

JAERI - M  
83-191

多目的高温ガス実験炉の運転に関する流量調節  
領域出口ガス温度一定制御アルゴリズムの検討

1983年11月

鈴木 勝男・島崎 潤也

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）で複写による実費領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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 印刷 いばらき印刷㈱

多目的高温ガス実験炉の運転に関する流量調節領域出口  
ガス温度一定制御アルゴリズムの検討

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

鈴木 勝 男

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

島 崎 潤 也

(1983年10月20日受理)

本報告書は、流量調節領域出口ガス温度を等しくする ( $\Delta\theta_0$ )オリフィス装置の制御方式を実験炉運転の観点から検討し、その結果をとりまとめたものである。

主要な結果は以下の点である。

- (1) 領域出口ガス温度の測定値  $\Delta\theta_{im}$ に基づく各オリフィスの調整巾  $\Delta Z_i$ が満足すべき基本式は

$$\frac{\Delta Z_i}{Z_{i0}} - \left( \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right)^{-1} \sum_{j=1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = \left( \frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{im}} \right)^{-1}$$

である。ここで  $Z_{i0}$  はオリフィスの初期設定値である。

- (2) 炉心圧力損失不変あるいは特定オリフィス固定などのそれぞれの条件付加のもとで、上記の基本式の解を検討し、原子炉出力一定及び流量一定の条件下でその解が適用できることを明らかにした。
- (3) オリフィスのバンク操作による領域出口温度一定制御の可能性を示した。

Discussion on Control Algorithm of Constant Outlet Gas Temperature  
of Flow Regulation Region from a view point of VHTR Operation

Katsuo SUZUKI

Department of Power Reactor Projects, JAERI

Junya SHIMAZAKI

Department of Reactor Engineering, Tokai Research  
Establishment, JAERI

( Received October 20, 1983 )

This report presents a method of adjusting orifice valves equipped on the top reflector of the core. These orifice valves are needed to regulate coolant flow rate for a constant gas temperature at the outlet of flow regulation region.

Only measuring coolant gas temperature at each region is required for the above method. The following results are obtained from discussion.

- (1) Basic equation is derived which should be satisfied with the orifice adjustment increments  $\Delta z_i$ . The equation includes measured gas temperature of each flow regulation region. This equation is as follows:

$$\Delta z_i / z_{i0} - \left( \sum_{j=1}^n z_{j0}^{-1} \right)^{-1} \sum_{j=1}^n (\Delta z_j / z_{j0}^2) = (\Delta \theta_0 / \Delta \theta_{im}) - 1 ,$$

where  $z_{i0}$  means initial setting of  $i$ -th orifice,  $\Delta \theta_0$ ,  $\Delta \theta_{im}$  mean a planned constant temperature and measured temperature respectively.

- (2) Solutions of the above equation are discussed under a certain conditions, e.g. without changing initial pressure loss of core or with fixing a specified orifice valve opening. It is shown that the above solution is applicable to the core provided the reactor is in control of constant total power and flow rate.
- (3) Orifices can be operated in a bank when some flow regulation regions indicate the same measured outlet temperature.

Keywords: VHTR, VHTR Operation, Orifice Control, Gas Temperature Control, Core Coolant Flow Regulation, Core Thermal Design.

## 目 次

1. 緒 言	1
2. 解析モデル	3
2.1 実験炉の炉心の概要	3
2.2 解析モデルと仮定	4
3. 流量調節領域出口ガス温度一定制御アルゴリズムの検討	9
3.1 平面炉心モデルにおける領域出口ガス温度一定制御方式	9
3.1.1 オリフィス弁体ストロークの初期設定法	10
3.1.2 流量制御の基本式の導出	11
3.1.3 制御方式の検討	13
3.2 炉心軸方向の流量分布を考慮した領域出口ガス温度一定制御方式	17
4. 結 言	21
謝 辞	22
参考文献	22

## Contents

1. Introduction	1
2. Analytical Model	3
2.1 Description of VHTR Core	3
2.2 Assumptions and Analytical Model	4
3. Discussion on Constant Outlet Gas Temperature Control	9
3.1 Constant Gas Temperature Control of Plane Core Model	9
3.1.1 Initial Setting of Orifice Valve	10
3.1.2 Derivation of Basic Equation for Flow Control	11
3.1.3 Discussions on Control Methods	13
3.2 Constant Gas Temperature Control of the Core with Axial Flow Distribution	17
4. Conclusions	21
Acknowledgement	22
References	22

## 1. 緒 言

多目的高温ガス実験炉は原子炉出口冷却材温度 950 °C を達成することを目標とした 50 M Wt のヘリウム冷却黒鉛減速型の熱中性子炉である。その主要目を実験炉の詳細設計 (I) にもとづいて Table 1 にまとめて示す。

実験炉は冷却材温度 950 °C という高温を目標としているため、燃料は厳しい温度条件下で使用されることになる。そこで、炉心熱設計では、燃料最高温度を低下させるため、流量調節領域出口における冷却材ガス平均温度を等しくするように炉心流量を配分する方式 (以下、流量調節領域出口ガス温度一定方式と呼ぶ) を採用してきた。これは流量調節領域の軸方向積分出力に比例して、全炉心流量を各領域に配分する方式である。<sup>1) 2)</sup> 本流量配分方式は他の方式 (たとえば、燃料最高温度一定方式) に比して、優れた特性を有していることが詳細設計 (I) (昭和 56 年 3 月) までの検討によって確認された。炉内流量配分を行うために、オリフィス装置が上部反射体の上に設置されている。このオリフィス装置の弁体ストロークは原子炉起動にあたって流量調節領域出口ガス温度が領域間で等しくなるように調節され、他の制約条件も考慮して設定される。

しかしながら、実際の原子炉運転の観点からみれば、燃焼に伴なう炉心特性の変化、あるいは制御棒挿入パターンの変化による出力の空間分布の変動などの効果により、流量調節領域出口ガス温度が設計々値からズレてくるであろうことは容易に予測される。このズレは流量調節領域の出口部に装着されている熱電対のガス温度測定によって検知することが可能である。このような出口ガス温度の測定値を用いて、流量調節領域の出口ガス温度を一定とするように、多数個のオリフィス弁体を調節する制御アルゴリズムを検討しておくことは、燃焼の適当なステップで領域流量の調節を効率的に実施するという運転上の観点からは意義あることと思われる。米国の Fort St. Vrain 炉にも炉内流量配分設定用にオリフィス装置が設置されているが、<sup>3)</sup> 領域出口ガス温度の測定値に基づくオリフィス調節のアルゴリズムについての報告は見当たらない。

本報では、原子炉運転中に測定される流量調節領域毎の出口ガス温度の測定値に基づく、領域出口ガス温度一定の炉心流量配分を実現するオリフィス制御の基本的アルゴリズムを種々の条件下で検討したので報告する。この結果の適用にあたっては、測温誤差及びクロスフローのさらに詳細な評価が必要である。

尚、実験炉詳細設計 (II) において、炉心の設計方針及び寸法諸元の見直し作業が進められているが、本報告書で得られた結果を新炉心へ拡張適用することは可能である。

Table 1 Core Thermal Performance of Detail Design

Reactor thermal power	50 MW
Rate of heat generation in fuel rods	94 %
Primary coolant pressure	40 kg/cm <sup>2</sup> G
Primary coolant flow rate	15.9 kg/s
Total channel heat transfer surface area	423.8 m <sup>2</sup>
Reactor inlet coolant temperature	395 °C
Reactor outlet coolant temperature	1000 °C
Average power density	2.2 W/cm <sup>3</sup>
Heat flux at channel surface	
Average flux (nominal)	0.95 x 10 <sup>5</sup> Kcal/m <sup>2</sup> h
Maximum flux (nominal)	1.77 x 10 <sup>5</sup> Kcal/m <sup>2</sup> h
Linear heat rate of fuel rod	
Average (nominal)	161 W/cm
Maximum (nominal)	298 W/cm
Total power peaking factor	1.85
Engineering hot spot factor	1.24
Over power factor	1.08
Fuel maximum temperatures	
Nominal	1295 °C
Systematic	1507 °C
Systematic (over power)	1542 °C

## 2. 解析モデル

本章では、まず多目的高温ガス実験炉の炉心（詳細設計（I）に基づく）についての概要を述べ、次いで、流量調節領域出口ガス温度一定制御のアルゴリズムを検討するための炉心のモデル化について述べる。

### 2.1 実験炉の炉心の概要

実験炉の炉体構造概念図を Fig. 1 に示す。炉心は鋼製圧力容器の中に収納され、制御棒駆動装置あるいはオリフィス駆動装置等を収納するスタンドパイプが圧力容器上部に設けられている。また、1次系配管ノズルは下鏡部に取付けられている。Fig. 2 は炉心断面図を示す。炉心は 73 個の燃料カラム（六角柱状黒鉛ブロックが軸方向に 7 段積重なった燃料ブロック柱）からなっている。この燃料カラムには 2 種類ある。ひとつは燃料棒と可燃性毒物細棒を挿入した燃料体黒鉛ブロックの燃料カラムであり、他のひとつは制御棒挿入孔（2 個）と後備停止系ボロン球挿入孔を設けた黒鉛ブロックのカラムである。

燃料体黒鉛ブロックは、平径 299 mm、長さ 570 mm であり、直径 50 mm の孔が 12 個設けられている。その中に外径 46 mm の燃料棒が挿入され、冷却材はブロックの孔と燃料棒との間の環状流路を流れる。

炉心の上部及び下部には、燃料体冷却流路に対応した冷却孔を有する可動反射体黒鉛ブロックを配置する。炉心流量を調節配分するオリフィス装置は上部可動反射体の上に設置されている。

本オリフィス装置は 2 重円筒の構造を有するものであり、内・外筒の相対変位による流路開口部（円周方向に 3 ケ所ある）の面積を変化させて流量を調節するものである。オリフィス駆動装置はスタンドパイプ内に収納されている。オリフィス装置の構造を Fig. 3 に示す。

炉心の流量は 7 個の燃料カラムを 1 単位として上記オリフィスによって調節される（Fig. 2 参照）。すなわち、炉心中央付近の流量調節単位に見られるように、制御棒挿入カラムの周囲を 6 個の燃料カラムで取囲む配置が標準的な流量調節単位である。しかし、炉心境界付近では 3 個の燃料カラムを含むものと、1 個のそれを含むものとの 2 種類が存在することになる。このようにして、炉心全体は 19 個の流量調節領域に分けられる。

原子炉圧力容器下部から流入した冷却材は原子炉下部構造物、圧力容器、コアバレル等の炉心周辺構造物を冷却しながら原子炉上部プレナムに至る。その後、オリフィス装置によって各流量調節領域に配分され、さらに領域内の冷却チャンネルに分流されて下降しながら燃料棒を冷却する。炉心部（燃料）を出た高温の冷却材は下部反射体を通過する途中で 7 カラム毎に集められ、下部の高温プレナムに至る。一方、一部の冷却材は制御棒チャンネル、可動反射体間あるいはカラム間ギャップを流れて下降し高温プレナム部に至る。これらの冷却材は混合して 950 °C の高温となり、冷却材出口管を通して原子炉容器の下部から 1 次冷却系へと導かれる。



## 2.2 解析モデル

運転中に測定される流量調節領域毎の出口ガス温度に基づいて、領域出口ガス温度一定の炉心流量配分を実現するオリフィス制御の基本アルゴリズムを検討する。そのため、実験炉々心を以下の仮定によって Fig. 4 に示すようにモデル化する。

- (1) 実験炉は原子炉出力一定の制御のもとに運転されており、冷却材流量はその原子炉出力に対応して原子炉出口温度（冷却材混合平均温度）が所与の温度  $\theta_0$ 。（例えば 950 °C）とるように制御されている。（原子炉出力・流量一定制御による）
- (2) 炉心流量（19 個のオリフィス部の冷却材流量の総計）は保存される。すなわち、原子炉の側部を流れる上向流からのリーク・フローは無視される。（リーク・フローの無視）
- (3) 各々の流量調節領域の軸方向の流量分布（Fig. 4 中の  $\alpha_{ij}$ ）は考慮するが、流量調節領域間のクロス・フロー冷却材ガス温度は流入する領域の冷却材主流の温度に等しいと仮定する。（領域冷却材主流とクロス・フローの温度差の無視）
- (4) (3)の軸方向分布はオリフィス装置による流量の微調整によって不変であると仮定する。この分布は炉心熱設計で定められたものを適用する。
- (5) オリフィス入口開口部以外からの流量調節領域内への冷却材の流入、カラム間ギャップの流れ及び制御棒冷却用流量の出口温度への影響は無視する。
- (6) 圧力損失係数を決定するオリフィス係数、摩擦係数等は流量に依存せず一定とする。但し、これらの係数は各々の領域毎には異なっても良いものとする。

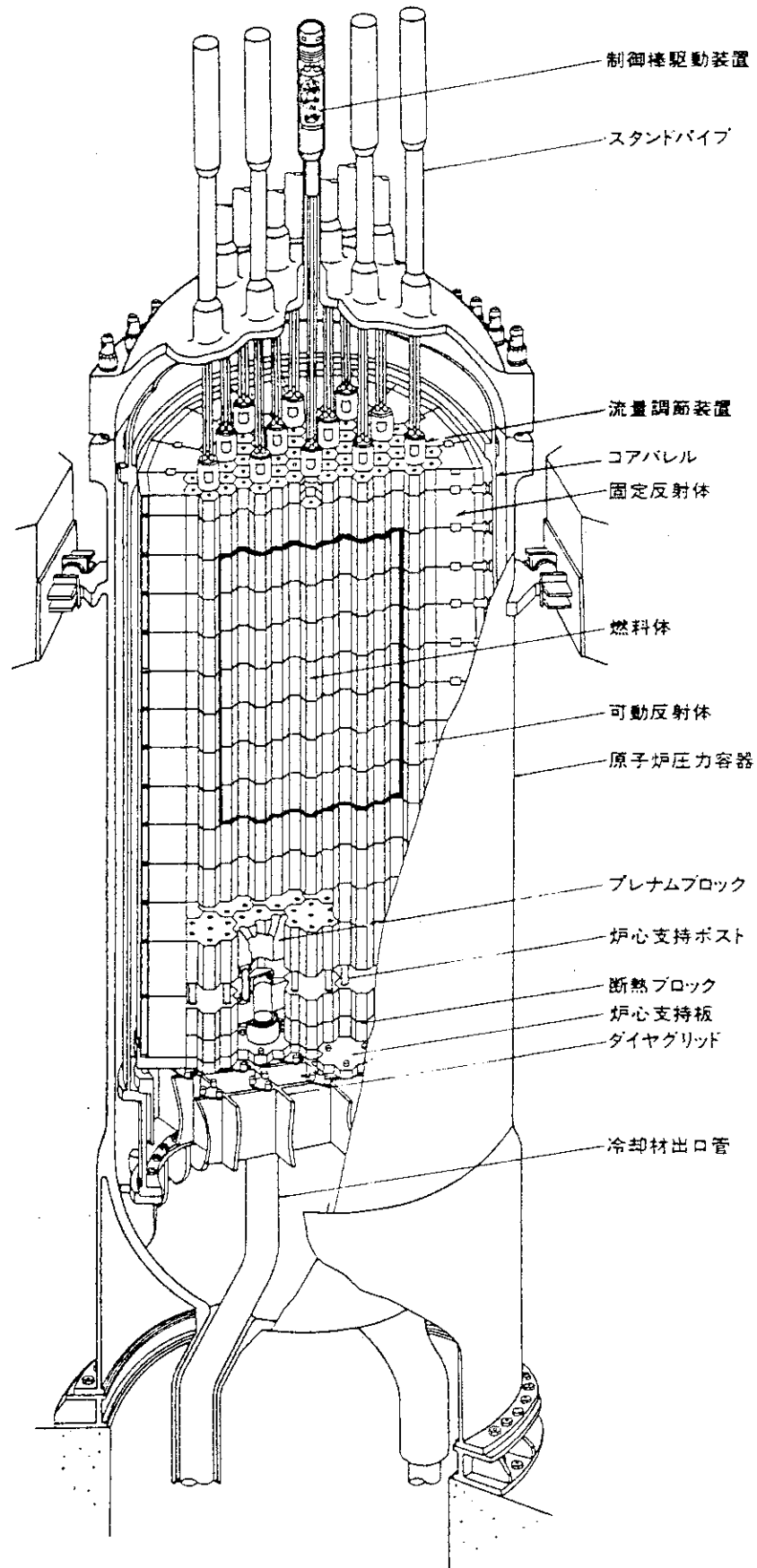


Fig. 1 Reactor view of Experimental VHTR (the conceptual design)

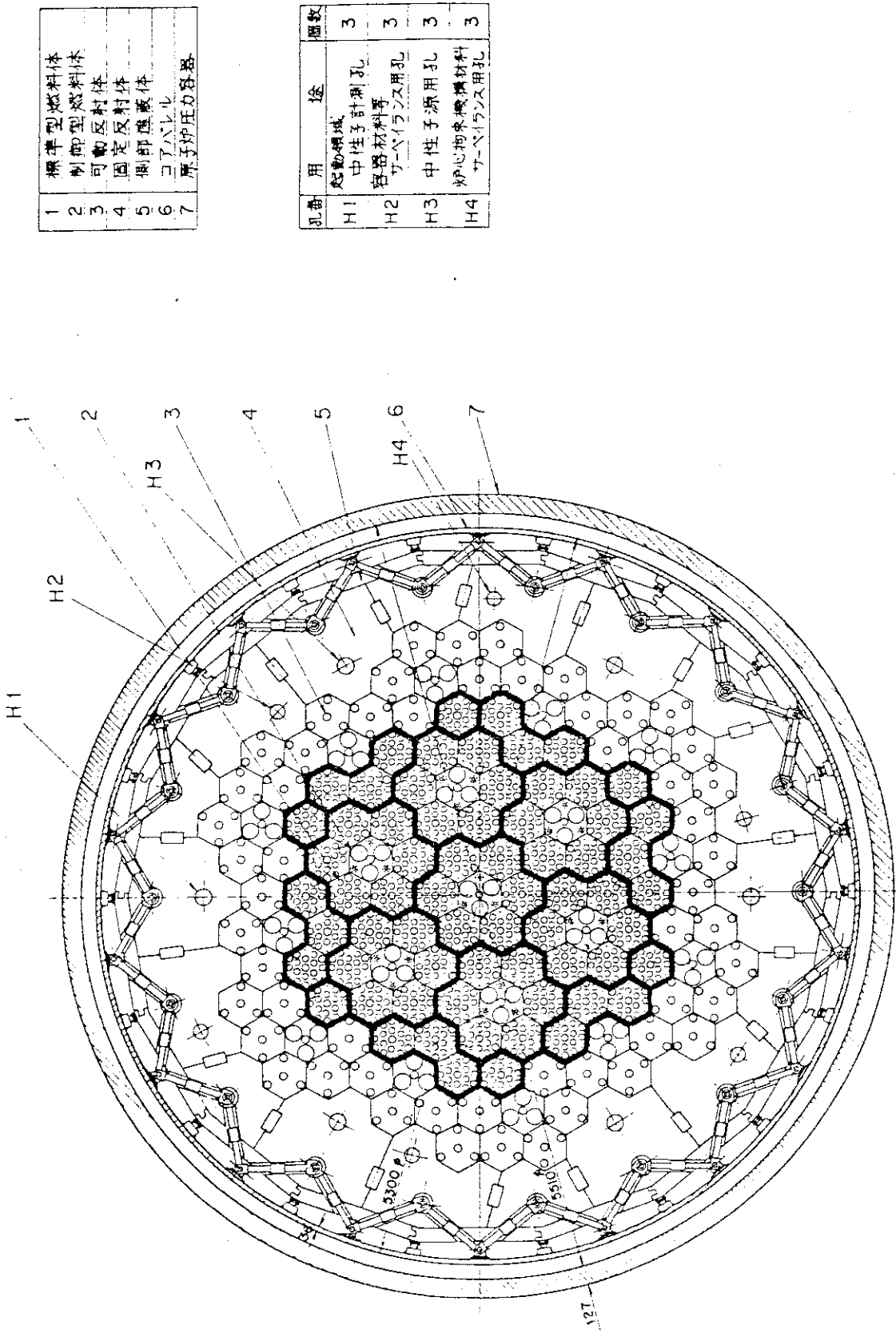


Fig. 2 Horizontal cross section of Experimental VHTR (core arrangement)

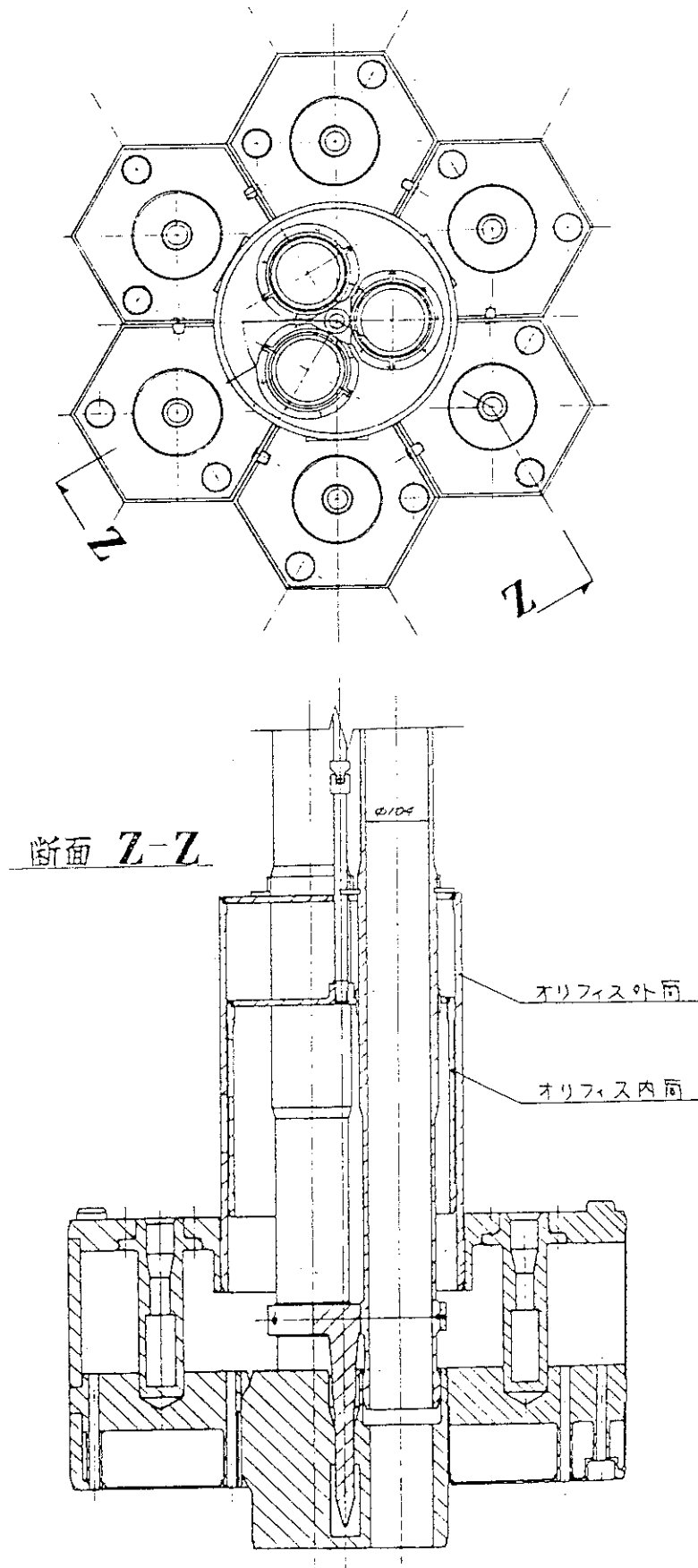


Fig. 3 Orifice arrangement of Experimental VHTR

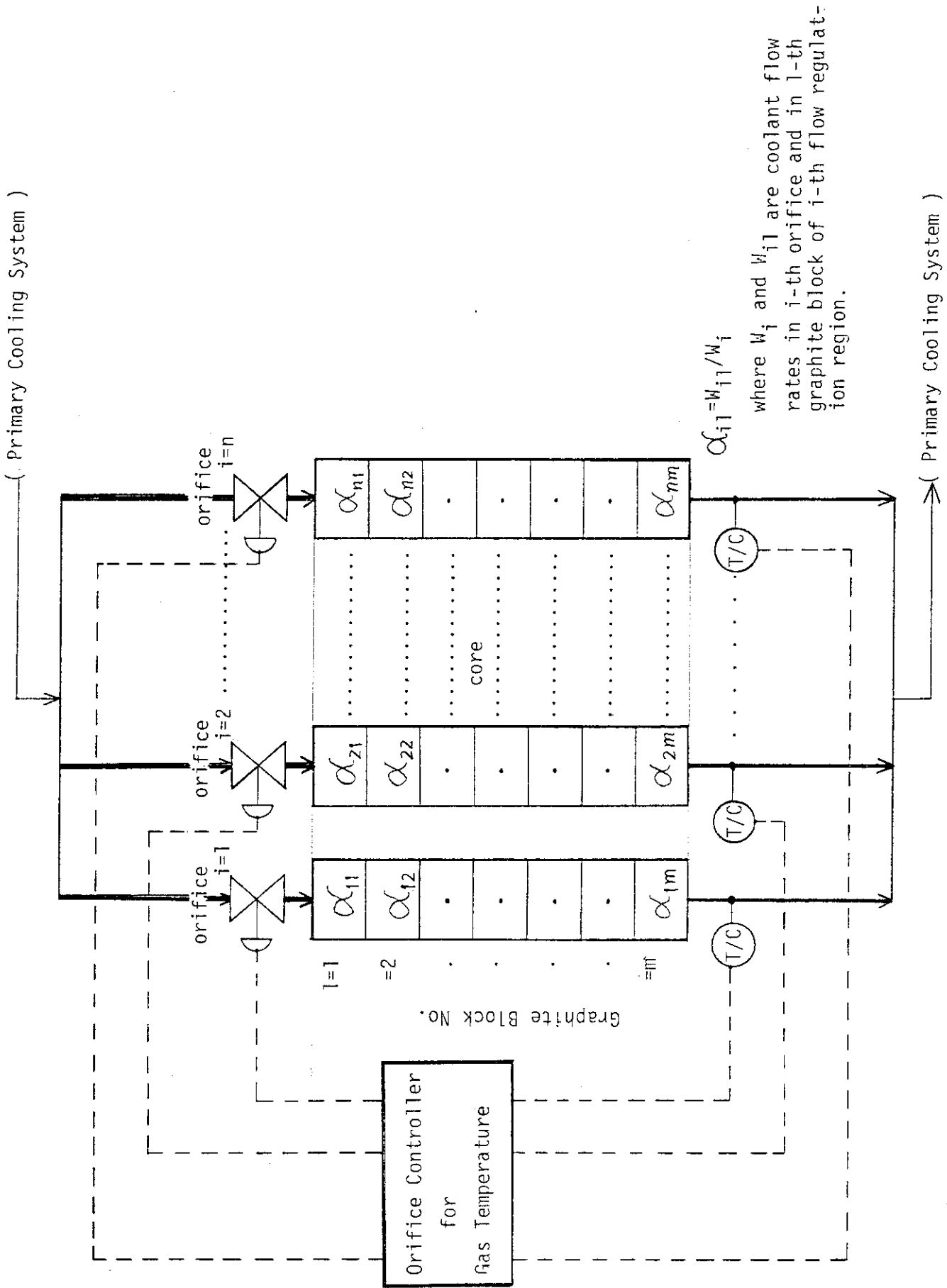


Fig.4 Analytical Model for Orifice Control

### 3. 流量調節領域出口ガス温度一定制御アルゴリズムの検討

流量調節領域の出口ガス温度の測定に基づき、領域出口ガス温度を一定とするように  $n = 19$  個のオリフィスを調節する方法を述べる。3.1節では炉心の軸方向に拡がりのない平面炉心の場合のオリフィス制御方式を述べる。3.2節では炉心の軸方向の拡がりを考慮する。2.2節のモデル化の(3), (4)の仮定のもとでは、炉心の軸方向の拡がりを考慮しても、平面炉心の場合と同形式の制御アルゴリズムが成立つことが示される。

#### 3.1 平面炉心モデルにおける領域出口ガス温度一定制御方式

実験炉においては、1次冷却系から原子炉に流入した冷却材流量は炉心上部プレナムに至り、オリフィス装置によって各々の流量調節領域に配分される。すなわち、オリフィス弁体ストローク  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  を独立変数として、炉心流量  $W_t$  が  $n$  個の領域に配分される。各流量調節領域を流れる流量  $w_i(\mathbf{X})$  について次式がなりたつ。<sup>4)~7)</sup>

$$K_i(x_i) w_i^2(\mathbf{X}) = \Delta P(\mathbf{X}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i(\mathbf{X}) = W_t \quad (2)$$

但し

$K_i(x_i)$  : 流量調節領域  $i$  の全圧力損失係数である。オリフィス部、燃料部及び反射体部流路の損失係数を含む。

$\Delta P(\mathbf{X})$  : 上・下プレナム間の圧力損失

また、式(1)及び(2)で定まる流量  $w_i$  によって流量調節出口ガス温度  $\Delta\theta_i$  (上部プレナム部温度  $\theta_{inlet}$  は一定であるので、出口温度  $\theta$  と出口入口温度差  $\Delta\theta_i$  とは区別せず、 $\Delta\theta_i$  を出口温度として以後使用する) は次式で与えられる。

$$\Delta\theta_i(\mathbf{X}) = \frac{q_i}{c_p \cdot w_i(\mathbf{X})}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

但し、

$c_p$  : 冷却材の比熱

$q_i$  : 領域  $i$  の軸方向の積分出力

式(1), (2), (3)において、 $w_i$ ,  $\Delta\theta_i$  及び  $\Delta\theta_i$  を独立変数  $\mathbf{X}$  で表示したのは、“領域出口温度を一定とするために、オリフィス開口部をどのように調節すべきか” という問題に注目しているからである。

上記の3つの方程式を解くにあたり、次のように変数変換する。

$$Z_i = \sqrt{K_i(x_i)} \quad (4)$$

圧力損失係数  $K_i(x_i)$  は  $x_i$  の一価関数であるので、 $x_i$  の代わりに  $Z_i$  を独立変数と考えても一般性は失われない。よって、式(1), (2), (3)を書換えせば

$$Z_i^2 w_i(\mathbf{Z}) = 4P(\mathbf{Z}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1')$$

$$\sum_{i=1}^n w_i(\mathbf{Z}) = W_t \quad (2')$$

$$4\theta_i(\mathbf{Z}) = q_i / c_p w_i(\mathbf{Z}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3')$$

となる。以下ではこの方程式に基づいて検討する。

領域流量  $w_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 圧力損失  $4P(\mathbf{Z})$  の  $(n+1)$  個の未知数は式(1')と(2')を連立させることによって次のように求められる。すなわち、

$$w_i(\mathbf{Z}) = W_t / (Z_i \sum_{j=1}^n Z_j^{-1}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$4P(\mathbf{Z}) = (W_t / \sum_{j=1}^n Z_j^{-1})^2 \quad (6)$$

式(5)を式(3')に代入すれば、流量調節領域出口ガス温度が次式のように表わされる。

$$4\theta_i(\mathbf{Z}) = (q_i / c_p W_t) Z_i \sum_{j=1}^n Z_j^{-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

式(5), (6), (7)は  $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$  を与えれば、云いかえれば、各々のオリフィス弁体ストローク  $\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_n)$  を設定すれば、流量、温度、及び上下プレナム間圧力損失が定まることを示している。

### 3.1.1 オリフィス弁体ストロークの初期設定法

まず、実験炉の炉心熱設計における流量調節領域出口ガス温度を一定するオリフィス弁体ストロークの初期設定の方法を考察する。

領域出口温度を一定値  $4\theta_0$  とするということは式(7)において

$$4\theta_i(\mathbf{Z}_0) = 4\theta_0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

となるように  $\mathbf{Z}_0 = (Z_{10}, Z_{20}, \dots, Z_{n0})$  を定めることと同値である。このような  $\mathbf{Z}_0$  が存在するためには、炉心全流量  $W_t$ , 出口温度  $4\theta_0$ , 原子炉出力  $Q_t$  の間に、

$$C_p W_t 4\theta_0 = Q_t \quad (9)$$

の関係が成立つことが必要である。ここで  $Q_t$  は次式で各流量調節領域出力  $q_i$  と関係づけられている。

$$Q_t = \sum_{i=1}^n q_i \quad (10)$$

条件式(9)のもとで、式(8)を満す  $\mathbf{Z}_0$  を簡単な計算によって求めると次の通りである。

$$Z_{10} : Z_{20} : \dots : Z_{n0} = q_1^{-1} : q_2^{-1} : \dots : q_n^{-1} \quad (11)$$

式(11)は領域出口温度を一定にするという条件からは $Z$ の絶対値、すなわち、オリフィス弁体ストロークの絶対位置は確定せず、その相対的比のみが定まるに過ぎないことを示している。これは数学的には式(7)が変数 $(Z_i/Z_j)$ の関係であり、 $Z_i$ を $\alpha Z_i$ に置換えても $\Delta\theta_i$ が不変であることによるが、物理的意味は次のように解釈される。すなわち、領域出口ガス温度を一定値 $\Delta\theta_0$ にするような流量配分はオリフィス開口部を一様に絞ることによっても、逆に開くことによっても、式(11)の比が保存されていれば可能であるということである。この場合、圧力損失 $\Delta P(Z)$ が従属変数となって変化することになり、1次系循環機のヘッドの変化となって現われる。

したがって、 $Z_0$ の絶対値を確定するためには、他にもうひとつの条件が必要である。例えば、上下プレナム間の圧力損失を所与の値とする、あるいは、特定オリフィスの開口部を全開とする等である。 $Z_0$ の絶対値が定まれば式(4)を用いて、対応するオリフィス弁体ストローク $X_0$ を設定することが可能である。すなわち、流量調節領域の出口ガス温度を一定とするように炉心流量を配分することはこのような条件を付加することによって確定する。

### 3.1.2 流量制御の基本式の導出

3.1.1で考察したようにして、オリフィス弁体ストロークは設定され実験炉は運転に入る。しかしながら、運転制御の観点からは、“原子炉運転中の流量調節領域出口のガス測定温度 $\Delta\theta_{im}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) が計画値 $\Delta\theta_0$ と異なっている場合、それを $\Delta\theta_0$ に修正するためには各オリフィス弁体ストロークをどのように調整すべきか”という問題を考察しておく必要がある。

以下では、この問題を条件式(9)の成立のもとで、すなわち、原子炉熱出力は制御され、それに対応する流量が維持されているという条件下で検討するための基本式を導出する。

前述のように、適当な条件を付加して式(11)の比の値を定めて、流量配分が設定されているから、運転初期の状態においては、式(5), (6), (7)により流量、圧力損失及び領域出口温度は次のように表わされる。

$$w_i(Z_0) = W_t / (Z_{i0} \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$\Delta p(Z_0) = (W_t \sqrt{\sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}})^2 \quad (13)$$

$$\Delta\theta_i(Z_0) = (q_i / c_p W_t) (Z_{i0} \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}) = \Delta\theta_0 \quad (14)$$

ここで、 $Z_0 = (Z_{10}, Z_{20}, \dots, Z_{n0})$ は、ある付加条件のもとで炉心流量を配分し、(14)が満足するように設定されたものである。

原子炉の運転に伴ない、流量調節領域出口ガス温度の測定値 $\Delta\theta_{im}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) は計画値 $\Delta\theta_0$ からズレてくることが予想される。実験炉は原子炉出力一定制御を基本としており、冷



却材の流量制御も行われている。

この条件下では、 $\Delta\theta_{im}$ の $\Delta\theta_0$ からのズレは炉内の出力の空間分布（径方径）の変化に基因するものと考えられる。すなわち、

$$\Delta\theta_i(\mathbf{Z}_0, q_i', W_t) = \Delta\theta_{im}, i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

である。ここで、 $q_i'$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )は燃焼に伴ない変化した出力空間分布である。

よって、式15で $q_i'$ を外乱と見做したとき、今、測定されている領域出口ガス温度 $\Delta\theta_{im}$ を計画値 $\Delta\theta_0$ に修正するためのオリフィス調節巾 $\Delta Z_1, \Delta Z_2, \dots, \Delta Z_n$ を決定することが問題である。これは次式のように定式化できる。

$$\Delta\theta_i(\mathbf{Z}_0 + \Delta\mathbf{Z}, q_i', W_t) = \Delta\theta_0, i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

上式は、領域出力 $q_i'$ と流量 $W_t$ との間に $\sum_{i=1}^n q_i' = c_p W_t \Delta\theta_0$ の関係が満されている限りは、

流量調節領域出口の測定ガス温度 $\Delta\theta_{im}$ を計画値 $\Delta\theta_0$ に等しくするように各々のオリフィス開度を調節することは工学的に可能であるとの前提に基づいて書表わしたものである。これは、式16の線形、非線形性に拘らず、 $\Delta\mathbf{Z}$ の近似値を第2項までのテイラー展開式からまず求めて、オリフィス調節を行い、それによる測定ガス温度 $\Delta\theta_{im}'$ が $\Delta\theta_0$ に一致しない場合には、上と同様の手続きによって、第2回目の調節巾 $\Delta\mathbf{Z}'$ を求めてオリフィスを再度調節するということを繰返すことによって、領域出口温度を計画値 $\Delta\theta_0$ に合せることが出来るということを保証している。

よって、オリフィス調節巾 $\Delta\mathbf{Z}$ の近似値を以下のようにして求める。

式16をテイラー展開して、第2項までをとれば次式を得る。

$$\Delta\theta_i(\mathbf{Z}_0, q_i', W_t) + \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial \Delta\theta_i}{\partial Z_j} \right|_{Z_j=Z_{j0}} \cdot \Delta Z_j = \Delta\theta_0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

ここで、式(7)を用いて、 $\frac{\partial \Delta\theta_i}{\partial Z_j}$ を求めれば

$$\frac{\partial \Delta\theta_i}{\partial Z_j} = \begin{cases} \left( \frac{\Delta\theta_i}{\sum_{j=1}^n Z_j^{-1}} \right) \frac{1}{Z_j^2} & (j \neq i) \\ \frac{\Delta\theta_i}{Z_i} - \frac{\Delta\theta_i}{\sum_{j=1}^n Z_j^{-1}} \cdot \frac{1}{Z_j^2} & (j = i) \end{cases} \quad (18)$$

となる。式18を式17に代入して整理すれば次式を得る。

$$\Delta\theta_i(\mathbf{Z}_0, q_i', W_t) + \Delta\theta_i(\mathbf{Z}_0, q_i', W_t) \left( \frac{\Delta Z_i}{Z_{i0}} \right)$$

$$-\frac{\Delta\theta_i(Z_0, q_i', W_t)}{\left(\sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}\right)} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = \Delta\theta_0 \quad (19)$$

( $i = 1, 2, \dots, n$ )

式(15)を用いれば、式(19)は

$$\Delta\theta_{im} + \frac{\Delta\theta_{im}}{Z_{io}} \cdot \Delta Z_i - \frac{\Delta\theta_{im}}{\sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}} \sum_{j=1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = \Delta\theta_0$$

となる。ゆえに、

$$\frac{\Delta Z_i}{Z_{io}} - \left(\sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}\right)^{-1} \sum_{j=1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = \left(\frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{im}} - 1\right), \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

となる。

式(20)は原子炉の出力空間分布の燃焼に伴う変動によって流量調節領域出口温度が計画値  $\Delta\theta_0$  からズレた場合、オリフィス開度を  $\Delta Z = (\Delta Z_1, \Delta Z_2, \dots, \Delta Z_n)$  だけ調節してそのズレを修正するとき、 $\Delta Z$  が満足しなければならない基本式である。したがって、前述の種々の付加条件のもとで、式(20)を  $\Delta Z = (\Delta Z_1, \Delta Z_2, \dots, \Delta Z_n)$  について解けば、その付加条件に対応したオリフィス開度調節方式が領域出口ガス温度の測定値  $\Delta\theta_{im}$  にもとづいて求められることになる。

以下ではいくつかの典型的な付加条件を与えて、それに応じたオリフィス開度調節方式を求め

### 3.1.3 制御方式の検討

#### (1) 炉心部圧力損失の初期設定値を保存する条件下でのオリフィス開度調節方式

この付加条件は、初期設定  $Z_0$  に  $\Delta Z$  の調節を施こして、出口ガス温度の測定値  $\Delta\theta_{im}$  を再び計画値  $\Delta\theta_0$  としたとき、調節後の炉心部圧力損失が以前のそれに等しいようにするということであり、条件式は次式で表わされる。

$$\Delta p(Z_0 + \Delta Z) = \Delta p(Z_0) \quad (21)$$

式(6)と(13)を用いれば式(21)は

$$\sum_{j=1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = 0 \quad (22)$$

となる。本式と式(20)を連立させて、 $\Delta Z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) を求めれば

$$\Delta Z_i = Z_{io} \left( \frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{im}} - 1 \right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

式(23)の適用限界を調べるため、それを式(22)に代入すると、

$$\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{Z_{j0}} \right) \left( \frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{im}} - 1 \right) = 0 \quad (24)$$

が成り立たなければならない。逆に云えば、 $\Delta\theta_{im}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) が本式を満すならば、式23によって定められる調節弁  $\Delta Z_i$  を  $Z_{i0}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) に加えて、領域出口温度を計画値に修正することが可能であることになる。すなわち、式24が23の適用限界である。

測定値  $\Delta\theta_{im}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) は一般に測定誤差を含むために、それらが式24を満すか否かを判定することに困難が伴う。このため、式23の適用限界を式24で記述するのは実用的でない。そこで、式24式と同等で、より実用的な条件を見出すことは意義がある。次に、そのような条件を求める。

式11)により

$$Z_{j0} = \left( \frac{q_i}{q_j} \right) Z_{i0} \quad 25$$

である。今、出力の空間分布  $q_j'$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) は

$$q_j' = q_j + \Delta q_j \quad 26$$

と表わされ、変分  $\Delta q_j$  は  $q_j$  に比して微小であると仮定する。実際、炉心設計及び温度計装設計では温度測定の誤差は  $\pm 30^\circ\text{C}$  程度としており、<sup>8)</sup> これは領域出力にして平均5%に相当していると考えられる。従って、 $\Delta q$  として領域出力がこの値以上に変化すれば、領域出口温度計装によって出力分布の変動を識別できることになる。以下では  $\Delta q$  として5~10%程度の変分量と考えることとする。

ここで

$$q_j = c_p w_j (Z_0) \Delta\theta_0$$

$$q_j' = c_p w_j (Z_0) \Delta\theta_{jm}$$

であるから、これより次式を得る。

$$\frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{jm}} = \frac{q_j}{q_j'} \quad 27$$

式26と式27から、 $\Delta q_j$  が微小変動であることに注意して

$$\frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{jm}} = 1 - \frac{\Delta q_j}{q_j} \quad 28$$

を得る。式25と式28を式24に代入すると、次式を得る。

$$\sum_{j=1}^n \Delta q_j = 0 \quad 29$$

これは、原子炉の全出力が一定であることを意味するもので、式24の適用限界の記述としては式24よりも実用的である。

以上の結果をまとめて次のように述べることができる。

原子炉出力が一定に制御されているならば、炉内の空間出力分布の変化による流量調節領域出口ガス温度の計画値からのズレは、式23で与えられるオリフィス調節を行うことによって一様に計画値に修正することが可能である。このとき、オリフィス開口部の調節前後で圧力損失

は不変である。

調節後の領域流量は以下のように変わる。

$$w_i' = w_i(Z_0) \left( \frac{\Delta\theta_{im}}{\Delta\theta_0} \right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

ここで、 $w_i(Z_0)$  は式(12)で与えられている。

(2) あるひとつのオリフィスの初期開度設定固定の条件下における、他の  $(n-1)$  個のオリフィス開度調節方式

第1番目のオリフィスを初期開度の設定値が固定される特性のオリフィスとみなして検討しても一般性は失われない。一般に原子炉の炉心では中央で最高出力密度の部分となり、オリフィスは中心の領域で全開状態に設定される。燃焼に伴って、最高出力密度の領域のオリフィス開度の再設定をするにあたり、その誤操作に起因する流路閉塞などを回避するという安全性の観点からみれば、本条件下でのオリフィス開度調節方式を考察しておくことは意味がある。

さて、1番目のオリフィスを開度調節をしないものとすれば  $\Delta Z_1 = 0$  である。したがって、残りの  $\Delta Z_2, \Delta Z_3, \dots, \Delta Z_n$  は基本式(20)から、次の連立方程式を満足しなければならない。

$$\left\{ \begin{array}{l} - \left( \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right) \sum_{j=1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = \frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{im}} - 1 \\ \left( \frac{1}{Z_{i0}} \right) \Delta Z_i - \left( \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right)^{-1} \sum_{j=2}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = \frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{im}} - 1 \end{array} \right. \quad (31)$$

( $i = 2, 3, \dots, n$ )

式(31)を  $\Delta Z_i$  ( $i = 2, 3, \dots, n$ ) について解くと、次のように求まる。

$$\Delta Z_i = Z_{i0} \Delta\theta_0 \left( \frac{1}{\Delta\theta_{im}} - \frac{1}{\Delta\theta_{im}} \right) \quad (32)$$

( $i = 1, 2, \dots, n$ )

これが与えられた条件下での求めるオリフィス開度調節方式の解であるが、この解の適用限界を以下に考察する。式(32)を式(31)の第1式に代入して整理すると次式が得られる。

$$\left( \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right)^{-1} \sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{Z_{j0}} \right) \left( \frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{jm}} \right) = 1 \quad (32')$$

式(12)によれば、

$$\frac{w_{i0}}{w_i} = \left( \frac{1}{Z_{i0} \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}} \right)$$

となるから、これを式32' に代入すれば、

$$\sum_{j=1}^n \left( \frac{w_{j0}}{\Delta\theta_{jm}} \right) \Delta\theta_0 = W_t \quad (33)$$

となる。ここで  $w_j(\mathbf{Z}_0)$  を  $w_{j0}$  と表記してある。

次に、 $q_i = c_p \Delta\theta_0 w_{i0}$ 、及び  $q_i' = c_p \Delta\theta_{im} w_{i0}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) であるから、式33は次式のように変形される。

$$\sum_{j=1}^n \left( \frac{q_j}{q_j'} \right) w_{j0} = W_t \quad (34)$$

式26のように  $q_j'$  を  $q_j$  から  $\Delta q_j$  の微小量の変分と考えれば、式34はさらに次式のようになる。

$$\sum_{j=1}^n \left( 1 - \frac{\Delta q_j}{q_{j0}} \right) w_{j0} = W_t$$

ゆえに

$$\sum_{j=1}^n \left( \frac{\Delta q_j}{q_{j0}} \right) w_{j0} = 0$$

$$\therefore \sum_{j=1}^n \frac{\Delta q_j}{c_p \Delta\theta_0} = 0$$

すなわち

$$\sum_{j=1}^n \Delta q_j = 0 \quad (35)$$

よって、再び原子炉の全出力が一定に制御されていれば、燃焼に伴って出力の空間分布の変化による流量調節領域の出口ガス温度の計画値からのズレは式32によって出口ガス温度の測定値から修正されうるとの結論が得られた。

このような流量調節方式は前述の(1)と異なり、炉心の上・下プレナム間の圧力損失は次のように変わる。また、各領域の流量も次式で与えられる。

$$\begin{cases} \Delta p' = \Delta p(\mathbf{Z}_0) \left\{ 1 + 2 \left( \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right)^{-1} \Delta\theta_0 \sum_{j=1}^n \frac{1}{Z_{j0}} \left( \frac{1}{\Delta\theta_{jm}} - \frac{1}{\Delta\theta_{1m}} \right) \right\} \\ w_i' = w_i(\mathbf{Z}_0) \left\{ 1 + \left( \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right)^{-1} \sum_{j=1}^n \frac{\Delta\theta_0}{Z_{j0}} \left( \frac{1}{\Delta\theta_{jm}} - \frac{1}{\Delta\theta_{1m}} \right) - \Delta\theta_0 \left( \frac{1}{\Delta\theta_{im}} - \frac{1}{\Delta\theta_{1m}} \right) \right\} \end{cases} \quad (36)$$

( $i = 1, 2, \dots, n$ )

(3) 領域出口ガス温度の測定値の等しい領域のオリフィス開度初期設定固定の条件下におけるオリフィス開度調節方式

流量調節領域出口ガス温度の計測によって、k 個の領域で等しい測定値を示したとき、これらの領域のオリフィスは固定して、他の残りのオリフィス開度調節によって、出口温度を一定値 ( $\Delta\theta_0$ ) に一様に揃える方式の検討である。これはオリフィス装置のバンク操作の可能性及び実現性に関するものであり、操作オリフィス個数を減少させる観点から有用な方式を提示することになる。

等しい測定値を示す k 個の領域を  $i = 1, 2, \dots, k$  としても一般性は失われない。 $Z_i = 0$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) として他の残りの  $(n-k)$  個のオリフィスの調節巾  $\Delta Z_{k+1}, \Delta Z_{k+2}, \dots, \Delta Z_n$  は基本式20から、次の連立方程式を満足しなければならない。

$$\left\{ \begin{array}{l} -\left(\sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}\right)^{-1} \sum_{j=k+1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = \frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_m} - 1 \\ \left(\frac{1}{Z_{i0}}\right) \Delta Z_i - \left(\sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}\right)^{-1} \sum_{j=k+1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = \frac{\Delta\theta_0}{\Delta\theta_{im}} - 1, \quad i = k+1, k+2, \dots, n \end{array} \right. \quad (37)$$

ここで  $\Delta\theta_m$  は k 個の領域で得られる等測定値である。

式37の連立方程式を  $(n-k)$  個の未知数  $\Delta Z_{k+1}, \Delta Z_{k+2}, \dots, \Delta Z_n$  について解けば次のようになる。

$$\Delta Z_i = Z_{i0} \Delta\theta_0 \left( \frac{1}{\Delta\theta_{im}} - \frac{1}{\Delta\theta_m} \right) \quad (38)$$

$$i = k+1, k+2, \dots, n$$

式38は  $i = 1, 2, \dots, k$  に対しても成立っている。

式38で与えられる制御方式の適用限界は式32のそれと全く同様にして検討できる。式38の適用上の制限は式32のそれと同じく、原子炉全出力が一定に制御されていることである。

上述の三つの制御方式は原子炉の出力及び炉心流量が一定のもとで、出力の空間分布の変化により生じた流量調節領域の出口ガス温度の測定によって領域出口温度を一定にする方法を与えている。

### 3.2 炉心軸方向の流量分布を考慮した領域出口ガス温度一定制御方式

前節では、冷却材の流れ方向の長さ (炉心の軸方向の長さ) の無いものとして炉心をモデル化し、平面炉心モデルと称した。本節では、炉心の軸方向の長さを考慮し、流量も軸方向に分布する場合を Fig. 4 に基づいて考察する。

炉心内の流量配分はオリフィス弁体ストロークの初期設定  $X_0$  に対して次の2つの式で決定される。

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{orif}}(x_{i0}) w_i^2(\mathbf{X}_0) + \sum_{\ell=1}^m K_{i\ell} w_{i\ell}^2 = 4p(\mathbf{X}_0) \\ \sum_{i=1}^n w_{i\ell}(\mathbf{X}_0) = W_t, \quad (\ell = 0, 1, 2, \dots, m) \end{array} \right. \quad (39)$$

ここで、第1式の  $w_i(\mathbf{X}_0)$  は  $i$  番目のオリフィス部の流入流量であり、 $w_{i\ell}$  は第  $i$  番目の流量調節領域の軸方向第  $\ell$  番目ブロックの流量である。 $K_{\text{orif}}(x_i)$  はオリフィス装置の圧力損失係数であり、 $K_{i\ell}$  は第  $\ell$  番目ブロックの全損失係数である。式39の第2式は流量の保存式である。ここでは  $w_{i\ell}(\mathbf{X}_0)$  はオリフィス部の流入流量である。

式39の第1式を書換えて

$$\left\{ K_{\text{orif}}(x_{i0}) + \sum_{\ell=1}^m K_{i\ell} \alpha_{i\ell}^2 \right\} w_i^2(\mathbf{X}_0) = 4p(\mathbf{X}_0) \quad (40)$$

となる。ここで、 $w_{i\ell} = \alpha_{i\ell} w_i$  とした。すなわち、オリフィス部入口流量  $w_i(\mathbf{X}_0)$  で各ブロック流量  $w_{i\ell}(\mathbf{X}_0)$  を規格化した。この係数  $\alpha_{i\ell}$  ( $i = 1, 2, \dots, n, \ell = 1, 2, \dots, m$ ) は炉心内のクロス・フロー、リーク・フローを考慮した炉心内流量分布であり、炉心熱流体力設計の設計結果として与えられるものである。この  $\alpha_{i\ell}$  は2.2節の仮定によって流量の微小調節によっては不変であるとして以下では扱われる。

式40は

$$K_i(\mathbf{X}_0) = K_{\text{orif}}(x_{i0}) + \sum_{\ell=1}^m K_{i\ell} \alpha_{i\ell}^2 \quad (41)$$

と置換えることによって、

$$\begin{aligned} K_i(\mathbf{X}_0) w_i^2(\mathbf{X}_0) &= 4p(\mathbf{X}_0), \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n w_{i\ell}(\mathbf{X}_0) &= W_t \quad (\ell = 0, 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (42)$$

と書き表わせる。式42の第1式は形式的には前述の平面炉心の流量配分式と同型である。式42の未知数は  $w_i(\mathbf{X}_0)$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) と  $4p(\mathbf{X}_0)$  の総計  $(n+1)$  である。式42の第2式のうち  $\ell = 0$  と第1式を連立させて、これらの未知数について解けば、3.1節と同様に、次式を得る。

$$w_i(\mathbf{Z}_0) = W_t / \left( Z_{i0} \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (43)$$

$$4p(\mathbf{Z}_0) = \left( W_t / \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right)^2 \quad (44)$$

ここで、

$$Z_{i0} = \sqrt{K_i(\mathbf{X}_0)}$$

$$= \sqrt{K_{\text{orif}}(x_{i0}) + \sum_{\ell=1}^m K_{i\ell} \alpha_{i\ell}^2} \quad (45)$$

と置換えた。以後の検討において、 $Z_i$ と各オリフィス弁体ストローク  $x_i$  とは特別に区別の必要がある場合を除き同義に用いるものとする。

式43は式42の第2式 ( $\ell = 1, 2, \dots, m$ ) に対しても成り立たなければならない。これは、初期設定値  $Z_0$  と係数  $\alpha_{i\ell}$  との関係式を与える。式43を式42の第2式に代入すると、

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{i\ell} \left( \frac{W_t}{Z_{i0} \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1}} \right) = W_t$$

すなわち

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{1 - \alpha_{i\ell}}{Z_{i0}} \right) = 0 \quad (\ell = 1, 2, \dots, m) \quad (46)$$

となる。

よって、初期設定値  $Z_{i0}$  と係数  $\alpha_{i\ell}$  は式46を満足するように与えられていなければならない。

さて、炉心の軸方向の流量分布を考慮する場合、2.2節の仮定(3)及び(5)を用いれば、流量調節領域出口ガス温度は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta\theta_i(Z_0) &= \sum_{\ell=1}^m (q_{i\ell} / c_p w_{i\ell}(Z_0)) \\ &= \frac{\sum_{\ell=1}^m \left( \frac{q_{i\ell}}{\alpha_{i\ell}} \right)}{c_p w_i(Z_0)} \end{aligned}$$

ここで、 $q_{i\ell}$  は、第  $i$  番目の流量調節領域の第  $\ell$  セグメントにおける出力を表わす。よって、式43を用いて、

$$\Delta\theta_i(Z_0) = (Q_i / c_p W_t) \left( Z_{i0} \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right) \quad (47)$$

但し、

$$Q_i = \sum_{\ell=1}^m (q_{i\ell} / \alpha_{i\ell}), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式43、44及び47が、オリフィス開度の初期設定  $Z_0$  に対する炉心軸方向の流量分布を考慮した場合の流量、圧力損失及び出口ガス温度である。この3式は平面炉心モデルで得られた対応する物理量の表式(式12、13、14)と同一形式である。したがって、原子炉の出力空間分布の燃焼に伴ない変動することによって領域出口温度が計画値からのズレた場合、それを修正する微調整巾  $\Delta Z$  が満足すべき基本式は、炉心の軸方向の流量分布を考慮しても、平面炉心モデルの式20と



全く同様に導から同一の形式で与えられる。すなわち

$$\frac{\Delta Z_i}{Z_{i0}} - \left( \sum_{j=1}^n Z_{j0}^{-1} \right) \sum_{j=1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{j0}^2} = \left( \frac{\Delta \theta_o}{\Delta \theta_{im}} \right) - 1 \quad (20')$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

である。式20' と式20の唯一の相違点は式20'の  $Z_{i0}$  が炉心軸方向の流量分布を表わす係数  $\alpha_{i\ell}$  を含んでいる点である (式45を参照のこと)。しかし、2.2節のモデル化の仮定のもとでは、 $\alpha_{i\ell}$  は所与の定数として一定であるため、式20'は式20と同一のものとして扱うことが可能である。

よって、炉心の軸方向の流量分布を考慮しても、原子炉出力が一定に制御され ( $\sum_{i=1}^n \Delta Q_i = 0$ )、炉心流量も一定に制御されていれば、3.1.3節のような適当な付加条件を与えて、式20'を解くことによって調整巾  $\Delta Z$  が領域出口ガス温度測定値  $\Delta \theta_{im}$  から決定することができる。

3章を終るにあたり、これまでの検討で得られた圧力損失係数の平方根  $Z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) の調節巾  $\Delta Z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) を各オリフィスの弁体ストローク  $x_i$  で記述すれば、式(4)あるいは(45)を用いて次のように表わせる。

$$\begin{aligned} \Delta Z_i &= \left. \frac{dZ_i}{dx_i} \right|_{x_{i0}} \Delta x_i \\ &= \frac{1}{2} K_i^{-\frac{1}{2}}(x_{i0}) \left( \frac{dK(x_i)}{dx_i} \right)_{x_{i0}} \Delta x_i \end{aligned}$$

ゆえに

$$\Delta x_i = 2 \sqrt{K_i(x_{i0})} \cdot \Delta Z_i / \left( \frac{dK(x_i)}{dx_i} \right)_{x_{i0}} \quad (48)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

一般に  $K(x_i)$  はオリフィス弁体ストロークを独立変数とする圧力損失係数であり、既知関数である。 $\Delta Z_i$  は式23あるいは式32あるいは式38等であり、オリフィス弁体ストロークの微調整巾  $\Delta x_i$  が式(48)から領域出口温度の測定値  $\Delta \theta_{im}$  に基づいて決定されることになる。

## 4. 結 言

冒頭に述べたように、多目的高温ガス実験炉の炉心熱設計では、燃料最高温度を低下させるひとつの手段として流量調節領域出口における冷却材ガス温度を領域間で等しくするような流量配分方式（流量調節領域出口ガス温度一定方式）を基本としている。領域出口温度は燃焼の進行による原子炉出口の空間分布の変化によって影響を受け、計画値からはずれてくることが予想される。このため、各領域出口ガス温度を測定し、計画値とのズレを監視して、適当な燃焼ステップにおいてオリフィス装置の調節によって、そのズレを修正する必要が生ずる。前章では、領域出口温度の測定値に基づく、オリフィス装置の微調整の方法、すなわち、オリフィス装置の制御アルゴリズムの検討とそのアルゴリズムの適用条件を明らかとした。

検討の結果、得られた主要な結論は要約以下の通りである。

- (1) 炉心軸方向の長さを無視した平面炉心モデルと長さを考慮し、流量の軸方向分布を扱う炉心モデルのいずれに対しても、オリフィス調整巾  $\Delta Z$  が満足すべき基本式は数学的に同一形式となる。
- (2) その基本式は

$$\frac{\Delta Z_i}{Z_{io}} - \left( \sum_{j=1}^n Z_{jo}^{-1} \right)^{-1} \sum_{j=1}^n \frac{\Delta Z_j}{Z_{jo}^2} = \left( \frac{\Delta \theta_o}{\Delta \theta_{im}} \right) - 1$$

(  $i = 1, 2, \dots, n$  )

である。

- (3) 上記の基本式を種々の付加条件のもとで解けば、その条件にあった調節巾  $\Delta Z$  を領域出口温度の測定値から定められる。
- (4) 炉心圧力損失の不変あるいは特定オリフィス開度一定の条件のもとで定めた  $\Delta Z$  は、原子炉出力が一定に制御され、流量も一定に制御されている状態に適用できる。
- (5)  $n$  個のオリフィスを適当なバンクに分けて操作することによる領域出口温度を一定に制御することが可能である。

尚、ここで得られた結論は詳細設計 (I) の炉心に基づいたものであるが、実験炉設計の進展に伴う炉心の諸元等の変更に対しても、若干の拡張を行うことにより十分適用可能であると思われる。

## 謝 辞

動力炉開発・安全性研究管理部の原昌雄部長は本研究の必要性を示唆された。多目的高温ガス実験炉設計室長、安野武彦氏（現次長）及び原子炉制御研究室長、篠原慶邦氏には筆者らが本研究を遂行するにあたっての便宜を図っていただいた。これらの方々に深く感謝いたします。

また、多目的高温ガス実験炉設計室の鈴木邦彦氏並びに佐藤貞夫氏には有益な討論とコメントをいただいた。深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 青地他, 「多目的高温ガス実験炉第1次概念設計」, JAERI-M 6845, (1977)
- 2) 安野他, 「多目的高温ガス実験炉・Mark-III 炉心の検討」 JAERI-M 8399 (1979)
- 3) Docket-50267, Fort St. Vrain Nuclear Generating Station, Final Safety Analysis Report
- 4) W.B. Hall, "Reactor Heat Transfer", Temple Press Limited
- 5) 鈴木(邦), 宮本, 「ブロック状炉心の熱流動解析コード" CROSS-2」, JAERI-M 5368 (1973)
- 6) 佐藤, 宮本, 「多並列チャンネルモデルによる高温ガス炉炉心の非定常熱流動解析コード: TRANTHAC-1」, JAERI-M 8972 (1980)
- 7) D.D. Paul, "FLODIS : A Computer Model to Determine the Flow Distribution and Thermal Response of the Fort St. Vrain Reactor", ORNL/TM-5365 (1976)
- 8) 多目的高温ガス実験炉設計室他「多目的高温ガス実験炉の原子炉計装に関する検討-核計装と炉心出口温度計装について」, 未公開資料 (1983年9月)

## 謝 辞

動力炉開発・安全性研究管理部の原昌雄部長は本研究の必要性を示唆された。多目的高温ガス実験炉設計室長、安野武彦氏（現次長）及び原子炉制御研究室長、篠原慶邦氏には筆者らが本研究を遂行するにあたっての便宜を図っていただいた。これらの方々に深く感謝いたします。

また、多目的高温ガス実験炉設計室の鈴木邦彦氏並びに佐藤貞夫氏には有益な討論とコメントをいただいた。深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 青地他, 「多目的高温ガス実験炉第1次概念設計」, JAERI-M 6845, (1977)
- 2) 安野他, 「多目的高温ガス実験炉・Mark-III 炉心の検討」 JAERI-M 8399 (1979)
- 3) Docket-50267, Fort St. Vrain Nuclear Generating Station, Final Safety Analysis Report
- 4) W.B. Hall, "Reactor Heat Transfer", Temple Press Limited
- 5) 鈴木(邦), 宮本, 「ブロック状炉心の熱流動解析コード" CROSS-2」, JAERI-M 5368 (1973)
- 6) 佐藤, 宮本, 「多並列チャンネルモデルによる高温ガス炉炉心の非定常熱流動解析コード: TRANTHAC-1」, JAERI-M 8972 (1980)
- 7) D.D. Paul, "FLODIS : A Computer Model to Determine the Flow Distribution and Thermal Response of the Fort St. Vrain Reactor", ORNL/TM-5365 (1976)
- 8) 多目的高温ガス実験炉設計室他「多目的高温ガス実験炉の原子炉計装に関する検討-核計装と炉心出口温度計装について」, 未公開資料 (1983年9月)