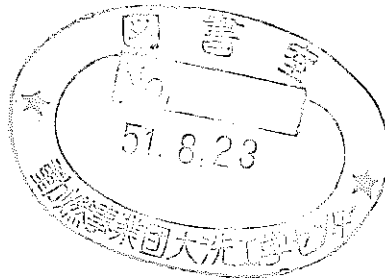


TN241 72-03

区 分 変 更	
変更後資料番号	≡
決裁年月日	平成 13年 7月31日

高速炉異常診断用アナログ型反応度計の特性試験

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	N241 72-03
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	



昭和47年 1月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

高速炉異常診断用アナログ型反応度計の特性試験

要 旨

高速炉の燃料破損・溶融事故の予知系の1つとして、反応度平衡法による異常診断装置が提案されているが、ここでは、反応度平衡装置の主要部である原子炉反応度算出部としてアナログ型反応度計を試作し、その特性試験を実施した。

ここで、アナログ型反応度計を採用しようとした理由は、異常診断は同一計算のくり返してあるので、計算機の利用率を上げるためにできるだけハードウェアに負担させるのが得策であり、とくに原子炉反応度の算出部が最も複雑になると考えたからである。

反応度平衡装置は、反応度フィードバックの非線形特性や論理判断の必要なことからデジタル計算機の使用が便利である。

特性試験は

(1) 単体試験……直線性、応答特性、ドリフト

(2) FCAでの試験……高速炉体系での反応度測定

をおこない、直線性 ($< \pm 2\% \text{ F. S.}$)、応答特性 ($63.2\% \text{ 立上り} < 0.4 \text{ ms}$ 、遮断周波数 $> 400 \text{ Hz}$)、ドリフト ($< \pm 1\% \text{ F. S.} / 8 \text{ Hr}$)、反応度測定精度 ($< \pm 4\% \text{ F. S.}$) の結果を得た。

また、本装置の取扱いは簡単であり、動作も安定であるので異常診断装置への利用の目通しを得た。

昭和47年1月

動力炉、核燃料開発事業団

高速増殖炉開発本部

星	薦	雄	
角	田	十三	男 (*1)
松	官	正	幸
飯	島		勉 (*2)
望	月	恵	一

(*1) 日本原子力事業(株)

(*2) 日本原子力研究所 原子炉工学部 高速炉物理研究室

Feasibility Tests of an Analog-type Reactivity Meter for
FBR Anomaly Detection Analyzer

Abstracts

Anomaly Detection Analyzer (ADA) of reactor core by means of the reactivity balance calculation is a powerful means of the early warning systems for preventing the fuel failure and propagation in sodium-cooled fast reactor.

The calculation of the reactivity balances, which include the control rod reactivity, the temperature feedback reactivity, burn up reactivity and the dynamic reactivity of the reactor, is usually conducted with a digital computer system because of the necessity of logical interpretation.

However, an analog type reactivity meter was developed and tested for use of the ADA system in the Japan Experimental Fast Reactor "JOYO".

The reason of adoption of the analog type reactivity meter is that the dynamic reactivity is easily, directly obtained from the change of neutron flux without interruption of computer time sharing and also it saves the computing time of the overall system.

Feasibility tests were carried out both out-of-pile and at the Fast Critical Facility (FCA) in JAERI and the following results were obtained,

- a) linearity : less than $\pm 2\%$ of full scale
- b) 63.2% response time : less than 0.4 msec ($f_c \approx 400\text{Hz}$)
- c) drift : less than $\pm 1\%$ of full scale/8Hrs.
- d) accuracy : less than $\pm 4\%$ of full scale

January 1972

Power Reactor & Nuclear Fuel
Development Corporation

Fast Breeder Reactor Development Project

Tsuta o H O S H I

Tomio TSUNODA (*1)

Masayuki MATSUMIYA

Tsutomu I I J I M A (*2)

Keiichi MOCHIZUKI

(* 1) Nippon Atomic Industry Group Ltd.

(* 2) Japan Atomic Energy Research Institute

目 次

要 旨

1. ま え が き	1
2. アナログ型反応度計の概要	3
2.1 原 理	3
2.2 構 成	3
3. 単体の特性試験	9
3.1 直 線 性	9
3.2 周波数特性	9
3.2.1 ステップ応答	9
3.2.2 周波数特性	9
3.3 ドリフト特性	10
4. F C A での特性試験	17
4.1 F C A の概要および炉定数、核計装	17
4.2 試験方法	21
4.2.1 試験の概要	21
4.2.2 試験手順、条件および計測系	21
4.3 試験結果および考察	23
4.3.1 ノイズレベルの検討	23
4.3.2 反応度の測定結果	23
4.3.3 中性子源の影響の検討	23
4.3.4 D. N. -I と D. N. -II の比較	25
5. あ と が き	35
謝 辞	35
参 考 文 献	36
附 録 I	36
附 録 II	36

1. ま え が き

高速炉のナトリウム沸騰や燃料破損・溶融などの異常状態を早期に検知する異常診断装置として使用することを目的に原子炉反応度計を試作し、FCA（高速臨界実験施設）にて特性試験を実施した。

異常診断装置（Anomaly Detection Analyzer）は、Fig. 1 に示すように原子炉の反応度と制御棒によって与えられた反応度や、燃料・冷却材温度などによる反応度フィードバックの平衡を求めるバランス回路全体で構成され、平衡がくずれた場合に警報を発するものである。

一般に、バランス回路は、制御棒や温度係数などは非線形特性を持ち、論理判断も必要なことから、デジタル計算機を用いるのが便利であるが、ここで原子炉反応度の算出部にアナログ型の反応度計を用いようとした理由は下記によるものである。

- (i) 異常診断のためには、診断の周期は短く（数秒以内）、運転中は常時おこなう必要があり、計算機をデータロガー、性能計算などにも利用する場合、診断のための計算専有時間をできるだけ短くするのが好ましく（同時に、計算機の容量—性能—を下げられる）、ハードウェアでできるところはそれに分担させる。
- (ii) すなわち、制御棒や温度の変化速度にくらべて、原子炉反応度と中性子束間の時定数は非常に短い（ $\ell \approx 2 \times 10^{-7}$ ， $\lambda \approx 0.26$ （早いもので））のでアナログ型が好ましく、同時に連続監視ができる。
- (iii) 中性子束→反応度の計算は、単純なくり返し計算であるので、ハードウェアが好ましい。

本報告は、将来高速実験炉「常陽」などで使用する前に、反応度計本体の単体特性と、実際の高速炉体系（FCA）での性能確認試験の結果についてまとめたものである。

(入力信号)

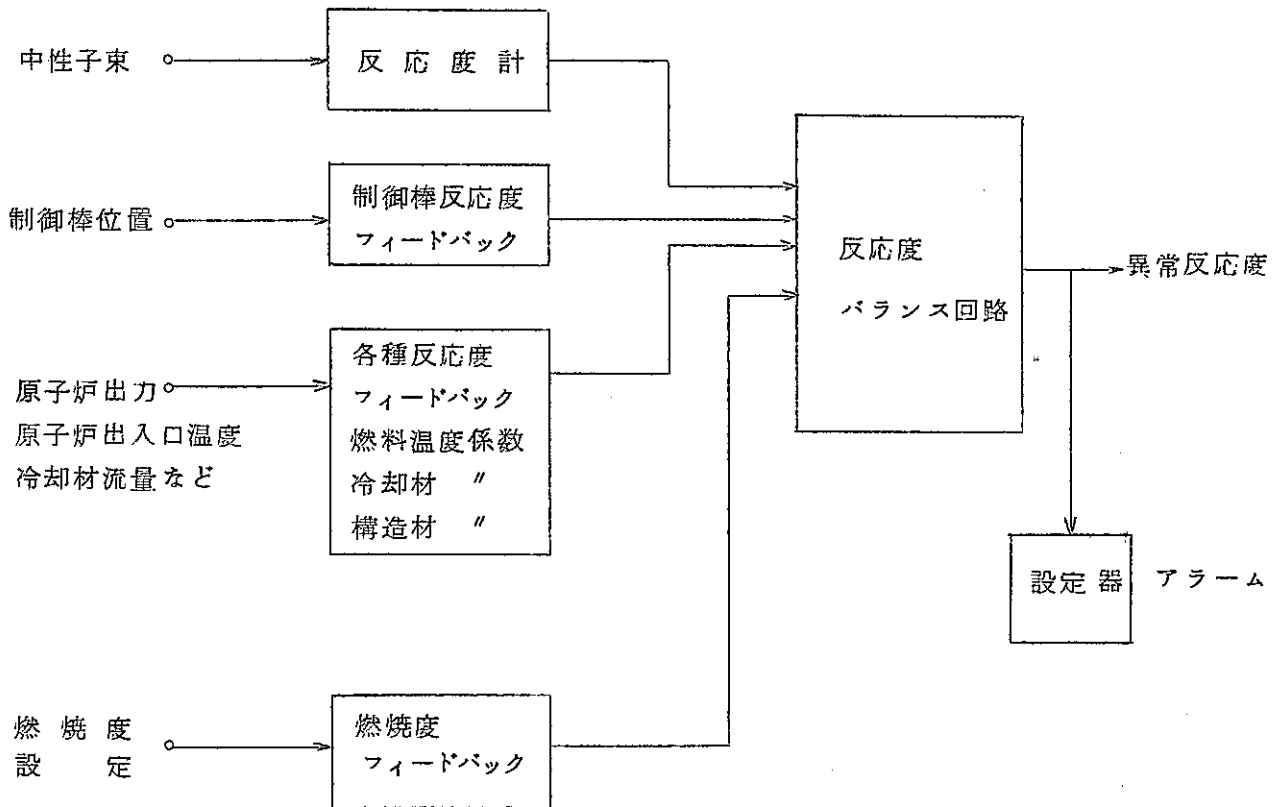


Fig. 1 反応度バランス法による Anomaly Detection Analyzer
ブロック図

2. アナログ型反応度計の概要

2.1 原理

原子炉の動特性方程式で

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\gamma \beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

n : 中性子束

ρ : 反応度

S : 中性子源の強さ

C_i, λ_i : 第 i 組の遅発中性子先行核の濃度と崩壊定数

β : 無限媒質の場合の遅発中性子割合

$$r = \beta_{\text{eff}} / \beta$$

ρ と n の関係が与えられるので、この基本式をもとに

n の変化から ρ を逆算するものである。

回路構成の原理を Fig. 2 に示す。遅発中性子群回路と割算回路の間に増巾器 OP-2 を入れたのは、反応度のフルスケール電圧 (ゲイン) を調整するためである。

2.2 構成

遅発中性子群 (D. N.) の定数は、一応高速実験炉「常陽」の設計値を用いた固定型のもので、定数が変わった場合でも使用できるようにするための定数可変型のもので2種類作成した。これは、D. N. のユニットを差し換えることによって簡単に選択できる。

1) 可変型 (D. N. -I) : $U^{235}, U^{238}, Pu^{239}$ の割合によって (各々6群)

定数を設定

2) 固定型 (D. N. -II) : 「常陽」の6群の定数を使用。

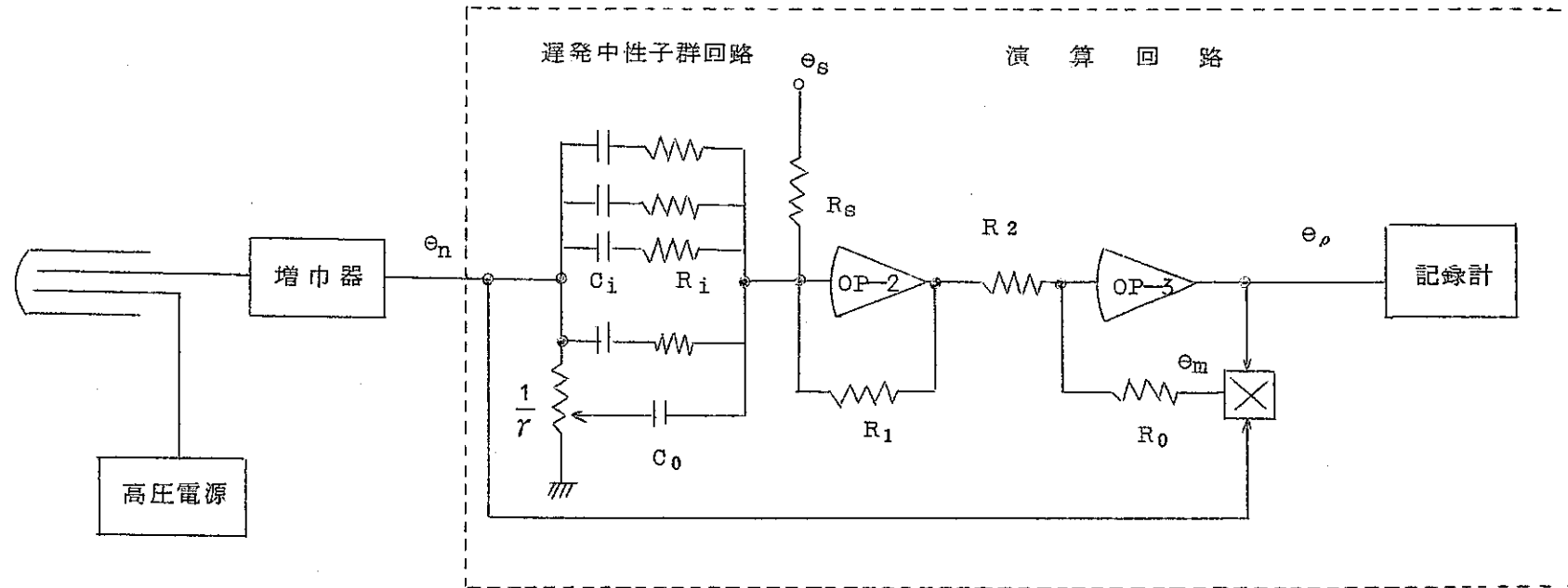
D. N. -I, D. N. -II 部の回路を Fig. 3 および Fig. 4 に、また遅発中性子定数、
ならびに回路定数を Table 1、Table 2 にそれぞれ示す。

なお、本反応度計の主要仕様は次のとおりである。

- (1) 測定レンジ ; $\pm 5 \phi, \pm 10 \phi, \pm 20 \phi, \pm 50 \phi$
(Full Scale) $\pm 1 \$, \pm 2 \$, \pm 5 \$, \pm 10 \$$
- (2) 入出力電圧 ; 入力 $0 \sim -1.0 \text{ V}$
出力 $0 \sim \pm 10 \text{ V}$
- (3) 直線性 (*1) ; Full Scale の $\pm 2\%$ 以下 (但し 入力は $-0.1 \sim -1.0 \text{ V}$ の範囲)
- (4) ドリフト (*2) ; $\pm 1\% / 8 \text{ Hr}$ 以下 ($15 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$)
- (5) 周波数特性 (*3) ; $\sim 400 \text{ Hz}$ (遅発中性子群回路含まず)

(*1) ~ (*3) 単体試験結果による。

反 応 度 計 本 体



— 5 —

$$C_i R_i = \frac{1}{\lambda_i}$$

$$R_i = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R_0}{k_m k_\rho \gamma \beta_i}$$

$$C_0 = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{k_m k_\rho \gamma l}{R_0}$$

$$R_s = \frac{k_s \gamma}{k_n C_0}$$

但し

- $e_n = k_n \cdot n$; 中性子検出系の出力電圧
- $e_s = k_s \cdot S$; 中性子源レベル設定電圧
- $e_\rho = k_\rho \cdot \rho$; 反応度出力電圧
- $e_m = K_m \cdot e_n \cdot e_\rho$; 乗算器出力電圧

Fig. 2 反応度計基本回路

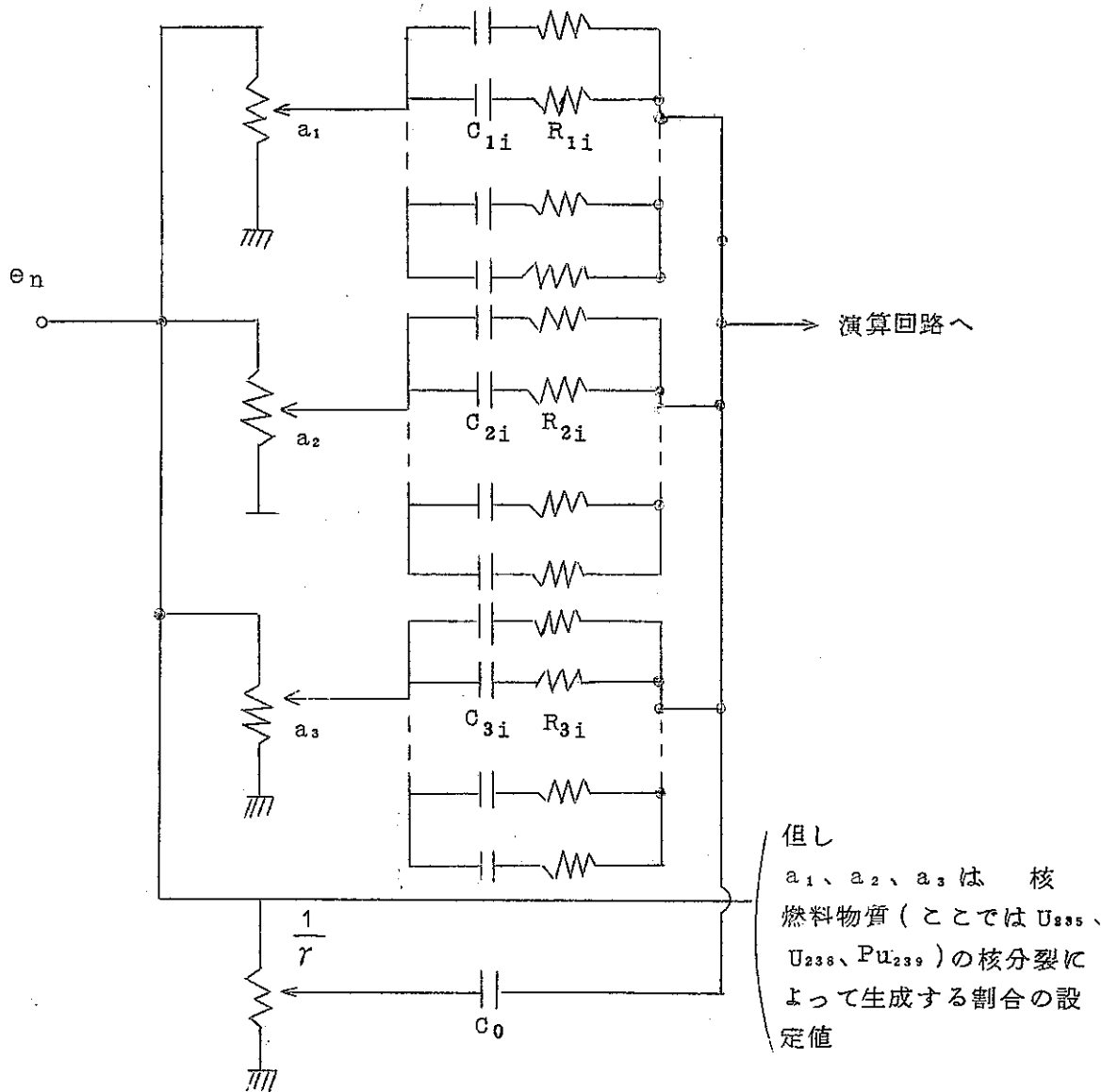


Fig. 3 D. N. -I の基本回路

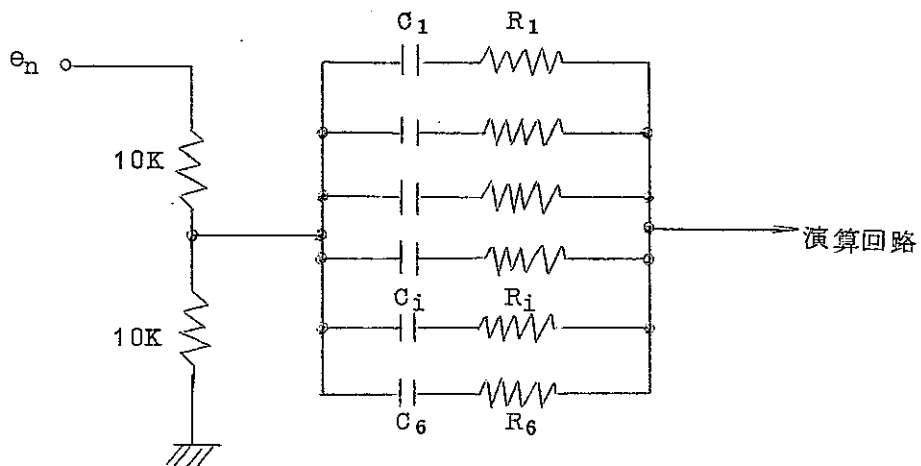


Fig. 4 D. N. -II の基本回路

Group No.	U ₂₃₅		U ₂₃₈		Pu ₂₃₉	
	β_i (%)	λ_i (sec ⁻¹)	β_i (%)	λ_i (sec ⁻¹)	β_i (%)	λ_i (sec ⁻¹)
1	0.0247	0.0127	0.0204	0.0132	0.0080	0.0129
2	0.1385	0.0317	0.2151	0.0321	0.0588	0.0311
3	0.1222	0.115	0.2543	0.139	0.0454	0.134
4	0.2646	0.311	0.6092	0.358	0.0689	0.331
5	0.0832	1.40	0.3533	1.41	0.0216	1.26
6	0.0169	3.87	0.1178	4.02	0.0074	3.21
β	0.6501	—	1.5701	—	0.2101	—

(a) 高速中性子の λ_i 、 β_i (Keepinによる)

Group No.	U ₂₃₅		U ₂₃₈		Pu ₂₃₉	
	C_i (μF)	R_i (M Ω)	C_i (μF)	R_i (M Ω)	C_i (μF)	R_i (M Ω)
1	8.89	20.2	2.32	3.27	3.09	25.1
2	8.73	3.61	10.0	3.10	9.45	3.40
3	2.18	4.09	2.74	2.62	1.69	4.41
4	1.70	1.89	2.55	1.09	1.04	2.90
5	9.119	6.01	0.376	1.89	0.0858	9.25
6	0.00873	29.6	0.0440	5.66	0.0115	27.2

(b) 回路定数

Table 1 D. N. -I の遅発中性子群定数

Group i	β_i (%)	λ_i (sec ⁻¹)
1	0.015	0.0127
2	0.099	0.0317
3	0.090	0.115
4	0.188	0.311
5	0.072	1.40
6	0.019	3.87

(a) 「常陽」の λ_i , β_i

Group i	C_i (μF)	R_i (M Ω)
1	3.54	22.2
2	9.30	3.39
3	2.35	3.70
4	1.81	1.77
5	0.154	4.68
6	0.0147	17.5

(b) 回路定数

Table 2 D. N. - II の遅発中性子群定数

3. 単体の特性試験

3.1 直線性

直線性として、とくに問題となる演算部（主として掛算器特性）を次の2つの方法で調べた。

- (a) Fig. 5 のように D. N. 回路をはずし、OP-2 の入力に抵抗 R を接続し、 θ_n を 10 V 一定に保ち（OP-1 にて入力を 10 倍にしている）ので θ_2 を変えて θ_p の変化を各レンジで測定する。

Fig. 6, Fig. 7 に測定結果の一例を、また、各レンジでのフルスケールに対する誤差ならびに直線度（勾配）を Table 3 に示す。

これから、 $\pm 2\%$ 以内と考えられる。

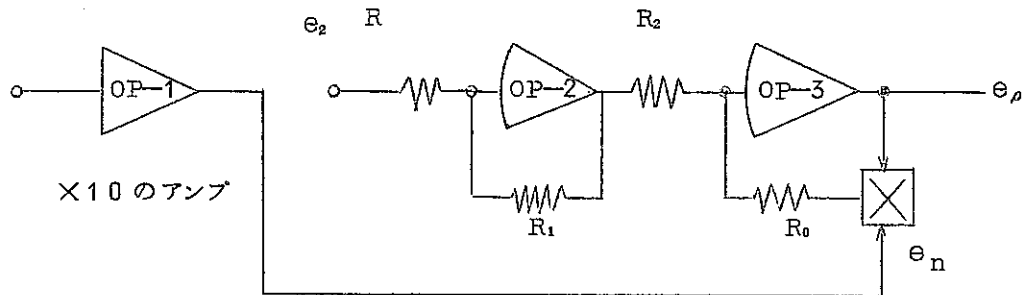


Fig. 5 直線性およびステップ応答測定回路

- (b) とくに割算回路としての特性を調べるために、Fig. 5 において、さらに $\theta_2 = \theta_n$ として θ_n を変え θ_p の変化を見る。測定は 2 \$ レンジでおこなったが、その時の結果を Fig. 8 に示す。この図から除数電圧は 0.2 V（入力換算 0.02 V）でも誤差は 5% 以下であり、割算特性の良いことが確認された。

3.2 周波数特性

3.2.1 ステップ応答

Fig. 5 の回路で、各レンジにおいて θ_2 にステップ電圧を加え、出力 θ_p の立上り時間（63.2% 応答）を調べた。

Table 4 は各レンジでの立上り時間を示す。

3.2.2 周波数応答

ステップ応答の結果から特に立上りの速い 1 \$ レンジと比較的立上りの遅い

20φレンジについて、周波数応答を調べた。測定回路はFig. 9 のようで、遅発中性子群回路はD. N. II を用い、 $\ell = 2 \times 10^{-7}$ sec、 $\beta = 0.00484$ 、 $\gamma = 1$ とした(常陽の値)。

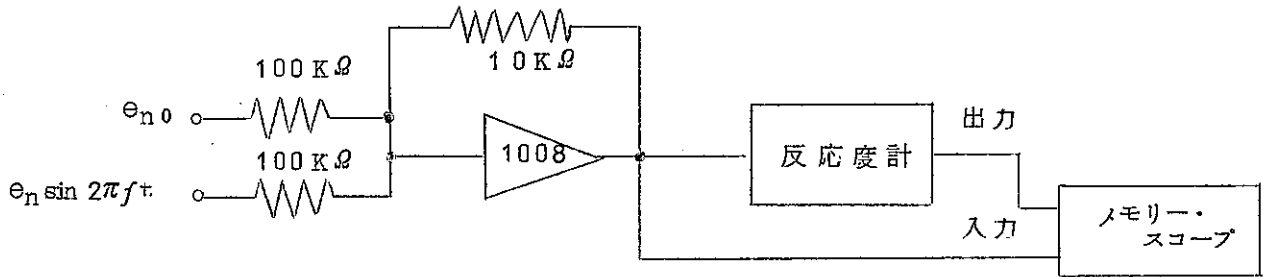


Fig. 9 周波数応答測定回路

実験に際しては、反応度計の線形近似が成立するよう $\theta_{n0} \gg \theta_n$ とした。

Fig. 10 および Fig. 11 に測定結果を示す。

-3 db 下る折点周波数 f_c は 20φレンジで 450 Hz、1φレンジで 3.5 KHz であった。なお、1φレンジにおいて、30 KHz 付近から盛り上がってくるが、これは反応度計の周波数特性が原子炉周波数特性の逆となり、ゲインが上がるためである。

3.3 ドリフト特性

ドリフトは核定数 β 、反応度測定レンジ、入力電圧 θ_n によって変わる。そこで、D. N. I を用いて θ_n を比較的低い値とし、定数は FCA の核定数を参考に設定し、最高感度の $\pm 5\phi$ レンジで、ドリフトを測定した。

$$\begin{cases} \beta = 0.004, & \beta/\beta_{\text{eff}} = 1 \\ \alpha_{u235} = 0.4794, & \alpha_{u238} = 0.1164, & \alpha_{pu239} = 0.3331 \\ e_n = 1.5 \text{ V} \end{cases}$$

この条件で得られた結果は 55 mV/8 Hr (フル スケールの 0.55%) であった。

測定レンジ	誤差(%)	直線度(%) (勾配)
5φ	-1.8	1.0
10φ	-1.5	0.5
20φ	-2.0	<0.5
50φ	-0.5	<0.5

測定レンジ	誤差(%)	直線度(%) (勾配)
1\$	0	<0.5
2\$	-1.2	<0.5
5\$	+1.0	0.5
10\$	+1.0	0

Table 3 演算回路の直線性

測定レンジ	立上り時間
5φ	0.32 m sec
10φ	0.18 m sec
20φ	0.40 m sec
50φ	0.10 m sec

測定レンジ	立上り時間
1\$	0.042 m sec
2\$	0.29 m sec
5\$	0.115 m sec
10\$	0.058 m sec

(63.2%)

Table 4 演算回路の立上り時間

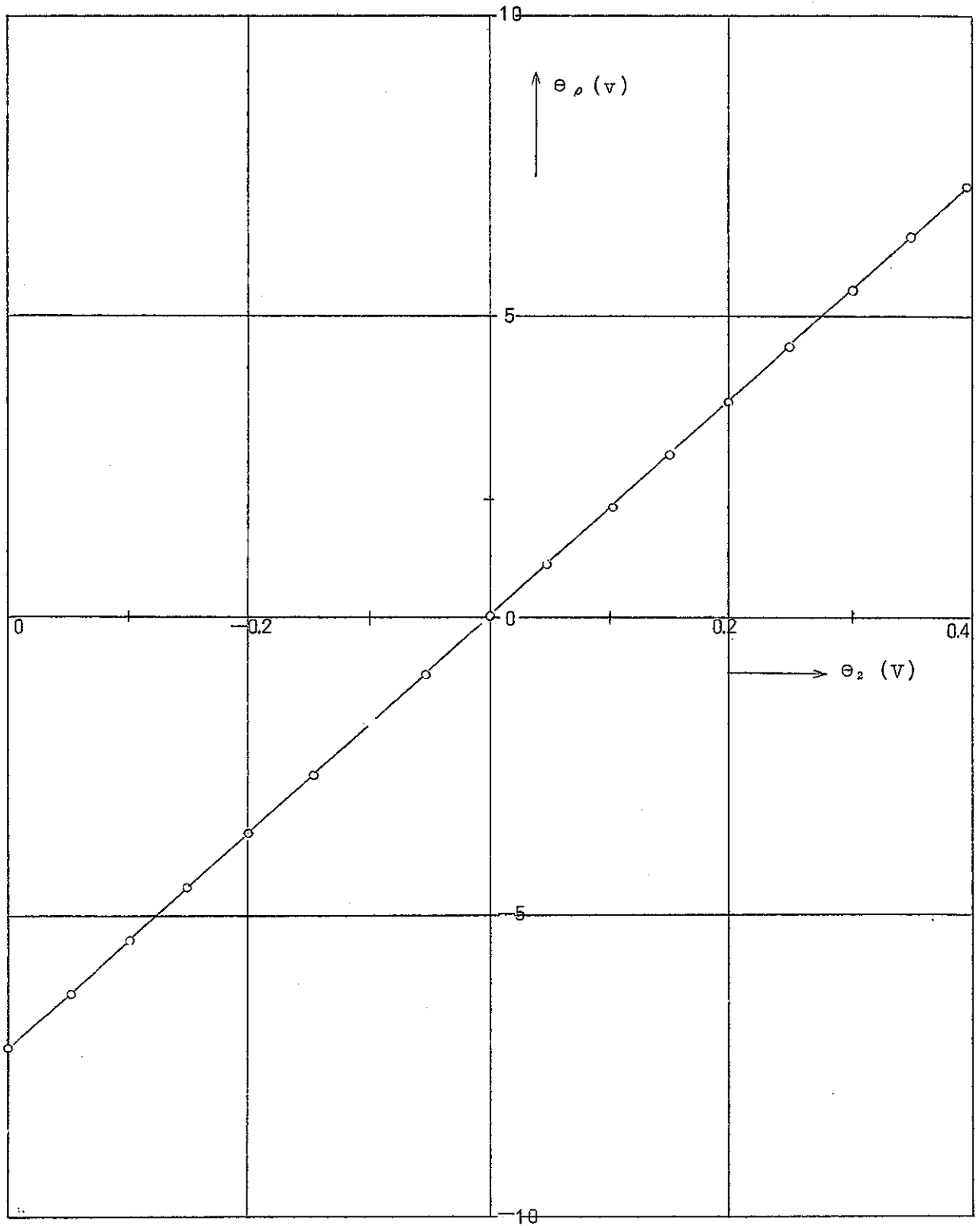


Fig. 6 掛算特性(5φレンジ), $e_n = 10V$

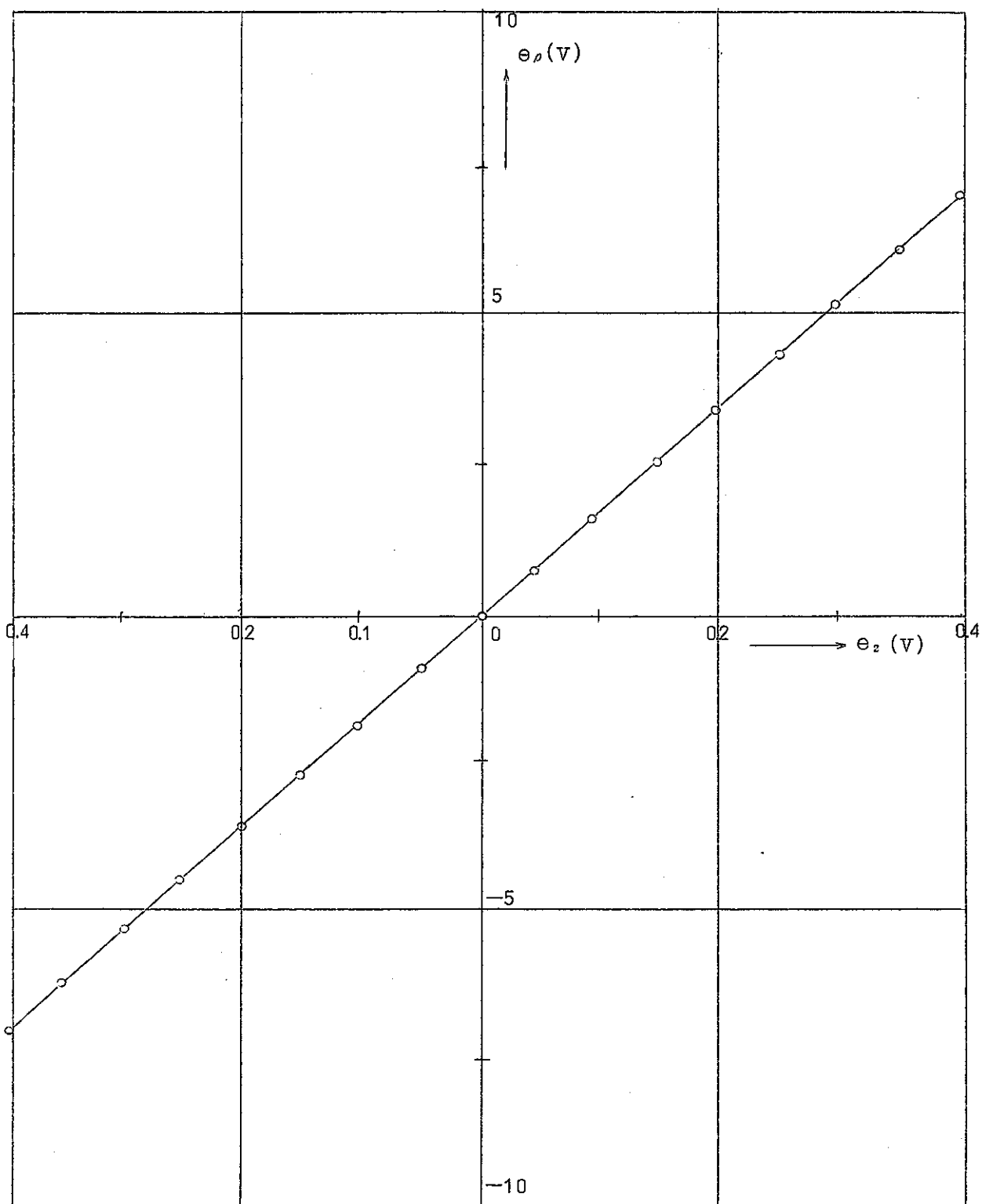


Fig. 7 掛算特性 (1\$レンジ), $e_n = 10V$

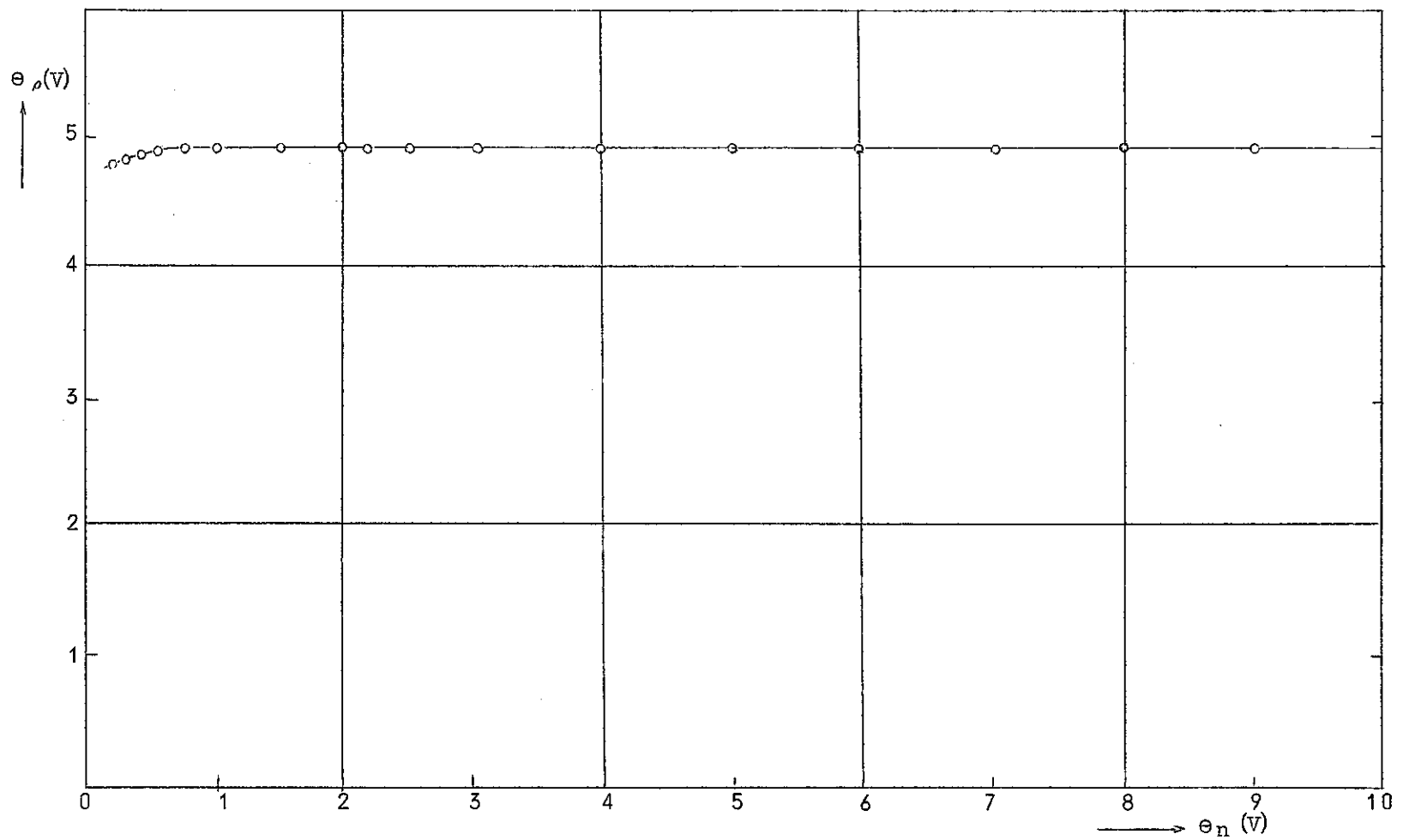


Fig. 8 割算特性 (2 \$ レンジ)

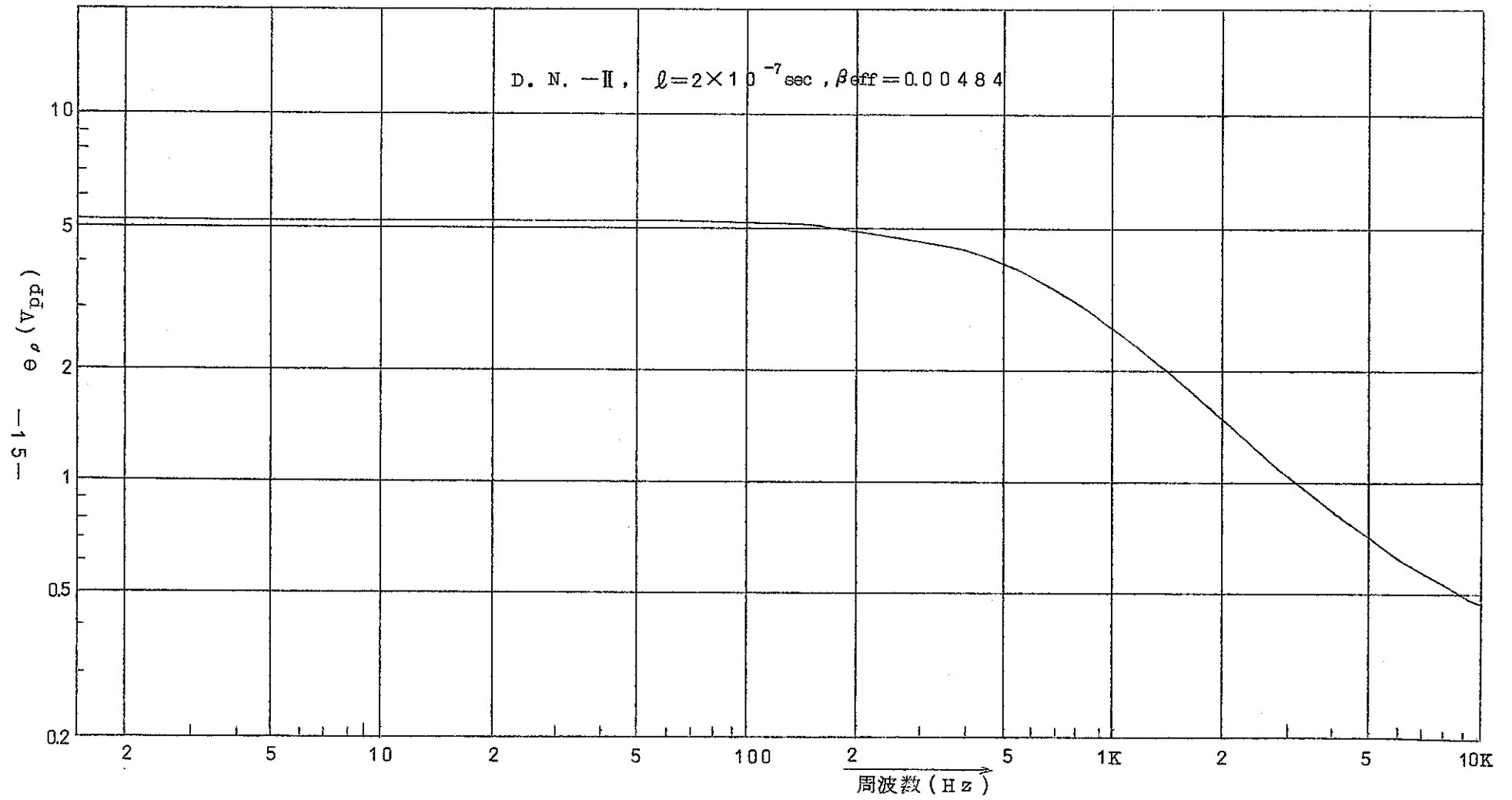


Fig. 10 周波数特性 (20φレンジ)

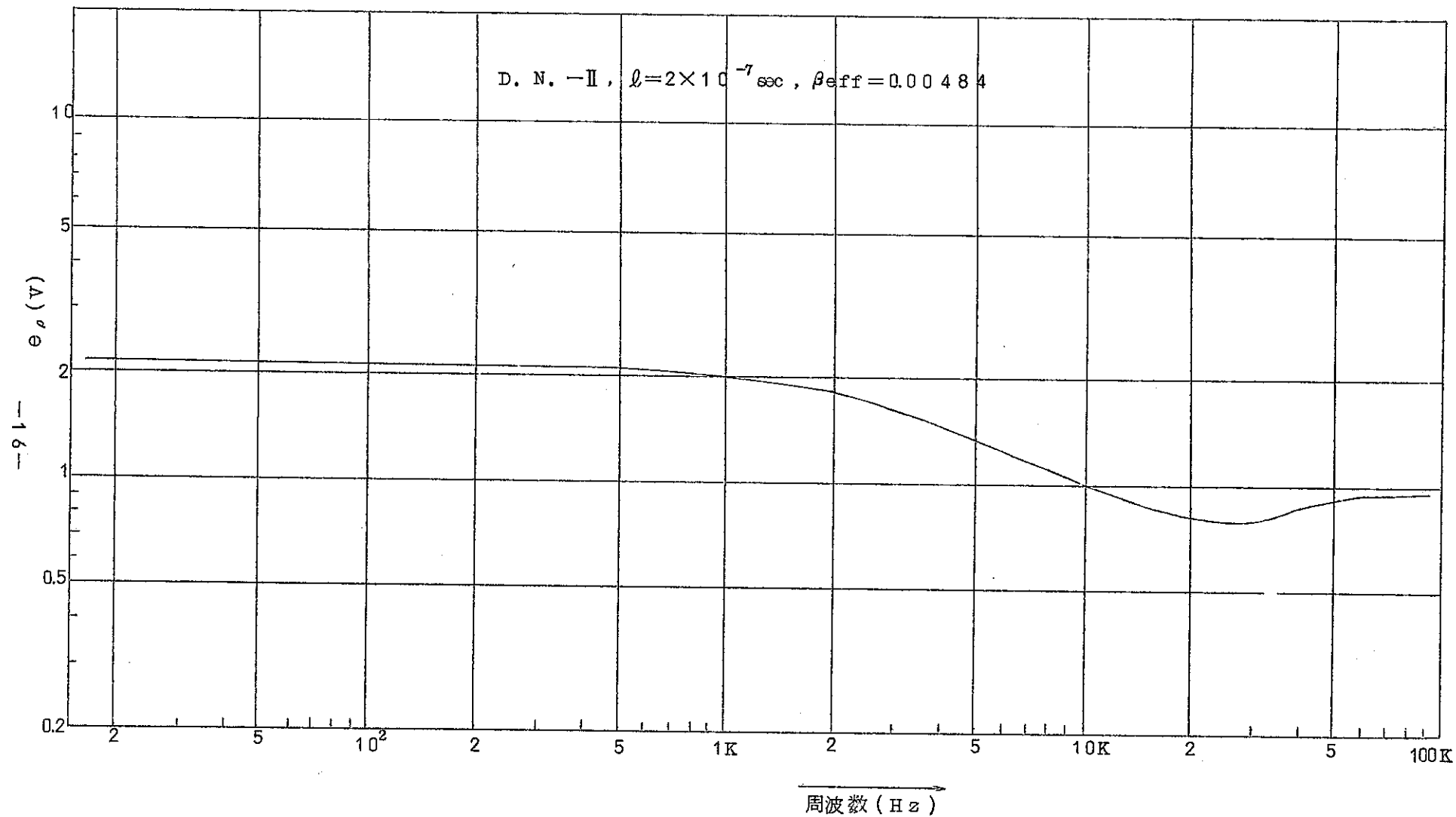


Fig. 11 周波数特性 (1\$レンジ)

4. F C A での特性試験

4.1 F C A の概要および炉定数、核計装

F C A (Fast Critical Assembly) は、日本原子力研究所東海研究所に設置されている高速炉臨海実験装置で、この反応度計の試験をおこなった時期は、高速実験炉「常陽」の一連の炉心モックアップ実験の一部である V-3-B 2 炉心のときであった。

以下に F C A の主要な特徴を列記する。

(イ) 原子炉型式 : 水平 2 分割型

(ロ) 公称出力 : 100 Wt

(ハ) 燃料 : 炉心 Pu/EU/Na/Al₂O₃

= 1/3/8/4 (Volume Ratio)

ブランケット① DUO₂/Na=4/4 (")

② DUO₂/Al₂O₃/Al/SUS=4/2/1/1 (")

(ニ) 制御棒 : 燃料除去型 制御棒 2 本、安全棒 6 本

(ホ) 中性子源 : なし

(ヘ) 核計装系 : 起動系 F C 2 チャネル (Reuter Stokes - 10A 型)

線形系 UIC 2 チャネル (Reuter Stokes - 77A 型)

LogN 系 UIC 2 チャネル (同 上)

安全系 UIC 2 チャネル (同 上)

なお、V-3-B 2 炉心の炉心構成図および制御棒ワースを Fig. 12, Fig. 13 に、炉定数を Table 5 に示す。

この実験では、中性子検出系としては、線形系 2 チャネルのうちの 1 ヶ (# 6) を使用した。この線形系の周波数特性 (6.3.2 % ステップ応答) は、以下のとおりである。

レ ン ジ	6.3.2% 応答
10 ⁻⁶	1 ms
10 ⁻⁷	5 ms
10 ⁻⁸	7.5 ms

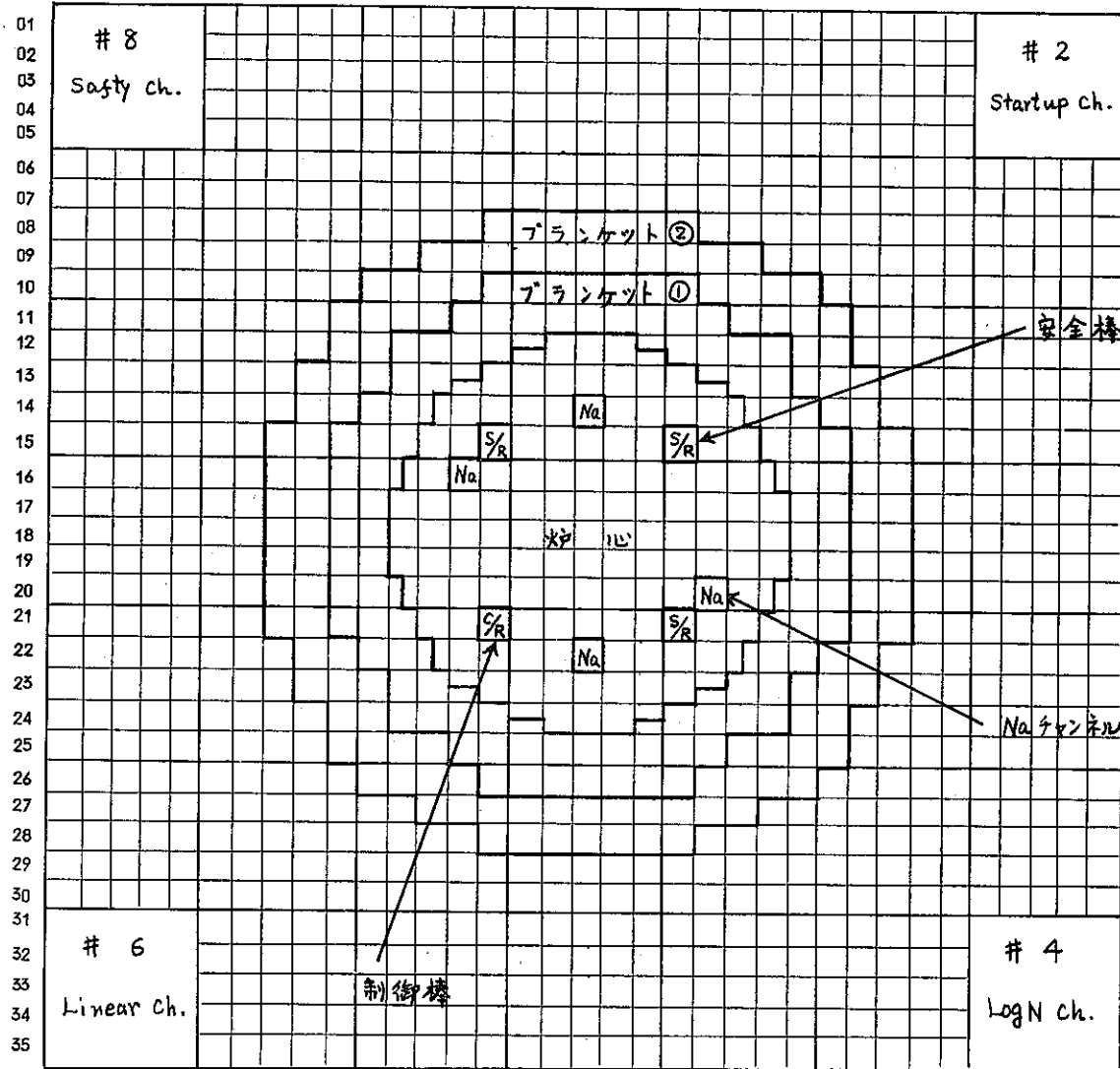
(a) 遅発中性子割合 β_{eff}

$i \backslash x$	Pu239	Pu240	Pu241	U 235	U 238	β_{ieff}
1	$\times 10^{-4}$ 0.259	$\times 10^{-5}$ 0.062	$\times 10^{-5}$ 0.029	$\times 10^{-3}$ 0.113	$\times 10^{-3}$ 0.022	$\times 10^{-3}$ 0.1608
2	2.243	0.668	0.676	0.631	0.227	1.0954
3	1.590	0.455	0.510	0.557	0.268	0.9936
4	2.453	0.884	1.149	1.205	0.642	2.1136
5	0.641	0.334	0.537	0.379	0.373	0.8244
6	0.333	0.067	0.046	0.077	0.124	0.2356
$\beta_{eff}(x)$	$\times 10^{-4}$ 7.519	$\times 10^{-5}$ 2.469	$\times 10^{-5}$ 2.947	$\times 10^{-3}$ 2.962	$\times 10^{-3}$ 1.656	$\times 10^{-3}$ 5.4234

(b) 即発中性子寿命 $\ell = 2.00 \times 10^{-7}$ (sec)

Table 5 FCA V-3-B2 炉心炉定数

35 34 33 32 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 09 08 07 06 05 04 03 02 01 (M)
 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 (F)



V-3-B2 炉心 (12/6/71)

1) 炉心 (volume ratio)
 $Pu/EU/Na/Al_2O_3 = 1/3/8/4$

2) ブランケット① (#)
 $DUO_2/Na = 4/4$

3) ブランケット② (#)
 $DUO_2/Al_2O_3/Al/SUS = 4/2/1/1$

装荷 U-235 量 143.16 kg

Pu-fissile 94.26 kg

Fig. 12 FCA V-3-B2 基準炉心

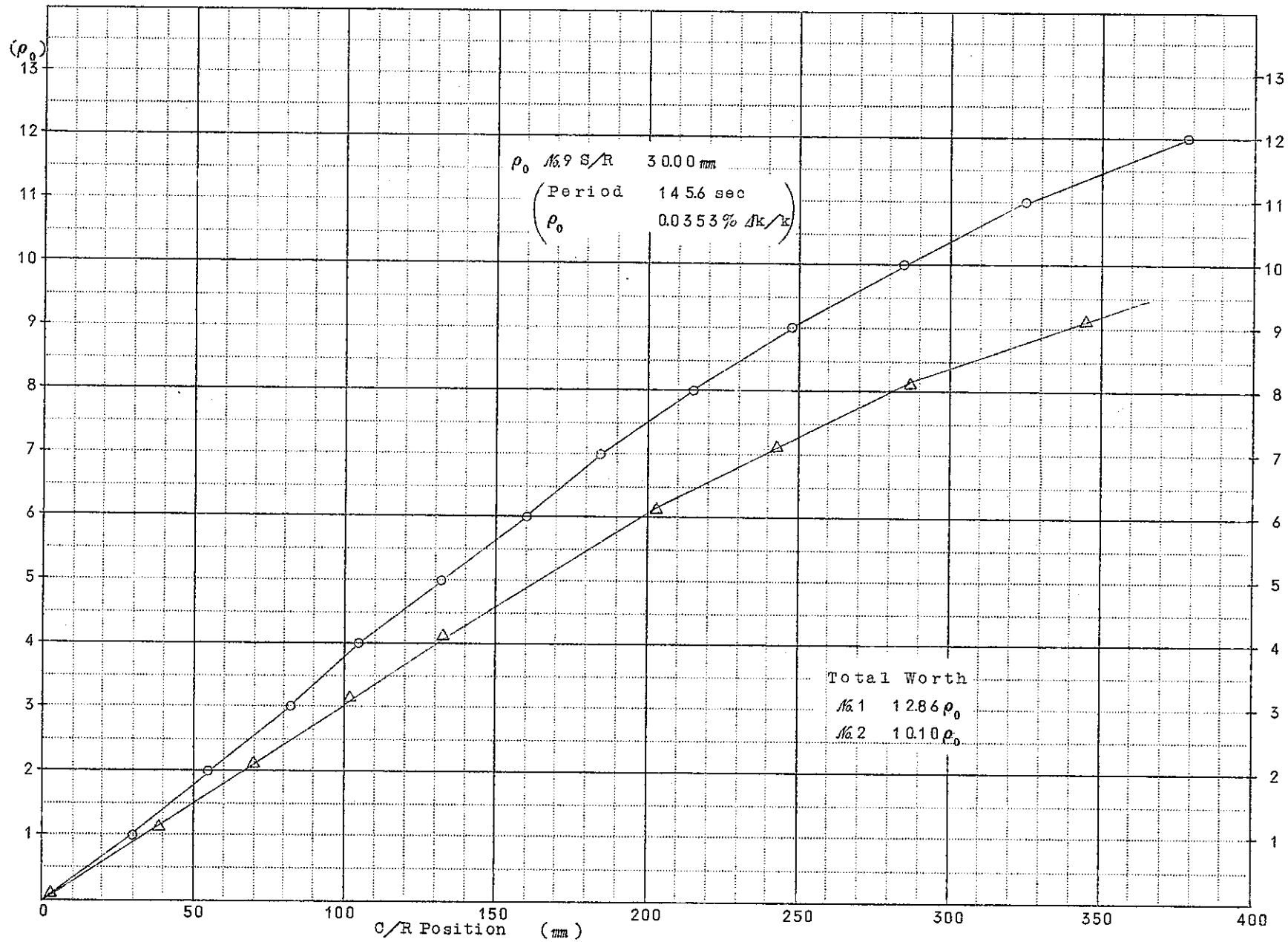


Fig. 13 V-3-B2 炉心制御棒校正 (1971.12.7)

4.2 試験方法

4.2.1 試験の概要

FCAでの試験目的は、試作反応度計を実際の高速炉体系で使用しその性能を確かめることにあり、このために制御棒で既知の反応度量を与えて反応度計の指示と比較した。

FCAでの運転の都合上、FCAでの試験時間をできるだけ短くするために、各種反応度投入に対する中性子束の応答をとりあえずデータレコーダに記録し、解析は後日それを再生しておこなった。

FCAでの測定試験と後日の詳細解析の概要は次のとおりである。

FCAでの測定試験（試験月日：昭和46年12月10日）

- 試験項目 (i) ノイズレベルの測定および測定レンジの検討
(ii) 反応度測定
(iii) スクラム試験

測定データの解析

- 解析項目 (i) 反応度測定精度の検討
(ii) 中性子源の効果の検討
(iii) D. N. -I, D. N. -IIの比較検討
(遅発中性子定数の検討)

なお、スクラム試験は、反応度によってスクラム速度を測定できるか否かの検討をするためのものであったので、この反応度計の性能試験報告とは別に報告する。

4.2.2 試験手順、条件および計測系

(1) ノイズレベルの測定

反応度測定試験開始前に各レンジのノイズレベルの測定をおこない、最適測定レンジを決める。

(2) 反応度測定試験

FCAの制御棒1本 ($M1 C/R$) を引抜き、または、挿入し、 $\pm 2\phi$ 、 $\pm 5\phi$ 、 $\pm 15\phi$ (目標値) の反応度変化量を与え、中性子束変化量制御棒位置を記録し、反応度計の指示値を読む。

なお、試験前および後の原子炉出力レベル、制御棒位置などの試験条件は、測定結果と同一の表 Table 6 に示す。また、試験時の計測系を Fig. 14 に示す。

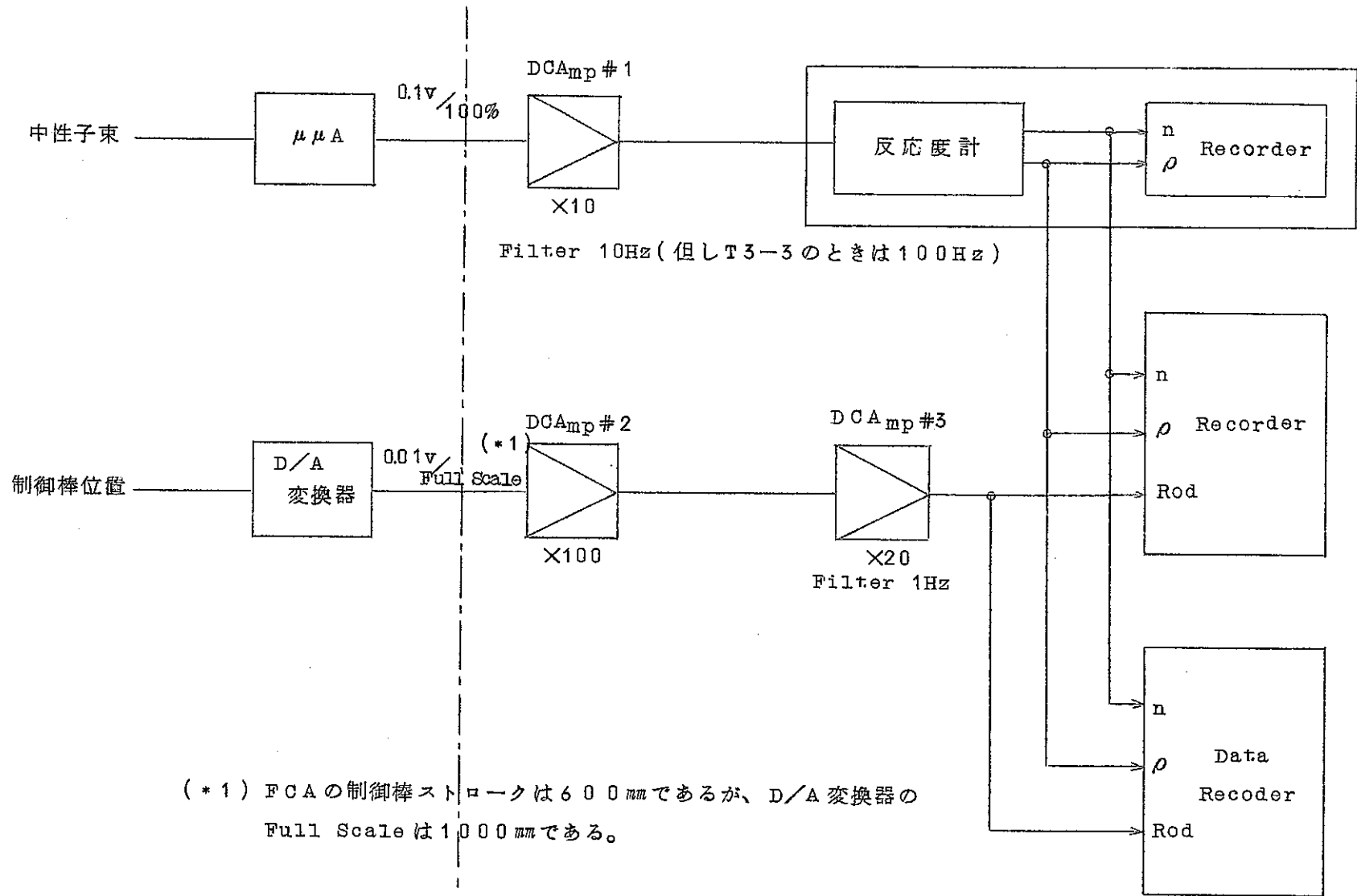


Fig. 14 反応度測定試験計測系

4.3 実験結果および考察

4.3.1 ノイズレベルの検討

原子炉出力レベル 5 W ($0.5 \times 10^{-7}\text{ A}$) で、増巾器(# 1) の折点周波数 (Low Pass Filter) 特性を 10 Hz 、 100 Hz とし各レンジでノイズレベルを測定し、その結果を Fig. 15 に示す。

この結果から $2 \sim 3\ \phi$ の反応度測定には、 10 Hz 程度の L. P. Filter が必要と判断され、一応今回の試験での反応度変化率は遅い (制御棒速度 $1\text{ mm}/\text{min} \approx 0.24\ \phi/\text{sec}$) から、増巾器の周波数特性 10 Hz と定めた。

4.3.2 反応度の測定結果

中性子源の効果 E_g を 4.3.3 でのべるような方法で設定した場合の反応度計の測定結果を Table 6 に示す。

全般的に制御棒等価反応度から求めた印加反応度と反応度計の指示値とは良く一致しており、その差異は、 4% 以下である。ノイズの影響を受け易い $2\ \phi$ 変化での測定を除外すると 2.7% 以下である。代表的反応度測定の記録を Fig. 16 ~ Fig. 19 に示す。(記録の一覧は Table. 6 DN-1 の項参照)

ピリオド測定から求めた FCA への印加反応度と、反応度計の指示値との差異は、制御棒等価反応度から求めた反応度との差異より大きい。

この原因は、原子炉出力が比較的低いので、また中性子源の影響があるためである。

なお、正の反応度を与えたとき、Fig. 19 に示されるように時間とともに反応度の指示が増える現象が認められる(附録の熱中性子炉の実験で λ 、 β の定数を熱中性子としたときは高速炉定数を用いたので当然ではあるがトランジェントのすぐ後にピークが出た)。これは、 λ の定数に問題があると考えられ、今後検討を要するところである。

しかし、反応度バランス計算をおこなわせる今回の目的の場合、その誤差は $6 \sim 7\%$ 以下(トランジェント直後と整定後)であるので、使用上のさしつかえはないと言える。

4.3.3 中性子源の影響の検討

(1) 中性子源の大きさ (E_g) の設定法の検討

Fig. 16, Fig. 17 および Fig. 18 (2/1) (2/2) の (a) のグラフ、とくに Fig. 18 ($-15\ \phi$ 入力) のグラフに顕著に現われているように反応度計の中性子源の項 $E_g = 0$ とすると反応度投入後、出力レベルが下がるにつれて、反応度の指示が $0\ \phi$ に近づいてくる傾向が出る。正の反応度投入の場合は影響が少ない。

これは、原子炉レベルが下がるにつれて中性子源の大きさが無視できなくなるため、正確な反応度測定のためには、適切な β_0 の値を反応度計に設定する必要があり、これの設定の方法は次のようにした。

すなわち、FCAの各出力レベルでの臨界時($\frac{dn}{dt} = 0$ となるところ)の制御棒位置から、未臨界相当反応度を求め、これから β_0 の概略値を推定し設定する。次に、この状態で反応度の測定を試み、もし、まだ反応度の変化が大きければ β_0 の値を若干変え、これをくり返し、反応度が一定となる β_0 の値を定める。このようにして得られた応答の例を上述Fig. 16～Fig. 18のグラフの(b)に示す。

FCAの各出力レベルでの今回の炉心の臨界時の制御棒位置の例は次のとおりである。

出力レベル	161 C/R 位置	相当反応度
(A)	(mm)	(β)
0.5×10^{-8}	160.22	39.2
0.5×10^{-7}	102.58	24.8
0.5×10^{-6}	96.34	23.1

(2) 出力レベルと未臨界度の実測

(1)で設定した β_0 の値のとき、反応度計による未臨界度の測定例をFig. 20に示す。

各出力での未臨界度は次のとおりである。

出力レベル	未臨界度 (反応度計による測定値)
(A)	(β)
0.8×10^{-7}	≈ 4
0.2×10^{-6}	≈ 1
0.8×10^{-6}	≈ 0.2

制御棒位置より求めた未臨界度の比較をFig. 21に示すが、反応度計による測定値は非常に良く一致することがわかる。

4.3.4 D. N. -I と D. N. -II との比較

遅発中性子群定数を「常陽」用に固定した D. N. -II と任意に設定する D. N. -I について、とくに D. N. -I を F C A の定数に設定して双方比較した。

まず、D. N. -I の定数の設定であるが、Fig. 3 に示されるように、U235, U238, Pu239 についての遅発中性子の生成割合 a_1, a_2, a_3 を求め設定する必要がある、この値は次のようにして決める。

各核種に対する $\beta(\chi)$ は、Table 1(a) によって与えられ、一方 F C A の $\beta_{eff}(\chi)$ は Table 5 (a) で与えられるので、核種毎の生成割合 $a(\chi)$ は、次の式で求まる。

$$a(\chi) = \frac{\beta_{eff}(\chi)}{\beta(\chi)}$$

(但し、 χ は U235, U238, Pu239 の 3 核種)

この関係式から求めた $a_1 \sim a_3$ の値は以下の通りである。

	$\beta(\chi)^{(*1)}$	$\beta_{eff}(\chi)^{(*2)}$	$a(\chi)$
a_1 (U235)	0.6501×10^{-2}	0.2962×10^{-2}	0.456
a_2 (U238)	1.5701	0.1656	0.110
a_3 (Pu239)	0.2101	0.0752	0.358

なお、 β_{eff} は、 0.5423×10^{-2} である。

この定数での反応度測定値は Table 6 に示すとうりて、正の反応度で誤差 (+5φ のとき 13%) が大きくなっている。これは D. N. -II が F C A の定数と若干異なるためと考えられる。

(*1) Table 1 より

(*2) Table 5 より

No.	試験項目		試験条件				反応度測定結果				参照グラフ
	試験No.	目標変化 反応度	出力レベル(*1)		制御棒位置		①制御棒より の算出反応度	ペリオドによ る算出反応度	反応度計指示値(*2)		
			前	後	前	後			D. N. -I	D. N. -II	
1	T1-1	+2	$\times 10^{-6}A$ 0.2	$\times 10^{-6}A$ 0.8	mm 56.80	mm 48.61	ϕ +1.83	ϕ +1.85	$\phi(\%)$ +1.90(3.9)	$\phi(\%)$ +1.75(4.4)	なし
2	T1-2	-2	0.8	0.2	55.42	63.18	-1.95	-1.63	-1.90(2.6)	-1.90(2.6)	Fig. 16 (a) DNII, Es = 0 (b) DNI, Es 印加
3	T2-1	+5	0.08	0.8	60.22	40.10	+4.95	+4.57	+5.09(2.4)	+4.3(13.1)	なし
4	T3-2	-5	0.8	0.2	55.78	76.00	-5.15	-4.37	-5.02(2.5)	-5.1(1.0)	Fig. 17 (a) DNII, Es = 0 (b) DNII, Es 印加
5	T3-2	-15	0.8	0.2	24.90	85.52	-14.9	-	-14.5(2.7)	-15.0(0.7)	Fig. 18(1/2) (a) DNII, Es = 0 (b) DNII, Es 印加 Fig. 18(2/2) (a) DNI, Es = 0 (b) DNI, Es 印加
6	T3-3	+15	0.08	0.8	60.00	0.00	+14.0	+19.7	+13.7(2.1)	+13.0(7.1)	Fig. 19 (a) DNII, Es = 0 (b) DNII, Es 印加 (c) DNI, Es 印加

(*1) $0.1 \times 10^{-6} A \approx 1 W$

(*2) () 内は、①との誤差

Table 6 反応度測定結果

100HzL. P. Filter

10HzL. P. Filter

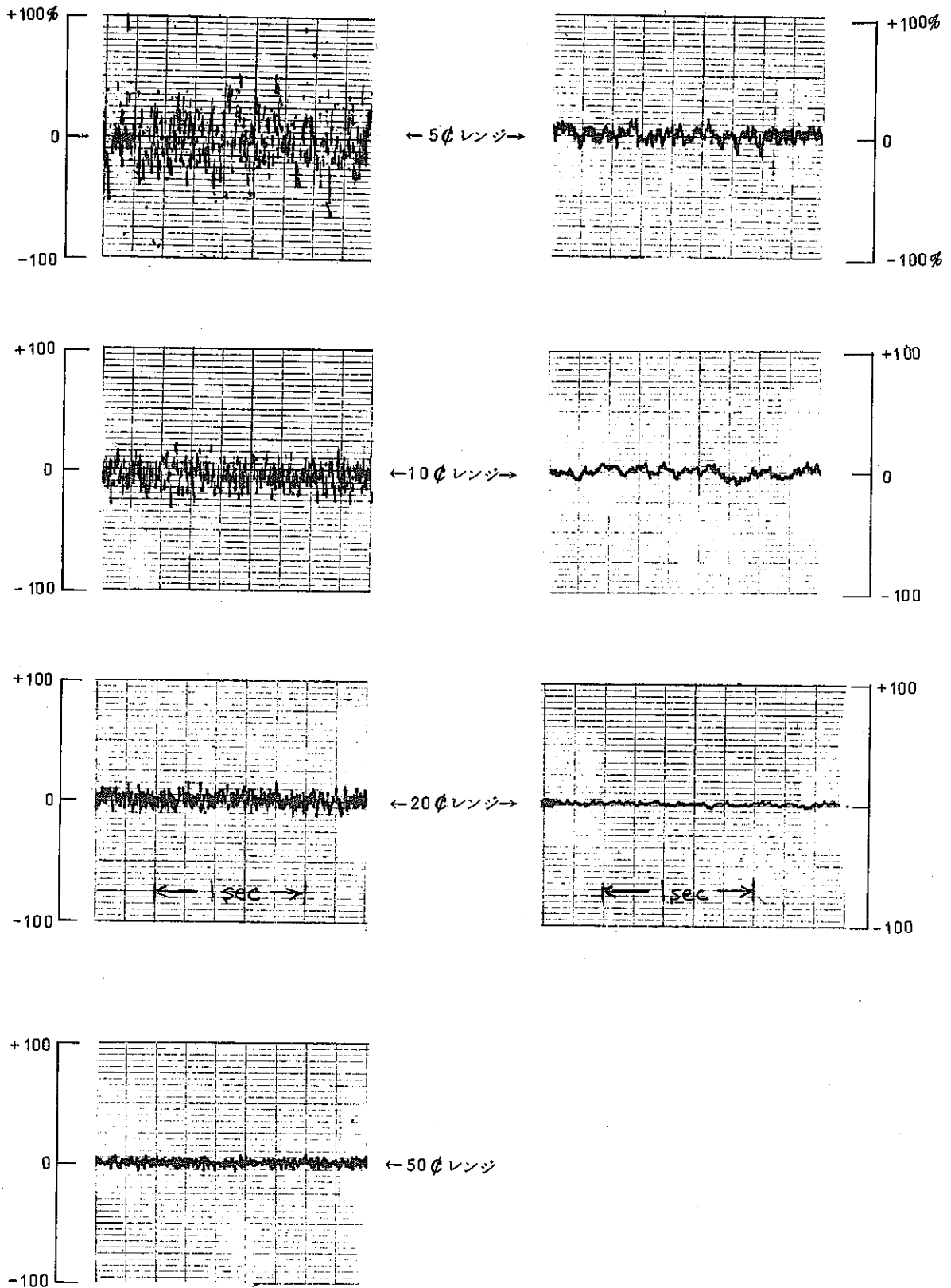
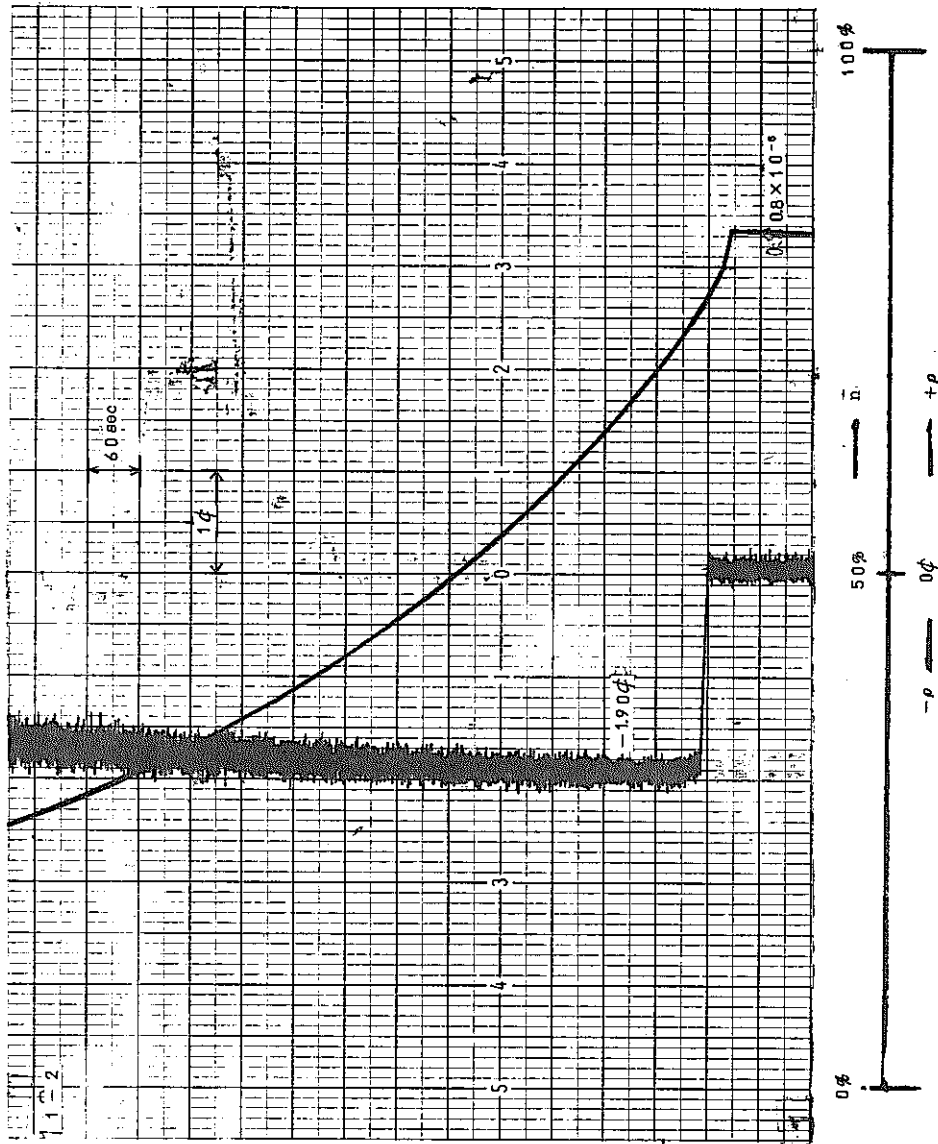
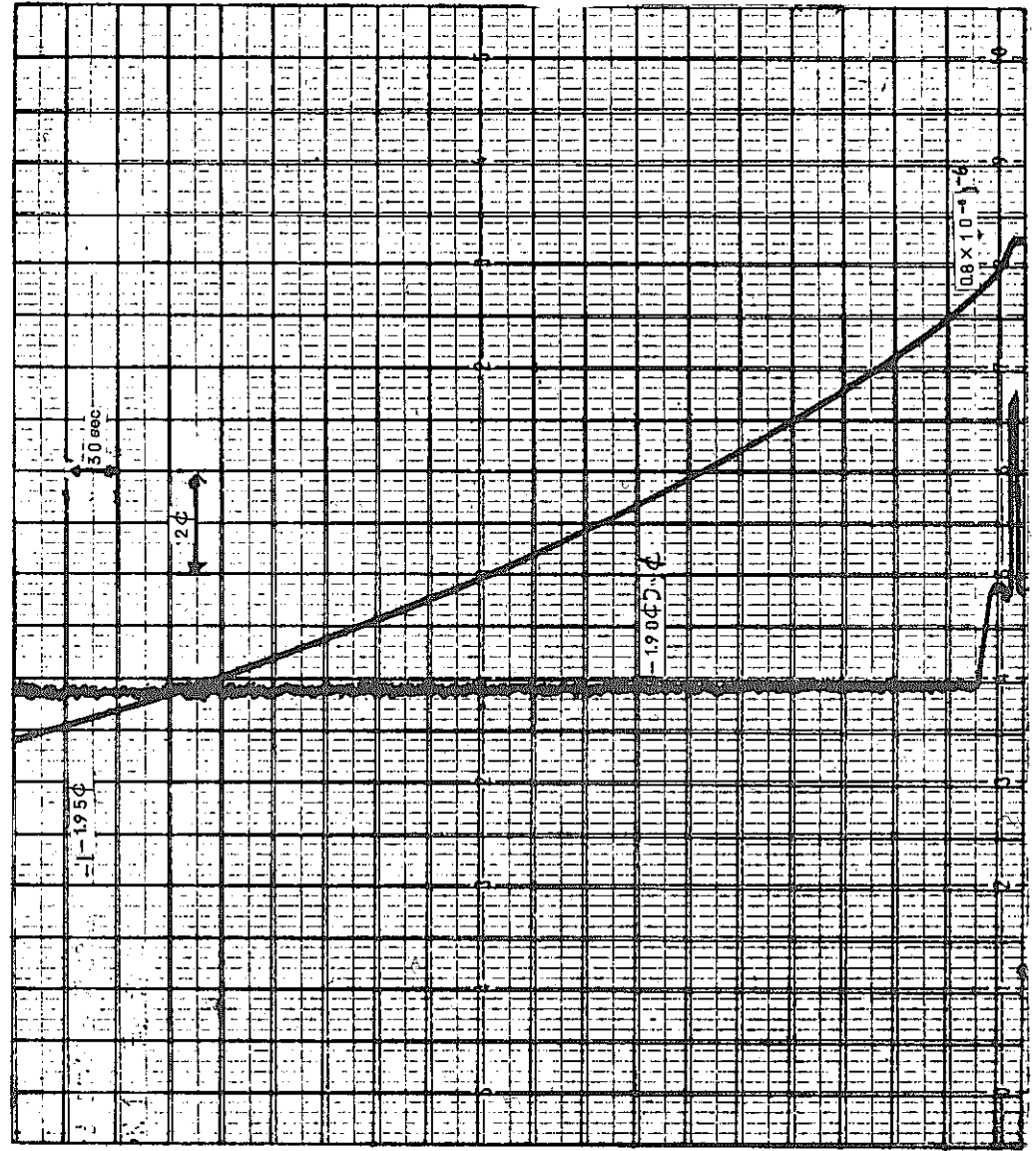


Fig. 15 各レンジにおけるノイズレベル
原子炉出力レベル 5W ($UIO 0.5 \times 10^{-7} A$)

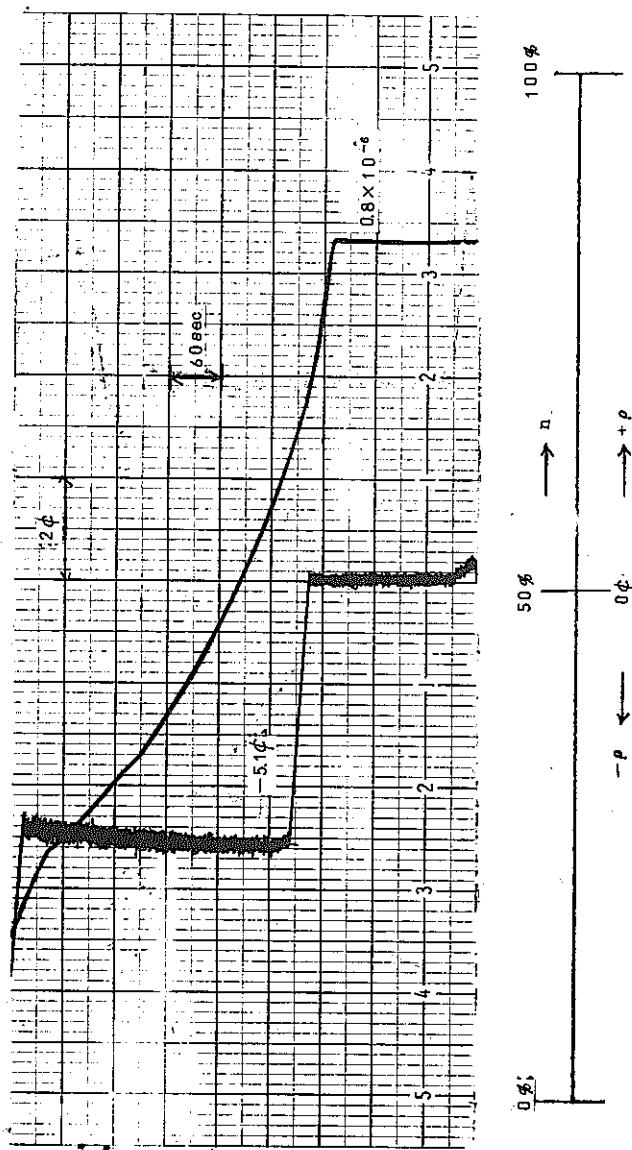


(a) DN-II, $E_0 = 0$

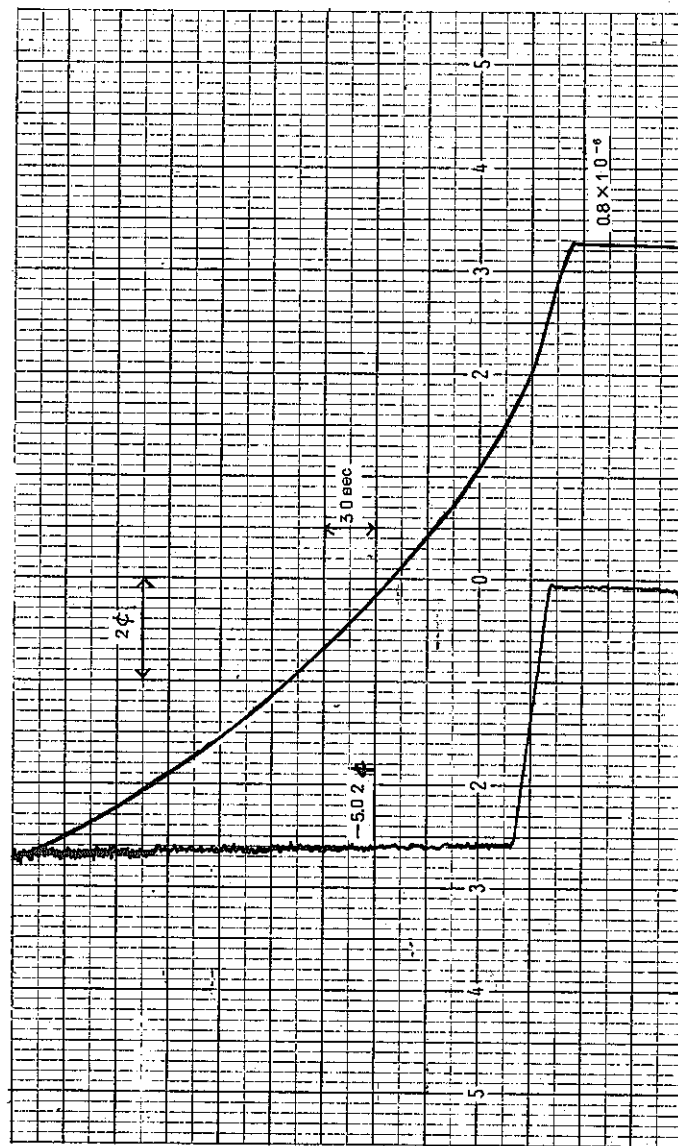


(b) DN-II, E_0 印加

Fig. 16 反応度測定 T1-2 (-2ϕ)

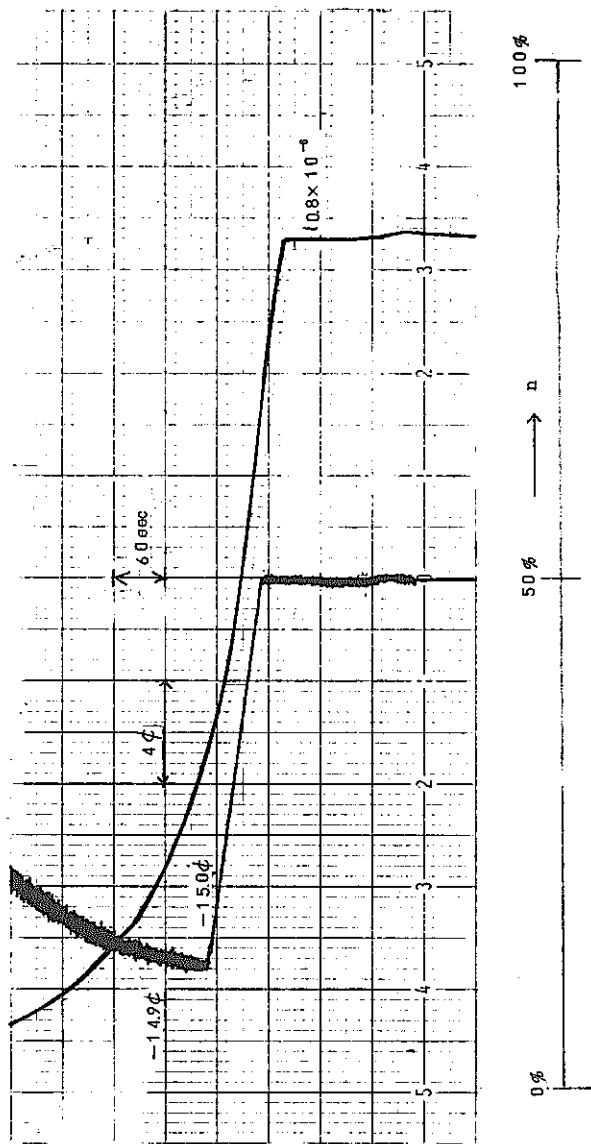


(a) DN-II, $E_s = 0$

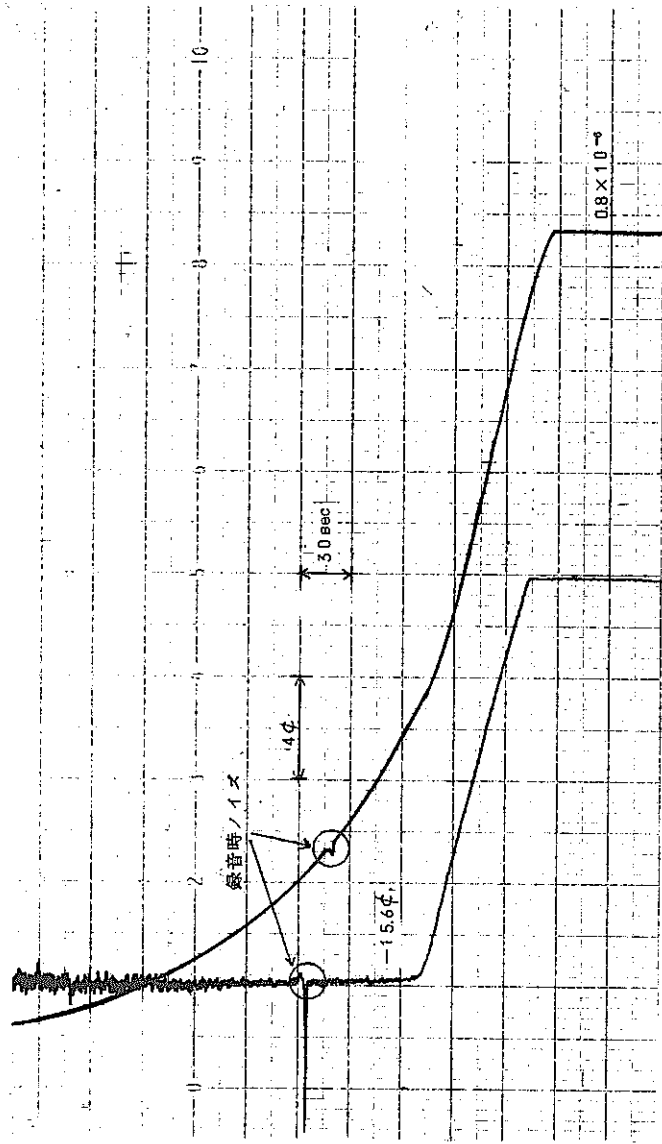


(b) DN-II, E_s 印加

Fig. 17 反应度测定 T2-2 (-5φ)

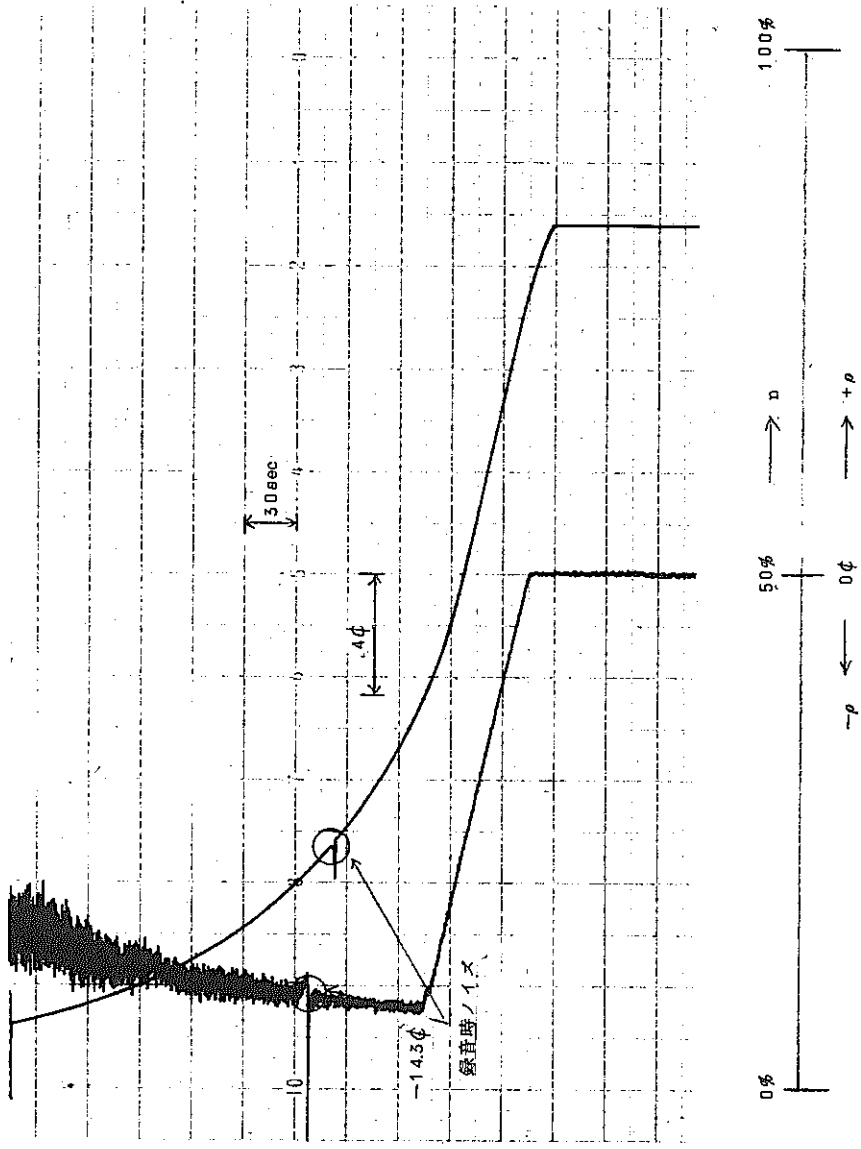


(b) DN-II, E_s 印加

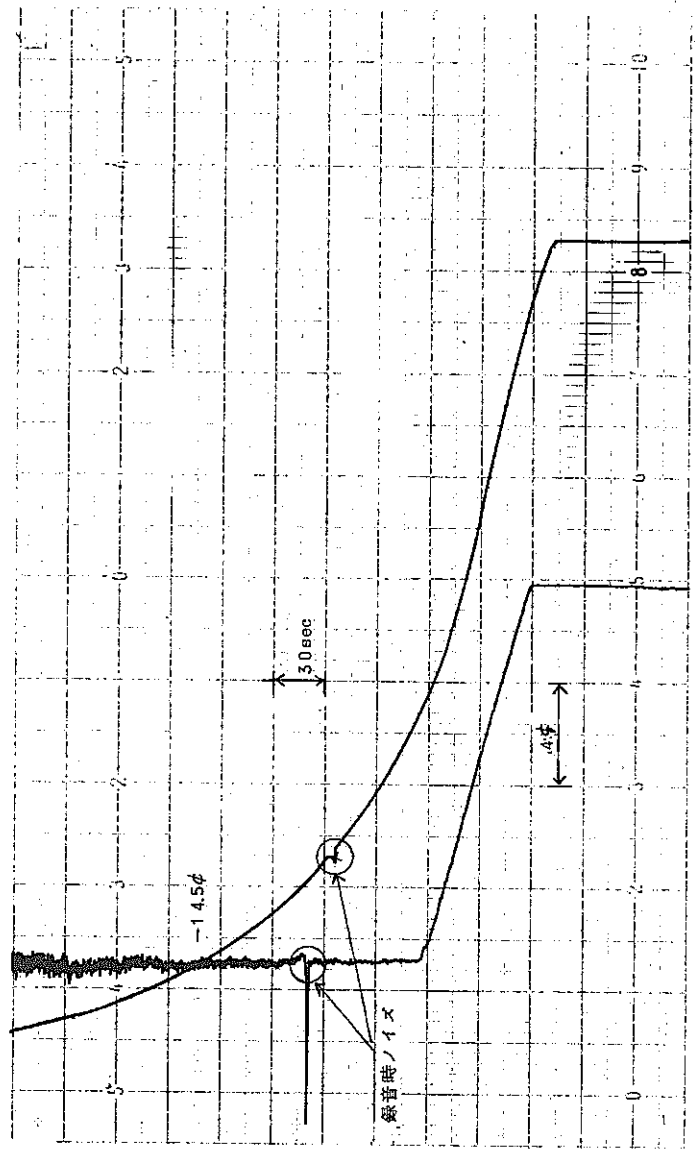


(a) DN-II, $E_s = 0$

Fig. 18-(1/2) 反応度測定 T3-2 (-15φ)

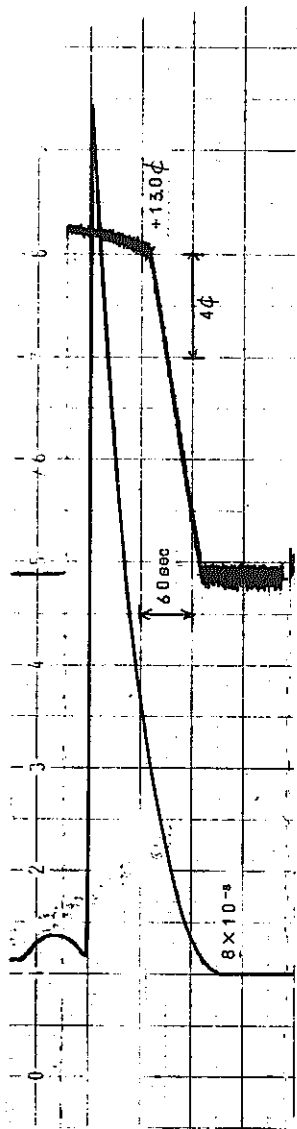


(c) DN-1, $E_s = 0$

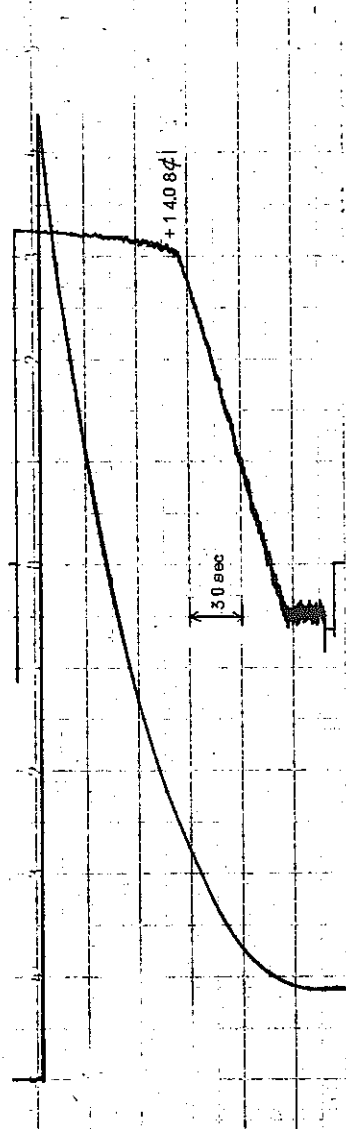


(d) DN-1, E_s 印加

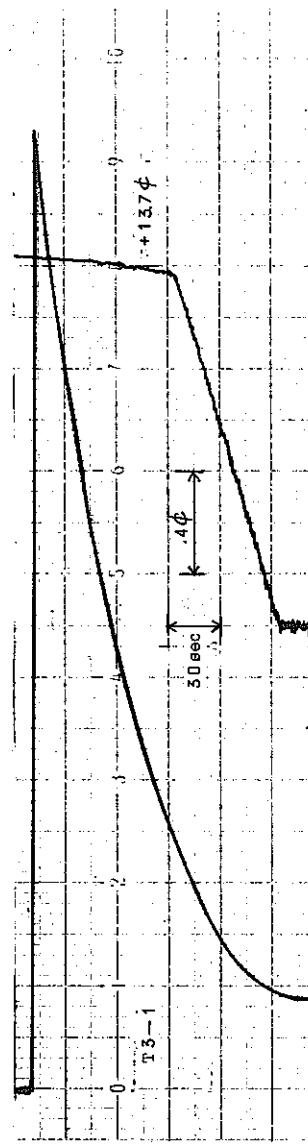
Fig. 18 ($\frac{2}{2}$) 反応度測定 T3-2 (-15φ)



(a) DN-II, $E_s = 0$



(b) DN-II, E_s 印加



(c) DN-I, E_s 印加

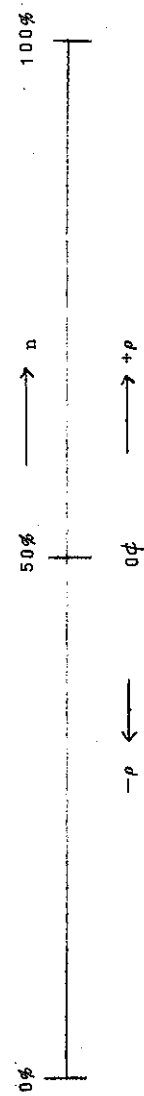
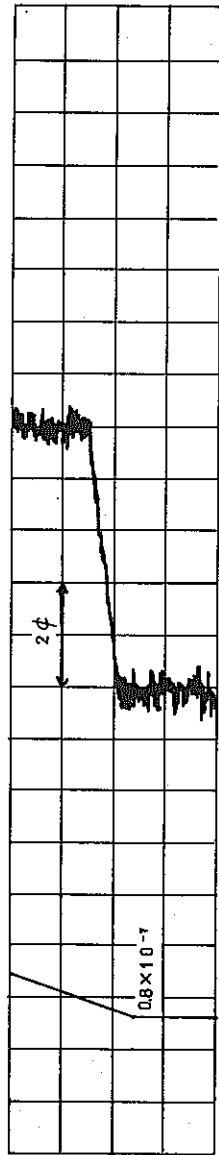
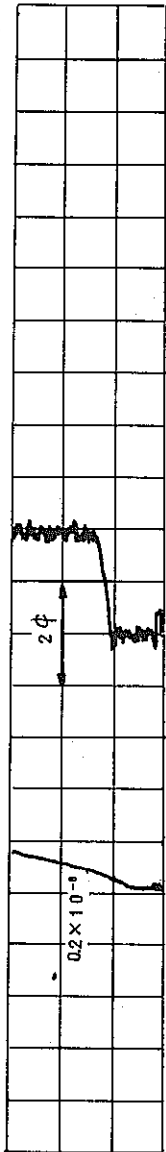


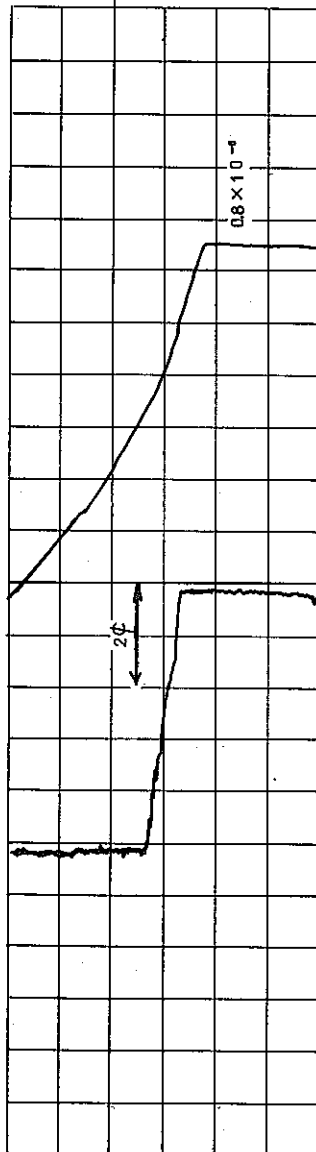
Fig. 19 反应度测定 T3-3 (+15 phi)



(a) 0.8×10^{-7} A



(b) 0.2×10^{-8} A



(c) 0.8×10^{-8} A

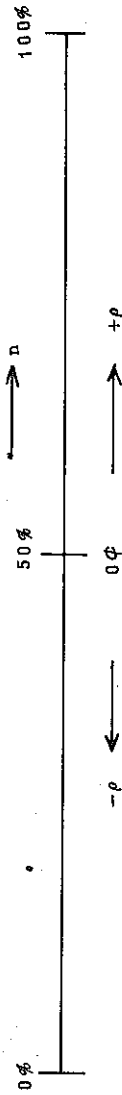


Fig.20 出力レベルによる未臨界度の測定例

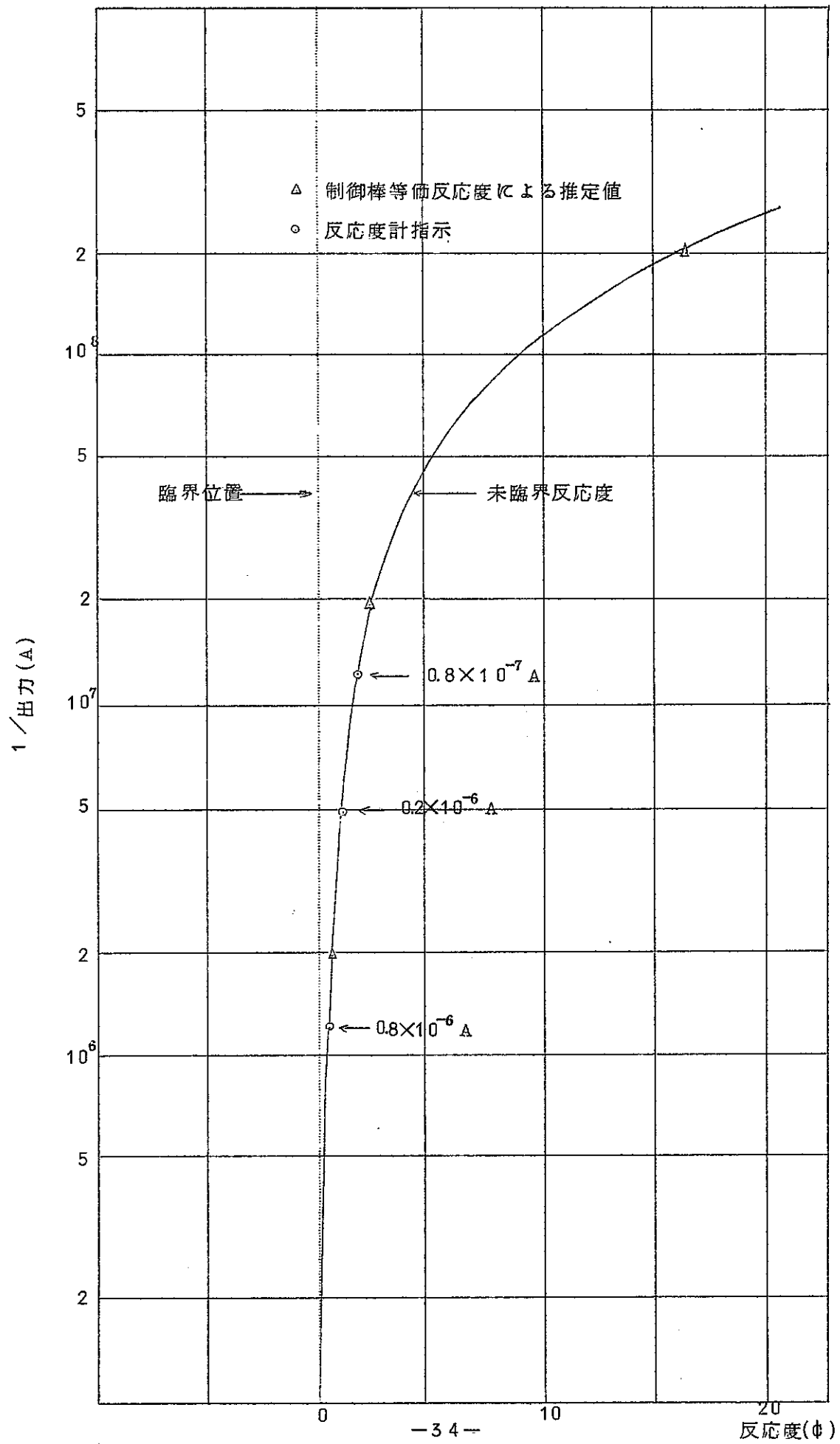


FIG. 21 出力レベルと未臨界度線図

5. あとがき

単体試験、FCAでの試験ならびに熱中性子炉定数での試験の結果、本反応度計について下記の結論が得られた。

- (1) 高速炉体系においても5%程度の精度で反応度測定の可能性が確認できた。
また、1~2%程度の微小反応度の測定も可能で、異常診断系への利用(出力時のバックグラウンドノイズレベルの大きさに左右されるが)の見通しを得た。また取扱いが簡単である。
- (2) 中性子源の効果を比較的簡単に設定でき、この反応度計を用いて、低出力の場合その未臨界度の値を手軽に測定できる。
- (3) 高速炉で異常診断をおこなう、高出力レベルでは、中性子源の影響は、全く無視でき、低出力時よりさらに取扱いが簡単である。
- (4) 単体試験の結果、予想より良い周波数特性を得ることができた。このことにより早い反応度変化も測定可能の見通しを得た。(63.2%応答 < 0.4 ms, 遮断周波数 > 400 Hz)。
- (5) 問題点として、起動時におこなわれる線型計測系のレンジ切換時には瞬時に大きな外乱が与えられるので、反応度計に見かけ上大きい変化が生じる。これは β_i のうち長い時定数によってきまるので整定までの時間が長くなる(≈ 80 sec)ので今後の検討が必要である。

但し、レンジ切換のおこなわれぬ出力時での使用には問題ない。

なお、反応度計は、「常陽」の計算機システムでの反応度平衡計算一部として使用する予定である。

謝 辞

本反応度計の試作に際しては、日本原子力事業(株)野村孜氏、玉置哲男氏に多大の協力を、当事業団実験炉建設部の寺垣鉄雄氏、池上哲雄氏には実験炉「常陽」の情報と試験の援助をいただいた。

また、FCAの実験では、日本原子力研究所原子炉工学部高速炉物理研究室長弘田実弥氏ならびに室員の各位に協力をいただいた。

本報告をまとめるにあたって、深く感謝いたします。

参 考 文 献

1. Suzuki, H., Tsunoda, T.; "Reactivity meter and its application",
J. Nucl. Sci., Technol., 1[6], 210(1964)

附 録

I 原子炉シミュレータによる試験

熱中性子炉シミュレータを用い、反応度計の遅発中性子群回路をD. N. IのU 235として反応度計の性能を調べた。核定数としてTTR-1の定数、即ち $\ell = 70 \mu \text{sec}$, $\gamma = 1.227$ を用いた。各レンジに対する直線性と誤差については既に単体試験で調べてあるので、ここでは20 ϕ レンジにて測定した。

Fig. I-1は反応度の測定結果である。測定結果に示す幅は、トランジェント直後と整定時の反応度計の測定巾を示すもので、これはU 235に対する熱中性子と高速中性子の核定数がやや異なることによるものと考えられる。

II TTR-1による試験

TTR-1において、この反応度計を用いて制御板反応度(①微・粗調整板および②安全板)の反応度測定を試みた。

遅発中性子回路はD. N. -1のU 235のみを用いた。

試験は微調整板及び粗調整板についてはベリオド法によって求めた反応度と比較し、安全板#1についてはロッド・ドロップ法によって求めた反応度と比較した。測定はプール水中の炉心に近い位置にC. I. Cを置き、その出力電流をマイクロ・マイクロ・アンメータにより電圧信号に変換して反応度計に加えた。

(1) 調整板の反応度測定

微調整板、粗調整板の反応度測定結果をFig. II-1に示す。反応度計とベリオド法で求めた値との誤差は2.5%以下であった。

(2) 安全板の反応度測定

安全板を全引抜にして臨界を保った後、安全板1本のみをテスト・スクラムした。外挿法によって求めた反応度は3.53 β ；一方反応度計では3.50 β で、誤差は0.85%であった。

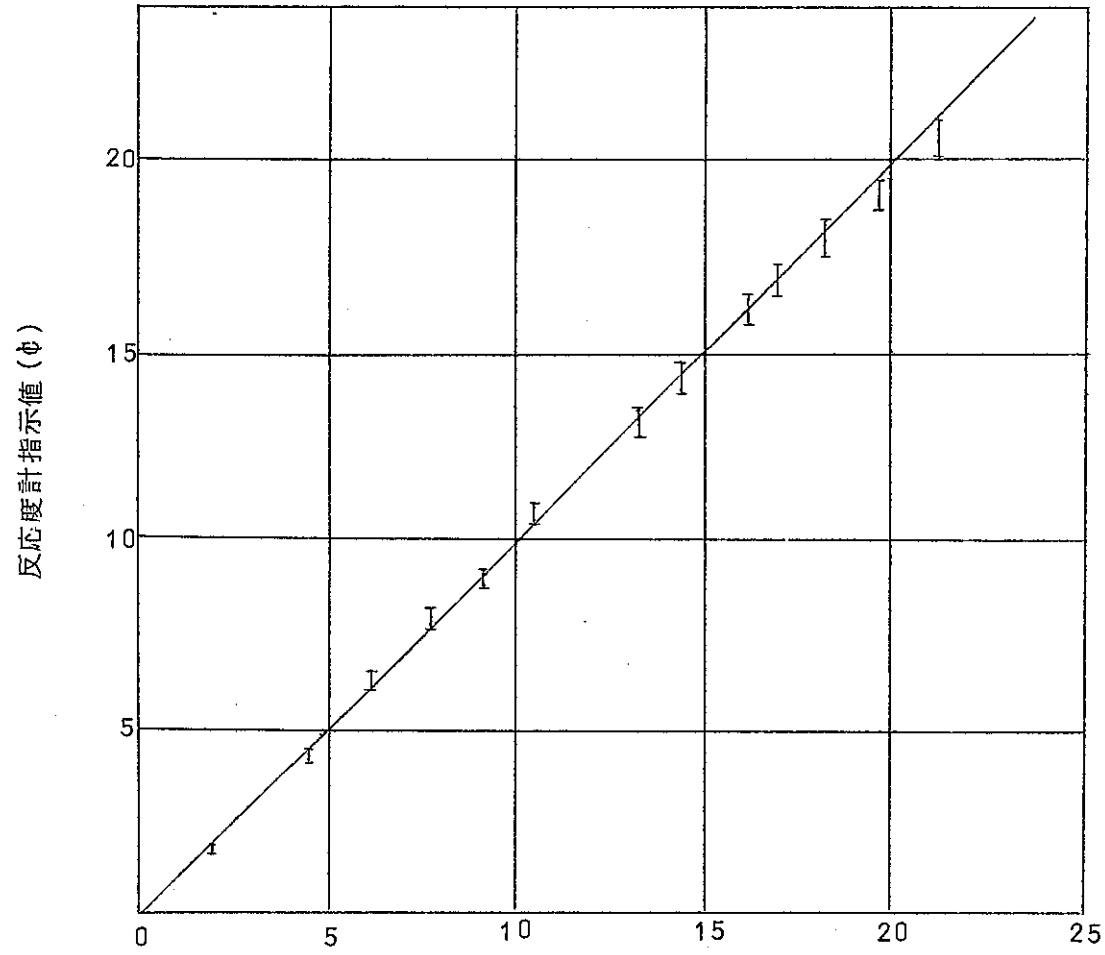
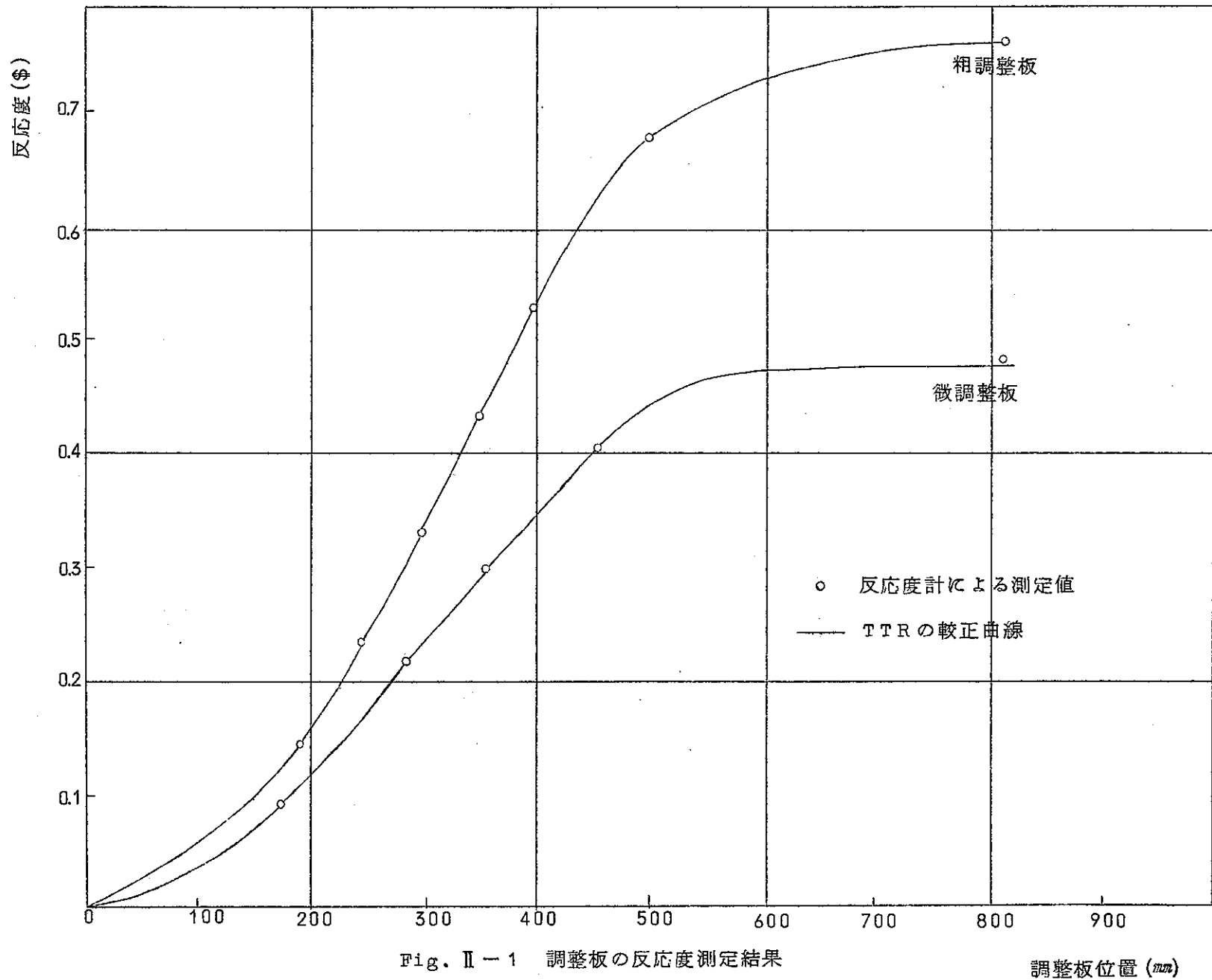


Fig. I-1 熱中性子原子炉シミュレータによる試験 (20φレンジ, $\ell=70 \mu \text{sec}$, $\gamma=1.227$)



調整板位置 (mm)