

# 制御棒操作ガイドシステムの開発(2)

系統昇温領域プログラムの開発



1989年3月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 89-052
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

Development of Control Rod Guidance System (2)

Development of system heat-up program

T. Terakado\*, I. Kanda\*, E. Okuda\*\*  
A. Fujiwara\*, K. Ozawa\* and Y. Yamashita

Abstract

Control rod operation guidance system (named Rod Guider) has been developed for the development of the automatic control rod system in experimental reactor Joyo from 1986. The first step of this development was completed. The four sphere's programs (Critical approach, Power ascent, Power adjustment, Power descent) had already been completed and the system heat-up program, remained last sphere's program, was developed continuously. And, Menu program was completed in order to unite five sphere's programs. During the 16th 100 MW duty cycle operation of Joyo, all programs (five sphere's program) were verified. Rod Guider gave adequate guidances for the operators. The results of these developments are following.

- (1) The program of system heat-up had a very good control.
- (2) New functions that give various plant operating guidances to the operators, excepting control rod operating guidance, were good.
- (3) All sphere's programs had a good contact to the menu program.
- (4) All sphere's programs (Critical approach, System heat-up, Power ascent, Power adjustment, Power descent) were completed.

---

\* Operation Section, Experimental Reactor Division, OEC.  
\*\* Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. ロッドガイダーの概要及び開発計画 .....	2
2.1 概 要 .....	2
2.2 開発計画 .....	5
3. 「常陽」の原子炉運転操作 .....	7
4. ロッドガイダープログラムの開発 .....	11
4.1 メニュープログラムの開発 .....	11
4.2 系統昇温プログラムの内容 .....	19
5. 系統昇温プログラムの検証 .....	39
5.1 現在の運転手法 .....	39
5.2 プログラムの検証 .....	39
6. ロッドガイダー第2フェーズへの移行 .....	45
7. 結 言 .....	49
8. 参考文献 .....	50

## 1. 緒 言

制御棒操作ガイドシステム（ロッドガイダー）は、高速実験炉「常陽」の制御棒操作自動化を目指す第1ステップとして開発を始め、昭和61年度に臨海・出力上昇・出力調整・出力下降プログラムの検証を行い、良好なガイダンス機能を実証した。

昭和62年度に系統昇温プログラムを作成し、合わせて5つのプログラムを、メニュープログラムによって統一を図った。

ロッドガイダーは、“軽水炉”や“もんじゅ”等の制御棒操作自動化方式とは異なり、炉内の反応度変化を計算し、目標とする反応度を予測しながら、操作対象制御棒の指示と制御棒操作量の予測を行う特徴を持つ。

系統昇温プログラム作成に於いても、その手法を採用するとともに制御棒操作時に行う他のプラント操作を、適切にガイドする方式も新たに採用した。

これらの機能を、汎用パソコンで実現させた意義は大きく、通常行っている運転員の操作の信頼性が向上した。

本報告書では、系統昇温プログラム及びメニュープログラムの機能について紹介し、100 MW 第16サイクルで、検証した結果について報告する。

## 2. ロッドガイダーの概要及び開発計画

### 2-1 機能概要

ロッドガイダーの開発は、制御棒操作自動化の第1段階として、昭和61年度から開発に着手し、炉心及び冷却系の情報に基づいて、「常陽」の全運転モード（臨界・系統昇温・出力上昇・下降・出力調整）に於いて、制御棒の操作手順・操作量を予測するとともに、各プラント操作時に、運転員が必要とするプラント情報を運転員に提供するシステムである。

本システムは、プラントからのアナログ・デジタル信号計105点をマイクロコンピュータにより、オンラインで演算処理し、制御棒操作量の予測・操作手順及びプラント操作の指示をカラーCRT上に表示するものであり、照射炉としての複雑な炉心構成変更時に於いても、反応度計算データの変更によって対応出来る。

ロッドガイダーシステムの構成図を図2.1に示す。

本システムは、計測制御システム入力装置、データ処理装置（マイクロコンピュータ）、ハードディスク2台、ドットプリンタ、カラーCRT、カラープリンタ、X-Yプロッタ等から構成される。

プラント信号は、計測制御システム入力装置により、2秒間隔のサンプリングタイムで連続的に入力され、データ処理装置で演算・処理し、インタフェースケーブルで接続されたカラーCRT上に、グラフ、計算値が表示される。同時に、プラントからの入力データは、本システムの機能確認、評価プログラムの検証及び今後の開発計画に反映させる為に、ハードディスクに保存され（MTへのSAVEを可能）、オフラインでの処理を可能にしている。また、カラーCRT用のカラープリンタを備え付けており、オフライン処理の幅を広げている。

本システムから得られる情報は、前述の様に各プラント状態に応じた制御棒操作に関するガイダンス及び制御棒操作時に確認を要求されるプラント信号である。特に操作を行うことにより著しく変化し、その変動傾向の監視を必要とする熱出力、核出力、原子炉入口Na温度、反応度については、トレンド表示をし、グラフにてその傾向把握を行う。

プログラムの流れは、図4.1に示す様にまずシステム起動と同時に、自動的に内部プログラムが立上り、各プログラム共通のデータ（反応度、反応度の関数演算、遅発中性子発生割合、崩壊定数、運転制限値等）の入力、演算、記憶そして、各運転モードプログラムを選択する機能を有するメニュープログラムが走り、メニュープログラムの最後のメニュー画面にて、各プログラムを選択する様にする。ファンクション・キーにて選択された運転モードプログラム（臨界・系統昇温・出力上昇・下降、出力調整）により、制御棒操作量の演算・表示、プラントからのデジタル・アナログ信号を用い、運転経験に基づいて構築した運転操作

ガイダンスのロジック出力により、原子炉通常起動・停止曲線に沿ったガイドをする。プラント状態判定後、ENDキーにてメニュー画面に戻る。

原子炉は、温態待機から定格出力運転に至るまでの過程で、未臨界領域・ペリオド領域・出力運転領域の各運転範囲を通過するので運転特性は大きく変化する。そのためロッドガイダーでは、原子炉の通常起動、停止曲線に沿ったスムーズな運転が出来る様に、5つの「運転モード」に分けた。

図 2.2 に、ロッドガイダー運転モードの範囲を示す。

- ① 臨界操作 (Critical Approach) : 温態待機の未臨界状態から、公称臨界レベル (中性子検出器 CH-1 :  $5 \times 10^4$  CPS ) 迄の操作。
- ② 系統昇温 (System Heat Up) : 臨界レベルから、系統温度  $370^\circ\text{C}$  迄の核加熱操作。
- ※③ 出力上昇 (Power Ascent) : 30MW から、100 MW 迄の出力上昇操作。
- ④ 出力調整 (Power Adjustment) : 100MW 定格運転中の燃焼補償操作。
- ※⑤ 出力下降 (Power Descent) : 100MW から 30MW 迄の出力降下。

※③出力上昇については、信頼出来るデータが、30MW から 100 MW 迄しか無いため、30 MW から 100 MW の領域のガイダンスとしている。出力下降についても同様である。

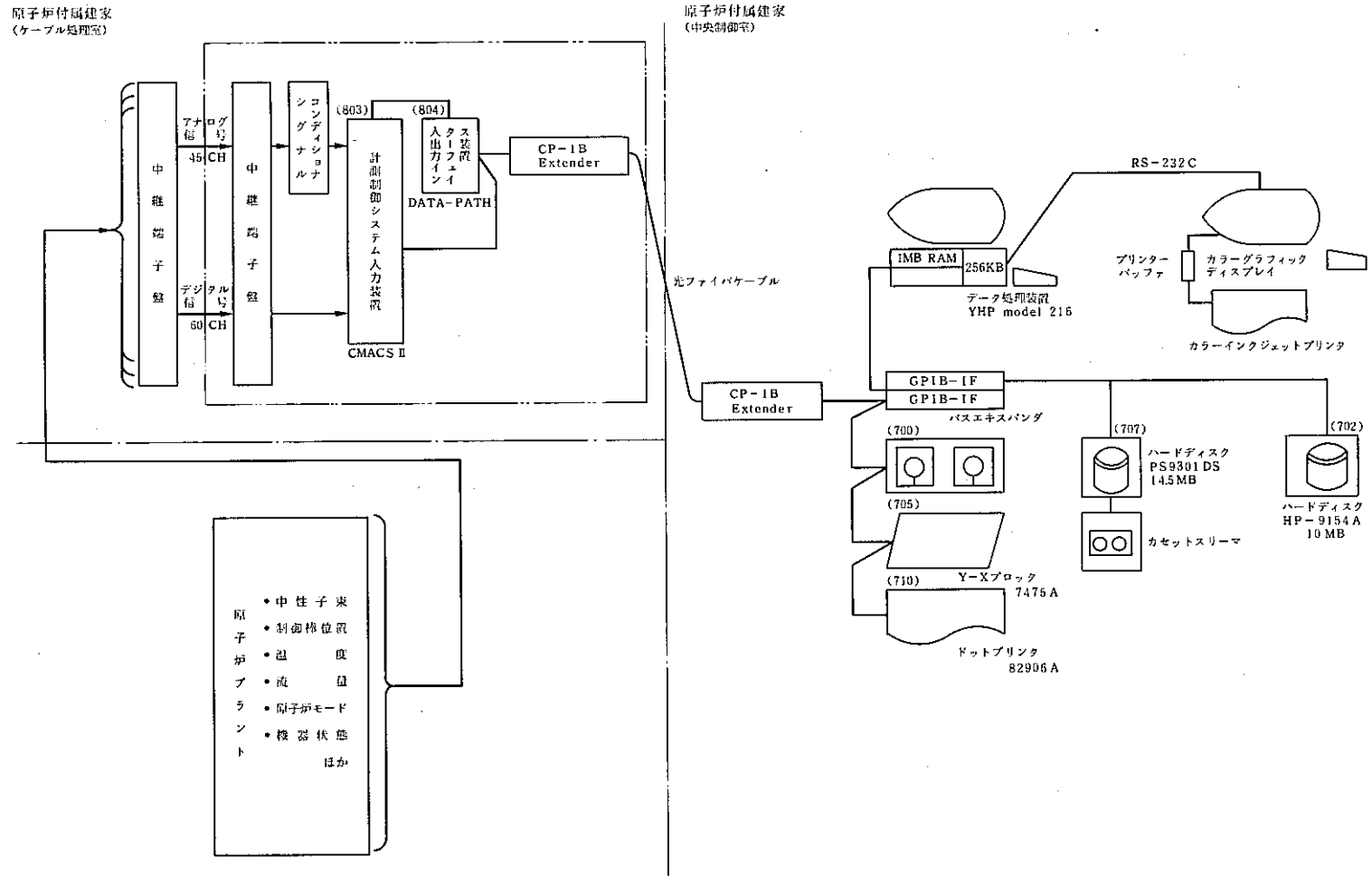


図 2.1 ロットガイダーシステム構成図



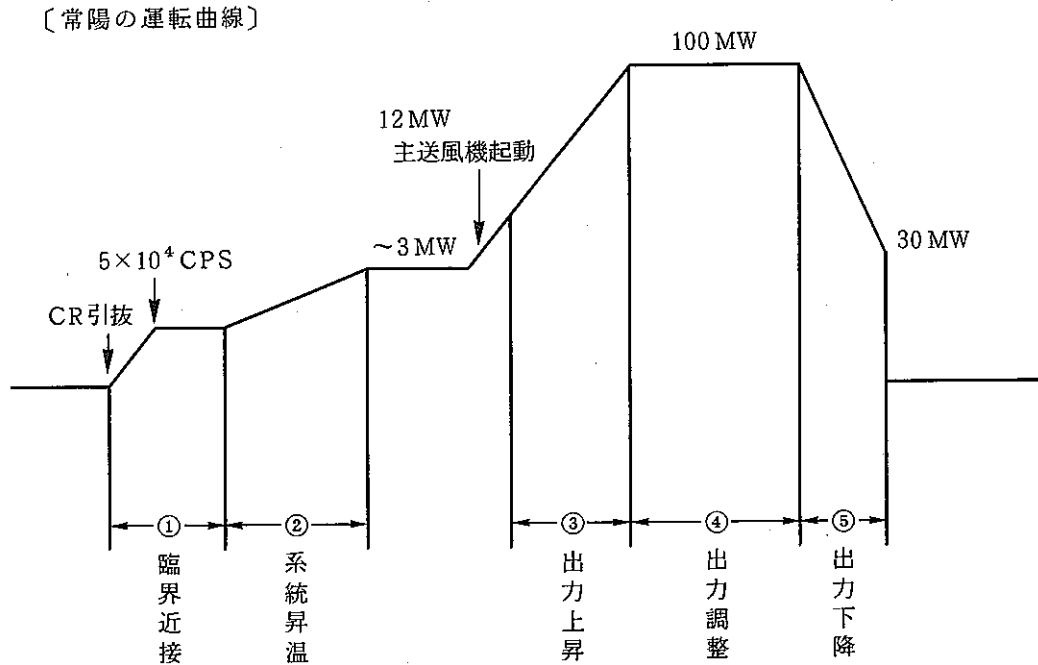


図 2.2 ロッドガイダー運転モードの範囲

## 2.2 開発計画

ロッドガイダーは、図 2.3 に示す様に、昭和61年度から開発に着手し、第1フェーズのガイダンスシステムのソフト（臨界・出力上昇・出力調整・出力下降）の開発・検証を行い、昭和62年度に系統昇温・メニュープログラムの開発・全プログラムの統一を行い、昭和63年度に系統昇温・メニュープログラムの検証を行った。

第2フェーズは、昭和63年度下期より開始し、移行準備を経たのち、シミュレータでのインタロック試験を行う。また、並行して第3フェーズの自動化の設計・検討を行い、平成元年度以降に、自動化への本格的な取組みに入る予定である。

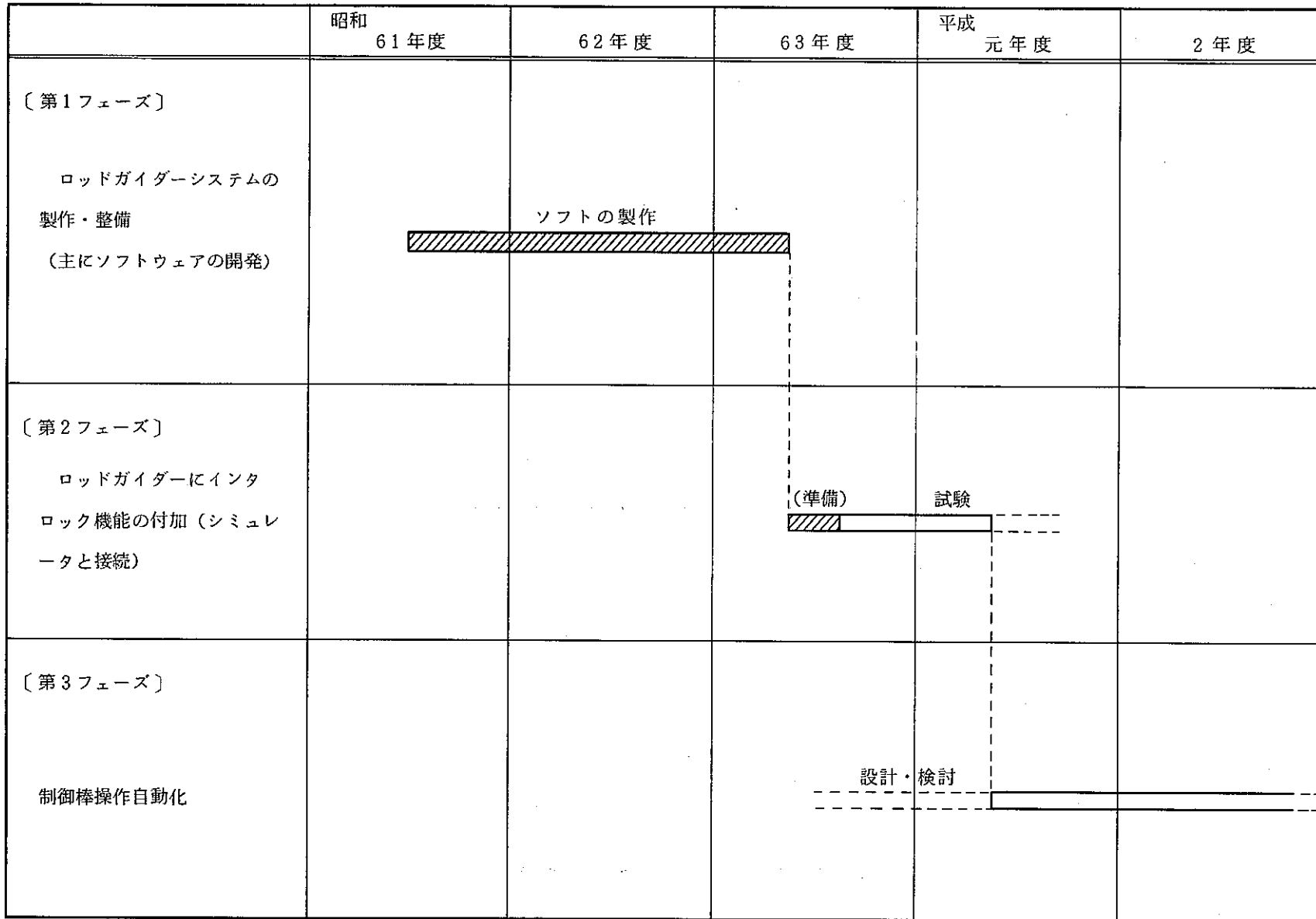


図 2.3 ロッドガイダー開発計画

### 3. 「常陽」の原子炉運転操作

「常陽」の原子炉運転操作は、臨界・系統昇温・出力上昇・出力調整・出力下降の一連のプラント状態を通して、制御棒の手動操作のみで行っている。冷却系に於ける制御棒操作と協調する操作は、12MWでの主冷却器主送風機の起動と主冷却器出口Na温度設定変更による冷却系除熱能力の増加であり、その操作タイミングは、原子炉出口Na温度の変化によって決定される。

図3.1に、原子炉通常起動曲線を示す。

原子炉起動操作は、温態待機（冷却系250℃等温状態）から、運転モードスイッチ「起動」の位置で、制御棒引抜を開始し、制御棒4本臨界予想位置、2本350mmの初期状態にセットする。ここから、計数率逆増倍法により、予測された臨界点1/2の範囲内で制御棒を引抜き、6本均等引抜状態で、公称臨界点 $5 \times 10^4$  CPS安定で臨界となる。この操作は、ペリオド領域であるので、ペリオドの変化に十分注意を要する。

運転モードスイッチを「低出力」に切替え、核計装中間系へ監視を移した後、制御棒引抜を行い、1MW（核出力CH-3）への出力上昇を行う。出力上昇に伴い、出力系レンジスイッチの切替を行う。1MW到達後、冷却系統の昇温操作を開始し、制御棒引抜を約2mm/5分の割合で行い、冷却系統温度を約20℃/hrで昇温させる。昇温中炉容器出口Na温度とオーバフロータンクNa温度の差が80℃を超えない様に注意する。原子炉入口Na温度が367℃に到達したら、昇温を停止する。

昇温終了後、主冷却器ダンパを自動制御に切替え、自然通風による除熱を開始する。12MWへの出力上昇を開始し、2mm/5分（5MW/20分）の割合で、制御棒引抜を行う。この間、主冷却器出口の温度設定は、原子炉入口温度370℃一定となる様に、適宜調整する。

12MW到達後、主冷却器主送風機を起動する。主冷却器主送風機起動後、主冷却器出口Na温度設定を「CAS」モードに切替える。「CAS」モードは、原子炉出口Na温度の変化に伴い、主冷却器出口Na温度設定を、自動的に変更し、原子炉入口Na温度を370℃一定に保つ様に、制御する。

15MW以降は、5MWスラップで、5MW/20分で出力上昇を行う。15MWで中間系から出力系へ監視を切替える。90MWで約7時間燃料のプレコンディショニングを行った後、100MWへ出力上昇する。100MW到達後、主冷却器出口Na温度制御を「AUTO」に切替る。

100MWでの、出力調整は、3回/日の割合で行い、燃焼に伴う反応度補正を行う。

原子炉出力降下は、10MWステップで、10MW/20分（2mm/3分）の割合で、制御棒を挿入する。

12MWで主冷却器主送風機を停止する。1 MW迄，出力降下した所で，手動制御棒一斉挿入を行い，原子炉を停止する。

原子炉運転モードスイッチ

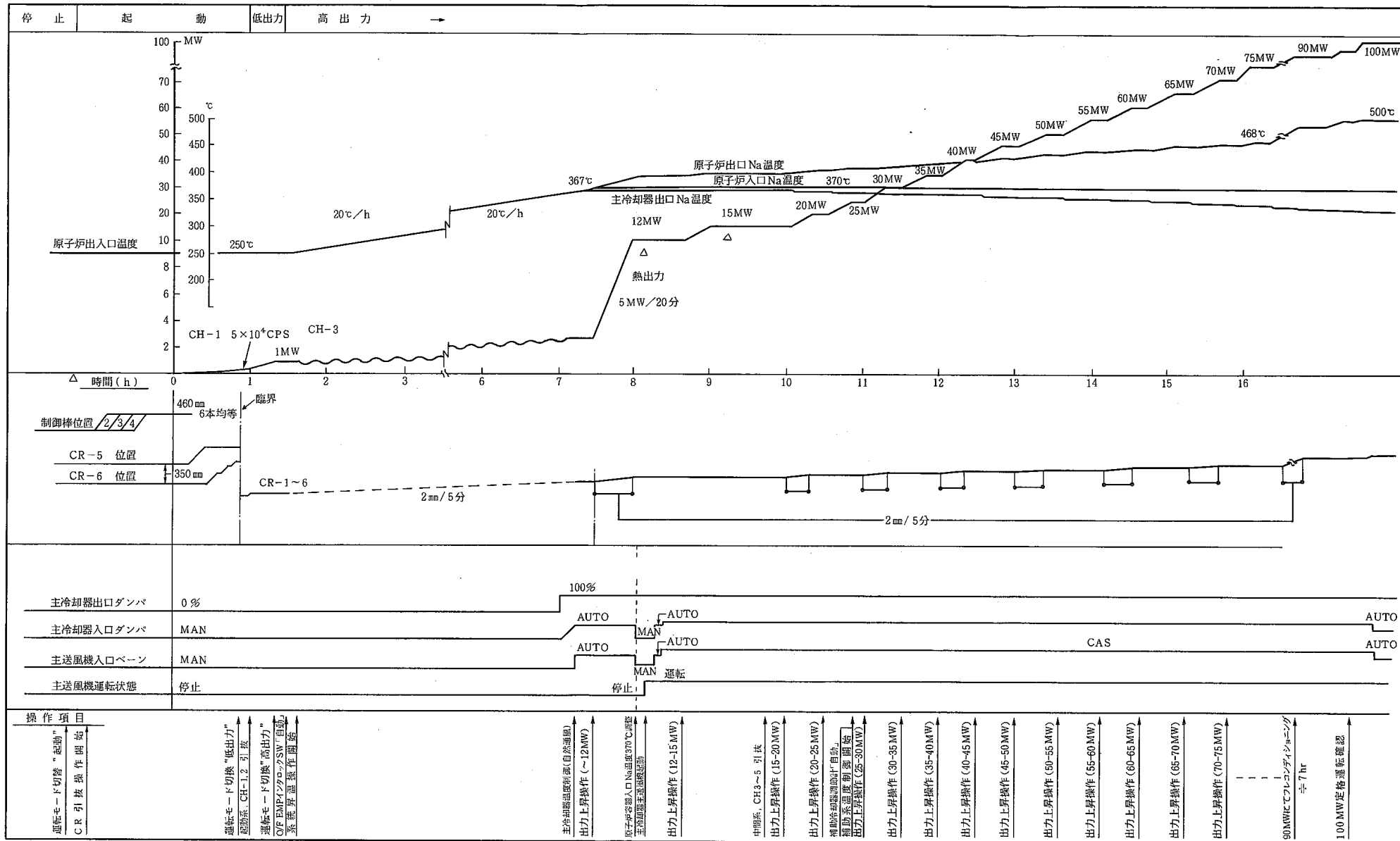


図 3.1 原子炉通常起動曲線

## 4. ロッドガイダープログラムの開発

### 4.1 メニュープログラムの内容

#### (1) 概要

ロッドガイダーは、各運転モードに於いて、現在の原子炉出力から、反応度曲線近似式出力係数近似式の計算等を行い、目標出力迄の制御棒操作量予測値を表示し、運転員に指示するシステムである。従来、この反応度曲線近似式・出力係数近似式等の作成、データ管理は、PC 9801 のオフラインで、実施していたが、これを「メニュープログラム」とし、5つの領域のプログラムと結合させることによりデータ処理装置 model 216 での一貫したデータ処理が可能となった。

メニュープログラムで管理するデータファイル項目を以下に示す。

- ① 制御棒反応度値定数           Data - 1
- ② 制御棒反応度値逆関数       Data - 2
- ③ 出力係数(上昇)・(下降)   Data - 3, Data - 4
- ④ 反応度データ                Data - 5

メニュープログラムは、各運転モードの制御棒操作量計算に用いる反応度のデータを5つのファイルに収納したハードディスクから、データを読み出し、計算・確認を行い、各運転モードプログラムと通信を行うデータ管理機能と、各運転モードプログラムを呼び出すメニュー機能の2つの機能を有する。

上記①～④のデータファイルの内容について、以下に示す。

#### (2) データファイル

##### 1) 制御棒反応度値定数 (Data - 1)

各運転サイクルの制御棒校正(起動初期)時に、技術課にて測定した制御棒1から6の制御棒反応度値定数をハードディスクのData-1 ファイルに入力する。制御棒反応度値定数データは、Data record キーにて、ハードディスク内のData-1 ファイルに格納される。

制御棒校正試験で測定した制御棒反応度値は、次の5次近似式で表わす。

$$h(P) = \sum_{i=0}^5 A_{\text{COEF}}(i) * \rho^i$$

$$(30 \leq P \leq 100)$$

Acoef が、下表のデータである。

本データは、系統昇温・出力上昇・出力調整・出力下降のプログラム中で使用する。

制御棒反応度値データ画面を下表に示す。

セイギョボウ カチ ジョウスウ					
ウンテン サイクル : 16					
C R 1		C R 2		C R 3	
5.0084075E+00		4.5736919E+00		5.0441670E-01	
-6.9499409E-02		-6.4899016E-02		-2.5556827E-02	
2.7888499E-04		2.5734966E-04		1.0852953E-04	
-5.0498703E-07		-4.5338462E-07		-1.7624154E-07	
4.4126507E-10		3.8094340E-10		1.2541851E-10	
-1.5297211E-13		-1.2591316E-13		-3.2180380E-14	
C R 4		C R 5		C R 6	
9.7995135E-01		-2.2846281E+00		-7.1307751E-01	
-3.1278646E-02		3.0685626E-03		-1.1331379E-02	
1.3561510E-04		-2.1725952E-06		5.2107256E-05	
-2.3697636E-07		3.2324394E-08		-7.1288189E-08	
1.9071385E-10		-6.8876388E-11		3.0274644E-11	
-5.9555707E-14		3.9867278E-14		2.0379697E-15	
ウンテン サイクル?					
Next page	Prev page	Calculation	Data confirm	Data record	
SCRATCH	LOAD "	CAT	RE-STORE "	END	

2) 制御棒反応度値逆関数 (Data-2)

炉心に投入された反応度から、制御棒位置を求めるには、1) で得られた制御棒校正曲線の逆関数を求めれば良い。この逆関数データは、1) の定数入力後、Calculationキーにて、逆関数計算をして、得られたものである。逆関数データは、Data recordキーにて、ハードディスク内のData-2 ファイルに格納される。

逆関数の反応度曲線は、次の5次近似式で表わす。

$$\rho (\% \Delta k/k) = f (CR, X) = \sum_{i=0}^5 B_{COEF} (i, CR) \times X^i$$

(但し、CR = 1 ~ 6, 350 ≤ X ≤ 650)

ここで Bcoef は、下表のデータである。

本データは、系統昇温・出力上昇・出力調整・出力下降のプログラム中で使用する。

制御棒反応度係数逆関数データ画面を下表に示す。

ギャクカンスウ データ					
ウンテン サイクル : 16					
C R 1		C R 2		C R 3	
647.803		647.144		647.782	
696.989		733.696		707.151	
1253.357		1415.633		1253.075	
1799.078		2053.501		1718.658	
1352.469		1255.291		1211.220	
410.516		450.758		338.503	
C R 4		C R 5		C R 6	
646.579		647.929		648.079	
763.205		763.579		772.502	
1487.953		1437.804		1475.851	
2152.991		2091.213		2214.672	
1578.428		1554.075		1710.838	
453.557		452.836		523.488	
ギャクカンスウ CR-1 Coef(0)?					
Next page	Prev page	Calculation	Data confirm	Data record	
SCRATCH	LOAD "	CAT	RE-STORE "	END	

[ (1), (2) のデータを確認する。]

制御棒のストローク 300 mm からの 50 mm ステップで 650 mm 迄の制御棒反応度係数と、逆関数のデータを比較し、計算結果の確認を行う。1 画面に制御棒 2 本分のデータを示し、ファンクションキー操作で画面を変え、制御棒 6 本分のデータを確認する。本画面は、Data confirm キー・インにて計算され、CRT 表示する。



下表は、代表して制御棒 1, 2 ( CR-1, 2 ) について示す。

データ カクニン				
C R 1	300 mm	-1.173890861860E+00	→	299.652632544
	350 mm	-9.859972426638E-01	→	350.245922647
	400 mm	-7.589758500800E-01	→	399.629362317
	450 mm	-5.371985828838E-01	→	450.442413069
	500 mm	-3.447392125000E-01	→	499.873546156
	550 mm	-1.911098372038E-01	→	549.520104357
	600 mm	-7.699733632001E-02	→	600.792653563
	650 mm	1.755762450983E-07	→	647.803272847
C R 2	300 mm	-1.196256302460E+00	→	299.240202846
	350 mm	-9.992844186544E-01	→	350.266697893
	400 mm	-7.637854376800E-01	→	399.536994223
	450 mm	-5.346257570306E-01	→	450.642014755
	500 mm	-3.373042125000E-01	→	499.697348054
	550 mm	-1.826738217569E-01	→	549.445125963
	600 mm	-7.166352791999E-02	→	601.118380792
	650 mm	5.686688631101E-08	→	647.143886015
Next page	Prev page			
SCRATCH	LOAD "	CAT	RE-STORE "	END

### 3 ) 出力係数 ( 上昇 ) ・ ( 下降 ) Data-3, Data-4

各運転サイクルの出力上昇・下降時に技術課で測定した出力係数をハードディスク内のData-3, Data-4 ファイルに入力する。出力係数データは、各出力毎の出力係数を入力後、Calcrlationキーにて、計算して、30MWから5 MWステップのデータに補正される。出力係数データは、Data record キーにて、Data-3, Data-4 ファイルに格納される。

出力係数測定で得られた30MWから100 MW ( 5 MWステップ, 15 データ ) の出力係数から最小 2 乗法により、出力係数曲線を以下の 5 次近似式で表わす。

$$CR_{Po} (mm) = g (CR, \rho) = \sum_{i=0}^5 C_{COEF} (i, CR) \times \rho^i$$

Ccoef は、次頁のデータである。

本データは、出力上昇・出力調整・出力下降のプログラム中で使用される。

出力係数データ ( 上昇 ) ・ ( 下降 ) 画面を次頁に示す。

シュツリョク ケイスウ データ (ジョウショウ)

ウンテン サイクル : 16		ウンテン タイプ : 15	
[MW]	[%ΔK/K]	[MW]	[%ΔK/K]
30.88	-6.08E-03	30.00	-5.97E-03
35.70	-5.96E-03	35.00	-6.07E-03
40.93	-5.68E-03	40.00	-5.83E-03
46.17	-5.48E-03	45.00	-5.47E-03
51.49	-5.26E-03	50.00	-5.13E-03
56.34	-4.81E-03	55.00	-4.85E-03
60.86	-4.30E-03	60.00	-4.64E-03
65.68	-4.30E-03	65.00	-4.48E-03
70.59	-4.51E-03	70.00	-4.34E-03
75.46	-4.35E-03	75.00	-4.18E-03
80.31	-4.05E-03	80.00	-4.01E-03
85.18	-3.58E-03	85.00	-3.86E-03
89.86	-3.96E-03	90.00	-3.86E-03
95.11	-4.20E-03	95.00	-4.19E-03

ウンテン サイクル ?

SCRATCH | LOAD " | CAT | RE-STORE " | LIST

シュツリョク ケイスウ データ (カコウ)

ウンテン サイクル : 16		ウンテン タイプ : 15	
[MW]	[%ΔK/K]	[MW]	[%ΔK/K]
32.57	-4.24E-03	30.00	-4.27E-03
37.30	-4.01E-03	35.00	-4.13E-03
42.43	-3.69E-03	40.00	-3.89E-03
47.43	-3.65E-03	45.00	-3.68E-03
52.51	-3.57E-03	50.00	-3.55E-03
57.70	-3.59E-03	55.00	-3.50E-03
62.93	-3.45E-03	60.00	-3.51E-03
67.71	-3.52E-03	65.00	-3.53E-03
72.59	-3.20E-03	70.00	-3.52E-03
77.90	-3.60E-03	75.00	-3.44E-03
82.96	-3.38E-03	80.00	-3.28E-03
87.55	-2.85E-03	85.00	-3.10E-03
92.19	-2.91E-03	90.00	-2.99E-03
96.22	-3.29E-03	95.00	-3.12E-03

ウンテン サイクル ?

Next page | Prev page | Calculation | Data confirm | Data record  
 SCRATCH | LOAD " | CAT | RE-STORE " | END

4) 反応度データ (Data-5)

各運転サイクル開始前に、技術課にて運転監視コード“MAGI”により、反応度計算に用いる動特性パラメータが算出される(制御棒校正用)。その動特性パラメータ値( $\beta$ 値,  $\lambda$ 値)を入力し、Data recordキーにて、ハードディスク内のData-5ファイルに格納する。この反応度データ( $\beta$ 値,  $\lambda$ 値)は、系統昇温において、炉心反応度算出の、演算式に用いられる。

$\beta$  値：遅発中性子発生割合 6群

$\lambda$  値：先行核崩壊定数 6群

本データは、系統昇温プログラムで使用される。

反応度データ画面を下表に示す。

ハンノウド データ		[ $\Delta K/K$ ]	[ $\text{sec}^{-1}$ ]
Beta 1	:	1.253E-04	Rambda 1 : 1.283E-02
Beta 2	:	9.169E-04	Rambda 2 : 3.139E-02
Beta 3	:	7.996E-04	Rambda 3 : 1.272E-01
Beta 4	:	1.607E-03	Rambda 4 : 3.312E-01
Beta 5	:	6.332E-04	Rambda 5 : 1.396E+00
Beta 6	:	1.687E-04	Rambda 6 : 3.777E+00
Beta-t	:	4.251E-03	

ハンノウド Beta 1 ?

Next page		Prev page				Data record
SCRATCH		LOAD "		CAT		RE-STORE "   END

5) 運転制限値データ

出力上昇時は、原子炉出口Na温度の上昇に比べ、オーバフロータンクNa温度の上昇が遅れる特徴がある。よって、出力上昇速度が早まると、その温度差が大きくなるため、運転操作上、制限値が決められており、その制限値内で出力上昇を行うことに決められている。

制限値については、熱的評価により今後変更されることも有るため本システムでは、

制限値変更を可能とし，警報及び操作禁止ガイダンスの基準値として，使用する。

REACTOR OUT Na TEMP - O/F TANK Na TEMP (°C)				
ウンテン セイゲンチ : 80.0°C ウンテン ケイカイチ : 75.0°C				
ウンテン セイゲンチ ?				
SCRATCH	LOAD "	CAT	RE-STORE "	LIST

(3) メニュー画面

反応度等のデータ確認終了後，これから使用する運転モードをファンクション・キーにて選択する。尚，各運転モードプログラム終了後は，END キーにてメニュープログラムの最初に戻る。

==== ROD GUIDER =====	
==== MODE SELECTER =====	
CRITICAL APPRORCH	..... 1
POWER CHANGE	..... 2
POWER UP	..... 3
POWER DOWN	..... 4
SYSTEM HEAT UP	..... 5
WHICH MODE SELECT ?	

メニュープログラムのフローチャートを図 4.1 に示す。

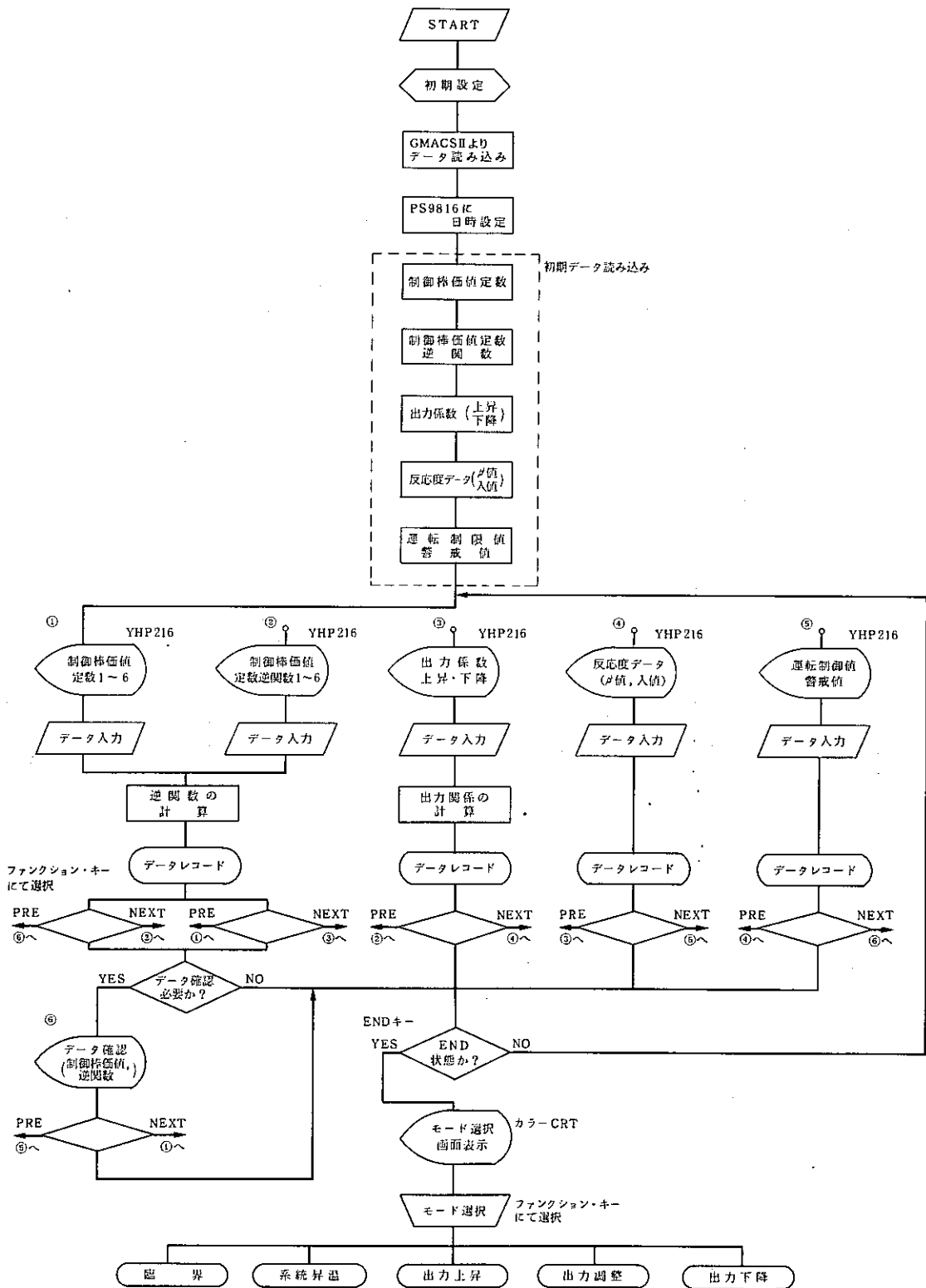


図 4.1 メニュープログラム フローチャート

#### 4-2 系統昇温プログラムの開発

系統昇温は、原子炉出力上昇過程において、原子炉臨界状態（約 250℃）から、1次冷却系のNa温度を、370℃迄上昇させる操作で、昇温に必要な制御棒操作量を、中性子検出器、原子炉入口Na温度、反応度定数等のパラメータより算出し、カラーCRT上に、グラフィック表示させる。

##### (1) 計算内容とプログラムの流れ

図 4.2 に、計算の流れを、図 4.3 に系統昇温プログラムフローチャートを示す。

##### 1) 炉心反応度計算

炉心反応度を計算するには、炉内の実際の生データ核出力CH-3の瞬時値をサンプリングし、計算に用いている。

反応度の計算は、Inverse Kinetics 法による原子炉動特性方程式を採用した。<sup>1)</sup>

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{\rho(t) - \beta t}{\lambda} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot Ci(t) + S \\ \frac{dCi(t)}{dt} &= \frac{\beta_i}{\lambda} n(t) - \lambda_i \cdot Ci(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

上記 2 式が、基本方程式である。

(1)式より、時間幅（サンプリング時間） $\Delta t$  間隔の 2 点の中性子束を  $n_{j-1}, n_j$  とすると、

$$\alpha_{j-1} = \ln(n_j/n_{j-1}) / \Delta t \dots\dots\dots (2)$$

$$A_{i,j} = A_{i,j-1} e^{-\lambda_i \cdot \Delta t} + (n_j - n_{j-1} e^{-\lambda_i \cdot \Delta t}) / (\alpha_{j-1} + \lambda_i) \dots\dots\dots (3)$$

$$\rho_j = \beta_t + \lambda \alpha_{j-1} - \frac{1}{n_j} \cdot \sum_i \beta_i (n_{j-1} e^{-\lambda_i \Delta t} + \lambda_i \cdot A_{i,j}) \dots\dots\dots (4)$$

- ここでは、 $\lambda_i$  : 先行核崩壊定数（6群）
- $\beta_i$  : 遅発中性子発生割合（6群）
- $\beta_t$  : " 6群 total
- $\rho$  : 反応度
- $\rho_j$  : 現在の反応度
- $\rho_{j-1}$  :  $\Delta t$  (sec) 分前の反応度
- $\Delta t$  :  $t_j - t_{j-1}$  (サンプリング時間) とする。

本プログラムでは、演算スピード向上の為、簡略化し、

$$\alpha_{j-1} = (m_j - \frac{m_j^2}{2} + \frac{m_j^3}{3} - \frac{m_j^4}{4} + \frac{m_j^5}{5}) / \Delta t \dots\dots\dots (5)$$

(2)式のテイラー展開)

$$m_j = \frac{n_j}{n_{j-1}} - 1 \dots\dots\dots (6)$$

$$A_{ij} = A_{i,j-1} e^{-\lambda_i t} + \frac{1}{\alpha_{j-1} + \lambda_i} (n_j - n_{j-1} e^{-\lambda_i t}) \dots\dots\dots (7)$$

$$A_{i,0} = \frac{n_0}{\lambda_i}$$

$$\therefore \rho_j = \beta_c - \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot \lambda_i \cdot A_{ij} \dots\dots\dots (8)$$

とした。

2) 必要反応度投入量計算

系統昇温は、1 KWから1 MW迄の出力上昇時では、ペリオド一定制御、1 MW 到達後の系統温度 250 °Cから 370 °C迄の昇温では、出力一定制御という異なった2種の領域を有するため、炉心への投入反応度制御式もおのずと異なってくる。

SN9410 87-100で既報したPNC作成の自己制御演算式(PC-9801Eにて、シミュレーション試験済)を採用し、投入反応度量の計算を行った。

① [1 KW→1 MW迄の出力上昇]

この範囲は、ペリオド領域から、熱的フィードバックのかかる出力領域へ移行する領域であり、前半は、反応度を一定とする領域で後半は、出力を一定とする制御を必要とする。

制御演算式は、PC9801Eを用いたシミュレーション試験にて、決定された下記の式を用いる。

$$\Delta\rho = \left(1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)\right)^\alpha \rho_0 - \rho_j \quad (\% \Delta k/k)$$

ここで、

$\Delta\rho$  : 制御棒操作により投入する反応度 ( $\Delta k/k$ )

$n$  : 中性子束 CH-3の移動平均値(%)正規化定数  $N=10$

$n_0$  : 目標出力 CH-3で 1 (%)

$\rho_0$  : ペリオド 100 秒に相当する反応度 ( $\Delta k/k$ )

$\rho_j$  : 現在の炉心反応度 ( $\Delta k/k$ )

$$n = \frac{9}{10} \cdot n + \frac{1}{10} \cdot n' \quad n' \text{ は、CH-3の瞬時値}$$

$$\rho_0 = \sum_{i=1}^6 (\beta_i / 1 + \lambda_i T)$$

T : ペリオド100(sec)

ここで、式(1)は、nの低い領域では、 $\rho_0$ にほぼ近い反応度が炉心に投入されることになる。一方出力が上昇し、nと $n_0$ の差が小さくなると、( )の中は、零に近くなり、 $\Delta\rho$ の値は小さくなり、1 MWへ収束する。定数 $\alpha$ は、出力上昇速度にブレーキをかけるタイミングをはかる定数である。

② 250℃→370℃への系統昇温

系統温度の低い領域では、20℃/hrの温度変化率一定制御、370℃近傍では、370℃一定制御が要求されるため、①同様に、異なる制御方式が一つの領域に存在することになる。

制御演算式は、PC-9801Eを用いたシミュレーション試験にて決定された下記の式を用いる。

$$\Delta\rho = \left(1 - \left(\frac{T_{IN} - 250}{117}\right)^r\right) \rho_T \quad (\% \Delta k/k)$$

ここで、 $\Delta\rho$  : 制御棒操作により、投入する反応度 ( $\Delta k/k$ )

$T_{IN}$  : 原子炉入口Na温度(℃)

$\rho_T$  : 温度係数\*1 ( $\Delta k/k/6$ 分) [20℃/hrに相当]

r : 制御定数 20

つまり、 $T_{IN}$ が250℃に近い領域では、 $\Delta\rho = \rho_T$ の反応度を投入し、 $T_{IN}$ が367℃に近い領域では、( )内が零に近づき、 $\Delta\rho$ は、ほぼ零となり、367℃に収束する。

定数rは、昇温の制御をする定数であり、20を超えるとオーバーシュートしてしまい又、10では、367℃到達直前が緩慢となるので、結果的に、最適定数を20とした。

\*1 温度係数とは系統温度を1℃変化させるのに費やす投入反応度量であり、常陽では系統昇温時に測定している。

100MW 第16サイクルでの検証時は、第13、14サイクルの温度係数 $4.0 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/^\circ C$  (20℃/hr相当で、6分おきの反応度投入で使用するので、 $8.0 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/6$ 分)を採用した。

100MW 第16サイクルの実績では、炉心構成の違いにより温度係数が、 $4.15 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/^\circ C$  ( $8.3 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/6$ 分)であった。

次に算出した制御棒反応度値の逆関数を求め、現在の制御棒位置(mm)を算出する。

$$CR_{PO} = \sum_{i=0}^5 A_{COEF}(i) \times \rho^i$$

$CR_{PO}$  : 現在の制御棒位置 (mm)



$\rho$  : 制御棒反応度値 ( $\Delta k/k$ )

逆関数の定数を 3-1(1)(2)に示す。

先に算出したトータル反応度の逆関数を出し、制御棒の予測位置 (mm) を出す。

$$CR_{pre'} = \sum_{i=0}^5 A_{COEF}(i) \times \rho_T (\Delta k/k)$$

$CR_{pre'}$  : 制御棒の予測位置 (mm)

$\rho_T$  : トータルの反応度 ( $\Delta k/k$ )

### 3) 制御棒位置予測計算

制御棒反応度値曲線を用いて、制御棒操作により、投入された反応度に、炉心反応度を加えたトータル反応度を算出し、逆関数により、制御棒位置予測を行う。

常陽では、各運転サイクルの起動時 (BOC) に制御棒校正を行い、運転に必要な制御棒反応度値を測定する。制御棒反応度値曲線は、5次多項式近似で得られる。制御棒校正近似式を以下に示す。

$$\rho (\% \Delta k/k) = f(CR) = \sum_{i=0}^5 CR_{COEF}(i,R) \times X^i$$

ここで、 $\rho$  は、制御棒値、 $R$  は、制御棒番号、 $X$  は制御棒位置を表す。

100 MW 第16サイクルの制御棒反応度値定数を P. 15 に示す。

そして、算出した制御棒値  $\rho$  に、必要投入反応度  $\Delta\rho$  を加えたトータルの反応度を算出する。トータルの反応度算出式を以下に示す。

$$\rho_T = \rho + \Delta\rho \quad (\Delta k/k)$$

### 4) 制御棒操作量の計算

3) で算出された制御棒予測位置  $CR_{pre}$  (mm) から現在の制御棒位置 (mm) を差し引いた値を制御棒操作量とする。制御棒操作量算出式を以下に示す。

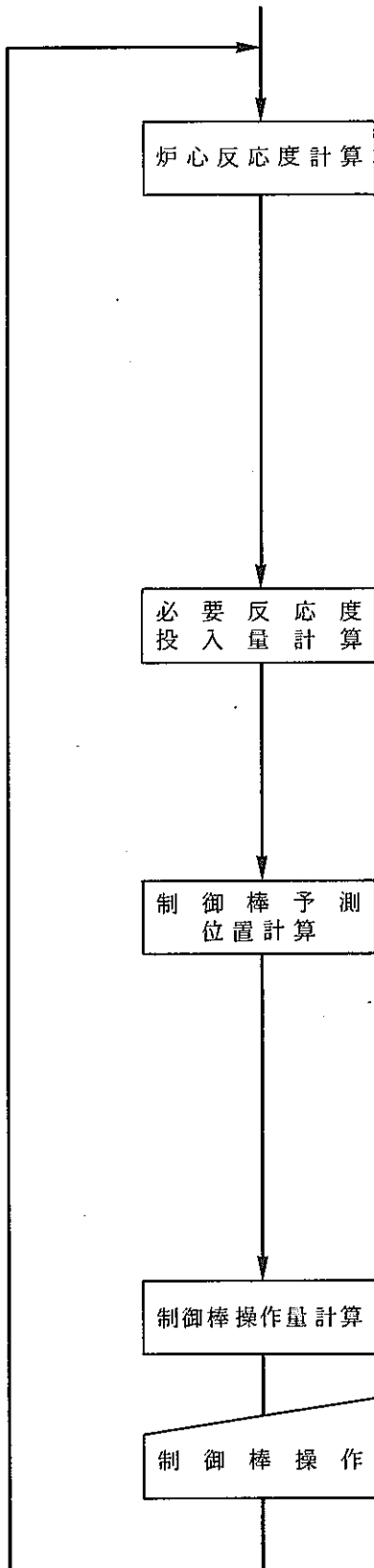
$$\Delta CR = CR_{pre} - CR_{Po} \quad (\text{mm})$$

#### (2) 制御棒操作順位並べ換え

制御棒操作順位並べ換えのフローチャートを、図 4.4 に示す。

ここに示す様に、ディスプレイ上には、操作順番及びそれに対応する「制御棒番号」と「制御棒操作量」を、現在の制御棒位置指示量の少ない順に表示する。

制御棒操作量の配分方法は、各制御棒共に 2 mm を制限とする。



$$\alpha_{j-1} = \left( m_j - \frac{m_j^2}{2} + \frac{m_j^3}{3} - \frac{m_j^4}{4} + \frac{m_j^5}{5} \right) / \Delta t$$

$$m_j = \frac{n_j}{n_{j-1}} - 1$$

$$\rho_j = \beta - \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot \lambda_i \cdot A_{ij}$$

$$A_{ij} = A_{i \cdot j-1} e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{1}{\alpha_{j-1} + \lambda_i} (n_j - n_{j-1} e^{-\lambda_i \Delta t})$$

$$A_{i,0} = \frac{n_0}{\lambda_i}$$

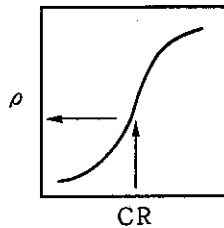
[ 1kW → 1MW ]

$$\Delta \rho = \left( 1 - \left( \frac{n}{n_0} \right)^\alpha \right) \rho_{50} - \rho_j$$

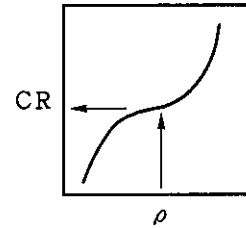
[ 250°C → 370°C ]

$$\Delta \rho = \left( 1 - \left( \frac{T_{IN} - 250}{117} \right)^\alpha \right) \rho_T$$

制御棒反応度値



逆関数



$$\rho = \sum_{i=0}^5 CR_{COEF}(i, R) \times X^i$$

$$CR_{PO} = \sum_{i=0}^5 A_{COEF}(i) \times \rho^i$$

$$\rho_T = \rho + \Delta \rho$$

$$CR_{PRE} = \sum_{i=0}^5 A_{COEF}(i) \times \rho_T^i$$

$$\Delta CR = CR_{PRE} - CR_{p0}$$

図 4.2 系統昇温の計算フロー

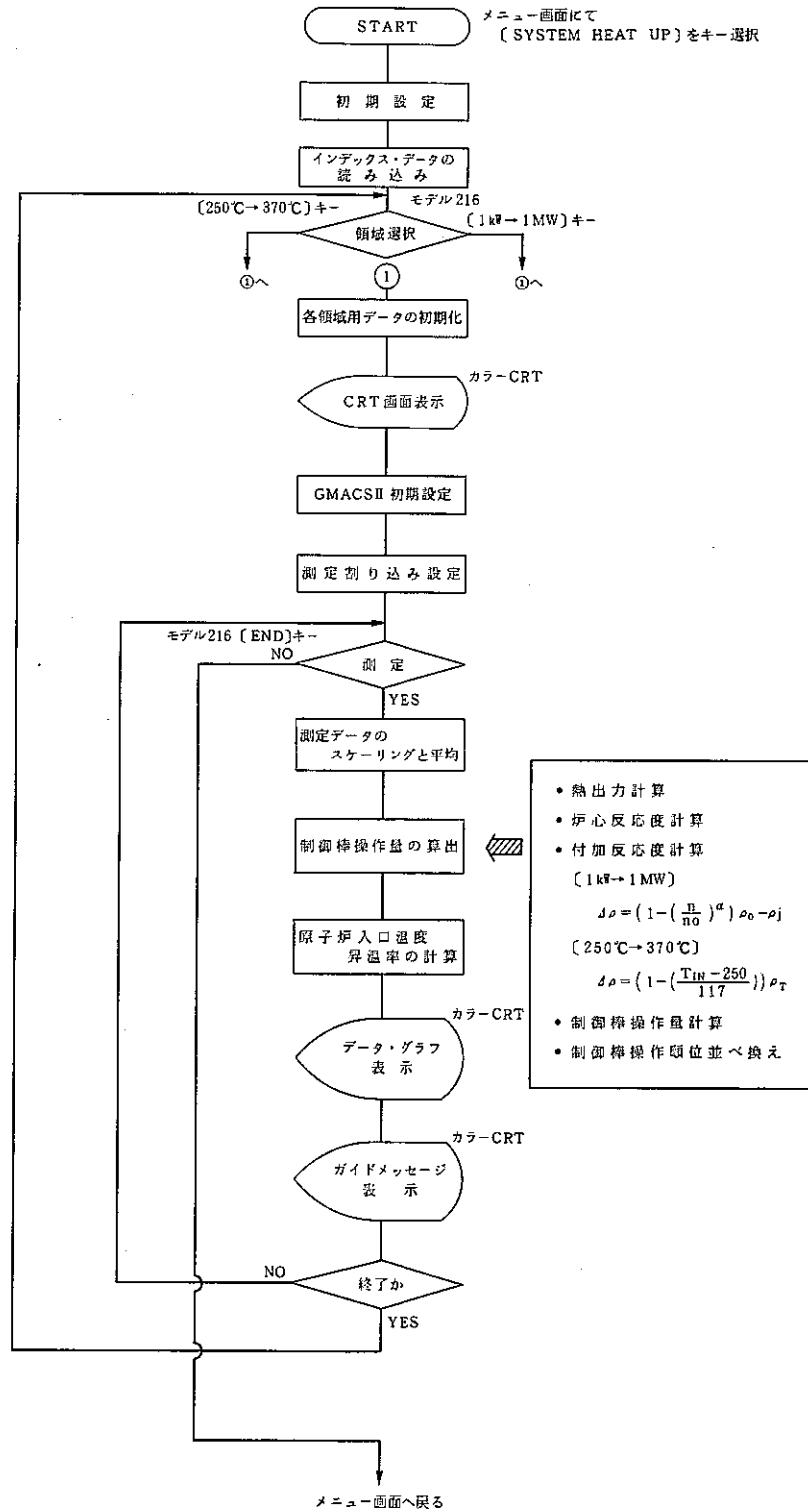


図 4.3 系統昇温プログラムフローチャート

(例) 制御棒操作順位並べ換え

〔mm〕		
1	CR-2	2.0
2	CR-3	2.0
3	CR-5	1.4
4	CR-4	0
5	CR-1	0
6	CR-6	0

➔

〔mm〕		
1	CR-3	2.0
2	CR-5	1.4
3	CR-4	0
4	CR-1	0
5	CR-6	0
6	CR-2	0

(1回目の引抜  
CR-2を2.0mm引抜く)

(CR-2が最下位になり  
他が1つずつ繰り上がる)

付加反応度 ( $\Delta\rho$ ) から算出したCR引抜量が、2.0 mmを超えた場合、2.0 mmだけを引抜いたと仮定し、投入される制御棒反応度を制御棒校正曲線から算出して、現在の全制御棒投入反応度に加える。その後、再び操作手順の2本目に選択された制御棒により、引抜操作量を算出する。2本目の2.0 mm引抜きでも未だCR引抜量が足りない場合は、3本目、4本目と順次同様に算出して表示する。

(3) ガイダンス項目

系統昇温は、高温・高出力の安定領域への移行操作であり、プラントとしては、特に監視項目や、操作が繁雑になってくる為、今回ガイダンスロジックを構築し、運転員に対して、制御棒操作以外のプラント操作をタイミング良く指示する方式を採用した。今後の制御棒操作自動化に反映するためにも重要な手法である。

〔1 KW→1 MW〕画面のガイダンス16項目を表 4.1 に、〔250℃→370℃〕画面のガイダンス11項目を表 4.2 に示す。

ロッドガイダーは、原子炉通常運転操作に対するガイドであるため、ガイダンスの項目は、高速実験炉「常陽」運転操作マニュアル原子炉運転編「原子炉通常起動操作」に即した内容とした。尚、カラーCRT上に出力されるガイダンス項目は、ホストコンピュータに日本語機能が無い為、英語表示となる。

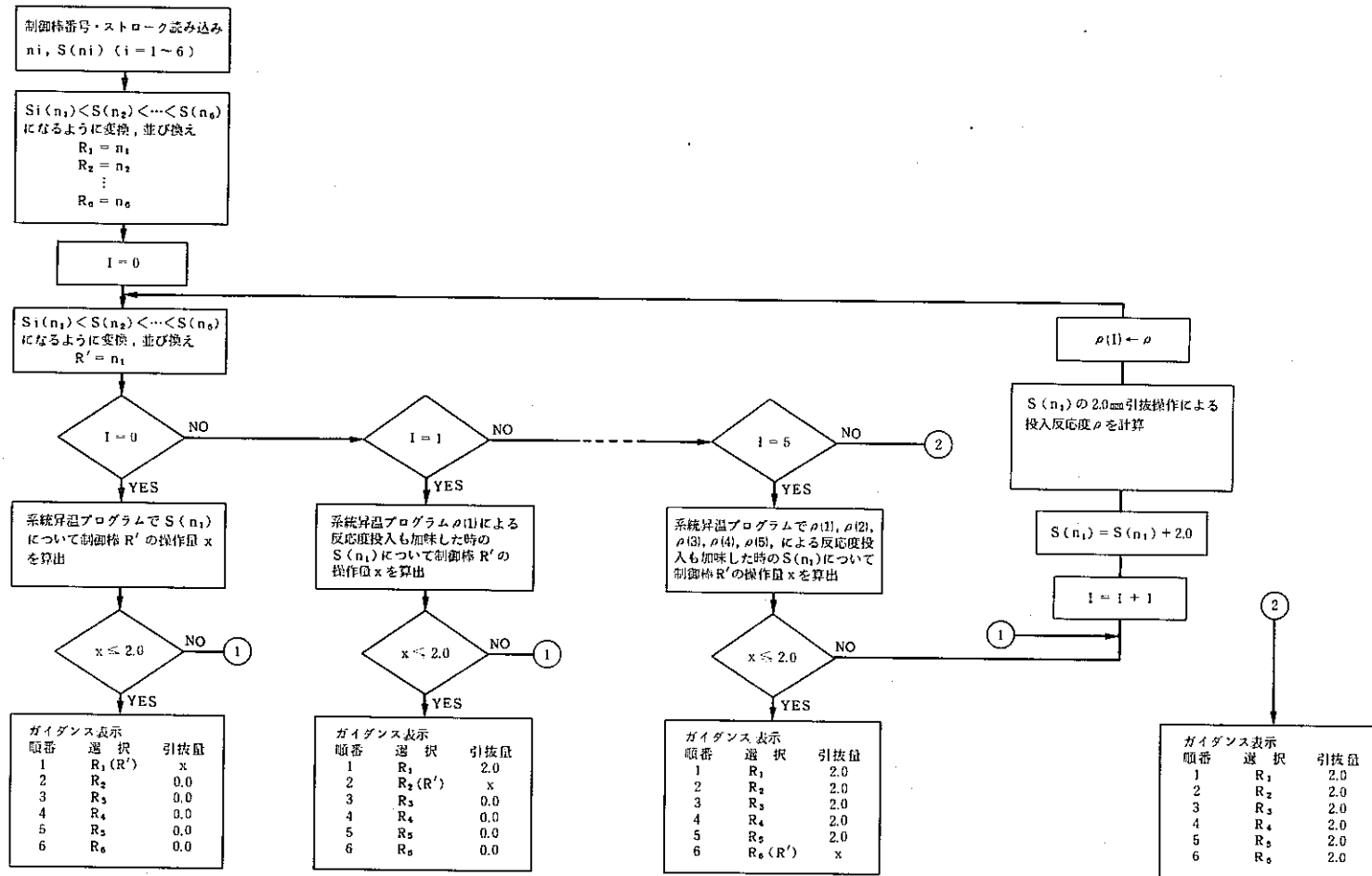


図 4.4 制御棒操作順位並べ換えフローチャート

表 4.1 &lt;1 KWから1 MW迄の出力上昇&gt;画面のガイダンス項目

	カラーCRT出力	ガイダンスの内容
1	CHANGE OPERATION MODE SW FROM START UP TO LOW POWER	運転モードスイッチを「起動」から「低出力」に切替える事を指示する。
2	OPERATION MODE SW LOW POWER	運転モードスイッチを「低出力」に切替えた。
3	WITHDRAW SRM CH-1, 2 FROM LOWER TO UPPER	起動系CH-1, 2を「下限」から「上限」迄、引抜く事を指示する。
4	SRM CH-1, 2 UPPER	起動系CH-1, 2が「上限」に達した。
5	CHANGE PRM RANGE SW POSITION FROM 0.125 TO 0.35 : UP	出力系レンジスイッチを「0.125」から「0.35」に切替える事を指示する。
6	PRM RANGE SW POSITION 0.35	出力系レンジスイッチが「0.35」に切替った。
7	CHANGE PRM RANGE SW POSITION FROM 0.35 TO 1.25 : UP	出力系レンジスイッチを「0.35」から「1.25」に切替える事を指示する。
8	PRM RANGE SW POSITION 1.25	出力系レンジスイッチが「1.25」に切替った。
9	CHANGE PRM RANGE SW POSITION FROM 1.25 TO 3.5 : UP	出力系レンジスイッチを「1.25」から「3.5」に切替える事を指示する。
10	PRM RANGE SW POSITION 3.5	出力系レンジスイッチが「3.5」に切替った。
11	CHANGE PRM RANGE SW POSITION FROM 3.5 TO 1.25 : DOWN	出力系レンジスイッチを「3.5」から「1.25」に切替える事を指示する。
12	ARRIVED AT NEUTRON POWER 1MW	核出力1 MWに到達した。
13	OPERATION MODE SW HIGH POWER	運転モードスイッチを「高出力」に切替えた。
14	CHANGE O/F SYSTEM SW FROM MAN TO AUTO	オーバフロー系インタロックスイッチを「手動」から「自動」に切替える事を指示する。
15	O/F SYSTEM SW AUTO	オーバフロー系インタロックスイッチが「自動」に切替った。
16	STOP CR MANIPULATION CHECK PERIOD	ペリオド100秒以下の反応度が炉心に投入されたので、制御棒引抜を停止し、ペリオドをチェックする事を指示する。

表 4.2 &lt; 250 °C から 370 °C 迄の系統昇温 &gt; 画面のガイダンス項目

	カラー-CRTの出力	ガイダンスの内容
1	CAUTION R/V Temp - O/F TANK Temp >= 75 C OVER	原子炉容器出口Na温度—オーバフロータンク Na温度の差が、警戒値75°Cを超えた。
2	LIMITED R/V Temp - O/F TANK Temp >= 80 C OVER	原子炉容器出口Na温度—オーバフロータンク Na温度の差が、制限値80°Cを超えた。
3	CHANGE PRM RANGE SW POSITION FROM 3.5 TO 12.5 : UP	出力レンジスイッチを「3.5」から「12.5」に 切換える事を指示する。
4	PRM RANGE SW POSITION 12.5	出力系レンジスイッチが「1.25」に切換った。
5	CHANGE PRM RANGE SW POSITION FROM 12.5 TO 3.5 : DOWN	出力系レンジスイッチを「1.25」から「3.5」 に切換える事を指示する。
6	PRM PANGE SW POSITION 3.5	出力系レンジスイッチが「3.5」に切換った。
7	CHANGE PRM RANGE SW POSITION FROM 1.25 TO 3.5 : UP	出力系レンジスイッチを「1.25」から「3.5」 に切換える事を指示する。
8	CHANGE PRM RANGE SW POSITION FROM 3.5 TO 1.25 : DOWN	出力系レンジスイッチを「3.5」から「1.25」 に切換える事を指示する。
9	ARRIVED AT TEMP. 367 C	原子炉入口Na温度が367°Cに到達した。
10	TEMP INC. RATE LIMIT OVER !	系統昇温率20°C/hr を超えた。
11	STOP CR MANIPULATION CHECK PERIOD	ペリオド 100 秒以下の反応度が炉心に投入さ れたので、制御棒引抜を停止し、ペリオドを チェックする事を指示する。

## ( 3.1 ) &lt; 1 KW → 1 MW &gt; ガイダンス画面

## 1) 運転モードスイッチ「起動」から「低出力」への切替え

運転モードスイッチ「起動」から「低出力」への切替え表示ブロック図を図 4.5 に示す。ここで示す様に、運転モードスイッチ「起動」で、公称臨界レベル  $5 \times 10^4$  cps を超え、かつ、CH-3, 4, 5 の 3 CH が共に  $1 \times 10^{-3}$  % を超えるのを待って、表示させる。運転モードスイッチ切替表示後、モードスイッチを低出力にすると、その表示を消し、「運転モードスイッチ「低出力」」を表示し、20秒後自動リセットする。

また、低出力モードへの切替えは、ロッドガイダーで判断し、指示してから運転員が操

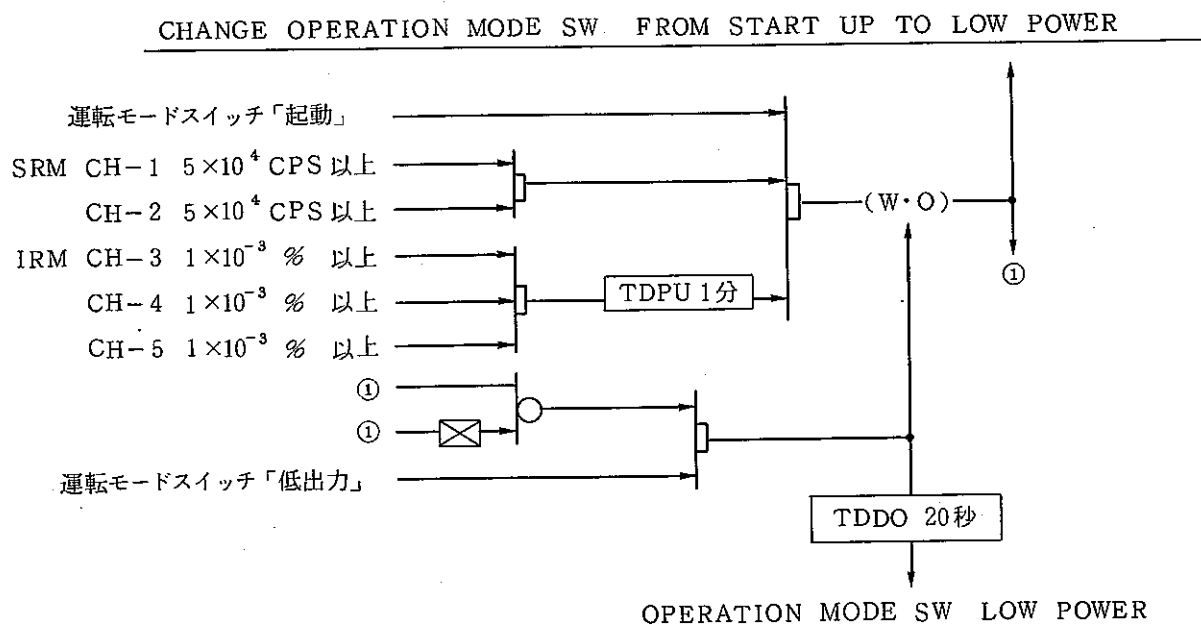


図 4.5 運転モードスイッチ「起動」→「低出力」ロジック図

作するのが望ましいが、万一ロードガイダーの指示する前に低出力に切替えても、低出力に切替えたという結果だけは表示する。

2) 中性子検出器（起動系）の引抜き〔下限→上限〕表示

中性子検出器（起動系）を下限から上限への引抜き表示ブロック図を、図 4.6 に示す。ここで示す様に、運転モードスイッチ「低出力」に切替り、SRMのCH-1,2「下限」の条件で、SRM引抜の表示をする。SRM CH-1,2「上限」に到達後、SRM引抜表示をリセットし、SRM CH-1,2 上限の表示をして、20秒後自動リセットする。

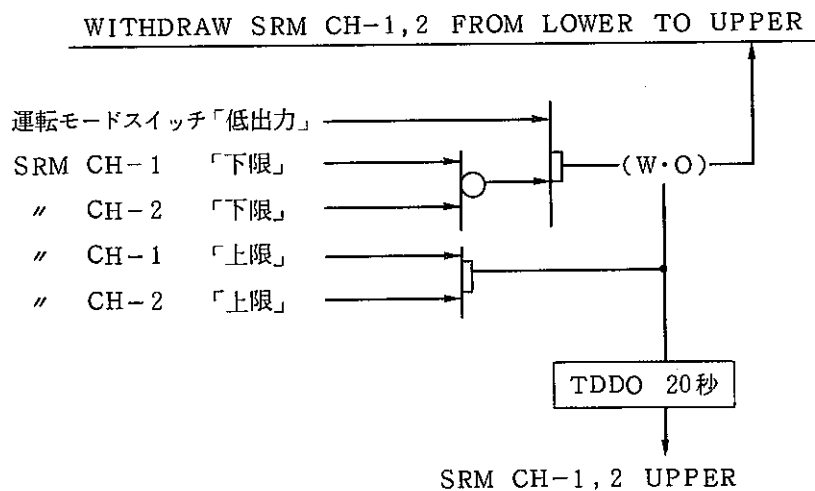


図 4.6 中性子検出器（起動系）下限→上限 ロジック図



3) 出力系レンジスイッチ切替

出力系レンジスイッチの切替え表示ブロック図を図4.7に示す。ここでは、代表して0.125から0.35への切替えを示す。出力系CH-6,7,8 0.125の時、CH-6,7,8の指示値60以上に1つでも達すると、PRMレンジスイッチの切替えを表示する。CH-6,7,8のレンジスイッチを3つ共0.35に切替えた時点で、“PRMレンジスイッチ位置0.35”を表示する。また、切替条件に達する前に、PRMレンジを切替えても、切替えた結果（PRMレンジ0.35）は、表示する様にした。

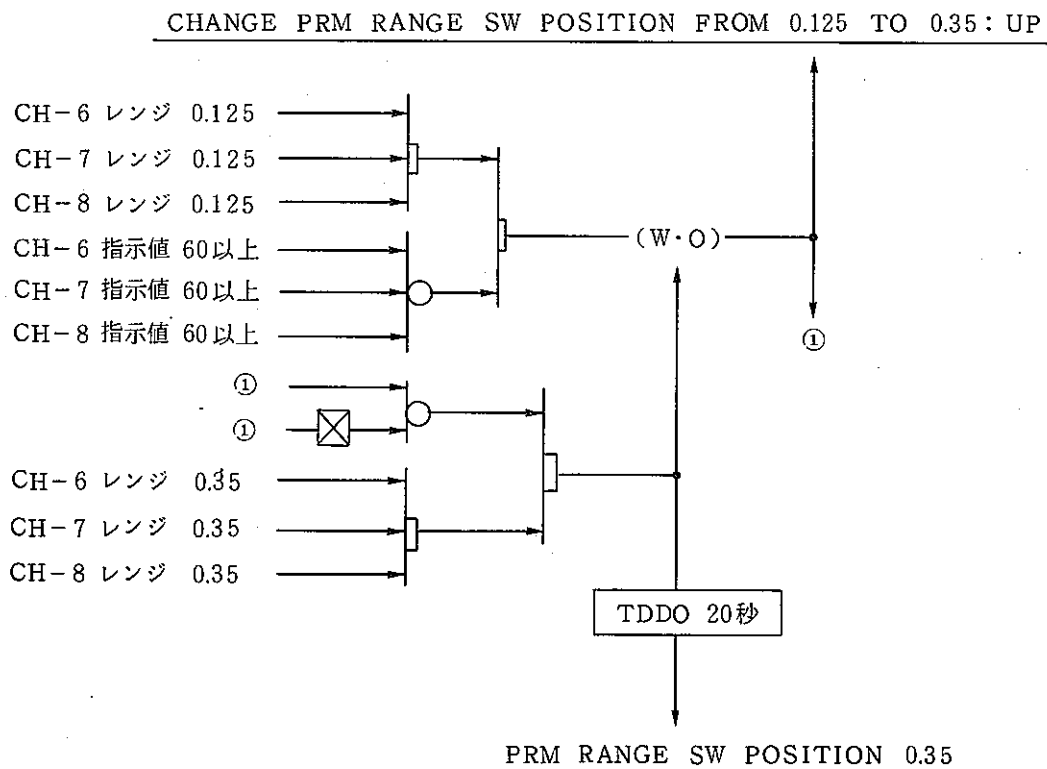


図4.7 出力系レンジ切替0.125→0.35 ブロック図

“PRMレンジスイッチ位置0.35”の表示は、20秒後に自動リセットされる。

次に出力系レンジスイッチ切換（上昇）0.35 → 1.25 のブロック図を図 4.8 に示す。

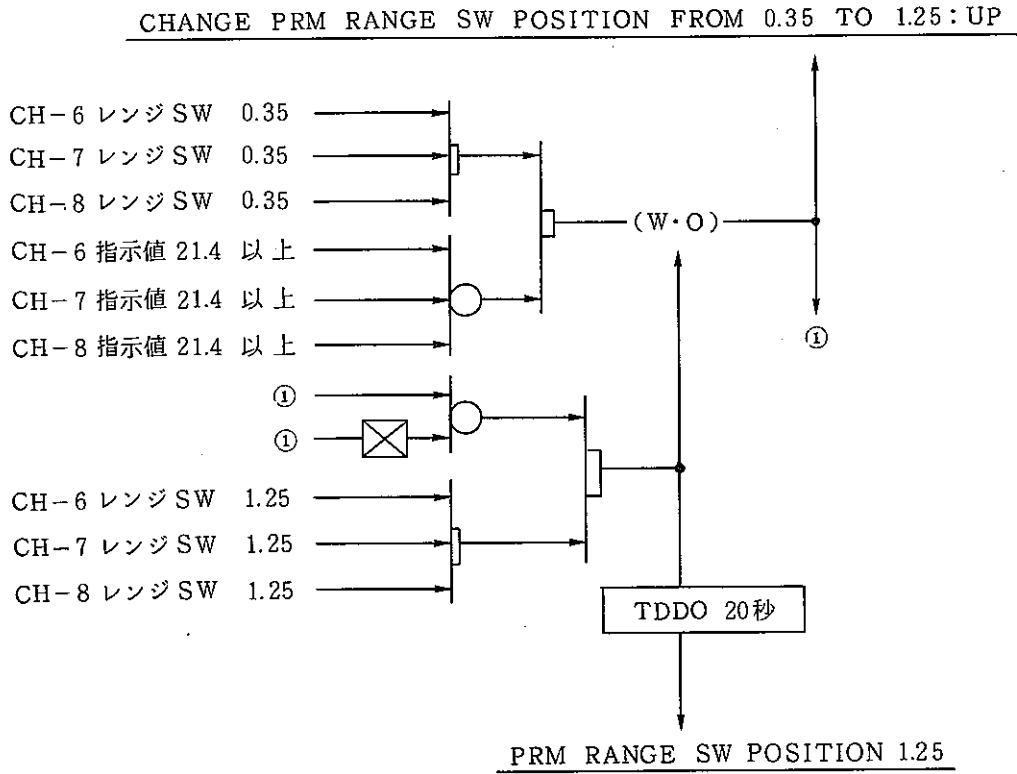


図 4.8 出力系レンジ切替 0.35 → 1.25 ブロック図

図 4.8 のブロック図は、基本的に図 4.7 と変わらない。

レンジ切替（下降）のガイダンスを，図 4.9 のブロック図に示す。

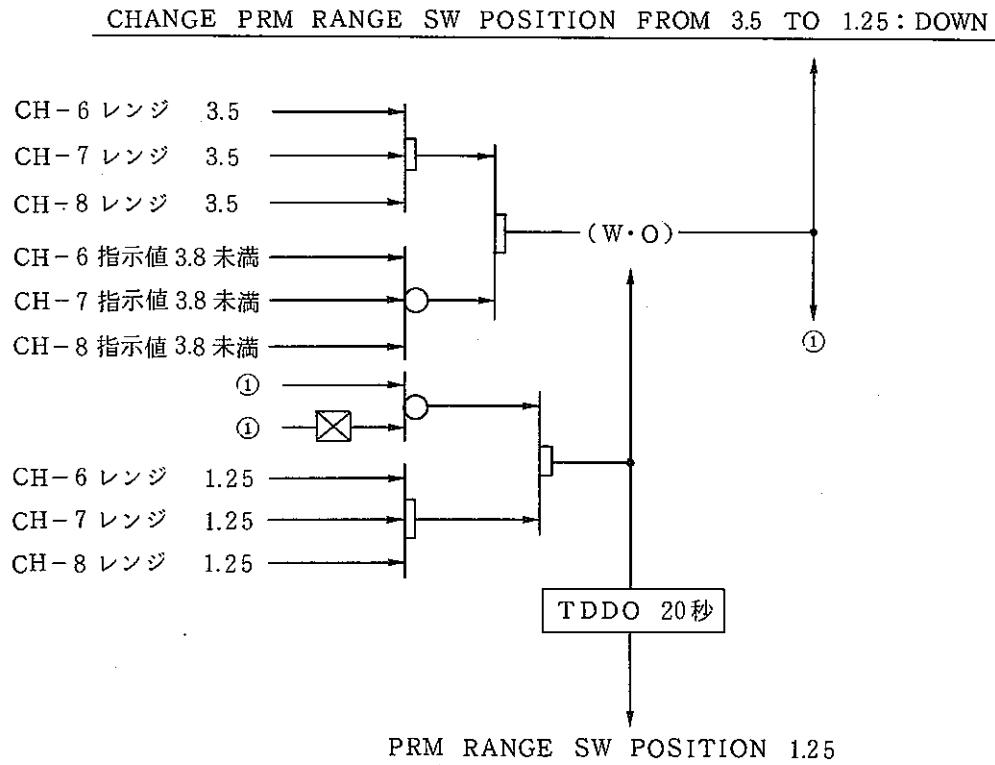


図 4.9 出力系レンジ切替 3.5 → 1.25 ブロック図

図 4.9 も，基本的に図 4.7， 4.8 と変わらない。

ただし，今後の課題として，CH-6, 7, 8 の指示値 3.8 未満を，現在の 1 out of 3 から 2 out of 3 に変える必要がある。（現在のロジックであると，CH-6, 7, 8 のいずれかの検出器がダウン（故障）した時，レンジスイッチ下降の指示が出てしまうため）

4) 「1 MW到達」表示及び「オーバフロー系インタロックスイッチ切替」表示の確認

1 MW到達表示のブロック図を図 4.10 に示す。ここに示す様に，1 MW到達の判定は運転モードスイッチ「低出力」，CH-6, 7, 8 レンジスイッチ位置全数 3.5 で，CH-3, 4, 5 1%以上としている。1 MW後は，すぐに昇温操作に移行するため，1 MW判定には，特に時間をかけない様にする。運転モードスイッチを高出力に切替えた時点で，「核出力 1 MW到達」の表示を消し，「運転モードスイッチ高出力」を表示させる。次に「オーバフロー系インタロックスイッチ切替」のブロック図を図 4.11 に示す。オーバフロー系インタロックスイッチは，手動引保持であるので，運転モードスイッチが高出力になった時点で，オーバフロー系インタロックスイッチを手動引保持から自動に切替

える表示をさせる。オーバフロー系インタロックスイッチが自動になった時点で、オーバフロー系インタロックスイッチ切替の表示を消し、オーバフロー系インタロック自動を表示する。

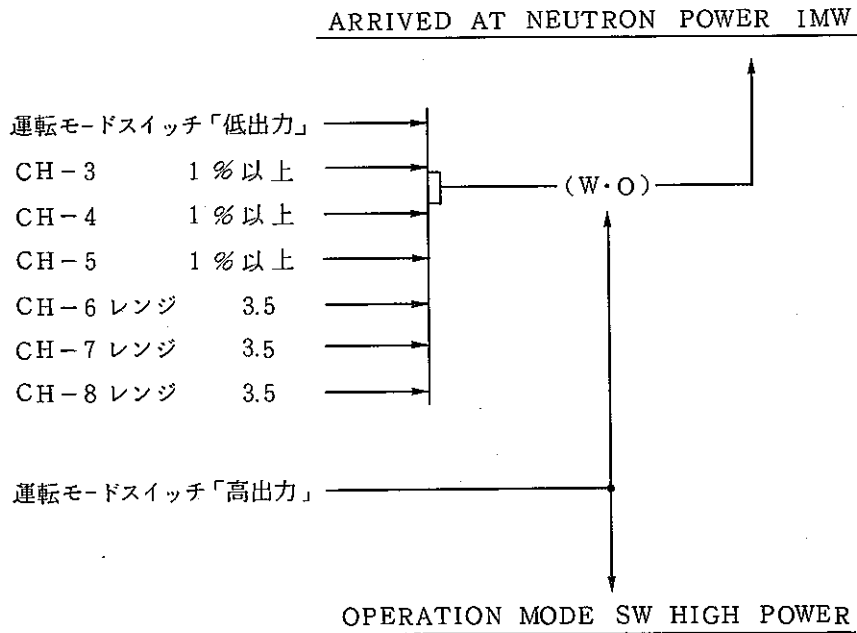


図 4.10 1 MW到達の判定 ブロック図

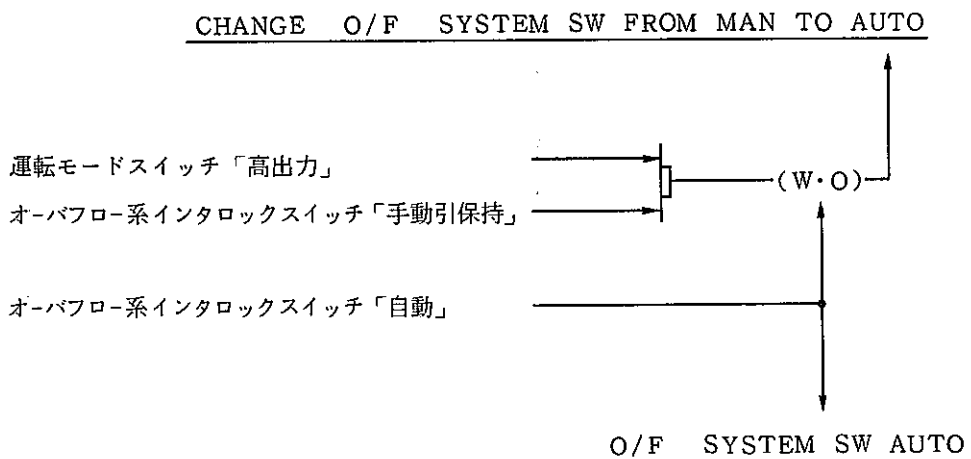


図 4.11 オーバフロー系インタロックスイッチ切替 ブロック図

5) ペリオド超過注意表示の確認

ペリオド超過注意の表示ブロック図を、図 4.12に示す。ここに示す様に、運転モード

スイッチ「低出力」で，運転員の目標ペリオド 100 秒に相当する反応度を越えた時，「CR 操作禁止，ペリオド注意」を表示する。文字は赤色とし，フリッカーさせる。

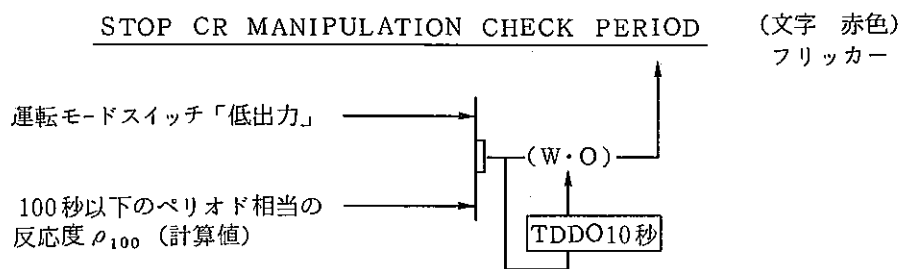


図 4.12 ペリオド超過注意 ブロック図

( 3.2 ) < 250 °C → 370 °C > ガイダンス

1) 出力系レンジスイッチ (上昇) の切替え表示の確認

出力系レンジスイッチ (上昇) の切替え表示のロジック図を図 4.13 に示す。ここでは代表して，3.5 レンジから 12.5 レンジへの切替表示を示す。PRM レンジ 3.5 位置で，CH-6, 7, 8 の何れかが指示値 60 を越えた時，レンジスイッチの切替を表示する。CH-6, 7, 8 のレンジスイッチが全数 12.5 に切替わると，レンジ切替の表示を消し，PRM レンジスイッチ位置 12.5 を表示する。また，レンジスイッチ切替表示以前に，レンジスイッチを切替えても，その結果 (PRM レンジスイッチ位置 12.5) だけは，表示する様にした。

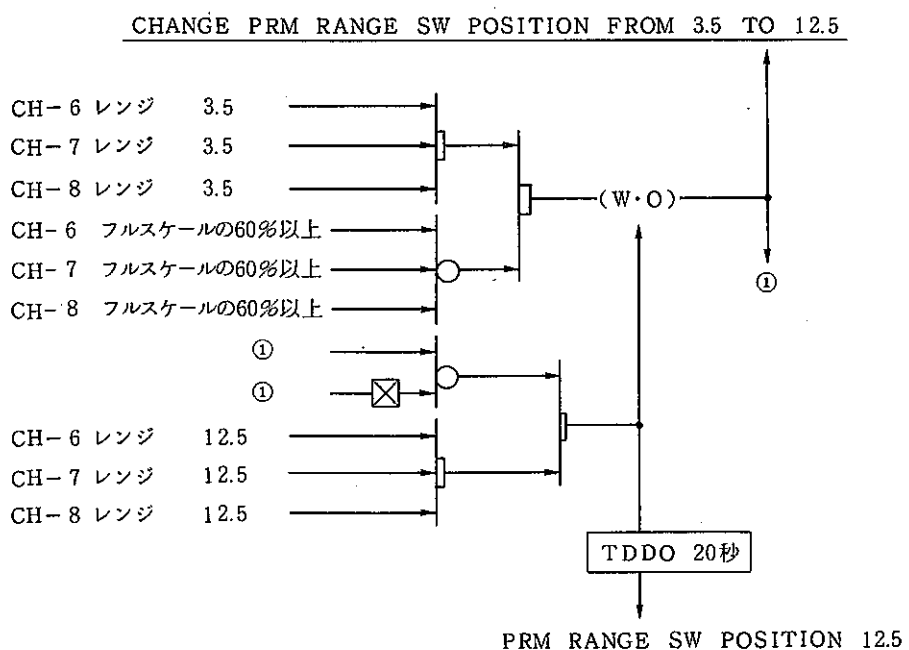


図 4.13 出力系レンジスイッチ切替え ブロック図

- 。レンジスイッチ（上昇）の切替は、この他に（ 1.25 → 3.5 ）がある。また、レンジスイッチ（下降）の切替は、（ 12.5 → 3.5 ）、（ 3.5 → 1.25 ）があり、基本的に、図 4.5, 4.6, 4.7 と同じであるので、省略する。

2) 原子炉入口Na温度 367 °C到達表示の確認

原子炉入口Na温度 367 °C到達表示のブロック図を図 4.14に示す。

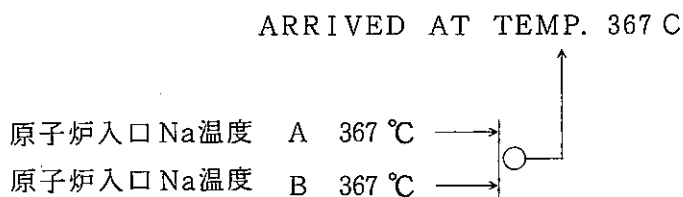


図 4.14 原子炉入口Na温度 367 °C到達 ブロック図

原子炉入口Na温度(A)か(B)の高い方が367 °Cに到達した時、表示する。

3) ペリオド超過注意表示の確認

〔 1 KW → 1 MW 〕画面での表示と同じである。

4) 系温昇温率20 °C/hr 超過表示の確認

系統の昇温率が20 °C/hr を超えると TEMP INC. RATE LIMIT OVER! を表示する。

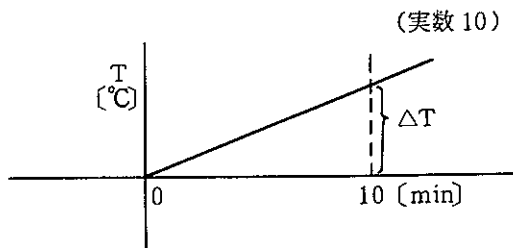
TEMP INC. RATE LIMIT OVER!



原子炉入口Na温度(A) 昇温率20 °C/hr 以上

〔20 °C/hr〕 の表示方法

データは移動平均法で平滑された原子炉入口Na温度(A)を採用した。



10分前の温度と比較し、その差（ $\Delta T$ ）に $\sigma$ をかけている。→ LTEMP（変数）

$LTEMP > 20 \Rightarrow$  表示

2秒おきに、データを表示する。

5) 運転制限値(原子炉出口Na温度-オーバフロータンクNa温度 $\geq 80^{\circ}\text{C}$ )超過表示の確認

原子炉起動における運転制限値及び警戒値を超えた時に警報を発し表示する。図 4.15 に示す。

LIMITED R/V OUT Temp-O/F TANK Temp  $\geq 80^{\circ}\text{C}$  OVER

↑  
TDDO 30秒

↓  
運転制限値(原子炉出口Na温度-オーバフロータンクNa温度 $\geq 80^{\circ}\text{C}$ )

LIMITED R/V OUT Temp-O/F TANK Temp  $\geq 75^{\circ}\text{C}$  OVER

↑  
TDDO 30秒

↓  
運転警戒値(原子炉出口Na温度-オーバフロータンクNa温度 $\geq 75^{\circ}\text{C}$ )

図 4.15 運転制限値超過ブロック図

6) [250 $^{\circ}\text{C}$ →370 $^{\circ}\text{C}$ ]画面に、カウントダウン表示をする。

運転員に6分間隔のCR操作タイミングを知らせる為、6分毎のカウントダウン表示を行う。

TILL NEXT DRAW 01 : 45 min

カウントダウン開始は、CR 0.3 mm操作したのを検出して、スタートし6分後(00:00 min)にBeep音を鳴らせる。

同時に、

“PLEASE WITHDRAW CR”と表示させる。

(3.3) PRMレンジスイッチの取扱い

PRMレンジスイッチの信号は、アナログ信号で入力されるが、これを使用する時はデジタルとして取扱わなければならない。その為、このアナログ信号をプログラム上でデジタルに変換している。方法は、以下の通りである。

図 4.16は、CH-6, 7, 8のレンジスイッチの位置と、入力装置(GMACS II)の出力値との関係を表わしたグラフである。プロットは、CH-6のデータである。縦軸に入出力装置(GMACS II)の出力(プラント生データを4096(12bit)で分割する)横軸にPRMレンジ位置を示す。

入出力装置の出力には、多少のゆらぎがあるので、図中の数字はその代表点を取っている。

図中に示す様に、レンジスイッチの各々のポイント間の中間に点を取り、相当する GMACS II の出力値を、そのレンジスイッチの切替点の持つ範囲とする。

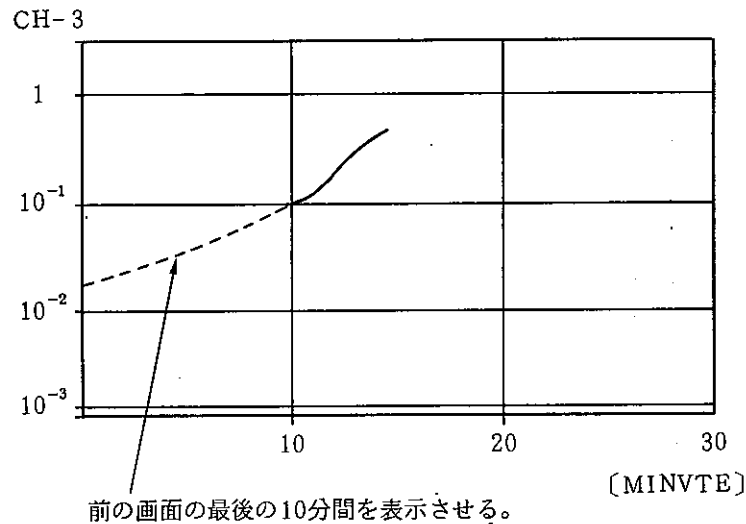
CH-6 0.125 レンジを例にとると、

GMACS II 出力値で、0 ~ 935 の範囲にある時は、CH-6 レンジが 0.125 位置にある。

$$\frac{1240(0.35 \text{ 値}) - 630(0.125 \text{ 値})}{2} + 630(0.125) = 935$$

### ( 3.4 ) トレンドグラフ

これまで作成された出力調整、出力上昇、出力下降のプログラムでは、トレンドグラフの目盛MAX（右端いっぱい迄で30分間に相当）になると、グラフを完全に消去し最初から再び描き直していた。今回新規作成した系統昇温プログラムでは、トレンドグラフの目盛MAX（右端いっぱい迄で、30分間に相当）になると、トレンドグラフ内のプロットデータが右端いっぱいになった時点から過去10分間のデータ（トレンドグラフ時間軸の1/3に相当）をメモリし、新しいトレンドグラフの左1/3にそのデータを描き写すようにする。



これにより、画面が切替わっても、過去（近い）の傾向がつかめる様になり、ガイダンスの性能がアップした。



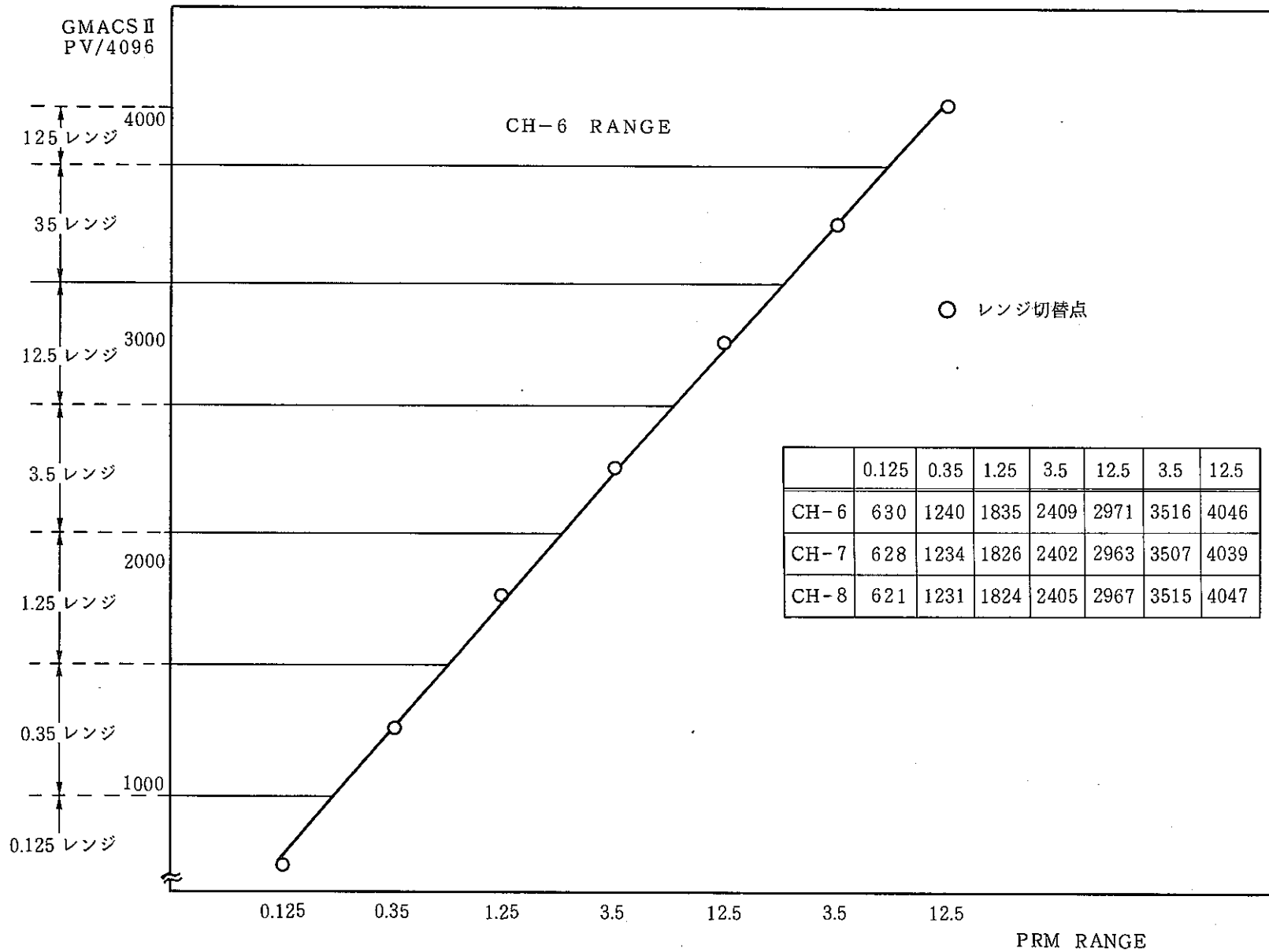


図 4.16 出力系レンジスイッチの位置—GMACS II 出力の関係

## 5. 系統昇温プログラムの検証

### 5.1 現在の運転手法（「常陽」運転操作マニュアル原子炉運転編より抜粋）

臨界（ $5 \times 10^4$  CPS）から 1 MW への出力上昇は、核出力 CH-3 指示値を基準として、制御棒引抜による一定ペリオドの速度で上昇させる。系統昇温は、系統温度 250℃ から 367℃ 迄の昇温操作で、20℃/hr の速度を保つ様に制御棒操作を行う。

<手順>

#### (1) 1 kw → 1 MW 迄の出力上昇

- ① 制御棒選択 sw により、CR-1～6 のうち、最も引抜かれていない CR を選択する。
- ② 選択した CR の操作 CS を「引抜」とし、炉出力を上昇させる。
- ③ 以後、①、② の操作を実施し、IRM CH-3 で指示で、1.0 % 迄炉出力を上昇させる。  
※ PRM レンジ切替操作、ペリオド・対数指示計に注意する事。
- ④ 炉出力が IRM CH-3 指示（1 MW）に達したら、CR を調整、炉出力を安定させる。

#### (2) 250℃ → 367℃ 迄の系統昇温

- ① 制御棒選択スイッチにより、CR 1～6 のうち最も引抜かれていない CR を選択する。
- ② 選択した CR を下記要領にて引抜き、系統温度上昇率 20℃/hr での昇温操作を行う。
  - a) CR 引抜速度を 2mm/5分とする。
  - b) PRM レンジ切替えに注意する。
  - c) 運転制限（原子炉容器出口 Na 温度—オーバフロータンク Na 温度：80℃）に注意する。
  - d) 全 CR のうち最大と最小の引抜量差は 5 mm 以内とする。
- ③ 原子炉入口 Na 温度が 367℃ に到達したら、CR を調整し、系統温度を安定させる。

[マニュアルにおける CR 引抜速度 2 mm/5分の決定根拠]

系統の目標昇温率は、20℃/hr である。この昇温率に対応する反応度投入率は、 $8.6 \times 10^{-2}$  %  $\Delta$  K/K/hr（温度係数  $-4.3 \times 10^{-3}$  %  $\Delta$  K/K/℃ による）となり、制御棒 480mm 付近では、制御棒引抜速度は、24.8 mm/hr = 0.41 mm/min となり、約 2 mm/5分となる。

検証プログラムでは、現在の炉心構成に最も近い第 13、14 サイクルの温度係数  $4.0 \times 10^{-3}$  %  $\Delta$  K/K/℃ を採用し、プログラム中で  $8.0 \times 10^{-5}$   $\Delta$  K/K/6分 として使用した。

### 5.2 プログラムの検証

4.1 で述べた運転手順を遵守しながら、ロッドガイダーに基づき、100MW 第 16 サイクルの起動時に昇温操作を行った。

## ① 1 kw→1 MWへの出力上昇

1988年8月3日(100MW第16サイクル起動時)16:00にロッドガイダーを起動した。

ロッドガイダーによると、最初の引抜指示量は、8.2 mmとであった。16:05から、最も引抜かれていない制御棒1を選択し、数mm/回の割合いで、引抜きを開始した。

16:07出力上昇に伴い、運転モードスイッチを「起動」から「低出力」への切替え起動系検出器(SRM)CH-1, 2の「下限」から「上限」への引抜指示が表示された。表示ロジックは良好であった。運転モードスイッチの切替え、SRMの引抜き後、監視は中間系検出器(IRM)CH-3, 4, 5へと移行した。さらに、出力は上昇し、16:21出力系レンジスイッチを0.125から0.35への切替指示を表示し、更に出力は上昇し、16:25 0.35から1.25, 16:27 1.25から3.5へのレンジ切替指示を表示した。切替は、各レンジスパンの約60%到達を条件としており、表示ロジックは、良好であった。過去に、このPRMレンジ切替え忘れによる原子炉スクラムを経験しており、この出力は、今後運転員にとって有効なものになるであろう。

16:41 IRM CH-3で1.0%(1MW)に到達した。ロッドガイダーの最初の指示8.2mmを引抜き、そのペリオドで出力上昇を行った結果、約860kwで制御棒引抜指示量にマイナス(挿入)の指示が出た。ロッドガイダーの指示では、約-1.0mm位であったため、1mm挿入、その後の挿入指示量に合わせて、2~3回挿入し(各1mmずつ)、1MWへ調整した。制御式の制御定数が、良好に働き、1MWへ収束する事を確認するとともに運転マニュアルを充分満足している事を確認した。今回の引抜量は、8.2mmで1MW収束への挿入量が2.4mmで、結果的に総引抜量は、5.8mmであった。

1MW到達の表示をした後、運転モードスイッチを「低出力」から「高出力」への切替えを表示した。高出力モードへの切替え後、オーバフローEMPのインタロックスイッチを「手動」から「自動」への切替を表示した。オーバフローEMPのインタロックスイッチを「自動」へ切替えた後、「1kw→1MW」画面が終了した。

1kwから1MWへの出力上昇ガイダンスは、良好であった。この領域は、ロッドガイダーの指示通り操作を行っても、十分に運転マニュアルを遵守した運転操作を行える事が判かった。

図5.1に[1kw→1MW]ガイダンス画面を示す。

## ② 250℃→370℃への昇温

8月3日系統温度250℃から370℃への昇温操作を開始した。ロッドガイダーの指示では、最初2.3mm/6分を表示した。制御棒操作は、CRTの表示通り行った。2.3mm~2.4mm/6分の引抜きを約1時間続けた所で昇温率が17℃/hrと若干低目で、途中から、2mm/5分に切替え、昇温を行った。100MW第16サイクルでは、温度係数 $-8.0 \times 10^{-4} K$

/K/6分（100MW第13, 14サイクル実績：20°C/hr相当）を採用したが，第16サイクルでは，炉心構成等の変化から，温度係数が $-8.3 \times 10^{-5} \Delta K/K/6分$ となった。この温度係数の増加分が影響し，ロッドガイダーの制御棒引抜指示量は，実際よりも低目の指示をし，昇温率を鈍らせる結果となった。（100MW第16サイクルの温度係数 $-8.3 \times 10^{-5} \Delta K/K/6分$ を用いると，ロッドガイダーの指示は，約0.1 mm程多くなり，2.5 mm/6分となる。）

第13サイクルから第16サイクルにおける温度係数の変化を表5-1に示す。

表 5.1 第13～16サイクルにおける等温温度係数

サイクルNo.	等温温度係数
13	$-4.00 \times 10^{-3} (\% \Delta K/K/^\circ C)$
14	$-4.00 \times 10^{-3} (\% \Delta K/K/^\circ C)$
15	$-3.88 \times 10^{-3} (\% \Delta K/K/^\circ C)$
16	$-4.15 \times 10^{-3} (\% \Delta K/K/^\circ C)$
17	$-4.11 \times 10^{-3} (\% \Delta K/K/^\circ C)$

温度係数は，各サイクル表共，ほぼ $-8.0 \times 10^{-5} \Delta K/K/6分$ で安定している為，ロッドガイダーでは，この値を採用しているが，各サイクルで若干変化がある。 $-8.0 \times 10^{-5} \Delta K/K/6分$ よりも，使用するサイクルの温度係数が低い場合は，制御棒引抜量は，多目に出るが，20°C/hrを超えた時に制御棒引抜阻止の警報が出るので，制御棒引抜を中止する事で，20°C/hr以上の昇温率は，防ぐことができる。

一方， $-8.0 \times 10^{-5} \Delta K/K/6分$ よりも，高い温度係数となり，制御棒引抜量が少な目に指示した時は，ロッドガイダーでは，20°C/hrの昇温率に合わせるために補正することができない。この場合は，運転員の判断で，制御棒引抜を調整し，昇温率を修正することが必要である。

温度係数は，各サイクル間で大きな差が無い為，現状の温度係数固定方式でも良いと思われるが，今後20°C/hrの昇温率に対して，低目になった場合，制御棒引抜量を補正することを考慮する必要があるとも考えられる。

17:27出力上昇に伴い出力系CH-6, 7, 8の指示が上昇し，約2.2 MWとなった時点で，PRMレンジを「3.5」から「2.5」への切替える指示の表示が出た。表示ロジックは良好であった。

昇温操作中は，運転制限（原子炉容器出口Na温度-オーバフロータンクNa温度 $\leq 80^\circ C$ ）及びペリオド超過（100秒）になる事なく順調であった。

22:11原子炉入口Na温度約352°C頃から $\left(\frac{T_{IN}-250}{117}\right)^r$ の項の影響が出始め，制御棒

引抜指示量が 2.4 mm/6分となり，除々に指示量は減少し始めた。23:00 に原子炉入口 Na 温度は，367℃に到達し，制御棒引抜指示量は，0.0 mm となった。制御定数  $r$  が，良好であり，367℃へ収束する事を確認した。367℃到達で，系統昇温度操作は終了した。

250℃から370℃への昇温ガイダンスは，良好であった。ガイダンス通りの操作を行っても，十分に運転マニュアルを遵守した昇温を行える事を確認した。

\*\*\* ROD GUIDER \*\*\*

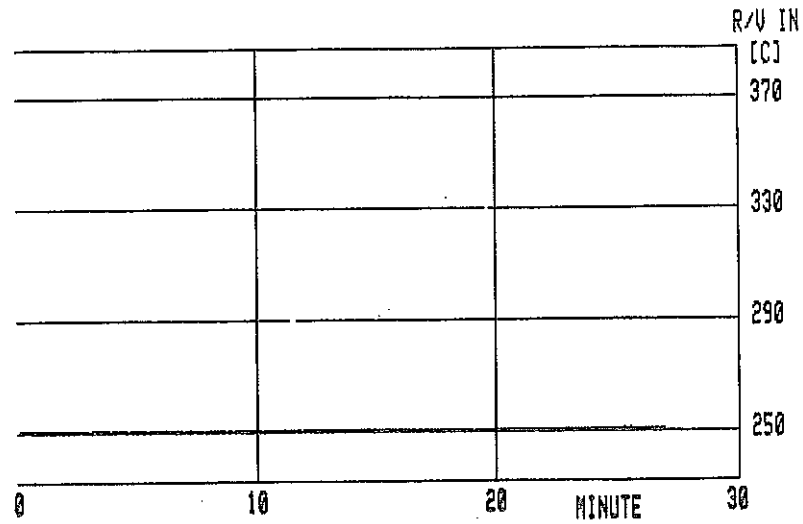
< SYSTEM HEAT UP >

[ 1 kW ==> 1 MW ] -AVERAGE-

THERMAL POWER (MW) 2.1  
 NEUTRON CH-3 (%) .5 .5  
 CH-4 (%) .6 .6  
 CH-5 (%) .5 .5

R/V IN TEMP (C) A 249.8 B 250.7  
 R/V OUT TEMP (C) A 251.7 B 251.6

O/F TANK TEMP (C) 232.3  
 R/V OUT - O/F TK (C) 19.4



CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
POSITION	493.0	489.2	487.9	487.6	488.0	489.6

INFORMATION		
LOOP TEMP	1.9	RATE (C/hr)

	ORDER	POSITION	WITHDRAW
1	CR- 4	487.6	2.0
2	CR- 3	487.9	.7
3	CR- 5	488.0	0.0
4	CR- 2	489.2	0.0
5	CR- 6	489.6	0.0
6	CR- 1	493.0	0.0

OPERATION GUIDE

1988/08/03 16:31:49



図 5.1 [ 1 kw → 1 MW ] ガイダンス画面

\*\*\* ROD GUIDER \*\*\*

< SYSTEM HEAT UP >

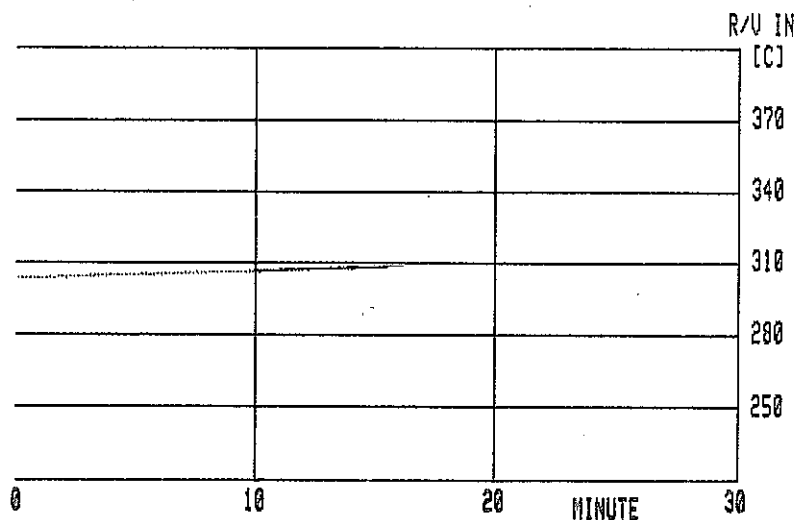
[ 250 C ==> 370 C ]

-AVERAGE-

THERMAL POWER (MW) 3.5  
 NEUTRON CH-3 (%) 2.4 2.4  
 CH-4 (%) 2.5 2.5  
 CH-5 (%) 2.4 2.4

R/V IN TEMP (C) A 308.4 B 308.6  
 R/V OUT TEMP (C) A 311.9 B 311.4

O/F TANK TEMP (C) 263.8  
 R/V OUT - O/F TK (C) 48.1



CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
POSITION	502.0	502.5	502.3	500.1	501.2	499.8

INFORMATION		
LOOP TEMP	19.8	RATE (C/hr)

	ORDER	POSITION	WITHDRAW
1	CR- 6	499.8	2.0
2	CR- 4	500.1	.5
3	CR- 5	501.2	0.0
4	CR- 1	502.0	0.0
5	CR- 3	502.3	0.0
6	CR- 2	502.5	0.0

OPERATION GUIDE

1988/08/03 19:49:21

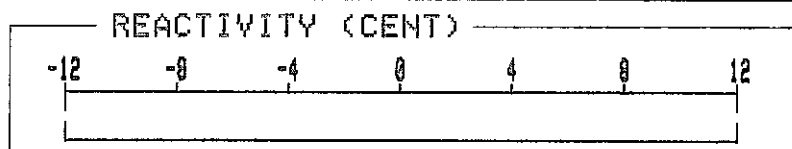


図 5.2 [250°C→370°C] ガイダンス画面

## 6. ロッドガイダー第2フェーズへの移行

ロッドガイダー第1フェーズであるガイダンスシステム整備は、100MW第16サイクルでのプログラム検証により、終了した。

ロッドガイダー計画は、これにより一步前進し、当該システムにインタロックを持たせて、プラント側に制御棒引抜阻止を掛ける第2フェーズへ移行する。

インタロック機能の検証では、制御棒引抜阻止信号を実際に投入する為、実機とのオンラインでは不可能である。従って、「常陽」運転訓練シミュレーションと接続して、インタロック機能の有効性を確認する事にした。また、従来実機の運転サイクル日程に合わせて、第1フェーズのプログラム検証を行わなければならなかった。制限についても、今後はシミュレータを操作する事により自由に各運転状態を作る事が出来るため、各プログラムの充実への対応も早くする事が出来る。

第2フェーズへは、昭和63年9月から移行を開始し、現システムのシミュレータ建家への移動、信号変換器の改造やシミュレータからの信号取出し、ケーブル布設、ハードウェアの改造等を行い、12月にハード部門の準備を終了した。ソフトの改良は、12月から開始し、デバックを重ねた後、平成元年3月頃終了の予定であり、4月から本格的な試験開始の予定である。

ロッドガイダーから発信するインタロック信号の項目を以下に示す。

- ① 出力上昇過程において生ずる冷却系の温度による制限  
(原子炉出口Na温度) - (オーバーフロータンクNa温度)  $\geq 80^{\circ}\text{C}$
- ② ペリオドの制限(運転マニュアル上の制限)  
50秒
- ③ 系統昇温における昇温率  
(原子炉入口Na温度上昇率)  $\geq 20^{\circ}\text{C/hr}$

シミュレータからロッドガイダーの入力信号リストを表6.1, 表6.2に示す。

これら、アナログ24点、デジタル27点の計51点をシミュレータから入力する。デジタル信号は、シミュレータ計算機のデジタルボード(接点出力用)から出力し、中継端子盤を経由して、ロッドガイダー信号変換器(GMACS II)内へ、アナログ信号は、シミュレータ盤の各プロセス計器端より出力し、盤内端子より直接信号変換器内へ取込まれる。これら、アナログ・デジタル信号をロッドガイダーのホストコンピュータにて、演算・判断処理し、CTR表示をしながら、一方では、シミュレータの制御棒駆動回路へインタロック信号を発する。



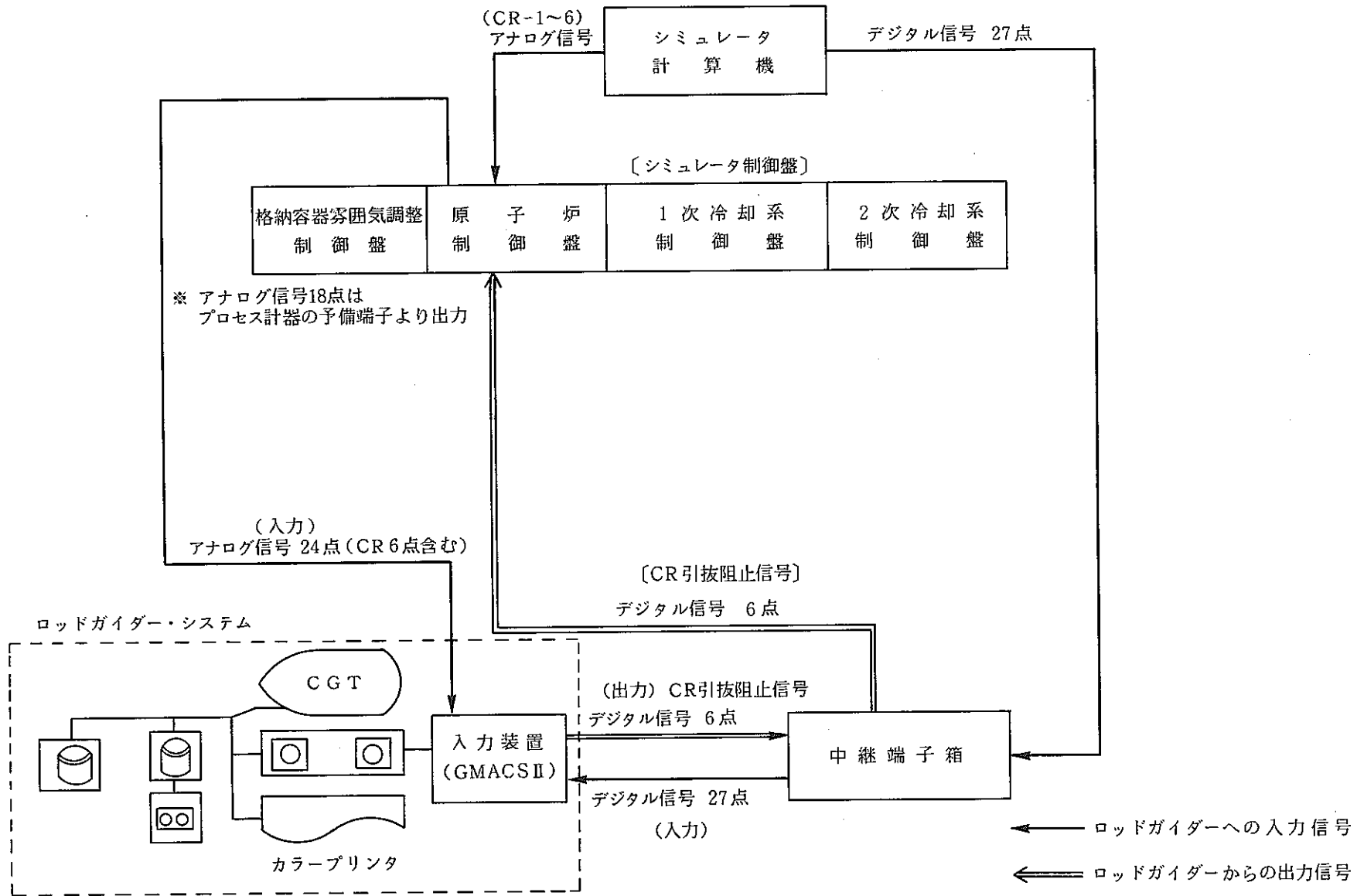


図 6.1 シミュレータ・ロッドガイダー接続図

表 6.1 デジタル出力信号

No	信 号 名 称
1	原子炉モードスイッチ(起 動)
2	原子炉モードスイッチ(低出力)
3	原子炉モードスイッチ(高出力)
4	オーバフローEMP スイッチ
5	2次補助ブロワ
6	中性子検出器位置 上限(CH-1)
7	中性子検出器位置 下限(CH-1)
8	中性子検出器位置 上限(CH-2)
9	中性子検出器位置 下限(CH-2)
10	中性子検出器位置 上限(CH-3)
11	中性子検出器位置 下限(CH-3)
12	中性子検出器位置 上限(CH-4)
13	中性子検出器位置 下限(CH-4)
14	中性子検出器位置 上限(CH-5)
15	中性子検出器位置 下限(CH-5)
16	CRDM動作 (往) (CR-1)
17	CRDM動作 (往) (CR-2)
18	CRDM動作 (往) (CR-3)
19	CRDM動作 (往) (CR-4)
20	CRDM動作 (往) (CR-5)
21	CRDM動作 (往) (CR-6)
22	CRDM動作 (復) (CR-1)
23	CRDM動作 (復) (CR-2)
24	CRDM動作 (復) (CR-3)
25	CRDM動作 (復) (CR-4)
26	CRDM動作 (復) (CR-5)
27	CRDM動作 (復) (CR-6)

表 6.2 アナログ出力信号

No.	信号名称	工業値レンジ	電圧レンジ
1	# 1 制御棒位置	-50 ~ 950 mm	0 ~ 10 v
2	# 2 制御棒位置	-50 ~ 950 mm	0 ~ 10 v
3	# 3 制御棒位置	-50 ~ 950 mm	0 ~ 10 v
4	# 4 制御棒位置	-50 ~ 950 mm	0 ~ 10 v
5	# 5 制御棒位置	-50 ~ 950 mm	0 ~ 10 v
6	# 6 制御棒位置	-50 ~ 950 mm	0 ~ 10 v
7	中性子束レベル (CH-1)	1 ~ 10 <sup>6</sup> cps	0 ~ 10 v
8	中性子束レベル (CH-2)	1 ~ 10 <sup>6</sup> cps	0 ~ 10 v
9	中性子束レベル (CH-3)	10 <sup>-4</sup> ~ 100 %	0 ~ 10 v
10	中性子束レベル (CH-4)	10 <sup>-4</sup> ~ 100 %	0 ~ 10 v
11	中性子束レベル (CH-5)	10 <sup>-4</sup> ~ 100 %	0 ~ 10 v
12	中性子束レベル (CH-6)	0 ~ 120 %	0 ~ 10 v
13	中性子束レベル (CH-7)	0 ~ 120 %	0 ~ 10 v
14	中性子束レベル (CH-8)	0 ~ 120 %	0 ~ 10 v
15	PRMレンジ (CH-6)		1 ~ 5 v
16	PRMレンジ (CH-7)		1 ~ 5 v
17	PRMレンジ (CH-8)		1 ~ 5 v
18	1次冷却 Na 流量 (Aループ)	0 ~ 1400 m <sup>3</sup> /h	1 ~ 5 v
19	1次冷却 Na 流量 (Bループ)	0 ~ 1400 m <sup>3</sup> /h	1 ~ 5 v
20	オーバーフロータンク Na 温度	0 ~ 600 °C	1 ~ 5 v
21	原子炉容器入口 Na 温度 (Aループ)	100 ~ 600 °C	1 ~ 5 v
22	原子炉容器入口 Na 温度 (Bループ)	100 ~ 600 °C	1 ~ 5 v
23	原子炉容器出口 Na 温度 (Aループ)	100 ~ 600 °C	1 ~ 5 v
24	原子炉容器出口 Na 温度 (Bループ)	100 ~ 600 °C	1 ~ 5 v

## 7. 結 言

制御棒操作ガイダンスシステム（ロッドガイダー）について、オンラインによる原子炉プラント制御の実用性を評価する目的で、既に報告済である臨界・出力上昇検証試験の他に、最後に残った系統昇温の検証を100MW第16サイクルで行い、次の結論を得た。

- ① 1 kwから1 MWへの出力上昇は、シミュレーション試験で用いた式及び、制御定数を用いた結果、実機においても最適な制御が出来た。
- ② 250℃から370℃への昇温は、シミュレーション試験で用いた式及び制御定数を用いた結果、実機においても、最適な制御が出来た。但し温度係数がサイクル毎に、僅かに変化するため、昇温スピードに若干の影響が出る事が判った。現在の温度係数を一定の割合で炉心に投入する方式を採るか、温度上昇の傾きを考慮した新たな方式を開発するかの検討を要する。
- ③ メニュー画面を新たに追加した事により、各サイクルの反応度データのファイル管理、データの修正が容易となり、炉心構成変化にも対応出来る事及びオフラインで行っていたCR値逆関数計算等も合わせて当システム内で行える様になり、ソフト及びデータ管理の高度化が図れた。
- ④ ガイダンス機能を27項目作成し、運転操作時の諸操作の適切なガイドが得られる様になり、制御棒操作自動化に向けての知見が得られた。

本検証試験にて、従来の運転操作量とロッドガイダーの予測量がほぼ一致し、期待通りの成果が得られた。Phase 1は臨界・系統昇温・出力上昇・出力調整・出力下降の一連の試験を終了し、期待通りの成果を上げて、終了した。

Phase 2は昭和63年9月から、移行に伴う各種改造工事を行い、平成元年3月シミュレータにて検証を行う予定である。

## 8. 参考文献

- (1) 奥田英一他 制御棒操作ガイドシステムの開発 SN9410 87-100, 1987, 7
- (2) 太陽計測機：7523 GMACS II 取扱説明書
- (3) 日本コンピュータ工業機：CGT1024J 使用説明書