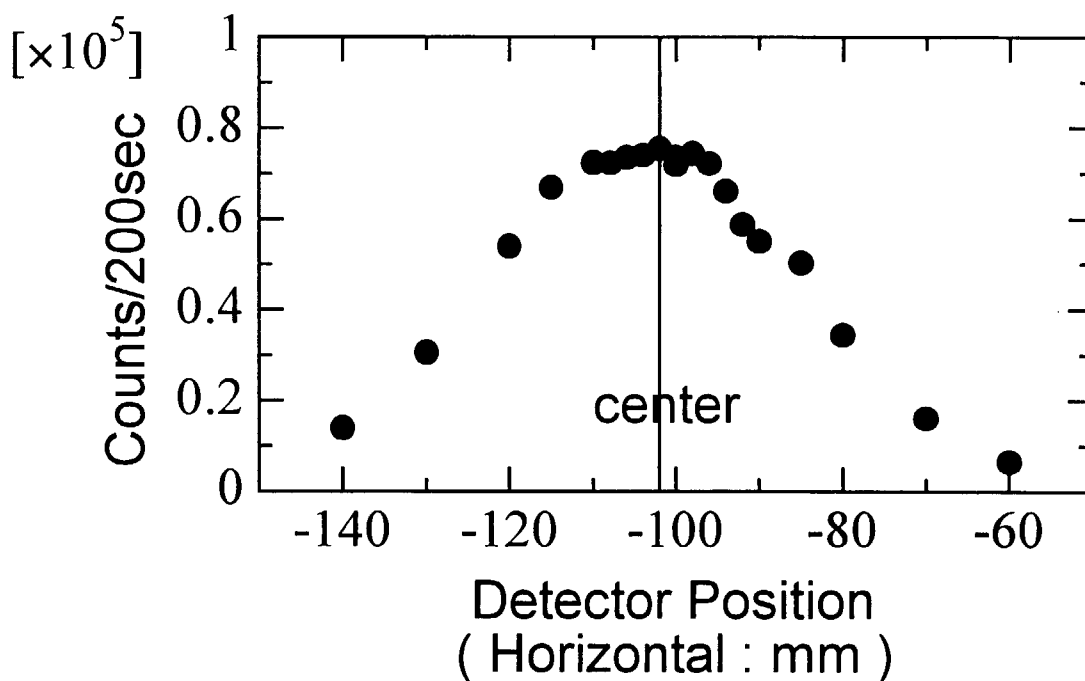
中性子導管上流の実験孔に設置されている 3 軸スペクトロメータ (LTAS) でパイログラファイト (PG) 製モノクロメータが用いられている。このため、中性子スペクトルにはその取り出し波長に対応する 0.42nm に常にディップが存在する。これを測定された飛行時間の規格化に利用することで、時間軸の校正を行った。

2. 2 ダイレクトビーム中心線の決定

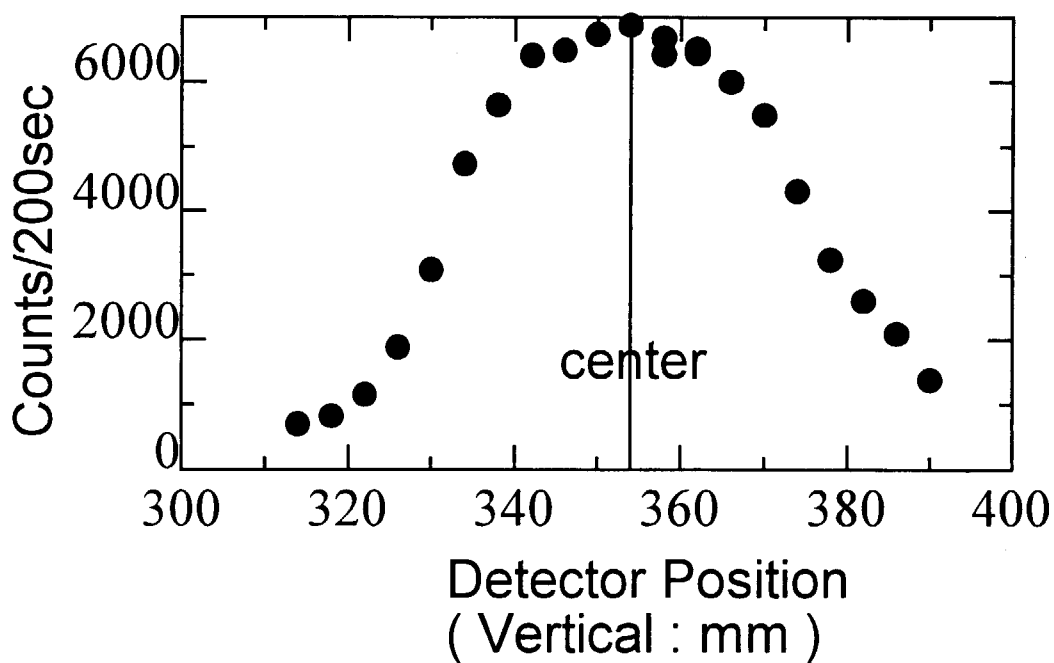
測定は、まずビームセンターを捉えるため、導管出口の幅 8mm、高さ 10mm のビームコリメータ 1 だけが有る状態で、検出器前のスリットを幅 1mm とし、上下方向には制限を設けずに水平方向のビーム広がり測定した。その結果を第 2 図に示す。ここではスペクトル測定は行わず、すべての速度を含んだ全計数で表示した。また同様に鉛直方向の分布を第 3 図に示す。ここでは、水平方向分布を測定したときに中央位置となった場所で、水平方向幅 1mm、鉛直方向幅 4mm のスリットを検出器前に取り付けて、上下方向にスリットを移動させる方法で、鉛直方向分布を測定した。

これらの結果、導管出口でビームサイズを幅 8mm、高さ 10 mm とした場合、飛行距離 3577mm でも、水平方向幅 7mm、高さ 20mm 程度にわたってほぼ一様に広がっていることがわかった。

次に、この様にして得られた導管出口からのダイレクトビームの中心位置に、水平方向幅 1mm、鉛直方向は制限しないスリットと共に検出器を配置し、スリット 1 の水平方向幅を 1mm としてビーム強度をスキャンし、得られた中心を導管側の中心点と決定した。この様にして決定した導管側の中心位置でソースビーム幅を 2mm とした。その後、検出器前スリット幅を水平方向 5mm、鉛直方向 2 mm とし、水平・鉛直両方向に対してビームスキャンを行うことによりダイレクトビームの検出器位置における中心を求めた。まず水平方向のスキャンを行って中心位置を求め、さらにその位置で鉛直方向のスキャンを行って中心位置を求める。この繰り返しを続けることによって、位置を収束させ、ビーム中心とした。



第2図 入射ビームの水平方向分布
(検出器スリット：幅1 mm)



第3図 入射ビームの鉛直方向分布
(検出器前スリット：幅1 mm、高さ4 mm)

2. 3 TOF スペクトル

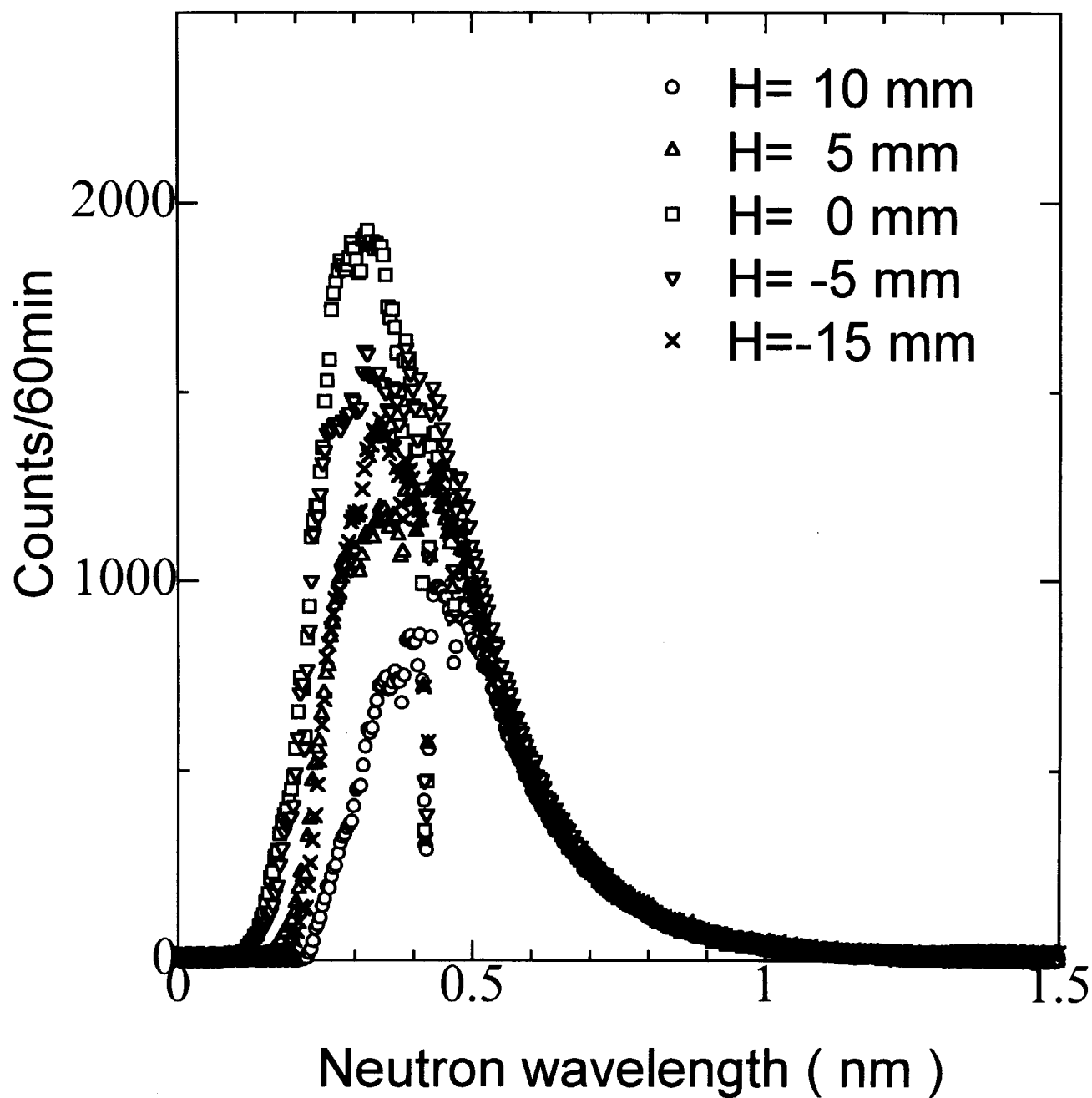
導管出口におけるスリット1の水平方向幅を 2 mm とし、検出器前スリットを幅 5mm, 高さ 6mm として、TOF によってスペクトルを測定した。

第4図に検出器位置を水平方向に移動させた各位置でのスペクトルを、第5図にそれを波長ごとの広がりとして示したものを示す。第4図では鉛直方向の位置をビーム中心高さに保ち、水平方向に移動させた。ここで(-)方向は導管を背にして右側方向である。また第5図でそれぞれの波長は± 0.01nm の波長幅を有している。

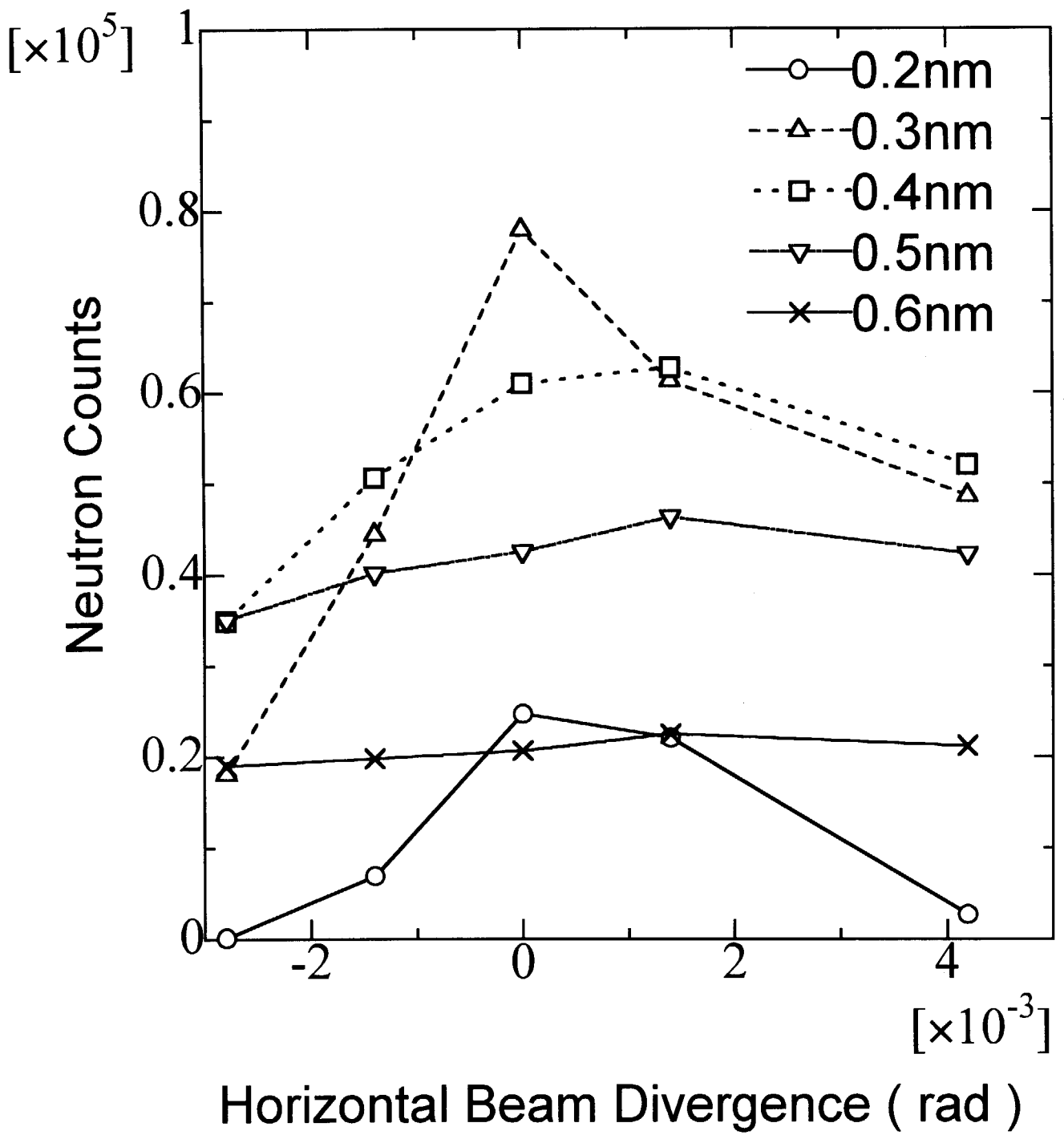
ここで実験配置による水平方向ビーム発散測定分解能は $2.0 \times 10^3 \text{ rad}$ であり、また中性子導管の鏡材料であるニッケルに対する全反射臨界角は、各波長に対して $3.4 \times 10^3 \text{ rad}$ (0.2nm), $5.2 \times 10^3 \text{ rad}$ (0.3nm), $6.9 \times 10^3 \text{ rad}$ (0.4nm), $8.6 \times 10^3 \text{ rad}$ (0.5nm), $1.0 \times 10^4 \text{ rad}$ (0.6nm)である⁷⁾。第5図から水平方向のビーム発散の半値幅を見ると、おおよそ $4 \times 10^3 \text{ rad}$ (0.2nm), $6 \times 10^3 \text{ rad}$ (0.3nm), $6 \times 10^3 \text{ rad}$ 以上 (0.4nm 以上)となっている。0.2 及び 0.3nm に対しては、測定分解能と全反射臨界角の和よりやや小さい値となっており、中性子導管末端でのビーム発散が前方に偏ったものになっていることが示された。また、ビーム広がり(+)側と(-)側に若干の差が認められるが、これは本測定における中心線が、実際のビーム発散の中心線とずれたため、見かけ上ビームの広がり(+)側に差異があらわれたものと考えられる。この差異は 10^3 rad のオーダーであり、以下のスペクトル及び中性子束測定においては、これらに比べて十分広いビーム発散角まで測定したため測定に影響することはない。

第6図に鉛直方向に移動させた場合のスペクトルを、第7図にそれぞれの波長ごとのビーム発散を示す。鉛直方向に対しては $4.2 \times 10^3 \text{ rad}$ の測定分解能を有している。第7図よりビーム発散の半値幅のおおよその値を求めると、 $6 \times 10^3 \text{ rad}$ (0.2nm), $1 \times 10^4 \text{ rad}$ (0.3nm), $1 \times 10^4 \text{ rad}$ 以上 (0.4nm 以上)となった。これらの値も測定分解能と全反射臨界角との和よりも小さいが、水平方向の広がりと比較すると明らかに広がっていることがわかる。また、水平方向と同様に、測定時の中心線設定の誤差によると思われる発散角の非対称性が若干みられる。

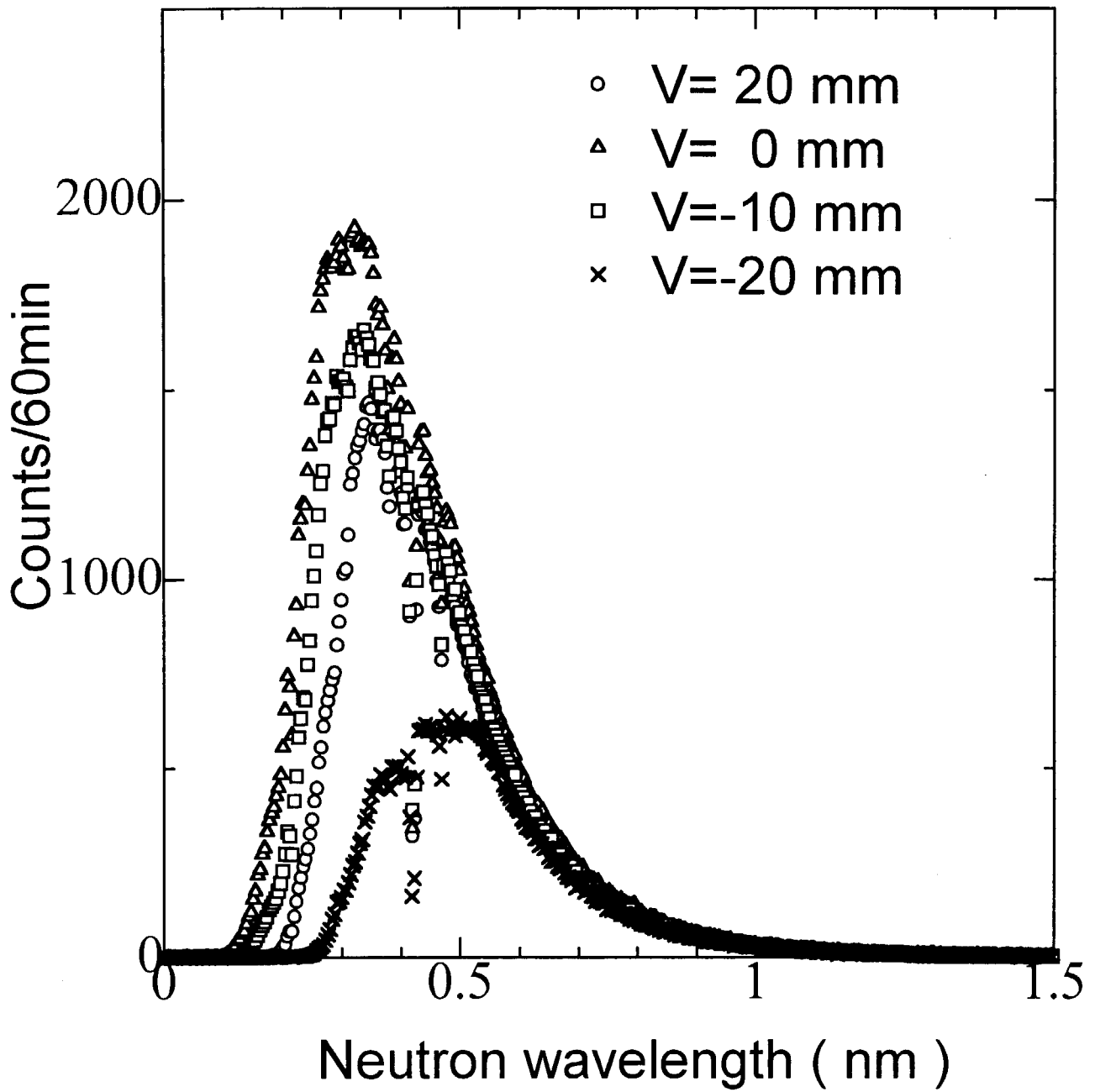
第8図に水平方向と鉛直方向の波長ごとのビーム発散の比較を示す。水平方向と鉛直方向のビーム発散の差は、導管断面が幅 2cm × 高さ 12cm (終端付近では 6cm) という縦長の矩形であるため、水平方向に対しては反射回数が多くなり、反射回数の多くなる発散角の大きい成分が減少することにより、前方成分が多くなる。また、鉛直方向は比較的反射回数が少なくなるため、ビーム発散が広く保たれると考えられる。



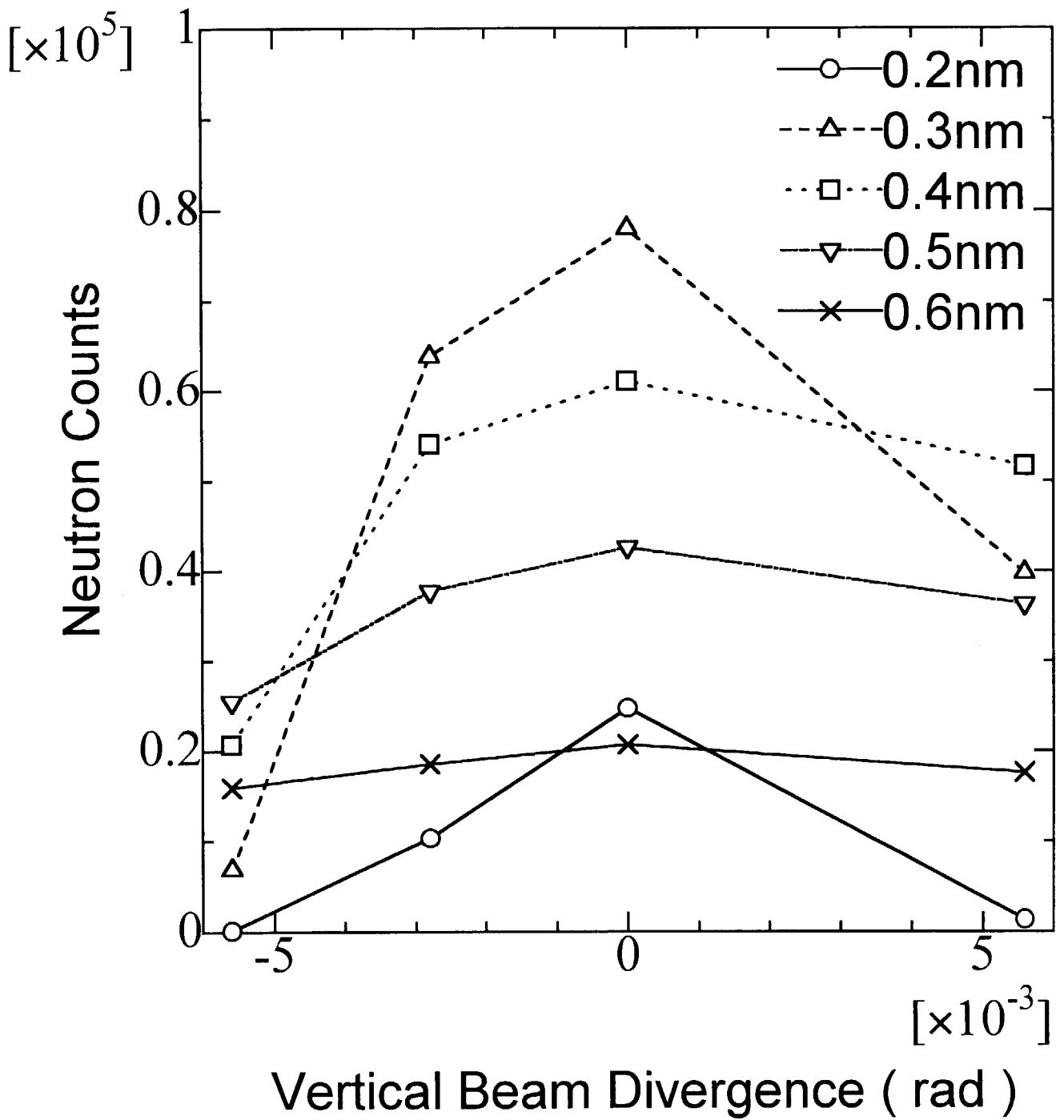
第4図 飛行時間(TOF)法スペクトルの水平方向位置による変化



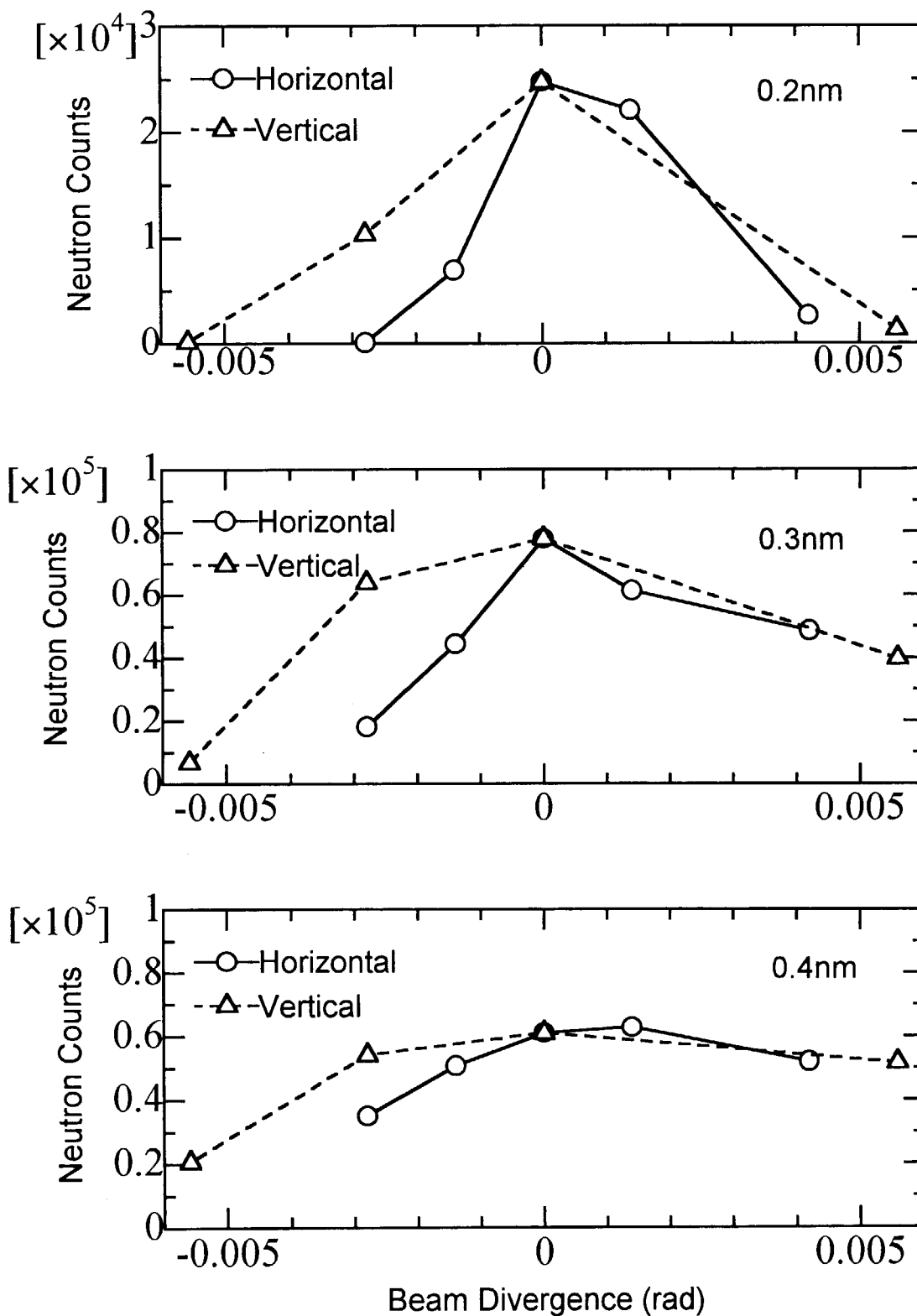
第5図 水平方向ビーム発散の波長依存性



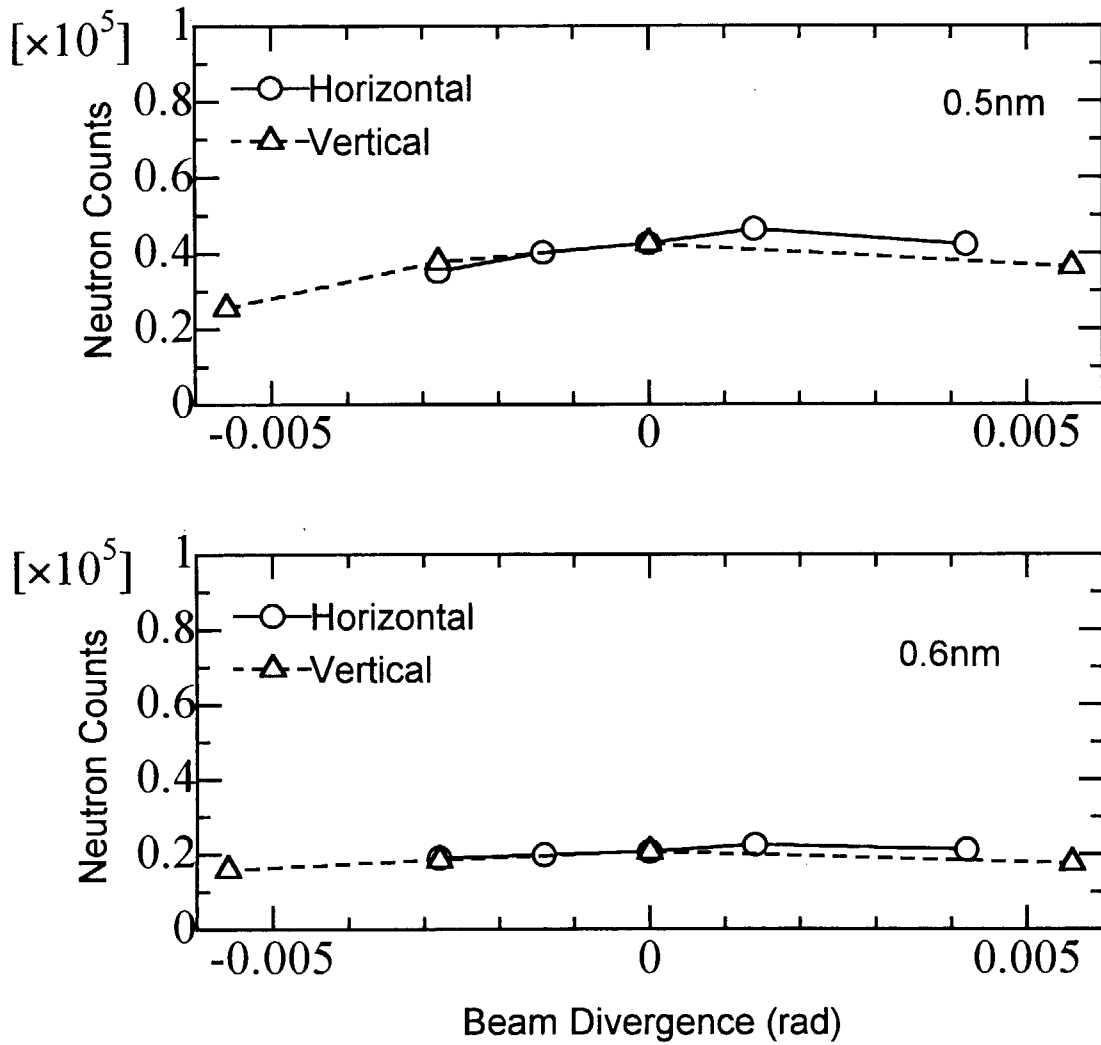
第 6 図 飛行時間(TOF)法スペクトルの鉛直方向位置による変化



第7図 鉛直方向ビーム発散の波長依存性



第 8 - 1 図 各波長ごとの中性子ビーム発散角



第8-2図 各波長ごとの中性子ビーム発散角

3. 多層膜モノクロメータを用いた $\theta - 2\theta$ 測定

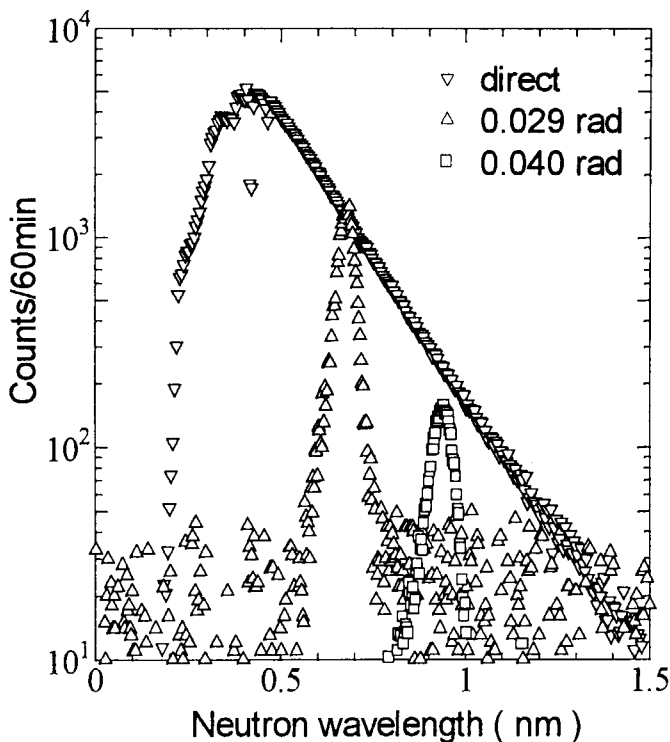
3. 1 モノクロメータ特性測定

モノクロメータの反射率及び反射波長幅測定を飛行時間法を用いて行った。チョッパー及び検出器周辺の配置は、スペクトル測定における TOF の条件と同一であり、反射率測定試料ホルダーまわりのみが挿入されている。従ってチョッパー周辺の条件は、TOF 測定時と同一である。試料直前のスリット幅は 0.5 mm、また検出器前コリメータは条件によって設置しない場合もあるが、設置時は 1 mm である。導管出口コリメータ・チョッパー出口スリット間距離は 350 mm、チョッパー出口スリット及び試料前スリット間距離は 650 mm である。これらの配置から、検出器位置におけるダイレクトビーム発散は計算上 ± 0.4 mm となる。また試料及び検出器間距離は 1300 mm、モノクロメータ直径は 65 mm である。

第9図に入射スペクトル及び反射スペクトルを示す。入射スペクトルに関しては、第2. 1節で述べたように 0.42 nm 位置のスペクトルのへこみとマルチアナライザの時間幅 4 μ sec/ch によって時間軸の規格化を行った。反射ビームに関しては 0.42 nm のディップはとらえることができないため、中性子入射角を 2.9×10^{-2} rad と 4.0×10^{-2} rad の2点として反射率測定を行った。両方の反射率測定は連続して行ったため、飛行時間原点のずれは一致すると考えると、モノクロメータの製作条件である $2d=23.5$ nm とよく一致し、それぞれ 0.68nm 及び 0.94nm の位置にピークが得られている。

これらの反射スペクトルピークの半値幅から、本モノクロメータは波長 $2d=23.5$ nm

を中心として、分解能 5 % を持つことが明らかになった。

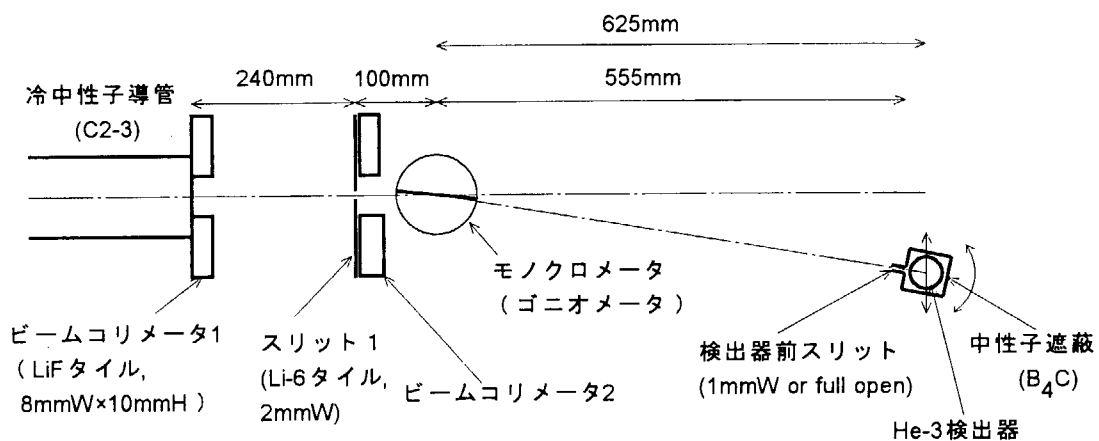


第9図
モノクロメータ特性測定
結果 (入射及び反射 TOF
スペクトル)

3. 2 $\theta - 2\theta$ 測定条件

JRR-3M に設置した冷中性子導管(C-2)から得られる中性子スペクトルは、波長 0.3nm 程度にピークを持っており、それより長波長領域では急速に中性子束が少なくなる。従って、飛行時間法による測定では、計数の多い短波長領域の測定は精度良く行えるが、長波長領域は急速に S/N が悪くなる。さらに、飛行時間法で長波長領域に条件を合わせた測定を行うと、計測される短波長中性子数が極めて多くなり、短波長中性子によるバーストのために中性子検出器が窒息して計測できなくなり、正常に測定が行えない恐れがある。従って、短波長領域は飛行時間法で行うと共に、長波長領域の測定には、入射中性子ビームの単色化を行う $\theta - 2\theta$ 法を用いて測定を行った。

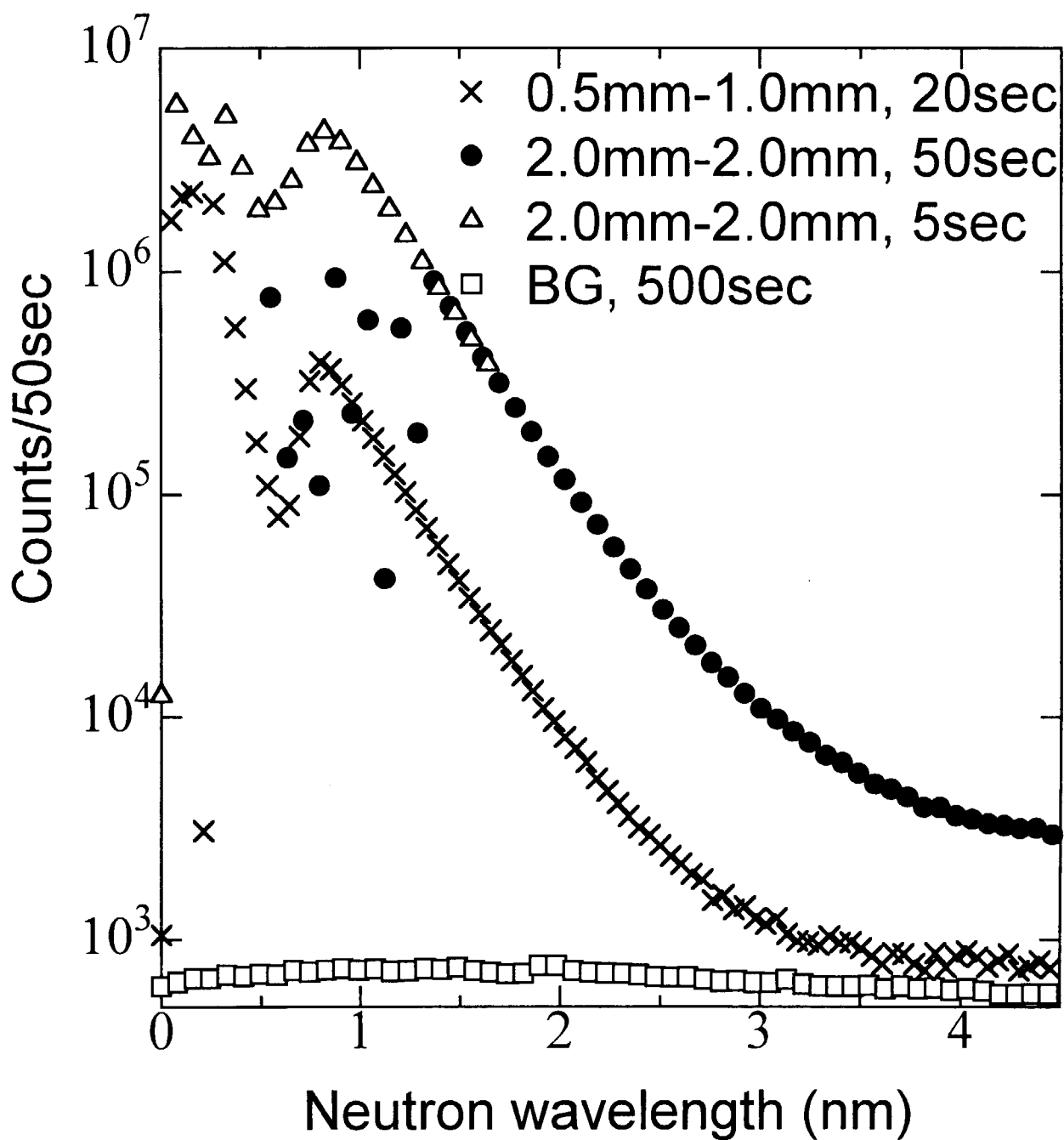
測定配置を第 10 図に示す。導管出口には TOF 測定と同様に中心部に幅 8mm, 高さ 100mm のビームコリメータ 1 を置く。その下流 240mm 位置に反射率測定時には幅 0.5 - 2.0 mm とする Li タイル製スリット 1 (S1) を置き、入射ビーム幅を制限する。さらにすぐ下流にバックグラウンドを押さえるためのビームコリメータ 2 を置く。スリット 1 とモノクロメータ中央間距離は 100 mm とし、モノクロメータ・検出器間距離は 625 mm とした。また検出器前スリット (S2) の幅は測定に応じて 1.0 - 2.0 mm とした。



第 10 図 $\theta - 2\theta$ 法測定配置図

3. 3 スペクトル測定結果

モノクロメータ入射側のスリット 1 の幅を 0.5mm, 検出器前スリット幅を 1mm とし、各点 20sec で測定した結果及びスリット 1 の幅を 2mm、検出器前スリット幅も 2mm とした場合の結果を第 11 図に示す。横軸はモノクロメータの反射中心波長が 23.5 nm として求めた。



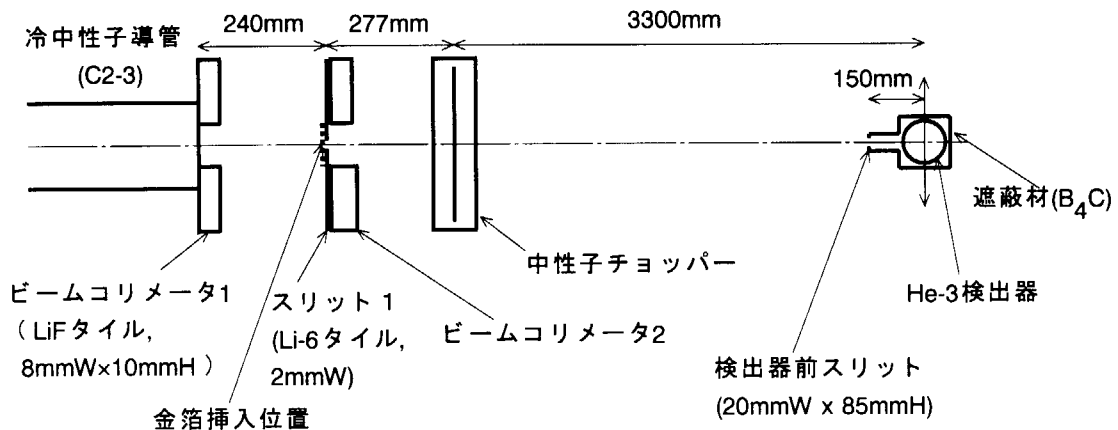
第11図 θ - 2θ 法によって測定された中性子スペクトル

まず入射幅スリットの狭い0.5mmと1mmの組み合わせの状態ですペクトルの全体形状を測定した。長波長側から短波長側を見て行くと、徐々に計測数が上がっており、正常なスペクトルを示している。しかし、0.8nm付近から下がるのは、試料への中性子入射角が小さくなり、この試料ですべての入射ビームを反射することができなくなることになっている。再び0.6nm程度から短波長側で計測数が増えているが、これは小さな反射角に対応するように検出器が移動し、モノクロメータで反射されなかったダイレクトビームを直接計測するようになったためである。

比較的厳しいスリット条件で全体像を把握するための測定を行った後、計測数を上げるためにスリット幅を2mm-2mmに広げた条件ですペクトル測定を行った。さらに長波長側で十分な計測数を得るために、各測定点での測定時間を50秒とした。この時、波長1.5nmより短い領域で、カウンターのオーバーフローのため、見かけ上計数が少なくなったため、各点の計測時間を5秒として波長0.8nm程度までの測定を行った。

4. 絶対中性子束測定

中性子導管出口における中性子束を求めるため、金箔放射化法によって中性子束の絶対測定を行った。使用した金箔の寸法は縦20mm、横10mm、厚さ約20μmである。また重量は78.45mgである。金箔の張り付け位置は第12図に示す。図に示された位置のビーム中心に、JRR-3Mの定格運転(20MW)中に40分間張り付けた。金箔の放射能測定は、JRR-3M PN-3 System-A(外側)によって行った。測定は照射より3.23日後、6767秒かけて行った。その結果、照射直後の放射化量は11.5MBq/gと測定された。



第12図 金箔挿入位置

中性子導管から出てくるダイレクトビームは、導管出口のビームコリメータで幅 8mm、高さ 10mm に制限される。これが金箔を張り付ける 240mm 下流では広がり、一部を金箔が受けていないことの補正が必要である。縦方向はダイレクトビーム幅 10mm を 20mm で受けている。つまり片側 5mm の余裕があり、角度にすると $2.1 \times 10^2 \text{rad}$ である。これは波長 0.12nm の中性子のニッケルに対する全反射臨界角に対応しているため、測定された TOF スペクトルから考えて、ほぼすべての中性子をとらえていると考えることができる。それに対し、横方向は十分に広くはないことの補正が必要である。金箔放射化量を計算するためには実効的中性子吸収断面積を求める必要がある。通常は吸収断面積 ($\sigma_a = 98.8 \text{b for } 2200 \text{m/s}$)⁸⁾ が単に $1/v$ 則に従うとして求める。さらに、ダイレクトビームがニッケルに対する波長依存性のある全反射臨界角をもって等方的に広がると仮定する。その重み付けをしたスペクトル変化をもとに求めた実効吸収断面積は 285 barn となった。

以上から、金の放射化量から中性子束を求めることができる。照射直後の放射化された金の個数密度は、 $N = \Sigma_{\text{eff}} \cdot \phi \cdot S \cdot T$ となる。ここで、 Σ_{eff} は巨視的幾何形状補正実効吸収断面積、 ϕ は導管出口での中性子束、 S は導管出口でのビーム断面積、 T は照射時間である。また、金の放射能濃度は $dN/dT = \lambda N$ となる。ここで λ は金の崩壊定数である。これらから絶対中性子束を求めると、C2 導管出口中央における値は $N = 2.3 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ となる。

5. スペクトル及び中性子束評価

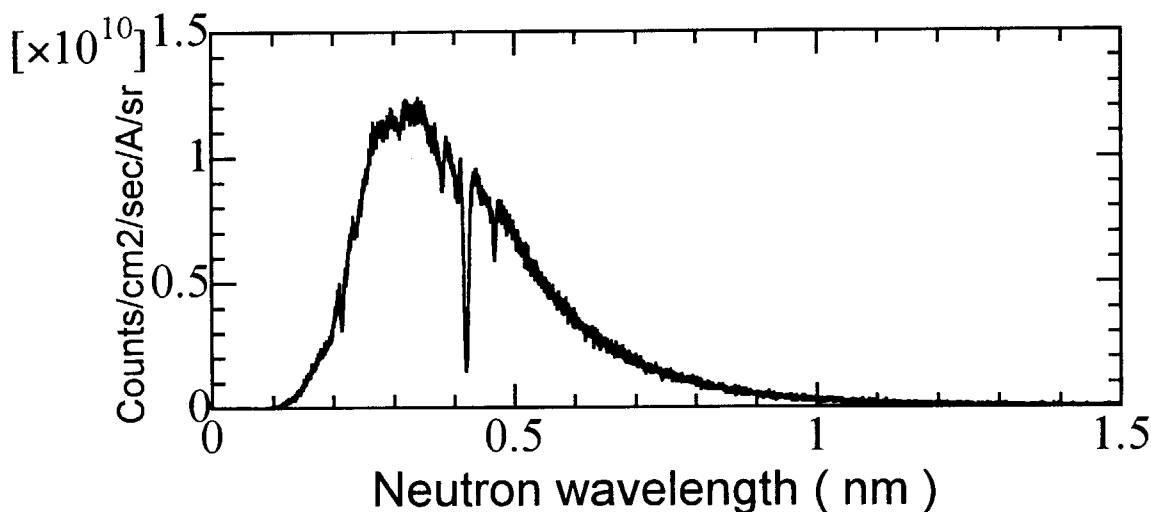
飛行時間法による測定では、ビーム発散角によってスペクトルが変化していることが示されている。これは中性子導管に用いられた中性子鏡の持つ全反射臨界角が波長依存性を持つため、小さな臨界角をもつ比較的速い中性子が、大きな反射角の必要なビームの広がった領域に到達できないことに起因する。従って、中性子導管からのダイレクトビームのうち、全波長成分が含まれている前方にコリメートした測定結果を用いてスペクトルを測定する。また前節で述べたように、この測定されたスペクトルをもとに、各波長成分がそれぞれ導管鏡であるニッケルに対する全反射臨界角まで当方に広がっていると仮定して、金箔放射化法により求めた全中性子束で規格化を行う。

第4図に示した TOF 測定結果をもとに、以上に述べた補正を行って、中性子スペクトルの縦軸の絶対を決定する。入射ビームの水平方向はスリット1で幅 2mm、鉛直方向はコリメータ1で高さ 10mm とされており、これを検出器位置で幅 5mm、高さ 6mm に制限した条件で測定している。なお、スリット1・検出器間距離は 3577mm、コリメータ1・検出器間距離は 3817mm である。この時のビームの発散角は、水平方向で $2.0 \times 10^3 \text{ rad}$ 、鉛直方向で $4.2 \times 10^3 \text{ rad}$ である。従って、この条件での立体角は $3.4 \times 10^5 \text{ sr}$ となる。測定のバックグラウンドはチョッパー出口にカドミウムを置くことにより測定し、257counts/200sec が得られた。また空気中で測定した TOF スペクトルの補正は、700Torr における空気の全段面積が中性子速度 10m/s に対して $\Sigma_{t,10} = 5.4 \pm 0.3 \text{ m}^{-1}$ であり、 $1/v$

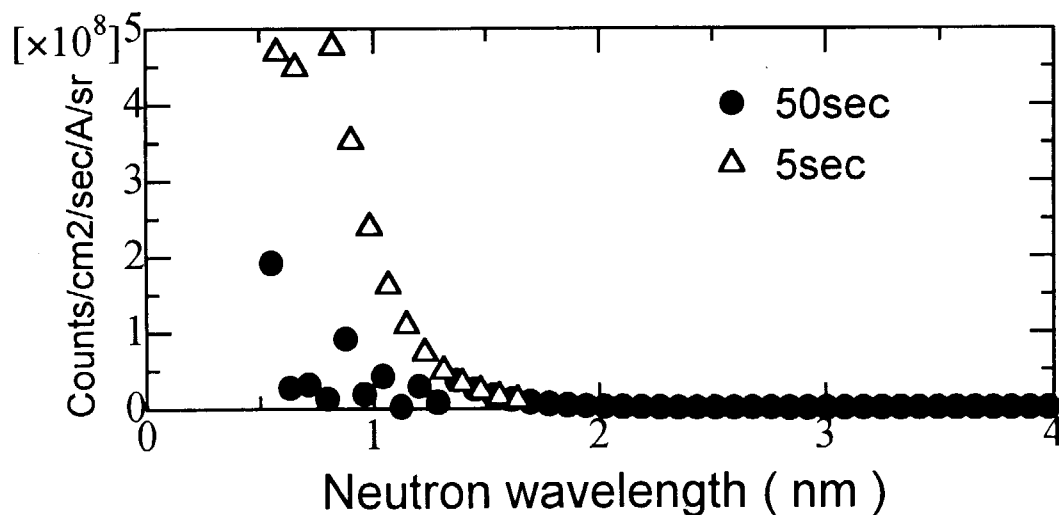
則に従う⁹⁾として行った。従って補正すべき値は $\exp(5.4 \times (760/700) \times (\lambda \times 10/3956) \times 3.577) = \exp(0.0495 \times \lambda)$ となる。この様にして求めた絶対中性子束を第13図に示す。

$\theta - 2\theta$ 法による測定でも、ビーム発散角の異なる測定ごとに中性子強度の違いが見られる。ここでは、スリット1 (S1) の幅 2mm 及び検出器前スリット (S2) の幅 2mm の場合について検討する。この時の水平方向ビーム発散角は、 $\pm 6.1 \times 10^3 \text{rad}$ である。鉛直方向はコリメータ系からは決められないが、中性子導管がニッケル製であるため、ニッケルの全反射領域まで広がっているものと仮定する。バックグラウンドは、ビームコリメータ2の直後にカドミウムを置き、6000counts/500sec を得た。また長波長成分に注目したため、検出効率を100%とした。以上から得られた中性子束を第14図に示す。

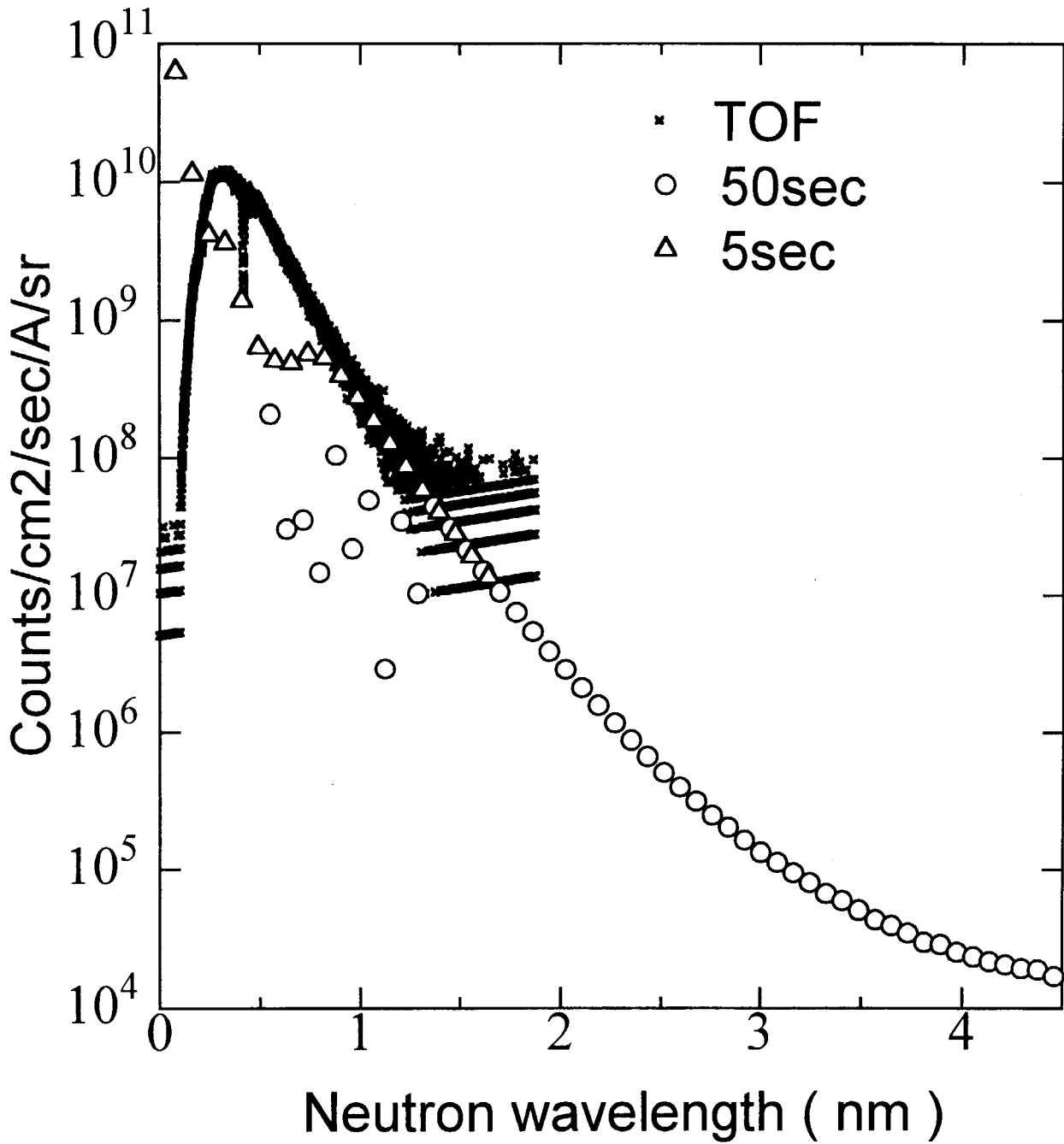
TOF法 (第13図) 及び $\theta - 2\theta$ 法 (第14図) を合わせて第15図に示す。この2種類の測定はそれぞれ独立に行われたが、両測定が重なる0.85 - 1.5 nm の領域において良い一致を見せている。このことから、両測定は信頼できると考えられる。



第13図 飛行時間(TOF)法による絶対スペクトル



第14図 $\theta - 2\theta$ 法による絶対スペクトル

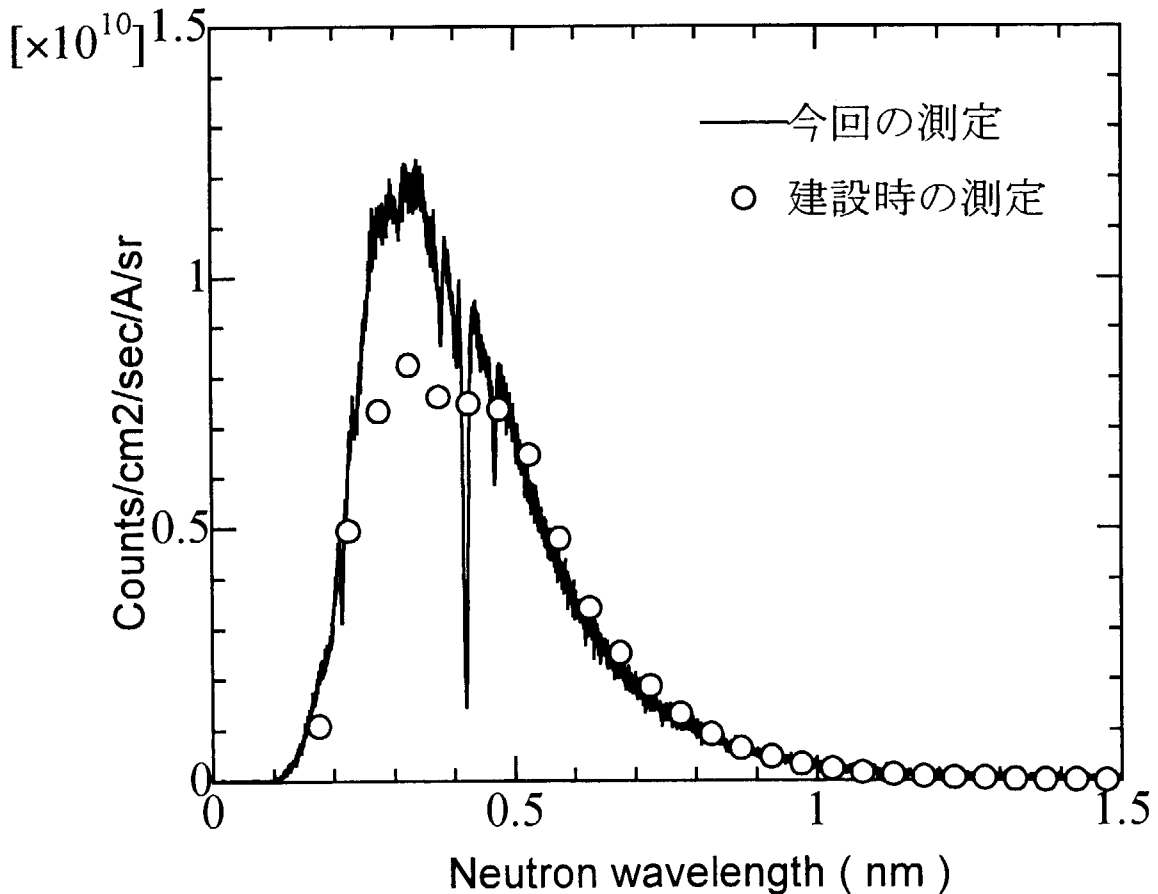


第15図 JRR-3M, C2-3 における絶対中性子スペクトル
(波長1nm以下はTOF測定、1nm以上は $\theta - 2\theta$ 測定が有効)

6. 中性子束及びスペクトルの経年変化

JRR-3M の初臨界から9年以上になり、中性子導管の劣化も考えられるようになっていいる。実際にも、熱中性子導管の中性子ガイドトンネル内の最も生体遮蔽に近い部分では、照射による強度劣化が原因と考えられる破損が発生している。それ以外にも、生体遮蔽内に挿入している直導管部分は、さらに強い照射損傷を受けているものと考えられるため、それらの劣化による中性子通過性能の低下が懸念される。このため、臨界直後の中性子導管特性測定のうち、今回の測定と同一場所である C2-3 の結果⁶⁷⁾と今回の測定結果を比較する。

絶対中性子束に対しては、建設当初の値として $2.0 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ が報告されている。これは、本測定の $2.3 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ に比して若干少ない値である。これらの中性子スペクトルの比較を第16図に示す。この際、同条件での比較とするため、建設当時のスペクトルに対してはビーム発散がもたらす効果の補正を行っている。またスペクトルはこれらの中性子束比で規格化した。今回は波長 0.3nm 付近のピークが高くなっており、中性子束の増加は、比較的短い波長の中性子が増加したことによることがわかる。



第16図 新旧TOF測定結果の比較

初期の特性測定においては、中性子導管出口における中性子束分布を測定するため、中性子ラジオグラフィーのフィルムによる測定を行った。それによると1mm程度のオーダーで微細な上下方向の縞模様があり、微細な中性子束分布構造があることが示された。この原因としては、曲導管部分は長さ85cmの直導管ユニットによって構成されているため、直導管ユニットの端部付近では円弧近似からの逸脱が大きく、この部分で反射される中性子の損失が大きくなることが考えられる。また、速い中性子ほど小さな全反射臨界角を持つことから反射による損失割合が高くなる。従って、導管出口において中性子束の高い位置と低い位置ではスペクトルが変化すると考えられる。今回の測定と建設時の初期特性測定時における結果を比較すると、今回の方が中性子束が約1割高い。この差は、ここで述べた中性子束の微細構造の程度である。また中性子スペクトルを比較すると、予想通り、短波長領域である0.3nmのピーク付近のみに差があり、長波長領域ではほとんど差が認められなかった。従って、今回の測定と初期特性時の測定では、導管出口の測定点の位置が異なることによる差以上の有意な差はなかったものと考えられる。

これ以外にも初期特性測定時と今回の測定結果の差の原因となる可能性のある要因としては、以下のものが考えられる。しかし、測定された中性子束及び中性子スペクトルに経年変化がほとんど見られなかったことから、これらによる影響は、今回の測定精度以下程度の小さなものであることがわかった。

1) 高線量下でCNSの減速材容器の交換が行われたが、古い容器の設置位置と今回の設置位置の再現性はほぼ信用できる。しかし、真空容器と水平実験孔間の重水層隙間は約1mmと非常に狭いため、この厚さが若干変化することにより、スペクトル等が変化した可能性が考えられる。

2) 中性子束を求める際の吸収断面積の評価において、導管からの中性子ビーム発散をニッケルの全反射臨界角まで等方であると仮定している。この仮定が中性子束評価にもたらす誤差が考えられる。

3) 初期特性試験時にはすべての燃料が新品である初期炉心であるのに対して、今回の測定時には定常炉心となっている。この炉心状態の違いによる中性子束の差は10%以下だと見積もられている¹⁰⁾。しかし、1サイクルの運転時間が4週間と長いため、定常炉心でも位置によっては運転初期と末期での中性子束の1, 2割程度の変化は発生する。

7. まとめ

JRR-3M 建設当初は熱中性子・冷中性子の利用は考えられていたが、冷中性子でも波長2nm以上のものや極冷中性子の利用は計画されていなかった。建設後約10年が経ち、中性子ビーム利用面でも新しい計画が提案されるようになってきた。C-2 冷中性子導管の末端であるC2-3 実験孔は新しいアイデアを実施する場として考えられているため、本実験孔から極めて波長の長い中性子がどの程度得られるかということが、新実験計画を計画するためには必須である。このような要請に応えるため、同実験孔で中性子スペクトル及

び中性子束の測定を行った。

中性子スペクトルは、飛行時間法と $\theta - 2\theta$ 法を併用することにより、波長 4.5nm までのスペクトルを測定することができた。その結果、この範囲では急激なスペクトル変化はなく、この領域の中性子が利用可能であることが確認された。また建設当初の測定と中性子束及び中性子スペクトルを比較したが、測定位置が原因と考えられる以上の差異はなく、経年劣化による影響はほとんどないことが確認された。

謝辞

中性子束測定のための金箔放射化量測定は、日本原子力研究所・研究炉部・研究炉利用課の笹島文雄氏により行なって頂きましたことを感謝します。

参考文献

- 1) 大西信秋、高橋秀武、高柳政二、市川博喜、川崎稔、日本原子力学会誌 Vol.32, No.10 (1990)962.
- 2) 研究炉利用ハンドブック、日本原子力研究所、東海研究所、研究炉部、(1999).
- 3) Y. Kawabata, M. Suzuki, H. Takahashi, N. Onishi, A. Shimanuki, Y. Sugawa, N. Niino, T. Kasai, K. Funasho, S. Hayakawa and K. Okuhata, J. Nucl. Sci. Technol., 27 (1990) 1138.
- 4) 鈴木正年、川端祐司、工藤三好、坂本正誠、大西信秋、高橋秀武、須川豊、新野信行、畑山君男、嶋貫昭雄、笠井泰治郎、舟所勝行、奥畑浩治、早川正治、JAERI-M 90-079 日本原子力研究所 1990年.
- 5) Activity Report on Neutron Scattering Research, Neutron scattering Laboratory, Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, vol.5, (1998).
- 6) Y. Kawabata, M. Suzuki, H. Kikuchi and M. Sano, J. Nucl. Sci. Technol., 30(1993) 1050.
- 7) 鈴木正年、川端祐司、市川博喜、JAERI-M 92-201 日本原子力研究所 1993年.
- 8) BNL 325 Neutron Cross Sections 3rd edition, Vol.1 (1973)
- 9) A. Steyerl and H. Vonach, Z. Physik 250 (1972) 166.
- 10) 鶴田晴道他、JAERI-M 84-099 日本原子力研究所 1984年.

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	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
照射度	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
線量等量	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
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	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, 1 eV および 1 u 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 ⁷ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (=1 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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻⁴	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁷	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	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

JRR-3M冷中性子実験孔C2-3における中性子スペクトル及び中性子束の測定