



JAEA-Technology

2008-054

JAEA-Technology

JRR-4 利用設備(照射設備、中性子ビーム設備、 プール設備)の特性測定

Characterization Measurement of JRR-4 Utilization Facility

岸 敏明 本橋 純 山本 和喜 熊田 博明
鳥居 義也

Toshiaki KISHI, Jun MOTOHASHI, Kazuyoshi YAMAMOTO, Hiroaki KUMADA
and Yoshiya TORII

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

August 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

JRR-4 利用設備（照射設備、中性子ビーム設備、プール設備）の特性測定

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター

原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

岸 敏明、本橋 純、山本 和喜、熊田 博明、鳥居 義也⁺¹

(2008年5月14日受理)

JRR-4 は、燃料ウラン濃縮度低減化を目的とした改造と併行して、利用設備（照射設備、中性子ビーム設備、プール設備）の改造が行われた。照射設備については、シリコン照射のための簡易照射筒の孔径 12 cm の L パイプから孔径 15 cm の N パイプへ大型化した。短寿命放射化分析ができるよう気送管照射設備の改造を行った。また、医療照射を行うための中性子ビーム設備の新設、医療照射時のホウ素濃度測定のためのプール設備の即発ガンマ線分析装置の新設を行った。

本報告書は、ウラン濃縮度低減化した初装荷炉心と平衡炉心における JRR-4 利用設備の特性測定結果について報告するものである。簡易照射筒の S パイプ及び D パイプ、水力照射設備、気送管照射設備について、特性測定の結果、改造後のその性能は改造前とほぼ同等の性能であることを確認した。N パイプの照射均一度については、5 %以下を達成することができた。新設した中性子ビーム設備では、中性子束が最大 $2.2 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であり、即発ガンマ線分析装置では、中性子束が $1 \times 10^{11} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であり、当初の設計目標を満足する値が得られた。これらは、医療照射、医療照射の基礎実験等を行うのに十分な性能である。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+ 1 安全統括部

Characterization Measurement of JRR-4 Utilization Facility

Toshiaki KISHI, Jun MOTOHASHI, Kazuyoshi YAMAMOTO, Hiroaki KUMADA
and Yoshiya TORII⁺¹

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 14, 2008)

During the modification of Japan Research Reactor No.4 (JRR-4) to convert the enriched uranium-silicide fuels to low-enriched one, the JRR-4 utilization facility has been also modified as follows. An irradiation pipe (N-pipe) of 12 cm in diameter among irradiation facilities has been changed to a larger one of 15 cm in diameter. A pneumatic irradiation tube has been modified for activation analysis of short-lived nuclides. A neutron beam facility has been installed for medical irradiation.

This report describes the result of characteristics measurement for the irradiation facilities at the initial and equilibrium states of the core filled with low-enriched uranium-silicide fuels. It was confirmed that the utilization facilities of S-pipe, D-pipe, hydraulic and pneumatic tubes had the performances as equal as those before the modifications. We have achieved the irradiation uniformity of less than 5% for the N-pipe.

The maximum neutron flux was about $2.2 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ at the new neutron beam facility and about $1 \times 10^{11} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ at the prompt gamma-ray analysis facility in the reactor pool. These performances are satisfactory for the purpose of medical irradiation, basic examinations for medical irradiation, etc.

Keywords: JRR-4, Modification, Utilization Facility, Neutron Beam Facility, Low-enriched Uranium-silicided Fuels, Characterization Measurement

+1 Safety Administration Department

目 次

1	はじめに	1
2	JRR-4 利用設備の概要	1
2.1	簡易照射筒	1
2.1.1	簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ)	2
2.1.2	簡易照射筒 (T パイプ (水力照射設備))	2
2.2	気送管照射設備	2
2.3	中性子ビーム設備	3
2.4	プール設備	4
3	反応度効果測定	6
3.1	反応度測定方法	6
3.1.1	測定原理	6
3.1.2	カドミウム試料	6
3.2	測定条件	7
3.2.1	簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ)	7
3.2.2	水力照射設備	7
3.2.3	気送管照射設備	8
3.2.4	中性子ビーム設備	8
3.2.5	プール設備	8
3.3	測定結果	8
4	熱中性子束の測定	10
4.1	熱中性子束の測定原理	10
4.1.1	$\beta - \gamma$ 同時計数法	10
4.1.2	熱中性子束の計算	12
4.2	測定方法	14
4.2.1	簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ)	14
4.2.2	水力照射設備	15
4.2.3	気送管照射設備	16
4.2.4	中性子ビーム設備	16
4.2.5	プール設備	17
4.3	測定結果	18
4.3.1	簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ)	18
4.3.2	水力照射設備	18
4.3.3	気送管照射設備	18
4.3.4	中性子ビーム設備	18

4.3.5 プール設備	19
5 高速中性子束の測定	20
5.1 高速中性子束の計算	20
5.2 測定方法	21
5.2.1 簡易照射筒（Sパイプ、Dパイプ、Nパイプ）	21
5.2.2 水力照射設備	21
5.2.3 気送管照射設備	21
5.2.4 中性子ビーム設備	21
5.3 測定結果	21
6 ガンマ線測定	22
6.1 TLD の原理	22
6.2 ガンマ線の測定方法	22
6.2.1 中性子ビーム設備	22
6.2.2 プール設備	22
6.3 測定結果	23
6.3.1 中性子ビーム設備	23
6.3.2 プール設備	23
7 Nパイプ均一照射特性	24
7.1 測定方法	24
7.2 測定条件	24
7.3 測定結果	25
8 中性子ビーム設備のファントム実験	26
8.1 測定方法	26
8.1.1 全身ファントム	26
8.1.2 頭部ファントム	26
8.2 測定結果	26
8.2.1 全身ファントム	26
8.2.2 頭部ファントム	27
9 まとめ	28
謝辞	29
参考文献	30

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of JRR-4 Utilization Facility	1
2.1 Simple Irradiation Facility	1
2.1.1 Simple Irradiation Facility(S-pipe, D-pipe, N-pipe)	2
2.1.2 Simple Irradiation Facility(T-pipe(Hydraulic Irradiation Facility))	2
2.2 Pneumatic Irradiation Facility	2
2.3 Neutron Beam Facility	3
2.4 Pool Irradiation Facility	4
3. Measurement for efficiency of reactivity	6
3.1 Measurement method of reactivity	6
3.1.1 Measurement principle	6
3.1.2 Cadmium sample	6
3.2 Measurement condition	7
3.2.1 Simple Irradiation Facility(S-pipe, D-pipe, N-pipe)	7
3.2.2 Hydraulic Irradiation Facility	7
3.2.3 Pneumatic Irradiation Facility	8
3.2.4 Neutron Beam Facility	8
3.2.5 Pool Irradiation Facility	8
3.3 Measurement results	8
4. Measurement of Thermal Neutron Flux	10
4.1 Measurement principle of Thermal Neutron Flux	10
4.1.1 $\beta - \gamma$ Coincidence Counting Method	10
4.1.2 Calculation of Thermal Neutron flux	12
4.2 Measurement method	14
4.2.1 Simple Irradiation Facility(S-pipe, D-pipe, N-pipe)	14
4.2.2 Hydraulic Irradiation Facility	15
4.2.3 Pneumatic Irradiation Facility	16
4.2.4 Neutron Beam Facility	16
4.2.5 Pool Irradiation Facility	17
4.3 Measurement results	18
4.3.1 Simple Irradiation Facility(S-pipe, D-pipe, N-pipe)	18
4.3.2 Hydraulic Irradiation Facility	18
4.3.3 Pneumatic Irradiation Facility	18
4.3.4 Neutron Beam Facility	18

4.3.5 Pool Irradiation Facility	19
5. Measurement of Fast Neutron Flux	20
5.1 Calculation of Fast Neutron Flux	20
5.2 Measurement method	21
5.2.1 Simple Irradiation Facility(S-pipe, D-pipe, N-pipe)	21
5.2.2 Hydraulic Irradiation Facility	21
5.2.3 Pneumatic Irradiation Facility	21
5.2.4 Neutron Beam Facility	21
5.3 Measurement results	21
6. Measurement of Gamma-ray	22
6.1 Principle of Thermo-Luminescence Dosimeter	22
6.2 Measurement method of Gamma-ray	22
6.2.1 Neutron Beam Facility	22
6.2.2 Pool Irradiation Facility	22
6.3 Measurement results	23
6.3.1 Neutron Beam Facility	23
6.3.2 Pool Irradiation Facility	23
7. Characteristic of Uniform Irradiation Facility (N-pipe)	24
7.1 Measurement method	24
7.2 Measurement condition	24
7.3 Measurement results	25
8. Phantom experiment by Neutron Beam Facility	26
8.1 Measurement method	26
8.1.1 Whole Body Phantom	26
8.1.2 Head Phantom	26
8.2 Measurement results	26
8.2.1 Whole Body Phantom	26
8.2.2 Head Phantom	27
9. Conclusion	28
Acknowledgements	29
References	30

1. はじめに

JRR-4 は燃料濃縮度低減化のため、平成 8 年 1 月に高濃縮燃料による共同利用運転を終了、改造工事を行った。利用設備についても、シリコン照射のための簡易照射筒の孔径 12 cm の L パイプから孔径 15 cm の N パイプへの変更及び短寿命放射化分析への対応を目的とした気送管照射設備の改造、医療照射を実施することを目的とした中性子ビーム設備の新設、医療照射時の患者血中のホウ素濃度測定のためのプール設備の即発ガンマ線分析装置の設置等¹⁾ が行われた。簡易照射筒の S パイプ、D パイプ、T パイプ（水力照射設備）についても、炉心タンクを No.2 プールへ移動するため一時撤去及び復旧が行われた。JRR-4 は平成 10 年 7 月 14 日に低濃縮燃料炉心としての初臨界を達成し、平成 10 年 10 月からは高出力の試験利用運転を開始した。この間に必要な特性試験を実施し、平成 11 年 1 月からは共同利用運転を再開し、順調に利用されている。これらの変更、改造、新設を行った利用設備について、平成 10 年度に実施した低濃縮燃料炉心における特性測定の結果について報告する。また、併せて共同利用運転の再開から、3 年が過ぎた平成 13 年度の特性測定について報告する。

簡易照射筒の S パイプ及び D パイプ、水力照射設備、気送管照射設備について、平成 10 年度に実施した熱中性子束及びカドミウム比の測定結果は改造前とほぼ同等の性能であることが確認された。また、平成 13 年度の熱中性子束及びカドミウム比の測定結果においても同等の性能であることが確認された。N パイプの照射均一度については、ユーザーの希望をほぼ満足するものが得られた。

新設された中性子ビーム設備では、ほぼ当初の設計目標を満足する値が得られ、医療照射、医療照射の基礎実験等を行うのに十分な性能が得られた。

プール設備の即発ガンマ線分析装置の特性については、熱中性子の値は目標を 1 枠上回る中性子束が得られた。

2. JRR-4 利用設備の概要

JRR-4 には、利用設備として炉心タンク内照射設備があり、次のものが設置されている。JRR4 照射設備の配置図を Fig.1 に示す。²⁾

- (1) 簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ及び T パイプ (水力照射設備))
- (2) 気送管照射設備

また、JRR-4 には実験設備として次のものが設置されている。

- (1) 中性子ビーム設備
- (2) プール設備

2. 1 簡易照射筒

簡易照射筒には、S パイプ、D パイプ、N パイプ及び T パイプ (水力照射設備) がある。

2. 1. 1 簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ)

S パイプ、D パイプ及び N パイプは、照射筒、昇降回転装置及び照射ホルダ等から構成されている。S パイプ、D パイプは、主に放射化分析に利用されており、D パイプは、シリコン照射にも使用することができる。N パイプでは、主にシリコン照射に利用されており、直接シリコン（最大口径 12.7 cm(5 インチ)×長さ 45 cm）を照射ホルダに収納して照射を行っている。照射筒、燃料要素の高さ方向の位置関係は Fig.2 のとおりである。

S パイプ、D パイプ及び N パイプは、照射時にシリコン又は、ポリエチレン製、PEN 製及びアルミ製の専用キャップセルを照射ホルダに収納して、昇降回転装置に接続し、炉心内に挿入、照射及び取出しを行うことができる。また、照射中は均一に照射が行えるように自動的に照射ホルダを回転させることが可能である。

2. 1. 2 簡易照射筒 (T パイプ (水力照射設備))

T パイプ（以下、水力照射設備という。）には、照射筒、詰替遮へいボックス、水中取出機、水中ポンプ、フィルタ、挿入機、取出機等から構成されており、プール水（No.1 プール）の循環により照射物を移送し照射する設備である。水力照射設備は Fig.1 に示すとおり炉心プール側反射体領域に挿入されており No.1 プール脇に設置されている詰替遮へいボックスとはキャップセル搬送ラインで連結されている。水力照射設備の系統図を Fig.3 に示す。

水力照射設備は、プール水で移送するとともに冷却もかねており、ポリエチレン製の専用キャップセルで 40 分、PEN（ポリエチレン・ナフタレート）製で 6 時間、アルミ製で 200 時間までの照射が可能である。また、水力照射設備は、A、B 系の 2 系統からなり、それぞれ別々にキャップセルを照射することができる。照射後は、No.1 プール内にある水中取出器に一時保管され、専用の線量測定器で測定し、線量が高い場合は減衰させ、その後詰替セルへ転送、搬出する。

2. 2 気送管照射設備

気送管照射設備は当初はガンマ線源装置と呼ばれ、炉心（反射体領域）内で照射した試料を散乱実験室へ搬送し、散乱実験用の γ 線源を生産するために開発されたものであった。その後、JRR-4 の利用が多目的化し、共同利用のために改造され放射化分析を中心とした短時間の照射装置として利用してきた。現在、炉心内で試料を照射する照射筒と附属建家にあるホット実験室から気送管機器室内のステーション経由或いは置換経路で連結され、試料の挿入、開封作業が炉室外から行えるようになっている。現在の気送管照射設備の系統図の Fig.4 に示す。気送管照射設備は、照射筒、Cd フィルタ、ステーション、自動挿入機、手動挿入機、取出機、三方弁、窒素ガスボンベ、フード、キャップセル詰替保管庫、制御盤等からなっている。試料の搬送、試料の冷却は窒素ガスによって行い、ポリエチレン製の専用キャップセルにより最大 20 分の照射が可能である。さらに置換回路備えたバイパス

ラインが設けられ、ステーションを経由せず試料の取り出しが可能となり、短時間（約 3 秒）で照射試料をホット実験室にあるフードまで戻すことができるようになっている。このことにより、アルミニウム、フッ素等の短半減期の核種分析に有効な装置となっている。また、フード 1 内の取出機には通過検出器と連動して自動的に計数開始する Ge 検出器を取り付け、到着した試料を開封せずにすぐ測定することができる。

ホット実験室には、開封作業に使用されるフード 1 とスクラバを装備した化学用のフード 2 の 2 つがある。また、ホット実験室内には、放射化分析に使用される γ 線スペクトロメトリー用の Ge 検出器が 3 台あり、1 台は開封した試料を測定できる装置、1 台は到着と同時に自動計数できる直接測定用の装置で、もう 1 台は最大 40 個のオートサンプルチェンジャーが使用できる装置である。さらに熱中性子モニタとして使用される金の絶対測定用の β - γ 同時計数装置、金線をスキャニングできる β - γ 同時計数装置等の装置が使用できるようになっている。

2. 3 中性子ビーム設備

中性子ビーム設備は主に医療照射を目的に設備されたもので、重水タンク、ビーム実験要素（ビスマス、黒鉛、コリメータ等から成る）、照射室及び簡易遮へい体等からなる。中性子ビーム設備の断面図を Fig.5 に示す。

重水タンクは、No.1 プール内に据え付けられ、炉心タンクとビーム実験要素の間で中性子の線質を調整するとともに、ビーム実験要素に中性子を導くためのものである。重水タンクは、4 層構造を有し、重水層 16 cm (A 層)、4 cm (B 層)、8 cm (C 層) と 5 cm (D 層) の 4 層にそれぞれ独立に重水を注入排水することができる。この 4 層の組み合わせにより、0 cm から 33 cm まで 16 段階の重水厚さを選択することができる。

また、カドミウムシャッタを重水タンクとプールライニング間に設置し、熱中性子をカットすることができる。³⁾

ビーム実験要素は、ビーム孔から取り出す中性子束の線質を調整するためにビーム孔に設置されるものであり、ビスマス遮へい体、ビーム孔ライニング、ビーム孔内構造物、ビーム孔コリメータ、照射コリメータ、ビーム実験要素扉、可動遮へい体、固定遮へい体、排気配管及びビームモニタ用配管から構成される。照射コリメータは、 $\phi 100$ mm、 $\phi 120$ mm、 $\phi 150$ mm、 $\phi 200$ mm の通常の円筒コリメータ、 $\phi 120$ mm の延長コリメータ（照射部 $\phi 120$ mm で照射孔から 150 mm 突出）、任意な形にできるマルチリーフコリメータ、さらに照射コリメータを設置するビームの出口部分は、照射コリメータを外して 220 mm の角形コリメータとして使用することができる。医療照射や実験の時には、これらの 7 種類を選択のコリメータを条件にあわせて使用することができる。延長コリメータは、頭頸部癌、舌癌等の脳腫瘍以外を対象とした医療照射において、ビーム孔部を患者の患部に接近させることができ、患部以外への中性子被ばくを低減することができるものである。

照射室には、簡易遮へい体、患者を監視するための監視装置、ビームストップ等備えら

れている。照射室は、照射孔を正面に見て、左側が 90° 、右側が 60° までの角度で照射台をセットすることができる。照射室の平面図を Fig.6 に示す。

中性子ビーム設備は、重水の厚さ、カドミウムシャッタの開、閉により、熱中性子から熱外中性子まで様々なモードを作ることができる。我々は、熱中性子モード I 、熱中性子モード II 、熱外中性子モードの 3 つのモードを代表的なモードとして、選定した。3 つのモードの照射条件を Table.1 に示す。

2. 4 プール設備

プール設備は炉心タンクを囲むプール（No.1 プール）に備えられた設備であり、炉心タンクから発生する中性子及びガンマ線を利用して様々な実験を行うことができる。プールに設備された実験装置としては即発ガンマ線分析装置及び簡易照射筒がある。

プール設備の即発ガンマ線分析装置は、黒鉛コリメータ、中性子導管、導管サポート、遮へい体、検出器及び制御装置等から成る。即発ガンマ線分析装置の構造を Fig.7 に示す。炉心で発生した熱中性子を黒鉛コリメータ、中性子導管（スーパーミラー）で炉頂に導き、遮へい体にセットした試料に熱中性子を照射し、その時、発生する即発ガンマ線を検出器で測定し、分析を行う。

中性子導管としては、プール上面で医療照射時のホウ素濃度の即発ガンマ線分析に必要な $10^{10} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の熱中性子束を得るために、全長 8 m、 $2 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ の中性子輸送路をスーパーミラーで構成した。中性子導管に用いたスーパーミラーは、ガラスにニッケルとチタンを交互に 124 層コーティングしたものであり、Ni 単一層の中性子ミラーの 2 倍の性能を有するものである。

即発ガンマ線分析装置は、中性子導管に回転機構を設けることにより、測定に使用する時は、中性子導管は炉心タンクに近接し、測定に使用しない時は、炉心から離れた位置にセットすることができる。これにより、プール設備を有効に使用することができる。

即発ガンマ線分析装置の遮へい体は、遮へい体本体、検出器遮へい体、検出器コリメータ、中性子コリメータ、ビームシャッタ及びビスマス遮へい等で構成される。遮へい体本体の内張りには、中性子遮へいとして、中性子の吸収断面積が 940 バーンと大きく、かつ、即発ガンマ線の放出率が小さい ${}^6\text{Li}$ が適している。このため、中性子遮へいには、天然 LiF タイルを用いた。ガンマ線遮へいには、鉛を用いた。検出器遮へい体は、検出器と試料の位置を任意に変更することができる。検出器コリメータは、鉛で $\phi 70 \text{ mm}$ 、 $\phi 40 \text{ mm}$ 、 $\phi 20 \text{ mm}$ 、 $\phi 10 \text{ mm}$ の 4 種類を用意した。中性子コリメータは、濃縮 LiF タイルで $\phi 20 \text{ mm}$ 、 $\phi 10 \text{ mm}$ 、 $\phi 5 \text{ mm}$ 、 $\phi 1 \text{ mm}$ の 4 種類を用意した。ビームシャッタは、中性子ビームの開・閉のために中性子導管出口部に設けた。ビームシャッタは、天然 LiF タイルと濃縮 LiF タイルを組み合わせて使用した。また、中性子導管を通して漏洩してくるガンマ線を遮へいするためにビスマス遮へい体を中性子ビーム出口に設け、必要に応じて 2 cm から 16 cm まで厚さを変えられる構造とした。自動試料交換装置は、最大 20 個の試料を自動で交換で

きるものを設けた。専用の試料ビンには、テフロン製の 8 cc の容器を使用した。検出器は、高純度 Ge 検出器（相対感度 30 %、分解能 1.9 keV）を用い、測定器は、高圧電源、デジタルシグナルプロセッサ（DSP）、波高分析器（MCA）等で構成した。

プール設備の簡易照射筒は、船研ブリッジの中央に設置されており、放射化分析、フィッショングループの校正、検出器校正等に使用することができる。プール設備の簡易照射筒の構造を Fig.8 に示す。照射筒は、直径（内径）6 cm、長さ約 10 m の純アルミニウム製パイプである。照射部分は外形を純アルミニウム製の角型にして中性子を効率良く導くようにした。また、照射筒の設置位置は炉心タンク直近の位置を 0 cm とし、そこから 15 cm 離れた位置を選択できるようにした。

3. 反応度効果測定

原子炉運転中における各設備の操作制限を明らかにすることを目的として、各照射設備の照射試料の挿入・取出あるいは照射設備及び実験設備にある可動物に伴う反応度変化を測定した。測定方法は、照射試料の挿入・取出については、模擬照射試料として吸収断面積の大きなカドミウムを使用するものとし、可動物に伴う反応度変化を測定については、中性子ビーム設備の重水タンクの重水の注排水、気送管照射設備のカドミウムフィルタの上限及び下限、即発 γ 線分析装置中性子導管移動等、実際に動作させその変化により確認した。

3. 1 反応度測定方法

3. 1. 1 測定原理

反応度の測定は JRR-4 の特性試験において校正された制御棒を使用して、補償法により求めることとした。補償法は照射設備によって印加された反応度を制御棒によって印加反応度を補償することで臨界を保持した。変化を与える前の制御棒の位置と反応度印加後の臨界になった時の制御棒位置の変化から反応度変化が求まる。ここで、あらかじめ制御棒が正しく反応度校正されていることが重要となる。補償法に用いた JRR-4 の改造後の初期臨界試験時に測定された校正曲線を Fig.9~Fig.13 に示す。

本実験では反応度が小さいため、補償する制御棒は微調整棒 C5 がほとんどである。

変化を与える前の状態の制御棒位置 x_1 、反応度印加後の制御棒の位置 x_2 とすると印加反応度 $\Delta \rho$ は

$$\Delta \rho = \rho(x_2) - \rho(x_1)$$

となる。

原子炉は自動制御により定值制御され臨界を保っている。原子炉出力はある揺らぎを持っているため、それに連動されている微調整棒 C5 は絶えず抜き差しをしながら制御していくことになる。この揺らぎのため制御棒位置は確定できず、幅を持ったものとなる。そこで、JRR-4 運転支援システムは常時データ収集しているので、1 秒ごとの微調整棒データ収集し、100 秒間の平均を取り、制御棒の位置を確定することにした。

3. 1. 2 カドミウム試料

吸収断面積の大きなカドミウム板を使用して模擬照射試料を製作した。カドミウム板（厚さ 0.5 mm）を適当な大きさに切断し、カドミウムはキャップセルに挿入できる大きさとし、当初予定していた試料重量に近い値になるよう設計した。

カドミウムの加工手順を以下に示す。

- 1) カドミウム板に、円柱を展開した時にできる長方形（側面）を描き、切断する。
- 2) 側面のカドミウム板を丸めて筒状にする。
- 3) 側面のカドミウム円筒の外径寸法をノギスで測り調整しながら、所定の寸法にする。
- 4) 筒状にした側面のカドミウム円筒で円を描き、切断し上面、底面となるカドミウム板を製作する。
- 5) 寸法調整をした後、ポリイミドテープで円柱状の形状に整える。

上記の方法で製作したカドミウム試料は気送管照射設備用に3種類、水力照射設備用に2種類、そして簡易照射筒（Sパイプ及びDパイプ）用に2種類の合計7種類とした。製作した模擬照射試料となるカドミウム板円柱の寸法をTable.2に示す。模擬照射試料（カドミウム）の製作をPhoto.1に示す。水力照射設備及び気送管照射設備の模擬照射試料をPhoto.2に示す。

3. 2 測定条件

3. 2. 1 簡易照射筒（Sパイプ、Dパイプ、Nパイプ）

Sパイプ、Dパイプについては、模擬照射試料を水力照射設備用のポリエチレン製キャップセルに入れ、さらにSパイプ、Dパイプ用ホルダに装填して照射した。挿入風景の写真をphoto3に示す。Nパイプについては、シリコン照射が優先されるため実際のシリコン（12.7cm（5インチ）×長さ45cm）を直接Nパイプ用ホルダに装填して反応度変化を測定した。

各ホルダの挿入、取出しについては簡易照射設備制御盤より操作し昇降回転装置で行った。以下の条件で測定した。

- ・ホルダ位置：昇降回転装置メモリで0mm（最下部）
- ・照射時間：2分
- ・原子炉出力：20W
- ・使用キャップセル：ポリエチレン製キャップセル、Nパイプについては、シリコンを直接ホルダに挿入
- ・照射試料：カドミウム（0、20、40cm²）、シリコン（12.7cm（5インチ）×45cm、Nパイプ）

3. 2. 2 水力照射設備

模擬照射試料を水力照射設備用のポリエチレン製キャップセルに入れ照射する。操作は水力照射設備制御盤から行う。また、A系及びB系ともに同じ試料キャップセルを使用して以下の条件で測定した。

- ・照射時間：5分
- ・原子炉出力：20W
- ・使用キャップセル：ポリエチレン製キャップセル

- ・照射試料：カドミウム（0、10、20、40 cm²）

3. 2. 3 気送管照射設備

模擬照射試料を気送管照射設備用のキャップセルに入れ照射、測定を行う。挿入操作はホット実験室内にある自動挿入機から行い、照射済キャップセルの戻りを保管庫とした。照射条件は以下の条件で測定した。

- ・照射時間：3分
- ・原子炉出力：20 W
- ・使用キャップセル：ポリエチレン製キャップセル
- ・照射試料：カドミウム（0、20、30、40 cm²）

気送管照射設備には高速中性子照射場を提供するためにカドミウムフィルタが取りつけられている。このカドミウムフィルタは反応度が大きいため原子炉運転状態での操作は禁止されている。そのため原子炉起動前に上限又は下限状態にしておき、原子炉を起動し臨界にする。臨界位置の変化量から補償法により反応度を求める。

原子炉起動前にカドミウムフィルタ挿入した場合と挿入されていない場合の臨界点との比較を行った。

3. 2. 4 中性子ビーム設備

中性子ビーム設備には運転中、重水タンクの注排水操作、カドミウムシャッタの開、閉操作を行わなくてはならない。これら操作を行った時の反応度の変化について測定した。

(1)重水タンク（A、B、C、D）各層の反応度効果

重水タンク各層に重水を充填していき、その時の反応度を測定した。また、重水挿入順はA、B、C、Dとし、運転出力は20 Wとする。

(2)カドミウムシャッタ挿入による反応度効果

カドミウムシャッタを挿入したときの反応度を測定した。

3. 2. 5 プール設備

プール設備については、即発 γ 線分析装置が運転中、黒鉛コリメータ部を含む中性子導管を炉心タンクに接近させなければならない。この中性子導管の旋回操作を行った時に反応度の変化について測定した。

3. 3 測定結果

測定された微調整棒C5位置の時間推移をFig.14～Fig.16に示す。微調整棒C5位置の揺らぎは最大約±2 mm程度であることが分かる。状態変化を加える前後の微調整棒C5の位置を割り出すために測定方法のなかで説明した通り、100秒間のデータを平均化して制御棒

位置を確定した。しかし、Fig.15 からも分かるように中性子ビーム設備の重水タンクの注排水操作及びカドミウムフィルタ上下操作については、有意な制御棒の変化量が見出しきれいなかったので処理を行わなかった。各照射設備の平均制御棒位置と微調整棒 C5 の余剰反応度の測定結果を Table.3 に示す。ここで、即発 γ 線分析装置の中性子導管の移動による反応度の測定結果は制御棒位置の変化が小さいため、有意差がなくまとめでは除外した。気送管照射設備のカドミウムフィルタについては、微調整棒 C5 のみでは補償されないため、粗調整棒 C1～C4 を含めて、炉心全体の余剰反応度を計算した。その結果を Table.4 に示す。

測定結果から、カドミウム量に対する反応度の相関を得るために、カドミウムの表面積を横軸に、反応度効果を縦軸にとり、Fig.17～Fig.19 に示す。水力照射設備 A 系統を除くとそれぞれ直線関係があることが分かった。水力照射設備 A 系統が直線関係ではないのは 10 cm² の試料が円筒形でなく平板のカドミウムを使用したため表面積が異なるからと考えられる。

各照射設備の反応度測定結果のまとめを Table.5 に示す。

4. 热中性子束の测定

JRR-4 の各照射設備及び実験設備の簡易照射筒（水力照射設備、S パイプ、D パイプ及び N パイプ）、気送管照射設備、中性子ビーム設備、即発ガンマ線分析装置について、平成 10 年度に熱中性子束分布及びカドミウム比の特性測定を行った。また、共同利用運転の再開から、3 年が過ぎた平成 13 年度の簡易照射筒（水力照射設備、S パイプ、D パイプ及び N パイプ）、気送管照射設備及び新設したプール設備の簡易照射筒において、JRR-4 の炉心がほぼ、平衡状態に近づいたと思われることから、熱中性子束分布及びカドミウム比の特性測定を行った。熱中性子束の測定には、金線、金箔を用いた箇放射化法を用いた。熱外中性子の補正にはカドミウム比を用いることとし、裸の金箔とカドミウム・カバーで覆った金箔の放射化量の比から求めた。使用する検出器は、 $\phi 0.25 \text{ mm}$ の金線及び $5 \times 5 \times 0.01 \text{ mm}$ の金箔を使用した。カドミウム比の測定には、金線にはカドミウムチューブ（外径 2 mm、厚さ 0.5 mm）を巻き付け、金箔にはカドミウム・カバー（厚さ 0.5 mm）を使用して照射を行った。なお、金の放射能絶対測定には、 $\beta - \gamma$ 同時計数装置を用いて測定を行った。⁴⁾ ⁵⁾

4. 1 热中性子束の測定原理

4. 1. 1 $\beta - \gamma$ 同時計数法

放射能の絶対量測定には $\beta - \gamma$ 同時計数法で測定を行った。 $\beta - \gamma$ 同時計数法による金の絶対放射能測定への適応について以下に示す。測定は、対向型のオートサンプルチェンジャー付 $\beta - \gamma$ 同時測定装置を使用した。 $\beta - \gamma$ 同時測定装置は、プリアンプ、アンプ、シングルチャンネルアナライザ、コインシデンスユニット、デュアルタイマ・カウンタ、高圧電源、検出器等から成る。検出器は、プラスチックシンチレーション β 線検出器と NaI(Tl) シンチレーション γ 線検出器を用いた。

^{198}Au の壊変図を Fig.20 に示す。ここで ^{198}Au の β_3 の分岐比は小さく β_1 の放出により達するエネルギー準位からは、その大部分が 0.4118 MeV のエネルギー準位に落ちるため、この壊変図は、 $\beta - \gamma$ 同時計数の観点から観ると Fig.21 に示すように簡略化することができる。 γ 線の放出割合が内部転換により電子放出にて減少すること、及び内部転換電子の検出効率が β 線と異なることを考慮すると、それぞれの検出器の計数率は β 線の内部転換割合を α として以下の式となる。⁵⁾

$$r_\beta = \varepsilon_\beta S + \frac{(1 - \varepsilon_\beta)\alpha - \varepsilon_c}{1 + \alpha} S \quad (4.1)$$

$$r_\gamma = \varepsilon_\gamma \frac{1}{1 + \alpha} S \quad (4.2)$$

$$r_t = \varepsilon_\beta \varepsilon_\gamma \frac{1}{1 + \alpha} S \quad (4.3)$$

したがって、 $\beta - \gamma$ 同時計数法による金の壊変率 S は、

$$S = \frac{r_\beta r_\gamma}{r_t} \left/ \left[1 + \frac{\alpha \varepsilon_c (1 - \varepsilon_\beta)}{\varepsilon_\beta (1 + \alpha)} \right] \right. \quad (4.4)$$

ここで

- r_β : β 線検出器の β 線に対する計数率
- r_γ : γ 線検出器の γ 線に対する計数率
- ε_β : β 線検出器の β 線に対する絶対検出効率
- ε_γ : γ 線検出器の γ 線に対する絶対検出効率
- S : 線源の壊変率
- r_t : 真の同時計数率
- ε_c : β 線検出器の内部転換電子に対する検出効率
- α : 放出 γ 線に対する内部転換の割合

なお、 β 線検出器の検出効率は内部転換のための補正項が小さいことから、以下のように表される。

$$\varepsilon_\beta \doteq \frac{r_{\beta\gamma}}{r_\gamma} \quad (4.5)$$

さらに、真の計数値 (r) に対して、それぞれ観測値 (N) にはバックグラウンド計数及び偶発同時計数が含まれるので、その補正項を加えると以下のように表される。

$$r_\beta = N_\beta - N_{\beta BG} \quad (4.6)$$

$$r_\gamma = N_\gamma - N_{\gamma BG} \quad (4.7)$$

$$r_t = N_{\beta\gamma} - N_{\beta\gamma BG} - 2\tau N_\beta N_\gamma \quad (4.8)$$

ここで

- N_β : 測定された β 線の計数率
- N_γ : 測定された γ 線の計数率
- $N_{\beta\gamma}$: 測定された β 線と γ 線の同時計数率
- $N_{\beta BG}$: β 線のバックグラウンド計数率
- $N_{\gamma BG}$: γ 線のバックグラウンド計数率

$N_{\beta\gamma BG}$: β 線と γ 線の同時計数のバックグラウンド計数率
 τ : 計数装置の分解時間

4. 1. 2 热中性子束の計算

式(4.4)により得られた金の壊変率より、照射終了時の放射能濃度は、半減期 2.696 日を考慮して、指数式で表せる。

$$A_{bare} = \frac{S_b e^{-\lambda T_{cb}}}{W_b} \quad (4.9)$$

$$A_{cd} = \frac{S_c e^{-\lambda T_{cc}}}{W_c} \quad (4.10)$$

ここで、

A_{bare} : 裸の金箔、金線の照射直後の単位質量当たりの放射能量 (Bq·g⁻¹)

A_{cd} : カドミウムで覆った金箔、金線の照射直後の放射能量 (Bq·g⁻¹)

S_b : 裸の金箔、金線の線源の壊変率(Bq)

S_c : カドミウムで覆った金箔、金線の線源の壊変率(Bq)

λ : 198Au の壊変定数 (s⁻¹)

T_{cb} : 裸の金箔、金線の冷却時間 (s)

T_{cc} : カドミウムで覆った金箔、金線の冷却時間 (s)

W_b : 裸の金箔、金線の重量 (g)

W_c : カドミウムで覆った金箔、金線の重量 (g)

使用する断面積は熱中性子束をマクスウェル分布、断面積を $1/v$ と仮定して、熱中性子平均のミクロ断面積をもとめると、

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi T_0}{4T_b}} \sigma_o \quad (4.11)$$

ここで、

σ : マクスウェル分布の熱中性子束に対する平均の ¹⁹⁷Au の放射化断面積

σ_o : 中性子速度 $2200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ に対する ¹⁹⁷Au のミクロ断面積(98.80b)

T_0 : 常温(=293.59K)

T_b : 中性子温度(K)

中性子温度は一般に媒質の温度より高いことが知られているが、ここでは簡単にするために中性子温度も常温であるとした。したがって、マクスウェル分布の熱中性子束に対する平均の ¹⁹⁷Au の放射化断面積は 87.56 barn である。

(4.9)、(4.10)、(4.11)式を用いて以下のように熱中性子束を求めることができる。

$$\phi_{th} = \frac{A_{bare}}{N \sigma} \frac{(1 - 1 / R_{cd}) P}{(1 - e^{-\lambda T_{ib}}) K} \quad (4.12)$$

$$R_{cd} = \frac{A_{bare}}{A_{cd}} \frac{P_b (1 - e^{-\lambda T_{ic}})}{P_c (1 - e^{-\lambda T_{ib}})} \quad (4.13)$$

$$N = \frac{YN_0}{M} \quad (4.14)$$

ここで、

ϕ_{th} : 热中性子束密度 $m^{-2} \cdot s^{-1}$

R_{cd} : カドミウム比

N : 金の単位重量当たりの原子個数 (個)

K : 金箔、金線の热中性子自己吸収補正係数

Y : ^{197}Au の存在比

N_0 : アボガドロ数 (個/mol)

M : ^{197}Au の原子量

T_{ib} : 裸の金箔、金線の照射時間 (s)

T_{ic} : カドミウムで覆った金箔、金線の照射時間 (s)

P_b : 裸の金箔、金線の照射時の原子炉補正計数

P_c : カドミウムで覆った金箔、金線の照射時の原子炉補正計数

原子炉の出力補正係数は、出力上昇過程及び停止の過程の積算出力分を補正するものである。この過程の概略図を Fig.22 に示す。原子炉補正係数は全領域（領域 1、2、3）の面積（積算出力）と領域 2 の積算出力との比であり、以下のように表される。

$$P = \frac{\text{領域 } 1 + \text{領域 } 2 + \text{領域 } 3}{\text{領域 } 2} \quad (4.15)$$

それぞれの面積において矩形の部分は出力と保持時間の積で表され、出力上昇時及び下降時の部分は、出力は指数関数的に変化するので、ペリオドが一定として仮定すると、出力変動時の積算出力は次の式で表される。

$$S_a = \int_0^{t_v} P_1 \cdot e^{\lambda t} dt = \frac{P_1}{\lambda} (e^{\lambda t_v} - 1) \quad (4.16)$$

ここで、

S_a : 出力変動時の積算出力

P_1 : 出力変動直前の出力

t_v : 出力変動時間 (出力調整時間または停止時間)

λ : 出力変動率 (ペリオド⁻¹)

$$\lambda = \frac{1}{t_v} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4.17)$$

P_2 : 出力変動後の出力

したがって、

$$S_a = \frac{t_v P_1}{\ln \frac{P_2}{P_1}} \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \quad (4.18)$$

となる。

以上の検討及び測定結果を踏まえて、 $\beta - \gamma$ 同時測定装置による絶対放射能量計算及び熱中性子束計算には、以下の数値を用いるものとする。

分解時間	τ	: 4.1×10^{-7} sec
内部転換割合	α	: 0.044
内部転換電子と β 線の検出効率比	$\epsilon_c / \epsilon_\beta$: 0.918
^{198}Au の半減期	$T_{1/2}$: 2.696 day
^{197}Au の原子量	M	: 196.9665
^{197}Au の吸収断面積	σ_0	: 98.80 b
^{197}Au の実効吸収断面積	σ	: 87.56 b
金線の自己吸収補正係数	K	: 0.925
金箔の自己吸収補正係数	K	: 1.000

4. 2 測定方法

4. 2. 1 簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ)

簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ) の熱中性子束の測定は、金線、金箔を用いた箔放射化法で行った。金線、金箔はそれぞれ、 $\phi 0.25$ mm の金線及び $5 \times 5 \times 0.01$ mm の金箔を使用した。カドミウム比の測定には、裸の金箔とカドミウム・カバーで覆った金箔及び金線にはカドミウムチューブ (外径 2 mm、厚さ 0.5 mm) を巻き付けて、それぞれの放射化量の比から求めた。

(1) 金箔、金線の取付け位置

簡易照射筒の熱中性子束測定とカドミウム比分布を測定するために、金線、金箔を貼りつけて簡易照射筒用ホルダ内に挿入するアクリル製の特性測定用ホルダを使用した。Fig.23 に特性測定用ホルダの概略図を示す。

イ. カドミウム比の測定

カドミウム比測定のために特性測定用ホルダの上、中、下部円盤上 3 箇所に、裸の金箔とカドミウム・カバーで覆った金箔を Fig.24 に示すように 120° 每ずらして配置して照射を行った。

ロ. 垂直方向の熱中性子束分布測定

各照射筒の熱中性子束垂直方向分布測定のため、特性測定用ホルダの中心チューブ部に金線を垂直に挿入し、照射を行った。

ハ. 水平方向の熱中性子束分布測定

水平方向分布測定のために、上、中、下部の円盤上に金線を十字に貼りつけて照射を行った。また、N パイプには、金線とともに上、中、下部円盤上に金箔を 8 枚毎貼りつけて照射を行った。

S パイプ、D パイプ及び N パイプの熱中性子束垂直方向及び水平方向分布測定のための金線、金箔の取付け位置を Fig.25、Fig.26 に示す。

(2) 照射条件

熱中性子束の測定においては、水平方向の分布の測定時には簡易照射筒用ホルダを回転させずに照射を行い、カドミウム比の測定時には、簡易照射筒用ホルダを回転させて照射を行った。平成 10 年度の各簡易照射筒の原子炉出力、照射時間を Table.6 に示す。平成 13 年度の各簡易照射筒の原子炉出力、照射時間を Table.7 に示す。

(3) 放射能測定及び熱中性子束の計算

放射能測定は、オートサンプルチェンジャー付き対向型 $\beta - \gamma$ 同時計数装置を用いて測定を行い、熱中性子束及びカドミウム比の計算は式(4.12)、式(4.13)を用いて行った。なお、平成 10 年度については原子炉出力が 10 kW に、平成 13 年度については、施設共用期間に実施したため、通常の原子炉出力のステップである 100 kW に到達してから特性測定用ホルダの入った簡易照射筒用ホルダを照射位置に挿入、取出しを行ったため、原子炉出力補正係数は 1 とした。

4. 2. 2 水力照射設備

水力照射設備の熱中性子束測定には、 $\phi 0.25$ mm の金線及び $5 \times 5 \times 0.01$ mm の金箔を使用した。カドミウム比の測定には、裸の金箔とカドミウム・カバーで覆った金箔との放射化量の比から求めた。

(1) 金箔、金線の取付け位置

水力照射設備の熱中性子束及びカドミウム比の測定は、水力照射設備用のポリエチレン

製キャプセル内に、裸の金箔とカドミウム・カバーで覆った金箔、及び金線を配置して照射を行った。金線、金箔の配置位置を Fig.27 に示す。

(2) 照射条件

平成 10 年度の水力照射設備の原子炉出力、照射時間を Table.8 に示す。平成 13 年度の水力照射設備の原子炉出力、照射時間を Table.9 に示す。

(3) 放射能測定及び熱中性子束の計算

放射能測定は、オートサンプルチェンジャ付き対向型 $\beta - \gamma$ 同時計数装置を用いて測定を行い、熱中性子束及びカドミウム比の計算は式(4.12)、式(4.13)を用いて行った。なお、平成 10 年度については原子炉出力が 10 kW に、平成 13 年度については原子炉出力が 100 kW に到達してから水力照射用キャップセルを照射位置に挿入、取出しを行ったため、原子炉出力補正係数は 1 とした。

4. 2. 3 気送管照射設備

気送管照射設備の熱中性子束測定のための金線、金箔はそれぞれ、 $\phi 0.25\text{ mm}$ の金線及び $5 \times 5 \times 0.01\text{ mm}$ の金箔を使用した。カドミウム比の測定には、裸の金箔とカドミウム・カバーで覆った金箔との放射化量の比から求めた。

(1) 金箔、金線の取付け位置

気送管照射設備の熱中性子束の測定は、気送管照射設備用のキャップセル内に裸の金箔とカドミウム・カバーで覆った金箔、及び金線を配置して照射を行った。金線、金箔の配置位置を Fig.28 に示す。

(2) 照射条件

平成 10 年度の気送管照射設備の原子炉出力、照射時間を Table.8 に示す。平成 13 年度の気送管照射設備の原子炉出力、照射時間を Table.9 に示す。

(3) 放射能測定及び熱中性子束の計算

放射能測定は、オートサンプルチェンジャ付き対向型 $\beta - \gamma$ 同時計数装置を用いて測定を行い、熱中性子束及びカドミウム比の計算は式(4.12)、式(4.13)を用いて行った。なお、平成 10 年度については原子炉出力が 10 kW に、平成 13 年度については原子炉出力が 100 kW に到達してから気送管照射用キャップセルを照射位置に挿入、取出しを行ったため、原子炉出力補正係数は 1 とした。

4. 2. 4 中性子ビーム設備

中性子ビーム設備の特性測定として、熱中性子モード I、熱中性子モード II、熱外中性子モードの 3 モードに対してビーム孔出口での熱中性子束の測定、カドミウム比の測定、中性子スペクトル測の測定を行った。照射コリメータは $\phi 100\text{ mm}$ 及び $\phi 150\text{ mm}$ を中心に測定を行った。また、各モードにおいてコリメータ $\phi 150\text{ mm}$ のビスマス表面における熱中性子束の測定及び簡易遮へい体出口における熱中性子束の測定を行った。

(1)照射条件

熱中性子モードI、熱中性子モードII、熱外中性子モードのフリービーム状態での特性測定を中心に行った。中性子ビーム設備の特性測定の照射条件をTable.10に示す。あわせて、各モードにおいてコリメータ $\phi 150\text{ mm}$ の時のビスマス表面における熱中性子束及び簡易遮へい体出口における熱中性子束の測定の測定を行った。

熱中性子の測定には、金箔による放射化法を用いた。金箔を裸及びカドミウム・カバーに覆われた金箔を測定個所に固定照射し、各金箔は $\beta - \gamma$ 同時計数装置を使用して絶対測定を行った。熱中性子束は裸の金箔($5\times 5\times 0.01\text{ mm}$)とカドミウム・カバーで覆った金箔からカドミウム比補正を行って求めた。

中性子スペクトル測定は金箔、銅箔をもちいて共鳴積分の放射化法並びにしきい検出器Ni(2.6 MeV以上)を使用することにより測定を行った。金は4.9 eVに主共鳴を持ち、銅は580 eVに主共鳴を有することを利用した測定法で、さらに3枚を重ねることで精度を上げることができる。こうした複数枚重ねる方法はサンドウィッチ法として知られる方法である。使用した箔は、金箔が $5\times 5\times 0.025\text{ mm}$ 、ニッケル箔が $8\times 8\times 0.8\text{ mm}$ 、銅箔が $5\times 5\times 0.1\text{ mm}$ を使用した。金箔放射量は $\beta - \gamma$ 同時計数装置を使用して絶対測定する。銅箔及びNiについては、Ge検出器(相対感度20 %、分解能1.8 keV)を用いて絶対測定を行った。

(2)検出器の取りつけ位置

各モードにおけるビーム孔出口の熱中性子束の測定を行った。また、カドミウム比は中性子束がビーム中央に対し左右に対称性が有るものとして、コリメータの径が $\phi 15\text{ cm}$ の場合左右対照位置に9 cm間隔で、 $\phi 10\text{ cm}$ の場合6 cm間隔に金箔を配置しカドミウム比を算出した。ビーム孔出口の検出器の取りつけ位置をFig.29に示す。

4. 2. 5 プール設備

即発ガンマ線分析装置の測定として、熱中性子束、カドミウム比の測定を行った。即発ガンマ線分析装置は、ガンマ線の遮へいのために、ビーム出口にはビスマス遮へい体を2 cmから16 cmまで2 cmずつ挿入できるようになっている。ビスマスは比重が大きく中性子吸収断面積が小さい特徴を有しているため、ガンマ線の線量を低減させ中性子線を透過させる効果がある。しかし、同時に散乱線を増加させ、試料に届く中性子強度が弱くなるため適度なビスマス厚さが存在するものと考えられる。このビスマス厚さの決定するため、中性子／ガンマ線比の測定を行った。

プール設備簡易照射筒の測定として、炉心タンク直近の位置を0 cm(定位置)での熱中性子束の測定及び定位置から15 cm離れた位置での熱中性子束の測定を行った。

(1)即発ガンマ線分析装置の測定方法

熱中性子の測定には、金箔による放射化法を用いた。金箔を裸及びカドミウム・カバーに覆われた金箔を固定して照射し各金箔を $\beta - \gamma$ 同時計数装置を使用して絶対測定を行った。裸の金箔

とカドミウム・カバーで覆った金箔からカドミウム比補正を行い、熱中性子束を求めた。金箔は $5 \times 5 \times 0.01$ mm のものを使用した。

ビスマスを 2 cm ずつ厚くして、2 cm から 8 cm までの時の中性子束とガンマ線の測定を行い、 n/γ 比の最大になるところを測定した。中性子束の測定には、 $5 \times 5 \times 0.01$ mm の金箔を使用した。ガンマ線の測定には、熱ルミネッセンス線量計（以下、TLD という。）を使用して測定した。

原子炉出力 3.5 MW で 30 分間照射を行い、測定を行った。

(2) 簡易照射筒の測定方法

簡易照射筒の照射位置は炉心タンク近傍の位置を 0 cm（定位置）としているが、15cm 離すことも可能である。それぞれの位置で照射筒の軸方向（下端から 85 cm の位置まで）の熱中性子束の測定を行った。

熱中性子の測定には、金箔による放射化法を用いた。金箔を裸及びカドミウム・カバーに覆われた金箔を固定して照射し各金箔を $\beta - \gamma$ 同時計数装置を使用して絶対測定を行った。裸の金箔とカドミウム・カバーで覆った金箔からカドミウム比補正を行い、熱中性子束を求めた。金箔は $5 \times 5 \times 0.01$ mm のものを使用した。

4. 3 測定結果

4. 3. 1 簡易照射筒（S パイプ、D パイプ、N パイプ）

平成 10 年度の簡易照射筒の S パイプ、D パイプ及び N パイプの熱中性子束及びカドミウム比の測定結果を Table.11 に示す。平成 10 年度の簡易照射筒の S パイプ、D パイプ、N パイプの軸方向の分布を Fig.30 から Fig.32 に示す。

また、平成 13 年度の特性測定の結果を Table.12 に示す。平成 13 年度の簡易照射筒の S パイプ、D パイプ、N パイプの軸方向の分布を Fig.33 から Fig.35 に示す。

4. 3. 2 水力照射設備

平成 10 年度の水力照射設備の熱中性子束及びカドミウム比の測定結果を Table.13 に示す。また、平成 13 年度の特性測定の結果を Table.14 に示す。

4. 3. 3 気送管照射設備

平成 10 年度の気送管照射設備の熱中性子束及びカドミウム比の測定結果を Table.13 に示す。また、平成 13 年度の特性測定の結果を Table.14 に示す。

4. 3. 4 中性子ビーム設備

熱中性子モード I、熱中性子モード II、熱外中性子モードにおける照射孔出口の熱中性子束、熱外中性子束及びガンマ線量率の結果を Table.15 に示す。熱中性子モード I 及び熱外中性子モードにおいて簡易遮へい体出口の熱中性子束及びカドミウム比を測定した。その結果を Table.16

に示す。各モードにおいてコリメータ $\phi 150\text{ mm}$ の時のビスマス表面における熱中性子束の測定結果をTable.17に示す。

中性子スペクトルは、金、銅、ニッケルNiの3種の箔を使用し、測定した結果をFig.36からFig.38に示す。Fig中の線は設計段階で使用したDOT3.5の計算結果である。熱外中性子モードのみ3種の箔での測定が完了しているが、その曲線の外形は計算値とよく一致していることが分かった。高速中性子の測定値が $4.7 \times 10^9 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ に対してDOT3.5の計算値は $4.9 \times 10^9 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であることから、高速領域までDOT3.5のスペクトル曲線はよく一致しているものと考えられる。以上のようにDOT3.5のスペクトル曲線が実験値とよく一致しているので、この曲線を用いて、熱外中性子束(0.53~10 keV)及び高速中性子束(10 keV以上)を算出した。その結果をTable.18に示す。

4. 3. 5 プール設備

(1) 即発ガンマ線分析装置の測定結果

測定結果は、ビーム出口中心において熱中性子束が $9.6 \times 10^{10} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、カドミ比85.3であることが分った。また、ガンマ線の遮へいを行うためにビスマスをビーム出口に挿入して、熱中性子束とガンマ線との比が最大になるところを測定した結果、ビスマスを4 cm挿入した時に最大となることが分かった。熱中性子束とガンマ線との比をFig.39に示す。

(2) 簡易照射筒の測定結果

プール設備の簡易照射筒の特性測定結果をFig.40及びFig.41に示す。熱中性子束の測定結果は、炉心タンク近傍の定位置で、最大約 $2.4 \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ が得られた。定位置から15 cm離れた位置では、最小で約 $1 \times 10^{12} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の熱中性子束が得られ、照射位置を変更することにより、放射化分析やフィッショングレンバーの校正といった様々な目的に利用することができるが分かった。

5 高速中性子束の測定

高速中性子束の測定は Ni 箔、Ni 線の放射化法を用いて行った。 $^{58}\text{Ni}(\text{n},\text{p})^{58}\text{Co}$ 反応の有感エネルギー範囲は約 1~5 MeV にあり、研究炉の高速中性子測定ではよく用いられているものである。 $^{58}\text{Ni}(\text{n},\text{p})^{58}\text{Co}$ 反応では、 ^{58m}Co (T1/2=9.2hr)が生成され、測定に影響を与える。この影響を避けるため 2 日ほど冷却期間をおいた。冷却された Ni 箔は効率校正されている Ge 検出器により放射能を求め、高速中性子束を求めた。

5. 1 高速中性子束の計算

高速中性子束 Φ_f は Ni(n,p) 反応を用いて 1 MeV 以上の平均中性子束として計算した。評価する高速中性子は 1 MeV 以上とし、Ni(n,p) 反応の断面積 σ_a は Cranberg の核分裂中性子スペクトルの半実験式⁶⁾ を用いて求めた。以下、高速中性子束の計算式⁷⁾ を示す。

$$\Phi_f = AS \quad (5.1)$$

$$S = \frac{(1-k)\sigma_a N_0}{A_m} [1 - \exp(-A_m t_i)] + \frac{\sigma_a N_0}{A} \cdot \frac{(\lambda_m + k\sigma_{th} \Phi_{th})}{A_m} [1 - \exp(-At_i)] \\ - \frac{\lambda_m (1-k)\sigma_a \Phi_f N_0}{A_m} \frac{\exp(-At_i) - \exp(-A_m t_i)}{\lambda_m - \lambda + \Phi_{th} (\sigma_{thm} - \sigma_{th})} \frac{\lambda_m}{(\lambda_m - \lambda)} \\ \times \{1 - \exp(-(\lambda_m - \lambda) t_0)\} \lambda \exp(-\lambda t_0) \quad (5.2)$$

$$A_m = \lambda_m + \sigma_{thm} \Phi_{th} \quad (5.3)$$

$$A = \lambda + \sigma_{th} \Phi_{th} \quad (5.4)$$

ここで、

Φ_f : 高速中性子束

Φ_{th} : 熱中性子束

A : 測定時点での ^{58}Co の放射能量

N_0 : 照射前の ^{58}Ni 核の原子数

K : ^{58}Co 生成分岐率

λ_m : ^{58m}Co 核の崩壊定数

λ : ^{58}Co 核の崩壊定数

σ_a : Ni(n,p) 反応の実効断面積

σ_{thm} : ^{58m}Co の熱中性子に対する放射化断面積

σ_{th} : ^{58}Co の熱中性子に対する放射化断面積

t_i : 照射時間

t_0 : 冷却期間

5. 2 測定方法

5. 2. 1 簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ)

簡易照射筒 (S パイプ、D パイプ、N パイプ) の高速中性子束の測定は、Ni 箔及び Ni 線の放射化法を用いて行った。使用した Ni 箔は、 $5 \times 5 \times 0.25$ mm、純度 99.50 %、Ni 線は $\phi 0.5$ mm、純度 99.98 % のものである。垂直方向分布測定のため特性測定用ホルダの中心円筒内に Ni 線を垂直に挿入し、照射を行った。また、水平方向分布測定のため、特性測定用ホルダの上、中、下部円盤上に Ni 箔を 8 枚毎に貼りつけて照射を行った。S パイプ、D パイプ及び N パイプの Ni 線、Ni 箔の取付け位置を Fig.42、Fig.43 に示す。各簡易照射筒の原子炉出力、照射時間を Table.18 に示す。Ni 線は照射後、挿入部分を約 2 cm に切断し、NaI 検出器を使用して測定した。

5. 2. 2 水力照射設備

水力照射設備の高速中性子束測定は、水力照射設備用ポリエチレン製キャップセル (L型) 内の上、中、下部の 3 箇所に Ni 箔を配置して照射を行った。Ni 箔の配置位置を Fig.44 に示す。使用した Ni 箔は、 $5 \times 5 \times 0.25$ mm、純度 99.50 % のものである。水力照射設備の原子炉出力、照射時間を Table.19 に示す。

5. 2. 3 気送管照射設備

気送管照射設備の高速中性子束測定は、気送管照射設備用ポリエチレン製キャップセル内の 2 箇所に Ni 箔を配置して照射を行った。使用した Ni 箔は、 $5 \times 5 \times 0.25$ mm、純度 99.50 % のものである。Ni 箔の配置位置を Fig.45 に示す。気送管照射設備の原子炉出力、照射時間を Table.19 に示す。

5. 2. 4 中性子ビーム設備

中性子ビーム設備のビーム軸におけるビスマス表面及び照射孔出口表面の高速中性子束を各照射基本モードにおいて測定した。使用した Ni 箔は、 $8 \times 8 \times 0.8$ mm、純度 99.50 % のものである。照射は原子炉停止中に Ni 箔を取り付け、原子炉出力が 3500 kW の定格出力になってから、熱中性子モード 6 時間、熱外中性子モード 2 時間の運転、照射を行った。Ni 箔は停止後取りだし、数日後、Ge 検出器にて測定を行った。

5. 3 測定結果

各照射設備の高速中性子束の測定結果を Table.20 に示す。中性子ビーム設備の高速中性子束の測定結果を Table.21 に示す。S パイプ、D パイプ、N パイプの高速中性子束の軸方向の分布を Fig.46 から Fig.48 に示す。

6 ガンマ線測定

中性子ビーム設備の各モードにおける照射孔出口、照射室内的ガンマ線量率及びプール設備の即発ガンマ線分析装置においてはガンマ線量率が重要となるのでガンマ線量率測定を行った。

ガンマ線量率の測定には、TLDを用いた。使用したTLDは、National社製の170L (BeO系)を使用した。170Lは、ガンマ線用のTLDで、測定範囲は、 $200\text{ }\mu\text{Sv}$ から 200 Sv （直線範囲： $200\text{ }\mu\text{Sv}$ から 5 Sv ）である。BeO系のTLDは、照射後、最初の1時間で比較的速やかなフェーディングを示すが、その後は安定する。照射1時間後に測定したときに正しい値が出るように校正されている。使用法は、照射前に素子の種類に応じたアニール（ $400\sim450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、10秒～10分）を行い、必要に応じて、残線量が消去されていることを測定装置で確認する。照射後、素子の種類に応じた放置時間（室温、30分～2日）をとり、その後に測定を行う。

6. 1 TLDの原理

放射線照射された結晶性物質を加熱したときに生ずるルミネセンス（蛍光）を利用した線量計である。放射線照射によって結晶内で分離した電子や正孔が、熱刺激によって再結合するときに発光する原理を利用したものである。読み取り装置は、TLD素子を $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 付近まで加熱し、熱ルミネセンスの発光量を測定して放射線の照射量（積算線量）を求める。加熱により照射の影響が除かれるので、再使用が可能である。CaSO₄、LiF、MgSiO₄、CaF₂、BeO等が多く用いられ、 $10\text{ }\mu\text{Sv}$ から 10 Sv まで測定できる。個人線量測定器としての需要がもっとも多いが、環境の積算線量測定にも利用される。TLDの原理をFig.49に示す。⁸⁾

6. 2 ガンマ線の測定方法

今回使用した170Lを含むTLD素子は、中性子に感度があることが報告されており、中性子・ γ 線混在場においては、 γ 線のみを測定する場合には中性子を除去する必要がある。このため⁶Liを含むエポキシ樹脂のフィルタを作成した。このLiフィルタは濃縮LiFの粉末をエポキシ樹脂系ボンドで外径約8 mm、長さ約20 mmに成形固化させたものである。LiF粉末とエポキシ樹脂との重量比は1:2で混合した。

6. 2. 1 中性子ビーム設備

中性子ビーム設備の特性測定として、熱中性子モードI、熱中性子モードII、熱外中性子モードの3モードに対してビーム孔出口でのガンマ線量率の測定を行った。照射コリメータは $\phi 100\text{ mm}$ 及び $\phi 150\text{ mm}$ について行った。

6. 2. 2 プール設備

プール設備の即発ガンマ線分析装置の測定として、ガンマ線量の測定を行った。ビーム出口には、ガンマ線の遮へいのために、ビスマス遮へい体を2 cmずつ厚くして2 cmから

16 cm まで挿入できるようになっている。ビスマス遮へい体の効果についても測定を行った。

6. 3 測定結果

6. 3. 1 中性子ビーム設備

各モードにおけるビーム孔出口のガンマ線線量率 Table.22 に示す。簡易遮へい体出口のガンマ線線量率 Table.23 に示す。

6. 3. 2 プール設備

即発ガンマ線分析装置のビーム出口及びのビスマス遮へい体を 2 cm ずつ厚くした時の 2 cm から 16 cm まで場合のガンマ線線量率 Table.24 に示す。

7 Nパイプ均一照射特性

JRR-4 では、燃料の濃縮度低減化に伴う改造工事の際に、均一照射装置の照射孔を以前の 4 インチ (L パイプ) から 5 インチ (N パイプ : 最大 5.5 インチ) のシリコンを照射できるように改造した。JRR-4 の均一照射装置は、最大直径 5 インチ、長さ 450 mm のシリコンを照射することができる。

N パイプの均一照射特性として、低出力運転時に試験用シリコン単結晶を用いて金箔による均一度測定を行った。

7. 1 測定方法

試験用シリコン単結晶を用いて、10 kW、1 時間の照射にて実施した。測定は、シリコンに金箔を挟み込んで均一度測定を行った。N パイプの照射筒の移動範囲は、700 mm である。ホルダに装荷して照射できるシリコンの最大長さが 450 mm であるので、どの位置で照射を行った時に、垂直分布が、一番良い均一度が得られるかを明らかにするために、試験用シリコン単結晶を用いて測定を行った。最初に照射孔下端から 450 mm の範囲の均一度について、測定を行った。直径方向の均一度についてはホルダを回転させて測定した。次に照射孔下端から 250 mm～約 700 mm の範囲の均一度について、ホルダを回転させて測定を行った。ホルダを回転させることによる効果を確認するために照射孔下端から 450 mm の範囲については、無回転による照射についても行った。

測定には、 $3 \times 3 \times 0.01$ mm の金箔を使用した。測定は、金箔の放射化量を測定することにより行い、 $\beta - \gamma$ 同時計数装置により放射化量を求め、計算により照射量（熱中性子束分布）を得るものとした。測定点は以下の基本パターンに示すものとした。垂直分布の測定は、試験用シリコンの中心に穴をあけ、金箔を挿入し測定した。垂直分布の測定点は 10 点とした。面分布の測定点は、上段、中断、下段の 3 面について、それぞれの面に金箔を挟み込む方法で 29 点とした。なお、無回転による照射は、中段の 29 点のみ測定を行った。均一照射測定基本パターンを Fig.50 に示す。

7. 2 測定条件

(1) 照射位置 0 mm～450 mm の位置に試験用シリコン単結晶を挿入して、回転照射により、直径方向分布及び垂直方向分布の均一度を測定した。

運転出力 : 10 kW

運転時間 : 1 時間

(2) 照射位置 250 mm～700 mm の位置に試験用シリコン単結晶を挿入して、回転照射により、直径方向分布及び垂直方向分布の均一度を測定した。

運転出力 : 10 kW

運転時間 : 1 時間

(3)照射位置 0 mm～450 mm の位置に試験用シリコン単結晶を挿入して、無回転照射で照射し、回転による効果（直径方向分布）を確認した。

運転出力：10 kW

運転時間：1 時間

7. 3 測定結果

(1)照射位置 0 mm～450 mm、回転照射の直径方向の均一度分布を Fig.51 から Fig.53 及び垂直方向の熱中性子分布を Fig.54 に示す。直径方向均一度は約 3 %以内で照射できることを確認した。

(2)照射位置 250 mm～700 mm、回転照射の直径方向中段の均一度分布を Fig.55 から Fig.57 及び垂直方向の熱中性子分布を Fig.58 に示す。直径方向均一度は約 3 %以内で照射できることを確認した。

(3)照射位置 0 mm～450 mm 無回転照射の直径方向分布（中段）を Fig.59 に示す。

8 中性子ビーム設備のファントム実験

中性子ビーム設備は主に医療照射に用いられる。医療照射において中性子線のターゲットとして人体の患部がビーム孔出口近傍に設置される。直接ビームがあたる患部以外にも、透過、散乱された中性子線及びガンマ線によって人体に外部被ばくを及ぼす。全身ファントム（人体模型）及び頭部ファントムを用いて測定を行った。測定は、全身ファントム（人体模型）に被ばく量を測定するための中性子束用金箔及びガンマ線用 TLD 素子等を装着し、外部被ばくを推定することにした。また、頭部ファントムは中性子束の分布を知るために、金箔、金線等をセットした。

代表的なモードとして設定した熱中性子モード I、熱中性子モード II、熱外中性子モードの 3 種類のモードに対し、ファントム実験を実施した。各モードの違いは以下に示すように重水厚さとカドミフィルタの有無である。

	重水厚さ	カドミフィルタ
熱中性子モード I	12 cm	閉
熱中性子モード II	33 cm	閉
熱外中性子モード	8 cm	開

このほかのパラメータとして照射コリメータの口径がある。JRR-4 中性子ビーム設備には $\phi 100\text{ mm}$ 、 $\phi 120\text{ mm}$ 、 $\phi 150\text{ mm}$ 、 $\phi 200\text{ mm}$ 等の口径の照射コリメータが用意されているが、主に直径 $\phi 150\text{ mm}$ の照射コリメータを用いてファントム実験を行った。

8. 1 測定方法

8. 1. 1 全身ファントム

金箔（直径 20 mm、厚さ 0.02 mm）及び LiF でカバーした TLD (170L) により、熱中性子束及びガンマ線量の測定を実施した。

全身ファントムは照射孔に対し約 35 度の角度を持って設置した。Fig.60 に全身ファントム配置図を示す。

8. 1. 2 頭部ファントム

頭部ファントムは照射孔に対し直角に配置し、内部にアクリル (PMMA) 製の板を配置して金線、金箔を張り付けることにより、熱中性子束の測定を実施した。Fig.61 に頭部水ファントム配置図を示す。 $\phi 0.25\text{ mm}$ の金線及び $5 \times 5 \times 0.01\text{ mm}$ の金箔を使用した。

8. 2 測定結果

8. 2. 1 全身ファントム

全身ファントムの結果を Table.25 に示す。

8. 2. 2 頭部ファントム

頭部ファントムの熱中性子モード I の測定結果を Fig.62 に、熱中性子モード II の測定結果を Fig.63 に熱外中性子モードの測定結果を Fig.64 に示す。

9 まとめ

簡易照射筒の S パイプ及び D パイプ、水力照射設備、気送管照射設備について、平成 10 年度に実施した熱中性子束及びカドミウム比の測定結果は改造前とほぼ同等の性能であることが確認された。また、平成 13 年度の熱中性子束及びカドミウム比の測定結果においても同等の性能であることが確認された。

L パイプから大口径の照射筒に改造された N パイプについては、熱中性子束で、改造時で $1.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、平成 13 年の測定では、 $1.3 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の中性子束が得られた。また、N パイプでは、主にシリコン照射を行う。シリコン照射を実施する上で、その均一度が重要である。N パイプの均一照射特性については、径方向及び軸方向の均一度の測定を金箔を用いて測定を行った。照射中回転させたケースと無回転で照射したケースの比較し回転させることによって径方向の均一度が、最大で約 20 % 程度よくなることを確認した。照射均一度はユーザーの希望をほぼ満足するものが得られた。

反応度効果においては、それぞれの設備で測定されたカドミウムのデータを基に、照射を行うときの照射試料の反応度を求めるための補正係数として使用することとする。また、簡易照射筒、気送管照射設備以外の設備で原子炉運転中に可動するものとして、即発ガンマ線分析装置の黒鉛コリメータ部を含む中性子導管を炉心タンクに接近させる時、中性子ビーム設備の重水タンクの重水の注排水、中性子ビーム設備のカドミシヤッタの開、閉の操作があるが、これら操作して測定した結果、いずれも反応度に影響が無いことが確認できた。さらに、運転中の操作は行わないが、反応度が大きく初期臨界点チェックでは重要な気送管照射設備のカドミウムフィルタの反応度について測定を行ったところ、その反応度は 0.155 % $\Delta k/k$ であった。

新設された中性子ビーム設備では、照射孔出口では、熱中性子モード I の熱中性子束が $2.0 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、熱中性子モード II の熱中性子束が $6.5 \times 10^{12} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、熱外中性子モードの熱外中性子束が $2.2 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、ほぼ当初の設計目標を満足する値が得られ、医療照射、医療照射の基礎実験等を行うのに十分な性能が得られた。各モードの中性子スペクトル計算値と実測値を比較すると、熱外及び高速領域の計算スペクトルと実験値とが比較的よく一致することから、計算されたスペクトルを用いて速中性子線量を評価した。なお、ガンマ線量率については、計算値に比較して高めの値になっている。

中性子ビーム設備の全身ファントム実験の測定では身体部位に対する検出器（金箔、TLD）の取付位置及びファントム配置の差が測定結果に大きく反映される。また、ビーム強度が高いものが全身被ばく量も多くなる傾向にあることが測定されている。なお、全身の熱中性子束の測定結果では、首部を除く各部位においてカドミウム比は、ほぼフリービームにおける測定値と同等であった。これは、コリメータから漏洩した中性子が全身被ばくに寄与していることを示している。

中性子ビーム設備のファントム実験の頭部水ファントム実験においては、ビームの平行

度が高いこと及び熱外中性子の効果によりファントム内における熱中性子のビルドアップが観察されている。熱中性子モードI、熱外中性子モードとなるにつれ、ビルドアップはさらに大きくなると共にピークはなめらかになって、深部到達度が深まる。最大熱中性子束は熱中性子モードIで $5.9 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、熱外中性子モードで $4.0 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。

プール設備の即発ガンマ線分析装置の特性については、ガンマ線量率は予定より高いものの、熱中性子の値は目標を1桁上回る約 $1.0 \times 10^{11} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の中性子束が得られた。即発ガンマ線分析装置は、主に医療照射時のホウ素濃度測定に使用されている。プール設備の簡易照射筒は、フィッショングレンバーの校正実験場として整備したが、約 $1.0 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ から最大約 $2.4 \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の中性子束が得られた。今後フィッショングレンバーの校正ばかりでなく、照射場として放射化分析や様々な用途に利用できる。

謝辞

本特性測定を実施するに当たって、JRR-4管理課の方々には、特性測定に関する様々な運転パターンでの原子炉の運転及び反応度の測定ためのデータの提供を頂きました。研究炉利用課のJRR-4利用係の方々には特性測定の準備をはじめ、諸々の実験の補助をして頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 研究炉部：“平成 9 年度研究炉部年報（運転・利用と研究・技術開発）”、JAERI-Review 98-027(1999).
- 2) 研究炉部：“研究炉利用ハンドブック”、P72-73(1999).
- 3) K. Yokoo, T. Yamada, F. Sakurai, T. Nakajima, N. Ohhashi and H. Izumo, “A New Medical Irradiation Facility at JRR-4”, JAERI-Conf 99-006, P228-231(1999).
- 4) 山本和喜、熊田博明、鳥居義也、岸敏明、堀口洋二：“ファントム内の 2 次元熱中性子束の分布測定と線量分布特性評価”、JAERI-Tech 2001-015(2001).
- 5) 横尾健司、鳥居義也、鯉渕薰、市村茂樹、大浦博文、前島猛、茂垣隆久、関根勝則、高橋秀武：“医療照射における熱中性子束測定技術”、JAERI-M 94-058(1994).
- 6) Cranberg, L., FRYE, G., Nereson, N., Rosen, L., “Fission neutron spectrum of ^{235}U ”, Phys. Rev. 103, P662 (1956).
- 7) Martin W.H. and Clare D.M., “Determination of Fast-Neutron Dose by Nickel Activation”, Nucl. Sci. and Eng. 18, P468 (1964).
- 8) (財) 高度情報科学技術研究機構：原子力百科事典 ATOMICA, (online)
<http://www.atomin.gr.jp/atomica/>

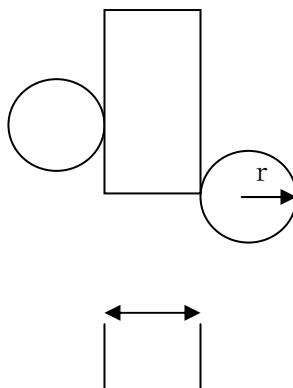
Table.1 中性子ビーム設備の代表的なモード

	重水厚さ	カドミウムシャッタ
熱中性子モードI	12cm	閉
熱中性子モードII	33cm	閉
熱外中性子モード	8cm	開

Table.2 カドミウム試料の寸法

長さ単位 : cm

設備名	サンプル No.	半径 (r)		高さ (h)		全面積 (cm ²)		重量 (g)
		設計	実測	設計	実測	設計	実測	実測
気送管照射設備	P-20	1.00	1.00	2.20	2.37	20	21.2	10.9
	P-30	1.00	1.00	3.80	4.00	30	31.4	16.9
	P-40	1.00	0.90	5.40	6.24	40	40.4	22.1
水力照射設備	T-10*	1.00	—	5.00	—	10	—	2.7
	T-20	1.00	1.00	2.20	2.40	20	21.4	11.2
	T-40	1.00	1.00	5.40	5.50	40	40.8	21.8
簡易照射筒 S,Dパイプ	S,D-20	1.00	0.96	2.20	2.36	20	20.1	10.7
	S,D-40	1.00	1.00	5.40	5.60	40	41.5	22.1

* 10cm² の円筒加工が困難なため板状とした。

円柱展開図

Table. 3 微調整棒 C5 位置と余剰反応度の測定結果

設備名	サンプル No	状態	制御棒位置	余剰反応度	反応度
			(mm)	(%Δk/k)	(%Δk/k)
簡易照射筒	Sパイプ	S,D-0	挿入前	257.0	0.2007
		S,D-0	挿入後	254.5	0.2039
	S,D-20	挿入前	257.0	0.2007	-0.0069
		挿入後	262.4	0.1937	
	S,D-40	挿入前	257.3	0.2003	-0.0104
		挿入後	265.4	0.1899	
	Dパイプ	S,D-0	挿入前	257.4	0.2002
		S,D-0	挿入後	256.2	0.2017
	S,D-20	挿入前	257.5	0.2000	-0.0091
		挿入後	264.6	0.1909	
	Nパイプ	S,D-40	挿入前	257.6	0.1999
		S,D-40	挿入後	273.4	0.1800
	N-0	挿入前	257.8	0.1996	0.0008
		挿入後	257.2	0.2004	
水力照射設備	A系統	N-si	挿入前	257.8	0.1996
		N-si	挿入後	254.0	0.2046
	T-0	挿入前	257.9	0.1995	-0.0008
		挿入後	258.5	0.1987	
	T-10	挿入前	258.2	0.1991	-0.0232
		挿入後	276.7	0.1760	
	T-20	挿入前	257.9	0.1995	-0.0311
		挿入後	283.0	0.1684	
	B系統	T-0	挿入前	257.9	0.1995
		T-0	挿入後	257.7	0.1998
	T-20	挿入前	258.0	0.1994	-0.0069
		T-20	挿入後	263.4	0.1925
	T-40	挿入前	258.0	0.1994	-0.0138
		T-40	挿入後	268.9	0.1855
即発γ線分析装置	即発γ	接地前	258.0	0.1994	0.0001
		接地	257.9	0.1995	
気送管照射設備	カドミウム フィルタ	0	上限	258.2	0.1991
		800	下限	272.5	0.1811
	P-0	P-0	挿入前	227.1	0.2410
		P-0	挿入後	227.6	0.2403
		P-10	挿入前	227.6	0.2403
		P-10	挿入後	237.0	0.2274
		P-20	挿入前	227.5	0.2405
	P-20	P-20	挿入後	238.3	0.2256
		P-30	挿入前	227.5	0.2405
	P-30	P-30	挿入後	242.1	0.2204

Table.4 気送管照射設備カドミウムフィルタの反応度測定結果

フィルタ 位置	各制御棒の余剰反応度(% $\Delta k/k$)					合計 (% $\Delta k/k$)
	C1	C2	C3	C4	C5	
上限	0.033	0.034	0.034	0.035	0.019	0.155
下限	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table.5 反応度測定結果のまとめ

照射筒		サンプ ルNo.	カドミ ウム量 (cm ²)	カドミウ ム重量 (g)	反応度 (% $\Delta k/k$)	備 考
簡易照射筒	Sパイプ	S,D-0	0.00	0.00	0.003	
		S,D-20	20.09	10.73	0.007	
		S,D-40	41.47	22.05	0.010	
	Dパイプ	S,D-0	0.00	0.00	0.002	
		S,D-20	20.09	10.73	0.009	
		S,D-40	41.47	22.05	0.020	
	Nパイプ	0	0.00	0.00	0.001	
		5	—	—	0.005	シリコン(5in×45cm)
水力照射設備	A系統	T-0	0.00	0.00	0.001	
		T-10	10.00	2.70	0.023	平板
		T-20	21.36	11.17	0.031	
	B系統	T-0	0.00	0.00	0.000	
		T-20	21.36	11.17	0.007	
		T-40	40.84	21.76	0.014	
気送管照射設備	カドミウム フィルタ	0	0.00	0.00	0.155	挿入
		800	—	—	0.000	引き抜き
	Pn	P-0	0.00	0.00	0.001	
		P-20	21.17	10.87	0.013	
		P-30	31.42	16.93	0.015	
		P-40	40.38	22.07	0.020	

Table.6 平成 10 年度の簡易照射筒の特性測定照射条件

照射筒	測定内容	原子炉出力 (kW)	照射時間 (min)	照射条件
S パイプ	熱中性子束分布	10	30	照射筒回転無し
	カドミ比測定	10	30	照射筒回転有り
D パイプ	熱中性子束分布	10	30	照射筒回転無し
	カドミ比測定	10	30	照射筒回転有り
N パイプ	熱中性子束分布	10	30	照射筒回転無し
	カドミ比測定	10	30	照射筒回転有り

Table.7 平成 13 年度簡易照射筒の特性測定照射条件

照射筒	測定内容	原子炉出力 (kW)	照射時間 (min)	照射条件
S パイプ	熱中性子束分布	100	15	照射筒回転有り
	カドミ比測定	100	20	照射筒回転有り
D パイプ	熱中性子束分布	100	15	照射筒回転有り
	カドミ比測定	100	20	照射筒回転有り
N パイプ	熱中性子束分布	100	15	照射筒回転無し
	カドミ比測定	100	20	照射筒回転無し

Table.8 平成 10 年度の水力照射設備及び気送管照射設備の特性測定照射条件

照射設備		原子炉出力 (kW)	照射時間 (min)	照射条件
水力照射設備	A 系統	10	10	ポリエチレン製水力照射用キャップセル (L型) にて照射
	B 系統	10	10	
気送管照射設備		10	10	気送管照射用キャップセルにて照射

Table.9 平成 13 年度水力照射設備及び気送管照射設備の特性測定照射条件

照射設備		原子炉出力 (kW)	照射時間 (min)	照射条件
水力照射設備	A 系統	100	10	ポリエチレン製水力照射用キャップセル (L型) にて照射
	B 系統	100	10	
気送管照射設備		100	10	気送管照射用キャップセルにて照射

Table.10 中性子ビーム設備特性測定項目一覧

	照射モード	原子炉出力	照射時間	コリメータ 径	重水厚さ	黒鉛ライ ニシグ	測定項目
1	熱中性子モードI	3.5 MW	120分	φ 15 cm	12 cm	有	中性子束、カドミウム比、 ガンマ線
2	熱中性子モードII	3.5 MW	90分	φ 15 cm	33 cm	有	中性子束、カドミウム比、 ガンマ線
3	熱中性子モードII	3.5 MW	120分	φ 10 cm	33 cm	有	中性子束、カドミウム比、 ガンマ線
4	熱中性子モードI	3.5 MW	120分	φ 10 cm	12 cm	有	中性子束、カドミウム比、 ガンマ線
5	熱外中性子モード	3.5 MW	120分	φ 10 cm	8 cm	無	中性子束、カドミウム比、 ガンマ線
6	熱外中性子モード	3.5 MW	120分	φ 15 cm	8 cm	無	中性子束、カドミウム比、 ガンマ線
7	熱外中性子モード	3.5 MW	60分	φ 15 cm	8 cm	有	中性子束、カドミウム比、 ガンマ線
8	熱外中性子モード	3.5 MW	120分	□40 cm	8 cm	無	簡易遮へい体出口での熱、 中性子束、ガンマ線線量
9	熱中性子モードI	3.5 MW	120分	□40 cm	12 cm	有	簡易遮へい体出口での熱、 中性子束、ガンマ線線量

Table.11 平成 10 年度の簡易照射筒の特性測定結果

照射筒	熱中性子束 (m ⁻² · s ⁻¹)	カドミウム比
S パイプ	4.0×10^{17}	4.5
D パイプ	4.3×10^{17}	4.8
N パイプ	1.5×10^{17}	8.1

Table.12 平成 13 年度の簡易照射筒の特性測定結果

照射筒	熱中性子束 (m ⁻² · s ⁻¹)	カドミウム比
S パイプ	4.3×10^{17}	4.0
D パイプ	4.4×10^{17}	4.3
N パイプ	1.3×10^{17}	8.1

Table.13 平成 10 年度の水力照射設備及び気送管照射設備の特性測定結果

照射設備		熱中性子束 (m ⁻² · s ⁻¹)	カドミウム比
水力照射設備	A 系統	5.3×10^{17}	3.8
	B 系統	4.3×10^{17}	4.6
気送管照射設備		3.2×10^{17}	3.6

Table.14 平成 13 年度の水力照射設備及び気送管照射設備の特性測定結果

照射設備		熱中性子束 ($m^{-2} \cdot s^{-1}$)	カドミウム比
水力照射設備	A 系統	5.2×10^{17}	3.9
	B 系統	4.4×10^{17}	5.0
気送管照射設備		3.5×10^{17}	4.1

Table.15 中性子ビーム設備のビーム孔中心の熱中性子束の特性測定結果

	熱中性子束 ($m^{-2} \cdot s^{-1}$) ($<0.53\text{eV}$)	熱外中性子束 ($m^{-2} \cdot s^{-1}$) ($0.53\text{-}10\text{keV}$)	カドミウム比			
コリメータ	10 cm	15 cm	—	15 cm	10 cm	15 cm
熱中性子モード I	1.7×10^{13}	2.0×10^{13}	—	9.0×10^{12}	2.3	2.5
熱中性子モード II	5.3×10^{12}	6.5×10^{12}	—	3.2×10^{11}	10.6	13.5
熱外中性子モード (黒鉛ライニング有)	—	3.6×10^{12}	—	2.2×10^{13}	—	1.15
熱外中性子モード (黒鉛ライニング無)	1.1×10^{12}	2.1×10^{12}	—	—	1.08	1.1

Table.16 簡易遮へい体出口ビーム中心の熱中性子束の特性測定結果

	熱中性子束 ($m^{-2} \cdot s^{-1}$)	カドミウム比
熱中性子モード I	1.4×10^{12}	2.3
熱外中性子モード	1.3×10^{11}	1.07

Table.17 ビスマス表面の熱中性子束の特性測定結果

照射モード	熱中性子束 ($m^{-2} \cdot s^{-1}$)					
	中央	中央上 5 cm	中央下 5 cm	中央右 5 cm	中央左 5 cm	
熱中性子モード I	9.1×10^{13}	9.0×10^{13}	—	—	—	
熱中性子モード II	2.9×10^{13}	2.8×10^{13}	—	—	—	
熱外中性子モード (黒鉛ライニング無)	7.4×10^{12}	6.3×10^{12}	6.0×10^{12}	6.2×10^{12}	6.3×10^{12}	

Table.18 DOT3.5のスペクトル曲線を利用した熱外中性子束及び高速中性子束

	熱外中性子束 0.53 eV ~ 10 keV (m ⁻² · s ⁻¹)	高速中性子束 > 10 keV (m ⁻² · s ⁻¹)	
コリメータ	10 cm	15 cm	10 cm
熱中性子モード I	8.9×10^{12}	9.0×10^{12}	2.6×10^{11}
熱中性子モード II	3.1×10^{11}	3.2×10^{11}	6.2×10^9
熱外中性子モード (黒鉛ライニング有)	—	2.2×10^{13}	—
熱外中性子モード (黒鉛ライニング無)	1.6×10^{13}	1.8×10^{13}	1.0×10^{13}
			9.5×10^{13}
			1.1×10^{13}

Table.19 各照射設備の特性測定照射条件

照射筒		原子炉出力 (kW)	照射時間 (min)	照射条件
簡易照射筒	S パイプ	200	20	特性測定用ホルダに Ni 箔、Ni 線を貼りつけ、回転無しにて照射
	D パイプ	200	20	
	N パイプ	200	20	
水力照射設備	A 系統	200	20	ポリエチレン製水力照射用キャップセル (L 型) にて照射
	B 系統	200	20	
気送管		200	20	気送管照射用キャップセルにて照射
中性子ビーム設備		3500	6 時間	照射孔表面中心にて照射

Table.20 各照射設備の高速中性子束の特性測定結果

		中央からの位置 (mm)	高速中性子束 ($m^{-2} \cdot s^{-1}$)
S パイプ	+150	4.0×10^{16}	
	0	5.9×10^{16}	
	-150	5.2×10^{16}	
D パイプ	+150	3.4×10^{16}	
	0	5.2×10^{16}	
	-150	4.9×10^{16}	
N パイプ	+225	4.7×10^{15}	
	0	9.6×10^{15}	
	-225	8.4×10^{15}	
水力照射設備	A 系統	+50	1.3×10^{17}
		0	1.1×10^{17}
		-50	1.2×10^{17}
	B 系統	+50	5.6×10^{16}
		0	4.6×10^{16}
		-50	5.3×10^{16}
気送管照射設備	+20	5.9×10^{16}	
	-20	7.8×10^{16}	

Table.21 中性子ビーム設備の高速中性子束の特性測定結果

中性子ビーム設備	モード	高速中性子束 ($m^{-2} \cdot s^{-1}$)
	熱中性子モード I	3.8×10^9
	熱中性子モード II	5.3×10^8
	熱外中性子モード	4.0×10^9

Table.22 中性子ビーム設備ビーム孔中心のガンマ線線量率の測定結果

	ガンマ線線量率 (Sv/h)	
コリメータ	10 cm	15 cm
熱中性子モード I	3.27	3.41
熱中性子モード II	—	0.7
熱外中性子モード (黒鉛ライニング有)	—	3.36
熱外中性子モード	1.86	2.39

Table.23 中性子ビーム設備簡易遮へい体出口ビーム中心のガンマ線線量率

	ガ ノ マ 線 線 量 率 (Sv/h)
熱 中 性 子 モ ー ド I	0.152
熱 外 中 性 子 モ ー ド	0.439

Table.24 即発ガンマ線分析装置のガンマ線線量率の測定結果

	ガ ノ マ 線 線 量 率 (mSv/h)	
ビーム出口	8.36	
ビ ス マ ス 厚 さ	2cm	3.42
	4cm	1.69
	6cm	1.56
	8cm	1.34

Table.25 全身ファントムの測定結果

	項 目	単 位	熱外中性子 モード	熱中性子モード I	熱中性子モード II
全 身 フ ア ン ト ム 実 験	最大熱中性子束	$m^{-2} \cdot s^{-1}$	4.0×10^{13}	5.9×10^{13}	1.5×10^{13}
	頭部表面ガンマ線量	Sv/h	12.8	14.8	4.2
	首	Sv/h	0.52	0.46	0.12
	胸	Sv/h	0.09	0.19	0.06
	腹	Sv/h	0.033	0.061	0.0087
	左肩	Sv/h	0.25	0.37	0.05
	右肩	Sv/h	0.16	0.17	0.065
	左膝	Sv/h	0.0077	0.016	0.0034
	右膝	Sv/h	0.0093	0.0072	0.0032
	首	$m^{-2} \cdot s^{-1}$	5.4×10^{10}	1.1×10^{11}	5.6×10^9
	胸	$m^{-2} \cdot s^{-1}$	1.6×10^{10}	2.7×10^{10}	1.8×10^9
	腹	$m^{-2} \cdot s^{-1}$	5.1×10^9	3.3×10^9	8.2×10^8
	左肩	$m^{-2} \cdot s^{-1}$	1.2×10^{10}	1.1×10^{11}	2.6×10^9
	右肩	$m^{-2} \cdot s^{-1}$	7.2×10^9	8.0×10^9	5.3×10^9
	左膝	$m^{-2} \cdot s^{-1}$	5.2×10^8	8.3×10^8	2.1×10^8
	右膝	$m^{-2} \cdot s^{-1}$	6.7×10^8	7.5×10^8	2.1×10^8

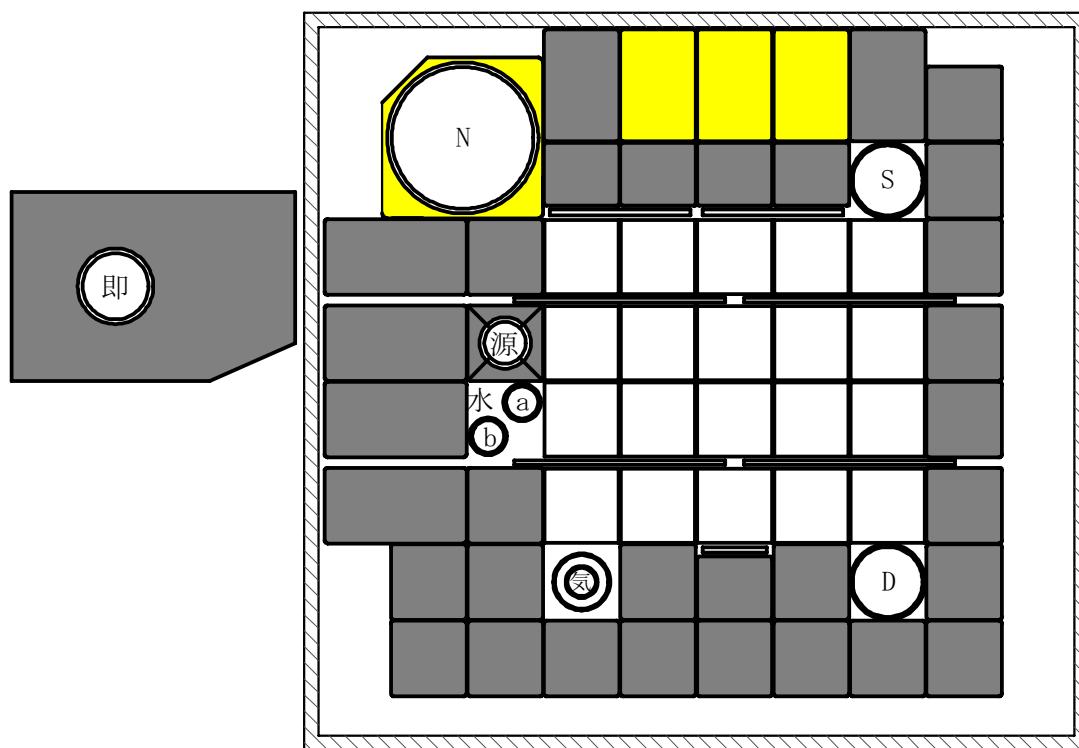


Fig.1 JRR-4 照射設備の配置図

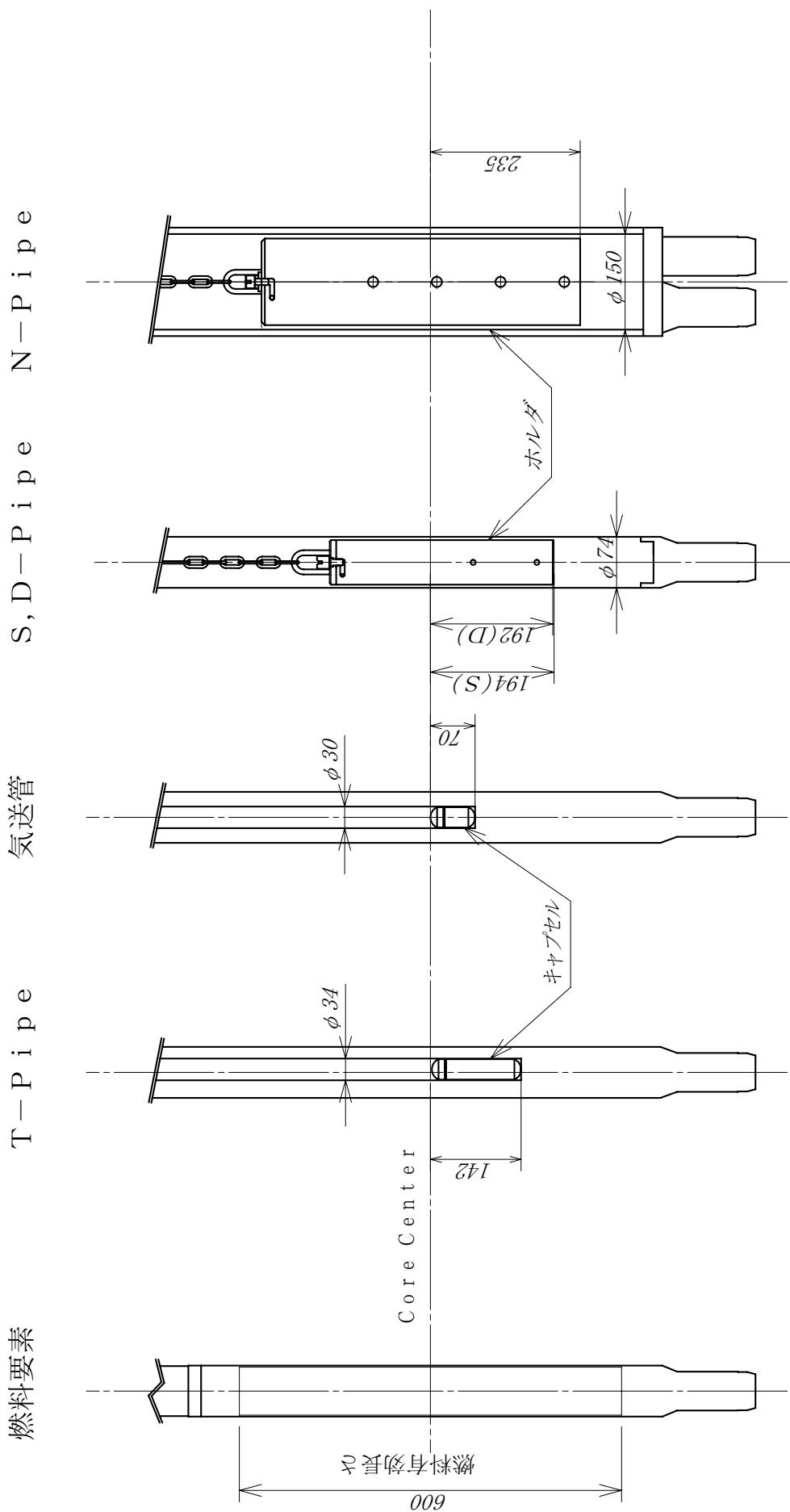


Fig. 2 照射孔、燃料要素の位置関係

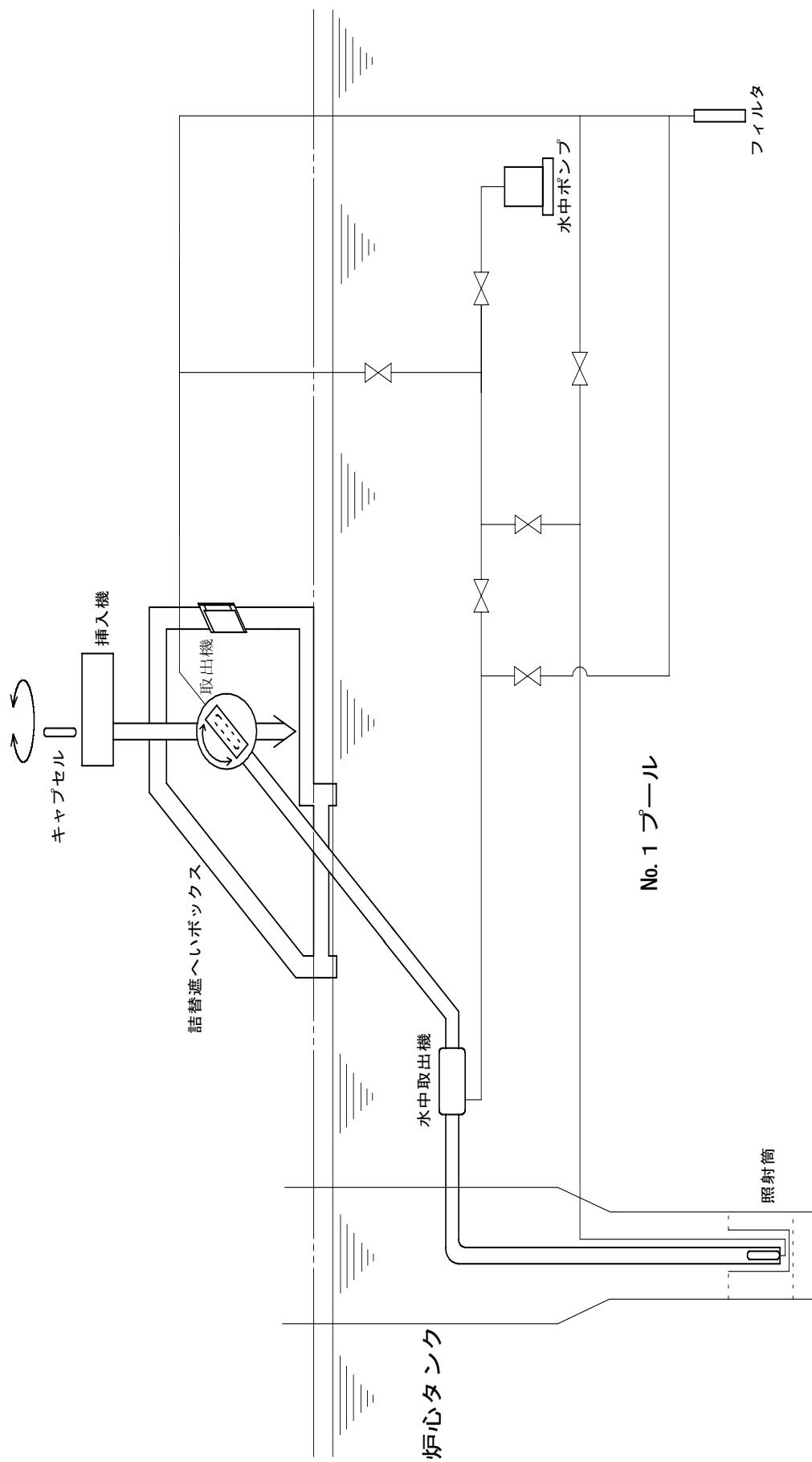


Fig.3 水力照射設備の系統図

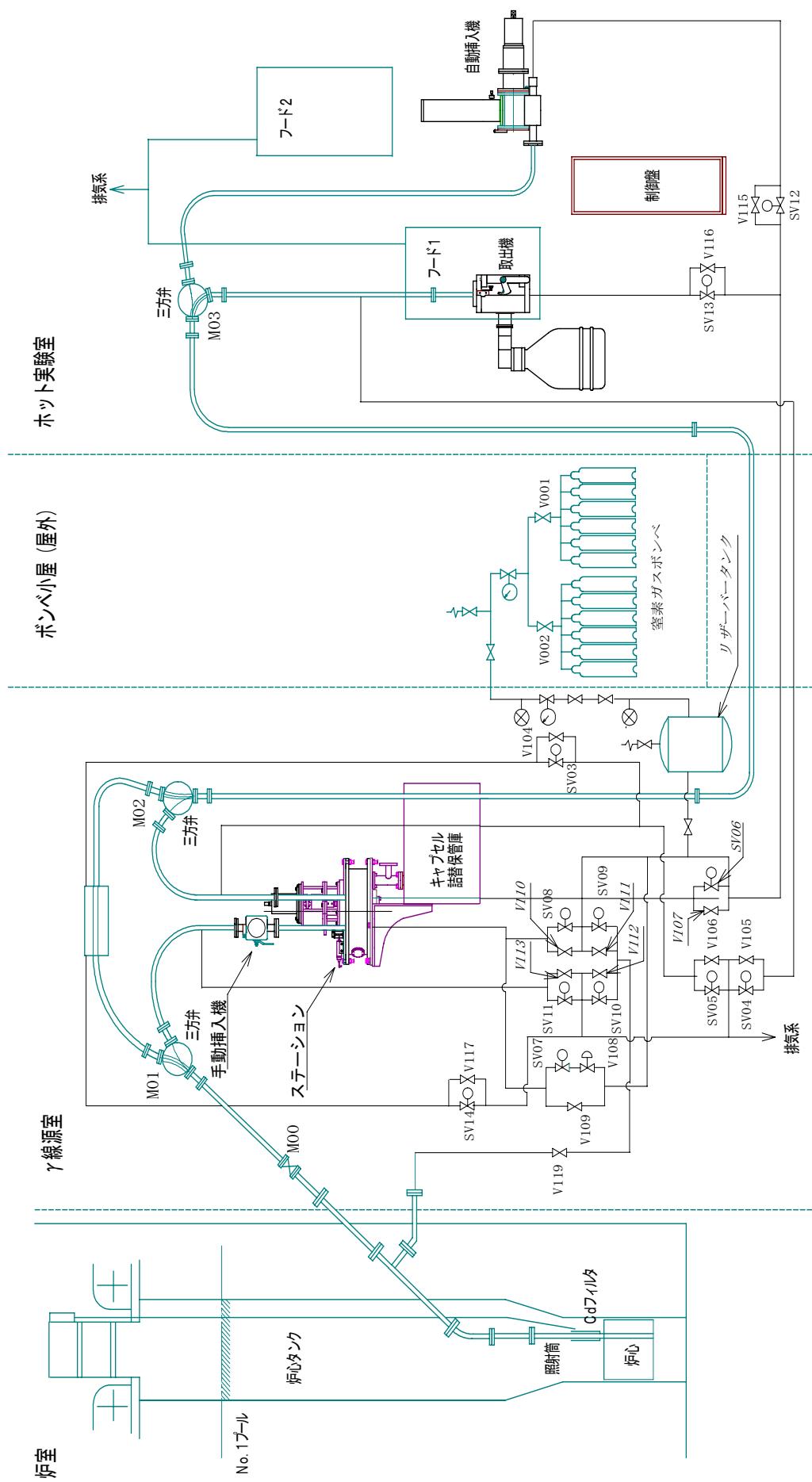


Fig.4 JRR-4 気送管照射設備の系統図

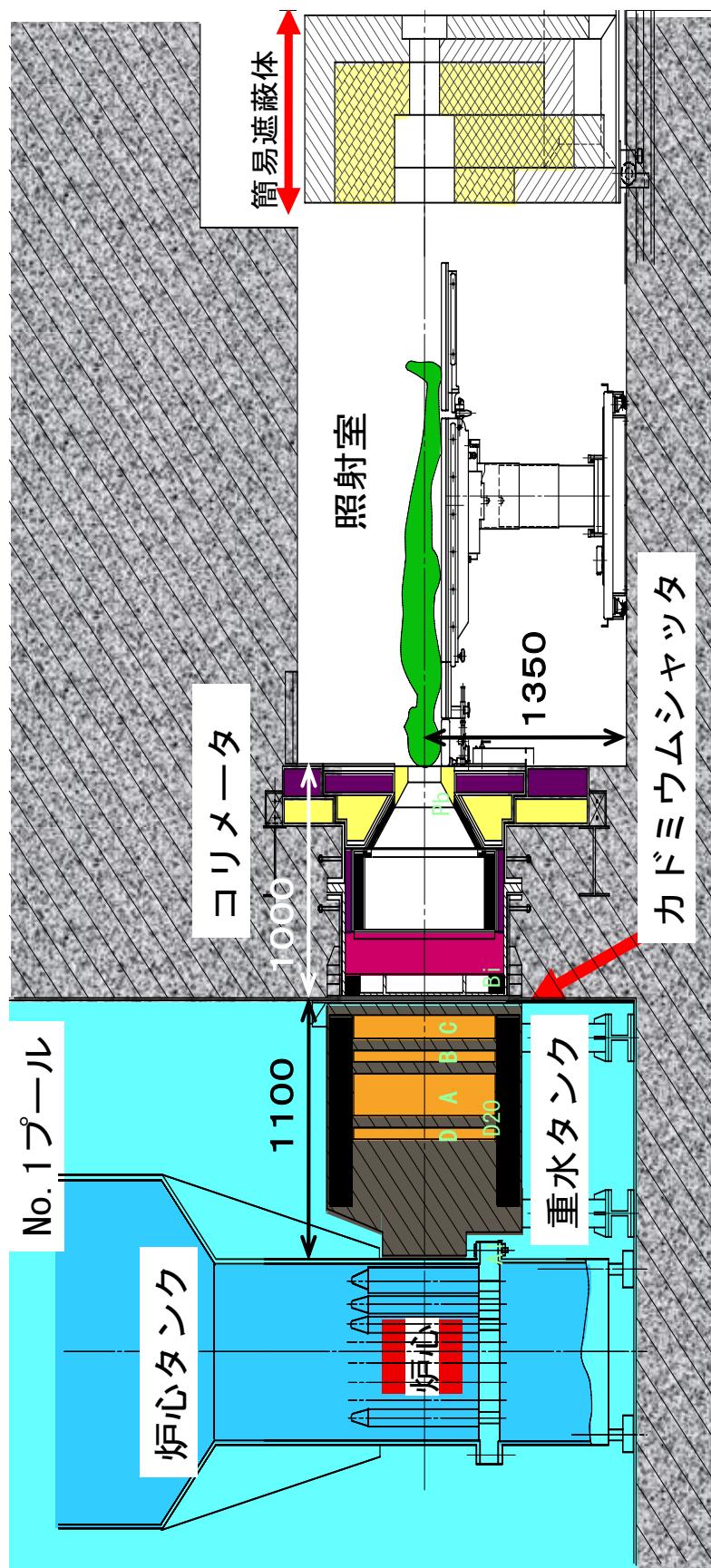


Fig.5 中性子ビーム設備の断面図

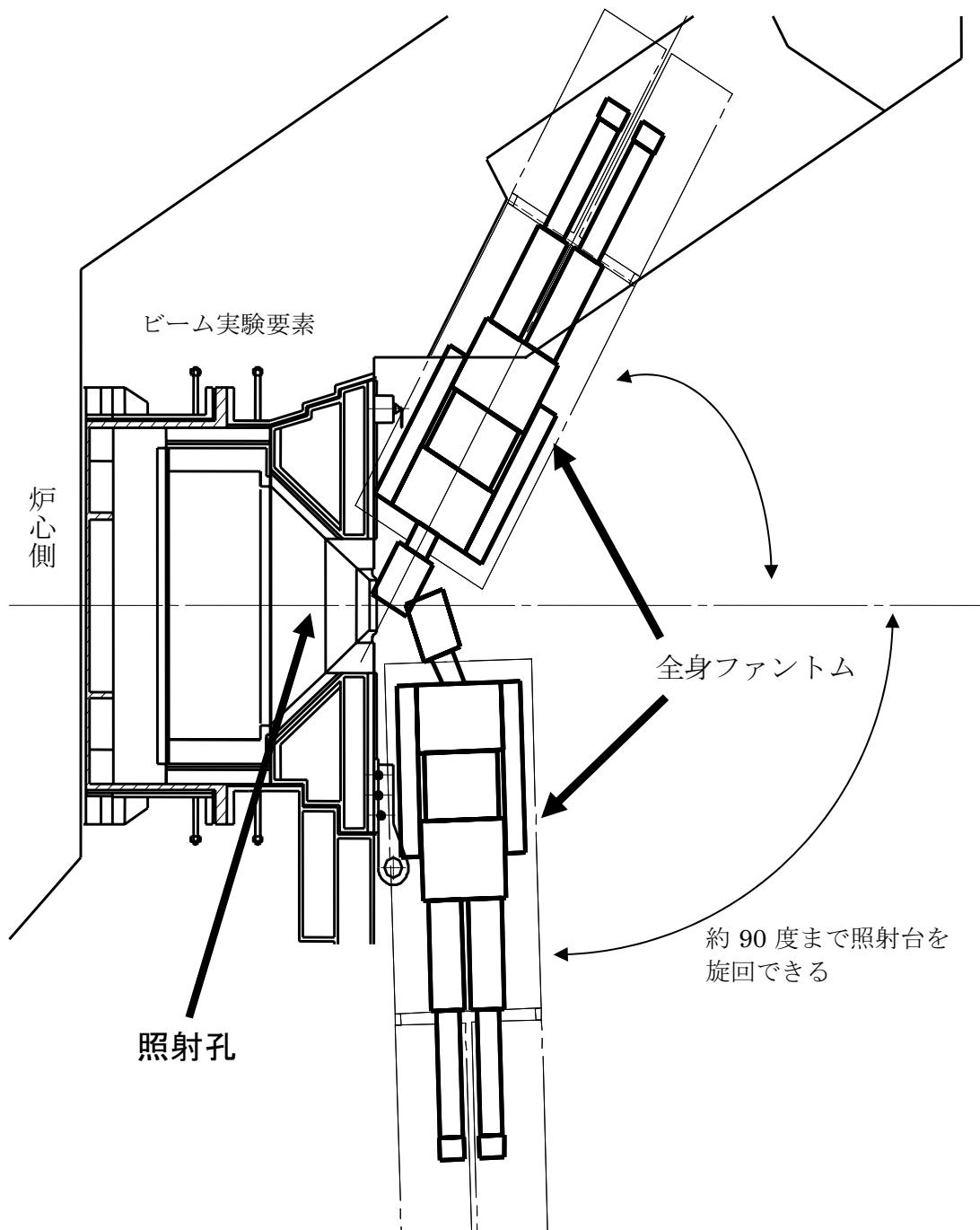


Fig.6 照射室の平面図

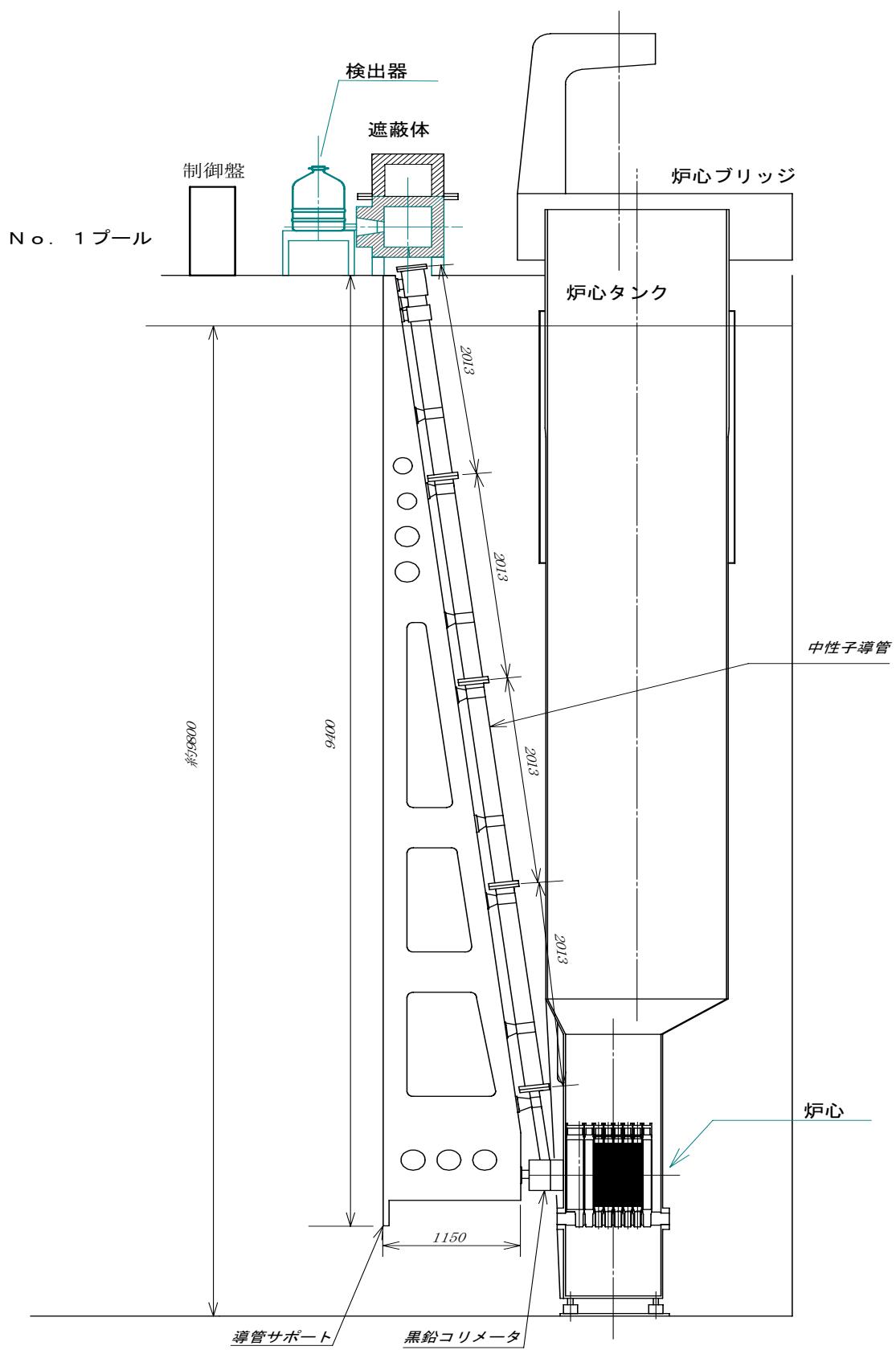


Fig. 7 即発ガンマ線分析装置

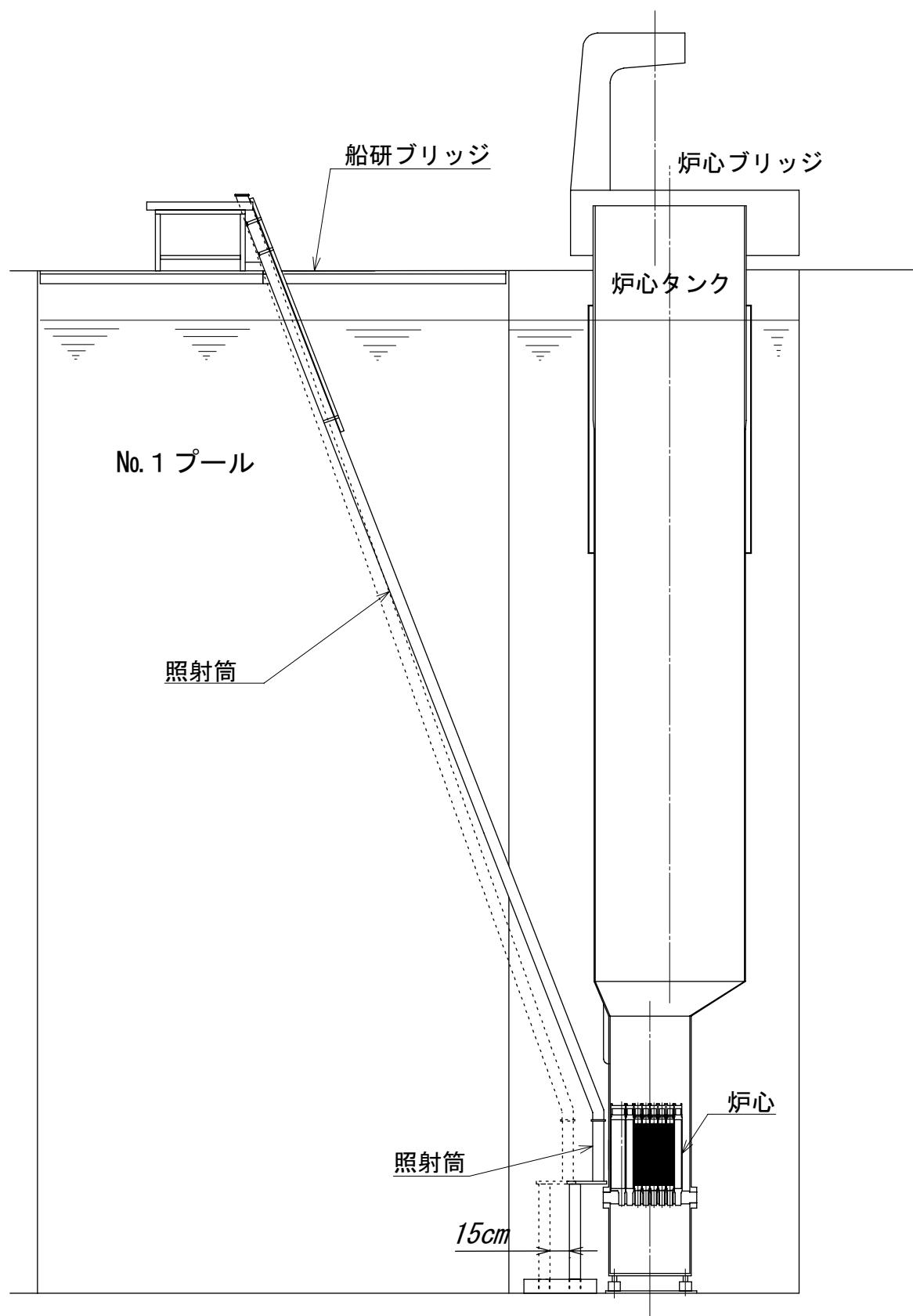


Fig. 8 プール設備 簡易照射筒

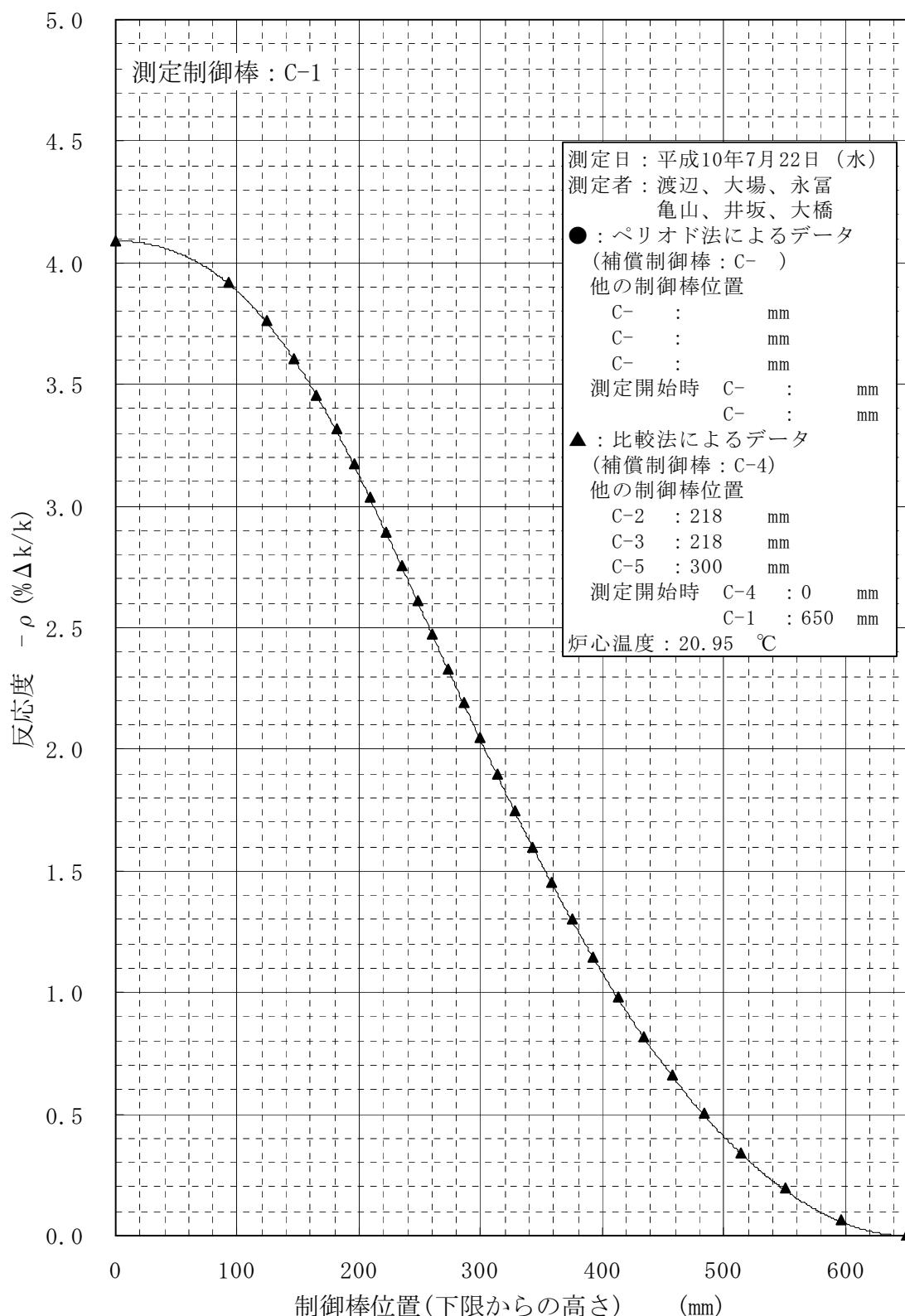


Fig.9 程調整棒 (C1) の積分曲線

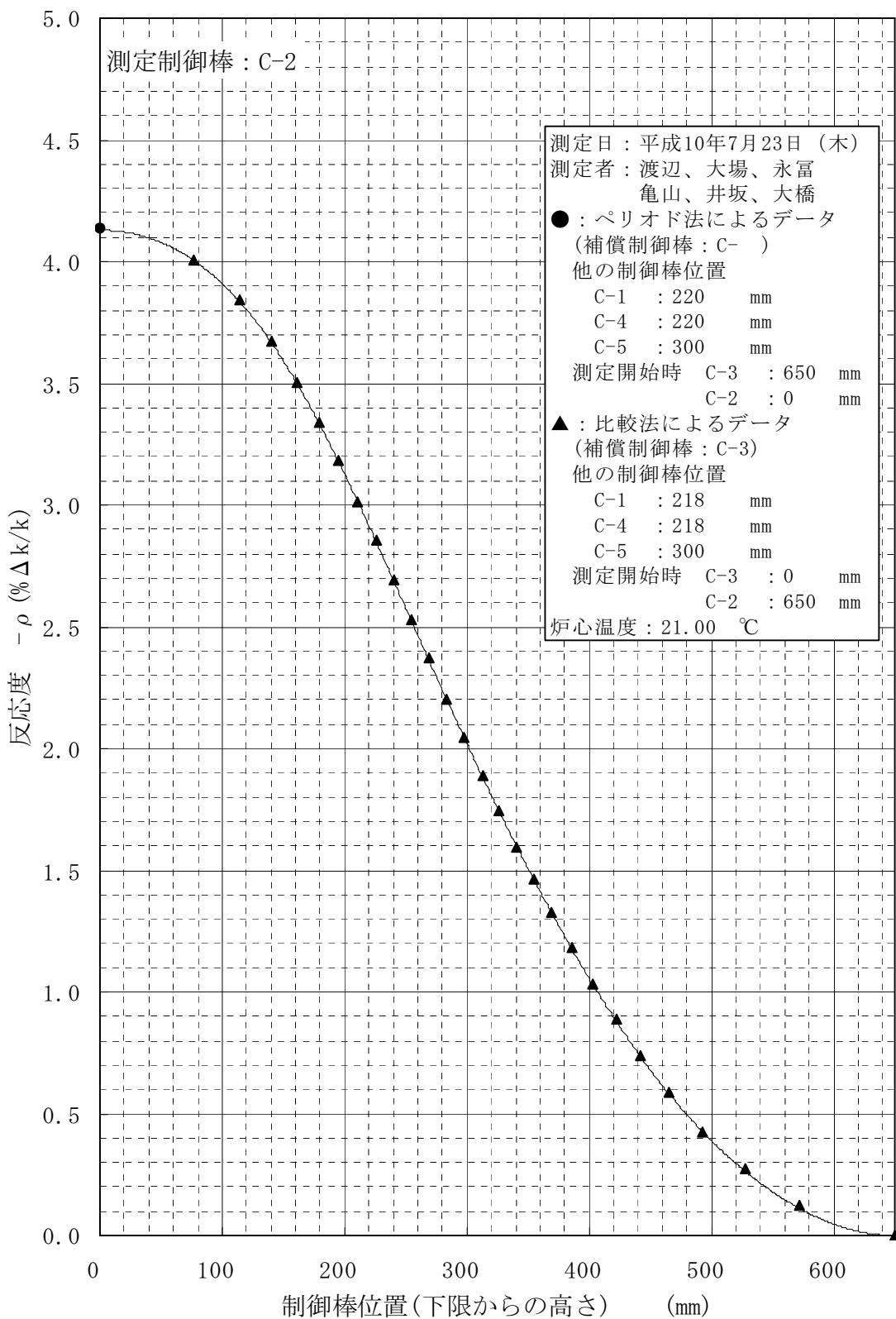


Fig.10 程調整御棒(C2)の積分曲線

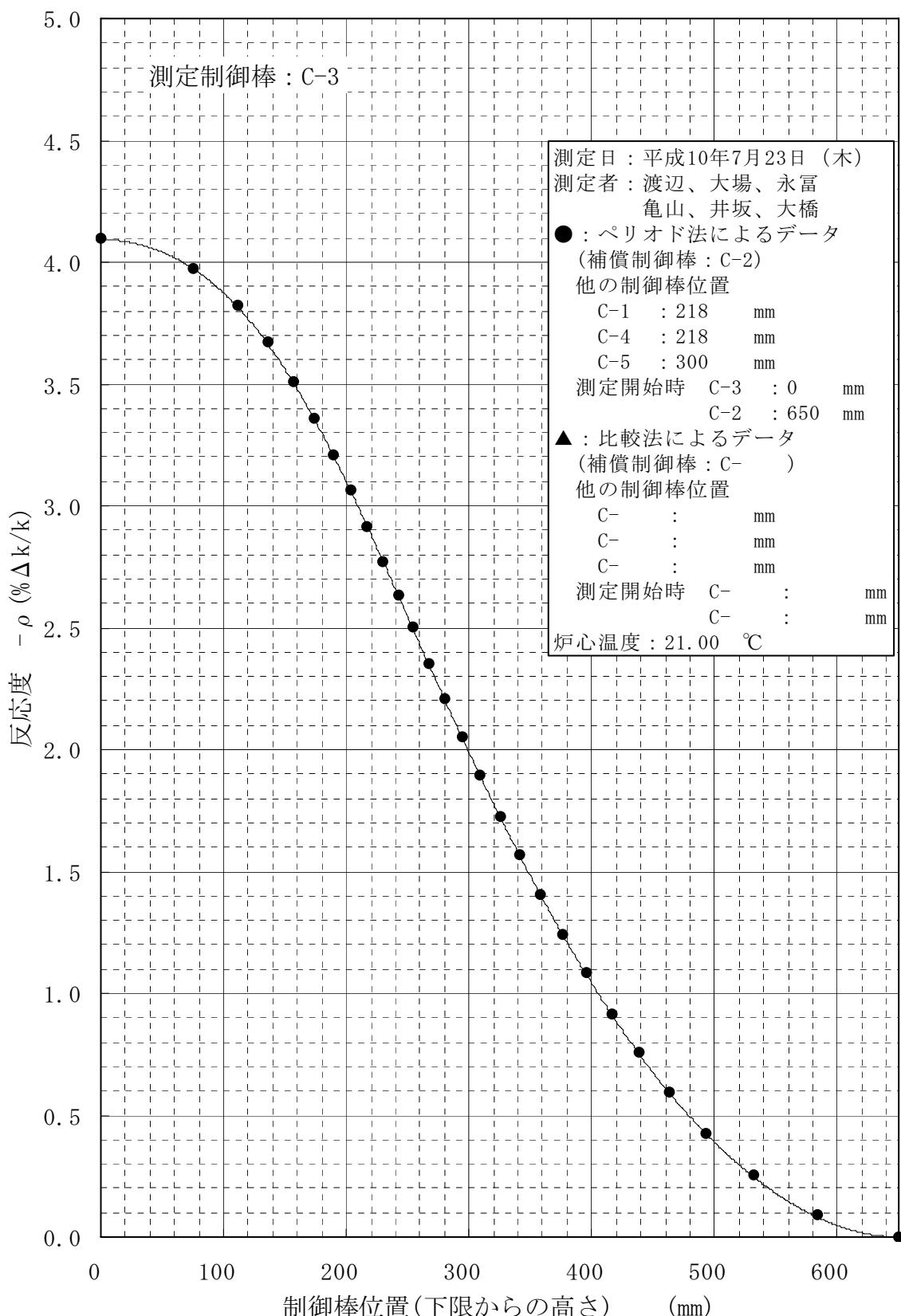


Fig.11 程調整棒 (C3) の積分曲線

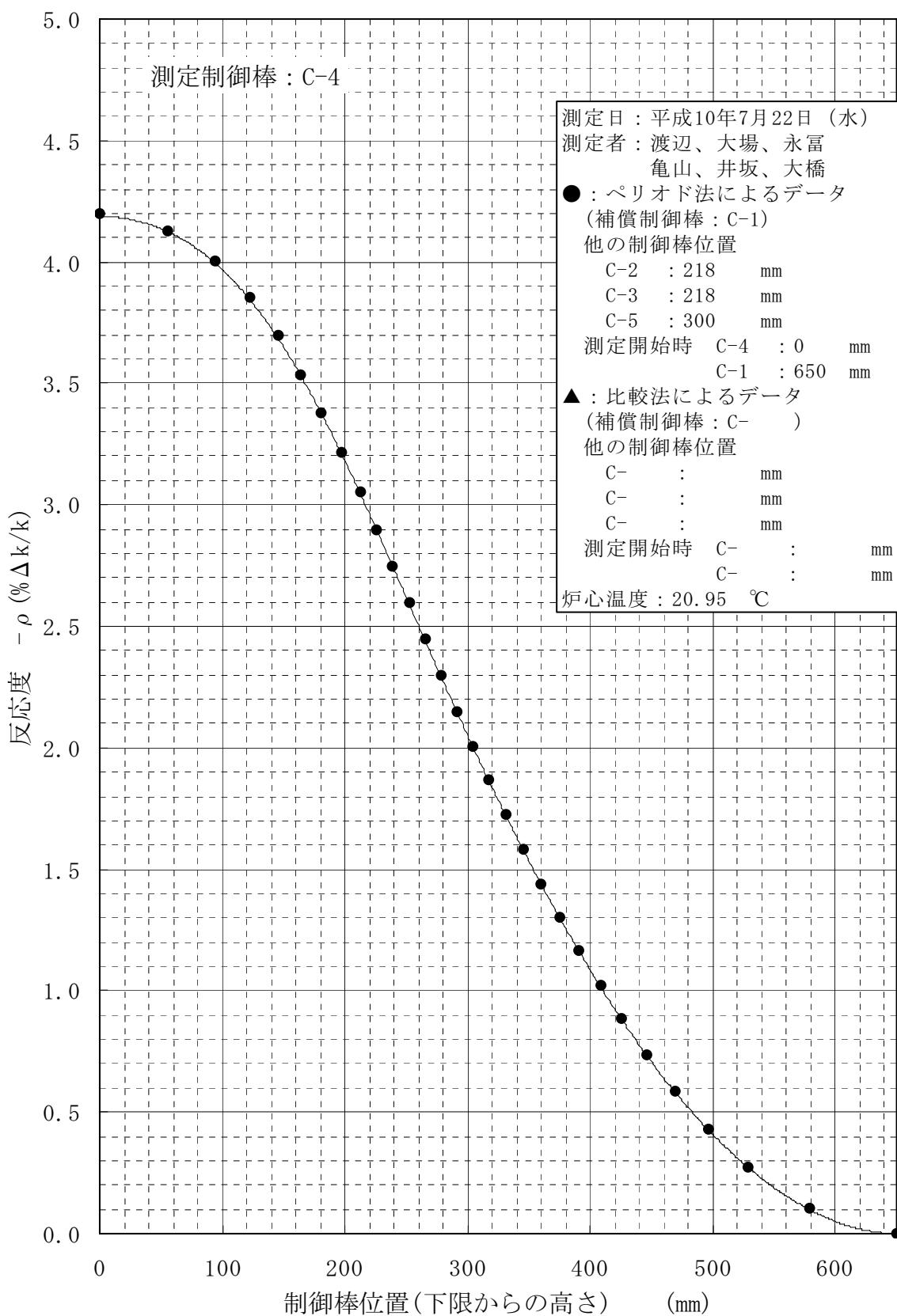


Fig.12 祖調整棒(C4)の積分曲線

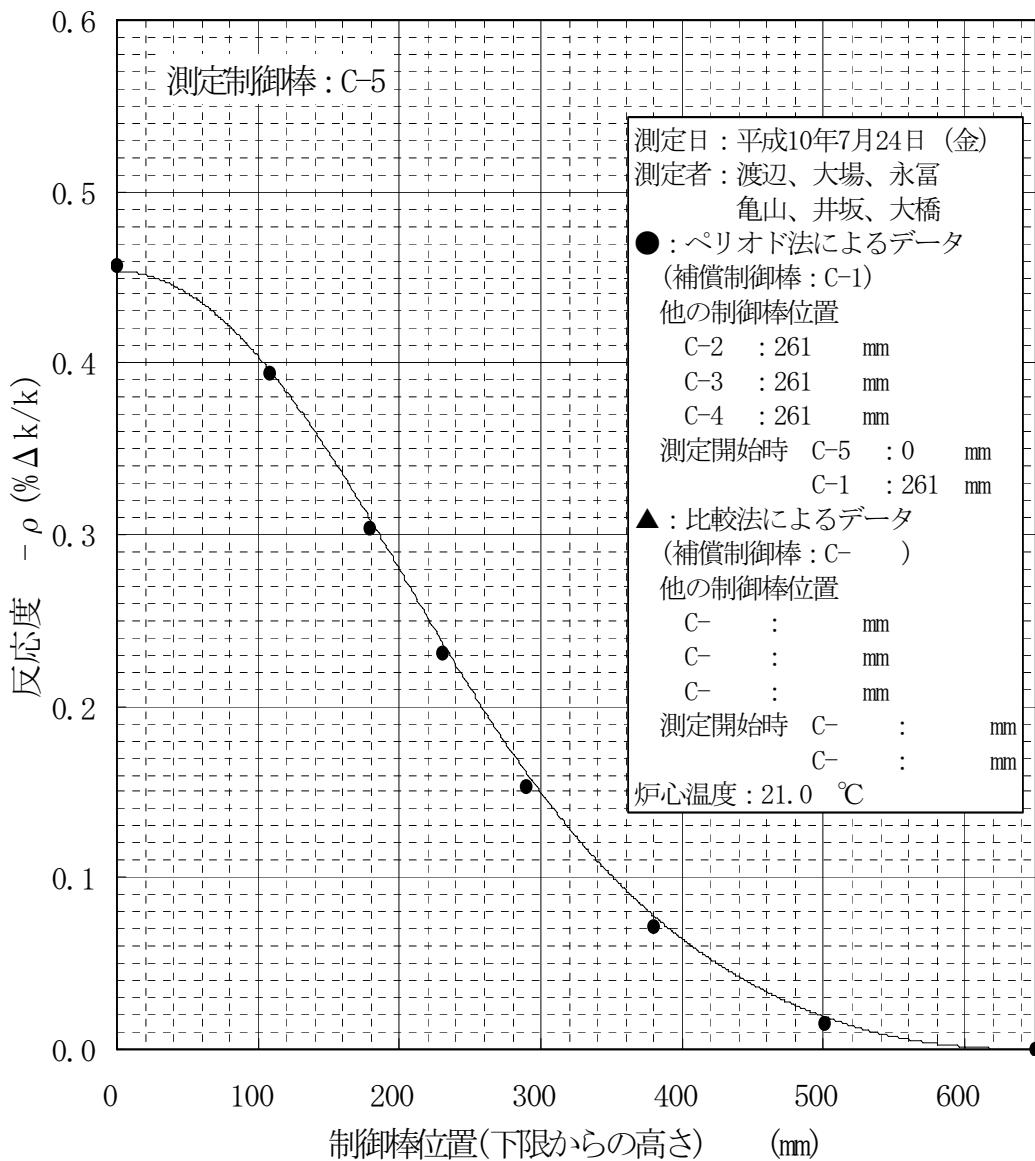


Fig. 13 微調整棒(C5)の積分曲線

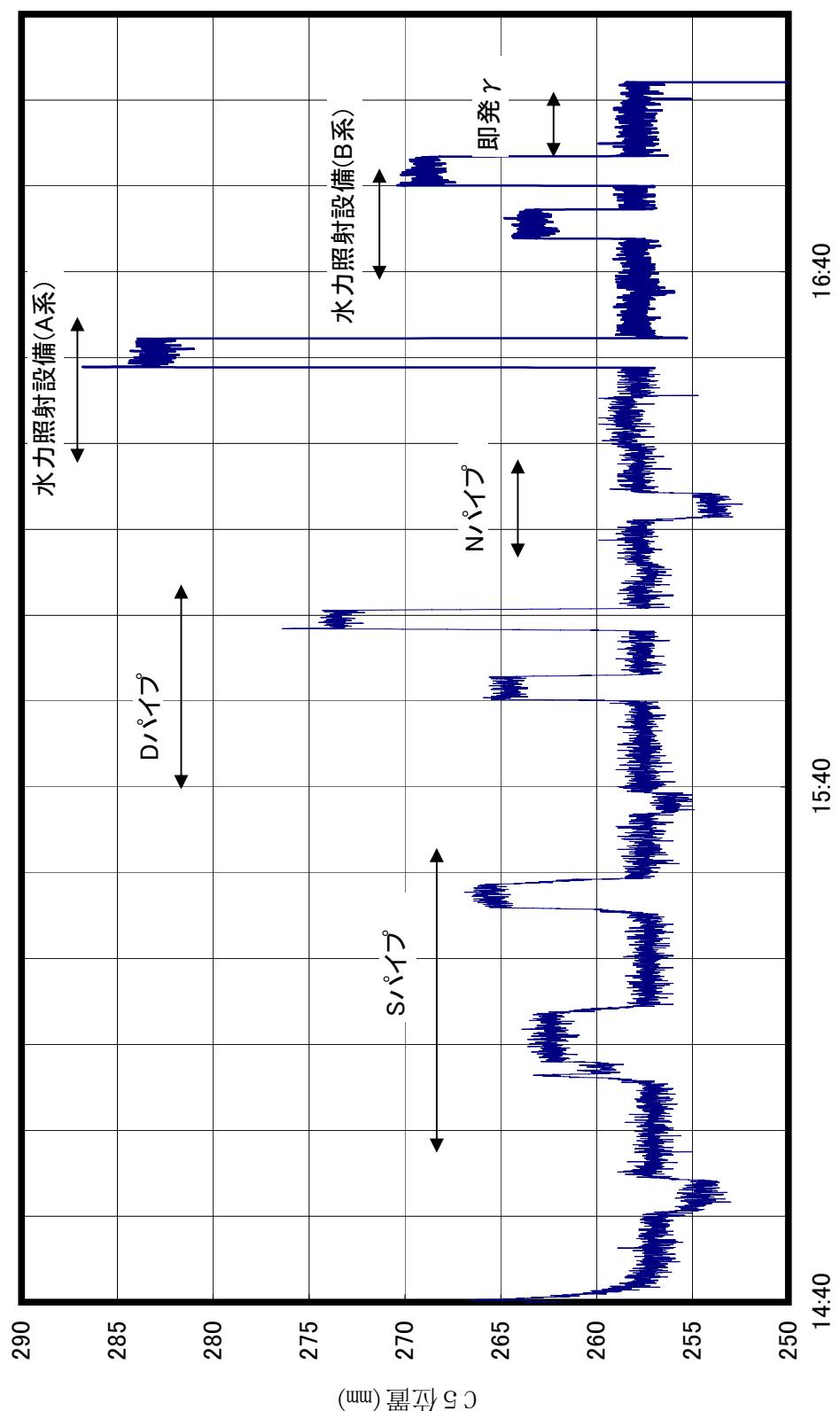
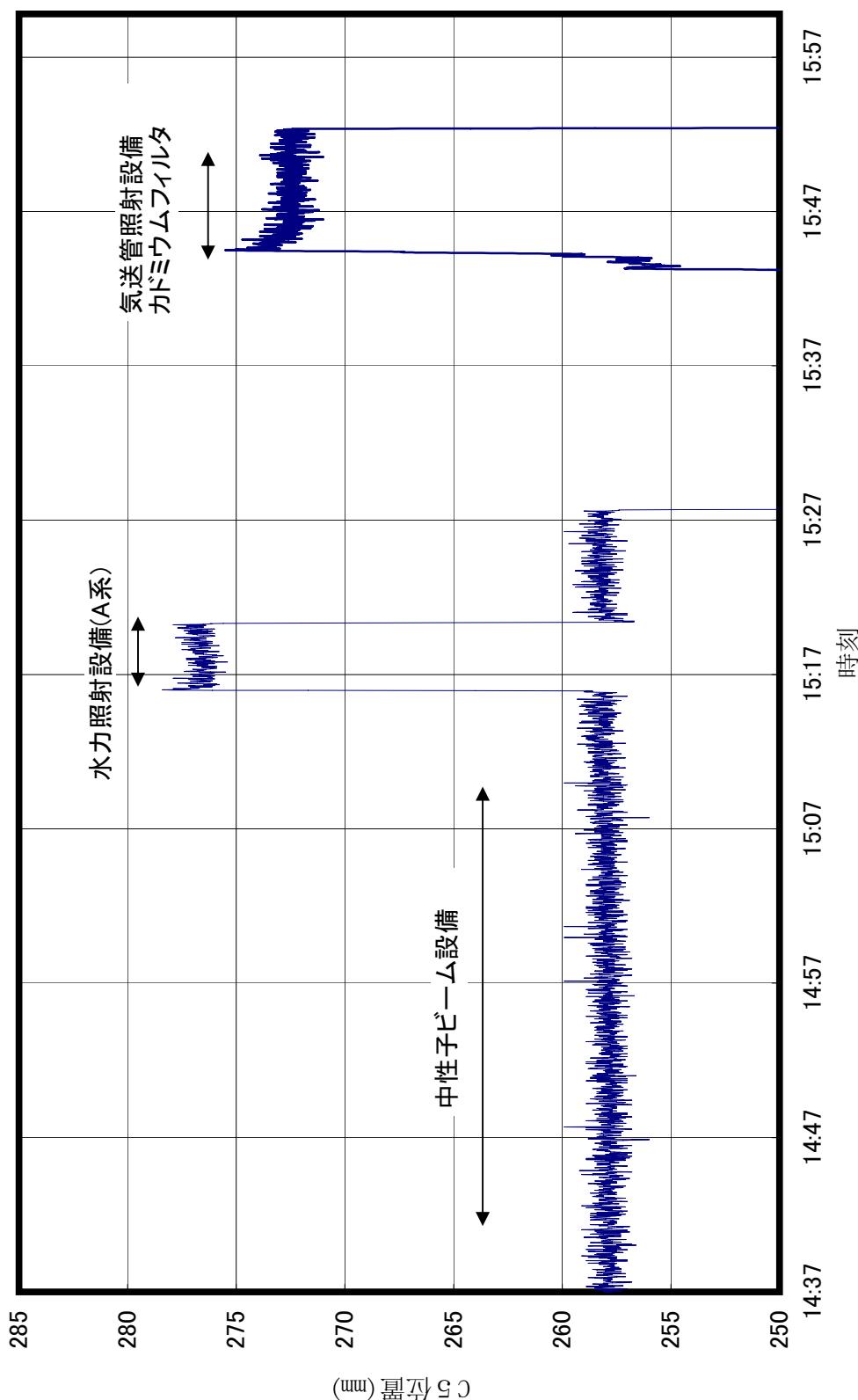


Fig.14 微調整制御棒C5の時間推移



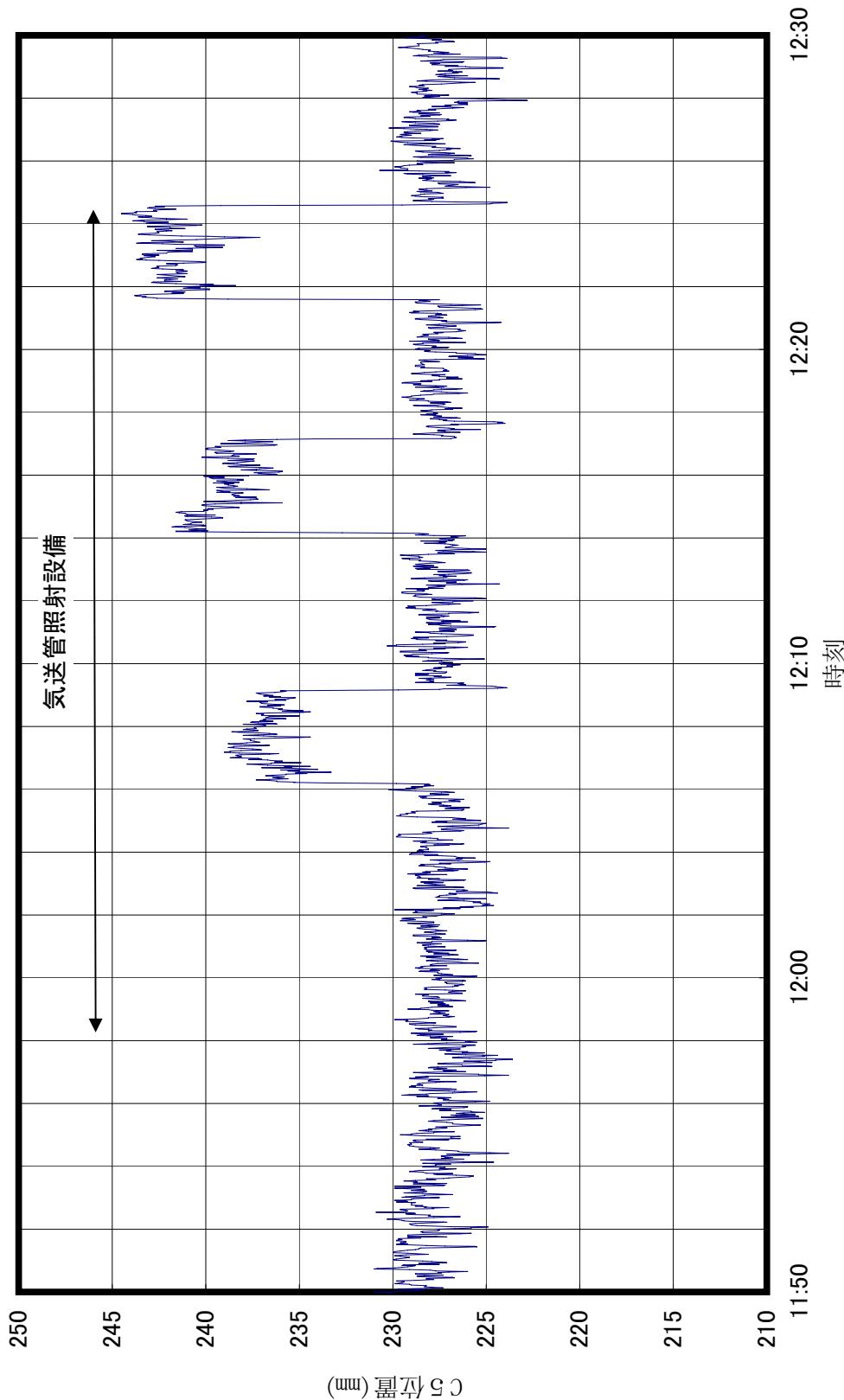


Fig.16 微調整制御棒C5の時間推移

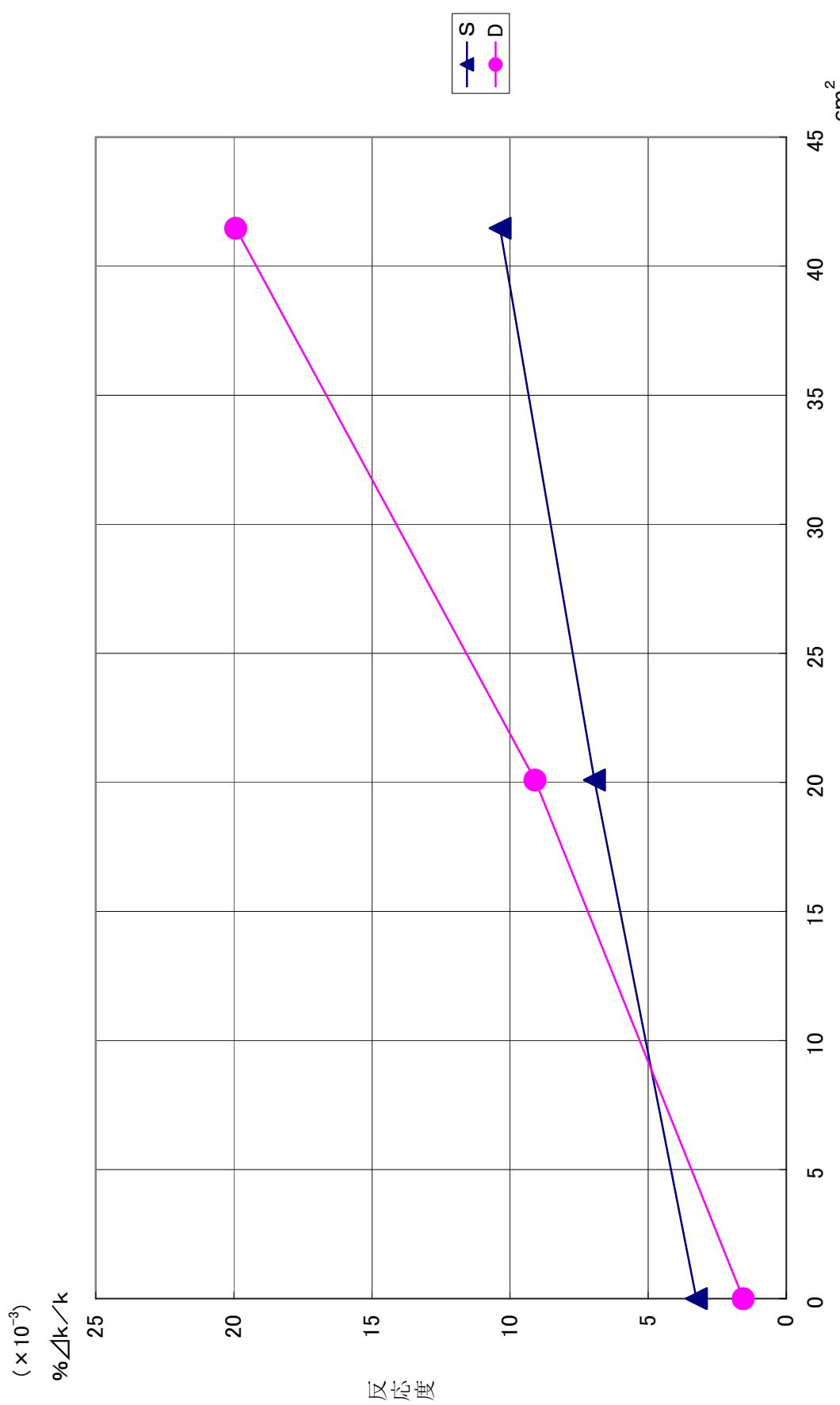


Fig.17 S, Dパーティクル反応度データ

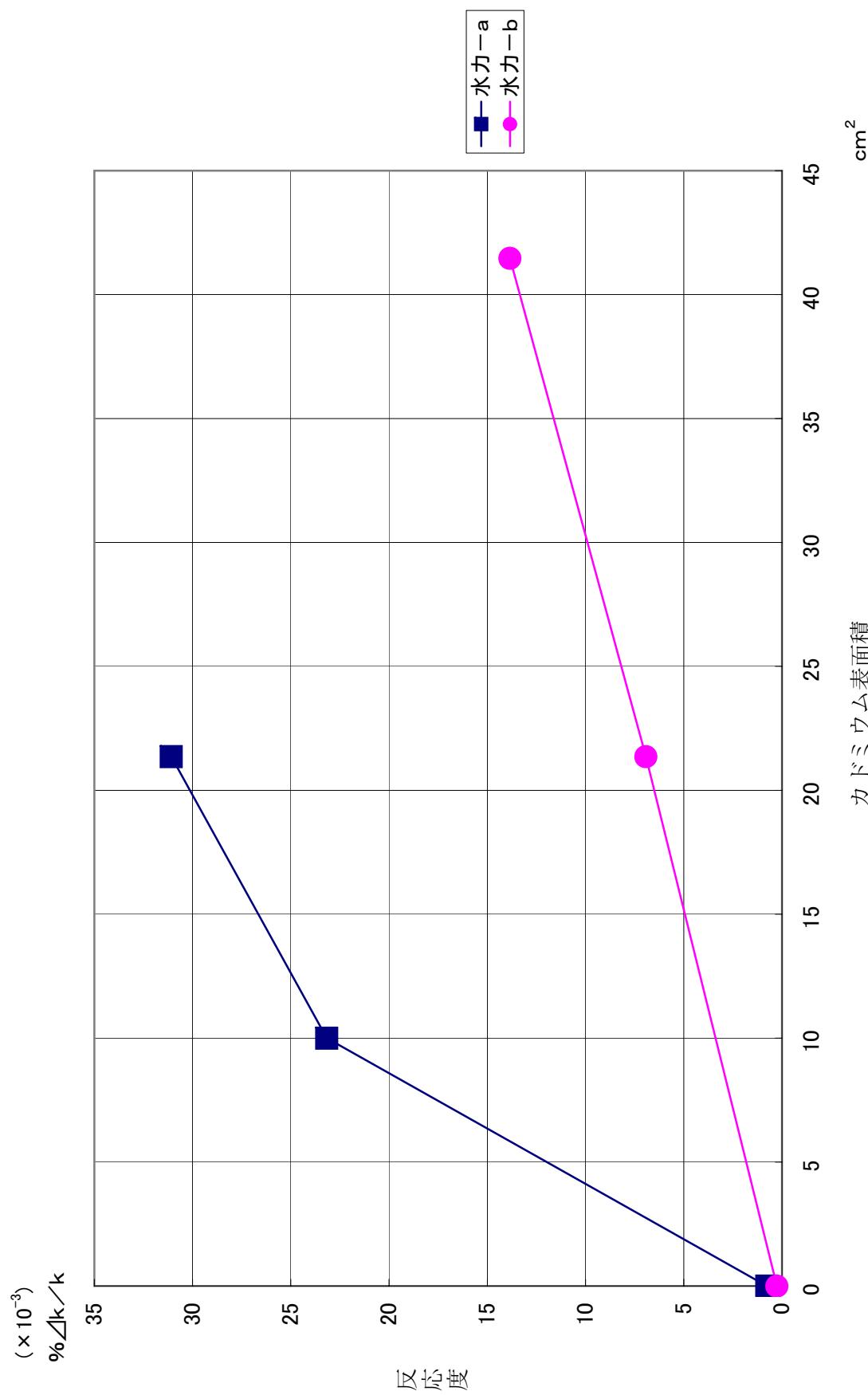


Fig.18 水力照射設備-A系統, B系統の反応度データ

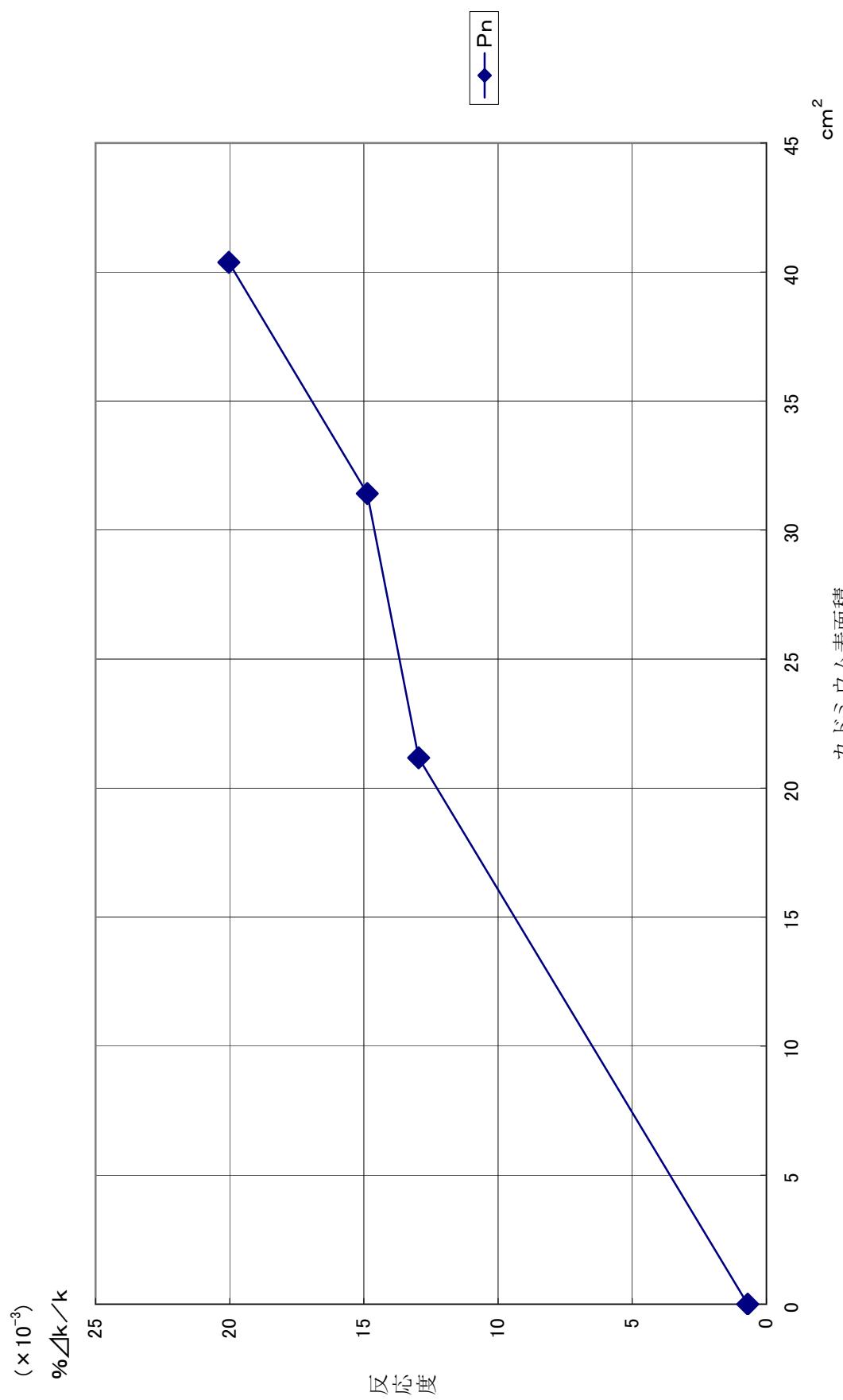


Fig.19 気送管照射設備反応度データ
力ドミウム表面積

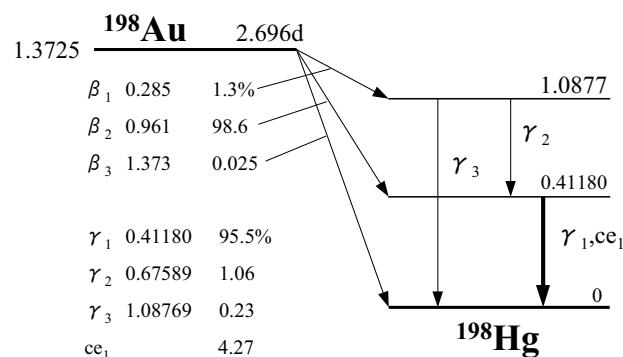
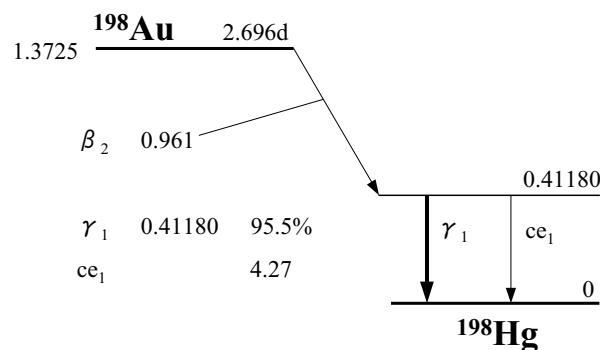
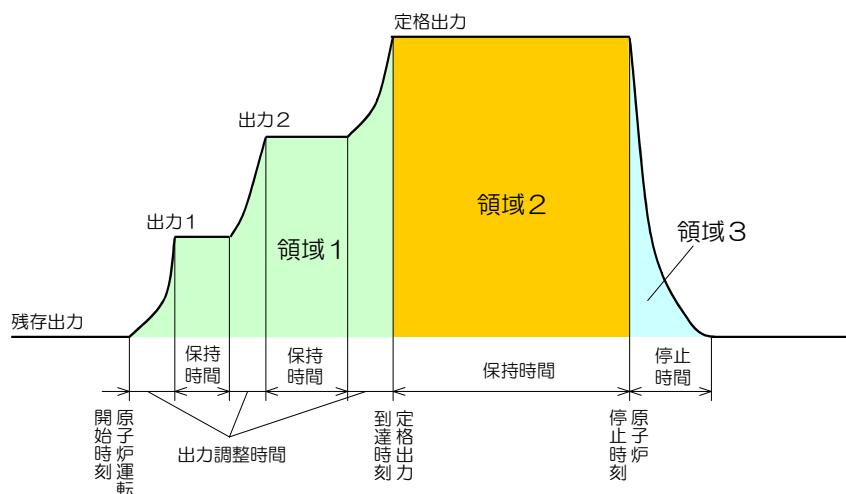
Fig.20 ^{198}Au の壊変図Fig.21 簡略化した ^{198}Au の壊変図

Fig.22 原子炉の運転パターン

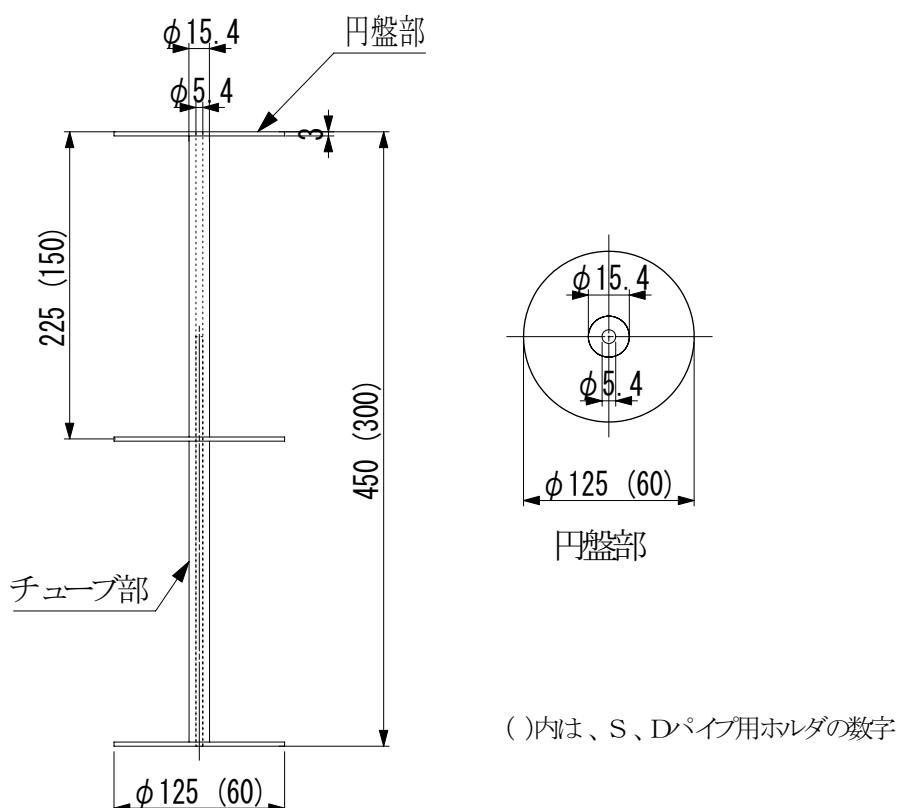


Fig.23 簡易照射筒の特性測定用ホルダ概略図

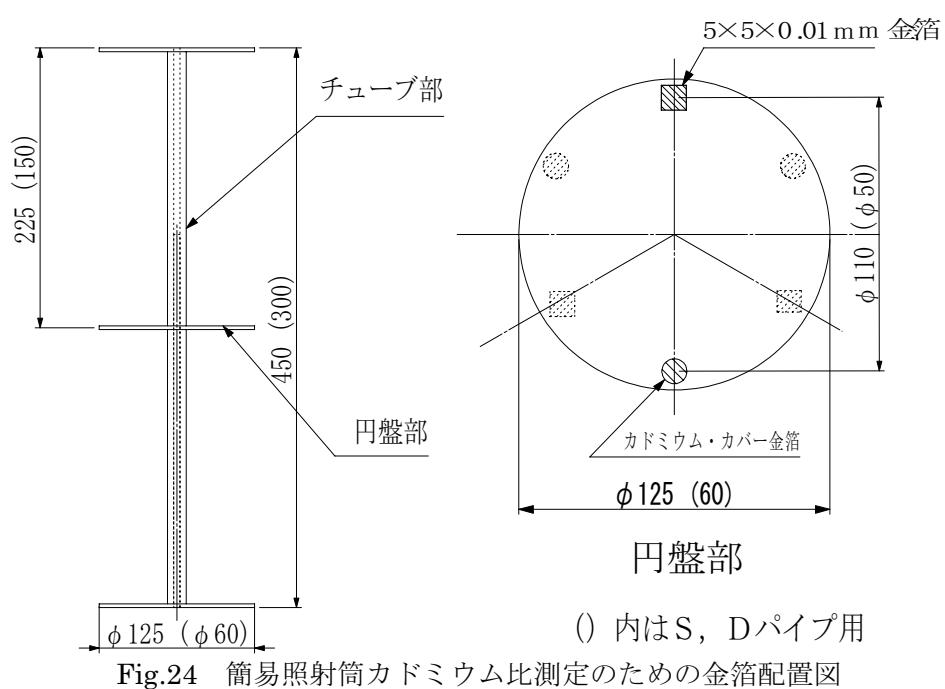


Fig.24 簡易照射筒カドミウム比測定のための金箔配置図

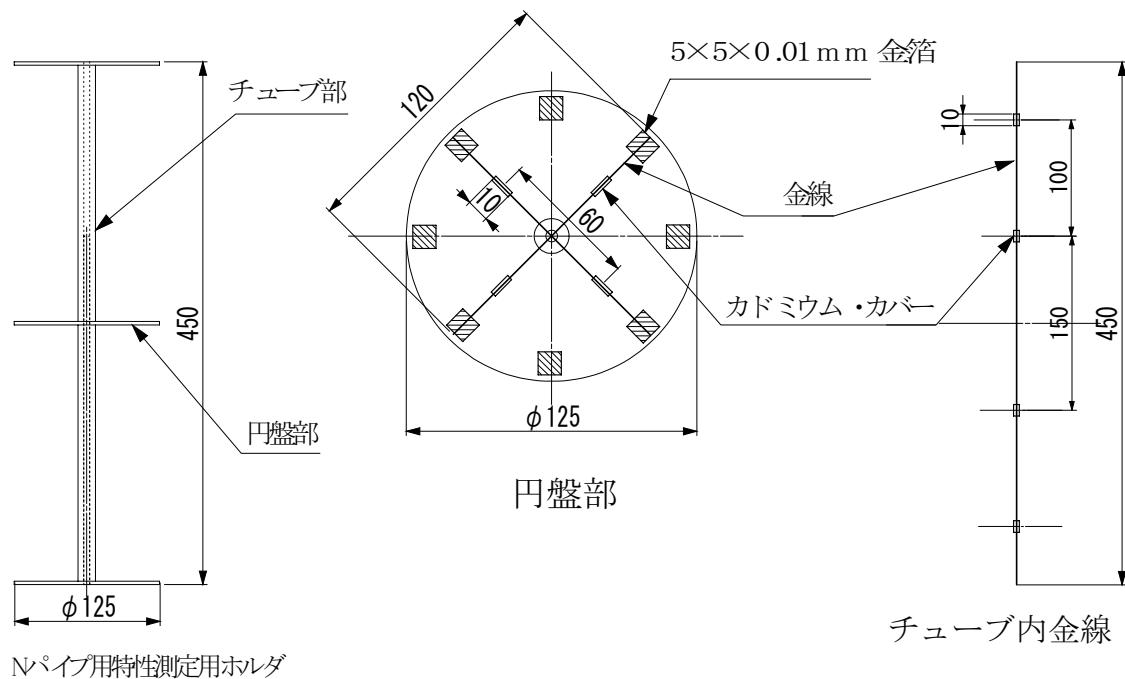


Fig.25 Nパイプの熱中性子束測定のための金線、金箔配置図

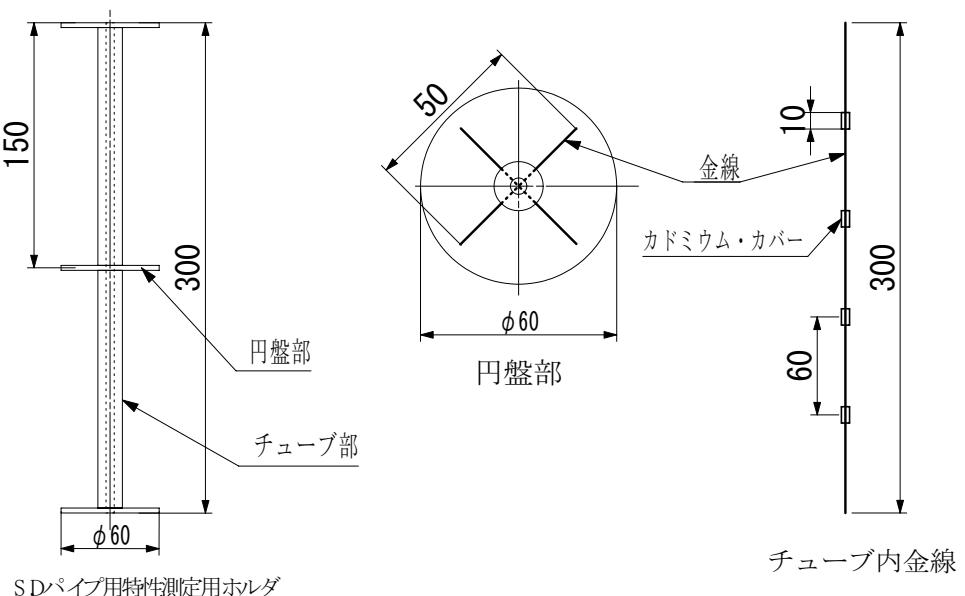


Fig.26 S, Dパイプの熱中性子束測定のための金線、金箔配置図

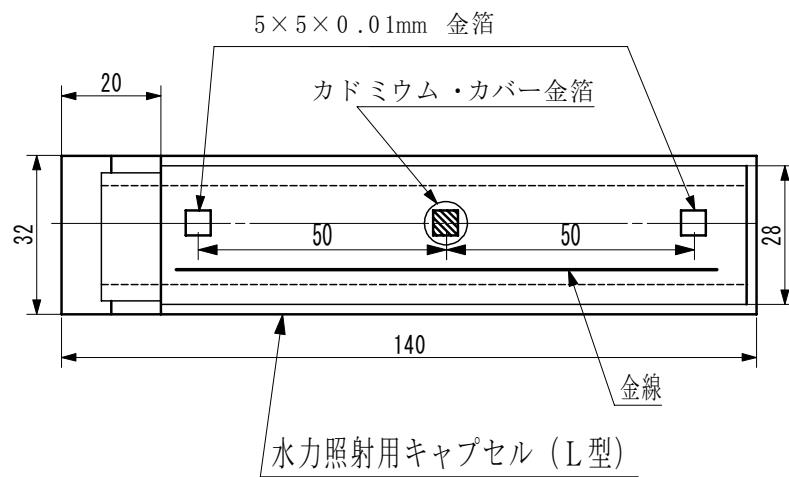


Fig.27 水力照射設備の熱中性子束、カドミウム比測定のための金線、金箔配置図

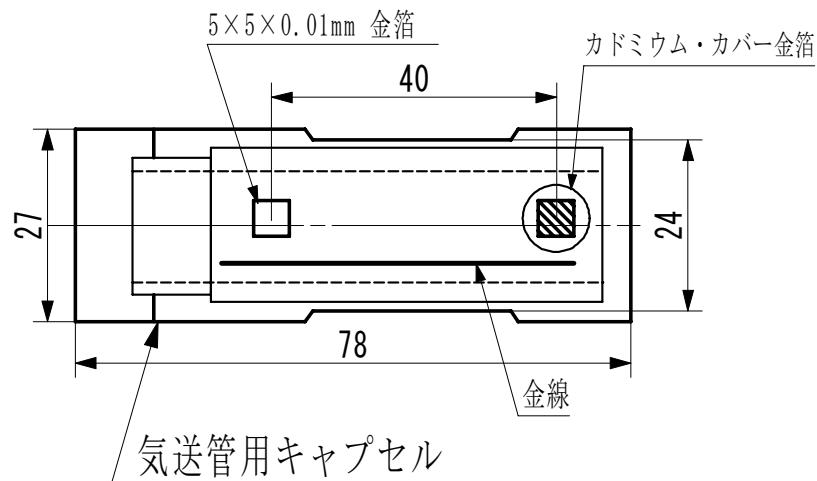


Fig.28 気送管照射設備の熱中性子束、カドミウム比測定のための金線、金箔配置図

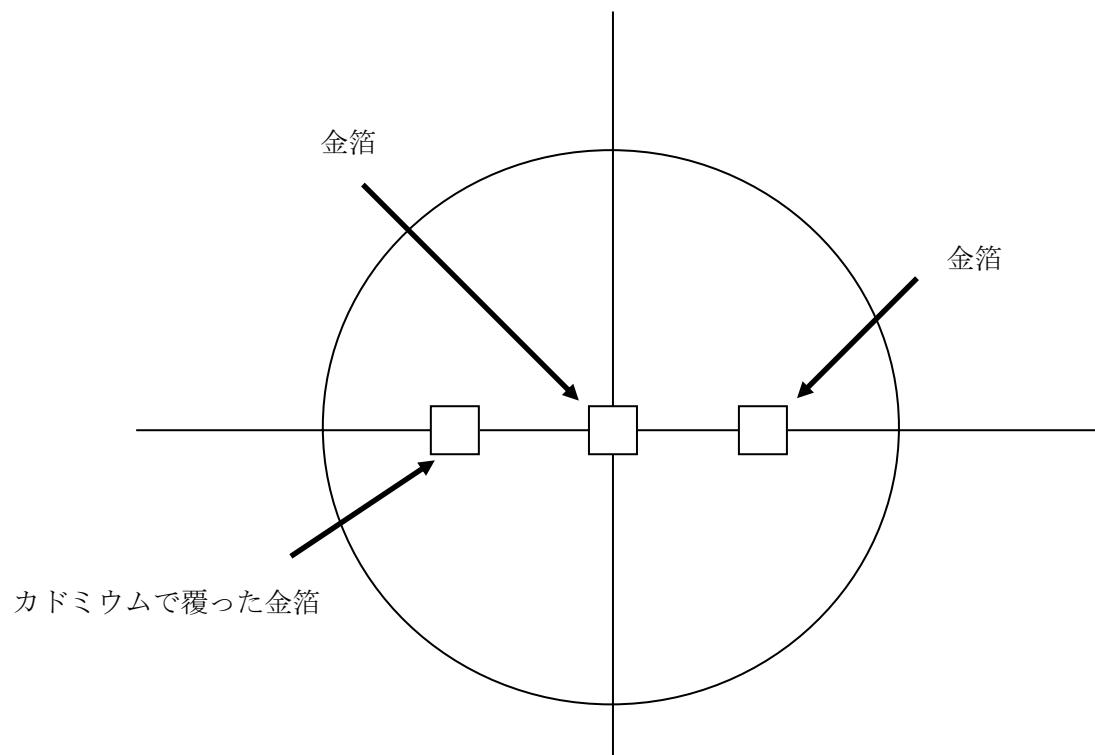


Fig.29 中性子ビーム設備ビーム孔出口の検出器の取りつけ位置

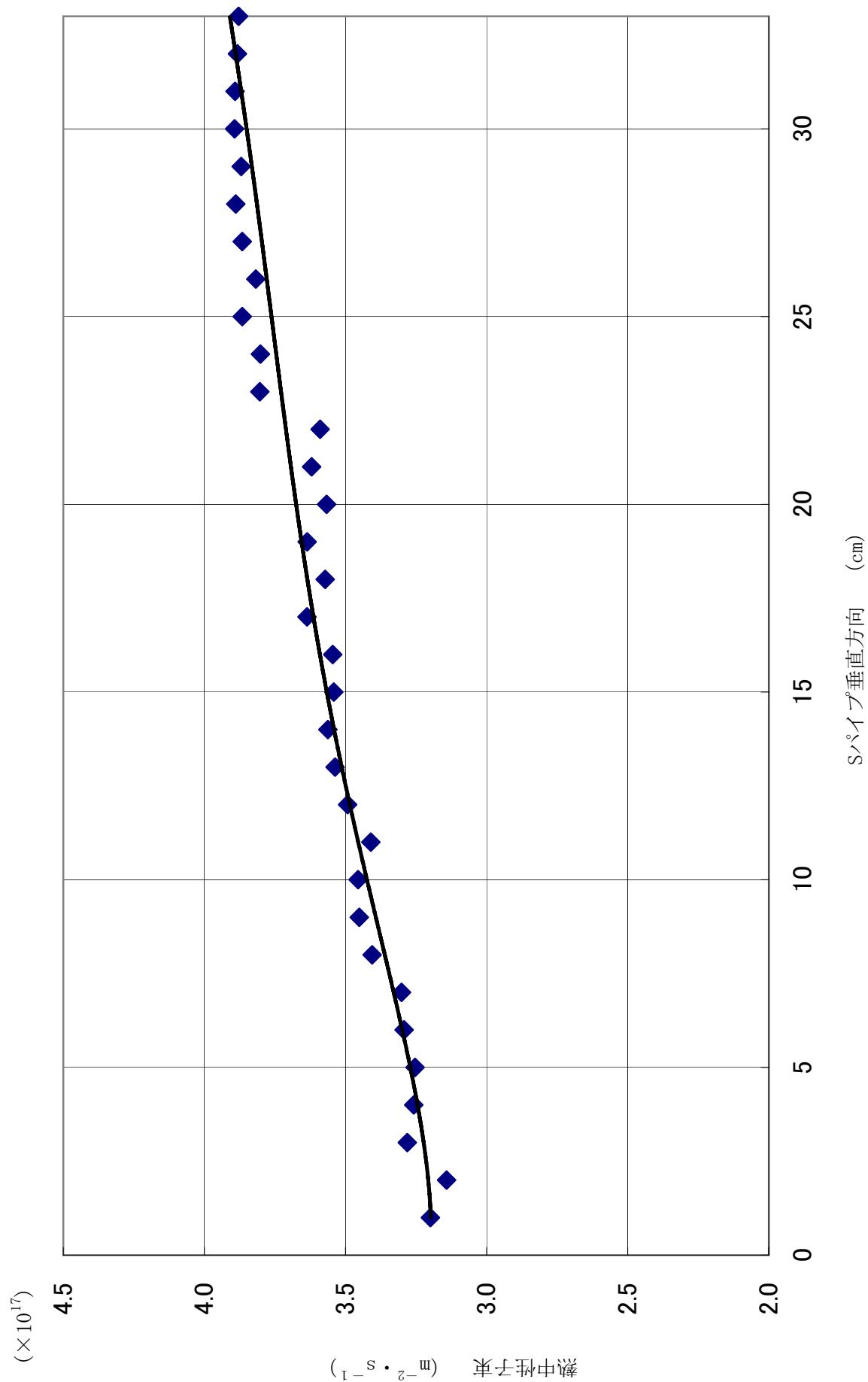


Fig.30 平成10年度の簡易照射筒 S-particle の熱中性子束垂直方向分布

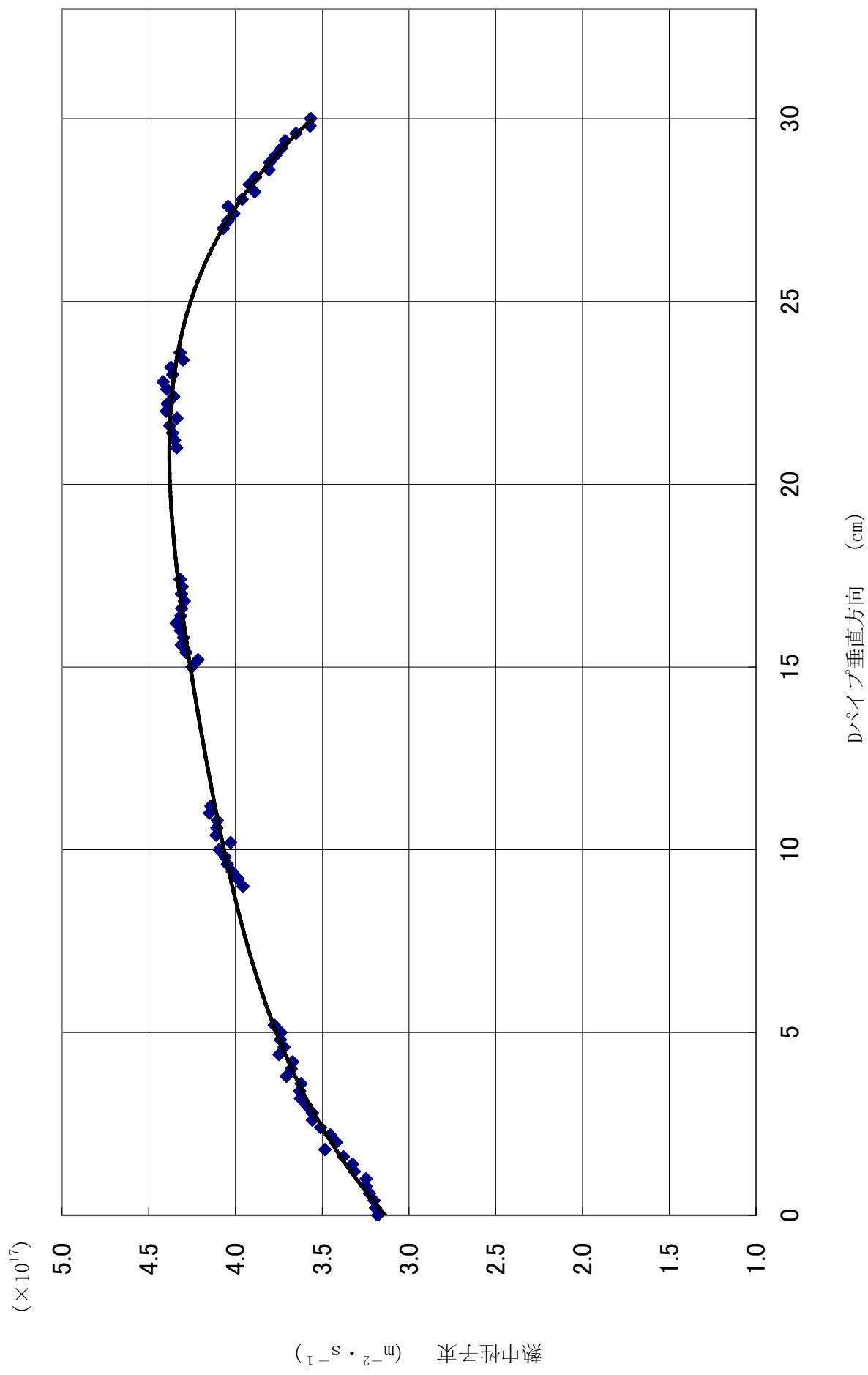


Fig.31 平成10年度の簡易照射筒 Dパイプ垂直方向熱中性子束分布

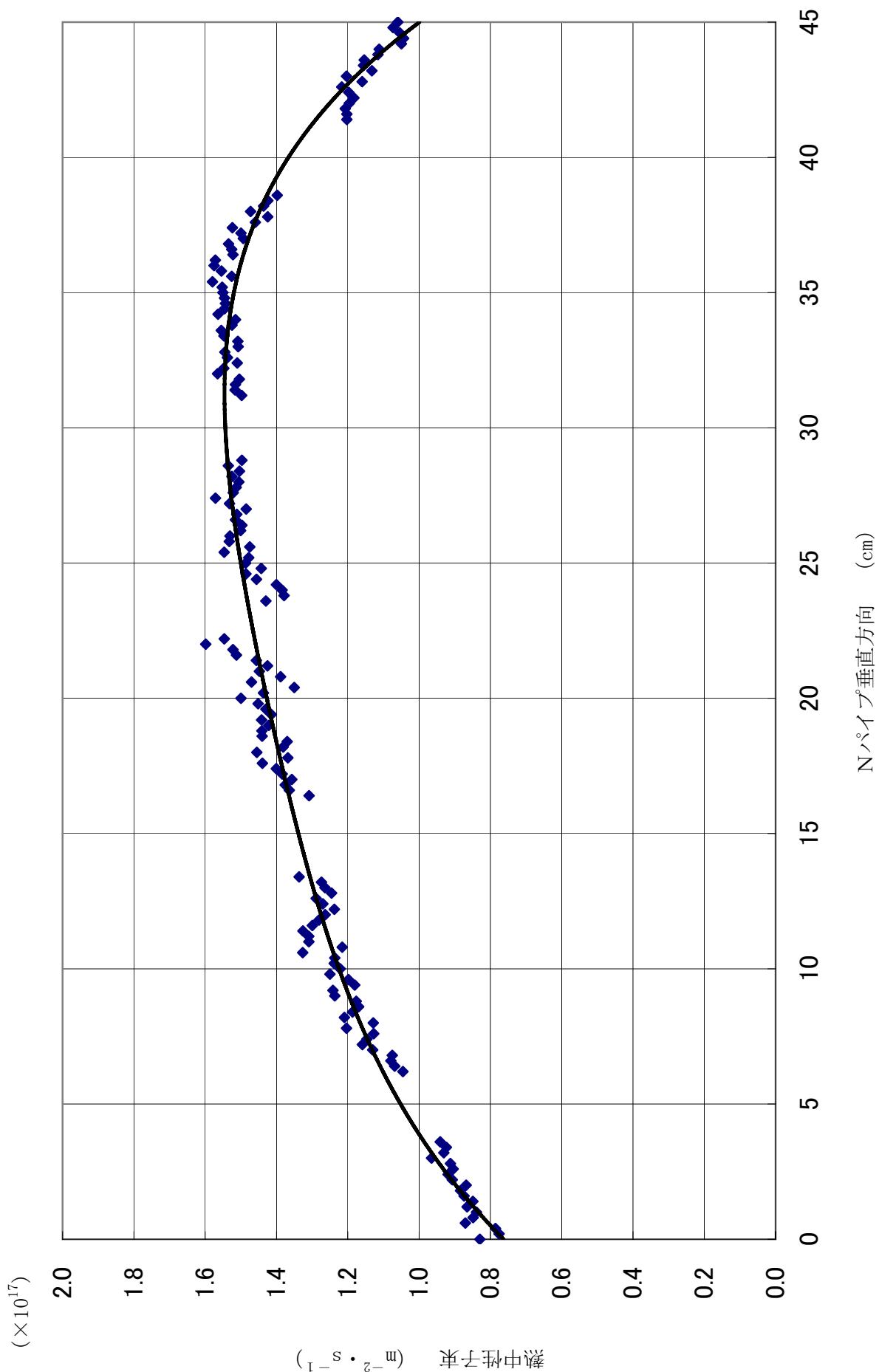


Fig.32 平成10年度の簡易照射筒 N-パイプの熱中性子束垂直方向分布

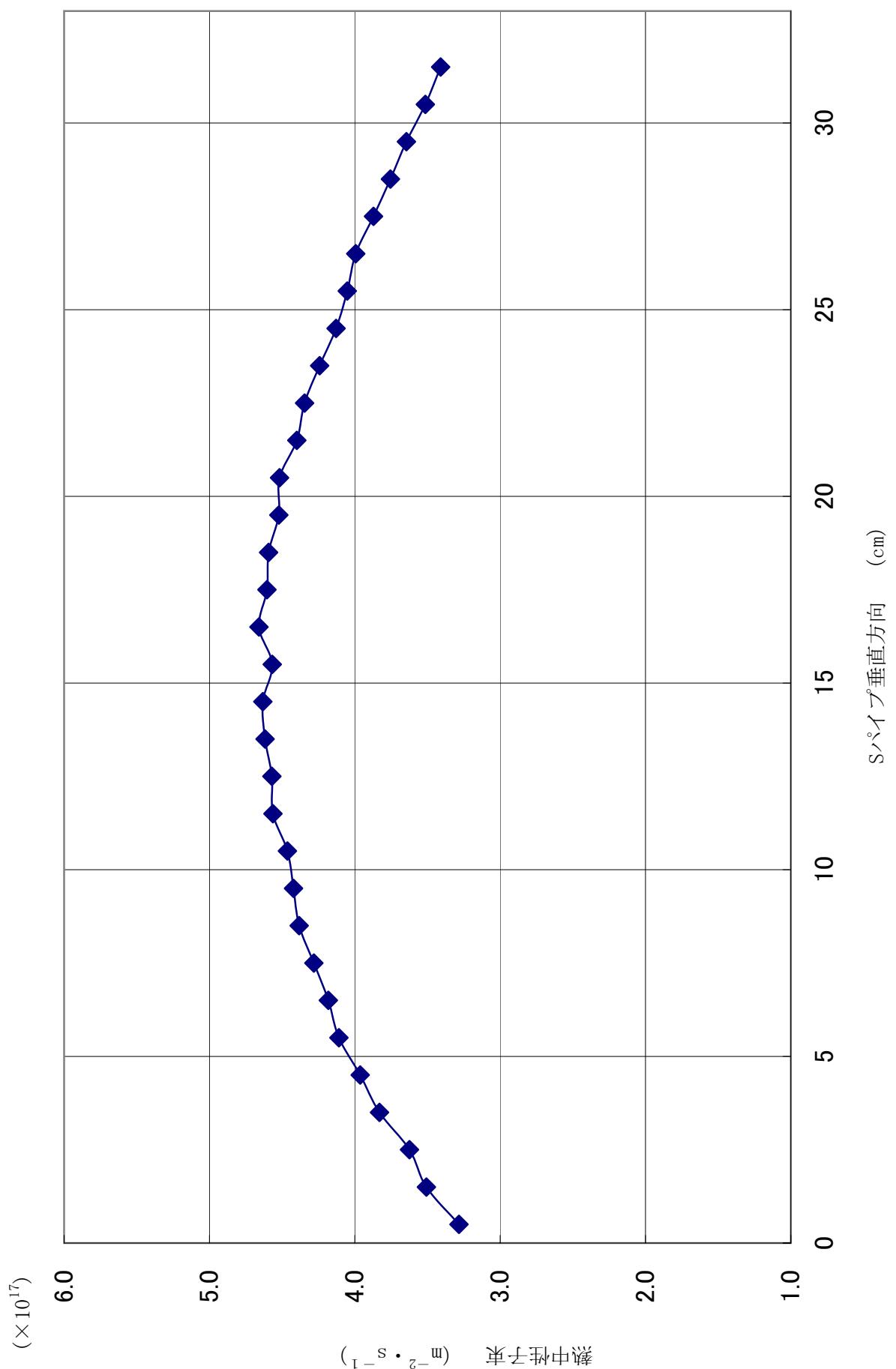


Fig.33 平成13年度の簡易照射筒 S_{n-p} の熱中性子束垂直方向分布

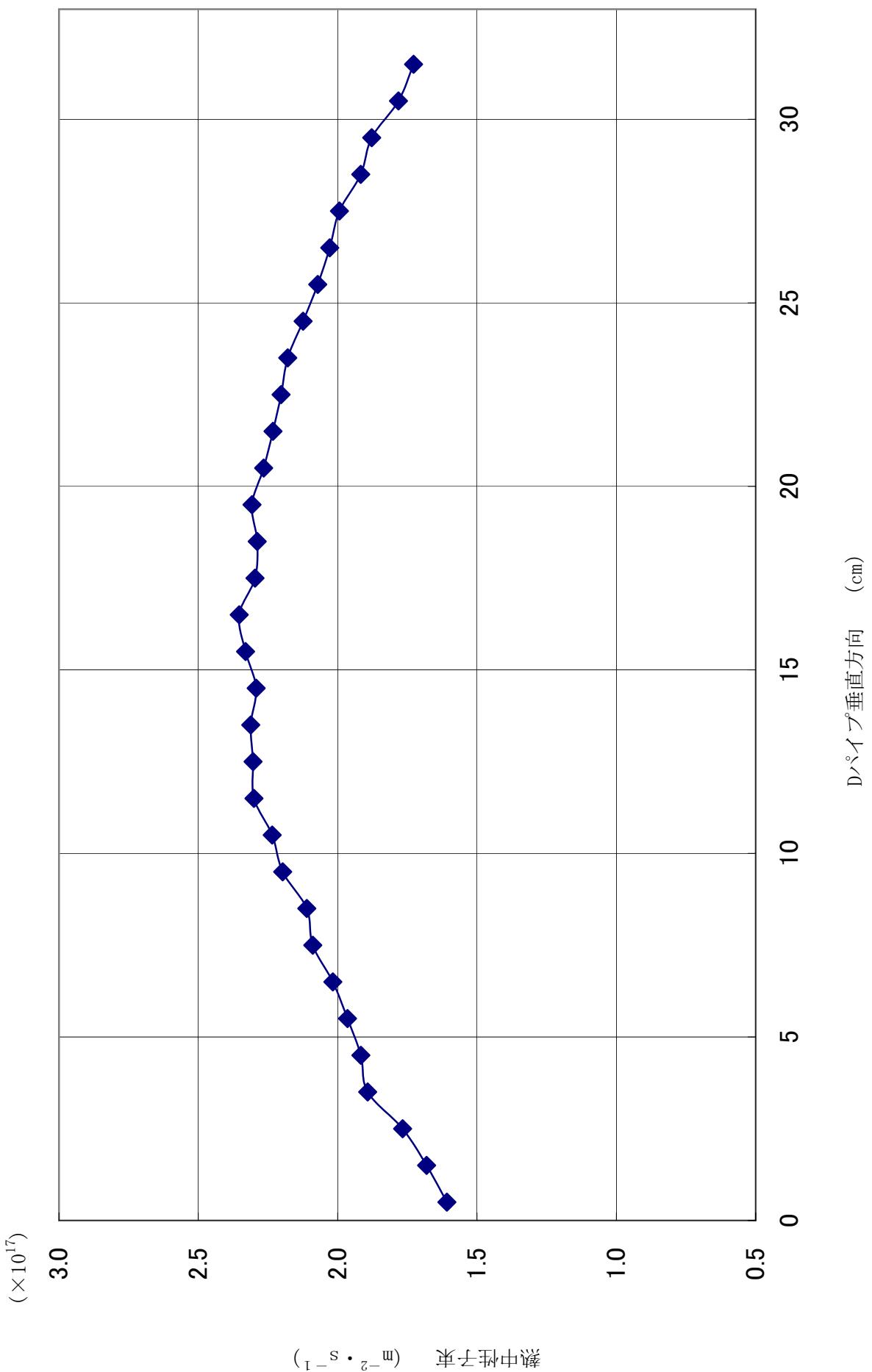


Fig.34 平成13年度の簡易照射筒Dパイプ垂直方向熱中性子束分布

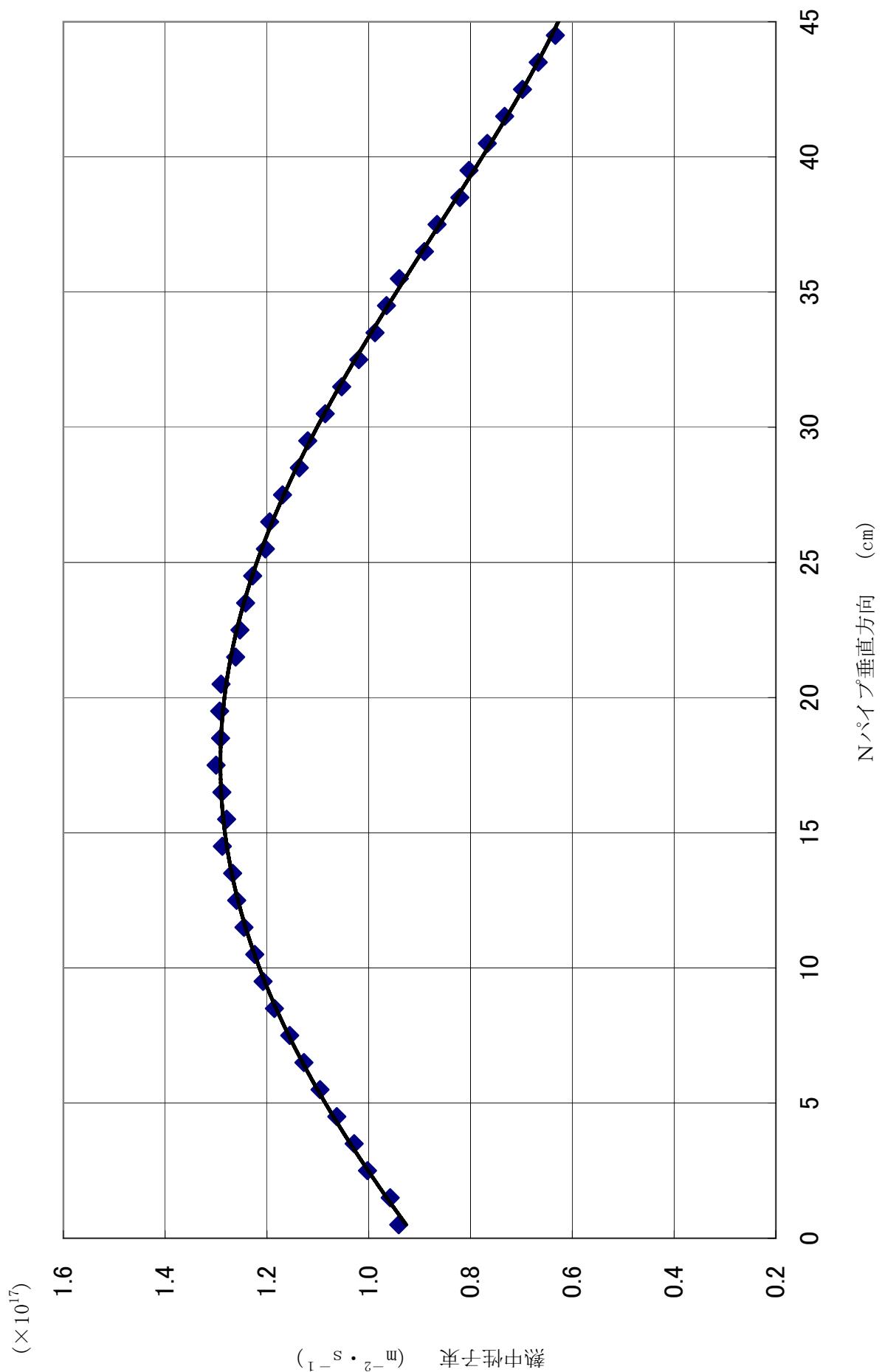


Fig.35 平成13年度の簡易照射筒 NPAIプロの熱中性子束垂直方向分布

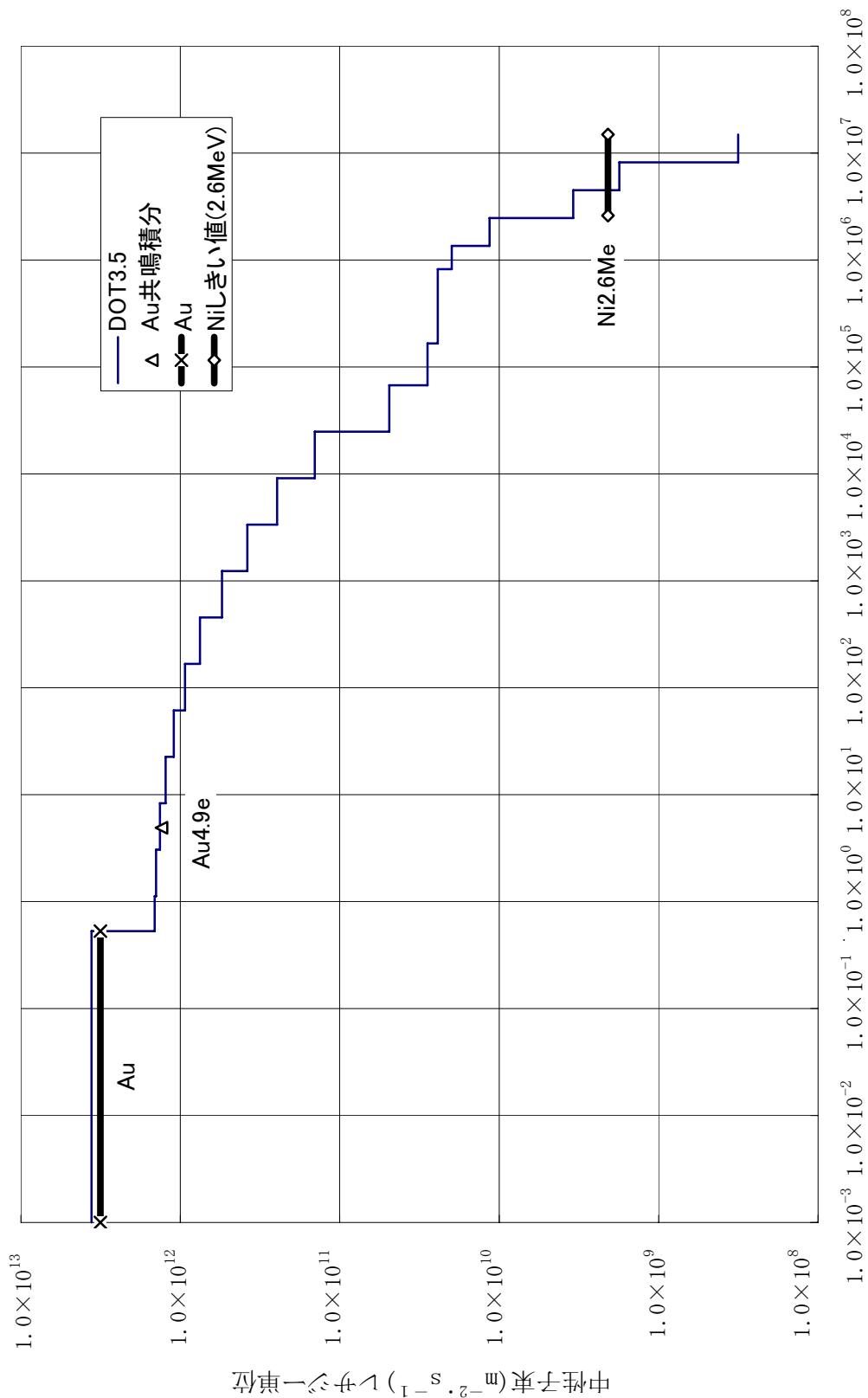


Fig.36 热中性子束 I モードにおける中性子スペクトルの計算結果と実験データの比較
エネルギー

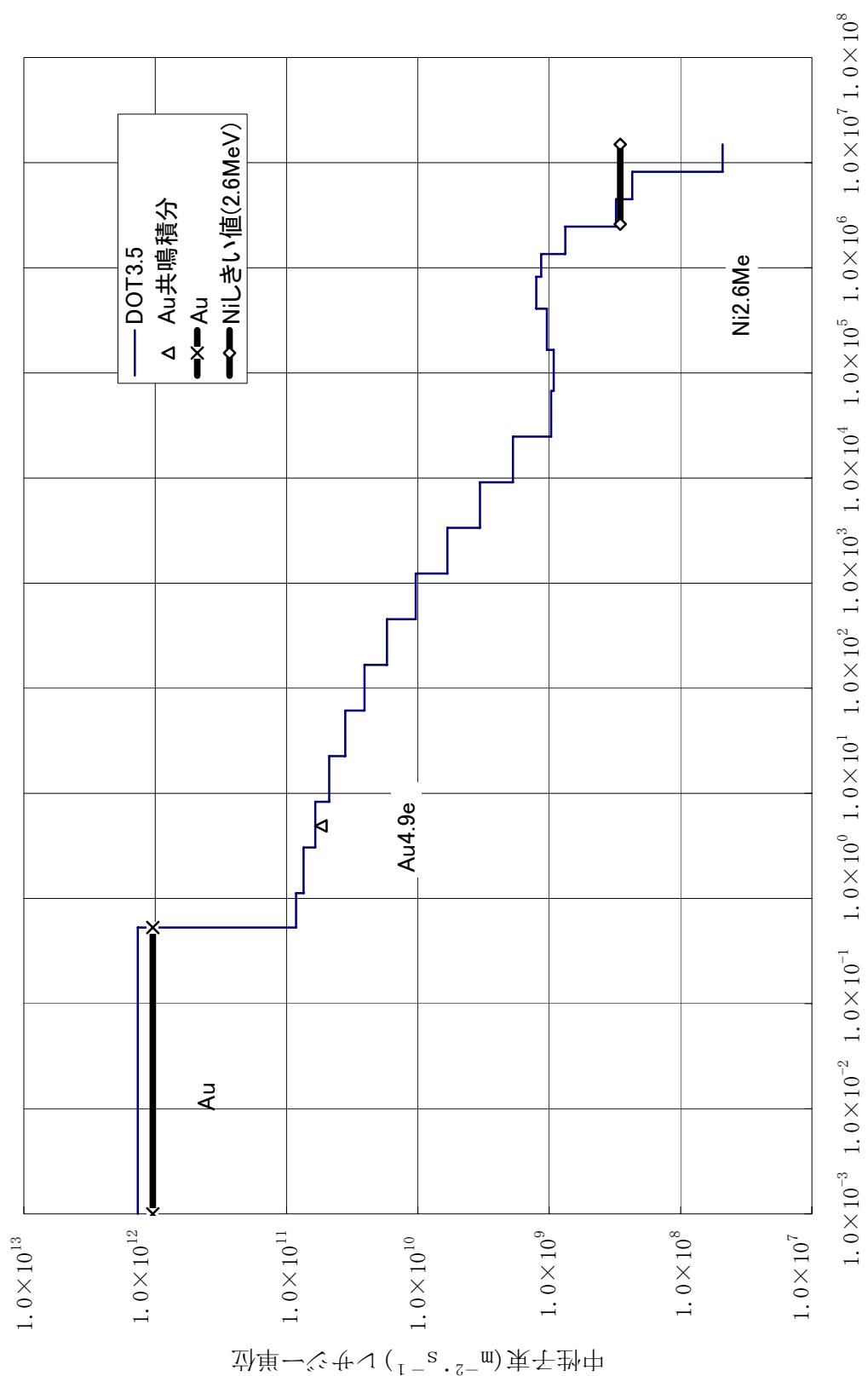


Fig.37 热中性子モード II における中性子スペクトルの計算結果と実験値の比較
エネルギー

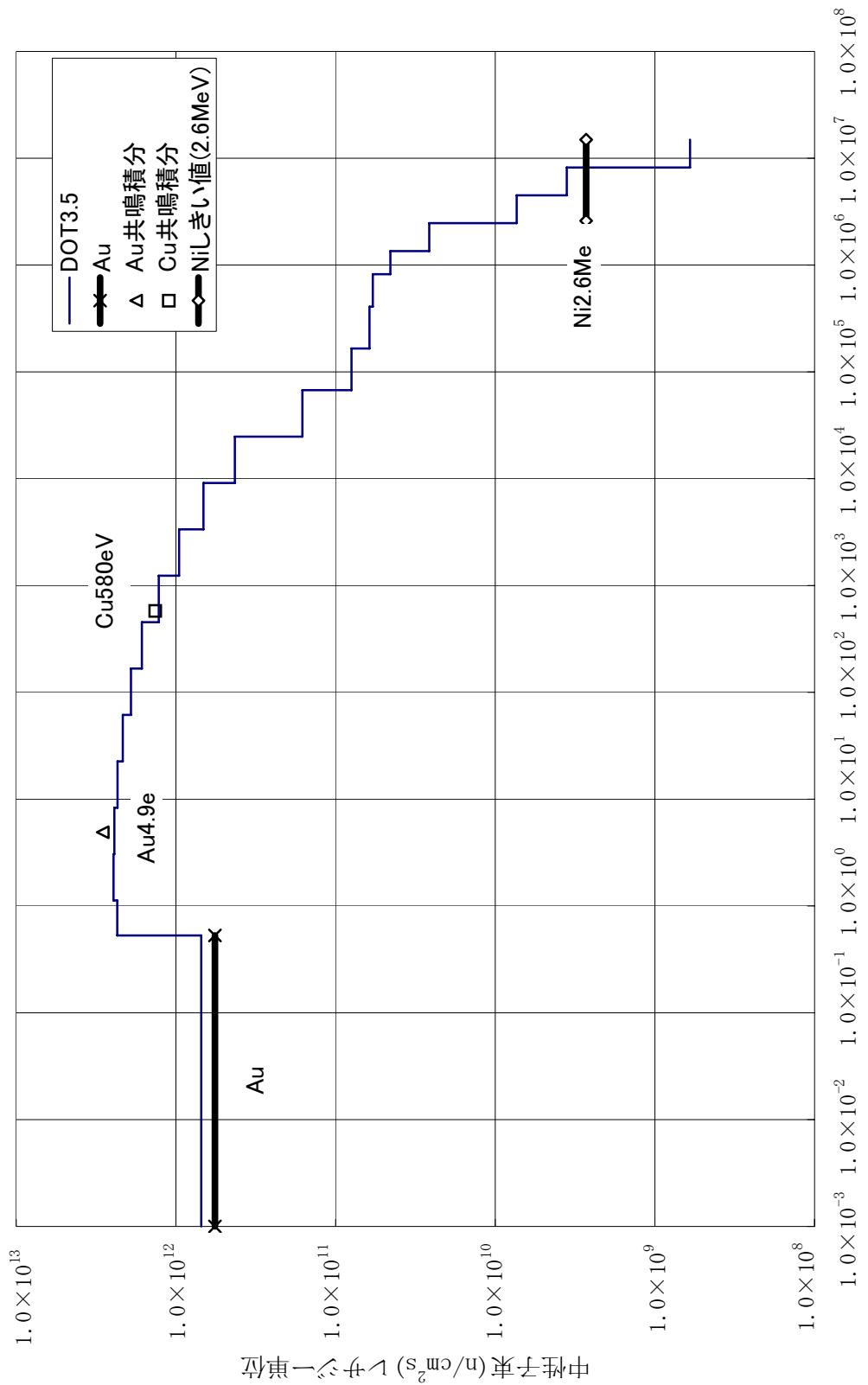


Fig.38 熱外中性子モードにおける中性子スペクトルの計算結果と実験値の比較
エネルギー

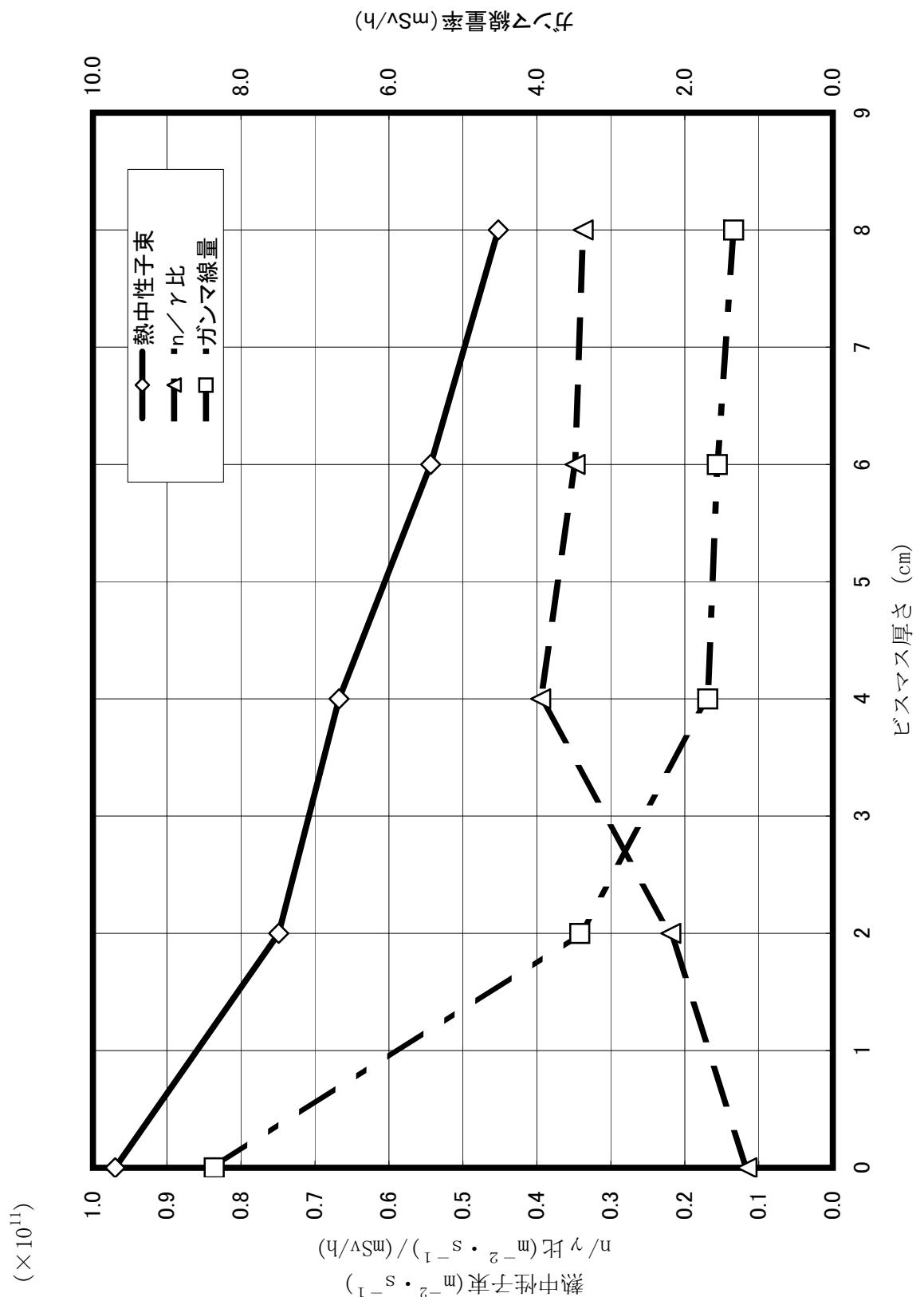


Fig.39 即発ガンマ線分析装置の熱中性子束とガンマ線との比

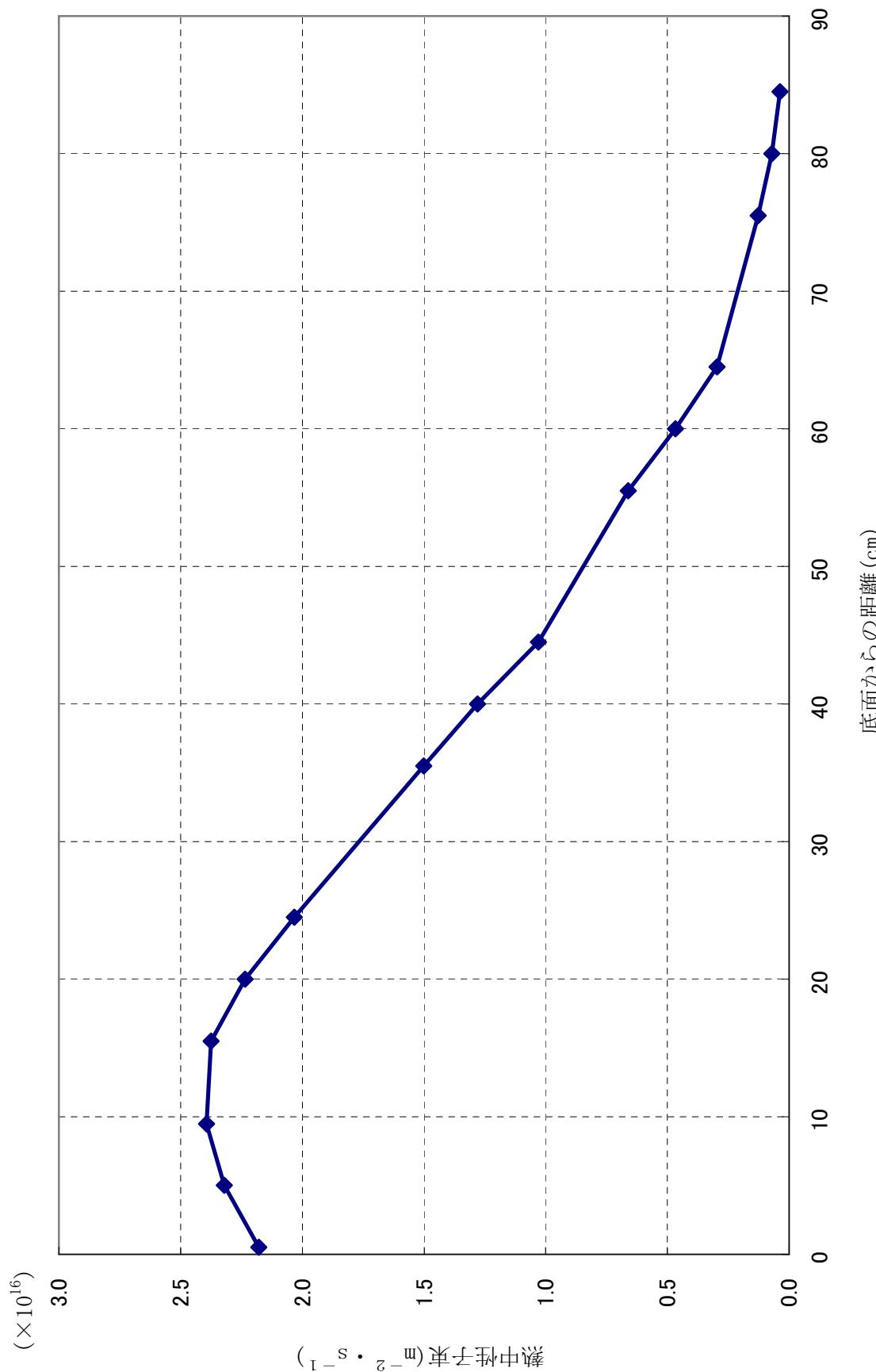


Fig.40 定位置でのプール設備照射筒内高さ方向の熱中性子束分布

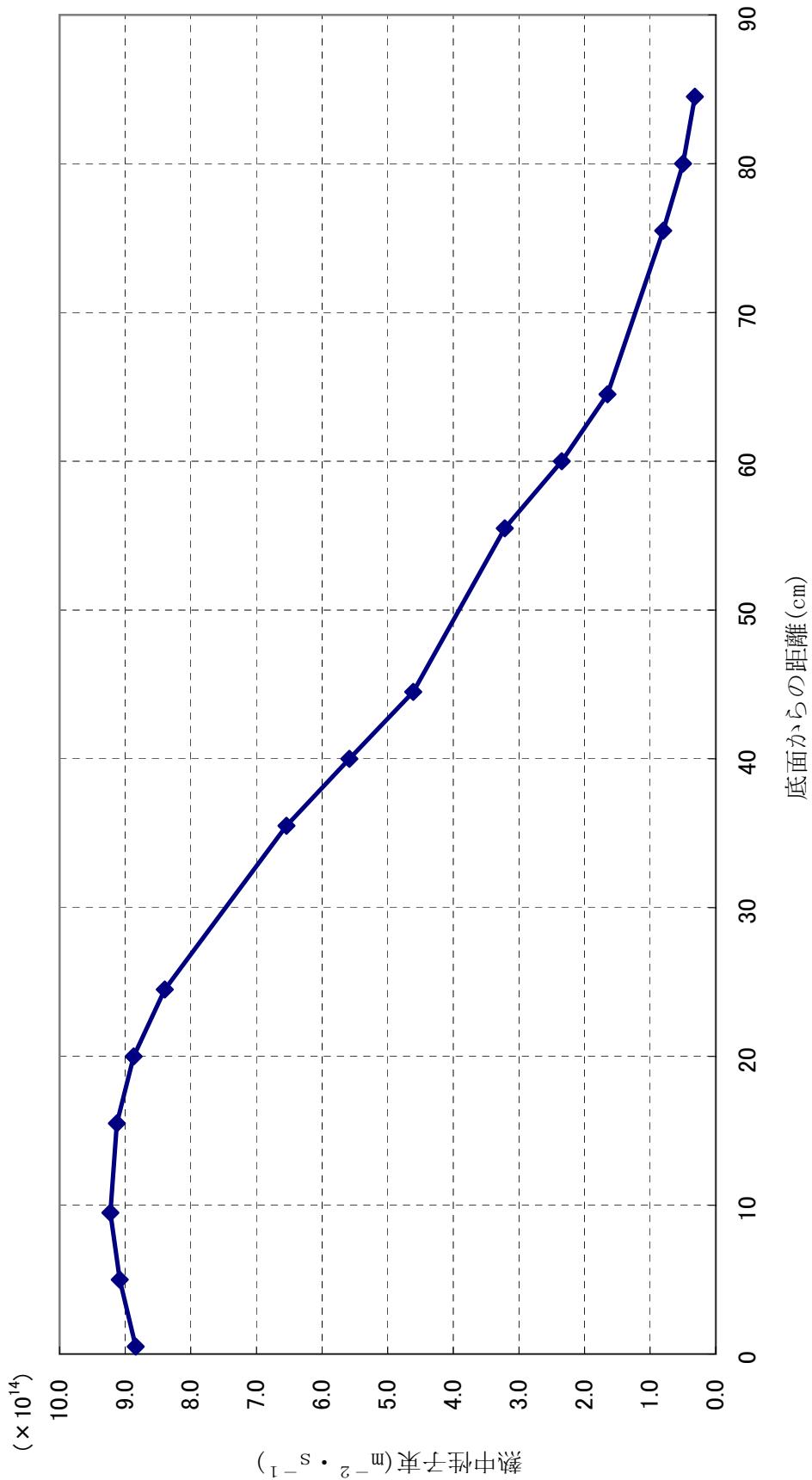
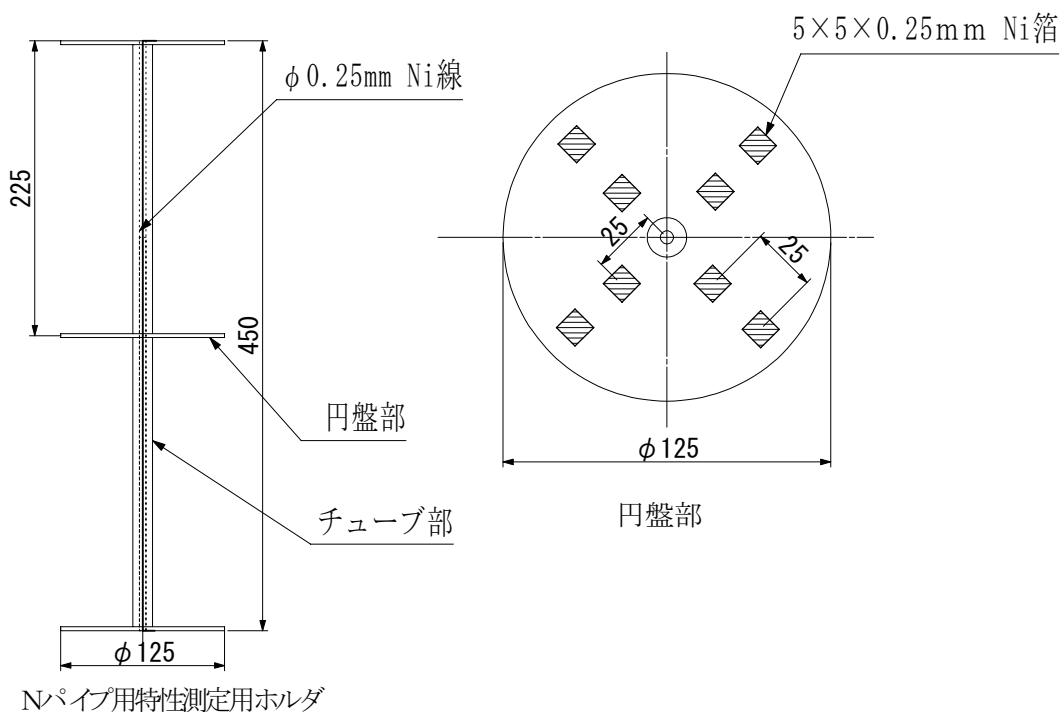
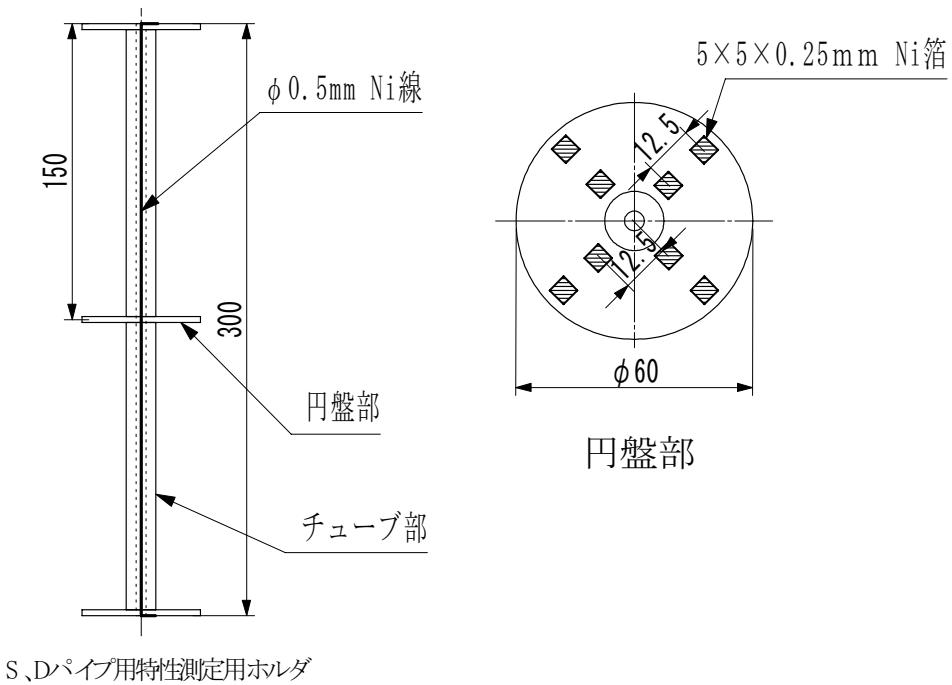


Fig.41 定位置から15cm離れた位置でのプール設備照射筒内高さ方向の熱中性子束分布



Nパイプ用特性測定用ホルダ
Fig.42 Nパイプの高速中性子測定用 Ni 線、Ni 箔配置図



S,Dパイプ用特性測定用ホルダ
Fig.43 S,Dパイプの高速中性子測定用 Ni 線、Ni 箔配置図

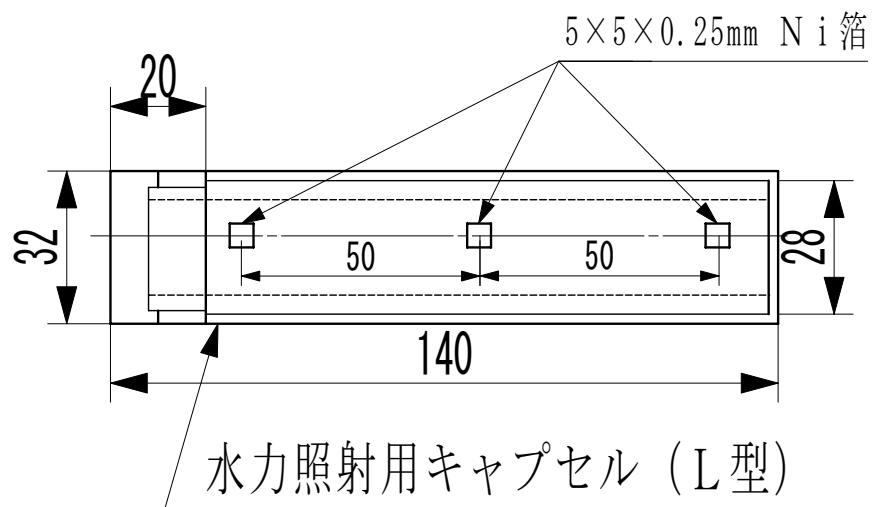


Fig.44 水力照射設備の高速中性子測定用 Ni 線、Ni 箔配置図

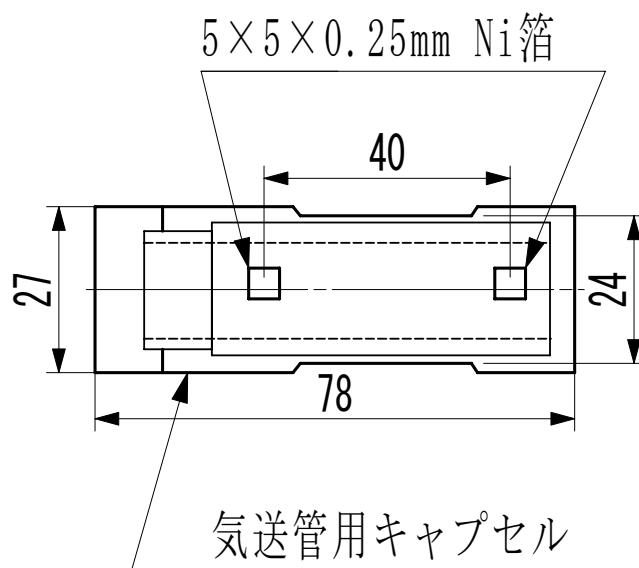


Fig.45 気送管照射設備の高速中性子測定用 Ni 線、Ni 箔配置図

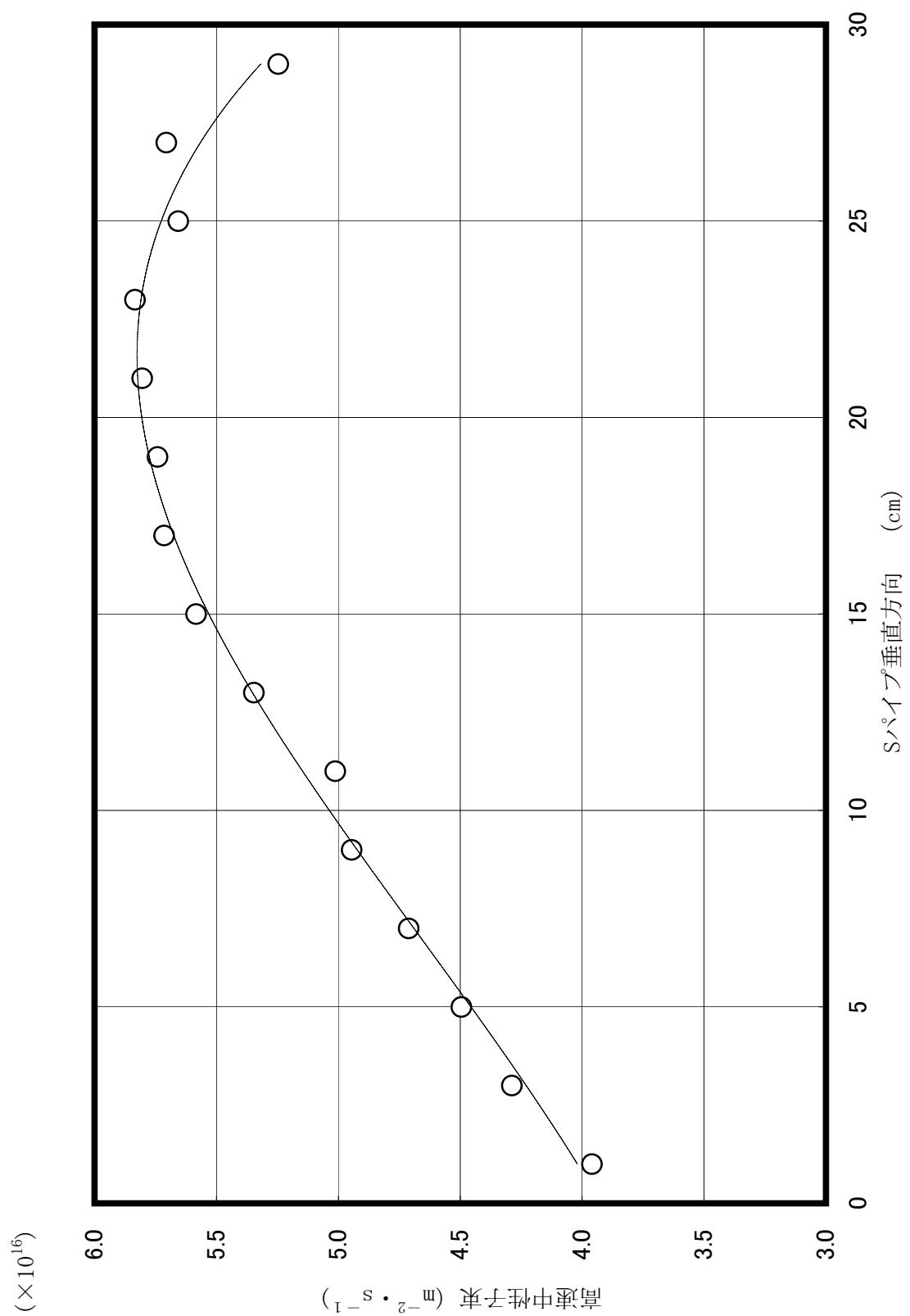


Fig.46 Sパイプの高速中性子の軸方向分布

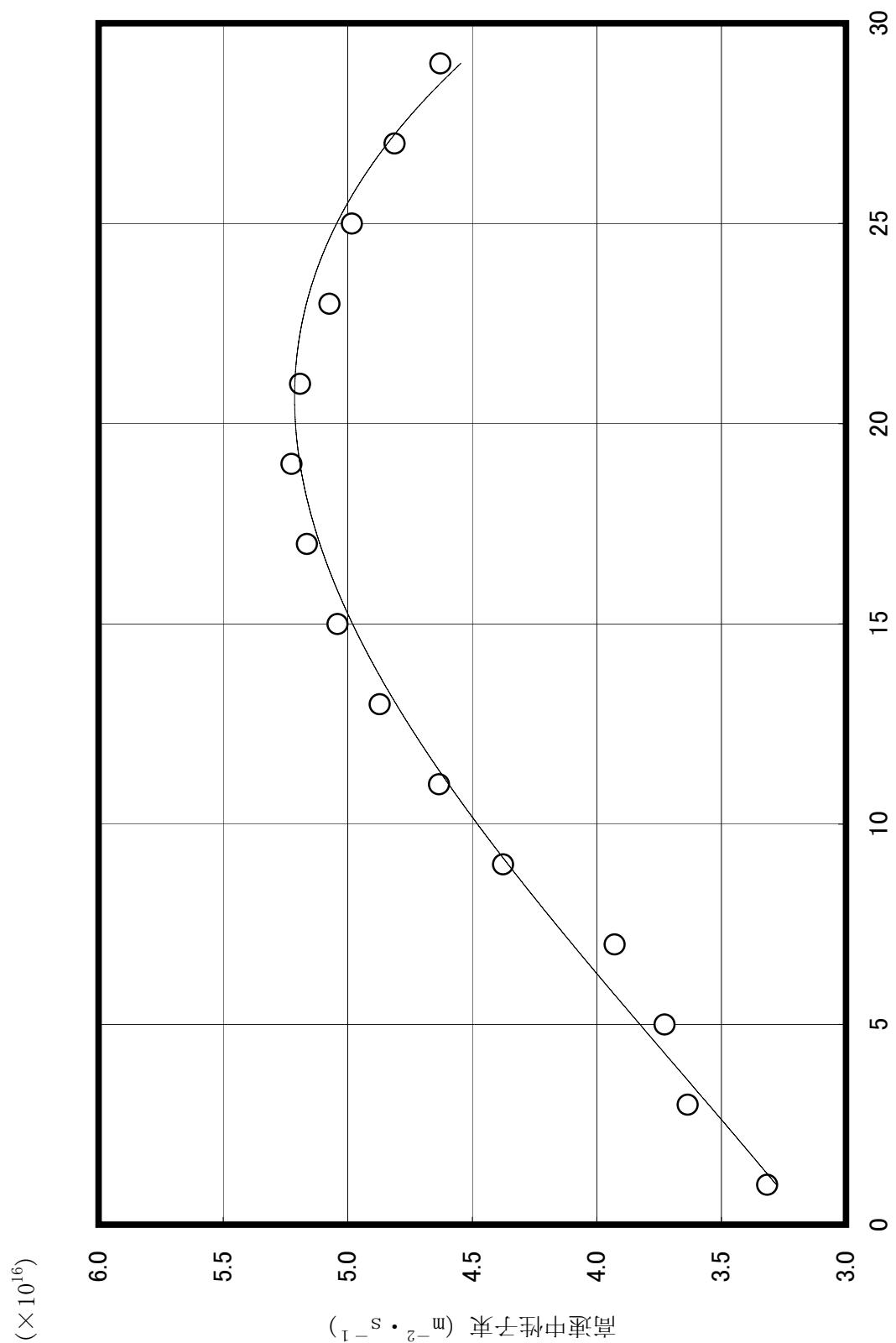


Fig.47 Dパイプの高速中性子の軸方向分布

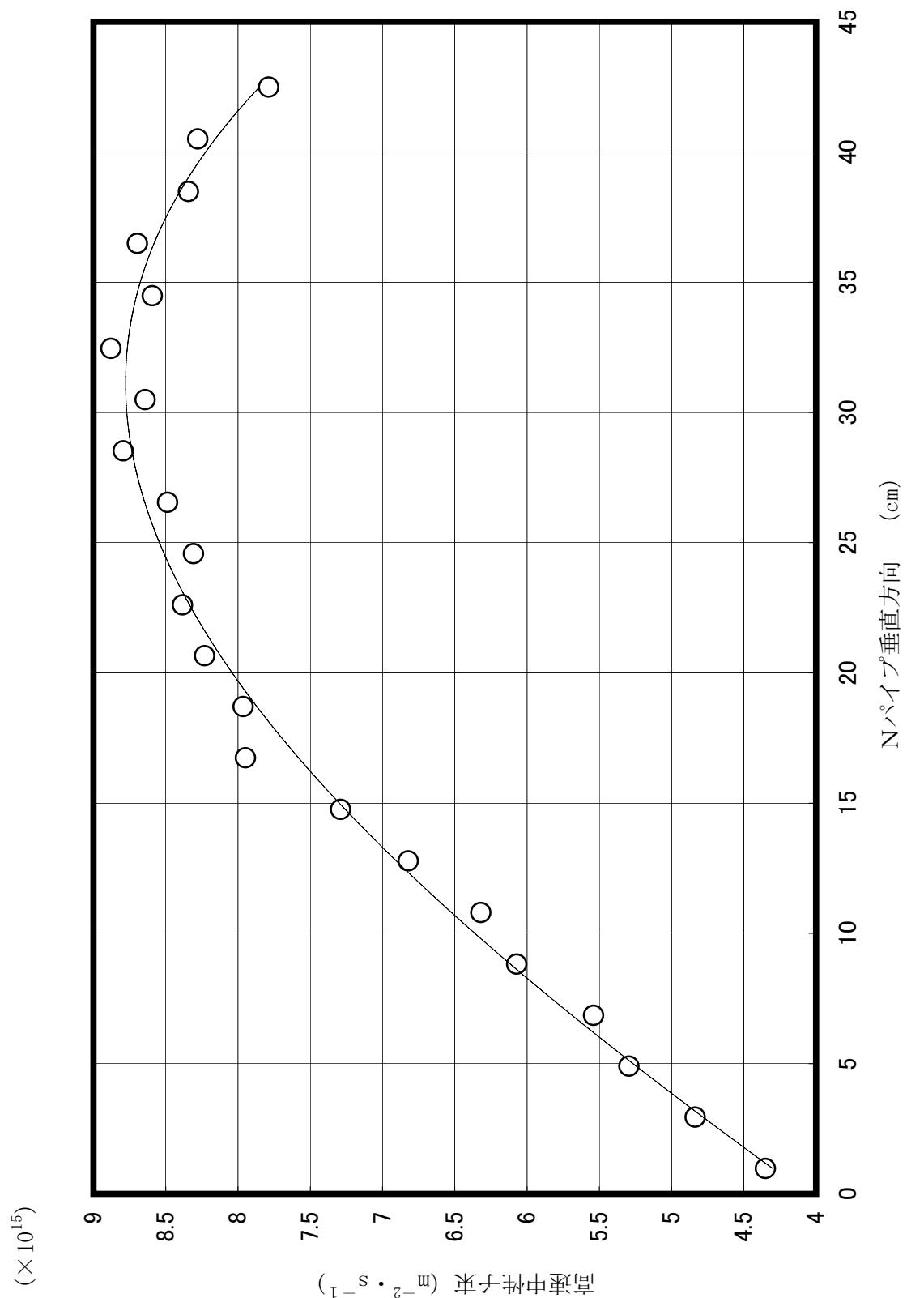


Fig.48 Nハイブの高速中性子の軸方向分布

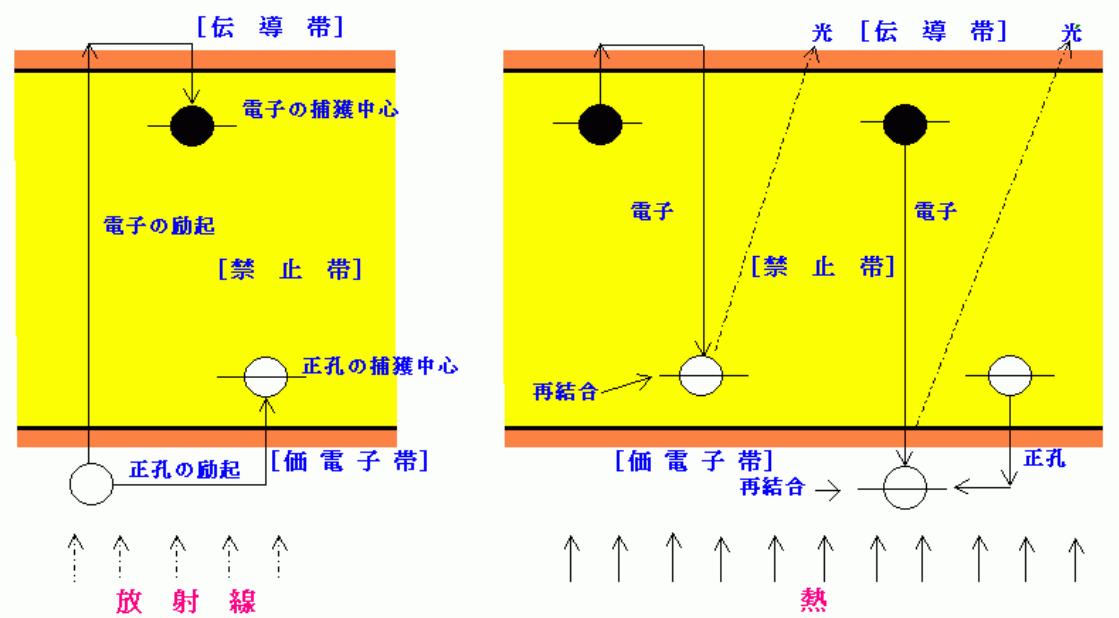


Fig.49 TLD の原理

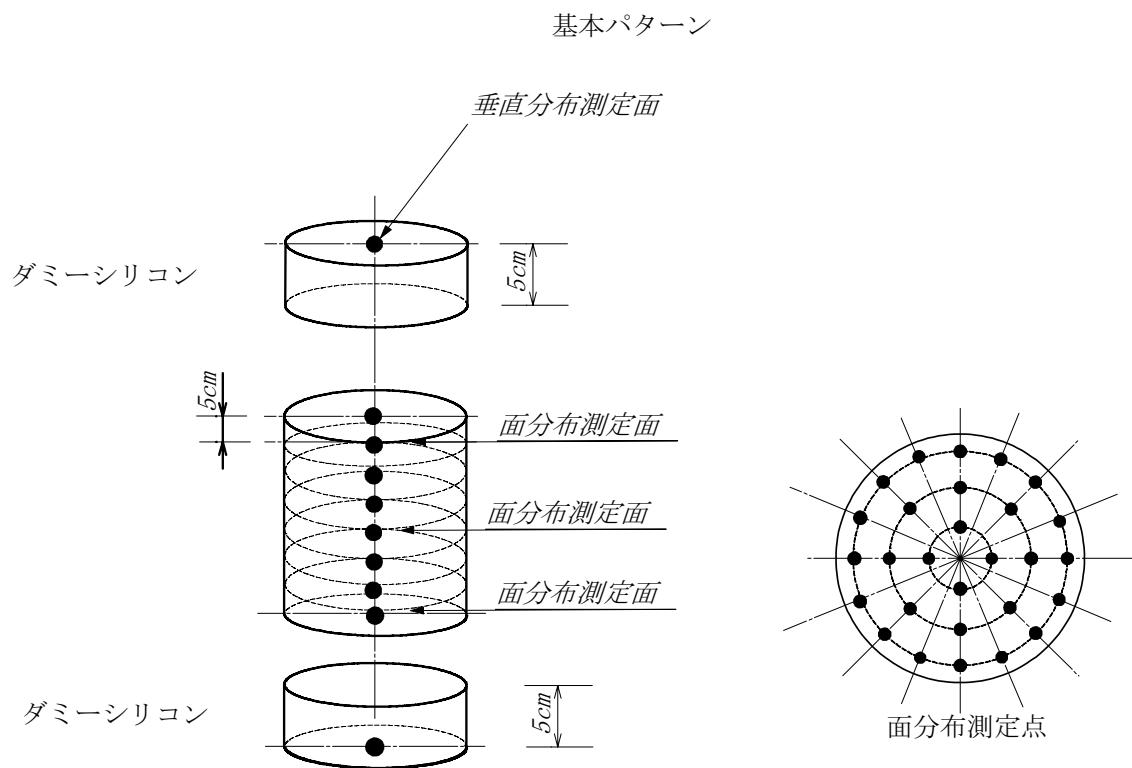
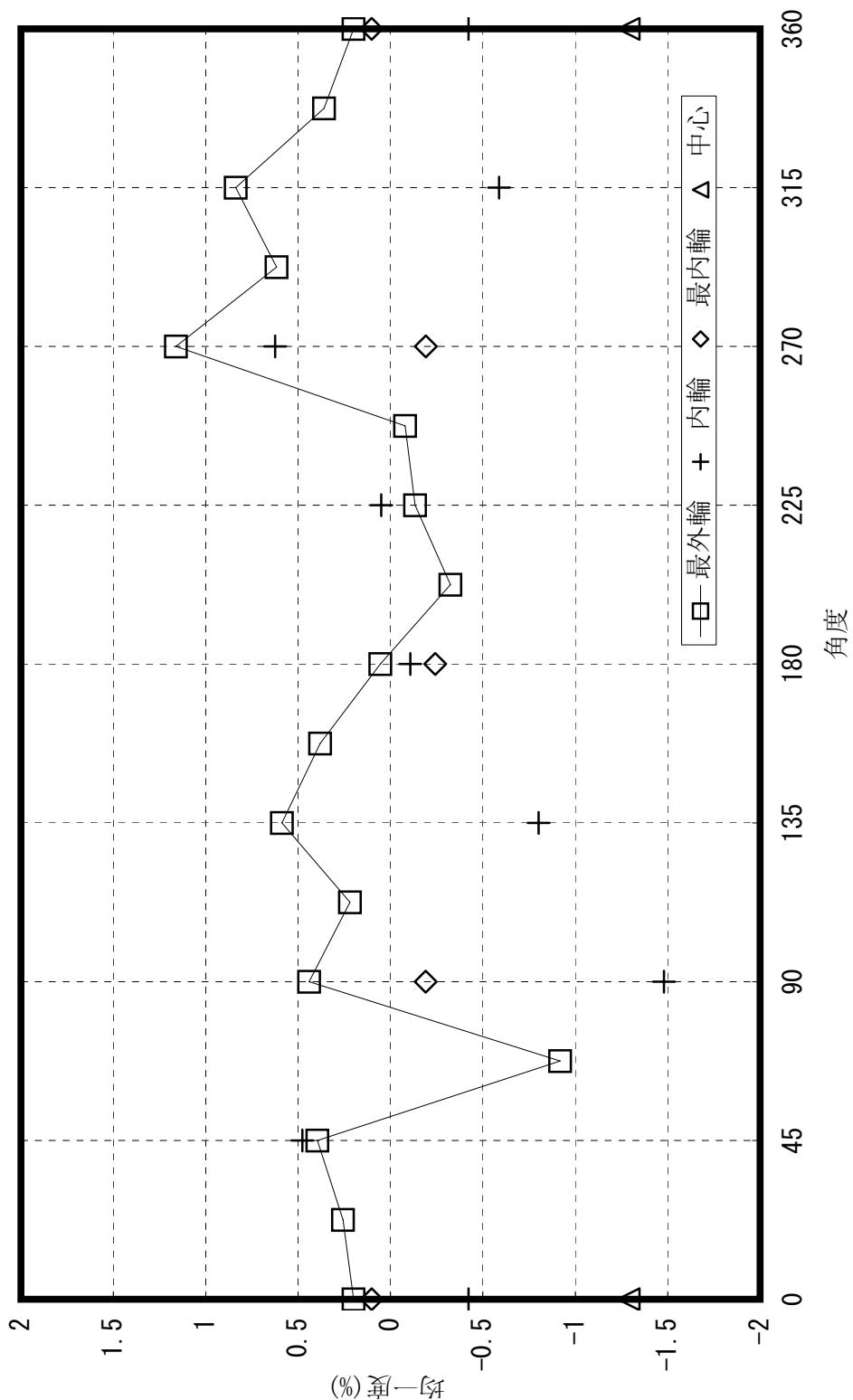


Fig.50 均一照射測定基本パターン

Fig.51 ネプイヌ(照射位置0mm、回転有)におけるシリコン($\Phi 5\text{in}$ 、高さ40cm)の上段均一度

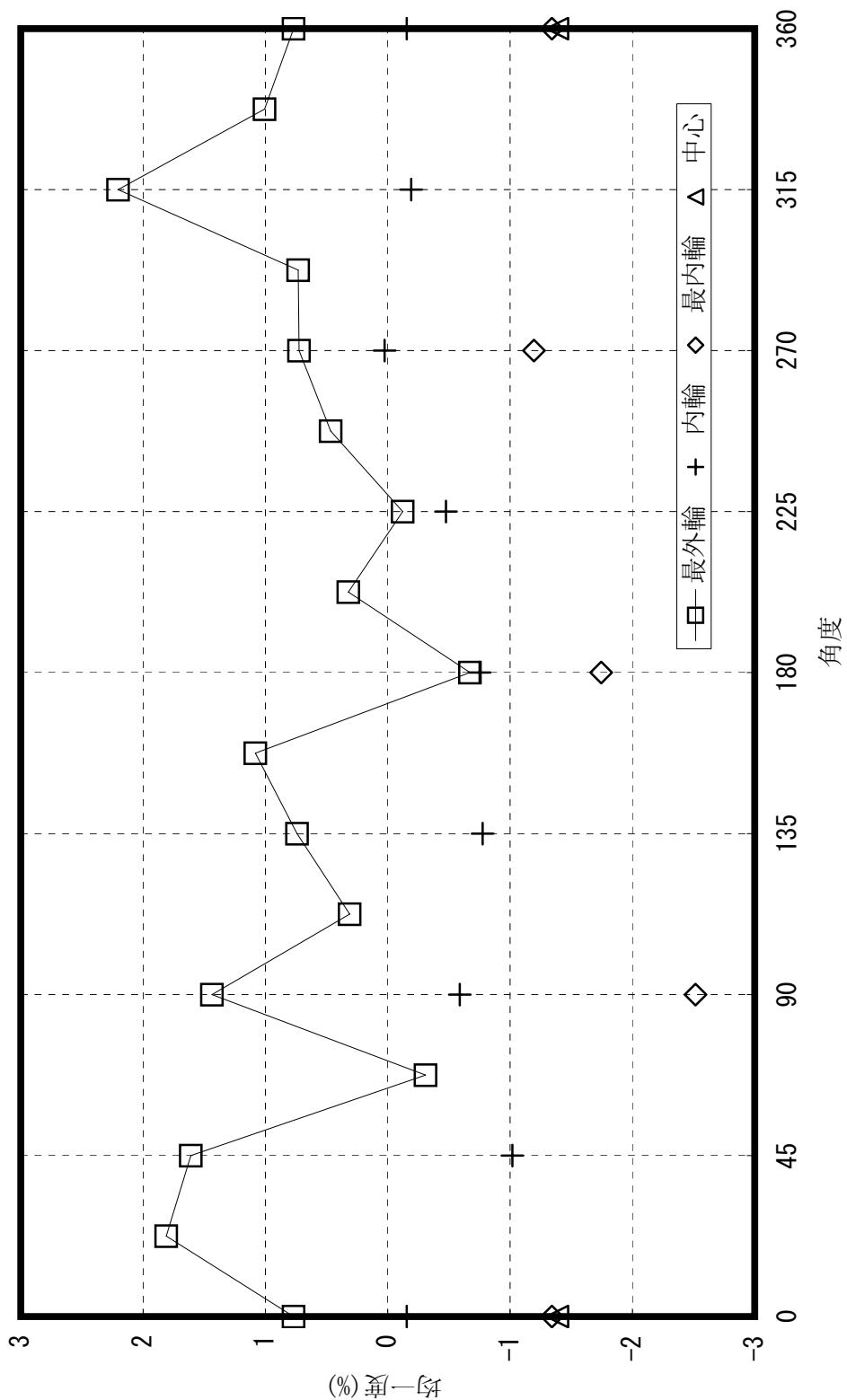


Fig.52 ナベイブ(照射位置0mm、回転有)におけるシリコン($\Phi 5\text{in}$ 、高さ40cm)の中段均一度

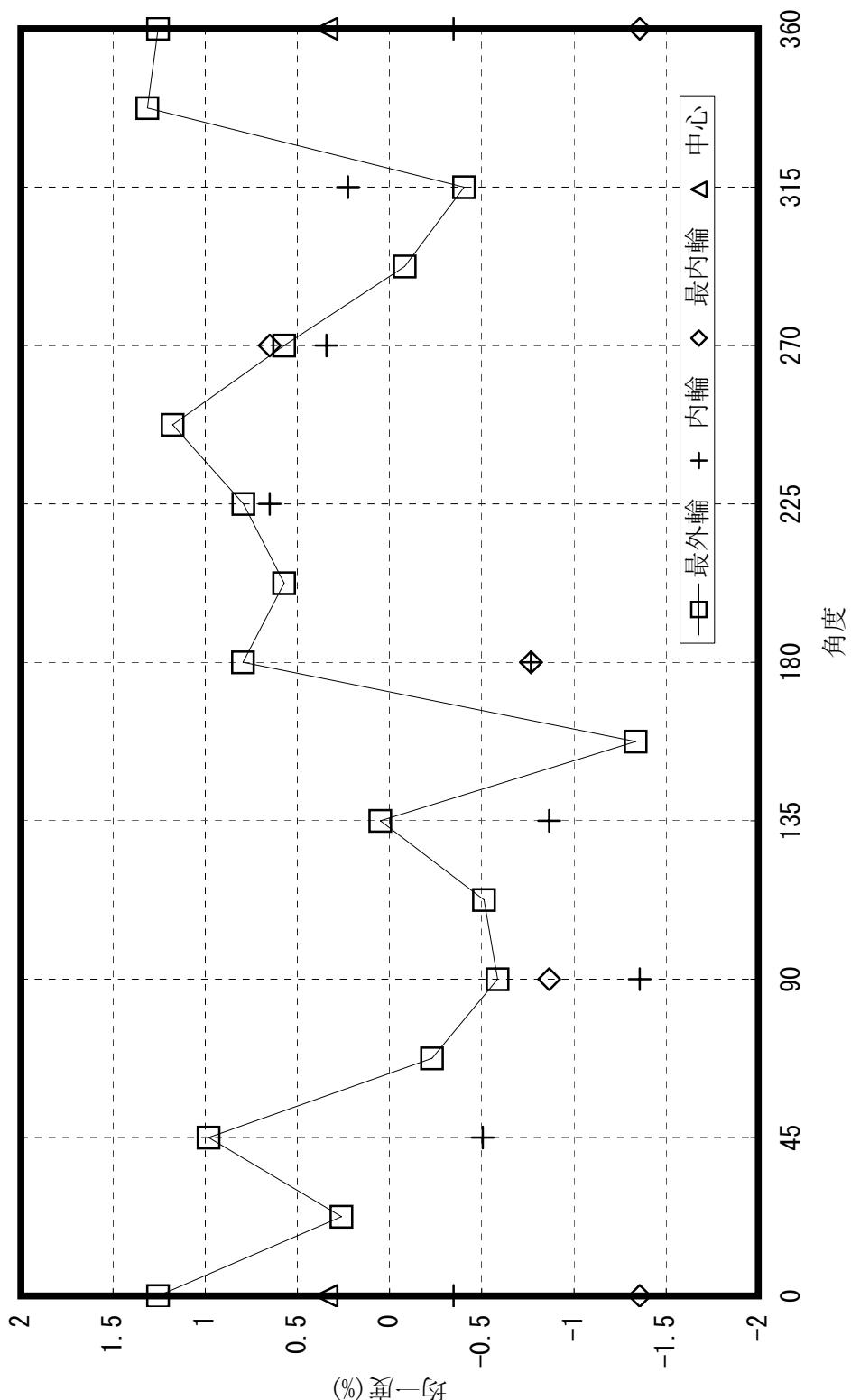


Fig.53 NaviPro(照射位置0mm、回転有)におけるシリコン($\Phi 5\text{in}$ 、高さ40cm)の下段均一度

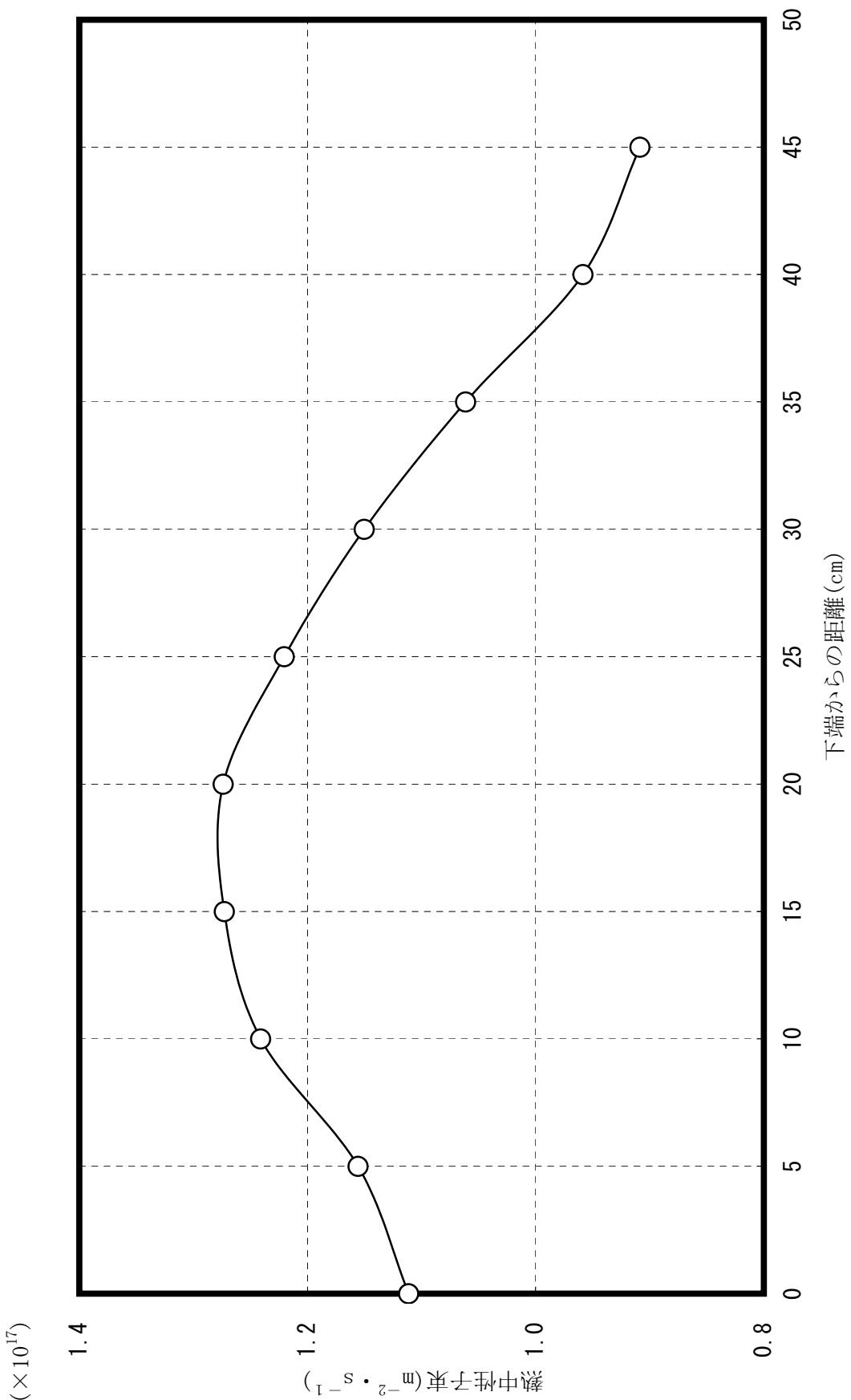


Fig.54 Nハイブ(照射位置0mm、回転有)におけるシリコン(Φ_{5in})の熱中性子垂直分布

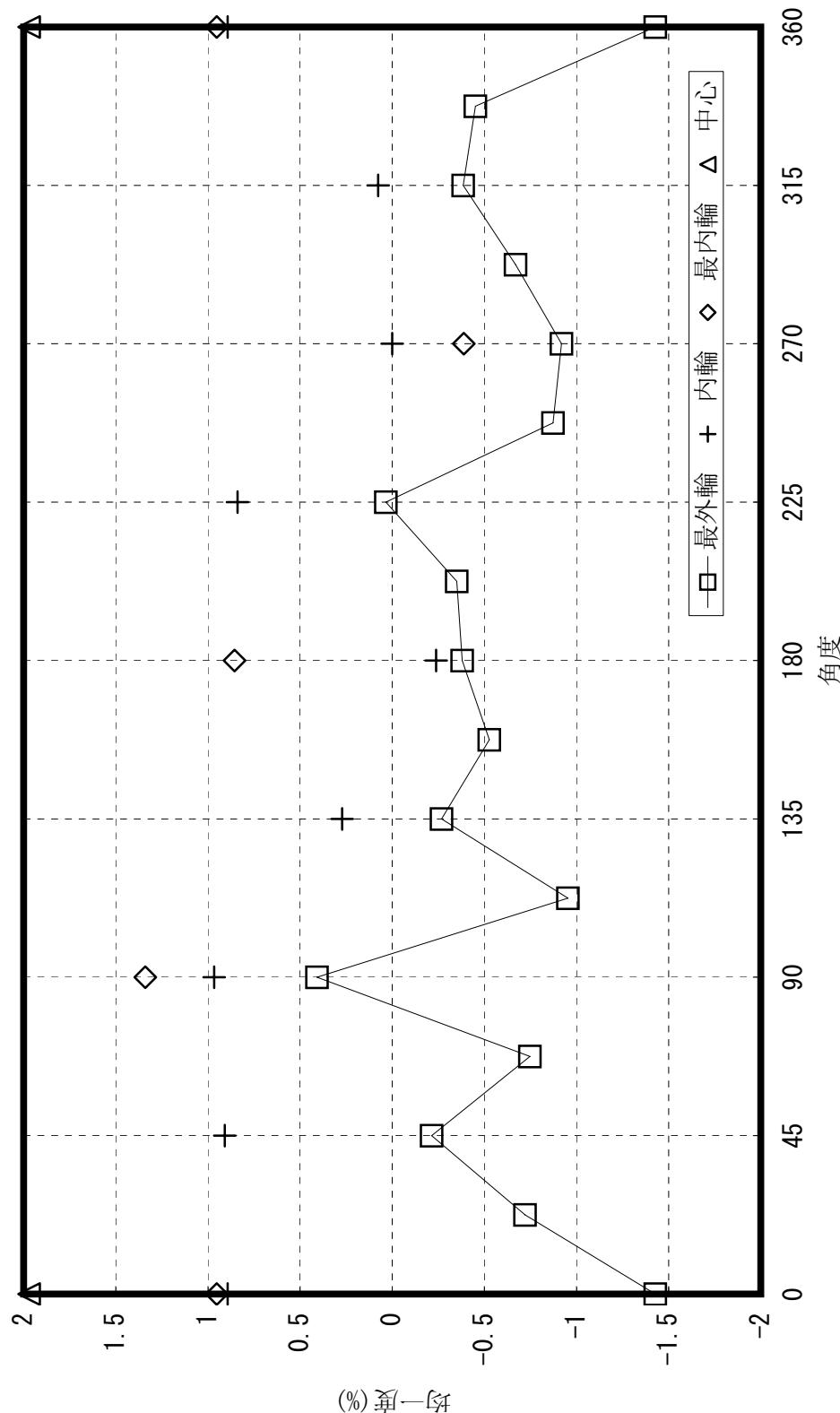


Fig.55 Nハイブ(照射位置250mm、回転有)におけるシリコン($\Phi 5\text{in}$ 、高さ40cm)の上段均一度

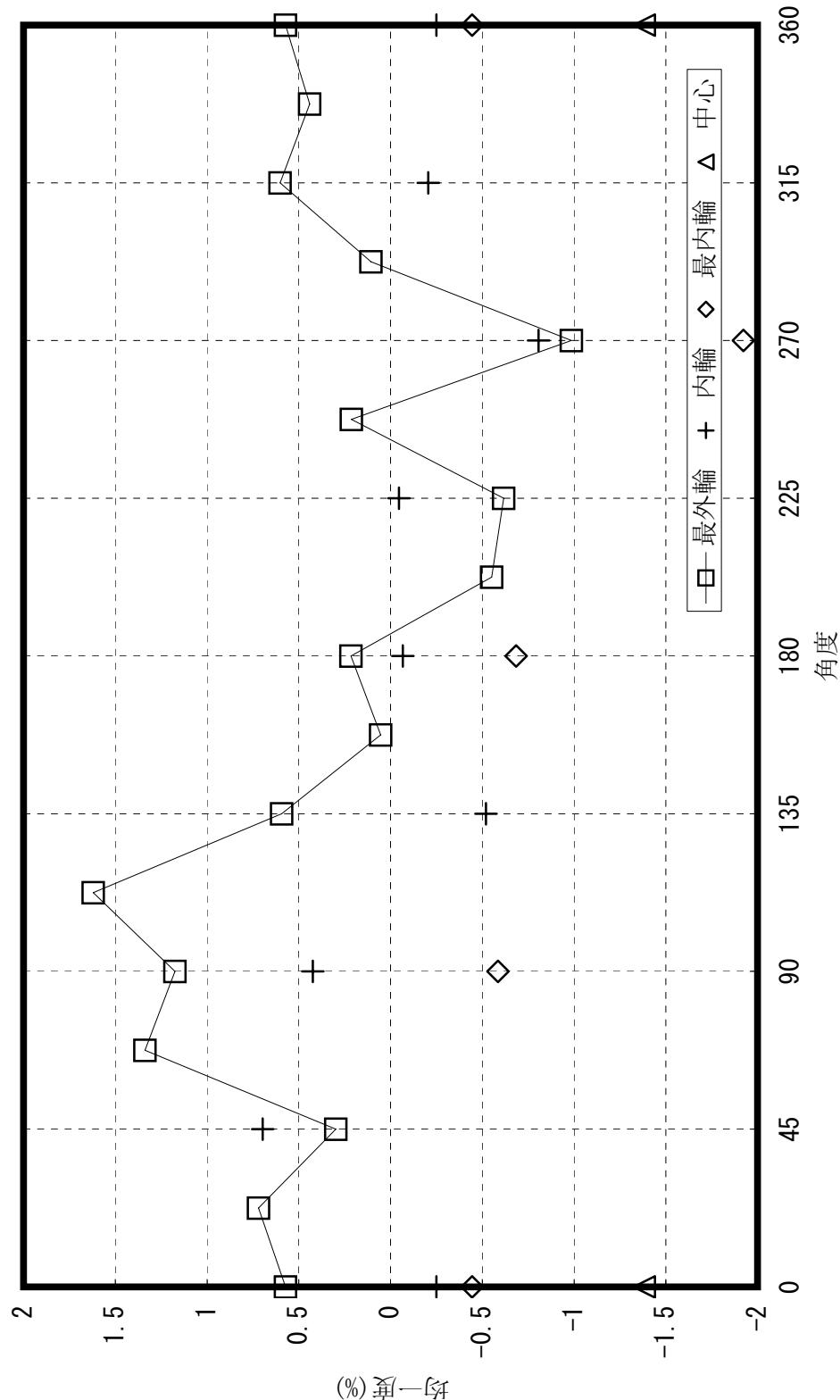


Fig.56 Naphypr(照射位置250mm、回転有)におけるシリコン($\Phi 5\text{in}$ 、高さ40cm)の中段均一度

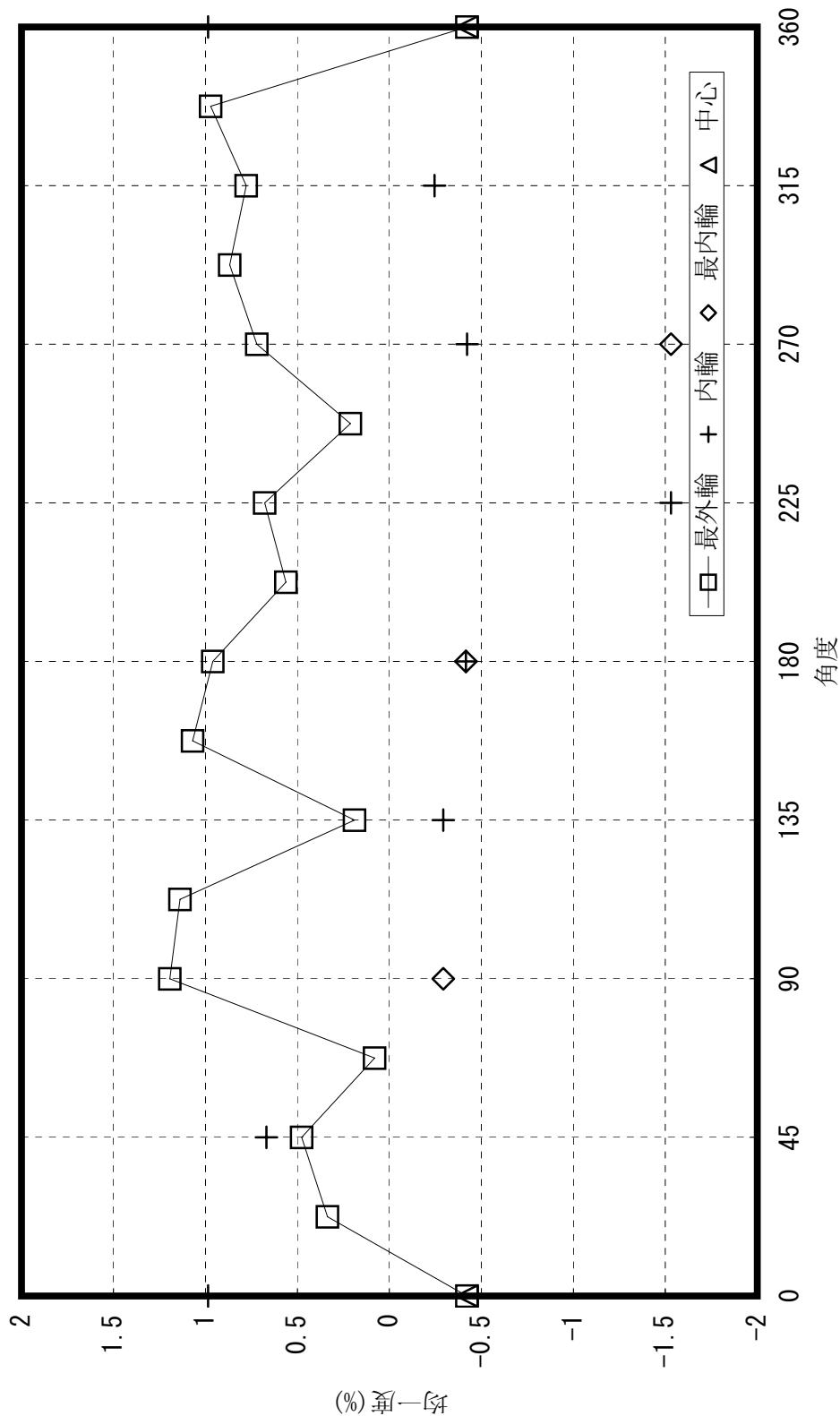


Fig.5.7 Nハイブ^o(照射位置250mm、回転有)におけるシリコン(Φ5in、高さ40cm)の下段均一度

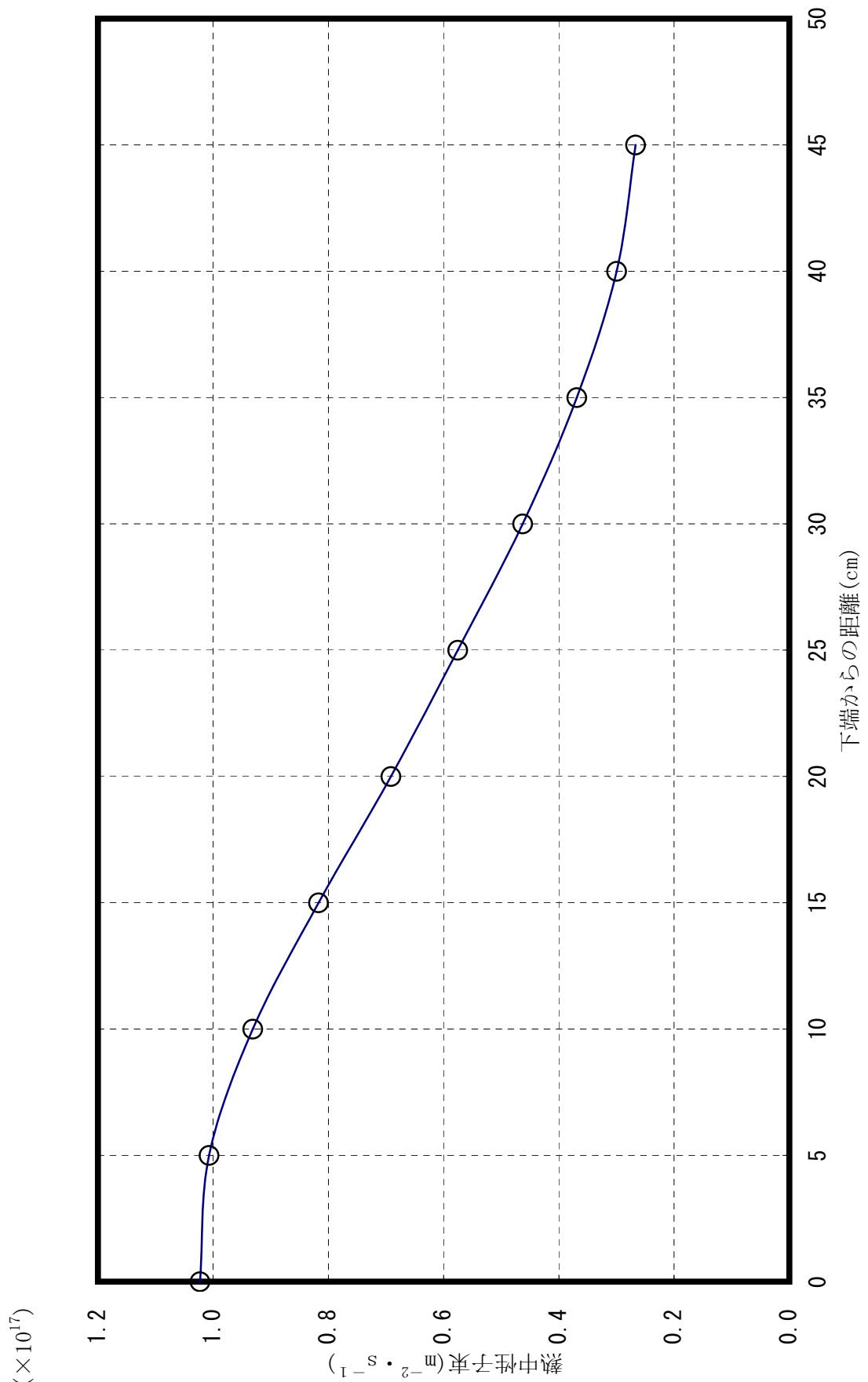
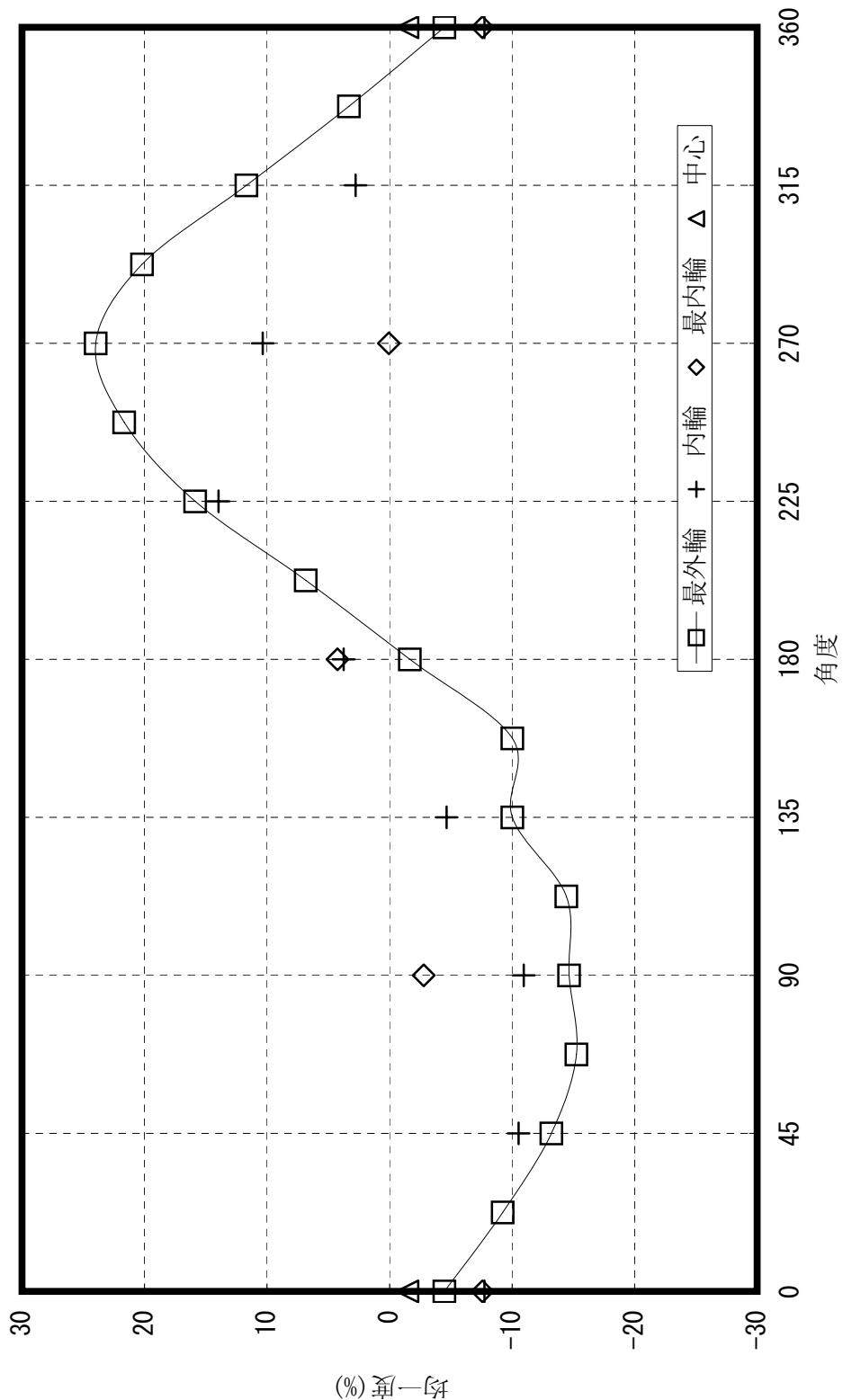


Fig.58 Nハイブ(照射位置250mm、回転有)におけるシリコン($\Phi 5in$)の熱中性子束垂直分布

Fig.59 Nハイブ(照射位置0mm、回転無)におけるシリコーン($\Phi 5\text{in}$ 、高さ40cm)の中段均一度

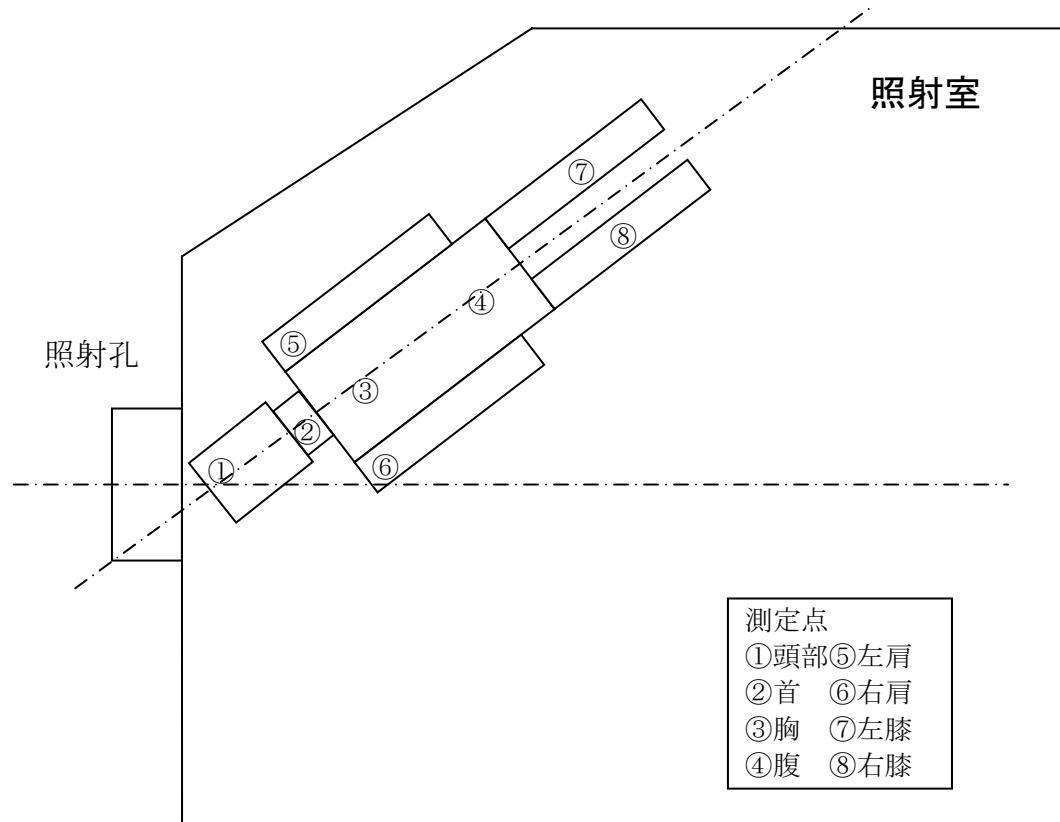


Fig.60 全身ファントム実験配置図

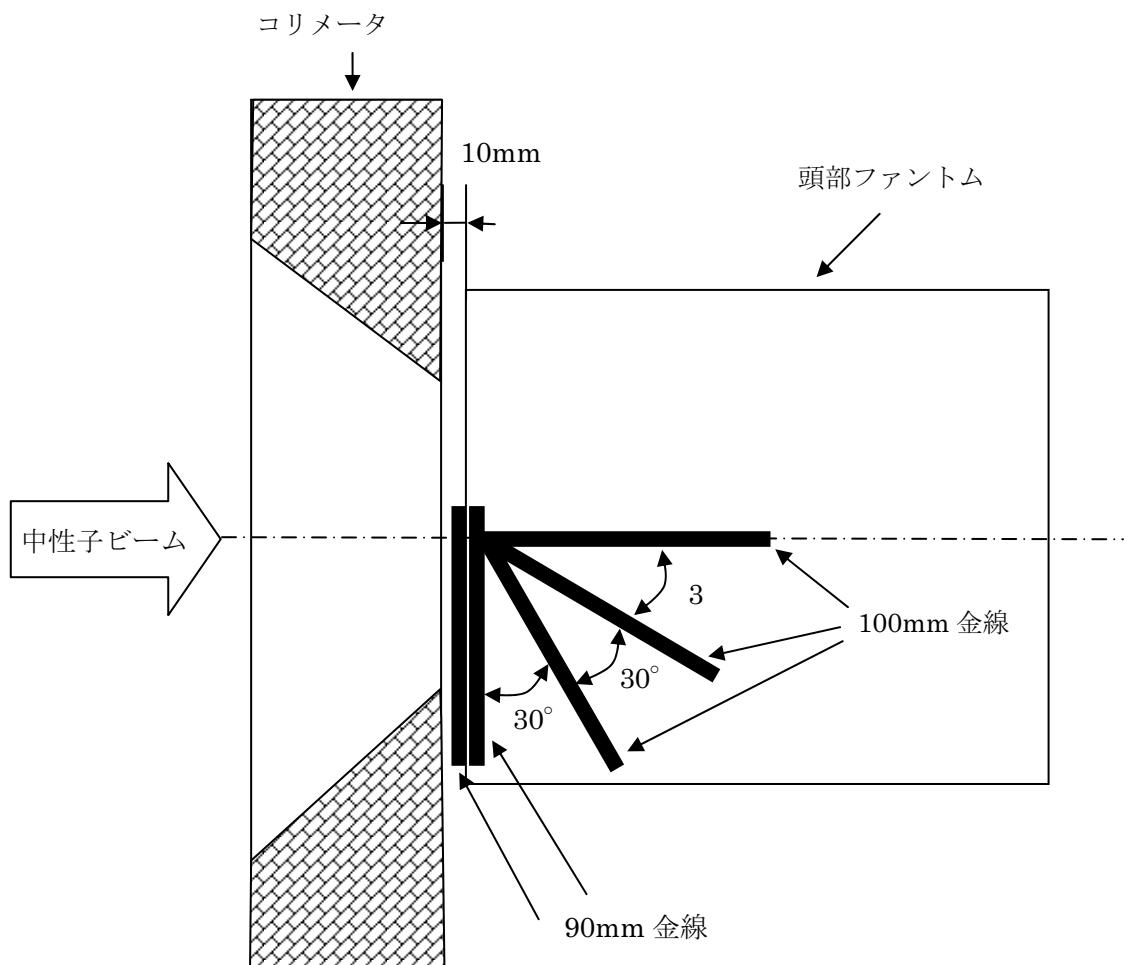


Fig.61 頭部ファントム

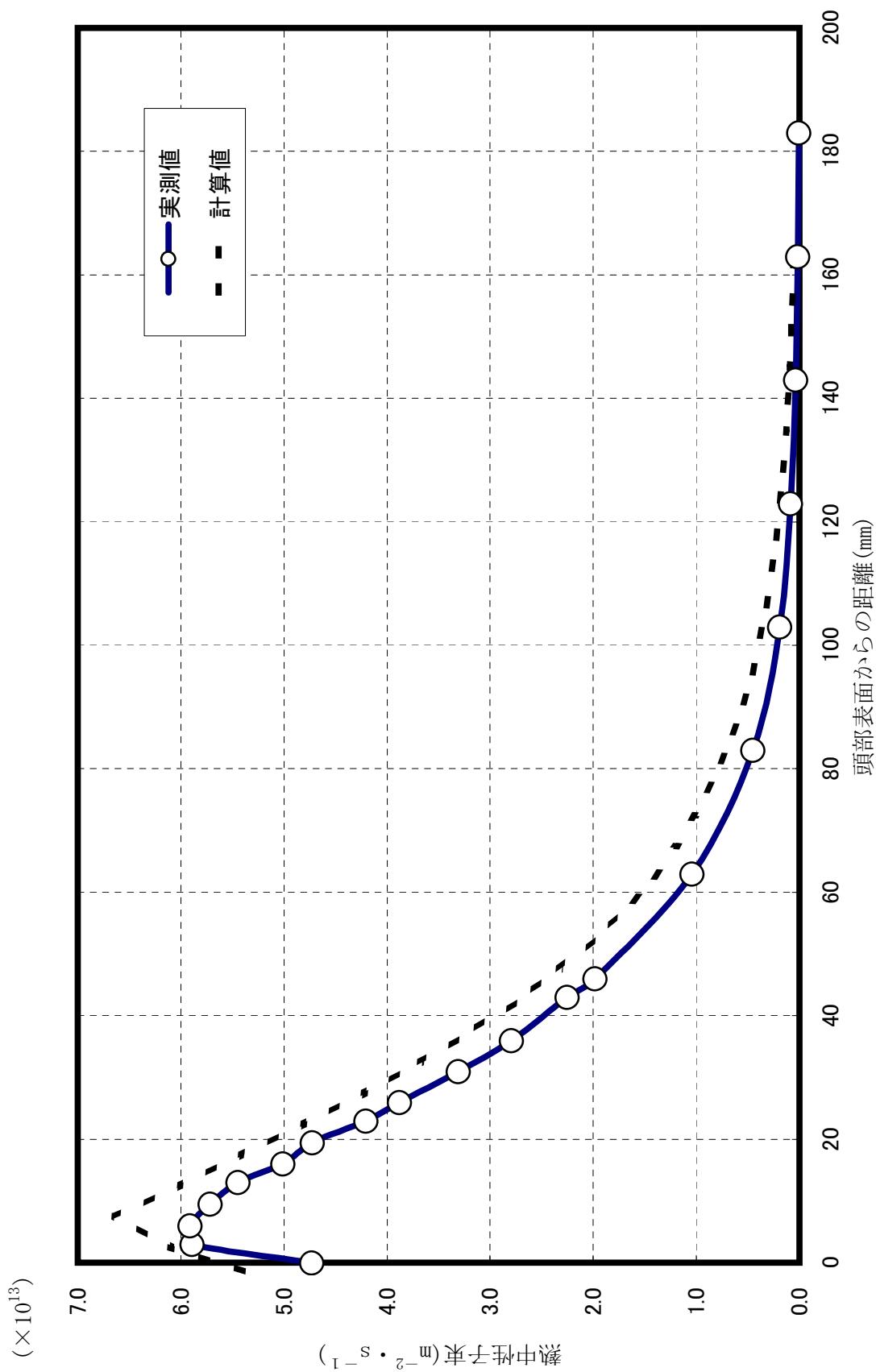


Fig.62 热中性子モードIにおける頭部水ファンタム内热中性子束分布

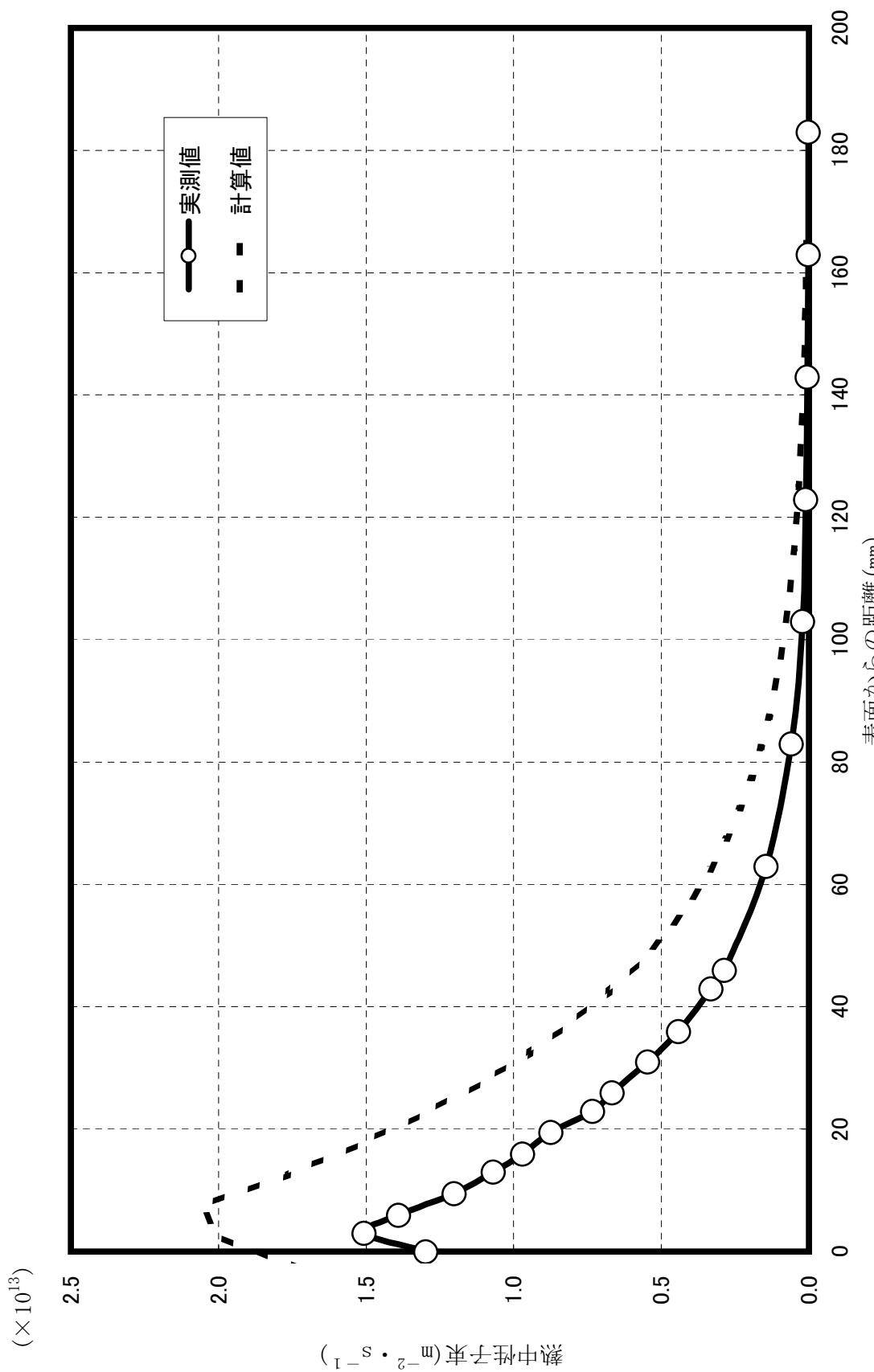


Fig.63 热中性子モードIIにおける頭部水ファントム内热中性子束分布

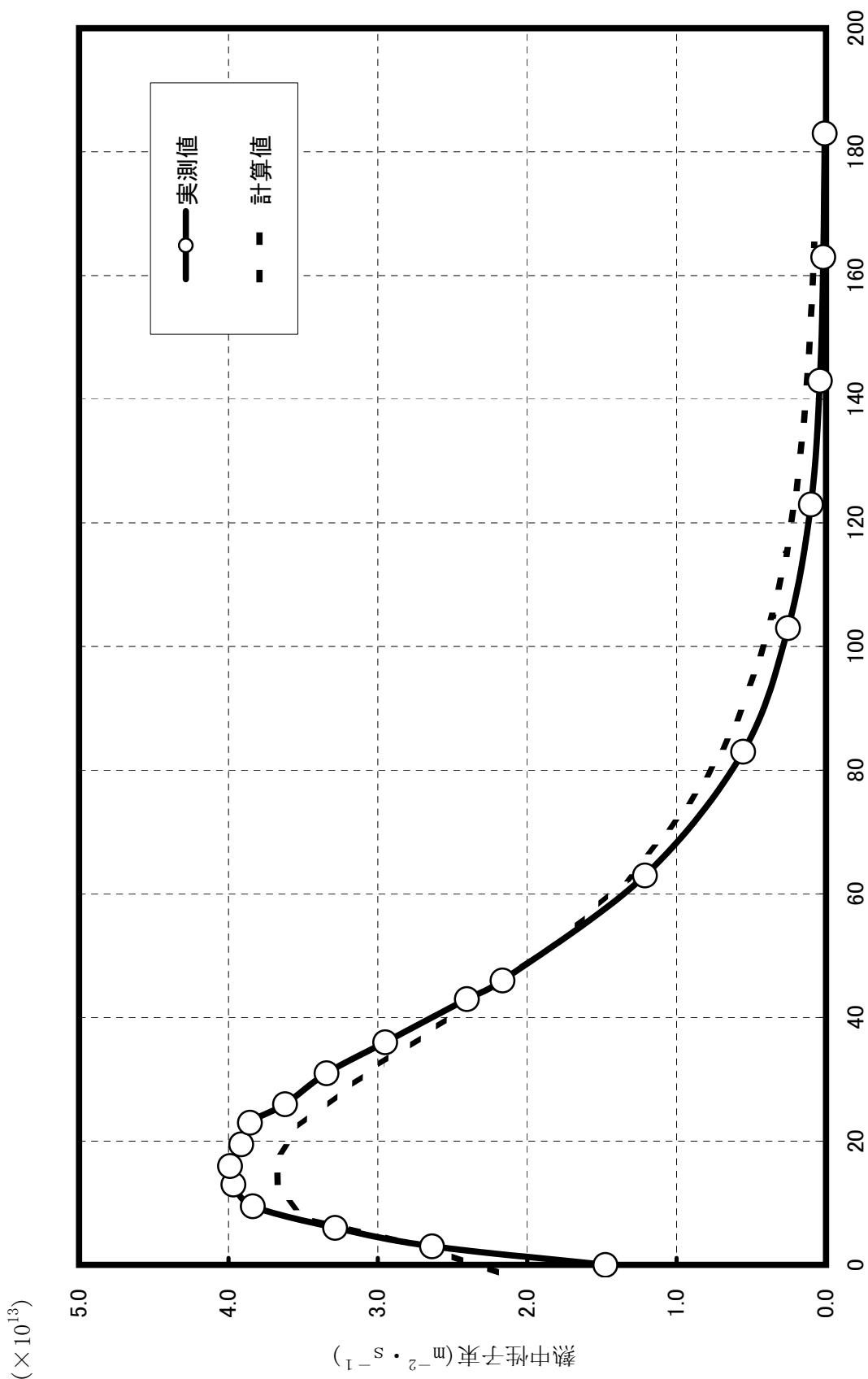


Fig.64 热外モードにおける頭部水ファントム内热中性子束分布

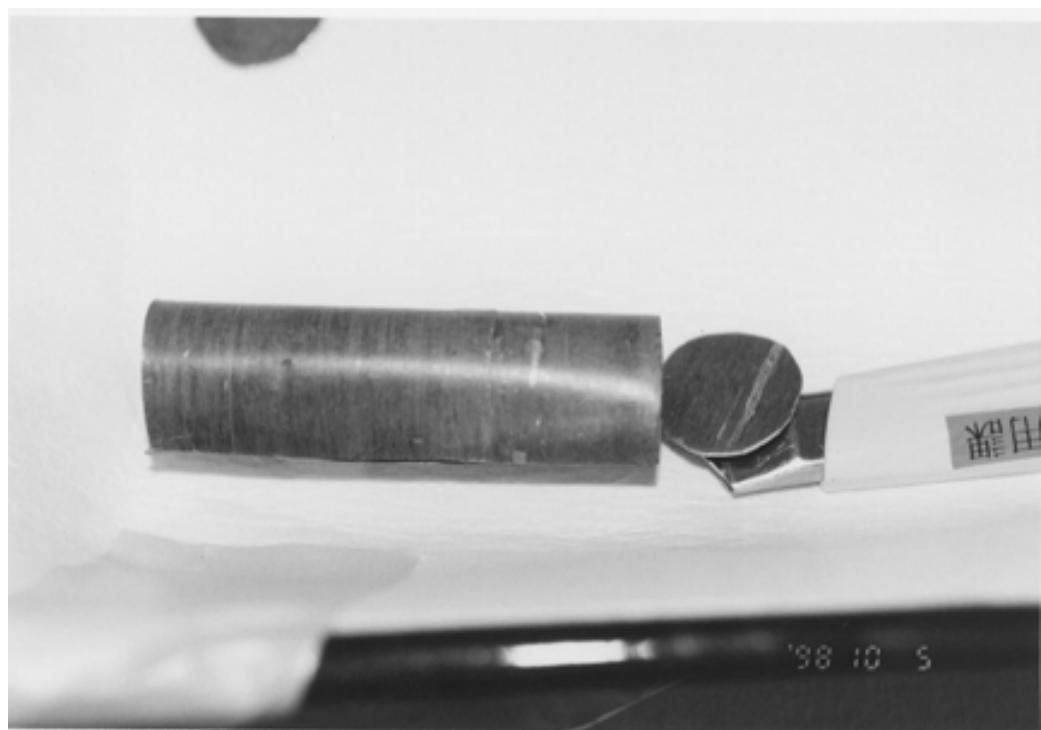


Photo.1 模擬照射試料（カドミウム製）製作

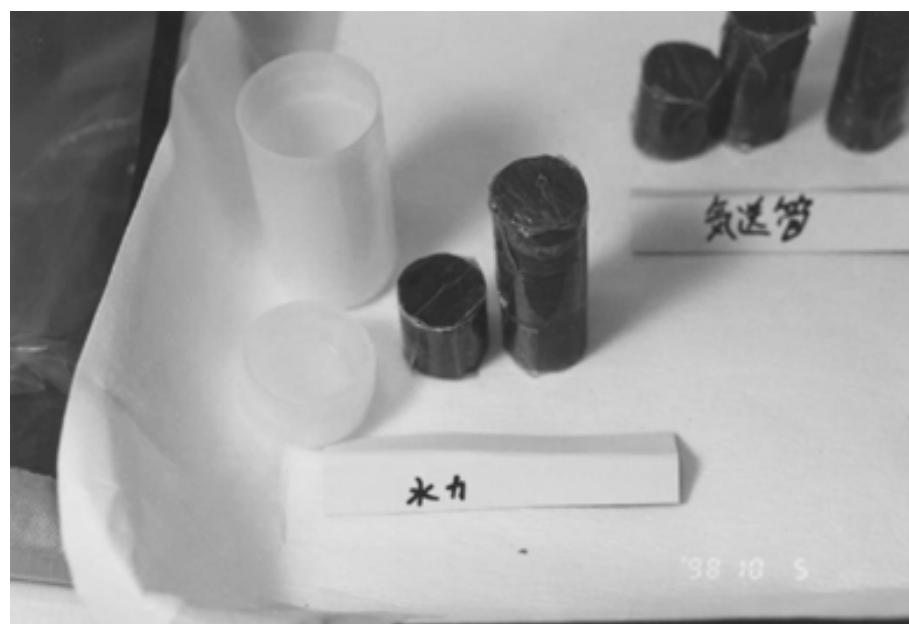


Photo.2 水力照射設備及び気送管照射設備の模擬照射試料



Photo.3 ホルダへ挿入風景

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V
静電容量	フアード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	$lm \cdot m^{-2}$
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	lm/m^2
線量当量、周辺線量当量	カーマ		$m^2 \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	°=(π/180) rad
分	'	'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1b=100 fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイニン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn·s/cm ² =0.1Pa·s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m/s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=1(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホル	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャニスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W·m ⁻² Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
標準大気圧	atm	1 Torr = (101 325/760) Pa
カリヨーン	cal	1 atm = 101 325 Pa
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

