

JAERI - M
92-201

JRR-3M中性子導管の特性測定

1993年1月

鈴木 正年・川端 祐司*・市川 博喜

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

JRR-3M中性子導管の特性測定

日本原子力研究所東海研究所研究炉部
鈴木 正年・川端 祐司*・市川 博喜

(1992年11月27日受理)

JRR-3改造炉(JRR-3M)に総延長232mにおよぶ大規模中性子導管群が設置された。2本の熱中性子導管と3本の冷中性子導管からなる中性子導管群の中性子スペクトル及び中性子束を測定した。中性子スペクトルは設計計算と良い一致をみた。また、中性子束については、特性波長2 Åの2本の熱中性子導管末端で $1.2 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 、また冷中性子稼働時において、特性波長4 Åの2本の冷中性子導管末端で $2.0 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 、特性波長6 Åの冷中性子導管末端では $1.4 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ を得た。

Characteristics of the JRR-3M Neutron Guide Tubes

Masatoshi SUZUKI, Yuji KAWABATA* and Hiroki ICHIKAWA

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

(Received November 27, 1992)

Large scale neutron guide tubes have been installed in the upgraded JRR-3 (Japan Research Reactor No.3, JRR-3M). The total length of the guide tubes is 232m. The neutron fluxes and spectra were measured at the end of the neutron guide tubes.

The neutron fluxes of thermal neutron guide tubes with characteristic wavelength of 2\AA are 1.2×10^8 n/cm²·s.

The neutron fluxes of cold guide tubes are 1.4×10^8 n/cm²·s with characteristic wavelength of 4\AA and 2.0×10^8 n/cm²·s with 6\AA when the cold neutron source is operated.

The neutron spectra measured by time-of-flight method agree well with their designed ones.

Keywords: Neutron Flux, Neutron Spectra, Gain, Neutron Guide Tube, Cold Neutron Source, JRR-3M, Thermal Neutron, Cold Neutron, Research Reactor

* Research Reactor Institute, Kyoto University

目 次

1. はじめに	1
2. 中性子導管	1
2.1 中性子導管の基本的特性	1
2.2 中性子導管の特長	2
2.3 JRR-3M中性子導管の概要	3
3. 中性子導管の性能を決定する要素	3
4. 中性子導管の特性測定	4
4.1 中性子スペクトル測定	4
4.2 中性子束測定	6
5. まとめ	7
謝 辞	7
引用文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Neutron Guide Tube	1
2.1 Basic Characteristic of Neutron Guide Tubes	1
2.2 Advantages of Neutron Guide Tubes	2
2.3 Outline of the Neutron Guide Tubes in JRR-3M	3
3. Essential Factor for Good Neutron Guide Tubes	3
4. Performance Measurements	4
4.1 Neutron Spectra	4
4.2 Neutron Flux	6
5. Conclusion	7
Acknowledgement	7
References	8

1. はじめに

ニッケル等の金属表面でおこる中性子の全反射を利用して、研究用原子炉等で発生する低速中性子を少ない損失で遠方まで導き、中性子散乱等に中性子を供給するための中性子導管が注目されている。JRR-3の改造¹⁾にあたり、新たに中性子導管を設置することになり、1985年から検討を開始した。中性子導管の性能を検証するためのプログラムの開発²⁻⁴⁾、中性子導管に使用するニッケル鏡の反射性能の実験的検証⁵⁾、中性子導管設置時の接合誤差が性能に及ぼす影響の実験的研究⁶⁾等を踏まえながら、実機的设计及び製作を進め、1990年2月に完成をみた^{7, 8)}。本稿はJRR-3Mの出力上昇試験に併せて行った種々の特性試験のうち中性子導管に関する特性⁹⁾について報告するものである。

2. 中性子導管

2.1 中性子導管の基本的特性

物質による中性子の全反射の現象は、最初Fermiによって見いだされた¹⁰⁾。Maier-Leibnitzらは、1960年代に中性子の全反射を利用して、中性子を遠くまで損失なく導く方法を提案した¹¹⁾。現在、ILLをはじめ、多くの研究所で中性子導管が用いられ^{12, 13)}、わが国でもKUR等に設置されている¹⁴⁾。

中性子導管としては、まっすぐな導管(直導管)と炉心を直接見ない湾曲した導管(曲導管)がある。前者は中性子が透過しやすいが、炉心を直接見ることになるため、 γ 線や高速中性子などの除去のためになんらかの対策を講じなければならないが、後者の場合は、高速中性子や γ 線は減少し、また短波長の熱中性子も湾曲に相当する分だけ導管反射面に対する中性子の入射角が大きくなり透過しにくくなる。しかし、波長の長い中性子はほとんどその影響を受けない。

中性子の全反射がおこる最大の入射角(臨界角) θ_c は、屈折率 n と

$$\cos \theta_c = n \quad (1)$$

の関係があり、また入射中性子の波長 λ および反射鏡の物質定数 Nb_{coh} と次の関係にある。

$$\sin \theta_c = \lambda \sqrt{\frac{Nb_{coh}}{\pi}} \quad (2)$$

ここに、 N は単位体積あたりの原子核の数で、 b_{coh} は物質のコヒーレントな散乱半径を表す。真空と無限大厚さの物質の境界での反射率 R は、入射角を θ とすると

$$R = \left\{ \frac{(n^2 - \cos \theta)^{1/2} - \sin \theta}{(n^2 - \cos \theta)^{1/2} + \sin \theta} \right\}^2 \quad (3)$$

1. はじめに

ニッケル等の金属表面でおこる中性子の全反射を利用して、研究用原子炉等で発生する低速中性子を少ない損失で遠方まで導き、中性子散乱等に中性子を供給するための中性子導管が注目されている。JRR-3の改造¹⁾にあたり、新たに中性子導管を設置することになり、1985年から検討を開始した。中性子導管の性能を検証するためのプログラムの開発²⁻⁴⁾、中性子導管に使用するニッケル鏡の反射性能の実験的検証⁵⁾、中性子導管設置時の接合誤差が性能に及ぼす影響の実験的研究⁶⁾等を踏まえながら、実機的设计及び製作を進め、1990年2月に完成をみた^{7, 8)}。本稿はJRR-3Mの出力上昇試験に併せて行った種々の特性試験のうち中性子導管に関する特性⁹⁾について報告するものである。

2. 中性子導管

2.1 中性子導管の基本的特性

物質による中性子の全反射の現象は、最初Fermiによって見いだされた¹⁰⁾。Maier-Leibnitzらは、1960年代に中性子の全反射を利用して、中性子を遠くまで損失なく導く方法を提案した¹¹⁾。現在、ILLをはじめ、多くの研究所で中性子導管が用いられ^{12, 13)}、わが国でもKUR等に設置されている¹⁴⁾。

中性子導管としては、まっすぐな導管(直導管)と炉心を直接見ない湾曲した導管(曲導管)がある。前者は中性子が透過しやすいが、炉心を直接見ることになるため、 γ 線や高速中性子などの除去のためになんらかの対策を講じなければならないが、後者の場合は、高速中性子や γ 線は減少し、また短波長の熱中性子も湾曲に相当する分だけ導管反射面に対する中性子の入射角が大きくなり透過しにくくなる。しかし、波長の長い中性子はほとんどその影響を受けない。

中性子の全反射がおこる最大の入射角(臨界角) θ_c は、屈折率 n と

$$\cos \theta_c = n \quad (1)$$

の関係があり、また入射中性子の波長 λ および反射鏡の物質定数 Nb_{coh} と次の関係にある。

$$\sin \theta_c = \lambda \sqrt{\frac{Nb_{coh}}{\pi}} \quad (2)$$

ここに、 N は単位体積あたりの原子核の数で、 b_{coh} は物質のコヒーレントな散乱半径を表す。真空と無限大厚さの物質の境界での反射率 R は、入射角を θ とすると

$$R = \left\{ \frac{(n^2 - \cos \theta)^{1/2} - \sin \theta}{(n^2 - \cos \theta)^{1/2} + \sin \theta} \right\}^2 \quad (3)$$

で表される。

曲導管の特性波長 λ^* （ガーランド伝播する最大の波長）は、曲率半径 ρ 、導管幅 a および Nb_{coh} と次の関係がある。

$$\lambda^* = \sqrt{\frac{2a}{\rho}} \sqrt{\frac{\pi}{Nb_{coh}}} \quad (4)$$

L^* を直接視距離、即ちこれ以上曲がった導管が長くなると出口から入口が直接見えなくなる距離とすると、これは

$$L^* = 2\rho\theta^* = \sqrt{8a\rho} \quad (5)$$

で与えられる。

直導管の収率に対する曲導管の収率比 G は次式で与えられる。

$$\theta^* \geq \theta_c \text{ の場合} \quad G = \frac{2}{3} (\theta_c / \theta^*)^2 \quad (6)$$

$$\theta^* < \theta_c \text{ の場合} \quad G = \frac{2}{3} (\theta_c / \theta^*)^2 \left\{ 1 - \left(1 - \left(\frac{\theta^*}{\theta_c} \right)^2 \right)^{3/2} \right\} \quad (7)$$

$$\theta^* \text{ は,} \quad \theta^* = \sqrt{\frac{2a}{\rho}} \quad (8)$$

で与えられる角度で、導管の特性角度と呼ばれている。よって中性子の波長 λ が導管の特性波長 λ^* に等しいと $\theta_c = \theta^*$ となり、 $G = 2/3$ となる。

2.2 中性子導管の特長

中性子導管の特長は、次の3点に要約できる。

- ① 中性子導管の曲率や幅を変えることにより、通過する中性子の特性波長を変え、必要なエネルギー領域のみの中性子を取り出すことができ、実験に有害な γ 線、高速中性子などを除去することができる。
- ② 遠方まで中性子ビームを導く途中で、中性子導管内を通過する中性子ビームを分岐することにより、いくつもの実験装置に中性子を供給することができ、研究用原子炉の利用効率を高めることができる。
- ③ 炉心から離れたところまで、損失なく中性子を導くことができるため、実験用のスペースが十分とれる。

JRR-3Mでは今回の改造にともない、冷中性子源装置（CNS）が設置された¹⁵⁾。これから発生する冷中性子ビームも熱中性子ビームとともに中性子導管で導くこととした。

2.3 JRR-3M中性子導管の概要

JRR-3Mに設置された中性子導管の全体図をFig. 1.に示すが、炉心に設置された水平実験孔のうち、CNSに接続された9C実験孔に3本と、重水減速領域に接続された8T実験孔に2本の中性子導管を設置する。これらの中性子導管から導き出された中性子ビームは、原子炉内のガイドトンネルを経て、原子炉建家に隣接して建設された実験利用棟まで達し、約20基の実験装置に中性子ビームを供給する。

このように中性子導管は、従来1実験孔に1実験装置しか設置できなかった研究用原子炉の利用効率を飛躍的に高めることになる。

中性子導管は、原子炉壁と実験利用棟で一旦分離されるほか、実験利用棟内でも実験装置に中性子を供給する部分（中性子取り出し口という）で、それぞれ分離されており、これらのブロック毎に導管内部を真空状態に保持している。

Table 1にJRR-3Mに設置する中性子導管群の幾何学的条件と特性波長を示す。

3. 中性子導管の性能を決定する要素

中性子導管が、原子炉から発生する中性子を損失なく導くための要素として次のことが上げられる。

(1) ニッケル鏡面の表面精度

ニッケル鏡面の表面精度は中性子を全反射させるために可能な限り平滑である必要がある。中性子導管はガラス板に1000Å程度のニッケル薄膜をスパッタしている。したがってニッケル鏡面の表面精度は基板であるガラス板の表面精度によって左右される。今回製作した中性子導管のニッケル鏡面の表面精度の平均値は、中心線平均粗さ(Ra)78Å、最大高さ(Rmax)415Åであった。我々がニッケルをスパッタしたガラス板で行った中性子の反射率測定実験ではRaが70Å、Rmaxが800Åでほぼ全反射することを確認している³⁾。

(2) 鏡管ユニットの組立精度

鏡管ユニットの組立精度は高さ、幅とも±0.02mm以内で組み立てることをめざした。結果として高さ、幅とも平均で±0.005mmの精度で組み立てられた⁷⁾。

(3) 中性子導管の設置精度

中性子導管は長さ85cmの鏡管ユニットを特性波長に対応する曲率半径で多角形に接続して設置して行くため、鏡管ユニット相互の接続誤差を極力小さく納めることが中性子の損失を少なくすることになる。今回設置した中性子導管の設置誤差の平均は、水平方向 2.409秒、垂直方向 5.377秒、接合部の縦ずれ 0.009mm、横ずれ 0.007mmであった。また接合角度の誤差は 1.058秒であった⁷⁾。

中性子導管の性能向上のためには、これらの要素の全てに関して『小さければ小さいほど良

2.3 JRR-3M中性子導管の概要

JRR-3Mに設置された中性子導管の全体図をFig. 1.に示すが、炉心に設置された水平実験孔のうち、CNSに接続された9C実験孔に3本と、重水減速領域に接続された8T実験孔に2本の中性子導管を設置する。これらの中性子導管から導き出された中性子ビームは、原子炉内のガイドトンネルを経て、原子炉建家に隣接して建設された実験利用棟まで達し、約20基の実験装置に中性子ビームを供給する。

このように中性子導管は、従来1実験孔に1実験装置しか設置できなかった研究用原子炉の利用効率を飛躍的に高めることになる。

中性子導管は、原子炉壁と実験利用棟で一旦分離されるほか、実験利用棟内でも実験装置に中性子を供給する部分（中性子取り出し口という）で、それぞれ分離されており、これらのブロック毎に導管内部を真空状態に保持している。

Table 1にJRR-3Mに設置する中性子導管群の幾何学的条件と特性波長を示す。

3. 中性子導管の性能を決定する要素

中性子導管が、原子炉から発生する中性子を損失なく導くための要素として次のことが上げられる。

(1) ニッケル鏡面の表面精度

ニッケル鏡面の表面精度は中性子を全反射させるために可能な限り平滑である必要がある。中性子導管はガラス板に1000Å程度のニッケル薄膜をスパッタしている。したがってニッケル鏡面の表面精度は基板であるガラス板の表面精度によって左右される。今回製作した中性子導管のニッケル鏡面の表面精度の平均値は、中心線平均粗さ(Ra)78Å、最大高さ(Rmax)415Åであった。我々がニッケルをスパッタしたガラス板で行った中性子の反射率測定実験ではRaが70Å、Rmaxが800Åでほぼ全反射することを確認している⁵⁾。

(2) 鏡管ユニットの組立精度

鏡管ユニットの組立精度は高さ、幅とも±0.02mm以内で組み立てることをめざした。結果として高さ、幅とも平均で±0.005mmの精度で組み立てられた⁷⁾。

(3) 中性子導管の設置精度

中性子導管は長さ85cmの鏡管ユニットを特性波長に対応する曲率半径で多角形に接続して設置して行くため、鏡管ユニット相互の接続誤差を極力小さく納めることが中性子の損失を少なくすることになる。今回設置した中性子導管の設置誤差の平均は、水平方向 2.409秒、垂直方向 5.377秒、接合部の縦ずれ 0.009mm、横ずれ 0.007mmであった。また接合角度の誤差は 1.058秒であった⁷⁾。

中性子導管の性能向上のためには、これらの要素の全てに関して『小さければ小さいほど良

い』という一般的な表現で精度を要求する。しかし、現状の研磨技術、組立技術及び設置に関する技術の限界は自ずから生ずるのは否めない。したがって本報告の特性測定の結果はこれらの主要な3要素がいかにか精度良く発揮されたかの証明でもある。

4. 中性子導管の特性測定

4.1 中性子スペクトル測定

4.1.1 目的

中性子導管が目的の特性波長を有しているかを確認するため、中性子導管端末における中性子スペクトルの測定を行った。JRR-3M中性子導管はTable 1に示したとおり2 Å, 4 Å及び6 Åの特性波長を持つように設置されている。これらについて端末でのスペクトルを飛行時間測定法を用いて行うこととした。Fig. 2に測定体系を示すが、中性子導管の端末から5 mm×5 mmのコリメータを設置し、コリメートされた中性子束をチョッパーでパルス状にした後、約5 m後方に配置した中性子検出器で中性子スペクトルを測定した。検出器は左右に移動しながら中性子の発散状態を測定する。

スペクトル測定は熱中性子導管についてはT1導管、冷中性子導管についてはC2導管の端末で実施した。またC2導管についてはCNSが運転状態のときと停止状態のときの2形態でスペクトルを測定して、CNSの性能についても確認した。

4.1.2 中性子飛行時間法

中性子飛行時間法は、チョッパーによってパルス化した中性子チョッパーから中性子検出器まで飛行する時間を測定することにより中性子のエネルギーを求める方法である。

中性子の運動量、波数、波長及び速度には次の関係がある。

$$p = \frac{h}{2\pi} k = \frac{h}{\lambda} \quad \therefore v = \frac{h}{m} \cdot k = \frac{1}{\lambda}$$

p : 中性子の運動量

k : 中性子の波数

λ : 中性子の波長

v : 中性子の速度

h : プランクの定数 : $h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ JHz}^{-1}$

m : 中性子の質量 : $m = 1.6749543 \times 10^{-27} \text{ kg}$

したがって中性子の速度と波長の間には次の関係が成立する。

$$v(\text{m/s}) = 3956.03/\lambda \quad (\text{Å})$$

い』という一般的な表現で精度を要求する。しかし、現状の研磨技術、組立技術及び設置に関する技術の限界は自ずから生ずるのは否めない。したがって本報告の特性測定の結果はこれらの主要な3要素がいかにか精度良く発揮されたかの証明でもある。

4. 中性子導管の特性測定

4.1 中性子スペクトル測定

4.1.1 目的

中性子導管が目的の特性波長を有しているかを確認するため、中性子導管端末における中性子スペクトルの測定を行った。JRR-3M中性子導管はTable 1に示したとおり2 Å, 4 Å及び6 Åの特性波長を持つように設置されている。これらについて端末でのスペクトルを飛行時間測定法を用いて行うこととした。Fig. 2に測定体系を示すが、中性子導管の端末から5 mm×5 mmのコリメータを設置し、コリメートされた中性子束をチョッパーでパルス状にした後、約5 m後方に配置した中性子検出器で中性子スペクトルを測定した。検出器は左右に移動しながら中性子の発散状態を測定する。

スペクトル測定は熱中性子導管についてはT1導管、冷中性子導管についてはC2導管の端末で実施した。またC2導管についてはCNSが運転状態のときと停止状態のときの2形態でスペクトルを測定して、CNSの性能についても確認した。

4.1.2 中性子飛行時間法

中性子飛行時間法は、チョッパーによってパルス化した中性子チョッパーから中性子検出器まで飛行する時間を測定することにより中性子のエネルギーを求める方法である。

中性子の運動量、波数、波長及び速度には次の関係がある。

$$p = \frac{h}{2\pi} k = \frac{h}{\lambda} \quad \therefore v = \frac{h}{m} \cdot k = \frac{1}{\lambda}$$

p : 中性子の運動量

k : 中性子の波数

λ : 中性子の波長

v : 中性子の速度

h : プランクの定数 : $h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ JHz}^{-1}$

m : 中性子の質量 : $m = 1.6749543 \times 10^{-27} \text{ kg}$

したがって中性子の速度と波長の間には次の関係が成立する。

$$v(\text{m/s}) = 3956.03/\lambda \quad (\text{Å})$$

したがって、チョッパーのスリットが開いた時刻を基準として、あらかじめ設定した時間幅ごとに検出器に到達する中性子を計数して飛行時間スペクトルを測定すれば、これらの関係式を用いて容易にエネルギーまたは波長を横軸にするスペクトルを得ることができる。

4.1.3 熱中性子スペクトル

熱中性子スペクトルは特性波長 2 \AA の T1 導管末端に飛行時間分析装置を設置して原子炉出力 20 MW で測定した。Fig. 3 に T1 導管末端で得られた中性子スペクトルの結果を示す。図からも明らかにように目的として 2 \AA にピークを示すスペクトルが得られており、短波長側の中性子は低く抑えられている。これは中性子導管が目的の性能を発揮していることを現している。また、スペクトルのグラフで、 2.33 \AA 、 4.05 \AA 及び 4.68 \AA に減衰が見える。これは原子炉本体と中性子導管の接続部及び中性子導管の各接続部で水封及び真空保持のために使用されているアルミニウム材のブラッグ反射による減衰である。この現象は後述する冷中性子導管のスペクトル測定結果にも同様に現れている。この減衰する波長位置はアルミニウムの格子定数から正確に定まるため、この位置を基に飛行時間の校正を行った。

図示したグラフは 5 m の飛行距離で測定した生データであり、中性子の飛行中における空気による減衰は補正していない。

空気及びアルミニウムによる吸収の補正を行った測定結果及び中性子導管特性プログラム“NEUGT”²⁾を用いた計算結果を Fig. 4 に示す。結果は良く一致しており、熱中性子導管の製作及び設置が良好であったことが示された。

4.1.4 冷中性子スペクトルと CNS ゲイン

冷中性子スペクトルは特性波長 4 \AA の C2 導管末端において測定した。前述したように C2 導管のスペクトル測定においては、冷中性子の発生源である CNS の性能確認も併せて行った。CNS の性能確認の方法としては CNS 減速材である液体水素が減速容器に充填されている状態と充填されていない状態のスペクトルを測定し、両者の比をとることによって CNS の性能を得る方法をとった。Fig. 5 に C2 導管末端における中性子スペクトルを示す。ここでもアルミニウムのブラッグ反射による減衰が見られるため、それを飛行時間の校正に用いた。さらに空気の吸収等の効果を補正した測定結果及びそれに対応する“NEUGT”の計算結果を Fig. 6 及び Fig. 7 に示す。ここでも測定値と計算値との一致は良く、製作及び設置が良好になされていることが示された。

CNS のゲインを CNS 運転時と非運転時の中性子束の比と定義した。CNS ゲインは 4 \AA に対して $7, 8 \text{ \AA}$ に対して 20 となっており CNS の有効性を示すことができた。なお、CNS の非運転時のスペクトルは原子炉出力が 10 MW のときの測定値を 20 MW 時の数値に補正している。これは高出力時における CNS の長時間にわたる無冷却運転を避けるためにとった措置である。次節で原子炉出力と中性子束の良く比例することが示されているため、この補正の正当性がいえる。

4.2 中性子束測定

4.2.1 目的

前項でJRR-3M中性子導管が目的とする特性波長を有していることを確認したが、中性子スペクトルについては、鏡管ユニットが著しい接合誤差を生じていたり、鏡面の表面精度が極端に悪くなれば、中性子導管を所定の曲率で設置すれば、強度はともかくとして目的のスペクトルが得られる。これに対して導管末端における中性子束の絶対値については中性子導管の設置精度、鏡面の仕上がり状態に左右される。したがって、中性子導管の性能をあらゆる重要な要素を前項で述べたスペクトルと中性子導管の収率に依存する中性子束の強度である。このような観点から中性子導管の中性子束測定は、中性子導管の始点である原子炉の水平実験孔の出口における中性子束と、中性子導管の終点である導管末端の中性子束の測定を行った。また、導管末端における中性子束の均一性も重要な要素になるため、末端断面における中性子束の均一性についても確認した。

4.2.2 中性子束の測定

中性子束の測定は金箔による放射化法で実施した。金箔は中性子導管の始点と終点に粘着テープで貼付し、原子炉の出力が安定した時点で水平実験孔のシャッターを所定時間開閉することにより放射化させた。測定はGe検出器で行った。中性子束測定で考慮したのは中性子束の算出における放射化断面積であった。金の中性子吸収断面積は $1/v$ 比例するため、中性子スペクトルに対して $1/v$ の重みをつけて平均した実効速度を求めた。これから測定位置でのスペクトルの効果を含めた金の吸収断面積を求めることにより放射化量を計算した。Table 2に計算で求めた金の放射化断面積を示す。中性子束の断面分布の測定においてはT1導管（幅20mm×高さ200mm）については幅を3等分、高さを5等分、C2導管（幅20mm×高さ60mm）は、幅、高さとも3等分してそれぞれの中心位置に金箔（タテ10mm×ヨコ6mm厚さ0.05mm）を貼付して測定した。

出力上昇試験に対応して中性子束測定を行った。導管出口中央での中性子束の変化Fig. 8に示す。原子炉出力と中性子束との間にはよい比例性が成り立つことが示された。また、Table 3に20MWにおける各中性子導管の始点と終点の中央位置における中性子束測定結果と設計値を示す。中性子導管末端まで十分大きな中性子束で導き出していることが確認できた。

4.2.3 中性子束の分布

一般に湾曲した中性子導管では内周部より外周部の方が中性子束が高くなることが知られている。JRR-3Mの中性子導管は導管断面の中性子束を均一に分布させるために、曲導管の下流部分に直導管部を接続している。中性子束の断面分布の測定は、この直導管部分の効果を確認する意味で重要である。測定は「4.2.1」で述べたように中性子導管の末端断面を等分して金箔を貼付して、熱中性子導管についてはT2導管、冷中性子導管についてはC2導管で行った。Table 4に20MWにおけるT2導管末端の中性子束の分布、Table 5にC2導管末端の中性子束の分布を示す。これにより明らかのように、中性子束の分布はほぼ均一になっている。

また、中性子ラジオグラフィー用フィルムを用いて、導管出口位置での中性子束微細分布を測定した。撮影はコンバータにガドリニウム 25μ を使用したコダックSRフィルムを用いた。照射時間はT1導管末端で12分（原子炉出力250KW）、C2導管末端で3分（原子炉出力200KW）である。撮影結果をFig. 9及びFig. 10に示す。撮影された写真を見ると微細な縦線が多く観察される。これは長さ85cmの鏡管ユニットをつなげるとき、熱膨張や地震時のショックを和らげるため0.5mmのゴムの間にはさんでおり、曲導管部分はこの鏡管ユニットを所定の曲率半径で多角形近似して位置していることによると考えられる。中性子散乱実験では微小コリメーターを使用する場合も多いため、中性子束が減少する縦線の存在について注意する必要がある。

5. ま と め

中性子導管の特性測定の結果、中性子スペクトルについてはそれぞれの導管において目的の特性波長を得ることができた。また中性子束測定においても冷中性子導管については80%以上の収率を得ることができた。短波長の中性子を取り出す熱中性子導管については60~70%程度にとどまったが、これは長波長中性子よりきびしい設置条件からして諸外国の同様の導管と同程度の性能であることから目標値に達していると考えられる。

JRR-3M中性子導管は総延長230mにも及ぶわが国としては最初の大型施設である。このような大型の中性子導管をわが国独自の技術で設計計算から据え付けまで行うことは当初一抹の不安があったことも事実である。しかし完成した中性子導管が設計計算とほぼ一致する性能を發揮していることが確認されたことで大きな自信を得ることができた。

この中性子導管群の完成により、多数の中性子ビーム実験機器に対して十分高い熱及び冷中性子束を供給することが可能になった。また、その実験装置もバックグラウンドの高い原子炉室ではなく、広く環境の良いビームホールに設置できるようになったため、実験環境は飛躍的に改善された。JRR-3Mのビームホールは、現状では世界でもトップクラスの実験施設だと言える。

謝 辞

本報告をまとめるにあたって、特性測定で協力して下さった（株）NKKの菊池仁志、阿部盛一両氏、原研研究炉部曾山和彦氏、中性子飛行時間法でご指導を賜った原研物理部の坂本正誠氏及び特性測定のために原子炉、CNS等の運転に協力賜ったJRR-3M原子炉運転員、CNS運転員各位に謝意を表明する。

また、中性子ラジオグラフィーフィルムを用いた中性子ビームの撮影は原研研究炉部の鶴野晃氏によって行われた。併せて謝意を表明する。

また、中性子ラジオグラフィー用フィルムを用いて、導管出口位置での中性子束微細分布を測定した。撮影はコンバータにガドリニウム 25μ を使用したコダックSRフィルムを用いた。照射時間はT1導管末端で12分（原子炉出力250KW）、C2導管末端で3分（原子炉出力200KW）である。撮影結果をFig. 9及びFig. 10に示す。撮影された写真を見ると微細な縦線が多く観察される。これは長さ85cmの鏡管ユニットをつなげるとき、熱膨張や地震時のショックを和らげるため0.5mmのゴムを間にはさんでおり、曲導管部分はこの鏡管ユニットを所定の曲率半径で多角形近似して位置していることによると考えられる。中性子散乱実験では微小コリメーターを使用する場合も多いため、中性子束が減少する縦線の存在について注意する必要がある。

5. ま と め

中性子導管の特性測定の結果、中性子スペクトルについてはそれぞれの導管において目的の特性波長を得ることができた。また中性子束測定においても冷中性子導管については80%以上の収率を得ることができた。短波長の中性子を取り出す熱中性子導管については60~70%程度にとどまったが、これは長波長中性子よりきびしい設置条件からして諸外国の同様の導管と同程度の性能であることから目標値に達していると考えられる。

JRR-3M中性子導管は総延長230mにも及ぶわが国としては最初の大型施設である。このような大型の中性子導管をわが国独自の技術で設計計算から据え付けまで行うことは当初一抹の不安があったことも事実である。しかし完成した中性子導管が設計計算とほぼ一致する性能を發揮していることが確認されたことで大きな自信を得ることができた。

この中性子導管群の完成により、多数の中性子ビーム実験機器に対して十分高い熱及び冷中性子束を供給することが可能になった。また、その実験装置もバックグラウンドの高い原子炉室ではなく、広く環境の良いビームホールに設置できるようになったため、実験環境は飛躍的に改善された。JRR-3Mのビームホールは、現状では世界でもトップクラスの実験施設だと言える。

謝 辞

本報告をまとめるにあたって、特性測定で協力して下さった（株）NKKの菊池仁志、阿部盛一両氏、原研研究炉部曾山和彦氏、中性子飛行時間法でご指導を賜った原研物理部の坂本正誠氏及び特性測定のために原子炉、CNS等の運転に協力賜ったJRR-3M原子炉運転員、CNS運転員各位に謝意を表明する。

また、中性子ラジオグラフィーフィルムを用いた中性子ビームの撮影は原研研究炉部の鶴野晃氏によって行われた。併せて謝意を表明する。

また、中性子ラジオグラフィー用フィルムを用いて、導管出口位置での中性子束微細分布を測定した。撮影はコンバータにガドリニウム 25μ を使用したコダックSRフィルムを用いた。照射時間はT1導管末端で12分（原子炉出力250KW）、C2導管末端で3分（原子炉出力200KW）である。撮影結果をFig. 9及びFig. 10に示す。撮影された写真を見ると微細な縦線が多く観察される。これは長さ85cmの鏡管ユニットをつなげるとき、熱膨張や地震時のショックを和らげるため0.5mmのゴムを間にはさんでおり、曲導管部分はこの鏡管ユニットを所定の曲率半径で多角形近似して位置していることによると考えられる。中性子散乱実験では微小コリメーターを使用する場合も多いため、中性子束が減少する縦線の存在について注意する必要がある。

5. ま と め

中性子導管の特性測定の結果、中性子スペクトルについてはそれぞれの導管において目的の特性波長を得ることができた。また中性子束測定においても冷中性子導管については80%以上の収率を得ることができた。短波長の中性子を取り出す熱中性子導管については60~70%程度にとどまったが、これは長波長中性子よりきびしい設置条件からして諸外国の同様の導管と同程度の性能であることから目標値に達していると考えられる。

JRR-3M中性子導管は総延長230mにも及ぶわが国としては最初の大型施設である。このような大型の中性子導管をわが国独自の技術で設計計算から据え付けまで行うことは当初一抹の不安があったことも事実である。しかし完成した中性子導管が設計計算とほぼ一致する性能を発揮していることが確認されたことで大きな自信を得ることができた。

この中性子導管群の完成により、多数の中性子ビーム実験機器に対して十分高い熱及び冷中性子束を供給することが可能になった。また、その実験装置もバックグラウンドの高い原子炉室ではなく、広く環境の良いビームホールに設置できるようになったため、実験環境は飛躍的に改善された。JRR-3Mのビームホールは、現状では世界でもトップクラスの実験施設だと言える。

謝 辞

本報告をまとめるにあたって、特性測定で協力して下さった（株）NKKの菊池仁志、阿部盛一両氏、原研研究炉部曾山和彦氏、中性子飛行時間法でご指導を賜った原研物理部の坂本正誠氏及び特性測定のために原子炉、CNS等の運転に協力賜ったJRR-3M原子炉運転員、CNS運転員各位に謝意を表明する。

また、中性子ラジオグラフィーフィルムを用いた中性子ビームの撮影は原研研究炉部の鶴野晃氏によって行われた。併せて謝意を表明する。

引用文献

- 1) 一色正彦, 高橋秀武, 市川博喜, 白井英次: 日本原子力学会誌 34, 108 (1992).
- 2) 原見太幹, 植村睦, 海老沢徹: JAERI-M 85-092 (1985).
- 3) 原見太幹, 川端祐司: JAERI-M 85-093 (1985).
- 4) 原見太幹, 鈴木正年, 植村睦: JAERI-M 85-103 (1985).
- 5) 鈴木正年, 川端祐司, 高橋秀武, 坂本正誠: JAERI-M 86-037 (1986).
- 6) Y. Kawabata, M. Suzuki et al.: J. Nucl. Sci. Technol. 27, 406 (1990).
- 7) 鈴木正年, 川端祐司他: JAERI-M 90-079 (1990).
- 8) Y. Kawabata, M. Suzuki et al.: J. Nucl. Sci. Technol. 27, 1138 (1990).
- 9) Y. Kawabata, M. Suzuki et al.: Physica B180&181, 987 (1992).
- 10) E. Fermi and W. H. Zinn: Phys. Rev. 70, 103 (1946).
- 11) H. Maier-Leibnitz and T. Spribnger: Reactor Sci. Technol. 17, 217 (1963).
- 12) B. Alefeld, J. Duppich, O. Scharpf, A. Schirmer, T. Springer and K. Werner: Proc. Int. Conf. on Thin-Film Neutron Optical Devices, San Diego, SPIE Vol.983, 75 (1988).
- 13) J. R. D Copley et al.: NIST Tech. Note 1257, 124 (1989).
- 14) T. Ebisawa, T. Akiyoshi, S. Tasaki, T. Kawai, N. Achiwa, M. Utsuro and S. Okamoto: Proc. Int. Conf. on Thin-Film Neutron Optical Devices, San Diego, SPIE Vol.983, 54 (1988).
- 15) T. Kumai, M. Suzuki and K. Kakefuda, JAERI-M 92-028, 559 (1992).

Table 1 JRR-3M中性子導管群の幾何学的条件と特性波長
Specifications of the neutron guide tubes in JRR-3M

導管 No.	特性 波長 (Å)	断面寸法 タ×ヨ (cm)	水平実 験孔内 長さ(m)	曲 管 部		直管部 長さ(m)	全 長 (m)
				曲率半径(m)	長さ(m)		
T1	2	20×2	1.54	3337.4	35.72	22.65	59.91
T2	2	20×2	1.54	3337.4	35.73	21.71	58.98
C1	4	12×2	2.49	834.3	17.05	11.21	30.75
C2	4	12×2	2.49	834.3	17.02	31.57	51.08
C3	6	12×2	2.49	370.8	15.28	13.61	31.38
計			10.55	-	120.80	100.75	232.10

Table 2 中性子スペクトルの効果を考慮にいれた金の放射化断面積
Effective cross-section of gold for neutron absorption
corrected by the neutron spectrum (単位: barn)

中性子導管		中性子導管始点 ^{*1)}	中性子導管端末
C 1		98.8	385.0
C 2	冷却	98.8	378.5
	無冷却	98.8	224.4
C 3		98.8	449.6
T 1		98.8	162.9
T 2		98.8	162.1

*1) 始点におけるスペクトルはマクスウェル分布と仮定した。

Table 3 20MWにおける各中性子導管の始点と終点の中性子束
Neutron fluxes at the start and the end of the
neutron guide tubes at a reactor power of 20MW

導管No	導管始点	導管端末
C 1 導管	1.5×10^{11} (2.1×10^{11})	2.0×10^8 (3.3×10^8)
C 2 導管	1.4×10^{11} (2.1×10^{11})	2.0×10^8 (2.8×10^8)
C 3 導管	1.5×10^{11} (2.1×10^{11})	1.4×10^8 (2.3×10^8)
T 1 導管	7.9×10^{11} (8.3×10^{11})	1.2×10^8 (2.1×10^8)
T 2 導管	6.8×10^{11} (8.3×10^{11})	1.2×10^8 (2.1×10^8)

上段が実測値・下段が計算値($n/cm^2 \cdot s$)

Table 5 20MWにおけるC 2 導管端末の中性子束の分布
Neutron flux distributions at the end of the
C2 guide tube at a reactor power of 20MW

	1.8×10^8	1.9×10^8	1.7×10^8	
外				内
周	2.1×10^8	1.9×10^8	1.9×10^8	周
側	1.9×10^8	1.9×10^8	1.8×10^8	側

($n/cm^2 \cdot s$)

Table 4 20MWにおけるT1導管末端の中性子束の分布
 Neutron flux distributions at the end of the
 T1 guide tube at a reactor power of 20MW

	1.1×10^8	1.3×10^8	1.1×10^8	
外	1.1×10^8	1.1×10^8	1.1×10^8	内
周				周
側	1.1×10^8	1.3×10^8	1.2×10^8	側
	1.2×10^8	1.2×10^8	1.2×10^8	
	1.2×10^8	1.3×10^8	1.3×10^8	

($n/cm^2 \cdot s$)

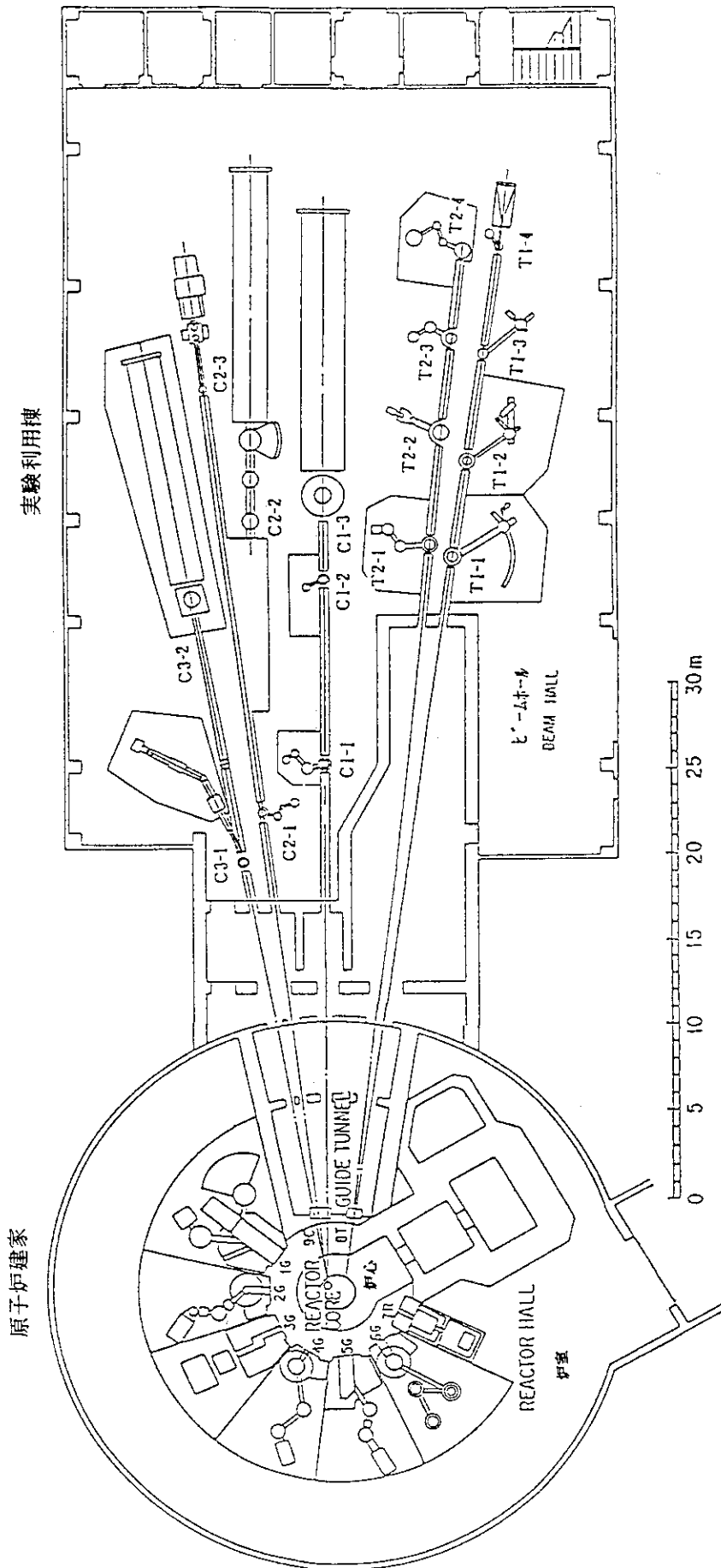


Fig. 1 中性子導管の全体図

General layout of the neutron guide tubes in JRR-3M

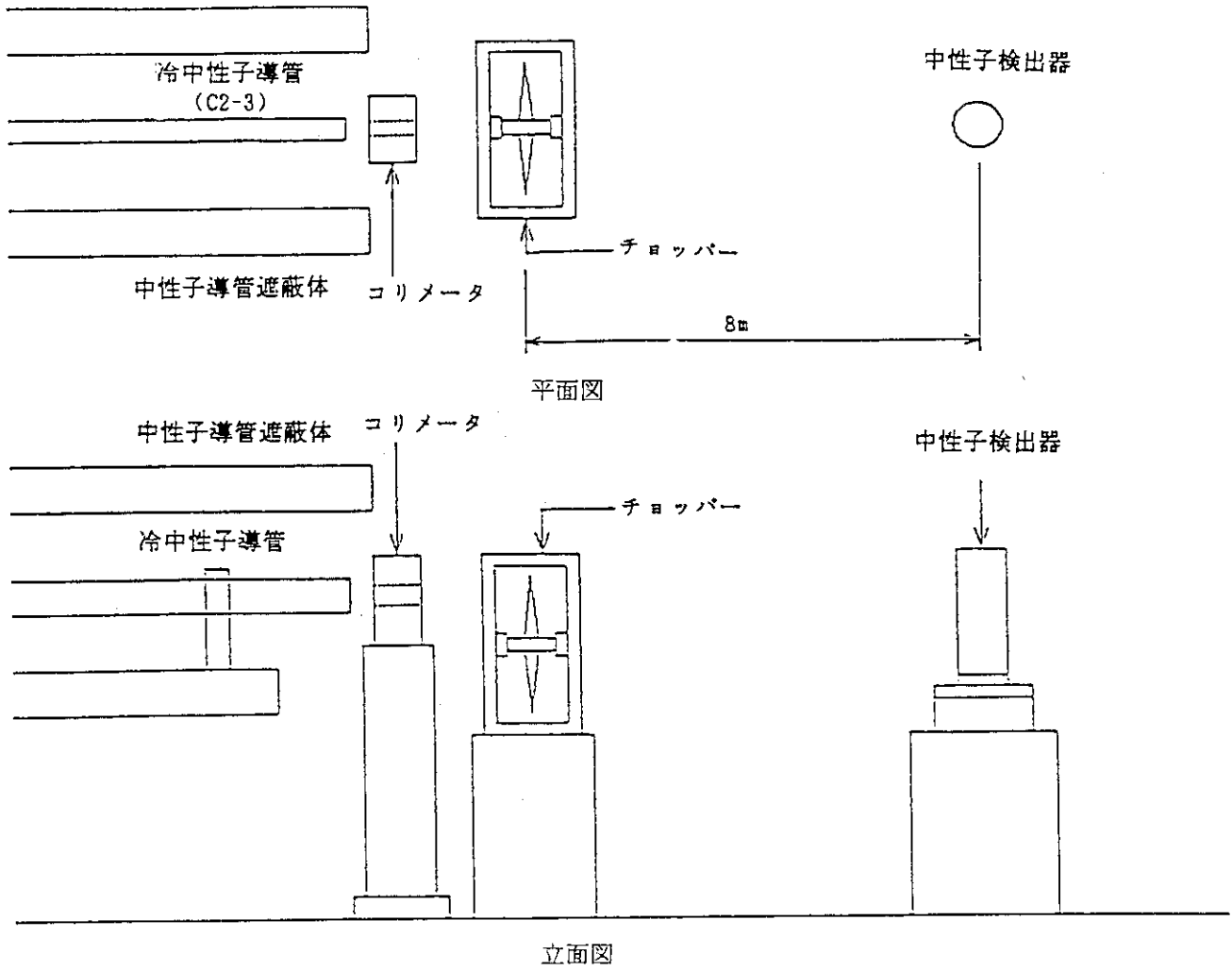


Fig. 2 中性子飛行時間測定体系
Measurement system of the time-of-flight spectrum

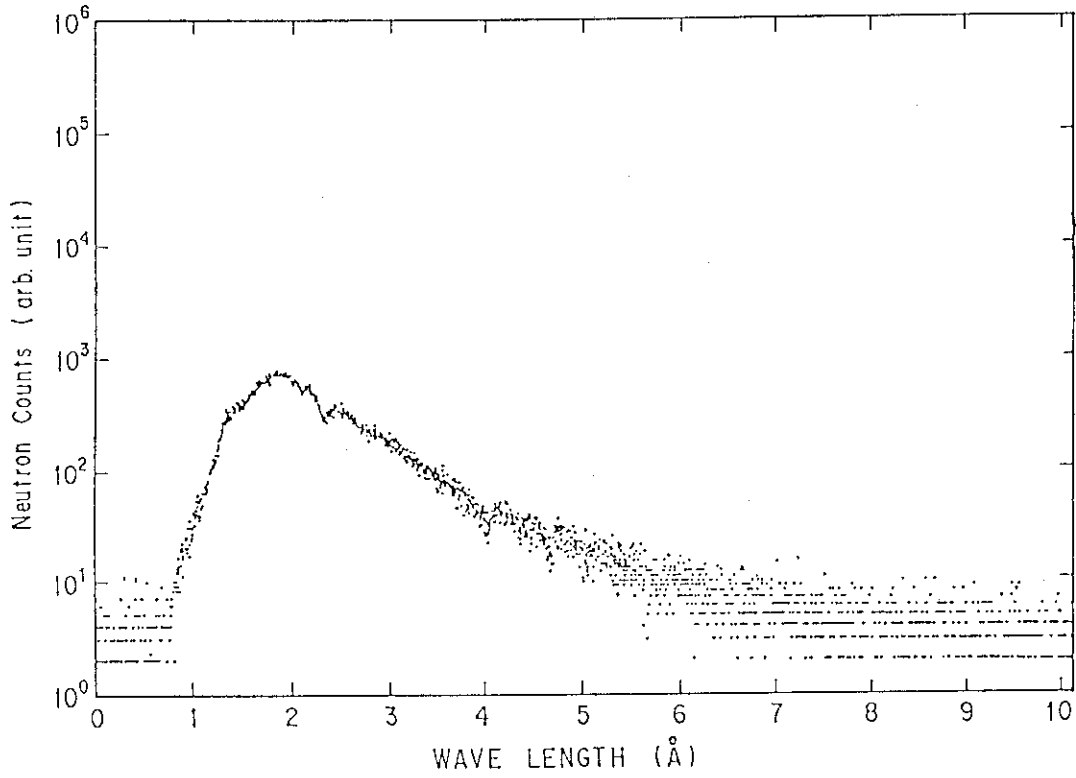


Fig. 3 T1 導管末端の中性子スペクトル
Neutron spectrum at the end of T1 guide tube

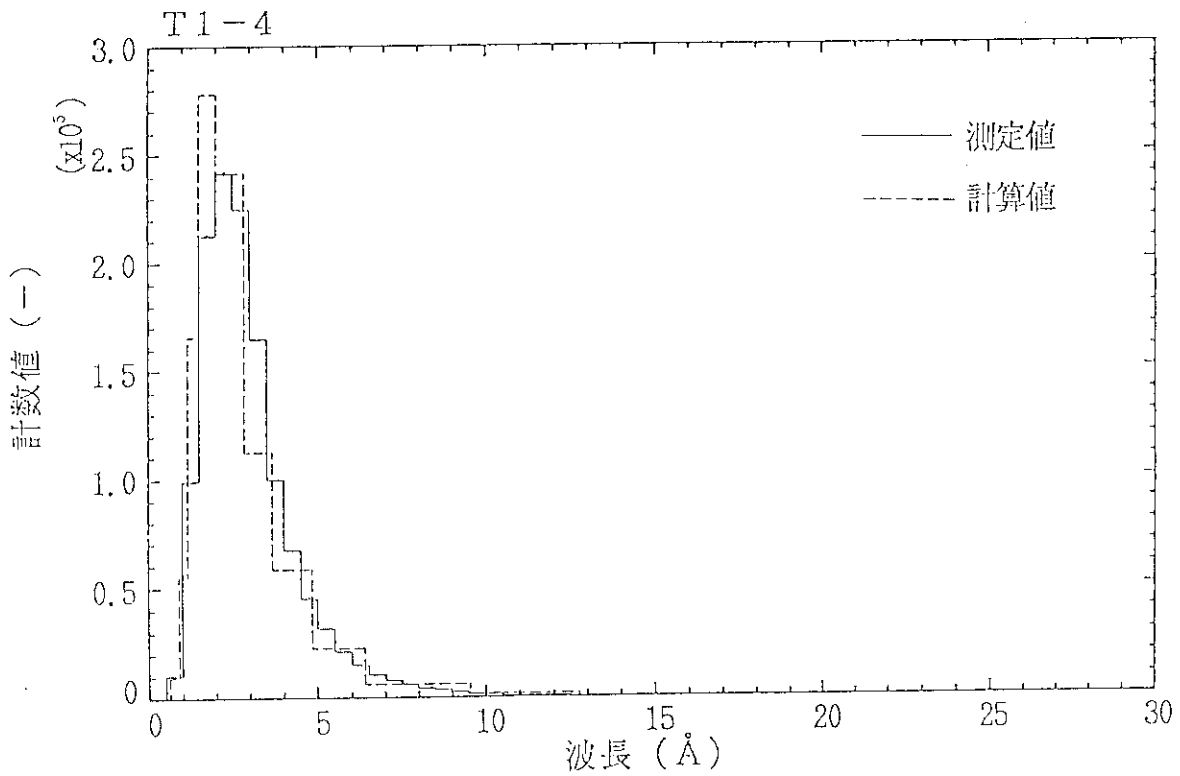


Fig. 4 T1 導管末端の中性子スペクトル (実測値と計算値の比較)
Corrected neutron spectra at the end of T1 guide tube
(Calculated and measured results)

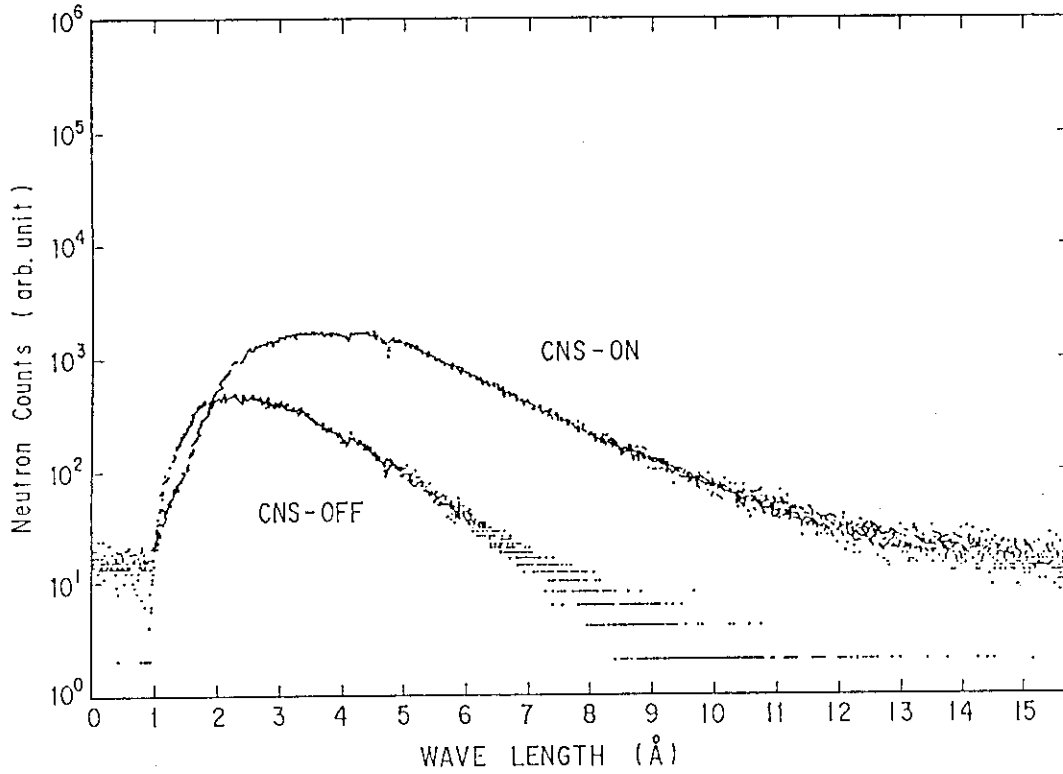


Fig. 5 C 2 導管末端の中性子スペクトル
Neutron spectrum at the end of C2 guide tube

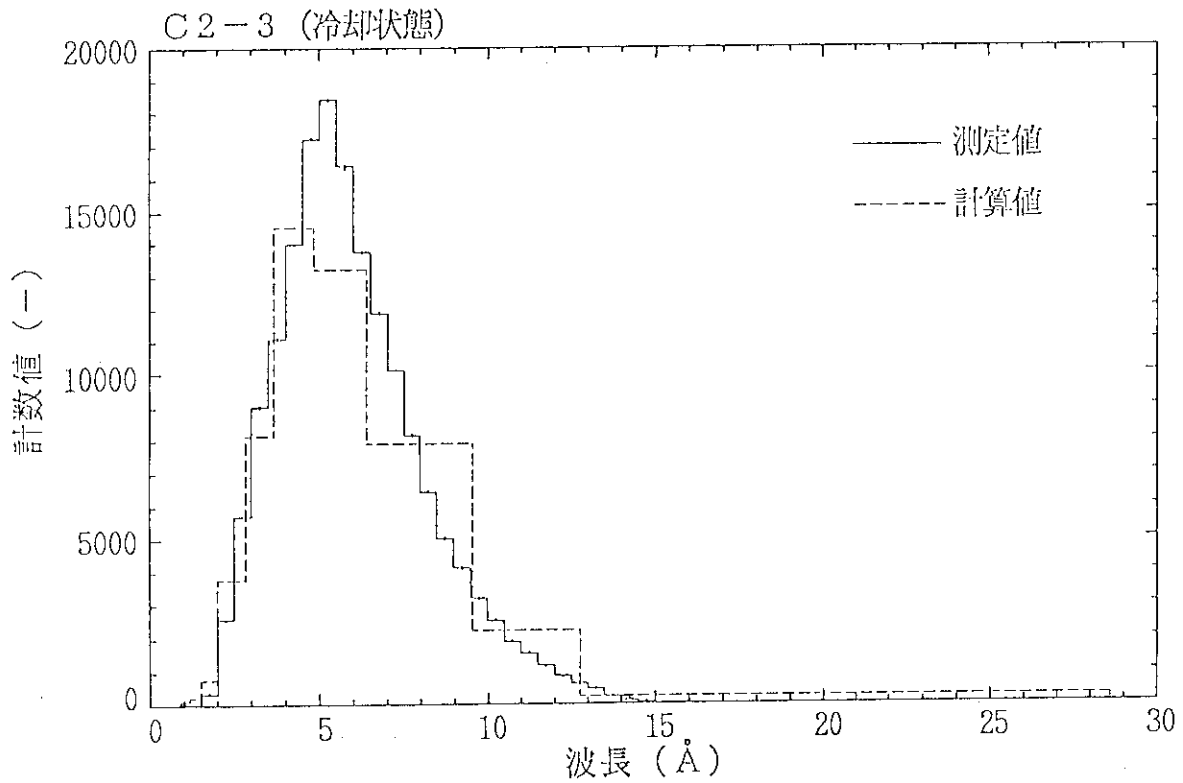


Fig. 6 C 2 導管末端の中性子スペクトル (実測値と計算値の比較 - CNS ON)
Corrected neutron spectra at the end of C2 guide tube
(Calculated and measured results: CNS=ON)

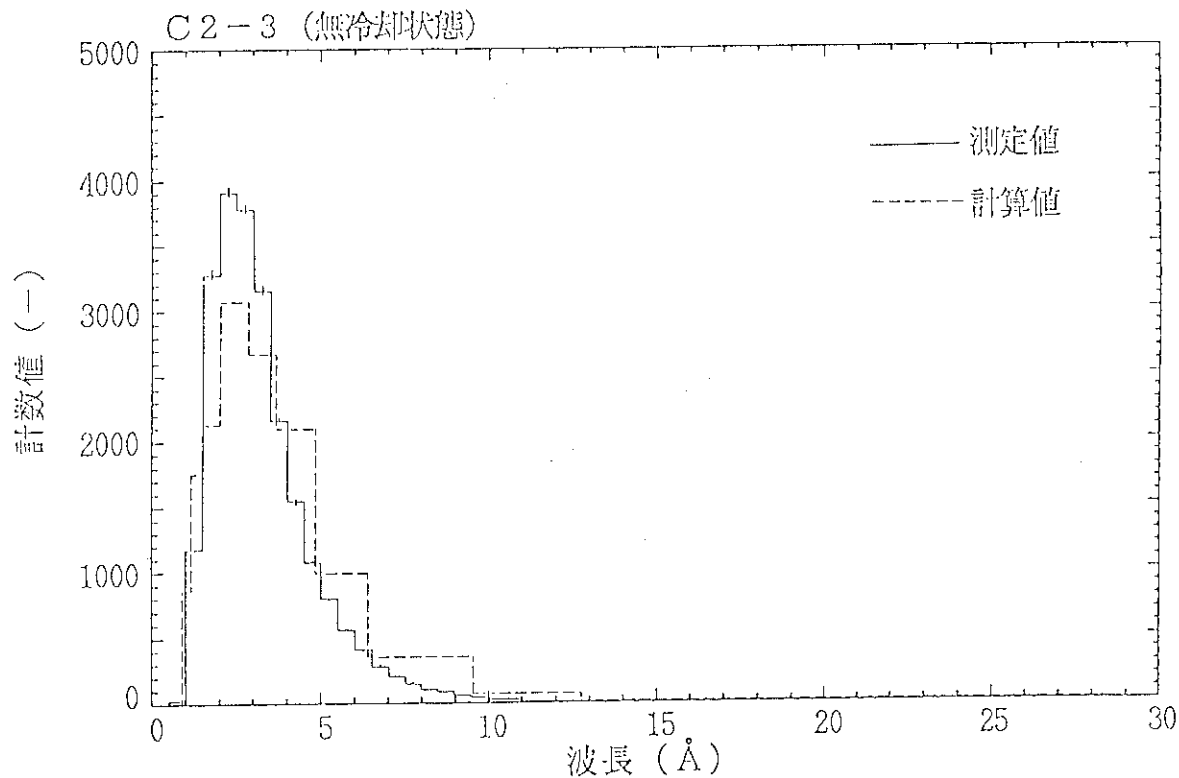


Fig. 7 C 2 導管末端の中性子スペクトル (実測値と計算値の比較-CNS OFF)
 Corrected neutron spectra at the end of C2 guide tube
 (Calculated and measured results: CNS=OFF)

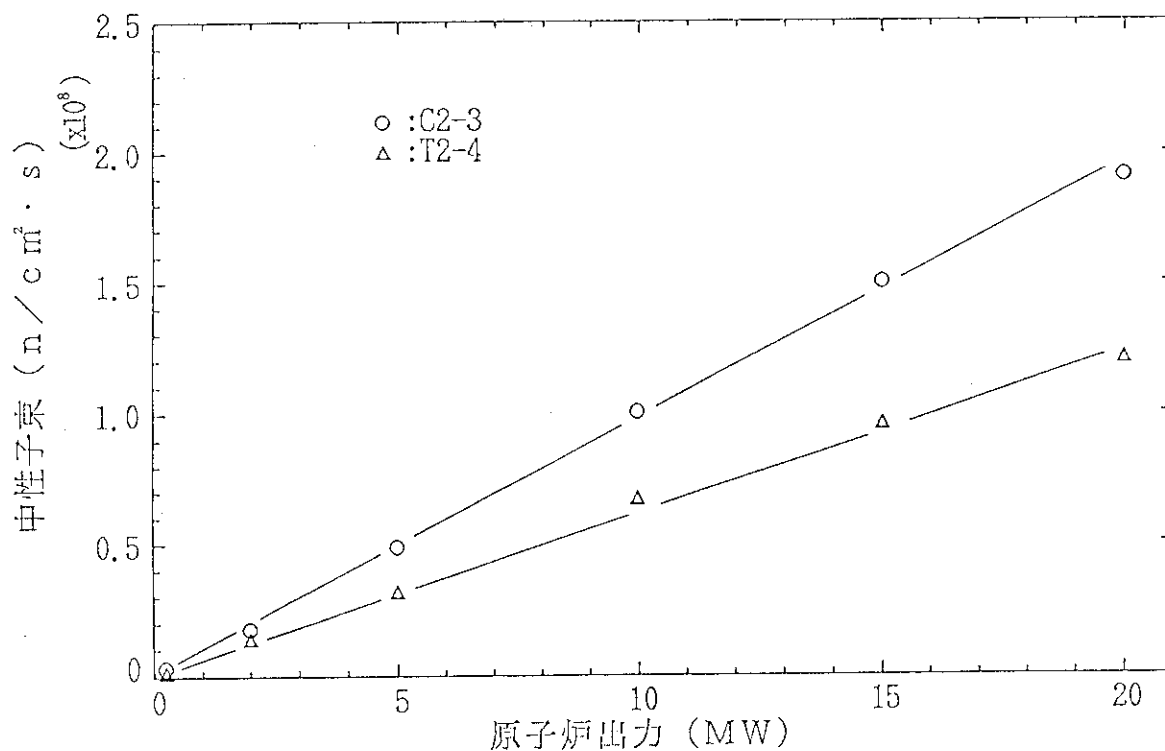


Fig. 8 原子炉出力の上昇に伴う T 1 導管と C 1 導管の末端における中性子束測定結果
 Neutron fluxes at T1 and C2 with several reactor powers

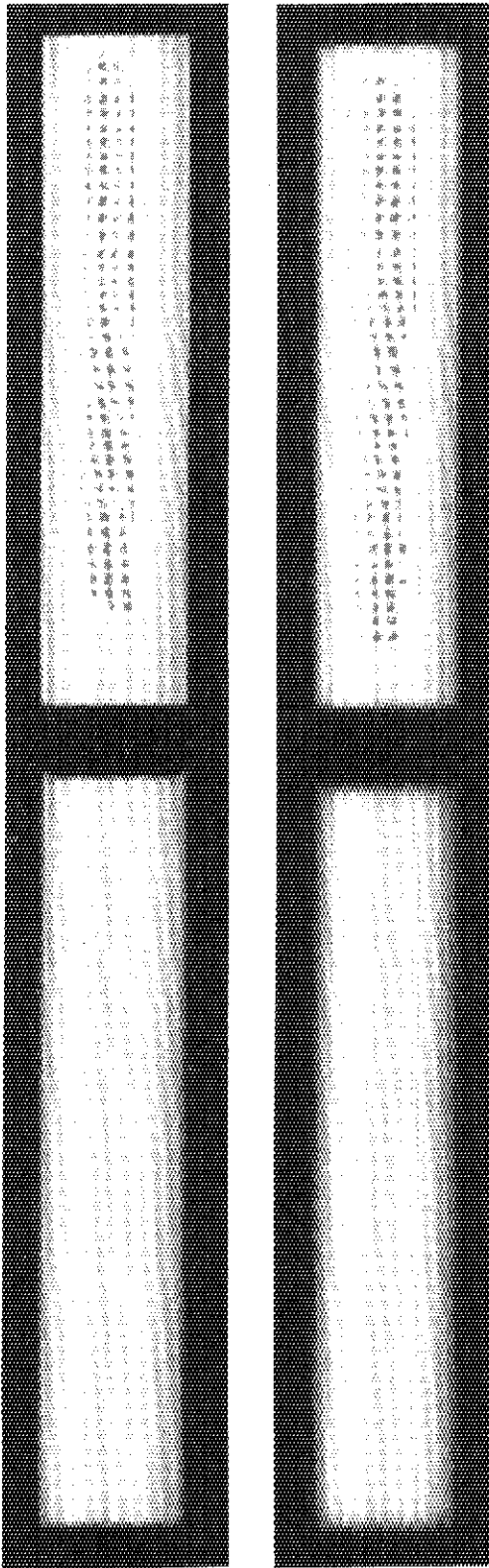


Fig. 9 NRGフィルムによる中性子束
微細分布 (T1-4)
(左・端末密着, 右・端末より
30cm後方)

Fine neutron flux
distributions at the end of
T1 guide tube

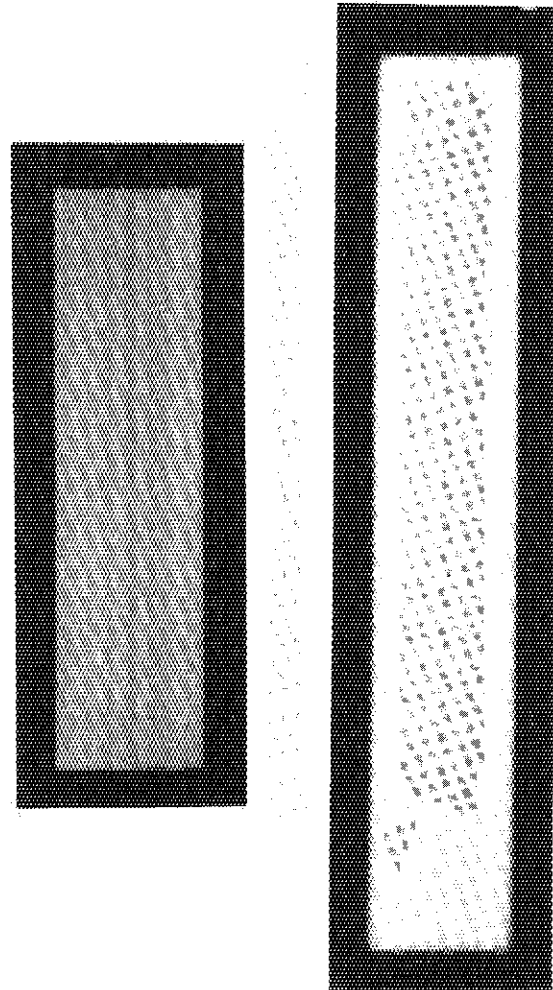


Fig. 10 NRGフィルムによる中性子束
微細分布 (T1-2)
(左・端末密着, 右・端末より
10cm後方)

Fine neutron flux
distributions at the end of
C2 guide tube