JAEA-Technology 2012-046



「常陽」における燃料要素と材料試験片の 混載照射試験リグの開発

―燃料 - 材料ハイブリッドリグの開発―

The Development of Fuel Pins and Material Specimens Mixed Loading Irradiation Test Rig in the Experimental Fast Reactor Joyo – The Development of the Fuel-material Hybrid Rig –

> 親松 泰子 染谷 博之 Yasuko OYAMATSU and Hiroyuki SOMEYA

> > 大洗研究開発センター 高速実験炉部

Experimental Fast Reactor Department Oarai Research and Development Center

C

February 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

「常陽」における燃料要素と材料試験片の混載照射試験リグの開発 - 燃料-材料ハイブリッドリグの開発-

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 高速実験炉部 親松 泰子^{*1}、染谷 博之^{*2}

(2012年12月17日 受理)

高速実験炉「常陽」の照射試験では、コンパートメント毎に試験条件の設定が可能な照射リグの利用実績が多い。燃料照射においては燃料要素が少ない場合や、目標とする燃焼度等に達した燃料要素の一部を取り出した後、替わりに照射する燃料要素がない場合は、これまで燃料要素が装填されないダミーコンパートメントを用いて照射試験を実施してきた。このスペースの 有効利用を図るために、材料試験片を組込むことが可能な材料照射用リグのコンパートメント に入れ替え、燃料要素と材料試験片を混載した照射リグ(ハイブリッドリグ)を開発している。

本ハイブリッドリグの開発上の課題は、発熱量が大きい燃料要素と発熱量が小さい材料試験 片とでは、冷却に必要な冷却材流量が大幅に異なることであり、適切な流量配分の成立性がポ イントとなる。

本報告書では、以下の内容について報告する。

- (1) 必要流量が異なるコンパートメントを同一の照射リグに装填した場合における流量配分の成立性を確認した。
- (2) 従来と同等の温度設定能力を確保できることを確認した。
- (3) コンパートメント下部の冷却材入口構造を標準化することにより、照射リグ間で種類の 異なるコンパートメントの組み換えが容易にできる見通しを得た。

大洗研究開発センター:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

※1 外来研究員(現在、株式会社 東芝)

※2 技術開発協力員

The Development of Fuel Pins and Material Specimens Mixed Loading Irradiation Test Rig in the Experimental Fast Reactor Joyo — The Development of the Fuel-material Hybrid Rig—

Experimental Fast Reactor Department, Oarai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2012)

In the experimental fast reactor Joyo, there were many tests using the irradiation rigs that it was possible to be set irradiation conditions for each compartment independently. In case of no alternative fuel element to irradiate after unloading the irradiated compartments, the irradiation test was restarted with the dummy compartment which the fuel elements was not mounted. If the material specimens are mounted in this space, it is possible to use the irradiation space effectively. For these reasons, the irradiation rig (hybrid rig) is developed that is consolidated with material specimens compartment and fuel elements compartment.

Fuel elements and material specimens differ greatly with heat generation, so that the most important issue in developing of hybrid rig is being able to distribute appropriately the coolant flow which satisfies irradiation conditions.

The following is described by this report.

- (1) It was confirmed that the flow distribution of loading the same irradiation rig with the compartment from which a flow demand differs could be satisfied.
- (2) It was confirmed that temperature setting range of hybrid rig could be equivalent to that of irradiation condition.
- (3) By standardizing the coolant entrance structure of the compartment lower part, the prospect which can perform easily recombination of the compartment from which a type differs between irradiation rigs was acquired.

Keywords: Joyo, Irradiation Rig, Fuel Element

X1 Visiting Researcher (present affiliation, Toshiba Corporation)

[★]2 Collaborating Engineer

目次

1.	はし	じめに
2.	基7	本概念
2	2.1	ハイブリッドリグへの適用を検討するコンパートメントの種類6
2	2.2	コンパートメント型照射リグの冷却材流路及び構造変更
3.	評値	西手法
3	3.1	要求性能と開発フロー
3	3.2	ハイブリッドリグのコンパートメントの流量設定範囲の評価手法17
3	3.3	ハイブリッドリグのコンパートメントの温度設定範囲の評価手法18
4.	ハ~	イブリッドリグのコンパートメントの流量設定範囲の評価
4	4.1	基準とする圧損特性を持つコンパートメントの選定
4	4.2	流量設定範囲の目標値の具体化
4	4.3	コンパートメントに追加する流動抵抗仕様及び設置範囲の検討
4	1.4	コンパートメント内の流動抵抗の設置構造
5.	11/	イブリッドリグのコンパートメントの温度設定範囲の評価61
5	5.1	タイロッド下部オリフィス孔径の調整によるバイパス流量の調整61
5	5.2	ガスギャップの Ar/He ガス比の調整による温度設定
5	5.3	多孔板オリフィスの追加によるバイパス流量の調整
5	5.4	多孔板オリフィスを追加したタイロッド下部の構造64
6.	水》	流動試験による圧損係数の取得
7.	まと	とめ
謝郡	穿…	
参	考文	献
付鈕	禄 1	助走距離を考慮したオリフィスの圧損係数の検証
付鈕	禄 2	オリフィス及び多孔板オリフィスの面取り
付鈕	禄 3	B型照射燃料集合体の合流圧損
付銀	禄 4	多孔板オリフィス孔径の設定範囲80

Contents

1. Introduction 1
2. Basic Concept ····································
2.1 Type of Compartment which Considers Application to Hybrid Rig
2.2 Flow Distribution and Structure Improvement of Compartment Type Rig7
3. Evaluation Approach 17
3.1 Required Performance and Development Flow Diagram
3.2 Evaluation Approach of Flow Setting Range of Hybrid Rig
3.3 Evaluation Approach of Temperature Setting Range of Hybrid Rig
4. Evaluation of Flow Setting Range of Hybrid Rig
4.1 Selection of Compartments with Standard Characteristic of Pressure Loss
4.2 Target Value of Flow Setting Range of Hybrid Rig
4.3 Specific and Installation Space of Addition Flow Resistance in Compartments
4.4 Installation Structure of Flow Resistance in Compartments
5. Evaluation of Temperature Setting Range of Compartment of Hybrid Rig
5.1 Adjustment of Bypass Flow by Adjustment of Orifice Size of Lower Tie Rod
5.2 Temperature Setting by Controlling Ar/He Ratio of Compartments' Gas Gap
5.3 Adjustment of Bypass Flow by Addition of Perforated Plate Orifice
5.4 Structure of Tie Rod Lower Part which Added Perforated Plate Orifice
6. Acquisition of Drag Coefficient by Hydraulic Characteristics Test
7. Conclusion
Acknowledgements 73
References 73
Appendix 1 Verification of Drag Coefficient of Orifice Designed for Inlet Length
Appendix 2 Edge of Orifice and Perforated Plate Orifice 77
Appendix 3 Drag Coefficient of Interaction at the Confluence of Uninstrumented Irradiation
Subassembly Type-B······ 78
Appendix 4 Setting Range of Diameter of Perforated Plate Orifice

表リスト

表 1.1	照射リグの利用目的、特徴及び構造
表 2.1	照射リグの主なコンパートメントの種類
表 4.1	CMIR 及び燃料用コンパートメントの流路モデル
表 4.2	CMIR コンパートメント全体の圧損係数
表 4.3	花びら(γ型コンパートメント)の圧損係数
表 4.4	グリッドスペーサ(γ型コンパートメント)の圧損係数34
表 4.5	先行試験用 γ 型コンパートメントの圧損係数
表 4.6	δ 型コンパートメントの圧損係数
表 4.7	CMIR コンパートメントの流量及び圧損
表 4.8	燃料用コンパートメントの流量及び圧損(オリフィスなし)
表 4.9	水流動試験の流動抵抗の仕様
表 4.10	先行試験用 γ 型コンパートメントオリフィスの圧損係数検証結果40
表 4.11	δ型コンパートメントオリフィスの圧損係数検証結果40
表 4.12	RTCB 用 A 型照射燃料集合体の多孔板オリフィスの圧損係数検証結果41
表 4.13	キャビテーション評価によるオリフィス及び多孔板オリフィスの最小径41
表 4.14	オリフィス4枚の圧損係数の実験値補正42
表 4.15	多孔板オリフィス 10 枚の圧損係数の実験値補正42
表 4.16	オリフィス及び多孔板オリフィスの設置範囲の比較43
表 4.17	γ 型コンパートメントで設置構造を共通(オリフィス枚数固定)とした場合の各流量
	のオリフィス孔径
表 4.18	オリフィス孔径の製作精度(±0.015mm)による流量誤差(オリフィス枚数 12 枚の場
	合)
表 4.19	オリフィス孔径の製作精度(±0.015mm)による流量誤差(多孔板オリフィス 10 枚の
	場合)
表 4.20	オリフィス孔径の製作精度(±0.015mm)による流量誤差(多孔板オリフィス 29 枚の
	場合)
表 5.1	ハイブリッドリグの圧損係数式
表 5.2	CMIR コンパートメントのバイパス流量実績
表 5.3	タイロッド下部オリフィス φ8.5mm におけるハイブリッドリグの流量配分66
表 5.4	CMIR-6 における Ar/He ガス比の実績
表 5.5	ハイブリッドリグにおける Ar/He ガス比の計算結果
表 5.6	Ar ガスの比率に対するコンパートメント温度の感度
表 5.7	多孔板オリフィスを追加したハイブリッドリグの流量配分67
表 6.1	ハイブリッドリグの開発に必要な水流動試験項目

図リスト

図 1.1	A型照射燃料集合体の構造 ······3
図 1.2	B型照射燃料集合体の構造3
図 1.3	C型照射燃料集合体の構造3
図 1.4	D型照射燃料集合体の構造
図 1.5	CMIR の構造4
図 1.6	SMIR の構造
図 1.7	ハイブリッドリグの概念図
図 2.1	B型照射燃料集合体の冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル10
図 2.2	D型照射燃料集合体の冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル 11
図 2.3	CMIRの冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル13
図 2.4	CMIR コンパートメントと γ 型コンパートメントを混載させた B 型照射燃料集合体の
	冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル13
図 2.5	B型照射燃料集合体の CMIR コンパートメントを γ 型コンパートメントに入れ替えた
	場合の冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル14
図 2.6	CMIR コンパートメントのナトリウム流入孔構造の変更15
図 2.7	D 型燃料集合体における δ 型コンパートメント構造変更・標準化案 16
図 3.1	CMIR コンパートメントの温度設定19
図 3.2	CMIR コンパートメント内冷却材の典型的な軸方向温度分布19
図 3.3	ハイブリッドリグ開発計画のフロー図
図 4.1	燃料用コンパートメントの圧損特性
図 4.2	γ型コンパートメントへのオリフィス追加前後の圧損特性比較48
図 4.3	δ 型コンパートメントへのオリフィス追加前後の圧損特性比較 49
図 4.4	CMIR コンパートメントの圧損特性
図 4.5	RTCB 用 A 型照射燃料集合体の多孔板オリフィス
図 4.6	オリフィス孔径比に対する圧損係数実験値/理論値の近似
図 4.7	多孔板オリフィス孔径比に対する圧損係数実験値/理論値の近似
図 4.8	オリフィス 12 枚の実験値補正後の圧損係数の近似 52
図 4.9	多孔板オリフィス 10 枚の実験値補正後の圧損係数の近似 52
図 4.10	多孔板オリフィス 29 枚の実験値補正後の圧損係数の近似
図 4.11	オリフィス及び多孔板オリフィス孔径の製作精度(±0.015mm)による流量誤差53
図 4.12	CMIR コンパートメントの構造
図 4.13	先行試験用 γ 型コンパートメントの構造
図 4.14	γ 型コンパートメントと混載させる CMIR コンパートメント(オリフィス:φ0.86mm、
	12枚)の構造
図 4.15	γ 型コンパートメントと混載させる CMIR コンパートメント(多孔板オリフィス:
	φ0.61mm、10枚)の構造 ······57

図 4.16	γ 型コンパートメントと混載させる CMIR コンパートメント(多孔板オリフィス:
	¢0.8mm、29枚)の構造
図 4.17	δ 型コンパートメントと混載させる CMIR コンパートメント(多孔板オリフィス:
	¢0.61mm、14枚)の構造 ······59
図 4.18	δ 型コンパートメントと混載させる CMIR コンパートメント(多孔板オリフィス:
	φ0.8mm、43枚)の構造
図 5.1	ハイブリッドリグの集合体内冷却材流路モデル(B型流路)68
図 5.2	CMIR-6 とハイブリッドリグの温度比較
図 5.3	タイロッド下部用多孔板オリフィスの設置場所
図 5.4	実績最小流量(151g/s)のときのタイロッド下部オリフィス圧損係数の近似 69
図 5.5	多孔板オリフィス 5 枚の圧損係数の実験値補正係数
図 5.6	タイロッド下部に多孔板オリフィスを設置した構造

This is a blank page.

1. はじめに

高速実験炉「常陽」におけるオフライン型の照射リグには、燃料照射用として照射燃料集合体、 材料照射用として材料照射用反射体がある。照射燃料集合体は照射目的に応じ、図1.1~1.4 に 示す A 型照射燃料集合体、B 型照射燃料集合体、C 型照射燃料集合体、D 型照射燃料集合体が あり、その照射目的及び構造等を表 1.1 に示す。材料照射用反射体には図 1.5~1.6 に示す炉心 材料照射用反射体(以下「CMIR」と称す)、構造材料照射用反射体(以下「SMIR」と称す)が あり、照射試料の種類によって使い分けている。このうち、B 型及び D 型照射燃料集合体と CMIR は、照射物をコンパートメントと呼ばれる複数の二重管円筒容器内に装填して照射試験 を行う構造である。高速中性子束の大きい燃料領域では、これまで B 型照射燃料集合体と CMIR の利用実績が多く、今後想定される照射試験においても、これらの利用が計画されている。

この理由は、以下に示したコンパートメント特有の機能が照射試験ニーズに合致しているた めである。

- (1) コンパートメント毎に流路を持ち、かつコンパートメント管壁には熱流束を調節するガ ス断熱層を設けているので、コンパートメント毎に温度を設定できること
- (2) 分解・再組立が可能であり、照射途中での中間検査や寿命に達したリグを乗り継ぐ継続 照射が可能であること

照射物が少ない場合や、目標照射量に達した一部の照射物を取り出して、残りを継続照射す る場合、空きのコンパートメントができる。これまでは、この空きコンパートメントには核燃 料物質を含まないダミー燃料要素やスペーサを装填しているが、こうした空きスペースの活用 は、照射試験を実施していく上で極めて有効な方策であることから、その具体化として、図 1.7 のとおり、燃料コンパートメントと材料コンパートメントを1集合体に混載するリグ概念(以 下「ハイブリッドリグ」と称す)の開発に着手している。

ハイブリッドリグでは、照射物の発熱量が大きく異なる燃料用コンパートメントと材料用コ ンパートメントに、各々適切に冷却材を配分できるようにすることが主要な技術的課題となる。

これまでの照射リグでは、発熱の大きい燃料は高圧プレナム(約300kPa)から冷却材を導入 し、発熱の小さい材料試験片は低圧プレナム(約55kPa)から冷却材を導入することとしてい る。低圧プレナムからでは、平均的な燃料用コンパートメントの除熱に必要な冷却材流量を確 保できないため、ハイブリッドリグでは、高圧プレナムから冷却材を導入する構造を採用し、 材料用コンパートメントの温度設定能力を従来並に確保する方針としている。

本報告書では、基本概念として2章で高圧プレナムから冷却材を導入するハイブリッドリグ の流路モデルを具体化するとともに、リグ間でのコンパートメントの組み換えが容易に実施で きるよう、対象コンパートメントの構造の標準化を提案した。また、ハイブリッドリグの成立 性は、高圧プレナムから材料用コンパートメントに冷却材を導入して、従来と同等な温度設定 性能が要求されることから、3章で要求性能とその検討フローを明確にし、4章及び5章でそれ らを満足する具体的な構造・仕様を検討し、ハイブリッドリグの成立性を評価した。

名称	目的	構造	特徴
A型照射	・限界照射試験の実施・高線出力試験の実施	 ・燃料集合体中央部に二重の試 料部六角管で試料部を設け、 	 ・燃料集合体内の燃料装荷量 が多く、炉心特性への影響
燃料集合体		燃料要素束またはコンパート メント (α型 ^{*1)} またはβ型 ^{*2)}) た収知	が小さい ・試料部で照射温度条件の設 まが可能
	・ 宮線出力試験の実施	を収附	<i>たい</i> 可能 ・コンパートメント毎に昭射
	 ・新型燃料の基礎昭射 	(一面管)内に燃料要素また	温度条件の設定が可能
	・パラメトリックな照射試験	は、燃料要素を装填した内壁	・ホットセル内での解体・組
	・中間試験を実施し、健全性	構造容器あるいは、密封構造	立が可能
B型照射	を確認した燃料要素の再装	容器を収納	・キャプセル構造のコンパー
燃料集合体	荷による照射試験の継続		トメントを採用すること
	・スリット付被覆管を使用し		により、照射実績がない
	た FFDL 試験の実施		(または少ない)燃料要素の
			照射試験が可能
	・A型、B型及びD型照射燃	・ラッパ管及び試料部六角管の	・多数の燃料要素を同一の
C型照射	料集合体を活用して取得し	二重六角管構造で、試料部六	条件で照射可能
燃料集合体	た照射データ等を基に選定	角管内に燃料要素束を収納	
	した燃料の燃料集合体規模		
	での確証試験の実施		
	 ・ハフメータ照射試験の実施 ・ ・ 田計 た	 ・ 最大 18 本の 8 型コンパート ・ いいし^{*3)} 由に 機関 再また 収納 	・ホットセル内での解体・再
	・ 中间 訊 練 を 夫 施 し 、 健 至 性 な 確 認 し た 厳 判 画 表 の 画 壮	メントットに燃料安素を収納	祖立かり肥
	を確認した旅科安系の丹表	・0 至コンパートメント及い?	・コンパードメンド世に思知 退産冬州の設定が可能
D刑昭射	一日(こよる)に対すれる次の力が生形に	至ユンバー トノントを低戦し て法博オストレが可能	価度未行の成定が可能 ・最大 18 木のコンパートメ
燃料集合体		Cag / Second	ントが装垣でき、さらに多
MAT A TH			種多様な燃料要素仕様に
			対応
			・流路構造の簡素化による照
			射温度の精度向上
炉心材料	・炉心材料等の材料照射試験	 ・B型照射燃料集合体と同様に 	・コンパートメント毎に照射
照射用反射体		二重管コンパートメント ^{*4)} 構造	温度を設定可能
(CMIR)			・燃料領域での使用
	・構造材料等の材料照射試験	・コンパートメント ^{*4)} は、スリ	・リグの再利用が可能
構造材料		ット付きシングル管構造	・照射試料は、キャプセルに
照射用反射体			組み込み個別に温度設定
(SMIR)			が可能
			・主に反射体領域等での使用

表 1.1 照射リグの利用目的、特徴及び構造

*1):燃料要素最大装填本数:5本 *2):燃料要素最大装填本数:1本

*1)~*3)の構造は、2.1.1節を参照のこと。

*4)の構造は、2.1.2節を参照のこと。







図 1.7 ハイブリッドリグの概念図

2. 基本概念

2.1 ハイブリッドリグへの適用を検討するコンパートメントの種類

「常陽」の照射リグに装填するコンパートメントの種類は、照射燃料集合体用として、α型、 β型、γ型及びδ型コンパートメントの4種類、材料照射用として、CMIR及びSMIRの2種 類である。断面形状等の詳細を表 2.1 に、各コンパートメントの特徴等を以下に示す。 2.1.1 照射燃料集合体用コンパートメント

照射燃料集合体用コンパートメントは、照射燃料集合体の内部において独自に冷却材流量を 設定できる二重の円筒管であり、装填する燃料要素の種類及び本数並びに構造等により、以下 の4種類に分類している。

(1) α型コンパートメント

A型照射燃料集合体に装填可能であり、複数(3~5本)の燃料要素支持構造の違いにより、 ワイヤスペーサ型及びグリッド型がある。

(2) β型コンパートメント

A型照射燃料集合体に装填可能であり、被覆管の開孔を許容する燃料の照射に用いる。 (3) γ型コンパートメント

B型及び D型照射燃料集合体に装填可能であり、α型コンパートメントと同様な断面構 造を有している。γ型コンパートメントには、B型照射燃料集合体への装填に限定される が、照射データがほとんどない試験燃料要素を照射するための先行試験用γ型コンパート メント及び基礎試験用γ型コンパートメントがある。

(4) δ型コンパートメント

D型照射燃料集合体に装填可能であり、組込み可能な試験用燃料要素本数は1本に限定 されるが、外径寸法が小さいことから、多数のコンパートメントを1体の集合体に装填で き、多くの照射条件を設定可能な利点を有している。

2.1.2 材料照射用反射体のコンパートメント

炉心材料試料を照射する CMIR 及び構造材料試料を照射する目的の SMIR の2 種類に大別される。

(1) CMIR コンパートメント

CMIR コンパートメントは、2.1.1 節の燃料要素照射用コンパートメントと同様オリフィ スによる冷却材流量調整機能を有し、温度設定が可能な二重管構造である。

(2) SMIR コンパートメント

SMIR コンパートメントは、主に反射体領域等の低発熱領域で用いることから、材料試料を組込む密封容器内の発熱体と不活性ガスの熱抵抗により、試料温度を設定する。このため、コンパートメント内冷却材流量調節のためのオリフィスはなく、また、スリット付きのシングル管構造で、CMIR コンパートメントに比べ、構造が単純である。

2.1.3 ハイブリッドリグへの適用を検討するコンパートメント

前項のコンパートメントのうち、本検討の対象は、以下の3種とし、集合体内の圧力損失特

性及び CMIR コンパートメント内の温度が従来通り設定可能かを検討する。

(1) γ型及びδ型コンパートメント

材料試料を組み込むコンパートメントと同一集合体内に混載ができ、また、γ型コンパー トメントは、具体的な流量配分を検討するに当たっての照射実績を有する。なお、δ型コン パートメントについては、照射実績がないため、設計流量に基づき検討する。

(2) 先行試験用 γ型コンパートメント

材料試料を組み込むコンパートメントと同一集合体内に混載ができ、また、具体的な流量 配分を検討するに当たっての照射実績を有する。

(3) 材料照射用 CMIR のコンパートメント

照射燃料集合体用のコンパートメントと同様に二重管構造を有し、具体的な流量配分を検 討するに当たっての照射実績を有する。

- 2.2 コンパートメント型照射リグの冷却材流路及び構造変更
 - (1) コンパートメント型照射リグの冷却材流路

コンパートメント型照射リグでは、エントランスノズルから入った冷却材ナトリウムは、 各コンパートメント、ラッパ管内(コンパートメント外側とラッパ管の間)及びタイロッド 下部内等の複数の流路に分岐して照射物等を冷却した後、合流してハンドリングヘッドから 出ていく流路を構成する。ハイブリッドリグには燃料要素を装填することから、多くの冷却 材流量を確保できる高圧プレナムから冷却材を導入し、基本構造は、以下の① B 型照射燃 料集合体または、② D 型照射燃料集合体とし、これらに材料試料のみを装填する CMIR コ ンパートメントを設置する。

① B型照射燃料集合体冷却材入口の流路構造及び集合体内冷却材流路モデル

図2.1にB型照射燃料集合体冷却材入口の流路構造及び集合体の冷却材流路モデルを示す。 B型照射燃料集合体の冷却材流路(以下「B型流路」と称す)におけるコンパートメント外 側とラッパ管との間の冷却材(以下「バイパス流」と称す)流量は、実績で470g/s~2348g/s である。

② D型照射燃料集合体入口の流路構造及び集合体内冷却材流路モデル

図2.2にD型照射燃料集合体冷却材入口の流路構造及び集合体内冷却材流路モデルを示す。 D型照射燃料集合体の冷却材流路(以下「D型流路」と称す)におけるバイパス流は、ほと んどゼロである。これにより、集合体出口冷却材温度の低下を防止し、隣接する運転用燃料 集合体との温度差が緩和でき、炉心上部機構へのサーマルストライピングを抑制する。さら に、隣接コンパートメントからの出口流量による圧損などの冷却材流れによる相互干渉を回 避し、コンパートメント内流量の独立性を確保できる。

(2) コンパートメント型照射リグの構造変更

従来の CMIR 冷却材入口の流路構造及び集合体内冷却材流路モデルを図 2.3 に示す。CMIR の材料コンパートメントへの冷却材流入孔位置は、燃料コンパートメントと異なり、下部支 持板の上方となっている。したがって、両コンパートメントを混載させた場合、図 2.4 及び 図 2.5 に示すとおり、エントランスノズル下流側の圧損抵抗が異なり、材料コンパートメン トと燃料コンパートメントの装填本数により、バイパス流量に影響する。そのため、図 2.6 のとおり、CMIR コンパートメントの流入孔をγ型コンパートメント又はδ型コンパートメ ントと同一とし、下部支持板の下方から冷却材を流入させる構造に変更する。

また、現行設計におけるδ型コンパートメント冷却材流入孔位置は、炉心中心から773mm であり、γ型コンパートメント及び CMIR コンパートメントの全長に比べ約8mm 短いこと から、標準化を図るため、図2.7 に示すとおり他のコンパートメント同様881mm に変更す る。なお、本変更に伴う構成部材への設計に影響はなく、冷却材流動特性及び組立性には問 題がない。

表 2.1	照射リ	グの主なコンパー	トメ	ン	トの種類
-------	-----	----------	----	---	------



※3 設置変更許可申請書に記載なし。また、製作実績なし。



図 2.1 B型照射燃料集合体の冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル



図 2.2 D 型照射燃料集合体の冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル



図 2.3 CMIR の冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル



図 2.4 CMIR コンパートメントと γ型コンパートメントを混載させた B型照射燃料集合体の 冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル



図 2.5 B型照射燃料集合体の CMIR コンパートメントを γ型コンパートメントに入れ替えた 場合の冷却材入口流路構造及び集合体内冷却材流路モデル



現 CMIR 構造

ハイブリッドリグ用の構造改良 (γ型コンパートメントと同じ構造)

CMIR コンパートメント流入孔をγ型コンパートメント又は、δ型コンパート メントと同一(炉心中心からの距離 881.0mm)とし、混載によるバイパス流変 動を避ける構造とする。

図 2.6 CMIR コンパートメントのナトリウム流入孔構造の変更



ハイブリッドリグに装荷するコンパートメント冷却材流入孔位置を炉心中 心から 881.0 mmに統一し、標準化を図るため、δ型コンパートメントを下方 に 8mm 延伸する。

図 2.7 D型燃料集合体における δ型コンパートメント構造変更・標準化案

3. 評価手法

3.1 要求性能と開発フロー

ハイブリッドリグでは、CMIR コンパートメントに高圧プレナムから冷却材を導入しても材 料開発に必要とされる従来と同様な温度設定能力(現行 CMIR と同程度の軸方向温度分布を設 定する能力)を確保する必要がある。通常、照射試験では照射位置や装填される照射物の種類 及び重量により、ガンマ発熱は設計条件として与えられる。これまで CMIR の設計では、この 設計条件を用いて図 3.1 に示すとおり、下記①、②を調節することで、各コンパートメントに 要求される軸方向温度分布を設定してきた。

①CMIR コンパートメント内の冷却材流量 Fi

②CMIR コンパートメント内管-外管の間の断熱ガス層に充填される Ar/He ガス比とバ イパス流量 Fo の調節によるコンパートメント内→外への熱流束の調節

図 3.2 に典型的な CMIR の軸方向冷却材温度分布を示す。試料装填範囲の温度は、最新の CMIR-6 の計画温度で約 447~783℃である。CMIR-6 からの継続照射もできるようにする場合、 ハイブリッドリグ用の CMIR コンパートメントにおいても熱流束調節によって図 3.2 のような 分布を設定できることが要求性能の目安となる。

よって、ハイブリッドリグでは、高圧プレナムから CMIR コンパートメントに冷却材を導入 する際、多様な燃料コンパートメントとバランスさせつつ、①の Fi を低く保てるよう、CMIR コンパートメントに圧損の大きい流動抵抗を追加し、流量を絞って設定温度を高められること、 ②の Ar/He ガス比の変更により断熱性を高めるか、Fo を低く保つことにより、図 3.2 のような 温度分布設定を可能にすることが、その主な開発内容となる。

また、流動抵抗の追加に当たって多段オリフィスの採用が考えられるが、この際の条件としては、キャビテーションの発生を抑制する反面、できるだけ従来の試料装填スペース(炉心中心から軸方向に±280mm)を犠牲にしないよう、小スペースで大きな圧力損失を確保できる流量調節機構が求められる。

これらの要求性能を、図 3.3 に示す開発フローに沿って評価することとした。3.2 節及び 3.3 節にその概要を説明する。実際の評価の詳細は4章及び5章に記載する。これらの検討に当た っては、可能な限り文献や過去の水流動試験の情報を活用した上で、理論値または実験値のな い範囲についてのみ、別途必要最小限の水流動試験を計画することによって、効率的に実用化 できることを目指した。

3.2 ハイブリッドリグのコンパートメントの流量設定範囲の評価手法

本検討では、ハイブリッドリグに収納予定の各燃料コンパートメントの圧力損失を整理し、 それらとバランスさせつつCMIRコンパートメント内流量Fiを絞る流量調節機構を具体化する ことにより、ハイブリッドリグにおいて設定できる冷却材流量範囲を示す。

Fiの目標は、過去の CMIR 照射試験の照射実績に基づいて定める。また、混載相手となる(圧 力損失を一致させるべき)燃料用コンパートメントの圧力損失も実績に基づき定めるが、その 種類は表 2.1 のとおり多様であり、それぞれ異なる圧力損失特性(流量-圧力損失の関係)を 持っている。全てのコンパートメントの混載を目標として対象となる γ型コンパートメント、 δ型コンパートメントのうち、それぞれ最も圧力損失の大きいコンパートメントを基準コンパートメントとし、他の種類の燃料コンパートメントは、オリフィスによって基準コンパートメントに圧力損失を合わせられるか否かを検討する。

その上で、CMIR コンパートメントについては、CMIR 実績の Fi において、燃料の基準コン パートメントの圧力損失を達成できるようにするため、抵抗係数の大きい流量調節機構として、 オリフィス等の仕様と設置場所(オリフィス段数等)について検討する。

3.3 ハイブリッドリグのコンパートメントの温度設定範囲の評価手法

本検討では、バイパス流量のある B 型流路を対象に、CMIR コンパートメントの内側から外 側への熱流束を抑制する仕様を具体化し、設定できる温度範囲を示す。

3.2 節の手法により CMIR 実績の Fi 流量を設定できる流量調節機構が設置できたとしても、 B 型流路のハイブリッドリグの場合は、バイパス流量 Fo が従来 CMIR よりも大きくなり、温 度が低下し、コンパートメントの内側から外側への熱流束が大きくなる。このため本検討では、 B 型流路の現構造のうち、タイロッド下部オリフィス孔径を小さくすることによって、バイパ ス流量 Fo を絞ることを検討する。CMIR の実績値まで Fo を低下できそうにない場合には、次 の検討を行う。

- ・コンパートメント内管と外管の間の Ar/He ガス組成の Ar の比率を増やしてコンパートメントの断熱効果を高め、バイパス流量への熱流束を小さくする。
- ・タイロッド下部オリフィスの構造を変更して流動抵抗を追加し、バイパス流量を CMIR の 実績まで下げる。

JAEA-Technology 2012-046



図 3.1 CMIR コンパートメントの温度設定



図 3.2 CMIR コンパートメント内冷却材の典型的な軸方向温度分布



図 3.3 ハイブリッドリグ開発計画のフロー図

4. ハイブリッドリグのコンパートメントの流量設定範囲の評価

4.1 基準とする圧損特性を持つコンパートメントの選定

2.1節で検討対象としたγ型及びδ型コンパートメントの実績圧損を比較して、基準とする圧 損特性を持つコンパートメントを決定する。圧損はコンパートメント各部の圧損係数を用いて 以下の式で計算する。

$$\Delta P_i = \sum C_i \frac{\rho v_i^2}{2}$$

ここで、ΔP_i:圧損 C_i:圧損係数

ρ:密度

v_i:流速

また、検討対象のコンパートメントの流路モデルを表 4.1 に示す。コンパートメントの圧損 を比較するため、オリフィスを削除した状態の圧損を求める。

4.1.1 CMIR コンパートメントの実績圧損の整理

CMIR コンパートメントの水流動試験から得られたコンパートメント全体の圧損係数を表 4.2 に示す。CMIR コンパートメントの流入部の形状は、燃料用コンパートメントとの入れ替え を考慮し、燃料用コンパートメントの流入部と同形状に変更する。圧損係数は実験式で得られ た値とは異なるが、流入部のみの測定結果はないため、本評価では表 4.2 のコンパートメント 全体の圧損係数式を用いることとした。圧損の算出結果を表 4.7 に示す。CMIR コンパートメ ントの実績流量は 4.10g/s~8.41g/s、オリフィスを除いたコンパートメント全体圧損は 0.18kPa ~0.57kPa となった。

4.1.2 γ型コンパートメント及び先行試験γ型コンパートメントの実績圧損の整理

γ型コンパートメントのうちワイヤスペーサ型(燃料要素本数(5本、4本)に応じコンパート メント内管の外側を絞り加工したコンパートメントを以下、「5本花びら」、「4本花びら」と称 す)の水流動試験から得られた圧損係数を表 4.3(a)~(c)に示す。コンパートメント全体の圧損 は5本花びらでのみ取得されているため、4本花びらコンパートメント全体の圧損係数は以下 の式で求めた。

(4本花びら全体)=(5本花びら全体)-(5本花びらバンドル)+(4本花びらバンドル) γ型コンパートメントのグリッドスペーサ型(以下燃料要素本数に応じ、「5本グリッド」、「4 本グリッド」、「3本グリッド」と称す)の水流動試験から得られた圧損係数を表 4.4(a)~(c)に示 す。ここに示した圧損係数は、コンパートメント流入管の抵抗係数を除いた試験体のものであ り、コンパートメントオリフィスには φ7.36mmのオリフィスを設置している。このことから、 3本グリッド全体の圧損係数は以下の式で求めた。4本グリッド及び5本グリッドの圧損係数に ついても、3本グリッドと同様に求めることができる。

(3本グリッド全体) = (3本グリッドのオリフィス組込試験体)

- (\$ 7.36mm オリフィス) + (流入管)

先行試験用γ型コンパートメントの水流動試験から得られた圧損係数を表4.5(a)~(b)に示す。 以上の式を用いて、γ型コンパートメント及び先行試験γ型コンパートメントの圧損を算出し た結果を表4.8に示す。各コンパートメントの実績流量及び圧損範囲は以下のようになる。

y型コンパートメント

- ・5本花びら : 流量範囲 291~330g/s、圧損範囲 122~155kPa
- ・4本花びら :流量範囲 225~342g/s、圧損範囲 66~141kPa
- ・4本グリッド : 流量範囲 191~269g/s、圧損範囲 31~59kPa、
- ・3 本グリッド : 流量範囲 242g/s、圧損範囲 63kPa
- ・5本グリッド : 照射試験実績なし
- 先行試験γ型

流量範囲 62~118g/s、圧損範囲 4.8~14.1kPa

4.1.3 δ型コンパートメントの実績圧損の整理

る型コンパートメントの水流動試験から得られた圧損係数を表 4.6(a)~(b)に示す。δ型コンパ ートメントは、燃料要素の支持方式(ワイヤスペーサ方式あるいは、シュラウド管ディンプル方 式)と燃料要素外径を変更して水流動試験を実施しているが、照射試験実績はないため、「D型 照射リグの設計報告書」¹⁾に記載された各コンパートメントの流量設定範囲を基に圧損を算出 した。圧損の算出結果を表 4.8 に示す。各コンパートメントの圧損範囲は以下のようになった。 なお、δ型コンパートメントは、燃料要素の支持方式により、以下「ワイヤスペーサ」、「シュ ラウド管ディンプル」と称す。

δ型コンパートメント

・ワイヤスペーサ、燃料要素外径 φ6.5mm : 45~125g/s、37~2

- ・ワイヤスペーサ、燃料要素外径 φ8.5mm
- : 48~125g/s、47~264kPa
- ・シュラウド管ディンプル、燃料要素外径 φ6.5mm : 45~125g/s、39~252kPa

・シュラウド管ディンプル、燃料要素外径 φ 8.5mm : 48~130g/s、42~256kPa

なお、δ型コンパートメントの定格流量は、「D型照射リグの設計報告書」における 51.7g/s を満足しており、コンパートメントの流量設定範囲としては十分である。

4.1.4 基準とする圧損特性を持つコンパートメントの決定

4.1.1~4.1.3 項の結果をもとに、燃料用コンパートメントの全体圧損を図 4.1 に示す。図より、 γ型コンパートメントの圧損特性は、δ型コンパートメントに比べ、流量は大きく圧損が小さい 傾向があり、双方の圧損特性が大きく異なる。よって、基準とするコンパートメントは、γ型 及びδ型コンパートメントのそれぞれで選定することとした。図 4.1 より、最も圧損が大きい のは、γ型コンパートメントの中では5本花びら、δ型コンパートメントの中では支持方式がワ イヤスペーサの燃料要素外径 8.5mm 場合であり、これらをそれぞれの基準とするコンパートメ ントとする。よって、他の燃料用コンパートメントの圧損特性が、コンパートメントオリフィ スを追加することで、基準とするコンパートメントの圧損特性と同等となることを確認する。 γ型コンパートメントに追加するコンパートメントオリフィスの圧損係数式は、表 4.3 の花び らコンパートメントオリフィスの実験式を用いた。この式は、花びら以外のγ型コンパートメ ントオリフィスとは助走距離、面取り量は異なるが、オリフィスの管外径は同じであるため、 コンパートメント内に設置可能である。γ型コンパートメントに設置するオリフィスの仕様を 以下に示す。

y型コンパートメント

:	ϕ 8.0mm
:	ϕ 6.8mm
:	φ 6.7mm
:	φ 7.3mm
	: : :

先行試験γ型

・追加するオリフィス

: \$\phi 6.6mm\$

δ型コンパートメントに追加するコンパートメントオリフィスの圧損係数式は、表 4.6 の δ 型コンパートメントオリフィスの実験式を用いた。このオリフィスは2枚1組のコンパートメ ントオリフィス及びシュラウド管オリフィスからなり、合計4枚のオリフィスを組み合わせて いる。2番目に圧損が大きい燃料要素 φ6.5mm のワイヤスペーサ型コンパートメントに φ5.5mm の最大径のオリフィスを追加すると、基準とした圧損特性よりも圧損が大きくなる。

よって、コンパートメントオリフィスとシュラウド管オリフィスで助走距離は異なるが、本 評価では圧損特性が同等となることを確認するため、コンパートメントオリフィスまたはシュ ラウド管オリフィスのどちらか一方を設置したとして、表 4.6 の圧損係数を 1/2 にして圧損を 求めた。δ型コンパートメントに追加するオリフィスの仕様を以下に示す。

・ワイヤスペーサ、燃料要素外径 φ6.5mm : φ5mm オリフィス(計2枚)

・シュラウド管ディンプル、燃料要素外径 ϕ 6.5mm : ϕ 5mm オリフィス(計 2 枚)

・シュラウド管ディンプル、燃料要素外径 φ8.5mm : φ5.5mm オリフィス(計4枚)

図4.2 及び図4.3 にγ型コンパートメント及びδ型コンパートメントの圧損特性を一致させた 結果を示す。適切なオリフィス孔径の流動抵抗を追加することで、5 枚花びらの圧損特性に他 のγ型コンパートメント(先行試験用γ型コンパートメントを含む)の圧損特性が一致した。 また、δ型コンパートメントについては、φ8.5mmのワイヤスペーサに一致した。

以上からγ型コンパートメントは、5枚花びらを、δ型コンパートメントは、φ8.5mm ワイ ヤスペーサをそれぞれ燃料用コンパートメントの基準とし、CMIR コンパートメントとの混載 についての検討を進める。

4.2 流量設定範囲の目標値の具体化

基準とした燃料用コンパートメントの流量実績を基にハイブリッドリグの流量設定範囲の目 標値を設定する。図 4.4 に示すように CMIR コンパートメントの水流動試験は約 20g/s まで実施 しているが、照射試験の実績流量は 4.1~8.4g/s である。CMIR コンパートメントの流量設定範 囲の目標値は、実績流量範囲をカバーできる 3~9g/s とした。同様に γ型コンパートメントに ついては、実績流量から 120~360g/s、δ型コンパートメントについては、基準のコンパートメ ントの設計流量範囲より 48~125g/s とした。よって、CMIR コンパートメントに追加する圧損 が最も大きくなるケースは、流量 3g/s の CMIR コンパートメントと流量 360g/s の 5 枚花びら (γ 型コンパートメント)または、流量 125g/s の燃料要素 ϕ 8.5mm の δ 型コンパートメント (ワイ ヤスペーサ)を同一集合体内に混載するケースである。このとき、追加する圧損は B 型流路の ハイブリッドリグの場合は 186kPa、D 型流路の場合は 264kPa となる。なお、これらの最大の 圧損を追加するケースが成立すれば、目標範囲内の全ての流量の組み合わせについても、流動 抵抗を設置することによりハイブリッドリグのコンパートメントの流量分配が成立する。よっ て、上記の流量の組み合わせのハイブリッドリグを成立させるために必要な流動抵抗の仕様を 検討する。

4.3 コンパートメントに追加する流動抵抗仕様及び設置範囲の検討

ハイブリッドリグの CMIR コンパートメントに追加する流動抵抗は、圧損が大きく、設置す る範囲が狭くて済むオリフィスまたは、RTCB 用 A 型照射燃料集合体に用いた多孔板オリフィ スの 2 種類を比較する。CMIR コンパートメントの実績流量及び圧損は、燃料用コンパートメ ントより非常に小さく、オリフィスまたは多孔板オリフィスは複数枚設置することになると想 定されるため、これらの設置場所についても併せて検討する。

4.3.1 検討手順

4.2 節で求めた CMIR コンパートメントに追加する流動抵抗の仕様と設置範囲の大きさについて、以下の手順で検討する。

- オリフィス1枚当たりの圧損をできるだけ大きくするために、水流動試験実績よりもオリフィス孔径を小さくする必要がある。このため、オリフィス及び多孔板オリフィスの圧損係数 実験値と理論値を比較し、理論式で圧損係数を算出できるか検証する。
- ② 圧損係数実験値と理論値が一致しない場合は、理論値を実験値補正することで現実に近い値 とする。
- ③ CMIR コンパートメントの最小流量における設置範囲を検討するため、キャビテーション評価により 3g/s でのオリフィス孔径を求める。
- ④③の最小流量のオリフィス孔径における圧損係数理論値を求め、②で求めた方法で実験値補 正する。
- ⑤ 実験値補正した圧損係数を用いて、γ型コンパートメントの最大圧損(186kPa)、またはδ型コンパートメントの最大圧損(264kPa)とするためのオリフィス枚数を求め、設置間隔は実績と同様にオリフィス約43mm、多孔板オリフィス 5.8mmとして、各流動抵抗の設置範囲を比較する。なお、オリフィスの設置間隔は多孔板オリフィスよりも大きく、助走距離を短くできる可能性もあるが、付録1に示すように先行試験用γ型コンパートメントの水流動試験で得られた助走距離を含めた圧損係数の式は適用できないため、設置間隔は実績を基に設定する。
- ⑥設置範囲、コンパートメント構造を流量によらず共通とするため、流量 3g/s のときと同じ枚数で、4~9g/s のときに最大圧損の燃料用コンパートメントと組み合わせることができるよう

に、各流量におけるオリフィス孔径を求める。

⑦オリフィス孔径の製作精度の実績最小値は±0.015mm のため、製作精度から生じる流量誤差 を小さくして再評価する。

4.3.2 オリフィス及び多孔板オリフィスの圧損係数理論式の検証

水流動試験結果を用いて、オリフィス及び多孔板オリフィスの圧損係数理論式を検証する。 検討対象の流動抵抗は以下の3種類とし、その仕様を表 4.9 に示す。

- ・先行試験用 γ 型コンパートメントのオリフィス (4 段)
- ・δ型コンパートメントのオリフィス(4段)
- ・RTCB用A型照射燃料集合体の多孔板オリフィス(4段~15段)

(1) 圧損係数の理論式

上記のオリフィス及び多孔板オリフィスについて、圧損係数の理論値を算出する。なお、付録2に示すように、試験結果のばらつきを小さくするためにオリフィスには面取り加工がされており、オリフィス孔径に対して面取り量が大きくなると圧損は小さくなる。コンパートメント構造をより正確に決定するため、圧損係数の理論値の算出では、オリフィスの面取りの効果も含めた。

①上流側を C 面取りしたオリフィスの圧損係数理論式

水流動試験における先行試験用 γ 型及びδ型コンパートメントのオリフィスは、縮流側のみ C 面取りとしているため、(4-1) 式のようにオリフィスの圧損係数理論式の各項が縮流、拡流 及び管摩擦にわかれている式²⁾を用いて圧損係数を算出した。オリフィス孔径定義の Re 数が Re>10⁴のときのオリフィス圧損係数 の式を以下に示す。

面取り抵抗係数

$$\zeta_{1} \cong \underbrace{\begin{array}{c} \bullet \\ 0.5 \left(1 - \frac{F_{0}}{F_{1}}\right)^{\frac{3}{4}}}_{\text{min}} + \underbrace{\left(1 - \frac{F_{0}}{F_{1}}\right)^{2}}_{\text{timin}} + \underbrace{\lambda \frac{l_{0}}{D_{0}}}_{\text{timin}} \qquad (4-1) \quad \vec{x}$$

 $\zeta = k_1 \zeta_1$

ここで、 F₀:オリフィス流路面積 F₁:オリフィス管内面積

- λ:管摩擦係数
- l₀:オリフィス板厚
- D₀:等価直径(オリフィス孔径)
- k₁:オリフィス板厚/孔径の比と管内径/孔径の比から得られる係数

なお、δ型コンパートメントの場合は、オリフィス1枚目の管内径が縮流側 4mm、拡流側 6mm

となっているため、オリフィス管内面積 F₁が縮流と拡流で異なる。また、(4-1) 式のオリフィ ス縮流の項の係数 0.5 は、面取り量がゼロの場合の面取り抵抗係数であり、C 面取りの場合は、 傾斜面取りしたオリフィスの圧損係数理論式³⁾で用いられている抵抗係数ζ'をこの抵抗係数 0.5 と置き換える。

面取り抵抗係数 ζ'は、面取り量 I'と等価直径(オリフィス孔径)D_hで、I/D_hの関数として表 わされ、Diagram4-12の図より読み取る。一例として、先行試験用 γ型コンパートメントオリ フィスでφ3mmのときの面取り抵抗係数は、I'/Dh=0.3/3=0.1よりζ'=0.19となる。オリフィス 面取り抵抗係数は、オリフィス孔径に対して面取り量が大きいほど抵抗係数は小さくなる。(4-1) 式で得られた圧損係数をオリフィス枚数の4枚分足した値を水流動試験結果と比較する。

②上流側を C 面取りした多孔板オリフィスの圧損係数理論式

多孔板オリフィスは、図 4.5 に示すようにオリフィス孔が 2 か所開いた多孔板で、オリフィ ス孔の位置を 90°回転させて 1.5mm 間隔で設置されている。助走距離が短いため圧損は理論値 よりも小さくなると考えられるが、オリフィス板の間隙を曲がって流れるときの抵抗分、圧損 が大きくなる。この流れは理論式では評価しにくいため、多孔板オリフィスの圧損係数の検証 では、助走距離と間隙の流れを含めずに、多孔板オリフィスのみの圧損係数の理論値と水流動 試験結果を比較した。

水流動試験での多孔板オリフィスは、①のオリフィスと同様に上流側を C 面取りとしている ため、多孔板オリフィスの圧損係数理論式の各項が縮流、板厚、拡流及び管摩擦に分割してい る以下の式⁴⁾を用いて圧損係数を算出した。なお、オリフィス孔径定義の Re 数は、Re>10⁵で ある。



ここで、ΔH: 圧損

γ:流体密度
 w₁:管内流速
 F₀:多孔板オリフィス流路面積
 F₁:多孔板オリフィス管内面積
 λ:管摩擦係数
 1:オリフィス板厚

D_h:等価直径(オリフィス孔径)

多孔板オリフィスの面取りについては、①で面取り抵抗係数を設定した方法と同様にして圧
損係数を算出した。なお、水流動試験の多孔板オリフィスは、拡流側にも C0.1mm の面取りを しているが、拡流側の面取り抵抗係数の理論値は文献に記載がなく、縮流側に比べて面取り量 も小さいため、ここでは縮流側の面取りの影響は無視した。(4-2)式で得られた圧損係数に相 当するオリフィス枚数分(4 枚から 15 枚)を加算した値を水流動試験結果と比較する。

(2) 圧損係数理論式の検証結果

(1)の理論式を用いて圧損係数を検証した結果を表 4.10、表 4.11 及び表 4.12 に示す。圧損係 数実験値と理論値の比は、いずれのコンパートメントも1に近い値となったため、オリフィス 孔径を小さくした場合でも、理論式を用いることで妥当な結果が得られると考えられる。

オリフィスについては、いずれのコンパートメントの場合もオリフィス孔径が小さい場合の 方が圧損係数実験値/理論値の比は1に近くなった。これは、オリフィスを通過した後の流れが 拡散する角度はオリフィス孔径によらず一定と考えると、オリフィス孔径が小さい方が必要な 助走距離は短くなるため、φ3mmの場合は助走距離が十分であり、理論値と実験値がほぼ一致 したと考えられる。多孔板オリフィスでは、オリフィスの場合よりも圧損係数の実験値と理論 値の比が大きくなっているが、これは1.5mm幅の多孔板オリフィス間隙の流れによる圧損が大 きいためと考えられる。なお、オリフィス及び多孔板オリフィスの両方とも、オリフィス孔径 が大きくなるにつれて理論値に対して実験値の圧損係数が大きくなる傾向があるため、圧損係 数を実験値補正する必要がある。

4.3.3 オリフィス及び多孔板オリフィスの圧損係数の実験値補正式

4.3.2 項より、水流動試験のオリフィス孔径と圧損係数実験値と理論値の比には相関がある。 よって、オリフィス孔径/管内径に対する圧損係数実験値/理論値のグラフの線形近似によって 実験値補正を行う。オリフィス及び多孔板オリフィスの実験値補正のグラフを図 4.6 及び図 4.7 に示す。オリフィスの場合は、オリフィス孔径をパラメータとした測定点数が多い先行試験用 γ型コンパートメントの試験結果を用い、多孔板オリフィスの場合も測定点及び設置枚数の多 い 10 枚の場合の試験結果を用いた。圧損係数の実験値補正式は、以下のように表わされる。

・オリフィス圧損係数の実験値補正式

 $h_1=0.5780 \times (d_0/d) + 0.8605$

・多孔板オリフィス圧損係数の実験値補正式

 $h_2=2.944 \times (d_0/d) + 0.932$

ここで、h₁、h₂:補正係数

d₀:オリフィス孔径

d:オリフィス管内径

圧損係数の実験値補正を行うときは、圧損係数の理論値に上記の補正式で得られた補正係数 を乗じる。なお、オリフィス孔径が小さくなると補正係数も小さくなるため、理論値をそのま ま用いるよりも実験値補正を考慮した方が、オリフィス必要枚数が多くなる評価となる。 4.3.4 最小流量におけるオリフィス及び多孔板オリフィス孔径の算出

CMIR コンパートメントに追加する圧損が大きいため、追加するオリフィス孔径を実績より も小さくするか、オリフィス枚数を増やす必要がある。オリフィス孔径を現状のままで、枚数 を増やして圧損を確保する場合オリフィスの設置可能なスペースを超えてしまう可能性がある。 このため、オリフィス孔径を小さくして圧損を大きくすることを検討した。オリフィス孔径を 小さくするとオリフィス部の流速が大きくなり、キャビテーションが発生する恐れがあること から、まず、キャビテーションが発生するオリフィス孔径の評価を以下の式で実施した。

$$K = \frac{P - PV}{\frac{\rho V^2}{2}}$$
ここで、K:キャビテーション係数
P:静圧(オリフィス下流の圧力)[Pa]
Pv:飽和蒸気圧[Pa]
 $\rho:密度[kg/m^3]$
V:オリフィス孔径での流速[m/s]

オリフィス及び多孔板オリフィスは試料ホルダの下に設置するため、静圧は以下の圧損の合 計とする。

- 静圧=(カバーガス圧)+(Na液面から試料ホルダの下までの位置圧損)
 - + (ハンドリングヘッド圧損) + (押上部圧損)
 - + (オリフィスなしのコンパートメント全体圧損)

表 4.13 にキャビテーション評価によるオリフィス及び多孔板オリフィスの最小径の算出結 果を示す。キャビテーション係数を 2.5 以上とすると、最小流量を 3g/s 流すためには、オリフ ィス孔径は ϕ 0.86mm 以上、多孔板オリフィス孔径 ϕ 0.61mm 以上とする必要がある。ただし、 孔径 ϕ 0.61mm は加工実績がないため、実績最小径の ϕ 0.8mm (B 型照射燃料集合体 (B11) に おける先行試験用 γ 型コンパートメントの内壁構造容器ストレーナの孔径) についても設置範 囲を検討することとした。RTCB 用 A 型照射燃料集合体の多孔板オリフィスの板厚は 4.3mm で あり、ストレーナの板厚 4.0mm と同等であるため、 ϕ 0.8mm、板厚 4.3mm の多孔板は製作可能 であると考えられる。ただし、ストレーナ孔径の製作精度は ϕ 0.8mm±0.1mm で、流量誤差が 大きくなるため、他のコンパートメントオリフィスと同程度の精度 (±0.015mm) で製作する必 要がある。

4.3.5 最小流量におけるオリフィス及び多孔板オリフィスの圧損係数の実験値補正

4.3.2 項で求めた理論式を用いてオリフィス及び多孔板オリフィスの圧損係数を実験値補正 した結果を表 4.14 及び表 4.15 に示す。オリフィス φ0.86mm のときの 4 枚分の圧損係数理論値 は 126,006 で、これに補正係数 0.91 をかけて、実験値補正後の圧損係数は 114,665 となる。同 様に多孔板オリフィス φ0.61mm及び φ0.86mmの 10 枚分の圧損係数を実験値補正した。なお、 オリフィス上流の面取りは、先行試験用 γ型コンパートメントの水流動試験と同様に、オリフ ィス孔径の 1/10 の面取り抵抗係数を用いた。この場合、オリフィス孔径 φ0.61mm のとき C0.061mm、オリフィス孔径 φ0.80mm のとき C0.080mm となり、面取りの製作実績 C0.2mm よ り小さい。多孔板オリフィスについては、RTCB 用 A 型照射燃料集合体と同様に上流側の面取 りを C0.5mm とした。

4.3.6 オリフィス及び多孔板オリフィスの設置枚数の検討

オリフィス及び多孔板オリフィスの設置枚数の検討では、CMIR コンパートメントに設置す る枚数が最大となるように、最大流量の燃料用コンパートメントと最小流量(3g/s)の CMIR コンパートメントを同一集合体内に装荷する場合について評価する。圧損係数は、4.3.3 項の実 験値補正式を用いて求める。4.2 節のハイブリッドリグの CMIR コンパートメントに追加する 圧損の最大値より、オリフィス及び多孔板オリフィスの必要枚数と設置範囲を比較した結果を 表 4.16 に示す。水流動試験では流動抵抗の前後に助走距離を長くとっており、助走距離とオリ フィス孔径の関係が明らかでないため、表 4.16 の設置範囲は前後の助走距離を含まない場合で ある。設置範囲はオリフィスの設置間隔を約 43mm、多孔板オリフィスの設置間隔を 5.8mm と して求めた。なお、この評価では CMIR コンパートメントに最大の圧損を追加する評価を実施 しているため、最大流量より小さい流量の燃料用コンパートメントと同一集合体に設置する場 合は、オリフィス孔径を大きくして圧損を小さくすればよい。

4.3.7 オリフィス及び多孔板オリフィスの設置範囲の共通化

4.3.6 項において最小流量 3g/s における流動抵抗の設置範囲を求めたが、CMIR コンパートメントの流量設定範囲の目標値は 3~9g/s としており、各流量においてコンパートメントに追加 する圧損が異なる。設置範囲、コンパートメント構造を流量によらず共通とするため、オリフ ィス及び多孔板オリフィスの枚数を流量 3g/s の場合で固定し、4~9g/s のときに基準のコンパ ートメントと同一リグ内に装荷する場合のオリフィス孔径を求める。なお、γ型及びδ型コン パートメントのどちらのハイブリッドリグにおいても、CMIR コンパートメントの流量が同じ 場合は設置するオリフィス孔径は同じであるため、ここではγ型コンパートメントについての み検討した。

圧損係数の実験値補正係数はオリフィス孔径に依存するため、表 4.17 に示すように、コンパ ートメント圧損と流量から求めた圧損係数と、オリフィスの圧損係数理論値と実験値補正係数 から求めた圧損係数がほぼ一致するときのオリフィス孔径を各流量におけるオリフィス孔径と する。表 4.17 のオリフィス孔径の算出結果と表 4.13 の各流量のキャビテーション評価におけ るオリフィス最小径と比較し、最小流量のコンパートメントに設置したオリフィス枚数を固定 してオリフィス孔径を調整すれば、他の流量のコンパートメントでもキャビテーションは発生 しないことを確認した。以上より、ハイブリッドリグの流量設定範囲内においては、流量によ らずコンパートメント構造を共通とすることが可能であることを確認した。なお、δ型コンパ ートメントの各流量のオリフィス枚数は、γ型コンパートメントとの最大圧損の大きさの比(δ 型/γ型=264kPa/186kPa)に比例して、オリフィス枚数が増えることになる。 4.3.8 オリフィス孔径の製作精度による流量誤差の検討

オリフィス孔径の製作精度の実績最小値は±0.015mm(B型照射燃料集合体(B14)のオリフ ィス実績値)であるため、この製作精度の違いによる流量誤差を求め、流量誤差が±5%以内に 収まることを確認する。流量誤差は、コンパートメント圧損を一定(γ型コンパートメントの 最大圧損 ΔP=186kPa)としたときに、オリフィス孔径の違いにより、流量がどの程度異なるか を求める。なお、γ型及びδ型コンパートメントのどちらのハイブリッドリグにおいても、CMIR コンパートメントの流量が同じ場合は設置するオリフィス孔径は同じであり、流量誤差はオリ フィス孔径によるので、ここではγ型コンパートメントについてのみ検討した。

まずオリフィス孔径/管内径と実験値補正後の圧損係数の関係をグラフ化し(図 4.8~図 4.10)、圧損係数の近似式を作成する。近似式はオリフィスの圧損係数理論式と同様に、d₀/dの 4 次関数で近似した。

・オリフィス φ0.86mm の圧損係数近似式

ζ₁=3.390E+10×(d₀/d)⁴-1.669E+10×(d₀/d)³+3.109E+9×(d₀/d)²-2.618E+8×(d₀/d)+8.518E+6 ・多孔板オリフィス φ 0.61mmの圧損係数近似式

- ζ_2 =4.999E+11×(d₀/d)⁴-1.471E+11×(d₀/d)³+1.639E+10×(d₀/d)²-8.252E+8×(d₀/d)+1.606E+7 ・多孔板オリフィス ϕ 0.80mm の圧損係数近似式
- ζ_3 =9.522E+10×(d₀/d)4-3.935E+10×(d₀/d)³+6.167E+9×(d₀/d)²-4.374E+8×(d₀/d)+1.199E+7 ここで、 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 :オリフィス圧損係数

d₀:オリフィス孔径

d:管内径

上記の圧損係数近似式を用いて、製作精度が最小、最大における圧損係数を求めて、そのと きの流量の算出結果を表 4.18~表 4.20 に示す。全ての条件において、基準径との流量誤差が 5%以内となっていることが確認できた。図 4.11 にオリフィス及び多孔板オリフィス孔径の製 作精度に対する流量誤差のグラフを示す。流量誤差の大きさはオリフィス、多孔板オリフィス で違いがなく、製作精度の観点からはどちらもハイブリッドリグに適用可能である。

4.4 コンパートメント内の流動抵抗の設置構造

4.4.1 流動抵抗を設置可能なコンパートメント内の範囲

CMIR コンパートメント及び先行試験用 γ 型コンパートメントの構造を図 4.12 及び図 4.13 に示す。CMIR コンパートメントへ追加するオリフィスは、先行試験用 γ 型コンパートメントのオリフィスとするため、CMIR コンパートメントの流入管構造は、先行試験用 γ 型コンパートメントと同じとする。いずれも流入管外径寸法が φ 24mm であり、照射リグの構造変更には 波及しない。

CMIR コンパートメントに追加する流動抵抗は、試料ホルダ下の下部ブロックから流入口までの間に設置することとし、設置可能範囲は以下のようにして算出した。

設置可能範囲=(CMIR コンパートメントの炉心中心から流入管先端までの寸法)

- (先行試験用 γ型コンパートメントの流入管先端から1枚目のオリフィスまでの寸法)

- (炉心中心から試料ホルダ下部断熱板までの寸法)

=889-42-296

=551 [mm]

流動抵抗の設置範囲を表 4.16 に示す。δ型コンパートメントのハイブリッドリグでオリフィ スを適用する場合のみ設置場所に収まらない。また、基準の圧損特性とするために5枚花びら 以外の燃料用コンパートメントに追加するオリフィスは、燃料用コンパートメントのコンパー トメントオリフィスの設置位置である流入口付近の流路に設置する。

4.4.2 流動抵抗を設置したコンパートメントの構造

図 4.14 に γ 型コンパートメントのハイブリッドリグの流動抵抗として、オリフィスを適用した場合の CMIR コンパートメントの構造図を示す。上流側 1 枚目のオリフィスは、先行試験用 γ 型コンパートメントの流入管内の 1 枚目のオリフィス位置に合わせて、合計 12 枚設置した。

なお、コンパートメントの基本構成や接続部、溶接箇所に変更はない。このため、組立手順 や製作性については問題ないと考えられる。図 4.15 及び図 4.16 に多孔板オリフィスを適用し た場合のコンパートメント構造図を示す。オリフィスの場合は、ベローズの内側にある内径 φ13.6mmの内管連結具の中に設置されているが、多孔板オリフィスは外径 φ15mm でこの中 には設置できないため、内管連結具の上部に接続した円管内に設置することとした。なお、内 管と多孔板オリフィス組立体の間に冷却材が入るような流れができてしまうと考えられるが、 幅が 2.8mm(コンパートメント内管内半径-多孔板オリフィス組立体外半径)と狭く、冷却材が 充填されれば多孔板オリフィスの流れには影響しないと考えられる。

δ型コンパートメントを装填したハイブリッドリグの場合は、試料ホルダまでの空間に必要 枚数のオリフィスは設置できないため、多孔板オリフィスのみを適用する。図4.17及び図4.18 に多孔板オリフィスを適用した場合のコンパートメント構造図を示す。φ0.80mmの多孔板オ リフィスの場合は中性子の遮へい効果を保持するため、下部ブロックと多孔板オリフィスの間 隔を10mmとし、下部ブロックを小さくして(168mmから112mm)設置した。よって、ハイ ブリッドリグの CMIR コンパートメントに設置する流動抵抗は、組み合わせる燃料用コンパー トメントの種類によらず適用可能な多孔板オリフィスを使用した方がよい。ただし、実績の多 いオリフィスを使用したい場合は、オリフィスの助走距離を短くした水流動試験を実施し、圧 損特性を確認することでハイブリッドリグに適用できる可能性がある。

以上より、CMIR コンパートメントに多孔板オリフィスを設置することで、B型及びD型照 射燃料集合体で検討対象とした全ての種類の燃料用コンパートメントと組み合わせ可能なハイ ブリッドリグが成立し、各コンパートメント流量も実績流量を十分満足する範囲において設定 可能であることが確認できた。

コンパートメント種類	コンパートメント流路		
CMIR	流入部 コンパートメントオリフィス コンパートメント 		
ア型 (花びら)	コンパートメントオリフィス バンドル:4本,5本 流入部 (表4.3(c)) (表4.3(b)) 		
γ型 (グリッド)	流入部 コンパートメントオリフィス バンドル: 表4.4(b) (表4.4(c)) 3本,4本,5本 ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓		
先行試験用γ型	コンパ [°] ートメントオリフィス キャフ [°] セルーコンパ [°] 間 流入部 (表4.5(b)) キャフ [°] セル内部 キャフ [°] セル吊輪 コンパ [°] ートメント全体(表4.5(a))		
δ型	コンパートメントオリフィス シュラウト 管オリフィス シュラウト 管 ーコンパ間 (表4.6(b)) 流入部 シュラウト 管 ー 燃料要素間 コンパートメント全体(表4.6(a))		

表 4.1 CMIR 及び燃料用コンパートメントの流路モデル

オリフィス径 [mm]	圧損係数	水力等価直径 [mm]	Re 数範囲
オリフィスなし	ξ=23,410Re^-0.4041	19	$1,200 \le \text{Re} \le 4,600$
1.0	ζ=203,000Re^0.00471	19	$680 \le \text{Re} \le 1,000$
1.9	ζ=25,320Re^-0.05895	19	$960 \le \text{Re} \le 4,900$
2.0	ζ=1,456.8Re^-0.0371	10	$2,500 \le \text{Re} \le 7,500$
2.5	ζ=18,300Re^-0.1399	19	$920 \le \text{Re} \le 4,700$
3.5	ζ=786.7Re^-0.1574	10	$3,500 \le \text{Re} \le 7,500$
5.0	ζ=1,260.8Re^-0.2856	10	$2,900 \le \text{Re} \le 5,600$

表 4.2 CMIR コンパートメント全体の圧損係数

表 4.3 花びら(γ型コンパートメント)の圧損係数

(a) 5本花びらコンパートメント全体(オリフィスなし)の圧損係数

水力等価直径[mm]	Re 数範囲	圧損係数近似式	
11	1.2E4 <re<1.5e5< td=""><td>ξ=18.29+6,350/(Re^0.628)</td></re<1.5e5<>	ξ=18.29+6,350/(Re^0.628)	

(b)バンドルの圧損係数

コンパ種類 水力等価直径[mm]		圧損係数近似式
5 本花びら	11	ξ=11.056+7,560*Re^-0.707
4 本花びら	11	ξ=136.09Re^-0.226

(c) コンパートメントオリフィスの圧損係数

オリフィス径	水力等価直径 (オリフィス管内径)	圧損係数近似式*
d (5.84mm-8.00mm)	D (11mm)	ξ=2,170×0.000147^(d/D)

*: Re 数依存性はほとんどなし

表 4.4 グリッドスペーサ (γ型コンパートメント)の圧損係数

(a)オリフィス組み込みコンパートメント圧損係数(流入管除く)

燃料本数	水力等価直径[mm]	圧損係数近似式
3本	34	ξ=3,925Re^-0.08315
4本	34	ξ=4,101Re^-0.1084
5本	34	ξ=4,903Re^-0.1215

(b)流入管の圧損係数

水力等価直径[mm]	圧損係数近似式*
34	$\xi = (4,495 \text{Re}^{-0.08908}) - (4,903 \text{Re}^{-0.1215})$

*:5本グリッドの(オリフィス φ7.36 模擬コンパートメント全体圧損)-(オリフィス φ7.36mm 組込)

(c) コンパートメントオリフィス圧損係数

オリフィス径[mm]	水力等価直径[mm]	圧損係数近似式
De(5mm-9mm)	34	ξ=11.03*De^-1.14

表 4.5 先行試験用 γ 型コンパートメントの圧損係数

(a)コンパートメント全体(オリフィスなし)の圧損係数

水力等価直径 (エントランスノズル内径)	圧損係数近似式*
34mm	ξ=30,075Re^-0.3172

*: 燃料径によらない。

(b)コンパートメントオリフィスの圧損係数

オリフィス径[mm]		水力等価直径[mm]	工指核粉近似式**	D。粉箔田	
前段	後段	(オリフィス管内径)	江預际	₩ 一 次 単 二	
5	5	11	ξ=72.921Re^0.0302	$7,100 \le \text{Re} \le 114,000$	
6	6		ξ=37.576Re^0.0148	$6,800 \leq \text{Re} \leq 148,000$	
9	9		ξ=1.442Re^0.0356	$7,100 \le \text{Re} \le 260,000$	
9	5		ξ=44.463Re^0.0211	$6,800 \leq \text{Re} \leq 130,000$	
9	6		ξ=21.69Re^0.0072	$7,100 \le \text{Re} \le 192,000$	
5	6		ξ=61.967Re^0.0066	$7,000 \le \text{Re} \le 142,000$	

<流路孔面取り 0.5mm>

<流路孔出口糸面取り>

オリフィス径 [mm]		入口側面取	水力等価直径 [mm]	圧損係数近似式**	Re 数範囲	
前段	後段	[mm]	(オリフィス管内径)			
3	3	0.3	-	ξ=907.11Re^-0.0196	$7,000 \le \text{Re} \le 41,000$	
5	5	糸面取		ξ=107.71Re^0.0246	$6,500 \le \text{Re} \le 81,000$	
5	5	0.5	11	ξ=106.02Re^-0.0201	$20,000 \le \text{Re} \le 111,000$	
5	5	1.0	11	ξ=130.81Re^-0.0274	$20,000 \le \text{Re} \le 107,000$	
6	6	0.6		ξ=39.824Re^-0.0077	$30,000 \le \text{Re} \le 170,000$	
9	9	0.9		ξ=2.849Re^-0.0223	$30,000 \le \text{Re} \le 254,000$	

**:動圧及びテストセクションの管摩擦損失分の補正を含む。

表 4.6 δ型コンパートメントの圧損係数

燃料要素	被覆管径	水力等価直径[mm]	口坦反粉近小寸*	D。粉箔田	
支持方式	[mm]	(オリフィス管内径)	广俱保级近似式*	KC 级 电I 田	
シュラウト゛管ディンプル	6.5		ξ=140.99Re^-0.1302		
ワイヤスへ。ーサ	6.5	6	ξ=144.12Re^-0.1352	$10.000 \le D_{2}$	
シュラウト゛管ディンプル	8.5	0	ξ=142.52Re^-0.1346	$10,000 \ge \text{Ke}$	
ワイヤスへ。ーサ	8.5		ξ=169.834Re^-0.1436		

(a)コンパートメント全体の圧損係数

*: コンパートメントオリフィス 4mm とシュラウド管オリフィス 4mm の組み合わせで、被覆管径と燃料 要素スペーサワイヤの有無にほとんど依存しない。

(b)コンパートメント、シュラウド管オリフィス組み合わせの圧損係数

オリフィス	径[mm]	水力等価直径[mm]	工埕区粉近川式
コンパートメント	シュラウド管	(オリフィス管内径)	圧損保效近似式
3	3		ξ=52.816Re^-0.0158
3	4		ξ=33.835Re^-0.02
3	5	6	ξ=29.448Re^-0.0207
4	4	0	ξ=14.311Re^-0.0352
4	4 5		ξ=11.146Re^-0.0302
5	5		ξ=4.0625Re^0

	∋ນ⊳ໍ່ໄປນໄ	コンハ゜ートメント	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~		コンハ゜ートメント	コンハ゜ートメント
リグ名		流量	7元速	Re	全体	全体圧損
	留万	[g/s]	[m/s]		圧損係数	[Pa]
	1	4.71	0.019	1.02E+03	1,422	226
	2	4.71	0.019	1.02E+03	1,422	226
CMID 1 2 2 4	3	4.71	0.019	1.02E+03	1,422	226
CMIR-1,2,3,4	4	4.71	0.019	1.02E+03	1,422	226
	5	6.34	0.026	1.38E+03	1,261	363
	6	6.78	0.028	1.47E+03	1,227	404
	1	4.63	0.019	1.01E+03	1,431	220
	2	4.63	0.019	1.01E+03	1,431	220
CMID 5	3	4.63	0.019	1.01E+03	1,431	220
CMIR-5	4	4.63	0.019	1.01E+03	1,431	220
	5	6.23	0.025	1.36E+03	1,270	353
	6	6.66	0.027	1.45E+03	1,236	393
	1	5.80	0.024	1.26E+03	1,307	315
	2	5.80	0.024	1.26E+03	1,307	315
MANTE OO	3	5.80	0.024	1.26E+03	1,307	315
WINTK-00	4	5.80	0.024	1.26E+03	1,307	315
	5	7.86	0.032	1.71E+03	1,156	512
	6	8.41	0.034	1.83E+03	1,124	571
	1	4.10	0.017	8.93E+02	1,503	181
	2	6.68	0.027	1.45E+03	1,234	395
CMID 6	3	6.35	0.026	1.38E+03	1,260	364
CIVIIK-0	4	7.22	0.029	1.57E+03	1,196	447
	5	6.68	0.027	1.45E+03	1,234	395
	6	4.10	0.017	8.93E+02	1,503	181

表 4.7 CMIR コンパートメントの流量及び圧損

			· · · ·			->° [/>]	
	171 - VC		コンパートメント流	流速	_		コンパートメント全体
リク名	ント	コンハートメント種類	\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\	[m/s]	Re	全体	圧損[Pa]
	番号		포 [6/ 5]	[11/ 3]		圧損係数	
	1		314.84	3.817	1.18E+05	22.4	1.42E+05
	2		314 83	3 817	1 18F+05	22.4	1 42F+05
	3		314.83	3,817	1 18E+05	22.1	1 42E+05
B0J	4	5本花びら(ア型)	214.77	2 9 1 6	1 195+05	22.4	1.42E+05
	4		314.77	3.010	1.10E+05	22.4	1.42E+05
	5		314.79	3.816	1.18E+05	22.4	1.42E+05
	6		314.79	3.816	1.18E+05	22.4	1.42E+05
	1		291.29	3.531	1.09E+05	22.6	1.23E+05
	2		291.28	3.531	1.09E+05	22.6	1.22E+05
	3		291.31	3 531	1 09F+05	22.6	1 23E+05
B1J	4	5本花びら(ア型)	201.01	2 5 2 2	1.002+00	22.0	1.20E+05
	4		291.35	3.332	1.10E+05	22.0	1.23E+05
	5		291.40	3.533	1.10E+05	22.6	1.23E+05
	6		291.39	3.533	1.10E+05	22.6	1.23E+05
	1		329.41	3.993	1.24E+05	22.3	1.54E+05
	2		329.49	3.994	1.24E+05	22.3	1.54E+05
	3		329.63	3 996	1 24F+05	22.3	1 55F+05
B2M	1	5本化ひら(ア型)	329.70	3 997	1 24E+05	22.3	1.55E+05
	- 4		329.70	3.337	1.24L+05	22.3	1.550-05
	5		329.02	3.990	1.24E+05	22.3	1.55E+05
	6		329.50	3.995	1.24E+05	22.3	1.55E+05
	1		297.16	3.602	1.12E+05	22.6	1.27E+05
	2		297.07	3.601	1.12E+05	22.6	1.27E+05
_	3		296 45	3 594	1.11F+05	22.6	1.27F+05
B3	1	5本花びら(ア型)	206.02	2 500	1 125+05	22.5	1 275+05
	- 4		200.00	0.000	1.12ETU0	22.0	1.2/ETU0
	о С		296.49	3.594	1.11E+05	22.6	1.2/E+05
	6		296.68	3.597	1.12E+05	22.6	1.27E+05
	1		304.63	3.693	1.14E+05	22.5	1.33E+05
	2		304.60	3.693	1.14E+05	22.5	1.33E+05
	3		304 32	3 689	1 14F+05	22.5	1 33F+05
B6	4	5本花びら(ア型)	304.49	3 601	1 1/E+05	22.5	1.22E±05
	- 4		204.43	3.031	1.140	22.5	1.332-05
	5		304.33	3.089	1.14E+05	22.5	1.33E+05
	6		304.42	3.690	1.14E+05	22.5	1.33E+05
	1	4木花びら(ャ刑)	316.40	3.836	1.19E+05	19.1	1.22E+05
	2	4本化0.5(7 主)	271.80	3.295	1.02E+05	19.6	9.25E+04
	3		307.64	3.730	1.16E+05	22.5	1.36E+05
B7	4		307.80	3 731	1 16E+05	22.5	1.36E+05
	- T	5本花びら(ア型)	207.66	0.701	1.165+05	22.0	1.00000
	5		307.00	3.730	1.10E+03	22.5	1.30E+03
	6		307.74	3./31	1.16E+05	22.5	1.36E+05
	1	4本花びら(ア型)	225.07	2.728	8.46E+04	20.3	6.57E+04
	2	5本花びら(ア型)	293.23	3.555	1.10E+05	22.6	1.24E+05
	3	4本花75ら(ア型)	342.07	4 1 4 7	1 29F+05	18.8	1 41F+05
B8	4	<u>5</u> 本花びら(ア型)	203.38	3 557	1 10E+05	22.6	1 24E+05
			233.30	0.007	1.005:05	10.0	1.415:05
	5		342.05	4.14/	1.29E+05	18.8	1.41E+05
	6	5本化ひら(ア型)	293.32	3.556	1.10E+05	22.6	1.24E+05
	1	4本花びら(ア型)	319.76	3.876	1.20E+05	19.1	1.24E+05
	2	4本グリッド(ア型)	268 79	0 341	3 27F+04	1207 0	6 09F+04
	-	<u>マホノノノロ(/ 王/</u> 2本ガロッド(ッ 刑)	240.75	0.01	2 02E±04	1545.0	6 26E±04
B9	<u>ა</u>		240.75	0.305	2.935+04	1040.8	0.202+04
	4	<u>4本グリッド(γ型)</u>	190.85	0.242	2.32E+04	1253.5	3.19E+04
	5	4本花びら(γ型)	316.81	3.841	1.19E+05	19.1	1.22E+05
	6	3本グリッド(ア型)	241.58	0.307	2.94E+04	1545.4	6.30E+04
	1		60.00	1			
	-		02.23				
	2		62.23				
P11	3	生行試験田を刑	62.23	0.079	7.57E+03	1769.3	4.79E+03
	Δ	元1] 武駛用了空	62.22				
	-		02.23				
	5		62.23				
	6		62.23	Į			
	1		118.24				
	2		118.24				
	3		118 24	0 150	1 44F+04	1443 4	1 41F+04
B14	1	先行試験用γ型	110.24	0.100			1.412.04
	-+		110.24				
	о -		118.24				
	6		118.24	1 L			
	1	シュラウト゛管テ゛ィンプル	45	<u>1.893</u>	3.83E+04	25.8	<u>3.89E+0</u> 4
	2	(δ型、要素外径6.5mm)	125	5.259	1.06E+05	21.7	2.52E+05
	3	ワイヤースペーサ	45	1 893	3 83E+04	24 7	3 73E+04
		(る刑 亜麦別な6.5mm)	+5	F.050	1.000-04	27.7	0.702.04
	4		125	5.259	1.06E+05	20.6	2.40E+05
(設計値)	5	シュフワト 管ティンフル	48	2.019	4.08E+04	24.3	4.16E+04
	6	(る型、要素外径8.5mm)	130	5.469	1.11E+05	20.3	2.56E+05
	7	ワイヤースペーサ	48	2 0 1 9	4 08F+04	27 1	4 65F+04
	Q	(² 型 要素外径8.5mm)	105	E 250	1 065+05	27.1	2 64E±05
1	O O	、 · エ、 · エ、 · エ / · 止 ·	125	0.209	1.00E+05		Z 04F+U5

表 4.8 燃料用コンパートメントの流量及び圧損(オリフィスなし)

コンパートメント	オリフィス 孔径	面取り	管内径	板厚	オリフィス間 距離
	3mm	上流側:C0.3 下流側:糸面取り			
先行試験用 γ 型	5mm	上流側:C0.5 下流側:糸面取り	11	2.0	1-2 段目:38mm
	6mm	上流側:C0.6 下流側:糸面取り	11mm	2.011111	2-3 段目:44.5mm 3-4 段目:40.5mm
	9mm	上流側:C0.9 下流側:糸面取り			
δ型	3mm	上流側:C0.5	1 段目上流側:4mm	2.0mm	1-2 段目:26mm 2-3 段目:35.5mm
	4mm	下流側:糸面取り	上記以外:6mm		3-4 段目:36mm
RTCB 型*	1.5mm×2 個 2.0mm×2 個 3.0mm×2 個	· 上流側:C0.5 · 下流側:-	13mm	4.3mm	1.5mm

表 4.9 水流動試験の流動抵抗の仕様

*: RTCB型のみオリフィス孔が2か所の多孔板で、オリフィス孔の位置を90°回転させて設置

オリフィス孔径	Re 数 (管内径定義)	圧損係数実験値 (Re=100,000 のとき)	圧損係数理論値	実験値/理論値
φ 3-3mm		723.9	749.1	0.97
φ 5-5mm	10.000	84.1	73.9	1.14
φ 6-6mm	10,000	36.4	28.9	1.26
φ 9-9mm		2.2	1.71	1.29

表 4.10 先行試験用 γ 型コンパートメントオリフィスの圧損係数検証結果

表 4.11 δ型コンパートメントオリフィスの圧損係数検証結果

オリフィス	オリフィス	水流量	圧損係数	圧損係数	宇幹は四シは
段数	孔径	[g/s]	正損係数 圧損係数 s] 実験値 理論値 1.6 21.76 23.5 0.9 22.01 23.6 1.3 22.33 23.6 5.8 4.54 4.1 6.8 4.61 4.1 5.7 4.76 4.1 1.6 44.13 49.5 0.9 44.71 49.5 1.3 45.31 49.7 5.8 9.44 8.9 6.8 9.58 8.9	夫駛恒/垤丽恒	
		111.6	21.76	23.5	0.93
	φ 3-3 mm	70.9	22.01	23.6	0.93
2 氏几		31.3	22.33	23.6	0.95
2 权		205.8	4.54	4.1	1.11
	φ 4-4mm	126.8	4.61	4.1	1.12
		45.7	4.76	4.1	1.16
		111.6	44.13	49.5	0.89
	φ 3-3 mm	70.9	44.71	49.5	0.90
4 巴		31.3	45.31	49.7	0.91
4 校		205.8	9.44	8.9	1.06
	φ 4-4 mm	126.8	9.58	8.9	1.08
		45.7	9.93	9.0	1.10

オリフィス	オリフィス	水流量	圧損係数	圧損係数	字段は(理約)は
孔径	枚数	[g/s]	実験値	理論値	夫缺恒/
	4		7,840	5,881	1.33
φ 1.5mm	10	10	19,200	14,703	1.31
	12	10	23,500	17,643	1.33
	15		29,300	22,054	1.33
	4		2,290	1,772	1.29
1 20000	10	25	5,980	4,429	1.35
φzmm	12	23	7,390	5,315	1.39
	15		9,230	6,644	1.39
	2		231	181	1.28
	4	00	526	362	1.45
φ smin	6	90	851	542	1.57
	10		1,480	904	1.64

表 4.12 RTCB 用 A 型照射燃料集合体の多孔板オリフィスの圧損係数検証結果

最小孔径[mm] 流量[g/s] オリフィス 多孔板 3 0.61 0.86 4 0.99 0.70 5 1.10 0.78 6 1.21 0.86 7 1.30 0.93 8 1.39 0.99

1.48

1.05

9

表 4.13 キャビテーション評価によるオリフィス及び多孔板オリフィスの最小径

	1	1	1				
	オリフィス孔径	F/0F	正損係数*				
	[mm]	d0/d	実験値	理論値	実験値/理論値	実験値補正	
最小径	0.86	0.08	-	126,006	0.91	114,665	
	3	0.27	724	749	0.97	-	
水流動試験	5	0.45	84	74	1.14	-	
の実績	6	0.55	36	29	1.26	-	
	9	0.82	2	2	1.29	-	

表 4.14 オリフィス 4 枚の圧損係数の実験値補正

* 管内径 11mm 定義、面取り量はオリフィス孔径の 1/10

	了仅[]	40/4	圧損係数*			
	₹L↑£[mm]	uu/u	実験値	理論値	実験値/理論値	実験値補正
最小径	0.61	0.047	-	600,455	1.07	642,487
実績径	0.80	0.062	-	195,425	1.11	216,922
水达动封殿	1.5	0.115	19,200	14,703	1.31	-
水流動試験の実績	2	0.154	5,980	4,429	1.35	-
い天限	3	0.231	1,480	904	1.64	-

表 4.15 多孔板オリフィス 10 枚の圧損係数の実験値補正

*: 管内径 13mm 定義、面取り量は C0.5

	項目	オリフィス 最小径	多孔板オリフィス 	多孔板オリフィス 実績容	
+11-7		取小性			
オリノ	イベ扎佺[mm]	0.86	0.61	0.80	
流量[g	/s]		3		
管内流	速[m/s]	0.036	0.0	026	
	基準としたコンパートメントの最大圧損[kPa]	186			
	CMIRコンパートメントに追加する圧損係数	324,019	632,082		
γ型	最小径のオリフィス圧損係数(1枚当たり)	28,666	64,257	21,754	
	枚数	11.3	9.8	29.1	
	設置範囲*[mm]	471	58	168.2	
	基準としたコンパートメントの最大圧損[kPa]		264		
	CMIRコンパートメントに追加する圧損係数	459,898	897	,148	
δ型	最小径のオリフィス圧損係数(1枚当たり)	28,666	64,257	21,754	
	枚数	16.0	14.0	41.2	
	設置範囲*[mm]	688	81.2	249.4	

表 4.16 オリフィス及び多孔板オリフィスの設置範囲の比較

*: オリフィス及び多孔板オリフィス前後の助走距離は含まない。

表 4.17 γ型コンパートメントで設置構造を共通(オリフィス枚数固定)とした場合の各流量 のオリフィス孔径

(1) オリフィス 12 枚の場合(流量 3g/s でオリフィス孔径 ϕ 0.86mm)

流量から求めた場合

オリフィス孔径から求めた場合

流量	管内流速	ΔP=186kPa と	実験値補正後の	圧損係数	圧損係数の	孔径/	孔径
[g/s]	[m/s]	なる圧損係数	圧損係数*	理論値	実験値/理論値	管内径	[mm]
4	0.048	186,012	188,374	207,004	0.91	0.091	1.00
5	0.061	115,176	117,650	127,880	0.92	0.103	1.13
6	0.073	80,422	82,329	88,526	0.93	0.113	1.24
7	0.085	59,318	60,478	65,030	0.93	0.122	1.34
8	0.097	45,549	47,062	50,066	0.94	0.130	1.43
9	0.109	36,072	36,793	39,142	0.94	0.138	1.52

(2) 多孔板オリフィス 10 枚の場合(流量 3g/s でオリフィス孔径 φ 0.61mm)

流量から求めた場合

オリフィス孔径から求めた場合

流量	管内流速	ΔP=186kPa と	実験値補正後の	圧損係数	圧損係数の	孔径/	孔径
[g/s]	[m/s]	なる圧損係数	圧損係数*	理論値	実験値/理論値	管内径	[mm]
4	0.035	349,854	366,887	336,594	1.09	0.054	0.70
5	0.043	231,786	237,365	213,842	1.11	0.061	0.79
6	0.052	158,495	162,751	144,027	1.13	0.066	0.86
7	0.061	115,176	119,721	105,018	1.14	0.072	0.93
8	0.069	90,017	90,105	77,677	1.16	0.077	1.00
9	0.078	70,442	71,401	61,026	1.17	0.082	1.06

(3) 多孔板オリフィス 29 枚の場合(流量 3g/s でオリフィス孔径 φ 0.8mm)

流量から求めた場合

オリフィス孔径から求めた場合

流量	管内流速	ΔP=186kPa と	実験値補正後の	圧損係数	圧損係数の	孔径/	孔径
[g/s]	[m/s]	なる圧損係数	圧損係数*	理論値	実験値/理論値	管内径	[mm]
4	0.035	349,854	366,602	321,581	1.14	0.071	0.92
5	0.043	231,786	238,171	205,320	1.16	0.078	1.02
6	0.052	158,495	161,334	135,575	1.19	0.087	1.13
7	0.061	115,176	115,376	95,352	1.21	0.095	1.23
8	0.069	90,017	90,174	73,312	1.23	0.101	1.31
9	0.078	70,442	71,666	57,333	1.25	0.107	1.39

*: 実験値補正後の圧損係数が ΔP=186kPa となる圧損係数を超えたときの孔径が各流量における孔径となる。

表 4.18	オリフィス孔径の製作精度	$(\pm 0.015 mm)$	による流量誤差
--------	--------------	------------------	---------

流量	最小径		実験値補正後の	流谏	製作誤差に	基準径との
	基準径[mm]	d0/d	圧損係数	[m/a]	よる流量	流量誤差
[g/s]	最大径		(12枚)	[111/5]	[g/s]	[%]
	0.845	0.077	367,675	0.034	2.816	3.29
3	0.860	0.078	343,859	0.035	2.912	-
	0.875	0.080	321,675	0.037	3.011	-3.39
	0.985	0.090	200,609	0.046	3.813	3.00
4	1.000	0.091	188,746	0.048	3.931	-
	1.015	0.092	177,772	0.049	4.050	-3.04
	1.115	0.101	122,868	0.059	4.872	2.51
5	1.130	0.103	116,771	0.061	4.997	-
	1.145	0.104	111,096	0.062	5.123	-2.52
	1.225	0.111	86,389	0.070	5.810	2.24
6	1.240	0.113	82,555	0.072	5.943	-
	1.255	0.114	78,910	0.074	6.079	-2.28
	1.325	0.120	63,895	0.082	6.756	2.27
7	1.340	0.122	61,029	0.084	6.913	-
	1.355	0.123	58,273	0.086	7.074	-2.34
	1.415	0.129	48,365	0.094	7.765	2.27
8	1.430	0.130	46,197	0.096	7.945	-
	1.445	0.131	44,173	0.098	8.125	-2.26
	1.505	0.137	37,887	0.106	8.773	1.34
9	1.520	0.138	36,881	0.108	8.892	-
	1.535	0.140	36,156	0.109	8.981	-1.00

(オリフィス枚数12枚の場合)

法目	最小径		実験値補正後の	**	製作誤差によ	基準径との
流重	基準径[mm]	d0/d	圧損係数	沉迷	る流量	流量誤差
[g/s]	最大径		(10枚)	[m/s]	[g/s]	[%]
	0.595	0.046	704,918	0.025	2.841	4.62
3	0.610	0.047	641,243	0.026	2.978	-
	0.625	0.048	583,648	0.027	3.122	-4.82
	0.695	0.053	381,732	0.034	3.860	4.23
4	0.710	0.055	350,145	0.035	4.031	-
	0.725	0.056	321,838	0.036	4.204	-4.31
	0.775	0.060	246,980	0.042	4.799	3.66
5	0.79	0.061	229,245	0.043	4.981	-
	0.805	0.062	213,230	0.045	5.165	-3.69
	0.855	0.066	169,531	0.050	5.793	3.27
6	0.870	0.067	158,637	0.052	5.988	-
	0.885	0.068	148,508	0.054	6.189	-3.35
	0.925	0.071	124,449	0.059	6.761	3.32
7	0.940	0.072	116,327	0.061	6.993	-
	0.955	0.073	108,629	0.063	7.237	-3.48
	0.985	0.076	94,479	0.067	7.760	3.45
8	1.000	0.077	88,065	0.070	8.037	-
	1.015	0.078	82,153	0.072	8.321	-3.54
	1.045	0.080	72,147	0.077	8.880	2.73
9	1.060	0.082	68,262	0.079	9.129	-
	1.075	0.083	65,296	0.081	9.334	-2.25

表 4.19 オリフィス孔径の製作精度(±0.015mm)による流量誤差 (多孔板オリフィス 10 枚の場合)

法目	最小径		実験値補正後の	ンオンナ	製作誤差に	基準径との
流重	基準 [mm]	d0/d	圧損係数	沉迷	よる流量	流量誤差
[g/s]	最大径		(29枚)	[m/s]	[g/s]	[%]
	0.785	0.060	669,110	0.025	2.916	3.33
3	0.800	0.062	625,325	0.026	3.016	-
	0.815	0.063	584,378	0.027	3.120	-3.44
	0.905	0.070	390,478	0.033	3.817	3.24
4	0.920	0.071	365,574	0.034	3.945	-
	0.935	0.072	342,464	0.035	4.076	-3.32
	1.015	0.078	245,066	0.042	4.818	2.94
5	1.030	0.079	230,882	0.043	4.964	-
	1.045	0.080	217,764	0.044	5.111	-2.97
	1.115	0.086	168,316	0.050	5.814	2.56
6	1.130	0.087	159,795	0.052	5.967	-
	1.145	0.088	151,866	0.053	6.120	-2.58
	1.215	0.093	121,167	0.059	6.852	2.30
7	1.230	0.095	115,663	0.061	7.013	-
	1.245	0.096	110,456	0.062	7.177	-2.33
	1.305	0.100	92,103	0.068	7.859	2.23
8	1.320	0.102	88,041	0.070	8.038	-
	1.335	0.103	84,167	0.071	8.221	-2.28
	1.385	0.107	72,587	0.077	8.853	2.13
9	1.400	0.108	69,531	0.079	9.045	-
	1.415	0.109	66,687	0.080	9.236	-2.11

表 4.20 オリフィス孔径の製作精度(±0.015mm)による流量誤差 (多孔板オリフィス 29 枚の場合)



図 4.1 燃料用コンパートメントの圧損特性



図 4.2 γ型コンパートメントへのオリフィス追加前後の圧損特性比較



図 4.3 δ型コンパートメントへのオリフィス追加前後の圧損特性比較









図 4.6 オリフィス孔径比に対する圧損係数実験値/理論値の近似



図 4.7 多孔板オリフィス孔径比に対する圧損係数実験値/理論値の近似



図 4.9 多孔板オリフィス 10 枚の実験値補正後の圧損係数の近似



図 4.11 オリフィス及び多孔板オリフィス孔径の製作精度(±0.015mm)による流量誤差







JAEA-Technology 2012-046





裄

個数 備

筫

Þ

名

品

0

インコネル718相当

SUS316



y型コンパートメントと混載させる CMIR コンパートメント (多孔板オリフィス: ゆ0.8mm、29枚)の構造 図 4.16

1	1	1	1	1	1	1	国数 備 考
SUS316	SUS316	SUS316	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316	インコネル718相当	材 質 1
多孔板オリフィス組立体	流入管	照射試料ホルダ	コンパートメント用内管	コンパートメント用外管	中間洞	上部キャップ	品名
2	9	5	4	с	2		樂唱



δ型コンパートメントと混載させる CMIR コンパートメント (多孔板オリフィス:φ0.61mm、14枚)の構造

奚 4.17



浟 氟 個数

名

묘믐

番品

の構造

δ 型コンパートメントと混載させる CMIR コンパートメント (多孔板オリフィス:φ0.8mm、43 枚)

奚 4.18

5. ハイブリッドリグのコンパートメントの温度設定範囲の評価

5.1 タイロッド下部オリフィス孔径の調整によるバイパス流量の調整

B 型流路のハイブリッドリグ流路モデルは、図 5.1 に示すとおり、冷却材がラッパ管内を流 れる流路モデルのため、4 章で評価したコンパートメントの設定流量範囲において、本章では ラッパ管とコンパートメントの熱流束も併せて CMIR コンパートメントの温度設定範囲を評価 する。なお、D 型流路のハイブリッドリグはラッパ管内のバイパス流がない構造のため、δ 型 コンパートメントと CMIR コンパートメントを混載したときに実績範囲の温度設定が可能か温 度解析によって別途評価する必要がある。

まず、集合体構造を変更せずに、タイロッド下部オリフィス孔径の大きさの変更によって、 バイパス流量を材料照射用反射体の実績と同等とすることができるか検討する。

図 2.4(a)に示したハイブリッドリグの流路モデルから、ラッパ管に流れる冷却材流量は、以 下の圧損バランスより求められる。

-・「燃料用コンパートメント圧損」+「コンパートメント側合流圧損」 =「タイロッド下部オリフィス圧損」+「ラッパ管圧損」+「ラッパ管側合流圧損」

・「タイロッド圧損」=「ラッパ管圧損」+「ラッパ管側合流圧損」+「押上部圧損」

各部の圧損は、表 5.1 に示す水流動試験の圧損係数式を用いて算出する。合流圧損は、コンパ ートメントから流出する冷却材とラッパ管を流れる冷却材が合流する際に生じる圧損で、付録 3 に示したようにコンパートメント流量とバイパス流量の比によって表わされる。ただし、こ の合流圧損係数はB型照射燃料集合体の水流動試験によって得られた係数で、バイパス流量の 測定範囲は 750g/s~4000g/s であるため、表 5.2 に示したハイブリッドリグで目標とする材料照 射用反射体のバイパス流量実績(151g/s~302g/s)よりも大きい範囲で取得されたデータを基に 近似している。よって、ハイブリッドリグの場合は適用範囲外であるため、圧損バランスは合 流圧損をゼロとして評価する。この場合、タイロッド下部オリフィスの圧損が大きくなり、検 討対象としたタイロッド下部オリフィスに厳しい条件になるため、評価上は問題ないと考えら れる。以上より、圧損バランスは以下の式で評価することとした。

・「燃料用コンパートメント圧損」=「タイロッド下部オリフィス圧損」+「ラッパ管圧損」 「タイロッド圧損」=「ラッパ管圧損」+「押上部圧損」

コンパートメントの構成は、ハイブリッドリグの流量設定範囲の最大及び最小流量のコンパ ートメントを含めて、燃料用コンパートメント 2 体(流量 120g/s×1 体、360g/s×1 体)、CMIR コンパートメント4体(流量3g/s×3体、9g/s×1本)とし、コンパートメントの圧損が最大186kPa となるようにした。コンパートメント圧損が大きく、タイロッド下部オリフィスを流れる冷却

材流量も大きくなると想定されるため、まず、最大の φ8.5mm のタイロッド下部オリフィスで バイパス流量を調整した。表 5.3 の圧損バランスの検討結果より、バイパス流量は 2282g/s とな った。これは、ハイブリッドリグで継続照射する計画の材料試料を装填した CMIR-6 のバイパ ス流量の最小実績 151g/s より 15 倍以上大きい値である。よって、φ8.5mm のタイロッド下部 オリフィスではバイパス流量を材料照射用反射体の実績値まで調整することができない。

バイパス流量が大きいため、タイロッド下部オリフィスにおけるキャビテーション評価を実施した。キャビテーション評価は 4.3.4 項と同様にして実施するが、静圧については以下の式に変更した。

静圧=「カバーガス圧」+「Na 液面からタイロッド下部オリフィス上部までの位置圧損」

+「ハンドリングヘッド圧損」+「押上部圧損」+「ラッパ管圧損」

評価の結果、キャビテーション係数は2.71 であるためキャビテーションは発生しない。ただし、 φ5.6mm 以下のオリフィス孔径のタイロッド下部オリフィスを設置した場合には、キャビテー ションが発生する結果となった。よって、タイロッド下部オリフィス孔径の調整だけではバイ パス流量を材料照射用反射体の実績程度まで調整することはできない。

5.2 ガスギャップの Ar/He ガス比の調整による温度設定

5.1 節より、タイロッド下部オリフィス孔径の調整だけではバイパス流量は材料照射用反射体の実績値よりも大きい値となってしまう。このため、コンパートメントガスギャップのAr/He ガス比も調整することにより、従来のCMIR コンパートメントと同程度となる温度設定が可能 か検討した。

コンパートメントの温度は、バイパス流量と Ar/He ガス比をパラメータとして、構造材重量、 ガンマ発熱密度等から算出する。表 5.4 に示した CMIR-6 のガスギャップの Ar/He ガス比の実 績より、Ar ガスの比率は 0~25%であった。ハイブリッドリグの温度が CMIR-6 と同等となる ときの Ar/He ガス比を求めるため、各コンパートメントの条件(流量、構造材重量、ガンマ発 熱密度)は CMIR-6 と同じとし、ラッパ管及びタイロッドの流量をコンパートメント圧損が最 大となるときのハイブリッドリグの条件に設定した。表 5.5 に評価結果を示す。ハイブリッド リグの温度を CMIR-6 と同等とするため、各コンパートメントの Ar ガスの比率を約 40~60% 増加させる。図 5.2 に CMIR-6 とハイブリッドリグの軸方向温度分布を比較した図を示す。ハ イブリッドリグはバイパス流量が大きいため、ラッパ管温度は CMIR-6 の実績よりも 100℃以 上低くなる範囲もあるが、Ar ガスの断熱効果により、試料装填範囲全体にわたり、CMIR-6 と ハイブリッドリグのコンパートメント温度は一致した。

バイパス流量が大きいため、Ar ガスの比率に対する温度の感度を確認した。表 5.6 に Ar ガ スを+1%増加させたときのコンパートメント温度の変化を比較した表を示す。バイパス流量が 大きいハイブリッドリグの方が温度の増加量がやや大きく、感度が高くなっている。ただし、 Ar ガスの比率を1%増やすと温度は2℃程度高くなり、ほぼ同程度の感度であるといえるため、 ハイブリッドリグでも材料照射用反射体と同等の精度で温度設定が可能である。

以上より、ハイブリッドリグに \$8.5mmのタイロッド下部オリフィスを設置してコンパート メントガスギャップの Ar/He ガス比を調整することによって、集合体構造を変更せずに材料照
射用反射体と同等の温度設定が可能である。ただし、バイパス流量は材料照射用反射体の実績 より非常に大きいため、サーマルストライピングが問題となる可能性がある。

5.3 多孔板オリフィスの追加によるバイパス流量の調整

5.2 節よりサーマルストライピングが問題となった場合に対応して、バイパス流量を材料照 射用反射体の実績と同程度とするために追加する流動抵抗の仕様と設置構造について検討した。 タイロッド下部オリフィスに追加する流動抵抗は、コンパートメントと同様に、設置範囲が小 さく圧損係数が大きい多孔板オリフィスとする。設置場所は図 5.3 のようにタイロッド下部の 上下のオリフィスの間とし、多孔板オリフィスの枚数によってタイロッド下部オリフィス間距 離を拡大することとした。図 2.4(a)のハイブリッドリグの流路モデルより、ラッパ管の流量を 実績と同等とするためにタイロッド下部オリフィス部に設置する多孔板オリフィスの圧損を以 下の圧損バランスより検討した。

・「CMIR コンパートメント圧損」=「タイロッド下部オリフィス圧損」+「多孔板オリフィス圧損」+「ラッパ管圧損」

、「タイロッド圧損」=「ラッパ管圧損」+「押上部圧損」

キャビテーションの評価から、バイパス流量を151g/s 流す場合は、タイロッド下部オリフィス 孔径 2.4mm 以上、多孔板オリフィス孔径 4.2mm 以上とする。これらのオリフィス孔径は水流 動試験の範囲外であるため、試験結果を外挿して各圧損係数を求めることとした。タイロッド 下部オリフィスについては、オリフィス孔径 3.6~5.6mm の圧損係数式を用いて、流量 151g/s における圧損係数を求めた。図 5.4 より、圧損係数は以下の近似式で算出することができる。

ζ=150,654×d^(-4.090)

ここで、ζ:タイロッド下部オリフィス圧損係数、

d: タイロッド下部オリフィス孔径[mm]

近似式を用いた外挿により、 φ2.4mm のタイロッド下部オリフィスの圧損係数は 4,197 となった。また、多孔板オリフィスの圧損係数は、4.3.5 項においてコンパートメントの多孔板オリフィスの圧損係数を求めた計算方法と同様の方法で求めた。図 5.5 より、実験値補正式は以下のように表わされる。

 $h=2.011\times(d_0/d)+1.053$

ここで、h:補正係数

d₀:オリフィス孔径

d:管内径

近似式を用いた外挿により、 φ4.2mm の多孔板オリフィスの補正係数は 1.70 となり、圧損係数 理論値 20.33 を 1.70 倍した値が実験値補正した多孔板オリフィス1 枚当たりの圧損係数となる。 なお、付録 4 に示したように多孔板オリフィスの管内径は φ13mm であり、寸法上はオリフィ ス孔径 φ4.5mm の多孔板オリフィスまで成立する。

以上の各オリフィスの圧損係数をもとに、コンパートメント流量の組み合わせは 5.1 節と同

じとして、圧損バランスを検討した結果を表 5.7 に示す。タイロッド下部オリフィスの圧損は 約71.0kPa であるため、多孔板オリフィスで圧損を約115kPa 確保する必要があり、オリフィス 枚数は5枚以上となる。なお、この枚数は、実験値補正によって多孔板オリフィスの圧損係数 を理論値の1.70倍大きく見積もって求めたものである。実験値補正を実施しないで多孔板オリ フィスについて厳しい条件で評価すると、オリフィス枚数は8枚必要である。

5.4 多孔板オリフィスを追加したタイロッド下部の構造

5.3節で求めた枚数の多孔板オリフィスをタイロッド下部に設置したときの構造を検討する。 多孔板オリフィス1枚の高さは 5.8mm で、5枚設置すると 29mm、8枚設置すると 46.4mm であ る。これに、タイロッド下部オリフィスと多孔板オリフィスの間を仕切る板の厚さと、RTCB 用 A 型照射燃料集合体のコンパートメント内の助走距離(上流側 20mm、下流側 10mm 程度) を加えると、多孔板オリフィスの設置範囲は5枚の場合61mm、8枚の場合79mm程度必要で ある。従来のタイロッド下部オリフィス間距離は約 30mm であり、上記の大きさの多孔板オリ フィスを設置するためには、軸方向の長さを下流側に拡大する必要がある。図 5.6 に多孔板オ リフィスを設置できるように構造変更したハイブリッドリグのタイロッド下部周りの構造図を 示す。下流側のタイロッド下部オリフィスからフラックスモニタ管まで 20mm 程度しかないた め、多孔板オリフィスを設置するためにはタイロッド及びフラックスモニタ管の長さを短くし た。ただし、コンパートメント内の照射試料の装填位置まで長さを短くする必要はないため、 フラックスモニタによる測定には影響しない。よって、従来のタイロッド下部構造を基に多孔 板オリフィスを設置することにより、バイパス流量を材料照射用反射体の最小流量実績に調整 することが可能である。なお、最小流量実績よりも大きい流量に調整する場合は、付録4に示 したようにオリフィス管内径を大きくして、 φ4.2mm よりも大きいオリフィス孔径を設定でき るようにする必要がある。

以上より、B型照射燃料集合体を基にしたハイブリッドリグにおいて、バイパス流量の調整 により従来と同等の温度設定範囲を有することが確認できた。

担示	オリフィス	水力直径	工指核粉式	Da粉络田
· //	孔径[mm]	[mm]	广 頂休	Ke 致軋曲
	3.6	34	$\zeta = 802.0 \times \text{Re}^{0.00191}$	29000 <re<89000< td=""></re<89000<>
タイロッドト部 オリフィス	4.6	34	$\zeta = 238.0 \times \text{Re}^{0.01645}$	29000 <re<150000< td=""></re<150000<>
	5.6	34	$\zeta = 111.9 \times \text{Re}^{0.01908}$	59000 <re<220000< td=""></re<220000<>
(下流側:長軸 5mm×短 軸 2.5mm の楕円)	8.5	34	$\zeta = 50.64 \times \text{Re}^{-0.0170}$	20000 <re<300000< td=""></re<300000<>
バイパス流	-	34	$\zeta = 141.9 \times \text{Re}^{-0.2531}$	80000 <re<300000< td=""></re<300000<>
コンパートメント側合流*	-	34	$\zeta = 342.8 \times \frac{Q_w}{Q_c(i)} + 12.61$	7000 <re<40000< td=""></re<40000<>
ラッパ管側合流*	-	34	$\zeta = 34.49 \times \left(\frac{Q_c(i)}{Q_w}\right)^2$ $+60.30 \times \frac{Q_c(i)}{Q_w} - 1.339$	7000 <re<40000< td=""></re<40000<>
タイロッド	-	34	$\zeta = 635600 \times \text{Re}^{-0.578}$	2000 <re<8000< td=""></re<8000<>
押上部	-	22	$\zeta = 0.1678 \times \text{Re}^{-0.1800}$	59000 <re<130000< td=""></re<130000<>
ハント゛リンク゛ヘット゛	-	22	$\zeta = 0.01714 \times \text{Re}^{0.003365}$	72000 <re<130000< td=""></re<130000<>

表 5.1 ハイブリッドリグの圧損係数式

*: コンパートメント及びラッパ管の流れの合流圧損係数式の詳細は、付録3に示す。

Qc(i):コンパートメント流量[g/s]、Qw:バイパス流量の 1/6[g/s]

コンパート名	CMIR-4***	CMIR-5	MNTR-00	CMIR-6
バイパス流量 [g/s]	210.67	204.04	301.91	150.96

表 5.2 CMIR コンパートメントのバイパス流量実績

***: CMIR-1~3 までは CMIR-4 とオリフィス構造や炉心内の配置、Ar/He ガス比等の条件が同一であるため、 バイパス流量は CMIR-4 とほぼ同じである。

場所	流量[g/s]	流速[m/s]	Re 数	圧損係数	圧損[kPa]
燃料用コンパートメント	120 or 360	-	-	-	186
CMIR コンパートメント	3 or 9	-	-	-	186
押上部	2,780	8.425	5.22E+05	0.016	0.48
タイロッド	111	0.141	1.35E+04	2,606	22.43
ラッパ管	2,282	2.896	2.77E+05	5.9	21.64
タイロッド下部オリフィス (2,393	3.037	2.91E+05	40.9	163.6
ハンドリングヘッド	2,891	8.762	5.43E+05	0.016	0.546

表 5.3 タイロッド下部オリフィス ϕ 8.5mm におけるハイブリッドリグの流量配分

タイロッド下部オリフィス+ラッパ管合計圧損* 185.3

ラッパ管+押上部合計圧損** 22.12

**:タイロッド圧損≅ラッパ管+押上部合計圧損

コンパートメント	1	2	3	4	5	6	CMIRの 軸心管	ラッパ管
He 百分率(%)	75	80	90	100	90	75	-	-
Ar 百分率(%)	25	20	10	0	10	25	-	-
流量(g/sec)	4.13	6.72	6.39	7.26	6.72	4.13	0.1	150.96

表 5.4 CMIR-6 における Ar/He ガス比の実績

表 5.5 ハイブリッドリグにおける Ar/He ガス比の計算結果

コンパートメント	1	2	3	4	5	6	タイロッド	ラッパ管
He 百分率(%)	35	21	42	41	39	35	-	-
Ar 百分率(%)	65	79	58	59	61	65	-	-
流量(g/sec)	4.13	6.72	6.39	7.26	6.72	4.13	111	2282

^{*:}燃料用コンパートメント圧損≅タイロッド下部オリフィス+ラッパ管合計圧損

тан	バイポマ法具	コンパー	トメント 1 (4.13g/s)	コンパー	トメント 4 (7.26g/s)
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	八十八八八里	Ar ガス	コンパートメント温度*	Ar ガス	コンパートメント温度*
CMIR-6 実績	151g/s	25%	800.1°C	0%	691.8°C
Ar +1%	"	26%	802.3°C	1%	693.3°C
温度差		—	+2.2°C	—	+1.5°C
ハイブリッド	2282g/s	65%	806.2°C	59%	694.4°C
Ar +1%	"	66%	808.9°C	60%	696.3°C
温度差		—	+2.7°C	—	+1.9°C

表 5.6 Ar ガスの比率に対するコンパートメント温度の感度

*: 炉心から 13cm の軸位置のピークのコンパートメント温度

表 5.7 多孔板オリフィスを追加したハイブリッドリグの流量配分

場所	流量[g/s]	流速[m/s]	Re 数	圧損係数	圧損[kPa]
燃料コンパートメント	120 or 360	-	-	-	186
CMIR コンパートメント	3 or 9	-	-	-	186
押上部	648.96	1.967	1.22E+05	0.020	0.034
タイロッド	4.3	0.005	5.23E+02	17,059	0.22
ラッパ管	150.96	0.192	1.84E+04	11.8	0.19
多孔板オリフィス φ4.2mm×5 枚	155.3	1.348	-	172.8	136.2
タイロッド下部オリフィス φ2.4mm	155.3	0.197	1.89E+04	4,195	70.7

タイロッド下部オリフィス+多孔板オリフィス+ラッパ管合計圧損* 207.1

押上部+ラッパ管合計圧損** 0.22

*:燃料用コンパートメント圧損≅タイロッド下部オリフィス+多孔板オリフィス+ラッパ管合計圧損

**:タイロッド圧損≅ラッパ管+押上部合計圧損



図 5.1 ハイブリッドリグの集合体内冷却材流路モデル(B型流路)



図 5.2 CMIR-6 とハイブリッドリグの温度比較



図 5.3 タイロッド下部用多孔板オリフィスの設置場所



図 5.4 実績最小流量(151g/s)のときのタイロッド下部オリフィス圧損係数の近似



図 5.5 多孔板オリフィス5枚の圧損係数の実験値補正係数



図 5.6 タイロッド下部に多孔板オリフィスを設置した構造

6. 水流動試験による圧損係数の取得

ハイブリッドリグの開発は、大幅な構造検討を実施せず、また、これまでに取得した水流動 試験データを有効活用することで検討を進めてきた。しかし、検討を進めていく上で、一部構 造の変更が必要になった。また、各オリフィスの圧損係数については、水流動試験結果の範囲 を超えたため、外挿で求めたデータを利用した。このため、ハイブリッドリグの詳細設計の前 に、表 6.1 に示す水流動試験を実施し、第4章及び第5章での評価内容を確認する必要がある。

試験対象	試験条件	試験目的
(1) 多孔板オリフ	多孔板オリフィス孔径:0.61~1.5mm	①設置予定のオリフィス孔径は、水流動試験の範囲
イス	多孔板オリフィス流量:3~9g/s	を超えているため、圧損係数を取得。【データ外挿】
(2) コンパートメ	オリフィス孔径:0.86~3mm	①設置予定のオリフィス孔径は、水流動試験の範囲
ントオリフィス	コンパートメント流量範囲:3~9g/s	を超えているため、圧損係数を取得。【データ外挿】
	コンパートメント助走距離:20,25,mm	②CMIR コンパートメントを D 型流路に組み込む場
		合には、オリフィスの設置範囲が下部ブロック部に
		収まらないため、助走区間をパラメータとした圧損
		係数を取得。【構造変更】
(3) タイロッド	タイロッド下部オリフィス孔径:2.4,2.9,	①設置予定のタイロッド下部及び多孔板オリフィス
・タイロッド単体	3.4mm	孔径は、水流動試験の範囲を超えているため、圧損
・タイロッド+多	タイロッド下部オリフィス間距離:70,80,	係数を取得。【データ外挿】
孔板オリフィス	mm	②バイパス流量を CMIR の実績最小値より大きい流
	多孔板オリフィス孔径:4.2, 4.9, 5.8mm	量に調整する場合、オリフィス孔径を大きくする必
	多孔板オリフィス管内径:16,18,mm	要があるため、オリフィス管内径を大きくして圧損
	バイパス流量 : 151~302g/s	係数を取得。【構造変更】
	(タイロッド下部オリフィス流量:155~	③タイロッド下部構造を変更するとともに、オリフ
	311g/s 程度)	ィスを取り付けるため、タイロッド単体及びタイロ
		ッド+オリフィスの圧損係数を取得。【構造変更】
(4) CMIR コンパ	コンパートメント流量範囲:3~9g/s	①CMIR コンパートメント流入部を構造変更し、燃
ートメント全体		料用コンパートメントとの構造共通化を図ったた
		め、コンパートメント全体の圧損係数を取得。【構造
		変更】
(5) コンパートメ	バイパス流量:151~302g/s	①B型照射燃料集合体の合流圧損式は、ハイブリッ
ントとラッパ管	CMIR コンパートメント流量範囲:3~9g/s	ドリグでは、水流動試験の範囲を超えているため、
の合流	燃料用コンパートメント流量範囲:120~	合流圧損係数を取得。【データ外挿】
	360g/s	

表 6.1 ハイブリッドリグの開発に必要な水流動試験項目

7. まとめ

ハイブリッドリグは B 型または D 型照射燃料集合体の構造を基本とし、検討対象のコンパー トメントは、材料用は CMIR コンパートメント、燃料用は y 型、先行試験 y 型、または δ 型コ ンパートメントとした。ハイブリッドリグは、燃料用コンパートメントを装填することから、 高圧プレナム部からの冷却材導入を行う必要がある。一方燃料要素に比べ発熱量が小さく、従 来低圧プレナム部から冷却材を導入している CMIR コンパートメントはこの場合、材料試料温 度の設定には多すぎる冷却材が流れてしまう。よって、ハイブリッドリグの要求仕様は、CMIR コンパートメントについて高圧プレナムから冷却材を導入しても従来と同等の温度設定能力を 確保できることとした。以下に主要な検討結果を示す。

- (1) CMIR コンパートメントの温度は、主にコンパートメント流量の調整によって設定される ことから、従来と同等の温度設定能力があることを評価した。各コンパートメントの設定 流量範囲は、CMIR コンパートメント 3~9g/s、γ型コンパートメント 120~360g/s、δ型コ ンパートメント 45~125g/s である。この流量範囲において、多孔板オリフィスを設置する ことで大きな構造変更を伴うことなく、コンパートメント間の流量バランスを調整し、同 ーの照射リグ内に混載可能であることを確認した。
- (2) 集合体との取り合い部となる CMIR コンパートメントの下部構造についてγ型コンパート メントとの共通化を検討した。本案の成立により、コンパートメント流量は独立してコン パートメントオリフィスで設定可能となることから、燃料用コンパートメントを CMIR コ ンパートメントに自由に入れ替えることができる。しかし、バイパス流(コンパートメン ト外側とラッパ管との間の冷却材の流れ)を流す B 型流路のハイブリッドリグでは、バイ パス流量が材料照射用反射体の実績より大きくなるため、コンパートメント流量を同じに しても CMIR コンパートメントの温度が低下する。そこで、タイロッド下部に多孔板オリ フィスを設置してコンパートメントとラッパ管の流量バランスを調整し、バイパス流量を 材料照射用反射体の実績値に設定した。なお、このバイパス流量の調整は、サーマルスト ライピングを抑制する効果もある。

以上から、ハイブリッドリグは要求性能である従来の集合体と同等の温度設定能力を有して おり、今後の照射試験に用いることで一層の効率的な試験の実施が期待できる見通しが得られ た。

本検討では、これまでに取得した水流動試験データを用いたが、オリフィス構造に一部変更 が必要になるとともに、水流動試験データの適用範囲を超えていることから、詳細設計着手前 に、これらを補完するための水流動試験データを取得する必要がある。

謝辞

本書をまとめるにあたり、ご指導ご協力をいただきました関係者各位に、感謝の意を表します。

参考文献

1) 岡本薫他: "D型照射リグの設計報告書", JNC TN9410 99-010, P.63(1999).

2) I.E.Idelchik : "HANDBOOK OF HYDRAULIC REISISTANCE", Boca Raton, FL : CRC Press, 1990, p.320, 3rd edition.

3) I.E.Idelchik : "HANDBOOK OF HYDRAULIC REISISTANCE", THE U.S.ATOMIC ENERGY COMMISION and THE NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, WASHINGTON, D.C., 1996, p.138, 1st edition.

4) Ibid., p.324

1. 助走距離を考慮した連続オリフィスの圧損係数の式

助走距離を考慮した連続オリフィス(n段)の圧損係数の式は、先行試験用 γ型コンパート メントの水流動試験で設定された以下の式を用いた。

連続オリフィス (n 段) の圧損係数:
$$\varsigma = \sum_{k=1}^{n} \varsigma_{k}$$

1 段目: $\varsigma_{1} = \frac{\left(C \cdot \left(1 - \frac{F_{1}}{F_{0}}\right)^{0.75} + \left(\frac{L_{1}}{15d_{1}}\right)^{2} \left(1 - \frac{F_{1}}{F_{0}}\right)^{2}\right) \cdot v_{1}^{2}}{v_{0}^{2}}$
2 段目から (n-1) 段目: $\varsigma_{k} = \frac{\left(C \cdot \left(\frac{L_{k-1}}{15d_{k-1}}\right)^{2} \left(1 - \frac{F_{k}}{F_{0}}\right)^{0.75} + \left(\frac{L_{k}}{15d_{k}}\right)^{2} \left(1 - \frac{F_{k}}{F_{0}}\right)^{2}\right) \cdot v_{k}^{2}}{v_{0}^{2}}$
最終段 (n 段目): $\varsigma_{n} = \frac{\left(C \cdot \left(\frac{L_{n-1}}{15d_{n-1}}\right)^{2} \left(1 - \frac{F_{n}}{F_{0}}\right)^{0.75} + \left(1 - \frac{F_{n}}{F_{0}}\right)^{2}\right) \cdot v_{n}^{2}}{v_{0}^{2}}$

ここで、

n:オリフィス枚数
C:オリフィス面取り部の抵抗係数
L:オリフィス下流側の長さ
d:オリフィス孔径
F:流路面積
v:流速

添え字の0は管内径定義、1~nはオリフィス孔定義

この式は、助走距離をオリフィス孔径の15倍と仮定して、圧損係数を算出した式である。なお、多孔板はオリフィス孔の位置を90°ずつ回転させて設置間隔を短くして設置した形状であるため、助走距離の実験式での評価は実施しない。

2. 検証結果

先行試験用 γ 型及び δ 型コンパートメントの助走距離を含めたオリフィス圧損係数の検証結 果を付録表 1.1 及び表 1.2 に示す。先行試験用 γ 型コンパートメントの場合は、助走距離の式 を含まない場合の実験値と理論値の比は 0.97~1.29 であり、助走距離の式を含む場合の実験値 と理論値の比は 1.12~4.00 となった。 δ 型コンパートメントの圧損係数の実験値と理論値の比 は、助走距離の式を含まない場合は0.89から1.16、助走距離を含んだ式の場合は0.21から0.72 となった。助走距離の実験式では、オリフィス通過後にオリフィス孔径の15倍の助走距離が必 要としていたが、助走距離を含まない式の方が実験値と理論値は近い値となっており、これら のオリフィスの仕様の場合は助走距離が十分確保できているといえる。よって、圧損係数の実 験値補正では、助走距離を含まない式で評価することとする。

		付録言	長1.1 先行試験用 γ 型:	コンパートメントの圧損係数検	 敲 武 結 果	
オリフィス	Re 数	圧損係数	助走距離の式を含	まない理論式の場合	助走距離の式を含	む理論式の場合
孔径	(管内径定義)	実験値	圧損係数理論値	実験値/理論値	圧損係数理論値	実験値/理論値
φ 3-3 mm		723.9	749.1	0.97	647.5	1.12
φ 5- 5mm		84.1	73.9	1.14	34.8	2.42
ф 6-6mm	ΤΟΛΟΛΟ	36.4	28.9	1.26	11.66	3.12
ф 9-9тт		2.2	1.7	1.29	0.55	4.00

圧損係数検証結
6
~
\mathcal{A}
\sim
~
ーペン
П
퇲
~
先行試験用
1.1
付録表

第二公士 田 \$ 1 12 Ц E 6 Ī v ¢ -Ħ

			付録表	1.2 8型コンパートメン	、トの圧損係数検証結	果	
オリフィス	オリフィス	水流量	圧損係数	助走距離を含まない	い理論式の場合	助走距離の関数を	含む理論式の場合
段数	孔径	[g/s]	実験値	圧損係数理論値	実験値/理論値	圧損係数理論値	実験値/理論値
		111.6	21.76	23.5	0.93	11.6	0.53
	φ 3-3mm	70.9	22.01	23.6	0.93	11.6	0.53
ng c		31.3	22.33	23.6	0.95	11.6	0.52
¥ 1		205.8	4.54	4.1	1.11	1.0	0.22
	φ 4-4mm	126.8	4.61	4.1	1.12	1.0	0.22
		45.7	4.76	4.1	1.16	1.0	0.21
		111.6	44.13	49.5	0.89	31.9	0.72
	φ 3-3mm	70.9	44.71	49.5	0.00	31.9	0.71
LET.		31.3	45.31	49.7	0.91	31.9	0.70
+ ☆		205.8	9.44	8.9	1.06	3.5	0.37
	φ 4-4mm	126.8	9.58	8.9	1.08	3.5	0.37
		45.7	9.93	9.0	1.10	3.5	0.35

JAEA-Technology 2012-046

付録2 オリフィス及び多孔板オリフィスの面取り

先行試験用 γ 型コンパートメントオリフィスの水流動試験結果より、オリフィス孔の面取り 量によって圧損係数が異なることが確認されている。付録表 2.1 にコンパートメントのオリフ ィス面取り量の実績、付録表 2.2 にオリフィス流入側の面取り抵抗係数を示す。圧損係数は面 取り量が小さいときの方が大きいが、C 面取りより糸面取りの方が圧損係数の試験結果にばら つきが生じるため、流入側のみでも C 面取りを実施する。なお、本評価で圧損係数を実験値補 正するときの面取り量は、連続オリフィスは水流動試験の先行試験用 γ 型コンパートメント、 多孔板オリフィスは RTCB 用 A 型照射燃料集合体の水流動試験の場合と同じとする。

分類	照射リグ	コンパートメント タイプ	判定基準 (面取り量±精度)	検査要領	検査結果	備考
A 型	水流動試験	β型(RTCB用)	C0.5mm±0.1mm	記載なし	0.42~0.54mm	
		γ型(4本花びら)			0.17~0.21mm	
	В9	γ型(3本グリッド)	C0.2±0.05mm	光学式測定器による	0.18~0.20mm	
		γ型(4本グリッド)			0.17~0.20mm	
B 刑*	F4B	γ型(5本花びら)	C0.2±0.05mm	投影器による	0.16~0.25mm	
D王	B11	先行試験用γ型	C0.30±0.05mm	投影器による	0.25~0.33mm	下流側は 糸面取り
	B14	先行試験用γ型	C0.50±0.05mm	投影器による	0.45~0.55mm	
	水流動試験	先行	孔径の 1/10+0 05mm	投影器による	記載なし	下流側は
	(H16年度)	試験用γ型		这形面による		糸面取り
CMIR	CMIR1~6	-	検査なし(糸面取り)	-	-	

付録表 2.1 コンパートメントオリフィスの面取り実績

*: B9 以前のリグはオリフィス面取り量の測定値がないが、面取り量の指示値の最小は C0.2mm

オリフィ 面取り C0.2mm 面取り C0.1mm 面取りなし ス孔径 l/Dh 面取り l/Dh 面取り l/Dh 面取り 抵抗係数 3) 抵抗係数 3) 抵抗係数 3) (面取り量/孔径) (面取り量/孔径) (面取り量/孔径) [mm] 1.0 0.20 0.130 0.10 0.19 1.5 0.13 0.145 0.07 0.25 0 0.5 2.00.10 0.190 0.05 0.31

付録表 2.2 オリフィス流入側の面取り抵抗係数

付録3 B型照射燃料集合体の合流圧損

- 1. B型照射燃料集合体のコンパートメントとラッパ管の冷却材の合流圧損の実験式
- ・ラッパ管

$$\left(\Delta C_{\rm DW}(i)\right)_{\rm I} = 34.49 \cdot \left(\frac{Q_{\rm C}(i)}{Q_{\rm W}/6}\right)^2 + 60.30 \cdot \frac{Q_{\rm C}(i)}{Q_{\rm W}/6} - 1.339$$
$$\frac{1}{\sqrt{(C_{\rm DW})_{\rm I}}} = \sum_{i=1}^6 \frac{1}{\sqrt{36 \cdot A_{\rm W} \cdot ({\rm Re})_{\rm I}^{\rm B_W} + (\Delta C_{\rm DW}(i))_{\rm I}}}$$

ここで、

2. 合流圧損係数のグラフとバイパス流量の適用範囲

前項のB型照射燃料集合体のコンパートメントとラッパ管の合流圧損係数の実験式を用いて、 コンパートメントとバイパス流量の組み合わせに対する合流圧損をグラフ化した(付録図 3.1)。 B型照射燃料集合体の水流動試験は、コンパートメント流量が約 100~600g/s,バイパス流量が 約 750~4000g/s の範囲で試験を実施している。ハイブリッドリグのバイパス流量は約 151g/s であるため、ハイブリッドリグの場合は合流圧損係数式の適用範囲外である。特に、ラッパ管 側の合流圧損係数式は、コンパートメント流量に対してバイパス流量が小さいほど圧損係数が 2 乗に比例して大きくなる式である。このため、水流動試験範囲で作成した近似式をバイパス 流量が小さいハイブリッドリグに適用するのは妥当でないと考えられることから、バイパス流 量の評価では、ラッパ管側の合流圧損は含めずに検討する。ハイブリッドリグの流路構成にお いて、ラッパ管側の合流圧損を削除すると、タイロッド下部に追加する圧損を大きくすること となり、オリフィスの圧損評価上は問題ないと考えられる。なお、コンパートメント側の合流 圧損係数は線形近似のため、ハイブリッドリグのバイパス流量に適用できる可能性はある。し かし、ハイブリッドリグの流量条件では、コンパートメント全体の圧損に比べ、コンパートメ ント側合流圧損が小さいため(コンパートメント流量 360g/s のとき 3.3kPa)、バイパス流量の 評価では使用しない。



付録図 3.1 水流動試験による B 型照射燃料集合体の合流圧損係数

付録4 多孔板オリフィス孔径の設定範囲

多孔板オリフィスは、直径 13mm のオリフィス板に 2 か所のオリフィス孔をもつ構造である。 RTCB 用 A 型照射燃料集合体の水流動試験の多孔板オリフィス孔径は、φ1.5mm、2.0mm、3.0mm であったが、ハイブリッドリグのタイロッド下部オリフィス間に設置する多孔板オリフィス孔 径は、φ4.2mm である。これはバイパス流量を 151g/s とした場合のオリフィス孔径であり、他 の材料照射用反射体の実績流量に合わせると、キャビテーション評価より、オリフィス孔径は 以下のようになる。

・MNTR-00:バイパス流量 300g/s より、多孔板オリフィス孔径 φ 5.8mm 以上

多孔板オリフィスのオリフィス孔の配置を付録図 4.1 に示す。オリフィスには C0.5mm の面 取りを実施するため、 φ4.2mm より大きい場合は、オリフィス孔が重なってしまう。多孔板オ リフィスの管内径が 13mm の場合、オリフィス孔が重ならない最大の大きさは φ4.5mm である。 よって、バイパス流量を 151g/s 以上流す場合は、多孔板オリフィスの管内径を 13mm よりも大 きくする必要があり、水流動試験の際に多孔板オリフィスの形状変更を検討する必要がある。



付録図 4.1 多孔板オリフィスのオリフィス孔の配置

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 表1. SI 基本単位

甘木県	SI 基本単位			
基个里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光 度	カンデラ	cd		

	100		
组立量		SI 基本単位	
和立里		名称	記号
面	積	平方メートル	m ²
体	積五	立法メートル	m ³
速さ,速	度 >	メートル毎秒	m/s
加速	度 >	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波	数每	毎メートル	m ⁻¹
密度,質量密	度 =	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面 積 密	度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比 体	積ゴ	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密	度フ	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強	さフ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃	度刊	モル毎立方メートル	mol/m ³

第一の「「濃度」」の「ホルー」」の「加加」」 豊度 (a)、濃度 モル毎立方メートル mol/m³ 量濃度 キログラム毎立法メートル g^{\dagger} 加加/m³ 度 カンデラ毎平方メートル cd/m²折率 (b) (数字の) 1 1 透磁率 (b) (数字の) 1 1 質 輝 屈 透磁 比

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 組立単位					
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方		
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m		
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m^{2}/m^{2}		
周 波 数	(ヘルツ ^(d)	Hz		s ¹		
力	ニュートン	Ν		m kg s ^{'2}		
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²		
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²		
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$		
電荷,電気量	クーロン	С		s A		
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹		
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$		
電 気 抵 扩	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$		
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$		
磁床	(ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$		
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$		
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$		
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K		
光 東	[ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd		
照良	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd		
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹		
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²		
カーマ		C, j	0/11g	111 0		
線量当量,周辺線量当量,方向 地線量当量,個人線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 s^2$		
融 表 活 州	カタール	kat		e ⁻¹ mol		
RX 215 10 1		nat		5 1101		

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (o)剤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス選びを大しに使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したかって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば認った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の	中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S. S.	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ^{'3}
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 卒	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{2} kg s^{3} = m^2 kg s^{3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{3} s^{1} mol$

表 5. SI 接頭語								
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号			
10^{24}	ヨ タ	Y	10^{-1}	デシ	d			
10^{21}	ゼタ	Z	$10^{.2}$	センチ	с			
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m			
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ			
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n			
10^{9}	ギガ	G	$10^{\cdot 12}$	ピョ	р			
10^{6}	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f			
10^{3}	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	アト	а			
10^{2}	ヘクト	h	$10^{.21}$	ゼプト	z			
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У			

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	1t=10 ³ kg		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 オ	゛ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

	表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値				
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa				
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa				
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m				
海		里	М	1 M=1852m				
バ		\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²				
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s				
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は				
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。				
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 AC44 (* [X1])				

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位							
名称	記号	SI 単位で表される数値					
エルク	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J					
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N					
ポアフ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s					
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$					
スチルフ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²					
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx					
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガウジ	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$					
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹					
(a) 3 元系のCCS単位系とSIでけ直接比較できかいため 笙母 [△							

3元系のCGS単位系とSI Cは は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 属	属さないその他の単位の例
	3	名利	К		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
ν	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	Ц		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
ŝ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています