

JAERI - M

88-113

改良型パルス運転のためのNSRR
計測制御系統施設の安全設計

1988年6月

稲邊 輝雄・石島 清見・丹沢 貞光・島崎 潤也
中村 武彦・藤城 俊夫・大友 正一・鈴木 芳弘
小林 晋昇・谷内 茂康・菊池 隆・宮崎 修
梅田 政幸・鈴木 寿之・堀木欧一郎

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

改良型パルス運転のためのNSRR
計測制御系統施設の安全設計

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

稲邊 輝雄・石島 清見・丹沢 貞光
島崎 潤也・中村 武彦・藤城 俊夫
大友 正一・鈴木 芳弘・小林 晋昇
谷内 茂康・菊池 隆・宮崎 修
梅田 政幸・鈴木 寿之・堀木欧一郎

(1988年5月27日受理)

NSRRにおいては、反応度事故条件下での燃料挙動解明を目的とした炉内実験のために、これまで、低出力(1 kW以下)の初期状態から、瞬間最高出力23,000 MWまでの急峻なパルス状出力を発生する運転(「単一パルス運転」)を行ってきた。今後は、さらに、実験条件の範囲を拡張し、高出力状態からの反応度事故条件を模擬したり、より緩やかな過渡出力変化を模擬することができるようにするために、10MWまでの高出力の発生と瞬間最高出力23,000 MWまでの急峻なパルス状出力の発生の組合せを行う運転(「合成パルス運転」)及び10MWまでの範囲での任意の形状の過渡出力の発生を行う運転(「台形パルス運転」)を、改良型パルス運転として実施することを計画している。これを達成するためには、NSRRの計測制御系統施設の改造が必要となる。このため、安全性を配慮した今後の運転方法の技術的検討を進めるとともに、原子炉の計装、制御、安全保護に係る各設備の設計作業を進め、これらの作業に基づき、NSRR計測制御系統施設全体の安全設計を固めた。本報告書は、安全設計に当たっての基本的な考え方、改良型パルス運転の方法、計測制御系統施設の各構成設備の設計方針及び基本設計の内容、並びに改良型パルス運転に係る主要な動特性等について述べるものである。本安全設計を通し、改良型パルス運転が、原子炉の安全性を損うことなく安定して実施しうる見通しを得ることができた。

Safety Design of NSRR Instrumentation and Control
Systems for the Improved Pulsing Operation

Teruo INABE, Kiyomi ISHIJIMA, Sadamitsu TANZAWA
Junya SHIMAZAKI, Takehiko NAKAMURA, Toshio FUJISHIRO
Shoichi OHTOMO, Yoshihiro SUZUKAWA, Shinsho KOBAYASHI
Shigeyasu YACHI, Takashi KIKUCHI, Osamu MIYAZAKI
Masayuki UMEDA, Toshiyuki SUZUKI and Ohichiro HORIKI

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 27, 1988)

In the Nuclear Safety Research Reactor (NSRR), inpile experiments have been conducted to study the fuel behavior under reactivity-initiated accident (RIA) conditions. The simulation of an RIA in the present NSRR operation is done by generating a sharp pulsed power with a peak value of up to 23,000 MW from an initial low power level of less than 1 kW (this type of operation is referred to as "Natural Pulse Operation").

On the other hand, the simulation of an RIA from a high power level and the simulation of a slower abnormal power transient are required to expand the experimental capability of the NSRR for the future research programs. The former will be done by combining the generation of a high power of up to 10 MW and the generation of a sharp pulsed power with a peak value of up to 23,000 MW (this type of operation is referred to as "Combined Pulse Operation"). The latter will be done by generating a transient power of up to 10 MW in an arbitrary shape (this type of operation is referred to as "Shaped Pulse Operation").

A significant modification of the reactor instrumentation and control systems of the NSRR is prerequisite for achieving the improved pulsing operations of these types, and therefore, the design works were developed as to the equipments for reactor instrumentation, control and safety protection together with the technical examinations of the new

type operations from the safety point of view. On the basis of these works, the safety design of the instrumentation and control systems of the NSRR has been established.

This paper presents the principle ideas for the safety design, the methodology of the new type pulsing operations, the fundamental design of the reactor instrumentation and control systems, and the predicted major reactor kinetics in the new type operations. Through the safety design presented herein, a fair prospect of realizing the safe and stable conduct of the improved pulsing operations has been obtained.

Keywords: TRIGA Reactor, NSRR, Safety Design, Natural Pulse, Shaped Pulse, Combined Pulse, Automatic Pulsing Operation, Reactor Control System, Reactor Instrumentation, Reactor Safety System

目 次

1. 序	1
2. NSRRの概要	2
2.1 炉心の構成及び現行運転の特徴	2
2.2 炉心の熱的制限値	3
3. 改良型パルス運転のための安全設計に当たっての基本的な考え方	8
4. NSRRの今後の運転方式	10
5. 計測制御系統施設の安全設計	18
5.1 原子炉計装設備	18
5.1.1 原子炉計装設備の概要	18
5.1.2 原子炉計装設備の設計方針	19
5.1.3 核計装	19
5.1.4 燃料計装	22
5.1.5 プロセス計装等	23
5.2 原子炉制御設備	23
5.2.1 原子炉制御設備の概要	23
5.2.2 原子炉制御設備の設計方針	23
5.2.3 制御棒駆動設備	23
5.2.4 出力制御設備	24
5.2.5 制御用インターロック回路	25
5.2.6 制御棒自動挿入回路	28
5.2.7 警報回路	28
5.3 安全保護回路	29
5.3.1 安全保護回路の概要	29
5.3.2 安全保護回路の設計方針	29
5.3.3 原子炉停止回路	29
5.3.4 原子炉保護用インターロック回路	30
6. 改良型パルス運転に係る核・熱特性及び動特性の概要	48
7. 結 論	54
謝 辞	54
参考文献	55

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of the NSRR	2
2.1 Core Components and Present Operation Features	2
2.2 Thermal Limitation of the Core	3
3. Basic Consideration in the Safety Design for the Improved Pulsing Operation	8
4. Future Operation Methods of the NSRR	10
5. Safety Design of the Reactor Instrumentation and Control Systems	18
5.1 Reactor Instrumentation System	18
5.1.1 Outline of the Reactor Instrumentation System	18
5.1.2 Reactor Instrumentation Design Principles	19
5.1.3 Nuclear Instrumentation	19
5.1.4 Fuel Instrumentation	22
5.1.5 Process Instrumentation and Others	23
5.2 Reactor Control System	23
5.2.1 Outline of the Reactor Control System	23
5.2.2 Reactor Control System Design Principles	23
5.2.3 Control Rod Drive Device	23
5.2.4 Power Control Device	24
5.2.5 Control Interlock Circuit	25
5.2.6 Automatic Control Rod Insertion Circuit	28
5.2.7 Alarm Circuit	28
5.3 Safety Protection Circuits	29
5.3.1 Outline of the Safety Protection Circuits	29
5.3.2 Safety Protection Circuits Design Principles	29
5.3.3 Reactor Scram Circuit	29
5.3.4 Reactor Protection Interlock Circuit	30
6. Outline of the Nuclear, Thermal, and Dynamic Characteristics of the NSRR Relevant to Improved Pulsing Operation	48
7. Conclusions	54
Acknowledgements	54
References	55

1. 序

日本原子力研究所のNSRR（原子炉安全性研究炉）は、反応度事故時の燃料挙動を解明する炉内実験のために建設されたパルス炉であり、昭和50年6月に初臨界に達した後、同年10月より実験に供されてきた。これまでのNSRR実験においては、未照射燃料を試料として、その破損限界、破損機構、破損後の影響等を研究してきたが、今後は、燃焼の進んだ照射済燃料を試料として、その破損挙動を研究する実験に着手する計画である。一方、これまでの実験におけるNSRRの運転では、低出力（1 kW以下）の初期状態から、制御棒の急速引抜きによって炉心に正の反応度を添加し、反応度事故を模擬したパルス状の出力を発生させる運転（以後、これを「単一パルス運転」とよぶ）を行うものであった。しかし、今後の照射済燃料を対象とする実験においては、燃料の破損機構上、特に、出力上昇過程でのペレット-被覆材間相互作用が重要な因子として介在することが予想されるために、事故条件発生以前の燃料の出力状態とその後の燃料の破損挙動との関係を明らかにすることが重要となる。このため、現行の「単一パルス運転」に加え、高出力状態から反応度事故を模擬したパルス状出力を発生させる運転（以後、これを「合成パルス運転」とよぶ）を行うことが、今後の実験研究上必要とされるに至った。また、「合成パルス運転」の手段となる高出力状態の発生を行う運転（以後、これを「台形パルス運転」とよぶ）は、それ自体で、比較的緩やかな過渡出力条件での燃料挙動を研究する上での有効な手段となる。

以上の理由から、照射済燃料に対する実験に関連して、現行のパルス運転の方式を改良し、「単一パルス運転」に加えて、新たに「台形パルス運転」及び「合成パルス運転」を行うこととして、これに必要なNSRRの原子炉計測制御系統施設の設計を進めてきた。

パルス運転の改良のためには、計測制御系統施設を構成する原子炉計装設備、原子炉制御設備及び安全保護回路の主要部を変更する必要がある。また、変更後の計測制御系統施設によって従来の運転を含め改良型パルス運転が安定かつ安全に行なえることを確認するために、構成設備の特徴を考慮した動特性解析を行うとともに、万一の誤動作等を想定した安全評価を行う必要がある。これら一連の設計、解析作業を経て、パルス運転改良のための計測制御系統施設の安全設計を固めることができた。NSRRの計測制御系統施設の安全設計の基本的内容は、同施設変更のための国の安全審査において、その妥当性が確認されるに至っている。

本報告書は、安全設計に当たっての基本的な考え方、改良型パルス運転の方法、計測制御系統施設の各構成設備の設計方針及び基本設計の内容、並びに改良型パルス運転に係る主要な動特性等について述べるものである。

なお、本報告書に示した計測制御系統施設による改良型パルス運転に関する動特性解析の詳細及び安全評価については、それぞれ別途報告する予定である。

2. NSRR の概要

2.1 炉心の構成及び現行運転の特徴

NSRRは、米国GA (General Atomic)社によって開発された熱中性子パルス炉TRIGA-ACPRに改良を加えたもので、第2.1図に示すように、水深約9mを有するスイミング・プール型の原子炉である。¹⁾ 炉心はプール底部に位置しており、炉心の燃料要素の冷却はプール水の自然循環によって行う。この炉心の中央部を、内径約22cmの中空実験孔が垂直に貫通している。実験孔は、炉心上部でY字状に分岐してプール上面に達するが、このうち垂直に伸びた部分を垂直装填管、傾斜して伸びた部分をオフセット装填管とよぶ。実験に当っては、試験燃料を収納したカプセルあるいはループを、これらの装填管を通して炉心中央部の実験孔に挿入する。

NSRRの炉心燃料要素は、第2.3図に示すように、直径約3.6cm、有効長約38cmの濃縮ウラン-水素化ジルコニウム (12 w/o U - 88 W/o ZrH : U - 235 濃縮度約20%, H/Zr 原子数比約1.60)を燃料体とし、その上下に長さ約8.7cmの黒鉛反射体を配し、これらをステンレス鋼製被覆材で覆ったものである。U-ZrH燃料体は、炉心に大きな正の反応度を添加しても、速やかに原子炉出力の上昇を抑える大きな即発性の負の反応度温度係数 (約 $-9 \times 10^{-5} \Delta k/k/^{\circ}C$)を有する。これは、燃料体中の減速材 (ZrH)の温度上昇が原子炉出力の上昇と同時に起こって、中性子のスペクトル硬化が即発的に生じ、熱中性子の利用率が著しく減少する効果を主たる原因とし、さらにU-238のドップラ効果も加わるためである。²⁾

燃料要素は、第2.2図に示すように、六角形の実験孔の周囲に稠密に配置され、外径約63cmの炉心を構成する。

また、炉心内には、安全棒2本、調整棒6本及びトランジェント棒3本の、合計11本の制御棒が配されており、各制御棒は、原子炉プール上面に設置した制御棒駆動機構によって駆動される。このうち、安全棒は、スクラムを含む原子炉停止を目的として使用され、調整棒は、出力調整及び反応度補償を目的として使用される。安全棒及び調整棒の構造は同一であり、長さ約38cmの B_4C 中性子吸収体の下部に、同一長のU-ZrH燃料フォロア (燃料要素の燃料体と同一)を配し、これをステンレス鋼製被覆材で覆った構造となっている。安全棒及び調整棒の駆動は、電動モータによって行なわれる。

トランジェント棒には、高速トランジェント棒 (2本) 及び調節用トランジェント棒 (1本)の2種類があり、パルス運転における急速な正の反応度添加を行う目的で使用される。高速トランジェント棒は、長さ約76cmの B_4C 中性子吸収体の下部に空気フォロア (上下を封じた空気筒)を配し、これをアルミニウム合金製被覆材で覆った構造となっている。高速トランジェント棒の駆動は、圧縮空気によって行なわれる。調節用トランジェント棒は、長さ約38cmの B_4C 中性子吸収体の下部に空気フォロアを配し、これをアルミニウム合金製被覆材で覆った構造となっている。調節用トランジェント棒の駆動は、電動モータあるいは圧縮空気のいずれかによって行なわれる。電動モータによる駆動は、トランジェント棒を圧縮空気によって引抜く際の反応度添加量

を調節する目的で使用される。

第2.4図には、各制御棒の構造上の特徴を示す。

NSRRの従来の運転においては、調整棒の駆動によって300 kWまでの出力を任意時間発生する定出力運転及び1 kW以下の低出力からトランジェント棒の急速引抜きによって最大瞬間出力23,000 MWまでのパルス状の出力を発生する単一パルス運転を行うことが可能である。なお、単一パルス運転において、トランジェント棒の引抜きにより炉心に添加しうる正の反応度は、最大 $0.0343 \Delta k$ (4.7%)に制限される。300 kWでの定出力運転時及び $0.0343 \Delta k$ の反応度添加による単一パルス運転時の炉心燃料要素の最高温度は、保守的に評価しても、それぞれ約 580°C 及び約 960°C であり、以下に示す熱的制限値に対して余裕のある値となっている。^{3,4)}

2.2 炉心の熱的制限値

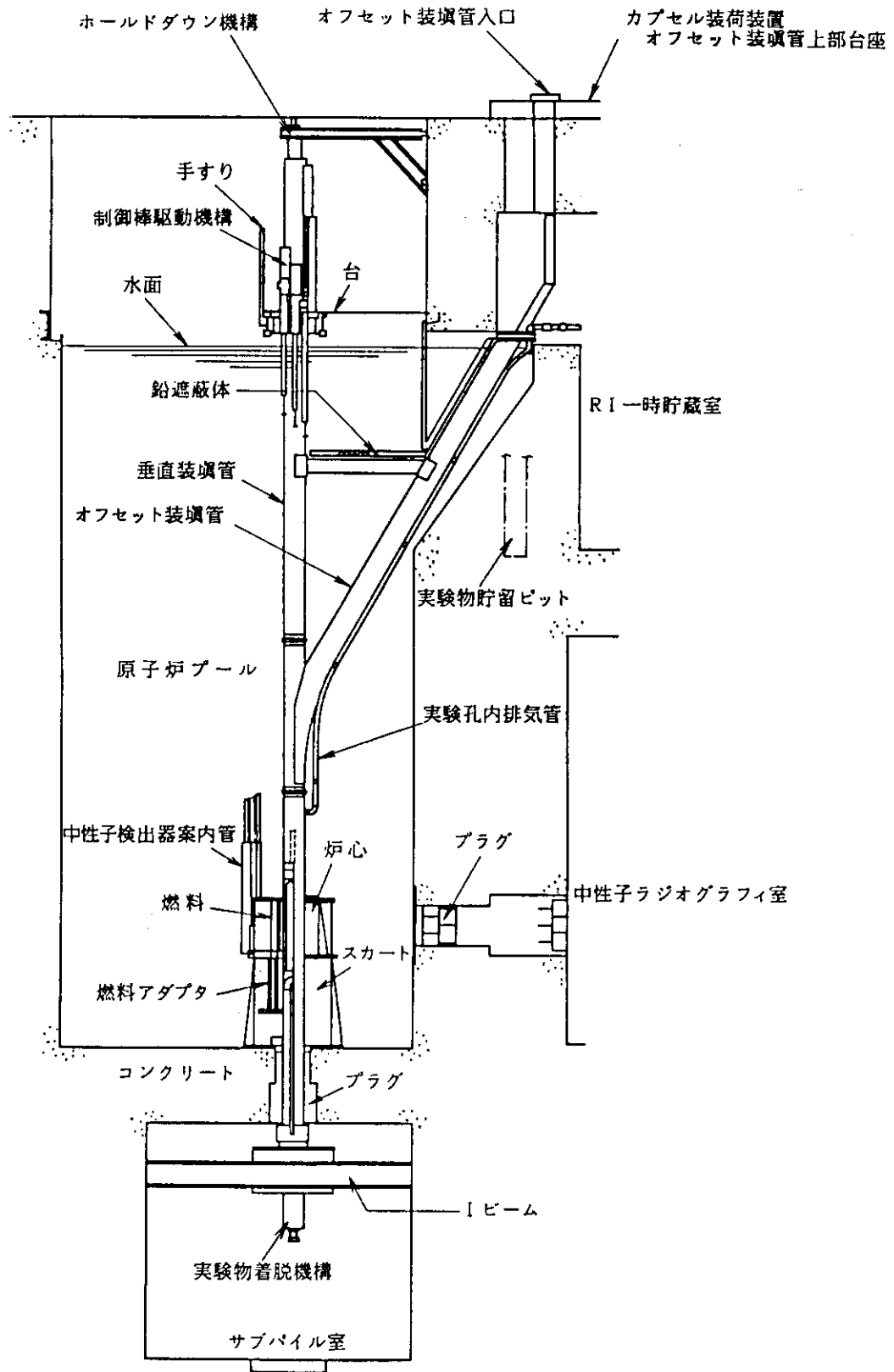
NSRR炉心燃料要素の破損は、高温になったU-ZrH燃料から解離した水素によって内圧が高まり、被覆管に過大な応力をもたらすことによって生じる。この水素の平衡解離圧は、U-ZrH燃料の一樣な温度の上昇に対してほぼ対数的に上昇するが、原子炉内で使用する状態においては温度分布があり、また、パルス出力によって短時間のみ高温となる場合には、水素の解離圧は平衡解離圧をかなり下回る。

燃料要素の軸方向温度分布を考慮した解析（半径方向温度分布は一樣）では、水素の解離圧は、一樣な温度の燃料における平衡解離圧の約20%となり、またGA社でパルス出力による照射を行って測定した結果では、水素の解離圧は燃料最高温度に対する平衡解離圧の6%以下であった。

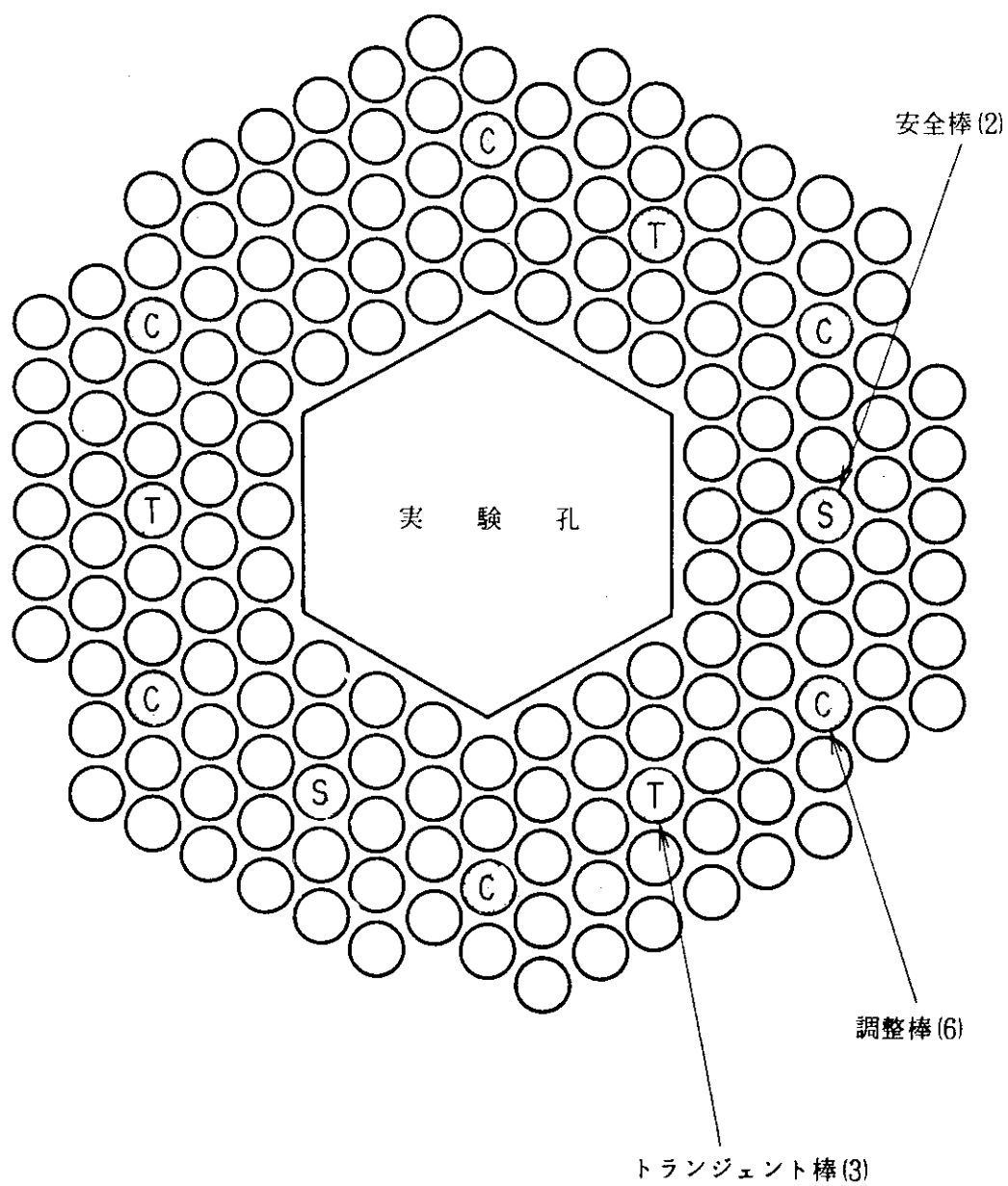
以上の解析及び実測に基づき、燃料要素内圧をU-ZrH燃料の最高温度に対する水素の平衡解離圧の20%として評価すると、被覆管の引張強さに対応する燃料要素内圧をもたらす燃料最高温度は $1,330^{\circ}\text{C}$ となり、被覆管の降伏応力に対応する燃料要素内圧をもたらす燃料最高温度は $1,260^{\circ}\text{C}$ となる。

これより、被覆管の引張強さに対応する内圧をもたらす燃料最高温度 $1,330^{\circ}\text{C}$ を被覆管の破裂条件とし、また、被覆管の降伏応力に対応する内圧をもたらす燃料最高温度 $1,260^{\circ}\text{C}$ に対しさらに安全余裕を見込んで燃料最高温度 $1,150^{\circ}\text{C}$ を燃料破損限界温度と定めた。

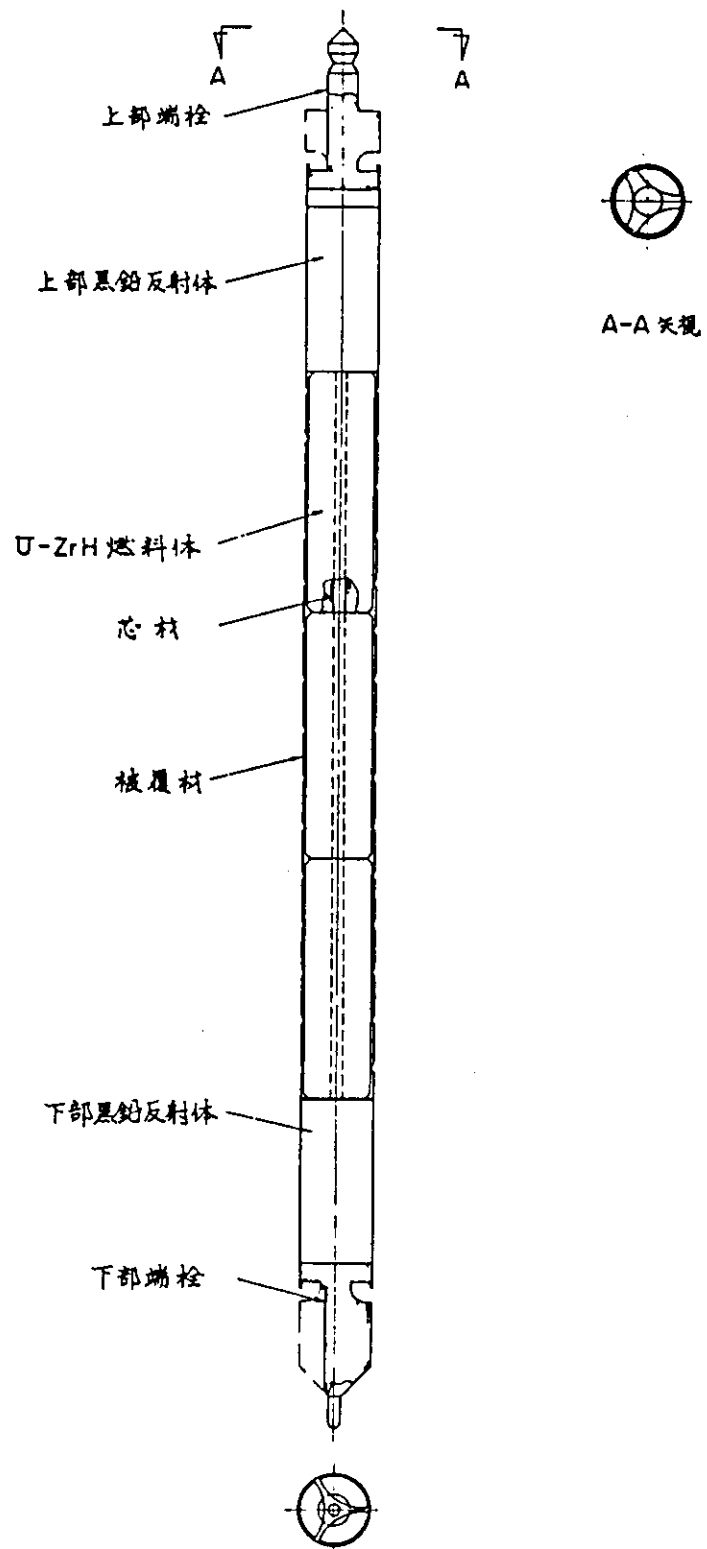
また、通常運転時の熱的制限値としては、燃料破損限界温度の $1,150^{\circ}\text{C}$ に対してさらに安全側に設定し、燃料最高温度をパルス運転時において $1,000^{\circ}\text{C}$ 、定出力運転時において 800°C と定めた。



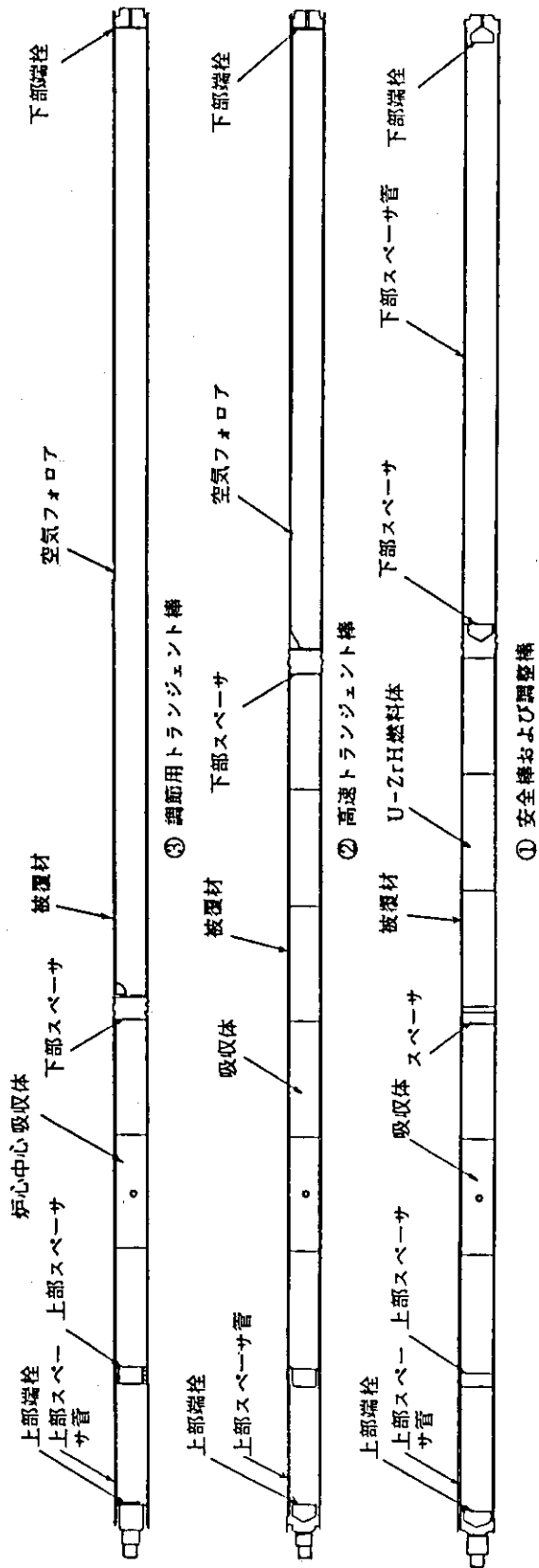
第 2.1 図 NSRR 原子炉本体立面図



第 2.2 図 NSRR 炉心横断面図



第 2.3 図 炉心燃料要素の構成



第 2.4 図 制御棒 (安全棒, 調整棒, トランジェント棒) の構成

3. 改良型パルス運転のための安全設計に当たっての基本的な考え方

NSRRの現行の運転として実施している定出力運転及び単一パルス運転に加え、新たに改良型パルス運転として追加する台形パルス運転及び合成パルス運転を行うための計測制御系統施設の安全設計に当たっては、以下の基本的な考えのもとに進めることとした。

(1) 炉心の構成条件

NSRRの大きな負の反応度フィードバック特性による固有の安全性を現行通り確保するため、炉心を構成する燃料要素及び制御棒並びに炉心の冷却条件には変更を加えない。

(2) 原子炉の運転形態

1) NSRRの制御棒(安全棒, 調整棒, トランジェント棒)の機能及び駆動源の相違を考慮し、台形パルス運転における高出力の発生, 及び合成パルス運転における急峻なパルス状出力を除く高出力の発生は、調整棒の駆動のみによって行う。また、合成パルス運転における急峻なパルス状出力の発生は、トランジェント棒の圧縮空気による急速引抜きによって行う。

2) 現行の運転モードは、定出力運転モード及び単一パルス運転モードの2種類であるが、新たに、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードを追加して、運転モードを4種類とし、各運転モードには、適切な制御棒駆動条件、核計装、インターロック条件、スクラム条件等を適用させる。

(3) 熱的制限値及び原子炉出力

1) 台形パルス運転時及び合成パルス運転時の熱的制限値は、燃料破損限界温度に対して余裕をもって定めた従来のパルス運転に対する熱的制限値と同一の燃料最高温度 1,000°C とする。

2) 台形パルス運転時及び合成パルス運転時の原子炉出力は、通常運転時において上記の熱的制限値を超えず、また、運転時の異常な過渡変化及び事故を想定しても、それぞれ、燃料要素の破損を防止すること及び炉心の著しい損傷を防止することが可能な条件(具体的には、2.2節に示した燃料最高温度 1,150°C 及び 1,330°C をそれぞれ超えないこと)に制限する必要がある。これらの条件を満たすために、台形パルス運転時及び合成パルス運転時における調整棒の駆動によって発生する原子炉出力の計画値は、最大10MWとする。また、合成パルス運転時のトランジェント棒引抜きによって発生する瞬間最大出力は、現行の単一パルス運転時における値を上回らないように制限する。台形パルス運転及び合成パルス運転のいずれの場合にも、積分出力の最大値(原子炉停止のためのトランジェント棒又は調整棒の再挿入開始時まで、あるいは、定出力運転モードへの切替え時までの原子炉出力の時間積分値)は、110 MW・sに制限する。

(4) 計測制御系統施設

1) 計測制御系統施設は、新たな台形パルス運転及び合成パルス運転を実施するための機能を備えるとともに、定出力運転及び単一パルス運転を現行通り実施する機能を維持し、総合的に原子炉の安全性と安定な運転を確保しうるものとする。

- 2) 現行の核計装は、定出力運転における300 kWまでの出力及び単一パルス運転における約10 MWから30,000 MWまでの出力を計測することを主眼として構成されており、今後の台形パルス運転及び合成パルス運転において重要となる300 kWから10 MWの範囲の出力が精度良く計測できない。このため、全ての運転範囲の出力を適切に計測しうるように、核計装の計測範囲の拡張及び応答性の改善を図るとともに、系統数を追加する。また、核計装の種類毎の機能を考慮し、監視、制御、安全保護等に必要な信号を適切に得るようにする。
- 3) 台形パルス運転及び合成パルス運転における高出力を安定して発生することができるように、調整棒の反応度制御能力を高める。このため、両運転モードにおける調整棒の最大駆動速度を75 mm/sまで高める。
- 4) 台形パルス運転及び合成パルス運転においては、短時間に複雑な制御棒操作を適確に行うことが要求されるので、運転員の誤操作を防止するため、両運転モードにおいては、予め定める運転計画データに基づく自動制御運転を行うこととし、このために必要な自動制御系を新たに設ける。
- 5) 全ての運転モードにおいて安全上問題の生じる恐れのある誤操作及び誤動作を防止するためのインターロックを、適切に設ける。
- 6) 台形パルス運転及び合成パルス運転において、インターロックにより自動制御運転が阻止された場合、あるいは、予め定める運転計画データに基づき計画的に原子炉停止を目的として制御棒を挿入する場合、ないしは、運転員の判断によって自動制御運転を中止する場合に、安全棒を除く全ての制御棒を自動的に炉心に挿入させるための設備を、新たに設ける。
- 7) 全ての運転モードにおいて、運転時の異常な過渡変化時及び事故時に、異常状態を検知した信号により、全制御棒を自動的に落下させて安全に原子炉を停止させる設備を、安全保護回路の一部として適切に設ける。さらに、合成パルス運転に関しては、従来の単一パルス運転では行なわれなかった高出力状態からのトランジェント棒の引抜きを行う運転方法に鑑み、異常状態を検知した信号によってトランジェント棒の引抜きを阻止するための設備を、安全保護回路の一部として新たに設ける。

4. NSRRの今後の運転方式

NSRRの今後の運転は、定出力運転とパルス運転に大別し、以下の4つの運転モードに区分して実施する。

定出力運転	定出力運転モード
パルス運転	単一パルス運転モード
	台形パルス運転モード
	合成パルス運転モード

定出力運転モードにおける運転は、運転時間に制限がなく、2.2節で述べたように、燃料最高温度 800°C を炉心の熱的制限値として、300 kW までの出力を連続して発生することが可能である。単一パルス運転モード、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおける運転は、いずれも 300 kW を超える過渡出力の発生を目的として行うものであり、燃料最高温度 1,000°C を炉心の熱的制限値として、積分出力を限定して運転を行う。

なお、定出力運転モード及び単一パルス運転モードにおける運転方式は現行と同一であり、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおける運転方式が新たに追加となるものである。

原子炉の起動及び停止は、定出力運転モードにおいて行う。パルス運転を行う場合には、運転モードを、定出力運転モードから、上記の3つのパルス運転モードのいずれかに切替える。また、パルス運転の後には、運転モードを定出力運転モードに切替える。運転モードの切替えは、モードの切替えを行っても問題がないことを確認の上、運転モードスイッチを手動で切替えることによって行う。

以下に、今後の各運転モードにおける原子炉の運転方式を示す。また、第4.1図には、各運転モードにおける原子炉出力特性の代表例を示す。第4.2図～第4.5図には、各運転モードにおける制御棒操作手順の一般例を示す。

(1) 定出力運転モード

定出力運転モードにおいては、原子炉の起動、パルス運転に備えての制御棒位置調整、出力 300 kW までの原子炉出力の上昇、一定保持、下降、原子炉停止のための一般運転を行い、また、必要に応じて制御棒校正のための特殊運転を行う。一般運転の起動時にあつては、トランジェント棒及び安全棒を1本ずつ上限まで引抜いた後、調整棒を1本ずつ又はバンクで引抜き、臨界点を確認する。その後の原子炉出力の調整は、調整棒1本ずつ又はバンクの操作によって行う。なお、必要に応じて、後述する定出力自動運転制御系を用いて、出力一定保持のための調整棒のバンク駆動を自動的に行う。

本モードの後に単一パルス運転モード又は合成パルス運転モードへ移行する場合には、トランジェント棒の引抜きによって挿入される反応度を設定するため、あらかじめ本モードにおいて、臨界点確認後、トランジェント棒を必要量炉内に挿入し、再び調整棒を1本ずつ又はバンクで引抜いて臨界点を確認する。なお、その後必要に応じて、トランジェント棒全数を炉心に挿入する。

(2) 単一パルス運転モード

単一パルス運転モードにおいては、定出力運転モードで定めた挿入状態のトランジェント棒を、圧縮空気によって上限位置まで急速引抜きする運転を行う。なお、トランジェント棒は、タイマーによりあらかじめ定められた時間が経過した後、全数炉心に挿入される。

本モードにおいては、調整棒の駆動は阻止される。また、安全棒が上限位置になれば、トランジェント棒の引抜きは阻止される。

なお、単一パルス運転に対する制御は、機械的な停止機構に依存することなく、燃料温度上昇による固有の負の反応度フィードバックによって原子炉が安全に自己停止できる範囲内に、トランジェント棒による挿入反応度を限定することによって行う。

本モードにおいては、トランジェント棒による挿入反応度を、 $0.0343 \Delta k$ 以下に制限する。

本モードの運転の後には、運転モードを定出力運転モードに切替える。

(3) 台形パルス運転モード

台形パルス運転モードにおいては、後述するパルス自動運転制御系を用いて、調整棒のバンク駆動により出力10MWまでの運転を自動的に行う。

調整棒のバンク駆動については、あらかじめ時間に対する調整棒の引抜き・挿入量を定めるかあるいは原子炉出力の時間変化を定めて、パルス自動運転制御系により自動的に行う。

本モードにおいては、安全棒及びトランジェント棒が上限位置になれば調整棒の引抜きは阻止される。

本モードにおける運転の後には、運転モードを定出力運転モードに切替える。なお、必要に応じて、定出力運転モードへの切替え前に、トランジェント棒及び調整棒の全数を自動挿入する。

(4) 合成パルス運転モード

合成パルス運転モードにおいては、後述するパルス自動運転制御系を用いて、調整棒のバンク駆動による出力10MWまでの運転とトランジェント棒の急速引抜きによる運転を自動的に行う。なお、本モードにおいては、トランジェント棒による挿入反応度を $0.0292 \Delta k$ 以下に制限する。

調整棒のバンク駆動については、台形パルス運転モードの場合と同様に、あらかじめ時間に対する調整棒の引抜き・挿入量を定めるかあるいは原子炉出力の時間変化を定め、また、トランジェント棒の急速引抜きについては、あらかじめ引抜き時刻を定めて、パルス自動運転制御系により自動的に行う。

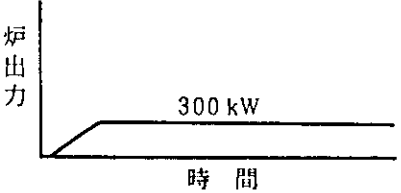
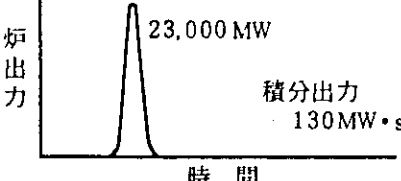
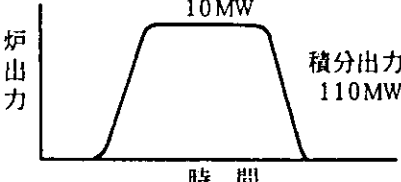
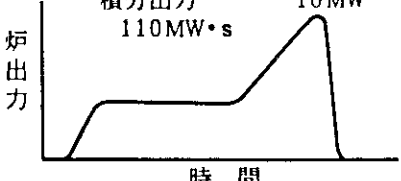
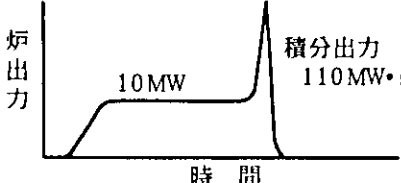
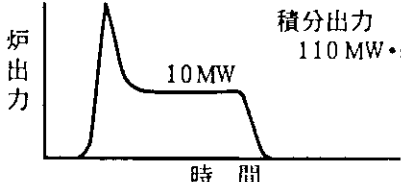
本モードにおける運転には、調整棒の駆動後トランジェント棒を急速引抜きする高出力パルス・パターンと、トランジェント棒の急速引抜き後調整棒を駆動するパルス-高出力・パターンがある。

- ① 高出力パルス・パターンにおいては、まず調整棒を引抜き10MWまでの出力に上昇させ、所定の原子炉出力を保持した後、定出力運転モードで定めた挿入状態のトランジェント棒を上限位置まで圧縮空気により引抜く運転を行う。
- ② パルス-高出力・パターンにおいては、定出力運転モードで定めた挿入状態のトランジェント棒を上限位置まで圧縮空気により引抜き、一定時間経過して、発生したパルス出力が10

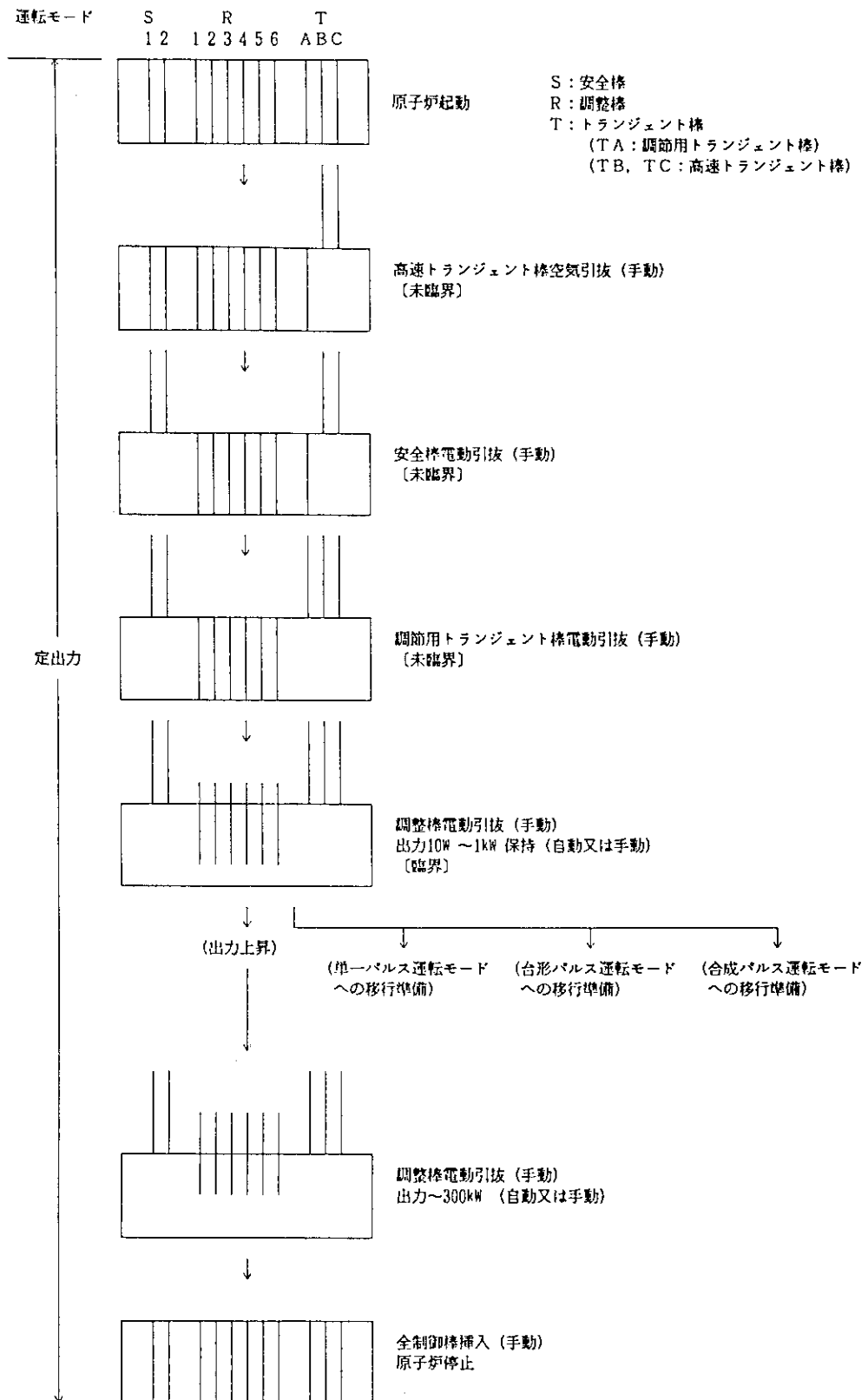
MW以下の出力まで降下した後、調整棒の駆動による運転を行う。

本モードにおいては、安全棒が上限位置になれば、調整棒及びトランジェント棒の引抜きは阻止される。

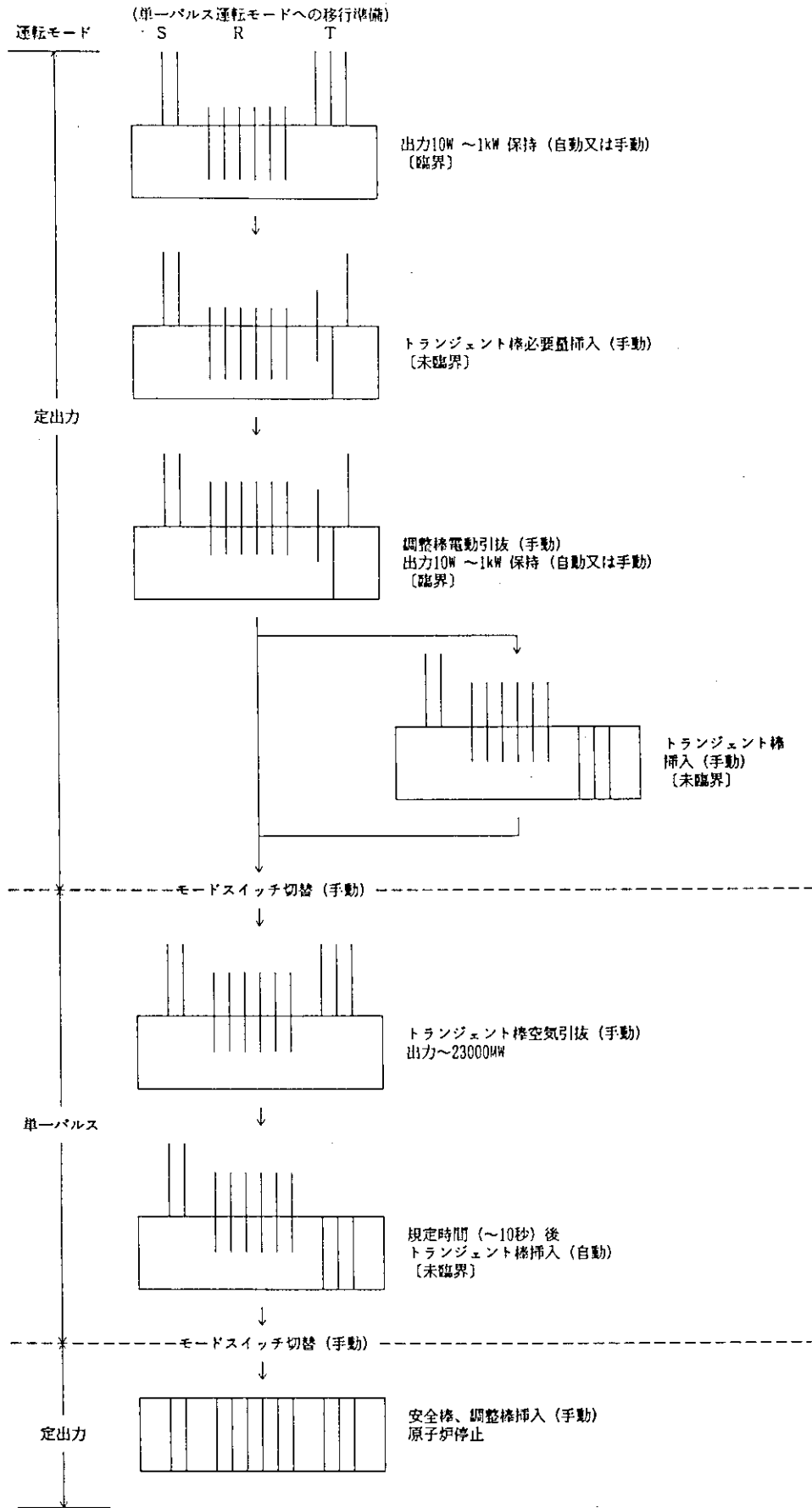
本モードにおける運転の後には、運転モードを定出力運転モードに切替える。なお、必要に応じて、定出力運転モードへの切替え前に、トランジェント棒及び調整棒の全数を自動挿入する。

運転の種類	運転モード	原子炉出力特性の代表例
定出力運転	定出力運転	 <p>炉出力</p> <p>300 kW</p> <p>時間</p>
パルス運転	単一パルス運転	 <p>炉出力</p> <p>23,000 MW</p> <p>積分出力 130 MW・s</p> <p>時間</p>
	台形パルス運転	 <p>炉出力</p> <p>10 MW</p> <p>積分出力 110 MW・s</p> <p>時間</p>
		 <p>炉出力</p> <p>積分出力 110 MW・s</p> <p>10 MW</p> <p>時間</p>
	合成パルス運転	 <p>炉出力</p> <p>23,000 MW</p> <p>10 MW</p> <p>積分出力 110 MW・s</p> <p>時間</p>
		 <p>炉出力</p> <p>23,000 MW</p> <p>10 MW</p> <p>積分出力 110 MW・s</p> <p>時間</p>

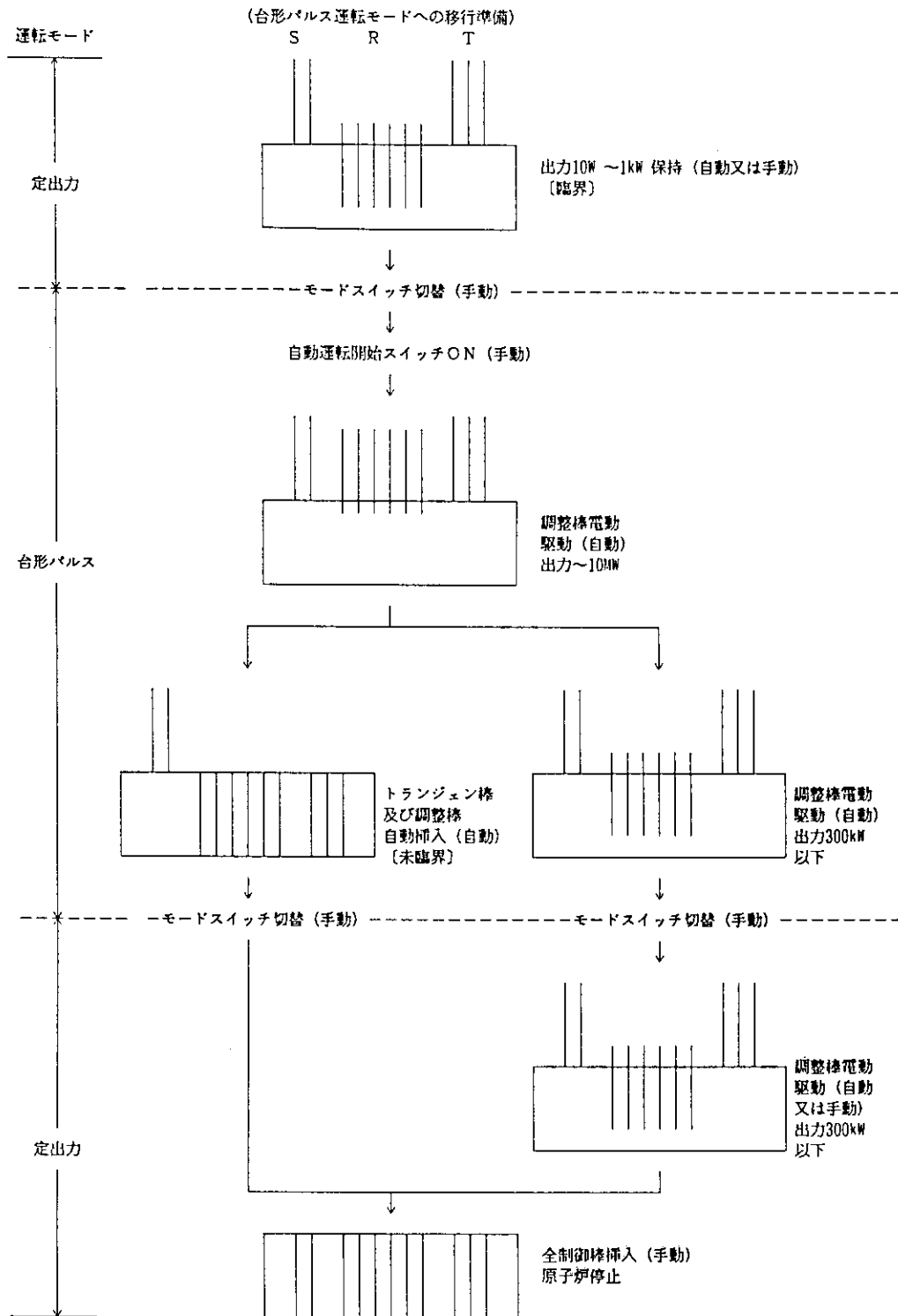
第 4.1 図 NSRR の運転の種類と運転モード及び炉出力特性の代表例



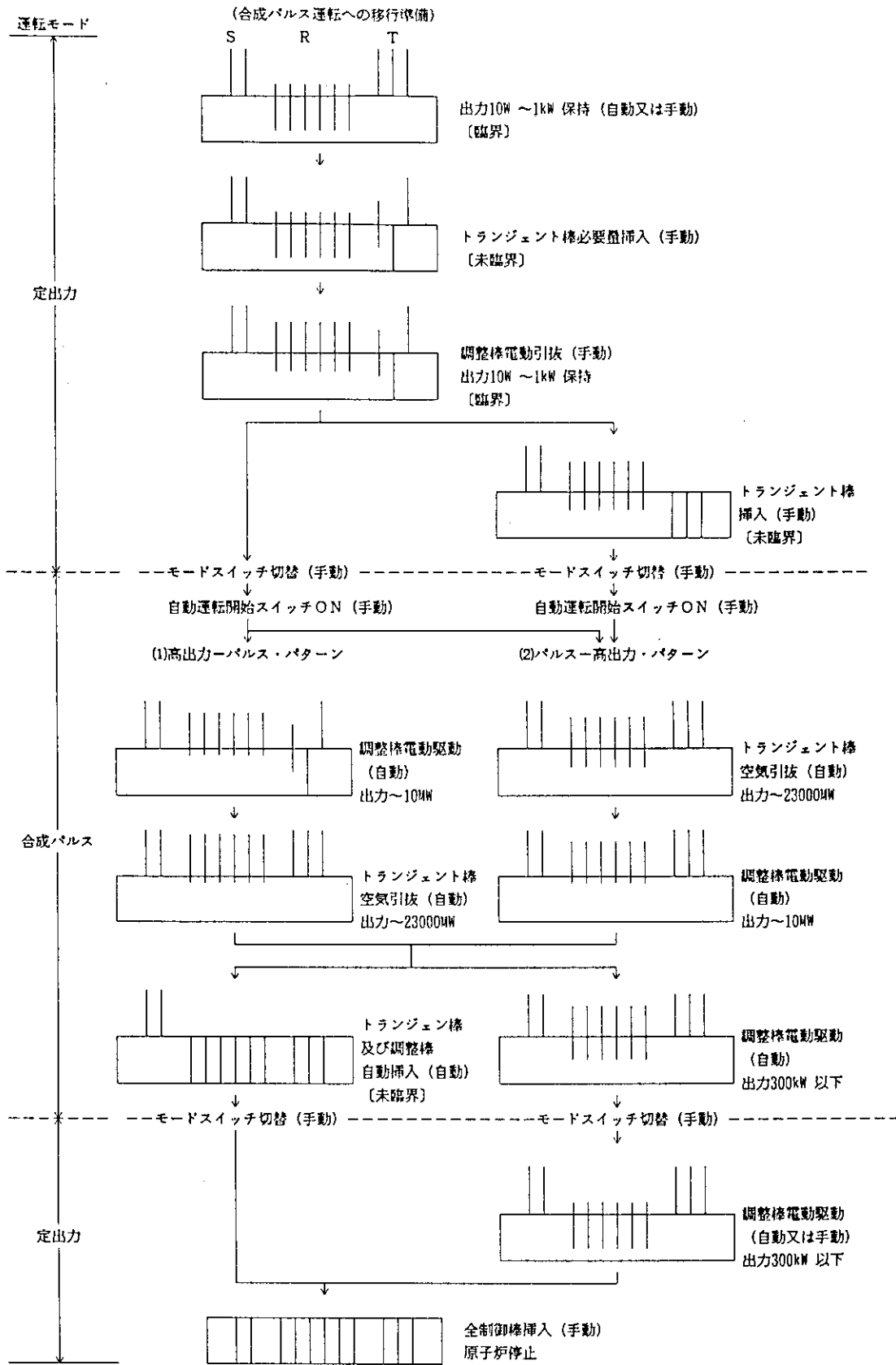
第 4.2 図 定出力運転モードにおける制御棒引抜き手順一般例



第 4.3 図 単一パルス運転モードにおける制御棒引抜き手順
(定出力運転モード間の移行状態を含む)



第 4.4 図 台形パルス運転モードにおける制御棒引抜き手順
(定出力運転モード間の移行状態を含む)



第 4.5 図 合成パルス運転モードにおける制御棒引抜き手順一般例
(定出力運転モード間の移行状態を含む)

5. 計測制御系統施設の安全設計

NSRRの計測制御系統施設は、以下の設備から構成する。

- (1) 原子炉の運転制御及び安全保護に必要な情報を得るための原子炉計装設備。
- (2) 原子炉出力を制御するとともに原子炉運転上の誤操作又は異常が拡大するのを防止するための原子炉制御設備。
- (3) 運転時の異常な過渡変化状態あるいは事故状態を検知した信号により、異常の程度によっては、制御棒を自動的に落下させて原子炉を停止させるための安全保護回路。

制御室においては、これらの設備から出される情報を基に、原子炉の運転に必要な諸変数の監視及び主要な機器の操作を集中管理する。

今後の計測制御系統施設は、新たな台形パルス運転及び合成パルス運転を実施するために、第3章に示したように、従来の計測制御系統施設の主要部を変更し、種々の機能の追加、拡張を行うとともに、定出力運転及び単一パルス運転を現行通りに実施するための機能を維持し、総合的に原子炉の安全性と安定な運転を確保するものとして構成しなければならない。このため、今後の計測制御系統施設を構成する全設備に関する安全設計上の基本方針を新たに定め、これに適合する設備対応とする設計を行った。以下には、今後の計測制御系統施設の全体について、これを構成する各設備の設計方針及び設計内容を示す。また、第5.1表には、今後の計測制御系統施設の従来からの主要な変更点を整理して示す。

5.1 原子炉計装設備

5.1.1 原子炉計装設備の概要

原子炉計装設備は、原子炉の運転制御及び安全保護に必要な情報を得るためのものであり、核計装、燃料計装、プロセス計装等により構成する。

(1) 核計装

核計装は、原子炉出力に関する情報を得るために設ける。定出力運転用核計装は、対数定出力系、線形定出力系及び安全出力系からなり、パルス運転用核計装は、安全出力系、パルス出力系、対数高出力系及び線形高出力系からなる。このうち、安全出力系は、定出力運転及びパルス運転の双方に使用する。なお、対数定出力系、安全出力系及びパルス出力系からの信号は、安全保護回路に導く。

(2) 燃料計装

燃料計装は、燃料要素内の温度、圧力に関する情報を得るために設け、燃料温度系等からなる。このうち、燃料温度系からの信号は、安全保護回路に導く。

(3) プロセス計装

プロセス計装は、原子炉プール水に関する情報を得るために設け、プール水位系、プール水温系等からなる。プール水位系及びプール水温系からの信号は、安全保護回路に導く。

このうち、核計装については、台形パルス運転及び合成パルス運転の追加に伴い、ほぼ全面的に変更を行うものである。燃料計装については、検出方法に変更はないが、インターロック条件の追加に伴い、燃料温度信号のインターロックに利用する種類を追加する。プロセス計装については、プール水温系を新たに安全保護系とするため、系統数を追加し、多重性を確保する。また、全ての安全保護系として使用する計装には絶縁増幅器を導入し、安全保護用及び制御用に使用する信号の分離を図る。その他の計装に係る変更はなく、従来と同様である。

5.1.2 原子炉計装設備の設計方針

原子炉計装設備は、全ての運転モードにおいて、以下の方針を満たす設計とする。

- (1) 原子炉の通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の状態を適切に監視することが可能であること。
- (2) 原子炉の安全保護に使用する計装は、多重化し、計測制御に使用する機器とは分離していること。
- (3) スクラム等の動作に必要な信号を適切に得ることが可能であること。
- (4) 原子炉の安全保護に使用する計装は、商用電源の喪失時に非常用電源から給電されること。

5.1.3 核計装

核計装は、従来は、定出力運転用3系統（起動・中間出力系、中間出力系、出力系）及びパルス運転用1系統（線形・積分出力系）の合計4系統で構成していたが、今後は、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードの追加に伴い、パルス運転用に2系統追加し、かつ、定出力運転用1系統の計測範囲を拡張しパルス運転にも用いることとして、合計6系統で構成する。また、一部の系統については、原子炉出力をより適切に計測するため、検出器の種類の変更を行う。

系統数の追加及び検出器の種類の変更に伴い、各系統の名称についても変更を行う。

変更後の核計装の構成は、以下に示すとおりである。

定出力運転用

A 対数定出力系	核分裂電離箱	1個
B 線形定出力系	核分裂電離箱	1個

定出力運転、パルス運転両用

C 安全出力系	γ 線補償型電離箱	2個
---------	------------------	----

パルス運転用

D パルス出力系	小型核分裂電離箱	2個
E 対数高出力系	核分裂電離箱	1個
F 線形高出力系	γ 線補償型電離箱	1個

安全出力系とパルス出力系については、単一故障を想定しても原子炉の安全保護機能が喪失しないよう多重性を有する設計とする。また、原子炉出力の検出信号を安全保護回路に導く系統にあつては、絶縁増幅器を用いることにより、安全保護回路に導く原子炉出力の検出信号が計測制御に使用する機器の故障等によって影響を受けない設計とする。核計装の電源は、商用電源の喪失時に非常用電源設備から給電する設計とする。なお、指示計、記録計については、運転モード

に応じて指示あるいは記録する系統を切替えて機能的な運転監視が行える構成とする。

第 5.2 表には、上記の各系の使用目的を、また、第 5.1 図には、原子炉出力の指示範囲を整理して示す。第 5.2 図～第 5.4 図には、各系の主要ブロック図を示す。

(1) 対数定出力系（1 チャンネル）

対数定出力系は、核分裂電離箱を検出器として使用し、高圧電源、前置増幅器、対数増幅器、炉周期計、指示計、記録計、トリップ回路等からなる。本系はパルス—キャンベル法を使用したものであり、定出力運転モードにおける約 0.03mW から約 450 kW までの原子炉出力を検出し、指示、記録する。

本系は、起動時の中性子源レベルに関する制御用インターロック及び 1 kW 以上の原子炉出力で他の運転モードへの切替えを阻止する制御用インターロックのための信号を与える。また、本系は、5 秒より短い正の炉周期でスクラムするトリップ信号を発生する。

対数定出力系は、変更前の起動・中間出力系と同様の検出器及び機能を有する系統であるが、新たに絶縁増幅器を導入し、安全保護用と制御用の信号の分離を図る。

(2) 線形定出力系（1 チャンネル）

線形定出力系は、核分裂電離箱を検出器として使用し、高圧電源、前置増幅器、レンジスイッチ、線形増幅器、記録計、トリップ回路等からなる。

本系はパルス—キャンベル法を使用したものであり、定出力運転モードにおける約 0.03mW から 330 kW までの原子炉出力を検出し、記録する。

本系は、定出力自動運転制御用の信号を与える。また、起動時の中性子源レベルに関する制御用インターロック及び原子炉出力が各レンジの 105 % 以上で制御棒の引抜きを阻止する制御用インターロックのための信号を与える。

線形定出力系は、変更前の中間出力系に相当する系統であるが、中間出力系は γ 線補償型電離箱を検出器として使用し、定出力運転モードにおける約 100mW から 330 kW までの原子炉出力を指示するものである。

変更後は、起動時の中性子源レベルでの原子炉出力を精度良く測定するため、対数定出力系と同様に、核分裂電離箱を検出器とし、パルス—キャンベル法を用いることによって、計測範囲を約 0.03mW まで拡張する。

(3) 安全出力系（2 チャンネル）

安全出力系は、 γ 線補償型電離箱を検出器として使用し、高圧電源、レンジスイッチ、線形増幅器、積分回路、指示計、記録計、トリップ回路等からなる。

本系は、定出力運転モード、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおいて使用し、定出力運転モードにおいては 330 kW までの原子炉出力を、また、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおいては最高 15 MW までの原子炉出力を検出し、指示、記録する。

本系は、定出力運転モードにおいては、定格出力（300 kW）の 110 % でスクラムするトリップ信号を発生する。

台形パルス運転モードでは、最大レンジを除く各レンジの 110 % 及び最大レンジにおいては 12.5 MW の原子炉出力でスクラムするトリップ信号、並びに 110 MW・s の積分出力でスクラムするトリップ信号を発生する。

合成パルス運転モードでは、最大レンジを除く各レンジの110%及び最大レンジにおいては12.5 MWの原子炉出力でスクラムするトリップ信号を発生する。ただし、トランジェント棒引抜き開始時から一定時間（原子炉出力が本系のスクラム設定値を下回る値まで降下する時間）は、タイマーによりこの機能をバイパスする。この期間は、次に示すパルス出力系によって原子炉出力に対するスクラムトリップ信号を得る。また、本系によりこの期間を除いて測定した積分出力と、パルス出力系によりこの期間測定した積分出力の合計値が110 MW・sに達すればスクラムするトリップ信号を発生する。なお、トランジェント棒引抜き時にあっては、原子炉保護用インターロック回路により、トランジェント棒引抜き時までの積分出力の測定値と、トランジェント棒引抜き後のパルス出力による積分出力の予測値を加算した値（以下「推定積分出力」という。）が105 MW・s以下でなければ、トランジェント棒の引抜きを阻止する設計とする。

安全出力系は、変更前の出力系に相当する系統であるが、出力系は核分裂電離箱を検出器として使用し、定出力運転モードにおける約3 kWまでの原子炉出力を指示するものである。

変更後は、台形パルス運転時及び合成パルス運転時の最高15 MWまでの原子炉出力も測定できるように、指示範囲を拡張するとともに、出力変化に対する応答性の良い γ 線補償型電離箱を検出器として使用し、また絶縁増幅器を導入し、安全保護用と制御用の信号の分離を図る。

(4) パルス出力系（2チャンネル）

パルス出力系は、小型核分裂電離箱を検出器として使用し、高圧電源、レンジスイッチ、線形増幅器、ピーク出力回路、積分回路、指示計、記録計、トリップ回路等からなる。

本系は、単一パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおけるトランジェント棒引抜き時のパルス出力を測定するとともに積分出力を得るために備えるものであり、約3 MWから30,000 MWまでの原子炉出力を検出し、記録する。

本系は、最大レンジを除く各レンジの110%及び最大レンジでは23,000 MWの原子炉出力でスクラムするトリップ信号、並びに、単一パルス運転モードでは130 MW・sの積分出力でスクラムするトリップ信号を発生する。

パルス出力系は、変更前の線形・積分出力系に相当する系統であるが、線形・積分出力系は、 γ 線電離箱を検出器として使用し、単一パルス運転モードにおける約10 MWから30,000 MWまでの原子炉出力及び130 MW・sまでの積分出力を指示するものである。 γ 線電離箱は、 γ 線を測定することによって原子炉出力を指示し、応答性が速いという利点を有するが、原子炉出力を測定する上では、中性子量の変化を直接測定する検出器の方がより望ましい。このため、変更後においては、小型核分裂電離箱を検出器として用い、速い応答性で中性子量を直接測定する。また、絶縁増幅器を導入し、安全保護用と制御用の信号の分離を図る。

(5) 対数高出力系（1チャンネル）

対数高出力系は、核分裂電離箱を検出器として使用し、高圧電源、前置増幅器、対数増幅器、記録計等からなる。

本系は、パルスーキャンベル法を使用したものであり、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおける約3 Wから30 MWまでの原子炉出力を検出し、記録する。

また、300 kW以上の原子炉出力では定出力運転モードへの切替えを阻止する制御用インタ

ーロックのための信号を与える。

本系は、台形パルス運転及び合成パルス運転の追加に伴い、今回新たに追加する系統である。

(6) 線形高出力系（1チャンネル）

線形高出力系は、 γ 線補償型電離箱を検出器として使用し、高圧電源、レンジスイッチ、線形増幅器、記録計等からなる。

本系は、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおける約5 kWから15 MWまでの原子炉出力を検出し、記録する。本系は、パルス自動運転制御用の信号を与える、また、300 kW以上の原子炉出力で定出力運転モードへの切替えを阻止する制御用インターロックのための信号を与える。

本系は、台形パルス運転及び合成パルス運転の追加に伴い、今回新たに追加する系統である。

5.1.4 燃料計装

燃料計装は、従来と同様に、燃料温度系及び燃料圧力系から構成する。

燃料温度系は、2系統設け、燃料温度を計測するために使用する。

燃料温度系の電源は、商用電源の喪失時に非常用電源設備から給電する設計とする。

燃料圧力系は、必要に応じ燃料要素の圧力を測定するために使用する。

燃料温度系については、検出器を含む検出方法に変更はないが、検出信号のインターロックに利用する種類を追加する。燃料圧力系については、変更はない。

第5.5図には、燃料温度系の主要ブロック図を示す。

(1) 燃料温度系（2チャンネル）

燃料温度系を2チャンネル設ける。1本の計装燃料要素に設けられた3本の熱電対のうち1本を選択し、1,200°Cまでの燃料温度の測定を行う。また、2チャンネルのうち1チャンネルを選択して記録計により記録する。両チャンネルにはトリップ回路を設け、定出力運転時750°Cでスクラムするトリップ信号を発生させる。また、定出力運転モードにおいては、100°C以上で他の運転モードへの切替えを阻止し、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおいては、700°C以上で定出力運転モードへの切替えを阻止する制御用インターロックの信号を与える。

さらに、合成パルス運転モードにおけるランジェント棒引抜き時においては、原子炉保護用インターロック回路により、ランジェント棒引抜き時までの燃料温度の測定値と、ランジェント棒引抜き後の温度増分の予測値を加算した値（以下「推定燃料温度」という。）が900°C以下でなければ、ランジェント棒の引抜きを阻止する設計とする。

燃料温度系から計測制御に使用する機器へ信号を取り出す場合には、絶縁増幅器を用いることにより、燃料温度の検出信号が計測制御に使用する機器の故障等によって影響を受けない設計とする。

(2) 燃料圧力系（1チャンネル）

燃料圧力系は、必要に応じて燃料要素内の圧力測定を行うために使用するものであり、圧力測定は燃料要素に取付けられたストレインゲージ型圧力変換器を用いて行う。

5.1.5 プロセス計装等

プロセス計装は、従来と同様に、プール水位系、プール水温系等から構成する。

プール水位系は、2系統設け、原子炉プール水位を計測するために使用する。

プール水温系は、従来は1系統であったが、今後はプール水温度高によるスクラム信号を新たに得ることとし、多重性を有するように1系統追加し、2系統とする。

第5.5図には、プール水位系及びプール水温系の主要ブロック図を示す。

(1) プール水位系（2チャンネル）

原子炉プール水位を水位計によって検出し、所定の水位以下に対してスクラム信号を発生させるようにする。

(2) プール水温系（2チャンネル）

原子炉プール水温を温度計によって指示し、所定の水温以上に対してスクラム信号を発生させるようにする。

(3) その他

プール水位系及びプール水温系の他に、原子炉の重要な部分には温度、液面、PH、電導度などを計測、指示及び記録する計装を設ける。

以上に加え、従来と同様に、プール水精製系に、プール水の放射能を連続モニタする破損燃料検出系を設け、燃料破損を監視する。

5.2 原子炉制御設備

5.2.1 原子炉制御設備の概要

原子炉制御設備は、実験物の有無、燃料温度変化等によって生じることが予想される反応度変化を調整し所要の出力を達成するために制御棒の挿入量を制御するとともに、運転上の誤操作又は異常が拡大するのを防止するための設備であり、制御棒、制御棒駆動設備、出力制御設備、制御用インターロック回路、制御棒自動挿入回路及び警報回路により構成する。

このうち、制御棒については、第3章に示したように従来と同一のものを扱い、変更を加えない。その他の設備については、台形パルス運転及び合成パルス運転の追加に伴う変更を行う。

5.2.2 原子炉制御設備の設計方針

原子炉制御設備は、以下の方針を満たす設計とする。

- (1) 原子炉制御設備は、原子炉の運転に必要な反応度を制御する機能を有し、安定な運転が行えること。
- (2) 原子炉制御設備は、原子炉の制御に関する重要な情報が設定値を超えた場合、安全側に動作する設計であること。
- (3) 制御棒駆動設備は、制御棒毎に独立性を有する設計であること。

5.2.3 制御棒駆動設備

制御棒駆動設備は、従来と同様に、安全棒、調整棒、調節用トランジェント棒及び高速トラン

ジェント棒のそれぞれの制御棒の機能に応じた独立の駆動機構と、各制御棒駆動機構を原子炉プール水面上部に固定する支持梁からなる。

このうち、調整棒駆動機構については、定出力運転モードにおける駆動速度に変更はないが、新たに追加する台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおいて高速駆動を必要とするため、これらの運転モードにおける駆動速度を最大75mm/sとする。

その他の制御棒の駆動機構に変更はなく、従来と同様である。各運転モードにおける制御棒駆動機構の駆動方法と駆動速度を第5.3表に示す。また、第5.6図には、各制御棒駆動機構の構成概要を示す。

(1) 安全棒及び調整棒駆動機構

安全棒及び調整棒の駆動は、ラック・ピニオン型駆動機構で行われる。駆動機構は、制御棒駆動モータ、電磁カップリング、ラック・ピニオンギア機構、位置指示計等で構成する。

ラック部の下端には電磁石があり、制御棒上部の連結棒の鉄製アマチュアと連結する。電磁石に電流が流れている間は、制御棒は炉心から引抜くことが可能であるが、原子炉のスクラム時には、この電流が切られ、アマチュア部分から下は、重力により自由に落下する。なお、制御棒の落下所要時間は1秒以内である。

制御棒駆動モータには、十分な信頼性と機能を有するものを用いる。

定出力運転モードにおける安全棒と調整棒の1本操作時の駆動速度は、約1.4mm/sとし、調整棒のバンク操作時における駆動速度は、約0.72mm/sとする。また、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおける調整棒の駆動は、バンク操作のみを行い、その駆動速度は可変であり最大75mm/sである。

(2) 調節用トランジェント棒駆動機構

調節用トランジェント棒の駆動は、圧縮空気・電気併用の駆動機構で行われる。

パルス運転に必要な反応度を加減するための予備引抜きは、駆動モータ、電磁カップリング、ラックピニオンギア機構、位置指示計等から構成される制御棒駆動機構により行われる。

調節用トランジェント棒の急速引抜きは、シリンダ下部から送り込まれる圧縮空気により行う。圧縮空気を送り込む圧縮空気タンクは、三方電磁弁の切換えにより圧縮空気の送り込み、排出を行う。圧縮空気が排出されれば調節用トランジェント棒は重力により、下限まで落下する。

調節用トランジェント棒が圧縮空気による急速引抜き時に炉心有効長(38cm)を移動する時間は、約90msである。

(3) 高速トランジェント棒駆動機構

高速トランジェント棒の駆動は、圧縮空気駆動機構によって行なわれる。高速トランジェント棒用の圧縮空気駆動機構は、調節用トランジェント棒用の圧縮空気駆動機構と同様のものがあるが、シリンダ内のピストン全行程は、加速用の行程を含め約91cmとなっている。

5.2.4 出力制御設備

出力制御設備は、定出力自動運転制御系及びパルス自動運転制御系により構成する。定出力自動運転制御系は、従来と同様に、定出力運転モードにおいて原子炉出力を一定に制御するための

ものである。パルス自動運転制御系は、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおいて原子炉出力を制御するために、新たに追加する設備である。

(1) 定出力自動運転制御系

定出力自動運転制御系は、定出力運転時に原子炉出力を一定に保持するために自動的に調整棒のバンク操作を行うものである。

なお、原子炉出力の目標値と実際の原子炉出力を比較して、その偏差（以下「原子炉出力誤差信号」という。）が設定値を超えた場合には、制御用インターロック回路により定出力自動運転を阻止する設計とする。

(2) パルス自動運転制御系

パルス自動運転制御系は、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおいて原子炉出力を自動的に制御するためのものであり、以下の機能を有する設計とする。

台形パルス運転及び合成パルス運転においては、あらかじめ時間に対する調整棒の引抜き・挿入量又は原子炉出力の時間変化あるいはこれらの組合せを定めた運転計画に従い、調整棒の駆動を行わせる。

合成パルス運転においては、さらにトランジェント棒の引抜き開始時間を定めた運転計画に従い、トランジェント棒の急速引抜きを行わせる。

この機能を達成するため、パルス自動運転制御系は、第 5.7 図に示す制御指令発生回路、出力制御回路及びモータ制御信号回路より構成する。

制御指令発生回路は、運転計画に従い、時間に対する調整棒の駆動速度、原子炉出力、あるいは、トランジェント棒引抜きの制御指令を発生する。出力制御回路は、原子炉出力の目標値と実際の原子炉出力を比較し、その偏差から調整棒の駆動速度信号を発生する。モータ制御信号回路は、制御指令発生回路又は出力制御回路からの調整棒の引抜き・挿入の速度信号によって、調整棒の駆動に必要なモータ駆動回路に入力する信号を発生する。

なお、原子炉出力の目標値と実際の原子炉出力を比較して、その偏差が設定値を超えた場合には、制御用インターロック回路により、台形パルス運転あるいは合成パルス運転を阻止する設計とする。

5.2.5 制御用インターロック回路

制御用インターロック回路は、運転上の誤操作を防止したり異常が拡大するのを防止するために、各運転モードにおける制御棒の引抜き及び運転モードの移行に係る条件を定めるものであり、制御棒の引抜きあるいは運転モードの移行に必要な条件が満足されない場合には、これらを阻止する機能を有する。

このうち、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおけるインターロックは、新たに全て追加するものである。また、運転モードの移行に係るインターロックは、運転モードの追加に伴い、各モードにおける運転を適切に開始するための条件として、新たに追加するものである。

(1) 運転モード選択インターロック

定出力運転モードからパルス運転の各モードへの移行及びパルス運転の各モードから定出力

運転モードへ移行するためのインターロックであり、その条件を第 5.4 表に示す。

1) 定出力運転モードからパルス運転の各モードへの移行

この移行に対するインターロックの条件(第 5.4 表(イ)~(ニ))は、従来の単一パルス運転の開始条件と同一であり、定出力運転において原子炉出力及び燃料温度が十分低く、核的に安定した状態からパルス運転を開始することを要求するものである。なお、パルス運転モード間での移行は行えない。

2) パルス運転の各モードから定出力運転モードへの移行

単一パルス運転モードから定出力運転モードへの移行に当っては、従来と同様に、移行前後の運転モードを定める条件のみを要求する(第 5.4 表の(ホ)及び(ヘ))。これは、単一パルス運転モードから定出力運転モードへの移行時の原子炉出力及び燃料温度は十分低下しており、これまでの運転実績から他の条件をインターロックとして追加する必要がないためである。

台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードから定出力運転モードへの移行に当っては、さらに、原子炉出力及び燃料温度が、それぞれ定出力運転モードにおける定格値及び警報設定値以下であることを要求する条件を追加する(同表(ト)及び(チ))。これらは、定出力運転を安定して行うために必要な条件である。

(2) 定出力運転モードでの制御棒引抜きインターロック

定出力運転モードにおける安全棒、調整棒及びトランジェント棒の引抜き並びに自動運転へ切替えるためのインターロックであり、その条件を第 5.5 表に示す。

定出力運転モードにおける各制御棒の引抜きに必要なインターロックとして、従来は、線形定出力系に相当する中間出力系の出力が各レンジの 110 % の場合には原子炉をスクラムすることとしていたが、今後は、このスクラム条件に代り、線形定出力系の各レンジにおける過大な出力にあってはレンジ切替えを行わない限り制御棒の引抜きを阻止するようにする(第 5.5 表(ニ))。

また、制御棒の電動引抜きに関して、高速トランジェント棒の位置が確認できない状態での制御棒の引抜きを阻止する条件(同表(ホ))を追加する。

(3) 単一パルス運転モードでの制御棒引抜きインターロック

単一パルス運転モードにおけるトランジェント棒の引抜きのためのインターロックであり、その条件を第 5.6 表に示す。

なお、このモードでは、調整棒の引抜き及びトランジェント棒の電動による引抜きができない回路構成とする。また、このモードでは、トランジェント棒の引抜きをくり返して行うことができない回路構成とする。

単一パルス運転モードにおける制御棒の引抜きに関して追加したインターロックは、スクラムに用いる安全棒を上限位置とした後、他の制御棒を引抜くことを要求する条件(第 5.6 表(ヘ))、及び(2)の場合と同様に高速トランジェント棒の位置が確認できない状態での制御棒の引抜きを阻止する条件(同表(チ))である。

(4) 台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードでの制御棒引抜きインターロック

台形パルス運転モードにおける調整棒の引抜きのためのインターロック、並びに、合成パルス運転モードにおける調整棒及びトランジェント棒の引抜きのためのインターロックであり、そ

の条件を第 5.6 表に示す。

なお、合成パルス運転モードでのトランジェント棒の引抜きは、くり返し行うことができない回路構成とする。

台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおける制御棒の引抜きに関して共通して追加したインターロックには、

- 原子炉の運転をいずれかの運転モードに限定して行い、運転を実施するモードに特有の原子炉計装設備、原子炉制御設備及び安全保護回路を自動的に適用するためのもの(第 5.6 表(ロ),(イ)),
- 台形パルス運転及び合成パルス運転を自動制御によってのみ行い、手動による運転を阻止するためのもの(同表(ウ)),
- パルス自動運転制御系の電源電圧の不安定による誤動作を防止するためのもの(同表(カ)),
- 調整棒の位置を目標とする制御を行っている際に、目標位置と実際の調整棒位置との偏差が設定値を超えた場合、調整棒の駆動速度が制限値を超えた場合、あるいは調整棒 6 本の位置が不整列となった場合には、運転を阻止するためのもの(同表(ヨ)),
- 運転員の判断により、制御棒自動挿入スイッチを手動で押した場合には、運転を阻止するためのもの(同表(タ)),
- 原子炉出力を目標とする制御を行っている際に、目標出力と実際の原子炉出力との偏差が設定値を超えた場合には、安定な制御を行うために運転を阻止するためのもの(同表(レ)),
- 安定な制御を行うために、調整棒の反応度制御能力の小さい炉心端部での駆動を阻止するためのもの(同表(リ)),

があり、また、他の運転モードの場合と共通した条件(同表(ニ),(ヘ),(チ),(リ))がある。

さらに、台形パルス運転モードに対しては、

- 自動制御中に使用しないトランジェント棒を上限位置に保持することにより、トランジェント棒が挿入状態にあった場合に万一の誤動作によって逸出し、計画外の反応度が炉心に挿入される恐れが生ずることを防止するためのもの(同表(ト)),

を追加する。

また、合成パルス運転モードに対しては、

- 合成パルス運転時の異常時にトランジェント棒の引抜きを阻止するために設けた原子炉保護用インターロックが作動した場合に、運転を阻止するためのもの(同表(ホ)),
- 合成パルス運転モードにおいては、トランジェント棒引抜き開始後一定時間はタイマーにより安全出力系出力高によるスクラム条件がバイパスされるので、この時間における調整棒の駆動を阻止するためのもの(同表(ツ)),

及び単一パルス運転モードにおけるトランジェント棒引抜きのための同一条件(同表(チ),(ヌ),(ル))を追加する。なお、(ル)に示したトランジェント棒テストスイッチは、定出力運転モードにおいて起動時にトランジェント棒を圧縮空気ですり抜くために用いられるスイッチである。テストスイッチは、起動時に圧縮空気ですり抜くために必要な他のインターロック(安全棒及び調整棒の全数が下限にあること)と連動する回路構成としているため、このインターロック条件が適用されない単一パルス運転モード及び合成パルス運転モ

ードでは、このテストスイッチをOFFの状態にして、トランジェント棒の引抜きを行う必要がある。

台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおいて、制御用インターロック回路により制御棒の引抜きが阻止された場合には、パルス自動運転制御系による運転は阻止され、後述する制御棒自動挿入回路の作動によって、直ちに調整棒及びトランジェント棒の全数が炉心に挿入される設計とする。

5.2.6 制御棒自動挿入回路

制御棒自動挿入回路は、パルス運転方式の一部追加に伴って今回追加する設備であり、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおいて、

- ① 運転計画に基づき原子炉停止を目的とした場合
- ② 制御用インターロック回路によって制御棒の引抜きが阻止された場合
- ③ 運転員の判断によって運転を中止する場合

に、調整棒及びトランジェント棒の全数を自動的に炉心に挿入するための設備である。

①の場合には、パルス自動運転制御系が、計画された時刻に制御棒自動挿入回路の作動信号を発生し、また、②の場合には、制御用インターロック回路が、制御棒自動挿入回路の作動信号を発生する。③の場合には、運転員が制御棒自動挿入スイッチを手動で押すことにより、制御棒自動挿入回路の作動信号を発生する。

制御棒自動挿入回路の作動により、調整棒は駆動モータによって75mm/s以下の速度で下限まで挿入され、また、トランジェント棒は圧縮空気の急排出によって自由落下される。

なお、安全棒は、運転モードを定出力運転モードに切替えた後、運転員の手動操作によって、あるいはスクラム時に、原子炉停止のために挿入される。

5.2.7 警報回路

警報回路は、原子炉の運転に係る諸変数が異常値になった場合に、運転員の注意を促すため、ブザー及び表示灯によって警報を発する回路である。

警報回路の作動する条件を、第5.7表に示す。このうち、「廃液タンク水位高」による警報及び「排気ダストモニタ」、「排気ガスモニタ」による警報については、従来、液体廃棄物廃棄設備の監視系及び放射線管理施設の監視系がこれらの警報を発する機能を有していたが、今後は、これらの警報発生状態を運転員が集中監視するために、原子炉制御設備の警報回路の作動条件として追加する。

また、「パルス自動運転中調整棒下限」の警報を、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおいて追加する。これは、制御棒引抜き阻止インターロックである「調整棒位置が設定値の範囲内であること」の条件が作動したことを運転員に知らせるためのものである。

その他の警報回路の作動条件については、定出力運転モード及び単一パルス運転モードに関しては変更がなく、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードに関する条件が追加となるが、内容的には定出力運転モード、単一パルス運転モードの場合と共通である。

5.3 安全保護回路

5.3.1 安全保護回路の概要

安全保護回路は、運転時の異常な過渡変化時及び事故時に、異常状態を検知した原子炉計装設備等からの信号により、制御棒を自動的に落下させて安全に原子炉を停止するための原子炉停止回路、並びに合成パルス運転時に異常状態を検知した信号によりトランジェント棒の引抜きを阻止するための原子炉保護用インターロック回路からなる。

原子炉停止回路については、台形パルス運転及び合成パルス運転の追加に伴い、これらの運転モードにおけるスクラム条件を新たに設ける。また、原子炉保護用インターロック回路は、合成パルス運転時の安全性を配慮し、今回新たに設けるものである。

5.3.2 安全保護回路の設計方針

安全保護回路は、以下の方針を満たす設計とする。

- (1) 運転時の異常な過渡変化時及び事故時に異常状態を検知した信号により、異常の程度によっては、制御棒を自動的に落下させて安全に原子炉を停止し、又はトランジェント棒の引抜きを阻止する機能を有すること。
- (2) 系の単一故障を想定してもその安全保護機能が喪失しないよう多重性及び独立性を有すること。
- (3) 電源の喪失又は回路の遮断に対して安全に原子炉を停止できること。
- (4) その作動状況が確認しうる設計であること。
- (5) 原子炉の停止時にその機能確認の検査等が行えること。

5.3.3 原子炉停止回路

原子炉停止回路は、運転時の異常な過渡変化時及び事故時に、スクラムにより原子炉を速やかに停止しその安全を確保するための回路である。

スクラムは、すべての制御棒を炉心内に急速に挿入することによって原子炉を停止させるもので、安全棒、調整棒にあっては懸架電磁石電流の遮断により、トランジェント棒にあっては圧縮空気の急排出によって行う。スクラム設定点に達した後制御棒が落下を開始するまでの遅れ時間は、0.2秒以内である。安全棒、調整棒にあってはトリップ信号が発せられてから全挿入までの時間は、1秒以内である。スクラム時には、ブザー及び表示灯によってスクラムの発生を確認できるようにする。

第5.8図には、原子炉停止回路のブロック図を示す。また、第5.8表には、スクラム条件を示す。

今回追加する台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについては、定出力運転モードの場合と同様に、調整棒操作時の過度の原子炉出力の上昇を防止するため「安全出力系出力高」によるスクラムを、また、調整棒が下限位置に達した状態での自動制御による運転を防止するため「パルス自動運転中調整棒下限」によるスクラムを、両運転モードに対して設け、さらに、単一パルス運転モードの場合と同様に、トランジェント棒操作時の過度の原子炉出力の上昇を防止

するため「パルス出力系出力高」によるスクラムを、合成パルス運転モードに対して設ける。これらを除く台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおけるスクラム条件は、従来の単一パルス運転モードにおけるスクラム条件と同様である。

5.3.4 原子炉保護用インターロック回路

原子炉保護用インターロック回路は、今回追加する設備であり、合成パルス運転中の異常時にトランジェント棒の引抜きを阻止するために設ける。

合成パルス運転モードにおいては、調整棒の駆動による運転を行うことに加え、トランジェント棒の引抜きによる運転も行う。調整棒の駆動による運転については、台形パルス運転の場合と同様に、原子炉停止回路により原子炉の安全性が確保される。さらに、合成パルス運転の場合には、トランジェント棒の引抜きに先立って調整棒により原子炉出力を高める運転を行うこともある。調整棒による運転中に積分出力及び燃料温度が計画した値を超えた状態からトランジェント棒が引抜かれた場合には、原子炉停止回路が作動しても燃料の破損を防止できない可能性がある。このため、合成パルス運転時に、計画外の状態からのトランジェント棒の引抜きを阻止し、原子炉の安全性を確保するために、原子炉保護用インターロック回路を設ける。

原子炉保護用インターロック回路は、合成パルス運転モードにおいて、以下の条件によりトランジェント棒引抜きを阻止する。(第5.8表参照)

- 1) トランジェント棒引抜きタイミング遅れ大
- 2) 推定積分出力高
- 3) 推定燃料温度高

1)については、トランジェント棒の引抜きタイミングの遅れが生じた場合に、引抜き遅れの期間中の積分出力の増加を抑制するために、運転を阻止するためのものである。

2)については、トランジェント棒引抜き前の積分出力の測定値とトランジェント棒引抜き後の積分出力増分の予測値との合計(推定積分出力)が設定値を超えた場合に、運転を阻止するためのものである。

3)については、トランジェント棒引抜き前の燃料温度の測定値とトランジェント棒引抜き後の燃料温度増分の予測値との合計(推定燃料温度)が設定値を超えた場合に、運転を阻止するためのものである。

原子炉保護用インターロック回路によるトランジェント棒の引抜きの阻止は、三方電磁弁電流の遮断によって行う。三方電磁弁電流が遮断されると、圧縮空気は急排出され、トランジェント棒は自重により炉心に落下される。

なお、原子炉保護用インターロック回路の作動によりトランジェント棒の引抜きが阻止された場合には、制御用インターロック回路で述べたように、パルス自動運転制御系による合成パルス運転は阻止され、制御棒自動挿入回路の作動によって、直ちに調整棒の全数が炉心に挿入される。

原子炉保護用インターロック回路のブロック図を、第5.9図に示す。

第 5.1 表 NSRR の今後の計測制御系統施設の構成と従来からの主要な変更点

区分	構成 (変更後)	従来からの主要な変更点	主な変更理由		
原子炉計設	対数定出力系	絶縁増幅器の導入	安全保護用及び制御用の信号分離のため		
	線形定出力系	検出器の種類変更, 計測範囲拡張	定出力運転時の中性子源レベル出力測定精度向上のため		
	核計装	安全出力系	検出器の種類変更, 計測範囲拡張	台形パルス・合成パルス運転時の 15MW までの出力測定 (安全保護用) のため	
		パルス出力系	検出器の種類変更, 計測範囲拡張	単一パルス・合成パルス運転時の急峻なパルス状出力測定精度向上のため	
	燃料計装	対数高出力系	新設	台形パルス・合成パルス運転時の 15MW までの出力測定 (監視用) のため	
		線形高出力系	新設	台形パルス・合成パルス運転時の 15MW までの出力測定 (制御用) のため	
		燃料温度系	インターロック用取出信号追加	合成パルス運転時の原子炉保護用インターロック信号を得るため	
		燃料圧力系	—	—	
	原子炉制御設	プロセス計装等	プール水位系	絶縁増幅器の導入	安全保護用及び制御用の信号分離のため
			プール水温系	系統数追加	安全保護系としての多重性の確保のため
その他			—	—	
制御棒		安全棒, 調整棒, トランジェント棒	—	—	
		安全棒駆動機構	—	—	
原子炉制御設		調整棒駆動機構	駆動速度変更	台形パルス・合成パルス運転時の反応度制御能力を高めるため	
		トランジェント棒駆動機構	—	—	
		駆動機構支持梁	—	—	
		定出力自動運転制御系	—	—	
安全保護回路		パルス自動運転制御系	新設	台形パルス・合成パルス運転時の複雑な制御棒操作の確実な計画的遂行のため	
	制御用インターロック回路	インターロック条件追加	台形パルス・合成パルス運転に係る誤操作及び異常の拡大の防止のため		
	制御棒自動挿入回路	新設	台形パルス・合成パルス運転に係る異常の拡大防止及び計画的停止のため		
	警報回路	警報条件追加	台形パルス・合成パルス運転に係る異常状態の警報のため		
	原子炉停止回路	スクラム条件追加	台形パルス・合成パルス運転に係る異常時, 事故時の安全確保のため		
	原子炉保護用インターロック回路	新設	合成パルス運転に係る異常時の安全確保のため		

— : 基本設計上の変更なし。

第 5.2 表 核計装の種類と使用目的

系統名	個数	検出器の種類	使用運転モード	指示範囲	安全保護用信号		原子炉制御用信号			備考	
					スクラム信号	原子炉保護用イ ンターロック信号	警報 信号	制御用インターロ ック 信号	指示		記録
A	1	核分裂電離箱 (FC)	定出力運転	0.03 mW ～ 450 kW	ペリオ ド短		ペリオ ド短	(1) 起動時計数率設定 値以下で制御棒引抜 き阻止 (2) 1 kW 以上で各パ ルス運転モードへの 切替阻止	○	○	検出器の種類 及び指示範囲 には変更なし
B	1	核分裂電離箱 (FC)	定出力運転	0.03 mW ～ 330 kW	—	—	出力高	(1) 起動時計数率設定 値以下で制御棒引抜 き阻止 (2) 各レンジの 105 % 以上の出力で制御棒 引抜き阻止 (3) 1 kW 以上で各パ ルス運転モードへの 切替阻止	—	○	検出器変更 (変更前 CIC) 指示範囲拡張 〔変更前 100 mW ～ 330 kW〕
C	2	7 線補償型 電離箱 (CIC)	定出力運転 台形パルス運転 合成パルス運転	3 kW ～ 330 kW 50 kW ～ 15 MW	出力高 出力高 積分出力高	—	出力高 出力高 積分出力高	—	○	○	検出器変更 (変更前 FC) 指示範囲拡張 〔変更前 3 kW ～ 330 kW〕
D	2	小型核分裂 電離箱 (μ FC)	単一パルス運転 合成パルス運転	3 MW ～ 30,000 MW	出力高 積分出力高	—	出力高 積分出力高	—	○	○	検出器変更 (変更前 7 線 電離箱) 指示範囲拡張 〔変更前 10 MW ～ 30,000 MW〕
E	1	核分裂電離箱 (FC)	台形パルス運転 合成パルス運転	3 W ～ 30 MW	—	—	—	300 kW 以上で定出力運 転モードへの切替阻止	—	○	増設
F	1	7 線補償型 電離箱 (CIC)	台形パルス運転 合成パルス運転	5 kW ～ 15 MW	—	—	—	300 kW 以上で定出力運 転モードへの切替阻止	—	○	増設

第 5.3 表 制御棒駆動機構の駆動方式と駆動速度

制御棒の種類	本数	駆動方式	駆動速度	駆動速度の変更の有無
安全棒	2本	電動モータ駆動	約 1.4 mm/s	変更なし
調整棒	6本	電動モータ駆動	単独駆動時 約 1.4 mm/s (定出力運転時)	変更なし
			バンク駆動時 約 0.72 mm/s (定出力運転時)	
			バンク駆動時 75 mm/s 以下 (台形パルス及び合成パルス運転時)	
調整棒	1本	電動モータ駆動	約 1.4 mm/s	変更なし
		圧縮空気駆動	約 90 ms *	変更なし
		圧縮空気駆動	約 50 ms *	変更なし

*1) トランジェント棒の引抜きによりパルス反応度投入に要する時間

第5.4表 運転モード選択インターロック

移行前運転モード 選択運転モード	定出力運転モード			単一パルス 運転モード	台形パルス 運転モード	合成パルス 運転モード
	単一パルス 運転モード	台形パルス 運転モード	合成パルス 運転モード			
運転モードの切替が 許可される必要条件						
(イ) 移行前運転モードとして定出力運転モードにあること	○	◎	◎	—	—	—
(ロ) パルス運転のいずれかの運転モードが選択されていること	○	◎	◎	—	—	—
(ハ) 原子炉出力が1kW以下であること	○	◎	◎	—	—	—
(ニ) 燃料温度が100℃以下であること	○	◎	◎	—	—	—
(ホ) 移行前運転モードとしてパルス運転のいずれかの運転モードにあること	—	—	—	○	◎	◎
(ヘ) 定出力運転モードが選択されていること	—	—	—	○	◎	◎
(ト) 原子炉出力が300kW以下であること	—	—	—	—	◎	◎
(チ) 燃料温度が700℃以下であること	—	—	—	—	◎	◎

◎：今回追加項目

第 5.5 表 定出力運転モードにおける制御棒引き抜きインターロック

制御棒の種類及び 引抜き方法	トラランジェント棒		安全棒 電動引抜	調整棒電動引抜		
	空気引抜	電動引抜		単独駆動	バンク駆動 (手動)	バンク駆動 (自動運転)
制御棒引き抜きが 許可される必要条件						
(イ) 定出力運転モードにあること	○	○	○	○	○	○
(ロ) スクラム条件が解除されていること	○	○	○	○	○	○
(ハ) 対数定出力系の出力が設定値以上であること	○	○	○	○	○	○
(ニ) 線形定出力系の出力が設定値の範囲内であること	◎	◎	◎	◎	◎	◎
(ホ) 高速トラランジェント棒が上限又は下限にあること	—	◎	◎	◎	◎	◎
(ヘ) 安全棒 2 本が上限にあること	—	○	—	○	○	○
(ト) 制御棒結合電磁石が結合されていること	—	○	○	○	○	○
(チ) 安全棒 2 本が下限にあること	○	—	—	—	—	—
(リ) 調整棒 6 本が下限にあること	○	—	—	—	—	—
(ス) 制御棒が選択されていること	*1)	○	○	○	○ *1)	—
(ル) 制御棒引き抜きスイッチが ON であること	*2)	○ *2)	○	○	○	○ *2)
(ヲ) 調整棒バンク引抜きタイマーがリセットされていること		—	—	—	○	—
(ワ) 自動運転解除スイッチが OFF であること		—	—	—	—	○
(カ) 原子炉出力誤差信号が設定値の範囲内であること		—	—	—	—	○

* 1) 調整棒バンク引抜き (手動) の場合には、バンク選択がなされていること。
 * 2) トラランジェント棒空気引抜の場合には、トラランジェント棒テストスイッチが ON であること。
 定出力自動運転の場合には、自動運転スイッチが ON であること。

◎：今回追加項目

第 5.6 表 単一パルス運転モード、台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードにおける制御棒引き込みインタローック

運転モード	単一パルス運転モード トランジェント棒空気引抜 (手動)	台形パルス運転モード 調整棒バンク駆動 (自動運転)	合成パルス運転モード 調整棒バンク駆動 (自動運転)	トランジェント棒空気引抜 (自動運転)
制御棒引き込みが許可される必要条件				
(イ) 単一パルス運転モードにあること	○	—	—	—
(ロ) 台形パルス運転モードにあること	—	○	—	—
(ハ) 合成パルス運転モードにあること	—	—	○	○
(ニ) スクラム条件が解除されていること	○	○	○	○
(ホ) 原子炉保護用インタローック条件が解除されていること	—	—	○	○
(ヘ) 安全棒 2 本が上限にあること	○	○	○	○
(ト) トランジェント棒 3 本が上限にあること	—	○	—	—
(チ) 高速トランジェント棒が上限又は下限にあること	○	—	○	○
(リ) 制御棒結合電磁石が結合されていること	—	○	○	○
(ル) トランジェント棒が選択されていること	○	—	○	○
(レ) トランジェント棒テストスイッチが OFF であること	○	—	○	○
(ワ) 単一パルス運転スイッチが ON であること	○	—	—	—
(ヰ) パルス自動運転スイッチが ON であること	—	○	○	○
(カ) 制御回路電源電圧に異常がないこと	—	○	○	○
(キ) 制御棒駆動系に異常がないこと	—	○	○	○
(ク) 制御棒自動挿入スイッチが OFF であること	—	○	○	○
(ケ) 原子炉出力誤差信号が設定値の範囲内であること *1)	—	○	○ *1)	○ *1)
(コ) 調整棒位置が設定値の範囲内であること	—	○	○	○
(サ) トランジェント棒引抜開始後一定時間を経過していること	—	—	○	—

* 1) 「原子炉出力誤差信号が設定値の範囲内であること」の条件は、出力変化の急激な部分については除く。

◎ : 今回追加項目

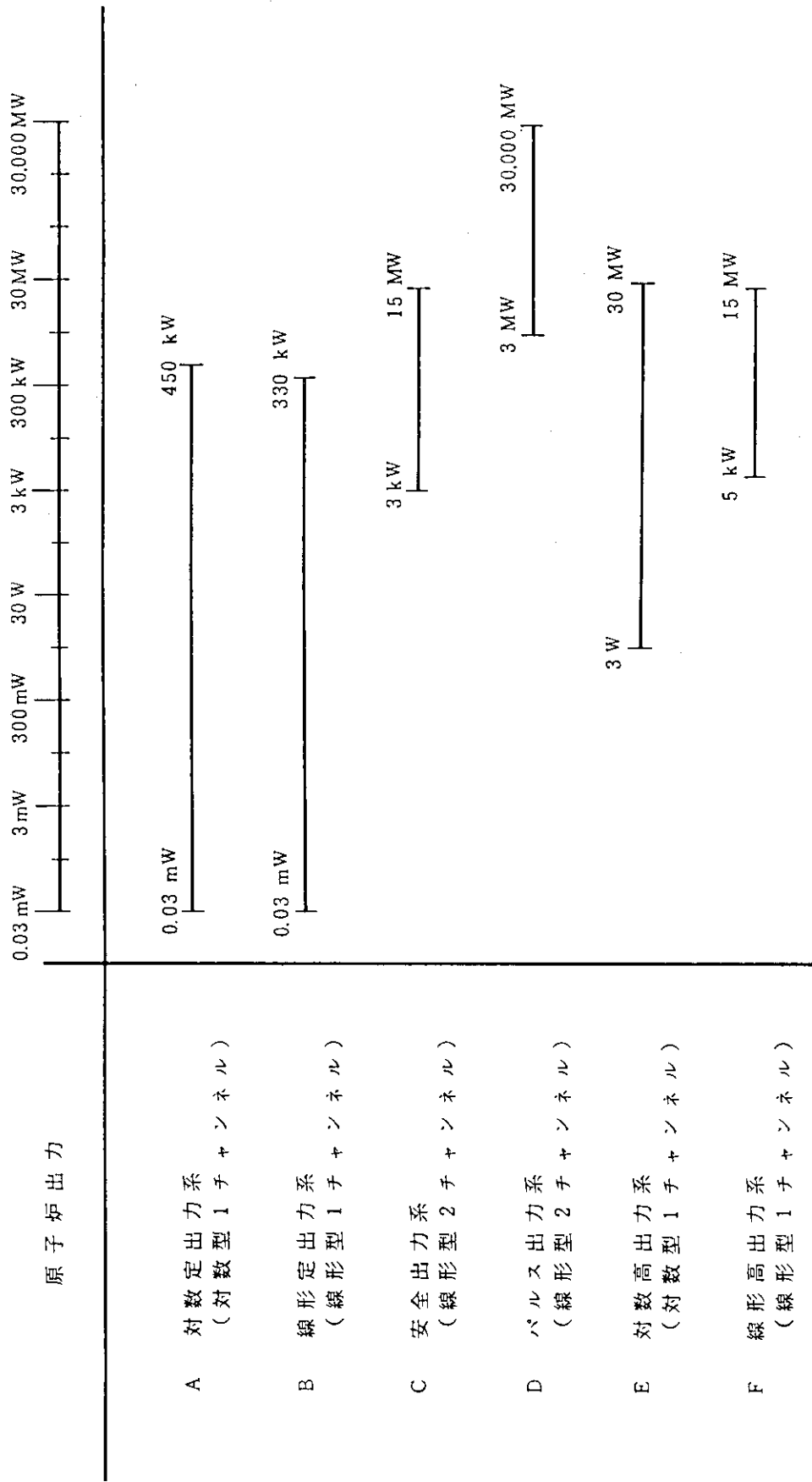
第 5.7 警報条件

項目	運転モード	定出力運転モード	単一パルス運転モード	台形パルス運転モード	合成パルス運転モード	備考	変更の有無
ペリオド短		10 s	—	—	—		変更なし
線形定出力系出力高		各レンジ 105%	—	—	—	最高レンジについては 315 kW で警報	変更なし
安全出力系出力高		315 kW	—	各レンジ 105%	各レンジ 105%	台形パルス運転時及び合成パルス運転時の最高レンジについては 11 MW で警報。 合成パルス運転時は、トランジェント棒引抜き開始後規定時間はバイパス。	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
パルス出力系出力高		—	各レンジ 105%	—	各レンジ 105%	最高レンジについては 21,800 MW で警報	合成パルス運転モードについて追加
積分出力高		—	各レンジ 95%	105 MW・s	105 MW・s	単一パルス運転時の最高レンジについては 123 MW・s で警報。	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
燃料温度高		700°C	900°C	900°C	900°C	最高出力密度を有する燃料要素の計測点に対する値で計装燃料要素の挿入位置を考慮し、これに見合う値とする。	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
プール水温度高		40°C	40°C	40°C	40°C		台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
プール水液面低		-25 cm	-25 cm	-25 cm	-25 cm		台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
中性子検出器高圧電源電圧低		-5%	-5%	-5%	-5%		台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
実験物固定異常		○	○	○	○	実験物の無い時はバイパスされる。	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
定出力自動運転中誤差信号大		±5%	—	—	—		変更なし
定出力自動運転中調整棒下限		2 cm	—	—	—		変更なし
パルス自動運転中調整棒下限		—	—	2 cm	2 cm	制御棒自動挿入回路作動時はバイパスされる	追加
廃液タンク水位高		190 cm	190 cm	190 cm	190 cm		設備区分の変更による追加
排気タストモニタ		$3 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$3 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$3 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$3 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$		設備区分の変更による追加
排気ガスマモニタ		$3 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$3 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$3 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$3 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$		設備区分の変更による追加

第5.8表 スクラム条件及び原子炉保護用インターロック条件

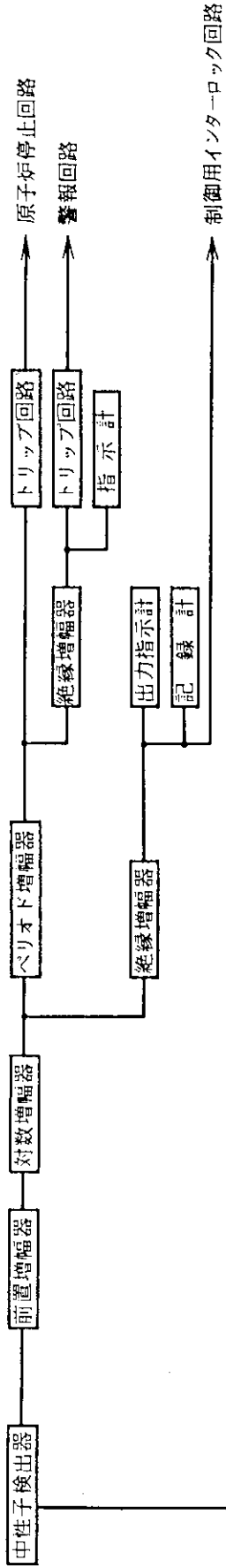
項目	運転モード	定出力運転モード	単一パルス運転モード	台形パルス運転モード	合成パルス運転モード	備考	変更の有無
パリオド短	短	5 s	—	—	—	変更なし	変更なし
安全出力系出力高	高	330 kW	—	各レンジ 110 %	各レンジ 110 %	台形パルス運転時及び合成パルス運転時の最高レンジについては12.5 MWでスクラム。合成パルス運転時は、トランジェント棒引抜き開始後規定時間はバイパス。	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
パルス出力系出力高	高	—	各レンジ 110 %	—	各レンジ 110 %	最高レンジについては23,000 MWでスクラム。	合成パルス運転モードについて追加
積分出力高	高	—	各レンジ 100 %	110 MW・s	110 MW・s	単一パルス運転時の最高レンジについては130 MW・sでスクラム。	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
燃料温度高	高	750 °C	950 °C	950 °C	950 °C	最高出力密度を有する燃料要素の計測点に対する値で計装燃料要素の挿入位置を考慮し、これに見合う値とする	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
プール水温度高	高	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C	—	全運転モードについて追加
プール水液面低	低	— 50 cm	— 50 cm	— 50 cm	— 50 cm	—	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
水平地震動大	大	25 gal	25 gal	25 gal	25 gal	—	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
垂直地震動大	大	25 gal	25 gal	25 gal	25 gal	—	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
電源電圧低	低	— 10 %	— 10 %	— 10 %	— 10 %	—	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
中性子検出器高圧電源電圧低	低	— 10 %	— 10 %	— 10 %	— 10 %	—	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
安全スイッチ	チ	○	○	○	○	—	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
クレーン炉心直上	上	○	○	○	○	—	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
サブパイル室扉開	開	○	○	○	○	—	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
手動スクラム	ラム	○	○	○	○	—	台形パルス運転モード及び合成パルス運転モードについて追加
定出力自動運転中調整棒下限	下限	0 cm	—	—	—	—	変更なし
パルス自動運転中調整棒下限	下限	—	—	0 cm	0 cm	制御棒自動挿入回路作動時はバイパスされる。	追加
トランジェント棒引抜き遅れ大	遅れ大	—	—	—	0.5 s	—	追加
推定積分出力高	高	—	—	—	105 MW・s	トランジェント棒引抜き開始後1 sまでの積分出力の推定値	追加
推定燃料温度高	高	—	—	—	900 °C	最高出力密度を有する燃料要素の計測点に対する値で計装燃料要素の挿入位置を考慮し、これに見合う値とする	追加

原子炉保護用インターロック条件

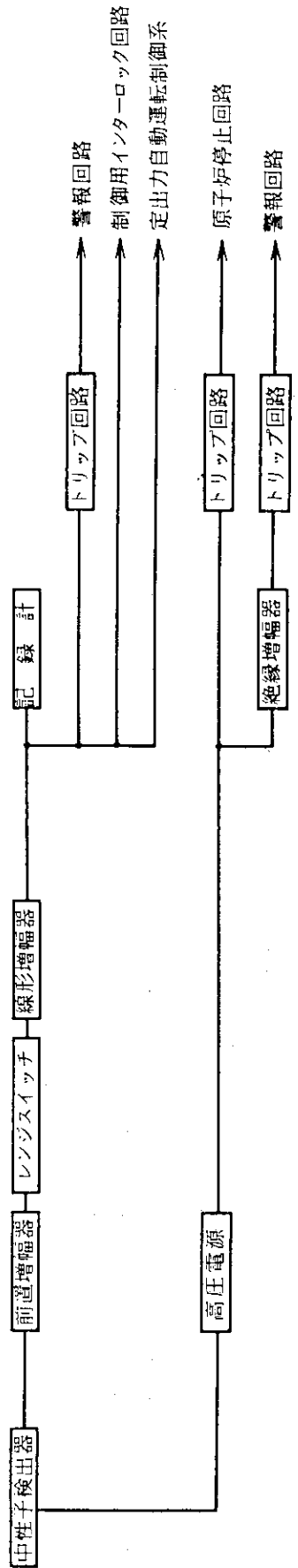


第5.1図 核計装指示範囲

A 対数定出力系 1チャンネル

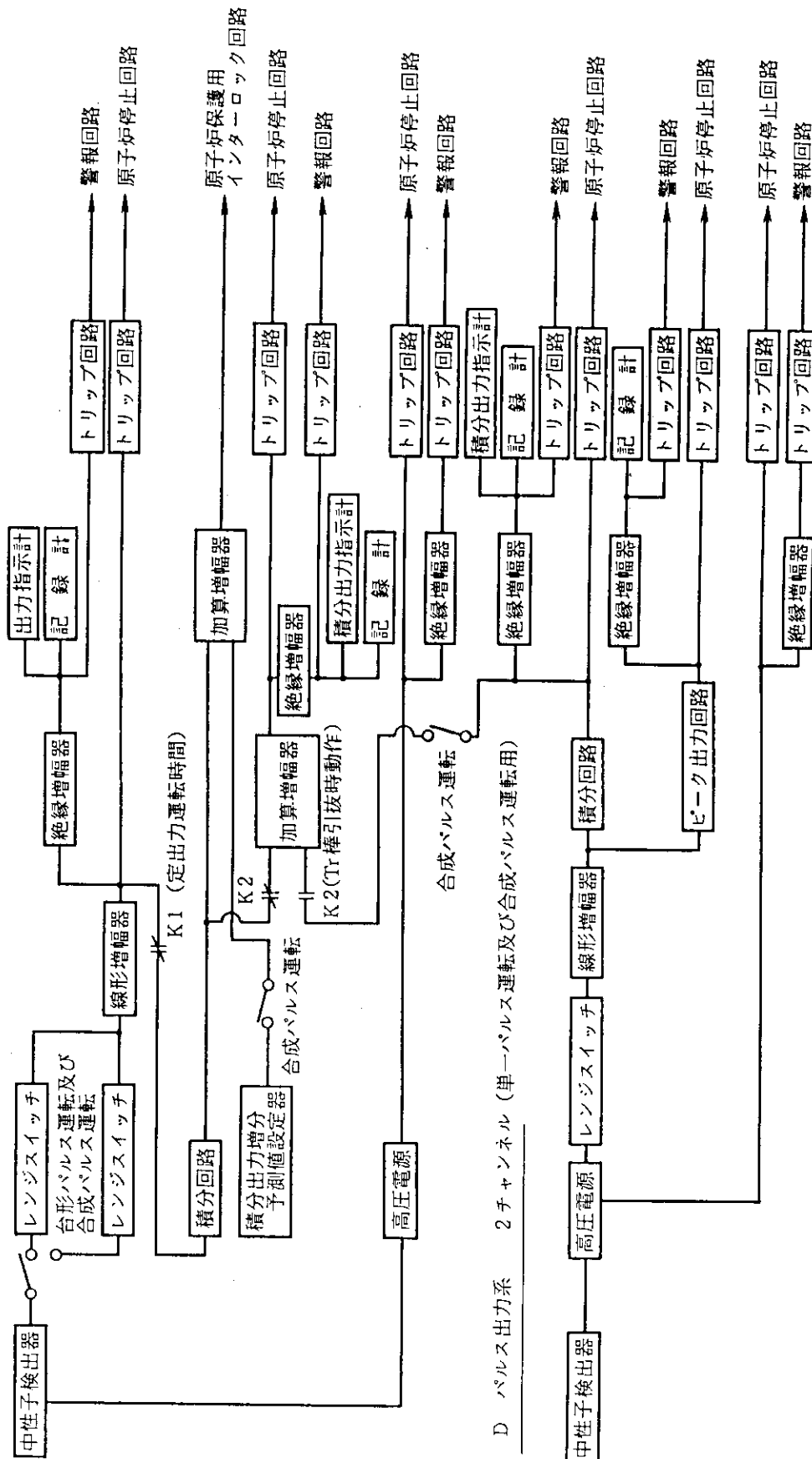


B 線形定出力系 1チャンネル



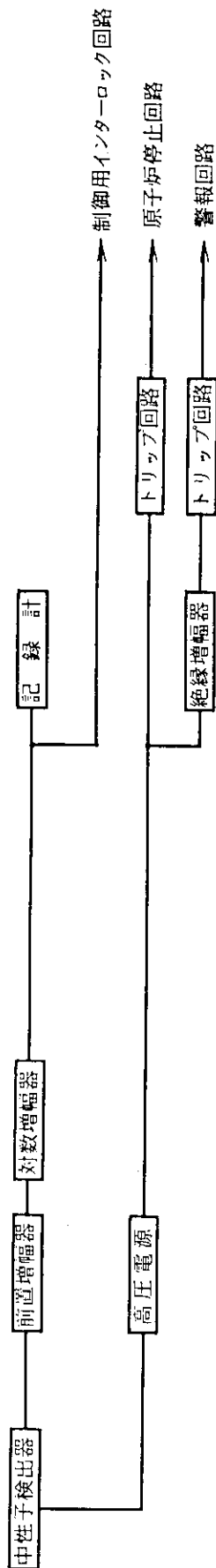
第 5.2 図 主要原子炉計測制御系ブロック図(1) (定出力運転用)

C 安全出力系 2チャンネル (定出力運転, 台形パルス運転及び合成パルス運転用)

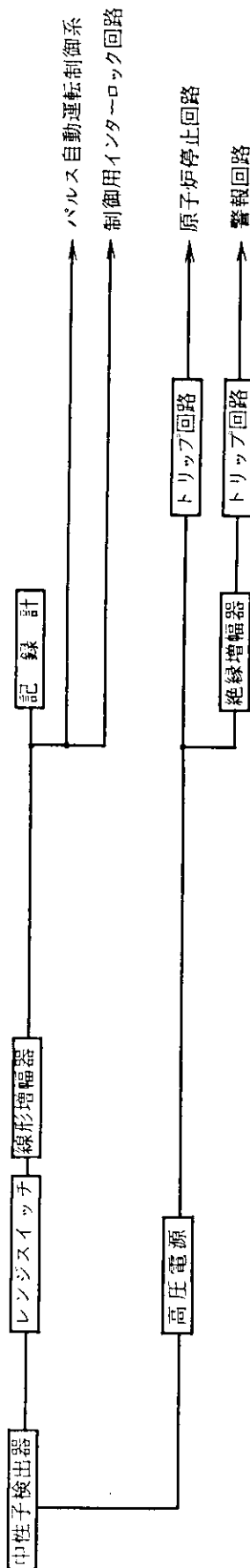


第 5.3 図 主要原子炉計測制御系ブロック図(2) (定出力運転及びパルス運転用)

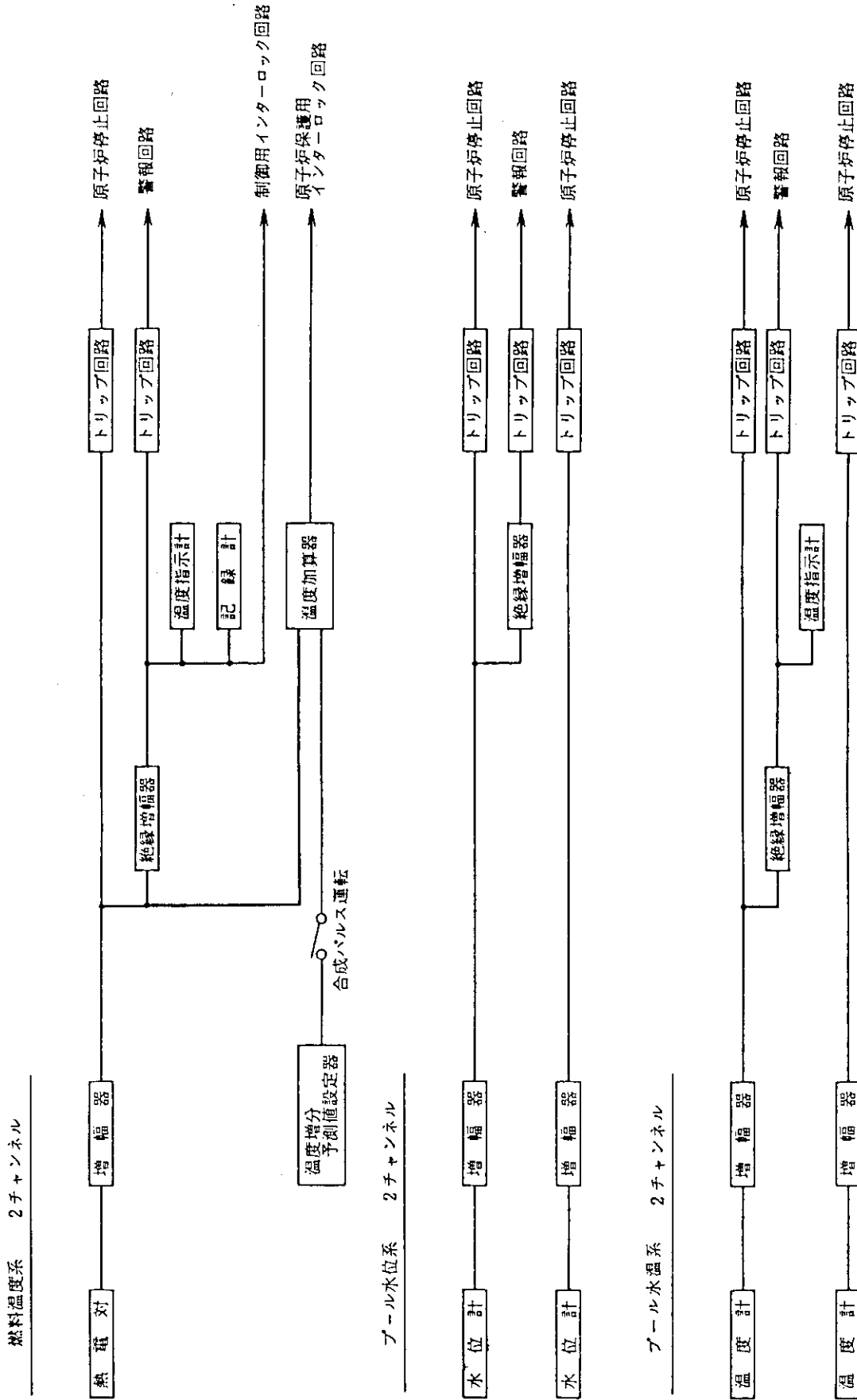
E 対数高出力系 1チャンネル (台形パルス運転及び合成パルス運転用)



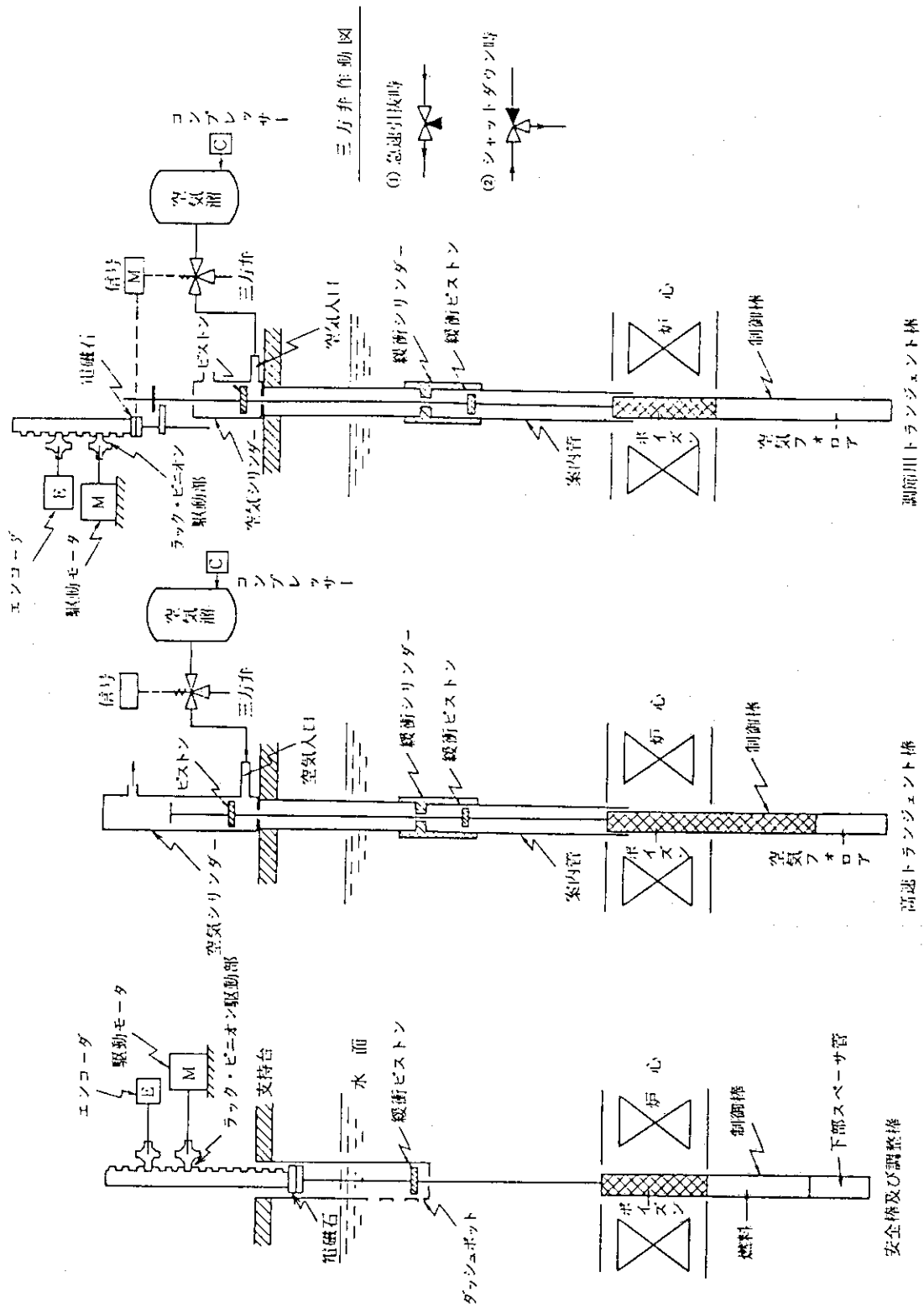
F 線形高出力系 1チャンネル (台形パルス運転及び合成パルス運転用)



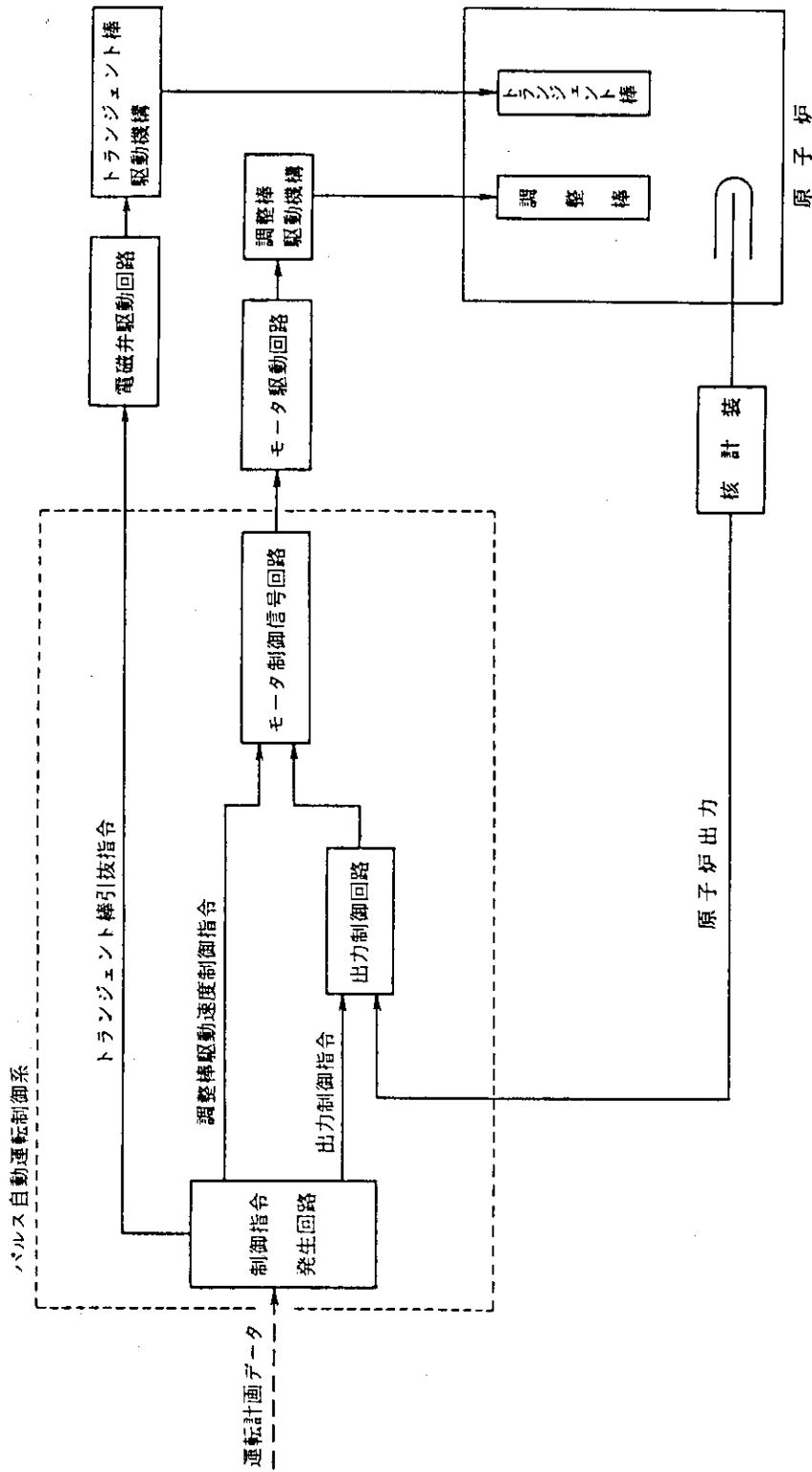
第5.4図 主要原子炉計測制御系ブロック図(3) (パルス運転用)



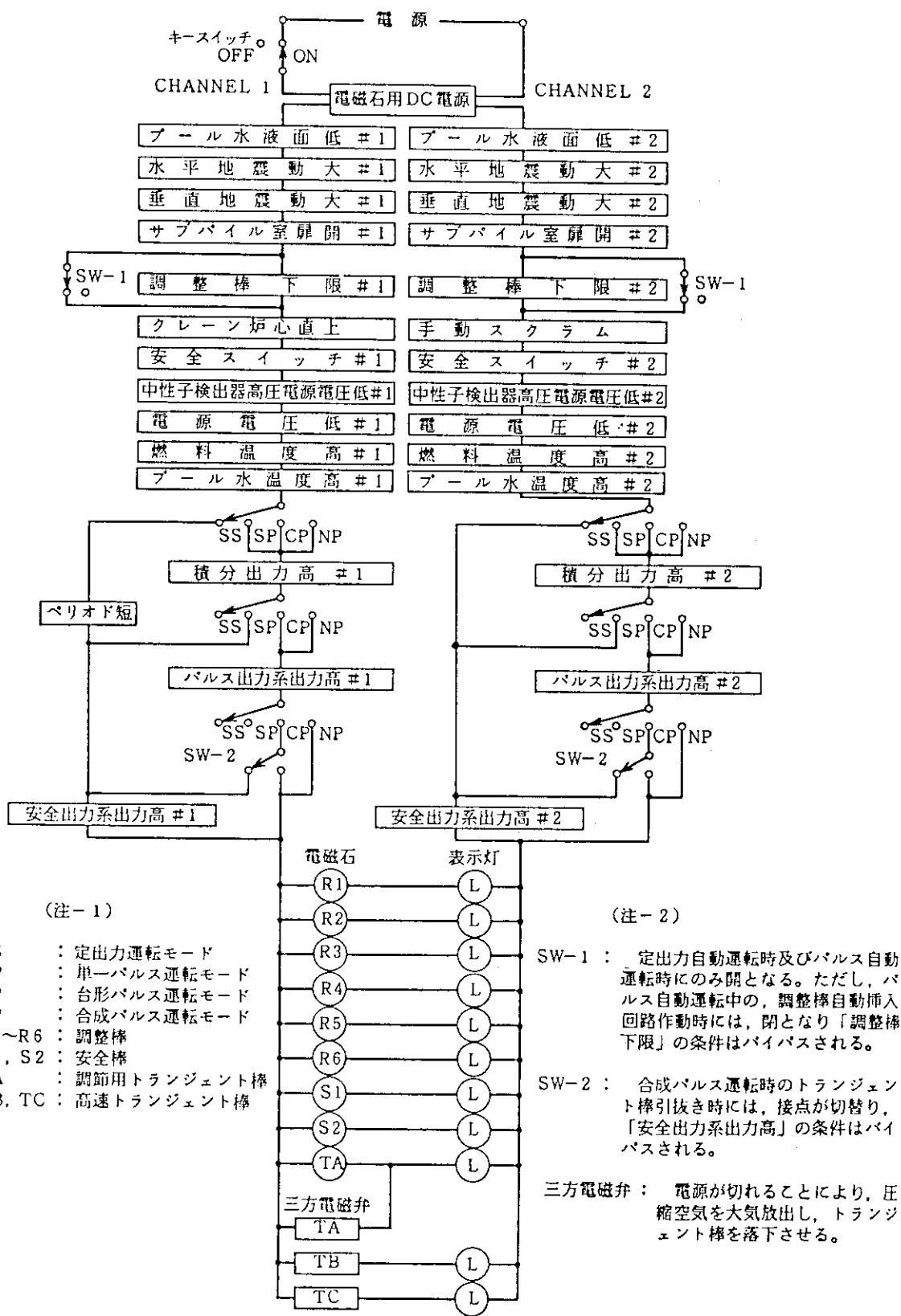
第 5.5 図 主要原子炉計測制御系ブロック図(4) (定出力運転及びパルス運転用)



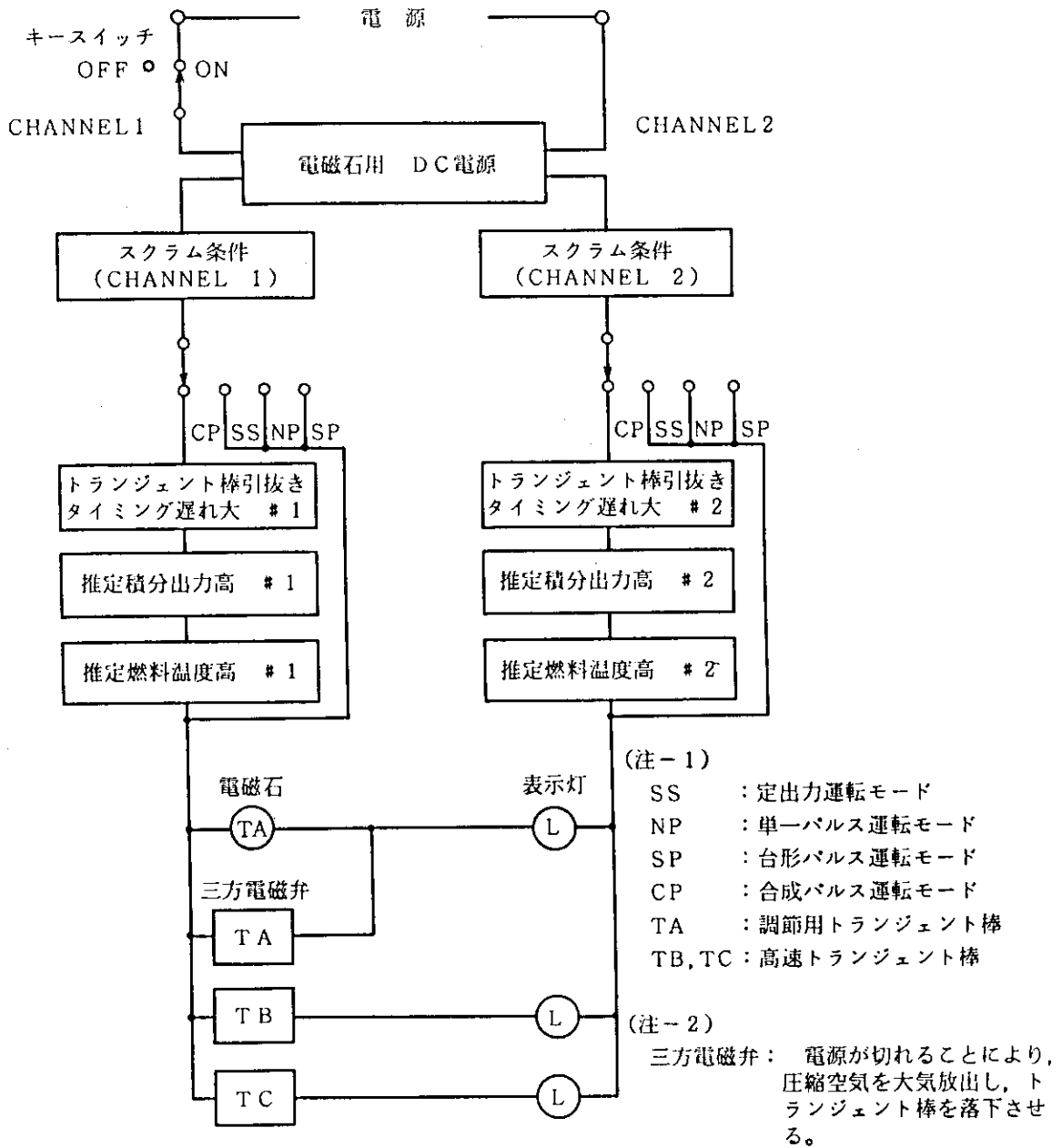
第 5.6 図 制御棒駆動機構概要



第 5.7 図 パルス自動運転制御系概念図 (台形パルス運転及び合成パルス運転用)



第 5.8 図 安全保護回路概要 (原子炉停止回路)



第 5.9 図 安全保護回路概要 (原子炉保護用インターロック回路)

6. 改良型パルス運転に係る核・熱特性及び動特性の概要

NSRRの運転方式として台形パルス運転及び合成パルス運転を追加するとともに、一部の核的制限値の変更を要するが、これらの変更に係る安全性の観点からNSRRの核・熱特性及び動特性を検討した結果を、以下に示す。

(1) 核特性

NSRRの主要な核的制限値としては、以下の値を設けることとする。

最大過剰反応度	0.073 Δk
停止余裕（最大反応度制御棒1本引抜時）	0.01 Δk 以上
トランジェント棒による最大添加反応度	
単一パルス運転時	0.0343 Δk
合成パルス運転時	0.0292 Δk *
実験物による最大の負の反応度	0.0365 Δk *

このうち、*印を付したものは今回変更を行うものであり、その他のものについては変更を加えない。

最大過剰反応度及び停止余裕については、炉心を構成する燃料要素及び制御棒を変更しないため、今後もこれらの制限値は満足される。

トランジェント棒による最大添加反応度のうち、単一パルス運転時の値0.0343 Δk (4.7 \$) については変更を加えず、従来の制限条件の範囲内で単一パルス運転を行う。合成パルス運転時の値については、合成パルス運転の追加に伴って今回新たに設定するものであり、調整棒の駆動による出力発生効果を考慮し、単一パルス運転時の最大値よりも低い0.0292 Δk (4.0 \$) の値を設定する。合成パルス運転時において、調整棒の駆動による10MWの出力の発生とトランジェント棒の急速引抜きによる0.0292 Δk の反応度添加を組み合わせる運転を行っても、最大積分出力110 MW・sの制限により、燃料最高温度は熱的制限値を下回り、原子炉の安全性上問題は生じない。

実験物による最大の負の反応度については、従来0.0256 Δk (3.5 \$) を制限値としていたが、今後の照射済燃料実験用実験物の構造がより複雑となり負の反応度値が増大すること等を考慮して、0.0365 Δk (5.0 \$) の値に変更するものである。実験物の最大の負の反応度の値を変更することによる炉心への影響としては、炉心内出力ピーキング係数の相違が考えられる。しかし、実験孔内に実験物を挿入しない場合（中空状態）及び異なる反応度値を有する実験物を挿入した場合について、2次元中性子拡散計算を実施した結果、第6.1表に示すように、炉心内半径方向出力ピーキング係数に顕著な差はなく、実験物の負の反応度値が増大するほど出力ピーキング係数は減少する傾向にあり、最大0.0365 Δk の負の反応度値を有する実験物を実験孔に挿入しても、出力ピーキング係数は実験孔が中空状態の場合の値を上回ることはない。炉心内軸方向出力ピーキング係数については、実験孔内の実験物の挿入による影響は受けず、制御棒の挿入状態を考慮して求めた従来の値（軸方向出力ピーキング係数1.25）

に変更はない。なお、実験物を実験孔内に挿入するに当っては、実験物の上部及び下部を、それぞれ十分な強度を有する抑え機構によって実験孔内に固定し、かつ、実験物の固定状態に異常がないことを電氣的信号によって確認し、固定状態に異常があった場合には制御室において警報を発するので、運転中に実験物が実験孔から逸出し炉心に核的外乱を及ぼす恐れはない。

(2) 熱特性及び動特性

NSRRの炉心構成及び冷却条件に変更を加えないので、炉心の有する負の反応度フィードバック特性に変化はなく、反応度変化に対する自己制御性は従来と同様に確保される。単一パルス運転時に、トランジェント棒の急速引抜きにより最大反応度 $0.0343 \Delta k$ を添加した場合の原子炉の応答を、第 6.1 図に示す。反応度添加後、原子炉出力は急上昇するが、フィードバック特性により速やかに低出力まで低下する。

台形パルス運転及び合成パルス運転の場合には、単一パルス運転時の最大出力及び最大積分出力を上回らない範囲で運転を行う。第 6.2 図には、台形パルス運転時に 10MW の高出力を一定時間保持する場合の原子炉の応答を、また、第 6.3 図には、合成パルス運転時に 10MW の高出力を一定時間保持した後トランジェントの引抜きによって合成パルス運転における最大反応度 $0.0292 \Delta k$ を添加した場合の原子炉の応答を、それぞれ代表例として示す。

台形パルス運転及び合成パルス運転における 10MW までの高出力の発生は、調整棒の駆動による反応度制御によって安定して行うことが可能であり、また、合成パルス運転におけるトランジェント棒の引抜きによる急速な反応度添加に対しては、単一パルス運転の場合と同様に、炉心の固有の負の反応度フィードバック特性により安定に自己制御される。

これら各運転時の熱的特性を、第 6.2 表に示す。単一パルス運転、台形パルス運転及び合成パルス運転のいずれの場合にも、燃料最高温度はパルス運転に対する熱的制限値の $1,000^{\circ}\text{C}$ を下回っており、原子炉の安全性は確保される。

なお、ここには、台形パルス運転時及び合成パルス運転時の熱特性及び動特性の代表例を示したが、これらのより詳細な解析については、別途報告する予定である。

第 6.1 表 NSRR 炉心半径方向出力ピーキング係数

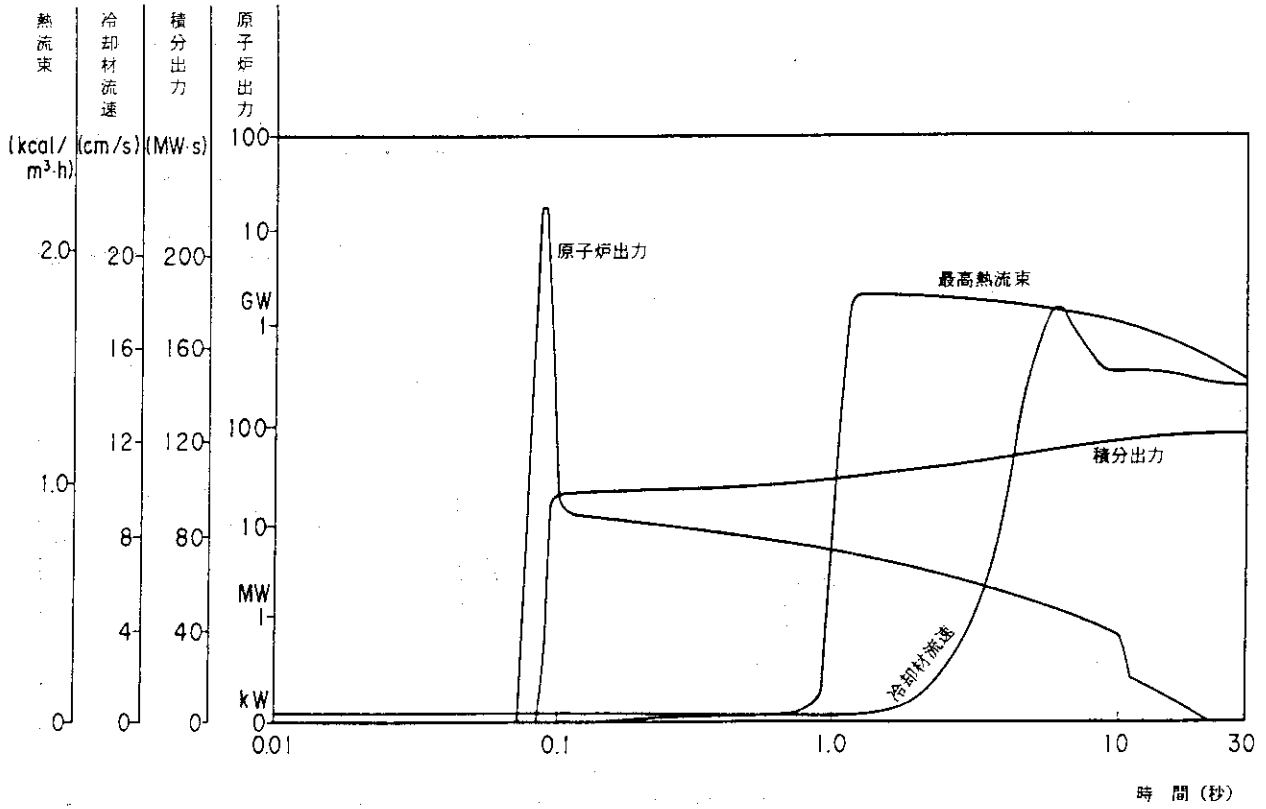
実験孔内の状態	半径方向出力ピーキング係数
実験物無装荷 (中空状態)	1.34
実験物 (- 0.0172 Δk) 装荷	1.33
実験物 (- 0.0365 Δk) 装荷	1.31

第 6.2 表 NSRR 炉心主要熱特性

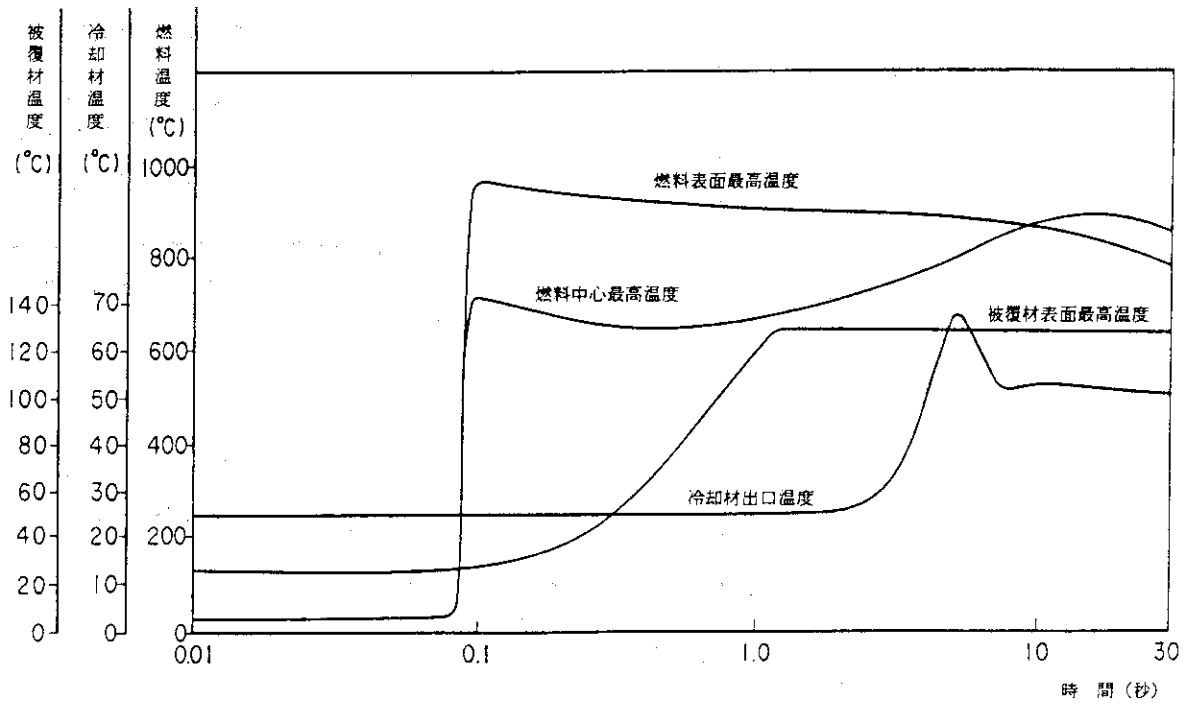
	0.0343 Δk 単一パルス運転時	台形パルス運転時 (*)	合成パルス運転時 (**)
熱出力	約 20,000 MW (瞬間最大)	約 10 MW (最大)	約 9,000 MW (瞬間最大)
炉心冷却材流速	約 17 cm/s (最大)	約 23 cm/s (最大)	約 25 cm/s (最大)
燃料最高温度	約 960 °C	約 880 °C	約 940 °C
被覆材表面最高温度	約 128 °C	約 132 °C	約 133 °C
冷却材炉心出口最高温度	約 67 °C	約 56 °C	約 63 °C

(*) 台形パルス運転時代表例

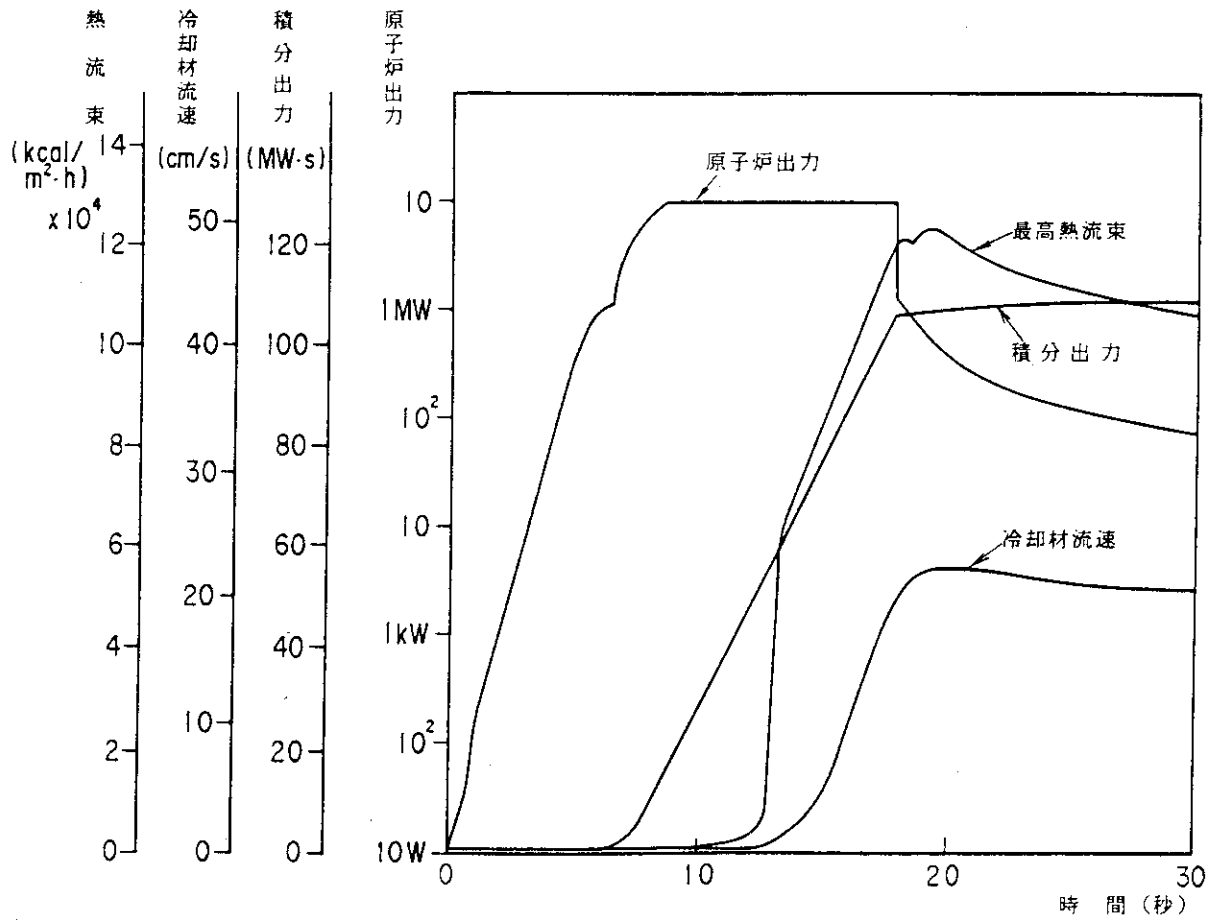
(**) 合成パルス運転時代表例として、10MWの出力を保持した後、トランジェント棒により0.0292 Δk の反応度を挿入した場合



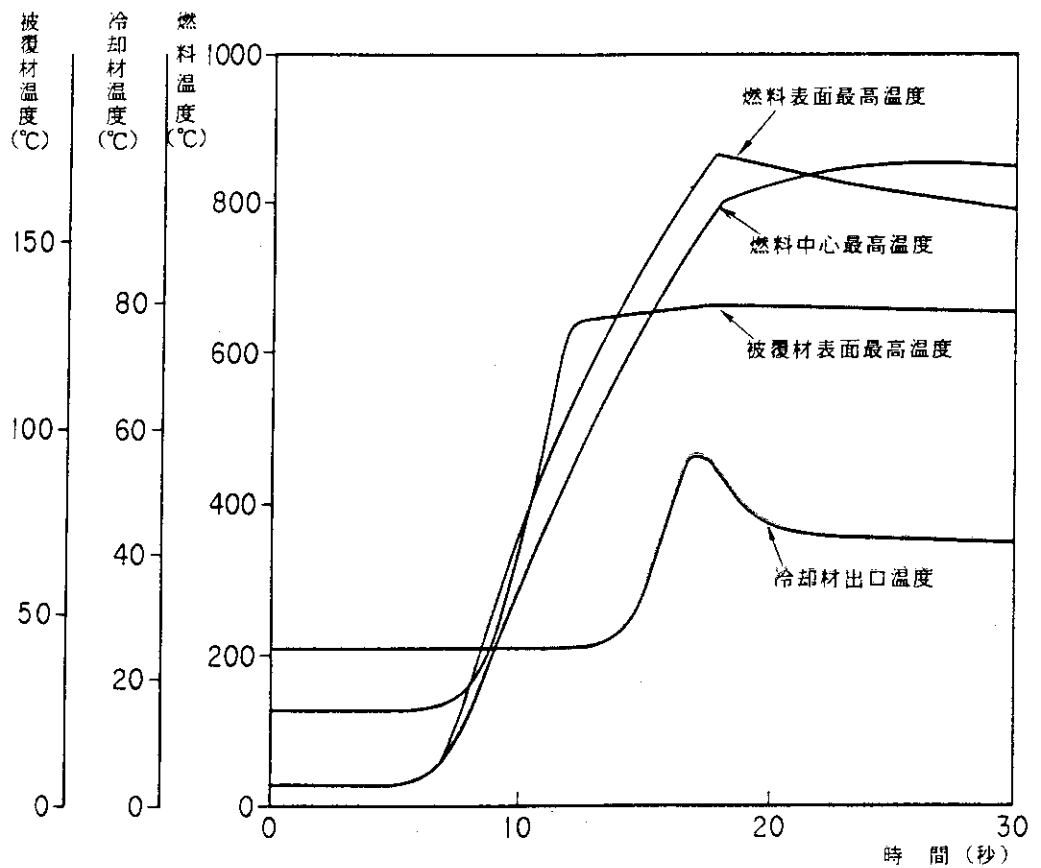
第 6.1(1)図 0.0343 Δk 単一パルス運転時炉心過渡特性



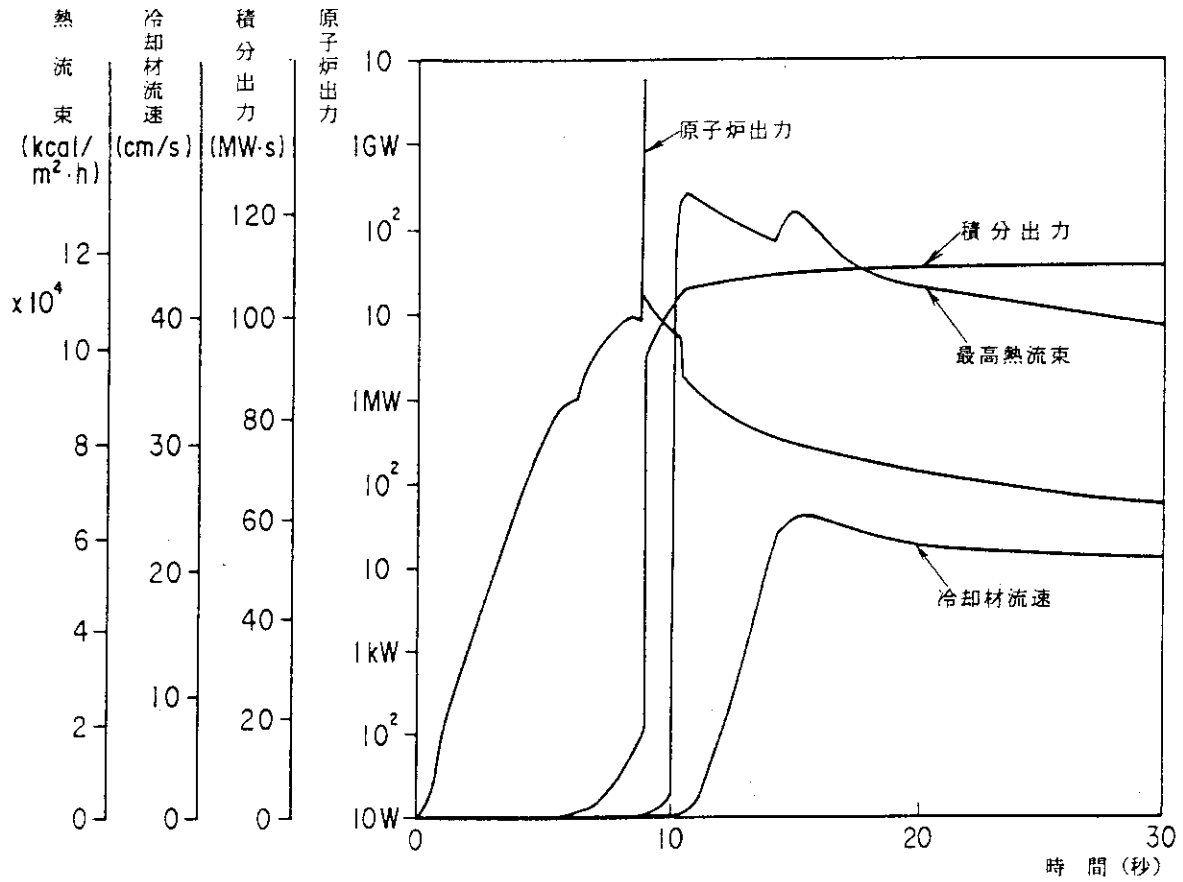
第 6.1(2)図 0.0343 Δk 単一パルス運転時炉心過渡特性



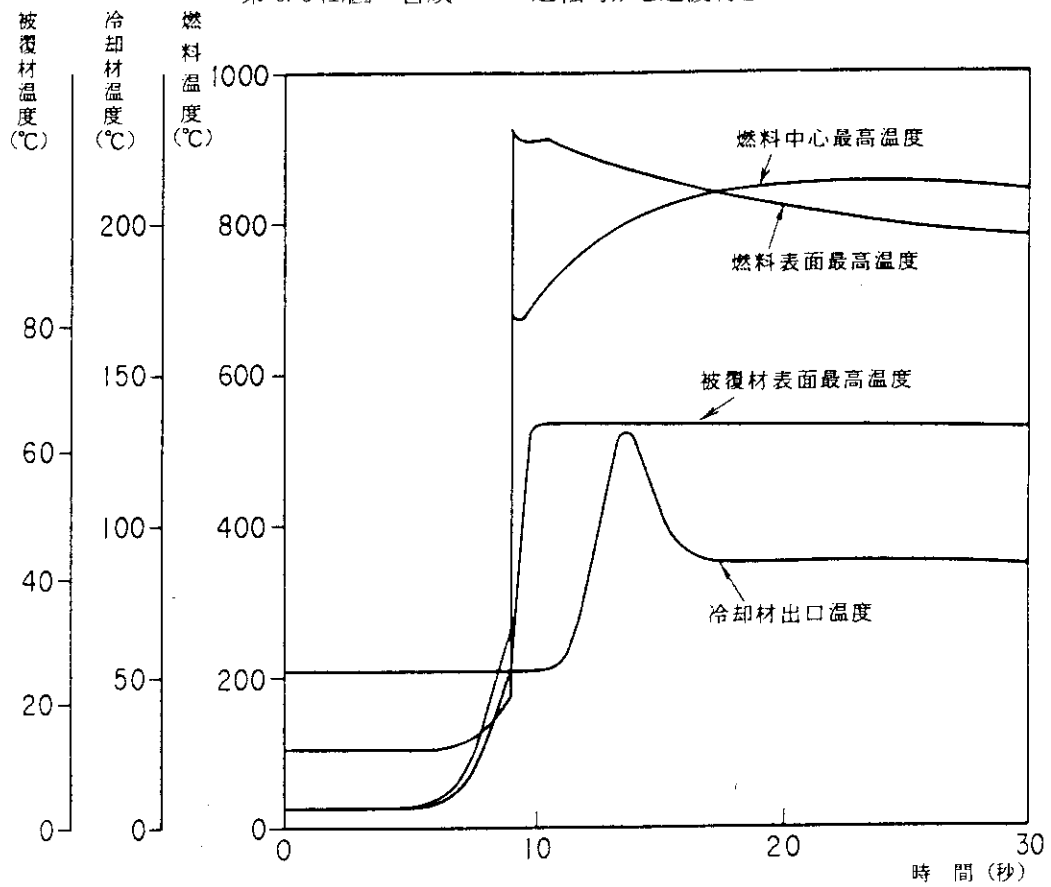
第 6.2 (1) 図 台形パルス運転時炉心過渡特性



第 6.2 (2) 図 台形パルス運転時炉心過渡特性



第 6.3 (1) 図 合成パルス運転時炉心過渡特性



第 6.3 (2) 図 合成パルス運転時炉心過渡特性

7. 結 論

今後の事故時照射済燃料挙動研究のためのNSRR実験に関連し、NSRRの原子炉運転方式として、従来の低出力からの急峻なパルス状出力を発生する単一パルス運転に加え、新たに改良型パルス運転として、10MWまでの高出力を発生する台形パルス運転及び10MWまでの高出力の発生と急峻なパルス状出力の発生を組み合わせる合成パルス運転を行うために、原子炉の安全性を配慮した計測制御系統施設（原子炉計装設備、原子炉制御設備、安全保護回路）の設計方針を固め、これを満足する機能的な同施設の基本設計を行った。また、同施設を用いて行うNSRRの今後の運転に係る動特性解析等を通し、改良型パルス運転が、原子炉の安全性を損うことなく安定して実施しうる見通しを得た。

本作業の成果は、NSRRの原子炉設置変更許可申請に反映され、国の安全審査を経て、昭和62年5月に原子炉設置変更の許可を得ることができた。なお、NSRRの計測制御系統施設の改造工事は、詳細設計に関する国の認可を得た後着手し、昭和63年度末に完了する予定であり、その直後より改良型パルス運転による実験を開始する計画である。

謝 辞

本作業を遂行するに当って、石井敏雄原子炉主任技術者及び斎藤伸三前反応度安全研究室長（現高温工学試験研究炉設計室長）には、貴重な御指導を賜った。また、NSRR管理室及び反応度安全研究室の皆様には、多大の御協力を賜った。ここに上記の各位に対し、深く感謝申し上げます。

7. 結 論

今後の事故時照射済燃料挙動研究のためのNSRR実験に関連し、NSRRの原子炉運転方式として、従来の低出力からの急峻なパルス状出力を発生する単一パルス運転に加え、新たに改良型パルス運転として、10MWまでの高出力を発生する台形パルス運転及び10MWまでの高出力の発生と急峻なパルス状出力の発生を組み合わせる合成パルス運転を行うために、原子炉の安全性を配慮した計測制御系統施設（原子炉計装設備、原子炉制御設備、安全保護回路）の設計方針を固め、これを満足する機能的な同施設の基本設計を行った。また、同施設を用いて行うNSRRの今後の運転に係る動特性解析等を通し、改良型パルス運転が、原子炉の安全性を損うことなく安定して実施しうる見通しを得た。

本作業の成果は、NSRRの原子炉設置変更許可申請に反映され、国の安全審査を経て、昭和62年5月に原子炉設置変更の許可を得ることができた。なお、NSRRの計測制御系統施設の改造工事は、詳細設計に関する国の認可を得た後着手し、昭和63年度末に完了する予定であり、その直後より改良型パルス運転による実験を開始する計画である。

謝 辞

本作業を遂行するに当って、石井敏雄原子炉主任技術者及び斎藤伸三前反応度安全研究室長（現高温工学試験研究炉設計室長）には、貴重な御指導を賜った。また、NSRR管理室及び反応度安全研究室の皆様には、多大の御協力を賜った。ここに上記の各位に対し、深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) M. Ishikawa, T. Inabe: "The Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) in Japan", Advances in Nuclear Science and Technology, Vol. 11, pp. 285 - 334 (1979), Plenum Publishing Corp.
- 2) 伊勢武治, 稲辺輝雄, 中原康明: "NSRR (原子炉安全性研究炉) の炉特性解析", 日本原子力学会誌, Vol. 17, No. 6, pp. 314 - 321 (1975)
- 3) NSRR管理室, 反応度安全研究室: "NSRR臨界および特性試験報告", JAERI-M 6791 (1976)
- 4) S. Saito, T. Inabe, T. Fujishiro, N. Ohnishi, T. Hoshi: "Measurement and Evaluation on Pulsing Characteristics and Experimental Capability of NSRR" J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 14, No. 3, pp. 226 - 238 (1977)