

JAERI - M
84-238

JRR-3 改造炉の炉心定常熱水力特性解析
(COOLOD コードによる解析)

1985年1月

篠津 和夫・井川 博雅・安藤 弘栄
数土 幸夫・大西 信秋

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

JRR-3 改造炉の炉心定常熱水力特性解析
(COOLOD コードによる解析)

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部
篠津 和夫・井川 博雅・安藤 弘栄
数土 幸夫・大西 信秋

(1984年12月14日受理)

本報告は、研究用原子炉の熱水力解析をするために開発された COOLOD コードを用いて行った JRR-3 改造炉の炉心定常熱水力計算、およびその熱水力特性の評価結果について述べたものである。

本稿では、定常熱水力計算について沸騰開始温度および DNBR を検討し、これら熱水力設計値が沸騰開始条件に対し十分な余裕があること、および DNB 開始条件に対して十分な余裕があることを示した。さらに、フォロー型燃料要素においても同様な検討を行い、標準型燃料要素に比べてさらに安全余裕があることを示した。また、流路閉塞時の熱水力についても考察し、DNB 条件に対してパラメータ計算を行い DNBR が 1.5 を下回る条件を明確にした。

Thermohydrodynamic Characteristic Analysis
on the Steady State Condition of JRR-3 Core
(Analysis by COOLOD Code)

Kazuo SHINOZU, Hiromasa IKAWA, Hiroei ANDO,
Yukio SUDO and Nobuaki OHNISHI

Department of Research Reactor Operation,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received December 14, 1984)

This report describes the analytical results of the thermohydrodynamic characteristics under the steady state condition of JRR-3 core, using COOLOD code which has been developed in the JAERI in order to analyze thermohydrodynamics under the steady state condition of research reactors.

In this report, thermohydrodynamic characteristics both in the standard fuel elements and in the control fuel elements on the steady state conditions were investigated to confirm that the JRR-3 thermohydrodynamic design satisfies the criteria of the safety design which were established against the onset of nucleate boiling (ONB) and the departure from nucleate boiling (DNB). Besides, parametric analyses were carried out to make clear the condition when the minimum DNBR (The ratio of DNB heat flux to the maximum heat flux) becomes less than 1.5 in the standard fuel elements at the channel blockage.

Keywords: COOLOD, ONB, JRR-3, Steady State, Channel Blockage,
Thermohydrodynamics.

目 次

1. 序	1
2. JRR-3 改造炉の熱水力の特性	1
3. COOLOD コードの概要	5
4. システムのモデル化および入力データ	5
5. 炉心定常熱水力計算	10
5.1 炉心圧力分布計算	10
5.1.1 流動損失特性	10
5.1.2 圧力分布計算	26
5.2 沸騰開始温度計算	31
5.3 DNBR評価	41
5.4 計算結果の検討	46
6. 流路閉塞時の熱水力計算	47
6.1 炉心圧力分布計算	47
6.1.1 流動損失特性	47
6.1.2 圧力分布計算	55
6.2 DNBR評価	64
6.3 計算結果の検討	68
7. 結 言	69
謝 辞	69
参考文献	69

Contents

1. Introduction	1
2. Thermohydrodynamic Characteristics of JRR-3	1
3. Description of "COOLOD" Code	5
4. Modeling of System and Input Data	5
5. Thermohydrodynamic Analyses on the Steady State Conditions ...	10
5.1 Pressure Distribution in JRR-3 Core	10
5.1.1 Characteristics of Pressure Losses	10
5.1.2 Pressure Distribution in Core	26
5.2 Calculation of Onset Nucleate Boiling	31
5.3 Evaluation of DNBR	41
5.4 Discussions of the Results	46
6. Thermohydrodynamic Analyses at the Channel Blockage	47
6.1 Pressure Distribution in JRR-3 Core	47
6.1.1 Characteristics of Pressure Losses	47
6.1.2 Pressure Distribution in Core	55
6.2 Evaluation of DNBR	64
6.3 Discussions of the Results	68
7. Concluding Remarks	69
Acknowledgements	69
References	69

1. 序

本報告書は、研究炉長期整備計画に基づいて進められている JRR-3 改造炉での、COOLOD コードを用いた炉心定常熱水力計算について述べたものである。

改造炉の基本的設計条件は、炉心のいかなる場所においても一次冷却材に沸騰が起らないようにすることである。したがって、本計算では、熱水力設計値が沸騰開始条件および DNB 開始条件に対して十分な余裕があることを、詳細な値を用いたパラメータ計算により評価・検討した。

さらに、フォロー型燃料要素内の局部的発熱に注目し、沸騰開始条件および DNB 開始条件に対して同様なパラメータ計算を行い、標準型燃料要素に比べて十分な安全余裕があることを明確にした。また、標準型燃料要素一体が閉塞する炉心部流路閉塞時において、DNB 開始条件に対して閉塞率をパラメータとした計算を行い、熱水力設計値に対し安全余裕を明確にした。

第 2 章に JRR-3 改造炉における熱水力の特徴を、また第 3 章には本解析で使用した炉心定常熱水力計算コード COOLOD の概要を述べた。

第 4 章で COOLOD コードの入力データを説明し、第 5 章には、上述した炉心定常熱水力計算およびその結果を述べた。また、第 6 章では、炉心部流路閉塞時における熱水力計算およびその結果について述べた。

2. JRR-3 改造炉の熱水力の特性

JRR-3 改造炉は、定格熱出力 20 MW の軽水冷却プール型原子炉であり、発電用軽水型原子炉などと比較して冷却材の温度・圧力が非常に低く、ほぼ常温・常圧で運転される。一方、照射利用上の性能を高めるため、できるだけ高い中性子束を得ることが必要である。このため、炉心はコンパクトで出力密度を高くすることが必要となる。本原子炉の基本的設計条件は⁽¹⁾、常圧下で炉心のいかなる点においても沸騰を起こさせないことであり、出力密度はこれにより制限される。このため、沸騰開始温度に対して燃料板表面温度が十分に低いことを確認する必要がある。

JRR-3 改造炉の炉心の熱水力学的な形状および仕様は次のとおりである。

- ① 燃料板間の流路は、ギャップ約 2.3 mm、幅約 67 mm、長さ約 750 mm の矩形流路であり、炉心には約 600 の流路がある。
- ② 定常の冷却材流量は約 2400 m³/h であり、炉心流速は約 6 m/s の下向流である。
- ③ 定常状態で冷却材は常温で、炉心入口圧力は約 1.5 kg/cm²・abs、炉心出口圧力は約 0.5 kg/cm²・abs の低圧である。

図 2.1 に冷却系を、図 2.2 と図 2.3 に炉心部を示す。

1. 序

本報告書は、研究炉長期整備計画に基づいて進められている JRR-3 改造炉での、COOLOD コードを用いた炉心定常熱水力計算について述べたものである。

改造炉の基本的設計条件は、炉心のいかなる場所においても一次冷却材に沸騰が起らないようにすることである。したがって、本計算では、熱水力設計値が沸騰開始条件および DNB 開始条件に対して十分な余裕があることを、詳細な値を用いたパラメータ計算により評価・検討した。

さらに、フォロー型燃料要素内の局部的発熱に注目し、沸騰開始条件および DNB 開始条件に対して同様なパラメータ計算を行い、標準型燃料要素に比べて十分な安全余裕があることを明確にした。また、標準型燃料要素一体が閉塞する炉心部流路閉塞時において、DNB 開始条件に対して閉塞率をパラメータとした計算を行い、熱水力設計値に対し安全余裕を明確にした。

第 2 章に JRR-3 改造炉における熱水力の特徴を、また第 3 章には本解析で使用した炉心定常熱水力計算コード COOLOD の概要を述べた。

第 4 章で COOLOD コードの入力データを説明し、第 5 章には、上述した炉心定常熱水力計算およびその結果を述べた。また、第 6 章では、炉心部流路閉塞時における熱水力計算およびその結果について述べた。

2. JRR-3 改造炉の熱水力の特性

JRR-3 改造炉は、定格熱出力 20 MW の軽水冷却プール型原子炉であり、発電用軽水型原子炉などと比較して冷却材の温度・圧力が非常に低く、ほぼ常温・常圧で運転される。一方、照射利用上の性能を高めるため、できるだけ高い中性子束を得ることが必要である。このため、炉心はコンパクトで出力密度を高くすることが必要となる。本原子炉の基本的設計条件は⁽¹⁾、常圧下で炉心のいかなる点においても沸騰を起こさせないことであり、出力密度はこれにより制限される。このため、沸騰開始温度に対して燃料板表面温度が十分に低いことを確認する必要がある。

JRR-3 改造炉の炉心の熱水力的な形状および仕様は次のとおりである。

- ① 燃料板間の流路は、ギャップ約 2.3 mm、幅約 67 mm、長さ約 750 mm の矩形流路であり、炉心には約 600 の流路がある。
- ② 定常の冷却材流量は約 2400 m³/h であり、炉心流速は約 6 m/s の下向流である。
- ③ 定常状態で冷却材は常温で、炉心入口圧力は約 1.5 kg/cm²・abs、炉心出口圧力は約 0.5 kg/cm²・abs の低圧である。

図 2.1 に冷却系を、図 2.2 と図 2.3 に炉心部を示す。

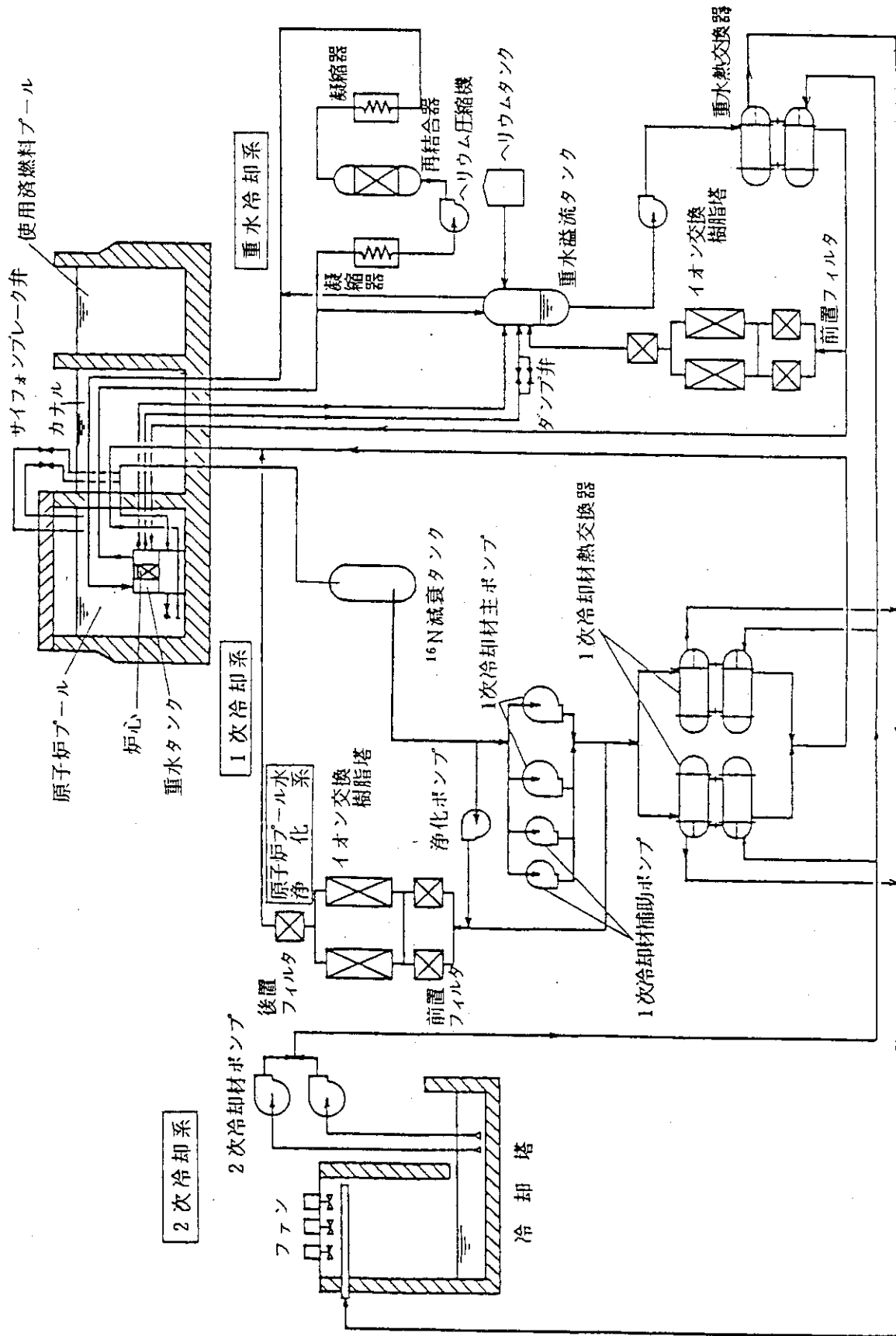


図 2.1 主要な冷却設備系統説明図

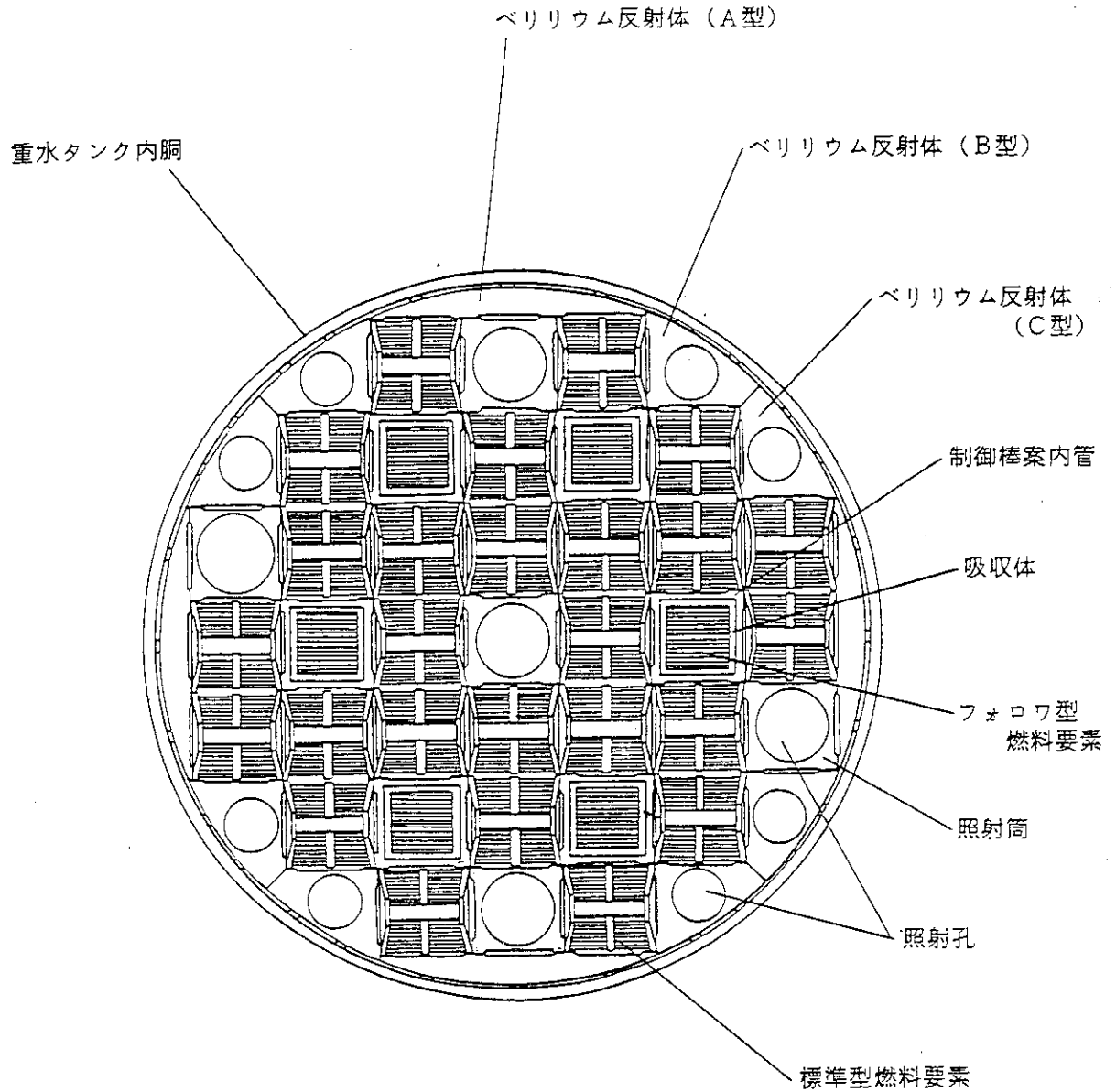


図 2.2 炉心水平断面図

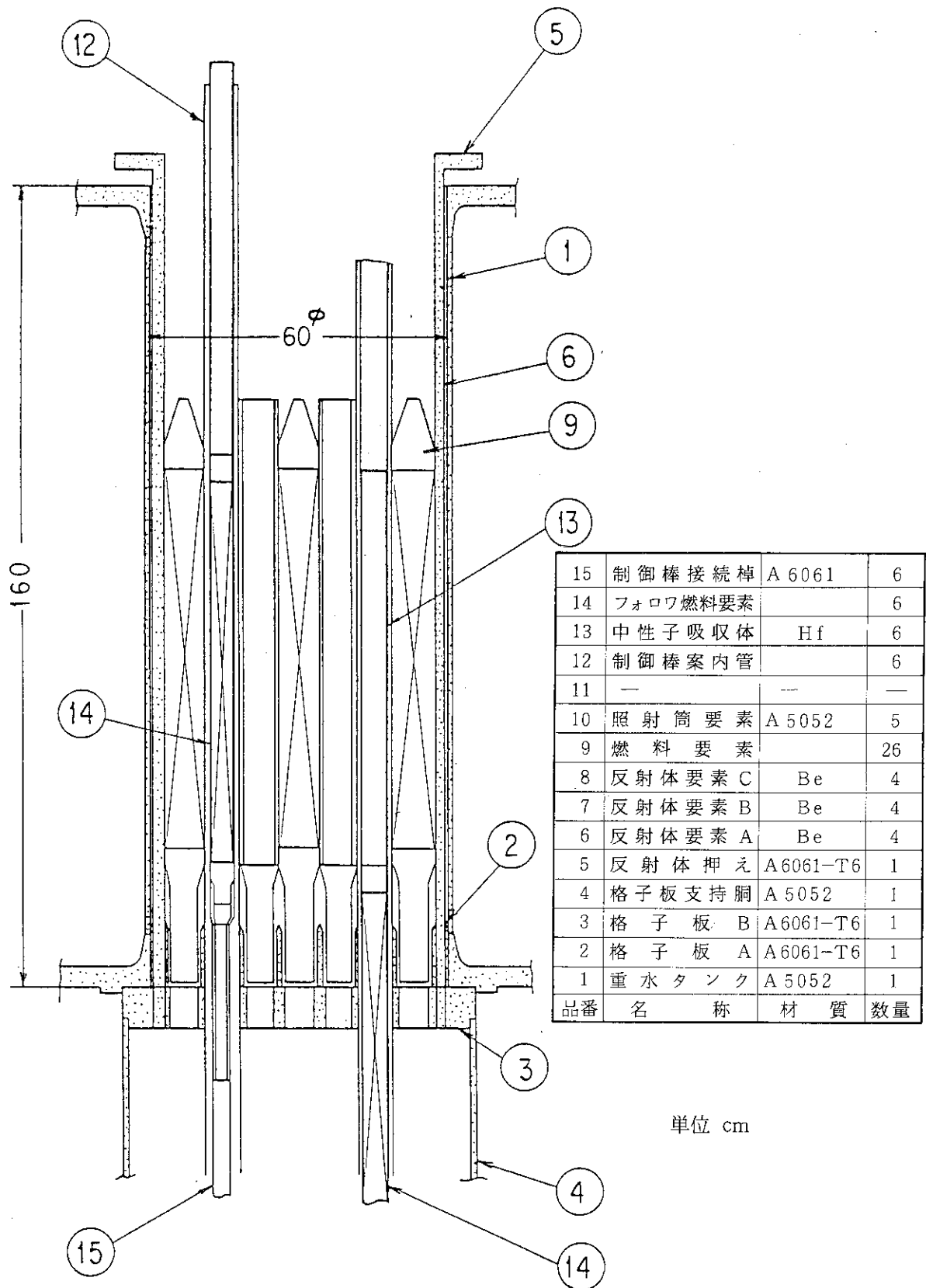


図 2.3 炉心垂直断面図

3. COOLOD コードの概要

COOLOD コードは、板状型燃料要素を使用する研究用原子炉の熱水力計算を行うために開発されたコードである。⁽²⁾ 定常時の圧力・温度等の計算を行い、その結果を図形処理することができる。

燃料板温度計算および、一次および二次冷却系の温度計算をそれぞれ単独に、あるいは組合せて行うことができ、かつ、DNBR 熱流束や沸騰開始温度の計算ができる。

燃料要素内の温度分布は、冷却水温度上昇および軸方向発熱密度分布より求められ、燃料要素内の流路の形状、冷却材流速が異なる場合や、各燃料板の発熱密度が異なるような非対称冷却条件下でも温度分布が求められる。

さらに、同一炉心内に形状の異なる板状燃料が挿入されていても、その発熱分布を入力することにより温度分布は計算できる。

ホットチャンネルファクターとしては、半径方向出力分布因子、冷却材温度上昇因子、フィルム温度上昇因子、被覆材温度上昇因子、ボンド層温度上昇因子、燃料芯材温度上昇因子等が入力可能である。

COOLOD では、入力で単相強制対流熱伝達相関式を指定することができる。また、沸騰開始温度評価式として Bergles-Rohsenow の式が内蔵されており、入力で指定した強制対流熱伝達相関式と組合せて、沸騰開始点を求めることができる。その他、圧力は、圧力損失、動圧より求められ、位置水頭の計算も考慮でき、これを基にして飽和温度等が求められる。

計算結果は、燃料板温度、飽和温度、沸騰開始温度等を各燃料板毎に図形処理することができる。また必要に応じて、各燃料板温度を1枚の図面に重ね書きし、それぞれ比較検討することもできる。

4. システムのモデル化および入力データ

本章では、COOLOD コードの計算対象としたシステムのモデル化および入力データを述べる。

図 4.1 に JRR-3 改造炉の計算モデルを示す。COOLOD では、炉心燃料部の標準型燃料要素 26 体、フォロー型燃料要素 6 体をモデル化した。図 4.2 に、標準型燃料要素、図 4.3 にフォロー型燃料要素を示す。

フォロー型燃料要素は通常運転時では、2 本が全挿入 (75 cm)、4 本が 35 cm 挿入となっているため、これらの伝熱面積を標準型燃料要素の伝熱面積に換算して入力とした。

燃料板は、燃料芯材と被覆材からなり、燃料芯材の U 密度は 2.2 g/cm^3 、ポイド率は 0.057 である⁽³⁾。

図 4.4 に、軸方向出力分布を示す。これは、JRR-3 改造炉の核計算より得られた値を基にして、COOLOD の入力用に換算したものである。

3. COOLOD コードの概要

COOLOD コードは、板状型燃料要素を使用する研究用原子炉の熱水力計算を行うために開発されたコードである。⁽²⁾ 定常時の圧力・温度等の計算を行い、その結果を図形処理することができる。

燃料板温度計算および、一次および二次冷却系の温度計算をそれぞれ単独に、あるいは組合せて行うことができ、かつ、DNBR 熱流束や沸騰開始温度の計算ができる。

燃料要素内の温度分布は、冷却水温度上昇および軸方向発熱密度分布より求められ、燃料要素内の流路の形状、冷却材流速が異なる場合や、各燃料板の発熱密度が異なるような非対称冷却条件下でも温度分布が求められる。

さらに、同一炉心内に形状の異なる板状燃料が挿入されていても、その発熱分布を入力することにより温度分布は計算できる。

ホットチャンネルファクターとしては、半径方向出力分布因子、冷却材温度上昇因子、フィルム温度上昇因子、被覆材温度上昇因子、ボンド層温度上昇因子、燃料芯材温度上昇因子等が入力可能である。

COOLOD では、入力で単相強制対流熱伝達相関式を指定することができる。また、沸騰開始温度評価式として Bergles-Rohsenow の式が内蔵されており、入力で指定した強制対流熱伝達相関式と組合せて、沸騰開始点を求めることができる。その他、圧力は、圧力損失、動圧より求められ、位置水頭の計算も考慮でき、これを基にして飽和温度等が求められる。

計算結果は、燃料板温度、飽和温度、沸騰開始温度等を各燃料板毎に図形処理することができる。また必要に応じて、各燃料板温度を1枚の図面に重ね書きし、それぞれ比較検討することもできる。

4. システムのモデル化および入力データ

本章では、COOLOD コードの計算対象としたシステムのモデル化および入力データを述べる。

図 4.1 に JRR-3 改造炉の計算モデルを示す。COOLOD では、炉心燃料部の標準型燃料要素 26 体、フォロー型燃料要素 6 体をモデル化した。図 4.2 に、標準型燃料要素、図 4.3 にフォロー型燃料要素を示す。

フォロー型燃料要素は通常運転時では、2 本が全挿入 (75 cm)、4 本が 35 cm 挿入となっているため、これらの伝熱面積を標準型燃料要素の伝熱面積に換算して入力とした。

燃料板は、燃料芯材と被覆材からなり、燃料芯材の U 密度は 2.2 g/cm^3 、ボイド率は 0.057 である⁽³⁾。

図 4.4 に、軸方向出力分布を示す。これは、JRR-3 改造炉の核計算より得られた値を基にして、COOLOD の入力用に換算したものである。

COOLODで使用するホットスポットファクターは、標準型燃料要素で、

半径方向出力分布因子 ; $F_r = 1.23$

局所出力分布因子 ; $F_{\ell} = 1.51$

不確定性因子 ; $F_e = 1.18$

バルク温度上昇因子 ; $F_b = 1.33$

フィルム温度上昇因子 ; $F_f = 1.37$

また、フォロー型燃料要素では、

半径方向出力分布因子 ; $F_r = 0.98$

局所出力分布因子 ; $F_{\ell} = 1.51$

不確定性因子 ; $F_e = 1.18$

バルク温度上昇因子 ; $F_b = 1.33$

フィルム温度上昇因子 ; $F_f = 1.37$

である。

入力で指定できる单相強制対流熱伝達相関式としては、Dittus-Boelter の式⁽⁴⁾を採用した⁽⁵⁾。

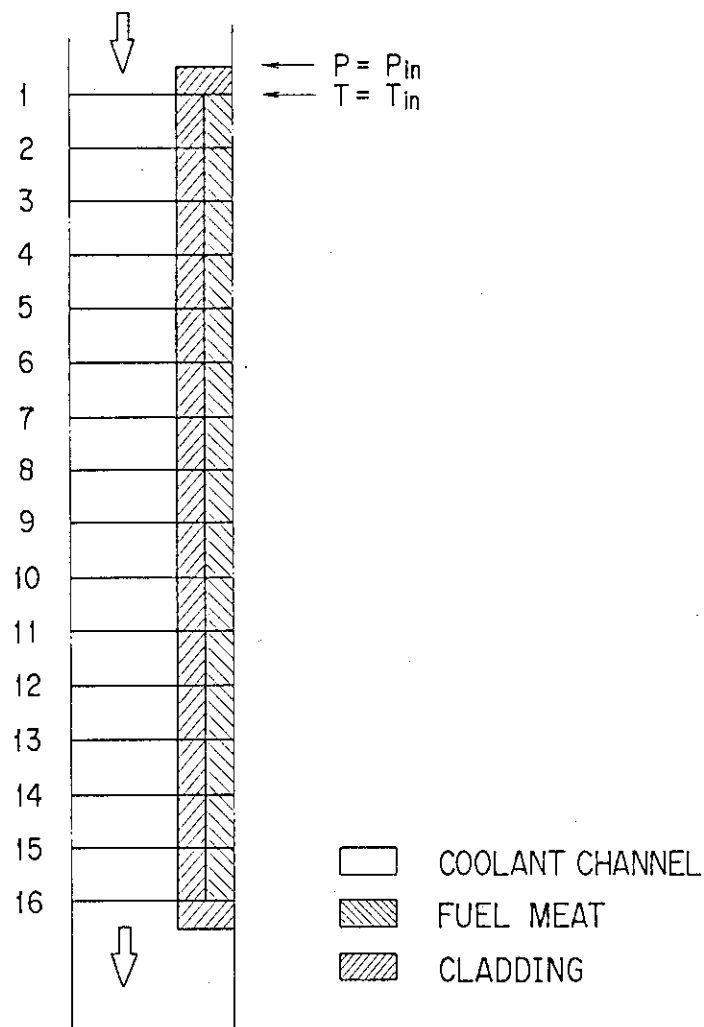


図 4.1 計算モデル

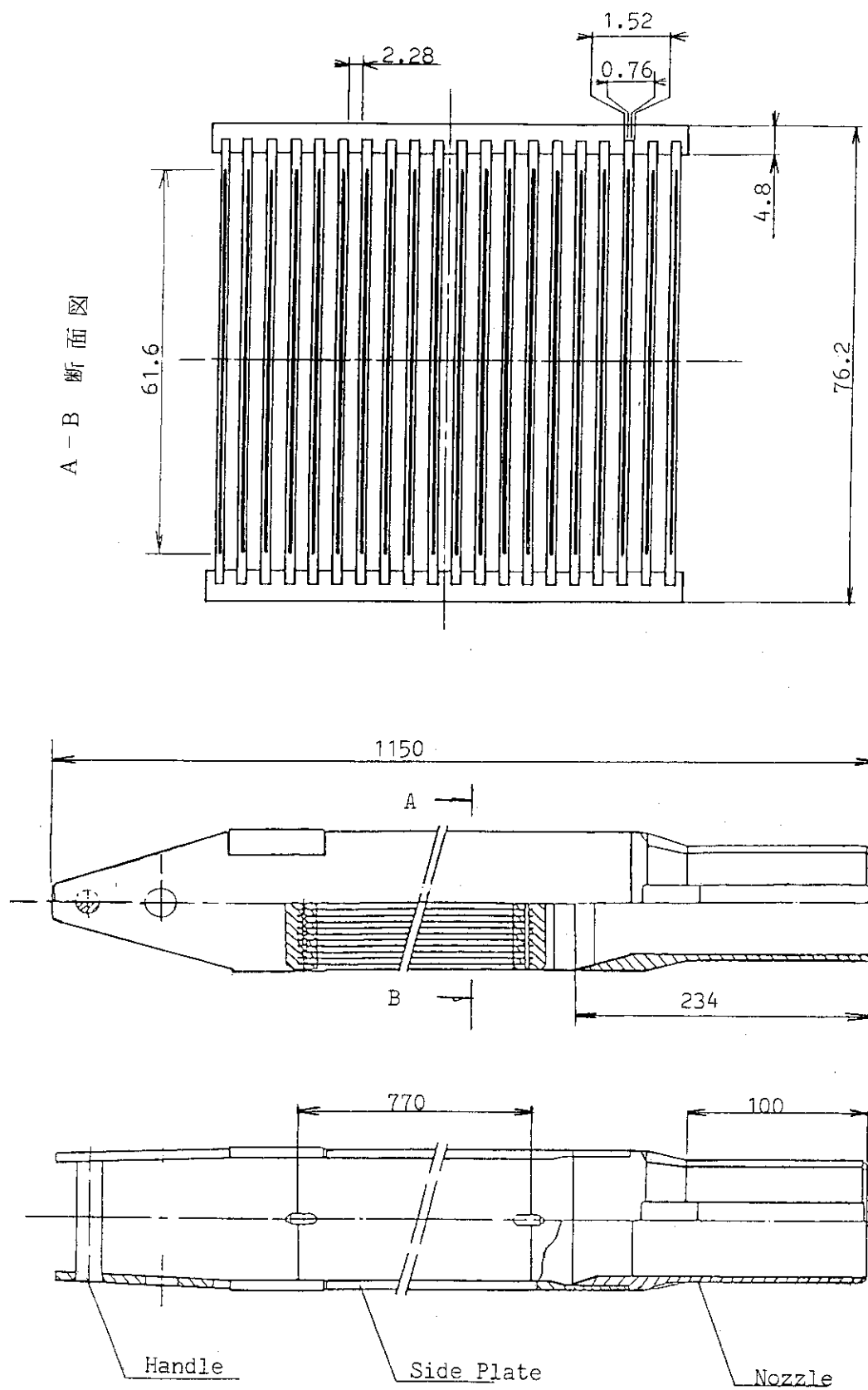


图 4.2 標準型燃料要素

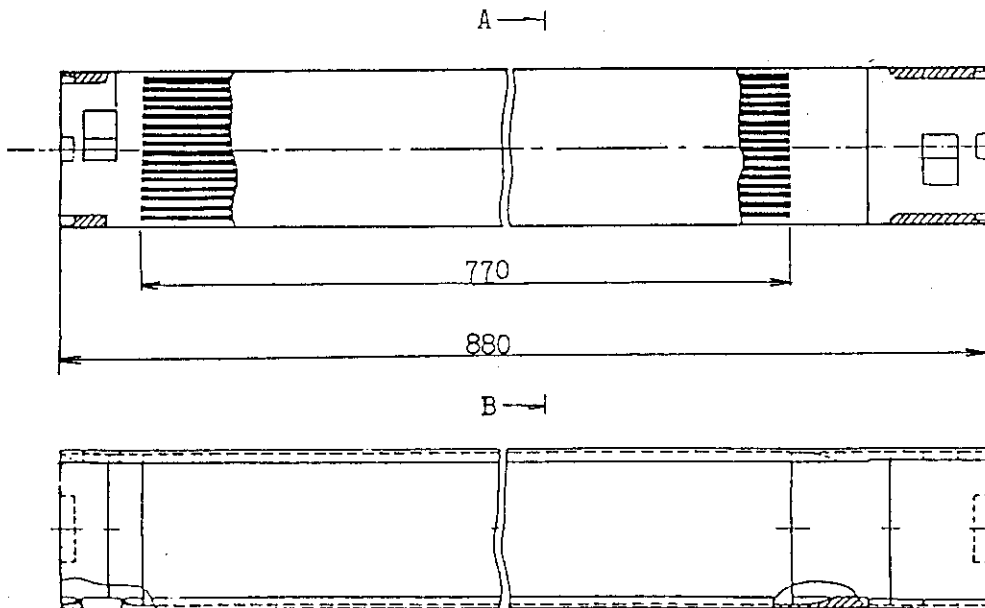
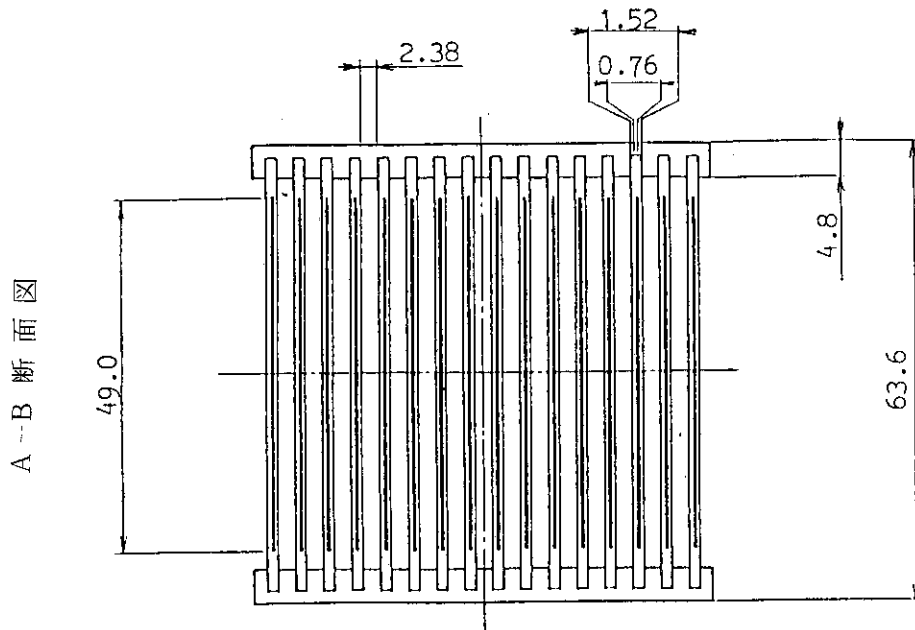


図4.3 フォロワ型燃料要素

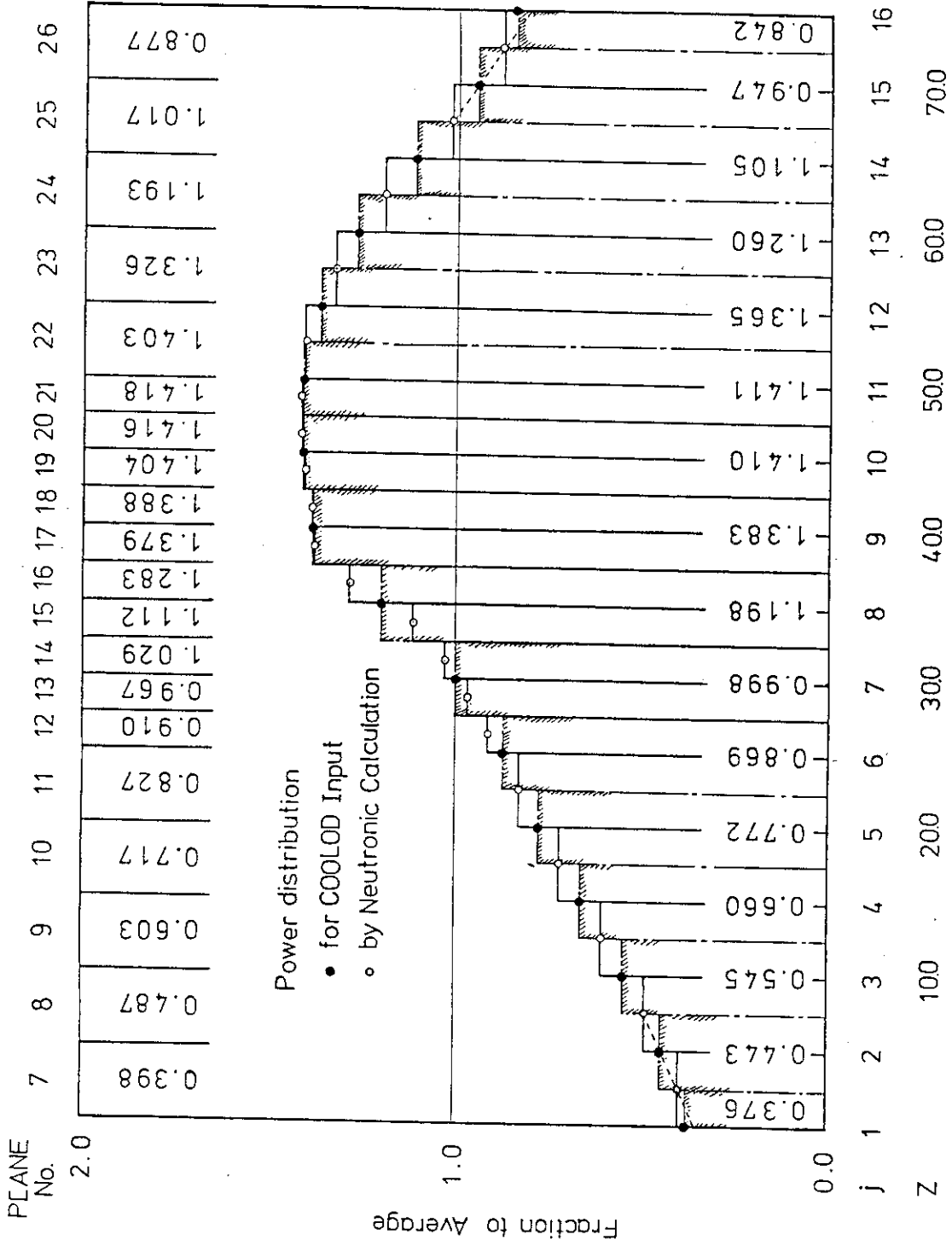


图 4.4 轴方向出力分布

5. 炉心定常熱水力計算

COOLOD コードを用いて、JRR-3 改造炉の炉心定常熱水力計算を行った。圧力計算、沸騰開始温度計算および DNBR 計算において、以下の 2 ケースについて計算を行った。

ケース 1 は、設計計算に用いた条件、すなわち炉心入口・出口での動圧を零とし炉心内の僅かな水頭差も考慮しない値を用いて計算した。

ケース 2 は、ケース 1 で考慮していない炉心入口・出口での動圧、および炉心内の水頭差を考慮して計算を行った。

5.1 炉心圧力分布計算

炉心の熱水力特性は、炉心の形状および冷却材流速などの流動状態に依存する。そのため、冷却材流量分布と炉心圧力損失は、炉心解析において重要である。

ここでは、まず流動損失を計算し⁽⁶⁾、それを基にして COOLOD で圧力分布計算を行った。

5.1.1 流動損失特性

図 5.1.1 ~ 図 5.1.6 に炉心および炉心周辺部の各領域を示し、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した。

流路形状の特徴を、

- i) 流路面積一定の流路部 (直流路部)
- ii) 流路の拡大部
- iii) 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 : 領域番号

ΔP : 流動損失水頭 (m)

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場合はその流速であり、流路の拡大・縮小部ではその前後の大なる流速をとる。直流路部では次式で評価する。

$$K_i = \lambda_i \frac{\ell_i}{D_{e i}}$$

ここで、

λ : 表面摩擦損失係数

ℓ : 流路長 (m)

D_e : 等価水力直径 (m)

である。

〔1〕 流動損失係数評価

(1) 標準型燃料要素の流動損失係数特性

図 5.1.1 に示す標準型燃料要素の領域 4 で、流速 6.24 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。

a. 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.5$

b. 領域 2 (直流路部) :

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

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

$$v_2 = 6.24 \times (S_4/S_2) = 3.831 \text{ m/s}$$

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

$$Re = v_2 D_{e2} / \nu = \frac{3.831 \times 0.0718}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.12 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.0136$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{\ell_2}{D_{e2}} = 0.0136 \times \frac{0.0365}{0.0718} = 6.91 \times 10^{-3}$$

c. 領域 3 (縮小部) : $K_3 = 0.5$

d. 領域 4 (直流路部) :

$$v_4 = 6.24 \text{ m/s}$$

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

$$Re = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{6.24 \times 4.41 \times 10^{-3}}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.12 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.0218$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{\ell_4}{D_{e4}} = 0.0218 \times \frac{0.77}{4.41 \times 10^{-3}} = 3.806$$

e. 領域 5 (拡大部) :

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

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

f. 領域 6 (直流路部) :

$$v_6 = 6.24 \times (S_4/S_6) = 3.791 \text{ m/s}$$

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

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

$$\therefore \lambda_6 = 0.0137$$

$$K_6 = \lambda_6 \frac{\ell_6}{D_{e6}} = 0.0137 \times \frac{0.022}{0.07142} = 4.21 \times 10^{-3}$$

g. 領域 7, 8 (直流路部で近似) :

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

$$v_{7,8} = 6.24 \times (S_4/S_{7,8}) = 5.364 \text{ m/s}$$

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

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

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

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

h. 領域 9 (拡大部) :

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

$$K_9 = \{1 - (S_{7,8}/S_9)\}^2 = 0.39$$

各領域の K 値を表 5. 1. 1 に基準流速と共に示す。

(2) フォロワ型燃料要素の流動損失係数特性

標準型燃料要素の流動損失係数特性の場合と同様、動粘性係数は水温 40°C で評価する。各領域の流速は、図 5. 1. 2 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. 1. 2 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。

a. 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.5$

b. 領域 2 (直流路部) :

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

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

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

$$v_2 = 5.60 \times (S_6/S_2) = 3.140 \text{ m/s}$$

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

$$\therefore \lambda_2 = 0.0144$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{\ell_2}{D_{e2}} = 0.0144 \times \frac{0.1515}{0.0662} = 0.033$$

c. 領域 3 (縮小部) :

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

$$S_4/S_2 = 0.641$$

$$K_3 = 0.18$$

d. 領域 4 (直流路部) :

$$v_4 = 5.60 \times (S_6/S_4) = 4.89 \text{ m/s}$$

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

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

$$\therefore \lambda_4 = 0.0138$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{\ell_4}{D_{e4}} = 0.0138 \times \frac{0.7825}{0.0536} = 0.201$$

e. 領域 5 (縮小部) :

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

$$S_6 / S_4 = 0.8747$$

$$K_5 \approx 0.1$$

f. 領域 6 (直流路部) :

$$v_6 = 5.60 \text{ m/s}$$

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

$$Re = v_6 D_{e6} / \nu = \frac{5.60 \times 0.0046}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.85 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_6 = 0.022$$

$$K_6 = \lambda_6 \frac{\ell_6}{D_{e6}} = 0.022 \times \frac{0.77}{0.0046} = 3.683$$

g. 領域 7, 8 (アダプター部) :

$$K_{7,8} = 1.11 \text{ (実測値)} \text{ (注)}$$

h. 領域 9 (縮小部) :

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

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

$$S_9 / S_8 = 0.771$$

$$v_9 = 5.60 \times (S_6 / S_9) = 7.86 \text{ m/s}$$

$$K_9 \approx 0.1$$

i. 領域 10 (縮小+直管+拡大部) :

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

$$S_{9'} = 3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_{10} / S_{9'} = 0.914$$

$$K_{10'} \text{ (縮小)} \approx 0.04$$

$$K_{10'} \text{ (拡大)} = 0.01$$

$$v_{10} = 5.60 \times (S_6 / S_{10}) = 4.40 \text{ m/s}$$

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

$$Re = v_{10} D_{e10} / \nu = \frac{4.40 \times 0.0262}{0.668 \times 10^{-6}} = 1.726 \times 10^5$$

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

(注) モックアップ試験結果

$$K_{10}' = \lambda_{10} \frac{\ell_{10}}{D_{e10}} = 0.016 \times \frac{0.12}{0.0262} = 0.073$$

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

j. 領域11 (直流路部) :

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

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

$$v_{11} = 5.60 \times (S_6 / S_{11}) = 4.023 \text{ m/s}$$

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

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

$$K_{11} = \lambda_{11} \frac{\ell_{11}}{D_{e11}} = 0.016 \times \frac{0.78}{0.0312} = 0.40$$

k. 領域12 (拡大部) :

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

$$v_{12} = 5.60 \times (S_6 / S_{12}) = 0.688 \text{ m/s}$$

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

$$K_{12} = 0.687$$

以上のKの値を基準流速と共に表 5. 1. 1 に示す。

(3) 燃料側板間ギャップ領域の流動損失係数特性

図 5. 1. 3 に示す領域 2 で、流速 1.50 m/s を基準にした流速を用いる。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。

a. 領域 1 (縮小部) :

$$S_0 = 8.90 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

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

$$S_1 / S_0 = 0.1724$$

$$K_1 = 0.39$$

b. 領域 2 (直流路部) :

$$v_2 = 1.50 \text{ m/s}$$

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

$$Re = v_2 D_{e2} / \nu = \frac{1.5 \times 1.987 \times 10^{-3}}{0.668 \times 10^{-6}} = 4.50 \times 10^3$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.039$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{\ell_2}{D_{e2}} = 0.039 \times \frac{0.9425}{0.001987} = 18.50$$

c. 領域 3 (縮小部) :

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

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

$$S_4/S_2 = 0.261$$

$$K_3 = 0.36$$

d. 領域 4 (直流路部) :

$$v_4 = 1.50 \times (S_2/S_4) = 5.75 \text{ m/s}$$

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

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

$$\therefore \lambda_4 = 0.032$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{\ell_4}{D_{e4}} = 0.032 \times \frac{0.12}{0.000976} = 3.934$$

e. 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 5.1.1 に示す。

(4) コアバイパス (重水タンク内胴と Be 反射体の間の隙間) 領域での流動損失係数特性

図 5.1.4 に示す領域 4 の流速 3.50 m/s を基準流速にとる。レイノルズ数算出は水温 40°C の動粘性係数を用いて行う。

a. 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.5$

b. 領域 2 (直流路部) :

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

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

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

$$v_2 = 3.50 \times (S_4/S_2) = 0.3133 \text{ m/s}$$

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

$$\therefore \lambda_2 = 0.024$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{\ell_2}{D_{e2}} = 0.024 \times \frac{0.073}{0.06} = 0.03$$

c. 領域 3 (縮小部) :

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

$$S_4/S_2 = 0.1$$

$$K_3 = 0.41$$

d. 領域 4 (直流路部) :

$$v_4 = 3.50 \text{ m/s}$$

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

$$Re = v_4 D_{e4} / \nu = \frac{3.50 \times 0.006}{0.668 \times 10^{-6}} = 3.15 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.023$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{\ell_4}{D_{e4}} = 0.028 \times \frac{1.4}{0.006} = 5.37$$

e. 領域 5 (縮小部) :

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

$$S_6/S_4 = 0.341$$

$$K_5 = 0.33$$

f. 領域 6 (直流路部+曲り部) :

$$v_6 = 3.50 \times (S_4/S_6) = 10.792 \text{ m/s}$$

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

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

$$\therefore \lambda_6 = 0.018$$

$$K_6'(\text{直流路部}) = \lambda_6 \frac{\ell_6}{D_{e6}} = 0.018 \times \frac{0.02}{0.006} = 0.06$$

$$K_6'(\text{曲り部}) = 0.131 + 0.1632 \left(\frac{8}{11} \right)^{3.5} = 0.1845$$

$$\therefore K_6 = \Sigma K_6' = 0.2445$$

g. 領域 7 (縮小部) :

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

$$S_6' = 8.64 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_8/S_6' = 0.3$$

$$K_7 = 0.33$$

h. 領域 8 (直流路部) :

$$v_8 = 3.50 \times (S_4/S_8) = 7.84 \text{ m/s}$$

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

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

$$\therefore \lambda_8 = 0.016$$

$$K_8 = \lambda_8 \frac{\ell_8}{D_{e8}} = 0.016 \times \frac{0.12}{0.01414} = 0.136$$

i. 領域 9 (拡大部) :

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

$$K_{10} = \{1 - (S_8/S_{10})\}^2 = 0.681$$

j. 領域 10 (直流路部) :

$$v_{10} = 3.50 \times (S_4/S_{10}) = 1.367 \text{ m/s}$$

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

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

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

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

k. 領域11 (拡大部) :

$$K_{11} = 1.0$$

以上の結果を基準流速と共に表 5.1.1 に示す。

(5) B_e反射体領域の流動損失係数特性

図 5.1.5 の領域 4 で、基準流速 3.75 m/s とする。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う。

a. 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.5$

b. 領域 2 (直流路部) :

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

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

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

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

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

$$\therefore \lambda_2 = 0.021$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{\ell_2}{D_{e2}} = 0.021 \times \frac{0.03}{0.045} = 0.0133$$

c. 領域 3 (縮小部) :

$$K_3 = 0.5$$

d. 領域 4 (直流路部) :

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

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

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

$$\therefore \lambda_4 = 0.024$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{\ell_4}{D_{e4}} = 0.024 \times \frac{1.424}{0.005} = 6.835$$

e. 領域 5 (拡大部) :

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

$$K_5 = \{1 - (S_4/S_6)\}^2 = 0.624$$

f. 領域 6,7 (直流路部) :

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

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

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

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

$$K_{6,7} = \lambda_{6,7} \frac{\ell_{6,7}}{D_{e6,7}} = 0.020 \times \frac{0.083}{0.045} = 0.037$$

g. 領域 8 (縮小部) :

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

$$K_8 = 0.5$$

h. 領域 9 (直流路部) :

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

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

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

$$\therefore \lambda_9 = 0.016$$

$$K_9 = \lambda_9 \frac{\ell_9}{D_{e9}} = 0.016 \times \frac{0.2}{0.015} = 0.214$$

i. 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. 1. 1 に示す。

(6) 照射筒領域の流動損失係数特性

基準流速を図 5. 1. 6 に示す領域 2 で 6.00 m/s とする。レイノルズ数算出は、水温 40°C の動粘性係数を用いて行う。

a. 領域 1 (縮小部) :

$$K_1 = 0.5$$

b. 領域 2 (直流路部) :

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

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

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

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

$$\therefore \lambda_2 = 0.0214$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{\ell_2}{D_{e2}} = 0.0214 \times \frac{0.9615}{0.005} = 4.12$$

c. 領域 3 (拡大部) :

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

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

d. 領域 4 (直流路部) :

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

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

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

$$\therefore \lambda_4 = 0.0185$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{\ell_4}{D_{e4}} = 0.0185 \times \frac{0.054}{0.067} = 0.0149$$

e. 領域 5 (拡大部) :

$$S_6' = 5.55 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$K_5 = \{1 - (S_4/S_6')\}^2 = 0.133$$

f. 領域 6, 7 (直流路部) :

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

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

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

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

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

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

g. 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. 1. 1 に示す。

(7) 自然循環孔の流動損失係数特性

a. 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.5$

b. 領域 2 (拡大部) : $K_2 = 1.0$

(2) 流量配分評価

前項に述べた流動損失係数特性を基にして、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

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00691) \left(\frac{3.831}{6.24} \right)^2 + (0.5 + 3.806 + 0.16) \right. \\ &\quad \left. + 0.00421 \times \left(\frac{3.791}{6.24} \right)^2 + (0.07 + 0.39) \left(\frac{5.364}{6.24} \right)^2 \right\} \times \left(\frac{6.24^2}{2 \times 9.8} \right) \\ &= 9.92 \text{ m 水頭} \end{aligned}$$

② フォロワ型燃料要素での流速

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.033) \left(\frac{3.14}{5.6} \right)^2 + (0.18 + 0.201) \left(\frac{4.89}{5.6} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + (0.1 + 3.683 + 1.11) + 0.1 \times \left(\frac{7.86}{5.6} \right)^2 + 0.123 \times \left(\frac{4.40}{5.6} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 0.40 \times \left(\frac{4.023}{5.6} \right)^2 + 0.687 \times \left(\frac{0.688}{5.6} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.344 v^2 \\ \therefore v &= 5.37 \text{ m/s} \end{aligned}$$

③ 燃料側板間ギャップでの流速

$$\begin{aligned}\Delta P &= \left\{ (0.39 + 18.50) + (0.36 + 3.934 + 1.0) \times \left(\frac{5.75}{1.5} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 4.93 v^2 \\ \therefore v &= 1.42 \text{ m/s}\end{aligned}$$

④ コアバイパスでの流速

$$\begin{aligned}\Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.03) \times \left(\frac{0.3133}{3.5} \right)^2 + (0.41 + 5.37) + (0.33 + 0.2445) \times \left(\frac{10.792}{3.5} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + (0.33 + 0.136 + 0.687) \times \left(\frac{7.84}{3.5} \right)^2 + (1.0 + 0.023) \times \left(\frac{1.36}{3.5} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.875 v^2 \\ \therefore v &= 3.37 \text{ m/s}\end{aligned}$$

⑤ B_e反射体での流速

$$\begin{aligned}\Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.0133) \times \left(\frac{0.787}{3.75} \right)^2 + (0.5 + 6.835 + 0.624) + 0.037 \times \left(\frac{0.789}{3.75} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + (0.5 + 0.214 + 1.0) \times \left(\frac{7.09}{3.75} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.720 v^2 \\ \therefore v &= 3.71 \text{ m/s}\end{aligned}$$

⑥ 照射筒での流速

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

⑦ 自然循環孔での流速

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

以上の結果を基に各領域の流路面積，流速，流量および流量割合を求めたものを表 5. 1. 2 に示す。

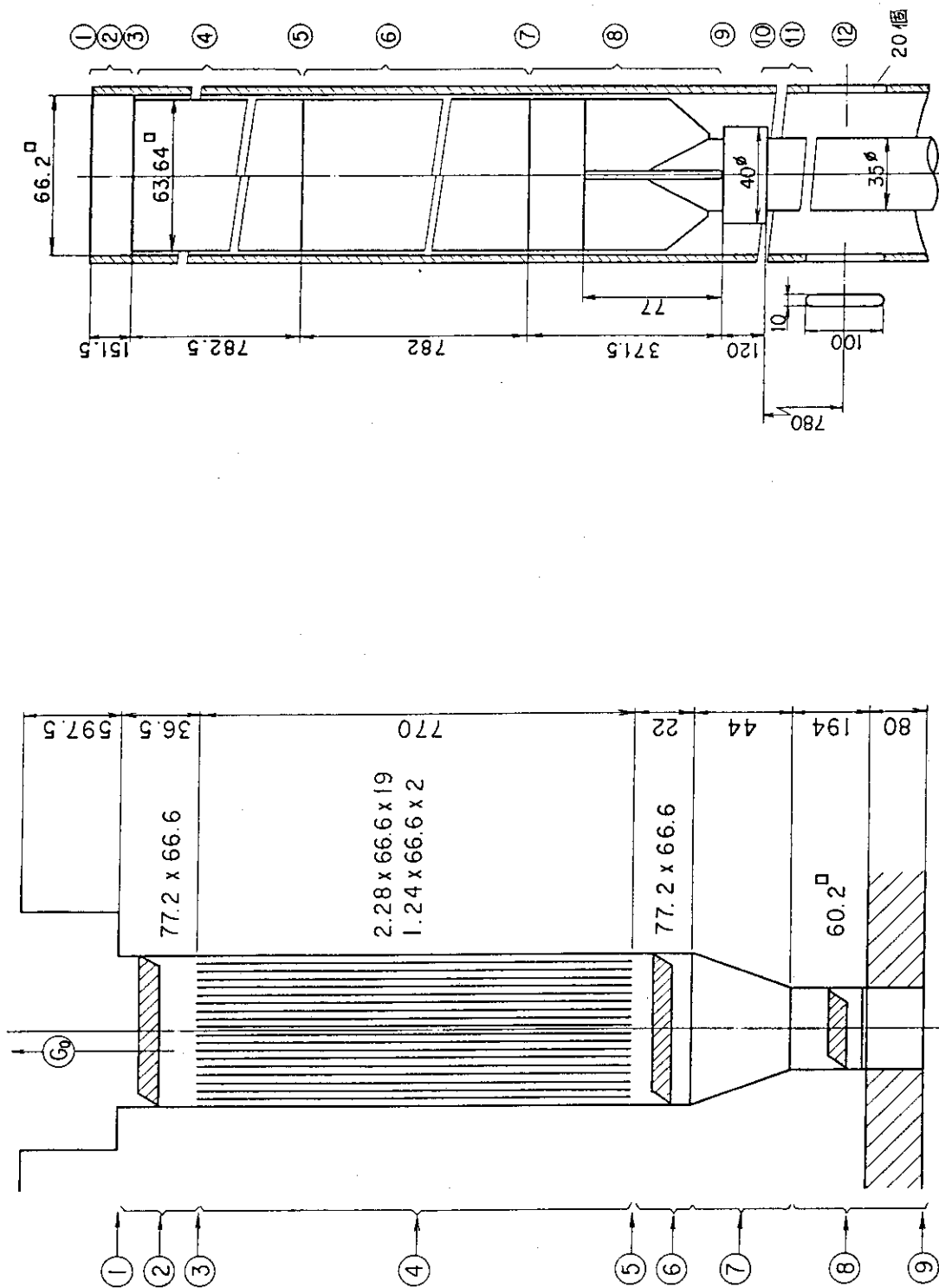


図 5. 1. 1 標準型燃料要素の形状と領域区分

図 5. 1. 2 フォロア型燃料要素の形状と領域区分

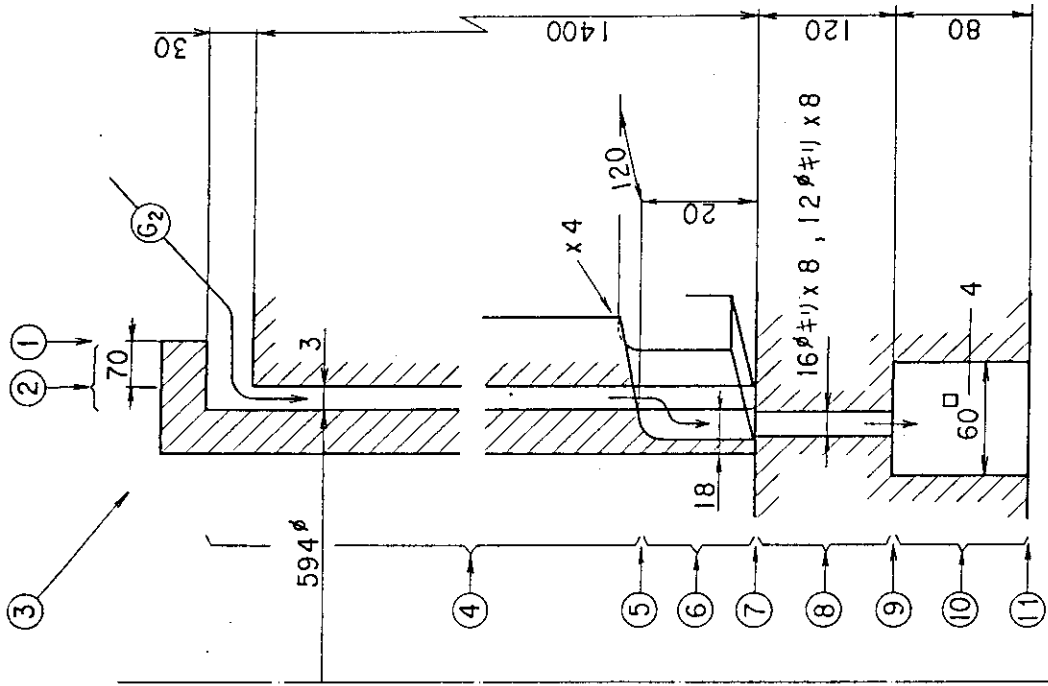


図 5.1.4 コアバイパス形状と領域区分

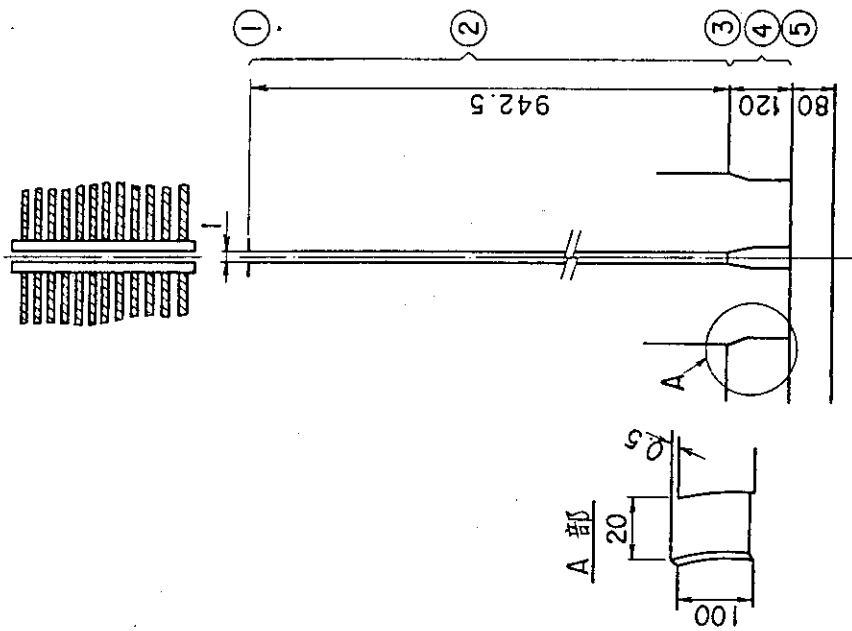


図 5.1.3 燃料側板間ギャップ形状と領域区分

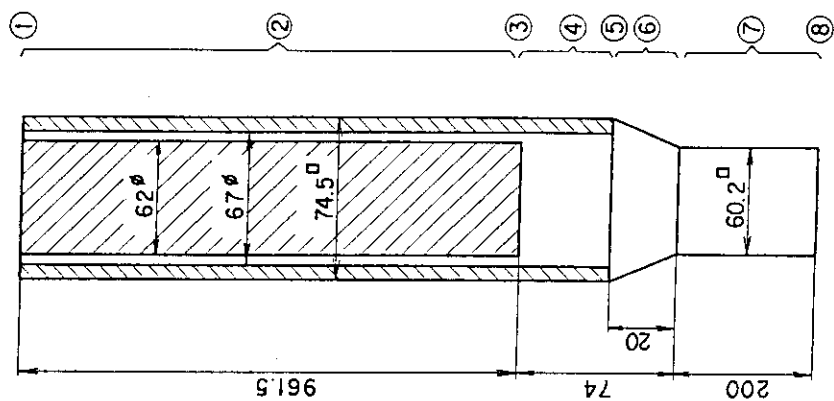


図 5.1.6 照射筒の形状と領域区分

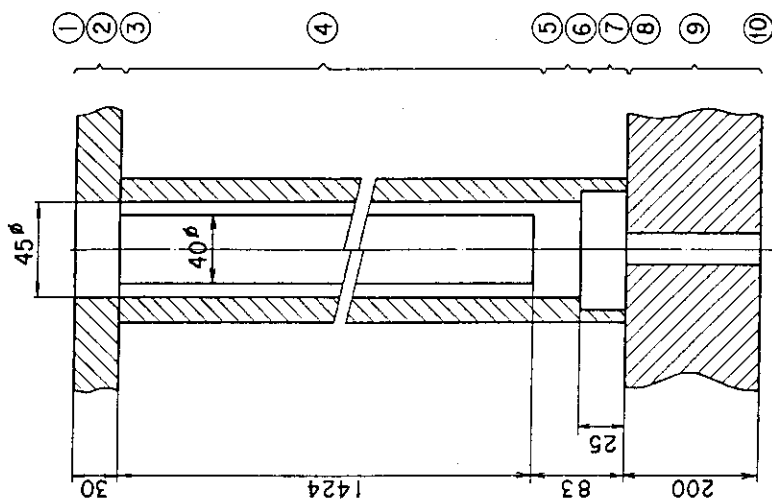


図 5.1.5 Be 反射体の形状と領域区分

表 5. 1. 1 各領域の基準流速と流動損失係数

領域	名称 標準型 燃料要素	フォロー型 燃料要素	燃料側板間 ギャップ	コアバイパス	Be反射体	照射筒
1	0.5	0.5	0.39	0.5	0.5	0.5
	3.831	3.140	1.50	0.3133	0.787	6.0
2	0.00691	0.033	18.5	0.03	0.0133	4.12
	3.831	3.140	1.50	0.3133	0.787	6.0
3	0.5	0.18	0.36	0.41	0.5	0.735
	6.24	4.89	5.75	3.50	3.75	6.0
4	3.806	0.201	3.934	5.37	6.835	0.0149
	6.24	4.89	5.75	3.50	3.75	0.862
5	0.16	0.1	1.0	0.33	0.624	0.133
	6.24	5.60	5.75	10.792	3.75	0.862
6	0.00421	3.683	/	0.2445	0.037	0.07
	3.791	5.60		10.792		
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				

上段：流動損失係数
下段：流速 (m/s)

表 5.1.2 炉心流量配分

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	0.08104	6.24	0.5057	78.1
フロー型燃料	0.01475	5.37	0.0792	12.2
燃料側板間ギャップ	0.00407	1.42	0.0058	0.9
コアバイパス	0.00566	3.37	0.0191	3.0
Be 反射体	0.00513	3.71	0.0190	2.9
照射筒	0.00253	6.03	0.0153	2.4
(自然循環孔)	(0.00030)	(11.4)	(0.0034)	(0.5)
合計	0.011348		0.648 (約2400m ³ /h)	100

5.1.2 圧力分布計算

前項までの流動損失係数評価および流量配分評価を基にして炉心内の軸方向圧力分布を求める。標準型燃料要素内の燃料板間隔が僅か2.28mmであり、かつ流速が約6m/sであるため、炉心内の圧力損失は大きく、約9~10m水頭の圧力損失が生じている。

図5.1.7に、COOLODで計算したケース1およびケース2による、炉心圧力分布を比較して示す。

ケース1では、炉心入口・出口の冷却材流速を零とし、さらに炉心内の僅かな水頭差をも考慮しない値を用いて計算している。

ケース2では、ケース1で考慮しない炉心入口・出口の流速、および水頭差を考慮に入れて、より詳細な値を用いて計算している。

図5.1.7に示すように、燃料板出口での静圧で、ケース1とケース2との差が約1.5m水頭あるのは、ケース2で考慮した炉心内の水頭差約0.8m、炉心入口での動圧約0.7mによるものである。

$$P_1 = P_0 - \frac{v_1^2}{2g} - \Delta P \quad (\text{ケース1})$$

$$P_1' = P_0 + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} + \Delta h - \Delta P \quad (\text{ケース2})$$

ここで、

P_1 : 燃料板出口静圧 (ケース1)

P_1' : 燃料板出口静圧 (ケース2)

P_0 : 炉心入口静圧

v_0 : 炉心入口流速

v_1 : 燃料板出口流速

g : 重力加速度

Δh : 水頭差

ΔP : 形状損失

$$P_1' - P_1 = \frac{v_0^2}{2g} + \Delta h$$

前項の流動損失特性より、 $v_0 = 3.831 \text{ m/s}$ 、 $\Delta h = 0.77 \text{ m}$ 、 $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ を代入して求めると、

$$P_1' - P_1 = 1.52 \text{ m}$$

となる。

ケース1による冷却材流速をパラメータとした炉心内圧力分布を表5.1.3に、またケース2による炉心内圧力分布を表5.1.4に示す。図5.1.8および図5.1.9にそれぞれを図示する。

表 5.1.3 ケース 1 における炉心内圧力分布

圧力(kg/cm ²)	流速(m/s)									
	4.50	5.00	5.50	6.00	6.24	6.50	7.00	7.50		
炉心入口	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55		
燃料板上部	1.37	1.33	1.28	1.23	1.21	1.18	1.12	1.06		
燃料板下部	0.97	0.85	0.71	0.56	0.48	0.40	0.22	0.02		
格子板出口	1.04	0.93	0.81	0.67	0.61	0.53	0.38	0.20		

表 5.1.4 ケース 2 における炉心内圧力分布

圧力(kg/cm ²)	流速(m/s)									
	4.50	5.00	5.50	6.00	6.24	6.50	7.00	7.50		
炉心入口	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55		
燃料板上部	1.42	1.38	1.35	1.31	1.29	1.27	1.22	1.18		
燃料板下部	1.09	0.97	0.84	0.70	0.63	0.55	0.40	0.23		
格子板出口	1.13	1.02	0.90	0.78	0.71	0.64	0.49	0.34		

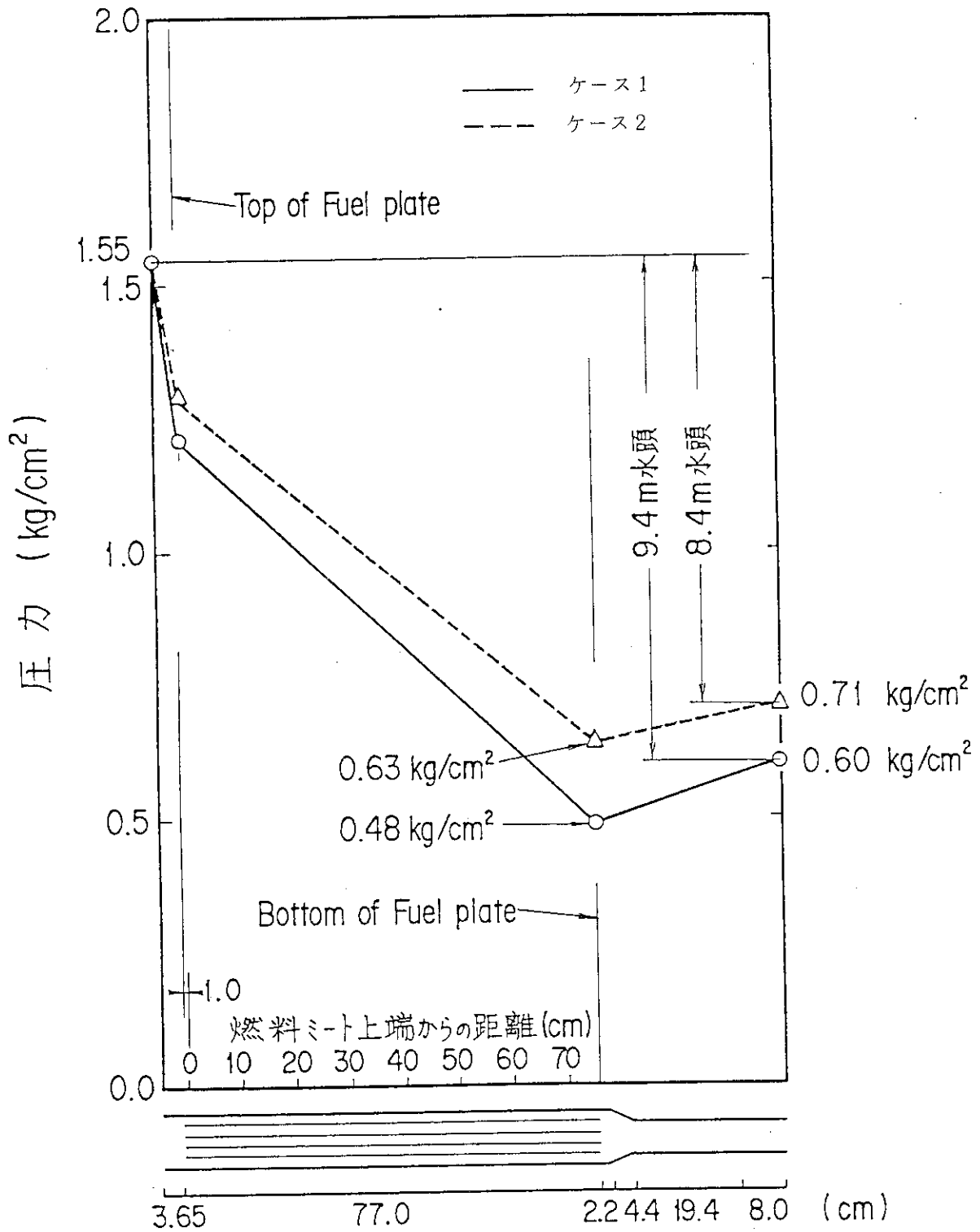


図 5. 1. 7 ケース 1 及びケース 2 による炉心内の軸方向圧力分布

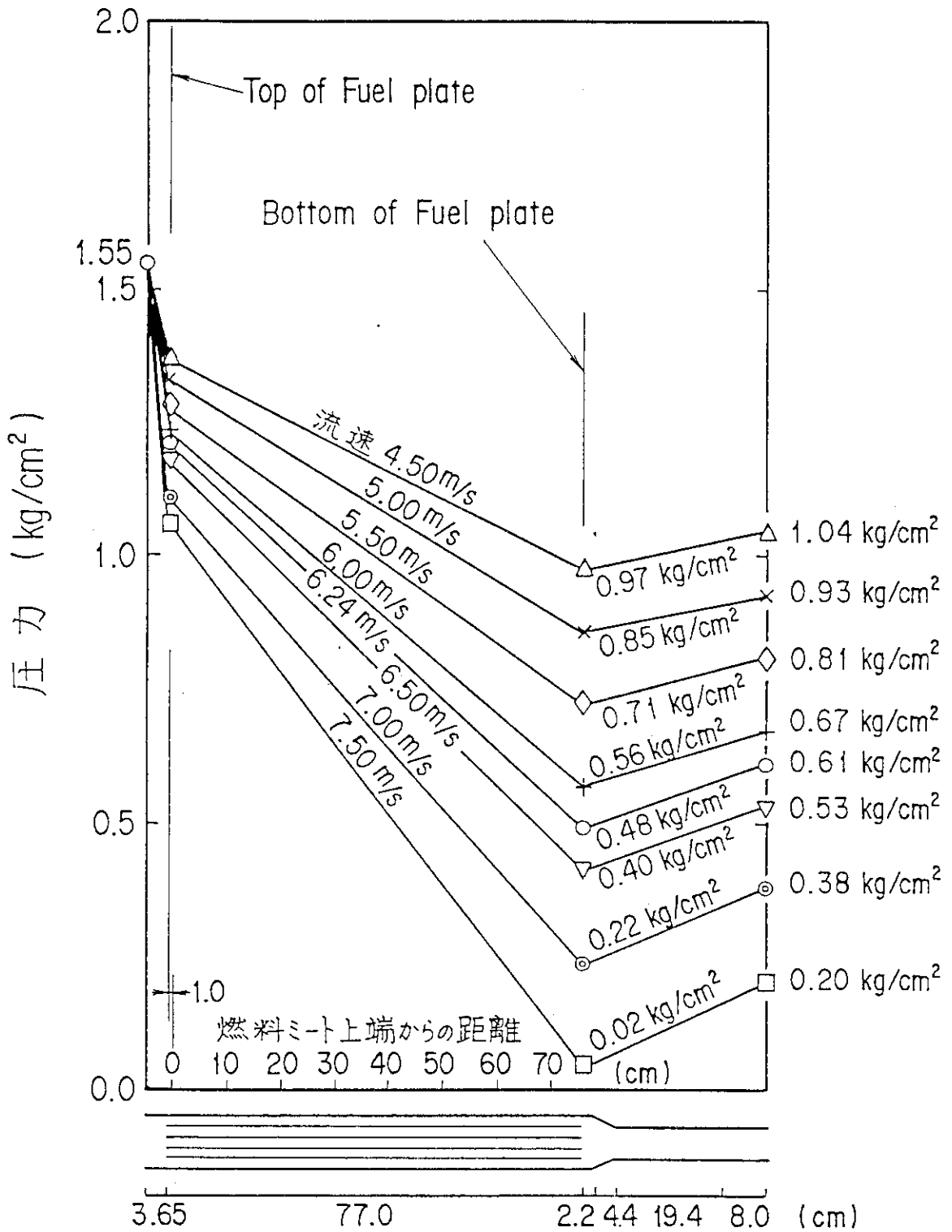


図 5. 1. 8 ケース 1 における炉心内の軸方向圧力分布

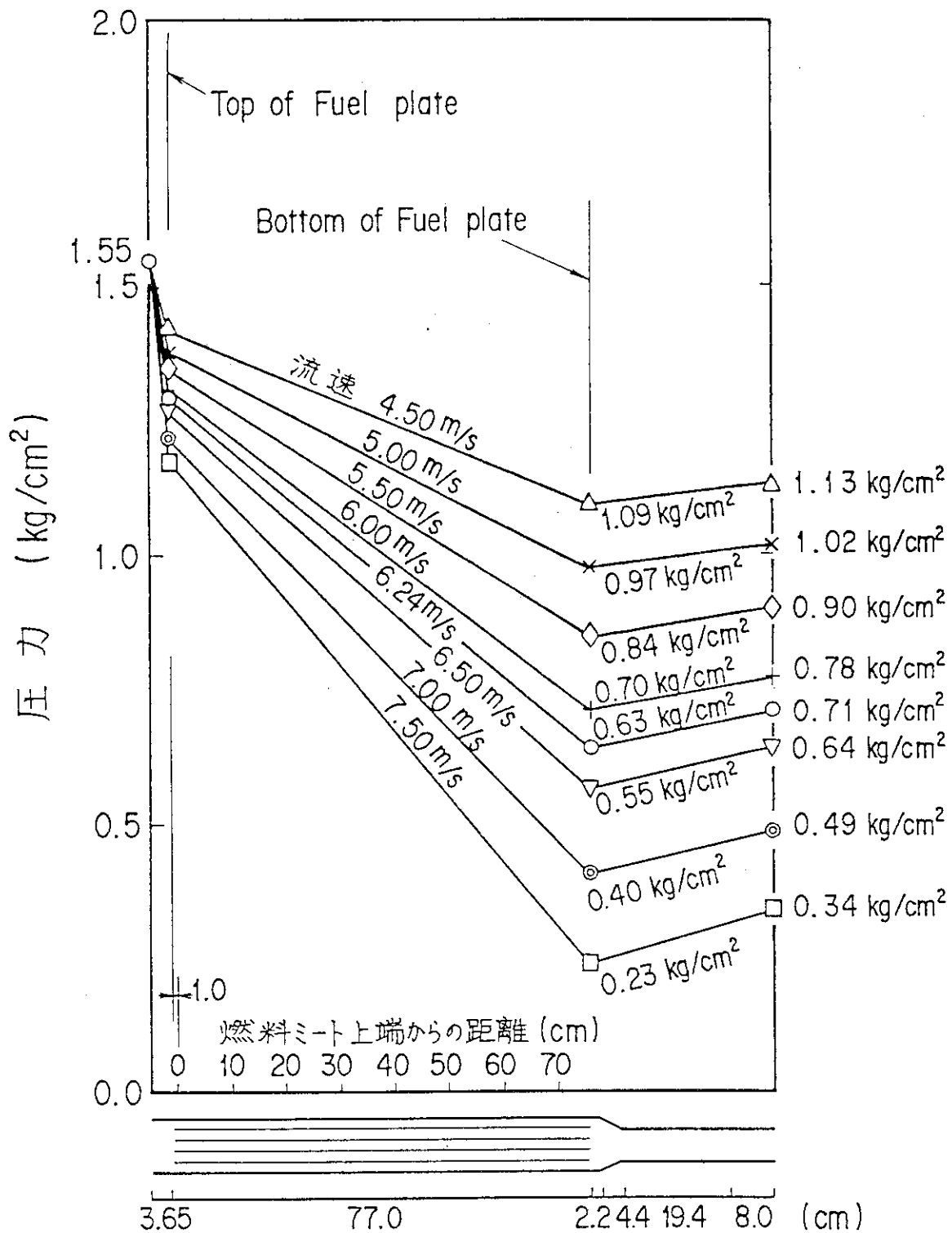


図 5. 1. 9 ケース 2 における炉心内の軸方向圧力分布

5.2 沸騰開始温度計算

JRR-3 改造炉の熱水力設計の設計条件である、沸騰を起させないということについての検討について、以下に述べる。

通常運転時に沸騰を起こすかどうかの判定は、強制対流熱伝達相関式と Bergles-Rohsenow の沸騰開始点における相関式の交点の温度を燃料板表面温度が起えているかどうかで行う。

沸騰開始温度計算で用いる強制対流熱伝達相関式は、次式によって行う。

$$\begin{aligned} q &= 0.023 R_e^{0.8} P_r^{0.4} (T_w - T_b) \frac{k_f}{D_e} \\ &= 0.023 R_e^{0.8} P_r^{0.4} \{ (T_w - T_s) + (T_s - T_b) \} \frac{k_f}{D_e} \end{aligned} \quad (5.2.1)$$

ここに、

- q : 燃料板表面熱流速 (kcal/m²h)
- R_e : レイノルズ数
- P_r : プラントル数
- T_w : 燃料板表面温度 (°C)
- T_s : 飽和温度 (°C)
- T_b : 液体バルク水温 (°C)
- k_f : 流体の熱伝導度 (kcal/mh°C)
- D_e : 流路の等価水力直径 (m)

また、Bergles-Rohsenow の沸騰開始点における相関式は、次式で与えられる。

$$q = 911 P^{1.156} \left\{ \frac{9}{5} (T_w - T_s) \right\} P^{\frac{2.16}{0.0234}} \quad (5.2.2)$$

ここに、

- P : 局所の静圧 (kg/cm²)

上記 2 式に対し、局所での流速 v (m/s)、流路の等価水力直径 D_e (m)、バルク水温 T_b (°C) が与えられると、(5.2.1) 式と (5.2.2) 式を連立して解くことにより、沸騰開始時の燃料板表面熱流束 q_{DNB} (kcal/m²h) と燃料板表面温度 T_{ONB} (°C) が決定される。

ケース 1 による冷却材流速をパラメータとした、沸騰開始点での冷却材流速と温度を表 5.2.1 に示す。図 5.2.1 にそれを図示する。冷却材流速が約 5.0 m/s 以下の I の領域、および約 7.5 m/s 以上の III の領域では、燃料板表面温度は沸騰開始温度を上回っており、沸騰を起していると判断できる。II の領域では、燃料板表面温度は沸騰開始温度を下回っており単相の領域である。通常運転時での沸騰開始温度と燃料板表面温度との差は、約 6°C である。

表 5.2.2 に、ホットスポットでの冷却材流速と温度を示し、図 5.2.2 にそれを図示する。通常運転時での燃料板表面温度と飽和温度との差は、約 6°C である。

図 5.2.3 には、ホットチャンネルでの冷却材流速と冷却材温度との関係を示す。通常運転時では、炉心入口と炉心出口の温度差は約 26°C である。

図 5.2.4 に、通常運転状態（冷却材流速 6.24 m/s ）におけるホットチャンネルでの温度分布を示す。

ケース 2 による冷却材流速をパラメータとした、沸騰開始点での冷却材流速と温度を表 5.2.3 に示す。それを図 5.2.5 に図示する。この図より、冷却材流速が約 4.5 m/s 以下の I の領域、および冷却材流速が約 7.5 m/s 以上の III の領域では、沸騰開始温度が燃料板表面温度を下回っており、沸騰を起こし二相領域になっていると判断できる。また、II の領域では、沸騰開始温度が燃料板表面温度を上回っており、単相の領域である。通常運転時での沸騰開始温度と燃料板表面温度との差は、約 12°C である。

表 5.2.4 に、ホットスポットでの冷却材流速と温度を示し、図 5.2.6 にそれらの関係を図示する。通常運転時での燃料板表面温度と飽和温度との差は、約 6°C である。

図 5.2.7 には、ホットチャンネルでの冷却材流速と冷却材温度との関係を示す。通常運転時では、炉心入口と炉心出口の温度差は、約 26°C である。

図 5.2.8 に、通常運転状態におけるホットチャンネルの温度分布を示す。

図 5.2.9 に、沸騰開始点における、ケース 1 とケース 2 の沸騰開始温度と燃料板表面温度を比較して示す。この図において領域 I, III は、ケース 1 での二相の領域であり、領域 I', III' は、ケース 2 での二相の領域である。また、領域 II, II' は、ケース 1 およびケース 2 における単相の領域である。ケース 1 とケース 2 の単相の領域を比較してみると、ケース 2 の方が沸騰開始温度と燃料板表面温度との差が大きく、冷却材流速をパラメータとして見ても、ケース 1 に比べ広範囲で単相である。

ケース 1 は、ケース 2 に比べて厳しい評価をしており、温度評価上、安全側である。さらに、ケース 1 およびケース 2 ともに通常運転状態で沸騰を起こしておらず、冷却材流速をパラメータとした計算でも通常運転状態の前後では、沸騰開始温度が燃料板表面温度を上回っている。すなわち、設計値である通常運転時の冷却材流速 6.24 m/s は、沸騰開始条件に対して十分な安全余裕がある。

以上は、標準型燃料要素について計算したものであるが、フォロー型燃料要素についても局所的に発熱の大きい部分については、以下のように沸騰開始温度を計算して評価した。

図 5.2.10 に、沸騰開始点での冷却材流速と温度との関係を図示する。標準型燃料要素の図 5.2.9 と比較して、広範囲で沸騰開始温度が燃料板表面温度を上回っている。通常運転時での沸騰開始温度と燃料板表面温度との差は、約 29°C であり、標準型燃料要素でのケース 1 の約 6°C 、ケース 2 の約 12°C と比較しても十分な余裕があることがわかる。

図 5.2.11 に、フォロー型燃料要素のホットスポットでの冷却材流速と温度との関係を示す。通常運転状態前後の流速において、飽和温度が燃料板表面温度を上回っており、その差は、通常運転時で約 13°C である。

以上の結果より、フォロー型燃料要素は標準型燃料要素に比べて、沸騰開始条件に対して十分な余裕がある。

表 5.2.1 ケース 1 による沸騰開始点での冷却材流速と温度との関係

項目	流速 (m/s)	4.50	5.00	5.50	6.00	6.24	6.50	7.00	7.50
沸騰開始温度(°C)		115.5	113.8	111.6	108.9	107.4	105.6	98.9	88.1
燃料板表面温度(°C)		116.1	113.4	107.9	103.3	101.3	99.2	93.7	87.2
飽和温度(°C)		101.1	98.2	94.8	90.6	88.3	85.4	75.5	57.3
冷却材温度(°C)		60.4	57.9	55.8	54.0	53.3	52.6	53.4	53.8

表 5.2.2 ケース 1 によるホットスポットでの冷却材流速と温度との関係

項目	流速 (m/s)	4.50	5.00	5.50	6.00	6.24	6.50	7.00	7.50
燃料中心温度(°C)		122.4	119.4	113.9	109.2	107.2	105.1	101.6	98.5
燃料板表面温度(°C)		116.4	113.4	107.9	103.2	101.2	99.1	95.6	92.6
飽和温度(°C)		101.7	99.1	95.9	92.1	90.0	87.4	81.5	73.5
冷却材温度(°C)		57.1	54.9	53.0	51.5	50.9	50.3	49.2	48.2

表 5.2.3 ケース 2 による沸騰開始点での冷却材流速と温度との関係

項目	流速 (m/s)									
	4.50	5.00	5.50	6.00	6.24	6.50	7.00	7.50		
沸騰開始温度(°C)	118.9	117.6	116.0	113.8	112.8	111.2	105.8	100.7		
燃料板表面温度(°C)	118.9	113.3	107.8	103.2	101.2	99.1	93.6	90.5		
飽和温度(°C)	104.0	101.4	98.5	94.8	93.0	90.3	82.4	73.9		
冷却材温度(°C)	60.4	57.8	55.8	54.0	53.3	52.5	53.3	52.1		

表 5.2.4 ケース 2 によるホットスポットでの冷却材流速と温度との関係

項目	流速 (m/s)									
	4.50	5.00	5.50	6.00	6.24	6.50	7.00	7.50		
燃料中心温度(°C)	125.5	119.2	113.8	109.1	107.1	105.0	101.5	98.5		
燃料板表面温度(°C)	119.6	113.3	107.8	103.1	101.1	99.1	95.6	92.5		
飽和温度(°C)	104.5	102.1	99.4	96.0	94.3	91.9	86.9	80.5		
冷却材温度(°C)	57.0	54.8	53.0	51.5	50.9	50.2	49.1	48.2		

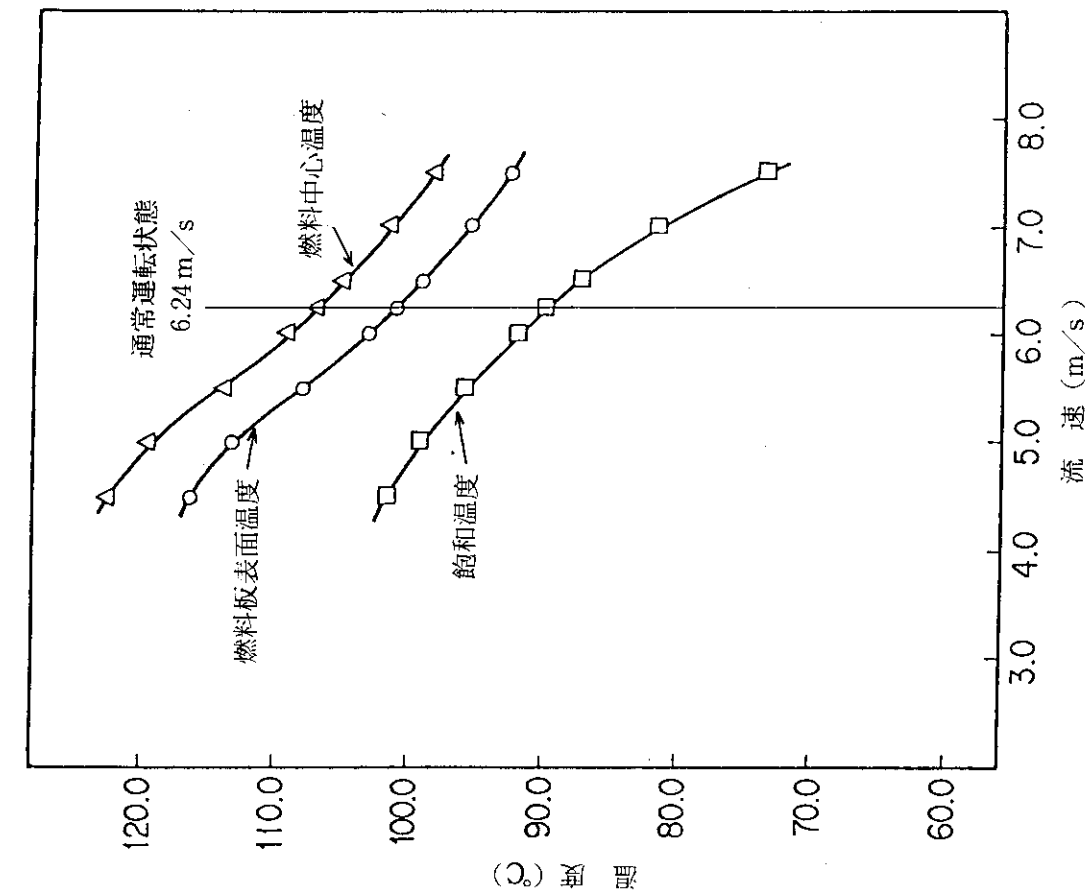


図5.2.1 ケース1による沸騰開始点での冷却材流速と温度との関係

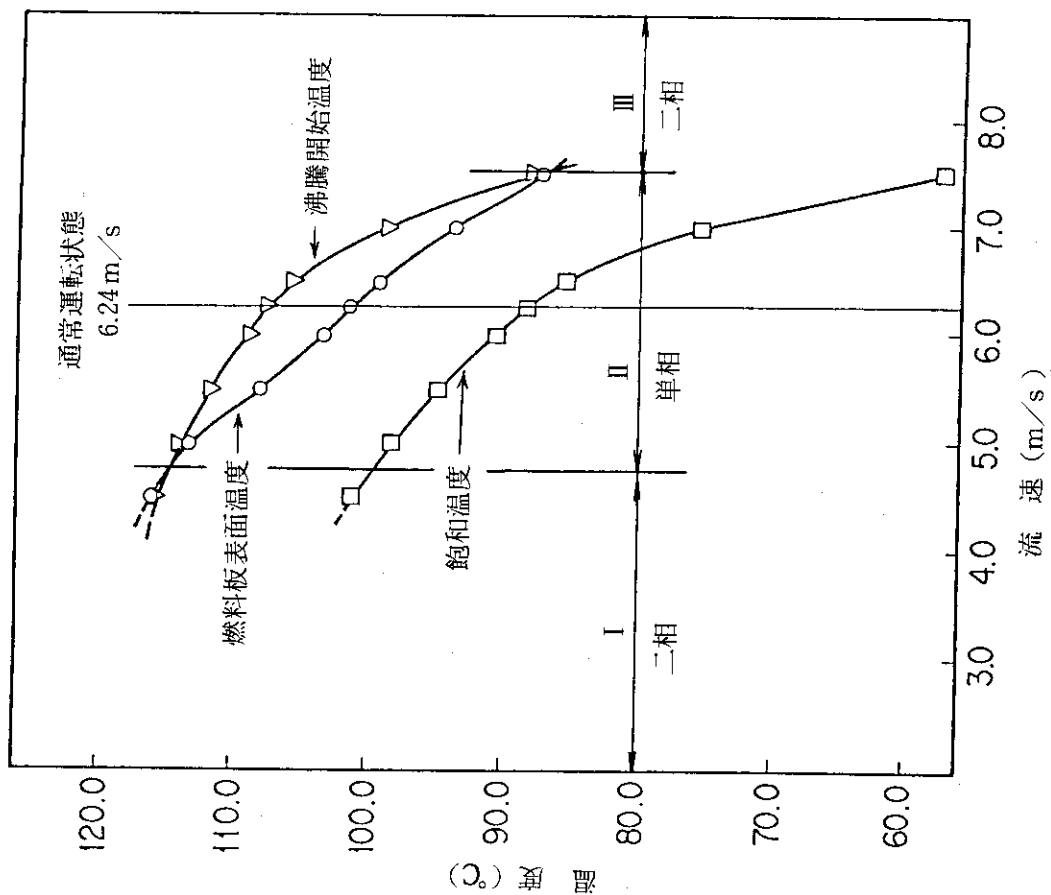


図5.2.2 ケース1によるホットスポットでの冷却材流速と温度との関係

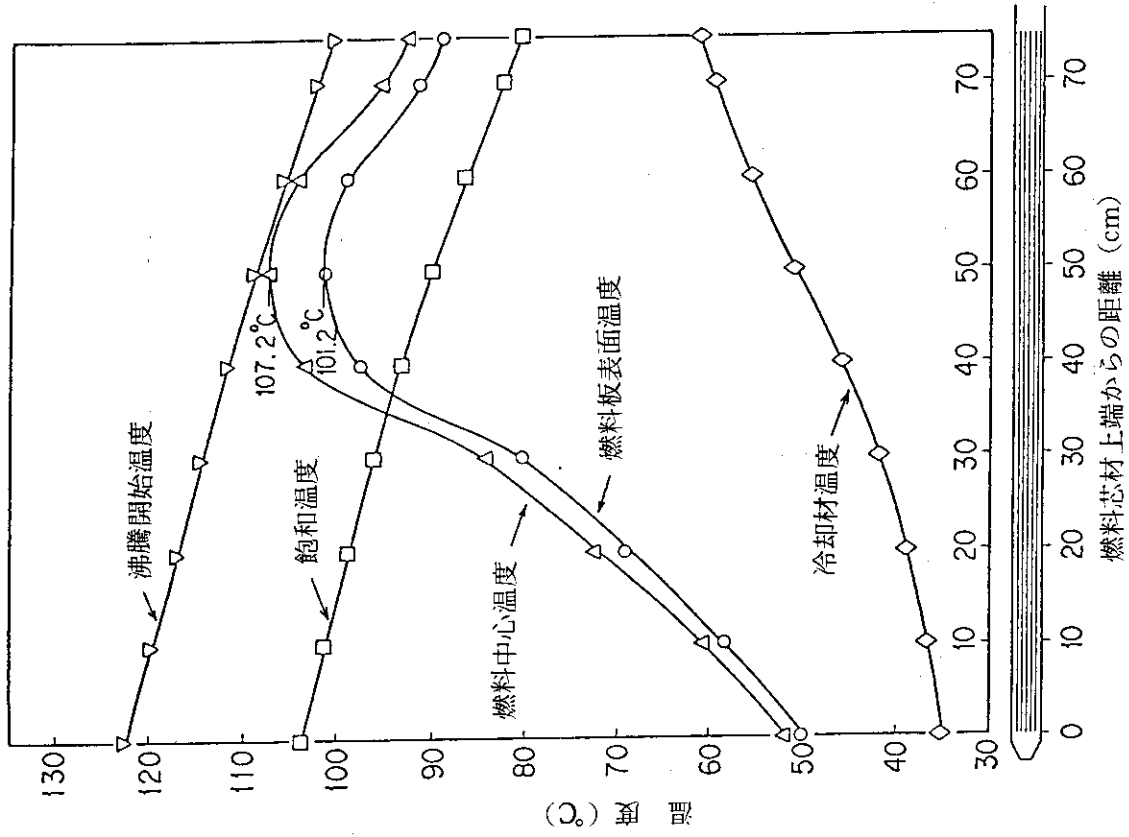


図 5.2.4 ケース 1 によるホットチャンネルの温度分布

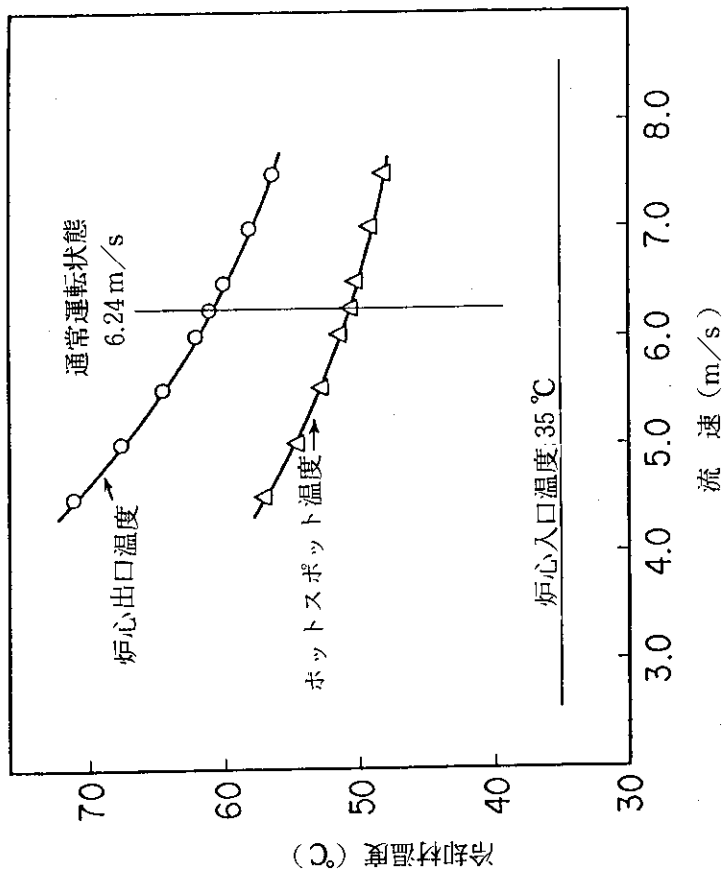


図 5.2.3 ケース 1 によるホットチャンネルでの冷却材流速と冷却材温度との関係

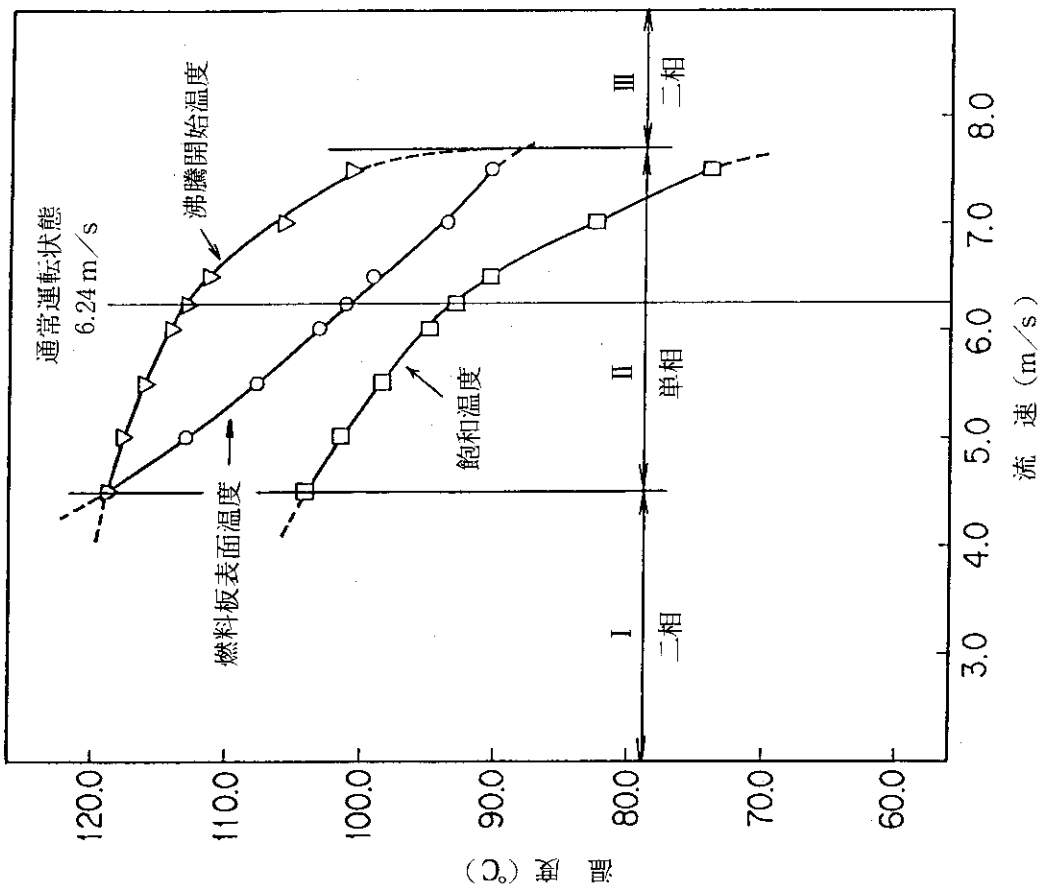
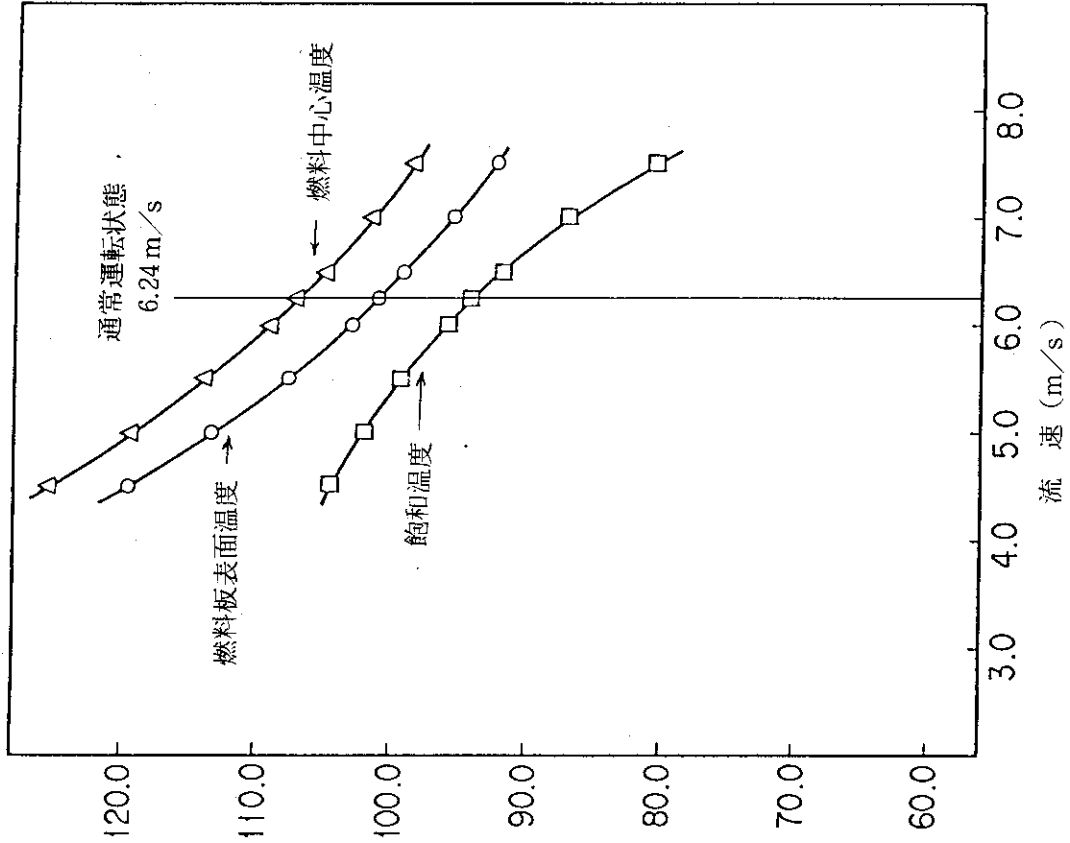


図 5.2.6 ケース 2 によるホットスポットでの冷却材流速と温度との関係

図 5.2.5 ケース 2 による沸騰開始点での冷却材流速と温度との関係

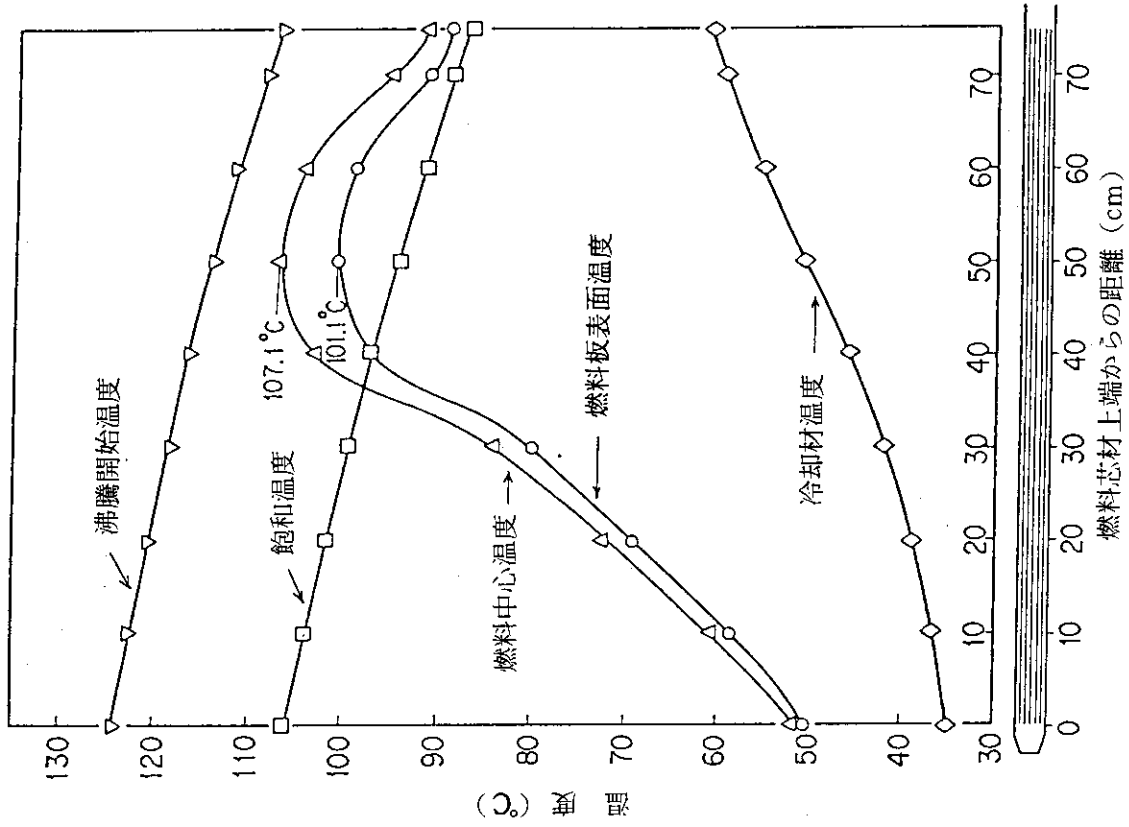


図 5.2.8 ケース 2 によるホットチャンネルの温度分布

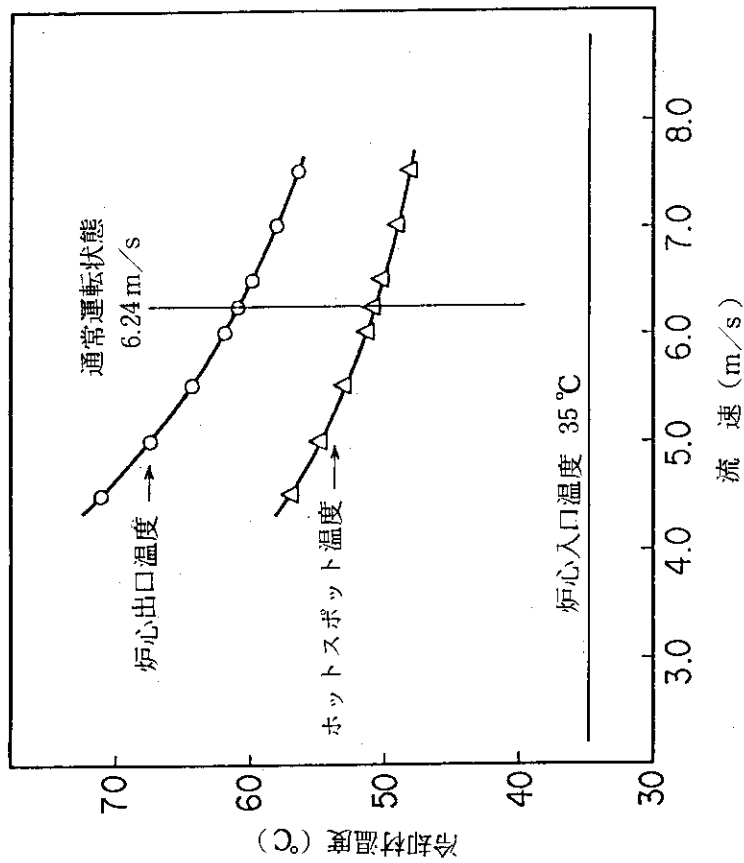


図 5.2.7 ケース 2 によるホットチャンネルでの冷却材流速と冷却材温度との関係

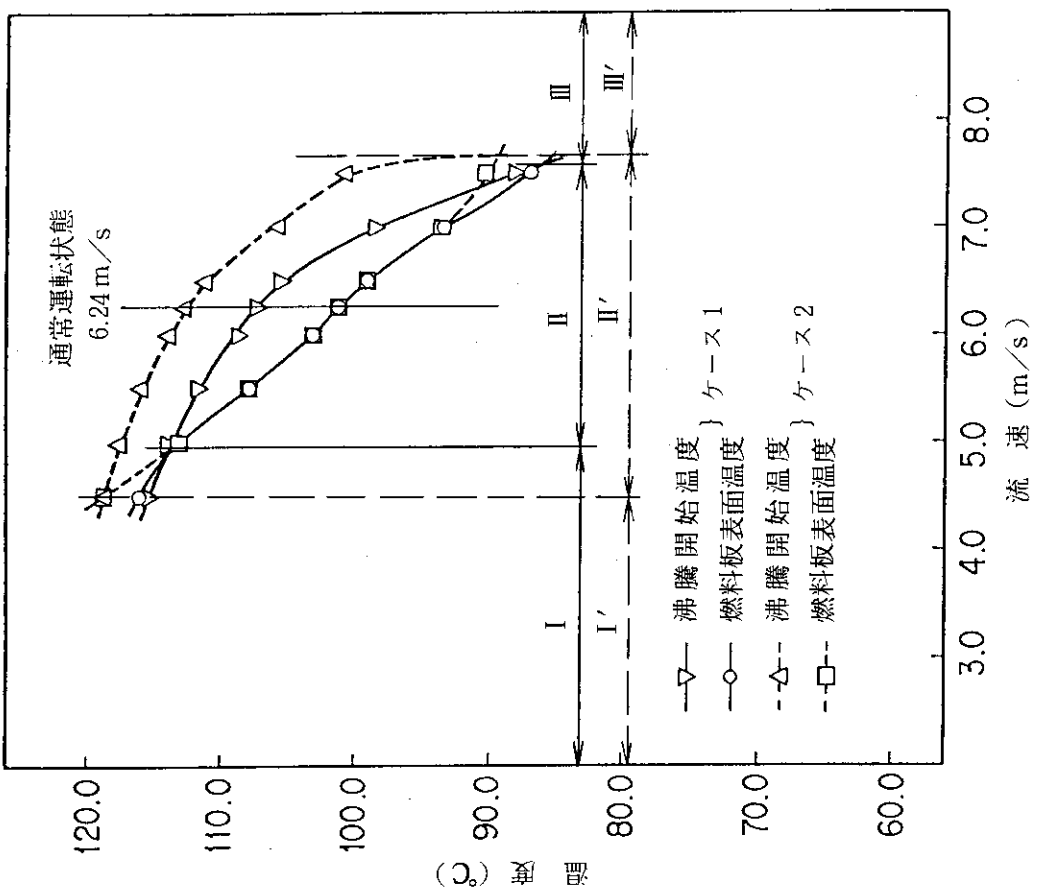
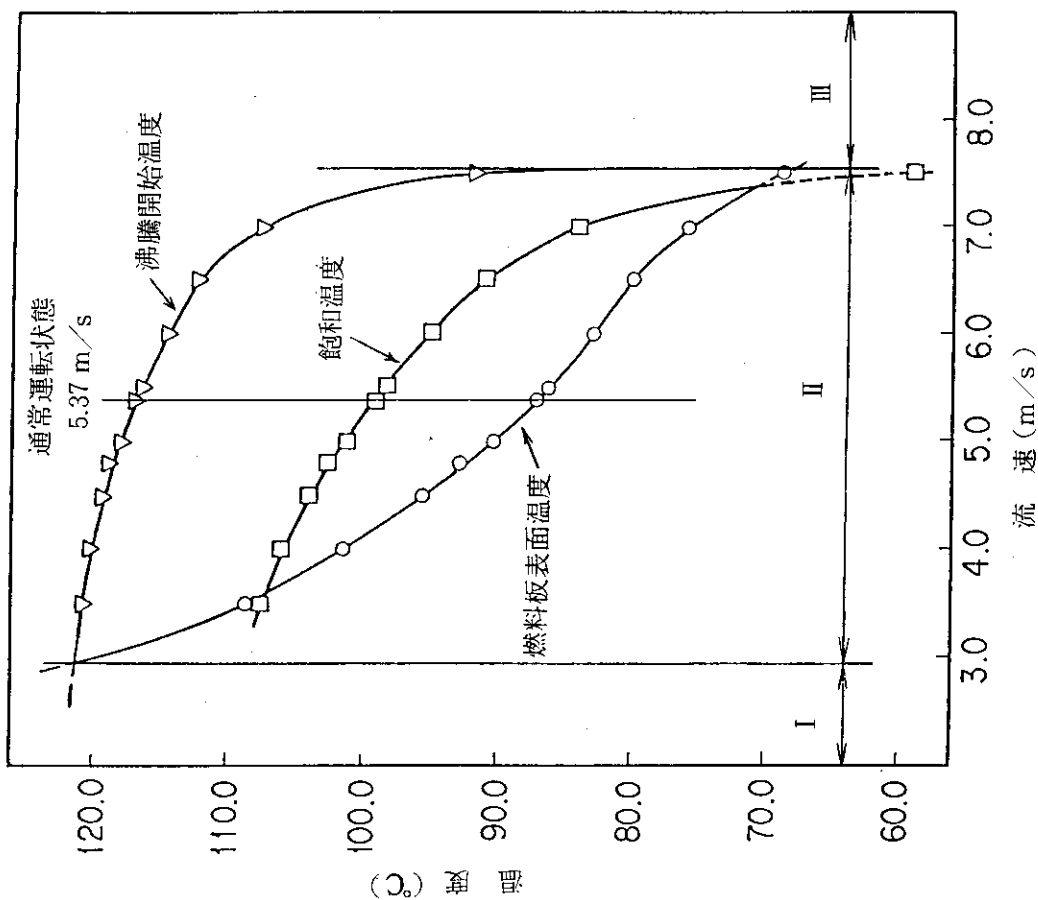


図 5.2.10 沸騰開始点での冷却材流速と温度との関係
(フォロワ型燃料要素)

図 5.2.9 沸騰開始点におけるケース 1 とケース 2 との温度の比較

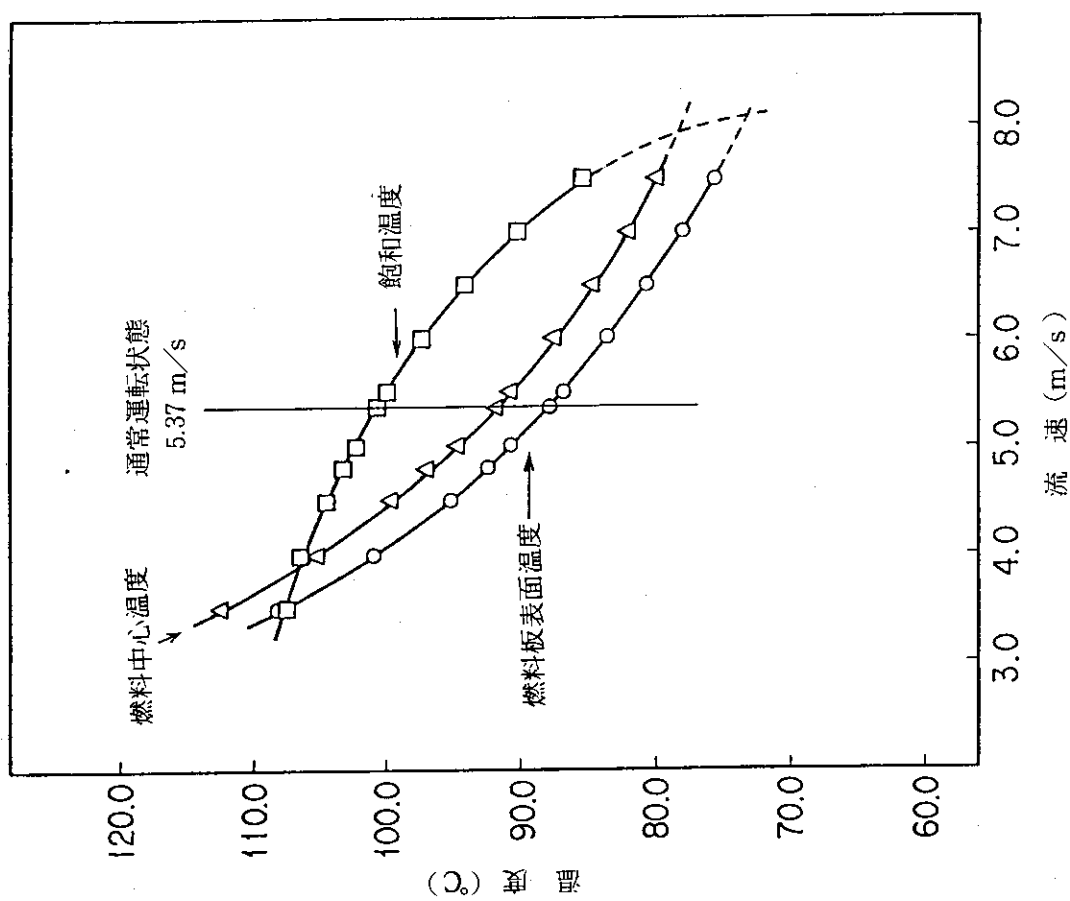


図5.2.11 ホットスポットでの冷却材流速と温度との関係
(フォロワ型燃料要素)

5.3 DNBR 評価

COOLOD での計算結果を基にして、DNBR 評価を行う。

JRR-3 改造炉における DNBR 評価では、その基本的流路の形状、流速、温度、圧力条件等を考慮して、DNB 熱流束評価式を定めた⁽⁵⁾。

DNB 熱流束評価式を得るための整理式は、下式を用いる。

$$\text{無次元熱流束} \quad q^* \equiv q_{\text{DNB}} / h_{fg} \sqrt{\lambda r_g g (r_l - r_g)} \quad (5.3.1)$$

$$\text{無次元質量流量} \quad G^* \equiv G / \sqrt{\lambda r_g g (r_l - r_g)} \quad (5.3.2)$$

$$\lambda \equiv \sqrt{\sigma / (r_l - r_g)} \quad (5.3.3)$$

ここに、

q_{DNB} : DNB 熱流束 (kcal/m²s)

h_{fg} : 蒸発潜熱 (kcal/kg)

λ : 臨界波長 (m)

r_g, r_l : 気液の比重 (kg/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

G : 質量流量 (kg/m²s)

σ : 表面張力 (kg/m)

DNB 熱流束評価式としては、下記の 2 式の値の内小なる値をとる。

$$q^* = 0.005 | G^* |^{0.611} \quad (5.3.4)$$

$$q^* = \frac{A}{A_H} \frac{\Delta h_i}{h_{fg}} | G^* | \quad (5.3.5)$$

上記 (5.3.4) 式、(5.3.5) 式から選んだ値が、下記の式より小さい時は、下記の式の値をとる。

$$q^* = 0.7 \left(\frac{A}{A_H} \right) \left\{ w \left(\frac{r_l}{\sigma} \right)^{1/2} \right\}^{1/2} / \left\{ 1 + \left(\frac{r_g}{r_l} \right)^{1/4} \right\}^2 \quad (5.3.6)$$

ここに、

A : 流路断面積 (m²)

A_H : 1 流路当りの加熱面積 (m²)

Δh_i : 入口サブクールエンタルピ (kcal/kg)

w : 長手方向流路幅 (m)

表 5.3.1 に、ケース 1 による DNBR と燃料板表面最高温度を示し、図 5.3.1 に、その関係を図示する。

ケース 2 による DNBR と燃料板表面最高温度を、表 5.3.2 および図 5.3.2 に示す。

ケース 1 では、通常運転状態の冷却材流速 6.24 m/s 時で、DNBR が 2.14、燃料板表面最高温度は約 101 °C であるのに対して、ケース 2 では、DNBR が 2.20、燃料板表面最高温度は約 101 °C である。これより、DNBR 評価に関しては、ケース 1 の方がケース 2 よりも安全側に評価している。

さらに、フォロワ型燃料要素についても、標準型燃料要素と同様に DNBR の計算を行った。表 5.3.3、図 5.3.3 にその結果を示す。

フォロー型燃料要素内での通常運転状態の冷却材流速は 5.37 m/s であり、その時のDNBRは3.00、燃料板表面最高温度は 88.1°C である。これより、フォロー型燃料要素の局部的発熱は、標準型燃料要素のそれに比べて、DNBR、温度等に関して、十分な安全余裕がある。

以上の結果より、標準型燃料要素での通常運転状態の冷却材流速 6.24 m/s 時では、DNBR 1.5に対して、ケース1で2.14、ケース2で2.20と十分な余裕があることがわかる。さらに、パラメータ計算の結果、通常運転時の前後の流速に関しても、DNBR 1.5に対して、余裕があることを示している。

表 5.3.3.1 ケース 1 による冷却材流速と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係

項目	4.50	5.00	5.50	6.00	6.24	6.50	7.00	7.50
流速 (m/s)								
DNBR	1.62	1.78	1.93	2.07	2.14	2.20	2.32	2.43
燃料板表面最高温度 (°C)	116.9	113.4	107.9	103.3	101.3	99.2	95.6	92.6

表 5.3.3.2 ケース 2 による冷却材流速と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係

項目	4.50	5.00	5.50	6.00	6.24	6.50	7.00	7.50
流速 (m/s)								
DNBR	1.64	1.81	1.97	2.12	2.20	2.27	2.42	2.54
燃料板表面最高温度 (°C)	119.6	113.3	107.8	103.3	101.2	99.1	95.6	92.5

表 5.3.3.3 冷却材流速と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係 (フォロワ型燃料要素)

項目	3.50	4.00	4.50	4.80	5.00	5.37	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50
流速 (m/s)											
DNBR	2.02	2.30	2.56	2.71	2.81	3.00	3.06	3.29	3.51	3.71	3.89
燃料板表面最高温度 (°C)	108.8	101.6	95.8	92.8	91.0	88.1	87.1	83.8	80.8	78.2	76.0

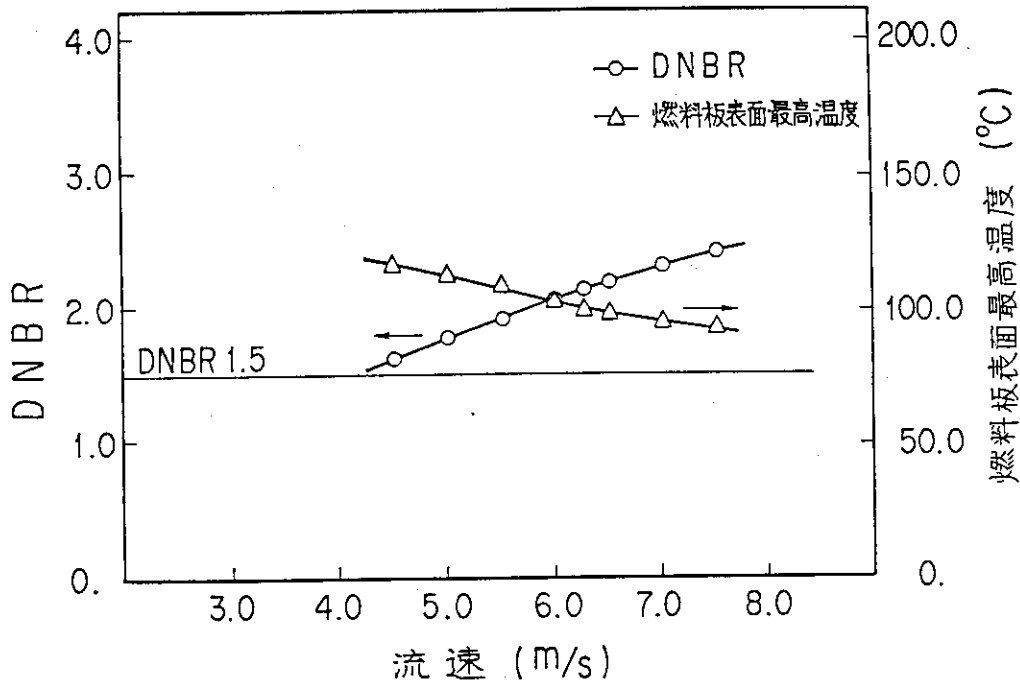


図 5.3.1 ケース 1 による冷却材流速と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係

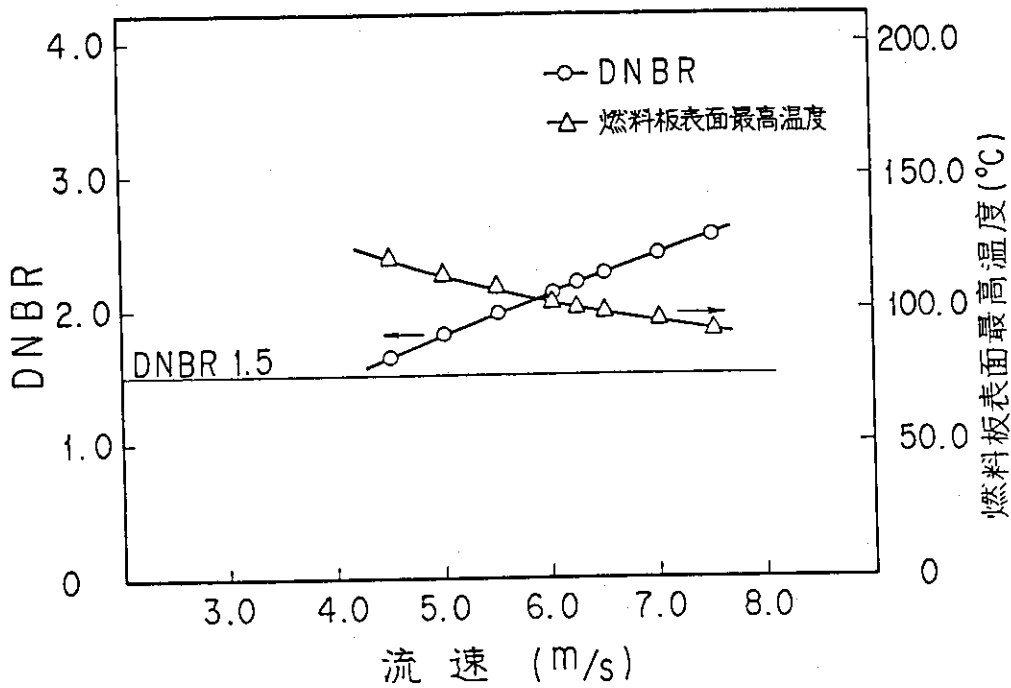


図 5.3.2 ケース 2 による冷却材流速と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係

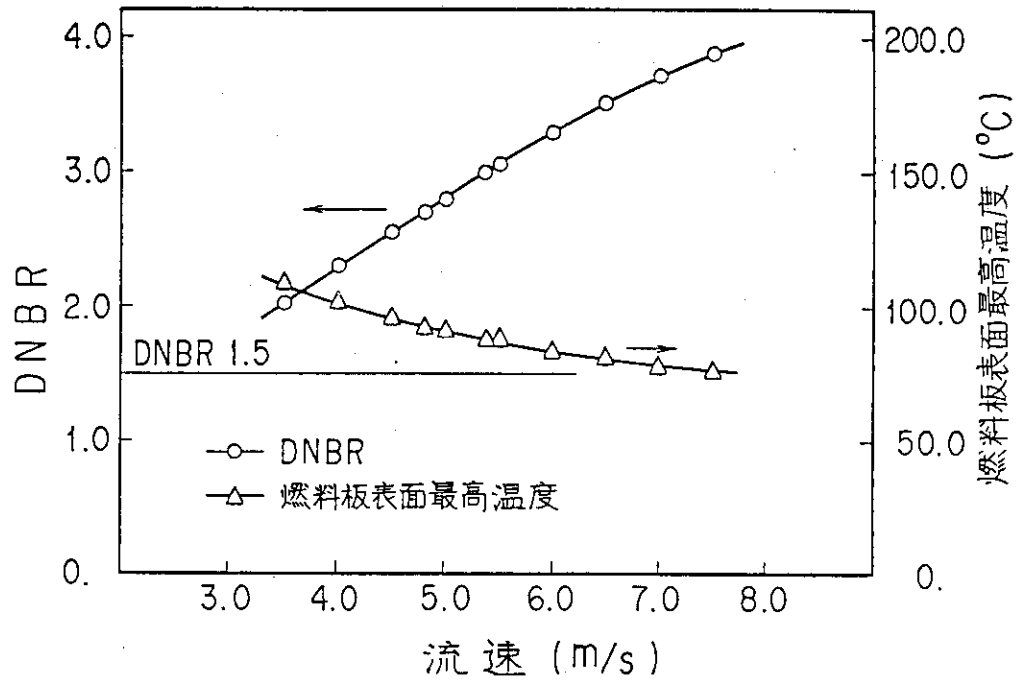


図 5. 3. 3 冷却材流速と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係
(フロー型燃料要素)

5.4 計算結果の検討

ケース1, ケース2の二通りの計算を行った結果, ケース1の方がケース2に比べて厳しめに評価していることが明らかになった。すなわち, 圧力分布計算では, 燃料板下部で約 0.15 kg/cm^2 ケース1の方が低く計算され, そのため, ケース2に比べて沸騰開始温度が低めに評価され, 冷却材温度, 燃料板表面温度との差が少なくなっている。ケース1の方が圧力が低く計算されているため, DNBR評価でも, 炉心入口サブクール度が小さくなりケース2に比べてDNBRは小さい値である。また, ケース1, ケース2ともに通常運転時およびその前後の冷却材流速において, DNBRが1.5以上であることが明確にされた。

ケース1は, 設計計算に用いた条件, すなわち炉心入口・出口での動圧を零とし, 炉心内の僅かな水頭差も考慮しない値を用いて計算を行い, ケース2は, ケース1で考慮していない炉心入口・出口での動圧, および炉心内の水頭差を考慮して計算を行ったが, その結果, 設計計算に用いた値で計算した方が安全側に評価された。すなわち, 設計値は沸騰開始条件およびDNB開始条件に対して, 十分な安全余裕を考慮した値である。

6. 流路閉塞時の熱水力計算

炉心部流路が異物で閉塞された場合、定常時に比べて閉塞流路およびその近傍の燃料温度が高くなることが想定される。そのため、熱水力計算を行い、圧力評価・DNBR評価を行う必要がある。

COOLODによる計算では、標準型燃料一要素において、基準流速を6.24 m/s, 6.00 m/s, 5.75 m/s としたときの閉塞率をパラメータとした炉心内圧力分布計算, DNBR評価を行う。パラメータとする閉塞率は、80%, 70%, 60%, 50%, 40%とし、これらと定常時の値を評価の対象とする。

6.1 炉心圧力分布計算

流路閉塞時は、定常時に比べて流動状態が変わるため、流動損失特性を調べ、それから圧力分布計算を行う。

6.1.1 流動損失特性

図 5.1.1 ~ 図 5.1.6 に示した様に、炉心および炉心周辺部の各領域で、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、図に示した様に番号を付す。

表 6.1.1 ~ 表 6.1.3 に、定常時の各基準流速における流動損失係数を示す。これを基にして、流路閉塞時の流速特性を調べる。

〔1〕 定常時の基準流速が6.24 m/s時の流速特性

基準流速6.24 m/s時の圧損 ΔP は、

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00691) \times \left(\frac{3.831}{6.24} \right)^2 + (0.5 + 3.806 + 0.16) + 0.00421 \times \left(\frac{3.791}{6.24} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + (0.07 + 0.39) \times \left(\frac{5.364}{6.24} \right)^2 \right\} \times \frac{6.24^2}{2 \times 9.8} \\ &= 9.92 \text{ m 水頭} \end{aligned}$$

これを基に閉塞時の基準流速を求める。

(1) 閉塞率80%時の基準流速

流速を v m/s, 流路面積を A m², 添字として流路閉塞部を₁₂, 閉塞部の上部を₁, 下部を₂ とすれば、

$$\begin{aligned} \left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 &= \left(\frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{v_{12}}{v_1} \right)^2 = \left(\frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{A_1}{A_{12}} \right)^2 \\ &= \left(\frac{3.831}{6.24} \cdot \frac{1.0}{0.2} \right)^2 = 9.432 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00691) \times \left(\frac{3.831}{6.24} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 9.432 + (3.806 + 0.16) \right. \\ &\quad \left. + 0.00421 \times \left(\frac{3.791}{6.24} \right)^2 + (0.0699 + 0.39) \times \left(\frac{5.364}{6.24} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.952 v^2 \\ \therefore v &= 3.23 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(2) 閉塞率70%時の基準流速

閉塞率80%時と同様に求めれば、

$$\begin{aligned} \left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 &= \left(\frac{3.831}{6.24} \cdot \frac{1.0}{0.3} \right)^2 = 4.190 \\ \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00691) \times \left(\frac{3.831}{6.24} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 4.190 + (3.806 + 0.16) \right. \\ &\quad \left. + 0.00421 \times \left(\frac{3.791}{6.24} \right)^2 + (0.07 + 0.39) \times \left(\frac{5.364}{6.24} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.550 v^2 \\ \therefore v &= 4.25 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(3) 閉塞率60%時の基準流速

$$\begin{aligned} \left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 &= \left(\frac{3.831}{6.24} \cdot \frac{1.0}{0.4} \right)^2 = 2.358 \\ \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00691) \times \left(\frac{3.831}{6.24} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 2.358 + (3.806 + 0.16) \right. \\ &\quad \left. + 0.00421 \times \left(\frac{3.791}{6.24} \right)^2 + (0.07 + 0.39) \times \left(\frac{5.364}{6.24} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.410 v^2 \\ \therefore v &= 4.92 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(4) 閉塞率50%時の基準流速

$$\begin{aligned} \left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 &= \left(\frac{3.831}{6.24} \cdot \frac{1.0}{0.5} \right)^2 = 1.509 \\ \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00691) \times \left(\frac{3.831}{6.24} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 1.509 + (3.806 + 0.16) \right. \\ &\quad \left. + 0.00421 \times \left(\frac{3.791}{6.24} \right)^2 + (0.07 + 0.39) \times \left(\frac{5.364}{6.24} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.345 v^2 \\ \therefore v &= 5.36 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(5) 閉塞率40%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 = \left(\frac{3.831}{6.24} \cdot \frac{1.0}{0.6} \right)^2 = 1.048$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00691) \times \left(\frac{3.831}{6.24} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 1.048 + (3.806 + 0.16) \right. \\ &\quad \left. + 0.00421 \times \left(\frac{3.791}{6.24} \right)^2 + (0.07 + 0.39) \times \left(\frac{5.364}{6.24} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.310 v^2 \\ \therefore v &= 5.66 \text{ m/s} \end{aligned}$$

〔2〕 定常時の基準流速が6.00m/s時の流速特性

基準流速6.00m/s時の圧損 ΔP は,

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00661) \times \left(\frac{3.685}{6.00} \right)^2 + (0.5 + 4.016 + 0.154) + 0.00425 \times \left(\frac{3.647}{6.00} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + (0.0676 + 0.39) \times \left(\frac{5.161}{6.00} \right)^2 \right\} \times \frac{6.00^2}{2 \times 9.8} \\ &= 9.55 \text{ m 水頭} \end{aligned}$$

これより、閉塞時の基準流速を求める。

(1) 閉塞率80%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 = \left(\frac{3.685}{6.00} \cdot \frac{1.0}{0.2} \right)^2 = 9.430$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00661) \times \left(\frac{3.685}{6.00} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 9.430 + (4.016 + 0.154) \right. \\ &\quad \left. + 0.00425 \times \left(\frac{3.647}{6.00} \right)^2 + (0.0676 + 0.39) \times \left(\frac{5.161}{6.00} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.962 v^2 \\ \therefore v &= 3.15 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(2) 閉塞率70%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 = \left(\frac{3.685}{6.00} \cdot \frac{1.0}{0.3} \right)^2 = 4.190$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ (0.5 + 0.00661) \times \left(\frac{3.685}{6.00} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 4.190 + (4.016 + 0.154) \right. \\ &\quad \left. + 0.00425 \times \left(\frac{3.647}{6.00} \right)^2 + (0.0676 + 0.39) \times \left(\frac{5.161}{6.00} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ &= 0.561 v^2 \\ \therefore v &= 4.13 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(3) 閉塞率60%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 = \left(\frac{3.685}{6.00} \cdot \frac{1.0}{0.4} \right)^2 = 2.358$$

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.00661) \times \left(\frac{3.685}{6.00} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 2.358 + (4.016 + 0.154) \right.$$

$$+ 0.00425 \times \left(\frac{3.645}{6.00} \right)^2 + (0.0676 + 0.39) \times \left(\frac{5.161}{6.00} \right)^2 \left\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8}$$

$$= 0.420 v^2$$

$$\therefore v = 4.77 \text{ m/s}$$

(4) 閉塞率50%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 = \left(\frac{3.685}{6.00} \cdot \frac{1.0}{0.5} \right)^2 = 1.509$$

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.00661) \times \left(\frac{3.685}{6.00} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 1.509 + (4.016 + 0.154) \right.$$

$$\left. + 0.00425 \times \left(\frac{3.647}{6.00} \right)^2 + (0.0676 + 0.39) \times \left(\frac{5.161}{6.00} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8}$$

$$= 0.355 v^2$$

$$\therefore v = 5.19 \text{ m/s}$$

(5) 閉塞率40%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 = \left(\frac{3.685}{6.00} \cdot \frac{1.0}{0.6} \right)^2 = 1.049$$

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.00661) \times \left(\frac{3.685}{6.00} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 1.049 + (4.016 + 0.154) \right.$$

$$\left. + 0.00425 \times \left(\frac{3.647}{6.00} \right)^2 + (0.0676 + 0.39) \times \left(\frac{5.161}{6.00} \right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8}$$

$$= 0.320 v^2$$

$$\therefore v = 5.46 \text{ m/s}$$

[3] 定常時の基準流速が5.75 m/s時の流速特性

基準流速5.75 m/s時の圧損 ΔP は,

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.00686) \times \left(\frac{3.532}{5.75} \right)^2 + (0.5 + 4.05 + 0.154) + 0.00428 \times \left(\frac{3.495}{5.75} \right)^2 \right.$$

$$\left. + (0.0687 + 0.39) \times \left(\frac{4.946}{5.75} \right)^2 \right\} \times \frac{5.75^2}{2 \times 9.8}$$

$$= 8.83 \text{ m 水頭}$$

これを基にして閉塞時の基準流速を求める。

(1) 閉塞率80%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2} \right)^2 = \left(\frac{3.532}{5.75} \cdot \frac{1.0}{0.2} \right)^2 = 9.431$$

$$\Delta P = \left\{ (0.5 + 0.00686) \times \left(\frac{3.532}{5.75} \right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 9.431 + (4.05 + 0.154) \right.$$

$$\left. + 0.00428 \times \left(\frac{3.495}{5.75} \right)^2 + (0.0687 + 0.39) \times \left(\frac{4.946}{5.75} \right)^2 \right\} \times \frac{v_2}{2 \times 9.8}$$

$$= 0.963 v^2$$

$$\therefore v = 3.03 \text{ m/s}$$

(2) 閉塞率70%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2}\right)^2 = \left(\frac{3.532}{5.75} \cdot \frac{1.0}{0.3}\right)^2 = 4.198$$

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.00686) \times \left(\frac{3.532}{5.75}\right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 4.198 + (4.05 + 0.154) \right. \\ & \left. + 0.00428 \times \left(\frac{3.495}{5.75}\right)^2 + (0.0687 + 0.39) \times \left(\frac{4.946}{5.75}\right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ = & 0.563 v^2 \end{aligned}$$

$$\therefore v = 3.96 \text{ m/s}$$

(3) 閉塞率60%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2}\right)^2 = \left(\frac{3.532}{5.75} \cdot \frac{1.0}{0.4}\right)^2 = 2.359$$

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.00686) \times \left(\frac{3.532}{5.75}\right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 2.359 + (4.05 + 0.154) \right. \\ & \left. + 0.00428 \times \left(\frac{3.495}{5.75}\right)^2 + (0.0687 + 0.39) \times \left(\frac{4.946}{5.75}\right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ = & 0.422 v^2 \end{aligned}$$

$$\therefore v = 4.57 \text{ m/s}$$

(4) 閉塞率50%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2}\right)^2 = \left(\frac{3.532}{5.75} \cdot \frac{1.0}{0.5}\right)^2 = 1.509$$

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.00686) \times \left(\frac{3.532}{5.75}\right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 1.509 + (4.05 + 0.154) \right. \\ & \left. + 0.00428 \times \left(\frac{3.495}{5.75}\right)^2 + (0.0687 + 0.39) \times \left(\frac{4.946}{5.75}\right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ = & 0.357 v^2 \end{aligned}$$

$$\therefore v = 4.97 \text{ m/s}$$

(5) 閉塞率40%時の基準流速

$$\left(\frac{v_{12}}{v_2}\right)^2 = \left(\frac{3.532}{5.75} \cdot \frac{1.0}{0.6}\right)^2 = 1.049$$

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.5 + 0.00686) \times \left(\frac{3.532}{5.75}\right)^2 + (0.5 + 1.0) \times 1.049 + (4.05 + 0.154) \right. \\ & \left. + 0.00428 \times \left(\frac{3.495}{5.75}\right)^2 + (0.0687 + 0.39) \times \left(\frac{4.946}{5.75}\right)^2 \right\} \times \frac{v^2}{2 \times 9.8} \\ = & 0.322 v^2 \end{aligned}$$

$$\therefore v = 5.24 \text{ m/s}$$

以上の結果を基に、COOLODで炉心内圧力分布を計算する。

表 6.1.1 定常時の基準流速6.24m/sでの各要素領域
の基準流速と流動損失係数

名称 領域	標準型 燃料要素	フォロー型 燃料要素	燃料側板間 ギャップ	コアバイパス	Be 反射体	照 射 筒
1	0.5	0.5	0.39	0.5	0.5	0.5
	3.831	3.140	1.50	0.3133	0.787	6.0
2	0.00691	0.033	18.5	0.03	0.0133	4.12
	3.831	3.140	1.50	0.3133	0.787	6.0
3	0.5	0.18	0.36	0.41	0.5	0.735
	6.24	4.89	5.75	3.50	3.75	6.0
4	3.806	0.201	3.934	5.37	6.835	0.0149
	6.24	4.89	5.75	3.50	3.75	0.862
5	0.16	0.1	1.0	0.33	0.624	0.133
	6.24	5.60	5.75	10.792	3.75	0.862
6	0.00421	3.683		0.2445	0.037	0.07
	3.791	5.60		10.792	0.789	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				

上段：流動損失係数

下段：流速(m/s)

表 6.1.2 定常時の基準流速 6.00 m/s での各要素領域の
基準流速と流動損失係数

名称 領域	標準型 燃料要素	フォロー型 燃料要素	燃料側板間 ギャップ	コアバイパス	Be 反射体	照 射 筒
1	0.5	0.5	0.39	0.5	0.5	0.5
	3.685	3.14	1.50	0.3133	0.787	6.0
2	0.00661	0.033	18.5	0.03	0.0133	4.12
	3.685	3.14	1.5	0.3133	0.787	6.0
3	0.5	0.18	0.36	0.41	0.5	0.735
	6.00	4.89	5.75	3.50	3.75	6.0
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	10.792	3.75	0.862
6	0.00425	3.683		0.2445	0.037	0.07
	3.647	5.60		10.792	0.789	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				

上段：流動損失係数

下段：流速 (m/s)

表 6.1.3 定常時の基準流速5.75m/sでの各要素領域の
基準流速と流動損失係数

名称 領域	標準型 燃料要素	フォロー型 燃料要素	燃料側板間 ギャップ	コアバイパス	Be反射体	照射筒
1	0.5	0.5	0.39	0.5	0.5	0.5
	3.532	3.140	1.50	0.3133	0.787	6.0
2	0.00686	0.033	18.5	0.03	0.0133	4.12
	3.532	3.140	1.50	0.3133	0.787	6.0
3	0.5	0.18	0.36	0.41	0.5	0.735
	5.75	4.89	5.75	3.50	3.75	6.0
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	10.792	3.75	0.862
6	0.00428	3.683		0.2445	0.037	0.07
	3.495	5.60		10.792	0.789	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				

上段：流動損失係数

下段：流速(m/s)

6.1.2 圧力分布計算

前項までの流動損失特性を基にして、炉心内の軸方向圧力分布を求める。

基準流速を6.24m/s, 6.00m/s, 5.75m/sとしたときのケース1における炉心内圧力分布を、表6.1.4～表6.1.6に示す。図6.1.1～図6.1.3に、それぞれを図示する。

流路閉塞時では、定常時に比べて燃料板入口での圧力損失が、閉塞率が大きくなるにしたがって大きくなる。COOLODの結果は、それをよく表わしている。

表6.1.7～表6.1.9に、ケース2による炉心内圧力分布を示し、図6.1.4～図6.1.6にそれぞれを図示する。

定常炉心熱水力計算でも述べた様に、ケース2の方が水頭、炉心出入口の動圧を考慮している分だけ圧力が高く計算されている。

基準流速6.24m/sで閉塞率80%の燃料板下部圧力は、ケース1では0.52kg/cm²、ケース2で0.66kg/cm²である。

表 6.1.4 ケース 1 における流路閉塞時の炉心内圧力分布
(定常時基準流速 6.24 m/s 時)

項目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
流 速 (m/s)	6.24	5.66	5.36	4.92	4.25	3.23
炉心入口圧力(kg/cm ²)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
燃料板上部圧力(kg/cm ²)	1.21	1.10	1.05	0.97	0.87	0.74
燃料板下部圧力(kg/cm ²)	0.48	0.50	0.50	0.50	0.51	0.52
格子板出口圧力(kg/cm ²)	0.61	0.60	0.59	0.58	0.56	0.55

表 6.1.5 ケース 1 における流路閉塞時の炉心内圧力分布
(定常時基準流速 6.00 m/s 時)

項目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
流 速 (m/s)	6.00	5.46	5.19	4.77	4.13	3.15
炉心入口圧力(kg/cm ²)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
燃料板上部圧力(kg/cm ²)	1.23	1.13	1.08	1.01	0.90	0.78
燃料板下部圧力(kg/cm ²)	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.57
格子板出口圧力(kg/cm ²)	0.67	0.66	0.65	0.63	0.62	0.60

表 6.1.6 ケース 1 における流路閉塞時の炉心内圧力分布
(定常時基準流速 5.75 m/s 時)

項目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
流 速 (m/s)	5.75	5.24	4.97	4.57	3.96	3.03
炉心入口圧力(kg/cm ²)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
燃料板上部圧力(kg/cm ²)	1.26	1.17	1.12	1.05	0.95	0.84
燃料板下部圧力(kg/cm ²)	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
格子板出口圧力(kg/cm ²)	0.74	0.73	0.72	0.71	0.69	0.67

表 6.1.7 ケース 2 における流路閉塞時の炉心内圧力分布
(定常時基準流速 6.24 m/s 時)

項目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
流 速 (m / s)	6.24	5.66	5.36	4.92	4.25	3.23
炉心入口圧力 (kg / cm ²)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
燃料板上部圧力 (kg / cm ²)	1.29	1.18	1.12	1.04	0.94	0.81
燃料板下部圧力 (kg / cm ²)	0.63	0.64	0.64	0.64	0.65	0.66
格子板出口圧力 (kg / cm ²)	0.71	0.70	0.69	0.68	0.68	0.67

表 6.1.8 ケース 2 における流路閉塞時の炉心内圧力分布
(定常時基準流速 6.00 m/s 時)

項目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
流 速 (m / s)	6.00	5.46	5.19	4.77	4.13	3.15
炉心入口圧力 (kg / cm ²)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
燃料板上部圧力 (kg / cm ²)	1.31	1.20	1.15	1.07	0.97	0.85
燃料板下部圧力 (kg / cm ²)	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.71
格子板出口圧力 (kg / cm ²)	0.78	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72

表 6.1.9 ケース 2 における流路閉塞時の炉心内圧力分布
(定常時基準流速 5.75 m/s 時)

項目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
流 速 (m / s)	5.75	5.24	4.97	4.57	3.96	3.03
炉心入口圧力 (kg / cm ²)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
燃料板上部圧力 (kg / cm ²)	1.33	1.23	1.18	1.11	1.02	0.90
燃料板下部圧力 (kg / cm ²)	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.78
格子板出口圧力 (kg / cm ²)	0.85	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79

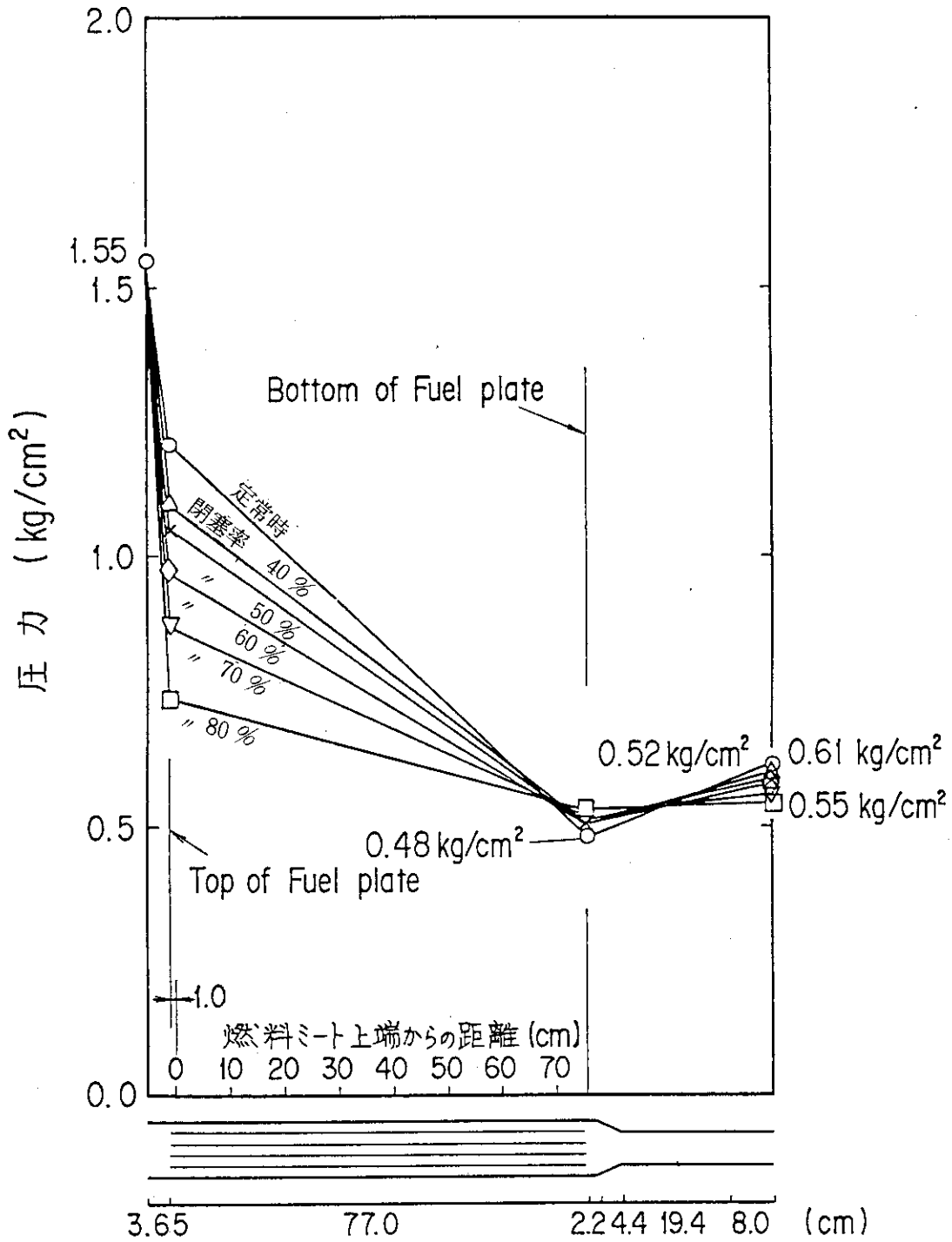


図 6. 1. 1 ケース 1 における流路閉塞時の炉心内軸方向圧力分布
(定常時基準流速 6.24 m/s 時)

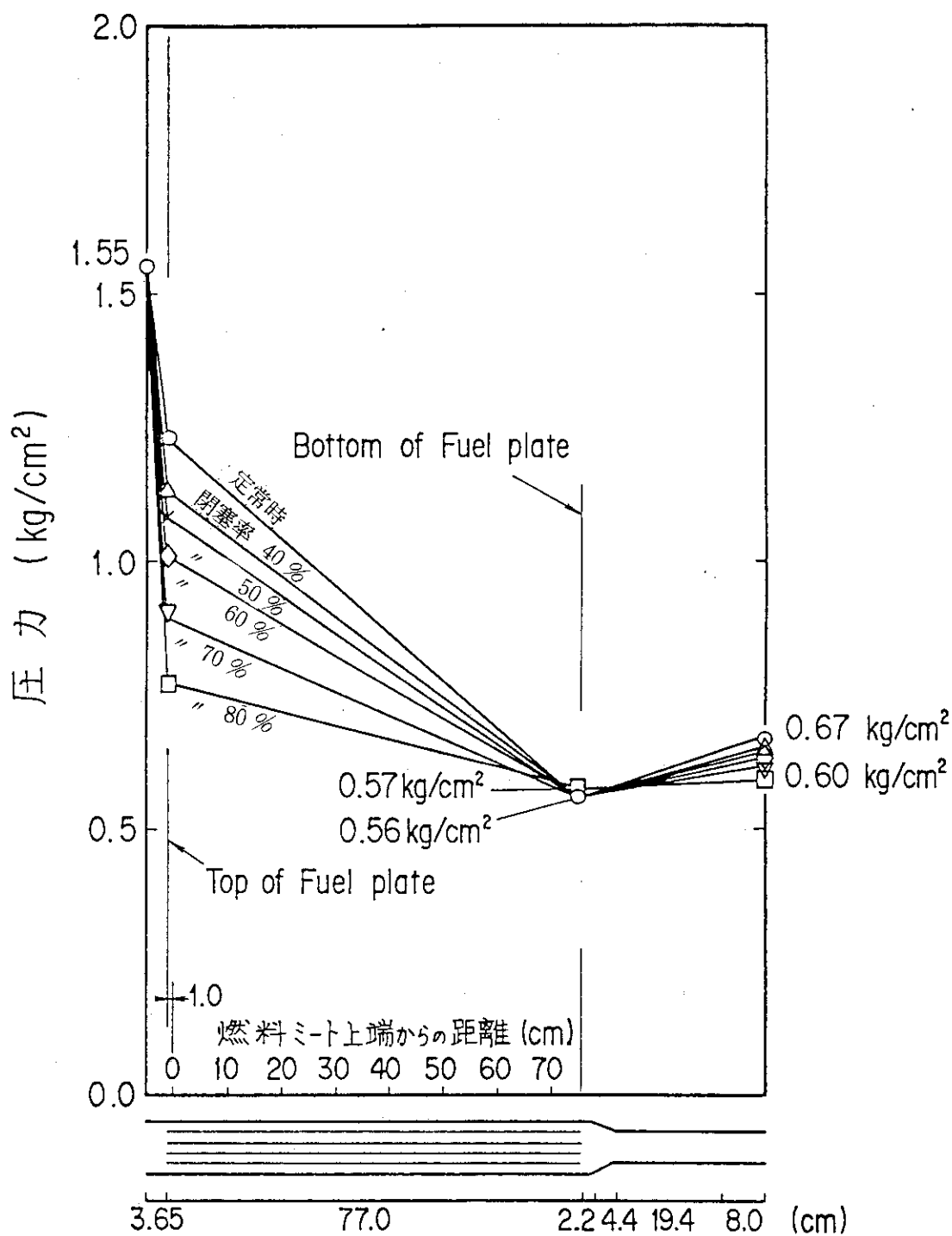


図 6.1.2 ケース 1 における流路閉塞時の炉心内軸方向圧力分布
(定常時基準流速 6.00 m/s 時)

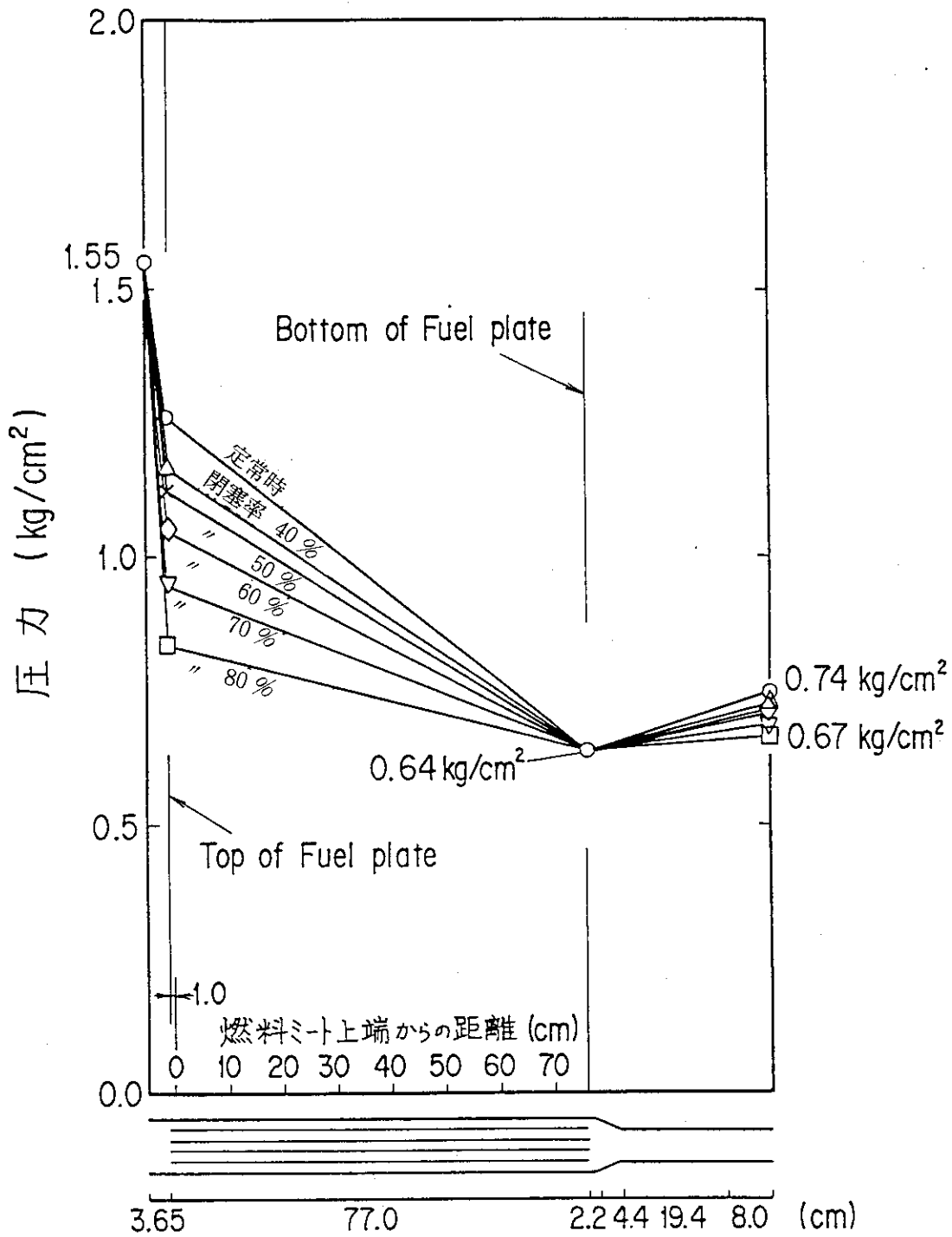


図 6.1.3 ケース 1 における流路閉塞時の炉心内軸方向圧力分布 (定常時基準流速 5.75 m/s)

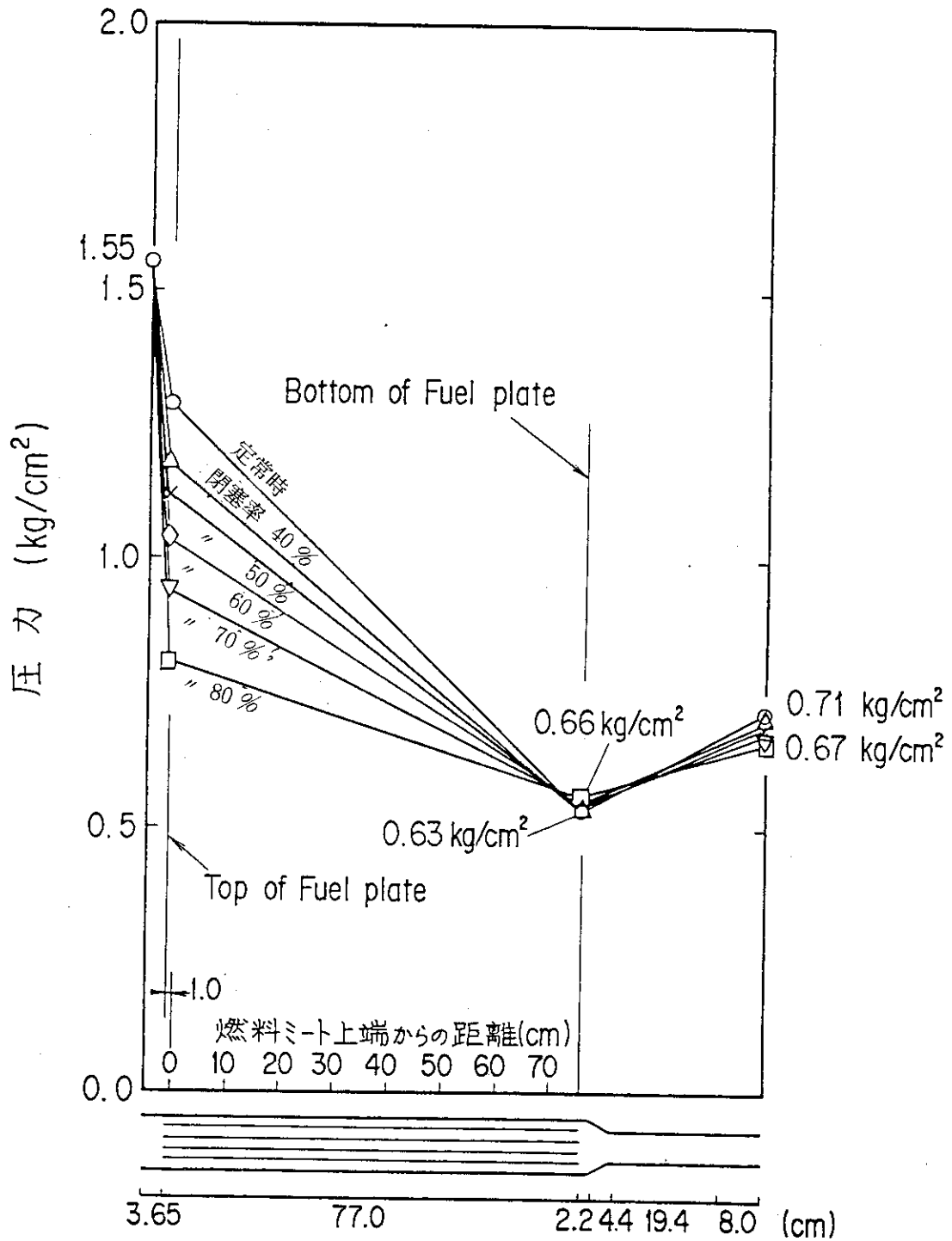


図 6.1.4 ケース 2 における流路閉塞時の炉心内軸方向圧力分布
(定常時基準流速 6.24 m/s 時)

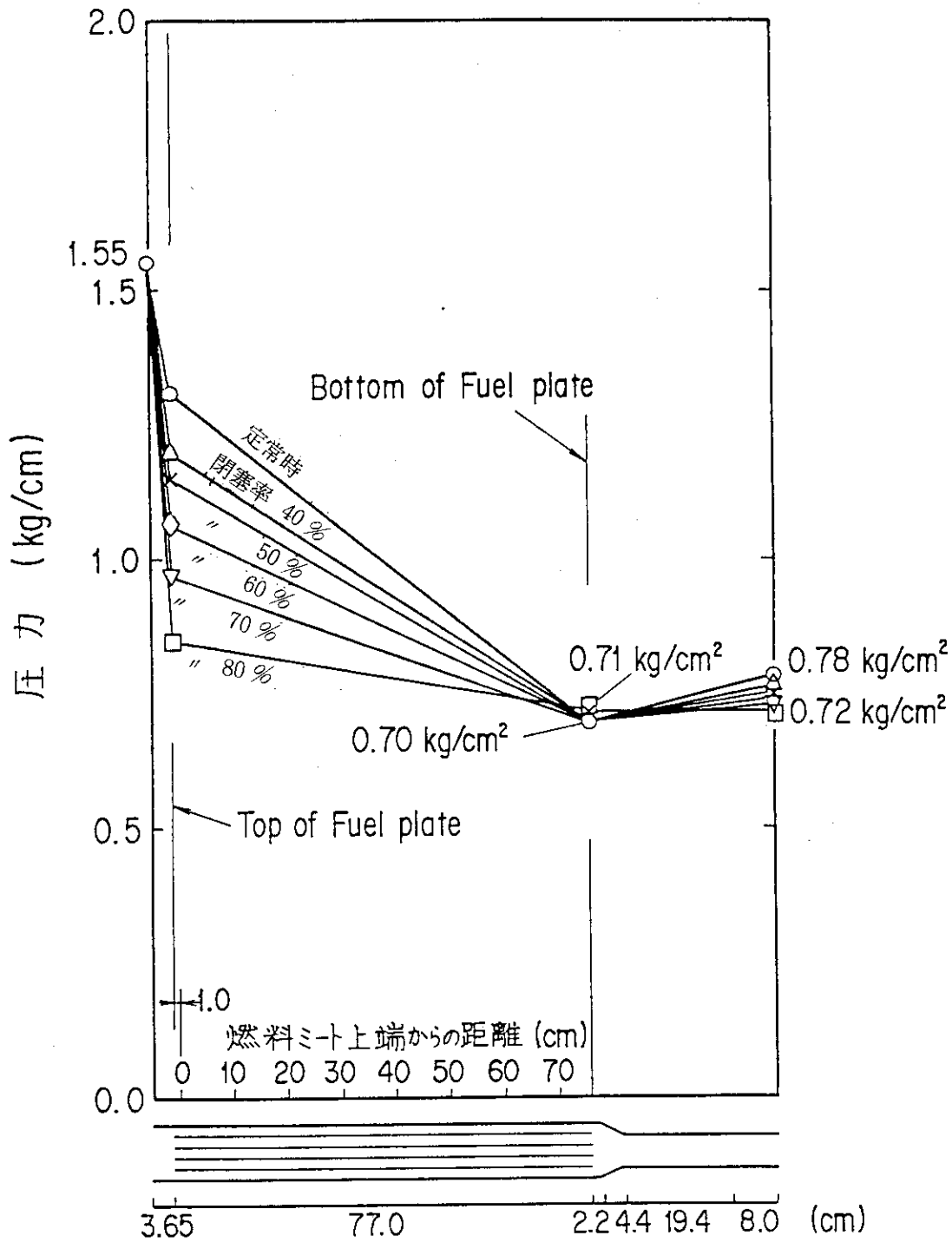


図 6.1.5 ケース 2 における流路閉塞時の炉心内軸方向圧力分布
(定常時基準流速 6.00 m/s 時)

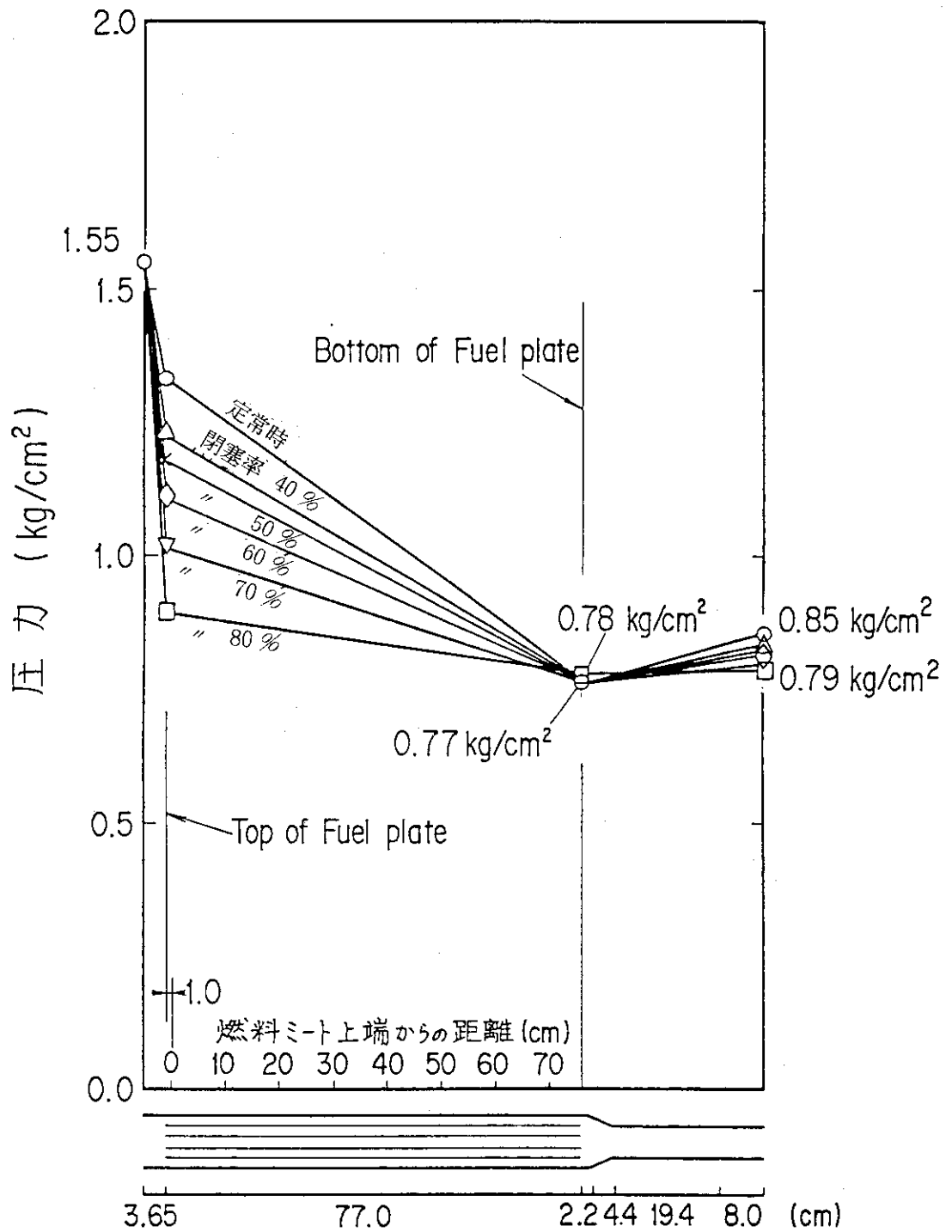


図 6.1.6 ケース 2 における流路閉塞時の炉心内軸方向圧力分布 (定常時基準流速 5.75 m/s 時)

6.2 DNBR 評価

前節の炉心圧力分布計算を基に、DNBR 評価を行う。

定常炉心熱水力計算の DNBR 評価で用いた、(5.3.4) 式、(5.3.5) 式および (5.3.6) 式により計算して求める。

ケース 1 における流路閉塞時の DNBR と温度との関係を、表 6.2.1 ~ 表 6.2.3 に示す。それぞれを図示したものを図 6.2.1 ~ 図 6.2.3 に示す。

基準流速が小さくなるか、または閉塞率が大きくなった場合は冷却能力が低下し、燃料板表面温度が下がる。また、炉心入口サブクール度が低下するので、DNBR は小さくなる。

表 6.2.4 ~ 表 6.2.6 に、ケース 2 における流路閉塞時の DNBR と温度との関係を示す。図 6.2.4 ~ 図 6.2.6 に、それぞれを図示する。ケース 2 は、ケース 1 に比べて各場所での圧力が高めに評価され、その分炉心入口サブクール度が高くなり、DNBR が大きくなる。

ケース 1、ケース 2 とともに、閉塞率が約 60% 以下では DNBR は 1.5 以上であり、DNB 開始条件に対して十分に余裕がある。

表 6.2.1 ケース 1 における流路閉塞時の DNBR と温度
(定常時基準流速 6.24 m/s 時)

閉塞率	0 % (定常)	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
項目						
流速 (m/s)	6.24	5.66	5.36	4.92	4.25	3.23
燃料板表面最高温度 (°C)	101.3	106.3	107.4	107.4	108.3	110.8
DNBR	2.14	1.86	1.73	1.53	1.26	0.88

表 6.2.2 ケース 1 における流路閉塞時の DNBR
(定常時基準流速 6.00 m/s 時)

閉塞率	0 % (定常)	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
項目						
流速 (m/s)	6.00	5.46	5.19	4.77	4.13	3.15
燃料板表面最高温度 (°C)	103.3	108.2	109.0	108.6	110.2	112.7
DNBR	2.07	1.82	1.69	1.51	1.24	0.88

表 6.2.3 ケース 1 における流路閉塞時の DNBR
(定常時基準流速 5.75 m/s 時)

項 目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40%	50%	60%	70%	80%
流 速 (m/s)	5.75	5.24	4.97	4.57	3.96	3.03
燃料板表面最高温度 (°C)	105.4	110.1	110.4	110.7	112.7	115.3
DNBR	2.00	1.76	1.64	1.47	1.22	0.88

表 6.2.4 ケース 2 における流路閉塞時の DNBR
(定常時基準流速 6.24 m/s 時)

項 目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40%	50%	60%	70%	80%
流 速 (m/s)	6.24	5.66	5.36	4.92	4.25	3.23
燃料板表面最高温度 (°C)	101.2	106.3	109.3	110.8	111.5	114.8
DNBR	2.20	1.91	1.78	1.58	1.30	0.92

表 6.2.5 ケース 2 における流路閉塞時の DNBR
(定常時基準流速 6.00 m/s 時)

項 目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40%	50%	60%	70%	80%
流 速 (m/s)	6.00	5.46	5.19	4.77	4.13	3.15
燃料板表面最高温度 (°C)	103.2	108.2	111.1	111.7	113.1	116.3
DNBR	2.12	1.86	1.74	1.55	1.28	0.92

表 6.2.6 ケース 2 における流路閉塞時の DNBR
(定常時基準流速 5.75 m/s 時)

項 目 \ 閉塞率	0 % (定常)	40%	50%	60%	70%	80%
流 速 (m/s)	5.75	5.24	4.97	4.57	3.96	3.03
燃料板表面最高温度 (°C)	105.4	110.6	113.3	113.6	115.3	118.5
DNBR	2.05	1.81	1.68	1.51	1.25	0.90

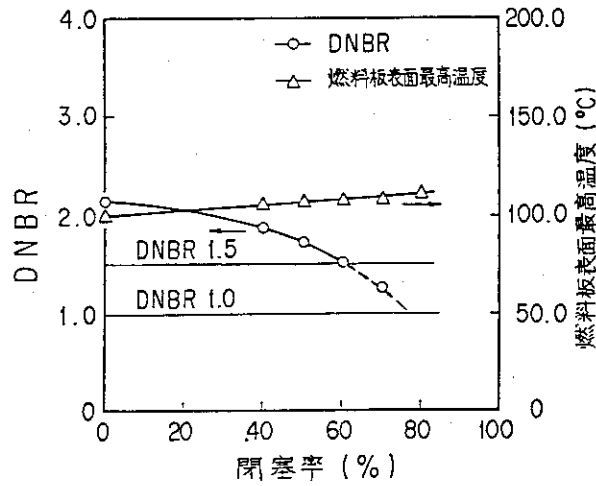


図 6.2.1 ケース 1 における閉塞率と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係
(定常時基準流速 6.24 m/s 時)

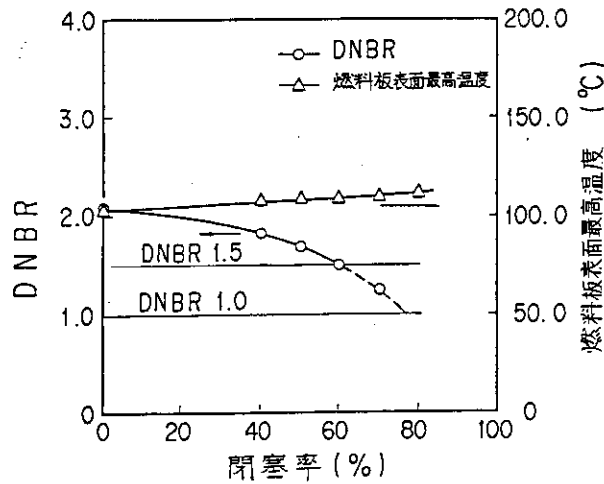


図 6.2.2 ケース 1 における閉塞率と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係
(定常時基準流速 6.00 m/s 時)

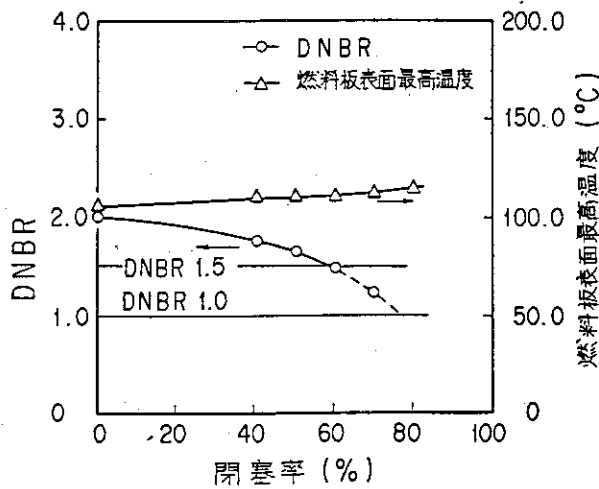


図 6.2.3 ケース 1 における閉塞率と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係
(定常時基準流速 5.75 m/s 時)

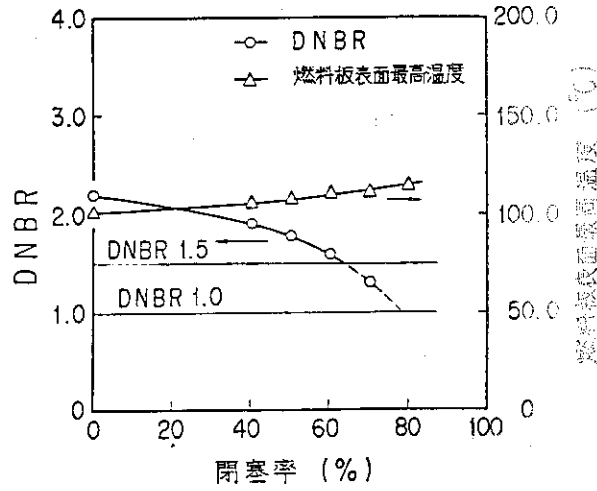


図 6.2.4 ケース 2 における閉塞率と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係
(定常時基準流速 6.24 m/s 時)

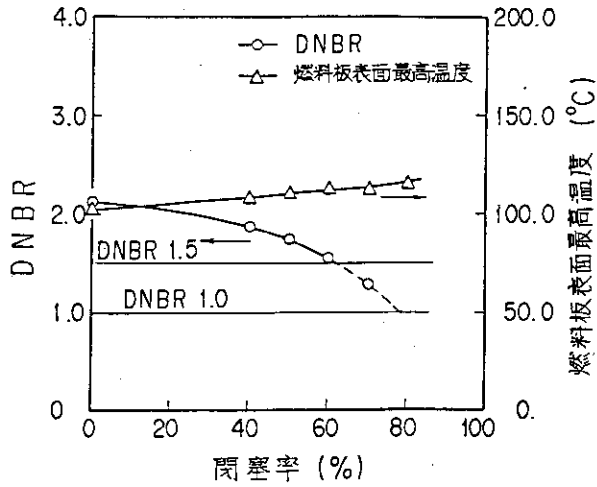


図 6.2.5 ケース 2 における閉塞率と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係
(定常時基準流速 6.00 m/s 時)

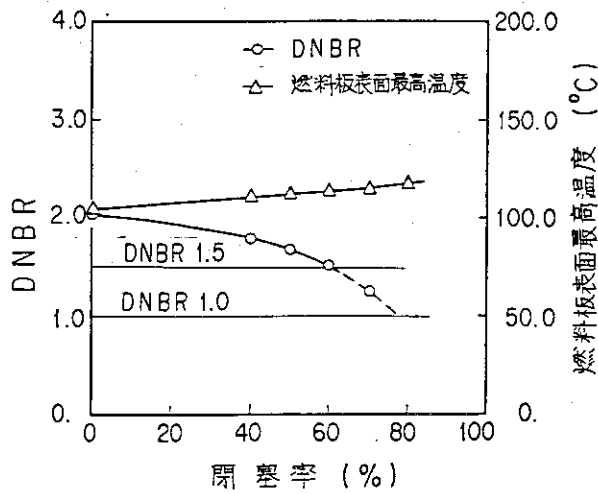


図 6.2.6 ケース 2 における閉塞率と DNBR, 燃料板表面最高温度との関係
(定常時基準流速 5.75 m/s 時)

6.3 計算結果の検討

流路閉塞時では、定常時と比較して炉心入口での圧損が、閉塞率とともに大きくなる。定常時に比べ流路閉塞時では、閉塞率が大きくなると炉心入口での圧力が低下し、そのため、炉心入口サブクール度が低くなり、DNBRが小さくなる。

定常計算で述べたように、ケース1の方がケース2に比べて圧力が低めに計算されているため、この流路閉塞時の圧力分布計算でもケース1の方がケース2に比べて圧力が低めに評価されている。そのため、ケース1の方がケース2に比べて、炉心入口サブクール度が低くなりDNBRは小さい値となる。

ケース1、ケース2ともに、閉塞率が約60%以下ではDNBRは1.5を上回っており、約80%でもDNBRは1.0である。

7. 結 言

JRR-3 改造炉では、COOLOD コードで定常計算を行い、それを初期条件として過渡解析を行った。したがって、COOLOD コードによる計算では、設計値に十分な安全余裕があることを評価・検討しておくことが必要である。

そこで、種々の条件でパラメータ計算を行い安全余裕を定量的に評価した。

COOLOD コードでの計算は、熱水力設計値に対し十分な安全余裕があり、設計条件を満足する結果が得られた。したがって、これを初期条件として他の熱水力計算、すなわち、異常な過渡変化および事故解析等を行うことは十分妥当であると考えられる。

また、安全審査に資するものである。

謝 辞

本報告書は、桜井裕研究炉管理部長および佐藤一男研究炉管理部次長を始めとして、改造に携わる方々の御協力によるものであり、ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- (1) 数土幸夫, 安藤弘栄, 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
- (2) 渡辺終吉: 板状燃料を使用する研究炉の熱水力計算コード-COOLOD, JAERI-M 84-162, 1984年9月
- (3) 鶴田晴通, 市川博喜, 岩崎淳一: JRR-3 改造炉の核設計, JAERI-M 84-099, 1984年5月
- (4) F. W. Dittus and L. M. K. Boelter: Univ. Calif. Pubs. Eng., 2, 443, 1930
- (5) 数土幸夫, 井川博雅, 平野雅司, 大西信秋: JRR-3 改造炉熱水力解析用熱伝達相関式の検討, JAERI-M 84-066, 1984年3月
- (6) 数土幸夫, 井川博雅, 篠津和夫, 安藤弘栄: JRR-3 改造炉用炉心流動実験及び炉心流動特性評価: JAERI-M 84-119, 1984年6月

7. 結 言

JRR-3 改造炉では、COOLOD コードで定常計算を行い、それを初期条件として過渡解析を行った。したがって、COOLOD コードによる計算では、設計値に十分な安全余裕があることを評価・検討しておくことが必要である。

そこで、種々の条件でパラメータ計算を行い安全余裕を定量的に評価した。

COOLOD コードでの計算は、熱水力設計値に対し十分な安全余裕があり、設計条件を満足する結果が得られた。したがって、これを初期条件として他の熱水力計算、すなわち、異常な過渡変化および事故解析等を行うことは十分妥当であると考えられる。

また、安全審査に資するものである。

謝 辞

本報告書は、桜井裕研究炉管理部長および佐藤一男研究炉管理部次長を始めとして、改造に携わる方々の御協力によるものであり、ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- (1) 数土幸夫, 安藤弘栄, 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
- (2) 渡辺終吉: 板状燃料を使用する研究炉の熱水力計算コード-COOLOD, JAERI-M 84-162, 1984年9月
- (3) 鶴田晴通, 市川博喜, 岩崎淳一: JRR-3 改造炉の核設計, JAERI-M 84-099, 1984年5月
- (4) F. W. Dittus and L. M. K. Boelter: Univ. Calif. Pubs. Eng., 2, 443, 1930
- (5) 数土幸夫, 井川博雅, 平野雅司, 大西信秋: JRR-3 改造炉熱水力解析用熱伝達相関式の検討, JAERI-M 84-066, 1984年3月
- (6) 数土幸夫, 井川博雅, 篠津和夫, 安藤弘栄: JRR-3 改造炉用炉心流動実験及び炉心流動特性評価: JAERI-M 84-119, 1984年6月

7. 結 言

JRR-3 改造炉では、COOLOD コードで定常計算を行い、それを初期条件として過渡解析を行った。したがって、COOLOD コードによる計算では、設計値に十分な安全余裕があることを評価・検討しておくことが必要である。

そこで、種々の条件でパラメータ計算を行い安全余裕を定量的に評価した。

COOLOD コードでの計算は、熱水力設計値に対し十分な安全余裕があり、設計条件を満足する結果が得られた。したがって、これを初期条件として他の熱水力計算、すなわち、異常な過渡変化および事故解析等を行うことは十分妥当であると考えられる。

また、安全審査に資するものである。

謝 辞

本報告書は、桜井裕研究炉管理部長および佐藤一男研究炉管理部次長を始めとして、改造に携わる方々の御協力によるものであり、ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- (1) 数土幸夫, 安藤弘栄, 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
- (2) 渡辺終吉: 板状燃料を使用する研究炉の熱水力計算コード-COOLOD, JAERI-M 84-162, 1984年9月
- (3) 鶴田晴通, 市川博喜, 岩崎淳一: JRR-3 改造炉の核設計, JAERI-M 84-099, 1984年5月
- (4) F. W. Dittus and L. M. K. Boelter: Univ. Calif. Pubs. Eng., 2, 443, 1930
- (5) 数土幸夫, 井川博雅, 平野雅司, 大西信秋: JRR-3 改造炉熱水力解析用熱伝達相関式の検討, JAERI-M 84-066, 1984年3月
- (6) 数土幸夫, 井川博雅, 篠津和夫, 安藤弘栄: JRR-3 改造炉用炉心流動実験及び炉心流動特性評価: JAERI-M 84-119, 1984年6月