

# 「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 —

(技術報告書)

1999年10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。

〒319-1194 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

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 319-1194  
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

## 「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 —

(技術報告書)

寺門嗣夫\* 鈴木伸也\* 河井雅史\*

青木裕\* 大久保利行\*

### 要　　旨

高速実験炉「常陽」では、原子炉プラントの起動から停止までの全ての運転領域にわたる原子炉出力の自動制御化を目指し、「常陽」制御棒操作自動化システムの開発を進めている。

本システムを実機へ適用する前段階として、制御棒操作自動化オフラインシステム（運転員に制御棒操作等をガイドするシステム）を製作し、実機信号を用いて検証した。制御棒操作自動化オフラインシステムは、運転員に対し、所定の原子炉出力までの出力上昇、下降に必要な制御棒操作量を提供する制御棒操作ガイド機能と、原子炉起動、停止の過程での機器の操作指示メッセージを提供する機器運転操作ガイド機能がある。このうち制御棒操作ガイド機能における制御棒操作量の演算には、ファジィ推論を用いており、「常陽」の運転領域毎に分割した臨界近接、核加熱、系統昇温、出力上昇、出力下降のそれぞれに対応する制御モードを有している。

制御棒操作自動化オフラインシステムの検証試験により、得られた成果は、以下の通りである。

- ① 制御棒操作ガイド機能は、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、下降並びに目標出力での整定に見合う適切な制御棒操作量をガイドすることができ、良好であった。
- ② 機器運転操作ガイド機能は、原子炉の出力変化に伴う各種機器の操作タイミングに応じて、的確に操作をガイドすることができ、良好であった。
- ③ 制御棒操作自動化システムについては、制御棒操作自動化オフラインシステムの検証試験を通して、実機適用に必要な技術的課題を提起することができた。
- ④ これらのことから、「常陽」実機に対し制御棒操作自動化システムが適用できる見通しを得た。

---

\* 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部 原子炉第一課

October, 1999

**Development of the Automatic Control Rod Operation System for JOYO**  
**-Verification of Automatic Control Rod Operation Guide System-**

Tsuguo Terakado\*, Shinya Suzuki\*, Masashi Kawai\*,  
Hiroshi Aoki\*, and Toshiyuki Ohkubo\*

**Abstract**

The automatic control rod operation system was developed to control the JOYO reactor power automatically in all operation modes(critical approach, cooling system heat up, power ascent, power descent), development began in 1989. Prior to applying the system, verification tests of the automatic control rod operation guide system was conducted during 32nd duty cycles of "JOYO" from Dec. 1997 to Feb. 1998. The automatic control rod operation guide system consists of the control rod operation guide function and the plant operation guide function.

The control rod operation guide function provides information on control rod movement and position, while the plant operation guide function provide guidance for plant operations corresponding to reactor power changes(power ascent or power descent).

Control rod insertion or withdrawing are predicted by fuzzy algorisms.

The main results obtained via the verification tests are as follows:

- (i) Control rod operation guide function provided adequate information on control rod operation in all operation modes.
- (ii) Plant operation guide function provided adequate guidance for the plant operation.
- (iii) The technical themes were specified for the verification tests of the automatic control rod operation system.
- (iv) It was concluded that the automatic control rod operation system can be used to automatically control the JOYO reactor power.

---

\* Operation Engineering Section, Experimental Fast Reacter Division,  
Irradiation Center, Oarai Engineering Center, JNC.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 制御棒操作自動化システムの開発経緯 .....	2
3. 「常陽」の原子炉制御系及び運転操作 .....	3
3. 1 「常陽」の原子炉制御系 .....	3
3. 2 「常陽」の原子炉運転操作 .....	3
4. 制御棒操作自動化オフラインシステム .....	5
4. 1 目的 .....	5
4. 2 構成 .....	5
4. 3 機能 .....	5
5. 制御棒操作自動化オフラインシステムの検証試験 .....	13
5. 1 臨界近接 .....	13
5. 2 核加熱 .....	15
5. 3 系統昇温 .....	15
5. 4 出力上昇 .....	16
5. 5 出力下降 .....	17
6. 考察 .....	19
7. おわりに .....	22
8. 参考文献 .....	23

## 図表 目次

表 4.1	臨界近接の規定ファジィ制御規則	25
表 4.2	核加熱の規定ファジィ制御規則	26
表 4.3	系統昇温の規定ファジィ制御規則	27
表 4.4	出力上昇の規定ファジィ制御規則	28
表 4.5	出力下降の規定ファジィ制御規則	29
表 4.6	制約ファジィ制御規則	30
表 4.7	機器運転操作ガイド	31
図 2.1	制御棒操作自動化システムの開発計画	33
図 3.1	「常陽」の原子炉断面	34
図 3.2	「常陽」の原子炉制御系の概念	35
図 3.3	「常陽」の原子炉起動停止曲線	36
図 4.1	オフラインシステムの構成	37
図 4.2	臨界近接操作画面	38
図 4.3	核加熱操作画面	39
図 4.4	系統昇温操作画面	40
図 4.5	出力上昇操作画面	41
図 4.6	出力下降操作画面	42
図 5.1	臨界近接におけるオフラインシステムと運転員操作の比較	43
図 5.2	核加熱におけるオフラインシステムと運転員操作の比較	43
図 5.3	系統昇温におけるオフラインシステムと運転員操作の比較	44
図 5.4	出力上昇におけるオフラインシステムと運転員操作の比較	44
図 5.5	出力下降におけるオフラインシステムと運転員操作の比較	45

## 1. はじめに

高速実験炉「常陽」（以下、「常陽」という。）では、高速炉の全運転領域にわたる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、ファジィ制御による制御棒操作自動化システム（以下、本システムという。）の開発を進めている。これまでに、ファジィ制御を用いた本システムの基本システムを設計・製作して、「常陽」プラント動特性解析コードに組み込んだ「常陽」運転訓練シミュレータ（以下、シミュレータという。）においてオンラインでの制御特性を検証・評価した。その結果、原子炉の起動から定格出力運転を経て停止に至る全運転領域にわたり通常運転時及び過渡変化時において、良好な制御特性を有することを確認した。<sup>(1), (2)</sup>

これら本システムの技術的成立性の確認を経て、次のステップである実機での検証を行うために、実機の信号は取り込むが制御棒駆動装置とは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。）を製作し、第31、32サイクル定格出力運転時に制御棒操作等のガイダンス機能を検証した。

本報告書は、オフラインシステムの実機での検証結果について報告する。

## 2. 制御棒操作自動化システムの開発経緯

本システムの開発は、図2.1に示すように平成元年度に開始された。平成元年度は、本システムの核となる基本システムを作成し、シミュレータにて検証し、制御棒操作自動化の技術的成立性を確認した。<sup>(1)</sup> 平成2年度は、炉心構成変更に伴う制御棒反応度値を測定する「制御棒校正試験」に対応するためのモードを追加した。制御棒校正試験は、原子炉出力を維持しながら制御棒2本を同時に大きく引き抜き、挿入する「同時差替え法」を採用しており、熟練を要する操作となっている。この制御棒校正試験時の操作のモードについてシミュレータを用いて検証した。その結果、信頼性の高い制御性が得られた。平成3年度は、運転中に異常な過渡変化が発生した場合における本システムの制御性を把握するため、「常陽」プラント動特性解析コードMIMIR-N2（以下、MIMIR-N2という。）に基本システムのファジィ制御プログラムを組み込んだ解析コードを用いて、6項目の運転中の異常な過渡変化事象（1次系ナトリウム流量減少、増大、2次系ナトリウム流量減少、増大、主冷却機冷却能力減少、増大）を抽出し解析した。その結果、過渡変化においても制約ファジィ制御が有効に働き、プラント挙動を安定に収束できることを確認した。平成5年度は、制御系の安定性を把握するためMIMIR-N2に基本プログラムを組み込んだ解析コードを用いて、制御系安定性解析を行い評価した。その結果、制御目標値がステップ状に変化した場合において、ペリオド領域では若干オーバーシュート量が多目ではあったが出力領域ではオーバーシュートが無く、良好に目標値に対して追従することを確認した。また、原子炉起動及び停止に対する標準的な原子炉運転曲線から逸脱した領域からでも、発散することなく良好に目標値に対して追従することを確認できた。<sup>(2)</sup> 一方、平成6年度からは、本システムを実機で使用する前段階として実機の制御棒駆動装置と接続しないオンラインシステムの製作に着手し、はじめに操作ガイド画面の製作を行った。平成7年度においては、平成6年度に製作したオンラインシステムの操作ガイド画面と制御棒操作量表示機能等の各種操作ガイド機能を組合せたシステムを製作し、シミュレータの信号を用いての検証を、平成8年度にはオンラインシステムに実機からのプラン信号を接続し、平成9年度の第31、32サイクル定格出力運転にて検証試験を行った。

### 3. 「常陽」の原子炉制御系及び運転操作

#### 3. 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なり、制御棒によって原子炉を所定の出力に保持するばかりでなく、十分な余裕をもって原子炉を停止することができる制御能力を有している。すなわち、反応度効果の最も大きい制御棒1本が完全に引き抜かれた状態でも、十分余裕をもって残りの制御棒で停止できる制御能力を有するように設計されている。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の拡充のため制御棒5については、炉心第5列に配置される。

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。駆動速度は130mm/min以下であり、反応度の付加率が0.00021ΔK/K/secを超えないように設計されている。なお制御棒5については、炉心第5列の配置のため、反応度価値は他の制御棒の約1/3となる。

図3. 1及び図3. 2に原子炉断面図及び原子炉制御系の概念をそれぞれ示す。

#### 3. 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、出力調整及び出力下降の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、これらの各ステップにおける操作の概要について述べる。

図3. 3に「常陽」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」の状態で、臨界近接操作に先立ち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、制御棒6本を350mm（制御棒の全ストロークは、650mmである。）まで順次引き抜き、次いで制御棒3から6を計算コードにより求められた臨界予想位置まで引き抜く。その後、臨界予想カーブ（計数率逆増倍法）を作成しながら制御棒1、2を徐々に引き抜き、制御棒6本の均等引き抜き状態で起動系計数率 $5 \times 10^4$  cps 安定で臨界とする。なお、臨界近接操作における起動系ペリオドは、50秒以上としている。

## (2) 系統昇温操作

本操作は、冷却系のナトリウム温度を250°Cから370°Cまで上昇させるためのものである。本操作開始直後は、制御棒ストローク5mm程度の引き抜くことにより、一定のペリオドで原子炉の出力を上昇させる。原子炉出力約1MWになるとナトリウム温度の上昇がはじまり、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って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、原子炉出口ナトリウム温度とオーバーフロータンクナトリウム温度の差を考慮し、20°C/hで行われる。このため、制御棒はこの昇温率に相当する約2mm/5min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、これ以上では「高出力」に切り替えられる。

## (3) 出力上昇操作

本操作は、冷却系のナトリウム温度370°Cの等温状態から原子炉入口ナトリウム温度370°C一定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出力を100MWまで上昇させ、原子炉出口ナトリウム温度を上昇させるものである。この場合も、昇温率は20°C/hであり、原子炉出力上昇率は5MW/20minである。

原子炉で発生した熱は、中間熱交換器を介して2次冷却系へ伝えられ、2次冷却系に設けられた主冷却器の主送風機によって大気に放散される。原子炉出力12MWまでは、主送風機によらない自然通風により原子炉入口ナトリウム温度を370°C一定に保持し、12MW到達時に主送風機を起動し、主冷却器での強制通風除熱を行う。

定格出力100MW時の原子炉出口ナトリウム温度は500°Cである。

## (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補償する必要があり、それは制御棒を引き抜くことにより行われる。

「常陽」での出力調整は8時間毎に1日に3回実施され、平均的に毎回約2MWの燃焼分を補償する。それに相当する制御棒引き抜き量は約3mmである。

## (5) 出力下降操作（原子炉停止操作を含む）

出力下降時も出力上昇時と同様に原子炉入口ナトリウム温度は370°C一定に制御される。降温率は35°C/hであり、原子炉出力の下降率は約10MW/20minである。本操作は、原子炉出力30MWまで行われる。

原子炉停止操作は、原子炉出力30MWからの「手動制御棒一斉挿入」により行われる。

## 4. 制御棒操作自動化オフラインシステム

### 4. 1 目的

本システムを実機にオンラインで設置する前段階として、本システムの核となるファジィ推論を用いたオフラインシステムを製作、検証、運用し、その運用データを蓄積して、本システムの実機への適用に反映させる。

### 4. 2 構成

オフラインシステムは、中性子束、原子炉出入口ナトリウム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、C R T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4.1 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。

### 4. 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を設定し、かつ、それらに対応するC R T画面を設定している。これらのC R T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、C R T上でマウスで選択できる。図4.2 に臨界近接操作画面、図4.3 に核加熱操作画面、図4.4 に系統昇温操作画面、図4.5 に出力上昇操作画面、図4.6 に出力下降操作画面を示す。

#### 4. 3. 1 基本条件

##### (1) 使用言語

プログラムの使用言語は、ファジィ推論部については制御棒操作自動化システムの基本プログラムで使用したフォートラン言語を用い、その他についてはC言語を用いた。

##### (2) 制御範囲

制御範囲は、原子炉の起動から停止にいた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た。制御モードとその制御範囲は、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 ( $5 \times 10^4$  c p s)までの領域)
- ② 核加熱モード (臨界 ( $5 \times 10^4$  c p s)以降から 1 MWまでの領域)
- ③ 系統昇温モード (系統温度 250°Cから 370°C (約 2 MW)までの領域)
- 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)

制御棒の操作頻度は、自動化基本プログラムにおいてはペリオド領域については1秒毎、出力領域については1分毎に連続的でかつ細かいオンライン制御を行うことにより原子炉出力の標準的な上昇、下降曲線上で安定に運転することを目標としているが、オフラインシステムにおいては、運転員による手動操作となるため運転員の操作に対する対応時間を考慮して、臨界近接モードでは30秒毎、また出力領域では1分毎とした。出力領域のうち、運転マニュアル上系統昇温、出力上昇においては、系統昇温率 20°C/h r に相当する 2 mm / 5 min で制御棒操作を、また出力下降においては、系統降温率 35°C/h r に相当する 2 mm / 3 min で制御棒操作を行っているが、オフラインシステムにおいては1分毎の制御棒操作を行っても、これらの系統温度変化率を満たす様に設計している。

#### 4. 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し、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に表示するものである。

核加熱モードは、臨界から原子炉出力約 1 MWまでの系統の温度が原子炉出力に依存しない領域であり、系統昇温モードとは区別して取り扱う。系統昇温モードは系統の温

度が原子炉出力に依存し、250°Cから370°Cまで上昇する領域を対象とする。また、定格出力を一定に保持するための定時出力調整操作は、出力上昇モードで対応する。

各運転モードにおいては、ペリオドや冷却系温度の熱輸送遅れが非線形特性を有し、原子炉出力制御の完全自動化に対応するためには、これらの非線形特性への対応が課題となってくる。一般的に、このような非線形特性を、解析的なモデルに基づく線形制御にて対応することは困難である。一方、非線形な特性は言葉により容易に表現でき、このような非線形な特性を有する対象を制御する場合は、運転員の操作方法（プラント運転状態の確認と判断、操作方法と操作タイミング等）を言葉による表現にて対応が可能となるファジィ推論を適用することが最適となる。また、ファジィアルゴリズムは制御対象の特性に応じた制御規則を、「もし……ならば、……せよ。」というように言語にて記述できるため、非線形特性を持つ対象の制御には特に有効なものとなる。特に重要な点は、ファジィアルゴリズムにはロバスト性（部分的な特性が変化したとしても全体特性としての影響が小さい性質）を有しているということである。これは、言語で制御対象の特性を記述できるため、複数の制御規則が相互に補完しあえるということである。

このようなファジィ推論の利点を有效地に活用し、制御特性を運転員による原子炉出力制御と同等の円滑かつ安定なものとなるよう、例えば制御棒操作量は運転員の操作量と同等に5mm、2mm、1mm、0.5mm、0.2mmを基本としている。ここで、運転員による制御は、臨界近接では $5 \times 10^4$  cps の±3%以内、核加熱では1MWの±20%以内、系統昇温では367°C±2°C以内、出力上昇、下降では、目標原子炉出力に対し、±1MW以内を目標にしている。また、プラントの熱的あるいは核的制限も十分に満足するようにする。これは、例えば系統昇温操作時の温度変化率の目標値である20°C/hr以下を満足することでありかつペリオドが警報設定値の25秒以上を十分満足することもある。

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とおりである。

### (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設定し、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、各モードに対応して定められた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

観対象とする 2 变量は制御モードにより異なり、以下のとおりとする。

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

- ・原子炉入口ナトリウム温度
- ・原子炉入口ナトリウム温度変化率

④ 出力上昇、出力下降

- ・原子炉出口ナトリウム温度
- ・原子炉出口ナトリウム温度変化率

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  $2 \text{ mm} / 5 \text{ min}$  程度で引き抜き、起動系計数率が  $5 \times 10^4 \text{ cps}$  に近くなったら引き抜き速度をゆっくりしていく。さらに、起動系計数率が  $5 \times 10^4 \text{ cps}$  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、制御棒を少しづつ挿入して起動系計数率を  $5 \times 10^4 \text{ cps}$  に整定させる。」等の操作手順が記述されている。

表4.1～表4.5 に臨界近接、核加熱、系統昇温、出力上昇、出力下降の規定ファジィ制御規則を示す。

ファジィルールから制御棒位置を設定するアルゴリズムには、ファジィ制御として一般的な「 $\text{min}-\text{max}$  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、原子炉出入口ナトリウム温度、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

口ナトリウム温度、原子炉出口ナトリウム温度変化率、原子炉出口ナトリウム温度－オーバフロータンクナトリウム温度差、ペリオド、中性子束レベル、1次系及び2次系主循環流量、原子炉ナトリウム液位等)が運転上の許容値を越えそうな場合に制御棒の引き抜き・挿入を制約する。制約ファジィ制御規則には、例えば「系統昇温時はオーバフロータンクナトリウム温度と原子炉出口ナトリウム温度の差がある程度大きくなった場合には、制御棒の引き抜きをゆっくり行う。」等の注意事項を記述している。表4.6に制約ファジィ制御規則を示す。

### (3) 規定ファジィ制御目標値入力機能

規定ファジィ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ダンスを提供するファジィ制御の制御目標値である原子炉出口ナトリウム温度を、C R T画面上の一覧表から入力する機能である。この目標原子炉出口ナトリウム温度は、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ものである。

#### 4. 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C R T上に表示するものである。そのメッセージは、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ものとする。通常の操作においては、20秒を用いるが、次のステップの操作に対して時間間隔が長いものには、10分(臨界到達、反応度計起動等)を用いた。尚、メッセージ項目は、運転経験上84項目とした。表4.7に機器運転操作ガイドの項目を示す。

#### 4. 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うえでの原子炉出力、原子炉出入口ナトリウム温度、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例えば制御棒が引き抜かれればC R T画面上の制御棒が引き抜かれた位置まで移動する動画表示を付加した。なお、デジタル表示項目の右側の( )内にバーチャート表示のものについてはバーチャートと、動画表示については動画

と記す。

### ① 臨界近接操作画面

起動系計数率 c h - 1、c h - 2 (バーチャート)

中間系出力 c h - 3、c h - 4、c h - 5 (バーチャート)

起動系ペリオド c h - 1、c h - 2 (バーチャート)

制御棒位置 1～6 (バーチャート)

熱出力

原子炉出入口ナトリウム温度 A、B

原子炉出口ナトリウム温度 - オーバフロータンクナトリウム温度差

オーバフロータンクナトリウム温度

臨界予想制御棒位置

なお、臨界予想制御棒位置については、予め炉心構成に基づき算出した臨界予想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 本が臨界予想位置へ到達した後は、残りの制御棒 1 本にて計数率逆増倍による臨界制御棒位置を計算し、C R T 上に表示するものであり、臨界近接操作上の目安という位置づけとして使用する。

### ② 核加熱操作画面

中間系出力 c h - 3、c h - 4、c h - 5 (バーチャート)

出力系出力 c h - 6、c h - 7、c h - 8 (バーチャート)

中間系ペリオド c h - 3、c h - 4、c h - 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

原子炉出入口ナトリウム温度 A、B

原子炉出口ナトリウム温度 - オーバフロータンクナトリウム温度差

オーバフロータンクナトリウム温度

### ③ 系統昇温操作画面

中間系出力 c h - 3、c h - 4、c h - 5 (バーチャート)

出力系出力 c h - 6、c h - 7、c h - 8 (バーチャート)

制御棒位置 1～6 (動画)

系統昇温率

熱出力

原子炉出入口ナトリウム温度 A、B

原子炉出口ナトリウム温度－オーバフロータンクナトリウム温度差

オーバフロータンクナトリウム温度

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

原子炉出入口ナトリウム温度 A、B

原子炉出口ナトリウム温度－オーバフロータンクナトリウム温度差

オーバフロータンクナトリウム温度

(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うえで重要な原子炉出力、原子炉出入口ナトリウム温度、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出来る点数は、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、下限を任意に変更でき、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。

トレンドグラフの表示方式は、以下の通りである。

トレンドグラフを時間軸で4分割し、トレンドグラフ表示開始直後に時間軸0（右から1/4のところ）を基準として過去のトレンドを表示し、以後は時間経過に従い右側にトレンドをのばしていく。トレンドが右隅に到達すると、トレンドグラフの1/4を左へ平行移動し、再び時間軸0より右側に向かって表示を開始するものである。トレンドグラフは1画面に対して2枚まで表示が可能である。

トレンドグラフの呼び出しは、操作ガイド表示枠上部のタイトル左のトレンドアイコンをマウスでクリックしてトレンドグラフメニューを表示させ、そのなかから表示させたい項目を選択し表示させる。

(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（

例えば臨界近接であると起動系計数率と起動系ペリオド）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。

このグラフは、データの表示点数は51点である。データのサンプリング頻度は、臨界近接、核加熱では運転操作に要する時間が短いことから1分毎に、系統昇温、出力上昇、出力下降では運転操作に要する時間が長いことから6分毎とした。

#### (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。

この機能において、制約のかかった条件については全て表示するものとし、実際の制御棒操作量の制約に使用するのは、この条件のなかで制約グレードが最も大きいものとした。

#### (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c h - 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。核加熱操作（1 kW→1 MWへの出力上昇）は、制御棒引き抜きにより一定のペリオドで出力を上昇させる操作である。この操作での反応度は約4～5¢である。また、本操作は反応度が最も大きくなる運転操作であることから、監視のため設けた。バーチャートは核加熱操作画面の右側中央部に表示される。

#### (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。系統昇温率は、系統昇温操作画面の左側中央部に表示される。

## 5. 制御棒操作自動化オフラインシステムの 検証試験

オフラインシステムの検証試験は、シミュレータと「常陽」実機にて行った。シミュレータのプラント動特性モデルは、「常陽」設計用に開発、利用されたプラント動特性コード“MIMIR-T”をベースとし、かつ機器ロジックは実機シーケンスを忠実にソフト化したロジックモデルとなっている。このため、「常陽」実機を忠実に再現したシミュレータにて検証試験を行った後、「常陽」実機にて検証試験を行うという段階を踏んだ。

上述の通り、シミュレータと「常陽」実機は、同一の特性を有しているため、ここでは代表して「常陽」実機における検証試験の結果について述べる。

なお、オフラインシステムの検証については、オフラインシステムを用いた制御棒操作と、上級運転員が中級運転員に指示して制御棒操作を行った場合とを比較する方法で行った。

### 5. 1 臨界近接

図5.1に臨界近接におけるオフラインシステムと運転員の操作の比較を示す。

運転モードスイッチを「停止」から「起動」とし、臨界近接操作を開始した。オフラインシステムの機器運転操作ガイドメッセージに従って、制御棒ラッチ操作、制御棒全数350mm位置までの引き抜き操作を行い、制御棒3から6までを臨界予想位置398.7mmまで順次引き抜き操作が終わった時点でファジィ制御が開始された。この時の起動系ch-2の指示は、約700cps、ペリオドは無限大であった。

ここからファジィ制御の出力結果に従い制御棒操作を行うが、その操作間隔はオフラインシステムで任意に設定（1秒～120秒）できる。制御棒の引き抜き指示を出力する間隔は、運転員が十分に余裕をもって制御棒操作に対応できる時間として30秒とした。まず、制御棒1をオフラインシステムの指示の通りに約2mmずつ引き抜いたところ、ペリオドは少しずつ短くなって行った。制御棒1が臨界予想位置398.7mmに到達するころは、ペリオドは600秒から800秒程度を推移し、制御棒の引き抜き量は1回当たり1.0mmから1.3mm程度となった。制御棒1が臨界予想位置に到達後、制御棒2の引き抜き指示がでた。この時の起動系ch-2の指示は、約 $1.2 \times 10^3$  cpsで、ペリオド700秒程度であった。起動系ch-2の指示が約5.

$0 \times 10^3$  c p s になる頃には、ペリオドは 500 秒から 600 秒程度になり、制御棒の引き抜き量は 1 回当たり 0.6 mm から 0.9 mm 程度となった。この後約  $4.0 \times 10^4$  c p s までは、ペリオドは約 400 秒程度で推移し、制御棒引き抜き量は、1 回当たり 0.5 mm から 0.2 mm まで徐々に減少した。起動系 ch-2 の指示が  $4.3 \times 10^4$  c p s 程度で制御棒挿入の指示が出始めた。オフラインシステムの指示に従い、制御棒を 0.1 mm から 0.2 mm ずつ挿入を続けるが起動系 ch-2 の指示は緩やかに上昇を続け、 $5.0 \times 10^4$  c p s となり臨界に到達した。その後、制御棒の挿入効果が現れて、起動系 ch-2 の指示上昇が抑制され、約  $4.9 \times 10^4$  c p s から約  $5.0 \times 10^4$  c p s の間で整定した。機器運転操作ガイドンスは、臨界到達後の原子炉運転モードスイッチの切替え（「起動」から「低出力」）や起動系検出器の引抜き等のガイドンスを的確に運転員に提供した。

運転員の臨界操作においては、計数率逆増倍法による臨界予想曲線により、臨界予想制御棒位置を求めながら、制御棒操作を行っている。このため、図5.1 のように起動系計数率は臨界予想制御棒位置を求めるための計数率安定待ちにより、不連続な曲線で上昇している。これに対して、オフラインシステムを用いた場合は、ファジィ推論が開始されてからは 30 秒毎の連続的な制御棒引き抜き操作により、連続的な曲線となり、円滑に推移している。一方、臨界近接操作の所要時間は、運転員の手動操作では約 1 時間 45 分に対し、オフラインシステムを用いた場合では、約 1 時間 15 分であった。また、臨界点 ( $5.0 \times 10^4$  c p s) での整定については、誤差 3 % 以内であり運転員の操作結果と同等であった。

運転員の手動操作においては、計数率逆増倍法による起動系計数率の安定待ち時間（数分間）があるため、制御棒引き抜き量が多めであっても、その待ち時間により、起動系ペリオドが長くなる。よって、臨界近接操作における出力上昇速度が抑制される。一方、オフラインシステムの制御棒操作については制約ファジィ推論で起動系ペリオドが 100 秒以上にならないよう制御棒引き抜き量を抑制している。さらに、運転員による制御棒操作と同様に、計数率逆増倍法による臨界予測を行い、C R T 上に臨界予想位置を表示している。（この計数率逆増倍法とファジィ推論は独立しており干渉はしない）。これにより、計数率逆増倍法とファジィ推論を対比させて監視することができる。よって、制御棒操作上の安全性という観点から、運転員による操作とオフラインシステムを用いた操作のいずれも、起動系ペリオドが連続的に短い状態を

継続しない操作方法を探っており、制御棒操作上の安全レベルは同等である。

## 5. 2 核加熱

図5.2 に核加熱におけるオフラインシステムと運転員操作の比較を示す。

制御棒の引き抜きは臨界状態から開始した。オフラインシステムの指示に従い、制御棒を 6.7 mm 引き抜き中間系ペリオドを上昇させ、約 200 秒を保持することができた。中間系出力約 1 MW にて制御棒挿入の指示により約 2 mm 插入して 1 MW に安定させることができた。核加熱操作の過程において、出力系の出力の上昇に伴い、機器運転操作ガイドンスに従い、出力系レンジスイッチの切替えや、1 MW 到達後の運転モードスイッチの切替え（「低出力」から「高出力」）に対し、的確に運転員にガイドンスを提供した。

運転員の核加熱操作においては、1 kW から制御棒を約 5 mm 程度ステップ状に引き抜き、その時のペリオドを一定に維持することにより、中間系出力を上昇させる。

図5.2 のように、核計装の中間系  $c\ h - 3$  の指示は、指數関数で上昇し、中間系出力の上昇が鈍くなったら、適時制御棒を引き抜き、ペリオドが一定になるようとする。これと比較して、オフラインシステムにおいても中間系出力は同様の上昇であった。核加熱操作の所要時間は、運転員の操作とオフラインシステムを用いた場合では双方ともに約 25 分程度であり、特に顕著な差は無かった。また 1 MW での整定については誤差 10 % 程度であり、運転員の操作と比較して顕著な差はなかった。核加熱操作はこのように比較的容易な操作であることから、運転員の操作と比較して差がでなかった。

## 5. 3 系統昇温

図5.3 に系統昇温におけるオフラインシステムと運転員操作の比較を示す。

制御棒の引き抜きは系統温度 250 °C から開始した。制御棒の引き抜き量は、系統ナトリウム温度の昇温率が 20 °C/h r の時で 2 mm / 5 min であった。また、系統ナトリウム温度の昇温率が大の時は制御棒の引き抜きを抑制（24 °C/h r の時で 1.1 mm / 5 min）し、系統ナトリウム温度の昇温率が小の時は制御棒の引き抜きを促進（14 °C/h r の時で 2.6 mm / 5 min）するように指示されていた。

このまま昇温率 20 °C/h r で系統昇温を継続し、系統ナトリウム温度 360 °C 過

ぎから徐々に制御棒の引き抜き量が減少し約  $1 \text{ mm} / 5 \text{ min}$  程度となり、昇温率は約  $1.5^\circ\text{C} / \text{hr}$  程度に下降した。その後、制御棒の引き抜き量は、約  $0.5 \text{ mm} / 5 \text{ min}$  程度となり、約  $8^\circ\text{C} / \text{hr}$  ではほぼ安定状態になった。制御目標値である  $367^\circ\text{C}$  を超えてからは、制御棒挿入の指示がでて、約  $0.1 \text{ mm}$  から  $0.3 \text{ mm}$  程度の挿入指示を繰り返し、ややオーバーシュートしたものの制御目標値との偏差 + 約  $1^\circ\text{C}$  で整定した。運転員の系統昇温操作においては、系統昇温率が  $20^\circ\text{C} / \text{hr}$  になるように制御棒を約  $2 \text{ mm} / 5 \text{ min}$  の割合で引き抜いている。このため、図5.3 のように原子炉入口ナトリウム温度は、ほぼ直線的に上昇する。系統昇温操作は、 $2 \text{ mm} / 5 \text{ min}$  で制御棒操作を行っていると  $20^\circ\text{C} / \text{hr}$  をわずかに超えてしまう。このため、 $20^\circ\text{C} / \text{hr}$  で昇温するためには運転員が制御棒操作量を微妙に調整している。

これに対しオフラインシステムは、過去 10 分間の原子炉入口ナトリウム温度の上昇分から昇温率を算出し、 $0.1 \text{ mm}$  程度の微妙な制御棒操作量の増減により、 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C} / \text{hr}$  以内の安定な昇温率が得られた。昇温率は、運転員の操作と比較して、オフラインシステムを用いた場合のほうが、ゆらぎが少なかった。また系統昇温操作の所要時間は、約 6 時間であり、運転員の操作と同等であった。原子炉入口ナトリウム温度  $367^\circ\text{C}$ への整定は、運転員の制御棒操作では  $360^\circ\text{C}$  付近から制御棒操作量を徐々に減少させ、 $367^\circ\text{C}$  を超えたら制御棒を挿入するという方法を行っており誤差が  $1^\circ\text{C}$  以内である。オフラインシステムにおいても、同様な結果が得られた。オフラインシステムに従って制御棒操作を行うことで、運転員の操作時より一定の昇温率での系統昇温操作を行うことができた。

#### 5. 4 出力上昇

出力上昇については、原子炉出力  $5.5 \text{ MW} \rightarrow 6.0 \text{ MW}, 6.0 \text{ MW} \rightarrow 6.5 \text{ MW}, 7.5 \text{ MW} \rightarrow 8.0 \text{ MW}, 8.0 \text{ MW} \rightarrow 8.5 \text{ MW}$  のケースについて、試験を行った。上記の出力上昇のケースのうち例として、 $6.0 \text{ MW} \rightarrow 6.5 \text{ MW}$ への出力上昇について以下に示す。

図5.4 に出力上昇におけるオフラインシステムと運転員操作の比較を示す。

原子炉出力  $5 \text{ MW}$ 当たりの制御棒引き抜き量は、 $6.6 \text{ mm}$  であった（制御棒 5 の引き抜きを含む）。制御棒 5 の制御棒反応度価値を  $1/3$  として制御棒操作量を計算すると、制御棒引き抜き速度は  $2 \text{ mm} / 5 \text{ min}$  であった。原子炉出力  $6.5 \text{ MW}$ への整定は、原子炉出口ナトリウム温度上昇率の変動を安定させるために平滑化処理（時定数

120秒)を行ったことにより、原子炉出口ナトリウム温度がややオーバーシュートしたものとの制御目標値である454°Cに対してプラス1°C程度の偏差で安定した。その他の出力上昇のケースについても同様の結果であった。

運転員の出力上昇操作においては、5MW/20minで出力を上昇させ、その時の昇温率は20°C/hrである。運転員の制御棒操作では、原子炉出力の上昇程度を確認ながら、5分毎に2mm引き抜く、または2分30秒毎に1mm程度ずつ引き抜いていく。オフラインシステムにおいては、ファジィ推論部が20°C/hrに設計されているため、初期の制御棒引き抜きは、多めになり約30°C/hr程度となる。その後制御棒引き抜き量が抑制され、20°C/hrになると、約0.5mm/minで出力を上昇させる。次いで、目標原子炉出口ナトリウム温度の1°C手前から制御棒引き抜きを抑制はじめ目標原子炉出口温度を超えたら制御棒を挿入する。この制御方法に対しては、5MWごとの出力上昇よりは100MWまでの連続した出力上昇(20°C/hr一定)のほうが昇温率の変動が少なく安定した出力上昇操作ができる。しかしながら「常陽」の場合、原子炉起動から定格出力までの間、5MWごとに炉物理試験を行い、各種データを取得している。このため、一定の昇温率が長時間保持されることがなく、出力上昇、出力保持を繰り返すこととなる。このような昇温率の変動が大きい状態での制御棒操作でも、オフラインシステムは、目標原子炉出口ナトリウム温度で運転員と同等の整定をさせることができた。また目標原子炉出口ナトリウム温度への到達時間は、20分であった。

## 5. 5 出力下降

出力下降については、原子炉出力80MW→75MW、70MW→65MW、60MW→55MW、45MW→40MWのケースについて、検証試験を行った。制御棒の挿入指示の間隔は、運転員が十分に対応出来る時間として、1分とした。上記の出力下降のケースのうち例として、45MWから40MWへの出力下降について以下に示す。

図5.5 に出力下降におけるオフラインシステムと運転員操作の比較を示す。

オフラインシステムを用いた操作において、原子炉出力5MW当たりの制御棒挿入量は、4.5mmであった。制御棒挿入速度は約1.5mm/3minであった。原子炉出力40MWへの整定は原子炉出口温度下降率の変動を安定させるために平滑化処理

(時定数120秒)を行ったことにより、原子炉出口ナトリウム温度がややアンダーシュートしたものの制御目標値423°Cに対して+約1°C以内の偏差で安定した。その他のケースについても同様であった。

運転員の出力下降操作においては、5MW/10minで出力を下降させ、その時の降温率は35°C/hrである。運転員の制御棒操作では、3分で2mm制御棒を挿入し原子炉出力を降下させている。この出力下降操作では、制御棒は挿入のみで、制御棒を引き抜いてまで目標原子炉出口温度に合わせることはしない。このため、目標温度に対してアンダーシュートすることが多い。一方、オフラインシステムでは、ファジィ推論が35°C/hrに設計されているため、初期の制御棒挿入量は多目になり、原子炉出口温度のゆらぎが多少大きくなるが、制御棒挿入により、原子炉出口ナトリウム温度が降下し、40°C/hrにて制御棒挿入指示がなくなり、その後、目標原子炉出口ナトリウム温度を超えたら、制御棒を引き抜くこととなる。このため、オフラインシステムは、運転員の操作と比較して、目標原子炉出口ナトリウム温度でより高い精度で整定させている。5MW/10minの下降率での目標出力到達時間は、運転員の操作と比較して同等であった。

## 6. 考察

本システムを「常陽」実機へ適用するに当たっての課題について、考察した結果を以下に示す。

### 1. オフラインシステム検証結果からの考察

臨界近接においては、起動系ペリオドを連続的に監視し、かつ、起動系ペリオドの変化が速いため短い時間間隔（例えば1秒間）での制御棒操作が要求される。この条件で自動化すると、起動系計数率はより円滑に推移し、臨界近接操作の所要時間も大幅に短縮されることになると考えられる。

核加熱（1 kW→1 MW）においても、臨界近接と同様に中間系ペリオドを連続的に監視し、かつ、中間系ペリオドの変化が速いため短い時間間隔（例えば1秒毎）での制御棒操作が要求される。しかし、本操作における制御棒操作量がほぼ 5~7 mm 程度となるため、中間系ペリオドも 100~200 秒程度となることが予想されることから、今回の検証結果と同等の制御性、所要時間になると考えられる。

系統昇温では、昇温率を連続的に監視し、かつ系統ナトリウム温度の熱輸送遅れを考慮して長い時間間隔（例えば1分間）での制御棒操作となることが予想される。系統ナトリウムの昇温率は 20 °C/h<sup>r</sup> であるため所要時間は同等であり、整定についても同等になると見える。

出力上昇、下降においては、5 MW毎の炉物理試験を伴う出力上昇と定格出力まで連続した出力上昇の2つの方法があるが、後者の場合は、原子炉出口ナトリウム温度変化率の変動がないため、安定した出力上昇、下降となる。また目標原子炉出口ナトリウム温度での精度の良い整定が得られるものと考えられる。そして、目標原子炉出口ナトリウム温度を定格原子炉出力相当に設定することにより、出力上昇モードにて原子炉出力一定運転が実現できると考えられる。

### 2. ハードウェアについての考察

#### (1) プラントのプロセス入力信号

オフラインシステムにおいてファジィ推論に用いている信号は、核計装の起動系、中間系の出力とペリオド、原子炉入口ナトリウム温度、原子炉出口ナトリウム温度で

ある。これらについては、核計装の起動系が2系統、中間系が3系統、原子炉入口、出口ナトリウム温度は各々2ループとも5系統（原子炉保護系信号3系統、監視用信号1系統、警報設定器用信号1系統）を有している。オフラインシステムにおいては、核計装信号の場合、ノイズの影響を受けにくい系統を手動で選択し、ファジィ推論に使用している。一方、原子炉出口ナトリウム温度の場合は定格出力において定格出力における設計値500°Cを超えないように各ループの監視用信号のうち高値を手動で選択している。

「もんじゅ」においては、制御棒操作の自動化は定格プラント出力40%から100%の間において行われている。この場合、制御の対象は原子炉出口ナトリウム温度であり、制御方法はP I制御である。この原子炉出口ナトリウム温度は、3ループそれぞれ2系統ある制御用信号の高値を選別し、それらの信号を平均し制御系の入力信号としている。

「常陽」の本システムにおいては、上述のプラントのプロセス信号の選別について以下の選択肢が考えられる。

#### 【核計装信号】

- ① ノイズの影響のない系統を手動で選択して使用する。
- ② 全ての系統において、所定の出力を超えないように高値を選別する。
- ③ 2系統においては高値を、3系統においては高値と低値を除き、中間値を選別する。

#### 【原子炉出口ナトリウム温度信号】

- ① 原子炉出口温度500°Cを超えないように2ループとも原子炉保護系信号3系統のうち高値を選別し、2ループのうち高値を選別する。
- ② 2ループそれぞれ原子炉保護系信号3系統の高値を選別し、それらを平均する。
- ③ 原子炉保護系信号3系統の高値と低値を除き、中間値を選別する。

これらについて、今後最新の原子力発電所のデジタル制御技術の動向を勘案し、決定して行きたい。

#### (2) ファジィ制御部の信頼性向上について

ファジィ制御部については、オフラインシステムでは規定ファジィ推論部と制約ファジィ推論部の二段構えとした。本システムにおいても、安全性の観点から同じ構成としたい。実機適用であることから、更にシステムの信頼性を向上させる（ファジィ

推論部を担当する計算機のハードウェア故障時にバンプレス切替可能なシステム構成にする)ため、計算機を多重化するなどの冗長性を持たせる必要がある。また、故障箇所の早期発見のため、計算機や制御装置の自己診断機能を付加することも必要と考える。

(3) 自動化の進行管理について

オフラインシステムにおいて、臨界近接、核加熱、系統昇温、出力上昇、出力下降の各運転モードにおいて、モード切替は運転員の判断により手動にて行った。本システムにおいても、運転員がプラントの状態を確認し、確実に次のステップに進行できるという判断のもとに、モード切替をさせる必要がある。軽水炉においても、原子炉出力上昇操作において自動化が図れしており、給水ポンプ切替えや発電機併入等の操作ポイントにおいて運転員の判断で、ステップを進行させる設計としていることから、本システムにおいても、同様な進行管理を導入する必要がある。

(4) 制御棒駆動機構について

オフラインシステムの検証試験において、制御棒は1.0 mm以下の細かい操作量となるケースが多かった。本システムにおいても細かい操作量が要求されるため、制御棒操作回数が多くなることが予想される。このため、実機制御棒駆動機構の駆動電動機の電磁ブレーキの磨耗と電磁接触器の寿命に対する評価を行う必要がある。

## 7. おわりに

制御棒操作自動化システムの開発の一環として、制御棒操作自動化オフラインシステムを製作し、実機にて検証試験を行った。

得られた成果は以下の通りである。

- ① 制御棒操作ガイド機能は、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、下降並びに目標出力での整定に見合う適切な制御棒操作量をガイドすることができ、良好であった。
- ② 機器運転操作ガイド機能は、原子炉の出力変化に伴う各種機器の操作タイミングに応じて、的確に操作をガイドすることができ、良好であった。
- ③ 制御棒操作自動化システムについては、オフラインシステムの検証試験を通して、実機適用に必要な技術的課題を提起することができた。
- ④ これらのことから、「常陽」実機に対し制御棒操作自動化システムが適用できる見通しを得た。

## 8. 参考文献

(1) 寺門嗣夫他：「常陽」における制御棒操作自動化システムの開発

日本原子力学会 1993年秋の大会予稿集 F 34

(2) 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 (1994. 9)

図 表

表4. 1 臨界近接の規定ファジィ制御規則

起動系ペリオド 計数率(CPS)	NB	NS	ZO	PS	PB
	-200	-1000	$\infty$	1000	200
P $6 \times 10^4$	Z O 0.0	N S -0.2	N S -0.2	N M -0.5	N M -0.5
Z O $5 \times 10^4$	Z O 0.0	P S 0.2	Z O 0.0	N S -0.2	N S -0.2
N S $4 \times 10^4$	Z O 0.0	P B 2 2.0	P S 0.2	Z O 0.0	N S -0.2
N M $5 \times 10^3$	Z O 0.0	Z O 0.0	P B 2 2.0	P B 2 2.0	Z O 0.0
N B 3 0	Z O 0.0	Z O 0.0	P B 3 5.0	P B 2 2.0	Z O 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。

## 〔起動系ペリオド〕

- N B ( Negative Big ) ..... ペリオドが短い  
 N S ( Negative Small ) ..... ペリオドが少し短い  
 Z O ( ZERO ) ..... ペリオドが安定している  
 P S ( Positive Small ) ..... ペリオドが少し長い  
 P B ( Positive Big ) ..... ペリオドが長い

## 〔起動系計数率〕

- N B ( Negative Big ) ..... 起動系計数率が低い  
 N M ( Negative Medium ) ..... 起動系計数率がやや低い  
 N S ( Negative Small ) ..... 起動系計数率が少し低い  
 Z O ( 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〕

- N M ( Negative Medium ) ..... 制御棒を多めに挿入する  
 N S ( Negative Small ) ..... 制御棒を少し挿入する  
 Z O ( ZERO ) ..... 制御棒を操作しない  
 P S ( Positive Small ) ..... 制御棒を少し引抜く  
 P B 2 ( Positive Big 2 ) ..... 制御棒をやや多めに引き抜く  
 P B 3 ( Positive Big 3 ) ..... 制御棒を多めに引き抜く

表4. 2 核加熱の規定ファジィ制御規則

中間系ペリオド 出力 (%) \ 中間系ペリオド (SEC)	NB	NS	ZO	PS	PB
	-200	-1000	$\infty$	1000	200
P 1.2	ZO 0.0	NS -0.2	NS -0.2	NM -0.5	NM -0.5
ZO 1.0	ZO 0.0	PS 0.2	ZO 0.0	NS -0.2	NS -0.2
NS 0.8	ZO 0.0	PB 2 2.0	PS 0.2	ZO 0.0	NS -0.2
NB 0.1	ZO 0.0	ZO 0.0	PB 2 2.0	PB 2 2.0	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、制御棒操作量は[mm]単位で表す。

#### [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 ) ..... 制御棒を少し引抜く
- PB 2 ( Positive Big 2 ) ..... 制御棒をやや多めに引き抜く

表4. 3 系統昇温の規定ファジィ制御規則

原子炉入口温度 原子炉 入口温度 変化率	NB	NS	ZO	PS	PM	PB
	-20	-10	0.0	14	20	30
PB 377	ZO 0.0	NS -0.2	NM -0.5	NM -0.5	NB -1.0	NB -1.0
PS 373	ZO 0.0	ZO 0.0	NS -0.2	NM -0.5	NM -0.5	NB -1.0
ZO 370	PM 0.5	PS 0.2	ZO 0.0	ZO 0.0	NS -0.2	NM 0.5
NS 367	PB 1.0	PM 0.5	PM 0.5	PS 0.2	ZO 0.0	ZO 0.0
NB 363	ZO 0.0	ZO 0.0	PB 1.0	PB 1.0	PM 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、原子炉入口ナトリウム温度 [°C]、原子炉入口温度変化率は [°C/h r]、  
制御棒操作量は [mm] 単位で表す。

## 〔原子炉入口ナトリウム温度変化率〕

- NB ( Negative Big ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度下降率が大きい
- NS ( Negative Small ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度下降率が小さい
- ZO ( ZERO ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度が安定している
- PS ( Positive Small ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度上昇率が小さい
- PM ( Positive Medium ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度上昇率がやや大きい
- PB ( Positive Big ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度上昇率が大きい

## 〔原子炉入口ナトリウム温度〕

- NB ( Negative Big ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度が低い
- NS ( Negative Small ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度少し低い
- ZO ( ZERO ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度ちょうどよい
- P ( Positive ) ..... 原子炉入口ナトリウム温度大きい

## 〔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 ) ..... 制御棒を少し引抜く
- PB2 ( Positive Big 2 ) ..... 制御棒をやや多めに引き抜く

表4. 4 出力上昇の規定ファジィ制御規則

原子炉出口温度 変化率 原子炉 出口温度	NB -20	NS -10	ZO 0.0	PS 14	PM 20	PB 30
ZO 500.0	PS 0.5	PS 0.2	ZO 0.0	ZO 0.0	NS -0.2	NM -0.5
NS 499.5	PM 1.0	ZO 0.2	ZO 0.2	NS 0.2	ZO 0.0	ZO 0.0
NB 499.0	PB 1.0	PB 1.0	PB 1.0	PB 1.0	PM 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、原子炉出口ナトリウム温度 [°C]、原子炉出口ナトリウム温度変化率は [°C / hr]、制御棒操作量は [mm] 単位で表す。

## 〔原子炉出口ナトリウム温度変化率〕

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

## 〔原子炉出口ナトリウム温度〕

- NB ( Negative Big ) ..... 原子炉出口ナトリウム温度が低い
- NS ( Negative Small ) ..... 原子炉出口ナトリウム温度が少し低い
- ZO ( ZERO ) ..... 原子炉出口ナトリウム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 ) ..... 制御棒を少し引抜く
- PB 2 ( Positive Big 2 ) ..... 制御棒をやや多めに引き抜く

表4. 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	N B -35.0	N S -17.5	Z O 0.0	P S 24.5	P M 35.0	P B 52.5
P B 500	N B -1.0	N B -1.0	N B -1.0	N B -1.0	N M -0.5	Z O 0.0
P M 498	N M -0.5	N S -0.2	N S -0.2	N S -0.2	Z O 0.0	Z O 0.0
Z O 497	N S -0.2	N S -0.2	Z O 0.0	Z O 0.0	P S 0.2	P M 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、原子炉出口ナトリウム温度 [°C]、原子炉出口ナトリウム温度変化率は [°C / hr]、制御棒操作量は [mm] 単位で表す。

## 〔原子炉出口ナトリウム温度変化率〕

- N B ( Negative Big ) 原子炉出口ナトリウム温度変化率が大きい
- N S ( Negative Small ) 原子炉出口ナトリウム温度上昇率が小さい
- Z O ( ZERO ) 原子炉出口ナトリウム温度が安定している
- P S ( Positive Small ) 原子炉出口ナトリウム温度下降率が小さい
- P M ( Positive Medium ) 原子炉出口ナトリウム温度下降率がやや大きい
- P B ( Positive Big ) 原子炉出口ナトリウム温度下降率が大きい

## 〔原子炉出口ナトリウム温度〕

- P B ( Positive Big ) 原子炉出口ナトリウム温度が低い
- P M ( Positive Medium ) 原子炉出口ナトリウム温度が少し低い
- Z O ( ZERO ) 原子炉出口ナトリウム温度がちょうどよい

## 〔制御棒操作量〕

- N B ( Negative Big ) 制御棒を多く挿入する
- N M ( Negative Medium ) 制御棒を少し多めに挿入する
- N S ( Negative Small ) 制御棒を少し挿入する
- Z O ( ZERO ) 制御棒を操作しない
- P S ( Positive Small ) 制御棒を少し引抜く
- P M ( Positive Medium ) 制御棒をやや多めに引き抜く

表4. 6 制約ファジィ制御規則

信 号 名 称		設 定 値
原子炉入口N a 温度 (A ループ)	上限	380 [°C]
原子炉入口N a 温度 (A ループ)	下限	372 [°C]
原子炉入口N a 温度 (B ループ)	上限	380 [°C]
原子炉入口N a 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 [sec]
起動系・中間系ペリオド	下限	50 [sec]
1次系N a 流量偏差 (A ループ)	上限	10 [%]
1次系N a 流量偏差 (A ループ)	下限	5 [%]
1次系N a 流量偏差 (B ループ)	上限	10 [%]
1次系N a 流量偏差 (B ループ)	下限	5 [%]
2次系N a 流量偏差 (A ループ)	上限	10 [%]
2次系N a 流量偏差 (A ループ)	下限	5 [%]
2次系N a 流量偏差 (B ループ)	上限	10 [%]
2次系N a 流量偏差 (B ループ)	下限	5 [%]
原子炉入口N a 温度 A、B ループ間温度差	上限	10 [°C]
原子炉入口N a 温度 A、B ループ間温度差	下限	8 [°C]
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N a 温度 - 設定値間偏差	上限	5 [°C]
主冷却器出口N a 温度 - 設定値間偏差	下限	1 [°C]

表 4. 7 機器運転操作ガイダンス (1 / 2)

No	機器運転操作ガイダンス
1	運転モード SW を停止から起動に切替えました
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 350 mm まで引き抜いて下さい
10	制御棒 1 が 350 mm 位置になりました
11	制御棒 2 を 350 mm まで引き抜いて下さい
12	制御棒 2 が 350 mm 位置になりました
13	制御棒 3 を 350 mm まで引き抜いて下さい
14	制御棒 3 が 350 mm 位置になりました
15	制御棒 4 を 350 mm まで引き抜いて下さい
16	制御棒 4 が 350 mm 位置になりました
17	制御棒 5 を 350 mm まで引き抜いて下さい
18	制御棒 5 が 350 mm 位置になりました
19	制御棒 6 を 350 mm まで引き抜いて下さい
20	制御棒 6 が 350 mm 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替えて下さい
33	運転モード SW を低出力から高出力に切替えました
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替えて下さい
35	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ました
36	回転プラグブースターファンを起動して下さい
37	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
38	出力系レンジを 12. 5 に切り換えました
39	出力系レンジを 35 に切り換えました
40	原子炉出力 12 MW に到達しました
41	出力系レンジを 125 に切り換えました
42	原子炉出力 15 MW に到達しました
43	中間系検出器を下限から上限に引き抜いて下さい
44	中間系検出器が上限になりました
45	原子炉出力 20 MW に到達しました
46	原子炉出力 25 MW に到達しました
47	2 次補助系を待機状態にして下さい
48	原子炉出力 30 MW に到達しました
49	原子炉出力 35 MW に到達しました
50	原子炉出力 40 MW に到達しました

表4. 7 機器運転操作ガイダンス（2／2）

No	機器運転操作ガイダンス
5 1	原子炉出力 4 5 MWに到達しました
5 2	原子炉出力 5 0 MWに到達しました
5 3	原子炉出力 5 5 MWに到達しました
5 4	原子炉出力 6 0 MWに到達しました
5 5	原子炉出力 6 5 MWに到達しました
5 6	原子炉出力 7 0 MWに到達しました
5 7	原子炉出力 7 5 MWに到達しました
5 8	原子炉出力 8 0 MWに到達しました
5 9	原子炉出力 8 5 MWに到達しました
6 0	原子炉出力 9 0 MWに到達しました
6 1	原子炉出力 9 5 MWに到達しました
6 2	原子炉出力 1 0 0 MWに到達しました
6 3	原子炉出口Na温度が 5 0 0 ℃に到達しました
6 4	核出力が 1 0 0 %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. 1 2 5 に切替えました
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替えて下さい
7 2	運転モードSWを低出力から起動に切替えて下さい
7 3	運転モードSWを起動から停止に切替えて下さい

## 〔自然通風操作時に表示〕

No	機器運転操作ガイダンス
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 1 0 0 % (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 3 6 7 ℃、1B、2Bについては 3 6 9 ℃に設定する
4	原子炉入口Na温度が 3 7 0 ℃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	機器運転操作ガイダンス
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

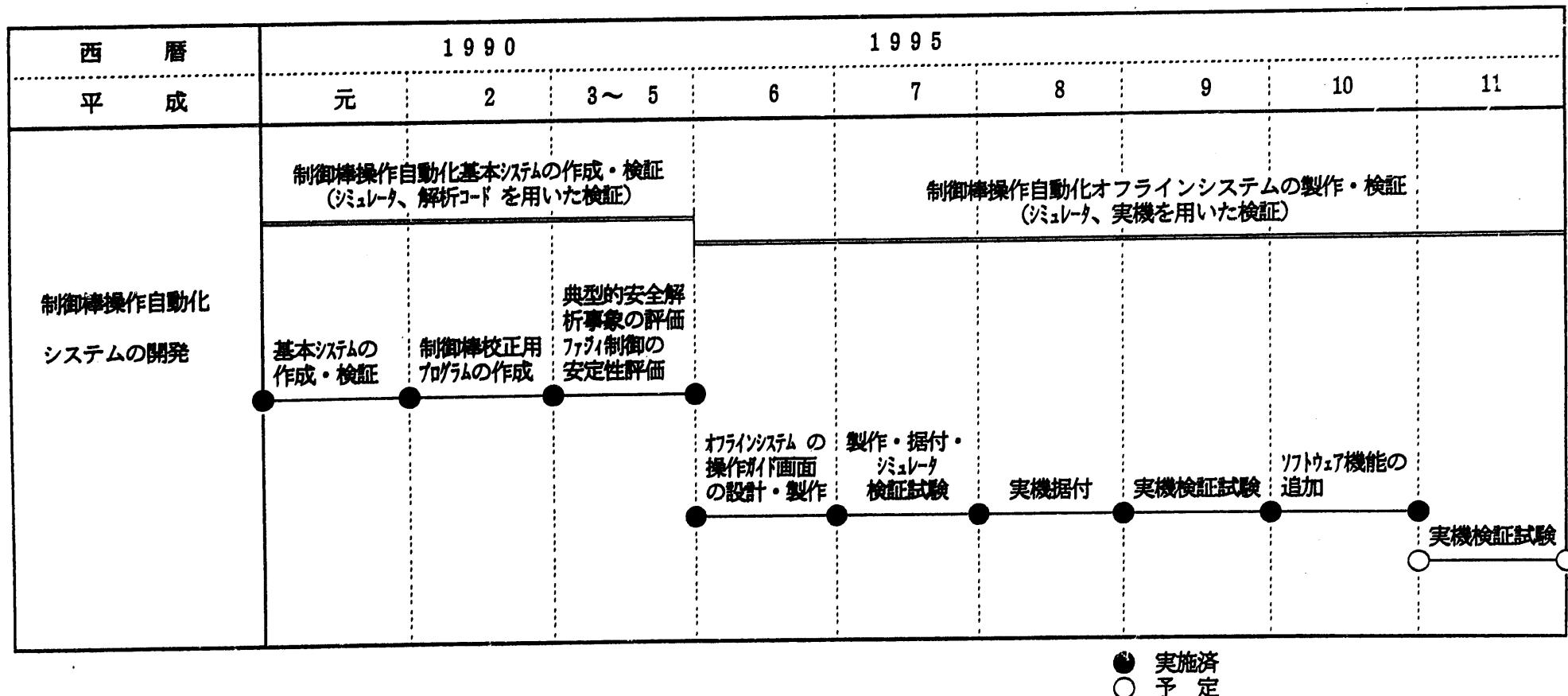


図2. 1 制御棒操作自動化システムの開発計画

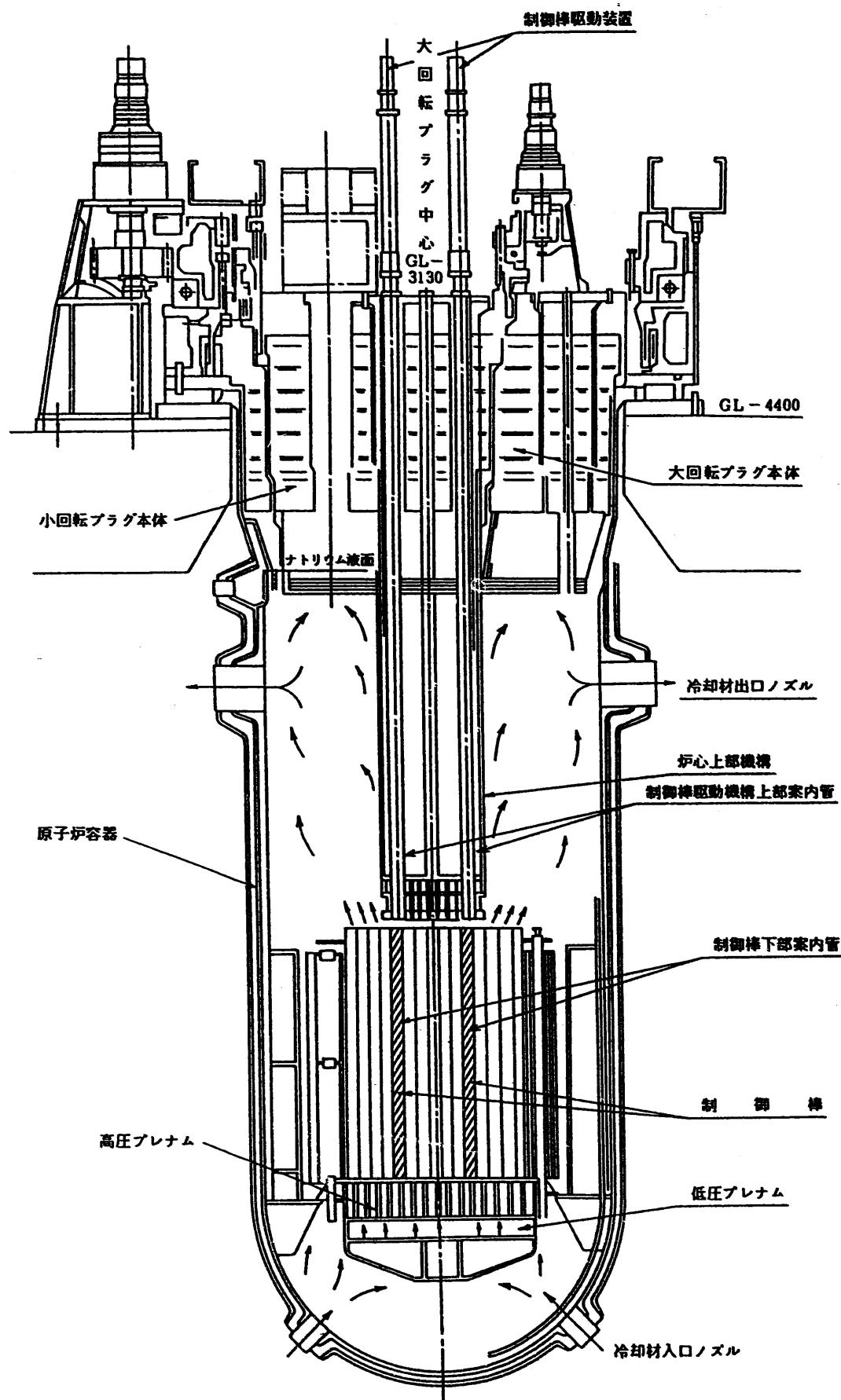


図 3.1 「常陽」の原子炉断面

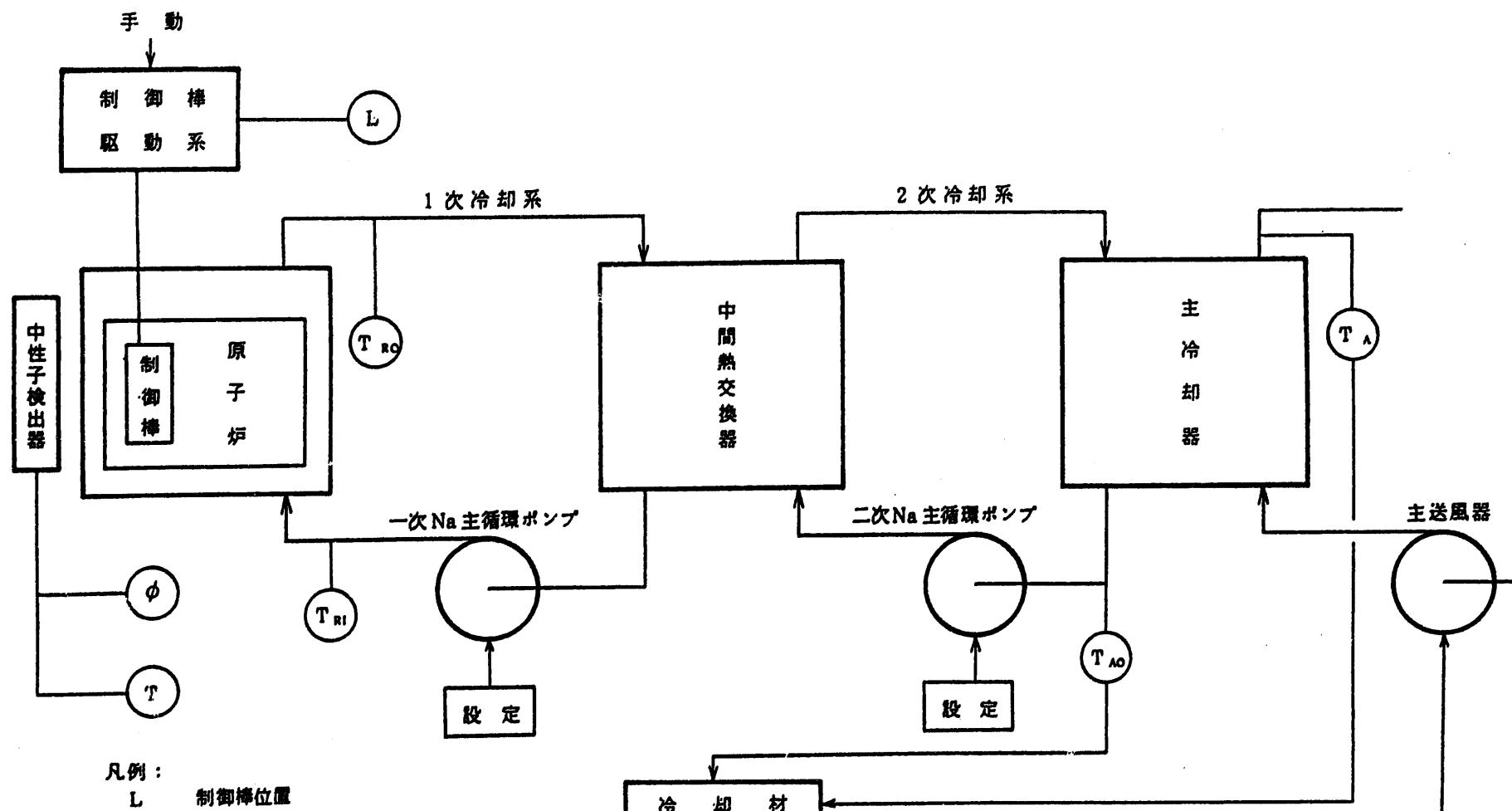


図 3.2 「常陽」の原子炉制御系の概念

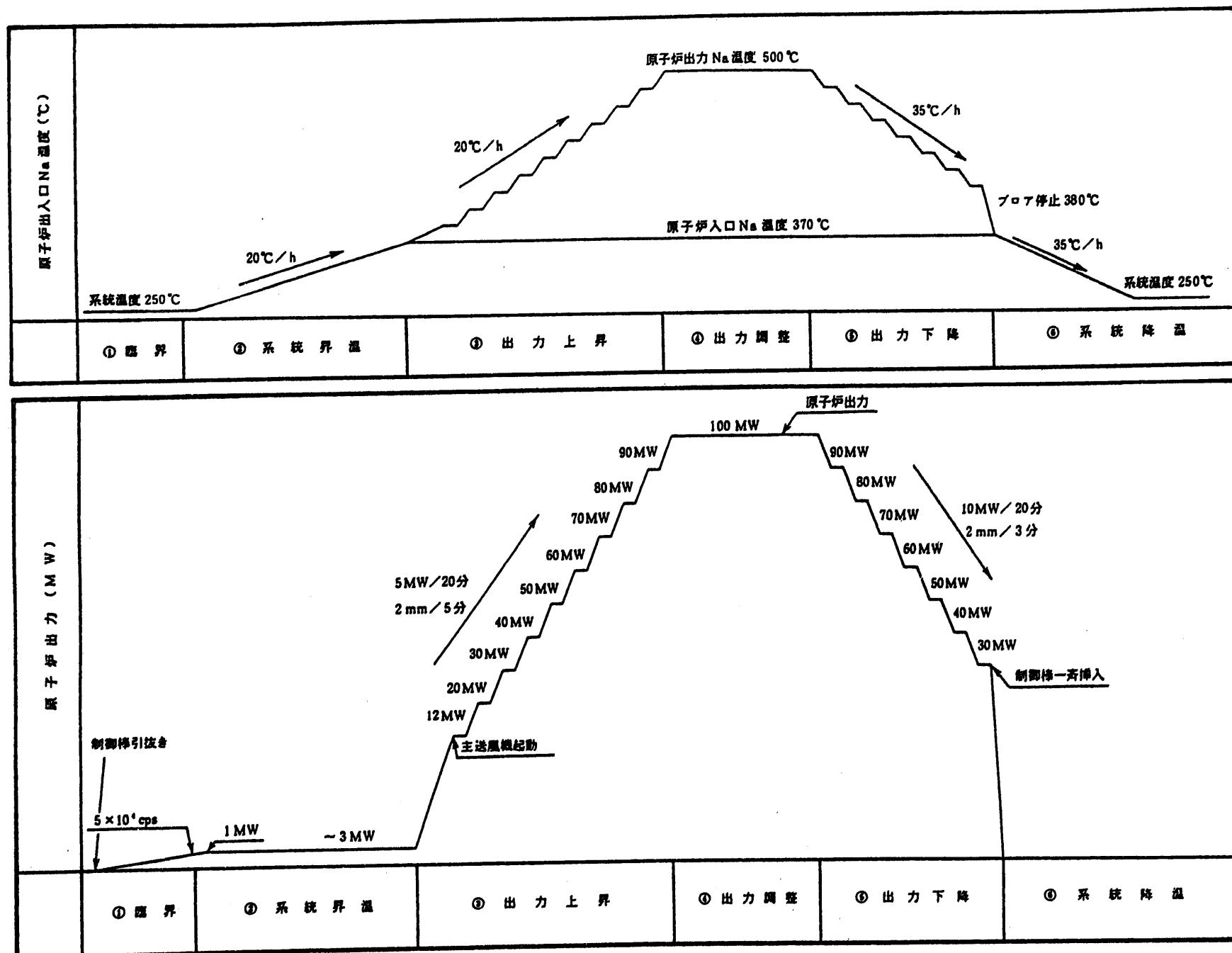


図 3.3 「常陽」の原子炉起動停止曲線

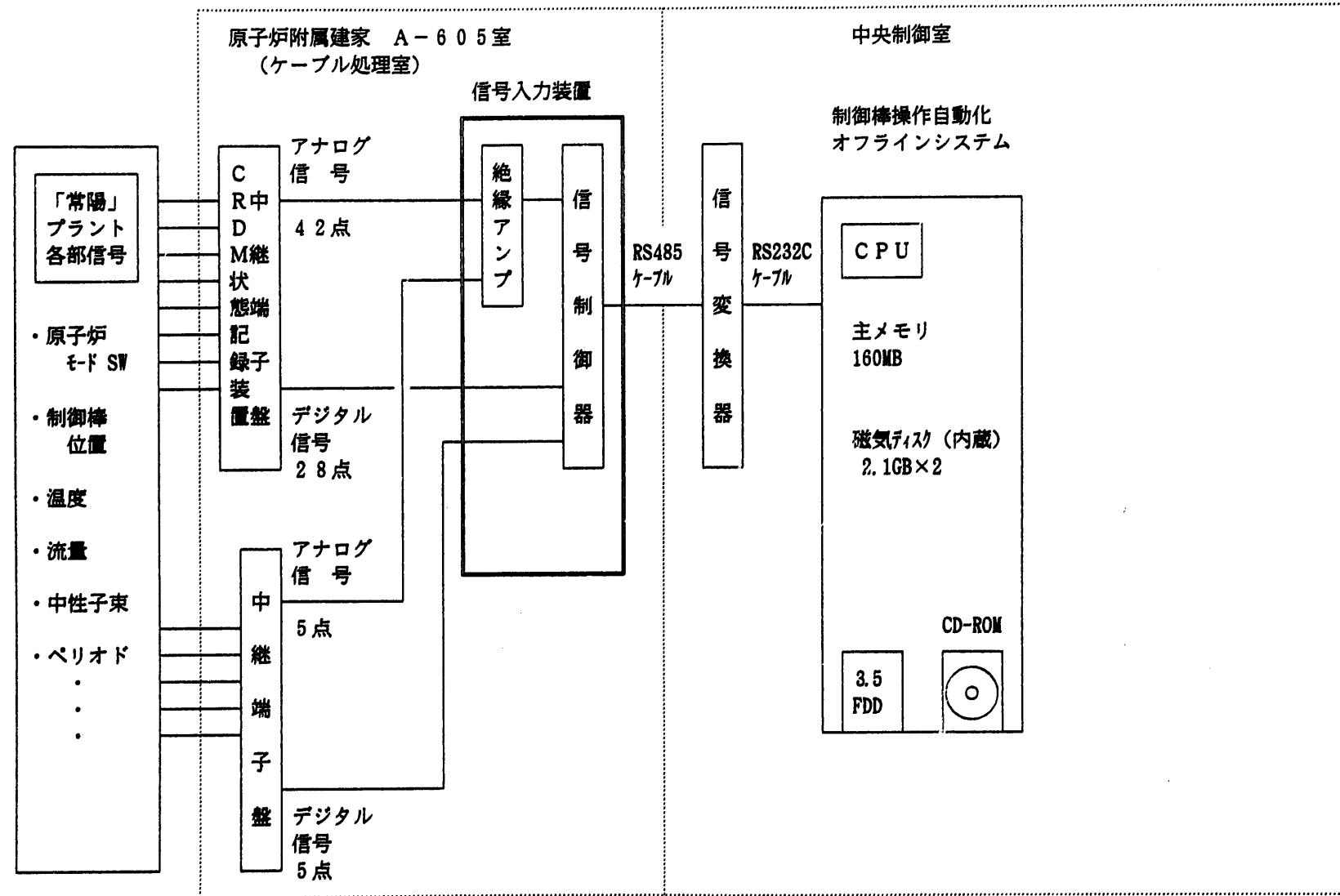


図4. 1 オフラインシステムの構成

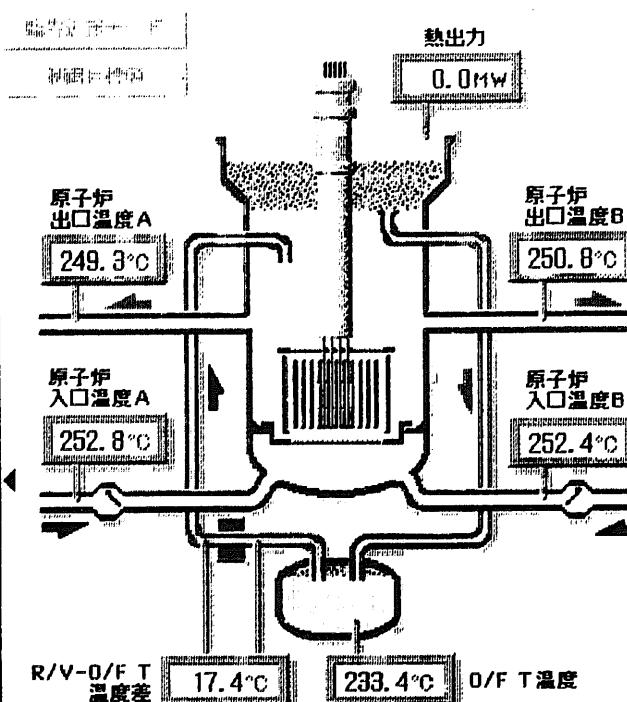
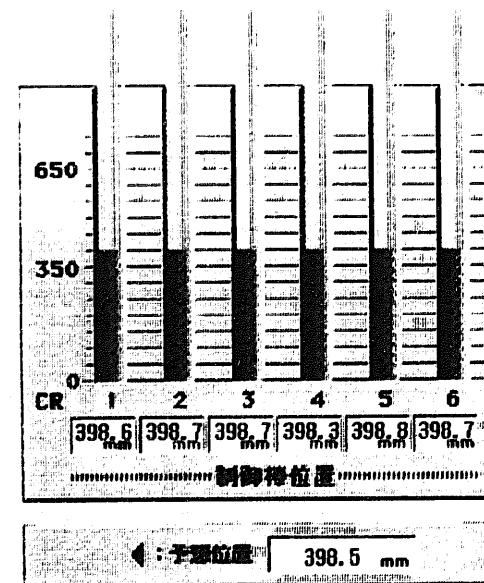


## 臨界近接操作画面

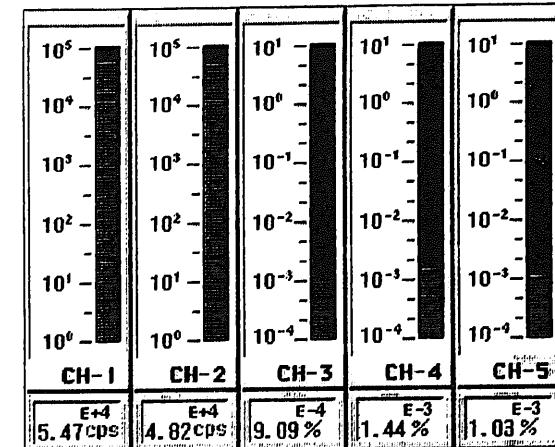


10:37

1997年12月15日



### 中性子束レベル



### ペリオド

CH-1	-1936 SEC	-25	-100	$\infty$	100	25
CH-2	-6667 SEC	-25	-100	$\infty$	100	25

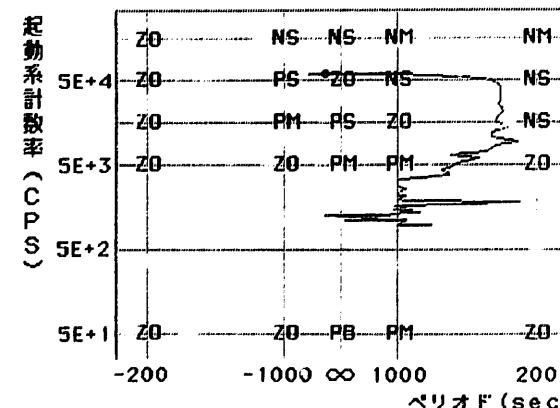
操作ガイド

ファジィ周期 30 sec

反応度計を起動して下さい

起動系検出器を下限から上限に引き抜いて下さい

原子炉臨界に到達しました



### 制御棒操作量制約条件

制約グレード : 0.00

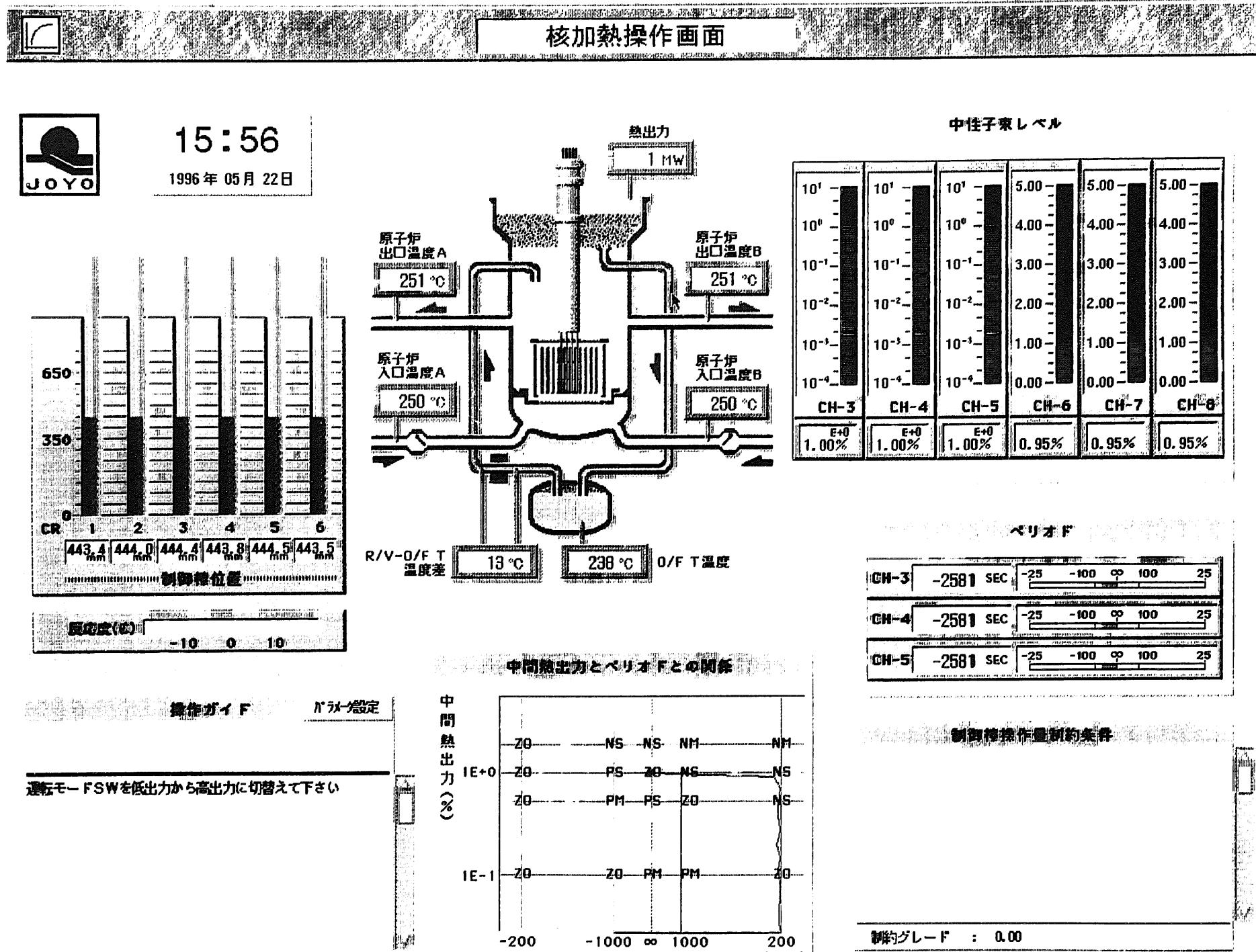


図4.3 核加熱操作画面

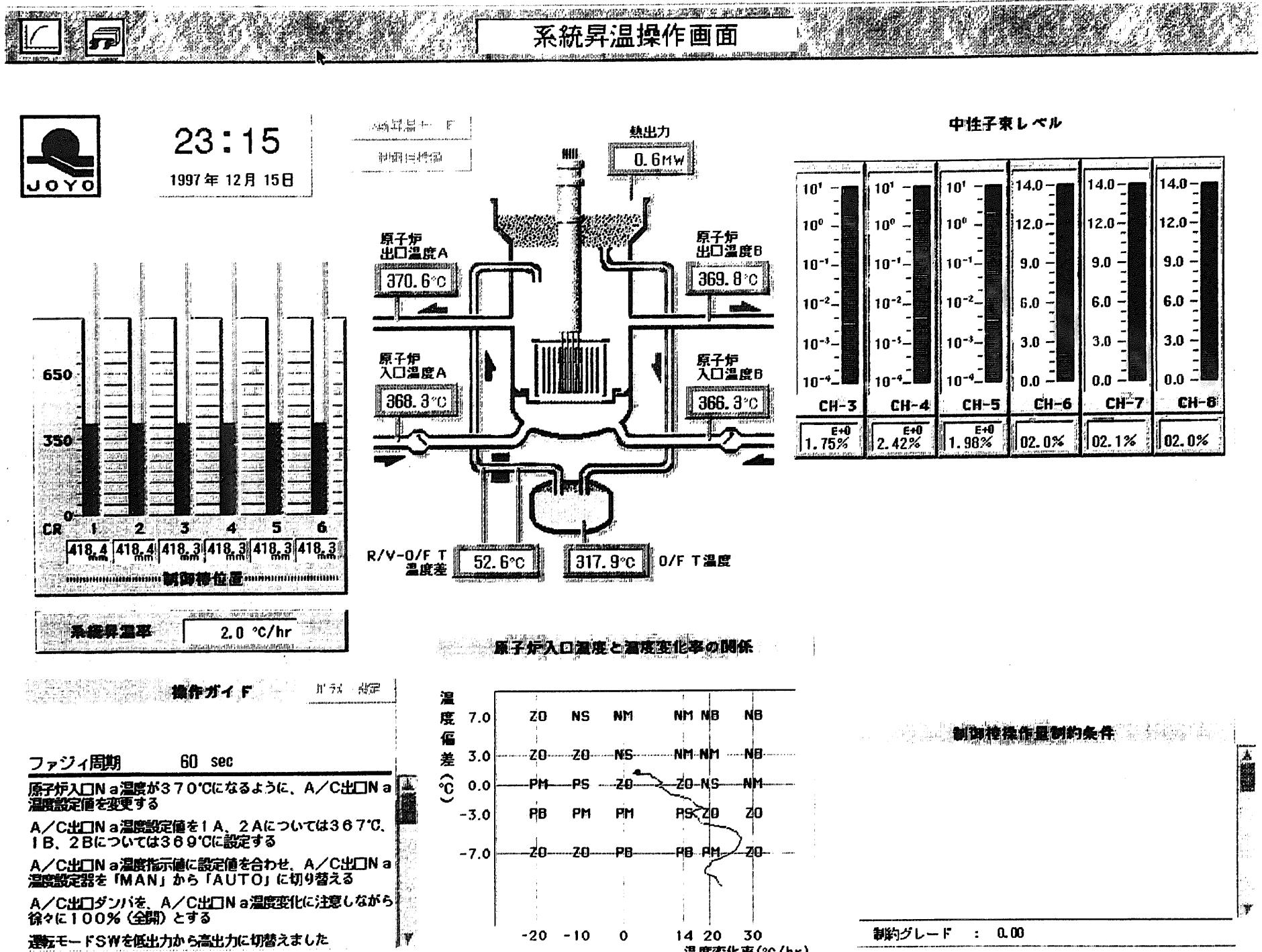


図4.4 系統昇温操作画面

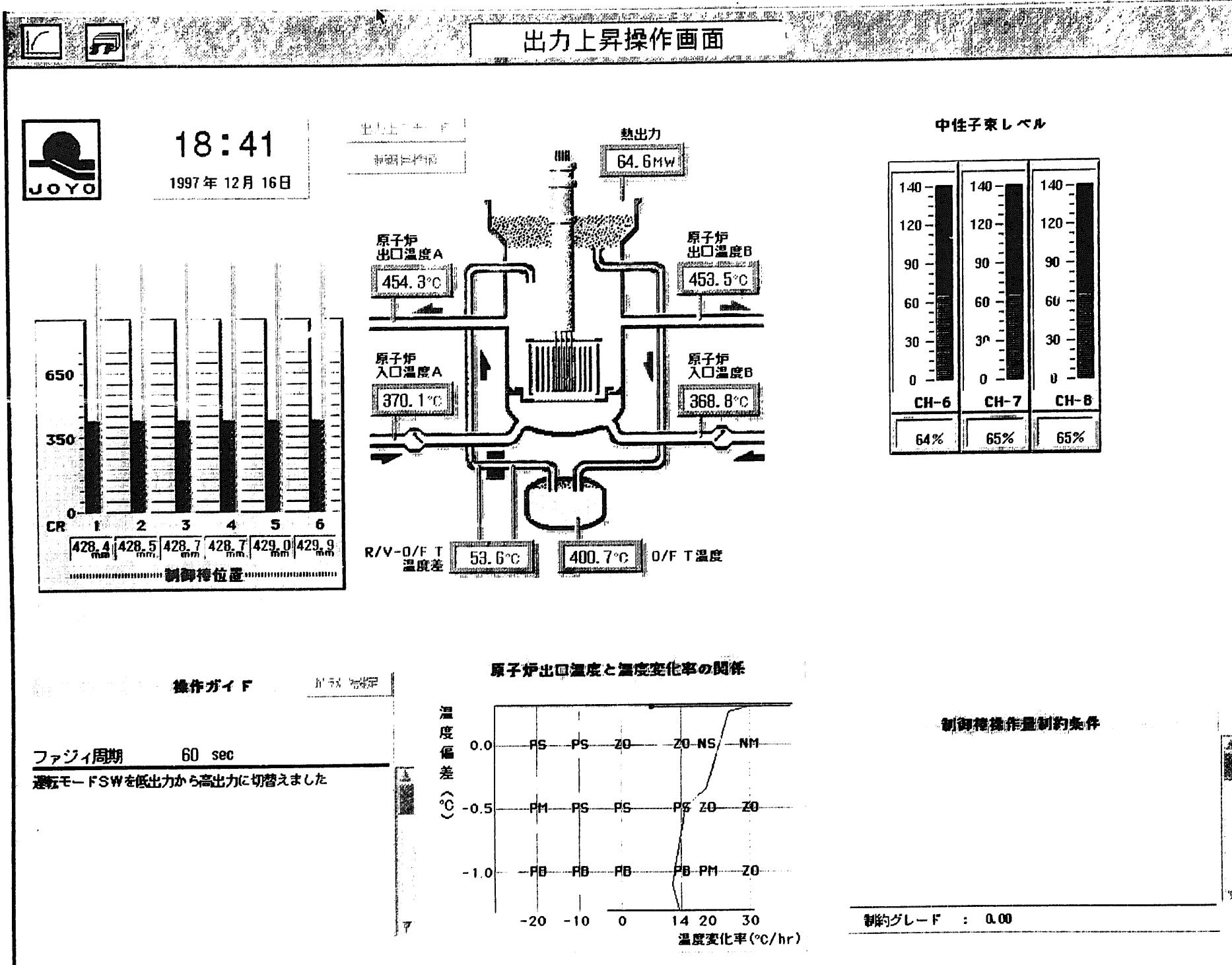


図4.5 出力上昇操作画面

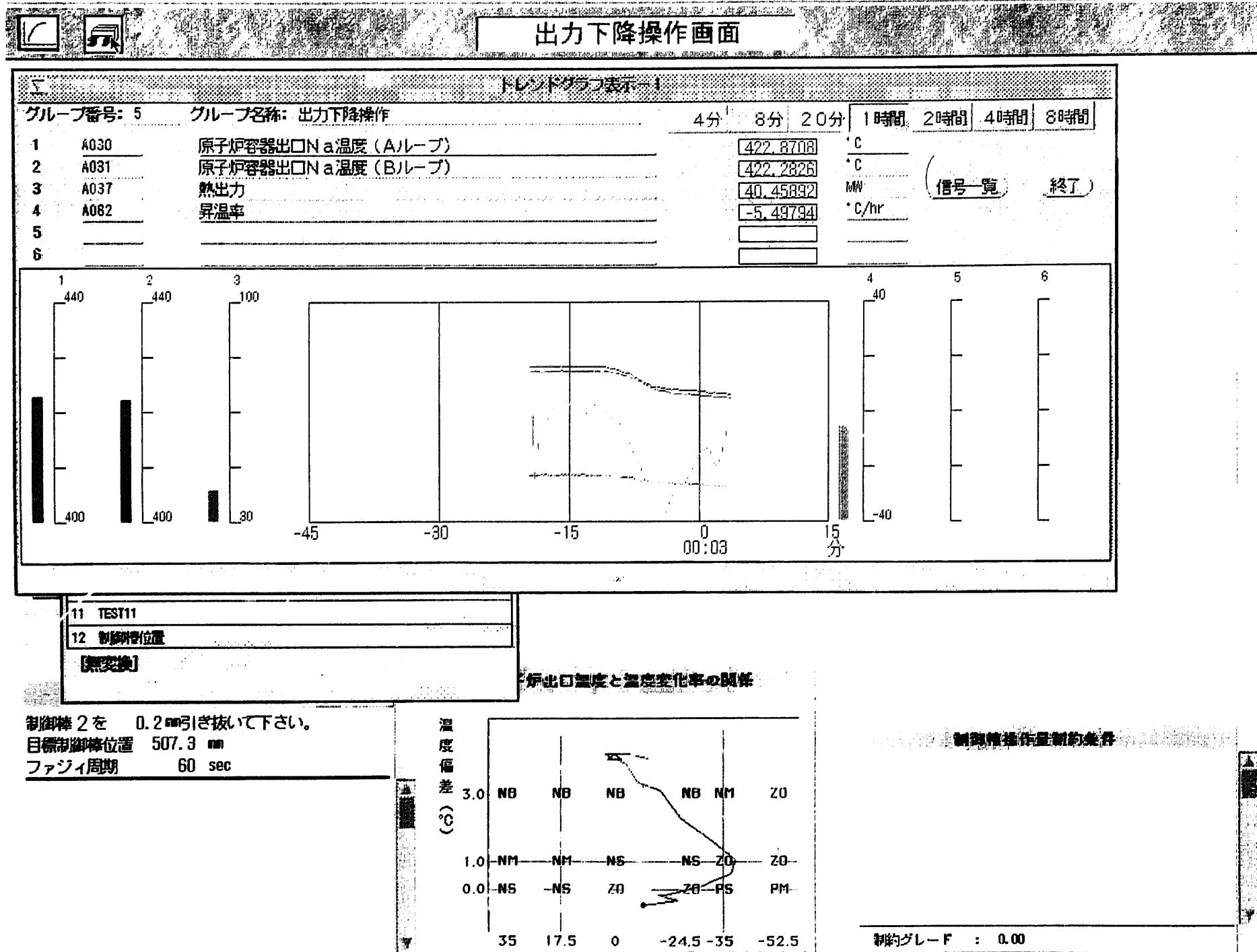


図4.6 出力下降操作画面

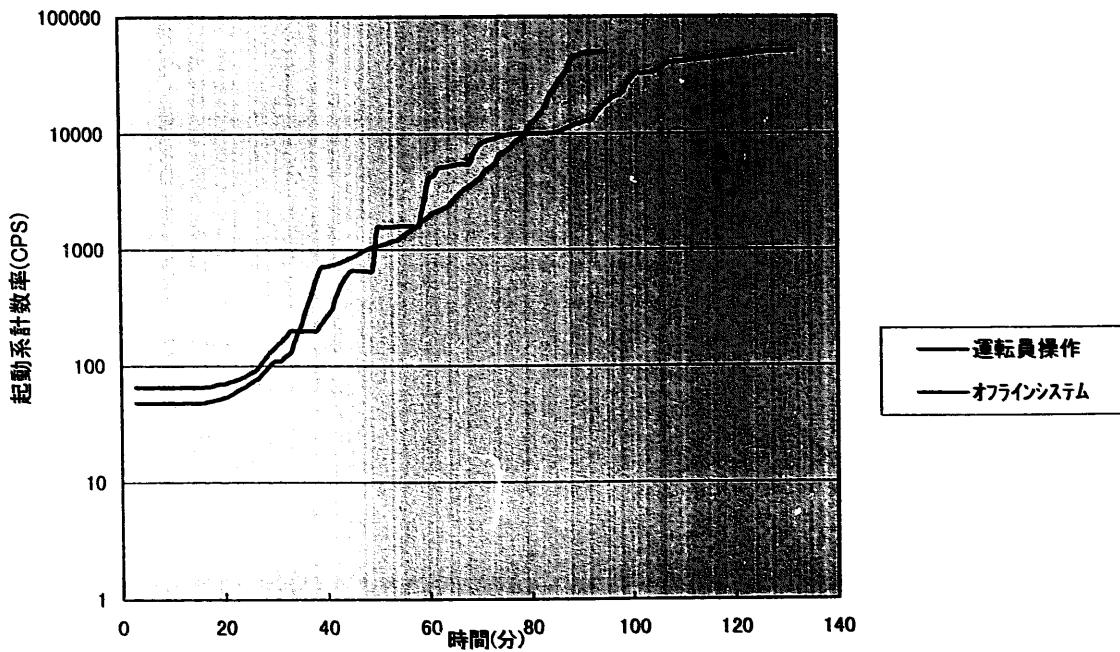


図5.1 臨界近接におけるオフラインシステムと運転員操作の比較

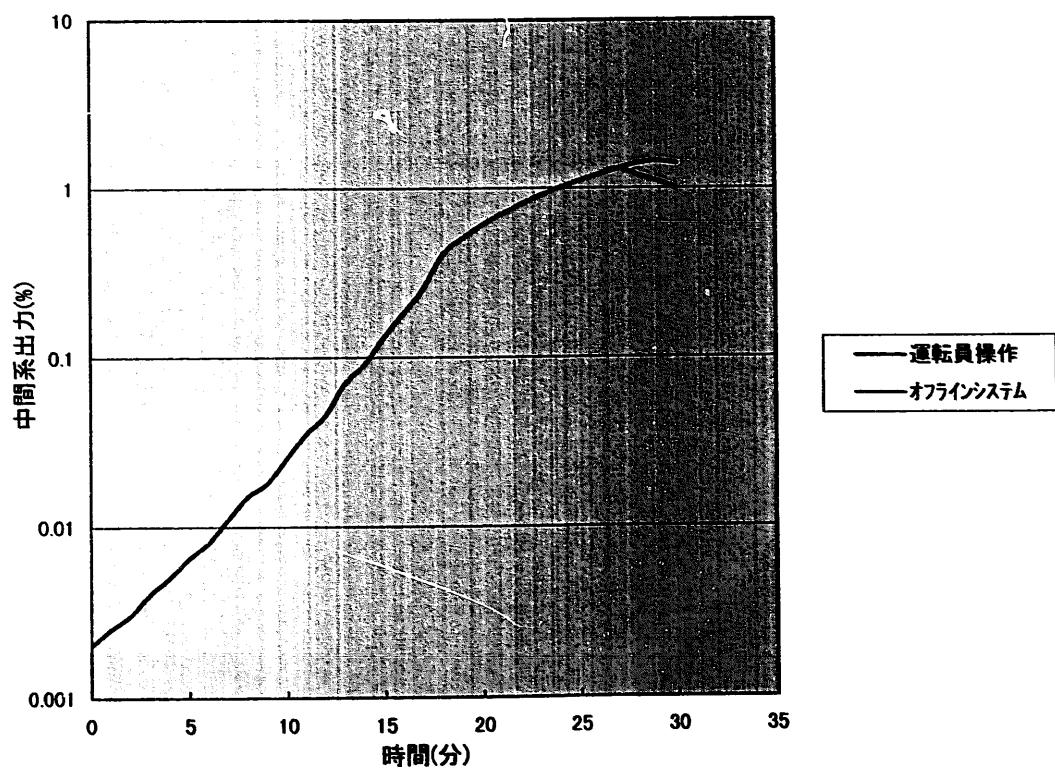


図5.2 核加熱におけるオフラインシステムと運転員操作の比較

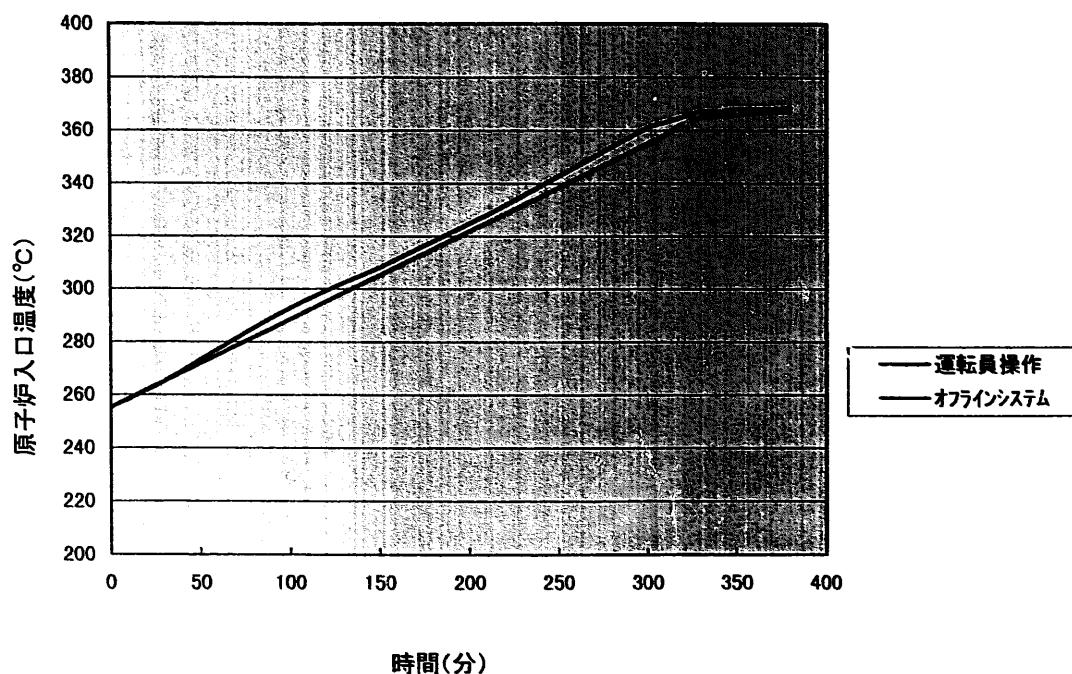


図5.3 系統昇温におけるオフラインシステムと運転員操作の比較

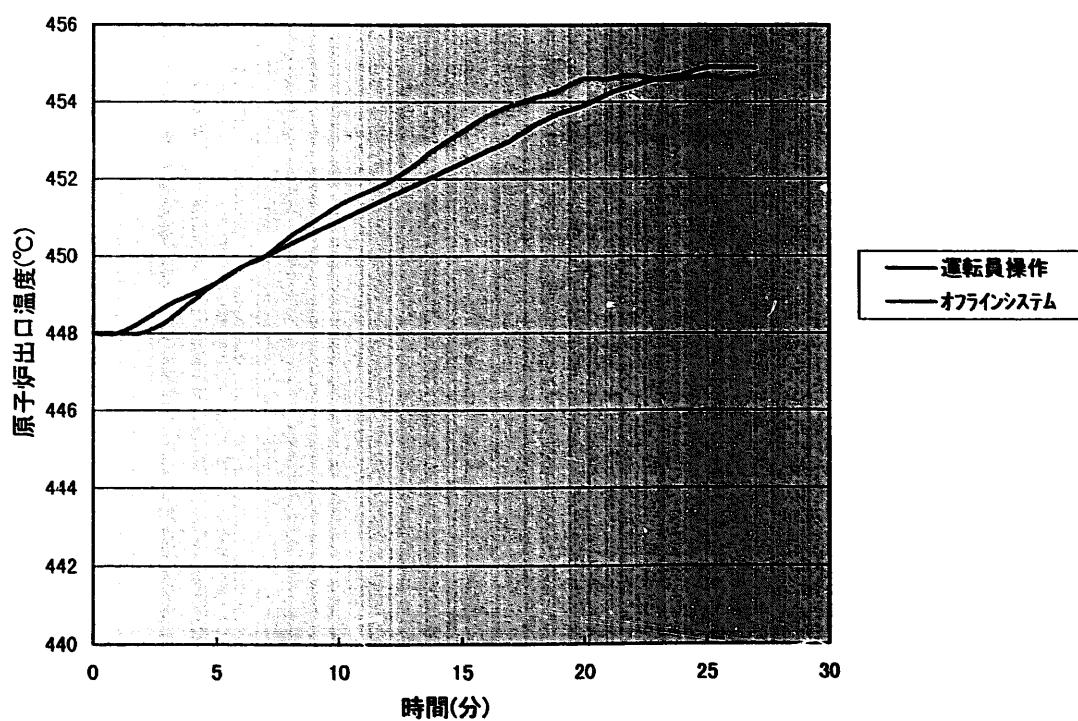


図5.4 出力上昇におけるオフラインシステムと運転員操作の比較

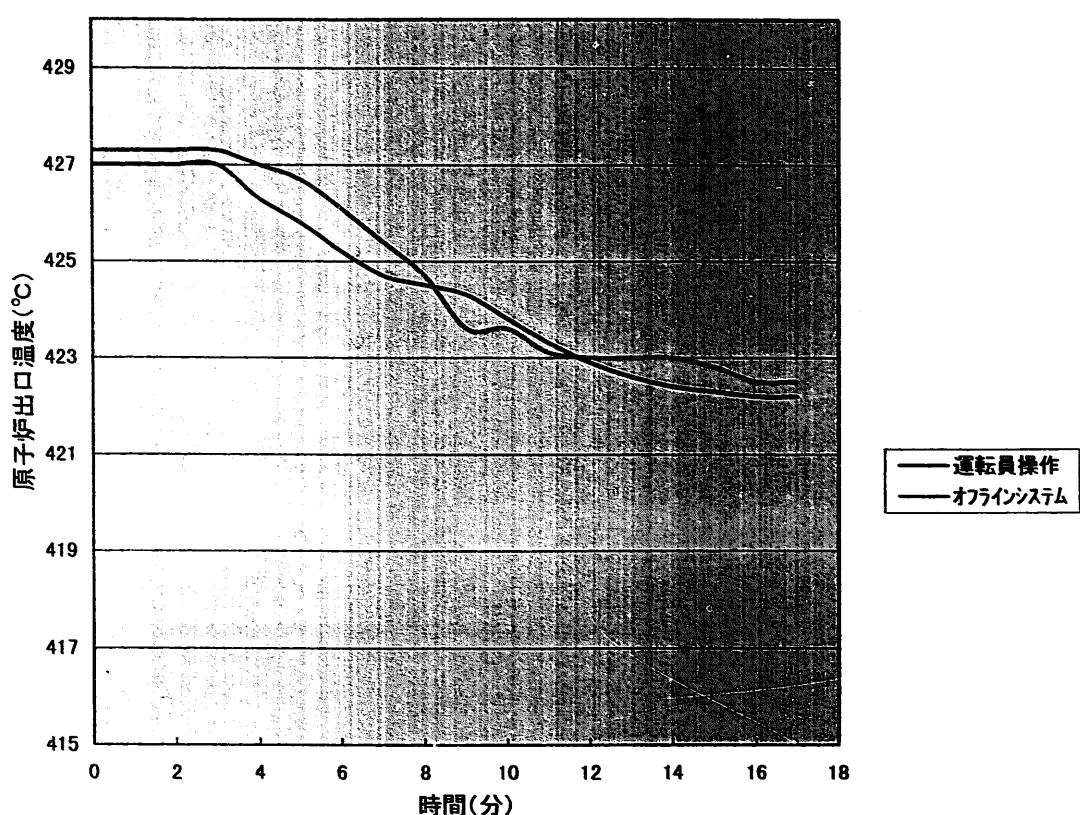


図5.5 出力下降におけるオフラインシステムと運転員操作の比較