

# 研究用原子炉の自動起動

---

1964年8月

---

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

## 研究用原子炉の自動起動

### 要 旨

本報告は JRR-1 の起動を自動化する計画を進めるにあたり、設計着手に先だつてあらかじめ解決を必要とする比較的基礎的な諸問題を総合的に取り扱ったものである。この結果は単に JRR-1 における具体的設計に役立つのみならず、将来ほかの型式の炉の自動起動を計画する場合にも、その制御系設計に基本的指針を与え得る一般性がある。

- 1) まず、多くの自動起動制御系で採用されているペリオド制御系についてその安定性を判別するため、近似的な方法としてペリオド伝達関数が導入され、その取り扱いの妥当性がペリオド・シュミレータによって確認された。
- 2) またペリオド制御範囲の拡大を考える場合、低出力時のペリオド信号を得るため使用される核分裂計数管・対数計数率ペリオド計系統について、主として統計的動揺の立場から検討が加えられた。JRR-1 においては、この系統が使用される低出力領域で計数管のパルス時系列が近似的にポアソン分布として扱えることが実験的に確かめられたので、このランダム・パルスに対する対数計数率ペリオド計の最適設計条件が見いだされた。

以上の基礎的検討に基いて設計された自動起動制御系により、JRR-1 の中性子源レベル付近 20 cps (3 mW) から約 2 kW までの範囲で、設定ペリオド 20 秒および 30 秒の自動起動実験がおこなわれた。この際、計数管はパルス計数率 3,300 cps (0.5 W) で CIC に自動的に切り換えられ、同時にペリオド計も対数計数率型から対数増幅器型へ切り換えられた。

この実験により小型研究炉の全領域自動起動化は技術的に実現容易であること、かつ上述の設計基準の妥当性が確認された。

1964 年 1 月

東海研究所原子力工学部計測制御研究室

住田健二，藤沢武夫，渡辺光一

# Automatic Start-up of a Research Reactor

## Summary

This paper describes the control quality (various characteristics and performances of a control system in transient and steady states) of an automatic start-up system which must be understood before design in a practical system to automate the start-up of JRR-1. Although limited to systems based on period and power control, the results obtained here can be extended to the system design of automatic start-up of other research reactors.

First, period and power transfer functions are introduced to examine the control quality of a simplified model of automatic start-up. Next, the transfer function of an adder circuit in the feedback network of the model is derived, including a time-varying gain factor in it. Using these transfer functions, gain-phase curves of the loop of the model are calculated. The transient performances which are expected from the curves are confirmed on an analog computer. In addition, two period setting methods are compared in their effects on the control quality of the period control system.

As the next step toward putting into practice the full range automatic start-up of JRR-1, this paper describes the design problem of a log. counting-rate and period meter (LCRPM) used for period control in the counter range. The design basis is to find the optimum point of compromise between the two requirements such as smaller period signal fluctuations and faster response of the LCRPM, under condition that the pulse sequence coming from a fission counter is Poisson-distributed. Then, the LCRPM of optimum design is applied to the automatic start-up experiments at JRR-1, ranging from 3 mW of power (or 20 cps) up to about 2 kW. The experiments demonstrate the applicability of the design method and the feasibility of full range automatic start-up.

January 1964

KENJI SUMITA, TAKEO FUJISAWA, KOICHI WATANABE  
Division of Nuclear Engineering, Tokai Research Establishment

## 目 次

1	はじめに	1	7.4	出力モニター系	31
2	自動起動の概要	3	8	中性子検出器	32
3	一定ペリオドにおける原子炉の伝達関数	5	8.1	配 置	32
3.1	ペリオド伝達関数	5	8.2	較 正	32
3.2	出力伝達関数	7	8.3	感 度	34
4	加算回路の伝達関数表示	9	9	制御棒およびその駆動装置	36
4.1	対数変換回路の等価伝達関数	9	9.1	制 御 棒	36
4.2	ペリオドと炉出力との関係	9	9.2	反応度較正試験	36
5	自動起動制御系の安定性	11	9.3	制御棒駆動装置	36
5.1	制御系のゲイン-位相特性	11	10	JRR-1 における自動起動実験	38
5.2	ペリオド・シュミレータ	14	10.1	自動起動実験	38
5.3	ペリオド設定	14	10.2	外乱試験	42
5.4	自動起動制御系モデルによる試験	18	10.3	出力降下試験	45
6	対数計数率ペリオド計の最適設計	21	11	結論と今後の問題点	46
6.1	対数計数率ペリオド計回路	21		参考文献	48
6.2	対数計数率ペリオド計の静特性	22	付録 1	POTTER の式との関係	50
6.3	ペリオド信号の動揺	22	2	6 群遅発中性子によるペリオド・ シュミレータ	50
6.4	対数計数率ペリオド系の最適条件	23	3	ペリオド信号動揺の測定	50
6.5	ペリオド・スクラムの起きる割合	25	4	計数率変換器	52
7	自動起動実験装置	28	5	原子炉シュミレータと対数増幅 器との接続	54
7.1	ペリオド制御系	28			
7.2	出力制御系	30			
7.3	ペリオドおよび出力制御系の自動 切換え	31			

## Contents

1	Introduction .....	1
2	Principle of automatic start-up.....	3
3	Reactor transfer function on a constant period .....	5
3.1	Period transfer function .....	5
3.2	Power transfer function .....	7
4	Transfer function representation of the feedback network including period and power channels .....	9
4.1	Equivalent transfer function of a log. converter.....	9
4.2	Relation between period and power .....	9
5	Stability of an automatic start-up control system .....	11
5.1	Gain-phase curves of the control system .....	11
5.2	Period simulator .....	14
5.3	Period setting method.....	14
5.4	Computer tests .....	18
6	Optimum design of a log. counting-rate and period meter .....	21
6.1	Circuit .....	21
6.2	Equivalent gain .....	22
6.3	Random fluctuation of the period signal.....	22
6.4	Optimum condition.....	23
6.5	Period scram occurrence rate .....	25
7	Automatic start-up control system.....	28
7.1	Period control system .....	28
7.2	Power control system .....	30
7.3	Automatics witeover between period and power systems.....	31
7.4	Power monitor system .....	31
8	Neutron detectors .....	32
8.1	Location .....	32
8.2	Calibration .....	32
8.3	Sensitivity .....	34
9	Control rod and its drive mechanism .....	36
9.1	Control rod.....	36
9.2	Reactivity calibration .....	36
9.3	Drive mechanism.....	36
10	Automatic start-up experiments with JRR-1 .....	38
10.1	Experiments .....	38
10.2	Disturbance tests.....	42
10.3	Power decrease test.....	45
11	Conclusion .....	46
	References .....	48

Appendices

A 1	Relation between power transfer function and POTTER's equation .....	50
A 2	Period simulator with 6 groups of delayed neutrons.....	50
A 3	Measurement of period signal fluctuation.....	50
A 4	Log. converter .....	52
A 5	Connection between reactor simulator and log. <i>N</i> amplifier .....	54

## 記 号 表

$A$	対数計数率ペリオド計の等価増幅度
$A_1$	CIC および微小電流増幅器を含めたゲイン
$A_2$	ペリオド計の増幅器回路増幅度
$A_{c1}, A_{c2}$	CIC の相対感度
$A_L$	対数増幅器回路増幅度
$A_P$	ペリオド増幅器回路増幅度
$A_\mu$	微小電流計増幅度
$B$	対数特性ダイオードの特性バイアス
$C_i$	$i$ 番グループ遅発中性子の先行核密度
$C_{i0}$	$C_i$ の直流成分
$C_L$	対数変換回路平滑容量
$D$	対数特性ダイオードの対数変換率
$e$	ペリオド計微分回路の出力電圧
$e_1$	炉出力信号
$e_2$	ペリオド信号
$e_L$	対数特性ダイオード両端の電位差
$e_l$	対数増幅器出力電圧
$e_s$	ペリオド信号のスクラム・レベル
$G$	対数計数率ペリオド計の等価伝達関数
$G_T$	ペリオドおよび出力信号測定系を加算したフィードバック回路の伝達関数
$G_P$	ペリオド伝達関数
$i_0$	対数特性ダイオードを流れる電流の直流成分
$K_n$	前置増幅器増幅度
$K_m$	単位入力の信号に対する制御棒駆動速度
$K_r$	制御棒単位長の反応度
$l$	即発中性子平均寿命
$M_i$	$C_i$ の $n$ に対する比 ( $=C_i/n$ )
$M_{i0}$	$M_i$ の直流成分
$M_P$	最大ゲインのゲイン定数に対する比
$n$	中性子密度
$n_c$	目標中性子密度
$n_i$	初期中性子密度
$n_0$	一定ペリオドで上昇する中性子密度の任意に選ばれた初期値
$p$	パルス計数率
$p_m$	ペリオド信号動揺を最大にするパルス計数率
$p_0$	制御範囲にある最低パルス計数率
$Q$	ポンプ回路入力パルス 1 箇の電荷
$r$	基準設定値
$R_L$	対数特性ダイオードの微分抵抗
$T_n$	前置増幅器時定数
$T_D$	対数計数率ペリオド計の微分回路時定数

$T_d$	対数・ペリオド増幅器微分回路時定数
$T_m$	制御棒駆動装置時定数
$\beta$	遅発中性子の全中性子に対する割合
$\delta k$	反応度
$\delta k_0$	$\delta k$ の直流成分
$\varepsilon$	誤差信号
$\lambda$	一群近似による遅発中性子先行核の崩壊定数
$\lambda_i$	$i$ 番グループ遅発中性子先行核の崩壊定数
$\mu$	中性子密度(炉出力)の上昇率
$\mu_0$	設定上昇率
$\mu_0$	$\mu$ の直流成分
$\sigma_0$	ペリオド信号動揺の標準偏差
$\sigma_{0max}$	ペリオド信号動揺の最大標準偏差
$\phi_{ii}$	対数計数率ペリオド計入力側電力密度スペクトル
$\phi_{out}$	同 上 出力側電力密度スペクトル
$\omega$	角周波数

注)  $\Delta$  は変数の微小変動成分を表わす。

〔用語〕

CIC	$r$ 線補償型電離箱
CIC 領域	CIC によって原子炉出力が測定される範囲。通常ペリオド領域と呼ばれるが、ここでは計数管領域に対応してこの名称を用いる。
計数管領域	計数管の使用される炉出力変化範囲
上昇率	炉ペリオドの逆数, $\mu = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt}$
ペリオド信号	増幅器を通して得られる上昇率。ペリオド制御に直接使われる信号で、上昇率およびペリオドとは区別して使う。



## 1. は じ め に

多くの原子炉が世界各国で建設され、その運転が日常の作業となるにおよんで、原子炉の全運転を自動化する試みが多方面にわたって採り入れられつつある。特に大型の原子炉においては自動化によって運転の複雑さから運転員を解放し、その注意力を全運転系統に注げるようにすることが、原子炉安全運転の見地からみて望まれる。自動化の一分野として BEPO<sup>1)</sup> や LIDO<sup>2)</sup>, DIDO<sup>3)</sup>, ノース・カロライナ州立大学にあるウォータ・ボイラー型原子炉<sup>4)</sup> その他いくつかの炉では、原子炉のペリオドを制御することによって原子炉起動の自動化が実現されている。さらに NRU<sup>5)</sup> や NRX<sup>6)</sup> の場合には、ペリオド制御だけでなく原子炉出力の変化の割合 ( $dn/dt$ ) を制御する方式も自動起動制御系の一部に採り入れられている。その他、現在準備中の例としては Ispra-1<sup>7)</sup> が報告されており、今後とも多くの原子炉で自動起動制御が次第に取り入れられていくものと思われる。ちなみにわが国においては現在立教大学の TRIGA-II が自動起動化されている。

上にあげた原子炉自動起動化の例では、ペリオド制御される炉出力変化範囲は CIC の測定範囲内である定格出力から 4~5 デカド下までに過ぎない。しかし、軽水炉ではその出力は一晚の運転休止によって中性子源レベルまで減少するので、上例の中には起動時計数管領域にある原子炉出力を手動によって CIC 領域まで上昇させ、しかるのち自動起動に入るものもある。一方 Geneva Conference Reactor<sup>8)</sup> の場合は、その安全性確保とともに運転の簡易性を強調するため、計数管と CIC とを使って中性子源レベルから定格出力までの全領域を自動起動化することが試みられた。

JRR-1 (ウォータ・ボイラー型原子炉) についても中性子源レベルからの全領域自動起動化の可能性を数年来検討してきたが<sup>9)</sup>、この場合まず問題となるのは主として次の 2 つの事項である。

- (a) 自動起動制御系の安定性
- (b) 自動起動可能な炉出力変化範囲の限界

(a) の問題は主にペリオド制御系の安定性を調べる問題に帰着する。この安定性は原子炉のペリオド伝達関数を用い、炉出力制御系との関連に於いて調べられた。通常、制御に利用されるペリオド 10~60 秒程度では、系の安定性は本質的な問題とはならないことがはっきりしたが、ペリオド設定方式によっては、特に短い設定ペリオドの場合、ペリオド制御系は安定性劣化の傾向にあることが確認された。次いで JRR-1 を原子炉核特性のシュミレータ<sup>10)</sup> で置き換えて設計した自動起動制御装置の特性を調べ、室内実験を行ない、この試作制御装置が十分安定に働作することを確かめた。

一方 (b) の問題として自動起動可能範囲を拡大するため、低出力での中性子検出に核分裂計数管が使用された。従来、研究用原子炉の出力制御およびペリオド制御には CIC のような電流型電離箱が主として使用されてきたが、この場合の制御可能な範囲はペリオド領域をも含めて 6 デカド前後に限られ、これが 1 本の電離箱で測定できる限界とされている。これ以下の低出力領域では 1 本の CIC によっては信頼性と直線性の保証が得られないのが現状であり、またたとえ広域中性子検出器と広域対数変換素子が開発されたとしても、低出力領域ではこの回路の等価時定数がきわめて大きくなるので応答が非常に遅くなる。

CIC の測定領域におけるペリオド制御については、上述したように今日すでにいくつかの原子炉で実用化されている。しかし、研究用原子炉の出力変化範囲は 8~11 デカド程度あり、たとえば JRR-1 についていえば 8 デカドの起動、停止が毎日繰返されている。そこで中性子源レベルから定格出力までの全領域自動起動化を考える場合、電離箱の移動などの特別の工夫をしない限り、中性子源レベルでの中性子検出には計数管を使用してペリオド制御信号を得ることが実現容易な実際的方法となる。しかし、計数管から得られるパルス計数率には統計的動揺が存在するので、比較的小さな遅れでしかもペリオド信号動揺を小さくするような対数計数率ペリオド計測回路の最適設計が問題となる。

以上の諸検討を経た後、自動起動実験が JRR-1 について行なわれた。設定ペリオド 30 秒および 20 秒で中性子源レベル付近 (20 cps, 3 mW) から約 2 kW まで炉出力を上昇させ良好な結果を得ることができた。

計数管領域ではペリオド制御および出力制御に1本の核分裂計数管を共通に使用し、制御装置を大幅に簡単化した。自動起動により炉出力が上昇し、パルス計数率が3,300 cps (0.5 W) に達すると、計数管領域でのペリオド制御はCIC領域に自動的に引き継がれ、3,300 cps 以上の炉出力ではCICからのペリオド信号によって原子炉はオペリオド制御される。

実験に使用された試作装置では、設定炉出力を計数管領域、CIC領域いずれにとることも可能である。またこの装置で自動起動範囲の上限をJRR-1の定格出力50 kWまで広げるのは、CICの原子炉内位置調整および反応度の負の温度係数を補償するため2本以上の制御棒の自動中継により可能である。この自動起動実験によってJRR-1の全領域自動起動化は技術的に実現容易であり、またCICと計数管とを数箇並用することによって、要求される原子炉出力上昇範囲が11デカードあっても自動起動化できることが実証された。

この報告書で述べる小型研究炉に対する自動起動は、アナログ量の信号によって制御されたものである。計数管領域で原子炉から得られる信号はパルス計数率なので、この場合、ペリオド信号は出力信号とともに計数率計でアナログ量に変換されている。一方、パルス計数率をデジタル量のまま扱い、CIC領域からの信号もデジタル化して自動起動を行なうことが考えられる。このデジタル技術による自動起動は小型研究炉に対しては製作費の面から不向きであろうが、将来動力炉の制御にはその経済的定常運転および出力降下の問題とともに考慮されねばならぬ技術となろう。

## 2. 自動起動の概要

原子炉の操作上、最も注意と熟練を要するのは起動のときである。中性子源レベルにある原子炉出力を、制御棒の操作によって定格出力レベルまで起動する場合、その過程において原子炉運転員は炉ペリオドがあらかじめ定めた値を保つよう注意しながら、原子炉出力を上昇させていく。起動時のペリオドは炉型によって異なるが、10~60秒程度が普通である。そこでペリオド増幅器から得られるペリオド信号を制御棒駆動装置に負饋還させることによって、原子炉の出力上昇を自動化することが考えられる。これが研究用原子炉に対する自動起動といわれるものである。

この自動起動を実現するには2つの方法がある。1つはこの報告書で扱われているペリオド制御方式で、第1節で例示したすべての原子炉がこの方式によるものである。他は対数出力制御方式<sup>1)</sup>で、これは対数増幅器の出力電圧を直線上昇させるように設定電圧を変化させ、原子炉出力の上昇を指数関数的とするものである。しかし、原理的には両方式とも同一であるとみなせる。

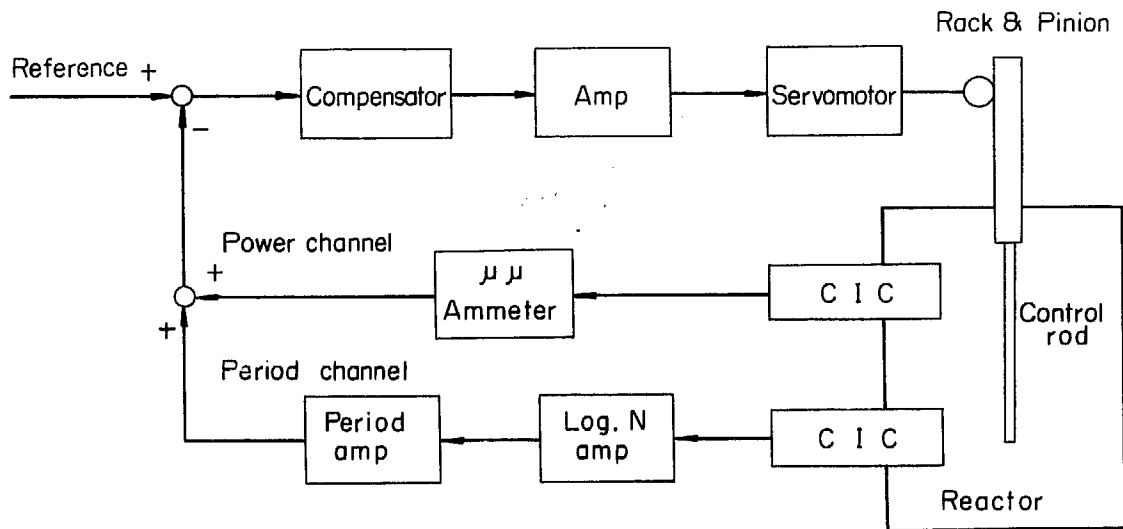


Fig. 1 Elementary block diagram of automatic start-up control system for a research reactor by period control.

Fig. 1 はペリオド制御方式による自動起動のブロック図で、出力系およびペリオド系から得られるそれぞれの測定値の和が常に設定値と等しい状態を保持するように制御される。したがって、炉出力は一定ペリオドで上昇し、最終的には目標出力レベルに自動的に納まることになる。このような案は、所定の時間関数に沿って出力を上昇させるプログラム制御系の1種とも考えられる。

この自動起動のプログラムを決定する関係式は

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dt} + \frac{\mu_c}{n_c} n = \mu_c \quad (1)$$

ここで  $\mu_c$  は設定上昇率、 $n_c$  は目標中性子密度である。初期値  $n_i$  を考慮して (1) 式を解くと、

$$n = n_c \frac{n_i \epsilon \mu_c t}{n_c - n_i + n_i \epsilon \mu_c t}$$

自動起動では  $n_c \gg n_i$  が成立するから

$$n = n_c \frac{\epsilon \mu_c t}{\frac{n_c}{n_i} + \epsilon \mu_c t} \quad (2)$$

(2) 式が示す出力上昇は、自動起動が理想的におこなわれた場合で、起動開始時の過渡状態やペリオド

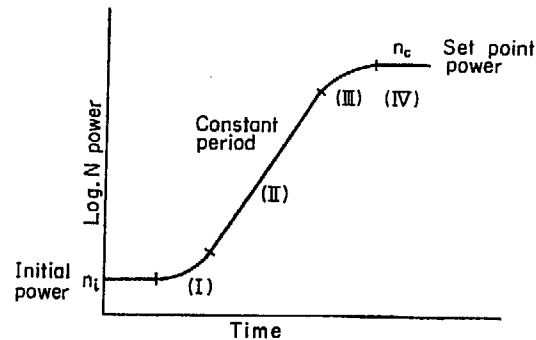


Fig. 2 Automatic start-up program.

増幅器，原子炉駆動回路の遅れ等は考慮されていない。これを Fig. 2 で説明すると，

領域 (I) 初期値  $n_i$  で平衡状態にある自動起動制御系は，Fig. 1 に示す微小電流計の感度を落とすことにより制御棒が引き抜かれ，過渡状態の後，設定ペリオドで平衡する。この場合，出力制御系からの信号は十分小さく全く無視できる。

領域 (II) 中性子密度は一定ペリオドに制御されており，したがって原子炉出力は指数関数的に上昇する。この場合も出力制御系からの信号は設定値に比較して無視でき，原子炉出力はペリオド制御系のみによって制御される。

領域 (III) 原子炉出力の増大につれて出力制御系からの信号が有効に効きはじめ，出力信号およびペリオド信号の和が一定になるように制御される。したがって，ペリオド信号は原子炉出力の増大とともに減少し，ペリオドは無限大に近づいていく。この領域では制御棒は次第に挿入される。

領域 (IV) ペリオドは無限大となり，したがってその信号は零となる。制御は原子炉出力信号のみによっておこなわれ，中性子密度は目標値  $n_c$  で一定に保持される。

実際には，このほか自動起動範囲を拡大するため，ペリオド制御の途上で中性子検出器や制御棒等の自動中継がおこなわれる。また (2) 式のプログラムでは炉出力が設定出力に漸近的に近づくことになるので，設定出力到達時間短縮のための措置がとられる。

### 3. 一定ペリオドにおける原子炉の伝達関数

原子炉自動起動装置におけるペリオド制御系の安定性を解析するためには、原子炉出力が一定ペリオドで上昇していく状態で原子炉がどのような特性を有するかを知る必要がある。原子炉自身は非線型特性をもつので、直流成分の近傍で微小変動する交流成分をもつような反応度を原子炉に与えたとする。このとき中性子密度は指数関数成分に微小変動を重ね合わされた形で Fig. 3 に示すように増大していく。さらに中性子密度微小変動の振幅もまた同時に指数関数的に増大する。したがって、上昇率  $\mu$  もその直流成分  $\mu_0$  の近傍でやはり微小変動をし、その振幅は一定である。そこでこれら入、出力の微小変動の間の関係を次に求める。

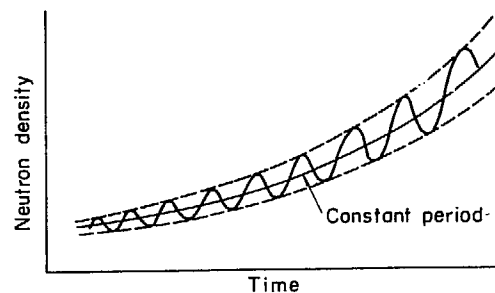


Fig. 3 Fractional variations of neutron density average on a constant reactor period.

#### 3.1 ペリオド伝達関数<sup>12)</sup>

よく知られているように反応度があまり大きくない場合の原子炉動特性方程式は

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{l} n + \sum \lambda_i C_i & (3) \\ \frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i C_i & (4) \end{cases}$$

また上昇率は次式で定義される。

$$\mu = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = \frac{d}{dt} (\ln n) \quad (5)$$

上の3式より次の関係が得られる。

$$\begin{cases} \mu = \frac{\delta k - \beta}{l} + \sum \lambda_i M_i & (6) \\ \frac{dM_i}{dt} + (\mu + \lambda_i) M_i = \frac{\beta_i}{l} & (7) \end{cases}$$

ただし  $M_i = C_i/n$  である。ここで(4)式から明らかなように、時間が十分経過し過渡状態が消えた後で  $n$  が一定ペリオドで上昇するとき、 $C_i$  もまたそれと等しいペリオドで上昇する。したがって、このような状態のとき  $M_i$  は、ある一定値を保つ。そこで次のようにそれぞれの変数の直流分、微小変動分を考える。すなわち、

$$\begin{cases} M_i = M_{i0} + \Delta M_i & (8) \\ \mu = \mu_0 + \Delta \mu & (9) \\ \delta k = \delta k_0 + \Delta \delta k & (10) \end{cases}$$

ただし、 $\delta k_0 \geq 0$  とする。これらの関係を(6)式および(7)式に代入して線型化し、微小変動分を Laplace 変換の形であらわすと、原子炉のペリオド伝達関数が次のように導かれる。

$$G_1(s) = \frac{\Delta \mu(s)}{\Delta \delta k(s)} = \frac{1}{l + \sum \frac{\lambda_i \beta_i}{(\mu_0 + \lambda_i) \cdot s + (\mu_0 + \lambda_i)}} \quad (11)$$

Fig. 4 および Fig. 5 は (11) 式のゲイン、位相の周波数特性を示したもので、核定数は JRR-1 に関する TABLE 1 に示す値を用いた。ペリオド伝達関数は出力伝達関数におけると同様、低周波において非線型性が特に著しい。

TABLE 1 Properties of delayed neutrons for JRR-1

Group $i$	Decay const. $\lambda_i$ (sec $^{-1}$ )	Fraction of total neutrons $\beta_i$
1	5.35	0.000152
2	1.515	0.00114
3	0.319	0.00345
4	0.119	0.00162
5	0.0321	0.00177
6	0.0128	0.000296

$$\beta = \sum \beta_i = 0.00843$$

$$\lambda = \frac{\beta}{\sum \beta_i / \lambda_i} = 0.0814 \text{ sec}^{-1}$$

$$l = 1.4 \times 10^{-4} \text{ sec}^{34)}$$

一方、原子炉が臨界未満の状態にあるとき、一定ペリオドの出力変化を保持するためには、入力反応度は時間的に増加する関数となり、(3)式に中性子源の項  $s$  を付け加えて計算すると、

$$\delta k(t) = l \mu_0 + \sum \frac{\beta_i \mu_0}{\lambda_i + \mu_0} - \sum \frac{\beta_i \mu_0}{\lambda_i + \mu_0} e^{-(\lambda_i + \mu_0)t} + \delta k(0) e^{-\mu_0 t}$$

となる。ただし  $\delta k(0)$  は起動前原子炉出力を一定に保つため与える負の反応度である。このように反応度が時間とともに比較的はやく変化する場合は (11) 式の関係は成立しなくなる。しかし、起動を始めた原子炉が大きく臨界未満状態にあるのは通常中性子源レベルからの起動直後だけであり、実際の制御系ではこの時制御棒は Fig. 37 に見られるように一定速度で引き抜かれるのみである。各時点で原子炉に与えられる

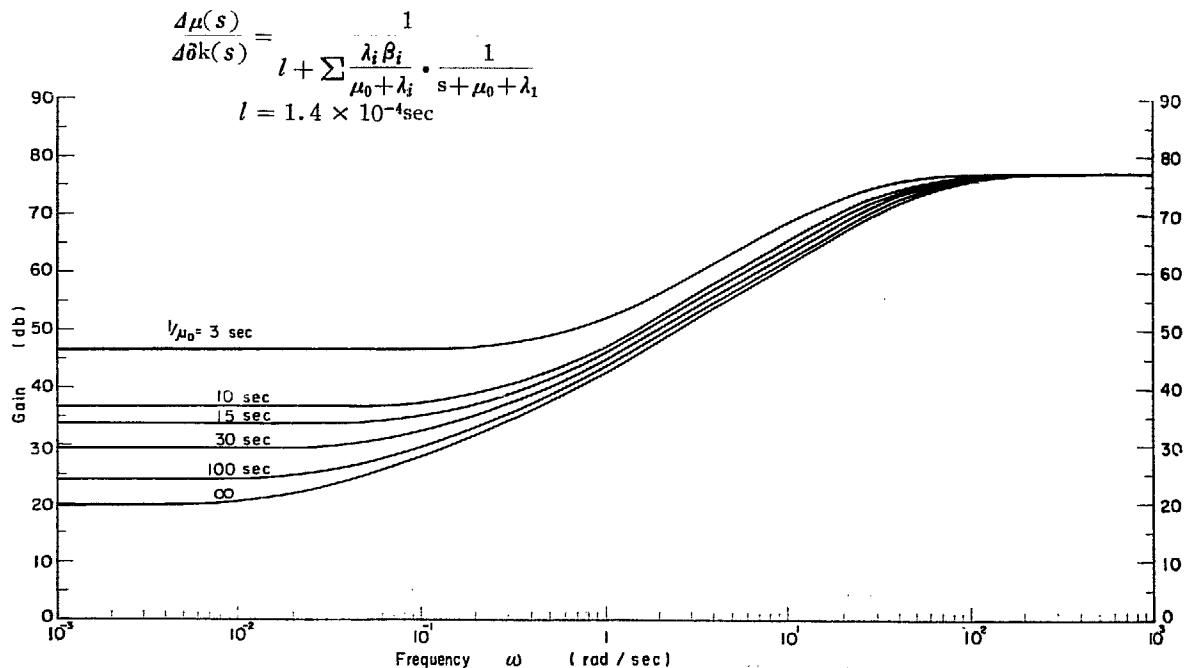


Fig. 4 Amplitude response of period transfer function for various values of period.

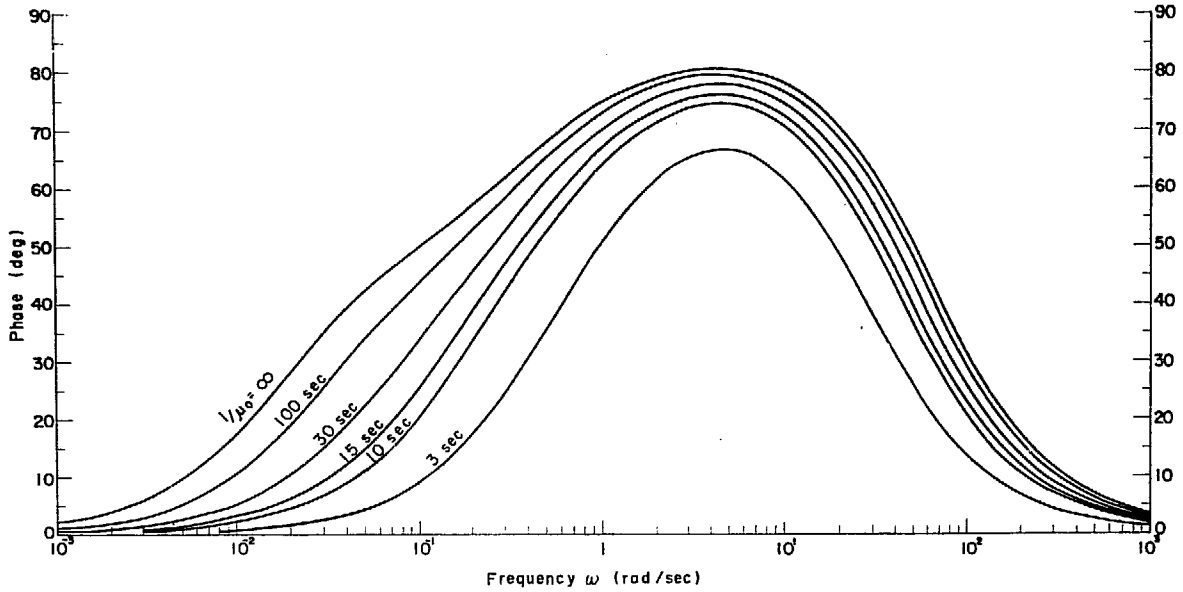


Fig.5 Phase shift response of period transfer function for various values of period.

反応度は上に求めた反応度変化より少な目になるのが普通で、この間の炉出力変化はわずかである。したがって、ペリオド制御による補正動作はおこなわれず、制御系の安定性はあまり問題とならない。

3.2 出力伝達関数<sup>13)</sup>

次に一定ペリオドで出力上昇する原子炉の、反応度入力に対する中性子密度の応答をみる。(10)式で表わされる反応度入力に対し、 $n$  および  $C_i$  の応答をそれぞれ次のように置く。

$$\begin{cases} n = n_0 e^{\mu_0 t} + \Delta n e^{\mu_0 t} & (12) \\ C_i = C_{i0} e^{\mu_0 t} + \Delta C_i e^{\mu_0 t} & (13) \end{cases}$$

ここで(10)、(12)および(13)式をもとの動特性方程式に代入し、微小変動項について整理すると

$$\begin{cases} \frac{d \Delta n}{dt} + \mu_0 \Delta n = \frac{\delta k_0 - \beta}{l} \Delta n + \frac{n_0}{l} \Delta \delta k + \sum \lambda_i \Delta C_i & (14) \\ \frac{d \Delta C_i}{dt} + \mu_0 \Delta C_i = \frac{\beta_i}{l} \Delta n - \lambda_i \Delta C_i & (15) \end{cases}$$

を得る。一方(8)~(10)式の直流成分のみに着目すると、(6)(7)式からよく知られた逆時間式方程式が次のように得られる。

$$\delta k_0 = l \mu_0 + \sum \frac{\beta_i \mu_0}{\mu_0 + \lambda_i} \quad (16)$$

(14)~(16)式から微小変動分を Laplac 変換の形であらわすと出力伝達関数は(付録1参照)

$$\frac{\Delta n(s)}{\Delta \delta k(s)} = \frac{n_0}{s} \cdot \frac{1}{\left\{ l + \sum \frac{\lambda_i \beta_i}{(\mu_0 + \lambda_i)(s + \mu_0 + \lambda_i)} \right\}} \quad (17)$$

(12)式では、中性子密度の変動分の振幅は、時間の経過とともに指数関数的に増大するパラメータ変数系である。その変動分の振幅を原子炉起動以前の定常状態にもどして考えたものが(17)式で示される関係である。

一定ペリオドで出力上昇するときの原子炉に関する以上の関係式を総合すると、原子炉の特性は Fig. 6 に示すように分割して表わすことができる。自動起動の完了近く、出力制御系が有効に効いてくる状態では、原子炉出力伝達関数の次にゲイン変数項が同図に示したように入ってくる。出力一定となった場合は、 $\mu_0 = 0$  となり、従来の原子炉伝達関数を表わすことになる。また、ペリオド制御系のみによって原子炉が制御されているときの安定性を考える場合は、この自動起動制御は線型化され、かつ定数係数系であるから、

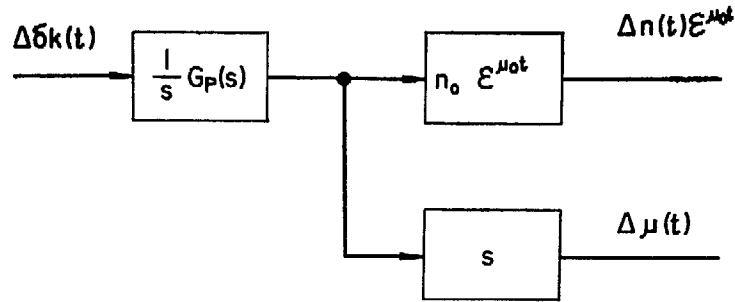


Fig. 6 Laplace transform block diagram of a reactor having timevarying gain term within, while its power is rising exponentially.

取り扱いが容易である。ペリオド信号は Fig. 6 の分割されたブロックの中央から微分回路を通して取り出されるが、ペリオド信号演算に使われる対数変換回路は、すでにペリオド伝達関数の中に考慮されている。しかし、実際の微分回路は簡単な抵抗・コンデンサの組合わせでつくられるので、さらに容量遅れ要素が入ってくる。



### 4. 加算回路の伝達関数表示

Fig. 2 に示される自動起動のプログラムで、領域 (I) および (II) では出力制御系からの信号は設定値に比較して十分小さく無視でき、ペリオド制御系のみが動作する。しかし、自動起動がペリオド制御の終りに近づき、出力信号が大きくなると、炉出力は (III) の領域に入り、ペリオド信号と出力信号との和が一定になるように制御される。したがって、このような領域での制御系の安定性を調べる際には、両測定系からの信号の和に関する応答を伝達関数表示する必要がある。

#### 4.1 対数変換回路の等価伝達関数

原子炉出力に比例する CIC からの微小電流  $i$  はペリオド信号をつくるため 2 極管その他の持つ対数特性によって対数に比例した電圧として取り出される。そして、この 2 極管と並列に入る浮遊容量が無視できる程度に小さい場合は、CIC 電流はすべて 2 極管を流れる。

対数増幅器の特性が理想的であれば対数変換回路は

$$e_l = D \ln i + B \tag{18}$$

と表わされる。ただし  $D$  は対数出力電圧の比例定数(対数変換率)であるが、制御系に対しては対数変換回路の等価ゲイン定数となるものである。(18) 式を微分し、ペリオドの定義を考慮して Laplace 変換すると、上昇率に関する対数変換回路の等価伝達関数は

$$\frac{e_l}{\mu} = \frac{D}{s} \tag{19}$$

と表わされる。

#### 4.2 ペリオドと炉出力との関係

自動起動の全期間を通じ、炉出力の上昇とともにペリオドの値は設定値から無限大まで変化する。一方、原子炉のペリオドおよび出力伝達関数は (11), (17) 式に示すように、これらペリオドと炉出力との関数であるが、制御系の振動周波数に比較して炉出力の上昇がゆるやかで、これら 2 つの値がゆっくり変化するなら先に求めた原子炉に関する伝達関数から制御系の安定性を考えることができる。特に出力制御系は、時間とともに変化するパラメータとして  $\mu_0$  および  $e^{\mu_0 t}$  を含むので、ペリオド制御系と出力制御系との和に関する伝達関数を考えるには、 $n$  と  $\mu_0$  の関係を明らかにしておくのが便利である。(2) 式による出力上昇のプログラムの関係は (1) 式からわかるように対数出力の完全微分によって得られた上昇率を仮定して求めたもので、Fig. 7 に示すように微分回路が抵抗-容量からなるものであれば、さらに 1 次遅れ要素を次のように考慮せねばならない。

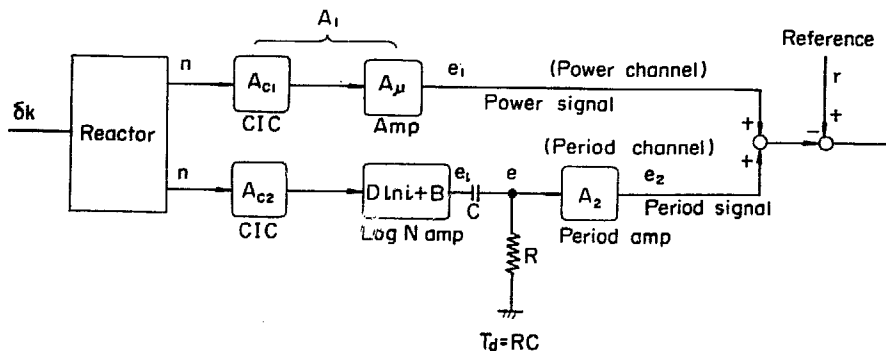


Fig. 7 Schematic of period and power channels in the feedback network of automatic start-up system, illustrating signal notation.

理想状態を考えて、原子炉から取り出されるこれら2つの信号の和が常に一定であるとすれば、

$$A_1 n + A_2 e = r \quad (20)$$

一方、微分回路における回路方程式から

$$T_d \frac{d}{dt} (e_I - e) = e \quad (21)$$

(18), (20) および (21) 式から

$$n = \frac{n_c - \{n_c - n_i (1 + T_d \mu_c)\} \frac{\mu_0}{\mu_c}}{1 + T_d \mu_0} \quad (22)$$

自動起動の場合、 $n_c \ll n_i$  を考慮すると (22) 式は次のように簡単化される。

$$n = n_c \frac{1 - \mu_0/\mu_c}{1 + T_d \mu_0} \quad (23)$$

自動起動のプログラムでは、 $n$  と  $\mu_0$  は (23) 式の関係を満たしながら  $\mu_0$  が  $\mu_c$  と 0 との範囲で変化する。ペリオド信号および出力信号検出系の和に関する制御を考える場合には、Fig. 6 のゲイン変数項の代り (23) 式を代入し、上昇率だけの関係にすれば取り扱いが容易になる。

出力信号検出系の伝達関数は (17) および (23) 式から

$$\frac{\Delta e_1}{\Delta \delta k} = A_1 n_c \frac{1 - \mu_0/\mu_c}{1 + T_d \mu_0} \cdot \frac{G_P(s)}{s} \quad (24)$$

一方、ペリオド信号検出系の伝達関数は (11), (19) 式およびペリオド増幅器の特性から

$$\frac{\Delta e_2}{\Delta \delta k} = \frac{A_2 D T_d}{T_d s + 1} \cdot G_P(s) \quad (25)$$

そこで Fig. 7 に示される回路の総合的な伝達関数は (24) および (25) 式から

$$\frac{\Delta e_1}{\Delta \delta k} + \frac{\Delta e_2}{\Delta \delta k} = \frac{1}{s} G_f(s) G_P(s) = \frac{[A_0(\mu_0) + A_2 D] T_d s + A_0(\mu_0)}{s(T_d s + 1)} \cdot G_P(s) \quad (26)$$

ただし

$$A_0(\mu_0) = A_1 n_c \cdot \frac{1 - \mu_0/\mu_c}{1 + T_d \mu_0}$$

(26) 式が成立するのは、この関係を導くのに置いた条件、すなわち自動起動制御系の誤差信号が零を保つように理想的に制御されるペリオドの比較的長い場合である。一方、制御系の遅れに比較して設定ペリオドが短い場合は、原子炉出力の上昇に対して制御系が十分な補正動作を行ない得ない。したがって、同じ  $\mu_0$  に対してもこのような場合 (23) 式の  $n$  は実際上わずかながら大きくなり、制御系のゲイン余有がそれだけ減少することも起り得る。

### 5. 自動起動制御系の安定性

#### 5.1 制御系のゲイン-位相特性

以上もとめてきた原子炉を含むペリオド信号および出力信号検出系の伝達関数に加えるに簡単化された各制御要素を考慮に入れると、自動起動制御系モデルのブロック図は Fig. 8 に示すようになる。さらにこれは Fig. 9 のごとくまとめられる。そこで、各制御要素の定数を以下のように定めて、Fig. 9 の簡単な自動起動制御系モデルの開回路ゲイン-位相特性をプロットすると、一例として設定ペリオド 30 秒では Fig. 10 のように示される。

炉出力の上昇とともにペリオドは次第に大きくなり、原子炉出力伝達関数および 2 系統の加算回路の特性

TABLE 2 Constants used in system analysis of simplified start-up model

Pre-amplifier	$K_a = 200 \text{ V/V}, T_a = 0.1 \text{ sec}$
Servomotor	$K_m = 0.03 \text{ mm/sec/V}, T_m = 0.04 \text{ sec}$
Control rod	$K_r = 0.01 \text{ \% / mm}$
Reactor	$l = 1.4 \times 10^{-4} \text{ sec}, \beta = 0.0843, \lambda = 0.0814 \text{ 1/sec}$
Set point period	$1/\mu_0 = 30 \text{ sec}$
Set point power	$n_0 = 4.5 \times 10^6 \text{ 1/cm}^3$
CIC, Amplifier	$A_1 = A_{e1} \cdot A_\mu = 2.2 \times 10^{-6} \text{ V/n}$
Differentiator	$T_d = 6.0 \text{ sec}$
Log. $N$ & period amplifier	$DA_2 T_d = 300 \text{ V} \cdot \text{sec}$

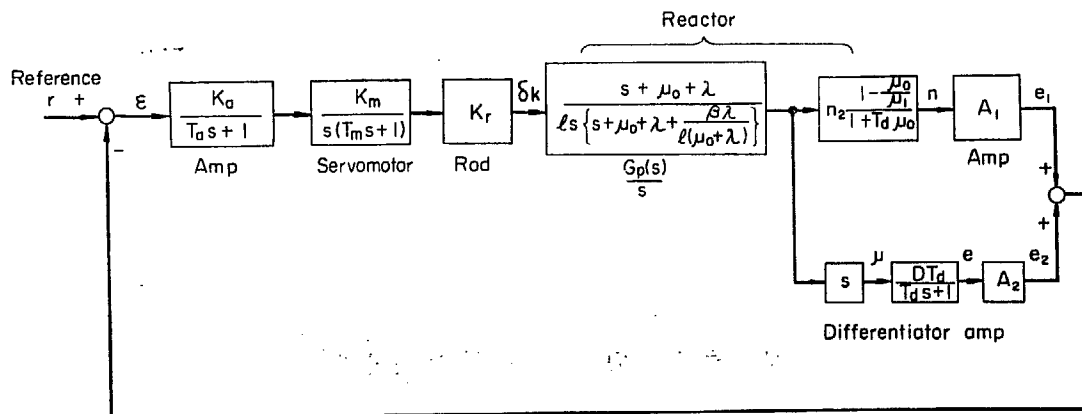


Fig. 8 Block diagram of the simplified model of automatic start-up control system.

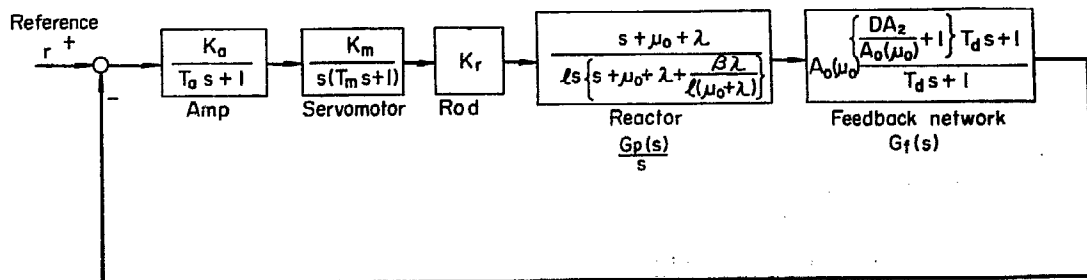


Fig. 9 Rearranged block diagram of Fig. 8 for calculation of gain-phase curves.

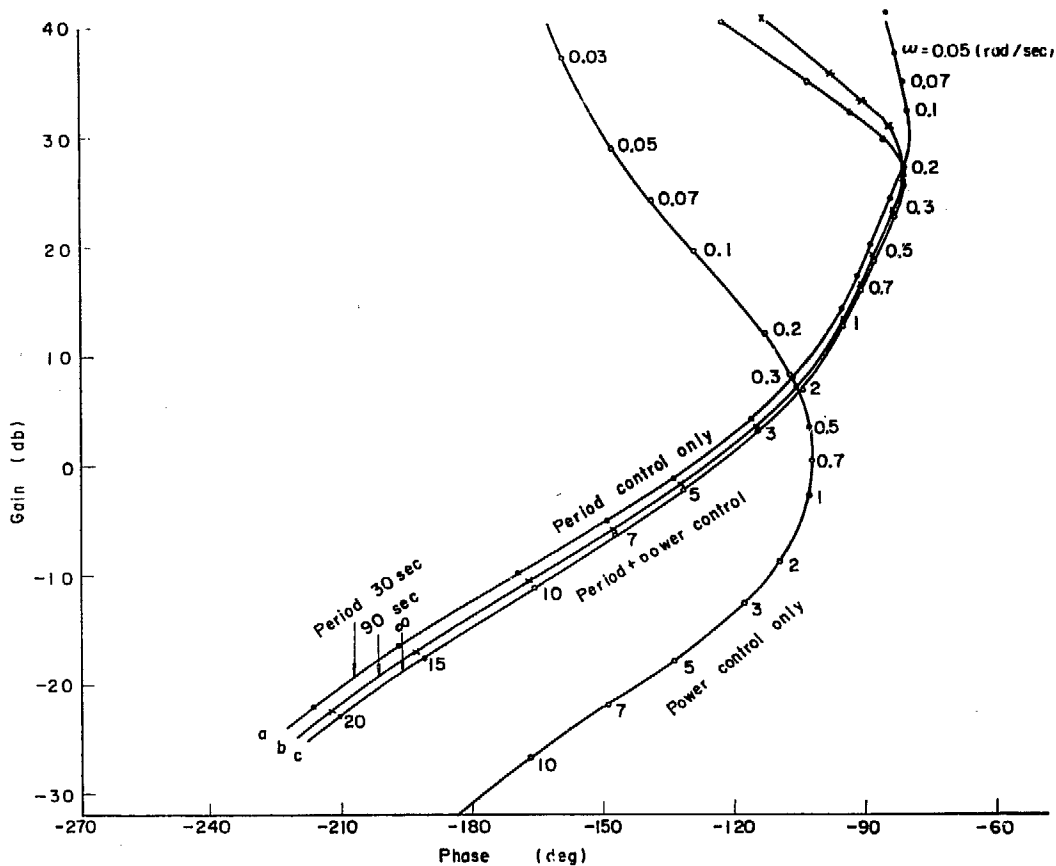


Fig. 10 Variation of gain-phase curves of the automatic start-up system shown in Fig. 5, where set point period is 30 sec.

も  $\mu_0$  とともに変わるので、ゲイン-位相特性は Fig. 10 の a, b, c と次第に変化してくる。これらから次のことがいえる。

- (1) 比較的周波数の高い領域では、 $\mu_0$  の減少とともに加算回路のゲインは増加するが、ペリオド伝達関数のゲインはそれ以上に減少するので、全体としてゲイン余有はやや大きくなる。しかし、さほど制御性に影響を及ぼすほどではない。自動起動制御系では、ペリオド制御系が安定であるなら Fig. 10 に見られるように出力上昇に伴うパラメータ変化があっても、それは安定性を増す方向に変化するので特に問題とならない。
- (2) 低周波領域では、 $\mu_0$  の減少とともに加算回路の微分特性は1次位相進み特性に変わってくる。すなわち、ペリオド制御系の特性から次第に出力制御系の特性に大きく変化するパラメータ変数系である。実際の系では、通常原子炉駆動装置に静摩擦があるので、ペリオド制御系は off-set を残す傾向がある。したがって、このことから、ペリオド制御系の補償回路の特性は、出力制御系のそれと異なる特性が要求される。出力が目標値に近ずきペリオドが大きくなると加算回路の位相進め時定数が減少し、特性は積分性となり、off-set は減少してくる。
- (3) ペリオド制御系には微分回路があるため、この系は雑音を拾いやすい。したがって、実際の制御系では、炉出力が目標値に達した場合、ペリオド制御系を切り離し、出力制御系のみによる出力の定値制御がおこなわれる。このようにペリオド制御系を切り離すと、系のゲイン-位相特性は Fig. 10 に見られるようにゲイン余有が大幅に増加し、制御性が変化する。したがって、この切り離しの際、制御系のゲインを高める操作がぜひ必要である。

この場合の制御性の変化は、加算回路の時定数が大きく変化的ことから起るものである。制御系モデルが目標値  $n_c$  で定出力制御の状態にある場合、Fig. 9 の加算回路の伝達関数は

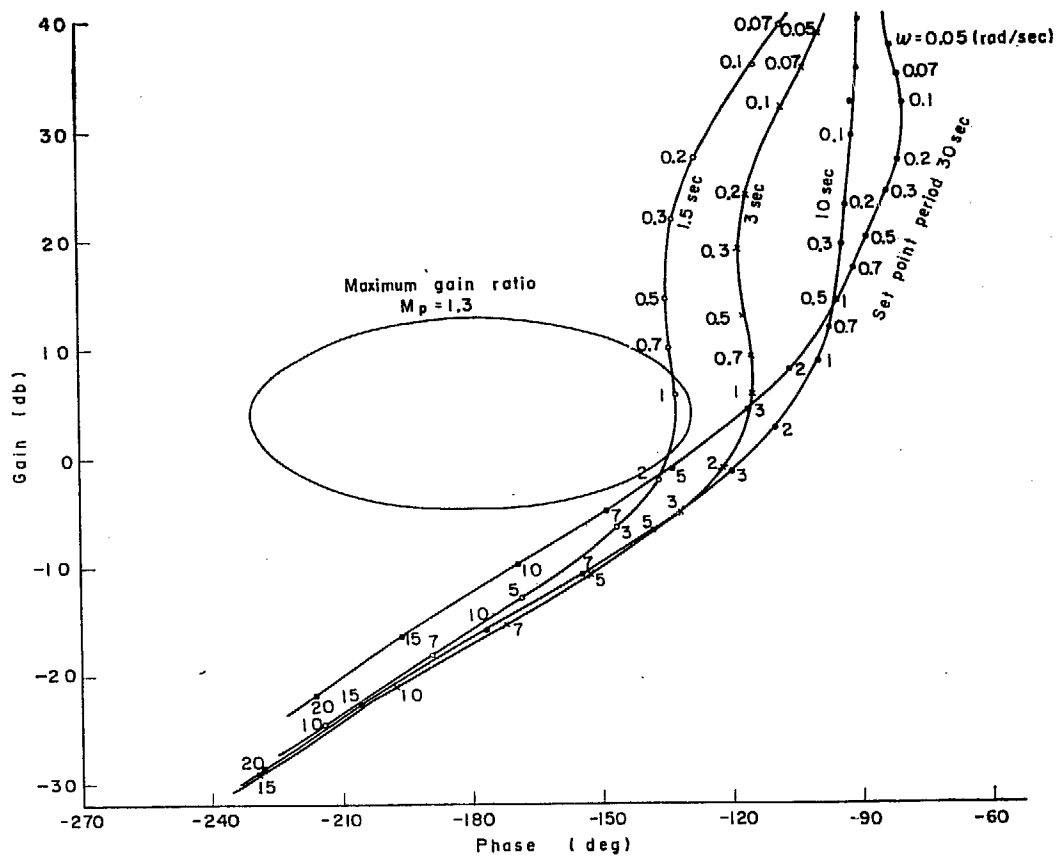


Fig. 11 Gain-phase curves of the period control loop shown in Fig. 5 for various set point periods from 3 to 30 sec, where the periods are changed by gain-adjusting method.

$$G_f(s)|_{\mu_0=0} = A_1 n_c \frac{\left(\frac{DA_2}{A_1 n_c} + 1\right) T_d s + 1}{T_d s + 1}$$

位相進め要素の時定数の値は、このモデルでは  $\frac{DA_2}{A_1 n_c} = 5$  であるから、ペリオド制御系を切り離すことにより時定数は 36 秒から 6 秒に減少する。この変化の大きさは  $A_1$  を変えることより設定出力を変えても不変であるから、御制系モデルが決まれば必然的に決定されるものである。しかし、基準設定値  $r$  や  $A_2$  により設定ペリオドを変える場合には、この変化の大きさもまた影響される。

以上のことから自動起動制御系の安定性を考えるには、

- (a) 設定ペリオドで動作中のペリオド制御系
- (b) 設定炉出力におけるペリオド + 出力制御系
- (c) 設定炉出力における出力制御系

これら 3 つの状態での各制御系を個々に調べておけばよいと結論される。中性子源レベルからの自動起動を考える場合のように、低出力レベルにおける中性子検出に計数管を使用する制御系にあっては、この系統についても CIC 領域での制御系と同様にこれら (a), (b) および (c) の各項を調べることが必要である。

しかし実際の制御系では、Fig. 8 に示す制御要素のほかにも多くの要素が挿入され、微分回路の後にもいくつかの容量遅れが入って (23) 式の関係は成立しなくなる。しかし、ここで述べたと同様の考え方は適用しうる。なお、簡単のためには (1) 項が成り立つような状況のもとで、一応 (b) の場合を除外して安定性を考えることはできる。ただし、さきにも少しふれたように、設定ペリオドが比較的短い場合には、出力上昇が急激なため系が追従できず、誤差信号が零とならないときがある。この場合は (23) 式が成立しなくなり、炉出力上昇とともにペリオド制御系のゲイン余有がわずかではあるが一時的に減少することがある。

Fig. 11 は、ゲイン  $A_2$  を変えて決めた種々の設定ペリオドに対するペリオド制御系のゲイン-位相特性

をプロットしたものである。設定ペリオドが短くなるに従い、中間周波領域の位相遅れが大きくなる様が見られる。このことはまた、ペリオド制御系の応答が遅くなる傾向にあることを示している。しかし通常、制御に用いられるペリオド 30 秒前後では、この中間周波領域のくびれは問題とはならない。

## 5.2 ペリオド・シュミレータ<sup>29)</sup>

ペリオド制御でペリオド一定という定常状態は、原子炉出力が指数関数的に上昇する状態である。自動起動実験用として原子炉をシュミレートするときは、使用する演算増幅器の出力電圧範囲の制限から、ペリオド制御の実験がわずかな時間に限定される。もっとも出力電圧が上限に達すると、その電圧を  $1/10$  に落としてゆき、6 デカードの出力範囲をカバーするようなシュミレータ<sup>14)</sup>も考えられている。しかし、対数出力やペリオド信号を得るため、対数増幅器を外部から取りつけることには種々問題があるので、ペリオド・シュミレータが利用された。これは原子炉の動特性方程式から  $n$  と  $C$  との変数を消去し、出力として上昇率を直接得るものである。したがってこの方法によれば、今までこの種の実験をおこなう際の隘路であった演算増幅器使用出力電圧範囲の制限から逃れることができる。

(6) および (7) 式を 1 群遅発中性子で近似し、 $M$  を消去すると

$$\frac{d\mu}{dt} - \left( \frac{\delta k - \beta}{l} - \lambda - \mu \right) \mu = \frac{1}{l} \left( \frac{d\delta k}{dt} + \lambda \delta k \right) \quad (27)$$

(27) 式は逆時間方程式の動特性を表わしており、ペリオド・シュミレータはこの式をアナコンで解いたものである。Fig. 12 にその回路を示す。Fig. 13 はこのシュミレータの静特性試験の結果で、実線は逆時間方程式から計算したものである。

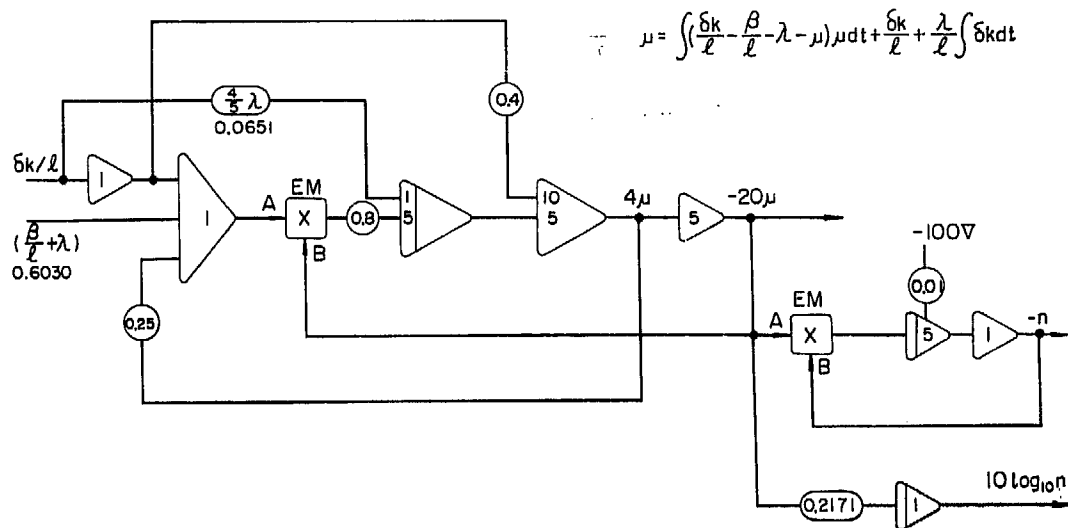


Fig. 12 Period simulator of a nuclear reactor with one group of delayed neutrons where EM denotes an electronic multiplier.

## 5.3 ペリオド設定

前述の自動起動制御系モデルを Fig. 14 のようにアナコンでシュミレートし、原子炉はペリオド・シュミレータで置き換えて、ペリオド制御系のゲイン余有および自励振動の周波数を調べた結果を Fig. 15 および Fig. 16 に示す。Fig. 16 は設定ペリオドによる発振周波数の変化の傾向を示した一例で、設定ペリオドが短くなるに従って発振周波数も減少し、ペリオド制御系の応答が悪くなっていくことを示している。このことは、ペリオド伝達関数からもわかる通りである。

ところでペリオド設定値を変えるには、当然 2 つのやり方が考えられる。1 つは基準設定値を変える方法であり、他はペリオド増幅器ゲイン  $A_2$  を変える方法である。設定ペリオドによってペリオド制御系のゲイン余有には変化を生じるが、その変化の傾向がそれぞれの方法によって異なってくる。しかし両方法による

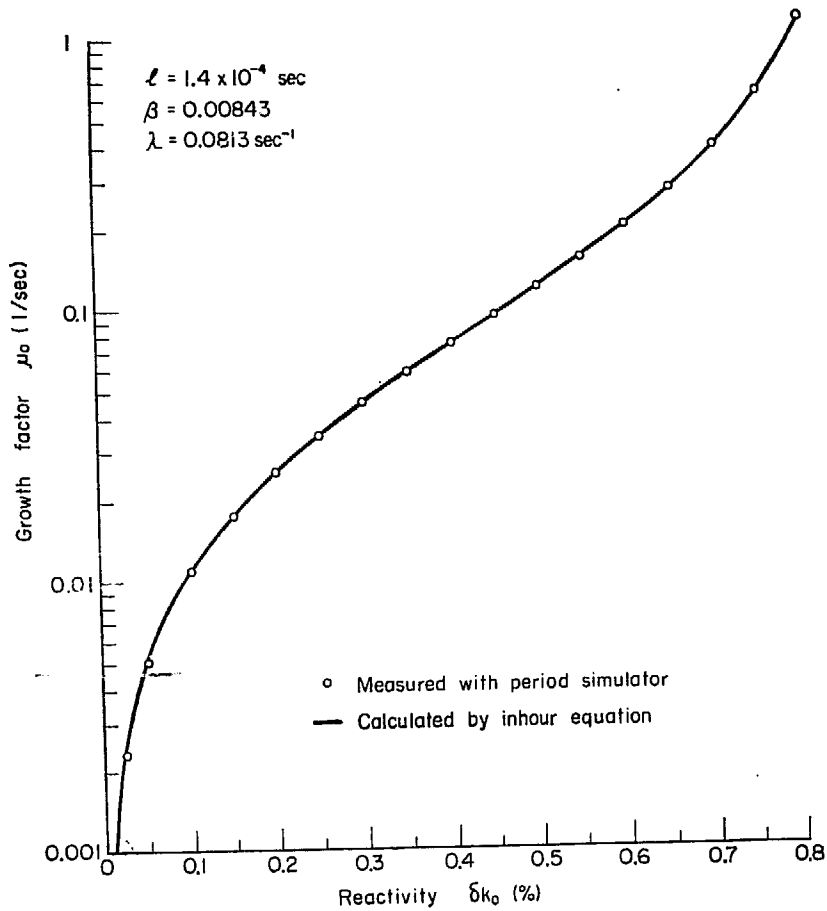


Fig. 13 Static characteristic of the period simulator with one group of delayed neutrons.

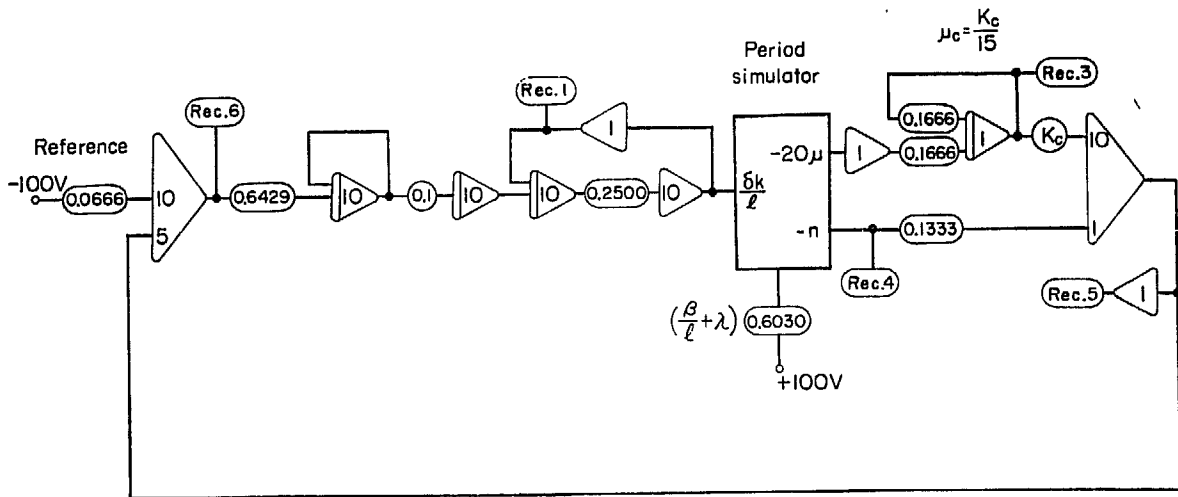


Fig. 14 Connection diagram of automatic start-up system model.

設定ペリオドが等しければペリオド伝達関数は等しくなるので、発振周波数の変化の様子は両方法とも同一である。

5.3.1 ゲイン調整法

これは基準設定値は固定しておき、ペリオド増幅器ゲイン  $A_2$  を変えてペリオド設定を行なう方法である。設定ペリオドの変化によって、ペリオド制御系のゲイン余有がどのように変化するかその傾向を自動起動制

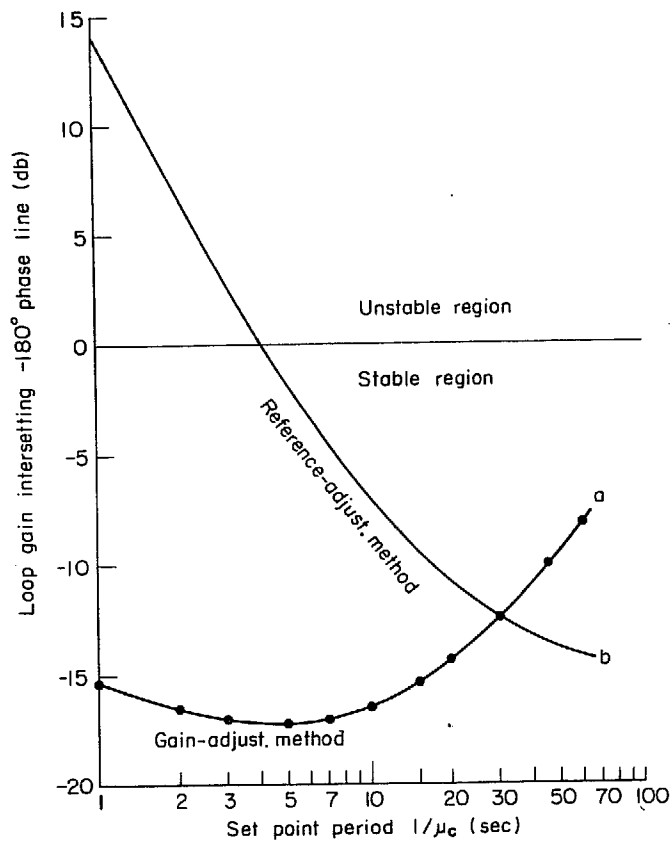


Fig. 15 Characteristic curves of gain margin vs. set point period for two period setting methods in the period control system.

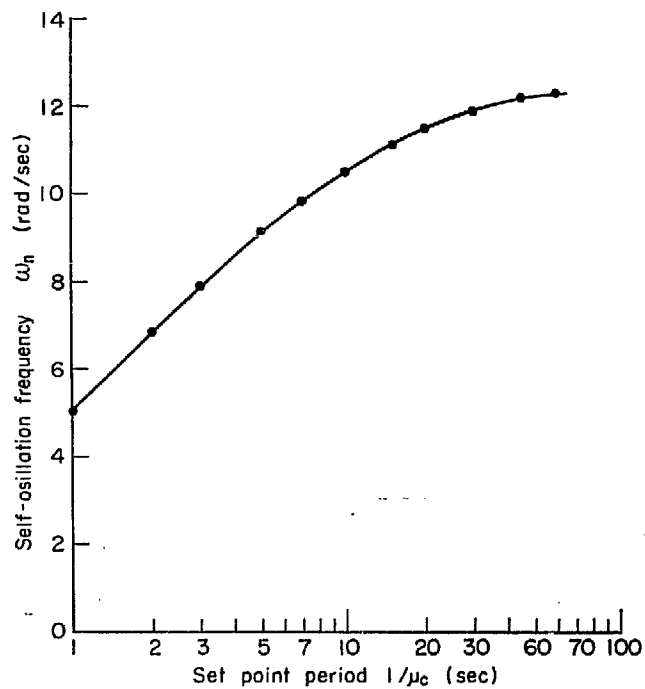


Fig. 16 Characteristic curve of self-sustained oscillation frequency vs. set point period in the period control system.



御系モデルから測定した結果が Fig. 15 の曲線(a)である。ただし、この測定で Fig. 9 に示される原子炉はペリオド・シュミレータで置き換えられている。結果は Fig. 11 で計算したゲイン余有とよく一致している。

ゲイン調整法ではゲイン  $A_2$  を小さくすることによって設定ペリオドを短くする一方、ペリオド伝達関数のゲイン定数は増加する。したがって、これら2つのゲイン変化の差によってゲイン余有変化の様子が決定される。設定ペリオドの比較的長い範囲では、ペリオド増幅器のゲイン低下によってゲイン余有は増えるが、設定ペリオドが短くなると、ペリオド伝達関数のゲイン増加に相殺されてゲイン余有の変化は少なくなる。

5.3.2 基準設定値調整法

この方法ではペリオド制御系のゲイン定数に変化がないので、設定ペリオドが短くなるとペリオド伝達関数のゲイン増加が一方向的に効いてゲイン余有は急激に少なくなり、ひいては安定性を著しく劣化する。この様子は Fig. 15 の曲線 (b) に示す通りである。したがって、設定ペリオドの範囲を大幅に変える自動起動制御系で、この方法によるペリオド設定をおこなうには困難がある。しかし、設定ペリオドの長い範囲で設定値をわずかに変える際には、この方法もゲイン調整法もゲイン余有の変化の傾向は逆であるが、その変化分

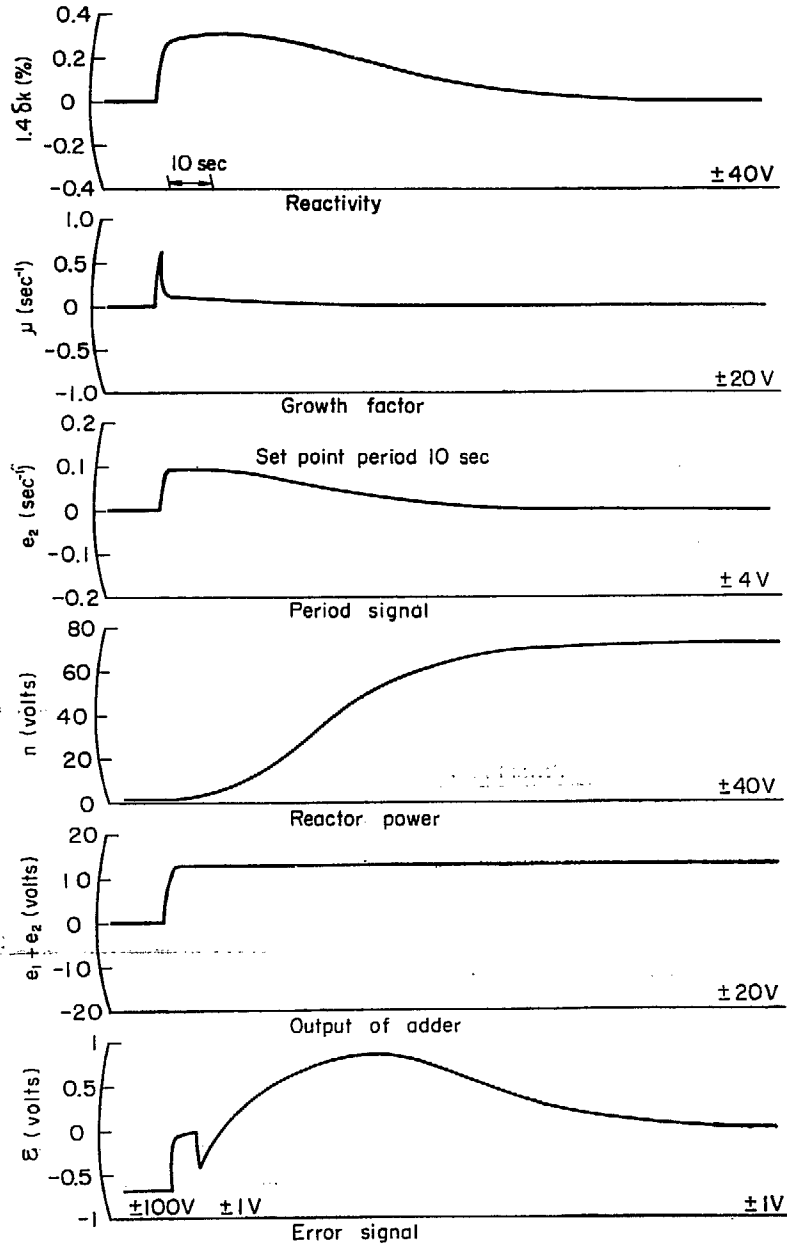


Fig. 17 An example of automatic start-up of the simplified model on analog computer where set point period is 30 sec.

に大差はない。なお Fig. 15 の曲線 (b) は曲線 (a) における測定値からゲイン変化を考慮して計算されたものである。

以上、2つの設定法を比較してみたが、外国の例に見られる自動起動制御系では、ペリオド設定にゲイン調整法を用いるのが多いようである。それは、基準設定値調整法では設定ペリオドを変えることによって設定出力も変化するためである。そこで、設定出力に影響せず、ゲイン余有も変化なく設定ペリオドを変えられるような両方法の混合形式が考えられる<sup>15)</sup>。

#### 5.4 自動起動制御系モデルによる試験

自動起動制御系がその働作を開始するに際しては、次の3つの場合からの起動がある。

- (a) 臨界未満状態からの起動
- (b) 低出力臨界状態からの起動
- (c) 高出力臨界状態からの炉出力変更

(a) の場合は原子炉停止時の残留出力や中性子源レベルからの起動であり、(b) は起動がペリオド制御系のみによって開始されるようなきわめて低い出力からの起動である。(c) は定出力制御されている原子炉が、その出力レベルを変更するため1デカート程度の再起動をし、したがってこのときは、ペリオド制御系とともに最初から出力制御系も働作する場合である。

Fig. 8 の自動起動制御系モデルを設定ペリオド10秒で試験した1例を Fig. 17 に示す。このペリオド設定はゲイン調整法によるもので、以下に示す応答曲線もすべて同様である。

##### 5.4.1 ペリオド信号応答

Fig. 17 の場合、チャンネル3のペリオド信号の応答に行き過ぎは見られないが、チャンネル2の上昇率にはその微分特性のため大きな行き過ぎが見られる。しかし、上昇率そのものはこの場合物理的な量を直接表現するものでなく、制御の立場から考えればペリオド信号の応答が重要である。

このモデルのペリオド制御系に関する開回路ゲイン-位相特性は設定ペリオドをパラメータとして Fig. 11 のごとく示される。各設定ペリオドについてのペリオド信号の応答は Fig. 18-a および -b のように得られる。これはペリオド制御系のみが動作する (b) の場合である。原子炉の非線型性のため応答の様子は各設定ペリオドで異なるが、Fig. 11 から予想されるように、設定ペリオドの短い場合は比較的低周波の振動傾

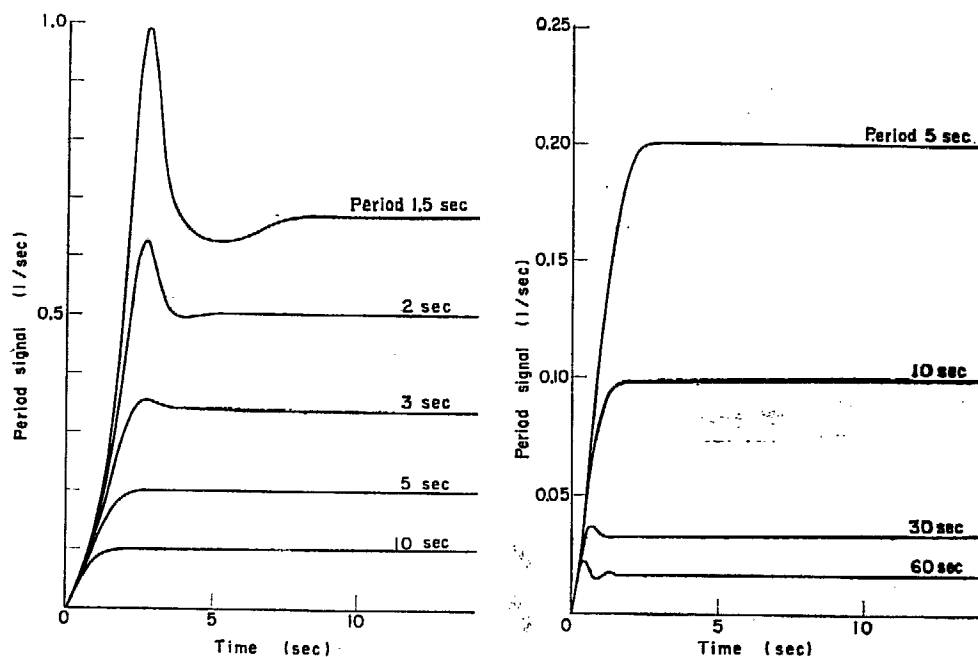


Fig. 18-a Time-response of period signal for various set point periods where only the period control system is in operation.

Fig. 18-b

向を有し、設定ペリオドが長くなるに従い応答はよくなる。しかし、さらにペリオドの長い場合はふたたび振動的となる。

低周波の振動傾向はゲイン-位相特性が低周波領域でくびれて位相余有が小さくなるためであり、後者の振動傾向はペリオド設定のゲイン調整法からくるゲイン余有の減少のためである。しかし、実際問題として、10秒以下の設定ペリオドで通常の原子炉が起動されることはないだろうし、制御系も複雑になって、ここに示した応答がそのままあてはまることはないが、自動起動制御系設計にあたっては、このような傾向への配慮は必要と思われる。

ここでは代表的な自動起動の例である (b) の場合について述べたが、実際問題として制御棒速度は一定なので、このことから応答の様子は実際のものとは異なる。また、(a) の場合に対しては制御棒速度の制限からペリオド信号応答は (b) の場合よりはるかにゆるやかであり、(c) に対しても出力制御系が効いているためペリオド信号応答の行き過ぎは押えられる傾向にある。

#### 5.4.2 出力信号応答

Fig. 17 で原子炉出力に相当するチャンネル4の電圧範囲は1V から約72V までで、炉出力は滑らかに上昇するが、目標出力に漸近的に近づくので、目標出力到達時間が掛り過ぎる欠点がある。Fig. 19 はペリオド制御系とともに出力制御系が動作したときの炉出力応答で、(c) の場合に相当する。位相余有を大きくするような適当な補償回路の挿入によって、設定ペリオド数秒での自動起動も原理的には可能であることを示している。これによって、目標出力到達時間はきわめて短縮されるが、実際的にはペリオド制御のみによって出力を上昇させ、あるレベルに達したとき出力制御系を投入して目標出力到達をはやめる。しかし、この出力制御系投入レベルの選定によっては、出力が行き過ぎを生じることもある。

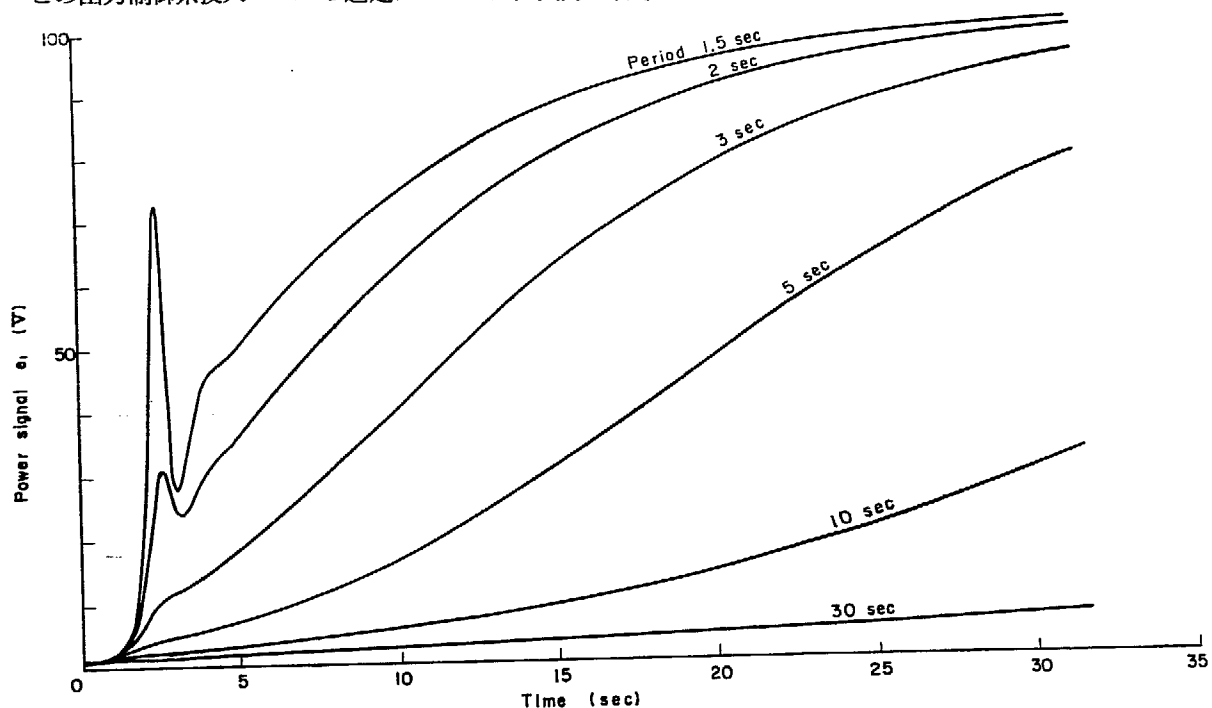


Fig. 19 Time-response of power signal  $e_1$  for various set point periods where both the period and power control systems are in operation.

#### 5.4.3 誤差信号

チャンネル5は加算回路出力信号で、これと基準設定電圧との差がチャンネル6の誤差信号である。Fig. 17の自動起動の例ではペリオド制御系の過渡状態が終わった後も、原子炉出力上昇中は誤差信号が完全に零にはならない。このことは、上昇出力とペリオドとのプログラムに関する(23)式が、わずかではあるが誤差をもつことを示している。また、これはFig. 10のゲイン余有変化の様子にも影響を与えることになる。Fig. 20-aは、設定ペリオド30秒でペリオド制御させ、系のゲインを徐々に上げて自励振動させておき、こ

のような状態で出力制御系を投入した際の誤差信号の変化の様態を示すものである。この場合のモデル制御系では出力制御系の投入と同時に炉出力が上昇し、それに伴って誤差信号の振動振幅が次第に減少していく。振幅が小さくなったところで自動起動制御系のゲインをわずかに上げてやると、振動振幅は一時的に増加するが、また減少傾向をたどる。この例では、振動する誤差信号の平均値の零からの偏差は僅少であり、(23)式は比較的良好に成立する。したがって、Fig. 10のゲイン-位相特性の変化から予想されるように、出力上昇にともないペリオドが長くなるとゲイン余有が大きくなる傾向と、よい一致を示している。

しかし Fig. 20-b の設定ペリオド3秒の場合では、出力制御系の投入後、誤差信号の振動振幅が一時的にわずかに増大している。いま、ここで調べているモデルでは、ペリオド3秒の炉出力上昇が急激で系が十分な補正動作をおこなえない。したがって、誤差信号の平均値が零からずれる。これはペリオドのプログラムが(23)式から計算される値より短めの傾向をとって変化していくためである。このことは等価的に基準設定値を変えて設定ペリオドをわずかに短くしたことになる。Fig. 15の曲線(b)からも推定されるように、この場合、系のゲイン余有が少なくなるので、誤差信号の振動振幅は一時的に増大する。しかし、炉出力上昇とともにペリオド  $1/\mu_0$  は長くなり、ゲイン余有も大きくなるので、この振動は次第に減衰していくことになる。

ペリオドのプログラムからのずれによる一時的な不安定傾向は、ここに述べたように設定ペリオドが短くゲイン余有も少ない場合に起こる。しかし、実際の自動起動制御系で設定されるような比較的長いペリオドの場合でも、制御系各要素の時定数が大きい場合には同じような傾向をとる可能性がある。しかし、ゲイン余有の減少は通常わずかであり、10 db 以上の十分なゲイン余有をとって設計された制御系に対しては、このことが問題になることはないだろう。

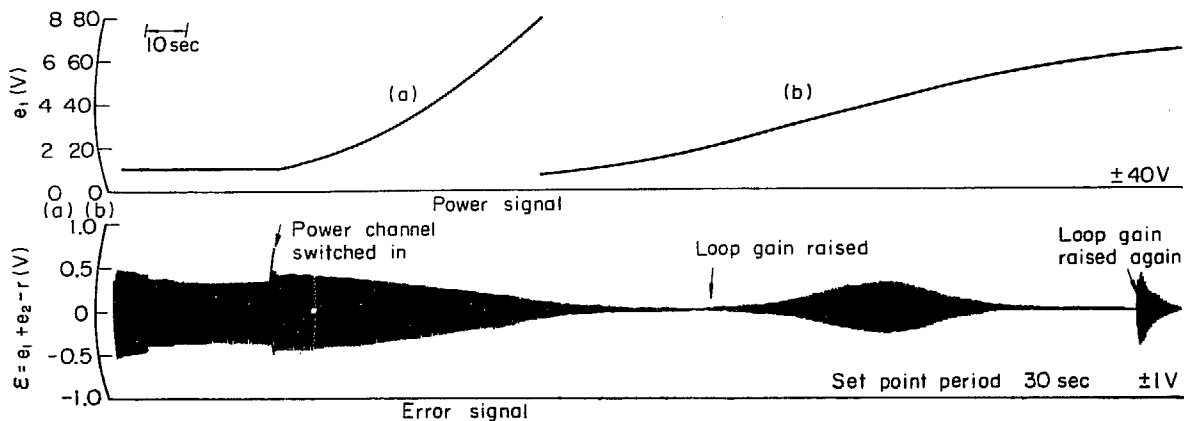


Fig. 20-a Oscillating error signal showing time-variation of the gain margin of automatic start-up system where set point period is 30 sec.

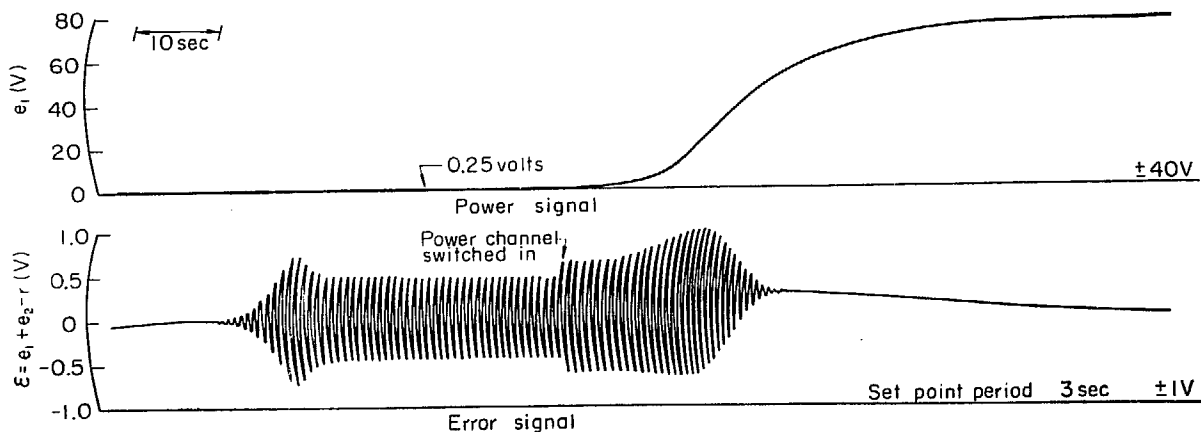


Fig. 20-b Oscillating error signal showing time-variation of the gain margin of automatic start-up system where set point period is 3 sec.

### 6. 対数計数率ペリオド計の最適設計

CIC 領域に関する自動起動については、第5節で取り上げたモデルにさらに適当な補償回路を考慮すればよいが、さらに低出力領域へ自動起動範囲を拡大するためには、計数管と対数計数率ペリオド計を使って計数管領域でのペリオド信号を得るのが実現容易な方法である。対数計数率計には、用いる対数変換素子によって2種類がある。1つは多重ダイオード・ポンプ回路<sup>16)17)</sup>を用いたもので、他は筆者らが使用した対数特性ダイオードによるものである。後者の型が使われたのは、普通に用いられていることと、理論的取扱いの容易なためである。そこでまず、このような計数率計を制御系に組み入れた場合に考えるべき特性を調べる必要がある。

計数管から得られるパルス計数率には、統計的な動揺が存在する。その測定範囲である低出力領域（JRR-1 では約 0.5 W 以下）では、核分裂過程および計数管の中性子検出過程はともに偶然性のみで支配される確率過程であると考えられる。したがって平均計数率一定の場合、そのパルス計数率の動揺はポアソン分布をすとみられる（付録3参照）。しかし JRR-1 の炉出力 500 W 以上では、原子炉での核分裂過程に炉出力の数%以内の振幅を持った周期的振動が観察されている<sup>18)</sup>。

パルス計数率の動揺によって、ペリオド信号はまたペリオド無限大の点を中心に統計的動揺をする。ペリオド制御の立場からみた場合、このペリオド信号動揺を小さくすることが望まれるが、一方対数計数率ペリオド計に挿入する低域濾波器の時定数はなるべく小さくして、ペリオド計の応答を改善することが望まれる。そこで、この相反する問題の妥協点を見出すような最適設計の問題が生ずる。対数計数率計ポンプ回路の等価時定数は、対数特性ダイオードの非線型性のため、平均パルス計数率の変化に伴って変っていくものである。自動起動ではパルス計数率の平均値が指数関数的に上昇していくので、最適設計は非線型系の立場を考慮せねばならない。

#### 6.1 対数計数率ペリオド計回路

対数特性ダイオードを用いた対数計数率ペリオド計の原理的な回路は Fig. 21 に示す通りである。ただし、ここで  $R_L$  は対数特性ダイオードの等価微分<sup>33)</sup> 抵抗である。微分回路には、その時定数を大きくとるため  $R_D$  と並列に  $C$  が挿入されているが、この  $C$  の大きさは回路のゲイン定数には影響を与えない。またゲイン  $A_P$  を持つペリオド増幅器の出力抵抗は  $R_F$  に比較して十分大きいとする。この仮定はチョップパ一による安定化増幅器に通常あてはまる。

対数特性ダイオードの電圧・電流特性は次のように表わされる。

$$e_L = D \ln i + B \tag{18}$$

ただし、この場合の  $i$  はパルス計数率から、ポンプ回路によって変換されたアナログ電流である。この関係から  $i$  の微小変化に対するダイオードの特価抵抗は

$$R_L = \frac{de_L}{di} = \frac{D}{i} \cong \frac{D}{i_0} \tag{28}$$

ここで  $i = i_0 + \Delta i$ 。また対数計数率ペリオド計の各時定数を以下のごとく定めると、その特性は Fig. 22 の

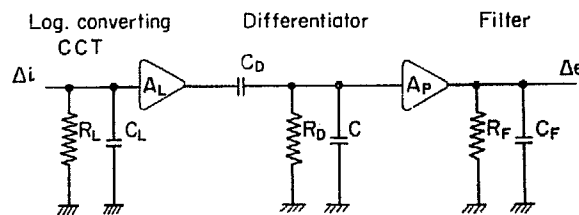


Fig. 21 Schematic diagram of LCRPM.

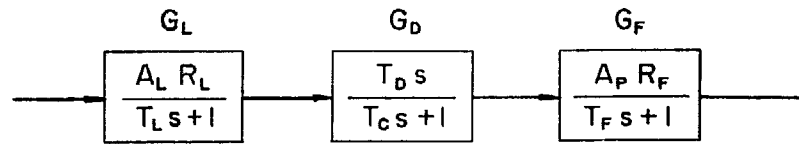


Fig. 22 Laplace transform block diagram of LCRPM.

ごとく伝達関数表示される。

$$T_L = R_L C_L$$

$$T_D = R_D C_D$$

$$T_C = R_D(C_D + C)$$

$$T_F = R_F C_F$$

## 6.2 対数計数率ペリオド計の静特性

対数特性ダイオードを流れる電流が上昇率  $\mu_0$  で指数関数的に増加する場合

$$i = I e^{\mu_0 t} \quad (29)$$

とおける。ただし  $I$  は定数である。このダイオードの両端に発生する電圧は (18) および (29) 式より

$$e_L = D \mu_0 t + D \ln I + B$$

これが微分回路を通してペリオド信号として現われる電圧は一定で

$$e_0 = A_L A_F R_F T_D D \mu_0 = A \mu_0$$

$$\text{ここで } A = A_L A_F R_F T_D D \quad (30)$$

(30) 式は対数計数率ペリオド計の等価ゲイン定数を表わすものであり、そのうち  $D$  は対数特性ダイオードの等価ゲイン定数と考えられるものである。

## 6.3 ペリオド信号の動揺

核分裂計数管から得られるパルス計数率の平均値が一定の場合、このパルス時系列はポアソン分布をするものとして扱うことができる。そこで対数計数率計のポンプ回路に一定の電荷  $Q$  を持ったパルスが単位時間当たり  $p$  の割合でランダムに到来するとき、Fig. 22 の入力側における電力密度スペクトルは

$$\Phi_{ii}(\omega) = \frac{1}{\pi} Q i_0$$

である。ただし  $i_0$  は対数特性ダイオードを流れる電流の直流成分で  $i_0 = pQ$ 。

Fig. 22 の出力側におけるペリオド信号の電力密度スペクトルは

$$\Phi_{oo}(\omega) = |G(j\omega)|^2 \Phi_{ii}(\omega)$$

で表わされる。さらに入力側におけるパルス計数率の統計的変動により、出力側のペリオド信号は、ペリオド無限大の位置を中心に動揺する。この動揺の分散は W. M. GRIM<sup>19)</sup> らが計算したように、

$$\begin{aligned} \sigma_0^2 &= \int_0^\infty \Phi_{oo}(\omega) d\omega = \int_0^\infty |G_L(j\omega) G_D(j\omega) G_F(j\omega)|^2 \frac{p}{\pi} Q^2 d\omega \\ &= \frac{A^2}{2p} \cdot \frac{1}{(T_L + T_C)(T_C + T_F)(T_F + T_L)} \\ &= \frac{(QA)^2}{2} \cdot \frac{1}{(T_C + T_F)} \cdot \frac{p}{(T_C + T_F)(\sqrt{T_C} + \sqrt{T_F})^2} \end{aligned} \quad (31)$$

(31) 式で計算される  $\sigma_0$  の分布は Fig. 23 に示す通りである。

$\sigma_0$  を最大にする  $p$  の値およびそのときの  $\sigma_0$  の値は  $\partial \sigma_0^2 / \partial p = 0$  を計算してそれぞれ次の式で示される。

$$p_m = \frac{DC_L}{Q \sqrt{T_C T_F}} \quad (32)$$

$$\sigma_{0m}^2 = \frac{QA^2}{2DC_L} \cdot \frac{1}{(T_C + T_F)(\sqrt{T_C} + \sqrt{T_F})^2} \quad (33)$$

ここで簡単のため次の条件が成立する場合について考える。すなわち

$$T_C = T_F \equiv T$$

この条件は微分回路に白色雑音が入ったとき、ペリオド計出力における動揺の標準偏差一定のもとで、ペリ

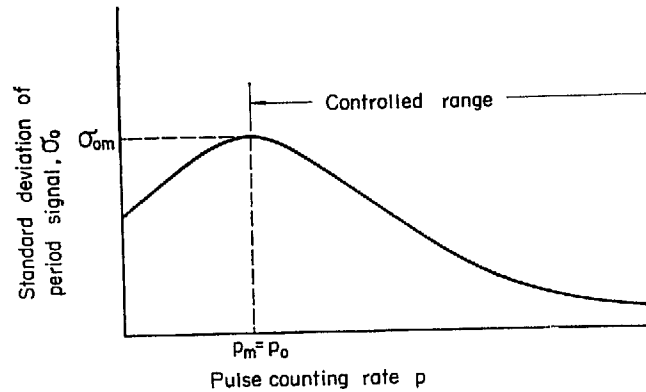


Fig. 23 Distribution of period signal fluctuations.

オド計回路の応答を最も速くするものである<sup>20)</sup>。この条件を考慮すると、(31)、(32) および (33) 式は次のようになる。

$$\sigma_0^2 = \left(\frac{QA}{2}\right)^2 \frac{p}{T(pQT + DC_L)^2} \quad (34)$$

$$p_m = \frac{DC_L}{QT} \quad (35)$$

$$\sigma_{0m} = \frac{K}{T\sqrt{C_L}} \quad (36)$$

ただし 
$$K = \frac{A}{4} \sqrt{\frac{Q}{D}}$$

#### 6.4 対数計数率ペリオド計の最適条件

次に第6.3節で求めた  $\sigma_{0m}$  を一定値に押えて、対数計数率ペリオド計の応答が最も速くなるような  $T$  および  $C_L$  の条件を見いだす。この計算を簡単にするためペリオド計の遅れ要素のみに着目し、これの絶対値を最小とする関係を求める。すなわち、

$$\begin{aligned} |H|^2 &= |(sT_L + 1)(sT + 1)|^2 \\ &= \left\{ \left(\frac{\omega D}{pQ}\right)^2 C_L^2 + 1 \right\} \left\{ \left(\frac{\omega K}{\sigma_{0m}}\right)^2 \frac{1}{C_L} + 1 \right\}^2 \end{aligned} \quad (37)$$

より 
$$\frac{\partial |H|^2}{\partial C_L} = \omega^2 \left\{ C_L + \left(\frac{\omega K}{\sigma_{0m}}\right)^2 \right\} \left\{ \left(\frac{D}{pQ}\right)^2 C_L^3 - \left(\frac{K}{\sigma_{0m}}\right)^2 \right\} = 0$$

したがって 
$$\left\{ C_L = \frac{Q}{D} \left(\frac{Ap}{4\sigma_{0m}}\right)^{\frac{2}{3}} \right. \quad (38)$$

$$\left. \left\{ T_L = T = \left(\frac{A}{4\sigma_{0m}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{p}\right)^{\frac{1}{3}} \right. \right. \quad (39)$$

これが求める関係であり、対数計数率ペリオド計の遅れ要素の時定数をすべて等しくする。この2式から

$$p = \frac{DC_L}{QT}$$

の関係を得る。これは(35)式の関係と同一であるから

$$p = p_m$$

である。すなわち、平均計数率  $p$  を任意に選んで(38)および(39)式から  $C_L$ 、 $T_L$  および  $T$  を決めると、 $\sigma_0$  はその選ばれた  $p$  の計数率のとき最大となるようにペリオド計の特性が決められることになる。また、そのときペリオド計全体の応答は各パラメータの他の異なる組み合わせのときより最も速くなる。しかし、以上の計算ではパルスの平均計数率が一定であるとした場合であって、原子炉自動起動におけるペリオド制御の場合には  $p$  が時間とともに大幅に変わるものである。しかも  $p$  の変化は  $R_L$ 、すなわち  $T_L$  にも変化を与える。

したがって、 $p_m$  を対数計数率計のどこに選ぶべきかが次の問題となる。そこで(38)式を(37)式に代

入すると、

$$|H|^2 = \left\{ \left( \frac{\omega}{p} \right)^2 \left( \frac{Ap_m}{4\sigma_{0m}} \right)^{\frac{4}{3}} + 1 \right\} \left\{ \omega^2 \left( \frac{A}{4\sigma_{0m}} \right)^{\frac{4}{3}} p_m^{-\frac{2}{3}} + 1 \right\}^2 \quad (40)$$

(40) 式によると、 $p$  が小さくなると  $|H|^2$  は単調に増大する。すなわち、応答が遅くなる。したがって、対数計数率計はその使用下限  $p=p_0$  において最大遅れを生ずるから、1つの基準として  $p_0$  の点で遅れが最も小さくなるように  $p_m$  を決めるのがよい。すなわち、

$$\frac{\partial |H|^2}{\partial p_m} \Big|_{p=p_0} = \frac{4}{3} \left( \frac{\omega}{p_0} \right)^2 \left( \frac{A}{4\sigma_{0m}} \right)^{\frac{4}{3}} (p_m)^{-\frac{5}{3}} \left\{ \omega^2 \left( \frac{A}{4\sigma_{0m}} \right)^{\frac{4}{3}} (p_m)^{-\frac{2}{3}} + 1 \right\} (p_m^2 - p_0)^2 = 0 \quad (41)$$

より  $p_m = p_0$  となる。

この関係から次のことがいえる。すなわち、対数計数率ペリオド計を使用して原子炉のペリオド制御を行なう場合、その制御系が安定に動作する範囲でペリオド信号の動揺を最大にする  $p_m$  の点をできるだけ低くとる。そして Fig. 23 に示すように  $p_m$  より大きい平均パルス計数率の範囲をその使用範囲にとれば、ペリオド信号の動揺は比較的小さく、速応性を得ることができる。このようにして、ペリオド制御範囲は1本の計数管で3デカド以上を楽にカバーできよう。 $p_0$  の点でペリオド制御系が安定ならば、それ以上の計数率範囲では対数変換回路の遅れが小さくなるから、その制御系は安定なのが普通である。パルス計数率の動揺によるペリオド信号のふらつきは計数率の増加とともに減少し、対数計数率ペリオド計の応答は改善されていく。この関係は Fig. 24 に見られる通りである。ここで周波数応答改善の尺度として、ゲインが3db減衰するときの折点周波数をとっている。

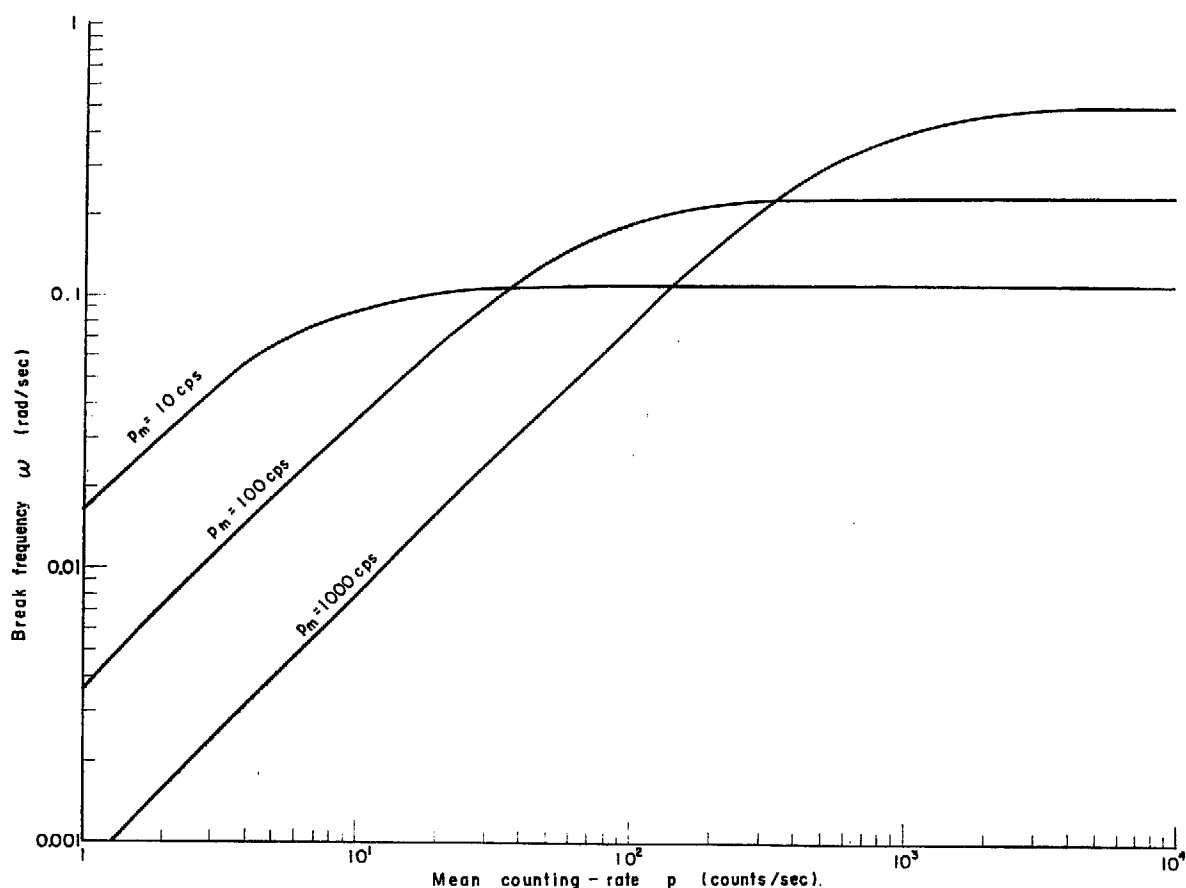


Fig. 24 Frequency-response variation of delay factors of the optimum-designed LCRPM as a function of pulse counting-rate.

しかし一方、自動起動の初期には大きな負の反応度が原子炉に与えられているので、制御棒は Fig. 39 に見られるごとく一定速度で引き抜かれる。このときはまだ、ペリオド制御の補正動作はおこなわれていな



い。したがって、このように臨界未満状態から起動する場合には、ここで求めた  $p_m$  よりわずかに低い計数率点から起動を開始しても差しつかえないものと考えられる。

Fig. 25 は (39) 式を図示したもので、この式の  $p$  には前述したように  $p_m$  を与えている。さらにもし  $p_m = p_0$  であれば Fig. 25 は最適条件を満足する対数計数率ペリオド計の時定数の変化の様相を図示することになる。 $\sigma_{0m}$  を規準化してペリオドまたは上昇率で表わすのが直観的でわかりやすい。そこで  $\sigma_{0m} = A\mu_m$  とおけば (39) 式は

$$T = \left(\frac{1}{4\mu_m}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{p_m}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{42}$$

となる。 $p_m$  を小さくすると、最適条件を満たすためには時定数を急激に増やすことが必要であり、このことは応答をきわめて悪くする。

任意に定めた  $p_0$  を中心とする計数率の微小変動を考えると、(40) 式は使用下限計数率  $p_0$  における対数計数率ペリオド計の周波数応答の目安を与える。Fig. 26 は  $p_m$  を変数とした (40) 式をグラフにしたものである。同図の計算例では、計数率 10 cps で  $p_m = p_0$  の関係が満たされ、このとき  $|H|$  はすべての周波数に対して最小値をとる。すなわち、入力信号の微小変動に対して対数計数率ペリオド計の応答が最も速くなる。 $p_m$  を  $p_0$  から上下どちらに変えても応答は悪くなる。

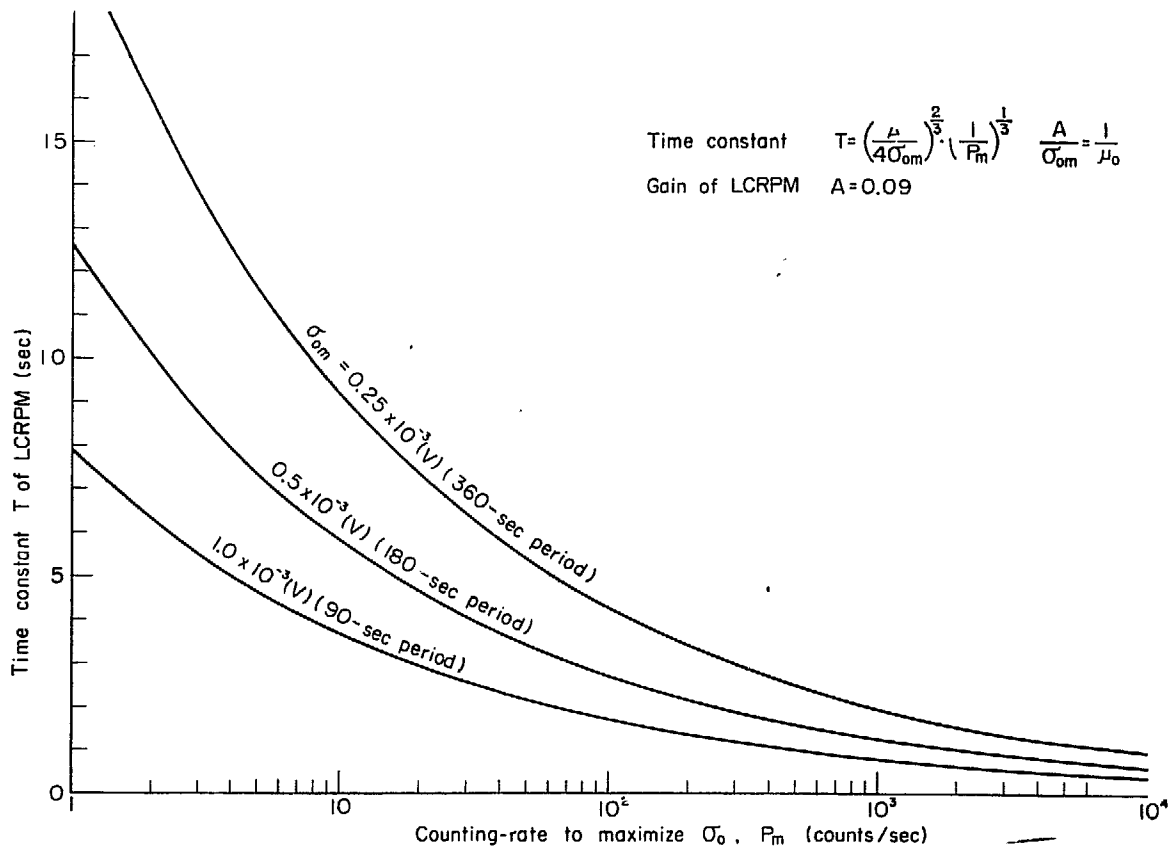


Fig. 25 Variation of time constant  $T$  as a function of  $p_m$ .

### 6.5 ペリオド・スクラムの起きる割合

前節までに述べた対数計数率ペリオド計の最適条件を決める際には、まず  $p_0$  と  $\sigma_{0m}$  とを与えることが必要である。 $p_0$  は制御系全体の制御特性とか安定性、1本の計数管の使用範囲をなるべく広くとりたいという要求等から総合的に判断されねばならない。 $\sigma_{0m}$  については、ペリオド信号の動揺が制御系を介して滑らかに上昇する原子炉出力に影響を与えない程度に最大標準偏差を決めるのがよいと考えられる。それと同

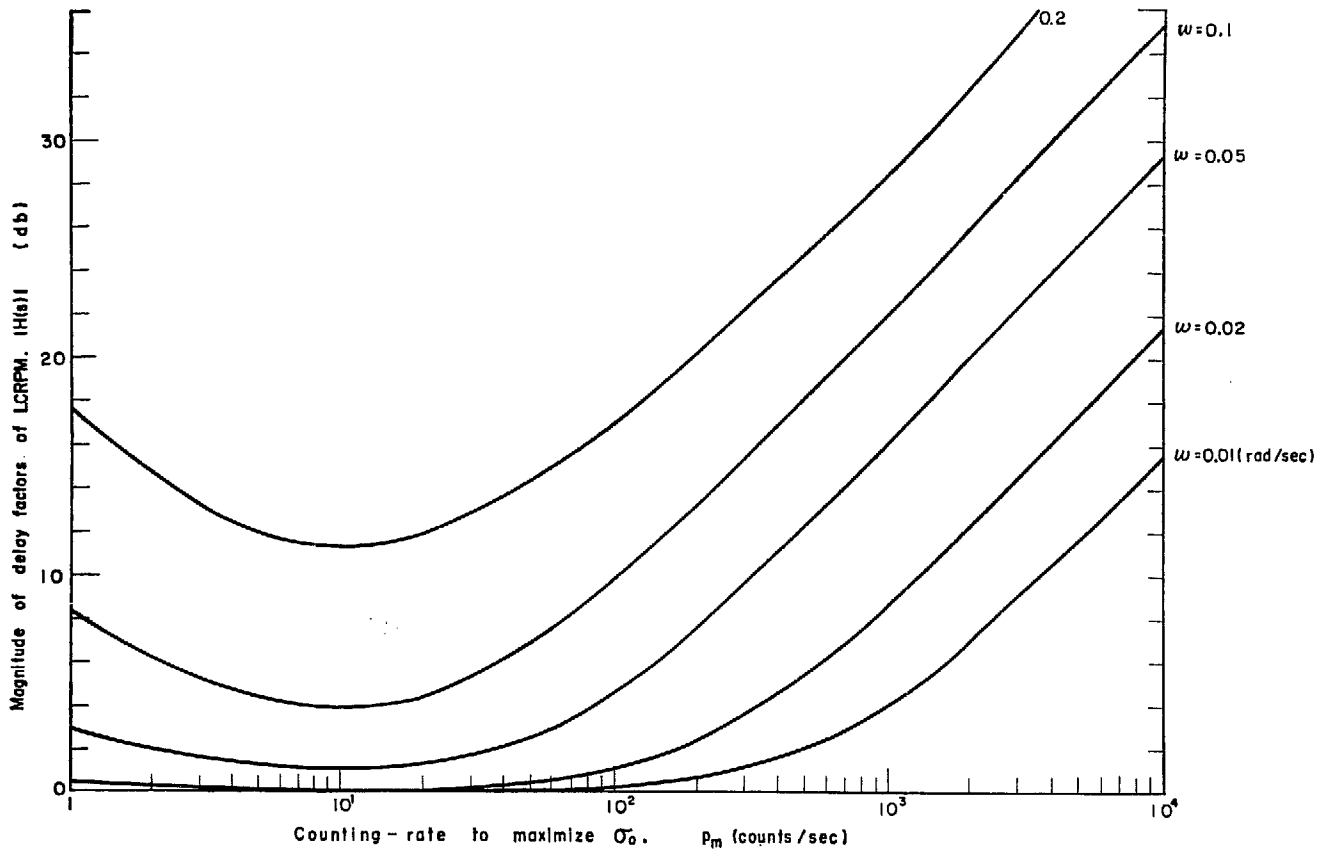


Fig. 26 Variation of magnitude of delay factors,  $|H(s)|$ , as a function of  $p_m$ , showing that  $|H(s)|$  is minimized at  $p_m=10$  cps for all frequencies of  $\omega$  where  $p_0=10$  cps.

時に、ペリオド信号動揺がペリオドのあるスクラム設定レベルを越えてペリオド・スクラムを起こす割合が事実上無視しえる程度に小さいことを確認しておくことが望ましい。

原子炉出力が一定の場合、付録3で実験的に確かめたように、計数管からの到来パルスはポアソン分布をする。また、ペリオド信号はペリオド無限大の前後で動揺する。このときペリオド信号がパルス計数率動揺のため、スクラム・レベル  $e_s$  を越える単位時間当りの平均回数是一般に次式で与えられる<sup>21)22)23)</sup>。

$$P(e_s) = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\int_0^\infty \omega^2 \Phi_{00}(\omega) d\omega}{\int_0^\infty \Phi_{00}(\omega) d\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{e_s^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad (43)$$

ここで  $\sigma_0^2$  および  $\Phi_{00}(\omega)$  はそれぞれペリオド信号動揺の分散および電力密度スペクトルで、 $\sigma_0^2$  は (24) または (27) 式で与えられる。

さらに

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \omega^2 \Phi_{00}(\omega) d\omega &= \frac{p}{\pi} Q^2 \int_0^\infty \omega^2 |G_L \cdot G_D \cdot G_F|^2 d\omega \\ &= \frac{A^2}{2p} \cdot \frac{T_L + T_C + T_F}{T_L T_C T_F (T_L + T_C) (T_C + T_F) (T_F + T_L)} \end{aligned}$$

したがって

$$P(e_s) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{T_L + T_C + T_F}{T_L T_C T_F}} \exp\left(-\frac{e_s^2}{2\sigma_0^2}\right)$$

(35) および (36) 式の関係を上式に代入すると、

$$P(e_s) = \frac{1}{2\pi T} \sqrt{1 + 2 \frac{p}{p_m}} \cdot \exp\left\{-\frac{2e_s^2}{(4\sigma_0 m)^2} \cdot \frac{(p/p_m + 1)^2}{p/p_m}\right\} \quad (44)$$

ただし  $T_C = T_P = T$ ,  $T_L = \frac{DC_L}{pQ}$  である。

Fig. 27 は、この式を図示したもので、縦軸は  $T$  秒間にペリオド信号が不規則な動揺によってレベル  $e_s$  を下から越える平均の割合を示す。対数計数率ペリオド計の使用範囲が  $p_m$  より上であれば、この計算は比較的よい近似で成り立つ。というのは Fig. 24 に見られるように、計数率変化の周波数特性に及ぼす影響が無視できる程度に小さくなり、この計数率計を線型と見なせるからである。筆者らの自動起動制御装置で採用された値は

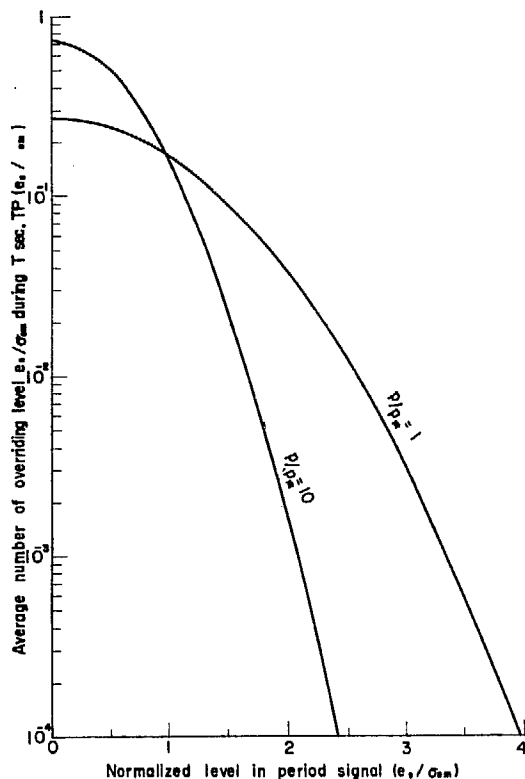


Fig. 27 Normalized curves of Eq.(18) that represent average number of overriding level  $e_s/\sigma_{0m}$  during a time  $T$  sec for  $p/p_m=1$  and 10.

$$p_m = 10 \text{ cps}, \quad \sigma_{0m} = 0.5 \times 10^{-3} \text{ Volts.}$$

ペリオド 30 秒のとき、ペリオド計の出力電圧は 3 mV であり、したがってこの  $\sigma_{0m}$  はペリオド 180 秒に相当する。一方 (30) 式から対数計数率ペリオド計の等価ゲイン定数は  $A=0.09$  であるから、これら 3 つの値を (39) 式に代入して  $T=5.90$  を得る。そこでペリオド信号の動揺が最大となる  $p=p_m$  において、この信号が  $e_s=3$  mV (ペリオド 30 秒に相当) を越える割合を計算すると、 $P(e_s)=7.4 \times 10^{-10}/\text{sec}$ 。

これはペリオド信号がその動揺によって 30 秒のレベルを越えるのは 5 カ月に 1 回であり、事実上起こらないことを示している。すなわち、通常計測用に使われるものに比較してペリオド制御に使われる対数計数ペリオド計はきわめて応答が遅く、この回路に対してはパルス計数率の統計的動揺によるペリオド・スクラムの心配はいらぬことを示している。

## 7. 自動起動実験装置

前節までに述べてきた自動起動制御系の安定性やペリオド設定方式、自動起動可能範囲の拡大、対数計数率ペリオド計の最適設計等を考慮して実験装置を製作した。これは JRR-1 での実験に先立ち、原子炉シュミレータ<sup>10)</sup>および計数率変換器（付録 4 参照）と組み合わせられて室内実験が繰返された。自動起動制御系に対する概念的な安定性の考え方は第 3 節で述べた通りである。しかし、系に多くの制御要素が含まれる場合、PID の補償係数を決定するには、やはりアナコンなり実際の装置について実験的に調べる必要がある。

ペリオド伝達関数が出力伝達関数と異なるのは、それが積分性でない点である。Fig. 10 のゲイン-位相特性からもわかるように、ペリオド制御系の off-set を補償するためには、I 項動作を強く入れねばならない。このようにペリオド制御系と出力制御系とはそれぞれ特性が異なり、また CIC 領域と計数管領域についても特性が異なる。ここでは装置の簡単のため PID 補償回路はこれら各系統共通に適用され、3 項動作の各係数は原子炉シュミレータを使用した自動起動制御系から実験的に決定された。

使用されたシュミレータは、普通の原子炉核特性に関するもので、その出力は中性子密度である。制御棒はポテンショメータによって置き換えられ、反応度はこのポテンショメータの回転角度に正比例して与えられる。

一方、シュミレータ出力は高抵抗を介して対数増幅器へ信号を送り、これで CIC 領域に関するペリオド制御実験をおこなった。この接続には対数特性ダイオードの非線型性に基づく対数増幅器の入力インピーダンス変化を考慮する必要があり、ペリオド制御実験は高抵抗が 1000 M $\Omega$  のとき 1.5 デカード程度に押えられる（付録 5 参照）。さらに計数管領域に関するペリオド制御を室内実験するためには、<sup>60</sup>Co の  $r$  線と ZnS とを利用した計数率変換器を試作して、パルス計数率の統計的動揺をシュミレートした。この変換器は原子炉シュミレータと対数計数率計とを結び付けるもので、これによって計数管領域での自動起動実験をほぼ完全にシュミレートすることができる。

以上の室内実験によって自動起動制御系の調整がおこなわれ、その後 JRR-1 での自動起動実験がおこなわれた。実験にあたっては、JRR-1 に既設の計測制御系統とは別個に実験用の系統が用意された。核分裂計数管 2 本と CIC 3 本が JRR-1 の熱中性子実験孔に挿入され、これらの検出器が測定する領域の分担は Fig. 28 に示す通りである。この実験では計数管領域でのペリオド制御および出力制御にむしろ重点が置かれたので、CIC の使用範囲は測定可能範囲より縮小されている。実験装置を簡単にするため Fig. 29 の制御系統図に見られるように、計数管 FC-1 からのパルスはペリオド制御、出力制御および出力モニター用として共通に利用されている。しかし CIC についてはそれぞれの系統ごとに別のものが使用された。

### 7.1 ペリオド制御系

計数管領域および CIC 領域でのペリオド制御にはそれぞれ FC-1, CIC-1 が使用された。FC-1 は炉出力 0.5 W 以下での中柱子束検出を分担し、これからのパルスは増幅後波形整形用として使われるパルス発生器を外部駆動する。一方、パルス発生器はまた、対数および直線計数率計の較正用としても利用された。

対数計数率ペリオド計については第 6 節で求めた基準にしたがって最適設計がおこなわれた。使用された特性定数や計算された時定数は TABLE 3 に示すものである。使用下限を  $k_0=10$  cps としたので、この計数率のとき時定数 5.9 秒を持った遅れ回路が 3 個カスケードに接続され、かなり大きな遅れをペリオド制御系に持ち込むことになる。しかし計数率の増加につれて対数変換回路の遅れは減少していく。

一方、CIC 領域におけるペリオド信号はチャンネル 2 のペリオド増幅器から得られる。FC-1 と CIC-1 の測定範囲は重複していて、炉出力が指数関数的増加によって 0.5 W に達すると対数増幅器出力側のメータ・リレー SW. 3 が作動し、ペリオド制御分担の自動切換えがおこなわれる。計数管領域でのペリオド制御は CIC 領域のペリオド制御に引き継がれて、原子炉全出力領域の自動起動を可能にする。

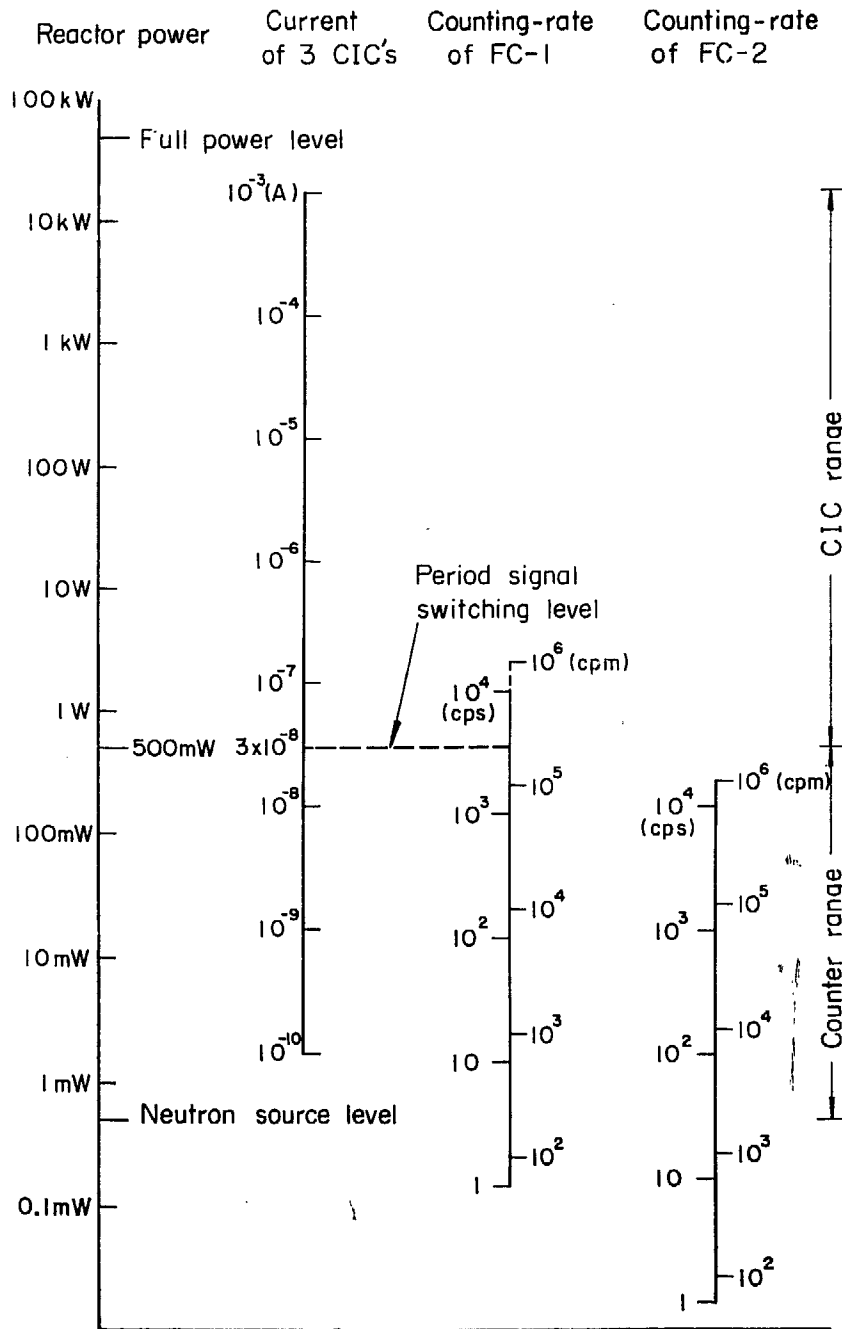


Fig. 28 Instrument-range coverage for automatic start-up control system.

TABLE 3 Characteristic constants and circuit components used in LCRPM

$A$	0.09 Vsec	$C$	60 $\mu$ F
$D$	0.1 V/ne per	$C_D$	1 $\mu$ F
$Q$	1.9 coulomb	$C_F$	1,000 $\mu$ F
$\sigma_{0m}$	0.5 mV (or 180-sec period)	$C_L$	11 $\mu$ F
$p_m$	10 cps	$R_D$	100 k $\Omega$
$p_0$	10 cps	$R_F$	5.8 k $\Omega$
		$T_c$	6.1 k $\Omega$
		$T_F$	5.8 sec

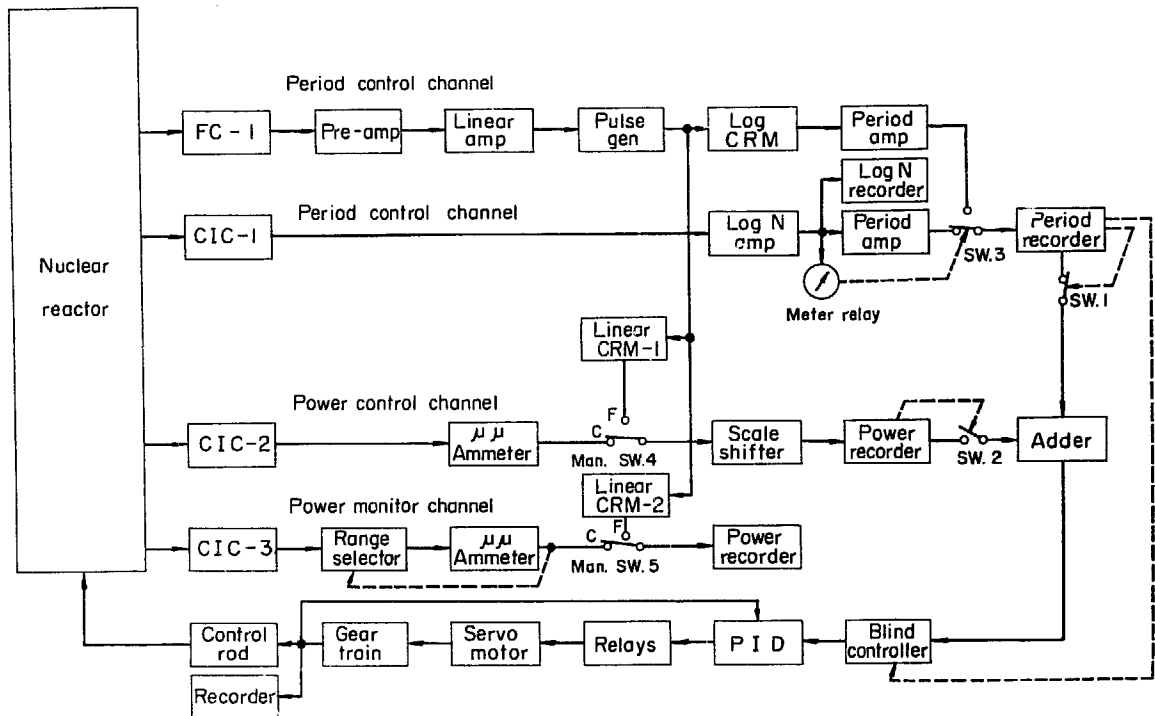


Fig. 29 Block diagram of automatic start-up control system used in the experiments at JRR-1.

一般にペリオド制御系は、その中の微分回路のため非常に外乱を受けやすい。したがって、外乱は出力系にも影響して、精度のよい炉出力定値制御を困難にする。この改善策として、微分回路に適当な大きさの時定数をとることも1つの方法であるが、さらに外乱による影響を除くには、ペリオド制御不要時に、この系を自動的に自動起動制御系から切り離す方法が採られた。Fig. 30で見られるように、ペリオド記録計の出力電圧はペリオド90秒以上および負のペリオドでは零電位にクランプされる。したがって、この範囲のペリオドでペリオド制御系は動作しない。なお5.3.1で述べた設定ペリオドを変えるためのゲイン調整は、実験の都合上考えなかった。簡単のため設定ペリオド変更には基準設定電圧を変えたので、この変更の際、出力設定値も多少変化する。

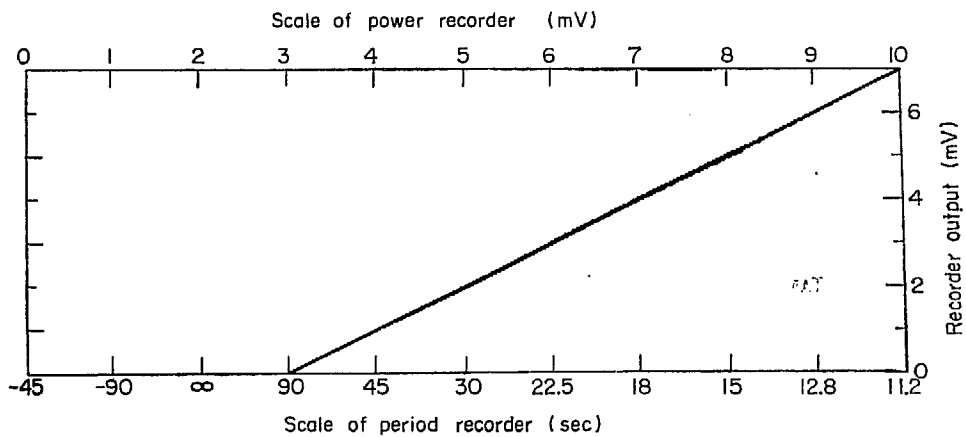


Fig. 30 Input-output relation of period and power recorders.

## 7.2 出力制御系

実験では CIC 領域での出力制御とともに計数管領域での出力制御も同時におこなわれた。これは FC-1 の出力パルスを制御信号として利用したものである。一方、CIC 領域での出力制御信号は CIC-2 から得ら

れ、いずれの領域に出力設定をとるかは SW.4 によって決められる。

出力記録計の出力電圧はペリオド記録計と同様 Fig. 30 に示す特性である。記録計目盛 3 mV 以下では自動的に零電位にクランプされる。すなわち、炉出力が低くてこの範囲にある間は、出力制御系は全く動作せず記録のみをおこなう。

### 7.3 ペリオドおよび出力制御系の自動切換え

原子炉が中性子源レベルから自動起動されると、まず対数計数率ペリオド計の信号によってペリオド制御系のみが動作する。しかし、出力記録計の出力電圧は零にクランプされている。計数率が指数関数的に上昇し、3300 cps に達すると SW.3 が切換えられてペリオド制御は CIC 領域に入る。設定ペリオドが 30 秒の場合では、原子炉出力が設定値の 60% に達すると SW.2 が投入されて出力制御系のクランプがはずされ、ペリオド信号と出力信号との和が基準電圧と比較される。したがって、炉出力の上昇が鈍り、ペリオド信号は次第に減少する。ペリオドが 45 秒以上になると SW.6 が動作してブラインド・コントローラのゲインが 20 db 高められる。このため炉出力は急速に設定値に向かう。ペリオドが 90 秒を越えると SW.1 が切れてペリオド制御系はクランプされ、出力制御系のみ動作によって炉出力は設定値に落ち着く。

### 7.4 出力モニター系

原子炉の自動起動途上においては、その出力上昇を絶えず監視することがやはり望まれる。この監視には炉に付属の出力指示計を使ってもよいし、また出力制御系を兼用させることもできるが、ここでは一応安全を期して別系統のものを考えることにした。計数管領域での監視は SW.5 の切換えにより直線計数率計-2 を通しておこなわれ、CIC 領域では CIC-3 からの信号によって監視される。原子炉出力が増大し電流計出力がある値に達するとメータ・リレーの動作によって小型モータが回転し、これによって微少電流計感度を 1/10 に落すことができる。このようにして CIC 領域 6 デカードの変化範囲は自動的に指示、記録することができる。

## 8. 中性子検出器

### 8.1 配 置

原子炉低出力時の中性子検出には核分裂計数管を使用し、計数管領域でのペリオド制御、出力制御および出力モニター用としては1本の計数管 FC-1 が共通に使用され、制御装置は大幅に簡単化された。ほかに3本の CIC が Fig. 29 の制御系ブロック図に示されるそれぞれのチャンネルに使用された。これら CIC (使用条件は Fig. 32 を参照) で同時に JRR-1 の出力を測定するには、CIC の特性の直線性を広範囲に確保するためにも、ビスマスで  $\gamma$  線遮蔽の施してある熱中性子実験孔を使用するのが好都合と考えられた。このときの配置図は Fig. 31 に示す通りである。

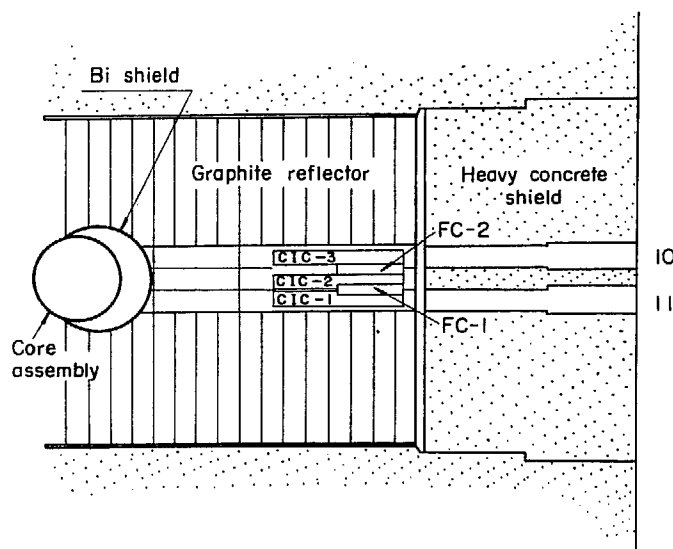


Fig. 31 Location of the chambers in the thermal column of JRR-1.

### 8.2 較 正

計数管の出力パルス計数率および CIC 出力電流の原子炉出力に対する較正は、簡単のため JRR-1 現用制御系に使用されている CIC 電流が炉の中性子束に比例しているものと仮定し、これに対しおこなった。

#### 8.2.1 計 数 管

特に計数管の較正については、JRR-1 現用 CIC 測定範囲である炉出力 50 mW 以上に対し較正し、その直線外挿から 50 mW 以下の較正を定めた。記号 FC-1 の計数管については、Cd 板をその前面に張り付け感度を約 1/10 に落した。

計数管領域での自動起動実験用に使用された計数管 FC-1 からのパルス計数率が原子炉出力に比例する範囲は、Fig. 32 に示すように約  $10^4$  cps 以下であった。この比例上限は使用したパルス整形器(パルス発生器を応用)の影響によるものである。しかし、この範囲は計数率計の測定可能範囲とも合っているので、特に問題とはならなかった。とはいえ、自動起動の範囲拡大とペリオド信号動揺の軽減という観点からみて、 $10^5$  cps 以上の測定範囲を持つ計測器を使用することが望ましい。

#### 8.2.2 CIC

CIC に対する較正測定の結果は Fig. 33 に示す通りである。熱中性子実験孔に並べておかれた CIC は、同一動作条件のもとでほとんど同一の特性を示した。この実験孔では相対的に中性子よりは  $\gamma$  線がビスマス遮



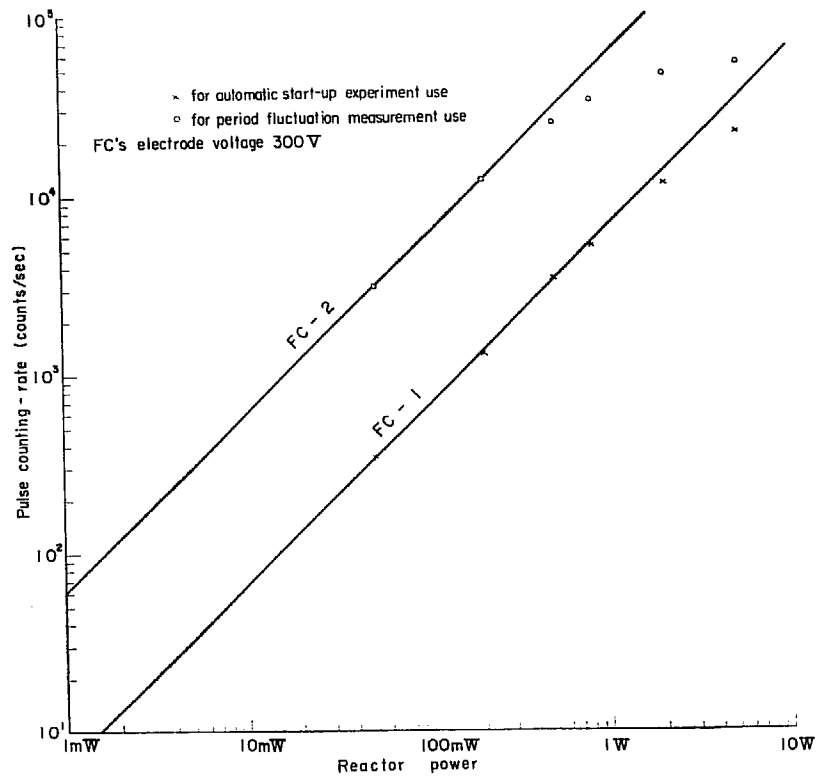


Fig. 32 Calibration of FC's pulse counting-rate to reactor power.

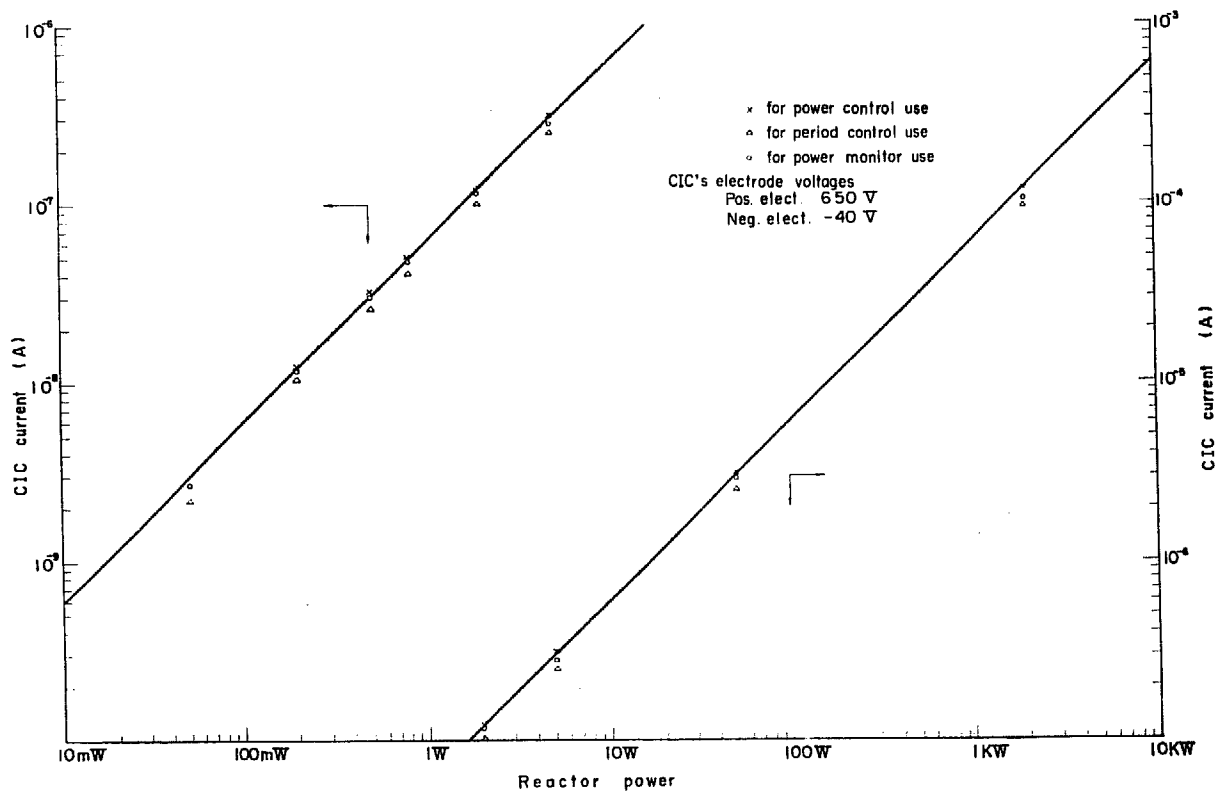


Fig. 33 Calibration of CIC current to reactor power.

蔽板と黒鉛によって吸収され、 $n/r$  存在比はきわめて大きい。したがって CIC の負電極による  $r$  線補償効果は他の実験孔に比較してかなり重要性が薄い。この場合は CIC における比例範囲下限を決めるのはむしろ漏洩電流によるものである。

実験に使用された CIC では  $10^{-10} \sim 10^{-3}$  amp の 7 デカード程度の範囲で炉出力に対して直線性を確保することが可能であるが、対数増幅器の測定可能な電流範囲は  $10^{-10} \sim 10^{-4}$  amp である。そこで CIC 電流の上限を  $10^{-4}$  amp に押えるものとすれば、この電流に対応する最大炉出力は Fig. 33 から 1.7 kW となる。なお上限の電流が  $10^{-3}$  amp まで対数特性を持つダイオードはすでにいくつか報告されているが、市販の CIC をこの範囲まで使うのは、印加電圧を 1000 V 程度にして未飽知状態を防ぐ必要があるため、あまり実用的ではない。

### 8.3 感 度

熱中性子実験孔内の熱中性子束の分布曲線は Fig. 34<sup>24)</sup> に示されるものであるが、CIC および計数管の挿入によって、当然この中性子束分布に変化が現われる。検出器の位置における中性子束は、この歪によって元の値の 20~30% 程度に減少しているものと推定される。なお、この歪は元の中性子束分布が同一でも媒質が異なれば違ってくるもので、この推定値は媒質としてグラファイトを考えた場合である。しかし、検出器から 25 cm 以上離れた位置では、中性子束分布の歪はほとんど見られないものと思われる<sup>25)</sup>。

筆者らが求めているのは、検出器挿入位置での炉出力に対する信号電流であり、したがって中性子束に対する検出器の絶対感度は本質的な問題とはならないが、Fig. 34 に示した CIC および計数管のそれぞれの位

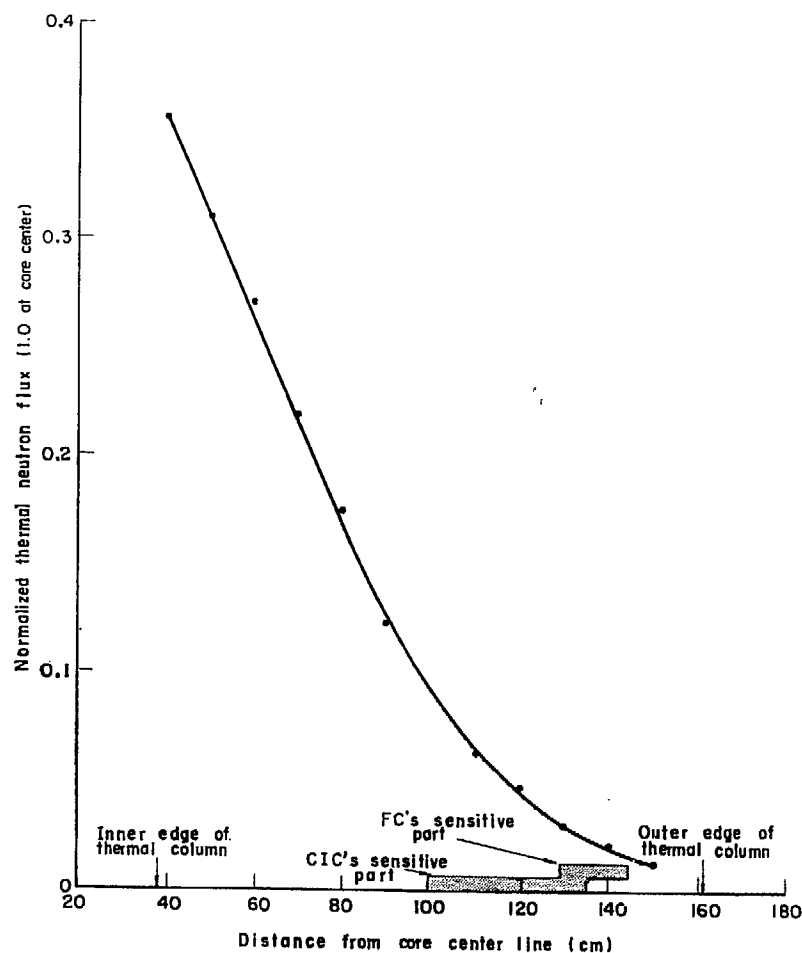


Fig. 34 Neutron flux distribution and location of the chambers in thermal column.

置に対する中性子束から感度を推算すると TABLE 4 に示す値となる。ただし、これは中性子束分布の歪を考えない値である。

TABLE 4 Sensitivity of CIC and FC

Reactor power (W)	Mean neutron flux at detector (nv)	Curr. of CIC (A)	Sensitivity of CIC (A/nv)	Counting-rate of FC (cps)	Sensitivity of FC (cps/nv)
0.5	$0.057 \times 10^7$	$3 \times 10^{-8}$	$5.2 \times 10^{-14}$ ( $4 \times 10^{-14}$ )		
0.5	$0.025 \times 10^7$			$3.1 \times 10^4$	$1.2 \times 10^{-1}$ ( $1.4 \times 10^{-1}$ )

Sensitivity in parentheses is that showed by the maker (Westinghouse).

## 9. 制御棒およびその駆動装置

### 9.1 制御棒

本来は JRR-1 の現用制御棒を使用するのが望ましいが、実験の安全性と運転に対する便宜上貫通実験孔 (glory hole) を利用して、ここに試作制御棒を挿入した。この制御棒は Al 製パイプで作られ、2本のパイプを接続した先に熱中性子吸収材として Cd パイプが取り付けられている。この吸収材は Cd 板を Al の棒に巻き付けてパイプ状となし、これをさらに Al パイプの中にはめ込んだものである。貫通実験孔の遮蔽コンクリートに当る箇所は Al 製パイプの中に比重約 3.7 の重コンクリートをつめ、グラファイト反射材に当る箇所は中空の Al 製パイプとなっている。

Fig. 35 に示すように、制御棒を全部挿入した位置では吸収材の先端が核燃料容器の他端に接する程度につくられている。制御棒はこの状態から 15 インチ引き抜くことができ、その可動範囲の両端にはリミット・スイッチが取り付けられている。

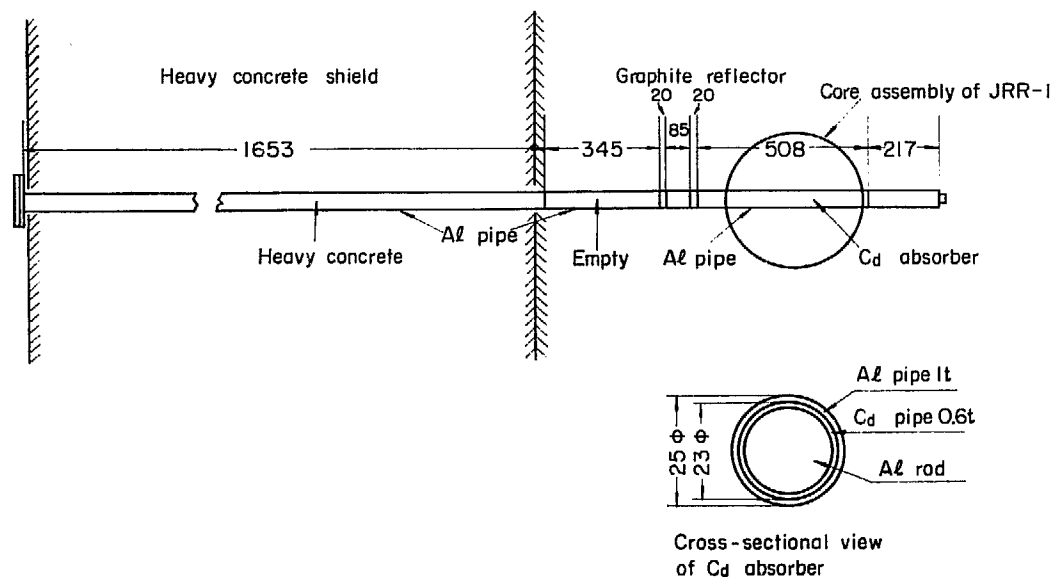


Fig. 35 Structure and location of control rod in glory hole.

### 9.2 反応度較正試験

貫通実験孔の実験用制御棒を 20 インチ抜いた状態で炉出力 0.5 W の定常運転をおこない、1 インチずつ制御棒を手で挿入して他の較正済み制御棒の位置の変化から試作制御棒の反応度較正をした。通常、較正にはペリオド法を用いるが、簡単のためこのような便法をとった。したがって、全反応度では 10~20% 程度の誤差は充分見込まれる。この試験結果は Fig. 36 に、制御棒の特性は TABLE 5 に示す通りである。

### 9.3 制御棒駆動装置

実験用の制御棒駆動装置は JRR-1 の予備品を使用したもので、現用装置<sup>26)</sup>とだいたい同一の構造である。主な相違点は、実験に貫通実験孔を利用するため制御棒を横方向に駆動していることである。制御棒駆動用コンデンサ・モータの回転速度は 75 rpm で、これを歯車機構で減速し、ピニオンをまわしてラックに動力を伝える。制御棒位置は PID 調節器に饋還されて積分動作がおこなわれる。モータは 2 箇のリレーによって可逆的に駆動される。

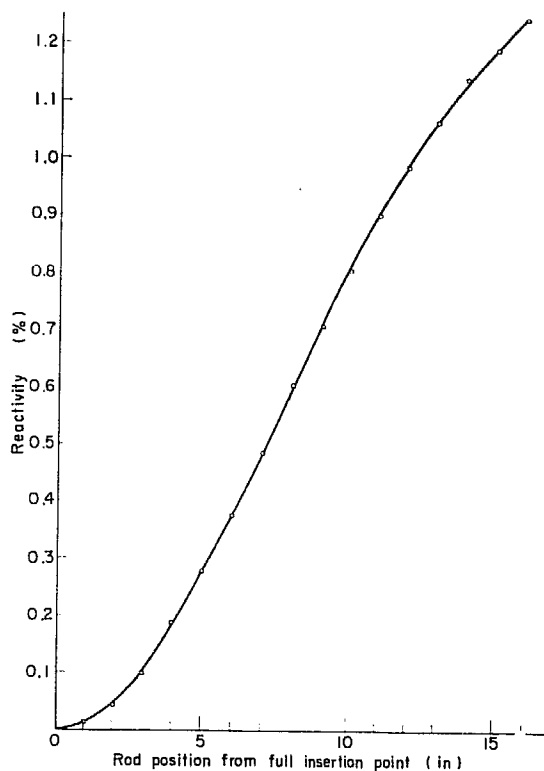


Fig. 36 Calibration curve of control rod position to reactivity.

TABLE 5 Specifications of control rod used in the experiments

Movable length	380 mm (15 in)
Total reactivity worth	1.2%
Velocity	2.54 mm/sec (0.1 in/sec)
Change of reactivity per unit time at center of rod position	0.011 %/sec
Change of reactivity per unit length at center of rod position	0.0044 %/mm

TABLE 6 Leakage of radiation from glory hole with control rod fully inserted

Reactor power	$\gamma$ -ray leakage	Thermal neutron leakage	Fast neutron leakage
40 kW	10 mR/hr	100 c/min/cm <sup>2</sup>	100 c/min/cm <sup>2</sup>

## 10. JRR-1 における自動起動実験

### 10.1 自動起動実験

#### 10.1.1 実験

実験としては制御棒の等価反応度分布がほぼ直線特性を有する範囲(12インチ以内)で使用するのが望ましいことと、制御棒の端で原子炉制御をするのは好ましくないということで、中性子源レベルからの自動起動開始前に原子炉に与える負の反応度は、Fig. 36 の制御棒反応度特性から $-0.75\%$ 程度に押えられてしまう。Fig. 38-a および -b に示した実験では、このような理由と計数管位置との関係から、最低計数率 20 cps (炉出力 3 mW) から起動するのが適当とされた。このとき設定ペリオド 30 秒で 1.7 kW まで自動起動した範囲は約 5 デカード半であった。

#### 10.1.2 ペリオド信号動揺

7.1 で述べたように対数計数率ペリオド計は 10 cps 以上を制御範囲として最適設計され、ペリオド信号動揺の最大標準偏差はこの 10 cps において現われる。このときの偏差はペリオドで規準化すると 180 秒に相当する。実験で起動前の最低計数率は 20 cps であったが、Fig. 38-a の記録からペリオド信号動揺は  $\pm 90$  秒程度である。確率的には  $\pm 60$  秒程度まで動揺するはずである。

自動起動が開始され、計数率が増加するに従い、ペリオド信号動揺は次第に減少する。6.3 での動揺分布の計算は定常状態の場合であるが、平均計数率が増加する自動起動の場合についてもペリオドが実験で設定された程度であれば動揺の大きさが変化する模様は定常状態の場合から推察しうる。この模様は  $^{60}\text{Co}$  によ

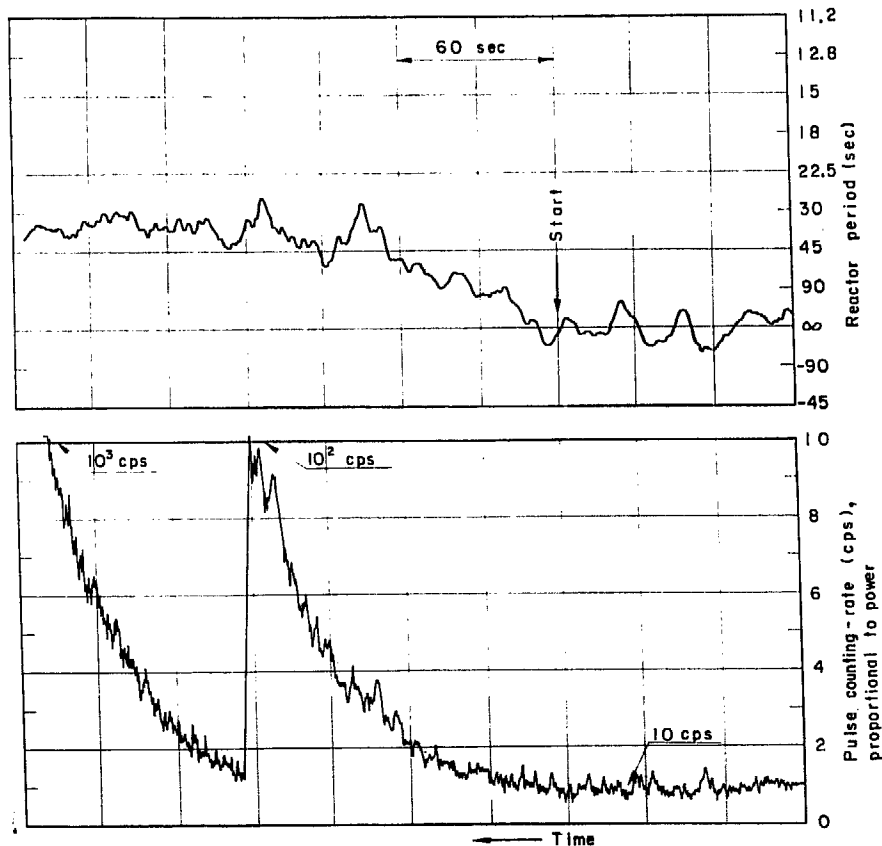


Fig. 37 Simulator test for automatic start-up experiments, using pulse converter.

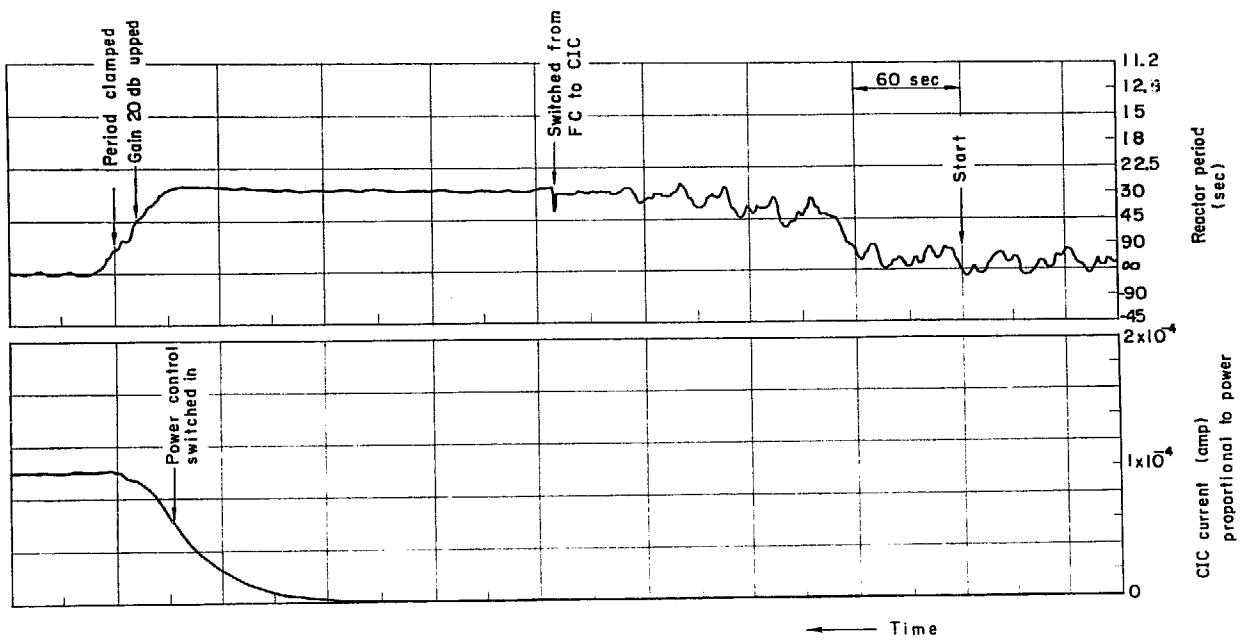


Fig. 38-a Automatic start-up experiment with JRR-1 in a range from 3 mW of power (or 20 cps) to 1.7 kW where set point period is 30 sec.

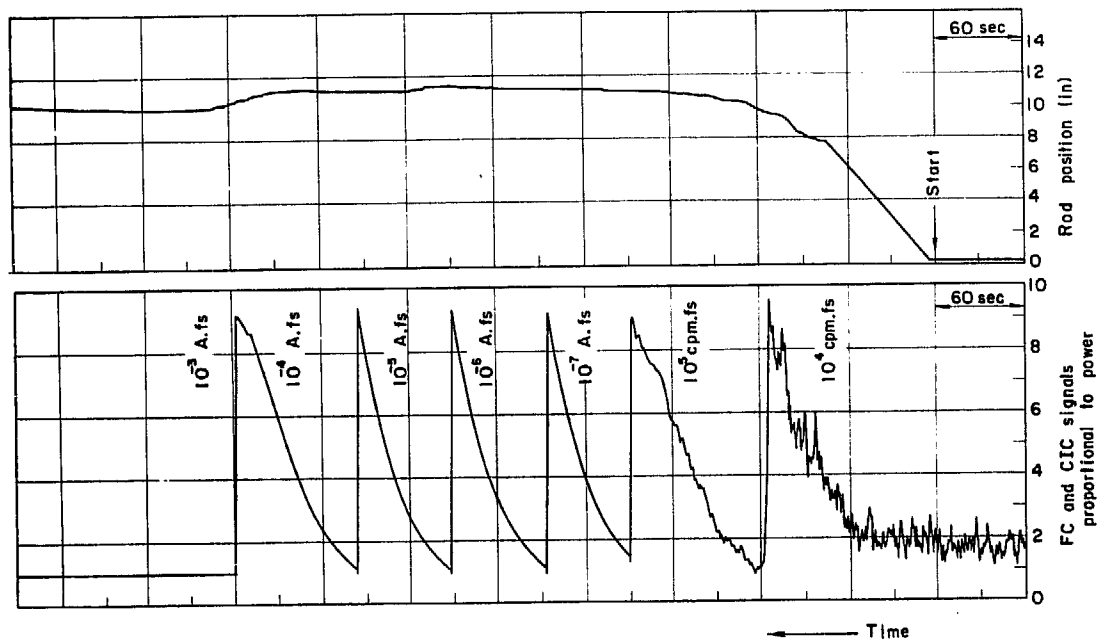


Fig. 38-b

る計数率変換器を原子炉シュミレータと組合わせておこなった計数管領域に関する室内実験の場合ともきわめて近以している。比較のため室内実験の場合の1例を Fig. 37 に示す。初期計数率は 10 cps, 反応度 -0.6 % の臨界未満状態からの起動である。

### 10.1.3 制御棒応答

原子炉の臨界状態から自動起動が開始されると、Fig. 38-b に見られるように実験用制御棒はある位置まで一定速度で引き抜かれる。したがってこの場合、ペリオド信号は動揺しながらも序々に増加していくので、3.1 で述べた反応度変化とは大部異なることになる。しかし、ペリオド制御系の補償動作がおこなわれている範囲では制御棒の動きは、反応度変化のプログラムから制御棒の反応度分布を補正して計算した曲線と一致する。Fig. 39 は計算値の時間原点を適当にずらせてこれら2つの曲線を比較してみたものである。た

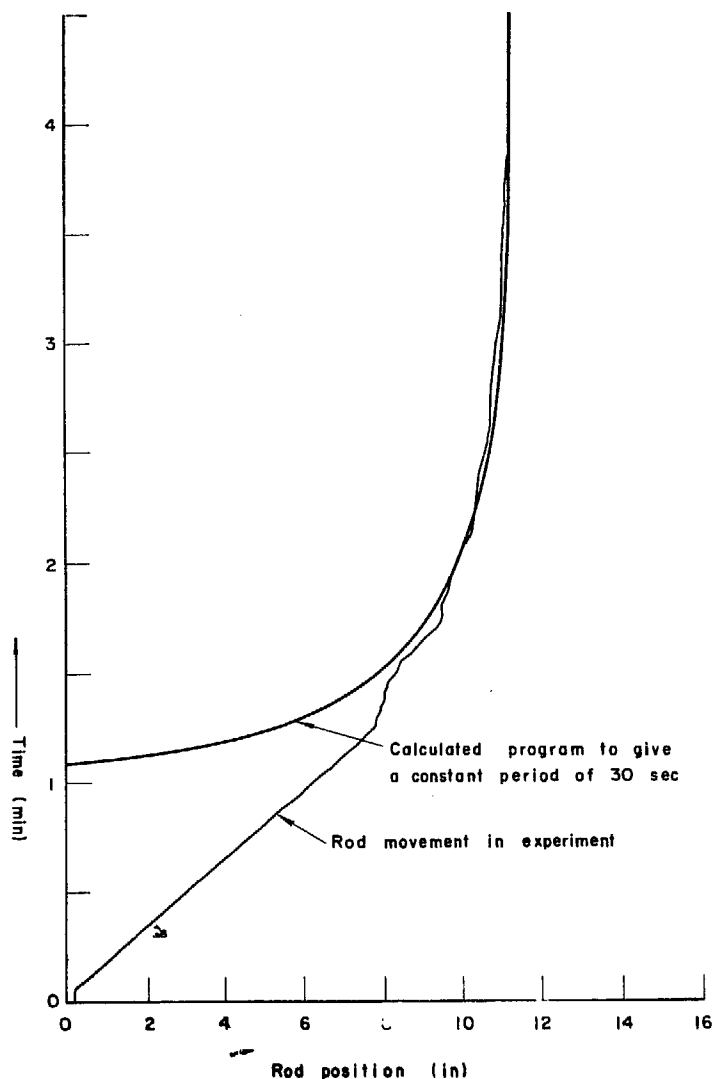


Fig. 39 Comparison of rod movement calculated and obtained in automatic start-up experiment from neutron source level.

だし、6群遅発中性子に関する核定数は TABLE 1 を用い、 $\mu_0=1/30 \text{ sec}^{-1}$ 、 $\delta k(0)_-=-0.74\%$ としている

#### 10.1.4 ペリオド制御系自動中継

計数率約 3,300 cps の点で、ペリオド制御は計数管領域から CIC 領域へメータ・リレーによって自動的に切り換えられる。このとき Fig. 38-a に見るように、一時的にわずかの過渡状態を発生し、ペリオド信号に外乱を与えている。しかし、この外乱はペリオド制御系全体には何ら影響を及ぼさず、まして原子炉出力を表わす CIC 出力電流には影響していない。しかし、やはりペリオド外乱は好ましくないので、切り換え回路を改善することが望ましい。また、この切換えの際、計数管領域のペリオド信号電圧と CIC 領域のそれとの間に、わずかながら差が生じた。これは両者のペリオド増幅器のゲイン調整が正確でなかったことによる。

#### 10.1.5 出力監視系手動中継

出力監視系統における計数管と CIC との切換えは、この実験ではマニュアル・スイッチによって操作された。したがって、この切換えはペリオド信号の切換えと同時点でなされたものではない。Fig. 38-a および -b の記録では両者の切換えに時間差が見られるのはこのためである。

#### 10.1.6 自動起動制御系ゲイン自動切り換え

自動起動で原子炉出力が設定出力に近づくと、ペリオド制御が終りに近づいてペリオドは次第に大きくなり、ペリオド 45 秒で制御系全体のゲインが 20 db だけ自動的に高められる。このため自動起動制御系のう



ちペリオド制御系の方がやや振動的になる。ペリオドが90秒を過ぎるとペリオド制御系は自動的にクランプされ、自動起動制御系から切り離されるので、この振動傾向はすぐに消える。結局これはペリオド制御系にとって、ゲインを20 db上げたのが大きすぎたためである。なお、ペリオド制御の終り近くでペリオドがやや短くなる傾向にあるのは、対数増幅器の対数変換素子の特性によるものと思われる。ペリオド制御には off-set がわずかみられるが、これは補償回路の調整によってさらに改善されよう。

10.1.7 ペリオド設定

設定ペリオド20秒についても自動起動実験がおこなわれた。設定ペリオドを変えるには、ペリオド制御

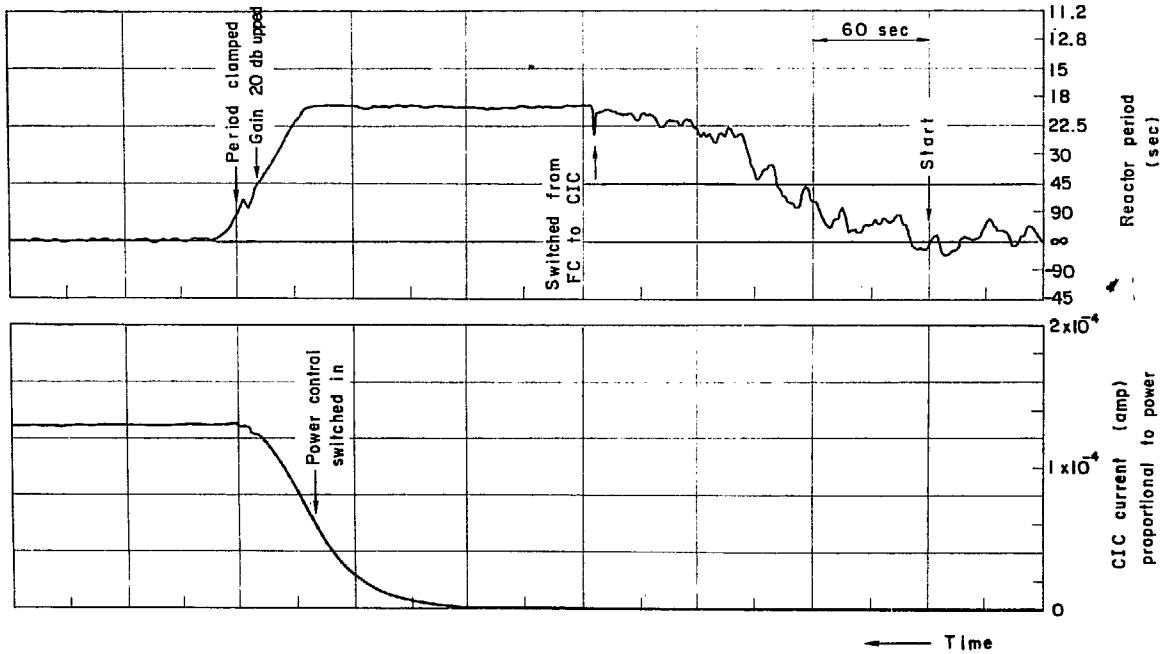


Fig. 40-a Automatic start-up experiment with JRR-1 in a range from 3 mW of power (or 20 cps) to 2.1 kW where set point period is 20 sec.

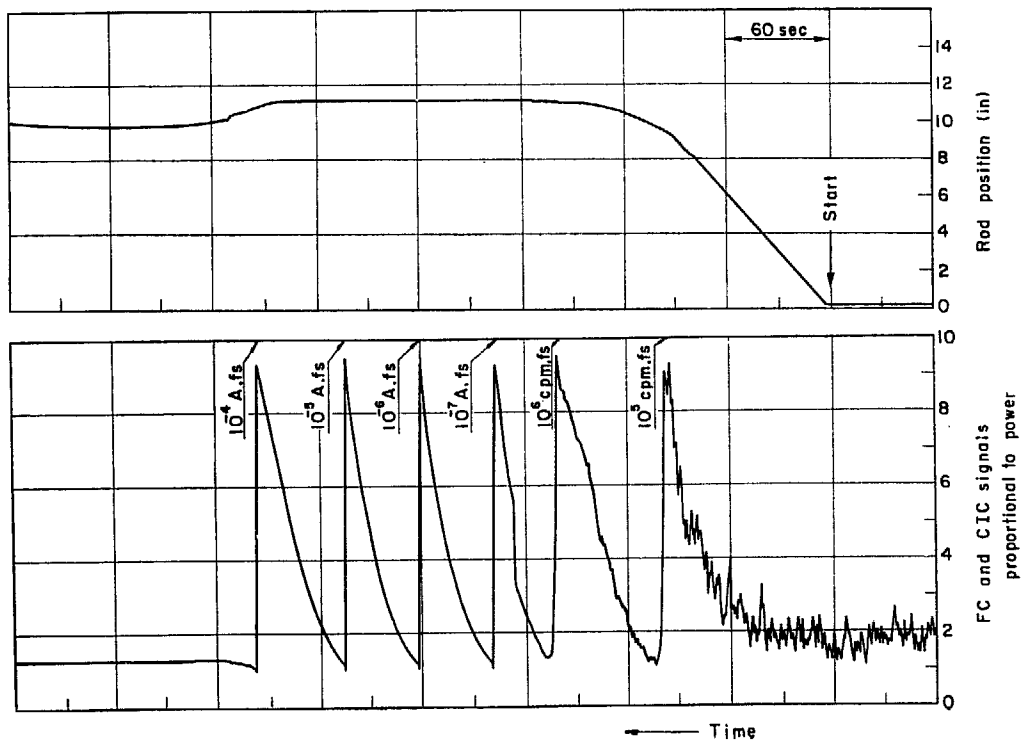


Fig. 40-b

系のゲイン調整によるのが好ましいが、この場合の実験では基準電圧を変えた。したがって、設定出力も変化して自動起動範囲は 20 cps (3 mW) から 2.1 kW となっている。この実験記録は Fig. 40-a および -b である。

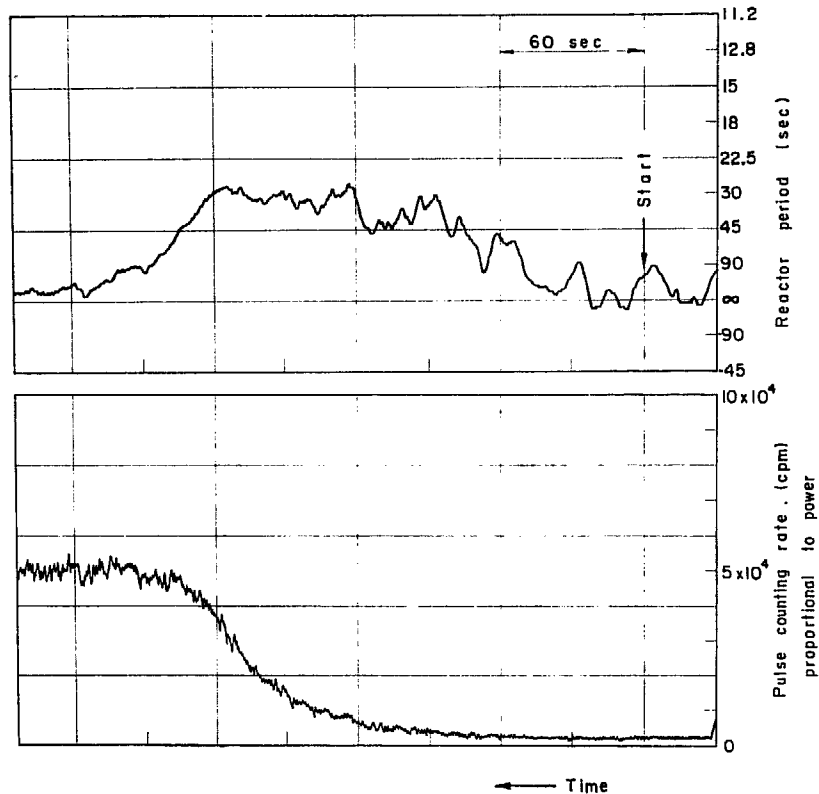


Fig. 41 Automatic start-up experiment with JRR-1 in the counter range from 3 mW (or 20 cps) to 120 mW (or 830 cps) where set point period is 30 sec.

#### 10.1.8 計数管による出力制御

計数管領域における出力制御についてもペリオド制御とともに実験された。これは Fig. 29 の制御系ブロック図に見られる SW.4 の切換えにより出力設定を計数管領域に選んだもので、出力制御信号はパルス計数率計の出力電圧である。Fig. 41 に示す実験では、臨界未満状態から自動起動した後、計数率  $5 \times 10^4$  cpm (830 cps, 炉出力 0.12 W) で平均計数率を一定に制御した。このほかペリオド、出力の各設定値を変えて実験がおこなわれた。炉出力が定値制御された最低計数率は 100 cps であった。臨界未満のような低出力では原子炉は自己制御性があり、特にパルス計数率による出力制御の必要性は薄いだが、この実験では高出力領域をも計数管で制御する場合の可能性を試験した。

#### 10.1.9 制御用リレー

計数管による原子炉出力制御の場合には、計数率のランダムな動揺のためリレーの動作回数が増加し、その寿命の点を考えるとこのような制御系は好ましくないと思われる。リレー接点寿命の長いものを使い、計数率計の時定数を大きくとっても炉出力信号の動揺は大きく、これを一定に制御するのは CIC を使った場合に比べてかなり劣る。しかしペリオド制御のごとく、系の動作時間が比較的短い場合には問題はないといえよう。

## 10.2 外乱試験

反応度外乱に対するペリオド制御系の強さを実験的に確認するため、設定ペリオド 30 秒で自動起動の途

中 JRR-1 現用制御棒によって外乱を与える実験がおこなわれた。計数率 1,000 cps (炉出力 150 mW) および CIC 電流  $4.7 \times 10^{-7}$  A (炉出力 7.8 W) の 2 回、それぞれ約 0.15% および 0.10% の正の反応度外乱がランプ状に加えられた。このときのペリオド信号および実験用制御棒の応答は Fig. 42-a, -b に見られる通りである。ペリオド制御系は計数管領域、CIC 領域ともに十分安定な補正動作をおこない、ペリオド・スクラムを起すことはなかった。これら両領域で使われているペリオド増幅器の時定数に比べてスクラム用増幅器の時定数は小さいので、ペリオドは Fig. 42-a に見られる値より当然短くなっている。なお、JRR-1 ではペリオド・スクラムは 5 秒で起るように調節されている。

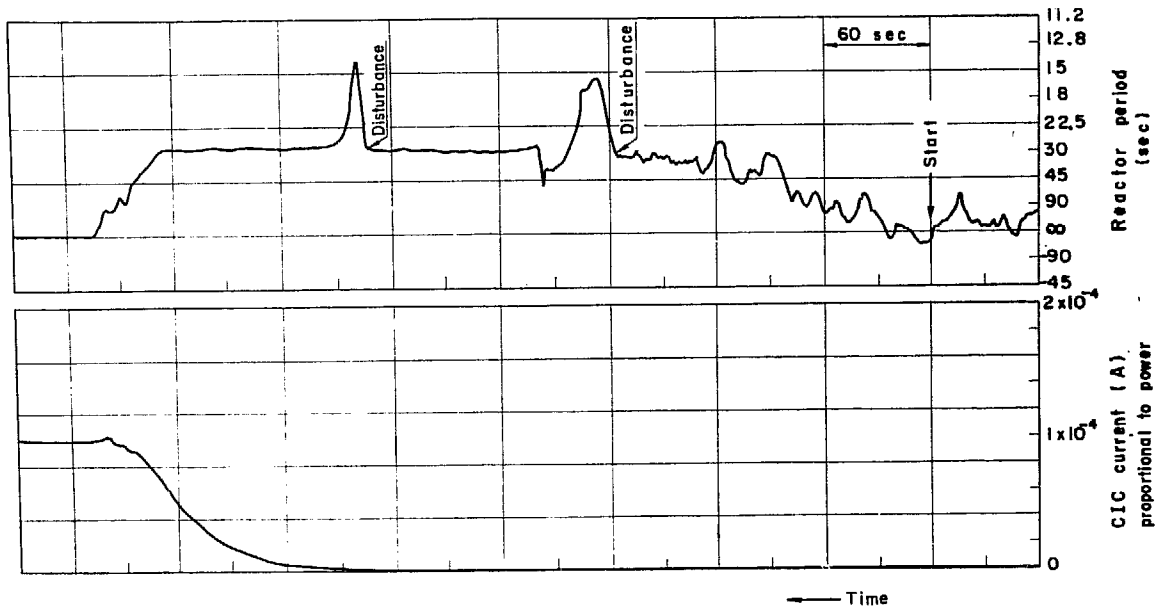


Fig. 42-a Disturbance tests of period control systems in counter and CIC ranges where set point period is 30 sec.

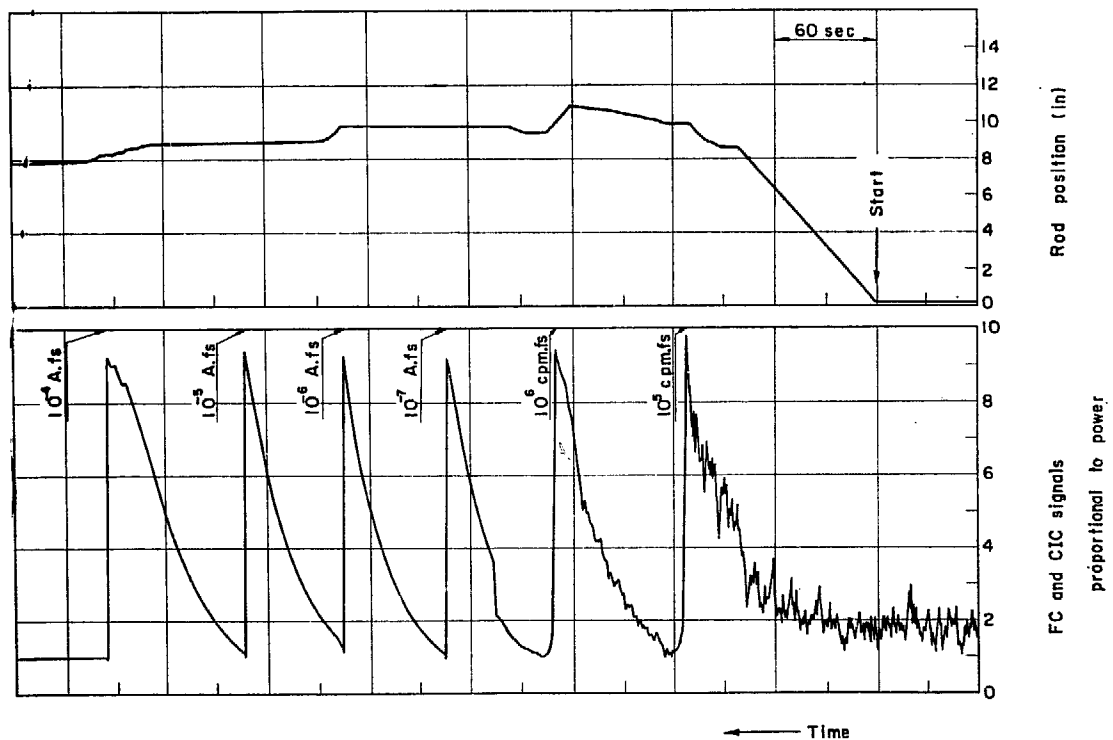


Fig. 42-b

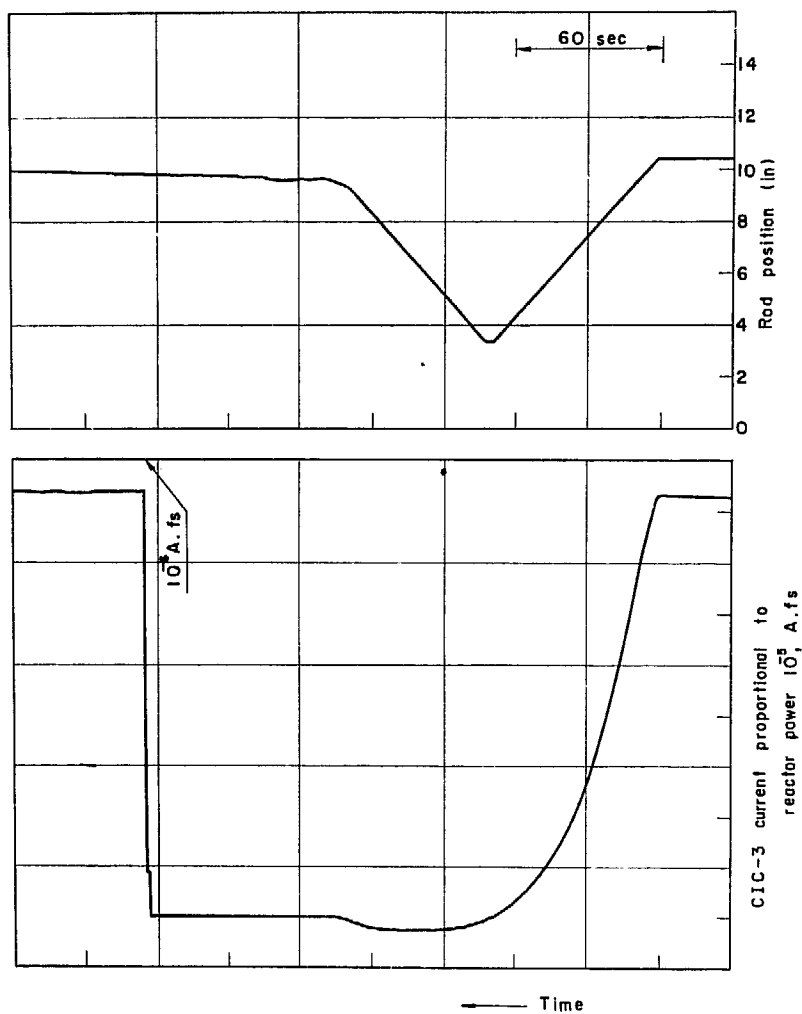


Fig.43 Transient responses of control rod and reactor power in  $1/10$  power decrease test.

TABLE 7 Set point values in each automatic start-up experiment

	Auto. start-up exp. 1	Auto. start-up exp. 2	Auto. start-up exp. 3	Disturbance test	Power down test
Set point period (sec)	30	20	30	30	—
Controlled period in pulse counting range (sec)	30	20	30	30	—
Controlled period in CIC range (sec)	28	19	28	28	—
Set point power	1.7 kW $1.0 \times 10^{-4} \text{A}$	2.1 kW $1.3 \times 10^{-4} \text{A}$	0.12 W 834 cps	1.7 kW $1.0 \times 10^{-4} \text{A}$	17 W $1.0 \times 10^{-6} \text{A}$
Initial power	3 mW 20 cps	3 mW 20 cps	3 mW 20 cps	3 mW 20 cps	170 W $1.0 \times 10^{-5} \text{A}$
Switching level	3300 cps $3 \times 10^{-8} \text{A}$	3300 cps $3 \times 10^{-8} \text{A}$	—	3300 cps $3 \times 10^{-8} \text{A}$	—
Reactivity disturbances at 1000 cps at $4.7 \times 10^{-7} \text{A}$	—	—	—	0.15% 0.10%	—

### 10.3 出力降下試験

試作された自動起動制御装置で、炉出力降下の自動化については特に考慮されなかった。そのため、試験的におこなわれた自動降下実験で炉出力を 1/10 および 1/100 に降下させた場合、炉出力にはそれぞれ設定出力に対し 25% および 40% 程度の下げ過ぎの応答が見られた。ペリオド信号が負の値のときペリオド制御系は動作せず、出力制御系のみによって炉出力が制御されるが、下げ過ぎ状態から設定出力へもどるときはペリオド信号が正となるので、ペリオド制御系もともに動作する。Fig. 43 は炉出力を 84 W から 1/10 に下げた場合の実験例で、その降下はかなり急である。そこでこれを改善する方法としては負のペリオドを制御させるとか、炉出力の微分 ( $dn/dt$ ) に関する制御回路を加えるとかすることが考えられる。

## 11. 結論と今後の問題点

この報告書で扱われているのはペリオドの定値制御による小型研究炉の自動起動であり、一応ここでは JRR-1 を対象として考えている。この場合のペリオド制御系の安定性、ペリオド設定法、全出力領域自動起動化、対数計数率ペリオド計の設計、 $^{60}\text{Co}$  計数率変換器による室内実験等を経て、最後に JRR-1 での自動起動実験がおこなわれた。この実験により、自動起動制御系設計の妥当性は一応確認されたものと思われる。しかし、この制御系を実際に日常運転用のものとして設置する場合には、なお実験的に確認しておくべき若干の問題点を残しているが、大筋としては主要な問題点は解決され、ただちに実用化できるものといえる。

なお、今回の実験で自動起動された範囲は 20 cps (3 mW) から約 2 kW までであった。Fig. 28 の中性子検出器分担図を見ればわかるように、CIC 位置の調整および測定範囲の上限が  $10^5$  cps 以上の対数計数率計を使用することにより、JRR-1 の全起動範囲 8 デカドを自動化することは技術的に問題はない。実験に使われた制御系には余分な記録計類が付加されているが、実際の自動起動制御系に使われる機器は現在 JRR-1 に組み込まれている機器と大差ないものである。むしろ自動起動化による運転の簡素化が、さらに促進されよう。

自動起動の日常運転系への実際化に際してさらに検討しておくべき問題点として、

- 1) ここでは外国の例と同様、出力+ペリオドのフィードバックを有する系について扱ったが、出力の行き過ぎを押える意味から、出力の微分  $dn/dt$  をもフィードバックする系について、ここで述べたのと同様の解析をおこない両者を比較しておくべきであろう。これは大型研究炉を対象とするとき重要な問題となる。出力制御系投入時期の選定や補償回路にも関係しているが、高出力時の炉出力応答をさらにゆるやかにした方がよいかもしれない。
- 2) 実験では簡単のため PID 償補係数を全ての系に共通に使用した。しかし、よりよい制御性を得るためには各系に適した補償係数を切り換えて使用すべきであろう。これは系の簡易性と制御性との兼ね合いである。
- 3) また温度上昇による負の反応度効果を打ち消すのに 1 本の制御棒では反応度が不十分なため、2 本の制御棒を自動制御用とし、ペリオド制御の途中で自動切換えするような機構が必要である。
- 4) この実験では原子炉出力降下の自動化については特に考慮しなかった。10.3 で述べたように、実用化にあたってはこのことについての配慮も必要となろう。
- 5) 反応度の温度効果については、それが負饋還であることと、中性子密度の変化に比べて温度変化は緩やかであることからこれを無視してきた。JRR-1 のような小型研究炉では温度効果は自動起動制御系に対してほとんど影響しないものと思われる。しかし、大型の原子炉で熱応力が問題となる場合には、温度変化を考慮した自動起動のプログラムが考えられねばならない。

その他、ペリオド信号の代りに対数出力を直接制御する方式<sup>11) 27)</sup>や、対数特性ダイオードを使った対数計数率ペリオド計の代りに多重ダイオード方式<sup>16) 17) 28)</sup>によるペリオド計について、それらの特性上の比較を明らかにしておくべきであろう。

アナログ技術による自動起動の大きな問題点であったペリオド制御範囲の拡大ということは、対数計数率ペリオド計の使用によって以上のように一応の解決をみた。さらに今後の問題として、デジタル方式による自動起動についても種々検討することが興味ある問題と思われる。これについては、すでにいくつかの方式が発表されており<sup>36)</sup>、実験もおこなわれているが<sup>41)</sup>、将来の動力炉自動起動化への一段階として手がけておくべき問題となろう。

謝辞 自動起動に関する文献調査から開始されたこの研究は、中性子源レベルからの自動起動実験を終えて、現在一段落を見た。途中の段階でまとめられ、または発表されてきた内容をさらに整理し、再検討を加え、全体的に編集したものがこの報告書である。

このように JRR-1 で最終的な実験をおこなうまでに長い準備期間があったが、本研究の開始当初より実験の計画と内容的検討、安全性の立場からの検討、実験の実施などあらゆる面で JRR-1 管理室苔米地顕氏の全面的な援助と助言をいただいた。また同室の巖淵光弘氏、油井多丸氏ら運転担当の方々の多大の協力があって、はじめてこの実験が成功したことに感謝いたします。

次にこの間、宇野秀郎（前計測制御研究室長、現研究炉管理部長）、天野昇室長の両氏には終始激励をいただき、さらに三井田純一室長代理からは研究内容に関して常に直接指導をいただいたうえ、当研究室の須田信英、篠原慶邦、越井秀夫、その他の諸氏からも種々の協力を受けることができたためこの研究が所期の満足すべき結果を得たことを記し、ここに感謝の意を表する次第です。

## 参 考 文 献

- 1) R. J. COX : Automatic Startup of Nuclear Reactors, IRE trans., NS-3, 1, p. 15 (1956)
- 2) G. J. R. MACLUSKY : Automatic Control of a Research reactor
- 3) L. A. J. LAWRENCE : Auto-control Experiments on DIDO Using Discontinuous Feedback, AEEW-R4 (1959)
- 4) H. A. LAMONDS : Automatic Period Control of the Raleigh Research reactor, *Nucleonics*, 14, 3, 88 (1956)
- 5) C.G. LENNOX & A. PEARSON : NRU Reactor Neutron Level Control System, IRE Trans., NS-5, 2, p. 64 (1958)
- 6) C. G. LENNOX & A. PEARSON : The Dynamic Behaviour of the NRX Control System, AECL-1050 (CREL-923), (1960)
- 7) S. BARABASCHI & A. PULACCI : The Control System of the Ispra-1 Reactor, *N. S. E.*, 12, 160 (1962)
- 8) E. P. EPLER & S. H. HANAUER : Control and Automatic Startup of the Geneva Conference Reactor, IRE conv. Rec., Pt. 9, p.90 (1956)
- 9) 住田健二, 藤沢武夫ほか : JRR-1 の自動起動について, 第3回原子力シンポジウム報文集, II-25, p. 212 (1959)
- 10) 三井田純一, 鈴木芳弘 : 試作原子炉シュミレータについて, 原研計測研資料, No.40, 41 (1960)
- 11) 井口征士ほか : 原子炉自動起動に対する一考察, 第3回原子力発表会要旨集, C.78, p.304 (1962)
- 12) S. BARABASCHI : Delayed Neutrons Importance in Reactor Transfer Function, *Energia Nucleare*, 4, 5 (1957)
- 13) R. POTTER : The Transfer Function of a Steadily Diverging Reactor, *J. Nuclear Energy*, 6, 291 (1958)
- 14) J. RASMUSSEN : Reactor Training Simulator with Automatic Amplitude Rescaling, Riso Report, No. 19 (1961)
- 15) 鈴木守 : 原子炉の自動起動について, 日立評論, 43, 9 (1961)
- 16) A. G. KLEIN : Logarithmic Rate Meters and Period Meters, *N. S. E.*, 11, 142 (1961)
- 17) E. H. COOKE-YARBOROUGH & E. W. PULSFORD : An Accurate Logarithmic Counting-Rate Meter Covering a Wide Range, Proc. IEE, Pt. II, 98, 62, p. 196 (1951)
- 18) 住田, 黒須, 中川, 山田, 中村 : JRR-1 の低周波域炉雑音解析, 第1回炉物理分科会要旨集, p. 41 (1961)
- 19) W. M. GRIM, B. B. BARROW & T. C. SIMONS : Random Fluctuations in Period-Meter Indications, *N. S. E.*, 1, 80 (1956)
- 20) B. B. BARROW : The Logarithmic-Diode Counting-Rate Meter and Period Meter, *AIEE Trans.*, Pt. 1, 76, 421 (1957)
- 21) S. O. RICE : Mathematical Analysis of Random Noise, *B. S. T. J.*, 23 (1944)
- 22) 宮脇一男 : 雑音解析, 朝倉書店 (1961)
- 23) H. CHRISTENSEN & R. B. STANFIELD : The Log Count Rate Period Meter Used with Safety Circuits, IRE conv. Rec., NS. 8-3, p. 22 (1961)
- 24) JRR-1 管理室 : JRR-1 の特性試験, JAERI 1003-E (1958)
- 25) ALAIN SOLA & W.W. MANAGAN : Flux Perturbation Produced by Ion Chambers and Fission Chambers, *N. S. E.*, 6, 294 (1959)
- 26) JRR-1 管理室 : JRR-1 の制御系について, JAERI 1003-F (1958)



- 27) IRE trans., NS-9, 1, p. 113, p. 134, p. 145 (1962)
- 28) W. ABSON, R. J. COX & A. L. GRAY : Neutron Flux Instrumentation for Research and Power Reactors, Proc. 2nd Geneva Conf., p.156 (1958)
- 29) J. P. FRANZ & N. F. SIMCIC : Nuclear Reactor start-up Simulation, IRE Trans., NS-4, p. 11 (1957)
- 30) W. F. HORNYAK : A Fast Neutron Detector, *Rev. Sci. Instr.*, 23, 6, p.264 (1952)
- 31) 住田, 藤沢, 苫米地ほか : 昭和 35 年電気四学会連合大会講演論文集, 556 (1960)
- 32) 住田, 藤沢, 渡辺 : 計数領域に於ける原子炉自動起動, 第 3 回原子力発表会要旨集, C 79, p. 305 (1962)
- 33) 佐藤孝平 : 原子炉の Automatic Startup について, 第 1 回原子力発表会要旨集, A 2, p. 200 (1960)
- 34) 住田, 中井 : ウェーブアナライザー法およびタイムアナライザー法による JRR-1 伝達関数の測定, 同上文献 A 3, p. 201 (1960)
- 35) 佐藤一男 : JRR-1 の運転経験と問題点, 原子力工業, 6, 8, p. 41 (1960)
- 36) Application of Digital Techniques to Reactor Control Systems, NYO-8500, 8501, 8502, 8586 (1957~1958)
- 37) S. N. LEHR & V. P. MATHIS : A Digital Start-up Control for Air-cooled Nuclear Reactors, *AIEE Trans.*, Pt. I, 79, p. 369 (1960)
- 38) E. P. GYFTOPAULAS & P. M. COBLE : A Digital Nuclear Reactor Control System. *AIEE Trans.*, Pt., II, 79, p. 305 (1960)
- 39) J. D. SCHMIDT, B. K. ERIKSEN & W. PEIL : A Digital Start-up Control Unit for Nuclear Reactors, IRE Trans., NS-8, 3 (1961)
- 40) R. B. RICE & J. I. OWENS *et al* : Automatic Control of T 7 Tanker Boiling Water Reactor Propulsion System, GEAP-3528 (1960)
- 41) 高橋, 高松 : 原子炉起動制御用デジタル計算機, 日本原子力学会年会要旨集, C43, p. 141 (1963)

付録 1 POTTER の式<sup>13)</sup> との関係

本報告においては、原子炉の中性子密度が一定ペリオドで上昇していくときの伝達関数を求めるのに、入力および出力の微小変動分についての関係式を求め、これを Laplace 変換して伝達関数としている。一方 POTTER はこのような状態における原子炉の周波数特性を Laplace 変換によらない方法で求めているが、両者の結果は一致している。

すなわち、一定ペリオドにおける出力伝達関数は (17) 式から、

$$G_R(s) = \frac{n_0}{s \left[ l + \sum \frac{\lambda_i \beta_i}{(\mu_0 + \lambda_i)} \cdot \frac{1}{(s + \mu_0 + \lambda_i)} \right]}$$

$$= \frac{n_0}{l \left[ \sum \frac{\omega^2 \lambda_i \beta_i}{l(\mu_0 + \lambda_i) \{(\mu_0 + \lambda_i)^2 + \omega^2\}} + s + s \sum \frac{\lambda_i \beta_i}{l \{(\mu_0 + \lambda_i)^2 + \omega^2\}} \right]}$$

ここで

$$\begin{cases} P_0 = \sum \frac{\omega^2}{l} \cdot \frac{\lambda_i \beta_i}{(\mu_0 + \lambda_i) \{(\mu_0 + \lambda_i)^2 + \omega^2\}} \\ Q_0 = 1 + \sum \frac{\lambda_i \beta_i}{l \{(\mu_0 + \lambda_i)^2 + \omega^2\}} \end{cases}$$

とすれば

$$G_R(s) = \frac{n_0}{l(P_0 + sQ_0)}$$

これを時間領域に移し指数項を考慮すれば POTTER が導いた関係と一致する。

付録 2 6 群遅発中性子によるペリオド・シュミレータ<sup>29)</sup>

6 群遅発中性子を考慮したペリオド・シュミレータは (6) および (7) 式を解けばよいが、核定数が大幅に異なる値を持つことと、その微分特性のため階段状入力に対して大きな行き過ぎを生ずること等により、このペリオド・シュミレータの回路構成には無理がある。上昇率の静特性精度を上げるため  $\mu$  の係数を 20 よりさらに大きくすると増幅器が過負荷になりやすく、したがって階段状入力反応度のとり得る範囲は強く制限される。さらに掛算器は、その周波数特性の点を考えて電子管式のものを使用すると、シュミレータは高価なものになる。アナ・コンに組んだペリオド・シュミレータの一例を Fig. A1 に示すが、この回路では反応度 0.4% 程度以下の階段状入力に対して演算増幅器が過負荷にならない程度である。

なお、核定数は TABLE 1 の値を使用している。

## 付録 3 ペリオド信号動揺の測定

入力パルス計数率がポアソン分布するために生ずるペリオド信号の統計的動揺を示す (34) 式の実験的に確認した。JRR-1 の熱中性子実験孔に挿入された核分裂計数管から得られるパルスを対数計数率計に入れる。この後の微分回路は演算増幅器でつくられ、掛算器を通し、積分された動揺を記録した。この記録からペリオド信号動揺の標準偏差  $\sigma_0$  を計算して Fig. A3 に示すグラフを得た。このグラフの実線は (34) 式から計算したもので、定数は下記の値を使用している。

$$D = 0.10, \quad Q = 1.9 \times 10^{-8} \text{ C}, \quad A = 338, \quad C_L = 52 \mu\text{F}$$

$$T_U = T_T = 2.73 \text{ sec}, \quad \sigma_{0m} = 1.87 \text{ V}$$

ただし、これらの定数は  $p_m = 100 \text{ cps}$  とした場合であって、自動起動実験に用いられた  $p_m = 10 \text{ cps}$  の場合とは異なっている。

測定の記録電圧が単位時間当たり  $E$  であれば、Fig. A2 の  $\Delta e$  に関する標準偏差は、

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{100 E}{K A_3^2}}$$

ただし、 $\Delta e$  はペリオド信号動揺の瞬時値である。

測定結果を示した Fig. A3 では計算値と実測値とが比較的よく一致している。この測定は炉出力一定の場合についておこなわれたものであり、この状態では計数管からのパルス時系列はポアソン分布で扱えるこ

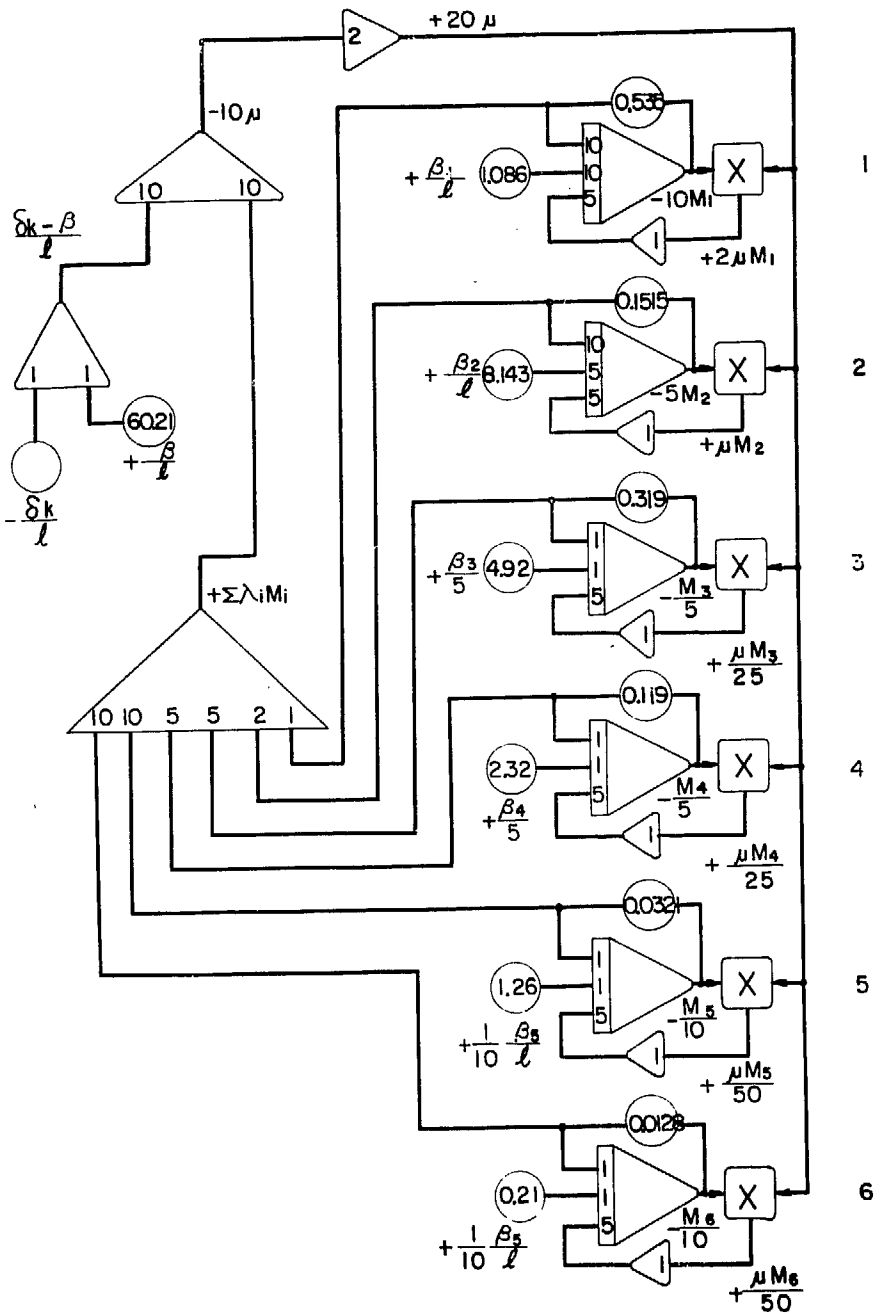


Fig. A 1 Computer schematic diagram of reactor period simulator with 6 groups of delayed neutrons.

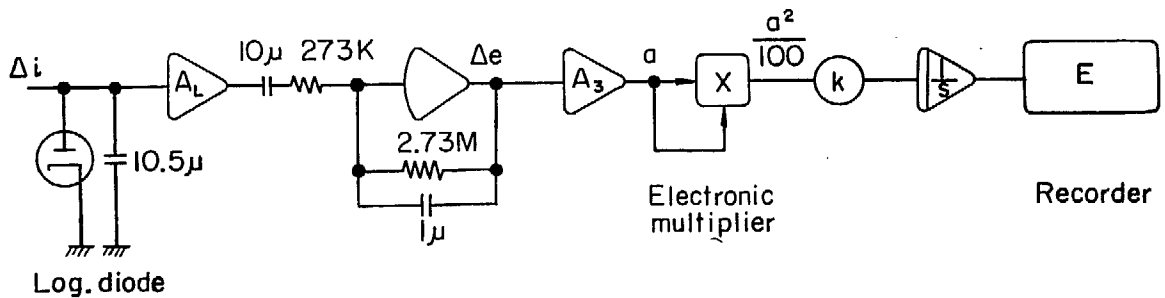


Fig. A 2 Schematic diagram of obtaining standard deviation of period signal random fluctuations.

とを示している。自動起動の場合のように、炉出力が変化する際のペリオド信号動揺については、これを定量的に測定するのは困難であるが、パルス計数率の増加とともにその動揺が減少していく様子は Fig. 37 に見られる通りである。その変化の様子はペリオド無限大の場合からも推定されよう。なお Fig. A 3 には  $^{60}\text{Co}$  の計数率変換器から得られる動揺についての測定結果も同時に示し、この場合も動揺成分がポアソン分布することを確認した。

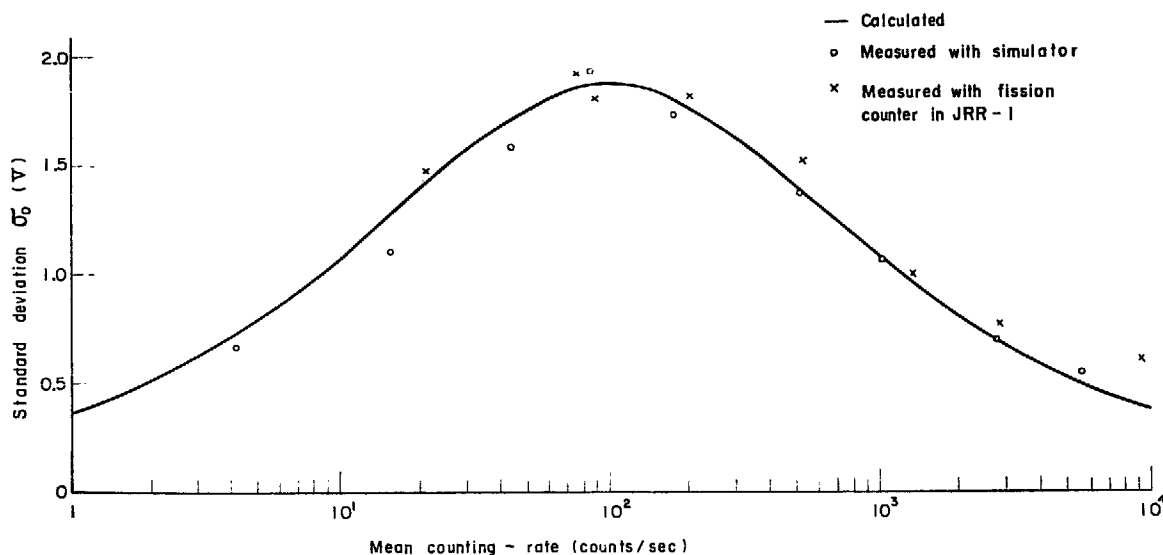


Fig. A 3 Fluctuation distribution of period signal about infinity period.

#### 付録 4 計数率変換器

計数管から得られるパルス計数率を原子炉自動起動の制御信号として利用する場合、計数率の統計的動揺をも示すようなパルス出力の原子炉シュミレータを使って室内実験を予め行なうことが望まれる。そこで従来のアナログ型シュミレータをこの実験に応用するには、その出力電圧をパルス計数率に変換することが必要となる。この変換器に必要な特性としては以下の事項が要求されよう。

- a) パルスの生起が偶然性のみによる過程であること。すなわち、パルス時系列がポアソン分布することは計数管のパルス出力の特性をよく表わすとともに、確率による定量的扱いを容易にする。
- b) パルス計数率の平均値が原子炉シュミレータの出力電圧に比例するとともに、平均計数率の制御が容易かつ高速度で行なえること。
- c) パルス計数率は  $1 \sim 10^5$  cps の範囲で可変なること。
- d) パルス計数率変換特性が精度よく、かつ信頼性のあること。

これらの諸特性をすべて満たす変換器を得ることは困難であるが、筆者らは  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線と ZnS を用いた検出器を利用して、パルス計数率の変換とともに動揺をシュミレートした。ZnS で検出されるパルスの波高分布は指数関数的<sup>30)</sup>なので、原子炉シュミレータ出力電圧の対数変換された電圧でパルス波高を選別すれば、パルス計数率の平均値はシュミレータ出力電圧に比例する。この原理を応用した計数率変換器のブロック図を Fig. A 4 に示す。この装置によって原子炉シュミレータのアナログ電圧をパルス計数率に変換するとともに、計数率の統計的性質と原子炉の動特性とをシュミレートすることができる。ここで得られたパルスを対数計数率ペリオド計に入れ、ペリオド信号の動揺分布を Fig. A 3 のごとく得た。測定結果はポアソン分布を仮定した計算値とよく一致しており、このことからパルスはポアソン分布であることが確認される。

$\gamma$  線源としては平均計数率変換特性の再現性を得るため、半減期の長い  $^{60}\text{Co}$  を利用した。ZnS と光電子増倍管 (Dumont 6292) よりなる  $\gamma$  線検出器は  $^{60}\text{Co}$  になるべく接近させて設置した。実験では約 2 cm の距離があった。このときパルスの波高分布は Fig. A 5 に示すような特性となり、 $1 \sim 10^4$  cps の範囲でかなりよい指数関数特性をもっている。しかし、この範囲の上、下限近くでは特性が指数関数的でなくなり、

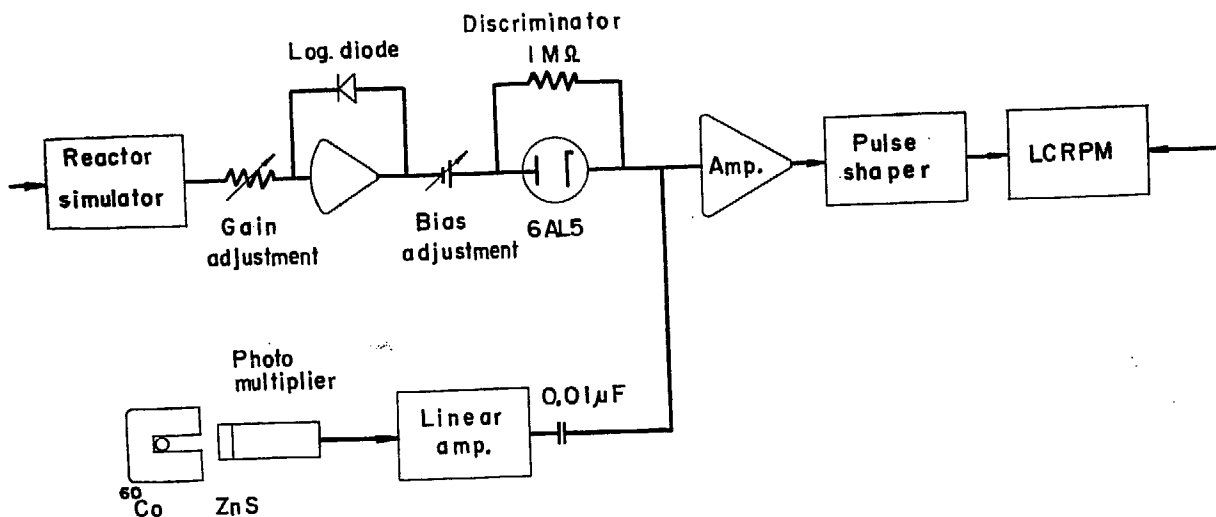


Fig. A 4 Block diagram of "analog to pulse counting-rate" converter that simulates reactor kinetics and random fluctuations of counting-rate.

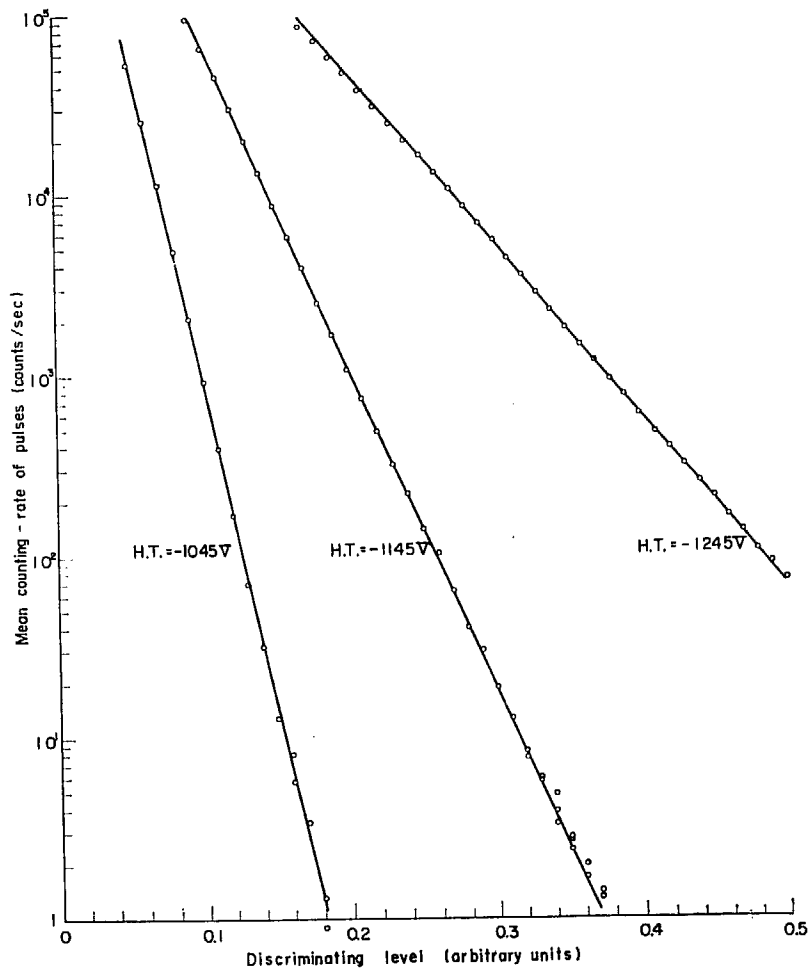


Fig. A 5 Analog to pulse counting-rate conversion characteristics of ZnS sensor. Parameter H.T. is a photo-multiplier voltage. The sensor was set 2 cm apart from <sup>60</sup>Co source.

特に低計数率でずれが大きくなる。

原子炉シュミレータの出力電圧は対数変換されたのち、直線増幅器の出力パルスを波高選別するのに使われる。これによってパルス計数率は、シュミレータ出力電圧に比例することになる。測定された比例特性を Fig. A 6 に示す。同図 A ; B 2つの特性は、バイアスの調整によつ得られる。

この変換装置は前述の4つの事項をほぼ具備しており、原子炉シュミレータを使った自動起動実験を行なうときおおいに活用された。対数変換はすでに開発された技術で、対数特性半導体と演算増幅器とを組合せて簡単につくられ、装置に機械的な可動部分がないので操作が手軽である。ただし光電子増倍管用の高圧電源は安定度のよいものが必要である。これは Fig. A 5 の対数特性に見られるように、電圧変動がパルス変換特性に大きく影響するためである。

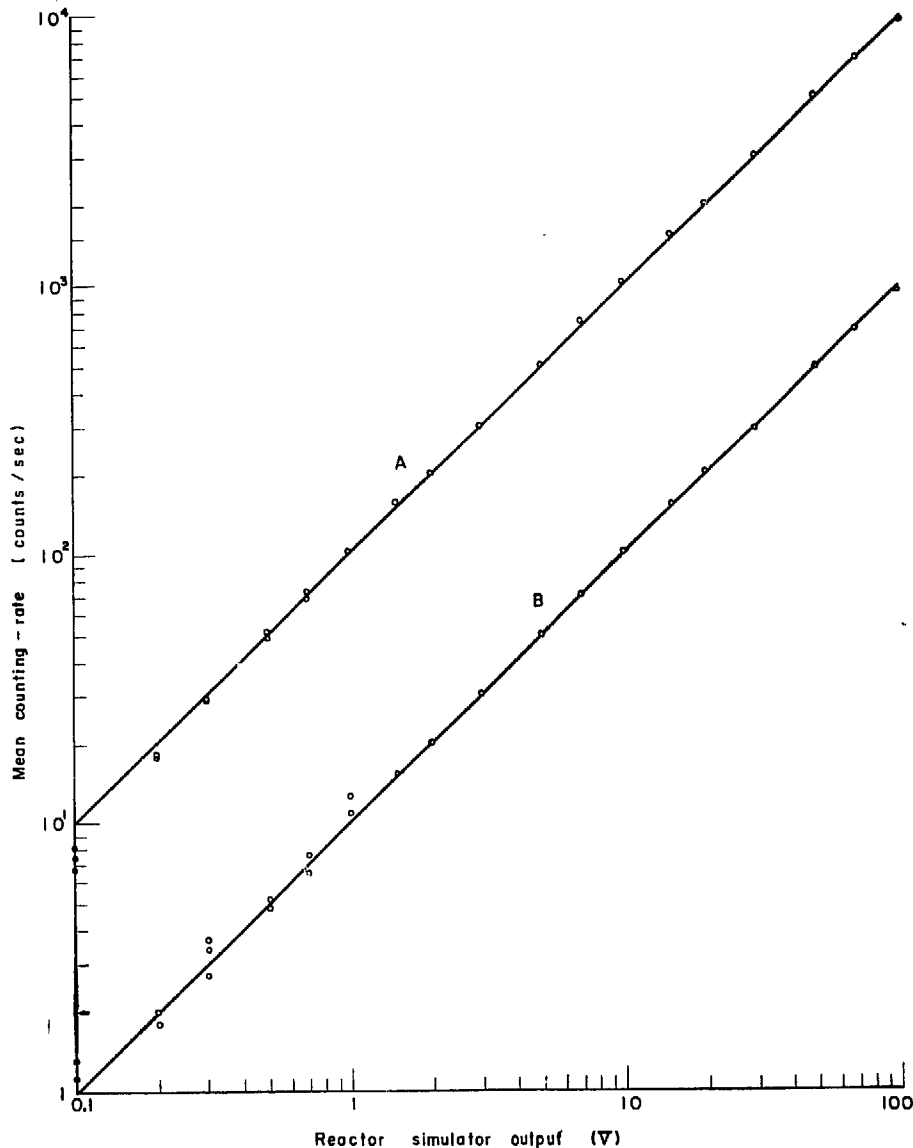


Fig. A 6 Linear characteristic of pulse converter having random fluctuations in pulse counting-rate.

#### 付録 5 原子炉シュミレータと対数増幅器との接続

原子炉の出力信号を取り出す CIC は電流源と考えられるので、その負荷抵抗が大幅に変化しても實際上 CIC の出力電流は変化しない。一方、原子炉制御の実験に原子炉シュミレータを使用し、これに対数増幅器を接続する場合には問題が起る。中性子密度に比例するシュミレータ出力は電圧源なので、高抵抗を通し

て電流源とし、入力側に対数特性ダイオードを持つ対数増幅器をこれに接続しても、なおかつ対数増幅器の等価入力抵抗が大幅に変化する。したがって、シュミレータ出力電圧と対数増幅器入力電流との比例範囲は限られてしまう。

この接続抵抗を大きくすることにより、これら電圧・電流の比例関係からの偏差は少なくなるが、電流値自体も小さくなり、これは対数増幅器測定下限電流によって押えられてしまう。そこでシュミレータ出力電圧と対数増幅器出力電圧とが対数比例する範囲を調べておく必要がある。

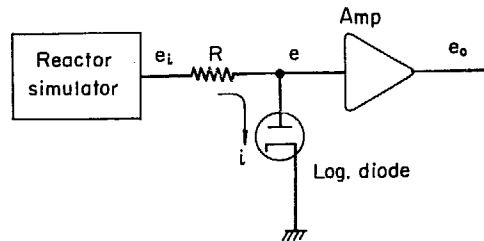


Fig. A7 Schematic circuit to connect log.  $N$  amplifier to reactor simulator.

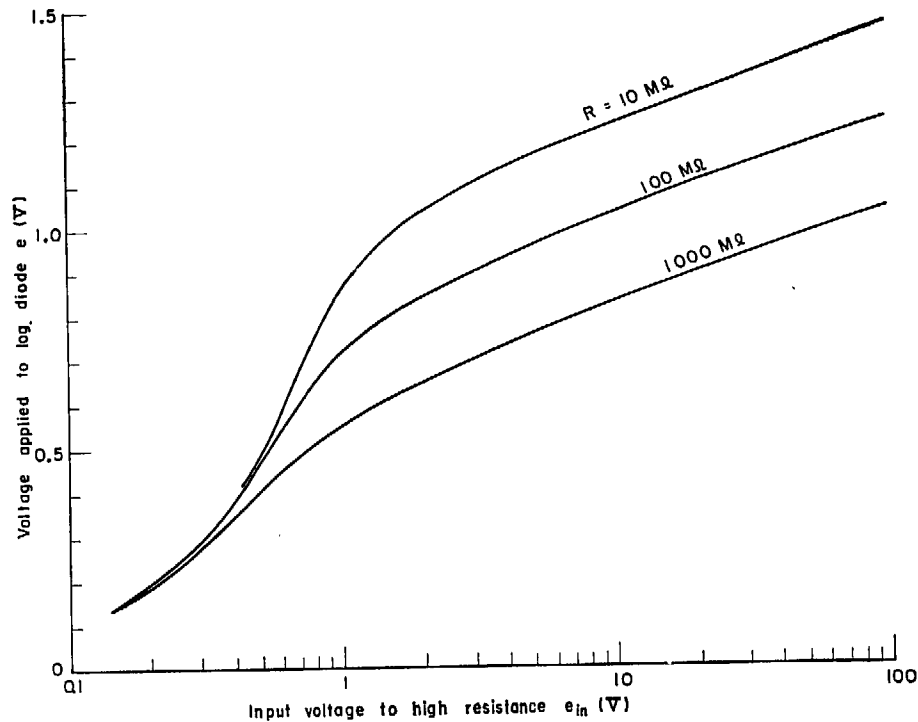


Fig. A8 The effect of high resistances which connect reactor simulator and log.  $N$  amplifier.

Fig. A7 で高抵抗  $R$  を流れる電流はすべて対数特性ダイオードを流れるものとし、このダイオード特性を次のように理想化する。

$$e = D \ln i + B \tag{A1}$$

したがって

$$e_i = Ri + D \ln i + B \tag{A2}$$

これら2式から種々の  $R$  について、 $e$  と  $e_i$  との関係をグラフに描くと Fig. A8 に示すような特性が得られる。ただし  $D=0.0904$ ,  $B=2.50$  である。

$e_i$  の小さい部分では、対数特性ダイオードを流れる電流が小さく、したがってその等価抵抗が大きくなり  $R$  と同一のオーダーになるので、もはや原子炉シュミレータ出力は電流源と見なせなくなる。そこで Fig.

A 8 の特性の対数特性からの誤差を次のように評価する。

対数特性ダイオードの等価抵抗が  $R$  に比べて十分小さく、これを無視できる場合は

$$e_i = Ri$$

したがって

$$\lim_{e_i \rightarrow \infty} \frac{de}{de_i} = \frac{de}{de_{i0}} = \frac{D}{e_i} \quad (\text{A } 3)$$

一方対数特性ダイオードの抵抗が無視できない場合は (A 1) および (A 2) 式より

$$\frac{de}{de_i} = \frac{D}{D + Ri} \quad (\text{A } 4)$$

誤差は

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\frac{de}{de_i} - \frac{de}{de_{i0}}}{\frac{de}{de_{i0}}} \\ &= \frac{e_i}{D + Ri} - 1 \end{aligned} \quad (\text{A } 5)$$

この誤差を原子炉シュミレータ出力電圧  $e_i$  に対して描くと Fig. A 9 のごとくなり、 $R = 10 \text{ M}\Omega$  の場合では  $e_i$  に対する  $e$  の変化割合は通常値の 5.5 倍にも達する。逆にいえば対数増幅器の等価ゲインが見かけ上それだけ大きくなり、ペリオド制御系が振動的になることも起り得る。また原子炉シュミレータを電流源として使える範囲は 50% の誤差を許すとしても 1.5 デカード程度である。

使用範囲を広げるには、対数特性ダイオードの  $D$  を見かけ上大きくなったものとして扱うか、シュミレータの増幅器出力電圧を大きくせねばならない。それにしても 2 デカードの使用範囲が限度であろう。

結論として、Fig. A 7 に示した型の対数増幅器を原子炉シュミレータと高抵抗を通して接続するのは好ましくない。むしろ対数特性ダイオードを増幅器の饋還回路に挿入した型を使用すべきであるといえる。

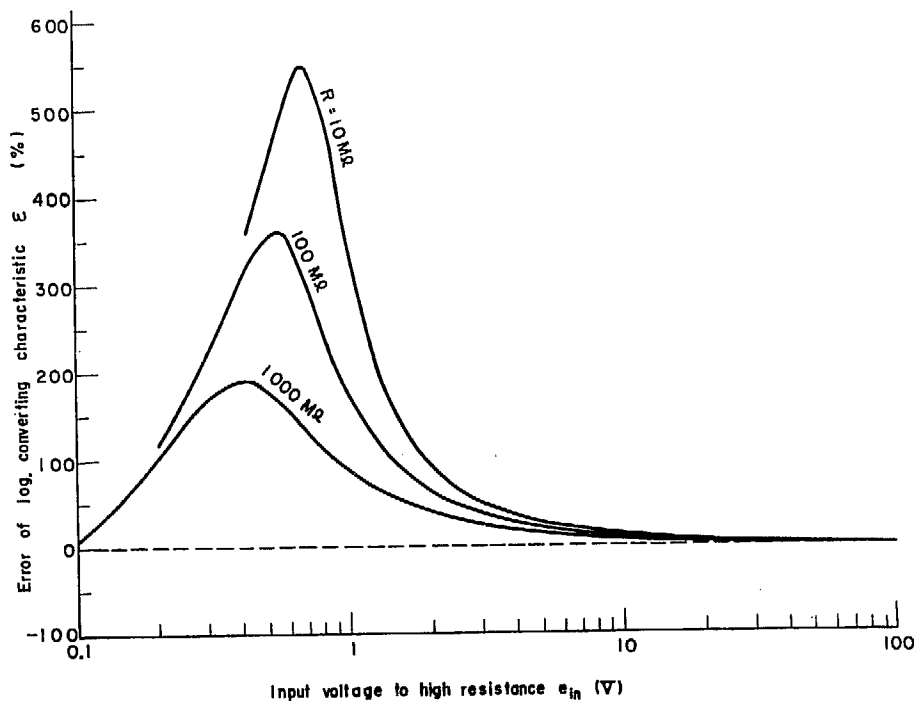


Fig. A 9 Error of log. converting characteristic due to finite resistance of  $R$ .