

原子炉の自動起動について

Automatic Start-up for Reactors

鈴木 守*
Mamoru Suzuki

内 容 梗 概

実験用原子炉を自動的に起動する原子炉自動起動制御回路の構成、回路上の問題点などについて説明し、試作装置によって原子炉をシミュレータで置き替えて原子炉の自動起動を実験した結果および試作装置の概要を報告した。

原子炉の自動起動は炉出力変化の周期の信号を制御回路にとり入れて、起動時の炉周期を制御することにより達成される。良好な周期制御を行うには周期の設定回路など詳細な検討を要するが、2極管を用いた比較的簡単な回路で、実験用原子炉の自動起動が可能であることが確かめられた。

1. 緒 言

原子炉の出力を安定に制御することは、原子炉の安全な運転を確保する上にきわめて重要な因子である。日立製作所日立研究所ではこの点に留意して、昭和31年以来原子炉出力自動制御装置の試作研究を行い定格出力付近での平常運転時における原子炉出力の自動制御系について種々検討した^{(1)~(4)}。同様な研究は各所でそれぞれ異なった形式容量の原子炉を対象に行われており⁽⁵⁾⁽⁶⁾、これらの研究およびJRR-1の運転経過報告^{(7)~(12)}などにより、平常運転時の原子炉出力制御に関する基本的な問題点はだいたい明らかとなった。実際に原子炉の制御系を設計するには、さらに系を構成する各機器の細部にわたる研究が必要であるが、この点についても各所で多くの研究が進められている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

しかしながら、原子炉出力の制御は平常運転時のみでなく、原子炉の起動時にも非常に重要である。これはあとで述べるように原子炉出力の急激な上昇は炉の起動時にも容易に起りうるからである。そこで、原子炉起動時にも原子炉出力上昇の割合を自動的に制御することが望まれる。

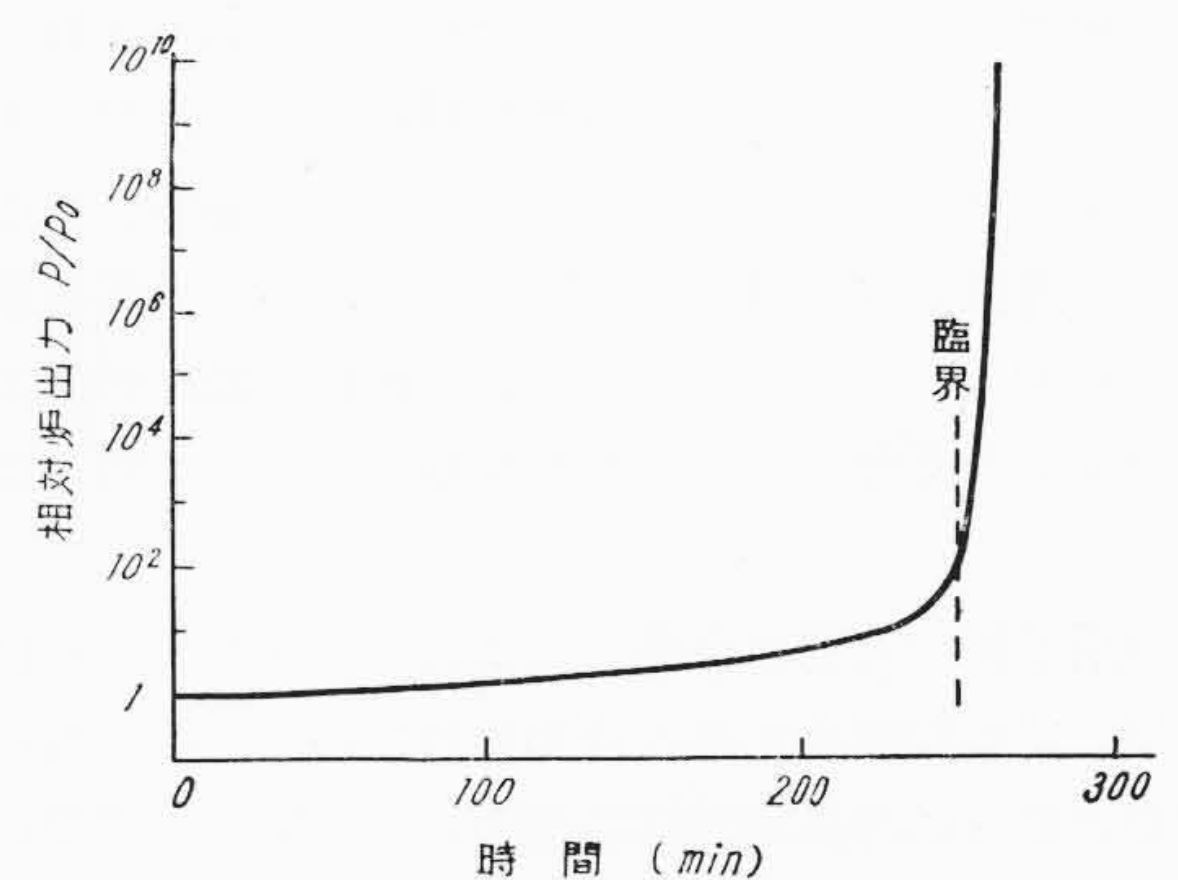
2. 原子炉起動の自動化

一般の実験用原子炉ではその炉内中性子束の強度をその出力と考えて、これを所要の値に制御することが原子炉出力制御の目標とされている。動力用原子炉ではその熱出力が問題とされるが、炉の熱出力と炉内中性子束はだいたい比例関係にあるので、両者は制御の本質において大きな差異はない。

ところで、炉内中性子束は、炉の停止時にはその定格値の 10^{-6} ないし 10^{-10} 倍ときわめて低くなる。したがって原子炉の起動時にはこの低い中性子束から出発して、定格値まで広範囲にわたって炉内中性子束を上昇せしめねばならない。このような広範囲にわたる炉出力の上昇を必要とするところに原子炉起動時の問題が生ずる。

原子炉の炉内中性子束を上昇せしめるには、原子炉の実効中性子増倍係数を1より大きくして、いわゆる原子炉の反応度と呼ばれる量をわずかに正にする必要がある。原子炉の停止時には反応度は負の大きな値になっていると考えられるので、原子炉を起動するには制御棒を引抜くとか、あるいは減速材としての重水などの水面を上昇せしめるとかの方法によって、炉に反応度を加えてやらねばならない。

通常は制御棒を引抜く方法が最も簡便であるところから、この方法が多く採用されている。いま制御棒の引抜きによって原子炉出力がどのように変化するか、一例を求めてみると第1図のような結果



第1図 起動時制御棒連続引抜きに対する応答を計算で求めた結果

が得られる⁽¹⁵⁾。同図からわかるように、炉が臨界点に達するまでは炉出力がきわめて徐々に増加するのに対して、臨界点をこえると炉出力は急速に上昇を開始する。

制御棒をどの程度引抜いたところで炉が臨界に達するかは、二三次度起動操作を行えばだいたい知ることができるが、実験のため試料を炉内にそう入した場合や、燃料交換後などでは一般に臨界となる制御棒位置は不明である。このような状況のもとで、手動により炉を起動するには、炉出力の上昇のありさまに十分注意して、臨界点をこえてもなお多量に制御棒を引抜くことのないように注意せねばならない。

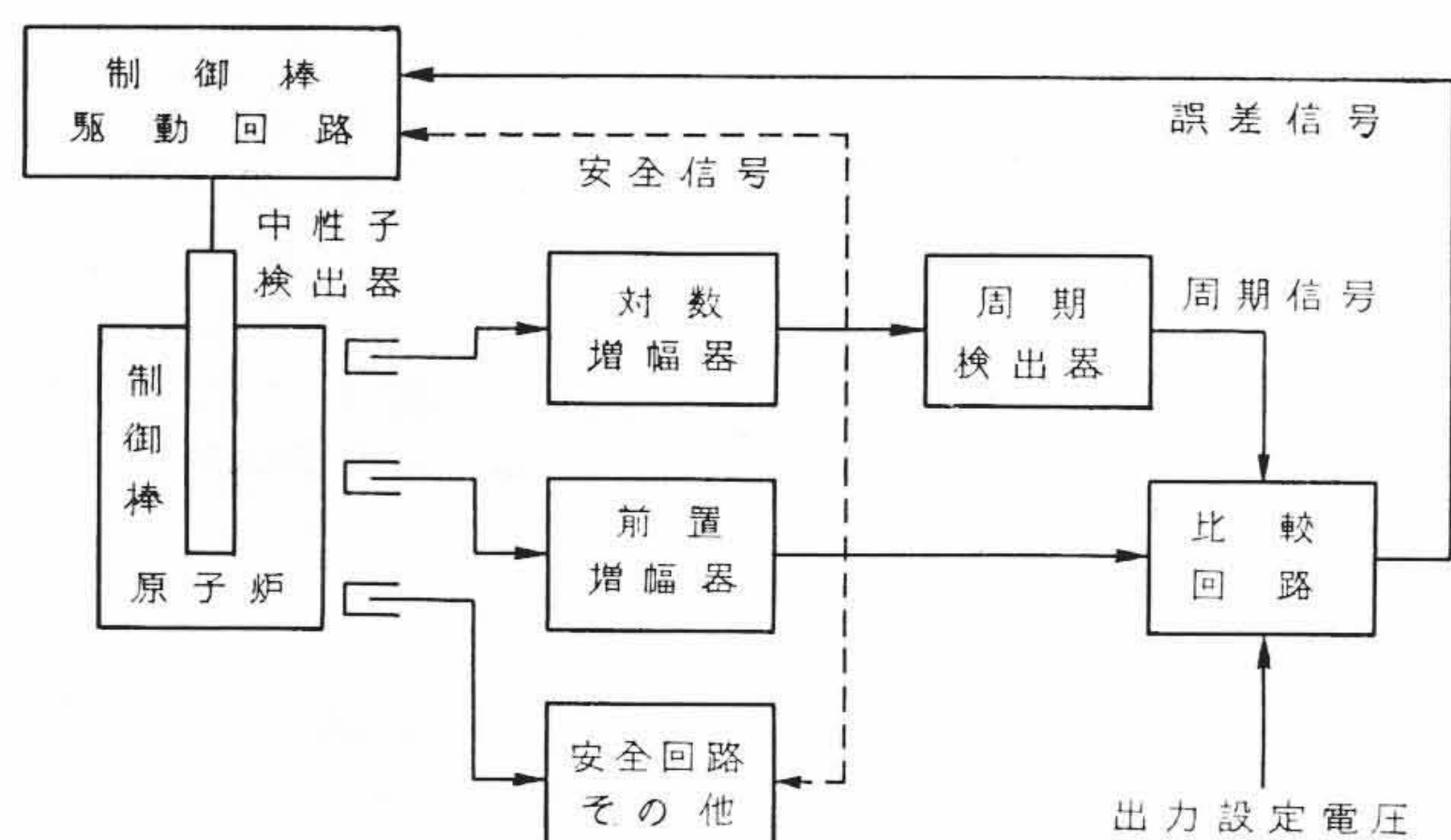
そのため原子炉の計装には、通常原子炉の周期と呼ばれる量（炉出力がe倍になるのに要する時間）を指示する計器が備えられ、これによって炉出力増加の割合を一定に保つように、すなわち炉出力上昇の周期を一定にするように制御棒を操作して炉の起動を行う。

また、制御棒の操作速度、特に引抜き速度には一定の制限が設けられ、場合によっては、一時に一定量の制御棒しか引抜けないような機構さえ採用されることもある⁽¹⁶⁾。この場合の制御棒引抜き量の制限は、その引抜きによって炉に加えられる反応度が、臨界点から即発臨界点（遅発中性子の効果がなくなる点）をこえるのに必要な反応度以下（ウラン235が燃料の場合には約0.64%以下）になるように選ばれる。

このような制限にもかかわらず、なお誤って制御棒が引抜かれた場合でも、炉出力の急上昇により原子炉が損傷されることのないように、原子炉にはさらに中性子束の上昇割合がある一定値をこえた場合（周期がある値よりも短くなった場合）には炉を緊急停止する安全回路が設けられている。

しかしながら、制御棒引抜き量が誤って即発臨界点をこえた場合には、安全回路によって炉を保護することは相当困難であり、また

* 日立製作所日立研究所



第2図 原子炉自動起動制御系の構成

たとえ安全回路の動作によって炉の損傷は免れても、ふたたび原子炉の起動操作を最初から繰り返さねばならない。

このように原子炉の起動に際して、制御棒の引抜きを手動で行うことは、広範囲にわたって炉出力が上昇する期間運転員に過度の注意を要求することとなり、また慎重を期すために起動に多くの時間を要する結果となる。もし、この原子炉起動の過程がある程度自動化されれば、運転員は制御系の故障、そのほかの異常状態に対処するように注意するのみでよく、原子炉の起動の際に炉出力の暴走を生ずる機会も少なくなり、原子炉の起動は安全かつ容易になると考えられる。

このため原子炉の起動を自動化する試みが各所で行われ⁽¹⁷⁾、自動起動に際しての問題点が種々研究されている。原理的には、上述の手動起動の場合に制御棒操作の基準とした原子炉周期の信号を原子炉出力制御回路に導入することにより達せられる。

通常の原子炉出力自動制御系では、原子炉出力、すなわち炉内中性子束が中性子検出器で検出され、比較回路で出力設定値と比較、増幅されて誤差信号となり、制御棒はこの誤差信号に比例する速度で駆動されるかあるいは誤差の正負によってオンオフ制御される。いずれの場合も誤差信号がなくなるまで制御棒が操作され、炉出力は出力設定値に等しく保たれている。

原子炉を自動的に起動するには第2図のように周期信号の回路を追加すればよい。第2図の系について考えると、原子炉を起動する初期の段階では炉出力は零と考えられ、炉周期も非常に長い。すなわち炉出力上昇が非常にゆっくりとしているので、比較回路の誤差信号は制御棒を引抜く方向に働く。この場合制御棒の引抜き速度は手動起動の場合と同様にある制限を設ける必要がある。

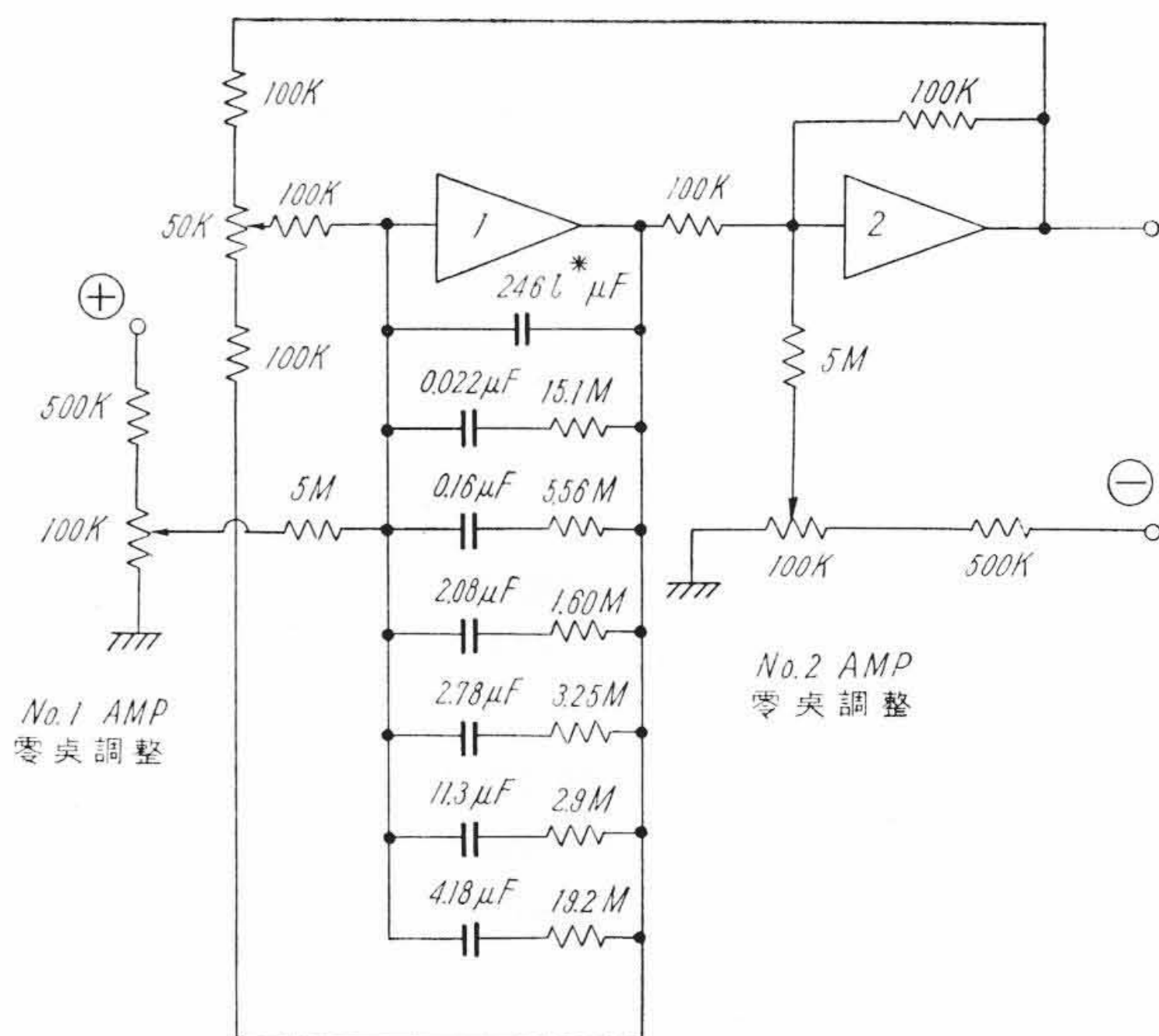
原子炉が臨界点をこえれば、炉出力の上昇割合は大きくなり、周期信号（周期の逆数、すなわち $\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt}$ に比例する信号）も大きくなるので、設定値と平衡して制御棒の引抜きはやむ。この状態で炉の反応度はわずかに正に保たれ、炉出力は一定の周期で上昇を続ける。最後に炉出力が十分高くなり定格出力に近づくと炉出力信号が大となり、制御棒をそう入する方向に働く。そして炉出力の上昇を止め、炉出力と設定値が平衡する点に落ち着く。この時には周期信号は零となり影響はなくなる。

以上が原子炉自動起動の原理であるが、実施に当っては制御系の構成、各機器の特性などに種々の問題が生ずる。筆者はこの点をいくぶんでも解明するために、比較的簡単な回路で原子炉自動起動の実験を行ってみた。以下その回路構成実験結果および問題点について報告する。

3. 実験回路の概要

3.1 原子炉シミュレータ

試作した原子炉制御装置では、原子炉の部分を電気的な相似回路、いわゆるシミュレータで置き換えて、系全体の動特性を検討し



第3図 原子炉シミュレータの構成

ている。シミュレータの構成はよく知られた第3図の回路を用いた⁽¹⁸⁾。

シミュレータを用いて原子炉の自動起動制御系の特性を調べる場合に直面する問題は、シミュレータの動作範囲が狭いことである。すなわち、シミュレータでは最大 $1 \sim 10^4$ 程度の動作範囲が得られるにすぎず、しかも低出力では雑音が相対的に大きくなり、また対数増幅器との接続にも問題がある。結局のところ起動時の相似はせいぜい0.1Vから100Vまでが実用となるにすぎない。これを克服するには、2台のシミュレータを時間的に直列に運転するとか、周期シミュレータを用いるとかの方法が考えられる。しかし今回は不十分ではあるが、上記の動作範囲内でもなんらかの結果は得られると考えて起動時の実験を行ってみた。

3.2 対数増幅器

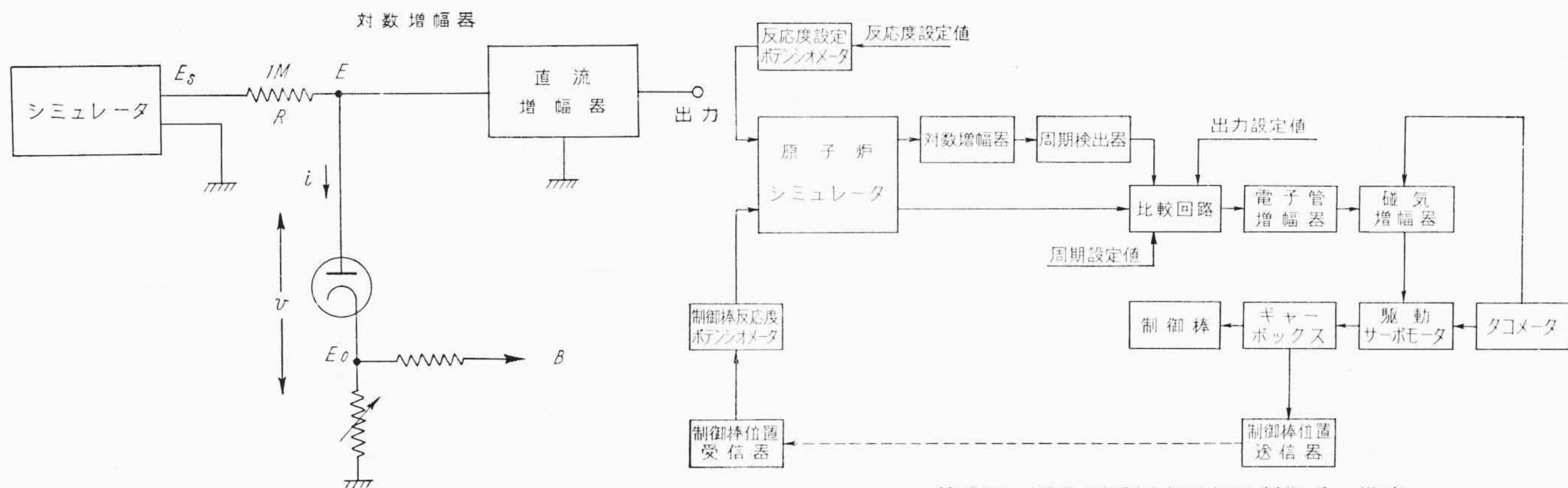
原子炉の周期信号は原子炉出力の対数に比例する信号を微分することによって得られる。この原子炉出力の対数に比例する信号は、2極管の特性を利用した、いわゆる対数増幅器と呼ばれる回路で得られる。対数増幅器についてはすでによく知られているので、ここでは対数増幅器をシミュレータと結びつける場合に生ずる問題について検討する。

2極管の特性を利用した対数増幅器は、原子炉の出力に比例した電流信号から、原子炉出力の対数に比例する電圧信号をうる回路である。そして電離箱形中性子束検出器は一種の電流信号源とみなすことができるので、この両者を結合することはきわめて容易である。これに対して原子炉シミュレータは電圧信号源であるから、シミュレータと対数増幅器とを結合するには、第4図に示すように高抵抗を使用して、仮想的な電流信号源とするのである。しかしシミュレータの出力が低くなると、2極管の内部抵抗に比して結合抵抗が低くなるので、もはや電流信号源とみなすことはできなくなり、この方法ではシミュレータ出力の低い方に限界が生ずる。上限は2極管の対数特性が失われる点であり、誤差をある程度に押えれば動作範囲は制限される。実験した回路では付録に述べるように動作範囲の約3%の誤差であった。

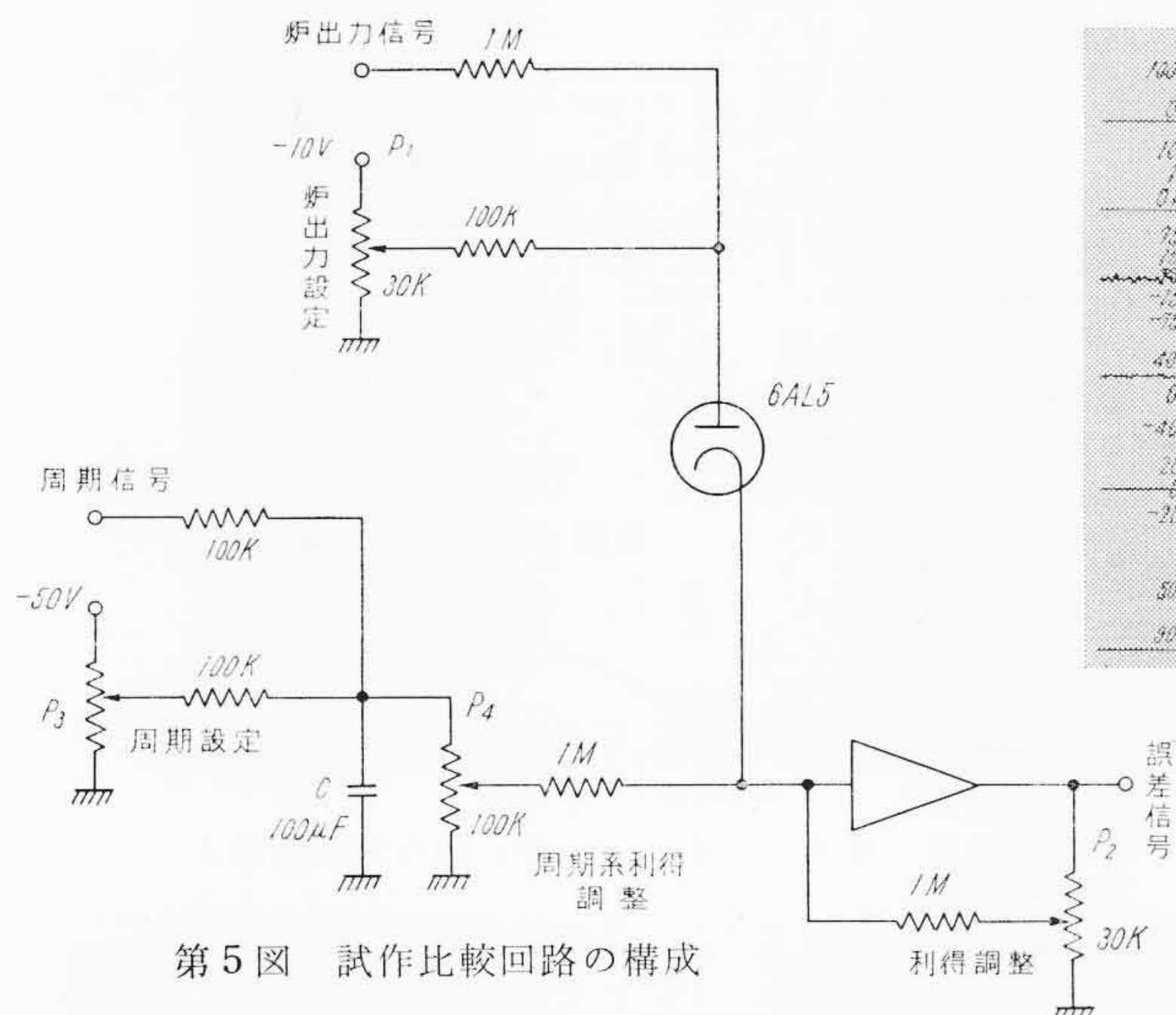
3.3 周期検出回路

周期検出回路は対数増幅器の出力を微分する回路である。微分回路のため雑音を大きく増幅するので、微分回路のCRはなるべく大きくとり、増幅器の増幅度は低くすることが望ましい。また雑音除去用のコンデンサを回路に入れる必要がある。

このようにCRを大きくとり、かつ雑音を除去するコンデンサを用いることは、周期検出器の応答速度を遅くする結果となるので、



第4図 原子炉シミュレータと対数増幅器との結合回路



実用回路では炉の特性と関連して適当な値を選ばねばならない。原子炉は遅発中性子の効果がある時間遅れを伴って現われるので、その出力変動には相当急激な変化が含まれ、周期の検出に時定数の大きい要素が含まれても、炉出力の平均的な変動の周期を遅れなく検出することは可能であると考えられる。

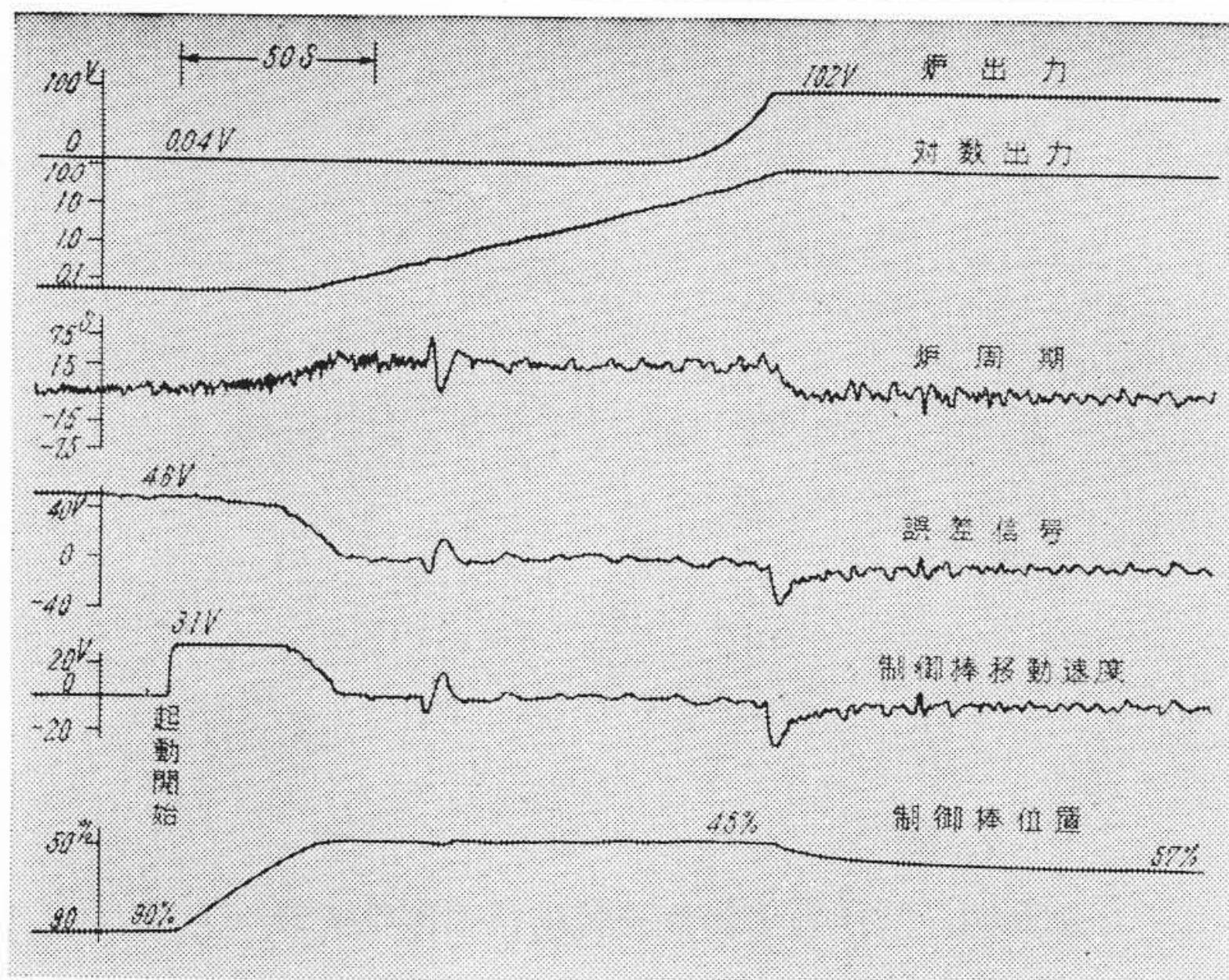
周期設定 30 s, A_p (比較回路の周期制御系利得) $\approx 6 \times 10^2$ (V·s)

3.5 全系の構成

試作した原子炉自動制御系の構成は第6図のようになる。同図において制御棒駆動機構および制御棒位置送受信回路については特記すべき点はないので省略する。

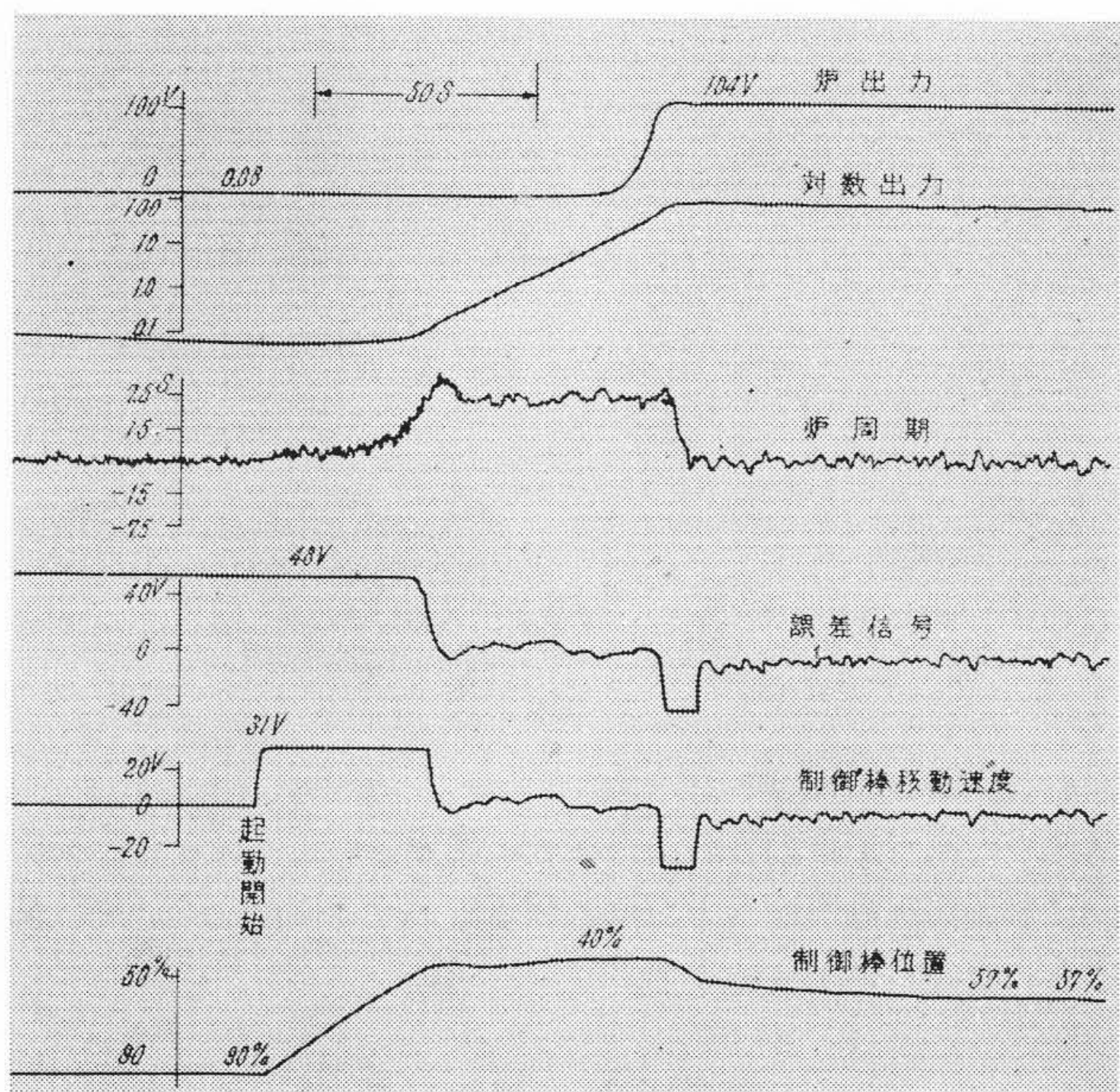
第6図の回路で原子炉自動起動の実験を行った結果を第7図以下に示す。実験は第5図の P_1 を 100(%), P_2 を 10(%) の位置に固定して P_3, P_4 を種々に調整した場合について行った。第7図は P_3 を零とし、2極管の熱電子起電力を打ち消す部分がちょうど30秒の周期設定値に相当する位置に P_4 をおいて、炉出力約 0.1% (シミュレータ出力 0.1(V)) の状態から炉出力 100%(シミュレータ出力 100(V)) の状態まで起動した場合の実測結果である。この場合周期制御系の利得は比較回路出力で約 6×10^2 (V-s) となる。これに対して炉出力制御系のそれは 10(V/%出力) となっている。

第8図および第9図は P_4 を前例の位置に固定し、 P_3 のほうを調整して周期の設定をそれぞれ15秒および8秒とした場合の結果である。第10図は参考のために周期制御系を殺した場合、すなわち P_4 を零とした場合の無制限制御棒引抜きによる暴走の記録を示したものである。第11図はふたたび P_3 を零として、 P_4 、すなわち系の利得を変えた場合の結果である。この場合 P_4 を周期の設定が8秒になるように調整したので、利得は約 160(V-s) となる。第12図は第11図と同一条件であるが、制御棒がすでに相当引抜かれて臨界に近い状態から起動を開始した場合の結果である。



周期設定 15s, $A_p \approx 6 \times 10^2 (V \cdot s)$

第8図 原子炉自動起動回路の動作実験結果2

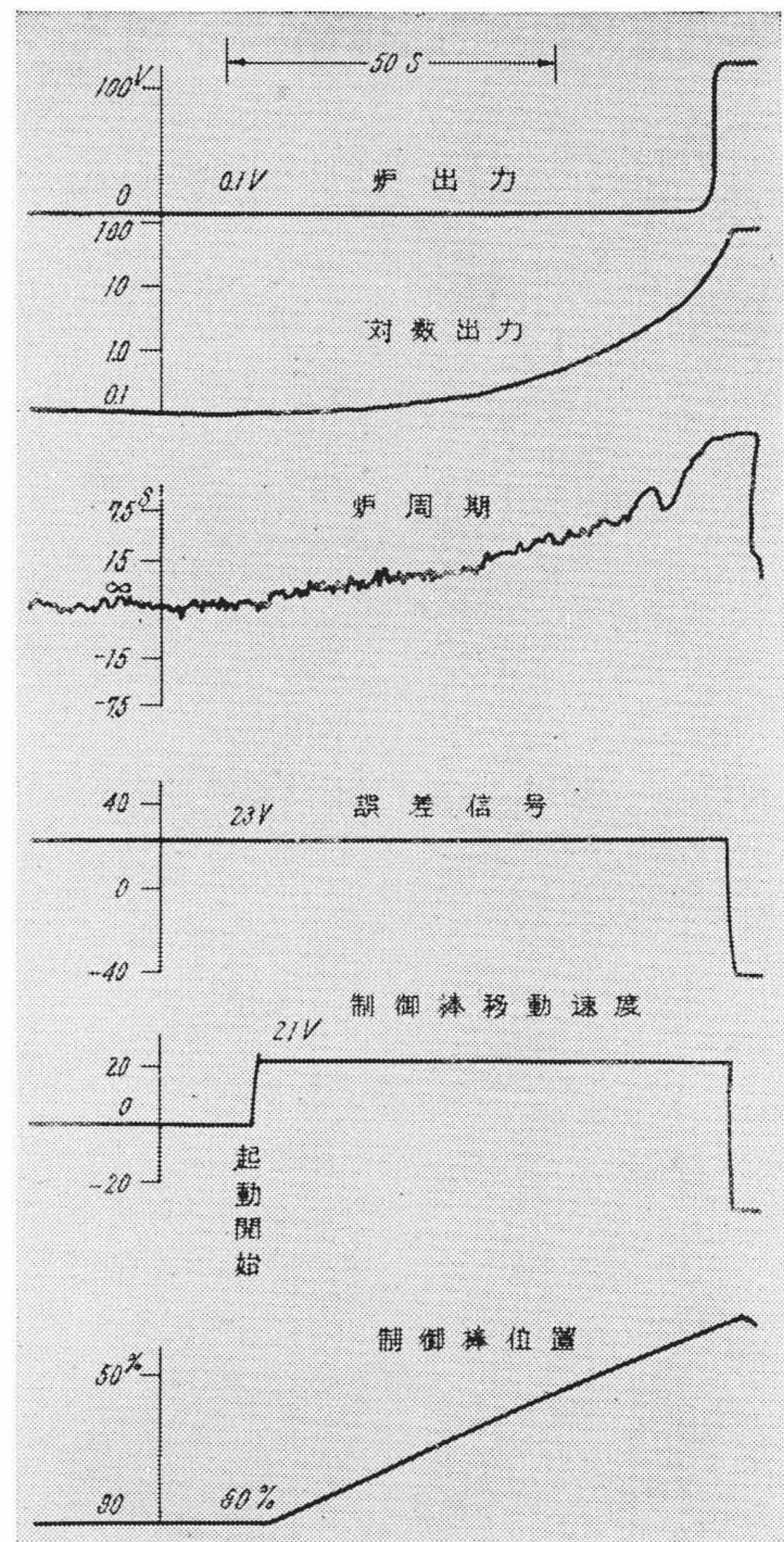


周期設定 8s, $A_p \approx 6 \times 10^2 (V \cdot s)$

第9図 原子炉自動起動回路の動作実験結果3

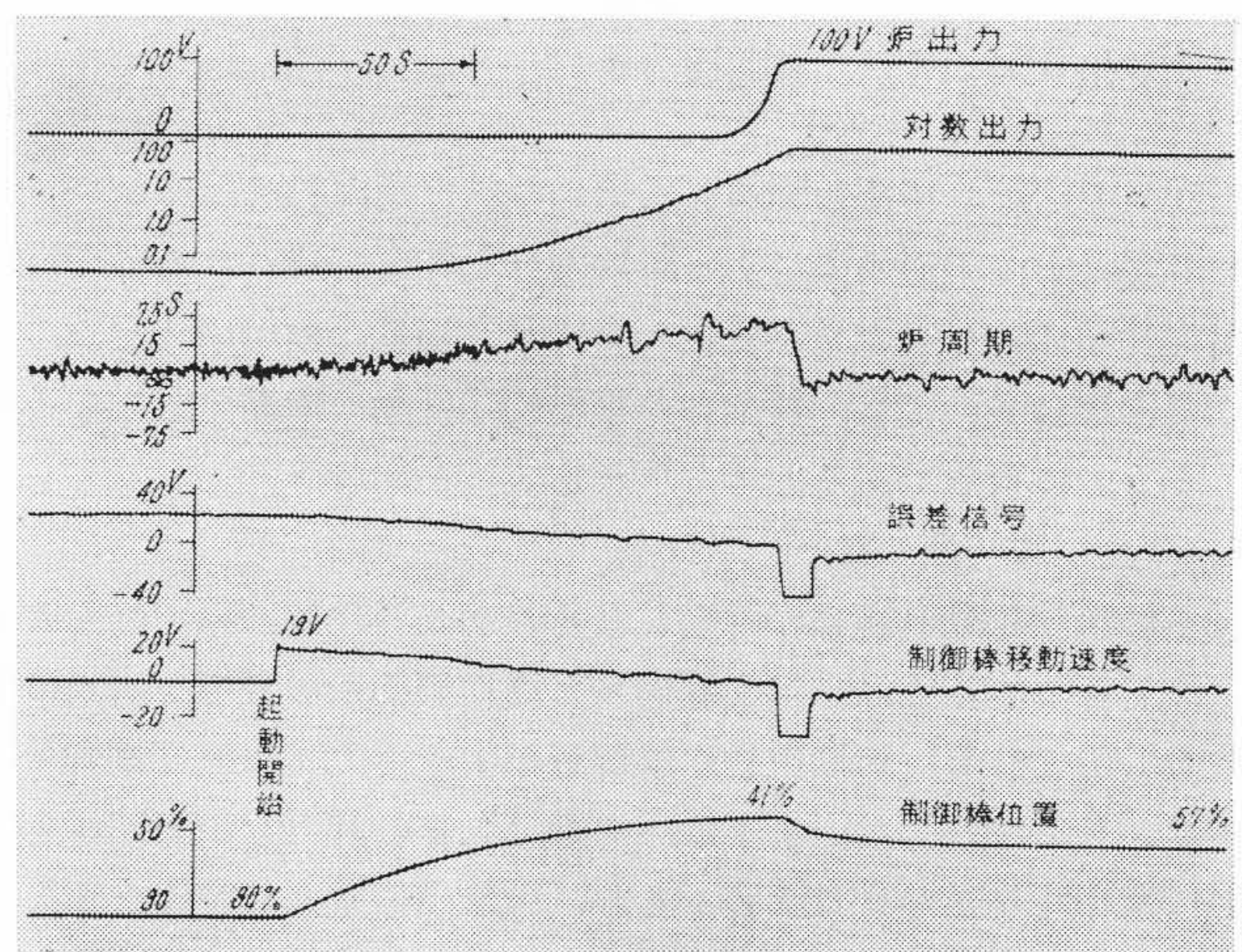
が、炉が臨界に達するまでは周期は設定値に比して長く、誤差信号は変わらない。制御棒が引抜かれるに従い炉出力の対数値は徐々に増加し、周期もわずかに短くなる。炉が臨界に近づけば周期は設定値に等しくなり、制御棒の引抜きは臨界をわずかにこえたところで止められる。その後は周期を設定値に等しく保って炉出力が増加し、炉出力がその設定値に達すると突然誤差信号が負の方向に生じて、制御棒をわずかにそう入して炉出力を平衡させ起動を完了する。第7図では周期信号の雑音のためこの関係はあまり明りょうでないが、第8、9図などでは、はっきりみられる。また第9図では起動周期が短いため、炉出力にわずかな行き過ぎがあるのが認められる。第10図に参考として示したように、周期制御系を殺した場合には、起動時の周期が制御されずきわめて短くなり、炉が臨界点をこえた後に暴走を起しているのが知られる。同図で炉出力の信号が水平になるのは設定値に平衡しているのではなく、シミュレータが飽和しているのである。

第7～9図では周期制御系の一巡利得は一定であり、第11図では P_4 がより低く設定されるので、周期制御系の一巡利得はそれだけ小さくなっている。しかし第11図の場合、制御棒の引抜速度に制限が設けられるため、周期が設定値に達したときには、すでに炉出力も設定値に達する結果となり、周期制御系が完全に動作する期間がなくなっている。そこで第12図では起動開始の状態をもっと臨界に近いところに採った。第12図の場合には、周期制御系の動作が



周期制御系のない場合

第10図 原子炉自動起動回路の動作実験結果4



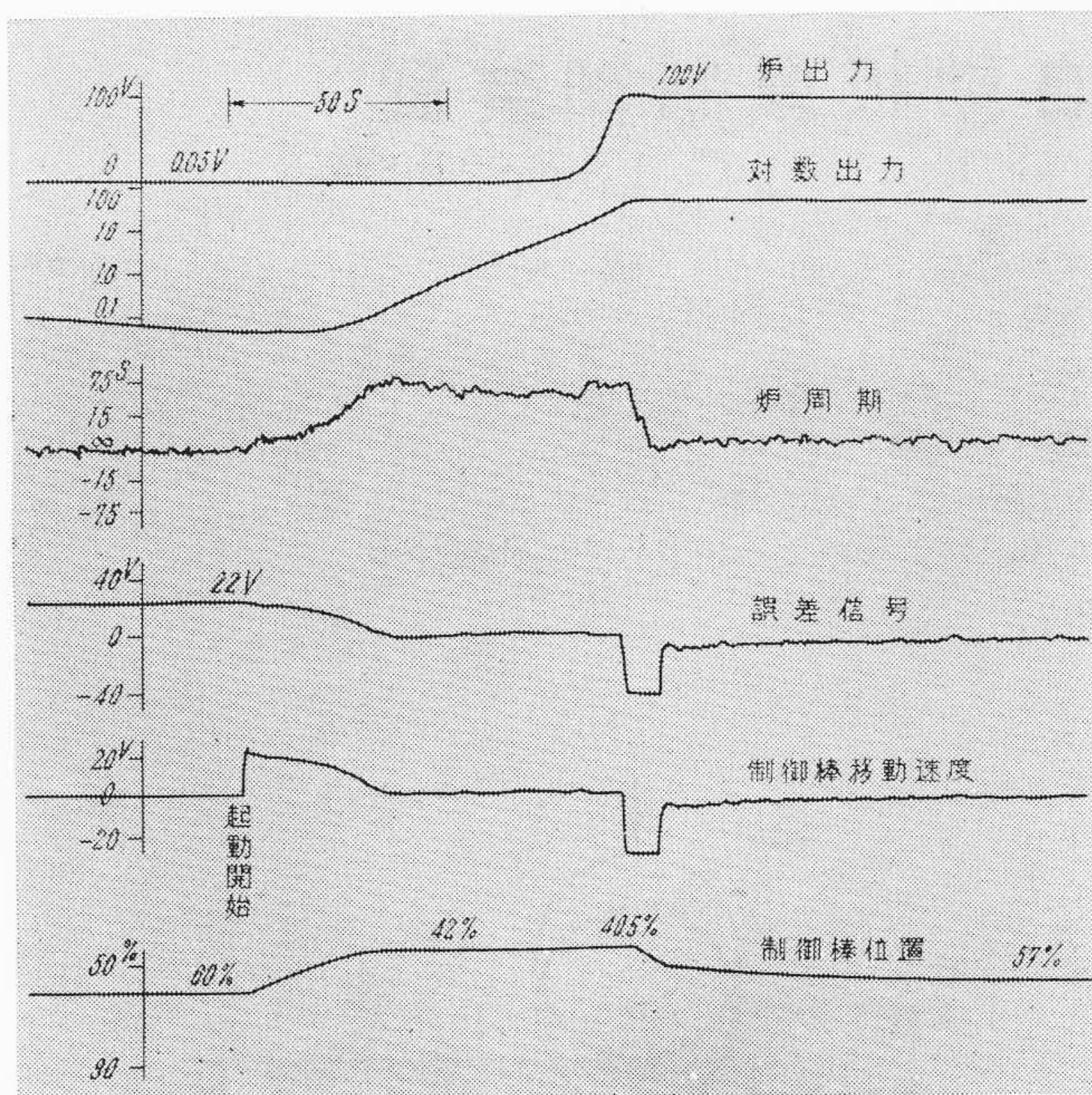
周期設定 8s, $A_p \approx 1.6 \times 10^2 (V \cdot s)$ 起動前に十分負の反応度があった場合

第11図 原子炉自動起動回路の動作実験結果5

明りょうになっている。実際の原子炉の場合は、起動時の出力変動範囲が広いので第11図のような状態が生ずることはなく、第11図で、周期が設定値に達したあとは第12図の状態が続くと考えてよい。

第9図の結果と第11図および第12図の結果とを比較すれば、周期制御系の一巡利得の効果が明らかにされる。すなわち、周期制御系の動作は一巡利得によってあまり変わらないが、誤差信号にみられる雑音は周期制御系の利得が小さくなるので、第12図では著しく小さくなっている。また、周期が設定されるまでの時間は利得により大きく左右されることが知られる。

次に制御系の安定性について検討すれば、第8図において起動中に偶然一種のじょう乱が生じたのがみられる。これは電源電圧の急激な変動などが原因となってシミュレータに生じたものと考えられ



周期設定 8s, $A\rho \approx 1.6 \times 10^2$ (V-s) 起動前に臨界点近くにあった場合

第12図 原子炉自動起動回路の動作実験結果6

るが、このようなじょう乱に対して系がきわめて安定であることが第8図より知られる。

6. 結 言

以上実験用原子炉自動起動制御系の構成、および試作装置による実験結果について報告した。第7～12図に得られた結果より、第5および第6図に示す比較的簡単な構成の原子炉自動起動制御系によっても、原子炉の自動起動が行われうることが知られた。実際の原子炉に自動起動を実施する場合には、周期制御系の一巡利得とその応答特性の関係、雑音を除去するための濾波回路の応答特性に及ぼす影響など、なお詳細な検討を要する問題が残されているがこれらの問題点はアナログ計算機の助けを借りて、容易に解決できるものと考えられる。

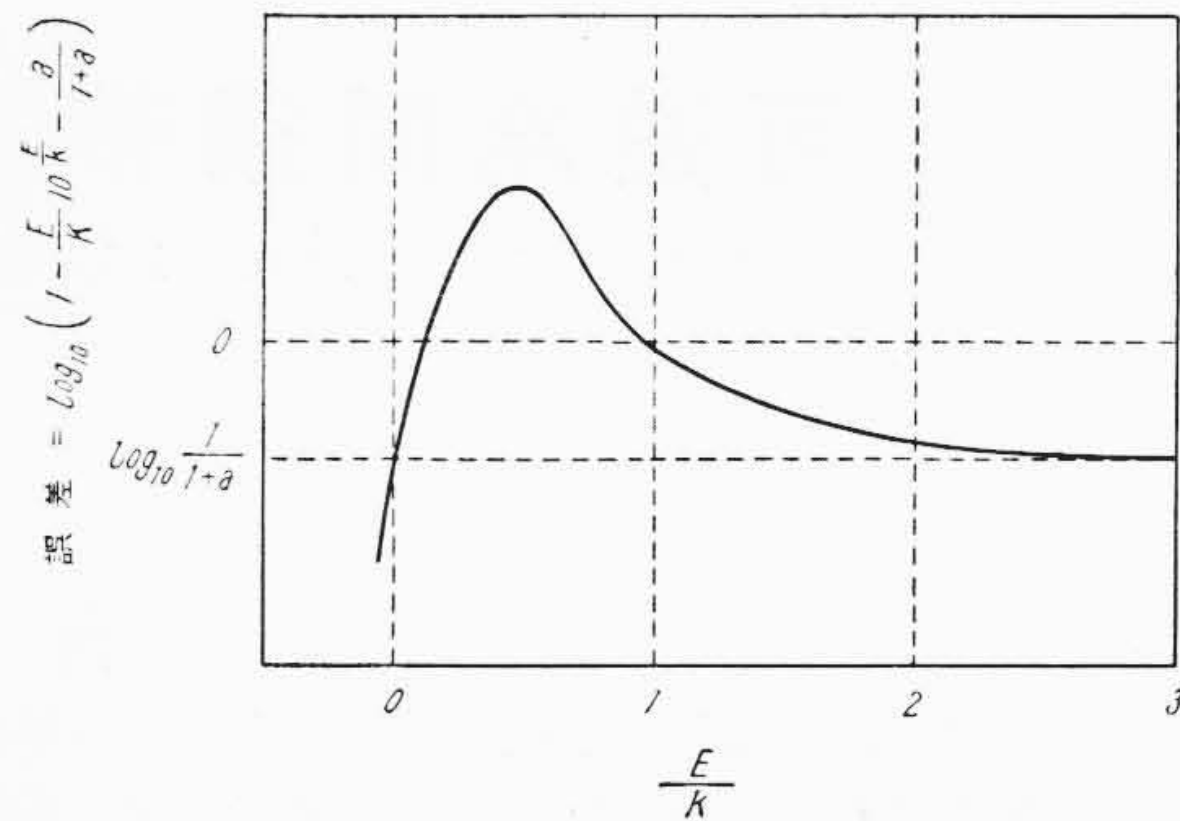
原子炉の起動を自動化するという課題は、その大部分をあるシーケンスに従ったスイッチやハンドル操作と、その結果の確認によって達成されるのであり、ここに報告した部分はその最終段階で、あらゆる準備が整ったのち、制御棒の引抜きを開始する最も重要な段階である。この段階に入る条件としてみのがすことのできない点は、対数増幅器と周期検出器がその動作範囲に入っていることである。したがって、試作装置のような自動起動装置で起動を開始する準備段階として、これらの回路が動作範囲に入っているのを確認することが必要である。

このように起動操作を明白にして、確認事項を確実に、かつ自動的にモニタし、原子炉起動の安全を確保することが重要である。

最後に、本研究に際して終始ご鞭撻ご激励をいただいた当社関係者各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 科学技術庁原子力局：原子力平和利用研究成果報告書 (P. 137, 1960)
- (2) 片木, 井上, 鈴木守：昭和33年電気学会東京支部予稿, 22
- (3) 片木, 鈴木守, 加藤：昭和33年電気学会東京支部予稿, 23
- (4) 片木, 鈴木守, 井上：昭和33年電気学会東京支部予稿, 24
- (5) 鈴木：第2回原子力シンポジウム報文集 (A-36, 1958)
- (6) 入島：第2回原子力シンポジウム報文集 (A-37, 1958)
- (7) 神原, 外：第2回原子力シンポジウム報文集 (A-19, 1958)
- (8) 松本：第2回原子力シンポジウム報文集 (A-20, 1958)
- (9) 苦米地：第2回原子力シンポジウム報文集 (A-21, 1958)
- (10) 庄司：第2回原子力シンポジウム報文集 (A-22, 1958)



付図 対数増幅器をシミュレータに接続した場合の誤差

- (11) 高橋：第2回原子力シンポジウム報文集 (A-23, 1958)
- (12) JRR-1 管理室：日本原子力研究所研究報告 (JAERI-1003, 1958)
- (13) 庵原：第3回原子力シンポジウム報文集 II -26, (1959)
- (14) 桜井, 高草, 田中：第3回原子力シンポジウム報文集 II -28, (1959)
- (15) 鈴木, 鴨井：原子力発電 Vol. 3, 2. p. 28-36, (1958)
- (16) S. グラストン(金関訳)：原子力ハンドブック原子炉篇 (上) p. 366, 商工会館出版部, 東京, (1956)
- (17) 住田外：第3回原子力シンポジウム報文集 II -25, (1959)
- (18) M. A. Schultz: Control of Nuclear Reactors and Power Plants, p. 282 Mc Graw Hill, New York, 1955
- (19) M. A. Schultz: Control of Nuclear Reactors and Power Plants, p. 243 Mc Graw Hill, New York, 1955
- (20) A. Pearson: NRU, Reactor, No. 13, CRE-681

付 録

原子炉シミュレータと対数増幅器との接続について、本文3.2で述べたように高抵抗によって対数増幅器をリアクタシミュレータに接続した場合に誤差を生ずる。この誤差について以下簡単に考察する。

本文第4図に示す回路で

$$\frac{E_s - E}{R} = i \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E = E_0 + v \quad \dots\dots\dots (2)$$

の関係が成り立つ。ここで

E_s ：シミュレータ出力電圧 (V)

E ：2極管陽極電圧≡対数増幅器入力電圧 (V)

R ：結合抵抗 (Ω)

i ：2極管に流れる電流 (A)

E_0 ：2極管陰極バイアス電圧 (V)

v ：2極管両極間電圧 (V)

である。2極間の対数特性を

$$v = k \log_{10} i/i_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし k ：比例定数 (V)

i_0 ： $v=0$ となる電流 (A)

とすれば、以上の3式より

$$E_s = E + R i_0 \cdot 10^{\frac{E - E_0}{k}} \cdot 10^{\frac{E}{k}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$= K 10^{\frac{E}{k}} \left(1 + \frac{E - E_0}{K} \cdot 10^{-\frac{E}{k}} - \frac{a}{1+a} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$K = (1+a) \cdot R i_0 \cdot 10^{-\frac{E}{k}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

の関係が得られる。両辺の対数をとれば

$$\frac{E}{K} = \log_{10} \frac{E_s}{K} - \log_{10} \left(1 + \frac{E - E_0}{K} \cdot 10^{-\frac{E}{k}} - \frac{a}{1+a} \right) \dots\dots\dots (7)$$

となって、最後の項が誤差を与えることになる。 $K=0.1$ (V) となるように a および E_0 を定めると、 E_s が 0.1 (V) ないし 100 (V) の間を変動するとき、 E/k はおよそ 0 ないし 3 の間を変動し、その場合の誤差は付図に示すようになる。

実験した回路では $k=0.24$ (V) であるから $a=0.21$ として、誤差は約 ± 0.09 となり、 E/k の全変動範囲の約 $\pm 3\%$ となる。