

JAERI-Tech
97-043



JRR-3シリサイド燃料炉心における
炉心構造物の設計差圧及び設計流速

1997年9月

神永雅紀・村山洋二・和田 茂・木名瀬政美

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開している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力公済会資料センター（〒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。

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 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 刷 (株)高野高速印刷

JRR-3 シリサイド燃料炉心における炉心構造物の設計差圧及び設計流速

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

神永 雅紀・村山 洋二・和田 茂・木名瀬政美

(1997年8月5日受理)

JRR-3は、低濃縮板状燃料を使用した軽水減速・冷却、ベリリウム及び重水反射体付プールの型炉であり、熱出力は20MWである。JRR-3では、現在、シリサイド燃料化計画が進められており、燃料としては現在のウランアルミニウム (UAl_x-Al) 分散型燃料 (アルミナイド燃料) に代わり、ウランシリコンアルミニウム (U_3Si_2-Al) 分散型燃料 (シリサイド燃料) を使用する予定である。

JRR-3シリサイド燃料炉心では、シリサイド燃料化に伴って標準型燃料要素及びフォロー型燃料要素の燃料板枚数、燃料板厚さ、冷却材流路ギャップを変更する。このため、これまでのアルミナイド燃料炉心と比べ炉心流量配分特性が異なり、燃料要素以外の炉心構造物の設計計算に用いている設計差圧及び設計流速を見直す必要がある。本報告書は、JRR-3シリサイド炉心の炉心流量配分特性、炉心流量配分特性の変更に伴い新たに設定した炉心構造物の設計差圧及び設計流速について述べたものである。付録には、それらの結果に基づき実施した炉心構造物の耐熱計算結果を示した。

Design Pressure Differences and Design Velocities for Core Components
of the JRR-3 Silicide Core

Masanori KAMINAGA, Youji MURAYAMA, Shigeru WADA
and Masami KINASE

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

(Received August 5, 1997)

JRR-3 is a light water moderated and cooled, beryllium and heavy water reflected pool type research reactor using low enriched uranium (LEU) plate-type fuels. Its thermal power is 20 MW. The core conversion program from uranium-aluminum (UAl_x -Al) dispersion type fuel (aluminide fuel) to uranium-silicon-aluminum (U_3Si_2 -Al) dispersion type fuel (silicide fuel) is currently conducted at the JRR-3.

In the JRR-3 silicide core, fuel plate thickness, number of fuel plates per fuel element and coolant channel gaps between fuel plates of both standard type fuel elements and follower type fuel elements will be changed from a aluminide core. Therefore, the flow rate distribution characteristics in the silicide core would be different from the aluminide core. The design pressure differences and velocities for core components, i.e, irradiation elements, beryllium reflector etc., should be changed according to the core flow rate distribution characteristics of the silicide core. This report describes about design pressure differences and design velocities for core components of the JRR-3 silicide core based on the core flow rate distribution calculation results. Temperature calculation results of the core components are shown in appendixes.

Keywords : Core Component, Design Pressure, Design Velocity, Flow Distribution, JRR-3,
Research Reactor, Silicide Fuel

目 次

1. 緒 言	1
2. 炉心冷却材流量配分	7
2.1 解析方法	7
2.2 解析モデル	10
2.3 解析結果	37
3. 炉心構造物設計差圧	40
3.1 概 要	40
3.2 設計差圧	40
4. 炉心構造物設計流速	43
4.1 概 要	43
4.2 設計流速	43
5. 結 言	49
謝 辞	49
参考文献	49
付録A 炉心冷却材流量配分解析モデル妥当性の検討	50
付録B シリサイド燃料炉心における炉心構造物の耐熱計算結果	51

Contents

1. Introduction	1
2. Core Flow Distribution	7
2.1 Analytical Method	7
2.2 Analytical Model	10
2.3 Analytical Results	37
3. Design Pressure Differences for Core Components	40
3.1 General Description	40
3.2 Design Pressure Differences	40
4. Design Velocities for Core Components	43
4.1 General Description	43
4.2 Design Velocities	43
5. Concluding Remarks	49
Acknowledgments	49
References	49
Appendix A Validity of Core Flow Distribution Analytical Model	50
Appendix B Core Components Temperature Calculation Results of the JRR-3 Silicide Core	51

1. 緒言

JRR-3 (改造炉) は、約20%濃縮のウランアルミニウム分散型燃料 (アルミナイド燃料) を用いた軽水減速・冷却、ベリリウム及び重水反射体付きのプール型炉で、最大熱出力は20 MWである。平成2年3月に臨界を達成し、平成2年11月から共同利用運転を行っている。JRR-3は、現在、熱・冷中性子を用いたビーム実験、放射化分析、半導体用シリコンの製造 (シリコン単結晶のドーピング)、RI製造などに利用されている。

しかし、高稼働率 (1サイクルの運転期間4週間、7サイクル/年) と5バッチ分散方式の燃料交換であることから、比較的燃料消費量が多く、従って使用済燃料の発生量も多くなっている。一方、国内外の試験・研究炉で使用される燃料要素は、近年アルミナイド燃料から、よりウラン密度を高めることが可能なウランシリコンアルミニウム分散型燃料 (シリサイド燃料) への変更が進められており、今後もアルミナイド燃料を継続して使用する場合、将来において燃料の安定供給と製作コスト等に問題が生じる可能性がでてきた。

このため、JRR-3においても、シリサイド燃料を使用することによって、燃料の安定供給の確保を図るとともに、燃料要素1体当たりのウラン量を増加させることによる燃料使用体数の削減と炉心管理をより効率的に行うことによって、使用済燃料の発生量の低減化を図ることとした。

JRR-3の変更の内容は、20%濃縮のアルミナイド燃料から20%濃縮のシリサイド燃料へ変更するとともに、最高燃焼度を約50%から60%へ変更するものである。また、これらの変更に伴い、安全設計及び安全評価等の見直しも行う。変更に当たっては、現在の原子炉の性能 (熱出力、中性子束) を維持する設計とする。Table 1.1.1及びTable 1.1.2にJRR-3シリサイド燃料 (標準型燃料要素及びフォロワ型燃料要素) の主要な仕様をアルミナイド燃料と比較して示す。また、Fig.1.1.1にJRR-3標準型燃料要素をFig.1.1.2にJRR-3フォロワ型燃料要素をそれぞれ示す。シリサイド燃料の特徴は、高燃焼度化を図るため、アルミナイド燃料に比べウラン密度が高いこと、初期の過剰反応度を抑えるために可燃性毒物としてカドミウムワイヤを側板に埋め込んでいることである。

JRR-3シリサイド燃料炉心では、シリサイド燃料化に伴ってFig.1.1.1及びFig.1.1.2に示すように標準型燃料要素及びフォロワ型燃料要素の燃料板枚数、燃料板厚さ、冷却材流路ギャップを変更する。このため、これまでのアルミナイド燃料炉心と比べ、燃料要素の燃料板領域の圧力損失 (摩擦損失) 特性が異なるために燃料領域の流量配分が異なり、それに伴って照射筒、ベリリウム反射体などへの流量配分も異なってくる。現在、炉心構造物の耐熱計算に用いている設計流速は、アルミナイド炉心の炉心流量配分計算結果に基づき設定されており、シリサイド炉心の炉心流量配分計算結果に基づき見直す必要がある。さらに、新たに設定した各炉心構造物の設計流速が、アルミナイド炉心における各炉心構造物の設計流速を下回っている場合には、耐熱計算を見直す必要がある。また、圧力条件 (設

計差圧)は、各炉心構造物の耐圧・耐震計算に用いており、炉心圧力損失特性の違い(圧力損失は減少する)により炉心出口圧力に係る部分に変更となるが、差圧としてはアルミナイド炉心よりも小さくなるために、設計差圧に変更はない。

本報告書は、JRR-3シリサイド炉心の炉心流量配分特性、炉心流量配分特性の変更に伴い新たに設定した炉心構造物の圧力条件及び流速条件について述べたものである。また、付録には、それらの結果に基づき実施した炉心構造物の耐熱計算結果を示した。

Table 1.1.1 Description of JRR-3 silicide fuel element (Standard fuel)

項目		シリサイド燃料 (変更後)	アルミナイド燃料 (変更前)
外形		約 76.2 x 76.2 x 1150 mm	同左
U-235 濃縮度		約 20 wt %	同左
U-235 含有量		約 472 g	約 300 g
ウラン密度		約 4.8 g/cm ³	約 2.2 g/cm ³
芯材	厚さ	約 0.51 mm	約 0.76 mm
	幅	約 62 mm	同左
	長さ	約 750 mm	同左
被覆材厚さ		約 0.38 mm	同左
燃料板	厚さ	約 1.27 mm	約 1.52 mm
	幅	約 71 mm	同左
	長さ	約 770 mm	同左
冷却材流路数		20	19
冷却材流路厚さ		約 2.35 mm (x 20)	約 2.28 mm (x 19)
燃料芯材		ウランシリコンアルミニウム分散型合金 (U ₃ Si ₂ -Al)	ウランアルミニウム分散型合金 (UAl _x -Al)
被覆材		アルミニウム合金 A 6061、AG3NE又は相当品	アルミニウム合金 AG3NE又は相当品
可燃性	種類	カドミウム	無し
吸収体	線径	約 0.4 mm	
	長さ	約 750 mm	
	被覆材種類	アルミニウム合金	
	被覆材厚さ	約 0.20 mm	
	本数	42	
最大燃焼度		要素平均 60 %	要素平均 50 %

Table 1.1.2 Description of JRR-3 silicide fuel element (Follower fuel)

項目		シリサイド燃料 (変更後)	アルミナイド燃料 (変更前)
外形		約 64 x 64 x 880 mm	同左
U-235 濃縮度		約 20 wt %	同左
U-235 含有量		約 302 g	約 190 g
ウラン密度		約 4.8 g/cm ³	約 2.2 g/cm ³
芯材	厚さ	約 0.51 mm	約 0.76 mm
	幅	約 49 mm	同左
	長さ	約 750 mm	同左
被覆材厚さ		約 0.38 mm	同左
燃料板	厚さ	約 1.27 mm	約 1.52 mm
	幅	約 60 mm	同左
	長さ	約 770 mm	同左
冷却材流路数		16	15
冷却材流路厚さ		約 2.40 mm (x 15)	約 2.38 mm (x 14)
燃料芯材		ウランシリコンアルミニウム分散型合金 (U ₃ Si ₂ -Al)	ウランアルミニウム分散型合金 (UAl ₃ -Al)
被覆材		アルミニウム合金 A 6061、AG3NE又は相当品	アルミニウム合金 AG3NE又は相当品
可燃性	種類	カドミウム	無し
吸収体	線径	約 0.4 mm	
	長さ	約 750 mm	
	被覆材種類	アルミニウム合金	
	被覆材厚さ	約 0.20 mm	
	本数	34	
最大燃焼度		要素平均 60 %	要素平均 50 %

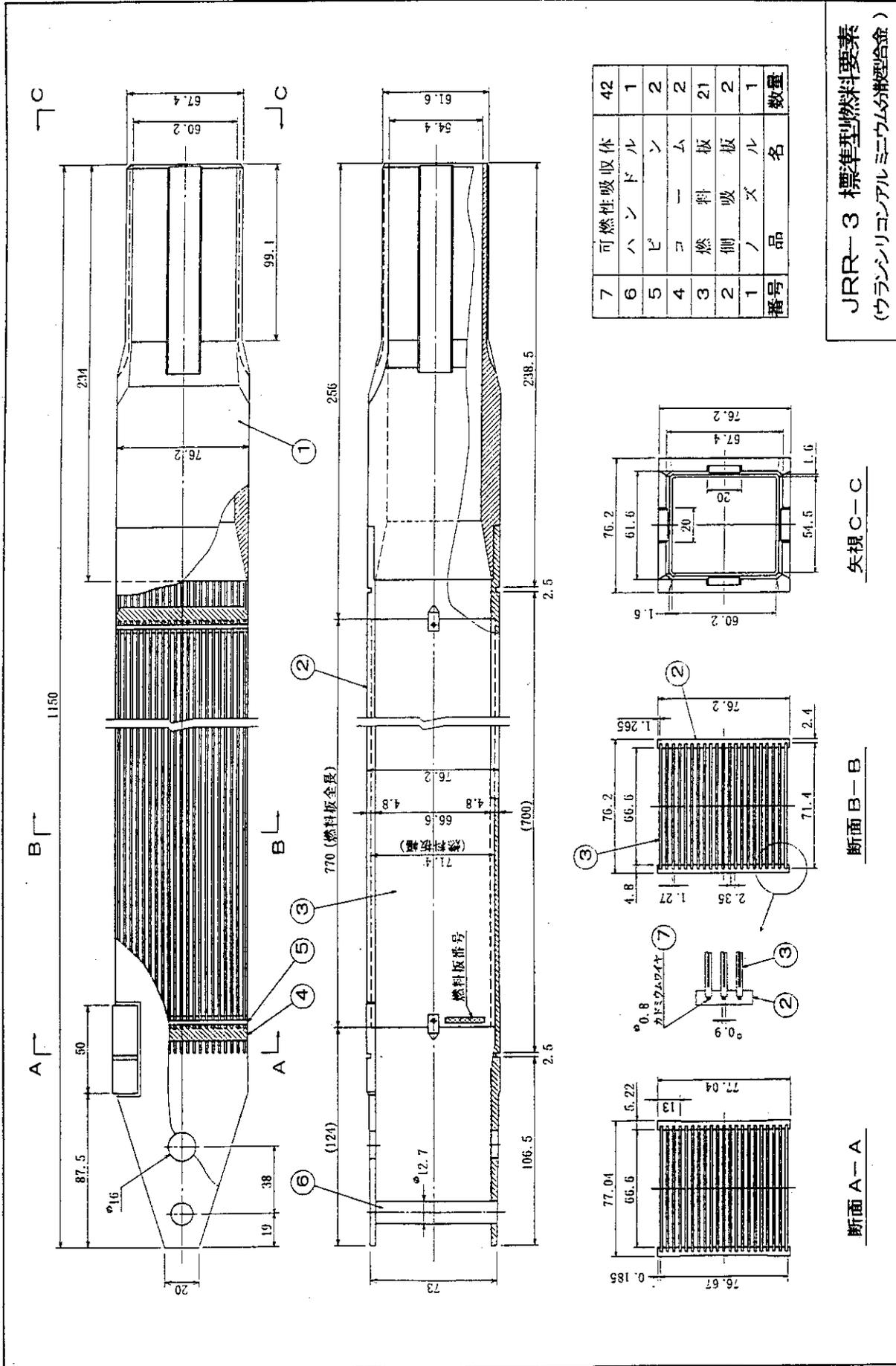


Fig.1.1.1 JRR-3 standard type fuel element (Silicide fuel)

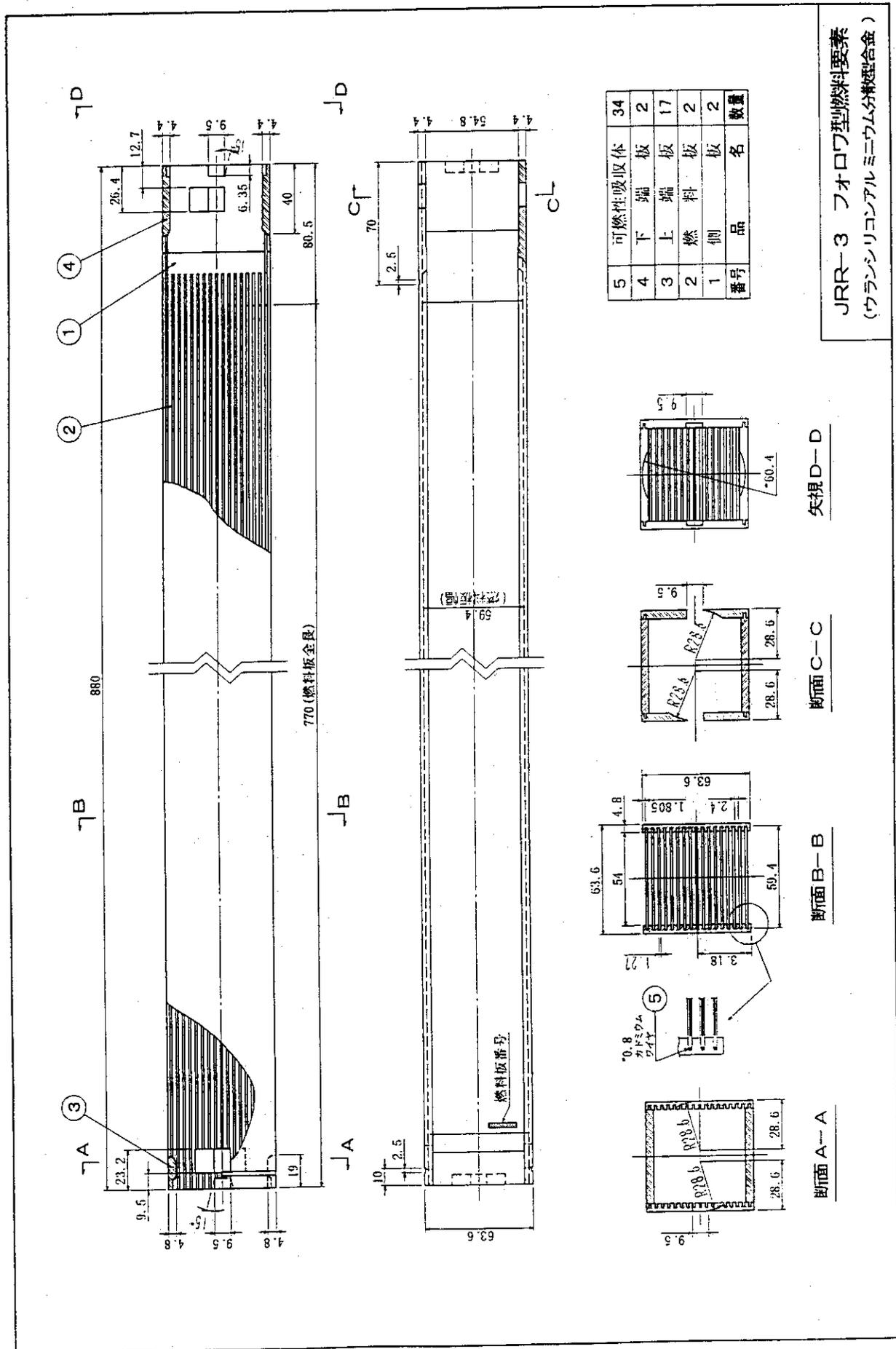


Fig.1.1.2 JRR-3 follower type fuel element (Silicide fuel)

2. 炉心冷却材流量配分

2.1 解析方法

JRR-3 の炉心部の冷却材流路としては以下の流路があり、各流路は独立しており流路間を横切る流れ（クロスフロー）はなく、かつ、炉心出入口は共通である。

① 標準型燃料要素	26 流路
② フォロワ型燃料要素	6 流路
③ 照射筒	5 流路
④ Be 反射体 (B, C 型)	8 流路
⑤ コアバイパス	1 流路
⑥ Be 反射体—側板間、 Be 反射体—照射筒間	18 流路
⑦ 燃料側板間	30 流路
⑧ 照射シンプル (照射物冷却管付)	3 流路
⑨ エア抜き孔・ドレン孔 (プレナム部)	2 流路
⑩ 自然循環弁	1 流路 (自然循環冷却時)

JRR-3 炉心部の水平方向の断面図を Fig.2.1.1 に、垂直方向の断面図を Fig.2.1.2 に示す。

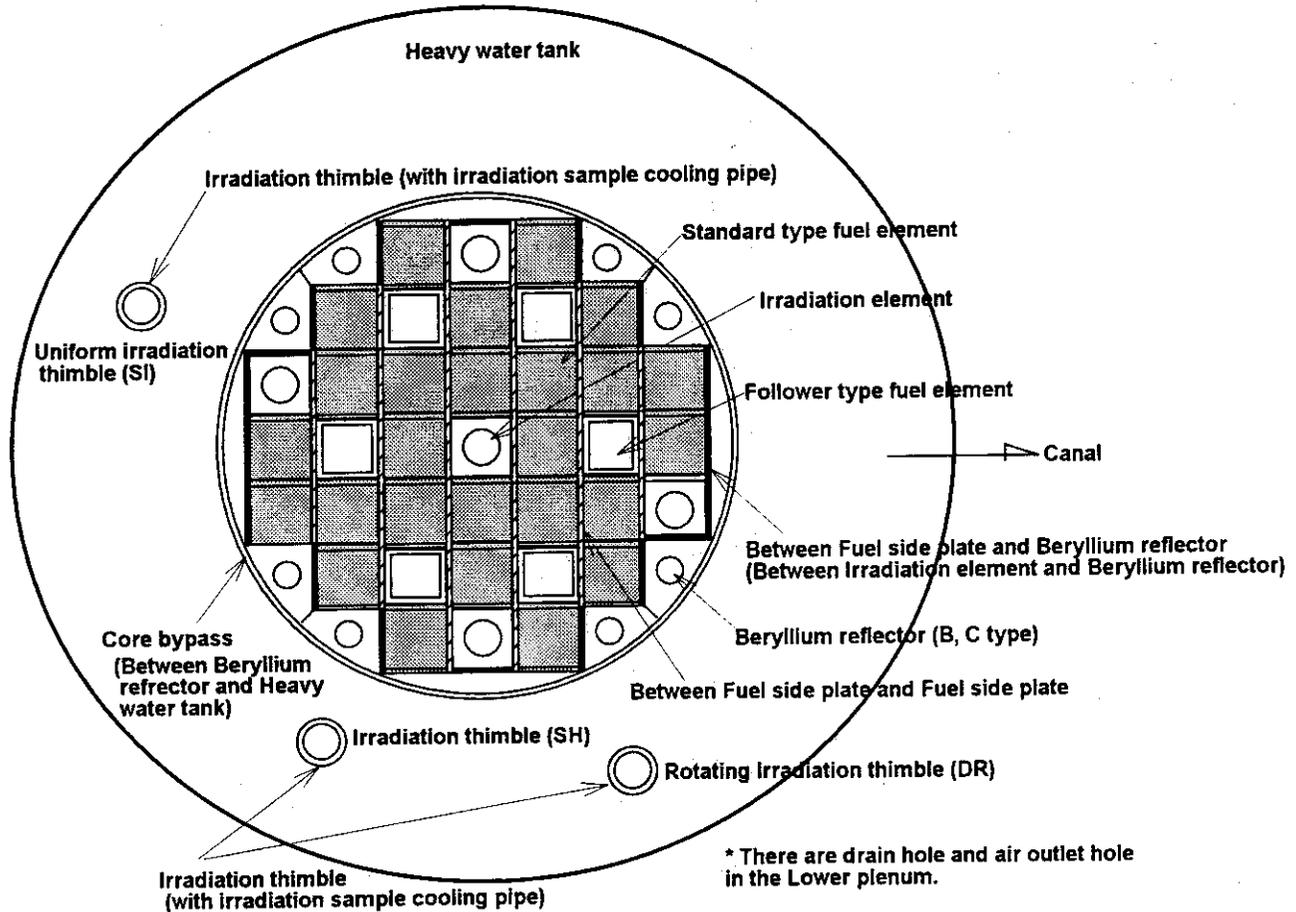


Fig.2.1.1 Horizontal view of JRR-3 silicide core

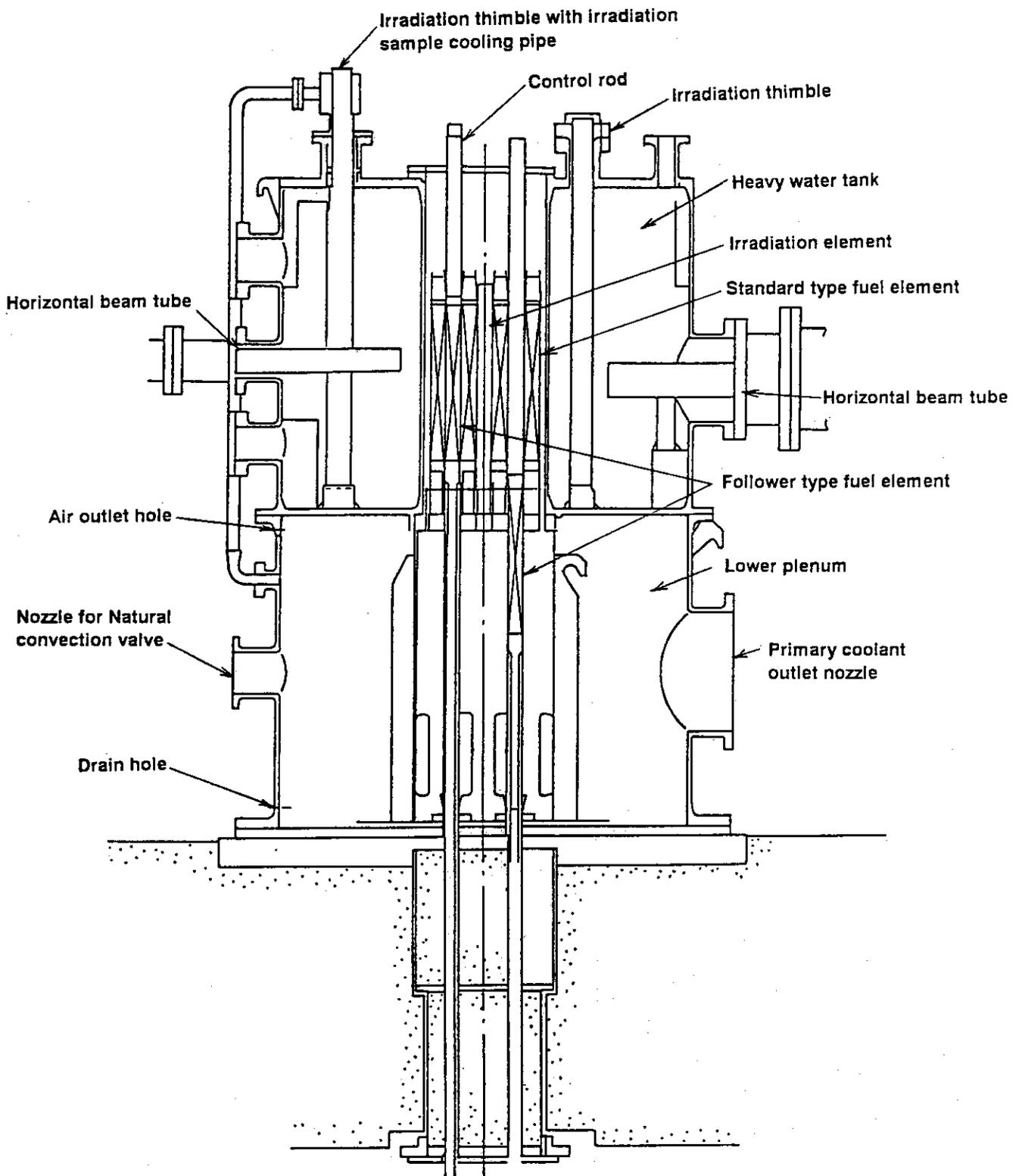


Fig.2.1.2 Vertical cross-sectional view of JRR-3 silicide core

各流路への流量配分の考え方は、炉心入口及びプレナム部（炉心出口）の圧力が各流路に対して共通であり、かつ、流路間を横切る流れ（クロスフロー）がないことから、各流路の炉心入口－プレナム間の全圧力損失が一定となる条件のもとに、流路毎の流量の総和が設定した1次冷却材流量（2400m³/h）になるように定めるといものである。炉心のシリサイド燃料化に伴いアルミナイド炉心から変更となった個所は、燃料要素の燃料板領域のみであり、他の領域については、寸法・形状の変更はない。

ここで、形状損失 ΔP_{form} は、次に示す式で計算する。

$$\Delta P_{form} = K \cdot \frac{\rho v^2}{2g} \quad (2-1)$$

K	:形状損失係数	(-)
ρ	:密度	(kg/m ³)
v	:冷却材流速	(m/s)
g	:重力加速度	(m/s ²)

また、摩擦損失 ΔP_{fric} は、次に示す式で計算する。

$$\Delta P_{fric} = \lambda \cdot \frac{\ell}{De} \cdot \frac{\rho v^2}{2g} \quad (2-2)$$

λ	:摩擦損失係数	(-)
ℓ	:流路長さ	(m)
De	:水力等価直径	(m)
ρ	:密度	(kg/m ³)
v	:冷却材流速	(m/s)
g	:重力加速度	(m/s ²)

摩擦損失係数 λ は、 $Re \geq 4000$ の場合、次に示すコール・ブルックの式を用い $\varepsilon/d = 4 \times 10^{-4}$ として評価する⁽¹⁾。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log_{10} \left[\frac{\varepsilon/d}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right] \quad (2-3)$$

Re	:レイノルズ数	(-)
ε/d	:表面粗さ	(-)

$Re \geq 4000$ の場合、円管流路では(2-4)式で、燃料要素内などの矩形流路では(2-5)式により、それぞれ摩擦損失係数を求める。

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2-4)$$

$$\lambda = \frac{96}{\text{Re}} \quad (2-5)$$

なお、炉心流量配分計算では、各流路を非加熱として取扱い、冷却材温度は 40°C と仮定する。

2.2 解析モデル

各流路における圧力損失評価では、各流路を Fig.2.2.1～Fig.2.2.10 に示すようにモデル化した。解析モデルでは、流路形状の特徴を考慮して各流路を軸方向にいくつか分割し、流れの向きに従って上流側から番号を付けた。流路形状の特徴としては、① 面積一定の流路部（直流路部）、② 流路面積の拡大部、③ 流路面積の縮小部に大別した。

2.2.1 標準型燃料要素

標準型燃料要素の軸方向領域分割を Fig.2.2.1 に示す。

各領域における流路断面積 A 、等価水力直径 De 、流路長さ L 、形状損失係数 K は以下に示す通りとする。

領域① 炉心上部直流路

$$A_1 = 77.2 \times 77.2 = 5959.8 \text{ mm}^2 = 59.60 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.0$$

領域② 燃料板上部縮小部

$$A_2 = 76.2 \times 66.6 = 5074.92 \text{ mm}^2 = 50.75 \text{ cm}^2$$

$$L_2 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_2 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right) = 0.0742$$

領域③ 燃料板上部直流路

$$A_3 = A_2 = 50.75 \text{ cm}^2$$

$$De_3 = 7.108 \text{ cm}$$

$$L_3 = 2621.5 - 2585 = 36.5 \text{ mm} = 3.65 \text{ cm}$$

領域④ 燃料板上端縮小部

$$A_4 = (76.2 + 2 \times 0.5) \times 66.6 - 1.27 \times 66.6 \times 21 = 3365.30 \text{ mm}^2 = 33.65 \text{ cm}^2$$

$$L_4 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_4 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_4}{A_3}\right) = 0.168$$

領域⑤ 燃料部直流路

$$A_5 = A_4 = 33.65 \text{ cm}^2$$

$$De_5 = 2 \times (2.35 \times 66.6) / (2.35 + 66.6) = 4.540 \text{ mm} = 0.4540 \text{ cm}$$

$$L_5 = 2585 - 1815 = 770 \text{ mm} = 77.0 \text{ cm}$$

領域⑥ 燃料下部拡大部

$$A_6 = A_5 = 33.65 \text{ cm}^2$$

$$A_7 = A_3 = 50.75 \text{ cm}^2$$

$$K_6 = \left(1 - \frac{A_6}{A_7}\right)^2 = 0.114$$

領域⑦ 燃料下部直流路

$$A_7 = 50.75 \text{ cm}^2$$

$$De_7 = De_3 = 7.108 \text{ cm}$$

$$L_7 = 1815 - 1793 = 22 \text{ mm} = 2.2 \text{ cm}$$

領域⑧ 燃料ノズル入口縮流路 (直流路で近似)

$$A_8 = 54.4 \times 60.2 = 3274.88 \text{ mm}^2 = 32.75 \text{ cm}^2$$

$$De_8 = 5.716 \text{ cm}$$

$$L_8 = 1793 - 1762.5 = 30.5 \text{ mm} = 3.05 \text{ cm}$$

領域⑨ 燃料ノズル入口直流路

$$A_9 = A_8 = 32.75 \text{ cm}^2$$

$$De_9 = De_8 = 5.716 \text{ cm}$$

$$L_9 = 1762.5 - 1559 = 203.5 \text{ mm} = 20.35 \text{ cm}$$

領域⑩ 格子板 B 直流路

$$A_{10} = 55 \times 60.8 = 3344 \text{ mm}^2 = 33.44 \text{ cm}^2$$

$$De_{10} = 5.776 \text{ cm}$$

$$L_{10} = 1599 - 1475 = 84 \text{ mm} = 8.4 \text{ cm}$$

領域⑪ 格子板 B 出口拡大部

$$A_{11} = A_{10} = 33.44 \text{ cm}^2$$

$$A_{12} = 77.2 \times 77.2 = 5959.84 \text{ mm}^2 = 59.60 \text{ cm}^2$$

$$K_{11} = \left(1 - \frac{A_{11}}{A_{12}}\right)^2 = 0.193$$

2.2.2 フォロワ型燃料要素

フォロワ型燃料要素の軸方向領域分割を Fig.2.2.2 に示す。

各領域における流路断面積 A、等価水力直径 De、流路長さ L、形状損失係数 K は以下に示す通りとする。

領域① 制御棒上端縮小部

$$A_0 = 77.2 \times 77.2 = 5959.84 \text{ mm}^2 = 59.60 \text{ cm}^2$$

$$A_1 = 53.6 \times 53.6 = 2872.96 \text{ mm}^2 = 28.73 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) = 0.259$$

領域② 制御棒部直流路

$$A_2 = A_1 = 28.73 \text{ cm}^2$$

$$De_2 = 5.36 \text{ cm}$$

$$L_2 = 3404.5 - 2585 = 819.5 \text{ mm} = 81.95 \text{ cm}$$

領域③ 燃料板上端縮小部

$$A_3 = 66.2 \times 66.2 - 54 \times 1.27 \times 17 - 63.6 \times 4.8 \times 2 = 2606.02 \text{ mm}^2 = 26.06 \text{ cm}^2$$

$$L_3 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_3 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_3}{A_2}\right) = 0.0465$$

領域④ 燃料部直流路

$$A_4 = A_3 = 26.06 \text{ cm}^2$$

$$De_4 = 0.4472 \text{ cm}$$

$$L_4 = 2585 - 1815 = 770 \text{ mm} = 77.0 \text{ cm}$$

領域⑤ 燃料下部拡大部

$$A_5 = A_4 = 26.06 \text{ cm}^2$$

$$A_6 = 66.2^2 - 63.6^2 + 54.8^2 = 3341 \text{ cm}^2$$

$$K_5 = \left(1 - \frac{A_5}{A_6}\right)^2 = 0.0484$$

領域⑥ 燃料下部直流路

$$A_6 = 3341 \text{ cm}^2$$

$$De_6 = 5.48 \text{ cm}$$

$$L_6 = 1815 - 1734.5 = 80.5 \text{ mm} = 8.05 \text{ cm}$$

領域⑦ アダプタ F₁ 部

$$A_7 = A_6 = 3341 \text{ cm}^2$$

$$De_7 = De_6 = 5.48 \text{ cm}$$

$$L_7 = 1734.5 - 1634.5 = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm}$$

領域⑧ アダプタ F₂ 入口

$$A_8 = 66.2^2 - 63.6^2 + 24.4^2 \times 4 = 2718.92 \text{ mm}^2 = 27.19 \text{ cm}^2$$

$$K_8 = \left(1 - \frac{A_8}{A_7}\right)^2 = 0.0931$$

領域⑨ アダプタ F₂ 部

$$A_9 = A_8 = 27.19 \text{ cm}^2$$

$$De_9 = 2.44 \text{ cm}$$

$$L_9 = 1634.5 - 1554.5 = 80 \text{ mm} = 8 \text{ cm}$$

領域⑩ アダプタ F₃ 入口

$$A_{10} = A_{11} = 66.2^2 - \frac{63.6-6}{2} \times 6 \times 4 - 6^2 = 3655.24 \text{ mm}^2 = 36.55 \text{ cm}^2$$

$$K_{10} = \left(1 - \frac{A_9}{A_{10}}\right)^2 = 0.0656$$

領域⑪ アダプタ F₃ 部

$$A_{11} = A_{10} = 36.55 \text{ cm}^2$$

$$De_{11} = 2.816 \text{ cm}$$

$$L_{11} = 1554.5 - 1416 = 138.5 \text{ mm} = 1.385 \text{ cm}$$

領域⑫ アダプタ F₄ 入口

$$A_{12} = A_{13} = 66.2^2 - \frac{\pi}{4} \times 35^2 = 3420.33 \text{ mm}^2 = 34.20 \text{ cm}^2$$

$$K_{12} = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_{12}}{A_{10}}\right) = 0.0321$$

領域⑬ アダプタ F₄ 部

$$A_{13} = A_{12} = 34.20 \text{ cm}^2$$

$$De_{13} = 3.651 \text{ cm}$$

$$L_{13} = 1416 - 390 = 1026 \text{ mm} = 10.26 \text{ cm}$$

領域⑭ 出口

$$A_{14} = A_{13} = 34.20 \text{ cm}^2$$

$$A_{15} = (\pi \times 5^2 + 90 \times 10) \times 18 = 17613.72 \text{ mm}^2 = 176.1 \text{ cm}^2$$

$$K_{14} = \left(1 - \frac{A_{14}}{A_{15}}\right)^2 = 0.649$$

2.2.3 照射筒

照射筒の軸方向領域分割を Fig.2.2.3 に示す。

各領域における流路断面積 A、等価水力直径 De、流路長さ L、形状損失係数 K は以下に示す通りとする。

領域① 炉心上部直流路

$$A_1 = 77.2 \times 77.2 = 5959.8 \text{ mm}^2 = 59.60 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.0$$

領域② 照射筒上部縮小部

$$A_2 = \frac{\pi}{4} \times (60^2 - 55^2) = 451.60 \text{ mm}^2 = 4.516 \text{ cm}^2$$

$$L_2 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_2 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right) = 0.462$$

領域③ 照射シリンダ直流路部

$$A_3 = A_2 = 4.516 \text{ cm}^2$$

$$De_3 = 0.5 \text{ cm}$$

$$L_3 = 2659 - 1745 = 914 \text{ mm} = 91.4 \text{ cm}$$

領域④ 照射シリンダ下端拡大部

$$A_3 = \frac{\pi}{4} \times 60^2 - (6^2 + 6 \times 27 \times 4) = 2143.43 \text{ mm}^2 = 21.43 \text{ cm}^2$$

$$A_4 = A_3 = 4.516 \text{ cm}^2$$

$$K_6 = \left(1 - \frac{A_4}{A_3}\right)^2 = 0.623$$

領域⑤ 照射筒下部

$$A_5 = A_4 = 21.43 \text{ cm}^2$$

$$De_5 = 2.253 \text{ cm}$$

$$L_5 = 1745 - 1716 = 29 \text{ mm} = 2.9 \text{ cm}$$

領域⑥ 照射筒ノズル縮小部

$$A_6 = 45 \times 45 = 2025 \text{ mm}^2 = 20.25 \text{ cm}^2$$

$$L_6 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_6 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_6}{A_5}\right) = 0.0275$$

領域⑦ 照射筒ノズル直流路

$$A_7 = A_6 = 20.25 \text{ cm}^2$$

$$De_7 = 4.5 \text{ cm}$$

$$L_7 = 1716 - 1559 = 157 \text{ mm} = 15.7 \text{ cm}$$

$$A_8 = 55 \times 60.8 = 3344 \text{ mm}^2 = 33.44 \text{ cm}^2$$

$$K_7 = \left(1 - \frac{A_7}{A_8}\right)^2 = 0.156$$

領域⑧ 格子板 B 直流路

$$A_8 = 33.44 \text{ cm}^2$$

$$De_8 = 5.776 \text{ cm}$$

$$L_8 = 1599 - 1475 = 84 \text{ mm} = 8.4 \text{ cm}$$

領域⑨ 格子板 B 出口拡大部

$$A_9 = A_8 = 33.44 \text{ cm}^2$$

$$A_{10} = 77.2 \times 77.2 = 5959.84 \text{ mm}^2 = 59.60 \text{ cm}^2$$

$$K_9 = \left(1 - \frac{A_9}{A_{10}}\right)^2 = 0.193$$

2.2.4 ベリリウム反射体 (B、C 型)

ベリリウム反射体 (B、C 型) の軸方向領域分割を Fig.2.2.4 に示す。

各領域における流路断面積 A、等価水力直径 De、流路長さ L、形状損失係数 K は以下に示す通りとする。

領域① 反射体押え上端縮小部

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \times 45^2 = 1590.43 \text{ mm}^2 = 15.90 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.0$$

領域② 反射体押え円筒直流路

$$A_2 = A_1 = 15.90 \text{ cm}^2$$

$$De_2 = 4.5 \text{ cm}$$

$$L_2 = 4.5 \text{ cm}$$

領域③ 照射シリンダ上端縮小部

$$A_3 = \frac{\pi}{4} \times (45^2 - 40^2) = 333.79 \text{ mm}^2 = 3.338 \text{ cm}^2$$

$$L_3 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_3 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_3}{A_2}\right) = 0.395$$

領域④ 照射シリンダ直流路

$$A_4 = A_3 = 3.338 \text{ cm}^2$$

$$De_4 = 0.5 \text{ cm}$$

$$L_4 = 2605 - 1735 = 870 \text{ mm} = 87.0 \text{ cm}$$

領域⑤ ベリリウム反射体下プラグ入口拡大部

$$A_5 = A_4 = 3.338 \text{ cm}^2$$

$$A_6 = \frac{\pi}{4} \times 12^2 \times 4 = 452.39 \text{ mm}^2 = 4.524 \text{ cm}^2$$

$$K_5 = \left(1 - \frac{A_5}{A_6}\right)^2 = 0.0687$$

領域⑥ ベリリウム反射体下プラグ上部直流路

$$A_6 = 4.524 \text{ cm}^2$$

$$De_6 = 1.2 \text{ cm}$$

$$L_6 = 1735 - 1700 = 35 \text{ mm} = 3.5 \text{ cm}$$

領域⑦ ベリリウム反射体下プラグ拡大部

$$A_7 = A_6 = 4.524 \text{ cm}^2$$

$$A_8 = \frac{\pi}{4} \times 36^2 = 1017.88 \text{ mm}^2 = 10.18 \text{ cm}^2$$

$$K_7 = \left(1 - \frac{A_7}{A_8}\right)^2 = 0.309$$

領域⑧ ベリリウム反射体下プラグ下直流路

$$A_8 = 10.18 \text{ cm}^2$$

$$De_8 = 3.6 \text{ cm}$$

$$L_8 = 1700 - 1675 = 25 \text{ mm} = 2.5 \text{ cm}$$

領域⑨ 格子板 A 入口縮小部

$$A_9 = 15 \times 34 = 510 \text{ mm}^2 = 5.1 \text{ cm}^2$$

$$K_9 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_9}{A_8}\right) = 0.250$$

領域⑩ 格子板 A 入口直流路

$$A_{10} = A_9 = 5.1 \text{ cm}^2$$

$$De_{10} = 2.082 \text{ cm}$$

$$L_6 = 1675 - 1645 = 30 \text{ mm} = 3.0 \text{ cm}$$

$$A_{11} = \frac{\pi}{4} \times 36^2 = 1017.88 \text{ mm}^2 = 10.18 \text{ cm}^2$$

$$K_{10} = \left(1 - \frac{A_{10}}{A_{11}}\right)^2 = 0.249$$

領域⑪ 格子板 A 中空部

$$A_{11} = 10.18 \text{ cm}^2$$

$$De_{11} = 3.6 \text{ cm}$$

$$L_{11} = 1645 - 1623 = 22 \text{ mm} = 2.2 \text{ cm}$$

領域⑫ 格子板 A 下部直流路

$$A_{12} = \frac{\pi}{4} \times 24^2 = 452.39 \text{ mm}^2 = 4.524 \text{ cm}^2$$

$$K_{12} = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_{12}}{A_{11}}\right) = 0.278$$

$$De_{12} = 2.4 \text{ cm}$$

$$L_{12} = 1623 - 1555 = 68 \text{ mm} = 6.8 \text{ cm}$$

領域⑬ 格子板 B 入口拡大部

$$A_{13} = A_{12} = 4.524 \text{ cm}^2$$

$$A_{14} = 60 \times 80 = 4800 \text{ mm}^2 = 48.0 \text{ cm}^2$$

$$De_{13} = 3.651 \text{ cm}$$

$$K_{13} = \left(1 - \frac{A_{13}}{A_{14}}\right)^2 = 0.820$$

領域⑭ 格子板 B 直流路

$$A_{14} = 48.0 \text{ cm}^2$$

$$De_{14} = 6.857 \text{ cm}$$

$$A_{15} = (\pi \times 5^2 + 90 \times 10) \times 18 = 17613.72 \text{ mm}^2 = 176.1 \text{ cm}^2$$

$$L_{14} = 1555 - 1475 = 80 \text{ mm} = 8.0 \text{ cm}$$

$$K_{14} = 0.0$$

2.2.5 コアバイパス

コアバイパスの軸方向領域分割を Fig.2.2.5 に示す。

各領域における流路断面積 A、等価水力直径 De、流路長さ L、形状損失係数 K は以下に示す通りとする。

領域① コアバイパス入口部

$$A_1 = 600\pi \times 30 = 56548.65 \text{ mm}^2 = 565.5 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.5$$

領域② 反射体押え水平流路

$$A_2 = A_1 = 565.5 \text{ cm}^2$$

$$De_2 = 6.0 \text{ cm}$$

$$L_2 = 7.3 \text{ cm}$$

領域③ 反射体押え垂直流路入口

$$A_3 = \frac{\pi}{4} \times (600^2 - 594^2) = 5626.59 \text{ mm}^2 = 56.27 \text{ cm}^2$$

$$L_3 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_3 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_3}{A_2}\right) = 0.450$$

領域④ 反射体押え垂直流路

$$A_4 = A_3 = 56.27 \text{ cm}^2$$

$$De_4 = 0.6 \text{ cm}$$

$$L_4 = 3155 - 2650 = 505 \text{ mm} = 50.5 \text{ cm}$$

領域⑤ ベリリウム反射体上部突起部

$$\text{突起部の占める長さ} = 15 \times 28 + 10 \times 8 = 500 \text{ mm}$$

$$\text{流路割合} = 1 - \frac{500}{600\pi} = 0.7347$$

$$A_5 = \frac{\pi}{4} \times (600^2 - 594^2) \times 0.7347 = 4133.86 \text{ mm}^2 = 41.34 \text{ cm}^2$$

$$De_5 = De_4 = 0.6 \text{ cm}$$

入口での形状損失

$$K_5 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_5}{A_4}\right) = 0.133$$

出口での形状損失

$$A_6 = A_4 = 56.27 \text{ cm}^2$$

$$K_5 = \left(1 - \frac{A_5}{A_6}\right)^2 = 0.0704$$

領域⑥ ベリリウム反射体直流路

$$A_6 = 56.27 \text{ cm}^2$$

$$De_6 = De_4 = 0.6 \text{ cm}$$

$$L_6 = 2581 - 1725 = 856 \text{ mm} = 85.6 \text{ cm}$$

領域⑦ ベリリウム反射体下プラグ縮小部

$$A_7 = A_5 = 41.34 \text{ cm}^2$$

入口形状損失

$$K_7 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_7}{A_6}\right) = 0.133$$

摩擦損失

$$De_7 = De_5 = 0.6 \text{ cm}$$

$$L_7 = 1725 - 1700 = 25 \text{ mm} = 2.5 \text{ cm}$$

出口形状損失

$$A_8 = 19 \times 60 \times 4 \times 10^{-2} + A_6 = 101.87 \text{ cm}^2$$

$$K_7 = \left(1 - \frac{A_7}{A_8}\right)^2 = 0.353$$

領域⑧ ベリリウム反射体下プラグ拡大部直流路

$$A_8 = 101.87 \text{ cm}^2$$

$$De_8 = 2.019 \text{ cm}$$

$$L_8 = 1700 - 1675 = 25 \text{ mm} = 2.5 \text{ cm}$$

領域⑨ 格子板 A 入口

$$A_9 = A_{10} = A_6 + \frac{\pi}{4} \times 16^2 \times 8 \times 10^{-2} = 72.35 \text{ cm}^2$$

$$K_9 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_9}{A_8}\right) = 0.145$$

領域⑩ 格子板 A 直流路

$$A_{10} = A_9 = 72.35 \text{ cm}^2$$

$$De_{10} = 0.697 \text{ cm}$$

$$L_6 = 1675 - 1555 = 120 \text{ mm} = 12.0 \text{ cm}$$

領域⑪ 格子板 B 入口

$$A_{11} = A_{10} = 72.35 \text{ cm}^2$$

$$A_{12} = (60 \times 25 + 52 \times 60.8 + 90 \times 60.8 + 31 \times 26.5) \times 8 = 87640.8 \text{ mm}^2 = 876.4 \text{ cm}^2$$

$$K_{11} = \left(1 - \frac{A_{11}}{A_{12}}\right)^2 = 0.842$$

領域⑫ 格子板 B 直流路

$$A_{12} = 876.4 \text{ cm}^2$$

$$De_{12} = 6.0 \text{ cm}$$

$$L_{12} = 1555 - 1475 = 80 \text{ mm} = 8.0 \text{ cm}$$

$$K_{12} = 0.0$$

2.2.6 ベリリウム反射体一側板間

ベリリウム反射体一側板間の軸方向領域分割を Fig.2.2.6 に示す。

各領域における流路断面積 A、等価水力直径 De、流路長さ L、形状損失係数 K は以下に示す通りとする。

領域① 側板上部

$$A_1 = 77.2 \times 77.2 = 5959.84 \text{ mm}^2 = 59.60 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.0$$

領域② 側板上端縮小部

入口形状損失

$$A_{21} = 2.45 \times 57.2 = 140.14 \text{ mm}^2$$

$$A_{22} = 1.6 \times 57.2 = 91.52 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = \frac{6A_{21} + 12A_{22}}{18} = 107.73 \text{ mm}^2 = 1.077 \text{ cm}^2$$

$$K_2 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right) = 0.491$$

摩擦損失

$$De_2 = 0.365 \text{ cm}$$

$$L_2 = 2650 - 2581 = 69 \text{ mm} = 6.9 \text{ cm}$$

出口形状損失

$$A_{31} = 2.45 \times 74.5 = 182.53 \text{ mm}^2$$

$$A_{32} = 1.6 \times 76.2 = 121.92 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = \frac{6A_{31} + 12A_{32}}{18} = 142.12 \text{ mm}^2 = 1.421 \text{ cm}^2$$

$$K_2 = \left(1 - \frac{A_2}{A_3}\right)^2 = 0.0586$$

領域③ ベリリウム反射体直流路

$$A_3 = 1.421 \text{ cm}^2$$

$$De_3 = 0.367 \text{ cm}$$

$$L_3 = 2581 - 1725 = 856 \text{ mm} = 85.6 \text{ cm}$$

領域④ 格子板 A 上面

$$A_4 = A_3 = 1.421 \text{ cm}^2$$

$$De_4 = De_3 = 0.367 \text{ cm}$$

$$L_4 = 1725 - 1675 = 50 \text{ mm} = 5.0 \text{ cm}$$

領域⑤ 格子板 A 入口

$$A_5 = A_6 = 1.4 \times 20 \times 2 = 56 \text{ mm}^2 = 0.56 \text{ cm}^2$$

$$K_5 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_5}{A_4}\right) = 0.303$$

領域⑥ 格子板 A 直流路

$$A_6 = 0.56 \text{ cm}^2$$

$$De_6 = 0.262 \text{ cm}$$

$$L_6 = 1675 - 1555 = 120 \text{ mm} = 12.0 \text{ cm}$$

領域⑦ 格子板 A 出口

$$A_7 = A_6 = 0.56 \text{ cm}^2$$

$$A_8 = 55 \times 60.8 = 3344 \text{ mm}^2 = 33.44 \text{ cm}^2$$

$$K_7 = \left(1 - \frac{A_7}{A_8}\right)^2 = 0.967$$

領域⑧ 格子板 B 直流路

$$A_8 = 33.44 \text{ cm}^2$$

$$De_8 = 5.776 \text{ cm}$$

$$L_8 = 1555 - 1475 = 80 \text{ mm} = 8.0 \text{ cm}$$

出口形状損失

$$K_8 = 0.0$$

2.2.7 燃料側板間

燃料側板間の軸方向領域分割を Fig.2.2.7 に示す。

各領域における流路断面積 A 、等価水力直径 De 、流路長さ L 、形状損失係数 K は以下に示す通りとする。

領域① 側板上部

$$A_1 = 77.2 \times 77.2 = 5959.84 \text{ mm}^2 = 59.60 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.0$$

領域② 側板上端縮小部

入口形状損失

$$A_{21} = 1.85 \times 51 = 94.35 \text{ mm}^2$$

$$A_{22} = 1 \times 51 = 51 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = \frac{8A_{21} + 22A_{22}}{30} = 62.56 \text{ mm}^2 = 0.626 \text{ cm}^2$$

$$K_2 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right) = 0.495$$

摩擦損失

$$De_2 = 0.24 \text{ cm}$$

$$L_2 = 2621.5 - 2571.5 = 50 \text{ mm} = 5.0 \text{ cm}$$

出口形状損失

$$A_{31} = 1.85 \times 76.2 = 140.97 \text{ mm}^2$$

$$A_{32} = 1 \times 76.2 = 76.2 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = \frac{8A_{31} + 22A_{32}}{30} = 93.47 \text{ mm}^2 = 0.935 \text{ cm}^2$$

$$K_2 = \left(1 - \frac{A_2}{A_3}\right)^2 = 0.109$$

領域③ 側板間直流路

$$A_3 = 0.935 \text{ cm}^2$$

$$De_3 = 0.24 \text{ cm}$$

$$L_3 = 2571.5 - 1699.5 = 872 \text{ mm} = 87.2 \text{ cm}$$

領域④ 格子板 A 上面

$$A_4 = A_3 = 0.935 \text{ cm}^2$$

$$De_4 = De_3 = 0.24 \text{ cm}$$

$$L_4 = 1699.5 - 1675 = 24.5 \text{ mm} = 2.45 \text{ cm}$$

領域⑤ 格子板 A 入口

$$A_5 = A_6 = 1.4 \times 20 \times 2 = 56 \text{ mm}^2 = 0.56 \text{ cm}^2$$

$$K_5 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_5}{A_4}\right) = 0.200$$

領域⑥ 格子板 A 直流路

$$A_6 = 0.56 \text{ cm}^2$$

$$De_6 = 0.262 \text{ cm}$$

$$L_6 = 1675 - 1559 = 116 \text{ mm} = 11.6 \text{ cm}$$

領域⑦ 格子板 B 入口

$$A_7 = A_6 = 0.56 \text{ cm}^2$$

$$A_8 = 55 \times 60.8 \times 2 = 6688 \text{ mm}^2 = 66.88 \text{ cm}^2$$

$$K_7 = \left(1 - \frac{A_7}{A_8}\right)^2 = 0.983$$

領域⑧ 格子板 B 直流路

$$A_8 = 66.88 \text{ cm}^2$$

$$De_8 = 5.776 \text{ cm}$$

$$L_8 = 1559 - 1475 = 84 \text{ mm} = 8.4 \text{ cm}$$

出口形状損失

$$K_8 = 0.0$$

2.2.8 照射シンプル (照射物冷却管付)

照射シンプル (照射物冷却管付) の概要を Fig.2.2.8~Fig.2.2.10 に示す。

各領域における流路断面積 A、等価水力直径 De、流路長さ L、形状損失係数 K は以下に示す通りとする。

a) 照射シンプル SI

領域① 下降流路入口

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \times 170^2 = 22698.0 \text{ mm}^2 = 227.0 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.5$$

領域② 下降流路直流路

$$A_2 = A_1 = 227.0 \text{ cm}^2$$

$$De_2 = 17.0 \text{ cm}$$

$$L_2 = 2150 - 55 = 2095 \text{ mm} = 209.5 \text{ cm}$$

領域③ 水平流路入口

$$K_3 = 0.5$$

$$A_3 = A_4 = \frac{\pi}{4} \times 55^2 = 2375.83 \text{ mm}^2 = 23.76 \text{ cm}^2$$

領域④ 水平流路

$$A_4 = A_3 = 23.76 \text{ cm}^2$$

$$De_4 = 5.5 \text{ cm}$$

$$L_4 = \frac{200}{2} = 100 \text{ mm} = 10.0 \text{ cm}$$

領域⑤ 水平流路出口

$$A_6 = \frac{\pi}{4} \times (200^2 - 180^2) = 5969.03 \text{ mm}^2 = 59.69 \text{ cm}^2$$

$$A_5 = A_4 = 23.76 \text{ cm}^2$$

$$K_5 = \left(1 - \frac{A_5}{A_6}\right)^2 = 0.362$$

領域⑥ 上昇流路

$$A_6 = 59.69 \text{ cm}^2$$

$$De_6 = 200 - 180 = 20 \text{ mm} = 2.0 \text{ cm}$$

$$L_6 = 2150 - 55 - 170 = 1925 \text{ mm} = 192.5 \text{ cm}$$

領域⑦ 冷却管入口

$$A_7 = \frac{\pi}{4} \times 50^2 = 1963.49 \text{ mm}^2 = 19.63 \text{ cm}^2$$

$$K_7 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_7}{A_6}\right) = 0.336$$

領域⑧ 冷却管

$$A_8 = A_7 = 19.63 \text{ cm}^2$$

$$De_8 = 5.0 \text{ cm}$$

$$L_8 = 3509 \text{ mm} = 350.9 \text{ cm}$$

$$K_8 = 1.129 \times 2 + 176.0 = 178.258$$

領域⑨ 冷却管出口

$$A_9 = A_7 = 19.63 \text{ cm}^2$$

$$K_9 = 1.0$$

b) 照射シンブル DR

領域① 下降流路入口

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \times 140^2 = 15393.80 \text{ mm}^2 = 153.9 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.5$$

領域② 下降流路直流路

$$A_2 = A_1 = 153.9 \text{ cm}^2$$

$$De_2 = 14.0 \text{ cm}$$

$$L_2 = 2110 - 55 = 2055 \text{ mm} = 205.5 \text{ cm}$$

領域③ 水平流路入口

$$K_3 = 0.5$$

$$A_3 = A_4 = \frac{\pi}{4} \times 55^2 = 2375.83 \text{ mm}^2 = 23.76 \text{ cm}^2$$

領域④ 水平流路

$$A_4 = A_3 = 23.76 \text{ cm}^2$$

$$De_4 = 5.5 \text{ cm}$$

$$L_4 = \frac{160}{2} = 80 \text{ mm} = 8.0 \text{ cm}$$

領域⑤ 水平流路出口

$$A_6 = \frac{\pi}{4} \times (160^2 - 150^2) = 2434.73 \text{ mm}^2 = 24.35 \text{ cm}^2$$

$$A_5 = A_4 = 23.76 \text{ cm}^2$$

$$K_5 = \left(1 - \frac{A_5}{A_6}\right)^2 = 0.001$$

領域⑥ 上昇流路

$$A_6 = 24.35 \text{ cm}^2$$

$$De_6 = 160 - 150 = 10 \text{ mm} = 1.0 \text{ cm}$$

$$L_6 = 2110 - 55 - 100 = 1955 \text{ mm} = 195.5 \text{ cm}$$

領域⑦ 冷却管入口

$$A_7 = \frac{\pi}{4} \times 50^2 = 1963.49 \text{ mm}^2 = 19.63 \text{ cm}^2$$

$$K_7 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_7}{A_6}\right) = 0.0969$$

領域⑧ 冷却管

$$A_8 = A_7 = 19.63 \text{ cm}^2$$

$$De_8 = 5.0 \text{ cm}$$

$$L_8 = 3662 \text{ mm} = 366.2 \text{ cm}$$

$$K_8 = 1.129 \times 2 + 176.0 = 178.258$$

領域⑨ 冷却管出口

$$A_9 = A_7 = 19.63 \text{ cm}^2$$

$$K_9 = 1.0$$

c) 照射シンプル SH

領域① 下降流路入口

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \times 100^2 = 7853.98 \text{ mm}^2 = 78.54 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = 0.0 \text{ cm}$$

$$K_1 = 0.5$$

領域② 下降流路直流路

$$A_2 = A_1 = 78.54 \text{ cm}^2$$

$$De_2 = 10.0 \text{ cm}$$

$$L_2 = 2110 - 55 = 2055 \text{ mm} = 205.5 \text{ cm}$$

領域③ 水平流路入口

$$K_3 = 0.5$$

$$A_3 = A_4 = \frac{\pi}{4} \times 55^2 = 2375.83 \text{ mm}^2 = 23.76 \text{ cm}^2$$

領域④ 水平流路

$$A_4 = A_3 = 23.76 \text{ cm}^2$$

$$De_4 = 5.5 \text{ cm}$$

$$L_4 = \frac{120}{2} = 60 \text{ mm} = 6.0 \text{ cm}$$

領域⑤ 水平流路出口

$$A_6 = \frac{\pi}{4} \times (120^2 - 110^2) = 1806.42 \text{ mm}^2 = 18.06 \text{ cm}^2$$

$$A_5 = A_4 = 23.76 \text{ cm}^2$$

$$K_5 = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_5}{A_4}\right) = 0.120$$

領域⑥ 上昇流路

$$A_6 = 18.06 \text{ cm}^2$$

$$De_6 = 120 - 110 = 10 \text{ mm} = 1.0 \text{ cm}$$

$$L_6 = 2110 - 55 - 100 = 1955 \text{ mm} = 195.5 \text{ cm}$$

領域⑦ 上昇流路出口

$$A_7 = 18.06 \text{ cm}^2$$

$$A_8 = \frac{\pi}{4} \times 50^2 = 1963.49 \text{ mm}^2 = 19.63 \text{ cm}^2$$

$$K_7 = \left(1 - \frac{A_7}{A_8}\right)^2 = 0.0064$$

領域⑧ 冷却管

$$A_8 = A_7 = 19.63 \text{ cm}^2$$

$$De_8 = 5.0 \text{ cm}$$

$$L_8 = 3539 \text{ mm} = 353.9 \text{ cm}$$

$$K_8 = 1129 \times 2 + 176.0 = 178.258$$

領域⑨ 冷却管出口

$$A_9 = A_7 = 19.63 \text{ cm}^2$$

$$K_9 = 1.0$$

領域番号

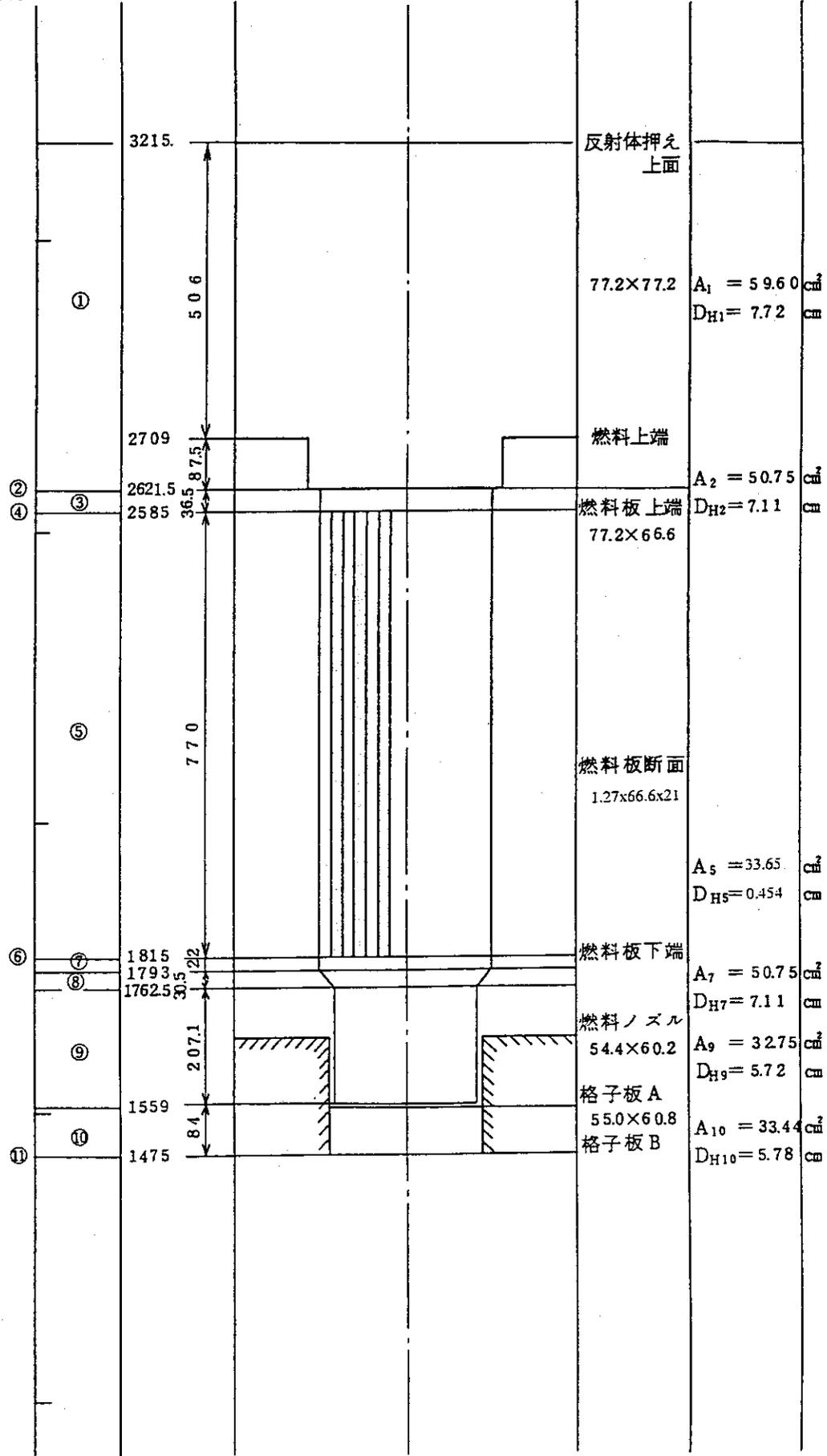


Fig.2.2.1 Pressure drop calculation model for the standard fuel element (Silicide fuel)

領域番号

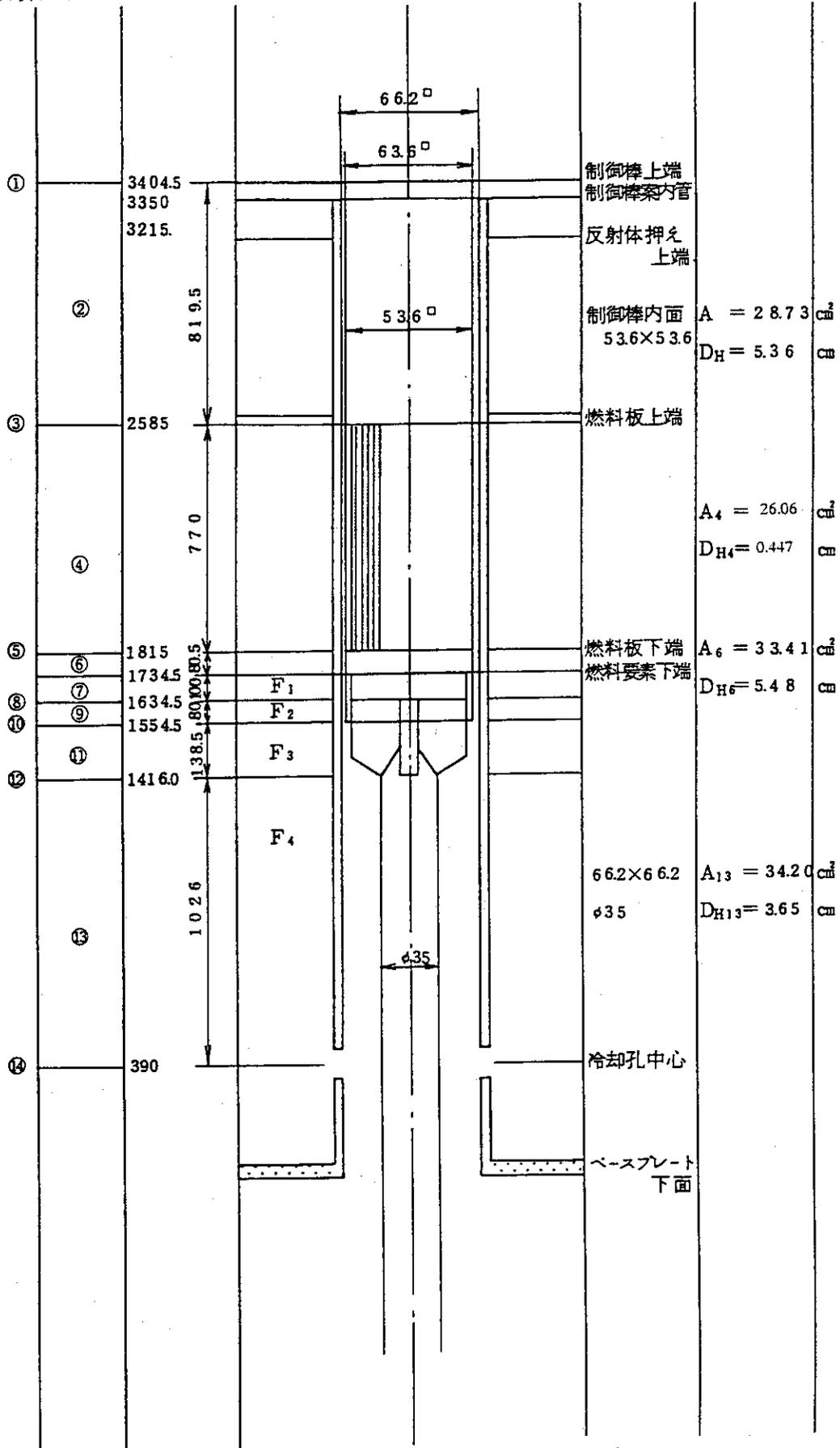


Fig.2.2.2 Pressure drop calculation model for the follower fuel element (Silicide fuel) with neutron absorber

領域番号

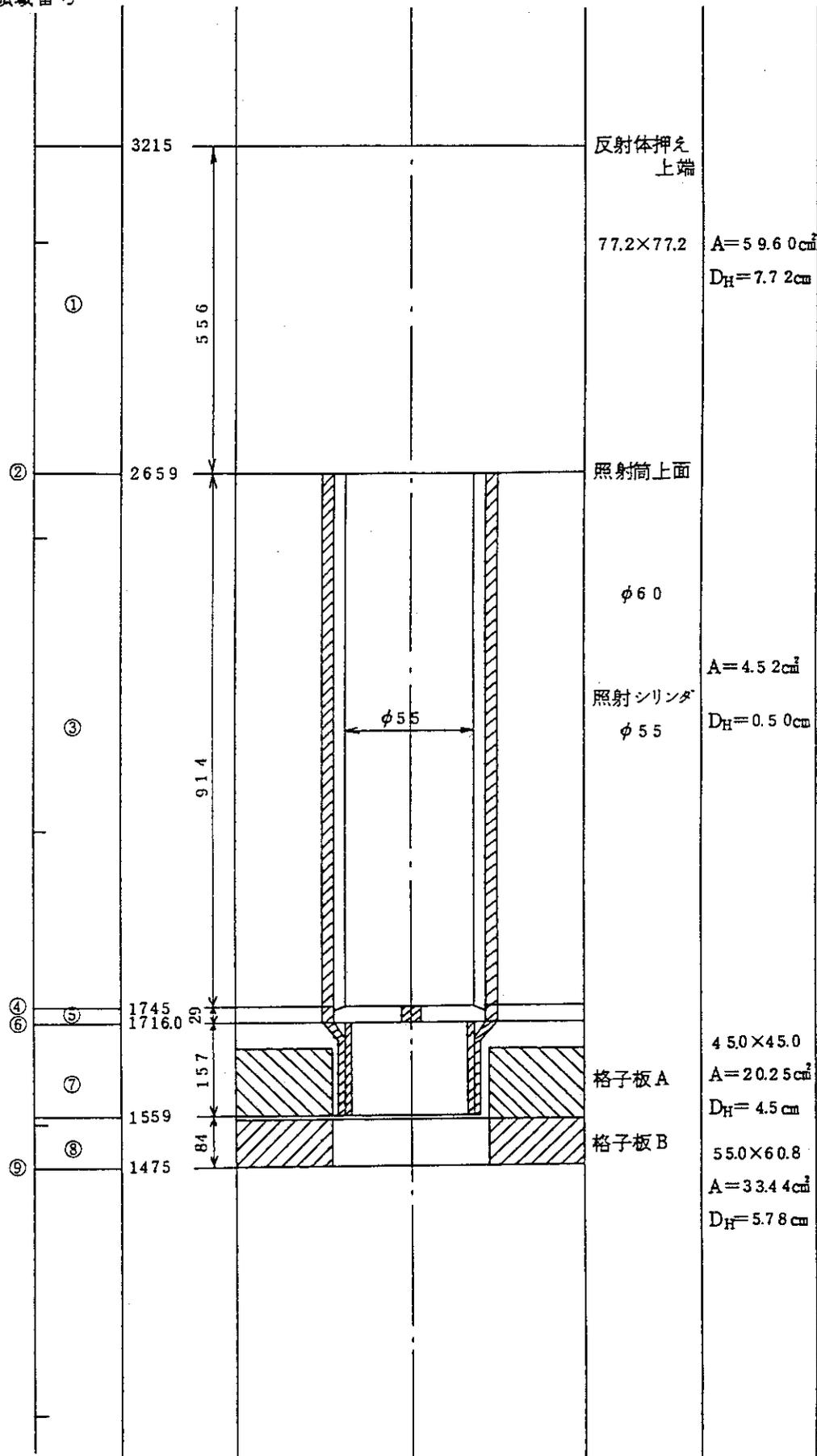


Fig.2.2.3 Pressure drop calculation model for the irradiation element

領域番号

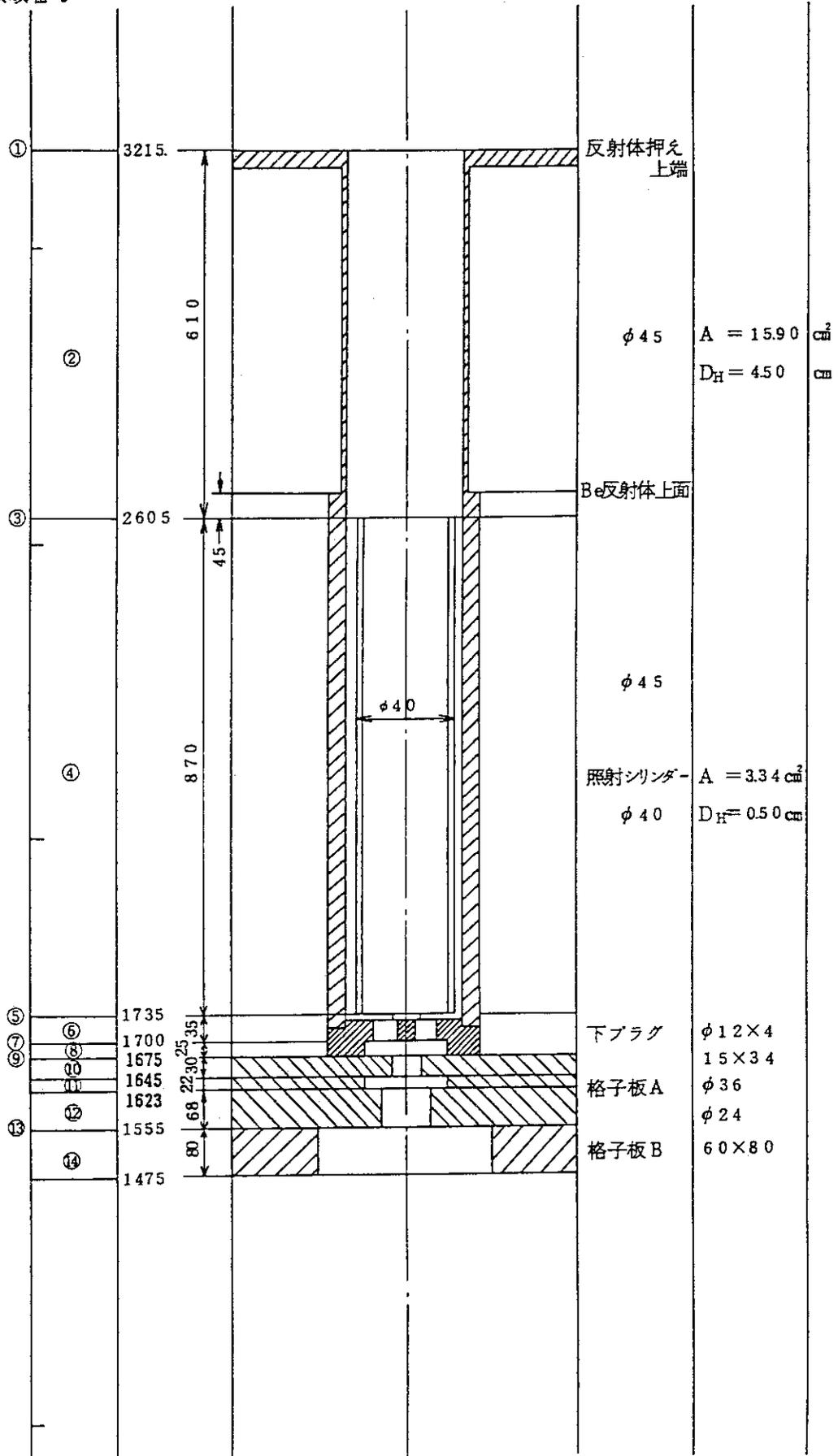


Fig.2.2.4 Pressure drop calculation model for the beryllium reflector element (Type B, C)

領域番号

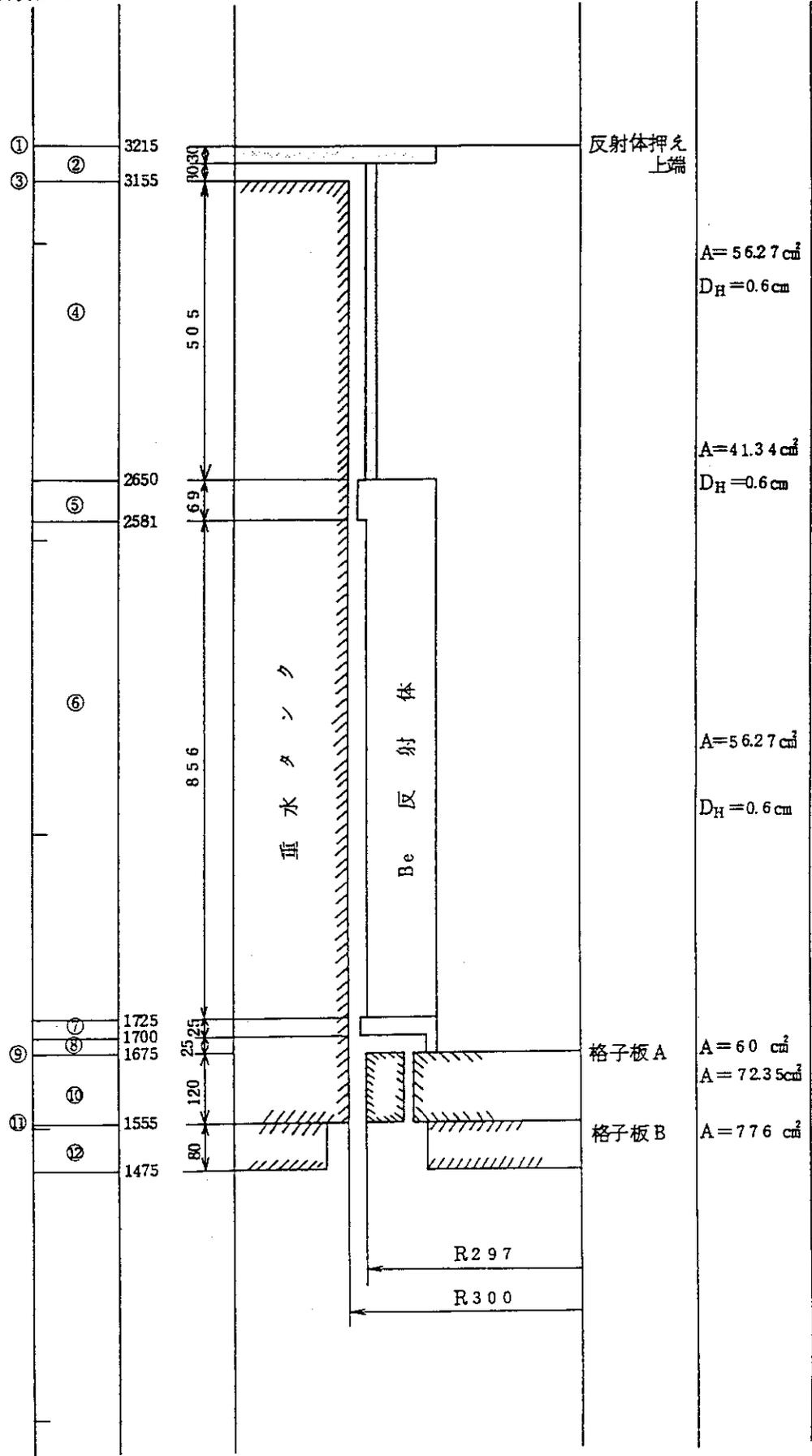


Fig.2.2.5 Pressure drop calculation model for the core bypass

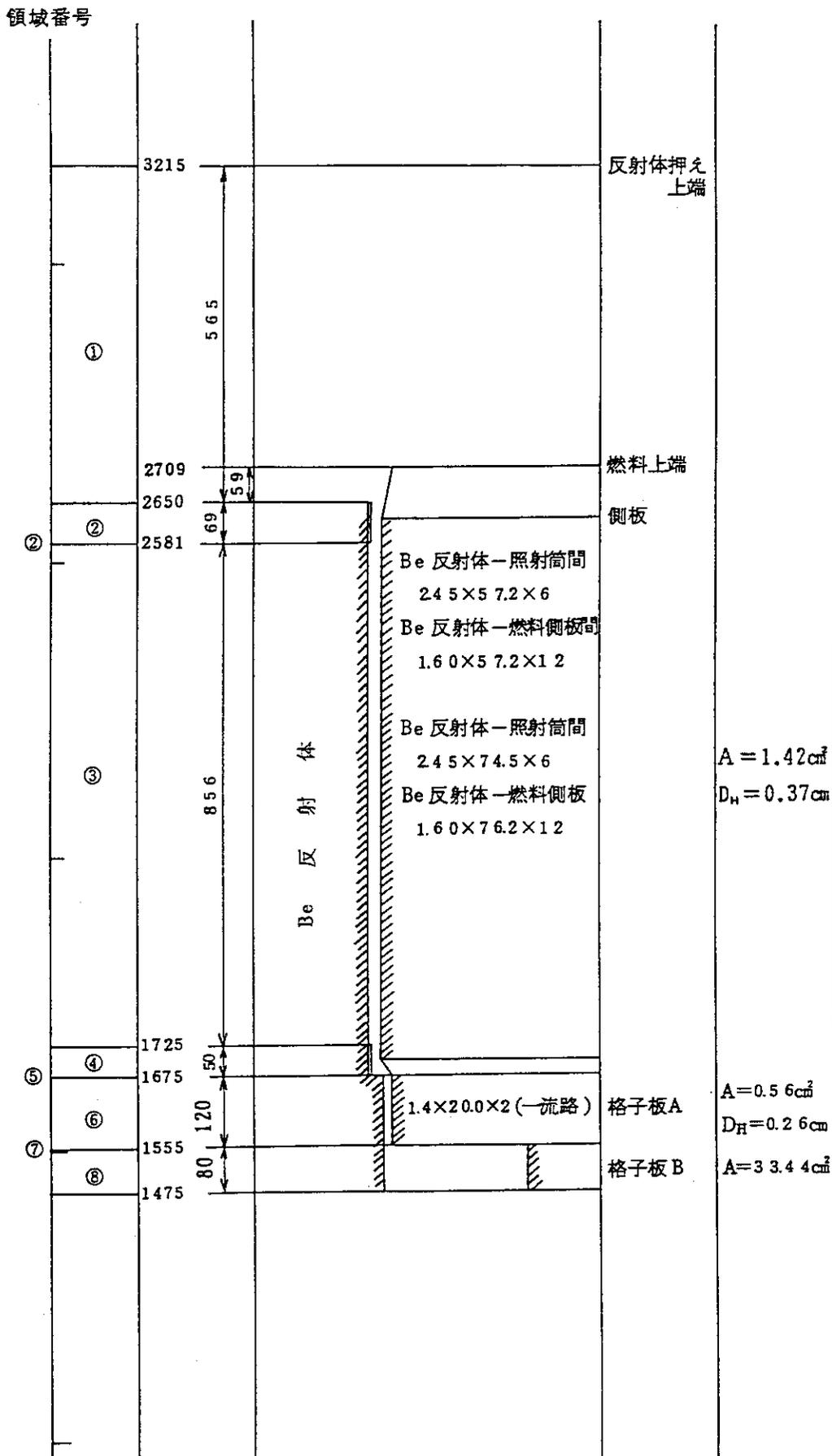


Fig.2.2.6 Pressure drop calculation model for the channel between beryllium reflector and fuel side plate

領域番号

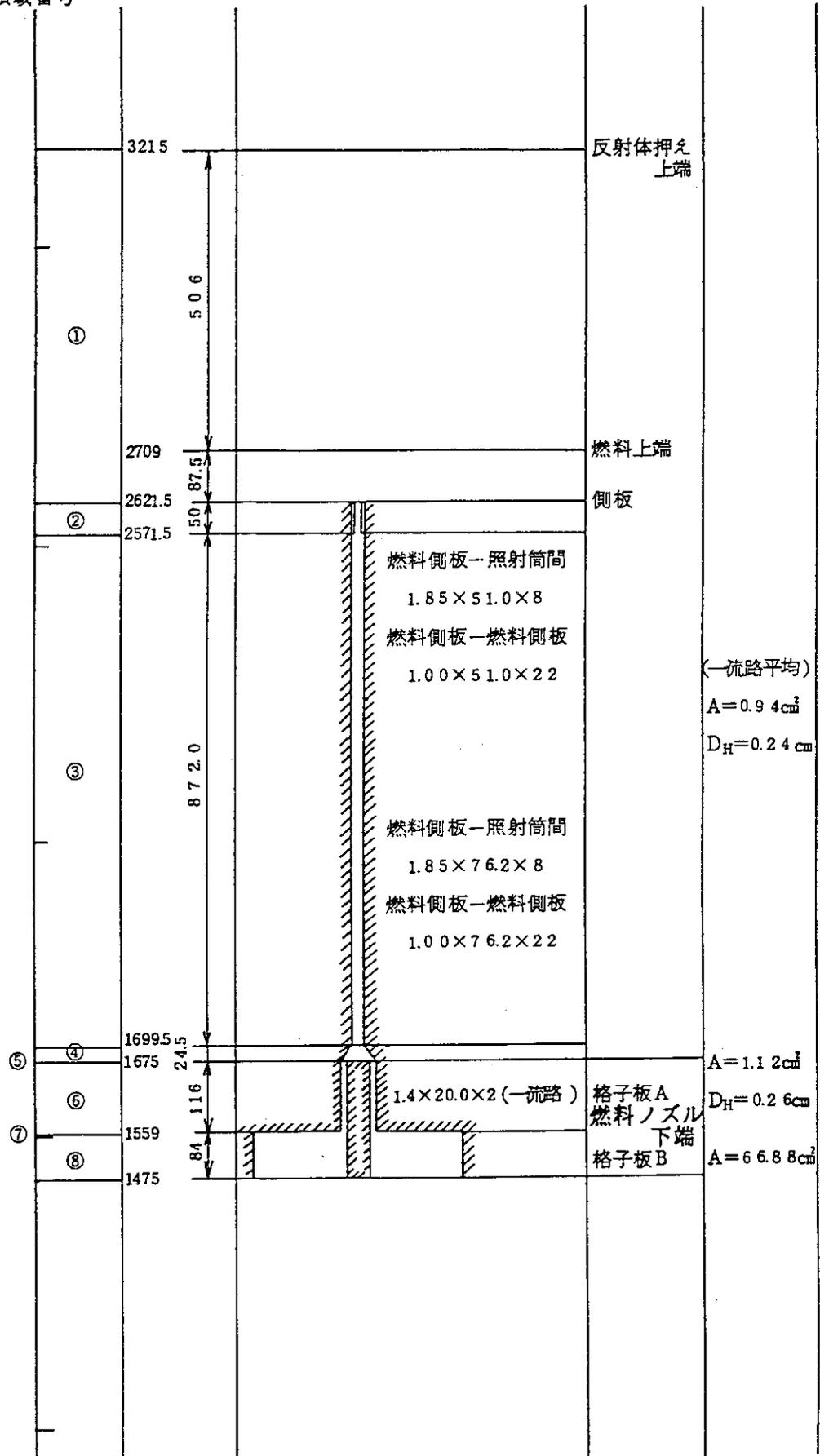
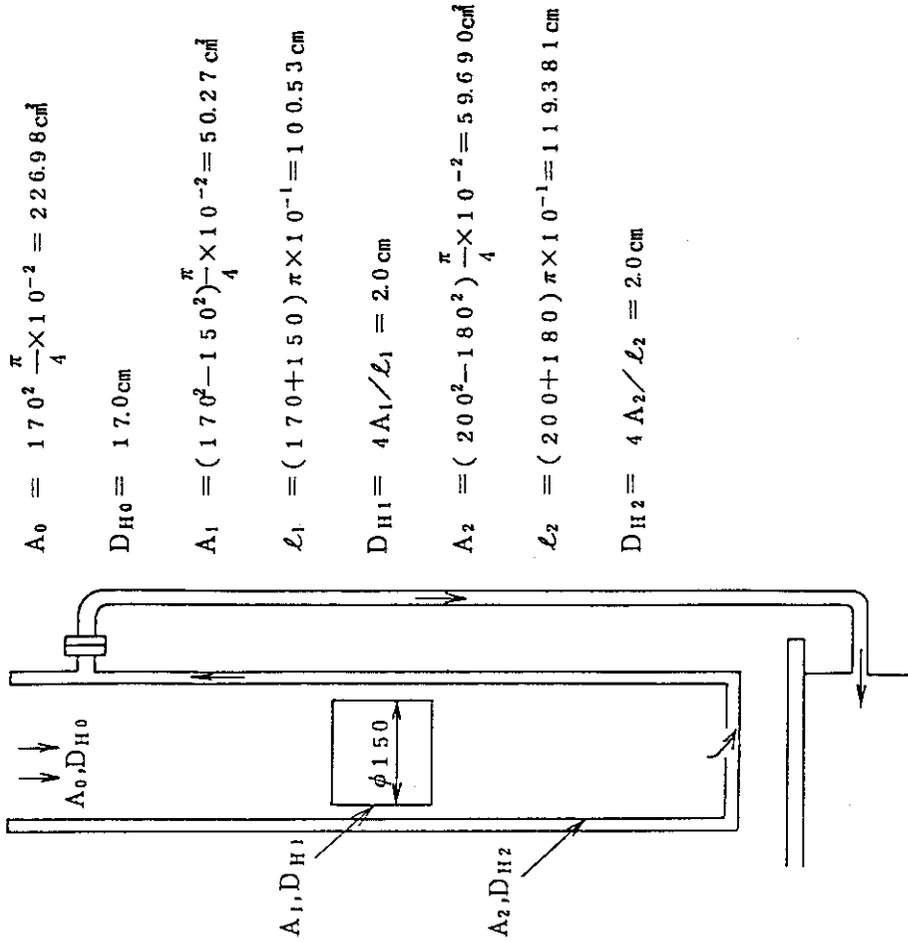
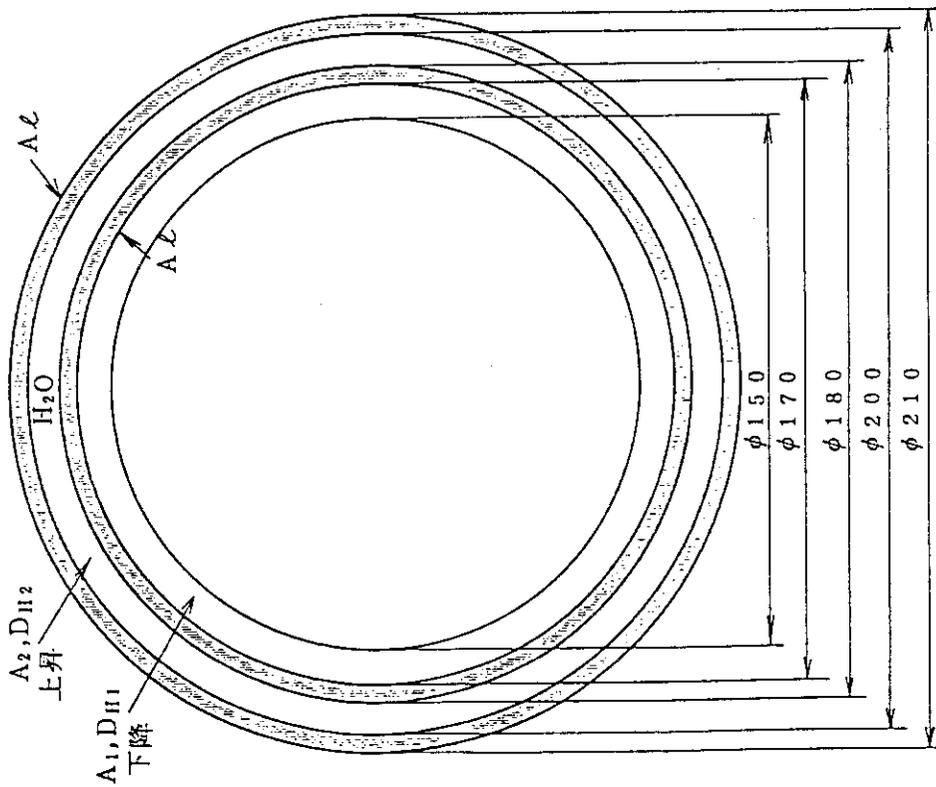


Fig.2.2.7 Pressure drop calculation model for the channel between fuel side plate fuel side plate

下降流路長 2150 - 55 = 2095

上昇流路長 2150 - 55 - 170 = 1925



$$A_0 = 170^2 \frac{\pi}{4} \times 10^{-2} = 226.98 \text{ cm}^2$$

$$D_{H0} = 17.0 \text{ cm}$$

$$A_1 = (170^2 - 150^2) \frac{\pi}{4} \times 10^{-2} = 50.27 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = (170 + 150) \pi \times 10^{-1} = 100.53 \text{ cm}$$

$$D_{H1} = 4A_1 / L_1 = 2.0 \text{ cm}$$

$$A_2 = (200^2 - 180^2) \frac{\pi}{4} \times 10^{-2} = 59.69 \text{ cm}^2$$

$$L_2 = (200 + 180) \pi \times 10^{-1} = 119.38 \text{ cm}$$

$$D_{H2} = 4A_2 / L_2 = 2.0 \text{ cm}$$

Fig.2.2.8 Pressure drop calculation model for the irradiation thimble (SI-1) with irradiation sample cooling pipe

下降流路長 2110-55=2055
 上昇流路長 2110-55-100=1955

$$A_0 = 140^2 \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-2} = 153.94 \text{ cm}^2$$

$$D_{H10} = 14.0 \text{ cm}$$

$$A_1 = (140^2 - 130^2) \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-2} = 21.206 \text{ cm}^2$$

$$\mathcal{L}_1 = (140 + 130) \pi \times 10^{-1} = 84.823 \text{ cm}$$

$$D_{H11} = 1.0 \text{ cm}$$

$$A_2 = (160^2 - 150^2) \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-2} = 24.347$$

$$\mathcal{L}_2 = (160 + 150) \pi \times 10^{-1} = 97.389$$

$$D_{H12} = 1.0 \text{ cm}$$

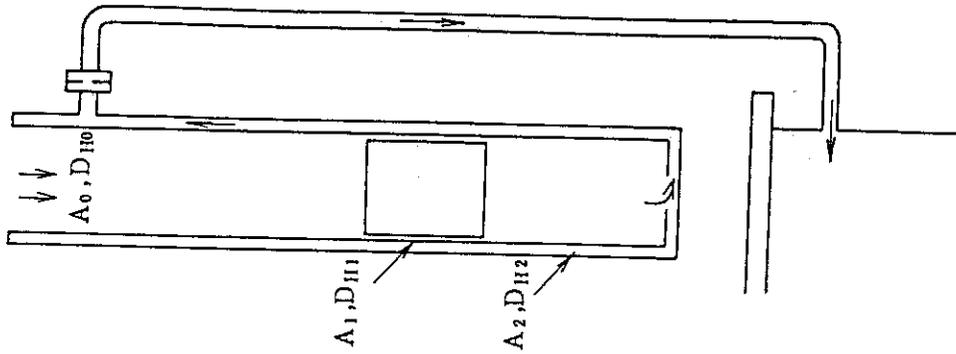
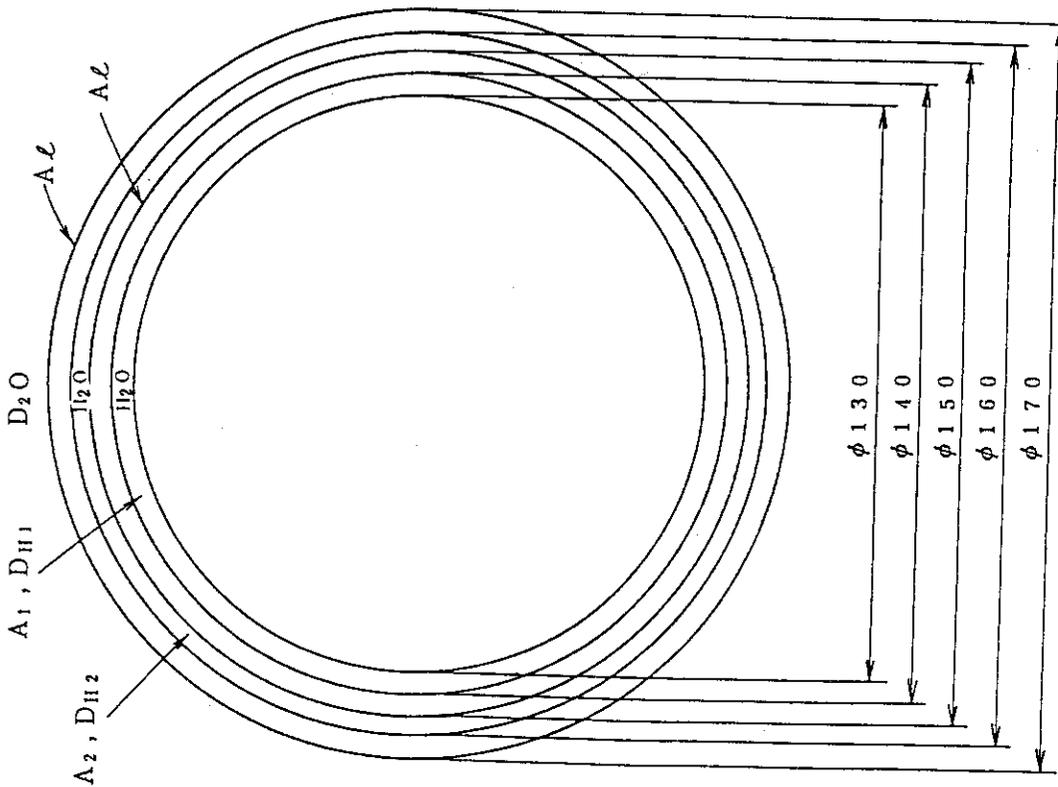
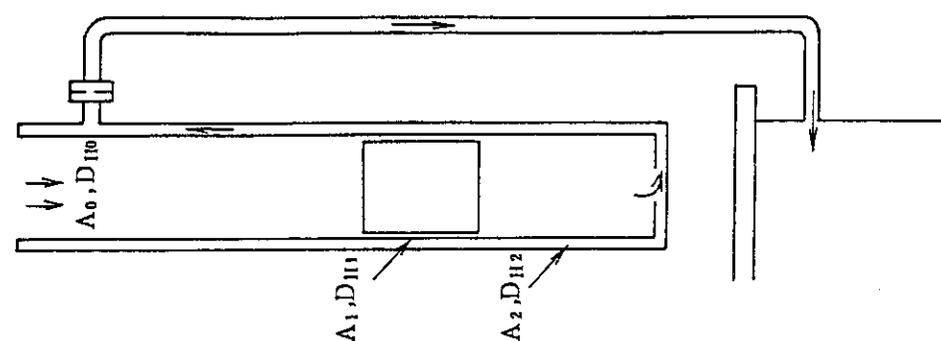
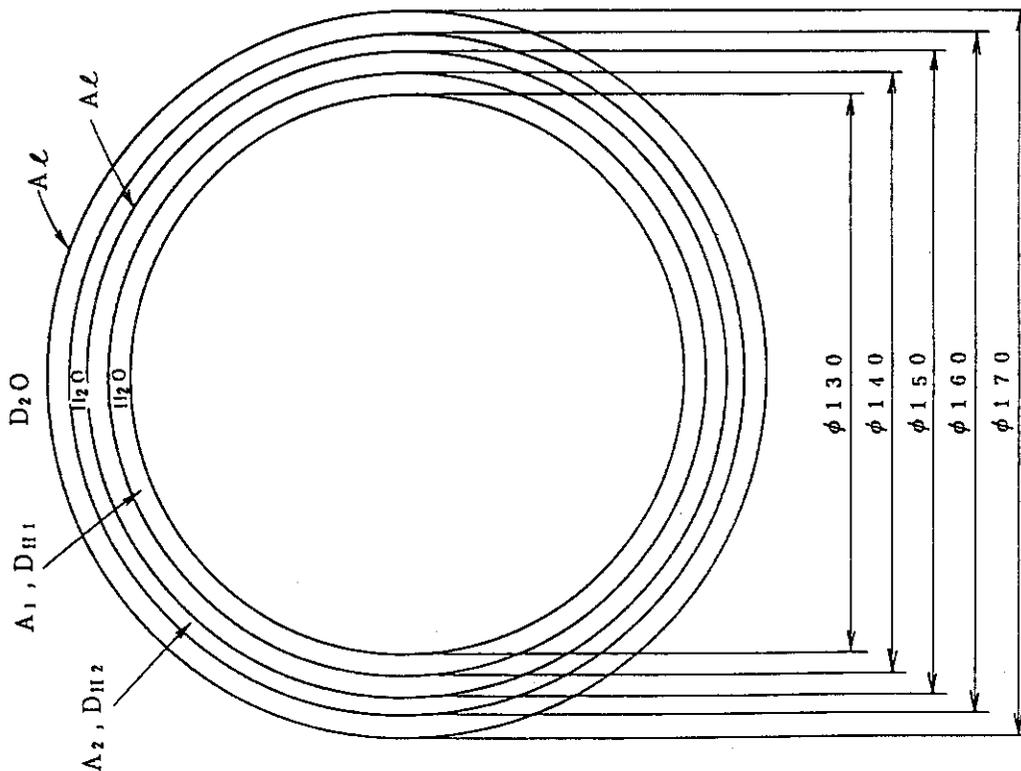


Fig.2.2.9 Pressure drop calculation model for the irradiation thimble (DR-1) with irradiation sample cooling pipe

下降流路長 2110-55=2055

上昇流路長 2110-55-100=1955



$$A_0 = 140^2 \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-2} = 153.94 \text{ cm}^2$$

$$D_{H0} = 14.0 \text{ cm}$$

$$A_1 = (140^2 - 130^2) \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-2} = 21.206 \text{ cm}^2$$

$$L_1 = (140 + 130) \pi \times 10^{-1} = 84.823 \text{ cm}$$

$$D_{H1} = 1.0 \text{ cm}$$

$$A_2 = (160^2 - 150^2) \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-2} = 24.347 \text{ cm}^2$$

$$L_2 = (160 + 150) \pi \times 10^{-1} = 97.389 \text{ cm}$$

$$D_{H2} = 1.0 \text{ cm}$$

Fig.2.2.9 Pressure drop calculation model for the irradiation thimble (DR-1) with irradiation sample cooling pipe

2.3 解析結果

シリサイド燃料炉心の冷却材流量配分解析結果を Table 2.3.1～Table 2.3.3 に示す。各表には、各流路の流路面積と流速を合わせて示した。なお、流速は、標準型燃料要素の燃料有効部中心と同一高さにおける値である。Table 2.3.1 にはアルミナイド燃料炉心との違いが比較できるように、アルミナイド燃料炉心の流量割合も示す。Table 2.3.1 に示すようにアルミナイド炉心の冷却材流量配分割合と比較すると、シリサイド燃料炉心の場合は標準型燃料要素の流量割合がわずかに増加し、それに伴ってその他の流路の流量割合が少しづつ減少していることがわかる。

シリサイド燃料炉心では、標準型燃料要素の冷却材流路寸法の変更（流路ギャップが 2.28 mm から 2.35 mm に 0.07 mm 増加）及び燃料要素当りの流路断面積の増加により、同じ流量の場合には、標準型燃料要素の圧力損失の大部分を占める摩擦損失が減少する。このため、アルミナイド燃料炉心と同じ流量配分では、フォロー型燃料要素、その他の構成要素及びバイパス流路と圧力損失のバランスが崩れ、これらの炉心構成要素と圧力損失が同一となるよう、標準型燃料要素への流量が増加する。また、標準型燃料要素の流量が増加した分、フォロー型燃料要素、その他の構成要素及びバイパス流路の流量が減少する。

一方、フォロー型燃料要素についても、冷却材流路寸法の変更（流路ギャップが 2.38 mm から 2.40 mm に 0.02 mm 増加）及び燃料要素当りの流路断面積の増加により、同じ流量の場合には、フォロー型燃料要素の圧力損失は減少するが、フォロー型燃料要素の場合、上部に中性子吸収体（制御棒）、下部に制御棒駆動機構のアダプタ部などが存在し、フォロー型燃料要素の燃料板領域以外に圧力損失に影響を及ぼす要因があり、標準型燃料要素のように燃料板領域の摩擦損失が圧力損失の大部分を占めないこと、流路ギャップの変更が

Table 2.3.1 Flow distribution analysis results of JRR-3 silicide core
(Rated flow rate of 2400 m³/h)

No	Region	Flow area (m ²)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /h)	Flow rate ratio(%)	
					Silicide core	Aluminaide core
1	Standard type fuel element	0.08750	5.83	1836.8	76.5	75.3
2	Follower type fuel element	0.01564	5.18	291.6	12.2	12.5
3	Irradiation element	0.00226	5.37	43.7	1.8	2.0
4	Beryllium reflector (B, C type)	0.00267	5.23	50.3	2.1	2.3
5	Core bypass	0.00563	4.24	85.9	3.6	3.9
6	Be reflector - Fuel side plate	0.00256	2.43	22.4	0.9	1.0
7	Fuel side plate - Fuel side plate	0.00281	2.64	26.6	1.1	1.2
8	Irradiation thimble (with irradiation sample cooling pipe)	0.01021	0.92	19.5	0.8	0.9
9	Air outlet hole and drain hole	0.00063	10.23	23.1	1.0	1.0
Total				2400.0	100.0	100.0

注) No.1～7: Flow area and velocity are indicated at the axial center of the core.

No.8 : Flow area is indicated at irradiation thimble outer channel. Velocity is indicated at cooling pipe.

Table 2.3.2 Flow distribution analysis results of JRR-3 silicide core
(Flow rate : 1200 m³/h)

No	Region	Flow area (m ²)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /h)	Flow rate ratio(%) Silicide core
1	Standard type fuel element	0.08750	2.91	915.9	76.3
2	Follower type fuel element	0.01564	2.60	146.3	12.2
3	Irradiation element	0.00226	2.70	21.9	1.8
4	Beryllium reflector (B, C type)	0.00267	2.64	25.4	2.1
5	Core bypass	0.00563	2.14	43.3	3.6
6	Be reflector - Fuel side plate	0.00256	1.23	11.3	0.9
7	Fuel side plate - Fuel side plate	0.00281	1.31	13.2	1.1
8	Irradiation thimble (with irradiation sample cooling pipe)	0.01021	0.49	10.4	0.9
9	Air outlet hole and drain hole	0.00063	5.44	12.3	1.0
Total				1200.0	100.0

注) No.1~7: Flow area and velocity are indicated at the axial center of the core.

No.8 : Flow area is indicated at irradiation thimble outer channel. Velocity is indicated at cooling pipe.

Table 2.3.3 Flow distribution analysis results of JRR-3 silicide core
(Flow rate : 480 m³/h)

No	Region	Flow area (m ²)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /h)	Flow rate ratio(%) Silicide core
1	Standard type fuel element	0.08750	1.16	364.4	75.9
2	Follower type fuel element	0.01564	1.04	58.7	12.2
3	Irradiation element	0.00226	1.08	8.8	1.8
4	Beryllium reflector (B, C type)	0.00267	1.07	10.3	2.1
5	Core bypass	0.00563	0.87	17.5	3.7
6	Be reflector - Fuel side plate	0.00256	0.51	4.7	1.0
7	Fuel side plate - Fuel side plate	0.00281	0.56	5.7	1.2
8	Irradiation thimble (with irradiation sample cooling pipe)	0.01021	0.21	4.6	1.0
9	Air outlet hole and drain hole	0.00063	2.40	5.4	1.1
Total				480.0	100.0

注) No.1~7: Flow area and velocity are indicated at the axial center of the core.

No.8 : Flow area is indicated at irradiation thimble outer channel. Velocity is indicated at cooling pipe.

標準型燃料要素に比べ小さいことから、標準型燃料要素の流量増加の影響を受けて流量が減少したものである。

Table 2.3.2 に示した 1 次冷却材流量 1200m³/h 時の流量配分解析結果、Table 2.3.3 に示した 1 次冷却材流量 480m³/h 時の流量配分解析結果は、それぞれ 1 次冷却材主ポンプ 1 台の定格流量、補助ポンプ 2 台による定格流量を想定したもので、定格流量 2400m³/h の場合と比較する 1 次冷却材流量が減少するに従って、標準型燃料要素の流量割合が僅かずつ減少

しているものの、ほぼ同等とみることができる。

炉心部の全圧力損失は、摩擦損失、形状損失及び位置損失（水頭）の和として求める。いま、反射体押え上部を炉心入口とみなし、格子板支持胴上部（格子板 B 直下）を炉心出口とすると、炉心部の圧力損失は 1 次冷却系の定格流量時において約 0.63 kg/cm^2 である。このときの圧力損失の成分は、流路ごとに異なるが、流量割合が最も大きく、炉心圧力損失に支配的な標準型燃料要素の流路についてみれば、下記の通りである。

摩擦損失	0.71 kg/cm^2	[0.81 kg/cm^2]
形状損失	0.09 kg/cm^2	[0.11 kg/cm^2]
位置損失	-0.17 kg/cm^2	[-0.17 kg/cm^2]
全圧力損失	0.63 kg/cm^2	[0.75 kg/cm^2]

ここで、炉心入口圧力を重水タンク上板上面位置でとれば、炉心入口圧力及び出口圧力はそれぞれ次の値となる。

$$\text{炉心入口圧力} = 1.49 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs} \quad [1.49 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}]$$

$$\text{炉心出口圧力} = 0.86 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs} \quad [0.86 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}]$$

[]内は、アルミナイド炉心における値を示す。

3. 炉心構造物設計差圧

3.1 概要

炉心構造物の耐圧・耐震強度計算では、各構造物が受ける最大圧力を考慮して定められた設計差圧が必要となる。本節では、各炉内構造物が受ける最大圧力に基づき設計差圧を定めた結果を示す。

3.2 設計差圧

耐圧・耐震強度計算に使用する設計差圧を最大差圧とともに Table 3.2.1 に示す。また、以下にそれぞれの構造物が受ける差圧の詳細⁽²⁾を示す。

Table 3.2.1 Maximum pressure difference and pressure difference for the design

No.	Component and part	Pressure difference for the design (kg/cm ²)	Maximum pressure difference (kg/cm ²)	
			Silicide core	Aluminaide core
1	Heavy water tank outer side plate	1.0	0.63	same as left
2	Heavy water tank inner side plate	1.0	0.63	same as left
3	Heavy water tank top plate	1.0	0.48	same as left
4	Heavy water tank bottom plate	1.0	0.64	same as left
5	Beam tube	1.0	0.59	same as left
6	Irradiation thinble	1.0	0.63	same as left
7	Vacuum containar for CNS	2.0	1.46	same as left
8	Grid plate	1.0	< 0.1	same as left
9	Plenum side plate	1.0	0.79	0.91

(1) 重水タンク外胴板

重水タンク外胴板の最大差圧は、原子炉プール水が満たされかつタンク内の重水を全量ダンプした際に、外胴板下端に生じる。

重水タンク外胴板外面圧力	:	1.64 kg/cm ² ·abs	(静水頭)
重水タンク内圧力	:	1.01 kg/cm ² ·abs	(カバーガス圧)
最大差圧	:	0.63 kg/cm ²	

(2) 重水タンク内胴板

[定格出力運転時]

定格出力運転時の最大差圧は、内胴下端に生じる。

重水タンク内圧力	: 1.18 kg/cm ² ·abs	(カバーガス圧+重水水頭)
内胴炉心側圧力	: 0.86 kg/cm ² ·abs	(炉心出口圧) [0.74 kg/cm ² ·abs]
最大差圧	: 0.32 kg/cm ²	[0.44 kg/cm ²]

[重水全量ダンプ時]

重水全量ダンプ時の最大差圧も、内胴下端に生じる。

内胴炉心側圧力	: 1.64 kg/cm ² ·abs	(静水頭)
重水タンク内圧力	: 1.01 kg/cm ² ·abs	(カバーガス圧)
最大差圧	: 0.63 kg/cm ²	

以上から、内胴板の最大差圧は重水全量ダンプ時に生じ、0.63 kg/cm²である。

(3) 重水タンク上板

重水タンク上板上部には静水頭がかかり、上板下面は重水タンク内のカバーガス圧である。

重水タンク上板上面圧力	: 1.49 kg/cm ² ·abs	(静水頭)
重水タンク上板下面圧力	: 1.01 kg/cm ² ·abs	(カバーガス圧)
最大差圧	: 0.48 kg/cm ²	

(4) 重水タンク底板

[定格出力運転時]

底板上面が高圧側となり、底板下面圧は炉心出口圧力で与えられる。

底板上面圧力	: 1.18 kg/cm ² ·abs	(カバーガス圧+重水水頭)
底板下面圧力	: 0.86 kg/cm ² ·abs	(炉心出口圧) [0.74 kg/cm ² ·abs]
最大差圧	: 0.32 kg/cm ²	[0.44 kg/cm ²]

[重水全量ダンプ時]

底板上面はカバーガス圧力で低圧側であり、底板下面圧は静水頭で高圧側になる。

底板下面圧力	: 1.65 kg/cm ² ·abs	(静水頭)
底板上面圧力	: 1.01 kg/cm ² ·abs	(カバーガス圧)
最大差圧	: 0.64 kg/cm ²	

以上から、重水タンク底板の最大差圧は重水全量ダンプ時に生じ、0.64 kg/cm²である。

(5) ビームチューブ

ビームチューブ内はヘリウム圧 $1.01 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$ で低圧側であり、原子炉プール水に接しているビームチューブ外面が高圧側となる。

ビームチューブ外圧	:	$1.60 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$	(静水頭)
ビームチューブ内圧	:	$1.01 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$	(ヘリウム圧)
最大差圧	:	0.59 kg/cm^2	

(6) 照射シンプル

照射シンプルの最大差圧は、重水全量ダンプ時にシンプル下端に生じる。

照射シンプル下端圧力	:	$1.64 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$	(静水頭)
重水タンク内圧力	:	$1.01 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$	(カバーガス圧)
最大差圧	:	0.63 kg/cm^2	

(7) 真空容器

真空容器の内圧は保守的に 0 と仮定する。外圧が最大となるのは真空容器フランジ上部であり静水頭 $1.46 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$ を受ける。

真空容器外圧	:	$1.46 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$	(静水頭)
真空容器内圧	:	$0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$	
最大差圧	:	1.46 kg/cm^2	

(8) 格子板

3. 流量配分と炉心圧力損失に示したように、炉心部の全圧力損失は 0.63 kg/cm^2 であり、かつその大部分は標準型燃料要素の燃料板部における摩擦損失である。従って、格子板差圧が 0.63 kg/cm^2 を越えることはない。

実際の格子板差圧は、炉心熱水力特性解析から求められるが、その結果では最大差圧は 0.10 kg/cm^2 以下であり十分小さい。

(9) プレナム胴板

プレナム胴板の最大差圧は、定格運転時にプレナム上部に発生し、プレナム内が低圧側、プレナム胴板外面が原子炉プール水頭により高圧側となる。

プレナム胴板外面圧力	:	$1.65 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$	(静水頭)
プレナム胴板内面圧力	:	$0.86 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$	(炉心出口圧) [$0.74 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$]
最大差圧	:	0.79 kg/cm^2	[0.91 kg/cm^2]

4. 炉心構造物設計流速

4.1 概要

炉心構造物のうち燃料要素に関しては、炉心熱水力設計計算により詳細な温度等が解析され、その安全性が確認される。一方、燃料要素以外の炉心構造物についても、 γ 線等による核発熱により温度上昇が生じる。炉心熱水力設計では、通常運転時には炉心内のいかなる点においても沸騰を許さないことを設計方針としており、燃料要素以外の炉心構造物も例外ではない。本節では、燃料要素以外で耐熱計算を実施する下記炉内構造物に対して温度計算に使用する流速（設計流速）を与える。設計流速の決定に際しては、炉心流量配分解析結果に基づく流速解析値に余裕をみて、温度計算に用いた場合、結果が厳しくなるよう低めの値に設定するものとする。

- 1) 照射筒・照射筒プラグ
- 2) 格子板 A
- 3) 格子板 B
- 4) 格子板支持胴
- 5) 制御棒案内管
- 6) 照射シンプル・照射シンプル用プラグ
- 7) ベリリウム反射体

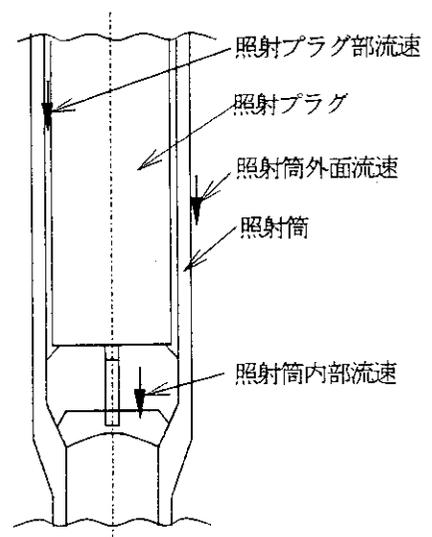
4.2 設計流速

各炉心構造物の耐熱計算に使用する設計流速と炉心流量配分解析結果に基づく流速解析値の一覧を Table 4.2.1 に示す。なお、[]内はアルミナイド炉心における値を示す⁽²⁾。

4.2.1 照射筒・照射筒プラグ

照射筒内ではプラグ部直下の流路面積が大きく流速が小さくなるので、この流速を照射筒内壁に適用する。

$$\begin{aligned} \cdot \text{流路面積} & A = 0.00214 \text{ m}^2 \\ \cdot \text{照射筒内流量} & J = 43.7 \text{ (m}^3/\text{h)} \times \frac{1}{3600 \text{ (s/h)}} \times \frac{1}{5 \text{ (体)}} \\ & = 2.43 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{体} \\ & \left[J = 47.4 \text{ (m}^3/\text{h)} \times \frac{1}{3600 \text{ (s/h)}} \times \frac{1}{5 \text{ (体)}} \right] \\ & = 2.63 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{体} \\ \cdot \text{照射筒内流速} & V = J/A = 1.13 \text{ m/s} \Rightarrow 1.1 \text{ m/s} \end{aligned}$$



$$[V = J/A = 1.23 \text{ m/s} \Rightarrow 1.2 \text{ m/s}]$$

照射筒外面流速は、ベリリウム反射体一側板間の流速で代表され、Table 2.3.1 No.6 より 2.43 m/s [2.64 m/s]である。これより、

・照射筒外面流速 $= 2.4 \text{ m/s} [2.6 \text{ m/s}]$

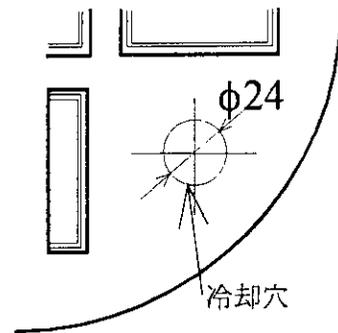
照射筒プラグ部流速は、Table 2.3.1 No.3 で与えられ 5.37 m/s [5.83 m/s]である。これより、

・照射筒プラグ部流速 $= 5.3 \text{ m/s} [5.8 \text{ m/s}]$

4.2.2 格子板 A

格子板 A の耐熱計算では、保守的に最高発熱密度を格子板 A 全体に使用する。従って最高温度点は冷却面から最も離れたベリリウム反射体 B・C 型直下位置の $\phi 24$ 冷却穴周辺に生じる。

この冷却穴を流れる流量は、ベリリウム反射体 (B・C 型) の照射孔流量であり、Table 2.3.1 No.4 より 50.3 m³/h [55.1 m³/h]である。



・流路面積 $A = 4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

・ベリリウム反射体流量 $J = 43.7 (\text{m}^3/\text{h}) \times \frac{1}{3600 (\text{s/h})} \times \frac{1}{5 (\text{体})}$
 $= 2.43 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{体}$

$$\left[\begin{aligned} J &= 47.4 (\text{m}^3/\text{h}) \times \frac{1}{3600 (\text{s/h})} \times \frac{1}{5 (\text{体})} \\ &= 2.63 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{体} \end{aligned} \right]$$

・冷却穴流速 $V = J/A = 1.13 \text{ m/s} \Rightarrow 1.1 \text{ m/s}$

$$[V = J/A = 1.23 \text{ m/s} \Rightarrow 1.2 \text{ m/s}]$$

4.2.3 格子板 B

格子板 B では、周辺の変形角穴部の流速が最も小さい。

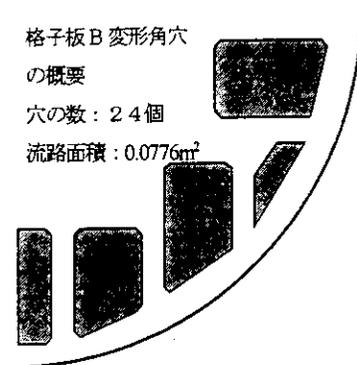
ここを流れる流量は、コアバイパス流量とベリリウム反射体 (B・C 型) の照射孔流量の合計である。

・流路面積 $A = 0.0776 \text{ m}^2$

格子板 B 変形角穴
の概要

穴の数: 24個

流路面積: 0.0776m²



(変形角穴全部の面積)

$$\begin{aligned}
 & \cdot \text{流量} \quad J = J_{\text{コアバイパス}} + J_{\text{ベリリウム反射体}} \\
 & \quad = (85.9 + 50.3)(\text{m}^3/\text{h}) \times \frac{1}{3600(\text{s/h})} \\
 & \quad = 0.0378 \text{ m}^3/\text{s} \\
 & \quad \left[\begin{aligned}
 & J = J_{\text{コアバイパス}} + J_{\text{ベリリウム反射体}} \\
 & = (93.0 + 55.1)(\text{m}^3/\text{h}) \times \frac{1}{3600(\text{s/h})} \\
 & = 0.0411 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \text{流速} \quad V = J/A = 0.49 \text{ m/s} \Rightarrow 0.45 \text{ m/s} \\
 & \quad [V = J/A = 0.53 \text{ m/s} \Rightarrow 0.50 \text{ m/s}]
 \end{aligned}$$

4.2.4 格子板支持胴

格子板支持胴外面では、保守的に断熱と考える。ここでは、支持胴内面流速を求める。

$$\begin{aligned}
 & \cdot \text{支持胴内流路面積} \quad A = \frac{\pi}{4} \times 0.68^2 = 0.363 \text{ m}^2 \\
 & \cdot \text{流量} \quad J = 2400 (\text{m}^3/\text{h}) \times \frac{1}{3600(\text{s/h})} = 0.667 \text{ m}^3/\text{s} \\
 & \cdot \text{支持胴内流速} \quad V = J/A = 1.84 \text{ m/s} \Rightarrow 1.8 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

4.2.5 制御棒案内管

制御棒案内管内で流路面積が最も大きい位置はアダプタ部であり、この部分の流速が最小となる。

$$\begin{aligned}
 & \cdot \text{流路面積} \quad A = 36.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{体} \\
 & \cdot \text{流量} \quad J = 291.6 (\text{m}^3/\text{h}) \times \frac{1}{3600(\text{s/h})} \times \frac{1}{6(\text{体})} \\
 & \quad = 0.0135 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{体} \\
 & \quad \left[\begin{aligned}
 & J = 299.4 (\text{m}^3/\text{h}) \times \frac{1}{3600(\text{s/h})} \times \frac{1}{6(\text{体})} \\
 & = 0.0139 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{体}
 \end{aligned} \right] \\
 & \cdot \text{流速} \quad V = J/A = 3.69 \text{ m/s} \Rightarrow 3.0 \text{ m/s} \\
 & \quad [V = J/A = 3.79 \text{ m/s} \Rightarrow 3.0 \text{ m/s}]
 \end{aligned}$$

制御棒案内管外表面流速は、燃料側板－燃料側板間流速で代表される。Table 2.3.1 No.7より、流速は 2.64 m/s [2.87 m/s]であり、下記値を設計流速とする。

・制御棒案内管外表面流速 = 2.0 m/s [2.0 m/s]

4.2.6 照射シンプル・照射シンプル用プラグ

[照射シンプル]

照射シンプル SI-1、DR-1、SH-1 の流量は、いずれも 6.5 m³/h [7.0 m³/h]である。従って、流速は流路面積が最大な SI-1 で最小となる。

・流量 $J = 6.5 \text{ (m}^3/\text{h)} \times \frac{1}{3600 \text{ (s/h)}} = 1.81 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\left[J = 7.0 \text{ (m}^3/\text{h)} \times \frac{1}{3600 \text{ (s/h)}} = 1.94 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \right]$$

・内筒内流路面積 $A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot 0.17^2 = 0.0227 \text{ m}^2$

・内筒内流速 $V_1 = J/A_1 = 0.080 \text{ m/s} \Rightarrow 0.075 \text{ m/s}$

$$\left[V_1 = J/A_1 = 0.086 \text{ m/s} \Rightarrow 0.08 \text{ m/s} \right]$$

・内外筒間流路面積 $A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (0.20^2 - 0.18^2) = 5.97 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

・内外筒間流速 $V_2 = J/A_2 = 0.30 \text{ m/s} \Rightarrow 0.28 \text{ m/s}$

$$\left[V_2 = J/A_2 = 0.32 \text{ m/s} \Rightarrow 0.30 \text{ m/s} \right]$$

[照射シンプル用プラグ]

照射シンプル SH-1 のプラグ部流路寸法は、内筒内径 $\phi 100 \text{ mm}$ 、プラグ外径 $\phi 96 \text{ mm}$ である。

・流路面積 $A = \frac{\pi}{4} \cdot (0.10^2 - 0.096^2) = 6.16 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

・流量 $J = 6.5 \text{ (m}^3/\text{h)} \times \frac{1}{3600 \text{ (s/h)}} = 1.81 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\left[J = 7.0 \text{ (m}^3/\text{h)} \times \frac{1}{3600 \text{ (s/h)}} = 1.94 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \right]$$

・プラグ外表面流速 $V = J/A = 2.94 \text{ m/s} \Rightarrow 2.8 \text{ m/s}$

$$\left[V = J/A = 3.16 \text{ m/s} \Rightarrow 3.0 \text{ m/s} \right]$$

プラグの上面及び下面部は断熱と考える。

4.2.7 ベリリウム反射体

[A 型]

ベリリウム反射体 A 型-重水タンク間はコアバイパスを構成している。従って、重水タンク側はコアバイパス流速となるので、Table 2.3.1 No.5 より、

$$\cdot \text{重水タンク側流速} \quad 4.24 \text{ m/s} \Rightarrow 4.2 \text{ m/s} \quad [4.59 \text{ m/s} \Rightarrow 4.5 \text{ m/s}]$$

次にベリリウム反射体 A 型の燃料側流速は、ベリリウム反射体-燃料側板間流路の流速で代表させ得る。Table 2.3.1 No.6 より、

$$\cdot \text{燃料側流速} \quad 2.43 \text{ m/s} \Rightarrow 2.4 \text{ m/s} \quad [2.64 \text{ m/s} \Rightarrow 2.6 \text{ m/s}]$$

[B・C 型]

ベリリウム反射体 B・C 型についても重水タンク側はコアバイパス流速であり、燃料側流速はベリリウム反射体-燃料側板間の流速である。

$$\begin{aligned} \cdot \text{重水タンク側流速} & \quad 4.24 \text{ m/s} \Rightarrow 4.2 \text{ m/s} \quad [4.59 \text{ m/s} \Rightarrow 4.5 \text{ m/s}] \\ \cdot \text{燃料側流速} & \quad 2.43 \text{ m/s} \Rightarrow 2.4 \text{ m/s} \quad [2.64 \text{ m/s} \Rightarrow 2.6 \text{ m/s}] \end{aligned}$$

ベリリウム反射体 B・C 型の照射孔内流速は、Table 2.3.1 No.4 ベリリウム反射体 B・C 型流路の流速である。

$$\cdot \text{照射孔内流速} \quad 5.23 \text{ m/s} \Rightarrow 5.2 \text{ m/s} \quad [5.74 \text{ m/s} \Rightarrow 5.7 \text{ m/s}]$$

Table 4.2.1 Calculated velocities and design velocities for core components

No.	Component or region	Design velocity (m/s)	Calculated velocity (m/s)
1	Irradiation element	1.1 [1.2]	1.13 [1.23]
2	Irradiation element outer surface	2.4 [2.6]	2.43 [2.64]
3	Irradiation plug surface	5.3 [5.8]	5.37 [5.83]
4	Grid plate A, cooling channel (hole)	3.8 [4.0]	3.88 [4.23]
5	Grid plate B, cooling channel (hole)	0.45 [0.50]	0.49 [0.53]
6	Grid plate support body	1.8	1.84
7	Control rod guid tube	3.0	3.69 [3.79]
8	Control rod guid tube outer surface	2.0	2.64 [2.87]
9	Irradiation thimble inner tube	0.075 [0.08]	0.080 [0.086]
10	Between inner and outer tubes of irradiation thimble	0.28 [0.30]	0.30 [0.32]
11	Irradiation thimble plug surface	2.8 [3.0]	2.94 [3.16]
12	Beryllium reflector A, Heavy water tank side	4.2 [4.5]	4.24 [4.59]
13	Beryllium reflector A, Fuel element side	2.4 [2.6]	2.43 [2.64]
14	Beryllium reflector B·C, Heavy water tank side	4.2 [4.5]	4.24 [4.59]
15	Beryllium reflector B·C, Fuel element side	2.4 [2.6]	2.43 [2.64]
16	Beryllium reflector B·C, Irradiation hole	5.2 [5.7]	5.23 [5.74]

[] is a value for the aluminide core.

5. 結 言

JRR-3シリサイド燃料炉心の炉心流量配分特性を明らかにし、炉心冷却材流量配分解析結果に基づき、炉心構造物の設計差圧及び設計流速を定めた。設計差圧は、シリサイド炉心について検討した結果、これまでと変わることはなかった。一方、設計流速は、大部分の炉心構造物あるいは炉内流路において、アルミナイド燃料炉心の設計流速を下回る結果となった。このため、設計流速が変更となった炉心構造物に関しては、付録に示すような耐熱計算を再度実施した。シリサイド燃料炉心では、炉心構造物の最高温度の変化は、照射シムプルにおいて最大となり約2°C上昇した。また、最高温度が最も高い炉心構造物は照射筒プラグの約93°Cであり、いずれの炉心構造物も設計方針（最高使用温度100°C以下）を満足することを確認した。

謝 辞

研究炉部一色正彦部長、研究炉部高柳政二次長、研究炉技術開発室市川博喜室長、JRR-3管理掛札和弘課長には終始御鞭撻戴いた。ここに深い感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 日本原子力研究所, "JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書[JRR-3 の改造(その3)]"
- (3) 日本原子力研究所, "JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書[JRR-3 の改造(その6)]"
- (4) 日本原子力研究所, "JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書[JRR-3 の改造(その8)]"

5. 結 言

JRR-3シリサイド燃料炉心の炉心流量配分特性を明らかにし、炉心冷却材流量配分解析結果に基づき、炉心構造物の設計差圧及び設計流速を定めた。設計差圧は、シリサイド炉心について検討した結果、これまでと変わることはなかった。一方、設計流速は、大部分の炉心構造物あるいは炉内流路において、アルミナイド燃料炉心の設計流速を下回る結果となった。このため、設計流速が変更となった炉心構造物に関しては、付録に示すような耐熱計算を再度実施した。シリサイド燃料炉心では、炉心構造物の最高温度の変化は、照射シムブルにおいて最大となり約2°C上昇した。また、最高温度が最も高い炉心構造物は照射筒プラグの約93°Cであり、いずれの炉心構造物も設計方針（最高使用温度100°C以下）を満足することを確認した。

謝 辞

研究炉部一色正彦部長、研究炉部高柳政二次長、研究炉技術開発室市川博喜室長、JRR-3管理掛札和弘課長には終始御鞭撻戴いた。ここに深い感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 日本原子力研究所, "JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書[JRR-3 の改造(その3)]"
- (3) 日本原子力研究所, "JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書[JRR-3 の改造(その6)]"
- (4) 日本原子力研究所, "JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書[JRR-3 の改造(その8)]"

5. 結 言

JRR-3シリサイド燃料炉心の炉心流量配分特性を明らかにし、炉心冷却材流量配分解析結果に基づき、炉心構造物の設計差圧及び設計流速を定めた。設計差圧は、シリサイド炉心について検討した結果、これまでと変わることはなかった。一方、設計流速は、大部分の炉心構造物あるいは炉内流路において、アルミナイド燃料炉心の設計流速を下回る結果となった。このため、設計流速が変更となった炉心構造物に関しては、付録に示すような耐熱計算を再度実施した。シリサイド燃料炉心では、炉心構造物の最高温度の変化は、照射シンプルにおいて最大となり約2°C上昇した。また、最高温度が最も高い炉心構造物は照射筒プラグの約93°Cであり、いずれの炉心構造物も設計方針（最高使用温度100°C以下）を満足することを確認した。

謝 辞

研究炉部一色正彦部長、研究炉部高柳政二次長、研究炉技術開発室市川博喜室長、JRR-3管理掛札和弘課長には終始御鞭撻戴いた。ここに深い感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 日本原子力研究所, "JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書[JRR-3 の改造(その3)]"
- (3) 日本原子力研究所, "JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書[JRR-3 の改造(その6)]"
- (4) 日本原子力研究所, "JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書[JRR-3 の改造(その8)]"

付録 A 炉心冷却材流量配分解析モデル妥当性の検討

炉心冷却材流量配分解析では、燃料要素以外の炉心構造物に関しても最新の構造図に基づき解析モデルを見直した。但し、シリサイド燃料炉心における解析モデルにおいても、アルミナイド燃料炉心と比べて燃料要素部以外の変更は無いため、燃料要素部をアルミナイド燃料に置きかえれば、現在の炉心の流量配分が得られるものとなっている。このため、炉心流量配分解析モデルの作成に際して、作成した解析モデルに間違いの無い事を確認するため、以下に示す方法により解析モデルの妥当性を検討した。

今回解析に用いたシリサイド燃料炉心の炉心流量配分解析モデルを基に、燃料板領域のみアルミナイド燃料の寸法に変更したモデルによるアルミナイド炉心の冷却材流量配分計算を実施した。Table A-1 に、アルミナイド炉心の冷却材流量配分計算結果と設工認に提出されているアルミナイド炉心の冷却材流量配分計算結果⁽⁴⁾とを比較したものを示す。

Table A-1 から明らかなように、今回の計算結果と設工認時の計算結果は、同等であると考えることができ、本モデルに基づき炉心流量配分を解析することは妥当なものである。

Table A-1 アルミナイド炉心の冷却材流量配分計算結果

No	領域	流路面積 (m ²)	流速(m/s)		流量(m ³ /h)		流量割合(%)	
			今回	設工認	今回	設工認	今回	設工認
1	標準型燃料要素	0.08104	6.20	6.20	1807.4	1806.1	75.3	75.3
2	フォロー型燃料要素	0.01475	5.64	5.64	299.6	299.4	12.5	12.5
3	照射筒	0.00226	5.81	5.83	47.2	47.4	2.0	2.0
4	Be 反射体 (B, C 型)	0.00267	5.65	5.73	54.3	55.1	2.3	2.3
5	コアバイパス	0.00563	4.58	4.59	92.8	93.0	3.9	3.9
6	Be 反射体-側板間	0.00256	2.62	2.64	24.1	24.3	1.0	1.0
7	燃料側板-側板間	0.00281	2.86	2.87	28.8	29.0	1.2	1.2
8	照射シブ M(冷却間付)	0.01021	0.99	1.00	21.0	20.9	0.9	0.9
9	芯抜き孔・ドレン孔	0.00063	11.0	11.0	24.9	24.8	1.0	1.0
	合計				2400.0	2400.0	100.0	100.0

注) No.1~7 流路面積、流速は、炉心軸方向中央と同一高さ位置における値

No.8 流路面積は上昇流路部、流速は、照射シンプル冷却間部

付録 B シリサイド燃料炉心における炉心構造物の耐熱計算結果

付録 B では、本文で設定したシリサイド燃料炉心の炉心構造物及び炉心流路の設計流速に基づき、設計流速がアルミナイド炉心から変更となった炉心構造物について耐熱計算を実施し、設計評価基準（最高温度が最高使用温度 [100℃] 以下であること）を満足することを確認した。

なお、耐熱計算では以下に示す仮定に基づき実施した。

① 各炉心構造物の γ 線及び中性子線の照射により発生する熱（以下、「核発熱」と称す）は、アルミナイド炉心と同等とする。炉心内の中性子束分布は、アルミナイド炉心及びシリサイド炉心ともに、運転時の制御棒パターンによって異なってくる。このため、核発熱密度も制御棒パターンの影響を受け、運転中に変化する。しかしながら、シリサイド炉心においても熱出力には変更がないので、核発熱密度も大きく変わることは考えられない。このため、保守的に設定されたアルミナイド炉心の核発熱密度を用いることは、シリサイド炉心においても保守的な結果を与える。

② 炉心構造物の耐熱計算に当たり、変更する計算条件は設計流速のみとする。このため、耐熱計算における計算条件においては、炉心構造物表面における熱伝達率のみの変更となる。この他の計算条件は、炉心構造物周辺の冷却材温度及び冷却材の物性値等であるが、これらは、いずれも保守的な値が設定されているため、再計算に当たって変更しない。

③ アルミナイド炉心における耐熱計算では、1次元熱伝導計算により最高温度を評価している場合（照射筒プラグ等）を除いては、ADINAT コード又は MARC コードを用いて2次元熱伝導計算を実施している⁽³⁾。シリサイド炉心における耐熱計算では、照射筒プラグ等1次元熱伝導計算により最高温度を評価できる場合は1次元熱伝導計算により、2次元熱伝導が必要な場合には、以下に示す方法によりアルミナイド炉心における ADINAT コード又は MARC コードの解析結果を基に熱伝達率の違いを考慮して最高温度を評価するものとする。

最高温度の評価方法（簡易計算）

(1) シリサイド燃料炉心における炉心構造物の最高温度

$$T_{\max,s} = \Delta T_m + \Delta T_{f,s} + T_b \quad (\text{B-1})$$

$$\Delta T_{f,s} = \frac{q}{h_s} \quad (\text{B-2})$$

(2) アルミナイド燃料炉心における炉心構造物の最高温度

$$T_{\max,a} = \Delta T_m + \Delta T_{f,a} + T_b \quad (\text{B-3})$$

$$\Delta T_{f,a} = \frac{q}{h_a} \quad (\text{B-4})$$

(3) アルミナイド燃料炉心における炉心構造物の最高温度を基に、シリサイド燃料炉心における炉心構造物の最高温度を評価

(B-2)、(B-4)式よりシリサイド燃料炉心のフィルム温度上昇は、次式で表される。

$$\Delta T_{f,s} = \frac{h_a}{h_s} \Delta T_{f,a} \quad (\text{B-5})$$

(B-1)、(B-5)式より炉心構造物の最高温度は、次式で表される。

$$T_{\max,s} = \Delta T_m + \frac{h_a}{h_s} \Delta T_{f,a} + T_b \quad (\text{B-6})$$

1次元熱伝導計算の場合には、(B-6)式により簡単に最高温度を求めることができるが、2次元熱伝の場合には、熱の移動が一方向のみではないため、(B-6)式においてフィルム温度上昇 $\Delta T_{f,a}$ 及び構造物の内部温度上昇 ΔT_m を単純に求めることはできない。このため、シリサイド燃料炉心における炉心構造物の最高温度の評価では、以下の式により最高温度を求めることとした。

$$\begin{aligned} T_{\max,s} &= (\Delta T_m + \Delta T_{f,a}) \frac{h_a}{h_s} + T_b \\ &= (T_{\max,a} - T_b) \frac{h_a}{h_s} + T_b \end{aligned} \quad (\text{B-7})$$

シリサイド燃料炉心では、炉心構造物の設計流速が減少したことにより、熱伝達率が低下し、フィルム温度上昇のみがこの影響を受け上昇する。しかし、(B-7)式は、この効果を保守的に構造物内部の温度上昇にも取入れているため、結果として最高温度を高め評価することとなる。なお、構造物周囲の除熱に関する条件（熱伝達率及び冷却材温度）が異なる場合には、それぞれの条件にて最高温度を評価し、最も厳しい結果を与える条件を選ぶこととする。

記号

- $\Delta T_{\max,a}$: アルミナイド燃料炉心における炉心構造物の最高温度 (°C)
(ADINAT コードによる計算結果)
- $\Delta T_{\max,s}$: シリサイド燃料炉心における炉心構造物の最高温度 (°C)
- ΔT_m : 炉心構造物内部の温度上昇 (°C)
- $\Delta T_{f,a}$: アルミナイド燃料炉心におけるフィルム温度上昇 (°C)
- $\Delta T_{f,s}$: シリサイド燃料炉心におけるフィルム温度上昇 (°C)
- q : 熱流束 (kcal/(m²·hr))
- h_a : アルミナイド燃料炉心における熱伝達率 (kcal/(m²·hr·°C))
- h_s : シリサイド燃料炉心における熱伝達率 (kcal/(m²·hr·°C))
- T_b : 冷却材バルク温度 (°C)

B.1 シリサイド燃料炉心における耐熱計算結果

本文 Table 4.2.1 に示すように、シリサイド燃料炉心では「格子板支持胴」、「制御棒案内管」及び「制御棒案内管外表面」以外の設計流速が、アルミナイド燃料炉心において設定された設計流速を下回り、以下に示す各炉心内構造物の耐熱計算の再評価が必要であることが明らかとなった。

- 1) 照射筒・照射筒プラグ
- 2) 格子板 A
- 3) 格子板 B
- 4) 照射シンプル・照射シンプル用プラグ
- 5) ベリリウム反射体

Table B.1.1 に、Table 4.2.1 に示した設計流速に基づき各炉心内構造物の最高温度を再評価した結果を示す。なお、個々の構造物の耐熱計算については、B.2 節以降に示す。

Table B.1.1 炉内構造物最高温度の再評価結果

No.	構造物名	最高温度 (°C)		備考
		シリサイド炉心	アルミナイド炉心	
1	照射筒	60.3	59.2	1.1 °C 増加
2	照射筒プラグ	93.3	92.3	1.0 °C 増加
3	格子板 A	73.2	72.8	0.4 °C 増加
4	格子板 B	73.2	71.8	1.4 °C 増加
5	照射シンプル	73.8	72.0	1.8 °C 増加
6	照射シンプル用プラグ	48.2	48.2	変化なし
7	ベリリウム反射体 A 型	53.2	52.6	0.6 °C 増加
8	ベリリウム反射体 B・C 型	57.1	56.3	0.8 °C 増加
9	ベリリウム反射体 B・C 型 用プラグ	67.0	66.6	0.4 °C 増加

各炉心構造物の耐熱上の安全性を評価する判断基準は、以下に示す通りである。

評価基準 : 構造物の最高温度が、最高使用温度 (100 °C) 以下であること。

シリサイド燃料炉心における炉心内構造物の設計流速に基づき再評価された各炉心内構造物の最高温度は、Table B-1 に示すようにいずれも最高使用温度 (100 °C) を下回っており安全上問題となることはない。

B.2 照射筒の耐熱計算

Table B.2.1～Table B.2.3 にシリサイド燃料炉心及びアルミナイド燃料炉心における照射筒の耐熱計算の計算条件及び計算結果を比較して示す。なお、照射筒表面における熱伝達率は、以下に示す Dittus-Boelter の式によるものとした。

$$h = \frac{\lambda_b Nu}{De} = \frac{\lambda_b}{De} \cdot 0.023 \cdot Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (B-8)$$

ここで、

- h : 熱伝達率 (kcal/(m²・hr・°C))
- λ_b : 冷却材の熱伝導率 (kcal/(m・hr・°C))
- De : 等価水力直径 (m)
- Re : レイノルズ数 (-)
- Pr : プラントル数 (-)
- Nu : ヌセルト数 (-)

Table B.2.1 照射筒の耐熱計算に使用する部材の物性値、冷却材温度及び発熱密度

シリサイド燃料炉心、アルミナイド燃料炉心共通計算条件						
部材	材料	熱伝導率 (kcal/(m・hr・°C))	動粘性係数 (m ² /s)	プラント ル数 (-)	発熱密度 (W/cc)	冷却材温度 (°C)
本体	A5052B-0	122.3 at 60°C	—	—	24.0	44 (外表面) 50 (内表面)
冷却材	軽水	0.562	0.480 x 10 ⁻⁶	3.02	—	物性値を 60°Cで評価

Table B.2.2 照射筒の耐熱計算に使用する熱伝達率

熱伝達率を適用 する領域	シリサイド燃料炉心		アルミナイド燃料炉心		備考 h_a / h_s
	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_s (kcal/(mhr°C))	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_a (kcal/(mhr°C))	
A:内表面	$u = 1.1$ $De = 0.0050$	7,100	$u = 1.2$ $De = 0.0050$	7,600	1.070
B:外表面	$u = 2.4$ $De = 0.0062$	12,700	$u = 2.6$ $De = 0.0062$	13,500	1.063
C:外表面	$u = 2.4$ $De = 0.0037$	14,000	$u = 2.6$ $De = 0.0037$	15,000	1.071

Table B.2.3 照射筒最高温度計算結果

	シリサイド燃料炉心 (°C)	アルミナイド燃料炉心 (°C)	備考
照射筒最高温度	60.3	59.2	1.1°C 増加

B.3 照射筒プラグの耐熱計算

Table B.3.1～Table B.3.3 にシリサイド燃料炉心及びアルミナイド燃料炉心における照射筒プラグの耐熱計算の計算条件及び計算結果を比較して示す。なお、照射筒プラグ表面における熱伝達率は、(B-8)式によるものとし、照射筒プラグ内部温度計算は次式によるものとした。計算は、軸方向の発熱密度が最も高くなる位置において行った。

$$T = T_b + \frac{Q \cdot r_o}{2h} + \frac{Q(r_o^2 - r^2)}{4\lambda} \quad (B-9)$$

ここで、

- T : 照射プラグ内温度 (°C)
- T_b : 冷却材温度 (°C)
- Q : 発熱密度 (kcal/(m³·h))
- r_o : 照射筒プラグの外半径 (m)
- r : 照射筒プラグ内の任意半径 (m)
- h : 熱伝達率 (kcal/(m²·hr·°C))
- λ : 照射筒プラグの熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))

Table B.3.1 照射筒プラグの耐熱計算に使用する部材の物性値、冷却材温度及び発熱密度

シリサイド燃料炉心、アルミナイド燃料炉心共通計算条件						
部材	材料	熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))	動粘性係数 (m ² /s)	プラント ル数 (-)	発熱密度 (W/cc)	冷却材温度 (°C)
本体	A5052B-0	122.3 at 60°C	—	—	24.0	50
冷却材	軽水	0.562	0.480 x 10 ⁻⁶	3.02	—	物性値を 60°Cで評価

Table B.3.2 照射筒プラグの耐熱計算に使用する熱伝達率

熱伝達率を適用 する領域	シリサイド燃料炉心		アルミナイド燃料炉心		備考 h_a/h_s
	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_s (kcal/(mhr°C))	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_a (kcal/(mhr°C))	
外表面	$u = 5.3$ $De = 0.005$	25,000	$u = 5.8$ $De = 0.005$	26,800	1.072

Table B.3.3 照射筒プラグ最高温度計算結果

	シリサイド燃料炉心 (°C)	アルミナイド燃料炉心 (°C)	備考
照射筒プラグ最高温度	93.3	92.3	1.0°C増加

B.4 格子板 A の耐熱計算

Table B.4.1～Table B.4.3 にシリサイド燃料炉心及びアルミナイド燃料炉心における格子板 A の耐熱計算の計算条件及び計算結果を比較して示す。なお、格子板 A 表面における熱伝達率は、(B-8)式によるものとした。格子板 A の梁部分は薄肉であり、発熱量も少なく、各側面が冷却材により冷却されているので温度上昇は大きくない。このため、温度計算では最も肉厚となるベリリウム反射体冷却孔付近を対象とし、ベリリウム反射体冷却孔を中心とする円筒モデルを考え、内部温度計算を次式によるものとした。計算は、軸方向発熱密度が最も高くなる位置で行った。

$$T = T_b + \frac{Q \cdot (b^2 - a^2)}{2h \cdot a} + \frac{Q(a^2 - r^2)}{4\lambda} + \frac{Q}{2\lambda} \cdot b^2 \cdot \ln \frac{r}{a} \quad (B-10)$$

ここで、

- T : 円筒モデル任意の半径 r における温度 (°C)
- T_b : 冷却材温度 (°C)
- Q : 発熱密度 (kcal/(m³·h))
- r : 任意の半径 $a \leq r \leq b$ (m)
- h : 熱伝達率 (kcal/(m²·hr·°C))
- λ : 格子板 A の熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))
- a : ベリリウム反射体冷却孔の内半径 (m)
- b : 円筒モデルの外半径 (m)

Table B.4.1 格子板 A の耐熱計算に使用する部材の物性値、冷却材温度及び発熱密度

シリサイド燃料炉心、アルミナイド燃料炉心共通計算条件						
部 材	材 料	熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))	動粘性係数 (m ² /s)	プラント ル数 (-)	発熱密度 (W/cc)	冷却材温度 (°C)
格子板 A	A6061F- T6	145.3 at 60°C	—	—	2.9	50 (内表面) 断熱 (外表面)
冷却材	軽 水	0.562	0.480 x 10 ⁻⁶	3.02	—	物性値を 60°C で評価

Table B.4.2 格子板 A の耐熱計算に使用する熱伝達率

熱伝達率を適用 する領域	シリサイド燃料炉心		アルミナイド燃料炉心		備 考 h_o / h_i
	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_i (kcal/(mhr°C))	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_o (kcal/(mhr°C))	
A:内表面	$u = 3.8$ $De = 0.024$	14,000	$u = 4.0$ $De = 0.024$	14,500	1.036
B:外表面		断熱		断熱	—

Table B.4.3 格子板 A 最高温度計算結果

	シリサイド燃料炉心 (°C)	アルミナイド燃料炉心 (°C)	備考
格子板 A 最高温度	73.2	72.8	0.4 °C 増加

B.5 格子板 B の耐熱計算

Table B.5.1～Table B.5.3 にシリサイド燃料炉心及びアルミナイド燃料炉心における格子板 B の耐熱計算の計算条件及び計算結果を比較して示す。なお、格子板 B 表面における熱伝達率は、(B-8)式によるものとした。格子板 B の梁部分は薄肉であり、発熱量も少なく、各側面が冷却材により冷却されているので温度上昇は大きくない。このため、温度計算では最も肉厚となる格子板 B 外枠部を対象とし、円筒モデルに置き換え内部温度計算を次式で計算するものとした。計算は、軸方向発熱密度が最も高くなる位置で行った。

$$T = T_b + \frac{Q \cdot (b^2 - a^2)}{2h \cdot a} + \frac{Q(a^2 - r^2)}{4\lambda} + \frac{Q}{2\lambda} \cdot b^2 \cdot \ln \frac{r}{a} \quad (B-11)$$

ここで、

- T : 格子板 B 外枠部の任意の半径 r における温度 (°C)
- T_b : 冷却材温度 (°C)
- Q : 発熱密度 (kcal/(m³·h))
- r : 任意の半径 $a \leq r \leq b$ (m)
- h : 熱伝達率 (kcal/(m²·hr·°C))
- λ : 格子板 B の熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))
- a : 格子板 B の外枠部の内半径 (m)
- b : 格子板 B の外枠部の外半径 (m)

Table B.5.1 格子板 B の耐熱計算に使用する部材の物性値、冷却材温度及び発熱密度

シリサイド燃料炉心、アルミナイド燃料炉心共通計算条件						
部材	材料	熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))	動粘性係数 (m ² /s)	プラント ル数 (-)	発熱密度 (W/cc)	冷却材温度 (°C)
外枠部	A5052P-0	122.3 at 60°C	—	—	1.4	52 (内表面) 断熱 (外表面)
冷却材	軽水	0.562	0.480 x 10 ⁻⁶	3.02	—	物性値を 60°C で評価

Table B.5.2 格子板 B の耐熱計算に使用する熱伝達率

熱伝達率を適用する領域	シリサイド燃料炉心		アルミナイド燃料炉心		備考 h_o/h_s
	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_s (kcal/(mhr°C))	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_o (kcal/(mhr°C))	
A:内表面	$u = 0.45$ $De = 0.66$	1,300	$u = 0.50$ $De = 0.66$	1,400	1.077
B:外表面		断熱		断熱	—

Table B.5.3 格子板 B 最高温度計算結果

	シリサイド燃料炉心 (°C)	アルミナイド燃料炉心 (°C)	備考
格子板 B 最高温度	73.2	71.8	1.4°C 増加

B.6 照射シンプルの耐熱計算

Table B.6.1～Table B.6.3 にシリサイド燃料炉心及びアルミナイド燃料炉心における照射シンプルの耐熱計算の計算条件及び計算結果を比較して示す。なお、照射シンプルの耐熱計算では、設計流速の変更に伴ない再評価が必要となった個所のみを対象とした。表面における熱伝達率は、(B-8)式によるものとした。照射シンプル (SI-1)、照射シンプル (DR-1) 及び照射シンプル (SH-1) の中心の半径方向位置は、炉心から同一距離にあり、内表面及び外表面の冷却材の冷却条件もほぼ同じであるため、これらの3つの照射シンプルの中で最大外径をもつ照射シンプル (SI-1) が炉心に近く、かつ、発熱密度が最大となるので、照射シンプル (SI-1) を代表的に取り上げて計算する。

Table B.6.1 照射シンプルの耐熱計算に使用する部材の物性値、冷却材温度及び発熱密度

シリサイド燃料炉心、アルミナイド燃料炉心共通計算条件						
部材	材料	熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))	動粘性係数 (m ² /s)	プラント ル数 (-)	発熱密度 (W/cc)	冷却材温度 (°C)
胴板	A5052T-0	122.3 at 60°C	—	—	1.1	48 (内表面) 43 (外表面)
内管	A5052T-0	122.3 at 60°C	—	—	1.1	48 (内表面) 48 (外表面)
受金具	A5052B-0	122.3 at 60°C	—	—	1.1	48 (内表面) 断熱 (外表面)
冷却材	軽水	0.562	0.480×10^{-6}	3.02	—	物性値を 60°C で評価

Table B.6.2 照射シンプルの耐熱計算に使用する熱伝達率

熱伝達率を適用する領域	シリサイド燃料炉心		アルミナイド燃料炉心		備考 h_a/h_s
	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_s (kcal/(mhr°C))	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_a (kcal/(mhr°C))	
胴板、内表面	$u = 0.28$ $De = 0.02$	1,800	$u = 0.30$ $De = 0.02$	1,900	1.056
内管、内表面	$u = 0.075$ $De = 0.17$	400	$u = 0.08$ $De = 0.17$	430	1.075
受金具、 底板内表面	$u = 0.075$ $De = 0.17$	400	$u = 0.08$ $De = 0.17$	430	1.075

Table B.6.3 照射シンプル最高温度計算結果

	シリサイド燃料炉心 (°C)	アルミナイド燃料炉心 (°C)	備考
照射シンプル最高温度	73.8	72.0	1.8 °C 増加

B.7 照射シンプルプラグの耐熱計算

Table B.7.1～Table B.7.3 にシリサイド燃料炉心及びアルミナイド燃料炉心における照射シンプルプラグの耐熱計算の計算条件及び計算結果を比較して示す。なお、照射シンプルプラグ表面における熱伝達率は、(B-8)式によるものとし、照射シンプルプラグ内部温度計算は次式によるものとした。計算は、軸方向の発熱密度が最も高くなる位置において行った。

$$T = T_b + \frac{Q \cdot r_o}{2h} + \frac{Q(r_o^2 - r^2)}{4\lambda} \quad (\text{B-12})$$

ここで、

- T : 照射シンプルプラグ内温度 (°C)
- T_b : 冷却材温度 (°C)
- Q : 発熱密度 (kcal/(m³·h))
- r_o : 照射シンプルプラグの外半径 (m)
- r : 照射シンプルプラグ内の任意半径 (m)
- h : 熱伝達率 (kcal/(m²·hr·°C))
- λ : 照射シンプルプラグの熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))

Table B.7.1 照射シンプルプラグの耐熱計算に使用する部材の物性値、冷却材温度及び発熱密度

シリサイド燃料炉心、アルミナイド燃料炉心共通計算条件						
部材	材料	熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))	動粘性係数 (m ² /s)	プラント ル数 (-)	発熱密度 (W/cc)	冷却材温度 (°C)
SH-1 プラグ	A5052B-0	122.3 at 60°C	—	—	1.0	断熱 (上表面) 断熱 (下表面) 43 (外表面)
冷却材	軽水	0.562	0.480 x 10 ⁻⁶	3.02	—	物性値を 60°C で評価

Table B.7.2 照射シンプルプラグの耐熱計算に使用する熱伝達率

熱伝達率を適用 する領域	シリサイド燃料炉心		アルミナイド燃料炉心		備考 h_a/h_s
	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_s (kcal/(mhr°C))	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_a (kcal/(mhr°C))	
A:外表面	u = 2.8 De = 0.004	16,500	u = 3.0 De = 0.004	16,500	1.000
B:上表面		断熱		断熱	—
C:下表面		断熱		断熱	—

Table B.7.3 照射シンプルプラグ最高温度計算結果

	シリサイド燃料炉心 (°C)	アルミナイド燃料炉心 (°C)	備考
照射シンプルプラグ 最高温度	48.2	48.2	変化なし

B.8 ベリリウム反射体 A の耐熱計算

Table B.8.1～Table B.8.3 にシリサイド燃料炉心及びアルミナイド燃料炉心におけるベリリウム反射体 A の耐熱計算の計算条件及び計算結果を比較して示す。なお、ベリリウム反射体 A 表面における熱伝達率は、(B-8)式によるものとした。

Table B.8.1 ベリリウム反射体 A の耐熱計算に使用する部材の物性値、冷却材温度及び発熱密度

シリサイド燃料炉心、アルミナイド燃料炉心共通計算条件						
部 材	材 料	熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))	動粘性係数 (m ² /s)	プラント ル数 (-)	発熱密度 (W/cc)	冷却材温度 (°C)
本体	金属ベリリウム	136.8 at 60°C	—	—	最大 8.3	44
アダプタ	A5052P-0	122.3 at 60°C	—	—	最大 8.3	44
冷却材	軽 水	0.562	0.480 x 10 ⁻⁶	3.02	—	物性値を 60°C で評価

Table B.8.2 ベリリウム反射体 A の耐熱計算に使用する熱伝達率

熱伝達率を適用 する領域	シリサイド燃料炉心		アルミナイド燃料炉心		備 考 h_o / h_s
	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_s (kcal/(mhr°C))	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_o (kcal/(mhr°C))	
A:内表面	u = 4.2 De = 0.006	20,000	u = 4.5 De = 0.006	21,100	1.055
B:外表面	u = 2.4 De = 0.005	13,200	u = 2.6 De = 0.005	14,100	1.068

Table B.8.3 ベリリウム反射体 A 最高温度計算結果

	シリサイド燃料炉心 (°C)	アルミナイド燃料炉心 (°C)	備 考
ベリリウム反射体 A 最高温度	53.2	52.6	0.6 °C 増加

B.9 ベリリウム反射体 B、C の耐熱計算

Table B.9.1～Table B.9.3 にシリサイド燃料炉心及びアルミナイド燃料炉心におけるベリリウム反射体 B、C の耐熱計算の計算条件及び計算結果を比較して示す。なお、ベリリウム反射体 B、C 表面における熱伝達率は、(B-8)式によるものとした。

Table B.9.1 ベリリウム反射体 B、C の耐熱計算に使用する部材の物性値、冷却材温度及び発熱密度

シリサイド燃料炉心、アルミナイド燃料炉心共通計算条件						
部材	材料	熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))	動粘性係数 (m ² /s)	プラント ル数 (-)	発熱密度 (W/cc)	冷却材温度 (°C)
本体	金属ベリリウム	136.8 at 60°C	—	—	最大 14.3	53 (内表面) 44 (外表面)
アダプタ	A5052P-0	122.3 at 60°C	—	—	最大 14.3	
冷却材	軽水	0.562	0.480×10^{-6}	3.02	—	物性値を 60°C で評価

Table B.9.2 ベリリウム反射体 B、C の耐熱計算に使用する熱伝達率

熱伝達率を適用する領域	シリサイド燃料炉心		アルミナイド燃料炉心		備考 h_a / h_s
	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_s (kcal/(mhr°C))	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_a (kcal/(mhr°C))	
A:内表面	$u = 2.4$ $De = 0.0057$	12,900	$u = 2.6$ $De = 0.0057$	13,700	1.062
B:外表面	$u = 4.2$ $De = 0.0060$	20,000	$u = 4.5$ $De = 0.0060$	21,100	1.055
C:内表面	$u = 5.2$ $De = 0.0050$	24,600	$u = 5.7$ $De = 0.0050$	26,500	1.077

Table B.9.3 ベリリウム反射体 B、C 最高温度計算結果

	シリサイド燃料炉心 (°C)	アルミナイド燃料炉心 (°C)	備考
ベリリウム反射体 B、C 最高温度	57.1	56.3	0.8 °C 増加

B.10 ベリリウム反射体 B、C 型プラグの耐熱計算

Table B.10.1~Table B.10.3 にシリサイド燃料炉心及びアルミナイド燃料炉心におけるベリリウム反射体 B、C 型プラグの耐熱計算の計算条件及び計算結果を比較して示す。なお、ベリリウム反射体 B、C 型プラグ表面における熱伝達率は、(B-8)式によるものとし、ベリリウム反射体 B、C 型プラグ内部温度計算は次式によるものとした。計算は、軸方向の発熱密度が最も高くなる位置において行った。

$$T = T_b + \frac{Q \cdot r_o}{2h} + \frac{Q(r_o^2 - r^2)}{4\lambda} \quad (B-13)$$

ここで、

- T : ベリリウム反射体プラグ内温度 (°C)
- T_b : 冷却材温度 (°C)
- Q : 発熱密度 (kcal/(m³·h))
- r_o : ベリリウム反射体プラグの外半径 (m)
- r : ベリリウム反射体プラグ内の任意半径 (m)
- h : 熱伝達率 (kcal/(m²·hr·°C))
- λ : ベリリウム反射体プラグの熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))

Table B.10.1 ベリリウム反射体 B、C 型プラグの耐熱計算に使用する部材の物性値、冷却材温度及び発熱密度

シリサイド燃料炉心、アルミナイド燃料炉心共通計算条件						
部材	材料	熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C))	動粘性係数 (m ² /s)	プラント ル数 (-)	発熱密度 (W/cc)	冷却材温度 (°C)
本体	金属ベリリウム	136.8 at 60°C	-	-	14.3	53
冷却材	軽水	0.562	0.480 x 10 ⁻⁶	3.02	-	物性値を 60°Cで評価

Table B.10.2 ベリリウム反射体 B、C 型プラグの耐熱計算に使用する熱伝達率

熱伝達率を適用 する領域	シリサイド燃料炉心		アルミナイド燃料炉心		備考 h_a / h_s
	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_s (kcal/(mhr°C))	流速 u (m/s) 直径 De (m)	熱伝達率 h_a (kcal/(mhr°C))	
外表面	$u = 5.2$ $De = 0.005$	24,600	$u = 5.7$ $De = 0.005$	26,500	1.077

Table B.10.3 ベリリウム反射体 B、C 型プラグ最高温度計算結果

	シリサイド燃料炉心 (°C)	アルミナイド燃料炉心 (°C)	備考
ベリリウム反射体 B、 C 型プラグ最高温度	67.0	66.6	0.4 °C 増加