

「常陽」制御棒操作ガイドシステムの開発

1994年3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)

「常陽」制御棒操作ガイドシステムの開発

*飛田 茂治、*河井 雅史、
*米川 満、*星野 勝明、
*伊藤 芳雄、*大久保利行、
*田村 政昭

要 旨

制御棒操作ガイドシステム（以下、ロッドガイダーという。）開発の最終ステップとして、マンマシンインターフェイス機能の改善を図る目的で、平成3年より CRT画面の日本語表示化、音声ガイド機能の追加、及び出力調整モードでの制御棒操作量の予測精度向上機能の追加を実施した。

これらの機能を追加したことにより、ロッドガイダーは期待通りの以下の成果を挙げ、開発業務を終了した。

- (1) CRT画面を日本語表示にしたことで、マンマシンインターフェイス機能が向上した。
- (2) 音声ガイド機能を追加したことで、ガイド内容を見落とすことがなくなり運転信頼性、安全性の向上及び運転員の負担軽減に寄与できた。
- (3) 原子炉運転操作マニュアルに記載されている操作内容の全てを取り込んだことにより、原子炉運転操作マニュアルと同等の機能となり、更にタイムリーな音声ガイドを行う事で運転経験の浅い運転員でも熟練運転員と同等の操作が可能となった。
- (4) これまでの炉心反応度計算手法に加え、過去5回の出力調整実績をフィードバックさせる予測機能を追加したことで、定時の出力調整時の予測操作量が実操作量に対して± 0.2mm以下の精度を達成することができた。

*大洗工学センター 実験炉部 原子炉第1課

M a r c h , 1 9 9 4

Development of Control Rod Guide System of Joyo

Shigeharu Tobita, Masashi Kawai, Mitsuru Yonekawa,
Katsuaki Hoshino, Yoshio Ito, Toshiyuki Okubo and
Masaaki Tamura

Abstract

As the final step of development of a control rod guide system (rod guider), it has been conducted to display information concerning the rod guider operation and the current plant conditions on a CRT in Japanese, to tell information for operators and to predict more accurately the stroke of each control rod to be driven at a reactor power adjustment operation since 1992, in order to improve a function of man-machine interface of the rod guider.

The development of the rod guider was completed with the following good results as expected.

- (1) The function of man-machine interface of the rod guider was improved to display information on a CRT in Japanese.
- (2) The voice guidance contributed to obtain higher operational reliability and to lower the load on the operators.
- (3) The rod guider provided the same function as operation manuals of Joyo because all operation procedures in the manuals were inputted into the rod guider. And the timely operation guides provided by the rod guider enabled non-skilled operators to control the reactor in the same manner as the experienced ones.
- (4) The difference of the predicted and actual rod stroke to be driven at the reactor power adjustment operation was reduced to less than $\pm 0.2\text{mm}$ by both the existing inverse multiplication method and the experiences gained in the past five reactor power adjustment operations.

Operation Section, Experimental Fast Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

1. 緒 言	1
2. ロッドガイダーの開発経緯	2
3. 「常陽」の原子炉運転操作	4
4. ロッドガイダーの機能	9
5. プログラムの開発内容	17
5.1 第1ステップ	17
5.2 第2ステップ	22
5.3 第3ステップ	23
(1) 臨界近接プログラム	29
a) 機能の概要	29
b) 予測手法	29
c) ガイド機能	29
(2) 系統昇温プログラム	39
a) 機能の概要	39
b) 予測手法	39
c) ガイド機能	39
(3) 出力上昇プログラム	45
a) 機能の概要	45
b) 予測手法	45
c) ガイド機能	46
(4) 出力調整プログラム	53
a) 機能の概要	53
b) 予測手法	53
c) ガイド機能	55
d) 特殊操作の判断機能	56
e) その他	57
(5) 出力降下プログラム	62
a) 機能の概要	62
b) 予測手法	62
c) ガイド機能	63

6. 結 言	67
7. 考 察	68
8. 参考文献	69

図. 表リスト

表2.1	ロッドガイダーの開発経緯	3
図3.1	通常起動及び出力上昇操作	5
図3.2	通常出力降下及び停止操作	7
表4.1	アナログ出力信号	11
表4.2	デジタル出力信号	13
図4.1	ロッドガイダーシステム構成図	15
図4.2	ロッドガイダープログラムのガイド範囲	16
表5.1	ステップ1のガイダンス項目	18
表5.3	日本語ガイド項目一覧表	24
図5.3-1.1	臨界近接プログラム1のCRT表示画面	33
図5.3-1.2	臨界近接プログラム2のCRT表示画面	35
図5.3-1.3	臨界近接プログラム3のCRT表示画面	37
図5.3-2.1	系統昇温プログラム1のCRT表示画面	41
図5.3-2.2	系統昇温プログラム2のCRT表示画面	43
図5.3-3.1	出力上昇プログラムのCRT表示画面	49
図5.3-3.2	制御棒配置図	51
図5.3-4	出力調整プログラムのCRT表示画面	59
表5.3.1-4	移動平均値表	61
図5.3-5	出力降下プログラムのCRT表示画面	65

1. 緒 言

高速実験炉「常陽」では、制御棒操作の自動化に向けての知見を得ること、また原子炉の運転信頼性と安全性の向上及び運転員の負担軽減を図る目的で、昭和61年から制御棒操作ガイドシステム（以下、ロッドガイダーという。）の開発に着手した。

第1ステップでは、「常陽」の全運転範囲（臨界近接、系統昇温、出力上昇、出力調整、出力降下）の制御棒操作及びプラント操作のガイドプログラムの開発を行い、第2ステップでは、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、計算機出力信号によって制御棒の引き抜きを阻止するプログラムの開発を行った。

これらの第1ステップ及び第2ステップを通して、本開発の目的である制御棒操作自動化に向けての知見を得ることができ、当初の目的を達成することができた。

しかし制御棒操作の自動化は、得られた知見をベースとしながらも原子炉の核的・熱的挙動が非線形で複雑であることから、今後はロッドガイダーの開発とは別に非線形の制御対象に有効で、なおかつ運転経験上のノウハウ等の言語情報を有効に活かすことができるファジイ制御を用いたシステム開発を目指すことにした。

一方ロッドガイダーとしては、出力制御操作を行っている運転員に対し、その支援機能を向上させる目的で第3ステップへの取り組みを開始した。

本報告書は、第3ステップとして行った、本システムのマンマシンインターフェイス機能の向上を図ることを目的とした CRT画面の日本語表示化及び音声ガイド機能の追加、また出力調整モードでの制御棒操作量の予測精度の向上を図るための予測機能の追加についてまとめたものである。

2. ロッドガイダーの開発経緯

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用いて高度な形で有形化し、運転員の負担軽減及び運転の信頼性、安全性の向上を図ることを目的として昭和61年に着手した。

第1ステップとして、昭和61年度は「常陽」の全運転範囲（臨界近接、系統昇温、出力上昇、出力調整、出力降下）のうち系統昇温を除いた4つのプログラムを作成し、原子炉運転中に実機で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。引き続き昭和62年度には、シミュレータを使って系統昇温プログラムの作成を行い、全てのプログラムについて昭和63年8月に開始した100MW第16サイクル運転を通して検証し、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。

第2ステップとして、昭和63年から平成元年にかけて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、計算機の出力信号によって制御棒の引き抜きを阻止するプログラムの開発を行った。開発にあたっては、制御棒引き抜き阻止インターロック信号を制御棒駆動装置の制御系に組み入れるため、実機を用いてのオンラインでの検証はプラント運転上制約があり、運転訓練シミュレータ（以下、シミュレータという。）を用いて行うこととした。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に移動し、シミュレータからの信号をロッドガイダーに取り込む為の接続工事の作業を平成元年3月末まで実施した。また、この作業に並行して制御棒引き抜き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、平成元年4月から6月にかけてシミュレータを用いて行い、ロッドガイダーからの出力信号によってシミュレータの制御棒に引き抜き阻止がかかり、機能が良好に作動することを確認した。

第3ステップとして、本システムのマンマシンインターフェイス機能の向上を図る目的で、平成3年より全プログラムに対してCRT画面の日本語表示化及び音声ガイド機能の追加を行うため、詳細設計、一部ハードウェアの追加及びプログラムの改造を開始した。また、出力調整プログラムでの制御棒操作量の予測精度を向上させるために、これまでの炉心反応度計算手法に加え、過去5回の出力調整時の実績をフィードバックさせる予測機能の追加を行った。本システムの実機検証を平成4年100MW第25サイクル運転を通して行い、良好な音声ガイド及び予測精度の向上を確認した。

表2.1に、ロッドガイダーの開発経緯を示す。

表 2.1 ロッドガイダーの開発経緯

年度 項目	昭和 61年度	昭和 62年度	昭和 63年度	平成 元年度	平成 2年度	平成 3年度	平成 4年度	平成 5年度
(第1ステップ) ロッドガイダーの製作・整備 (主にソフトウェアの開発)	<ul style="list-style-type: none"> 「炉島」の運転モードガイドプログラム (系統昇温除く) 作成 原子炉運転中、実機での検証試験 	<ul style="list-style-type: none"> 系統昇温プログラム作成 100MW第16サイクル運転での検証試験 						
(第2ステップ) ロッドガイダーにインター ロック機能の追加 (シミュレ ータと接続)			<ul style="list-style-type: none"> 制御棒開放禁止プログラムの開発 シミュレータでの検証試験準備作業 	<ul style="list-style-type: none"> シミュレータでの検証試験 				
(第3ステップ) ロッドガイダーの機能向上・ 制御棒操作量の予測精度の向上						<ul style="list-style-type: none"> CRT画面の日本語表示及び音声機能の追加のためのプログラムの改造 出力調整モードでの制御棒操作量予測精度向上のための機能追加 100MW第25サイクル運転での検証試験 運用開始 		

3. 「常陽」の原子炉運転操作

「常陽」においては、臨界近接・系統昇温・出力上昇・出力調整・出力降下の一連の出力調整を、制御棒の手動操作のみで行っている。

図3.1に、通常起動及び出力上昇操作、図3.2に、通常出力降下及び停止操作を示す。

原子炉起動操作は、系統温度 250°C状態から、運転モードスイッチ「起動」の位置で制御棒を引き抜き、制御棒4本の臨界予想位置、他2本を 350mm位置にセットするところから開始する。この状態から、計数率逆増倍法により求められた、臨界予想位置までに必要な制御棒操作量の1/2を繰り返し引き抜き、6本均等引き抜き状態で公称臨界点（中性子検出器CH-1： 5×10^4 cps）で安定とする。

その後、運転モードスイッチを「低出力」に切替え核計装の監視を「起動系」から「中間系」へ移した後、ペリオド100秒の出力上昇速度で1 MW（中性子検出器CH-3）まで出力を上昇する。1 MW到達後は運転モードスイッチを「高出力」とし、系統昇温操作を開始する。制御棒は2 mm/5分の割合で引き抜き、系統温度を昇温率20°C/hrで原子炉入口Na温度が 367°Cになるまで昇温する。

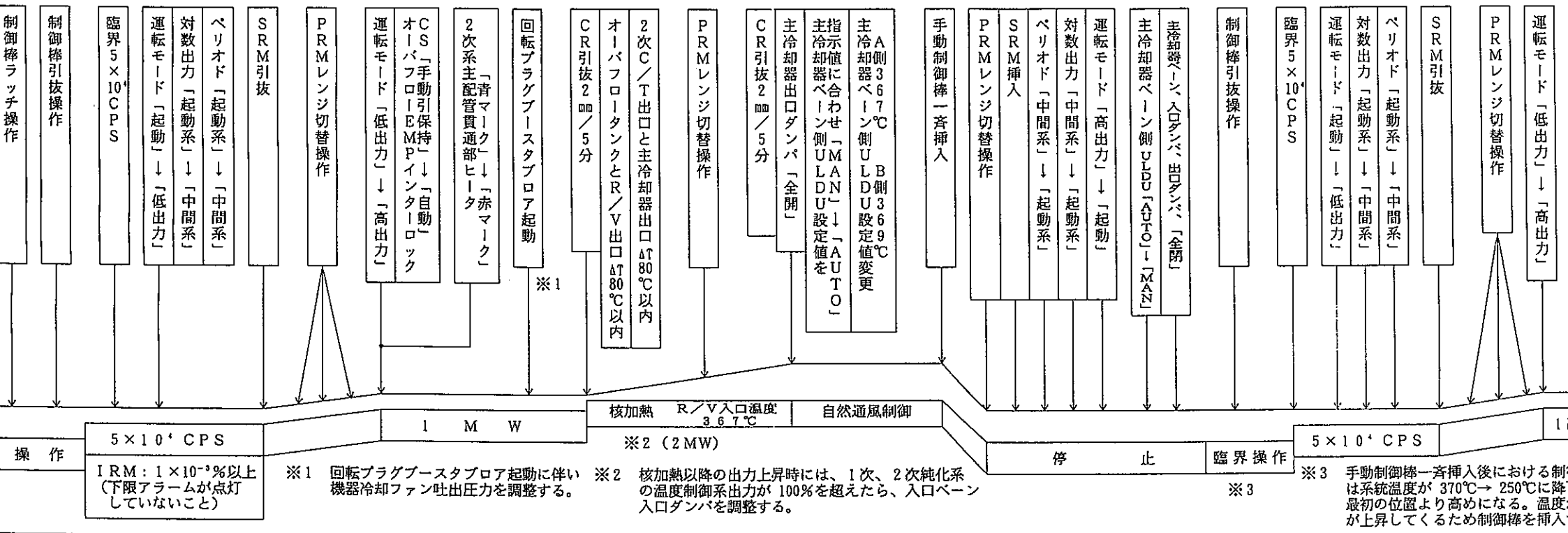
系統昇温終了後は、原子炉入口温度を370°C一定にするため、主冷却器出口Na温度制御系を「AUTO」に切替え、自然通風による除熱を開始する。その後、12MWの出力上昇を開始し、2 mm/5分（5 MW/20分）の割合で制御棒引き抜き操作を行う。この間、主冷却器出口Naの温度設定は、原子炉入口温度が370°C一定となるように適宜調整する。

12MW到達後、主送風機を起動し強制冷却を開始する。起動後は主冷却器出口Na温度制御系を「CAS」モードに切替える。「CAS」モードは、原子炉出口Na温度の変化に応じて主冷却器出口Na温度設定を自動的に変更し、原子炉入口Na温度を370°C一定に制御するものである。

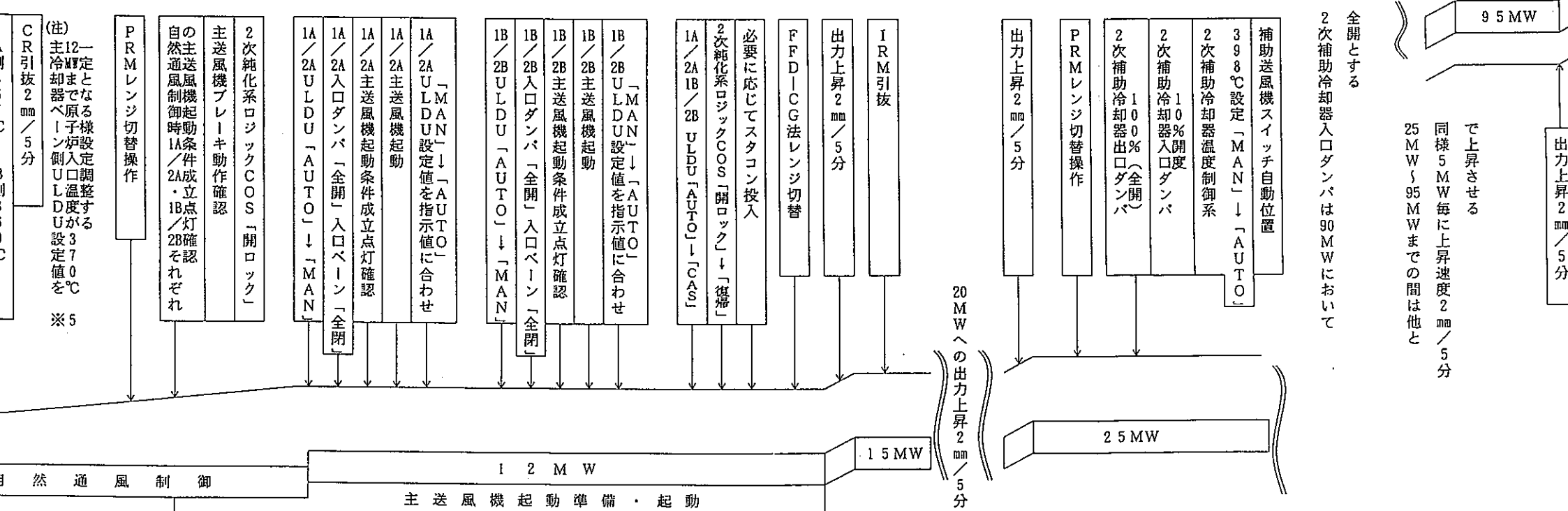
その後、12MWから15MWまでの出力上昇を行い、15MW以降は定格出力まで5 MWステップで5 MW/20分の出力上昇速度で上昇する。

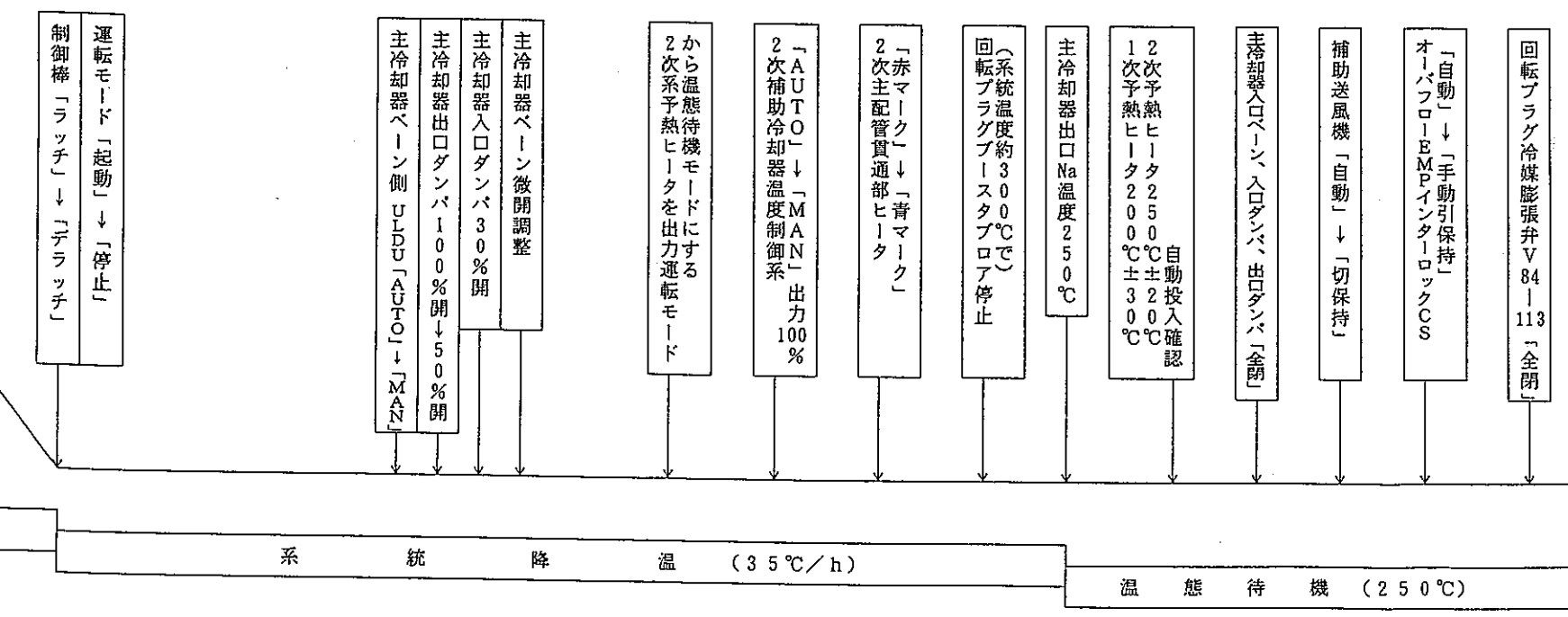
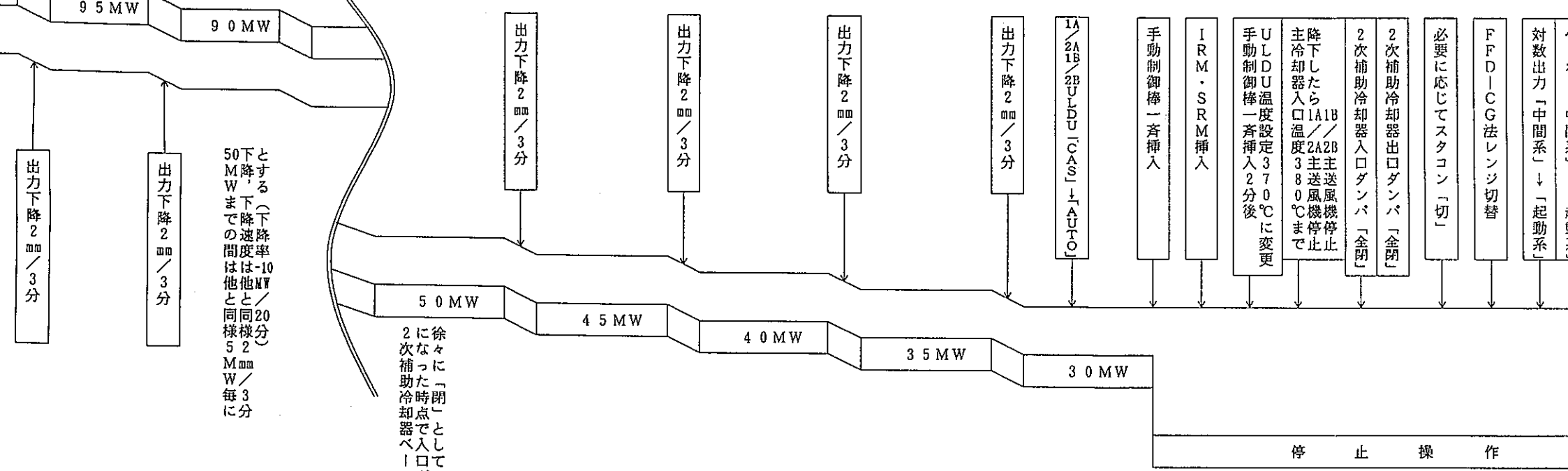
100MW到達後は、3回/日の割合で出力調整を行い、燃焼に伴う出力降下分を補償する。

出力降下は、定格出力 100MWから30MWまで、5 MWステップで5 MW/10分（35°C/h）の出力降下速度で出力を降下し、30MWに到達した時点で制御棒一斉挿入を行い原子炉を停止する。



R/V入口温度 370℃一定となるためには自然通風制御の時、温度制御系を最終的にA側 365℃、B側 367℃に設定する。





4. ロッドガイダーの機能

ロッドガイダーは、「常陽」の臨界近接、系統昇温、出力上昇、出力調整及び出力降下のプラント操作時に、運転員が必要とする情報を提供すると同時にプラント操作ガイドを行うもので、制御棒操作に関しては、目標とする原子炉出力及び原子炉出口温度を満足するための操作量、更に操作手順をCRT画面に表示するとともに音声出力にてガイドするものである。

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、カラーグラフィックディスプレイ、音声応答装置等から構成されており、オンラインにてプラント信号を計測制御システム入力装置からデータ処理装置に送り、演算処理を行っている。(表4.1にアナログ出力信号、表4.2にデジタル出力信号を示す。)また、プラントからの入力データは、システムの機能確認、評価及び今後の開発計画に反映させるためにオフラインでの処理が可能ないように記録装置に保存できるようになっている。(図-4.1に、ロッドガイダーシステム構成図を示す。)

本システムから得られる情報は、制御棒操作に関するもの及び制御棒操作時に確認を要求されるプラントパラメータなどがある。特に制御棒操作を行うことによって著しく変化するパラメータについては、監視強化の面からトレンドグラフの表示を行うものとしている。また保安規定、運転要領等に規定されている運転値を逸脱した場合、CRT表示及び音声ガイドで注意を促す機能もある。更に、原子炉出力上昇及び降下操作の中で必要となる主要機器の操作タイミングと運転操作上の注意を促すインフォメーション機能もある。

原子炉は、停止状態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、出力領域の各運転範囲を通過する時、中性子束レベル及びNa温度など、運転特性は大きく変化する。そのためロッドガイダーのプログラムは、原子炉の運転特性及び運転に伴う主要機器の起動、停止タイミングを考慮した上で、運転制御に最適と考えられるガイド範囲を決定した。(図4.2に、ロッドガイダープログラムのガイド範囲を示す。)

以下に、プログラム別のガイド範囲を示す。

① 臨界近接プログラム

原子炉「停止」モード、系統温度 250℃の未臨界状態から臨界レベル(中性子検出器CH-1 : 5×10^4 cps)までの操作。

② 系統昇温プログラム

原子炉「起動」モード、臨界レベルから原子炉「高出力」モード、系統温度 370℃までの核加熱操作。

③ 出力上昇プログラム

核加熱終了後(熱出力 : 2 ~ 3 MW) から100MWまでの出力上昇操作。

- ④ 出力調整プログラム
100MW定格運転中の燃焼補償のための操作。
- ⑤ 出力降下プログラム
100MWから30MWまでの出力降下操作。

表4.1 アナログ出力信号 (1/2)

No.	信号名称	信号レベル	入力点
1	# 1 制御棒位置 (長針)	1 ~ 5 V	ZT12-1
2	# 2 制御棒位置 (長針)	1 ~ 5 V	ZT12-2
3	# 3 制御棒位置 (長針)	1 ~ 5 V	ZT12-3
4	# 4 制御棒位置 (長針)	1 ~ 5 V	ZT12-4
5	# 5 制御棒位置 (長針)	1 ~ 5 V	ZT12-5
6	# 6 制御棒位置 (長針)	1 ~ 5 V	ZT12-6
7	# 1 制御棒位置 (短針)	1 ~ 5 V	ZT12-7
8	# 2 制御棒位置 (短針)	1 ~ 5 V	ZT12-8
9	# 3 制御棒位置 (短針)	1 ~ 5 V	ZT12-9
10	# 4 制御棒位置 (短針)	1 ~ 5 V	ZT12-10
11	# 5 制御棒位置 (短針)	1 ~ 5 V	ZT12-11
12	# 6 制御棒位置 (短針)	1 ~ 5 V	ZT12-12
13	中性子束 (CH-1)	0 ~ 80mv	TBAB19-20
14	中性子束 (CH-2)	0 ~ 80mv	TBCB19-20
15	中性子束 (CH-3)	0 ~ 80mv	TBAB40-41
16	中性子束 (CH-4)	0 ~ 80mv	TBBB40-41
17	中性子束 (CH-5)	0 ~ 80mv	TBCB40-41
18	中性子束 (CH-6)	0 ~ 80mv	TBAB61-62
19	中性子束 (CH-7)	0 ~ 80mv	TBCB61-62
20	中性子束 (CH-8)	0 ~ 80mv	TBBB61-62
21	PRMレンジ (CH-6)	0 ~ 0.35 v	TBAA64~70
22	PRMレンジ (CH-7)	0 ~ 0.35 v	TBAA64~70
23	PRMレンジ (CH-8)	0 ~ 0.35 v	TBAA64~70
24	1次冷却Na流量 (Aループ)	1 ~ 5 v	FE33.1-1A
25	1次冷却Na流量 (Bループ)	1 ~ 5 v	FE33.1-1B
26	原子炉容器レベル	10~50mv	LEB1.1-2
27	オーバフロータンクNa温度	10~50mv	TR33-1
28	2次冷却Na流量 (Aループ)	0.25~1.25V	FE31.2-1A
29	2次冷却Na流量 (Bループ)	0.25~1.25V	FE31.2-1A
30	主冷却器出口Na温度 (1A)	0.25~1.25V	TE31.2-2A-1

表 4.1 アナログ出力信号 (2/2)

No.	信号名称	信号レベル	入力点
31	主冷却器出口Na温度 (2 A)	0.25~1.25V	TE31.2-2B-1
32	主冷却器出口Na温度 (1 B)	0.25~1.25V	TE31.2-2A-2
33	主冷却器出口Na温度 (2 B)	0.25~1.25V	TE31.2-2B-2
34	原子炉容器入口Na温度 (Aループ)	0~5 v	TISO31.1-7A
35	原子炉容器入口Na温度 (Bループ)	0~5 v	TISO31.1-7B
36	原子炉容器出口Na温度 (Aループ)	0~5 v	TISO31.1-1A
37	原子炉容器出口Na温度 (Bループ)	0~5 v	TISO31.1-1B
38	黒鉛遮蔽体温度 (1)	0~5 v	TE83-7
39	黒鉛遮蔽体温度 (2)	0~5 v	TE83-9
40	燃料集合体出口Na温度 (1)	0~5 v	TE14-1-F34(4A3)
41	燃料集合体出口Na温度 (2)	0~5 v	TE14-1-F34(4B3)
42	燃料集合体出口Na温度 (3)	0~5 v	TE14-1-F34(4C3)
43	燃料集合体出口Na温度 (4)	0~5 v	TE14-1-F34(4D3)
44	燃料集合体出口Na温度 (5)	0~5 v	TE14-1-F34(4E3)
45	燃料集合体出口Na温度 (6)	0~5 v	TE14-1-F34(4E3)

表4.2 デジタル出力信号 (1/2)

No.	信 号 名 称	入 力 点
1	原子炉モードスイッチ (停止)	DMI 5 - 3
2	原子炉モードスイッチ (起動)	DMI 2 - 1
3	原子炉モードスイッチ (低出力)	DMI - 6
4	原子炉モードスイッチ (高出力)	DMI - 7 - 2
5	原子炉モードスイッチ (燃交)	DMI 1 - 1
6	原子炉停止 (スクラム、制御棒一斉挿入信号)	SICA/B
7	オーバフローEMPスイッチ	CO4 S - 1
8	2次補助ブロー	3 - 88/C
9	中性子検出器位置 上限 (CH-1)	ILS 1 X 1
10	中性子検出器位置 下限 (CH-1)	ILS 2 X 1 - 1
11	中性子検出器位置 上限 (CH-2)	ILS 1 X 2
12	中性子検出器位置 下限 (CH-2)	ILS 2 X 2 - 1
13	中性子検出器位置 上限 (CH-3)	ILS 1 X 3
14	中性子検出器位置 上限 (CH-4)	ILS 1 X 4
15	中性子検出器位置 上限 (CH-5)	ILS 1 X 5
16	中性子検出器位置 下限 (CH-3)	ILS 2 X 3 - 1
17	中性子検出器位置 下限 (CH-4)	ILS 2 X 4 - 1
18	中性子検出器位置 下限 (CH-5)	ILS 2 X 5 - 1
19	CRDM選択信号 (CR-1)	SX-1
20	CRDM選択信号 (CR-2)	SX-2
21	CRDM選択信号 (CR-3)	SX-3
22	CRDM選択信号 (CR-4)	SX-4
23	CRDM選択信号 (CR-5)	SX-5
24	CRDM選択信号 (CR-6)	SX-6
25	CRDM下限信号 (CR-1)	LS 8 X 1 - 1
26	CRDM下限信号 (CR-2)	LS 8 X 2 - 1
27	CRDM下限信号 (CR-3)	LS 8 X 3 - 1
28	CRDM下限信号 (CR-4)	LS 8 X 4 - 1
29	CRDM下限信号 (CR-5)	LS 8 X 5 - 1
30	CRDM下限信号 (CR-6)	LS 8 X 6 - 1
31	CRDM下端信号 (CR-1)	LS 7 X 1 - 1

表4.2 デジタル出力信号 (2/2)

No.	信 号 名 称	入 力 点
32	CRDM下端信号 (CR-2)	LS7 X 2 - 1
33	CRDM下端信号 (CR-3)	LS7 X 3 - 1
34	CRDM下端信号 (CR-4)	LS7 X 4 - 1
35	CRDM下端信号 (CR-5)	LS7 X 5 - 1
36	CRDM下端信号 (CR-6)	LS7 X 6 - 1
37	CRDMデラッチ信号 (CR-1)	LSDX 1 - 1
38	CRDMデラッチ信号 (CR-2)	LSDX 2 - 1
39	CRDMデラッチ信号 (CR-3)	LSDX 3 - 1
40	CRDMデラッチ信号 (CR-4)	LSDX 4 - 1
41	CRDMデラッチ信号 (CR-5)	LSDX 5 - 1
42	CRDMデラッチ信号 (CR-6)	LSDX 6 - 1
43	CRDMラッチ信号 (CR-1)	LSLX 1 - 1
44	CRDMラッチ信号 (CR-2)	LSLX 2 - 1
45	CRDMラッチ信号 (CR-3)	LSLX 3 - 1
46	CRDMラッチ信号 (CR-4)	LSLX 4 - 1
47	CRDMラッチ信号 (CR-5)	LSLX 5 - 1
48	CRDMラッチ信号 (CR-6)	LSLX 6 - 1
49	CRDM動作 (引抜) (CR-1)	88 F (CR-1)
50	CRDM動作 (引抜) (CR-2)	88 F (CR-2)
51	CRDM動作 (引抜) (CR-3)	88 F (CR-3)
52	CRDM動作 (引抜) (CR-4)	88 F (CR-4)
53	CRDM動作 (引抜) (CR-5)	88 F (CR-5)
54	CRDM動作 (引抜) (CR-6)	88 F (CR-6)
55	CRDM動作 (挿入) (CR-1)	88 R (CR-1)
56	CRDM動作 (挿入) (CR-2)	88 R (CR-2)
57	CRDM動作 (挿入) (CR-3)	88 R (CR-3)
58	CRDM動作 (挿入) (CR-4)	88 R (CR-4)
59	CRDM動作 (挿入) (CR-5)	88 R (CR-5)
60	CRDM動作 (挿入) (CR-6)	88 R (CR-6)

原子炉付属建家
(ケーブル処理室)

原子炉付属建家
(中央制御室)

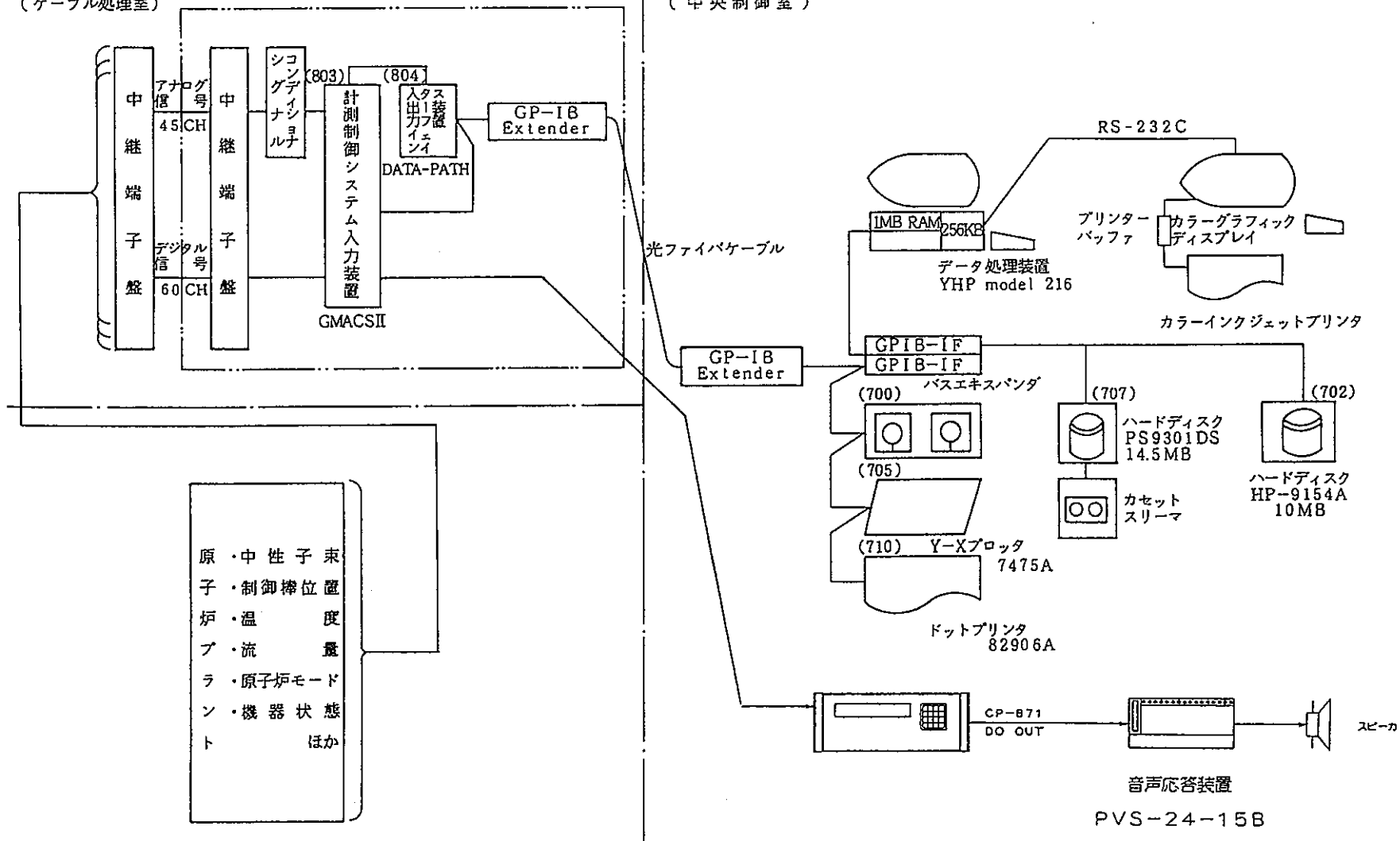


図4.1 ロッドガイダーシステム構成図

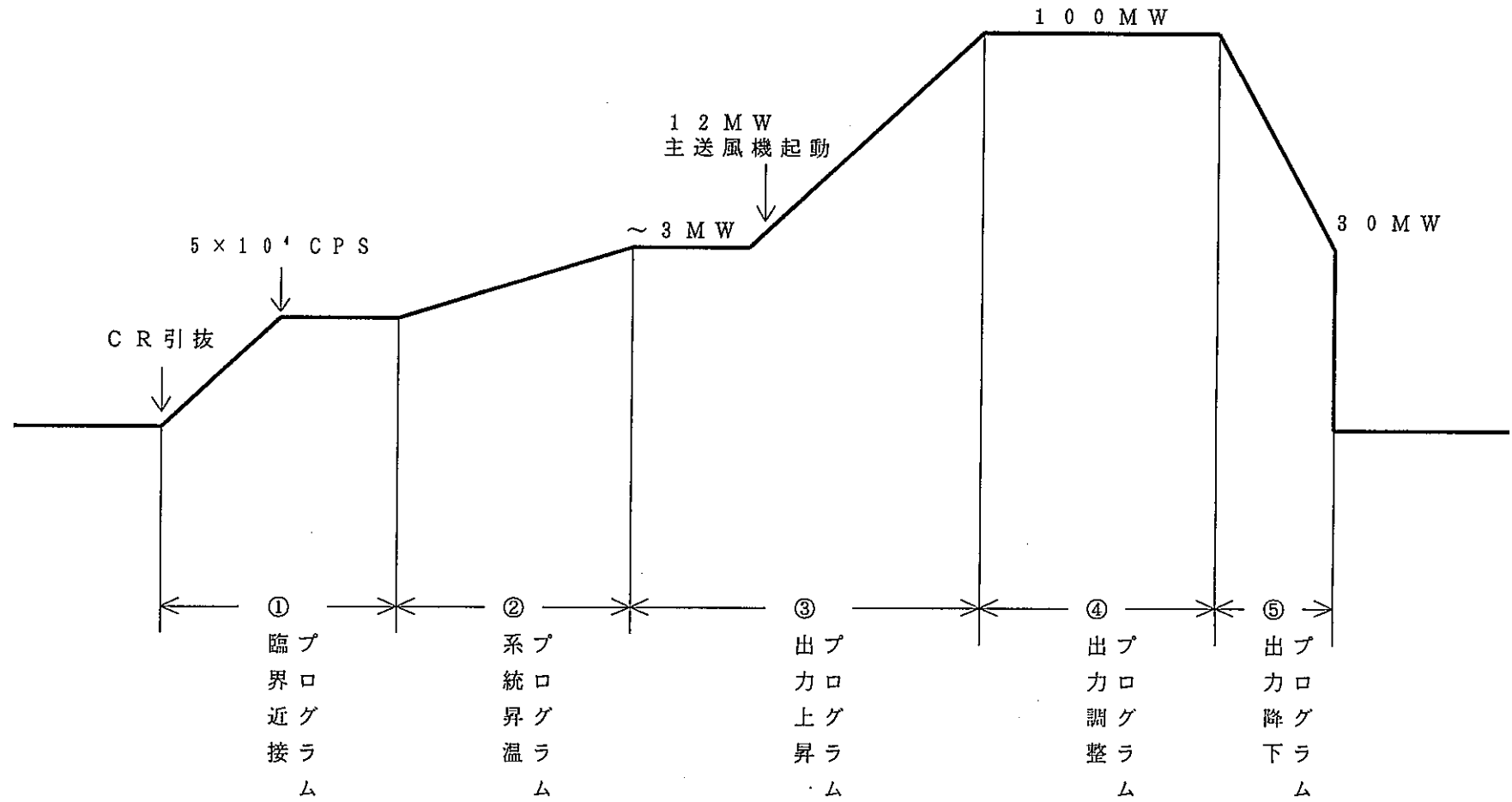


図4.2 ロッドガイドプログラムのガイド範囲

5. プログラムの開発

5.1 第1ステップ

原子炉の運転信頼性と安全性の向上及び運転員の負担軽減を図る目的で、制御棒操作を中心とした支援システムとして、ロッドガイダーを製作し、全運転モードの臨界近接、系統昇温、出力上昇、出力調整、出力降下プログラムについて、100MW第16サイクル運転（昭和63年8月～10月）を通して検証を行った。

以下に検証で得られた結果を示す。

- (1) ゆらぎ雑音成分を含むプラントの実信号をそのまま演算に使用すると、ロッドガイダーによる予測量が、100 MW運転時で±1 MWの誤差となる。そのため移動平均法による信号処理を実施した結果、その誤差は実用上問題とならない±0.3MWまで低減できた。
- (2) 臨界近接検証試験では、制御棒の実操作量とロッドガイダーによる予測操作量との比較による評価を行った結果、十分な精度が得られ、その実用性が検証できた。
- (3) 出力領域での出力上昇検証試験は、30MW～60MW、90MW～100MWの領域で制御棒の実操作量と予測操作量は良く一致したが、60MW～90MWの範囲では予測操作量が実操作量を下回り、10MWあたり最大4.47%ΔK/K、制御棒操作で約1.5mmに相当する誤差が生じた。これは出力係数の変動に起因するものであるが、実際の運転手法を考慮すると、1回の制御棒操作では、10MWに相当する反応度投入は行われず、数mmづつ制御棒の操作を繰り返し行うため、実用上問題とならない。
- (4) メニュー画面を追加したことにより、各サイクルの反応度データのファイル管理とデータの修正が容易となり、炉心構成の変化にも対応でき、またオフラインで行っていた制御棒価値逆関数計算等も合わせて当システム内で行えるようになり、ソフト及びデータ管理の高度化が図れた。
- (5) ガイダンス機能を39項目作成し、運転操作時の諸操作の適切なガイドを行えるようになった。（表5.1に、ステップ1のガイダンス項目を示す。）

以上の結果から、従来の運転員の判断で行っていた制御棒操作量とロッドガイダーの予測操作量がほぼ一致することが判り、また制御棒操作時にプラント諸操作のガイドが適切に行えるようになったことで制御棒操作自動化に向けての知見が得られた。これにより第1ステップは、臨界近接・系統昇温・出力上昇・出力調整・出力降下の一連の検証試験を終え、期待通りの成果を挙げて終了した。

表5.1 ステップ1のガイダンス項目

	カラー CRT 出力	ガイダンス内容
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」まで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。

	カラー CRT 出力	ガイダンス内容
12	ARRIVED AT NEUTRON POWER 1MW	核出力 1 MW に到達した。
13	CHANGE OPERATION MODE SW FROM LOW POWER TO HIGH POWER	運転モードスイッチを「低出力」から「高出力」に切替える事を指示する。
14	OPERATION MODE SW HIGH POWER	運転モードスイッチを「高出力」に切替えた。
15	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。
16	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。
17	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。
18	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。
19	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。
20	CHANGE PRM RANGE SW POSITION FROM 3.5 TO 12.5 :UP	出力系レンジスイッチを「3.5」から「12.5」に切替える事を指示する。
21	PRM RANGE SW POSITION 12.5	出力系レンジスイッチが「12.5」に切替った。

	カラー CRT出力	ガイダンス内容
22	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」に切替える事を指示する。
23	ARRIVED AT TEMP . 367°C	原子炉入口Na温度が367°Cに到達した。
24	TEMP INC . RATE LIMIT OVER!	系統昇温率20°C/hrを超えた。
25	IRM'S WERE WITHDRAWEN	中間系中性子検出器が引き抜かれました。
26	KEEP POWER ASCENT RATE : 5MW/20min : 20°C/hour : 2mm/5min	出力上昇率を保持して下さい。 : 5MW/20min : 20°C/hour : 2mm/5min
27	CHAGE SEC AUX CONTROLER 「MAN」 TO 「AUTO」 AT 25MW	25MWで2次補助制御系を「手動」から「自動」に切替えて下さい。
28	SEC AUX CONTROLER WAS 「AUTO」	2次補助制御系が自動になりました。
29	CHANGE DHX CONTROLER 「CAS」 TO 「AUTO」 AT 100MW	主冷却器制御系を「CAS」から「自動」に切替えて下さい。
30	ADJUST SEC AUX DHX INLET DUMPER	2次補助冷却器入口ダンパを調整して下さい。
31	OVER POWER	出力超過です。
32	EXCESS OF CR LBVL DIFFERENCE	制御棒位置の偏差が5mmを超えました。
33	OVER TEMP (R/V OUT > 500°C)	原子炉出口Na温度が500°Cを超えました。

	カラー CRT 出力	ガイダンス内容
34	ARRIVED AT 100MW	原子炉出力100MWに到達しました。
35	CHANGE DHX CONTROLLER 「AUTO」 TO 「CAS」	主冷却器制御系を「自動」から「CAS」に切替えて下さい。
36	KEEP POWER ASCENT RATE :-10MW/20min :-35°C/hour :- 2mm/3min	出力降下率を保持して下さい。 :-10MW/20min :-35°C/hour :- 2mm/3min
37	CHECK SEC AUX DHX OUTLET TEMP	2次補助冷却器出口Na温度を確かめて下さい。
38	CLOSE AUX DHX OUT & INLET DUMPER	2次補助冷却器出入口ダンパを「全閉」にして下さい。
39	DON'T FORGET TO CHAGE PWR RENGE SW	出力系レンジスイッチの切替えを忘れないで下さい。

5.2 第2ステップ

第2ステップの制御棒引き抜き阻止プログラムの開発は、第1ステップのロッドガイダー機能に、制御棒引き抜き阻止機能を追加し、制御棒操作時の安全性及び信頼性の向上を図ることを目的とした。

シミュレータを用いて確認した制御棒引き抜き阻止項目は、以下の通りである。

- ① ペリオド : 50秒超過 (系統昇温時に適用)
- ② 系統昇温率 : 20°C/h 以上 (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温度差 : 80°C以上
(系統昇温操作及び出力上昇操作時に適用)

以上の3項目に対して、いずれも制御棒引き抜き阻止機能が良好に動作することを確認し、第2ステップの開発を終了した。

5.3 第3ステップ

本システムのマンマシンインターフェイス機能の向上を図る目的で、全プログラムについて CRT 画面の日本語表示化及び音声ガイド機能の追加を行った。(表-5.3に日本語ガイド項目を示す。)

また出力調整モードでの制御棒操作量の予測精度の向上を図る目的で、これまでの炉心反応度計算手法に加え、過去5回の出力調整の実績をフィードバックさせる予測機能の追加を行った。

従来、ロッドガイダーの原子炉出力調整時における制御棒操作量の予測は、現時点の熱、核出力(原子炉出口温度を使用する場合もある。)と、目標出力との差から反応度計算によりリアルタイムで制御棒操作量の予測を行っていた。そのため制御棒を操作する度にその値が常に変化し、出力を上昇させる場合、予測通りの操作を行うと目標運転値をオーバーしてしまう問題があった。

この問題を解決するためにリアルタイムでの予測はやめて、出力調整前の安定した状態における熱、核出力及び原子炉出口温度を基に目標運転値までに必要な制御棒操作量を、同一手法により求めるものである。これを基に実操作量を差し引いた残りの操作量を常にガイドするよう改善を図った。

この予測手法を採用した結果、第24サイクル時の制御棒操作量の予測では、予測値と実際の操作量の間には1mm前後の誤差が見られた。0.1mm単位で制御棒操作を行う出力調整において、この誤差は大きいものであった。そのため予測手法の再検討を行った結果、反応度計算に代わって過去の出力調整の実績に基づいた予測手法を採用する事とした。これは、熱出力1MW上昇させるのに必要な操作量(mm/MW)、核出力1%上昇させるのに必要な操作量(mm/%)、原子炉出口温度1℃上昇させるのに必要な操作量(mm/℃)を用いるものであり、最新の過去5回の出力調整実績におけるこれらの平均値と目標運転値との差から予測を行うものである。この方法が最適であることが運用経験上確認できた。

表 5. 3 日本語ガイド項目一覧表

日本語ガイド項目	音声メッセージ用番地	
	チャンネル	番号
1. 運転モードSWを停止から起動に切替えて下さい。	0	16
2. 運転モードSWが起動に切替わりました。	0	17
3. 制御棒のラッチ操作を開始して下さい。	0	18
4. 制御棒 1 ラッチ操作完了しました。	0	19
5. 制御棒 2 ラッチ操作完了しました。	0	32
6. 制御棒 3 ラッチ操作完了しました。	0	33
7. 制御棒 4 ラッチ操作完了しました。	0	34
8. 制御棒 5 ラッチ操作完了しました。	0	35
9. 制御棒 6 ラッチ操作完了しました。	0	48
10. 制御棒 1 を	0	49
11. 制御棒 2 を	0	50
12. 制御棒 3 を	0	51
13. 制御棒 4 を	0	52
14. 制御棒 5 を	0	53
15. 制御棒 6 を	0	54
16. 350mm位置まで引き抜いて下さい。	0	64
17. 制御棒 1 が	0	65
18. 制御棒 2 が	0	66
19. 制御棒 3 が	0	67
20. 制御棒 4 が	0	68
21. 制御棒 5 が	0	69
22. 制御棒 6 が	0	70
23. 350mm位置になりました。	0	80
24. 臨界予想位置まで引き抜いて下さい。	0	81
25. 臨界予想位置になりました。	0	82
26. 計数率測定中です。	0	83

日本語ガイド項目	音声メッセージ対応表	
	チャンネル	番号
27. メッセージストローク分引き抜いて下さい。	0	96
28. メッセージストローク分挿入して下さい。	0	97
29. 計数率が40000CPSを超えました微調整を実施して下さい。	0	98
30. 計数率が50000CPSに到達しました。	0	99
31. 対数出力及びペリオド記録計を起動系から中間系に切り替え起動系検出器を引き抜いて下さい。	0	112
32. 反応度計を起動して下さい。	0	113
33. 起動系検出器が上限になりました。	0	114
34. 運転モードSWを起動から低出力に切替えて下さい。	0	128
35. 運転モードSWが低出力に切替わりました。	0	129
36. 0.1mm引き抜いて下さい。	0	130
37. 0.2mm引き抜いて下さい。	0	131
38. 0.3mm引き抜いて下さい。	0	132
39. 0.4mm引き抜いて下さい。	0	133
40. 0.5mm引き抜いて下さい。	0	144
41. 1.0mm引き抜いて下さい。	0	145
42. 2.0mm引き抜いて下さい。	0	146
43. 5.0mm引き抜いて下さい。	0	147
44. ペリオドに注意して下さい。	0	148
45. 出力系レンジを切替えて下さい。	0	149
46. 出力系レンジが0.35に切替りました。	0	160
47. 出力系レンジが1.25に切替わりました。	0	161
48. 出力系レンジが3.5に切替わりました。	0	162
49. 原子炉出力が800KWを超えました。	0	163
50. 原子炉出力1MWに到達しました。	0	176
51. 運転モードSWを低出力から高出力に切替えて下さい。	0	177

日本語ガイド項目	音声メッセージ対応表	
	チャンネル	番号
52. 運転モードSWが高出力に切替わりました。	0	178
53. オーバフロー系インターロックSWを手動から自動に切替えて下さい。	0	179
54. オーバフロー系インターロックSWが自動に切替わりました。	0	192
55. 回転プラグブースタブロアを起動して下さい。	0	193
56. 2次補助貫通部ヒータを青マークから赤マークに変更して下さい。	0	194
57. 出力系レンジが12.5に切替わりました。	0	195
58. 系統昇温率が25°C/hを超えました。	0	208
59. 原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差に注意して下さい。	0	209
60. 制御棒操作を行わないで下さい。	0	210
61. 原子炉入口Na温度が360°Cを超えました。	0	224
62. 原子炉入口Na温度が367°Cに到達しました。	0	225
63. 主冷却器による自然通風制御を開始して下さい。	0	226
64. 原子炉入口Na温度に注意して下さい。	0	227
65. 出力系レンジが35に切替わりました。	0	240
66. 原子炉出力12MWに到達しました。	0	241
67. 2次純化系ロジックを開ロックとし主送風機を起動して下さい。	0	242
68. 出力系レンジが125に切替わりました。	0	243
69. 原子炉出力15MWに到達しました。	1	0
70. 中間系検出器を引き抜いて下さい。	1	1
71. 中間系検出器が上限になりました。	1	2
72. 原子炉出力20MWに到達しました。	1	3
73. 原子炉出力25MWに到達しました。	1	16

日本語ガイド項目	音声メッセージ対応表	
	チャンネル	番号
74. 2次補助系を待機状態にして下さい。	1	17
75. 原子炉出力30M達しました。	1	18
76. 原子炉出力35MWに到達しました。	1	19
77. 原子炉出力40M達しました。	1	32
78. 原子炉出力45MWに到達しました。	1	33
79. 原子炉出力50M達しました。	1	34
80. 原子炉出力55MWに到達しました。	1	35
81. 原子炉出力60M達しました。	1	48
82. 原子炉出力65MWに到達しました。	1	49
83. 原子炉出力70M達しました。	1	50
84. 原子炉出力75MWに到達しました。	1	51
85. 原子炉出力80MWに到達しました。	1	64
86. 2次補助入口ダンパの開度調整を行って下さい。	1	65
87. 原子炉出力85MWに到達しました。	1	66
88. 原子炉出力90MWに到達しました。	1	67
89. 原子炉出力95MWに到達しました。	1	80
90. 原子炉出力100MWに到達しました。	1	81
91. 出力上昇速度5 MW/20分を超えました。	1	82
92. 原子炉出口Na温度が500°Cに到達しました。	1	83
93. 核出力が100%に到達しました。	1	96
94. 出力調整の準備を開始して下さい。	1	97
95. 出力調整を開始して下さい。	1	98
96. 出力下降速度10MW/20分を超えました。	1	99
97. 0.1mm挿入して下さい。	1	112
98. 0.2mm挿入して下さい。	1	113
99. 0.3mm挿入して下さい。	1	114
100. 0.4mm挿入して下さい。	1	115

日本語ガイド項目	音声メッセージ対応表	
	チャンネル	番号
101. 0.5mm挿入して下さい。	1	128
102. 1.0mm挿入して下さい。	1	129
103. 2.0mm挿入して下さい。	1	130
104. 50mm挿入して下さい。	1	131
105. 出力系レンジが0.125に切替わりました。	1	144
106. 中間系検出器を挿入して下さい。	1	145
107. 中間系検出器が下限になりました。	1	146
108. 起動系検出器を挿入し、対数出力及びペリオド記録計を中間系から起動系に切替えて下さい。	1	147
109. 起動系検出器が下限になりました。	1	160
110. 運転モードSWを高出力から低出力に切替えて下さい。	1	161
111. 運転モードSWを低出力から起動に切替えて下さい。	1	162
112. 運転モードSWを起動かから停止に切替えて下さい。	1	163
113. 運転モードSWが停止に切替わりました。	1	176
114. 制御棒一斉挿入を実施して下さい。	1	177

(1) 臨界近接プログラム

a) 機能の概要

ロッドガイダーの臨界近接プログラムは、臨界近接プログラム1、2及び3に分かれており、臨界近接プログラム1は制御棒デラッチ下端、原子炉モードスイッチ「停止」位置の状態から、制御棒1、2が350mm位置、制御棒3、4、5、6が臨界予想位置になるまでのガイドを行うもので、臨界近接プログラム2は、前述の位置から中性子検出器CH-1またはCH-2の計数率のいずれかが 2×10^4 cpsに到達するまでのガイドを行うものである。臨界近接プログラム3は、 2×10^4 cpsを超えた時から公称臨界点の 5×10^4 cpsに到達するまでのガイドするものである。

b) 予測手法

このモードでの制御棒操作量の予測は、制御棒1、2が350mm位置、制御棒3、4、5、6が臨界予想位置における、CH-1、2の計数率を基準とし、制御棒操作量と計数率の変化量から逆増倍法により操作量を決定するものである。

最初の予測は、制御棒1を臨界予想位置まで引き抜いた後、計数率安定待ちの時間60秒が経過した段階で行う。その後は、制御棒2を予測操作量に従って引き抜き、制御棒が停止した60秒後毎に行われる。これらの予測は、CH-1、2のいずれかが 4×10^4 cpsを超えるまで繰り返して行われる。その後の公称臨界点 5×10^4 cpsの微調整は、運転員の判断で行うものとしている。

c) ガイド機能

臨界近接プログラム1は、制御棒デラッチ下端、原子炉モードスイッチ「停止」の状態からスタートさせる。(図5.3-1.1に臨界近接プログラム1のCRT表示画面を示す。)最初に「原子炉運転モードスイッチを起動に切替えて下さい。」と音声及びCRT画面の両方でガイドし、切替わると「原子炉モードスイッチが起動に切替わりました。」とガイドする。次に「制御棒のラッチ操作を開始して下さい。」というガイドの後、ラッチ操作が終了した制御棒に対して「制御棒○ラッチ操作終了しました。」とガイドする。この場合、制御棒のラッチ操作の順番に関係なくラッチ操作終了の判断を行う。ラッチ操作終了の判断は、ラッチリミットスイッチONと制御棒位置が-2mm以上のAND条件である。全ての制御棒のラッチ操作が終了すると、次に制御棒1から6まで順に「制御棒○を350mm位置まで引き抜いて下さい。」とガイドし、350mm位置になった時点で「制御棒○が350mm位置になりました。」とガイドする。この時350mm位置になったと判断する条件は、制御棒のラッチリミットスイッチONと制御棒位置345mm以上のAND条件である。この操作は制御棒1から6まで順に、シーケンシャルに行われる事がプログラムの流れからベストであるが、操作手順が異なった場合でも350mm到達の判断は出来るようになっている。

全ての制御棒が 350mm位置に到達すると、制御棒 3 から 6 まで順に「制御棒○を臨界予想位置まで引き抜いて下さい。」とガイドし、臨界予想位置になった時点で「制御棒○が臨界予想位置になりました。」と各々ガイドを行う。この時の臨界予想位置は、各運転サイクル開始前に計算により求めた値を予め入力しておき、制御棒位置が（臨界予想位置 - 5 mm）以上になったことをもって臨界予想位置と判断する。制御棒 3 から 6 の 4 本が臨界予想位置になった時点で、自動的に臨界近接プログラム 2 に切替わる。（図 5.3 - 1.2 に臨界近接プログラム 2 の CRT 表示画面を示す。）

臨界近接プログラム 2 の起動直後は、逆増倍法に必要な初期データ取得のため「計数率測定中です。」「制御棒操作を行わないで下さい。」とガイドし、計数率の安定を待つため 60 秒間のカウントダウンを開始する。カウントダウン終了後、「制御棒 1 を臨界予想位置まで引き抜いて下さい。」とガイドし、臨界予想位置まで引き抜かれた時点で「制御棒○が臨界予想位置になりました。」「計数率測定中です。」「制御棒操作を行わないで下さい。」とガイドし 60 秒間のカウントダウンを開始する。ここで再度、逆増倍法に必要なデータを取得し、次に操作する制御棒 2 の操作量を求める。（CH-1、CH-2 の計数率からそれぞれに対して 2 通りの操作量が算出されるが、ここで用いる値は、安全側から少ない方の操作量に対する $1/2$ の値である。）予測計算が終了すると、操作量を CRT 画面に表示するとともに、「制御棒 2 をメッセージストローク分引き抜いて下さい。」とガイドする。制御棒 2 を操作する毎に、60 秒間のカウントダウンを行い、計数率が安定した時点で逆増倍法に必要なデータを取得し操作量を予測する。これを繰り返し、CH-1、CH-2 のいずれかが 2×10^4 cps を超えると、自動的に臨界近接プログラム 3 がロードされランされる。（図 5.3 - 1.3 に臨界近接プログラム 3 の CRT 表示画面を示す。）

臨界近接プログラム 3 においても、起動直後は逆増倍法に必要なデータを取得するため「計数率測定中です。」「制御棒操作を行わないで下さい。」とガイドし、60 秒間のカウントダウンを行う。このプログラムは前のプログラムよりも、トレンドグラフのスパンが拡大されているため、臨界到達の判断が判り易いようになっている。その後も順次、制御棒 2 の操作を行い CH-1 または CH-2 の計数率のいずれかが、 4×10^4 cps を超えると「計数率が 4×10^4 cps を超えました微調整を実施して下さい。」とガイドする。これ以降は、制御棒操作量の予測計算は行わず、運転員の判断で公称臨界点の 5×10^4 cps にする。「計数率が 4×10^4 cps を超えました微調整を実施して下さい。」の表示は、 5×10^4 cps を超えた時点で消え、次いで「計数率が 5×10^4 cps に到達しました。」「反応度計を起動して下さい。」とガイドする。この時、反応度計起動の表示は、起動の入力信号がないため無条件で 20 秒後に消えるようになっている。その後、中間系中性子検出器 CH-3、CH-4、CH-5 の全てが $1 \times 10^{-3} \%$ 以上あることをもって「運転モードスイッチを起動から低出力に切替えて下さい。」

とガイドし、運転モードスイッチが切替わった時点で「運転モードスイッチが低出力に切替わりました。」「対数出力及びペリオド記録計を起動系から中間系に切替え、起動系検出器を引き抜いて下さい。」とガイドする。起動系中性子検出器が引き抜かれると、「起動系検出器引抜中」とCRT画面にのみ表示し、検出器が上限に到達した時点で「起動系検出器が上限になりました。」とガイドする。このプログラムの終了条件は、運転モードスイッチが「低出力」で、起動系中性子検出器が上限になった時点である。

以上が臨界近接プログラムでのガイド機能である。

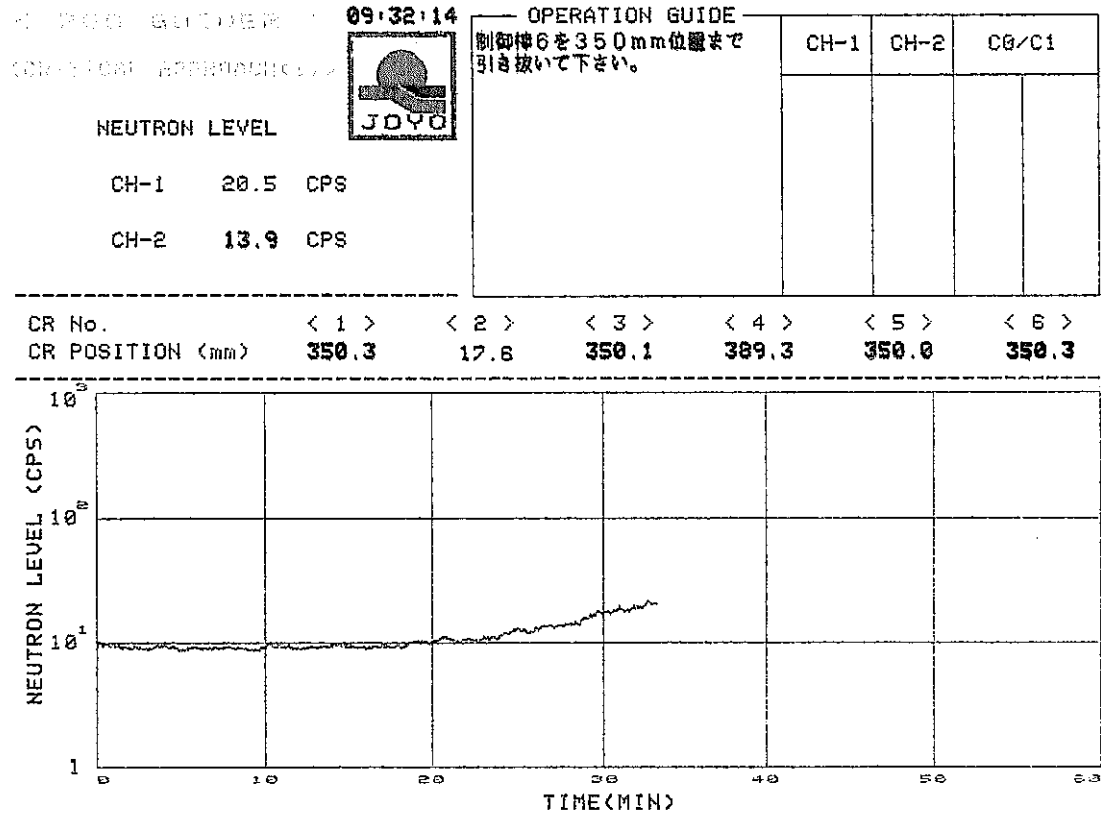


図5.3-1.1 臨界近接プログラム1のCRT表示画面

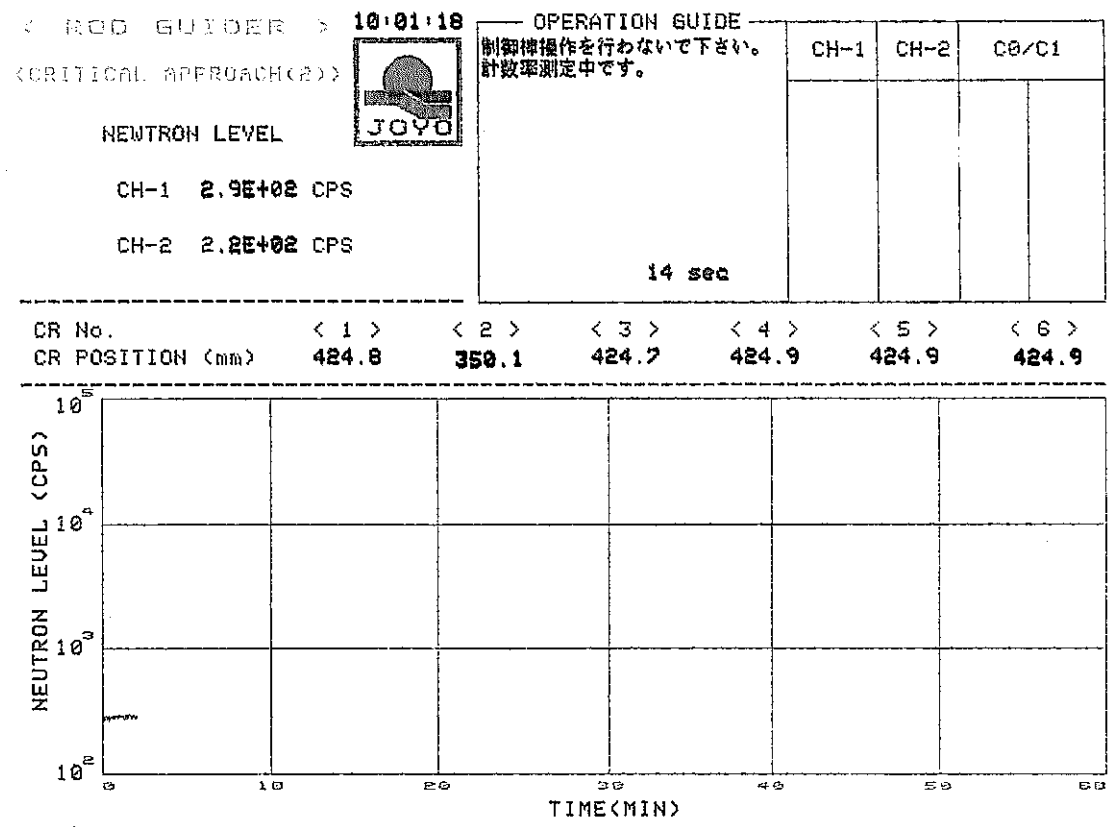


図5.3-1.2 臨界近接プログラム2のCRT表示画面

< ROD GUIDER > 10:29:22

< CRITICAL APPROACH(3) >

NEUTRON LEVEL

CH-1 3.0E+04 CPS

CH-2 2.9E+04 CPS

JOYO

OPERATION GUIDE

制御棒操作を行わないで下さい。
計数率測定中です。

CH-1	CH-2	C0/C1	
288	214	1.00	1.00
287	220	1.00	0.97
610	471	0.47	0.46
1441	1079	0.20	0.20
16144	12323	0.02	0.02

58 sec

CR No.	< 1 >	< 2 >	< 3 >	< 4 >	< 5 >	< 6 >
CR POSITION (mm)	424.0	424.9	424.0	424.9	424.9	424.9

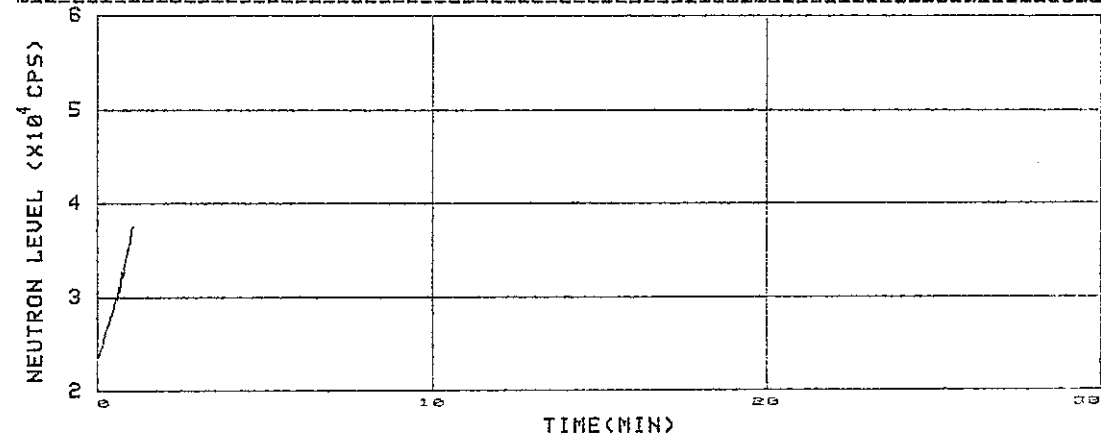


図 5.3 - 1.3 臨界近接プログラム 3 の CRT 表示画面

(2) 系統昇温プログラム

a) 機能の概要

系統昇温プログラムは、原子炉臨界 (CH-1 : 5×10^4 cps) の状態から中性子検出器 CH-3、CH-4、CH-5 のいずれかが1%までに到達するまでの出力上昇操作をガイドする系統昇温プログラム1、更に系統温度250°Cから367°Cまでの系統昇温操作をガイドする系統昇温プログラム2に分かれ、それぞれCRT画面表示及び音声にてガイドを行うものである。

b) 予測機能

系統昇温は、核・熱制限条件から制御棒の操作量が定められており、本プログラムでは制御棒の操作量を予測する必要性がないことから予測は行わない。

c) ガイド機能

系統昇温プログラム1を起動した時点で、起動系検出器が中間位置にある場合、起動系検出器が上限になった時点で「起動系検出器が上限になりました。」とガイドする。CRT表示は10秒後に消える。

図5.3-2.1に系統昇温プログラム1のCRT表示画面を示す。トレンドグラフは、横軸の時間を60分、縦軸の中性子束レベルを 10^{-4} ~10%としCH-3、4、5のうち最も高いものをグラフに書くものとし、そのときどれを選択しているのか判るようにデジタル表示値の表示色を変化させる。

プログラム起動直後1分間は「制御棒の操作を行わないで下さい。」「計数率測定中です。」とガイドする。1分後に最も引き抜かれていない制御棒を選択し「制御棒○を5mm引き抜いて下さい。」とガイドし、制御棒動作(0.3mm以上動作)があったらこの表示を消し、その後は「ペリオドが100秒になるように制御棒を引き抜いて下さい。」とCRT画面にのみ表示する。この時、ペリオドが50秒以下を2秒間継続した場合「ペリオドに注意して下さい。」とガイドし、ペリオドが50秒を超えた時点で表示は消すようになっている。

系統昇温中CH-6~8のいずれかの指示がフルスケールの60%に達した時点で「出力系レンジを切替えて下さい。」とガイドし、レンジスイッチが切替わったことをもって「出力系レンジが○○○に切替わりました。」とガイドする。この表示は10秒後に消す。

これらの操作を繰り返し、800kwを超えた時点で「原子炉出力が800kwを超えました。」とガイドし、原子炉出力が1MWを超えた時点で「原子炉出力1MWを超えました。」とガイドする。その後、CH-3~5の指示値の全てが1%以上30秒間保持された事をもって「運転モードスイッチを低出力から高出力に切替えて下さい。」とガイドする。この表示は、運転モードスイッチが高出力に切替わったことをもって消し、「運転モードスイッチが高出力に切り替わりました。」「オーバフロー系インターロックスイッチを手動から自動に切替えて下さい。」とガイドする。オーバフロー系インターロックスイッチが自動に切替わったことを

もって、「オーバフロー系インターロックスイッチが自動的に切替わりました。」とガイドし、その後、自動的に系統昇温プログラム2へ移行する。

図5.3-2.2に系統昇温プログラム2のCRT表示画面を示す。系統昇温プログラム2のトレンドグラフは、横軸の時間を60分、縦軸のNa温度を250°C~370°Cとし原子炉入口Na温度A・Bのうち高い方のみを表示する。この時どちらを表示しているか判るようにデジタル表示値の色を変化させる。

系統昇温開始時点の原子炉入口温度A、Bを基準に、現時点での温度変化率(°C/h)を常時表示する。系統昇温開始の判断は、プログラムスタート1分後、最も引き抜かれていない制御棒を選択し、「制御棒○を2mm引き抜いて下さい。」とガイドし、その後、制御棒動作(0.3mm以上動作)があった時点である。系統昇温時の制御棒操作ガイドは、マニュアルに定められた出力上昇速度の2mm/5分に従い、5分毎に最も引き抜かれていない制御棒を選択し「制御棒○を2mm引き抜いて下さい。」とガイドする。その後、制御棒動作後から5分間のカウントダウンで時間経過を表示する。これらの操作の中で系統昇温速度が25°C/hを超えた時は「系統昇温率が25°C/hを超えました。」「制御棒操作を行わないで下さい。」とガイドする。表示は系統昇温率が25°C/hを下回った時点で消える。

また原子炉出口Na温度A・Bの高い方とオーバフロータンクNa温度との温度差80°Cに対し、5°Cの余裕をみた75°C以上になった時点で「原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差に注意して下さい。」とガイドする。表示は、温度差が75°C未満になった時点で消える。

系統昇温時の制御棒操作の原則は、2mm/5分であるが、タイマーが0秒になり制御棒操作時期になっても系統昇温速度が20°C/hを超えている時は、制御棒引き抜き操作のガイドは行わず、系統昇温速度が20°C/hを下回った時点でガイドを再開する。

これらの操作を繰り返し行っていく、系統昇温操作終了である原子炉入口ナトリウム温度367°Cの一手手前の360°Cになった時点で、注意を促すために「原子炉入口Na温度が360°Cを超えました。」とガイドし、367°Cに到達した時点で「原子炉入口Na温度が367°Cに到達しました。」「主冷却器による自然通風制御を開始して下さい。」とガイドする。

以上が系統昇温プログラムでのガイド内容である。

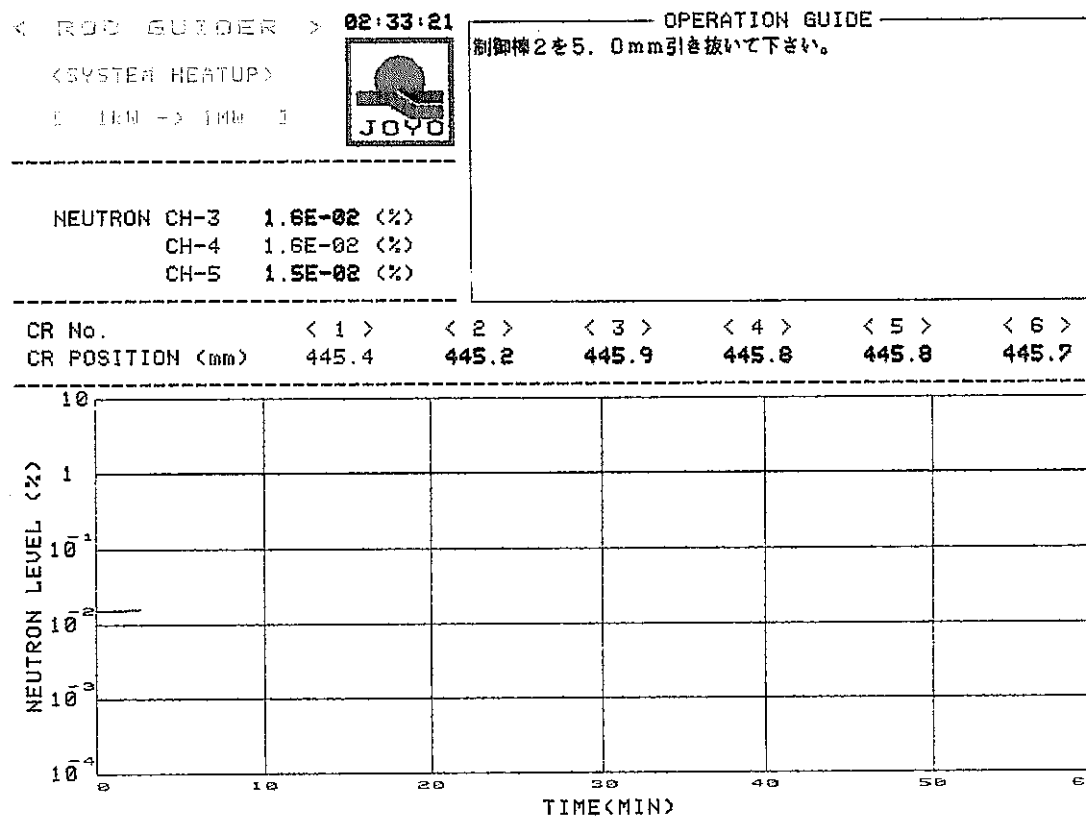


図5.3-2.1 系統昇温プログラム1のCRT表示画面

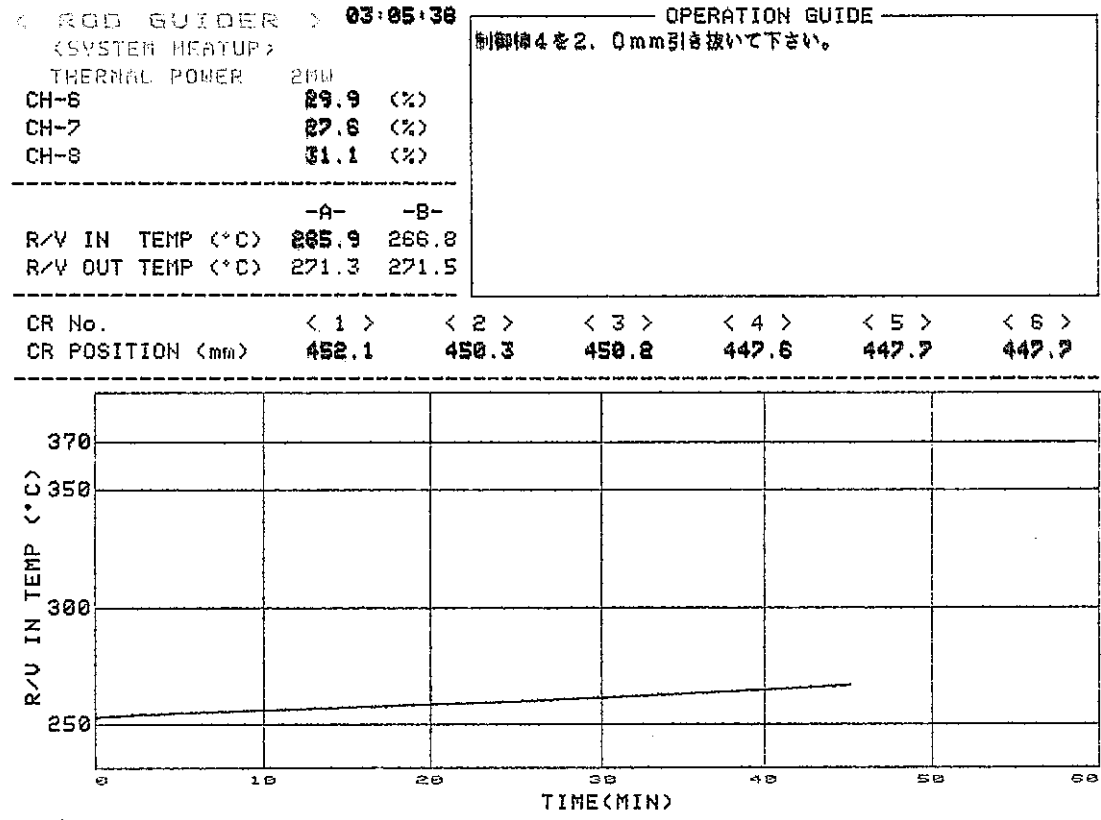


図5.3-2.2 系統昇温プログラム2のCRT表示画面

(3) 出力上昇プログラム

a) 機能の概要

本プログラムは、系統昇温が終了し、系統温度約 370℃、原子炉出力約 3 MWの状態から定格出力100MWまでの出力上昇操作に係わる制御棒及びプラント操作を、音声及びCRT画面でガイドするものである。

図5.3-3.1に、出力上昇プログラムのCRT表示画面を示す。CRTのトレンドグラフは、目安とする熱出力のみを表示し、横軸60分、縦軸は任意に計算機のキー入力により、2～12MW、10～15MW、以降15～20MW、25～30MWと5 MW毎に100MWまで選択できるようになっている。また CRT画面には熱出力の他、プラント監視に必要なパラメータとして、核出力CH-6、7、8、原子炉出入口Na温度、オーバフロータンクNa温度と原子炉出口Na温度との温度差、制御棒位置を表示している。

CRT のオペレーションガイド画面上に表示される予測引き抜き量は、出力上昇直前に予測した操作量で、最も引き抜かれていない制御棒から順に制限した操作量（2.0、1.0、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1mm）で分配した時の値を合計したものである。実引き抜き量は実際に引き抜いた合計で、残引き抜き量は予測引き抜き量から実引き抜き量を差し引いた値である。この時、計算機内部では炉心での各制御棒の相対位置から、制御棒4については制御棒1、2、3、6の約1.1倍の反応度値を有するため実引き抜き量に1.1倍し、同様に制御棒5は約1/3の反応度値を有するため実引き抜き量を1/3にそれぞれ補正した操作量で計算している。（図5.3-3.2に制御棒配置図を示す。） 予測引き抜き量に対して実引き抜き量がオーバした時、残引き抜き量は”ゼロ”表示となり、最も引き抜かれていない制御棒の操作量も”ゼロ”表示となる。また、熱出力が目標値に到達した時も残引き抜き量は”ゼロ”表示となり、その時点で再度実引き抜き量も表示し直すようになっている。これらのガイド表示はすべて、目標出力到達10分後に消えるようになっている。

b) 予測手法

このモードでの制御棒操作量の予測は、従来の制御棒反応度値曲線を用いた反応度計算手法をやめ、前ステップの出力上昇実績を基に予測する手法を採用した。その理由としては、出力上昇時において本運転サイクルの制御棒値曲線ができていないこと、また炉心構成の変更により前サイクルのデータを用いることができないことからである。

出力上昇実績を基に予測する手法とは、前ステップの実績データを用いて行うもので、例えば、25→30MWの出力上昇操作を行う時は、直前の20→25MWの出力上昇時の実績から1 MW上昇させるのに要した制御棒実操作量（mm/MW）を求め、出力上昇操作開始前の安定した熱出力と目標出力との差にこの値を乗じて予測操作量を導き出す手法である。

c) ガイド機能

プログラムがランされると、熱出力の安定待ちのため、60秒間「制御棒操作を行わないで下さい。」とガイドする。その時、CRT画面上にカウントダウンで時間の経過を表示する。その後、2～12MWスケールのトレンドグラフに表示されている熱出力を参考に、系統温度約370℃、原子炉出力約3MWの状態から12MWまでの出力上昇操作を運転員の判断で行う。このステップでは前ステップでの実績がないため、制御棒操作量の予測は行わない。熱出力が12MWに到達した時点で「原子炉出力12MWに到達しました。」「2次純化系ロジックを開ロックとし主送風機を起動して下さい。」と音声及びCRT画面でガイドする。

次に12→15MWの出力上昇操作を行うため、計算機のキー入力によりCRT画面を10～15MWスケールのトレンドグラフに変更する。このステップでも、前ステップの実績が安定領域に入っていない3→12MW出力上昇であるため、精度の良い予測ができないことから制御棒操作の予測は一切行わず、運転員の判断で出力上昇操作を行う。熱出力が15MWに到達した時点で「原子炉出力15MWに到達しました。」とガイドする。

更に15→20MWの出力上昇操作を行うため、CRT画面のスケールを変更する。このステップでは、前ステップでの実績を基に制御棒操作量の予測を行う。制御棒操作ガイドは、例えば予測量が2.8mmとなった場合、最も引き抜かれていない制御棒から順に1.0、1.0、0.5、0.3に分配し、順次「制御棒○を○mm引き抜いて下さい。」とガイドする。この時の制御棒操作間隔は、ステップ応答試験を考慮し、制御棒操作量に応じて2mm/5分の制限から〔操作量(mm)×150秒=カウントダウン秒数〕の計算式で決定する。またステップ応答試験を判断する機能もっており、制御棒が一回の操作で3mm以上引き抜かれたことを条件にステップ応答試験と判断し、「ステップ応答試験中」とCRT画面上に表示する。その時、引き抜き量も併せて表示する。その後、ガイドに従い制御棒を引き抜き、目標出力の20MWに到達した時点で、「原子炉出力20MWに到達しました。」と、ガイドする。操作ガイドは、目標出力の20MW、または残引き抜き量が”ゼロ”になった時点で終了する。

これ以降は、5MWステップで定格出力の100MWまで、同様の操作を進めていく。

これらのガイドの他に、原子炉出力15MWに到達時「中間系検出器を引き抜いて下さい。」とガイドし、引き抜きが開始されるとCRT画面に「中間系検出器引抜中」とCRT画面に表示する。中間系中性子検出器が上限に到達した時点で「中間系検出器が上限になりました。」とガイドする。また、25MW到達時には「2次補助系を待機状態にして下さい。」、80MW到達時には「2次補助入口ダンパの開度調整を行って下さい。」とガイドする。これらのCRT画面の表示は、全て30秒後に消えるようになっている。

更に、プラント状態の監視強化の面から、次のガイド機能も有している。

1. 出力系中性子検出器CH-6、CH-7、CH-8の指示が一つでも60%を超えた時点で「出力系レンジを切替えて下さい。」、切替わった時点で「出力系レンジが○に切替わりました。」とガイドする。CRT表示は30秒後に消える。
2. 原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度の差が75℃を超えた時点で「原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差に注意してください。」とガイドする。CRT表示は、温度差が75℃を下回った時点で消える。
3. 原子炉入口Na温度が373℃を超えた時点で「原子炉入口Na温度に注意して下さい。」とガイドする。CRT表示は、原子炉入口温度が371℃以下になった時点で消える。
4. 出力上昇速度が5 MW/20分を超えた時点で、「出力上昇速度5 MW/20分を超えました。」とガイドする。CRT表示は、出力上昇速度が5 MW/20分以下になった時点で消える。

以上が、出力上昇プログラムでのガイド機能である。

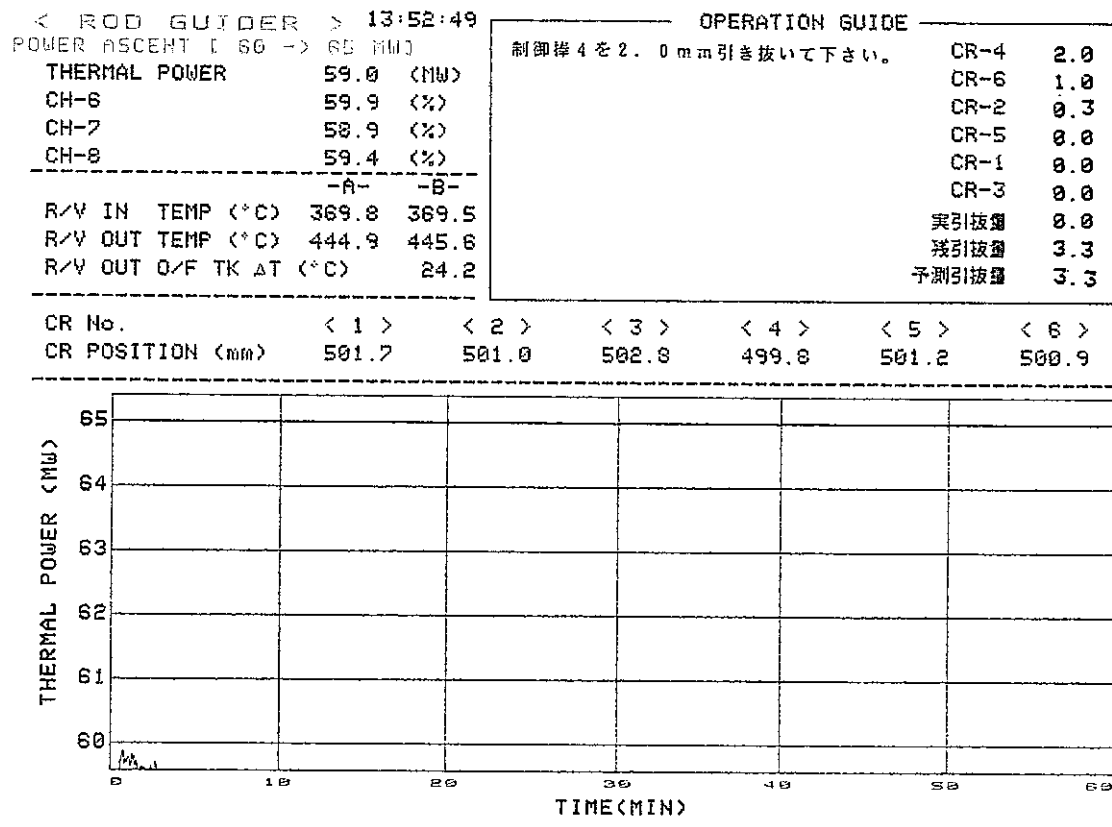
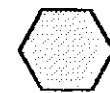
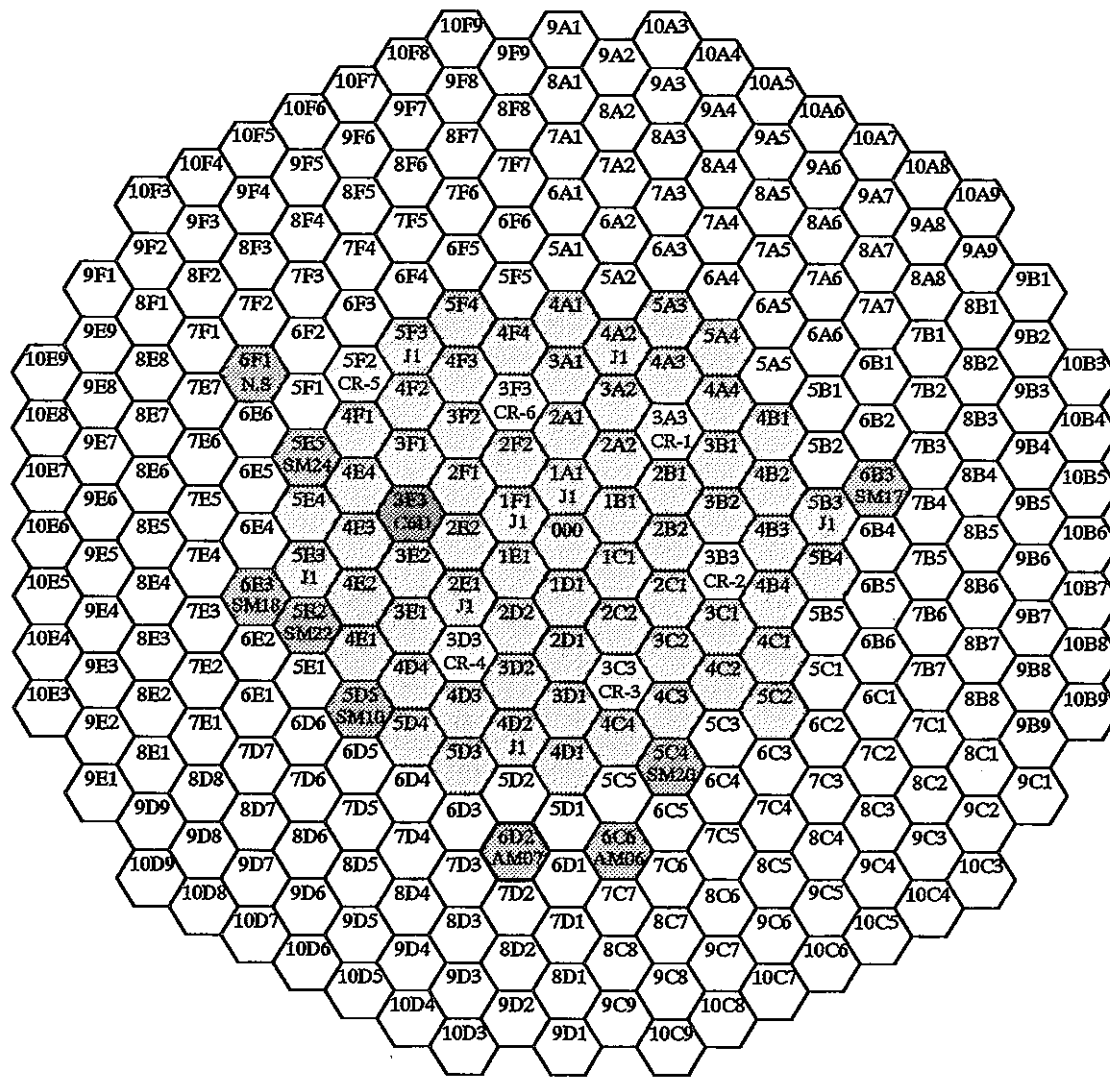
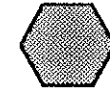


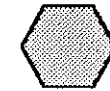
図5.3-3.1 出力上昇プログラムのCRT表示画面



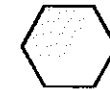
炉心燃料集合体 66体
(J1燃料 8体)



特殊燃料集合体 1体
注1



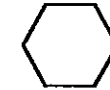
材料照射用反射体 8体
注2



制御棒 6体



中性子源 1体



反射体 231体

注1. C6D(3E3)

注2. AMIR-6(6C6), AMIR-7(6D2)
SMIR-20(5C4), SMIR-10(5D5)
SMIR-22(5E2), SMIR-24(5E5)
SMIR-17(6B3), SMIR-18(6E3)

图 5.3 - 3.2 制御棒配置图

(4) 出力調整プログラム

a) 機能の概要

本プログラムは、定時の出力調整時（2：00、10：00、18：00）に制御棒操作量の予測を行い、操作する制御棒を選択し、操作量を音声及び CRT画面への表示によってガイドするものである。

図 5.3-4 に出力調整プログラムの CRT表示画面を示す。CRT画面には熱出力の他、プラント監視に必要なパラメータとして、中性子検出器 CH-6、7、8、原子炉出入口温度、制御棒位置を表示している。

CRT のオペレーションガイド画面上に表示される予測引き抜き量は、出力上昇プログラムと同様に出力調整直前に予測し、制限した操作量（1.0、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1mm）で分配した時の値を合計したものである。出力上昇プログラムとは異なり、出力調整プログラムの制限した操作量に 2.0mm を使用していないのは、操作直後の出力のオーバーシュートで定格出力（100MW、100%）を超えないようにするためである。実引き抜き量は実際に引き抜いた合計で、残引き抜き量は予測引き抜き量から実引き抜き量を差し引いた値である。この時、計算機内部では出力上昇プログラムと同様、各々の制御棒の反応度値を考慮し、制御棒 4 は実引き抜き量の 1.1 倍、制御棒 5 は実引き抜き量の $1/3$ に補正した操作量で計算している。予測引き抜き量に対して実引き抜き量がオーバーした時、残引き抜き量は”ゼロ”表示となり、最も引き抜かれていない制御棒の操作量も”ゼロ”表示となる。また、原子炉出口 Na 温度 A または B、原子炉出力（核、熱）のいずれかが、それぞれの定格運転値である 500°C、100%（MW）に到達した時点でも”ゼロ”表示とし、その時点で再度実引き抜き量も表示し直すようにしている。これらのガイド表示は全て、目標出力到達 10 分後に消える。

b) 予測手法

出力調整プログラムは、過去 5 回の出力調整時の実績に基づいて制御棒操作量の予測を行う。

この予測手法は、出力調整直前の原子炉出力（熱出力、CH-6、7、8）の内、最も高い値を使用し、出力調整前の出力と出力調整後の出力、更に出力調整での制御棒操作量から 1MW または 1% 上昇させるために要した制御棒操作量（mm/MW）、（mm/%）を求める。それと同時に原子炉出口 Na 温度（A、B）の高い方の値を使用し、1°C 上昇させる為に要した操作量（mm/°C）についても求める。計算の中で制御棒の操作量は、反応度値から制御棒 4 の実引き抜き量に 1.1 倍、制御棒 5 の実引き抜き量に $1/3$ した補正值を使用している。

以上から求められた値を出力調整実績の1回分とし、過去5回の出力調整実績の最大値、最小値のデータを除く3つのデータを平均した値を基に、出力調整開始時の核出力、熱出力、原子炉出口温度とそれぞれの調整目標運転値の100% (MW)、500°Cに対する差を求め、それぞれについて予測し操作量が最も少ない値を予測操作量とする。

以下に計算式を示す。

$$F_1 \text{ (mm/MW)} = \text{制御棒引抜量 (mm)} / \text{原子炉出力変化量 (MW)}$$

$$F_2 \text{ (mm/\%)} = \text{制御棒引抜量 (mm)} / \text{原子炉出力変化量 (\%)}$$

$$F_3 \text{ (mm/°C)} = \text{制御棒引抜量 (mm)} / \text{原子炉出口温度変化量 (°C)}$$

$$H_1 \text{ (mm)} = (100 - P) \text{ (MW)} \cdot F_1 \text{ (mm/MW)}$$

$$H_2 \text{ (mm)} = (100 - P) \text{ (\%)} \cdot F_2 \text{ (mm/\%)}$$

$$H_3 \text{ (mm)} = (500 - T) \text{ (°C)} \cdot F_3 \text{ (mm/°C)}$$

H_1 、 H_2 、 H_3 : 制御棒予測操作量

P : 出力調整前の熱及び核出力の最も高い出力

T : 出力調整前の原子炉出口温度でA、Bループのうち高い温度

この予測手法は、普段運転員が出力調整において、操作量を予想する手法と同じ考え方である。この方式を採用することで必要操作量に対し、 $\pm 0.2\text{mm}$ 以下の予測精度を達成することができた。

予測は、原子炉出口Na温度及び原子炉入口Na温度が安定している出力調整開始時に1回行い、その後のガイダンスはここで求めた予測量から実操作量を差し引き、残りの操作量をガイドするものである。

一方、100MW到達直後は、その運転サイクルにおける出力調整実績がないため、5回のデータが蓄積されるまでは、制御棒校正で求めた制御棒価値曲線及び95～100MWでの出力係数 ($\Delta K/K/\text{MW}$) を用いた反応度計算手法によって制御棒操作量を予測する。この予測は原子炉出口Na温度A、Bのいずれかを500°C、または原子炉出力(核、熱)を100% (MW) にするのに必要な反応度を求め、少ない方の値を採用し求めるものである。

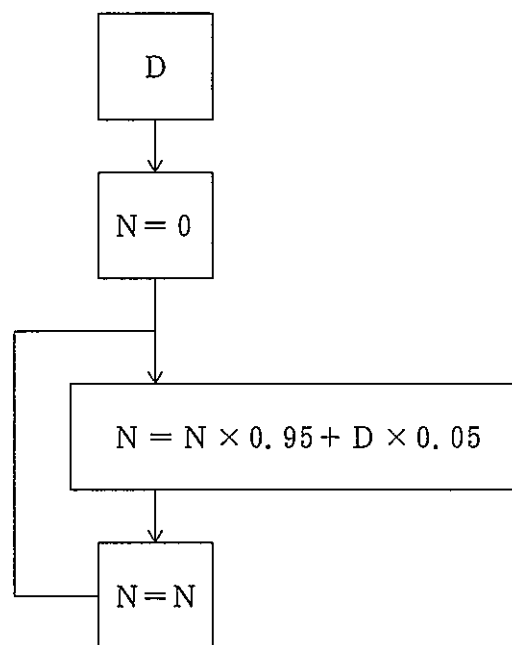
上記の予測計算を行う時、計算の過程で核出力、熱出力、原子炉出口Na温度についてはムービングアベレージを使用している。これは、主冷却器での温度制御性から原子炉入口Na温度がゆらぎ、その影響を受けて熱出力、核出力、原子炉出口Na温度が変動するため、予測する時に採取する出力調整直前の原子炉出力（熱出力、CH-6、7、8）及び原子炉出入口Na温度を平均化し予測精度を上げるためである。因みに熱出力は、原子炉出入口Na温度差とNa流量にある一定の係数を用いて算出している。ムービングアベレージとは、1回のサンプリングで入力されるデータの重みを変化させるもので、予測に用いている原子炉出力（熱出力、CH-6、7、8）及び原子炉出入口Na温度の入力されるデータの重みは0.05を使用している。

以下に処理方法を示す。

$$N = (N \times 0.95) + (D \times 0.05)$$

D : 入力される生データ

N : 計算に用いるデータ



従って、この値が生データに近づくには、時間を要するため、計算機起動直後（約10分間）には予測はできない。

表5.3-4に、各パラメータ毎にCRT画面のデジタル表示、トレンド表示、音声ガイド及び予測計算に用いている移動平均値を示す。尚、この値は出力調整モードに限らず全てのモードにおいて共通のものである。

c) ガイド機能

CRT画面上に表示される原子炉核出力、各Na温度、制御棒位置のデジタル値及びトレンドグラフの値は生データを用いている。熱出力については、0.3の重みを持ったムービングアベレージデータを用いている。なぜなら熱出力の算出において、ばらつきのある生データを用いる事でその値の精度が低下するためである。また定格出力、温度到達時に表示される

メッセージに対してもその基準値は熱出力以外は生データを用いている。

トレンドグラフの原子炉出力（核、熱）及び原子炉出口Na温度A、Bデータは、込み入った表示とならないように、それぞれ最大値のものだけをプロットする。この時、トレンドグラフに書かれているデータがどれであるか判別するために、デジタル値の表示色を変化するようにしている。

主なガイドは、出力調整5分前に「出力調整の準備を開始して下さい。」と音声及びCRT画面でガイドし、定時に「出力調整を開始して下さい。」「制御棒○を○mm引き抜いて下さい。」とガイドする。制御棒動作があると120秒のカウントダウンを開始し、0秒になった時点で次の制御棒操作のガイドを行う。この120秒は1次系から2次系への熱移送の遅れ時間として、過去の実績から最もリーズナブルな時間として定めたもので、出力調整プログラムでの制御棒操作のガイド間隔は操作量に関係なく120秒としている。これらの操作を繰り返し行い、原子炉出口Na温度A、Bのいずれかが500℃、または原子炉出力（核、熱）のいずれかが100%（MW）に到達した時点で、それぞれ「原子炉出口Na温度500℃に到達しました。」「核（熱）出力、100%（MW）に到達しました。」とガイドする。これらの表示は10分後に消えるが、計算機内部では到達信号が継続されており、原子炉出口Na温度は499℃以下、原子炉出力（核、熱）は99%（MW）以下になった時点でリセットされる。

トレンドグラフは、1時間毎に更新され、更新した場合でも、監視し易いように10分前のデータは残すようにしている。また出力調整の準備開始時にも更新するが、この場合10分前のデータ表示は行わない。

d) 特殊操作の判断機能

(I) ステップ応答試験の判断

ステップ応答試験は、10時の出力調整時に制御棒を6mm挿入し、出力が安定した後4mm引き抜き主冷却器のベーンの応答性を確認する試験である。

ステップ応答試験が行われる場合、一旦出力調整開始の旨の表示及び音声ガイドを行うが、制御棒位置が出力調整開始前の値より6秒間に4mm以上変化した時にステップ応答試験と判断し、「ステップ応答試験中」とCRT画面にのみ表示し、挿入した制御棒番号及び挿入量も表示する。その後、ステップ応答試験と判断した時の制御棒位置を基準として、6秒間に3mm以上の変化があった時、引き抜いた制御棒番号及び引き抜き量も表示する。その5分後にステップ応答試験終了と判断し「ステップ応答試験中」の表示を消した後、「出力調整の準備を開始して下さい。」とガイドし、更にその5分後「出力調整を開始して下さい。」とガイドする。それ以降は、通常出力調整のパターンと同様である。尚、予測はステップ応答試験を終了し、出力調整開始時の原子炉出力（核、熱）、原子炉出口Na温度、制御棒位置のデータを基準に行う。ステップ応答試験での制御棒引き抜き量は、

通常約 4 mm であり、2 mm / 5 分の制限より 10 分経過した時点で制御棒の操作が開始されるため、10 分間を計算機がカウントしている。

(II) M 系列試験及び安定性試験の判断

M 系列試験は、プラントに対して M 系列信号と呼ばれる擬似ランダム信号の小外乱を印加し、この時のプラント各部の動特性を解析するもので、10 時の出力調整時に原子炉出力 95 MW の状態で実施する。

M 系列試験が実施される場合、事前に原子炉出力を 95 MW に降下させており、出力調整開始 5 分前の 9 時 55 分の時点で、原子炉出力は約 95 MW に保持されている。出力調整前の原子炉出力は通常、燃焼に伴う出力降下によって約 98 MW であることから、9 時 55 分の時点で原子炉出力が 96 MW を下回っていた時、M 系列試験と判断し CRT 画面にその旨を表示する。試験終了後、計算機が引き続き実施される出力調整開始のタイミングを判断することができないため、計算機のキー入力により出力調整開始を認識させる。

安定性試験とは、通常運転時に予想される炉出力変更に伴う冷却材温度制御系の温度設定値の変更、炉出力変更に対してプラントが安定に動作することを確認するためのものである。

安定性試験が実施される場合、10 時になった時点で原子炉出力を 95 MW まで降下させるため、計算機での判断ができない。この対策として、10 時から 20 分経過した 10 時 20 分の時点で制御棒位置の変化が 2 mm 以上あり、かつ原子炉出力が 96 MW 以下の時、安定性試験と判断し、CRT 画面にその旨を表示する。また試験終了の判断も出来ないため、M 系列試験同様に試験終了後に出力上昇を行う時は、計算機のキー入力により出力調整開始を認識させる。

e) その他

制御棒位置指示計の長針が 50 mm 位置前後 (約 ± 2 mm) においてセンサ側に不感帯があり、制御棒位置指示が正常値を示さなくなるため、この位置においての出力調整結果のデータは信頼できなくなる。そのため、その後の出力調整時における予測が正常に行われなくなる。この不感帯を通過した後の 5 回分の出力調整データが蓄積された時点で、再度正常な予測が行われるようになるが、計算機ではその判断が出来ないため、運転員の判断が必要となってくる。

出力調整時の予測に用いられる原子炉出力 (核、熱)、原子炉出入口 Na 温度、制御棒位置は、出力調整開始直前に取得し、それより 30 分後に出力調整後の同種のデータを取得し 1 回分のデータとする。ステップ応答試験時には、制御棒 3 mm 引き抜き終了時より 10 分経過した時点で出力調整直前のデータを取得し、それより 30 分後に出力調整後のデータを取得する。いずれの場合においても、出力調整後のデータを取得すると同時にこれらのデータをハード

ディスクに記憶し、出力調整前後のデータ、予測データ、実際の制御棒操作量等をプリンタに自動出力する。ハードディスク内においては、5回分のデータのみ記憶し、古いデータから順に消去していく。

M系列試験及び安定性試験により、10時に行われるはずの出力調整が遅れ、18時の段階で原子炉出力が高く出力調整が行われないことがある。この場合、過去5回のデータの内1回が消去されてしまい、予測精度が低下する。この対策として、定時の出力調整時に20分が経過しても1mm以上の制御棒動作がなく、M系列試験でもなく、ステップ応答試験でもなく、安定性試験でもない場合、出力調整が実施されないと判断し、「〇時の出力調整は実施されていません。」という表示が次の出力調整5分前までCRT画面に表示する。この時、データの取得は行わず精度が落ちないようにしている。

CRT画面上の制御棒位置指示値は、セルシン指示に合うよう適宜補正を加え、また原子炉出力（核、熱）については、原子炉制御盤のレコーダを基準に補正し、Na温度については「常陽」データ処理装置（JOYDAS）の値を基準に補正している。

図5.3-4は、本システムのガイド通り操作したときのトレンドグラフである。この図を見ると原子炉出力、原子炉出口Na温度、ともになめらかな変化を示しており、操作タイミング（2分）は妥当であることが判る。また予測操作量についても十分満足できるものとなり、信頼性が向上した。

18:43:10

OPERATION GUIDE

THERMAL POWER 100.0 (MW)
 CH-6 99.4 (%)
 CH-7 99.4 (%)
 CH-8 99.7 (%)

CR-3 0.0
 CR-6 0.0
 CR-2 0.0
 CR-5 0.0
 CR-1 0.0
 CR-4 0.0
 実引抜量 3.3
 残引抜量 0.0
 予測引抜量 3.3

-A- -B-
 R/V IN TEMP (°C) 369.3 369.8
 R/V OUT TEMP (°C) 499.0 499.7

CR No. < 1 > < 2 > < 3 > < 4 > < 5 > < 6 >
 CR POSITION (mm) 530.9 530.9 530.8 531.0 530.9 530.9

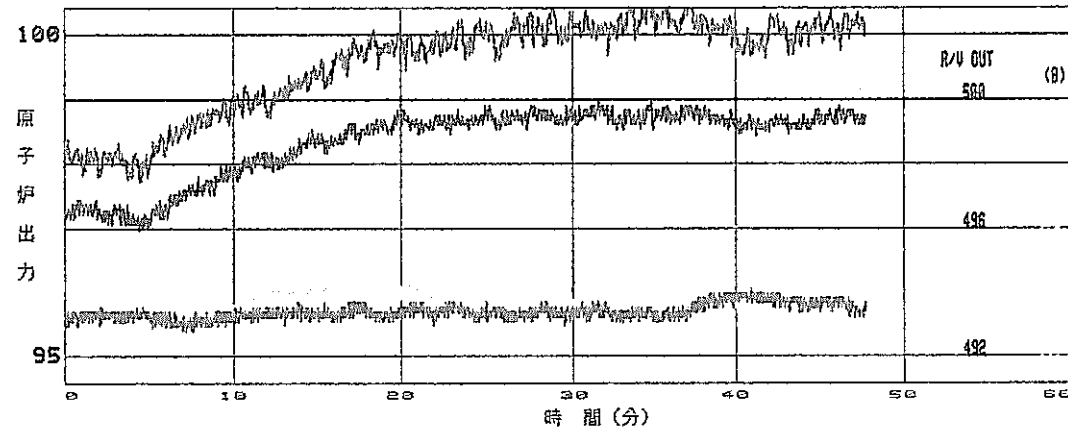


図 5.3 - 4 出力調整プログラムのCRT表示画面

表 5.3.1-4 移動平均値表

	デジタル 表示		トレンド 表示		音 声 ガイド		予 測 計算値	
	N	D	N	D	N	D	N	D
熱出力	0.7	0.3	0.7	0.3	0.7	0.3	0.95	0.05
核出力	生データ		生データ		生データ		0.95	0.05
温 度	生データ		生データ		生データ		0.95	0.05

N : 計算値に用いる値

D : 計算機に入力される生データ

(5) 出力降下プログラム

a) 機能の概要

本プログラムは、原子炉出力約 100MWから降下を開始し、30MWで制御棒一斉挿入にて原子炉を停止するまでの出力降下操作に係わる、制御棒及びプラント操作を音声及び CRT画面表示によってガイドするものである。

図 5.3-5 に出力降下プログラムの CRT 表示画面を示す。CRT のトレンドグラフは、目安とする熱出力のみを表示し、横軸の時間を 60 分、縦軸の熱出力は任意に計算機のキー入力により、100 ~ 95MW、95 ~ 90MW、以降 90 ~ 85MW、85 ~ 80MW と 5 MW 毎に 30MW まで更新できるようになっており、操作に対応した画面を選択できるようになっている。また CRT 画面には熱出力の他、プラント監視に必要なパラメータとして、核出力 CH-6、7、8、原子炉出入口 Na 温度、オーバフロータンク Na 温度と原子炉出口 Na 温度との温度差及び制御棒位置を表示している。

CRT のオペレーションガイド画面上に表示される予測挿入量は、出力降下直前に予測し最も引き抜かれている制御棒から順に制限した操作量 (2.0、1.0、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 mm) で分配した時の値を合計したものである。実挿入量は実際に挿入した合計で、残挿入量は予測挿入量から実挿入量を差し引いた値である。この時計算機内部では、制御棒 4 は制御棒 1、2、3、6 の約 1.1 倍の反応度価値を有するため実挿入量の 1.1 倍、制御棒 5 は約 1/3 の反応度価値を有するため実挿入量の 1/3 に補正した操作量で計算している。予測挿入量に対して実挿入量がオーバした時、残挿入量は”ゼロ”表示となり、最も引き抜かれている制御棒の操作量も”ゼロ”表示となる。また、熱出力が目標値に到達した時も残挿入量は”ゼロ”表示となり、その時点で再度実挿入量も表示し直すようになっている。これらのガイド表示はすべて、目標出力到達 10 分後に消えるようになっている。

b) 予測手法

このモードでの制御棒操作量の予測は、出力上昇プログラムと同様、従来の制御棒反応度価値曲線を用いた反応度計算手法をやめ、前ステップの実績データを用いて行うものである。しかし、最初の 100 → 95MW 時は、前ステップの実績データがないため、出力調整時の最新 5 回のデータをそのまま出力降下モードに適用し予測を行う。よって、出力調整時の最新の係数 (mm/MW) を求め、この値と目標出力までの出力差から操作量を導き出す。

その後は、前ステップの実績データを用いて行うもので、例えば 90 → 85MW の出力降下操作を行う時は、95 → 90MW の出力降下操作時に要した制御棒操作量から係数 (mm/MW) を求め、この値と目標出力までの出力差から操作量を導き出していく。これらの予測は、画面を更新するために計算機でキー入力した時に 1 回行い、その後はこの値を基に実際の制御棒操作量を差し引いていくものである。

c) ガイド機能

制御棒の操作ガイドは、例えば予測量が 2.8mm となった場合、最も引き抜かれている制御棒から順に 2.0、0.5、0.3 に分配し、順次「制御棒○を○mm 挿入して下さい。」とガイドしていく。この時の操作間隔は、出力降下時に行われるステップ応答試験を考慮し、制御棒操作量に応じて 2 mm / 3 分の制限から [操作量 (mm) × 90 秒 = カウントダウン秒数] の計算式で決定する。

またステップ応答試験と判断する機能もあり、制御棒が一回の操作で 3 mm 以上挿入されたことを条件にステップ応答試験と判断し、「ステップ応答試験中」と CRT 画面にのみ表示する。この時、挿入量も併せて表示する。その後、ガイドに従い制御棒を挿入し目標出力の 95MW、または残挿入量が”ゼロ”になった時点で操作ガイドは終了し、目標出力 95MW に到達した時点で、「原子炉出力 95MW に到達しました。」と、ガイドする。

以降、同様な方法で、95→90MW、90→85MW、85→80MW と 5 MW 毎に、30MW まで計算機からのキー入力で画面を更新して、出力降下操作を行う。

更に、プラント状態の監視強化の面から、次のガイド機能も有している。

1. 中性子検出器 CH-6、CH-7、CH-8 の指示が 1 つでも 20% 以下になった時点で「出力系レンジを切替えて下さい。」、切替わった時点で「出力系レンジが○に切替わりました。」とガイドする。CRT 表示は 30 秒後に消える。
2. 原子炉出口 Na 温度とオーバフロータンク Na 温度の温度差が 75°C を超えた時点で「原子炉出口 Na 温度とオーバフロータンク Na 温度との差に注意してください。」とガイドする。CRT 表示は、温度差が 75°C を下回った時点で消える。
3. 原子炉入口 Na 温度が 373°C を超えた時点で「原子炉入口 Na 温度に注意して下さい。」とガイドする。CRT 表示は、原子炉入口温度が 371°C 以下になった時点で消える。

本プログラムは、原子炉停止信号（制御棒一斉挿入、原子炉スクラム）で終了するようになっている。

以上が出力降下プログラムのガイド内容である。

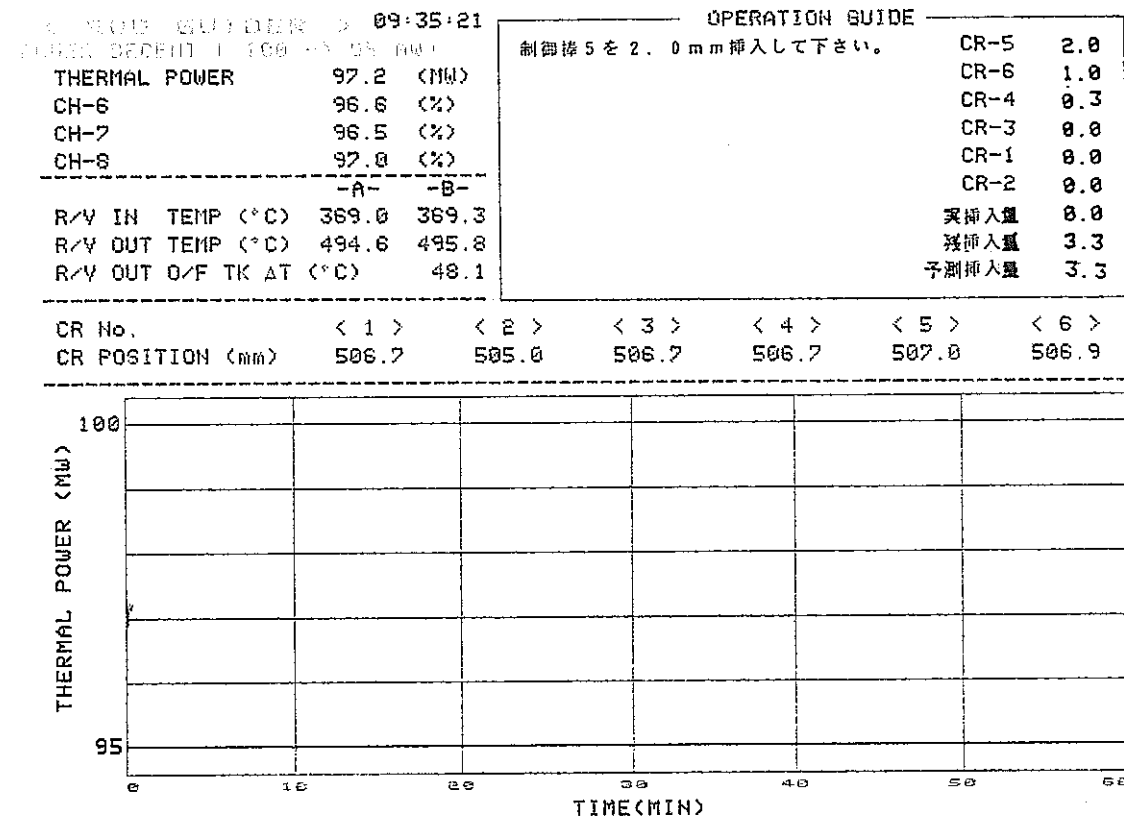


図 5.3 - 5 出力降下プログラムのCRT表示画面

6. 結 言

制御棒操作ガイドシステムの開発に関する第3ステップとして、平成3年より本システムのマンマシンインターフェイス機能の向上を図るため、CRT画面の日本語表示と音声ガイド機能の追加を行った。また、出力調整モードでの制御棒操作量の予測精度の向上を図る目的で、これまでの炉心反応度計算手法に加え、過去5回の出力調整時の実績をフィードバックさせる予測機能の追加を行った。

これらの機能の追加を通じて得られた主な成果は、以下の通りである。

- (1) CRT画面を日本語表示にしたことで、マンマシンインターフェイス機能が向上した。
- (2) 音声ガイド機能を追加したことで、ガイド内容を見落とすことがなくなり運転信頼性と安全性の向上及び運転員の負担軽減に寄与できた。
- (3) 114点の音声ガイド項目について良好な音声ガイドができることを確認した。
- (4) 原子炉運転操作マニュアルに記載されている操作内容の全てを取り込んだことにより、原子炉運転マニュアルと同等の機能となり、更にタイムリーな音声ガイドを行う事で運転経験の浅い運転員でも熟練運転員と同等の操作が可能となった。
- (5) これまでの炉心反応度計算手法に加え、過去5回の出力調整時の実績をフィードバックさせる予測機能を追加したことで、定時の出力調整時の予測操作量が実操作量に対して±0.2mm以下の精度を達成することができた。

7. 考 察

ロッドガイダーの開発は、制御棒操作自動化の基礎となる知見を得る目的で開始され、第1ステップ及び第2ステップを通して当初の目的を達成した。

制御棒操作の自動化は、得られた知見をベースとしながらも原子炉の核的・熱的挙動が非線形で複雑であることから、非線形の制御対象に有効でなおかつ運転経験上のノウハウ等の言語情報を有効に活かすことができるファジイ制御を用いたシステム開発を目指すことにした。

そこでロッドガイダーは、現在の出力制御のための運転員の操作に対し、その支援機能を向上させる目的で第3ステップへの取り組みを開始した。

制御棒操作の自動化のためには、常に現在の出力と目標出力との偏差から制御棒操作量を予測しなければならないことから、制御棒価値、各種反応度係数、プラントデータ等の正確なデータから反応度計算により求めてきた。しかし、以上のデータは各運転サイクル毎に変化しなおかつ運転サイクル初期にはデータ不足から予測値の精度が良くなかった。

一方、運転員はプラントデータを読みながら過去の経験値を勘案して操作することから、操作量の予測には運転員の予測手法である経験値を平均化したものを追加する方法に変更することにした。

本手法は、制御棒操作自動化には適用できないが、ガイドシステムとしての予測精度は向上し、100%定格運転中に実施する1日3回の定時の出力調整ではロッドガイダーのガイダンス通りの操作で出力調整が可能となった。また、音声ガイダンスの追加及びCRT画面表示の日本語表示化により、経験の浅い運転員に対してもマンマシンインターフェース機能は向上した。

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
- (2) 寺門嗣夫他、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、SN9410 89-052
- (3) 寺門嗣夫他、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、SN9410 90-022
- (4) 太陽計測（株）：7523 GMACS II 取扱説明書
- (5) 日本コンピュータ工業（株）：CGT1024J 使用説明書