

JAERI-M
93-154

JRR-3M平衡炉心時の垂直照射孔における
中性子束及びカドミ比の測定

1993年8月

大友 昭敏・笛島 文雄・石田 卓也・前島 猛*
関根 勝則*・重本 雅光・高橋 秀武

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

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。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

J R R - 3 M 平衡炉心時の垂直照射孔における中性子束
及びカドミ比の測定

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

大友 昭敏・笹島 文雄・石田 卓也・前島 猛*

関根 勝則*・重本 雅光・高橋 秀武

(1993年7月14日受理)

J R R - 3 改造炉（以下、J R R - 3 M）は、平成2年10月に改造工事を終了し、平成3年度の第3サイクル終了時に平衡炉心に到達した。J R R - 3 Mの垂直照射孔のうち重水反射体領域に照射孔のある水力照射設備（H R - 1, H R - 2），気送照射設備（P N - 1, P N - 2）及び放射化分析用照射設備（P N - 3）において、炉心がほぼ平衡に達した平成3年6月から8月にかけて、原子炉出力20MWで照射位置での熱中性子束、高速中性子束及びカドミ比の測定を実施した。

本報告書は、これらの測定結果について述べたものである。併せて、最近の炉心で得られた結果についても記述した。

Measurements of Neutron Fluxes and Cadmium Ratio
at Equilibrium Core in JRR-3M

Akitoshi OHTOMO, Fumio SASAJIMA, Takuya ISHIDA
Takeshi MAEJIMA*, Katsunori SEKINE*, Masamitsu SHIGEMOTO
and Hidetake TAKAHASHI

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

(Received July 14, 1993)

Construction and characteristics tests of JRR-3M (Modified JRR-3) had been completed on October 1990, and the reactor reached to equilibrium core in July 1991.

Measurements of neutron flux and cadmium ratio in Hydraulic irradiation facility(HR) and Pneumatic irradiation facility(PN) at 20MW reactor power were carried out for the equilibrium core from May to August 1991 and for the latest core in April 1993. The results at the equilibrium core and the latest core are described in this paper.

Keywords: JRR-3M, Measurements of Characteristics, Thermal Neutron Flux, Fast Neutron Flux, Cadmium Ratio, Hydraulic Irradiation Facility, Pneumatic Irradiation Facility, Activation Analysis Irradiation Facility

* Radiation Application Development Association

目 次

1. まえがき	1
2. 照射設備及び照射孔の概要	1
3. 平衡炉心での特性測定	3
3.1 03-01サイクル特性測定	3
3.2 03-02サイクル特性測定	4
3.3 03-03サイクル特性測定	4
3.4 中性子束の計算	5
3.5 Ge検出器の計数効率	8
3.6 照射時間の補正	9
4. 04-07サイクル特性測定	9
5. 考察	10
6. あとがき	11
謝 辞	12
参考文献	12
付録A Ni-58の実効断面積	37
付録B γ 線線量率測定	41

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Irradiation Facilities and Irradiation Holes in JRR-3M	1
3. Characteristics Measurements at Equilibrium Core	3
3.1 03-01 Cycle	3
3.2 03-02 Cycle	4
3.3 03-03 Cycle	4
3.4 Calculation of Flux	5
3.5 Counting Efficiency of Ge Detector	8
3.6 Compensation of Irradiation Time	9
4. Characteristics Measurements at 04-07 Cycle	9
5. Discussion	10
6. Conclusion	11
Acknowledgement	12
References	12
Appendix A Effective Cross Section of Ni-58	37
Appendix B Measurements of γ Ray Dose Rate in Irradiation Holes ..	41

1. まえがき

研究炉の利用は、照射利用と中性子ビーム実験に大別されるが、照射利用のうち水力、気送、放射化分析用照射設備は、主としてラジオアイトソープ生産、放射化分析を行うための設備であり、照射場での中性子束及び中性子束分布に関するデータは必要不可欠なものである。

JRR-3Mは、平成2年3月22日に臨界に到達して以降、原子炉施設の特性を確認するための特性試験、試験利用運転を経て、平成3年度から共同利用運転を開始した。

照射利用設備の特性に関するデータとしては、原子炉臨界到達後の平成2年6月から8月までに原子炉の運転のスケジュールに合わせて中性子束測定等を実施した結果が得られている¹⁾。これらのデータは炉心が初期炉心の条件で得られたものであるため、炉心が平衡炉心になる時期に特性試験を計画し、ほぼ平衡炉心に達する平成3年6月から8月にかけて、水力照射設備(HR-1, HR-2), 気送照射設備(PN-1, PN-2)及び放射化分析用照射設備(PN-3)について照射位置での熱中性子束、高速中性子束、カドミ比の測定を実施した。また、これらのデータと比較するため、最近のデータとして平成5年4月に実施した測定結果についても記述した。

特性測定は、原子炉出力20MWでAu箔、Au-Al線、Ni線等を用いた放射化法で行い、生成された放射能をゲルマニウム検出器を用いて測定し、測定値から熱中性子束、高速中性子束を算出した。

JRR-3Mの平衡炉心での炉心内の垂直照射孔の特性測定がすでに実施されており^{2) 3) 4)}、本報告書は、JRR-3Mの重水反射体領域に設置されているHR(HR-1, HR-2), PN(PN-1, PN-2, PN-3)の照射位置での熱中性子束、高速中性子束、カドミ比について、平衡炉心及び最近の炉心で得られた結果について述べたものである。

2. 照射設備及び照射孔の概要

JRR-3Mには、照射設備として次のものが設置されている。各設備は、JRR-3Mの照射孔に対応して設置されている。

- ① 水力照射設備 (HR-1, HR-2)
- ② 気送照射設備 (PN-1, PN-2)
- ③ 放射化分析用照射設備 (PN-3)
- ④ 均一照射設備 (SI-1)
- ⑤ 回転照射設備 (DR-1)
- ⑥ 垂直照射設備 (VT, RG, BR, SH)

1. まえがき

研究炉の利用は、照射利用と中性子ビーム実験に大別されるが、照射利用のうち水力、気送、放射化分析用照射設備は、主としてラジオアイトソープ生産、放射化分析を行うための設備であり、照射場での中性子束及び中性子束分布に関するデータは必要不可欠なものである。

JRR-3Mは、平成2年3月22日に臨界に到達して以降、原子炉施設の特性を確認するための特性試験、試験利用運転を経て、平成3年度から共同利用運転を開始した。

照射利用設備の特性に関するデータとしては、原子炉臨界到達後の平成2年6月から8月までに原子炉の運転のスケジュールに合わせて中性子束測定等を実施した結果が得られている¹⁾。これらのデータは炉心が初期炉心の条件で得られたものであるため、炉心が平衡炉心になる時期に特性試験を計画し、ほぼ平衡炉心に達する平成3年6月から8月にかけて、水力照射設備(HR-1, HR-2), 気送照射設備(PN-1, PN-2)及び放射化分析用照射設備(PN-3)について照射位置での熱中性子束、高速中性子束、カドミ比の測定を実施した。また、これらのデータと比較するため、最近のデータとして平成5年4月に実施した測定結果についても記述した。

特性測定は、原子炉出力20MWでAu箔、Au-Al線、Ni線等を用いた放射化法で行い、生成された放射能をゲルマニウム検出器を用いて測定し、測定値から熱中性子束、高速中性子束を算出した。

JRR-3Mの平衡炉心での炉心内の垂直照射孔の特性測定がすでに実施されており^{2) 3) 4)}、本報告書は、JRR-3Mの重水反射体領域に設置されているHR(HR-1, HR-2), PN(PN-1, PN-2, PN-3)の照射位置での熱中性子束、高速中性子束、カドミ比について、平衡炉心及び最近の炉心で得られた結果について述べたものである。

2. 照射設備及び照射孔の概要

JRR-3Mには、照射設備として次のものが設置されている。各設備は、JRR-3Mの照射孔に対応して設置されている。

- ① 水力照射設備(HR-1, HR-2)
- ② 気送照射設備(PN-1, PN-2)
- ③ 放射化分析用照射設備(PN-3)
- ④ 均一照射設備(SI-1)
- ⑤ 回転照射設備(DR-1)
- ⑥ 垂直照射設備(VT, RG, BR, SH)

Fig. 1 に照射孔の配置を, Fig. 2 ~ Fig. 5 に各照射孔と炉心との関係を示す。また, Table 1 に各照射設備の諸元を示す。

特性測定を行った水力, 気送, 放射化分析用照射設備の概要を以下に示す。

(1) 水力照射設備 (HR-1, HR-2)

本照射設備は, 試料の入ったラビットを炉心まで搬送し, 冷却するための照射系, ラビットを挿入機から照射系, 照射系から詰替セルへ搬送するための転送系から構成されており, HR-1, HR-2 の 2 基が設置されている。照射試料を原子炉運転中に10分間以上1サイクルまでの時間の中性子照射を行うことができる。

試料を入れた容器(以下, ラビットと称する)は, 外径32mm, 長さ150mmのアルミニウム製であり, 搬送時の衝撃吸収及びラビット開封後の取扱いのため, 放射化箔などの試料をアルミ箔で包んでラビットに入れて照射する。ラビットは, 設備1基あたり最大3個まで照射可能であり, 照射中には軽水で冷却される。

Fig. 6 に, 本照射設備の系統を示す。

(2) 気送照射設備 (PN-1, PN-2)

本照射設備は, 試料の入ったラビットを炉心まで搬送し, 冷却するための照射系, ラビットを挿入機から照射系, 照射系から詰替セルへ搬送するための転送系から構成されており, 2基が設置されている。照射試料を原子炉運転中に1分間以上20分間までの時間の中性子照射を行うことができる。

放射化箔試料の容器となるラビットは, 外径33mm, 長さ95mmのポリエチレン製であり, ラビット開封後の取扱いのため, 通常, 試料を緩衝材とともにインナーカプセルに入れてからラビットに入れて照射する。ラビットは, 設備1基あたり2個まで照射可能であり, 照射中には窒素ガスで冷却される。なお, 1時間までの比較的長い時間の照射のためには, ポリイミドをラビットとして使用する。

Fig. 7 に, 本照射設備の系統を示す。

(3) 放射化分析用照射設備 (PN-3)

本照射設備は, 照射系と試料取出部とから構成されており, 照射試料を原子炉運転中に10秒間から120秒間の中性子照射を行うことができる。

短寿命核種の放射能測定のように取出直後に測定する必要がある場合にはラビットごと検出器で測定するかまたは実験フードでラビットを開封し, 内部の試料をポリ袋に詰め替えて, 分析室内の測定器で測定する。

試料は, 外径17mm, 長さ30mmのポリエチレン製のラビットに入れて, 窒素ガスで搬送し, 炉心で照射する。短寿命核種の分析等でポリエチレンの不純物が測定の妨害となる場合には高純度ポリエチレン製のラビットを利用する。

Fig. 8 に, 本照射設備の系統を示す。

3. 平衡炉心での特性測定

特性測定は、HR-1, HR-2, PN-1, PN-2, PN-3について実施した。(Fig. 2, Fig. 3～Fig. 5参照)

HR-1, HR-2では、上段、中段、下段での照射が可能であり、PN-1, PN-2では上段、下段での照射が可能であるが、使用頻度の高い下段を中心に特性測定を実施した。PN-3については、炉心中央部と炉心中央から約50cm上で照射が可能であるのでそれぞれの位置で特性測定を実施した。

3.1 03-01サイクル特性測定

平成3年度の第1サイクル(以下、「03-01サイクル」と称する)運転時の3年4月に予備的に試験を実施し、使用する放射化検出器の選択、照射時間、計測条件を検討した。検討の対象とした放射化検出器は、熱中性子束測定用としてAu箔($3 \times 3 \times 0.01\text{mm}$)、Au-Al線($\phi 0.5\text{mm}, 0.02\%\text{Au}$)、Co-Al線($\phi 0.5\text{mm}, 0.85\%\text{Co}$)、Co-Al線($\phi 0.5\text{mm}, 0.024\%\text{Co}$)及び高速中性子束測定用としてNi線($\phi 0.5\text{mm}, 99.9\%$)である。

放射化検出器は、予め重量を測定したものをポリエチレンの袋に入れて密封し、HR-1, HR-2の場合はアルミ箔で包み、PN-1, PN-2の場合にはポリエチレン製のインナーキャップセルにポリエチレン袋とともにに入れ、PN-3の場合はポリエチレン袋に包んでラビット(試料を入れるための容器)の中心になるように組み込んだ。ラビットの形状寸法、組み込み状況をFig. 9, Fig. 10に示す。(放射化検出器をラビットに組み込む方法については、以降の特性測定についても同様に行っている。

各照射設備の測定箇所は、下段(照射筒内の下側)のみを対象とした。

03-01サイクル特性測定の結果をTable 2に示す。また、03-01サイクルの原子炉出力の履歴をFig. 11に示す。

20MWで使用可能と考えられる放射化検出器の比較のために使用した熱中性子束測定用の2種類のCo-Al線については、カドミ比の算出に適さないこと及び算出した結果に約10%程度の差が生じたことから採用を見送り、熱中性子束測定用としては、原則としてHR-1, HR-2, PN-1及びPN-2用としてAu-Al線、PN-3用としてAu箔を使用することとした。高速中性子束測定用としては、Ni線が十分有効であることが確認できた。

照射時間については、設備の最短照射時間(HR-1及びHR-2の場合は5分、PN-1及びPN-2の場合は1分、PN-3の場合は5秒)を考慮し、計測時に適度な放射能が得られるよう計画した。

3.2 03-02サイクル特性測定

03-01サイクル特性測定に引き続き、03-02サイクル（平成3年6月）に特性測定を実施した。

前サイクルでの検討に基づき、HR-1, HR-2, PN-1及びPN-2では熱中性子束を算出するためにAu-Al線、高速中性子束を算出するためにNi線を用い、PN-3では照射時間を短くできるところから熱中性子束を算出するためにAu箔を使用した。

中性子束測定のための照射時間は、HR-1及びHR-2の場合で10分から1時間30分、PN-1及びPN-2の場合で10分から30分、PN-3で20秒から2分の間で設定した。

03-02サイクルの特性測定結果をTable 3に示す。また、03-02サイクルの原子炉出力の履歴をFig. 12に示す。

3.3 03-03サイクル特性測定

03-02サイクル特性測定に引き続き、03-03サイクル（平成3年7月～8月）に特性測定を実施した。使用した放射化検出器は、前サイクルで使用したものと同様であり、試験目的に合わせて決定した。HR-1, HR-2, PN-1及びPN-2では熱中性子束を算出するためにAu-Al線、高速中性子束を算出するためにNi線を用いた。PN-3では、熱中性子束を算出するためにAu箔を使用した。

中性子束測定のための照射時間は、HR-1及びHR-2の場合で5分、PN-1及びPN-2の場合で1分から10分、PN-3で5秒から2分の間で設定した。

試料を挟んだカドミニウム板が照射中に熱で変形しないように、カドミニウム板をラビットの外壁に近づけて配置した。また、カドミ比の測定で、厚さの効果を確認するため、0.5mm, 1mmのカドミニウム板に挟んだ試料を準備して照射した。

PN-3で照射時間を変えて照射した場合では、照射時間の短い方が熱中性子束の値として大きい結果が得られた。これは、設定した照射時間と、実際の照射時間との差によるものであり、短時間照射の場合には照射時間の補正が必要であることを示している。

03-03サイクルの特性測定結果をTable 4に示す。また、03-03サイクルの原子炉出力の履歴をFig. 13に示す。

4週間の原子炉運転中、毎週各照射設備で中性子束を測定した。結果としては、サイクル内での平均的な中性子束を得ることはできたが、各週に行ったデータのバラツキが比較的大きく、サイクル内変動を把握するためには不十分であった。同じ条件で複数の放射化検出器を照射した場合でもバラツキが大きいことは、前回の試験で確認されていたが、測定対象、測定頻度が多いことから、1サンプル／条件として照射を実施したことによるもので、サンプル数を増やすことで測定のバラツキは少なくなるものと考えられる。

3.4 中性子束の計算

以下に、熱中性子束の計算式、高速中性子束の計算式を示す。

1) 热中性子束の計算式

Auの放射能、カドミウムで覆ったAuの放射能をGe検出器で測定した結果から熱中性子束を次式で算出する。

$$\begin{aligned} \phi_{\text{th}} = & \frac{1}{N_0 \cdot W_B} \times \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \frac{1}{\sigma_{a0}} \times \frac{1}{g_{a(T_n)}} \times \frac{\sqrt{T_n}}{T_0} \times \frac{K_B}{\varepsilon \cdot Y_r} \\ & \times \left(1 - \frac{F_{CD}}{R_{CD}}\right) \times \frac{1}{1 - X \cdot F_{CD}} \times \frac{\lambda(\text{tm})_B}{1 - \exp\{-\lambda(\text{tm})_B\}} \\ & \times \frac{\exp\{\lambda(td)_B\}}{1 - \exp\{-\lambda(ti)_B\}} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times K_p \end{aligned}$$

(n/cm². sec)

ここで、

- N_0 : Au 1 gr中の原子数 $0.003057 \times 10^{24} (\text{gr}^{-1})$
- W_B : Auの重量 (g)
- σ_{a0} : $v_0 = 2200 \text{m/s}$ の中性子に対するAuの放射化断面積 98.8 (barn)
- $g_{a(T_n)}$: 実効中性子温度 T_n におけるAuの非 $1/v$ 因子 (Table 5 参照)
- T_n : 照射孔内の減速材中の実効中性子温度 (K) (Table 5 参照)
- T_0 : $v_0 = 2200 \text{m/s}$ の中性子に対応する温度 293.6 (K)
- K_B : ^{198}Au の計数率 (cps)
- ε : 計数効率 (Fig. 15 参照)
- Y_r : ^{198}Au からの412KeVの γ 線放出率 0.955
- F_{CD} : カドミウムによる共鳴中性子束の吸収補正 (Table 5 参照)
- R_{CD} : カドミウム比
- X : 热中性子束のカドミ透過量の補正因子 ($1 - X \cdot F_{CD} = 1$) (Table 5 参照)
- λ : ^{198}Au の崩壊定数 $2.9757 \times 10^{-6} (\text{sec}^{-1})$
- $(\text{tm})_B$: 計測時間 (sec)
- $(\text{td})_B$: 冷却時間 (sec)
- $(\text{ti})_B$: 照射時間 (sec)
- f_1 : Auによる熱中性子束の自己しゃへい効果の補正因子 (Table 5 参照)
- f_2 : Auの挿入による熱中性子束の歪効果の補正因子 (Table 5 参照)

f_3 : カドミウムしきいエネルギー (0.5eV)と炉心設計における熱中性子上限エネルギー (0.625eV)との差の補正因子 (Table 5 参照)

K_p : 原子炉出力比 (定格出力20MW/照射出力)

2) 热中性子束計算のための実効中性子温度、補正因子

- (1) 実効中性子温度は板状1次元輸送計算 (WIMS-D) で求められており、各種補正因子とともにTable 5に示す。

放射化検出器としてAu箔を用いた場合の補正因子を以下の通りとした。

- (2) 热中性子束の自己しゃへい効果の補正因子 f_1 :

$$f_1 = \frac{2 \cdot \tau}{G(\tau)}$$

$$\tau \equiv \sum a \cdot t$$

$$G(\tau) = 1 - 2 \cdot E_3(\tau)$$

$\sum a$: 平均熱中性子吸収断面積 (cm^{-1})

t : 厚さ (cm)

$E_3(\tau)$: 3次の指數関数積分関数

- (3) 热中性子束の歪効果の補正因子⁶⁾ f_2 :

$$f_2 = 1 + \frac{G(\tau)}{2} g_{BT}$$

$$g_{BT} = 0.68 \frac{r}{\lambda tr}$$

r : Au箔の等価直径 (cm)

λtr : Au箔回りの熱中性子平均輸送距離 (cm)

- (4) カドミウムしきいエネルギー (0.5eV)と炉心設計における熱中性子上限エネルギー (0.625eV)との差の補正因子 f_3 :

1次元輸送計算から算出する。重水反射体領域の場合、0.5eVから0.625eVの範囲のエネルギーの中性子束成分が少ないため、1とする。

3) 高速中性子の計算式

Niを照射して (n, p) 反応で生成したCo-58の放射能をGe検出器で測定した結果から、高速中性子束を次式で算出する。

$$\phi^f = \frac{1}{N_o \cdot W} \times \frac{1}{\sigma_{ao}} \times \frac{1}{\alpha} \times \frac{K}{\varepsilon \cdot Yr} \times \frac{\lambda(tm)}{1 - \exp\{-\lambda(tm)\}}$$

$$\times \frac{\exp\{\lambda(td)\}}{1 - \exp\{-\lambda(ti)\}} K_p \quad (\text{n/cm}^2/\text{sec})$$

ここで、

N_0 : Ni 1 gr中の原子数 $0.010259 \times 10^{24} (\text{gr}^{-1})$

W : Niの重量 (g)

σ_{so} : 中性子に対するNiの放射化断面積 $0.166(\text{barn})$ (Table 6 参照)

α : Ni中の ^{58}Ni の存在比 0.6776

K : ^{58}Co の計数率 (cps)

ε : 計数効率 (Fig. 15参照)

λ : ^{58}Co の崩壊定数 $1.1331 \times 10^{-7} (\text{sec}^{-1})$

Y_r : ^{58}Co からの811KeVの γ 線放出率 0.994

t_m : 計測時間 (sec)

t_d : 冷却時間 (sec)

t_i : 照射時間 (sec)

K_p : 原子炉出力比 (定格出力20MW/照射出力)

4) Ni-58の実効断面積

実効しきいエネルギーの概念を用いて、しきい検出器であるNi-58の実効断面積を算出する。

しきい反応による放射化反応率 R_s は次式で与えられる。

$$R_s = N \int_0^\infty \sigma(E) \phi(E) dE [s^{-1}]$$

ここで、

N : 検出器中の標的原子核数 ($\times 10^{24} \text{ atoms}$)

E : 中性子のエネルギー [MeV]

$\sigma(E)$: エネルギー E の中性子に対するしきい反応の断面積 [barn]

$\phi(E)$: 中性子束スペクトル [$\text{n/cm}^2 \cdot \text{s. MeV}$]

しきい反応の断面積を、あるしきいエネルギー以上では一様であるようなステップ関数で模擬し、反応率を保存するように次式で定義する。

$$\frac{R_s}{N} = \int_0^\infty \sigma(E) \phi(E) dE = \sigma_{\text{eff}} \int_{E_{\text{eff}}}^\infty \phi(E) dE$$

ここで、

σ_{eff} : 実効断面積

E_{eff} : しきいエネルギー

$\phi(E)$ が既知であれば、しきいエネルギー E_{eff} を決めることで実効断面積 σ_{eff} を決定することができる。

Table 6 に、JRR-3M 中性子スペクトル⁷⁾ の値を用いて、重水反射体領域での Ni-58 の実効断面積を算出した結果を示す。計算に使用した JRR-3M の中性子スペクトルを Fig. 14 に示す。

重水反射体領域に配置されている照射孔 (HR-1, HR-2, PN-1, PN-2, PN-3, SI-1, DR-1, SH-1) は、いずれも重水反射体領域の計算位置 ($R=37\text{cm}$) より外側のため、スペクトルが、より軟化しているものと考えられる。

5) 中性子束の算出に関する考察

熱中性子束を算出する場合、照射場の中性子温度を知る必要があるが、本報告では原子炉の特性測定のために計算された重水反射体領域での中性子温度を用いた。今後、各照射孔での中性子温度を計算、測定で確認する必要がある。

金の熱中性子に対する実効断面積が照射場の中性子温度に依存するため、反応率から中性子束を算出するためには照射場の中性子温度を把握する必要がある。JRR-3M 中性子スペクトルから中性子温度を求めた結果と、原子炉本体の特性試験のうち利用設備に関する試験で使用した中性子温度を計算した結果を重水反射体領域で比較した結果では、核計算結果の方が中性子温度が高い（熱領域のスペクトル分布がマックスウェル分布から高エネルギー側に片寄っている）ことが判った。本体の特性試験結果との整合性から、今回の特性測定では、本体の特性試験で使用したデータを使用することとした。しかし、核計算結果と差があること、HR-1 など、燃料に近い照射孔では中性子温度がより高いことが予想されるため、今後各照射孔位置でのスペクトルを再検討すること、Lu 等により中性子温度を測定し比較検討することが必要である。

高速中性子束に関しては、今回は Ni のみをしきい検出器としたが、Fe 等についても実施し、比較する必要がある。高速中性子束を算出するためには、照射場のスペクトルを予め知る必要があるが、現在のところ、重水反射体領域としての計算結果があるだけなので、各照射孔毎のスペクトルを計算あるいは測定し、さらに検討を行う必要がある。

3.5 Ge 検出器の計数効率

照射済み放射化検出器の放射能測定は、生成された放射能を、Ge 検出器、スペクトロスコピアンプ、マルチチャンネル・アナライザを用いて Au-198, Co-60, Co-58 の光電ピーク面積を計数し、Eu-152 の標準線源のピーク面積と比較し、算出した。

使用した分析装置の構成を Table 7 に示す。照射済み放射化検出器および標準線源を、検出器から 5 cm, 10 cm, 15 cm 高さに調整したアクリル筒を検出器エンドキャップ上部に乗せて測定した。Ge 検出器の計数効率は、1 μCi の Eu-152 標準線源を用いて 5 cm, 10 cm, 15 cm について算出した。計数効率を Fig. 15 に示す。

3.6 照射時間の補正

JRR-3Mの照射設備には原子炉の重水タンクに設置した照射筒の入口に光電式反射型の通過検出器が取り付けられており、ラビットが照射筒を出入りする際の通過検出信号の時間差を「照射時間」としている。通過検出器と照射筒の位置関係をFig. 16に示す。また、実際に試料が照射される「実際の照射時間」は、「照射時間」から通過検出器の作動から照射筒に入るまでの時間及び照射筒を出てから通過検出器を作動させるまでの時間を差し引いたものであり、この値は測定困難な値であるため、設備の製作中にモックアップで確認した。

一方、ラビットの照射筒への出入りは、設備を制御している計算機のシーケンス機能により制御されており、内部タイマーを調整することで「照射時間」を予め「設定した照射時間」と合わせている。本照射設備の実際の照射時間は、前述の考え方を基にして、ラビットの重量及び機器の作動時間により若干バラツキはあるが、水力照射設備で「設定した照射時間」+6秒～+8秒、気送照射設備で「設定した照射時間」+0秒～+1秒、放射化分析用照射設備で「設定した照射時間」+0秒～+1秒である。照射時間が中性子束の計算に与える影響は、上述の値を考慮すると、水力照射設備の照射最短時間10分の場合で約1.6%、気送照射設備の最短時間1分の場合で約1.7%、放射化分析用照射設備の最短時間10秒の場合で約10%である。従って、特性測定の値を算出する際に1%以上の影響を与えないためには、水力照射設備の場合で8分以上、気送照射設備の場合で2分以上、放射化分析用照射設備の場合で100秒以上の照射時間が必要であり、それぞれ前述の値以下の場合には補正を行う必要があることを示している。

4. 04-07サイクル特性測定

03-01サイクルから03-03サイクルまでに実施した特性測定の結果と現在の炉心での特性とを比較するために04-07サイクルに特性測定を実施した。熱中性子束測定にはAu-Al線($\Phi 0.5\text{mm}$, 0.1142% Au)及びAu箔(3 mm × 3 mm × 0.01 mm), 高速中性子束測定にNi線を使用した。また、カドミ比は、前途のAu-Al線及びAu箔を0.5 mm厚さのカドミ板で包んだものを使用した。測定対象箇所及び照射時間は、HR-1, HR-2, PN-1, PN-2については照射筒内の下段で20分, PN-3については底部で3秒から60秒である。

中性子束の計算は、3.5の熱中性子束の計算式及び高速中性子束の計算式を用いて算出した。

04-07サイクルの原子炉出力履歴をFig. 17に、測定結果をTable 8～Table 10に示す。

04-07サイクルの特性測定結果としては、03-03サイクルに実施した特性測定とほぼ同じ結果が得られた。

使用した測定装置は γ 線スペクトル測定装置Ⅰ(Ge検出器), 測定装置Ⅱ(Ge検出器)及び $\beta-\gamma$ 同時計数装置³⁾であり、 γ スペクトルのピーク面積はPC GAMMAの分析結果を用い、Ge検出器

3.6 照射時間の補正

JRR-3Mの照射設備には原子炉の重水タンクに設置した照射筒の入口に光電式反射型の通過検出器が取り付けられており、ラビットが照射筒を出入りする際の通過検出信号の時間差を「照射時間」としている。通過検出器と照射筒の位置関係をFig. 16に示す。また、実際に試料が照射される「実際の照射時間」は、「照射時間」から通過検出器の作動から照射筒に入るまでの時間及び照射筒を出てから通過検出器を作動させるまでの時間を差し引いたものであり、この値は測定困難な値であるため、設備の製作中にモックアップで確認した。

一方、ラビットの照射筒への出入りは、設備を制御している計算機のシーケンス機能により制御されており、内部タイマーを調整することで「照射時間」を予め「設定した照射時間」と合わせている。本照射設備の実際の照射時間は、前述の考え方を基にして、ラビットの重量及び機器の作動時間により若干バラツキはあるが、水力照射設備で「設定した照射時間」+6秒～+8秒、気送照射設備で「設定した照射時間」+0秒～+1秒、放射化分析用照射設備で「設定した照射時間」+0秒～+1秒である。照射時間が中性子束の計算に与える影響は、上述の値を考慮すると、水力照射設備の照射最短時間10分の場合で約1.6%、気送照射設備の最短時間1分の場合で約1.7%、放射化分析用照射設備の最短時間10秒の場合で約10%である。従って、特性測定の値を算出する際に1%以上の影響を与えないためには、水力照射設備の場合で8分以上、気送照射設備の場合で2分以上、放射化分析用照射設備の場合で100秒以上の照射時間が必要であり、それぞれ前述の値以下の場合には補正を行う必要があることを示している。

4. 04-07サイクル特性測定

03-01サイクルから03-03サイクルまでに実施した特性測定の結果と現在の炉心での特性とを比較するために04-07サイクルに特性測定を実施した。熱中性子束測定にはAu-Al線($\Phi 0.5\text{mm}$, 0.1142% Au)及びAu箔(3 mm × 3 mm × 0.01 mm), 高速中性子束測定にNi線を使用した。また、カドミ比は、前途のAu-Al線及びAu箔を0.5 mm厚さのカドミ板で包んだものを使用した。測定対象箇所及び照射時間は、HR-1, HR-2, PN-1, PN-2については照射筒内の下段で20分, PN-3については底部で3秒から60秒である。

中性子束の計算は、3.5の熱中性子束の計算式及び高速中性子束の計算式を用いて算出した。

04-07サイクルの原子炉出力履歴をFig. 17に、測定結果をTable 8～Table 10に示す。

04-07サイクルの特性測定結果としては、03-03サイクルに実施した特性測定とほぼ同じ結果が得られた。

使用した測定装置は γ 線スペクトル測定装置Ⅰ(Ge検出器), 測定装置Ⅱ(Ge検出器)及び $\beta-\gamma$ 同時計数装置³⁾であり、 γ スペクトルのピーク面積はPC GAMMAの分析結果を用い、Ge検出器

の計数効率は、 $1 \mu\text{Ci}$ のEu-152標準線源を検出器のエンドキャップから5cmの距離に置いて求めた。Ge検出器の計数効率をTable 11, Fig. 18, Fig. 19に示す。

PN-3で、時間を変えて照射した測定結果では、算出される熱中性子束に違いがあった。これは、PN-3装置で設定した照射時間にズレがあることを示しており、実際の照射時間を正確に把握する必要がある場合には、設定した照射時間を補正する必要があることを示している。照射時間のズレ量が一定であると仮定した場合、Table 10の結果から、実際の照射時間は、設定した照射時間+0.65秒である。

5. 考察

平衡炉心での特性測定の結果、04-07サイクルの特性測定結果及び初期炉心での特性測定結果をTable 12に示す。

平衡炉心の特性測定結果は、(1)初期炉心での測定結果、04-07サイクルの測定結果と比較的良好い一致を見せており、照射設備の設計時に行われた核計算値とも大きな差はない、(2)初期炉心及び04-07サイクルでのカドミ比に比べて約2倍の差が認められる、(3)初期炉心の測定結果、04-07サイクルの測定結果に比べて比較的大きなバラツキが認められた。

平衡炉心以降の特性測定結果のバラツキの原因として考えられるのは、(1)使用した放射化検出器の重量が数mgと小さいため、秤量時の重量測定誤差が大きい、(2)Au-Alの場合には、Al中に含まれるAuの含有量の不均一性、(3)計数値の統計誤差、(4)ラビット内での検出器の位置が一定していない、(5)原子炉の制御棒位置による軸方向の中性子束分布の変化、(6)炉心に装荷された照射キャップセルによる中性子束の変化等が考えられる。上記の原因のうち、重量測定時の誤差、計数値の統計誤差については、重量の測定、放射能の測定を繰り返して行ってバラツキの原因が測定上の問題だけではないことを明らかにするとともに、さらに他の原因についても検討を行った。

03-03サイクルと04-07サイクル特性測定データとの比較を行った結果では、(1)04-07サイクルの結果は、03-03サイクルの結果と良く一致している、(2)03-03サイクルの特性測定ではHR-1の熱中性子束はHR-2の熱中性子束より約20%大きい結果が得られていたが、04-07サイクルの測定では同一の結果となった、(3)PN-1, PN-2及びPN-3のカドミ比は03-03サイクルの結果の1/2であった。重水反射体領域での中性子束分布は、炉心領域に装荷されるキャップセルの影響を比較的受けやすく、HR-1とHR-2の中性子束の差が小さいこと及びPN-1, PN-2, PN-3のカドミ比が小さくなったことは、その影響を受けているものと考えられる。

これら特性測定の結果を核計算結果と比較したものを中性子束分布としてFig. 20に示す。照射孔HR-1, HR-2, PN-1, PN-2での熱中性子束の測定結果は、照射筒部での熱中性子束の減衰を考慮した核計算結果と良く一致している。PN-3での熱中性子束の測定結果は、核計算

の計数効率は、 $1 \mu\text{Ci}$ のEu-152標準線源を検出器のエンドキャップから5cmの距離に置いて求めた。Ge検出器の計数効率をTable 11, Fig. 18, Fig. 19に示す。

PN-3で、時間を変えて照射した測定結果では、算出される熱中性子束に違いがあった。これは、PN-3装置で設定した照射時間にズレがあることを示しており、実際の照射時間を正確に把握する必要がある場合には、設定した照射時間を補正する必要があることを示している。照射時間のズレ量が一定であると仮定した場合、Table 10の結果から、実際の照射時間は、設定した照射時間+0.65秒である。

5. 考察

平衡炉心での特性測定の結果、04-07サイクルの特性測定結果及び初期炉心での特性測定結果をTable 12に示す。

平衡炉心の特性測定結果は、(1)初期炉心での測定結果、04-07サイクルの測定結果と比較的良好い一致を見せており、照射設備の設計時に行われた核計算値とも大きな差はない、(2)初期炉心及び04-07サイクルでのカドミ比に比べて約2倍の差が認められる、(3)初期炉心の測定結果、04-07サイクルの測定結果に比べて比較的大きなバラツキが認められた。

平衡炉心以降の特性測定結果のバラツキの原因として考えられるのは、(1)使用した放射化検出器の重量が数mgと小さいため、秤量時の重量測定誤差が大きい、(2)Au-Alの場合には、Al中に含まれるAuの含有量の不均一性、(3)計数値の統計誤差、(4)ラビット内での検出器の位置が一定していない、(5)原子炉の制御棒位置による軸方向の中性子束分布の変化、(6)炉心に装荷された照射キャップセルによる中性子束の変化等が考えられる。上記の原因のうち、重量測定時の誤差、計数値の統計誤差については、重量の測定、放射能の測定を繰り返して行ってバラツキの原因が測定上の問題だけではないことを明らかにするとともに、さらに他の原因についても検討を行った。

03-03サイクルと04-07サイクル特性測定データとの比較を行った結果では、(1)04-07サイクルの結果は、03-03サイクルの結果と良く一致している、(2)03-03サイクルの特性測定ではHR-1の熱中性子束はHR-2の熱中性子束より約20%大きい結果が得られていたが、04-07サイクルの測定では同一の結果となった、(3)PN-1, PN-2及びPN-3のカドミ比は03-03サイクルの結果の1/2であった。重水反射体領域での中性子束分布は、炉心領域に装荷されるキャップセルの影響を比較的受けやすく、HR-1とHR-2の中性子束の差が小さいこと及びPN-1, PN-2, PN-3のカドミ比が小さくなったことは、その影響を受けているものと考えられる。

これら特性測定の結果を核計算結果と比較したものを中性子束分布としてFig. 20に示す。照射孔HR-1, HR-2, PN-1, PN-2での熱中性子束の測定結果は、照射筒部での熱中性子束の減衰を考慮した核計算結果と良く一致している。PN-3での熱中性子束の測定結果は、核計算

値の約1/2となった。PN-3は、重水タンクの外周に近く、タンク外部の軽水の影響を強く受けていることを示しているものと考えられる。

重水タンク領域での高速中性子束分布の測定値は、HR-1, HR-2付近では良く一致しているが、外周に近づくに従って核計算結果より大きくなる傾向となった。

6. あとがき

この種の特性測定は、従来、原子炉出力100KW程度の低出力でAu箔を用いた箔放射化法で行われることが多いが、制御棒の位置が定格出力20MWの場合と異なるために定格出力と同じ中性子束分布が得られない、原子炉運転の時間経過とともに変化する中性子束が把握できない問題がある。このため、平衡炉心の特性測定以降については定格出力20MWで実施した。しかし、定格出力でのAu箔を用いた特性測定では、生成される放射能量が大きくなるため、測定できる放射能量に達するまで減衰させる必要があり、取り扱いが容易ではない。また、放射能量を少なくするためにAu箔の重量を3桁ほど小さくした場合には測定の精度が低くならざるを得ない問題がある。また、Au箔の代りにAu-Al線を用いた場合には、照射後に容易に取り扱える放射能量になるが、アルミニウム金属内に含まれるAuが極微量であるため、成分が精度良くコントロールされたAu-Al線を使用する必要がある。

照射孔の特性をさらに把握するため、さらに(1)照射筒内中性子束分布（上、中、下及び半径方向）、ラビット内の中性子束分布の測定、(2)サイクル内の中性子束の変動、(3)スペクトル、中性子温度、 γ 線線量率等の測定を行う必要がある。

今後、測定の面で検討を要する点は、データのバラツキを少なくし、確からしさを向上させることである。そのためには、(1)放射化検出器の選択及び特性の把握、(2)重量測定の信頼性向上、(3)より精度の高い標準線源を用いて装置を校正し、その性能を保つ等、誤差の原因を一つ一つ解決していく必要がある。具体的には、より高精度の天秤を用いて重量測定方法を標準化する、Ge検出器での計測方法を確立する、Au-Al線の選択等の検討を行う予定である。

今後、この種の特性測定を定期的に実施して、JRR-3Mの照射孔の特性を把握する予定である。

値の約1/2となった。PN-3は、重水タンクの外周に近く、タンク外部の軽水の影響を強く受けていることを示しているものと考えられる。

重水タンク領域での高速中性子束分布の測定値は、HR-1, HR-2付近では良く一致しているが、外周に近づくに従って核計算結果より大きくなる傾向となった。

6. あとがき

この種の特性測定は、従来、原子炉出力100KW程度の低出力でAu箔を用いた箔放射化法で行われることが多いが、制御棒の位置が定格出力20MWの場合と異なるために定格出力と同じ中性子束分布が得られない、原子炉運転の時間経過とともに変化する中性子束が把握できない問題がある。このため、平衡炉心の特性測定以降については定格出力20MWで実施した。しかし、定格出力でのAu箔を用いた特性測定では、生成される放射能量が大きくなるため、測定できる放射能量に達するまで減衰させる必要があり、取り扱いが容易ではない。また、放射能量を少なくするためにAu箔の重量を3桁ほど小さくした場合には測定の精度が低くならざるを得ない問題がある。また、Au箔の代りにAu-Al線を用いた場合には、照射後に容易に取り扱える放射能量になるが、アルミニウム金属内に含まれるAuが極微量であるため、成分が精度良くコントロールされたAu-Al線を使用する必要がある。

照射孔の特性をさらに把握するため、さらに(1)照射筒内中性子束分布（上、中、下及び半径方向）、ラビット内の中性子束分布の測定、(2)サイクル内の中性子束の変動、(3)スペクトル、中性子温度、 γ 線線量率等の測定を行う必要がある。

今後、測定の面で検討を要する点は、データのバラツキを少なくし、確からしさを向上させることである。そのためには、(1)放射化検出器の選択及び特性の把握、(2)重量測定の信頼性向上、(3)より精度の高い標準線源を用いて装置を校正し、その性能を保つ等、誤差の原因を一つ一つ解決していく必要がある。具体的には、より高精度の天秤を用いて重量測定方法を標準化する、Ge検出器での計測方法を確立する、Au-Al線の選択等の検討を行う予定である。

今後、この種の特性測定を定期的に実施して、JRR-3Mの照射孔の特性を把握する予定である。

謝 辞

本特性測定にあたって多大なご協力とご指導をいただいたJRR-3管理課、研究炉利用課の諸氏に深く感謝いたします。また、中性子束の算出について研究炉技術開発室市川博喜氏、曾山和彦氏から貴重な意見をいただいた。深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 研究炉・ホットラボの運転と技術管理(平成2年度), JAERI M91-150, 1991年9月
- 2) A.OHTOMO, et al., Installation of Irradiation Facilities in the JRR-3M, ASRR-3 Nov. 11-14, 1991
- 3) 研究炉部; 平成3年度研究炉部年報, JAERI M92-154, 1992年10月
- 4) 落合康明, 他; JRR-3M平衡炉心における垂直照射孔の特性測定, 未公刊資料(1993年)
- 5) 原子炉本体特性試験報告書, 内部資料
- 6) C.W.TITTLE, Slow Neutron Detection by Foils-II, Nucleonics 9,(1), 60(1951)
- 7) 岩崎淳一, 他; JRR-3改造炉の核計算(燃料, 制御棒及び反射体等に関する補遺), JAERI M85-062, May 1985.
- 8) 鶴田晴道, 他; JRR-3改造炉の核設計, JAERI M84-099, 1984年5月

謝 辞

本特性測定にあたって多大なご協力とご指導をいただいたJRR-3管理課、研究炉利用課の諸氏に深く感謝いたします。また、中性子束の算出について研究炉技術開発室市川博喜氏、曾山和彦氏から貴重な意見をいただいた。深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 研究炉・ホットラボの運転と技術管理(平成2年度), JAERI M91-150, 1991年9月
- 2) A.OHTOMO, et al., Installation of Irradiation Facilities in the JRR-3M, ASRR-3 Nov. 11-14, 1991
- 3) 研究炉部; 平成3年度研究炉部年報, JAERI M92-154, 1992年10月
- 4) 落合康明, 他; JRR-3M平衡炉心における垂直照射孔の特性測定, 未公刊資料(1993年)
- 5) 原子炉本体特性試験報告書, 内部資料
- 6) C.W.TITTLE, Slow Neutron Detection by Foils-II, Nucleonics 9,(1), 60(1951)
- 7) 岩崎淳一, 他; JRR-3改造炉の核計算(燃料, 制御棒及び反射体等に関する補遺), JAERI M85-062, May 1985.
- 8) 鶴田晴道, 他; JRR-3改造炉の核設計, JAERI M84-099, 1984年5月

Table 1 Major Specification of Irradiation Facilities in JRR-3M

照 射 設 備	照 射 領 域	照 射 孔 径 (mm)	冷 却 方 式	照 射 時 間	照 射 方 式	照 射 キ ャ プ セ ル		キ ャ プ セ ル 最 大 収 納 個 数	冷 却 材 温 度 (°C)	γ 線 線 量 率 (Sv/h)
						材 質 ¹⁾	外 形 尺 寸 (mm)			
水力照射設備 HR-1, HR-2	重水反射体	36.7 φ	輕 水 強制循環	10分～ 1cycle	水 力	AL, SUS	32 φ × 150L	3	30	2.5 × 10 ⁶
氣送照射設備 PN-1, PN-2	重水反射体	36.7 φ	N ₂ ガス 強制循環	1分～ (60)分 ²⁾	氣 送	PE (PI)	33 φ × 95L	2	30	7.5 × 10 ⁶
放射化分析用 照射設備 PN-3	重水反射体	20 φ	N ₂ ガス	5秒～	氣 送	PE	17 φ × 30L	1	30	
均一照射設備 SI-1	重水反射体	170 φ	輕 水 強制循環	1時間～ 1cycle	無 計 装 ホルダ～	AL	34 φ × 140L	18	30	
回転照射設備 DR-1	重水反射体	140 φ	輕 水 強制循環	1cycle ～	計 無 キヤブセル	AL, SUS	130 φ × 1000L 34 φ × 150L	1 24	30	4.4 × 10 ⁶
垂 直 照 射 設 備	VT-1	燃 料	60 φ	1cycle ～	無 計 装 キヤブセル	AL, SUS	34 φ × 150L	4	30	
	RG-1～ RG-4	燃 料	60 φ	輕 水 強制循環	計 無 キヤブセル	AL, SUS	55 φ × 1000L 34 φ × 150L	1 4	30	
SH-1	BR-1～ BR-4	B e 反射体	45 φ	輕 水 強制循環	計 無 キヤブセル	AL, SUS	40 φ × 1000L 34 φ × 150L	1 4	30	
		重水反射体	100 φ	輕 水 強制循環	計 無 キヤブセル	AL, SUS	90 φ × 1000L 34 φ × 150L	1 12	30	

1) 材質がボリヤードの場合の照射時間
2) 材質がアルミニウムの場合の照射時間
AL : アルミニウム、SUS : ステンレス鋼、PE : ポリエチレン、PI : ポリイミド

Table 2 Results of Neutron Flux Measurement at 03-01 Cycle

単位 ; n/cm². sec

月日	フランクスモニタ 種類(%)	HR-1		HR-2		備 考
		ϕ th	ϕ f	ϕ th	ϕ f	
4/19(金)	0.02Au-Al	9.6×10^{13}		8.7×10^{13}		
	0.85Co-Al	1.1×10^{14}		1.0×10^{14}		
	0.024Co-Al	1.2×10^{14}		1.1×10^{14}		
	Ni		1.4×10^{12}		1.1×10^{12}	
4/22(月)	0.024Co-Al	1.2×10^{14}		1.1×10^{14}		
	Ni		1.4×10^{12}		1.1×10^{12}	

月日	フランクスモニタ 種類(%)	PN-1		PN-2		備 考
		ϕ th	ϕ f	ϕ th	ϕ f	
4/23(火)	0.02Au-Al	6.0×10^{13}		5.1×10^{13}		
	0.85Co-Al	6.4×10^{13}		5.8×10^{13}		
	Ni		1.5×10^{11}		1.3×10^{11}	
5/2(木)	Au	6.2×10^{13}		5.6×10^{13}		
	0.02Au-Al	5.9×10^{13}		5.0×10^{13}		
	0.85Co-Al	6.6×10^{13}		5.7×10^{13}		

月日	フランクスモニタ 種類(%)	PN-3				備 考
		ϕ th	ϕ f			
4/26(金)	Au	2.1×10^{13}				
	0.02Au-Al	5.6×10^{13}				

Table 3 Results of Neutron Flux and Cadmium Ratio Measurement
at 03-02 Cycle单位; n/cm². sec 20MW換算

	6/12 照射		7/2 照射	
	ϕ_{th}	ϕ_f	ϕ_{th}	ϕ_f
HR-1上 中 下	--	--	8.9×10^{13}	9.6×10^{11}
	9.7×10^{13}	--	1.1×10^{14}	1.4×10^{12}
	1.0×10^{14}	1.5×10^{12}	--	--
HR-2上 中 下	7.1×10^{13}	--	--	
	9.0×10^{13}	--	9.7×10^{13}	1.4×10^{12}
	9.6×10^{13}	1.3×10^{12}	--	--
PN-1上 下	6.0×10^{13}	--	6.2×10^{13}	1.2×10^{11}
	6.5×10^{13}	1.9×10^{11}	5.9×10^{13}	1.7×10^{11}
PN-2上 下	5.0×10^{13}	--	4.6×10^{13}	8.7×10^{10}
	5.5×10^{13}	1.4×10^{11}	5.0×10^{13}	1.4×10^{11}
PN-3中 底	--	--	1.2×10^{12}	--
	1.9×10^{13}	5.7×10^9	1.8×10^{13}	--

Table 4 Results of Neutron Flux and Cadmium Ratio Measurement
at 03-03 Cycle

単位 ; n/cm². sec 20MW換算

月日	HR-1		HR-2		HR-1 ϕf	HR-2 ϕf	備考
	ϕth	Cd比	ϕth	Cd比			
7/25(木)	1.2×10^{14}	9.9	1.0×10^{14}	10.4	1.7×10^{12}	1.3×10^{12}	
8/ 1(木)	1.2×10^{14}	5.2	1.0×10^{14}	5.5	1.8×10^{12}	1.4×10^{12}	
8/ 8(木)	1.0×10^{14}	4.5	1.0×10^{14}	4.7	1.6×10^{12}	1.5×10^{12}	

月日	PN-1		PN-2		PN-1 ϕf	PN-2 ϕf	γ 線量率 R/h
	ϕth	Cd比	ϕth	Cd比			
7/16(火)	6.4×10^{13}	--	5.9×10^{13}	--	1.7×10^{11}	1.5×10^{11}	--
7/22(火)	5.8×10^{13}	23	5.3×10^{13}	28	1.7×10^{11}	1.4×10^{11}	7×10^7
7/30(火)	6.1×10^{13}	28	5.4×10^{13}	26	2.2×10^{11}	1.8×10^{11}	--
8/ 6(火)	5.8×10^{13}	23	5.2×10^{13}	26	1.2×10^{11}	1.2×10^{11}	--

月日	PN-3 底		PN-3 中		PN-3 底 ϕf	PN-3 中 ϕf	備考
	ϕth	Cd比	ϕth	Cd比			
7/19(金)	1.8×10^{13}	257	--	--	--	--	
7/29(月)	1.9×10^{13}	302	1.3×10^{12}	--	6.0×10^9	2.0×10^9	
8/ 2(金)	2.0×10^{13}	310	1.2×10^{12}	776	--	--	
8/ 8(木)	1.9×10^{13}	277	1.2×10^{12}	777	--	--	
8/ 8(木)	1.8×10^{13}		1.1×10^{12}				

(照射時間を変えて照射した例)

月日	PN-3 底		PN-3 中		PN-3 底 ϕf	PN-3 中 ϕf	備考
	ϕth	Cd比	ϕth	Cd比			
8/ 8(木)	2.21×10^{13} 1.98×10^{13} 1.91×10^{13} 1.77×10^{13}		1.63×10^{12} 1.44×10^{12} 1.23×10^{12} 1.12×10^{12}				5秒照射 10秒照射 20秒照射 60秒照射

Table 5 Effective Neutron Temperature and Compensation Factors
for Thermal Neutron Flux Evaluation

金箔厚さ (0.015mm)

熱中性子束 測定場所	実効 ⁶⁾ 中性子温度 Tn (K)	非1/v因子 g*(Tn)	補正因子				
			F _{co}	X	f ₁	f ₂	f ₃
標準型 燃料要素内	476.1	1.0154	1.0	0.0	1.016	1.001	1.063
B e 反射体内	367.4	1.0094	1.0	0.0	1.018	1.001	1.018
重水反射体内 (DR-1, SH-1)	328.9	1.0073	1.0	0.0	1.018	1.001	1.002

Table 6 Effective Cross Section for $^{58}\text{Ni}(\text{n},\text{p})^{58}\text{Co}$ Reaction
in D₂O Reflector Region

群NO	エネルギー - (MeV)		σg (barn)	ϕg (1/cm ² . s)	$\sum_{g'=1}^5 \phi g'$	$(E_{eff})g$ (MeV)	$(\sigma_{eff})g$ (barn)	備考
	上限	下限						
1	10.000	6.066	0.637	7.646E-04	7.646E-04	6.0655	3.932	
2	6.066	3.679	0.484	2.891E-03	3.656E-03	3.6790	0.822	
3	3.679	2.231	0.165	5.771E-03	9.427E-03	2.2310	0.319	
4	2.231	1.353	0.027	5.868E-03	1.529E-02	1.3530	0.197	
5	1.353	0.821	0.002	4.661E-03	1.996E-02	0.8210	0.151	
6	0.821	0.500	0.000	5.158E-03	2.511E-02	0.500	0.120	
						1.000	0.166	

実効断面積 : $(\sigma_{eff})g = \int_0^{\infty} \sigma \phi dE / \int_0^{\infty} \phi dE = \sum_{g'=1}^5 \sigma g' \phi g' / \sum_{g'=1}^5 \phi g'$
J R R - 3 M 中性子スペクトル⁷⁾を使用して算出 (R=37cm、重水タンク内胴から6cm外側)

Table 7 Specification of Analysis System for Measurements

設置場所：実験利用棟実験室 I

検出器	GX-1519(CANBERRA) 高エネルギー帯域ゲルマニウム検出器 1.9keV(FWHM) at 1.33MeV
高圧電源	4261(CANBERRA) ポルトオン型高圧電源(0~5kV)
スペクトロスコピーアンプ	2021 (CANBERRA) ゲルマニウム検出器用スペクトロスコピーアンプ
マルチチャンネルアナライザ	シリーズ357ラス(CANBERRA) 3502T
標準線源	Eu-152 42.7 kBq (1.154 μ Ci) 83/03/01 Amersham 7D042
	γ 線エネルギー(放出率) 単位: keV 121.776(0.284) 244.692(0.0771) 344.286(0.266) 411.122(0.0223) 443.894(0.0280) 778.920(0.1298) 867.384(0.0421) 964.110(0.145) 1085.885(0.0994) 1112.075(0.136) 1408.002(0.208)

Table 8 Results of Neutron Flux and Cadmium Ratio Measurement
at 04-07 Cycle单位 : n/cm²·sec 20MW換算

月日	HR-1		HR-2		HR-1 ϕ f	HR-2 ϕ f	備 考
	ϕ th	Cd比	ϕ th	Cd比			
4/13(火)	1.0 × 10 ¹⁴	4.7	1.0 × 10 ¹⁴	5.2	1.4 × 10 ¹²	1.4 × 10 ¹²	

月日	PN-1		PN-2		PN-1 ϕ f	PN-2 ϕ f	備 考
	ϕ th	Cd比	ϕ th	Cd比			
4/13(火)	5.7 × 10 ¹³	12.7	5.1 × 10 ¹³	13.6	1.6 × 10 ¹¹	1.5 × 10 ¹¹	

月日	PN-3 底				PN-3 底 ϕ f		備 考
	ϕ th	Cd比					
4/12(月)	2.1 × 10 ¹³	114			6.2 × 10 ⁹		

Table 9 Comparison of Measured Values by Different Measurement System

单位 : n/cm²·s 20MW換算

照射孔	装置	熱中性子束	Cd比	高速中性子束	備 考
H R - 1	I	1.0 × 10 ¹⁴	4.7	1.4 × 10 ¹²	Au-Al, 20分照射
	β	1.0 × 10 ¹⁴	4.9		
H R - 2	I	1.0 × 10 ¹⁴	5.2	1.4 × 10 ¹²	
	β	1.0 × 10 ¹⁴	5.5		
P N - 1	I	5.7 × 10 ¹³	12.7	1.6 × 10 ¹¹	
	β	5.4 × 10 ¹³	13.7		
P N - 2	I	5.1 × 10 ¹³	13.6	1.5 × 10 ¹¹	
	β	4.9 × 10 ¹³	14.4		

I : γ線スペクトル測定装置（実験利用棟実験室）

β : β-γ同時計数装置（ホット実験室）

Table 10 Comparison of Measured Values by Different Irradiation Time

単位: n/cm²·s 20MW換算

照射孔	照射時間	装置	熱中性子束	Cd比	高速中性子束	備 考
P N - 3	3 sec	II	2.53×10^{13}	114	6.24×10^8	Au箔
	5	II	2.51×10^{13}			
	10	II	2.21×10^{13}			
	20	II	2.17×10^{13}			
	60	II	2.10×10^{13}			
	3	β	2.35×10^{13}			
	5	β	2.28×10^{13}			
	10	β	2.05×10^{13}			
	20	β	1.98×10^{13}			
	60	β	1.94×10^{13}			
	600	II				Ni板
	600	β				

II : γ線スペクトル測定装置（ホット実験室）

β : β-γ同時計数装置（ホット実験室）

Table 11 Counting Efficiency of Ge Detector No.1 and No.2

番号	エネルギー (keV)	放出率 (%)	標準線源 ¹⁵² Eu (C0559)	
			γ線スペクトル 測定装置 I	γ線スペクトル 測定装置 II
1	121.78	28.40	1.757E-02	1.671E-02
2	244.70	7.51	9.976E-03	9.767E-03
3	344.28	26.60	7.327E-03	7.079E-03
4	411.12	2.23	5.936E-03	5.861E-03
5	444.00	3.12	5.444E-03	5.341E-03
6	778.91	12.96	3.197E-03	3.123E-03
7	867.39	4.21	2.841E-03	2.751E-03
8	964.13	14.50	2.590E-03	2.567E-03
9	1085.91	10.16	2.031E-03	2.370E-03
10	1112.12	13.56	2.280E-03	2.252E-03
11	1299.12	1.63	1.803E-03	1.856E-03
12	1408.01	20.85	1.861E-03	1.833E-03

測定条件 測定位置：検出器エンドキャップから 5 cm

標準線源：¹⁵²Eu 45200 Bq (線源番号 C0559)

※使用した計数効率

エネルギー	測定装置 I	測定装置 II	備 考
411.80 keV	5.985E-03	5.863E-03	¹⁹⁸ Au
810.76 keV	3.012E-03	3.026E-03	⁵⁸ Co

Table 12 Summary of the Neutron Flux and Cd-ratio Measurements

20MW換算

中性子束 設備	平衡炉心での特性測定結果			0.4-0.7サイクルでの特性測定結果 ¹⁾			初期炉心での特性測定結果 ¹⁾			備考
	ϕ_{th} (n/cm ² ・s) ^{*1}	Cd比	ϕ_f (n/cm ² ・s) ^{*2}	ϕ_{th} (n/cm ² ・s) ^{*1}	Cd比	ϕ_f (n/cm ² ・s) ^{*2}	ϕ_{th} (n/cm ² ・s) ^{*1}	Cd比	ϕ_f (n/cm ² ・s) ^{*3}	
HR-1	1.2 x 10 ¹⁴	5	1.7 x 10 ¹²	1.0 x 10 ¹⁴	4.8	1.4 x 10 ¹²	1.1 x 10 ¹⁴	13	1.3 x 10 ¹²	
HR-2	1.0 x 10 ¹⁴	5	1.4 x 10 ¹²	1.0 x 10 ¹⁴	5.3	1.4 x 10 ¹²	8.9 x 10 ¹³	16	8.4 x 10 ¹¹	
PN-1	6.0 x 10 ¹³	26	1.7 x 10 ¹¹	5.7 x 10 ¹³	12.7	1.6 x 10 ¹¹	6.1 x 10 ¹³	46	1.4 x 10 ¹¹	
PN-2	5.5 x 10 ¹³	26	1.5 x 10 ¹¹	5.2 x 10 ¹³	13.8	1.6 x 10 ¹¹	4.6 x 10 ¹³	60	8.9 x 10 ¹⁰	
PN-3	1.9 x 10 ¹³	287	6.0 x 10 ⁹	2.1 x 10 ¹³	114	6.5 x 10 ⁹	1.6 x 10 ¹³	105	4.2 x 10 ⁹	

¹⁾ 重水反射体領域の中性子温度を328.9 Kとして算出した。^{*1} 実効断面積を166mbとして算出^{*2} 実効断面積を113mbとして算出^{*3} 実効断面積を113mbとして算出

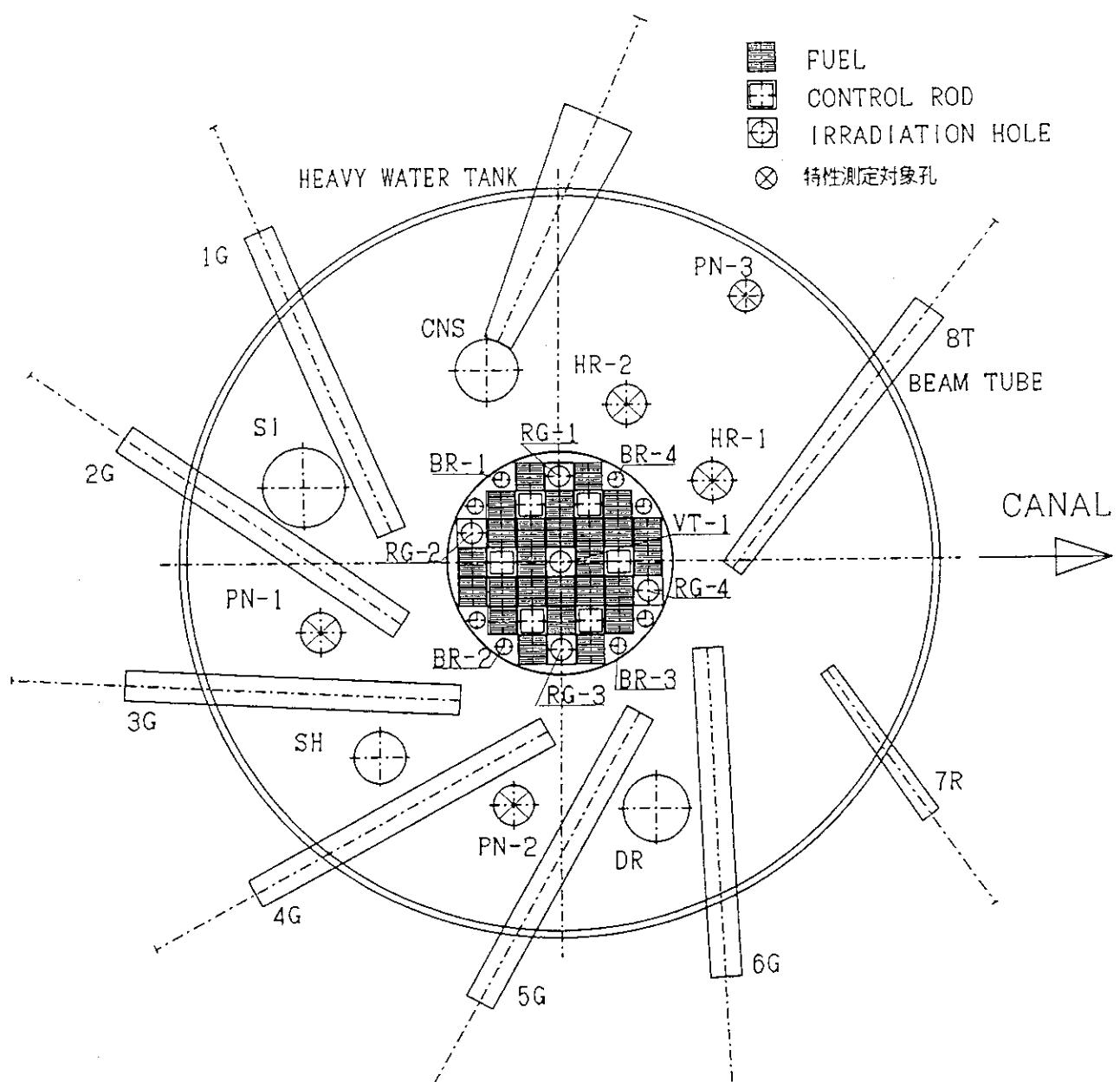


Fig. 1 Irradiation Holes Arrangement in JRR-3M

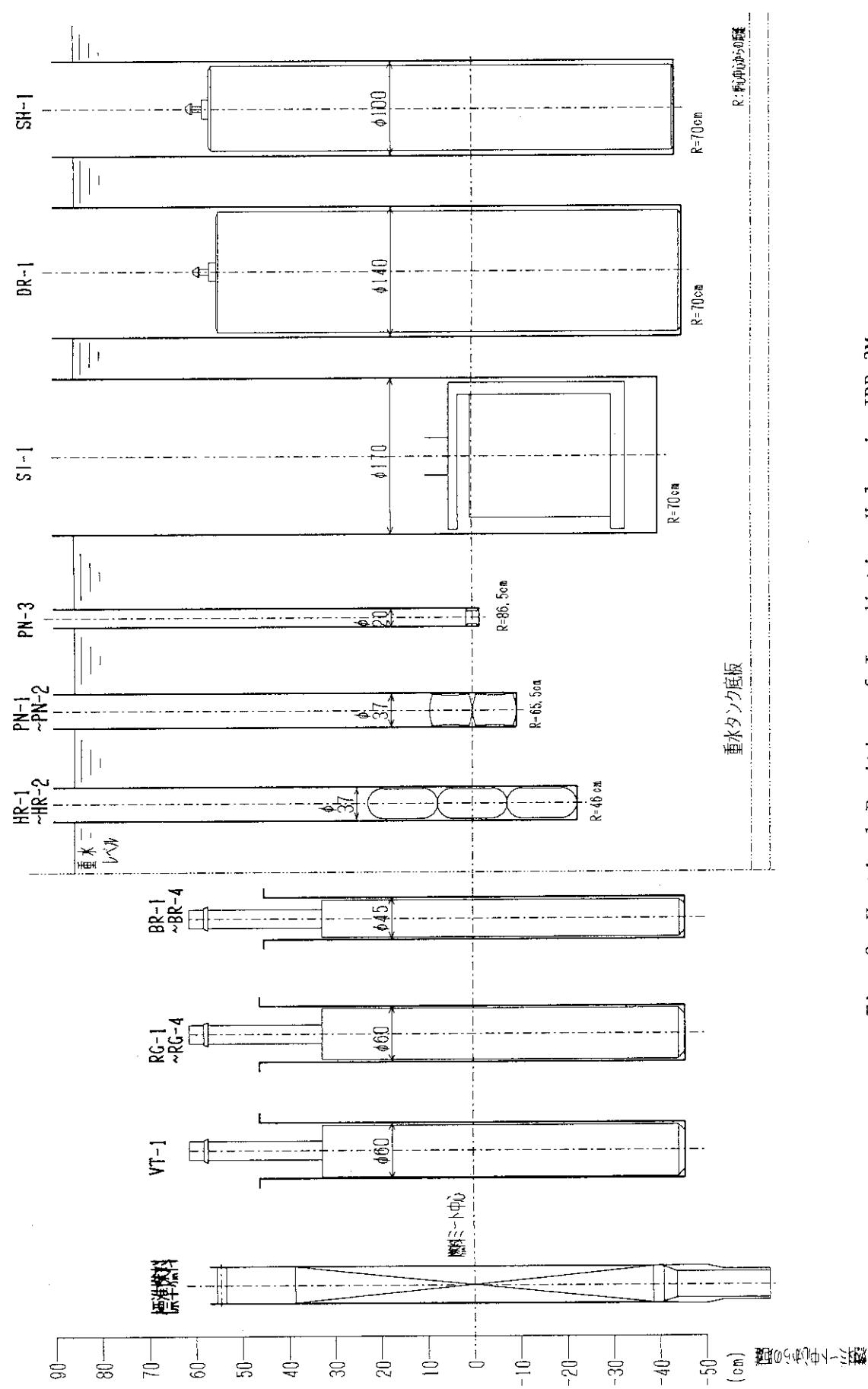


Fig. 2 Vertical Position of Irradiation Holes in JRR-3M

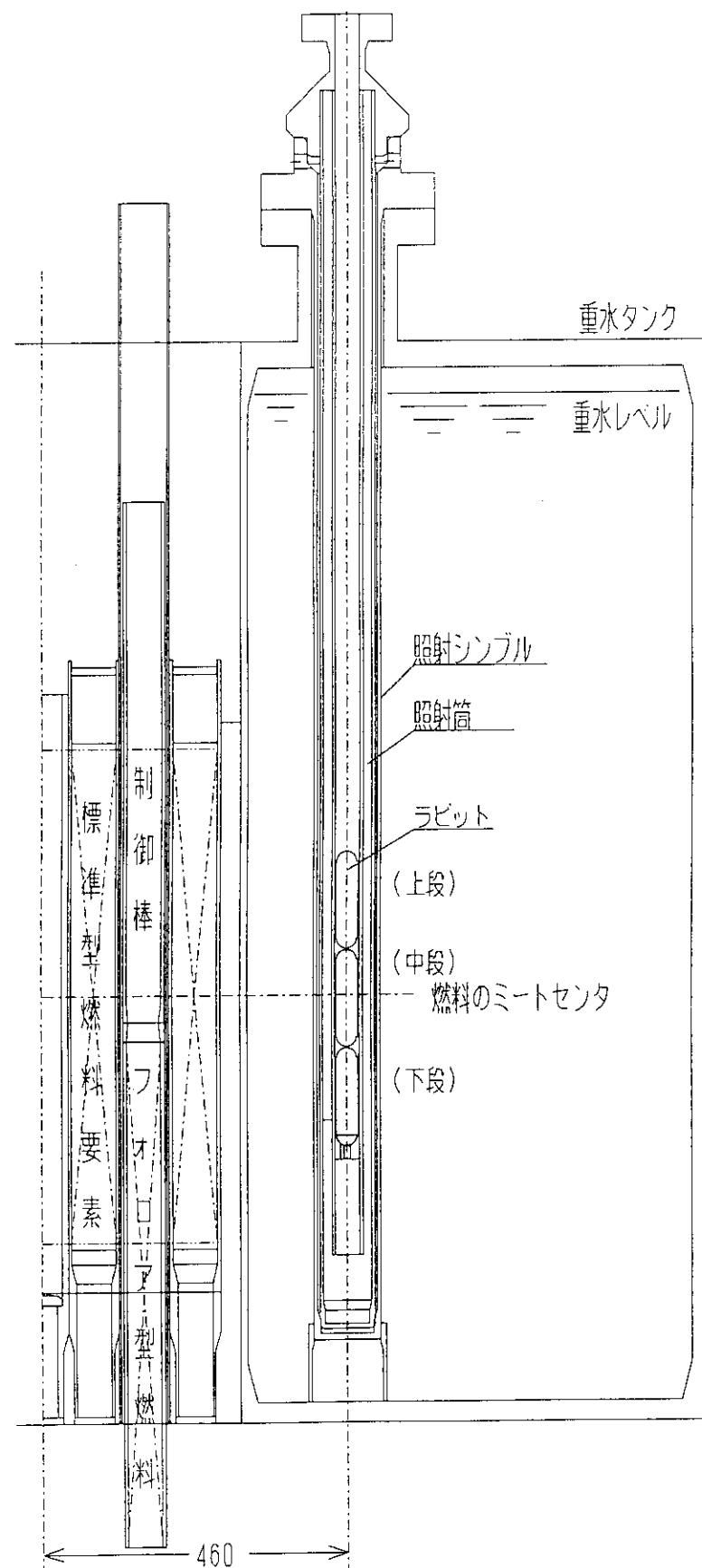


Fig. 3 Cross Section of HR(HR-1 and HR-2) Irradiation Hole and Tube

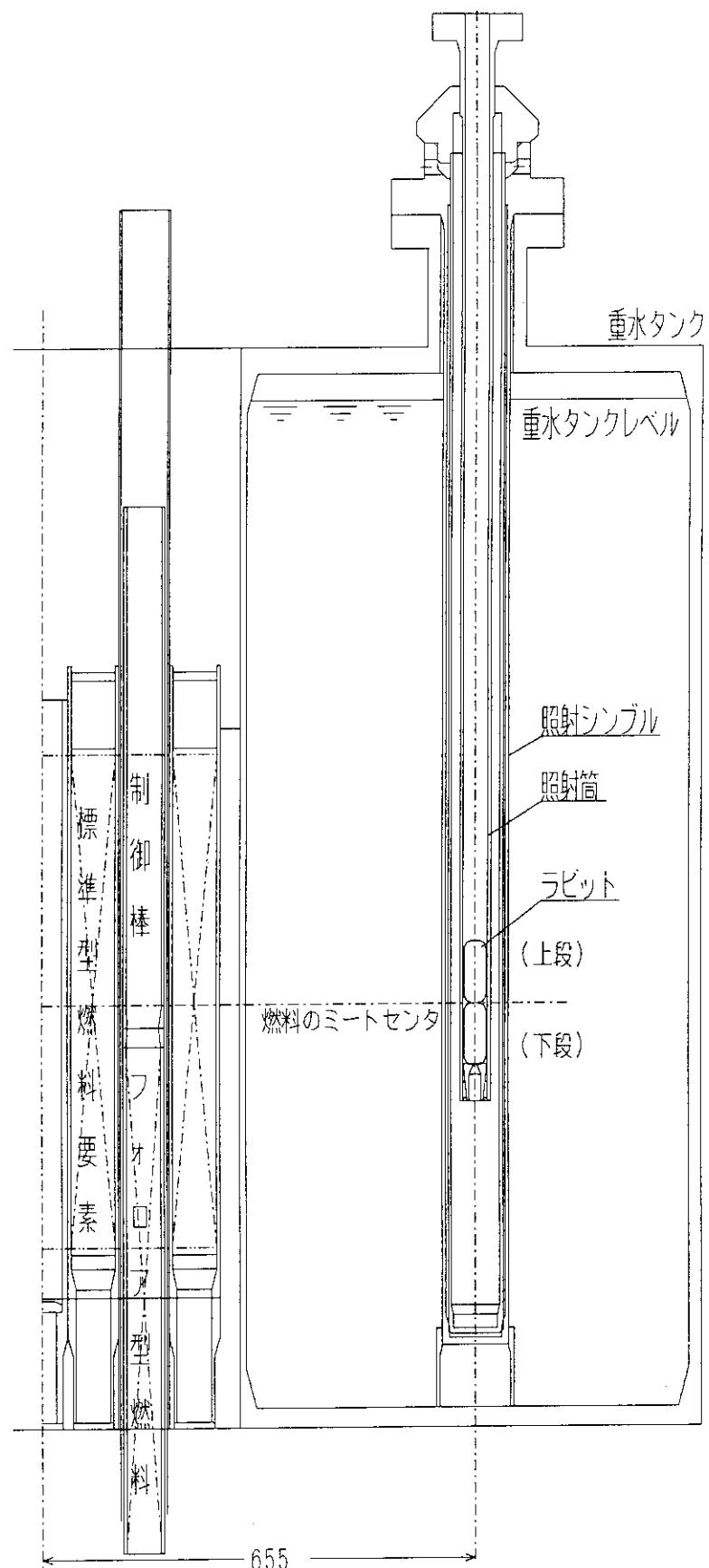


Fig. 4 Cross Section of PN(PN-1 and PN-2) Irradiation Hole and Tube

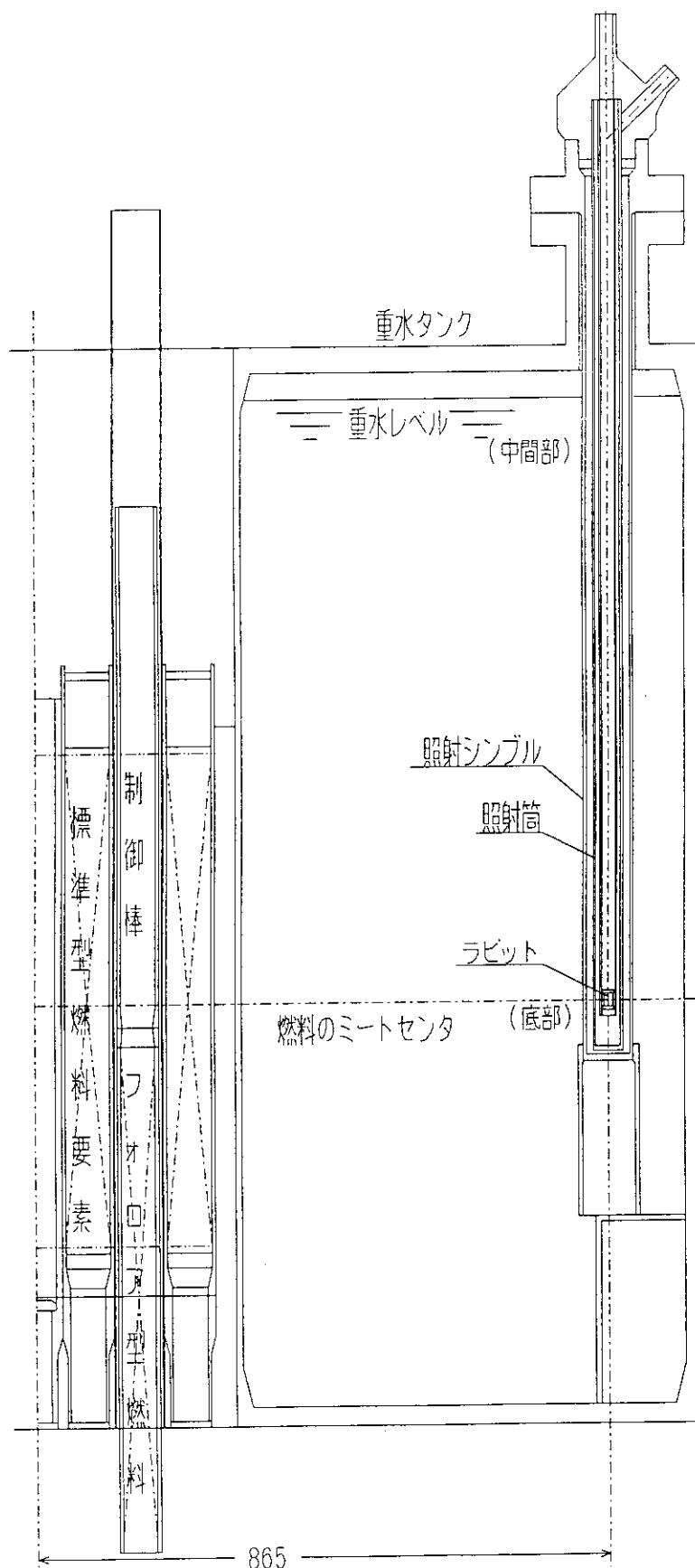


Fig. 5 Cross Section of PN-3 Irradiation Hole and Tube

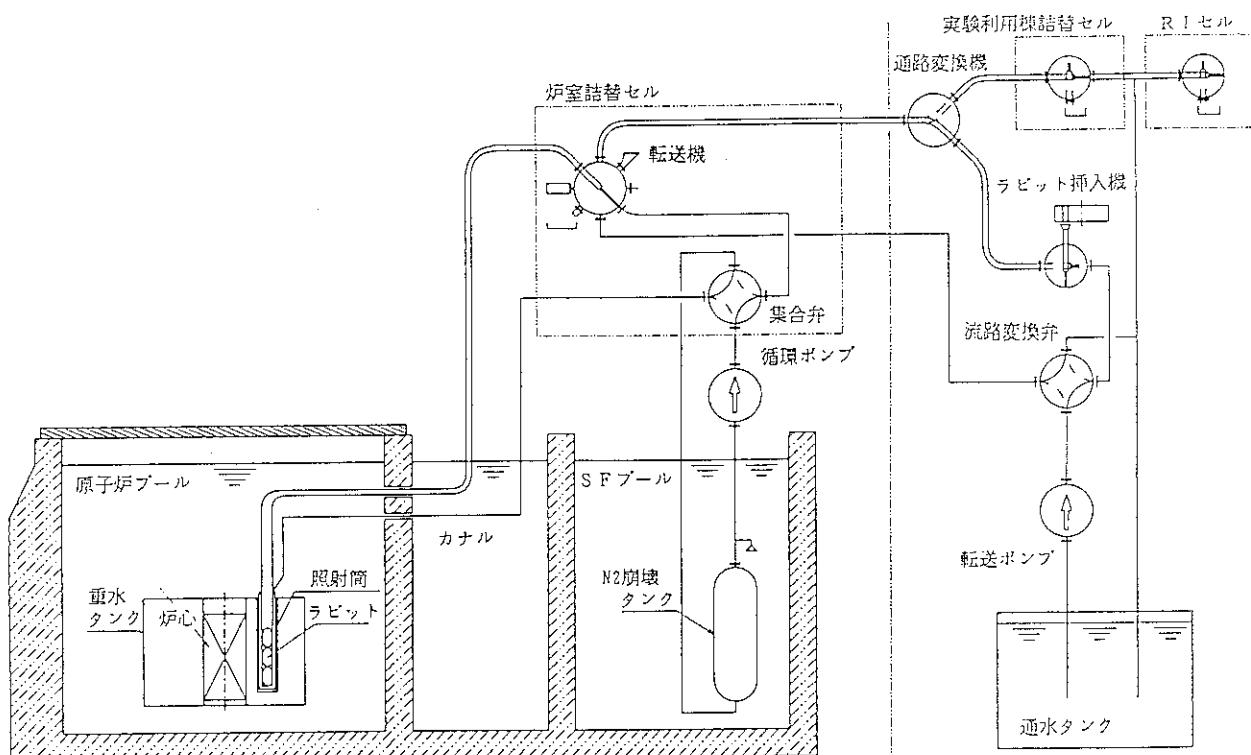


Fig. 6 Schematic Drawing of Hydraulic Irradiation Facility(HR)

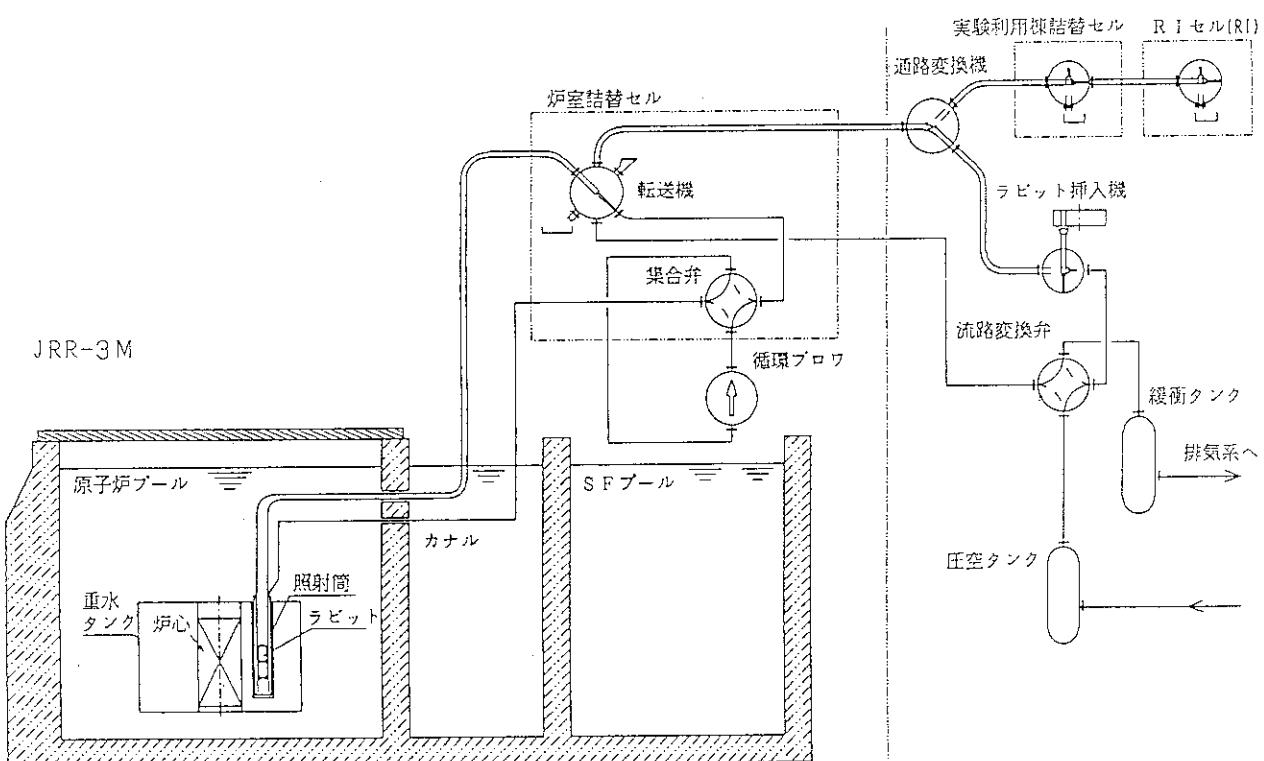


Fig. 7 Schematic Drawing of Pneumatic Irradiation Facility(PN)

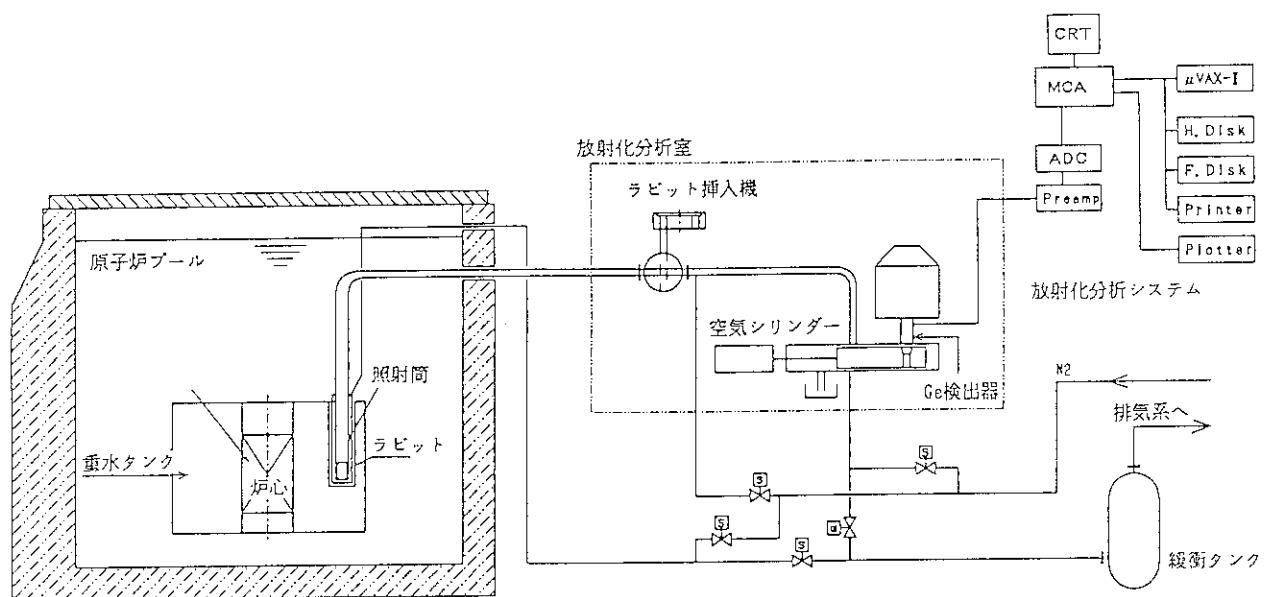


Fig. 8 Schematic Drawing of Activation Analysis Irradiation Facility (PN-3)

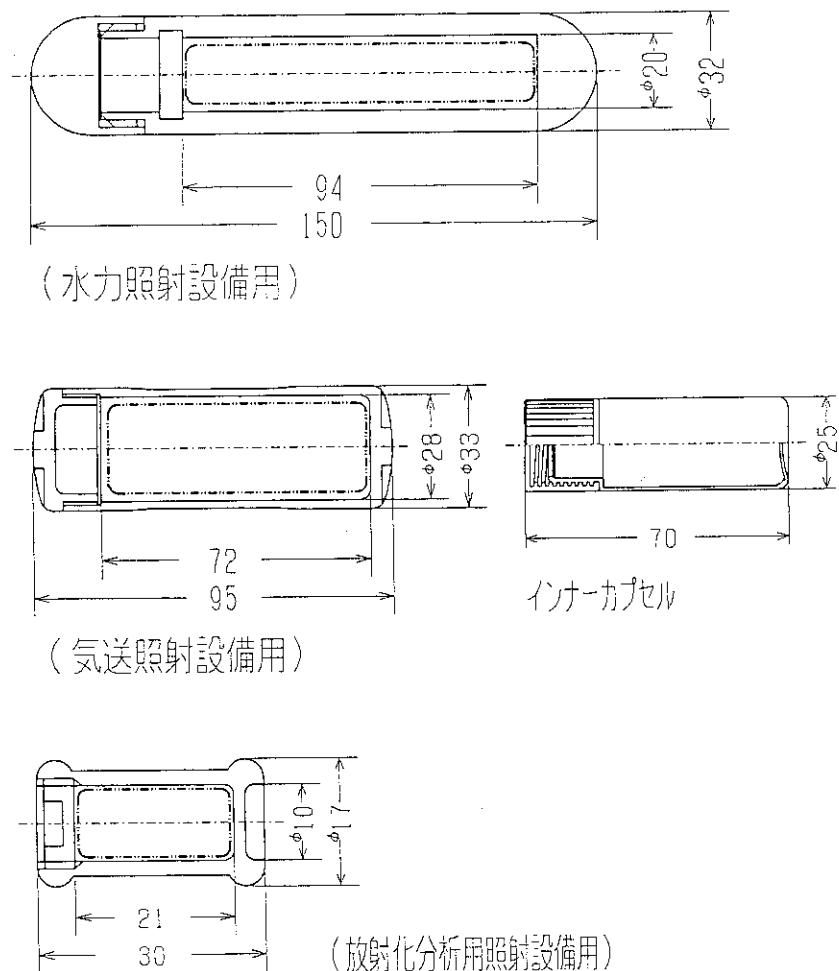
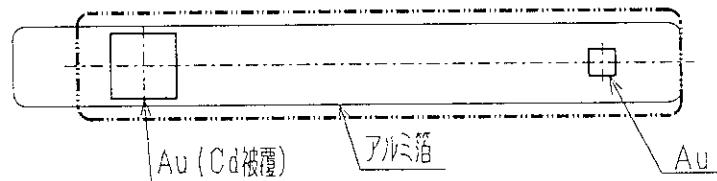
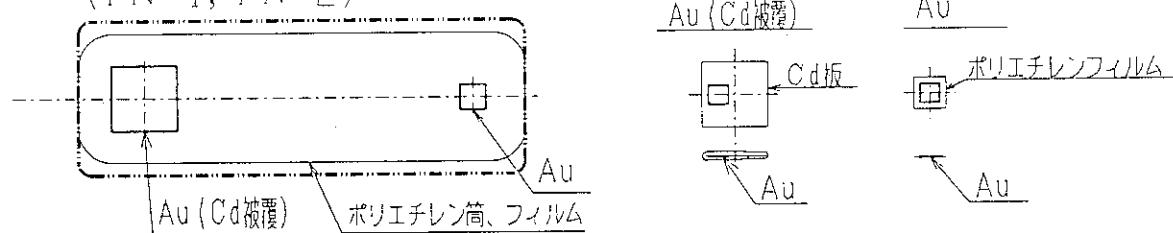


Fig. 9 Drawing of Rabbits for Neutron Flux and Cadmium Ratio Measurement

(HR-1, HR-2)



(PN-1, PN-2)



(PN-3)

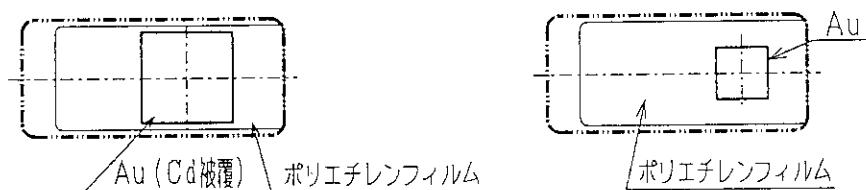
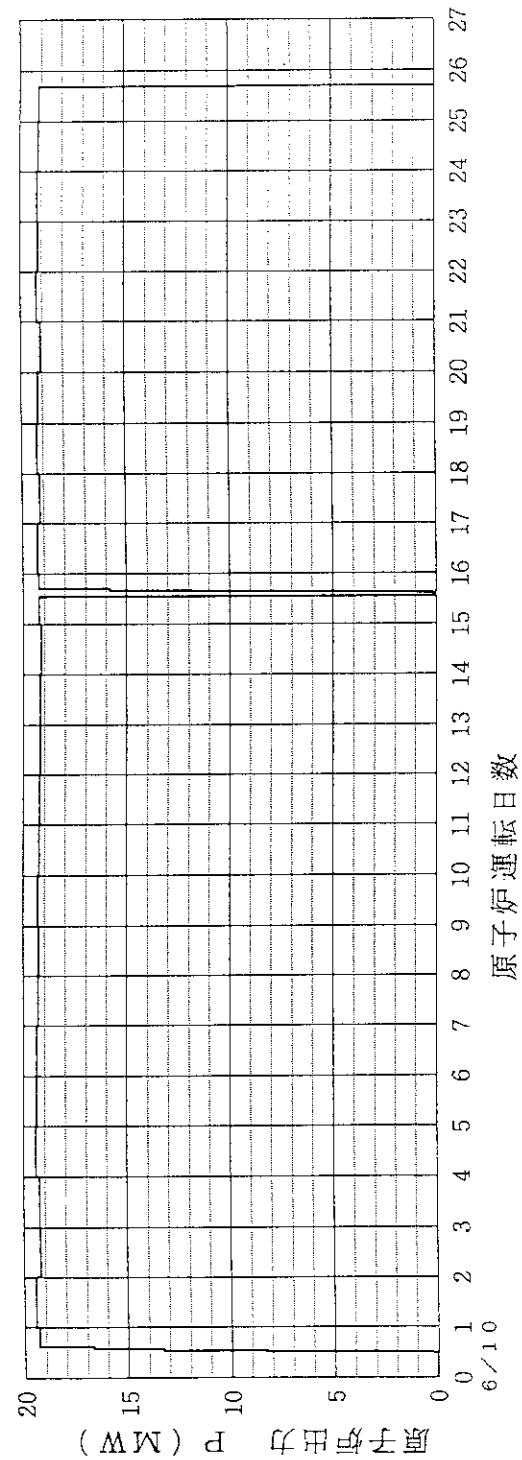
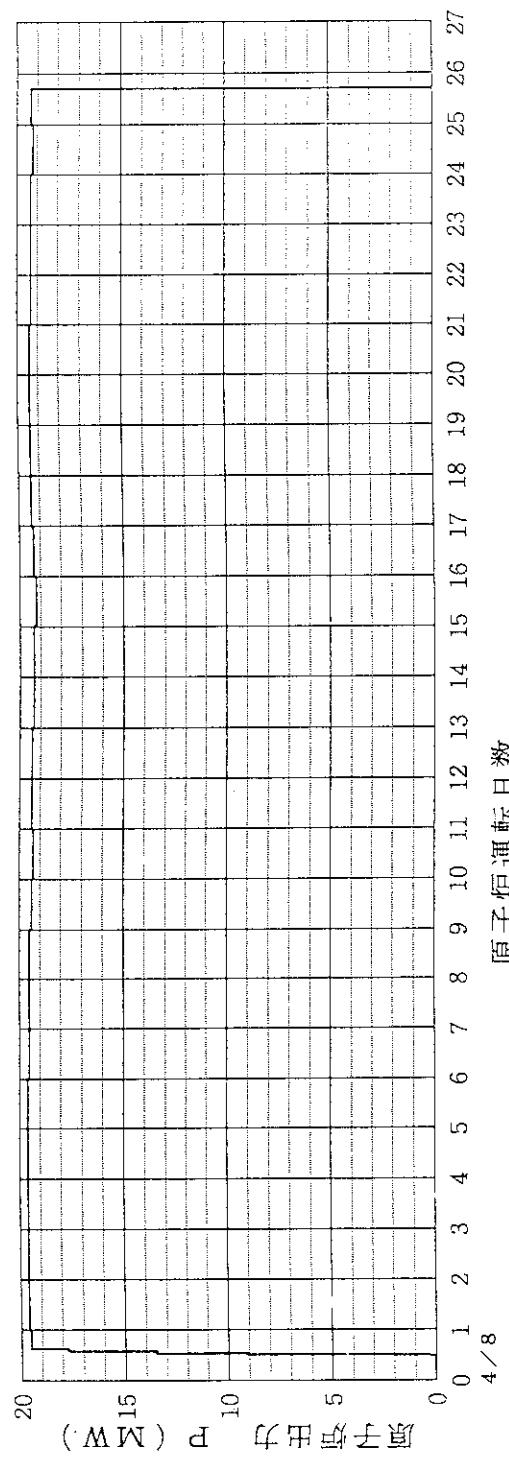


Fig. 10 Assembly of Activation Detector



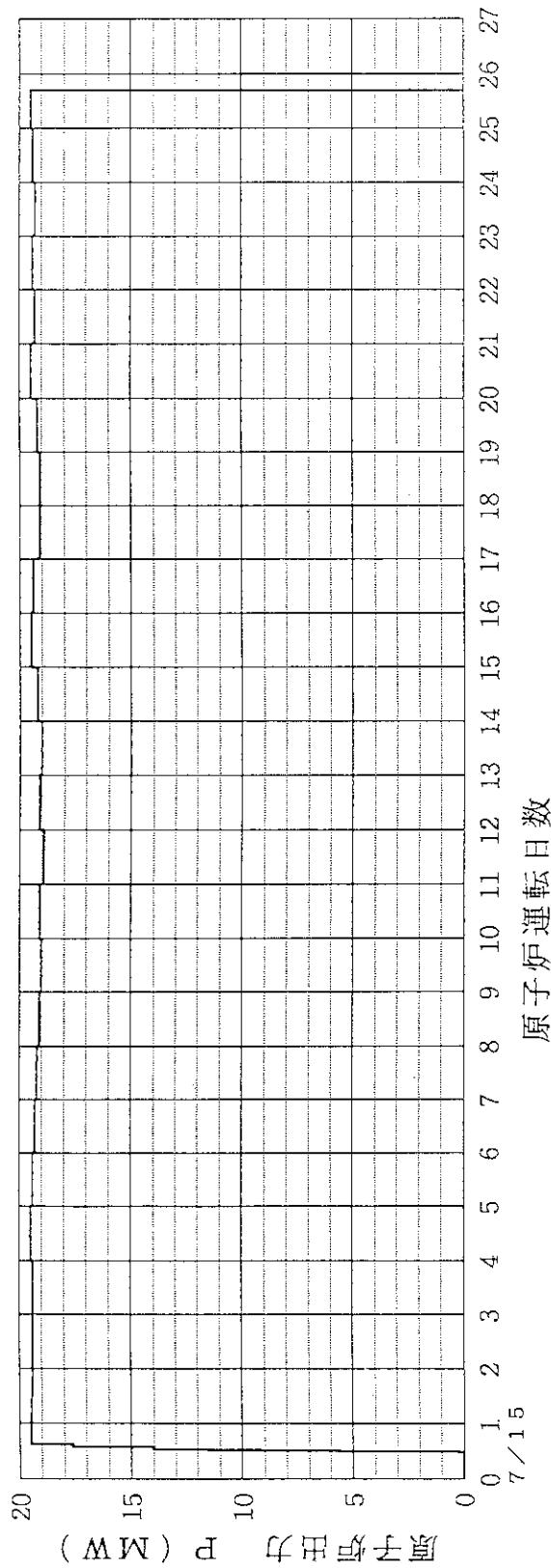


Fig. 13 Reactor Power History at 03-03 Cycle of JRR-3M

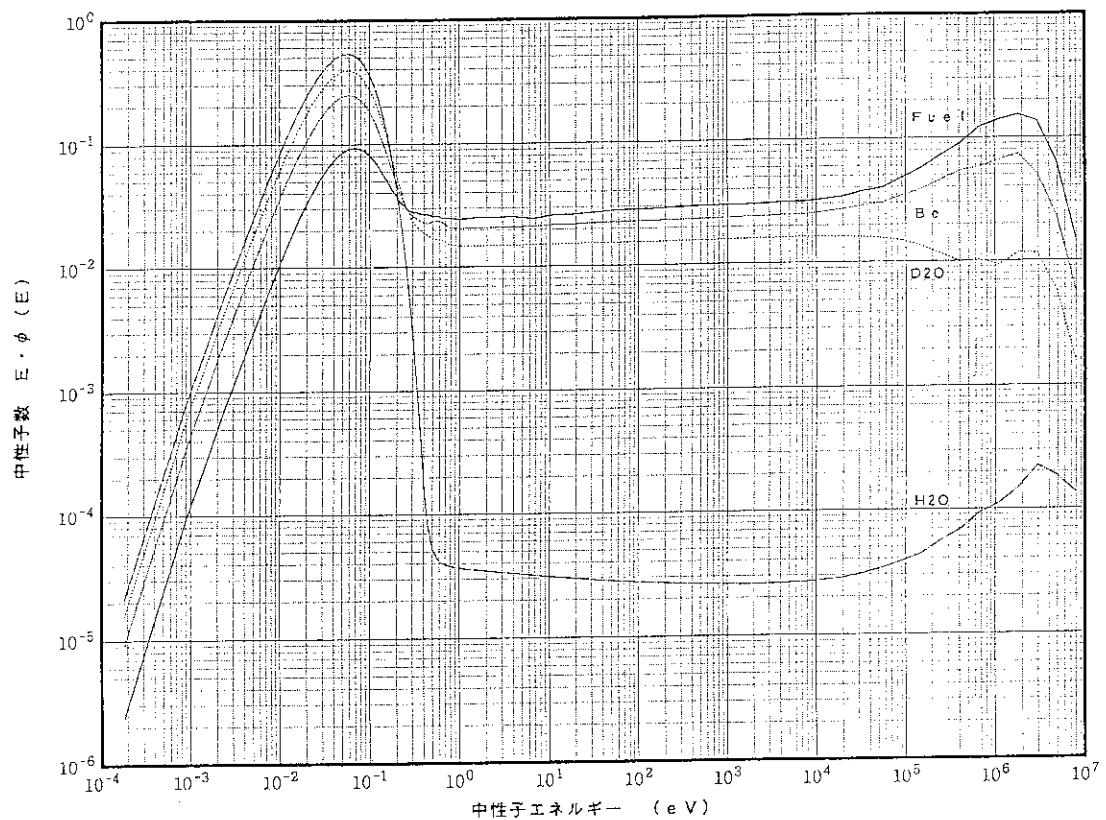


Fig. 14 Neutron Spectra in JRR-3M⁷)

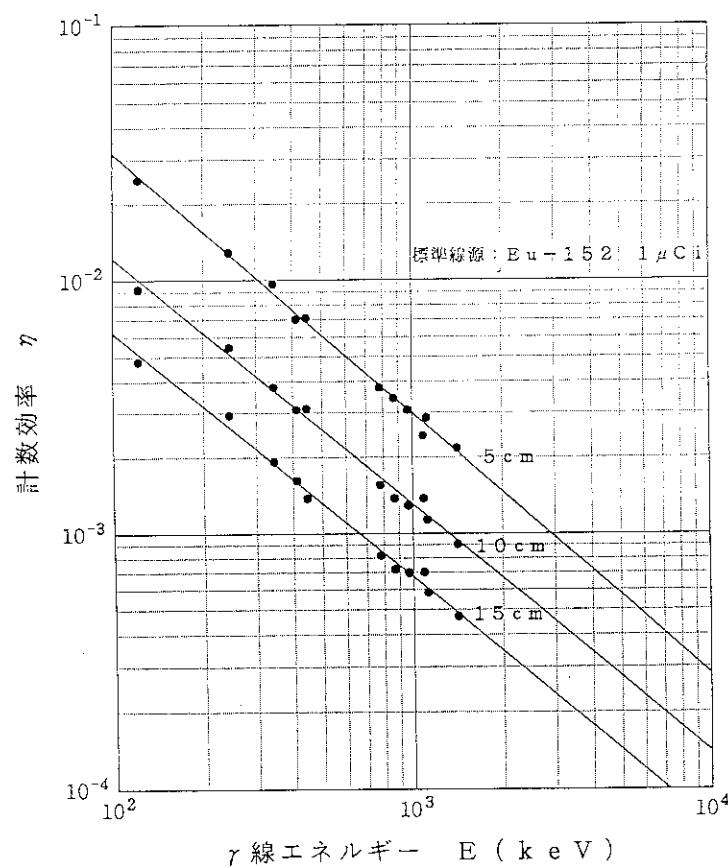


Fig. 15 Counting Efficiency of Ge Detector
in Experimental Room No.1

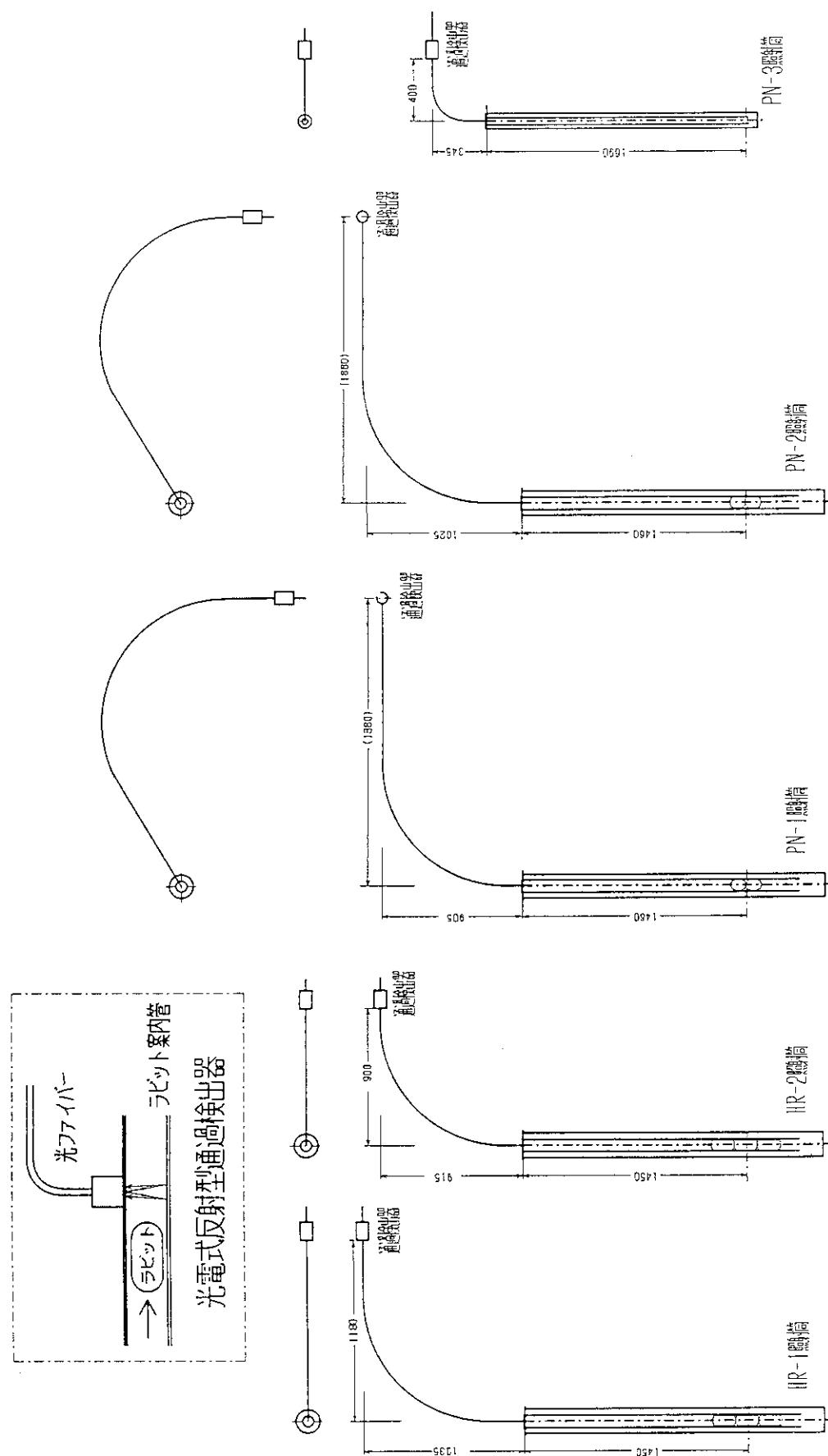


Fig. 16 Detection System of Rabbit Transfer

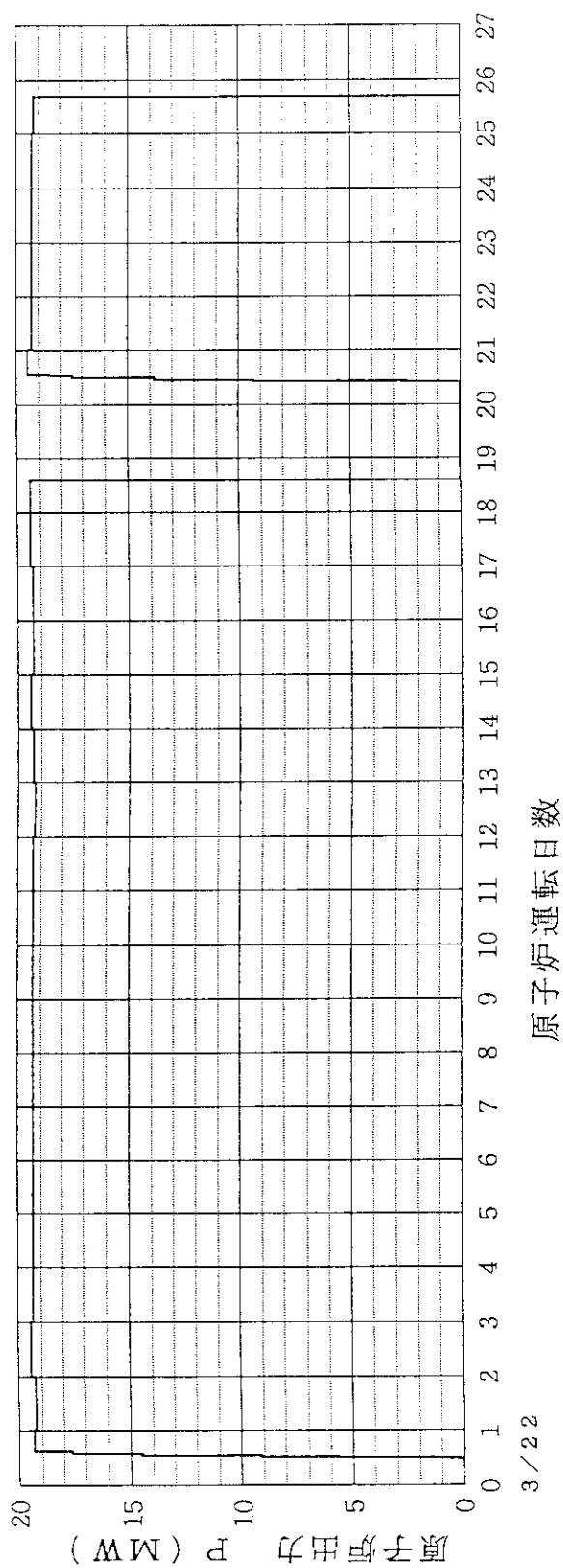


Fig. 17 Reactor Power History at 04-07 Cycle of JRR-3M

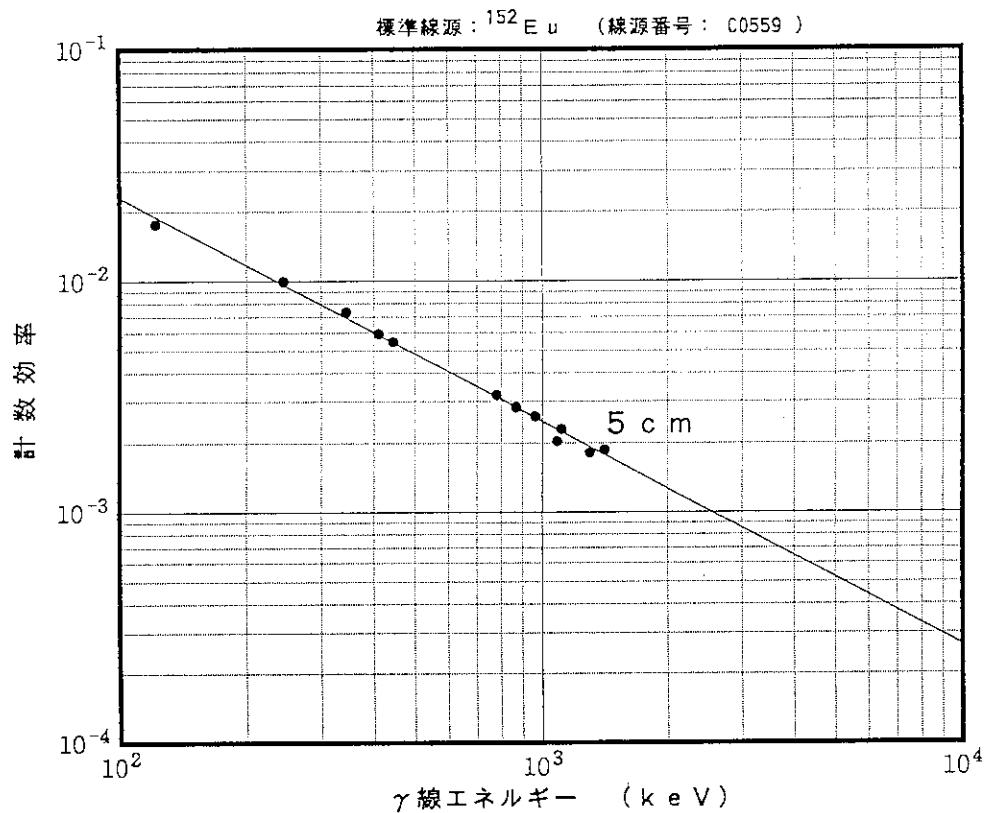


Fig. 18 Counting Efficiency of Ge Detector No.1

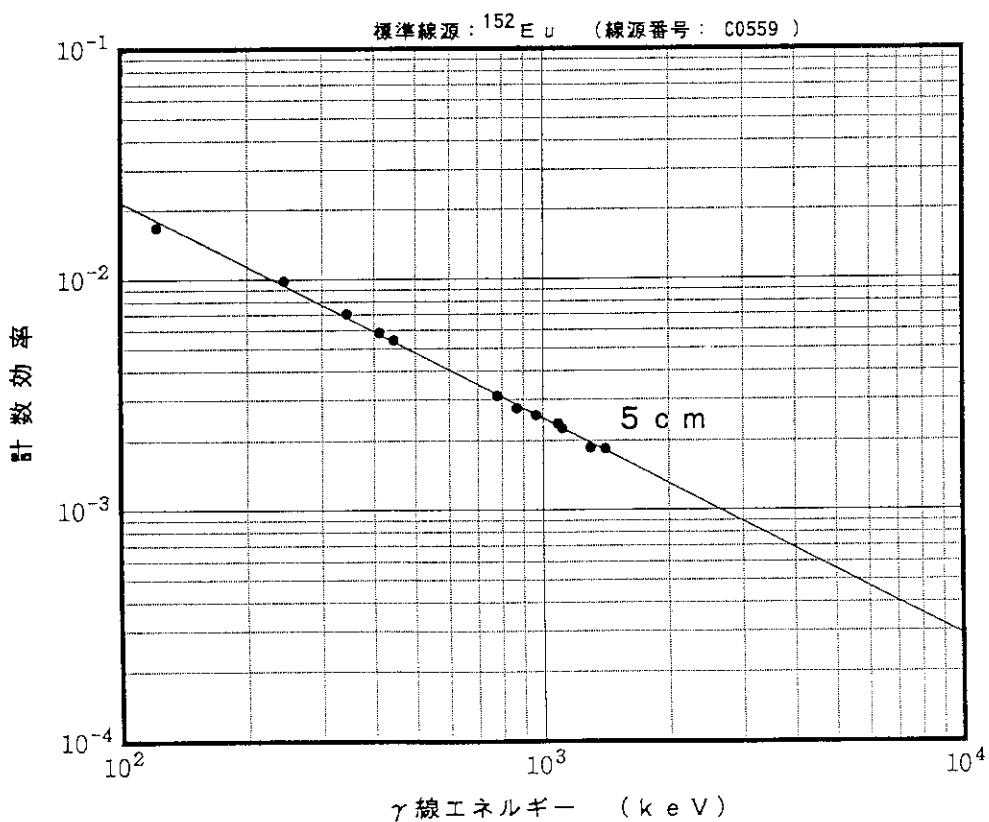


Fig. 19 Counting Efficiency of Ge Detector No.2

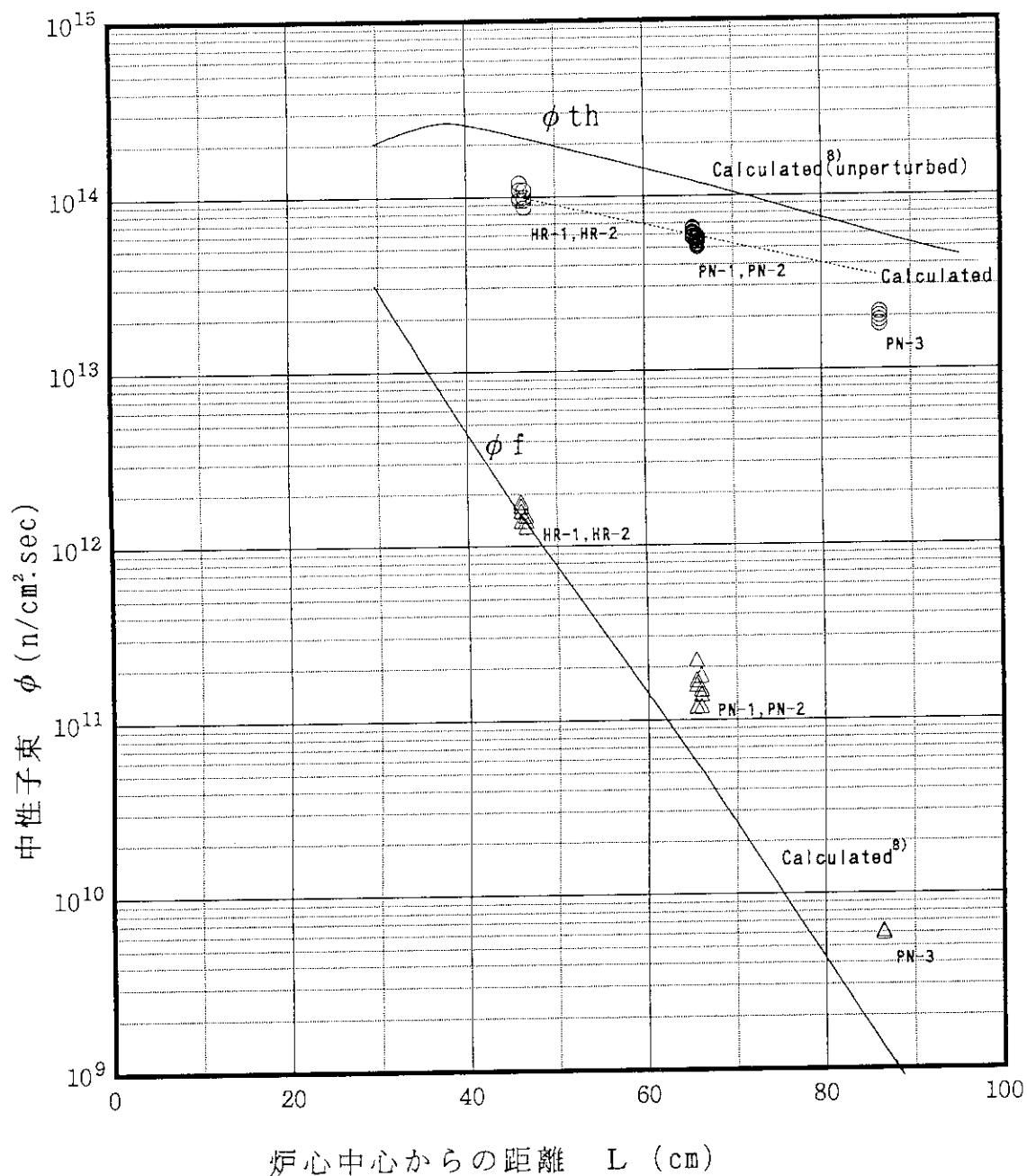


Fig. 20 Measured Thermal Neutron Flux and Fast Neutron Flux
at Heavy Water Reflector Region in JRR-3M

付録A Ni-58の実効断面積

実効しきいエネルギーの概念を用いて、しきい検出器であるNi-58の実効断面積を求める。しきい反応による放射化反応率Rは次式で与えられる。

$$R = N \int_0^{\infty} \sigma(E) \phi(E) dE \quad [s^{-1}] \quad (1)$$

ここで、

N : 検出器中の標的原子核数 ($\times 10^{24}$ atoms)

E : 中性子のエネルギー [MeV]

$\sigma(E)$: エネルギーEの中性子に対するしきい反応の断面積 [barn]

$\phi(E)$: 中性子束スペクトル [$n/cm^2 \cdot s \cdot MeV$]

しきい反応の断面積を、あるしきいエネルギー以上では一様であるようなステップ関数で模擬し、反応率を保存するように次式で定義する。

$$\frac{R}{N} = \int_0^{\infty} \sigma(E) \phi(E) dE = \sigma_{eff} \int_{E_{eff}}^{\infty} \phi(E) dE \quad (2)$$

ここで、

σ_{eff} : 実効断面積

E_{eff} : しきいエネルギー

$\phi(E)$ が既知であれば、しきいエネルギー E_{eff} を決めることで実効断面積 σ_{eff} を決定することができる。

Table A.1～Table A.6に、核分裂スペクトルを使用した場合、標準型燃料要素、燃料領域照射筒、Be反射体領域、重水反射体領域、軽水領域でのNi-58の実効断面積の計算結果を示す。Table A.1～Table A.3については、JRR-3M原子炉本体特性試験報告書から引用、Table A.4～Table A.6については、「改造炉の核計算」⁷⁾に記載されている中性子スペクトルの値を用いて、同様の方法で計算した結果を示している。JRR-3Mの中性子スペクトルをFig. A.1に示す。

重水反射体領域に配置されている照射孔(HR-1, HR-2, PN-1, PN-2, PN-3, SI-1, DR-1, SH-1)は、いずれも重水反射体領域の計算位置 $R=37cm$ より外側のため、スペクトルがより、軟化しているものと考えられる。重水反射体領域内の照射孔のスペクトルについては、別途検討する。

Table A.1 $^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p})$ ^{58}Co 反応の実効断面積 (LWR-WIMS核分裂スペクトル使用)

群NO	エネルギー-(MeV)		σg (barn)	χg ($1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	$\sum_{g=1}^5 \chi g$	(Eeff)g (MeV)	$(\sigma \text{ eff})g$ (barn)	備考
	上限	下限						
1	10.000	6.066	0.637	2.710E-02	2.710E-02	6.0655	4.258	
2	6.066	3.679	0.484	1.160E-01	1.431E-01	3.6790	0.806	
3	3.679	2.231	0.165	2.148E-01	3.579E-01	2.2310	0.322	
4	2.231	1.353	0.027	2.293E-01	5.872E-01	1.3530	0.197	
5	1.353	0.821	0.002	1.758E-01	7.630E-01	0.8210	0.151	
6	0.821	0.500	0.000	1.107E-01	8.737E-01	0.500	0.132	
					7.022E-01	1.000	0.164	

$$\text{実効断面積} : (\sigma \text{ eff})g = \int_0^\infty \sigma \phi dE / \int_0^\infty \phi dE = \sum_{g'=1}^5 \sigma g' \phi g' / \sum_{g'=1}^5 \phi g'$$

原子炉本体特性試験報告書から

Table A.2 $^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p})$ ^{58}Co 反応の実効断面積 (標準型燃料要素)

群NO	エネルギー-(MeV)		σg (barn)	ϕg ($1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	$\sum_{g=1}^5 \phi g$	(Eeff)g (MeV)	$(\sigma \text{ eff})g$ (barn)	備考
	上限	下限						
1	10.000	6.066	0.637	5.511E-04	5.511E-04	6.0655	4.185	
2	6.066	3.679	0.484	2.145E-03	2.696E-03	3.6790	0.856	
3	3.679	2.231	0.165	4.687E-03	7.383E-03	2.2310	0.312	
4	2.231	1.353	0.027	5.003E-03	1.239E-02	1.3530	0.186	
5	1.353	0.821	0.002	4.363E-03	1.675E-02	0.8210	0.138	
6	0.821	0.500	0.000	4.107E-03	2.086E-02	0.500	0.111	
					1.501E-02	1.000	0.154	

$$\text{実効断面積} : (\sigma \text{ eff})g = \int_0^\infty \sigma \phi dE / \int_0^\infty \phi dE = \sum_{g'=1}^5 \sigma g' \phi g' / \sum_{g'=1}^5 \phi g'$$

原子炉本体特性試験報告書から

Table A.3 $^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p})^{58}\text{Co}$ 反応の実効断面積（燃料領域内照射孔）

群NO	エネルギー-(MeV)		σg (barn)	ϕg (1/cm ² .s)	$\sum_{g'=1}^5 \phi g'$	(Eeff)g (MeV)	$(\sigma \text{ eff})g$ (barn)	備考
	上限	下限						
1	10.000	6.066	0.637	2.840E-05	2.840E-05	6.0655	4.697	
2	6.066	3.679	0.484	1.140E-04	1.424E-04	3.6790	0.937	
3	3.679	2.231	0.165	3.001E-04	4.425E-04	2.2310	0.301	
4	2.231	1.353	0.027	3.676E-04	8.101E-04	1.3530	0.165	
5	1.353	0.821	0.002	3.462E-04	1.156E-03	0.8210	0.115	
6	0.821	0.500	0.000	3.943E-04	1.551E-03	0.500	0.086	
					1.006E-03	1.000	0.133	

$$\text{実効断面積} : (\sigma \text{ eff})g = \int_0^\infty \sigma \phi dE / \int_0^\infty \phi dE = \sum_{g'=1}^5 \sigma g' \phi g' / \sum_{g'=1}^5 \phi g'$$

原子炉本体特性試験報告書から

Table A.4 $^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p})^{58}\text{Co}$ 反応の実効断面積（Be反射体領域）

群NO	エネルギー-(MeV)		σg (barn)	ϕg (1/cm ² .s)	$\sum_{g'=1}^5 \phi g'$	(Eeff)g (MeV)	$(\sigma \text{ eff})g$ (barn)	備考
	上限	下限						
1	10.000	6.066	0.637	2.788E-03	2.788E-03	6.0655	4.525	
2	6.066	3.679	0.484	1.154E-02	1.433E-02	3.6790	0.881	
3	3.679	2.231	0.165	2.541E-02	3.974E-02	2.2310	0.317	
4	2.231	1.353	0.027	3.693E-02	7.667E-02	1.3530	0.165	
5	1.353	0.821	0.002	3.282E-02	1.095E-01	0.8210	0.115	
6	0.821	0.500	0.000	2.910E-02	1.386E-01	0.500	0.091	
						1.000	0.132	

$$\text{実効断面積} : (\sigma \text{ eff})g = \int_0^\infty \sigma \phi dE / \int_0^\infty \phi dE = \sum_{g'=1}^5 \sigma g' \phi g' / \sum_{g'=1}^5 \phi g'$$

JAERI-M85-062記載のスペクトルを使用 (R=28.5cm)

Table A.5 $^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p})$ ^{58}Co 反応の実効断面積 (D₂O反射体領域)

群NO	エネルギー-(MeV)		σg (barn)	ϕg (1/cm ² . s)	$\sum_{g'=1}^5 \phi g'$	(Eeff)g (MeV)	$(\sigma \text{eff})g$ (barn)	備考
	上限	下限						
1	10.000	6.066	0.637	7.646E-04	7.646E-04	6.0655	3.932	
2	6.066	3.679	0.484	2.891E-03	3.656E-03	3.6790	0.822	
3	3.679	2.231	0.165	5.771E-03	9.427E-03	2.2310	0.319	
4	2.231	1.353	0.027	5.868E-03	1.529E-02	1.3530	0.197	
5	1.353	0.821	0.002	4.661E-03	1.996E-02	0.8210	0.151	
6	0.821	0.500	0.000	5.158E-03	2.511E-02	0.500	0.120	
						1.000	0.166	

$$\text{実効断面積} : (\sigma \text{eff})g = \int_0^\infty \sigma \phi dE / \int_0^\infty \phi dE = \sum_{g'=1}^5 \sigma g' \phi g' / \sum_{g'=1}^5 \phi g'$$

JAERI-M85-062記載のスペクトルを使用 (R=37cm、重水タンク内胴から6cm外側)

Table A.6 $^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p})$ ^{58}Co 反応の実効断面積 (H₂O反射体領域)

群NO	エネルギー-(MeV)		σg (barn)	ϕg (1/cm ² . s)	$\sum_{g'=1}^5 \phi g'$	(Eeff)g (MeV)	$(\sigma \text{eff})g$ (barn)	備考
	上限	下限						
1	10.000	6.066	0.637	6.701E-05	6.701E-05	6.0655	1.623	
2	6.066	3.679	0.484	9.345E-05	1.605E-04	3.6790	0.678	
3	3.679	2.231	0.165	1.134E-04	2.739E-04	2.2310	0.397	
4	2.231	1.353	0.027	7.417E-05	3.480E-04	1.3530	0.312	
5	1.353	0.821	0.002	5.517E-05	4.032E-04	0.8210	0.270	
6	0.821	0.500	0.000	4.653E-05	4.497E-04	0.500	0.242	
						1.000	0.284	

$$\text{実効断面積} : (\sigma \text{eff})g = \int_0^\infty \sigma \phi dE / \int_0^\infty \phi dE = \sum_{g'=1}^5 \sigma g' \phi g' / \sum_{g'=1}^5 \phi g'$$

JAERI-M85-062記載の中性子スペクトルを使用 (R=107cm、重水タンク外胴表面から7cm外側)

付録B γ 線線量率測定

1. 概要

アラニン線量計により JRR-3M の水力照射設備 (HR) , 気送照射設備 (PN) 及び均一照射設備 (SI) の線量率測定を行った。原子炉の低出力運転, 出力上昇時の各出力でアラニン線量計を所定の時間照射し, 十分冷却したものを高崎研究所極限材料研究室の協力を得て, ESR 装置で測定した。

2. 照射条件, 測定方法

アラニン線量計をアルミ及びポリエチレンのラビットに入れて照射し, 放射線によってアラニンに生じたラジカル濃度を電子スピン共鳴 (ESR) 装置を用いて測定する。

アラニン線量計 ; アミノグレイ (日立電線)

測定装置 ; ESR 装置 (高崎研究所)

- ・アラニンは, 測定範囲の関数から, 十分直線性があると言われている $10^2 \sim 10^4$ Gy を目安として各原子炉出力での照射時間を決定した。

3. 測定結果

測定結果を Table B-1 ~ Table B-4 及び Fig. B-1 に示す。

Table B.1 第1回特性測定結果

NO.	設備	炉出力	時間	線量 R	線量率 R/h	線量率 R/h at 20MW	備考
991	PN-1	20MW	1m	1.25×10^6	7.5×10^7	7.5×10^7	照射日 1991.7/22
992	PN-1	20MW	1m	1.24×10^6	7.44×10^7	7.44×10^7	
993	PN-2	20MW	1m	1.16×10^6	6.96×10^7	6.96×10^7	測定日 1992.5/14
994	PN-2	20MW	1m	1.17×10^6	7.02×10^7	7.02×10^7	

Table B.2 第2回特性測定結果

NO.	設備	炉出力	時間	線量 R	線量率 R/h	線量率 R/h at 20MW	備考
764	PN-1	10KW	10m	5.03×10^4	3.02×10^5	(6.08×10^8)	照射日 1991.8/14 測定日 1992.5/14
765	PN-2	10KW	10m	4.31×10^4	2.59×10^5	(5.08×10^8)	
999	HR-1	10KW	5m	9.76×10^4	1.17×10^6	(2.34×10^9)	
1000	HR-2	10KW	5m	1.04×10^5	1.25×10^6	(2.5×10^9)	
997	PN-1	200KW	10m	1.69×10^5	1.01×10^6	(1.01×10^8)	
998	PN-2	200KW	10m	1.52×10^5	9.12×10^5	(9.12×10^7)	
766	HR-1	200KW	5m	2.81×10^5	3.37×10^6	(3.37×10^8)	
767	HR-2	200KW	5m	2.92×10^5	3.50×10^6	(3.5×10^8)	

Table B.3 第3回特性測定結果

回数NO.	設備	炉出力	時間	線量 R	線量率 R/h	線量率 R/h at 20MW	備考
105091 4 5 6	HR-2	10KW	10m	7.9 x10 ⁴	4.7 x10 ⁵	(9.34 x10 ⁸)	照射日 1992.1/9 測定日 1992.5/14
	HR-2	10KW	10m	7.64 x10 ⁴	4.58 x10 ⁵		
	HR-2	10KW	10m	7.81 x10 ⁴	4.69 x10 ⁵		
7 8 9	HR-2	100KW	10m	2.73 x10 ⁵	1.64 x10 ⁶	(3.25 x10 ⁸)	
	HR-2	100KW	10m	2.71 x10 ⁵	1.63 x10 ⁶		
	HR-2	100KW	10m	2.68 x10 ⁵	1.61 x10 ⁶		
10 11 12	HR-2	200KW	10m	4.86 x10 ⁵	2.92 x10 ⁶	(2.87 x10 ⁸)	照射日 1992.1/13 測定日 1992.5/14
	HR-2	200KW	10m	4.71 x10 ⁵	2.83 x10 ⁶		
	HR-2	200KW	10m	4.76 x10 ⁵	2.86 x10 ⁶		
13 14 15	HR-2	2MW	5m	2.12 x10 ⁶	2.54 x10 ⁷	(2.50 x10 ⁸)	
	HR-2	2MW	5m	2.07 x10 ⁶	2.48 x10 ⁷		
	HR-2	2MW	5m	2.07 x10 ⁶	2.48 x10 ⁷		
16 17 18	PN-1	100KW	10m	7.78 x10 ⁴	4.67 x10 ⁵	(9.67 x10 ⁷)	照射日 1992.1/9 測定日 1992.5/14
	PN-1	100KW	10m	8.29 x10 ⁴	4.97 x10 ⁵		
	PN-1	100KW	10m	8.10 x10 ⁴	4.86 x10 ⁵		
19 20 07011 41	PN-2	10KW	10m	1.88 x10 ⁴	1.13 x10 ⁵	(2.35 x10 ⁸)	
	PN-2	10KW	10m	2.00 x10 ⁴	1.2 x10 ⁵		
	PN-2	10KW	10m	1.99 x10 ⁴	1.19 x10 ⁵		
42 43 44	PN-2	100KW	10m	7.99 x10 ⁴	4.79 x10 ⁵	(9.35 x10 ⁷)	
	PN-2	100KW	10m	7.87 x10 ⁴	4.72 x10 ⁵		
	PN-2	100KW	10m	7.56 x10 ⁴	4.54 x10 ⁵		
45 46 47	PN-2	200KW	10m	1.39 x10 ⁵	8.34 x10 ⁵	(8.62 x10 ⁷)	照射日 1992.1/13 測定日 1992.5/14
	PN-2	200KW	10m	1.44 x10 ⁵	8.64 x10 ⁵		
	PN-2	200KW	10m	1.48 x10 ⁵	8.88 x10 ⁵		
48 49 50	PN-2	2MW	5m	6.59 x10 ⁵	7.91 x10 ⁶	(7.80 x10 ⁷)	
	PN-2	2MW	5m	6.34 x10 ⁵	7.61 x10 ⁶		
	PN-2	2MW	5m	6.57 x10 ⁵	7.88 x10 ⁶		
05301 51 52 53	PN-2	10MW	1m	6.19 x10 ⁵	3.71 x10 ⁷	(7.54 x10 ⁷)	
	PN-2	10MW	1m	6.47 x10 ⁵	3.88 x10 ⁷		
	PN-2	10MW	1m	6.19 x10 ⁵	3.71 x10 ⁷		
54 55 56	PN-2	20MW	1m	1.15 x10 ⁶	6.9 x10 ⁷	6.82 x10 ⁷	
	PN-2	20MW	1m	1.11 x10 ⁶	6.66 x10 ⁷		
	PN-2	20MW	1m	1.15 x10 ⁶	6.9 x10 ⁷		

Table B.4 第4回特性測定結果

ロットNO.	設備	炉出力	時間	線量 R	線量率 R/h	線量率 R/h at 20MW	備考
05301-57 58 59	SI-1 保管台 外 上	20MW	5h	1.92 × 10 ³	3.84 × 10 ²	3.77 × 10 ²	照射日 1992.8/25
				1.80 × 10 ³	3.60 × 10 ²		測定日 1992.12/22
				1.94 × 10 ³	3.88 × 10 ²		
768 770 07011-60	SI-1 保管台 外 下	20MW	5h	4.70 × 10 ³	9.40 × 10 ²	9.23 × 10 ²	1992.12/22
				4.72 × 10 ³	9.44 × 10 ²		
				4.43 × 10 ³	8.86 × 10 ²		
07011-54 55 56	SI-1 保管台 内 上	20MW	5h	8.85 × 10 ²	1.77 × 10 ¹	1.75 × 10 ¹	
				9.54 × 10 ²	1.91 × 10 ¹		
				7.82 × 10 ²	1.56 × 10 ¹		
07011-51 52 53	SI-1 保管台 内 下	20MW	5h	2.31 × 10 ²	4.62 × 10 ¹	3.74 × 10 ¹	
				1.85 × 10 ²	3.70 × 10 ¹		
				1.45 × 10 ²	2.90 × 10 ¹		
07011-57 58 59	SI-1 照射筒 上	100KW	20m	8.81 × 10 ⁴	2.64 × 10 ⁵	(5.22 × 10 ⁷)	照射日 1992.10/19
				8.91 × 10 ⁴	2.67 × 10 ⁵		測定日 1992.12/22
				8.40 × 10 ⁴	2.52 × 10 ⁵		
07011-60 61 62	SI-1 照射筒 下	100KW	20m	0.96 × 10 ⁵	2.88 × 10 ⁵	(5.78 × 10 ⁷)	1992.12/22
				1.00 × 10 ⁵	3.00 × 10 ⁵		
				0.93 × 10 ⁵	2.79 × 10 ⁵		

4.まとめ

上記の測定結果から、水力照射設備(HR)、気送照射設備(PN)の20MWでの線量率は以下の通りである。

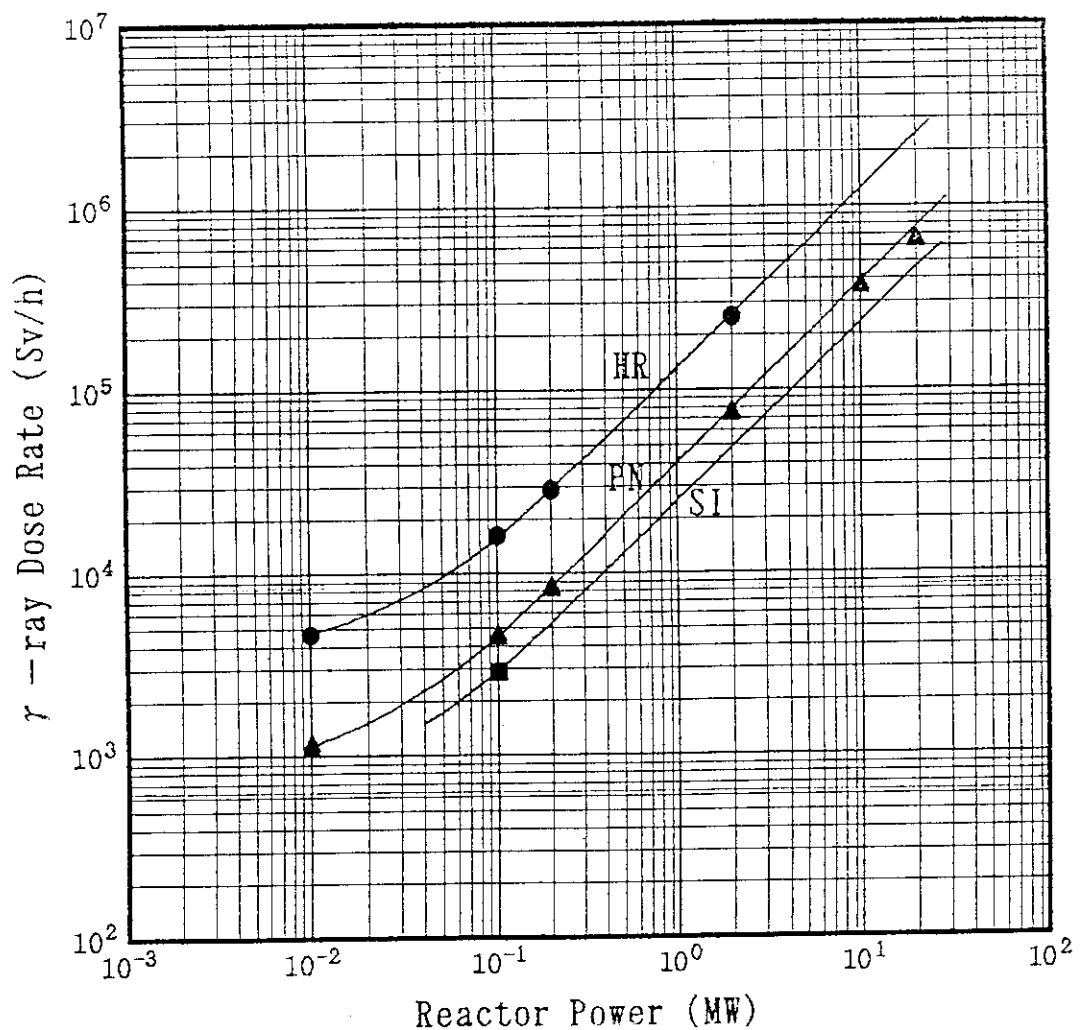
照 射 設 備	線 量 率
水力照射設備(HR)	$2.5 \times 10^8 \text{ R/h}$
気送照射設備(PN)	$7.5 \times 10^7 \text{ R/h}$

PNの測定結果では、10KW, 100KW程度の出力では $1 \times 10^5 \text{ R/h} \sim 5 \times 10^5 \text{ R/h}$ を示し、炉出力に

対して直線性が悪い。炉にバックグラウンドとして存在するガンマ線によるものと考えられる。20MWでのデータは、10MWのデータから得た20MW換算値より小さくなっている。これは、アラニンの測定範囲として推奨されている上限の 10^6 R/h を越えたために、若干小さくなっているものと考えられる。20MWでの正しい値としては、10MWからの換算値が近いものと考えられる。

100KWの出力で得たPN-1, PN-2の測定結果から、PN-1, PN-2では、線量率にはほとんど差が認められなかった。

HRでは、5分以下の照射ができないために、2MWまでのデータを得ることができなかった。PNの例から、1MW以上の出力ではほぼ出力に比例するものと考えられることから、2MWの値から20MW換算値を得ることとした。

Fig. B.1 HR, PN, PN-3孔の γ 線線量当量率