



JP0150306

JAERI-Tech  
2000-091



HTTR出力上昇試験での  
臨界制御棒位置と温度係数  
— 中間報告 —

2001年3月

藤本 望・野尻 直喜・高田 英治・斎藤 賢司  
小林 正一・澤畑 洋明・石仙 繁

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

# HTTR 出力上昇試験での臨界制御棒位置と温度係数

## —中間報告—

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

藤本 望・野尻 直喜・高田 英治・斎藤 賢司

小林 正一・澤畑 洋明※・石仙 繁

(2000 年 12 月 22 日受理)

現在、HTTR では 100%出力の達成を目指して出力上昇試験を進めている。これまで 50% 出力を達成し、各種試験を行ってきた。HTTR は原子炉出口冷却材温度が 950°C と高いため、出力を上昇する過程で炉心内の温度変化が大きい。このような炉心の解析精度の向上を目的として、50%出力までの出力上昇試験の各過程での臨界制御棒位置及び温度係数について測定を行い、解析結果との比較を行った。解析は、炉内熱流動解析コードと拡散計算によって炉心内温度分布を評価し、モンテカルロ計算及び拡散計算で行った。その結果、臨界制御棒位置は、モンテカルロ計算で 50mm 以下の誤差で一致した。この結果から、100% 出力での臨界制御棒位置は 2900mm 程度になると予想される。また、温度係数は拡散計算により測定値とよく一致した。

今後、100%出力までの測定を行い、解析結果と比較することにより解析精度の向上を目指す。

Control Rod Position and Temperature Coefficients  
in HTTR Power-rise Tests  
-Interim Report-

Nozomu FUJIMOTO, Naoki NOJIRI, Eiji TAKADA, Kenji SAITO,  
Shoichi KOBAYASHI, Hiroaki SAWAHATA\* and Sigeru KOKUSEN

Department of HTTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 22, 2000)

Power-rise tests of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) have been carried out aiming to achieve 100% power. So far, 50% of power operation and many tests have been carried out. In the HTTR, temperature change in core is so large to achieve the outlet coolant temperature of 950 °C. To improve the calculation accuracy of the HTTR reactor physics characteristics, control rod positions at criticality and temperature coefficients were measured at each step to achieve 50% power level. The calculations were carried out using Monte Carlo code and diffusion theory with temperature distributions in the core obtained by reciprocal calculation of thermo-hydraulic code and diffusion theory. Control rod positions and temperature coefficients were calculated by diffusion theory and Monte Carlo method. The test results were compared to calculation results. The control rod positions at criticality showed good agreement with calculation results by Monte Carlo method with error of 50mm. The control position at criticality at 100% was predicted around 2900mm. Temperature coefficients showed good agreement with calculation results by diffusion theory.

The improvement of calculation will be carried out comparing the measured results up to 100% power level.

Key words : HTTR, Power-rise Tests, Control Rod Position, Temperature Coefficients, Diffusion Calculation, Monte Carlo Calculation.

---

\* on loan to Science and Technology Agency

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 試験内容と結果 .....	2
2.1 臨界制御棒位置の測定 .....	2
2.2 温度係数の測定 .....	2
2.2.1 零出力状態での等温温度係数 .....	2
2.2.2 7 %出力状態での温度係数 .....	3
2.2.3 30 %出力状態での温度係数 .....	4
3. 解析及び結果 .....	17
3.1 拡散計算による解析 .....	17
3.1.1 解析モデル .....	17
3.1.2 臨界制御棒位置の解析結果 .....	18
3.1.3 温度係数の解析結果 .....	19
3.2 モンテカルロ計算による解析 .....	20
3.2.1 解析モデル .....	20
3.2.2 臨界制御棒位置の解析結果 .....	21
3.2.3 温度係数の解析結果 .....	21
3.3 測定結果との比較 .....	22
3.3.1 臨界制御棒位置の比較 .....	22
3.3.2 温度係数の比較 .....	23
4. まとめ .....	36
謝辞 .....	36
参考文献 .....	36
付録 1 評価に用いる制御棒反応度値曲線について .....	38
付録 2 燃焼による物質量変化の影響について .....	41
付録 3 7 %出力時の温度係数評価における Sm の効果について .....	43
付録 4 炉心解析における反射体温度の効果について .....	45
付録 5 出力上昇試験時の解析における空気の効果 .....	47

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Results .....	2
2.1 Measurement of Control Rod Position at Criticality .....	2
2.2 Measurement of Temperature Coefficients .....	2
2.2.1 Temperature Coefficients at Zero Power .....	2
2.2.2 Temperature Coefficients at 7% Power .....	3
2.2.3 Temperature Coefficients at 30% Power .....	4
3. Calculation and Results .....	17
3.1 Calculation using Diffusion Theory .....	17
3.1.1 Calculation Model .....	17
3.1.2 Results of Control Rod Position at Criticality .....	18
3.1.3 Results of Temperature Coefficients .....	19
3.2 Calculation using Monte Carlo Method .....	20
3.2.1 Calculation Model .....	20
3.2.2 Results of Control Rod Position at Criticality .....	21
3.2.3 Results of Temperature Coefficients .....	21
3.3 Comparison between Experiments and Calculation Results .....	22
3.3.1 Comparison of Control Rod Position at Criticality .....	22
3.3.2 Comparison of Temperature Coefficients .....	23
4. Conclusion .....	36
Acknowledgments .....	36
Reference .....	36
Appendix 1 Control Rod Worth Curve for Evaluation .....	38
Appendix 2 Effects of Change in Materials at Burnup .....	41
Appendix 3 Effects of Sm on Evaluation of Temperature Coefficients at 7% Power .....	43
Appendix 4 Effects of Reflector Temperature for Core Calculation .....	45
Appendix 5 Effects of Air in Graphite at Evaluations for Power-rise Tests .....	47

## 1. はじめに

現在、高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR)は100%出力(30MW)の達成を目指して出力上昇試験を行っている。出力上昇試験では、炉出力を段階的に上昇させ、それぞれの出力で各種の試験を行い、性能を確認しながら試験を進めている。これまで50%出力運転を達成している。

HTTRの核特性については、臨界試験において室温(低温)状態での各種の試験が行われてきた<sup>1,2)</sup>。

HTTRは原子炉出口冷却材温度を950°Cまで上昇させるため、炉心内部の温度変化が大きいことが特徴の一つとして挙げられる。このように炉心内部の温度変化が大きな炉心で、出力運転時の評価を適切に行うためには、炉心内部の温度変化を考慮した評価を行うことが必要である。そこで、出力運転時の核特性として、臨界制御棒位置と温度係数について、測定結果と比較することにより出力運転時の核特性解析手法の妥当性とその精度を明らかにすることが求められている。

HTTRの核特性解析は、拡散計算によるHTTR核特性解析コードシステム<sup>3)</sup>と、モンテカルロコードMVP<sup>4)</sup>を用いて行っている。本報では、各出力における臨界制御棒位置と温度係数について、測定結果、解析結果及び測定結果と解析結果の比較について報告する。また、併せて今後予定されている100%出力での臨界制御棒位置の予測についても報告する。

## 2. 試験内容と結果

### 2. 1 臨界制御棒位置の測定

HTTR の出力上昇試験では、出力を段階的に上昇させ、それぞれの出力レベルで各種の試験を行うこととしている。各出力では、Xe が飽和した時点（出力到達後 2 日以上）の制御棒位置を臨界制御棒位置とした。制御棒は、R3 を全引き抜きとし、C、R1 及び R2 をそろえた状態（Fs パターンと称する）で臨界とする。測定は、常温・常圧での臨界確認時、原子炉出力約 7%(約 2.1MW)、30%(約 9MW)及び 50%(約 15MW)で行った。制御棒位置は全挿入した状態を 0mm とし、引き抜き距離で表している。測定結果を第 2.1.1 表に示す。

### 2. 2 温度係数の測定

試験では、零出力状態で、ガス循環機により炉心温度を上昇させた場合の等温温度係数と、出力運転状態での温度係数を測定した。それぞれの温度係数の測定法と結果について以下に示す。

#### 2. 2. 1 零出力状態での等温温度係数

##### (1) 試験の実施記録

測定は、まず 1999 年 9 月 16 日に常温、常圧での臨界確認を行った。その後ガス循環機及び加圧水循環ポンプによる炉心の加熱を開始した。9 月 29 日に炉心温度約 130°C に保持した状態での測定を行った。その後、制御棒位置を保持したまま炉心温度の上昇を再開し、炉心温度の上昇による原子炉出力の低下を測定した。9 月 29 日の 22 時前に C 制御棒のみを挿入してこの日の試験を終了した。ここで、炉心温度は、圧力容器の上部プレナムへの入口部の冷却材温度と高温プレナムブロック内の冷却材温度の平均値とした。第 2.2.1 図に圧力容器内での温度測定部の概念図を示す。

9 月 30 日には、炉心温度約 150°C での測定を行った。各状態での制御棒位置、各部の温度の測定結果を第 2.2.1 表に示す。ここで、22.7°C の状態は、常圧であるのでスタンダードパイプクロージャーは加圧状態より約 14mm 下がった状態である。制御棒位置は、加圧状態で本来の制御棒位置を示すよう調整されているので、22.7°C の臨界制御棒位置は表示値の 1765mm より 14mm 低い 1751mm として評価することとした。

##### (2) 評価結果

等温温度係数の評価に用いる制御棒の反応度値は、制御棒 1 対毎の測定結果と修正因子から評価した制御棒反応度値曲線を用いた。なお、ここで用いた制御棒反応度値曲線は、制御棒反応度値測定時の臨界制御棒位置である 1866mm から全引き抜き位置である 4060mm の間について、測定結果と修正因子を用いて評価したものである。そのため、1866mm より低い位置については外挿により評価した。評価に用いた制御棒反応度値曲

線について、付録 1 に示す。

等温温度係数は、以下の式によって評価した。

$$\alpha_e = \frac{\rho_1 - \rho_2}{T_2 - T_1}$$

ここで、

$T_1$ ：基準となる炉心平均温度[°C]

$T_2$ ：昇温した状態の炉心平均温度[°C]

$\alpha_e$ ：温度  $\frac{T_1 + T_2}{2}$  [°C]での等温温度係数 [Δk/k/°C]

$\rho_1$ ：温度  $T_1$  での臨界制御棒位置における制御棒反応度値 [Δk/k]

$\rho_2$ ：温度  $T_2$  での臨界制御棒位置における制御棒反応度値 [Δk/k]

等温温度係数の評価結果を第 2.2.2 表に示す。

## 2. 2. 2 7%出力状態での温度係数

### (1) 運転履歴

出力上昇試験(1)及び(2)での出力履歴を第 2.2.2 図に示す。7%出力運転は、2000 年 5 月 2 日から 10%出力 (3MW) として開始し、同年 5 月 8 日に終了した。この時点で出力領域系 (PRM) の校正が終了していなかったため、実質の出力は約 2MW (7%出力) であった。温度係数には Xe の与える影響が大きいため、Xe が飽和した状態である、7%出力到達後 3 日後の 5 月 5 日から 8 日までの間のデータを基に温度係数を評価することとした。

第 2.2.3 図及び第 2.2.4 図に、5 月 5 日から 5 月 8 日までの臨界制御棒位置の平均（平均 CR 位置）と PRM 出力の変化及び平均 CR 位置と炉心平均温度の変化を示す。ここで、平均 CR 位置は C、R1 及び R2 制御棒の位置の算術平均であり、炉心平均温度は、零出力状態での評価と同様の炉心入口部の冷却材温度と高温プレナムブロック内の冷却材温度の算術平均である。

平均制御棒位置は、両図に示す期間、6mm 程度の範囲で変動している。原子炉出力に相当する PRM 出力は 2.5%から 2.8%の間で変動している。PRM 出力は、5 月 7 日の 12 時頃にやや低下しているが、その前後ではほぼ一定となっている。炉心平均温度は、155°C から 160°C の間で変動している。5 月 7 日までは 2°C 程度の変動であるが、5 月 7 日の 12 時頃にいったん上昇し、その後低下し、5 月 8 日になってからほぼ一定の状態となっている。

なお、5 月 8 日に平均 CR 位置、出力等が急激に低下しているのは、原子炉の停止操作（通常停止）によるものである。

### (2) 温度係数の評価

温度係数は、制御棒位置の変化から反応度の変化量を求め、これを炉心平均温度差で割

ることにより評価した。評価に用いた制御棒反応度係数曲線は、零出力状態での等温温度係数の評価に用いたものである。

温度係数は、以下の式によって評価した。

$$\alpha_e = \frac{\rho_1 - \rho_2}{T_2 - T_1}$$

ここで、

$T_1$ ：基準となる炉心平均温度[℃]

$T_2$ ：昇温した状態の炉心平均温度[℃]

$\alpha_e$ ：温度  $\frac{T_1 + T_2}{2}$  [℃]での温度係数 [ $\Delta k/k/\text{°C}$ ]

$\rho_1$ ：温度  $T_1$  での臨界制御棒位置における制御棒反応度係数 [ $\Delta k/k$ ]

$\rho_2$ ：温度  $T_2$  での臨界制御棒位置における制御棒反応度係数 [ $\Delta k/k$ ]

温度係数の評価においては、出力及び温度が一定の状態の比較によって評価することが必要である。そのため、出力の変動が小さく、炉心平均温度がほぼ一定であること、反応度差を大きくとれるよう制御棒位置の差が大きいこと、Sm 蓄積の効果を小さくするため時間的にあまり離れていないことが必要である。そこで、5月7日 07:00 の点を基準とし、5月8日 0:00 から 9:00 間での間の点で温度係数を評価し、平均化した。第 2.2.3 図及び第 2.2.4 図に基準点及び平均化区間を合わせて示している。なお、基準点と平均化した区間とは 1 日程度の時間差がある。このときの燃焼による Sm の蓄積が温度係数に与える影響は 5%以下と考えられる。温度係数評価における、燃焼による Sm の効果について付録 2 に示す。

2000 年 5 月 7 日 9:00 を基準点として評価した温度係数を第 2.2.5 図に示す。ここで、温度差が小さい場合はゼロ割りがおきるため、数値が大きくばらついている点があるが、温度差が大きくなるにつれ温度係数は小さくなり、温度及び出力がほぼ一定となった 5 月 8 日以降はほぼ一定の値を示している。平均化区間での温度係数の平均値は  $-1.23 \times 10^{-4} \Delta k/k/\text{°C}$  である。

## 2. 2. 3 30%出力状態での温度係数

### (1) 試験方法と運転履歴

30%出力運転は、2000 年 5 月 13 日から 6 月 6 日にかけて行われ、5 月 22 日に温度係数測定試験が行われた。温度係数測定試験は、原子炉出力を一定に保ちつつ空気冷却器の除熱量を減少させることにより炉心温度を上昇させ、このときの制御棒位置の変化から反応度変化を求め、温度係数を評価するものである。

温度係数測定試験での原子炉出力と平均 CR 位置、原子炉入口温度と出口温度及び炉心平均温度と臨界制御棒位置の変化を第 2.2.6 図から第 2.2.8 図に示す。原子炉出力としては、PRM の Ch.1 を示している。また、第 2.2.7 図に示す原子炉入口温度と出口温度の測定位置

の概念図を第 2.2.9 図に示す。

第 2.2.9 図に示すように、原子炉入口温度及び原子炉出口温度は、1 次冷却設備の高温二重配管の中間熱交換機と 1 次加圧水冷却器との分岐点付近の冷却材温度である。そのため、炉心入口部と高温プレナムブロック内の冷却材温度の平均である炉心温度と比較すると、入口温度は下流側の影響を受けるため変化が急激である。原子炉出口温度は、炉心の熱容量の影響を受けるため、入口温度より緩やかな変化である。

試験では、10:52 に空気冷却器のファンを 1 台停止し、炉心温度を上昇させた。19:30 から原子炉出力を  $30\% \pm 01\%$  の範囲に調整開始している。21:00 に空気冷却器のファンを 2 台起動し、試験を終了した。この間の出力はほぼ  $30\% \pm 0.5\%$  の範囲に保持され、炉心平均温度は約 245°C から約 280°C まで上昇した。

## (2) 温度係数の評価

温度係数の評価は、7%出力での評価と同様の方法により求めた。9:00 の状態を基準として、温度係数の変化を評価した。結果を第 2.2.10 図に示す。制御棒位置や炉心平均温度の変化が小さい時点では、温度係数は大きく変化しているが、温度差が生じてきた 11:00 以降はほぼ一定の値を示している。ここで、13:00 から 22:00 までの平均は約  $1.02 \times 10^{-4} \Delta k/k/\text{°C}$  であった。

第 2.1.1 表 各出力での臨界制御棒位置

出力	臨界制御棒位置 [mm]
0%出力 <sup>1)</sup> (低温状態)	1751
7%出力 (2.1MW)	2010
30%出力 (9MW)	2290
50%出力 (15MW)	2508

1) : 低温、大気圧状態での測定結果。

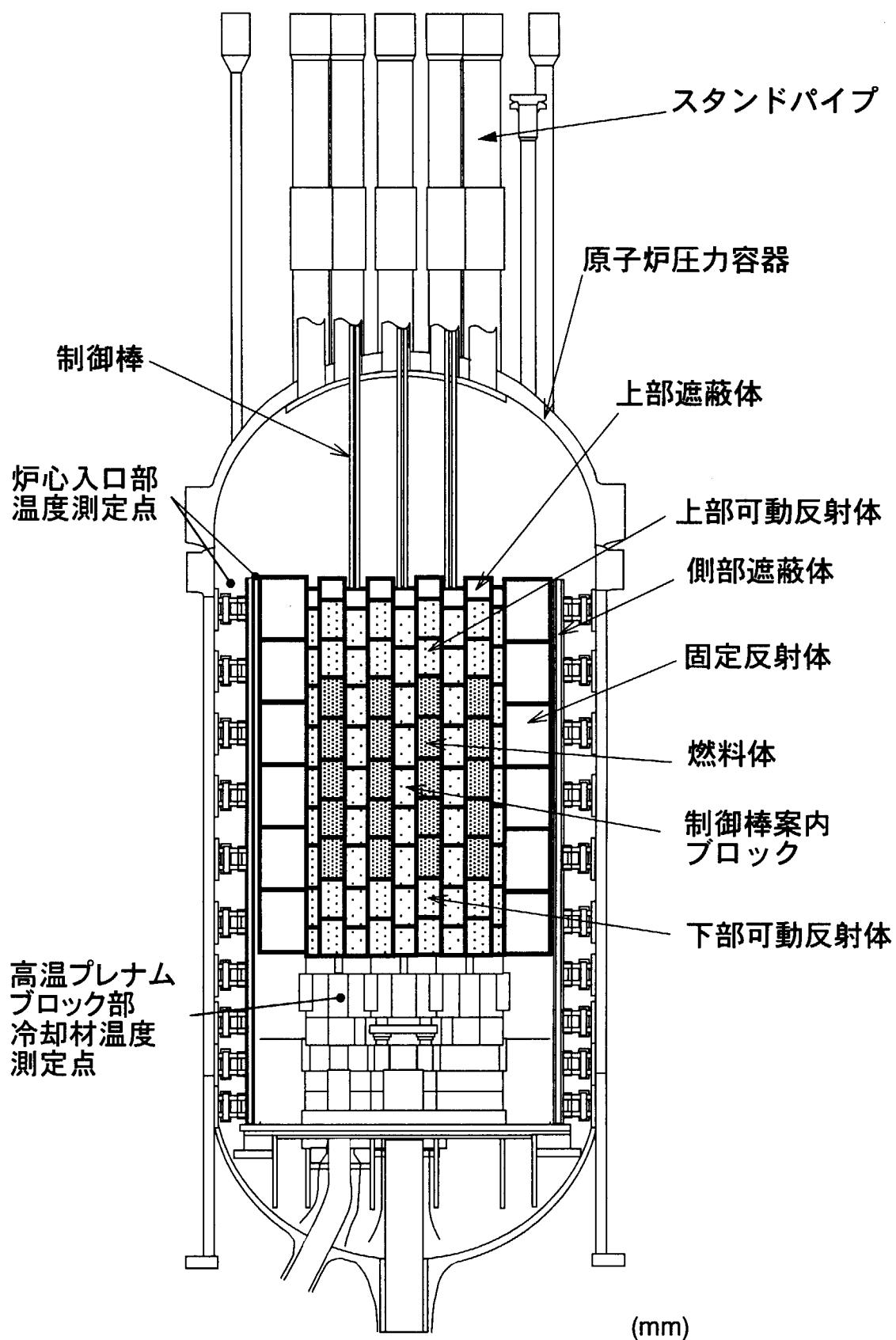
第 2.2.1 表 各温度での臨界制御棒位置

炉心温度 [°C]	臨界制御棒位置 [mm]	備考
22.7	1765 (1751)*	常圧での測定結果
122.0	1873	
144.9	1903	

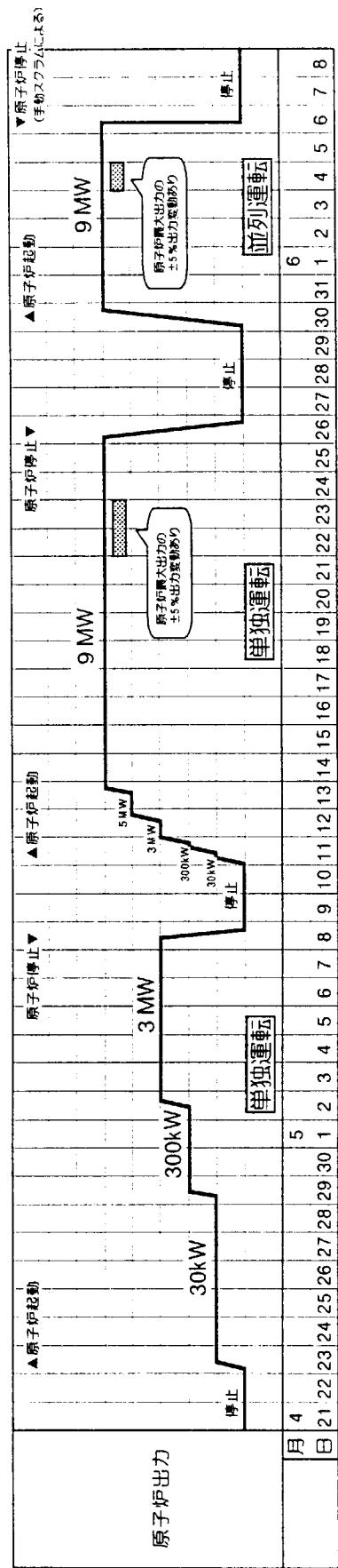
\*クロージャの浮き上がり(約 14mm)を考慮した値。

第 2.2.2 表 等温温度係数の評価結果

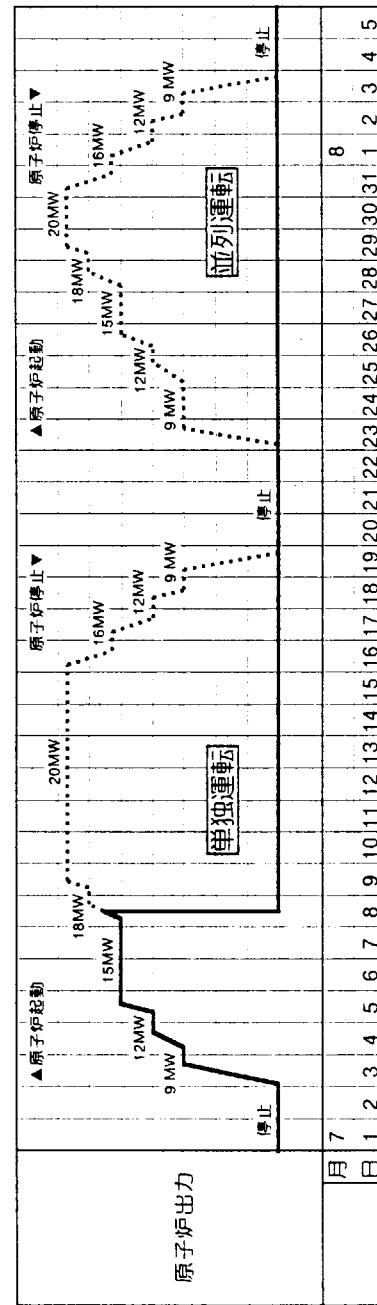
温度 [°C]	温度係数 [ $\Delta k/k/{}^{\circ}\text{C}$ ]	制御棒位置 [mm]
72.4	$-1.23 \times 10^{-4}$	1812
133.5	$-1.32 \times 10^{-4}$	1888



第2.2.1図 HTTR炉心温度測部の概念図

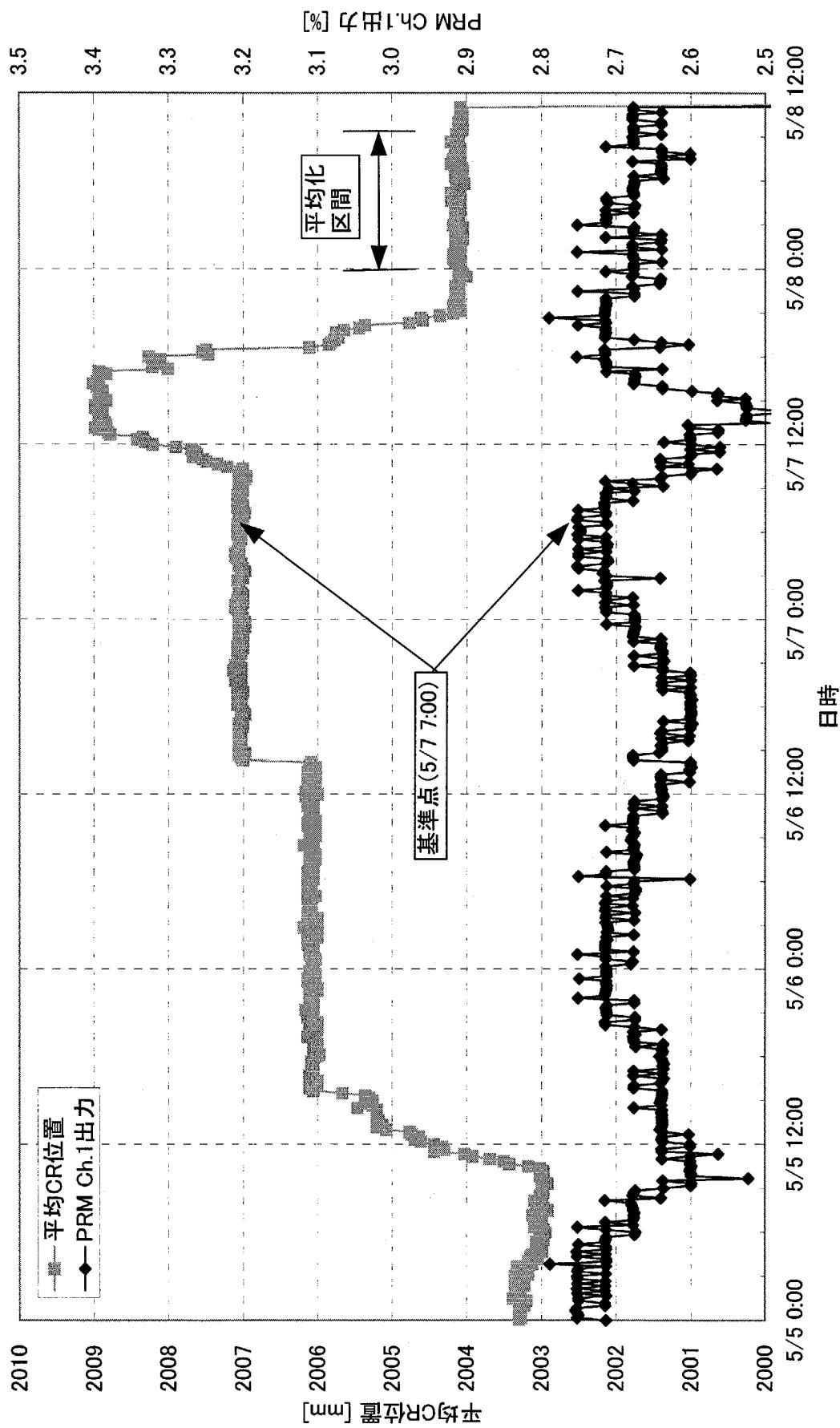


a) 出力上昇試験(1)での出力履歴（実績）

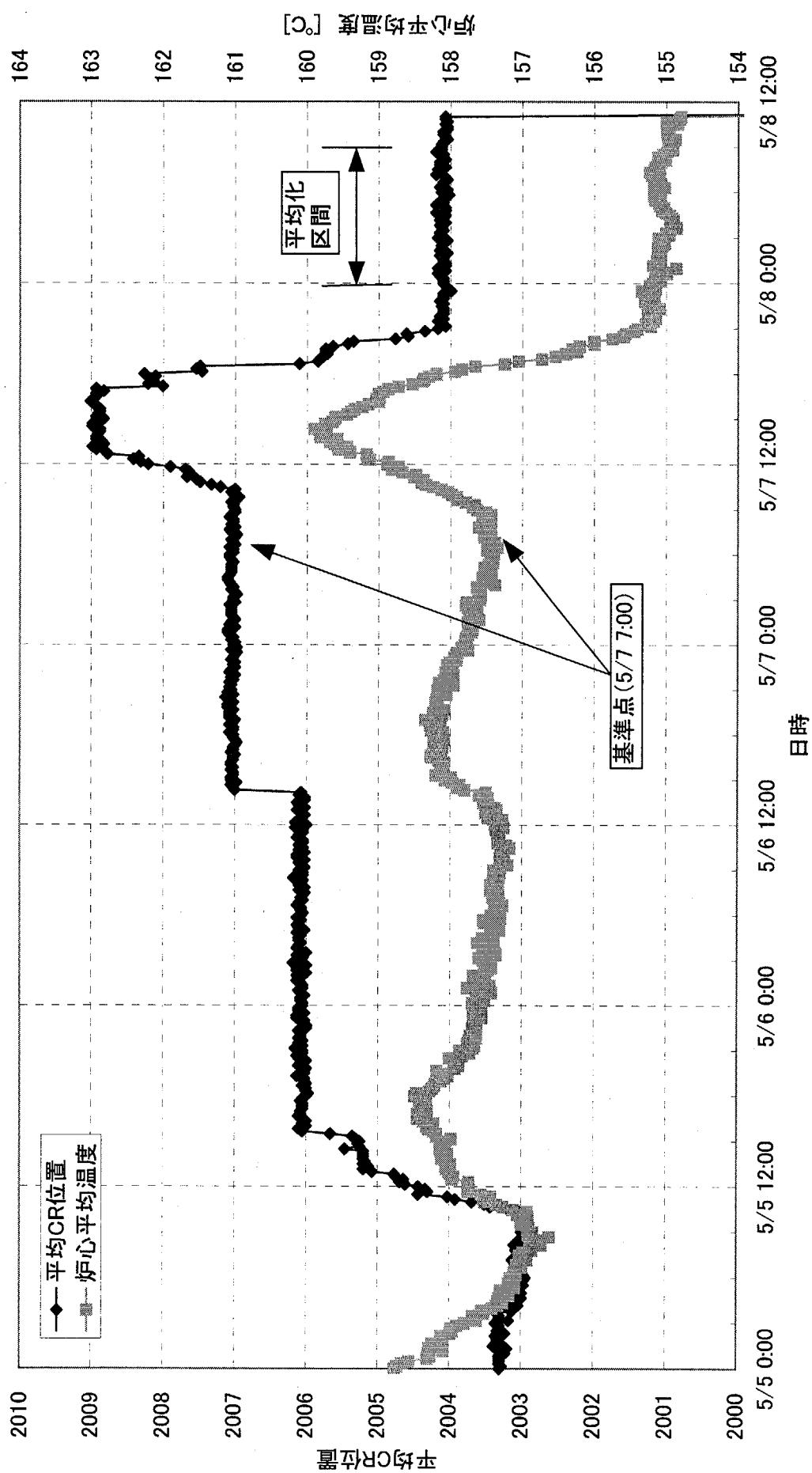


b) 出力上昇試験(2)での出力履歴（計画と実績）

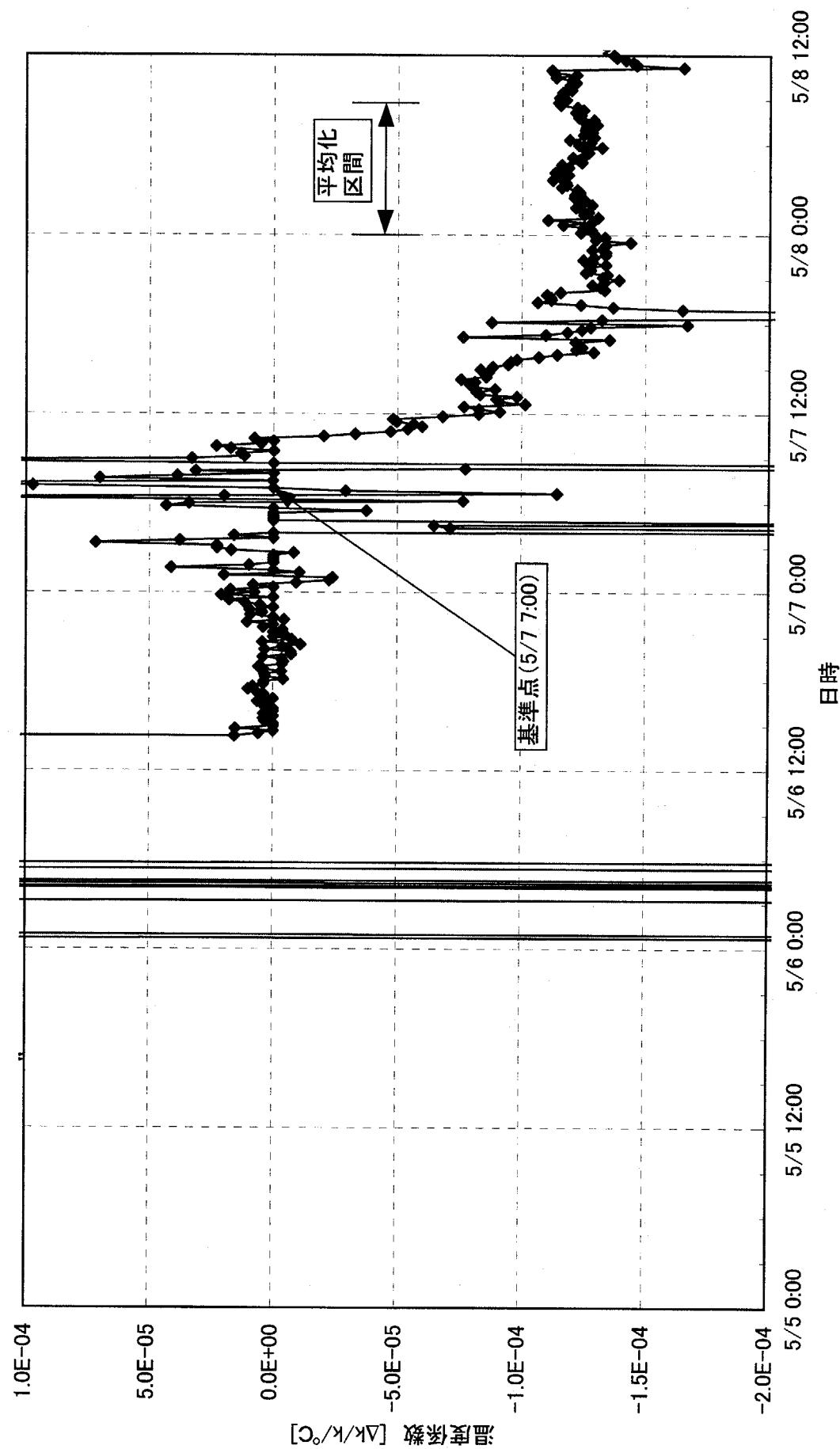
第2.2.2 図 出力上昇試験での運転履歴の計画と実績



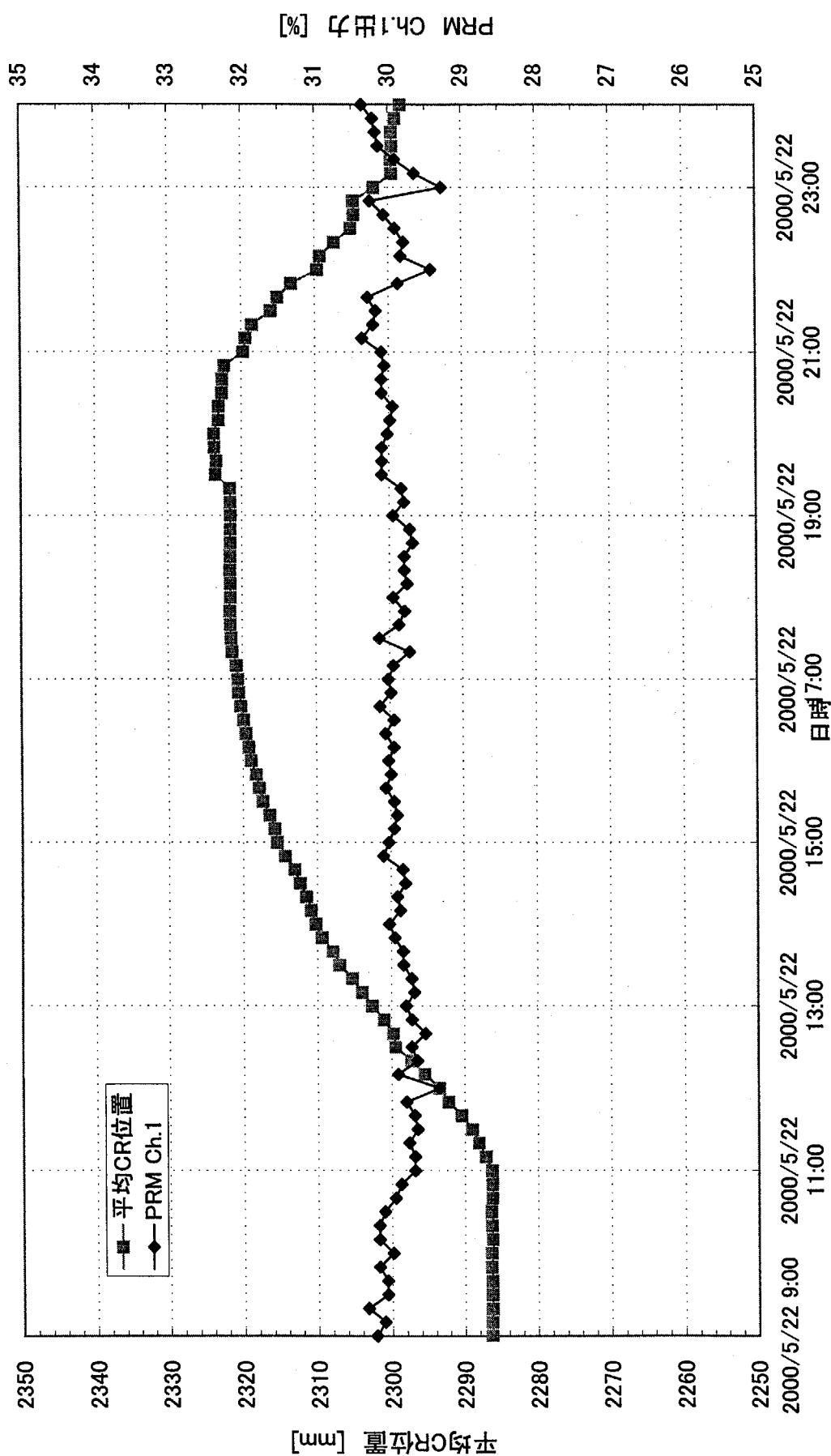
第2.2.3図 PRM出力と平均CR位置の変化(7%出力時)



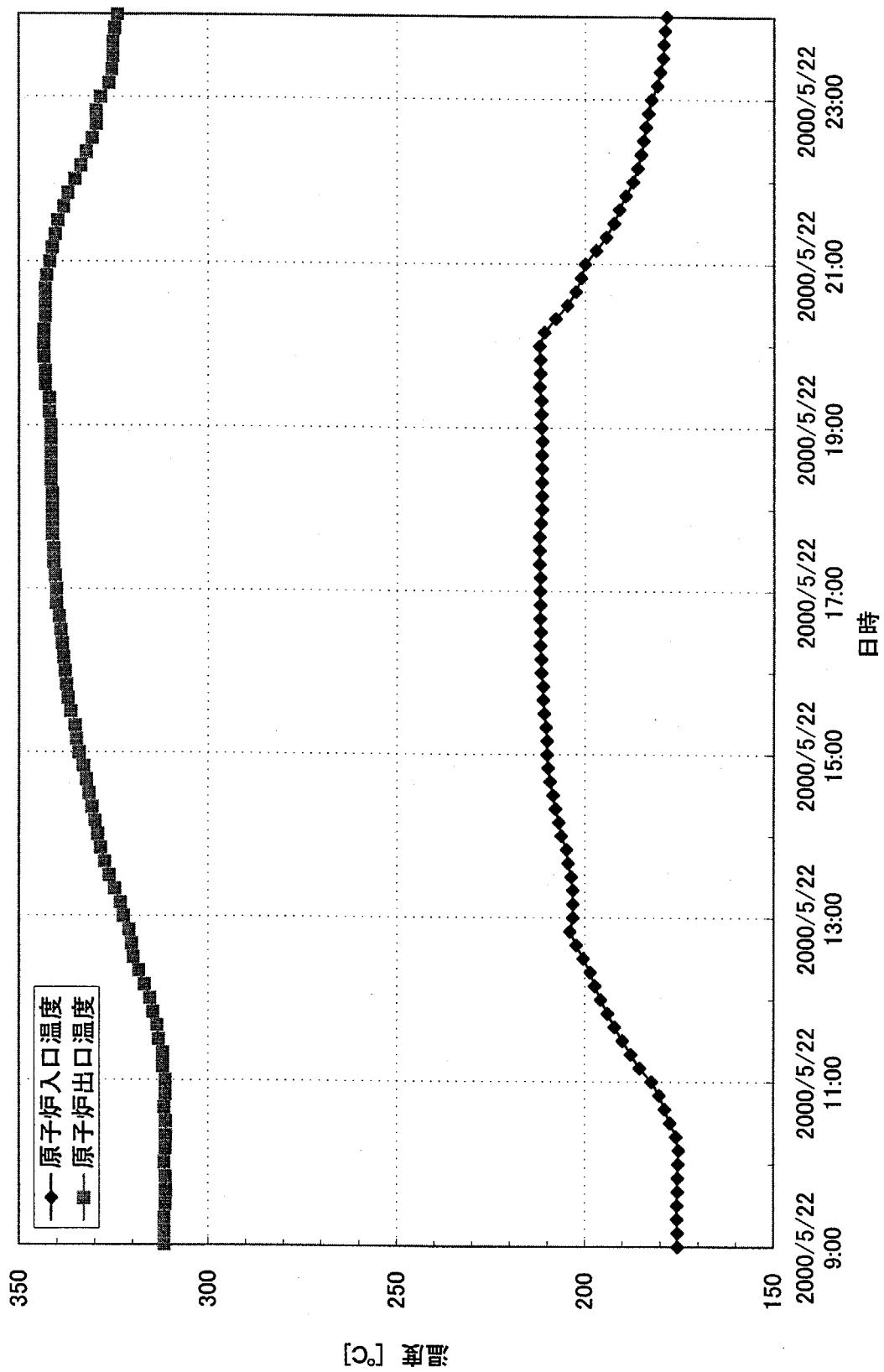
第2.2.4図 平均CR位置と炉心平均温度の変化(7%出力時)



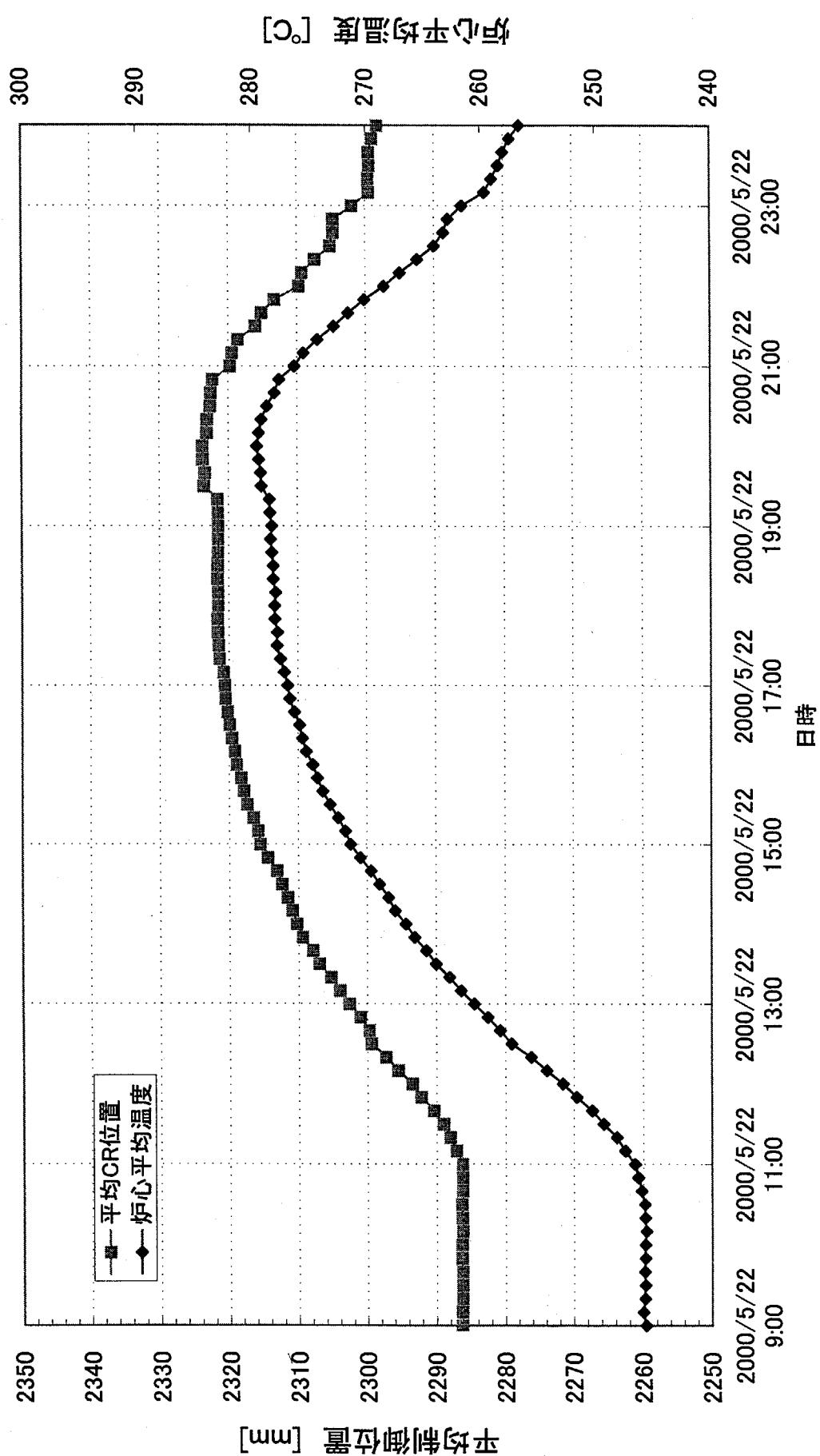
第2.2.5図 溫度係数の変化(7%出力時)



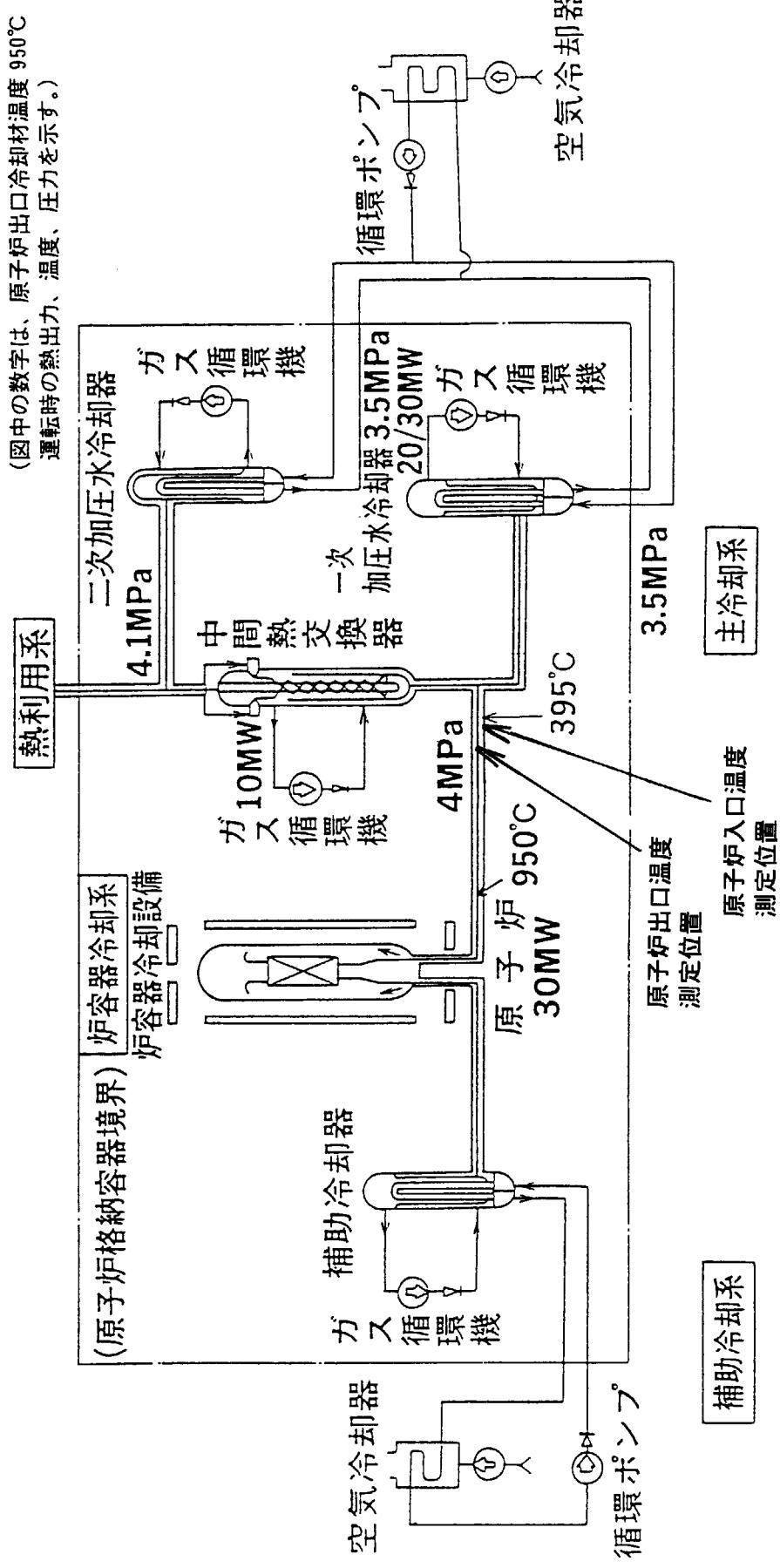
第2.2.6図 平均制御棒位置及び出力の変化(9MW)



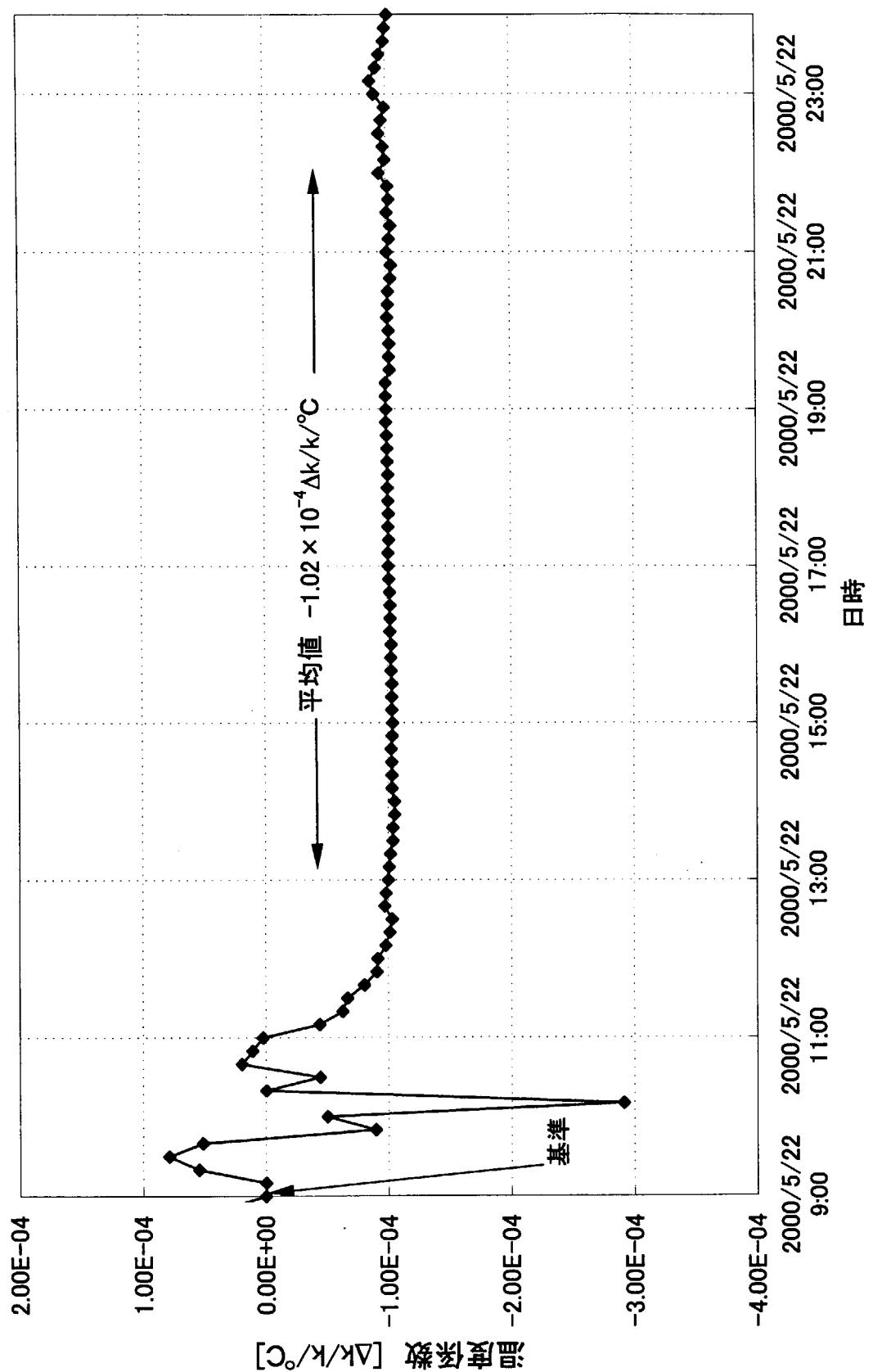
第2.2.7図 原子炉出口温度及び入口温度の変化



第2.2.8図 平均制御棒位置及び炉心平均温度の変化(9MW)



第 2.2.9 図 HTTR の冷却系統と出口温度及び入口温度測定位置の概念図



第2.2.10図 9MW運転時の温度係数

### 3. 解析及び結果

#### 3. 1 拡散計算による解析

##### 3. 1. 1 解析モデル

解析は、HTTR 核特性解析コードシステムを用いて行った。解析に用いたモデルは、臨界試験の解析に用いた 24 メッシュ非均質モデル<sup>3)</sup>を用いた。

炉心内の温度分布は、炉内流量配分解析コード FLOWNET<sup>5)</sup>と燃料温度解析コード TEMDIM<sup>6)</sup>と、HTTR 核特性解析コードシステムで繰り返し計算を行い定めた。解析に用いたコードのフローを第 3.1.1 図に示す。

##### (2) 炉心内温度分布の評価

出力運転状態の解析に用いる炉内温度分布を定めるため、炉心内をいくつかの領域に分割し、それぞれの領域での温度を定めた。温度設定のための炉心内部の領域分割は、設計で用いていた領域分割を参考に定めた。

燃料部は、軸方向の燃料ブロック段毎に分割し、4 種類とした。燃料部の上から 1 段目、2 段目、3 段目と 4 段目及び 5 段目に分割した。各段の温度は同一とした。解析に用いるミクロ断面積セットは各段 1 種類とし、合計 4 種類用いることとした。

制御棒案内カラムの内、燃料領域の内部にある C 及び R1 カラムは、軸方向に 6 領域に分割した。燃料より上部と燃料より下部をそれぞれ 1 領域づつとし、燃料と同じ高さ部分は燃料領域と同一の分割とした。

燃料上部及び下部の可動反射体領域はそれぞれ 1 領域とした。側部の可動反射体及び固定反射体は、高さ方向に 3 領域に分割した。

##### (3) 炉心内温度分布の評価結果

炉内温度分布は、以下の方法により求めた。

まず、CITATION-1000VP で得られた炉内出力分布とフルエンス分布を基に、FLOWNET で炉内流量配分を求める。次に、炉内出力分布と得られた炉内流量配分を基に、TEMDIM で燃料部の温度分布を求め、TEMDIM の結果を基に核特性解析用の炉内温度分布を評価する。

解析では、CITATION-1000VP、FLOWNET 及び TEMDIM による計算を繰り返して炉内温度分布を定めた。繰り返し計算では、反射体部の温度は一定とし、燃料部の温度を変えて計算を行った。

解析での臨界制御棒位置は、145mm おきに設定することができるので、測定値が得られている出力状態では測定値に最も近い位置とし、測定値が得られていない出力状態では、モンテカルロ計算での臨界制御棒位置に最も近い位置とした。

なお、燃料温度は 10K 単位とし、黒鉛部の温度は 20K 刻みとしている。

以下に、各部の温度設定法について述べる。

### 1) 燃料部の温度

燃料部の温度は、燃料温度（ウランの温度） $T_f$ と減速材温度 $T_m$ に分けて設定した。温度評価は、以下の方法で行った。

- i) TEMDIM の解析結果を基に、各段毎の燃料コンパクト、黒鉛スリーブ及び黒鉛ブロックの平均温度を求める。
- ii) 燃料温度は燃料コンパクトの平均温度とし、減速材温度は、燃料コンパクト、黒鉛スリーブ及び黒鉛ブロックの体積平均温度とする。

燃料領域の温度分布は、軸方向に 4 種類の分割とした。分割は、軸方向の濃縮度配分と同一とした。上から 1 段目、2 段目及び 3 段目は各段毎に温度を設定し、4 及び 5 段目はまとめて同じ温度とした。

### 2) 制御棒案内カラムの温度

制御棒案内カラムのうち、固定反射体に接している R2 及び R3 制御棒カラムの温度は、固定反射体と同一とした。燃料領域内にある C 及び R1 カラムの温度は、それぞれの段の、燃料部の温度評価に用いた黒鉛ブロックの温度と同一とした。減速材温度は燃料コンパクト、黒鉛スリーブ及び黒鉛ブロックの体積平均温度であるので、C 及び R1 の制御棒案内カラムの温度は、同じ高さ位置の燃料部の減速材温度より若干低めとなっている。

なお、制御棒の中性子吸収体は、中性子の強い吸収体であるので自己遮蔽が強いため温度依存性は無視できるとして、温度はすべて 300K とした。

### 3) 反射体領域の温度

炉心側部の可動反射体の温度は、同じ高さ位置の固定反射体の温度と同一とした。炉心上部の反射体温度は炉心入口温度とほぼ同じ温度となるよう設定した。炉心下部の反射体温度は、燃料体最下段の黒鉛ブロック温度とした。

固定反射体の温度は、測定値が得られている 50%出力以下では測定値とし、50%出力より高い出力では外挿により定めた。

第 3.1.1 表から第 3.1.6 表に、各出力での解析用炉内温度分布を示す。表中の  $T_f$  は燃料温度、 $T_m$  は減速材温度である。

## 3. 1. 2 臨界制御棒位置の解析結果

解析は、それぞれの出力で 10 日燃焼させた、Xe が飽和した状態について行った。

臨界制御棒位置は、制御棒を F<sub>s</sub> パターンで 290mm おきに移動させ、内挿により実効増倍率が 1.0 となる位置を求めた。解析では、黒鉛ブロック中に残留していると考えられる空気の効果は臨界制御棒位置で 3cm 程度であること、出力の上昇とともに空気はブロックか

ら放出され、その量が減少すると考えられることから、黒鉛ブロック内に空気は残留していないとしている。解析結果を第 3.1.7 表に示す。予測結果は 5mm 単位であるめた結果を示している。

なお、0%出力の解析は、300K の状態とし、仮設中性子検出器の保持具（アルミニウム製）を炉心に装荷した状態としている。黒鉛に残留していると考えられる空気の臨界制御棒位置に与える効果について付録 4 に示す。

### 3. 1. 3 温度係数の解析結果

#### (1) 零出力状態の解析

零出力状態での等温温度係数は、炉心全体の温度を変化させることにより反応度変化を求め、これを温度差で割ることにより求めた。この解析を、制御棒位置を変えて行い、測定結果の制御棒位置及び温度での温度係数を求めた。零出力状態の解析であるので Xe、Sm の蓄積は無視し、U の燃焼による変化も考慮しなかった。また、燃料は上から 1 段目、2 段目、3 段目及び 4、5 段目の 4 種類に分け、それぞれミクロ断面積セットを作成した。制御棒位置を 1740mm 及び 2030mm としたときの解析結果を第 3.1.8 表、第 3.1.9 表及び第 3.1.2 図に示す。ここでは、炉心温度を 300K から 500K まで変化させているが、この範囲での等温温度係数は負でほぼ一定となっている。また、臨界制御棒位置が深くなると、負の温度係数の絶対値が大きくなることがわかる。

この結果を基に、測定結果に対応する温度での温度係数を求め、第 2.2.2 表に示す制御棒位置に対応する位置での等温温度係数を評価した。評価結果を第 3.1.10 表に示す。

#### (2) 出力運転状態の解析

出力運転状態の温度係数は、制御棒位置を一定とし、第 3.1.1～3.1.6 表に示す温度分布での実効増倍率と、それぞれの表の温度から均一に 20°C 上昇させた状態での実効増倍率を求めて温度上昇による反応度変化を求め、温度差で割ることにより評価した。制御棒位置を変えて温度係数を評価し、臨界制御棒位置に対応する位置での温度係数を求めた。なお、測定値が得られていない出力では、モンテカルロ計算での予測臨界制御棒位置での値を示す。解析結果を第 3.1.11 表に示す。

温度上昇は燃料、可動反射体及び固定反射体すべてについて均一に上昇させた。また、原子数密度はそれぞれの出力で 10 日燃焼させた時点での値を用いた。このため、燃焼による Xe 及び Sm は考慮している。なお、83%出力 (25MW) では、燃料温度評価のための核計算と熱計算による繰り返し回数が少なく温度分布が十分収束していないと考えられるため、結果を省略した。

同表から、出力が上昇するにつれ、負の温度係数の絶対値が小さくなっていることがわかる。

### 3. 2 モンテカルロ計算による解析

#### 3. 2. 1 解析モデル

##### 1) 解析モデル

コードは連続エネルギーモンテカルロコード MVP<sup>4)</sup>を用いた。断面積は主に JENDL-3.2 を使用（熱中性子散乱断面積は ENDF/B-Ⅲを使用）した。モデル化した領域は、拡散計算モデルと同様に垂直方向は上部可動反射体上端から下部可動反射体下端まで、径方向は固定反射体までの全炉心である。燃料体は冷却孔、燃料スリーブ、燃料コンパクトまでモデル化している。また、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロックなどについてはそれぞれストリーミング効果の大きい制御棒挿入孔、冷却孔などを詳細にモデル化している。

臨界試験時は、燃料コンパクト内の被覆燃料粒子 (CFP) による非均質効果については、実効増倍率に別途計算した効果分を解析結果に加えていたが、今回は、燃料コンパクト中の CFP 充填率から、中性子の飛行過程に CFP 位置をサンプリングして計算していく計算ルーチン (STG モデル) により CFP の非均質効果を直接計算する機能を用いている<sup>7)</sup>。

解析では、1 バッチを 20000 ヒストリーとし 50 バッチを行い、1 ケースの総ヒストリー数を 1000000 とし、統計誤差 ( $1\sigma$ ) を最大 0.1%以下に抑えることとした。なお、実効増倍率の評価では、最初の 5 バッチを無視した。

##### 2) 温度分布

炉内の温度分布は、各出力とも拡散計算と同じものを用いた。つまり、各ブロックにおける温度は拡散計算と同じものである。ただし、モンテカルロ計算では、炉心の燃料温度 ( $T_f$ ) は燃料コンパクトの温度（コンパクト中の被覆燃料粒子、黒鉛マトリックスも同じ温度とした。）とし、炉心の減速材温度 ( $T_m$ ) は燃料棒スリーブ、燃料ブロック及び反応度調整材(BP)の温度とした。

##### 3) 燃焼効果

燃焼の影響については MVP で直接その影響を考慮することができないので、燃焼による U 及び BP の減少は無視した。なお、拡散計算による燃焼 10 日程度の初期における U 及び BP の燃焼による影響は制御棒位置で 10mm 以下であるので、結果に大きな影響を与えることはない。拡散計算に基づく検討結果を付録 2 に示す。

なお、現在までの時点で、30MW 出力運転相当で燃焼 8 日程度の運転実績である。

##### 4) Xe、Sm 効果

Xe 及び Sm による影響は、各出力において 10 日燃焼した時点 (Xe が十分飽和した時点) の Xe と Sm の量を拡散計算で計算し、CFP 内の原子数密度データとして入力することにより考慮した。

また、モンテカルロ計算の、拡散計算と異なる条件として以下のものがある。

- ① 黒鉛ブロックの空孔中に空気が残留しているとした。
- ② 制御棒のショックアブソーバを考慮していること。(制御棒位置は、実機と同じくショックアブソーバと制御棒本体の間としている。)
- ③ 断面積はモンテカルロでは主に JENDL-3.2 を用いている。拡散計算では ENDF/B を用いている。

### 3. 2. 2 臨界制御棒位置の解析結果

臨界制御棒位置は、制御棒を Fs パターンで変化させた解析を行い、内挿により実効増倍率が 1 となる位置をその出力での予想臨界制御棒位置とした。

解析は、出力 0, 2.1, 9, 15, 20, 25 及び 30MW について行った。解析結果を第 3.2.1 表に示す。なお、結果は 5mm 単位で丸めている。

モンテカルロ計算の解の統計誤差から臨界制御棒位置の誤差を評価した。微分反応度値は、付録 1 に示す反応度値曲線から、臨界制御棒位置 2000mm 付近で  $0.1\%\Delta k/k/cm$ 、2500mm 付近で  $0.07\%\Delta k/k/cm$ 、3000mm 付近で  $0.05\%\Delta k/k/cm$  とした。実効増倍率の統計誤差  $3\sigma$  を制御棒位置誤差に換算して求めた。

### 3. 2. 3 温度係数の解析結果

温度係数については、拡散計算と同様に、制御棒位置を各出力での予想臨界制御棒位置とし、各出力の温度分布から炉内の温度を均一に  $20^\circ C$  上昇させた解析を行い、各状態での実効増倍率から温度係数を以下の式により評価した。

$$\alpha_T = \frac{k' - k}{k' k} \frac{1}{T' - T}$$

ここで、

$\alpha_T$  : 温度係数 ( $\Delta k/k/C$ )

$k$  : 温度  $T$  の時の実効増倍率 (解析値)

$k'$  : 温度  $T'$  の時の実効増倍率 (解析値)

解析結果を第 3.2.2 表に示す。15~30MW での温度係数の値は誤差を含めて、 $-2.9 \sim -9.9 \times 10^{-5}\Delta k/k/C$  (中央値は  $-6.4 \times 10^{-5}\Delta k/k/C$ ) となった。

測定値としてまとめた値を示している 9MW のところで、測定値は解析値の誤差内であるが、測定値との比較、拡散計算との比較を定量的にするために解析値の誤差をさらに小さくする必要がある。

誤差 ( $\Delta\alpha_T$ ) は、解析値の統計誤差  $\sigma$  ( $=\Delta k, k'$ ) から求めた。誤差の計算方法を以下に示す。

$$\Delta\alpha_T^2 = \left( \frac{\partial\alpha_T}{\partial k'} \right)^2 \Delta k'^2 + \left( \frac{\partial\alpha_T}{\partial k} \right)^2 \Delta k^2$$

$$\Delta\alpha_T = \frac{\Delta k}{T' - T} \sqrt{\left( \frac{1}{k'^2} \right)^2 + \left( \frac{1}{k^2} \right)^2}$$

$$\Delta k' \approx \Delta k, k \approx k' \approx 1$$

$$\Delta\alpha_T = \frac{\sqrt{2}}{T' - T} \Delta k$$

ここで、

$k$  : 温度  $T$  の時の実効増倍率（解析値）

$k'$  : 温度  $T'$  の時の実効増倍率（解析値）

20°Cでの反応度が 0.3~0.2%Δk/k 程度に対して、統計誤差が 0.05%程度あるので、伝搬する温度係数の誤差は 50%近くになり、誤差が大きい。計算機の処理能力と計算資源の合理性から、この計算条件では（計算時間を長くするだけでは）統計誤差をこれ以上下げられないで、計算精度を上げるには、測定した時の状態と異なってくるが評価する温度差を大きくする等が必要となる。

### 3. 3 測定結果との比較

#### 3. 3. 1 臨界制御棒位置の比較

臨界制御棒位置の、拡散計算及びモンテカルロ計算による解析結果と測定結果と比較を第 3.3.1 表及び第 3.3.1 図に示す。

モンテカルロ計算による結果は、測定値より 20~50mm 程度高い結果となっているが、出力運転状態では、測定結果は解析結果の誤差範囲内にあり、よく一致しているといえる。

また、モンテカルロ計算は測定値より高めの結果与えているため、30MW での臨界制御棒位置は 2900mm よりわずかに引き抜かれた位置になると予想される。

これに対し拡散計算では、測定結果に対して 120~140mm 程度低い結果となっている。またモンテカルロ計算の結果と比較すると 150mm~200mm 程度低い結果となっている。

ここで、モンテカルロ計算及び拡散計算の両者とも 25MW の結果が他の結果と比較すると低めとなっているが、これは 25MW の炉内温度分布を評価する際の、拡散計算と熱計算との繰り返し回数が少ないためであると考えられる。

20MW 以上の点については、固定反射体温度の測定値が得られていないため、固定反射体温度は推定値を用いている。固定反射体部の温度の臨界制御棒位置に与える影響は 1cm 程度と予想されるので、結果に大きな影響を与えることはないと考えられる。固定反射体部の温度の臨界制御棒位置に与える影響について付録 4 に示す。今後、試験の進展に伴い

測定値が得られた時点で炉内の温度分布について見直し、解析を進めていく予定である。

拡散計算とモンテカルロ計算の解析条件の違いとして、拡散計算は黒鉛ブロック中に残留していると考えられる空気を考慮していないこと、制御棒先端のショックアブソーバの有無、使用する核データの相違が挙げられる。このうち、黒鉛中の空気には、付録5に示すように、反応度で  $0.25\sim0.3\%\Delta k/k$  程度の効果と考えられる。これを考慮しても拡散計算の結果は最大で 30mm 程度上昇するのみである。

制御棒先端のショックアブソーバについて、拡散計算では、モデル上の制限から制御棒先端に設けられているショックアブソーバを考慮できない。ショックアブソーバは金属製であるため、中性子の吸収体として働くので、これを考慮することにより臨界制御棒位置は高くなる。臨界試験時の評価では、18 カラム炉心で制御棒を全引き抜きした状態でのショックアブソーバの効果は約  $0.1\%\Delta k/k$  と評価されている<sup>8)</sup>。出力運転状態では、制御棒が炉心内に挿入されているため、この効果は 18 カラム炉心の結果と同じかそれ以上であると考えられる。

核データについては、モンテカルロ計算では JENDL3.2、拡散計算では ENDF/B-IV を用いている。使用する核データによって、解析結果がばらつくこと<sup>9)</sup>が報告されているため、今後検討が必要である。

ここで、臨界近接時の実効増倍率の、拡散計算とモンテカルロ計算<sup>2)</sup>との解析値の比較を第3.3.2図に示す。ここに示す結果は、制御棒を全引き抜き位置とし、炉心内に予め装荷した模擬燃料体をカラム単位で燃料体に置き換えて行った場合の結果である。解析条件として、モンテカルロ計算及び拡散計算のいずれも黒鉛ブロック中に残留していると考えられる空気及び臨界近接に用いた仮設検出器保持装置のアルミニウムを考慮している。また、モンテカルロ計算は、燃料コンパクト内部を均質化し、被覆粒子燃料による非均質効果は別途 SRAC で評価した結果を考慮したものである。

同図から、制御棒を全引き抜きした状態では拡散計算とモンテカルロ計算はよい一致を示しており、30 カラムの全炉心状態ではほぼ同一の結果を与える。このことから、出力運転状態で拡散計算とモンテカルロ計算の間に差がある原因としては、制御棒の反応度価値が両者で異なっているためと考えられる。

拡散計算による制御棒反応度価値の評価精度は、臨界実験装置 VHTRC の解析では 2.6% 程度であり、過小評価の傾向であることが報告されている<sup>10)</sup>。HTTR の解析でも同様に過小評価すると、臨界制御棒位置が低くなる傾向を示す。

今後、拡散計算での制御棒反応度価値についての見直しが必要であると考えられる。

### 3. 3. 2 温度係数の比較

温度係数の、拡散計算及びモンテカルロ計算による解析結果と測定結果と比較を第3.3.2表及び第3.3.3図に示す。ここで、第3.3.2図の横軸は原子炉入口部と高温プレナムブロック内の冷却材温度の平均である炉心平均温度としている。また、2.1MW 及び 9MW の測定

値として、2章で述べた平均化区間のデータすべてをプロットしている。

30%出力以下の状態では、拡散計算による解析値は測定値とよく一致している。また9MW以上では出力が上昇するにつれ負の温度係数の絶対値が小さくなる傾向を示している。20MW以上については、臨界制御棒位置の結果と同様に、固定反射体部の温度もすべて推定値であるため、測定値が得られた時点で温度分布を見直し、再度解析を進めることとしている。

モンテカルロ計算による結果は、出力が上昇するにつれ負の温度係数の絶対値が小さくなる傾向は拡散計算と同じであるが、誤差棒が長いため測定値と離れた結果となっている。これは、解析においては20°Cの温度上昇としたため、反応度変化が小さく、誤差が大きくなってしまったことによる。また15MW以上では負の温度係数の絶対値が大きくなっているが、この部分でも誤差が大きいこと、拡散計算の結果では変化が小さいことから、信頼性は低いと考える。今後、温度差を大きくとる等の方法により誤差を小さくした解析を行うべきであると考える。

第3.1.1表 定格運転、7%出力(2.1MW)の解析用炉内温度分布

	炉心	CRカラム	可動反射体	固定反射体
上部	420			
1段目	$T_f$ 420	420	420	420
	$T_m$ 420			
2段目	$T_f$ 440	420	420	420
	$T_m$ 420			
3段目	$T_f$ 460	440	440	420
	$T_m$ 440			
4段目	$T_f$ 480	460	440	420
5段目	$T_m$ 460			
下部	460			

(単位:K)

第3.1.2表 定格運転、30%出力(9MW)の解析用炉内温度分布

	炉心	CRカラム	可動反射体	固定反射体
上部	460			
1段目	$T_f$ 490	460	460	460
	$T_m$ 460			
2段目	$T_f$ 580	500	480	480
	$T_m$ 520			
3段目	$T_f$ 630	540	480	480
	$T_m$ 560			
4段目	$T_f$ 650	600	480	480
5段目	$T_m$ 620			
下部	600			

(単位:K)

第3.1.3表 定格運転、50%出力(15MW)の解析用炉内温度分布

	炉心	CRカラム	可動反射体	固定反射体
上部	520			
1段目	$T_f$ 650	560	520	520
	$T_m$ 580			
2段目	$T_f$ 780	620	560	560
	$T_m$ 660			
3段目	$T_f$ 840	720	560	560
	$T_m$ 740			
4段目	$T_f$ 850	780	560	560
5段目	$T_m$ 800			
下部	780			

(単位:K)

第3.1.4表 定格運転、67%出力(20MW)の解析用炉内温度分布

	炉心	CRカラム	可動反射体	固定反射体
上部	580			
1段目	$T_f$ 790 $T_m$ 680	640	580	580
2段目	$T_f$ 940 $T_m$ 800	760		
3段目	$T_f$ 990 $T_m$ 900	860	620	620
4段目	$T_f$ 1010	940		
5段目	$T_m$ 960		620	620
下部	940			

(単位:K)

第3.1.5表 定格運転、83%出力(25MW)の解析用炉内温度分布

	炉心	CRカラム	可動反射体	固定反射体
上部	620			
1段目	$T_f$ 830 $T_m$ 720	680	620	620
2段目	$T_f$ 1040 $T_m$ 880	820		
3段目	$T_f$ 1130 $T_m$ 1000	960	680	680
4段目	$T_f$ 1160	1080		
5段目	$T_m$ 1100		680	680
下部	1080			

(単位:K)

第3.1.6表 定格運転、100%出力(30MW)の解析用炉内温度分布

	炉心	CRカラム	可動反射体	固定反射体
上部	680			
1段目	$T_f$ 1050 $T_m$ 900	840	680	680
2段目	$T_f$ 1230 $T_m$ 1060	1020		
3段目	$T_f$ 1300 $T_m$ 1180	1160	740	740
4段目	$T_f$ 1320	1260		
5段目	$T_m$ 1280		740	740
下部	1260			

(単位:K)

第 3.1.7 表 拡散計算による臨界制御棒位置の予測結果

出力 [%]	制御棒位置 [mm]	実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ [-]	臨界制御棒位置 [mm]	備 考
0	1885	1.0293386	1635	仮設中性子検出器 保持具考慮
	1740	1.0127406		
	1595	0.9951438		
7 (2.1MW)	2030	1.0181557	1875	
	1885	1.0012183		
	1740	0.9834149		
30 (9MW)	2320	1.0173132	2165	
	2175	1.0011117		
	2030	0.9846637		
50 (15MW)	2610	1.0250523	2385	
	2465	1.0091054		
	2320	0.9925258		
67 (20MW)	2755	1.0236224	2540	
	2610	1.0088664		
	2465	0.9909844		
83 (25MW)	2900	1.0259937	2630	
	2755	1.0132170		
	2610	0.9981287		
100 (30MW)	3045	1.0194598	2800	
	2900	1.0087838		
	2755	0.9957303		

注：黒鉛中の残留空気なし。

第 3.1.8 表 零出力状態の温度係数解析結果（制御棒位置：1740mm）

ケース名	温度 [K]	実効増倍率 [-]	温度 [K]	温度係数 [ $\Delta k/k/K$ ]
tc30c1	300	1.01696016	310	$-1.16596 \times 10^{-4}$
tc32c1	320	1.0145556		$-1.24751 \times 10^{-4}$
tc34c1	340	1.0119939	360	$-1.34046 \times 10^{-4}$
tc38c1	380	1.0065323		$-1.34768 \times 10^{-4}$
tc42c1	420	1.0011004	400	$-1.35356 \times 10^{-4}$
tc46c1	460	0.9957035		$-1.40737 \times 10^{-4}$
tc50c1	500	0.9901534		

第 3.1.9 表 零出力状態の温度係数解析結果（制御棒位置：2030mm）

ケース名	温度 [K]	実効増倍率 [-]	温度 [K]	温度係数 [ $\Delta k/k/K$ ]
tc30c2	300	1.0497657	310	$-1.05309 \times 10^{-4}$
tc32c2	320	1.0474498		$-1.12913 \times 10^{-4}$
tc34c2	340	1.0449780	360	$-1.21521 \times 10^{-4}$
tc38c2	380	1.0396969		$-1.22091 \times 10^{-4}$
tc42c2	420	1.0344445	400	$-1.22247 \times 10^{-4}$
tc46c2	460	1.0292383		$-1.28395 \times 10^{-4}$
tc50c2	500	1.0238264		

第 3.1.10 表 零出力状態での温度係数の評価結果

温度 [°C]	制御棒位置 [mm]	温度係数 [Δk/k/°C]
72.4	1812	-1.267 × 10 <sup>-4</sup>
133.5	1888	-1.284 × 10 <sup>-4</sup>

第 3.1.11 表 各出力での温度係数の評価結果

出力 [%]	解析結果		解析結果に基づく評価	
	制御棒位置 [mm]	温度係数 [Δk/k/°C]	制御棒位置 [mm]	温度係数 [Δk/k/°C]
7 (2.1MW)	2030	-1.228 × 10 <sup>-4</sup>	2010	-1.257 × 10 <sup>-4</sup>
	1885	-1.439 × 10 <sup>-4</sup>		
30 (9MW)	2320	-9.835 × 10 <sup>-5</sup>	2290	-9.935 × 10 <sup>-5</sup>
	2175	-1.032 × 10 <sup>-4</sup>		
50 (15MW)	2610	-7.138 × 10 <sup>-5</sup>	2508	-7.316 × 10 <sup>-5</sup>
	2465	-7.391 × 10 <sup>-5</sup>		
67 (20MW)	2755	-7.156 × 10 <sup>-5</sup>	2704	-7.267 × 10 <sup>-5</sup>
	2610	-7.471 × 10 <sup>-5</sup>		
100 (30MW)	3045	-6.169 × 10 <sup>-5</sup>	2991	-6.347 × 10 <sup>-5</sup>
	2900	-6.648 × 10 <sup>-5</sup>		

第 3.2.1 表 モンテカルロ計算による臨界制御棒位置の予測結果

出力 [%]	制御棒位置 [mm]	実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ [-]	統計誤差 $\sigma$ [%]	臨界制御棒位置 [mm]	備 考
0	1800	1.00062	0.0618	1795±20	
	1788	0.999137	0.0572		
7 (2.1MW)	2000	0.99476	0.0762	2050±30	
	2060	1.00145	0.0948		
30 (9MW)	2290	0.99699	0.0840	2315±30	
	2325	1.00148	0.0873		
50 (15MW)	2500	0.99623	0.0706	2530±30	
	2550	1.00267	0.0662		
67 (20MW)	2650	0.99544	0.0798	2705±35	
	2710	1.00055	0.0828		
83 (25MW)	2790	0.99741	0.0514	2805±60	
	2810	1.00096	0.0918		
100 (30MW)	2920	0.99316	0.0893	2990±50	
	3010	1.00186	0.0818		

注：黒鉛中の残留空気あり。

第 3.2.2 表 モンテカルロ計算による温度係数の評価

## 1) 解析結果

出力 [%]	制御棒位置 [mm]	実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ [-]	統計誤差 $\sigma$ [%]	備考
7 (2.1MW)	2040	1.00324	0.0400	
		1.00004	0.0441	+20°Cの値
30 (9 MW)	2325	1.00033	0.0419	
		0.997711	0.0406	+20°Cの値
50 (15 MW)	2530	0.999504	0.0409	
		0.998364	0.0381	+20°Cの値
100 (30 MW)	2950	1.00208	0.0416	
		1.00069	0.0393	+20°Cの値

## 2) 温度係数の評価結果

出力 [%]	温度係数 [ $\Delta k/k/^\circ C$ ]	誤差* <sup>1</sup> [%]	温度係数±誤差 [ $\Delta k/k/^\circ C$ ]
7 (2.1MW)	-1.59×10 <sup>-4</sup>	±19	-1.59±0.3×10 <sup>-4</sup>
30 (9 MW)	-1.31×10 <sup>-4</sup>	±22	-1.31±0.3×10 <sup>-4</sup>
50 (15 MW)	-5.71×10 <sup>-5</sup>	±49	-5.71±3×10 <sup>-5</sup>
100 (30 MW)	-6.93×10 <sup>-5</sup>	±41	-6.93±3×10 <sup>-5</sup>

第 3.3.1 表 各出力での臨界制御棒位置の比較

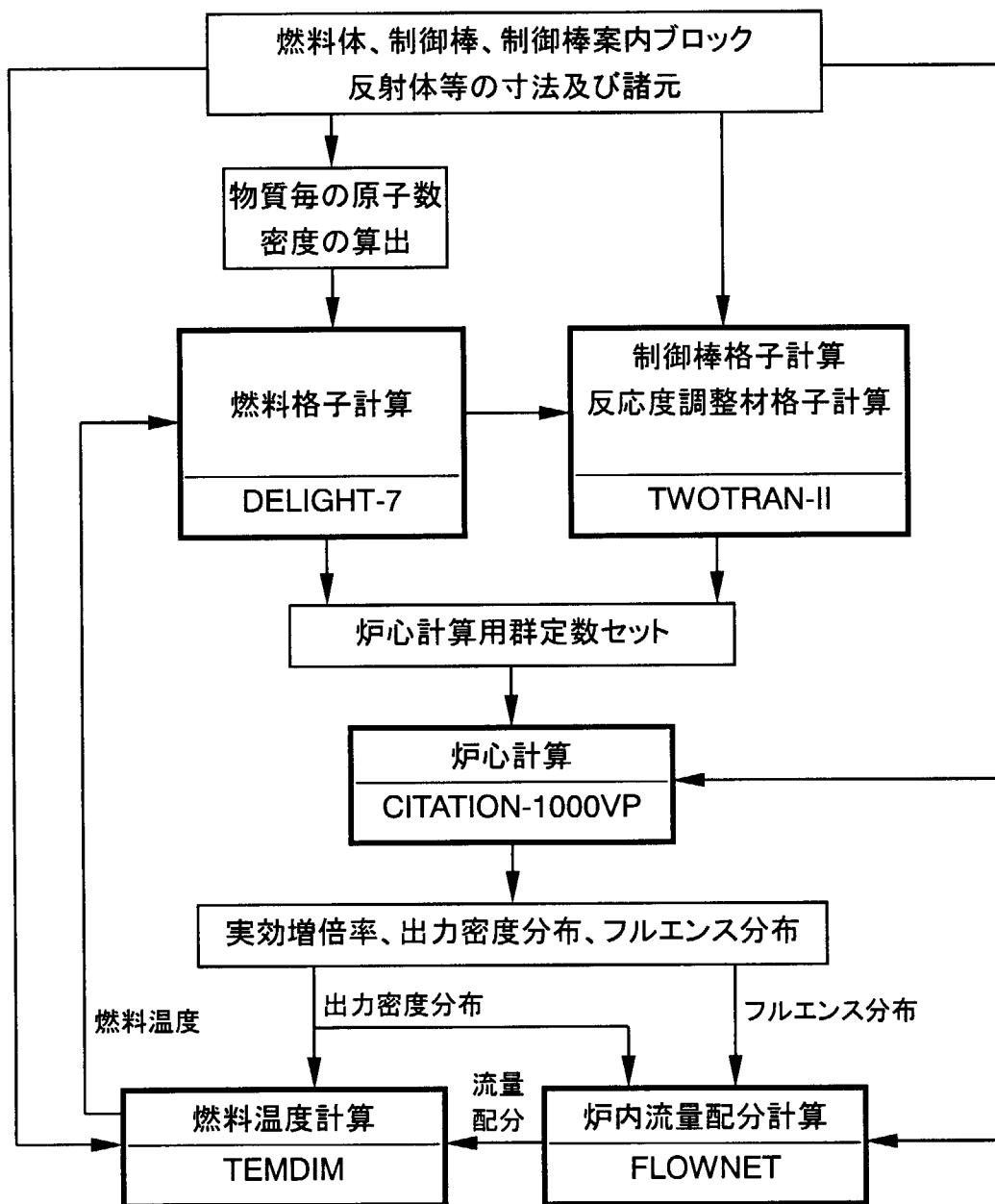
出力 [%]	臨界制御棒位置 [mm]			モンテカルロと 拡散計算の差	
	測定結果	拡散計算 <sup>1)</sup>	モンテカルロ 計算 <sup>2)</sup>	制御棒位置 [mm]	反応度 [%Δk/k]
0 (0MW)	1751	1635	1795±20	160	1.87
7 (2.1MW)	2010	1875	2050±30	175	1.92
30 (9MW)	2290	2165	2315±30	150	1.65
50 (15MW)	2508	2385	2530±30	145	1.60
67 (20MW)	-	2540	2705±35	165	1.82
83 (25MW)	-	2630	2805±60	175	1.73
100 (30MW)	-	2800	2990±50	190	1.52

1) 黒鉛中の残留空気なし、制御棒先端のショックアブソーバなし。

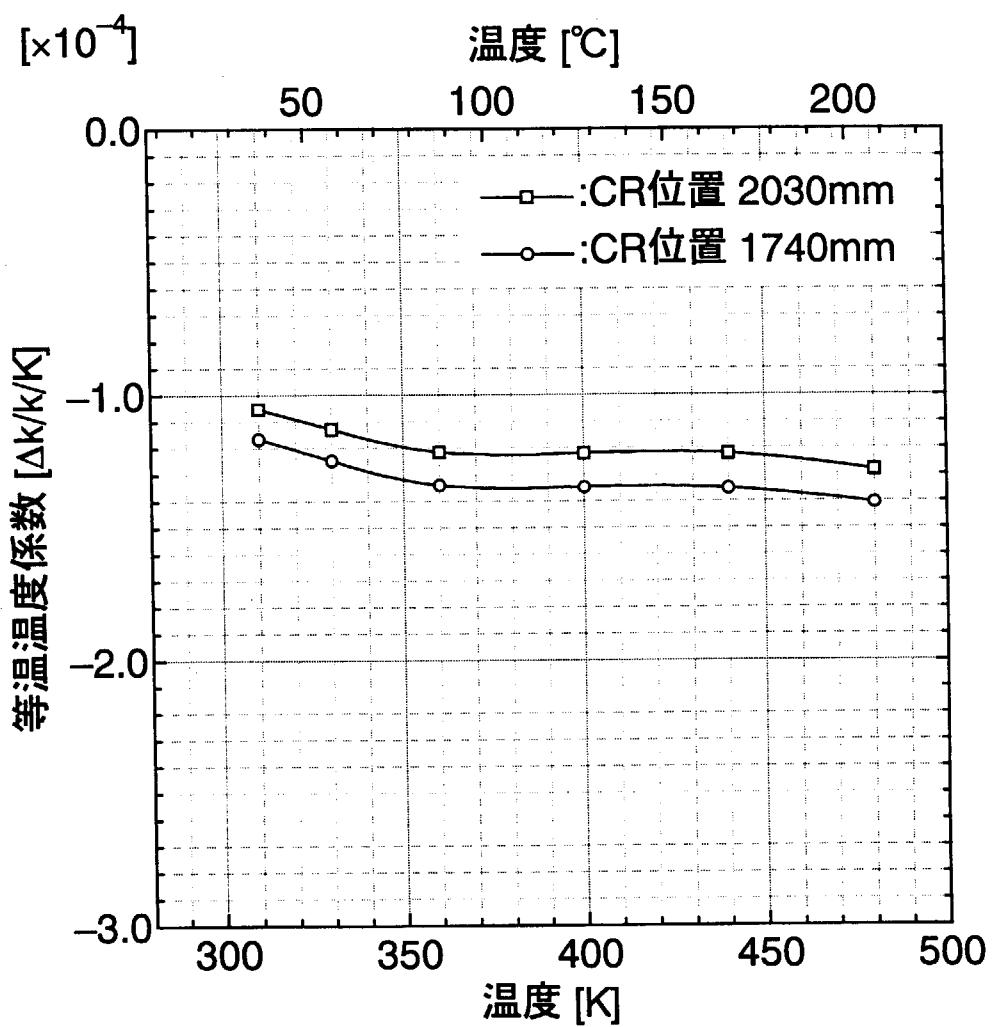
2) 黒鉛中の残留空気あり、制御棒先端のショックアブソーバあり。

第 3.3.2 表 各出力での温度係数の温度係数の比較

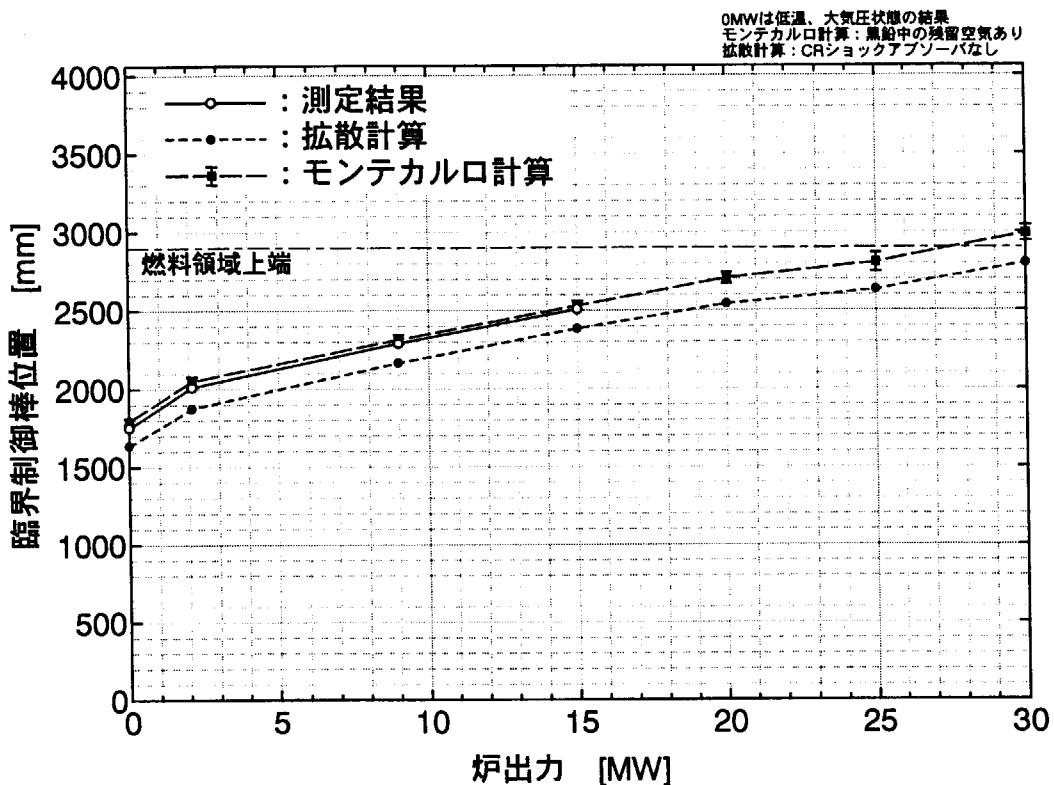
出力 [%]	測定結果 [Δk/k°C]	解析結果 [Δk/k°C]		備 考
		拡散	モンテカルロ	
0 (0MW)	-1.23×10 <sup>-4</sup>	-1.267×10 <sup>-4</sup>	-	炉心平均温度 72.4°C
0 (0MW)	-1.32×10 <sup>-4</sup>	-1.284×10 <sup>-4</sup>	-	炉心平均温度 133.5°C
7 (2.1MW)	-1.23×10 <sup>-4</sup>	-1.257×10 <sup>-4</sup>	-1.59±0.3×10 <sup>-4</sup>	
30 (9MW)	-1.02×10 <sup>-4</sup>	-9.935×10 <sup>-5</sup>	-1.31±0.3×10 <sup>-4</sup>	
50 (15MW)	-	-7.316×10 <sup>-5</sup>	-5.71±3×10 <sup>-5</sup>	
67 (20MW)	-	-7.267×10 <sup>-5</sup>	-	
100 (30MW)	-	-6.347×10 <sup>-5</sup>	-6.93±3×10 <sup>-4</sup>	



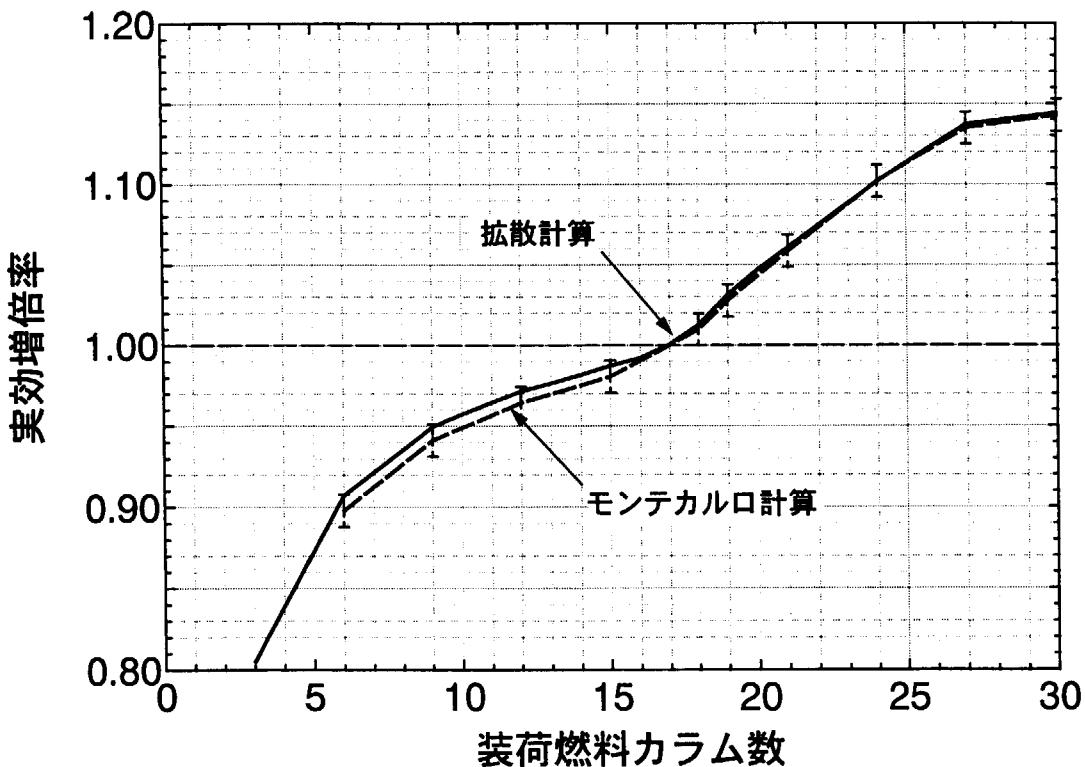
第 3.1.1 図 解析に用いたコードの流れ図

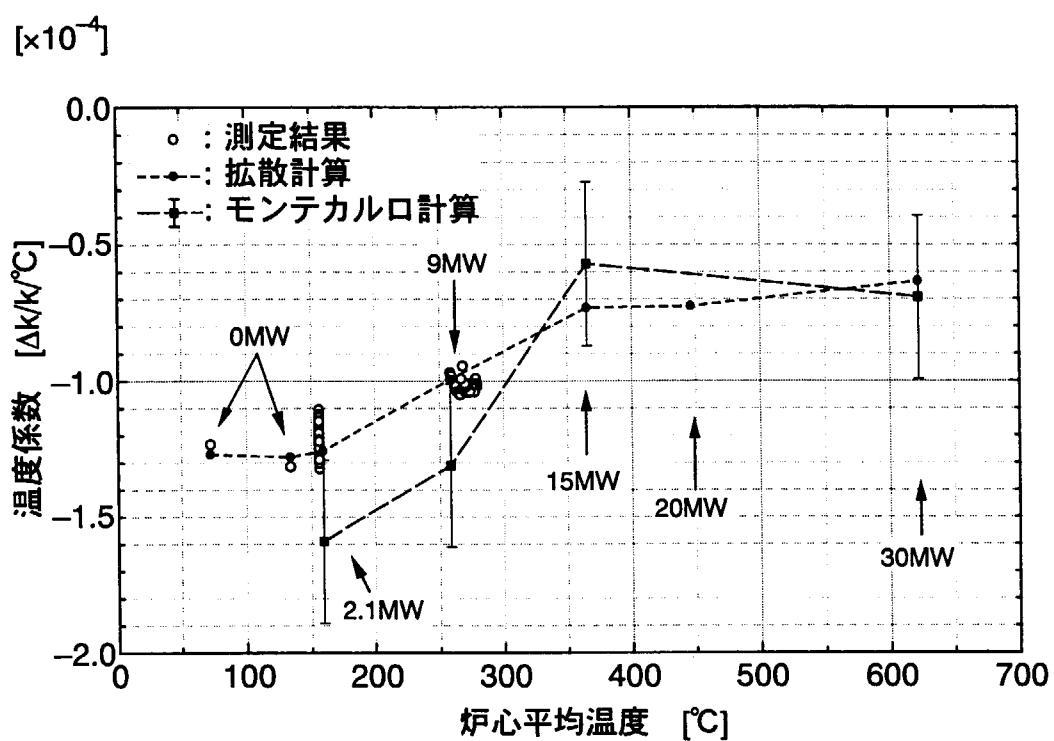


第 3.1.2 図 拡散計算による等温温度係数の解析結果



第 3.3.1 図 臨界制御棒位置の測定値と解析結果との比較

第 3.3.2 図 臨界近接時の拡散計算とモンテカルロ計算の比較  
(モンテカルロ計算は SRAC による二重非均質効果を考慮した解析)



第 3.3.3 図 温度係数の測定値と解析結果との比較

## 4. まとめ

HTTR の出力上昇試験のうち、炉心特性として臨界制御棒位置及び温度係数について測定を行い、拡散計算及びモンテカルロ計算による解析を行った。その結果、以下の項目が明らかとなった。

- (1) 臨界制御棒位置はモンテカルロ計算により 20~50mm 程度のずれで評価可能であり、100%出力での臨界制御棒位置は 2900mm 程度になると予想される。
- (2) 拡散計算による臨界制御棒位置は測定値及びモンテカルロ計算の結果より 100mm 以上低くなっている。これは制御棒反応度係数を低めに評価しているためと考えられる。
- (3) 温度係数では、拡散計算による評価値は測定値とよく一致している。また、出力が上昇するにつれてその絶対値が小さくなると予想される。
- (4) モンテカルロ計算による温度係数評価では、温度差を大きくとる等解析方法の改善を図る必要がある。

今後、出力を更に上昇して測定を行うとともに、今回明らかになった項目について解析モデル及び手法を見直すことにより解析精度の向上を図ることとしたい。

## 謝辞

測定を行うに当たり多大なる協力をいただいた HTTR 試験室及び関係各位、解析を行うに当たりご助言、協力いただいた高温工学試験研究炉開発部山下清信氏に感謝いたします。また、本報告書を作成するに当たり、御査読いただきました材料試験炉部照射第 1 課小森芳廣氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 山下 清信、他、「高温工学試験研究炉(HTTR)の臨界試験、(I) 試験計画、燃料装荷および核特性試験」、日本原子力学会誌、Vol.42, No.1, pp.30~42(2000).
- 2) 藤本 望、他、「高温工学試験研究炉(HTTR)の臨界試験、(II) 環状型燃料装荷による初臨界達成とその予測法」、日本原子力学会誌、Vol.42, No.5, pp.458~464(2000).
- 3) 藤本 望、他、「高温工学試験研究炉炉心解析モデルの改良－過剰反応度に関する検討」、日本原子力学会誌、Vol.42, No.5, pp.465~471(2000).

- る検討－」、JAERI-Research 99-059(1999).
- 4) 森 貴正、他、「MVP/GMVP 連続エネルギー法及び他群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード」、JAERI-DATA/Code 94-007(2000).
  - 5) 丸山 創、他、「炉内流動解析コード FLOWNET の検証」、JAERI-M 88-138(1988).
  - 6) 丸山 創、他、「燃料温度解析コード TEMDIM の検証」、JAERI-M88-170(1988).
  - 7) 安藤 弘栄、他、私信 (2000) .
  - 8) 中野 正明、他、私信 (1999) .
  - 9) Y. Nagao, et al., JAERI-Cof 96-008, p.135(1995).
  - 10) K. Yamashita, et al., "Nuclear Design of the High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", Nucl. Sci. Eng., 122, 212-228(1996).

## 付録 1

### 評価に用いる制御棒反応度価値曲線について

#### 1. はじめに

制御棒位置の変化から反応度の変化を評価するための制御棒反応度価値曲線を評価する。評価においては、出力上昇試験で得られた、制御棒 1 対ごとの反応度価値曲線と解析結果を基に、修正因子を用いて評価する。

#### 2. 測定結果

制御棒反応度価値の測定は、出力上昇試験(1)の試験項目として、2000 年 4 月 24 日から 27 日にかけて行われた。測定は、制御棒 1 対について、臨界位置から全引き抜き位置までと、臨界位置から全挿入位置までとに分けて測定した。測定は C、R1、R2 及び R3 の各グループの代表制御棒について行った。測定結果を第 1 図に示す。

#### 3. 評価方法及び結果

臨界制御棒位置の変化から反応度変化を評価するためには、R3 を全引き抜き、C、R1 及び R2 をそろえた状態 ( $F_s$  パターンと称する) での反応度価値曲線を求める必要がある。

$F_s$  パターンでの反応度価値曲線は、測定結果と臨界試験で用いた修正因子を用いて求められる。

臨界制御棒位置を 1866mm として、臨界位置から全引き抜き位置までの反応度価値曲線を求めることとした。第 1 表に、解析により求めた各制御棒の反応度価値と修正因子を示す。修正因子は、解析により以下の式で評価する。

$$\text{修正因子} = \frac{\text{制御棒を } F_s \text{ パターンで動かした場合の反応度価値}}{\sum \text{制御棒 1 対を動かした場合の反応度価値}}$$

ここで、第 1 表中の「 $F_s$  パターン」が制御棒を  $F_s$  パターンで動かした場合の反応度価値に相当し、「Total」が制御棒 1 対を動かした場合の反応度価値の合計に相当する。

この修正因子を測定した、制御棒 1 対を動かした場合の反応度価値の合計にかけることにより  $F_s$  パターンでの制御棒反応度価値曲線を評価する。測定値は、修正因子を評価した点の値を測定結果から内挿で求めた。結果を第 2 表及び第 2 図に示す。

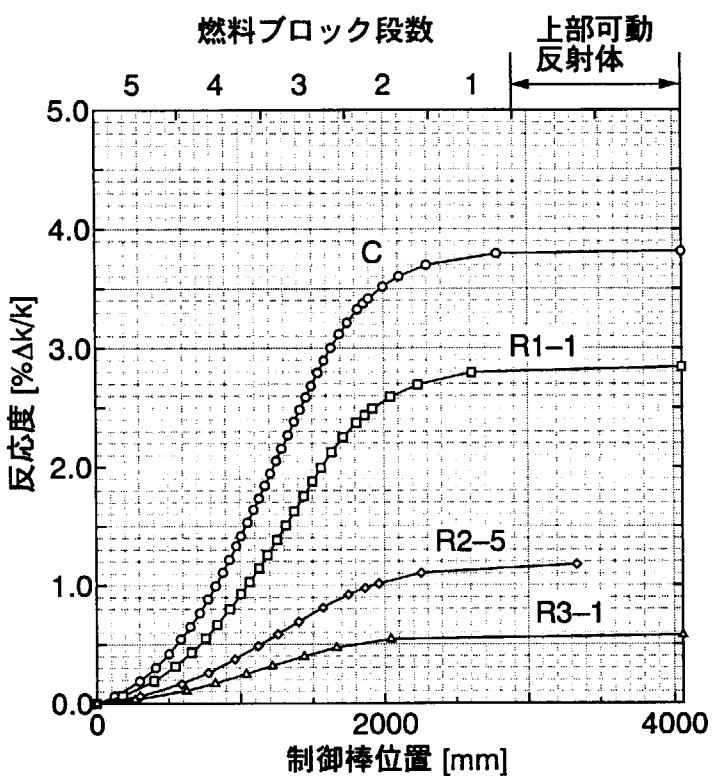
第1表 解析により求めた各制御棒の反応度価値と修正因子

制御棒位置 [mm]	反応度価値 [%Δk/k]					修正因子* [-]
	C	R1	R2	Total	Fs パターン	
1866	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
2030	0.181	0.149	0.063	1.453	1.738	1.196
2320	0.320	0.306	0.116	2.852	4.384	1.537
2610	0.383	0.382	0.142	3.527	6.720	1.905
2900	0.407	0.415	0.153	3.815	8.607	2.256
3190	0.415	0.427	0.157	3.919	9.751	2.488
3480	0.416	0.429	0.157	3.932	10.20	2.594
3770	0.416	0.430	0.157	3.938	10.32	2.621
4060	0.416	0.430	0.157	3.938	10.33	2.623

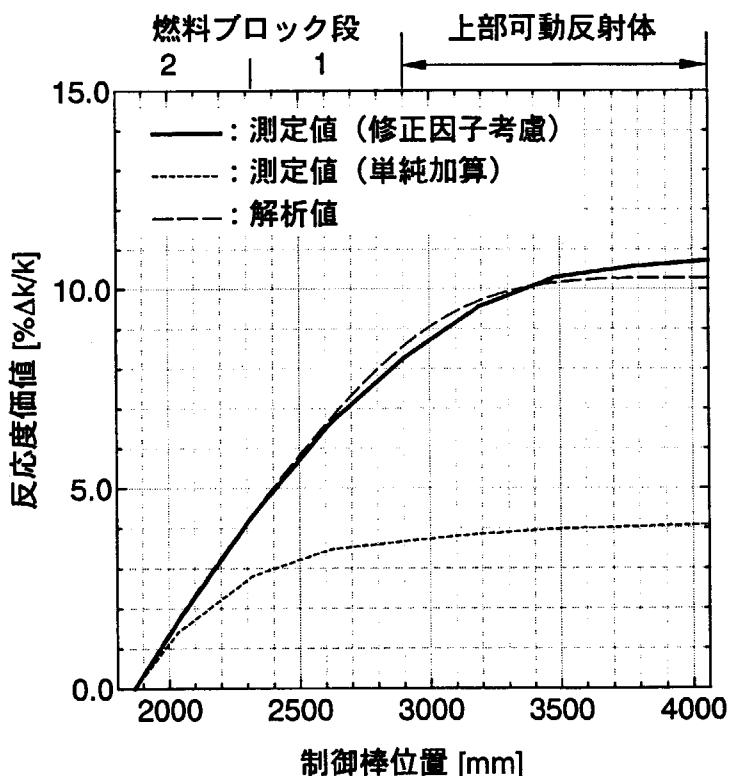
$$* : \text{修正因子} = \frac{\text{Fs パターン}}{\text{Total}}$$

第2表 修正因子を用いて評価した Fs パターンでの制御棒反応度価値

制御棒位置 [mm]	測定結果 [%Δk/k]	修正因子 [-]	修正した反応度価値 [%Δk/k]
1866	0.000	-	0.000
2030	1.376	1.196	1.646
2320	2.801	1.537	4.305
2610	3.451	1.905	6.574
2900	3.661	2.256	8.259
3190	3.841	2.488	9.556
3480	3.966	2.594	10.288
3770	4.026	2.621	10.552
4060	4.085	2.623	10.715



第1図 各制御棒反応度価値の測定結果



第2図 修正因子を考慮した制御棒反応度価値曲線

## 付録 2

### 燃焼による物質量変化の影響について

#### 1. 目的

原子炉が燃焼すると、U や BP が減少するとともに、 $^{238}\text{U}$  の中性子吸収による核分裂性物質の生成、核分裂生成物 (FP) の蓄積がある。これら物質量の変動はいずれも原子炉の反応度に影響を及ぼす。しかしながら、MVP では燃焼による物質量の変化を考慮できないので、燃焼による効果として Xe 及び Sm の蓄積のみを考慮し、U や BP の燃焼による物質量の変化を考慮していない。この方法が、臨界制御棒位置の評価上どの程度の影響を及ぼすかを拡散計算により評価する。

#### 2. 方法

拡散計算により、10 日燃焼した状態の実効増倍率と、燃焼していない状態の原子数密度に、10 日燃焼した時点の Xe 及び Sm のみを考慮した状態の実効増倍率の比較を行い、反応度及び臨界制御棒位置の差を求める。解析は 100%出力及び 30%出力について行う。

#### 3. 評価結果

解析結果を第 1 表及び第 2 表に示す。なお、反応度差から臨界制御棒位置差への換算は、拡散計算による、臨界制御棒位置近傍での反応度変化率から評価した。

100%出力では、燃焼 0 日に Xe、Sm を考慮した場合反応度が低下し、臨界制御棒位置が 10mm 程度低くなっている。しかしながら 30%出力では逆に反応度が高くなり、臨界制御棒位置が 8mm 程度低くなる結果となっている。これは、出力が違うため臨界制御棒位置が異なり、炉内の中性子束分布の形が異なること、生成する Pu などの核分裂性物質の量が異なること等の原因が考えられる。しかしながら、いずれの出力でも 10mm (1cm) 程度の差であり、10 日燃焼した状態を MVP で模擬する方法として、燃焼 0 日の原子数密度に 10 日燃焼した Xe と Sm のみを考慮する方法は大きな誤差を与えるものではないと考えられる。

第1表 100%出力(30MW)での評価結果（制御棒位置 2900mm での解析）

	実効増倍率 $k_{\text{eff}}$	反応度差 [% $\Delta k/k$ ]	臨界制御棒位置差 [mm]
10日燃焼	1.0088886	-0.09	10
燃焼なし+Xe、Sm	1.0079904		

第2表 30%出力(9MW)での評価結果（制御棒位置 2320mm での解析）

	実効増倍率 $k_{\text{eff}}$	反応度差 [% $\Delta k/k$ ]	臨界制御棒位置差 [mm]
10日燃焼	1.0173132	0.09	-8
燃焼なし+Xe、Sm	1.0182572		

## 付録 3

### 7%出力時の温度係数評価における Sm の効果について

#### 1. はじめに

7%出力運転時の温度係数評価は、基準とする時点から 24 時間程度経過した時点で評価している。この間の燃焼による反応度変化が温度係数評価に及ぼす影響を検討した。

#### 2. 評価方法

検討では、Sm について評価した。温度係数の評価では、7%出力達成後 2 日以上経過した時点のデータを用いているため、Xe は既に飽和している。そのため、燃焼により蓄積する核種のうち、反応度効果が最も大きい核種として Sm を考えた。

まず、CITATION による燃焼解析で Xe、Sm の量を求める。これと燃焼 10 日の Sm の反応度値と Sm の増加速度から、燃焼による反応度変化を求め、温度係数評価時に用いた反応度と比較することにより、燃焼の影響を評価した。

#### 3. 評価結果

第 1 図に 7%出力運転時の燃焼に伴う Xe 及び Sm の量の変化を示す。同図に示す値は炉心全体の量である。Xe は燃焼開始後 2 日でほぼ飽和し、3 日以降は一定となっている。また、Sm はほぼ一定の割合で増加している。

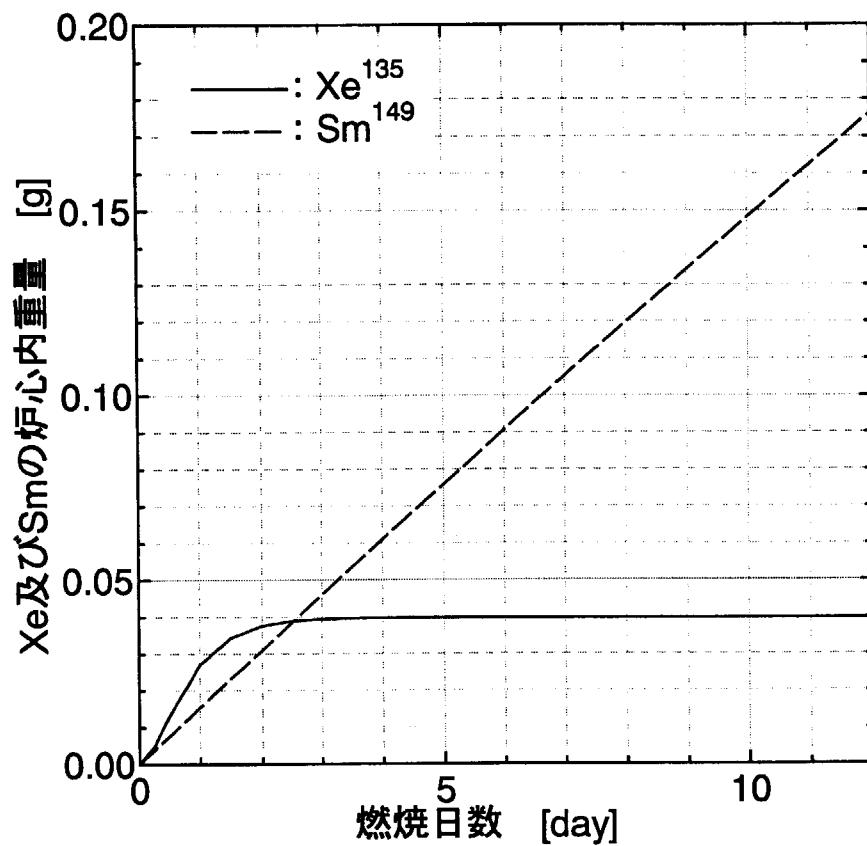
燃焼 10 日の時点での Sm 量は約 0.15g であり、1 日あたりの増加量は約 0.0036g である。燃焼 10 日での Sm の反応度効果は約 0.06%Δk/k であるので、1 日の燃焼により蓄積した Sm による反応度変化は約 0.0014%Δk/k となる。

ここで、7%出力運転時の温度係数評価では、約 3mm の制御棒位置の変化から反応度差を評価した。これは約 0.03%Δk/k に相当する。

以上から、燃焼により蓄積した Sm による反応度変化量の、温度係数評価時の反応度差に対する割合は以下のようになる。

$$\frac{0.0014}{0.03} \times 100 = 4.67(\%)$$

よって、1 日の燃焼により蓄積した Sm による、温度係数の誤差は 5%程度と考えられる。



第1図 燃焼による炉心内の Xe 及び Sm 量の変化  
(7%出力、解析結果)

## 付録 4

### 炉心解析における反射体温度の効果について

HTTR の炉心特性解析に用いている炉内温度分布のうち、固定反射体部の温度は測定結果に基づき定めている。しかしながら測定結果が得られていない出力での解析を行おうとする場合、固定反射体部の温度を推定して定めているため、不確定さが存在する。そのため、固定反射体部の温度の、炉心特性解析に及ぼす影響を評価するため、固定反射体部の温度を変化させ、実効増倍率に対する影響を評価した。

解析は 30MW (100%出力) の炉心について、固定反射対と可動反射体部の温度を変えた解析を行い、実効増倍率の差を検討した。解析に用いた温度分布を第 1 表に示す。同表中の基準状態は現在解析に用いている温度分布であり、15MW までの固定反射体部の温度の測定結果から推定した者である。状態 1 の固定反射体、側部及び上部の可動反射体温度は、出力上昇試験(2)開始前に設定していた温度分布である。解析は、10 日燃焼させた状態で制御棒位置を変えて行った。結果を第 2 表に示す。

固定反射体部の温度を上昇させると反応度が約  $0.1\%\Delta k/k$  増加する結果となっており、臨界制御棒位置が高くなるとその差は小さくなる傾向である。これは、反射体部の温度が上昇することにより中性子スペクトルが硬くなり、反射体部での不純物による吸収が減少することによるものと考えられる。また  $0.1\%\Delta k/k$  の反応度は臨界制御棒位置で 1cm 程度に相当する。

このことから、反射体温度の不確定さによる臨界制御棒位置への影響は 1cm 程度であると考えられる。

第1表 解析に用いた炉内温度分布

## (1) 基準状態

	炉心	CR カラム (C、R1)	可動反射体	固定反射体
上部	680			
1段目	$T_f = 1050$ $T_m = 900$	840	680	680
2段目	$T_f = 1230$ $T_m = 1060$	1020		
3段目	$T_f = 1300$ $T_m = 1180$	1160	740	740
4段目	$T_f = 1320$ $T_m = 1280$	1260		
5段目			740	900
下部	1260			

単位 : K

## (2) 状態 1

	炉心	CR カラム (C、R1)	可動反射体	固定反射体
上部	700			
1段目	$T_f = 1050$ $T_m = 900$	840	700	700
2段目	$T_f = 1230$ $T_m = 1060$	1020		
3段目	$T_f = 1300$ $T_m = 1180$	1160	800	800
4段目	$T_f = 1320$ $T_m = 1280$	1260		
5段目			900	900
下部	1260			

単位 : K

第2表 解析結果

制御棒位置 [mm]	実効増倍率 $k_{eff}$		反応度差 [% $\Delta k/k$ ]
	基準状態	状態 1	
2755	0.9957303	0.9971747	0.145
2900	1.0087838	1.0100143	0.121
3045	1.0194598	1.0205355	0.103

## 付録 5

### 出力上昇試験時の解析における空気の効果

HTTR の臨界試験の解析では、黒鉛の空孔に残留していると考えられる空気を考慮することにより、測定値とよく一致する結果が得られている<sup>1)</sup>。臨界試験での検討は、低温状態での結果であるため、出力上昇試験時のように炉心温度が上昇し、かつ炉心内に温度分布がある状態での空気の効果を検討した。

解析は、拡散計算による HTTR 核特性解析コードシステムを用いて行った。空気の量は、黒鉛の空孔内に大気圧状態の乾燥空気が残留しているとして求め、量は出力上昇のいずれの段階でも変化しないとした。空気の効果は、各出力状態において 10 日燃焼させた状態の原子数密度を用い、制御棒位置を臨界近傍で変化させ、空気ありとなしの状態の実効増倍率から反応度効果を求めた。0%出力のみ燃焼を考慮していない。第 1 表に解析結果を示す。

同表から、黒鉛中の空気の反応度価値は約 0.3%程度となっており、出力が高くなるにつれ反応度価値が小さくなっている。これは、空気のうち最も反応度効果の大きい窒素は、熱中性子領域でエネルギーが高くなるとわずかに吸収断面積が低下していることによると考えられる。

この反応度効果による臨界制御棒位置の変化を第 2 表に示す。同表の結果は 5mm 単位で丸めた結果である。出力運転状態では、空気を考慮すると臨界制御棒位置は 20~25mm 低くなっている。このことから、黒鉛中の空気による、臨界制御棒位置への影響は最大 25mm 程度であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 藤本 望、山下 清信、「高温工学試験研究炉炉心解析モデルの改良—過剰反応度に関する検討—」、JAERI-Research 99-059(1999).

第1表(1/2) 各出力における空気の反応度効果

## i) 0MW (0%出力、低温状態)

制御棒位置 [mm]	実効増倍率		反応度効果 [%Δk/k]
	空気なし	空気あり	
1595	0.9951438	0.9913492	0.3846
1740	1.0127406	1.0093164	0.3350
1885	1.0293386	1.0260504	0.3113
	平均		0.34

## ii) 2.1MW (7%出力)

制御棒位置 [mm]	実効増倍率		反応度効果 [%Δk/k]
	空気なし	空気あり	
1740	0.9840970	0.9809788	0.3230
1885	1.0014924	0.9983903	0.3102
2030	1.0181315	1.0150520	0.2980
	平均		0.31

## iii) 9MW (30%出力)

制御棒位置 [mm]	実効増倍率		反応度効果 [%Δk/k]
	空気なし	空気あり	
2030	0.9846637	0.9817160	0.3049
2175	1.0011117	0.9982517	0.2862
2320	1.0183132	1.0144784	0.2747
	平均		0.29

## iv) 15MW (50%出力)

制御棒位置 [mm]	実効増倍率		反応度効果 [%Δk/k]
	空気なし	空気あり	
2320	0.9927603	0.9900589	0.2748
2465	1.0090901	1.0064118	0.2637
2610	1.0250949	1.0224378	0.2535
	平均		0.26

第1表(2/2) 各出力における空気の反応度効果

v) 20MW (67%出力)

制御棒位置 [mm]	実効増倍率		反応度効果 [%Δk/k]
	空気なし	空気あり	
2465	0.9944875	0.9919269	0.2596
2610	1.0103755	1.0078315	0.2498
2755	1.0252196	1.0226836	0.2419
	平均		0.25

vi) 25MW (83%出力)

制御棒位置 [mm]	実効増倍率		反応度効果 [%Δk/k]
	空気なし	空気あり	
2610	0.9982550	0.9957320	0.2538
2755	1.0133448	1.0108308	0.2454
2900	1.0263423	1.0238200	0.2400
	平均		0.25

vii) 30MW (100%出力)

制御棒位置 [mm]	実効増倍率		反応度効果 [%Δk/k]
	空気なし	空気あり	
2755	0.9971074	0.9946660	0.2462
2900	1.0100027	1.0075512	0.2409
3045	1.0206724	1.0181789	0.2399
	平均		0.24

第2表 空気による臨界制御棒位置の変化

出力 [MW]	臨界制御棒位置 [mm]		差 [mm]
	空気なし	空気あり	
0	1635	1665	30
2.1	1875	1900	25
9	2165	2190	25
15	2385	2410	25
20	2515	2540	25
25	2630	2650	20
30	2790	2815	25

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)(g/(cm\cdot s))}$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)(cm}^2/\text{s)}$$

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-1</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-3</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>19</sup>	1.63377 × 10 <sup>20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605J (計量法)  
= 4.184J (熱化学)  
= 4.1855J (15°C)  
= 4.1868J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS(ボルト)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499W

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	0.01	1	

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-1</sup>	1

線量率	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

# HTR出力上昇試験での臨界制御棒位置と温度係数 —中間報告—

この報告は、HTR出力上昇試験中の臨界制御棒位置と温度係数についての中間報告である。試験は、臨界制御棒を逐次挿入する方法で実施された。各挿入段階での臨界制御棒位置と温度係数が記載されている。また、試験結果による臨界制御棒位置と温度係数の関係についても述べられている。