



# 次世代炉心解析システム MARBLE 用 単チャンネル熱流動コード HARP 高速炉版の開発

Development of the Single Channel Thermal Hydraulic Code,  
HARP for FBRs  
in the Next Generation Reactor Analysis Code System, MARBLE

深谷 裕司

Yuji FUKAYA

原子力基礎工学研究部門

核工学・炉工学ユニット

Division of Nuclear Data and Reactor Engineering  
Nuclear Science and Engineering Directorate

December 2011

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 (<http://www.jaea.go.jp>)  
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

## 次世代炉心解析システム MARBLE 用単チャンネル熱流動コード

### HARP 高速炉版の開発

日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究部門 核工学・炉工学ユニット

深谷 裕司

(2011 年 9 月 26 日受理)

これまで、実用高速炉設計研究を効率的に進めるため、複数の分野を包括する次世代解析システムの概念検討が行われており、その成果の一つとして、次世代炉心解析システム MARBLE 第 1 版が開発された。MARBLE 第 1 版は高速炉核特性解析を目的として整備されているが、次世代解析システムのスコープにある軽水炉核設計や、熱流動などの他分野との連成解析へも適用する可能性がある。そこで、MARBLE における熱流動ソルバーの開発を行うとともに、MARBLE プラットフォームに熱流動パラメーターを格納する枠組みを構築する。今回は、その先駆けとして、高速炉設計用熱流動ソルバーを開発した。

本開発の結果として、MARBLE における高速炉核設計用熱流動ソルバーが整備された。これにより、高速炉核設計において MARBLE を用いて出力係数の評価を行う為に必要な温度評価が行えるようになった。また、本コードに用いられる解析手法は、単チャンネル一次元モデルであるが、これは、一般に BWR 炉心解析に用いられるものと同様であるため、今後の軽水炉対応への下準備としても意義がある。さらに、熱流動パラメーターを格納する枠組みが整備され、今後の連成解析のプラットフォームとしての MARBLE の発展に資するものになると期待できる。

# Development of the Single Channel Thermal Hydraulic Code, HARP for FBRs in the Next Generation Reactor Analysis Code System, MARBLE

Yuji FUKAYA

Division of Nuclear Data and Reactor Engineering  
Nuclear Science and Engineering Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 26, 2011)

The conceptual studies for the Next Generation Simulation Code (NGSC) to simulate various fields of phenomena had been performed. As a result, the development of a next generation reactor analysis code system, MARBLE version 1.0, was developed. At this stage, the ability of the MARBLE version 1.0 is only to estimate the nuclear characteristics of FBRs. However, the plan of the NGSC includes LWR analysis and coupling calculations to connect various fields of estimation. In the future, the MARBLE may be successfully employed in other areas, e.g., LWR analysis or as the platform to connect various fields of estimation, according to the plan. In this context, the objectives of this development are to implement the Hydraulic Analysis code for Reactor Plant, HARP as a thermal hydraulic module in the part of the MARBLE and to implement the container class for thermal hydraulic parameters.

As a result, the MARBLE was equipped with the thermal hydraulic module for nuclear design of FBRs. Therefore, the temperature, which is essential to estimate power coefficient of reactivity, can be estimated only by the MARBLE system. Moreover, this module could be extended to LWR calculation, because the calculation method of single channel model is common to it. It is expected to profit for the evolution of the MARBLE as the platform for coupling calculations, because of the implementation for the thermal hydraulic parameter container class.

Keywords: Fast Reactor, Thermal Hydraulic, HARP, MARBLE

## 目次

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 1. 背景及び目的                                            | 1  |
| 2. HARP の仕様について                                      | 3  |
| 2. 1 原子炉核設計に必要な熱流動計算と HARP に要求される機能                  | 3  |
| 2. 2 高速炉熱流動計算に必要な機能                                  | 4  |
| 3. 解析手法                                              | 6  |
| 3. 1 冷却材を対象とした熱流動解析                                  | 6  |
| 3. 2 燃料棒を対象とした伝熱解析                                   | 9  |
| 4. プログラムの実装                                          | 12 |
| 5. 解析例                                               | 16 |
| 5. 1 FBR_standard                                    | 18 |
| 5. 2 FBR_pressure_drop                               | 19 |
| 5. 3 FBR_flow_distribution                           | 20 |
| 5. 4 FBR_flow_distribution_with_vessel               | 22 |
| 6. HARP における熱流動データの格納と<br>MARBLE の連成解析プラットフォームとしての考察 | 25 |
| 6. 1 従来のデータ管理法と MARBLE における管理法                       | 25 |
| 6. 2 MARBLE におけるデータ構造と HARP による拡張                    | 27 |
| 6. 3 実行速度に関する検討                                      | 28 |
| 7. まとめ                                               | 31 |
| 謝辞                                                   | 31 |
| 参考文献                                                 | 32 |
| 付録 A 高速炉炉心設計における熱流動コードの用途について                        | 33 |
| 付録 B 入力例                                             | 35 |
| 付録 C 流動特性に関する情報                                      | 89 |
| 付録 D MARBLE 用 GUI インターフェース LIME                      | 91 |
| 付録 E シリアルライズ速度検証のために作成したシステムの詳細                      | 93 |
| 付録 F シリアルライズについて                                     | 99 |

## Contents

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Background and Objective .....                                                                                   | 1  |
| 2. Specifications for HARP .....                                                                                    | 3  |
| 2.1 Thermal Hydraulic Calculation for Reactor Core design<br>and Requirement for HARP .....                         | 3  |
| 2.2 Requirement for Thermal Hydraulic Calculation of FBRs Core .....                                                | 4  |
| 3. Calculation Method .....                                                                                         | 6  |
| 3.1 Thermal Hydraulic Calculation for Coolant .....                                                                 | 6  |
| 3.2 Thermal Conductivity Calculation for Fuel Rod .....                                                             | 9  |
| 4. Program Implementation .....                                                                                     | 12 |
| 5. Example for calculation .....                                                                                    | 16 |
| 5.1 FBR_standard .....                                                                                              | 18 |
| 5.2 FBR_pressure_drop .....                                                                                         | 19 |
| 5.3 FBR_flow_distribution .....                                                                                     | 20 |
| 5.4 FBR_flow_distribution_with_vessel .....                                                                         | 22 |
| 6. Thermal Hydraulic Data Construction for HARP and Function of MARBLE as<br>Platform of Coupling Calculation ..... | 25 |
| 6.1 Data Management of Ordinary System and MARBLE .....                                                             | 25 |
| 6.2 Data Construction of MARBLE and Extension in HARP .....                                                         | 27 |
| 6.3 Processing Speed .....                                                                                          | 28 |
| 7. Summary .....                                                                                                    | 31 |
| Acknowledgement .....                                                                                               | 31 |
| Reference .....                                                                                                     | 32 |
| Appendix A Usage for Thermal Hydraulic Calculation in FBRs Core Design .....                                        | 33 |
| Appendix B Example for Input .....                                                                                  | 35 |
| Appendix C Information of Hydraulic Characteristics .....                                                           | 89 |
| Appendix D LIME GUI Interface of MARBLE .....                                                                       | 91 |
| Appendix E System for Test of Serialization .....                                                                   | 93 |
| Appendix F Serialization .....                                                                                      | 99 |

## List of Tables

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| Table 5.1 もんじゅの熱流力設計諸元 .....                 | 16 |
| Table 5.2 もんじゅ炉心の流量配分値 .....                 | 17 |
| Table 5.3 各流量領域の冷却材流量(kg/s)の比較 .....         | 21 |
| Table 6.1 FBR_standard による各工程の計算時間の比較 .....  | 29 |
| Table 6.2 Python 及び C++によるシリアライズの速度の比較 ..... | 29 |
| Table C.1 エントランスノズル部の局所抵抗係数及び流路面積 .....      | 89 |
| Table C.2 集合体部の局所抵抗係数及び流路面積 .....            | 90 |
| Table C.3 その他の減圧要素の局所抵抗係数及び流路面積 .....        | 90 |
| Table C.4 バンドル部の摩擦係数 .....                   | 90 |
| Table D.1 EVIRA 及び LIME の開発環境 .....          | 91 |

## List of Figures

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1.1 NGSC 概念図 .....                                     | 1  |
| Fig. 1.2 MARBLE における HARP モジュールとの<br>データの受け渡しに関する概念図 .....  | 2  |
| Fig. 2.1 単チャンネルモデルの概念図 .....                                | 3  |
| Fig. 2.2 もんじゅの炉心格納容器の構造 .....                               | 4  |
| Fig. 2.3 もんじゅの炉心格納容器内の減圧要素の模式図 .....                        | 5  |
| Fig. 4.1 HARP の主要なクラスの階層構造に関する概念図 .....                     | 13 |
| Fig. 4.2 BWR 解析と高速炉解析における流量配分計算法の違い .....                   | 14 |
| Fig. 5.1 もんじゅ炉心の流量配分領域 .....                                | 17 |
| Fig. 5.2 FBR_standard による冷却材集合体出口温度 .....                   | 18 |
| Fig. 5.3 FBR_pressure_drop による圧力損失 .....                    | 19 |
| Fig. 5.4 FBR_flow_distribution による圧力損失 .....                | 20 |
| Fig. 5.5 FBR_flow_distribution による流量配分 .....                | 21 |
| Fig. 5.6 炉内構造における流量配分と圧力損失の分布 .....                         | 22 |
| Fig. 5.7 FBR_flow_distribution_with_vessel による圧力損失 .....    | 23 |
| Fig. 5.8 FBR_flow_distribution_with_vessel による冷却材出口温度 ..... | 24 |
| Fig. 6.1 データ管理に関する概念図 .....                                 | 26 |
| Fig. 6.2 炉心データ管理に関する概念図 .....                               | 27 |
| Fig. A.1 高速炉炉心設計における熱流力設計 .....                             | 33 |
| Fig. A.2 PIBRA コードの炉内熱流動モデル .....                           | 34 |
| Fig. D.1 GUI 使用例 .....                                      | 92 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Fig. D.2 出力分布 .....         | 92 |
| Fig. D.3 径方向ピーキング .....     | 92 |
| Fig. D.4 集合体毎の軸方向出力分布 ..... | 92 |



## 1. 背景及び目的

旧サイクル機構では実用高速炉設計研究を効率的に進めるため、複数の分野を包括する次世代解析システム(NGSC: Next Generation Simulation Code)の概念検討が行われた。<sup>1)</sup> この概念検討では、以下のような用途を想定して検討が行われた。

- 炉物理 : コード群のオブジェクト指向統合
- 熱流動 : マルチスケール・マルチフィジックス解析
- 燃料 : 熱流動コードとの連携
- 構造 : 多次元熱流動・熱過渡応力解析

また、これらの評価を行うに際し解析システムに求められる要求は以下のようなものである。

- 効率性 : 既存のソフトウェア資源を効率的に利用できること
- 普遍性 : 業界標準に基づいたものであること
- 公開性 : 原子力分野のエンジニア及び研究者から容易にアクセス可能であること
- 拡張性 : システムの設計が柔軟で拡張が可能であること
- 完全性 : システムの検証と品質保証 (V&V)

これらの要求を満たすシステム概念の一つとしてプラットフォーム（共通基盤）が検討された。これは、Fig. 1.1 に示すように解析システムが体系化された計算部品ライブラリから必要な計算部品を呼び出すための媒体である。また、複数の解析コードで連成解析を行う際もこのプラットフォームを介して必要なデータのやり取りを行う。

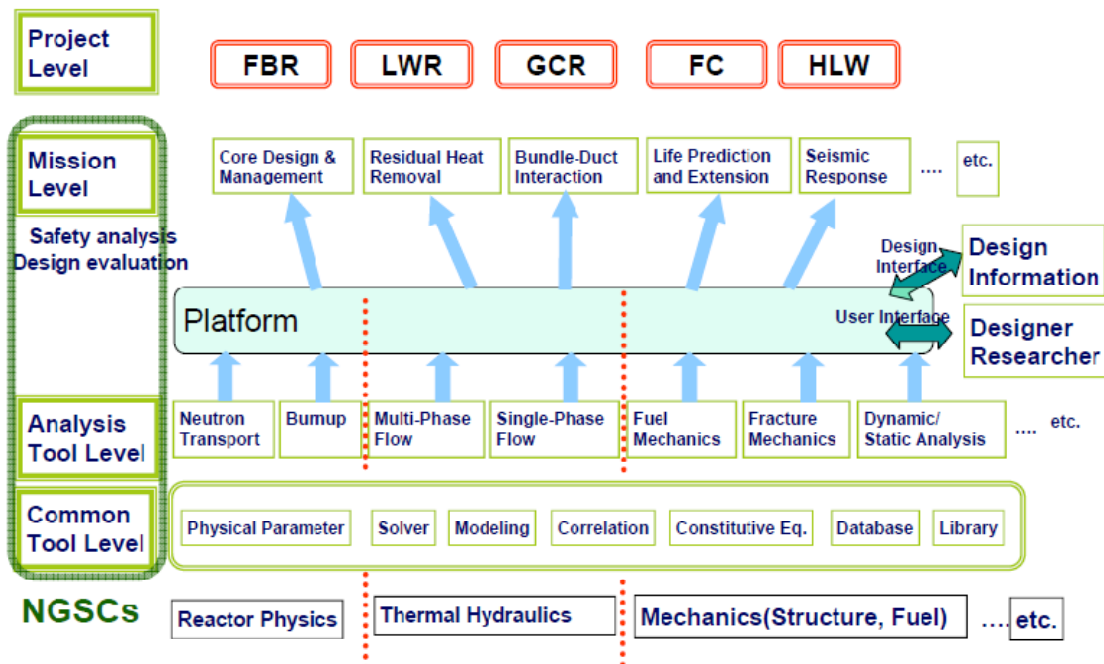


Fig. 1.1 NGSC 概念図 <sup>1)</sup>

次世代炉心解析システム MARBLE<sup>2)</sup>は上記のプラットフォーム概念検討の延長として設計開発が行われてきた。現状では、MARBLE は高速炉核設計のみを対象としているが、次世代解析システムの概念に基づいているため、NGSC において想定された用途を包括することも視野において開発されている。

上記の通り、MARBLE の現状では高速炉核設計のみに対応している。本報告書執筆時において MARBLE においては熱流動コードは整備されておらず、それに必要な熱流動計算に関する入出力情報に関する格納クラス等の整備がなされていない。

そこで、MARBLE の連成解析用プラットフォームへの拡張の第一段階として、現状 MARBLE において解析が可能である高速炉核設計に必要な温度情報を提供する為の熱流動コードの開発を本開発の目的とする。そのため、本開発では高速炉用単チャンネル熱流動コードとして HARP(Hydraulic Analysis code for Reactor Plant)の開発を行う。この開発により、これまで MARBLE 単体では評価できなかった高速炉の出力係数を算出する為に必要な温度情報の評価が行えるようになる。HARP は MARBLE 上の熱流動モジュールとして実装されることから、MARBLE 上の実機燃焼システムである ORPHEUS<sup>3)</sup>との連成解析を簡単に行うことができるようになる。また、HARP の解析手法は一般的に軽水炉炉心設計に用いられる手法と同等であるため、HARP の機能拡張が簡単に行え、当初 NGSC の適用範囲として考えられていた軽水炉炉心設計への対応も可能となる。

HARP に関しても将来的には、BWR 炉心解析にも適用できるよう二相流を対象とした開発を行っていく予定である。しかし、本報告書執筆時点におけるバージョンである MARBLE 第1版は高速炉体系のみに対応しており熱中性子炉に対する核計算機能を持たないため、高速炉を対象とした定常単チャンネル熱流動コードの開発に限定する。コードの仕様決定に関する根拠は次章にて述べる。

また、プラットフォームの主要な機能としてはソルバー間のデータの受け渡しであるが、そのためには、プラットフォーム内で適切なデータ構造が決定される必要がある。このデータの受け渡しに関する概念図を Fig.1.2 に示す。本開発では HARP を開発するとともに、熱流動計算を行う上で必要なデータを格納する枠組みの整備も目的とする。このことは、MARBLE が将来的に連成解析のプラットフォームとして発展していく上で重要な下準備となる。

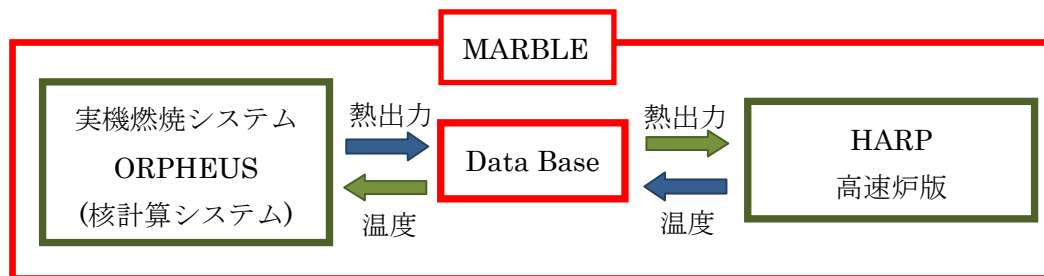


Fig. 1.2 MARBLE における HARP モジュールとのデータの受け渡しに関する概念図

## 2. HARP の仕様について

### 2. 1 原子炉核設計に必要な熱流動計算と HARP に要求される機能

本章では HARP の仕様を決定する為に原子炉核設計に必要な熱流動計算について説明する。また、今回の HARP の開発は高速炉体系に限定するが、将来的には、BWR などの軽水炉体系への対応を予定しているため軽水炉核設計に対しても言及する。

原子炉核設計に必要な熱流動計算手法は炉型により異なる。核熱結合計算に関しては、流体の密度や温度変化による反応度フィードバックが顕著な炉型のみが必要となる。高速炉体系では通常運転時の冷却材 (Na) の密度、温度変化による反応度の変動が微小な為、核熱結合計算を行う必要が無い。一方で、BWR 炉心ではボイド率変化による反応度フィードバックが顕著であるため、核設計を行う際には核熱結合計算が必須となる。また、PWR 炉心では核熱結合計算は必須ではないが、精度向上の為に用いられることがある。<sup>4)</sup> これらのことを考慮すると、将来的には核熱結合計算のフレームワークが必要となるが、今回の開発では、高速炉設計を対象とするため、核計算コードより得られた熱出力を用い熱流動計算を行うにとどめる。

動特性問題に関する対応であるが、他のプラント動特性コードに譲るものとし、今回の開発では考慮しないものとする。動特性問題を解く場合には核設計コードにより必要な動特性パラメーターや反応度係数を算出し、それらの値を用いてプラント動特性コードにより解くものとする。一般的に核設計コードでは中性子束 (熱出力評価に必要) を評価する際の臨界計算は定常問題として解く。(ただし、燃料の組成変化を評価する為の燃焼方程式に関しては動特性問題として解く。)これは、約1年から2年にわたる運転サイクル間の出力分布の変化は緩やかであり、定常問題として扱えるためである。これに対応する熱流動計算に関しても定常問題で扱うことが出来る。そのため、HARP では定常問題を解くものとする。

炉心設計の為の熱流動計算としては一般的に単チャンネルモデルが用いられる。<sup>4)</sup> このモデルでは集合体1体を一つのチャンネルとみなし軸方向一次元の問題として解く手法である。概念図を Fig. 2.1 に示す。定常条件の下で複数のチャンネルを並列させて評価する際には、それぞれチャンネルの圧力損失が一致するようにそれぞれのチャンネルの流量を決定する。高速炉の集合体ではラップ管、BWR の集合体ではチャンネルボックスと呼ばれる集合体を覆うカバーがあり、流路がこれらのカバーにより区切られている。一方で、PWR 集合体はこのような構造は存在しないため集合体1体毎の評価には向かない。しかし、炉心全体を1チャンネルもしくは大まかな分割を行

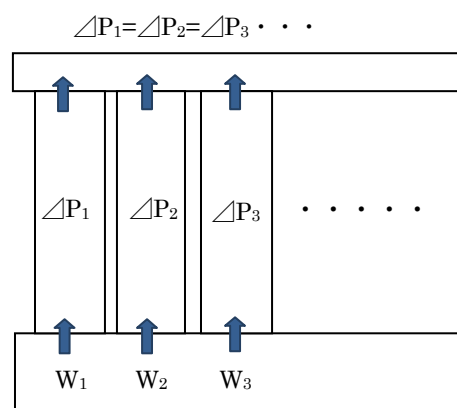


Fig. 2.1 単チャンネルモデルの概念図

った数チャンネルとして扱うことにより平均的な特性を評価する際は単チャンネルモデルが適用できる。HARP の解析においては単チャンネルモデルを採用するものとする。

将来の二相流解析に対する対応に関しては、拡張均質流モデル及びドリフトフラックスモデルによるボイド率評価を行えば、単相流解析のフレームワークからの拡張は問題なく行える。そのため、現段階における評価は単相流解析に限定する。

## 2. 2 高速炉熱流動計算に必要な機能

前節で述べた通り、HARP では定常、単チャンネル、単相流解析を行うが高速炉プラントに対しては特有の配慮が必要になる。BWR 解析においては、Fig.2.1 に示した通り集合体入口と集合体出口間の圧力損失が一致するように集合体の流量配分が決定される。しかし、一部の高速炉ではこのほかにも流量配分機構を持っている炉心があり、炉心領域毎に燃料集合体における圧力損失が異なる。一つの例としてもんじゅが該当する。Fig.2.2 にもんじゅの炉心格納容器構造を示す。

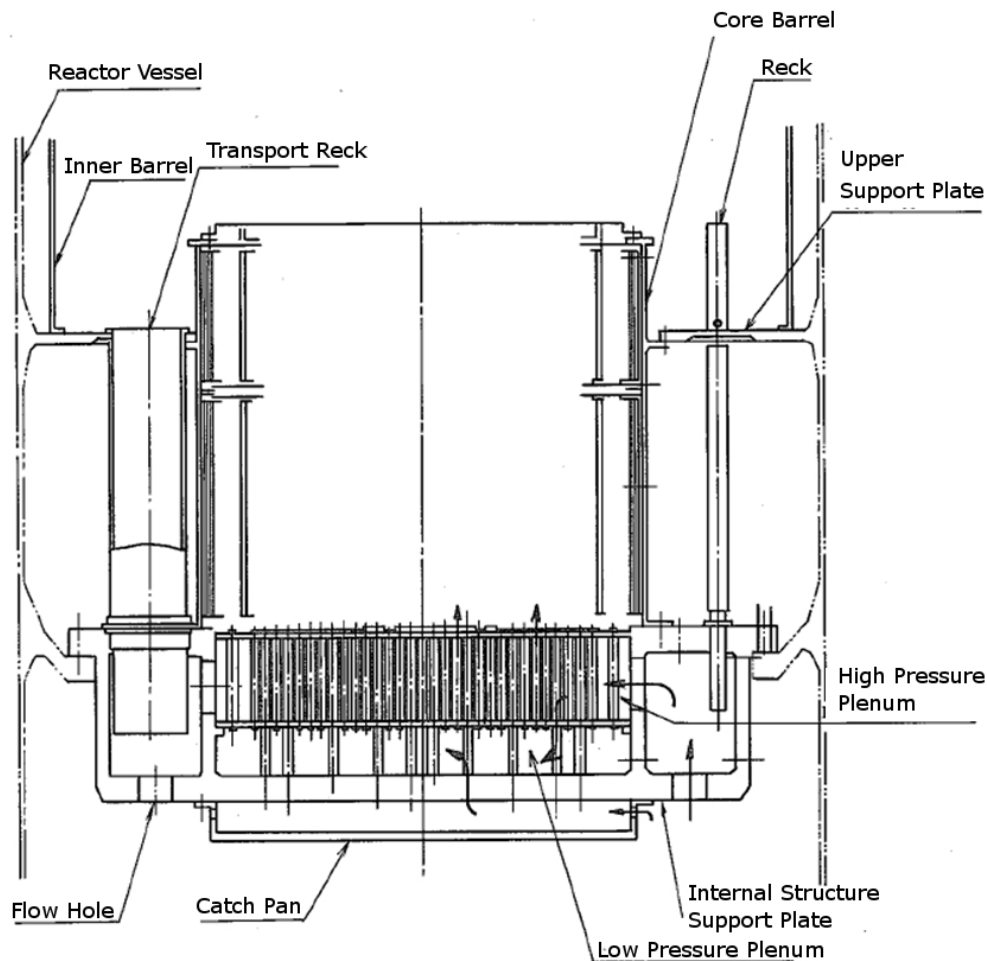


Fig. 2.2 もんじゅの炉心格納容器の構造 5)

集合体の他にも減圧要素が存在する為、上部プレナム及び下部プレナム間での圧力損失を一致させる必要がある。これらの減圧要素と冷却材の流れを示したものが Fig. 2.3 である。

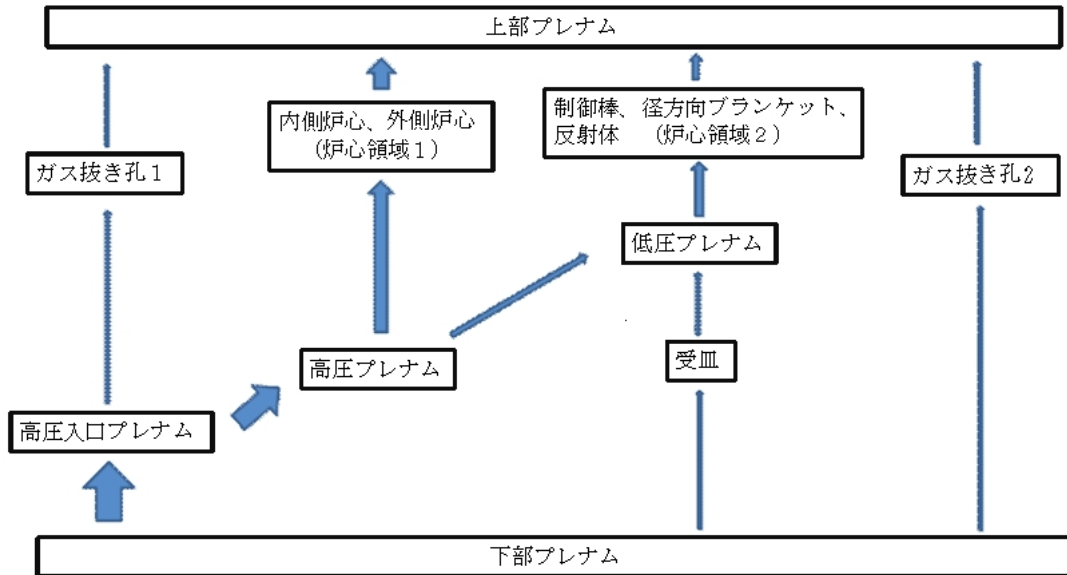


Fig. 2.3 もんじゅの炉心格納容器内の減圧要素の模式図

下部プレナムから上部プレナムへ至るルートとしては以下のように5つ存在する。

- ・ 下部プレナム→高圧入口プレナム→ガス抜き孔1→上部プレナム
- ・ 下部プレナム→高圧入口プレナム→高圧プレナム→炉心領域1→上部プレナム
- ・ 下部プレナム→高圧入口プレナム→高圧プレナム→低圧プレナム  
→炉心領域2→上部プレナム
- ・ 下部プレナム→受皿→低圧プレナム→炉心領域2→上部プレナム
- ・ 下部プレナム→ガス抜き孔2→炉心領域2→上部プレナム

このうちガス抜き孔を通るルート以外は流量配分の為に設計されたものである。内側炉心、外側炉心のように発熱の多い集合体に関しては、冷却の為に大きな冷却材流量を必要とする。一方で、制御棒集合体、径方向ブランケット集合体、反射体等は発熱が少ないため、比較的少ない冷却材流量で十分である。このように、冷却材流量が異なれば、当然発生する圧力損失も異なる。そのため、冷却の必要性が高く集合体における圧力損失が大きな集合体は高圧プレナムへ、冷却の必要性が低く集合体における圧力損失が低い集合体は低圧プレナムへ接続する仕組みとなっている。流量配分を決定する為には、上記の5つのルート間で圧力損失を一致させる必要がある。

このように、高速炉では流量配分機構が複雑であるため、複雑な減圧要素の組み合わせに対し柔軟に対応出来るルーチンを作成する必要がある、HARP ではこのような機能を実装する。

### 3. 解析手法

#### 3. 1 冷却材を対象とした熱流動解析

本解析手法に限らず、熱流動解析を行う上では3つの保存式を解く必要がある。質量保存式、エネルギー保存式、運動量保存式（ナビエストーク方程式）である。一次元（単チャンネル）、定常、单相流（均質流）の条件下では以下ようになる。<sup>6)</sup>

質量保存式：

$$\frac{dW}{dz} = 0 \quad (3.1-1)$$

エネルギー保存式：

$$\frac{d(Wh)}{dz} = q' \quad (3.1-2)$$

運動量保存式：

$$\frac{dWv}{dz} = -A \frac{dP}{dz} - A\rho g - \tau_w P_w \quad (3.1-3)$$

ここで、

W：質量流量(kg/s)

h：冷却材のエンタルピー(J/kg)

q'：集合体の線出力(W/m)

v：冷却材の速度(m/s)

g：重力加速度(m/s<sup>2</sup>)

A：流路面積(m<sup>2</sup>)

ρ：冷却材密度(kg/m<sup>3</sup>)

τ<sub>w</sub>：壁面せん断応力(N/m)

P<sub>w</sub>：濡れぶち長さ(m)

質量保存式である(3.1-1)式は、全ての高さ位置における質量流量を一定とすることにより満たすことができる。

エネルギー保存式に関しては流体のエネルギーのうち、エンタルピーのみを対象とする。原子炉燃料の発熱による流体のエネルギー上昇を評価する際には、流体の運動エネルギー及び位置エネルギーを無視したモデルによる評価でも十分に妥当な評価が出来る。同様に、エネルギー流入に関しても燃料の発熱のみを考える。定常の条件から発生した熱量が全て冷却材へ伝達されて除熱されるものと考えることができる。そのため、線出力を高さ方向に積分し、冷却材質量流量で割り入口エンタルピーに加算することにより局所エンタルピーの評価ができる。具体的には以下ようになる。

$$h(z) = h_{in} + \frac{1}{W} \int_0^z q'(z) dz \quad (3.1-4)$$

ここで、

$q'$ : 集合体の線出力(W/m)

$h_{in}$ : 入口エンタルピー(J/kg)

入口エンタルピーに関しては、解析条件として与えられる入口温度に対し、Na の物性表を用いることにより一意的に決定される。入口エンタルピーが与えられると式(3.1-4)に従ってエンタルピーが決定されるため、物性表による換算により、温度、密度、熱伝導度などの状態量が決定できる。

運動量保存式に関しては、式(3.1-3)に示されるように圧力に関する式である。右辺第 1 項は軸方向に関する圧力の変化率であり、一定の区分で積分することにより圧力損失を示す。他の項に関しては圧力損失の各成分を示す。このように運動量保存式としては圧力損失評価式と考えることが出来る。本解析で考慮する圧力損失は、水頭圧力損失、加速圧力損失、摩擦圧力損失、局所圧力損失である。水頭圧力損失は冷却材の重量に関する圧力損失で以下のように記述することができる。

$$\Delta p_h = \rho g L \quad (3.1 - 5)$$

ここで、

$L$ : ノード高さ(m)

ここで、ノードは計算メッシュに当たるものである。

加速圧力損失は密度変化による圧力損失で以下のようにあらわすことができる。

$$\Delta p_a = G^2 \left\{ \frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_i} \right\} \quad (3.1 - 6)$$

ここで、

$G$ : 質量流束(kg/m<sup>2</sup>s)

$\rho_i$ : ノード入口における密度(kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_o$ : ノード出口における密度(kg/m<sup>3</sup>)

この加速圧力損失は発熱ノードのみに発生する圧力損失である。

摩擦圧力損失に関しては、以下のようにあらわすことができる。

$$\Delta p_f = \frac{fL}{D_e} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3.1 - 7)$$

ここで、

$D_e$ : 水力等価直径(m)

$f$ : 摩擦係数(-)

$L$ : ノード高さ(m)

$\rho$ : 冷却材密度(kg/m<sup>3</sup>)

$v$ : 冷却材流速(m/s)

主に、燃料バンドル部などの圧力損失ではこの摩擦圧力損失が支配的であり、バンドル部の形状などに依存した摩擦係数を与える。

最後に局所圧力損失であるが、以下のようにあらわすことができる。

$$\Delta p_i = K \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3.1-8)$$

ここで、

$K$  : 局所抵抗係数(-)

一般的には、エルボ要素（湾曲部）、ティー要素（分岐部）、グリッドスペーサー等を対象としているが、高速炉プラントでは、燃料集合体の流量調整部（エントランスノズルを含む）や炉心下部と下部プレナム間に存在する減圧要素を対象としている。

このような減圧要素を含む圧力損失の合計が各流路において釣り合う必要がある。本解析では各流路の圧力損失の平均値に、それぞれの流路の圧力損失が一致するようにニュートン法を用いて流量の調整を行っている。具体的には、以下ようになる。

$$W_i^{\text{new}} = W_i + \frac{\overline{\Delta P} - \Delta P_i}{\Delta P_i - \Delta P_i^{\text{old}}} (W_i - W_i^{\text{old}}) \quad (3.1-9)$$

ここで、

$W_i$  : 流路  $i$  の質量流量(kg/s)

$W_i^{\text{old}}$  : 前回の解析による流路  $i$  の質量流量(kg/s)

$W_i^{\text{new}}$  : 新しく評価した流路  $i$  の質量流量(kg/s)

$\Delta P_i$  : 流路  $i$  の圧力損失(Pa)

$\Delta P_i^{\text{old}}$  : 前回の解析による流路  $i$  の圧力損失(Pa)

$\overline{\Delta P}$  : 全流路平均の圧力損失(Pa)

ニュートン法では全流路平均圧力損失と各流路の圧力損失の差を評価関数とし、この評価関数を 0 とする様に入流量の更新を行う。ニュートン法で用いる評価関数の導関数は現在の繰り返し計算の値と前回の繰り返し計算の値を用いた数値差分により、評価関数の入流量に対する微分として算出している。また、この導関数を算出する際に圧力損失の平均値は各チャンネル流量に依存しないものと仮定する。これは、チャンネル全体の圧力損失の平均値の特定チャンネル流量の変化に起因した変化分（偏微分）を算出するのが不可能なためである。また、このような流量調整の結果は必ずしも各チャンネルの総流量を保存する結果とならないため、流量調整の最後のプロセスには規格化作業を追加している。集合体間の流量配分（軽水炉のような）を考慮する際は、上記のような考え方で良いが、高速炉の下部プレナムと炉心間の流量配分のような複雑な要素における流量配分は、特定の分岐点以下の流路に沿って各減圧要素の圧力損失を積算し、その合計値を一致させるように流量を調整する。その際、分岐後に再合流するような流路が存在する場合には、収束性（実機環境でも振動が観測されると推測される）が著しく低下することが予想される。

このように圧力損失のつり合いを考慮し流量配分が決定される。しかし、集合体流量が変化すれば冷却材温度も変化するため、エネルギー方程式との繰り返し計算を行う。



### 3. 2 燃料棒を対象とした伝熱解析

3. 1 に示された手法により冷却材温度が決定される。この冷却材温度が決定されれば、この値を境界条件として燃料温度が決定できる。初めに、燃料棒表面温度を算出する。これは、単純に熱伝達による温度上昇でありフィルム温度上昇と呼ばれる。

$$T_{\text{cladding\_surface}} = T_{\text{coolant}} + \frac{q''}{h_c} \quad (3.2 - 1)$$

ここで、

$T_{\text{cladding\_surface}}$  : 被覆管表面温度(K)

$T_{\text{coolant}}$  : 冷却材バルク温度(K)

$q''$  : 熱流束(W/m<sup>2</sup>)

$h_c$  : 冷却材と被覆管間の熱伝達率(W/m<sup>2</sup>K)

ここで言うフィルムは、沸騰膜のことではなく温度境界層のことである。一般的に壁面付近の流速は小さく、主な伝熱の現象としては熱伝導が支配的である。それに対して、3. 1 で示されたような手法により評価された冷却材温度は、平均的な温度という意味でバルク温度と呼ばれる。

当然のことながら、この熱伝達係数は流動状態に大きく依存する。一般的に熱伝達係数は熱伝達に関する無次元数であるヌッセルト数の相関式を通して決定される。

$$h_c = \frac{Nu k}{D_e} \quad (3.2 - 2)$$

ここで、

$D_e$  : 水力等価直径(m)

$k$  : 冷却材の熱伝導率(W/mK)

$Nu$  : ヌッセルト数(-)

この式自体はヌッセルト数の定義式から得られるものである。本解析では、もんじゅの評価及び FaCT における評価で用いられている定義にしたがって実装した。しかし、水力等価直径ではなく加熱等価直径（流路面積の4倍/加熱長さ）を用いる定義も存在し、実験相関式の導出の際の定義にしたがって処理すべき問題である。用いる相関式によっては実装の変更が必要な場合がある。

このヌッセルト数は体系及び流動条件により大きく異なるため、一般的にはその体系に合致した実験相関式が用いられる。今回は、もんじゅ体系の解析に特化した開発を行ったため、もんじゅの設置許可に関する評価<sup>7)</sup>でも用いられている相関式<sup>8)</sup>を使用した。

$$Nu = 7.0 + 0.025(\bar{\Phi} \cdot Pe)^{0.8} \quad (3.2 - 3)$$

ここで、

$\bar{\Phi}$  : 乱流拡散補正因子(0.5)

$Pe$  : ペクレ数(-)

これらの値は体系に特化したものであるため、今後は、設計用途に合わせて大型バンドル

にも対応できる相関式の導入や、ユーザー指定の関数による解析を行えるような枠組みを整備していく必要がある。

このようにして、被覆管の表面温度が決定されれば、被覆管温度分布の算出が可能となる。無限円筒座標における定常熱伝導方程式を、被覆管内面に対する熱流束及び、被覆管表面温度を境界条件として解析的に解くと以下ようになる。

$$T(r) = T_{\text{cladding\_surface}} + \frac{q'}{2\pi\bar{k}_c} \ln\left(\frac{r_{\text{cladding\_surface}}}{r}\right) \quad (3.2-4)$$

ここで、

$\bar{k}_c$  : 被覆管熱伝導度(W/mK)

$q'$  : 燃料棒の線出力(W/m)

$r_{\text{cladding\_surface}}$  : 被覆管の外半径(m)

$r$  : 被覆管の任意位置における半径(m)

熱伝導度は一般的に温度に依存するため、ここでは、被覆管平均温度に対する熱伝導度を用いる。熱伝導度に関しても、もんじゅの設置許可に関する評価<sup>7)</sup>でも用いられている相関式<sup>9)</sup>を用い以下のように与える。

$$k_c = 1.32 \times 10 + 1.3 \times 10^{-2}(T + 273.15) \quad (3.2-5)$$

ここで、

$k_c$  : 熱伝導度(W/cm・K)

$T$  : 温度 (K)

材料毎に熱伝導度が異なるため、今後は、MARBLE 上における熱伝導度に対するデータベースの整備が望まれる。熱伝導度を求める際の被覆管平均温度は、単純な体積平均により以下のようにあらわすことができる。

$$\bar{T}_c = \frac{q'}{4\pi\bar{k}_c} + \frac{q'}{2\pi\bar{k}_c} \left\{ \frac{\ln(r_{\text{cladding\_surface}}/r_{\text{cladding\_inner}})}{(r_{\text{cladding\_surface}}/r_{\text{cladding\_inner}})^2 - 1} \right\} \quad (3.2-6)$$

ここで、

$\bar{T}_c$  : 被覆管平均温度(K)

$r_{\text{cladding\_inner}}$  : 被覆管内半径(m)

この平均温度自体が熱伝導度に依存する為、繰り返し解法により決定される。被覆管内面の温度が決定されればギャップ部における熱伝達を考慮することにより燃料表面温度の決定ができる。具体的には以下ようになる。

$$T_{\text{fuel\_surface}} = T_{\text{cladding\_inner}} + \frac{q''}{h_g} \quad (3.2-7)$$

ここで、

$T_{\text{fuel\_surface}}$  : 燃料表面温度(K)

$T_{\text{cladding\_inner}}$  : 被覆管内面温度(K)

$h_g$  : ギャップ熱伝達(W/m<sup>2</sup>K)

ギャップ部の熱伝達率については、もんじゅの設置許可に関する評価値<sup>7)</sup>より  $0.5678 \times 10^4 (\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$ を用いた。このようにして、燃料表面温度が求まれば燃料温度の評価を行うことが出来る。燃料温度に関しては、最も簡易的な一様発熱モデルを採用した。一般的に、高速炉燃料設計に用いられる発熱分布は、燃料棒における空間自己遮蔽効果が無視できるため、一様発熱モデルが用いられる。具体的には以下のように温度を決定する。

$$T(r) = T_{\text{fuel\_surface}} + \frac{q'}{4\pi k_f} \left\{ 1 - \left( \frac{r}{r_{\text{fuel\_surface}}} \right)^2 \right\} \quad (3.2-8)$$

被覆管の場合と同様に燃料の熱伝導率はもんじゅの設置許可に関する評価<sup>7)</sup>でも用いられている値<sup>10)</sup>を用いる。具体的には、以下の式となる。

$$k_f = 1.169 + \frac{1}{\left\{ 6.717 \times 10^{-4} + \frac{2.226 \times 10^{-4} \cdot (1 - r_{\text{TD}})}{\frac{\text{O}}{\text{M}} - 1.90} \right\} \cdot (T + 273.15)} + 7.214 \times 10^{-11} (T + 273.15)^3 \quad (3.2-9)$$

ここで、

$k_f$  : 燃料の熱伝導率 ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )

$r_{\text{TD}}$  : 理論密度比

$T$  : 温度(K)

$\text{O/M}$  : 化学量論比 (重金属元素に対する酸素元素の原子個数比)

ここでも、平均温度に対する熱伝導率を用いるが、平均温度は以下のように与える。

$$\bar{T}_f = T_{\text{fuel\_surface}} + \frac{q'}{8\pi k} \quad (3.2-10)$$

ここで、

$\bar{T}_f$  : 燃料平均温度(K)

である。このようにして燃料温度の算出ができる。ただし、今回実装したモデルは最も簡便なモデルである。正確な燃料温度の評価には燃料設計に用いられるようなリロケーションや組成変化を考慮したモデルの導入が必要となるが、どの程度のモデルが必要になるかは評価値を用いる用途に依存する。今後、ユーザーのニーズにより、より詳細なモデルの導入を検討する。

#### 4. プログラムの実装

開発言語は MARBLE システムの制御層の記述言語と同一の **Python** とした。これにより、制御層とソルバーの柔軟な接続が可能となる。ただし、実行速度が問題になる場合には、部分的もしくはソルバー全体の **C++** 言語への移植を検討する必要がある。

本プログラムはオブジェクト指向プログラミングによる開発を行った。オブジェクト指向の意味は多様であるが、ここでは、クラスに代表されるような、データ及びそれに対応する操作を一つのまとまりと考え、そのまとまりの組み合わせで実際の機器等を模擬し、現象の解析を試みる。

HARP の主要なクラスとしては以下のとおりである。

**DuctType**: 流路面積、発熱長、濡れぶち長さ等、流路に対する基本的な情報を保持。

**ChannelType**: 集合体の熱流動条件により集合体をグループ化したもの、  
各流量配分領域に対応。

**Channel**: 集合体そのものを模擬。

**Core**: 炉心部（集合体の集まり）を模擬。

**Vessel**: 圧力容器を模擬、**Core** 全体を一つの減圧要素とみなして格納が可能である。  
その他の減圧要素と併用して炉外の流量配分の計算を行う。  
ただし、炉内のみの評価で十分な場合は使用しない。

**ResistanceElement**: **Vessel** 内の炉心部以外の減圧要素を模擬。

Fig.4.1 にはこれらのクラスの内包関係から発生する階層構造の概念図を示す。最も基本的な要素は **DuctType** クラスである。集合体のノズル部とバンドル部では、流路面積を初め様々な、流動に関する条件が異なる。このようなそれぞれの流動条件を保持した **DuctType** を複数組み合わせ、**ChannelType** に **DuctType** のインスタンスを渡すことにより、典型的な集合体の流動条件を内包する **ChannelType** のインスタンスが生成される。

**ChannelType** は、集合体の流動条件をまとめた幾何形状に起因する最低限の要素であるが、実際の集合体は、流動条件が同一でも熱出力分布等の発熱に関する条件が異なる。このため、**ChannelType** のインスタンスを内包する **Channel** が用意される。この **Channel** は実際に模擬する集合体の数だけ生成される。このように、**Channel** は **ChannelType**、**DuctType** により流動条件が決定される。また、明示的な実装はなされていないが **DuctType** の下層には **Node** という概念がある。これは、計算メッシュと考えることができ、HARP では核計算(MARBLE では **FluxMeshGeometry**)の軸方向のメッシュ数と一致させる必要がある。これは、**DuctType** の **node\_number** として与える。これらの情報を用いて **Channel** 内において主要な熱流動解析が行われる。この **Channel** はさらに、**Core** に内包され、計算の制御自体は **Core** によって行われる。**Core** では、冷却材入口温度、冷却材流量等の情報が与えられ、それらの値を保存するように、各 **Channel** の入口情報を決定していく。もし、流量配分問題を解く場合には、この **Core** が各 **Channel** に圧力損失の問い合わせを行い、

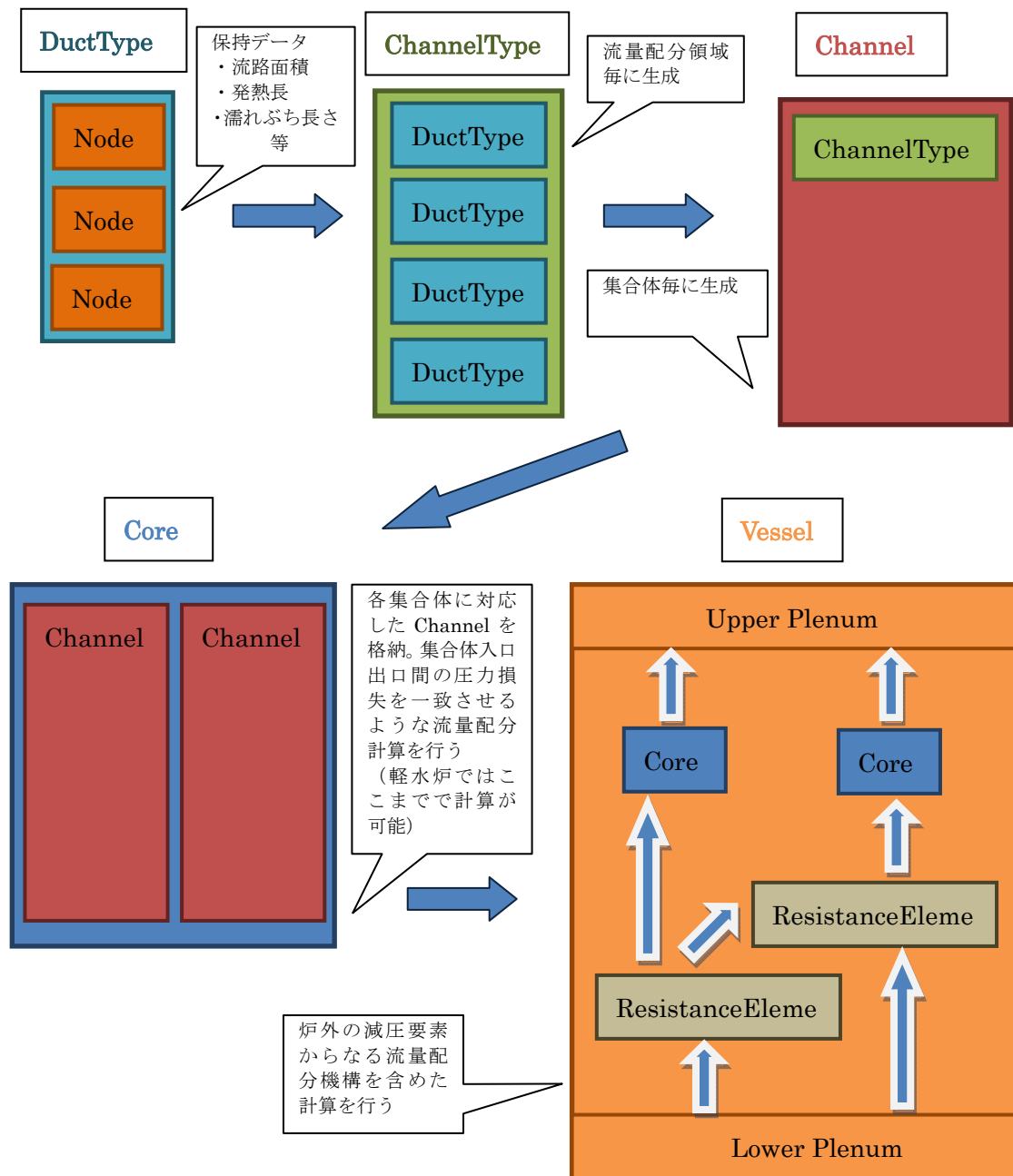


Fig. 4.1 HARP の主要なクラスの階層構造に関する概念図

圧力損失の高い集合体には前回よりも少ない冷却材流量を、圧力損失の低い集合体には前回よりも多い冷却材流量を割り当てていく。計算が収束した後は、その圧力損失を炉心の圧力損失として認識し、さらに上層からの問い合わせがあった場合にはその情報を以て回答する。

軽水炉の炉内の流量配分に関しては、上記のプロセスで完了するが、高速炉プラントの流量配分については、炉心部と下部プレナム間にさらに複雑な流量配分が必要となる。これらの事情を説明した概念図を Fig. 4.2 に示す。

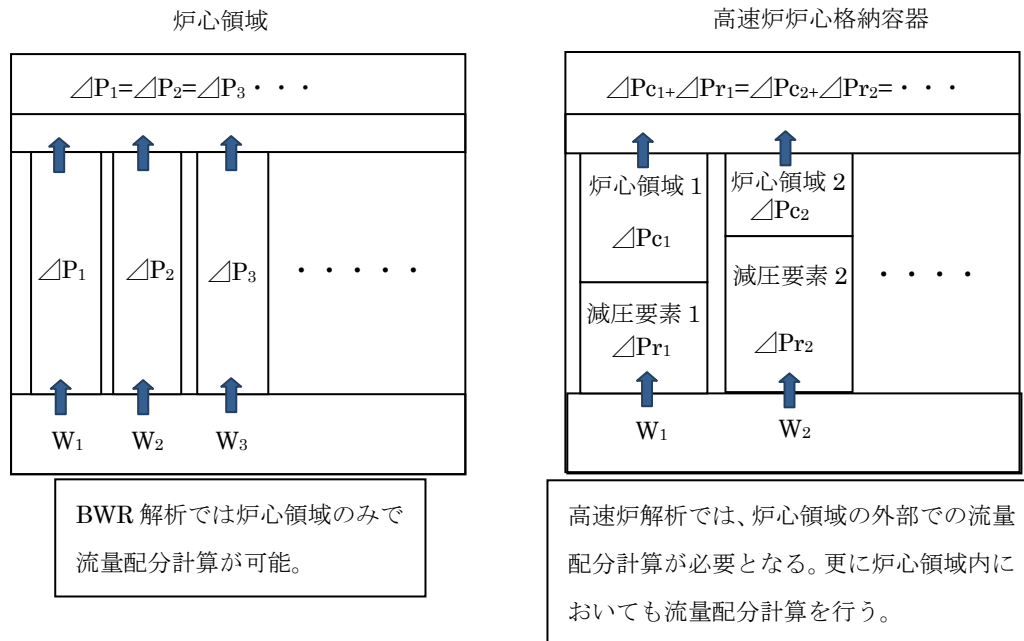


Fig. 4.2 BWR 解析と高速炉解析における流量配分計算法の違い

高速炉におけるこのような炉外の流量配分は、発熱量の多い炉心部のみではなく、径方向ブランケット、制御棒集合体、反射体など発熱量の少ないチャンネルに対する冷却を考慮して行われている。圧力損失の少ない高压プレナムと圧力損失の大きい低压プレナムを設置し、発熱量の多い炉心部の集合体は高压プレナムへ、発熱量の少ない径方向ブランケット、制御棒集合体、反射体などは低压プレナムへ接続する。このように、高速炉プラントの流量配分は多くの減圧要素からなり、これらの減圧要素に関しては、局所抵抗係数及び流路面積のみが与えられた集中定数モデルで模擬されることが多い。この減圧要素を模擬するため **ResistanceElement** クラスの実装を行った。この **ResistanceElement** のインスタンスを複数作成し、上記の **Core** を含めて **Vessel** クラスに内包させれば、下部プレナムから上部プレナム間の流量配分問題を解くことができる。なお、**ResistanceElement** には下流側と上流側に接続される要素の名前を登録しておく必要がある。この情報をもとに、**Vessel** クラスは自動的に **ResistanceElement** の接続から作成されるネットワークを構築し、流量配分の解析を行う。なお、本解析で用いる主要な減圧要素の局所抵抗係数及び流路面積は公開文献である文献 4)の情報をを用い **ResistanceModel** として登録してある。ユーザーは、適切な **ResistanceModel** を指定することにより簡便に減圧要素の設定を行うことができる。

なお、これらの解析に必要となる Na の物性表に関しては、軽水の蒸気表と共に同様のインターフェースを持つように Python のライブラリとして整備してある。将来、軽水炉解析へ拡張する際には簡単に移行できる。

また、入力形式としては、MARBLE のデータ保存形式として用いられている YAML を

採用している。これは、XML(Extensible Markup Language)を簡略化したものである。YAML は名前付けと字下げ（インデント）による構造化が可能なファイル形式であり、人が見たときの読みやすさとコンピュータ処理のしやすさの両方を兼ね備えている。Python で扱うデータ構造との親和性が良いので YAML 形式ファイルの処理プログラムを書くのは容易である。また、YAML 形式ファイルは通常のエディタを使って簡単に編集することができる。入力データに関しては、集合体の形状に関するもの、集合体は位置に関するものについては、核計算で使用するものと共通する部分が存在する。利便性を考えて、実機燃焼システムである ORPHEUS のシステムに組み込む際には、これらの共通した形状に関する情報を独立させ、核計算及び熱計算部で共有させればユーザーの負荷は減少する。

上記のようなユーザーの入力により `calc_mode` が決定されると、その値に応じた解析シナリオが実行される。現在実装されている解析シナリオは、`FBR_standard`、`FBR_pressure_drop`、`FBR_flow_distribution`、`FBR_flow_distribution_with_vessel` の4シナリオである。具体的な解析内容については、第5章において解析例と共に説明する。

また、HARP の入力には熱出力が必要となるが、この入力は Fig. 1. 2 に示したようにデータベース経由で行われる。HARP の出力に関してもデータベースに登録される。ユーザーはデータベースにアクセスすることにより出力を参照できる。

## 5. 解析例

以下に、解析例を示す。解析対象としては、もんじゅ体系とし熱出力分布としては、文献 11)に示されたもんじゅの高燃焼度炉心の未燃焼時のものとし高速炉実機燃焼解析システム ORPHEUS<sup>3)</sup>により解析されたものを用いる。なお、この入力には ORPHEUS の入力サンプルとして整備されているものを利用した。熱流動条件に関しては、文献 5)に示された値を引用している。また、解析条件の設定は設置許可書等の公開文書から比較的整合性が取れているものを選択して使用している。(そのため、妥当な結果が得られると思われる。)熱流設計諸元を Table 5.1 に、流量配分値を Table 5.2 に流量配分領域を Fig. 5.1 に示す。なお、解析結果の表示は付録 D に示した LIME によって作成されたものである。LIME ではデータベースに直接アクセスすることにより解析結果を参照している。

解析結果の妥当性を確認する為の公開ベースの情報としては、Table 5.1, Table 5.2 に示した情報のみである。そのため、この情報以外の項目に関しては傾向を見て妥当な結果が得られているかの判断を行う。冷却材温度に関しては、集合体出口温度を観察する。集合体出口温度はサーマルストラIPPINGの観点から集合体間の温度差は小さいほうが望ましいとされ、炉心設計の際には重要な制約条件となる。圧力損失に関しては、流量配分計算の妥当性に直結する重要な項目である。流量配分は圧力損失のバランスで決定されるが、2. 2 節で説明したように、一部の高速炉においては、炉外に流量配分機構を持つ為、全ての集合体の圧力損失は一致しない。具体的には、高圧プレナムに接続された集合体間（流量領域 1～8）、及び低圧プレナムに接続された集合体間（流量領域 9～11）では圧力損失が一致する。なお、解析で得られた入口流量に関しては、Table 5.2 の値と直接比較が出来る。これらの項目の中から解析シナリオ毎に適切な項目を選択し比較するものとする。

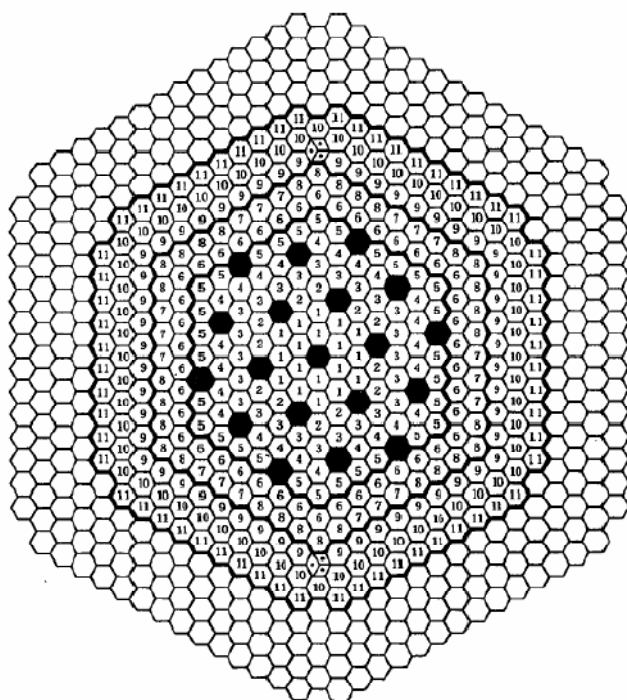
Table 5.1 もんじゅの熱流設計諸元 <sup>7)</sup>

| Items                      | Values                    |
|----------------------------|---------------------------|
| Thermal Power              | 714MW                     |
| Coolant Flow Rate          | 15.3x10 <sup>6</sup> kg/h |
| Coolant Inlet Temperature  | 397°C                     |
| Coolant Outlet Temperature | 529°C                     |



Table 5.2 もんじゅ炉心の流量配分値

| Region Number | Number of Assemblies | Mass Flow Rate (kg/s) |
|---------------|----------------------|-----------------------|
| 1             | 18                   | 21.0                  |
| 2             | 12                   | 20.0                  |
| 3             | 24                   | 19.0                  |
| 4             | 24                   | 17.0                  |
| 5             | 30                   | 16.0                  |
| 6             | 42                   | 19.0                  |
| 7             | 18                   | 16.0                  |
| 8             | 30                   | 14.0                  |
| 9             | 52                   | 4.6                   |
| 10            | 60                   | 2.1                   |
| 11            | 60                   | 1.0                   |



| 記号                                                                                    | 領域        |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|
| ①                                                                                     | 流量領域 1    | 内側炉心         |
| ②                                                                                     | 流量領域 2    |              |
| ③                                                                                     | 流量領域 3    |              |
| ④                                                                                     | 流量領域 4    |              |
| ⑤                                                                                     | 流量領域 5    |              |
| ⑥                                                                                     | 流量領域 6    | 外側炉心         |
| ⑦                                                                                     | 流量領域 7    |              |
| ⑧                                                                                     | 流量領域 8    |              |
| ⑨                                                                                     | 流量領域 9    | 半径方向<br>ブランク |
| ⑩                                                                                     | 流量領域 10   |              |
| ⑪                                                                                     | 流量領域 11   |              |
|  | 制御棒集合体    |              |
|  | 中性子源集合体   |              |
|  | 中性子しゃへい体等 |              |

Fig. 5.1 もんじゅ炉心の流量配分領域 7)

## 5. 1 FBR\_standard

炉心部（燃料集合体、径方向ブランケット）のみを対象とし、流量配分はユーザーの入力によるものとする。この条件において、温度計算のみを行うシナリオである。これにより、核計算に必要な最低限の情報を得ることができる。

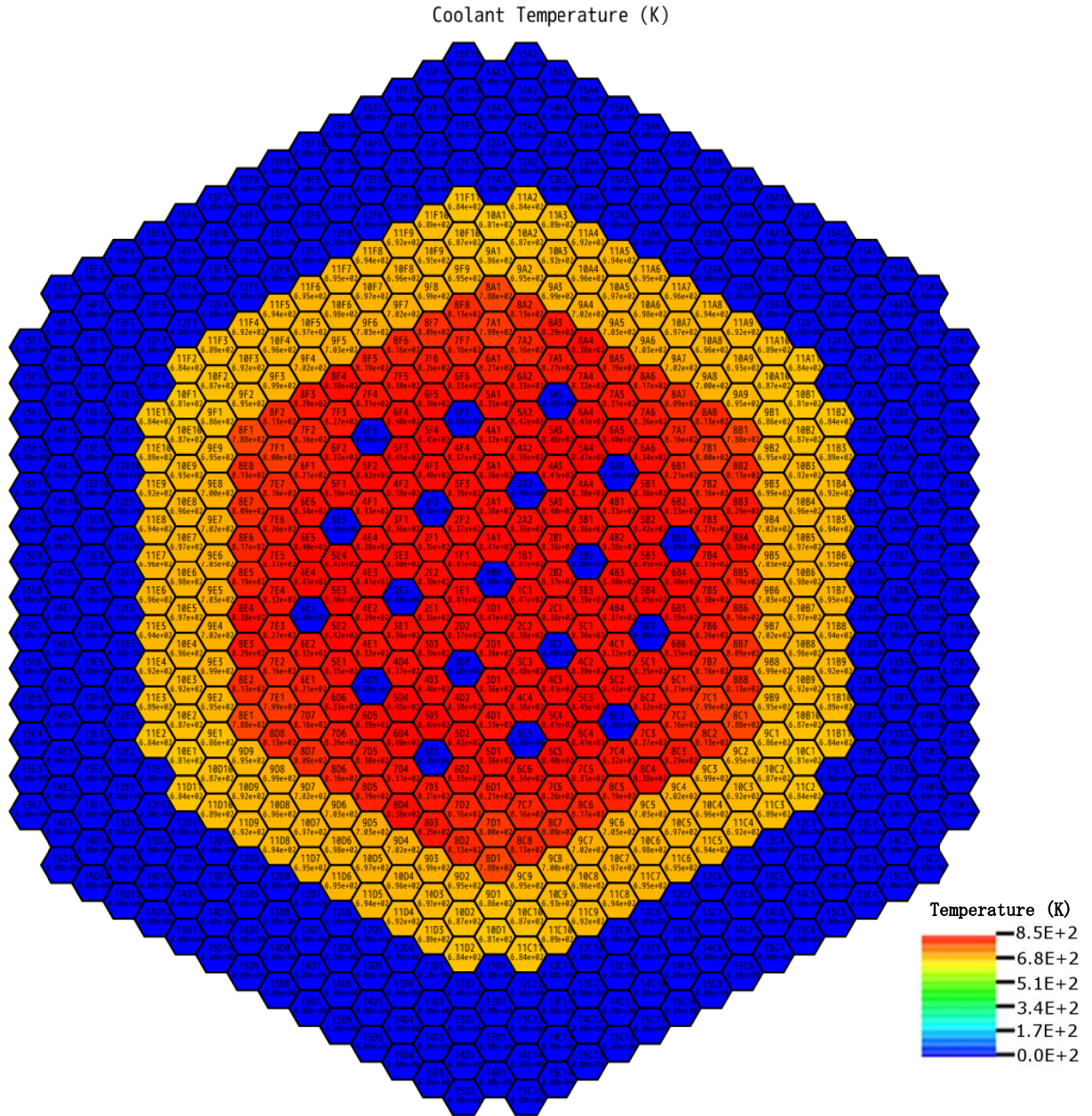


Fig. 5.2 FBR\_standard による冷却材集合体出口温度

Fig. 5.2 は FBR\_standard により解析された各集合体の出口における冷却材温度である。炉心領域（内側炉心及び外側炉心）に関しては、集合体間に大きな温度差が見られず流量配分が適切に行われている。ブランケット部と炉心部間はやや大きな温度差が見られるが、

燃焼が進んだ状態では出力分布の変化（ブランケット部の出力分担率の上昇）によりこの差は縮まると思われる。

## 5. 2 FBR\_pressure\_drop

FBR\_standard の解析に加えて圧力損失の計算を行う。ただし、ユーザーの入力した流量配分による解析結果となるため、各集合体の圧力損失が一致する保証はない。解析結果を以下に示す。

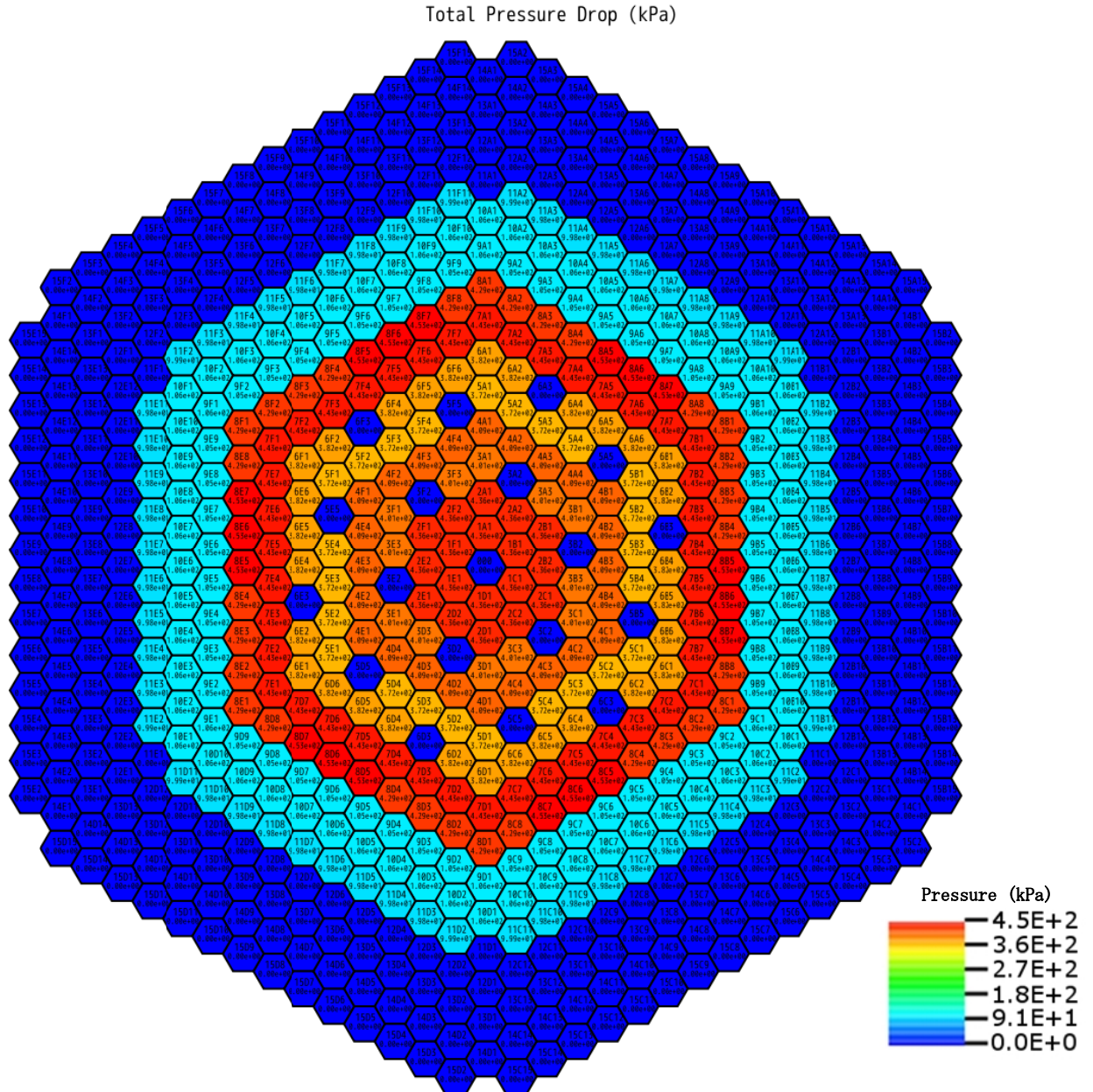


Fig. 5.3 FBR\_pressure\_drop による圧力損失

Fig. 5.3 は集合体全体の圧力損失の合計値を示している。炉心部集合体間、ブランケット集合体間では、ほぼ圧力損失が一致し、解析が正しく行われていると推測される。

### 5. 3 FBR\_flow\_distribution

FBR\_pressure\_drop の解析とは異なり、各集合体の圧力損失が一致するまで流量配分計算を行う。ただし、プレナム部の圧力損失は直接考慮しない。冷却材流量の入力としては、炉心全体として与える。また、プレナム部の圧力損失を疑似的に考慮するため、集合体毎に圧力損失のバイアス値を与えることができる。Fig.5.4 に解析例を示す。本解析例では高圧プレナムと低压プレナムの圧力差を 5. 2 節における解析結果から 320kPa と推定し、入力にバイアス値として与え炉内のみの流量配分を行っている。バイパス流（ここでは、反射体、ガス抜き孔、その他の漏えい流）の存在もあるため、入口炉心流量は FBR\_pressure\_drop の解析例の集合体内の流量を合算したものとしている。

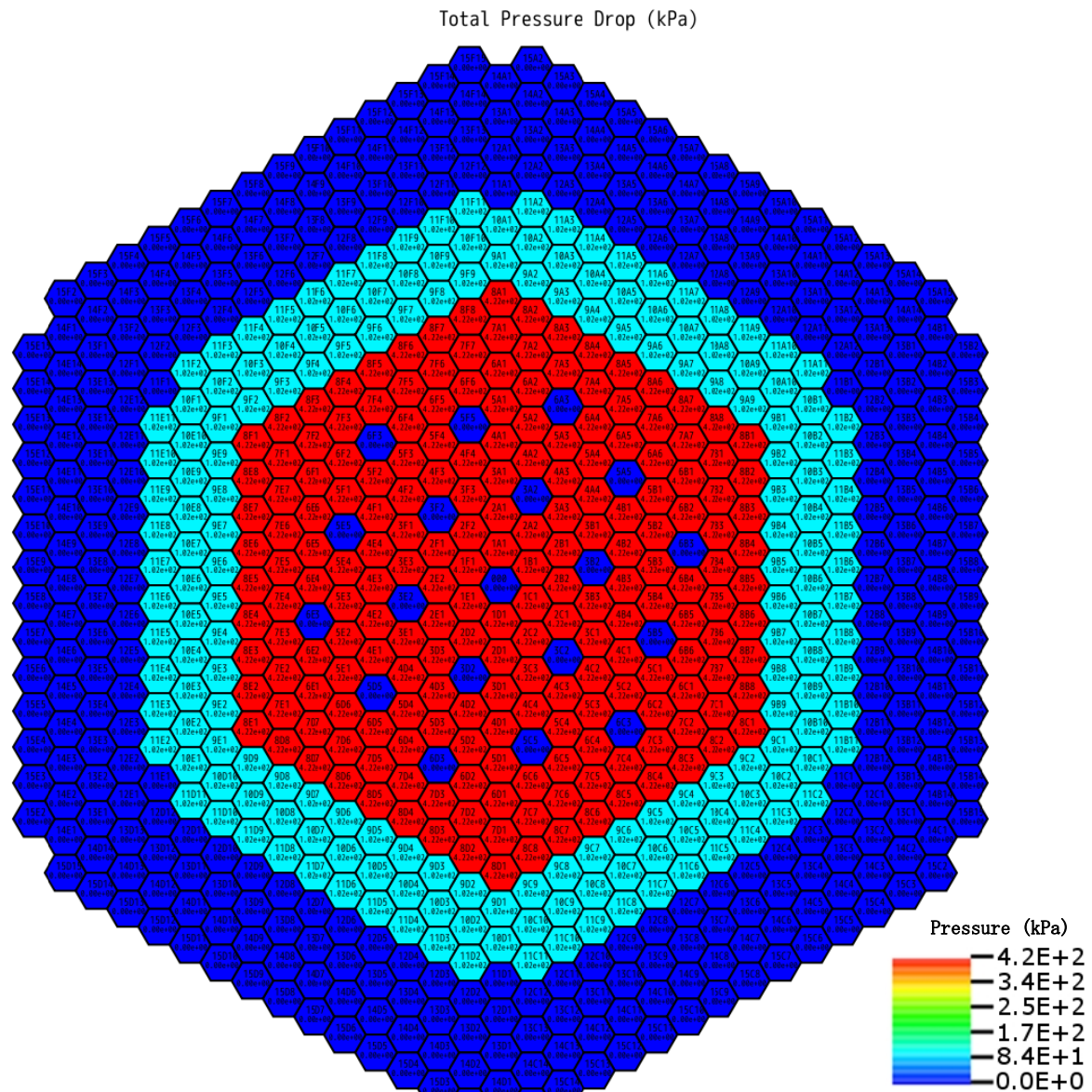


Fig. 5.4 FBR\_flow\_distribution による圧力損失



径方向ブランケット（低圧プレナムに接続）に圧力損失のバイアス値を与え、流量配分を行った。当然ではあるが、炉心部及び径方向ブランケット部でそれぞれ圧力損失の完全一致が見られ、その圧力差は入力値である 320kPa と合致している。

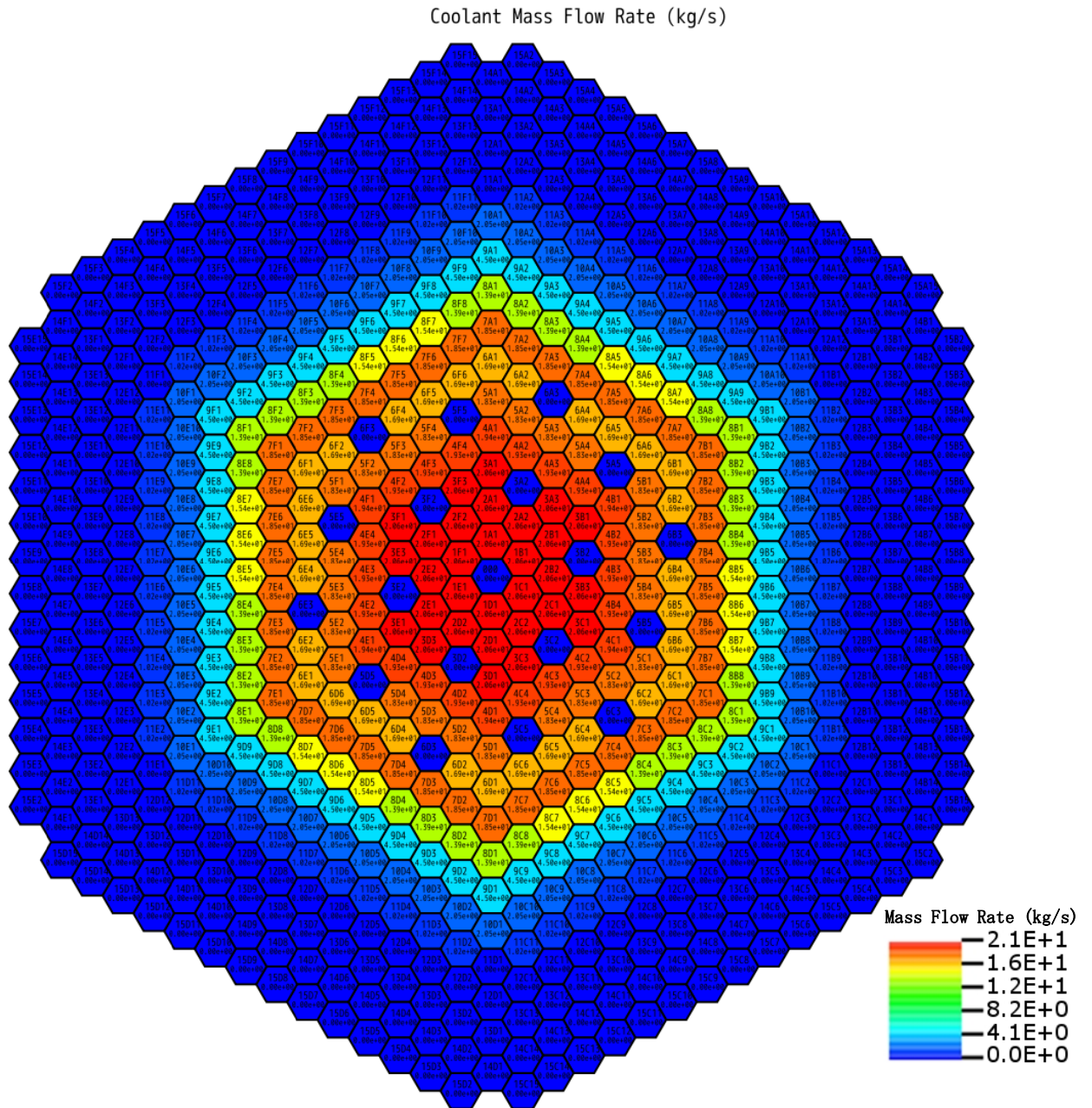


Fig. 5.5 FBR\_flow\_distribution による流量配分

Table 5.3 各流量領域の冷却材流量(kg/s)の比較

|                       | 領域1  | 領域2  | 領域3  | 領域4  | 領域5  | 領域6  | 領域7  | 領域8  | 領域9 | 領域10 | 領域11 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| 設置許可書                 | 21.0 | 20.0 | 19.0 | 17.0 | 16.0 | 19.0 | 16.0 | 14.0 | 4.6 | 2.1  | 1.0  |
| FBR_flow_distribution | 20.6 | 20.6 | 19.4 | 18.3 | 16.9 | 18.5 | 15.4 | 13.9 | 4.5 | 2.1  | 1.0  |

Fig. 5.5 に流量配分計算の結果を示す。これらの値を設置許可書に記載された値と比較したものが Table 5.3 である。このように、良い一致が確認されている。

#### 5. 4 FBR\_flow\_distribution\_with\_vessel

本シナリオでは、炉心部以外の減圧要素（下部プレナムに存在する構造物）を含めた流量配分計算を行う。炉心部は圧力損失の違いに合わせ、複数領域に分割することができる。本解析では、文献 4) から読み取れる全ての流路、減圧要素に対しての模擬を行った。そのため、反射体に関しても流路として考慮し、ガス抜き孔などの微小な流路に対しても考慮している。これらの構造に関しては、2. 2 節で説明したとおりである。

もんじゅの流配機構は炉心と下部プレナム間で複雑な構造を取っている。主要な流路としては、下部プレナムからフローホールを通して、高圧入口プレナムに入り、高圧プレナムに入り、エントランスノズルから炉心部の集合体を通して上部プレナムに流れ出るパスである。次に、高圧プレナムから低圧プレナムに分岐し低圧プレナムから径方向ブランケット、反射体に入り上部プレナムへ至るルートがある。また、微量ではあるが、下部プレナムから受皿に入り受皿から低圧プレナムへ合流するパスも存在する。また、このような構造物に対しては、ガス抜き孔の設置が義務付けられており、高圧入口プレナムから上部プレナムへ、下部プレナムから上部プレナムへ繋がるガス抜き孔が存在し、これらすべてを模擬するものとする。HARP による Vessel 内の流量配分と圧力損失の解析結果を Fig. 5.6 に示す。

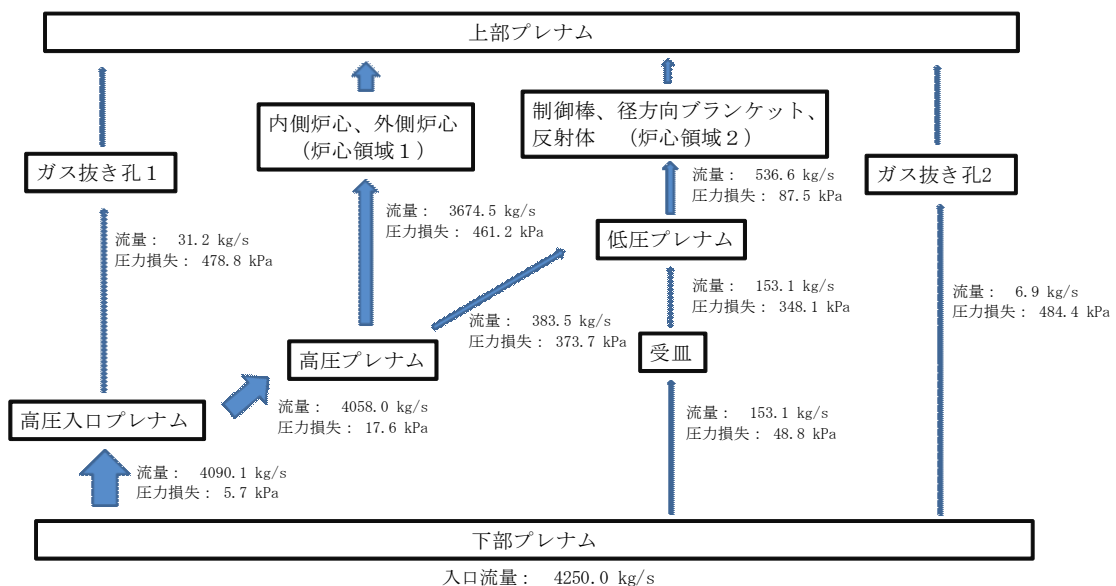


Fig. 5.6 炉内構造における流量配分と圧力損失の分布

炉心領域 1 及び炉心領域 2 の圧力損失差は 370kPa であり、流量配分を固定した FBR\_pressure\_drop による計算値である約 320kPa とほぼ一致している。

以下に、炉内の圧力損失分布と出口温度分布を示す。

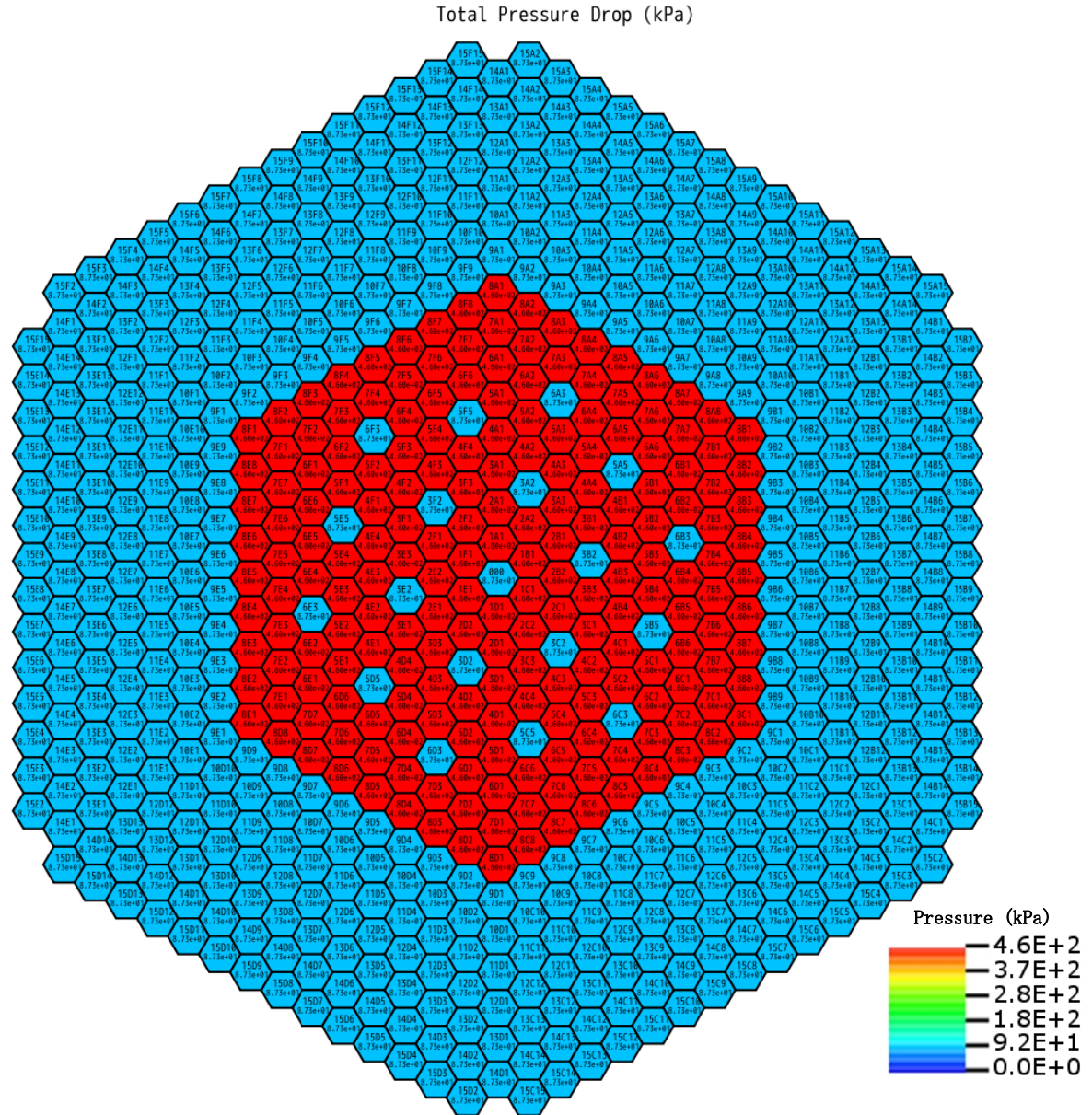


Fig. 5.7 FBR\_flow\_distribution\_with\_vessel による圧力損失

Fig. 5.7 では FBR\_flow\_distribution\_with\_vessel により計算された炉内の圧力損失を示している。Fig. 5.6 に示された Vessel 内の圧力損失に示されたとおり炉内の圧力損失に関しても、炉心領域 1（内側炉心、外側炉心）、炉心領域 2（径方向ブランケット、制御棒、反射体）の 2 領域でそれぞれ同一の圧力損失が算出されている。



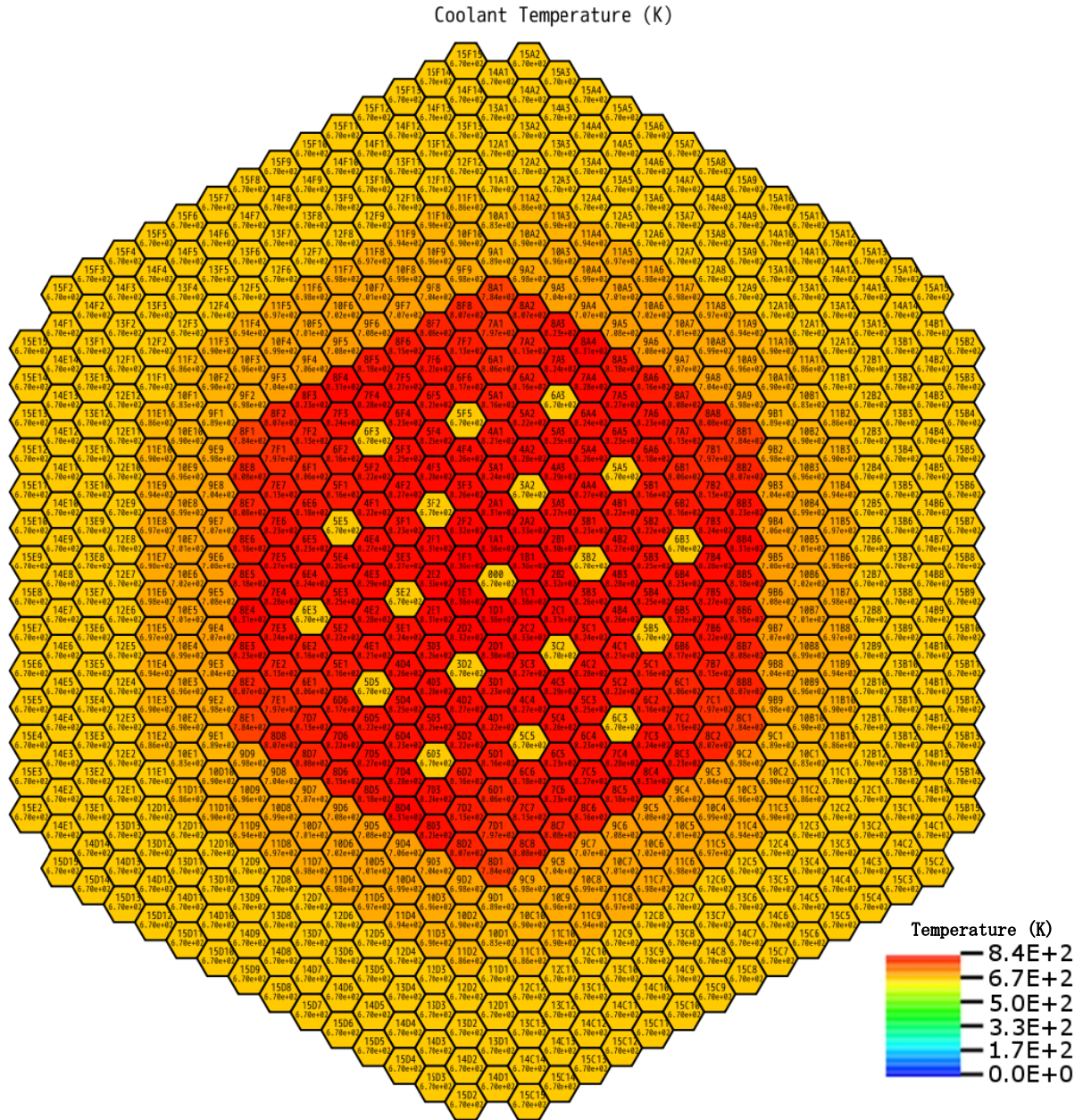


Fig. 5.8 FBR\_flow\_distribution\_with\_vessel による冷却材出口温度

Fig. 5.8 には FBR\_flow\_distribution\_with\_vessel により計算された各集合体の出口冷却材温度を示した。冷却材出口温度では反射体、制御棒集合体に関しても流配領域として考慮したため、入口温度がそのまま出口温度として示されている。現在、ORPHEUS において反射体や制御棒集合体のような核分裂反応が起こらない領域における  $\gamma$  線輸送を考慮した発熱評価機能の開発が行われており、より精度の高い評価結果を得る見込みがある。



## 6. HARP における熱流動データの格納と MARBLE の連成解析プラットフォームとしての考察

本章では、5章の解析例で示されたような HARP の解析結果の格納方法を説明するとともに、MARBLE の連成解析プラットフォームとしての在り方等を検討する。また、HARP におけるデータ管理法は MARBLE 全体に共通した事項である。

### 6. 1 従来のデータ管理法と MARBLE における管理法

複数のプログラムによるデータの共有法には2種類存在する。一つはメモリ上に情報として保持し続ける形式であり、2つ目は外部の記録媒体にデータを吐き出してそのデータを複数のプログラムで共有する方法である。前者を密結合、後者を疎結合と呼ぶことがある。小さな規模の解析においては、メモリ上に値を保持し続けても問題ないが、大規模な解析になると外部の記憶媒体に吐き出すことが必須となる。

従来の核設計コードでは Fortran のバイナリファイルで構成される PDS(Partial Data Set)を作成することによりデータの受け渡しを行っている。これには、プログラム側にデータ構造を考慮して PDS ファイルに情報を書き込むルーチンと PDS ファイルからメモリ上読み込み展開するルーチンが付属している。このため、新規に作成したツールにより PDS ファイルを読み取る場合には、データ構造を熟知したうえで、構造のとおり値を展開するインターフェースを作成する必要がある。また、Fortran のバイナリファイルには、ファイル自身の容量を記録する為にレコードマーカーという領域が設けられている。このレコードマーカーのサイズは、OS・コンパイラ環境により異なる場合があり、このような場合にはデータの読み取りに障害が発生することがある。

一方で、MARBLE においては、データはクラスに格納される。クラスはデータを格納するだけではなくそのデータにアクセスする為のメソッドを持つ。そのため、データ構造を考慮することなくメソッドを通じて値の取得が可能である。このクラスに格納されたデータはプログラム内からの呼び出しが可能であるが、外部媒体に記録する処理を行う際には、従来の Fortran を用いた手法と同様の問題が発生する。もし、クラス内の値を呼び出してファイルに出力すること考えると、PDS ファイルのようなデータ構造を定義する必要がある。この問題を回避する為の技術にシリアライズがある。シリアライズはクラスオブジェクトをビット列に展開し、ファイルへの書き出しを可能とする。また、シリアライズされたオブジェクトはデシリアライズすることによりメモリ上にオブジェクトとして再構成を行うことが出来る。このような、シリアライズの機能を利用すれば、ユーザーはデータ構造を定義する必要が簡便にデータの利用が出来る。このデータ管理に関する概念図を Fig. 6.1 に示す。ORPHEUS では Key-Value ストア型データベースである TokyoCabinet にシリアライズ化されたデータを格納する。

HARP の解析に必要な熱出力分布は MARBLE の実機燃焼解析システムである

ORPHEUS より供給されるものを想定している。(本報告書執筆時点では ORPHEUS に熱出力計算機能が実装されていないため、中性子束と断面積情報を用いて HARP 内で熱出力計算を行っているが、この機能は将来的には ORPHEUS に移植されるべきだと考えられる。) また、HARP では、ORPHEUS により解析登録された熱出力データをデータベースから呼び出しデシリアライズすることにより値を取得している。同様に、HARP で解析した結果はシリアライズされデータベースに登録される。

このように、HARP では MARBLE の設計思想に則り、オブジェクト指向プログラミングにより設計されたクラスによりデータを管理し、シリアライズ・デシリアライズ機能を用いてそれらのオブジェクトを外部記憶媒体に記録可能な形に変換し、データベースにより管理している。なお、HARP の出力は必要なデータをユーザーが直接データベースから取得するものとしている。

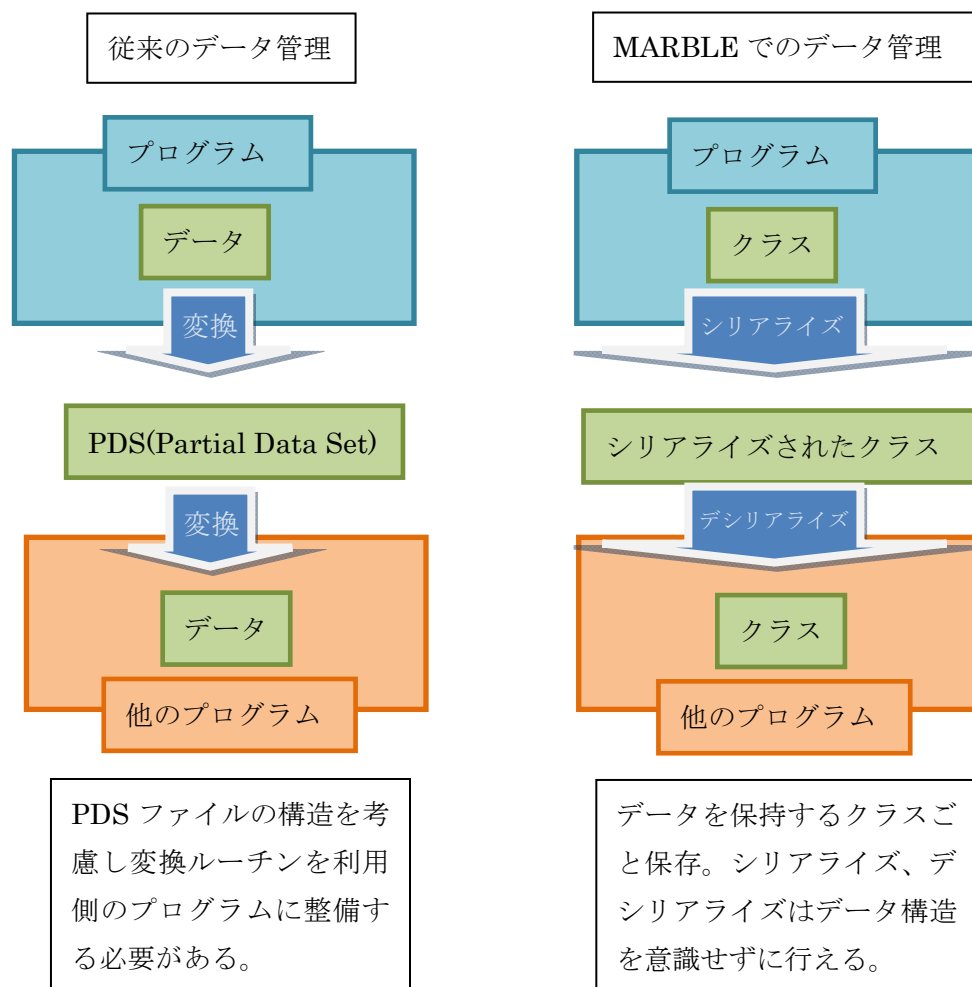


Fig. 6.1 データ管理に関する概念図

## 6. 2 MARBLE におけるデータ構造と HARP による拡張

6. 1 節においては、MARBLE のアーキテクチャとしてのデータ構造及びその管理法を示したが、本節では、具体的なクラスの実装について説明し、それが HARP の導入によりどのように拡張されたかを示す。

MARBLE (特に、ORPHEUS) では、炉心の情報を管理する為に **CoreInfo** というクラスを利用する。この **CoreInfo** クラスには、各領域の組成データや中性子束データ等を持つ。当然のことながら、HARP により拡張された温度条件等に関するデータもこの **CoreInfo** に格納されるべきものであると考えられる。各データの格納法に関しては、暗黙のルールが成立している。組成データを例にすると炉心全体の組成データの格納クラスとして **CoreMaterialInfo** クラスが実装されている。このクラスは各領域の組成データとして **RegionMaterialInfo** を持つ。そのため、HARP による拡張もこのルールに則り行われている。各領域の値はマテリアルや中性子束などそれぞれの項目に対応したメッシュ番号により識別され、多くの場合は、ユーザーが直接メッシュ番号を意識することは難しい。この問題を解決するため、ORPHEUS では **LocationToMeshInterpreter** モジュールが用意されている。このモジュール内に実装された **PositionInfo** を利用すれば、特定集合体の特定の高さ位置等のようにユーザーの理解しやすい指定法により、メッシュ番号を得ることができる。解析結果を含む炉心情報をデータベースに格納する際には、**CoreInfo** クラスを直接シリアル化することをせず、領域毎の情報（組成情報の場合 **RegionMaterialInfo**）がシリアル化される。この炉心データの管理に関する概念図を Fig.6.2 に示す。このような事情があるため HARP では各領域の熱流動解析の結果を格納するクラスの実装までにとどめている。

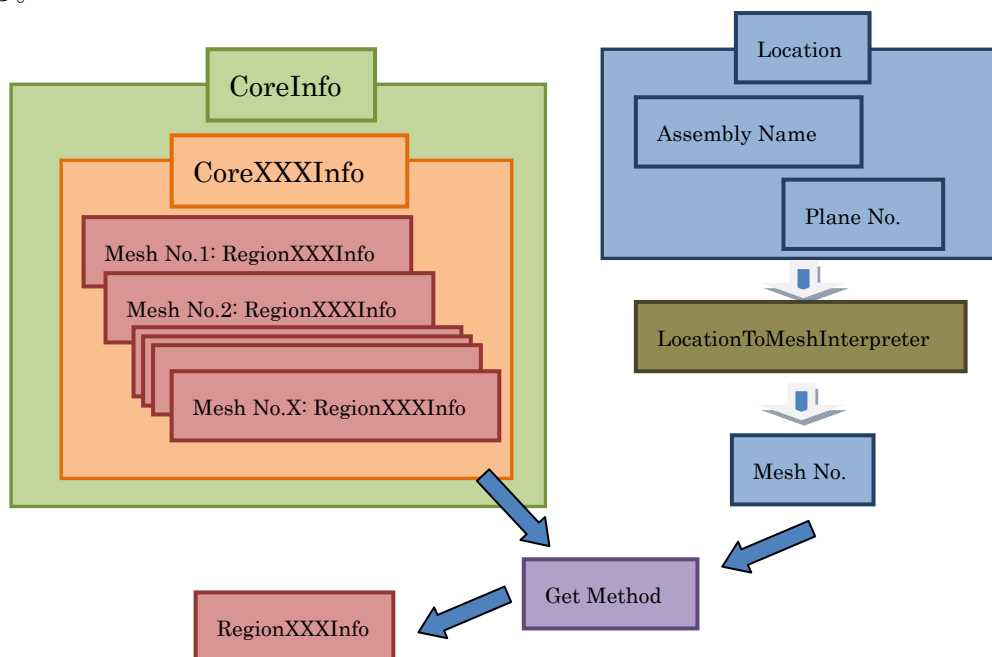


Fig. 6.2 炉心データ管理に関する概念図

具体的に HARP により実装された熱流動解析の結果を格納するクラスの概要を以下に示す。

**PowerRegionInfo**: 熱出力格納クラス

**PressureDropRegionInfo**: 圧力損失格納クラス

**CoolantTemperatureRegionInfo**: 冷却材温度格納クラス

**CoolantMassFlowRateRegionInfo**: 冷却材質量流量格納クラス

**FuelTemperatureRegionInfo**: 燃料温度格納クラス

今回の開発により上記に示されたクラスを実装した。なお、**FuelTemperatureRegionInfo** には、被覆管温度も含まれている。被覆管温度に関しては、内側、中心、平均、外側の温度が登録されている。これは、燃料の種類により着目する温度が異なるためである。酸化物燃料のようにクリープ損傷等が問題とされる場合には被覆管中心の温度、金属燃料のように共晶反応が問題とされる場合には内側の温度、核的なフィードバックとしては平均温度が用いられることが妥当である。

また、今回実装しなかったクラスの他に、将来の核熱結合（核計算へのフィードバック）及び、軽水炉対応の際に必要なと推測される情報としては以下のようなものが挙げられる。

- ・ 冷却材密度
- ・ ボロン濃度（PWR）
- ・ ボイド率（BWR）

なお、これらの格納クラスは HARP の解析結果を出力する際に格納するにとどめてあり、HARP の解析において明示的にこれらの格納クラスを利用したデータ管理までは行っていない。これは、HARP の解析において **numpy** を利用し処理の高速化を図れる部分が存在したためであり、このような処理においては、集合体の入口から出口までの情報が一つの配列に格納されていることが望ましいためである。このような、事情は HARP に限ったことではないと思われ、開発に際しては、ソルバーとシステムを分離したほうがメンテナンスの観点からもよいものと思われる。

### 6. 3 実行速度に関する検討

プラットフォームとしての要求としては、実効速度も重要な要因となる。特に軽水炉設計においては、本コードのような熱流動コードによる解析を核計算とカップリングさせ双方の解析値が収束するまで繰り返し計算を行う。特に、BWR 解析において、二相流解析であるため計算モデルが複雑であり、その負荷は大きいと思われる。また、現状においてはこのような解析を行う際は密結合はメモリの確保の観点から現実的ではなく、疎結合という形で連成を行うのが一般的であると思われる。疎結合による連成解析では外部記憶媒体へのデータの書き出し及び読み込の速度に関しても留意すべきである。CPU のクロック周波数 3GHz 程度の環境において今回の例として示した FBR\_standard モードによるもん

じゅ体系の解析は約6分程度の時間がかかるが、その大半は解析結果のデータベースへの書き出しに要している。詳細は Table 6.1 に示す。この表は、解析工程を4分割し、その実効速度を比較したものである。1ステップ目は入力ファイルの読み込み及び Channel 等の形状に計算要素に関するインスタンスの生成に関する部分である。この部分の速度は無視できる。次に、2ステップ目では、データベースより断面積及び中性子束データをデシリアライズ処理を行いながら取出し、演算を行うことにより熱出力を算出している部分である。この工程では35秒程度かかっている。3ステップ目は HARP による主要な解析を行う部分であり、この工程は約1分20秒程度使われている。4ステップ目はデータベースへの解析結果の書き出しを行っているが4分程度使用している。

Table 6.1 FBR\_standard による各工程の計算時間の比較

| Step No. | Time    | Procedure             |
|----------|---------|-----------------------|
| 1        | 00:00.4 | Read input file       |
| 2        | 00:34.9 | Power Calculation     |
| 3        | 01:17.5 | Hydraulic Calculation |
| 4        | 04:14.5 | Write data to DB      |

このように、データベースへのアクセスに多くの時間を必要としている。PositionInfo を利用した高級な領域の参照によって時間が消費されていることも考えられるが、シリアルイズ、デシリアライズが多く時間を要しているものと推測される。そこで、もし、システム部を C++ で書き換えた際にはどの程度の速度の向上が望めるかについて以下のような調査を行った。詳細は付録 E に示すが、その概要はもんじゅ体系相当のメッシュ数のデータ構造（中性子束を想定し 70 word のサイズの配列を持つ）に対しシリアルイズ及びデシリアライズを行いその速度を比較したものである。また、シリアルイズされたオブジェクトのデータベースへの書き込み及び呼び出しも行っている。結果は Table 6.2 に示すとおりである。

Table 6.2 Python 及び C++ によるシリアルイズの速度の比較

|                 | Python | C++  | Python/C++(Ratio) |
|-----------------|--------|------|-------------------|
| Serialization   | 5.86   | 0.54 | 10.9              |
| Writing DB      | 0.49   | 0.57 | 0.9               |
| Reading DB      | 0.39   | 0.41 | 1.0               |
| Deserialization | 4.44   | 0.65 | 6.8               |

結果として、データベースへの書き込みや読み込みに要する時間は非常に少ないことが分かる。一方で、Python ではシリアルイズ・デシリアライズにかかる時間が大きく、シリア

ライズで C++ の 10 倍、デシリアライズで 7 倍程度の時間が必要となる。もし、頻繁にデータの転送を必要とする連成解析においては、このシリアライズ・デシリアライズに関する時間が実用性を損なう恐れがある。その場合には、システム部を C++ に移植する必要があると推測される。

## 7. まとめ

MARBLE の連成解析用プラットフォームへの拡張に資する為に、MARBLE における熱流動モジュールとして単チャンネル熱流動コード HARP の高速炉版を開発した。本コードは出力係数を評価するのに必要となる温度情報を算出する機能を持つ。さらに、結果の妥当性についてはもんじゅ体系を対象とした解析において確認した。

また、本開発により MARBLE の熱流動計算に関する情報の格納クラスの実装が行われ、MARBLE の連成解析プラットフォームとしての拡張の一例が示された。さらに、データ処理法の中核技術であるシリアライズ・デシリアライズに関する検討も行った。

今後は、軽水炉解析にも対応できるよう開発を行っていく予定である。

## 謝辞

本開発を行うに当たり、次世代原子力システム研究開発部門、炉システム開発計画室の杉野和輝氏、小川隆氏、燃料設計 Gr の永沼正行氏、プラント安全評価 Gr の岡野靖氏、原子力基礎工学研究部門、炉物理研究 Gr の横山賢治氏、熱流動研究 Gr の玉井秀定氏に貴重なご意見を頂きました。この場を借りて謝意を示させていただきます。

参考文献

- 1) 横山賢治、細川広視、千葉豪他、“工学系モデリング言語としての次世代解析システムの開発(III) -プロトタイプ作成による検討(その2)-”、JNC TN9400 2004-022, (2004).
- 2) 横山賢治、巽雅洋、平井康志他、“次世代炉心解析システム MARBLE の開発”, JAEA-Data/Code 2010-030, (2010).
- 3) 横山賢治、巽雅洋、兵頭秀昭他、“高速炉実機燃焼解析システムの高度化”, JAEA-Data/Code 2009-016, (2010).
- 4) 岡芳明、“原子力教科書 原子炉設計”、株式会社 オーム社、(2010).
- 5) 村松寿晴、松本雅彦、平戸康孝、他、“単相多次元コード AQUA による高速原型炉「もんじゅ」炉内熱流動解析(II)”, PNC TN 9410 90-095, (1990).
- 6) 日本原子力学会、“二相流数値解析法の基礎と応用”、日本原子力学会、(1990).
- 7) 日本原子力研究開発機構、“高速増殖炉研究開発センター、原子炉設置許可申請書、(高速増殖炉原型炉もんじゅ原子炉施設の変更)”
- 8) R. N. Kyon, Chem. Eng. Progr. 47, 75 (1951).
- 9) International Nickel Company, “Mechanical and Physical Properties of the Austenites Chromium-Nickel Stainless Steels at Elevated Temperature” (1963).
- 10) Hilbert, R.F., Cantley, D.E., “Evaluation of Material Property Correlations Used in LIFE-II”, GEAP-13967, (1973).
- 11) 高下浩文、樋口真史、富樫信仁、“核設計手法報告書”、JNC TN8410 2000-011、(2000).
- 12) 大洗工学センター、“高速増殖炉技術読本”、PNC TN9100 96-014、(1996).
- 13) 私信、(1985).
- 14) 中井良大、伊藤勝、寺田和道 他、“高速増殖炉の安全解析に用いる計算コードについて”、PNC N241 81-28、(1981).
- 15) 深谷裕司、“EVIRA: FLWR 研究開発支援用インターフェース”, JAEA-Data/Code 2008-011, (2008).



## 付録 A 高速炉炉心設計における熱流動コードの用途について

今回開発を行った HARP の位置づけを確認する為に、高速炉炉心設計における熱流動コードの用途について示す。

高速炉炉心設計における熱流体力設計は Fig. A.1 に示されるような手順で行われる。初めに、プラントの熱出力を決め、炉心の大きさ燃料集合体数、燃料ピン径、冷却材流量（圧力損失）等を決めていく。その際、燃料中心が溶融しないための「燃料ピンの最大の線出力密度」、燃料被覆管の健全性を決めるための「被覆管制限值（照射による累積損傷、高温強度）」、「ホットチャンネル係数」等を適切に決めていくとされる。<sup>12)</sup>

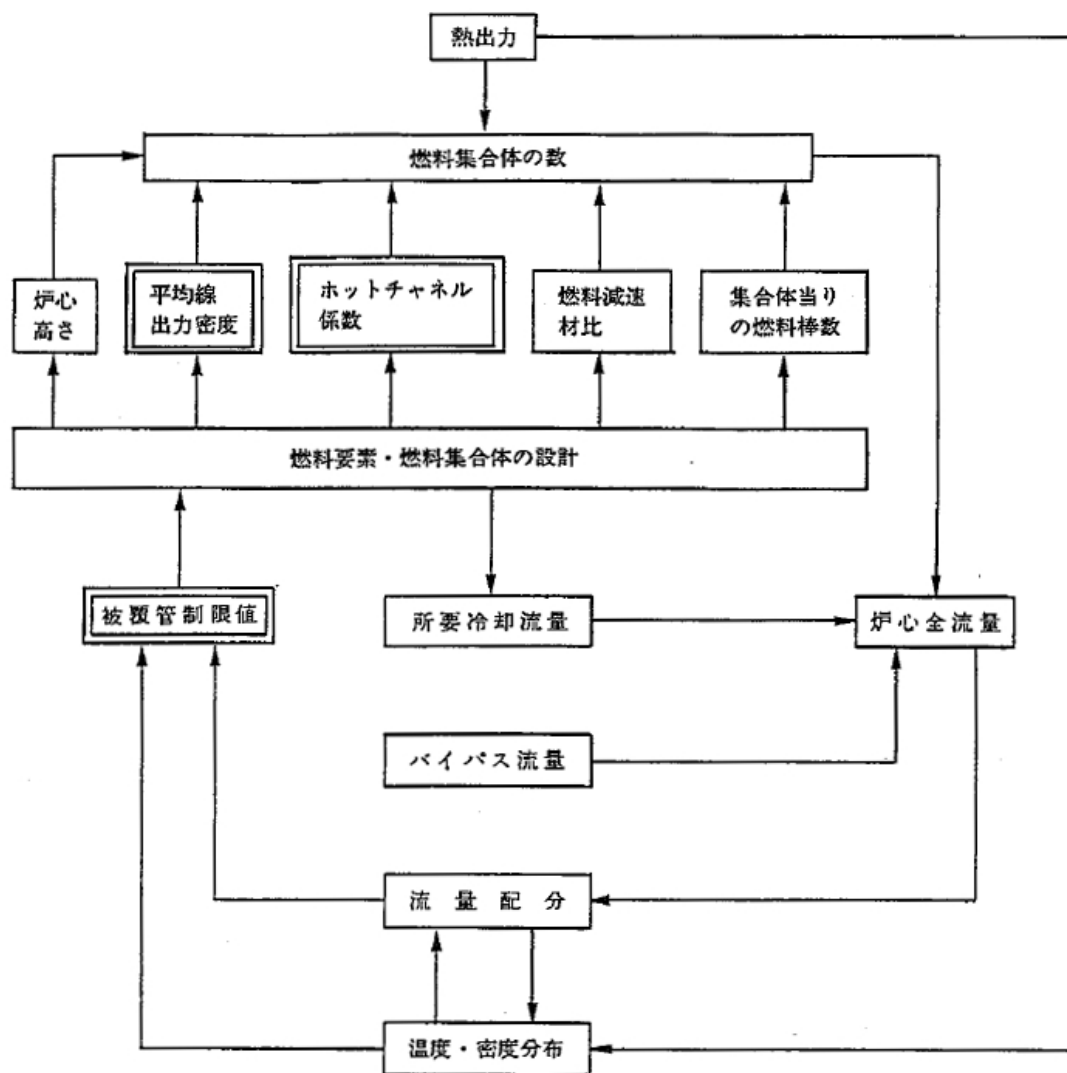


Fig. A.1 高速炉炉心設計における熱流体力設計 <sup>12)</sup>

被覆管温度、燃料温度の詳細な評価の為には、一般的にはサブチャンネル解析と呼ばれる、集合体内部の流路を複数領域に分割した解析手法が用いられる。<sup>13)</sup>このような解析を行うことにより、周辺サブチャンネルにおける大きな流路面積により相対的に中心部の流量割合が減少することによる周辺流れ効果や、サブチャンネル間の冷却材の混合に関する効果であるミキシング効果など、単チャンネル解析では正確に評価できない現象に対し正確な評価が出来る。

Fig. A.1 に示されるように、集合体設計には集合体毎の冷却材流量を決定する流量配分の評価が重要であり、流量配分計算はサブチャンネル解析による被覆管温度、燃料温度の評価と同等に重要な役割を果たす。そして、HARP の高速炉炉心熱流設計の役割は、この流量配分計算である。

この炉内流量配分計算コードの一例としてループ型ナトリウム冷却材高速炉の一次主冷却系配管の破断事故評価の為の過渡解析コードである PIBRA コードのモデルを紹介する。<sup>14)</sup> 炉内熱流動に関しては、Fig. A.2 に示すとおり、過渡解析であることを覗けば、ほぼ、HARP と同様である。一次元(単チャンネル)モデルを用いており、各プレナム部においては圧力、温度が一樣であるとして評価を行っている。集合体の圧力損失に関しては、エントランスノズル部、上下遮蔽体部及びバンドル部での摩擦損失、流体の水頭圧とされ、HARP と同様の評価を行っている。定常時の評価に関しては、HARP と PIBRA は全く同じ評価を与えるものと思われる。

一般的に集合体部のバンドル部の摩擦係数などの減圧要素の特性は、実験により決定され、チャンネル全体の特性すなわち、単チャンネルモデルの特性として評価される。流量配分計算において単チャンネルモデルが用いられるのは、この用途においてこれ以上の高度化が行えないためである。

また、高速炉(もんじゅ)においては、崩壊熱の除去が自然循環により行え、この自然循環による崩壊熱の除去に関する評価が三次元乱流モデルを用いた熱流動コードである AQUA によって行われている。<sup>5)</sup>この評価では炉内を三次元でモデル化しているものの、主要な炉内の減圧要素は HARP の解析で用いたものと同様の、実験値を用いているため、定常状態の解析においては、同様の結果が得られるものと考えられる。

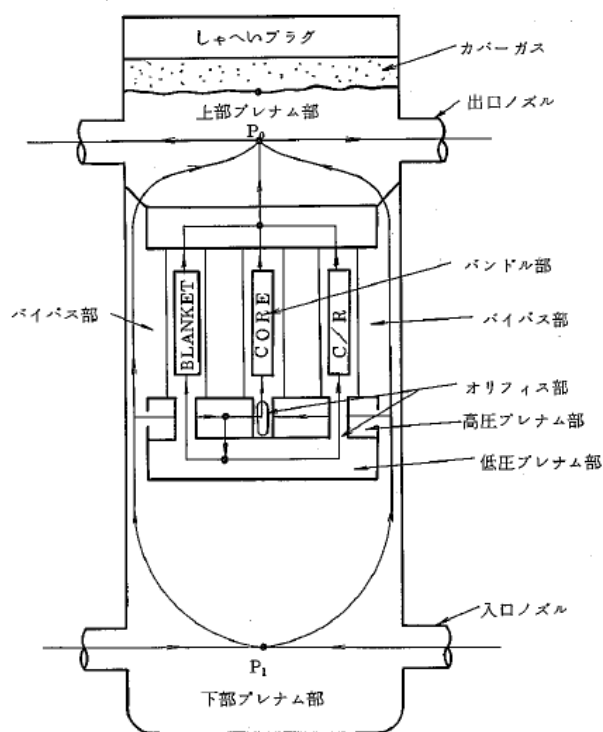


Fig. A.2 PIBRA コードの炉内熱流動モデル <sup>14)</sup>

## 付録 B 入力例

各計算モードに対する入力例を以下に示す。

○FBR\_standard の入力例

## Input for thermal core property

calc\_mode: FBR\_standard

cycle\_number: 0

step\_number: 1

inlet\_temperature: 670.15

mass\_flow\_rate: channel\_type

core\_calculation\_database: ../../data/orpheus/monju/output/monju\_1cyc\_base.out.database

output\_database: ./output/harp\_standard.database

## Input for channel type data

duct\_type\_info:

duct\_type:

top\_ref\_duct\_01:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00282743

wetted\_perimeter: 0.0189506450137

heated\_perimeter: 0.0

node\_number: 8

length: 0.4

bottom\_ref\_duct\_01:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00282743

wetted\_perimeter: 0.0189506450137

heated\_perimeter: 0.0

node\_number: 8

length: 0.4

core\_duct\_01:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00363611052925

wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913

node\_number: 7

length: 0.35

pin\_number : 169

cladding\_outer\_radius: 0.00325

cladding\_inner\_radius: 0.00278

core\_duct\_02:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00363611052925

wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913

```
node_number: 1
length: 0.065
pin_number : 169
cladding_outer_radius: 0.00325
cladding_inner_radius: 0.00278

core_duct_03:
  xs_area: 0.0115730092399
  flow_area: 0.00363611052925
  wetted_perimeter: 4.17081666414
  heated_perimeter: 4.15186601913
  node_number: 2
  length: 0.1
  pin_number : 169
  cladding_outer_radius: 0.00325
  cladding_inner_radius: 0.00278

core_duct_04:
  xs_area: 0.0115730092399
  flow_area: 0.00363611052925
  wetted_perimeter: 4.17081666414
  heated_perimeter: 4.15186601913
  node_number: 3
  length: 0.15
  pin_number : 169
  cladding_outer_radius: 0.00325
  cladding_inner_radius: 0.00278

core_duct_05:
  xs_area: 0.0115730092399
  flow_area: 0.00363611052925
  wetted_perimeter: 4.17081666414
  heated_perimeter: 4.15186601913
  node_number: 3
  length: 0.15
  pin_number : 169
  cladding_outer_radius: 0.00325
  cladding_inner_radius: 0.00278

core_duct_06:
  xs_area: 0.0115730092399
  flow_area: 0.00363611052925
  wetted_perimeter: 4.17081666414
  heated_perimeter: 4.15186601913
  node_number: 3
  length: 0.15
  pin_number : 169
  cladding_outer_radius: 0.00325
  cladding_inner_radius: 0.00278

core_duct_07:
  xs_area: 0.0115730092399
```

flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278

core\_duct\_08:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 2  
 length: 0.1  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278

core\_duct\_09:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 1  
 length: 0.065  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278

core\_duct\_10:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 6  
 length: 0.30  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278

radial\_blanket\_duct\_01:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 7  
 length: 0.35  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053

radial\_blanket\_duct\_02:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.0029479961806  
  wetted\_perimeter: 2.48415840029  
  heated\_perimeter: 1.48785828074  
  node\_number: 1  
  length: 0.065  
  pin\_number : 61  
  cladding\_outer\_radius: 0.0058  
  cladding\_inner\_radius: 0.0053

radial\_blanket\_duct\_03:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.0029479961806  
  wetted\_perimeter: 2.48415840029  
  heated\_perimeter: 1.48785828074  
  node\_number: 2  
  length: 0.1  
  pin\_number : 61  
  cladding\_outer\_radius: 0.0058  
  cladding\_inner\_radius: 0.0053

radial\_blanket\_duct\_04:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.0029479961806  
  wetted\_perimeter: 2.48415840029  
  heated\_perimeter: 1.48785828074  
  node\_number: 3  
  length: 0.15  
  pin\_number : 61  
  cladding\_outer\_radius: 0.0058  
  cladding\_inner\_radius: 0.0053

radial\_blanket\_duct\_05:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.0029479961806  
  wetted\_perimeter: 2.48415840029  
  heated\_perimeter: 1.48785828074  
  node\_number: 3  
  length: 0.15  
  pin\_number : 61  
  cladding\_outer\_radius: 0.0058  
  cladding\_inner\_radius: 0.0053

radial\_blanket\_duct\_06:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.0029479961806  
  wetted\_perimeter: 2.48415840029  
  heated\_perimeter: 1.48785828074  
  node\_number: 3  
  length: 0.15

pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053

radial\_blanket\_duct\_07:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053

radial\_blanket\_duct\_08:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 2  
 length: 0.10  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053

radial\_blanket\_duct\_09:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 1  
 length: 0.065  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053

radial\_blanket\_duct\_10:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 6  
 length: 0.30  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053

channel\_info:

channel\_type:  
 channel\_type\_01:

```

address:
  ["000",
   1A1+,
   2A1+, 2A2+]
except:
  ["000"]
duct:
  0: bottom_ref_duct_01
  1: core_duct_01
  2: core_duct_02
  3: core_duct_03
  4: core_duct_04
  5: core_duct_05
  6: core_duct_06
  7: core_duct_07
  8: core_duct_08
  9: core_duct_09
  10: core_duct_10
  11: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 21

channel_type_02:
address:
  [3A1+, 3A2+, 3A3+]
except:
  [3A2, 3C2, 3E2, 3B2, 3D2, 3F2]
duct:
  0: bottom_ref_duct_01
  1: core_duct_01
  2: core_duct_02
  3: core_duct_03
  4: core_duct_04
  5: core_duct_05
  6: core_duct_06
  7: core_duct_07
  8: core_duct_08
  9: core_duct_09
  10: core_duct_10
  11: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 20

channel_type_03:
address:
  [4A1+, 4A2+, 4A3+, 4A4+]
duct:
  0: bottom_ref_duct_01
  1: core_duct_01
  2: core_duct_02
  3: core_duct_03
  4: core_duct_04
  5: core_duct_05
  6: core_duct_06

```



```

7: core_duct_07
8: core_duct_08
9: core_duct_09
10: core_duct_10
11: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 19

```

```

channel_type_04:
address:
  [5A1+, 5A2+, 5A3+, 5A4+, 5A5+]
except:
  [5A5, 5C5, 5E5, 5B5, 5D5, 5F5]
duct:
  0: bottom_ref_duct_01
  1: core_duct_01
  2: core_duct_02
  3: core_duct_03
  4: core_duct_04
  5: core_duct_05
  6: core_duct_06
  7: core_duct_07
  8: core_duct_08
  9: core_duct_09
  10: core_duct_10
  11: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 17

```

```

channel_type_05:
address:
  [6A1+, 6A2+, 6A3+, 6A4+, 6A5+, 6A6+]
except:
  [6A3+]
duct:
  0: bottom_ref_duct_01
  1: core_duct_01
  2: core_duct_02
  3: core_duct_03
  4: core_duct_04
  5: core_duct_05
  6: core_duct_06
  7: core_duct_07
  8: core_duct_08
  9: core_duct_09
  10: core_duct_10
  11: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 16

```

```

channel_type_06:
address:
  [7A1+, 7A2+, 7A3+, 7A4+, 7A5+, 7A6+, 7A7+]
duct:
  0: bottom_ref_duct_01

```

```

1: core_duct_01
2: core_duct_02
3: core_duct_03
4: core_duct_04
5: core_duct_05
6: core_duct_06
7: core_duct_07
8: core_duct_08
9: core_duct_09
10: core_duct_10
11: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 19

```

```

channel_type_07:
address:
  [8A5+, 8A6+, 8A7+]
duct:
  0: bottom_ref_duct_01
  1: core_duct_01
  2: core_duct_02
  3: core_duct_03
  4: core_duct_04
  5: core_duct_05
  6: core_duct_06
  7: core_duct_07
  8: core_duct_08
  9: core_duct_09
  10: core_duct_10
  11: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 16

```

```

channel_type_08:
address:
  [8A1+, 8A2+, 8A3+, 8A4+, 8A8+]
duct:
  0: bottom_ref_duct_01
  1: core_duct_01
  2: core_duct_02
  3: core_duct_03
  4: core_duct_04
  5: core_duct_05
  6: core_duct_06
  7: core_duct_07
  8: core_duct_08
  9: core_duct_09
  10: core_duct_10
  11: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 14

```

```

channel_type_09:
address:
  [9A1+, 9A2+, 9A3+, 9A4+, 9A5+, 9A6+, 9A7+, 9A8+, 9A9+]

```

```

duct:
  0: bottom_ref_duct_01
  1: radial_blanket_duct_01
  2: radial_blanket_duct_02
  3: radial_blanket_duct_03
  4: radial_blanket_duct_04
  5: radial_blanket_duct_05
  6: radial_blanket_duct_06
  7: radial_blanket_duct_07
  8: radial_blanket_duct_08
  9: radial_blanket_duct_09
  10: radial_blanket_duct_10
  11: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 4.6

```

```

channel_type_10:
  address:
    [10A1+, 10A2+, 10A3+, 10A4+, 10A5+, 10A6+,
     10A7+, 10A8+, 10A9+, 10A10+]
  duct:
    0: bottom_ref_duct_01
    1: radial_blanket_duct_01
    2: radial_blanket_duct_02
    3: radial_blanket_duct_03
    4: radial_blanket_duct_04
    5: radial_blanket_duct_05
    6: radial_blanket_duct_06
    7: radial_blanket_duct_07
    8: radial_blanket_duct_08
    9: radial_blanket_duct_09
    10: radial_blanket_duct_10
    11: top_ref_duct_01
  mass_flow_rate: 2.1

```

```

channel_type_11:
  address:
    [11A1+, 11A2+, 11A3+, 11A4+, 11A5+, 11A6+, 11A7+,
     11A8+, 11A9+, 11A10+, 11A11+]
  except:
    [11A1+]
  duct:
    0: bottom_ref_duct_01
    1: radial_blanket_duct_01
    2: radial_blanket_duct_02
    3: radial_blanket_duct_03
    4: radial_blanket_duct_04
    5: radial_blanket_duct_05
    6: radial_blanket_duct_06
    7: radial_blanket_duct_07
    8: radial_blanket_duct_08
    9: radial_blanket_duct_09
    10: radial_blanket_duct_10

```

11: top\_ref\_duct\_01  
mass\_flow\_rate: 1.0

○FBR\_pressure\_drop の入力例

## Input for thermal core property

calc\_mode: FBR\_pressure\_drop

cycle\_number: 0

step\_number: 1

inlet\_temperature: 670.15

mass\_flow\_rate: channel\_type

core\_calculation\_database: ../../data/orpheus/monju/output/monju\_1cyc\_base.out.database

output\_database: ./output/harp\_pressure\_drop.database

## Input for channel type data

duct\_type\_info:

duct\_type:

top\_ref\_duct\_01:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00363611052925

wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913

node\_number: 8

length: 1.161

pin\_number : 169

cladding\_outer\_radius: 0.00325

cladding\_inner\_radius: 0.00278

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel

friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

top\_ref\_duct\_02:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00363611052925

wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913

node\_number: 8

length: 1.161

pin\_number : 169

cladding\_outer\_radius: 0.00325

cladding\_inner\_radius: 0.00278

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel

friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

bottom\_ref\_duct1\_01:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00282743

wetted\_perimeter: 0.0189506450137

heated\_perimeter: 0.0

node\_number: 4

length: 0.2

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel

resistance: pressure\_drop\_inner\_core1\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_02:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.00282743  
  wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
  heated\_perimeter: 0.0  
  node\_number: 4  
  length: 0.2  
  resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
  resistance: pressure\_drop\_inner\_core2\_nozzle  
  resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_03:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.00282743  
  wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
  heated\_perimeter: 0.0  
  node\_number: 4  
  length: 0.2  
  resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
  resistance: pressure\_drop\_inner\_core3\_nozzle  
  resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_04:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.00282743  
  wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
  heated\_perimeter: 0.0  
  node\_number: 4  
  length: 0.2  
  resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
  resistance: pressure\_drop\_inner\_core4\_nozzle  
  resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_05:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.00282743  
  wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
  heated\_perimeter: 0.0  
  node\_number: 4  
  length: 0.2  
  resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
  resistance: pressure\_drop\_inner\_core5\_nozzle  
  resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_06:  
  xs\_area: 0.0115730092399  
  flow\_area: 0.00282743  
  wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
  heated\_perimeter: 0.0

node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_outer\_core1\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_07:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00282743  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_outer\_core2\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_08:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00282743  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_outer\_core3\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_09:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.001963  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_blanket1\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_10:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.001963  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_blanket2\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_11:  
xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_blanket3\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_01:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_core\_fuel\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_02:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_blanket\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_03:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_reflector\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

core\_duct\_01:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 7  
 length: 0.35  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_02:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 1  
length: 0.065  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_03:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 2  
length: 0.1  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_04:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 3  
length: 0.15  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_05:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 3  
length: 0.15  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278



resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_06:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 3  
length: 0.15  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_07:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 3  
length: 0.15  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_08:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 2  
length: 0.1  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_09:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 1  
length: 0.065  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_10:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 6  
length: 0.30  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

radial\_blanket\_duct\_01:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.0029479961806  
wetted\_perimeter: 2.48415840029  
heated\_perimeter: 1.48785828074  
node\_number: 7  
length: 0.35  
pin\_number : 61  
cladding\_outer\_radius: 0.0058  
cladding\_inner\_radius: 0.0053  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_02:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.0029479961806  
wetted\_perimeter: 2.48415840029  
heated\_perimeter: 1.48785828074  
node\_number: 1  
length: 0.065  
pin\_number : 61  
cladding\_outer\_radius: 0.0058  
cladding\_inner\_radius: 0.0053  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_03:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.0029479961806  
wetted\_perimeter: 2.48415840029  
heated\_perimeter: 1.48785828074  
node\_number: 2  
length: 0.1  
pin\_number : 61  
cladding\_outer\_radius: 0.0058  
cladding\_inner\_radius: 0.0053

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_04:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.0029479961806  
wetted\_perimeter: 2.48415840029  
heated\_perimeter: 1.48785828074  
node\_number: 3  
length: 0.15  
pin\_number : 61  
cladding\_outer\_radius: 0.0058  
cladding\_inner\_radius: 0.0053  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_05:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.0029479961806  
wetted\_perimeter: 2.48415840029  
heated\_perimeter: 1.48785828074  
node\_number: 3  
length: 0.15  
pin\_number : 61  
cladding\_outer\_radius: 0.0058  
cladding\_inner\_radius: 0.0053  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_06:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.0029479961806  
wetted\_perimeter: 2.48415840029  
heated\_perimeter: 1.48785828074  
node\_number: 3  
length: 0.15  
pin\_number : 61  
cladding\_outer\_radius: 0.0058  
cladding\_inner\_radius: 0.0053  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_07:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.0029479961806  
wetted\_perimeter: 2.48415840029  
heated\_perimeter: 1.48785828074  
node\_number: 3  
length: 0.15  
pin\_number : 61  
cladding\_outer\_radius: 0.0058  
cladding\_inner\_radius: 0.0053

```

resistance_model_version: MonjuResistanceModel
friction_factor: friction_factor_blanket_bundle

```

```

radial_blanket_duct_08:
  xs_area: 0.0115730092399
  flow_area: 0.0029479961806
  wetted_perimeter: 2.48415840029
  heated_perimeter: 1.48785828074
  node_number: 2
  length: 0.10
  pin_number : 61
  cladding_outer_radius: 0.0058
  cladding_inner_radius: 0.0053
  resistance_model_version: MonjuResistanceModel
  friction_factor: friction_factor_blanket_bundle

```

```

radial_blanket_duct_09:
  xs_area: 0.0115730092399
  flow_area: 0.0029479961806
  wetted_perimeter: 2.48415840029
  heated_perimeter: 1.48785828074
  node_number: 1
  length: 0.065
  pin_number : 61
  cladding_outer_radius: 0.0058
  cladding_inner_radius: 0.0053
  resistance_model_version: MonjuResistanceModel
  friction_factor: friction_factor_blanket_bundle

```

```

radial_blanket_duct_10:
  xs_area: 0.0115730092399
  flow_area: 0.0029479961806
  wetted_perimeter: 2.48415840029
  heated_perimeter: 1.48785828074
  node_number: 6
  length: 0.30
  pin_number : 61
  cladding_outer_radius: 0.0058
  cladding_inner_radius: 0.0053
  resistance_model_version: MonjuResistanceModel
  friction_factor: friction_factor_blanket_bundle

```

```

channel_info:

```

```

  channel_type:
    channel_type_01:
      address:
        ["000",
         1A1+,
         2A1+, 2A2+]
      except:
        ["000"]

```

```

duct:
  0: bottom_ref_duct1_01
  1: bottom_ref_duct2_01
  2: core_duct_01
  3: core_duct_02
  4: core_duct_03
  5: core_duct_04
  6: core_duct_05
  7: core_duct_06
  8: core_duct_07
  9: core_duct_08
  10: core_duct_09
  11: core_duct_10
  12: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 21

```

```

channel_type_02:
  address:
    [3A1+, 3A2+, 3A3+]
  except:
    [3A2, 3C2, 3E2, 3B2, 3D2, 3F2]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_02
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08
    10: core_duct_09
    11: core_duct_10
    12: top_ref_duct_01
  mass_flow_rate: 20

```

```

channel_type_03:
  address:
    [4A1+, 4A2+, 4A3+, 4A4+]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_03
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08
    10: core_duct_09

```

```

    11: core_duct_10
    12: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 19

```

```

channel_type_04:
address:
    [5A1+, 5A2+, 5A3+, 5A4+, 5A5+]
except:
    [5A5, 5C5, 5E5, 5B5, 5D5, 5F5]
duct:
    0: bottom_ref_duct1_04
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08
    10: core_duct_09
    11: core_duct_10
    12: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 17

```

```

channel_type_05:
address:
    [6A1+, 6A2+, 6A3+, 6A4+, 6A5+, 6A6+]
except:
    [6A3+]
duct:
    0: bottom_ref_duct1_05
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08
    10: core_duct_09
    11: core_duct_10
    12: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 16

```

```

channel_type_06:
address:
    [7A1+, 7A2+, 7A3+, 7A4+, 7A5+, 7A6+, 7A7+]
duct:
    0: bottom_ref_duct1_06
    1: bottom_ref_duct2_01

```

```

2: core_duct_01
3: core_duct_02
4: core_duct_03
5: core_duct_04
6: core_duct_05
7: core_duct_06
8: core_duct_07
9: core_duct_08
10: core_duct_09
11: core_duct_10
12: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 19

```

```

channel_type_07:
address:
  [8A5+, 8A6+, 8A7+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_07
  1: bottom_ref_duct2_01
  2: core_duct_01
  3: core_duct_02
  4: core_duct_03
  5: core_duct_04
  6: core_duct_05
  7: core_duct_06
  8: core_duct_07
  9: core_duct_08
  10: core_duct_09
  11: core_duct_10
  12: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 16

```

```

channel_type_08:
address:
  [8A1+, 8A2+, 8A3+, 8A4+, 8A8+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_08
  1: bottom_ref_duct2_01
  2: core_duct_01
  3: core_duct_02
  4: core_duct_03
  5: core_duct_04
  6: core_duct_05
  7: core_duct_06
  8: core_duct_07
  9: core_duct_08
  10: core_duct_09
  11: core_duct_10
  12: top_ref_duct_01
mass_flow_rate: 14

```

```

channel_type_09:

```

```

address:
  [9A1+, 9A2+, 9A3+, 9A4+, 9A5+, 9A6+, 9A7+, 9A8+, 9A9+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_09
  1: bottom_ref_duct2_02
  2: radial_blanket_duct_01
  3: radial_blanket_duct_02
  4: radial_blanket_duct_03
  5: radial_blanket_duct_04
  6: radial_blanket_duct_05
  7: radial_blanket_duct_06
  8: radial_blanket_duct_07
  9: radial_blanket_duct_08
  10: radial_blanket_duct_09
  11: radial_blanket_duct_10
  12: top_ref_duct_02
mass_flow_rate: 4.6

```

```

channel_type_10:
address:
  [10A1+, 10A2+, 10A3+, 10A4+, 10A5+, 10A6+,
   10A7+, 10A8+, 10A9+, 10A10+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_10
  1: bottom_ref_duct2_02
  2: radial_blanket_duct_01
  3: radial_blanket_duct_02
  4: radial_blanket_duct_03
  5: radial_blanket_duct_04
  6: radial_blanket_duct_05
  7: radial_blanket_duct_06
  8: radial_blanket_duct_07
  9: radial_blanket_duct_08
  10: radial_blanket_duct_09
  11: radial_blanket_duct_10
  12: top_ref_duct_02
mass_flow_rate: 2.1

```

```

channel_type_11:
address:
  [11A1+, 11A2+, 11A3+, 11A4+, 11A5+, 11A6+, 11A7+,
   11A8+, 11A9+, 11A10+, 11A11+]
except:
  [11A1+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_11
  1: bottom_ref_duct2_02
  2: radial_blanket_duct_01
  3: radial_blanket_duct_02
  4: radial_blanket_duct_03
  5: radial_blanket_duct_04
  6: radial_blanket_duct_05

```



```

7: radial_blanket_duct_06
8: radial_blanket_duct_07
9: radial_blanket_duct_08
10: radial_blanket_duct_09
11: radial_blanket_duct_10
12: top_ref_duct_02
mass_flow_rate: 1.0

```

○FBR\_flow\_distribution の入力例

## Input for thermal core property

calc\_mode: FBR\_flow\_distribution

cycle\_number: 0

step\_number: 1

inlet\_temperature: 670.15

mass\_flow\_rate: 3926.4

core\_calculation\_database: ../../data/orpheus/monju/output/monju\_1cyc\_base.out.databa  
se

output\_database: ./output/harp\_flow\_distribution.database

## Input for channel type data

duct\_type\_info:

duct\_type:

top\_ref\_duct\_01:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00363611052925

wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913

node\_number: 8

length: 1.161

pin\_number : 169

cladding\_outer\_radius: 0.00325

cladding\_inner\_radius: 0.00278

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel

friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

top\_ref\_duct\_02:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00363611052925

wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913

node\_number: 8

length: 1.161

pin\_number : 169

cladding\_outer\_radius: 0.00325

cladding\_inner\_radius: 0.00278

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel

friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

bottom\_ref\_duct1\_01:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00282743  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_inner\_core1\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_02:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00282743  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_inner\_core2\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_03:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00282743  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_inner\_core3\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_04:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00282743  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_inner\_core4\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_05:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00282743  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_inner\_core5\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_06:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_outer\_core1\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_07:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_outer\_core2\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_08:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_outer\_core3\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_09:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_blanket1\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_10:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_blanket2\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_11:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_blanket3\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_01:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_core\_fuel\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_02:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_blanket\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_03:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_reflector\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

core\_duct\_01:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 7  
length: 0.35  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_02:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 1  
length: 0.065  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_03:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 2  
length: 0.1  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_04:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414  
heated\_perimeter: 4.15186601913  
node\_number: 3  
length: 0.15  
pin\_number : 169  
cladding\_outer\_radius: 0.00325  
cladding\_inner\_radius: 0.00278  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_05:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00363611052925  
wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_06:  
   xs\_area: 0.0115730092399  
   flow\_area: 0.00363611052925  
   wetted\_perimeter: 4.17081666414  
   heated\_perimeter: 4.15186601913  
   node\_number: 3  
   length: 0.15  
   pin\_number : 169  
   cladding\_outer\_radius: 0.00325  
   cladding\_inner\_radius: 0.00278  
   resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
   friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_07:  
   xs\_area: 0.0115730092399  
   flow\_area: 0.00363611052925  
   wetted\_perimeter: 4.17081666414  
   heated\_perimeter: 4.15186601913  
   node\_number: 3  
   length: 0.15  
   pin\_number : 169  
   cladding\_outer\_radius: 0.00325  
   cladding\_inner\_radius: 0.00278  
   resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
   friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_08:  
   xs\_area: 0.0115730092399  
   flow\_area: 0.00363611052925  
   wetted\_perimeter: 4.17081666414  
   heated\_perimeter: 4.15186601913  
   node\_number: 2  
   length: 0.1  
   pin\_number : 169  
   cladding\_outer\_radius: 0.00325  
   cladding\_inner\_radius: 0.00278  
   resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
   friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_09:  
   xs\_area: 0.0115730092399  
   flow\_area: 0.00363611052925  
   wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 1  
 length: 0.065  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_10:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 6  
 length: 0.30  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

radial\_blanket\_duct\_01:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 7  
 length: 0.35  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_02:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 1  
 length: 0.065  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_03:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029

heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 2  
 length: 0.1  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_04:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_05:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_06:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_07:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029



heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_08:  
   xs\_area: 0.0115730092399  
   flow\_area: 0.0029479961806  
   wetted\_perimeter: 2.48415840029  
   heated\_perimeter: 1.48785828074  
   node\_number: 2  
   length: 0.10  
   pin\_number : 61  
   cladding\_outer\_radius: 0.0058  
   cladding\_inner\_radius: 0.0053  
   resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
   friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_09:  
   xs\_area: 0.0115730092399  
   flow\_area: 0.0029479961806  
   wetted\_perimeter: 2.48415840029  
   heated\_perimeter: 1.48785828074  
   node\_number: 1  
   length: 0.065  
   pin\_number : 61  
   cladding\_outer\_radius: 0.0058  
   cladding\_inner\_radius: 0.0053  
   resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
   friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_10:  
   xs\_area: 0.0115730092399  
   flow\_area: 0.0029479961806  
   wetted\_perimeter: 2.48415840029  
   heated\_perimeter: 1.48785828074  
   node\_number: 6  
   length: 0.30  
   pin\_number : 61  
   cladding\_outer\_radius: 0.0058  
   cladding\_inner\_radius: 0.0053  
   resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
   friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

channel\_info:

channel\_type:  
   channel\_type\_01:

```

address:
  ["000",
   1A1+,
   2A1+, 2A2+]
except:
  ["000"]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_01
  1: bottom_ref_duct2_01
  2: core_duct_01
  3: core_duct_02
  4: core_duct_03
  5: core_duct_04
  6: core_duct_05
  7: core_duct_06
  8: core_duct_07
  9: core_duct_08
  10: core_duct_09
  11: core_duct_10
  12: top_ref_duct_01
bias_pressure_drop: 0.0

channel_type_02:
address:
  [3A1+, 3A2+, 3A3+]
except:
  [3A2, 3C2, 3E2, 3B2, 3D2, 3F2]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_02
  1: bottom_ref_duct2_01
  2: core_duct_01
  3: core_duct_02
  4: core_duct_03
  5: core_duct_04
  6: core_duct_05
  7: core_duct_06
  8: core_duct_07
  9: core_duct_08
  10: core_duct_09
  11: core_duct_10
  12: top_ref_duct_01
bias_pressure_drop: 0.0

channel_type_03:
address:
  [4A1+, 4A2+, 4A3+, 4A4+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_03
  1: bottom_ref_duct2_01
  2: core_duct_01
  3: core_duct_02
  4: core_duct_03

```

```

5: core_duct_04
6: core_duct_05
7: core_duct_06
8: core_duct_07
9: core_duct_08
10: core_duct_09
11: core_duct_10
12: top_ref_duct_01
bias_pressure_drop: 0.0

```

```

channel_type_04:
  address:
    [5A1+, 5A2+, 5A3+, 5A4+, 5A5+]
  except:
    [5A5, 5C5, 5E5, 5B5, 5D5, 5F5]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_04
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08
    10: core_duct_09
    11: core_duct_10
    12: top_ref_duct_01
  bias_pressure_drop: 0.0

```

```

channel_type_05:
  address:
    [6A1+, 6A2+, 6A3+, 6A4+, 6A5+, 6A6+]
  except:
    [6A3+]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_05
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08
    10: core_duct_09
    11: core_duct_10
    12: top_ref_duct_01
  bias_pressure_drop: 0.0

```

```

channel_type_06:
  address:
    [7A1+, 7A2+, 7A3+, 7A4+, 7A5+, 7A6+, 7A7+]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_06
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08
    10: core_duct_09
    11: core_duct_10
    12: top_ref_duct_01
  bias_pressure_drop: 0.0

```

```

channel_type_07:
  address:
    [8A5+, 8A6+, 8A7+]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_07
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08
    10: core_duct_09
    11: core_duct_10
    12: top_ref_duct_01
  bias_pressure_drop: 0.0

```

```

channel_type_08:
  address:
    [8A1+, 8A2+, 8A3+, 8A4+, 8A8+]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_08
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08

```

```

10: core_duct_09
11: core_duct_10
12: top_ref_duct_01
bias_pressure_drop: 0.0

```

```

channel_type_09:
address:
  [9A1+, 9A2+, 9A3+, 9A4+, 9A5+, 9A6+, 9A7+, 9A8+, 9A9+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_09
  1: bottom_ref_duct2_02
  2: radial_blanket_duct_01
  3: radial_blanket_duct_02
  4: radial_blanket_duct_03
  5: radial_blanket_duct_04
  6: radial_blanket_duct_05
  7: radial_blanket_duct_06
  8: radial_blanket_duct_07
  9: radial_blanket_duct_08
  10: radial_blanket_duct_09
  11: radial_blanket_duct_10
  12: top_ref_duct_02
bias_pressure_drop: 320E+3

```

```

channel_type_10:
address:
  [10A1+, 10A2+, 10A3+, 10A4+, 10A5+, 10A6+,
  10A7+, 10A8+, 10A9+, 10A10+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_10
  1: bottom_ref_duct2_02
  2: radial_blanket_duct_01
  3: radial_blanket_duct_02
  4: radial_blanket_duct_03
  5: radial_blanket_duct_04
  6: radial_blanket_duct_05
  7: radial_blanket_duct_06
  8: radial_blanket_duct_07
  9: radial_blanket_duct_08
  10: radial_blanket_duct_09
  11: radial_blanket_duct_10
  12: top_ref_duct_02
bias_pressure_drop: 320E+3

```

```

channel_type_11:
address:
  [11A1+, 11A2+, 11A3+, 11A4+, 11A5+, 11A6+, 11A7+,
  11A8+, 11A9+, 11A10+, 11A11+]
except:
  [11A1+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_11

```

```

1: bottom_ref_duct2_02
2: radial_blanket_duct_01
3: radial_blanket_duct_02
4: radial_blanket_duct_03
5: radial_blanket_duct_04
6: radial_blanket_duct_05
7: radial_blanket_duct_06
8: radial_blanket_duct_07
9: radial_blanket_duct_08
10: radial_blanket_duct_09
11: radial_blanket_duct_10
12: top_ref_duct_02
bias_pressure_drop: 320E+3

```

○FBR\_flow\_distribution\_with\_vessel の入力例

## Input for thermal core property

calc\_mode: FBR\_flow\_distribution\_with\_vessel

cycle\_number: 0

step\_number: 1

inlet\_temperature: 670.15

mass\_flow\_rate: 4250.0

core\_calculation\_database: ../../data/orpheus/monju/output/monju\_1cyc\_base.out.database

output\_database: ./output/harp\_flow\_distribution\_with\_vessel.database

## Input for channel type data

duct\_type\_info:

duct\_type:

top\_ref\_duct\_01:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00363611052925

wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913

node\_number: 8

length: 1.161

pin\_number : 169

cladding\_outer\_radius: 0.00325

cladding\_inner\_radius: 0.00278

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel

friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

top\_ref\_duct\_02:

xs\_area: 0.0115730092399

flow\_area: 0.00363611052925

wetted\_perimeter: 4.17081666414

heated\_perimeter: 4.15186601913

node\_number: 8

length: 1.161

pin\_number : 169

cladding\_outer\_radius: 0.00325

cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

top\_ref\_duct\_03:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 1.963E-3  
 wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 8  
 length: 1.161

bottom\_ref\_duct1\_01:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_inner\_core1\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_02:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_inner\_core2\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_03:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_inner\_core3\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_04:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2

resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_inner\_core4\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_05:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_inner\_core5\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_06:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_outer\_core1\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_07:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_outer\_core2\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_08:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00282743  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_outer\_core3\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_09:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137



heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_blanket1\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_10:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_blanket2\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_11:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.001963  
 wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_blanket3\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_fcr:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 1.963E-3  
 wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_fcr\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_ccr:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 1.963E-3  
 wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_ccr\_nozzle  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_bcr:

xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 1.963E-3  
wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_bcr\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct1\_reflector:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 1.963E-3  
wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_reflector\_nozzle  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_01:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.00282743  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_core\_fuel\_assembly\_part  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_02:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.001963  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_blanket\_assembly\_part  
resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_03:  
xs\_area: 0.0115730092399  
flow\_area: 0.001963  
wetted\_perimeter: 0.0189506450137  
heated\_perimeter: 0.0  
node\_number: 4  
length: 0.2  
resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
resistance: pressure\_drop\_reflector\_assembly\_part

resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_fcr:

xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 1.963E-3  
 wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_fcr\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_ccr:

xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 1.963E-3  
 wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_ccr\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_bcr:

xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 1.963E-3  
 wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_bcr\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

bottom\_ref\_duct2\_reflector:

xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 1.963E-3  
 wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 4  
 length: 0.2  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 resistance: pressure\_drop\_reflector\_assembly\_part  
 resistance\_offset: 0

core\_duct\_01:

xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 7

length: 0.35  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_02:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 1  
 length: 0.065  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_03:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 2  
 length: 0.1  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_04:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_05:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 3

length: 0.15  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_06:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_07:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_08:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 2  
 length: 0.1  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_09:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 1

length: 0.065  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

core\_duct\_10:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.00363611052925  
 wetted\_perimeter: 4.17081666414  
 heated\_perimeter: 4.15186601913  
 node\_number: 6  
 length: 0.30  
 pin\_number : 169  
 cladding\_outer\_radius: 0.00325  
 cladding\_inner\_radius: 0.00278  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_core\_fuel\_bundle

radial\_blanket\_duct\_01:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 7  
 length: 0.35  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_02:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 1  
 length: 0.065  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_03:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 2

length: 0.1  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_04:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_05:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_06:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 3  
 length: 0.15  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_07:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 3

length: 0.15  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_08:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 2  
 length: 0.10  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_09:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 1  
 length: 0.065  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

radial\_blanket\_duct\_10:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 0.0029479961806  
 wetted\_perimeter: 2.48415840029  
 heated\_perimeter: 1.48785828074  
 node\_number: 6  
 length: 0.30  
 pin\_number : 61  
 cladding\_outer\_radius: 0.0058  
 cladding\_inner\_radius: 0.0053  
 resistance\_model\_version: MonjuResistanceModel  
 friction\_factor: friction\_factor\_blanket\_bundle

reflector\_and\_cr\_duct:  
 xs\_area: 0.0115730092399  
 flow\_area: 1.963E-3  
 wetted\_perimeter: 1.570796E-2  
 heated\_perimeter: 0.0  
 node\_number: 31



length: 1.58

channel\_info:

channel\_type:

channel\_type\_01:

address:

["000",  
1A1+,  
2A1+, 2A2+]

except:

["000"]

duct:

0: bottom\_ref\_duct1\_01  
1: bottom\_ref\_duct2\_01  
2: core\_duct\_01  
3: core\_duct\_02  
4: core\_duct\_03  
5: core\_duct\_04  
6: core\_duct\_05  
7: core\_duct\_06  
8: core\_duct\_07  
9: core\_duct\_08  
10: core\_duct\_09  
11: core\_duct\_10  
12: top\_ref\_duct\_01

core\_division: 0

channel\_type\_02:

address:

[3A1+, 3A2+, 3A3+]

except:

[3A2, 3C2, 3E2, 3B2, 3D2, 3F2]

duct:

0: bottom\_ref\_duct1\_02  
1: bottom\_ref\_duct2\_01  
2: core\_duct\_01  
3: core\_duct\_02  
4: core\_duct\_03  
5: core\_duct\_04  
6: core\_duct\_05  
7: core\_duct\_06  
8: core\_duct\_07  
9: core\_duct\_08  
10: core\_duct\_09  
11: core\_duct\_10  
12: top\_ref\_duct\_01

core\_division: 0

channel\_type\_03:

address:

[4A1+, 4A2+, 4A3+, 4A4+]

```

duct:
  0: bottom_ref_duct1_03
  1: bottom_ref_duct2_01
  2: core_duct_01
  3: core_duct_02
  4: core_duct_03
  5: core_duct_04
  6: core_duct_05
  7: core_duct_06
  8: core_duct_07
  9: core_duct_08
  10: core_duct_09
  11: core_duct_10
  12: top_ref_duct_01
core_division: 0

```

```

channel_type_04:
  address:
    [5A1+, 5A2+, 5A3+, 5A4+, 5A5+]
  except:
    [5A5, 5C5, 5E5, 5B5, 5D5, 5F5]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_04
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07
    9: core_duct_08
    10: core_duct_09
    11: core_duct_10
    12: top_ref_duct_01
  core_division: 0

```

```

channel_type_05:
  address:
    [6A1+, 6A2+, 6A3+, 6A4+, 6A5+, 6A6+]
  except:
    [6A3+]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_05
    1: bottom_ref_duct2_01
    2: core_duct_01
    3: core_duct_02
    4: core_duct_03
    5: core_duct_04
    6: core_duct_05
    7: core_duct_06
    8: core_duct_07

```

9: core\_duct\_08  
 10: core\_duct\_09  
 11: core\_duct\_10  
 12: top\_ref\_duct\_01  
 core\_division: 0

channel\_type\_06:  
 address:  
   [7A1+, 7A2+, 7A3+, 7A4+, 7A5+, 7A6+, 7A7+]  
 duct:  
   0: bottom\_ref\_duct1\_06  
   1: bottom\_ref\_duct2\_01  
   2: core\_duct\_01  
   3: core\_duct\_02  
   4: core\_duct\_03  
   5: core\_duct\_04  
   6: core\_duct\_05  
   7: core\_duct\_06  
   8: core\_duct\_07  
   9: core\_duct\_08  
 10: core\_duct\_09  
 11: core\_duct\_10  
 12: top\_ref\_duct\_01  
 core\_division: 0

channel\_type\_07:  
 address:  
   [8A5+, 8A6+, 8A7+]  
 duct:  
   0: bottom\_ref\_duct1\_07  
   1: bottom\_ref\_duct2\_01  
   2: core\_duct\_01  
   3: core\_duct\_02  
   4: core\_duct\_03  
   5: core\_duct\_04  
   6: core\_duct\_05  
   7: core\_duct\_06  
   8: core\_duct\_07  
   9: core\_duct\_08  
 10: core\_duct\_09  
 11: core\_duct\_10  
 12: top\_ref\_duct\_01  
 core\_division: 0

channel\_type\_08:  
 address:  
   [8A1+, 8A2+, 8A3+, 8A4+, 8A8+]  
 duct:  
   0: bottom\_ref\_duct1\_08  
   1: bottom\_ref\_duct2\_01  
   2: core\_duct\_01  
   3: core\_duct\_02

```

4: core_duct_03
5: core_duct_04
6: core_duct_05
7: core_duct_06
8: core_duct_07
9: core_duct_08
10: core_duct_09
11: core_duct_10
12: top_ref_duct_01
core_division: 0

```

```

channel_type_09:
address:
[9A1+, 9A2+, 9A3+, 9A4+, 9A5+, 9A6+, 9A7+, 9A8+, 9A9+]
duct:
0: bottom_ref_duct1_09
1: bottom_ref_duct2_02
2: radial_blanket_duct_01
3: radial_blanket_duct_02
4: radial_blanket_duct_03
5: radial_blanket_duct_04
6: radial_blanket_duct_05
7: radial_blanket_duct_06
8: radial_blanket_duct_07
9: radial_blanket_duct_08
10: radial_blanket_duct_09
11: radial_blanket_duct_10
12: top_ref_duct_02
core_division: 1

```

```

channel_type_10:
address:
[10A1+, 10A2+, 10A3+, 10A4+, 10A5+, 10A6+,
10A7+, 10A8+, 10A9+, 10A10+]
duct:
0: bottom_ref_duct1_10
1: bottom_ref_duct2_02
2: radial_blanket_duct_01
3: radial_blanket_duct_02
4: radial_blanket_duct_03
5: radial_blanket_duct_04
6: radial_blanket_duct_05
7: radial_blanket_duct_06
8: radial_blanket_duct_07
9: radial_blanket_duct_08
10: radial_blanket_duct_09
11: radial_blanket_duct_10
12: top_ref_duct_02
core_division: 1

```

```

channel_type_11:
address:

```

```

[11A1+, 11A2+, 11A3+, 11A4+, 11A5+, 11A6+, 11A7+,
 11A8+, 11A9+, 11A10+, 11A11+]
except:
  [11A1+]
duct:
  0: bottom_ref_duct1_11
  1: bottom_ref_duct2_02
  2: radial_blanket_duct_01
  3: radial_blanket_duct_02
  4: radial_blanket_duct_03
  5: radial_blanket_duct_04
  6: radial_blanket_duct_05
  7: radial_blanket_duct_06
  8: radial_blanket_duct_07
  9: radial_blanket_duct_08
  10: radial_blanket_duct_09
  11: radial_blanket_duct_10
  12: top_ref_duct_02
core_division: 1

channel_type_12:
  address:
    [5A5, 5C5, 5E5]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_fcr
    1: bottom_ref_duct2_fcr
    2: reflector_and_cr_duct
    3: top_ref_duct_03
  core_division: 1

channel_type_13:
  address:
    ["000", 3A2, 3C2, 3E2, 6A3+]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_ccr
    1: bottom_ref_duct2_ccr
    2: reflector_and_cr_duct
    3: top_ref_duct_03
  core_division: 1

channel_type_14:
  address:
    [3B2, 3D2, 3F2, 5B5, 5D5, 5F5]
  duct:
    0: bottom_ref_duct1_ber
    1: bottom_ref_duct2_ber
    2: reflector_and_cr_duct
    3: top_ref_duct_03
  core_division: 1

channel_type_15:
  address:

```

```

[11A1+,
 12A1+, 12A2+, 12A3+, 12A4+, 12A5+, 12A6+,
 12A7+, 12A8+, 12A9+, 12A10+, 12A11+, 12A12+,
 13A1+, 13A2+, 13A3+, 13A4+, 13A5+, 13A6+,
 13A7+, 13A8+, 13A9+, 13A10+, 13A11+, 13A12+, 13A13+,
 14A1+, 14A2+, 14A3+, 14A4+, 14A5+, 14A6+, 14A7+,
 14A8+, 14A9+, 14A10+, 14A11+, 14A12+, 14A13+, 14A14+,
 15A2+, 15A3+, 15A4+, 15A5+, 15A6+, 15A7+, 15A8+, 15A9+,
 15A10+, 15A11+, 15A12+, 15A13+, 15A14+, 15A15+]
duct:
 0: bottom_ref_duct1_reflector
 1: bottom_ref_duct2_reflector
 2: reflector_and_cr_duct
 3: top_ref_duct_03
core_division: 1

vessel_info:

element_type:
  lower_plenum:
    outlet_path:
      0: high_pressure_entrance_plenum
      1: catch_pan
      2: gas_release_hole2
    initial_flow_rate_fraction:
      high_pressure_entrance_plenum: 0.9
      catch_pan: 0.09
      gas_release_hole2: 0.01

  high_pressure_entrance_plenum:
    inlet_path:
      0: lower_plenum
    inlet_info:
      lower_plenum:
        flow_area: 2.309
        equivalent_hydraulic_diameter: 3.5E-1
        resistance_model_version: MonjuResistanceModel
        resistance: pressure_drop_lp_to_hpep
    outlet_path:
      0: high_pressure_plenum
      1: gas_release_hole1
    initial_flow_rate_fraction:
      high_pressure_plenum: 0.99
      gas_release_hole1: 0.01

  gas_release_hole1:
    inlet_path:
      0: high_pressure_entrance_plenum
    inlet_info:
      high_pressure_entrance_plenum:
        flow_area: 1.810E-1
        equivalent_hydraulic_diameter: 8.0E-2

```

```

        resistance_model_version: MonjuResistanceModel
        resistance: pressure_drop_gas_release_hole1
outlet_path:
    0: upper_plenum

high_pressure_plenum:
    inlet_path:
        0: high_pressure_entrance_plenum
    inlet_info:
        high_pressure_entrance_plenum:
            flow_area: 1.202
            equivalent_hydraulic_diameter: 4.675E-1
            resistance_model_version: MonjuResistanceModel
            resistance: pressure_drop_hpep_to_hpp
    outlet_path:
        0: low_pressure_plenum
        1: core00
    initial_flow_rate_fraction:
        low_pressure_plenum: 0.1
        core00: 0.9

low_pressure_plenum:
    inlet_path:
        0: high_pressure_plenum
        1: catch_pan
    inlet_info:
        high_pressure_plenum:
            flow_area: 0.17204
            equivalent_hydraulic_diameter: 7.4E-2
            resistance_model_version: MonjuResistanceModel
            resistance: pressure_drop_hpp_to_lpp
        catch_pan:
            flow_area: 7.658E-2
            equivalent_hydraulic_diameter: 5.0E-2
            resistance_model_version: MonjuResistanceModel
            resistance: pressure_drop_cp_to_lpp
    outlet_path:
        0: core01

catch_pan:
    inlet_path:
        0: lower_plenum
    inlet_info:
        lower_plenum:
            flow_area: 2.088E-2
            equivalent_hydraulic_diameter: 2.384E-2
            resistance_model_version: MonjuResistanceModel
            resistance: pressure_drop_lp_to_cp
    outlet_path:
        0: low_pressure_plenum

gas_release_hole2:

```

```
inlet_path:
  0: lower_plenum
inlet_info:
  lower_plenum:
    flow_area: 1.810E-1
    equivalent_hydraulic_diameter: 8.0E-2
    resistance_model_version: MonjuResistanceModel
    resistance: pressure_drop_gas_release_hole2
outlet_path:
  0: upper_plenum
```



## 付録 C 流動特性に関する情報

本開発において ResistanceModel モジュールに登録した局所抵抗係数及び摩擦係数を以下に示す。基本的に文献 5)より引用したものである。また、バンドル部についても文献 5)には水力等価直径が与えられているが、HARP ではこの値を用いずに、入力からの幾何形状を元に算出している。

Table C.1 エントランスノズル部の局所抵抗係数及び流路面積

| Element      | Resistance Coeff.                       | Flow Area   | Function Name                    |
|--------------|-----------------------------------------|-------------|----------------------------------|
| Inner Core 1 | $2.46046\text{Re}^{-1.05639\text{E-}2}$ | 2.82743E-03 | pressure_drop_inner_core1_nozzle |
| Inner Core 2 | $2.46046\text{Re}^{-1.05639\text{E-}2}$ | 2.82743E-03 | pressure_drop_inner_core2_nozzle |
| Inner Core 3 | $5.35845\text{Re}^{-2.33660\text{E-}2}$ | 2.82743E-03 | pressure_drop_inner_core3_nozzle |
| Inner Core 4 | $7.29919\text{Re}^{-2.02723\text{E-}2}$ | 2.82743E-03 | pressure_drop_inner_core4_nozzle |
| Inner Core 5 | $11.5204\text{Re}^{-2.43755\text{E-}2}$ | 2.82743E-03 | pressure_drop_inner_core5_nozzle |
| Inner Core 6 | $15.7226\text{Re}^{-2.42327\text{E-}2}$ | 2.82743E-03 | pressure_drop_inner_core6_nozzle |
| Outer Core 1 | $7.22196\text{Re}^{-2.29836\text{E-}2}$ | 2.82743E-03 | pressure_drop_outer_core1_nozzle |
| Outer Core 2 | $15.8182\text{Re}^{-1.91639\text{E-}2}$ | 2.82743E-03 | pressure_drop_outer_core2_nozzle |
| Outer Core 3 | $22.9654\text{Re}^{-2.03792\text{E-}2}$ | 2.82743E-03 | pressure_drop_outer_core3_nozzle |
| Blanket 1    | $14.9786\text{Re}^{7.76592\text{E-}3}$  | 1.96350E-03 | pressure_drop_blanket1_nozzle    |
| Blanket 2    | $86.5521\text{Re}^{1.68810\text{E-}2}$  | 1.96350E-03 | pressure_drop_blanket2_nozzle    |
| Blanket 3    | $968.033\text{Re}^{-5.27056\text{E-}2}$ | 1.96350E-03 | pressure_drop_blanket3_nozzle    |
| Reflector 1  | $12630.3\text{Re}^{-1.51333\text{E-}2}$ | 1.96350E-03 | pressure_drop_reflector_nozzle   |
| Reflector 2  | $12630.3\text{Re}^{-1.51333\text{E-}2}$ | 1.96350E-03 | pressure_drop_reflector_nozzle   |
| Reflector 3  | $12630.3\text{Re}^{-1.51333\text{E-}2}$ | 1.96350E-03 | pressure_drop_reflector_nozzle   |
| Reflector 4  | $12630.3\text{Re}^{-1.51333\text{E-}2}$ | 1.96350E-03 | pressure_drop_reflector_nozzle   |
| C.C.R.       | $3.73637\text{Re}^{5.09175\text{E-}4}$  | 1.96350E-03 | pressure_drop_ccr_nozzle         |
| B.C.R.       | $53.9955\text{Re}^{3.22697\text{E-}4}$  | 1.96350E-03 | pressure_drop_bcr_nozzle         |
| F.C.R        | $3.73637\text{Re}^{5.09175\text{E-}4}$  | 1.96350E-03 | pressure_drop_fcr_nozzle         |

※Outer Core3 は文献 5)の表中に記載されていないが、AQUA コードの入力ファイルから読み取れるため記載してある。

※Re はレイノルズ数を示す

Table C.2 集合体部の局所抵抗係数及び流路面積

| Element   | Resistance Coeff.              | Flow Area   | Function Name                         |
|-----------|--------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| Core      | $16.7\text{Re}^{-0.163}$       | 2.82743E-03 | pressure_drop_core_fuel_assembly_part |
| Blanket   | $14.7\text{Re}^{-0.196}$       | 1.96350E-03 | pressure_drop_blanket_assembly_part   |
| Reflector | $17265.0\text{Re}^{-0.004526}$ | 1.96350E-03 | pressure_drop_reflector_assembly_part |
| C.C.R.    | $22.9\text{Re}^{-0.1253}$      | 1.96350E-03 | pressure_drop_ccr_assembly_part       |
| B.C.R.    | $12.7\text{Re}^{-0.05}$        | 1.96350E-03 | pressure_drop_bcr_assembly_part       |
| F.C.R.    | $22.9\text{Re}^{-0.1253}$      | 1.96350E-03 | pressure_drop_fcr_assembly_part       |

Table C.3 その他の減圧要素の局所抵抗係数及び流路面積

| Element            | Resistance Coeff.           | Flow Area   | Function Name                   |
|--------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------|
| Gas release hole 1 | 26201.0                     | 1.81000E-01 | pressure_drop_gas_release_hole1 |
| Gas release hole 2 | 578848.0                    | 1.81000E-01 | pressure_drop_gas_release_hole2 |
| HPP→LPP            | $162.0\text{Re}^{-0.01709}$ | 1.72040E-01 | pressure_drop_hpp_to_lpp        |
| CP→LPP             | 149.6                       | 7.65800E-02 | pressure_drop_cp_to_lpp         |
| LP→HPEP            | $2.063\text{Re}^{0.02796}$  | 2.30900E+00 | pressure_drop_lp_to_hpep        |
| HPEP→HPP           | $3.536\text{Re}^{-0.01868}$ | 1.20200E+00 | pressure_drop_hpep_to_hpp       |
| LP→CP              | 1.56                        | 2.00800E-02 | pressure_drop_lp_to_cp          |

HPP: High Pressure Plenum

LPP: Low Pressure Plenum

HPEP: High Pressure Entrance Plenum

CP: Catch Pan

LP: Lower Plenum

Table C.4 バンドル部の摩擦係数

| Element   | Friction Factor                              | Function Name                             |
|-----------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Core Fuel | $75.5/\text{Re}$                             | ( $\text{Re} < 400$ )                     |
|           | $75.5/\text{Re} + 0.00367\text{Re}^{0.2146}$ | ( $400 \leq \text{Re} < 8000$ )           |
|           | $0.262\text{Re}^{-0.229}$                    | ( $\text{Re} \geq 8000$ )                 |
| Blanket   | $84.4/\text{Re}$                             | ( $140 < \text{Re} < 500$ )               |
|           | $84.4/\text{Re} + 0.0266$                    | ( $500 \leq \text{Re} < 7800$ )           |
|           | $0.2334\text{Re}^{-0.208}$                   | ( $7800 \leq \text{Re} < 3.0\text{E}+4$ ) |

## 付録 D MARBLE 用 GUI インターフェース LIME

本解析例において、冷却材出口温度等のグラフィカルな出力が示されているが、MARBLE 用 GUI インターフェースとして開発途中の LIME(Light Interface for Marble Environment)による出力である。この LIME は本報告書執筆時においては、リリース版としての正式な採用はされていないが、正式採用を目指し、目下開発中である。

LIME は同様の GUI インターフェースである EVIRA<sup>15)</sup>の経験を元に開発されている。しかし、その開発環境は Table D.1 に示されるように大きく変更されている。

Table D.1 EVIRA 及び LIME の開発環境

|          | EVIRA      | LIME       |
|----------|------------|------------|
| 使用言語     | C++        | Python     |
| GUIライブラリ | Gtkmm      | Pygtk      |
| 2Dライブラリ  | Cairomm    | Pycairo    |
| 3Dライブラリ  | GtkGLextmm | PyGtkGLext |

EVIRA は C++により開発されているが LIME は MARBLE のシステム記述言語である Python を利用している。これにより、演算処理に MARBLE のモジュールをシームレスに使用することが可能であり、最低限の開発で済むようになっている。ライブラリ群に関しては、名称からも推測されるように、同系のライブラリを用いている。これにより、プログラムの移植も最低限のもので済んでいる。仮に、将来において、速度面に問題があり Python から C++に移行する際も最低限の労力により対応出来る。このように、LIME は EVIRA とほぼ同様の機能を実現している。ただし、3D 環境に関しては、OpenGL の挙動に関し環境及びライブラリのバージョンに依存する不安定さが目立つため、現在、実用上の実装は行っていない。これに関しては、独自のレンダラーを開発することを含め対応策を模索している。

機能の概要を以下に示す。操作は Fig. D.1 に示されるように GUI 上の操作により必要なオプションを与えて、目的の画像を得る。出力結果に関しては、Fig. D.2 に代表される解析結果の出力の他に、Fig. D.3 で示されるように解析結果を処理して得られる指標等の表示が可能である。また、Fig. D.4 で示されるように、値の軸方向分布の表示もでき、特定の集合体、炉心平均等柔軟な出力が可能となっている。

このように、MARBLE の開発においては、ユーザーの利便性を考えたポスト処理に関しても力が入れている。

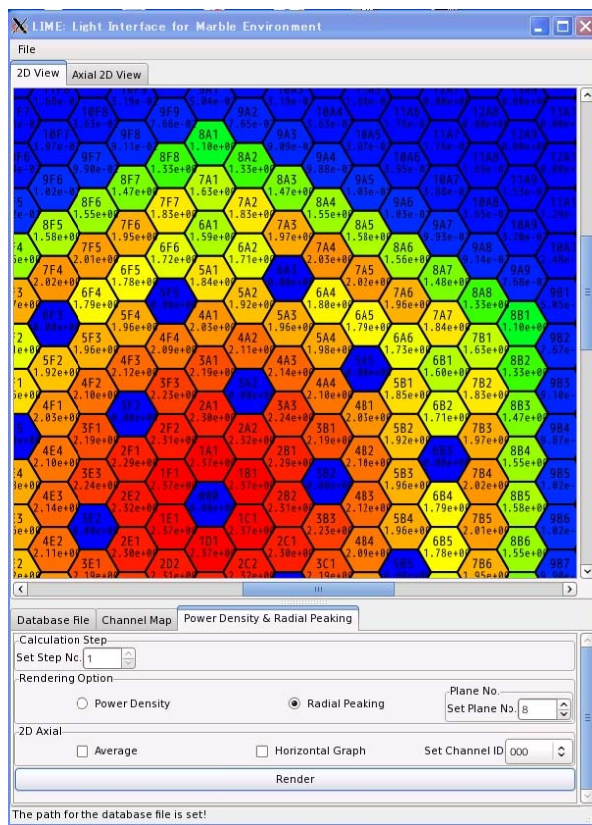


Fig. D.1 GUI 使用例

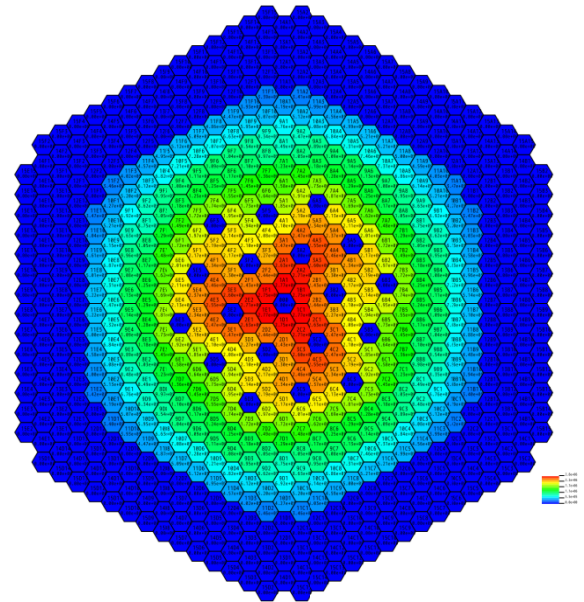


Fig. D.2 出力分布

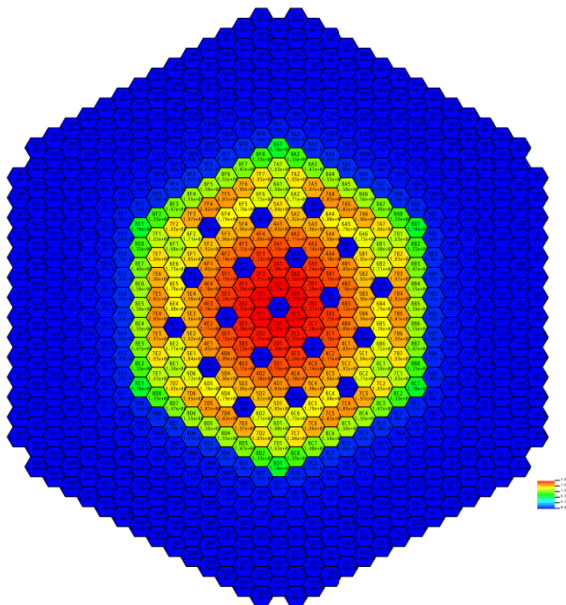


Fig. D.3 径方向ピーキング

Power Density (W/m<sup>3</sup>)  
Channel No. 1E1

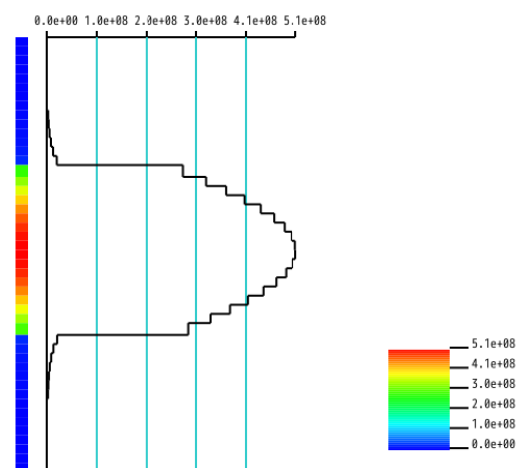


Fig. D.4 集合体毎の軸方向出力分布

## 付録 E シリアライズ速度検証のために作成したシステムの詳細

以下に、今回作成したシステムのソース文を示す。

○Python 版 Data (Data.py)

```
class Data:

    def __init__(self):
        self._data={}

    def set_data_number(self, val):
        self._data["data_number"] = val

    def get_data_number(self):
        return self._data["data_number"]

    def set_data(self, data):
        self._data["data"] = data

    def get_data(self):
        return self._data["data"]
```

○Python 用シリアライズツール (Serialize.py)

```
import cPickle

class Serialize:
    """
    This class provides tools to serialize and to deserialize.
    """

    @classmethod
    def serialize(cls, obj):
        return cPickle.dumps(obj, protocol = cPickle.HIGHEST_PROTOCOL)

    @classmethod
    def deserialize(cls, serialized_obj):
        return cPickle.loads(serialized_obj)
```

○Python 版の検証計算 (SerializeTest.py)

```
import numpy
from copy import deepcopy
from Data import Data
from Serialize import Serialize
from datetime import datetime
import pytc

data_set = []

data = Data()
```

```

data.set_data_number = 70
data.set_data(numpy.zeros(70))

layer_number = 15
assembly_number = 1
for i in range(layer_number + 1):
    assembly_number += i*6
assembly_number -= 6
radial_mesh_number = 6
axial_mesh_number = 8 + 6 + 1 + 2 + 3 + 3 + 3 + 3 + 2 + 1 + 7 + 8
mesh_number = assembly_number * radial_mesh_number * axial_mesh_number

print "mesh_number:", mesh_number

for i in range(mesh_number):
    data_set.append(deepcopy(data))

serialized_data_set = []

start = datetime.now()
for i in range(mesh_number):
    serialized_data_set.append(Serialize.serialize(data_set[i]))
end = datetime.now()
print "time to serialize:", end - start

data_base_for_write = pytc.HDB("test.db", pytc.HDBOWRITER | pytc.HDBOCREAT)

start = datetime.now()
for i in range(mesh_number):
    data_base_for_write[str(i)] = serialized_data_set[i]
end = datetime.now()
print "time to write db:", end - start
data_base_for_write.close()

data_base_for_read = pytc.HDB("test.db", pytc.HDBOREADER)

new_serialized_data_set = []
start = datetime.now()
for i in range(mesh_number):
    new_serialized_data_set.append(data_base_for_read[str(i)])
end = datetime.now()
print "time to read db:", end - start
data_base_for_read.close()

deserialized_data_set = []

start = datetime.now()
for i in range(mesh_number):
    deserialized_data_set.append(Serialize.deserialize(new_serialized_data_set[i]))
end = datetime.now()
print "time to deserialize:", end - start

```

## ○Python 版検証計算の結果

mesh\_number: 201630  
 time to serialize: 0:00:05.863532  
 time to write db: 0:00:00.487868  
 time to read db: 0:00:00.394365  
 time to deserialize: 0:00:04.443760

## ○C++版 Data(Data.h, Data.cpp)

```

////////////////////////////////Data.h////////////////////////////////
#ifndef __DATA_H__
#define __DATA_H__
#include <vector>

#include <boost/serialization/serialization.hpp>
#include <boost/serialization/vector.hpp>
#include <boost/archive/binary_iarchive.hpp>
#include <boost/archive/binary_oarchive.hpp>

class Data{
public:
    void set_data(const std::vector<double>& data);
    std::vector<double>& get_data();

    void set_data_number(int data_number);
    int get_data_number();

private:
    int data_number;
    std::vector<double> data;
    friend class boost::serialization::access;
    template<class Archive>
        void serialize(Archive &ar, const unsigned int){
            ar & data_number;
            ar & data;
        }
};

#endif

```

```

////////////////////////////////Data.cpp////////////////////////////////
#include "Data.h"

void Data::set_data(const std::vector<double>& data){
    this->data = data;
}

std::vector<double>& Data::get_data(){
    return this->data;
}

void Data::set_data_number(int data_number){
    this->data_number = data_number;
}

int Data::get_data_number(){
    return this->data_number;
}

```

○C++版検証計算(SerializeTest.cpp)

```

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <vector>
#include <kchashdb.h>
#include <sstream>
#include <boost/timer.hpp>
#include "Data.h"

int main(){
    Data data;
    std::vector<double> data_vector;
    std::vector<Data> data_set;
    int layer_number = 15;
    int assembly_number = 1;
    int radial_mesh_number = 6;
    for (int i = 0; i < layer_number + 1; i++){
        assembly_number += i*6;
    }
    assembly_number -=6;
    int axial_mesh_number = 8 + 6 + 1 + 2 + 3 + 3 + 3 + 3 + 2 + 1 + 7 + 8;
    int mesh_number;
    mesh_number = assembly_number * radial_mesh_number * axial_mesh_number;

    std::cout << "mesh_number:" << mesh_number << std::endl;
    for (int i = 0; i < 70; i++){
        data_vector.push_back(i);
    }
    data.set_data_number(70);
    data.set_data(data_vector);
}

```



```

for (int i = 0; i < mesh_number; i++){
    Data copy_data;
    copy_data = data;
    data_set.push_back(copy_data);
}

kyotocabinet::HashDB data_base_for_write;
data_base_for_write.open("test.db", kyotocabinet::HashDB::OWRITER
                        | kyotocabinet::HashDB::OCREATE);

std::vector<std::string> serialized_data_set;

boost::timer btimer1;
for (int i = 0; i < mesh_number; i++){
    std::ostringstream oss;
    boost::archive::binary_oarchive oarchive(oss);
    oarchive << data_set[i];
    serialized_data_set.push_back(oss.str());
}
std::cout<< "time to serialize: " << btimer1.elapsed()<<"sec"<< std::endl;

boost::timer btimer2;
for (int i = 0; i < mesh_number; i++){
    std::ostringstream oss;
    oss << i;
    data_base_for_write.set(oss.str(), serialized_data_set[i]);
}
std::cout<< "time to write db: " << btimer2.elapsed()<<"sec"<< std::endl;

data_base_for_write.close();

std::vector<std::string> new_serialized_data_set;

kyotocabinet::HashDB data_base_for_read;
data_base_for_read.open("test.db", kyotocabinet::HashDB::OREADER);

boost::timer btimer3;
for (int i = 0; i < mesh_number; i++){
    std::ostringstream oss;
    oss << i;
    std::string result;
    data_base_for_read.get(oss.str(), &result);
    new_serialized_data_set.push_back(result);
}
std::cout<< "time to read db: " << btimer3.elapsed()<<"sec"<< std::endl;
data_base_for_read.close();

std::vector<Data> deserialized_data_set;

boost::timer btimer4;
for (int i = 0; i < mesh_number; i++){
    Data deserialized_data;

```

```
std::stringstream iss(new_serialized_data_set[i]);  
boost::archive::binary_iarchive iarchive(iss);  
iarchive >> deserialized_data;  
deserialized_data_set.push_back(deserialized_data);  
}  
std::cout<< "time to deserialize: " << btimer4.elapsed()<<"sec"<< std::endl;  
}
```

○C++版検証計算の結果

mesh\_number:201630

time to serialize: 0.54sec

time to write db: 0.57sec

time to read db: 0.41sec

time to deserialize: 0.65sec

## 付録 F シリアライズについて

今回の調査では、シリアライズ・デシリアライズに関して現在の処理システムでは速度面に問題があることが明確になった。(PositionInfo を用いた高級なデータ参照に関しても処理速度を多く要していると思われる。)そこで、シリアライズ・デシリアライズに関する雑多な考察を行う。

初めに、速度面に関してであるが、Python のシリアライズでは cPickle モジュールを用いているが、これは、Pickle モジュールの C 言語実装による高速版である。他にもシリアライズの方法はあるようだが、インターネットによる文献調査を行った結果、cPickle より優れたシリアライズツールは存在しないようである。やはり、シリアライズしたオブジェクトをデータベースに格納する方式を維持したまま、速度向上を望むのであれば C++化が必須になると思われる。

次に、シリアライズの実装に関してであるが、Python は cPickle へシリアライズしたいオブジェクトを引数として渡すだけで、シリアライズが完了する。一方で、C++(今回は Boost の機能を利用)によるシリアライズは、シリアライズしたいクラスにシリアライズ機能を実装する必要がある。シリアライズしたいクラスにフレンドクラスとして boost::serialization::access を登録することや、serialize メソッドを実装しシリアライズした際に保存して欲しいデータを明示的に指定することや、vector 等の複雑なコンテナのインスタンスを含む場合には、それに対応したヘッダーファイルをインクルードするなど設定は複雑なようである。このことを考えると、複雑な内包関係を持つクラスなどでは、シリアライズが利用できない例が発生することもあると考えられる。

This is a blank page.

# 国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

| 基本量   | SI 基本単位 |     |
|-------|---------|-----|
|       | 名称      | 記号  |
| 長さ    | メートル    | m   |
| 質量    | キログラム   | kg  |
| 時間    | 秒       | s   |
| 電流    | アンペア    | A   |
| 熱力学温度 | ケルビン    | K   |
| 物質량   | モル      | mol |
| 光度    | カンデラ    | cd  |

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量                     | SI 基本単位      |                    |
|-------------------------|--------------|--------------------|
|                         | 名称           | 記号                 |
| 面積                      | 平方メートル       | m <sup>2</sup>     |
| 体積                      | 立法メートル       | m <sup>3</sup>     |
| 速度                      | メートル毎秒       | m/s                |
| 加速度                     | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |
| 波数                      | 毎メートル        | m <sup>-1</sup>    |
| 密度, 質量密度                | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 面積密度                    | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |
| 比体積                     | 立方メートル毎キログラム | m <sup>3</sup> /kg |
| 電流密度                    | アンペア毎平方メートル  | A/m <sup>2</sup>   |
| 磁界の強さ                   | アンペア毎メートル    | A/m                |
| 量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度 | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |
| 質量濃度                    | キログラム毎立法メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 輝度                      | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>      | (数字の) 1      | 1                  |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>     | (数字の) 1      | 1                  |

(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

| 組立量                           | SI 組立単位               |                   |                      |                                                                |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------|
|                               | 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 <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>     | m/m                                                            |
| 立体角                           | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>     | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                 |
| 周波数                           | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                |                      | s <sup>-1</sup>                                                |
| 力                             | ニュートン                 | N                 |                      | m kg s <sup>-2</sup>                                           |
| 圧力, 応力                        | パスカル                  | Pa                | N/m <sup>2</sup>     | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |
| エネルギー, 仕事, 熱量                 | ジュール                  | J                 | N m                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                              |
| 仕事率, 工率, 放射束                  | ワット                   | W                 | J/s                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                              |
| 電荷, 電気量                       | クーロン                  | C                 |                      | s A                                                            |
| 電位差 (電圧), 起電力                 | ボルト                   | V                 | W/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 静電容量                          | ファラド                  | F                 | C/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                          | オーム                   | Ω                 | V/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>              |
| コンダクタンス                       | ジーメンズ                 | S                 | A/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束                            | ウェーバ                  | Wb                | Vs                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 磁束密度                          | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup>    | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                             |
| インダクタンス                       | ヘンリー                  | H                 | Wb/A                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>              |
| セルシウス度 <sup>(e)</sup>         | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                      | K                                                              |
| 光束度                           | ルーメン                  | lm                | cd sr <sup>(c)</sup> | cd                                                             |
| 照射度                           | ルクス                   | lx                | lm/m <sup>2</sup>    | m <sup>-2</sup> cd                                             |
| 放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>      | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                |                      | s <sup>-1</sup>                                                |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ           | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 酸素活性化                         | カタール                  | kat               |                      | s <sup>-1</sup> mol                                            |

(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。  
(c) 測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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。  
(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、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、しばしば誤った用語で"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

| 組立量             | SI 組立単位           |                       |                                                                                      |
|-----------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                 | 名称                | 記号                    | SI 基本単位による表し方                                                                        |
| 粘着力のモーメント       | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>                                                   |
| 表面張力            | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                    |
| 角速度             | ニュートン毎メートル        | N/m                   | kg s <sup>-2</sup>                                                                   |
| 角加速度            | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>                                   |
| 熱流密度, 放射照度      | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱容量, エントロピー     | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>                                                                   |
| 比熱容量, 比エントロピー   | ジュール毎ケルビン         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                    |
| 比エネルギー          | ジュール毎キログラム毎ケルビン   | J/(kg K)              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                       |
| 熱伝導率            | ジュール毎キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                                       |
| 体積エネルギー         | ワット毎メートル毎ケルビン     | W/(m K)               | m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>                                                 |
| 電界の強さ           | ジュール毎立方メートル       | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                   |
| 電荷密度            | ジュール毎平方メートル       | V/m                   | m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>                                                 |
| 表面電荷            | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>-3</sup> s A                                                                  |
| 電束密度, 電気変位      | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A                                                                  |
| 誘電率             | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A                                                                  |
| 透磁率             | ファラド毎メートル         | F/m                   | m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                       |
| モルエネルギー         | ヘンリー毎メートル         | H/m                   | m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>                                                 |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル           | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                  |
| 照射線量 (X線及びγ線)   | ジュール毎モル毎ケルビン      | J/(mol K)             | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                  |
| 吸収線量率           | クーロン毎キログラム        | C/kg                  | kg <sup>-1</sup> s A                                                                 |
| 放射線強度           | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>                                                       |
| 放射輝度            | ワット毎ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 酵素活性濃度          | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>                |
|                 | カタール毎立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol                                                  |

表 5. SI 接頭語

| 乗数               | 接頭語 | 記号 | 乗数                | 接頭語 | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|-----|----|
| 10 <sup>24</sup> | ヨ   | Y  | 10 <sup>-1</sup>  | デ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼ   | Z  | 10 <sup>-2</sup>  | セ   | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エ   | E  | 10 <sup>-3</sup>  | ミ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペ   | P  | 10 <sup>-6</sup>  | マイ  | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テ   | T  | 10 <sup>-9</sup>  | ナ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギ   | G  | 10 <sup>-12</sup> | ピ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メ   | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェ  | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キ   | k  | 10 <sup>-18</sup> | ア   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘ   | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼ   | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デ   | da | 10 <sup>-24</sup> | ヨ   | y  |

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     | °    | 1°=(π/180) rad                                                                           |
| 分     | ′    | 1′=(1/60)°=(π/10800) rad                                                                 |
| 秒     | ″    | 1″=(1/60)′=(π/648000) rad                                                                |
| ヘクタール | ha   | 1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                     |
| リットル  | L, l | 1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1t=10 <sup>3</sup> 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                               |
|----------|----|--------------------------------------------|
| 電子ボルト    | eV | 1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <sup>11</sup> 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                                                                                  |
|-----------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| バール       | bar  | 1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa                                                        |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa                                                                               |
| オングストローム  | Å    | 1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m                                                           |
| 海里        | M    | 1 M=1852m                                                                                     |
| バイン       | b    | 1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| ノット       | kn   | 1 kn=(1852/3600)m/s                                                                           |
| ネーパ       | Np   | SI単位との数値的な関係は、<br>対数量の定義に依存。                                                                  |
| ベレル       | B    |                                                                                               |
| デジベール     | dB   |                                                                                               |

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                    | erg | 1 erg=10 <sup>-7</sup> J                                                               |
| ダイン                   | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N                                                               |
| ポアズ                   | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s                                                  |
| ストークス                 | St  | 1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>                          |
| フオット                  | ph  | 1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx                                        |
| ガリ                    | Gal | 1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                           |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb                                          |
| ガウス                   | G   | 1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T                                           |
| エルステッド <sup>(c)</sup> | Oe  | 1 Oe ≡ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>                                         |

(c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称        | 記号   | SI 単位で表される数値                                                      |
|-----------|------|-------------------------------------------------------------------|
| キュリー      | Ci   | 1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq                                      |
| レントゲン     | R    | 1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                                  |
| ラド        | rad  | 1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                                    |
| レム        | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                                   |
| ガンマ       | γ    | 1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                       |
| フェルミ      | f    | 1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m                                    |
| メートル系カラット |      | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg                       |
| トル        | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa                                         |
| 標準大気圧     | atm  | 1 atm = 101 325 Pa                                                |
| カロリ       | cal  | 1cal=4.1858J (「15°C」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー) |
| マイクロン     | μ    | 1 μ =1μm=10 <sup>-6</sup> m                                       |

