

JAERI - M  
91-165

高温工学試験研究炉における  
原子炉スクラム時の炉停止余裕の評価

1991年10月

村田 勲・山下 清信・丸山 創  
藤本 望・新藤 隆一・数土 幸夫

JAERI-M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。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷(株)

高温工学試験研究炉における原子炉スクラム時の炉停止余裕の評価

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

村田 勲・山下 清信・丸山 創・藤本 望  
新藤 隆一・数土 幸夫

(1991年9月18日受理)

HTTRは原子炉出口冷却材温度が950℃と高く、このためスクラムに伴う原子炉停止においては、制御棒の高温における繰り返し使用による寿命の低下を軽減するため、まず反射体領域の制御棒を挿入して原子炉を未臨界にし、ついで炉心温度が所定の温度(原子炉出口冷却材温度750℃)に下がるのを待って、あるいは所定の時間(2400秒)をおいて燃料領域へ制御棒を挿入して常温で未臨界を維持する制御棒2段階挿入方式を採用している。

本報告では、2段階挿入方式を用いたスクラム時において燃料領域の制御棒が挿入されるまでの間、原子炉を未臨界に維持できることの確認を行った。この結果、もっとも厳しい条件となる原子炉出口冷却材温度950℃からのスクラム時でも0.7% $\Delta k/k$ (制御棒1対のスタックを考慮した場合)以上の炉停止余裕を確保できることが分かった。

Evaluation of Shut Down Margin in Scram Condition for High Temperature  
Engineering Test Reactor (HTTR)

Isao MURATA, Kiyonobu YAMASHITA, So MARUYAMA, Nozomu FUJIMOTO  
Ryuichi SHINDO and Yukio SUDO

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

(Received September 18, 1991)

The reactor outlet coolant temperature of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) aims to achieve extremely high temperature of 950°C. In order to mitigate a damage of control rod casing in high temperature environment, the two-step control rods insertion method was adopted. In case of reactor scram, the control rods in reflector region are inserted in the core immediately, then the control rods in fuel region are inserted automatically after the reactor outlet coolant temperature decreases down to 750°C or after the present time of 2400 sec is elapsed.

This report describes the evaluation results of shutdown margin when the control rods in the fuel region are inserted after reactor scram. It was found from the present study that the shutdown margin with one control rod stuck is higher than 0.7%  $\Delta k/k$  in the severest case.

Keywords: HTTR, HTGR, Shut Down Margin, Scram, Two-step Control Rods Insertion, One Rod Stuck, Control Rods, Re-criticality Temperature, Nuclear Design

## 目 次

1. 概 要 .....	1
2. 制御棒 2 段階挿入の方法 .....	7
2.1 制御棒 2 段階挿入方式のロジック .....	7
2.2 燃料領域の制御棒の挿入条件 (2400秒及び750°C) の設定 .....	8
3. 炉停止余裕の評価方法 .....	18
3.1 炉心計算方法 .....	18
3.2 炉心温度分布評価法 .....	19
3.3 炉停止余裕評価法 .....	22
4. 評価結果 .....	41
4.1 スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕 .....	41
4.2 再臨界温度評価 .....	41
4.3 減速材温度反応度効果 .....	42
5. 結 論 .....	54
謝 辞 .....	54
参考文献 .....	55
付録A 概略再臨界温度評価 .....	56
付録B 炉停止余裕詳細計算結果 .....	63
付録C 炉停止余裕評価時の誤差評価について .....	65
付録D 図4.2.1及び図4.2.2で基準状態を評価に加えないことについて .....	67
付録E 減速材温度反応度効果評価法 .....	69

## Contents

1. Outline .....	1
2. Control Rods Insertion Method by Two-step .....	7
2.1 Logic of Two-step Control Rods Insertion Method .....	7
2.2 Scram Condition .....	8
3. Evaluation Method of Reactor Shutdown Margin .....	18
3.1 Core Calculation Method .....	18
3.2 Evaluation of Core Temperature Distribution .....	19
3.3 Evaluation Method of Shutdown Margin .....	22
4. Evaluation Results .....	41
4.1 Shutdown Margin after 2400s is Elapsed in Case of Reactor Scram .....	41
4.2 Re-criticality Temperature .....	41
4.3 Reactivity Effect of Conservative Moderator Temperature .....	42
5. Conclusion .....	54
Acknowledgements .....	54
References .....	55
Appendix A Roughly Evaluation of Re-criticality Temperature .....	56
Appendix B Minutely Evaluation of Shutdown Margin Considering Conservative Moderator Temperature .....	63
Appendix C Errors in Evaluation of Shutdown Margin .....	65
Appendix D Reason for Omission of Standard State Result in Evaluation of Shut Down Margin in Fig. 4.2.1 and Fig. 4.2.2 .....	67
Appendix E Evaluation Method of Reactivity Effect of Conservative Moderator Temperature .....	69

## 1. 概 要

日本原子力研究所は、将来の高温ガス炉技術基盤の確立と高度化並びに高温における先端的基礎研究を目的として、熱出力30MW、原子炉出口冷却材温度 950°Cの高温工学試験炉（HTTR:High Temperature Engineering Test Reactorの略）の設計を進めている<sup>(1)</sup>。HTTRの主要諸元を表1.1に示す。

HTTRでは、原子炉出口冷却材温度が高いことから、減速材としては耐熱性が高い黒鉛を、冷却材としては化学的に安定なヘリウムガスを使用している。燃料には、ウラン濃縮度が3~10wt%の低濃縮二酸化ウラン燃料を熱分解炭素(PyC)等で4重に被覆した被覆燃料粒子を使用している。炉心内のウラン濃縮度配分及び反応度調整材の諸元を表1.2に示す。ここで、ウラン濃縮度配分は、軽水炉等の「炉内で出力分布を平坦化する」という考え方とは異なり「燃料温度を平坦化する」という考え方にに基づき炉心の上部及び側部で高い配分となっている<sup>(2)</sup>。また、反応度調整材及び制御棒の吸収体には、炭化ほう素と黒鉛の焼成体を使用している。HTTRの炉心領域は、図1.1及び図1.2に示すように、六角柱状の黒鉛ブロックを積み重ねたカラムの集合体であり、30個の燃料カラムと7個の制御棒案内カラムの計37個のカラムからなる燃料領域と、それを取り囲む15個の可動反射体カラムと9個の制御棒案内カラムの計24個のカラムからなる反射体領域の合計61個のカラムにより構成されている。燃料体は、図1.3に示すように高さ580mm、面間距離360mmの黒鉛ブロックに燃料棒挿入孔を設け、33本または31本の燃料棒を装荷したピン・イン・ブロック型燃料体である。

1次冷却材（4MPaのヘリウムガス）は、原子炉压力容器（炉容器）底部の1次ヘリウムノズルから395°Cで流入し、炉床部及び炉側部の金属構造物並びに压力容器を冷却しながら上向きに流れ、上部プレナムにおいて逆転して下降流となり、燃料体及び制御棒案内ブロックの冷却材流路に配分される。燃料カラムに配分された冷却材は、燃料要素により加熱されながら下向きに流れ、高温プレナムにおいて他の流路から流出する冷却材と混合したのち、出口管を通過して炉外へ導かれる。

HTTRは、原子炉出口冷却材温度が最高 950°Cと高いため、原子炉の運転において他の炉にはない特徴的なプロセスを持つ。HTTRにおいても最も特徴的なプロセスの1つに、以下に示すスクラム時における制御棒の挿入がある。スクラムに伴う原子炉停止においては、高温中に制御棒が繰り返し挿入されるために生じる制御棒の損傷による寿命の低下を避けるため、まず反射体領域の制御棒を挿入して原子炉を未臨界にし、ついで炉心温度が所定の温度に下がるのを待って、あるいは所定の時間において燃料領域へ制御棒を挿入して常温で未臨界を維持する方式（以下「制御棒2段階挿入方式」という。）を採用している。炉心温度が所定の温度に下がったことの判断は、原子炉出口冷却材温度で行い、所定の時間間隔はタイマーで設定する。具体的には、燃料領域の制御棒は原子炉出口冷却材温度が750°C以下となったとき、もしくは反射体領域の制御棒の挿入後2400秒経過のタイマー信号で挿入する。

本評価から、原子炉出口冷却材温度が750°C、850°C及び950°Cの運転時におけるスクラム後2400

秒経過後の炉停止余裕は制御棒の1対スタックを考慮しない場合、各々4.0、2.8及び1.9% $\Delta k/k$ となることがわかった。また、1対スタックを考慮した場合でも、2400秒後の炉停止余裕は各々2.8、1.6及び0.7% $\Delta k/k$ であり、最も厳しい950°C運転時からのスクラムでも、十分な炉停止余裕があることがわかった。

なお、HTTRの安全設計方針の方針15「原子炉停止系の独立性及び試験可能性」では、高温においても1% $\Delta k/k$ 以上の余裕を持って未臨界とすべきとの記述があるとする議論もあり、HTTRの安全審査ではその指摘を受けて、評価において計算を簡略化するため炉停止余裕計算時に低めに仮定していた炉心温度分布の保守性を取り除いて評価した結果スタックを考慮しても1.2% $\Delta k/k$ の炉停止余裕が確保できることがわかった。

本報告では、第2章に、2段階挿入時のスクラム設定点である750°C及び2400秒の設定及び概略評価について、第3章に、核計算に用いた炉心内温度分布の評価方法及び炉停止余裕の評価方法について、第4章に、スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕、再臨界温度及び減速材温度反応度効果の結果についてそれぞれ示した。また、結論を第5章に示した。さらに、Appendixとして、Appendix Aに概略計算による再臨界温度の評価について、Appendix Bに減速材温度の余裕を取り除いた詳細な炉停止余裕の計算結果を、Appendix Cに炉停止余裕評価時の誤差の評価について、Appendix Dに2400秒後の炉停止余裕の評価においてスクラム直後の炉停止余裕の結果をフィッティングに使用しない理由について、そしてAppendix Eに減速材温度の評価上の余裕を温度係数を用いて補正した結果についてそれぞれ述べた。

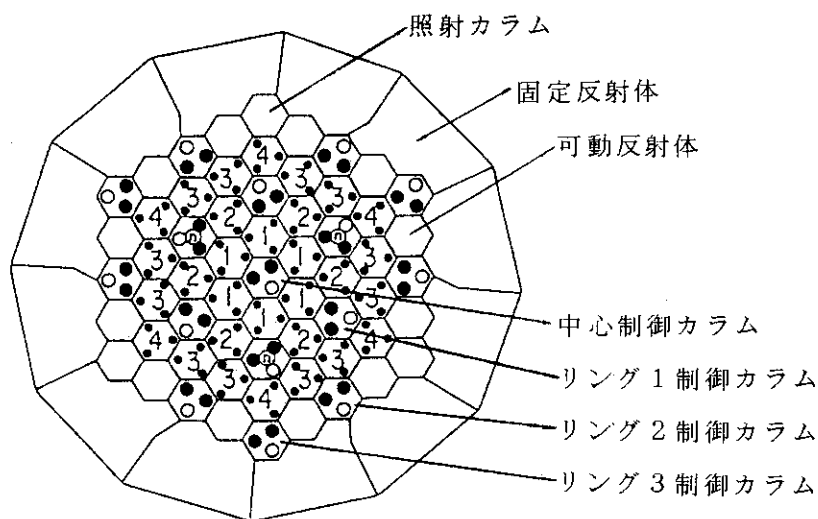
表1.1 高温工学試験研究炉の主要諸元

原子炉熱出力	30MW
原子炉入口/出口冷却材温度	395/850~950°C
一次系冷却材圧力	4 MPa
炉心有効高さ	2.9m
炉心等価直径	2.3m
出力密度	2.5MW/m <sup>3</sup>
燃料	低濃縮二酸化ウラン
燃料形式	被覆粒子/黒鉛分散型
ウラン濃縮度	3~10wt%(平均6wt%)/12種類
燃料体	ブロック型
原子炉圧力容器	鋼製(2 1/4 Cr - 1 Mo鋼)
主冷却回路数	1 ループ(中間熱交換器及び加圧水冷却器)

表1.2 高温工学試験研究炉の炉内燃料配分

上からの燃料段数 径方向燃料領域番号*	燃料濃縮度 (wt%)				反応度調整材諸元		
	1	2	3	4	直径 (mm)	天然ほう素濃度 (wt%)	ブロック内装荷本数
1	6.7	7.9	9.4	9.9	14	2.0	2
2	5.2	6.3	7.2	7.9	14	2.5	2
3	4.3	5.2	5.9	6.3	14	2.5	2
4	3.4	3.9	4.3	4.8	14	2.0	2
5	3.4	3.9	4.3	4.8	14	2.0	2

\* 径方向燃料領域番号は下図参照



燃料体カラム {  
 K : 領域番号  
 ● : 反応度調整材装荷孔

制御棒案内カラム {  
 ● : 制御棒挿入孔  
 ○ : 炭化ほう素ペレット落下孔

可動反射体カラム  
 中性子源 (D)

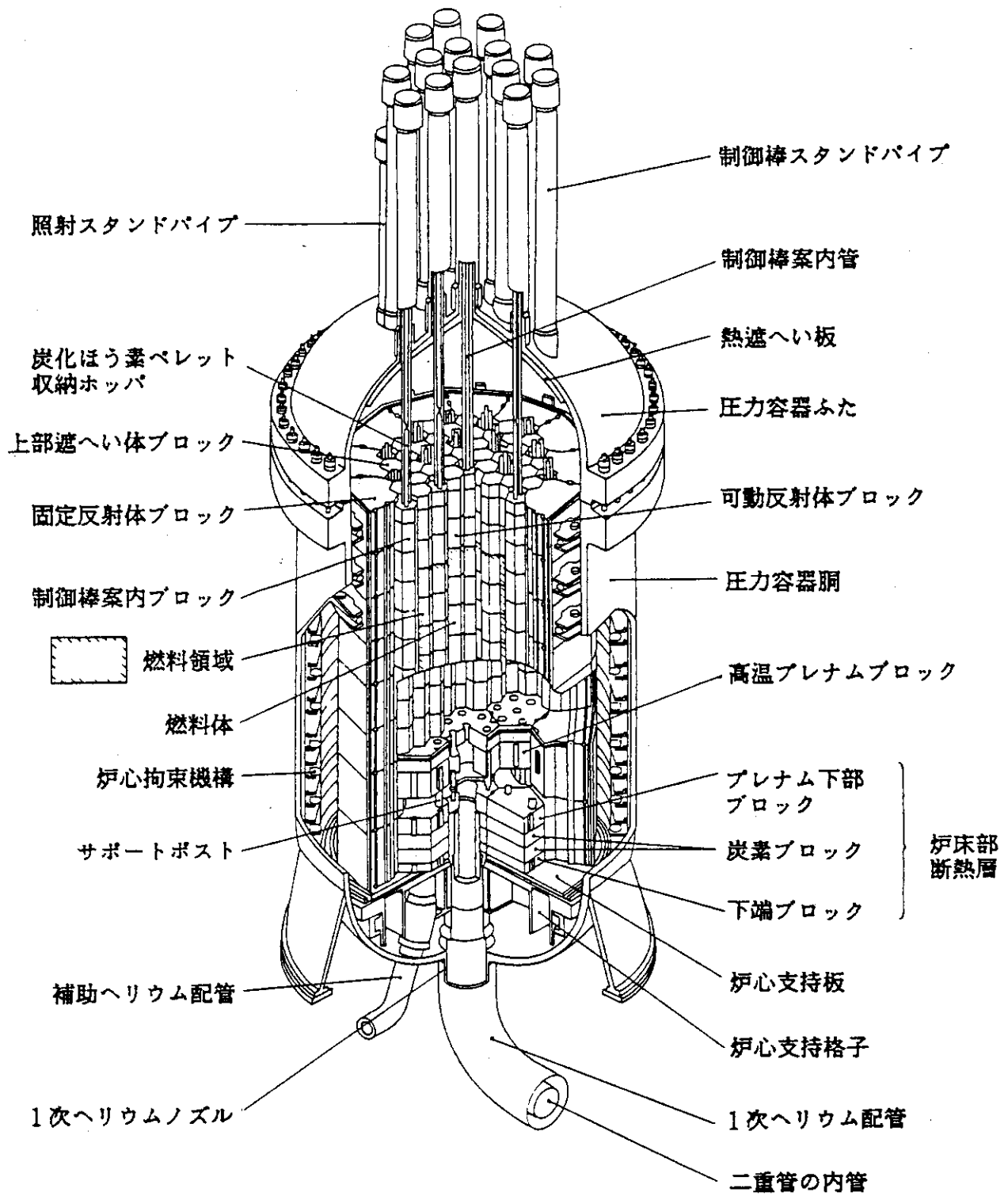


図1.1 原子炉本体構造説明図

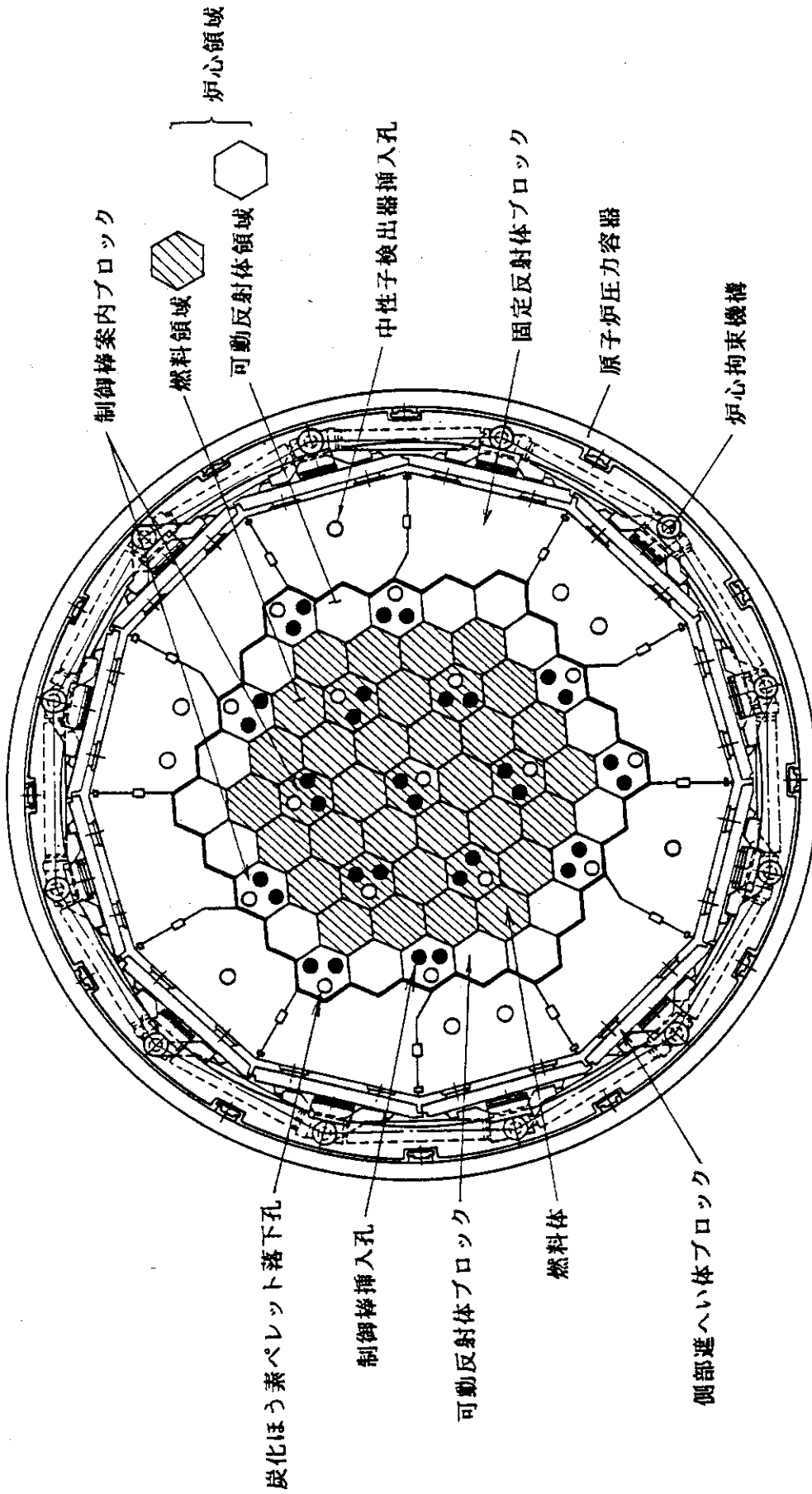


図1.2 原子炉平断面説明図

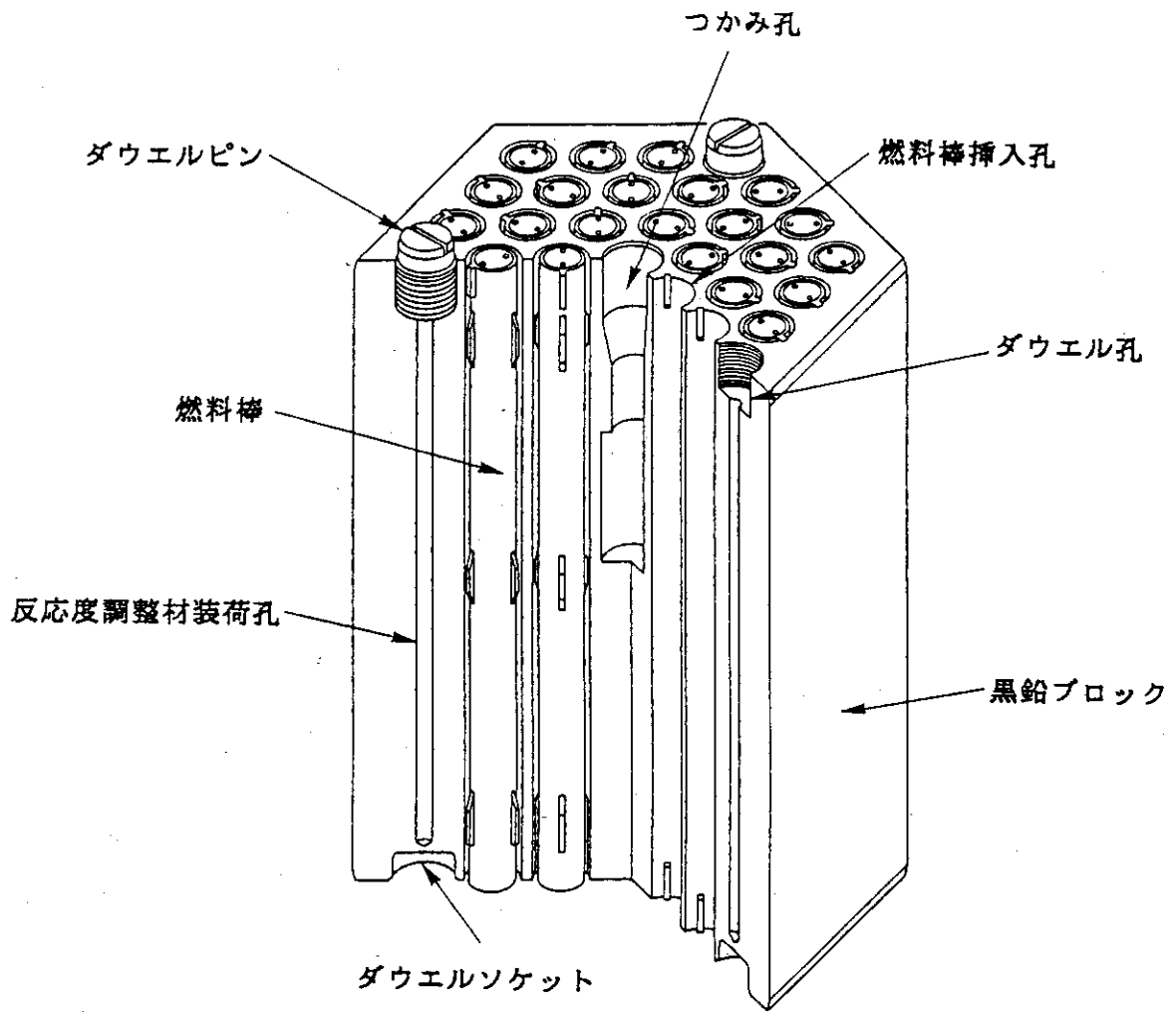


図1.3 燃料体説明図

## 2. 制御棒 2 段階挿入の方法

HTTRのスクラムに伴う原子炉停止においては、制御棒の高温における繰り返し使用による寿命の低下を避けるため、まず反射体領域の制御棒を挿入して原子炉を未臨界にし、ついで炉心温度が所定の温度に下がるのを待って、あるいは所定の時間をおいて燃料領域へ制御棒を挿入して常温で未臨界を維持する制御棒 2 段階挿入方式を採用している。

具体的には、燃料領域の制御棒を原子炉出口冷却材温度が 750℃以下となったとき、もしくは反射体領域の制御棒の挿入後2400秒経過したとき挿入する。スクラム時に原子炉出口冷却材温度が 750℃以下の場合スクラム後速やかに炉心領域の制御棒が挿入される。制御棒 2 段階挿入方式は、スクラム信号により可動反射体領域の制御棒を挿入した後、燃料領域の制御棒挿入が終了するまで、連続的かつ自動的に移行する一連の停止モードとなっている。

本章では、上記の燃料領域の制御棒の挿入条件（750℃及び2400秒）の概略設定方法及び減圧事故時等、2 段階挿入を行わない事象の説明を行う。

### 2.1 制御棒 2 段階挿入方式のロジック

HTTRのスクラム時における制御棒 2 段階挿入方式のロジックを図2.1.1に示す。

#### 2.1.1 スクラムの種類

原子炉スクラム信号が発生すると、次の2つのうちのどちらかの方法により制御棒が挿入される。

- (1) 原子炉出口冷却材温度が一定値（750℃）以下の場合、燃料領域及び可動反射体領域の制御棒が一括挿入される。
- (2) 原子炉出口冷却材温度が一定値（750℃）以上の場合、制御棒は2段階挿入方式により挿入される。

#### 2.1.2 燃料領域の制御棒の挿入時期

燃料領域の制御棒の挿入時期を、①減圧事故時、②内管破損事故時、および③それ以外、の3つの場合に分けて考える。

##### ① 減圧事故時

減圧事故時には、タイマーによる2400秒経過後、燃料領域の制御棒の挿入時に、炉心温度が制御棒の健全性が確保できるほど低下していない可能性が高いが、炉心の変形等、万一の場合を想定し可動反射体領域の制御棒の挿入後、速やかに燃料領域制御棒を挿入する。なお、減圧事故の特定は以下のように行う。まず、原子炉スクラム第1信号「1次冷却材・加圧水差压低」で可動

反射体領域の制御棒を挿入する。その後「原子炉格納容器内圧高」信号で減圧事故を特定し、燃料領域の制御棒を挿入する。「1次冷却材・加圧水差圧低」信号は、1次加圧水冷却器伝熱管破損事故時にも発生するため、減圧事故を特定できないことから、本信号による可動反射体領域及び燃料領域の制御棒の同時挿入は行わない。

## ② 二重管内管破損事故時

二重管内管破損事故時には、補助冷却系が起動しても冷却材の大部分は炉心をバイパスする恐れがあり「原子炉出口温度」信号の指示値は、炉心温度が推定可能な真の原子炉出口温度を示さない可能性がある。従って、本解析においてはタイマー（スクラム後2400秒）のみに期待し、燃料領域の制御棒を挿入するとして考える。

## ③ 減圧事故及び内管破損事故以外の時

タイマー（スクラム後2400秒）と「原子炉出口温度低（補助冷却器入口部温度、設定値 750℃）」のOR回路により、どちらか先に発生した信号で燃料領域の制御棒を挿入する。

## 2.2 燃料領域の制御棒の挿入条件（2400秒及び750℃）の設定

スクラム時、炉心では、まず、反射体領域の制御棒が挿入され、補助冷却系により炉心は冷却される。燃料温度は、速やかに周りの減速材温度まで低下し、その後炉心全体がゆっくりと冷却されていく。燃料領域の制御棒はスクラム後2400秒経過後、もしくは、原子炉出口冷却材温度が750℃以下となった時挿入される。この一連のスクラム手順において、以下の2点について評価し、その実行可能性の確認を行うことにより初めて2段階挿入方式が成立すると言える。

- ① 炉停止余裕の確保
- ② 制御棒の健全性

燃料領域の制御棒の挿入条件は、上記①及び②に基づいて、反射体領域の制御棒挿入後2400秒経過後及び原子炉出口冷却材温度750℃以下と定めた。以下に設定方法の概略を述べる。

図2.2.1にスクラム後の経過時間に対する挿入された制御棒の最高温度と炉停止余裕の関係を模式的に示す。破線は燃料領域で最も温度の高い制御棒温度を、実線は炉停止余裕を示す。なお、反射体領域の制御棒については、950℃運転状態からの挿入に対しても健全性を確保できることが確認されている（図2.2.5参照）。制御棒の温度は、スクラム後、時間の経過にともない低下する。いま、制御棒の温度が図2.2.1中の $T_{CR}$ 以下の場合、健全性が確保できるとすると、スクラム後少なくとも $t_0$ 以降には、制御棒の健全性の観点からは燃料領域の制御棒は挿入可能である。また、スクラム直後に燃料領域の制御棒を挿入しても制御棒の温度が $T_{CR}$ を下回る時2段階挿入とする必要はない。

以上より制御棒を1括挿入とする原子炉出口冷却材温度の設定値（スクラム直後） $T$ （ $\leq 950$  °C）は、そのときの制御棒温度 $T_1$ とすると、 $T_1 < T_{CR}$ となるよう定めた。また、炉停止余裕は、スクラム後の炉心の温度低下にともなう正の温度フィードバックにより減少し、スクラム後 $t_u$ 以降は炉停止余裕は負となり原子炉は再臨界となる\*。このため、スクラム後燃料領域の制御棒を挿入するまでの時間（タイマー設定値）は、 $t_b$ と $t_u$ の間に入るように各々定めることにより2段階挿入方式を成立させることができる。

図2.2.1を作成することは、実際には困難なためここでは以下のような方法により評価している。

まず、制御棒については設計上十分な余裕を見た条件<sup>3)</sup>「繰り返し使用に対する温度のしきい値を900°C以下とする。」に対し、炉停止余裕が確保されるかを検討した。スクラム後の炉停止余裕の評価は、後述する図3.1.1の手順により行う。この評価方法により図2.2.1を作成し、2段階挿入方式の成立性を評価できるが、実際には長時間の計算を必要とするため、設定値の評価は以下の2ステップにより効率的に行った。

#### Step 1

出力運転状態におけるスクラム後の再臨界温度を概略評価し、熱過渡解析結果から炉心温度分布を算出し、炉心領域の制御棒の挿入条件の設定を行う。

#### Step 2

Step 1で求められた設定に対して十分炉停止余裕が確保できるかを図3.1.1に示す詳細計算方法により確認する。

本節の後半では、Step 1について述べ、Step 2については3章に詳しく述べた。

図2.2.2に950°Cの運転時の、図2.2.3に850°Cの運転時の再臨界温度の計算結果を示す。

再臨界温度の評価は、付録Aに示すように、まず可動反射体領域の制御棒が挿入されている状態で、高温（定格、70%、50%及び30%運転）及び低温のいわゆるスクラム反応度を求める。この時、低温状態では、再臨界となっておりスクラム反応度は負となる。次に、直線内挿によりスクラム反応度が0となる、すなわち再臨界となる炉心平均減速材温度\*\*を求めた。再臨界となる時、炉心は、実際には過渡的な状態にあり、上記の方法では定常状態から過渡状態を推定しているためかなり概略的な評価となる。この効果については付録Dに述べる。

図2.2.4に熱過渡解析による原子炉出口冷却材温度750°C、850°C及び950°C運転時におけるスクラム後の経過時間と出口温度の関係を示す。この計算は、冷却が最も速い事象（手動スクラム時）について行った結果である。図より、950°C及び850°Cでは、燃料領域の制御棒はタイマーによりスクラム後2400秒経過後に挿入されることが分かる。

\* 図2.2.1に示すように $T$ に相当する（ $t_u$ が最も小さくなる）温度は750°Cと予想できるが、実際には950°Cであり、この場合の方が2400秒経過後の炉停止余裕が厳しい。（4.1節参照）

\*\* 炉心平均減速材温度とは、燃料領域の減速材の平均温度であり次の式により算出された値である。

$$(T_m(1段) + T_m(2段) + T_m(3段) + T_m(4段) + T_m(5段)) / 5$$

再臨界温度の概略解析結果と熱過渡解析による炉心平均減速材温度解析結果を表2.2.1に示す。原子炉出口冷却材温度850°C及び950°Cからのスクラム後2400秒経過後では再臨界に至ることはないと判断されるが、950°C運転状態からのスクラム後4200秒経過後では再臨界になる可能性がある。

図2.2.5に示す制御棒温度解析結果から、950°C運転状態からのスクラムではタイマーによる燃料領域の制御棒の挿入は2400秒が限度であることが分かる。

以上より、燃料領域の制御棒を挿入する時間は、スクラム後2400秒経過後と決定した。

制御棒温度解析結果に基づく制御棒被覆材の健全性の観点から、原子炉出口冷却材温度750°C以下では、スクラム時に制御棒の一括挿入が可能となる<sup>3)</sup>。スクラム後2400秒及び4200秒経過後の炉心平均減速材温度を熱過渡解析結果から評価すると、図2.2.2及び図2.2.3に示すA点(750°C運転状態を850°C及び950°C運転の中間出力状態と評価した場合)、B点(850°C及び950°C運転時のスクラム後2400秒経過後)及びC点(950°C運転時のスクラム後4200秒経過後)のようになり、750°C運転においてもスクラム後2400秒経過後に再臨界にならないと判断できる。

以上から、燃料領域の制御棒の挿入を決定する原子炉出口冷却材温度の設定値を750°Cとした。実際には、温度設定値を750°Cとすると、750°C運転状態からのスクラムは全制御棒の一括挿入となり、スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕の問題はなくなる。しかし、図2.2.1に示したように内管破損事故の場合、燃料領域の制御棒の挿入は、タイマーに期待することになるため、Step 2における炉停止余裕評価では750°C運転時のスクラム後2400秒経過後の炉停止余裕の評価を行っている。更に850°C及び950°C運転からのスクラムでは、両者ともタイマーにより燃料領域の制御棒が挿入されることから、750°Cと850°C運転の間にタイマーと原子炉出口冷却材温度による燃料領域の制御棒挿入の境界が存在することになり、この境界点の評価が困難なことからも、750°C運転状態からのスクラム後2400秒経過後の炉停止余裕の評価は重要となる。

表2.2.1 熱過渡解析による炉心平均減速材温度（スクラム後2400秒及び4200秒経過後）及び概略再臨界温度

原子炉出口 冷却材温度 (°C)	炉心平均減速材温度 (°C)			再臨界温度の概 略評価値 (°C)	
	スクラム直後	40分経過後・	70分経過後・	スタック	
750	527	482	—	無	—**
				有	—**
850	707	567	—	無	386
				有	431
950	767	616	525	無	445
				有	491

\*：熱過渡解析計算結果

\*\*：950°C運転時の70%出力状態に相当

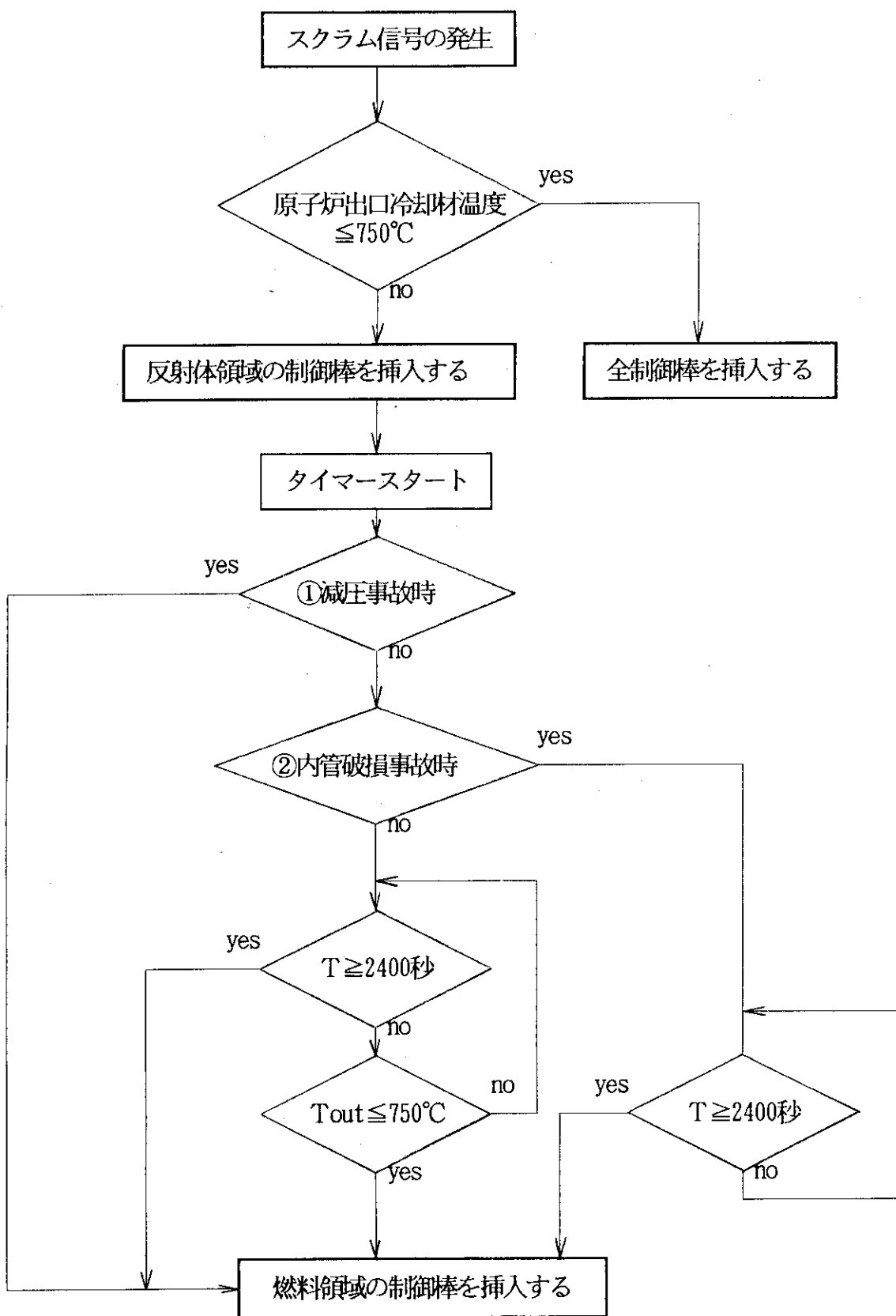
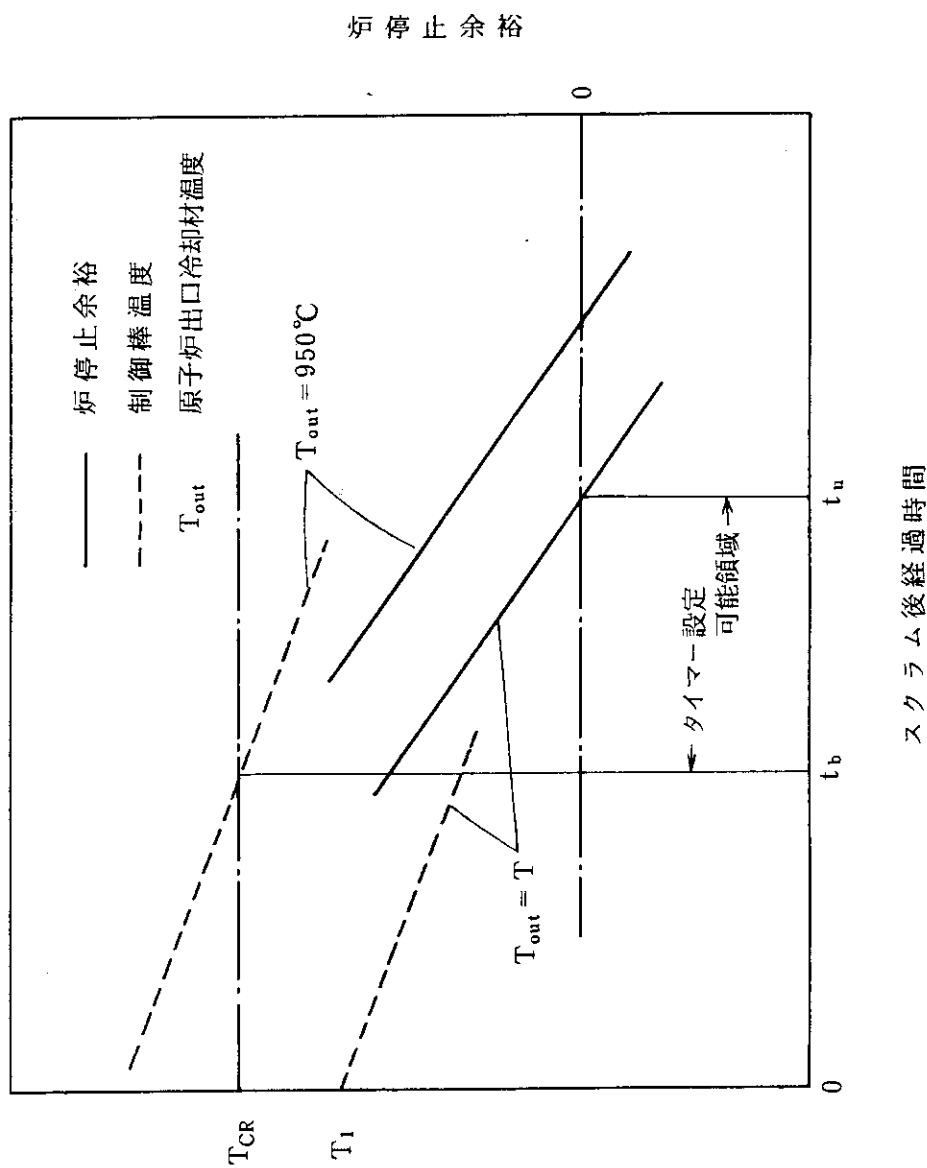


図2.1 HTTRにおける原子炉スクラム時のロジック



スクラム後の時間経過に対する挿入された  
燃料領域の制御棒の最高温度

図2.2.1 スクラム後の時間経過に対する挿入された  
制御棒の最高温度と炉停止余裕の関係

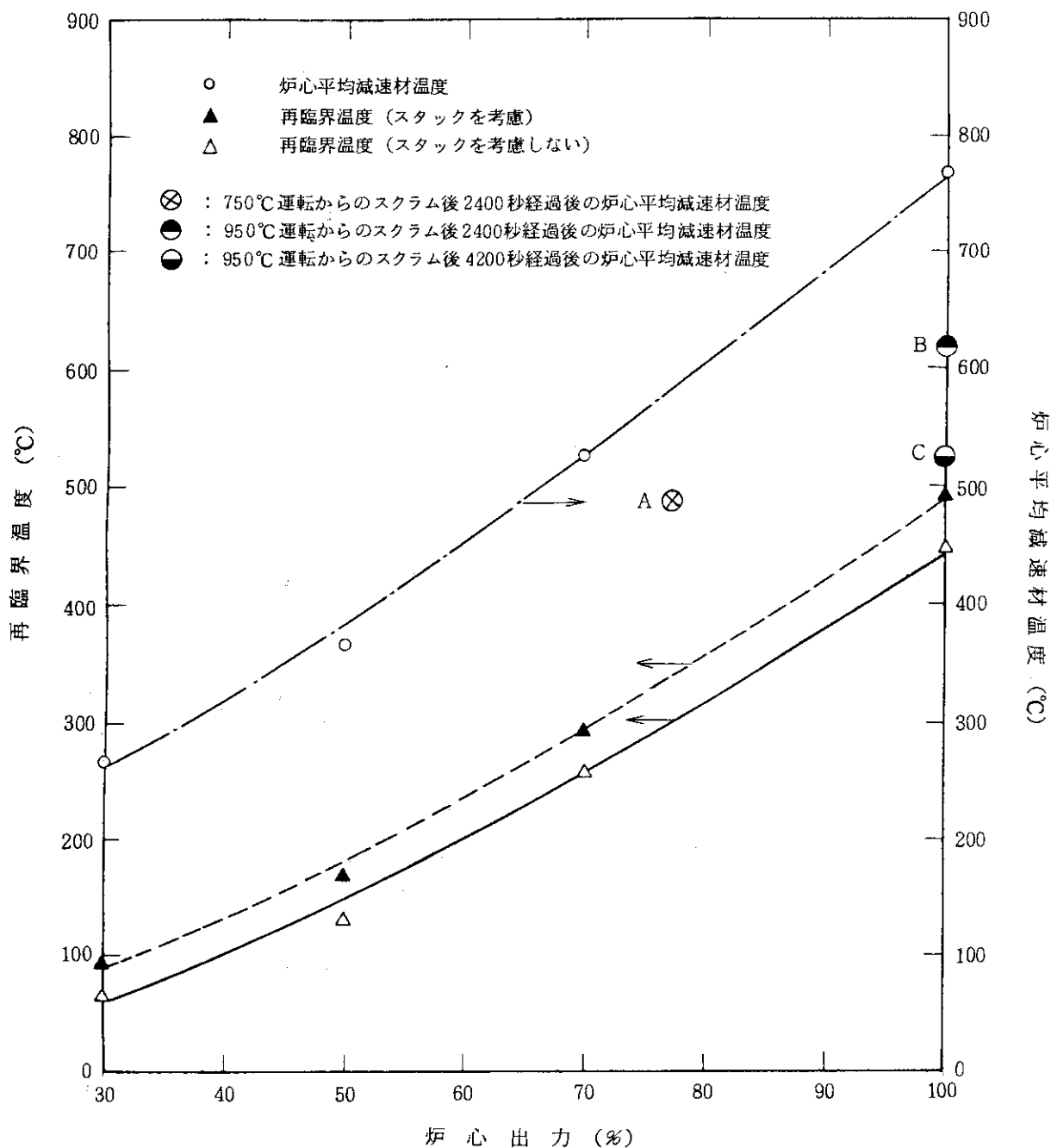


図2.2.2 原子炉出力と再臨界温度との関係 (原子炉出口冷却材温度 950°C)

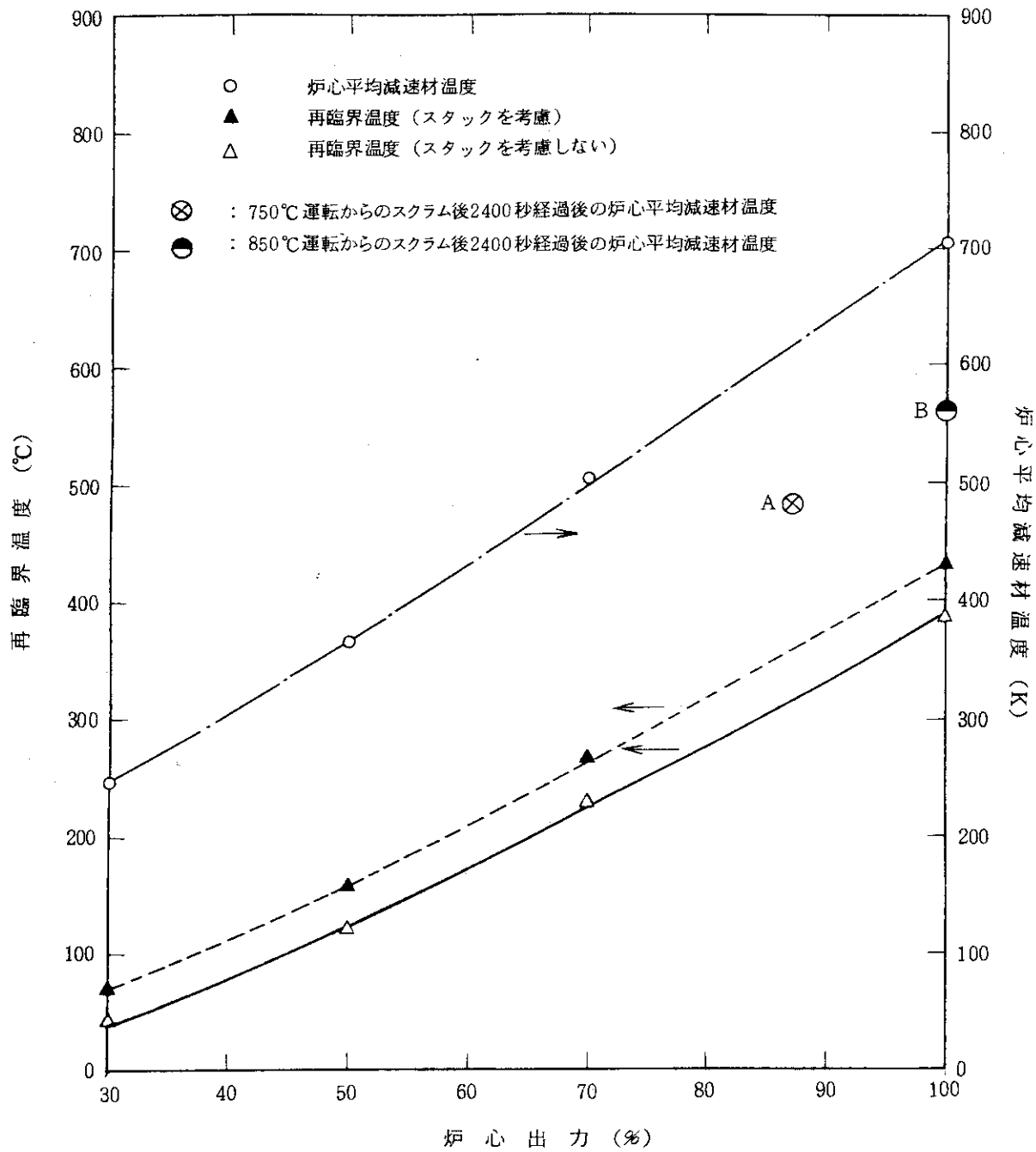


図2.2.3 原子炉出力と再臨界温度との関係 (原子炉出口冷却材温度 850°C)

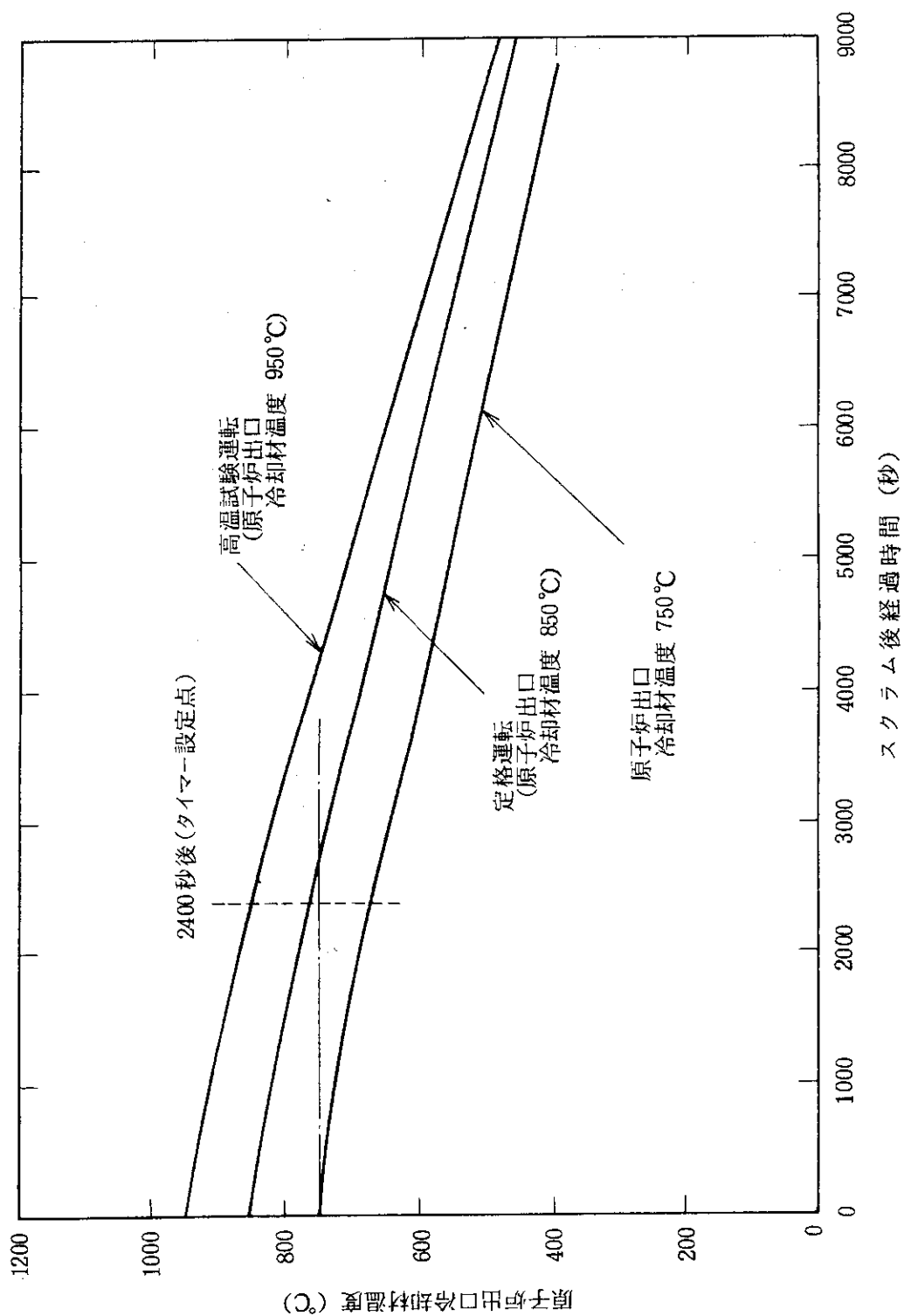


図2.2.4 スクラム後の原子炉出口冷却材温度の変化  
(冷却が最も早い事象)

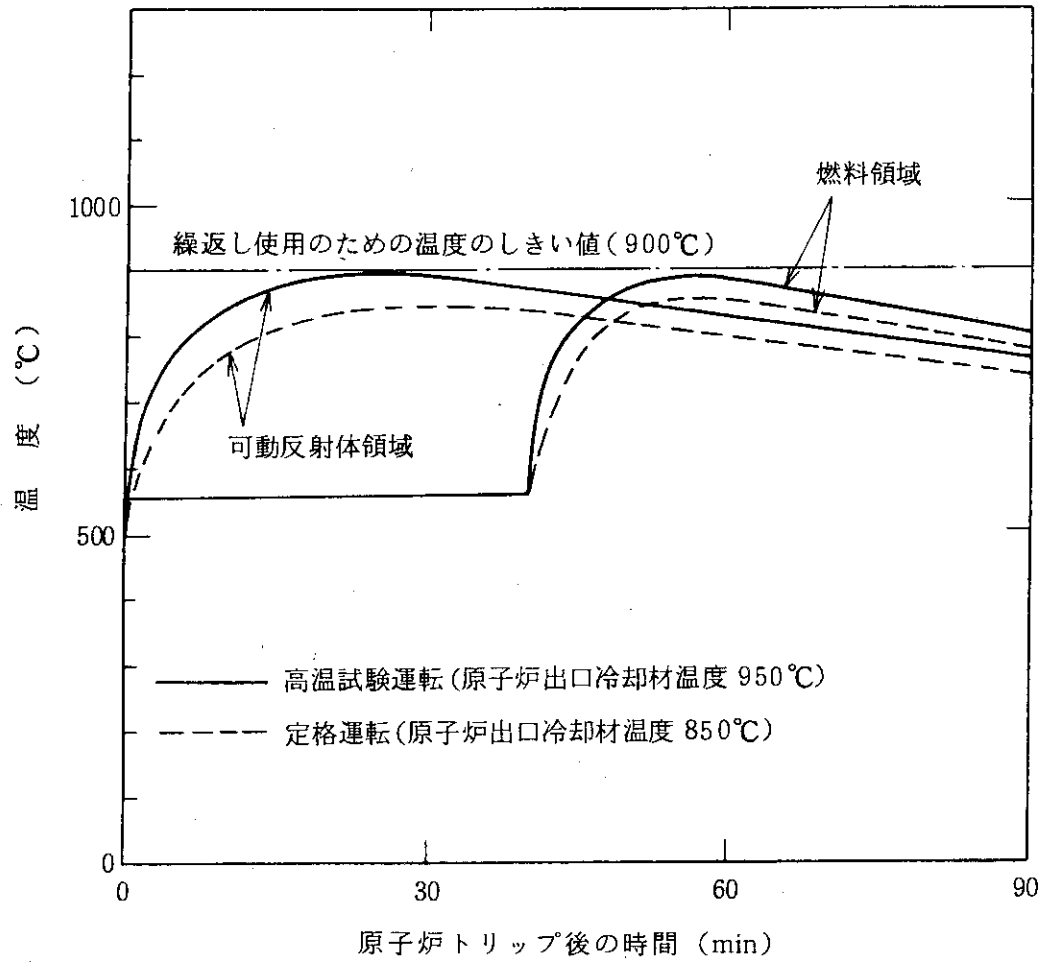


図2.2.5 商用電源喪失後の制御棒外側被覆管温度履歴

### 3. 炉停止余裕の評価方法

制御棒 2 段階挿入方式によるスクラム時の炉停止余裕の評価方法は概略以下のとおりである。原子炉は、スクラム後補助冷却系により崩壊熱を除去する。原子炉出口冷却材温度及び炉内構造物等の温度は、徐々に下がってゆく。スクラム後2400秒経過後の炉心内温度分布は THYDE-HTGRコードによるプラント熱過渡解析から得られる燃料ブロックの温度及び TRUMPコードによる炉心内 3 次元温度解析から得られる燃料体黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック及び反射体ブロックの温度を基に計算した<sup>4)</sup>。得られた温度分布は炉停止余裕評価上保守的な値が得られるよう 3.2 節に示す方法により核計算用温度分布に変換した。この温度を用い格子燃焼計算を行い群定数を作成し、3次元中性子拡散コードにより炉心計算を行った。

上記の方法により得られた実効増倍率 ( $k_{eff}$ ) を 3.3 節に示す炉停止余裕評価方法に従って処理し、スクラム後の過渡的な状態における炉停止余裕を評価した。

#### 3.1 炉心計算方法

炉停止余裕の評価に必要な実効増倍率の計算は図 3.1.1 に示す核設計計算の手順に基づいて行った。中性子スペクトル計算と縮約群定数の作成に当たっては、高温ガス炉用燃料格子特性解析のために開発された DELIGHT<sup>5)</sup> を使用する。熱過渡解析により得られた炉内の温度分布を DELIGHT に入力することにより群定数を作成した。制御棒の遮蔽効果の計算と縮約群定数作成に当たっては、2次元  $S_N$  計算を行う TWOTRAN-2<sup>6)</sup> を使用する。DELIGHT 及び TWOTRAN-2 によって得られた炉心計算用縮約群定数セットを使用し、CITATION<sup>7)</sup> 及びこれをベクトル化して計算速度を速めた CITATION-1000VP<sup>8)</sup> を用いて実効増倍率を求める。DELIGHT を用いた燃料格子計算及び反応度調整材(BP)格子計算を 3.1.1 節に、TWOTRAN-2 を用いた制御棒格子計算を 3.1.2 節に示す。また、CITATION 及び CITATION-1000VP を用いた炉心計算を 3.1.3 節に示す。

##### 3.1.1 燃料格子計算及び反応度調整材(BP)格子計算

DELIGHT の計算フローを図 3.1.2 に、燃料格子計算及び BP 格子計算の速中性子群及び熱中性子群の群構造を各々表 3.1.1 及び表 3.1.2 に示す。速中性子群のエネルギーの上限は 10MeV とし、速中性子領域と熱中性子領域の境界エネルギーは 2.38eV としている。核定数としては ENDF/B-IV に基づいて作成した 111 群核データを使用する。中性子スペクトル計算は 111 群の多群で行い、燃料格子及び BP 格子の計算は 40 群の少数群で行う。この少数群の群定数を更に縮約し、炉心特性計算に用いる縮約群の群定数を作成する。黒鉛による中性子散乱効果の計算には、黒鉛の結晶構造を考慮したモデルを使用している。また、共鳴吸収計算は、被覆燃料粒子と燃料要素によって生じる燃料の 2 重非均質効果を考慮して行っている。燃料チェーンモデルには Garison モデルを使用している。

燃料格子の計算モデルは、図3.1.3に示すように燃料棒及び冷却材ヘリウムの周辺に1燃料棒当りの黒鉛ブロックの黒鉛（等価黒鉛）を配置した円環状モデルである。BP格子の計算モデルは、図3.1.4に示すようにBP棒の周辺に燃料格子特性計算より得られた均質化した燃料の群定数を配置した円環状モデルである。

### 3.1.2 制御棒格子計算

制御棒格子計算は、制御棒が制御棒案内ブロック内に挿入されている状態の制御棒格子モデル内の中性子束分布を求め、この中性子分布を重みとして制御棒挿入状態の黒鉛ブロック内の平均群定数を作成する計算である。この計算は、2次元中性子輸送計算コードTWOTRAN-2を用い、 $P_1S_4$ の条件で行っている。計算メッシュモデルは、制御棒の挿入状態が円対称でないことから、図3.1.5に示すXYメッシュモデルを使用し、各々の吸収体部の形状を多数の微小長方形で模擬している。モデルの吸収体部の外表面積は、制御棒の中性子吸収材の表面積とほぼ一致するように定めている。

### 3.1.3 炉心特性計算

炉心特性計算では、燃料格子計算、BP格子計算及び制御棒格子計算より得られた燃料体、反射体並びに制御棒の群定数及び炉心形状データを用いて、炉停止余裕評価に用いる炉心の実効増倍率を求める。計算コードとしては、中性子拡散コードCITATION及びこれをベクトル化したCITATION-1000VPを用いる。計算に用いる3次元三角柱メッシュモデルは、図3.1.6及び3.1.7に示すように1燃料体ブロックを径方向に6個の三角形に、軸方向に4個の三角柱に分割したメッシュモデルである。

## 3.2 炉心温度分布評価法

温度変化に対する反応度変化は $^{12}\text{C}$ 及び $^{238}\text{U}$ の断面積変化に起因するものが大部分であり、これらを含む黒鉛ブロック及び燃料ブロックについて温度を考慮した核計算用定数を作成する必要がある。核計算用の定数作成に必要な炉心内の温度分布は3次元炉心温度解析結果<sup>4)</sup>を用い、炉停止余裕評価上保守的となるように、100℃以下を切り捨てて評価している。図3.2.1、図3.2.2及び図3.2.3に熱過渡解析により評価された原子炉出口冷却材温度750℃、850℃及び950℃運転時の炉心内温度分布を示す。

温度分布は、TRUMPによる解析結果に基づいて第1燃料領域、第3燃料領域、リング1制御カラム、リング2制御カラム、可動反射体及び固定反射体について評価している（表1.2の参考図参照）。核計算用群定数は、基本的には図3.2.4に示す領域毎に熱過渡解析の計算結果から、各々の領域の体積平均温度に基づいて作成した。図3.2.5には原子炉出口冷却材温度750℃、850℃及び950℃運転時における群定数作成用の各領域の燃料及び減速材の温度分布を示す。各々のカラムの体積比を表3.2.1に示す。各領域の核計算用温度評価方法を以下に示す。

## (1) 上部反射体領域

上部反射体領域は、図3.2.4に示すように固定反射体を含んでいることから炉心温度の計算結果から体積平均により領域平均温度を算出できない。しかし、体積的には、固定反射体の寄与が大きく、また、温度も固定反射体の方が上部可動反射体より低いため、この領域では、固定反射体の温度のみを使用して、各段で平均することにより評価した。その結果、750℃、850℃及び950℃運転時の上部反射体領域の領域平均温度は各々227℃、327℃及び327℃とした。

## (2) 下部反射体領域

下部反射体領域は、図3.2.4に示すように炉心領域の下部可動反射体2段分である。炉心温度計算結果は、炉心領域では表3.2.1に示すように第1燃料領域、第1リング制御カラム及び第3燃料領域に対して得られていることから、温度が与えられていない領域については、表3.2.1に示すように隣接する領域の結果を使用し、体積平均することとした。

領域平均温度 $T$ は、 $T_1$ (第1燃料領域の温度)、 $T_2$ (第1リング制御カラムの温度)及び $T_3$ (第3燃料領域の温度)から次式により与えられる。

$$T = \alpha T_1 + \beta T_2 + \lambda T_3 \quad (3.2.1)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{\text{中心制御カラム数} + \text{第1燃料領域カラム数} + \text{第2燃料領域カラム数}}{\text{炉心領域カラム数}} = \frac{13}{37}$$

$$\beta = \frac{\text{第1リング制御カラム数}}{\text{炉心領域カラム数}} = \frac{6}{37}$$

$$\lambda = \frac{\text{第3燃料領域カラム数} + \text{第4燃料領域カラム数}}{\text{炉心領域カラム数}} = \frac{18}{37}$$

## (3) 燃料領域

燃料領域については、図3.2.4に示すように径方向に制御カラムと燃料カラムとに分けており、さらに燃料カラムの燃料体は、31ピン燃料体と33ピン燃料体に分けている。また、軸方向には、各々を4領域に分割している。温度評価上は、径方向の温度勾配が小さいことから、燃料カラムは31ピン燃料体と33ピン燃料体で同じ温度を用い、制御棒案内カラムについても同様に同じ温度を用いることとした。また、燃料領域では、格子計算において燃料と減速材(黒鉛ブロック)を別々に扱うことが可能であり、以下に示すように温度を別々に評価した。

燃料：第1燃料領域の温度( $T_1$ )と第3燃料領域の温度( $T_2$ )を使用

減速材：第1燃料領域の温度( $T_1$ )、第1リング制御カラムの温度( $T_2$ )及び第3燃料領域の温度( $T_3$ )を使用

燃料領域については、炉心温度解析により温度が与えられていない第2燃料領域には第1燃料

領域の値を、第4燃料領域には第3燃料領域の値を各々使用し、体積平均を行った。

減速材温度については(2)と同様の方法により領域平均温度を評価した。

燃料の領域平均温度 $T$ は次式により与えられる。

$$T = aT_1 + bT_2 \quad (3.2.2)$$

ここで、

$$a = \frac{\text{第1燃料領域カラム数} + \text{第2燃料領域カラム数}}{\text{全燃料カラム数}} = \frac{12}{30}$$

$$b = \frac{\text{第3燃料領域カラム数} + \text{第4燃料領域カラム数}}{\text{全燃料カラム数}} = \frac{18}{30}$$

評価温度 $T$ は $10^\circ\text{C}$ 単位で与えている。また、4段及び5段の燃料温度は異なっているが、濃縮度等が同じであるため領域平均温度としては4段及び5段の平均をとり、格子計算は同一条件を仮定している。

#### (4) 可動反射体A領域

可動反射体A領域は、図3.2.4に示すように側部可動反射体領域において軸方向位置が燃料体の2段及び3段に相当する領域である。可動反射体領域では、炉心温度計算結果は、第2リング制御カラムと可動反射体ブロックについて得られている。照射カラム及び第3リング制御カラムは、どちらも可動反射体ブロックに囲まれているため、これらの領域では、可動反射体の炉心温度計算結果を使用することとした。各段毎の平均温度 $T$ は、第2リング制御カラムの温度( $T_1$ )及び可動反射体ブロックの温度( $T_2$ )を使って、次式より与えられる。

$$T = cT_1 + dT_2 \quad (3.2.3)$$

ここで、

$$c = \frac{\text{第2リング制御カラム数}}{\text{可動反射体領域全カラム数}} = \frac{6}{24}$$

$$d = \frac{\text{可動反射体ブロックカラム数} + \text{第3リング制御カラム数} + \text{照射カラム数}}{\text{可動反射体領域全カラム数}} = \frac{18}{24}$$

(3.2.3)式で得られた各段毎の平均温度は、段数で平均して領域平均温度とした。

#### (5) 可動反射体B領域

可動反射体B領域は、図3.2.4に示すように側部可動反射体領域において燃料体の4段及び5段に相当する領域と下部可動反射体の一部(径方向位置は炉心領域の外側)を合わせた領域である。この領域では(4)と同様第2リング制御カラムと可動反射体ブロックについて、4段及び5段

目の温度及び下部可動反射体の温度が得られている。従って(4)と同様に、可動反射体ブロックの温度を照射カラム及び第3リング制御カラムに適用すると、各段の平均温度は(3.2.3)式で与えられる。下部可動反射体が2段あることから、領域平均温度は、 $\{T(4,5 \text{ 段平均温度}) + T(\text{下部可動反射体温度})\} / 2$  で与えられる。

#### (6) 固定反射体領域

固定反射体領域は、図3.2.4に示すように、A及びBの2領域に分け、それぞれ体積平均をとり評価している。

なお、炉停止余裕評価上保守的となるよう燃料温度については $10^{\circ}\text{C}$ 単位で減速材温度については $100^{\circ}\text{C}$ 単位の切捨てとした。また、評価においては、

- 1) 燃料領域では  $T_m(\text{減速材温度}) \leq T_f(\text{燃料温度})$
- 2) 冷却材の流れる方向に温度が減少しない

の2点についても考慮した。温度評価結果は、図3.2.5にまとめて示した。

### 3.3 炉停止余裕評価法

2.2節ではスクラム直後の炉停止余裕(いわゆるスクラム反応度)と低温の炉停止余裕から内挿により再臨界温度を求め、スクラム設定値の概略評価を行った。本節では、設定されたスクラム条件に従って原子炉がスクラムした場合、もっとも炉心の反応度が高くなるスクラム後2400秒経過後の炉停止余裕の評価方法について述べる。

#### 3.3.1 2段階挿入における炉停止余裕

原子炉は、スクラム後まず燃料温度が低下し、減速材温度とほぼ等しくなり、その後、炉心はゆっくりと冷却される。燃料領域の制御棒が挿入されない場合には、炉心温度低下に伴い正の反応度が添加されやがて再臨界となる。HTTRでは、スクラム後2400秒経過後もしくは原子炉出口冷却材温度が $750^{\circ}\text{C}$ 以下となった時点で燃料領域の制御棒を挿入することとしており、そのあいだに再臨界となることはない。

図3.3.1にスクラム後の減速材温度変化と炉停止余裕の関係の概略図を示す。

2.2節に述べた再臨界温度は、図中の $T_1$ に相当し、低温時の炉停止余裕Aと高温時の炉停止余裕Bから直線内挿したものである。実際には、上述したように、スクラム直後には燃料温度のみ下がるため、図中のB点はC点になると考えられ、再臨界温度は若干上がる( $T_2$ )と考えられる。ここで、A点、B点、C点は、何れも定常計算による温度分布を用いた結果であり、過渡的な計算を行った場合には直線内挿できず、スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕は、D点に示すように直線AC上にない可能性がある。以上のように、直線ABから求めた再臨界温度及び2400秒経過後の炉停止余裕は、結果的にかなりの誤差を含んでいることが分かる。そこで本解析では、実際に炉心温度の過渡解析を行い、2400秒経過後の炉心温度分布を算出、D点に相当する炉停止余裕を評価し、十分な炉停止余裕が確保できることを確認することとした。なお、D点は、炉停止余裕計算を簡略

化するために減速材温度を保守的に低めに仮定しており（3.2節参照）、実際には、炉停止余裕はD点よりも若干大きな値（E点）になると考えられる。減速材温度評価の保守性を取り除いた場合の炉停止余裕の評価については、最も厳しい運転状態について行っており、その結果は付録Bに示す。

### 3.3.2 炉停止余裕計算方法

炉停止余裕の評価方法が、通常の炉心特性解析と異なる点は、炉心温度分布評価が前段階として必要なことであり、その結果及び核計算用炉心温度分布評価については3.2節に述べた。また、3.1節では温度分布を用いて実効増倍率を求める手順について述べた。本節では、実効増倍率から炉停止余裕を評価する方法について述べる。

スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕評価時の反応度収支を図3.3.2に示す。炉停止余裕の評価では、以下に示す誤差\*を考慮するため、図に示す4種類の炉心状態の計算を行い、実効増倍率を算出している。

- ① 実効増倍率の誤差（1%  $\Delta k$ ）
- ② 反応度調整材の反応度値の誤差（10%）
- ③ 制御棒の反応度値の誤差（10%）

これらの誤差による制御棒レベルの相違を評価するため、制御棒位置をノミナル、深め及び浅めにした計算を行っている。評価は上記の制御棒レベルの内で炉停止余裕評価上最も厳しい場合の値を評価値として採用している。

図3.3.2より図3.3.1中のD点に相当する炉停止余裕を算出する方法は以下のとおりである。なお、スクラム反応度（スクラム直後の炉停止余裕）は図3.3.1のB点を評価値とした。この算出方法についても同時に示す。求めるべき値は、図3.3.2では①と③の差 $\Delta\rho_b$ （スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕（図3.3.1のD点に対応））及び①と②の差 $\Delta\rho_a$ （スクラム直後の高温炉停止余裕（図3.3.1のB点に対応））である。

図3.3.2の①は通常運転状態、②は①の状態からスクラムした状態を示す。炉心温度が低下すると温度効果により正の反応度が加えられ③になり、その状態から仮に制御棒を抜くと④になる。実際の手順は $\Delta\rho_a$ は①→②であり、 $\Delta\rho_b$ については①→②→③もしくは①→④→③が評価上考えられる。 $\Delta\rho_b$ はノミナル値ではどちらのプロセスでも同じ値となるが、誤差を考慮すると（例えば①→②では制御棒反応度値誤差、②→③では温度効果に対する誤差）両プロセスで違った値を示すようになる。本評価では、これらの効果を包絡するように次の式で $\Delta\rho_b$ を定義した。

\* ①～③を総合した誤差を2.4%  $\Delta k/k$ と評価し、 $k_{eff}$ がだいたい1.0、0.98及び1.02となる場合についての計算を行った。2.4%  $\Delta k/k$ の根拠を付録Cに示す。

$$\Delta\rho_b = \min(\rho_{s1}, \rho_{s2}) \cdot f_2 - \max(\rho_{T1}, \rho_{T2}) \cdot f_1 \quad (3.3.1)$$

ここで,

$f_1, f_2$  は誤差因子であり,

$f_1$  : 温度効果に対する誤差 (10%) = 1.1

$f_2$  : 制御棒反応度値に対する誤差 (10%) 及び輸送補正 (輸送計算と拡散計算の差 5%) =  $0.9 \times 0.95 = 0.855$

$\Delta\rho_b$  が最も小さくなるのは制御棒反応度値として  $\rho_{s2}$  を, 温度効果として  $\rho_{T1}$  を仮定した場合であり (3.3.1) 式は次式のような\*。

$$\Delta\rho_b = \rho_{s2} \cdot 0.855 - \rho_{T1} \cdot 1.1 \quad (3.3.2)$$

一方,  $\Delta\rho_a$  は①→④→③→②というプロセスでは明らかに物理的に考え難いので, ここでは次式で評価した。

$$\Delta\rho_a = \rho_{s1} \cdot f_2 \quad (3.3.3)$$

以上より, 2段階挿入時の炉停止余裕は, 反応度値評価時にも十分な保守性を持たせた評価となっている\*\*。但し, (3.3.2) 式は,  $\rho_{T1} = 0$  の場合  $\Delta\rho_b$  と  $\Delta\rho_a$  は等しくならない点に注意を要する。

\* 実効増倍率を考えた場合, 定格運転状態からスクラムした場合と, 温度を下げた場合, つまり図3.3.2  $k_1 \rightarrow k_2$  と  $k_1 \rightarrow k_4$  を考えた場合,  $k_2$  は深い未臨界状態となり, もともと  $k_1$  (標準状態) が誤差を考慮して深めに挿入していることから, 必ず  $\rho_{T1} > \rho_{T2}$ ,  $\rho_{s1} > \rho_{s2}$ となる。

\*\* (3.3.2) 式から  $\rho_{T1} = 0$  の場合  $\Delta\rho_b$  は  $\Delta\rho_a$  に等しくならない。これは常に  $\rho_{s1} > \rho_{s2}$  となるため (3.3.1) 式の定義から (3.3.2) 式で  $\rho_{s2}$  が選ばれるためである。

表3.1.1 速中性子群・群構造

群			レサジー (下限)	エネルギー (下限, eV)	群			レサジー (下限)	エネルギー (下限, eV)	
1)	2)	3)			1)	2)	3)			
1	1	1	0.25	$7.79 \times 10^6$	3	10	35	8.75	$1.59 \times 10^3$	
		2	0.50	$6.07 \times 10^6$			36	9.00	$1.23 \times 10^3$	
		3	0.75	$4.72 \times 10^6$			37	9.25	961	
		4	1.00	$3.68 \times 10^6$			11	38	9.50	748
		5	1.25	$2.87 \times 10^6$				39	9.75	583
	2	6	6	1.50		$2.23 \times 10^6$	12	40	10.00	454
			7	1.75		$1.74 \times 10^6$		41	10.25	354
		8	2.00	$1.35 \times 10^6$		13	42	10.50	275	
	3	9	9	2.25			$1.05 \times 10^6$	14	43	10.75
			10	2.50		$8.21 \times 10^5$	44		11.00	167
		11	2.75	$6.39 \times 10^5$		15	45	11.25	130	
	12	3.00	$4.98 \times 10^5$	46			11.50	101		
	4	13	13	3.25			$3.88 \times 10^5$	47	11.75	78.9
			14	3.50		$3.02 \times 10^5$	16	48	12.00	61.4
		15	3.75	$2.35 \times 10^5$		49		12.25	47.9	
		16	4.00	$1.83 \times 10^5$		17	50	12.50	37.3	
5	17	17	4.25	$1.43 \times 10^5$	51		12.75	29.0		
		18	4.50	$1.11 \times 10^5$	18	52	13.00	22.6		
	6	19	19	4.75		$8.65 \times 10^4$	53	13.25	17.6	
			20	5.00	$6.74 \times 10^4$	19	54	13.50	13.7	
		21	5.25	$5.25 \times 10^4$	55		13.75	10.68		
2	7	22	5.55	$4.09 \times 10^4$	20	56	14.00	8.32		
		23	5.75	$3.18 \times 10^4$		57	14.25	6.48		
		24	6.00	$2.48 \times 10^4$		58	14.50	5.04		
	8	25	25	6.25	$1.93 \times 10^4$	62	59	14.75	3.93	
			26	6.50	$1.50 \times 10^4$		63	60	15.00	3.06
		27	6.75	$1.17 \times 10^4$	61	15.25		2.38		
	9	28	28	7.00	$9.12 \times 10^3$	64	62	15.50	1.86	
29			7.25	$7.10 \times 10^3$	63		15.75	1.44		
30			7.50	$5.53 \times 10^3$	64		16.00	1.125		
31		31	31	7.75	$4.31 \times 10^3$		65	16.25	0.876	
			32	8.00	$3.36 \times 10^3$		66	16.50	0.683	
		33	8.25	$2.61 \times 10^3$	67		16.75	0.532		
		34	8.50	$2.04 \times 10^3$	68		17.00	0.414		

注) 1群の上限エネルギーは $10^7$  eVである。

1)は縮約群、2)は少数群、3)は多群を示す。

表3.1.2 熱中性子群・群構造

群			エネルギー (上限,eV)	幅 (eV)	群			エネルギー (上限,eV)	幅 (eV)
1)	2)	3)			1)	2)	3)		
6	40	1	0.002	0.002	4	28	26	0.55	0.1
		2	0.004	0.002			27	0.65	0.1
	39	3	0.006	0.002		27	28	0.75	0.1
		4	0.008	0.002			29	0.85	0.1
		5	0.015	0.007			26	30	0.95
	38	6	0.025	0.01		31		0.99	0.04
		7	0.035	0.01		25	32	1.01	0.02
	37	8	0.045	0.01			33	1.03	0.02
		9	0.055	0.01			34	1.045	0.015
	36	10	0.065	0.01		24	35	1.055	0.01
		11	0.075	0.01			36	1.065	0.01
	35	12	0.085	0.01			37	1.08	0.015
13		0.105	0.02	38	1.10		0.02		
5	34	14	0.135	0.03	23	39	1.16	0.06	
		15	0.165	0.03		40	1.24	0.08	
	33	16	0.195	0.03		41	1.35	0.11	
		17	0.225	0.03		42	1.45	0.1	
	32	18	0.255	0.03	22	43	1.55	0.1	
		19	0.285	0.03		44	1.65	0.1	
	31	20	0.295	0.01		45	1.75	0.1	
		21	0.305	0.01		46	1.85	0.1	
	30	22	0.335	0.03	21	47	1.95	0.1	
		23	0.35	0.015		48	2.05	0.1	
29	24	0.39	0.04	49		2.15	0.1		
	25	0.45	0.06	50		2.38	0.23		

注) 1)は縮約群、2)は少数群、3)は多群を示す。

表3.2.1 HTTR炉心のカラムの体積と温度解析条件

領域	炉心領域				可動反射体領域			固定反射体領域	
	領域1	領域2		領域3	領域4	第2リング制御カラム	可動反射体カラム		照射・第3リング制御カラム
領域番号	—								
カラム名	中心制御カラム	第1燃料領域	第2燃料領域	第1リング制御カラム	第3燃料領域	第4燃料領域	第2リング制御カラム	可動反射体カラム	照射・第3リング制御カラム
カラム数	1	6	6	6	1 2	6	6	1 2	6
温度解析 <sup>*2</sup>	→	○	←	○	○	←	○	○	←

\*1 固定反射体は黒鉛製であるがブロック構造ではないため

\*2 ○印は炉心温度解析結果が与えられていることを示す

矢印はその方向の隣接領域の温度解析結果を使用することを示す

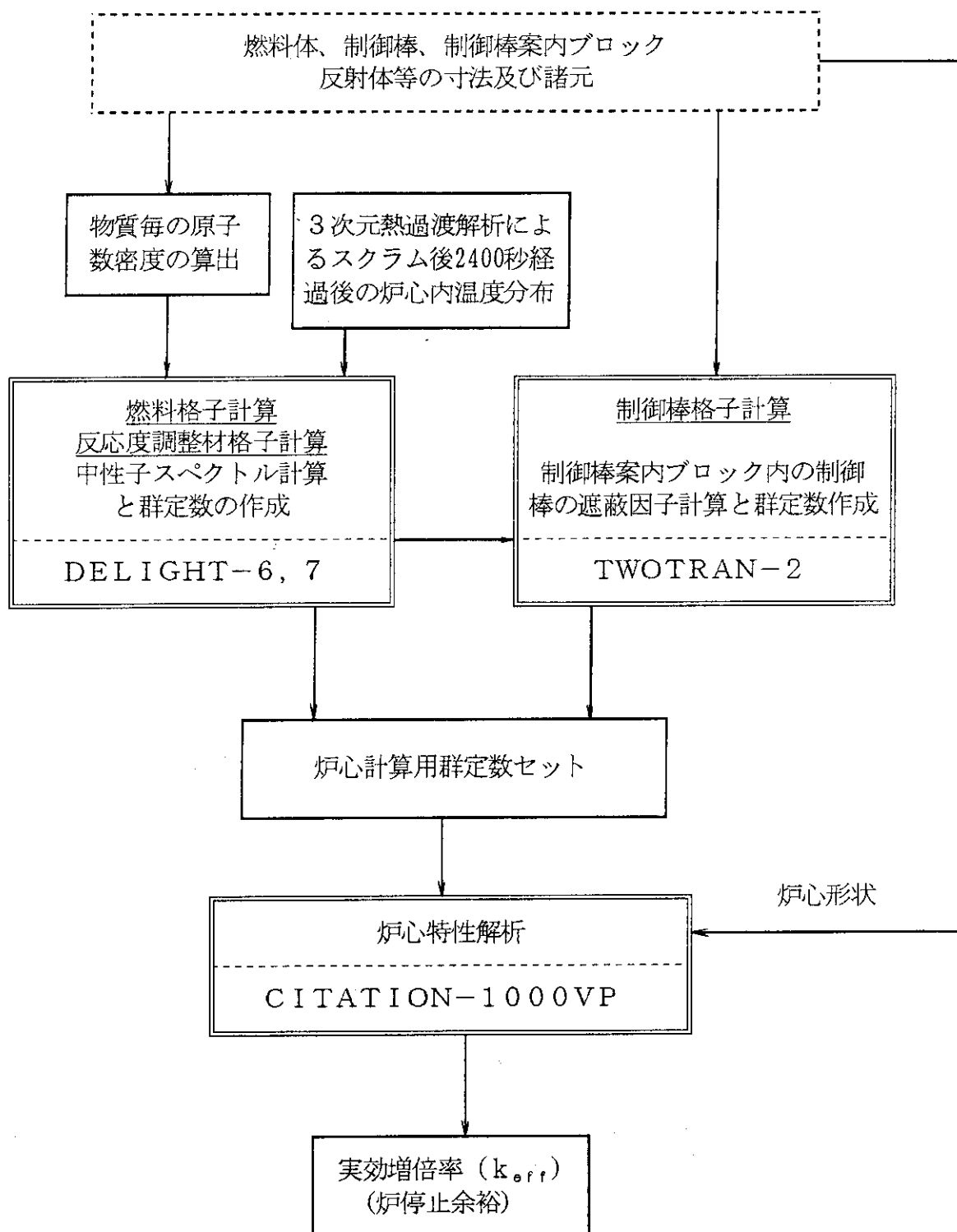


図3.1.1 炉心特性解析手順

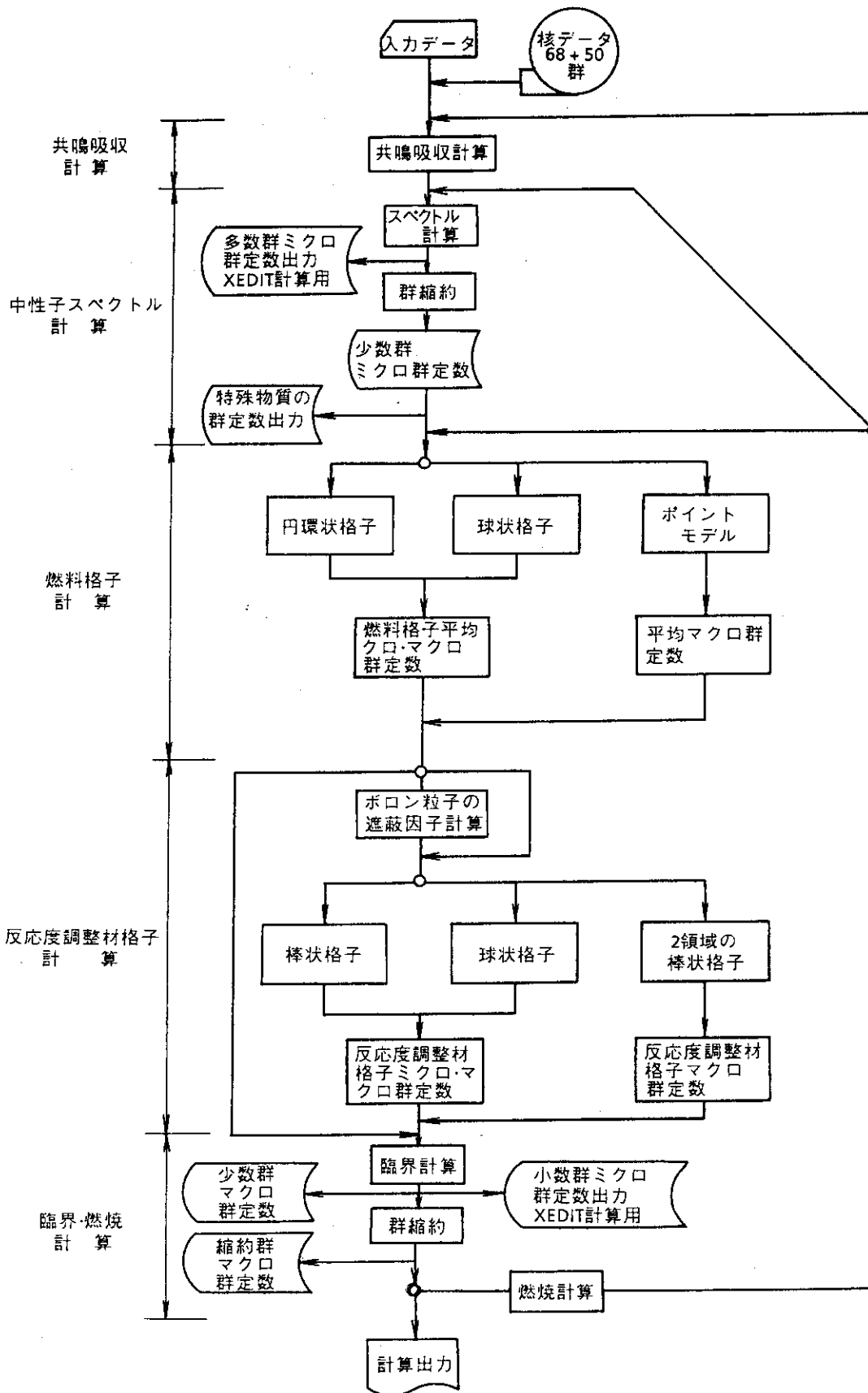


図3.1.2 DELIGHT-7の計算フロー

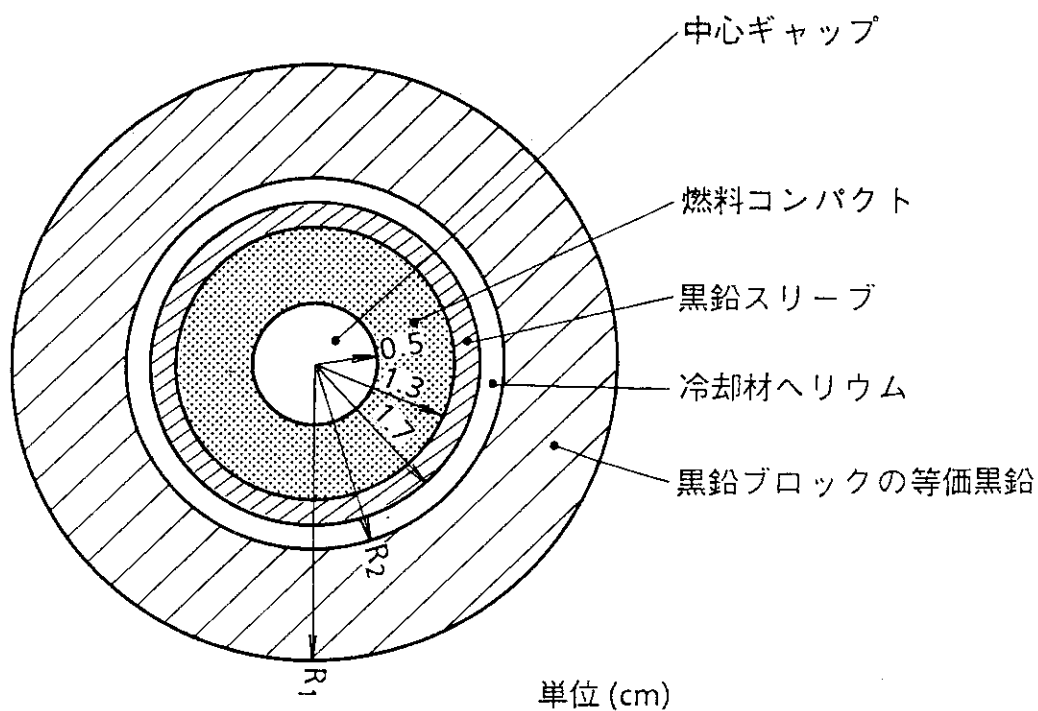


図3.1.3 燃料格子計算モデル

(燃料棒本数が33ピンの場合  $R_1=3.41\text{cm}$   $R_2=2.09\text{cm}$ )

(燃料棒本数が31ピンの場合  $R_1=3.52\text{cm}$   $R_2=2.10\text{cm}$ )

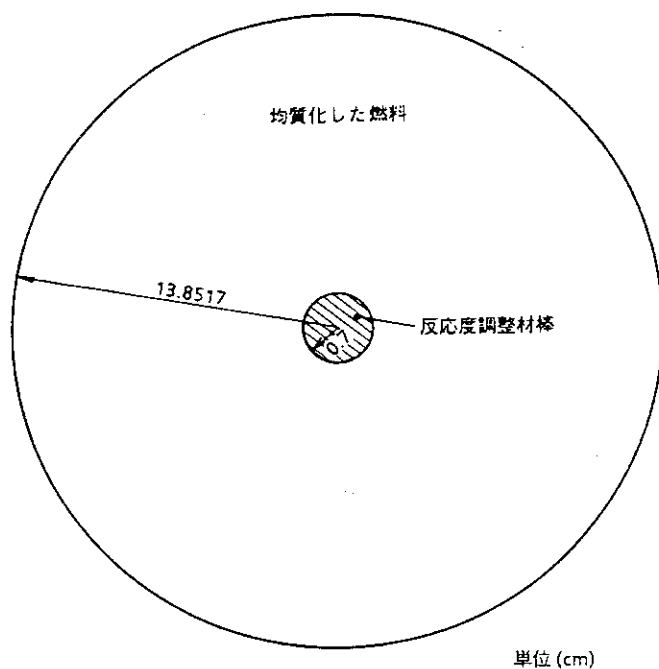


図3.1.4 反応度調整材格子計算モデル

(燃料体中2本装荷されている場合)



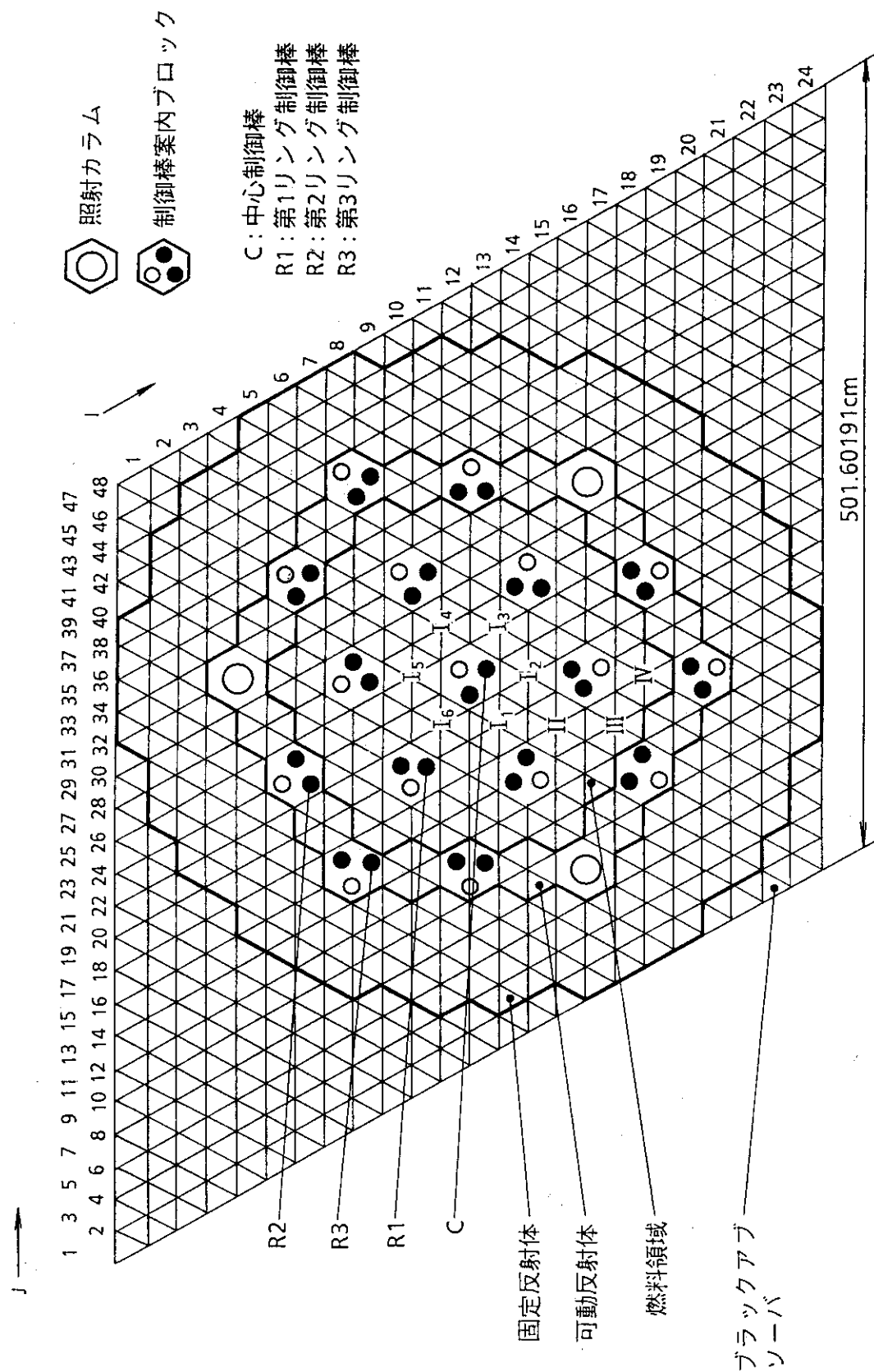


図3.1.6 全炉心径方向メッシュモデル

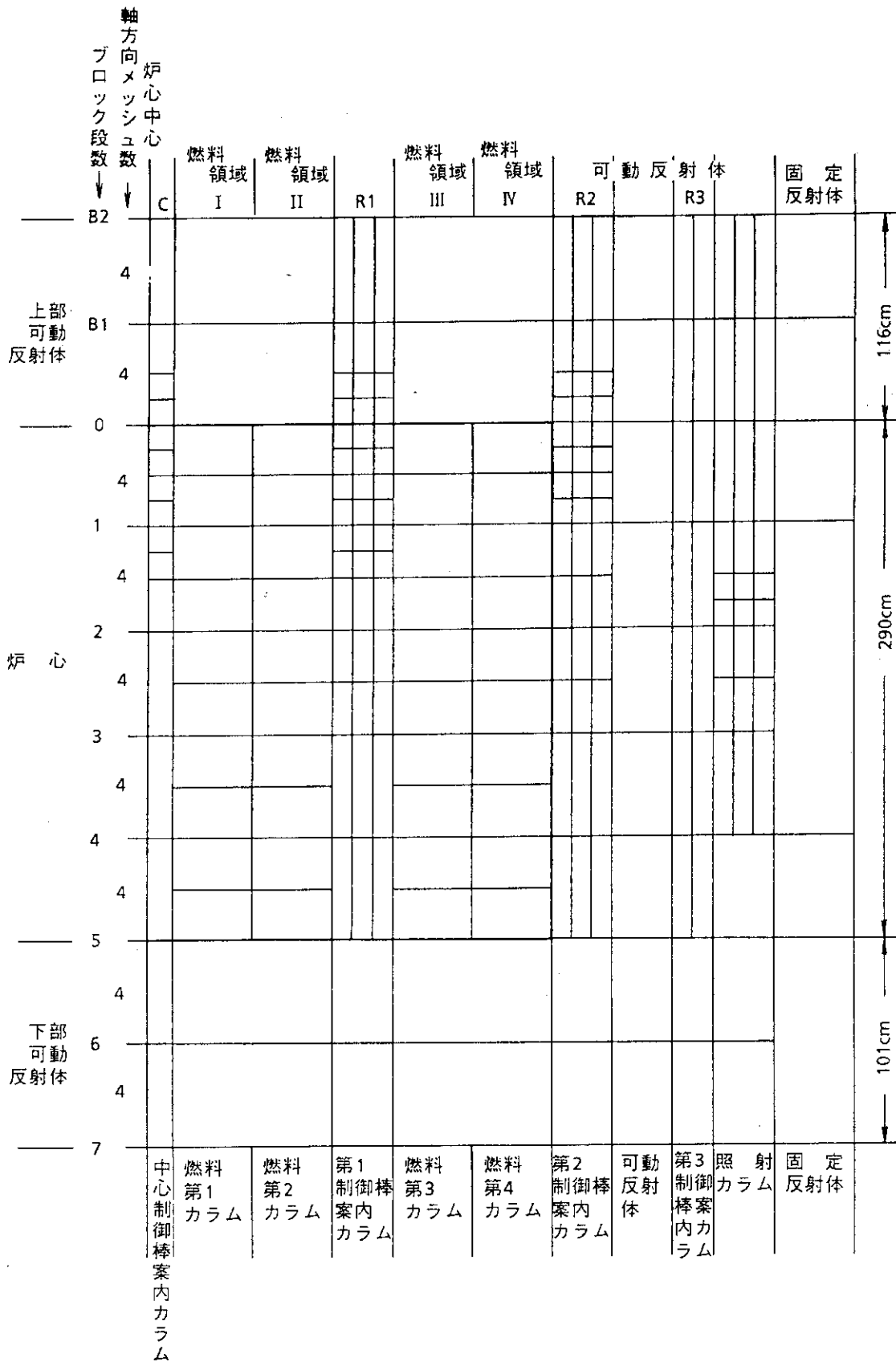


図3.1.7 炉心モデル縦断面模式図 (CITATION, 3D-TZモデル)

炉心中心		領域 1		領域 2		領域 3		領域 4		可動反射体		固定反 射体	
		燃料第 1カラ ム	燃料第 2カラ ム	リング 1制御 カム	燃料第 3,4 カム	燃料第 5カラ ム	リング 2制御 カム	可動反 射体	照射・ リング3 制御カ ラム	固定反 射体			
上部可 動反射 体													
1段	231	233	232						240	241		246	
2段	292	313	314						325	338		293	
3段	393*	418*	401*						405*	424*		315*	
4段	493	522	488						484	509		336	
5段	570*	589*	561*						549**	570**		336**	
下部可 動反射 体									549	570		336	
	693	689	675						571	572		341	

(単位: °C)

\* 上下のブロブロックから内挿  
 \*\* 下段のブロブロックと同じ値 (等温線が下段との間で縦に走っているため)

図3.2.1 スクラム後2400秒経過後の熱過渡解析による炉心内減速材温度  
 (原子炉出口冷却材温度 750°Cの場合)

炉心中心	領域 1		領域 2		領域 3		領域 4		可動反射体		固定反 射体	
	中心制 御カラム	燃料第 1カラム	燃料第 2カラム	リング 1制御 カラム	燃料第 3,4 カラム	燃料第 5カラム	リング 2制御 カラム	可動反 射体	照射・ リング 制御カ ラム	固定反 射体		
上部可 動反射 体		296		298	297		305	306		311		
1段		357		378	379		390	403		358		
2段		468*		493*	476*		480*	499*		390*		
3段		578		607	573		569	594		421		
4段		665*		684*	656*		654**	675**		441**		
5段		752		760	738		654	675		441		
下部可 動反射 体		798		794	780		676	677		446		

(単位: °C)

\* 上下のブロッックから内挿  
 \*\* 下段のブロッックと同じ値 (等温線が下段との間で縦に走っているため)

図3.2.2 スクラム後2400秒経過後の熱過渡解析による炉心内減速材温度  
 (原子炉出口冷却材温度 850°Cの場合)

炉心中心		領域 1		領域 2		領域 3		領域 4		可動反射体		固定反射体	
		燃料第 1 カラム	燃料第 2 カラム	リング 1 制御カラム	燃料第 3, 4 カラム	燃料第 5 カラム	リング 2 制御カラム	可動反射体	照射・リング 3 制御カラム	固定反射体			
上部可動反射体	326		328		327		335		341				
1段	387		408		409		420		388				
2段	503*		528*		511*		515*		425*				
3段	618		647		613		609		461				
4段	725*		744*		716*		714**		521**				
5段	832		840		818		714		521				
下部可動反射体	878		874		850		756		526				

(単位: °C)

\* 上下のブロックから内挿  
 \*\* 下段のブロッキングと同じ値 (等温線が下段との間で縦に走っているため)

図3.2.3 スクラム後2400秒経過後の熱過渡解析による炉心内減速材温度 (原子炉出口冷却材温度 950°Cの場合)

炉心中心		炉心領域			側部可動反射体	固定反射体
上部可動反射体	上部反射体領域					
1段	制御カラム	燃料領域	制御カラム	燃料領域		
炉 2段					側部可動反射体A領域	固定反射体A領域
心 3段						
4/5段					側部可動反射体B領域	固定反射体B領域
下部可動反射体	下部反射体領域					
	センター制御カラム	33ピン燃料領域	リング1制御カラム	31ピン燃料領域	可動反射体、リング2,3制御カラム、照射カラム	固定反射体

図3.2.4 炉心計算用温度設定のための炉心分割

炉心中心	炉心領域	可動反射体	固定反射体
上部可動反射体	$T_m = 500/600/600$		
1段			
炉 2段	$T_f = 670/750/780$ $T_m = 600/700/700$	$T_m = 700/800/900$	
心 3段	$T_f = 760/850/890$ $T_m = 700/800/800$		
4/5段	$T_f = 870/980/1050$ $T_m = 800/900/1000$	$T_m = 800/900/1000$	
下部可動反射体	$T_m = 1000/1100/1100$		

数値は (750°C / 850°C / 950°C) の運転時に相当する。 (Unit:K)

図3.2.5 スクラム後2400秒経過後の炉心計算用温度設定値

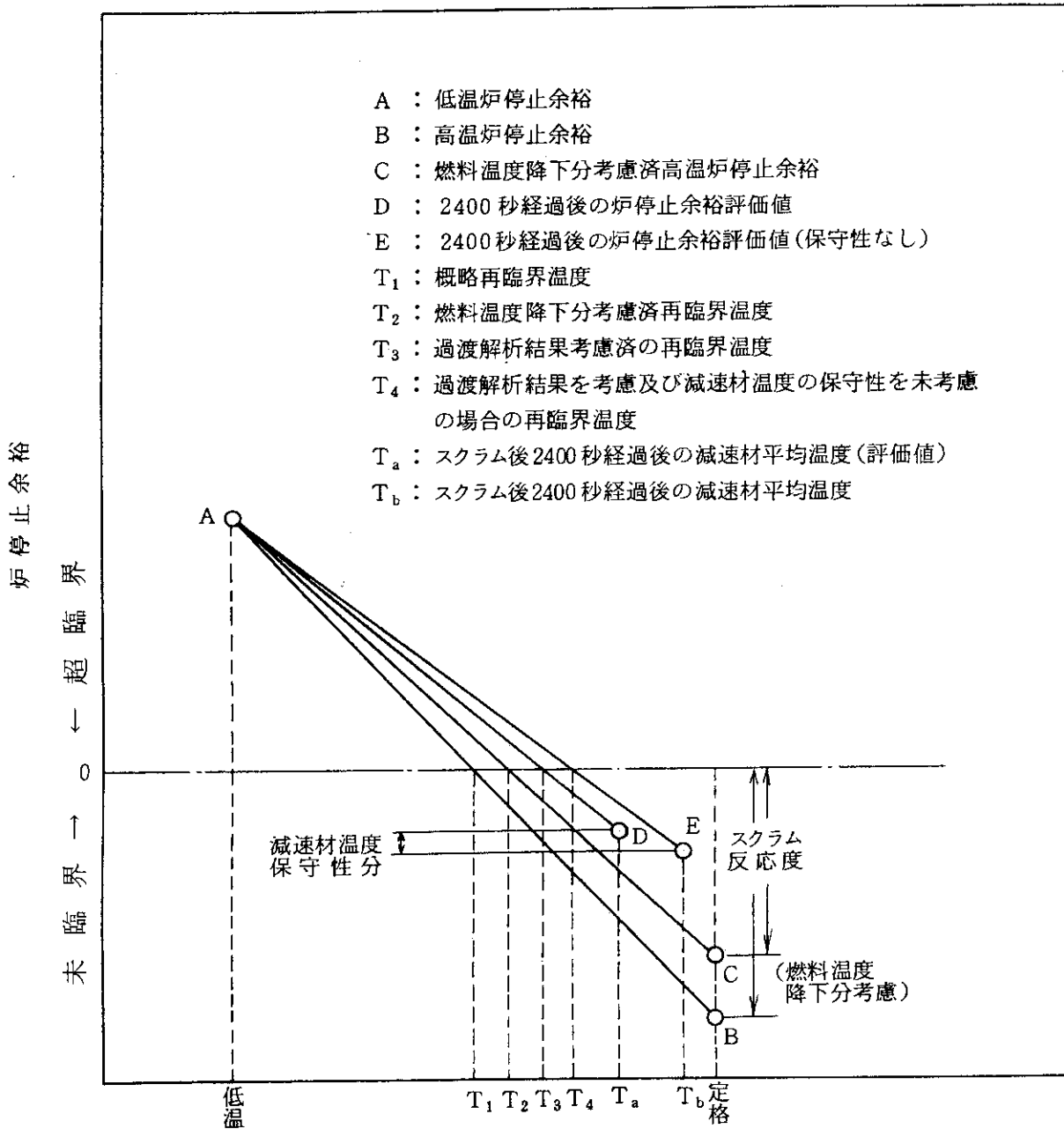
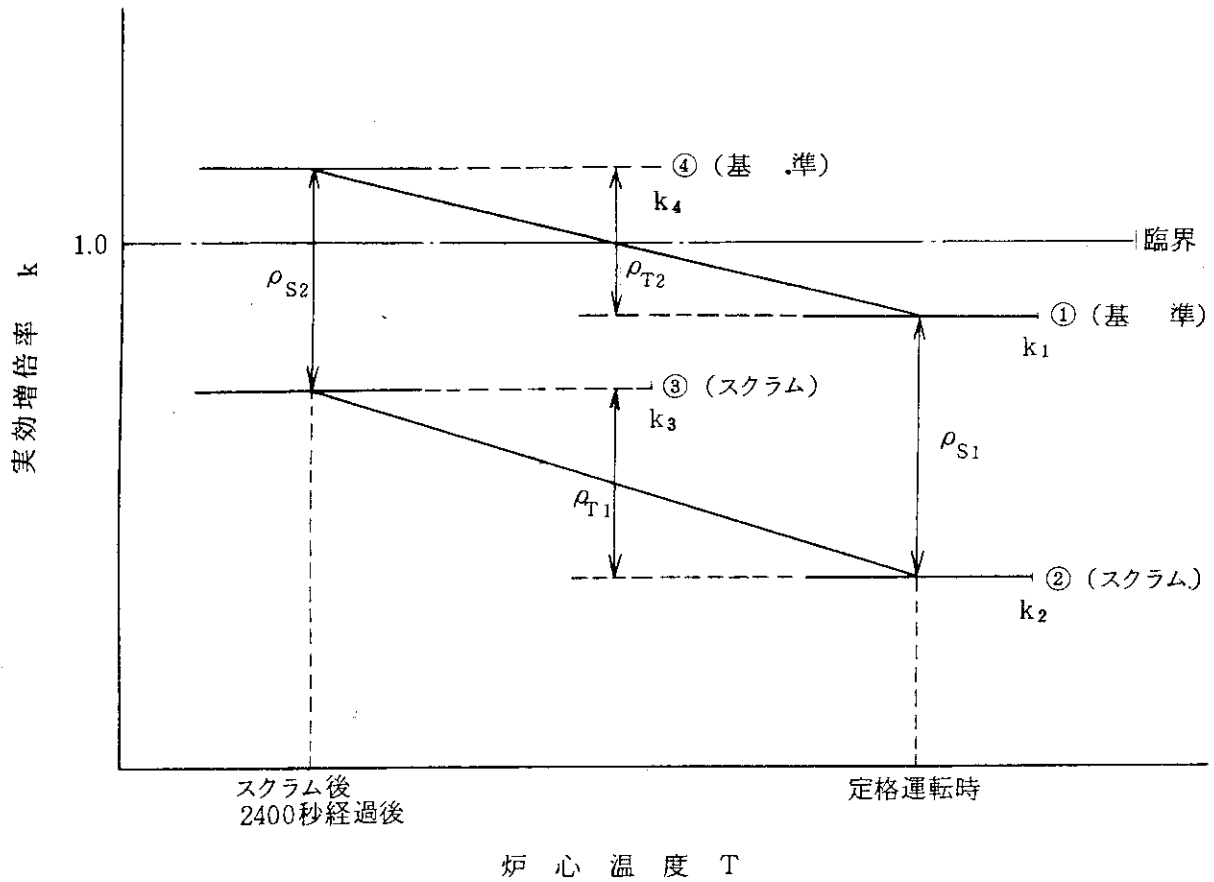


図3.3.1 スクラム後の減速材温度変化と炉停止余裕の関係



$\rho_{s1}$  : 高温スクラム時の制御棒補償反応度  $\left( \frac{k_1 - k_2}{k_1 \cdot k_2} \right)$   
 $\rho_{s2}$  : 低温 (300K) 状態の制御棒補償反応度  $\left( \frac{k_4 - k_3}{k_3 \cdot k_4} \right)$   
 $\rho_{T1}$  : スクラム状態での温度効果分  $\left( \frac{k_3 - k_2}{k_2 \cdot k_3} \right)$   
 $\rho_{T2}$  : 運転状態での温度効果分  $\left( \frac{k_4 - k_1}{k_4 \cdot k_1} \right)$

- ① : 基準ケース ( $k_1$  ; 運転時の制御棒パターン、出力運転状態)
- ② : 高温スクラム ( $k_2$  ; 反射体領域の制御棒挿入(リング2,3)、出力運転状態)
- ③ : 低温スクラム ( $k_3$  ; 反射体領域の制御棒挿入(リング2,3)、低温状態)
- ④ : 低温基準ケース ( $k_4$  ; 運転時の制御棒パターン、低温状態)

図3.3.2 炉停止余裕評価時の反応度収支

## 4. 評価結果

3章で説明した評価方法に従って算出したスクラム後2400秒経過後の炉停止余裕を示す。同時に低温、227°C(500K)及び4200秒経過後(950°C運転のみ)の計算結果、並びにこれらの結果より得られた再臨界温度の評価結果及び炉心平均減速材温度の保守性の効果の評価結果についても示す。

### 4.1 スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕

原子炉出口冷却材温度750°C、850°C及び950°C運転時について原子炉スクラム直後及び2400秒経過後の炉停止余裕の評価結果を表4.1.1、図4.1.1及び図4.1.2にそれぞれ示す。炉停止余裕の評価に用いた実効増倍率の計算結果を表4.2.1に示す。図4.1.1及び図4.1.2は、制御棒の1対スタックの有無の場合の結果を示している。同図よりスクラム反応度は、スタックの有無に依らず950°C運転からのスクラムの場合がもっとも大きな値を示すことが分かる。しかし、スクラム反応度のスクラム前の原子炉出口冷却材温度変化による影響は小さく750°C運転と950°C運転の差は高々0.4% $\Delta k/k$ にすぎない。950°C運転の場合が最も大きくなる原因としては、スクラムによる印加反応度が単に制御棒のストローク長に伴い増大するためであり、950°C運転時の制御棒位置が750°C運転時に比べ、約0.5段引き抜かれていることによる。一方、スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕については逆に950°C運転時が最も小さく厳しい評価となる。スクラム反応度に対して傾向が逆になり、その変化割合が大きい理由は、スクラム反応度が制御棒のストロークのみに依存しているのに対し、スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕はその効果に2400秒間に変化した温度分の反応度変化が加算され、その効果が、制御棒の挿入ストローク効果よりも大きいためである。参考として表4.1.2にスクラム後2400秒経過後の温度変化を示す。スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕は最も厳しい950°C運転時(スタックを考慮しない)の場合でも1.9% $\Delta k/k$ あり、十分未臨界である。なお、950°C運転時にスタックを考慮した場合でも、炉停止余裕は0.7% $\Delta k/k$ あり、原子炉を未臨界とすることができる。

### 4.2 再臨界温度評価

各々の運転状態(750°C、850°C及び950°C)からのスクラムでは、それぞれで2400秒経過後のみではなく、炉停止余裕評価のために必要な基準状態の計算、概略再臨界温度評価に必要な低温(27°C)での計算及び炉心温度が227°C(500K)まで低下した場合の計算を合わせて行っている。各々の温度状態に対する計算結果を表4.2.1に示す。これらの結果から再臨界温度の正確な評価、次節

で述べる減速材温度の保守性の評価等が可能となっている\*。

スクラム後の炉心平均減速材温度の変化に伴う炉停止余裕の変化をスクラム直前の原子炉出口冷却材温度をパラメータとして、図4.2.1及び図4.2.2に示す。図4.2.1は制御棒のスタックを考慮しない場合を、図4.2.2はスタックを考慮した場合を示す。同図より、炉心平均減速材温度と炉停止余裕は、比例関係にあることが分かる。なお、この評価には基準状態の結果（スクラム直後の炉停止余裕の値）は入っていない。3.3節で述べたように、スクラム直後の燃料温度の低下による反応度印加があるからで、これについては付録Dに示した。また、950℃運転（スタックを考慮）では4200秒経過後には再臨界になることが分かる。再臨界温度は、上述したように基準状態以外の点を最小2乗法によりフィッティングし、炉停止余裕が0となる温度とした。この結果を2.2節で行った概略再臨界温度の評価結果と併せて表4.1.2に示す。両者は良く一致しているが、950℃運転では3.3節で述べた理由により若干、本詳細評価温度が高くなる。

#### 4.3 減速材温度反応度効果

図4.2.1及び図4.2.2に示すスクラム後の炉心平均減速材温度の変化に対する炉停止余裕の変化は、大変良い比例関係を示していることから、表4.1.2に示す減速材温度の保守性が反応度にしてどの程度の影響を与えるかを、外挿によって評価することが可能である。具体的には、表4.1.2に示す熱過渡解析による炉心平均減速材温度に対する炉停止余裕を図4.2.1及び図4.2.2から読みとる。この値は、燃料温度についても外挿しているため、外挿による印加反応度から、温度係数（ドプラ係数及び減速材温度係数）を用いて減速材温度による寄与のみを取り出す必要がある。手法の詳細は付録Eに示す。評価結果を表4.1に示す。炉心平均減速材温度は50℃以上の保守性を有しているが、これは反応度に換算すれば約1% $\Delta k/k$ 以上に相当する。なお、950℃運転については、減速材温度を詳細に入力して炉心計算を行っていることから、比較のためにその結果も併せて表4.1.1に示す。この結果から、炉心平均減速材温度の保守性を取り除けば、最も厳しい950℃運転（スタックを考慮）の場合でも、1.2% $\Delta k/k$ の炉停止余裕があり、評価値には約0.5% $\Delta k/k$ の余裕があることがわかった。

\* 950℃運転については、スクラム後4200秒経過後の計算も行った。

表4.1.1 スクラム直後及び2400秒経過後の炉停止余裕

スクラム直前の原子炉出口冷却材温度	制御棒のスタック <sup>*1</sup>	炉停止余裕 (% $\Delta k/k$ )		
		スクラム直後	スクラム後2400秒経過後	減速材温度詳細入力計算結果 <sup>*3</sup>
750°C	無し	7.31	3.99	5.23
	有り	5.90	2.76	3.92
850°C	無し	7.58	2.81	3.81
	有り	6.12	1.63	2.57
950°C	無し	7.74	1.86	2.89
	有り	6.24	0.68	1.66

\*1 リング2制御棒1対、

\*2 減速材温度の保守性を温度係数により補正した結果 (付録E参照)

\*3 減速材温度を詳細に入力して炉心計算を行った結果 (付録B参照)

表4.1.2 スクラム時及びスクラム後2400秒経過後の炉心平均温度と再臨界温度

スクラム時の原子炉出口冷却材温度 (°C)	減速材温度 ( $T_m$ ) — 燃料温度 ( $T_f$ )	炉心平均減速材温度			再臨界温度		
		スクラム直後 (°C)	スクラム後2400秒経過		スタック	概略評価 (°C)	詳細評価 (°C)
			熱過渡解析の結果 (°C)	核計算に用いた温度 (°C)			
750	$T_m$	527	482	407	有	—	301
	$T_f$	669	479	477	無	—	261
850	$T_m$	707	567	507	有	431	433
	$T_f$	986	564	567	無	386	387
950	$T_m$	767	616	547	有	491	516
	$T_f$	1070	613	615	無	445	468

表4.2.1 原子炉スクラム後の炉停止余裕(750°C, スタック無し, 深め) (1/6)

項目	制御棒レベル (C/R1/R2/R3)	炉心平均 減速材温 度 (°C)	実効増倍率 $k_{eff}$	基準① との差*1 (% Δk/k)	スクラム反応度 (計算値 ×0.855)	温度効果*2 (% Δk/k)	炉停止 余裕*3 (% Δk/k)
基準状態*4 750°C, スタック無し (スクラム直後)	1.5/1.5/1.5/0.0	527	① 0.96486	—	7.31	—	—
	1.5/1.5/5.0/5.0		② 0.89135	-8.55		—	
$T_m = 27°C$ $T_r = 27°C$	1.5/1.5/5.0/5.0	27	0.98558	2.18	5.72	11.80	-6.08
	1.5/1.5/1.5/0.0		1.05514	—		—	
$T_m = 227°C$ $T_r = 227°C$	1.5/1.5/5.0/5.0	227	0.94935	-1.69	6.38	7.54	-1.16
	1.5/1.5/1.5/0.0		1.02167	—		—	
スクラム後2400秒 経過後	1.5/1.5/5.0/5.0	407	0.91293	-5.90	6.91	2.92	3.99
	1.5/1.5/1.5/0.0		0.98570	—		—	

\*1 ①との差 (ノミナル, 誤差無し)      \*4 炉心内温度設定については表A-1参照

\*2 ②との差 (計算値×1.1)

\*5 炉心内の全ての領域を一定温度とした

\*3 スクラム反応度-温度効果

表4.2.1 原子炉スクラム後の炉停止余裕(850°C, スタック無し, 深め) (2/6)

項目	制御棒レベル	炉心平均減速材温度 (°C)	実効増倍率 $k_{eff}$	基準①との差 <sup>*1</sup> (% $\Delta k/k$ )	スクラム反応度 (計算値 $\times 0.855$ )	温度効果 <sup>*2</sup> (% $\Delta k/k$ )	炉停止余裕 <sup>*3</sup> (% $\Delta k/k$ )
基準状態 <sup>*4</sup> 850°C, スタック無し (スクラム直後)	1.25/1.25/1.25/0.0	707	① 0.96111	—	7.58	—	—
	1.25/1.25/5.0/5.0		② 0.88566	-8.86		—	
$T_m = 27^\circ\text{C}$ $T_f = 27^\circ\text{C}$	1.25/1.25/5.0/5.0	27	0.99922	3.97	5.63	14.12	-8.49
	1.25/1.25/1.25/0.0		1.06956	—		—	
$T_m = 227^\circ\text{C}$ $T_f = 227^\circ\text{C}$	1.25/1.25/5.0/5.0	227	0.96350	0.26	6.26	10.03	-3.77
	1.25/1.25/1.25/0.0		1.03662	—		—	
スクラム後2400秒 経過後	1.25/1.25/5.0/5.0	507	0.91660	-5.05	7.00	4.19	2.81
	1.25/1.25/1.25/0.0		0.99097	—		—	

\*1 ①との差 (ノミナル, 誤差無し)      \*4 炉心内温度設定については表A-1参照

\*2 ②との差 (計算値 $\times 1.1$ )      \*5 炉心内の全ての領域を一定温度とした

\*3 スクラム反応度-温度効果

表4.2.1 原子炉スクラム後の炉停止余裕(950°C, スタック無し, 深め) (3/6)

項目	制御棒レベル	炉心平均減速材温度(°C)	実効増倍率 $k_{eff}$	基準①との差 <sup>1</sup> (% Δk/k)	スクラム反応度(計算値 × 0.855)	温度効果 <sup>2</sup> (% Δk/k)	炉停止余裕 <sup>3</sup> (% Δk/k)
基準状態 <sup>4</sup> 950°C, スタック無し (スクラム直後)	1.25/1.25/1.25/0.0	767	① 0.94979	—	7.74	—	—
	1.25/1.25/5.0/5.0		② 0.87455	-9.06		—	
$T_m = 27^\circ\text{C}$ $T_f = 27^\circ\text{C}$	1.25/1.25/5.0/5.0	27	0.99922	5.21	5.63	15.69	-10.06
	1.25/1.25/1.25/0.0		1.06956	—		—	
$T_m = 227^\circ\text{C}$ $T_f = 227^\circ\text{C}$	1.25/1.25/5.0/5.0	227	0.96350	1.50	6.26	11.61	-5.35
	1.25/1.25/1.25/0.0		1.03662	—		—	
スクラム後4200秒 経過後	1.25/1.25/5.0/5.0	487	0.92271	-3.09	6.92	6.56	0.36
	1.25/1.25/1.25/0.0		0.99715	—		—	
スクラム後2400秒 経過後	1.25/1.25/5.0/5.0	547	0.91228	-4.33	7.06	5.20	1.86
	1.25/1.25/1.25/0.0		0.98659	—		—	

\*1 ①との差 (ノミナル、誤差無し) \*4 炉心内温度設定については表A-1参照

\*2 ②との差 (計算値×1.1)

\*5 炉心内の全ての領域を一定温度とした

\*3 スクラム反応度-温度効果

表4.2.1 原子炉スクラム後の炉停止余裕(750°C, スタック有り, 深め) (4/6)

項目	制御棒レベル (C/R1/R2/R3)	炉心平均 減速材温 度 (°C)	実効増倍率 $k_{eff}$	基準① との差 <sup>1</sup> (% $\Delta k/k$ )	スクラム反応度 (計算値 $\times 0.855$ )	温度効果 <sup>2</sup> (% $\Delta k/k$ )	炉停止 余裕 <sup>3</sup> (% $\Delta k/k$ )
基準状態 <sup>4</sup> 750°C, スタック有り (スクラム直後)	1.5/1.5/1.5/0.0	527	① 0.96486	—	—	—	—
	1.5/1.5/5.0/5.0		② 0.90462	-6.90	5.90	—	—
$T_m = 27^\circ\text{C}$ <sup>5</sup> $T_f = 27^\circ\text{C}$	1.5/1.5/5.0/5.0	27	0.99767	3.41	4.67	11.34	-6.67
	1.5/1.5/1.5/0.0		1.05514	—		—	
$T_m = 227^\circ\text{C}$ <sup>5</sup> $T_f = 227^\circ\text{C}$	1.5/1.5/5.0/5.0	227	0.96197	-0.31	5.19	7.25	-2.06
	1.5/1.5/1.5/0.0		1.02167	—		—	
スクラム後2400秒 経過後	1.5/1.5/5.0/5.0	407	0.92612	-4.34	5.58	2.82	2.76
	1.5/1.5/1.5/0.0		0.98570	—		—	

\*1 ①との差 (ノミナル、誤差無し)

\*4 炉心内温度設定については表A-1参照

\*2 ②との差 (計算値 $\times 1.1$ )

\*5 炉心内の全ての領域を一定温度とした

\*3 スクラム反応度-温度効果

表4.2.1 原子炉スクラム後の炉停止余裕(850°C, スタック有り, 深め) (5/6)

項目	制御棒レベル	炉心平均減速材温度 (°C)	実効増倍率 $k_{eff}$	基準①との差 <sup>・1</sup> (% $\Delta k/k$ )	スクラム反応度 (計算値 $\times 0.855$ )	温度効果 <sup>・2</sup> (% $\Delta k/k$ )	炉停止余裕 <sup>・3</sup> (% $\Delta k/k$ )
基準状態 <sup>・4</sup> 850°C, スタック有り (スクラム直後)	1.25/1.25/1.25/0.0	707	① 0.96111	—	6.12	—	—
	1.25/1.25/5.0/5.0		② 0.89920	-7.16		—	
$T_m = 27^\circ\text{C}$ $T_f = 27^\circ\text{C}$	1.25/1.25/5.0/5.0	27	1.01134	5.17	4.60	13.56	-8.96
	1.25/1.25/1.25/0.0		1.06956	—		—	
$T_m = 227^\circ\text{C}$ $T_f = 227^\circ\text{C}$	1.25/1.25/5.0/5.0	227	0.97614	1.60	5.11	9.64	-4.53
	1.25/1.25/1.25/0.0		1.03662	—		—	
スクラム後2400秒 経過後	1.25/1.25/5.0/5.0	507	0.92990	-3.49	5.67	4.04	1.63
	1.25/1.25/1.25/0.0		0.99097	—		—	

\*1 ①との差 (ノミナル, 誤差無し) \*4 炉心内温度設定については表A-1参照

\*2 ②との差 (計算値 $\times 1.1$ ) \*5 炉心内の全ての領域を一定温度とした

\*3 スクラム反応度-温度効果

表4.2.1 原子炉スクラム後の炉停止余裕(950°C, スタック有り, 深め) (6/6)

項目	制御棒レベル	炉心平均 減速材温 度 (°C)	実効増倍率 $k_{eff}$	基準① との差 <sup>・1</sup> (% $\Delta k/k$ )	スクラム反応度 (計算値 $\times 0.855$ )	温度効果 <sup>・2</sup> (% $\Delta k/k$ )	炉停止 余裕 <sup>・3</sup> (% $\Delta k/k$ )
基準状態 <sup>・4</sup> 950°C スタック有り (スクラム直後)	1.25/1.25/1.25/0.0	767	① 0.94979	—	6.24	—	—
	1.25/1.25/5.0/5.0		② 0.88819	-7.30		—	
$T_m = 27^\circ\text{C}$ <sup>・5</sup> $T_r = 27^\circ\text{C}$	1.25/1.25/5.0/5.0	27	1.01134	6.41	4.60	15.08	-10.48
	1.25/1.25/1.25/0.0		1.06956	—			
$T_m = 22^\circ\text{C}$ <sup>・5</sup> $T_r = 22^\circ\text{C}$	1.25/1.25/5.0/5.0	227	0.97614	2.84	5.11	11.16	-6.05
	1.25/1.25/1.25/0.0		1.03662	—			
スクラム後4200秒 経過後	1.25/1.25/5.0/5.0	487	0.93595	-1.56	5.61	6.32	-0.71
	1.25/1.25/1.25/0.0		0.99715	—			
スクラム後2400秒 経過後	1.25/1.25/5.0/5.0	547	0.92569	-2.74	5.70	5.02	0.68
	1.25/1.25/1.25/0.0		0.98659	—			
スクラム後2400秒 経過後(詳細計算 付録B参照)	1.25/1.25/5.0/5.0	607	0.92227	-3.14	5.80	4.58	1.22
	1.25/1.25/1.25/0.0		0.98388	—			

\*1 ①との差 (ノミナル、誤差無し) \*4 炉心内温度設定については表A-1参照

\*2 ②との差 (計算値 $\times 1.1$ ) \*5 炉心内の全ての領域を一定温度とした

\*3 スクラム反応度-温度効果

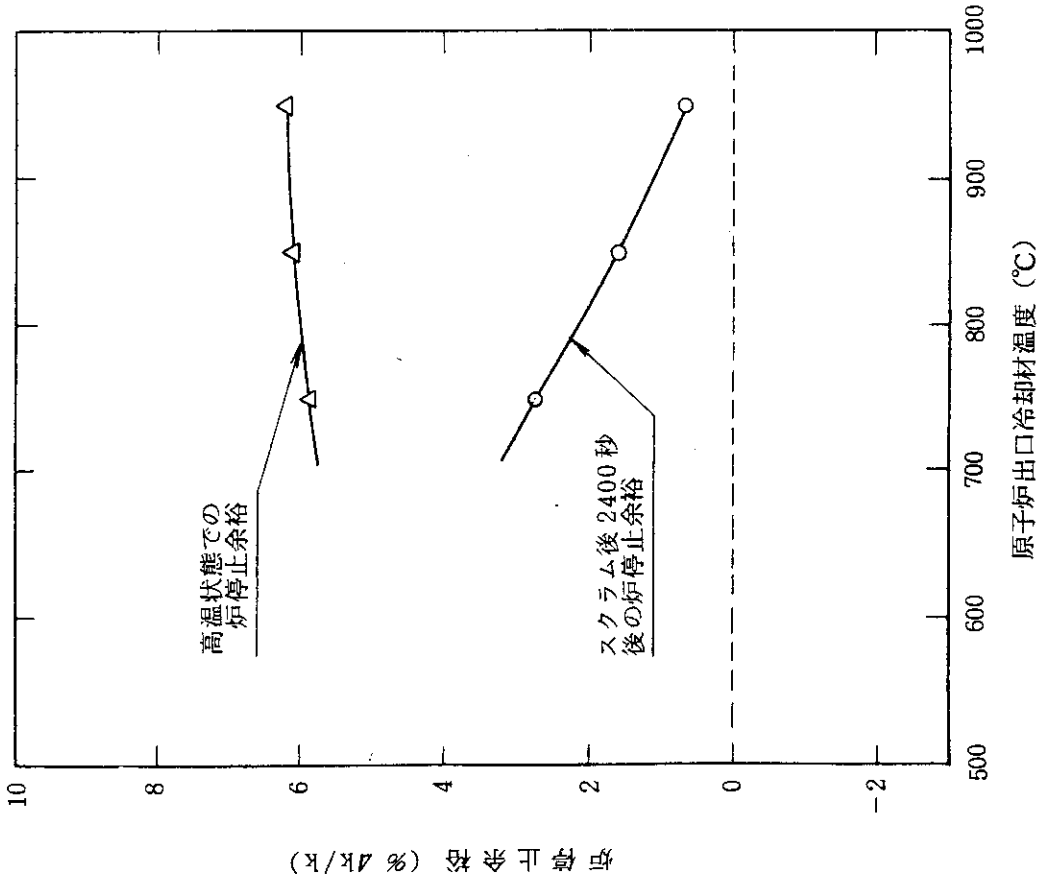


図4.1.2 反射体制御棒による炉停止余裕 (スタックを考慮する場合)

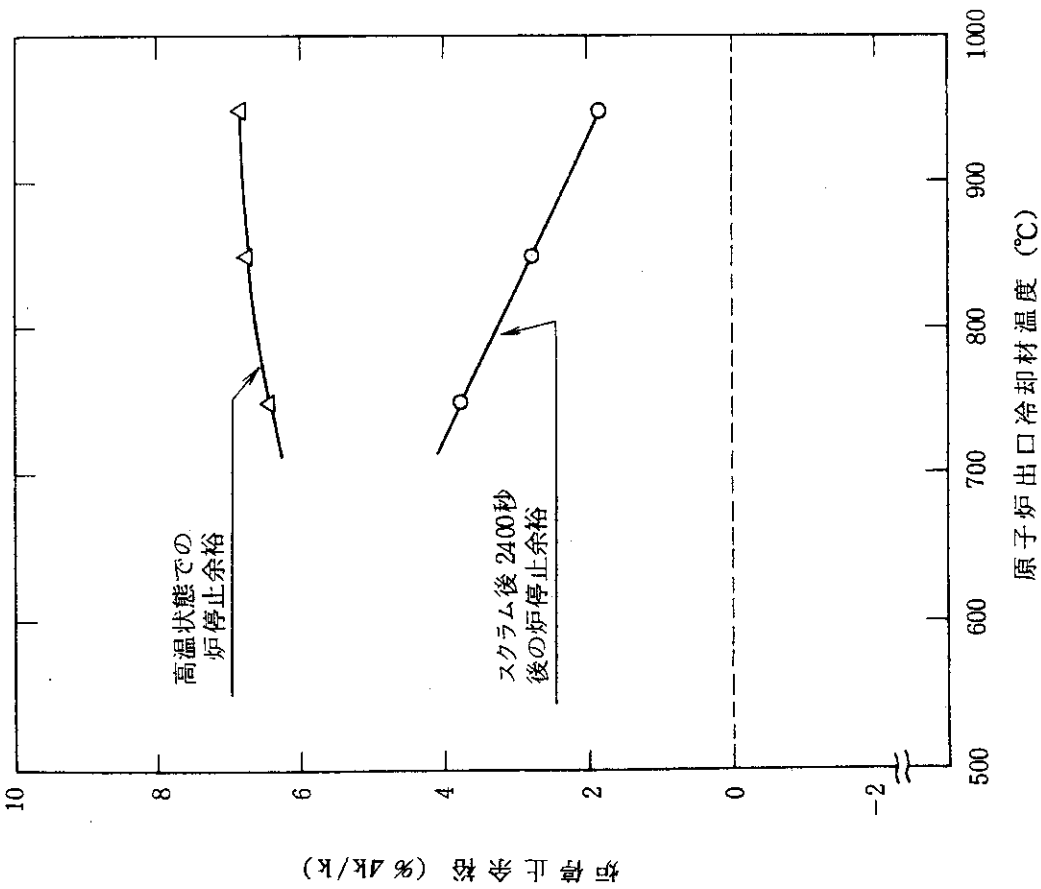


図4.1.1 反射体制御棒による炉停止余裕 (スタックを考慮しない場合)

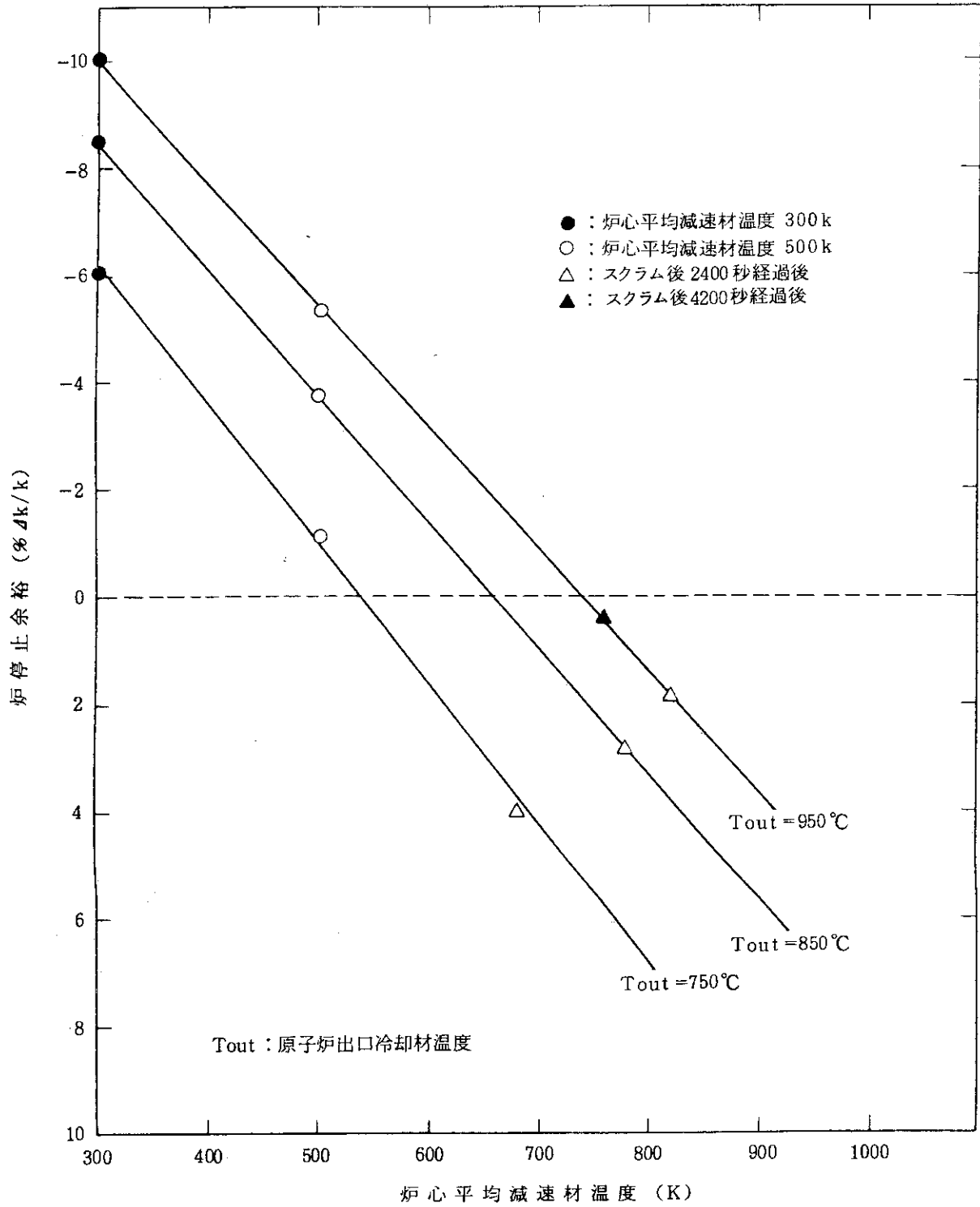


図4.2.1 スクラム後の炉停止余裕の時間変化  
 (スタックを考慮しない場合)

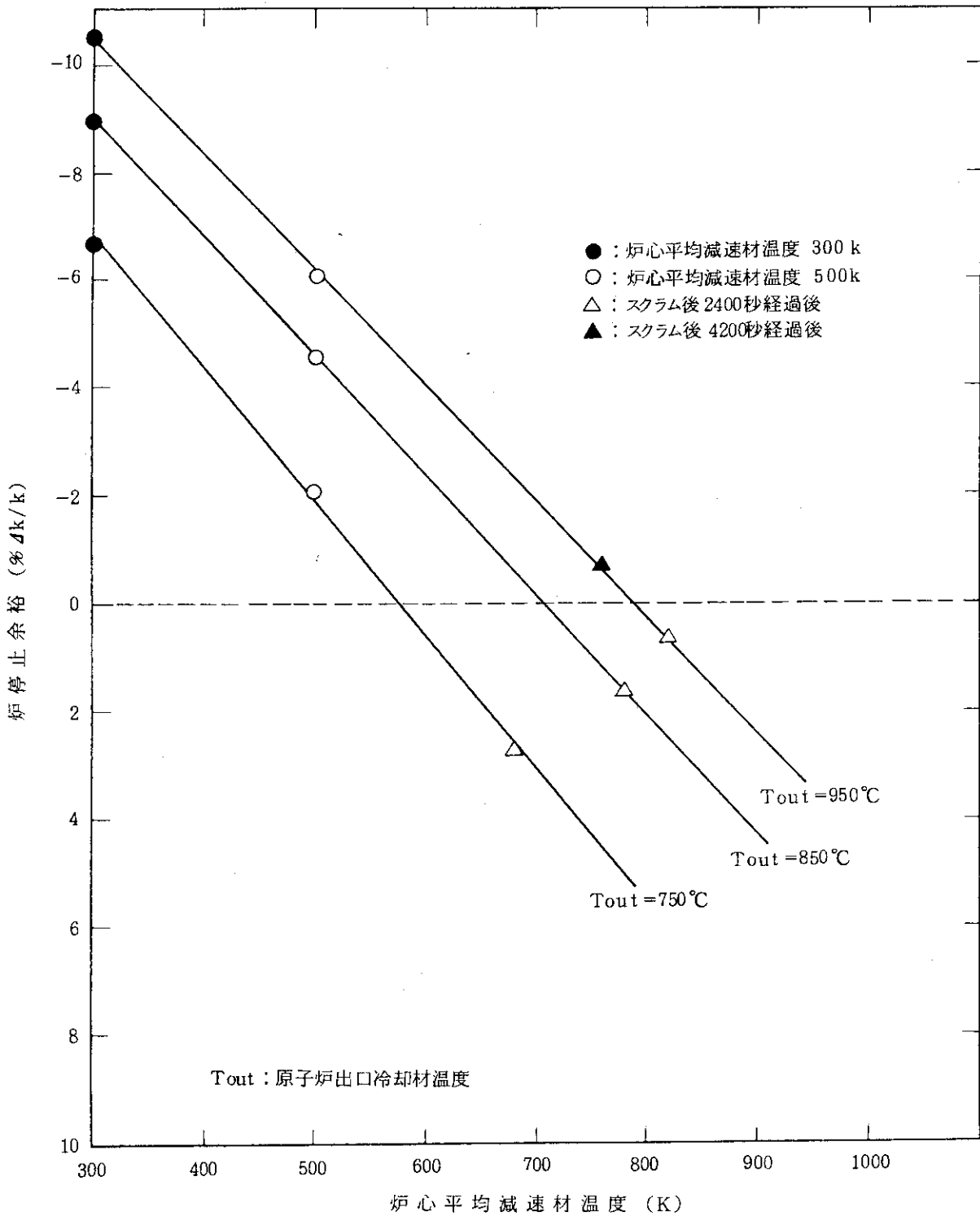


図4.2.2 スクラム後の炉停止余裕の時間変化  
 (スタックを考慮する場合)

## 5. 結 論

HTTRにおける制御棒2段階挿入方式を用いたスクラム時の炉停止余裕の評価を行った。原子炉出口冷却材温度950°C及び850°Cからのスクラム時には、スクラム後2400秒経過後も原子炉出口冷却材温度は750°Cを下回らない。そこで、スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕の評価を行ったところ、もっとも炉停止余裕が小さくなる950°C運転からのスクラム時に1.9% $\Delta k/k$ (スタックを考慮しない場合)、スタックを考慮した場合には0.7% $\Delta k/k$ の炉停止余裕を有しており、十分未臨界であることが分かった。なお、HTTRの安全設計方針の方針15「原子炉停止系の独立性及び試験可能性」では、高温においても1% $\Delta k/k$ 以上の余裕を持って未臨界とすべきとの記述であるとする議論もあり、評価において計算を簡略化するため炉停止余裕計算時に低めに仮定していた炉心温度分布の保守性を取り除いて、厳密な減速材評価温度に基づく計算を実施した結果、スタックを考慮しても1.2% $\Delta k/k$ の炉停止余裕が確保できることがわかった。

スクラム後の再臨界温度については、750°C、850°C及び950°C運転に対し、スタックを考慮しない場合で、各々261°C、387°C及び468°Cとなることがわかった。

以上の評価結果より、HTTRのスクラム時には、十分な炉停止余裕が確保できることが明らかとなった。

## 謝 辞

本報をまとめるに当たり、御指導頂いた高温工学試験研究炉開発部次長斉藤伸三氏並びに高温工学試験研究炉開発部HTTR原子炉開発室室長田中利幸氏に深く感謝します。また、本報の内容について論理的な観点から貴重な助言をいただきました塩沢周策氏に感謝の意を表します。

## 5. 結 論

HTTRにおける制御棒2段階挿入方式を用いたスクラム時の炉停止余裕の評価を行った。原子炉出口冷却材温度950°C及び850°Cからのスクラム時には、スクラム後2400秒経過後も原子炉出口冷却材温度は750°Cを下回らない。そこで、スクラム後2400秒経過後の炉停止余裕の評価を行ったところ、もっとも炉停止余裕が小さくなる950°C運転からのスクラム時に1.9% $\Delta k/k$ (スタックを考慮しない場合)、スタックを考慮した場合には0.7% $\Delta k/k$ の炉停止余裕を有しており、十分未臨界であることが分かった。なお、HTTRの安全設計方針の方針15「原子炉停止系の独立性及び試験可能性」では、高温においても1% $\Delta k/k$ 以上の余裕を持って未臨界とすべきとの記述であるとする議論もあり、評価において計算を簡略化するため炉停止余裕計算時に低めに仮定していた炉心温度分布の保守性を取り除いて、厳密な減速材評価温度に基づく計算を実施した結果、スタックを考慮しても1.2% $\Delta k/k$ の炉停止余裕が確保できることがわかった。

スクラム後の再臨界温度については、750°C、850°C及び950°C運転に対し、スタックを考慮しない場合で、各々261°C、387°C及び468°Cとなることがわかった。

以上の評価結果より、HTTRのスクラム時には、十分な炉停止余裕が確保できることが明らかとなった。

## 謝 辞

本報をまとめるに当たり、御指導頂いた高温工学試験研究炉開発部次長齊藤伸三氏並びに高温工学試験研究炉開発部HTTR原子炉開発室室長田中利幸氏に深く感謝します。また、本報の内容について論理的な観点から貴重な助言をいただきました塩沢周策氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 日本原子力研究所；「高温工学試験研究の現状」(1990).
- 2) 山下, 新藤, 村田, 丸山, 徳原；「高温工学試験研究炉におけるウラン濃縮度配分及び反応度調整材の最適設計」, JAERI-M 89-118(1989).
- 3) 丸山, 西口, 藤本, 小倉, 塩沢, 数土；「高温工学試験研究炉(HTTR)の制御棒温度解析」, JAERI-M 90-104(1990).
- 4) 藤本, 丸山, 数土；「高温工学試験研究炉のスクラム時における炉内温度評価」, JAERI-M 投稿中
- 5) 新藤, 山下, 村田；「高温ガス冷却炉・格子燃焼特性解析コード-DELIGHT-7-」, JAERI-M 90-048(1990).
- 6) Lathrop, K. D. and Brinkley, F. W. ; "TWOTRAN-II; An Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-4848MS(1973).
- 7) Fowler, T. B. and Vondy, D. R. ; "Nuclear Reactor Core Analysis Code, CITATION", ORNL-TM-2496(1969).
- 8) 原田, 山下；「高温工学試験研究炉の炉心核特性解析コード-CITATION-1000VP-」, JAERI-M 89-135(1989).
- 9) 山下, 新藤, 村田, 中川, 中田, 徳原；「高温工学試験研究炉の反応度係数の評価」, JAERI-M 90-008(1990).

## 付録A 概略再臨界温度評価

詳細計算による再臨界温度の評価は4.2節に示した。ここでは2段階挿入におけるスクラム条件の設定に使用した概略再臨界温度評価について述べる。

炉心内の温度はスクラム後ゆっくり低下するが、実際のスクラムは任意の出力状態から起こる可能性があるため、スクラム直前の原子炉出力に対する再臨界温度を求め、スクラム後、炉心平均減速材温度が何度になった時に再臨界になるかを評価した。この結果と熱過渡解析の結果より、制御棒被覆材の健全性の観点からスクラム後何分間燃料領域の制御棒を挿入することを遅らせることができるかの概略評価が可能となる。

再臨界温度は、スクラム後の炉心内温度分布の過渡的な変化が分からないと計算できないため、ここでは、炉心平均減速材温度に対するスクラム直後のいわゆるスクラム反応度と、低温臨界におけるスクラム反応度（低温では、再臨界となっているためスクラム反応度は負となっている）から、反応度が0となる、つまり再臨界となる炉心平均減速材温度を求め、その温度を再臨界温度とした。即ち、炉心の反応度は炉心平均減速材温度に対して比例関係にあると仮定して評価した。なお、この評価方法の妥当性については、付録Dに示した。

再臨界温度計算に用いた原子炉出力に対する炉心内の燃料及び減速材温度を表A.1に示す。評価は、原子炉出力30%、50%、70%及び定格運転の高温状態並びに低温状態(300K)に対して行った。また、3.3.2節に示したように、制御棒に対するレベル誤差を臨界に対して0.5段深め及び浅めに設定することにより評価した。

850℃運転からのスクラムに対する、スタックを考慮しない場合及び考慮した場合の結果を図A.1及び図A.2に、950℃運転からの結果を図A.3及び図A.4にそれぞれ示す。同図より、スクラム反応度は制御棒のレベル誤差に対して高温では浅めの場合が、低温の場合は深めが厳しいことが分かる。これは、制御棒による反応度値は深めになるにつれて負で大きく、温度効果は深めの方が正で大きくなることと、低温におけるスクラム反応度は両者の和であるため、深めの方が大きくなるが、高温のスクラム反応度については上記のように深めの方が絶対値が小さいためである。再臨界温度は、30%出力運転の場合を除き、全て深めの場合が高く保守的な評価となっている。再臨界温度の評価結果を表A.2、表A.3、図2.2.2及び図2.2.3に示す。再臨界温度は出力と共に上昇するが、炉心平均減速材温度と再臨界温度の差、つまり再臨界にならない温度範囲も出力と共に上昇することが分かる。また、制御棒のスタックの有無による効果は出力に関係なく、再臨界温度は常にスタックの有る場合が無い場合に比べて約40℃高くなる。

表A-1 炉心内温度設定値

温度設定 (850°C運転時)							(単位: K)						
炉心出力	0%	30%	50%	70%	100%	*1 炉心の1段目より上部の可動及び固定反射体を含む。 備考 側部可動反射体領域はリング2,3制御カラム及び可動反射体領域の照射カラムを含む。 炉心領域は中心制御カラム及びリング1制御カラムを含む。							
上部可動 反射体 <sup>1</sup>	$T_m$	300	400	500	600	700							
炉心	1段	$T_f$	300	480	560	680	1023						
		$T_m$	300	400	500	600	800						
	2段	$T_f$	300	560	690	870	1203	反射体領域 (第2,3段)					
		$T_m$	300	500	600	700	900	炉心出力	0%	30%	50%	70%	100%
	3段	$T_f$	300	640	790	970	1323	側部可動反射体	300	500	600	700	800
		$T_m$	300	500	700	800	1000	固定反射体	300	500	500	600	800
4,5段	$T_f$	300	650	800	970	1373	反射体領域 (第4,5段、下部可動反射体)						
	$T_m$	300	600	700	900	1100	炉心出力	0%	30%	50%	70%	100%	
下部可動 反射体	$T_m$						側部可動反射体	300	500	600	800	1000	
							固定反射体	300	500	600	700	900	

温度設定 (950°C運転時)							(単位: K)						
炉心出力	0%	30%	50%	70%	100%	*2 炉心の1段目より上部の可動及び固定反射体を含む。 備考 側部可動反射体領域はリング2,3制御カラム及び可動反射体領域の照射カラムを含む。 炉心領域は中心制御カラム及びリング1制御カラムを含む。							
上部可動 反射体 <sup>2</sup>	$T_m$	300	400	500	600	700							
炉心	1段	$T_f$	300	490	570	690	1083						
		$T_m$	300	400	500	600	800						
	2段	$T_f$	300	570	720	910	1303	反射体領域 (第2,3段)					
		$T_m$	300	500	600	700	900	炉心出力	0%	30%	50%	70%	100%
	3段	$T_f$	300	670	830	1030	1443	側部可動反射体	300	500	600	700	900
		$T_m$	300	600	700	900	1100	固定反射体	300	500	600	600	800
4,5段	$T_f$	300	690	840	1040	1443	反射体領域 (第4,5段、下部可動反射体)						
	$T_m$	300	600	700	900	1200	炉心出力	0%	30%	50%	70%	100%	
下部可動 反射体	$T_m$						側部可動反射体	300	600	700	800	1100	
							固定反射体	300	500	600	700	900	

表A-2 再臨界温度評価値 (制御棒レベル深め)

運転状態	出力	炉心平均減速 材温度(°C) <sup>*2</sup>	炉停止余裕 (% Δk/k)	再臨界温度 (°C) <sup>*2</sup>
850°C運転時 (スタック無し)	30%	247(520)	6.70	43(316)
	低温・	27(300)	-0.53	
	50%	367(640)	6.99	121(394)
	低温・	27(300)	-2.66	
70%	507(780)	7.21	230(503)	
低温・	27(300)	-5.29		
100%	707(980)	7.58	386(659)	
低温・	27(300)	-8.49		
850°C運転時 (スタック有り)	30%	247(520)	5.4	72(345)
	低温・	27(300)	-1.4	
	50%	367(640)	5.7	161(434)
	低温・	27(300)	-3.7	
70%	507(780)	5.8	269(542)	
低温・	27(300)	-5.9		
100%	707(980)	6.1	431(704)	
低温・	27(300)	-9.0		

\* 各々の出力に対する制御棒位置における低温状態を意味する

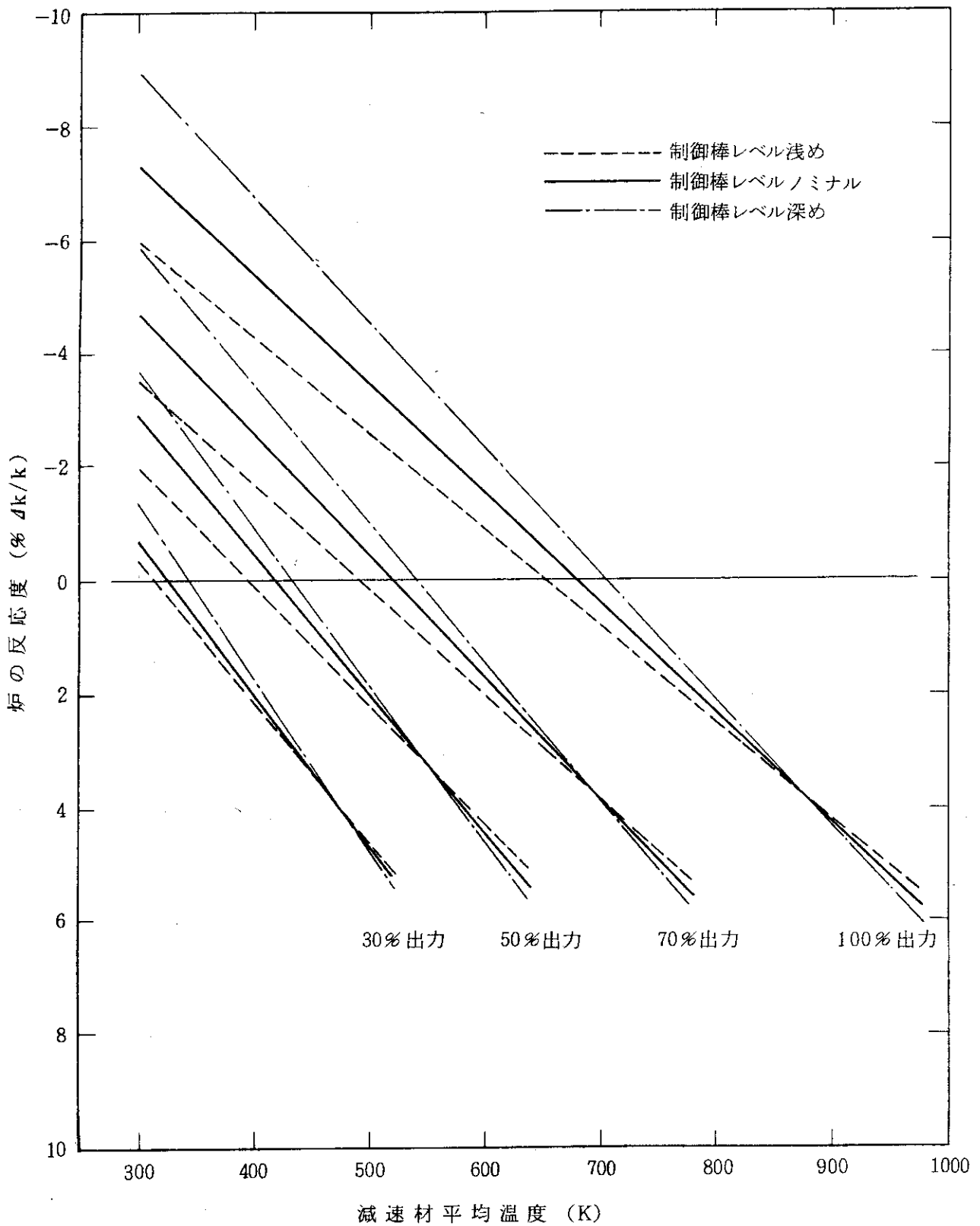
\*2 ( )内はKelvin表示

表A-3 再臨界温度評価値 (制御棒レベル深め)

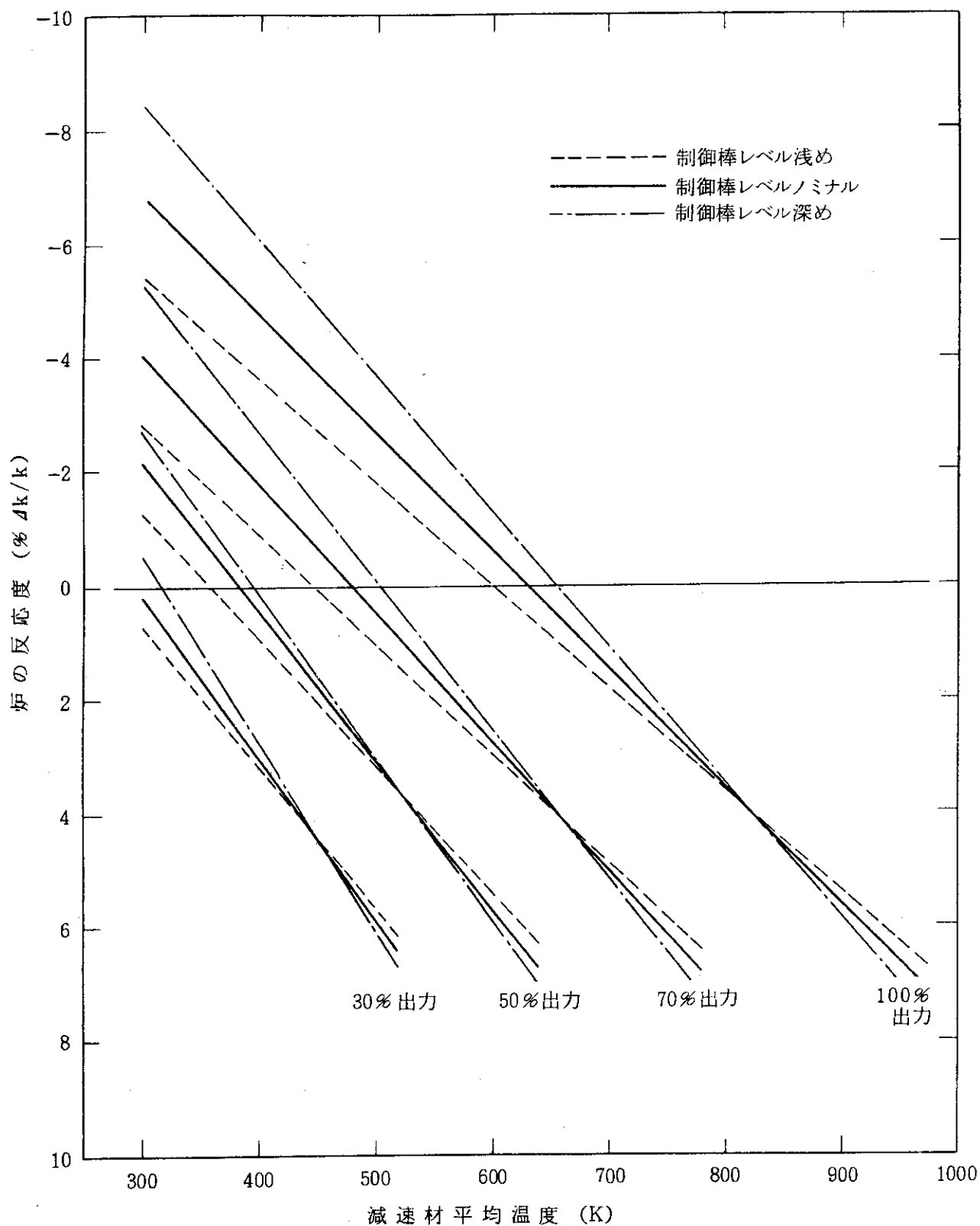
運転状態	出力	炉心平均減速 材温度(°C) <sup>*2</sup>	炉停止余裕 (% Δk/k)	再臨界温度 (°C) <sup>*2</sup>
950°C運転時 (スタック無し)	30%	267(540)	6.83	64(337)
	低温・	27(300)	-1.24	
	50%	367(640)	7.04	129(402)
	低温・	27(300)	-3.00	
70%	527(800)	7.31	254(527)	
低温・	27(300)	-6.08		
100%	767(1040)	7.74	445(718)	
低温・	27(300)	-10.06		
950°C運転時 (スタック有り)	30%	267(540)	5.51	93(366)
	低温・	27(300)	-2.07	
	50%	367(640)	5.69	167(440)
	低温・	27(300)	-4.00	
70%	527(800)	5.90	292(565)	
低温・	27(300)	-6.67		
100%	767(1040)	6.24	491(764)	
低温・	27(300)	-10.48		

\* 各々の出力に対する制御棒位置における低温状態を意味する

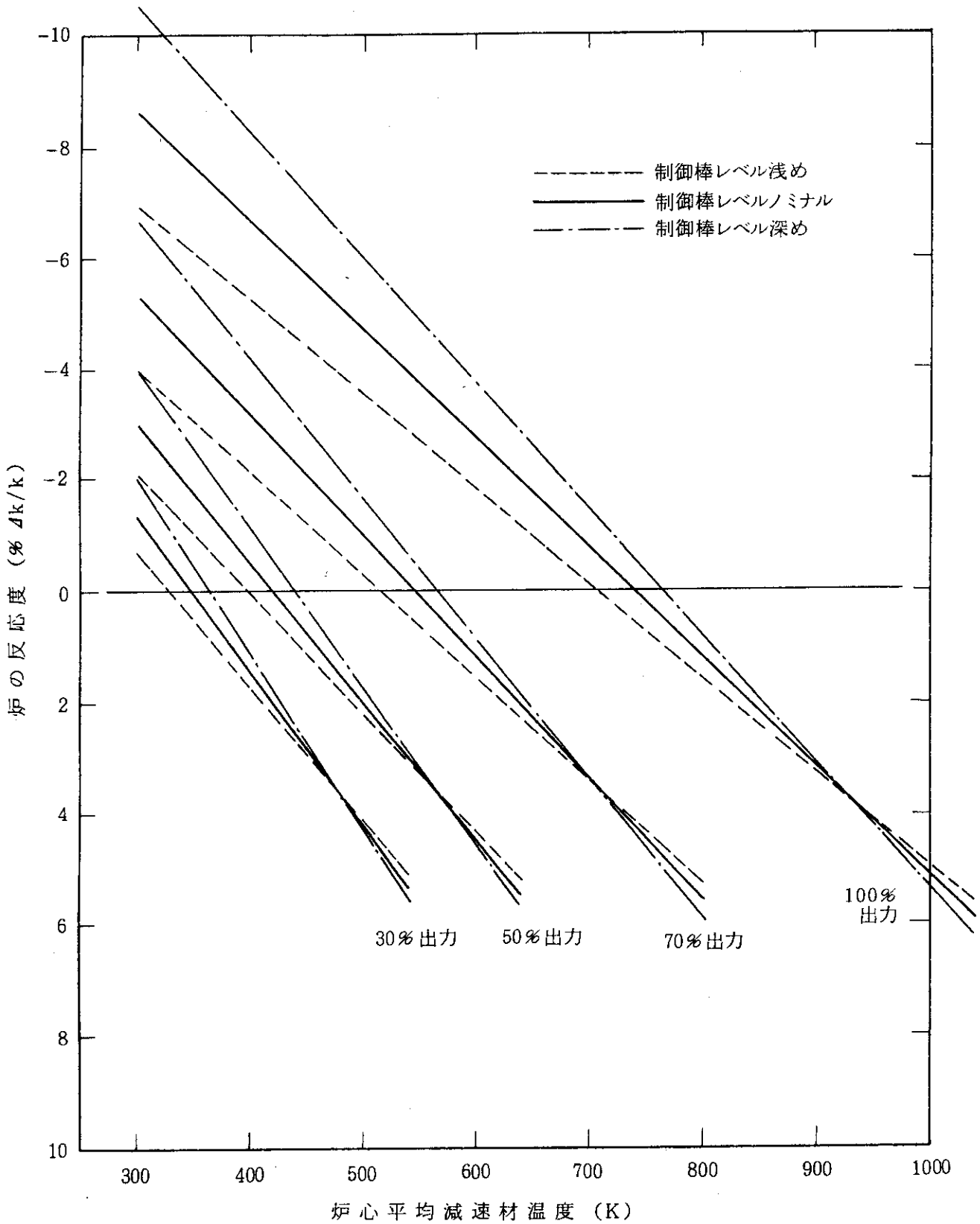
\*2 ( )内はKelvin表示



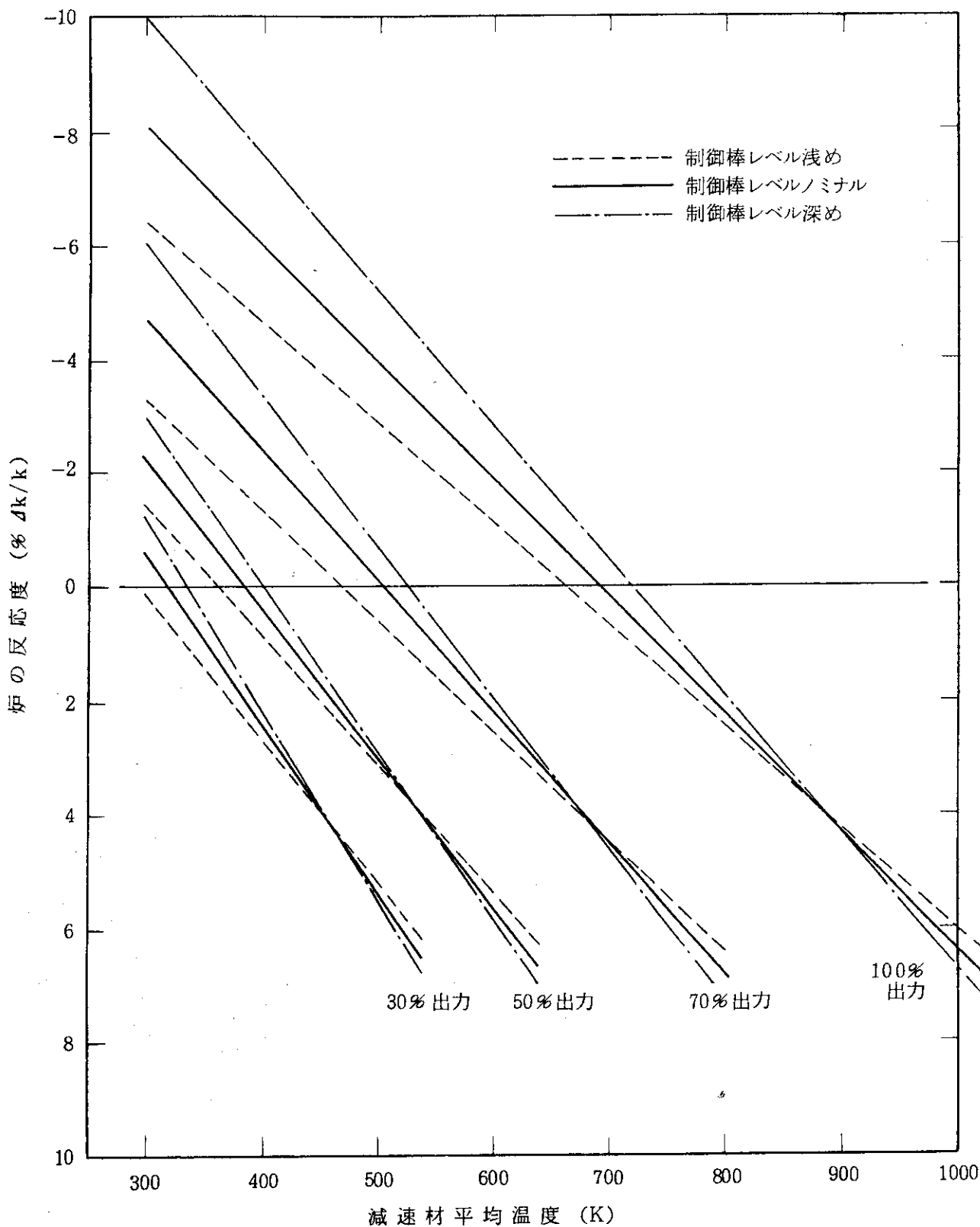
図A. 1 30%, 50%, 70%および100%出力時におけるスクラム時の温度変化による炉の反応度変化(850°C, スタックを考慮)



図A. 2 30%, 50%, 70%および100%出力時におけるスクラム時の温度変化による炉の反応度変化(850°C, スタック未考慮)



図A. 3 30%, 50%, 70%および100%出力時におけるスクラム時の温度変化による炉の反応度変化(950°C, スタックを考慮)



図A. 4 30%, 50%, 70%および100%出力時におけるスクラム時の温度変化による炉の反応度変化(950°C, スタック未考慮)

## 付録B 炉停止余裕詳細計算結果

炉停止余裕計算時に必要となる群定数は格子燃焼計算コード DELIGHTにより求めているが、その入力条件の1つとなる減速材温度については、DELIGHT内蔵の黒鉛散乱カーネルが100°C毎のデータであるため、減速材温度を全て切り捨てて100°C毎の入力となっている。これは、HTTRでは、減速材温度係数が燃焼初期において全ての温度範囲において負となるため、温度設定値を低めにすることは炉停止余裕評価上保守的となるためである。

表4.1.1に示すように、上記のような仮定により保守的に炉停止余裕の評価を行った場合には、スクラム後2400秒経過後において十分に未臨界となるが、減速材温度の保守性を取り除いたノミナル計算において、どの程度の炉停止余裕が確保できるかを評価しておくことは、特性試験時の炉停止余裕の値を測定することを考えた場合大変有益と思われる。ここでは、熱計算による炉心内温度分布を切捨てずにそのまま DELIGHTによる格子計算に使用することにより群定数を作成し、炉心計算による炉停止余裕を評価した結果を示す。

減速材温度の保守性を取り除いて炉停止余裕評価は、最も厳しい燃焼初期における950°C運転時のスクラム後2400秒経過後について行った。炉心内の温度分布は、燃料温度については従来と同様の値を用い、減速材温度については図3.2.3の値を1°Cの位を四捨五入することによりできるだけノミナル値に近くなるようにして評価した。炉心内の温度設定値を図B.1に示した。減速材温度の設定時に考慮した保守性を取り除くと減速材温度は、燃料領域の平均で考えても約60°Cの余裕があり、更に反射体領域についても数10°Cの余裕がある。燃料領域の平均温度については表4.1.2に、炉停止余裕の評価結果は表4.2.1(6/6)及び表4.1.1に示した。炉停止余裕は評価計算上簡略化するために低めに設定してた温度分布の保守性を取り除いた場合1.2%  $\Delta k/k$ となり、炉心平均減速材温度の余裕60°Cに対し約0.5%  $\Delta k/k$ の余裕があることが分かった。

炉心中心		炉心領域	可動反射体	固定反射体
上部可動反射体			$T_m = 600(600)$	
1段	$T_f = 670(670)$ $T_m = 660(600)$			
2段	$T_f = 780(780)$ $T_m = 780(700)$		$T_m = 840(900)$	$T_m = 700(700)$
3段	$T_f = 890(890)$ $T_m = 880(800)$			
4/5段	$T_f = 1050(1050)$ $T_m = 1040(1000)$		$T_m = 1020(1000)$	$T_m = 780(800)$
下部可動反射体	$T_m = 1120(1100)$			

括弧内の数値は保守性を取り除く以前の設定温度を示す。 (単位: K)

図B. 1 950°C運転時のスクラム後2400秒経過後詳細炉停止余裕評価用温度設定値

## 付録C 炉停止余裕評価時の誤差評価について

原子炉スクラム時の炉停止余裕の評価においては、核設計上十分保守的となるようにHTTRの核設計手法において評価している以下の誤差を全て安全側に考慮している。

具体的には以下の項目について誤差を考慮している。

## 1. 反応度値の誤差

(1) 制御棒反応度値 .....	10%
(2) 出力による炉心の温度変化による反応度値 .....	10%
(3) 反応度調整材反応度値 .....	10%
(4) 輸送補正 .....	5%

## 2. 実効増倍率の誤差

(5) 拡散計算の誤差 .....	1% $\Delta k$
-------------------	---------------

(1), (2), (3)及び(5)については、いずれも VHTRCによる実験から評価決定したものであり、(4)については制御棒の反応度値計算時に使用する制御棒の群定数に対して設計上の余裕として定めたものである。制御棒の群定数は $S_N$  計算コードで求めており、反応度値はその制御棒を出し入れすることにより求めるため、 $S_N$  計算コードの誤差が拡散計算に上乘せされるためである。各々の誤差は、炉停止余裕評価時に、以下のように反映した。

## (1) 実効増倍率評価時の制御棒挿入位置の誤差

定常運転状態における制御棒の挿入位置に影響する反応度誤差としては、上記の実効増倍率の誤差 (1%  $\Delta k$ )、反応度調整材の反応度値の誤差 (10%) 及び制御棒の反応度値の誤差 (10%) を考慮している。これらの誤差を総合すると以下に示すように約2.4%  $\Delta k/k$ となる。この合計誤差が正の反応度として作用する場合には、運転時の全制御棒の挿入位置を実効増倍率の計算値が 0.976以下となるよう深めに調整し、逆に負の反応度として作用する場合には、運転時の制御棒の挿入位置を実効増倍率の計算値が 1.024以上となるよう浅めに調整する。この2種類の運転時の制御棒の挿入位置より、反射体領域の制御棒を全挿入した場合、反射体領域の制御棒の挿入分の反応度値が小さく評価されるのは、定格運転時には制御棒が浅めの場合であり、低温臨界時は制御棒の挿入度が深い場合である (付録A参照)。

誤差の内訳を以下に示す。反応度調整材の反応度値の誤差は、全制御棒が引き抜かれた状態で反応度調整材がある状態とない状態の差より求め、(C-1)式に示すように1.2%  $\Delta k/k$ とした。

$$\frac{k(\text{BP無}) - k(\text{BP有})}{k(\text{BP無}) \cdot k(\text{BP有})} \times 0.1 \times 100 = 1.19\Delta k/k \quad (\text{C-1})$$

ここで

$$k(\text{BP無}) = 1.31222(30\% \text{出力運転状態})$$

$$k(\text{BP有}) = 1.13426(30\% \text{出力運転状態})$$

制御棒反応度値は、全制御棒引抜き状態と運転時の制御棒挿入状態との差より求め、(C-2)、式に示すように1.7%  $\Delta k/k$ とした。

$$\frac{k(\text{CP無}) - k(\text{CP有})}{k(\text{CP無}) \cdot k(\text{CP有})} \times 0.1 \times 100 = 1.69\Delta k/k \quad (\text{C-2})$$

ここで

$$k(\text{CP無}) = 1.13426(30\% \text{出力運転状態})$$

$$k(\text{CP有}) = 0.95144(30\% \text{出力運転状態})$$

合計誤差は、上記の反応度調整材反応度値の誤差と制御棒反応度の誤差及び実効増倍率の誤差(1%  $\Delta k/k$ )を考慮して、次式の結果をまとめて2.4%  $\Delta k/k$ とした。

$$(1^2 + 1.2^2 + 1.7^2)^{0.5} = 2.31\% \Delta k/k \quad (\text{C-3})$$

## (2) 制御棒反応度値 ( $\rho_c$ ) の誤差

制御棒の反応度値の誤差には、反応度値の誤差10%の他、輸送補正5%を考慮している。制御棒の反応度値は次式に示すように反応度を低く評価する場合が厳しくなる。

$$\rho_c = \frac{k_1 - k_2}{k_1 \cdot k_2} \times 0.9 \times 0.95 \times 100\% \Delta k/k \quad (\text{C-4})$$

ここで

$k_1$  : 運転時の制御棒挿入状態における実効増倍率

$k_2$  : 反射体領域の制御棒を全挿入した状態における実効増倍率

## (3) 反応度温度効果 ( $\rho_T$ ) の誤差

温度変化による反応度への影響は、炉停止余裕評価時には温度低下による反応度の印加というかたちで現れるため、反応度は高く評価される場合が厳しい。温度効果分は次式に示すように10%の誤差を考慮した。

$$\rho_T = \frac{k_4 - k_3}{k_3 \cdot k_4} \times (1 + 0.1) \times 100\% \Delta k/k \quad (\text{C-5})$$

ここで

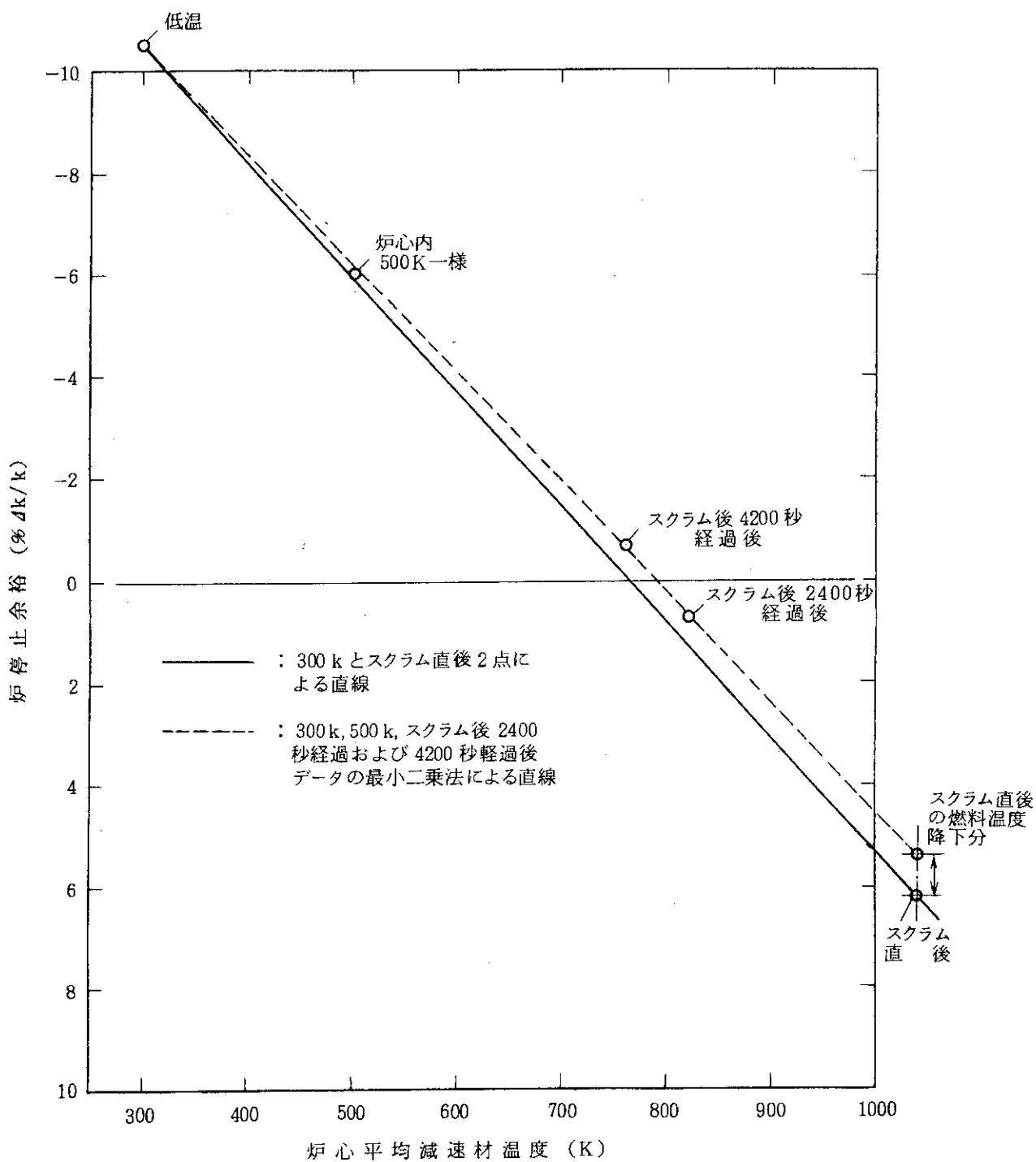
$k_3$  : 炉心温度が  $T_1$  の場合の実効増倍率

$k_4$  : 炉心温度が  $T_2 < T_1$  の場合の実効増倍率

## 付録D 図4.2.1及び図4.2.2で基準状態を評価に加えないことについて

スクラム後、炉内は、補助冷却系で除熱するためまず燃料温度が減速材温度と同じになるまで低下し、その後、炉心全体が緩やかに冷却されていく。炉停止余裕評価における温度設定は、スクラム直後はスクラム直前の運転状態の温度に等しいとしており、その場合の炉停止余裕は、減速材温度より燃料温度が高い状態での評価となっている。図4.2.1及び図4.2.2に示した炉停止余裕は、いずれも2400秒経過以降の評価結果であり、燃料温度と減速材温度はほぼ同じ温度となっている。

図D.1にスクラム直後の炉内温度分布と全炉心を $27^{\circ}\text{C}$ (300K)一様として得られた炉停止余裕から作成した減速材温度と炉停止余裕の関係と、スクラム直後のものを除いた結果によるフィッティング直線と比較した結果を示す。後者の直線の外挿によるスクラム直後の炉停止余裕と3.3.3式によるスクラム直後の温度分布を用いた計算値を比較すると、後者の外挿値の方が炉停止余裕が大きくなり、これが燃料の温度効果分に相当する。従って、スクラム直後に燃料温度のみが低下することにより正の反応度が加わり、減速材と燃料がほぼ同じ温度になった時点から、後者の外挿直線にのると考えられる。なお、実際には、スクラム後の炉停止余裕の評価はスクラム直後は(3.3.3)式を、2400秒経過以降は(3.3.2)式を用いて行っていることから、図3.3.2に示す $\rho_{s1}$ と $\rho_{s2}$ の違いが両者の違いの中に含まれると考えられる。



図D.1 950°Cにおけるスタックを考慮した場合の炉停止余裕

## 付録E 減速材温度反応度効果評価法

表4.1.1に示す炉停止余裕の評価値は、保守的に評価した減速材温度を用いることから、表4.1.2に示すように50℃以上の保守性があり、減速材温度の保守性に相当する分だけ炉停止余裕が大きくなる。図4.2.1及び図4.2.2に示すように、炉停止余裕は、スクラム後の減速材の平均温度に比例することが分かっているため、上記の保守性を図より外挿し、実際にはどの程度の炉停止余裕があるかを定量的に評価できる。図4.2.1及び図4.2.2から外挿する場合、燃料温度及び減速材温度の両者の外挿となるが、炉停止余裕の評価に用いる燃料温度は熱設計計算の結果をそのまま用いているため温度の保守性はなく、外挿する場合、外挿による炉停止余裕の減少分から燃料温度の上昇に起因する減少分を取り除く必要がある。このための方法としては、HTTRで評価している温度係数<sup>(9)</sup>を用い、燃料の分だけ取り除くことが考えられるが、燃料温度係数及び減速材温度係数は制御棒全引抜き状態で評価されており、保守的な値となっているため、燃料温度係数を用いた補正は困難である。そこで、ここでは、燃料温度係数、減速材温度係数、外挿により得られた燃料温度と減速材温度を用い、両者の温度効果分の割合から外挿の変化分の内、減速材温度の保守性の分のみを取り出し評価値に加え、減速材温度反応度効果補正分として評価した。結果を表4.1.1に示す。

なお、参考までに本評価の具体的な算出方法について表E.1に補正に使用したHTTRの減速材温度係数及び燃料温度係数を表E.2にそれぞれ示す。

表E. 1 減速材温度反応度効果補正結果

T <sub>out</sub>	スラック	場所	基準温度 T <sub>a</sub>	スクラム後2400秒経過後温度			温度差 ΔT		炉停止余裕 (% Δk/k)			温度係数 (×10 <sup>-5</sup> Δk/k/°C) ( )内は評価温度	温度係数考慮済み炉停止余裕 <sup>*1</sup> (% Δk/k)
				核計算 T <sub>B</sub>	熱計算 T <sub>C</sub>	外挿 T <sub>D</sub>	T <sub>D</sub> - T <sub>B</sub>	ΔT <sup>*6</sup>	T <sub>g</sub> 時 ρ <sub>g</sub>	外挿値 ρ <sub>e</sub> <sup>*8</sup>	差 Δρ <sup>*7</sup>		
950°C	有り	T <sub>f</sub>	523 <sup>*2</sup>	615	613	721 <sup>*3</sup>	106	-2	0.68	2.12	1.44	-2.0 (886K)	1.66
		T <sub>m</sub>	487 <sup>*2</sup>	547	616	616 <sup>*4</sup>	69	-				-6.8 (889K)	
	無し	T <sub>f</sub>	523 <sup>*2</sup>	615	613	721 <sup>*3</sup>	106	-2	1.86	3.37	1.51	-2.0 (886K)	2.89
		T <sub>m</sub>	487 <sup>*2</sup>	547	616	616 <sup>*4</sup>	69	-				-6.8 (889K)	
850°C	有り	T <sub>f</sub>	227 <sup>*5</sup>	567	564	640 <sup>*3</sup>	73	-3	1.63	2.96	1.33	-2.2 (837K)	2.57
		T <sub>m</sub>	227 <sup>*5</sup>	507	567	567 <sup>*4</sup>	60	-				-6.8 (840K)	
	無し	T <sub>f</sub>	227 <sup>*5</sup>	567	564	640 <sup>*3</sup>	73	-3	2.81	4.23	1.42	-2.2 (837K)	3.81
		T <sub>m</sub>	227 <sup>*5</sup>	507	567	567 <sup>*4</sup>	60	-				-6.8 (840K)	
750°C	有り	T <sub>f</sub>	227 <sup>*5</sup>	477	479	581 <sup>*3</sup>	104	2	2.76	4.49	1.73	-2.5 (752K)	3.92
		T <sub>m</sub>	227 <sup>*5</sup>	407	482	482 <sup>*4</sup>	75	-				-6.8 (755K)	
	無し	T <sub>f</sub>	227 <sup>*5</sup>	477	479	581 <sup>*3</sup>	104	2	3.99	5.84	1.85	-2.5 (752K)	5.23
		T <sub>m</sub>	227 <sup>*5</sup>	407	482	482 <sup>*4</sup>	75	-				-6.8 (755K)	

\*1  $\Delta \rho \times \frac{(\Delta \rho / \Delta T)_f \cdot \Delta T'_f + (\Delta \rho / \Delta T)_m \cdot \Delta T'_m}{(\Delta \rho / \Delta T)_f \cdot \Delta T'_f + (\Delta \rho / \Delta T)_m \cdot \Delta T'_m} + \rho_0$  \*2 4200秒後の値 \*3  $T_{fD} = T_{fB} + \frac{T_{fB} - T_{fA}}{T_{mB} - T_{mA}} \cdot (T_{mC} - T_{mB})$   
 \*4  $T_{mD} - T_{mC}$  \*5 500Kを基準とした \*6  $\Delta T'_f = T_{fC} - T_{fB}$  \*7  $\Delta \rho = \rho_e - \rho_0$  \*8 図4.2.1及び図4.2.2のフィッティング直線から求めた T<sub>D</sub> に対する炉停止余裕

表E. 2 燃焼初期の減速材温度係数及びドブラ係数

燃料温度 $T_f$ (K)	減速材温度 $T_m$ (K)	温度係数 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$ )	
		減速材	燃料
300	300	-5.9	-3.8
400	400	-6.4	-3.7
500	500	-6.6	-3.3
600	600	-7.0	-3.0
700	700	-6.8	-2.8
800	800	-6.8	-2.3
900	900	-6.8	-2.0
1000	1000	-6.9	-1.8
1100	1100	-7.5	-2.1
1200	1200	-7.8	-1.9
1300	1300	-7.8	-1.9
1400	1400	-8.3	-1.8