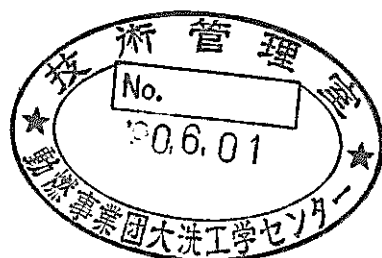


制御棒操作ガイドシステムの開発

制御棒引抜阻止プログラムの開発



1989年10月

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)

制御棒操作ガイドシステムの開発

制御棒引抜阻止プログラムの開発

寺門 嗣夫* 阿部 定好* 河井 雅史*
藤原 昭和* 小沢 健二* 照沼 誠一*

要 旨

高速実験炉「常陽」では、「常陽」の制御棒操作自動化を目指して、第1フェーズである制御棒操作ガイドシステム(ロッドガイダー)の開発に昭和61年度から着手した。既にその第1フェーズであるロッドガイダーは、「常陽」の全運転モード(臨界近接, 系統昇温, 出力上昇・下降, 出力調整)において, 制御棒操作時の操作量及び操作手順, 並びにプラント操作のガイドを行うプログラムを開発, 完成し, 昭和63年9月第16サイクル原子炉運転中に検証試験を行い, 実用上十分な精度で制御棒操作及びプラント操作をガイドできることを確認した。

今回, 第1フェーズのバックアップ機能的役割を目的として, 第2フェーズの核的・熱的運転制限値を逸脱する制御棒操作に対して, 計算機の出力によって制御棒の引抜を阻止する制御棒引抜阻止プログラムの開発を行った。

本プログラムの検証試験は, 「常陽」運転訓練用シミュレータを用いて行い, その結果, 制御棒引抜阻止インタロック項目, ①ペリオド超過: 50秒未満, ②系統昇温率: 20℃/h超過, ③原子炉出口Na温度-オーバフロータンクNa温度: 80℃超過のいずれの項目も, ロッドガイダーからの引抜阻止信号で制御棒の引抜阻止が良好に作動することを確認し, ロッドガイダーのバックアップ機能として有効であることが分った。

* 大洗工学センター 実験炉部 原子炉第1課

October 1989

Development of a Control Rod Operation Guidance System

Development of a Interlocking System on Control Rod Operation

T. Terakado *, S. Abe *, M. Kawai *

A. Fujiwara *, K. Ozawa *, S. Terunma *

Abstract

In order to improve operational safety reliability and to reduce operator's load, an automatic control rod system has been developed since 1986 using JOYO.

The phase 1 program, the first stage for the development of the automatic reactor operation system, is to develop a control rod operation guidance system (Rod Guider) which provided information on control rod operation to plant operator in all the plant operation modes (approaching criticality, heating up, increasing, decreasing and adjusting power).

The development of the Rod Guider began in April 1986 and completed in September 1989.

All functions of the guider were tested for verification during the 16th duty cycle operation in August 1988. The test result confirm that the guider has an excellent performance to guide the control rod and plant operation during all the plant modes.

Interlocking of control rod in case plant operational parameters exceed the limited core characteristics or thermal transient was added to the phase 1. The modified system was tested for verification in a full-scope operator training simulator. The test results demenstrated the designed interlocking and confirmed the required performance.

* JOYO Operation Section, Experimental Reactor Division,
O-arai Engineering Center.

Items of the limited plant parameters for interlocking on the control rod operation are as follows.

- (1) Period time : < 50 seconds (apply to heating up mode)
- (2) Heating up rate at the reactor vessel inlet :
 $> 20^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (apply to heating up and increasing power mode)
- (3) Temperature difference between the overflow tank and the reactor vessel outlet : $> 80^{\circ}\text{C}$
(apply to heating up and increasing power mode)

目 次

1. はじめに	1
2. 開発の経過	2
3. ロッドガイダーの概要	4
4. 制御棒引抜阻止プログラムの開発	15
4.1 開発目的	15
4.2 制御棒引抜阻止項目の考え方	15
4.3 制御棒引抜阻止項目選定の根拠	16
4.4 ロッドガイダーとシミュレータとの接続	16
4.5 制御棒引抜阻止インタロック回路	20
5. 制御棒引抜阻止プログラムの検証試験	23
5.1 試験方法	23
5.2 試験結果	24
5.3 試験の成果	25
6. ま と め	29
7. 参 考 文 献	30

1. はじめに

高速実験炉「常陽」では、原子炉の運転信頼性、安全性の向上及び運転員の負担軽減を図る目的で、AI技術を適応した制御棒操作の自動化を目指して、①制御棒操作ガイドシステム（以下ロッドガイダーと言う）の開発、②運転制限値逸脱防止機能を有するシステムの開発、③制御棒操作自動化システムの開発の3つのフェーズに分けて開発を実施している。

既に、第1フェーズのロッドガイダーの開発は、「常陽」の全運転モード（臨界近接，系統昇温，出力上昇・下降，出力調整）の制御棒操作及びプラント操作のガイダンスプログラムについて、昭和63年9月100MW第16サイクル原子炉運転中に検証試験を行い、実用上十分な精度で制御棒操作及びプラント操作をガイドできることを確認した。

今回、第1フェーズのロッドガイダー機能をバックアップする目的で、第2フェーズのプラントの核的及び熱的運転制限値を逸脱する制御棒操作に対して、計算機の出力によって制御棒の引抜を阻止するプログラムの開発を行った。

検証試験は、「常陽」運転訓練用シミュレータ（以下シミュレータと言う）を用いて行った。その結果、ロッドガイダーからの制御棒引抜阻止インターロック信号によって、シミュレータの制御棒に引抜阻止がかかり、制御棒引抜阻止機能が良好に作動することを確認した。

本報告書は、第1フェーズのロッドガイダー機能をバックアップする目的で開発した、第2フェーズ制御棒引抜阻止プログラムの開発結果について、報告するものである。

2. 開発の経過

制御棒操作自動化システムの開発スケジュールを表-1に示す。

第1フェーズのロッドガイダーの開発は、①制御棒操作自動化に向けての技術的知見を得ること、②「常陽」の運転経験を計算機を利用して高度な形で有形化し、運転員の負担軽減、及び原子炉の運転の信頼性、安全性の向上を目的として、昭和61年度に開発に着手した。

昭和61年度は、「常陽」の全運転モード（臨界近接、系統昇温、出力上昇・下降、出力調整）の内、系統昇温を除いた4つのプログラムを作成し、原子炉運転中に検証試験を行い、運転員に対して良好にガイドすることを確認した。¹⁾

引き続き、昭和62年度には、第1フェーズの残りの系統昇温プログラムの作成及び5つのプログラムの機能強化を図り、昭和63年9月100MW第16サイクル原子炉運転中に、5つのプログラムの検証試験を行い、実用上十分な精度でガイドできることを確認し、実機適応の見通しを得た。²⁾

引続いて、第2フェーズ制御棒引抜阻止プログラムの開発に移行した。

第2フェーズの開発は、昭和63年10月から開始した。第2フェーズは、制御棒引抜阻止インタロック信号を制御棒駆動装置の制御系に組込むため、実機を用いてオンラインでの検証は、プラント運転上不可能であり、シミュレータで検証試験³⁾を行うことにした。

このため検証試験準備として、中央制御室に設置していたロッドガイダーをシミュレータ室へ移設し、シミュレータからの信号取り出し、ロッドガイダーとシミュレータとの接続工事等のハードに係る作業を平成元年3月末まで実施した。また、この間並行して制御棒引抜阻止プログラムの開発を行った。

検証試験は、平成元年4月から6月にかけて実施し、各制御棒引抜阻止項目について、シミュレータを用いてプログラムの検証試験を行った。

その結果、ロッドガイダーからの制御棒引抜阻止インタロック信号によって、シミュレータの制御棒に引抜阻止がかかり良好に作動することを確認し、第1フェーズのロッドガイダーのバックアップとして有効な手段であることが確認された。

これにより、第1フェーズ、第2フェーズの開発は完了した。

現在、本開発の最終目標である、第3フェーズの制御棒操作自動化システムの開発に着手し、ファジィルールを適用した、自動化プログラムを全運転領域に渡って開発中である。

表-1 制御棒操作自動化システムの開発スケジュール

年度 開発項目	昭和 61年度	62年度	63年度	平成 元年度	2年度	3年度	4年度	5年度	6年度	7年度
第1フェーズ 制御棒操作 ガイドシステム の開発			S.63/9 100MW第16 サイクルで検証試験実施			「常陽」プラントに運転支援システムとして適用				
第2フェーズ 制御棒引抜 阻止プログラム 開発				H.1/4~9 シミュレータで検証試験実施						
第3フェーズ 制御棒操作 自動化システム の開発				ファジィ理論を適用した制御棒操作自動化プログラムの開発		実機システムの詳細設計	設置変更, 設工認		製作・据付	実証試験

3. ロッドガイダーの概要

第1フェーズで開発したロッドガイダーの概要について以下に述べる。

ロッドガイダーのシステム構成を図-1に示す。システムの構成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プロッタ等からなっている。

プラント信号は、計測制御系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、評価プログラムに保存され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ており、制御棒操作後の評価が容易にできるようになっている。

本システムから得られる情報は、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運転員が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って著しく変化し、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、トレンド表示を採用しグラフにてその傾向把握を行うことができるようになっている。図-2～図-7に各運転モード時のカラーCRT画面表示例を示す。

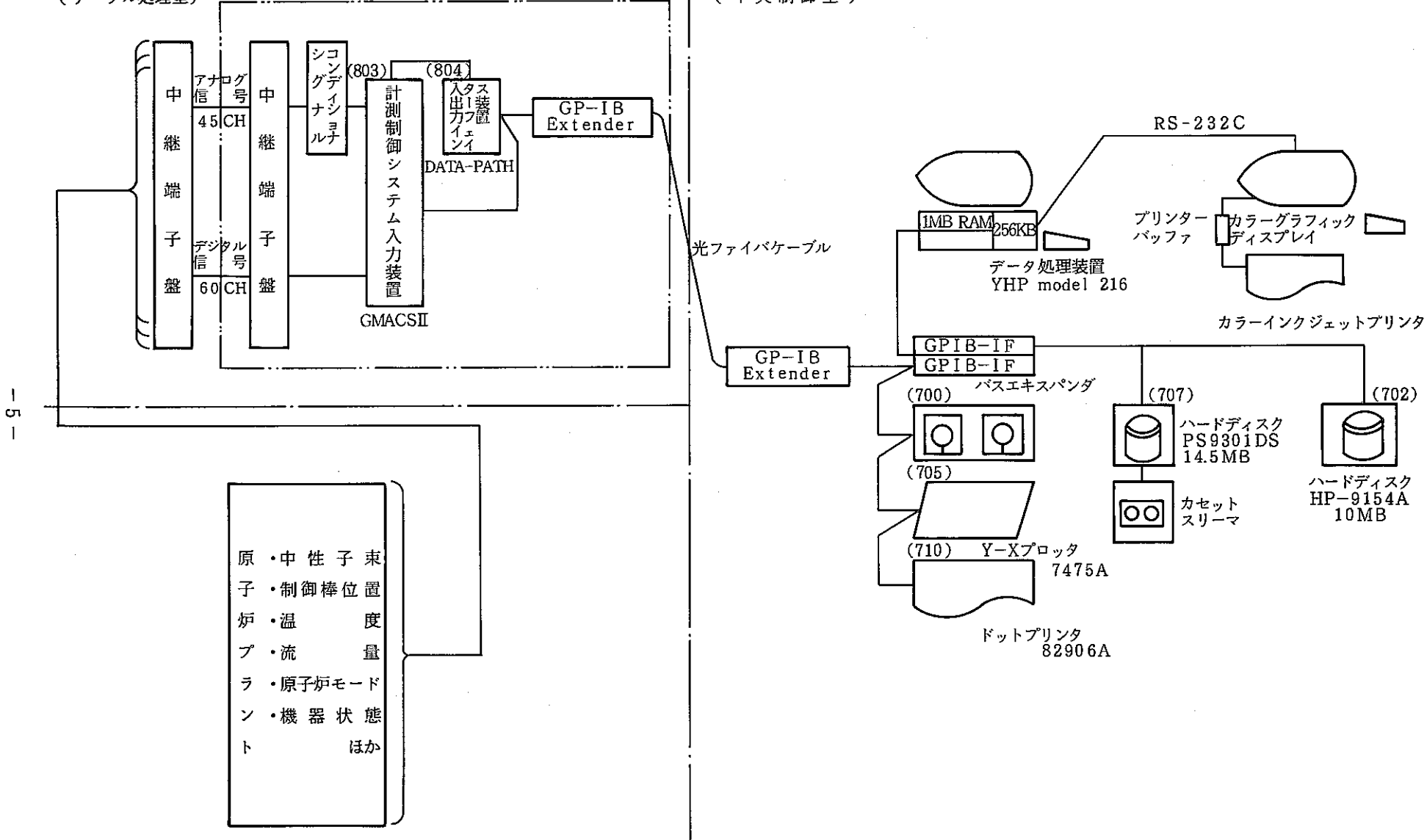
プログラムの流れは、図-8に示すように、まずプログラムが立ち上り、各プログラム共通のデータ(反応度、反応度の関数演算、遅発中性子発生割合、崩壊定数、運転制限値等)の入力、演算、記憶、そして、各運転モードプログラム(臨界近接、系統昇温、出力上昇・下降、出力調整)により、制御棒操作量の演算、表示、プラントからのデジタル・アナログ信号を用い、運転経験に基づいて構築した運転操作ガイダンスのロジック出力により、原子炉の通常起動・停止曲線に沿ったガイドを行うようになっている。図-9に原子炉通常起動曲線を示す。

原子炉は、温態待機(系統温度250℃)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、出力運転範囲を通過するま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、原子炉の起動・停止曲線に沿ったスムーズな運転ができるように、以下の5つの「運転モード」に分けてある。図-10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： 5×10^4 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℃迄の核加熱操作。
- ③ 出力上昇(Power Ascent)：系統温度370℃から100MW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。

原子炉附属建家
(ケーブル処理室)

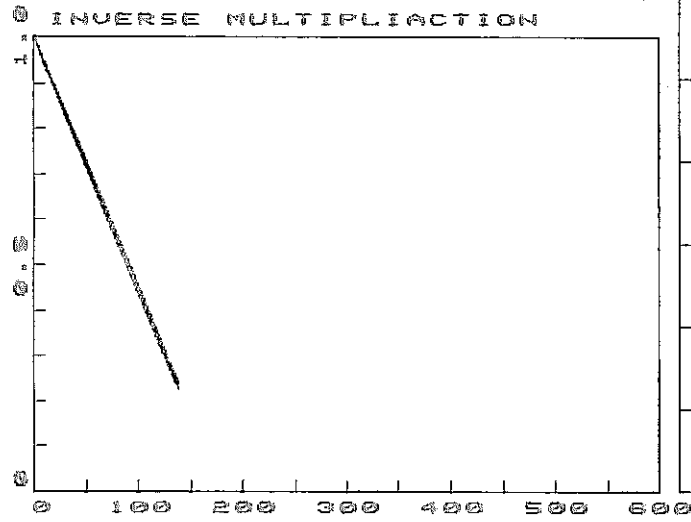
原子炉附属建家
(中央制御室)



- 5 -

図-1 ロットガイダーシステム構成図

**** ROD GUIDER ****
< CRITICAL APPROACH >



	STROKE	ρ	CH-1	CH-2	Co/Cn	
0	2454.2	0.00E+00	58	55	1.00	1.00
1	2545.4	0.00E+00	114	112	0.51	0.49
2	2592.4	0.00E+00	243	240	0.24	0.23
3						
4						
5						

CH-1 FLUX :	248 CPS	1E0	1E1	1E2	1E3	1E4	1E5	1E6
CH-2 FLUX :	244 CPS							
CR	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >		
POSITION :	440.8	440.3	439.2	440.5	442.6	388.9		

PREDICTED STROKE FOR CRITICAL :	
CH-1 :	43.9 mm
PREDICTED STROKE FOR CRITICAL :	
CH-2 :	40.8 mm

GUIDANCE	
WITHDRAW CR	20.4 mm
1989/08/23	15/16/29

図-2 臨界操作時のCRT表示画面例

*** ROD GUIDER ***

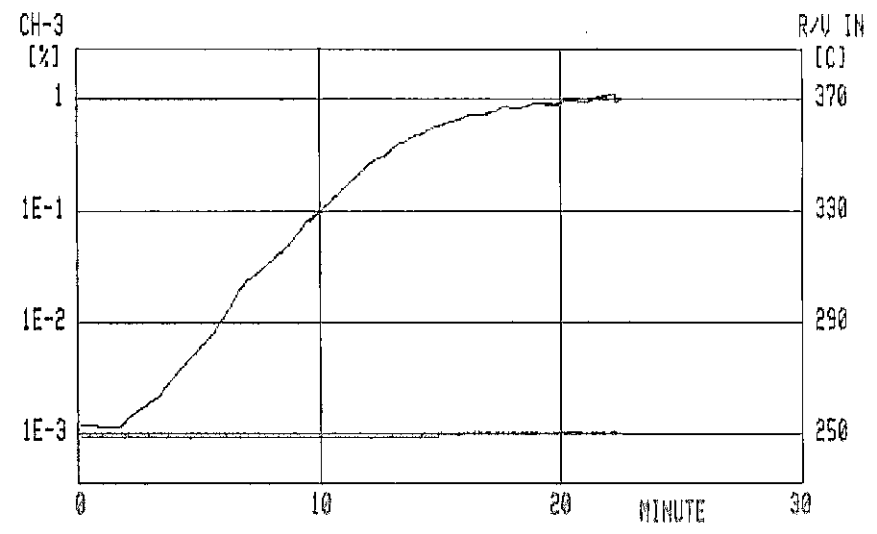
< SYSTEM HEAT UP >

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

THERMAL POWER (MW) 2.2
 NEUTRON CH-3 (%) 1.0 1.0
 CH-4 (%) 1.0 1.0
 CH-5 (%) 1.0 1.0

R/V IN TEMP (C) A 250.0 B 249.9
 R/V OUT TEMP (C) A 251.5 B 251.3

O/F TANK TEMP (C) 237.2
 R/V OUT - O/F TK (C) 14.3



CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
POSITION	439.6	442.3	439.3	437.6	442.5	434.7

INFORMATION

LOOP TEMP	8.1	RATE (C/hr)
-----------	-----	-------------

	ORDER	POSITION	WITHDRAW
1	CR- 6	434.7	.8
2	CR- 4	437.6	0.0
3	CR- 3	439.3	0.0
4	CR- 1	439.6	0.0
5	CR- 2	442.3	0.0
6	CR- 5	442.5	0.0

OPERATION GUIDE

OPERATION MODE SW HIGH POWER

CHANGE O/F SYSTEM SW
 FROM MAN TO AUTO

1989/08/23 15:57:50

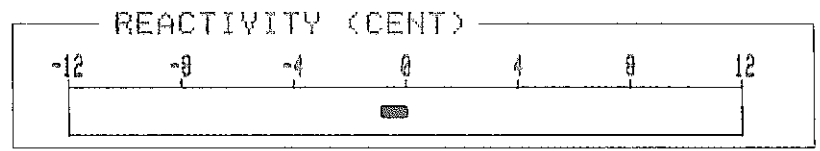


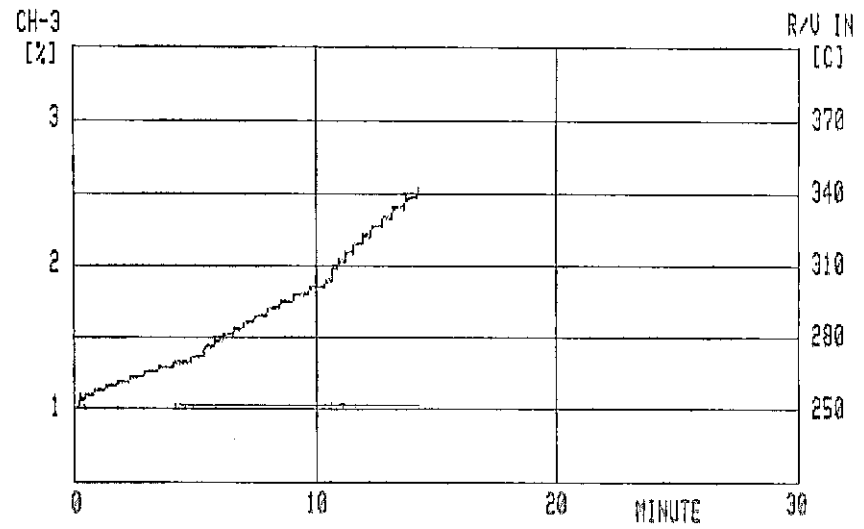
図-3 系統昇温時(1KWから1MW)のCRT表示画面例

*** ROD GUIDER ***
 < SYSTEM HEAT UP >
 [250 C ==> 370 C] -AVERAGE-

THERMAL POWER (MW) 3.1
 NEUTRON CH-3 (%) 2.5 2.5
 CH-4 (%) 2.5 2.5
 CH-5 (%) 2.5 2.5

R/V IN TEMP (C) A 251.0 B 251.4
 R/V OUT TEMP (C) A 253.8 B 253.8

O/F TANK TEMP (C) 236.9
 R/V OUT - O/F TK (C) 16.9



CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
POSITION	439.6	442.3	440.3	440.6	441.7	439.2

INFORMATION	
LOOP TEMP	3.4 RATE (C/hr)

	ORDER	POSITION	WITHDRAW
1	CR- 6	439.2	1.7
2	CR- 1	439.6	0.0
3	CR- 3	440.3	0.0
4	CR- 4	440.6	0.0
5	CR- 5	441.7	0.0
6	CR- 2	442.3	0.0

OPERATION GUIDE

TILL NEXT DRAW 01:26 min.
 1989/08/23 18:18:27

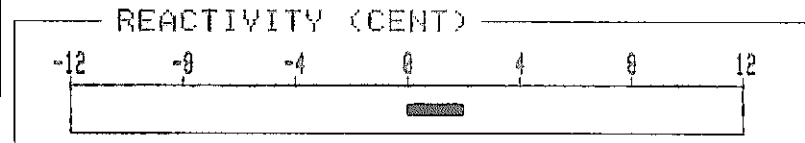


図-4 系統昇温時(250℃から370℃)のCRT表示画面例

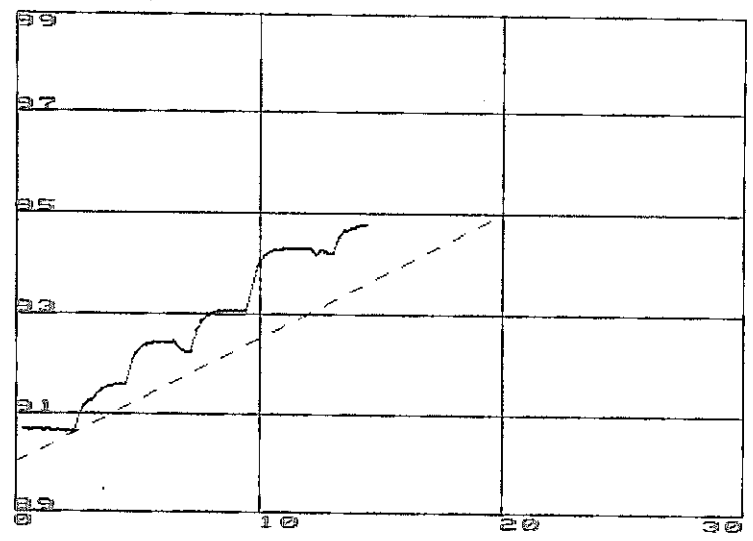
*** ROD GUIDER ***

< POWER ASCENT >

[90 MW ==> 95 MW]

THERMAL POWER (MW)	94.9	-AVERAGE- 95.4
NEUTRON CH-6 (%)	94.9	94.8
CH-7 (%)	94.8	94.8
CH-8 (%)	94.8	94.7

R/V INLET TEMP. (C)	-A LOOP- 368.4	-B LOOP- 369.9
R/V OUTLET TEMP. (C)	492.4	492.3
O/F TANK TEMP. (C)		449.9
R/V OUT - O/F TK (C)		42.6



CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
POSITION	488.8	488.1	488.1	487.2	487.4	486.5
CR-PREDICT	489.0	488.4	488.4	487.5	487.7	486.7

	ORDER	POSITION	WITHDRAW
1	CR- 6	486.5	.2
2	CR- 4	487.2	0.0
3	CR- 5	487.4	0.0
4	CR- 3	488.1	0.0
5	CR- 2	488.1	0.0
6	CR- 1	488.8	0.0

— OPERATION GUIDE —
 ADJUST SEC AUX DHX INLET DUMPER
 KEEP POWER ASCENT RATE: 5 MW/ 20min
 = 20 C/ hour
 CR WITHDRAW RATE : 2 mm/ 5min
 1989/08/27 06:07:37

— INFORMATION —
 LOOP TEMP ASCENT RATE (C/hr) 3.6

図-5 出力上昇時のCRT表示画面例

*** ROD GUIDER ***

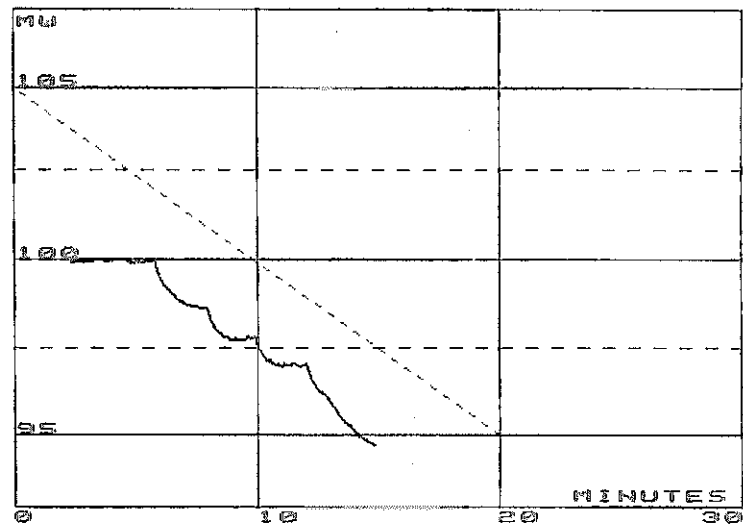
< POWER DESCENT >

[100 MW ==> 95 MW]

		-AVERAGE-
THERMAL POWER (MW)	98.4	97.7
NEUTRON CH-6 (%)	94.5	94.8
CH-7 (%)	94.5	94.8
CH-8 (%)	94.4	94.7

	-A LOOP-	-B LOOP-
R/V INLET TEMP. (C)	367.2	368.7
R/V OUTLET TEMP. (C)	492.6	492.3

D/F TANK TEMP. (C)	449.9
R/V OUT - D/F TK (C)	42.7



CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
POSITION	488.9	486.1	488.1	487.3	487.2	488.5
CR-PREDICT	489.1	486.3	488.5	487.6	487.5	488.8

	ORDER	POSITION	INSERT
1	CR- 1	488.8	.3
2	CR- 6	488.5	0.0
3	CR- 3	488.1	0.0
4	CR- 4	487.3	0.0
5	CR- 5	487.2	0.0
6	CR- 2	486.0	0.0

OPERATION GUIDE

CHANGE DHX CONTROLLER [AUTO] TO [CAS]
 KEEP POWER DESCENT RATE: -10MW/20min
 = -35 C/hour
 CR INSERT RATE : 2mm/ 3min

1989/08/27 05:38:22

INFORMATION

LOOP TEMP DESCENT RATE (C/hr) 15.4

図-6 出力降下時のCRT表示画面例

*** ROD GUIDER ***

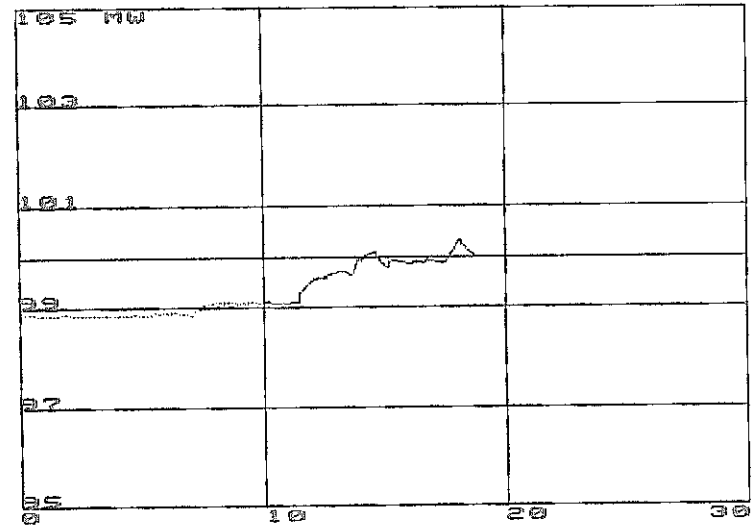
< POWER ADJUSTMENT >

		-AVERAGE-
REACTOR POWER (MW)	98.0	99.6
CH-6 (%)	100.0	100.0
CH-7 (%)	100.0	100.0
CH-8 (%)	99.9	100.0

R/V INLET TEMP. (C)	365.1	368.8
R/V OUTLET TEMP. (C)	497.3	497.3
PRI. FLOW RATE (M3/H)	1153.2	1286.8

O/F TANK TEMP.(C)	450.1
Delta T (R/V OUT - O/F TK)	47.2

CR No.	- 1 -	- 2 -	- 3 -	- 4 -	- 5 -	- 6 -
POSITION	490.7	489.1	488.2	489.4	489.3	488.8
CR-PREDICT	490.7	489.0	488.0	489.3	489.3	488.7



	ORDER	POSITION	WITHDRAW
1	CR- 3	488.1	- .1
2	CR- 6	488.7	0.0
3	CR- 2	489.1	0.0
4	CR- 4	489.3	0.0
5	CR- 5	489.4	0.0
6	CR- 1	490.7	0.0

OPERATION GUIDE

1989/08/27 05:08:12

!! ARRIVED AT 100MW !!

図-7 出力調整時のCRT表示画面例

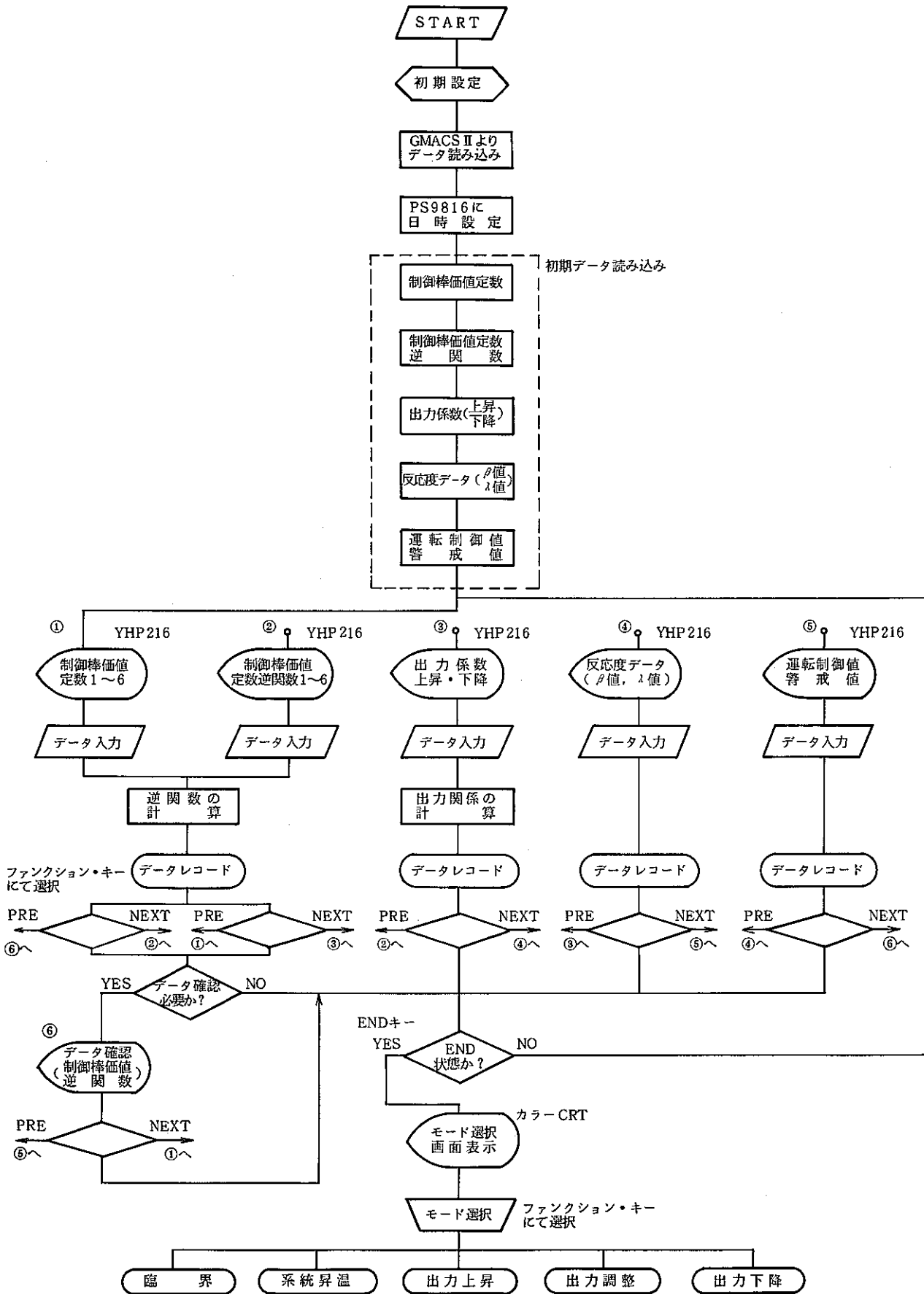


図-8 メニュープログラムフローチャート

原子炉運転モードスイッチ

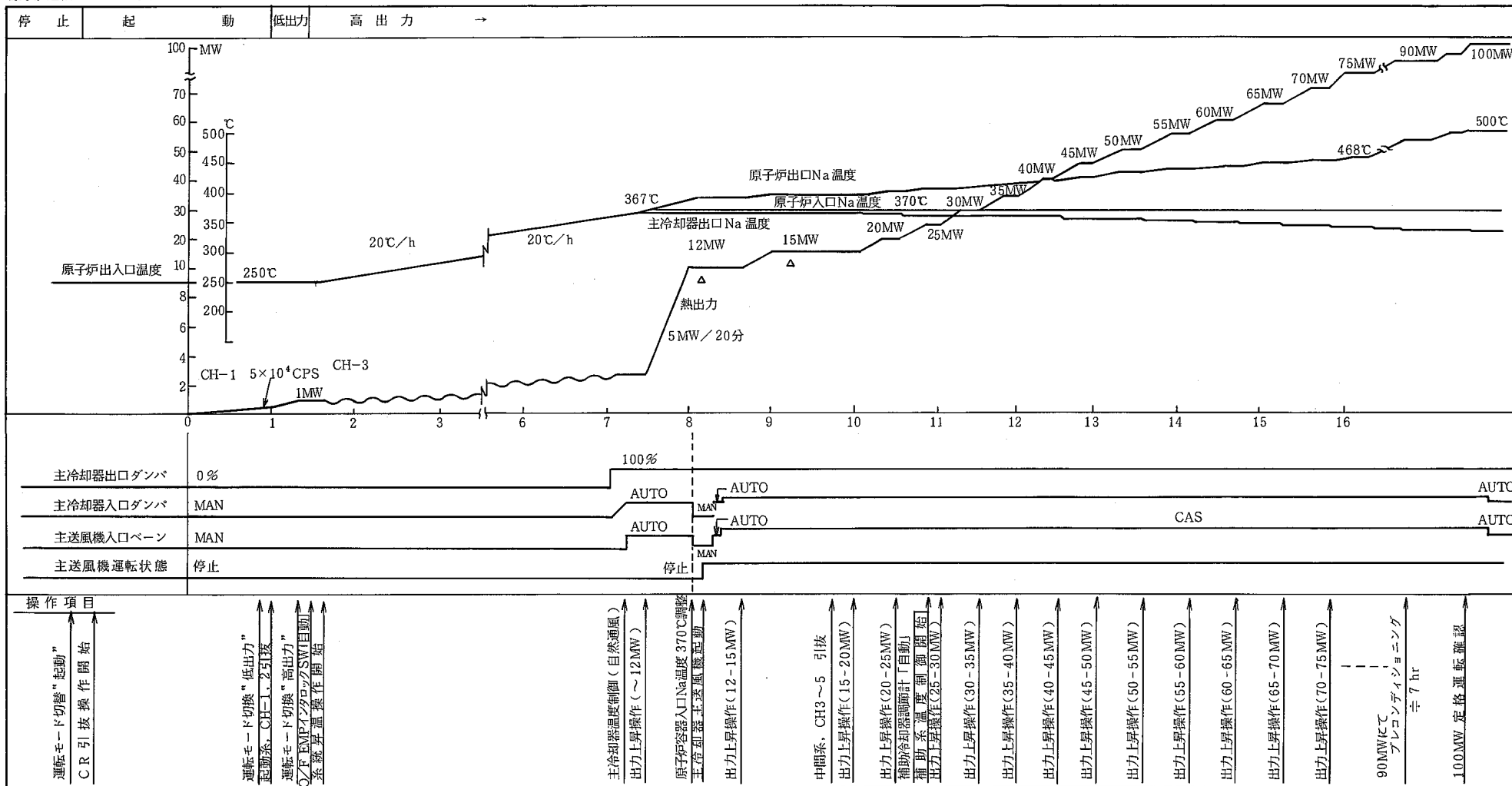


図-9 原子炉通常起動曲線

[常陽の運転曲線]

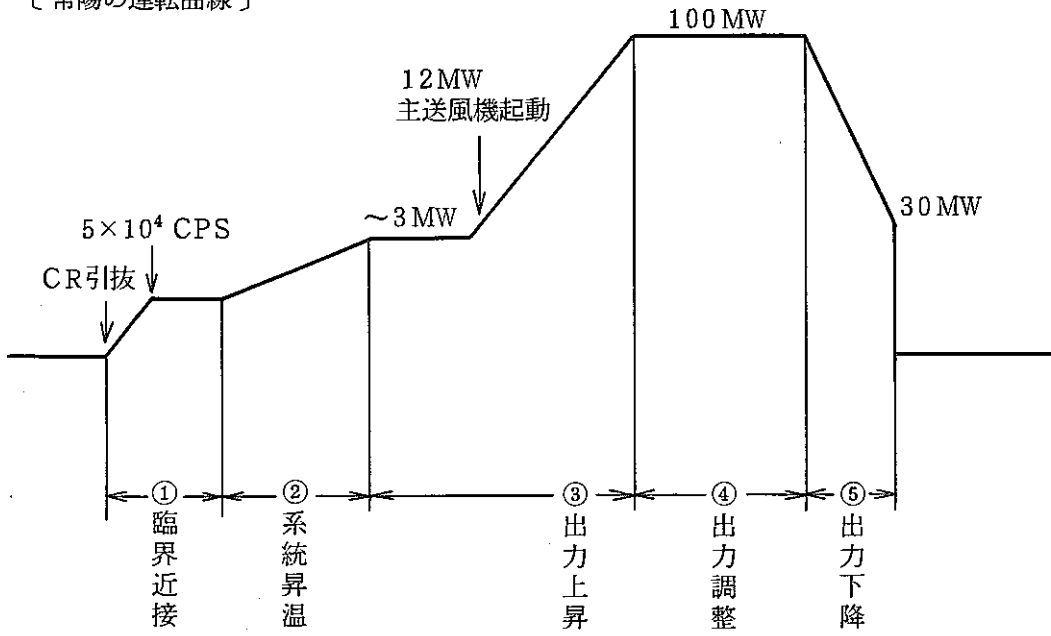


図-10 ロッドガイダーのガイダンス範囲

4. 制御棒引抜阻止プログラムの開発

4.1 開発目的

本プログラムの開発目的は、核的及び熱的運転制限値を逸脱する制御棒操作に対して、制御棒の引抜阻止をかけ、制御棒操作の信頼性の向上を図ることでロッドガイダーのバックアップ的役割を持たせることを目的としている。

4.2 制御棒引抜阻止項目の考え方

「常陽」の運転に当っては、「原子炉施設保安規定」に記載されている原子炉の運転上の制限を超えて原子炉を運転することは、原子炉施設の保安上からも許容できない。

「常陽」における原子炉運転操作に当っての具体的な運用は、「運転操作マニュアル・プラント編」，「運転操作マニュアル・系統編」，「事故想定マニュアル」，「異常時処置マニュアル」等の要領書に記載されている運転管理の制限に基づいて行われている。

制御棒操作に係わるインタロックは、原子炉の安全を確保するため多数設けられている。³⁾

しかし、例えば、運転管理上の制限として設けられている系統昇温操作時の制御棒操作は、「系統昇温率 20℃/h」以下を厳守するよう操作マニュアルで規定されているが、系統昇温率 20℃/h を超える制御棒操作を行った場合のインタロックは設けられていない。したがって、系統昇温率 20℃/h を超える制御棒操作は可能である。

この対策として、運転管理上の制限を逸脱する制御棒操作、特にロッドガイダーのガイドを無視することによって、核的及び熱的運転制限値を逸脱する可能性のある項目について、ロッドガイダーをバックアップする意味で制御棒引抜阻止のインタロックを設け、制御棒操作の信頼性の向上を図ることにした。

第1フェーズのロッドガイダーの開発で設けた表-2，表-3のガイダンス項目を参考にし、系統昇温時及び出力上昇時の制御棒操作で最も注意を要する、以下の項目を制御棒引抜阻止項目として選定しプログラムの開発を行った。

(制御棒引抜阻止項目)

- ① ペリオド：50秒未満 (系統昇温操作時に適用)
- ② 系統昇温率：20℃/h超過 (系統昇温，出力上昇操作時に適用)
- ③ 原子炉入口Na温度－オーバフロータンクNa温度：80℃超過
(系統昇温，出力上昇操作時に適用)

4.3 制御棒引抜阻止項目選定の根拠

(1) ペリオド：50 秒未満（系統昇温操作時に適用）

系統昇温操作の領域は、ペリオド・核加熱領域である。本領域での制御棒操作は、ペリオドを一定の範囲で維持しながら制御棒の引抜操作を行うことになっており、ペリオドの指示には特に注意を要する。最悪の場合は、原子炉保護系が作動（警報値：25 秒，原子炉スクラム値：5 秒）し、原子炉スクラムに至る。通常このような制御棒操作はありえないが、制御棒操作の信頼性向上のために、本項目を選定した。

(2) 系統昇温率：20 ℃/h 超過及び原子炉出口 Na 温度－オーバフロータンク Na 温度：80 ℃超過（系統昇温操作及び出力上昇操作に適用）

系統昇温操作及び出力上昇時の制御棒操作において、最も注意を要することは、原子炉出力の変化とともに、各系統の各部温度の変化の状況である。特に系統昇温率に関しては、平均昇温率 50 ℃/h 以下という運転上の制限が設けられている。しかし、実際の運転では、原子炉出口 Na 温度の変化に対し、1 次系のオーバフロータンク Na 温度の変化が追従しにくいいため、系統昇温率を 50 ℃/h にすると、オーバフロー系の温度制限条件「原子炉出口 Na 温度とオーバフロータンク Na 温度の差 80 ℃以下」が満足できなくなり、オーバフロー系汲上げ配管炉容器貫通部の熱衝撃が問題となることが、通常運転時の構造健全性評価の結果としてでている。この結果、運転経験に基づき「系統昇温率 20 ℃/h 超過」の運転管理上の制限値が決定されている。また、同様に熱衝撃防止の観点から「原子炉出口 Na 温度－オーバフロータンク Na 温度の差 80 ℃超過」の運転管理上の制限値が決定されている。

これらの制限値の逸脱は、制御棒操作のみに起因することから、これを防止する意味で2つの項目を選定した。

4.4 ロッドガイダーとシミュレータとの接続

第1フェーズのロッドガイダーの検証試験は、原子炉運転中を利用して行った。これは、実プラントの信号取り込みのみであり、実プラントに悪影響を与える心配がなかったからである。

しかし、第2フェーズの制御棒引抜阻止の検証試験は、直接制御棒駆動装置の制御系に引抜阻止のインタロック信号を入れて作動確認を行うため、実プラントでの検証試験は、プラント管理上からの制約から、ロッドガイダーをシミュレータ⁴⁾に接続し、シミュレータで検証試験を行うことにした。

このための準備作業として、中央制御室に設置されていたロッドガイダーをシミュレータ室に移設し、ロッドガイダーをシミュレータに接続する工事を行った。図-11にロッドガイダーとシミュレータとの接続図を示す。

また、ロッドガイダーをシミュレータに接続するにあたって、シミュレータからロッドガイダーへの入力信号は、制御棒引抜阻止プログラムの開発に必要な信号に限定し、デジタル信号 27

表-2 <1 KWから1 MW迄の出力上昇>画面のガイダンス項目

	カ ラ - C R T 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」 に切換える事を指示する。
2	OPERATION MODE SW LOW POWER	運転モードスイッチを「低出力」に切換えた。
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」 に切換える事を指示する。
6	PRM RANGE SW POSITION 0.35	出力系レンジスイッチが「0.35」に切換った。
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」 に切換える事を指示する。
8	PRM RANGE SW POSITION 1.25	出力系レンジスイッチが「1.25」に切換った。
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」 に切換える事を指示する。
10	PRM RANGE SW POSITION 3.5	出力系レンジスイッチが「3.5」に切換った。
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」 に切換える事を指示する。
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」に切換えた。
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」に切換える事を指示する。
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」 に切換った。
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-3 <250℃から370℃迄の系統昇温>画面のガイダンス項目

	カラ - C R T の 出 力	ガイダンスの内容
1	CAUTION R/V Temp - O/F TANK Temp >= 75℃ 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℃を超えた。
2	LIMITED R/V Temp - O/F TANK Temp >= 80℃ 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℃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「12.5」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「12.5」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℃	原子炉入口Na温度が367℃に到達した。
10	TEMP INC . RATE LIMIT OVER !	系統昇温率20℃/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。

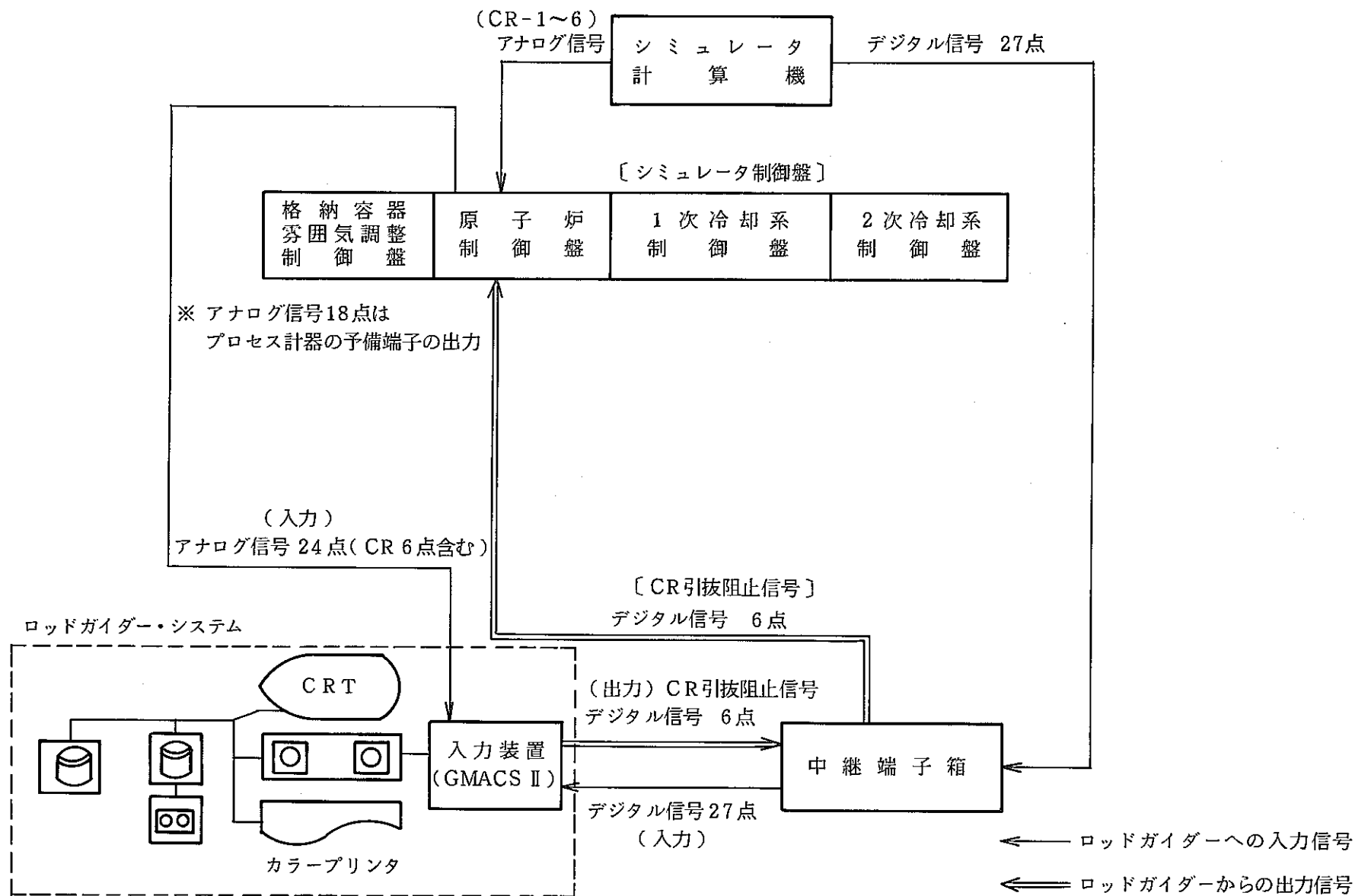


図-11 シミュレータとロッドガイダーとの接続図

点，アナログ信号 24 点の計 51 点とした。シミュレータからロッドガイダーへの出力信号リストを表-4，表-5に示す。

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）から入力し，中継端子盤を経由してロッドガイダー信号変換器内に取り込み，また，アナログ信号は，シミュレータ盤の各プロセス信号端子から入力し，盤内端子から直接，ロッドガイダー信号変換器内へ取り込んだ。

デジタル信号及びアナログ信号は，ロッドガイダーのパーソナルコンピュータにて演算処理し，カラー CRT に表示しながら一方で，シミュレータ側へ信号を発信するようになっている。

4.5 制御棒引抜阻止インタロック回路

制御棒引抜阻止インタロックは，ロッドガイダーからの信号によって引抜阻止が働くように，シミュレータの制御棒位置指示用セルシンモータ駆動回路に設けた。

制御棒引抜阻止インタロック回路図を図-12に示す。

インタロックを設けた個所は，制御棒位置指示用セルシンモータ駆動回路で，接点は通常「閉」の b 接点を用い，ロッドガイダーからの制御棒引抜阻止インタロック信号で回路が「開」となり制御棒引抜阻止が働くようにした。

また，制御棒引抜阻止が働いた時，安全側の操作として，制御棒を挿入したい場合は，操作スイッチを「挿入」位置に操作することによって「開」いていた b 接点が「閉」となり，回路が形成され制御棒の挿入操作が可能となる。

尚，シミュレータの制御棒位置指示用セルシンモータは，直流モータを使用しており，シミュレータ計算機によって極性を変えて正転（引抜），逆転（挿入）動作を行っている。一方，実機では，制御棒駆動に三相誘導モータを使用しており，正転（引抜），逆転（挿入）は相の切替によって行っている。実機採用時は，回路の改造を行うことで対処できる。

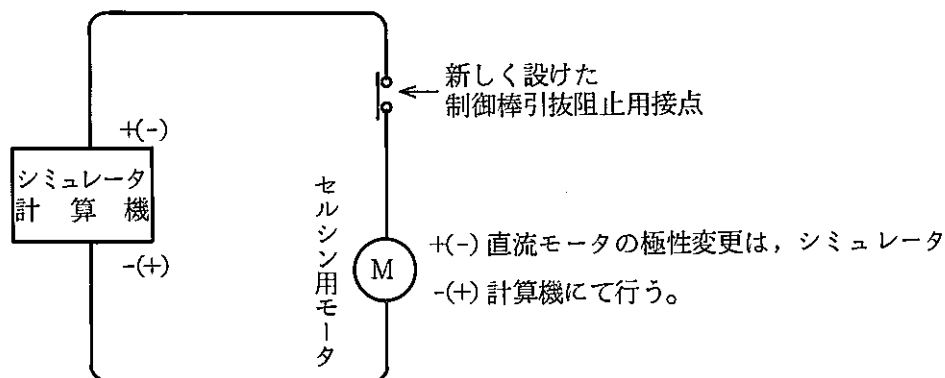


図-12 制御棒引抜阻止用インタロック回路

表-4 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 ~ 950mm	0 ~ 10V
2	# 2 制御棒位置	-50 ~ 950mm	0 ~ 10V
3	# 3 制御棒位置	-50 ~ 950mm	0 ~ 10V
4	# 4 制御棒位置	-50 ~ 950mm	0 ~ 10V
5	# 5 制御棒位置	-50 ~ 950mm	0 ~ 10V
6	# 6 制御棒位置	-50 ~ 950mm	0 ~ 10V
7	中性子束 (CH-1)	1 ~ 10 ⁶ cps	0 ~ 10V
8	中性子束 (CH-2)	1 ~ 10 ⁶ cps	0 ~ 10V
9	中性子束 (CH-3)	10 ⁻⁴ ~ 100%	0 ~ 10V
10	中性子束 (CH-4)	10 ⁻⁴ ~ 100%	0 ~ 10V
11	中性子束 (CH-5)	10 ⁻⁴ ~ 100%	0 ~ 10V
12	中性子束 (CH-6)	0 ~ 120%	0 ~ 10V
13	中性子束 (CH-7)	0 ~ 120%	0 ~ 10V
14	中性子束 (CH-8)	0 ~ 120%	0 ~ 10V
15	PRMレンジ (CH-6)		1 ~ 5V
16	PRMレンジ (CH-7)		1 ~ 5V
17	PRMレンジ (CH-8)		1 ~ 5V
18	1次冷却Na流量 (Aループ)	0 ~ 1400m ³ /h	1 ~ 5V
19	1次冷却Na流量 (Bループ)	0 ~ 1400m ³ /h	1 ~ 5V
20	オーバフロータンクNa温度	0 ~ 600℃	1 ~ 5V
21	原子炉容器入口Na温度 (Aループ)	100 ~ 600℃	1 ~ 5V
22	原子炉容器入口Na温度 (Bループ)	100 ~ 600℃	1 ~ 5V
23	原子炉容器出口Na温度 (Aループ)	100 ~ 600℃	1 ~ 5V
24	原子炉容器出口Na温度 (Bループ)	100 ~ 600℃	1 ~ 5V

表-5 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(引抜)(CR-1)
17	CRDM動作(引抜)(CR-2)
18	CRDM動作(引抜)(CR-3)
19	CRDM動作(引抜)(CR-4)
20	CRDM動作(引抜)(CR-5)
21	CRDM動作(引抜)(CR-6)
22	CRDM動作(挿入)(CR-1)
23	CRDM動作(挿入)(CR-2)
24	CRDM動作(挿入)(CR-3)
25	CRDM動作(挿入)(CR-4)
26	CRDM動作(挿入)(CR-5)
27	CRDM動作(挿入)(CR-6)

5. 制御棒引抜阻止プログラムの検証試験

5.1 試験方法

ロッドガイダーからの制御棒引抜阻止インタロック信号により、シミュレータの制御棒が引抜けないことを、以下の制御棒引抜阻止項目について確認する。

- ① ペリオド : 50 秒未満 (系統昇温操作時に適用)
- ② 系統昇温率 : 20 ℃/h 超過 (系統昇温操作及び出力上昇操作時に適用)
- ③ 原子炉出口 Na 温度 - オーバフロータンク Na 温度 : 80 ℃ 超過
(系統昇温操作及び出力上昇操作時に適用)

(1) 試験-1 (ペリオド : 50 秒未満)

シミュレータを起動し、シミュレータの運転状態を系統昇温モードに設定して、ロッドガイダーのカラー CRT 画面に表示されている制御棒引抜操作量の指示に従って、制御棒を引抜き系統昇温操作を行う。次に、ロッドガイダーの指示を超える制御棒引抜操作を行い、シミュレータのペリオド指示計で 50 秒未満になった時点で、ロッドガイダーのカラー CRT 画面に「STOP CR MANIPULATION CHECK PERIOD」が表示されるとともに、制御棒の引抜操作が阻止されることを確認する。

(2) 試験-2 (系統昇温率 : 20 ℃/h 超過)

シミュレータの運転状態を系統昇温モードまたは出力上昇モードに設定し、ロッドガイダーのカラー CRT 画面に表示される制御棒引抜操作量の指示に従って制御棒を引抜き系統昇温操作または出力上昇操作を行う。次に、ロッドガイダーの指示を超える制御棒引抜操作を行い、原子炉入口 Na 温度上昇率が 20 ℃/h を超えた時点で、ロッドガイダーのカラー CRT 画面に「TEMP INC RATE LIMIT OVER 20 ℃/h」が表示されるとともに制御棒の引抜操作が阻止されることを確認する。

(3) 試験-3 (原子炉出口 Na 温度 - オーバフロータンク Na 温度 : 80 ℃ 超過)

シミュレータの運転状態を系統昇温モードまたは出力上昇モードに設定し、ロッドガイダーのカラー CRT 画面に表示される制御棒引抜操作量の指示に従って制御棒を引抜き系統昇温操作または出力上昇操作を行う。次に、ロッドガイダーの指示を超える制御棒引抜操作を行い、「原子炉出口 Na 温度 - オーバフロータンク Na 温度」の温度差が 80 ℃ を超えた時点で、ロッドガイダーのカラー CRT 画面に「LIMITED R/V Temp-O/F TANK Temp > 80 ℃ OVER」が表示されるとともに制御棒の引抜操作が阻止されることを確認する。

写真-1 に、シミュレータでの検証試験風景を示す。

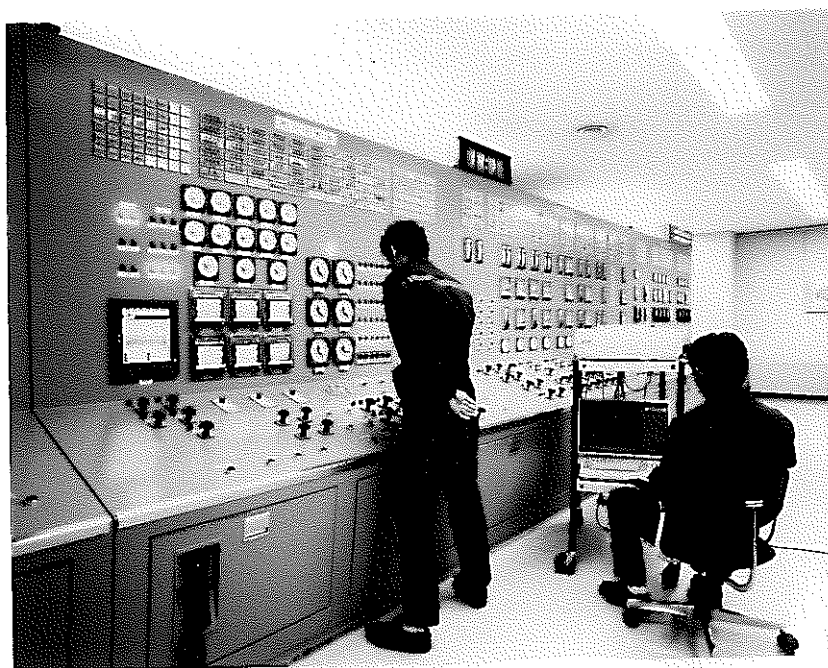


写真-1 シミュレータでの検証試験風景

5.2 試験結果

(1) 試験-1 (ペリオド: 50秒未満)

系統昇温操作において、ロッドガイダーの制御棒引抜操作量の指示を超える制御棒引抜操作を行った結果、ペリオド指示計で50秒未満に達した時点で、ロッドガイダーから制御棒引抜阻止インタロック信号が発信し、ロッドガイダーカラーCRT画面に「STOP CR MANIPULATION CHECK PERIOD」が表示されるとともに、制御棒引抜阻止インタロックが良好に動作し、制御棒が引抜けないことを確認した。

図-13に系統昇温時、ペリオド10秒未満で制御棒引抜阻止が働いた時のロッドガイダーカラーCRT画面を示す。

(2) 試験-2 (系統昇温率: 20℃/h超過)

系統昇温操作または出力上昇操作において、ロッドガイダーの制御棒引抜操作量の指示を超える制御棒引抜操作を行った結果、原子炉入口Na温度の上昇率が20℃/hを超えた時点で、ロッドガイダーから制御棒引抜阻止インタロック信号が発信し、ロッドガイダーカラーCRT画面に「TEMP INC RATE LIMIT OVER 20℃/h」が表示されるとともに、制御棒引抜阻止インタロックが良好に動作し、制御棒が引抜けないことを確認した。図-14に系統昇温時、系統昇温率が20℃/hを超えて制御棒引抜阻止が働いた時のロッドガイダーカラーCRT画面を示す。

(3) 試験-3 (原子炉出口Na温度) - (オーバフロータンクNa温度): 80℃未満

系統昇温操作または出力上昇操作において、ロッドガイダーの制御棒引抜操作量の指示を超える制御棒引抜操作を行った結果、「原子炉出口Na温度 - オーバフロータンクNa温度」

の温度差が80℃を超えた時点で、ロッドガイダーから制御棒引抜阻止インタロック信号が発信し、ロッドガイダーカラーCRT画面に「LIMITED R/V Temp-O/F TANK Temp > 80℃ OVER」が表示されるとともに制御棒引抜阻止インタロックが良好に動作し、制御棒が引抜けないことを確認した。

試験-1～3の検証試験結果、核的及び熱的運転制限値を逸脱した制御棒操作に対して、今回設けた引抜阻止インタロック項目は、いずれもロッドガイダーから制御棒引抜阻止インタロック信号が良好に発信され、制御棒引抜阻止インタロックが良好に作動し、制御棒が引抜けないことを確認した。図-15に出力上昇時に原子炉出口Na温度-オーバフロータンクNa温度が80℃を超えて、制御棒引抜阻止が働いた時のロッドガイダーCRT画面を示す。

5.3 試験の成果

制御棒引抜阻止インタロックは、ロッドガイダーの機能(制御棒操作量の指示及び主要なプラント操作のガイド)のバックアップ的役割を果たすもので、特に、核的及び熱的運転制限値を逸脱する制御棒操作を阻止する目的で設けられたものである。

検証試験の結果、期待していた通りの結果を得ることができ、制御棒操作に対する信頼性の向上に寄与できることが確認された。

*** ROD GUIDER ***

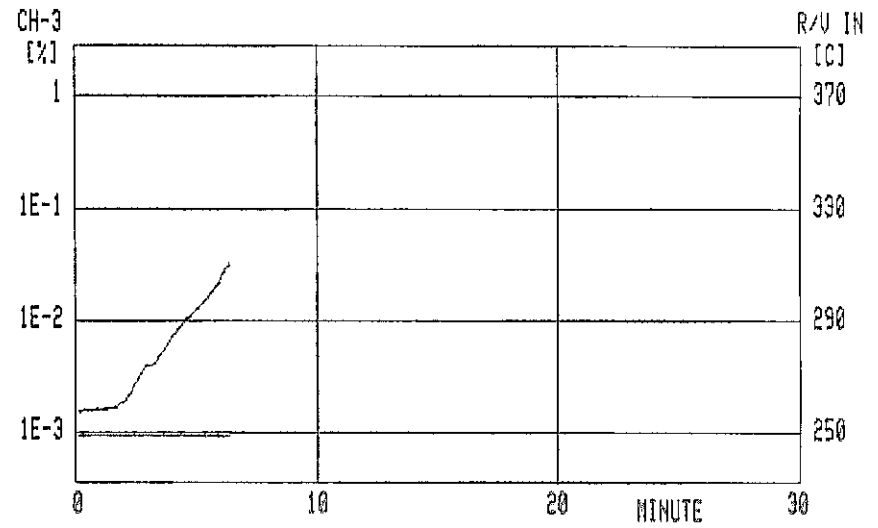
< SYSTEM HEAT UP >

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

THERMAL POWER (MW) 1.2
 NEUTRON CH-3 (%) 0.0 0.0
 CH-4 (%) 0.0 0.0
 CH-5 (%) 0.0 0.0

R/V IN TEMP (C) A 248.6 B 248.8
 R/V OUT TEMP (C) A 248.9 B 248.9

O/F TANK TEMP (C) 238.5
 R/V OUT - O/F TK (C) 10.4



CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
POSITION	439.3	442.4	440.2	436.6	442.5	438.1

INFORMATION		
LOOP TEMP	-84.4	RATE (C/hr)

	ORDER	POSITION	WITHDRAW
1	CR- 4	436.5	-1.7
2	CR- 6	438.1	0.0
3	CR- 1	439.2	0.0
4	CR- 3	440.2	0.0
5	CR- 2	442.3	0.0
6	CR- 5	442.5	0.0

OPERATION GUIDE

**STOP CR MANIPULATION
CHECK PERIOD**

1989/08/17 14:19:08

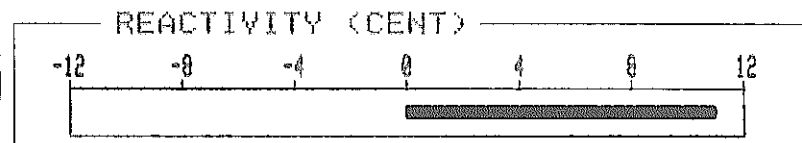


図-13 系統昇温時のCRT表示画面(ペリオド50秒未満での制御棒引抜阻止)

*** ROD GUIDER ***

< SYSTEM HEAT UP >

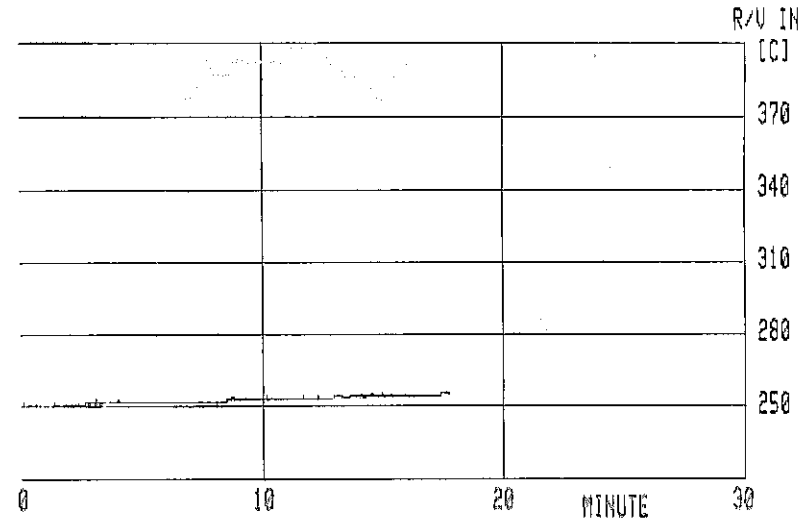
[250 C ==> 370 C]

-AVERAGE-

THERMAL POWER (MW) 1.8
 NEUTRON CH-3 (%) 3.4 3.4
 CH-4 (%) 3.4 3.4
 CH-5 (%) 3.4 3.4

R/V IN TEMP (C) A 255.4 B 253.9
 R/V OUT TEMP (C) A 257.7 B 257.6

O/F TANK TEMP (C) 238.5
 R/V OUT - O/F TK (C) 19.2



CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
POSITION	440.6	440.2	441.3	440.5	441.5	439.5

INFORMATION		
LOOP TEMP	21.0	RATE (C/hr)

	ORDER	POSITION	WITHDRAW
1	CR- 6	439.5	1.7
2	CR- 2	440.2	0.0
3	CR- 4	440.5	0.0
4	CR- 1	440.6	0.0
5	CR- 3	441.3	0.0
6	CR- 5	441.5	0.0

OPERATION GUIDE

TEMP INCR RATE LIMIT OVER
 WILL NEXT DRAW 02:18 min
 1990/01/24 19:01:46

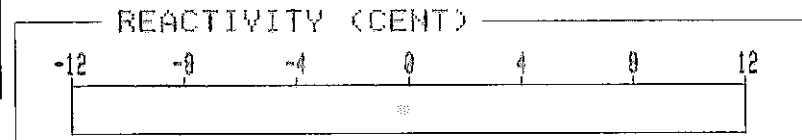
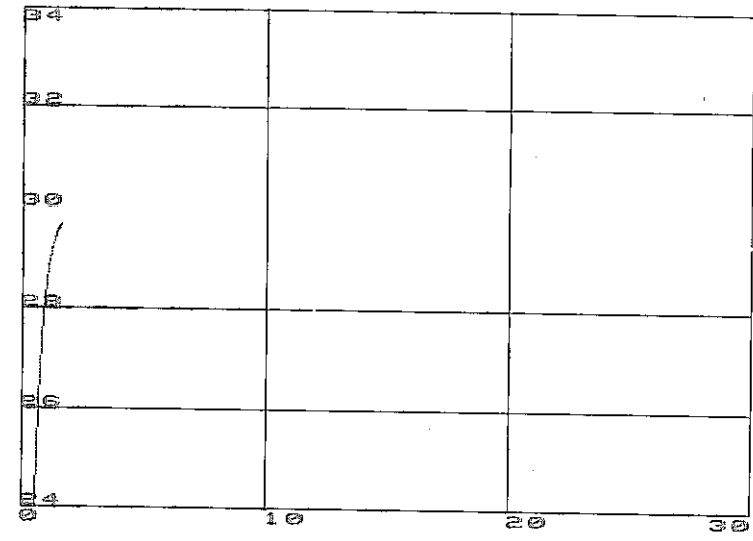


図-14 系統昇温時のCRT表示画面(系統昇温率20℃/h超過での制御棒引抜阻止)

[25 MW ==> 30 MW]

THERMAL POWER (MW)	30.3	-AVERAGE-	30.2	
NEUTRON CH-6 (%)	29.8		29.7	
CH-7 (%)	30.1		29.9	
CH-8 (%)	30.0		29.8	
<hr/>				
R/V INLET TEMP. (C)	-A LOOP-	368.3	-B LOOP-	369.8
R/V OUTLET TEMP. (C)		407.2		407.2
<hr/>				
O/F TANK TEMP. (C)			366.1	
R/V OUT - O/F TK (C)			41.2	



CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
POSITION	471.4	475.4	474.3	465.9	475.8	472.3
CR-PREDICT	471.6	475.7	474.6	466.2	476.1	472.6

	ORDER	POSITION	WITHDRAW
1	CR- 4	465.9	.3
2	CR- 1	471.4	0.0
3	CR- 6	472.3	0.0
4	CR- 3	474.3	0.0
5	CR- 2	475.4	0.0
6	CR- 5	475.8	0.0

OPERATION GUIDE

CAUTION R/V Temp - O/F TANK
Temp >= 80 C OVER !!

1900/03/01 01:26:24

INFORMATION

LOOP TEMP ASCENT RATE (C/hr) 0.0

図-15 出力上昇時のCRT表示画面(原子炉出口Na温度-オーバーフロータンクNa温度との差が80℃超過での制御棒引抜阻止)

6. ま と め

第2フェーズ制御棒引抜阻止プログラムの開発は、第1フェーズのロッドガイダー機能に、制御棒引抜阻止インタロック機能を付加し、ロッドガイダーのバックアップ的役割を持たせ、制御棒操作時の操作の信頼性向上を図ることを目的として開発したものである。

検証試験の結果、3つの制御棒引抜阻止インタロック項目は、核的及び熱的運転制限値を逸脱する制御棒操作に対して、いずれも制御棒引抜阻止機能が良好に作動することを確認し、ロッドガイダーのバックアップ的役割を十分果すことが分かった。

第2フェーズの開発をもって、ロッドガイダーの開発は終了した。今後の計画は、マンマシンインタフェイスの機能強化を図り、実機採用に向けて準備を進めていく予定である。

第1フェーズ、第2フェーズの開発を通じて得られた主な成果は、以下の通りである。

- (1) 計算機を活用することにより、「常陽」で蓄積したFBR運転技術を高度な形で有形化することができた。
- (2) 運転員自から開発に携わり、その運転経験を生かしたガイダンスプログラムを作成したことにより、制御棒操作時の操作量の予測、及びプラント操作のガイド等、実用的なシステムを構築することができた。
- (3) 最終目標である第3フェーズ、制御棒操作自動化の開発に向けてガイダンス方法等のマンマシンインタフェイスの構築手法に多くの知見を得ることができた。

7. 参 考 文 献

- (1) 奥田, 河井他: 制御棒操作ガイドシステムの開発 PNC SN9410 87-100 1987.7
- (2) 寺門, 阿部他: 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
PNC SN9410 89-052 1989.3
- (3) 高速実験炉「常陽」運転技術資料, 系統設備機器詳細資料
SMD・10-01 原子炉制御系
- (4) 大和田他: 高速実験炉「常陽」オンサイトシミュレータ活用経験
PNC I9410 87-015