

JAERI-Tech
2002-034



JP0250163



JRR-4シリサイド燃料炉心の燃料要素
冷却水流量の測定

2002年3月

山本 和喜・渡辺 終吉・永富 英記・神永 雅紀・船山 佳郎

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

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

This report is issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

JRR-4シリサイド燃料炉心の燃料要素冷却水流量の測定

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

山本 和喜・渡辺 終吉・永富 英記・神永 雅紀⁺・船山 佳郎

(2002年1月31日受理)

JRR-4は3.5MWのスイミングプール型研究用原子炉であり、濃縮度低減化計画の下で濃縮度90%の燃料を20%の燃料に交換して1998年7月に臨界に到達した。

燃料濃縮度低減計画の一環として流路閉塞事象等の安全解析を実施した結果、熱水力的な余裕を持たせる必要があるとの結論を得たため、炉心の冷却水流量を増加させる検討を実施した。炉心流量を増加させる対策としては、炉心部におけるバイパス流を低減すること及び1次冷却水流量を7m³/minから8m³/minへ変更することにより燃料要素の流量を増加させた。流速測定用模擬燃料要素による流量測定の結果、燃料板間の流速は設計値の1.44m/sに対し、1.45m/sとの測定結果が得られ、炉心流量に対する全燃料要素の流量の比が0.88となり、安全解析で用いた0.86を超えていることを確認した。

これらの炉心流量増加のための対策を述べるとともに、各燃料要素の冷却水流量測定結果について報告する。

Measurement of Coolant Flow in Fuel Elements at the JRR-4 Silicide Fuel Core

Kazuyoshi YAMAMOTO, Shukichi WATANABE, Hideaki NAGATOMI,
Masaki KAMINAGA⁺ and Yoshiro FUNAYAMA

Department of Research Reactor
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2002)

JRR-4, a swimming-pool type research reactor with a thermal power of 3.5MW, attained criticality in July 1998, after replacing its 90% enrichment fuel with a 20% enrichment fuel under the Reduced Enrichment Program. As a part of the program, safety analysis on thermo-hydraulics of the reactor core was conducted on cases including single channel blockage accident. With the conclusion that a certain margin on thermo-hydraulics was necessary, investigation and experiments were carried out with an aim to increase the core flow rate. To increase the core flow, it was carried out to reduce the bypass flow in the core and to increase the primary coolant flow rate from 7m³/min to 8m³/min. After flow measurements using a mock-up fuel element, flow velocity of the fuel channel was determined as 1.45m/s as opposed to the designed value of 1.44m/s, and the ratio of core flow to total flow was 0.88, exceeding the value 0.86 used for the safety analysis.

This report describes the JRR-4 core flow increase plan as well as the results of the channel flow rate measurement.

Keywords: JRR-4, Flow Distribution, LEU, Channel Blockage Accident, Reduced Enrichment Program, Friction Factor, Silicide Fuel, Rectangular Channel

⁺Center for Neutron Science

目次

| | | |
|-----|------------------|----|
| 1 | はじめに | 1 |
| 2 | 炉心流量増加のための対策 | 2 |
| 2.1 | 制御棒のフォロワーの改良 | 2 |
| 2.2 | 案内カラーの改良 | 2 |
| 3 | 測定方法 | 4 |
| 3.1 | 流速測定用模擬燃料要素 | 4 |
| 3.2 | 模擬燃料要素の校正 | 5 |
| 3.3 | 炉心流量及び各燃料要素流量の測定 | 6 |
| 4 | 炉心燃料要素間流量配分測定の結果 | 8 |
| 5 | まとめ | 9 |
| | 謝辞 | 9 |
| | 参考文献 | 10 |
| | 付録 | 37 |

Contents

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Introduction | 1 |
| 2 | JRR-4 Core Flow Increasing Plan | 2 |
| 2.1 | Renew of Control Rod Follower | 2 |
| 2.2 | Renew of Guide Collar with Rod for Fixing Core Tank | 2 |
| 3 | Measurements | 4 |
| 3.1 | Mock up Fuel Element for Measurement of Core Flow | 4 |
| 3.2 | Calibration of Mock up Fuel Element | 5 |
| 3.3 | Flow Distribution during Each Fuel Elements in Core | 6 |
| 4 | Results of Flow Distribution during Each Fuel Elements in Core | 8 |
| 5 | Conclusions | 9 |
| | Acknowledgment | 9 |
| | References | 10 |
| | Appendix | 37 |

This is a blank page.

1 はじめに

1977年4月アメリカのカーター大統領が高濃縮燃料の供給停止するいわゆるカーター声明を発表して以来、世界の研究炉において低濃縮化の計画が始まった。研究炉燃料の低濃縮化プログラム(RERTR : Reduced Enrichment Program Research and Test Reactors)の中で、日本では1986年にJMTRが、1987年にはJRR-2がすでに中濃縮ウラン(MEU)アルミナイト燃料(約45%濃縮)に変更を終え、1990年にはJRR-3が低濃縮ウラン(LEU)アルミナイト燃料(約20%濃縮)を用いて運転を開始した¹⁾。その後、1992年にはKURが2体の燃料をシリサイド燃料に変更可能とし、1993年にはJMTRが全燃料をLEUシリサイド燃料へ変更、JRR-3も1999年にはLEUシリサイド化を終えている。

JRR-4は熱出力3.5MWのスイミングプール型の研究炉であり、遮蔽実験、原子炉物理実験、核燃料材料照射、RI生産、シリコンドーピング、原子炉技術者養成などに寄与している。1965年(昭和40年)1月28日に最初の臨界に達し、1976年には最高出力を2MWから3.5MWへ変更し、1996年1月12日までの31年間、高濃縮燃料(93%濃縮)による運転を行ってきた²⁾。

高濃縮燃料で運転する一方、RERTRに基づき、JRR-4でもLEUシリサイド燃料炉心³⁾への変更を実施するとともに、医療照射設備の新設、短寿命核種に対応した放射化分析システムの改良、大口径照射設備(N Pipe)の設置、計測制御機器の更新及び建家改修²⁾を合わせて1996年10月より実施した。(以下、JRR-4改造という。)

改造に係る工事を1998年に終了し、同年7月に低濃縮燃料による再臨界試験、引き続き原子炉並びに利用設備の特性試験を実施した⁴⁾。その後1999年1月から共同利用を再開し、医療照射を新たな目的に加えて現在まで順調に運転されている。改造後のJRR-4原子炉本体及び利用設備をFig.1に炉心構成をFig.2に、またJRR-4の履歴をTable1にそれぞれ示す。

JRR-4の燃料濃縮度低減化計画では、その基本方針として燃料要素の形状を変更しないことが1つの大きな条件とされた。一方、安全設計の中で單一流路の流路閉塞事象を考慮した場合、破損を防止するために燃料板間の流速を増加させることにより⁵⁾、炉心の冷却水流量増加を図る必要性が生じた。そのため、炉心部の不要なバイパス流を低減すること並びに1次冷却水流量を7m³/minから8m³/minへ変更し、燃料要素内の流量を増加させることを決定した。

本報告書ではJRR-4改造で実施した冷却水流量増加に伴なう燃料板間の流速の確認及び各燃料要素の流量の測定結果について報告する。なお、測定は流速測定用模擬燃料要素を炉心に挿入して行った。本実験の目的は安全設計時に用いた燃料要素を冷却する冷却水量が全1次冷却水流量の0.86以上であることを確認するとともに、各燃料要素位置での流量を明らかにすることである。

2 炉心流量増加のための対策

1次冷却系統を変更せずに炉心流量を増加するため、次に示す2つの対策を実施した。

- 1) 炉心タンク脚及び制御板に関係した隙間を少なくし、冷却に不要なバイパスする経路を阻止する。
- 2) 流量の增量によるポンプサクション側のサイフォンブレーキ用管内の負圧に対応して、サイフォンブレーキ弁は通常運転時には閉まり、水位低下時には自動的に開く機構とする。

改造前のJRR-4には炉心タンク脚と格子板並びに炉心タンク脚と炉心タンク下部案内との間に案内カラーが挿入されており、その間に隙間が存在している。このため炉心をバイパスする回路が形成され、炉心冷却に寄与しない流れがある。また、制御棒のフォロワーと格子板のガイド部との間にも隙間があり、そこを1次冷却水は流れている。これらの無駄な冷却水のバイパス経路を少なくすることにより、燃料要素に流れる冷却水量を増加させることができる。

サイフォンブレーキ弁は炉心タンクの出入口にそれぞれ取り付けられており、水位が6.4mに低下した時に配管に空気が流れ込み、配管のサイフォン現象をブレーキする機構となっている。しかし、通常時、サクション側は負圧になっているため、サイフォンブレーキ用の配管内の水位はプール水位より下がることになる。これが1次冷却水流量を8m³/minにすると0.34kgf/cm²以下となるため、空気が配管内に流れ込み、通常運転時においてもブレーキしてしまう。これを防止するために、ポンプの運転中にサイフォンブレーキの配管を閉じる機構が必要となった。

以下に、炉心流量の増加に直接関係する制御棒のフォロワーの改良及び案内カラーの改良の結果について述べる。

2.1 制御棒のフォロワーの改良

制御棒のフォロワーと格子板のガイド部との間にはFig.3に示す隙間が存在し、そこを1次冷却水は流れている。1次冷却水流量の増加による制御棒周りに流れる冷却水の流速の変化は小さいため、制御棒に与える流体振動の影響は少ないと考えられるが、こうした隙間の流速は大きく変化するため渦流を誘発し、制御棒にとっては好ましいことでない。また、制御棒の熱流束は十数kW/m²程度であり強制流動による除熱は不要であり、ここを流れる冷却水は「除熱」という観点から考えると無駄になっている。渡辺らのモックアップ試験から1次冷却水全体の2~3%がこの制御棒のガイド部を通過しているものと推定されている⁶⁾。これを塞ぐことができれば、燃料要素内に流れる冷却水は増加し、炉心の冷却性能が改善されることになる。

このため、Fig.4のように格子板の穴に合わせた形状にフォロワーの形状を合わせることにより、流路断面積を小さくした。また、このフォロワーの改造は燃料領域にあるときには軽水層を排除することから、従来の制御棒に比べ中性子束の上昇を防ぐ効果も期待できる。

2.2 案内カラーの改良

JRR-4の炉心タンクは、Fig.1に示すように炉心ブリッジ（レールクランプにより固定）より吊り下げられ、炉心タンク振れ止め用脚をプールの受座に挿入して固定する構造となっている。この炉心タンクの振れ止め用脚（以下、炉心タンク脚と呼ぶ）はFig.5に示すように、外径34mmのステンレス棒で、ガイド、格子板、集水筒底部を貫通し、プールの受座に挿入されており、集水筒の案内部（径

46mm)には案内カラーを挿入し隙間を調整している。この案内カラーは自重で挿入されているだけで、ネジ等の物理的な固定措置は行われていない。

改造前の1995年6月19日に水中カメラを炉心下部の集水筒に潜水させ、流量を2、4、6、7、 $7.5\text{m}^3/\text{min}$ と変化させたときの案内カラーの動きを観察した結果、 $7.5\text{m}^3/\text{min}$ まで上昇させると案内カラーが回転を始め、浮上していることが確認された。 $8\text{m}^3/\text{min}$ に増加させた場合、プールと集水筒の間の圧力差が高くなることから、プール水を吸い込むことが明らかとなった。このため、集水筒案内部の案内カラーの肉厚部を長くし重量を増加することによって、案内カラーの浮上防止を行った。また、格子板と脚の隙間に案内カラーを装着した。これらによってバイパス流の低下を図った。これらの形状をFig.6に示す。

3 測定方法

流速測定用模擬燃料要素（以下、模擬燃料要素と呼ぶ。）を用いて炉心流量を測定するには以下の点を注意しなければならない。

- 1) 実際の燃料要素と水力学的形状・寸法（Table.2 参照）が同じこと。
- 2) 約 25m 程度圧力導管を延長するため、その間の差圧情報が損なわれないこと。
- 3) 燃料要素間の流量比は最大でも±5%程度であるため、測定値の誤差を 2%程度にすること。

L型燃料要素の圧力損失の内訳を Table3 に示す（計算方法は付録を参照）。燃料板間の摩擦損失と燃料要素出口の圧力損失の割合が大きいことが分かる。燃料要素出口の圧力損失を利用することも考えられるが、上述のごとく炉心構造に左右されてしまうため差圧測定用には適していない。一方、燃料板間の摩擦損失は流速が速く、外部の影響は受けにくいため、安定した計測が可能であり、十分な精度が得られるものと考えた。このため燃料要素間の流速分布を測定するためには、模擬燃料要素の水力学的形状を燃料要素と等価にして、圧力損失の測定はこの燃料板間の摩擦損失を対象とした。

3.1 流速測定用模擬燃料要素

模擬燃料要素の外観図を Fig.7 に示す。模擬燃料要素は、実際の L型燃料要素とほとんど同じ寸法で製作されており、主要材質はアルミニウム合金（A5052）を用いた。実際の燃料要素との違いは Table4 のとおりである。L型燃料要素の燃料板の厚みが 1.26mm であるのに対し、模擬燃料要素では 1.2mm のアルミ板を用いた。これは燃料要素内の $0.06 \times 15 = 0.9\text{ mm}$ の余裕と、外側に 0.45mm 広げることで、すべての燃料板間隔を 4.1mm に保ち、肉厚 3mm の差圧測定用燃料板を挿入できるようにしたためである。Table3 に示すように燃料板間の摩擦損失 Δp_5 は全圧力損失に対して 27% を占めるため、4.1mm に揃えることは、流体力学的に等価にするためには有効である。

中央の差圧測定用燃料板には圧力導管を設けており、燃料板間の流路内の差圧を模擬燃料要素の外側まで導き出している。圧力測孔の間隔は 56cm と長くとり、差圧が大きくなるよう配慮した。入口側が助走区間となることから、高圧側の測孔を板の先端から 5cm 下流に配置した。

Table 5 に模擬燃料要素の代表寸法を、Table 6 に模擬燃料要素の圧力損失の計算結果をそれぞれ示す。Fig.8 に示すとおり、定格流量（8m³/min）の時の燃料板間流速 1.44m/s に対する L型燃料要素の全圧力損失差は、計算上、模擬燃料用そのほうが 32Pa 高くなるが、この値は燃料板間ギャップの許容公差 0.05mm による全圧力損失差 ±129Pa より十分小さい。また、外径 3mm の圧力導管 2 本が挿入されているチャンネルは流速が 14%程度低下すると考えられるが、要素全体では 1%の低下、全炉心では 0.05%の低下にすぎない。したがって、この模擬燃料要素は L型燃料要素と水力学的形状・寸法がほぼ同じと判断できることから、特別な調整を行うこともなく、直接炉心へ挿入して流量分布を測定することができる。

原子炉は水面から約 9m、測定位置は炉室の 1F フロアに設置したため、合計 25m もの圧力導管が必要となる。炉心タンク出口が最高高さとなり、最も圧力が低下することから、気泡が発生しやすい状況になる。気泡が発生すると正しい圧力測定ができず、誤差の要因となるので注意を要する。測定時の圧力導管の影響を小さくするため、対策として測定するときには毎回気泡の存在の有無を確認し、気泡がある場合には十分脱気した。また、管の材質もビニール製のパイプを避け、硬質であるテフロ

ンチューブを用いることで、正確に圧力が伝達されるよう配慮した。

3.2 模擬燃料要素の校正

実炉心で流水試験を行う前に、既存の模擬燃料要素流動実験装置を用いて流速測定用燃料要素単体の要素内通過流量と圧力損失の関係を校正した。模擬燃料要素の校正に用いた流動試験装置の外観と配管図を Fig.9 に示す。流動試験装置はポンプ、大気開放のタンク、配管、弁、ターピン式流量計、熱電対等から構成され、主ループとバイパスループを組み換えることができ、適切な流量条件を設定できる。また、流動試験用の模擬燃料要素はタンク内にある格子板に 1 体装荷することができ、圧力測定用の導管などタンク上面から引き出すことが可能な構造となっている。主ループの流量はストレーナ及びストレートナを通過した後、十分な整流区間を経てターピン式流量計で計測する。このターピン式流量計の計測誤差は 0.5% であるので今回の校正実験には十分な精度を有している。ターピン式流量計の測定値を基に模擬燃料要素に取り付けられた圧力測定孔間の差圧に対する流速の実験式を求める際には、以下の点に注意した。

<校正実験前の注意点>

- (1) 各計測機器は計測 30 分前に十分ヒートランを行う。
- (2) 流動試験装置のタンクに十分純水が貯えられていること。(水位約 2 m)
- (3) 差圧計につながる圧力導管に空気が混入ないよう十分な脱気を行う。
- (4) ターピン式流量計のパルス信号にパルス性のノイズが混入しないよう配慮する。
- (5) 圧力計は校正済みのものを使用する。

特に重要な校正前の条件として、差圧計につながる圧力導管の脱気操作が考えられ、ポンプ圧を利用し、差圧計のドレン孔から逆流させることによって、十分空気を抜いてから実験を行った。

実験では流量計(ターピン式流量計)からのパルス信号、差圧計の信号、流体温度を測定した。計測誤差を低減するために同じ条件で何度かデータを取り、記録した。得られたデータから Blasius の管内乱流圧力損失相関式の相関方法により実験式を作成し、直線回帰式を決定した。本校正実験のデータを Table 7.a~7.e に、管内乱流摩擦係数入を Fig.10 に、それぞれ示す。Fig.10 に示すように、レイノルズ数が 5000 前後で傾きの異なる直線が見られる。これらの中には層流、乱流を含んでいるので、レイノルズ数が 5000 前後でデータを層流と乱流に分け、それぞれの領域に対し実験式を求めた。

$$\begin{array}{lll} \text{層流 } (Re = \sim 5130) & \lambda = 167.8 Re^{-1} & (1) : \text{データ No.103} \sim 125 \\ \text{乱流 } (Re = 5130 \sim 20000) & \lambda = 0.2747 Re^{-0.25} & (2) : \text{データ No.1} \sim 103 \end{array}$$

矩形流路であっても、水力等価直径を用いると Blasius の円管摩擦係数の実験式に一致するものと考えたが、本実験では 11.7% 低い値となった。これは燃料板間の隙間に ±0.2mm の公差を許していること、上部測定孔の助走域の影響が無視できないことなど、いくつかの要因が考えられる。(1)式は Blasius の円管摩擦係数の実験式に一致しないが、燃料板間流速を測定するには十分であると判断した。実験式の誤差を Fig.11 に示す。この校正データより得られる乱流域の相関は標準偏差 2.2% であり、燃料要素間の流量比が最大 ±5% 程度であることから精度的に十分な校正結果が得られた。

3.3 炉心流量及び各燃料要素流量の測定

JRR-4 の 1 次冷却系は Fig.12 に示すとおり、ポンプ 3 台 (MP-1, MP-2, MP-3)、熱交換器 2 基 (HX-1, HX-2)、流量計 3 台 (FRA-1, FRA-2, FRA-3)、流量調節弁 2 個 (VCM-9, VCM-10)、温度計 5 個 (TRA-1-1, TRA-1-2, TRA2-1A, TRA2-1B, TRA2-2) から構成されている。

測定するデータは Table8 のとおりである。燃料要素流量を燃料板間圧力損失から評価する上で、流体の温度、炉心流量を測定することが必要である。1 次系の流量、温度の状態は、原子炉計装系を使用し、直接計測することができる。これらのプロセスデータは μXL (横河電機社製) のプロセスコンピュータに取り込こまれる指示値を記録した。

流量計はいずれもオリフィスタイプのものを使用しており、FRA-1 及び FRA-2 は 2 基の熱交換器出口に設けられており、それぞれの流量を測定するために用いられる。FRA-3 はこれらが合流した後、炉心に向かう配管に取り付けられている。また、温度計は炉心入口に 1 ヶ所、出口配管に 1 ヶ所、炉心タンクに 3 ヶ所設置されており、いずれも測温抵抗体を用いている。

次に、炉心内の模擬燃料要素を挿入して流量配分の測定を行う手順について説明する。JRR-4 は 2 つのプールを持っていることから、原子炉プール水位の変更は比較的容易に行うことができる。

試験前日、No.1 プールから No.2 プールへ水を移動し炉心タンク水位を低下させ、模擬燃料要素を炉心タンク内の一時燃料貯蔵棚に置き、燃料交換用トングを使用して燃料要素と交換可能なよう配置する。模擬燃料要素は炉心内のどの位置にも装荷可能なように圧力導管の長さに余裕をみて、圧力導管の配管を行う。圧力導管の配管が終了したら、水位を 9.8m に戻す。

測定当日、JRR-4 運転員に制御室において、各計装機器の状況確認及び監視を依頼する。測定前の注意事項として以下の事項が挙げられる。

- (1) 各機器に電源が供給され十分ヒートランされていること。
- (2) 炉心ブリッジ上面が養生されていること。
- (3) C 1 ~ C 5 が下限にあること。
- (4) B 1, B 2 が上限にあること。
- (5) 差圧計につながる圧力導管にガスが混入していないこと。
- (6) 強制循環運転ループになっていること。
- (7) 燃料交換用トングが用意されていること。
- (8) 起動系が計数可能であること。

炉心タンク上の作業員は各主要弁が全閉であることを確認し、燃料交換用トングを炉心タンクへ挿入することから始める。目的の位置の燃料要素 1 体を取り出し、一時燃料貯蔵棚に移し、目的の燃料であることを確認する。燃料一時貯蔵棚にある模擬燃料要素を燃料交換用トングでつかみ、取り出した燃料要素の代わりに挿入する。挿入が終了したら燃料交換用トングを炉心タンクより取り出す。

炉心内の点検を行い、強制循環運転の手順に従って、主循環ポンプを起動し、流量調整弁 (VCM-9, VCM-10) を用いて定格流量 $8.0\text{m}^3/\text{min}$ に調整する。流量、圧力、温度等が安定した後、データ収集を開始する。

データの収集終了後、流量調整弁 VCM-9, VCM-10 は開けたままにし、主循環ポンプを停止し、VCM-13 のみ全閉にする。ここで流量調節弁を変更しない理由は、定格流量 $8.0\text{m}^3/\text{min}$ の条件の再現性を高めるためである。流れが停止した後、燃料交換用トングを炉心タンクに再度挿入し、模擬燃料要素を一時燃料貯蔵棚へ、一時燃料貯蔵棚の燃料要素を元の位置に挿入する。これで一連の作業が終

了する。これを燃料要素全数である 20 体繰り返して測定を行った。本実験は 20 体燃料の臨界試験を終え、高出力運転が行われるまでの期間に実施した。実験は Table 9 に示すスケジュールで計画どおり行った。

4 炉心燃料要素間流量配分測定の結果

炉心燃料要素間流量配分測定は臨界試験後から高出力運転が行われるまでの期間に、炉心内燃料要素間流量及び炉心流量配分のため3章に述べたとおりの手順に従って、実炉心燃料域に模擬燃料要素を挿入し、全燃料位置における燃料要素流量測定を行った。

得られる圧力損失から模擬核燃料要素の燃料板間流速 u を求めるために、校正を行った実験式である(2)式を次式のとおり変形した。

$$u = \left\{ \frac{2\Delta p \cdot D^{1.25}}{0.2795 \rho \cdot L \cdot \nu^{0.25}} \right\}^{4/7} \quad (3)$$

ここで、

Δp : 差圧測定用燃料板の測定孔間の差圧 (Pa)

D : 水力等価直径 (m)

L : 差圧測定用燃料板の測定孔間の距離 (m)

ρ : 水の密度(kg/m^3)

ν : 水の動粘性係数(Ns/m^2)

これに燃料要素内の総流路断面積 $A (=0.004041\text{m}^2)$ を掛けることにより燃料要素流量 $U(\text{m}^3/\text{min})$ は次式であらわされる。なお、水の密度、動粘性係数は1次冷却系の平均水温を用いて算出した。

$$U = A \times 60 \left\{ \frac{2\Delta p \cdot D^{1.25}}{0.2795 \rho \cdot L \cdot \nu^{0.25}} \right\}^{4/7} \quad (4)$$

各燃料要素の流量 U を測定した結果をTable 10.a～Table 10.dに示す。また、流量分布を見やすくするために、Fig.13の炉心配置図にデータを合わせて表示した。これらからデータには大きなばらつきもなく、均等な分布を示していることが分かる。燃料要素の平均流量は $0.351\text{m}^3/\text{min}$ であり、燃料板間のチャンネル流速は $1.45\text{m}/\text{s}$ であった。D3～D7、E3～7の要素流量の変化を観ると制御室に向けて(Fig.13の右手) 流量が大きくなる傾向があることが分かる。これは炉心出口配管が制御室側に設けられているためと考えられる。F4が他に比べ高い理由は、燃料上部の構造が影響しているものと考えられ、炉心タンク内に大きな渦による局部的な偏りが生じているものと思われる。

測定した燃料要素流量を積算したものを炉心流量とすると、その1次系の定格流量 ($8\text{m}^3/\text{min}$) に対する比は 0.878 となる。この炉心流量比は重要な数値であり、JRR-4改造成における安全解析で使用している数値 (0.86) を上回る結果が得られた。

5 まとめ

JRR-4では燃料濃縮度低減化の基本方針として燃料要素の形状を変更しないことを1つの条件として単一の流路閉塞事象を考慮した時に、閉塞流路に隣接する燃料板間の流速を増加させることが必要とされたことから冷却水の炉心流量増加を図った。1次冷却系統を変更せずに炉心流量を増加するには、冷却水流量を $7\text{m}^3/\text{min}$ から $8\text{m}^3/\text{min}$ へ増加させ、不要な炉心をバイパスする流量を阻止することを考えた。バイパスする流量を低下させるために、制御棒のフォロワー改良及び炉心タンク脚の案内カラー改良等を行った。

その成果を実証するために水力学的形状の等価な模擬燃料要素を製作・校正を行った。臨界試験を終えた後、高出力運転を開始するまでの間に、実炉心燃料域に模擬燃料要素を挿入して、全燃料位置において燃料要素流量測定を行った。各燃料要素間の流量分布は比較的均等な分布をしており、燃料要素平均流量は $0.351\text{m}^3/\text{min}$ 、燃料板間のチャンネル流速は 1.45m/s という結果を得た。同データより炉心流量を計算し、1次冷却水流量に対する比を求めた結果、安全解析で用いてきた0.86を上回る0.88を示した。

謝辞

1次冷却系の運転及び各測定に協力していただいたJRR-4管理課の運転員の方々には大変感謝致します。圧力センサ及び測定技術について技術援助していただいた司測研（株）技術部賀羽常道圧力研究室長並びに加藤航兵氏に感謝致します。特性試験を計画する上で御指導下さった安全管理室の中島照夫次長（当時、JRR-4管理課長）、並びに、本報告書をまとめるにあたり御指導下さった研究炉部の高柳政二部長、小林晋昇次長、内山順三調査役、堀口洋二研究炉利用課長には深く感謝致します。

参考文献

- 1) Keiji Kanda, Hideaki Nishihara, Yoshiaki Futamura, Eiji Shirai and Takumi Asaoka, "Status Reduced Enrichment Program for Research Reactors in JAPAN", ANL/RERTR/TM19, CONF-9209266, p14, 1992.
- 2) T.Nakajima, M.Banba, Y. Funayama, F. Sakurai, Y.Horiguchi, K. Kaieda, "Status of JRR-4 Modification Works", 6th Meeting of the International Group on Research Reactors , April 29-May 1, 1996, Taejon, The Republic of Korea.
- 3) Teruo Nakajima, Nobuaki Ohnishi and Eiji Shirai, "Status of Core Conversion with LEU silicide Fuel in JRR-4", Proceeding of the 1994 Intenational meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Williamsburg, Virginia, Sept. 18-23,1994, ANL/RERTR/TM-20, CONF-9409107, p369
- 4) 永富英記、根本工、出雲寛互、高橋博樹、頬常勉、渡辺終吉、“JRR-4 の改造（その 2）－特性試験－”,日本原子力学会 1999 年春の年会 要旨集、広島大学、p349
- 5) 神永雅紀、山本和喜、渡辺終吉、“JRR-4 シリサイド燃料炉心の炉心定常熱水力解析及び炉心流路閉塞事故解析”、JAERI-Tech 96-039、 1996
- 6) 渡辺終吉、池田良和、有金賢次、藤 肇、山本章、鈴木良雄、“JRR-4 モックアップ流動実験（第 1 報）－低濃縮燃料炉心の流水特性及び現炉心における流水特性－”, 1983 年, p101,(Private Communication)
- 7) I.E.Idel lChik, “Handbook od Hydrauluc Resistance”, AEC-tr-6630

Table 1 JRR-4 本体及び利用の履歴

| | |
|------------|--------------------------|
| 1956年5月 | 原研創立 |
| 1962年4月 | JRR-4 原子炉施設設置許可 (HEU 燃料) |
| 1962年6月 | 工事着手 |
| 1965年1月28日 | 原子炉初臨界 |
| 1965年10月 | 1MW 出力達成 |
| 1965年11月 | 原子力船むつの第1次遮へい実験 |
| 1966年4月 | 2.5MW 運転開始 |
| 1969年1月 | 原子炉研修（一般課程）開始 |
| 1969年6月 | 共同利用（所内）開始 |
| 1970年10月 | 3.5MW へ出力上昇 |
| 1974年1月 | 共同利用（所外）開始 |
| 1975年2月 | 積算出力 1万 kWh 達成 |
| 1976年6月 | 原子力船むつの第2次遮へい実験 |
| 1976年10月 | 3.5MW 運転開始 |
| 1976年11月 | 原子炉研修（原子炉工学課程）開始 |
| 1977年7月 | シリコン半導体照射開始 |
| 1986年3月 | 原子炉研修（国際コース）開始 |
| 1992年3月 | 積算出力 5万 kWh 達成 |
| 1995年12月 | 改造工事着手 |
| 1998年7月14日 | LEU シリサイド燃料炉心、初臨界 |
| 1998年9月 | LEU シリサイド燃料炉心、3.5MW 運転開始 |
| 1999年1月 | 共同利用再開 |
| 1999年10月 | 第1回医療照射実施 |

Table 2 L型燃料要素の代表寸法

| 区間 | 主要寸法 | (m) | 流路面積A(m ²) | 濡れ縁長さPh(m) | 水力等価直径 d (m) | 長さ l (m) |
|----|--------|----------|------------------------|------------|-----------------|-------------|
| 2 | 0.05 | x 0.05 | 0.0025 | 0.2 | 0.05 | |
| 3 | 0.0738 | x 0.0704 | 0.005196 | 0.2884 | 0.07206 | 0.045 |
| 4 | 0.0041 | x 0.0704 | 0.004041 | 2.086 | 0.007749 | 0.63 |
| 5 | 0.0738 | x 0.0704 | 0.005196 | 0.2884 | 0.07206 | 0.025 |
| 6 | Ø 0.05 | | 0.001963 | 0.15708 | 0.05 | 0.1491 |

Table 3 L型燃料要素の圧力損失

| 温度 (°C) | 密度(kg/m ³) | 動粘性係数 Ns/m ² |
|---------|------------------------|----------------------------|
| 20.0 | 995.7 | 0.000001 |

| 損失係数 | 燃料板間流速 1m/s時の圧力損失 (Pa) | | 全損失に対する割合(%) | 1.44m/s時の圧力損失 (Pa) | 全損失に対する割合(%) |
|--------------|------------------------------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|
| | ζ_1 | Δp_1 | | | |
| ζ_1 | 0.653 | Δp_1 | 6.88 | 674.3 | 7.12 |
| ζ_2 | 0.738 | Δp_2 | 7.78 | 762.3 | 8.04 |
| ζ_3 | 0.008 | Δp_3 | 0.08 | 7.3 | 0.08 |
| ζ_4 | 0.111 | Δp_4 | 1.17 | 114.7 | 1.21 |
| ζ_5 | 2.742 | Δp_5 | 28.90 | 2583.9 | 27.27 |
| ζ_6 | 0.049 | Δp_6 | 0.52 | 51.0 | 0.54 |
| ζ_7 | 0.004 | Δp_7 | 0.05 | 4.1 | 0.04 |
| ζ_8 | 0.343 | Δp_8 | 3.61 | 353.6 | 3.73 |
| ζ_9 | 0.786 | Δp_9 | 8.28 | 740.4 | 7.81 |
| ζ_{10} | 4.053 | Δp_{10} | 42.72 | 4184.5 | 44.16 |

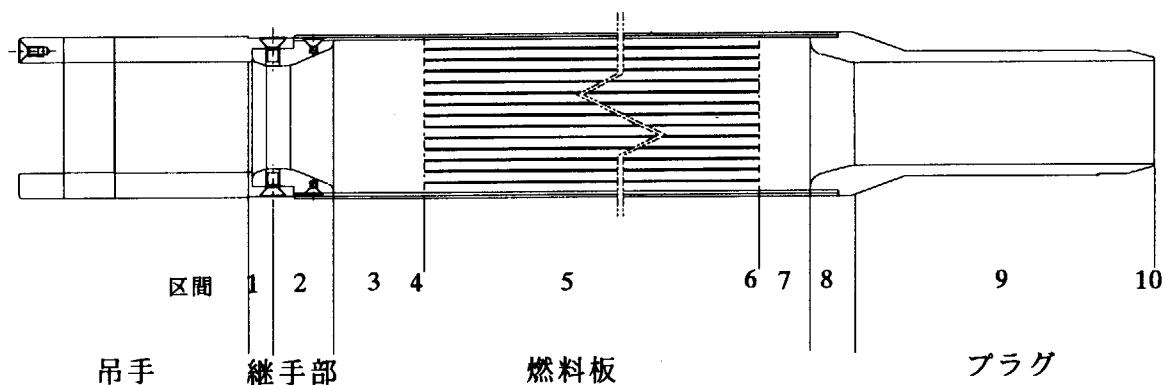


Table 4 L型燃料要素と模擬燃料要素との相違点

| | 模擬燃料要素 | L型燃料要素 | 備考 |
|-----------|-------------|-------------|----------|
| 材質 | A5052 | A6061 | |
| 燃料板厚 | 1.2mm | 1.26mm | |
| 中央の燃料板厚 | 3.0mm | 1.26mm | |
| 燃料板間ギャップ | 4.1mm | 4.1mm | 圧力導管がある。 |
| 外側ギャップ | 1.4mm | 1.85mm | |
| 継手-燃料板入口 | 70.4 × 74.8 | 70.4 × 73.8 | |
| 燃料板出口-プラグ | 70.4 × 74.8 | 70.4 × 73.8 | |

Table 5 模擬燃料要素の代表寸法

| 区間 | 主要寸法 | (m) | 流路面積A(m ²) | 濡れ縁長さPh(m) | 水力等価直径 d (m) | 長さ l (m) |
|----|--------|----------|------------------------|------------|-----------------|-------------|
| 2 | 0.05 | x 0.05 | 0.002500 | 0.2 | 0.05 | |
| 3 | 0.0748 | x 0.0704 | 0.005266 | 0.2904 | 0.072533 | 0.045 |
| 4 | 0.0041 | x 0.0704 | 0.004041 | 2.086 | 0.007749 | 0.63 |
| 5 | 0.0748 | x 0.0704 | 0.005266 | 0.2904 | 0.072533 | 0.025 |
| 6 | Ø 0.05 | | 0.001963 | 0.15708 | 0.05 | 0.1491 |

Table 6 模擬燃料要素の圧力損失

| 温度 (°C) | 密度(kg/m ³) | 動粘性係数 | |
|---------|------------------------|---------------------|--|
| | | N S /m ² | |
| 20.0 | 995.7 | 0.000001 | |

| 損失係数 | | 燃料板間流速 1m/s時の圧力損 失 (Pa) | 全損失対する割合 (%) | 1.44m/s時の圧力損 失 (Pa) | 全損失 対する 割合(%) |
|------------|-------|-------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| | | | | | |
| ξ_1 | 0.653 | Δp_1 | 6.86 | 674.3 | 7.09 |
| ξ_2 | 0.757 | Δp_2 | 7.95 | 781.3 | 8.22 |
| ξ_3 | 0.008 | Δp_3 | 0.08 | 7.1 | 0.07 |
| ξ_4 | 0.116 | Δp_4 | 1.22 | 120.1 | 1.26 |
| ξ_5 | 2.742 | Δp_5 | 28.81 | 2583.9 | 27.18 |
| ξ_6 | 0.054 | Δp_6 | 0.57 | 55.9 | 0.59 |
| ξ_7 | 0.004 | Δp_7 | 0.04 | 3.9 | 0.04 |
| ξ_8 | 0.345 | Δp_8 | 3.63 | 356.5 | 3.75 |
| ξ_9 | 0.786 | Δp_9 | 8.25 | 740.4 | 7.79 |
| ξ_{10} | 4.053 | Δp_{10} | 42.59 | 4184.5 | 44.01 |

Table 7.a 模擬燃料要素の校正実験のデータ

| run No. | count | Δp | T | v | ρ | μ | Re | $\rho v^2/2$ | λ |
|------------|-----------------|------------|------------|-----------------------|-----------|--|------------|--------------|-----------|
| | 流量計 の 周波数 | 差圧 Hz | 水温 mmAq | 燃料板 間の 速度 °C | 密度 m/s | 粘性係数 $\times 10^6 \text{ N S}/\text{m}^2$ | レイノ ルズ数 | 動圧 Pa | 管摩擦係数 |
| | | | | | | | | | |
| 1 | 155.19 | 3008.7 | 31.8 | 1.902 | 991.69 | 0.7787 | 18926 | 1794 | 0.02321 |
| 2 | 154.99 | 3015.5 | 31.7 | 1.899 | 991.72 | 0.7801 | 18869 | 1789 | 0.02332 |
| 3 | 154.72 | 2998.9 | 31.7 | 1.896 | 991.72 | 0.7801 | 18836 | 1783 | 0.02328 |
| 4 | 154.71 | 3005.7 | 31.7 | 1.896 | 991.72 | 0.7801 | 18835 | 1783 | 0.02333 |
| 5 | 154.53 | 3003.8 | 31.7 | 1.894 | 991.72 | 0.7801 | 18813 | 1778 | 0.02337 |
| 6 | 143.98 | 2579.1 | 33.1 | 1.765 | 991.25 | 0.7612 | 17964 | 1543 | 0.02313 |
| 7 | 143.70 | 2582.1 | 33.0 | 1.761 | 991.28 | 0.7625 | 17897 | 1537 | 0.02324 |
| 8 | 143.56 | 2587.0 | 33.0 | 1.759 | 991.28 | 0.7625 | 17879 | 1534 | 0.02333 |
| 9 | 143.40 | 2767.4 | 33.1 | 1.757 | 991.25 | 0.7612 | 17891 | 1531 | 0.02502 |
| 10 | 143.26 | 2628.2 | 31.1 | 1.756 | 991.93 | 0.7882 | 17261 | 1529 | 0.02379 |
| 11 | 143.06 | 2632.1 | 31.2 | 1.753 | 991.89 | 0.7868 | 17267 | 1525 | 0.02389 |
| 12 | 143.06 | 2587.0 | 33.1 | 1.753 | 991.25 | 0.7612 | 17849 | 1524 | 0.02350 |
| 13 | 142.99 | 2624.3 | 31.0 | 1.752 | 991.96 | 0.7895 | 17199 | 1523 | 0.02384 |
| 14 | 142.95 | 2618.4 | 31.2 | 1.752 | 991.89 | 0.7868 | 17254 | 1522 | 0.02380 |
| 15 | 142.82 | 2639.0 | 31.2 | 1.750 | 991.89 | 0.7868 | 17238 | 1519 | 0.02403 |
| 16 | 142.71 | 2531.1 | 37.6 | 1.749 | 989.72 | 0.7004 | 19349 | 1514 | 0.02314 |
| 17 | 142.68 | 2523.3 | 37.7 | 1.749 | 989.68 | 0.6991 | 19383 | 1513 | 0.02308 |
| 18 | 142.57 | 2500.7 | 37.5 | 1.747 | 989.75 | 0.7018 | 19293 | 1511 | 0.02290 |
| 19 | 142.53 | 2522.3 | 37.7 | 1.747 | 989.68 | 0.6991 | 19362 | 1510 | 0.02312 |
| 20 | 142.41 | 2521.3 | 37.7 | 1.745 | 989.68 | 0.6991 | 19346 | 1507 | 0.02315 |
| 21 | 128.21 | 2300.6 | 30.6 | 1.571 | 992.10 | 0.7949 | 15317 | 1225 | 0.02599 |
| 22 | 128.18 | 2284.9 | 30.6 | 1.571 | 992.10 | 0.7949 | 15313 | 1224 | 0.02583 |
| 23 | 128.08 | 2151.6 | 32.7 | 1.570 | 991.38 | 0.7666 | 15867 | 1221 | 0.02438 |
| 24 | 127.91 | 2297.7 | 30.6 | 1.568 | 992.10 | 0.7949 | 15281 | 1219 | 0.02608 |
| 25 | 127.85 | 2288.9 | 30.6 | 1.567 | 992.10 | 0.7949 | 15274 | 1218 | 0.02601 |
| 26 | 127.82 | 2157.5 | 32.7 | 1.566 | 991.38 | 0.7666 | 15835 | 1216 | 0.02454 |
| 27 | 127.77 | 2307.5 | 30.6 | 1.566 | 992.10 | 0.7949 | 15264 | 1216 | 0.02625 |
| 28 | 127.71 | 2166.3 | 32.6 | 1.565 | 991.42 | 0.7679 | 15794 | 1214 | 0.02468 |
| 29 | 127.68 | 2141.8 | 32.7 | 1.565 | 991.38 | 0.7666 | 15818 | 1214 | 0.02442 |
| 30 | 127.44 | 2183.0 | 32.7 | 1.562 | 991.38 | 0.7666 | 15788 | 1209 | 0.02498 |

Table 7.b 模擬燃料要素の校正実験のデータ

| | count | Δp | T | v | ρ | μ | Re | $\rho v^2/2$ | λ |
|---------|---------|------------|-------|-------------|----------|---------------------------------------|--------|--------------|-----------|
| run No. | 流量計の周波数 | 差圧 Hz | 水温 °C | 燃料板間の速度 m/s | 密度 kg/m³ | 粘性係数 $\times 10^{-6} \text{ N s/m}^2$ | レイノルズ数 | 動圧 Pa | 管摩擦係数 |
| | | | | | | | | | |
| 31 | 126.73 | 2112.4 | 36.5 | 1.553 | 990.09 | 0.7153 | 16826 | 1194 | 0.02448 |
| 32 | 126.53 | 2085.9 | 36.4 | 1.551 | 990.12 | 0.7166 | 16768 | 1190 | 0.02425 |
| 33 | 126.51 | 2112.4 | 36.7 | 1.550 | 990.02 | 0.7126 | 16860 | 1190 | 0.02456 |
| 34 | 126.42 | 2091.8 | 36.6 | 1.549 | 990.06 | 0.7139 | 16817 | 1188 | 0.02436 |
| 35 | 126.35 | 2080.0 | 36.6 | 1.548 | 990.06 | 0.7139 | 16807 | 1187 | 0.02425 |
| 36 | 115.40 | 1822.1 | 30.2 | 1.414 | 992.23 | 0.8003 | 13693 | 992.3 | 0.02541 |
| 37 | 115.39 | 1805.4 | 32.4 | 1.414 | 991.48 | 0.7706 | 14220 | 991.4 | 0.02520 |
| 38 | 115.31 | 1827.0 | 30.1 | 1.413 | 992.27 | 0.8017 | 13660 | 990.8 | 0.02551 |
| 39 | 115.31 | 1835.8 | 30.2 | 1.413 | 992.23 | 0.8003 | 13683 | 990.8 | 0.02564 |
| 40 | 115.21 | 1808.3 | 30.2 | 1.412 | 992.23 | 0.8003 | 13671 | 989.1 | 0.02530 |
| 41 | 115.20 | 1818.2 | 30.1 | 1.412 | 992.27 | 0.8017 | 13647 | 988.9 | 0.02544 |
| 42 | 114.83 | 1696.6 | 36.0 | 1.407 | 990.26 | 0.7220 | 15103 | 980.6 | 0.02394 |
| 43 | 114.79 | 1724.0 | 32.3 | 1.407 | 991.52 | 0.7720 | 14121 | 981.2 | 0.02431 |
| 44 | 114.68 | 1689.7 | 36.1 | 1.405 | 990.23 | 0.7207 | 15112 | 978.0 | 0.02391 |
| 45 | 114.65 | 1797.6 | 32.3 | 1.405 | 991.52 | 0.7720 | 14104 | 978.8 | 0.02541 |
| 46 | 114.58 | 1702.4 | 36.0 | 1.404 | 990.26 | 0.7220 | 15071 | 976.3 | 0.02413 |
| 47 | 114.55 | 1701.5 | 36.1 | 1.404 | 990.23 | 0.7207 | 15095 | 975.8 | 0.02413 |
| 48 | 114.47 | 1831.9 | 32.4 | 1.403 | 991.48 | 0.7706 | 14107 | 975.7 | 0.02598 |
| 49 | 114.22 | 1840.7 | 32.4 | 1.400 | 991.48 | 0.7706 | 14076 | 971.4 | 0.02622 |
| 50 | 114.19 | 1696.6 | 36.1 | 1.399 | 990.23 | 0.7207 | 15047 | 969.7 | 0.02421 |
| 51 | 100.94 | 1440.6 | 35.7 | 1.237 | 990.36 | 0.7261 | 13202 | 757.8 | 0.02630 |
| 52 | 100.91 | 1449.4 | 32.0 | 1.237 | 991.62 | 0.7760 | 12349 | 758.3 | 0.02645 |
| 53 | 100.69 | 1403.3 | 35.6 | 1.234 | 990.40 | 0.7274 | 13145 | 754.1 | 0.02575 |
| 54 | 100.66 | 1424.9 | 35.6 | 1.234 | 990.40 | 0.7274 | 13141 | 753.6 | 0.02616 |
| 55 | 100.63 | 1397.4 | 35.7 | 1.233 | 990.36 | 0.7261 | 13162 | 753.1 | 0.02567 |
| 56 | 100.56 | 1454.3 | 32.0 | 1.232 | 991.62 | 0.7760 | 12306 | 753.0 | 0.02672 |
| 57 | 100.41 | 1458.2 | 29.8 | 1.231 | 993.25 | 0.8069 | 11817 | 752.0 | 0.02683 |
| 58 | 100.36 | 1459.2 | 29.8 | 1.230 | 993.25 | 0.8069 | 11811 | 751.3 | 0.02688 |
| 59 | 100.34 | 1459.2 | 32.0 | 1.230 | 991.62 | 0.7760 | 12279 | 749.8 | 0.02693 |
| 60 | 100.28 | 1424.9 | 35.5 | 1.229 | 990.43 | 0.7288 | 13068 | 748.0 | 0.02636 |

Table 7.c 模擬燃料要素の校正実験のデータ

| run No. | count | Δp | T | v | ρ | μ | Re | $\rho v^2/2$ | λ |
|------------|-----------------|------------|------|-----------------|--------|------------------|------------|--------------|-----------|
| | 流量計 の 周波数 | 差圧 | 水温 | 燃料板 間の 速度 | 密度 | 粘性係数 | レイノ ルズ数 | 動圧 | 管摩擦係数 |
| | | mmAq | °C | m/s | kg/m³ | x10⁻⁶ N s /m² | | Pa | |
| 61 | 100.24 | 1441.6 | 29.8 | 1.228 | 993.25 | 0.8069 | 11797 | 749.5 | 0.02661 |
| 62 | 100.21 | 1456.3 | 29.9 | 1.228 | 993.23 | 0.8050 | 11822 | 749.0 | 0.02690 |
| 63 | 100.10 | 1437.7 | 29.8 | 1.227 | 993.25 | 0.8069 | 11780 | 747.4 | 0.02662 |
| 64 | 100.03 | 1449.4 | 32.1 | 1.226 | 991.59 | 0.7747 | 12263 | 745.1 | 0.02692 |
| 65 | 100.03 | 1455.3 | 32.1 | 1.226 | 991.59 | 0.7747 | 12263 | 745.1 | 0.02703 |
| 66 | 87.26 | 1095.4 | 29.3 | 1.069 | 993.38 | 0.8168 | 10145 | 568.0 | 0.02668 |
| 67 | 87.18 | 1095.4 | 29.3 | 1.068 | 993.38 | 0.8168 | 10136 | 567.0 | 0.02673 |
| 68 | 87.12 | 1081.7 | 29.3 | 1.068 | 993.38 | 0.8168 | 10129 | 566.2 | 0.02643 |
| 69 | 87.08 | 1096.4 | 29.4 | 1.067 | 993.35 | 0.8148 | 10149 | 565.7 | 0.02682 |
| 70 | 87.00 | 1101.3 | 29.3 | 1.066 | 993.38 | 0.8168 | 10115 | 564.7 | 0.02699 |
| 71 | 86.56 | 1071.9 | 35.1 | 1.061 | 990.57 | 0.7342 | 11197 | 557.4 | 0.02661 |
| 72 | 86.55 | 1068.9 | 35.0 | 1.061 | 990.60 | 0.7355 | 11175 | 557.3 | 0.02654 |
| 73 | 86.54 | 1065.0 | 35.0 | 1.061 | 990.60 | 0.7355 | 11174 | 557.1 | 0.02645 |
| 74 | 86.30 | 1098.3 | 35.1 | 1.058 | 990.57 | 0.7342 | 11163 | 554.0 | 0.02743 |
| 75 | 86.26 | 1068.9 | 35.1 | 1.057 | 990.57 | 0.7342 | 11158 | 553.5 | 0.02672 |
| 76 | 70.23 | 750.2 | 29.0 | 0.861 | 993.45 | 0.8227 | 8107 | 368.0 | 0.02821 |
| 77 | 70.15 | 746.3 | 29.1 | 0.860 | 993.43 | 0.8207 | 8117 | 367.1 | 0.02813 |
| 78 | 70.11 | 741.4 | 29.1 | 0.859 | 993.43 | 0.8207 | 8112 | 366.7 | 0.02797 |
| 79 | 70.08 | 742.4 | 29.1 | 0.859 | 993.43 | 0.8207 | 8109 | 366.4 | 0.02804 |
| 80 | 69.97 | 745.3 | 29.1 | 0.858 | 993.43 | 0.8207 | 8096 | 365.2 | 0.02824 |
| 81 | 69.86 | 727.7 | 34.1 | 0.856 | 990.91 | 0.7477 | 8873 | 363.2 | 0.02772 |
| 82 | 69.83 | 728.6 | 34.2 | 0.856 | 990.87 | 0.7463 | 8886 | 362.9 | 0.02779 |
| 83 | 69.82 | 726.7 | 34.1 | 0.856 | 990.91 | 0.7477 | 8868 | 362.8 | 0.02772 |
| 84 | 69.78 | 726.7 | 34.2 | 0.855 | 990.87 | 0.7463 | 8879 | 362.3 | 0.02775 |
| 85 | 69.76 | 722.8 | 34.3 | 0.855 | 990.84 | 0.7450 | 8893 | 362.1 | 0.02762 |
| 86 | 58.25 | 546.2 | 28.8 | 0.714 | 993.50 | 0.8266 | 6692 | 253.2 | 0.02986 |
| 87 | 58.24 | 547.2 | 28.8 | 0.714 | 993.50 | 0.8266 | 6691 | 253.1 | 0.02992 |
| 88 | 58.15 | 556.0 | 28.7 | 0.713 | 993.53 | 0.8286 | 6664 | 252.3 | 0.03050 |
| 89 | 58.04 | 546.2 | 28.7 | 0.711 | 993.53 | 0.8286 | 6652 | 251.3 | 0.03007 |
| 90 | 58.00 | 538.4 | 28.7 | 0.711 | 993.53 | 0.8286 | 6647 | 251.0 | 0.02968 |

Table 7.d 模擬燃料要素の校正実験のデータ

| run No. | count | Δp | T | v | ρ | μ | Re | $\rho v^2/2$ | λ |
|------------|-----------------|------------|------|-----------------|--------|------------------|------------|--------------|-----------|
| | 流量計 の 周波数 | 差圧 | 水温 | 燃料板 間の 速度 | 密度 | 粘性係数 | レイノ ルズ数 | 動圧 | 管摩擦係数 |
| | Hz | mmAq | °C | m/s | kg/m³ | x10⁻⁶ N s /m² | | Pa | |
| 91 | 56.19 | 501.1 | 33.9 | 0.689 | 990.97 | 0.7504 | 7111 | 235.0 | 0.02951 |
| 92 | 56.16 | 502.1 | 33.9 | 0.688 | 990.97 | 0.7504 | 7108 | 234.7 | 0.02960 |
| 93 | 56.13 | 511.9 | 33.9 | 0.688 | 990.97 | 0.7504 | 7104 | 234.5 | 0.03021 |
| 94 | 56.09 | 504.1 | 33.9 | 0.687 | 990.97 | 0.7504 | 7099 | 234.1 | 0.02979 |
| 95 | 56.04 | 500.1 | 33.8 | 0.687 | 991.01 | 0.7517 | 7080 | 233.7 | 0.02961 |
| 96 | 43.81 | 333.4 | 33.9 | 0.537 | 990.97 | 0.7504 | 5545 | 142.8 | 0.03230 |
| 97 | 43.66 | 326.6 | 34.0 | 0.535 | 990.94 | 0.7490 | 5536 | 141.9 | 0.03185 |
| 98 | 43.63 | 335.4 | 33.6 | 0.535 | 991.08 | 0.7544 | 5492 | 141.7 | 0.03276 |
| 99 | 43.62 | 330.5 | 34.0 | 0.535 | 990.94 | 0.7490 | 5530 | 141.6 | 0.03230 |
| 100 | 43.59 | 334.4 | 33.8 | 0.534 | 991.01 | 0.7517 | 5507 | 141.4 | 0.03272 |
| 101 | 43.27 | 323.6 | 28.5 | 0.530 | 993.58 | 0.8326 | 4936 | 139.7 | 0.03205 |
| 102 | 43.10 | 320.7 | 28.5 | 0.528 | 993.58 | 0.8326 | 4916 | 138.6 | 0.03201 |
| 103 | 43.02 | 323.6 | 28.4 | 0.527 | 993.60 | 0.8345 | 4895 | 138.1 | 0.03243 |
| 104 | 42.91 | 325.6 | 28.4 | 0.526 | 993.60 | 0.8345 | 4883 | 137.4 | 0.03279 |
| 105 | 42.89 | 326.6 | 28.4 | 0.526 | 993.60 | 0.8345 | 4881 | 137.3 | 0.03292 |
| 106 | 34.95 | 251.1 | 34.9 | 0.433 | 990.63 | 0.7369 | 4549 | 92.68 | 0.03748 |
| 107 | 34.95 | 252.0 | 34.9 | 0.433 | 990.63 | 0.7369 | 4549 | 92.68 | 0.03763 |
| 108 | 34.94 | 252.0 | 34.9 | 0.432 | 990.63 | 0.7369 | 4548 | 92.63 | 0.03765 |
| 109 | 34.88 | 253.0 | 34.9 | 0.432 | 990.63 | 0.7369 | 4540 | 92.31 | 0.03793 |
| 110 | 34.86 | 249.1 | 34.9 | 0.431 | 990.63 | 0.7369 | 4537 | 92.20 | 0.03738 |
| 111 | 30.09 | 205.0 | 34.7 | 0.373 | 990.70 | 0.7396 | 3910 | 68.97 | 0.04112 |
| 112 | 30.07 | 206.9 | 34.7 | 0.373 | 990.70 | 0.7396 | 3907 | 68.88 | 0.04157 |
| 113 | 30.05 | 206.9 | 34.7 | 0.373 | 990.70 | 0.7396 | 3905 | 68.79 | 0.04162 |
| 114 | 30.03 | 205.0 | 34.7 | 0.372 | 990.70 | 0.7396 | 3902 | 68.70 | 0.04128 |
| 115 | 30.00 | 206.9 | 34.7 | 0.372 | 990.70 | 0.7396 | 3898 | 68.56 | 0.04176 |
| 116 | 24.69 | 171.6 | 34.5 | 0.307 | 990.77 | 0.7423 | 3209 | 46.81 | 0.05073 |
| 117 | 24.68 | 169.7 | 34.5 | 0.307 | 990.77 | 0.7423 | 3208 | 46.77 | 0.05020 |
| 118 | 24.65 | 168.7 | 34.6 | 0.307 | 990.74 | 0.7409 | 3210 | 46.65 | 0.05003 |
| 119 | 24.64 | 168.7 | 34.5 | 0.307 | 990.77 | 0.7423 | 3202 | 46.62 | 0.05007 |
| 120 | 24.56 | 168.7 | 34.5 | 0.306 | 990.77 | 0.7423 | 3192 | 46.31 | 0.05039 |

Table 7.e 模擬燃料要素の校正実験のデータ

| run No. | count | Δp | T | v | ρ | μ | Re | $\rho v^2/2$ | λ |
|------------|-----------------|------------|------------|-----------------------|-----------|--|------------|--------------|-----------|
| | 流量計 の 周波数 | 差圧 Hz | 水温 mmAq | 燃料板 間の 速度 °C | 密度 m/s | 粘性係数 $\times 10^{-6} \text{ N s/m}^2$ | レイノ ルズ数 | 動圧 Pa | 管摩擦係数 |
| | | | | | | | | | |
| 121 | 20.19 | 148.1 | 34.4 | 0.252 | 990.80 | 0.7436 | 2629 | 31.54 | 0.06496 |
| 122 | 20.19 | 146.1 | 34.4 | 0.252 | 990.80 | 0.7436 | 2629 | 31.54 | 0.06410 |
| 123 | 20.11 | 147.1 | 34.4 | 0.251 | 990.80 | 0.7436 | 2619 | 31.29 | 0.06504 |
| 124 | 20.06 | 148.1 | 34.4 | 0.251 | 990.80 | 0.7436 | 2613 | 31.14 | 0.06580 |
| 125 | 20.05 | 147.1 | 34.4 | 0.251 | 990.80 | 0.7436 | 2611 | 31.11 | 0.06543 |
| 126 | 14.05 | 123.6 | 34.8 | 0.177 | 990.67 | 0.7382 | 1856 | 15.48 | 0.11044 |
| 127 | 13.99 | 132.4 | 34.7 | 0.176 | 990.70 | 0.7396 | 1844 | 15.35 | 0.11934 |
| 128 | 13.99 | 128.5 | 34.7 | 0.176 | 990.70 | 0.7396 | 1844 | 15.35 | 0.11580 |
| 129 | 13.88 | 133.4 | 34.7 | 0.175 | 990.70 | 0.7396 | 1830 | 15.11 | 0.12213 |
| 130 | 13.79 | 124.5 | 34.7 | 0.174 | 990.70 | 0.7396 | 1818 | 14.91 | 0.11555 |

Table 8 測定データ一覧

| 名称 | タグ | 単位 | センサー |
|------------------|---------|-------------------------|--------------------------------------|
| 炉心入口温度 | TRA1-1 | °C | 白金側温抵抗体 (JPt) |
| 炉心出口温度 | TRA1-2 | °C | 白金側温抵抗体 (JPt) |
| 炉心直上温度 | TRA2-1A | °C | 白金側温抵抗体 (Pt) |
| 炉心直上温度 | TRA2-1B | °C | 白金側温抵抗体 (Pt) |
| 炉心直下温度 | TRA2-2 | °C | 白金側温抵抗体 (Pt) |
| 炉心タンク水位 | LRA-1 | mm | 差圧式水位計 |
| 炉心タンク水位 | LTA-11 | m | 圧力計 |
| No.1熱交換器 1次側出口流量 | FRA-1 | m^3/min | オリフィス |
| No.2熱交換器 1次側出口流量 | FRA-2 | m^3/min | オリフィス |
| 炉心流量 | FRA-3A | m^3/min | オリフィス |
| 炉心流量 | FRA-3B | m^3/min | オリフィス |
| 流量調節弁VCM9開度 | VCM-9 | % | |
| 流量調節弁VCM10開度 | VCM-10 | % | |
| 模擬燃料要素差圧 | PZ77 | mmH_2O | 測定孔φ1、測定間隔56cm 精密差圧計 (PZ77: 司測研製) |

Table 9 実験スケジュール

| 順番 | 炉心位置 | 燃料番号 | 実施日 | 測定時刻 | 備考 |
|----|------|---------|-----------|---------|-----|
| 1 | D5 | R4L0008 | 1998/7/28 | 14 : 53 | |
| 2 | E5 | R4L0013 | 1998/7/28 | 15 : 24 | |
| 3 | E5 | R4L0013 | 1998/7/28 | 15 : 55 | 再測定 |
| 4 | D6 | R4L0009 | 1998/7/28 | 16 : 25 | |
| 5 | E6 | R4L0014 | 1998/7/28 | 16 : 50 | |
| 6 | D7 | R4L0010 | 1998/7/28 | 17 : 11 | |
| 7 | E7 | R4L0015 | 1998/7/28 | 17 : 29 | |
| 8 | E7 | R4L0015 | 1998/7/29 | 10 : 43 | 再測定 |
| 9 | E4 | R4L0012 | 1998/7/29 | 11 : 07 | |
| 10 | E3 | R4L0011 | 1998/7/29 | 11 : 28 | |
| 11 | E6 | R4L0014 | 1998/7/29 | 15 : 17 | 再測定 |
| 12 | F4 | R4L0017 | 1998/7/29 | 13 : 38 | |
| 13 | F5 | R4L0018 | 1998/7/29 | 14 : 12 | |
| 14 | F6 | R4L0019 | 1998/7/29 | 14 : 37 | |
| 15 | F7 | R4L0020 | 1998/7/29 | 15 : 03 | |
| 16 | C6 | R4L0004 | 1998/7/29 | 15 : 41 | |
| 17 | C7 | R4L0005 | 1998/7/29 | 16 : 48 | |
| 18 | F3 | R4L0016 | 1998/7/29 | 17 : 11 | |
| 19 | D4 | R4L0007 | 1998/8/14 | 10 : 52 | |
| 20 | D3 | R4L0006 | 1998/8/14 | 11 : 18 | |
| 21 | C5 | R4L0003 | 1998/8/14 | 11 : 39 | |
| 22 | C4 | R4L0002 | 1998/8/14 | 13 : 48 | |
| 23 | C3 | R4L0001 | 1998/8/14 | 14 : 58 | |

Table 10.a 炉心実験の測定結果（1）

| 測定項目 | タグ | 単位 | 燃料要素位置 | | | | |
|-------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| | | | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
| 炉心入口温度 | TRA1-1 | °C | 23.40 | 23.23 | 23.18 | 23.33 | 23.14 |
| 炉心出口温度 | TRA1-2 | °C | 23.36 | 23.23 | 23.13 | 23.27 | 23.07 |
| 炉心直上温度 | TRA2-1A | °C | 23.28 | 23.13 | 23.06 | 23.23 | 23.02 |
| 炉心直上温度 | TRA2-1B | °C | 23.26 | 23.11 | 23.04 | 23.20 | 23.01 |
| 炉心直下温度 | TRA2-2 | °C | 23.27 | 23.09 | 23.05 | 23.20 | 23.00 |
| 平均温度 | T _{av} | °C | 23.31 | 23.16 | 23.09 | 23.25 | 23.05 |
| 炉心タンク水位 | LRA-1 | mm | -3.96 | -3.97 | -3.91 | -3.37 | -3.35 |
| 炉心タンク水位 | LRA-11 | m | 9.75 | 9.75 | 9.75 | 9.76 | 9.76 |
| No.1熱交換器 出口流量 | FRA-1 | m ³ /min | 4.19 | 4.19 | 4.17 | 4.13 | 4.18 |
| No.2熱交換器 出口流量 | FRA-2 | m ³ /min | 3.94 | 3.97 | 3.97 | 4.00 | 3.99 |
| 炉心流量A系 | FRA-3A | m ³ /min | 8.00 | 8.00 | 7.98 | 8.00 | 8.01 |
| 炉心流量B系 | FRA-3B | m ³ /min | 8.00 | 8.01 | 7.98 | 8.00 | 8.01 |
| 流量調節弁 VCM-9開度 | VCM9 | % | 46.53 | 46.55 | 46.55 | 44.50 | 44.50 |
| 流量調節弁 VCM-10開度 | VCM10 | % | 46.48 | 46.48 | 46.49 | 46.30 | 46.30 |
| 模擬燃料要素差圧 | ΔP | mmAq | 188.8 | 204.0 | 211.4 | 217.3 | 194.8 |
| | | Pa | 1851 | 2001 | 2073 | 2131 | 1910 |
| 水の密度 | ρ | kg/m ³ | 997.37 | 997.41 | 997.43 | 997.39 | 997.44 |
| 水の動粘性係数 | ν | Ns/m ³ | 9.35x10 ⁻⁷ | 9.38x10 ⁻⁷ | 9.39x10 ⁻⁷ | 9.36x10 ⁻⁷ | 9.4x10 ⁻⁷ |
| 燃料版間流速 | v | m/s | 1.379 | 1.440 | 1.470 | 1.494 | 1.402 |
| 燃料要素流量 | U | m ³ /min | 0.334 | 0.349 | 0.356 | 0.362 | 0.340 |

Table 10.b 炉心実験の測定結果（2）

| 測定項目 | タグ | 単位 | 燃料要素位置 | | | | |
|-------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 |
| 炉心入口温度 | TRA1-1 | °C | 22.82 | 22.38 | 23.07 | 23.40 | 23.85 |
| 炉心出口温度 | TRA1-2 | °C | 22.79 | 22.34 | 23.01 | 23.33 | 23.78 |
| 炉心直上温度 | TRA2-1A | °C | 22.71 | 22.28 | 22.93 | 23.24 | 23.71 |
| 炉心直上温度 | TRA2-1B | °C | 22.71 | 22.27 | 22.92 | 23.24 | 23.71 |
| 炉心直下温度 | TRA2-2 | °C | 22.69 | 22.26 | 22.92 | 23.24 | 23.69 |
| 平均温度 | T _{av} | °C | 22.74 | 22.31 | 22.97 | 23.29 | 23.75 |
| 炉心タンク水位 | LRA-1 | mm | -3.96 | -3.99 | -3.33 | -3.32 | -3.27 |
| 炉心タンク水位 | LRA-11 | m | 9.76 | 9.76 | 9.76 | 9.76 | 9.76 |
| No.1熱交換器 出口流量 | FRA-1 | m ³ /min | 4.19 | 4.17 | 4.12 | 4.16 | 4.15 |
| No.2熱交換器 出口流量 | FRA-2 | m ³ /min | 3.99 | 3.95 | 4.00 | 4.01 | 4.02 |
| 炉心流量A系 | FRA-3A | m ³ /min | 7.99 | 7.99 | 8.00 | 8.00 | 7.99 |
| 炉心流量B系 | FRA-3B | m ³ /min | 7.99 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| 流量調節弁 VCM-9開度 | VCM9 | % | 46.53 | 46.54 | 44.50 | 44.50 | 44.50 |
| 流量調節弁 VCM-10開度 | VCM10 | % | 46.48 | 46.48 | 46.30 | 46.30 | 46.30 |
| 模擬燃料要素差圧 | ΔP | mmAq | 194.5 | 206.1 | 204.5 | 209.2 | 212.5 |
| | | Pa | 1907 | 2021 | 2005 | 2052 | 2084 |
| 水の密度 | ρ | kg/m ³ | 997.51 | 997.62 | 997.46 | 997.38 | 997.26 |
| 水の動粘性係数 | ν | Ns/m ³ | 9.46x10 ⁻⁷ | 9.55x10 ⁻⁷ | 9.41x10 ⁻⁷ | 9.35x10 ⁻⁷ | 9.26x10 ⁻⁷ |
| 燃料版間流速 | v | m/s | 1.400 | 1.445 | 1.441 | 1.462 | 1.477 |
| 燃料要素流量 | U | m ³ /min | 0.339 | 0.350 | 0.349 | 0.354 | 0.358 |

Table 10. c 炉心実験の測定結果（3）

| 測定項目 | タグ | 単位 | 燃料要素位置 | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| | | | E3 | E4 | E5 | | E6 | | E7 | | |
| | | | | | | 再測定 | | 再測定 | | 再測定 | |
| 炉心入口温度 | TRA1-1 | °C | 23.28 | 23.02 | 22.45 | 22.80 | 23.66 | 24.02 | 23.98 | 22.57 | |
| 炉心出口温度 | TRA1-2 | °C | 23.23 | 22.96 | 22.39 | 22.74 | 23.59 | 23.94 | 23.93 | 22.49 | |
| 炉心直上温度 | TRA2-1A | °C | 23.15 | 22.89 | 22.33 | 22.67 | 23.50 | 23.30 | 23.84 | 22.45 | |
| 炉心直上温度 | TRA2-1B | °C | 23.14 | 22.89 | 22.32 | 22.60 | 23.50 | 23.89 | 23.84 | 22.44 | |
| 炉心直下温度 | TRA2-2 | °C | 23.14 | 22.88 | 22.32 | 22.67 | 23.49 | 23.86 | 23.84 | 22.44 | |
| 平均温度 | T _{av} | °C | 23.19 | 22.93 | 22.36 | 22.70 | 23.55 | 23.80 | 23.89 | 22.48 | |
| 炉心タンク水位 | LRA-1 | mm | -3.35 | -3.38 | -3.38 | -3.35 | -3.27 | -3.30 | -3.25 | -3.41 | |
| 炉心タンク水位 | LRA-11 | m | 9.76 | 9.76 | 9.76 | 9.76 | 9.76 | 9.76 | 9.76 | 9.76 | |
| No.1熱交換器 出口流量 | FRA-1 | m ³ /min | 4.16 | 4.17 | 4.16 | 4.14 | 4.14 | 4.15 | 4.16 | 4.14 | |
| No.2熱交換器 出口流量 | FRA-2 | m ³ /min | 4.01 | 4.00 | 4.01 | 3.99 | 4.01 | 4.03 | 4.01 | 4.00 | |
| 炉心流量A系 | FRA-3A | m ³ /min | 8.01 | 8.02 | 8.01 | 8.02 | 8.00 | 8.00 | 7.98 | 7.99 | |
| 炉心流量B系 | FRA-3B | m ³ /min | 8.01 | 8.01 | 8.02 | 8.04 | 8.00 | 8.00 | 8.03 | 8.01 | |
| 流量調節弁 VCM-9開度 | VCM9 | % | 45.04 | 45.04 | 44.50 | 44.50 | 44.50 | 45.04 | 44.50 | 45.04 | |
| 流量調節弁 VCM-10開度 | VCM10 | % | 46.48 | 46.48 | 46.30 | 46.30 | 46.30 | 46.48 | 46.30 | 46.48 | |
| 模擬燃料要素差 圧 | ΔP | mmAq | 191.4 | 206.8 | 203.5 | 197.3 | 208.2 | 210.7 | 214.5 | 216.2 | |
| | | Pa | 1877 | 2028 | 1996 | 1935 | 2042 | 2066 | 2104 | 2120 | |
| 水の密度 | ρ | kg/m ³ | 997.40 | 997.47 | 997.61 | 997.53 | 997.31 | 997.25 | 997.23 | 997.58 | |
| 水の動粘性係数 | ν | Ns/m ³ | 9.37 $\times 10^{-7}$ | 9.42 $\times 10^{-7}$ | 9.53 $\times 10^{-7}$ | 9.47 $\times 10^{-7}$ | 9.30 $\times 10^{-7}$ | 9.25 $\times 10^{-7}$ | 9.23 $\times 10^{-7}$ | 9.51 $\times 10^{-7}$ | |
| 燃料版間流速 | v | m/s | 1.389 | 1.450 | 1.435 | 1.411 | 1.459 | 1.470 | 1.486 | 1.486 | |
| | | m ³ /min | | | 1.423 | | 1.464 | | 1.486 | | |
| 燃料要素流量 | TRA1-1 | m ³ /min | 0.337 | 0.352 | 0.345 | | 0.355 | | 0.360 | | |

Table 10. d 炉心実験の測定結果（4）

| 測定項目 | タグ | 単位 | 燃料要素位置 | | | | |
|-------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 |
| 炉心入口温度 | TRA1-1 | °C | 24.59 | 24.50 | 24.19 | 23.75 | 23.59 |
| 炉心出口温度 | TRA1-2 | °C | 24.51 | 24.43 | 24.12 | 23.68 | 23.55 |
| 炉心直上温度 | TRA2-1A | °C | 24.43 | 24.35 | 24.04 | 23.62 | 23.48 |
| 炉心直上温度 | TRA2-1B | °C | 24.43 | 24.33 | 24.03 | 23.59 | 23.46 |
| 炉心直下温度 | TRA2-2 | °C | 24.43 | 24.33 | 24.03 | 23.59 | 23.45 |
| 平均温度 | T _{av} | °C | 24.48 | 24.39 | 24.08 | 23.65 | 23.51 |
| 炉心タンク水位 | LRA-1 | mm | -3.23 | -3.27 | -3.27 | -3.31 | -3.32 |
| 炉心タンク水位 | LRA-11 | m | 9.76 | 9.76 | 9.76 | 9.76 | 9.76 |
| No.1熱交換器 出口流量 | FRA-1 | m ³ /min | 4.16 | 4.17 | 4.17 | 4.14 | 4.16 |
| No.2熱交換器 出口流量 | FRA-2 | m ³ /min | 4.02 | 4.01 | 4.00 | 4.04 | 4.03 |
| 炉心流量A系 | FRA-3A | m ³ /min | 8.01 | 8.01 | 7.98 | 8.01 | 8.00 |
| 炉心流量B系 | FRA-3B | m ³ /min | 8.01 | 8.00 | 7.99 | 8.00 | 8.01 |
| 流量調節弁 VCM-9開度 | VCM9 | % | 44.50 | 44.50 | 44.50 | 44.50 | 44.50 |
| 流量調節弁 VCM-10開度 | VCM10 | % | 46.30 | 46.30 | 46.30 | 46.30 | 46.30 |
| 模擬燃料要素差圧 | ΔP | mmAq | 205.7 | 225.1 | 198.1 | 210.4 | 216.5 |
| | | Pa | 2017 | 2207 | 1943 | 2063 | 2123 |
| 水の密度 | ρ | kg/m ³ | 997.08 | 997.10 | 997.18 | 997.29 | 997.32 |
| 水の動粘性係数 | ν | Ns/m ³ | 9.12x10 ⁻⁷ | 9.14x10 ⁻⁷ | 9.2x10 ⁻⁷ | 9.28x10 ⁻⁷ | 9.31x10 ⁻⁷ |
| 燃料版間流速 | v | m/s | 1.453 | 1.530 | 1.420 | 1.468 | 1.492 |
| 燃料要素流量 | U | m ³ /min | 0.352 | 0.371 | 0.344 | 0.356 | 0.362 |

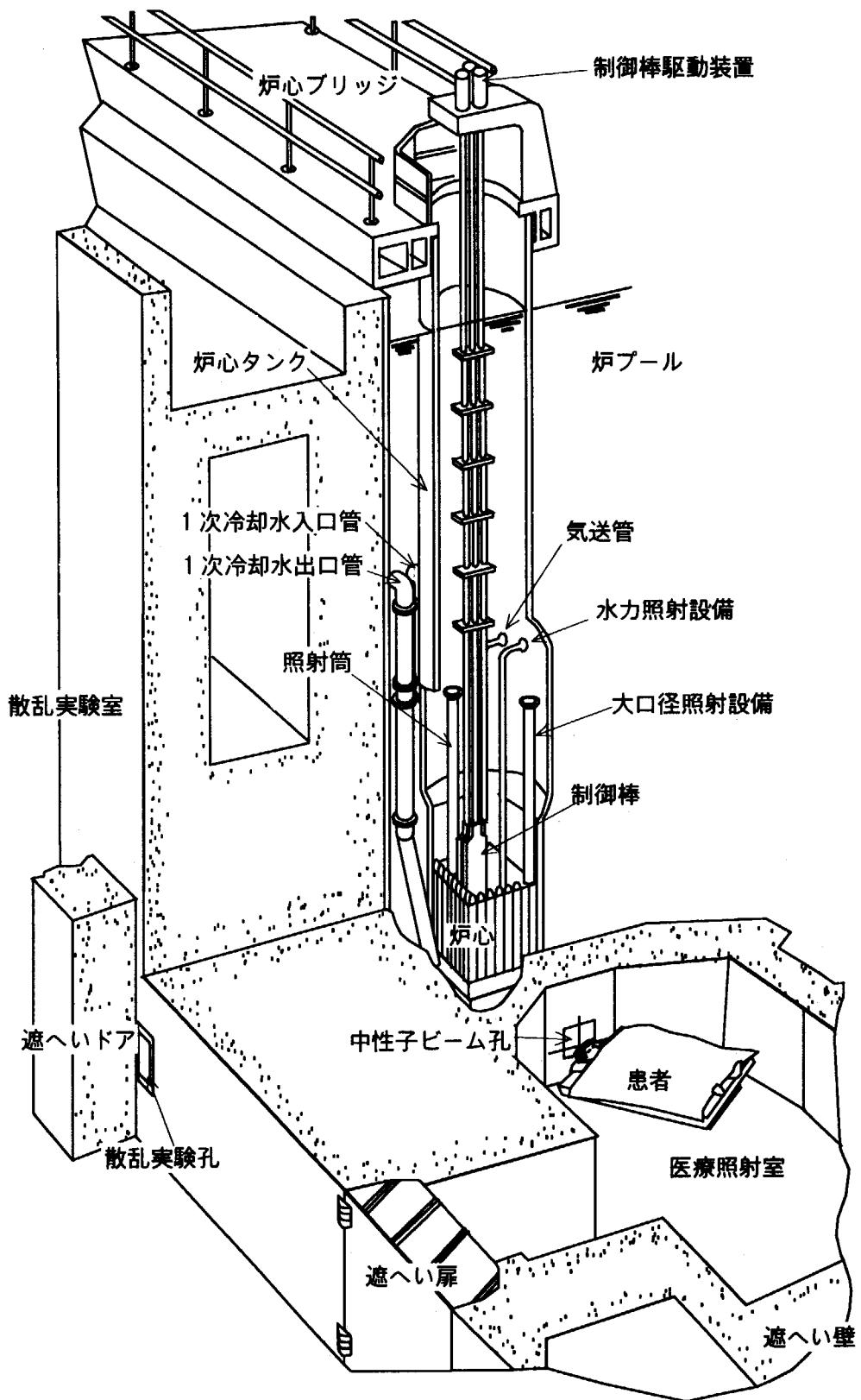


Fig.1 JRR-4 原子炉本体及び実験設備

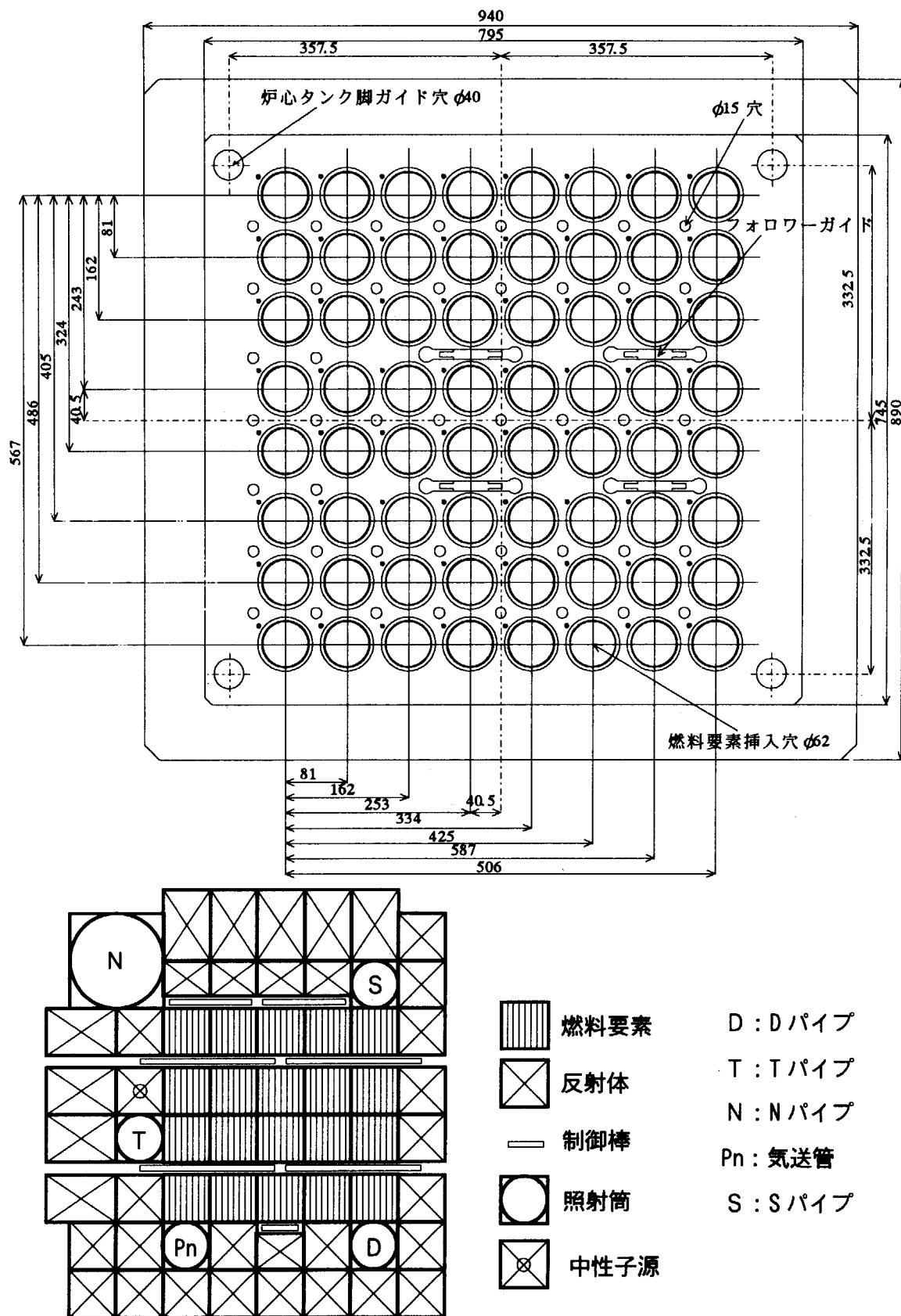


Fig.2 格子板と炉心の構成

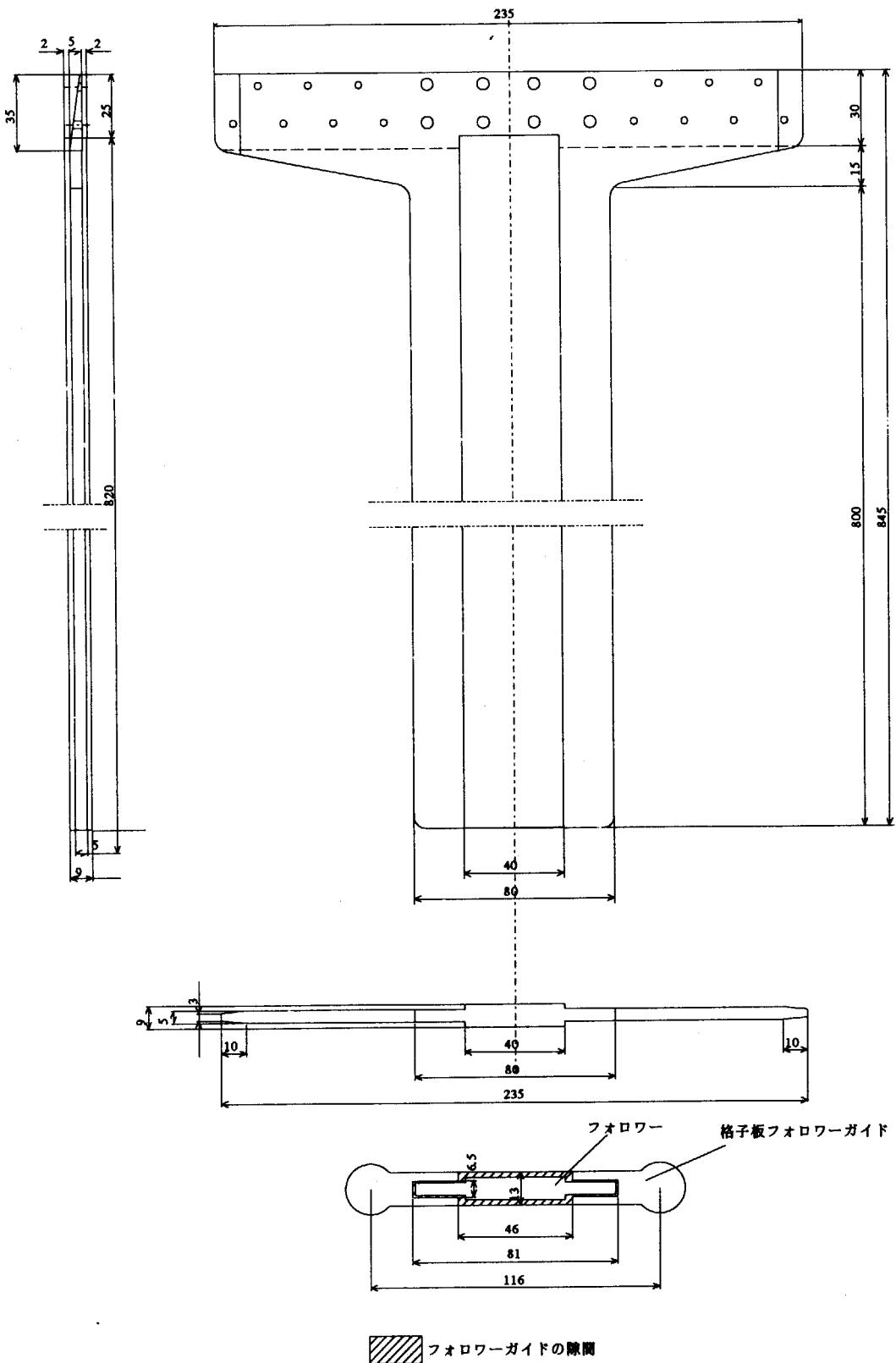


Fig.3 制御板フォロワと格子板フォロワガイド

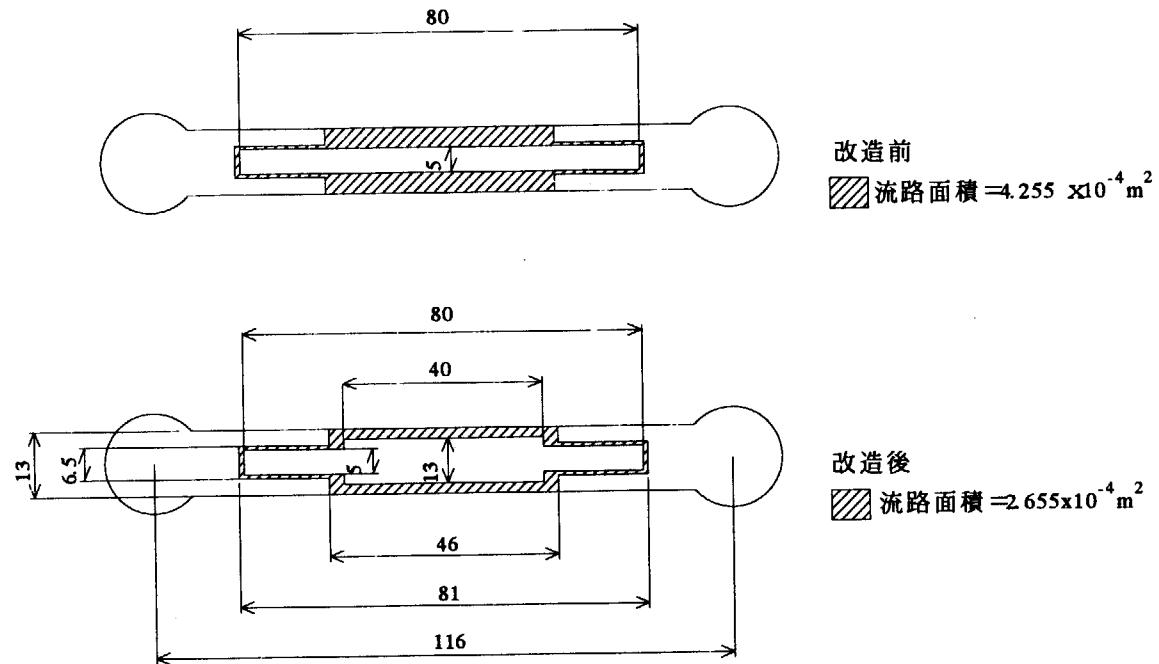


Fig.4 フォロワーの改造による流路面積の縮小

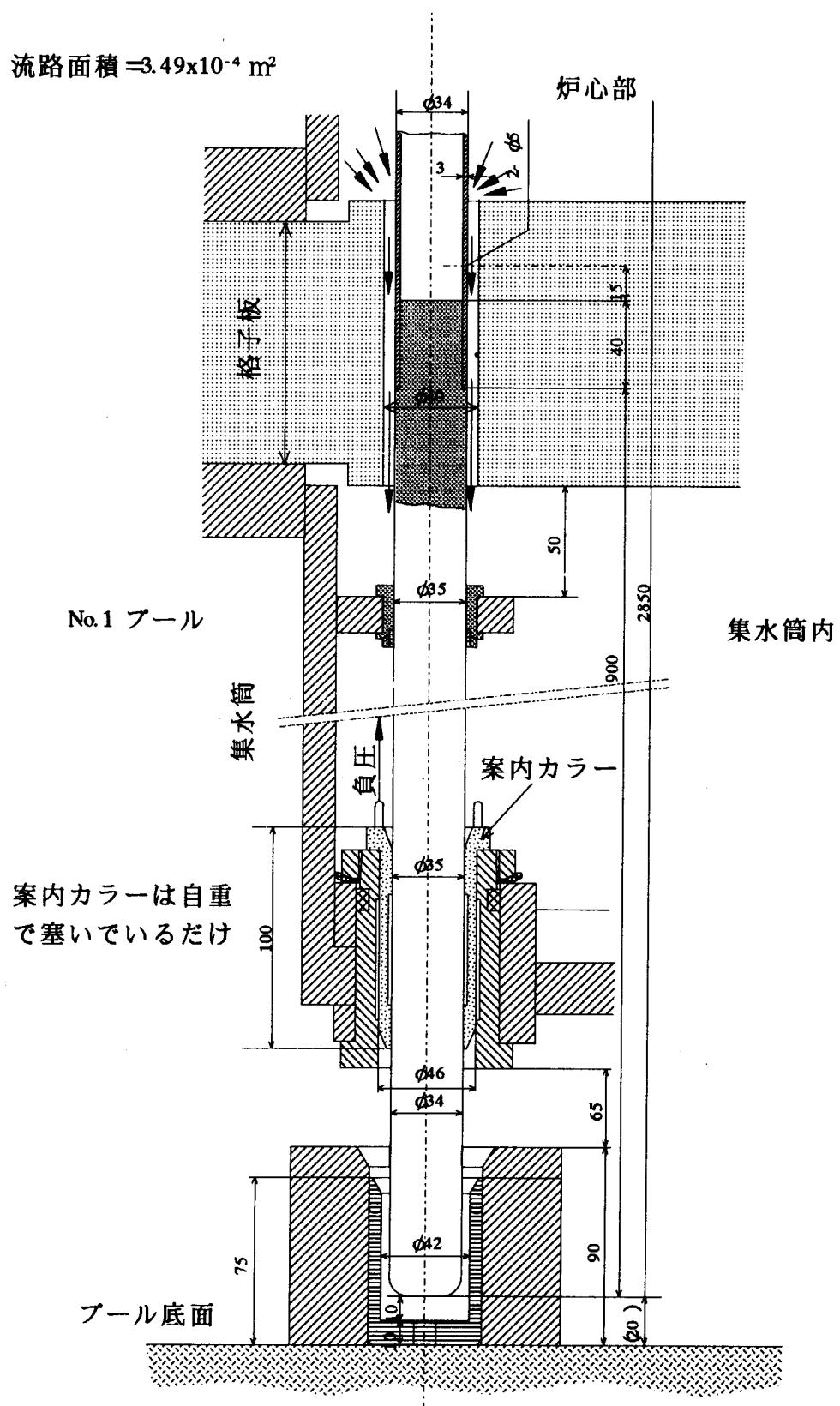
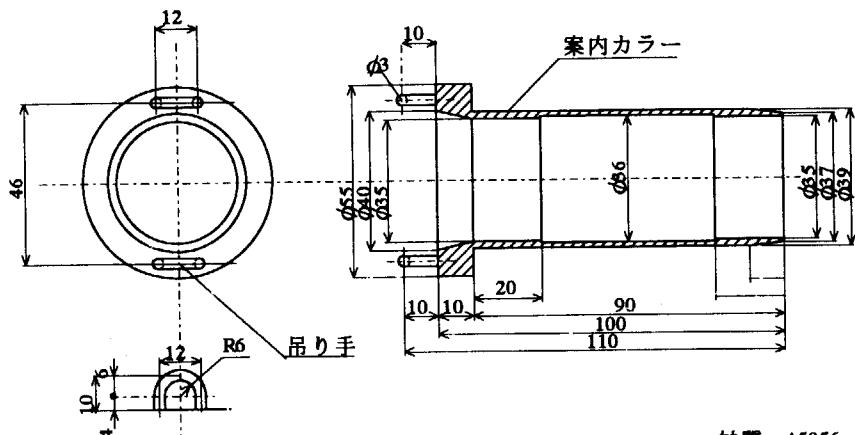


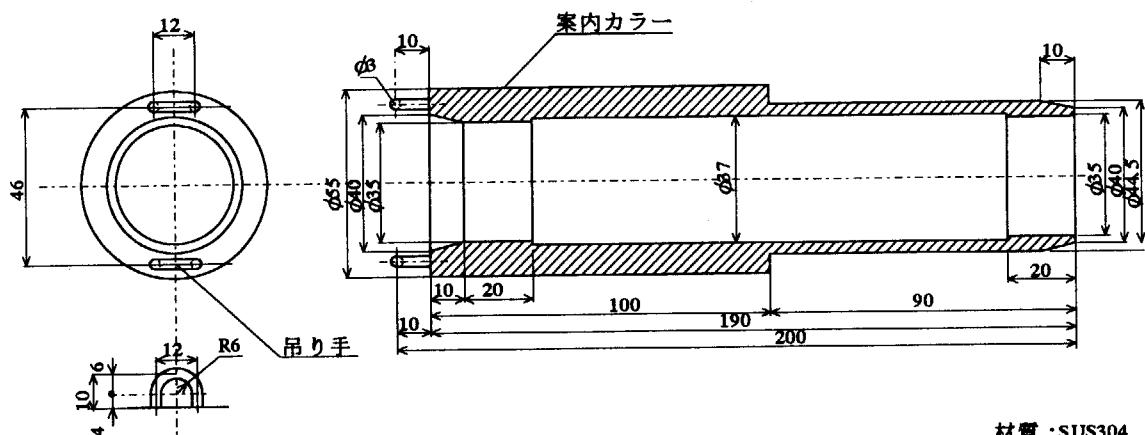
Fig.5 炉心タンクの振れ止め用脚

格子板の案内カラー



材質：A5056

炉心タンク下部用の案内カラー



材質:SUS304

Fig.6 炉心タンク脚の案内カラー（改造後）

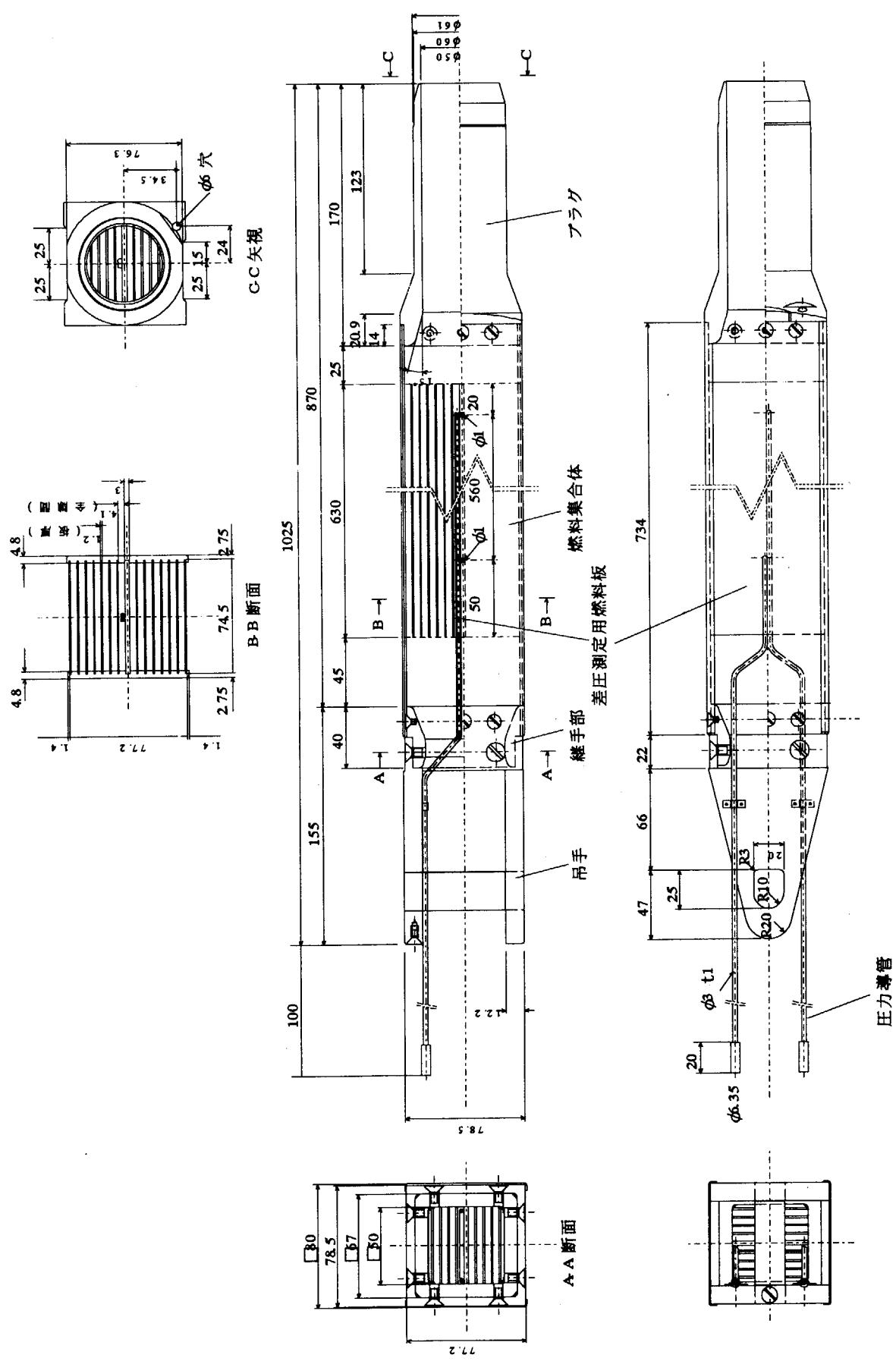


Fig. 7 模擬燃料要素の外観図

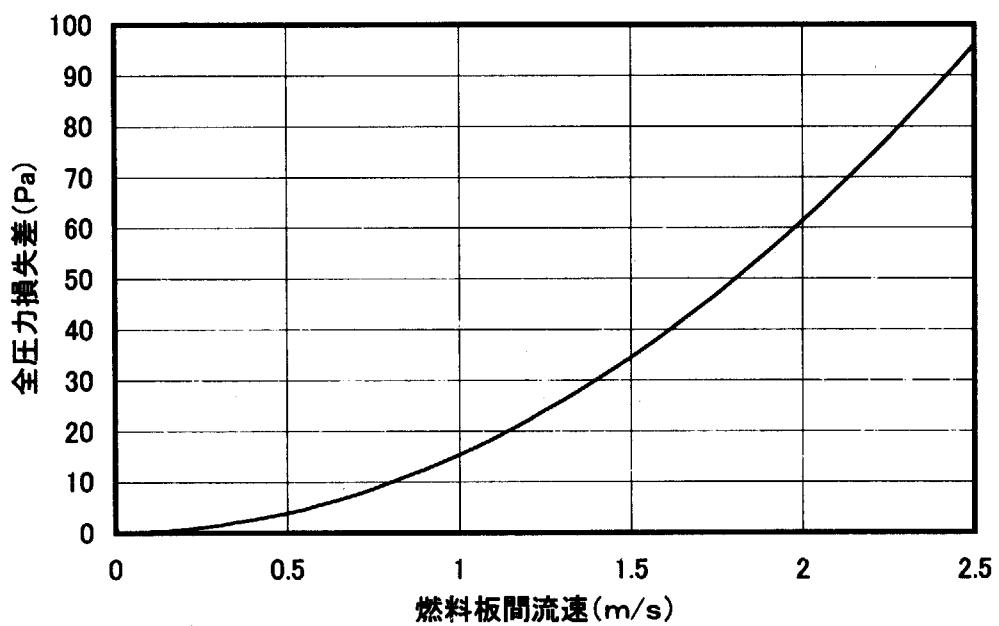


Fig.8 模擬燃料要素の L 型燃料要素に対する全圧力損失の差

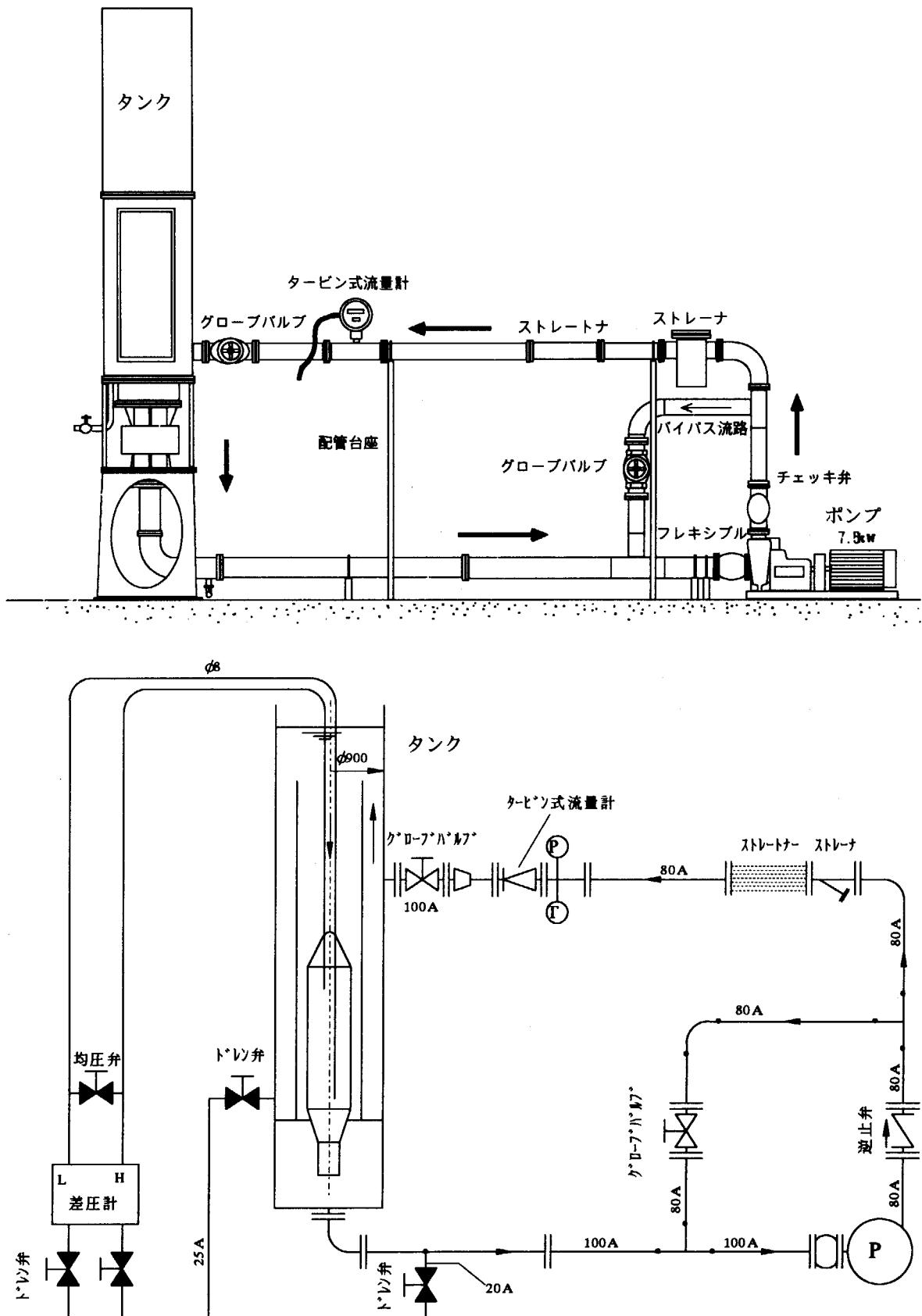


Fig.9 校正に用いた流動試験装置の外観と配管図（JRR-4 純水製造室内に設置）

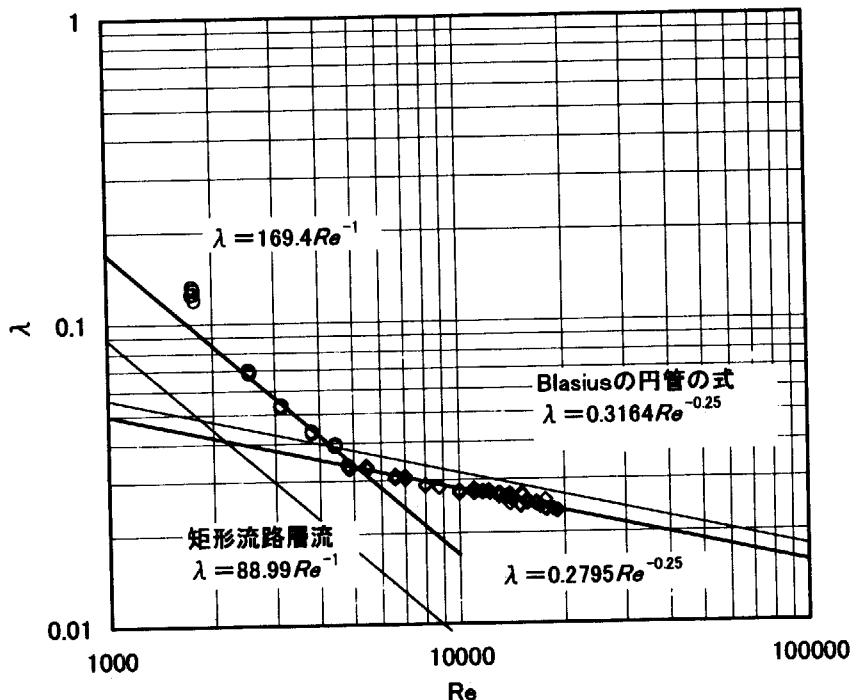


Fig.10 模擬燃料要素の校正データ

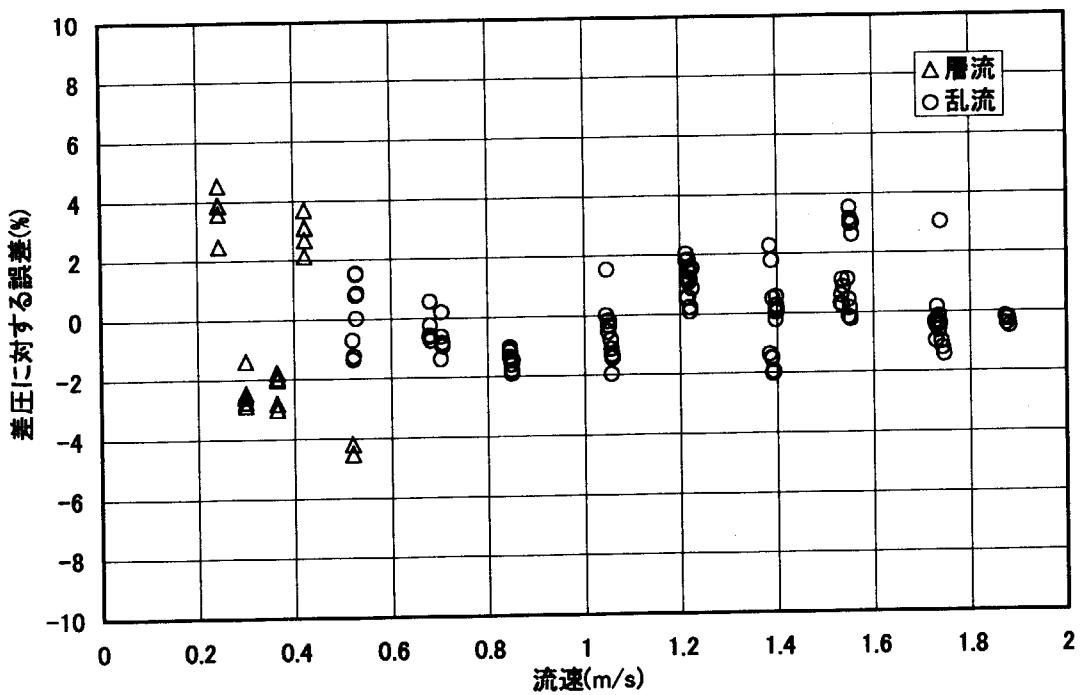


Fig.11 模擬燃料要素の測定誤差

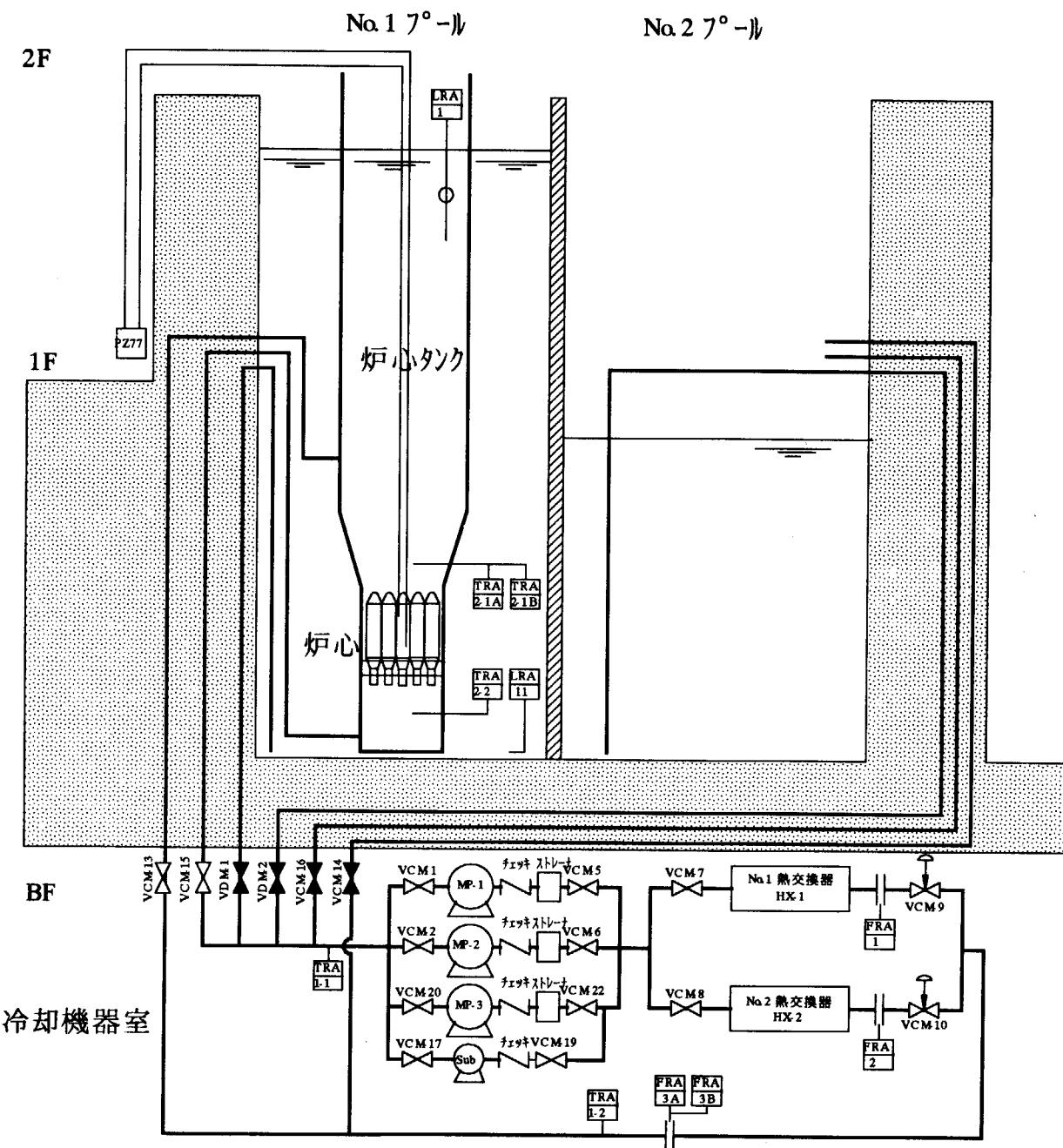
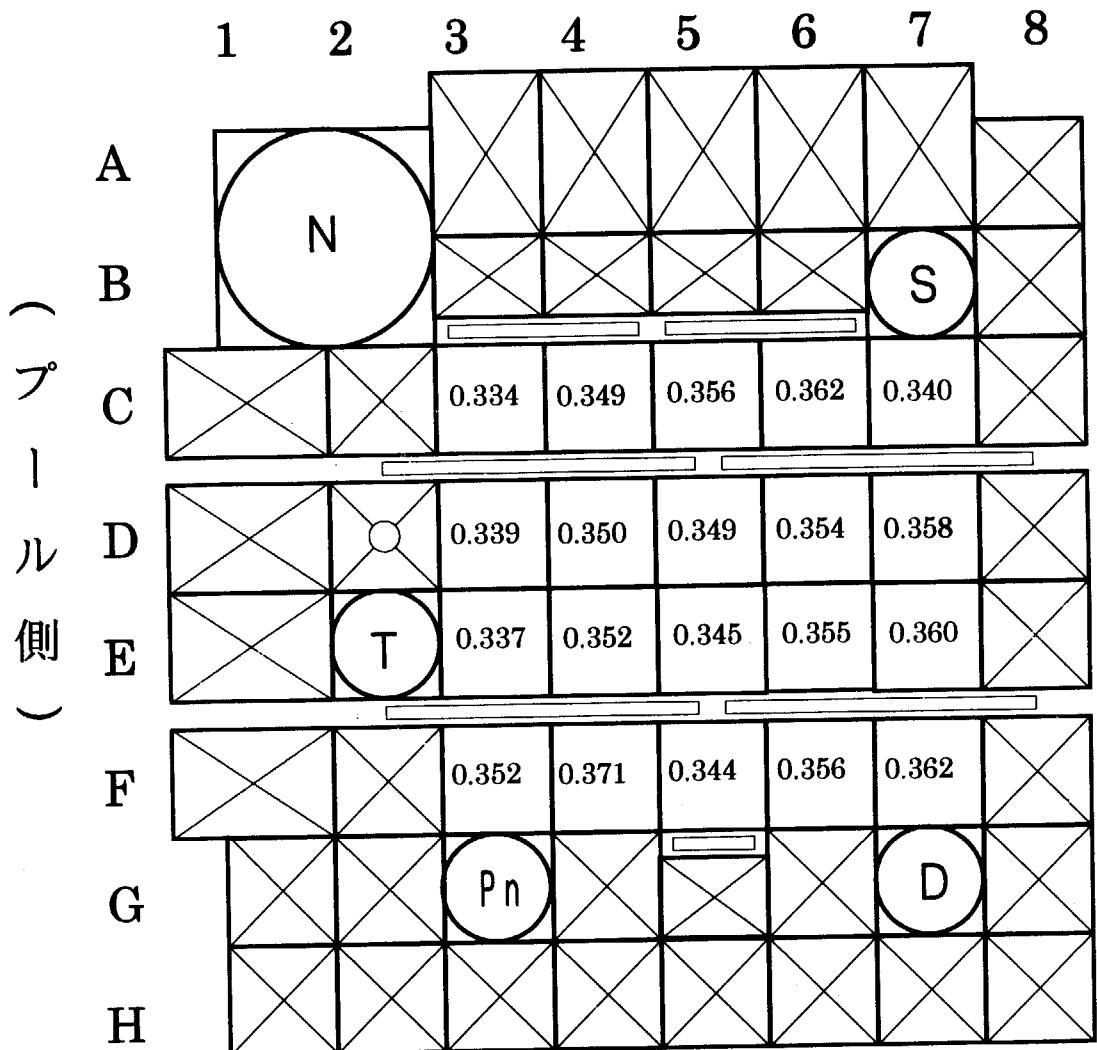


Fig.12 JRR-4 の 1 次冷却水系統図（概略）

単位 : $\text{m}^3/\text{min.}$

測定条件

1 次冷却水流量 $8.0 \text{ m}^3/\text{min}$

制御棒位置 全制御棒下限、後備安全棒上限

炉心流量（燃料要素内全通過流量）/ 1 次冷却系流量 = 0.879 (87.9%)

Fig.13 L型燃料要素 20 体炉心の燃料要素内流量配分の測定結果

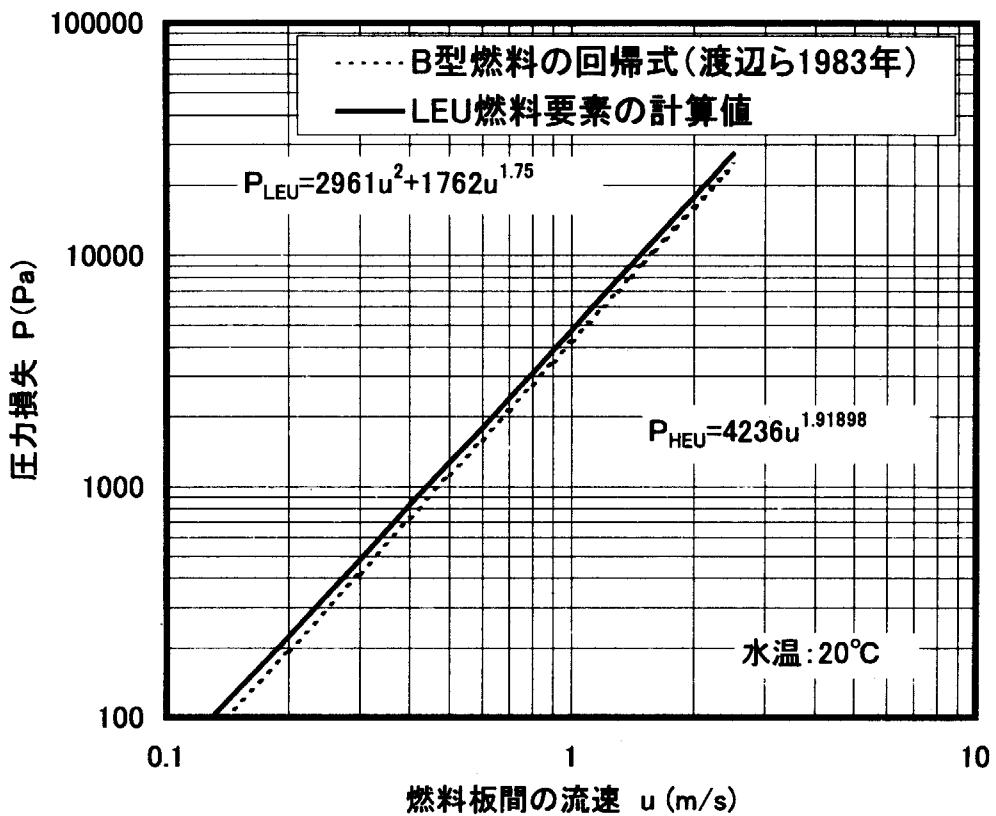


Fig.14 L型燃料要素の全圧力損失

付録 L型燃料要素の圧力損失の計算

LEU 燃料を用いた ETR 型 (Engineering Test Reactor Type) の L 型燃料要素は形状及び寸法が従来の B 型燃料要素 (ETR 型の HEU 燃料) と同じことから、その流動特性は変わることはない。炉心内の流速を測定するためには L 型燃料要素の圧力損失の特性をできるだけ同じにしなくてはならず、その特性を乱さないで流速を測定できるよう差圧測定用模擬燃料要素を設計しなくてはならない。そのためには新型の L 型燃料要素の圧力損失の特性等について知っておく必要があり、燃料要素の各部における圧力損失について分析し、差圧測定に適した部分を選択する。

1 圧力損失の一般式

一般に圧力損失は、流路形状の変化に伴なって損失する形状損失 Δp_s 及び流路の摩擦による摩擦損失 Δp_f とに大別される。

流路の形状損失は次式で表される。

$$\Delta p_s = \zeta_s \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

ここで、

ζ_s : 損失係数 (loss coefficient)

ρ : 流体の密度

v : 流体速度

g : 重力加速度

また、摩擦損失は

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

で与えられ、流れが乱流の場合 ($2000 < Re \leq 10^5$) の円管の管摩擦係数 λ は Blasius 抵抗公式 (Blasius's resistance formula) が良く用いられる。

$$\lambda = 0.3164 Re^{-1/4} \quad (3)$$

という実験式で表される。

ここで

l : 流路長さ

d : 流路の水力等価直径

Re : レイノルズ数

である。式 (1) 及び (2) を流速 v の関数になるように整理すると、

$$\Delta p_f = 0.3164 \left(\frac{\mu}{\rho d v} \right)^{0.25} \left(\frac{l}{d} \right) \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) = 0.3164 \left(\frac{\mu l^4}{d^5 \rho} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho v^{1.75}}{2} \right) \quad (4)$$

となる。ここで、 μ は粘性係数である。

2 JRR-4 燃料要素各部の圧力損失

JRR-4 燃料要素の圧力損失の成分としては、次のようなものが考えられる。

| | |
|-------------------------|-----------------|
| 1) 燃料要素入口での形状損失 | Δp_1 |
| 2) 繰手部の拡大による形状損失 | Δp_2 |
| 3) 繰手部から燃料板入口までの摩擦損失 | Δp_3 |
| 4) 燃料板入口での形状損失 | Δp_4 |
| 5) 燃料板間の摩擦損失 | Δp_5 |
| 6) 燃料板出口での形状損失 | Δp_6 |
| 7) 燃料板出口からプラグ入り口までの摩擦損失 | Δp_7 |
| 8) プラグ入り口での形状損失 | Δp_8 |
| 9) プラグ通過時の摩擦損失 | Δp_9 |
| 10) プラグ出口の形状損失 | Δp_{10} |

以下に各部それぞれの圧力損失の計算を行なう。

2.1 燃料要素入口での形状損失

JRR-4 燃料要素の冷却水流入口は、炉心に装荷された燃料要素が抜け出さないように、隣接する炉心要素と相互にツメで固定するように設計、製作されている。このため吊手と燃料集合体との間に繰手を設けるなど複雑な構造となっている。流路入口での圧力損失は吊手によるものより、繰手にある絞りの効果のほうが大きい。このため、吊手による圧力損失を無視し、繰手の絞りによる形状損失のみを考慮する。燃料板間流速を v_5 とすると燃料入口での形状損失 Δp_1 は

$$\Delta p_1 = \zeta_1 \left(\frac{A_4}{A_2} \right)^2 \left(\frac{\rho v_5^2}{2} \right) \quad (5)$$

で与えられる。ここで ζ_1 は 0.241(文献 9 Diagram3-9.B.3)である。ここで、 A_n 等は Table2 で与えられる各部の断面積であり、n は同表の区間欄に示す数字である。

2.2 繰手部の拡大による形状損失

角錐形ディフューザの損失係数の値は文献 7 の Diagram5-3 によれば、摩擦損失を無視すれば

$$\zeta_2 = \phi \left(1 - \frac{A_2}{A_3} \right)^2 \quad (6)$$

となる。 ϕ は広がり角度に依存し、 40° の場合、1.05 である。したがって、繰手部の拡大による形状損失 Δp_2 は次式のようになる。

$$\Delta p_2 = 1.05 \left(1 - \frac{A_2}{A_3} \right)^2 \left(\frac{A_4}{A_3} \right)^2 \left(\frac{\rho v_5^2}{2} \right) \quad (7)$$

2.3 繰手部から燃料板入口までの摩擦損失

繰手部の流路の長さ l_3 、水力等価直径を d_3 とすれば、(4)式より、摩擦損失の Δp_3 は、

$$\Delta p_3 = 0.3164 \left(\frac{l_3 v^{0.25}}{d_3^{1.25}} \right) \left(\frac{A_4}{A_3} \right)^{1.75} \left(\frac{\rho v_5^{1.75}}{2} \right) \quad (8)$$

で表される。

2.4 燃料板入口での形状損失

断面積 A_3 から断面積 A_4 (全燃料板間流路断面積) へ急縮小する流路を考えると、文献 7 の Diagram3-9 より

$$\Delta p_4 = 0.5 \left(1 - \frac{A_4}{A_3} \right) \left(\frac{\rho v_7^2}{2} \right) \quad (9)$$

となる。

2.5 燃料板間の摩擦損失

継手部の流路の長さ l_4 、水力等価直径を d_4 とすれば、(4)式より、摩擦損失の Δp_5 は、

$$\Delta p_5 = 0.3164 \left(\frac{l_4 v^{0.25}}{d_4^{1.25}} \right) \left(\frac{\rho v_5^{1.75}}{2} \right) \quad (10)$$

で表される。

2.6 燃料板出口での形状力損失

断面積 A_4 から A_5 へ急激に拡大する流路を想定すると、文献 7 より

$$\Delta p_6 = \left(1 - \frac{A_4}{A_5} \right) \left(\frac{\rho v_5^2}{2} \right) \quad (11)$$

となる。

2.7 燃料板出口からプラグ入口までの摩擦損失

燃料板出口からプラグ入り口までの流路の長さ l_5 、水力等価直径を d_5 とすれば、(4)式より、摩擦損失の Δp_7 は、

$$\Delta p_7 = 0.3164 \left(\frac{l_5 v^{0.25}}{d_5^{1.25}} \right) \left(\frac{A_4}{A_5} \right)^{1.75} \left(\frac{\rho v_5^{1.75}}{2} \right) \quad (12)$$

で表される。

プラグ入口と同形状の流路の抵抗係数は、文献 7 の Diagram3-9 により、

$$\zeta_8 = \zeta' \left(1 - \frac{A_6}{A_5} \right)^2 \quad (13)$$

で表され、 $\xi \doteq 0.13$ (at 30° , $l/D_h \doteq 0.6$) から、 Δp_8 は次式のようになる。

$$\Delta p_8 = 0.13 \left(1 - \frac{A_6}{A_5}\right) \left(\frac{A_4}{A_6}\right) \left(\frac{\rho v_7^2}{2}\right) \quad (14)$$

2.8 プラグ通過時の摩擦損失

プラグ部の流路長さを l_6 、直径を d_6 とすれば、 Δp_9 は次式のようになる。

$$\Delta p_9 = 0.3164 \left(\frac{l_6 v^{0.25}}{d_6^{1.25}}\right) \left(\frac{A_4}{A_6}\right)^{1.75} \left(\frac{\rho v_5^{1.75}}{2}\right) \quad (15)$$

2.9 プラグ出口の形状損失

プラグ出口の形状損失は、プラグ部よりプレナムへの急激な拡大とみなすと、 ϕ は広がり角度に依存し、 180° の場合、1.0 である。したがって、継手部の拡大による形状損失 Δp_{10} は次式のようになる。

$$\Delta p_{10} = 1.0 \left(1 - \frac{A_2}{A_3}\right)^2 \left(\frac{A_4}{A_6}\right)^2 \left(\frac{\rho v_5^2}{2}\right) \quad (16)$$

2.10 燃料要素の全圧力損失

燃料要素の全圧力損失は、上記の各部圧力損失の総和であることから

$$\Delta p_{Total} = (\xi'_1 + \xi'_2 + \xi'_4 + \xi'_6 + \xi'_8 + \xi'_{10}) \left(\frac{\rho v_5^2}{2}\right) + (\xi'_3 + \xi'_5 + \xi'_7 + \xi'_{9}) \left(\frac{\rho v_5^{1.75}}{2}\right) \quad (17)$$

となる。

3 燃料要素の圧力損失計算

以上の計算式に水温 20°Cのときの物性値を代入して、整理すると、L型燃料要素の全圧力損失 Δp_{LEU} (Pa)は、燃料板間流速 v (m/s)に対して

$$\Delta p_{LEU} = 2961 \times v^2 + 1762 \times v^{1.75} \quad (18)$$

となる。1983 年の渡辺によって測定された B型燃料要素の全圧力損失¹⁾の近似式(回帰曲線)は

$$\Delta p_{HEU} = 5019 \times v^{1.91898} \cdot T^{-0.05644} = 4236 \times v^{1.91898} \quad (19)$$

であることから、Fig.14 に比較して示すように、(18)式で計算される値は実測値から求めた(19)式で計算される値より約 9%程度高い値を示した。これは燃料要素出口の形状損失によるものと考えられる。

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

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

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

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

| 力 | N(=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---------|-------------------------|----------|-----|
| 1 | 0.101972 | 0.224809 | |
| 9.80665 | 1 | 2.20462 | |
| 4.44822 | 0.453592 | 1 | |

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

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

| 圧力 | MPa(=10 bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg(Torr) | lbf/in ² (psi) |
|----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 力 | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062 × 10 ³ | 145.038 |
| | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322 × 10 ⁻⁴ | 1.35951 × 10 ⁻³ | 1.31579 × 10 ⁻³ | 1 | 1.93368 × 10 ⁻² |
| | 6.89476 × 10 ⁻³ | 7.03070 × 10 ⁻² | 6.80460 × 10 ⁻² | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J(=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal(計量法) | Btu | ft·lbf | eV | 1 cal = 4.18605 J(計量法) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ | = 4.184 J(熱化学) |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁹ | = 4.1855 J(15 °C) |
| | 3.6 × 10 ⁶ | 3.67098 × 10 ⁵ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁶ | 2.24694 × 10 ²⁵ | = 4.1868 J(国際蒸気表) |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ | 仕事率 1 PS(仏馬力) |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ | = 75 kgf·m/s |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ | = 735.499 W |
| | 1.60218 × 10 ⁻¹⁹ | 1.63377 × 10 ⁻²⁰ | 4.45050 × 10 ⁻²⁶ | 3.82743 × 10 ⁻²⁰ | 1.51857 × 10 ⁻²² | 1.18171 × 10 ⁻¹⁹ | 1 | |

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2.70270 × 10 ⁻¹¹ |
| | 3.7 × 10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-------------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58 × 10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

(86年12月26日現在)

JRR-4シンカイド燃料炉心の燃料要素冷却水流量の測定

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。