

JAERI-M

4860

放射化検出器による JRR-4 炉
内実験孔の熱中性子束測定

1972年6月

東條 隆夫・近藤 真

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

放射化検出器による J R R - 4 廉内実験孔の熱中性子束測定

日本原子力研究所東海研究所原子炉研修所

東條 隆夫・近藤 慎

(1 9 7 2 年 6 月 3 日受理)

J R R - 4 廉心燃料装荷量や廉内垂直実験孔の配置変更にともない、廉利用上必要になった中性子束測定の結果が S および K - パイプ実験孔について報告されている。

熱および熱外中性子束の相対分布の測定には金、銅およびルテシウム - アルミニウム合金などの放射化ワイヤを、熱中性子束の絶対測定には金箔を用いてカドミウム比法によって行なった。

炉出力 2.5MW 時の熱中性子束として、K および S - パイプについてそれぞれ、 3.05×10^{13} n/v ± 5 % および 3.46×10^{13} n/v ± 5 % が得られた。

本報は原子炉研修所における実験マニュアルとして利用することも考慮し、放射化検出器を用いた中性子束測定に関する基礎的事項に重点をおいた記述がなされている。

Measurements of Thermal Neutron Flux in In-Core
Experimental Holes of JRR-4 Using Activation Detectors

Takao TOJO and Makoto KONDO

Nuclear Engineering School, Tokai, JAERI

(Received 3 June 1972)

The neutron flux distributions in vertical in-core experimental holes (K- and S-pipe) of Japan Research Reactor No.4 (swimming-pool type) have been measured with activation detectors, and the results are given. These measurements were necessary, because of increase in the loaded fuel and change in the hole position. For the measurements of relative neutron flux activation wires of Cu, Au and Lu-Al alloy were used, and Au foils for the measurements of absolute thermal neutron flux, both by cadmium-ratio techniques.

The thermal neutron flux at the peak of its distribution for K-pipe and for S-pipe are 3.05×10^{13} nv $\pm 5\%$ and 3.46×10^{13} nv $\pm 5\%$, respectively, at full power of the reactor.

Presented here is not merely a technical report; it is intended to be used as an experimental manual for Nuclear Engineering School, JAERI. So, emphasis in description is mainly on this respect.

目 次

1 序 論	1
2 放射化検出器による中性子測定概説	1
3 実 験	10
3-1 実 験 目 的	10
3-2 実験方法の概説	10
3-3 放射化検出器および測定系	10
3-4 実 験 手 順	12
3-4-1 放射化ワイヤによる相対的な中性子束分布の測定	12
3-4-2 金箔による熱中性子束の絶対測定	18
4 結 論	23
参 考 文 献	24

付 錄

付録 I S-パイプ内の Lu-A ℓ ワイヤによる相対的な熱および熱外中性子束分布 とカドミウム比の分布	25
付録 II S-パイプ内の Cuワイヤによる半径方向の相対的中性子束分布	26
付録 III In-Core Fission Chamberによる K-パイプ内円周上の相対的中性子 束分布	27

1 序 論

炉内の中性子束およびその分布に関する情報は試料の中性子照射条件の決定や燃焼度などを求めるために基本的に必要となる。

この測定のためには、放射化検出器および核分裂電離箱や自己出力型検出器などの炉内検出器が使用されている。

ここでは、針金状放射化検出器 (activation wire) を用いて相対的中性子束分布を、箔状の放射化検出器を用いて絶対的中性子束を測定し、両者の結果から絶対的中性子束分布を求める方法で、スイミングプール型研究炉 JRR-4 の炉心内垂直実験孔内の中性子束を測定した。

ここで行なう測定は、最近行なわれた JRR-4 炉心の装荷燃料の増加や実験孔の配置変更にともない利用者の立場から必要になったものである。

本報告書は単に測定結果を研修生や JRR-4 一般利用者の便に供する目的のみならず、原子炉研修所における放射化検出器による炉内中性子束測定実験のマニュアルとして、あるいは炉内検出器による炉内計測実験の補助資料として利用することを意図して作成された。このため、この種実験のために必要な基礎的事項に重点をおいて記述した。

2 放射化検出器による中性子測定概説

ある安定核種が中性子による核反応の結果放射性核種になることを利用し、その放射能を測定することによって中性子束を求める方法は箔放射化法 (foil activation method) とよばれ、放射化される物質は放射化検出器 (activation detector) とよばれる。

放射化検出器としては相対的な中性子束分布を求める場合には、針金状またはリボン状のものが、絶対測定のためには箔状のものが一般的に用いられる。

絶対測定に箔検出器 (activation foil) が用いられるのは、吸収物質の量を必要最少限にとどめて中性子束分布の乱れを少なくするとともに検出器自身の中性子自己遮蔽によって生ずる検出器表面と内部での放射化量の差異を少くして、正確な測定ができるようにするためである。

一方、箔状の検出器は β 線や γ 線の自己吸収が少なく、またその効果の評価も容易になるなど、放射能の定量の段階における利点をも有している。

安定核種が放射化され、壊変定数が λ の放射性核種が生成される割合は次式で与えられる。

$$\frac{dN}{dT} = \Sigma_{ac} \phi V - \lambda N \quad (1)$$

ただし、

N : 中性子束 ϕ で検出器物質を照射しはじめてから T 時間経過したときの放射性核種の個数

Σ_{ac} : 検出器物質の巨視的放射化断面積

1 序 論

炉内の中性子束およびその分布に関する情報は試料の中性子照射条件の決定や燃焼度などを求めるために基本的に必要となる。

この測定のためには、放射化検出器および核分裂電離箱や自己出力型検出器などの炉内検出器が使用されている。

ここでは、針金状放射化検出器 (activation wire) を用いて相対的中性子束分布を、箔状の放射化検出器を用いて絶対的中性子束を測定し、両者の結果から絶対的中性子束分布を求める方法で、スイミングプール型研究炉 JRR-4 の炉心内垂直実験孔内の中性子束を測定した。

ここで行なう測定は、最近行なわれた JRR-4 炉心の装荷燃料の増加や実験孔の配置変更にともない利用者の立場から必要になったものである。

本報告書は単に測定結果を研修生や JRR-4 一般利用者の便に供する目的のみならず、原子炉研修所における放射化検出器による炉内中性子束測定実験のマニュアルとして、あるいは炉内検出器による炉内計測実験の補助資料として利用することを意図して作成された。このため、この種実験のために必要な基礎的事項に重点をおいて記述した。

2 放射化検出器による中性子測定概説

ある安定核種が中性子による核反応の結果放射性核種になることを利用し、その放射能を測定することによって中性子束を求める方法は箔放射化法 (foil activation method) とよばれ、放射化される物質は放射化検出器 (activation detector) とよばれる。

放射化検出器としては相対的な中性子束分布を求める場合には、針金状またはリボン状のものが、絶対測定のためには箔状のものが一般的に用いられる。

絶対測定に箔検出器 (activation foil) が用いられるのは、吸収物質の量を必要最少限にとどめて中性子束分布の乱れを少なくするとともに検出器自身の中性子自己遮蔽によって生ずる検出器表面と内部での放射化量の差異を少くして、正確な測定ができるようにするためである。

一方、箔状の検出器は β 線や γ 線の自己吸収が少なく、またその効果の評価も容易になるなど、放射能の定量の段階における利点をも有している。

安定核種が放射化され、壊変定数が λ の放射性核種が生成される割合は次式で与えられる。

$$\frac{dN}{dT} = \Sigma_{ac} \phi V - \lambda N \quad (1)$$

ただし、

N : 中性子束 ϕ で検出器物質を照射しはじめてから T 時間経過したときの放射性核種の個数

Σ_{ac} : 検出器物質の巨視的放射化断面積

V : 検出器物質の体積

$T = 0$ のとき $N = 0$ であるので、式(1)は次のようになる。

$$N(T) = \frac{\Sigma_{ac} \phi V (1 - e^{-\lambda T})}{\lambda} \quad (2)$$

検出器物質の放射能 A は $N \lambda$ であるので、式(2)は次のようになる。

$$A = \Sigma_{ac} \phi V (1 - e^{-\lambda T}) \quad (3)$$

照射時間 T を十分長くし、 $e^{-\lambda T}$ が無視できるようすれば、放射能は飽和し、一定の中性子束で照射したときに得られる最大の放射能、すなわち飽和放射能 A_∞ が得られる。

$$A_\infty = \Sigma_{ac} \phi A \quad (4)$$

検出器物質を T 時間照射した後、中性子束の場から取り出せば、その後引続き壊変が起るので、 t 時間経過したときの放射能 $A(T, t)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} A(T, t) &= \Sigma_{ac} \phi V (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t} \\ &= \Sigma_{ac} \phi V \{e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(T+t)}\} \end{aligned} \quad (5)$$

熱中性子に対する放射化断面積は温度 20.44°C (絶対温度 293.59°K) における最大期待速度 v_0 (2200 m/sec^*) を有する中性子に対する断面積 $\sigma_{ac}(v_0)$ として一般的に与えられている。したがって、絶対温度 T において照射した場合、その温度で Maxwell 分布している中性子に対する平均断面積 $\bar{\sigma}_{ac}$ は次式によって求め、この値を式(5)などに用いる必要がある。

$$\bar{\sigma}_{ac} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} g(T) \sqrt{\frac{293.59}{T}} \sigma_{ac}(v_0) \quad (6)$$

ここで、 $g(T)$ は非 $1/v$ 係数 (non $1/v$ factor) とよばれ、それぞれの放射化物質について温度 T の関数として得られる。放射化検出器が $1/v$ 吸収体の場合は、 $g(T) = 1$ であり、Mn, Co, Cu などがこれに相当する。

第 1 表に種々な物質の $g(T)$ を表す。¹⁾

検出器物質の放射能 A (dps) と測定された計数率 N (cps) の間には次式の関係がある。

$$A = \frac{N}{\epsilon_{in} \cdot \epsilon_g \cdot R_b} \quad (7)$$

ただし

ϵ_{in} : 検出器のイントリンシック検出効率 (intrinsic detection efficiency)
〔計数率 / 検出器入射粒子数〕

ϵ_g : 幾何的効率

R_b : 壊変あたりに放出される注目した粒子の数

β 壊変核種を 4π ガスフロー計数管で測定する場合は、式(7)の分母は 1 となるが、線源の自

* $\frac{1}{2} m v_0^2 = 0.02530 \text{ eV}$

第1表 種々な物質の非 $1/v$ 係数

温 度 (C)	Au	In	Rh	$^{235}\text{U}^*$	$^{239}\text{Pu}^*$
20	1.0053	1.0192	1.023	0.9759	1.0487
40	1.0064	1.0231	1.027	0.9711	1.0623
60	1.0075	1.0270	1.032	0.9665	1.0777
80	1.0086	1.0310	1.037	0.9622	1.0952
100	1.0097	1.0350	1.041	0.9581	1.1150
120	1.0108	1.0391	1.046	0.9543	1.1373
140	1.0119	1.0432	1.051	0.9507	1.1623
160	1.0130	1.0473	1.056	0.9473	1.1898
180	1.0141	1.0515	1.061	0.9441	1.2200
200	1.0152	1.0558	1.066	0.9411	1.2528

自己吸収や計数損失などの補正が必要になる。

NaI(Tl) シンチレーション・スペクトロメーターや Ge(Li) スペクトロメーターで特定光子エネルギーの全エネルギー吸収ピークの計数率 N_{FEP} を用いて放射能の絶対測定を行う場合には、イントリンシック全エネルギー吸収ピーク効率 $(\epsilon_{\text{FEP}})_{\text{in}}$ と光子の分岐比 (branching ratio, 光子/壊変) R_b を用いて次式から放射能 $A(\text{dps})$ を求めることができる。

$$A = \frac{N_{\text{FEP}}}{(\epsilon_{\text{FEP}})_{\text{in}} \cdot \epsilon_g \cdot R_b} \quad (8)$$

一般的には、NaI(Tl) の場合 $(\epsilon_{\text{FEP}})_{\text{in}}$ は特定の幾何的条件について、 $(\epsilon_{\text{FEP}})_{\text{in}} = (\text{interaction ratio}^{**}) \times (\text{peak-to-total ratio}^{***})$ の形で与えられており、Ge(Li) の場合の検出効率は幾何的効率を含んだ特定の幾何的条件下での絶対全エネルギー吸収ピーク効率 (absolute full-energy peak efficiency) $(\epsilon_{\text{FEP}})_{\text{ab}}$ として、 $(\epsilon_{\text{FEP}})_{\text{ab}} = (\epsilon_{\text{FEP}})_{\text{in}} \times \epsilon_g$ の形で与えられている。したがって、これらの場合、 $A(\text{dps})$ と N_{FEP} (cps) の関係は次のようになる。

$$\text{NaI(Tl)} : A = \frac{N_{\text{FEP}}}{(\text{interaction ratio}) \cdot (\text{peak-to-total ratio}) \cdot \epsilon_g \cdot R_b} \quad (9)$$

$$\text{Ge(Li)} : A = \frac{N_{\text{FEP}}}{(\epsilon_{\text{FEP}})_{\text{ab}} \cdot R_b} \quad (10)$$

一方、 β 壊変を行い、同時に光子を放出する核種の場合には、 $\beta - \gamma$ 同時計数法 ($\beta - \gamma$ coincidence method) を用いれば放射線検出効率や幾何的効率が未知のときでも、次式

* 核分裂に対する $g(T)$

** 検出器入射光子あたりの計数値 (光電ピークまたはコンプトンスペクトルのいかんを問わない計数値)

*** 全計数率中に占める全エネルギー吸収ピークの計数率の割合

によって $A(\text{dps})$ を求めることができる。

$$A = \frac{N_\beta \cdot N_\gamma}{N_{\beta\gamma}} \quad (1)$$

ただし、

N_β , N_γ : それぞれ β 線および γ 線の計数率 (cps)

$N_{\beta\gamma}$: β 線と γ 線の同時計数の計数率 (cps) (測定された β - γ 同時計数率に偶然の同時計数* の補正をした計数率)

以上のように、放射化検出器の放射能の絶対測定は比較的容易に行えるので、式(5)から明らかなように、放射化物質の断面積と体積、照射時間および経過時間がわかっていれば中性子束の絶対測定が可能となる。

放射化検出器がもつべき特性としては、その測定原理から次のような点が重要なものとして挙げられる。

- 1) 断面積が適當な大きさであること** (低中性子束測定には ^{164}Dy や ^{115}In のように大きな断面積のものが望まれ、高炉出力時の炉心内中性子束測定のような場合には ^{55}Mn や ^{59}Co あるいはこれらよりかなり小さな断面積しかもたないものでも利用上の問題はほとんどない)
- 2) 誘導放射能の半減期が放射性核種の生成や測定の立場から適當であること (積算中性子束の測定の場合には ^{60}Co ($T_{1/2} = 5.24$ 年) のように、長半減期核種が生成されるものが用いられる)
- 3) 壊変形式 (decay scheme) が簡単で β - γ 、あるいは γ - γ 同時計数を行いやすいこと
- 4) その物質が箔や針金状のものへの加工性や化学的安定性が良いこと。

熱中性子用として使用されている代表的な放射化検出器物質を第2表に示す。

第2表 代表的な熱中性子測定用放射化検出器

元素	原子数(g^{-1})	標的核種	存在比%	放射性核種	半減期	放射化断面積*($\bar{\sigma}_{\text{ac}}$)
^{25}Mn	1.097×10^{22}	^{55}Mn	100	^{56}Mn	2.58 h	13.2 ± 0.1
^{27}Co	1.022×10^{22}	^{59}Co	100	^{60}Co	5.28 y	20.2 ± 1.9
^{29}Cu	9.48×10^{21}	^{63}Cu	69.09	^{64}Cu	12.87 h	4.41 ± 0.20
^{47}Ag	5.58×10^{21}	^{107}Ag	51.35	^{108}Ag	2.3 m	4.5 ± 4
		^{109}Ag	48.65	^{110m}Ag	253 d	3.2 ± 0.4
^{49}In	5.25×10^{21}	^{115}In	95.77	^{116m}In	54.12 m	160 ± 2
^{66}Dy	3.71×10^{21}	^{164}Dy	28.18	^{165}Dy	140 m	800 ± 100
^{79}Au	3.055×10^{21}	^{197}Au	100	^{198}Au	2.695 d	98.5 ± 0.4

* $2\tau N_\beta N_\gamma$ (τ : 同時計数の分解時間)

** 测定目的の中性子エネルギーに対しては大きな断面積をもち、それ以外のものに対しては小さな断面積をもつことが望まれるので、中性子エネルギーと断面積の関係が重要なものとなる。

熱中性子の測定には、Dy のように σ_{ac} の $1/v$ ($1/\sqrt{E}$) 特性のよいものが望ましい。

熱中性子束の測定には熱外中性子を主とする熱中性子以上の、よりエネルギーの高い中性子による放射化量を評価し、その寄与を除去しなければならない。

第3表に示すとく、Au や In では低中性子エネルギー領域での共鳴吸收断面積がとくに大きいので、この領域に存在する中性子による放射化が著しくなる。一方、種々な物質がもつている個有な共鳴エネルギーを利用すればこの領域における中性子エネルギースペクトルの測定が可能となり、この目的に使用される放射化検出器は共鳴放射化検出器（箔）とよばれる。

第3表 代表的な共鳴放射化検出器

核種	存在比 (%)	主共鳴 エネルギー(eV)	放射性 核種	半減期	共鳴放射化断面積 (バーン)
²³ Na	100	2850	²⁴ Na	1.50 h	0.075 ± 0.01
⁵⁵ Mn	100	337	⁵⁶ Mn	2.58 h	6.0 ± 1.2
⁵⁹ Co	100	132	⁶⁰ Co	5.24 y	50 ± 12
⁶³ Cu	69.09	580	⁶⁴ Cu	1.28 h	2.4 ± 0.5
⁶⁵ Cu	30.91	227	⁶⁶ Cu	5.1 m	1.2 ± 0.5
¹¹⁵ In	95.72	1.457	^{116m} In	5.40 m	2000 ± 300
¹⁸⁶ W	28.4	18.8	¹⁸⁷ W	24 h	
¹⁹⁷ Au	100	4.906	¹⁹⁸ Au	2.70 d	1505 ± 20

熱中性子束と熱外中性子束の相対的な大きさを測定する方法にカドミウム比法がある。

カドミウム比(cadmium ratio) R_{cd} は第1図^{2,3)}に示すとく、熱中性子に対してほぼ完全な吸収体と考えられるカドミウムで放射化検出器を包み、これをフィルターとして用いて測定したときの放射化量 N_{cd} に対するフィルターのない裸の放射化検出器の放射化量 N_b の比として定義される。^{*}

$$R_{cd} = \frac{N_b}{N_{cd}} \quad (12)$$

R_{cd} は熱中性子束と熱外中性子束の相対的な大きさ、すなわち中性子が十分減速されているか否かの尺度として一般的に用いられている。

カドミウム比は放射化物質の種類や厚さおよび C_d の厚さや形状などの影響を受ける。

放射化物質を C_d でカバーしたとき、 E_{cd} から上のエネルギーを有する中性子が放射化に寄与できる場合、したがって、 E_{cd} 以上の中性子による裸の放射化物質の放射化量と C_d カバーした物質の放射化量が等しくなる場合に E_{cd} をカドミウム切断エネルギー(cadmium cut-off energy) とよぶ。

裸の放射化物質の放射化量 N_b は熱中性子束および主として熱外中性子束に起因したもので

* N_{cd} および N_b は同一条件で照射、測定されたものである。一方、cadmium fraction F_{cd} は、

$F_{cd} = \frac{N_b - N_{cd}}{N_b}$ と定義される。

あり、カドミウムカバーを用いた場合の放射化量 N_{cd} は主として熱外中性子に起因するものである。したがって、カドミウム比法においては熱中性子による放射化量 N_{th} は次式によって求められる。

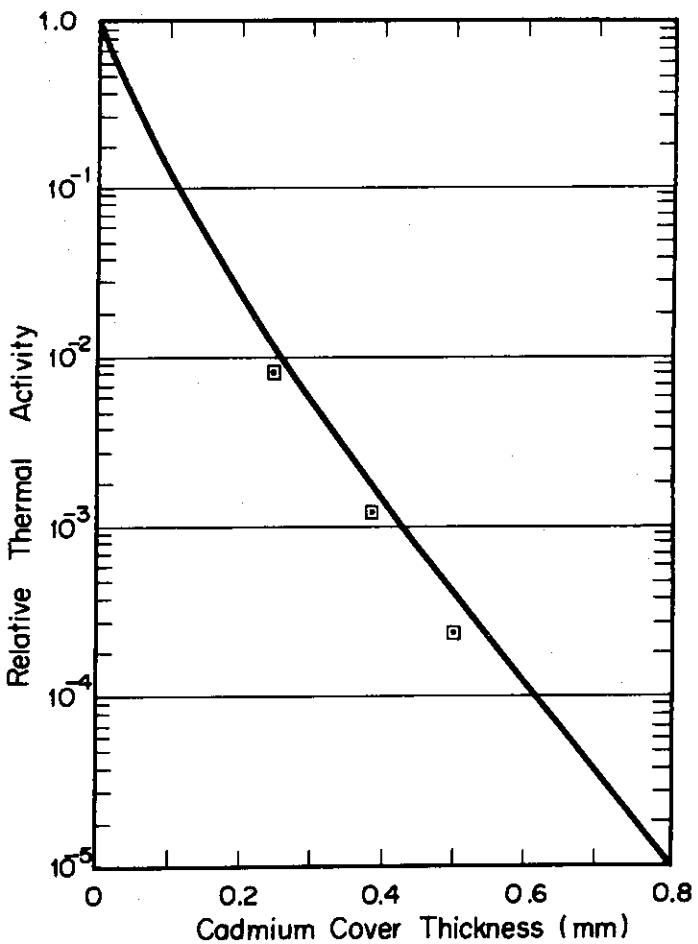
$$\begin{aligned} N_{th} &= N_b - N_{cd} \\ &= N_b \left(1 - \frac{1}{R_{cd}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

一般的に用いられている 0.5 ~ 1 mm 厚のカドミウムカバーでは第2図⁴⁾から明らかのように、カドミウム切断エネルギーが 0.5 eV 程度と比較的大きなため、式(13)の N_{cd} は幾分小さな値を示すことになる。これはカドミウムカバーが熱外中性子のエネルギー領域の下限（約 0.1 eV）からカドミウム切断エネルギーまでのエネルギー領域に存在する熱外中性子を吸収してしまうことに原因している。このような効果を補正するために用いられるのがカドミウム補正因子（cadmium correction factor） F_{cd} であり、これを用いると式(13)は次式のようになる。

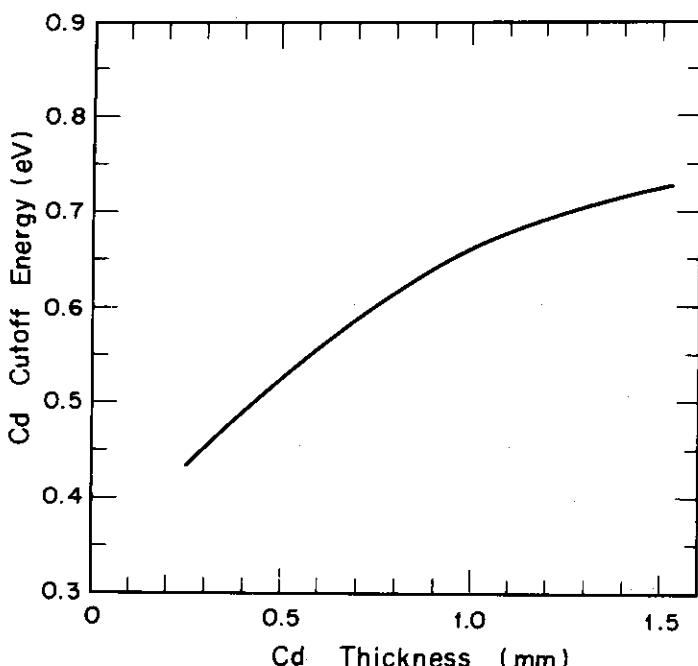
$$N_{th} = N_b - N_{cd} \cdot F_{cd} \quad (14)$$

第3図にカドミウムカバーの厚さが 1 mm の場合の F_{cd} を金箔の厚さの関数として示す。⁵⁾ 同図は中性子が金箔に等方的に入射する場合のものである。

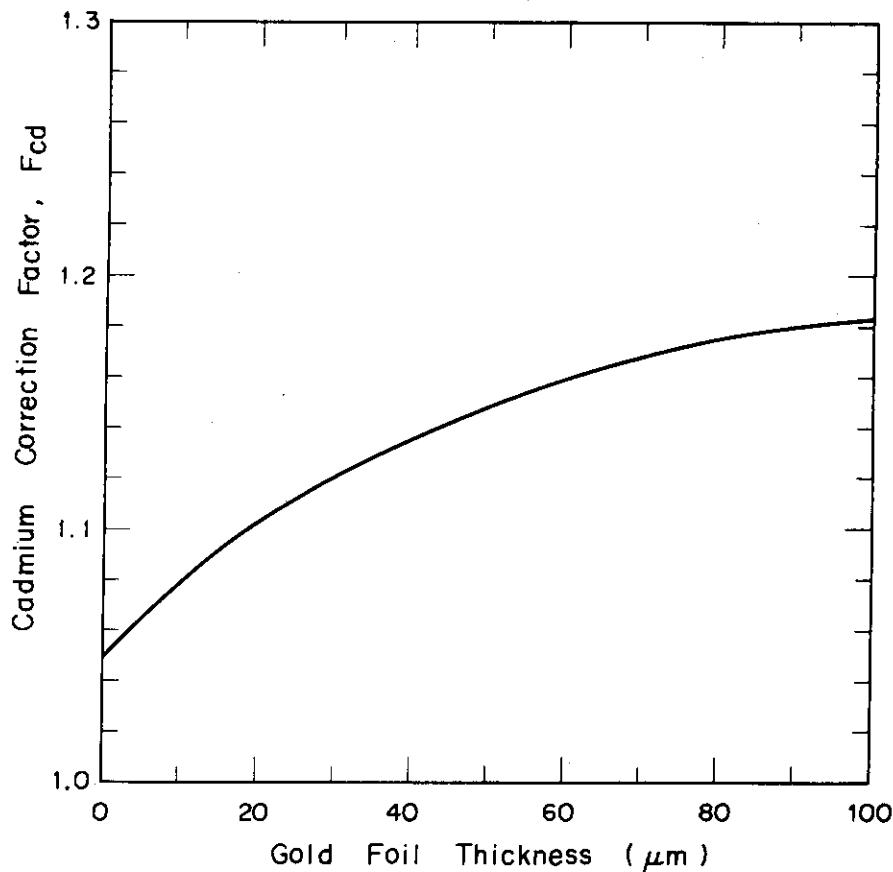
一方、放射化検出器の放射化



第1図 カドミウムカバーの厚さと Dy 落の熱中性子による誘導放射能強度の関係（—：実験値， □：計算値）



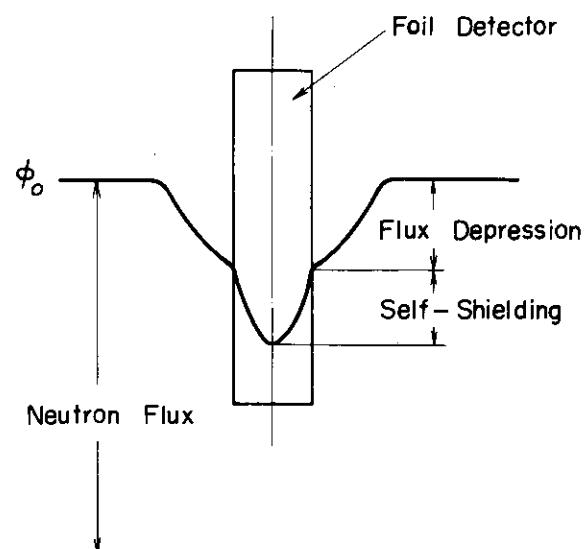
第2図 カドミウムカバーの厚さとカドミウム切断エネルギーの関係



第3図 金箔の厚さとカドミウム補正因子の関係（カドミウムカバーの厚さ：1mm）

量は検出器自身の中性子遮蔽効果および検出器を挿入したことによるその周囲媒質中のバーテーベーション効果による中性子束低下(*flux depression*)の影響を受ける。

これらの効果の概念を第4図に示す。



第4図 自己遮蔽およびバーテーベーション効果

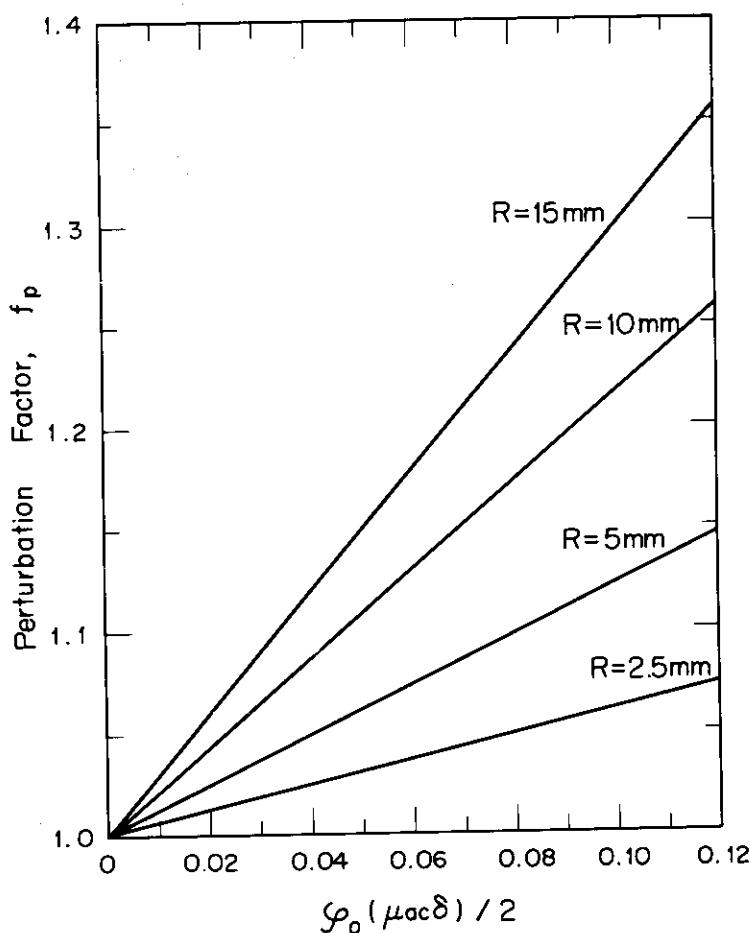
自己遮蔽効果を補正する因子としては自己遮蔽因子(self-shielding factor)がある。バーテーベーションは中性子拡散が行われている媒質中でのみ起るので、空気中のように中性子拡散を考えなくてもよい場合や検出器が非常に薄い場合には自己遮蔽効果のみを補正すればよい。また、熱外中性子の場合にはバーテーベーション効果は無視できる。

自己遮蔽およびバーテーベーションの両者の効果による放射化量の低下を補正する因子はバーテーベーション因子(perturbation factor) f_p とよばれる。

第5図に軽水中に置かれた種々の直径の金箔に対するバーテーベーション因子の計算値を示す。⁶⁾

同図の縦軸は放射化量の低下が起ったときの放射化量 N に対する低下が起らなかったときの放射化量 N_0 の相対値として、横縦は $\varphi_0(\mu_{ac}\delta)/2$ で表わされている。 $\varphi_0(\mu_{ac}\delta)$ は中性子が箔検出器に等方的に入射する場合の吸収確率(absorption probability)であり、次式によって表わされる。

$$\varphi_0(\mu_{ac}\delta) = 1 - 2E_3(\mu_{ac}\delta) \quad (15)$$



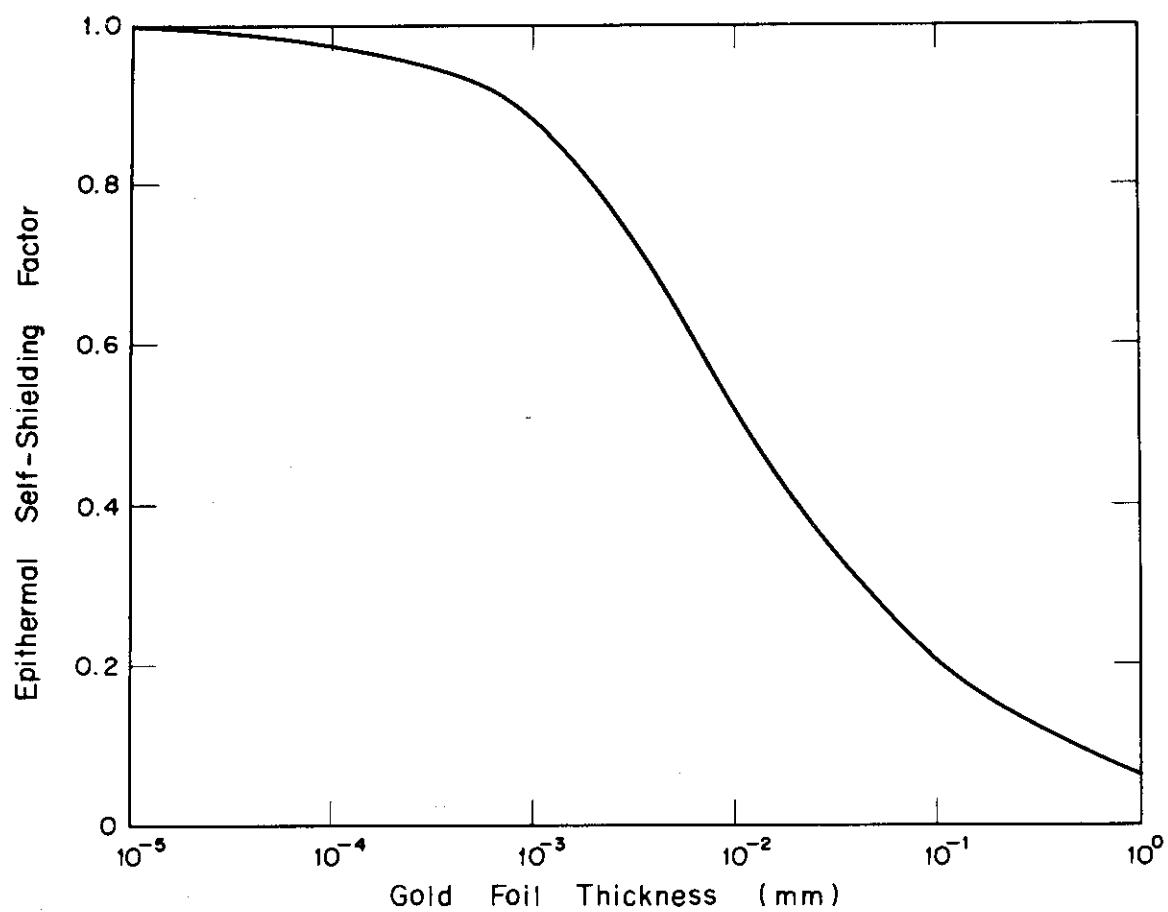
第5図 軽水中における各種半径の金箔に対するバーテーベーション因子
(R: 箔検出器の半径)

ただし、 μ_{ac} は質量放射化吸収係数であり、 $\mu_{ac} = \Sigma_{ac} / \rho$ [cm²/g] で与えられ、 δ は箔検出器の厚さ (g/cm²) である。

非常に厚い箔 ($\mu_{ac} \delta \gg 1$) では、 $\varphi_0(\mu_{ac} \delta) = 1$ となり、非常に薄い箔では、 $\varphi_0(\mu_{ac} \delta) = 2\mu_{ac} \delta$ となる。

このように、 φ_0 は式(15)から積分指数表^{5,7)}を用いて種々な箔検出器について求めることができるので、 f_p も求められる。

参考のため、第6図に熱外中性子に対する金箔の自己遮蔽因子 G_{epi} を箔の厚さの関数として示す。⁸⁾ 同図の G_{epi} は自己遮蔽効果がないときの放射化量に対する遮蔽効果を受けた放射化量の相対値で表わされ、中性子エネルギーの下限を 0.68 eV として計算したものである。



第6図 热外中性子に対する金箔の自己遮蔽因子と箔の厚さの関係

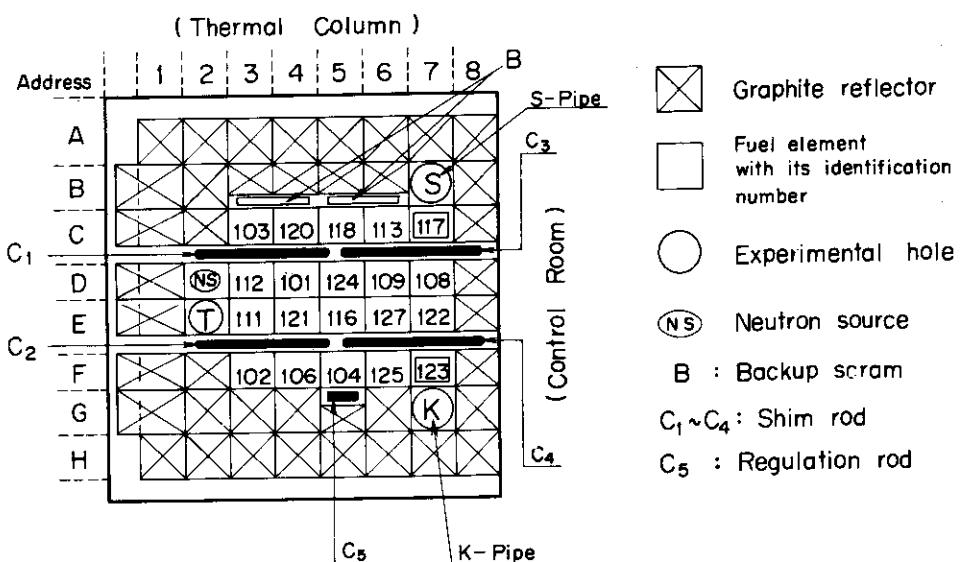
3 実験

3-1 実験目的

JRR-4の炉心内垂直実験孔中の相対中性子束分布および絶対中性子束の測定を放射化検出器を用いて行ない、この種測定法の基本的概念や手法についての理解を深めるとともに、この実験を通して原子炉における中性子束分布などに対する理解を深める。また、得られた結果は種々な実験、とくに核分裂電離箱や自己出力型検出器などを利用した原子炉内計測実験における炉内検出器の中性子感度を決定する際などの参考資料に供する。

3-2 実験方法の概説

第7図にJRR-4の炉心構成図を示す。測定対象の実験孔はK-パイプ、S-パイプと一緒に一般的によばれている垂直実験孔である。



第7図 JRR-4の炉心構成図

(□で囲ったものは新しく装荷された燃料要素)

測定はCuなどの放射化ワイヤを用いて相対的中性子束分布を測定する。その後、特定の垂直位置において金箔を使ったカドミウム法によって熱中性子束の絶対測定を行う。後者の結果を用いて前者の結果を絶対値化することによって絶対熱中性子束分布を求める。

相対中性子束分布測定の際のCuなどの放射能強度の相対測定にはNaI(Tl)シンチレーション・スペクトロメーターを、金箔の放射能強度の絶対測定には絶対全エネルギー吸収ピーク効率が既に求められているGe(Li)スペクトロメーターを用いる。

3-3 放射化検出器および測定系

試料および測定系については以下の各項において示される参考データを測定した際に使用したものと示す。

A) 放射化検出器など

i) 銅線；中性子束分布の相対測定に使用する。

直径：0.76 mm, 純度：99.999% (Reactor Experiments Inc. (米国) 製
activation wire*, カタログ番号 605)

ii) カドミウム管；flux wireのカドミウムカバーとして用いる。

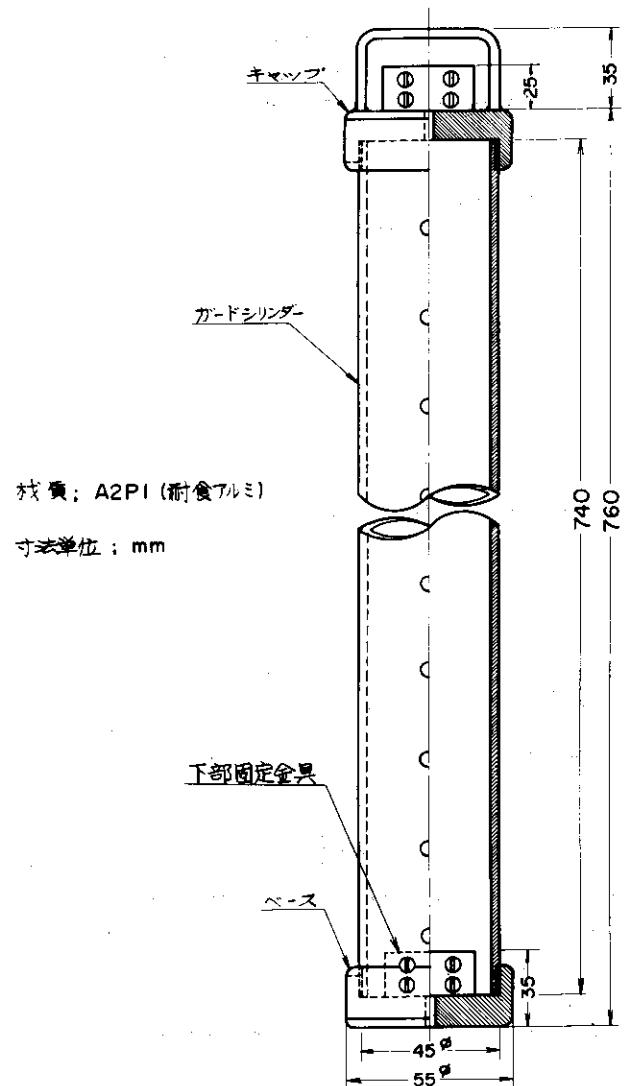
外径：2.3 mm, 内径：1.3 mm, 肉厚：0.5 mm

(Reactor Experiments Inc., カタログ番号 630)

iii) 金箔；熱中性子束の絶対測定に使用する。

直径：10 mm, 厚さ：0.02 mm (38.6 mg/cm²)

(IAEA, Code TN-5)



第8図 放射化検出器収納筒 (S - パイプ用)

*商品名はFlux Wire

IV) カドミウムカバー；金箔用のフィルターとして使用する。

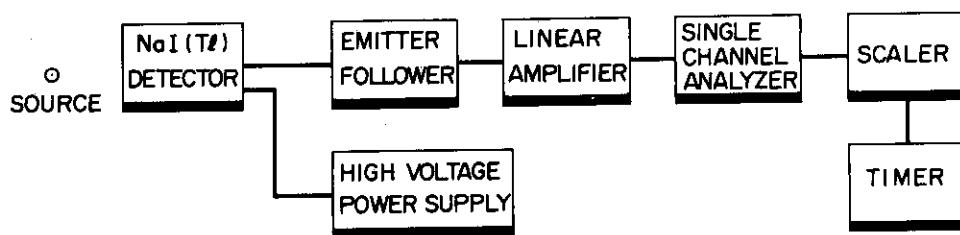
厚さ：1 mm (IAEA, Code TN-5)

V) 放射化検出器収納筒；実験孔へ放射化検出器を挿入する際の容器として用い，放射化検出器ワイヤはその中心軸に張られる。一方，箔は中心軸に張ったプラスチック・テープなどの上に固定される。S-パイプ用の収納筒の図を第8図に示す。この収納筒は燃料領域の垂直方向をほぼ全域にわたって測定できるように設計されている。

B) 測定系

i) NaI(Tl)シンチレーション・スペクトロメーター

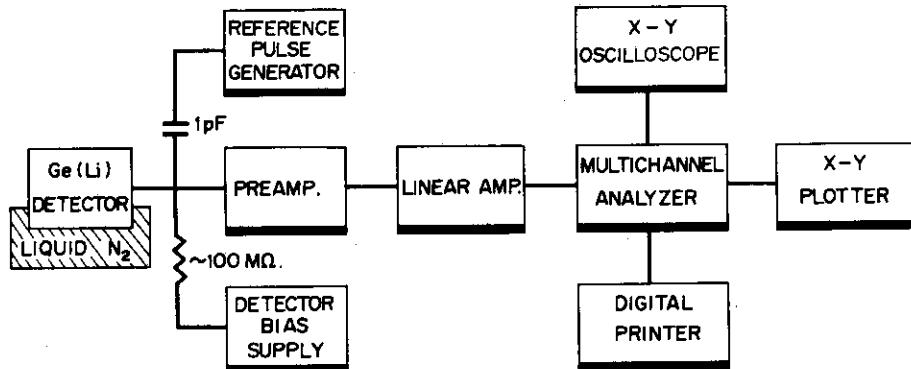
測定系のブロックダイヤグラムを第9図に示す。NaI(Tl)は2" dia × 2" hgt程度のものを使用する。



第9図 シンチレーション・スペクトロメーターのブロックダイヤグラム

ii) Ge(Li)スペクトロメーター

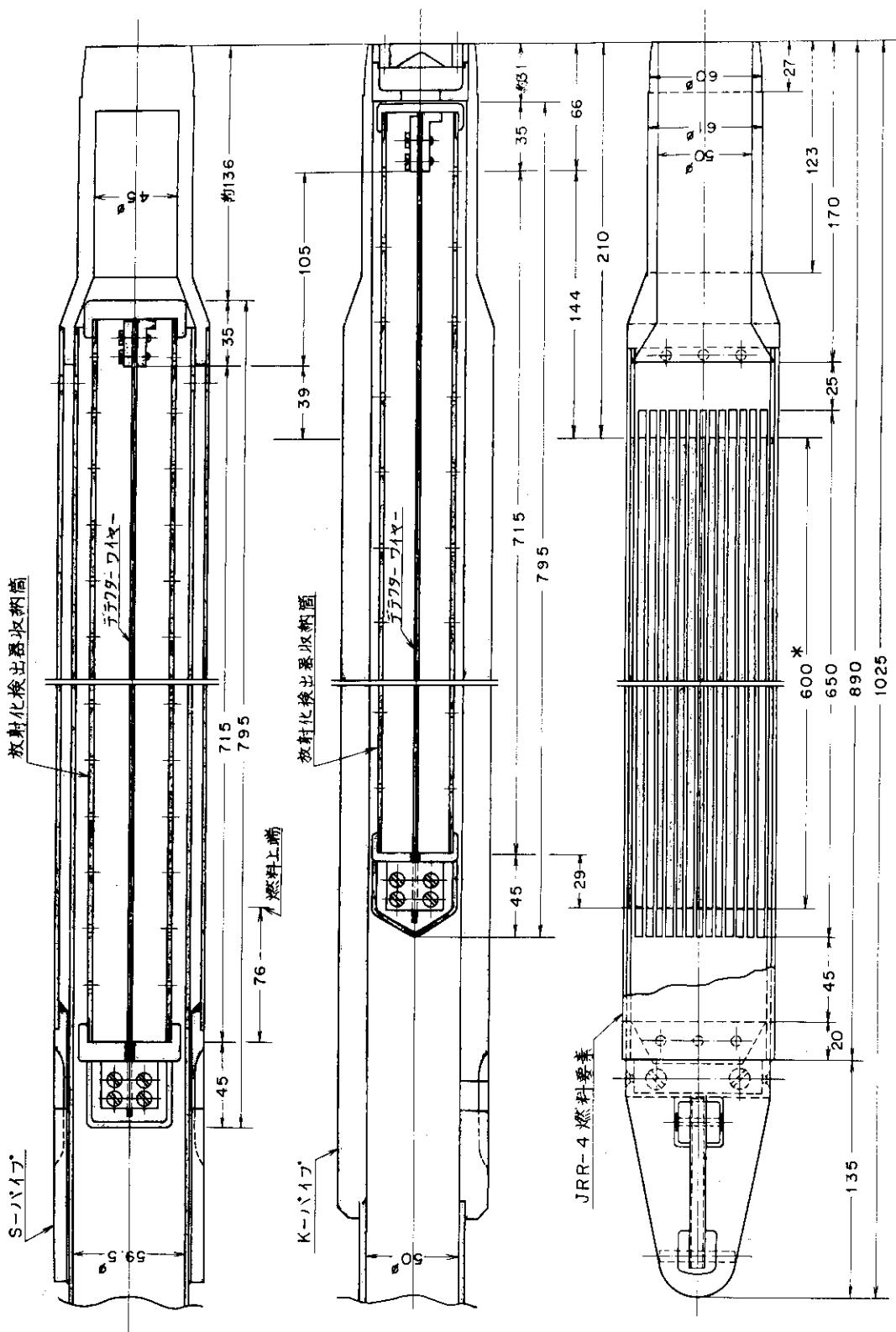
測定系のブロックダイヤグラムを第10図に示す。ここで使用するGe(Li)は有感体積として約30ccを有する同軸型検出器である。[Elron Electronics Industry Ltd., EGL/1/2C型, ダイオード番号 219/03]



第10図 Ge(Li)スペクトロメーターのブロックダイヤグラム

C) その他

放射化ワイヤの切断器，切断されたワイヤーの収納箱，金箔や切断されたワイヤの重量測定用天秤などが使用される。



* 燃料領域

第11図 炉心内におけるactivation wireの位置

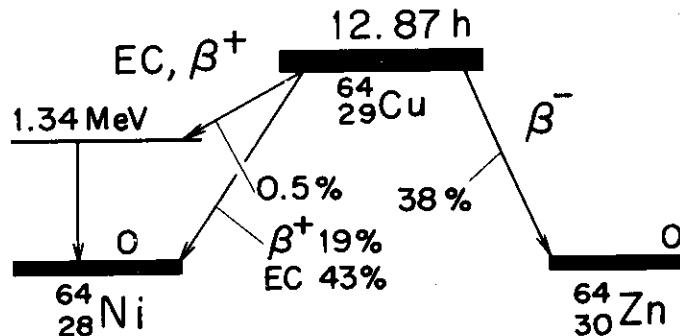
3-4 実験手順

3-4-1 放射化ワイヤによる相対的な中性子束分布の測定

- i) 放射化ワイヤを収納筒に装着する。
- ii) SまたはK一パイプの最下端にまで収納筒を挿入し、適当な中性子束で一定時間照射するCuやAuの場合は炉出力500Wで10分間程度が適当である。この際、収納筒挿入前、挿入直後および抜出し直前における制御板配置*などを記録しておくことが望ましい。

収納筒を実験孔の最下端にまで挿入した場合の、炉心と放射化ワイヤの位置関係は第11図に示すとおりである。

- iii) 照射後、放射化ワイヤを収納筒の下部固定金具の上端面で切断し、収納筒からとり出す。
- iv) 放射化ワイヤをiii)での切断端の方から1cmづつ切断し、順序よくワイヤ収納箱に入れる。収納箱のワイヤ収納穴には番号が記されているので、この番号が各ワイヤの炉心内位置に対応することになる。
- v) NaI(Tl)シンチレーション・スペクトロメーターで各ワイヤの放射能強度を測定する。銅の場合、 $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$ 反応で半減期12.87時間の ^{64}Cu が生成され、その壊変図(decay scheme)を第12図に示す。

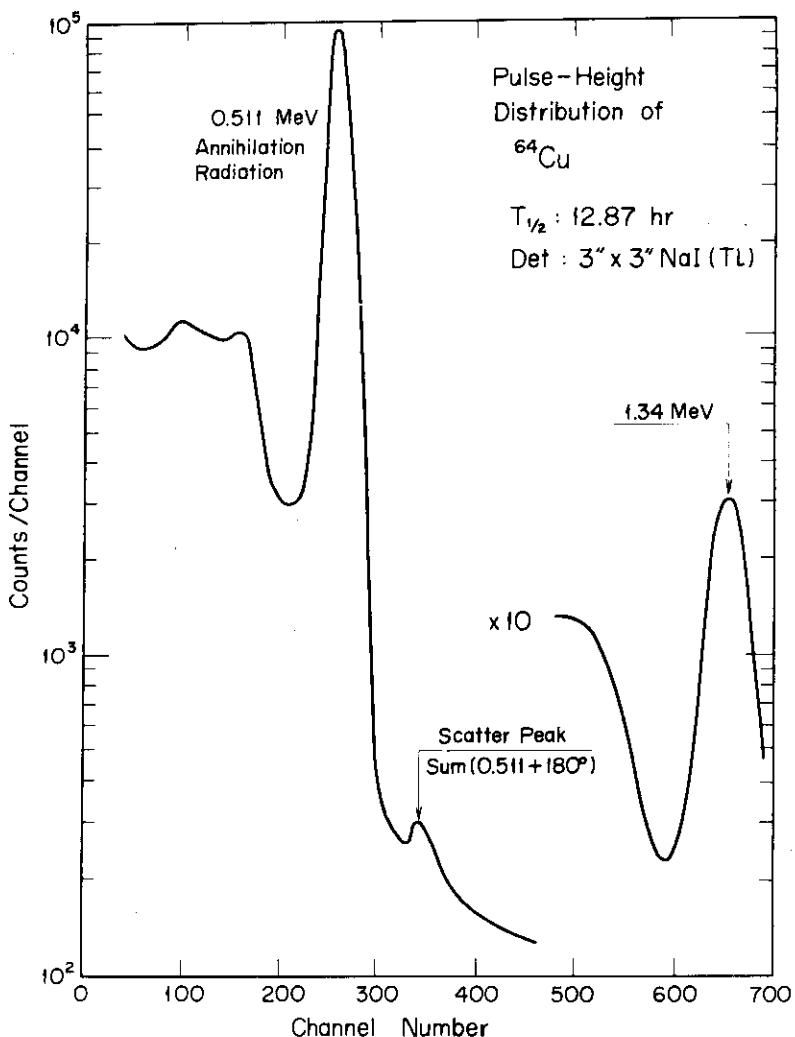
第12図 ^{64}Cu の壊変図

第13図にNaI(Tl)を用いて測定した ^{64}Cu のア線パルス波高分布を示す。

放射能の測定は1.34MeV光子の分岐比が小さい(0.5%)ため、511keVの消滅輻射の全エネルギー吸収ピークに対応するパルスを計数することによって行なう。このため第9図に示した測定系は ^{22}Na など消滅輻射を放出する線源を用いて、あらかじめ調整しておかなければならない。

* 制御室において指示される指示値は制御板のホウ素入りステンレス鋼部の下端が燃料領域の下端部より30mm下方に位置するとき、0(mm)と指示されるように設計され、両者の相互位置の公差は7mmである。

** ワイヤを切断せずに、コリメートされた検出器を用いてワイヤ各部の放射能強度の測定、記録を行なう“Gamma Scanning”的方法も用いられている。

第13図 ^{64}Cu の γ 線パルス波高分布 (検出器: NaI(Tl), 3" dia. \times 3" hgt)

VI) 各ワイヤは全く同一長さに切断されなかったり、ワイヤそのものの直径が不均一であったりするので、各ワイヤの測定値にはワイヤの重量補正が必要になる。このため、各ワイヤの重量を測定する必要がある。

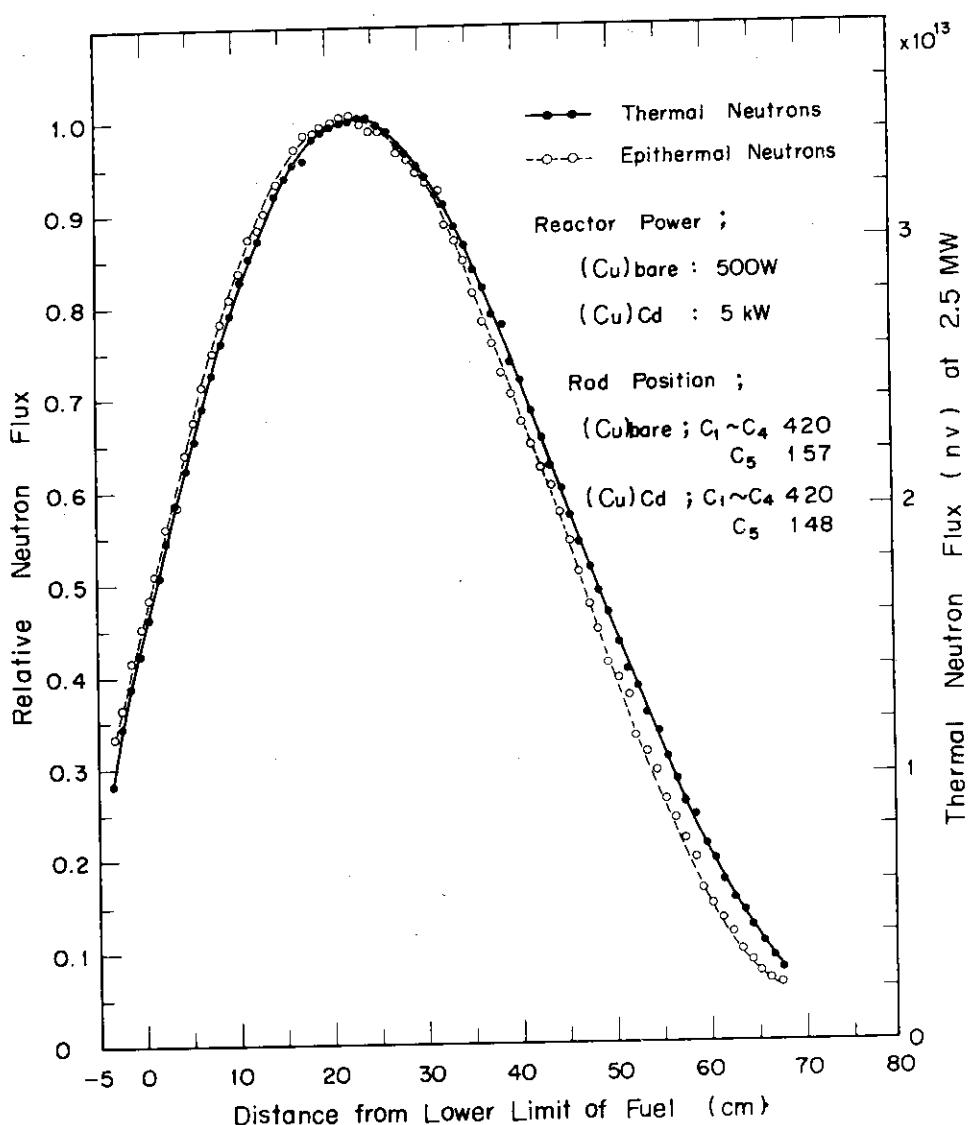
VII) 放射能測定結果に重量補正および式(5)における $e^{-\lambda t}$ の補正を行なう（相対中性子束分布を求めるので、 $e^{-\lambda t}$ は考慮する必要はない）。整理様式の一例を第4表に示す。

第14図に Cu ワイヤとカドミウム管を用いたカドミウム比法による S-パイプ内の相対的な熱および熱外中性子束の分布を示す。同図の横軸は高さ 60 cm の燃料領域の下端からの距離を示している。これらの測定における統計誤差は全て 1 % 以下である。第14図から、両者の分布はほぼ同様な傾向を示していることが明らかになっている。

第14図に示した測定の結果得られたカドミウム比を、参考のために、Au ワイヤ^{*} を用いて測定したカドミウム比とともに第15図に示す。^{**}

* 直径: 0.254 mm, 純度: 99.999% [Reactor Experiments Inc., Cat. No. 601]

** 照射した炉出力; (Au)Cd: 5 kW, (Au)bare: 500 W, 照射時間: 10 分, 制御板位置, (Au)_{Cd}: C₁ ~ C₄ 406, C₅ 178, (Au)bare: C₁ ~ C₄ 406, C₅ 144



第14図 S一パイプ内の熱および熱外中性子束の相対分布(放射化検出器: Cu Wire)

第4表 相対的中性子束分布測定のデータシートの一例(S一パイプ)

ワイヤ番号	炉心内*位置(cm)	経過時間 t(分)	$e^{-\lambda t}$	計数率 N(cpm)	重量 W(mg)	$N/W \cdot e^{-\lambda t} = N_0$	$(N_0)_{rel}^{***}$
1	-3.4	0	1.00				
2	-2.4	1.5					
3	-1.4	3.0					
4	-0.4	4.5					
5	+0.6	6.0					
:	:	:					

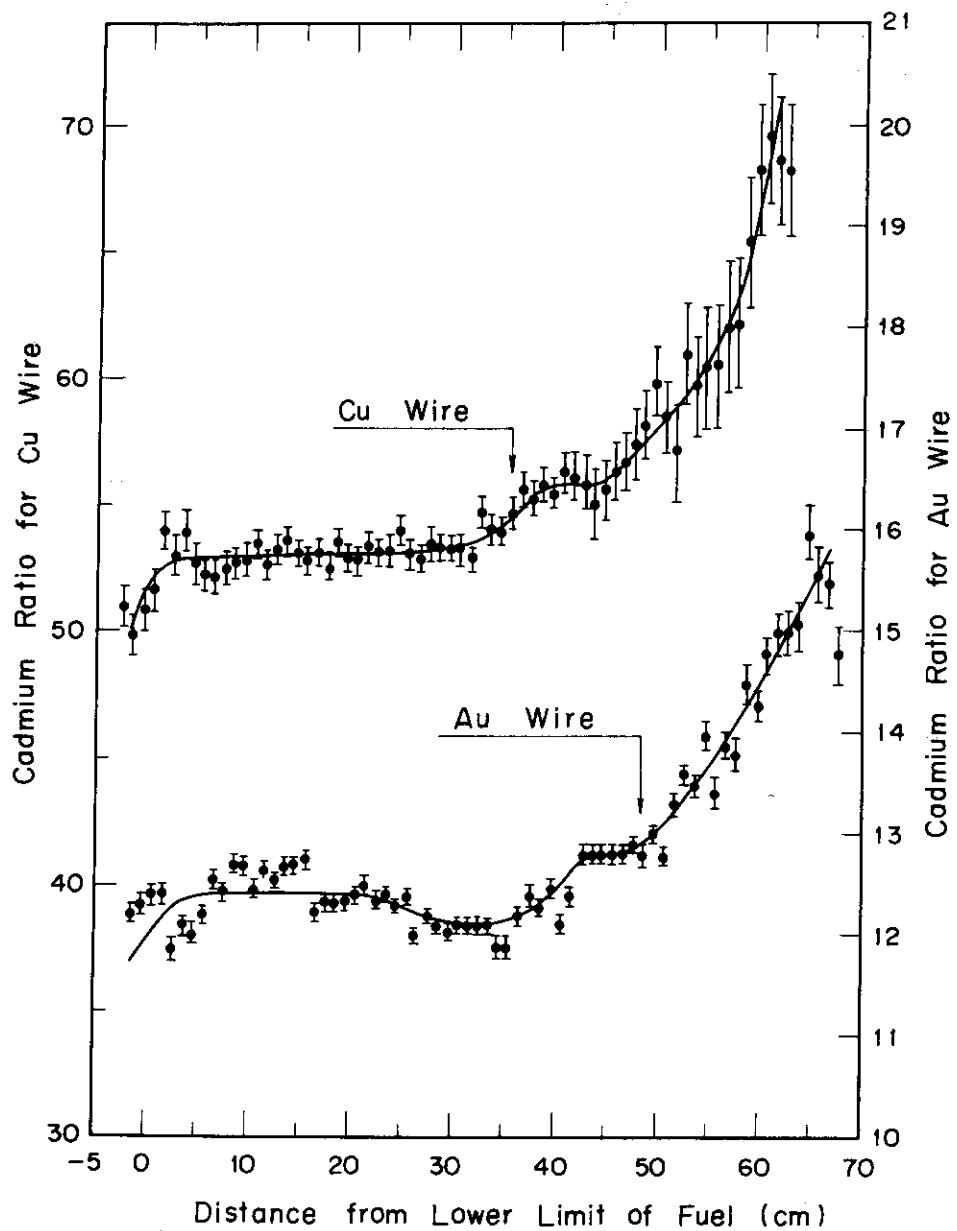
 ^{64}Cu の λ は $8.974 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$

* 燃料領域下端からの距離

** 1分計測, 0.5分試料交換の場合

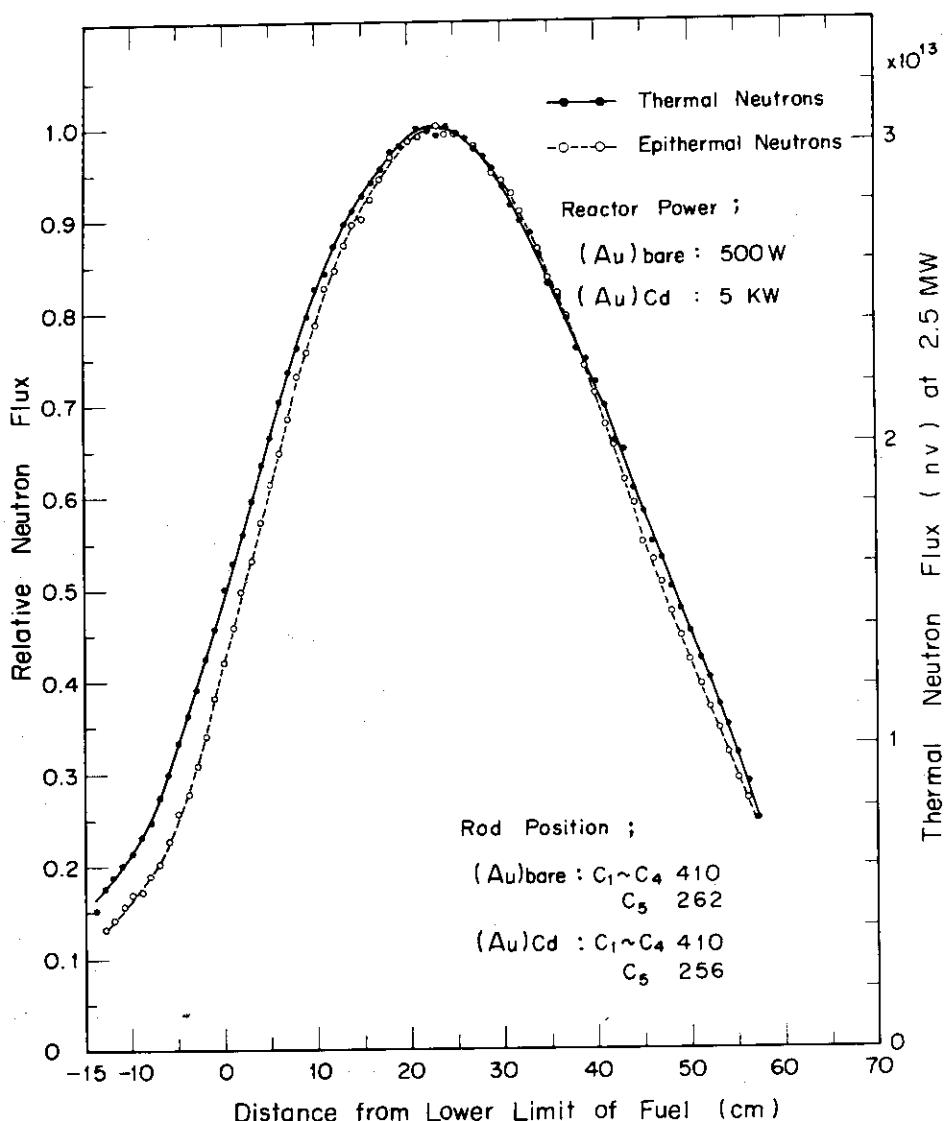
*** 最も強い放射能強度を 1.00 としたときの相対値である。この結果、ピーク値を 1.00 と規格化した相対中性子束分布が得られる。

第15図から明らかなように、 ^{63}Cu の主共鳴エネルギー(580 eV)は ^{197}Au の共鳴エネルギー4.9 eVよりかなり大きく測定されている。また、Auワイヤを用いて得られた熱および熱外中性子束の分布はほぼ完全に第14図と一致する結果が得られている。



第15図 CuおよびAu Wire を用いて測定した S-パイプ内のカドミウム比
(カドミウム管: 0.5 mm 厚)

第16図と第17図にAuワイヤを用いて測定したK-パイプ内の熱および熱外中性子束の相対分布とカドミウム比の分布を示す。これらの図から、燃料領域の上部では減速材効果でカドミウム比が増加し、SはK-パイプより大きなカドミウム比をもっていることが認められている。



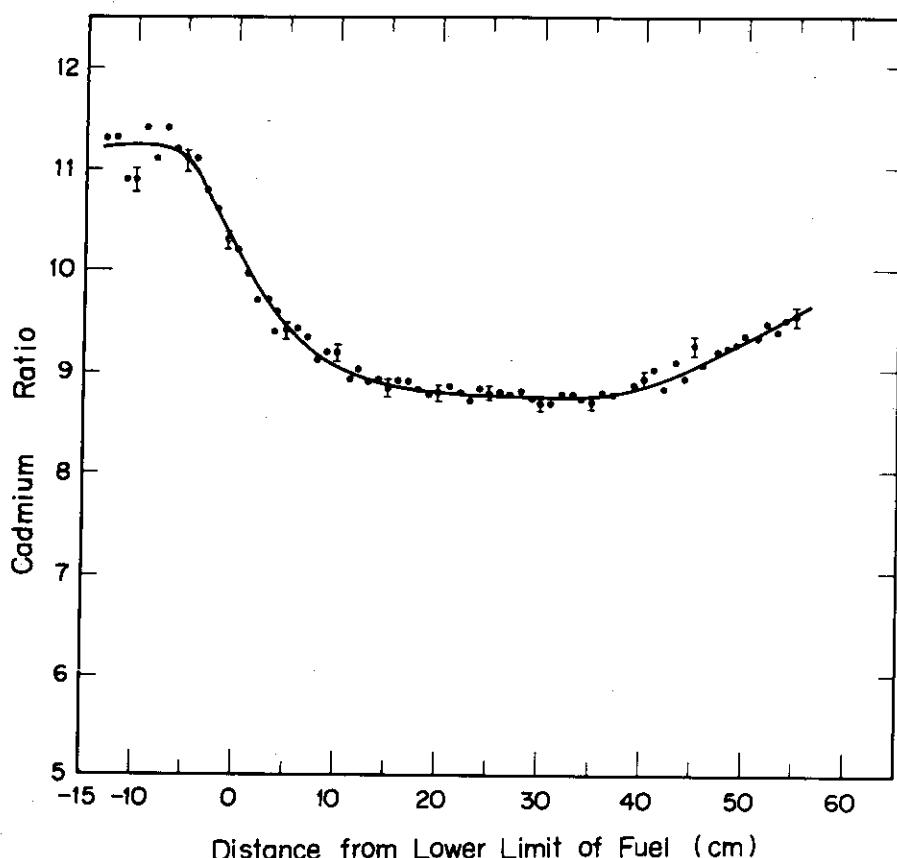
第16図 K-パイプ内の中性子束の相対分布（放射化検出器：Au Wire）

SとK-パイプのカドミウム比の相異には実験孔の構造が、燃料下部領域の測定結果にはAl製グリット板などの炉心構造が複雑に関係していると思われる。

以上のカドミウム比や熱および熱外中性子束分布の参考データから、裸のCuワイヤだけを用いて測定した中性子束分布を熱中性子束分布とみなしてもほとんどさしつかえがないと考えられる。

3-4-2 金箔による熱中性子束の絶対測定

- I) 放射化検出器収納筒を2本用意し、プラスチックテープなどをそれぞれの収納筒の軸に張る。
- II) 裸およびカドミウムカバーをした金箔をそれぞれのプラスチックテープ上の適当な同一の位置に粘着テープなどで固定する。両者の箔は第11図を参考にして、燃料領域の中間の高さ付近に位置するようにするのが適当である。
- III) 両者の箔をそれぞれ適当な炉出力(500W程度)で一定時間照射する。



第17図 Au Wire を用いて測定した K-パイプ内のカドミウム比
(カドミウム管: 0.5 mm 厚)

IV) 両者の箔の全エネルギー吸収ピークの計数率 (cps) を第10図に示した Ge(Li) スペクトロメーターで ^{198}Au の 411.8 keV の光子に注目して測定する。 ^{198}Au の γ 線パルス波高分布の一例を第17図に、ここで用いる Ge(Li) スペクトロメーターの絶対全エネルギー吸収ピーク効率を第18図に示す。⁹⁾ 第18図は線源を検出器軸上の検出器真空窓前面 5 cm の位置においていた場合のものである。

V) 式(14)を用いて熱中性子のみによる箔の放射能 ($N_{\text{FEP}})_{\text{th}}$ (cps) を求め、* この値を式(10)に用いて、箔の放射能強度 A_{th} (dps) を求める。

VI) A_{th} を次式に用いて熱中性子束 ϕ_{th} を求める。**

$$\phi_{\text{th}} = \frac{A_{\text{th}} M f p}{W N_0 \bar{\sigma}_{\text{ac}} (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t}} \quad (16)$$

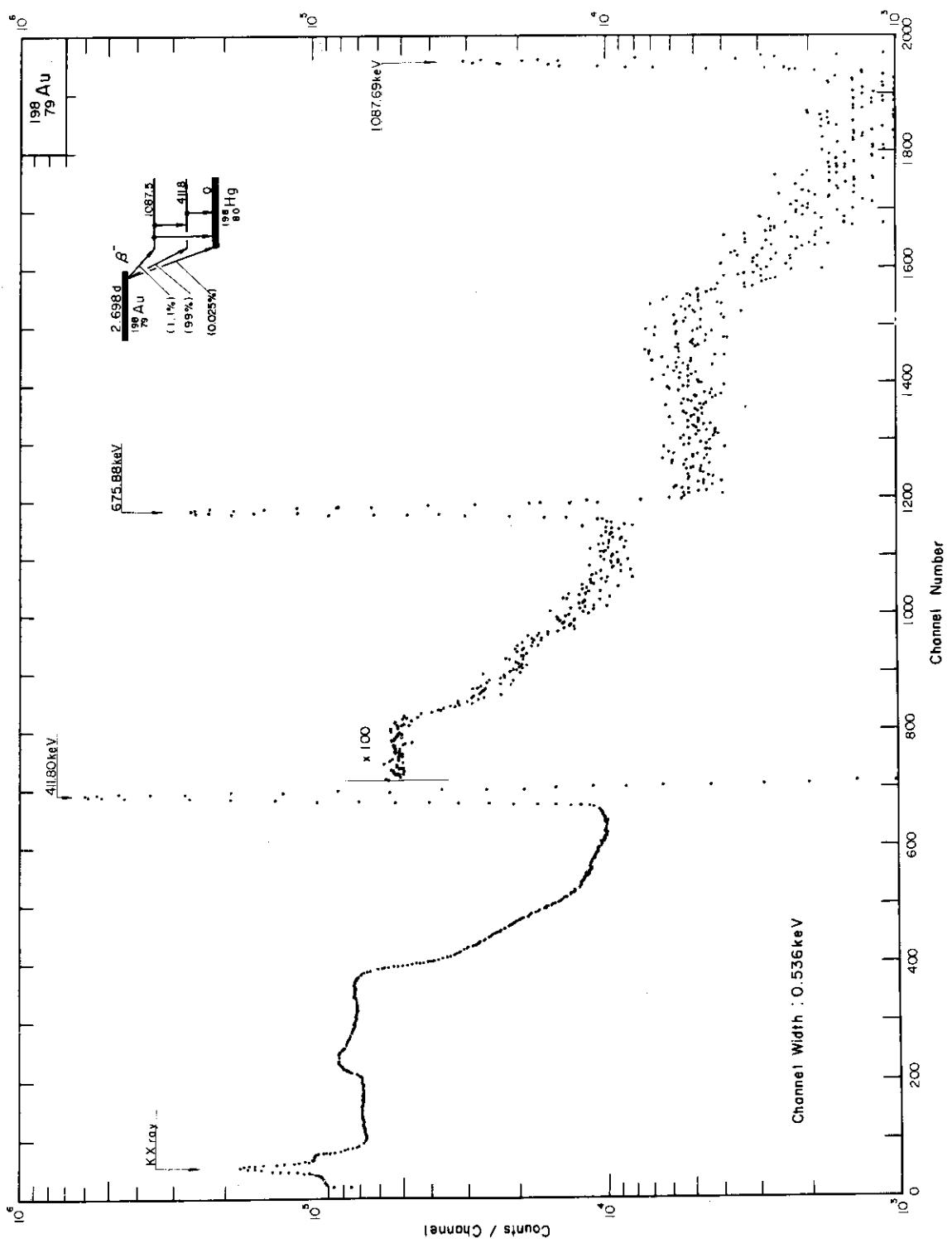
ただし、 M は金の原子量、 W は金箔の重量 (g)、 N_0 はアボガドロ数である。

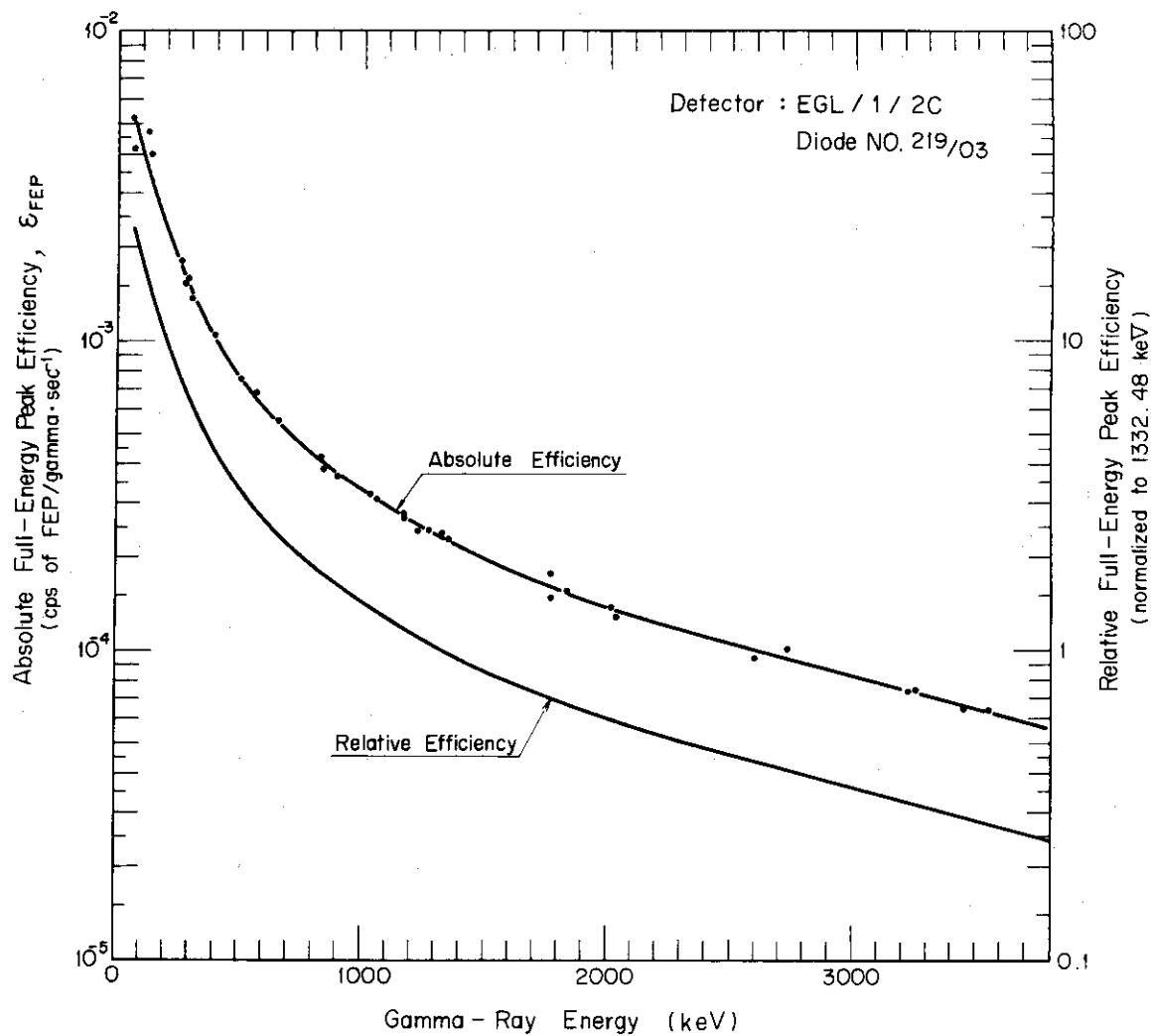
以上の一連の過程において用いる諸定数を第5表に示す。

第6表に金箔を用いた K および S-パイプ内の熱中性子束の測定結果を示す。

* 両者の箔の重量の相違に注意し、 N_{cd} にこの点の補正を行なうことも必要になる。

** $\bar{\sigma}_{\text{ac}}$ を求める際の温度はとりあえず室温を用いて計算する（後に行う炉内計測実験で熱電対を用いて測定する）。

第18図 Ge(Li)スペクトロメータによる ^{198}Au の γ 線パルス波高分布



第19図 Ge(Li)スペクトロメーターの絶対全エネルギー吸収ピーク効率
〔線源—検出器窓間距離：5 cm, Ge(Li) : EGL/1/2C, No. 219/03〕

第5表 金箔による熱中性子束絶対測定に用いる諸定数
〔金箔の厚さ : 0.02 mm (3.86 mg/cm^2), カドミウムの厚さ : 1 mm〕

原 子 量	M	1.97
半 減 期	$T_{1/2}$	$2.695 \pm 0.002 \text{ days}$ ^{10,11)}
壊 变 定 数	λ	$1.785 \times 10^{-4} (\text{min}^{-1})$
放射化断面積 (2200 m/sec)	σ_{ac}	$98.7 \pm 0.2 \text{ barns}$ ¹²⁾
平 均 断 面 積 (Maxwell, 20°C)	$\bar{\sigma}_{ac}$	87.9 barns
カドミウム補正因子	f_{cd}	0.268 cm ² /g
カドミウム切断エネルギー	E_{cd}	1.1 eV
バーチャベーション因子*	f_p	0.68 eV
411.8 keV光子の分岐比	R_b	1.013
全エネルギー吸収ピーク効率	ϵ_{FEP}	$9.553 \pm 0.05\%$ ¹⁰⁾ 9.8×10^{-4} (411 keV) ⁹⁾

* 金箔の半径 : 5 mm の場合

第6表 KおよびS一パイプ内の熱中性子束

測定時の 炉出力 (kW)	K一パイプ			S一パイプ		
	熱中性子束 (nv)	熱中性子束 (2.5MW時)	カドミウム比	熱中性子束 (nv)	熱中性子束 (2.5MW時)	カドミウム比
第1回	0.5	6.23×10^9	3.12×10^{13}	7.07×10^9	3.53×10^{13}	
第2回	0.5	5.74×10^9	2.87×10^{13}	4.72	6.91×10^9	3.46×10^{13}
第3回	1	1.27×10^{10}	3.18×10^{13}	5.47	1.36×10^{10}	3.40×10^{13}
平均			3.05×10^{13}	5.09		3.46×10^{13}

(第1回目の測定ではカドミウム比を測定できなかったので、第3回目の値を用いて熱中性子束を求めた。)

第6表に示した結果は、金箔を収納筒の下部固定金具の上端より30cm上に固定して照射し、第14および第16図の結果を利用して得られた熱中性子束の値を分布のピーク値に換算したものである。熱中性子束の測定誤差は5%程度と考えられる。また、同表の2.5MW時の熱中性子束はJRR-4の最高炉出力に対応するものであり、炉出力指示計が良好な直線性を保っていると仮定して測定結果を換算したものである。第14および第16図の熱中性子束の絶対値は2.5MW時換算の平均値を用いて目盛られている。しかし、金箔の照射は最高炉出力より3桁低い出力で行なわれているので、直線性には多少問題があると思われる。

4 結論

Cu および Au ワイヤを用いた K および S 一パイプ内の中性子束分布測定の結果、両実験孔中心軸の垂直熱中性子束分布はほとんど同様な傾向を示していることが明らかになった。また、熱外中性子束も熱中性子束とほぼ同様な分布を示し、両実験孔での分布の相違も認めがたい程度であった。

熱中性子束分布の最大値は、両実験孔とも、燃料領域の下端から 23 cm 上方において得られその値として、JRR-4 最大炉出力の場合、K-パイプで 3.05×10^{13} nv ± 5 %, S-パイプで 3.46×10^{13} nv ± 5 %, が得られた。両実験孔は炉心において対称な位置にあるにもかかわらず、K-パイプの熱中性子束が S-パイプのそれに比べて約 12 % 低い値が得られ、その理由として実験孔の構造がまず考えられる。すなわち、S-パイプの直徑（内径：60 mm）は K-パイプ（内径：50 mm）に比べて大きく、そのためその中を環流する冷却水による中性子の減速効果は S-パイプの方が大きくなる。また、K-パイプは Al 製の角柱を貫通する形になっているが、S-パイプは Al 製薄肉の角形パイプを貫通し、S-パイプと角形パイプの間には水が満されている構造になっている。このような理由で、K-パイプは S に比べて中性子が熱化され難いため、熱中性子束が低下していると考えられる。

この点は S-パイプのカドミウム比（6.98）が K-パイプの値（5.09）より大きく測定されていることから明らかになっている。さらに、K-パイプは C₅ 制御板に接近した位置にあるため、制御板効果も考えられるが、今回の実験からは、この影響を明確にできなかった。しかし、in-core fission chamber による測定によって、C₅ の位置変化は数 % 程度の中性子束の変動をもたらすことが確認されているので、¹³C 制御板の存在やその配置による中性子束の変化は無視できないと考えられる。

最高炉出力 2.5 MW 時の熱中性子束の値は、それより 3 術低い炉出力時での測定による換算値であるため、炉出力指示計の非直線性（CICO の γ 線補償量の不完全性も含めて）の影響を直接受けている。このような効果を少なくするために、キャンベル法によって炉出力を測定する方法もあるが、Co-Ti や Co-Al 合金など高中性子束での測定に適した放射化検出器を用いて測定するほうが直接的である。この方法による測定は現在予備実験の段階である。付録に示した Lu-Al 合金による 2.5 MW 時の熱中性子束分布は、制御板配置が近似していることもあって第 14 図に示した 3 術低い炉出力時における分布とほとんど一致する結果が得られている。

一方、放射能の絶対測定の見地においては、 $4\pi\beta-\gamma$ や $\gamma-\gamma$ 同時計数法などと今回の方針との比較検討などを深め、測定精度の向上を計る努力を行なうことが重要だと考えられる。

謝 辞

実験に際し、御助力下された第24回一般課程研修生遠藤六郎（日本原子発電）、中岡章（電力中央研究所）および白石忠男（原研、炉修）の各氏に感謝の意を表わします。
また、実験に際し有益な助言や御協力を賜った両角実（原研、JRR-4）ならびに渡辺智美（原研、炉利用課）の両氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

1. C.H.Westcott, AECL-1161-CRPP-960 (1960)
2. J.A.DuJuren and R.K.Paschall, Nucl.Sci.and Eng., 20, 314 (1964)
3. R.W.Stoughton and J.Halperin, ORNL-TM-236 (1962)
4. H.B.Stewart and G.B.Gairn, KAPL-329 (Pt.I) (1950)
5. K.H.Beckurts and K.Wirtz, "Neutron Physics", Springer-Verlag, Berlin (1964)
6. G.R.Dalton and R.K.Osborn, Nucl.Sci.and Eng., 9, 198 (1961)
7. D.K.Trubey, "Table of Three Exponential Integrals", ORNL-2750 (1959)
8. M.Brose, Nukleonik, 6, 134 (1964)
9. 東條隆夫, 近藤眞, 白石忠男ら, JAERI-Mレポート, No. 4560 (1971)
10. M.J.Martin and P.H.Blichert-Toft, Nuclear Data Tables, A8 (1970)
11. M.M.Costa Paiva and E.Martinko, Intern.J.Appl.Radiation and Isotope 21, 40 (1970)
12. C.C.Hanna, C.H.Westcott, H.D.Lemmel, B.R.Leonard, J.S.Story and P.M.Attree, Atomic Energy Review, 7, 8 (1969)
13. 東條隆夫, 近藤眞, 白石忠男ら, JAERI-M レポート, No. 4566 (1971)

謝

辞

実験に際し、御助力下された第24回一般課程研修生遠藤六郎（日本原子発電）、中岡章（電力中央研究所）および白石忠男（原研、炉修）の各氏に感謝の意を表わします。

また、実験に際し有益な助言や御協力を賜った両角実（原研、JRR-4）ならびに渡辺智美（原研、炉利用課）の両氏に深く感謝致します。

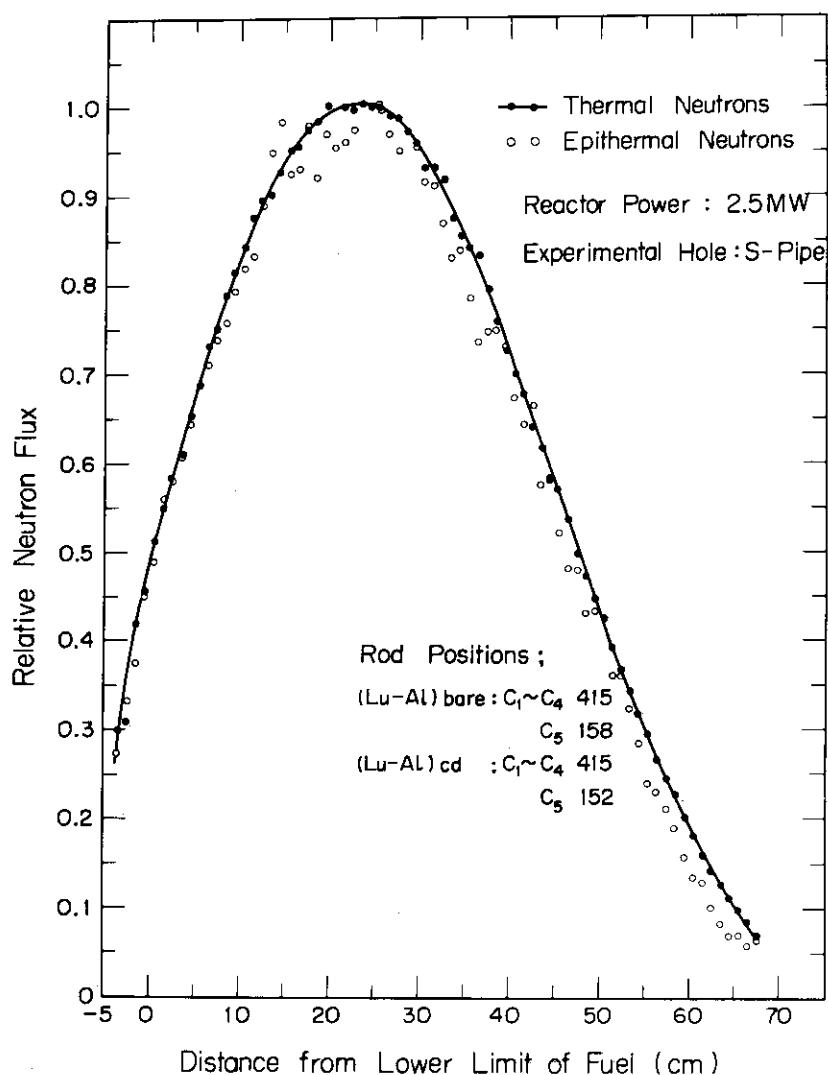
参 考 文 献

1. C.H.Westcott, AECL-1101-CRRP-960 (1960)
2. J.A.DuJuren and R.K.Paschall, Nucl.Sci.and Eng., 20, 314 (1964)
3. R.W.Stoughton and J.Halperin, ORNL-TM-236 (1962)
4. H.B.Stewart and G.B.Gairn, KAPL-329 (Pt.I) (1950)
5. K.H.Beckurts and K.Wirtz, "Neutron Physics", Springer-Verlag, Berlin (1964)
6. G.R.Dalton and R.K.Osborn, Nucl.Sci.and Eng., 9, 198 (1961)
7. D.K.Trubey, "Table of Three Exponential Integrals", ORNL-2750 (1959)
8. M.Brose, Nukleonik, 6, 134 (1964)
9. 東條隆夫, 近藤眞, 白石忠男ら, JAERI-Mレポート, No. 4560 (1971)
10. M.J.Martin and P.H.Blichert-Toft, Nuclear Data Tables, A8 (1970)
11. M.M.Costa Paiva and E.Martinko, Intern.J.Appl.Radiation and Isotope 21, 40 (1970)
12. C.C.Hanna, C.H.Westcott, H.D.Lemmel, B.R.Leonard, J.S.Story and P.M.Attree, Atomic Energy Review, 7, 8 (1969)
13. 東條隆夫, 近藤眞, 白石忠男ら, JAERI-M レポート, No. 4566 (1971)

付 錄

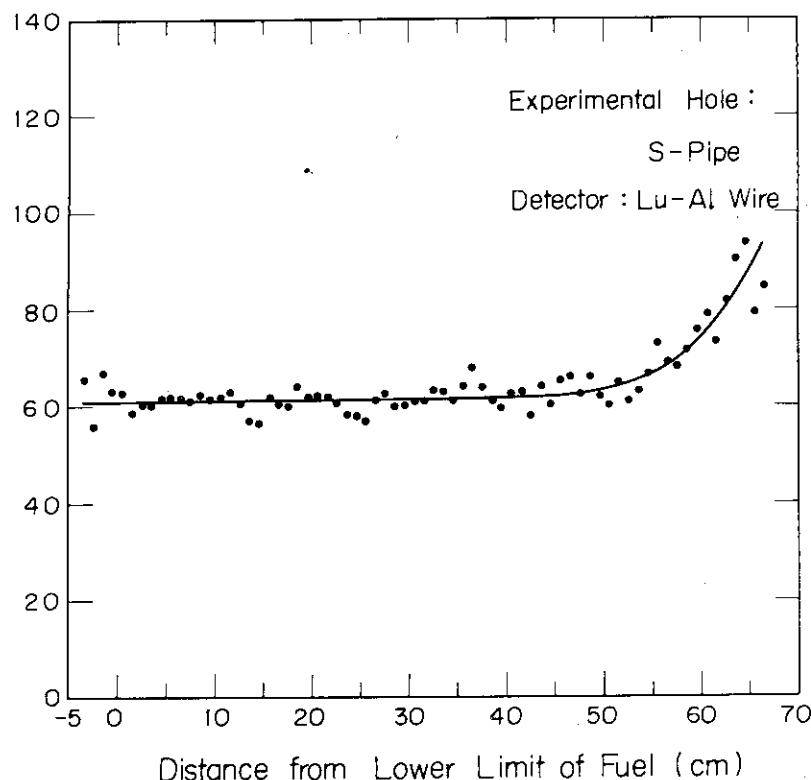
付録 I S-パイプ内の Lu-Al ワイヤによる相対的な熱および熱外中性子束分布とカドミウム比の分布

炉出力 2.5MW において Lu-Al ワイヤ* を S-パイプ内で照射し、 ^{177}Lu の 208.36 keV の光子の全エネルギー吸収ピークの計数率を NaI(Tl) シンチレーション・スペクトロメーターで測定し、垂直方向の相対的な熱および熱外中性子束分布を求めた結果を第 I-1 図に、カドミウム管(0.5mm 厚)を用いて求めたカドミウム比の分布を第 I-2 図に示す。



第 I-1 図 Lu-Al Wire による熱および熱外中性子束の相対分布

* Lu : 4.4% , 直径 : 0.508 mm (Reactor Experiments Inc., Cat. No. 625)



第 I-2 図 Lu-Al Wire を用いた場合のカドミウム比(カドミウム管: 0.5 mm 厚)

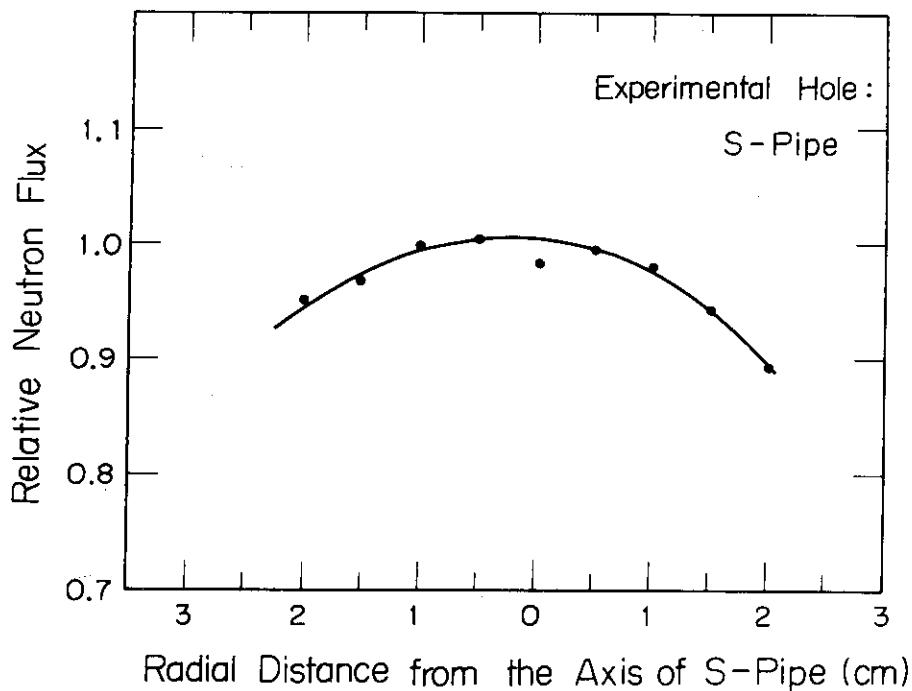
これらの図から、熱および熱外中性子束の分布はほぼ一致し、カドミウム比は燃料領域の全域にわたってほぼ一定の値を示している。しかし、その上端部では冷却水の反射体効果によってカドミウム比が増加している、などが明らかになっている。

付録 II S-パイプ内の Cu ワイヤによる半径方向の相対的中性子束分布

Cu ワイヤを放射化検出器収納筒下部固定金具より 30 cm 上方の位置において半径方向の中性子束分布を炉出力 500 W で照射して測定した。

この場合、収納筒が実験孔内で回転するため、どの方向の半径方向の分布を測定したのかは不明である。

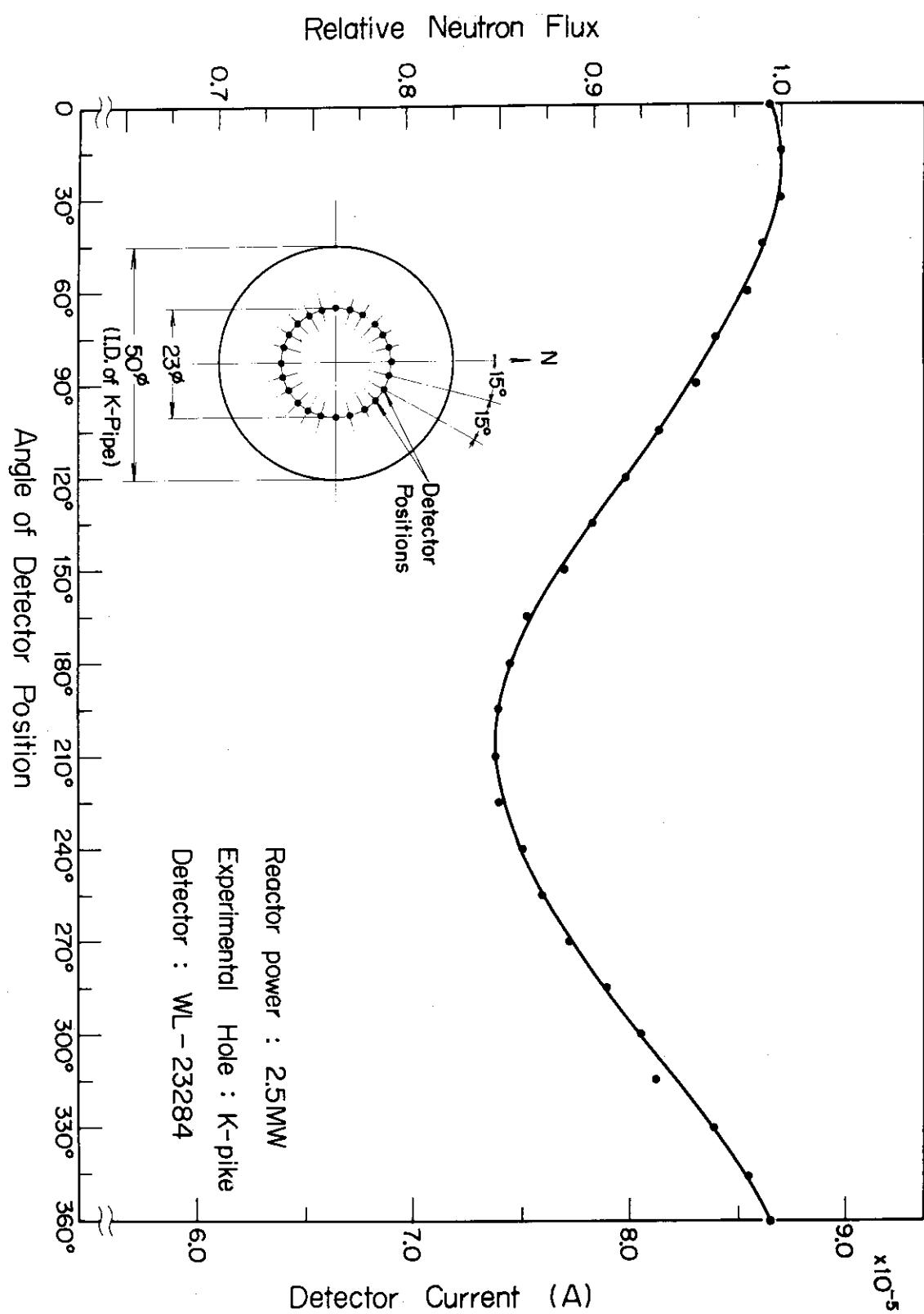
裸のワイヤの消滅輻射の全エネルギー吸収ピークを測定して得られた結果を第 II-1 図に示す。同図におけるピーク点の値が 2 % 低くなっている現象は、垂直方向測定用の Cu ワイヤと交差することによる中性子束低下に起因するものと考えられる。第 II-1 図から、実験孔の中心軸附近で中性子束が最大になり、その点から 2 cm 離れた位置では 5~10 % の中性子束低下が認められている。



第II-1図 S-Pipe内半径方向の相対中性子束分布(放射化検出器: Cu wire)

付録一Ⅲ In-Core Fission ChamberによるK-パイプ内円周上の相対的中性子束分布

炉内計測用核分裂電離箱(WL-23284, Westinghouse)を使用して、K-パイプの軸を中心とした半径11.5 mmの円周上の中性子束分布を炉出力2.5MWのもとで測定し、この結果を第III-1図に示す。K-パイプ用の検出器保持具は同図中に示されているように、15°づつの角度で階段状に変化できるように設計されている。第III-1図から、円周上の中性子束は一定ではなく、最高値に対して最低値は85%の中性子束をもっており、分布の状態は斜切直円筒のような傾向を示していることが明らかになっている。また、中性子束の最大値は第7図に示した123番の燃料側ではなく、燃料要素に平行して並んでいるK-パイプ横のグラフアイトの側で得られ、最低値は燃料から最も離れた位置で得られていることが明らかになっている。



第Ⅲ-1図 In-Core Fission ChamberによるK-Pipe内の円周上の相対中性子束分布