

「常陽」制御棒操作自動化システムの開発

オンラインシステムMK-III適用性評価

(技術報告)

2004年3月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

「常陽」制御棒操作自動化システムの開発 —オフラインシステムMK-III適用性評価—

寺門 嗣夫^{*1} 星野 勝明^{*1} 鈴木 伸也^{*1}
伊東 秀明^{*1} 青木 裕^{*1} 大戸 敏弘^{*1}

要 旨

制御棒操作自動化システムを実機に据付ける前段階として、MK-II原子炉運転時に開発した「制御棒操作自動化オフラインシステム」について MK-III性能試験中に操作ガイド機能の基礎データを採取し、MK-IIIでの適用性を検討し以下の結果を得た。

- (1) 系統昇温・出力上昇・出力下降の制御モードについては、系統温度変化率が MK-II と同じであることから、MK-III運転に適用できた。この間の、制御棒引抜量とガイド機能の出力との差は±0.2mm 以内であり、精度よく合致した。MK-II 運転時の運用経験を反映して作成した規定ファジィ制御規則も、MK-III運転に適用できた。
- (2) 制御棒操作量表示機能のうち臨界近接モードは、MK-IIIにおいて臨界点が MK-II での 5×10^4 cps から 2×10^4 cps に変更されたことから、規定ファジィ制御部の制御規則を検討し、改造案を提起した。機器運転ガイド機能については、MK-III原子炉運転手順をもとにガイドメッセージを検討し、改造案を提起した。
- (3) 今後、ハードウェアの機能の維持及び利便性の向上を図るため、システムの更新を進める。

* 1 : 実験炉部原子炉第一課

**Development of the Automatic Control Rod Operation System for JOYO
Appreciation of apply to MK-III reactor operation**

T.Terakado*,K.Hoshino*, S.Suzuki*
H.Ito*,H.Aoki*and T.Odo*

Abstract

Prior to applying the automatic control rod operation system to JOYO, we examined possibility of application for the automatic control rod operation guide system which developed in MK-II operation to get the control rod operation guide data in MK-III performance tests.

The main results are as follows;

- (1) The operation guide system could be applied to MK-III reactor operation of cooling system heat up mode, power ascent mode and power descent mode because cooling system heat up rate were the same as of MK-II reactor operation. The difference between actual rod stroke and the system's guidance was less than $\pm 0.2\text{mm}$. Fuzzy control rules based on MK-II operation experience could be applied to MK-III reactor operation.
- (2) Fuzzy control rules for critical approach mode in the control rod operation guide function was proposed for applying to MK-III critical point. Plant operation guide was proposed based on MK-III reactor operation manual.
- (3) The automatic control rod operation guide system will be replaced for improving its maintainability and convenience.

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

目 次

1. 緒 言	1
2. 「常陽」の原子炉制御系及び運転操作	2
2. 1 「常陽」の原子炉制御系	2
2. 2 「常陽」の原子炉運転操作	2
3. 制御棒操作自動化オフラインシステム	5
3. 1 目的	5
3. 2 構成	5
3. 3 機能	5
4. MK-IIIでの適用性の評価	12
4. 1 臨界近接	12
4. 2 核加熱	13
4. 3 系統昇温	14
4. 4 出力上昇	15
4. 5 出力下降	16
5. オフラインシステム改造箇所の検討	17
5. 1 オフラインシステムの改造箇所	17
5. 2 オフラインシステムの機能の追加	20
6. 結 言	22
7. 参考文献	23

表リスト

表 1	制御棒操作自動化システムの開発計画	25
表 3.3-1	臨界近接の規定ファジィ制御規則	26
表 3.3-2	核加熱の規定ファジィ制御規則	27
表 3.3-3	系統昇温の規定ファジィ制御規則	28
表 3.3-4	出力上昇の規定ファジィ制御規則	29
表 3.3-5	出力下降の規定ファジィ制御規則	30
表 3.3-6	制約ファジィ制御規則	31
表 3.3-7	機器運転操作ガイド項目(1/3)	32
表 3.3-7	機器運転操作ガイド項目(2/3)	33
表 3.3-7	機器運転操作ガイド項目(3/3)	34
表 5.1	臨界近接の規定ファジィ制御規則変更箇所	35

図リスト

図 2.1-1	MK-III性能試験炉心の構成	36
図 2.1-2	原子炉制御系の概念	37
図 2.2-1	原子炉通常起動曲線	38
図 2.2-2	原子炉通常停止曲線	39
図 3.1	オフラインシステムの構成	40
図 3.3-1	臨界近接操作画面	41
図 3.3-2	核加熱操作画面	42
図 3.3-3	系統昇温操作画面	43
図 3.3-4	出力上昇操作画面	44
図 3.3-5	出力下降操作画面	45
図 4.1-1	オフラインシステムガイド機能出力と起動系ペリオドとの比較 [臨界近接 (70cps:168mm引抜後)]	46
図 4.1-2	オフラインシステムガイド機能出力と起動系ペリオドとの比較 [臨界近接 (125cps:84mm引抜後)]	46
図 4.1-3	オフラインシステムガイド機能出力と起動系ペリオドとの比較 [臨界近接 (約 3×10^3 cps から 2×10^4 cps)]	46
図 4.3-1	実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力の比較 [系統昇温 (系統温度 310°C)]	47
図 4.3-2	実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力の比較 [系統昇温 (系統温度 340°C)]	47
図 4.4-1	実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力との比較 [50MW から 60MWへの出力上昇]	48
図 4.4-2	実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力との比較 [110MW から 120MWへの出力上昇]	48

1. 緒 言

高速実験炉「常陽」（以下、「常陽」という。）では、高速増殖炉の原子炉起動から定格出力運転を経て停止に至る全ての運転領域での原子炉出力の自動制御を実現し、より一層の運転信頼性の向上を図ることを目的として、ファジィ推論を用いた制御棒操作自動化システムの開発を進めている。これまでに、ファジィ推論を用いた基本システムを「常陽」運転訓練シミュレータに組み込み、良好な制御特性を有することを確認した。⁽¹⁾

次のステップとして実機での検証を行うために、実機の信号は取り込み制御棒操作量等を提供する駆動装置と接続しない制御棒操作自動化オフラインシステム（以下、オフラインシステムという。）を作成し、MK-II 100MW 第31、32サイクル運転時に制御棒操作等のガイド機能を検証した。

その結果、ガイド機能は、原子炉の起動、停止操作において、所定の出力変化率での出力上昇、下降ならびに目標出力での整定に見合う適切な制御棒操作量を良好にガイドすることができた。⁽²⁾ 表1に制御棒操作自動化システムの開発計画を示す。

このように MK-II 原子炉運転サイクルにおいては、オフラインシステムが実機に適用できることを確認した。

これらの開発経験と実績を踏まえ、MK-III原子炉運転においても、オフラインシステムを使用することを検討しており、性能試験で実機の制御棒操作量とオフラインシステムの制御棒操作等のガイド機能出力とを比較し、その適用性について評価した結果を報告する。

2. 「常陽」の原子炉制御系及び運転操作

2.1 「常陽」の原子炉制御系

「常陽」の原子炉制御系は、6本の制御棒（制御要素全長650mm）とそれらの駆動機構を中心として構成される。これらの制御棒によって、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び事故時とともに原子炉の反応度が制御される。各制御棒は、炉心上部機構上に取り付けた駆動電動機等からなる駆動機構により駆動され、円筒形のチャンネル内を移動する。制御棒はすべて同一の構造と機能を有しており、通常の運転操作に必要な速度（130mm/min以下）で炉心への挿入、引抜きの動作が行われるとともに、運転時の異常な過渡変化時および事故時には急速に炉心内へ挿入されるよう自重及び加速スプリング力によってスクラム動作が行われる。

また、制御棒は、最も反応度効果の大きい1本が完全に引き抜かれた状態でも十分な余裕を持って原子炉を臨界未満にし、停止できる能力を有する設計とされている。これらの制御棒は基本的に炉心第3列に配置されるが、照射スペース拡大のため制御棒5はMK-IIで、制御棒2はMK-IIIで第5列に配置された。

原子炉の運転中、制御棒は炉心上部機構に設置された駆動機構の延長管によって吊り下げられ、駆動機構に取り付けられた電動機を中央制御室から手動にて遠隔操作することにより、引き抜き、または挿入される。また、制御棒による炉心への反応度付加率は、 $0.00019 \Delta k/k/sec$ (MK-III) を超えないように設計している。なお、制御棒2と5については、炉心第5列配置のため、反応度値は他の制御棒の約1/3となる。

図2.1-1及び図2.1-2にMK-III性能試験炉心の構成と原子炉制御系の概念をそれぞれ示す。

2.2 「常陽」の原子炉運転操作

「常陽」の原子炉運転操作は、臨界近接、系統昇温、出力上昇、出力調整、出力下降の5つの運転領域を通過することにより行われる。この間、原子炉の出力は、制御棒の手動操作のみで調整される。以下に、これら各ステップにおけるMK-III原子炉運転操作の概要について述べる。

図2.2-1と図2.2-2に「常陽」MK-IIIの原子炉起動・停止曲線を示す。

(1) 臨界近接操作

温態待機（冷却系250°C等温状態）から原子炉運転モードスイッチ「起動」状態で、制御棒駆動機構と制御棒を連結する制御棒保持操作を行う。保持操作終了後、臨界近接操作を開始する。

まず制御棒6本を全数300mmまで順次引き抜き、次いで制御棒2と5を計算コードにて求められた臨界予測位置（当該運転サイクルの過剰反応度と制御棒価値曲線から算出）まで引き抜く。その後、残り4本の制御棒で計数率逆増倍法から求められた臨界予測位置まで引き抜き、 2×10^4 cps 安定で6本均等位置にて臨界とする。臨界点は、MK-IIでは 5×10^4 cps であったが、MK-IIIでは遮蔽集合体の効果を考慮して約1/3である 2×10^4 cps とし、臨界近接操作におけるペリオドは50秒以上としている。

(2) 系統昇温操作

系統昇温は、冷却系のナトリウム（以下Naと略す）温度を制御棒操作により250°Cから350°Cまで上昇させるための操作である。操作開始直後は、制御棒を5mm程度引き抜くことにより、一定のペリオドで原子炉出力を上昇させる。この出力上昇の過程において、核計装出力系モニタの測定レンジの切り替え操作を行う。原子炉出力約1MWになると燃料温度の上昇が始まり、負の反応度が入るために原子炉出力の上昇は抑制され、制御棒引き抜き操作により温度は上昇するものの原子炉出力は約2～3MWで一定に保持される。

冷却系の昇温は、原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度の差を考慮し、20°C/hrの昇温率にて行われる。このため、制御棒はこの昇温率に相当する約2mm/5分の割合で引き抜かれる。なお、原子炉出力1MWまでは原子炉運転モードスイッチは「低出力」位置とし、それ以上は「高出力」位置に切り替えられる。

(3) 出力上昇操作

出力上昇は、冷却系のNa温度350°Cの等温状態から、原子炉冷却材温度制御設備により原子炉入口Na温度を350°Cに保持しながら、制御棒の引き抜き操作によって原子炉の熱出力を140MWまで、原子炉出口Na温度を500°Cに上昇させるものである。この場合も昇温率は、20°C/hrであり、原子炉熱出力上昇率は5MW/20分である。

原子炉で発生した熱は、主中間熱交換器を介して2次主冷却系に伝えられ、主冷却機の主送風機運転により大気に放散される。原子炉熱出力18MWまでは主冷却機入口ダンパや主送風機入口ベーンの開度調節による自然通風制御により原子炉入口Na温度を350°C一定に保持する。18MW到達時に主送風機を起動し、主冷却機での強制通風による除熱を行う。

(4) 出力調整操作

原子炉の出力を一定に保持するためには、燃料の燃焼に伴う反応度の低下分を制御棒の引き抜きにより補償する必要がある。

「常陽」の出力調整は、8時間毎に1日3回実施され、毎回約3MWの燃焼分を補償する。それに相当する制御棒の引き抜き量は、約3mmである。

(5) 出力下降操作

出力降下時も出力上昇時と同様に、原子炉冷却材温度制御設備により原子炉入口Na温度は350°C一定に制御される。降温率は35°C/hrであり、原子炉出力の下降率は10MW/20分である。本操作は原子炉出力35MWまで行われ、制御棒2本同時挿入（制御棒2と5は除く）により原子炉を停止する。

3. 制御棒操作自動化オフラインシステム

3.1 目 的

制御棒操作自動化システムを実機に接続（オンライン）する前段階として、プラントデータは取り込むが実機と接続させないファジィ推論を用いたオフラインのシステムを運用し、そのデータを蓄積して、制御棒操作自動化システムを実機へ適用する場合に反映させる。

3.2 構 成

オフラインシステムは、中性子束、原子炉出入口 Na 温度等のプラントプロセス信号を入力し、ファジィ推論により原子炉運転に必要な制御棒操作量を算出し、CRT画面を介して運転員に制御棒操作量及び各種機器の運転操作に対するメッセージ等を提供するシステムである。

図 3.1 にオフラインシステムの構成を示す。オフラインシステムはデスクトップ型計算機を中心としたワークステーション、磁気テープ装置、カラーハードコピー、信号入力装置から構成される。プラントからの入力信号は、アナログ信号 47 点、デジタル信号 33 点であり、信号入力装置にてアナログ信号を工学値変換し、インターフェイスケーブルを介して、エンジニアリングワークステーション (EWS) に入力される。

3.3 機 能

オフラインシステムには、目標出力、目標温度までに現時点で操作する制御棒操作量を表示する制御棒操作ガイド機能、プラントの主要機器の操作時期に応じて運転員に対して、タイミングよく操作指示のメッセージを提供する機器運転操作ガイド機能及び制御棒操作を行う上で重要な監視パラメータを表示するプラントデータ表示機能がある。

また、このシステムは、「常陽」の全運転領域である臨界近接、核加熱、系統昇温、出力上昇、出力下降の 5 つの領域に対してそれぞれに制御モード及びこれに対応する CRT 画面を有している。これらの CRT 画面はそれぞれ臨界近接操作画面、核加熱操作画面、系統昇温操作画面、出力上昇操作画面、出力下降操作画面とし、CRT 上でマウスで選択できる。図 3.3-1 に臨界近接操作画面、図 3.3-2 に核加熱操作画面、図 3.3-3 に系統昇温操作画面、図 3.3-4 出力上昇操作画面、図 3.3-5 出力下降操作画面を示す。

3.3.1 制御範囲

制御範囲は、原子炉の起動から停止に至る通常運転の範囲とし、原子炉保護系が作動するような異常時は対象外としている。制御モードは、以下の通りである。

- (1) 臨界近接モード（原子炉起動から臨界 (5×10^4 cps) の範囲)
- (2) 核加熱モード（臨界 (5×10^4 cps) 以降から 1 MW の範囲）
- (3) 系統昇温モード（系統温度 250°C から 350°C (約 2 MW) までの範囲）
- (4) 出力上昇モード（約 2 MW から 100 MW までの領域、定格出力調整を除く）
- (5) 出力下降モード（100 MW から 20 MW までの領域）

3.3.2 制御棒操作ガイド機能

本機能は、臨界近接、核加熱、系統昇温、出力上昇、出力下降の各制御モードにおいて、それぞれ制御目標値を設定することにより、これに対応した制御棒操作量をファジィ推論により算出し、CRT表示するものである。ファジィ推論部は、規定ファジィ制御部と制約ファジィ制御部からなる。各々の機能は以下の通りである。

(1) 規定ファジィ制御部

規定ファジィ制御部は、各々の制御モード毎に、ファジィ推論によって制御棒操作量を求めて制約ファジィ制御部に出力する。具体的には、各モードで異なる 2 変量を監視し、それらが所定の値になるように、操作手順をファジィルールとして記述した規定ファジィ制御規則を実行した後、制御棒操作量を求める。監視対象とする 2 変量は各モード毎に、以下の通りである。

① 臨界近接

- ・ 起動系計数率
- ・ 起動系ペリオド

② 核加熱

- ・ 中間系出力
- ・ 中間系ペリオド

③ 系統昇温

- ・ 原子炉入口 Na 温度
- ・ 原子炉入口 Na 温度変化率

④ 出力上昇、出力下降

- ・ 原子炉出口 Na 温度

- 原子炉出口 Na 温度変化率

なお、これら制御規則には予め運転員の経験や知識に基づいて作成されたデータが入力されている。

規定ファジィ制御規則には、例えば「臨界近接操作時は、起動系ペリオドが 200 秒以内となるように制御棒を 2 mm/5 分程度で引き抜き、起動系計数率が 5×10^4 cps に近くなったら引き抜き速度をゆるやかにしていく。さらに、起動系計数率が 5×10^4 cps をわずかにオーバーシュートするように制御棒引き抜き操作を行い、その後、制御棒を少しずつ挿入して起動系計数率を 5×10^4 cps に整定させる。」等の操作手順が規定されている。

表 3.3-1 に臨界近接、表 3.3-2 に核加熱、表 3.3-3 に系統昇温、3.3-4 に出力上昇、3.3-5 に出力下降の規定ファジィ制御規則を示す。

この規定ファジィ制御規則は 100MW 定格出力運転での運用実績を踏まえ、100MW 第 34 サイクル運転において以下の部分を調整した。

i) 臨界近接

臨界点でのオーバーシュート量を極力低減させるため、制御棒操作量について、NS (Negative Small) の設定値を -0.2mm から -0.5mm に NM (Negative Medium) の設定値を -0.5mm から -0.7mm に変更した。

ii) 核加熱

1 MW でのオーバーシュート量を極力低減させるため、制御棒操作量について、NS (Negative Small) の設定値を -0.2mm から -0.5mm に NM (Negative Medium) の設定値を -0.5mm から -0.7mm に変更した。

iii) 出力上昇

目標とする原子炉出口 Na 温度に対し、より緩やかに到達させるため、制御棒操作量について、PB(Positive Big) の設定値を 1.0mm から 0.5mm に、PM (Positive Medium) の設定値を 0.5mm から 0.3mm に、PS(Positive Small) の設定値を 0.2mm から 0.1mm に変更した。

ファジィ制御規則から制御棒位置を設定するアルゴリズムには、ファジィ推論として一般的な「min-max 重心法」を用いている。

(2) 制約ファジィ制御部

制約ファジィ制御部は、原子炉出入口 Na 温度、中性子束等のプロセス信号及びプラントの熱的あるいは核的制限値に基づき、前記規定ファジィ制御部で設定された制御棒操作量を補正し、補正後の制御棒操作量を最終的な制御棒操作量として出力するものである。すなわち、原子炉プラントの主要な監視パラメータ（原子炉出入口 Na 温度、原子炉出入口 Na

温度、原子炉出口 Na 温度変化率、原子炉出口 Na 温度－オーバフロータンク Na 温度差、ペリオド、中性子束レベル、1 次系及び 2 次系主循環流量、原子炉 Na 液位等) が運転上の許容値を超えそうな場合に制御棒の引き抜き・挿入を制約する。制約ファジイ制御規則には、例えば「系統昇温時はオーバフロータンク Na 温度と原子炉出口 Na 温度の差がある程度大きくなった場合は、制御棒の引き抜きをゆっくり行う。」等の注意事項を規定している。表 3.2-6 に制約ファジイ制御規則を示す。

(3) 規定ファジイ制御目標値入力機能

規定ファジイ制御部の出力上昇と出力下降モードにおいて、運転員に制御棒操作ガイドを提供するファジイ制御の制御目標値である原子炉出口 Na 温度を、CRT 画面上のウィンドウから入力する機能である。この目標原子炉出口 Na 温度は、手入力にて変更可能であり、計算機を停止しても入力値が保持される。

3.3.3 機器運転操作ガイド機能

本機能は、原子炉運転操作において必要な機器の操作時期に当該機器の操作のガイドメッセージを CRT 上に表示するものである。そのまま表示しておくと新たに出てくるガイドメッセージを表示する上で支障をきたすため、所定の時間（20 秒または 10 分）が経過した後に自動的に消去される。表 3.3-7 に機器運転操作ガイド項目を示す。

3.3.4 プラントデータ表示機能

本機能は、原子炉運転操作を行う上で必要な原子炉出力、原子炉出入口 Na 温度、制御棒位置等の重要な監視パラメータをプラントデータとして各操作画面上にデジタル及びトレンドにて表示するものである。プラントデータ表示機能を以下に示す。

(1) デジタル表示機能

各操作画面毎のデジタル表示項目を以下に示す。また、中性子束については、指示計をイメージしてバーチャート表示を、制御棒位置については実際の制御棒の動きをイメージして動画表示とした。

① 臨界近接操作画面

起動系計数率 ch-1、ch-2 (バーチャート)

中間系出力 ch-3、ch-4、ch-5 (バーチャート)

起動系ペリオド ch-1、ch-2 (バーチャート)

制御棒位置 1～6 (動画)

熱出力

原子炉出入口 Na 温度 A、B

原子炉出口 Na 温度－オーバフロータンク Na 温度差

オーバフロータンク Na 温度

臨界予測制御棒位置

臨界予測制御棒位置の表示は、予め炉心構成に基づき算出した臨界予測制御棒位置を入力しておくと、その位置を表示し、制御棒5本が臨界予測位置へ到達したあとは、残りの制御棒1本にて計数率逆増倍法による臨界制御棒位置を計算し、CRT 上に表示するものであり、臨界近接操作上の目安として使用する。

② 核加熱操作画面

中間系出力 ch-3、ch-4、ch-5 (バーチャート)

出力系出力 ch-6、ch-7、ch-8 (バーチャート)

中間系ペリオド ch-3、ch-4、ch-5 (バーチャート)

反応度 (バーチャート)

制御棒位置 1～6 (動画)

熱出力

原子炉出入口 Na 温度 A、B

原子炉出口 Na 温度－オーバフロータンク Na 温度差

オーバフロータンク Na 温度

③ 系統昇温操作画面

中間系出力 ch-3、ch-4、ch-5 (バーチャート)

出力系出力 ch-6、ch-7、ch-8 (バーチャート)

制御棒位置 1～6 (動画)

系統昇温率

熱出力

原子炉出入口 Na 温度 A、B

原子炉出口 Na 温度－オーバフロータンク Na 温度差

オーバフロータンク Na 温度

④ 出力上昇操作画面及び出力下降操作画面

出力系出力 ch-6、ch-7、ch-8 (バーチャート)

制御棒位置 1～6 (動画)

熱出力

原子炉出入口 Na 温度 A、B

原子炉出口 Na 温度 - オーバフロータンク Na 温度差

オーバフロータンク Na 温度

(2) トレンドグラフ表示機能

各制御モードにおいて、原子炉運転操作を行う上で重要な原子炉出力、原子炉出入口 Na 温度、制御棒位置等の監視パラメータをトレンドグラフとして表示する。1つのトレンドグラフ上で表示できる点数は、最大 6 点であり、表示可能な項目数は、72 点である。このトレンドグラフのスケール幅（縦軸）は、上限、下限を任意に設定でき、グラフの時間幅（横軸）は、4 分、8 分、20 分、1 時間、2 時間、4 時間、8 時間のなかから任意に選択できる。

(3) 規定ファジィ制御表示機能

本機能は、各制御モードにおいて、規定ファジィ制御で使用する制御パラメータ（例えば出力上昇モードの時は原子炉出口 Na 温度と原子炉出口 Na 温度変化率）2 点のパラメータの交点の推移をグラフ上に表示するものである。この機能は、規定ファジィ制御の制御状況を表したものであり、実機検証試験時に規定ファジィ制御の制御性を確認することを目的に設けた。

(4) 制約ファジィ制御表示機能

本機能は、プラントの熱的・核的運転制限値に近づく異常な兆候が現われた時に規定ファジィ制御部で計算した制御棒操作量を補正する制御棒操作量制約条件と制約定数（グレード）を表示するものである。この機能は、制約ファジィ制御の制御状況を表したものであり、シミュレータや実機での検証試験時に制約ファジィ制御の制御性を確認することを目的に設けた。

(5) 反応度指示表示機能（核加熱操作画面のみに適用）

実機の反応度計を模擬したもので、核計装の中間系 ch-3 のデータを用いて炉心反応度を計算し、炉心反応度をバーチャートにて表示する機能である。原子炉出力 1 kW から 1 MW への出力上昇時に使用する。本領域は、反応度計起動後反応度が最も大きくなる領域であることから、監視のために設けた。

(6) 系統昇温率表示機能（系統昇温画面のみに適用）

系統昇温において、系統昇温率をデジタル表示する機能である。昇温率は、原子炉入口 Na 温度パラメータを平滑化処理して、直近 10 分間の同温度の差を時間当たりの数値として表示している。

4. MK-IIIでのオフラインシステム適用性の評価

「常陽」の運転操作において、MK-II運転とMK-III運転の主な違いは、臨界点が 5×10^4 cps から 2×10^4 cps に、系統昇温の終了が 367°C から 347°C に、主送風機起動時原子炉出力が 12MW から 18MW に、最高原子炉出力が 100MW から 140MW に変わったことである。出力上昇速度については、MK-II、MK-IIIともに 5MW/20 分で、系統昇温率も 20°C/hr で変更されていない。また出力下降速度については MK-II は 10MW/20 分で MK-III は 10MW/15 分であるが、系統降温率は 35°C/hr で変更されていない。

オフラインシステムの MK-III での適用性の評価は、MK-III 性能試験における原子炉運転時の原子炉出力上昇過程において実機の運転員操作による制御棒操作量（単位：mm）を採取し、オフラインシステムの制御棒操作ガイド機能（以下、ガイド機能と略す）の制御棒操作量出力（単位：mm）と比較し、両者の差を確認する方法で行った。また、合わせて原子炉出口 Na 温度変化率（以下、系統昇温率という）データを採取して、ファジイ推論の妥当性も確認した。但し、臨界近接については、制御棒の操作方法の違いから前述の比較が困難であるので、ガイド機能のファジイ推論の作動状況を確認し、評価することとした。臨界近接時の制御棒操作方法は、実機は計数率逆増倍法に基づき算出した制御棒操作量（臨界点から未臨界度が深いときは連続的に制御棒を引き抜き、その操作量が百数十 mm になる）を起動系ペリオドが短くならないように引き抜く、一方、オフラインシステムを使用した場合は起動系計数率と起動系ペリオドの関係から制御棒引抜き量を決定するための規則をあらかじめ作成しておき数 mm 単位を短い時間間隔で引抜く方法である。

4.1 臨界近接

MK-III での臨界点が 5×10^4 cps から 2×10^4 cps に低下したことから、適用性の調査は 2×10^4 cps 以下の範囲で行った。

運転モードスイッチを「起動」として、臨界近接操作を開始した。運転操作マニュアルに従つて、制御棒ラッチ操作、制御棒全数 300mm までの引き抜き操作を行った。その後、制御棒を 2、5、3、6 の順に臨界予測位置 468mm まで引き抜いた時点で、オフラインシステムのガイド機能が動作を開始した。この時の起動系計数率は 40cps 程度、起動系ペリオドは約 500 秒であった。ガイド機能の出力は、運転員が制御棒操作に対応できる時間で、かつ実機の臨界操作に要する時間（約 1 時間 30 分）を考慮して 20 秒毎に設定した。

臨界まで残りの制御棒は2本となり、制御棒4を臨界予測位置468mm(168mm 分引抜き)まで引き抜いた。図4.1-1にオフラインシステムガイド機能出力と起動系ペリオドとの比較[臨界近接(70cps:168mm 引抜後)]を示す。制御棒の引き抜き後起動系ペリオドは約100秒から200秒程度に短くなったが、その後制御棒引き抜き間隔が長く未臨界のため3000秒程度となった。ガイド機能の出力は約3mmとなった。図4.1-2にオフラインシステムガイド機能出力と起動系ペリオドとの比較[臨界近接(120cps:84mm 引抜後)]を示す。起動系計数率は約120cpsとなり、逆増倍法により制御棒1を84mm引き抜いた。制御棒引き抜き直後は、起動系ペリオドが200秒程度となり制御棒引き抜き量は0.1mm前後となった。その後起動系計数率の上昇を監視し、制御棒引き抜きを行わなかったことにより起動系ペリオドが長くなり、ガイド機能の制御棒引抜き量は、多め(起動系ペリオド4600秒で3.0mm)になった。図4.1-3にオフラインシステムガイド機能出力と起動系ペリオドとの比較[臨界近接(約 3×10^3 cps から 2×10^4 cps)]を示す。逆増倍法による制御棒引き抜きにより、起動系ペリオドが約200秒程度を推移し、ガイド機能の制御棒引抜き量は0.1mm程度となった。

MK-IIIにおいてもガイド機能は、起動系計数率が低く、起動系ペリオドが長い時には規定ファジイ制御規則に従い多めに引抜き、起動系計数率が高めで起動系ペリオドが比較的短めの時は少なく引き抜くように調節するようファジイ推論が適切に働いており、制御棒引抜き量を良好に指示できることを確認した。MK-IIIの臨界点が起動系計数率で 2×10^4 cpsに低下したことに対しては、表3.3-1 臨界近接の規定ファジイ制御規則の中で起動系計数率のZO(Zero)とNS(Negative Small)の間隔が 1×10^4 cpsであることから、ZOを 5×10^4 cpsから 2×10^4 cpsに、NSを 4×10^4 cpsから 1×10^4 cpsに変更することで適応可能と考える。改造については、5章 オフラインシステム改造箇所の検討のなかで述べる。

これらのことから、MK-III原子炉臨界操作においてオフラインシステムを適用できると考える。

4.2 核加熱

原子炉臨界レベル(出力約1kW)から中間系出力1%(1.4MW)までの領域である。この領域はMK-II原子炉運転と規定ファジイ制御規則の制御範囲が同じであることから、同等の制御性を確保できる。このため、MK-III原子炉運転での約1kWから中間系出力1%までの出力上昇操作において、オフラインシステムを適用できると考える。

4.3 系統昇温

系統 Na 温度 250°C から 350°C までの昇温操作である。オフラインシステムの制御目標値は、CRT 画面上のウインドウから変更可能である。ファジイ推論の制御目標値は、MK-II 運転時の 370°C から MK-III 運転時の 350°C に変更した。系統 Na 温度 250°C から、運転マニュアルに従って制御棒を引き抜き、実機の運転員の操作による制御棒操作量とオフラインシステムのガイド機能の出力との比較を行った。

制御棒の引き抜きは、約 2mm/5 分で行い、系統昇温率 20°C/hr を目標に行った。なお制御棒 2 と 5 の反応度価値は、炉心第 5 列に配置されていることから、他の制御棒の反応度価値と比較して、約 1/3 となる。このため、制御棒 2 と 5 の引き抜きについては、2mm の 3 倍である 6mm を 2 回に分けて 3mm ずつ引き抜く方法で行った。系統昇温率を調節するため、制御棒引き抜き量を 1.3mm 程度まで抑制する操作も行った。オフラインシステムのガイド機能の出力も 20°C/hr を目標としており、実機と同様にオフラインシステムのガイド機能の出力についても、出力値を 3 倍とした。この制御棒操作方法は、出力上昇、出力下降モードにおいても同様である。図 4.3-1 に実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力の比較[系統昇温(系統温度 310°C)]を、図 4.3-2 に実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力の比較[系統昇温(系統温度 340°C)]を示す。

系統昇温率が 20°C/hr の時は、実機の制御棒 1 の引き抜き量 1.5mm に対してオフラインシステムのガイド機能は 5 分間の合計で 1.5mm（以後ガイド機能の指示値は 5 分間の値）であった。

系統昇温率が 23°C/hr の時は、実機の制御棒引き抜き量 2.0mm に対してガイド機能は 1.0mm であった。この時もガイド機能は適切に働き、制御棒引抜量の抑制を指示している。その後、運転員は系統昇温率が高めに推移していることを認識し、制御棒引抜量を 1.5mm に抑制した。

系統昇温率が 17°C/hr の時は、実機の制御棒引抜量 1.5mm に対してガイド機能は 1.9mm であった。制御棒の引き抜き量は 5 分当たり 1.5mm から 2.0mm の間であると考える。このようにして約 20°C/hr を目標に系統昇温を継続した。原子炉入口 Na 温度が 346°C に上昇して、ファジイ推論が働き、ガイド機能は制御棒引抜量ゼロを指示し、原子炉入口 Na 温度は 347°C で安定した。

MK-IIIにおいてもガイド機能は、系統昇温率の変化に対して 20°C/hr に調節するようファジイ推論が適切に働いており、制御棒引抜量を良好に指示できることを確認した。

これらのことから、MK-III 原子炉運転の系統昇温操作において、オフラインシステムを適用できると考える。

4.4 出力上昇

出力上昇は、50MW から 60MW、70MW から 80MW、100MW から 110MW、110MW から 120MW のケースで確認した。代表して、50MW から 60MW、110MW から 120MW について記述する。

制御棒引抜操作は、運転マニュアルに従い、約 2mm/5 分を基本とし、5MW 毎に 10 分間保持（今回は系統温度、原子炉出力の安定のため長めに保持）した。50MW から 60MW については、実機の制御棒引抜き量は合計 6.0mm であった。これに対してガイド機能は合計 6.1mm であった。また、110MW から 120MW については、実機の制御棒引抜量は 7.0mm（制御棒 2 と 5 の引抜分を 1/3 として計算した値）[制御棒 2 と 5 の引抜分 5.9mm を含め実際の制御棒引抜量 7.0mm] であった。これに対してガイド機能は 6.8mm（制御棒 2 と 5 の引抜分を 1/3 として計算した値）[制御棒 2 と 5 の引抜分 4.3mm 含め実際の制御棒引抜量 6.8mm] であった。この間、20°C/hr に調節するようファジィ推論が適切に働いている。系統昇温率が 25°C/hr の時は系統昇温率を抑制するように制御棒引抜量がゼロとなり、系統昇温率が約 14°C/hr 以下の時は系統昇温率を緩やかに増加するよう制御棒引抜量は 0.5mm であった。原子炉出口 Na 温度は制御目標温度に到達し、ガイド機能の制御棒引抜量はゼロになって、120MW で整定した。10MW 毎の制御棒引抜量とガイド機能の出力との差は、±0.2mm 以内であり精度よく合致した。また、性能試験において MK-II と同様に 50MW から 60MW の領域は出力反応度係数（フィードバック反応度）が小さく、110MW から 120MW の領域は出力反応度係数が大きいという結果であったが、出力反応度係数に差があっても、ガイドに従って制御棒を操作することにより 20°C/hr の系統昇温率を維持できる見通しを得た。

3.3.2 項において述べた 100MW 第 34 サイクル時の運用経験を反映して変更した規定ファジィ制御規則についても以下の通り評価した。

出力上昇操作は、5MW ステップで行い、原子炉出力や系統昇温率が完全に安定する迄の時間を持続し、次の出力上昇のステップに移行させた。規定ファジィ制御規則のうち PB (Positive Big) については、ガイド機能出力は最大で 0.5mm に制限された。これにより出力上昇開始時の系統昇温率のゆらぎが小さく抑えられ、安定したガイド機能出力が得られるものと考える。原子炉出口 Na 温度の制御目標値まで 0.5°C 程度である PS (Positive Small) については、PS を 0.1mm としたことにより制御棒引き抜きは最大でも 0.1mm に制限され、制御目標値に対して緩やかに到達できるものと考える。このように、系統昇温率を大きく変動させない制御棒引抜きにより、原子炉出口 Na 温度は制御目標値に対し緩やかに到達できる。

図 4.4-1 に実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力の比較[50MW から 60MW までの出力上昇]を、図 4.4-2 に実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力の比較

[110MW から 120MW までの出力上昇]を示す。

MK-IIIにおいてもガイド機能は、系統昇温率の変化に対して $20^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ に調節するようファジィ推論が適切に働いており、制御棒引抜量を良好に指示できることを確認した。

これらのことから、MK-III原子炉運転の出力上昇操作において、オフラインシステムを適用できると考える。

4.5 出力下降

出力下降については、出力上昇と同じ運転領域（出力領域）である。規定ファジィ制御部のプログラムの構造が出力上昇プログラムと同じであり、同等の制御性を有していることから、MK-III運転においても使用できる。

5. オフラインシステム改造箇所の検討

5.1 オフラインシステムの改造箇所

オフラインシステムを MK-III原子炉運転に適用するに当たり必要な改造箇所について、以下の通り検討した。

5.1.1 プラント入力点

変更箇所は、1次主冷却系Na流量である。入力信号（1～5V変更なし）のスパンが、MK-IIでは0～1,500m³/hであったが、MK-IIIでは0～1,700m³/hに変更となった。このため変換式については、「常陽」運転監視用計算機（JOYDAS）と同様に7折れ線1次式から、1次式に変更する。

5.1.2 制御棒操作ガイド機能

改造箇所は、臨界近接モードのみである。臨界近接モードのファジィ推論の開始条件について、MK-IIでは制御棒3～6まで臨界予想位置、制御棒1、2が350mmであったが、MK-IIIでは原子炉運転手順の変更により、制御棒2、5、1、3臨界予想位置、制御棒4、6を300mmに変更する。また系統昇温モードの制御目標値をMK-IIの「367°C」からMK-IIIでは「347°C」に変更する。その他、制御棒の反応度価値、ペーク値等の定数をMK-III値に変更する。

臨界近接モードのファジィ推論部については、制御目標値である臨界点が 5×10^4 cpsから 2×10^4 cpsに変更されたことにより、規定ファジィ制御部を変更する必要がある。

表5.1に臨界近接の規定ファジィ制御規則変更箇所を示す。

5.1.3 機器運転操作ガイド機能

MK-IIIに伴う原子炉運転手順の変更により、以下のガイドメッセージ及びガイドメッセージ表示条件を変更する。下線付は、変更箇所である。

(1)ガイドメッセージ「制御棒1～6を350mm位置まで引抜いてください」

ガイドメッセージ表示条件：制御棒1～6が350mm位置（MK-II）



ガイドメッセージ「制御棒1～6を300mm位置まで引抜いてください」

ガイドメッセージ表示条件：制御棒1～6が300mm位置（MK-III）

(2)ガイドメッセージ「制御棒○が 350mm 位置になりました」

ガイドメッセージ表示条件：制御棒○が 350mm 位置になりました (MK-II)

↓

ガイドメッセージ「制御棒○が 300mm 位置になりました」

ガイドメッセージ表示条件：制御棒○が 300mm 位置 (MK-III)

(3)ガイドメッセージ (囲いの中は一括表示)

「A ループ主送風機起動操作を行う」

- ・1A、2A A/C 出口 Na 温度制御系を「AUTO」から「MAN」に切替える
- ・1A、2A 入口ダンパを全開にする
- ・1A、2A 入口ベーンを全閉にする
- ・「起動条件成立」ランプ点灯確認
- ・主送風機 1A、2A CS を「入」にする
- ・A/C 出口 Na 温度制御系を「MAN」から「AUTO」に切替える

ガイドメッセージ表示条件：12MW

↓

「A ループ主送風機起動操作を行う」

- ・1A ULDU を「AUTO」から「MAN」に切替える
- ・1A 入口ダンパを全開にする
- ・1A 入口ベーンを全閉にする
- ・「起動条件成立」ランプ点灯確認後直ちに以下の操作を行う
- ・主送風機 1A CS を「入」にする
- ・1A ULDU を「MAN」から「AUTO」に切替える
- ・2A についても同様に実施する

ガイドメッセージ表示条件：18MW

上記ガイドメッセージは、B ループについても同様に変更する。

(4)ガイドメッセージ (囲いの中は一括表示)

- ・A/C 出口ダンパを、A/C 出口 Na 温度変化に注意しながら徐々に 100% (全開) とする。
(1A、2A、1B、2B の 4 台同時操作)
- ・A/C 出口 Na 温度指示値に設定値を合わせ、A/C 出口 Na 温度設定器 「MAN」 から「AUTO」に切替える
(1A、2A、1B、2B の 4 台同時操作)
- ・A/C 出口 Na 温度設定値を 1A、2A については 367°C、1B、2B については 369°C に設定する
- ・原子炉入口 Na 温度が 370°C になるように、A/C 出口 Na 温度設定値を変更する

ガイドメッセージ表示条件：主冷却器出口 Na 温度 367°C

↓

ガイドメッセージ

- ・ A/C 出口ダンパを、A/C 出口 N a 温度変化に注意しながら徐々に 100% (全開) とする。
(1A、2A、1B、2B の 4 台同時操作)
- ・ A/C 出口 N a 温度指示値に設定値を合わせ、ULDU を「MAN」から「AUTO」に切替える
(1A、2A、1B、2B の 4 台同時操作)
- ・ ULDU 設定値を 1A、2A、1B、2B とも 344°C に設定する
- ・ 原子炉入口 N a 温度が 350°C になるように、ULDU 設定値を変更する

ガイドメッセージ表示条件：主冷却器出口 Na 温度 347°C

(5) ガイドメッセージ「中間系検出器を下限から上限に引抜いてください」

ガイドメッセージ表示条件：熱出力 15MW (MK-II)

↓

ガイドメッセージ「中間系検出器を下限から上限に引抜いてください」

ガイドメッセージ表示条件：熱出力 25MW (MK-III)

(6) ガイドメッセージ「2 次補助系を待機状態にして下さい」

ガイドメッセージ表示条件：熱出力 25MW (MK-II)

↓

ガイドメッセージ「2 次補助系を待機状態にして下さい」

ガイドメッセージ表示条件：熱出力 45MW (MK-III)

(7) 新規ガイドメッセージ「原子炉出力 110MW に到達しました」

ガイドメッセージ表示条件：熱出力 110MW (MK-III)

(8) 新規ガイドメッセージ「原子炉出力 120MW に到達しました」

ガイドメッセージ表示条件：熱出力 120MW (MK-III)

(9) 新規ガイドメッセージ「原子炉出力 130MW に到達しました」

ガイドメッセージ表示条件：熱出力 130MW (MK-III)

(10) 新規ガイドメッセージ「原子炉出力 140MW に到達しました」

ガイドメッセージ表示条件：熱出力 140MW (MK-III)

(11)その他

2000年4月3日原子炉出力調整時に発生した「制御棒挿入による一時的出力低下」事象は、制御棒のブレーキ開放補助繼電器接点の復帰動作不良によるものであった。これを踏まえて、極短時間の制御棒操作を防止する観点から0.5mm以上のガイドの時にのみ表示することを検討する。

5.2 オフラインシステム更新の検討

オフラインシステムのハードウェア機能の維持と機能性の向上を図るため、以下の検討を行った。

(1) ソフトウェア、ハードウェアの検討

オフラインシステムで使用している計算機（EWS）は製造中止となっており、経年劣化により、計算機ハードウェアが故障した場合、修理できない可能性がある。EWSを購入した場合においても、OSバージョンの違いからオフラインシステムの改造が必要となる。また、オフラインシステムを原子炉運転にて使用する毎にEWSを運転員席近くに設置する必要がある。オフラインシステム専用の計算機の確保、EWS専用ソフトの維持管理の経費を削減することや、利活用での利便性を考慮すると汎用Windowsパソコンを端末として使用するシステムが今後の運用面でも効率的であると考えられる。

汎用Windowsパソコンを使用する場合、OSの違いからオフラインシステムの機能は全面的に新規製作となる。新規製作となる機能は、3章 制御棒操作自動化オフラインシステムで紹介した全てとなる。臨界近接操作画面、核加熱操作画面、系統昇温操作画面、出力上昇操作画面及び出力下降操作画面については、画面サイズが変更（1152×900⇒1280×1024）となるためレイアウトを変える必要がある。

(2) 制御棒操作量予測機能

原子炉出力上昇・下降操作において、ファジィ推論による制御棒操作量の算出結果の信頼性向上させる目的で、目標原子炉出力までの制御棒操作量を簡易に予測できる機能を追加する。本機能と従来のファジィ推論による制御棒操作量の算出結果を比較し、制御棒操作量の信頼性を向上させる。以下に本機能の概要について記述する。

予測手法は、出力上昇実績を元に導き出すものである。出力上昇実績を元に予測する方法とは、5MW毎に実施する出力上昇・下降操作において、直前5MW分前のステップの出力上昇実績データを用いるものである。例えば、25MWから30MWへの出力上昇操作において、直前の20MWから25MWの出力上昇実績から1MW分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原子炉出力との差にこの値を乗じて制御棒の予測操作量を導き出す手法である。制御棒反応度係数や出力係数は、炉心構成の変更により僅かに変化する。これに対応するため、オンラインシステムを使用する原子炉運転サイクルのデータを引用する。

6. 結 言

「常陽」MK-III原子炉運転におけるオフラインシステムの適用性を評価した。

得られた結果は、以下の通りである。

- (1) 系統昇温・出力上昇・出力下降の制御モードについては、系統温度変化率が MK-II と同じであることから、MK-III運転に適用できた。この間の、制御棒引抜量とガイド機能の出力との差は±0.2mm 以内であり、精度よく合致した。MK-II 運転時の運用経験を反映して作成した規定ファジィ制御規則も、MK-III運転に適用できた。
- (2) 制御棒操作量表示機能のうち臨界近接モードは、MK-IIIにおいて臨界点が MK-II での 5×10^4 cps から 2×10^4 cps に変更されたことから、規定ファジィ制御部の制御規則を検討し、改造案を提起した。機器運転ガイド機能については、MK-III原子炉運転手順をもとにガイドメッセージを検討し、改造案を提起した。
- (3) 今後、ハードウェアの機能の維持及び利便性の向上を図るため、システムの更新を進め る。

7. 参考文献

- (1) 寺門嗣夫,他 ; “「常陽」制御棒操作自動化システムの開発”,
動燃技報 No.91 技術報告,
PNC TN 9410 94-206,P.25,(1994)
- (2) 寺門嗣夫,他 ; “「常陽」制御棒操作自動化システムの開発
-制御棒操作自動化オフラインシステムの検証”,
JNC TN 9410 99-021,P.22,(1999)

図 表

表1 制御棒操作自動化システムの開発計画

西暦 平成	1996 6	1997 7	1998 8	1999 9	2000 10	2001 11	2002 12	2003 13, 14	2004 15	2005 16	2006 17
制御棒操作自動化 システムの開発											
CR自動化オフラインシステムの製作・検証・運用											
	操作ガイド 画面の設計 製作	製作・据付・ パッケージ 検証試験							MK-III 改造工事 期間中		
		実機据付		実機検証試験 ソフトウェア 機能の追加		実機検証試験	実機運用		CR自動化 オフラインシステム のMK-III 適用性評価	CR自動化 オフラインシステム の更新	

表 3.3-1 臨界近接の規定ファジィ制御規則

起動系ペリオド (sec)	NB	NS	ZO	PS	PB
起動系 計数率(cps)	-200	-1000	∞	1000	200
P	ZO	NS	NS	NM	NM
6×10^4	0.0	-0.5	-0.5	-0.7	-0.7
ZO	ZO	PS	ZO	NS	NS
5×10^4	0.0	0.2	0.0	-0.5	-0.5
NS	ZO	PB2	PS	ZO	NS
4×10^4	0.0	2.0	0.2	0.0	-0.5
NM	ZO	ZO	PB2	PB2	ZO
5×10^3	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0
NB	ZO	ZO	PB3	PB2	ZO
30	0.0	0.0	3.0	2.0	0.0

注記: 表中のアルファベットはファジィ集合の区分、数値はファジィパラメータを示す。
なお、制御棒操作量は[mm]単位で表す。[計算周期 1 秒、ガイド周期 20 秒]

[起動系ペリオド]

NB(Negative Big)	.....	ペリオドが短い
NS(Negative Small)	.....	ペリオドが少し短い
ZO(ZERO)	.....	ペリオドが安定している
PS(Positive Small)	.....	ペリオドが少し長い
PB(Positive Big)	.....	ペリオドが長い

[起動系計数率]

NB(Negative Big)	.....	起動系計数率が低い
NM(Negative Medium)	.....	起動系計数率がやや低い
NS(Negative Small)	.....	起動系計数率が少し低い
ZO(ZERO)	.....	起動系計数率がちょうどよい
P(Positive)	.....	起動系計数率が大きい

[制御棒操作量]

NM(Negative Medium)	.....	制御棒を多めに挿入する
NS(Negative Small)	.....	制御棒を少し挿入する
ZO(ZERO)	.....	制御棒を操作しない
PS(Positive Small)	.....	制御棒を少し引き抜く
PB2(Positive Big2)	.....	制御棒をやや多めに引き抜く
PB3(Positive Big3)	.....	制御棒を多めに引き抜く

表 3.3-2 核加熱の規定ファジィ制御規則

中間系ペリオド (sec)	NB	NS	ZO	PS	PB
中間系 出力(%)	-200	-1000	∞	1000	200
P	ZO	NS	NS	NM	NM
1.2	0.0	-0.5	-0.5	-0.7	-0.7
ZO	ZO	PS	ZO	NS	NS
1.0	0.0	0.2	0.0	-0.5	-0.5
NS	ZO	PB2	PS	ZO	NS
0.8	0.0	2.0	0.2	0.0	-0.5
NB	ZO	ZO	PB2	PB2	ZO
0.1	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0

注記:表中のアルファベットはファジィ集合の区分、数値はファジィパラメータを示す。

なお、制御棒操作量は[m m]単位で表す。[計算周期 1秒、ガイド周期 20秒]

[中間系ペリオド]

NB(Negative Big)	.....	ペリオドが短い
NS(Negative Small)	.....	ペリオドが少し短い
ZO(ZERO)	.....	ペリオドが安定している
PS(Positive Small)	.....	ペリオドが少し長い
PB(Positive Big)	.....	ペリオドが長い

[中間系出力]

NB(Negative Big)	.....	中間系出力が低い
NS(Negative Small)	.....	中間系出力が少し低い
ZO(ZERO)	.....	中間系出力がちょうどよい
P(Positive)	.....	中間系出力が大きい

[制御棒操作量]

NM(Negative Medium)	.....	制御棒を多めに挿入する
NS(Negative Small)	.....	制御棒を少し挿入する
ZO(ZERO)	.....	制御棒を操作しない
PS(Positive Small)	.....	制御棒を少し引き抜く
PB2(Positive Big2)	.....	制御棒をやや多めに引き抜く

表3.3-3 系統昇温の規定ファジィ制御規則

原子炉入口温度 変化率 [°Ch]	NB	NS	ZO	PS	PM	PB
原子炉入口 温度[°C]	-20	-10	0	14	20	30
PB	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
377	0.0	-0.2	-0.5	-0.5	-1.0	-1.0
PS	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM
373	0.0	0.0	-0.2	-0.5	-0.5	-0.5
ZO	PM	PS	ZO	ZO	NS	NM
370	0.5	0.2	0.0	0.0	-0.2	0.5
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
367	1.0	0.5	0.5	0.2	0.0	0.0
NB	ZO	ZO	PB	PB	PM	ZO
363	0.0	0.0	1.0	1.0	0.5	0.0

注記: 表中のアルファベットはファジィ集合の区分、数値はファジィパラメータを示す。
 なお、原子炉入口Na温度 [°C]、原子炉入口温度変化率 [°Ch]、制御棒操作量[m m] 単位で表す。[計算周期60秒、ガイド周期60秒]

[原子炉入口Na温度変化率]

- | | | |
|---------------------|-------|--------------------|
| NB(Negative Big) | ..... | 原子炉入口Na温度降下率が大きい |
| NS(Negative Small) | ..... | 原子炉入口Na温度降下率が小さい |
| ZO(ZERO) | ..... | 原子炉入口Na温度が安定している |
| PS(Positive Small) | ..... | 原子炉入口Na温度上昇率が小さい |
| PM(Positive Medium) | ..... | 原子炉入口Na温度上昇率がやや大きい |
| PB(Positive Big) | ..... | 原子炉入口Na温度上昇率が大きい |

[原子炉入口Na温度]

- | | | |
|--------------------|-------|------------------|
| NB(Negative Big) | ..... | 原子炉入口Na温度が低い |
| NS(Negative Small) | ..... | 原子炉入口Na温度が少し低い |
| ZO(ZERO) | ..... | 原子炉入口Na温度がちょうどよい |
| P(Positive) | ..... | 原子炉入口Na温度が大きい |

[制御棒操作量]

- | | | |
|---------------------|-------|---------------|
| NM(Negative Medium) | ..... | 制御棒を多めに挿入する |
| NS(Negative Small) | ..... | 制御棒を少し挿入する |
| ZO(ZERO) | ..... | 制御棒を操作しない |
| PS(Positive Small) | ..... | 制御棒を少し引き抜く |
| PB2(Positive Big2) | ..... | 制御棒をやや多めに引き抜く |

表 3.3-4 出力上昇の規定ファジィ制御規則

原子炉出口温度 原子炉 変化率 出口温度	NB -20	NS -10	ZO 0.0	PS 14	PM 20	PB 30
ZO 500.0	PS 0.1	PS 0.1	ZO 0.0	ZO 0.0	NS -0.2	NM -0.5
NS 499.5	PM 0.3	PS 0.1	PS 0.1	PS 0.1	ZO 0.0	ZO 0.0
NB 499.0	PB 0.5	PB 0.5	PB 0.5	PB 0.5	PB 0.5	ZO 0.0

注記：表中のアルファベットはファジィ集合の区分、数値はファジィパラメータを示す。
なお、原子炉出口Na温度 [°C]、原子炉出口温度変化率 [°C/hr]、制御棒操作量[m m]単位で表す。[計算周期60秒、ガイド周期60秒]

[原子炉出口Na温度変化率]

- | | | |
|---------------------|-------|--------------------|
| NB(Negative Big) | ..... | 原子炉出口Na温度降下率が大きい |
| NS(Negative Small) | ..... | 原子炉出口Na温度降下率が小さい |
| ZO(ZERO) | ..... | 原子炉出口Na温度が安定している |
| PS(Positive Small) | ..... | 原子炉出口Na温度上昇率が小さい |
| PM(Positive Medium) | ..... | 原子炉出口Na温度上昇率がやや大きい |
| PB(Positive Big) | ..... | 原子炉出口Na温度上昇率が大きい |

[原子炉出口Na温度]

- | | | |
|--------------------|-------|------------------|
| NB(Negative Big) | ..... | 原子炉出口Na温度が低い |
| NS(Negative Small) | ..... | 原子炉出口Na温度が少し低い |
| ZO(ZERO) | ..... | 原子炉出口Na温度がちょうどよい |

[制御棒操作量]

- | | | |
|---------------------|-------|-------------|
| NM(Negative Medium) | ..... | 制御棒を多めに挿入する |
| NS(Negative Small) | ..... | 制御棒を少し挿入する |
| ZO(ZERO) | ..... | 制御棒を操作しない |
| PS(Positive Small) | ..... | 制御棒を少し引き抜く |
| PB(Positive Big) | ..... | 制御棒を多めに引き抜く |

表 3.3-5 出力下降の規定ファジィ制御規則

原子炉出口温度 原子炉 出口温度 変化率	NB	NS	ZO	PS	PM	PB
-35	-17.5	0.0	24.5	35.0	52.5	
PB 500.0	NB -1.0	NB -1.0	NB -1.0	NB -1.0	NM -0.5	ZO 0.0
PM 498	NM -0.5	NS -0.2	NS -0.2	NS -0.2	ZO 0.0	ZO 0.0
ZO 497	NS -0.2	NS -0.2	ZO 0.0	ZO 0.0	PS 0.2	PM 0.5

注記：表中のアルファベットはファジィ集合の区分、数値はファジィパラメータを示す。
なお、原子炉出口Na温度 [°C]、原子炉出口温度変化率 [°C/hr]、制御棒操作量[m m]単位で表す。

[原子炉出口Na温度変化率]

NB(Negative Big)	.....	原子炉出口Na温度上昇率が大きい
NS(Negative Small)	.....	原子炉出口Na温度上昇率が小さい
ZO(ZERO)	.....	原子炉出口Na温度が安定している
PS(Positive Small)	.....	原子炉出口Na温度下降率が小さい
PM(Positive Medium)	.....	原子炉出口Na温度下降率がやや大きい
PB(Positive Big)	.....	原子炉出口Na温度下降率が大きい

[原子炉出口Na温度]

NB(Negative Big)	.....	原子炉出口Na温度が低い
NS(Negative Small)	.....	原子炉出口Na温度が少し低い
ZO(ZERO)	.....	原子炉出口Na温度がちょうどよい

[制御棒操作量]

NB(Negative Big)	.....	制御棒を多く挿入する
NM(Negative Medium)	.....	制御棒を少し多めに挿入する
NS(Negative Small)	.....	制御棒を少し挿入する
ZO(ZERO)	.....	制御棒を操作しない
PS(Positive Small)	.....	制御棒を少し引き抜く
PM(Positive Medium)	.....	制御棒をやや多めに引き抜く

表 3.3-6 制約ファジィ制御規則

信号名称		設定値
原子炉入口 Na 温度 (A ループ)	上限	380[°C]
原子炉入口 Na 温度 (A ループ)	下限	372[°C]
原子炉入口 Na 温度 (B ループ)	上限	380[°C]
原子炉入口 Na 温度 (B ループ)	下限	372[°C]
起動系計数率 (最高デカードにおける百分率)	上限	70[%]
起動系計数率 (最高デカードにおける百分率)	下限	65[%]
起動系・中間系ペリオド	上限	100[%]
起動系・中間系ペリオド	下限	50[%]
1 次系 Na 流量偏差 (A ループ)	上限	10[%]
1 次系 Na 流量偏差 (A ループ)	下限	5[%]
1 次系 Na 流量偏差 (B ループ)	上限	10[%]
1 次系 Na 流量偏差 (B ループ)	下限	5[%]
2 次系 Na 流量偏差 (A ループ)	上限	10[%]
2 次系 Na 流量偏差 (A ループ)	下限	5[%]
2 次系 Na 流量偏差 (B ループ)	上限	10[%]
2 次系 Na 流量偏差 (B ループ)	下限	5[%]
原子炉入口 Na 温度 A、B ループ間温度差	上限	10[%]
原子炉入口 Na 温度 A、B ループ間温度差	下限	8[%]
中間系出力	上限	70[%]
中間系出力	下限	65[%]
出力系出力	上限	103[%]
出力系出力	下限	100[%]
主冷却器出口 Na 温度 - 設定値間偏差	上限	5[%]
主冷却器出口 Na 温度 - 設定値間偏差	下限	1[%]

表 3.3-7 機器運転操作ガイドンス(1/3)

No	機器運転操作ガイドンス
1	運転モード SW を停止から起動に切り替えました
2	制御棒のラッチ操作を開始して下さい
3	制御棒1 ラッチ操作完了しました
4	制御棒2 ラッチ操作完了しました
5	制御棒3 ラッチ操作完了しました
6	制御棒4 ラッチ操作完了しました
7	制御棒5 ラッチ操作完了しました
8	制御棒6 ラッチ操作完了しました
9	制御棒1 を 350mm まで引き抜いて下さい
10	制御棒1 が 350mm 位置になりました
11	制御棒2 を 350mm まで引き抜いて下さい
12	制御棒2 が 350mm 位置になりました
13	制御棒3 を 350mm まで引き抜いて下さい
14	制御棒3 が 350mm 位置になりました
15	制御棒4 を 350mm まで引き抜いて下さい
16	制御棒4 が 350mm 位置になりました
17	制御棒5 を 350mm まで引き抜いて下さい
18	制御棒5 が 350mm 位置になりました
19	制御棒6 を 350mm まで引き抜いて下さい
20	制御棒6 が 350mm 位置になりました
21	原子炉臨界に到達しました
22	起動系検出器を下限から上限に引き抜いて下さい
23	起動系検出器が上限になりました
24	反応度計を起動して下さい
25	運転モード SW を起動から低出力に切替えて下さい
26	運転モード SW を起動から低出力に切替えました
27	出力系レンジを切り替えて下さい
28	出力系レンジを 0.35 に切り換えました
29	出力系レンジを 1.25 に切り換えました
30	出力系レンジを 3.5 に切り換えました
31	原子炉出力 1 MW に到達しました
32	運転モード SW を低出力から高出力に切り換えてください
33	運転モード SW を低出力から高出力に切り換えました
34	オーバフロー系インターロック SW を手動から自動に切り換えてください

表 3.3-7 機器運転操作ガイドンス(2/3)

No	機器運転操作ガイドンス
3 5	オーバフロー系インターロック SW を手動から自動に切り換えました
3 6	回転プラグブースターファンを起動して下さい
3 7	2時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
3 8	出力系レンジを 1 2 . 5 に切り換えました
3 9	出力系レンジを 3 5 に切り換えました
4 0	原子炉出力 1 2 MW に到達しました
4 1	出力系レンジを 1 2 5 に切り替えました
4 2	原子炉出力 1 5 MW に到達しました
4 3	中間系検出器を下限から上限に引き抜いて下さい
4 4	中間系検出器が上限になりました
4 5	原子炉出力 20MW に到達しました
4 6	原子炉出力 25MW に到達しました
4 7	2次補助系を待機状態にしてください
4 8	原子炉出力 30MW に到達しました
4 9	原子炉出力 35MW に到達しました
5 0	原子炉出力 40MW に到達しました
5 1	原子炉出力 45MW に到達しました
5 2	原子炉出力 50MW に到達しました
5 3	原子炉出力 55MW に到達しました
5 4	原子炉出力 60MW に到達しました
5 5	原子炉出力 65MW に到達しました
5 6	原子炉出力 70MW に到達しました
5 7	原子炉出力 75MW に到達しました
5 8	原子炉出力 80MW に到達しました
5 9	原子炉出力 85MW に到達しました
6 0	原子炉出力 90MW に到達しました
6 1	原子炉出力 95MW に到達しました
6 2	原子炉出力 100MW に到達しました
6 3	原子炉出口 Na 温度が 500°C に到達しました
6 4	核出力が 100% に到達しました
6 5	出力調整を開始して下さい
6 6	出力系レンジを 0.125 に切り換えました
6 7	中間系検出器を上限から下限まで挿入して下さい
6 8	中間系検出器が下限になりました
6 9	起動系検出器を上限から下限まで挿入して下さい
7 0	起動系検出器が下限になりました
7 1	運転モード SW を高出力から低出力に切り換えて下さい
7 2	運転モード SW を低出力から起動に切り換えて下さい
7 3	運転モード SW を起動から停止に切り換えて下さい

表 3.3-7 機器運転操作ガイドンス (3/3)

[自然通風操作時に表示]

No	機器運転操作ガイドンス
1	A/C 出口ダンパを、A/C 出口 Na 温度変化に注意しながら徐々に 100% (全開) とする (4 台同時操作)
2	A/C 出口 Na 温度指示値に設定値を合わせ、A/C 出口 Na 温度設定値を「MAN」から 「AUTO」に切り換える
3	A/C 出口 Na 温度設定値を 1A、2A については 367°C、1B、2B については 369°C に設 定する
4	原子炉入口 Na 温度が 370°C になるように、A/C 出口 Na 温度設定値を変更する

[主送風機起動操作時に表示]

No	機器運転操作ガイドンス
1	主送風機ブレーキ動作の確認を行う
2	2 次純化系ロジック SW を「開ロック」にする
3	A ループ主送風機起動操作を行う
4	B ループ主送風機起動操作を行う
5	A/C 出口 Na 温度制御系を「AUTO」から「CAS」に切り換える
6	2 次純化系ロジック SW を「復帰」にする
7	電源監視盤にて力率計の指示を監視し必要であれば力率改善の措置をする

表 5.1 臨界近接の規定ファジィ制御規則変更箇所

[MK-II 運転用]

起動系ペリオド (sec)	NB	NS	ZO	PS	PB
起動系 計数率(cps)	-200	-1000	∞	1000	200
P	ZO	NS	NS	NM	NM
6×10^4	0.0	-0.5	-0.5	-0.7	-0.7
ZO	ZO	PS	ZO	NS	NS
5×10^4	0.0	0.2	0.0	-0.5	-0.5
NS	ZO	PB2	PS	ZO	NS
4×10^4	0.0	2.0	0.2	0.0	-0.5
NM	ZO	ZO	PB2	PB2	ZO
5×10^3	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0
NB	ZO	ZO	PB3	PB2	ZO
30	0.0	0.0	3.0	2.0	0.0

[MK-III 運転用変更案]

起動系ペリオド (sec)	NB	NS	ZO	PS	PB
起動系 計数率(cps)	-200	-1000	∞	1000	200
P	ZO	NS	NS	NM	NM
3×10^4	0.0	-0.5	-0.5	-0.7	-0.7
ZO	ZO	PS	ZO	NS	NS
2×10^4	0.0	0.2	0.0	-0.5	-0.5
NS	ZO	PB2	PS	ZO	NS
1×10^4	0.0	2.0	0.2	0.0	-0.5
NM	ZO	ZO	PB2	PB2	ZO
5×10^3	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0
NB	ZO	ZO	PB3	PB2	ZO
30	0.0	0.0	3.0	2.0	0.0

網掛け部は、変更箇所案を示す。

[変更理由]

起動系計数率の ZO、NS、P の間隔が 1×10^4 cps ずつであることから、P を 6×10^4 cps から 3×10^4 cps に、ZO を 5×10^4 cps から 2×10^4 cps に、NS を 4×10^4 cps から 1×10^4 cps に変更する。

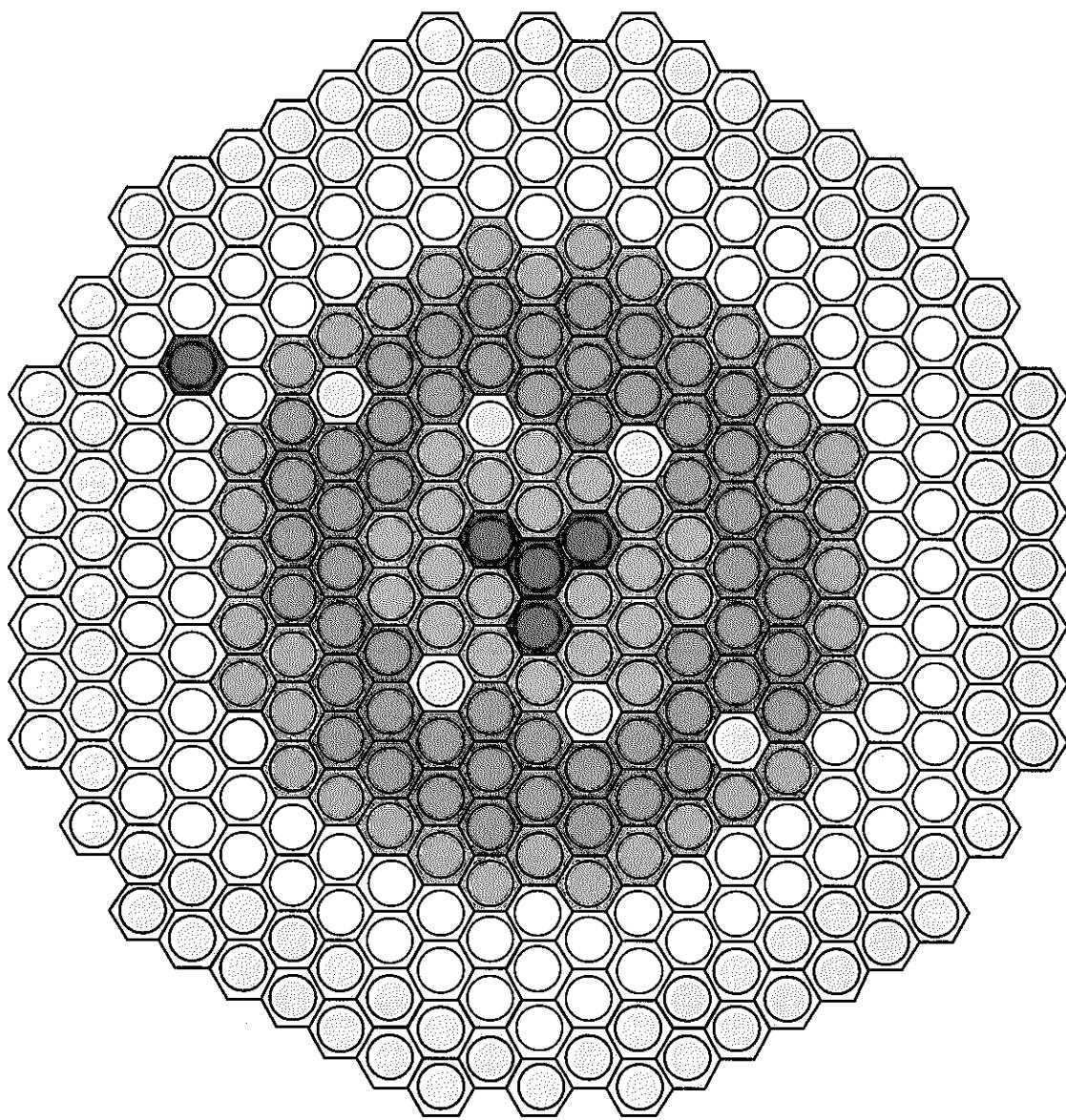


図 2.1-1 MK-III性能試験炉心の構成

	合計
MK-III炉心燃料 (内側)	21
MK-III炉心燃料 (外側)	54
内側反射体	36
外側反射体A	95
中性子遮へい体	96
制御棒	6
中性子源	1
材料照射用 反射体	4
合 計	313
累 計	

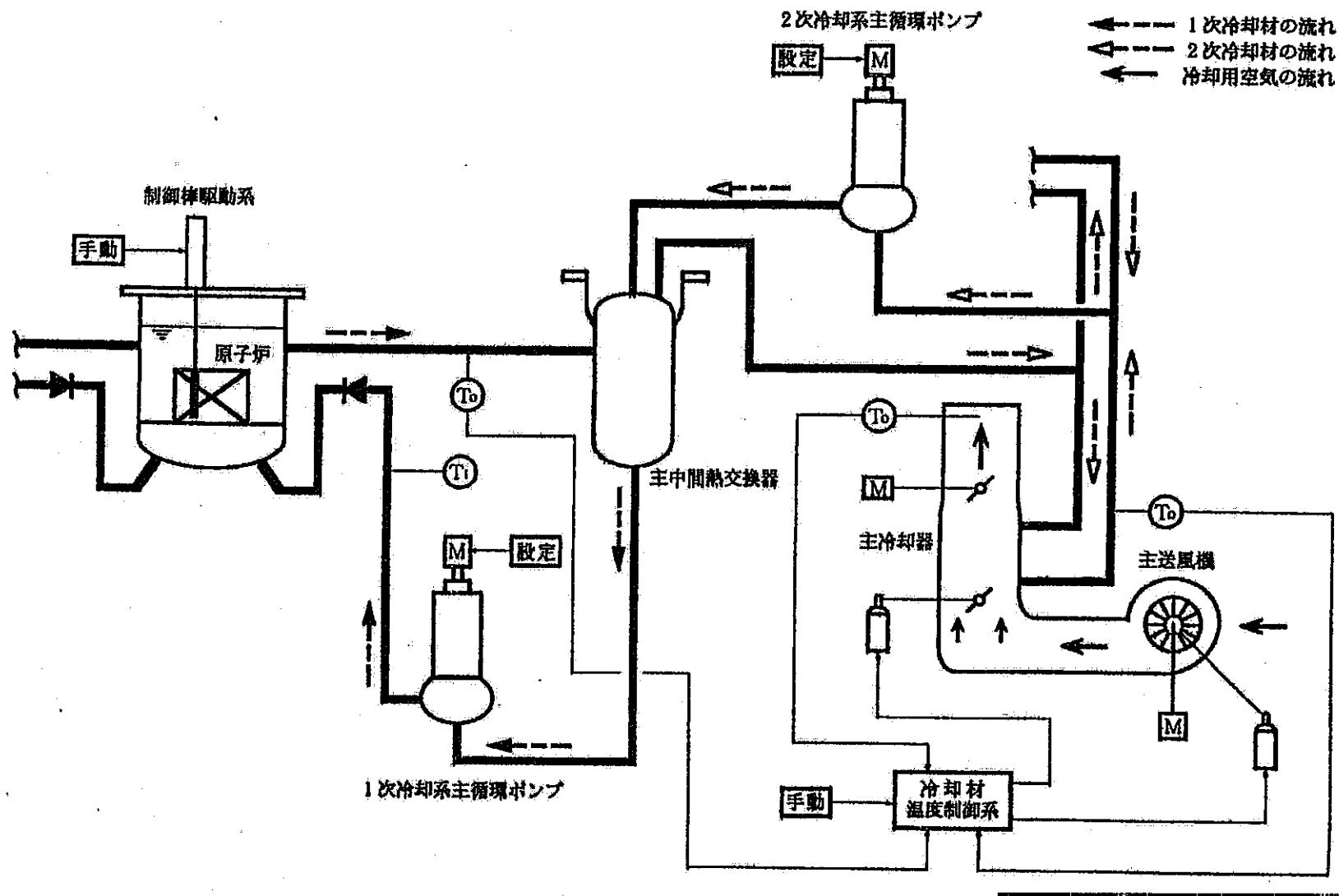


図 2.1-2 原子炉制御系の概念

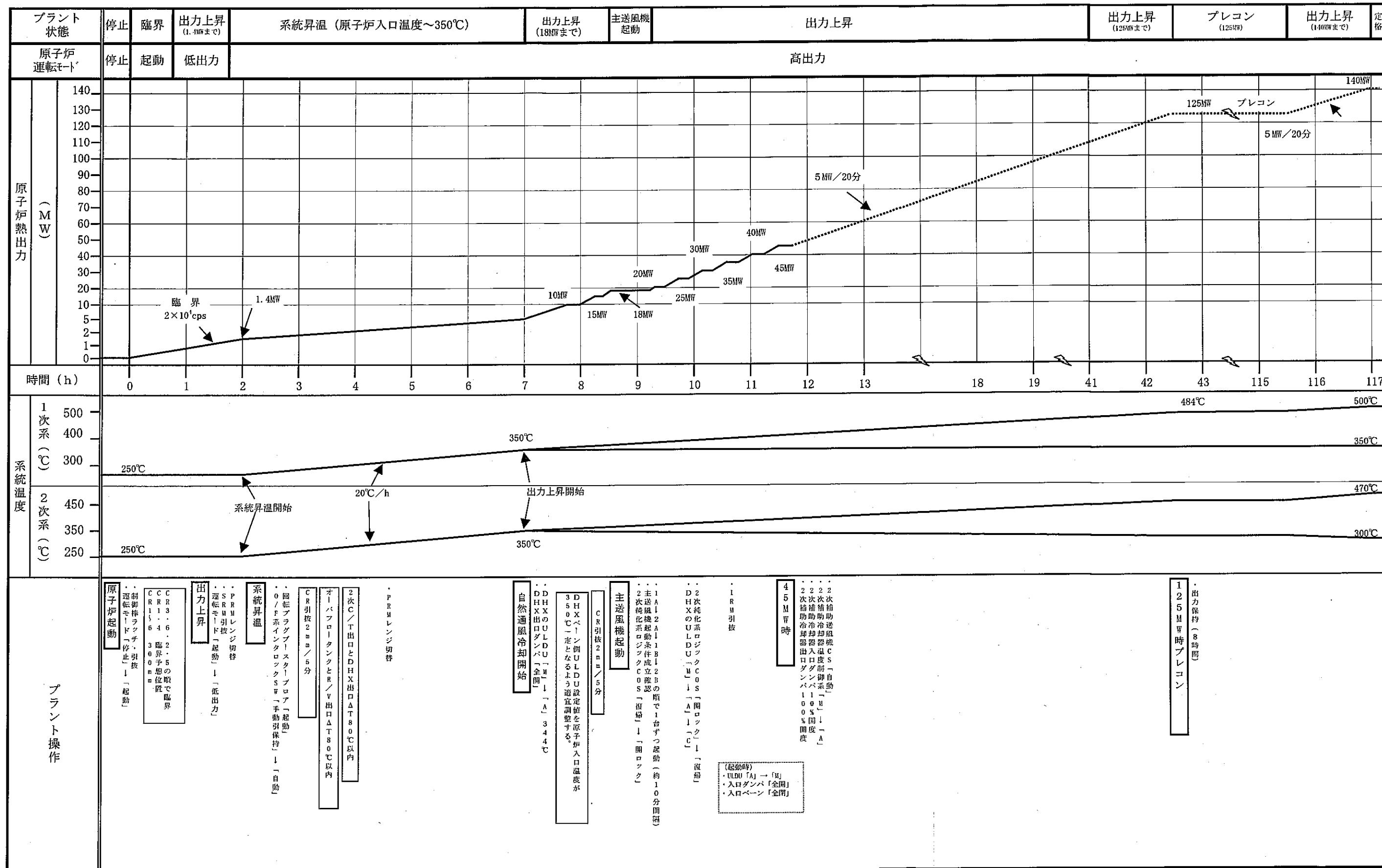


図 2.2-1 MK-III原子炉通常起動曲線

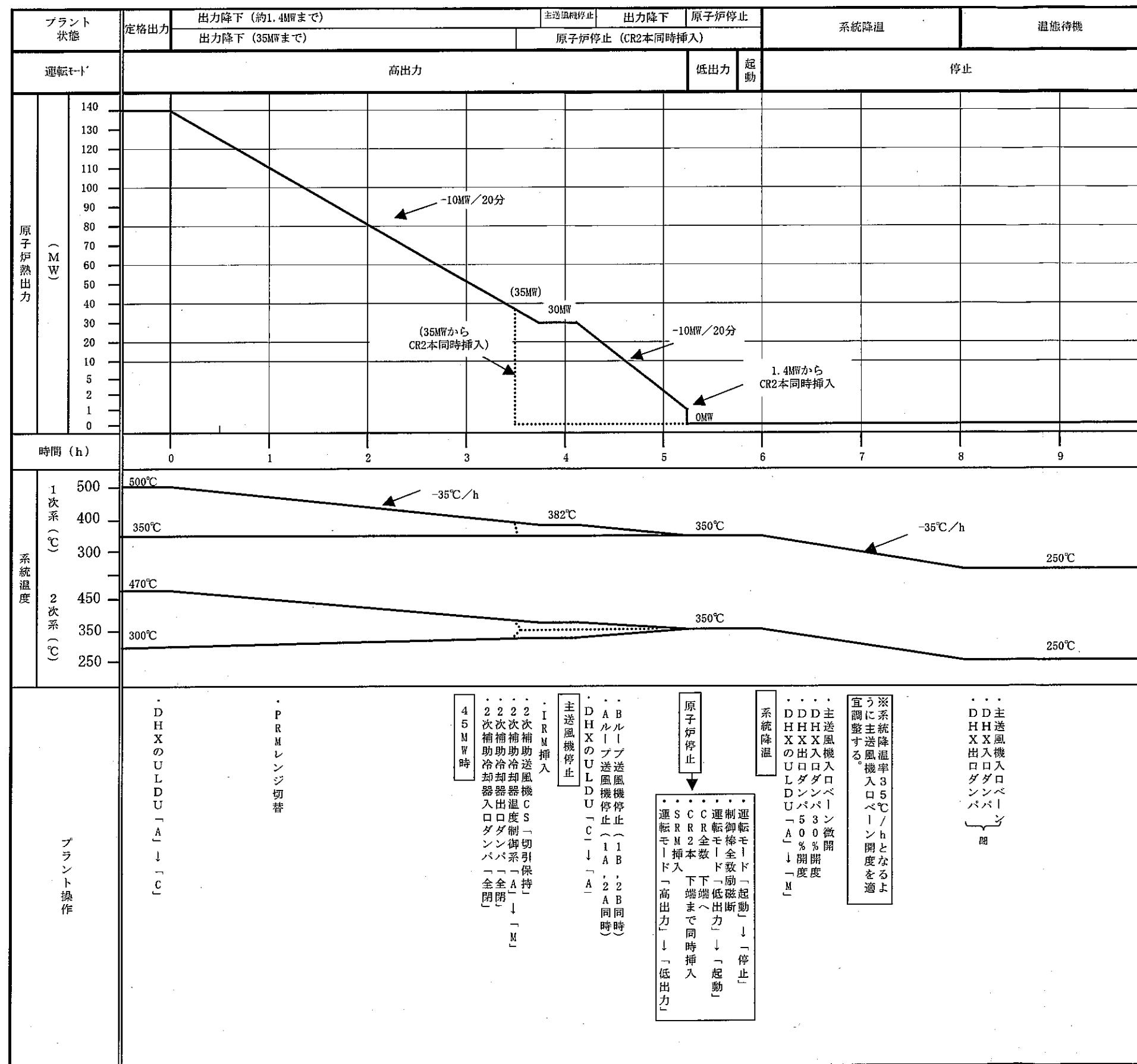


図 2.2-2 MK-III原子炉通常停止曲線

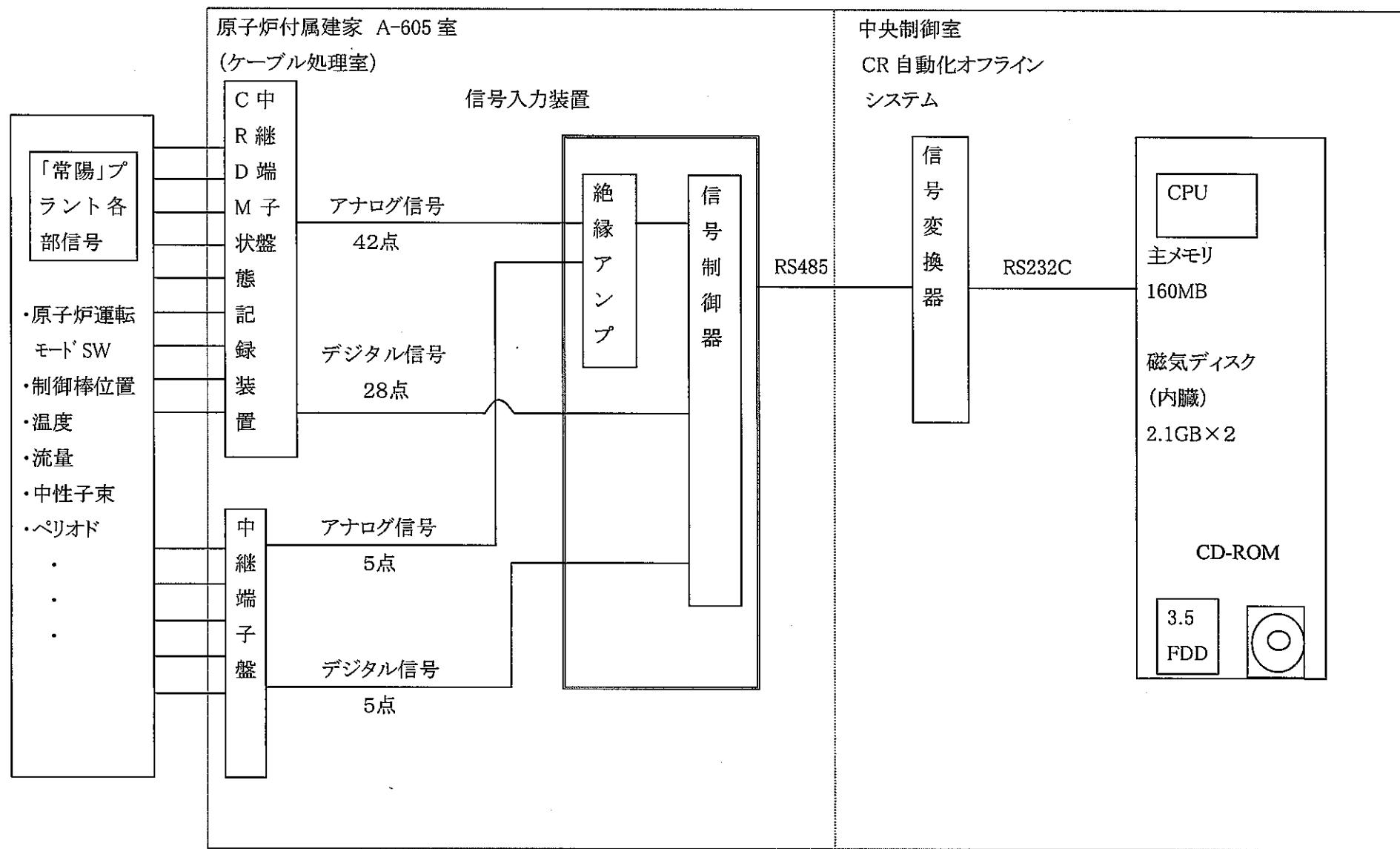


図 3.1 オフラインシステムの構成

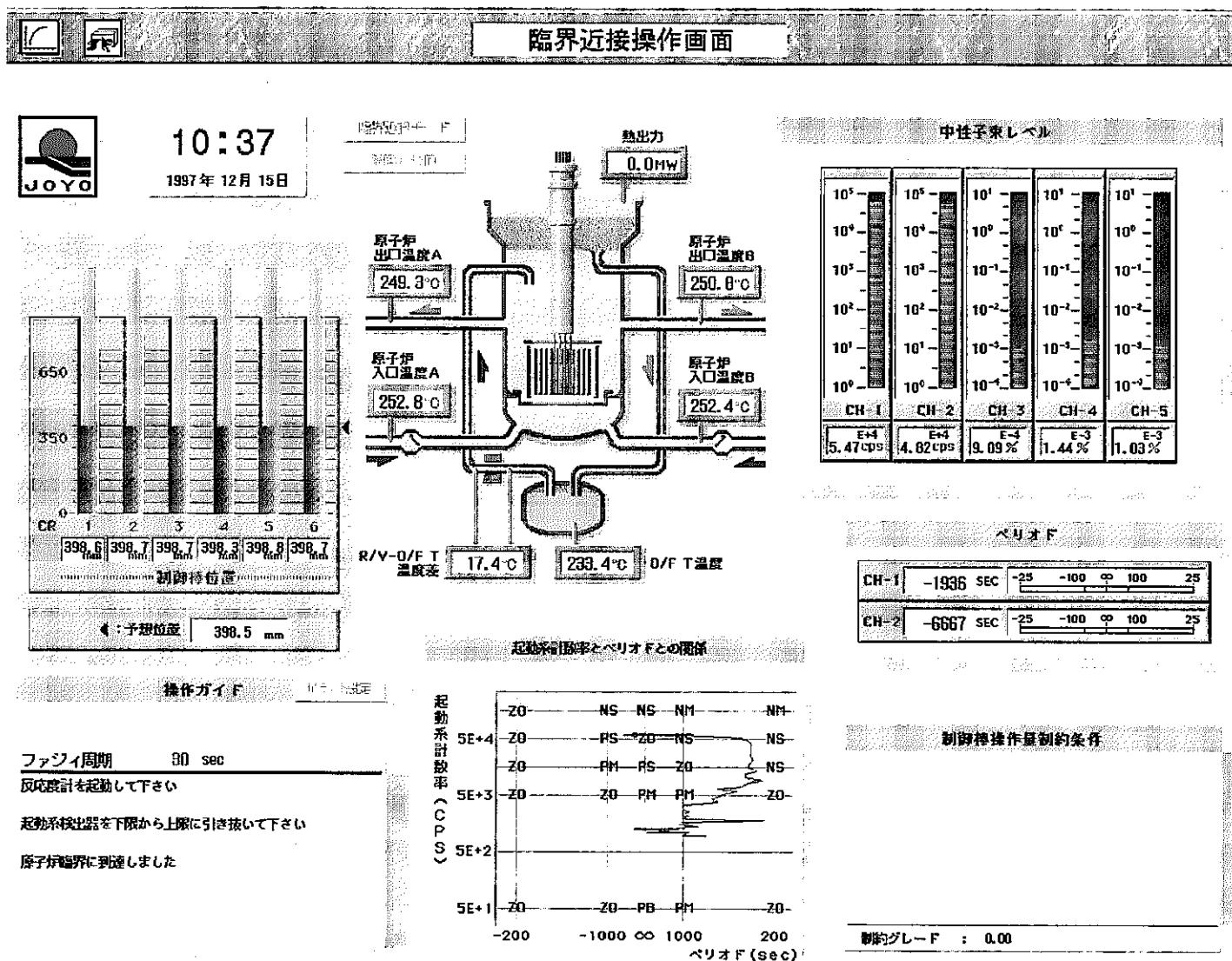


図 3.3-1 臨界近接操作画面

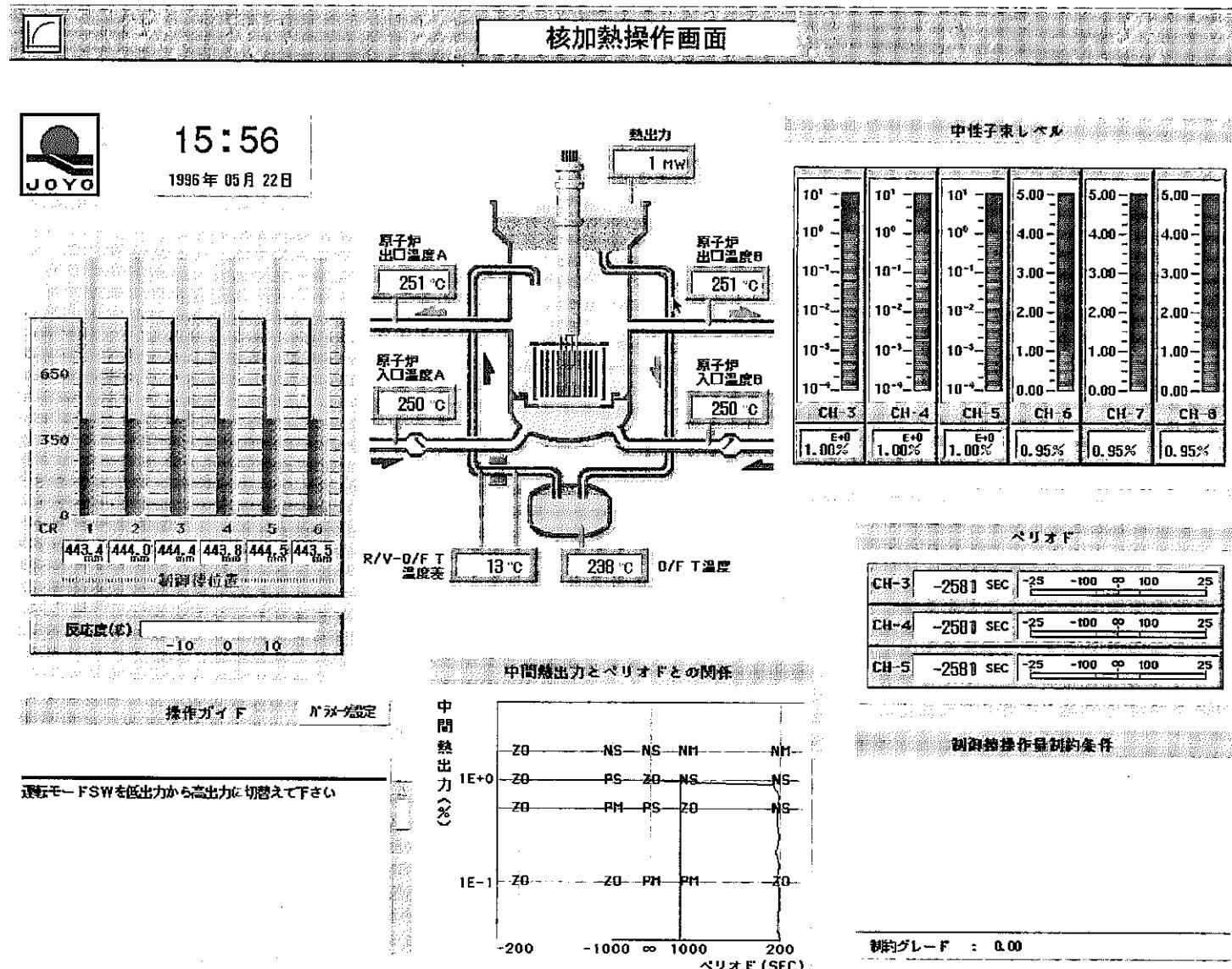


図 3.3-2 核加熱操作画面

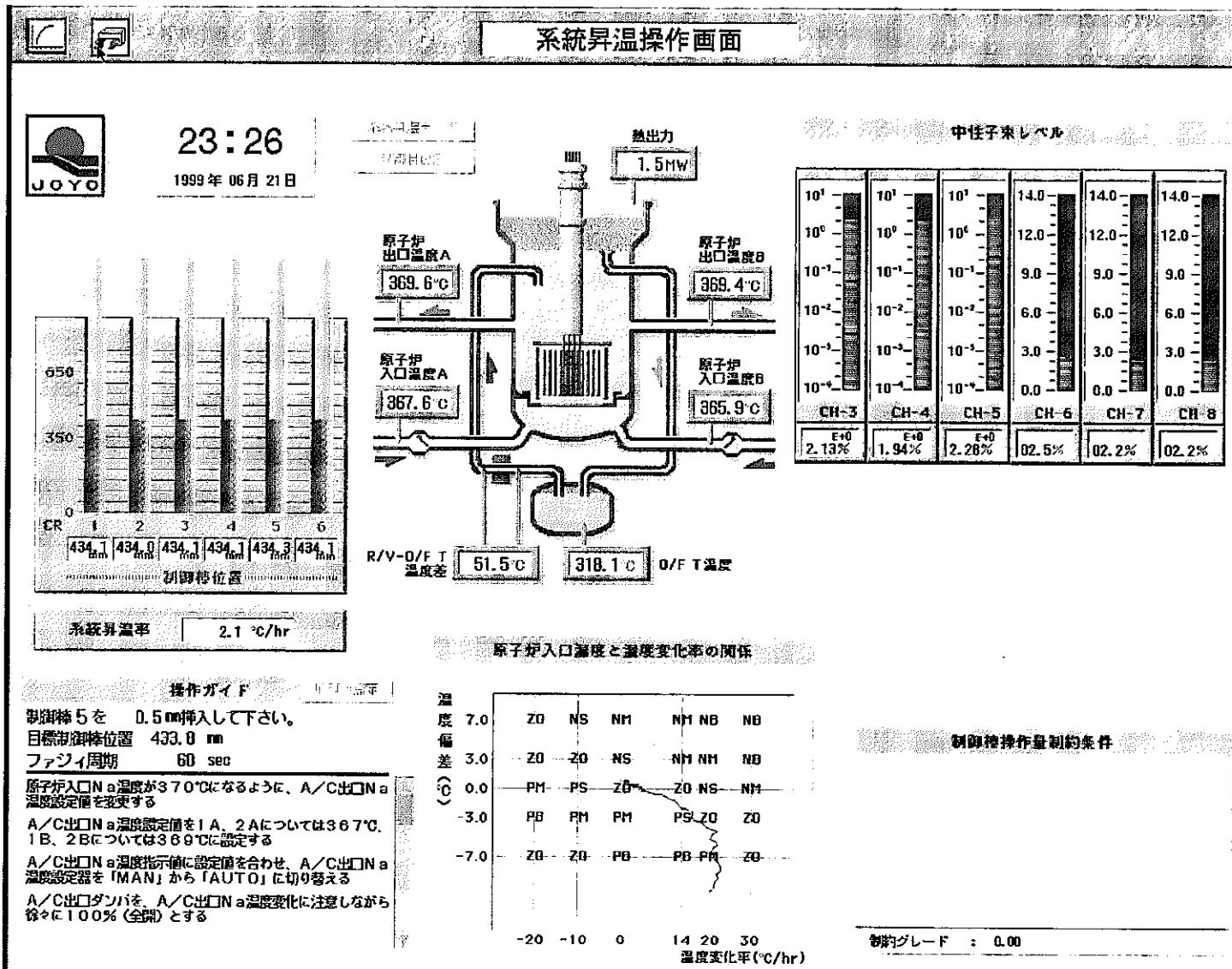


図 3.3-3 系統昇温操作画面

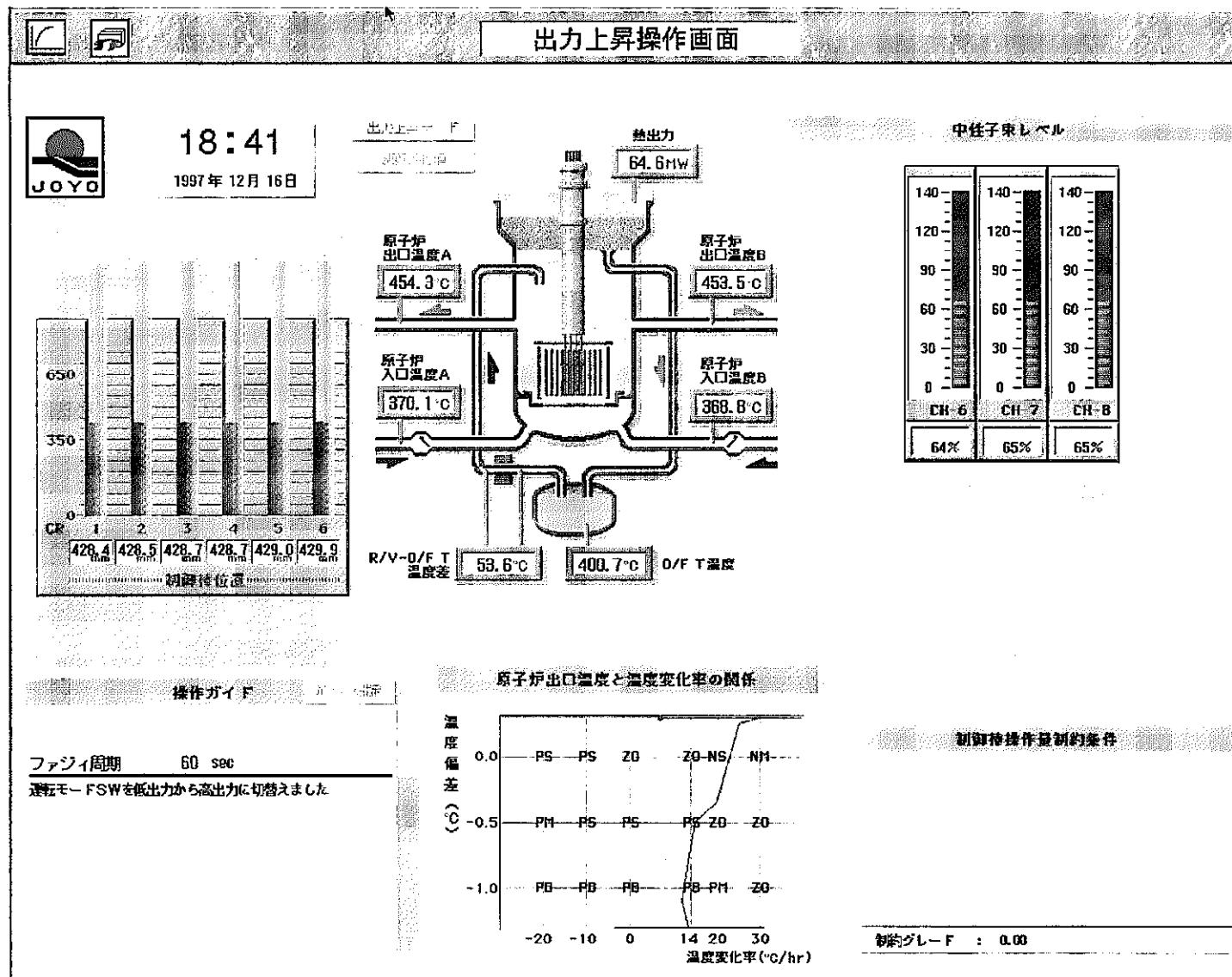


図 3.3-4 出力上昇操作画面

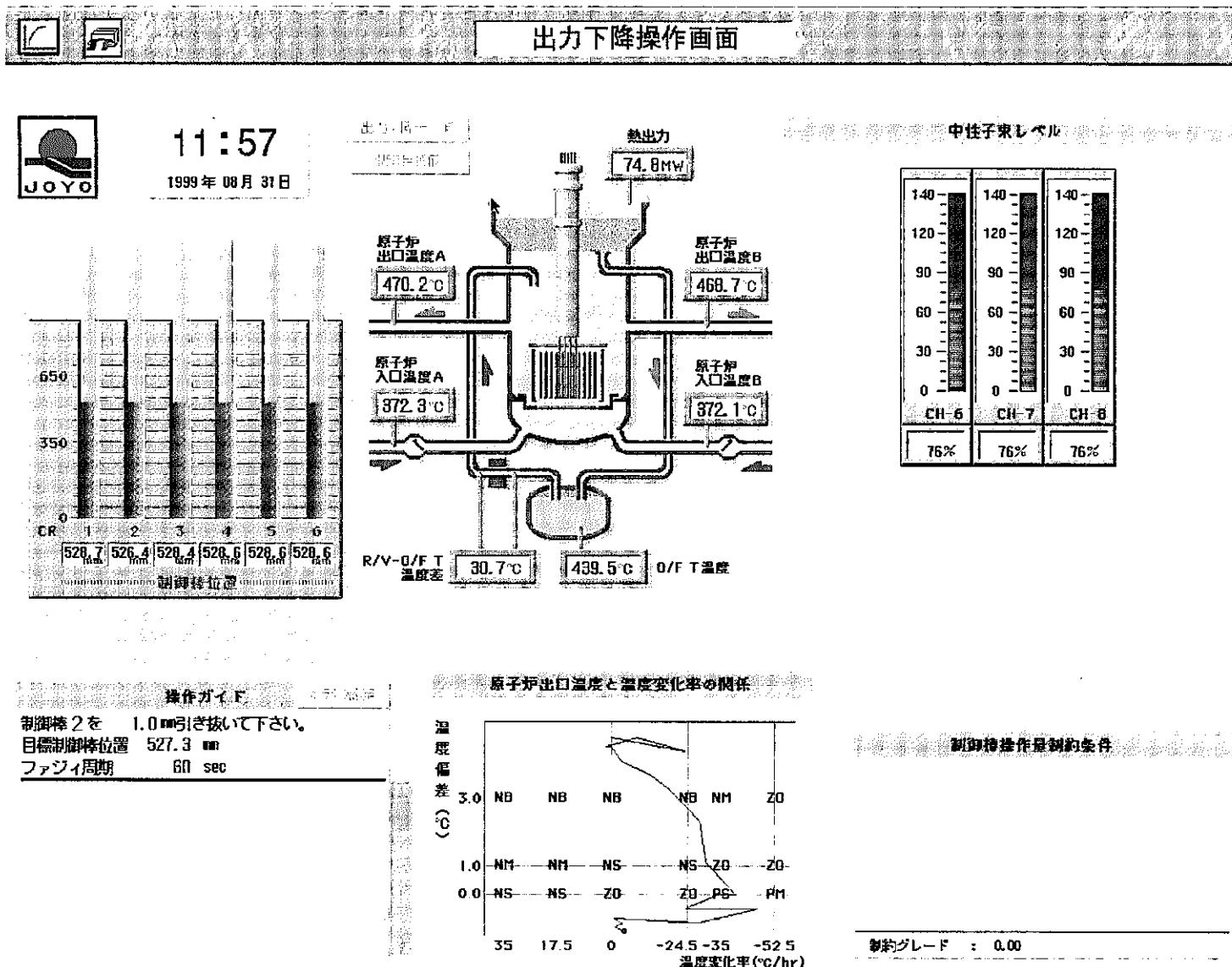


図 3.3-5 出力下降操作画面

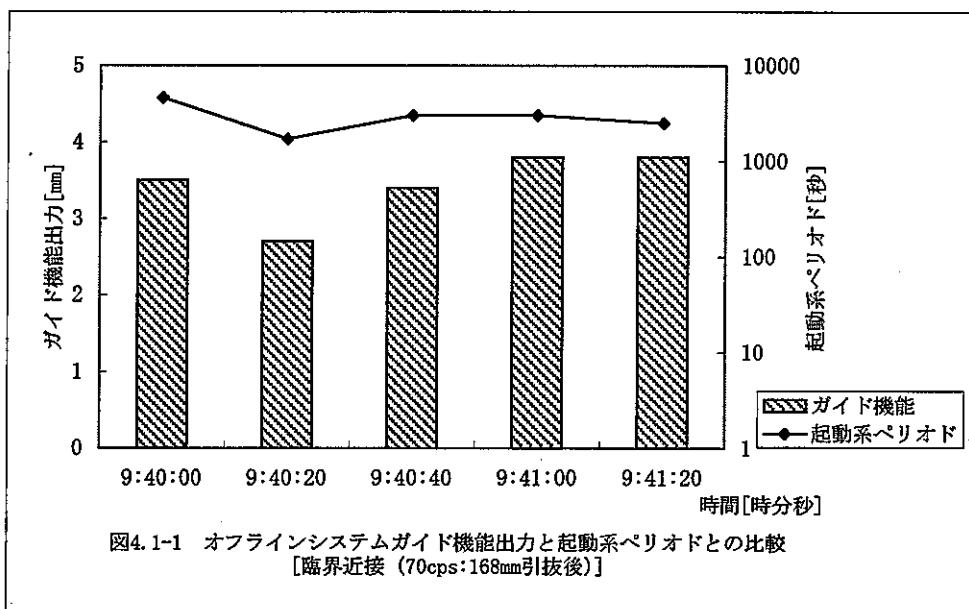


図4.1-1 オフラインシステムガイド機能出力と起動系ペリオドとの比較
[臨界近接 (70cps:168mm引抜後)]

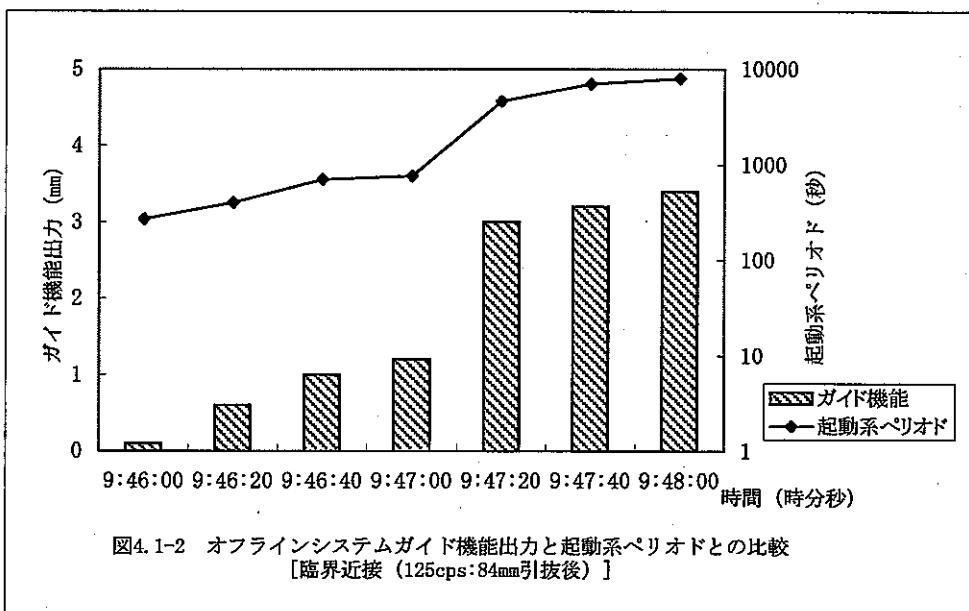


図4.1-2 オフラインシステムガイド機能出力と起動系ペリオドとの比較
[臨界近接 (125cps:84mm引抜後)]

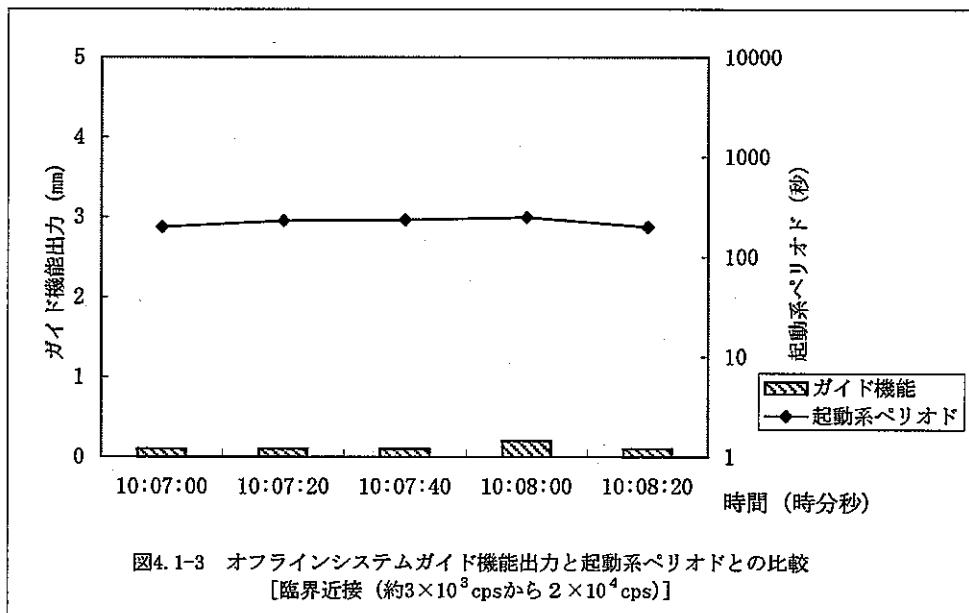
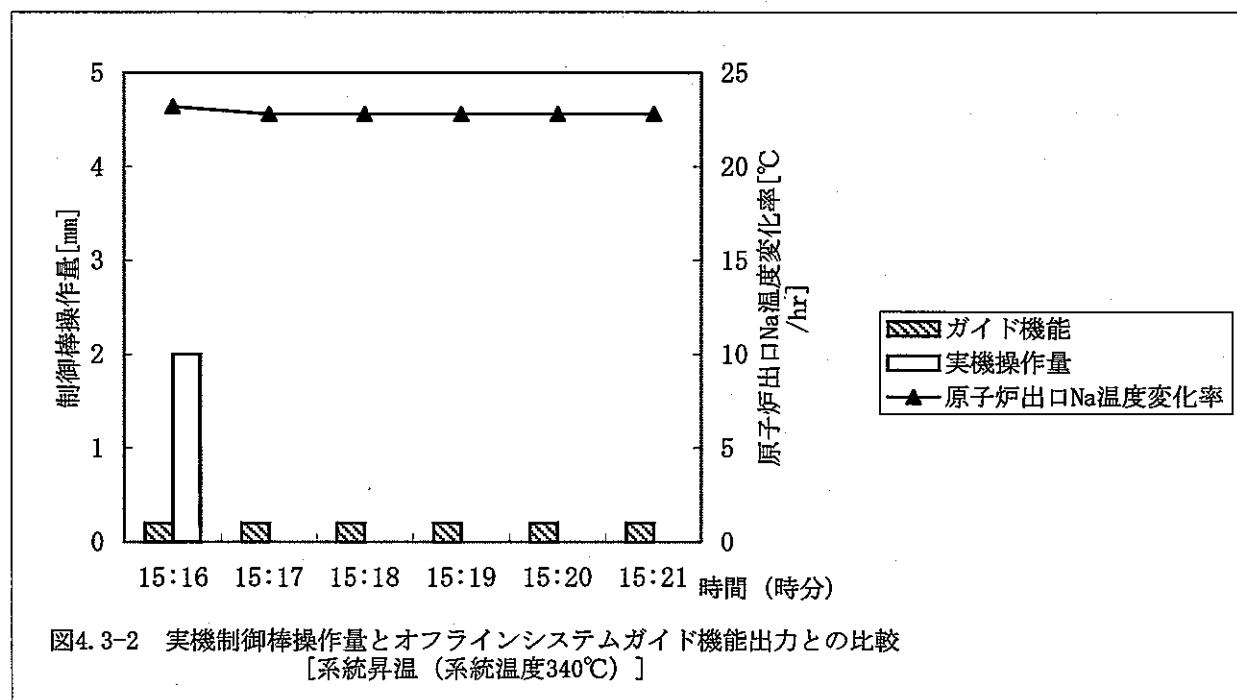
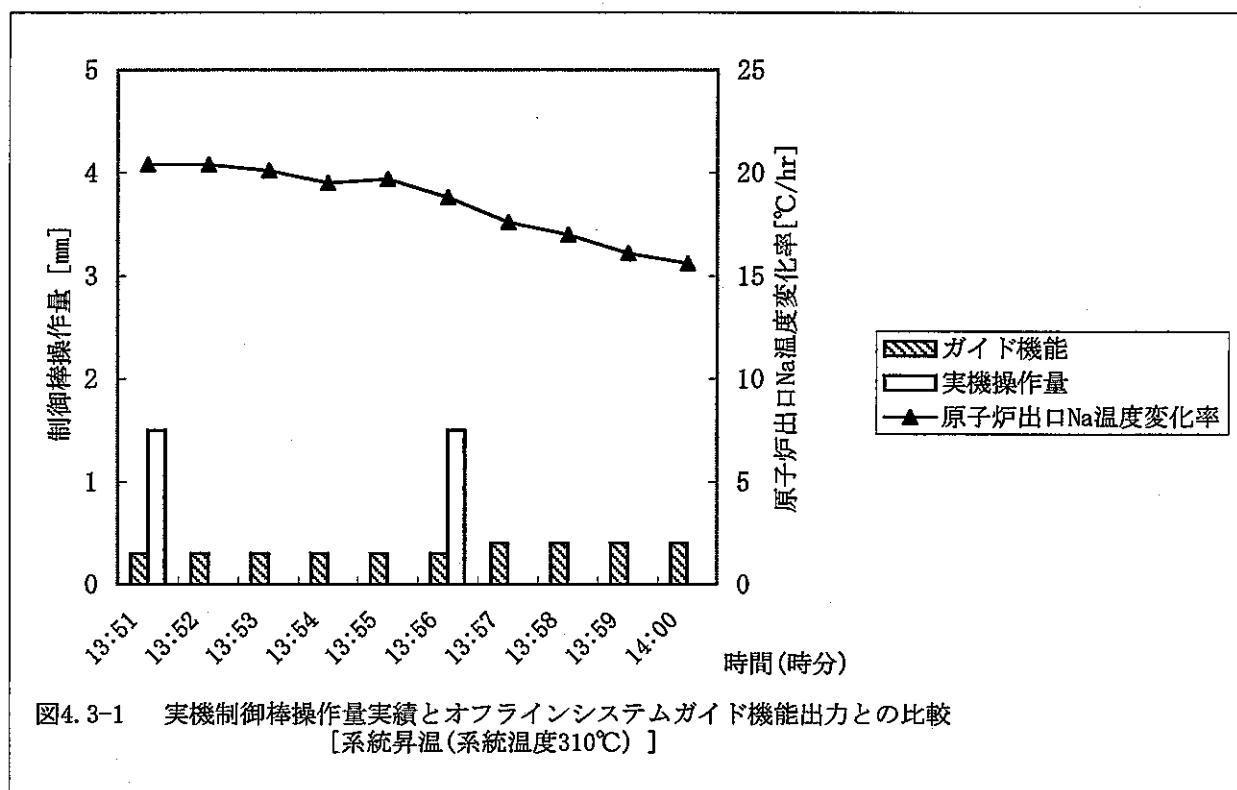


図4.1-3 オフラインシステムガイド機能出力と起動系ペリオドとの比較
[臨界近接 (約 3×10^3 cpsから 2×10^4 cps)]



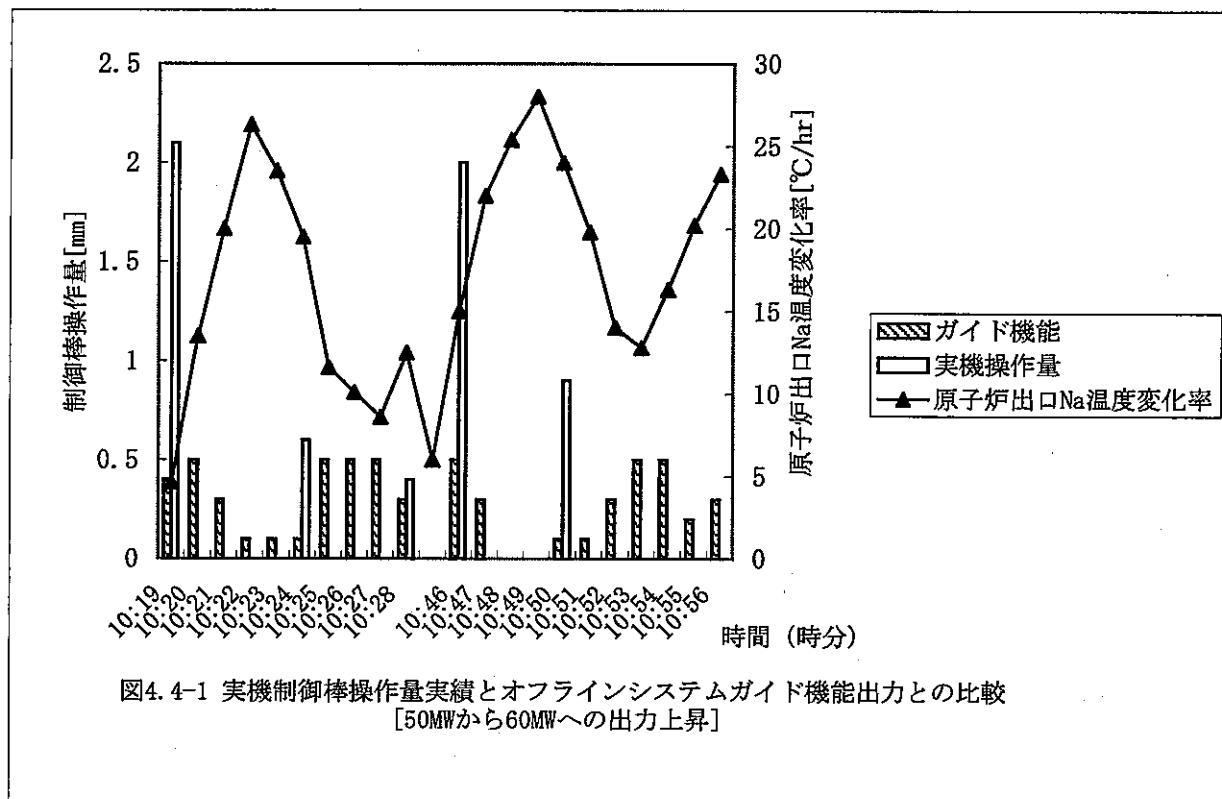


図4.4-1 実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力との比較
[50MWから60MWへの出力上昇]

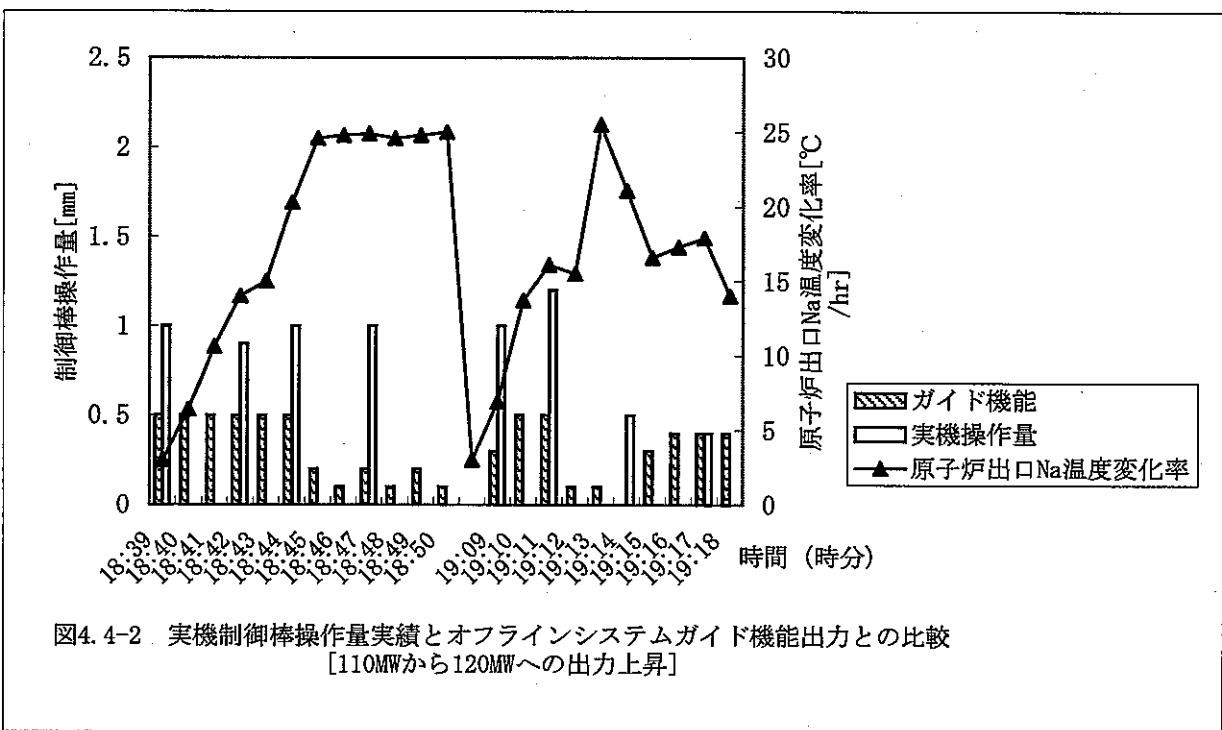


図4.4-2 実機制御棒操作量実績とオフラインシステムガイド機能出力との比較
[110MWから120MWへの出力上昇]