

JAERI - M
90-104

高温工学試験研究炉(HTTR)の制御棒温度解析

1990年7月

丸山 創・西口 磯春・藤本 望
小倉 健志*・塩沢 周策・数上 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, 1990

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 (HTTR) の制御棒温度解析

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

丸山 創・西口 磯春・藤本 望

小倉 健志*・塩沢 周策・数土 幸夫

(1990年6月8日受理)

高温工学試験研究炉では、原子炉スクラム時に制御棒被覆管の高温における繰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、その後炉心温度が所定の温度以下となった時点で燃料領域の制御棒を挿入し、低温まで未臨界を維持する2段階挿入法を採用している。炉心領域の制御棒の挿入は、タイマーによる設定時間または原子炉出口冷却材温度の設定値に達した時点で行う。本報は、種々のスクラム条件下での制御棒被覆管温度解析の手法、条件及び結果についてまとめたものである。

Temperature Analysis of Control Rod for HTTR

So MARUYAMA, Isoharu NISHIGUCHI, Nozomu FUJIMOTO
Takeshi OGURA^{*}, Shusaku SHIOZAWA and Yukio SUDO

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

(Received June 8, 1990)

For the High Temperature Engineering Test Reactor, the reactor shut down from the high temperature condition is made by the two-step control rods insertion in order to avoid a fatigue damage of control rod casing at high temperature. The control rods in reflector region are inserted into the core immediately after reactor scram and then, the control rods in fuel region are inserted when the core temperature becomes enough lower than the temperature limit of materials. Control rods in fuel region are inserted automatically by either signal of prescribed time given by timers or the signal that reactor outlet coolant temperature reached the preset value.

This report describes the method, condition and results of control rod temperature analysis under various scram conditions.

Keywords: HTTR, Control Rod, Temperature Analysis, Scram Condition

* TOSHIBA Co.

目 次

1. 緒 言	1
2. 解析方法	5
2.1 解析事象の選定と評価対象制御棒	5
2.2 計算モデル	6
2.3 公称温度と高温点温度解析	7
3. 解析条件	21
3.1 スクラム時のプラント熱過渡状態値	21
3.2 解析に用いる物性値	21
3.3 境界条件	22
4. 解析結果	37
4.1 初期定常状態	37
4.2 商用電源喪失	37
4.3 商用電源喪失+AGC 1 台起動失敗	38
4.4 原子炉出力制御系異常	38
4.5 制御棒誤落下	38
4.6 燃料領域制御棒の被覆管温度	38
5. 結 言	59
謝 辞	60
参考文献	60

Contents

1. Introduction	1
2. Analytical method	5
2.1 Analysis events and evaluated control rod	5
2.2 Calculation model	6
2.3 Nominal temperature and hot spot analysis	7
3. Analytical condition	21
3.1 Thermal transient at scram condition	21
3.2 Physical properties	21
3.3 Boundary conditions	22
4. Analytical results	37
4.1 Initial temperature	37
4.2 Loss of electric power supply	37
4.3 Loss of electric power supply and single failure of AGC	38
4.4 Malfunction of reactor power control system	38
4.5 Control rod miss-insertion	38
4.6 Control rod temperature in fuel region	38
5. Conclusion	59
Acknowledgement	60
References	60

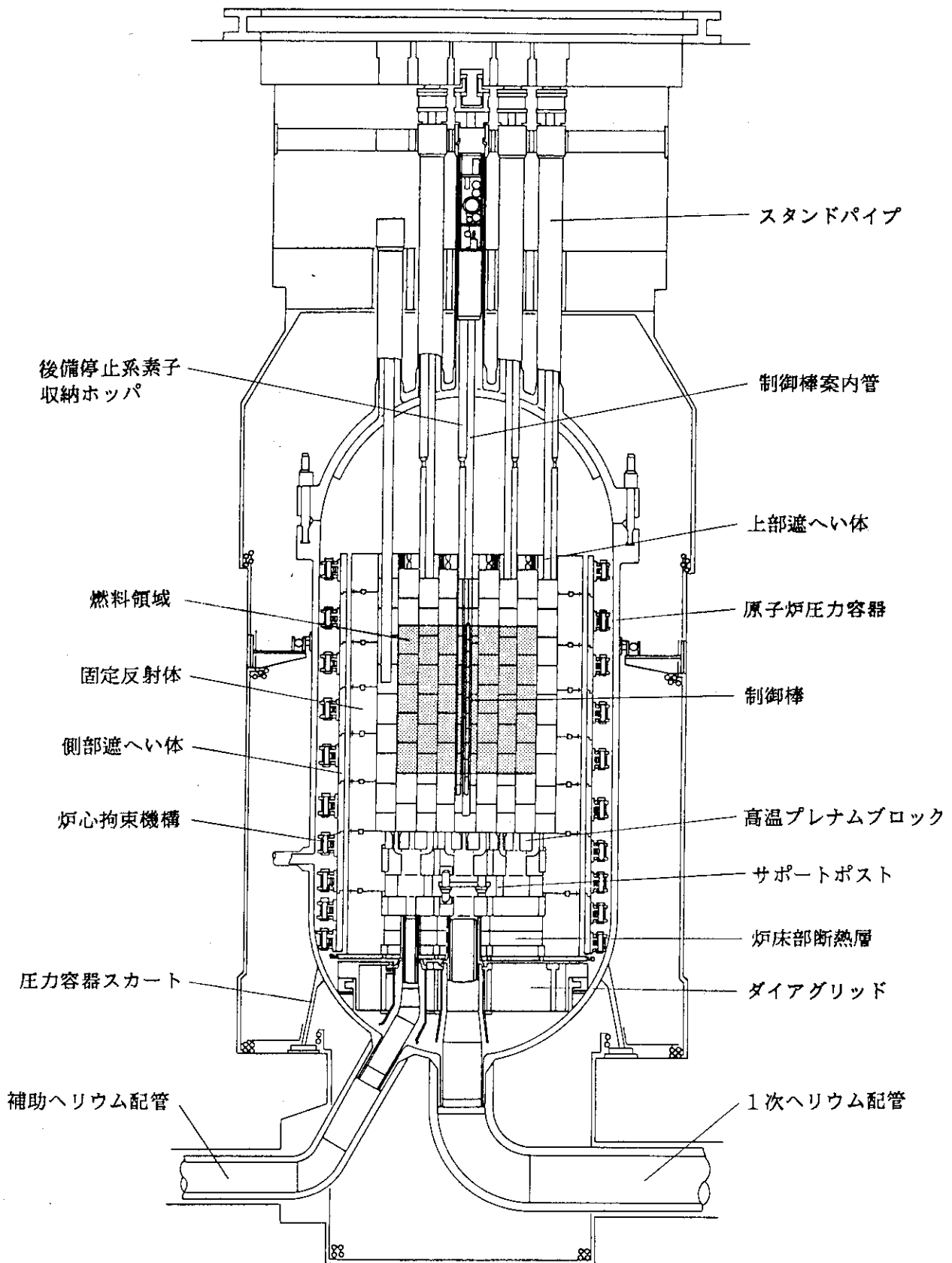
1. 緒 言

高温工学試験研究炉（HTTR：High Temperature Engineering Test Reactorの略）では、原子炉出口冷却材温度950℃という高温での運転を行うため、炉心構成要素及び炉内構造物の大部分は、黒鉛又は炭素等の耐熱材料から構成されている⁽¹⁾。また、炉内鋼構造物については、その使用場所を制限する、あるいは断熱構造にすることより、使用温度が材料の制限温度を超えることがない設計となっている。原子炉本体の縦断面図及び水平断面図を第1.1図及び第1.2図に示す。

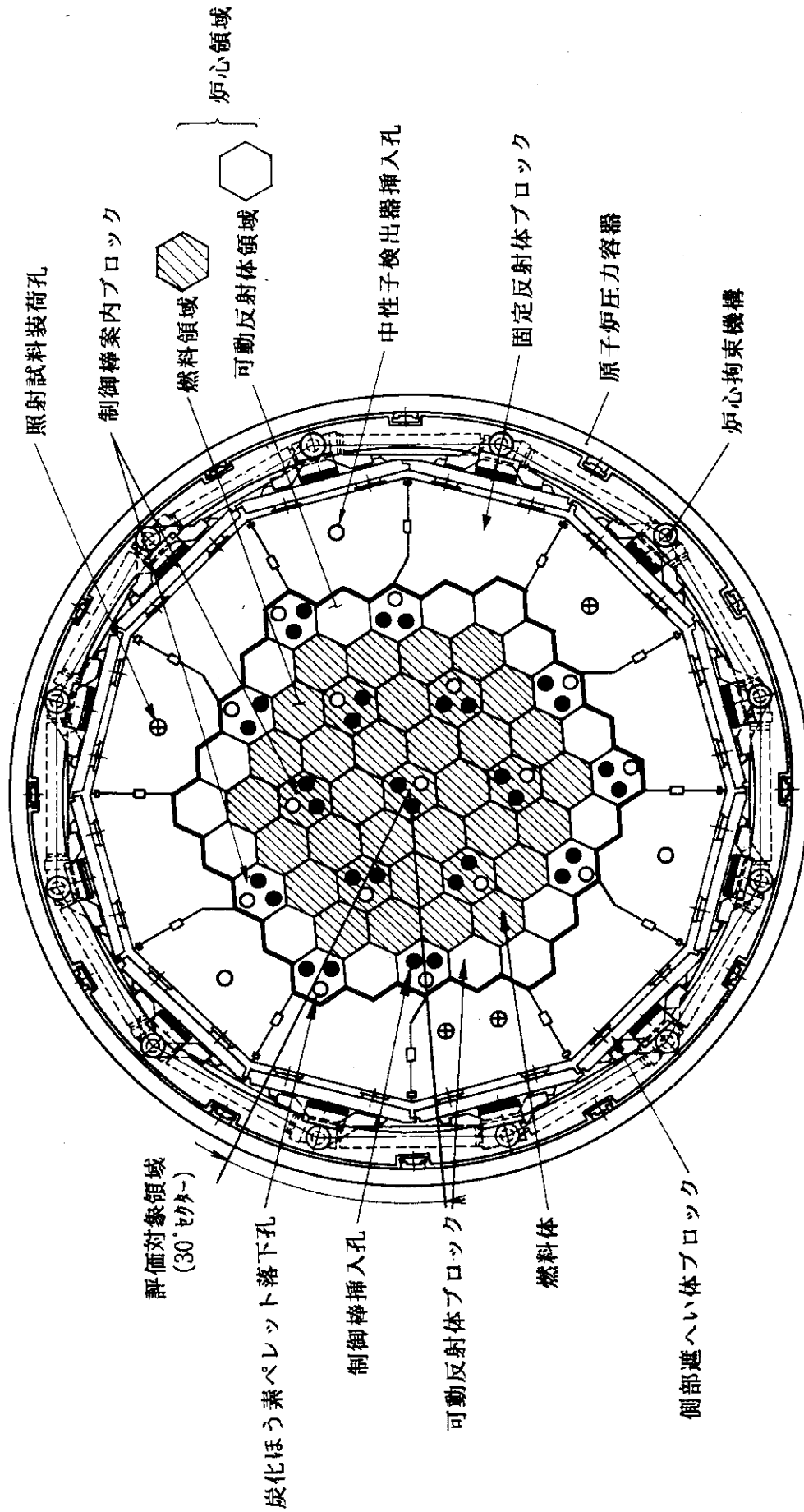
一方、制御棒は、原子炉スクラム時に高温の炉心領域に挿入されることから、制御棒被覆管の高温における繰返し使用により寿命が低下し、被覆管に大きな変形や亀裂が生じる可能性がある。この変形や亀裂が、制御棒による炉停止機能に直接影響を与えることはないが、制御棒の構造設計では、挿入性の観点から安全側の評価をするために、これらの変形や亀裂の発生を抑え、挿入性を確保する設計としている。この場合、制御棒被覆管の構造材料であるAlloy 800Hのクリープ疲労の評価に必要なデータベース等を勘案して、繰返し使用に対する温度のしきい値を900℃と定め、これを超えた場合には制御棒を交換する。したがって、この温度のしきい値以下では、制御棒の寿命中の健全性は確保される設計となっている。制御棒の概略構造図を第1.3図に示す。

原子炉スクラム時には、制御棒被覆管温度の制限の観点から、まず比較的温度の低い反射体領域に制御棒を挿入して原子炉を未臨界とする。次いで炉心温度が所定の温度の下がるのを待って、あるいは所定の時間間隔をおいて燃料領域に制御棒を挿入することにより、制御棒被覆管温度をしきい値以下に抑えるとともに低温状態まで原子炉を未臨界に維持する2段階挿入法を採用している。この時、炉心温度が所定の温度以下になったことは、原子炉出口冷却材温度により判断する。また、所定の時間間隔は、タイマーにより設定する。

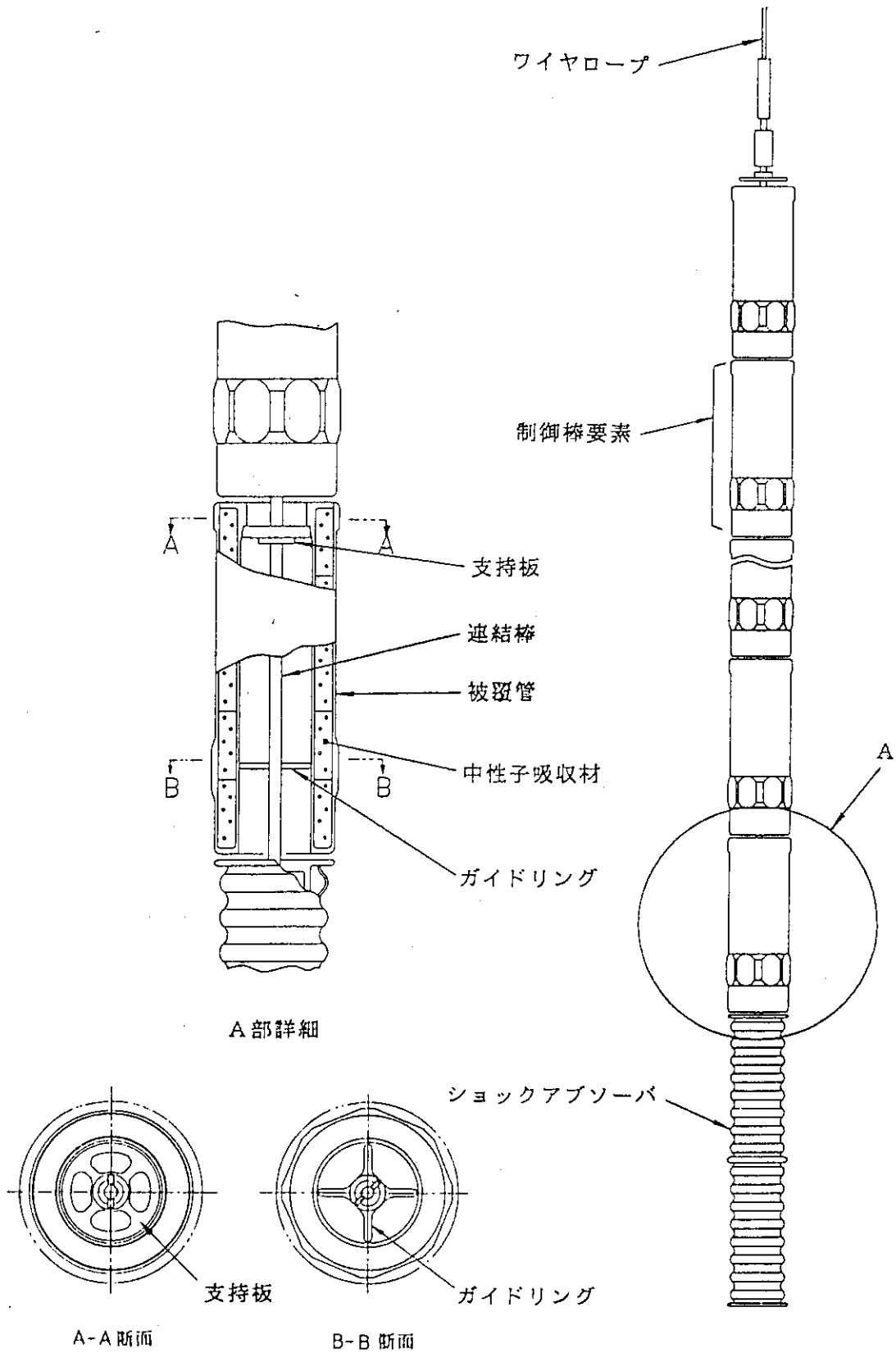
このため、種々のスクラム条件における2段階挿入時の制御棒被覆管温度解析を行ない、燃料領域制御棒の挿入を決定するタイマー設定時間の妥当性を確認した。本報は、スクラム時及び制御棒誤落下時における制御棒被覆管温度の解析方法、解析条件及び解析結果についてまとめたものである。



第 1.1 図 原子炉縦断面図



第1.2図 原子炉平断面図



第 1.3 図 制御棒構造図

2. 解析方法

2.1 解析事象の選定と評価対象制御棒

制御棒被覆管温度解析の対象事象として、被覆管温度評価上適切な保守性を有する評価となるよう、

- ・原子炉トリップ直前の燃料ブロック及び制御棒案内ブロック温度が高い事象であること。
- ・原子炉トリップ後の冷却材流量が少ない事象であること。
- ・高温領域に制御棒が挿入される事象であること。

の3点を考慮して、以下に示す4事象を選定し、制御棒被覆管の温度評価を行った。

- ① 商用電源喪失
- ② 商用電源喪失+補助冷却設備ガス循環機 (AGC) 1台起動失敗
- ③ 原子炉出力制御系異常
- ④ 制御棒誤落下

商用電源喪失は、原子炉の通常運転時に商用電源 (外部電源) が喪失し、瞬時に原子炉がスクラムする事象である。スクラム後、約60秒の時間遅れを持って非常用電源が確立した後にAGC 2台が同時に起動され、炉心の冷却が行われる。この時、AGC 2台の内1台は、炉心構成要素等に過大な熱衝撃を与えないよう、原子炉スクラム後2400秒後に自動的に停止する。

商用電源喪失+AGC 1台起動失敗は、商用電源喪失によるスクラム時に自動起動するAGC 2台の内1台の起動に失敗する事象であり、スクラム後の炉心冷却能力が低下し、商用電源喪失に比較すると炉心の高温状態が続く事象である。

原子炉出力制御系異常は、原子炉出力が仮想的にステップ状に110%に到達し、約800秒後に原子炉がスクラムするとした事象である。ただし、HTTRの炉心特性あるいは制御系の特性から原子炉出力がステップ状に変化し、その状態が長時間継続することはない。

制御棒誤落下は、本来2段階挿入によりスクラム後2400秒後に炉心に挿入されるべき燃料領域制御棒が、スクラムと同時に誤挿入される事象であり、炉心が最も高温状態にあるときに制御棒が挿入される事象である。

上記の各事象について、プラント熱過渡解析コードTHYDE-HTGR⁽²⁾を用いて原子炉入口冷却材温度、冷却材流量及び冷却材圧力の過渡状態値を求め、これを制御棒被覆管温度解析の入力値とする。

評価対象の制御棒は、第1.2図に示すように2段階挿入時に最も高温領域に挿入されるとともに、スクラム後に炉心部からの熱の流入量が最も大きくなる反射体領域の制御棒 (第2リング制御棒) とする。

2.2 計算モデル

制御棒被覆管温度解析では、まず、汎用有限差分解コードTRUMP⁽³⁾を用いて、軸方向には第1.1図に示した原子炉縦断面図において上部遮へい体から下部可動反射体までを、水平方向には原子炉圧力容器内の1/12セクターを対象として3次元非定常温度分布解析を行い、炉心内温度分布を求める。この時、評価対象の制御棒挿入用黒鉛ブロックは、燃料体、可動反射体及び固定反射体の異なる構造物と接しているため、黒鉛ブロックの過渡温度挙動は、それぞれの構造物の温度挙動に大きく影響される。このため、制御棒挿入用黒鉛ブロックについては、周方向に3分割し、それぞれの温度挙動を評価し、これにより得られた制御棒挿入用黒鉛ブロック各部の温度を境界条件として制御棒単体の温度分布解析を行う。ただし、1ブロックを3要素に分割すると制御棒挿入孔表面の周方向温度分布は不連続になるため、2.3項に後述するように別途FEM解析を行い、挿入孔周方向温度の影響を定量的に評価して被覆管温度に考慮する。

上部遮へい体及び上部可動反射体領域の径方向解析モデルを第2.1図に、燃料領域の径方向解析モデルを第2.2図に、下部可動反射体領域の径方向解析モデルを第2.3図に示す。また軸方向には、上部遮へい体と上部可動反射体を合わせて1分割、燃料領域は5分割（1燃料体を1分割）、下部可動反射体を1分割して解析を行う。

各構成要素については、カラム内の黒鉛ブロック、冷却材、燃料棒及び制御棒をそれぞれ1要素で表す。ただし、評価対象の黒鉛ブロックについては、制御棒要素の周方向温度分布を評価するため、ブロックの径方向に3要素に分割する。図中のF1～F4は燃料ブロックを、CR1～CR4は制御棒案内ブロックを、S1、S2、S3はそれぞれ可動反射体ブロック、固定反射体ブロック、側部遮へい体ブロックを示している。またカラム間ギャップ幅については、同一高温プレナムブロック上のカラム間ギャップである内部ギャップ（GI）と高温プレナムブロック間のギャップである外部ギャップ（GO）に分けて、バイパス流れの影響を評価する。カラム間ギャップ幅は、第2.1表に示す高温試験運転時における各ギャップ幅の炉心部軸方向各段の値⁽⁴⁾を平均化して設定した。

各固体要素間の熱伝導評価に用いる等価熱伝導距離の考え方を第2.2表に示す。なお、評価対象の可動反射体領域制御棒挿入ブロックの等価熱伝導距離の設定に当たっては、第2.3表に示すようにFEMによる温度分布解析を行い定めた。

制御棒被覆管温度は、炉心温度分布解析により得られた黒鉛ブロック温度に基づいて、第1.3図に示した制御棒要素と黒鉛ブロックからなる領域を第2.4図に示すモデルにより模擬して計算する。解析モデルは、スパイン、ヘリウムガス、被覆管（Alloy 800H）及びB₄C/Cを各1要素で表した軸対称モデルである。軸方向には、炉心の高さに相当する2.9mをモデル化し、制御棒の全挿入時に炉心燃料体の1段目から4段目の位置に対応する制御棒を1メッシュ当り14.5cm（1ブロックを軸方向に4等分割）に、5段目の位置に対応する制御棒を1メッシュ当り19.3cm（1ブロックを軸方向に3等分割）に分割している。

2.3 公称温度と高温点温度解析

制御棒被覆管及びスパインの公称温度と高温点温度の解析条件の比較を第2.4表及び第2.5表に示す。第2.4表は、制御棒を挿入する黒鉛ブロックの温度評価上考慮する工学的安全係数の項目を、第2.5表は、制御棒被覆管温度評価上考慮する工学的安全係数の項目を示している。工学的安全係数の値については、基本的には炉心熱流体力設計において燃料最高温度評価に用いた値⁽⁵⁾と同一である。制御棒被覆管の高温点温度評価に特有な項目を以下に示す。

① クロス流れ評価誤差

カラム間ギャップを流れるバイパス流量の誤差として-100%を定める。

② Alloy 800Hふく射率

公称値を0.5とし、工学的安全係数を考慮した値を0.8とする。

③ カラム間ギャップ幅

ダウンエルピン・ダウンエルソケットのクリアランスによるブロックの片寄りを統計的因子として考慮する。

④ 冷却材周方向混合効果

公称温度の評価に当たっては、制御棒挿入孔内の冷却材は、完全混合するものとし、高温点温度の評価に当たっては、混合しないものとする。ただし、黒鉛ブロックを介しての熱伝導による効果は、別途FEM解析によりその影響を定量的に評価し、温度評価に反映するものとする。

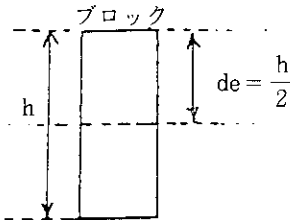
⑤ 偏心効果⁽⁶⁾

制御棒挿入孔内径と制御棒被覆管表面のパッドの外径から許容される制御棒の偏心により生じる被覆管表面温度の変化を評価し、工学的安全係数として高温点温度評価に用いる。

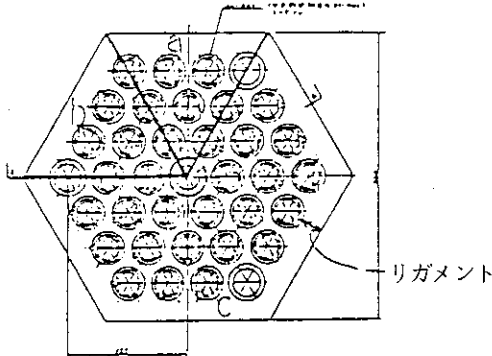
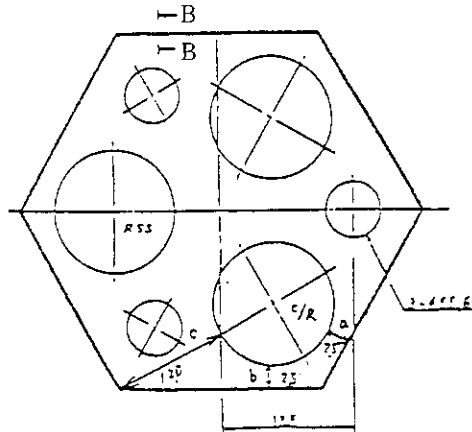
第2.1表 カラム間ギャップ幅設定値 (燃焼 220 日)

ギャップ設定 領域	軸 方 向 領 域 (cm)						下部可動 反射体
	上部可動 反射体	炉心部 1 段	炉心部 2 段	炉心部 3 段	炉心部 4 段	炉心部 5 段	
G I 1	0.228	0.2375	0.1815	0.156	0.147	0.132	0.112
G I 2	0.275	0.233	0.193	0.159	0.144	0.133	0.122
G I 3	0.228	0.224	0.187	0.157	0.143	0.131	0.118
G I 4	0.117	0.113	0.103	0.090	0.081	0.076	0.077
G I 5	0.228	0.227	0.197	0.167	0.151	0.141	0.137
G I 6	0.117	0.113	0.103	0.090	0.081	0.076	0.077
G I 7	0.228	0.221	0.199	0.173	0.155	0.145	0.147
G I 8	0.117	0.114	0.103	0.090	0.081	0.076	0.077
G I 9	0.117	0.114	0.103	0.090	0.081	0.076	0.077
G O 1	0.237	0.241	0.200	0.167	0.154	0.141	0.125
G O 2	0.157	0.156	0.126	0.097	0.081	0.070	0.067
G O 3	0.157	0.156	0.126	0.097	0.081	0.071	0.068
G O 4	0.157	0.150	0.128	0.102	0.084	0.075	0.077
G O 5	0.134	0.131	0.120	0.107	0.097	0.092	0.094
G S 1	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150


第2.2表 炉心温度分布解析設定条件 (1/4)

項 目	設 定 部 位	算 出 方 法	設 定 値
等価伝熱導距離 de	軸方向には等価である ので各ブロックの中心 距離を設定	 <p style="text-align: center;">ブロック</p> <p style="text-align: center;">$de = \frac{h}{2}$</p>	
	以下径方向の等価熱伝 導距離を示す。 ① 黒鉛ブロックー 燃料チャンネル内 He及びギャップ He ② 黒鉛ブロックー 黒鉛ブロック分 割間 (F3のみ)	最短のリガメント長さの2.5倍 $de = \left\{ \begin{array}{l} \text{上部可動反射体} \\ \frac{3.43 \times 2.5}{2} = 4.2875\text{cm} \\ \text{炉心部} \\ \frac{2.95 \times 2.5}{2} = 3.6875\text{cm} \\ \text{下部可動反射体} \\ \frac{3.47 \times 2.5}{2} = 4.3375\text{cm} \end{array} \right.$ i) a, b領域 最短リガメント長さの2.5倍	上部 4.2875cm 炉心 3.6875cm 下部 4.3375cm 上部 4.2875cm 炉心 3.6875 下部 4.3375cm

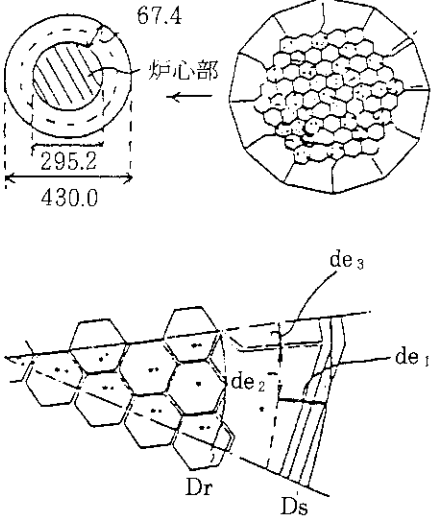
第2.2表 炉心温度分布解析設定条件 (2/4)

項 目	設 定 部 位	算 出 方 法	設 定 値
		<p>ii) C領域</p> <p>最短リガメント長さの2.5倍×2</p>  <p>炉心燃料ブロック F3</p>	<p>上部 8.575cm</p> <p>炉心 7.375cm</p> <p>下部 8.675cm</p>
	<p>③ CRブロッカー CR内He及び ギャップHe</p>	<p>最短リガメント長さの1/2</p> <p>i) 挿入孔φ12.3cmの場合</p> <p>3分割した領域については、 各最短距離の1/2</p> $de = \frac{2.5}{2} = 1.25\text{cm}$ $de = \frac{12.0}{2} = 6.0\text{ cm}$ <p>(3分割領域のみ)</p> 	<p>1.25cm</p> <p>6.0 cm</p>

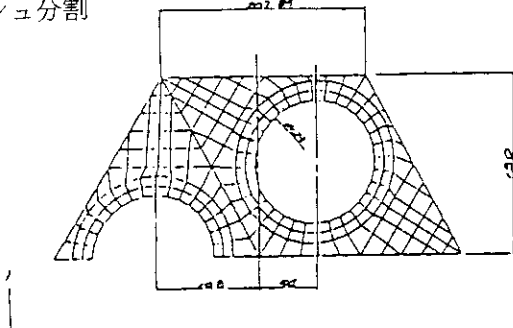
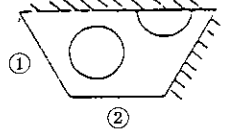
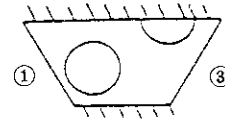
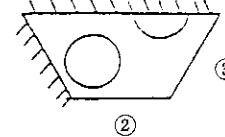
第 2.2 表 炉心温度分布解析設定条件 (3/4)

項 目	設 定 部 位	算 出 方 法	設 定 値
		ii) 挿入孔φ14.0cmの場合 可動反射体領域CRブロック (CR3)の炉心部5段めにつ いては以下のように設定する。 $de = \frac{1.65}{2} = 0.825\text{cm}$ $de = \frac{11.15}{2} = 5.575\text{cm}$	0.825cm 0.825cm 5.575cm
	⑤ 可動遮へい体	半径36.0cmのブロックであるので中 心までの最短距離とする。 	
	⑥ 固定反射体	炉心部及び固定反射体内側面を等価 な円に置換し設定した。 炉心部等価直径Dr 炉心部は半径36.0cmの正六角形が61 ブロックであるので $\frac{\pi}{4} D_s^2 = 12 \times \frac{425}{2} \times \tan\left(\frac{\pi}{12}\right)$ $D_s = 430.0\text{cm}$	18.0cm

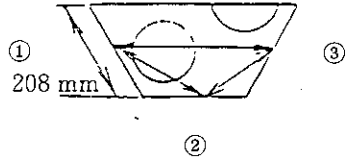
第 2.2 表 炉心温度分布解析設定条件 (4/4)

項 目	設 定 部 位	算 出 方 法	設 定 値
			
	<p>de₁</p>	<p>DsとDrの差の1/2とする。</p> $de_1 = \left(\frac{Ds - Dr}{2} \right) \times \frac{1}{2}$	<p>33.7cm</p>
	<p>de₂, de₃</p>	<p>DsとDrの平均直径における円周より設定する。</p> $de_2 + de_3 = \pi \times \left(\frac{Ds + Dr}{2} \right) \times \frac{1}{12} \times \frac{1}{2}$	<p>2.85cm</p> <p>47.5cm</p>
	<p>⑦ 側面遮へい体</p>	<p>板厚9.3cmの1/2とする。</p> $\frac{9.3}{2} = 4.65\text{cm}$	<p>4.65cm</p>

第 2.3 表 評価対象制御棒 CR3 黒鉛ブロック間等価熱伝導距離 (1/2)

項 目	内 容
1 解析モデル	FEMによるメッシュ分割 
2 境界条件	<p>黒鉛ブロックの 3 辺のうち 2 辺の温度境界条件を 1000℃ 及び 800℃ とし、他の 1 辺を断熱として 3 ケース計算する。制御棒挿入孔及び R S S 孔廻りについては断熱とする。</p> <p>(a)  ① 1000℃ ② 800℃</p> <p>(b)  ① 1000℃ ③ 800℃</p> <p>(c)  ② 1000℃ ③ 800℃</p>
3 各辺の通過熱流束の算出	<p>各辺はメッシュにより 10 分割されているが、各要素の通過熱流束を合計し各辺の通過熱流束を算出する。</p> <p>(a) ①→② 2.2 kcal/mms (単位長当り)</p> <p>(b) ①→③ 0.736kcal/mms (")</p> <p>(c) ③→② 2.97 kcal/mms (") 但し、$\Delta T = 200^\circ\text{C}$</p>

第 2.3 表 評価対象制御棒 CR3 黒鉛ブロック間等価熱伝導距離 (2/2)

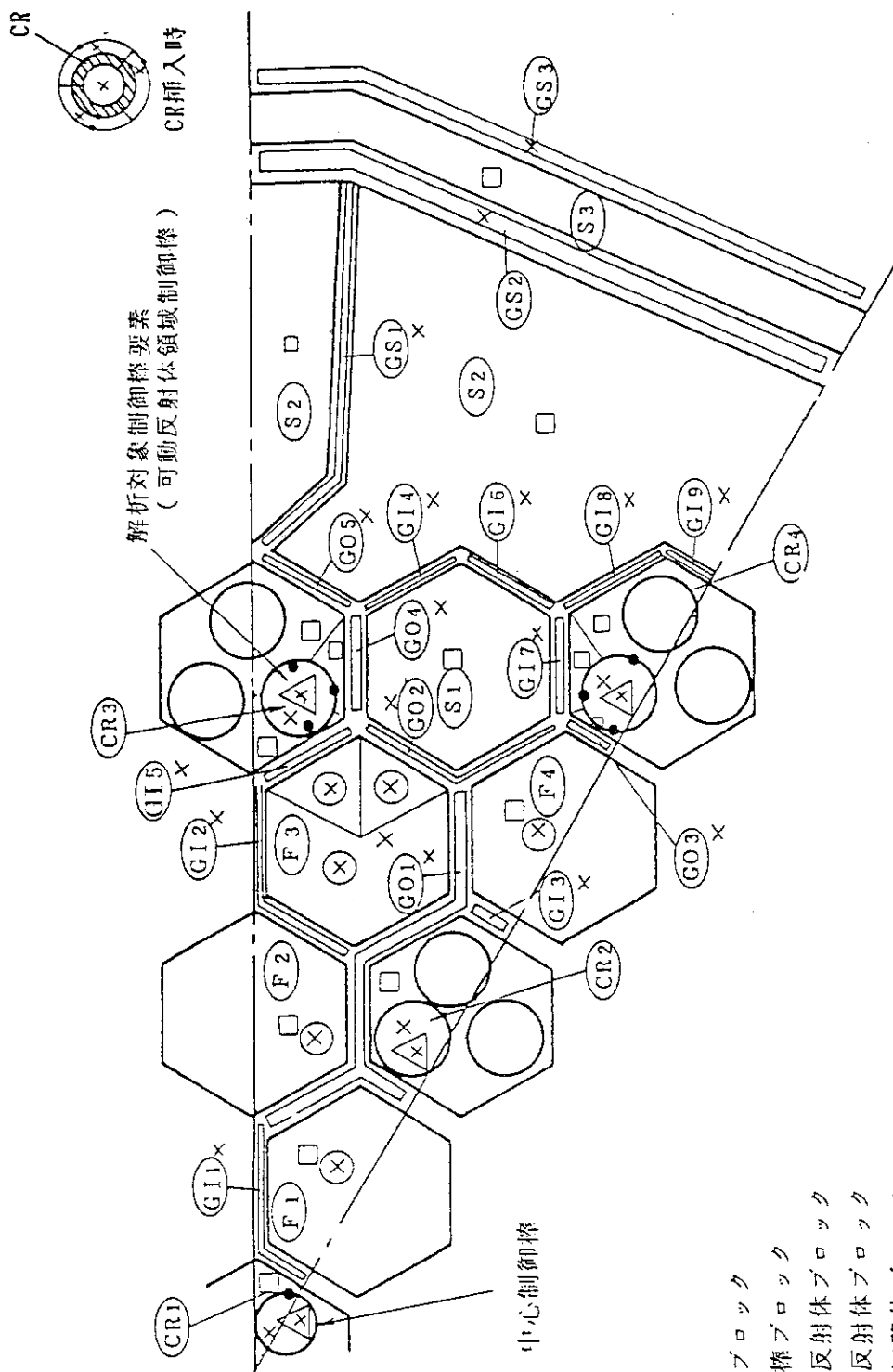
項 目	内 容
4 2 辺間の等価熱伝導距離の算出	<div style="text-align: center;">  </div> <p>de : 等価熱伝導距離</p> <p>λ : IG-110の熱伝導率 0.012kcal/mms℃</p> <p>(a) ①-②間</p> $\frac{2.2\text{kcal/mms}}{208\text{mm}} = \frac{\lambda \text{ kcal/mms}^\circ\text{C}}{de} \Delta T$ <p style="margin-left: 100px;">de=226.8mm</p> <p>(b) ②-③間</p> <p style="margin-left: 40px;">同上</p> <p style="margin-left: 100px;">de=168 mm</p> <p>(c) ①-③間</p> <p style="margin-left: 40px;">同上</p> <p style="margin-left: 100px;">de=678 mm</p>

第 2.4 表 黒鉛ブロック CR 挿入孔表面温度に及ぼす工学的安全係数の効果

	項 目	工学的安全係数	黒鉛ブロック温度 上昇分	備 考
系 統 的 因 子	1. 出力関連因子			
	(1) 原子炉熱出力	+2.5%	0	・ F3 ブロック
	(2) 出力分布誤差	+3 %	+ 8 ℃	
	2. 冷却材流量関連因子			
	(1) 冷却材流量	-1 %	+ 6 ℃	・ F3 ブロック
	(2) 炉内流配誤差	-0.4%	+ 1 ℃	
	(3) クロス流れ評価 誤差	-100%	~ 0	カラム間ギャップ流 量
	3. 冷却材温度			
	(1) 炉容器入口温度 評価誤差	+6 ℃	+ 6 ℃	・ 炉心入口公称 温度：409℃
	統 計 的 因 子	4. 製造公差	炉心設計ベース	~ 0
5. 物性値				
(1) 冷却材比熱		-0.2%	~ 0	・ 公称値:0.8
(2) 冷却材熱伝導率		+2 %	~ 0	
(3) 冷却材粘性係数		+4 %	~ 0	
(4) IG-110, PGX 密度		+3 %	~ 0	
(5) " 輻射率		1.0	10℃	
6. 伝熱評価式関連				
(1) 熱伝達率	-15 %	+ 3 ℃		
7. ブロック間ギャップ	ギャップ幅0.6mm とする。		+12℃	・ F3-CRブロック 間

第2.5表 制御棒被覆管温度に及ぼす工学的安全係数の効果

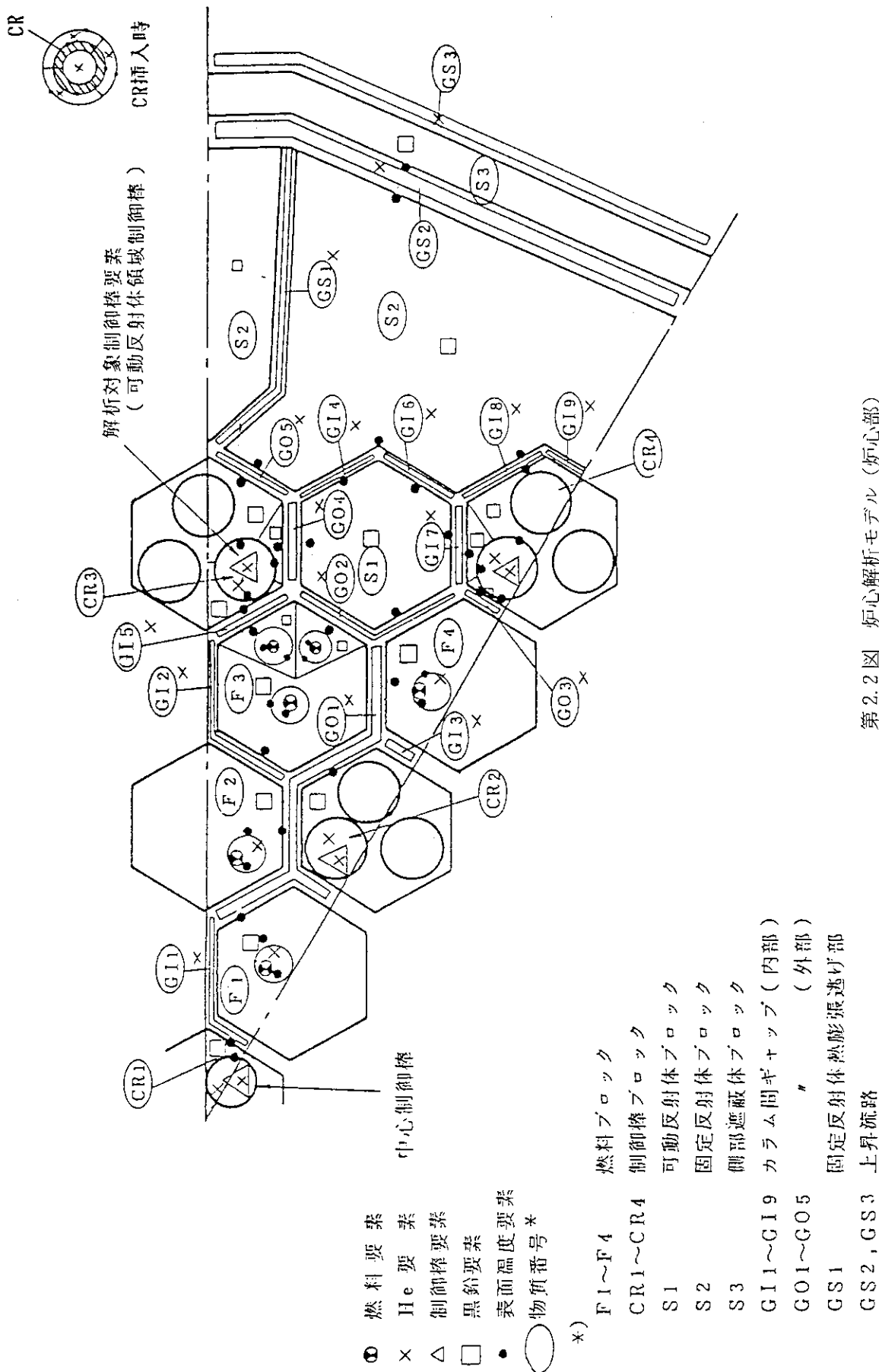
	項 目	工学的安全係数	被覆管温度上昇分	備 考
系 統 的 因 子	1. 出力関連因子			} B,C発熱に 対して
	(1)原子炉熱出力	+2.5%	~ 0	
	(2)出力分布誤差	0	0	
	2. 冷却材流量関連因子			} 外側被覆温度に対し ては影響なし 内: 9 外: 11
	(1)制御棒冷却材 全流量	-1 %	~ 0	
	(2)炉内流配誤差	-2.2%	~ 0	
	(3)内外流配誤差	10%	~ 0	
	(4)冷却材周方向混合 効果	周方向の混合なし	24℃	
	3. 冷却材温度			黒鉛ブロック温度評 価に考慮済
	(1)炉容器入口温度 評価誤差	0	0	
統 計 的 因 子	4. 製造公差	炉心設計ベース	~ 0	公称値: 0.5
	5. 物性値			
	(1)冷却材比熱	-0.2%	~ 0	
	(2)冷却材熱伝導率	-2 %	~ 0	
	(3)冷却材粘性係数	+4 %	~ 0	
	(4)B ₄ C密度	-3 %	~ 0	
	(5)B ₄ C熱伝導率	+50 %	+ 2℃	
	(6)Alloy800H 輻射率	0.8	+ 9℃	
6. 熱伝導率	15%	~ 0		
7. ブロック間ギャップ	8.5mm	~ 0	挿入孔一スペース間 ギャップ幅	



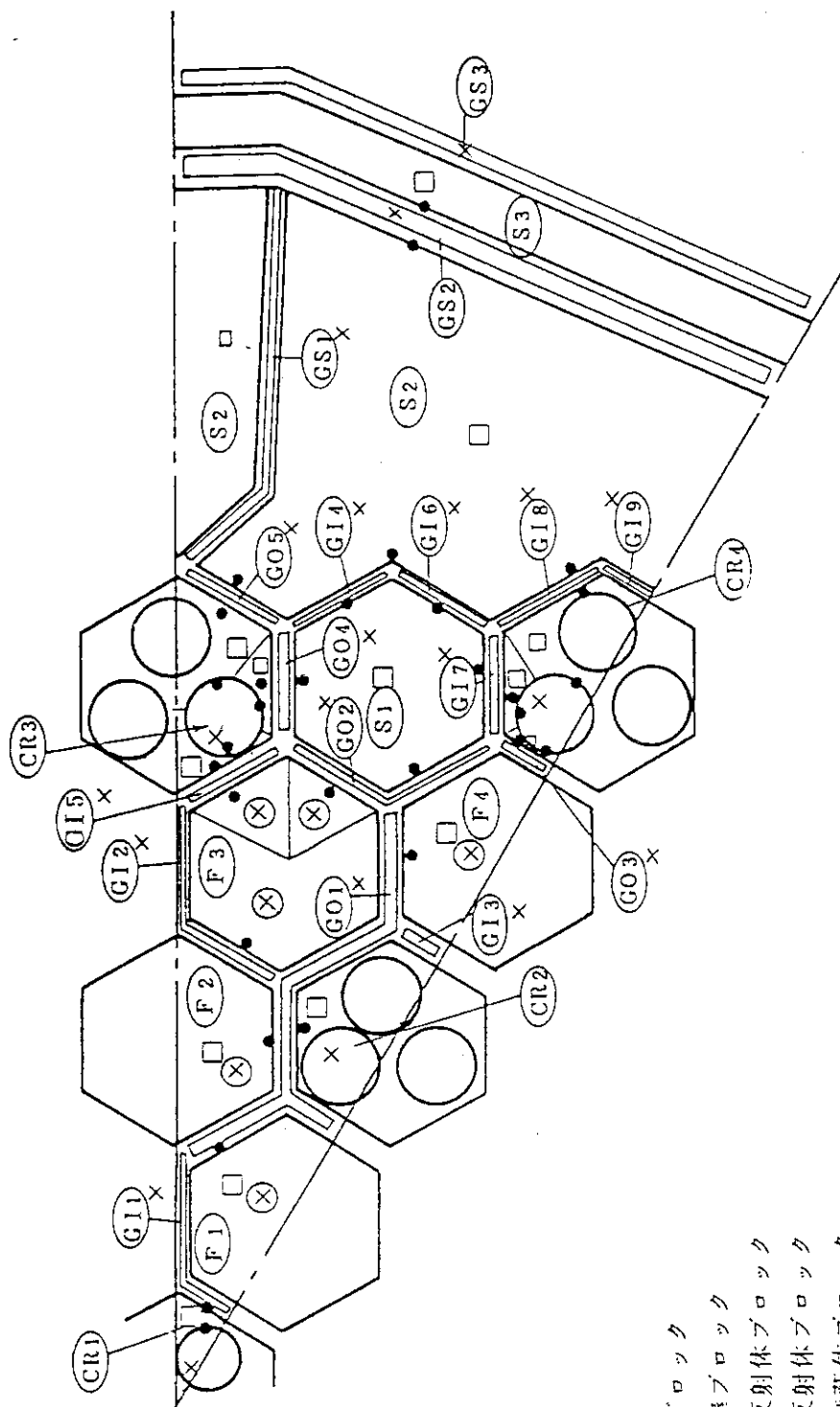
第2.1図 炉心解析モデル (上部可動反射体, 上部遮へい体部)

- x He 要素
- Δ 制御棒要素
- 黒鉛要素
- 表面温度要素
- 物負番号*

- F1~F4 燃料ブロック
- CR1~CR4 制御棒ブロック
- S1 可動反射体ブロック
- S2 固定反射体ブロック
- S3 側部遮蔽体ブロック
- GI1~GI19 カラム間ギャップ (内部)
- G01~G05 " (外部)
- GS1 固定反射体熱膨脹逃げ部
- GS2, GS3 上昇流路



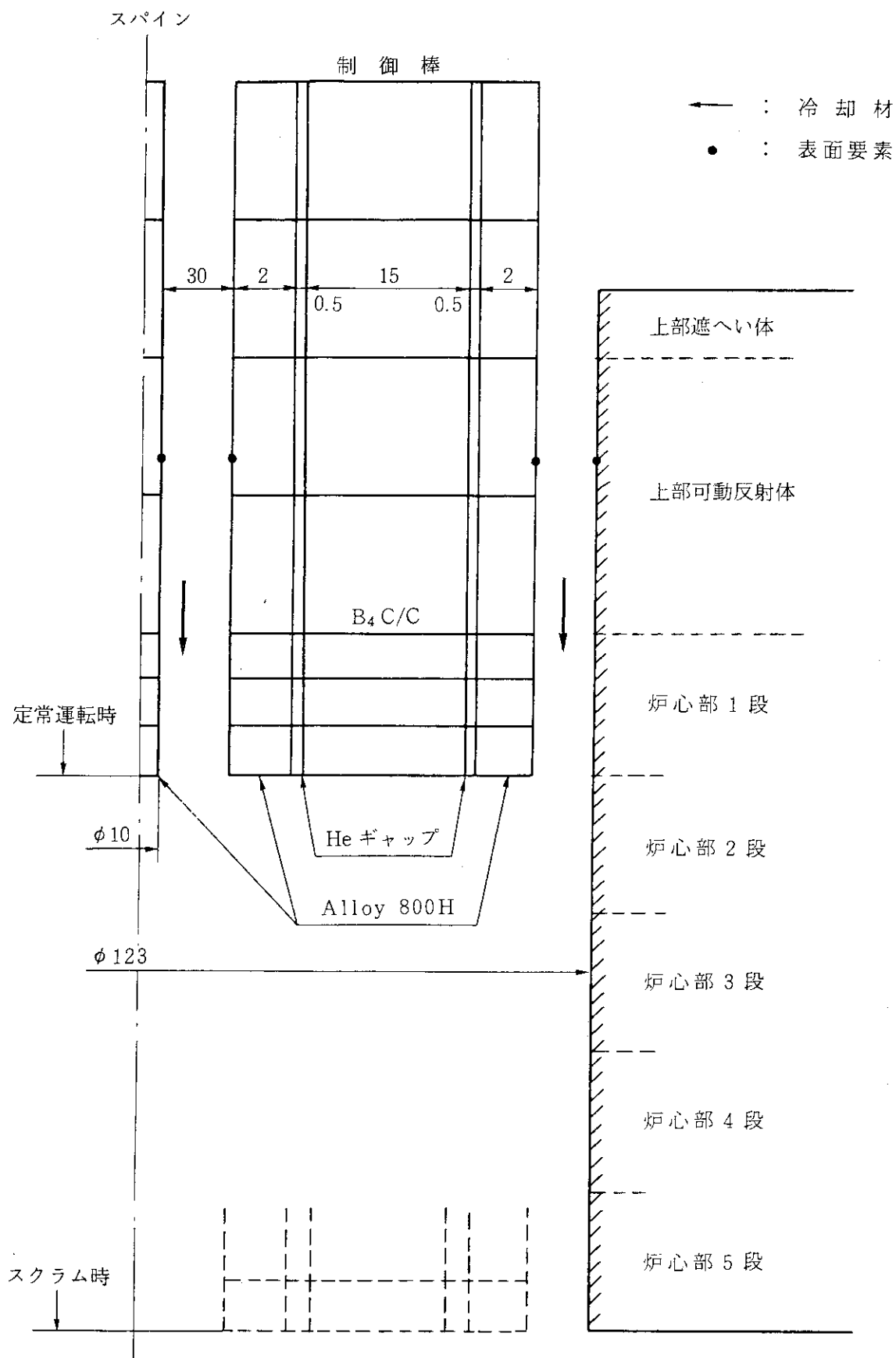
第2.2図 炉心解析モデル (炉心部)



- x He 要素
- 黒鉛要素
- 表面温度要素
- 物質番号*

- F1~F4 燃料ブロック
- CR1~CR4 制御棒ブロック
- S1 可動反射体ブロック
- S2 固定反射体ブロック
- S3 側部遮蔽体ブロック
- GI1~GI9 カラム間ギャップ (内部)
- GO1~GO5 * (外部)
- GS1 固定反射体熱膨張逃げ部
- GS2, GS3 上昇流路

第 2.3 図 炉心解析モデル (下部可動反射体部)



第 2.4 図 制御棒要素解析モデル (断面図)

3. 解析条件

3.1 スクラム時のプラント熱過渡状態値

スクラム時のプラント熱過渡状態値は、2.1節に示した各事象について、プラント熱過渡解析コードTHYDE-HTGRによる解析結果を用いる。

(1) 商用電源喪失

商用電源喪失は、原子炉の定常運転時に商用電源（外部電源）が喪失し、瞬時に原子炉がスクラムする事象である。スクラム後、非常用電源が確立した後にAGCが起動され、炉心の冷却が行われる。

本事象の初期定常運転状態は、炉心平均温度が高く、炉心から放熱量が大きくなる燃料0日の高温試験運転状態とする。原子炉スクラム時には、構造物の熱衝撃を避けるために、スクラム後2400秒まではAGC 2台を起動し、その後1台を停止させる運転を行う。この時の原子炉圧力容器入口の冷却材流量及び冷却材圧力の時刻歴を第3.1図に、原子炉圧力容器入口及び出口における冷却材温度の時刻歴を第3.2図に示す。

定常運転時の原子炉出力は、定格運転時の102.5%とし、これに基づく炉心各部の発熱分布を第3.1表に示す。また、スクラム後の原子炉出力の相対変化を第3.3図に示す。なお、制御棒の中性子吸収体については、スクラム後の発熱はないものとする。

(2) 商用電源喪失+AGC 1台起動失敗

本事象は、商用電源の喪失により原子炉がスクラムした後、2台あるAGCのうち、1台の起動に失敗する事象であることから、原子炉スクラム後の流量条件のみが商用電源喪失と異なる。スクラム後の原子炉圧力容器入口における冷却材流量及び冷却材圧力の時刻歴を第3.4図に示す。

(3) 原子炉出力制御系異常

原子炉出力制御系異常は、出力制御系の異常により、原子炉出力がステップ状に定格運転時の110%になり、約800秒後に原子炉がスクラムする事象である。スクラム後の原子炉圧力容器の入口及び出口における冷却材温度の時刻歴を第3.5図に示す。

3.2 計算に用いる物性値

解析に用いた各構造物の物性値を第3.2表に示す。2種以上の物質から構成される構造物については、それぞれの物性値に基づいて等価な物性値を定めた。なお、IG-110黒鉛及びPGX黒鉛の熱伝導率については、制御棒温度評価上保守的となるように、炉心からの熱は流れやすく、かつ炉外へは逃げ難くなるよう、固定反射体ブロック（PGX黒鉛）については20年間の中性子照射、可動反射体ブロック（IG-110黒鉛）については9年間の中性子照射、燃料体ブロック（IG-110黒鉛）については0日間の中性子照射によるフルエンスを考慮して定めた。解析に用いた

IG-110黒鉛及びPGX黒鉛の熱伝導率を第3.3表及び第3.4表に示す。

3.3 境界条件

定常運転時の炉心部冷却材流量配分は、炉心熱流路設計において得られた炉内流量配分に基づいて、各流路の上部遮へい体から下部可動反射体までを平均化した値を用いている。定常運転時の炉心部流量配分を第3.5表に示す。スクラム後の冷却材流量配分は、同表の配分を維持しながらTHYDE-HTGRにより得られた冷却材流量の時刻歴に基づいて変化するものとする。また、制御棒チャンネルの冷却材は、制御棒要素の内外流路に1対1の割合で配分されるものとする。

解析では、炉容器入口冷却材温度を境界温度とし、炉容器外側を断熱境界として炉心温度分布を求める。このとき、燃料要素、制御棒中性子吸収体及び黒鉛ブロックで発熱するものとし、伝熱機構としては、構造物とヘリウムガスとの熱伝達及び構造物間のふく射熱伝達を考慮する。また、炉容器冷却設備（VCS）による除熱（通常運転時最大0.6MW）は、制御棒被覆管温度評価上保守的となるよう、温度解析においては考慮しない。

第3.1表 定常運転時炉心各部の発熱量 (1/12炉心)

基準炉心 燃焼220日

出力 102.5% [W]

炉心位置	燃 料 部			制 御 棒			可動反射体 S 1
	記号	燃 料 棒	黒 鉛 部	記号	吸 収 体	黒 鉛 部	
1 段	F 1	1.1485×10^5	6045	CR1	261	464	1694
	F 2	1.1707×10^5	6162	CR2	1327	2785	
	F 3	2.1765×10^5	11455	CR3	—	847	
	F 4	1.093×10^5	5753	CR4	790	847	
2 段	F 1	1.4674×10^5	7723	CR1		820	3050
	F 2	1.4876×10^5	7840	CR2		4923	
	F 3	2.7285×10^5	11361	CR3		1525	
	F 4	1.3436×10^5	7072	CR4		1525	
3 段	F 1	1.1945×10^5	6287	CR1		993	3863
	F 2	1.2072×10^5	6354	CR2		5959	
	F 3	2.2241×10^5	11706	CR3		1932	
	F 4	1.0819×10^5	5694	CR4		1932	
4 段	F 1	7.3606×10^4	3874	CR1		774	3050
	F 2	7.4241×10^4	3907	CR2		4664	
	F 3	1.3674×10^5	7197	CR3		1525	
	F 4	6.6944×10^4	3523	CR4		1525	
5 段	F 1	4.6956×10^4	2471	CR1		447	1667
	F 2	4.7590×10^4	2505	CR2		2682	
	F 3	8.7249×10^4	4592	CR3		834	
	F 4	4.2514×10^4	2238	CR4		834	
小 計	2.4084×10^6	0.1268×10^6	0.0024×10^6	0.0378×10^6	0.0133×10^6		
合 計	2.589×10^6 ($\times 12 = 31\text{MW}$)						

注) VCS冷却2%を考慮して98%出力とする。このため解析条件は上記数値を0.98倍して用いる。

第3.2表 解析に用いた物性値

温度 ℃	ヘリウム 40気圧	IG-110	P G X	燃料棒	Alloy 800H	B ₄ C(I) 制御棒吸収体 コンパクト	B ₄ C(II) 遮へい体ブロック他	SUS304	側部遮へい体
390		0.353		0.300	0.108(20℃)			0.128 (200℃)	0.168(200℃)
400		0.356		0.302	0.133(427℃)			0.177	0.177
600		0.401		0.339	0.141(538℃)			0.132	0.191
800	1.24	0.430	IG-110と同じ	0.362	0.148(649℃)	IG-110と同じ	IG-110と同じ	(400℃)	0.204
1000		0.449		0.376	0.155(760℃)			0.138	
1200		0.462		0.387	0.162(871℃)			(600℃)	
1400		0.472		0.396	0.169(982℃)			0.147	
					0.176(1093℃)			(800℃)	
390	6.4915×10^{-4}	中性子フル	径方向	1.003×10^{-2}	0.0276(20℃)			0.0405	4.51×10^{-2} (200℃)
400	6.5609×10^{-4}	エンスに従	軸方向	1.007×10^{-2}	0.0438(427℃)			(200℃)	4.88×10^{-2}
500		い設定			0.0479(538℃)			0.0470	
600	7.8648×10^{-4}		中性子フルエンス	1.08×10^{-2}	0.0524(649℃)			(400℃)	5.15×10^{-2}
700			に従い設定		0.0572(760℃)			0.534	
800	8.9955×10^{-4}			1.13×10^{-2}	0.0624(871℃)	0.02 ^{+0.02} -0.01	0.05 ± 0.01	(600℃)	5.41×10^{-2}
900					0.0737(982℃)			0.0598	
1000	1.0011×10^{-3}			1.17×10^{-2}				(800℃)	
1200	1.0989×10^{-3}			1.21×10^{-2}					
1400	1.1950×10^{-3}			1.23×10^{-2}					
密度 [g/cm ³]		1.75 ± 0.05	1.73 ± 0.05	1.375 ± 0.032	8.02	1.9 ± 0.05	1.75 ± 0.05	7.81 ± 0.10	4.53 ± 0.05
輻射率		0.80 ^{+0.20} -0.0	0.80 ^{+0.20} -0.0	IG-110と同じ	0.5 ^{+0.20} -0.0	0.80 ^{+0.20} -0.0	0.80 ^{+0.20} -0.0		B ₄ C(II)に 同じ
備考			固体反射体	IG-110,燃料 コンパクト, Heの等価物性 値					B ₄ C(II) 50mm SUS304 43mm

第 3.3 表 IG-110 黒鉛熱伝導率 (1/5)

燃焼 0 日

部 位	温 度 (°C)	熱伝導率 (cal/cms °C)	部 位	温 度 (°C)	熱伝導率 (cal/cms °C)
中心制御棒 CRI 上部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	燃料第 1 コラム FI 上部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 1 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 1 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 2 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 2 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 3 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 3 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 4 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 4 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 5 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 5 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 下部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 下部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02

第 3.3 表 IG-110 黒鉛熱伝導率 (2/5)

燃焼 0 日

部 位	温 度 (°C)	熱 伝 導 率 (cal/cms °C)	部 位	温 度 (°C)	熱 伝 導 率 (cal/cms °C)
燃料第 2 カラム F2 上部可動 反射体		燃料第 1 カラム F1 と同じ	リング 1 制御 カラム CR2 上部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 1 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 1 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 2 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 2 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 3 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 3 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 4 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 4 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 5 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 5 段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 下部可動 反射体		燃料第 1 カラム F1 と同じ	同 上 下部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02

第3.3表 IG-110 黒鉛熱伝導率 (3/5)

燃焼0日

部 位	温 度 (°C)	熱 伝 導 率 (cal/cms °C)	部 位	温 度 (°C)	熱 伝 導 率 (cal/cms °C)
燃料第3.4 カ ラム (F3) 上部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	燃料第5 カラム (F4) 上部可動 反射体		燃料第3.4 カラム (F3) と同じ
同 上 炉心部 1段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 1段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.130000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 2段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.070000E-01 9.980000E-02	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.200000E+03 1.400000E+03	同 上 炉心部 2段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 3段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 3段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 4段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 4段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 5段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 炉心部 5段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 下部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 下部可動 反射体		燃料第3.4 カラム (F3) と同じ

第 3.3 表 IG-110 黒鉛熱伝導率 (4/5)

燃焼9年

部 位	温 度 (°C)	熱伝導率 (cal/cms °C)	部 位	温 度 (°C)	熱伝導率 (cal/cms °C)
リング2制御 カラム (CR3) 上部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	可動反射体 (SI)	TVARK 2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	CONDUCTIVITY 2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 1段	2.000000E+02 6.620000E-01 4.960000E-02 8.060000E-02 9.680000E-02 9.900000E-02 9.690000E-02 9.450000E-02	1.020000E+00 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	同 上 炉心部 1段		同 上
同 上 炉心部 2段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	1.060000E+00 6.620000E-01 4.950000E-02 6.880000E-02 8.690000E-02 9.310000E-02 9.350000E-02 9.270000E-02	同 上 炉心部 2段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02
同 上 炉心部 3段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	1.040000E+00 6.620000E-01 4.960000E-02 7.540000E-02 9.290000E-02 9.670000E-02 9.560000E-02 9.380000E-02	同 上 炉心部 3段		同 上
同 上 炉心部 4段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	9.010000E-01 6.620000E-01 5.170000E-02 9.480000E-02 1.060000E-01 1.040000E-01 9.950000E-02 9.590000E-02	同 上 炉心部 4段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	1.010000E+00 6.620000E-01 4.990000E-02 8.150000E-02 9.750000E-02 9.940000E-02 9.710000E-02 9.460000E-02
同 上 炉心部 5段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	6.270000E-01 6.620000E-01 6.540000E-02 1.170000E-01 1.170000E-01 1.100000E-01 1.030000E-01 9.750000E-02	同 上 炉心部 5段		同 上
同 上 下部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02	同 上 下部可動 反射体		同 上

第3.3表 IG-110 黒鉛熱伝導率 (5/5)

燃焼9年

部 位	温 度 (°C)	熱 伝 導 率 (cal/cm ^s °C)			
照射リング制 御カラム (CR4) 上部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	4.470000E-01 6.590000E-01 9.210000E-02 1.320000E-01 1.230000E-01 1.130000E-01 1.040000E-01 9.840000E-02			
同 上 炉心部 1段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02			
同 上 炉心部 2段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	7.620000E-01 6.620000E-01 5.650000E-02 1.070000E-01 1.120000E-01 1.070000E-01 1.010000E-01 9.680000E-02			
同 上 炉心部 3段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	8.950000E-01 6.620000E-01 5.190000E-02 9.540000E-02 1.060000E-01 1.040000E-01 9.960000E-02 9.600000E-02			
同 上 炉心部 4段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	7.980000E-01 6.620000E-01 5.490000E-02 1.040000E-01 1.110000E-01 1.060000E-01 1.010000E-01 9.660000E-02			
同 上 炉心部 5段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	5.780000E-01 6.620000E-01 7.040000E-02 1.210000E-01 1.190000E-01 1.100000E-01 1.030000E-01 9.780000E-02			
同 上 下部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	4.090000E-01 6.530000E-01 1.020000E-01 1.360000E-01 1.250000E-01 1.140000E-01 1.050000E-01 9.860000E-02			

第3.4表 PGX 黒鉛熱伝導率

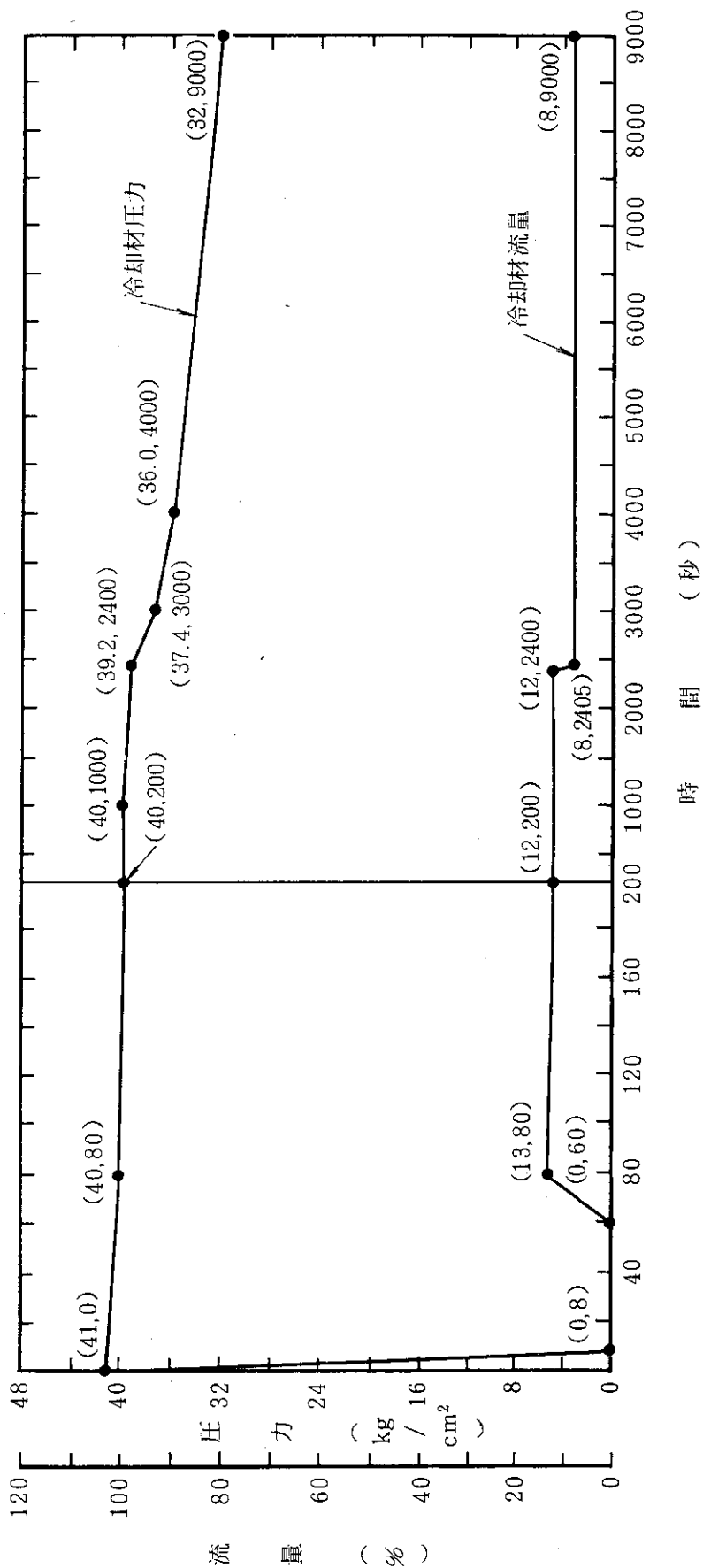
燃焼20年

部 位	温 度 (°C)	熱 伝 導 率 (cal/cms °C)			
固定反射体 S2 上部可動 反射体	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.390000E-01 2.120000E-01 1.900000E-01 1.560000E-01 1.330000E-01 1.180000E-01 1.070000E-01 9.980000E-02			
同 上 炉心部 1段		同 上			
同 上 炉心部 2段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.260000E-01 2.600000E-01 1.690000E-01 1.510000E-01 1.310000E-01 1.150000E-01 1.040000E-01 9.700000E-02			
同 上 炉心部 3段		同 上			
同 上 炉心部 4段	2.000000E+02 3.000000E+02 4.000000E+02 6.000000E+02 8.000000E+02 1.000000E+03 1.200000E+03 1.400000E+03	2.580000E-01 4.300000E-01 1.450000E-01 1.450000E-01 1.290000E-01 1.150000E-01 1.040000E-01 9.670000E-02			
同 上 炉心部 5段		同 上			
同 上 下部可動 反射体		同 上			

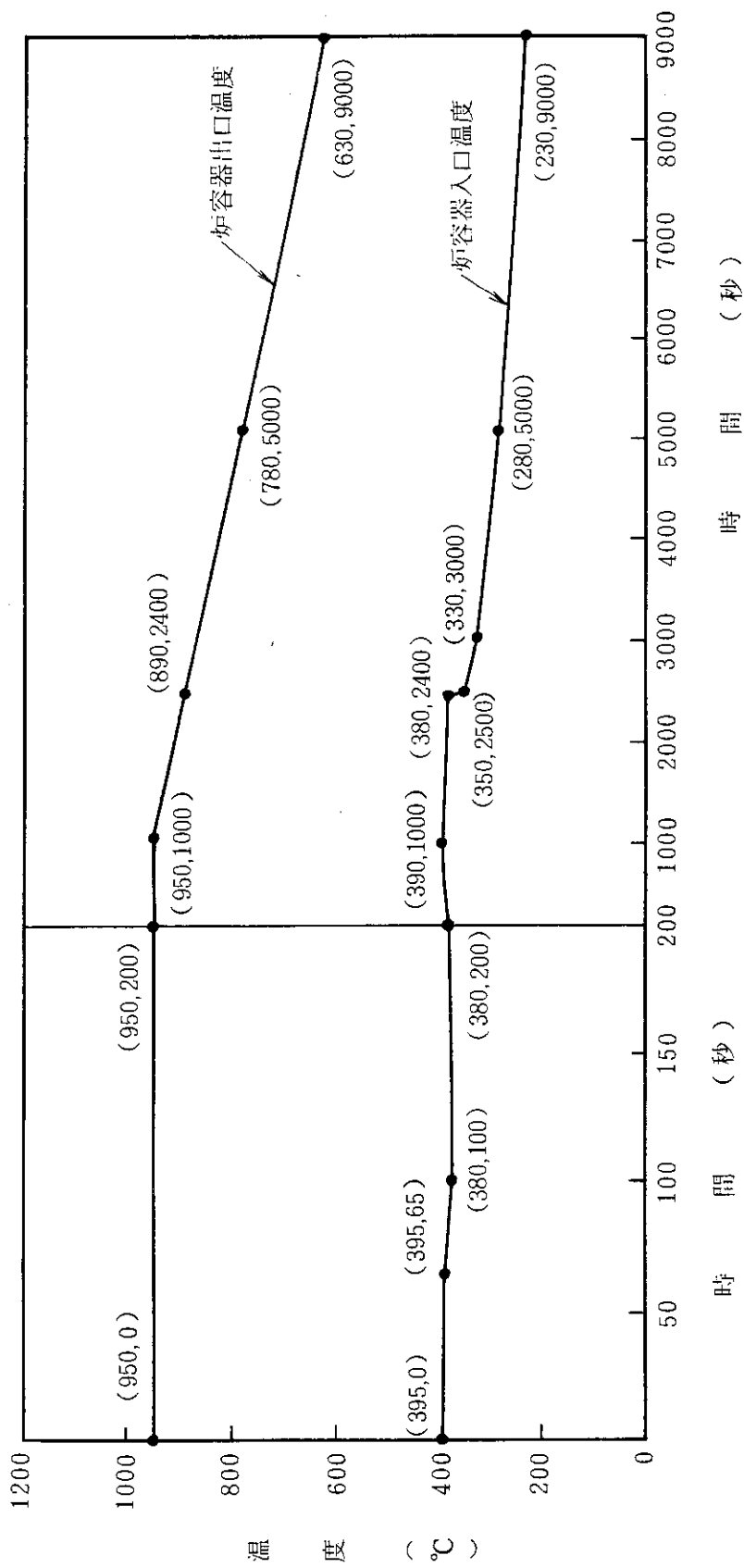
第3.5表 定常運転時各部の冷却材流量 (1/12炉心)

炉心部位位置	記号	流量 (g/s)
燃料チャンネル	F 1	157.5
	F 2	157.0
	F 3	302.3
	F 4	152.0
* 制御棒チャンネル	C R 1	3.02
	C R 2	18.1
	C R 3	18.1
	C R 4	18.1
コラム間ギャップ (内部)	G I 1	0.792
	G I 2	1.404
	G I 3	0.435
	G I 4	0.242
	G I 5	1.179
	G I 6	0.252
	G I 7	1.581
	G I 8	0.280
	G I 9	0.154
コラム間ギャップ (外部)	G O 1	4.557
	G O 2	0.591
	G O 3	0.162
	G O 4	0.352
	G O 5	0.260
固定反射体熱膨脹逃げ部	G S 1	3.03
固定反射体外側**	G S 2	420.70
側部遮へい体外側**	G S 3	420.70

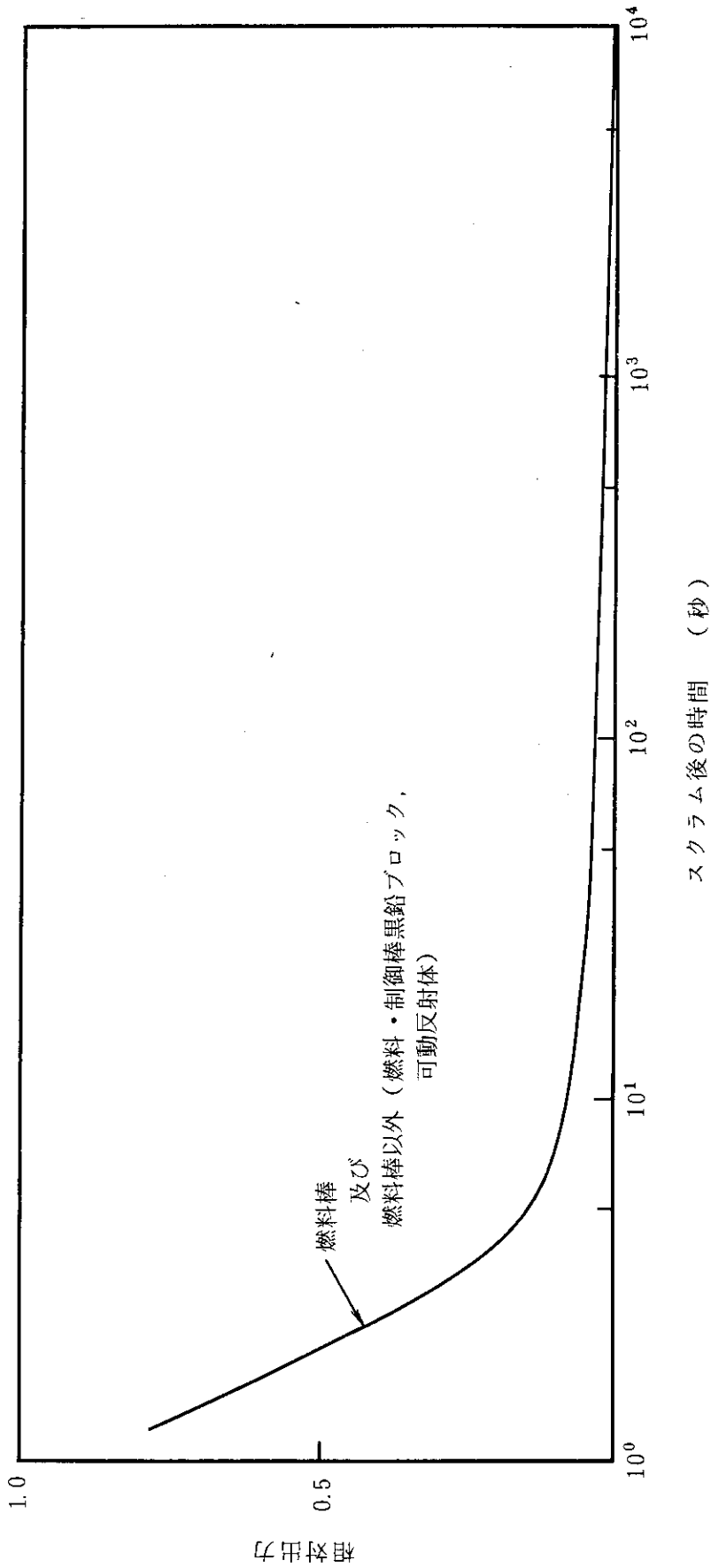
- *) 制御棒挿入時の内外ヘリウムの流量比は1:1とする。
 **) 側部遮へい体内外の流量比は1:1とする。
 ***) VCS冷却を2%と仮定して炉心出力を設定しているので炉心出口温度を合わせるため全流量も98%とする。



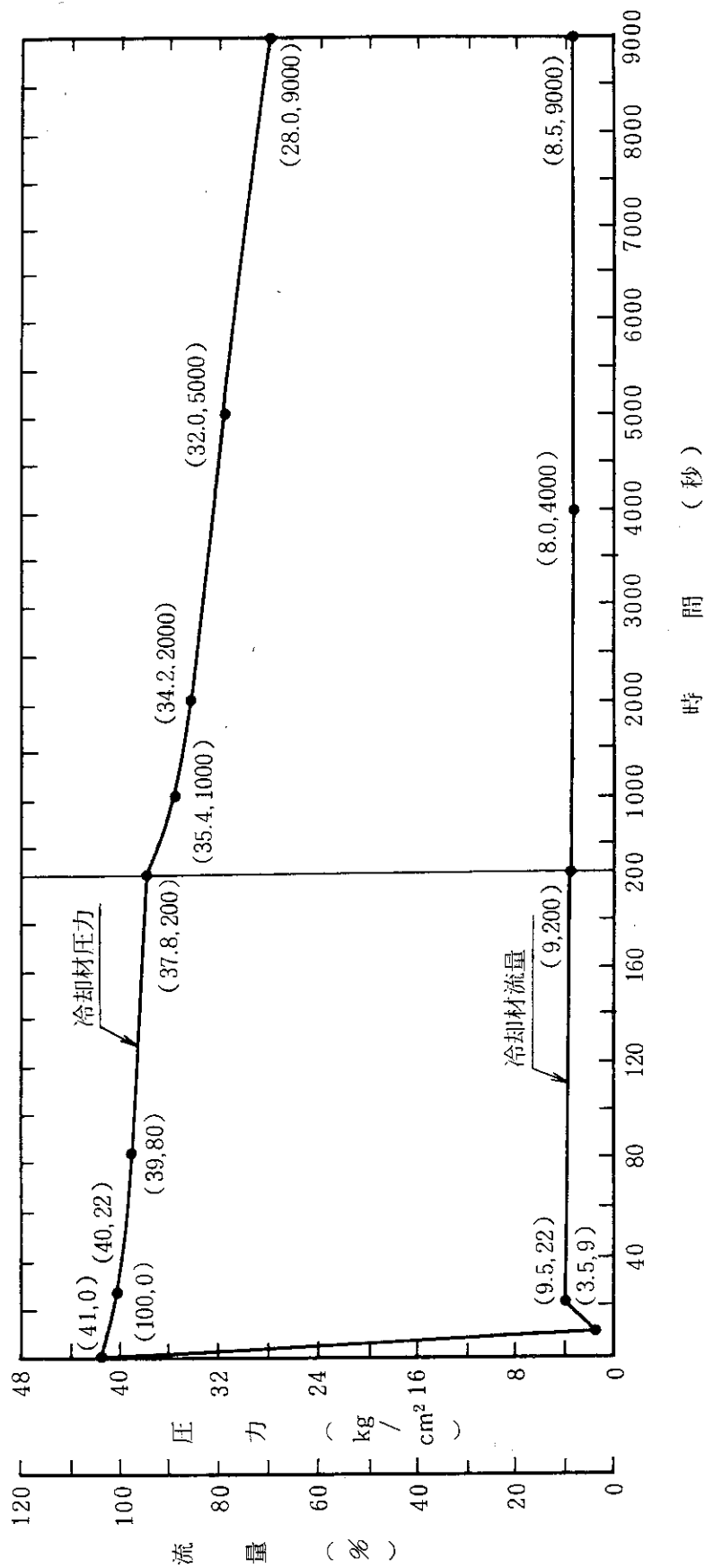
第 3.1 図 冷却材流量及び圧力：商用電源喪失



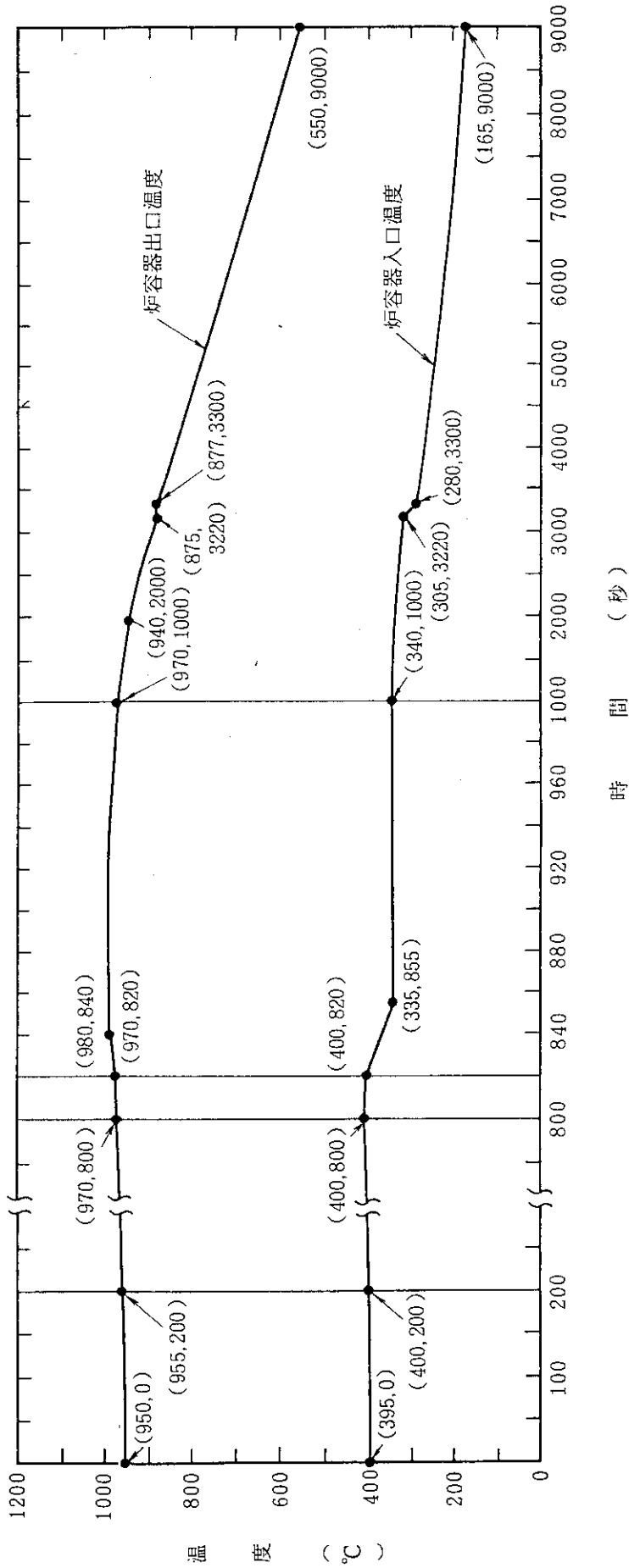
第 3.2 图 炉容器出入口冷却材温度：商用電源喪失



第3.3図 スクラム後の相対出力変化



第 3.4 図 冷却材流量及び压力：補助 He 循環機 1 台起動失敗



第 3.5 図 炉容器出入口冷却材温度：原子炉出力制御系異常

4. 解析結果

4.1 初期定常状態

定常運転時における燃料カラム黒鉛ブロック軸方向温度分布を第4.1図に示す。定常運転時の燃料カラムの温度は、炉心中央領域のカラム（F1, F2）に比べて周辺領域（F3, F4）の方が低くなっている。また、反射体領域制御棒案内カラムに接する燃料カラムを比較すると、F3カラムの方が約20℃高くなっており、この結果から評価対象とする制御棒案内カラム（第2.1図参照）を決定した。

評価対象制御棒案内カラム（以後CRカラムと称する）の黒鉛ブロック温度分布及び隣接する黒鉛ブロックの温度分布を第4.2図から第4.4図に示す。CRカラムは、3種類の異なる構成要素（燃料体、可動反射体及び固定反射体）に接していることから、3領域に分けて温度評価した。各領域の温度分布をまとめると、第4.5図に示すように燃料体側要素と固定反射体側要素とでは153℃の温度差がある。このCRカラム黒鉛ブロック温度分布を境界条件として得られた制御棒の定常運転時温度分布を第4.6図に示す。この時、制御棒は、燃料領域の1段目まで挿入されており、制御棒被覆管の公称最高温度は内面側に発生し、約480℃である。

4.2 商用電源喪失

原子炉スクラム後のCRカラム最下端ブロックの各領域（燃料体側、可動反射体側及び固定反射体側）の黒鉛要素温度の時間変化を第4.7図に、制御棒挿入孔の表面温度の時間変化を第4.8図に示す。CRカラムの燃料体側の温度が一旦上昇するのは、スクラム後に炉心温度分布が均一化する過程において、燃料要素の保有熱が冷却材を介してCRカラム側の燃料体黒鉛ブロックに伝わり、その結果としてCRカラムの燃料体側要素温度が上昇するためである。可動反射体側の要素温度は、冷却材の強制循環による冷却が行われないため約2000秒まではほぼ一定値を保つが、その後、約6400秒で温度降下の大きい燃料体側の温度と逆転する。また、固定反射体側の温度は、熱容量の大きい固定反射体ブロックの温度に支配され、時間とともに徐々に低下する。第4.8図より制御棒挿入孔廻りの温度を比較すると燃料体側と固定反射体側とで199℃の温度差が生じている。

第4.8図に示した制御棒挿入孔表面温度の時刻歴を境界条件として得られた制御棒単体温度分布解析結果を第4.9図に示す。この時、制御棒外側流路の冷却材は完全混合するものとしている。商用電源喪失時のスクラム後の制御棒被覆管の公称最高温度は燃料体側に面した外側被覆管に生じ、855℃である。

2.3節に示した高温点温度解析の結果、系統的因子を考慮したCRカラムの制御棒挿入孔表面温度の時間変化を第4.10図に、制御棒各部温度の時間変化を第4.11図(1)から(3)に示す。この時の制御棒被覆管の最高温度は、約900℃である。

制御棒要素の周方向温度分布に詳細に評価するために、有限要素法を用いた2次元解析を行い、

TRUMPコードによる制御棒単体温度分布解析結果との比較を行った。その結果を第4.1表に示す。有限要素法による解析では、制御棒被覆管最高温度は約27℃低下することから、最高温度評価においては、この効果を低めに-25℃と見積った。また、第2.4表及び第2.5表から、統計的因子による制御棒被覆管温度の増分は約18℃である。

従って、高温点温度解析の結果、商用電源喪失時における反射体領域制御棒被覆管の高温点温度は、制限値である900℃を上回ることなく、893℃となる。

4.3 商用電源喪失+AGC 1台起動失敗

商用電源喪失による原子炉のスクラム時にAGC 2台の内1台の起動に失敗した場合の、系統的因子を考慮したCRカラム制御棒挿入孔表面温度及び制御棒各部温度の時刻歴を第4.12図及び第4.13図(1)~(3)に示す。この時の制御棒被覆管最高温度は919℃となり、温度分布の詳細評価による温度低下分25℃を差し引くと894℃となる。これに統計的因子を考慮すると、制御棒被覆管の高温点温度は制限値である900℃を上回り、912℃となる。

4.4 原子炉出力制御系異常

本事象は、仮想的に原子炉出力制御系の異常により、原子炉出力がステップ状に定格値の110%となり、約800秒後に原子炉がスクラムするとした事象である。この時、炉心下部の黒鉛ブロック温度は、商用電源喪失時の場合と比較すると約40℃上昇することから、制御棒被覆管最高温度も同程度の上昇となり、制限値である900℃を上回り、約930℃になる。ただし、HTTRの炉心特性及び制御系の特性から、原子炉出力制御系の異常時においては、本事象のような過渡特性を示すことはないものと予想される。

4.5 制御棒誤落下

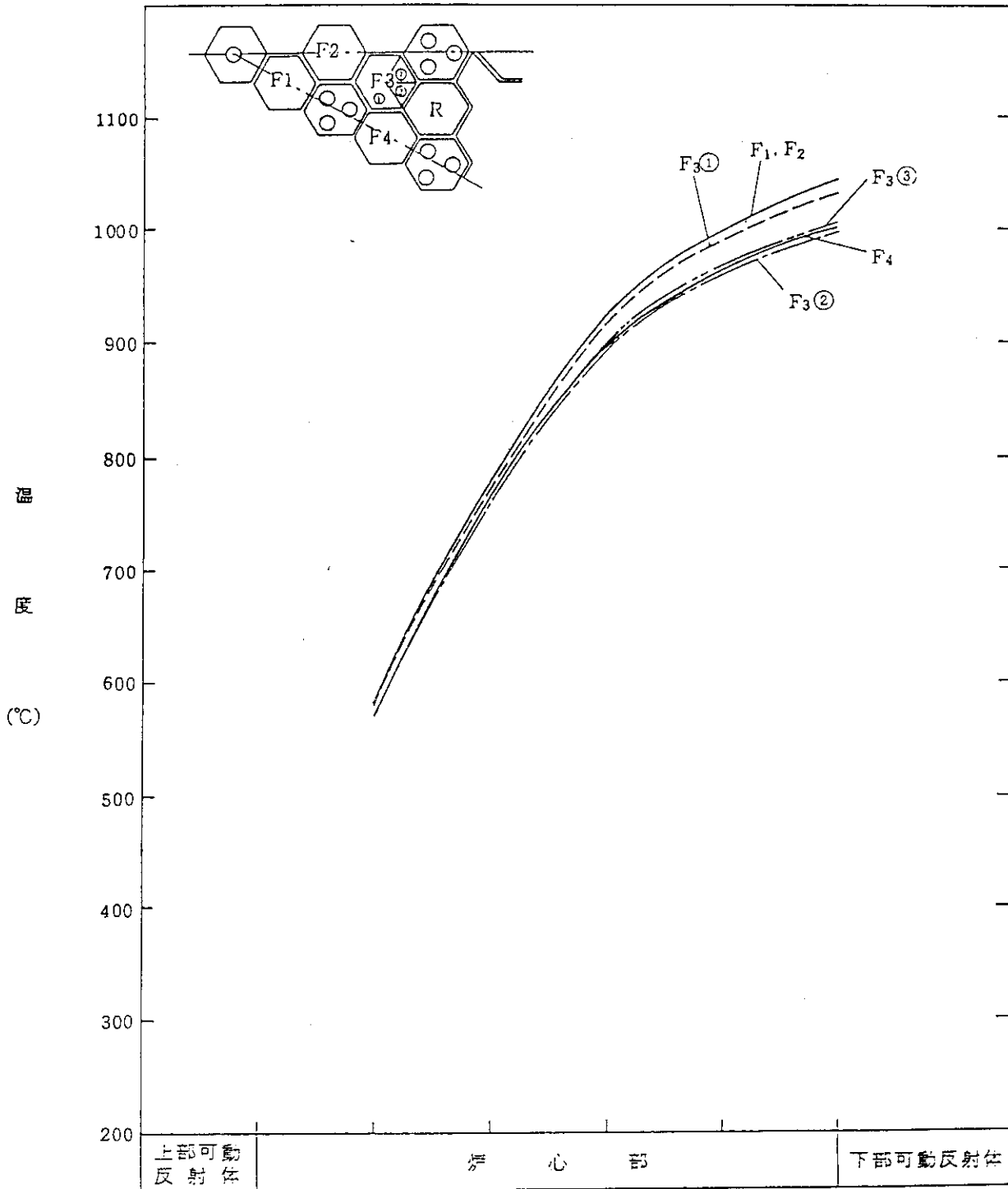
本事象は、燃料領域制御棒が、スクラムと同時に誤挿入される事象である。この時の制御棒被覆管温度の評価値は、系統的因子を考慮した最高温度が1025℃、統計的因子及び系統的因子を考慮した最高温度が1043℃であり、制限値である900℃を上回る。第4.14図に原子炉スクラム後の燃料ブロック(F1)及び制御棒案内ブロック(CR1)の公称温度の時刻歴を示す。

4.6 燃料領域制御棒の被覆管温度

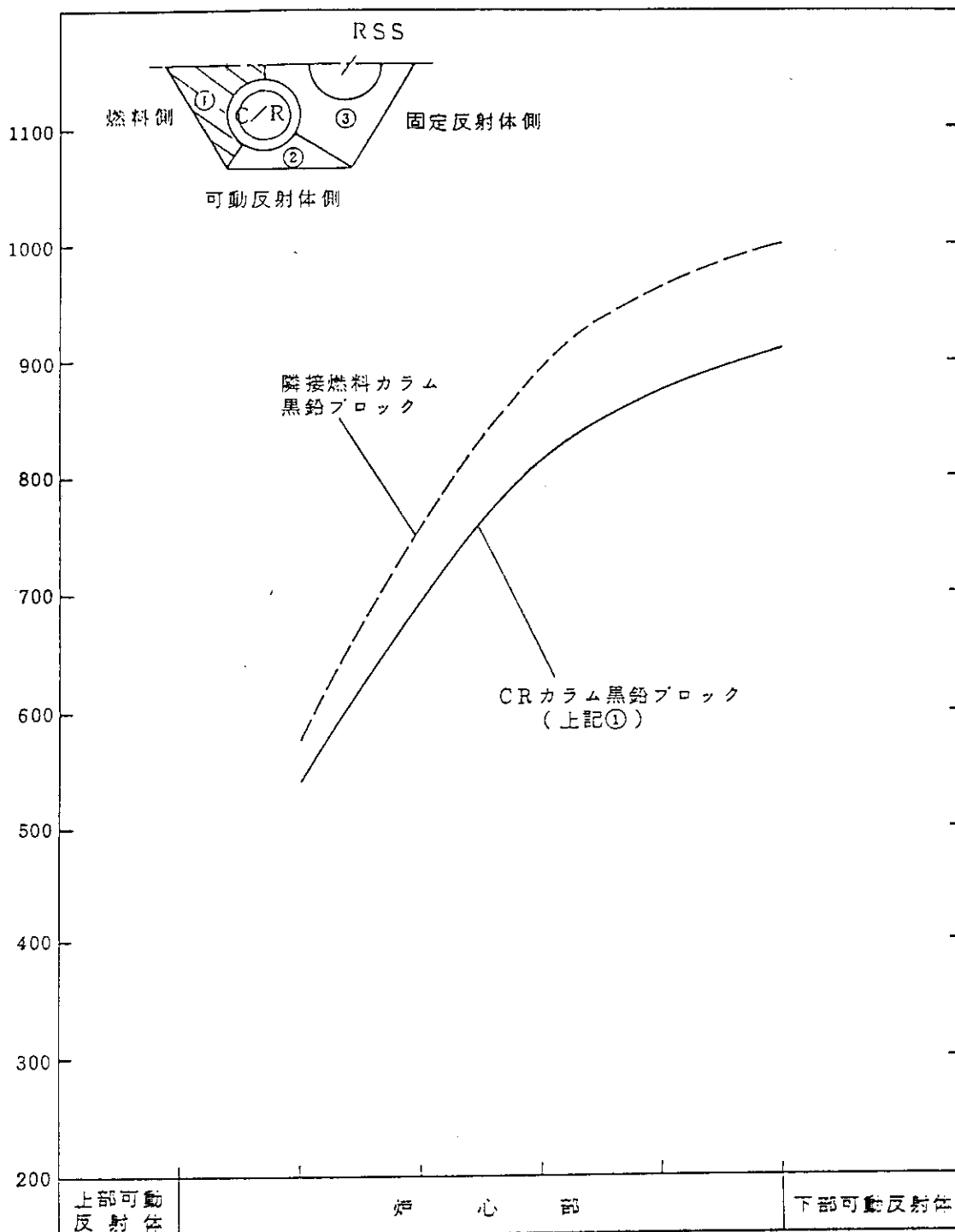
2段階挿入により、燃料領域制御棒は原子炉スクラム後2400秒経過した後に挿入される。この時の燃料領域制御棒(炉心中央制御棒)の各部温度(公称温度)の時刻歴を第4.15図に示す。制御棒被覆管の最高温度はスクラム後約3300秒後(挿入後約900秒後)に発生し、約848℃である。これに統計的因子及び系統的因子を考慮しても約886℃であり、900℃を超えることはない。このことにより、タイマーの設定時間2400秒の妥当性が確認された。

第4.1表 FEM 2次元定常解析との比較

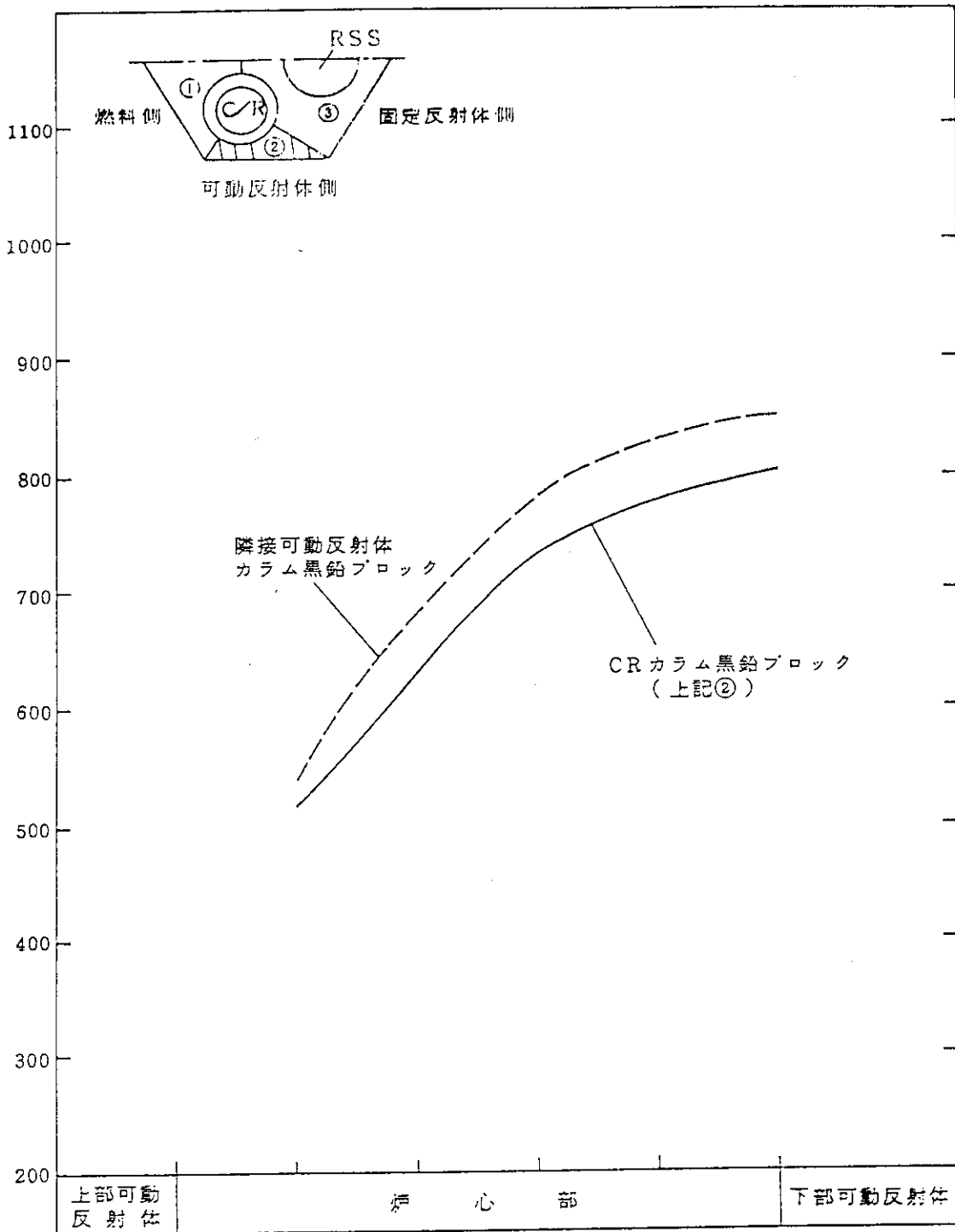
	燃料側 (Max.)		反射体側 (Min.)	
	挿入孔表面温度 (℃)	TRUMP	936	TRUMP
	FEM	933	FEM	739
外側被覆管温度 (℃)	TRUMP	907	TRUMP	756
	FEM	880	FEM	746
内側被覆管温度 (℃)	TRUMP	871	TRUMP	770
	FEM	839	FEM	756



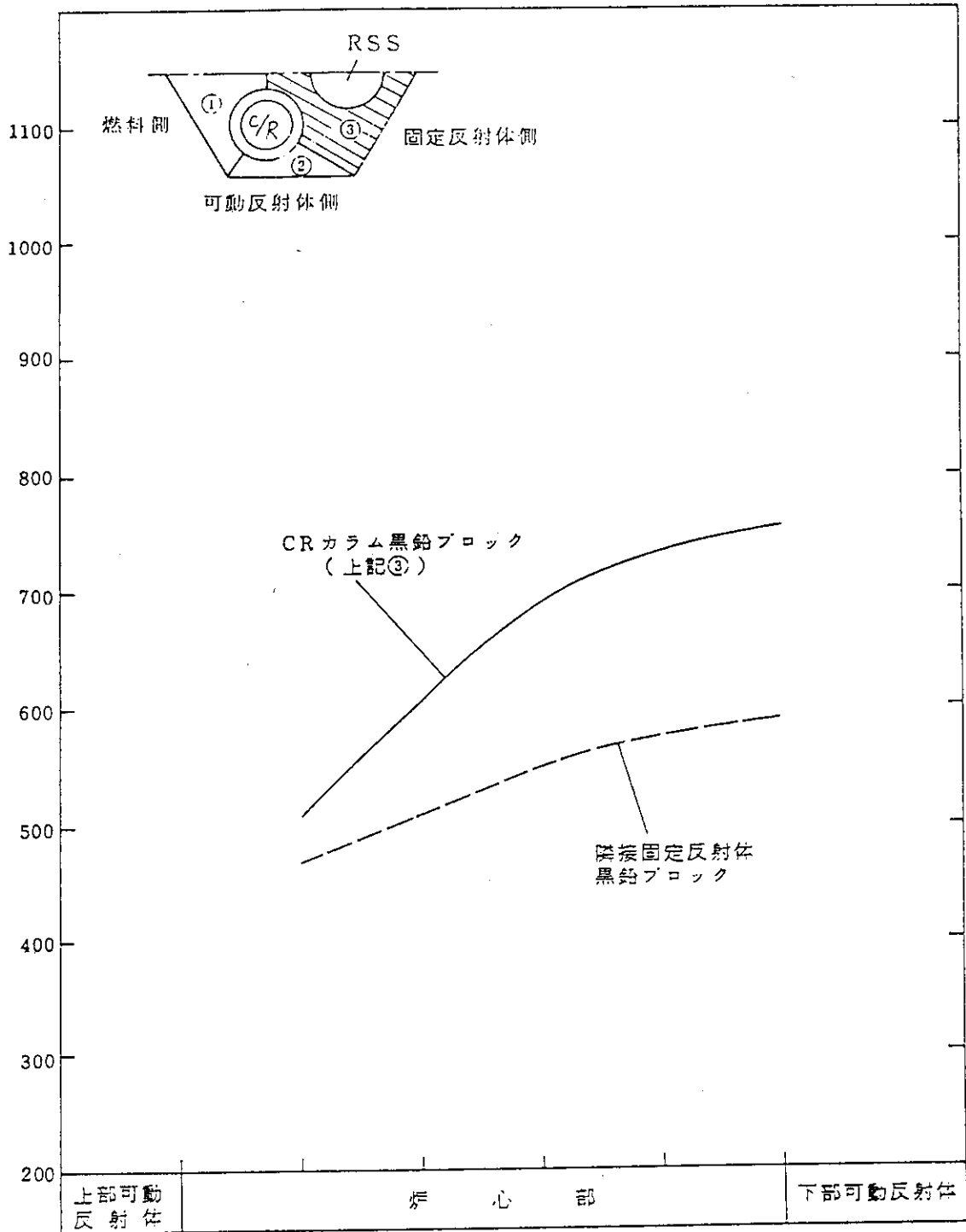
第 4.1 図 燃料ブロック初期温度分布 (公称温度)



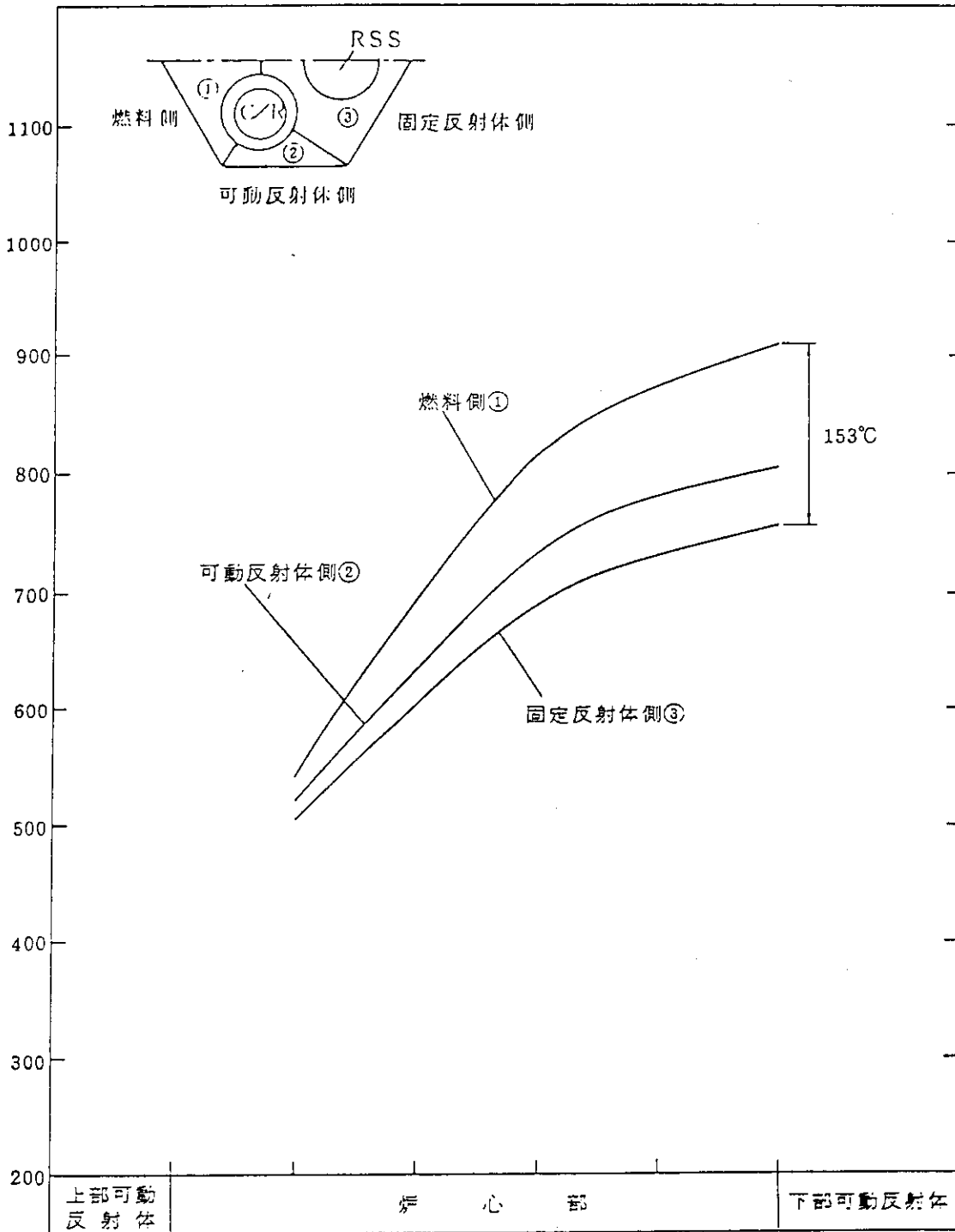
第4.2図 定常時CRカラム温度分布(1) (公称温度)



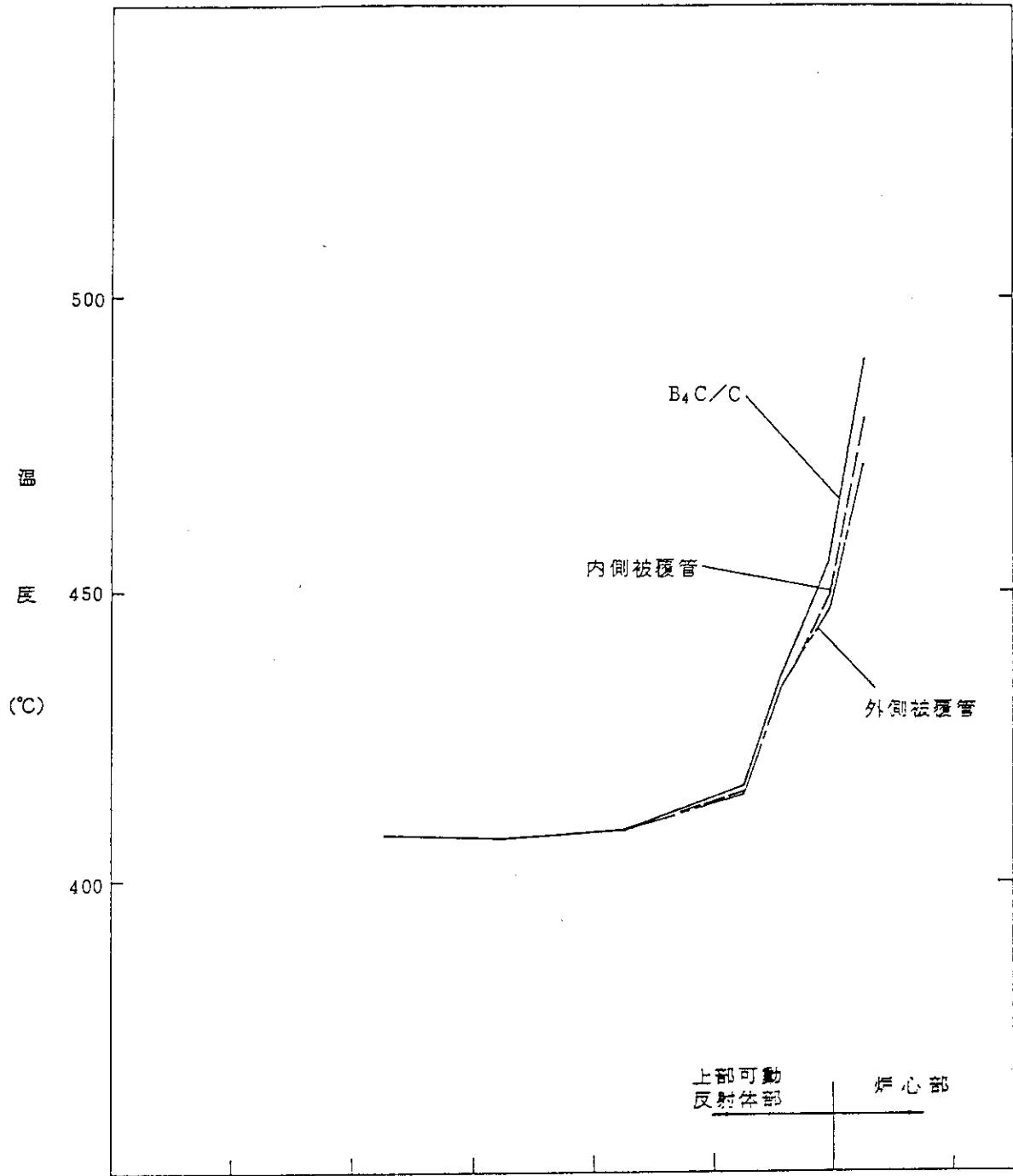
第 4.3 図 定常時 CR カラム温度分布(2) (公称温度)



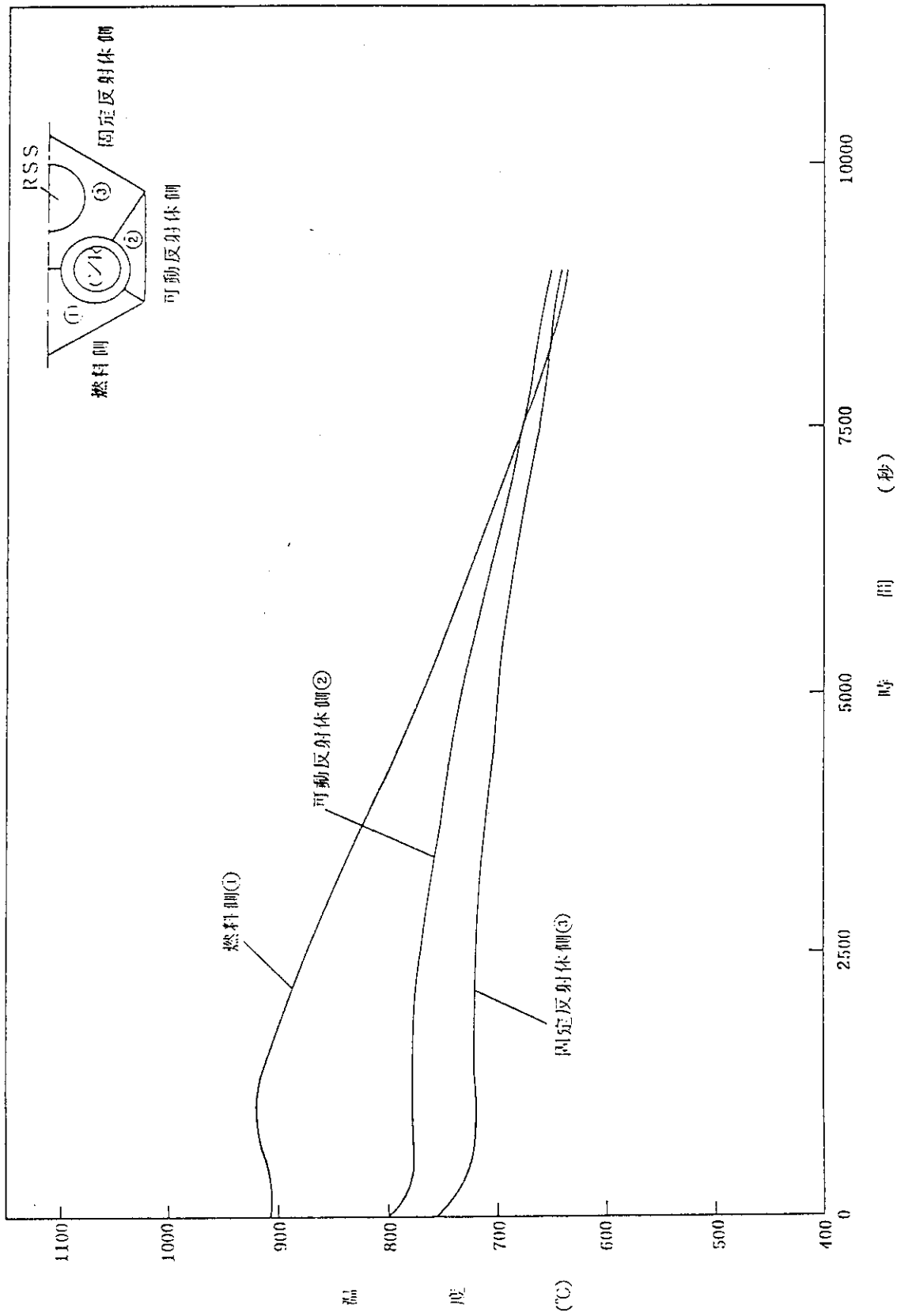
第 4.4 図 定常時 CR カラム温度分布(3) (公称温度)



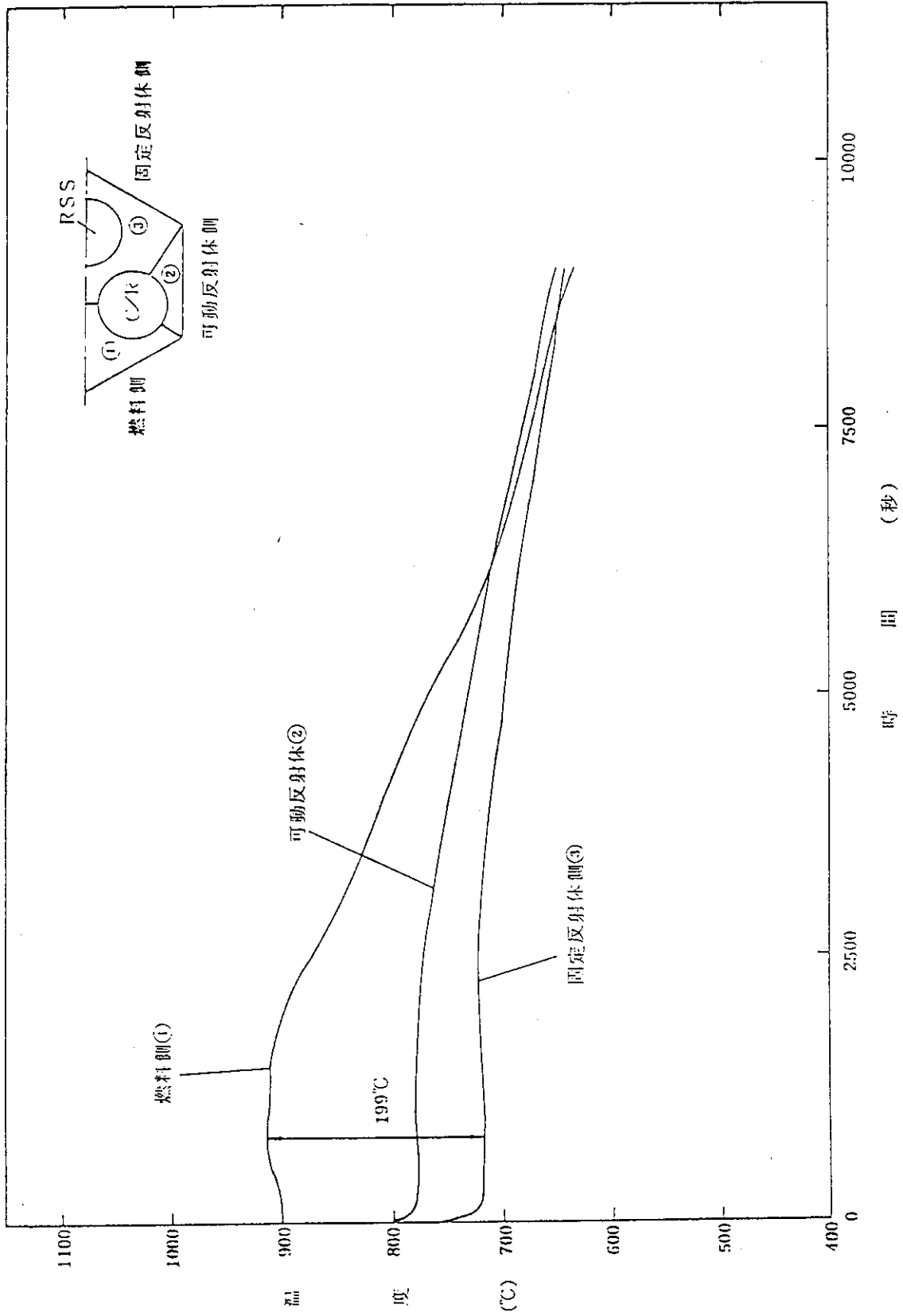
第 4.5 図 制御棒ブロック初期温度分布 (公称温度)



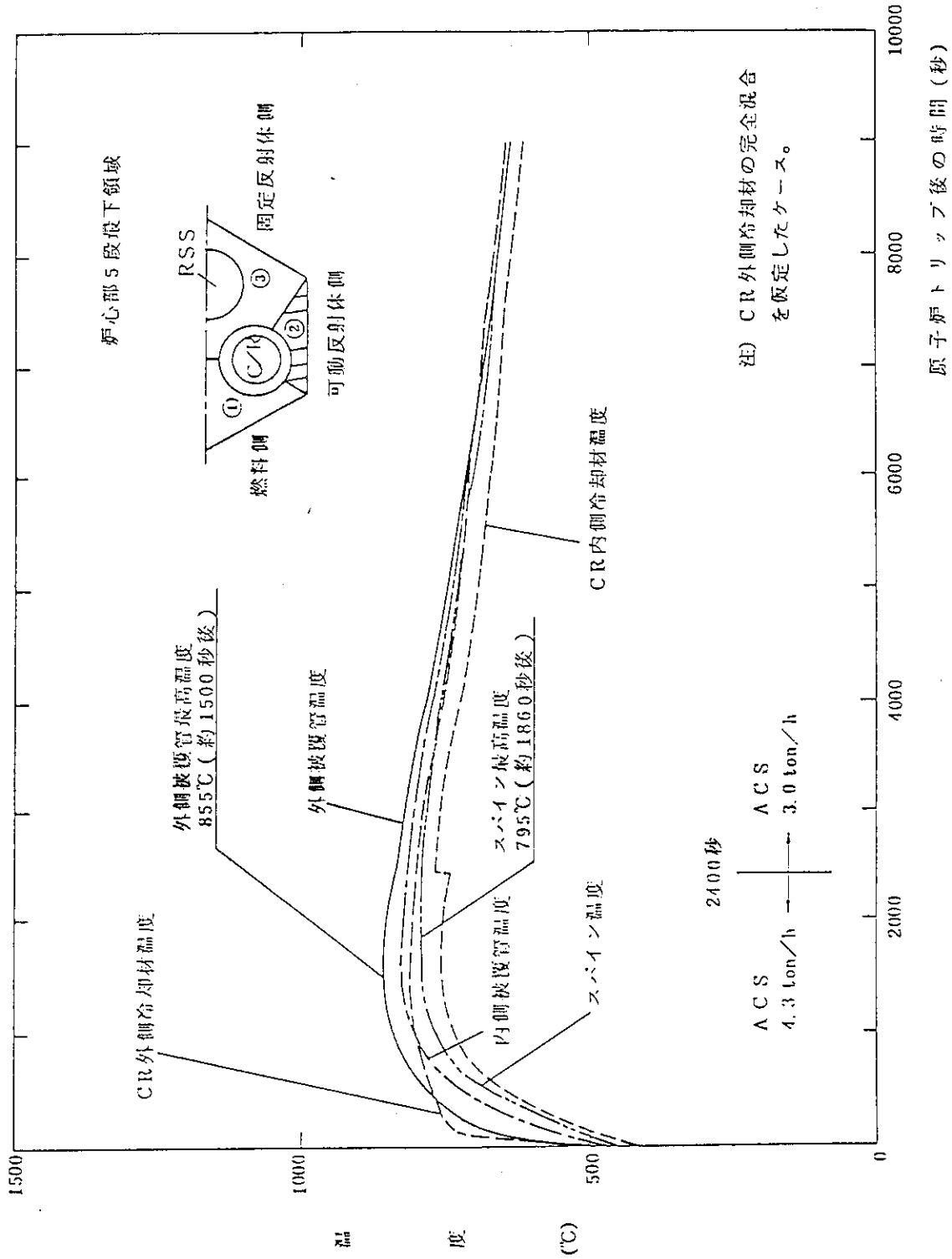
第4.6図 定常時の制御棒温度分布



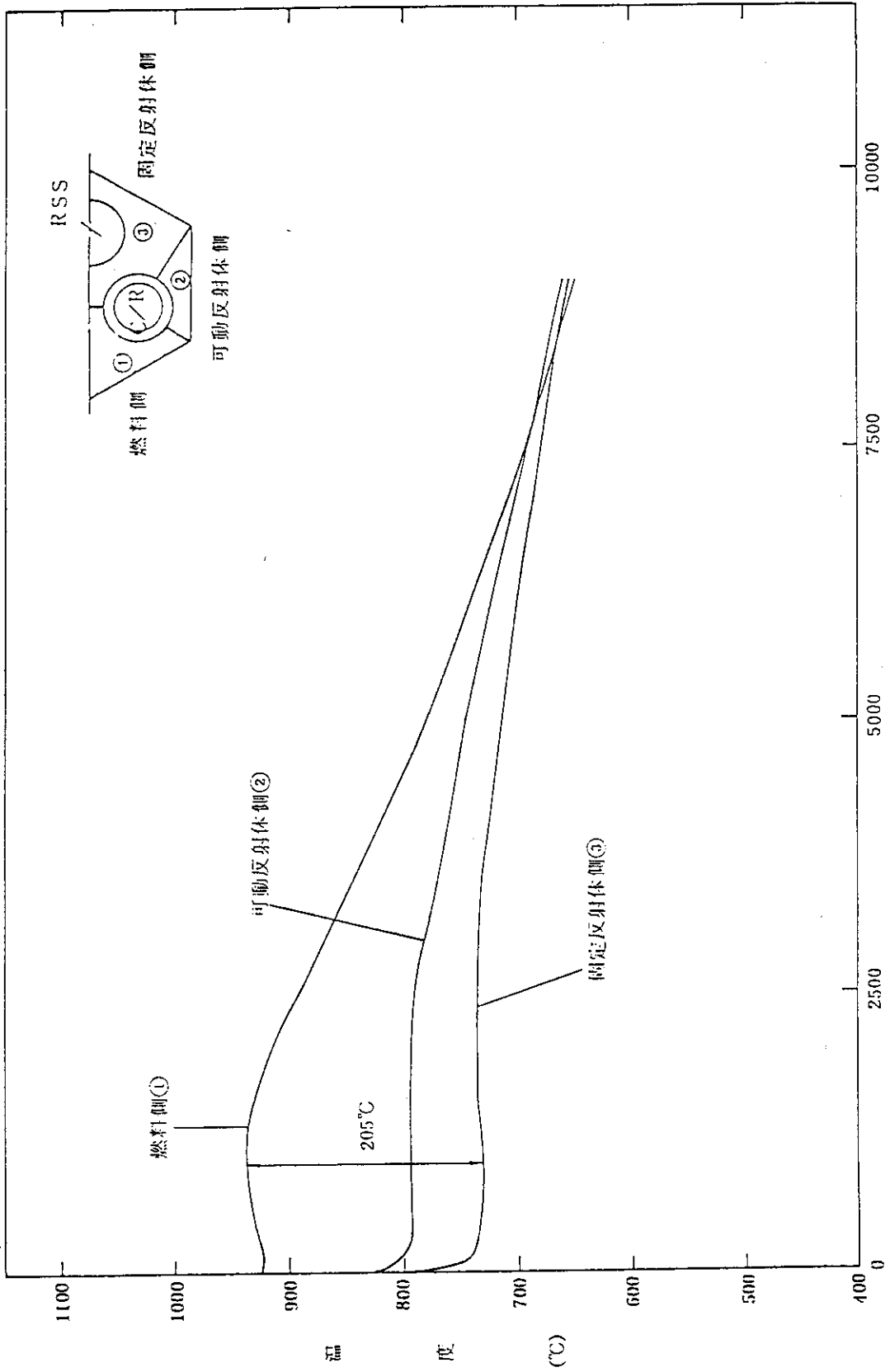
第 4.7 図 商用電源喪失時制御棒黒鉛ブロックの温度変化 (公称温度)



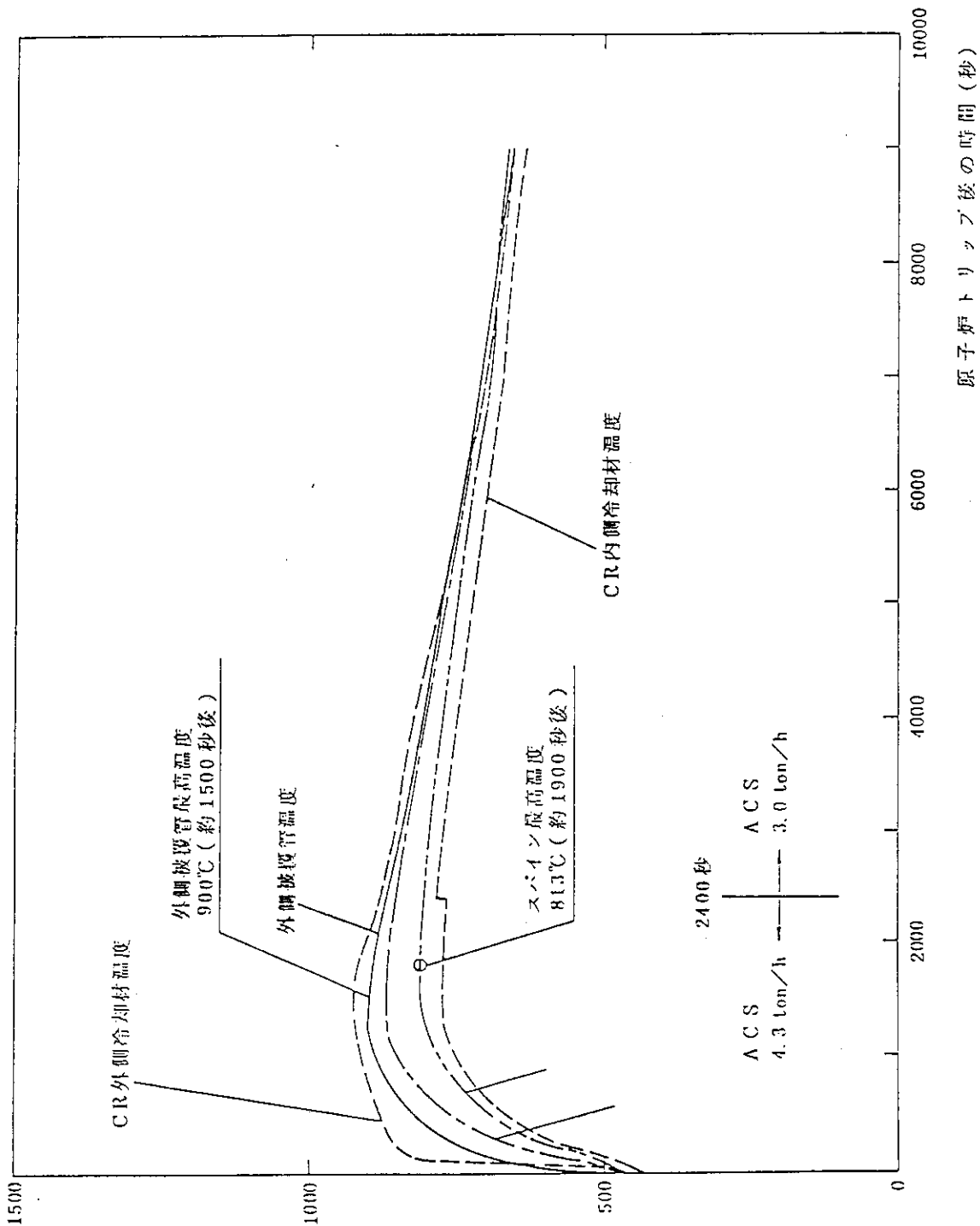
第 4.8 図 商用電源喪失時制御棒挿入孔の温度変化 (公称温度)



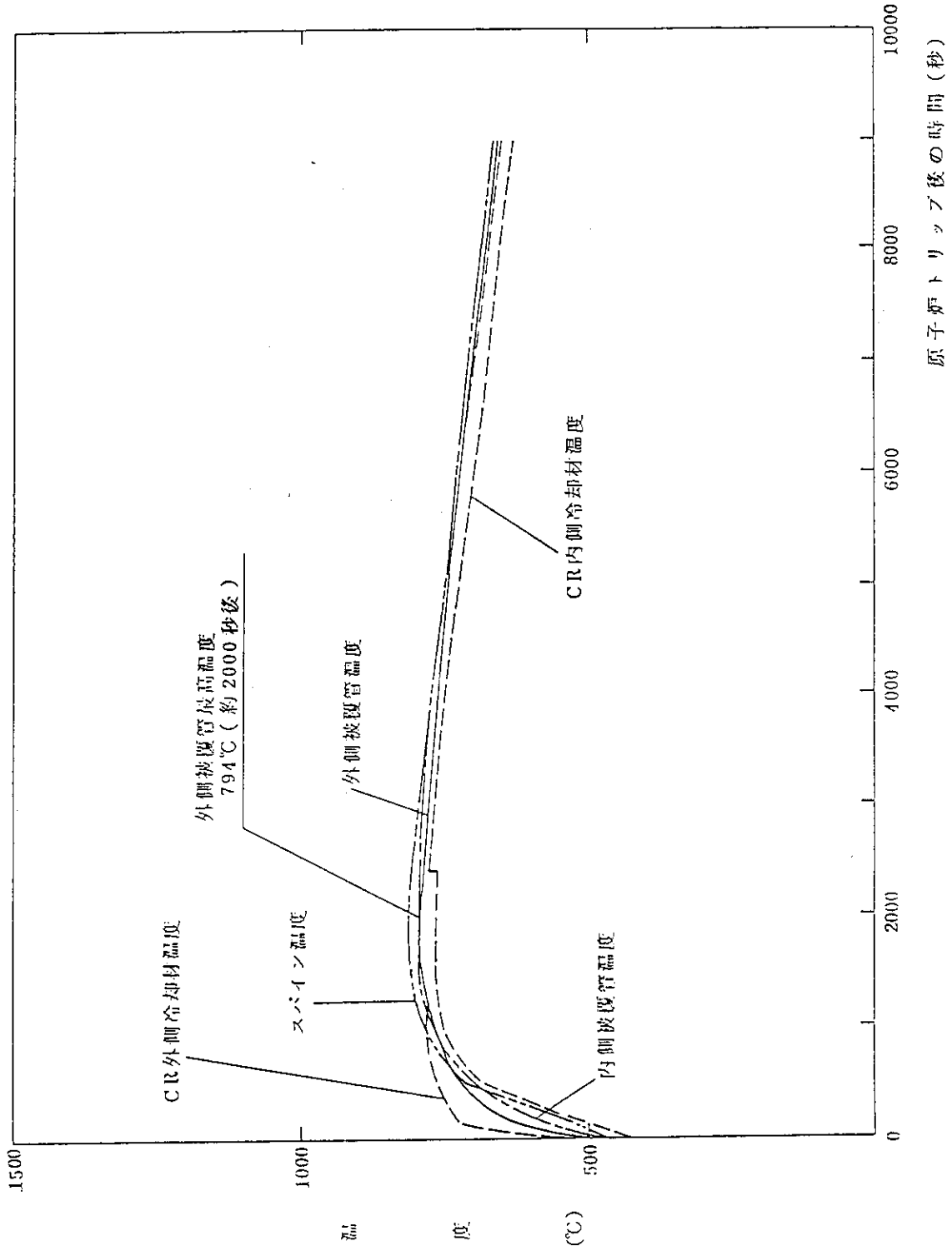
第4.9図 商用電源喪失時制御棒温度変化 (公称温度)



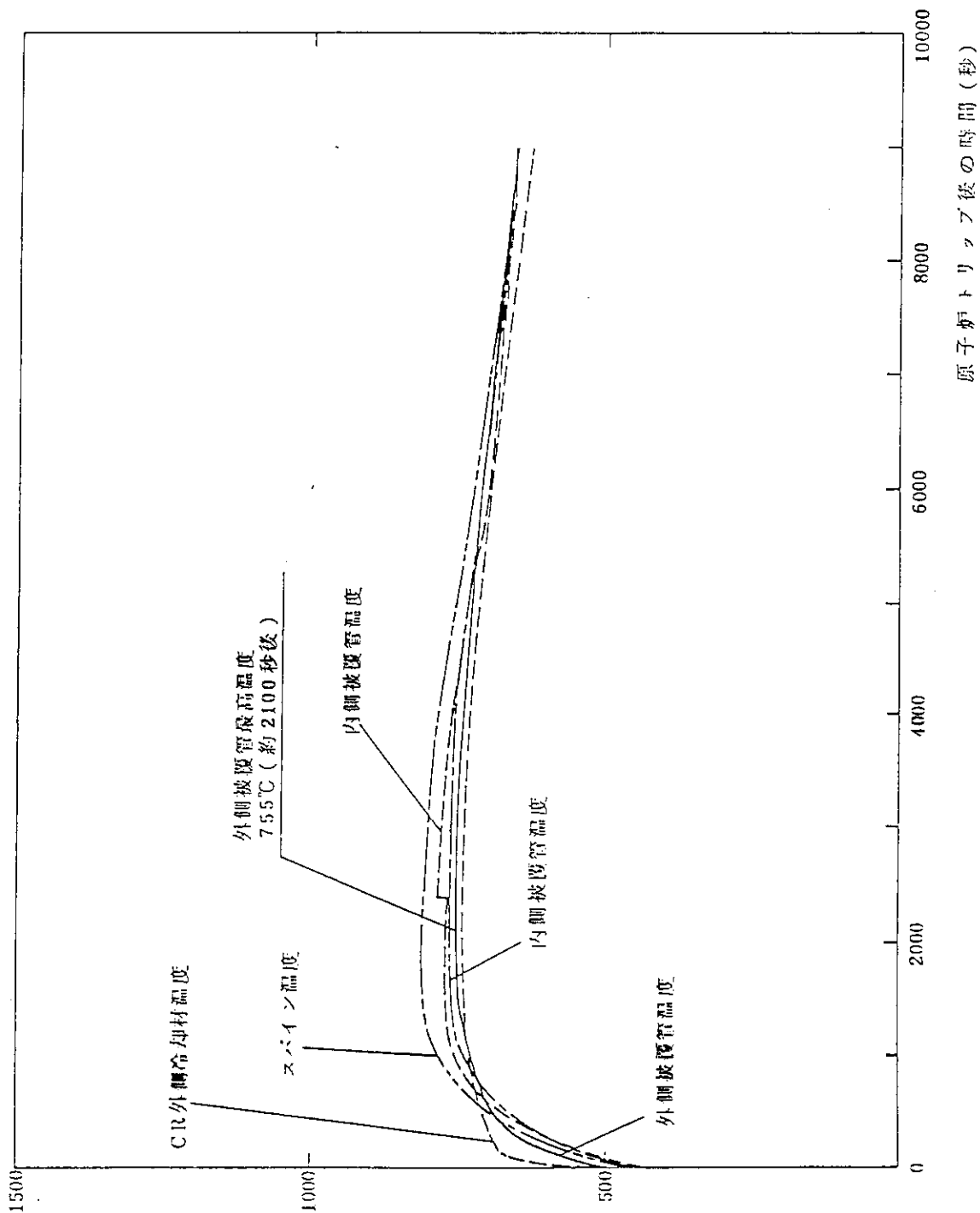
第 4.10 図 商用電源喪失時制御棒挿入孔の温度変化 (系統的因子考慮)



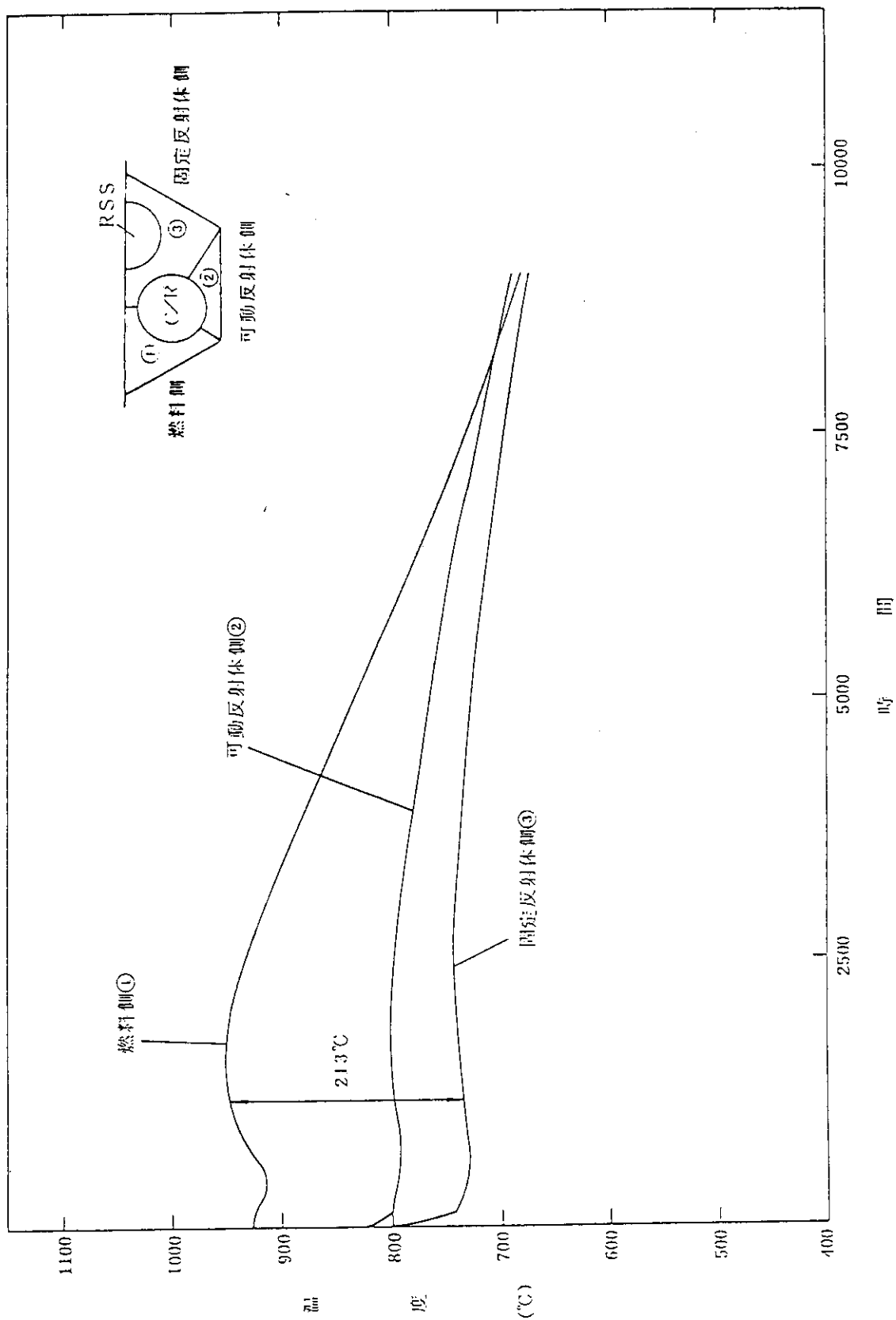
第4.11図(1) 商用電源喪失時制御棒温度変化(燃料側)(系統的因子考慮)



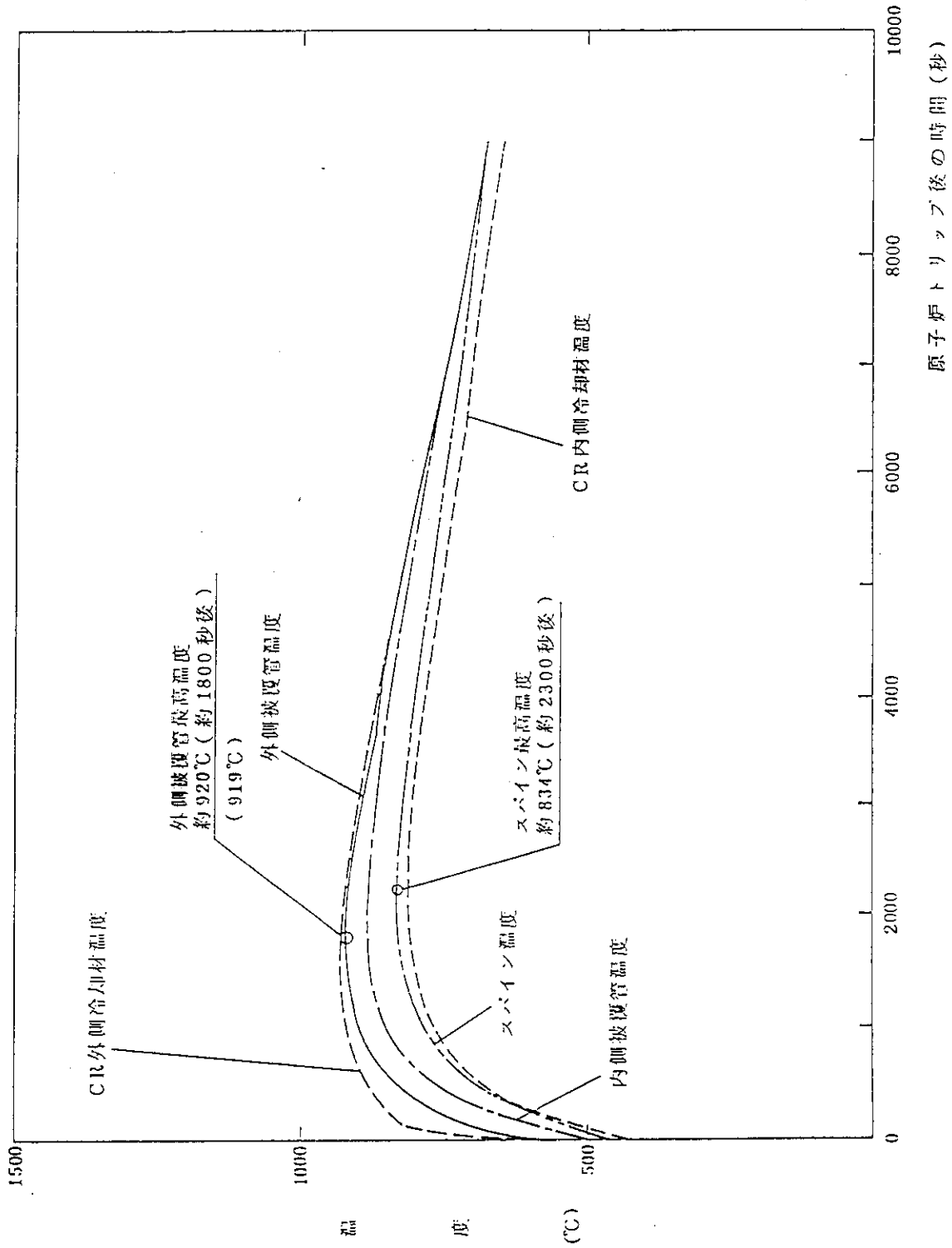
第 4.11 図(2) 商用電源喪失時制御棒温度変化 (可動反射体側) (系統的因子考慮)



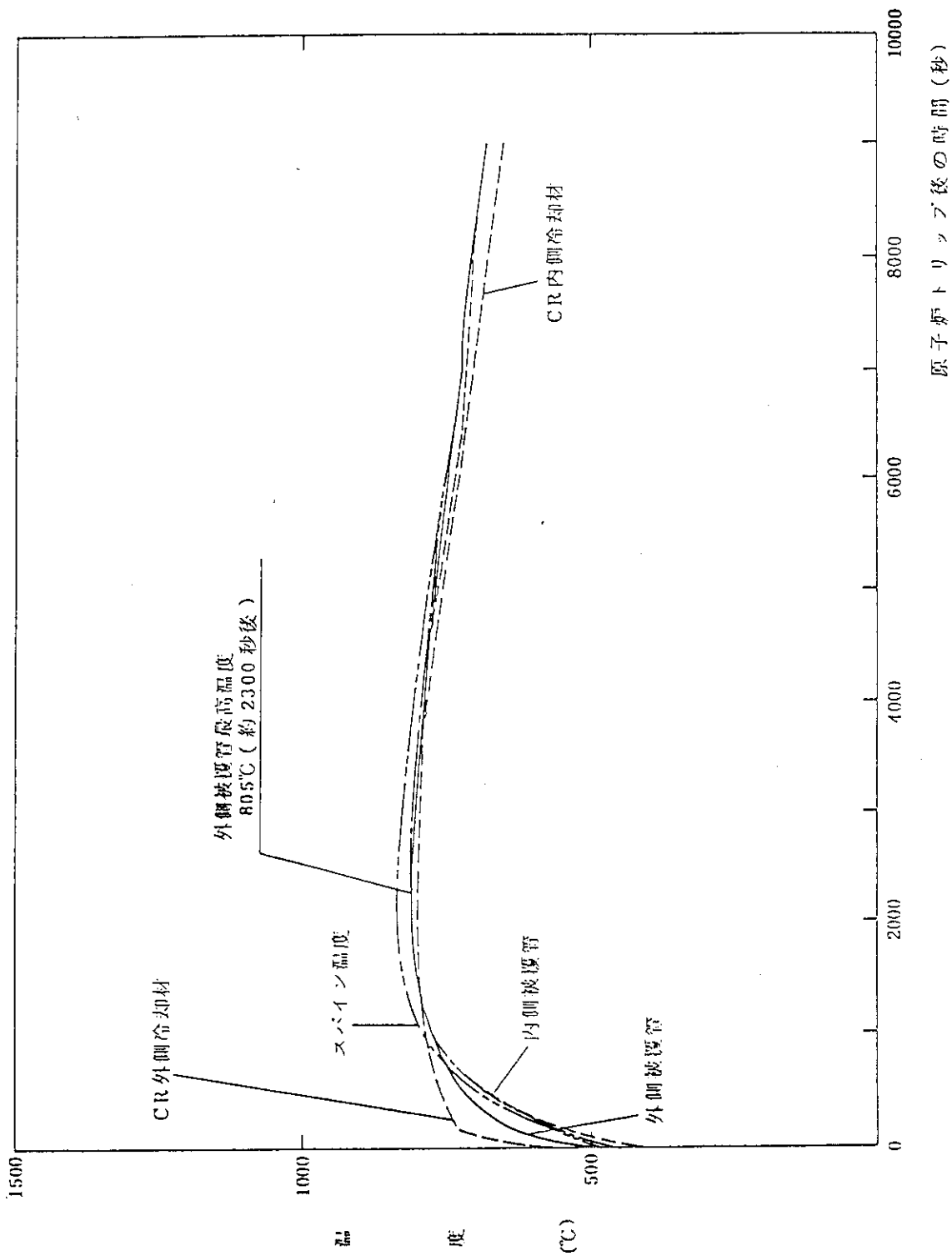
第4.11図(3) 商用電源喪失時制御棒温度変化 (固定反射体側) (系統的因子考慮)



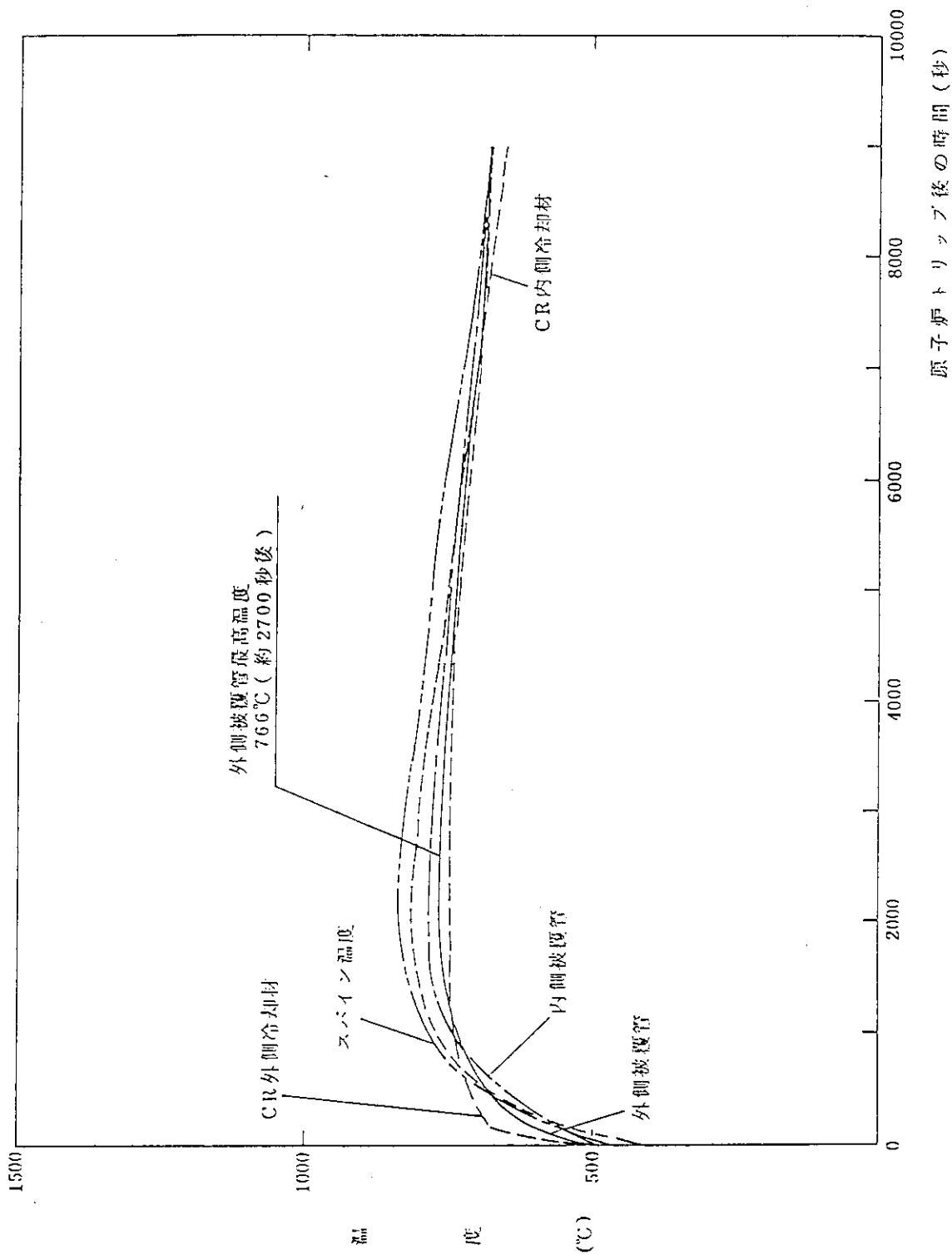
第 4.12 図 商用電源喪失 + AGC1 台起動失敗時挿入孔表面温度 (系統的因子考慮)



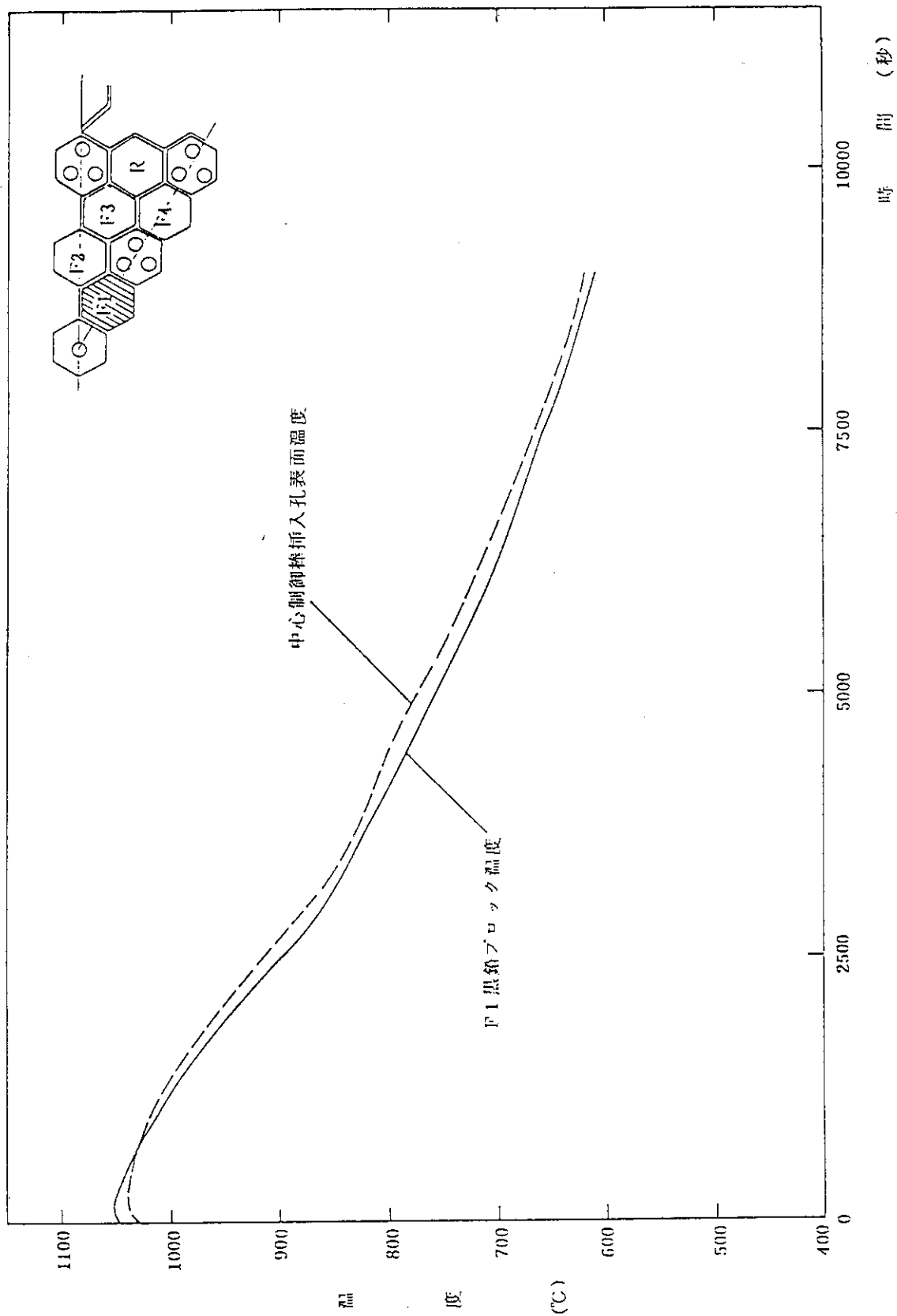
第4.13図(1) 商用電源喪失 + AGC1台起動失敗時制御棒温度変化 (燃料体側) (系統的因子考慮)



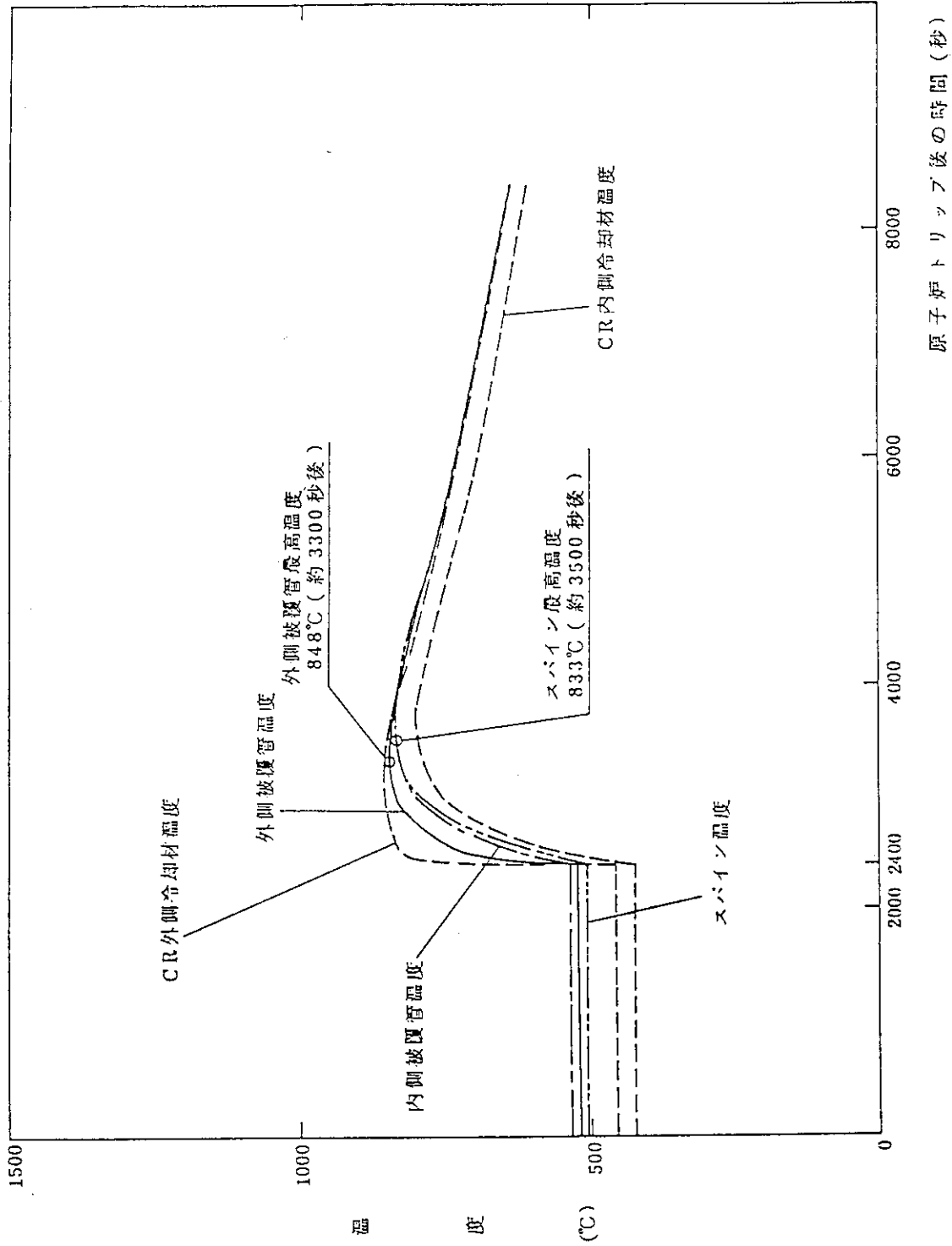
第 4.13 図(2) 商用電源喪失 + AGC1 台起動失敗時制御棒温度変化 (可動反射体側) (系統的因子考慮)



第 4.13 図(3) 商用電源喪失 + AGC1 台起動失敗時制御棒温度変化 (固定反射体側) (系統的因子考慮)



第 4.14 図 商用電源喪失時中心制御棒挿入孔温度変化 (公称温度)



第 4.15 図 商用電源喪失時中心制御棒温度変化 (公称温度)

5. 結 言

通常運転時及び原子炉スクラム時における制御棒被覆管温度解析を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 通常運転時における制御棒被覆管温度の最大値は、反射体領域制御棒の被覆管内面に発生し、公称温度で約480℃である。
- (2) 商用電源喪失による原子炉スクラム後の反射体領域制御棒の被覆管温度は、スクラム後、約1500秒後に燃料体側に面した被覆管表面に発生する。工学的安全係数を考慮した高温点温度解析の結果は、約893℃であり、制限温度を超えることはない。
2段階挿入により、原子炉スクラム後約2400秒経過した後に挿入される燃料領域制御棒の被覆管最高温度は、約3300秒後（挿入後900秒後）に発生し、高温点温度で約886℃となる。このことより、燃料領域制御棒を挿入するタイマーの設定時間2400秒の妥当性が確認された。
- (3) 商用電源喪失による原子炉スクラム後にAGC 1 台の起動に失敗した場合の反射体領域制御棒の被覆管高温点温度は、スクラム後約1800秒後に発生し、約912℃となる。従って、AGC 1 台の起動に失敗した場合には、被覆管最高温度が制限値を超えるために制御棒を交換する必要がある。
- (4) 原子炉出力制御系の異常による原子炉スクラム後の制御棒被覆管温度は、炉心下端黒鉛ブロック温度が商用電源喪失時に比較して約40℃上昇することから、約930℃になるものと予想される。本事象で想定したような出力制御系異常事象が発生した場合には、制御棒の交換が必要となる。
- (5) 燃料領域制御棒がスクラムと同時に炉心に誤挿入された時の被覆管温度は、制限値を超え高温点温度で約1043℃となり、制御棒を交換する必要がある。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部斎藤伸三次長、原子炉建設室田中利幸室長並びに同室関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所：「高温ガス炉研究開発の現状」(1989)。
- 2) HIRANO M. and HADA K. : "DEVELOPMENT OF THYDE-HTGR : COMPUTER CODE FOR TRANSIENT THERMAL-HYDRAULICS OF HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR", JAERI-M 90-071 (1990)。
- 3) EDWARDS L. : "TRUMP : A Computer Program for Transient and Steady-State Temperature Distribution in Multidimensional Systems", UCRL-14754, Rev. 3, Lawrence Livermore Laboratory (1972)。
- 4) 丸山 創他：「高温工学試験研究炉の炉心内流量配分計画と評価」, JAERI-M 88-154 (1988)。
- 5) 丸山 創他：「高温工学試験研究炉炉心燃料温度計算用工学的安全係数の評価」, JAERI-M 88-250 (1988)。
- 6) TROMBETTA M. : "LAMINAR FORCED CONVECTION IN ECCENTRIC ANNULI", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 14, pp. 1161-1173 (1971)。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部斎藤伸三次長、原子炉建設室田中利幸室長並びに同室関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所：「高温ガス炉研究開発の現状」(1989)。
- 2) HIRANO M. and HADA K.：“DEVELOPMENT OF THYDE-HTGR：COMPUTER CODE FOR TRANSIENT THERMAL-HYDRAULICS OF HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR”，JAERI-M 90-071 (1990)。
- 3) EDWARDS L.：“TRUMP：A Computer Program for Transient and Steady-State Temperature Distribution in Multidimensional Systems”，UCRL-14754, Rev. 3, Lawrence Livermore Laboratory (1972)。
- 4) 丸山 創他：「高温工学試験研究炉の炉心内流量配分計画と評価」，JAERI-M 88-154 (1988)。
- 5) 丸山 創他：「高温工学試験研究炉炉心燃料温度計算用工学的安全係数の評価」，JAERI-M 88-250 (1988)。
- 6) TROMBETTA M.：“LAMINAR FORCED CONVECTION IN ECCENTRIC ANNULI”，Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 14, pp. 1161-1173 (1971)。