

JAERI-M

84-119

JRR-3改造炉用炉心流動実験及び
炉心流動特性評価

1984年6月

数土 幸夫・井川 博雅・篠津 和夫*
安藤 弘栄

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

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。
入手の問合せは、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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

JRR-3 改造炉用炉心流動実験及び炉心流動特性評価

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部
数土幸夫・井川博雅・篠津和夫・^{*}安藤弘栄

(1984年6月1日受理)

本報は、熱出力 20 MW の JRR-3 改造炉の炉心熱水力設計・解析の基礎となる炉心流動特性を、実規模のモックアップ装置を用いて調べた実験結果と、その結果を基にし JRR-3 改造炉の定常運転時の炉心流量配分を含む流動特性を確定した結果について述べたものである。

定常運転時の炉心流量配分は、モックアップ装置と JRR-3 改造炉とで若干異なる寸法の効果を、実験結果を基に計算で補正し確定した。

* 外来研究員：日本エナジー

Core Hydrodynamic Tests and Determination of
Core Flow Characteristics of JRR-3

Yukio SUDO, Hiromasa IKAWA, Kazuo SHINOZU^{*}
and Hiroei ANDO

Department of Research Reactor Operation
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June 1, 1984)

With a full scale mock-up test facility, core hydrodynamic characteristics were investigated of the research reactor, JRR-3 which is to be renewed at 20 MWt. The understanding of core hydrodynamic characteristics is essential to the design and analysis of core thermo-hydraulics.

This report presents the core hydrodynamic test results and the characteristics of the core flow of the JRR-3 which was determined based on the hydrodynamic tests. Core flow characteristics including the flow distribution in the core at the normal operation was determined, taking into account some differences in configurations and dimensions between the mock-up test facility and the JRR-3 to be renewed.

Keywords: Research Reactor, JRR-3, Core Hydrodynamic Test, Mock-up Test, Core Flow Distribution, Thermohydraulic Design, Normal Operation Condition

* On leave from NIPPON Energy Inc.

目 次

1. 序	1
2. 炉心流動モックアップ実験装置	2
2.1 実験装置の構成	2
2.2 主要機器の寸法諸元	2
2.3 計測項目、計測装置及び計測位置	5
2.4 実験方法及び計測方法	6
3. 炉心流速分布測定結果とその検討	17
3.1 流速分布測定方法	17
3.2 流速分布測定結果	17
3.3 測定結果の検討	20
4. 燃料板表面摩擦損失係数測定及びフォロア型燃料要素アダプタ形状の改善	46
4.1 燃料板表面摩擦損失係数測定	46
4.2 フォロア型燃料要素アダプタ形状の改善	47
5. 炉心流動特性評価	54
5.1 炉心流量配分についてのモックアップ実験結果と計算値との比較	54
5.2 実炉における流動特性評価	77
5.3 結果に対する考察	106
6. 結　　言	108
謝　　辞	108
参考文献	108

Contents

1. Introduction	1
2. Description of Mock-up Test Facility	2
2.1 Schematic of test facility	2
2.2 Dimensions of major components	2
2.3 Instrumentation	5
2.4 Test procedures and measurement methods	6
3. Results and Discussions of Measured Core Velocity Distribution	17
3.1 Measurement of core velocity	17
3.2 Measured results of core velocity distribution	17
3.3 Discussions of measured results	20
4. Measurement of Friction Loss Factor of Fuel Plate and Reduction of Pressure Loss at Follower-type Fuel Element	46
4.1 Measurement of friction loss factor of fuel plate	46
4.2 Reduction of pressure loss at follower-type fuel element ..	47
5. Determination of Core Flow Characteristics of JRR-3	54
5.1 Comparison between the calculated and measured core flow distributions	54
5.2 Determination of core flow characteristics of JRR-3	77
5.3 Discussions of the results	106
6. Concluding Remarks	108
Acknowledgement	108
References	108

1. 序

JRR-3 改造炉は、定常状態において標準型燃料要素内の流速が約 6.2 m/s ，炉心全流量が約 $2400 \text{ m}^3/\text{h}$ の下向流で熱出力約 20 MW を冷却する研究炉である。JRR-3 改造炉の炉心は、長さ 750 mm の燃料板で構成される標準型燃料要素 26 体と、ハフニウム中性子吸収体とその下部に付随しているフォロア型燃料要素とから成る 6 体の制御棒、及び 5 体の垂直照射筒要素とから成っており、この炉心をベリリウム反射体が取囲む。この反射体の外側には、環状の重水タンクが設けられる構造となっている。なおベリリウム反射体には垂直照射孔がある。燃料要素、照射筒要素、ベリリウム反射体はその発熱のため冷却が必要であり、冷却のため適切な炉心内の流量配分が必要である。又、炉心流量配分特性の把握は炉心熱水力設計・解析の基礎でもあり重要である。

そこで本研究では、JRR-3 改造炉の流量配分特性を求めるために、

①出来るだけ JRR-3 改造炉の寸法に近いモックアップ実験装置を用いて、実験的に流量配分特性を調べ、

②モックアップ実験結果を基にして、JRR-3 改造炉とモックアップ実験装置との寸法・形状が異なる点を計算で補正し、JRR-3 改造炉での流量配分特性を確定した。又、炉心内の圧力損失を評価した。

本報は、上記の結果について述べたものである。第 2 章ではモックアップ実験装置の概要を、第 3 章ではモックアップ実験装置を用いて測定した炉心流量配分の結果を示す。第 4 章では、JRR-3 改造炉とモックアップ実験装置との寸法の違う効果を補正し、JRR-3 改造炉の流量配分特性を得るために必要な情報である燃料板摩擦損失係数等を、別途実験で求めた結果について述べる。第 5 章では、第 3、4 章で得られた結果に基づいて得た JRR-3 改造炉の流量配分特性について述べる。第 6 章は結言である。

2. 炉心流動モックアップ実験装置

2.1 実験装置の構成

実験装置は、(1)模擬炉心、(2)模擬原子炉構造物、(3)一次冷却系を模擬した水循環設備、及び(4)測定装置から構成されている。この内、模擬炉心及び模擬原子炉構造物は、コンクリート製の模擬原子炉プール内に設置されており、水循環設備の大部分は模擬原子炉プールの地下に設置されている。

模擬炉心は、26体の標準型燃料要素、6体のフォロア型燃料要素付の制御棒、5体の照射筒要素の計37要素と、この37要素を取り囲む4分割されている反射体要素とから成っている。

模擬原子炉構造物は、反射体要素を取り囲む円環状の重水タンク、模擬炉心を正しい位置に固定・支持するための格子板、格子板支持胴、反射体押え、さらには模擬炉心下部に位置する空間であるプレナム及び制御棒案内管等から成る。

一次冷却系を模擬した水循環設備は、模擬炉心下部に位置するプレナムからポンプで吸引し、模擬原子炉プールに戻す模擬一次冷却配管と、循環用ポンプ、流量調節弁、フィルター、クーラー等から成っている。

測定装置は、模擬一次冷却配管に取付けられているオリフィス流量計、水温測定用温度計、圧力計及び炉心内の流速測定用のピトー管式の流速測定装置、流動損失を測定するための差圧計等から成る。

実験装置全体の構成を図2.1に示す。

2.2 主要機器の寸法諸元

以下に主要機器の構造、寸法諸元を示す。

2.2.1 模擬炉心

(1) 標準型燃料要素

* 数量：26体、この内、2体は流速測定用のピトー管各9本を装備している。

* 材質：アルミニウム合金。

* 寸法：長さ 1153.5 mm、外径 77.04 mm[□]

燃料板 長さ	770 mm ,
厚さ	1.27 mm ,
ウォータキャップ	2.35 mm ,
枚数	21 枚。

(2) 制御棒

* 数量：6体 この内、1体は流速測定用ピトー管8本を装備している。

フォロア型燃料要素	長さ 890 mm 外径 63.64 mm
燃料板	長さ 782 mm 厚さ 1.27 mm
	ウォーターギャップ 2.40 mm
	枚数 17 枚
材質	アルミニウム合金
模擬吸収体	長さ 790 mm 外径 63.64 mm 内厚 5 mm
	ガイドローラ 4 個付
材質	ステンレス鋼
アダプタ	長さ 430 mm 外径 63.64 mm 角錐型水抜孔 12 mm^ϕ 28 個付。
材質	アルミニウム合金

(3) 照射筒要素 (A 及び B の 2 種)

* 数量: A 型 (67 mm^ϕ リグ照射孔) 3 体
B 型 (38 mm^ϕ リグ照射孔) 3 体

* 材質: アルミニウム合金

* 寸法: 外径 74.5 mm^ϕ
長さ 1100 mm

挿入するプラグは $961.5 \text{ mm} \times 62.0 \text{ mm}^\phi$ 3 体及び $961.5 \text{ mm} \times 35.0 \text{ mm}^\phi$ 6 体が用意されている。

(4) 反射体要素 (A, B, C の 3 種)

* 数量: A, B, C 各 4 体

* 材質: A 5052

* 形状: 三日月形 (A) 及び扇形 (B 及び C)

* 寸法: 高さ 1507 mm, B 及び C は通水孔 14 mm^ϕ 2 個及びプラグ挿入孔 $45 \text{ mm}^\phi \times 2$ 個を各々有する。プラグの寸法は $1422 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}^\phi$ である。

2.2.2 模擬原子炉構造物

(1) 重水タンク

* 数量: 1 体

* 寸法: 高さ 1600 mm,
外径 2000 mm^ϕ , 内径 600 mm^ϕ

* 形状: 環状タンク

2 重管式の内径 60 mm^ϕ , 外径 80 mm^ϕ , 長さ 2045 mm の垂直リグ照射筒が 1 体,

重水タンクに挿入されている。

(2) 格子板 (A 及び B)

* 数量：各 1 個

* 材質：A 6061-T6

* 寸法： $594 \text{ mm}^\phi \times 120 \text{ mm}^t$ (A), $700 \text{ mm}^\phi \times 80 \text{ t}$ (B)

* 形状：矩形孔付円形板

(3) 格子板支持胴

* 数量：1 個

* 材質：A 5052

* 寸法：高さ 1400 mm

(4) プレナム

* 数量：1 個

* 材質：炭素鋼（防錆塗装付）

* 寸法：高さ 約 1500 mm

上フランジ $2200 \text{ mm}^\phi \times 1980 \text{ mm}^\phi$

下フランジ $2200 \text{ mm}^\phi \times 690 \text{ mm}^\phi$

胴外径 2000 mm^ϕ

600 A, 300 A, 150 A JIS 5K フランジ各 1 個及び 50 A のリグ照射孔冷却管 1 個
が備わっている。

(5) 制御棒案内管

* 数量：6 体

* 材質：A 6063

* 寸法：長さ 3500 mm, 外径 76.2 mm

* 形状：角パイプ

(6) 下部プラグ

* 数量：1 個

* 材質：炭素鋼（防錆塗装付）

* 寸法：高さ 1610 mm

板厚 7 mm^t

上フランジ $900 \text{ mm}^\phi \times 30 \text{ mm}^\phi$

下フランジ $560 \text{ mm}^\phi \times 50 \text{ mm}^t \times 2$ 個

* 形状：円筒形、内部に制御棒 2 本が組込んである。

その他、実験用架台があり、計測、機器のハンドリング等に供するため模擬原子炉プール内
に設けられている。

2.2.3 水循環設備

(1) 循環ポンプ 2 台

* 形式：豎形両吸込うず巻形

* 容量：950 m³/h, * 揚程：21 m,
 * モータ：3相, 50 Hz, 400 V, 75 kW, 4極。

(2) 補助ポンプ 1台

* 形式：横形片吸込うず巻形
 * 容量：20 m³/h, * 揚程：10 m,
 * モータ：3相, 50 Hz, 200 V, 1.5 kW, 2極。

(3) 热交換器 1台

* 形式：プレートタイプ
 * 容量：100 kW
 * 材質：プレート, SUS 304

(4) 流量調整弁 1台

* 形式：電動バタフライ弁（遠隔操作式）
 * 口径：500 A, 5 K
 * 電動機：3相, 50 Hz, 200 V, 0.75 kW
 * 材質：本体－FC 25, 弁体－FCD 45

(5) 主たる配管

* 循環系配管：炉プール出口 STPY 600 A-6 T
 炉プール戻り SGP 500 A
 * 循環ポンプ吸入, 吐出部：SGP 350 A/SGP 500 A
 * サイフォンブレークライン：SGP 150 A

模擬炉心内の各要素の配置を図2.2に示す。

標準燃料要素, 制御棒の形状と寸法を図2.3, 図2.4に示す。又, 原子炉プール内の模擬原子炉構造物の配置を図2.5に示す。

2.3 計測項目, 計測装置及び計測位置

(1) 流量計 1台

水循環配管に流量測定用に500 A, 5 Kのオリフィス流量計が取付けられている。

(2) 溫度計 2個

水循環配管に水温測定用のPt測温抵抗体式温度計が取付けられている。

(3) 圧力計 1個

水循環配管に流体圧力測定用の圧力電気変換式圧力計が1個取付けられている。

(4) 流速分布測定装置

流速分布測定のため流速はピト一管により測定した。検出端であるピト一管は, 全圧管と静圧管とが別々に分かれたもので, 形状を図2.6に示す。

ピト一管は, 標準燃料要素の燃料板上端から600 mmの位置に感圧部が来るよう取付けた。他の要素についても標準燃料要素の感圧部と同一平面上に配列してある。ピト一管の燃料要素への取付要領を図2.7に, 取付位置を図2.8に示す。燃料要素以外の炉心要素に取付けた位置

を図2.9、図2.10に示す。なお、図2.8～2.10にはピトー管の番号が示してある。又図2.11に標準燃料要素、フォロア燃料要素以外のピトー管の取付位置を示す。

(a) ピトー管

* 数量：全圧管 27本

静圧管 4本

* 材質：SUS 304

* 寸法：外径 1.6 mm^ϕ × 内径 1.15 mm^ϕ × 長さ 2000 mm

(b) 圧力導管

* 材質：ポリウレタンチューブ

* 寸法：外径 6 mm^ϕ × 内径 4 mm^ϕ

(c) 多管マノメータ 1台

* 型式：多管逆U字マノメータ

* 範囲：2200 mm水柱

* 連数：35連

* ゲージ管：硬質ガラス 外径 12 mm^ϕ × 内径 8 mm^ϕ

(d) U字マノメータ 3台

* 範囲：0～600 mm水銀柱

* ゲージ管：硬質ガラス 外径 12 mm^ϕ × 内径 6 mm^ϕ

2.4 実験方法及び計測方法

実験は、流量条件の設定と流速測定、流量測定等の測定とから成る。流量条件は水循環系の流量調節弁を全開とした時の最大流量約 $2350 \text{ m}^3/\text{h}$ を定格 100 % 流量とし、以下 80 %、60 % の 3 種類で全流量を設定した。

測定の手順は次の通りである。

- ① ピトー管が取付けてある計装標準燃料要素 2 体を所定の位置に設置する。
- ② ピトー管、導管内の空気抜きを行う。
- ③ ポンプを運転し、流量調節弁で流量を設定する。
- ④ マノメータ指示が想定するまで待機（約 10 分）
- ⑤ マノメータ、連成計の値を読み取る。
- ⑥ 炉心要素の内、標準型燃料要素については炉心内の全ての標準型燃料要素の収まる 26 場所について移動し、計測した。

上記の手順を流量の異なる毎に繰返した。

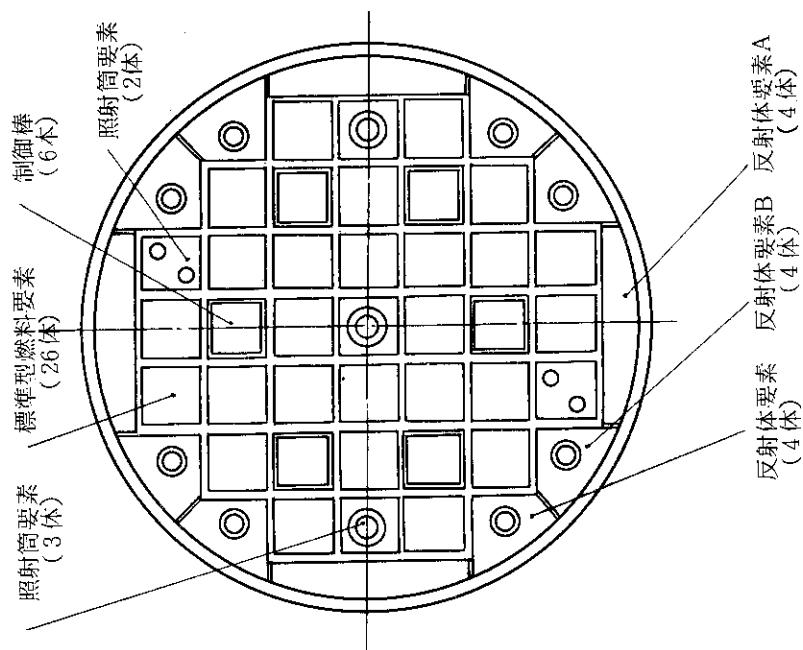


図 2.2 模擬炉心内の各要素の配置

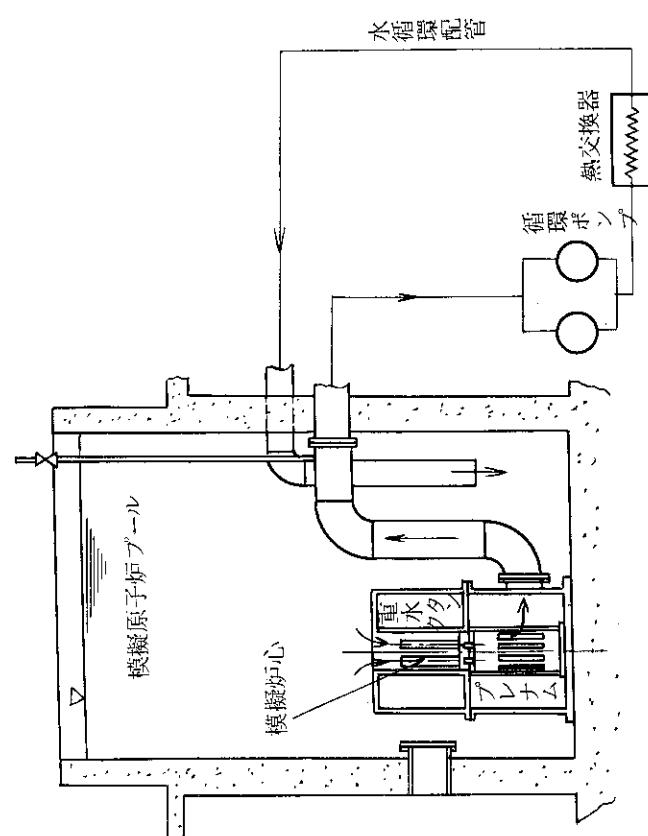


図 2.1 実験装置全体構成

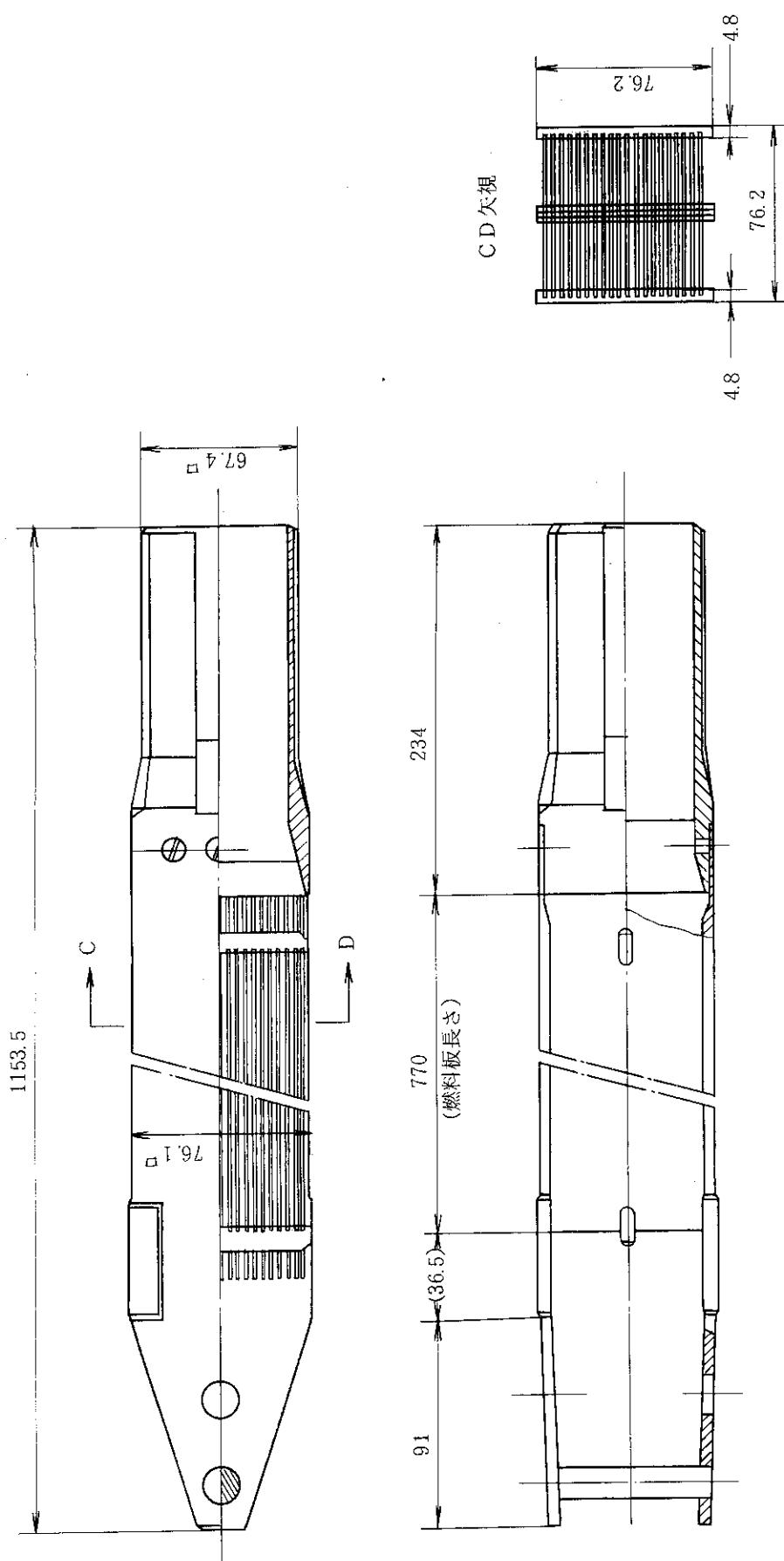


図 2.3 模擬標準燃料要素の形状と寸法

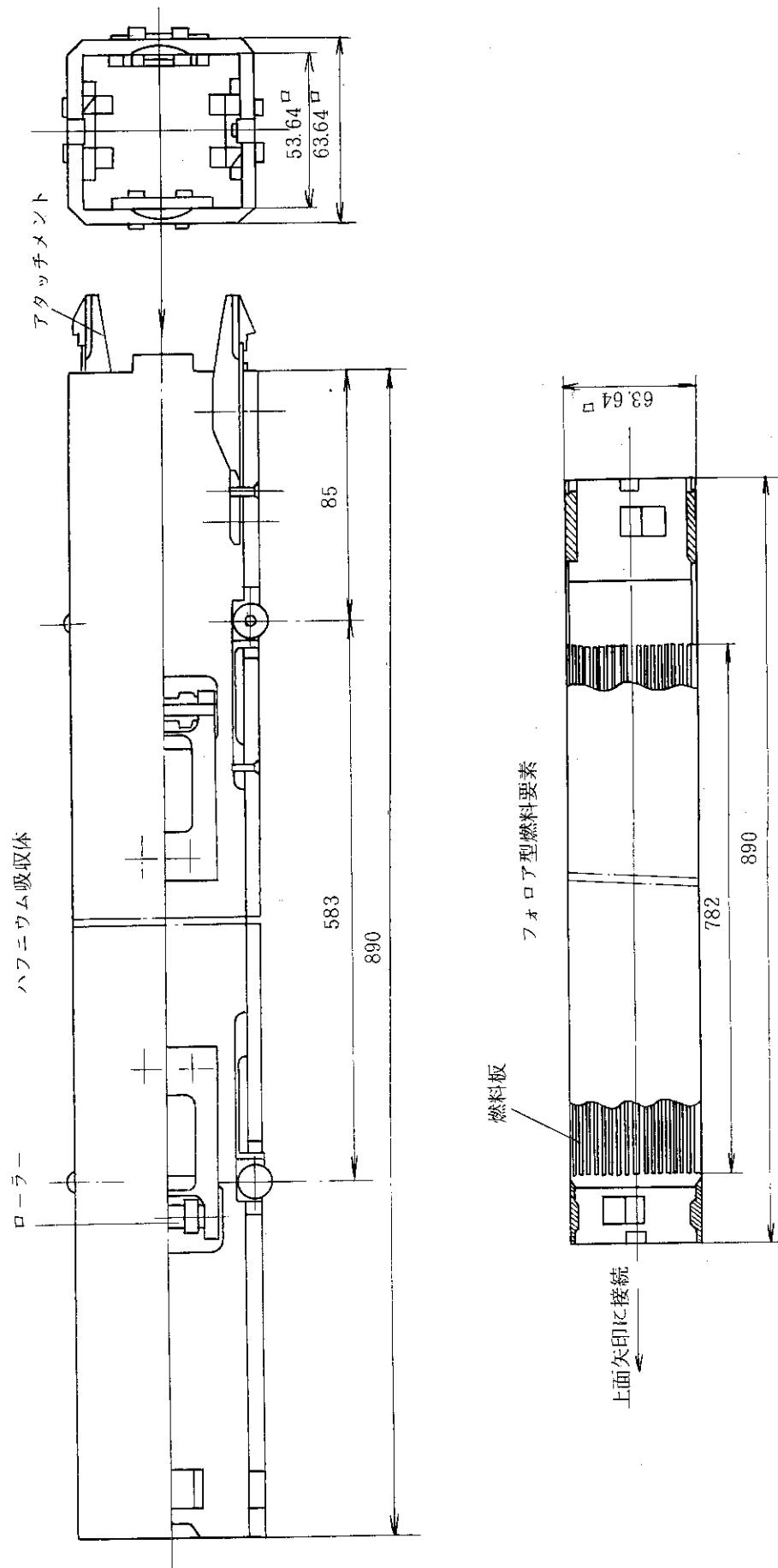


図 2.4 模擬制御棒の形状と寸法

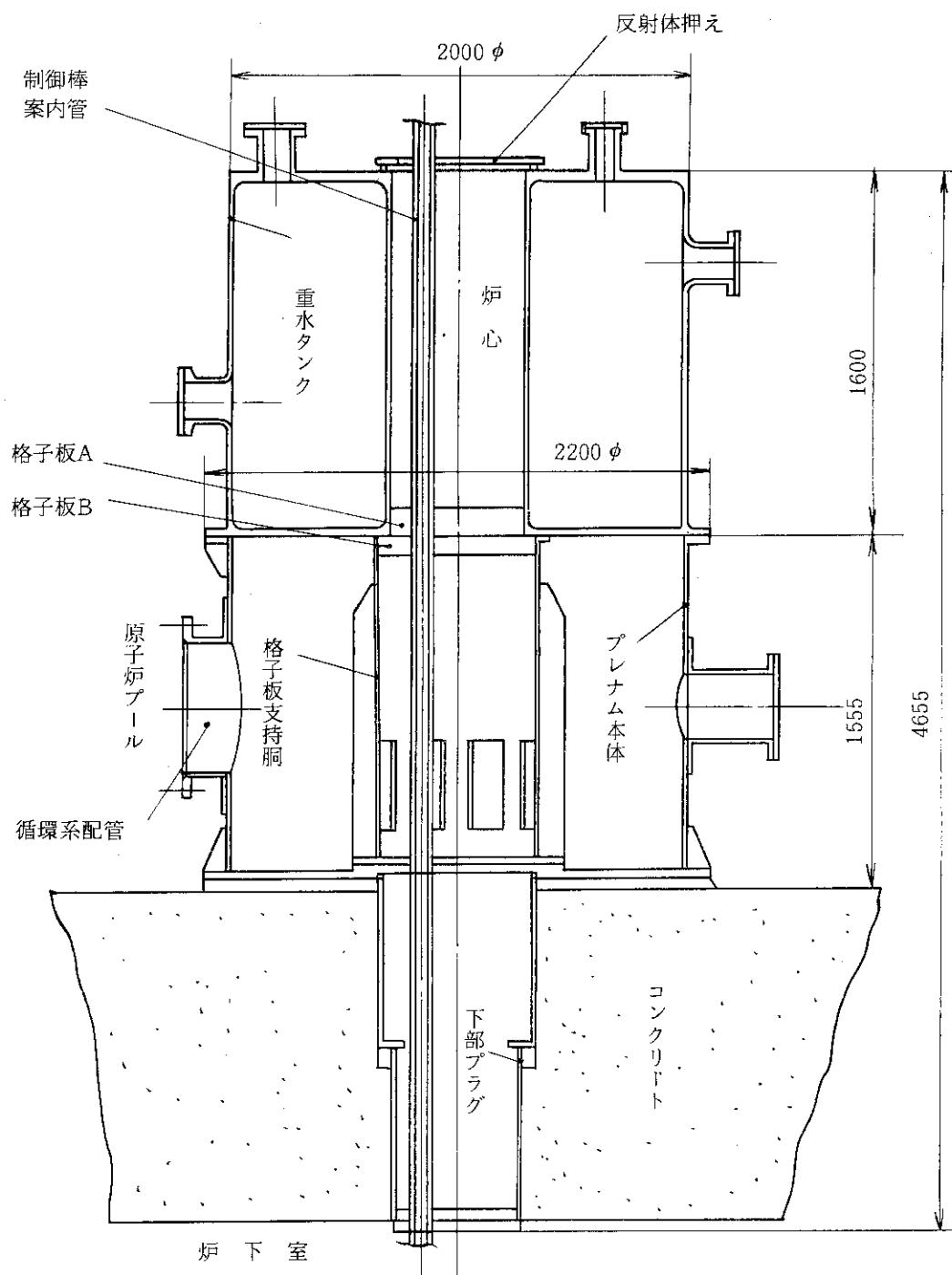


図 2.5 模擬原子炉構造物配置の概要

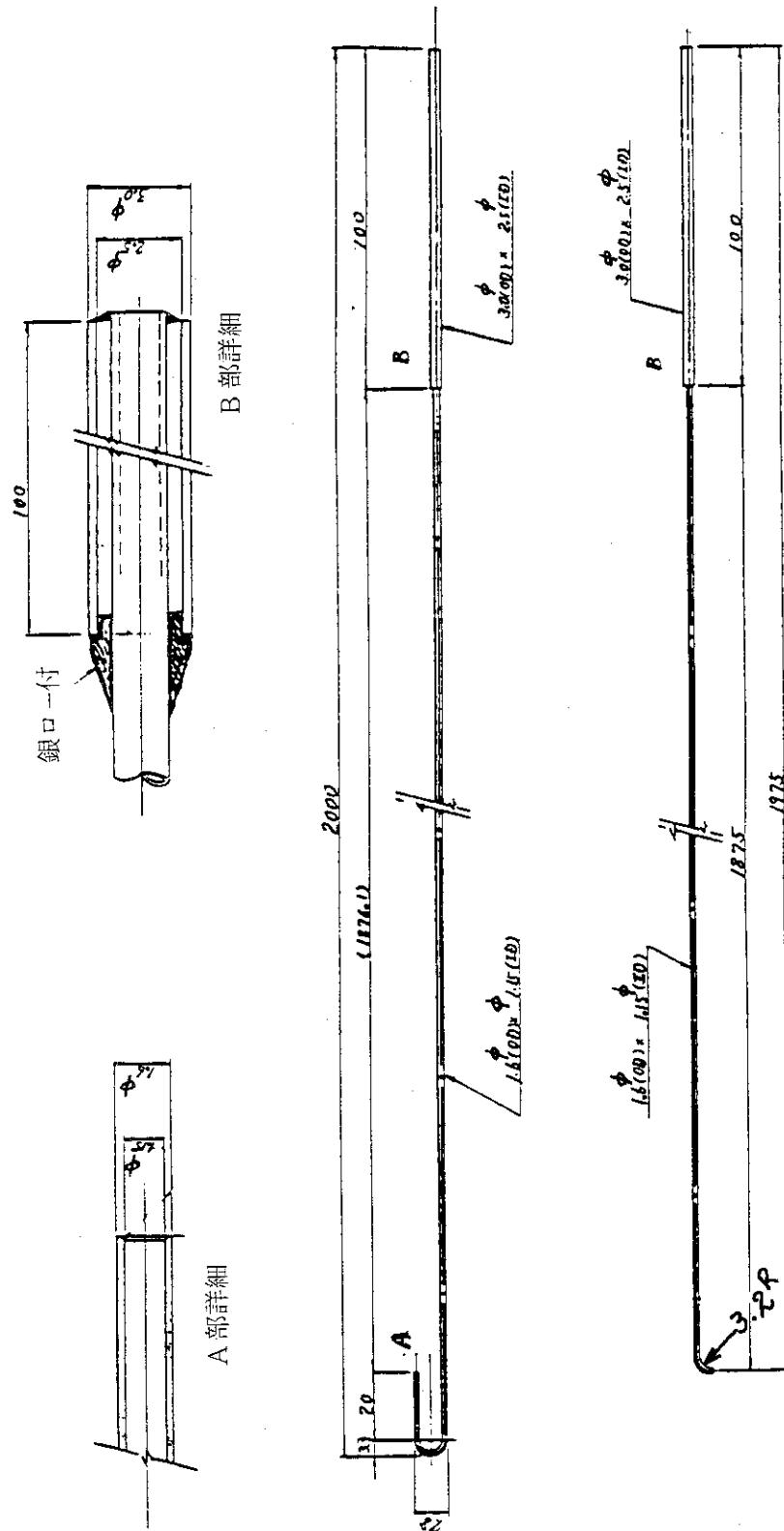


図 2.6 ビュートー管形状図 (全圧管と静圧管)

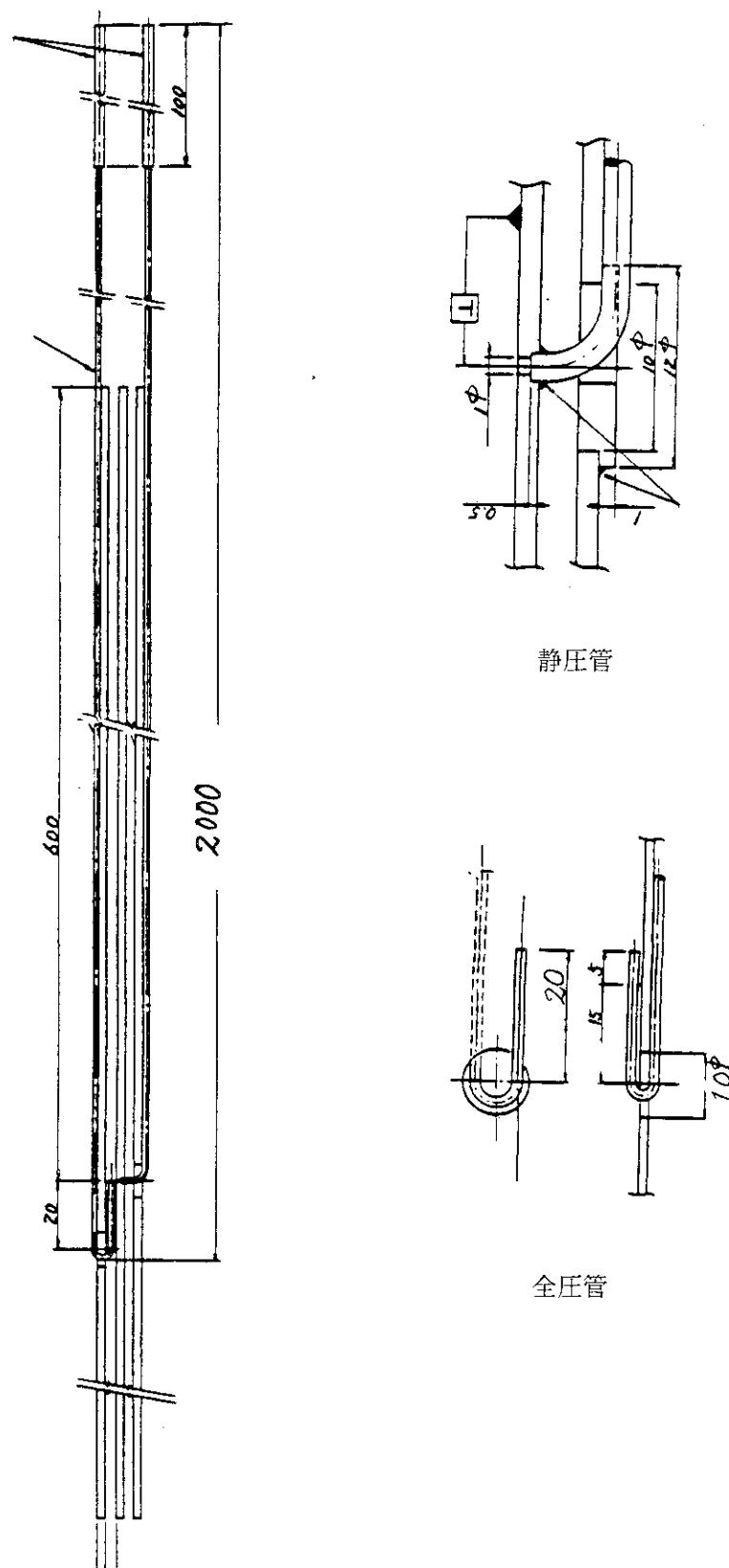


図 2.7 ピト一管取付図

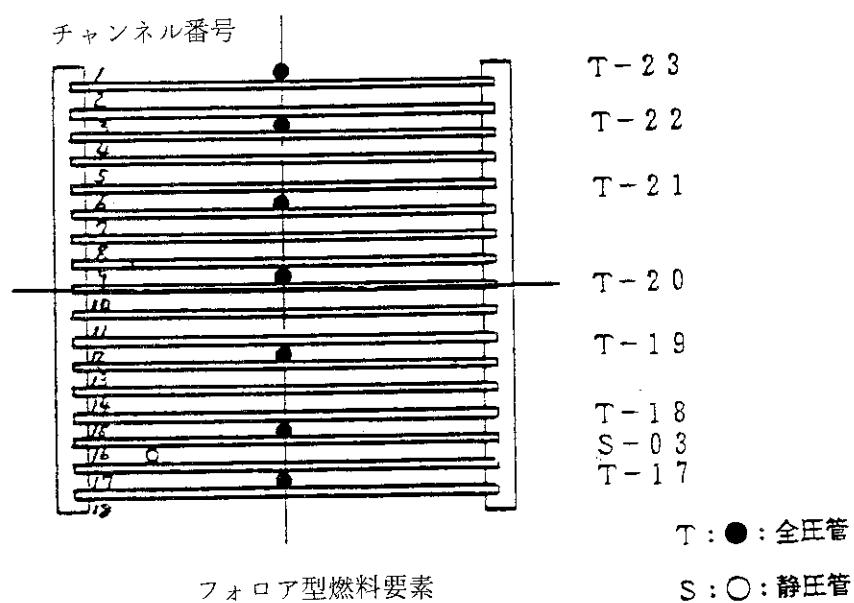
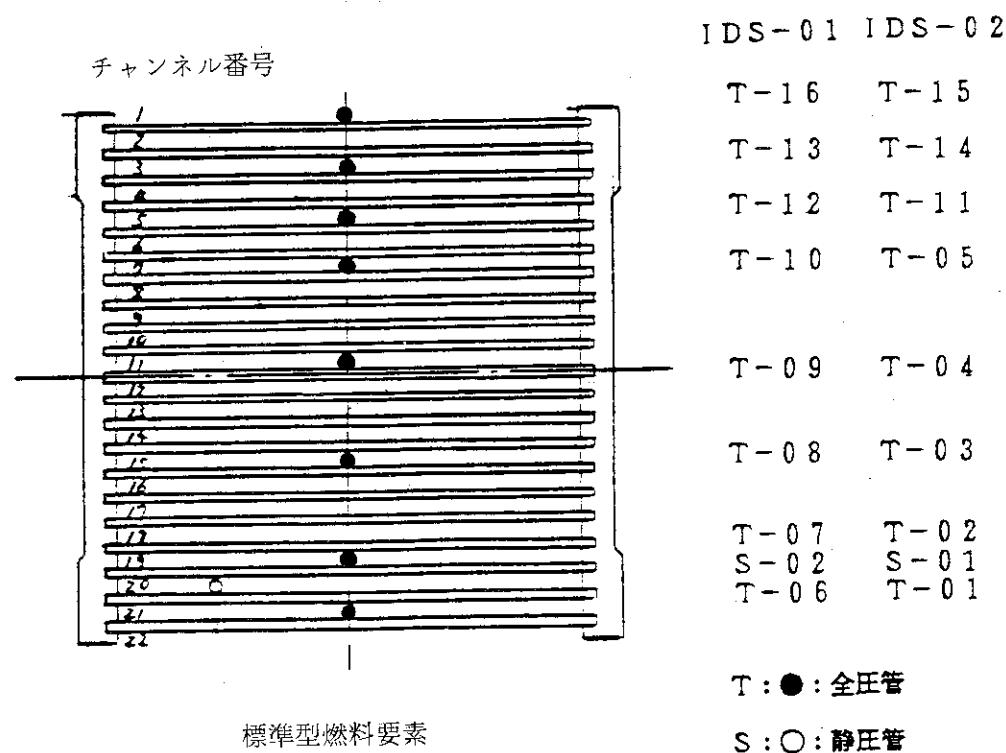


図 2.8 ピト一管取付位置

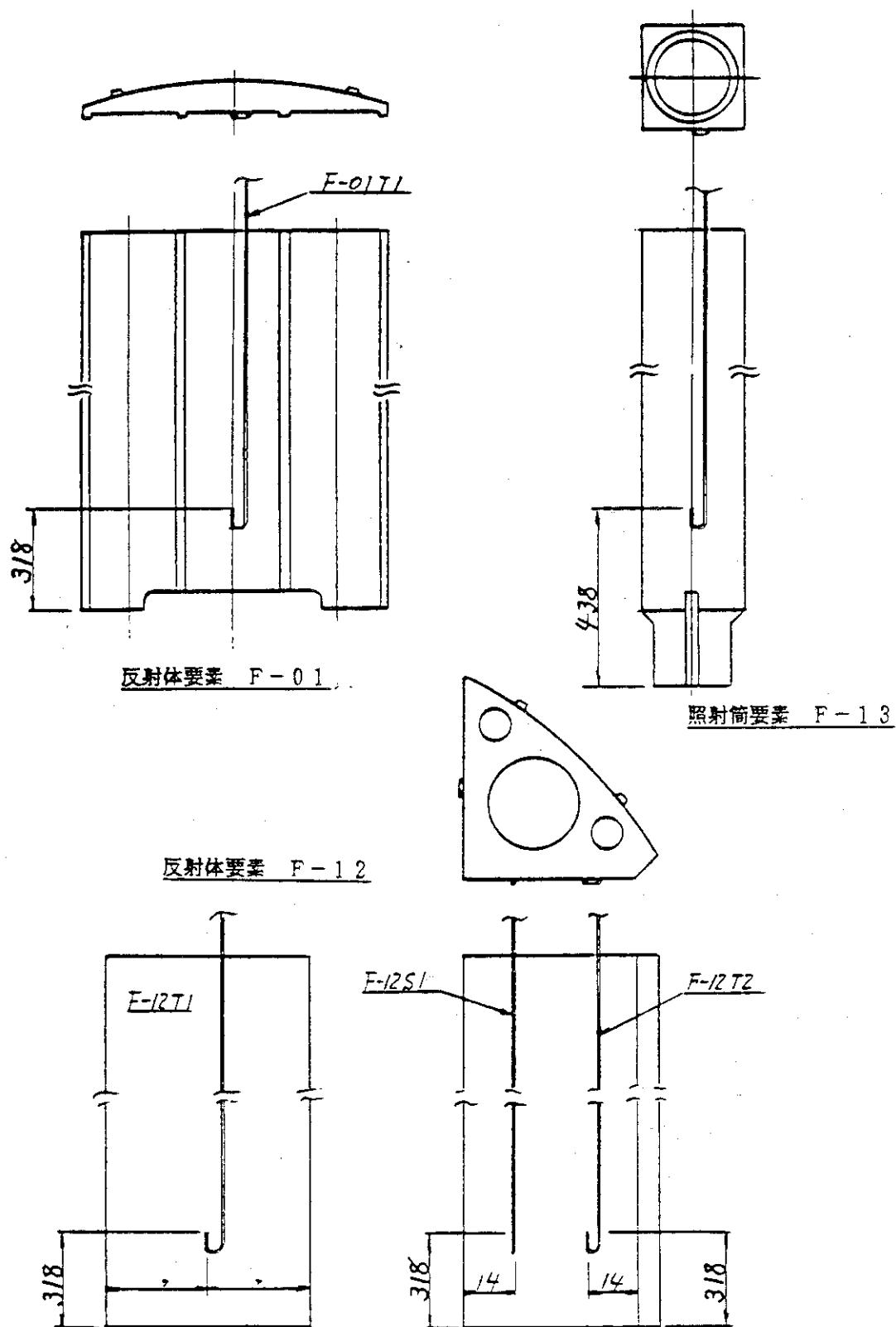


図 2.9 反射体要素におけるピトー管取付位置

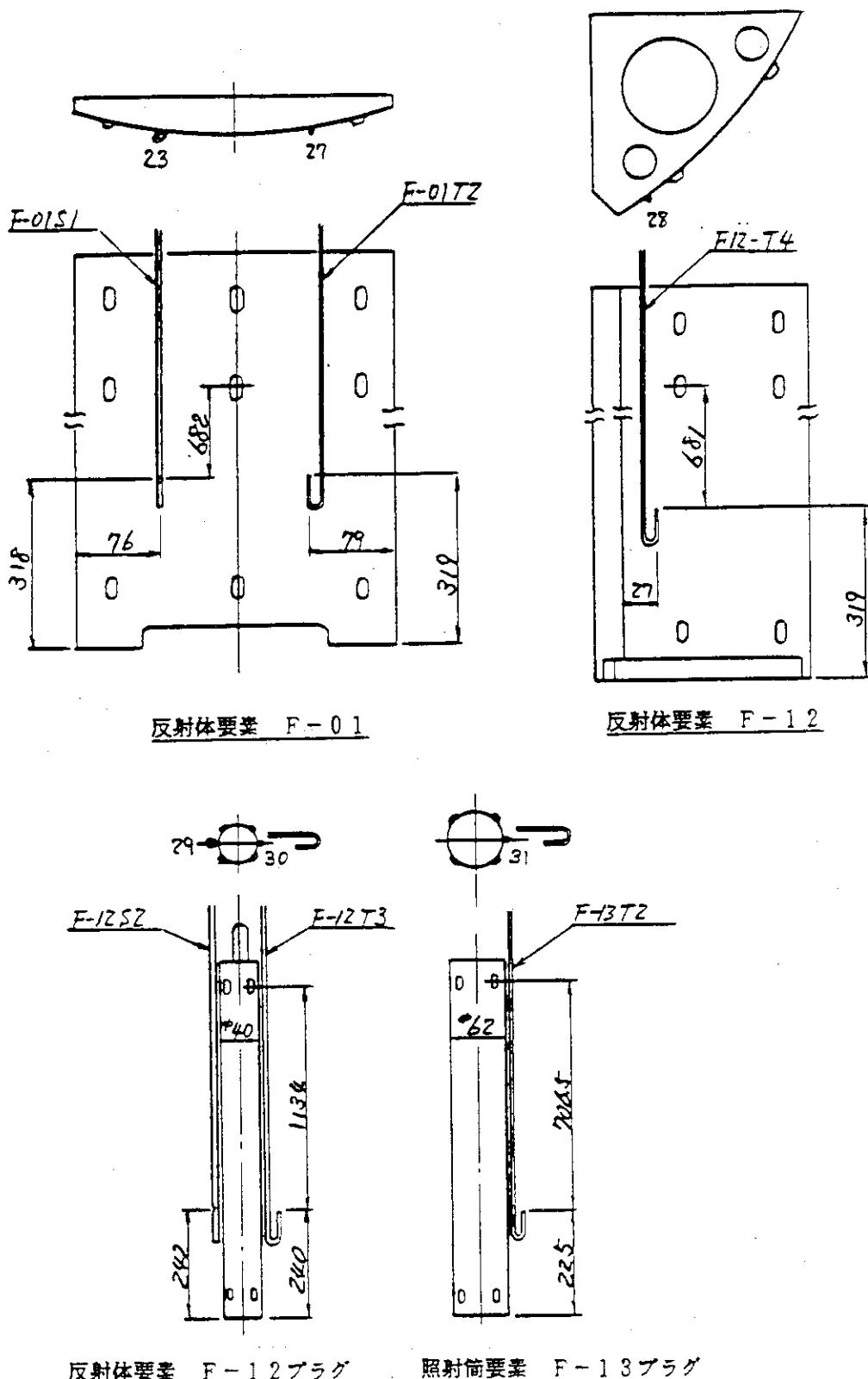


図 2.10 反射体要素及び照射筒要素におけるピト一管取付位置

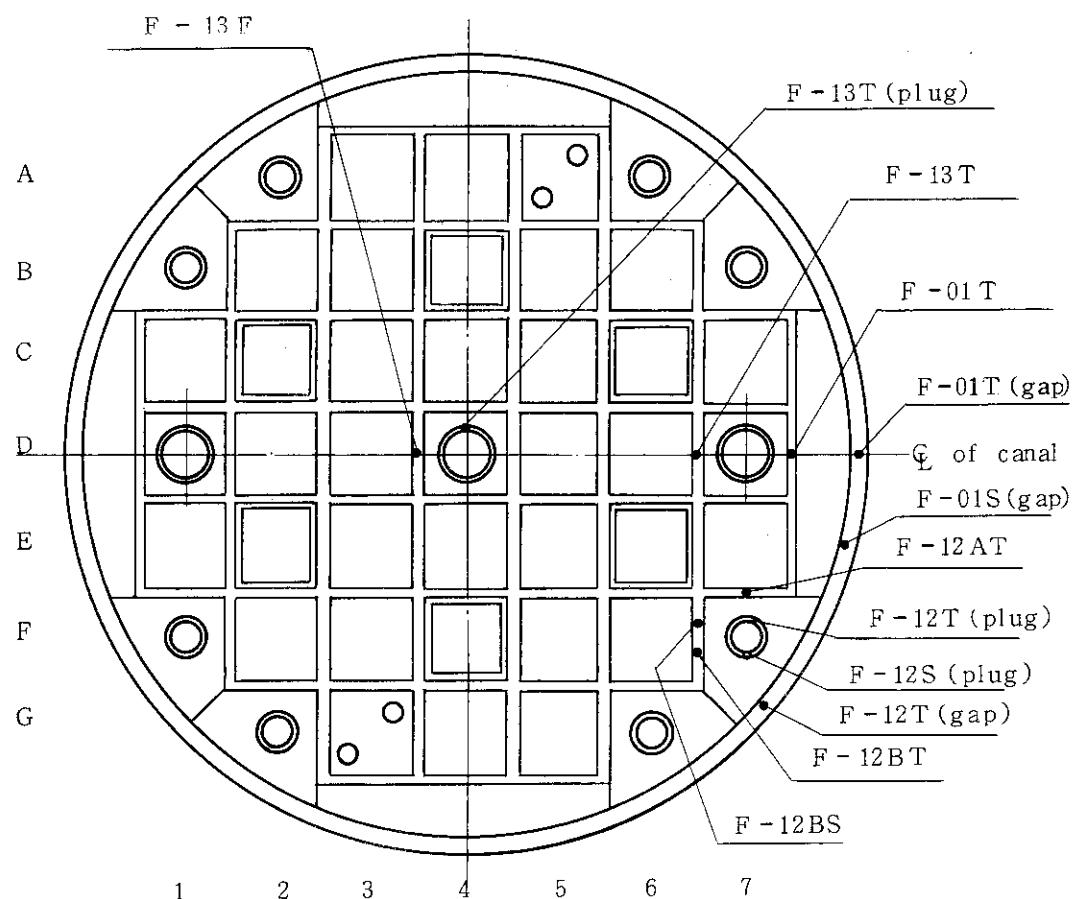


図 2.11 標準型燃料要素、フォロア型燃料要素以外に取付けられているピトー管の位置

3. 炉心流速分布測定結果とその検討

3.1 流速分布測定方法

(1) ピトー管係数 k の決定

流速測定の基礎となるピトー管係数 k は、全体流量の測定から決定した。すなわち、ピトー管で得られた全圧と静圧の差 h (mm水柱) から、次式

$$v = \sqrt{2g h / r_f} \quad (\text{m/s})$$

v : 流速 (m/s)

g : 重力加速度 (m/s²)

r_f : 水の比重 (kg/m³)

で求まる流速を得た後、炉心各部の流路断面積をかけて全体流量を積算し、水循環系に設置された流量計の指示値との比 k を上式にかけて流速を求めた。

その結果を下表に示す。

全流量 (m ³ /h)	k の値 (-)
2350	0.834
1880	0.842
1410	0.828

上記の k の値の平均値

$$k = 0.835$$

をピトー管係数として使用する。

(2) 標準型燃料要素のゾーン分け

標準型燃料要素は 26 体あり、その幾何学的配置が必ずしも同一でない。すなわち、Be 反射体に接しているもの、接していないもの、制御棒、照射筒に接しているもの、接していないもの等の違いがある。そこで、標準型燃料要素 26 体の配置上の特長から、図 3.1 に示すように 3 つのゾーンに分けて炉心を特徴付けて流速分布を調べることにした。ゾーン 1 は、8 要素から成るが中央の照射筒を囲む標準型燃料要素から成る。ゾーン 2 は、Be 反射体に接していないかつゾーン 1 以外の要素であって 6 体から成る。ゾーン 3 は、Be 反射体に接している標準型燃料要素であって 12 体から成る。

3.2 流速分布測定結果

(1) 標準型燃料要素 26 体での流速分布

全流量が 2350 m³/h の時を 100 % 流量とし、これを基準にして、80 % 及び 60 % の時即ち

1880 及び $1410 \text{ m}^3/\text{h}$ の時の 3 ケースについて標準型燃料要素 26 体の流速分布測定結果を表 3.1(a),(b),(c) に各々示す。表 3.1(a),(b),(c) で上段に示す標準型燃料要素 26 体の流速は、各標準型燃料要素内で測定した流速の平均値を示してある。各標準型燃料要素内では図 2.8 に示すチャンネル番号 1, 3, 5, 11, 15, 19, 21 の中央で流速を測定しており、この 8 点の平均値が表 3.1 の上段に流速として掲げてある。なお、表 3.1 の下段には 3 つに分けた標準型燃料要素のゾーン別の平均値が掲げてある。

表 3.1(a) には全流量が 60 % 即ち $1410 \text{ m}^3/\text{h}$ の時の値、(b) には 80 % 即ち $1880 \text{ m}^3/\text{h}$ 、(c) には 100 % 即ち $2350 \text{ m}^3/\text{h}$ の時の値が各々掲げてある。

標準型燃料要素 26 体における総平均流速は 100 %, 80 %, 及び 60 % 流量に対し各々下記に示す値となっている。

流量割合 (%)	総平均流速 (m/s)
100	5.49
80	4.38
60	3.28

(2) 総平均流速に対する各標準型燃料要素の平均流速の比

表 3.2(a), (b), (c) に流量割合が 60, 80, 100 % の場合の、標準型燃料要素 26 体全部の総平均流速に対する各標準型燃料要素の平均流速の比を示す。

各流量割合に対する最大・最小の地を以下にまとめて示す。

総平均流速に対する標準型燃料要素内平均流速の比

流量割合 (%) (流量 m^3/h)	総平均流速に対する比	
	最大	最小
60 (1410)	1.04	0.957
80 (1880)	1.039	0.952
100 (2350)	1.056	0.962

(3) 炉心部の流速分布

標準型燃料要素 26 体、フォロア型燃料要素（制御棒）6 体についてはそれぞれ要素毎の平均値をとったものに加えて反射体要素、照射筒要素等の流速を測定した結果を合せて、炉心部の流速分布としたものを表 3.3(a), (b) に掲げる。流量が 100, 80, 60 % の場合について示してある。

(4) 燃料要素内の各チャンネルの流速のはらつき

標準型燃料要素内の各チャンネルの流速のはらつき程度を見るために、各標準型燃料要素毎に、図 2.8 に示すように 1, 3, 5, 7, 11, 15, 19, 21 チャンネル番号でのその要素の測定流速から得られた平均流速に対する最大・最小の値の流速の地を調べた結果を、表 3.4(a), (b), (c) に示す。(a) は流量 60 %, (b) は流量 80 %, (c) は流量 100 % に対するものである。

標準型燃料要素 26 体の内で、最大のへだたり、最小のへだたりを各流量割合について示すと以下のようになる。

標準型燃料要素におけるチャンネル間の流速の最大は最小へだたり

流量割合 (%)	チャンネル間の流速のへだたり	
	最大	最小
100	1.051	0.956
80	1.045	0.961
60	1.044	0.972

次にフォロア型燃料要素でのチャンネル間の流速のばらつきを平均値に対する比としてその最大と最小を表 3.5 に掲げる。フォロア型燃料要素は合計 6 体有るが本実験では同一の配置 E 6 に固定しており、図 2.8 に示すチャンネル番号 1, 3, 6, 9, 12, 15, 17 の流速の平均値に対しそのへだたりの最大・最小を示してある。流量は 60, 80, 100 % の 3 ケースについて調べた。その結果は、へだたりの最大値は平均値に対する速度比にして 1.043, 最小値 0.953 であった。

標準型燃料要素の最外側チャンネルでの流速は、最外側チャンネルが、①標準型燃料要素、②反射体要素、③フォロア型燃料要素（制御棒案内管）、④照射筒要素に隣接している場合がある、異なる状況にあるので、平均流速に対しての比も異なることが考えられる。そこで、標準型燃料要素の最外側チャンネルの流速に注目して、それが属する標準型燃料の平均流速に対しての速度比を調べた結果を表 3.6(a), (b), (c) に掲げる。表 3.6(a), (b), (c) は流量割合 60, 80, 100 % の 3 ケースについて、最外側チャンネルの流速、平均の流速及び速度比を各々示す。

(5) 炉心流量配分

炉心流量配分を、これまで述べてきた流速測定結果から得るために、まず各領域の区分けと各領域の流路面積を求めた。その結果を表 3.7(a), (b) に示す。流路面積は標準型燃料要素の燃料板上端から 600 mm 下方での位置の面積である。又、領域区分は、大別して①標準型燃料要素、②フォロア型燃料要素、③反射体要素、④照射筒要素、⑤制御棒案内管、⑥プレナム、⑦垂直リグ冷却管に分けてそれぞれの主要部分を表 3.7(a), (b) に示すように区分けすることによって、表 3.8(a), (b), (c) の第 2 棚に示す各領域の流路面積に割当てた。

表 3.8(a), (b), (c) には領域、流路面積、流速、流量、全流量に対する比率がそれぞれ示してある。(a), (b), (c) は流量割合 60, 80, 100 % の結果を各々示している。

(6) データの再現性のチェック

測定データの再現性のチェックを、標準型燃料要素の配置 D 5, D 6, G 4, G 5 で行った。流量割合 60, 80, 100 % の 3 ケースについて調べた結果を表 3.9 に示す。同表の上欄には測定した流速を、下欄には平均の流速に対する比率を各々示してある。再現性が最も悪いもので、平均速度に対する比率で示して 1.034 であって 3.4 % の違いが生じている。

(7) 誤装荷状態でのデータの変化

万一、燃料を 90° 回転して誤装荷した時の、正常装荷時と比較した結果を表 3.10 に示す。誤装荷状態を標準型燃料要素の配置 F 3, F 5 の位置で 90° 回転し、その状態を F 3r, F 5r とし、流量割合 60, 80, 100 % の 3 ケースについて測定した結果を正常装荷時と比較して表 3.10 に示した結果を正常装荷時と比較して表 3.10 に示してある。

3.3 測定結果の検討

(1) 標準型燃料要素間の平均流速の一様性

標準型燃料要素 26 体での各平均流速のはらつきは非常に小さく、ほど一様と見ることできる。表 3.2 (a), (b), (c) からわかるように、標準型燃料要素 26 体の総平均流速に対し最大の偏りは、100 % 流量割合の時であって 5.6 % である。

(2) 標準型燃料要素内のチャンネル間の流速の一様性

標準型燃料要素内のチャンネル間の流速のはらつきは、表 3.4 に示すように、26 体の標準型燃料要素において非常に小さく、標準型燃料要素内の平均流速に対して最大の偏りは、流量割合が 100 % の時 B 6 の配置に現われており僅か 5.1 % である。

(3) 標準型燃料要素の最外側チャンネルでの流速

標準型燃料要素の最外側チャンネルは、他の炉心要素と向き合っており、対向する炉心要素の種類によって最外側のチャンネルでの流速特性が異なることが考えられる。しかしながら、表 3.6 に示した実験データから判るように、各標準型燃料要素内の平均流速に対する最大の偏りは、B 6 の配置に現われており約 6 % 弱であって小さい。

(4) フォロア型燃料要素内のチャンネル間流速の一様性

フォロア型燃料要素内のチャンネル間の流速のはらつきは表 3.5 からわかるように、平均流速に対し最大の偏りは 100 % 流量割合の時に現われており約 4.7 % である。

(5) 炉心内流量配分

炉心内の各要素を基準にとって領域分けした時の各領域の流量割合は、表 3.8 から判るように 60, 80, 100 % 流量に対してほど同一であった。100 % 流量の時全体の流量の 75.5 % は標準型燃料要素領域を、10.6 % はフォロア型燃料要素領域を、重水タンク内胴と反射体要素とのギャップを 5.2 % 流れ、この 3 者で全体の 91.3 % を占めている。60, 80 % 流量についてもほど同様の割合であった。

(6) フォロア型燃料要素の流速

フォロア型燃料要素の流速は、100 % 流量で 4.44 m/s であるが、この速度は標準型燃料要素での流速 $5.39 \sim 5.59 \text{ m/s}$ に対し約 80 % 程度である。フォロア型燃料要素では燃料板枚数が標準型燃料要素での枚数より少ないため、必ずしも標準型燃料要素と同じ流速を必要とはしないが冷却の面からは、出来るだけ標準型燃料要素の流速に近い方が良い。フォロア型燃料要素での流速が標準型燃料要素での流速より約 20 % 低い理由は、図 3.2 に示すフォロア型燃料要素のアダプタ(制御棒駆動部との接続部)の形状によるものと考えられる。図 3.2 に矢印で示すよう流れはアダプタに作られた斜め切りの穴を通して流れるので、拡大・縮小による流動損失が大きくなるためと考えられる。そこで、この部分の流動損失低減のためアダプタ部の形状を改善した設計での流動損失を調べた結果を 4.2 節に後述する。JRR-3 には、この改善した設計でのフォロア型燃料要素を用いることにする。

(7) データの再現性

表 3.9 で見るように、ほとんどのデータは 1 % 以内の違いであった。1 番大きな差異で 3.4 % の違いであり、これより再現性は充分ある。

(8) 誤装荷状態での流速変化

万一、燃料要素を90°回転して誤装荷した時の、正常装荷時の流速の違いは、ほとんどが1～2%であって最大のもので3.6%である。従って誤装荷による流速変化は小さい。

(9) 誤差評価

測定データの誤差は、測定系における次の2つの系統から生ずる。

ア. 流量計の系統からの誤差

イ. ピトー管測定系からの誤差

以下に、それぞれの系統からの誤差を評価する。

① 流量計系統

流量計はオリフィス流量計である。オリフィス単体の設計はJIS規格に基づいて設計されており、その誤差は2%以内である。なお、オリフィスの設計条件である必要管長を確保するため、循環ポンプ吐出側の垂直配管に取付け直管長を確保した。

差圧発信器及び指示計については、差圧発信器と指示計とを接続した上で差圧発信器の低圧側(LP)を大気開放し、高圧側(HP)に水マノメータを接続して較正を行った。指示計の読み取り誤差は、水柱で10mmであった。この指示計の読み取り誤差は、低流量で大きくなるがそれでも流量60%で約1100m水柱の読みがあり、この時10mm水柱の誤差があるとすると、

$$\sqrt{\frac{1100 \pm 10}{1100}} = 1.005 \sim 0.995$$

となり、約0.5%程度であり小さい。

指示計自体の読み取り誤差については、指示計はリニア目盛で0～3000を5きざみで指示されている。差圧5000mm水柱が3000に相当し、流量60%での1100mm水柱は660となる。目盛の読みに±10程度の誤差を含んでおり、誤差は

$$\sqrt{\frac{660 \pm 10}{660}} = 1.008 \sim 0.992$$

から0.8%となる。これから、60%流量の時においても $0.5 + 0.8 = 1.3\text{ (%)}$ となり低流量では充分精度が良いことがわかる。

② ピトー管測定系

ピトー管測定系は、ピトー管、導圧管、逆U字管水マノメータ及び水銀マノメータから成っており、ここで検討する誤差原因は導圧管への気泡の混入、読み取り誤差、及びピトー管の取付具合によるものゝ3つである。

導圧管内への気泡の混入については、水ポンプによりプール水を導圧管内に加圧して気泡を排除しており、さらに確認して測定しているので、空気の混入は皆無と考えて良い。

水及び水銀マノメータの読み取り誤差については、0.5mm程度の誤差がある。水銀マノメータでは100%流量で190mm水銀に対して1mmの誤差があるとすると、

$$\sqrt{\frac{190 \pm 1}{190}} = 1.003 \sim 0.997$$

となり1%程度の誤差となる。水マノメータの場合は無視できる。

ピトー管の取付による誤差は基礎試験の段階で水ギャップに平行に角度を振って見た。その結果、 $1\sim 2^\circ$ の傾きでの測定値の誤差は、ほゞ零であった。実際の装荷状態でのピトー管の傾き具合は不明であるが、装荷前後の状態がほゞ正常であることから、ピトー管取付による誤差は無視できると考えられる。

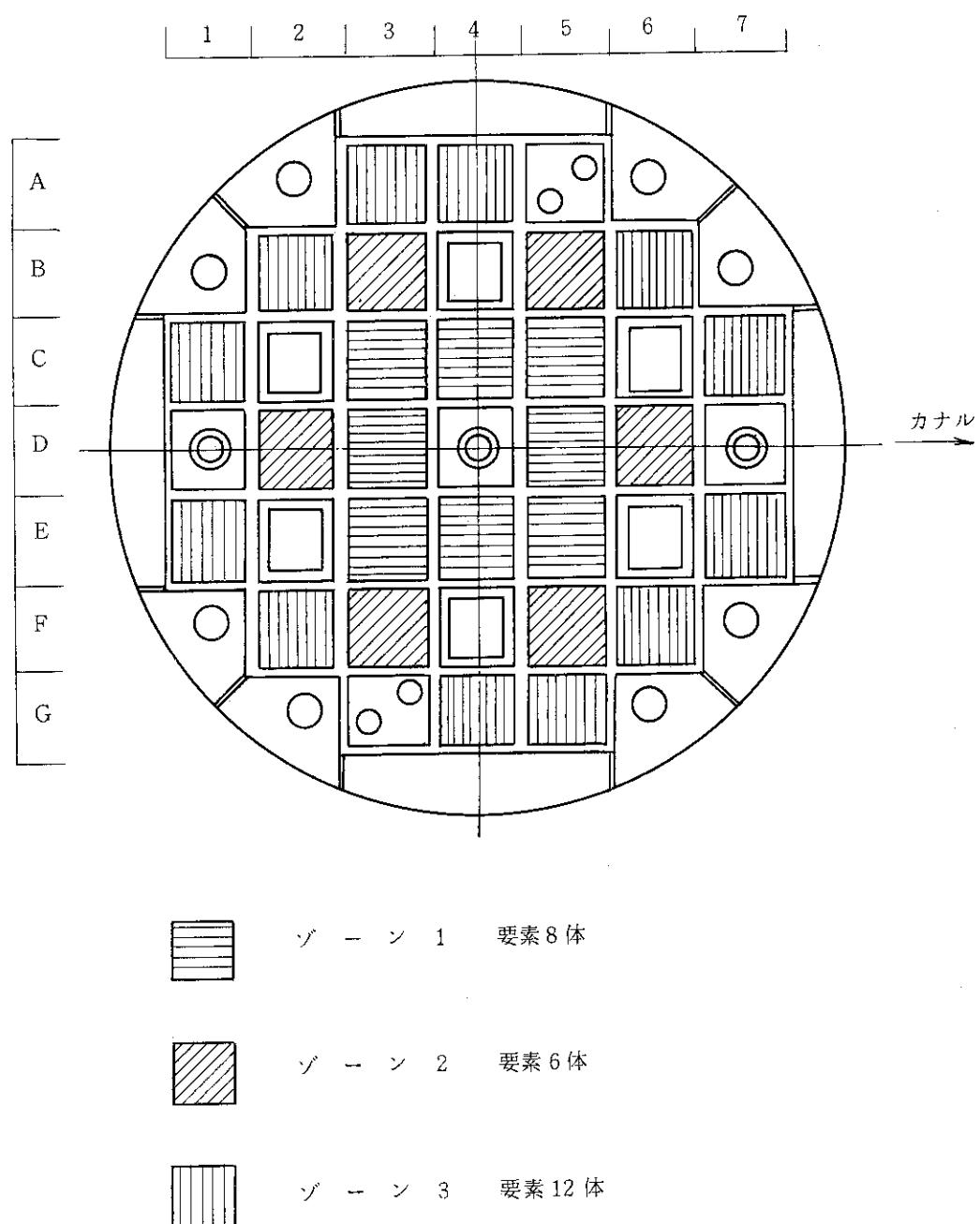


図3.1 炉心部ゾーン区分図

表 3.1 (a) 炉心部流速分布

流 量 : 60%

	1	2	3	4	5	6	7	
A		3.29	3.34	I				
B	3.21	3.31	C	3.33	3.42			
C	3.14	C	3.41	3.29	3.27	C	3.22	
D	I	3.29	3.29	I	3.31	3.35	I	カナル方向
E	3.17	C	3.35	3.19	3.34	C	3.23	
F	3.27	3.22	C	3.33	3.28			
G		I	3.20	3.28				単位: m/s

C : 制御要素

I : 照射筒要素

ゾーン	燃 料 要 素						備 考
1	C3 C4 C5 D3 D5 E3 E4 E5						平均流速 3.31 m/s
2	B3 B5 D2 D6 F3 F5						平均流速 3.31 m/s
3	A3 A4 B2 B6 C1 C7 E1 E7 F2 F6 G4 G5						平均流速 3.26 m/s * IDR-01 2.69 m/s
							平均流速 3.28 m/s

表 3.1 (b) 炉心部流速分布

流 量 : 80%

	1	2	3	4	5	6	7	
A		4.3 4	4.3 2	I				
B	4.2 5	4.4 1	C	4.4 2	4.5 5			
C	4.1 7	C	4.5 5	4.4 5	4.3 8	C	4.2 9	
D	I	4.4 2	4.4 2	I	4.4 1	4.4 6	I	カナル方向
E	4.1 8	C	4.5 2	4.3 0	4.4 9	C	4.2 9	
F	4.3 3	4.3 4	C	4.4 5	4.3 6			
G		I	4.2 7	4.3 9				単位: m/s

C : 制御要素

I : 照射筒要素

ゾーン	燃 料 要 素			備 考
1	C 3 D 3 E 3	C 4 E 4	C 5 D 5 E 5	平均流速 4.44 m/s
2	B 3 D 2 F 3	B 5 D 6 F 5		平均流速 4.42 m/s
3	B 2 C 1 E 1 F 2	A 3 A 4	B 6 * E 7 F 6 G 4 G 5	平均流速 4.31 m/s * IDF-01 3.55 m/s

平均流速
4.38 m/s

表 3.1 (c) 炉心部流速分布

流 量 : 100%

	1	2	3	4	5	6	7	
A		5.43	5.49	I				
B	5.37	5.55	C	5.55	5.53			
C	5.28	C	5.70	5.52	5.53	C	5.40	
D	I	5.56	5.54	I	5.76	5.80	I	カナル方向
E	5.58	C	5.70	5.37	5.60	C	5.35	
F	5.47	5.44	C	5.58	5.44			
G		I	5.36	5.47				単位: m/s

C : 制御要素

I : 照射簡要素

ゾーン	燃 料 要 素						備 考
1	C3 C4 C5 D3 D5 E3 E4 E5						平均流速 5.59 m/s
2	B3 B5 D2 D6 F3 F5						平均流速 5.58 m/s
3	A3 A4 B2 B6 C1 C7 E1 * E7 F2 F6 G4 G5						平均流速 5.39 m/s * IDF-01 4.43 m/s
							平均流速 5.49 m/s

表 3.2(a) 標準型燃料要素総平均流速に対する各要素の平均流速の比
流 量 : 60%

	1	2	3	4	5	6	7	
A			1.003	1.018	I			
B		.979	1.009	C	1.015	1.043		
C	.957	C	1.040	1.003	.997	C	.982	
D	I	1.003	1.003	I	1.009	1.021	I	カナル方向
E	.966	C	1.021	.973	1.018	C	.985	
F		.996	.982	C	1.015	1.000		
G			I	.976	1.000			
								最大 : 1.04 最小 : .957

備 考

C ; 制御要素
I ; 照射簡要素

上記の値は次により求めた。

$$V_i = v_i / v_a$$

v_i ; 各要素の平均流速

v_a ; 標準型燃料要素の総平均流速 (26要素)

表 3.2(b) 標準型燃料要素総平均流速に対する各要素の平均流速の比
流 量 : 80%

	1	2	3	4	5	6	7	
A			.991	.986	I			
B		.970	1.007	C	1.009	1.039		
C	.952	C	1.039	1.016	1.000	C	.979	
D	I	1.009	1.009	I	1.007	1.018	I	カナル方向
E	.954	C	1.032	.982	1.025	C	.979	
F		.989	.991	C	1.016	.995		
G			I	.975	1.002			
								最大 : 1.039 最小 : .952

備 考

C ; 制御要素
I ; 照射簡要素

上記の値は次により求めた。

$$V_i = v_i / v_a$$

v_i ; 各要素の平均流速

v_a ; 標準型燃料要素の総平均流速 (26要素)

表 3.2(c) 標準型燃料要素総平均流速に対する各要素の平均流速の比

流 量 ; 100 %

	1	2	3	4	5	6	7	
A		.989	1.000	I				
B		.978	1.011	C	1.011	1.007		
C	.962	C	1.038	1.005	1.007	C	.984	
D	I	1.013	1.009	I	1.049	1.056	I	カナル方向
E	.962	C	1.038	.978	1.020	C	.974	
F		.996	.991	C	1.016	.991		
G			I	.976	.996			最大 ; 1.056 最小 ; .962

備 考

C ; 制御要素
 I ; 照射簡要素

上記の値は次により求めた。

$$V_i = v_i / v_a$$

v_i ; 各要素の平均流速v_a ; 標準型燃料要素の総平均的流速 (26要素)

表 3.3 (a) 炉心部流速計測結果 (1/2)

単位 ; m/s

要素名称	流路名称	要素番号	流 量 (%)		
			60	80	100
1. 標準型燃料要素	1.1 燃料板	IDS-01	△3.31	4.44	5.59
		IDS-02	○3.31	4.42	5.58
	1.2 燃料側板	△3.26	4.31	5.39	
		F-13	△2.12	2.81	3.29
		F-13	○2.12	2.81	3.29
		F-12B	△2.16	2.91	3.54
2. フォロア型燃料要素	2.1 燃料板	IDF-01	2.69	3.55	4.44
	2.2 燃料側板				
3. 反射体要素 A	3.1 水ギャップ (タンクー反射体)	F-01	2.78	3.67	4.47
	3.2 水ギャップ (照射筒ー反射体)	F-01 *	—	—	—
	3.3 水ギャップ (反射体ー燃料)	IDS-01 IDS-01 *	—	—	—
	3.4 水ギャップ (反射体ー側板)	F-12B *	—	—	—
	4.1 水ギャップ (タンクー反射体)	F-01 *	—	—	—
	4.2 水ギャップ (反射体ー燃料)	IDS-01 IDS-02 *	—	—	—
4. 反射体要素 B, C	4.3 水ギャップ (反射体ー側板)	F-12B *	—	—	—
	4.4 プラグ部	F-11	2.07	2.86	3.50
	4.5 冷却孔 (φ14)	C	3.73	5.05	6.25
	4.6 水ギャップ (反射体ー照射筒)	F-12B *	—	—	—

表 3.3 (b) 炉心部流速計測結果 (2/2)

単位: m/s

要素名称	流路名称	要素番号	流量 (%)		
			60	80	100
5.照射筒要素 A	5.1 水ギャップ (照射筒—燃料)	I DS-01 I DS-02 *	—	—	—
	5.2 水ギャップ (照射筒—側板)	F-13 *	—	—	—
	5.3 プラグ部	F-13	2.59	3.53	4.37
	5.4 水ギャップ (照射筒—反射体)	F-01	2.67	3.53	4.39
6.照射筒要素 B, C	6.1 水ギャップ (照射筒—燃料)	I DS-01 I DS-02 *	—	—	—
	6.2 水ギャップ (照射筒—燃料)	F-13	—	—	—
	6.3 プラグ部	C	2.23	3.03	3.75
	6.4 冷却孔 (Φ10)	C	3.84	5.20	6.45
	6.5 水ギャップ (照射筒—反射体)	F-01 F-01	2.67 2.67	3.53 3.53	4.39 4.39
7.制御棒案内管	7.1 水ギャップ (照射筒—燃料)	I DS-01 I DS-01 *	—	—	—
	7.2 水ギャップ (照射筒—燃料)	F-12B *	—	—	—
8.プレナム	8.1 空気抜孔	C	5.87	7.96	9.85
9.垂直リグ冷却管	9.1 冷却管	C	1.67	2.27	2.82

備考

1. タンク ; 重水タンク内筒
2. 燃 料 ; 燃料要素燃料板
3. 側 板 ; 燃料要素側板
4. C ; 計算燃料要素による
5. 井 ; 試験番号
6. ◆/♡/♦ ; ゾーン1/ゾーン2/ゾーン3

表 3.4(a) 標準型燃料要素における最大及び最小流速比

流 量 ; 60%

	1	2	3	4	5	6	7	
A			1.033 .966	1.033 .979	I			
B		1.020 .985	1.027 .972	C	1.026 .974	1.032 .976		
C	1.042 .973	C	1.027 .977	1.039 .973	1.019 .981	C	1.021 .975	
D	I	1.016 .982	1.013 .986	I	1.011 .987	1.030 .975	I	
E	1.024 .982	C	1.016 .970	1.019 .980	1.027 .970	C	1.044 .982	
F		1.024 .981	1.014 .983	C	1.017 .976	1.018 .981		
G			I	1.033 .987	1.032 .978			

カナル方向

最大； 1.044
最小； .972

備 考

C ; 制御要素
I ; 照射筒要素

上段 ; 最大流速比
下段 ; 最小流速比

表 3.4(b) 標準型燃料要素における最大及び最小流速比

流 量 ; 80%

	1	2	3	4	5	6	7	
A			1.031 .986	1.042 .975	I			
B		1.020 .983	1.025 .974	C	1.025 .977	1.042 .961		
C	1.031 .977	C	1.028 .975	1.041 .971	1.017 .976	C	1.029 .970	
D	I	1.023 .981	1.010 .981	I	1.010 .973	1.032 .973	I	カナル方向
E	1.025 .975	C	1.015 .971	1.015 .986	1.027 .973	C	1.045 .981	
F		1.026 .979	1.016 .983	C	1.019 .972	1.019 .981		
G			I	1.026 .986	1.031 .975			最大； 1.045 最小； .961

備 考

C ; 制御要素
I ; 照射簡要素

上段 ; 最大流速比
下段 ; 最小流速比

表 3.4(c) 標準型燃料要素における最大及び最小流速比

流 量 ; 100%

	1	2	3	4	5	6	7	
A			1.030 .968	1.044 .976	I			
B		1.016 .978	1.022 .969	C	1.020 .972	1.051 .956		
C	1.029 .974	C	1.031 .975	1.051 .978	1.017 .972	C	1.032 .968	
D	I	1.020 .981	1.013 .978	I	1.011 .979	1.037 .971	I	カナル方向
E	1.023 .967	C	1.010 .968	1.016 .987	1.024 .967	C	1.049 .978	
F		1.030 .977	1.018 .983	C	1.020 .972	1.022 .981		
G			I	1.026 .986	1.031 .971			最大； 1.051 最小； .956

備 考

C ; 制御要素

I ; 照射筒要素

上段 ; 最大流速比

下段 ; 最小流速比

表 3.5 フォロア型燃料要素各燃料板間の流速比

ID#	60 %		80 %		100 %		備考
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	
3	1.032	.961	1.033	.962	1.034	.959	
4	1.030	.970	1.034	.966	1.041	.959	
5	1.030	.967	1.036	.967	1.037	.965	
6	1.037	.960	1.039	.956	1.039	.953	
8	1.034	.970	1.036	.966	1.037	.967	
9	1.034	.963	1.036	.961	1.037	.963	
10	1.034	.970	1.034	.964	1.034	.961	
11	1.031	.970	1.039	.969	1.043	.971	
12	1.038	.969	1.036	.966	1.039	.967	
13	1.038	.969	1.039	.966	1.039	.967	
14	1.037	.970	1.039	.972	1.039	.967	
15	1.038	.973	1.037	.969	1.037	.967	
20	1.034	.973	1.034	.969	1.037	.969	

60%流量：最大値 = 1.038
 最小値 = .961

80%流量：最大値 = 1.039
 最小値 = .961

100%流量：最大値 = 1.043
 最小値 = .953

ID# : 炉心流動試験番号

表 3.6(a) 標準型燃料要素最外側燃料板における流速

流 量 : 60%

1 2 3 4 5 6 7

A		3.34	3.26				単位: m/s
		3.29	3.34	I			
		1.02	.98				
B		3.25	3.34		3.35	3.33	カナル方向
		3.21	3.31	C	3.33	3.42	
		1.01	1.01		1.006	.97	
C	3.05		3.33	3.20	3.30	3.15	カナル方向
	3.14	C	3.41	3.29	3.27	C	
	.97		.98	.97	1.01	.98	
D	I	3.26	3.30		3.33	3.27	カナル方向
		3.29	3.29	I	3.31	3.35	
		.99	1.00		1.01	.98	
E	3.23		3.30	3.26	3.26	3.18	カナル方向
	3.17	C	3.35	3.19	3.34	C	
	1.02		.99	1.02	.98	.98	
F		3.26	3.17		3.26	3.30	カナル方向
		3.27	3.22	C	3.33	3.28	
		1.00	.98		.98	1.01	
G				3.22	*1		* 1 3.28
			I	3.20			
				1.01			

C ; 制御要素
I ; 照射筒要素

備 考

- 上段 ; 最外側燃料板流速
 中段 ; 各要素における平均流速
 下段 ; 比(上段/中段)

表 3.6(b) 標準型燃料要素最外側燃料板における流速

流量 ; 80%

	1	2	3	4	5	6	7	
A		4.41 4.34 1.02	4.42 4.32 1.02	I				単位 : m/s
		4.28 4.25 1.01	4.46 4.41 1.01	C	4.43 4.42 1.00	4.29 4.55 .94		
		4.17 4.17 1.00	4.44 4.55 .98	4.33 4.45 .97	4.40 4.38 1.00		4.17 4.29 .97	
D	I	4.37 4.42 .99	4.42 4.42 1.00	I	4.42 4.41 1.00	4.34 4.46 .97	I	カナル方向
		4.25 4.18 1.02	4.42 4.52 .98	4.38 4.30 1.02	4.38 4.49 .98		4.20 4.29 .98	
		4.30 4.33 .99	4.33 4.34 1.00	C	4.35 4.45 .98	4.40 4.32 1.02		
G			I	4.27 4.27 1.00	*1			* 1 3.60

C ; 制御要素
 I ; 照射筒要素

備考

- 上段 ; 最外側燃料板流速
- 中段 ; 各要素における平均流速
- 下段 ; 比(上段/中段)

表 3.6(c) 標準型燃料要素最外側燃料板における流速

流 量 ; 100%

	1	2	3	4	5	6	7	
A			5.53 5.43 1.02	5.52 5.49 1.01	I			単位 : m/s
			5.41 5.37 1.01	5.59 5.55 1.01	C	5.64 5.55 1.01	5.20 5.53 .94	
			5.27 5.28 1.00	5.58 5.70 .98	5.40 5.52 .98	5.56 5.53 1.01	5.23 5.40 .97	
D	I		5.47 5.56 .98	5.55 5.54 1.00	I	5.77 5.76 1.00	5.62 5.80 .97	カナル方向
			5.36 5.28 1.02	5.46 5.70 .96	5.45 5.37 1.01	5.41 5.60 .97	C	
			5.39 5.47 .99	5.43 5.44 1.00	C	5.43 5.58 .97	5.46 5.44 1.00	
G				I	5.35 5.36 1.00	*1		* 1 4.40

C ; 制御要素
I ; 照射簡要素

備 考

- 上段 ; 最外側燃料板流速
- 中段 ; 各要素における平均流速
- 下段 ; 比(上段/中段)

表 3.7 (a) 流路断面積 (1/2)

要素名称	流路名称	要素番号	流路断面積 (mm ²)	備考
1. 標準型燃料要素	1.1 燃料板	IDS-01	△ 27,102.2	5.1 を含む
		IDS-02	◇ 20,591.4	7.1 を含む
			◆ 42,070.6	5.1, 6.1, 3.3, 4.2 を含む
	1.2 燃料側板	F-13	△ 577.0	5.2 を含む ID #13-20
		F-13	◇ 1,041.6	7.2 を含む
		F-12B	◆ 2,455.4	5.2, 6.2, 3.4, 4.3 を含む
2. フロア型燃料要素	2.1 燃料板	IDF-01	15,628.8	
	2.2 燃料側板			
3. 反射体要素 A	3.1 水ギャップ (タンク—反射体)	F-01	7,514.7	ID #29 4.1 を含む
	3.2 水ギャップ (照射筒—反射体)	F-01	5.4	に含む
	3.3 水ギャップ (反射体—燃料)	IDS-01 IDS-02	1.1 ◆	に含む
	3.4 水ギャップ (反射体—側板)	F-12B	1.2 ◆	に含む
	4.1 水ギャップ (タンク—反射体)	F-01	3.1	に含む
	4.2 水ギャップ (反射体—燃料)	IDS-01 IDS-02	1.1 ◆	に含む
4. 反射体要素 B, C	4.3 水ギャップ (反射体—側板)	F-12B	1.2 ◆	に含む
	4.4 プラグ部	F-11	2,670.4	ID #29
	4.5 冷却孔 (φ14)	C	2,463.2	
	4.6 水ギャップ (反射体—照射筒)	F-12B	6.5	に含む

表 3.7 (b) 流路断面積 (2/2)

要素名称	流路名称	要素番号	流路断面積	備考
			(mm ²)	
5. 照射筒要素A	5.1 水ギャップ (照射筒—燃料)	IDS-01 IDS-02	1.1 ◇, ◆ に含む	
	5.2 水ギャップ (照射筒—側板)	F-13	1.2 ◇に 含む	
	5.3 プラグ部	F-13	1,519.8	ID #29
	5.4 水ギャップ (照射筒—反射体)	F-01	391.8	3.2 を含む
6. 照射筒要素B	6.1 水ギャップ (照射筒—燃料)	IDS-01 IDS-02	1.1 ◇に含む	
	6.2 水ギャップ (照射筒—側板)	F-13	1.2 ◇に含む	
	6.3 プラグ部	C	688.0	
	6.4 冷却孔 (φ10)	C	314.2	
	6.5 水ギャップ (照射筒—反射体)	F-01 F-01	391.8 391.8	3.2 を含む 4.6 を含む
7. 制御棒案内管	7.1 水ギャップ (案内管—燃料)	IDS-01 IDS-02	1.1 ◇に含む	
	7.2 水ギャップ (案内管—側板)	F-12B	1.2 ◇に含む	
8. プレナム	8.1 空気抜孔	C	39.3	
9. 垂直リグ 冷却管	9.1 冷却管	C	389.6	

備考

1. タンク ; 重水タンク内筒
2. 燃 料 ; 燃料要素燃料板素
3. 側 板 ; 燃料要素側板
4. C ; 計算値による
5. ♪×× ; 試験番号
6. ◇/◇/◇ ; ゾーン1/ゾーン2/ゾーン3

表 3.8 (a) 流量配結果

60%流量

項目	断面積 (mm ²)	流速 (m/sec)	流量 (m ³ /hr)	比率 (%)
1. 標準型燃料要素燃料板				
ゾーン1	27,102.2	3.31	322.9	22.9
ゾーン2	20,591.4	3.31	245.4	17.4
ゾーン3	42,070.6	3.26	493.7	35.0
2. 標準型燃料要素側板				
ゾーン1	577.0	2.12	4.4	.3
ゾーン2	1,041.6	2.12	7.9	.6
ゾーン3	2,455.0	2.16	19.1	1.4
3. フォロア型燃料要素	15,628.8	2.69	151.3	10.7
4. 水ギャップ (重水タンクー反射体 要素)	7,514.7	2.78	75.2	5.3
5. ベリリウム反射体要素 (B), (C)				
プラグ部	2,670.4	2.07	19.9	1.4
冷却孔 (φ14)	2,463.2	3.73	33.1	2.3
6. 照射簡要素 (A)				
プラグ部	1,519.8	2.59	14.2	1.0
水ギャップ (反射体要 素間)	391.8	2.67	3.8	.3
7. 照射簡要素 (B), (C)				
プラグ部	688.0	2.23	5.5	.4
冷却孔 (φ10)	314.2	3.84	4.3	.3
水ギャップ (反射体要 素 (A) 間)	391.8	2.67	3.8	.3
水ギャップ (反射体要 素 (B), (C) 間)	391.8	2.67	3.8	.3
8. プレナム空気抜き	39.3	5.87	.8	.1
9. 垂直リグ冷却管	389.6	1.67	2.3	.2

表 3.8 (b) 流量配分結果

80%流量

項目	断面積 (mm ²)	流速 (m/sec)	流量 (m ³ /hr)	比率 (%)
1. 標準型燃料要素燃料板				
ゾーン1	27,102.2	4.44	433.2	23.1
ゾーン2	20,591.4	4.42	327.7	17.4
ゾーン3	42,070.6	4.31	652.8	34.7
2. 標準型燃料要素側板				
ゾーン1	577.0	2.81	5.8	.3
ゾーン2	1,041.6	2.81	10.5	.6
ゾーン3	2,455.0	2.91	25.7	1.4
3. フォロア型燃料要素	15,628.8	3.55	199.7	10.6
4. 水ギャップ (重水タンク—反射体 要素)	7,514.7	3.67	99.3	5.3
5. ベリリウム反射体要素 (B), (C)				
プラグ部	2,670.4	2.86	27.5	1.5
冷却孔 (φ14)	2,463.2	5.05	44.8	2.4
6. 照射簡要素 (A)				
プラグ部	1,519.8	3.53	19.3	1.0
水ギャップ (反射体要 素間)	391.8	3.53	5.0	.3
7. 照射簡要素 (B), (C)				
プラグ部	688.0	3.03	7.5	.4
冷却孔 (φ10)	314.2	5.20	5.9	.3
水ギャップ (反射体要 素(A)間)	391.8	3.53	5.0	.3
水ギャップ (反射体要 素(B), (C)間)	391.8	3.53	5.0	.3
8. プレナム空気抜き	39.3	7.96	1.1	.1
9. 垂直リグ冷却管	389.6	2.27	3.2	.2

表 3.8 (c) 流量配分結果

100%流量

項目	断面積 (m ²)	流速 (m/sec)	流量 (m ³ /hr)	比率 (%)
1. 標準型燃料要素燃料板				
ゾーン1	27,102.2	5.59	545.4	23.2
ゾーン2	20,591.4	5.58	413.6	17.6
ゾーン3	42,070.6	5.39	816.3	34.7
2. 標準型燃料要素側板				
ゾーン1	577.0	3.29	6.8	.3
ゾーン2	1,041.6	3.29	12.3	.5
ゾーン3	2,455.0	3.54	31.3	1.3
3. フォロア型燃料要素	15,628.8	4.44	249.8	10.6
4. 水ギャップ (重水タンク-反射体 要素)	7,514.7	4.47	120.9	5.2
5. ベリリウム反射体要素 (B), (C)				
プラグ部	2,670.4	3.50	33.6	1.4
冷却孔 (φ14)	2,463.2	6.25	55.4	2.4
6. 照射箇要素 (A)				
プラグ部	1,519.8	4.37	23.9	1.0
水ギャップ (反射体要 素間)	391.8	4.39	6.2	.3
7. 照射箇要素 (B), (C)				
プラグ部	688.0	3.75	9.3	.4
冷却孔 (φ10)	314.2	6.45	7.3	.3
水ギャップ (反射体要 素 (A) 間)	391.8	4.39	6.2	.3
水ギャップ (反射体要 素 (B), (C) 間)	391.8	4.39	6.2	.3
8. プレナム空気抜き	39.3	9.85	1.4	.1
9. 垂直リグ冷却管	389.6	2.82	4.0	.2

表3.9 データの再現性のチェック

単位:m/s

流 量 (%)	位置	試 驗 番 号 I D #					平均 流速
		2	4	16	17	20	
60	D 5		3.66	3.61	3.62		
			1.008	.994	.997		3.63
	D 6		3.71	3.54	3.62		
			1.025	.978	1.000		3.62
80	G 4	3.52				3.54	
		.997				1.003	3.53
	G 5	3.64				3.63	
		1.000				.997	3.64
100	D 5		4.80	4.78	4.77		
			1.004	1.000	.998		4.78
	D 6		4.85	4.75	4.74		
			1.015	.994	.991		4.78
	G 4	4.60				4.64	
		.996				1.004	4.62
	G 5	4.76				4.77	
		.998				1.000	4.77
	D 5		6.32	6.13	6.07		
			1.024	.994	.984		6.17
	D 6		6.36	6.06	6.03		
			1.034	.985	.980		6.15
	G 4	5.83				5.89	
		.995				1.005	
	G 5	6.04				6.00	
		1.003				.997	6.02

上段： 流速値、下段：流速／平均流速

表 3.10 誤装荷状態のデータ

単位: m/s

流 量 (%)	位 置	流 速 (m/s)	備 考 正常時の値に対する比率
60	F 3	3.23	—
		3.22	—
	F 3 r	3.32	1.028
		3.32	1.031
	F 5	3.27	—
		3.33	—
	F 5 r	3.28	1.003
		3.35	1.006
80	F 3	4.33	—
		4.34	—
	F 3 r	4.34	1.002
		4.34	1.0
	F 5	4.35	—
		4.45	—
	F 5 r	4.34	0.998
		4.42	0.993
100	F 3	5.43	—
		5.44	—
	F 3 r	5.52	1.016
		5.43	0.998
	F 5	5.48	—
		5.56	—
	F 5 r	5.28	0.964
		5.38	0.968

上段：燃料要素最外側燃料板流速

下段：燃料要素平均流速

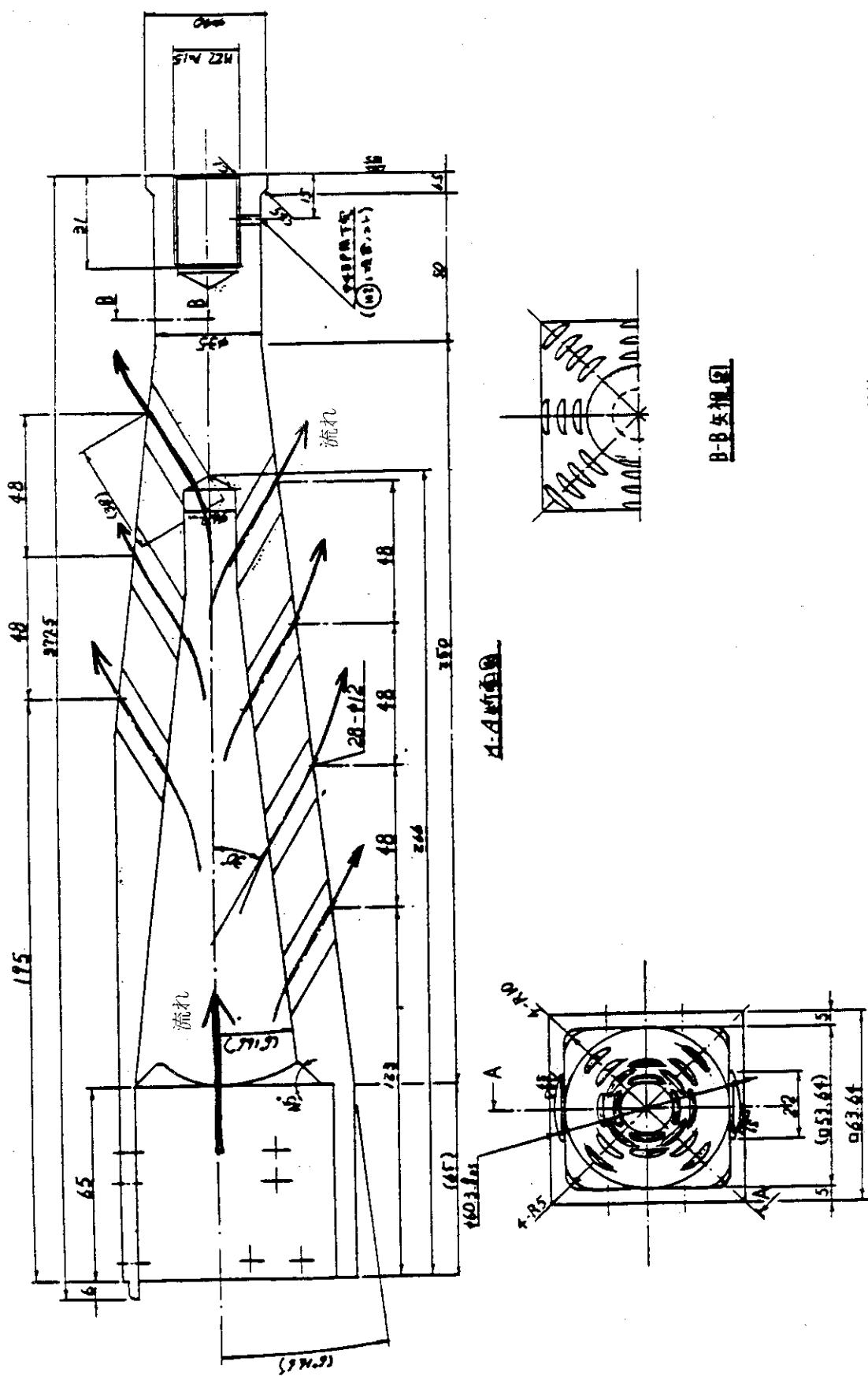


図3.2 フォロア型燃料要素のアダプタ形状

4. 燃料板表面摩擦損失係数測定及びフォロア型燃料要素 アダプタ形状の改善

4.1 燃料板表面摩擦損失係数測定

(1) 目的

本測定は、燃料板表面摩擦損失係数を実験的に調べるもので、第3章で得られたモックアップ実験装置での流量配分と、ここで得られた燃料板表面摩擦損失係数を用いた計算で得られる流量配分とを比較し、その計算方法の妥当性を検証した上で、JRR-3での流量配分を評価しようとするものである。その意味で重要な位置を占める。なお、計算方法の妥当性の検証及びJRR-3の流量配分の評価は第5章で述べる。

(2) 実験方法

燃料板表面摩擦損失係数の測定に用いるピトー管の配置を図4.1に示す。ピトー管は外径が 1.6ϕ のステンレス管で出来ており、静圧管2本と全圧管1本が1燃料要素に取付けられている。図4.1に示すように燃料板上端から600 mm下方に取付けられている静圧管と全圧管との差圧 ΔP_1 から流速 u を求める。又、燃料板上端から100 mm下方に取付けられている静圧管と600 mm下方に取付けられている静圧管の差圧 ΔP_2 から距離 $\ell = 500$ mmでの表面摩擦損失係数 λ を求める。ここで、 u 及び λ は下式で求める。

$$u = k \sqrt{2g \Delta P_1 / r_\ell} \quad (\text{m/s})$$

$$\lambda = \frac{\Delta P_2}{\frac{\ell}{D} \frac{u^2}{2g}} \quad (-)$$

ここに、 u : 流速 (m/s)

k : ピトー管係数 ($= 0.835$)

g : 重力加速度 (m/s^2)

ΔP_1 : 差圧 (mm水柱)

λ : 表面摩擦損失係数 (-)

ΔP_2 : 差圧 (mm水柱)

ℓ : 差圧測定区間長さ ($= 0.5$ m)

D : 流路の等価水力直径 ($= 0.00454$ m)

r_ℓ : 水の比重 (kg/m^3)

である。

流量条件としては、全流量 $2360 \text{ m}^3/\text{h}$ を100%流量として、100, 90, 80, 70, 60%の計5条件で各々3回実験を行った。

実験手順は、2.4節で述べた方法と同一である。

(3) 実験結果

表 4.1 に流量割合が 60, 70, 80, 90, 100 % の時の標準型燃料要素で測定された流速を示す。表 4.2 に測定された標準型燃料要素の燃料板表面摩擦係数 λ を示す。同表には、試験番号、レイノルズ数 Re 、表面摩擦係数 λ が掲げてある。¹⁾ 図 4.2 に機械工学便覧 から引用した λ と Re の関係を示すが、同図上に実験値がプロットしてある。実験結果はなめらかな管に対して適用されるカルマン・ニクラゼの式

$$1/\sqrt{\lambda} = 2 \log (Re\sqrt{\lambda}) - 0.8$$

と粗い管の中間領域に対するコールブルックの式、

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \log [(\epsilon/d)/3.71 + 2.51/Re\sqrt{\lambda}]$$

で $\epsilon/d = 0.0004$ とした関係のほど中間に入っていることがわかる。ここで、 $\epsilon/d = 0.0004$ は引抜管の表面粗さ 0.0015 m に対し等価水力直径 $de = 0.00454$ m に対する板表面の粗度 ϵ/de を示し、燃料板表面状態に相当する値である。

従って燃料板表面の摩擦損失係数 λ として、コールブルックの式で $\epsilon/d = 0.0004$ をした時の値を用いることとする。

4.2 フォロア型燃料要素アダプタ形状の改善

(1) 目的

3.2 節流速分布測定結果で見たように、モックアップ実験装置の標準型燃料要素とフォロア型燃料要素との流速には大略 1 : 0.81 の違いがあり、フォロア型燃料要素の流速が低い。フォロア型燃料要素での流速が低い大きな理由は、3.3 節測定結果の検討の(6)項で述べた様に図 3.2 に示すフォロア型燃料要素部と制御棒駆動部の接続部であるアダプタの形状によるものと考えられる。

フォロア型燃料要素では燃料板枚数が標準型燃料要素より少ないため、必ずしも標準型燃料要素と同じ流速を必要とはしないが、冷却の面からは出来るだけ標準型燃料要素の流速に近い方がよい。

以上のことから、図 4.3 に示す改良アダプタ形状を持つフォロア型燃料要素 1 体をモックアップ実験装置に組込み、流速測定から改良アダプタ形状での流動損失係数を実験的に調べ、改善の効果を確かめた。

(2) 実験方法

実験方法は、2 章に述べた方法と同一であり、フォロア型燃料要素の流速測定位置は図 2.8 に示す通りである。

(3) 実験結果とその検討

表 4.3 に、改良アダプタ付の新フォロア型燃料要素での測定された流速を、旧フォロア型燃料要素で測定された流速と対比させて掲げてある。流量割合 100, 80, 60 % のいずれの場合も、新フォロア型燃料要素で流速が増しており、改善の効果が現われているのがわかる。

同表には、定量的に流動損失係数としてどれだけ低下しているのを調べるために、標準型燃料流速、炉心の圧力損失 ΔP (m水頭)および新旧フォロア型燃料の全流動損失係数Kとその差 ΔK が掲げてある。

炉心の圧力損失は、標準型燃料要素での流速を基に5.1(1)に後述する方法で求めたものであり、新旧フォロア型燃料要素の全流動損失係数Kは、新旧フォロア型燃料要素での流速uから次式で求めたものである。

$$K = \frac{\Delta P}{(u^2 / 2 g)}$$

ここで、 ΔP ：炉心圧力損失(m水頭)

u ：流速 (m/s)

g ：重力加速度 ($= 9.8 \text{ m/s}^2$)

表4.3から、全流動損失係数の低減分 ΔK は流量割合60～100%の範囲の平均で、

$$\frac{0.622 + 0.511 + 0.556}{3} = 0.563$$

となっていることがわかる。

そこで、流動損失評価においては、新フォロア型燃料要素では旧フォロア型燃料要素に比べてアダプタ領域の流動損失係数として0.563低減されていることを考慮する。

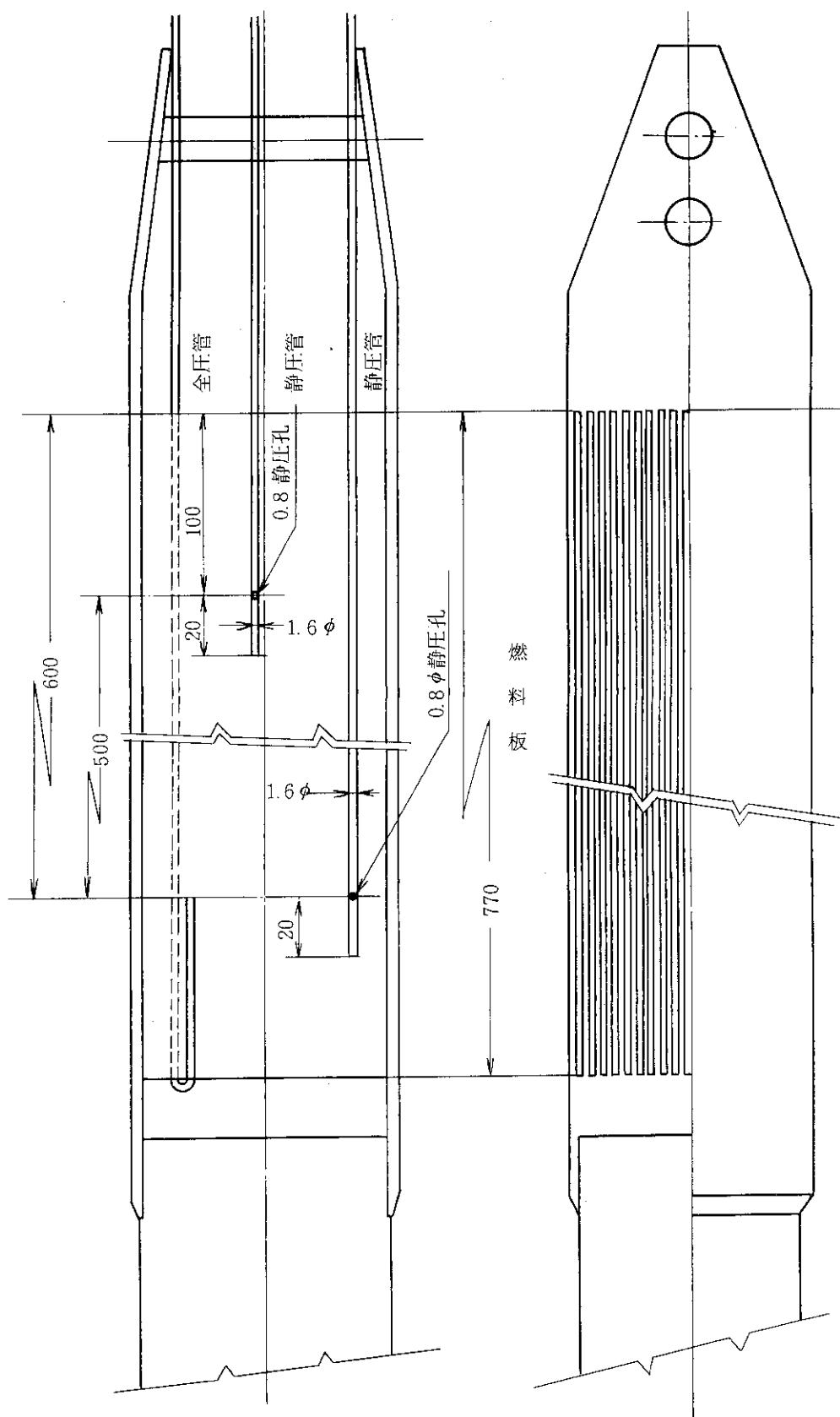


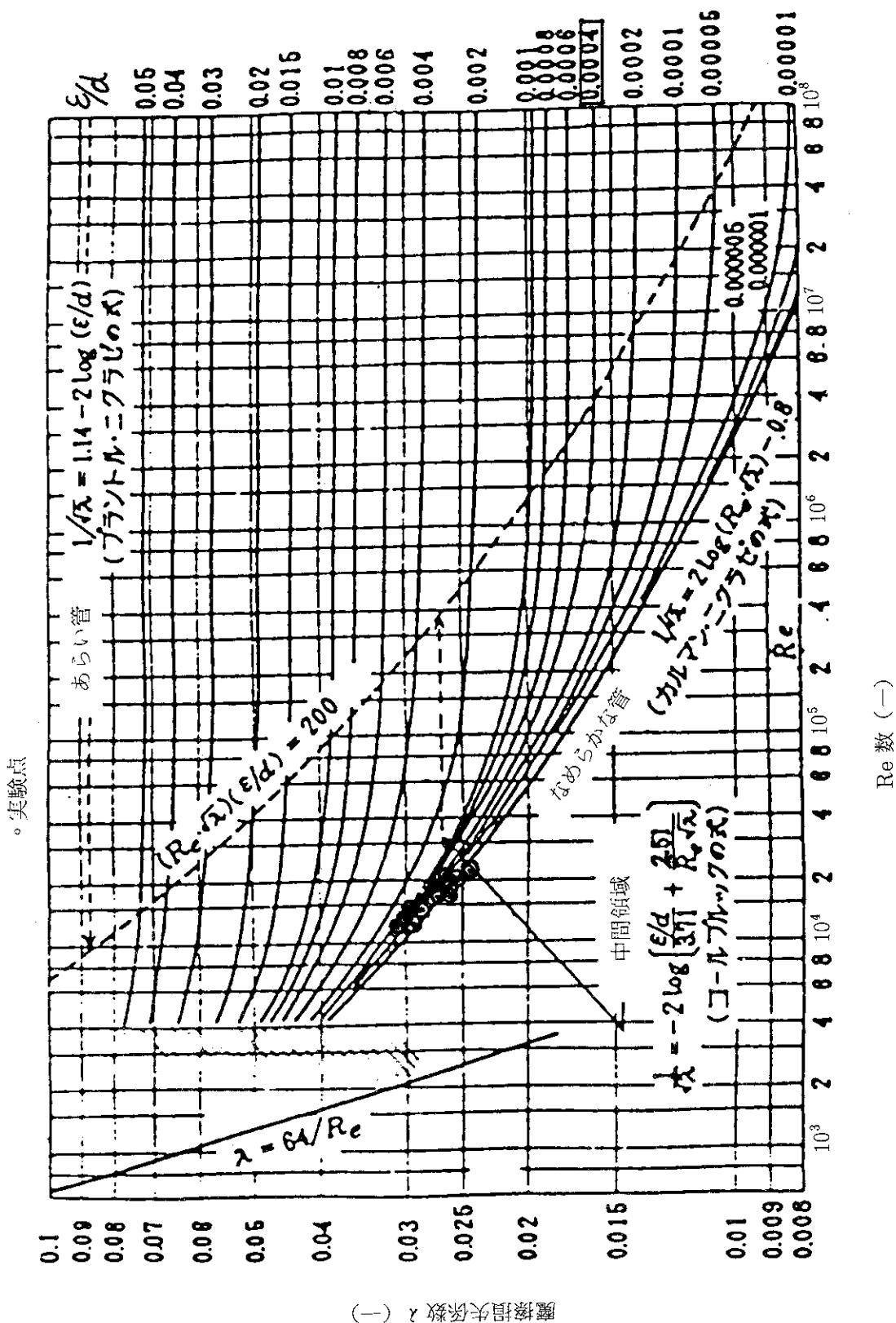
図 4.1 燃料板表面摩擦損失係数測定のためのピトーパイプ配置図

表 4.1 標準型燃料要素流速 単位 : m/s

試験番号	流 量 (%)				
	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
第1回目	3.28	3.75	4.33	4.93	5.50
第2回目	3.22	3.74	4.32	4.99	5.53
第3回目	3.21	3.78	4.36	4.96	5.34
平均	3.24	3.74	4.34	4.96	5.46
全体流量 m ³ /h	1410	1645	1880	2115	2360

表 4.2 燃料板表面の摩擦損失係数 (実測値)

番 号	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
流速(m/s)	3.28	3.22	3.21	3.75	3.74	3.73
Re	1.29×10^4	1.27×10^4	1.26×10^4	1.47×10^4	1.47×10^4	1.47×10^4
λ	0.0296	0.0296	0.0312	0.0286	0.0282	0.0295
番 号	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
流速(m/s)	4.33	4.32	4.36	4.93	4.99	4.96
Re	1.70×10^4	1.70×10^4	1.71×10^4	1.94×10^4	1.96×10^4	1.95×10^4
λ	0.0268	0.0263	0.027	0.0258	0.0248	0.0260
番 号	5-1	5-2	5-3			
流速(m/s)	5.50	5.53	5.34			
Re	2.16×10^4	2.17×10^4	2.1×10^4			
λ	0.0245	0.0242	0.0267			



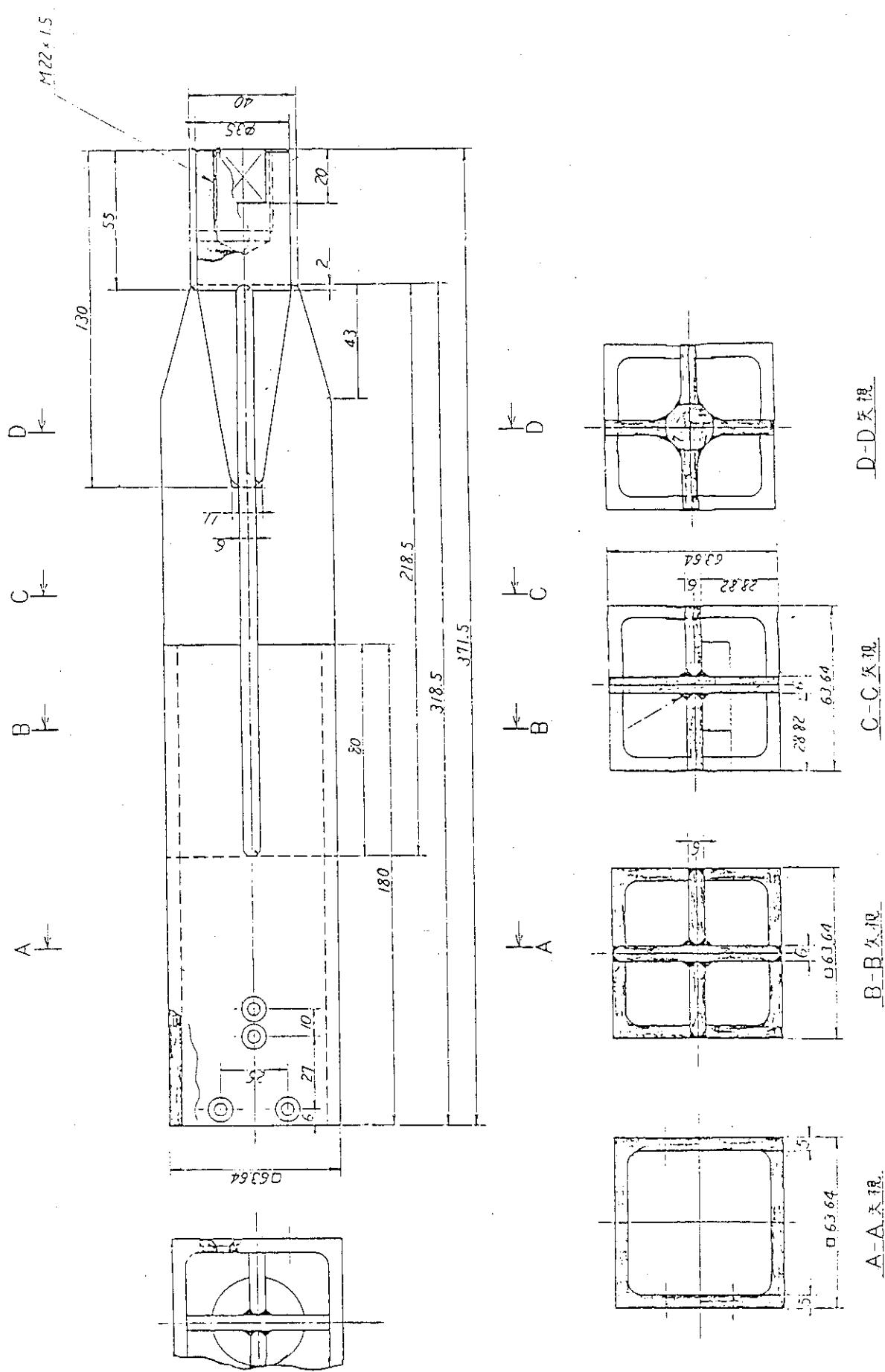


図4.3 改良アダプタ形状

表4.3 改良アダプタ付新フォロア型燃料要素の流動損失係数

項 目 流量割合 (%)	標準型燃料流速 (m/s)	流速 (m/s)		炉心の圧力損失 ΔP (m水頭)	全流動損失係数 K	$\Delta K = K_1 - K_2$
		旧フォロア型 燃料要素形状	新フォロア型 燃料要素形状			
100 (2360 m ³ /h)	5.52	4.44	4.62	8.18	8.133	7.511
90	4.96	—	4.20	—	—	—
80	4.33	3.55	3.66	5.55	8.632	8.121
70	3.74	—	3.13	—	—	—
60	3.22	2.69	2.78	3.22	8.722	8.166
						0.556

5. 炉心流動特性評価

本章ではまず、5.1節で炉心流量配分評価の妥当性を調べるために、モックアップで得られた炉心流量配分結果と、実験で得られた燃料板表面摩擦損失係数等を用いて評価した計算で得られた炉心流量配分結果とを比較検討し、炉心流量配分評価法の妥当性を調べた結果について述べる。5.2節では、5.1節で妥当性を確かめた炉心流量配分評価法を用いてJRR-3での炉心流量配分及び炉心内の長手方向圧力分布の流動特性を評価した結果について述べる。炉心流動特性評価評価を上記の様に2段階に分けて行った理由は、モックアップ実験装置とJRR-3との寸法形状に若干の違いがあるためで、JRR-3炉心流動特性評価では寸法・形状の違いが評価に入れられている。5.3節では評価結果に対する考察及び問題点が述べてある。

5.1 炉心流量配分についてのモックアップ実験と計算値との比較⁽¹⁾

(1) 標準型燃料要素における圧力損失評価⁽¹⁾

本項では、標準型燃料要素での圧力損失の実験結果と、4.1節で述べた燃料表面摩擦損失係数を用いた計算結果とを比較し圧力損失評価法の妥当性を調べた結果について述べる。

表5.1に、上記の妥当性を検討するために測定した標準型燃料要素での圧力を水頭で示す。

標準型燃料要素での流動損失係数を計算で求めるために図5.1に示すように標準型燃料要素を領域区分する。以下に各番号の領域での流動損失係数を示す。水温を20°Cとして物性値を評価する。

a. 流量 2350 m³/h の時

* 番号0の領域（反射体上面から標準型燃料要素上端まで）

縮小部: $K_0 = 0.5$

直管部: 動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$ m²/s,

流速 $u = 2.95$ m/s, 等価水力直径 $D_e = 0.53$ m

レイノルズ数 $R_e = 2.95 \times 0.53 / 10^{-6} = 1.56 \times 10^6$

表面摩擦係数 $\lambda = 0.01$, 流路長 $L = 0.64$ m

$$K_0' = \lambda \frac{L}{D_e} = 0.01 \times \frac{0.64}{0.53} = 0.012$$

* 番号1の領域

縮小部: $K_1 = 0.5$, 流路面積 $S_1 = 0.008517$ m²

* 番号2の領域

直管部: $S_2 = 0.005075$ m², $U_2 = 0.0365$ m, $D_{e2} = 0.0718$ m

$R_e = 2.57 \times 10^5$, $L_2 = 0.036$ m, $\lambda_2 = 0.014$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{L_2}{D_{e2}} = 0.014 \times \frac{0.0365}{0.0718} = 0.00712$$

表 5.1 標準燃料要素での圧力（実験値）

全流量 (m ³ /h)	2350	1880	1410
燃料要素内平均流速(m/s)	5.49	4.38	3.28
炉心流量割合 (%)	75.5	75.2	75.3
上面から下方への ベリリウム反射体 距離 H [m]	0	4.72	4.72
	1240	-1.36	1.23
	1885	-2.05	0.98
	2425	-1.15	1.78
			3.84

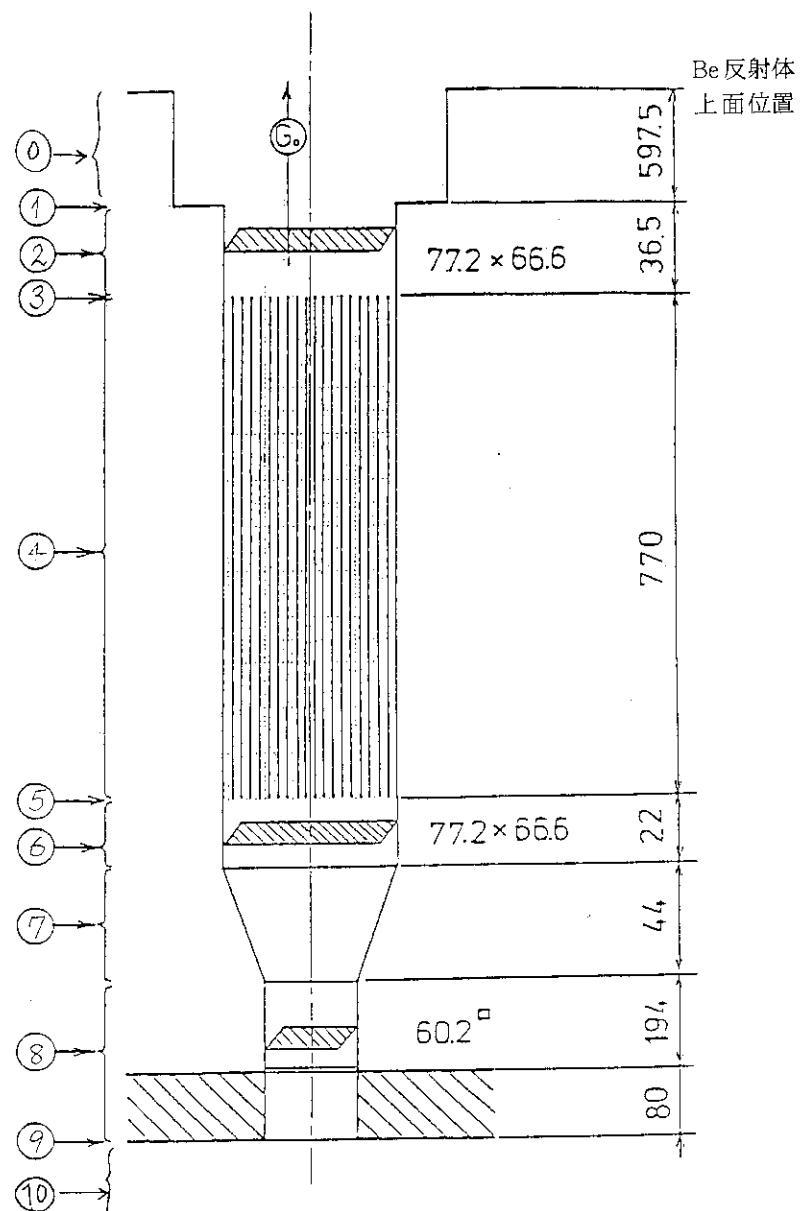


図 5.1 標準燃料要素の形状と領域区分

* 番号 3 の領域

$$\text{縮小部: } K_3 = 0.50$$

* 番号 4 の領域

$$\text{直流路部: } S_4 = 0.00345 \text{ m}^2, \quad U_4 = 5.5 \text{ m/s}, \quad D_{e2} = 0.00454 \text{ m}$$

$$R_e = 2.50 \times 10^4, \quad L_4 = 0.77 \text{ m}, \quad \lambda_4 = 0.025$$

$$K_4 = 0.025 \times \frac{0.77}{0.00454} = 4.28$$

* 番号 5 の領域

$$\text{拡大部: } S_6 = 0.005128 \text{ m}^2, \quad S_4/S_6 = 0.673$$

$$K_5 = \left\{ 1 - \left(\frac{S_4}{S_6} \right) \right\}^2 = 0.107$$

* 番号 6 の領域

$$\text{直流路部: } U_6 = 3.70 \text{ m/s}, \quad D_{e6} = 0.07142 \text{ m}, \quad R_e = 2.64 \times 10^5,$$

$$L_6 = 0.022 \text{ m}, \quad \lambda_6 = 0.016$$

$$K_6 = 0.016 \times \frac{0.022}{0.07142} = 0.005$$

* 番号 7, 8 の領域 (テーパ部を無視して長さを 8 の領域に加える)

$$\text{直流路部: } S_8 = 0.003624 \text{ m}^2, \quad D_{e8} = 0.0602 \text{ m}, \quad L_8 = 0.3145 \text{ m},$$

$$R_e = 3.15 \times 10^5, \quad \lambda_8 = 0.016, \quad u_8 = 5.23 \text{ m/s}$$

$$K_{7.8} = 0.016 \times \frac{0.3145}{0.0602} = 0.084$$

* 番号 9 の領域

$$\text{拡大部: } S_9 = 0.00593 \text{ m}^2,$$

$$K_9 = \left(1 - \frac{S_8}{S_9} \right)^2 = 0.151$$

* 番号 10 の領域

$$\text{直流路部: } U_{10} = 1.7 \text{ m/s}, \quad D_{e10} = 0.7 \text{ m}, \quad R_e = 1.2 \times 10^6$$

$$\lambda = 0.012$$

従って、 B_e 反射体上面から下方へ、 $L = 1240, 1885, 2425 \text{ mm}$ の位置での水頭 H は、
ベルヌーイの式及び上述の摩擦損失評価から次の様に求まる。

(a-1) $L = 1240 \text{ mm}$ での水頭 H_{1240}

$$H_{1240} = (4.72 + 1.24) - \frac{1}{2g} (5.49^2 - 2.95^2) \\ - \frac{1}{2g} \left\{ (0.5 + 0.012) \times \left(\frac{2.95}{5.49} \right)^2 + (0.5 + 0.00712) \times \left(\frac{3.58}{5.49} \right)^2 \right\}$$

$$+ (0.5 + 0.025 \times \frac{606}{4.54}) \} \times 5.49^2$$

$$= 5.96 - 1.094 - 6.459 = - 1.59 \text{ m}$$

(a-2) L = 1885 mm での水頭 H₁₈₈₅

$$\begin{aligned} H_{1885} &= (4.72 + 1.885) - \frac{1}{2g} (1.7^2 - 2.95^2) - \frac{1}{2g} \left\{ (0.5 + 0.012) \times \left(\frac{2.95}{5.49}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. + (0.5 + 0.00712) \times \left(\frac{3.58}{5.49}\right)^2 + (0.5 + 0.025) \times \frac{770}{4.54} + 0.107 \right. \\ &\quad \left. + 0.005 \times \left(\frac{3.70}{5.49}\right)^2 + (0.084 + 0.151) \times \left(\frac{5.23}{5.49}\right)^2 + 0.012 \times \frac{141}{700} \times \left(\frac{1.7}{5.49}\right)^2 \right\} \times 5.49^2 \\ &= 0.605 - 0.2966 - \frac{1}{2g} (0.1478 + 0.2156 + 4.847 + 0.00227 + 0.2133 \\ &\quad + 0.000232) \times 5.49^2 \\ &= 6.605 - 0.2966 - 8.3438 = - 2.035 \text{ m} \end{aligned}$$

(a-3) L = 2425 mm での水頭 H₂₄₂₅

$$H_{2425} = H_{1885} + (2.425 - 1.885) = - 1.495 \text{ m}$$

上記の計算結果と実験結果との比較を図 5.2 に示す。

b. 流量 1880 m³/h の時

このときは、a 項で述べた流量 2350 m³/h の場合の摩擦損失係数で直流路部の表面摩擦係数をレイノルズ数によって異なる部分を修正する。

(b-1) L = 1240 mm での水頭 H₁₂₄₀

$$\begin{aligned} H_{1240} &= (4.72 + 1.24) - \frac{1}{2g} (4.38^2 - 2.35^2) \\ &\quad - \frac{1}{2g} \left\{ (0.5 + 0.014) \times \left(\frac{2.35}{4.38}\right)^2 + (0.5 + 0.0079) \times \left(\frac{2.856}{4.38}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. + (0.5 + 0.027) \times \frac{606}{4.54} \right\} \times 4.38^2 \\ &= 5.96 - 0.697 - 4.373 = 0.98 \text{ (m)} \end{aligned}$$

(b-2) L = 1885 mm での水頭 H₁₈₈₅

$$\begin{aligned} H_{1885} &= (4.72 + 1.885) - \frac{1}{2g} (1.356^2 - 2.35^2) \\ &\quad - \frac{1}{2g} \left\{ (0.5 + 0.014) \times \left(\frac{2.35}{4.38}\right)^2 + (0.5 + 0.0079) \times \left(\frac{2.856}{4.38}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. + (0.5 + 0.027) \times \frac{770}{4.54} + 0.107 + 0.005 \times \left(\frac{2.95}{4.38}\right)^2 \right\} \end{aligned}$$

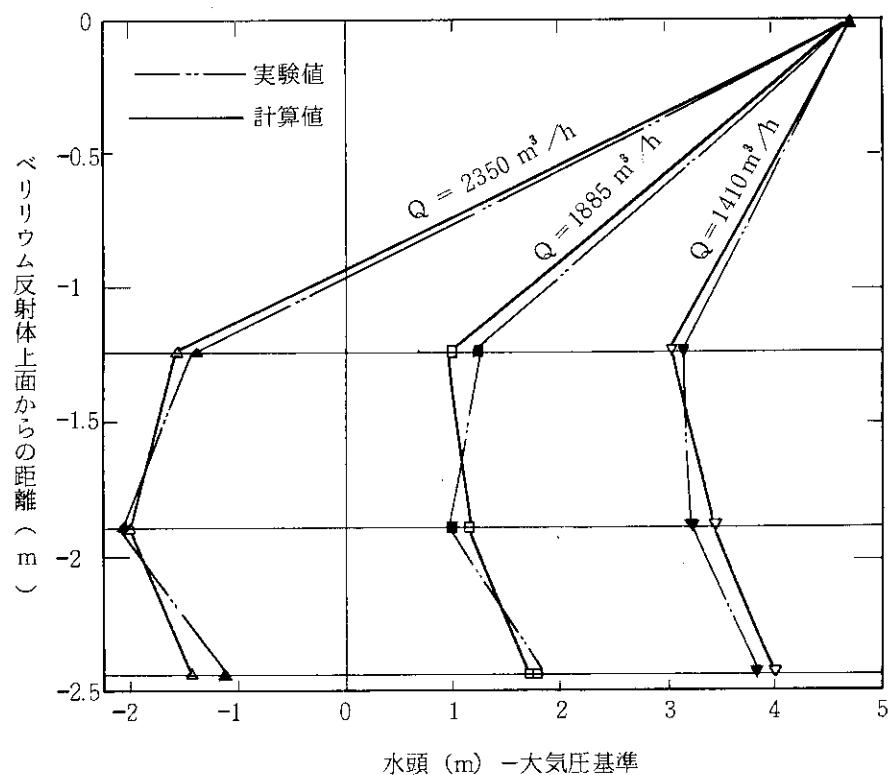


図 5.2 標準型燃料要素における圧力の実験値と計算値との比較

$$\begin{aligned}
& + (0.084+0.151) \times \left(\frac{4.17}{4.38} \right)^2 + 0.0125 \times \frac{141}{700} \times \left(\frac{1.36}{4.38} \right)^2 \} \times 4.38^2 \\
& = 6.605 + 0.188 - \frac{1}{2g} (0.148 + 0.216 + 5.186 + 0.0023 \\
& \quad + 0.213 + 0.00024) \times 4.38^2 \\
& = 6.605 + 0.188 - 5.643 = 1.15 \text{ (m)}
\end{aligned}$$

(b-3) L = 2425 mm での水頭 H₂₄₂₅

$$H_{2425} = H_{1885} + (2.425 - 1.885) = 1.69 \text{ (m)}$$

上記の計算結果と実験結果との比較を図 5.2 に示す。

c. 流量 1410 m³/h の時(C-1) L = 1240 mm での水頭 H₁₂₄₀

$$\begin{aligned}
H_{1240} & = (4.72 + 1.24) - \frac{1}{2g} (3.28^2 - 1.76^2) \\
& - \frac{1}{2g} \{ (0.5 + 0.015) \times \left(\frac{1.76}{3.28} \right)^2 + (0.5 + 0.00814) \times \left(\frac{2.14}{3.28} \right)^2 \\
& \quad + (0.5 + 0.028) \times \frac{606}{4.54} \} \times 3.28^2 \\
& = 5.96 - 0.391 - \frac{1}{2g} \{ 0.1483 + 0.2163 + 4.237 \} \times 3.28^2 \\
& = 5.96 - 0.391 - 2.526 = 3.04 \text{ (m)}
\end{aligned}$$

(c-2) L = 1885 mm での水頭 H₁₈₈₅

$$\begin{aligned}
H_{1885} & = (4.72 + 1.885) - \frac{1}{2g} (1.016^2 - 1.76^2) \\
& - \frac{1}{2g} \{ (0.5 + 0.015) \times \left(\frac{1.76}{3.28} \right)^2 + (0.5 + 0.00814) + \left(\frac{2.14}{3.28} \right)^2 \\
& \quad + (0.5 + 0.028) \times \frac{770}{4.54} + 0.107 + 0.0055 \times \left(\frac{2.21}{3.28} \right)^2 \\
& \quad + (0.089 + 0.15) \times \left(\frac{3.125}{3.28} \right)^2 + 0.013 \times \frac{141}{700} \times \left(\frac{1.016}{3.28} \right)^2 \} \times 3.28^2 \\
& = 6.605 + 0.105 - \frac{1}{2g} \{ 0.1483 + 0.2163 + 5.356 + 0.0025 \\
& \quad + 0.218 + 0.00025 \} \times 3.28^2 \\
& = 6.605 + 0.105 - 3.261 = 3.45 \text{ (m)}
\end{aligned}$$

(C-3) L = 2425 mm での水頭 H₂₄₂₅

$$H_{2425} = H_{1885} + (2.425 - 1.885) = 3.99 \text{ (m)}$$

上記の計算結果と実験結果との比較を図 5.2 に示す。

図5.2の計算値と実験値との比較から、両者の一致は非常に良好であり、計算で用いた数値の妥当性が得られている。

従って、以下の計算方法は、上述の方法に準拠して行うこととする。

(2) モックアップ実験装置に対する炉心流量配分計算のための流動損失係数評価

次に各炉心要素毎の流動損失係数を以下に示す。

a. 標準型燃料要素の流動損失係数

(1)項に既述した通りであるので省略する。

b. フォロア型燃料要素の流動損失係数

流動損失係数の評価に当り、水温を20°、フォロア型燃料要素の B_e 反射体上面から下方600 mmの位置での平均流速を5.0 m/sと仮定する。フォロア型燃料要素の形状と領域区分を図5.3に示す。図5.3に示した領域区分での流動損失係数は以下のようになる。

* 番号1の領域

$$\text{縮小部: } K_1 = 0.5$$

* 番号2の領域

$$\text{直路部: } S_2 = 0.004382 \text{ m}^2, \quad U = 2.75 \text{ m/s}, \quad D_e = 0.0662 \text{ m}$$

$$R_e = 1.8 \times 10^5, \quad \lambda = 0.016, \quad K_2 = 0.016 \times \frac{0.1515}{0.0662} = 0.0366$$

* 番号3の領域

$$\text{縮小部: } S_4 = 0.002809 \text{ m}^2, \quad S_4/S_2 = 0.641, \quad K_3 = 0.18$$

* 番号4の領域

$$\text{直路部: } U_4 = 4.291 \text{ m/s}, \quad R_e = 2.27 \times 10^5, \quad \lambda = 0.016$$

$$K_4 = 0.016 \times \frac{0.7825}{0.053} = 0.2362$$

* 番号5の領域

$$\text{縮小部: } S_6 = 0.002411 \text{ m}^2, \quad S_6/S_4 = 0.8583, \quad K_5 = 0.0625$$

* 番号6の領域

$$\text{直路部: } U_6 = 5.0 \text{ m/s}, \quad D_e = 0.0046 \text{ m}, \quad R_e = 2.3 \times 10^4,$$

$$\lambda = 0.027, \quad K_6 = 0.027 \times \frac{0.782}{0.0046} = 4.59$$

* 番号7の領域

$$\text{拡大部: } S_8 = 0.00281, \quad U = 4.291 \text{ m/s}, \quad S_6/S_8 = 0.858,$$

$$K_7 = 0.0202$$

* 番号8の領域

$$\text{テーパ部: } S_8 = 0.00071 \text{ m}^2 (D_e = 0.030 \text{ m}), \quad U_8 = 17 \text{ m/s},$$

$$R_e = \frac{17 \times 0.03}{10^{-6}} = 5.11 \times 10^5, \quad \lambda = 0.014,$$

$$K_8 = 0.014 \times \frac{112}{30} = 0.052$$

12 φ × 28 個の穴の通過部：

$$S_{8h} = 0.0032 \text{ m}^2, \quad U_{8h} = 3.81 \text{ m/s},$$

$$R_e = \frac{3.8 \times 0.012}{10^{-6}} = 4.56 \times 10^4, \quad \lambda = 0.0225$$

$$K_{8h} = (0.5 + 1 + \lambda \frac{\ell}{d}) = 1.5 + 0.0225 \frac{30}{12} = 1.56$$

* 番号 9, 10 の領域

$$\text{縮小部: } S_{10} = 0.003126 \text{ m}^2, \quad S_{11} = 0.00342 \text{ m}^2, \quad U_{10} = 3.856 \text{ m/s}$$

$$S_{10}/S_{11} = 0.914, \quad K_9 = 0.036$$

$$\text{直流路部: } R_e = 3.856 \times 0.0262 / 10^{-6} = 10^5, \quad \lambda = 0.018$$

$$K_{10} = 0.018 \times \frac{120}{26.2} = 0.0824$$

$$\Sigma K_{9,10} = 0.1184$$

$$* \text{ 番号 11 の領域: } U_{11} = 3.52 \text{ m/s}, \quad R_e = 3.52 \times \frac{0.0312}{10^{-6}} = 1.1 \times 10^5$$

$$\lambda_{11} = 0.018, \quad K_{11} = 0.018 \times \frac{0.78}{0.0312} = 0.45$$

* 番号 12 の領域

$$\text{拡大・縮小部: } S_{12} = 0.02 \text{ m}^2, \quad U = 0.603 \text{ m/s}, \quad S_{11}/S_{12} = 0.171$$

$$K_{12} = 0.4 + 0.687 = 1.087$$

c. 燃料要素側板間

流路形状と領域区分を図 5.4 に示す。流速を 3 m/s と仮定する。

* 番号 1 の領域

$$\text{縮小部: } S_0 = 8.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2, \quad S_1 = 1.534 \times 10^{-4} \text{ m}^2, \quad S_1/S_0 = 0.1724,$$

$$K_1 = 0.39$$

* 番号 2 の領域

$$\text{直流路部: } D_e = 1.987 \times 10^{-3} \text{ m}, \quad U = 3 \text{ m/s}, \quad R_e = 5.96 \times 10^3,$$

$$\lambda = 0.037, \quad K_2 = 0.037 \times \frac{0.9425}{0.001987} = 17.55$$

* 番号 3 の領域

$$\text{縮小部: } S_4 = 0.00004 \text{ m}^2, \quad S_4/S_2 = 0.261, \quad K_3 = 0.36$$

$$U = 11.505 \text{ m/s}$$

* 番号 4 の領域

$$\text{直流路部: } D_e = 9.76 \times 10^{-4} \text{ m}, \quad U = 11.505 \text{ m/s}, \quad R_e = 1.12 \times 10^4$$

$$K_4 = 0.032 \times \frac{0.12}{0.000976} = 3.934$$

d. B 反射体要素の流動損失係数

B_e 反射体要素の形状と領域区分を図 5.5 に示す。流速を 4.5 m/s と仮定する。

* 番号 1 の領域

縮小部: $K_1 = 0.5$

* 番号 2 の領域

直流路部: $S_2 = 0.00159 \text{ m}^2$, $U = 0.945 \text{ m/s}$, $R_e = 4.253 \times 10^4$

$$D_e = 0.045 \text{ m}, \quad \lambda = 0.022, \quad K_2 = 0.022 \times \frac{0.03}{0.045} = 0.015$$

* 番号 3 の領域

縮小部: $S_4/S_2 = 0.21$, $K_3 = 0.38$, $U_4 = 4.5 \text{ m/s}$

* 番号 4 の領域

直流路部: $D_e = 0.005 \text{ m}$, $R_e = 4.5 \times 0.005 \times 10^6 = 2.25 \times 10^4$

$$\lambda = 0.027, \quad K_4 = 0.027 \times \frac{1.424}{0.005} = 7.69$$

* 番号 5 の領域

拡大部: $S_6 = 0.00159 \text{ m}^2$, $S_4/S_6 = 0.21$, $K_5 = 0.624$

* 番号 6, 7 の領域

直流路部: $D_e = 0.045 \text{ m}$, $U = 0.945 \text{ m/s}$, $R_e = 4.25 \times 10^4$,

$$\lambda = 0.022, \quad K_{6,7} = 0.022 \times \frac{0.083}{0.045} = 0.041$$

* 番号 8 の領域

縮小部: $K_8 = 0.5$

* 番号 9 の領域

直管部: $D_e = 0.015 \text{ m}$, $U_9 = 8.51 \text{ m/s}$, $R_e = 1.27 \times 10^5$

$$\lambda = 0.018, \quad K_9 = 0.018 \times \frac{0.20}{0.015} = 0.24$$

* 番号 10 の領域

拡大部: $K = 1.0$

e. 照射筒 A 型の流動損失係数

照射筒 A, B 型の形状と領域区分を図 5.6 に示す。基準の流速を 4.5 m/s に仮定する。

* 番号 1 の領域

縮小部: $K_1 = 0.5$, $U_2 = 4.5 \text{ m/s}$

* 番号 2 の領域

直流路部: $S_2 = 0.0005066 \text{ m}^2$, $D_e = 0.005 \text{ m}$, $R_e = 2.25 \times 10^4$

$$\lambda = 0.026, \quad K_2 = 0.026 \times \frac{0.9615}{0.005} = 5.0$$

* 番号 3 の領域

拡大部: $S_2/S_4 = 0.144, \quad K_3 = 0.733$

* 番号 4 の領域

直流路部: $U_4 = 0.6465 \text{ m/s}, \quad D_e = 0.067 \text{ m}, \quad R_e = 4.33 \times 10^4$

$$K_4 = 0.0225 \times \frac{0.054}{0.067} = 0.0181$$

* 番号 5 の領域

拡大部: $S_6^U = 0.00555 \text{ m}^2, \quad S_4/S_6^U = 0.635, \quad K_5 = 0.133$

* 番号 6, 7 の領域

直流路部: $D_e = 0.0602 \text{ m}, \quad S_7 = 0.003624 \text{ m}^2,$

$U_7 = 0.14 \text{ m/s}, \quad R_e = 8.43 \times 10^3, \quad \lambda = 0.031$

$$K_{6,7} = 0.031 \times \frac{0.22}{0.0602} = 0.11$$

* 番号 8 の領域

拡大部: $S_8 = 0.00555 \text{ m}^2, \quad S_7/S_8 = 0.6529, \quad K_8 = 0.12$

f. 照射筒B型の流動損失係数

基準流速を 4.5 m/s に仮定する。

* 番号 1 の領域

縮小部: $K_1 = 0.5$

* 番号 2 の領域

直流路部: $D_e = 0.005617 \text{ m}, \quad S_2 = 7.147 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

$$R_e = 2.528 \times 10^4, \quad \lambda = 0.026, \quad K_2 = 0.026 \times \frac{0.9615}{0.005617} = 4.451$$

* 番号 3 の領域

拡大部: $S_4 = 0.002425 \text{ m}^2, \quad S_2/S_4 = 0.2947, \quad K_3 = 0.4975$

* 番号 4 の領域

直流路部: $D_e = 0.03216 \text{ m}, \quad U = 1.326 \text{ m/s}, \quad R_e = 4.265 \times 10^4,$

$$\lambda = 0.022, \quad K_4 = 0.022 \times \frac{0.054}{0.03216} = 0.037$$

* 番号 5 の領域

拡大部: $S_4/S_6^U = 0.4369, \quad K_5 = 0.317$

* 番号 6, 7 の領域

テーパ部: 直流路部で近似, $L = 0.22 \text{ m}, \quad D_e = 0.0602 \text{ m},$

$U_7 = 0.8875 \text{ m/s}, \quad R_e = 5.34 \times 10^4, \quad \lambda = 0.021$

$$K_{6,7} = 0.021 \times \frac{0.22}{0.0602} = 0.0767$$

* 番号 8 の領域

拡大部: $K_8 = 0.12$ g. 重水タンク内胴と B_e 反射体との隙間（コアバイパス）

領域の流動損失係数

基準流速を 3 m/s に仮定する。形状と領域区分を図 5.7 に示す。

* 番号 1 の領域

縮小部: $K_1 = 0.5$

* 番号 2 の領域

直流路部: $S_2 = 0.06286 \text{ m}^2$, $U_2 = 0.359 \text{ m/s}$, $D_e = 0.06 \text{ m}$

$$R_e = 2.15 \times 10^4, \quad \lambda = 0.026, \quad K_2 = 0.026 \times \frac{0.073}{0.06} = 0.032$$

* 番号 3 の領域

縮小部: $S_4/S'_2 = 0.007515/0.05598 = 0.134$, $K_3 = 0.40$

* 番号 4 の領域

直流路部: $D_e = 0.008 \text{ m}$, $U = 3 \text{ m/s}$, $R_e = 2.4 \times 10^4$,

$$\lambda = 0.025, \quad K_4 = 0.025 \times \frac{1.40}{0.008} = 4.375$$

* 番号 5 の領域

縮小部: $S_6 = 0.00192 \text{ m}^2$, $U_6 = 11.74 \text{ m/s}$, $S_6/S_4 = 0.255$

$$K_5 = 0.36$$

* 番号 6 の領域

直流路部: $D_e = 0.008 \text{ m}$, $r = \{(18+4)/2\} \times 10^{-3} = 0.0011 \text{ m}$,

$$R_e = 8 \times 10^{-3} \times 11.74 \times 10^6 = 9.4 \times 10^4, \quad \lambda = 0.019,$$

$$K_6 = 0.019 \times \frac{0.02}{0.008} + \{ 0.131 + 0.1632 \times \left(\frac{8}{11} \right)^{3.5} \}$$

$$= 0.232$$

* 番号 7 の領域

縮小部: $S_8 = 0.00213 \text{ m}^2$, $S_8/S_6 = 0.3344$, $K_7 = 0.34$,

* 番号 8 の領域

直流路部: $D_e = 0.01414 \text{ m}$, $U = 8.971 \text{ m/s}$, $R_e = 1.27 \times 10^5$,

$$\lambda = 0.017, \quad K_8 = 0.017 \times \frac{0.12}{0.01414} = 0.1443$$

* 番号 9 の領域

拡大部: $S_{10} = 0.0144 \text{ m}^2$, $S_8/S_{10} = 0.1745$, $K_9 = 0.681$

* 番号 10, 11 の領域

直流路部と拡大部: $U_{10} = 1.565 \text{ m/s}$, $D_e = 0.06 \text{ m}$,

$$R_e = 9.39 \times 10^4, \quad \lambda = 0.019$$

$$K_{10} = 0.019 \times \frac{0.08}{0.06} + 1 = 1.025$$

上述の各要素毎の各領域の流動損失係数を表 5.2 に、流速と共に示す。なお、標準型燃料要素については領域番号を 1 からはじめて、1 つずつずらしてある。

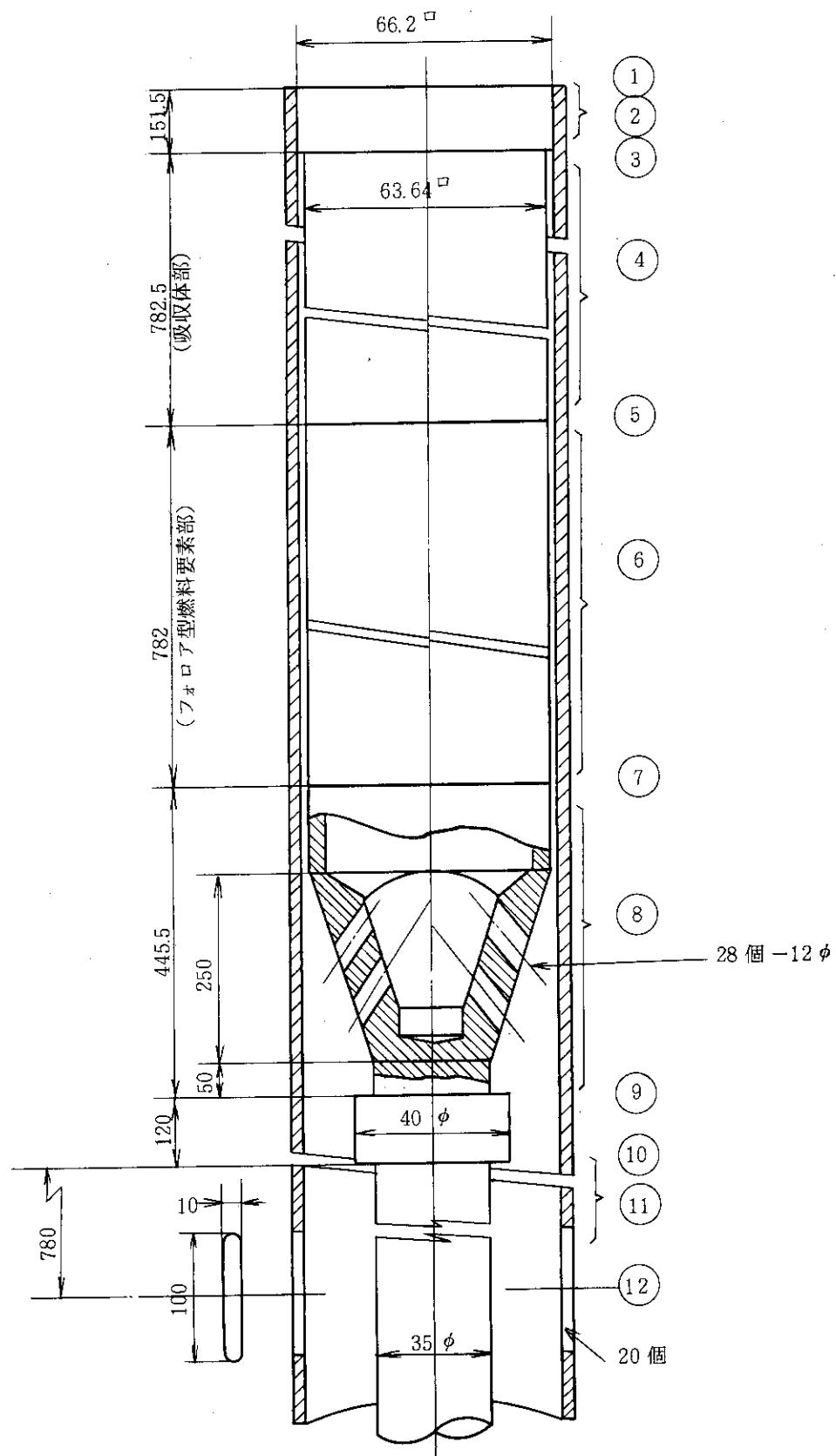


図 5.3 フォロア型燃料要素の形状と領域区分

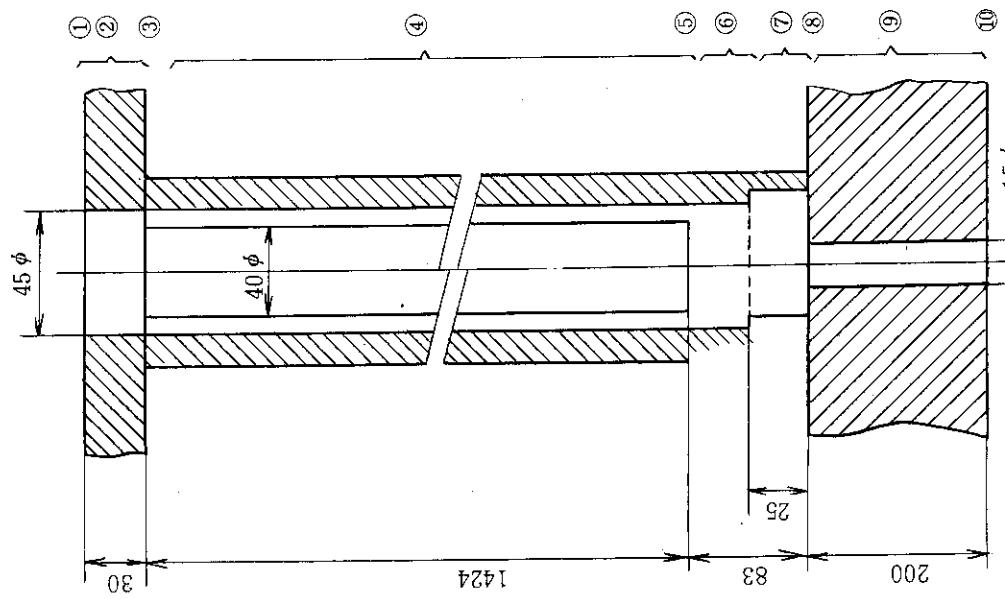


図 5.5 Be 反射体要素の形状と領域区分

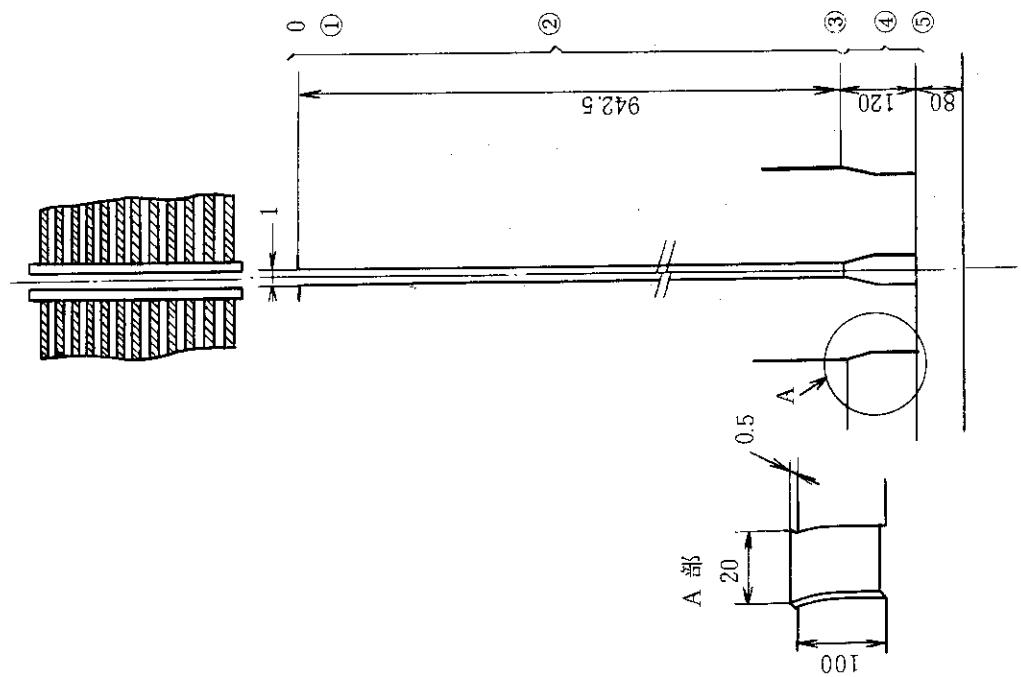


図 5.4 燃料側板間の形状と領域区分

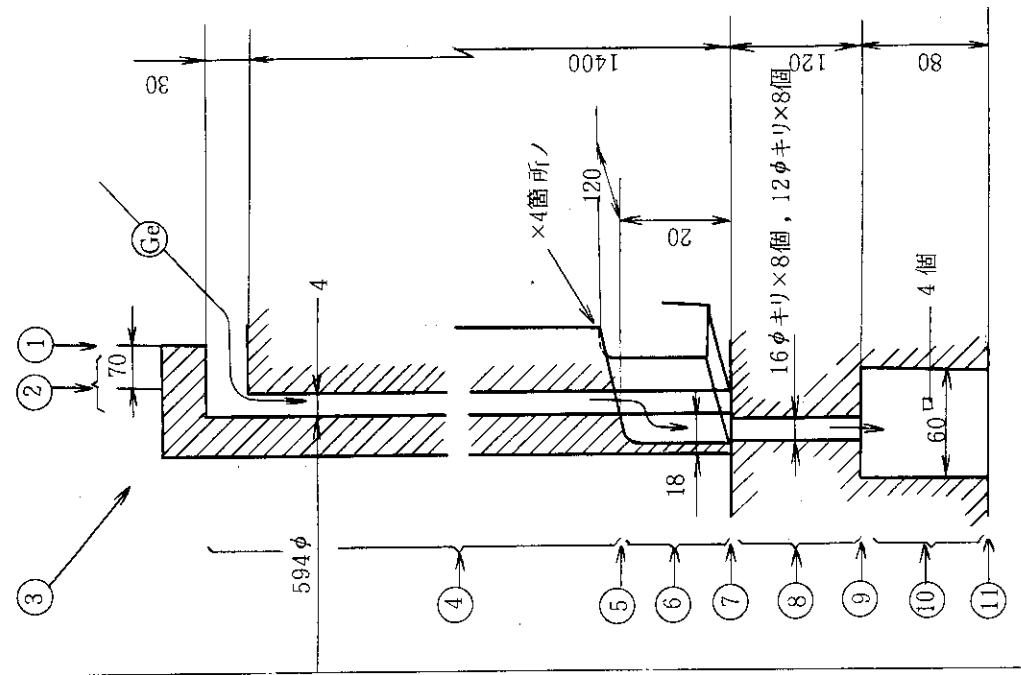


図 5.7 コアバイパスの形状と領域区分

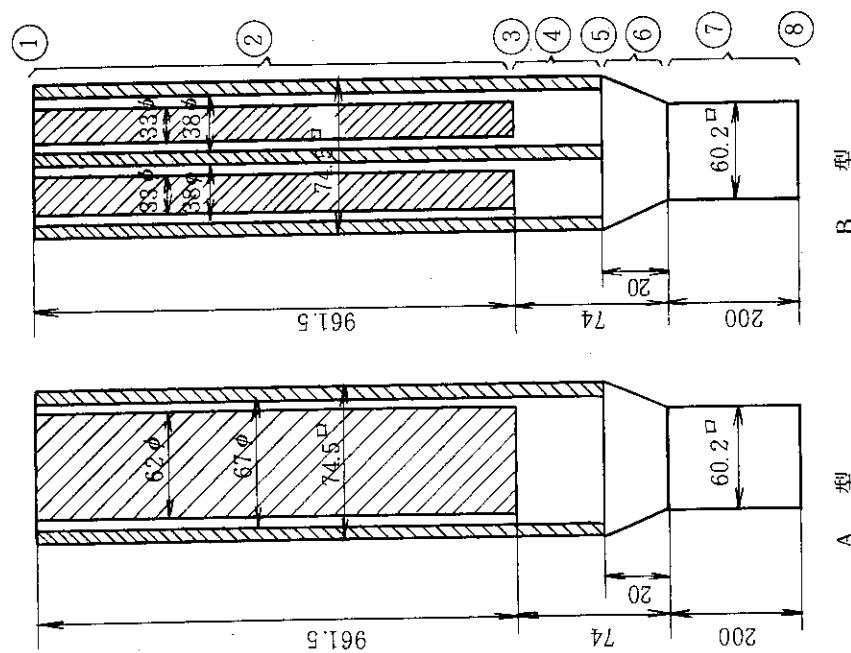


図5.6 照射筒要素A, B型の形状と領域区分

表 5.2 各要素の流動損失係数(流量割合 100 % の時)

要 領、素 域	標準型 燃料要素	フォロア型 燃料要素	燃料側 板 間	コアバイパス	B_e 反射体 B, C	照射筒 A	照射筒 B
1	0.512	0.50	0.39	0.5	0.5	0.5	0.5
	2.95	2.750	3	0.359	0.945	4.5	4.5
2	0.5	0.0366	17.55	0.032	0.01	5.0	4.451
	3.58	2.75	3	0.359	0.945	4.5	4.5
3	0.00712	0.18	0.36	0.4	0.38	0.733	0.4975
	3.58	4.291	11.505	3	4.5	4.5	4.5
4	0.5	0.2362	3.934	4.375	7.69	0.0181	0.037
	5.5	4.291	11.505	3	4.5	0.6465	1.326
5	4.28	0.0625	1	0.36	0.624	0.133	0.317
	5.5	5.0	11.505	11.74	4.5	0.6465	1.326
6	0.107	4.59		0.232	0.041		
	5.5	5.0		11.74	0.945		
7	0.005	0.0202		0.34		0.11	0.0767
	3.70	5.0		8.971		0.14	0.8875
8		0.052	8, 9	0.144+0.681	0.5	0.12	0.12
		17		8.971	8.51	0.14	0.8875
9	0.084	1.56	10, 11	1.025	0.24		
	5.23	3.81		1.565	8.51		
10	0.151	0.1184			1		
	5.23	3.856			8.51		
11		0.45	1.087				
		0.52	0.603				

上段：流動損失係数

下段：流速 (m/s)

(3) 炉心流量配分評価

① 標準型燃料要素で流速 $U = 5.49 \text{ m/s}$ の時（流量割合 100 % の時）

炉心での圧力損失 ΔP は、標準燃料要素で次のように求まる。

$$\begin{aligned}\Delta P &= \left\{ 0.512 \times \left(\frac{2.95}{5.49} \right)^2 + (0.5 + 0.00712) \times \left(\frac{3.58}{5.49} \right)^2 + (0.5 + 4.28 + 0.107) \right. \\ &\quad \left. + 0.005 \times \left(\frac{3.7}{5.49} \right)^2 + 0.084 \times \left(\frac{5.23}{5.49} \right)^2 + 0.151 \times \left(\frac{5.23}{5.49} \right)^2 \right\} \times \frac{5.49^2}{2 \times 9.8} \\ &= (0.1478 + 0.2156 + 4.887 + 0.0023 + 0.0762 + 0.137) \\ &\quad \times \frac{5.49^2}{2 \times 9.8} = 8.405 \text{ (m)}\end{aligned}$$

従って各要素の流速は以下のように得られる。

* フォロア型燃料要素での流速

$$\begin{aligned}\Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.0366) \times \left(\frac{2.75}{5.0} \right)^2 + (0.18 + 0.2362) \times \left(\frac{4.291}{5.0} \right)^2 + (0.0625 \right. \\ &\quad \left. + 4.59 + 0.0202) + 0.052 \times \left(\frac{17}{5} \right)^2 + 1.56 \times \left(\frac{3.81}{5.0} \right)^2 + 0.1184 \times \left(\frac{3.856}{5.0} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 0.45 \times \left(\frac{3.52}{5.0} \right)^2 + 1.087 \times \left(\frac{0.603}{5.0} \right)^2 \right\} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\ &\quad + 0.512 \times \left(\frac{2.95}{5.49} \right)^2 \times 5.49^2 / 2 \times 9.8 \\ &= (0.1623 + 0.3065 + 4.6727 + 0.6011 + 0.9058 + 0.0704 \\ &\quad + 0.223 + 0.0158) \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.2273\end{aligned}$$

$$\frac{U^2}{2 \times 9.8} = \frac{8.405 - 0.2273}{6.9576}$$

$$U = 4.8 \text{ m/s}$$

* 燃料板側板間での流速

$$\begin{aligned}\Delta P &= \left\{ (0.39 + 17.55) + (0.36 + 3.934 + 1) \times \left(\frac{11.505}{3} \right)^2 \right\} \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\ &\quad + 0.2273 \\ &= (17.94 + 77.86) \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.2273\end{aligned}$$

$$U = 1.293 \text{ m/s}$$

* コアバイパスでの流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.032) \times \left(\frac{0.359}{3}\right)^2 + (0.4 + 4.375) + (0.36 + 0.232) \times \left(\frac{11.74}{3}\right)^2 \right. \\ \left. + (0.34 + 0.144 + 0.681) \times \left(\frac{8.971}{3}\right)^2 + 1.025 \times \left(\frac{1.565}{3}\right)^2 \right\} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\ = (0.00762 + 4.775 + 9.066 + 10.418 + 0.2789) \times \frac{U^2}{2 \times 9.8}$$

$$U^2 = \frac{8.405 \times 2 \times 9.8}{24.54}$$

$$U = 2.591 \text{ m/s}$$

* B_e 反射体での流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.01) \times \left(\frac{0.945}{4.5}\right)^2 + (0.38 + 7.69 + 0.624) + 0.041 \times \left(\frac{0.945}{4.5}\right)^2 \right. \\ \left. + (0.5 + 0.24 + 1) \times \left(\frac{8.51}{4.5}\right)^2 \right\} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\ = (0.0243 + 8.694 + 6.223) \times \frac{U^2}{2 \times 9.8}$$

$$U = 3.32 \text{ m/s}$$

* 照射筒 A での流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 5.0 + 0.733) + (0.0181 + 0.133) \times \left(\frac{0.6465}{4.5}\right)^2 + (0.11 + 0.12) \right. \\ \left. \times \left(\frac{0.14}{4.5}\right)^2 \right\} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.2273 \\ = (6.233 + 0.00312 + 0.00022) \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.2273$$

$$U = 5.07 \text{ m/s}$$

* 照射筒 B での流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 4.451 + 0.4975) + (0.037) \times \left(\frac{1.326}{4.5}\right)^2 \right. \\ \left. + (0.0767 + 0.12) \times \left(\frac{0.8875}{4.5}\right)^2 \right\} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.2273 \\ = (5.4485 + 0.0307 + 0.00765) \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.2273$$

$$U = 5.405 \text{ m/s}$$

(2) 標準型燃料要素で流速 4.4 m/s の時 (流量割合 80 % の時)

炉心での圧力損失 ΔP

$$\begin{aligned}\Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.0145) \times \left(\frac{2.95}{5.49}\right)^2 + (0.5 + 0.00788) \times \left(\frac{3.58}{5.49}\right)^2 + (0.5 + 4.58 + 0.107) \right. \\ & \left. + 0.005 \times \left(\frac{3.7}{5.49}\right)^2 + 0.084 \left(\frac{5.23}{5.49}\right)^2 + 0.151 \times \left(\frac{5.23}{5.49}\right)^2 \right\} \times \frac{4.4^2}{2 \times 9.8} \\ & = 5.696 \text{ (m)}\end{aligned}$$

* フォロア型燃料要素での流速

$$\begin{aligned}\Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.0389) \times \left(\frac{2.75}{5.0}\right)^2 + (0.18 + 0.2362) \times \left(\frac{4.291}{5.0}\right)^2 + (0.0625 + 4.675 + 0.0202) \right. \\ & \left. + 0.052 \times \left(\frac{1.7}{5}\right)^2 + 1.56 \times \left(\frac{3.81}{5}\right)^2 + (0.036 + 0.087) \times \left(\frac{3.856}{5}\right)^2 \right. \\ & \left. + 0.475 \times \left(\frac{3.52}{5}\right)^2 + 1.087 \times \left(\frac{0.603}{5}\right)^2 \right\} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.1467 \\ & = (0.163 + 0.3065 + 4.7577 + 0.6011 + 0.9058 + 0.0732 \\ & \quad + 0.2354 + 0.0158) \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.1467 \\ U^2 = & \frac{(5.696 - 0.1467) \times 2 \times 9.8}{7.0585} \\ U = & 3.925 \text{ m/s}\end{aligned}$$

* 燃料板側板間での流速

$$\begin{aligned}\Delta P = & \left\{ (0.39 + 18.50) + (0.36 + 4.06 + 1) \times \left(\frac{11.505}{3}\right)^2 \right\} \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.1467 \\ & = 5.031 U^2 + 0.1467\end{aligned}$$

$$U = 1.05 \text{ m/s}$$

* コアバイパスでの流速

$$\begin{aligned}\Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.0345) \times \left(\frac{0.359}{3}\right)^2 + (0.4 + 4.55) + (0.36 + 0.05 + 0.1845) \right. \\ & \left. \times \left(\frac{11.74}{3}\right)^2 + (0.34 + 0.153 + 0.681) \times \left(\frac{8.971}{3}\right)^2 + 1.0253 \times \left(\frac{1.565}{3}\right)^2 \right\} \\ & \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\ & = (0.00765 + 4.95 + 9.104 + 10.498 + 0.279) \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\ & = 1.2673 U^2\end{aligned}$$

$$U = 2.12 \text{ m/s}$$

* B_e 反射体での流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.0164) \times \left(\frac{0.945}{4.5} \right)^2 + (0.38 + 7.833 + 0.624) + 0.045 \times \left(\frac{0.945}{4.5} \right)^2 \right. \\ \left. + (0.5 + 0.253 + 1) \times \left(\frac{8.51}{4.5} \right)^2 \right\} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\ = (0.0228 + 8.837 + 0.002 + 6.269) \times \frac{U^2}{2 \times 9.8}$$

$$U = 2.716 \text{ m/s}$$

* 照射筒 A での流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 5.193 + 0.733) + (0.0185 + 0.133) \times \left(\frac{0.6465}{4.5} \right)^2 \right. \\ \left. + (0.121 + 0.12) \times \left(\frac{0.14}{4.5} \right)^2 \right\} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.1467 \\ = (6.426 + 0.00313) + 0.00023 \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.1467$$

$$U = 4.113 \text{ m/s}$$

* 照射筒 B での流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 4.622 + 0.4975) + (0.0387 + 0.317) \times \left(\frac{1.326}{4.5} \right)^2 \right. \\ \left. + (0.0785 + 0.12) \times \left(\frac{0.8875}{4.5} \right)^2 \right\} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.1467 \\ = (5.620 + 0.0309 + 0.0077) \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.1467$$

$$U = 4.384 \text{ m/s}$$

③ 標準型燃料要素で流速 3.3m/s の時 (流量割合 60 % の時)

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.015) \times \left(\frac{2.95}{5.49} \right)^2 + (0.5 + 0.00814) \times \left(\frac{3.58}{5.49} \right)^2 + (0.5 + 4.75 + 0.107) \right. \\ \left. + 0.0055 \times \left(\frac{3.7}{5.49} \right)^2 + 0.089 \times \left(\frac{5.23}{5.49} \right)^2 + 0.151 \times \left(\frac{5.23}{5.49} \right)^2 \right\} \times \frac{3.3^2}{2 \times 9.8} \\ = (0.1487 + 0.2161 + 5.357 + 0.0025 + 0.0808 + 0.137) \times \frac{3.3^2}{2 \times 9.8}$$

* フォロア型燃料要素での流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.0423) \times \left(\frac{2.75}{5} \right)^2 + (0.18 + 0.2583) \times \left(\frac{4.291}{5} \right)^2 \right. \\ \left. + (0.0625 + 5.015 + 0.0202) + 0.054 \times \left(\frac{17}{5} \right)^2 + 1.56 \times \left(\frac{3.81}{5} \right)^2 \right\}$$

$$\begin{aligned}
& + (0.036+0.0916) \times \left(\frac{3.856}{5} \right)^2 + 0.5 \times \left(\frac{3.52}{5} \right)^2 + 1.087 \times \left(\frac{0.603}{5} \right)^2 \} \\
& \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.0826 \\
= & (0.164 + 0.3228 + 5.098 + 0.6242 + 0.9058 + 0.0759 \\
& + 0.2478 + 0.0158 \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.0826
\end{aligned}$$

$$U = 2.91 \text{ m/s}$$

* 燃料板側板間での流速

$$\begin{aligned}
\Delta P = & \left\{ (0.39+19.92) + (0.36+4.18+1) \times \left(\frac{11.505}{3} \right)^2 \right\} \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\
& + 0.0826 \\
= & (20.31+81.48) \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.0826
\end{aligned}$$

$$U = 0.787 \text{ m/s}$$

* コアバイパスでの流速

$$\begin{aligned}
\Delta P = & \left\{ (0.5+0.0345) \times \left(\frac{0.359}{3} \right)^2 + (0.4+4.90) + (0.36+0.0563+0.1845) \right. \\
& \times \left(\frac{11.74}{3} \right)^2 + (0.34+0.17+0.681) \times \left(\frac{8.971}{3} \right)^2 + 1.0267 \left(\frac{1.565}{3} \right)^2 \} \\
& \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\
= & (0.00765+5.30+9.201+10.65+0.2794) \frac{U^2}{2 \times 9.8}
\end{aligned}$$

$$U = 1.595 \text{ m/s}$$

* B_e 反射体での流速

$$\begin{aligned}
\Delta P = & \left\{ (0.5+0.017) \times \left(\frac{0.945}{4.5} \right)^2 + (0.38+8.402+0.624) + 0.0467 \left(\frac{0.945}{4.5} \right)^2 \right. \\
& + (0.5+0.267+1) \times \left(\frac{8.51}{4.5} \right)^2 \} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} \\
= & (0.0228+9.406+0.00206+6.3193) \times \frac{U^2}{2 \times 9.8}
\end{aligned}$$

$$U = 2.027 \text{ m/s}$$

* 照射筒 A での流速

$$\begin{aligned}
\Delta P = & \left\{ (0.5+5.77+0.733) + (0.0201+0.133) \times \left(\frac{0.6465}{4.5} \right)^2 + (0.135+0.12) \right. \\
& \times \left(\frac{0.14}{4.5} \right)^2 \} \times \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.0826
\end{aligned}$$

$$= (7.003 + 0.00316 + 0.00025) \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.0826$$

$$U = 3.00 \text{ m/s}$$

* 照射筒 B での流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 5.05 + 0.4975) + (0.0429 + 0.317) \times \left(\frac{1.326}{4.5} \right)^2 \right.$$

$$+ (0.0858 + 0.12) \times \left(\frac{0.8875}{4.5} \right)^2 \left. \right\} \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.0826$$

$$= (6.0475 + 0.0312 + 0.0080) \frac{U^2}{2 \times 9.8} + 0.0826$$

$$U = 3.22 \text{ m/s}$$

流量割合が 100, 80, 60 % に対するに対する実験結果と計算値との比較を、各要素での流速と流量割合について表 5.3 に示す。各要素での流速の絶対値の一致は必ずしも良好ではないが標準型燃料要素の全体に対する流量割合は実験値がほぼ 75.5 % であるのに対し、計算値は 78 % であって良好な一致が得られている。

また各要素での流速も、フォロア型燃料要素で約 10.5 %, B_e 反射体で約 35 %, 照射筒で約 20 % の誤差があるが、誤差が大きい B_e 反射体やコアバイパスでは計算値の方が小さい値を示しており、冷却の面から保守的評価をすることがわかる。従って本計算手法は妥当なものである。

表 5.3 モックアップ実験に対する計算値の炉心流量配分

流路面積(m ²)	実験 値						計算 値				
	流速(m/s)			流量割合(%)			流速(m/s)			流量割合(%)	
	100 %	80 %	60 %	100 %	80 %	60 %	100 %	80 %	100 %	80 %	60 %
標準燃料要素	0.089764	5.49	4.37	3.29	75.5	75.2	5.49	4.40	3.30	78.3	78.0
フオロア型 燃料要素	0.015629	4.44	3.55	2.69	10.6	10.6	4.80	3.925	2.91	11.9	12.1
燃料板間隙間	0.004074	3.44	2.87	2.14	2.1	2.3	2.3	1.293	1.05	0.787	0.8
コアバイバス	0.007515	4.47	3.67	2.78	5.2	5.3	5.3	2.591	2.112	1.595	3.1
B _e 反射対	0.005134	4.88	3.99	2.87	3.8	3.9	3.7	3.32	2.716	2.027	2.7
照射筒 A	0.001912	4.37	3.53	2.61	1.3	1.3	1.3	5.07	4.113	3.00	1.6
照射筒 B	0.001786	4.51	3.63	2.71	1.3	1.3	1.3	5.405	4.384	3.22	1.6
											1.6

注) 流量割合 100 % = 2350 m³/h80 % = 1880 m³/h60 % = 1410 m³/h

5.2 実炉における流動特性評価

JRR-3 改造炉の炉心熱水力特性に関し基本となる冷却材流量配分及び炉心内での圧力損失の評価を、前節の手法を用いて行う。

JRR-3 改造炉の炉心構成物（要素）の形状・寸法は、モックアップ実験装置で異なるところがあるので、本節ではその違いを考慮して流量配分及び炉心内での圧力損失の評価を行うこととする。

モックアップ実験装置と JRR-3 改造炉の炉心構成物の形状・寸法の違いの主要な点は以下の通りである。

① 標準型燃料要素

モックアップ実験装置では、燃料板枚数は 1 燃料要素当たり 21 枚であるのに対し、JRR-3 改造炉では 20 枚を等間隔に配置しており流路ギャップは 2.35 mm に対し 2.28 mm である。又、モックアップ実験装置の燃料板厚さは 1.27 mm であるのに対し、JRR-3 では 1.52 mm である。

② 制御棒

フォロア型燃料要素とアダプタ形状が異なる。

フォロア燃料要素 1 体当たりの燃料板枚数は、モックアップ実験装置では 17 枚であるのに対し、JRR-3 改造炉では 16 枚を等間隔に配置しており、流路ギャップ 2.40 mm に対し 2.38 mm である。燃料板厚みは標準燃料要素といずれも同一である。

アダプタ形状は、モックアップ実験装置では図 3.2 に示すように 12 φ の穴が 28 個有りこの部分での圧力損失が大きかったのに対し、JRR-3 改造炉ではこの部分の形状を図 4.3 に示すように改良し、圧力損失の低減を図っている。

③ 重水タンク内胴と B_e 反射体との間隙の寸法

重水タンク内胴と B_e 反射体との間隙はいわゆるコアバイパス領域であるが、この間隙はモックアップ実験装置では 4 mm であったのに対し、JRR-3 改造炉では 3 mm である。

④ 照射筒の形状

モックアップ実験装置では、図 5.6 に示すように照射筒に A 型と B 型の 2 種類があったが、JRR-3 改造炉では A 型の 1 種類のみである。

なお、モックアップ実験では循環ポンプの能力から標準型燃料要素で流速 5.5 m/s を基準としていたが、その後の解析から JRR-3 改造炉では 6.237 m/s を定常状態の基準流速としている⁽²⁾。

JRR-3 改造炉の炉心熱水力特性に関し基本となる冷却材流速の評価を、炉心及び炉心周辺部を次の 7 領域に大別して行う。

- a . 標準燃料要素領域
- b . フォロア型燃料要素領域
- c . 燃料側板間ギャップ領域
- d . 照射筒領域
- e . B_e 反射体領域

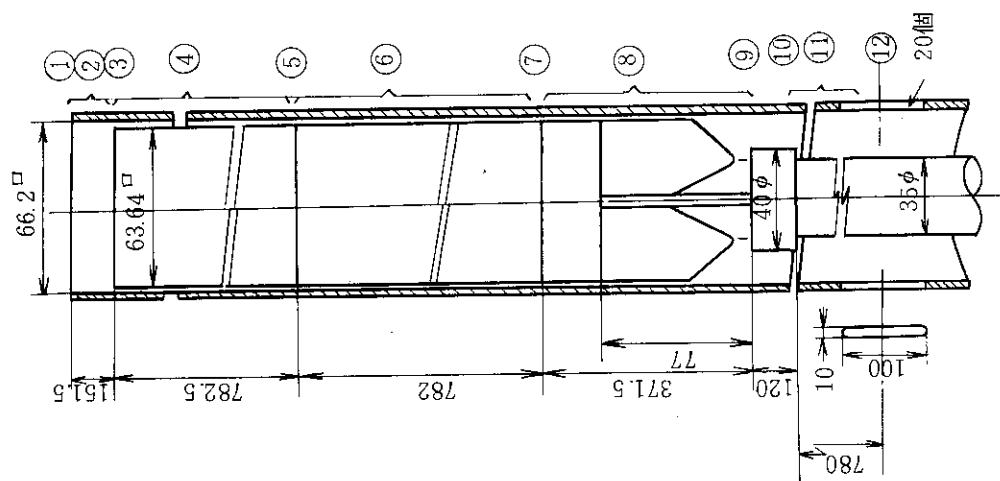


図 5.9 JRR-3 改造炉のフォロア型燃料の形状
と領域区分

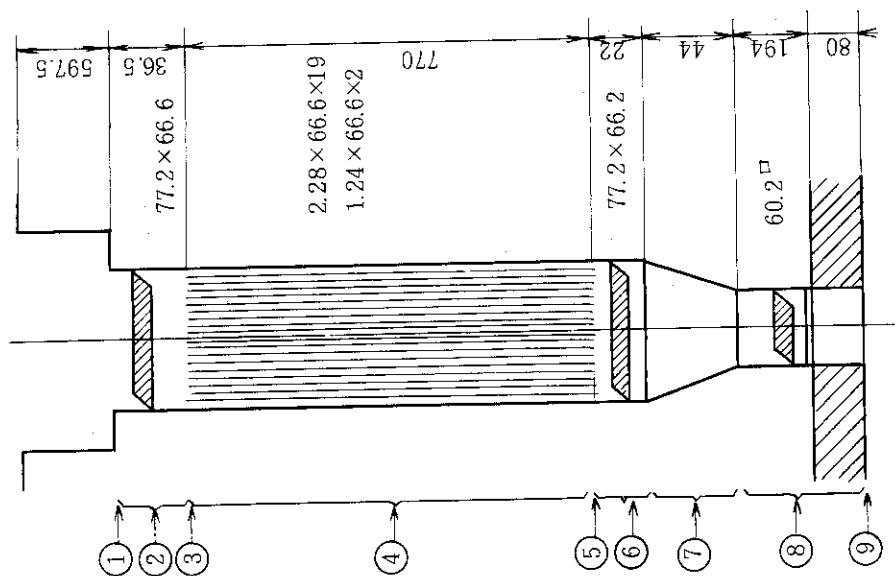
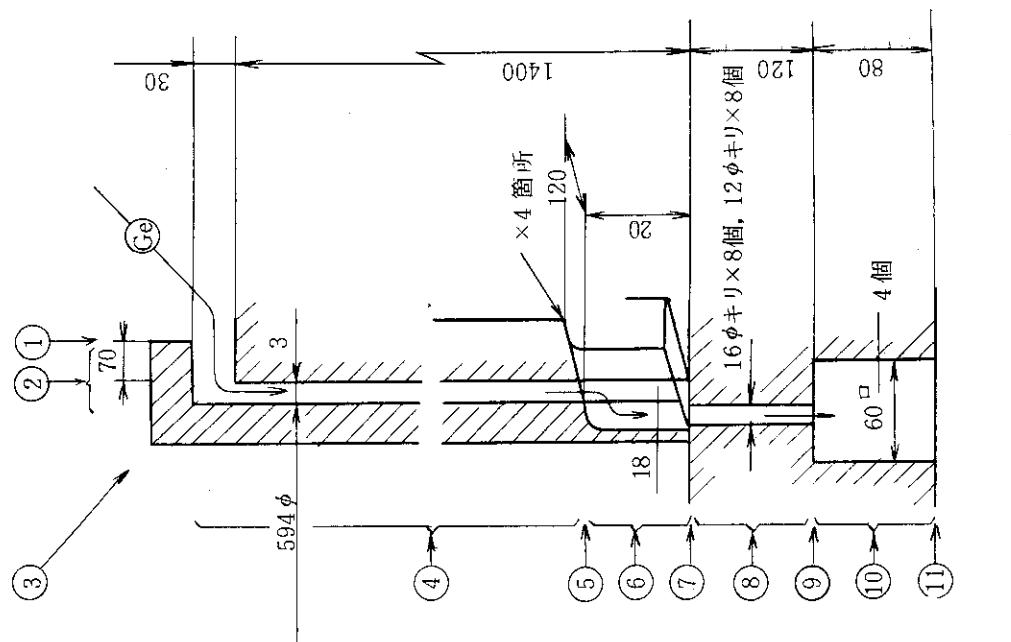


図 5.8 JRR-3 改造炉の標準型燃料要素の形状
と領域区分



JRR-3 改造炉のコアバイパス形状と領域区分

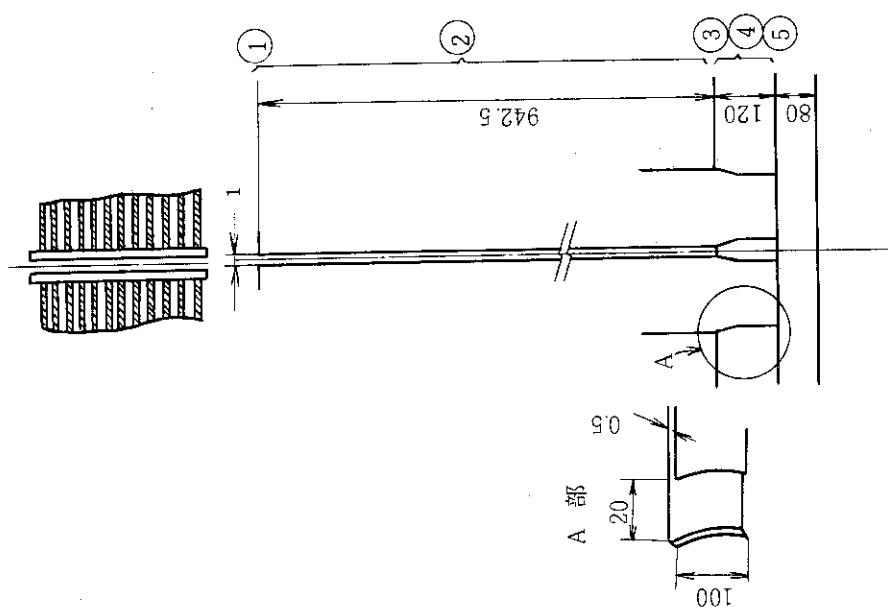


図 5.10 JRR-3 改造炉の燃料側板門ギヤップ
形状と領域区分

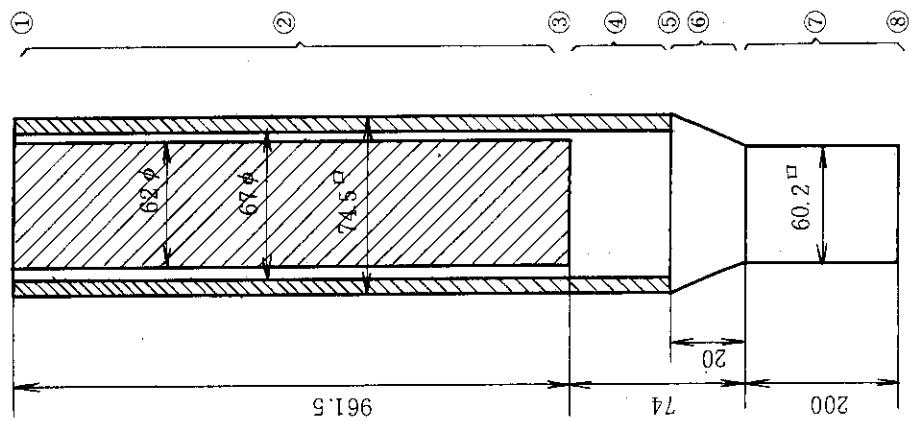


図 5.13 JRR-3 改造炉の照射筒の形状
と領域区分

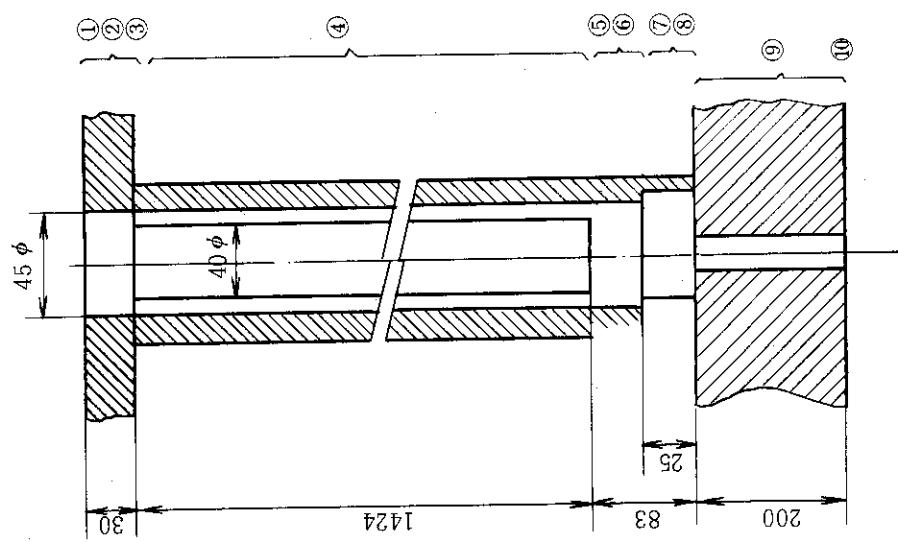


図 5.12 JRR-3 改造炉の Be 反射体の形状
と領域区分

f. コアバイパス領域

g. ドレイン孔

上記7領域の流動損失特性と、これに基づく流量配分特性を記す。以下では、これらの特性に対し標準燃料要素の流速をA) 6.237, B) 6.00, C) 5.75 m/s の3ケースについて行う。

5.2.1 流動損失特性

流動損失評価に際し、図5.8～図5.13に示した各流路形状に対し流路形状の特徴を考慮して流路を分割し、図に示したように番号を付す。流路形状の特徴を、

- * 流路面積一定の流路部（直流路部）
- * 流路の拡大部
- * 流路の縮小部

に大別して流路を分割する。

分割した領域に対し、次の流動損失係数 K_i ($i = 1, 2, \dots$) を定義する。

$$\Delta P_i = K_i \frac{v_i^2}{2g} \quad (\text{水頭 m})$$

ここで、 i は領域番号、 ΔP ：流動損失水頭、 v_i ：領域 i における流速(m/s)、 g ：重力加速度(m/s²)である。速度 v_i は、流路面積が一定である時はそこの流速であり、流路の拡大・縮小部ではその前後の大なる流速をとる。直流路部では $K_i = \lambda_i \frac{l_i}{D_{e,i}}$ で評価する (λ_i ：表面摩擦損失係数、 l_i ：流路長、 $D_{e,i}$ ：等価水力直径)

A. 基準流速 6.237 m/s の流動損失特性

a-1 標準燃料要素の流動損失係数評価

図5.8に示す標準燃料要素の領域4で、流速6.237 m/sを基準にした流速を用いる。表面摩擦損失係数を求めるのに必要なレイノルズ数算出に当っては、40°Cでの動粘性係数を用いる。

* 領域1(縮小部) : $K_1 = 0.5$

* 領域2(直流路部) :

$$S_2 = 5.075 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_4 = 3.117 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v_2 = 6.237 \times (S_4/S_2) = 3.831 \text{ m/s}$$

$$D_{e,2} = 0.0718 \text{ m}$$

$$R_e = v_2 D_{e,2} / \nu = \frac{3.831 \times 0.0718}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.12 \times 10^5$$

$$\lambda_2 = 0.0136$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{D_{e,2}} = 0.0136 \times \frac{0.0365}{0.0718} = 6.91 \times 10^{-3}$$

* 領域3(縮小部) : $K_3 = 0.5$

* 領域 4 (直流路部) :

$$v_4 = 6.237 \text{ m/s}$$

$$D_{e4} = 4.41 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$R_e = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{6.237 \times 4.41 \times 10^{-3}}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.12 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.0218$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{D_{e4}} = 0.0218 \times \frac{0.77}{4.41 \times 10^{-3}} = 3.806$$

* 領域 5 (拡大部) :

$$S_6 = 5.128 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_4/S_6 = 0.608$$

$$K_5 = \{1 - (S_4/S_6)\}^2 = 0.16$$

* 領域 6 (直流路部) :

$$v_6 = 6.237 \times (S_4/S_6) = 3.791 \text{ m/s}$$

$$D_{e6} = 0.07142 \text{ m}$$

$$R_e = v_6 D_{e6} / \nu = \frac{3.791 \times 0.07142}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.05 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_6 = 0.0137$$

$$K_6 = \lambda_6 \frac{l_6}{D_{e6}} = 0.0137 \times \frac{0.022}{0.07142} = 4.21 \times 10^{-3}$$

* 領域 7, 8 (直流路部で近似) :

$$S_{7,8} = 3.624 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v_{7,8} = 6.237 \times (S_4/S_{7,8}) = 5.364 \text{ m/s}$$

$$D_{e7,8} = 0.0602 \text{ m}$$

$$R_e = v_{7,8} D_{e7,8} / \nu = \frac{5.364 \times 0.0602}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.834 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{7,8} = 0.0132$$

$$K_{7,8} = \lambda_{7,8} \frac{l_{7,8}}{D_{e7,8}} = 0.0132 \times \frac{0.318}{0.0602} = 0.0699$$

* 領域 9 (拡大部) :

$$S_9 = 9.65 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_{7,8}/S_9 = 0.375$$

$$K_6 = \{1 - (S_{7,8}/S_9)\}^2 = 0.39$$

各領域の K 値を表 5.4 に、基準流速と共に示す。

a-2 フォロア型燃料要素の流動損失係数評価

表 5.4 実機 (JRR-3 改造炉) における流速 6.237 m/s
時での各要素領域の基準流速と流動損失係数

領域 番号	名称	標準型 燃料要素	フォロワ型 燃料要素	燃料側板 間ギャップ	コア バイパス	B_e 反射体	照射筒
流動損失係数 と 流速	1	0.5	0.5	0.39	0.5	0.5	0.5
		3.831	3.14	1.50	0.313	0.787	6.00
	2	0.00691	0.033	18.50	0.03	0.0133	4.12
		3.831	3.14	1.50	0.313	0.787	6.00
	3	0.5	0.18	0.36	0.41	0.5	0.735
		6.237	4.89	5.75	3.50	3.75	6.00
	4	3.806	0.201	3.934	5.37	6.835	0.0149
		6.237	4.89	5.75	3.50	3.75	0.862
	5	0.16	0.1	1.0	0.33	0.624	0.133
		6.237	5.60	5.75	10.26	3.75	0.862
	6	0.00421	3.683		0.2445	0.037	0.07
		3.791	5.60		10.26	0.788	0.839
	7	0.0699	1.11		0.33		
		5.364	5.60		7.84		
	8				0.136	0.5	1.0
					7.84	7.09	0.839
	9	0.39	0.1		0.681	0.214	
		5.364	7.86		7.84	7.09	
	10		0.123		0.023	1.0	
			4.40		1.367	7.09	
	11		0.40		1.0		
			4.023		1.367		
	12		0.687				
			0.688				

標準型燃料要素の流動損失係数評価の場合と同様、動粘性係数は水温 40°Cで評価する。各領域の流速は、図 5.9 に示す領域 6 で流速 5.6 m/s を基準にした流速を用いる。図 5.9 に示した各領域に対する流動損失係数 K は次の様に求まる。

* 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.5$

* 領域 2 (直流路部) :

$$S_2 = 4.382 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_6 = 2.457 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_{e2} = 0.0662 \text{ m}$$

$$v_2 = 5.6 \times (S_6 / S_2) = 3.140 \text{ m/s}$$

$$R_e = v_2 D_{e2} / \nu = \frac{3.140 \times 0.0662}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.11 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.0144$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{D_{e2}} = 0.0144 \times \frac{0.1515}{0.0662} = 0.033$$

* 領域 3 (縮小部) :

$$S_4 = 2.809 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_4 / S_2 = 0.641$$

$$K_3 \doteq 0.18$$

* 領域 4 (直流路部) :

$$v_4 = 5.6 \times (S_6 / S_4) = 4.89 \text{ m/s}$$

$$D_{e4} = 0.0536 \text{ m}$$

$$R_e = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{4.89 \times 0.0536}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.93 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.0138$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{D_{e4}} = 0.0138 \times \frac{0.7825}{0.0536} = 0.201$$

* 領域 5 (縮小部) :

$$S_6 = 2.457 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_6 / S_4 = 0.8747$$

$$K_5 \doteq 0.1$$

* 領域 6 (直流路部) :

$$v_6 = 5.6 \text{ m/s}$$

$$D_{e6} = 0.0046 \text{ m}$$

$$R_e = v_6 D_{e6} / \nu = \frac{5.6 \times 0.0046}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.85 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_6 = 0.022$$

$$K_6 = \lambda_6 \frac{l_6}{D_{e6}} = 0.022 \times \frac{0.77}{0.0046} = 3.683$$

* 領域 7, 8 (アダプター部) (注) :

モックアップ試験での実測値をもとにして、旧アダプタ形状の流動損失係数から、新アダプタ形状による低減分を差し引いた値を用いる

$$K_{7,8} = 1.51 + 0.1 - 0.563 = 1.11$$

* 領域 9 (縮小部) :

$$S_8 = 2.27 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_9 = 1.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_9 / S_8 = 0.771$$

$$v_9 = 5.6 \times (S_6 / S_9) = 7.86 \text{ m/s}$$

$$K_9 \doteq 0.1$$

* 領域 10 (縮小+直管+拡大部) :

$$S_{10} = 3.126 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_9' = 3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_{10} / S_9' = 0.914$$

$$K_{10}' (\text{縮小}) \doteq 0.04$$

$$K_{10}' (\text{拡大}) \doteq 0.01$$

$$v_{10} = 5.6 \times (S_6 / S_{10}) = 4.40 \text{ m/s}$$

$$D_{e10} = 0.0262 \text{ m}$$

$$R_e = v_{10} D_{e10} / \nu = \frac{4.4 \times 0.0262}{0.668 \times 10^{-6}} = 1.726 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{10} = 0.016$$

$$K_{10}' (\text{直流路部}) = \lambda_{10} \frac{l_{10}}{D_{e10}} = 0.016 \times \frac{0.12}{0.0262} = 0.073$$

$$K_{10} = \Sigma K_{10}' = 0.123$$

* 領域 11 (直流路部) :

$$S_{11} = 3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_{e11} = 0.0312 \text{ m}$$

$$v_{11} = 5.6 \times (S_6 / S_{11}) = 4.023 \text{ m/s}$$

$$R_e = v_{11} D_{e11} / \nu = \frac{4.023 \times 0.0312}{0.668 \times 10^{-6}} = 1.882 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{11} = 0.016$$

$$K_{11} = \lambda_{11} \frac{l_{11}}{D_{e11}} = 0.016 \times \frac{0.78}{0.0312} = 0.4$$

* 領域 12 (拡大部) :

$$S_{12} = 0.02 \text{ m}^2$$

(注) モックアップ試験結果による。(4.2節参照)

$$v_{12} = 5.6 \times (S_6 / S_{12}) = 0.688 \text{ m/s}$$

$$S_{11} / S_{12} = 0.171$$

$$K_{12} = 0.687$$

以上のKの値を、基準流速と共に表5.4に示す。

a-3 燃料側板間ギャップ領域の流動損失係数評価

直流路部でのレイノルズ数評価の為の水温は40°Cで行う。図5.10に示した各分割領域での流動損失係数を以下に示す。基準速度を領域2で1.5 m/sにとる。

* 領域1(縮小部) :

$$S_0 = 8.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S_1 = 1.534 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S_1 / S_0 = 0.1724$$

$$K_1 = 0.39$$

* 領域2(直流路部) :

$$v_2 = 1.5 \text{ m/s}$$

$$D_{e2} = \frac{4 \times 1.534 \times 10^{-4}}{0.3088} = 1.987 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$R_e = v_2 D_{e2} / \nu = \frac{1.5 \times 1.987 \times 10^{-3}}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.5 \times 10^3$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.039$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{D_{e2}} = 0.039 \times \frac{0.9425}{0.001987} = 18.50$$

* 領域3(縮小部) :

$$S_2 = 1.53 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S_4 = 4.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$S_4 / S_2 = 0.261$$

$$K_3 = 0.36$$

* 領域4(直流路部) :

$$v_4 = 1.5 \times (S_2 / S_4) = 5.75 \text{ m/s}$$

$$D_{e4} = \frac{4 \times 0.0005 \times 0.02}{2 \times (0.0005 + 0.02)} = 9.76 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$R_e = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{5.75 \times 9.76 \times 10^{-4}}{0.668 \times 10^{-6}} = 0.84 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.032$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{D_{e4}} = 0.032 \times \frac{0.12}{0.000976} = 3.934$$

* 領域 5 (拡大部) :

$$K_5 = 1.0$$

以上の結果を、各領域の流速と共に表 5.4 に示す。

a-4 コアバイパス (重水タンク内胴と B_e 反射体の間の隙間) 領域での流動損失係数評価

図 5.11 に示す各分割した領域での流動損失係数 K を以下に示す。基準流速を領域 4 で 3.5 m/s にとる。レイノルズ数算出は水温 40°C での動粘性係数を用いて行う。

* 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.5$

* 領域 2 (直流路部) :

$$S_2 = 6.286 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$S_4 = 5.6266 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_{e2} = 0.06 \text{ m}$$

$$v_2 = 3.5 \times (S_4 / S_2) = 0.3133 \text{ m/s}$$

$$R_e = v_2 D_{e2} / \nu = \frac{0.3133 \times 0.06}{0.688 \times 10^{-6}} = 2.81 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.024$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{D_{e2}} = 0.024 \times \frac{0.073}{0.06} = 0.03$$

* 領域 3 (縮小部) :

$$S_3 = 5.598 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$S_4 / S_3 = 0.1$$

$$K_3 = 0.41$$

* 領域 4 (直流路部) :

$$v_4 = 3.5 \text{ m/s}$$

$$D_{e4} = 0.006 \text{ m}$$

$$R_e = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{3.5 \times 0.006}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.15 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.023$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{D_{e4}} = 0.023 \times \frac{1.4}{0.006} = 5.37$$

* 領域 5 (縮小部) :

$$S_6 = 1.92 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_6 / S_4 = 0.341$$

$$K_5 = 0.33$$

* 領域 6 (直流路部+曲り部) :

$$v_6 = 3.5 \times (S_4 / S_6) = 10.792 \text{ m/s}$$

$$D_{e6} = 0.006 \text{ m}$$

$$R_e = v_6 D_{e6} / \nu = \frac{10.792 \times 0.006}{0.668 \times 10^{-6}} = 9.22 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_6 = 0.018$$

$$K'_6 \text{ (直流路部)} = \lambda_6 \frac{l_6}{D_{e6}} = 0.018 \times \frac{0.02}{0.006} = 0.06$$

$$K'_6 \text{ (曲り部)} = 0.131 + 0.1632 \left(\frac{8}{11} \right)^{3.5} = 0.1845$$

$$K_6 = \Sigma K'_6 = 0.2445$$

* 領域 7 (縮小部) :

$$S_8 = 2.513 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S'_6 = 8.64 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_8 / S'_6 = 0.3$$

$$K_7 = 0.33$$

* 領域 8 (直流路部) :

$$v_8 = 3.5 \times (S_4 / S_8) = 7.84 \text{ m/s}$$

$$D_{e8} = 0.01414 \text{ m}$$

$$R_e = v_8 D_{e8} / \nu = \frac{7.84 \times 0.01414}{0.668 \times 10^{-6}} = 1.66 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_8 = 0.016$$

$$K_8 = \lambda_8 \frac{l_8}{D_{e8}} = 0.016 \times \frac{0.12}{0.01414} = 0.136$$

* 領域 9 (拡大部) :

$$S_{10} = 1.44 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$S_8 / S_{10} = 0.1745$$

$$K_9 = 0.681$$

* 領域 10 (直流路部) :

$$v_{10} = 3.5 \times (S_4 / S_{10}) = 1.367 \text{ m/s}$$

$$D_{e10} = 0.06 \text{ m}$$

$$R_e = v_{10} D_{e10} / \nu = \frac{1.367 \times 0.06}{0.668 \times 10^{-6}} = 1.225 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{10} = 0.017$$

$$K_{10} = \lambda_{10} \frac{l_{10}}{D_{e10}} = 0.017 \times \frac{0.08}{0.06} = 0.023$$

* 領域 11 (拡大部) :

$$K_{11} = 1.0$$

以上の結果を、基準流速と共に表 5.4 に示す。

a-5 B_e 反射体領域の流動損失係数評価

レイノルズ数算出は40°Cの水温での動粘性係数を用いて行い、基準流速は図5.12の領域4で3.75 m/sとする。

* 領域1(縮小部) : K₁ = 0.5

* 領域2(直流通路部) :

$$S_2 = 1.59 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_4 = 3.34 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v_2 = 3.75 \times (S_4 / S_2) = 0.787 \text{ m/s}$$

$$D_{e2} = 0.045 \text{ m}$$

$$R_e = v_2 D_{e2} / \nu = \frac{0.787 \times 0.045}{0.668 \times 10^{-6}} = 5.31 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.021$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{D_{e2}} = 0.021 \times \frac{0.03}{0.045} = 0.0133$$

* 領域3(縮小部) :

$$K_3 = 0.5$$

* 領域4(直流通路部) :

$$v_4 = 3.75 \text{ m/s}$$

$$D_{e4} = 0.005 \text{ m}$$

$$R_e = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{3.75 \times 0.005}{0.668 \times 10^{-6}} = 2.81 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.024$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{D_{e4}} = 0.024 \times \frac{1.424}{0.005} = 6.835$$

* 領域5(拡大部) :

$$S_6 = 1.59 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_4 / S_6 = 0.21$$

$$K_5 = 0.624$$

* 領域6,7(直流通路部) :

$$v_{6,7} = 3.75 \times (S_4 / S_6) = 0.789 \text{ m/s}$$

$$D_{e6,7} = 0.045 \text{ m}$$

$$R_e = v_{6,7} D_{e6,7} / \nu = \frac{0.789 \times 0.045}{0.668 \times 10^{-6}} = 5.333 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_{6,7} = 0.020$$

$$K_{6,7} = \lambda_{6,7} \frac{l_{6,7}}{D_{e6,7}} = 0.02 \times \frac{0.083}{0.045} = 0.037$$

* 領域 8 (縮小部) :

$$S_9 = 1.767 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$K_8 = 0.5$$

* 領域 9 (直路部) :

$$v_9 = 3.75 \times (S_4/S_9) = 7.09 \text{ m/s}$$

$$D_{e9} = 0.015 \text{ m}$$

$$R_e = v_9 D_{e9} / \nu = \frac{7.09 \times 0.015}{0.668 \times 10^{-6}} = 1.592 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_9 = 0.016$$

$$K_9 = \lambda_9 \frac{1_9}{D_{e9}} = 0.016 \times \frac{0.2}{0.015} = 0.214$$

* 領域 10 (拡大部) :

$$K_{10} = 1.0$$

以上の K の値を各領域の速度と共に表 5.4 に示す。

a - 6 照射筒領域の流動損失係数評価

40°C の水温でレイノルズ数算出における動粘性係数を評価し、基準の流速を図 5.13 に示す領域 2 で 6.0 m/s にとって考える。

* 領域 1 (縮小部) :

$$K_1 = 0.5$$

* 領域 2 (直路部) :

$$S_2 = 5.066 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v_2 = 6.00 \text{ m/s}$$

$$D_{e2} = 0.005 \text{ m}$$

$$R_e = v_2 D_{e2} / \nu = \frac{6.00 \times 0.005}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.49 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.0214$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{1_2}{D_{e2}} = 0.0214 \times \frac{0.9615}{0.005} = 4.12$$

* 領域 3 (拡大部) :

$$S_4 = 3.526 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_2/S_4 = 0.143$$

$$K_3 = \{1 - (S_2/S_4)\}^2 = 0.735$$

* 領域 4 (直路部) :

$$v_4 = 6.00 \times (S_2/S_4) = 0.862 \text{ m/s}$$

$$D_{e4} = 0.067 \text{ m}$$

$$R_e = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{0.862 \times 0.067}{0.668 \times 10^{-6}} = 8.67 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.0185$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{D_{e4}} = 0.0185 \times \frac{0.054}{0.067} = 0.0149$$

* 領域 5 (拡大部) :

$$S'_6 = 5.55 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_4 / S'_6 = 0.635$$

$$K_5 = \{ 1 - (S_4 / S'_6) \}^2 = 0.133$$

* 領域 6, 7 (直流路部) :

$$S_{6,7} = 3.624 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v_{6,7} = 6.00 \times (S_2 / S_{6,7}) = 0.839 \text{ m/s}$$

$$D_{e6,7} = 0.0602 \text{ m}$$

$$R_e = v_{6,7} D_{e6,7} / \nu = \frac{0.839 \times 0.0602}{0.668 \times 10^{-6}} = 7.56 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_{6,7} = 0.0192$$

$$K_{6,7} = \lambda_{6,7} \frac{l_{6,7}}{D_{e6,7}} = 0.0192 \times \frac{0.22}{0.0602} = 0.07$$

* 領域 8 (拡大部) :

$$K_8 = 1.0$$

以上の K の値を各領域の速度と共に表 5.4 に示す。

a-7 ドレイン孔の流動損失係数評価

* 領域 1 (縮小部) :

$$K_1 = 0.5$$

* 領域 2 (拡大部) :

$$K_2 = 1.0$$

K の値及び各領域の流速を表 5.4 に示す。

B. 基準流速 6.00 m/s の流動損失特性

b. 標準型燃料要素の流動損失評価

図 5.8 に示す標準型燃料要素の領域 4 で、流速 6.00 m/s を基準流速にとる。レイノルズ数算出は、水温 40°C で評価する。

* 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.5$

* 領域 2 (直流路部) :

$$S_2 = 5.075 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_4 = 3.117 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v_2 = 6.00 \times (S_4 / S_2) = 3.685 \text{ m/s}$$

$$D_{e2} = 0.0718 \text{ m}$$

$$R_e = v_2 D_{e2} / \nu = \frac{3.685 \times 0.0718}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.96 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.013$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{D_{e2}} = 0.013 \times \frac{0.0365}{0.0718} = 6.61 \times 10^{-3}$$

* 領域 3 (縮小部) : $K_3 = 0.5$

* 領域 4 (直流路部) :

$$v_4 = 6.00 \text{ m/s}$$

$$D_{e4} = 4.41 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$R_e = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{6.00 \times 4.41 \times 10^{-3}}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.96 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.023$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{D_{e4}} = 0.023 \times \frac{0.77}{4.41 \times 10^{-3}} = 4.016$$

* 領域 5 (拡大部) :

$$S_4 = 3.117 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_6 = 5.128 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$K_5 = \{ 1 - (S_4 / S_6) \}^2 = 0.154$$

* 領域 6 (直流路部) :

$$v_6 = 6.00 \times (S_4 / S_6) = 3.647 \text{ m/s}$$

$$D_{e6} = 0.07142 \text{ m}$$

$$R_e = v_6 D_{e6} / \nu = \frac{3.647 \times 0.07142}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.90 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_6 = 0.0138$$

$$K_6 = \lambda_6 \frac{l_6}{D_{e6}} = 0.0138 \times \frac{0.022}{0.07142} = 4.25 \times 10^{-3}$$

* 領域 7, 8 (直流路部で近似) :

$$S_{7,8} = 3.624 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v_{7,8} = 6.00 \times (S_4 / S_{7,8}) = 5.161 \text{ m/s}$$

$$D_{e7,8} = 0.0602 \text{ m}$$

$$R_e = v_{7,8} D_{e7,8} / \nu = \frac{5.161 \times 0.0602}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.65 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{7,8} = 0.0128$$

$$K_{7,8} = \lambda_{7,8} \frac{l_{7,8}}{D_{e7,8}} = 0.0128 \times \frac{0.318}{0.0602} = 0.0676$$

* 領域 9 (拡大部) :

$$S_9 = 9.65 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_8/S_9 = 0.376$$

$$K_9 = \{ 1 - (S_8/S_9) \}^2 = 0.39$$

以上のKの値及び各領域の流動損失係数を基準流速と共に表5.5に示す。

C. 基準流速 5.75 m/s の流動損失特性

c. 標準型燃料要素の流動損失評価

図5.8に示す領域4の流速 5.75 m/s を基準流速にとる。レイノルズ数算出には、水温 40 °C での動粘性係数を用いて行う。

* 領域1（縮小部）： $K_1 = 0.5$

* 領域2（直路部）：

$$S_2 = 5.075 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_4 = 3.117 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v_2 = 5.75 \times (S_4/S_2) = 3.532 \text{ m/s}$$

$$D_{e2} = 0.0718 \text{ m}$$

$$R_e = v_2 D_{e2} / \nu = \frac{3.632 \times 0.0718}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.80 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.0135$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{1}{D_{e2}} = 0.0135 \times \frac{0.0365}{0.0718} = 6.86 \times 10^{-3}$$

* 領域3（縮小部）： $K_3 = 0.5$

* 領域4（直路部）：

$$v_4 = 5.75 \text{ m/s}$$

$$D_{e4} = 4.41 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$R_e = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{5.75 \times 4.41 \times 10^{-3}}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.80 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.0232$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{1}{D_{e4}} = 0.0232 \times \frac{0.77}{4.41 \times 10^{-3}} = 4.05$$

* 領域5（拡大部）：

$$S_4 = 3.117 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_6 = 5.128 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$K_5 = \{ 1 - (S_4/S_6) \}^2 = 0.154$$

* 領域6（直路部）：

$$v_6 = 5.75 \times (S_4/S_6) = 3.495 \text{ m/s}$$

$$D_{e6} = 0.07142 \text{ m}$$

$$R_e = v_6 D_{e6} / \nu = \frac{3.495 \times 0.07142}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.74 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_6 = 0.0139$$

$$K_6 = \lambda_6 \frac{1}{D_{e6}} = 0.0139 \times \frac{0.022}{0.07142} = 4.28 \times 10^{-3}$$

* 領域 7, 8 (直角路部で近似) :

$$S_{7,8} = 3.624 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v_{7,8} = 5.75 \times (S_4 / S_{7,8}) = 4.946 \text{ m/s}$$

$$D_{e7,8} = 0.0602 \text{ m}$$

$$R_e = v_{7,8} D_{e7,8} / \nu = \frac{4.946 \times 0.0602}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.46 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{7,8} = 0.013$$

$$K_{7,8} = \lambda_{7,8} \frac{1}{D_{e7,8}} = 0.013 \times \frac{0.318}{0.0602} = 0.0687$$

* 領域 9 (拡大部) :

$$S_9 = 9.65 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_8 / S_9 = 0.376$$

$$K_9 = \{1 - (S_8 / S_9)\}^2 = 0.39$$

以上の K の値及び各領域の流動損失係数を基準流速と共に表 5.6 に示す。

表 5.5 実機 (JRR-3 改造炉) における流速 6.00 m/s
での各要素領域の基準流速と流动損失係数

領域番号	名称	標準燃料型要素	フォロワ型燃料要素	燃料側板間ギャップ	コアバイパス	B_e 反射体	照射筒
流动損失係数 (下段と流速)	1	0.5	0.5	0.39	0.5	0.5	0.5
		3.685	3.14	1.50	0.313	0.787	6.00
	2	0.00661	0.033	18.50	0.03	0.0133	4.12
		3.685	3.14	1.50	0.313	0.787	6.00
	3	0.5	0.18	0.36	0.41	0.5	0.735
		6.00	4.89	5.75	3.50	3.75	6.00
	4	4.016	0.201	3.934	5.37	6.835	0.0149
		6.00	4.89	5.75	3.50	3.75	0.862
	5	0.154	0.1	1.0	0.33	0.624	0.133
		6.00	5.60	5.75	10.26	3.75	0.862
	6	0.00425	3.683		0.2445	0.037	0.07
		3.647	5.60		10.26	0.788	0.839
	7	0.0676	1.11		0.33		
		5.161	5.60		7.84		
	8				0.136	0.5	1.0
					7.84	7.09	0.839
	9	0.39	0.1		0.681	0.214	
		5.161	7.86		7.84	7.09	
	10		0.123		0.023	1.0	
			4.40		1.367	7.09	
	11		0.40		1.0		
			4.023		1.367		
	12		0.687				
			0.688				

表 5.6 実機 (JRR-3 改造炉) における流速 5.75 m/s
での各要素領域の基準流速と流動損失係数

領域番号	名称	標準燃料型要素	フォロワ型燃料要素	燃料側板間ギャップ	コアバイパス	B _e 反射体	照射筒
流動へ 損失 係 数 下段 と m 流 速	1	0.5	0.5	0.39	0.5	0.5	0.5
		3.532	3.14	1.50	0.313	0.787	6.00
	2	0.00686	0.033	18.50	0.03	0.0133	4.12
		3.532	3.14	1.50	0.313	0.787	6.00
	3	0.5	0.18	0.36	0.41	0.5	0.735
		5.75	4.89	5.75	3.50	3.75	6.00
	4	4.05	0.201	3.934	5.37	6.835	0.0149
		5.75	4.89	5.75	3.50	3.75	0.862
	5	0.154	0.1	1.0	0.33	0.624	0.133
		5.75	5.60	5.75	10.26	3.75	0.862
	6	0.00428	3.683		0.2445	0.037	0.07
		3.495	5.60		10.26	0.788	0.839
	7	0.0687	1.11		0.33		
		4.946	5.60		7.84		
	8				0.136	0.5	1.0
					7.84	7.09	0.839
	9	0.39	0.1		0.681	0.214	
		4.946	7.86		7.84	7.09	
	10		0.123		0.023	1.0	
			4.40		1.367	7.09	
	11		0.40		1.0		
			4.023		1.367		
	12		0.687				
			0.688				

5.2.2 流動配分特性

前項の流動損失係数を基にして、各領域の流量配分と全流量を求める。

A. 基準流速 6.237 m/s の流量配分特性(1) 標準型燃料要素での圧損 ΔP

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.00691) \left(\frac{3.831}{6.237} \right)^2 + (0.5 + 3.806 + 0.16) \right. \\ & \left. + 0.00421 \times \left(\frac{3.791}{6.237} \right)^2 + (0.07 + 0.39) \left(\frac{5.364}{6.237} \right)^2 \right\} \times \frac{6.237^2}{2 \times 9.8} \\ = & 9.92 \text{ m 水頭} \end{aligned}$$

(2) フォロワ型燃料要素での流速

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.033) \left(\frac{3.14}{5.6} \right)^2 + (0.18 + 0.201) \left(\frac{4.89}{5.6} \right)^2 \right. \\ & + (0.1 + 3.683 + 1.11) + 0.1 \times \left(\frac{7.86}{5.6} \right)^2 + 0.123 \times \left(\frac{4.4}{5.6} \right)^2 \\ & \left. + 0.4 \times \left(\frac{4.023}{5.6} \right)^2 + 0.687 \times \left(\frac{0.688}{5.6} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ = & 0.344 v^2 \\ v = & 5.37 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(3) 燃料板側板間ギャップでの流速

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.39 + 18.5) + (0.36 + 3.934 + 1.0) \left(\frac{5.75}{1.5} \right)^2 \right\} \\ & \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ = & 4.93 v^2 \\ v = & 1.42 \end{aligned}$$

(4) コアバイパスでの流速

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.03) \left(\frac{0.3133}{3.5} \right)^2 + (0.41 + 5.37) \right. \\ & + (0.33 + 0.2445) \left(\frac{10.26}{3.5} \right)^2 + (0.33 + 0.136 + 0.681) \left(\frac{7.84}{3.5} \right)^2 \\ & \left. + (1.0 + 0.023) \left(\frac{1.36}{3.5} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ = & 0.875 v^2 \\ v = & 3.37 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(5) B_e 反射体での流速

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.0133) \left(\frac{0.789}{3.75} \right)^2 + (0.5 + 6.835 + 0.624) \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & + 0.037 \times \left(\frac{0.789}{3.75} \right)^2 + (0.5 + 0.214 + 1.0) \left(\frac{7.09}{3.75} \right)^2 \} \\
 & \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\
 & = 0.720 v^2 \\
 v & = 3.71 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

(6) 照射筒での流速

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= \{ (0.5 + 4.12 + 0.735) + (0.0149 + 0.133) \left(\frac{0.862}{6.0} \right)^2 \\
 &+ (0.07 + 1.0) \left(\frac{0.839}{6.0} \right)^2 \} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\
 &= 0.273 v^2 \\
 v &= 6.03 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

(7) ドレイン孔での流速

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= 1.5 \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} = 0.07653 v^2 \\
 v &= 11.4 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

以上の結果をもとに各領域の流路面積、流速、流量及び流量割合を求めたものを表 5.7 に示す。

B. 基準流速 6.00 m/s の流量配特性

標準型燃料要素内の平均流速が 6.00 m/s の時の各領域の流量配分と全流量を求める。

(1) 標準型燃料要素での圧損 ΔP

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= \{ (0.5 + 0.00661) \left(\frac{3.685}{6.00} \right)^2 + (0.5 + 4.016 + 0.154) \\
 &+ 0.00425 \times \left(\frac{3.647}{6.00} \right)^2 + (0.0676 + 0.39) \left(\frac{5.161}{6.00} \right)^2 \} \\
 &\times \frac{6.00^2}{2 \times 9.8} \\
 &= 9.553 \text{ m 水頭}
 \end{aligned}$$

(2) フォロワ型燃料要素での流速

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= 0.344 v^2 \\
 v &= 5.27 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

(3) 燃料板側板間ギャップでの流速

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= 4.93 v^2 \\
 v &= 1.39 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

(4) コアバイパスでの流速

$$\Delta P = 0.875 v^2$$

$$\therefore v = 3.30 \text{ m/s}$$

⑤ B_e 反射体での流速

$$\Delta P = 0.720 v^2$$

$$\therefore v = 3.64 \text{ m/s}$$

⑥ 照射筒での流速

$$\Delta P = 0.273 v^2$$

$$\therefore v = 5.92 \text{ m/s}$$

⑦ ドレイン孔での流速

$$\Delta P = 0.0765 v^2$$

$$\therefore v = 11.2 \text{ m/s}$$

以上の結果をもとに各領域の流路面積、流速、流量及び流量割合を求めたものを表 5.8 に示す。

C. 基準流速 5.75 m/s の流量配分特性

標準燃料要素内の平均流速が 5.75 m/s の時の各領域の流量配分と全流量を求める。

① 標準燃料要素での圧損 ΔP

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00788) \left(\frac{3.532}{5.75} \right)^2 + (0.5 + 4.05 + 0.154) \right. \\ &\quad \left. + 0.00428 \times \left(\frac{3.495}{5.75} \right)^2 + (0.0687 + 0.39) \left(\frac{4.946}{5.75} \right)^2 \right\} \\ &\quad \times \frac{5.75^2}{2 \times 9.8} \\ &= 8.83 \text{ m 水頭} \end{aligned}$$

② フォロワ型燃料要素での流速

$$\Delta P = 0.344 v^2$$

$$\therefore v = 5.07 \text{ m/s}$$

③ 燃料板側板間ギャップでの流速

$$\Delta P = 4.93 v^2$$

$$\therefore v = 1.34 \text{ m/s}$$

④ コアバイパスでの流速

$$\Delta P = 0.875 v^2$$

$$v = 3.18 \text{ m/s}$$

⑤ B_e 反射体での流速

$$\Delta P = 0.720 v^2$$

$$\therefore v = 3.50 \text{ m/s}$$

⑥ 照射筒での流速

$$\Delta P = 0.273 v^2$$

$$\therefore v = 5.69 \text{ m/s}$$

⑦ ドレイン孔での流速

$$\Delta P = 0.765 v^2$$

$$v = 10.7 \text{ m/s}$$

以上の結果をもとに各領域の流路面積、流速、流量及び流量割合を求めたものを表 5.9 に示す。

3 ケースの流量配分特性を比較したものを表 5.10 に示す。

表 5.7 実機 (JRR-3 改造炉) における流速 6.237 m/s 時の炉心流量配分評価結果

領域 \ 項目	流路面積 (m ²)*	流速 (m/s)	流量 (m ³ /s)	流量割合 (%)
標準型燃料要素	0.08104	6.24	0.5057	78.1
フォロワ型燃料要素	0.01475	5.37	0.0792	12.2
燃料板側板間ギャップ	0.00407	1.42	0.0058	0.9
コアバイパス	0.00566	3.37	0.0191	3.0
B _e 反射体	0.00513	3.71	0.0190	2.9
照射筒	0.00253	6.03	0.0153	2.4
(ドレン孔)	(0.00030)	(11.4)	0.0034	0.5
合計	0.11348		0.648 (2332.8 m ³ /h)	100.0

* 標準燃料要素上端から 600 mm 下方位置での面積

表 5.8 実機 (JRR-3 改造炉) における流速 6.00 m/s 時の炉心流量配分評価結果

領域 \ 項目	流路面積 (m ²)	流速 (m/s)	流量 (m ³ /s)	流量割合 (%)
標準燃料	0.08104	6.00	0.4862	77.7
フォロワ型燃料	0.01475	5.27	0.0777	12.5
燃料板側板間ギャップ	0.00407	1.39	0.0057	0.9
コアバイパス	0.00566	3.30	0.0187	3.0
B _e 反射体	0.00513	3.64	0.0187	3.0
照射筒	0.00253	5.92	0.0150	2.4
(ドレン孔)	(0.00030)	(11.20)	0.0034	0.5
合計	0.11348		0.625 (2250.0 m ³ /h)	100.0

表 5.9 実機 (JRR-3 改造炉) における流速 5.75 m/s
時の炉心流量配分評価結果

領域 \ 項目	流路面積 (m ²)	流速(m/s)	流量(m ³ /s)	流量割合(%)
標準燃料	0.08104	5.75	0.4660	77.7
フォロワ型燃料	0.01475	5.07	0.0748	12.5
燃料板側板間ギャップ	0.00407	1.34	0.0055	0.9
コアバイパス	0.00566	3.18	0.0180	3.0
B _e 反射体	0.00513	3.50	0.0180	3.0
照射筒	0.00253	5.69	0.0144	2.4
(ドレンイン孔)	(0.00030)	(10.7)	(0.0032)	0.5
合計	0.11348		0.600 (2160.0 m ³ /h)	100.0

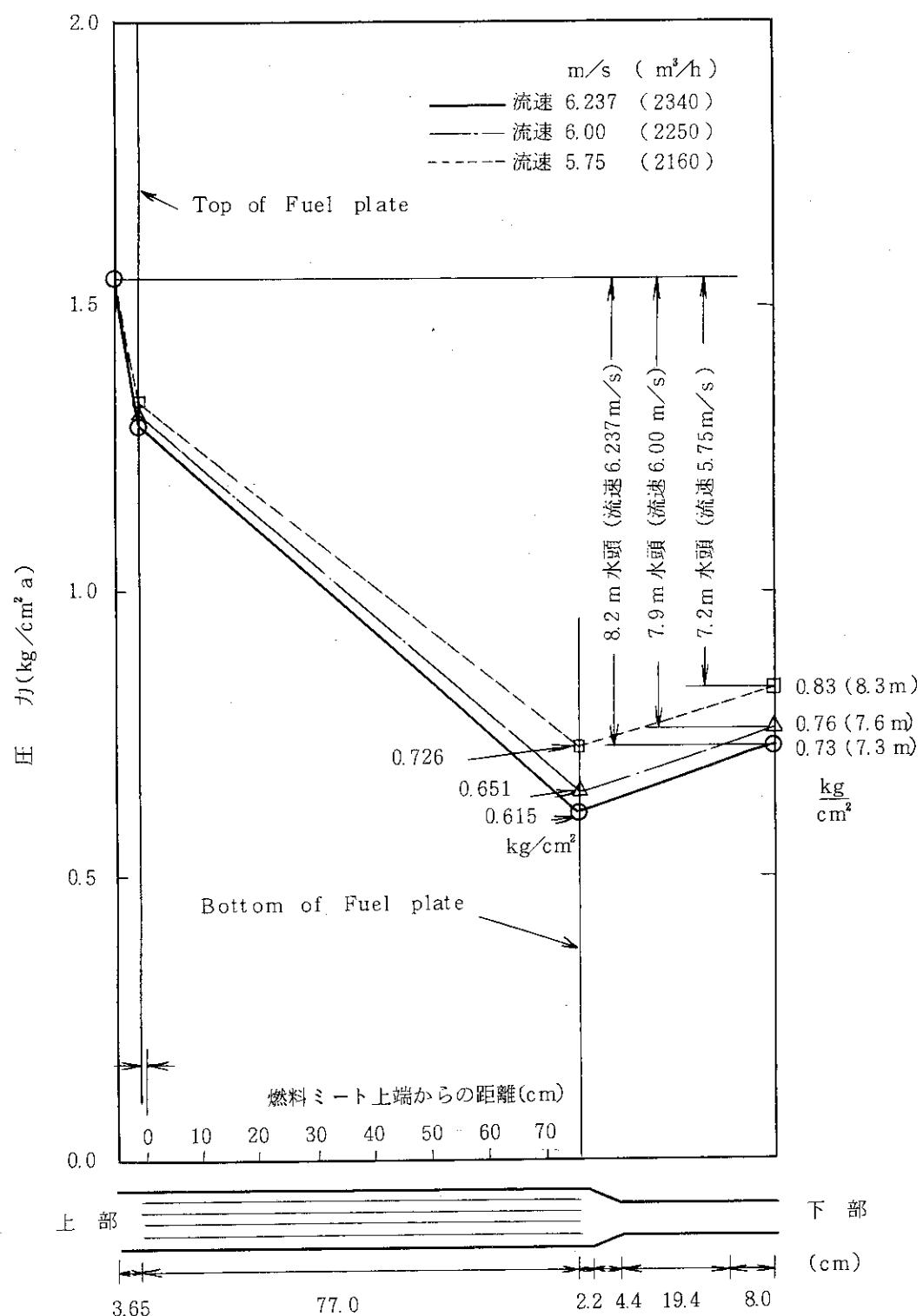


図 5.14 JRR-3 改造炉の炉心内の軸方向静圧分布

表 5.10 JRR-3 改造炉における炉心流量配分評価の比較

項目 領域	ケーネス 1			ケーネス 2			ケーネス 3			
	流路面積(m ²)	流速(m/s)	流量(m ³ /s)	流量割合(%)	流速(m/s)	流量(m ³ /s)	流量割合(%)	流速(m/s)	流量(m ³ /s)	流量割合(%)
標準燃料	0.08104	6.24	0.5057	78.1	6.00	0.4862	77.7	5.75	0.4660	77.7
フォロワ型燃料	0.01475	5.37	0.0792	12.2	5.27	0.0777	12.5	5.07	0.0748	12.5
燃料板側板間ギャップ	0.00407	1.42	0.0058	0.9	1.39	0.0057	0.9	1.34	0.0055	0.9
コアバス	0.00566	3.37	0.0191	3.0	3.30	0.0187	3.0	3.18	0.0180	3.0
B _e 反射体	0.00513	3.71	0.0190	2.9	3.64	0.0187	3.0	3.50	0.0180	3.0
照射筒	0.00253	6.03	0.0153	2.4	5.92	0.0150	2.4	5.69	0.0144	2.4
ドレン孔	0.00030	11.40	0.0034	0.5	11.20	0.0034	0.5	10.70	0.0032	0.5
合計	0.11348		0.648 2332.8m ³ /h	100.	0.625 2250.0m ³ /h	100.		0.600 2160.0m ³ /h	100.	

5.2.3 炉心内の軸方向静圧分布

前項までの流動損失評価及び流量配分評価より求めた炉心内の軸方向静圧分布を図5.14に示す。標準燃料要素内の燃料板間隔が僅か 2.28 mm であり、かつ流速が約 6 m/s であるため炉心内の圧力損失は大きく、約 9~10 m 水頭の圧力損失が生じている。

燃料板入口、燃料板出口及び格子板出口での静圧は、以下の様に求める。標準燃料要素入口の静圧は 15.5 m 水頭であり、それより、動圧、圧力損失、水頭差を考慮して行う。

A. 基準流速 6.237 m/s 時の静圧

(1) 燃料板入口での静圧

$$P_1 = P_0 + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} + \Delta h + \Delta P$$

ここに、

P_1 : 燃料板入口圧力 (m)

P_0 : 炉心入口圧力 (m)

v_0 : 炉心入口流速 (m/s)

v_1 : 燃料板入口流速 (m/s)

Δh : 水頭差

ΔP : 圧力損失

$$\begin{aligned} P_1 &= 15.5 + \frac{3.831^2 - 6.237^2}{2 \times 9.8} + 0.0365 \\ &\quad - \left\{ (0.5 + 0.00691) \times \left(\frac{3.831}{6.237} \right)^2 + 0.5 \right\} \times \frac{6.237^2}{2 \times 9.8} \\ &= 12.93 \text{ (m)} \\ &= 1.293 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(2) 燃料板出口での静圧

$$P_2 = P_0 + \frac{v_0^2 - v_2^2}{2g} + \Delta h - \Delta P$$

ここに、

P_2 : 燃料板出口圧力 (m)

v_2 : 燃料板出口流速 (m/s)

$$\begin{aligned} P_2 &= 15.5 + \frac{3.831^2 - 6.237^2}{2 \times 9.8} + (0.8065) \\ &\quad - \left\{ (0.5 + 0.00691) \times \left(\frac{3.831}{6.237} \right)^2 + (0.5 + 3.806) \right\} \times \frac{6.237^2}{2 \times 9.8} \\ &= 6.15 \text{ (m)} \\ &= 0.615 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(3) 格子板出口での静圧

$$P_3 = P_0 + \frac{v_0^2 - v_3^2}{2g} + \Delta h - \Delta P$$

ここで、

P_3 : 格子板出口圧力 (m)

v_3 : 格子板出口流速 (m/s)

= (標準燃料要素一体の流量)

÷ (格子板出口面積)

$$P_3 = 15.5 + \frac{3.831^2 - 2.02^2}{2 \times 9.8} + 1.1465 - 9.92$$

$$= 7.27 \text{ (m)}$$

$$= 0.727 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

B. 基準流速 6.00 m/s 時の静圧

基準流速 6.237 m/s の時と同様に求める。

① 燃料板入口での静圧

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} + \Delta h - \Delta P \\ &= 15.5 + \frac{3.685^2 - 6.00^2}{2 \times 9.8} + 0.0365 \\ &\quad - \left\{ (0.5 + 0.00661) \times \left(\frac{3.685}{6.00} \right)^2 + 0.5 \right\} \times \frac{6.00^2}{2 \times 9.8} \\ &= 13.12 \text{ (m)} \\ &= 1.312 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

② 燃料板出口での静圧

$$\begin{aligned} P_2 &= P_0 + \frac{v_0^2 - v_2^2}{2g} + \Delta h - \Delta P \\ &= 15.5 + \frac{3.685^2 - 6.00^2}{2 \times 9.8} + 0.8065 \\ &\quad - \left\{ (0.5 + 0.00661) \times \left(\frac{3.685}{6.00} \right)^2 + (0.5 + 4.016) \right\} \times \frac{6.00^2}{2 \times 9.8} \\ &= 6.51 \text{ (m)} \\ &= 0.651 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

③ 格子板出口での静圧

$$\begin{aligned} P_3 &= P_0 + \frac{v_0^2 - v_3^2}{2g} + \Delta h - \Delta P \\ &= 15.5 + \frac{3.685^2 - 1.938^2}{2 \times 9.8} + 1.1465 - 9.553 \end{aligned}$$

$$= 7.59 \text{ (m)}$$

$$= 0.759 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

C. 基準流速 5.75 m/s 時の静圧

(1) 燃料板入口での静圧

$$P_1 = P_0 + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} + \Delta h - \Delta P$$

$$= 15.5 + \frac{3.532^2 - 5.75^2}{2 \times 9.8} + 0.0365$$

$$- \left\{ (0.5 + 0.00686) \times \left(\frac{3.532}{5.75} \right)^2 + 0.5 \right\} \times \frac{5.75^2}{2 \times 9.8}$$

$$= 13.32 \text{ (m)}$$

$$= 1.332 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

(2) 燃料板出口での静圧

$$P_2 = P_0 + \frac{v_0^2 - v_2^2}{2g} + \Delta h - \Delta P$$

$$= 15.5 + \frac{5.532^2 - 5.75^2}{2 \times 9.8} + 0.8065$$

$$- \left\{ (0.5 + 0.00686) \times \left(\frac{5.532}{5.75} \right)^2 + (0.5 + 4.05) \right\} \times \frac{5.75^2}{2 \times 9.8}$$

$$= 7.26 \text{ (m)}$$

$$= 0.726 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

(3) 格子板出口での静圧

$$P_3 = P_0 + \frac{v_0^2 - v_3^2}{2g} + \Delta h - \Delta P$$

$$= 15.5 + \frac{3.532^2 - 1.857^2}{2 \times 9.8} + 1.1465 - 8.83$$

$$= 8.28 \text{ (m)}$$

$$= 0.828 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

以上の値を、図 5.14 に示す。

5.3 結果に対する考察

JRR-3 改造炉の炉心流動特性として、炉心流量配分については表 5.10 に炉心の長手方向圧力分布については図 5.14 にまとめて示してある。JRR-3 改造炉の炉心内要素の寸法が、モックアップ実験装置の炉心要素の寸法と若干異なるため、既述の様にモックアップ実験結果と計算との一致が良好であることを確認した上で、同じ手法を JRR-3 の炉心に適用したものである。

炉心流量配分は、標準燃料要素の流速が 6.24, 6.00, 5.75 m/s の 3 ケースで各要素での全体に対する流量割合はほとんど変わらないことがわかる。これは、モックアップ実験で全体流量を 100 % から 60 % に変えて各要素の全体に対する配分割合は、ほとんど変わることと同じ傾向を示している。又、各要素の炉心全体に対する流量割合は、モックアップ実験結果と JRR-3 改造炉とでは顕著な差異が見受けられない。これは、モックアップ実験装置と JRR-3 改造炉とで寸法・形状の違いが大きくないためであり、このことは結果の妥当性を示すものである。

次に図 5.14 に示す炉心内の長手方向の圧力分布を見ると、図 5.2 に示すモックアップ実験結果に比べて JRR-3 改造炉の圧力内での圧力損失は、同じ全流量に対して 1 m 水頭程度増加していることがわかる。この理由は、JRR-3 改造炉の標準型燃料要素の燃料板ギャップがモックアップ実験での標準燃料要素での 2.35 mm に対し、2.28 mm であって若干狭くなっているためである。この 1 m 水頭の違いは無視できず、一次冷却配管の静圧分布を考える時 1 m 水頭静圧が減ることを意味しており、一次冷却系配管部での大気圧より低下している負圧部の領域が広くなり、又、ポンプの吸込み圧力が低下することになる。従って、一次冷却配管の静圧分布については設計上、充分な配慮が必要である。

6. 結 言

熱出力約 20 MW の JRR-3 改造炉の熱水力設計及び解析の基礎として重要な炉心流動特性を、炉心流動配分と圧力損失に注目して調べた。まず、JRR-3 改造炉の炉心構造物の形状・寸法に出来るだけ近くしたモックアップ実験装置で炉心流速を測定し、炉心流量配分を求めた。さらに JRR-3 改造炉とモックアップ実験装置とで異なる形状・寸法の効果を考慮して、JRR-3 改造炉での炉心流量配分及び圧力損失を評価するために必要な燃料板表面摩擦損失係数を別途実験に求めると共に、フォロア燃料要素で流動損失が大きかったアダプタ部の形状を改善しその効果を調べた。これらの実験的知見に基づき、JRR-3 改造炉での炉心流量配分と炉心圧力損失との炉心流動特性を評価した。

これらの結果は、JRR-3 改造炉の熱水力設計及び解析に重要なものである。

謝 辞

本研究遂行に当り、終始御鞭撻戴いた研究炉管理部佐藤一男次長、大西信秋主任研究員に深甚なる謝意を表する。また、モックアップ実験装置の製作・実験に当り、日本鋼管株式会社古田公人氏に御協力戴いた。ここに記し感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 日本機械学会編、機械工学便覧、改訂 5 版、第 8 編「水力学及び流体力学」、1968 年
- (2) 数土幸夫・安藤弥栄・井川博雅・篠津和夫・大西信秋：JRR-3 改造炉の熱水力設計の基本的考え方、JAERI-M 84-079、1984 年 5 月

6. 結 言

熱出力約 20 MW の JRR-3 改造炉の熱水力設計及び解析の基礎として重要な炉心流動特性を、炉心流動配分と圧力損失に注目して調べた。まず、JRR-3 改造炉の炉心構造物の形状・寸法に出来るだけ近くしたモックアップ実験装置で炉心流速を測定し、炉心流量配分を求めた。さらに JRR-3 改造炉とモックアップ実験装置とで異なる形状・寸法の効果を考慮して、JRR-3 改造炉での炉心流量配分及び圧力損失を評価するために必要な燃料板表面摩擦損失係数を別途実験に求めると共に、フォロア燃料要素で流動損失が大きかったアダプタ部の形状を改善しその効果を調べた。これらの実験的知見に基づき、JRR-3 改造炉での炉心流量配分と炉心圧力損失との炉心流動特性を評価した。

これらの結果は、JRR-3 改造炉の熱水力設計及び解析に重要なものである。

謝 辞

本研究遂行に当り、終始御鞭撻戴いた研究炉管理部佐藤一男次長、大西信秋主任研究員に深甚なる謝意を表する。また、モックアップ実験装置の製作・実験に当り、日本鋼管株式会社古田公人氏に御協力戴いた。ここに記し感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 日本機械学会編、機械工学便覧、改訂 5 版、第 8 編「水力学及び流体力学」、1968 年
- (2) 数土幸夫・安藤弥栄・井川博雅・篠津和夫・大西信秋：JRR-3 改造炉の熱水力設計の基本的考え方、JAERI-M 84-079、1984 年 5 月

6. 結 言

熱出力約 20 MW の JRR-3 改造炉の熱水力設計及び解析の基礎として重要な炉心流動特性を、炉心流動配分と圧力損失に注目して調べた。まず、JRR-3 改造炉の炉心構造物の形状・寸法に出来るだけ近くしたモックアップ実験装置で炉心流速を測定し、炉心流量配分を求めた。さらに JRR-3 改造炉とモックアップ実験装置とで異なる形状・寸法の効果を考慮して、JRR-3 改造炉での炉心流量配分及び圧力損失を評価するために必要な燃料板表面摩擦損失係数を別途実験に求めると共に、フォロア燃料要素で流動損失が大きかったアダプタ部の形状を改善しその効果を調べた。これらの実験的知見に基づき、JRR-3 改造炉での炉心流量配分と炉心圧力損失との炉心流動特性を評価した。

これらの結果は、JRR-3 改造炉の熱水力設計及び解析に重要なものである。

謝 辞

本研究遂行に当り、終始御鞭撻戴いた研究炉管理部佐藤一男次長、大西信秋主任研究員に深甚なる謝意を表する。また、モックアップ実験装置の製作・実験に当り、日本鋼管株式会社古田公人氏に御協力戴いた。ここに記し感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 日本機械学会編、機械工学便覧、改訂 5 版、第 8 編「水力学及び流体力学」、1968 年
- (2) 数土幸夫・安藤弥栄・井川博雅・篠津和夫・大西信秋：JRR-3 改造炉の熱水力設計の基本的考え方、JAERI-M 84-079、1984 年 5 月