

JRR-1における
中性子束の絶対測定

研究報告 No. 4

1962年3月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

JRR-1 における中性子束の絶対測定

要 旨

JRR-1 の出力較正の 1 つの手段として、金箔による誘導放射能の方法を用いて炉心部の中性子束の絶対測定を行った。

中性子の照射により生じた ^{198}Au の放射能は、 β - γ 同時計数法および 4π -フロー・カウンタにより絶対測定し、両者の結果は実験誤差の範囲内で良い一致をみた。その結果から炉心部における熱中性子束を計算で求め、JRR-1 の炉心部における最大熱中性子束として $1.2 \times 10^{12} \text{n/cm}^2/\text{sec}$ を得た。またこれらの結果は低出力領域における JRR-1 の出力較正にも適用された。ここではこれらの金箔の誘導放射能の測定法ならびにその結果について述べる。

1958 年 9 月

高橋 嘉右^{*)}

今井 宗丸^{**)}

加藤 洋明^{***)}

Absolute Measurements of Neutron Flux in JRR-1

Abstract

For the purpose of the power calibration test of Japan Research Reactor No. 1, the absolute measurements of thermal neutron flux in the core of the reactor were carried out using a method of neutron induced activity of gold foils.

The induced activities of ^{198}Au have been absolutely measured both with the method of β - γ coincidence and β -ray counting using a 4π -flow counter, and the results obtained by these two methods coincide with each other within experimental errors. The present report gives the detailed descriptions about the experiments and the results obtained. The maximum value of thermal neutron flux at the core center of JRR-1 calculated from these results was $1.2 \times 10^{12} \text{n/cm}^2/\text{sec}$ at 50 kW. Results were also applied to the power calibration test of JRR-1.

September 1958

KASUKE TAKAHASHI^{*)}

MUNEMARO IMAI^{**)}

YOHMEI KATOH^{***)}

*) 日本原子力研究所 Japan Atomic Energy Research Institute.
 **) 日立製作所中央研究所 Hitachi Central Research Laboratory.
 ***) 日立製作所日立研究所 Hitachi Research Laboratory.

目 次

I 緒 言	1
II 実験の方法	1
III 実験装置および測定	2
IV 結果および考察	5
文 献	6

表 目 次

TABLE-1 測定結果の比較	5
-----------------	---

図 目 次

Fig. 1. ^{198}Au の壊変形式	2
Fig. 2. 検出器部略図	3
Fig. 3. β - γ 同時計数回路ブロック図	3
Fig. 4. 4π -フロー・カウンターの構造	4
Fig. 5. 4π -フロー・カウンター特性曲線の一例	4

Contents

I Introduction	1
II Methods of Experiment	1
III Apparatus and Measurement	2
IV Results and Conclusion	5
Reference	6

Table Contents

TABLE-1. Comparison of Experimental Results	5
---	---

Figure Contents

Fig. 1. Decay Scheme of ^{198}Au	2
Fig. 2. Arrangement of Detectors	3
Fig. 3. Block Diagram of Coincidence Circuit Assembly	3
Fig. 4. Picture of 4π -Flow Counter	4
Fig. 5. Typical Plateau Curve of 4π -Flow Counter	4

I. 緒 言

JRR-1 の特性試験ならびに運転にあたって、その出力を正確に測定する必要があった。すなわち原子炉出力計の読みはそれに用いた中性子検出器^{*}の感度とその置く位置によって大巾に変化する。したがってこれを適当に調節して、出力計の読みが正しく炉の出力を表示するようにしなければならない。実際 JRR-1 の臨界実験当初には検出器は非常に高感度が得られるような位置に設置されていたが、その後炉の停止時の微小な出力レベル（約 0.5 mW）を一応の基準として、出力計の目盛がなるべく直読目盛に近くなるように仮の設置が行われていた。一方 JRR-1 はこの型の炉としては最高である 50 kW の出力を予定していたため、その出力値は関係者の特に注目するところであった。これらの点から JRR-1 の出力較正は非常に慎重を期して行われた。

一般に原子炉の出力を測定するには発生した熱量を直接測定する方法と、炉心内の平均熱中性子束の絶対値を測定し、これより単位時間に起っている核分裂反

応の割合から出力を計算する方法等が行われている。炉がある程度高い出力で働いている場合には熱的方法も可能であり、実際 JRR-1 においても 10 kW 以上の高出力領域では冷却水の流量と温度差から熱出力を求める方法を採用した^{**}。しかし数 W 程度の低出力領域ではこの方法の適用は困難であり、また JRR-1 の特性の 1 つとして実際の炉内の実験孔における中性子束の絶対値も必要であるので、低出力時において中性子束の絶対測定を行い、これを低出力領域での出力較正に適用することとした。この場合あらかじめ中性子束の絶対値の知れている標準炉があれば、これと比較測定を行うことにより炉内の中性子束の絶対値を決定できるが、現在の国内においては不可能であるため、われわれは金箔を熱中性子で照射してその誘導放射能を測定し、これから計算によって熱中性子束の絶対値を決定することとした。ここではこれら金箔の誘導放射能による絶対測定に関してその実験の詳細および得られた結果について報告する。

II. 実験の方法

熱中性子を検出するにはその強さに応じて硼素電離箱、核分裂計数管、BF₃ 計数管、熱中性子用シンチレーション・カウンター、および金属箔の誘導放射能による方法などがある。一方、炉の出力を測定するには単に中性子束の絶対値を求めるのみでなく、その分布状態を詳細に知ることが必要である。したがって検出器は、その挿入により中性子束の分布に歪みを生ずることなく、また測定点における幾何学的位置が精度良くきめられるように十分小型であることが要求される。そのためたとえば特別小型の核分裂計数管^{*)}や BF₃ 計数管^{*)}を製作し測定した例もあるが、われわれは比較的容易でしかも正確に測定できる方法として、金属箔の放射線による方法を採用することとした。放射線に使用される元素としては通常、Mn, Rh, Dy, Ag, In, Au, など多くのものが考えられるが、以下に述べるような理由から絶対測定には金

箔がもっとも多く使用されているのでわれわれもこれを利用することとした。一般に誘導放射能による熱中性子束の測定にはつぎのような条件を満たすものが望ましい。すなわち、

- 熱中性子に対する吸収断面積が正確に求められていて、かつ大きいこと。これは低い中性子束を測定するためには必要なことである。
 - 吸収断面積がいわゆる $1/v$ 法則にしたがうこと。
 - その誘導放射能の半減期が適当であること。
 - 薄い箔にすることが可能で化学的に安定であること。また純度の高いものが容易に得られること。
 - 壊変形式が簡単であること。1 つの β 崩壊に続いて γ 線の放出があること^{***}。
 - しかもその γ 線の内部転換率が小さいこと。
- 上述のうち、とくに e), f) などの条件は同時計数

^{*} JRR-1 では γ 線補償型硼素電離箱が用いられている。詳しくは 原研・研究報告 JAERI 1003-F「JRR-1 の制御系について」参照。

^{**} 出力較正についての詳細は原研・研究報告 JAERI 1003-E「JRR-1 の特性試験」参照。

^{***} 1 つの γ 線に続いて同時にカスケードにもう 1 つの γ 線の放出がある場合でもよい。しかし、一般に、これにはいちじるしい角相関のある場合が多く、取り扱いが複雑になる。

(Coincidence) 法を用いる場合には重要である。そして金はこれらの条件をもっともよく満足するものの1つであると考えられる⁹⁾。

以上のような観点から、われわれは中性子照射のための試料としては金箔を用い、これをよく知られた

4 π -フロー・カウンター (4 π -Flow Counter) によって β 線を測定する方法と、この種の測定法としてはきわめて巧妙な方法である β - γ 同時計数 (β - γ Coincidence) 法の2つの方法により測定した。

III. 実験装置および測定

§ III-1 金箔の照射

使用した金箔は純度 99.98% 以上の高純度のもので大きさは 10 mm \times 10 mm, 厚さ (39.0 \pm 0.1) mg/cm² である。これを厚さ 0.5 mm のアルミニウム製の箔容器 (Foil Container) 内におさめ、直径 25 mm, 長さ 130 cm のルーサイト (Lucite) 製支持棒に所要の間隔で固定し^{*}, JRR-1 の炉心貫通実験孔^{**}) を通じて炉心に挿入した。熱中性子束の分布を求めるためにはカドミウム比 (Cd-Ratio) の測定が必要であり、そのためアルミニウム製のものと同大のカドミウム製の箔容器を用いて相対的な分布の測定も行った。すなわち直径 40 cm の炉心内に 5 cm 間隔に 9 枚, その両外側にさらに各 1 枚, 計 11 枚の金箔を用いた。しかし測定の簡便化をはかるため、炉心内の中性子束の相対的な分布は単にこれをマイカ端窓型 G-M 計数管によって相対的な計数を求めるのみに留め、絶対測定は炉心中央に位置した箔など少数のものに限って行った。

炉心内に挿入された金箔は、以下に述べる2つの方法による測定に都合の良い適当な強さの放射能を持つべく、炉の出力と考え合わせてその照射時間を決定した。まずおよその出力が 0.5 W と予想された出力計目盛が 25×10^{-9} A のレベルにおいてはカドミウム被覆のない場合 50 分, カドミウム被覆を行った場合 100 分, また出力計目盛が 25×10^{-8} A のレベル (大体 5 W と予想されていた。) においてはそれぞれ 5 分, および 10 分の照射とした。このさい箔の挿入・抜き出しは炉の運転中に敏速に行い中性子の照射が時間的になるべく矩形波状になるように努めた。こうして照射した金箔のうちカドミウムの被覆をしない炉心中央に位置した箔および炉心より両側の各 10 cm 離

れた点におかれた箔の3種についてその放射能の絶対測定を行った。つぎにその装置について詳述する。

§ III-2 β - γ 同時計数 (β - γ Coincidence) 法

前述のように金箔は中性子束の絶対測定をするための検出器としてかなり有用なものであるが、さらにその中性子吸収による生成放射性核 ¹⁹⁸Au の壊変形式からいってもきわめて便利な性質を有している。¹⁹⁸Au

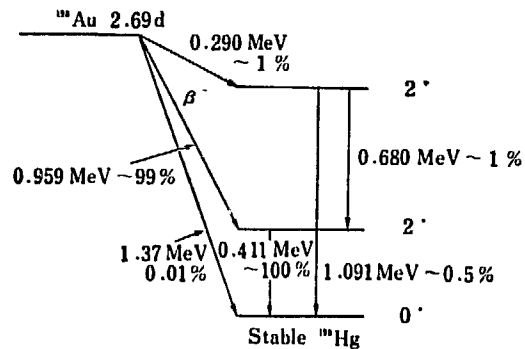


Fig. 1 Decay scheme of ¹⁹⁸Au.

の壊変形式は Fig. 1 に示すように^{9)****}) その構造が比較的簡単でしかも (i) 1つの β 崩壊 ($\sim 99\%$, $E_{\max} = 0.959$ MeV) に続いて $E_{\gamma} = 0.411$ MeV なる γ 線が放出される。(ii) この γ 線の内部転換率は相当小さく^{****}) (転換率は 4.8% である。⁹⁾⁷⁾), (iii) β 線とそれに引き続いて起る γ 線の間には、現在までのところ顕著な角相関は認められない⁹⁾。(iv) またこの 0.411 MeV の準位の平均寿命は 2×10^{-11} sec で十分短い⁹⁾。以上のような理由から ¹⁹⁸Au の放射能の強さを測定するもっとも信頼できる方法の一つとして β - γ 同時計数法が考えられるわけである⁹⁾¹¹⁾。

よく知られているように、いま ¹⁹⁸Au の崩壊数を毎秒 N_0 とし β 線および γ 線検出器の計数を毎秒 N_{β} とし N_{γ} とし

*) これらの点に関しては原研・研究報告 JAERI 1003-E 「JRR-1 の特性試験」参照。

**) JRR-1 の炉の構造、実験孔の配置等については例えば原研・資料 No. 1 「JRR-1 の概要とその安全対策」参照。

***) ごく最近の報告によれば ¹⁹⁸Au の壊変形式が γ 線の強度比等について多少異なるような提案⁵⁾ もなされているが、いづれにしてもこの結果生ずる誤差はきわめて小さいと考えてよい。

****) この内部転換による同時計数および β 線、 γ 線の計数におよぼす効果については金箔と β 線検出器の間に適当なアルミニウム吸収体を挿入することにより実験的に補正を行うことができる¹⁰⁾。

それぞれ N_β , N_γ , その同時計数率を $N_{\beta\gamma}$ とすると,
 β - γ 角相関はないので

$$N_\beta = \epsilon_\beta \omega_\beta N_0$$

$$N_\gamma = \epsilon_\gamma \omega_\gamma N_0$$

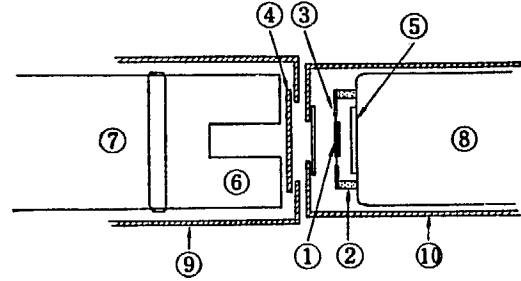
$$N_{\beta\gamma} = \epsilon_\beta \epsilon_\gamma \omega_\beta \omega_\gamma N_0$$

$$\therefore N_0 = N_\beta N_\gamma / N_{\beta\gamma} \quad \text{(III-1)}$$

となる。ここに ϵ および ω はおのおのの検出器の感度および幾何学的効率を表わしている。(III-1) 式から容易にわかるように、われわれは ϵ_β , ϵ_γ , ω_β および ω_γ を求めることなく、単に N_β , N_γ および $N_{\beta\gamma}$ を測定することにより ^{198}Au の崩壊数 N_0 , すなわち金箔の中性子照射による誘導放射能の強さを求めることができる。

β 線の検出器としては直径 25 mm, 厚さ 2 mm のアントラセン結晶を用いたシンチレーション・カウンターを使用し, 光電子増倍管には E. M. I. 6097 を用いた。前置増巾器はカソード・ホロアー型, 主増巾器には AID 型線型増巾器を用い, 波高弁別器によりバックグラウンドや γ 線によるパルスを除き, パルス整形ののちこれを同時計数回路に入れ, 同時にこの信号を β 線チャンネルの計数装置に送る。ここで主増巾器の立上り時間は $T_r \lesssim 0.3 \mu\text{sec}$ である。

γ 線検出器としては NaI(Tl) のシンチレーション・カウンターを使用した。結晶の大きさは直径 1 1/4" 高さ 1 1/2" の井戸型, 光電子増倍管は R. C. A. 6655 である。増巾器, 波高弁別器, パルス整形回路および計数装置はすべて β 線チャンネルの場合と同様である。 β 線および γ 線検出器の構成ならびに配置は, 大略 Fig. 2 に示すごとくである。また装置全体の回路構成をブロック図に示すと Fig. 3 のようになる。同時



0 1.0 cm

Fig. 2 Arrangement of detectors

- ① Gold foil
- ② Lucite ring
- ③ Foil holder of aluminium
- ④ Al-absorber
- ⑤ Anthrathene crystal
- ⑥ NaI(Tl) crystal
- ⑦ RCA 6655 P. M. Tube
- ⑧ E. M. I. 6097 P. M. Tube
- ⑨ Counter case
- ⑩ Counter case

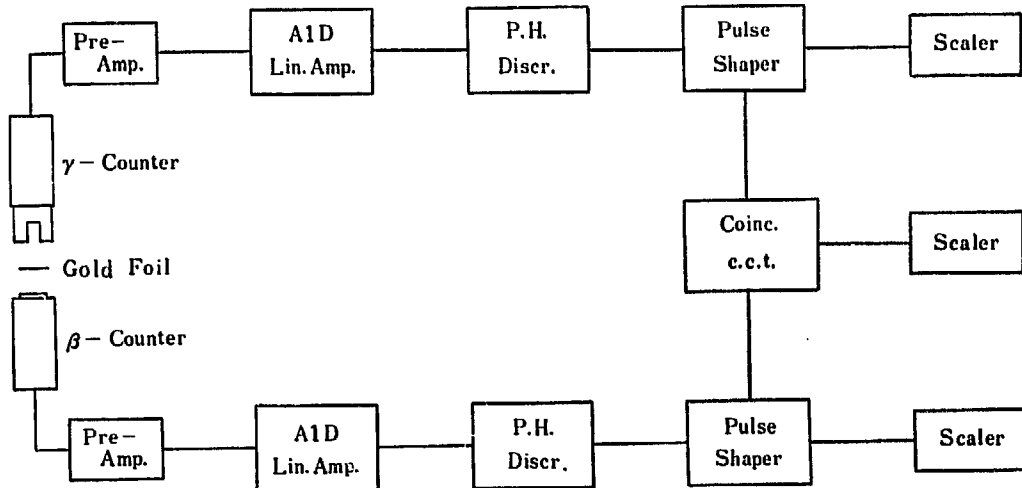


Fig. 3 Block diagram of coincidence circuit assembly.

*) 詳しくは

$$N_\beta = \frac{N_0}{V} \int \epsilon_\beta(r) \omega_\beta(r) dV, \quad N_\gamma = \frac{N_0}{V} \int \epsilon_\gamma(r) \omega_\gamma(r) dV$$

$$N_{\beta\gamma} = \frac{N_0}{V} \int \epsilon_\beta(r) \epsilon_\gamma(r) \omega_\beta(r) \omega_\gamma(r) dV$$

$$\frac{N_\beta \cdot N_\gamma}{N_{\beta\gamma}} = \frac{\frac{N_0}{V} \int \epsilon_\beta(r) \omega_\beta(r) dV \int \epsilon_\gamma(r) \omega_\gamma(r) dV}{\int \epsilon_\beta(r) \epsilon_\gamma(r) \omega_\beta(r) \omega_\gamma(r) dV}$$

ここでわれわれの箔については $\epsilon_\gamma(r)$, $\omega_\gamma(r)$ はほとんど一様であると考えることができる。その結果から (III-1) 式が近似的に導き出され、実際われわれの測定値においてもそれは確かめられている。

計数回路の分解能は $\tau \leq 0.8 \mu\text{sec}$, またその入力パルスに対する不感時間は $T_D \leq 10 \mu\text{sec}$ であった. なお測定回路全体としての安定性は十分良好で, 測定中における増巾器の利得変動, 分解能のふらつき, 波高弁別器のレベルの変動などは実験誤差の上からも十分無視できる程小さい.

§ III-3 4 π -フロー・カウンター法¹²⁾

一般にある試料からの β 線を測定してその放射能を決定しようとする場合, 実測の計数率 N' とその試料の壊変率 N との間にはつぎの関係が考えられる.

$$N = N' / f_g f_w f_e f_\gamma f_{bs} f_s(x) \quad (\text{III-2})$$

ただし上式において

f_g : 幾何学的効率

f_w : 検出器の窓による吸収の割合

f_e : 検出器自身の効率

f_γ : γ 線に対する補正項

f_{bs} : 試料支持器による背面反射の補正

f_s : 試料内における自己吸収の割合

x : 試料の厚さ

である. 端窓型 G-M 計数管などで絶対測定を行うにはこれらの補正項をすべて決定する必要がある. しかし 4 π -フロー・カウンターを使用すれば, その構造から直ちにわかるように $f_g \approx 1$, $f_w = f_e = 1$ となり, f_{bs} もほとんど 1 とみなし得るようにできる. したがって残りの f_γ を吸収曲線の方法によって求め, f_s を計算または測定結果によって求めればよい. われわれはフロー・カウンターとしては, Fig. 4 に示すような 4 π -カウンターの上半分を 2 π -カウンターとして

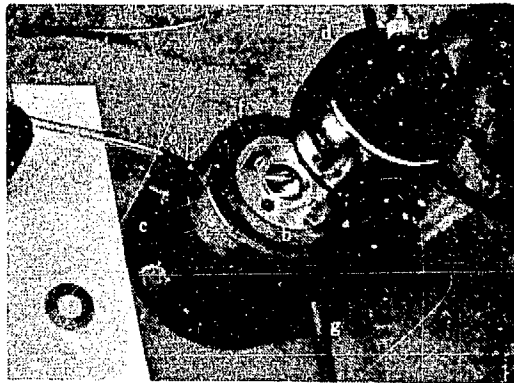


Fig. 4 Picture of 4 π -Flow Counter

- | | |
|---|----------------------|
| (a) Sample holder (I. D. = 20 mm, O. D. = 38 mm)
thickness = 0.1 mm Al | (c) Output connector |
| (b) Al plate | (e) Gas outlet |
| (d) Gas inlet | (f) Rubber "O" ring |
| (g) Rubber "O" ring | (h) Handle |

用い(したがって $f_g \approx 1/2$ となる. これは実験的にも確かめられている.), ガスは Q ガス (98.7% ヘリウム, 1.3% ブタン) を使用してガイガー領域で動作させた. またこれは PR ガス (アルゴン 90%, メタン 10%) の使用により比例計数管として動作させることも可能であり, プラトー特性および精度の上からは後者の方がかなり優れているのであるが, 測定の簡便さ, 動作の安定さなどからここでは主として Q ガスの使用によりガイガー領域で測定を行い, PR ガスによる比例計数管での測定は参考データを求めるに留めた. ガイガー領域での動作特性は, プラトー巾約 200V, 傾斜は $\leq 2\%/100\text{V}$, 始動電圧 1200V であった. また測定回路を含めた不感時間は, 1350V において約 150 μsec . であった. Fig. 5 はその特性および測定結果の一例

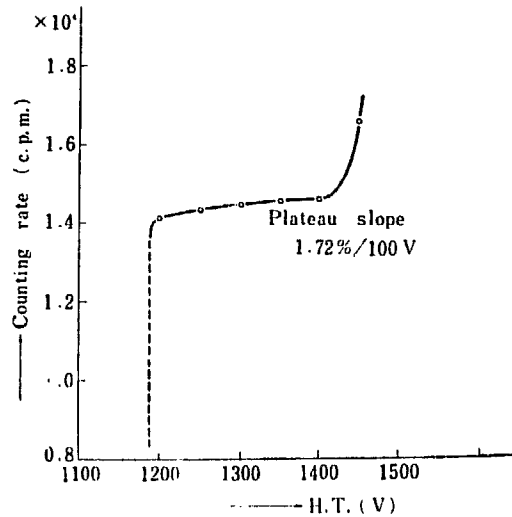


Fig. 5 Typical plateau curve of 4 π -Flow Counter:
Source.....Gold foil irradiated at 5W

を示している. 金箔試料は細いセロテープで水平に支持し試料の荷重を防ぐため細い針金で外壁と導通させ接地した. γ 線に対する補正項 f_γ は, アルミニウム製の標準吸収板を試料の上に重ねて, 吸収曲線よりその効果を測定し, 0.910 を得た. また f_s については金の薄い箔における吸収係数を推定し, これより使用した金箔の厚さ 39 mg/cm^2 に対して 0.632 をとることとした*. このようにかんがりの補正を要するような厚さの金箔を用いることは実験の精度および実験結果の信頼度の点から望ましいものではないが, 種々の制約のためさらに薄い金箔の使用は不可能であった.

§ III-4 測定

上述したように, 測定装置のおおのこの特性を確かめ,

*) 自己吸収に対する補正は相当複雑な問題で, 一応われわれは Baker¹³⁾ および他の人々¹⁴⁾¹⁵⁾ による近似式 $f_s = (1 - e^{-kd})/kd$ を用いることとした. ここに d は箔の厚さ (mg/cm^2), k は箔内での平均的な吸収係数を表わす.

かつ装置全体の長時間に対する変動を見きわめたのち金箔を炉内に挿入照射して測定した。照射はすでに述べたように、炉の出力がおよそ 5 W および 0.5 W と予想された 2 点の出力レベルで行い、照射時間はそれぞれ 5 分、50 分である。まづ同時計数法の場合は各試料について数 10 分間の測定を数回繰り返して行いそれらの結果から平均値を求めた。このとき β 線のカウンタ数は平均約 100 c. p. s., γ 線検出器については 20 c. p. s. 程度であり、自然計数は β 線検出器では 0.028 c. p. s., γ 線検出器については 1.36 c. p. s. であったので、 γ 線の計数に対しては自然計数に対する補正を行った。真の β - γ 同時計数はほぼ 1 c. p. s. 程度であり偶発同時計数は 0.0033 c. p. s. であるのでこれに対しては補正はしていない。このようにして求めた真の放射能の強さは半減期を 2.69 日として各測定時刻についての時間補正を行い照射直後の金箔の誘導放射能の強度を算出した。つぎにフロー・カウンタの場合は各試料について 30 秒づつの測定を数回繰り返して平均値を求め、不感時間による計数落しに対する補正を行い、さらに自然計数 1.3 c. p. s. を差し引き γ 線および自己吸収についての補正を加えた。2 π 型での各試料の計数は大体 400~500 c. p. s. 程度であった。TABLE-1 に以上の結果をまとめて掲げている。炉心中央とその両側 10 cm の距離に位置した金箔について 2 つの方法

TABLE-1 Comparison of Results by Various Methods

(a) Power Indicator : 25×10^{-9} A level
Irradiation : 50 min.

Distance from Core Center (cm)	Coincidence Method (d. p. s.)	Flow Counter (d. p. s.)	End-Window G-M Counter (c. p. s.) ^{c)}
-10 ^{a)}	1824 \pm 1.7%	1849 \pm 2.0%	106.3
0	2060 \pm 1.5%	1983 \pm 2.5%	120.5

+10	1791 \pm 1.5%	1854 \pm 2.0%	108.0
$N_0(0)^b/N_0(-10)$	1.13	1.07	1.13
$N_0(0)/N_0(+10)$	1.15	1.07	1.12

(b) Power Indicator : 25×10^{-8} A level
Irradiation : 5 min.

Distance from Core Center (cm)	Coincidence Method (d. p. s.)	Flow Counter (d. p. s.)	End-Window G-M Counter (c. p. s.) ^{c)}
-10 ^{a)}	1949 \pm 1.6%	1945 \pm 1.8%	98.5
0	2108 \pm 1.7%	2310 \pm 3.5%	108.1
+10	2043 \pm 1.8%	2039 \pm 1.7%	99.4
$N_0(0)^b/N_0(-10)$	1.08	1.19	1.10
$N_0(0)/N_0(+10)$	1.03	1.13	1.09

- a) The signs (+) and (-) denote the southern and the northern side from the core center respectively.
b) $N_0(0)$, $N_0(-10)$ and $N_0(+10)$ mean intensities of induced activities of gold foils at the core center and the positions 10 cm from the core center respectively.
c) Relative intensity.

による結果を示し同時に比較のためマイカ端窓型 G-M 計数管による測定値をも併記した。また TABLE-1 (a), (b) のそれぞれ下の 2 欄は炉心中央とその両側 10 cm の点についての測定値の相対比をそれぞれの方法に関して示したものである。この相対比において同時計数法とマイカ端窓型 G-M 計数管による測定値の比はきわめて良い一致を示していることがわかる。

また TABLE-1 に示された結果からこれら 2 つの測定法による絶対測定値は各々の実験誤差の範囲において一致したと考えることができる。ただし 4 π -フロー・カウンタによる方は誘導放射能の箔自身による自己吸収の見積りに精度の不確実性が存在するので、その結果に対する信頼度は多少低いと考えなければならぬ。

IV. 結果および考察

以上のようにして金箔の誘導放射能の強さの絶対値 (Disintegration per second; d. p. s.) が求められたが、さらにこの結果と炉心内におけるカドミウム比の測定の結果とから炉心部における熱中性子束を求めることができる*)。

§IV-1 箔の標準化

まづ炉心部において金箔が ϕ_{th} (n/cm²/sec) なる等方的分布の熱中性子束によって照射を受けたと考えると、このとき熱中性子の照射によって金箔に誘導される飽和放射能 $A_{s, th}$ (d. p. s.) はそれ自身の内部で吸収されてしまうものも含めて

$$A_{s, th} = N_G \cdot \sigma_{act, G} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \phi_{th} \quad (IV-1)$$

*) これらの詳しい計算および出力校正に適用する場合の取り扱いについては原研・研究報告 JAERI 1003-E「JRR-1 の特性試験」参照。

で与えられわれわれの箔については $0.0102 \phi_{th}$ である。ここに

N_G : 金箔内の ^{197}Au の全原子数

$\sigma_{act, a}$: ^{197}Au の熱中性子による平均活性化断面積

また f_1 は箔が中性子の照射を受ける際、それ自身が中性子の吸い込みとなるために生ずる中性子束の歪みを表わす係数であり、BOTHE¹³⁾ にしたがって計算の結果われわれの場合一応箔を等面積・等厚の円板でおきかえて考え、熱中性子に対して 0.998 を得ている。また f_2 は箔の自己遮蔽についての補正係数でこれも BOTHE¹³⁾ にしたがって中性子束を等方的と考えた場合近似的に 0.971 と計算された。

§IV-2 結果

こうして (IV-1) 式により $A_{s, th}$ から ϕ_{th} が求まるわけであるが炉心内では共鳴中性子束が熱中性子束と共存するので、このために生ずる誘導放射能を全放射能より差し引いて $A_{s, th}$ を分離しなければならない。 A_B をカドミウム被覆のない金箔の飽和放射能とし、 A_{C_d} をカドミウムで被覆した場合の金箔のそれ、 R_{C_d} をカドミウム比、すなわち A_B/A_{C_d} とするとカドミウム比の低い炉心内での測定については

$$A_{th} = A_B - A_{C_d} = (1 - 1/R_{C_d}) A_B \quad (\text{IV-2})$$

と表わすことができる。

カドミウム比は既述の方法で測定されているから §III-4 に述べた測定結果に基いて熱中性子束の絶対値が計算できる。計算の結果は以下に示す通りである。

出力計の目盛	$25 \times 10^{-9} \text{A}$ レベル	$25 \times 10^{-8} \text{A}$ レベル
A_B	2060 d. p. s.	2108 d. p. s.
$A_{s, B}$	2.312×10^5 d. p. s.	2.355×10^6 d. p. s.
R_{C_d}	2.51	2.53
$A_{s, th}$	1.39×10^5 d. p. s.	1.42×10^6 d. p. s.
ϕ_{th}	$1.36 \times 10^7 \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$	$1.40 \times 10^8 \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$

ここに $A_{s, B}$ はカドミウム被覆のない金箔の飽和放射能、 $A_{s, th}$ は熱中性子による飽和放射能、 ϕ_{th} は炉心中央における熱中性子束の値を示し、他は上述の記号にしたがっている。なおこれらの結果から各測定時

における出力レベルの較正值を計算した結果それぞれ 0.59 W および 5.9 W となり、高出力時に行った熱量測定法による結果を外挿して得られる値と良い一致を示した。これから換算すると 50 kW の最高出力時における最大熱中性子束は炉心中央で $1.2 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{sec}$ となる*。

§IV-3 誤差の検討

箔の放射能の測定については上述のように同時計数法、 4π -フロー・カウンターとも測定上の実験誤差は 4% を超えないと考えられる。そのほか飽和放射能に換算する際の照射時間の誤差として、短時間照射の場合には 2% 以下の程度見積る必要がある。またカドミウム比によって共鳴中性子束による放射能を分離する過程にも誤差は 2% 位はあると考えるべきである。一方この箔の標準化計算についての誤差は 2% 以下と考えることができる。さらに核反応断面積の値に含まれる誤差が 2%~5% 位はあるものと考えられる。これら全部を考慮に入れると求められた熱中性子束の値に対する誤差は約 6% 程度と考えられる。

§IV-4 むすび

すでに述べたごとくこの実験は出力較正その他の JRR-1 の特性試験の一環として行われたものであるが、問題の性質上それらの報告とは一応別個の形で取りまとめることにした。一方その特殊性にもかかわらず時間的な制約もあって実験精度の吟味、それに基づく装置および試料の改良等がかなり犠牲にされた。したがってここに述べた装置および得られた結果は絶対測定としては必ずしも十分満足といえないかも知れないし、実際多少の改良を施すことによりさらに実験精度を上げることができた点も 2, 3 あると考えている。しかし上述のごとく結果は比較的良好で所期の目的を達成するには十分であったと考えられる。

なおこの実験を遂行するにあたっては JRR-1 管理室の方々の御協力に負う所が多であった。ここに記して感謝の意を表するものである。

文 献

- 1) J. W. SHORTALL *et al* : LRL-149 (1954)
- 2) L. D. P. KING *et al* : AECD-3054 (1944)
- 3) K-E. LARSSON : *Ark. Fys.* 7 323 (1953)
- 4) D. SCHIFF and F. R. METZGER : *Phys. Rev.* 90 849 (1953)
- 5) G. BACKSTRÖM and O. BERGMAN : *Ark. Fys.* 13 393 (1958)
- 6) P. HUBERT : *Comptes Rendus Akad. Sci. Paris*

* 原研・研究報告 JAERI 1003-E 「JRR-1 の特性試験」参照。

- 232 2201 (1951)
- 7) L. SIMONS : *Phys. Rev.* **86** 570 (1952)
- 8) H. FRAUNFELDER : *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **2** 156 (1953)
- 9) F. R. METZGER and W. B. TODD : *Phys. Rev.* **95** 853 (1954)
- 10) A. C. G. MITCHELL in " β -and γ -ray Spectroscopy" edited by KAI SIEGBAHN, Interscience Publishers Inc. New York (1955) p. 216
- 11) C. VON PLANTS und P. HUBER : *Helv. Phys. Act.* **29** 375 (1956)
- 12) M. A. GREEFIELD *et al* : *Nucleonics* **15** (3) 57 (1957)
- 13) W. BOTHE : *Zeits. f. Phys.* **120** 437 (1943)
- 14) G. K. SCHWEITZER and B. R. STEIN : *Nucleonics* **7** (3) 65 (1950)
- 15) L. R. ZUMWALT : AECD-567.