

全炉心熱流動解析コード ACT の開発 (IV)

— 燃料集合体モデルの簡易化及び MPI による並列処理化 —

(研究報告)



2001年10月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

全炉心熱流動解析コード ACT の開発(IV)

—燃料集合体モデルの簡易化及び MPI による並列処理化— (研究報告)

大島 宏之¹ 橋本 昭彦²

要 旨

高速炉の定格運転時および強制循環から自然循環へ移行する過渡時を含む様々な運転状態に対し、インターラッパフローを含む炉心の熱流挙動を精度良く評価することを目的として、全炉心熱流動解析コード ACT の開発を実施している。炉心部の熱流挙動評価には、炉心部内の詳細なモデル化に加え、炉心部に対して適切な境界条件を与えることが重要であることから、本コードは、燃料集合体、炉心槽のみならず熱輸送系を解析するモジュール群で構成される。それらをカップリングすることによりプラントシステムの応答を加味した炉心部の詳細な熱流動挙動を解くことを可能とする。

本報告は、大規模な体系への適用性を確保するために実施した、燃料集合体解析部のモデル追加および並列マシンやクラスターマシンなどで動作するメッセージパッシング方式によるコードの並列化についてまとめたものである。燃料集合体解析部については、これまでの各集合体内部の燃料ピン全てを模擬するモデル化に加えて、計算負荷軽減の観点から注目する集合体以外の集合体について熱流挙動が同等となる簡易モデルを適用できるようにした。並列化については、コード内部の計算負荷やデータフローを分析することにより、数値計算アルゴリズムの見直しを含む最適なプログラムの並列化を行った。並列化に伴う各プロセス間のデータ通信やプログラム処理の同期などの制御に使用する並列化プログラミングツールには、MPI(Message Passing Interface)を用いた。これらの改良に対して、機能検証解析を実施し、改良したプログラムの基本動作を確認した。

また、炉心解析モジュール(燃料集合体+炉心槽)および熱輸送系解析モジュールの入力マニュアルの整備も併せて行った。

1:大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究グループ

2:株式会社エヌデー

**Development of Whole Core Thermal-Hydraulic Analysis Program ACT (IV)
- Simplified Fuel Assembly Model and Parallelization by MPI -**

H. Ohshima¹, A. Hashimoto²

ABSTRACT

A whole core thermal-hydraulic analysis program ACT is being developed for the purpose of evaluating detailed in-core thermal hydraulic phenomena of fast reactors including the effect of the flow between wrapper-tube walls (inter-wrapper flow) under various reactor operation conditions. As appropriate boundary conditions in addition to a detailed modeling of the core are essential for accurate simulations of in-core thermal hydraulics, ACT consists of not only fuel assembly and inter-wrapper flow analysis modules but also a heat transport system analysis module that gives response of the plant dynamics to the core model. This report describes incorporation of a simplified model to the fuel assembly analysis module and program parallelization by a message passing method toward large-scale simulations.

ACT has a fuel assembly analysis module which can simulate a whole fuel pin bundle in each fuel assembly of the core and, however, it may take much CPU time for a large-scale core simulation. Therefore, a simplified fuel assembly model that is thermal-hydraulically equivalent to the detailed one has been incorporated in order to save the simulation time and resources. This simplified model is applied to several parts of fuel assemblies in a core where the detailed simulation results are not required.

With regard to the program parallelization, the calculation load and the data flow of ACT were analyzed and the optimum parallelization has been done including the improvement of the numerical simulation algorithm of ACT. Message Passing Interface (MPI) is applied to data communication between processes and synchronization in parallel calculations. Parallelized ACT was verified through a comparison simulation with the original one.

In addition to the above works, input manuals of the core analysis module and the heat transport system analysis module have been prepared.

1: Thermal-Hydraulic Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center,
Japan Nuclear Cycle Development Institute

2: NDD, Inc.

< 目 次 >

要旨

図表リスト

第1章 はじめに	1
第2章 燃料集合体解析部の改良	2
2.1 簡易集合体モデルの概要	2
2.2 体系	2
2.3 工学モデル	3
2.4 検証計算	3
2.4.1 計算条件	3
2.4.2 計算結果	3
第3章 MPI によるコードの並列化	6
3.1 燃料集合体解析部の負荷分析	6
3.2 並列化方法	7
3.2.1 全炉心解析コードの概要	7
3.2.2 炉心解析モジュールの概要	8
3.2.3 熱輸送系解析モジュールの概要	12
3.2.4 集合体初期流量設定部(SUBDIS)の概要	18
3.2.5 炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールの数値的結合方法	18
3.2.6 炉心内初期値設定方法	20
3.3 タスクコントロール	21
3.3.1 MPI(MPICH)について	21
3.3.2 タスク分割方法とグループ分割方法	21
3.3.3 タスク間通信	22
第4章 機能検証解析	26
4.1 計算条件	26
4.1.1 計算体系	26
4.1.2 境界条件	27
4.2 計算結果	27
第5章 まとめ	29
<参考文献>	30
付録A コード解説書	51
付録B 炉心解析モジュール用入力データマニュアル	59

付録C	ループ解析モジュール用入力データマニュアル	80
付録D	コンパイルと実行方法	90

＜図表リスト＞

表 2-1	217 本ピンバンドルと 7 本ピンバンドル体系のサブチャンネル数の対応	31
表 2-2	217 本ピンバンドル体系形状データ	31
表 2-3	217 本ピンバンドル軸方向流路の形状パラメータ	32
表 2-4	217 本ピンバンドル横方向流路の形状パラメータ	32
表 2-5	7 本ピンバンドル軸方向流路の形状パラメータ	32
表 2-6	7 本ピンバンドル横方向流路の形状パラメータ	33
表 2-7	軸方向メッシュ分割	33
表 2-8	境界条件	33
表 2-9	集合体出入口圧力差及び温度差	33
表 3-1	MPI 版 ASFRE の計算負荷 (過渡計算部)	34
表 4-1	炉心槽の主な幾何形状パラメータ	35
表 4-2	中心集合体の主な幾何形状パラメータ	35
表 4-3	周辺集合体の主な幾何形状パラメータ	36
表 4-4	集合体の軸方向メッシュ分割	36
図 2-1	217 本ピンバンドルサブチャンネル分割方法	37
図 2-2	7 本ピンバンドルサブチャンネル分割方法	37
図 2-3	217 本ピンバンドル解析結果 (定格運転条件)	38
図 2-4	7 本ピンバンドル解析結果 (定格運転条件)	39
図 2-5	217 本体系と 7 本体系の軸方向温度分布の比較 (定格運転条件)	40
図 2-6	217 本ピンバンドル解析結果 (自然循環条件)	41
図 2-7	7 本ピンバンドル解析結果 (自然循環条件)	42
図 2-8	217 本体系と 7 本体系の軸方向温度分布の比較 (自然循環条件)	43
図 3-1	全炉心熱流解析システムの構成	44
図 3-2	炉心解析モジュールとループ解析モジュールの結合	45
図 3-3	システムフロー	46
図 4-1	冷却系ループの構成	47
図 4-2	炉心槽と集合体のサブチャンネル分割方法	48
図 4-3	流量変化に対する両コードの比較	49
図 4-4	集合体から炉心槽への熱流束を無視したケースとの流量の比較	50

第1章 はじめに

様々な熱流動条件下における炉心部の構造健全性を評価するためには、炉心部内の熱流動挙動を詳細に解析できるツールと、炉心部に対し適切な境界条件を与えることが重要である。このため流体計算工学研究グループでは、燃料集合体内と炉心槽および熱輸送系を解析するコード群を全てカップリングし、冷却系システム全体を解くことができる炉心熱流解析コードの開発を行っている^{[1],[2],[3]}。本件は、このコードに対して、大規模な体系への適用性を確保すること、および今後予定されている他の計算モジュール・コードとの結合性を確保することを目的として、燃料集合体解析部の改良および超並列マシンやクラスターマシンなどで動作するメッセージパッシング方式によるコードの並列化を実施したものである。また、併せて機能検証解析を実施し改良されたコードの性能評価を行った。

本コードは、燃料集合体一体毎に対応した燃料解析部を有し、集合体内部については、燃料ピン全てを模擬するモデル化がなされている。炉心内の全ての集合体に対しこのようなモデルで対応しようとする、実証炉等の大型炉心への適用には多大な計算時間が予想される。このため、計算負荷軽減の観点から、注目する集合体以外の集合体については、熱流挙動が同等となる簡易モデルを適用する検討を行った。

コード内部の計算負荷やデータフローを分析することにより、4～8プロセッサエレメントで構成される並列マシン環境（富士通 VPP300 や DEC クラスターマシン等）を前提として、数値計算アルゴリズムの見直しを含む最適なプログラムの並列化を行った。並列化に伴う各プロセス間のデータ通信やプログラム処理の同期などの制御に使用する並列化プログラミングツールには、現在の主流である MPI(Message Passing Interface)を用いた。

改良したプログラムの基本動作および改良前と改良後の解析結果が一致することを確認するとともに、並列化の効果を評価するため、炉心と冷却ループを模擬した PLANDTL-DHX の試験^[4]を模擬する計算を行った。

なお、今回の作業で新規に作成したサブルーチンや変更したサブルーチン等の仕様を付録 A として添付した。また、ACT 内の炉心解析モジュールおよび熱輸送系解析モジュールに関する入力データマニュアルを整備し、付録 B および付録 C として添付した。さらに ACT コード実行方法を付録 D にまとめた。

第2章 燃料集合体解析部の改良

本コードは、燃料集合体一体毎に対応した燃料解析部を有し、集合体内部については燃料ピン全てを模擬するモデル化がなされている。炉心内の全ての集合体に対しこのようなモデルで対応しようとする、実証炉等の大型炉心への適用には多大な計算時間が予想される。このため、計算負荷軽減の観点から、注目する集合体以外の集合体については、熱流力挙動が同等となる簡易モデルを適用する検討を行った。また、大型燃料集合体についての通常のサブチャンネル解析結果と比較した。

2.1 簡易集合体モデルの概要

従来からある詳細な集合体解析モデルと熱流力挙動を同一とするために、同じ出入口境界条件時において、出入口圧力差（集合体間流量配分に影響）、周辺サブチャンネル温度（集合体間熱移行に影響）が同等となるように以下のモデルを検討した。

大型燃料集合体の簡易モデル化の例としては、単一集合体の解析に、サブチャンネル体系ではなく、リング体系で模擬することなどは従来から行われていた。しかし、炉心槽を含む炉心全体の解析には、集合体間熱移行を表現できるように周方向の変化を考慮できるモデルとしなければならない。また、径方向については、周辺部以外はおおよそフラットな分布形状であることを想定し、内部と周辺部の二領域とする大型燃料集合体を7本ピン集合体に集約したモデルを採用することにより、計算速度向上および周辺サブチャンネルの再現性を重視したものとした。

2.2 体系

表2-1に大型集合体と集約した7本ピン集合体々系の対応を示す。

大型集合体のコーナーとエッジサブチャンネルを除く全てのサブチャンネルは、7本ピン集合体々系における6つの中心サブチャンネルで代表する。エッジサブチャンネルについては、六角形の一辺に存在するエッジサブチャンネルの全てを7本ピン集合体の一つのエッジサブチャンネルで代表する。コーナーサブチャンネルについては、両者の体系で1:1の対応となる。

集約方法は、リング体系時と同様に対応する領域内の流路断面積、濡れぶち長さ、加熱周長を等しくするものであるが、水力学的等価直径は結果として対応する単一サブチャンネルと等しくなる。横方向運動量コントロールボリュームの長さは、全てサブチャンネル解析時と同じにする。

また、コードの対応は、流路断面積、等価直径、横方向運動量コントロールボリュームの長さ、加熱周長を入力データで指定するようにし、個々の集合体々系の任意性を考慮できる並列化プログラミングを行った。

2. 3 工学モデル

ほとんどの工学モデルについてはサブチャンネル解析と共通に使用できるが、スパーサモデルや乱流混合モデル等については検討が必要である。(もちろん、詳細ワイヤースペーサモデルである Distributed Resistance Model は使用できない。)

簡易ワイヤースペーサモデルである Cheng-Todreas モデルで使用される幾何形状パラメータは、集約で変化しないもののみであるが、乱流混合量が評価されるのは集約後の領域の境界のみである。集約によって一つのサブチャンネルとなる領域内では、無限大の拡散係数が設定されていることと同様である。また領域間の混合量の評価については、幾何形状パラメータ以外の状態量等の評価に影響を受けるので、今後の検討課題とする。

2. 4 検証計算

簡易モデルの妥当性を検討するため、大型燃料集合体の模擬計算を行った。大型燃料集合体は実証炉と同燃料ピン本数の 217 本ピン集合体とし、単一集合体解析をサブチャンネル解析と簡易モデル解析の両方で行った。それぞれの体系により定格運転時と自然循環時の条件で計算し、結果を評価する。

2. 4. 1 計算条件

(1) 集合体データ

実証炉燃料集合体を模擬した 217 本ピン集合体のデータを表 2-2 に示す。

(2) 幾何形状データ

それぞれの体系について流路形状データを表 2-3～表 2-6 に示す。

(3) メッシュ分割方法

それぞれの体系で使用したサブチャンネル分割方法を図 2-1 と図 2-2 に、軸方向分割方法を表 2-7 に示す。

(4) 境界条件

定格運転時、自然循環時を想定した境界条件を表 2-8 に示す。

(5) その他

ワイヤモデルには、Cheng-Todreas のモデルを使用した。

2. 4. 2 計算結果

(1) 定格運転時と自然循環時における集合体出入口圧力差

定格運転時と自然循環時における集合体出入口圧力差を表 2-9 に示す。これより定格運転時と自然循環時の両方に対して、集合体出入口圧力差が一致することが確認された。

(2) 定格運転時の温度分布と軸方向流速の径方向分布

217 本ピンバンドル体系での計算による径方向の温度分布と軸方向流速分布を図 2-3 に、7 本ピンバンドル体系のものを図 2-4 に示す。また、両体系に対する中心サブチャンネル、エッジサブチャンネルおよびコーナーサブチャンネルにおける軸方向温度分布の比較を図 2-5 に示す。

径方向温度分布に関しては、発熱部中央、発熱部上端および集合体出口のどの位置においても、1 : 1 に対応しているコーナーサブチャンネルの温度は良く一致しており、1 : 1 に対応しない中心サブチャンネル、エッジサブチャンネルにおいても 217 本バンドルの対応する領域の温度分布をよく代表している。

流速分布については、217 本バンドル体系においても中心サブチャンネル領域における軸方向流速の分布形状は温度分布よりフラットで、全サブチャンネルにおいて良く一致している。

この結果から、定格運転時の全炉心解析においては、詳細な解析を要しない集合体については、7 本ピンバンドル体系による簡易モデルで 217 本ピンバンドルに対して十分に対応可能であることが分かった。

(3) 自然循環時の径方向温度分布と軸方向流速の径方向分布

217 本ピンバンドル体系での計算による径方向温度分布と軸方向流速の径方向分布を図 2-6 に、7 本ピンバンドル体系のものを図 2-7 に示す。また、両体系に対する中心サブチャンネル、エッジサブチャンネルおよびコーナーサブチャンネルにおける軸方向温度分布の比較を図 2-8 に示す。

温度分布、流速分布とも、集合体入口から発熱部上端まで良く一致しているが、集合体出口近傍では、少し違いが現れる。集合体熱移行の評価に重要な温度の差は集合体出口で最大となり、ここで 10℃弱程度となった。集合体出入口間の温度差に対する割合は 5%以下の違いとなる。定格運転時にほぼ一様であった中心サブチャンネルの軸方向流速の径方向分布は、自然循環時には、勾配が大きくなった。軸方向流速も温度分布と同様に集合体出口近傍で違いが大きくなっている。

7 本ピンバンドル体系の簡易モデルでも概ね妥当と思われる結果が得られたが、大型ピンバンドルの再現性をより上げるには、径方向のミキシング係数を調節することによって可能となる。但し、汎用性を考慮して体系や境界条件を変えた多くの計算によりミキシング係数の最適値を見出す必要がある。

これに対して、同様な手法でより周辺部の模擬精度を上げるには、19 本ピンバンドル体系の簡易モデルが考えられる。この方法は、7 本ピンバンドル体系に比べ計算時間を要するが、計算条件に影響を受けにくいモデルとなることが予想される。7 本ピンバンドル体系でも周辺部の温度誤差が 5%以下の違いであるので、十分な精度が期待できる。大型バンドルの領域と 19 本ピンバンドル体系の対応は、周辺部の対応は 7 本ピンバンドル体系の場合と同様に、中心サブチャンネル領域内で温度勾配の大きい最外周リング(中心サブチャンネル領域内)を 19 本ピンバンドル体系の第 2 リングのサブチャンネルに割

り当てるのが妥当と思われる。

第3章 MPIによるコードの並列化

コード内部の計算負荷やデータフローを分析することにより、4～8プロセッサエレメント (PE) で構成される並列マシン環境 (富士通 VPP300 や DEC クラスタマシン等) を前提として、数値計算アルゴリズムの見直しを含む最適なプログラムの並列化を行った。並列化に伴う各プロセス間のデータ通信やプログラム処理の同期などの制御に使用する並列化プログラミングツールには、現在の主流である MPI (Message Passing Interface) を用いた。

3.1 燃料集合体解析部の負荷分析

全炉心に対して最適な並列化を行うための知見を得るために、MPI で並列化された集合体解析部の計算負荷分析を経過時間と CPU 時間に対して行った。

多次元の偏微分方程式を離散化して解くコードの並列化手法として、領域分割は最も一般的に採用される手法である。当解析部も集合体高さ方向に領域を分割して、それぞれの部分領域に対してプロセスを割り当てる手法を用いている。

このモジュール単体で 37 本ピンバンドルを定常運転条件下で解析した時の 1PE と 4PE での計算に対する各サブルーチンにおける平均経過時間と平均 CPU 時間を表 3-1 に示す。これより、過渡計算部中においては、マトリックスソルバー以外の並列化効率は良好であることが分かる。一方、マトリックスソルバーである ILUBCG 法の負荷は非常に大きいことが分かる。特に、前処理として不完全 LU 分解を行うソルバーでは、並列化による効率向上が得られていない。より並列性が高く (逐次的に計算する必要がある部分が少ない) 通信が少なく済む前処理として不完全 LU 分解をせず対角のスケーリングのみ行う簡易版の BCG 法においても、内積計算部の通信にかなりの負荷が掛かっており、並列化効率の妨げとなっている。(これに関しては、同様な並列化プログラミングツールである PVM やマシン環境についても、今後、調査する必要がある。)

この内積計算部のプログラミング方法を変えた調査では、(極端に大量のデータ通信は別として) 通信量は計算時間にあまり影響せず、通信回数が大きく計算負荷に影響することが分かった。これは、MPI の通信手続きにかなりの計算時間が費やされることを示唆する (通信手続きによるオーバーヘッドが大きい)。また、一般に CG 系のソルバーの収束性は丸め誤差の影響を受けやすいことが知られているが、内積計算の順序を変えた計算でもそれが確認された。領域によって分割されたプロセス間で和を計算する前に、水平面の部分和を計算する段階を経ることにより丸め誤差を押し収束回数を減らすことができる。これにより通信回数をかなり減らすことができる。

燃料集合体解析部は領域分割による並列化がなされているが、BCG 法のソルバーも同様な並列化を行う限り、収束のための繰り返し計算中の内積計算部での通信は避けられない。この対策として、BCG のみ領域分割せず BCG ソルバー専用のプロセスを設け一括計算する方

法が考えられる。小規模な集合体に対して領域分割による並列化を行う場合は、直接法によるマトリックスソルバーの導入も有効と考えられる。

以上の燃料集合体解析モジュールの負荷分析により、並列化に対する次の知見が得られた。

- ・ MPI でのタスク間通信においては、通信手続きのオーバーヘッドによる計算時間負荷が大きく、通信のデータ量よりも通信回数が並列化効率に対する重要なパラメータとなる。したがって同じデータ量を通信する場合、極力、回数を減らすプログラミングが必要である。
- ・ 収束計算等の繰り返し計算中では、できるだけ通信を避ける。
- ・ 領域分割による並列化は有効である。特に全炉心モデルの並列化に関しては、集合体という領域で分割を行うことで、高効率な並列化が期待できる。

3. 2 並列化方法

ここでは、全炉心システムを構成するそれぞれの主要モジュールの概要を説明した後、数値計算上の結合方法について詳細を述べる。

3.2.1 全炉心解析コードの概要

精度の高い全炉心解析を行うためには、高精度の炉心解析モジュールに適切な境界条件を与えることが必要不可欠である。これは、既存の集合体熱流解析コードやプラントシミュレーションコードを並列計算機上で結合することで比較的容易に実現できる。

本作業では、集合体部および炉心槽に対してサブチャンネル解析コード ASFRE^[5]を、冷却系に対しては一次元プラント動特性コード LEDHER^[6]をそれぞれの境界条件の享受による緩い結合で連成させるシステムを構築した。このシステムの構成を図 3-1 に示す。炉心解析モジュールと LEDHER の主要モジュールに加え、ACT の初期値設定や過渡計算中のモニターなど補助的なモジュールである SUBDIS で構成される。

並列化手法には一般的に使用される領域分割を採用し、集合体単位の分割（集合体内も軸方向に領域分割を行うことが可能）と炉心部-冷却系間で分割を行う。これは、既存コードの担当領域そのものであり、自然かつ合理的な分割方法と考えられる。このため、集合体間では、集合体管壁上での熱伝達に関するパラメーターが、炉心部-冷却系間では、出入口境界条件等がやり取りされるだけで、最小限の通信で実現することができた。

また、並列化プログラミングツールには現在主流である MPI を採用し、分割領域間の全ての通信には MPI の通信用ライブラリーを使用した。

3.2.2 炉心解析モジュールの概要

ACT は、定格運転時から自然循環崩壊熱除去時に至る原子炉の様々な運転モードに対し、炉心部全体の熱流力特性を詳細に評価することを目的として開発が進められているコードである。原型を集合体サブチャンネル解析コード ASFRE III とし、集合体と炉心槽との構造的相似性を利用し、炉心槽解析用物理モデルを装備し、並列計算機である CRAY-T3D 上で炉心全体の熱流力を解析できる機能を有するバージョンも作成された^[2]。なお、ACT の詳細な内容については参考文献[1], [2], [3], [5]を参照されたい。

ここでは、LEDHER の結合方法の説明に必要なモデルと解法の概要についてのみ触れる。

(1) モジュールの概略

・機能

並列アルゴリズムによる全炉心熱流力解析 (サブチャンネル解析)

・計算対象

集合体内冷却材、炉心槽内冷却材、燃料ピンおよび集合体管壁

・基礎式

集合体内および炉心槽内の冷却材に対して

質量保存式、運動量式およびエネルギー式

燃料ピンに対して

三次元または径方向一次元熱伝導方程式

集合体管壁に対して

厚さ方向一次元熱伝導方程式

・構成式

壁面摩擦

Novend-Stern (集合体軸方向) Gunter-Shaw (集合体横方向)

円管モデル(炉心槽軸方向) 二次元溝モデル

ENEAC (炉心槽横方向)

さらに、ワイヤースペーサモデルとして

DRM (詳細モデル)

Cheng-Todreas (簡易モデル)

壁面熱伝達

FFTF、Aoki (集合体)

Subbotin (炉心槽)

・離散化

コントロールボリューム法 (空間積分) 半陰解法 (時間積分)

・数値計算アルゴリズム

M-ICE

・その他の数値計算手法

直接法あるいは ILUBCG 法による連立方程式ソルバー

・対象とする計算機

MPI がインストールされているもの。

並列計算機またはネットワークで結合されたワークステーション

(2) 数値計算法

a) 基礎式

炉心解析モジュールのベースはサブチャンネル解析コードであり、サブチャンネル解析固有のコントロール・ボリューム形状で計算領域を分割する。図 3-2 にサブチャンネル分割方法を示す。流体の数値モデル化には、ポーラスメディアアプローチを採用している。このため、積分形で基礎式を表示する。

質量保存式

$$\frac{\partial \langle \rho_f \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{ff}} \rho_f v_f \cdot n dA = 0 \quad (3-1)$$

運動量式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \rho_f v_f \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{ff}} \rho_f v_f (v_f \cdot n) dA = & \langle \rho_f \rangle g + \frac{1}{V_f} \int_{A_{ff}} (-Pn - \tau \cdot n) dA \\ & + \frac{1}{V_f} \int_{A_{fw}} (-Pn - \tau \cdot n) dA \end{aligned} \quad (3-2)$$

エネルギー式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \rho_f e_f \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{ff}} \rho_f e_f v_f \cdot n dA = & -\frac{1}{V_f} \int_{A_{fw}} \vec{q}_f \cdot n dA - \frac{1}{V_f} \int_{A_{ff}} \vec{q}_f \cdot n dA \\ & - \langle P \nabla \cdot v_f \rangle \end{aligned} \quad (3-3)$$

ここで、 ρ 、 v 、 P 、 e は、それぞれ、密度、流速、圧力、内部エネルギーを、 g 、 τ 、 \vec{q} は、それぞれ、重力加速度、せん断応力テンソル、熱流束を表わす。 V_f 、 A_{ff} 、 A_{fw} は、それぞれ、コントロール・ボリューム内で流体が占める体積、流体-流体間の接触面積、流体-構造物間の接触面積を表わす。

$\langle \rangle$ はコントロール・ボリューム内で流体が占める部分の体積平均量を表わし、コントロール・ボリューム内の状態量 ϕ の体積平均は、次式で表わされる。

$$\langle \phi \rangle = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \phi dV \quad (3-4)$$

b) 離散化式

質量保存式

$$V_{i,l} \frac{\rho_{f,i,l}^{n+1} - \rho_{f,i,l}^n}{\Delta t} + \langle A_z \rho_f^n w_f^{n+1} \rangle_{i,l+1/2} - \langle A_z \rho_f^n w_f^{n+1} \rangle_{i,l-1/2} + \sum_k \left[\sigma_k \langle A_l \rho_f^n u_f^{n+1} \rangle_{k,l} \right] = 0 \quad (3-5)$$

軸方向運動量式

$$V_{i,l} \frac{(\rho_f^n w_f^{n+1})_{i,l+1/2} - (\rho_f^n w_f^n)_{i,l+1/2}}{\Delta t} + \langle A_z \rho_f w_f w_f \rangle_{i,l+1}^n - \langle A_z \rho_f w_f w_f \rangle_{i,l}^n + \sum_k \left[\sigma_k \langle A_l \rho_f w_f u_f \rangle_{k,l+1/2}^n \right] = -\frac{A_{z,i,l+1} + A_{z,i,l}}{2} (P_{i,l+1}^{n+1} - P_{i,l}^{n+1}) - F_{wz,i,l+1/2}^{n+1} - g(V_f \rho_f^n)_{i,l+1/2} \quad (3-6)$$

横方向運動量式

$$V_{k,l} \frac{(\rho_f^n u_f^{n+1})_{k,l} - (\rho_f^n u_f^n)_{k,l}}{\Delta t} + \langle A_l \rho_f u_f w_f \rangle_{i,l+1/2}^n - \langle A_l \rho_f u_f w_f \rangle_{i,l-1/2}^n + \sum_k \left[\cos \theta_k \langle A_l \rho_f u_f u_f \rangle_{k,l}^n \right] = -\frac{V_f}{L_{k,l}} (P_{j,l}^{n+1} - P_{i,l}^{n+1}) - F_{wl,k,l}^{n+1} - g(V_f \rho_f^n)_{k,l} \quad (3-7)$$

エネルギー式

$$V_{i,l} \frac{(\rho_f e_f)_{i,l}^{n+1} - (\rho_f e_f)_{i,l}^n}{\Delta t} + \langle A_z (\rho_f e_f)^n w_f^{n+1} \rangle_{i,l+1/2} - \langle A_z (\rho_f e_f)^n w_f^{n+1} \rangle_{i,l-1/2} + \sum_k \left[\sigma_k \langle A_l \rho_f e_f u_f \rangle_{k,l}^n \right] = Q_{wf,i,l}^{n+1} + Q_{ff,i,l}^{n+1} \quad (3-8)$$

ここで、 w 、 u 、 Q は、それぞれ、軸方向流速、横方向流速、熱伝導または熱伝達による仕事率の収支を表わし、 n 、 i 、 k 、 l は、時間、サブチャンネル番号、ギャップ番号、軸方向メッシュ番号を表わす。 σ は、ギャップにおける流体の方向を識別するための符号である。 θ_k は $u_{k,l}$ と隣接する横方向流速との流速定義方向のなす角度である。なお、 $\langle \rangle$ は、ここでは、風上差分を表わす。

c) 数値計算アルゴリズム

軸方向運動量式と横方向運動量式の離散化式 (3-6) 式、(3-7) 式は、それぞれ、以下のよう整理できる。

$$w_{i,l+1/2}^{n+1} = \hat{w}_{i,l+1/2}^n + d_{i,l+1/2}^n (P_{i,l}^{n+1} - P_{i,l+1}^{n+1}) \quad (3-9)$$

$$u_{k,l}^{n+1} = \hat{u}_{k,l}^n + d_{k,l}^n (P_{i,l}^{n+1} - P_{j,l}^{n+1}) \quad (3-10)$$

これらを、質量保存式とエネルギー式の離散化式 (3-5) 式、(3-8) 式に代入して流速を消去して得られる二式は、圧力と温度の関係式となる。さらに温度を消去すると、以下のよう自分自身と隣接するコントロール・ボリュームの圧力だけの関係式が得られる。

$$P_{i,l}^{n+1} + a_{i,l-1} P_{i,l-1}^{n+1} + a_{i,l+1} P_{i,l+1}^{n+1} + \sum_j a_{j,l} P_{j,l}^{n+1} = b_{i,l} \quad (3-11)$$

ここで、 a 、 b は定数、 j は隣接サブチャンネルを表わす。

全コントロール・ボリュームについて (3-11) 式で表わされる圧力関係式を連立させて、適切な境界条件を与えて解くことにより計算領域の全ての圧力が求められる。

ACTでは、炉心上下端における圧力分布を一様と仮定しており、圧力指定境界条件、各集合体および炉心槽毎に与える流量指定境界条件に対して次の式が用いられる。

圧力境界条件

炉心入口において、

$$P_{i,l}^{n+1} = P_{bottom} \quad (3-12)$$

炉心出口において

$$P_{i,top}^{n+1} = P_{top} \quad (3-13)$$

ここで、 P_{bottom} 、 P_{top} は既知である炉心入口部、出口部の圧力。

流量境界条件

各集合体および炉心槽の入口において、

$$W_{in} = \sum_i (A\rho w)_{i,l/2} = \sum_i A\rho [\hat{w}_{i,l/2} + d_{i,l/2} (P_1^{n+1} - P_{i,2}^{n+1})] \quad (3-14)$$

各集合体および炉心槽の出口において、

$$W_{out} = \sum_i (A\rho w)_{i,top-1/2} = \sum_i A\rho [\hat{w}_{i,top-1/2} + d_{i,top-1/2} (P_{i,top-1}^{n+1} - P_{top}^{n+1})] \quad (3-15)$$

ここで、 W_{in} 、 W_{out} は、炉心入口、出口における各集合体の全流量で既知である。

3.2.3 熱輸送系解析モジュールの概要

熱輸送系解析モジュールとして適用されるコードは LEDHER である。LEDHER は、大型炉崩壊熱除去系の信頼性向上とプラント設備容量の合理化を図るため、長期にわたる崩壊熱の自然循環除熱能力を評価するために開発されたシステム解析コードである。冷却システム全体を長時間シミュレーションするために、極力計算点数を減らすことによる思い切った簡略化と時間積分法として陰解法を用いることで高速化を図っている。

オリジナルの LEDHER は、大型炉の一次冷却系と二次冷却系のシステム解析が可能であるが、今回はその簡易版である PLANDTL-DHX バージョンを利用する。なお、LEDHER の詳細については参考文献に譲ることとし、ここでは、炉心解析モジュールとの結合方法の理解のために必要なモデルと解法の概要の説明に止める。

(1) モジュールの概略

- ・機能

一次元モデルによる原子炉システム解析

- ・解析対象システム構成要素

炉心、上下プレナム、IHX、ポンプ、配管

SG、AC、リザーバータンク、逆止弁等

- ・基礎式

質量保存式、運動量式およびエネルギー式（冷却材に対して）

エネルギー式（構造材に対して）

- ・離散化

有限体積法（空間積分）

陰解法（時間積分）

- ・数値計算手法

流動とエネルギーそれぞれに対しマトリックスを構成し直接法で解く

(2) 数値計算モデル

LEDHER PLANDTL-DHX バージョンの各構成要素について計算モデルを示した後、最終的に解かれる流動の式で構成されるマトリックスとエネルギーの式で構成されるマトリックスの構成について説明する。両者は、逐次的に解かれるが、感度の違いから異なった時間刻み幅を使用している。

a) 各コンポーネントの計算モデル

・Volume モデル (炉心上下プレナムを模擬する)

流動の式

$$\sum_j W_j^{in} = \sum_j W_j^{out} \quad (3-16)$$

$$P_j = P_{ref} - \rho g Z_j \quad (3-17)$$

ここで、 $W_j^{in/out}$: j を通って Volume を通過する質量流量

P_j, P_{ref} : j 点の圧力、基準点の圧力

Z_j : 基準圧力位置から見た j 点の高さ

エネルギーの式

$$\rho V_i C_p \frac{dT_{vi}}{dt} = \sum W_j^{in} C_p T_j + \sum W_j^{out} C_p T_{vi} - h_{ik} A (T_{vi} - T_{sk}) \quad (3-18)$$

ここで、 V_i : Volume i の冷却材体積

T_{vi} : Volume i の代表温度

T_{sk} : Structure k の代表温度

T_j : j 点の温度

h_{ik} : Volume i と Structure k 間の熱伝達率

・Path モデル (炉心及び配管)

流動の式

$$\frac{L}{A} \frac{dW}{dt} = P_1 - P_2 - \Delta P - \rho g Z \quad (3-19)$$

$$\Delta P = \frac{L}{D} f \frac{1}{2} \frac{W|W|}{\rho A^2} + K \frac{W|W|}{\rho A^2} \quad (3-20)$$

ここで、 A : 流路断面積

D : 等価直径

f : 摩擦損失係数

g : 重力加速度

K : 形状損失係数

P : 圧力

W : 流量

Z : エレベーション

ρ : 密度

エネルギーの式

$$\rho V C_p \frac{dT_{pj}}{dt} = W C_p (T_1 - T_2) - h_{jk} A (T_{pj} - T_{sk}) \quad (3-21)$$

ここで、 h_{jk} : Path j と Structure k 間の熱伝達率

T_{pj} : Path j の代表温度 T_1 or T_2

・ Structure モデル

エネルギーの式

$$M C_p \frac{dT_{sk}}{dt} = \sum_i h_{ik} A (T_{vi} - T_{sk}) + \sum_j h_{jk} A (T_{pj} - T_{sk}) + Q_k(t) \quad (3-22)$$

ここで、 M : 質量

Q : 発熱量

・ 熱交換器モデル

出入口プレナム部と熱交換部から成る。熱交換部は、1次系と2次系（冷却材、伝熱管、構造材）から成り、構造材以外については任意の個数の計算格子に分割できる。

流動の式

$$\frac{L}{A} \frac{dW}{dt} = P_i - P_o - \Delta P - \rho(T_p^{in}) g Z_p^{in} - \rho(T_x) g Z_x - \rho(T_p^{out}) g Z_p^{out} \quad (3-23)$$

$$\Delta P = \frac{L}{D} f \frac{1}{2} \frac{W|W|}{\rho A^2} + K \frac{W|W|}{\rho A^2} \quad (3-24)$$

ここで、 T_p^{in}, T_p^{out} : 入口、出口プレナムの冷却材代表温度

Z_p^{in}, Z_p^{out} : 入口、出口プレナム部流路の高低差

T_x : 熱交換部代表温度

Z_x : 熱交換部流路の高低差

エネルギーの式

イ) 冷却材

$$T_x = \sum_i \frac{T_i + T_{i+1}}{2} \quad (3-25)$$

i 番目のコントロール・ボリュームについて

$$\rho V C_p \frac{dT_{xi}}{dt} = W C_p (T_i - T_{i+1}) - h_t A (T_{xi} - T_i) - h_w A (T_x - T_w) \quad (3-26)$$

$$T_{xi} = T_{i+1} \quad (W \text{ が正の場合}) \quad (3-27)$$

$$T_{xi} = T_i \quad (W \text{ が負の場合}) \quad (3-28)$$

ここで、 T_x : 熱交換部代表温度 T_{xi} : i 番目のコントロール・ボリュームの代表温度 h_t : 伝熱管との熱伝達係数 h_w : 構造材との熱伝達係数

ロ) 伝熱管

$$M C_p \frac{dT_{ii}}{dt} = h_{tp} A (T_{pi} - T_{ii}) + h_{ts} A (T_{si} - T_{ii}) \quad (3-29)$$

ここで、 T_{ii} : 伝熱管の代表温度 T_{pi}, T_{si} : 1次系、2次系冷却材の代表温度 h_{tp}, h_{ts} : 1次系、2次系冷却材との熱伝達係数

ハ) 構造材

$$M C_p \frac{dT_w}{dt} = h_w A (T_x - T_w) - h_a A (T_w - T_a) \quad (3-30)$$

ここで、 T_a : 雰囲気温度 h_a : 雰囲気との熱伝達係数

・ポンプ

定格運転時、フローコストダウン時、ポニーモーター運転時には、流量を与える。自然循環に引き継いでからは、ポンプは流動抵抗としてのみ働く。

流動の式

$$W = W_{set} \cdot \alpha \quad (3-31)$$

$$t_p = t - t_0 \quad (3-32)$$

$$\alpha = 1.0 \quad t_p < 0.0 \quad (3-33)$$

$$\alpha = \exp(-t_p / \tau) \quad \exp(-t_p / \tau) > f_c \quad (3-34)$$

$$\alpha = f_c \quad \exp(-t_p / \tau) < f_{cc} \text{ かつ ポニーモーター ON} \quad (3-35)$$

$$\alpha = 0.0 \quad \exp(-t_p / \tau) < f_{cc} \text{ かつ ポニーモーター OFF} \quad (3-36)$$

ここで、 W_{set} : 設定流量 (定格流量)

τ : $1/e$ 減衰時間

t_0 : ポンプトリップ時刻

f_c : ポニーモーターONの時、ポニーモーター流量比

ポニーモーターOFFの時、自然循環に切り換える流量比

但し、 $\alpha = 0.0$ の場合 (フローコストダウンから自然循環に引き継いだ後) には (3-31) 式の代わりに次の式を用いる。

$$P_i - P_o = \Delta P + \rho g Z \quad (3-37)$$

$$\Delta P = C \frac{W|W|}{W_{ref}^2} \quad (3-38)$$

ここで、 P_i, P_o : 入口、出口圧力

W_{ref} : 定格流量

Z : 出入口高低差

C : ポンプ停止時圧力損失係数

b) マトリックスの構成

・流動の式

以下に流動の式をマトリックスで表示する。

流動のマトリックスは、圧力定義点に対応する連続の式と流量定義点に対応する運動量式の混合で構成される。

$$\begin{matrix}
 & A & & x & & b \\
 \left(\begin{array}{c} \text{連続の式の係数} \\ \hline \text{運動量の式の係数} \end{array} \right) & \cdot & \left(\begin{array}{c} P_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{NPRESS} \\ W_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ W_{NPATH} \end{array} \right) & = & \left(\begin{array}{c} \text{RHS} \end{array} \right)
 \end{matrix}$$

(3-39)

ここで、NPRESS, NPATH は総圧力定義点数と総パス数を表わす。

・エネルギーの式

以下にエネルギーの式をマトリックスで表示する。

エネルギーのマトリックスは、圧力定義点に対応する代表温度の式（一種の平均化）とエネルギー式の混合で構成される。

$$\begin{matrix}
 & A & & x & & b \\
 \left(\begin{array}{c} \text{代表温度の式の係数} \\ \hline \text{エネルギーの式の係数} \end{array} \right) & \cdot & \left(\begin{array}{c} T_{P1} \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{PNPRESS} \\ T_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{NPATH} \end{array} \right) & = & \left(\begin{array}{c} \text{RHS} \end{array} \right)
 \end{matrix}$$

(3-40)

3.2.4 集合体初期流量設定部 (SUBDIS) の概要

SUBDIS は、炉心解析モジュールのために炉心内における状態量の初期値を設定し、定常計算の負荷を軽減するために作成した補助的なモジュールである。ただし、SUBDIS を使用しても完全な初期定常解が得られるわけではなく、初期定常を再現するには、Null Transient 計算が必要となる。

炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールへ与える入力データをもとに全集合体をパラレル次元モデルで模擬し、初期状態における炉心内の流量配分を計算し、炉心解析モジュールへ各集合体の入口流量を渡す。SUBDIS 専用の入力データ (ファイル) は必要とせず、炉心解析モジュールや熱輸送系解析モジュールのデータを使用する。炉心解析モジュール、熱輸送系解析モジュールから SUBDIS への入力データや SUBDIS の計算結果の炉心解析モジュールへの受け渡しは、全てタスク間通信で行う。

パラレル次元モデルによる炉心内流量配分数値計算モデルは、炉心解析モジュールの燃料集合体内の初期流量配分モデルを分離して作成したもので、炉心解析モジュールと同様、Newton-Raphson 法により、全炉心流量に対し炉心出入口圧力が一様になる状態を求めるものである。なお、全炉心流量は、熱輸送系解析モジュールの初期流量を使用する。

3.2.5 炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールの数値的結合方法

炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールは、それぞれ異なる目的のために開発された独立したコードであり、そのまま単純に結合できるわけではなく数値モデルの変更を必要とする。炉心解析モジュールは、集合体と炉心槽領域のみを計算対象領域とするため、上下プレナムとの境界における条件を必要とする。一方、熱輸送系解析モジュールはそれ自体に炉心の簡易モデルを含んでおり、単独でシステム全体の解析を行う。これらの結合には、CRAY T3D での並列化で使用した方法を用いた。

結合モデル図を図 3-2 に示す。炉心解析モジュールは、熱輸送系解析モジュールから炉心上下端の圧力と温度を受け取り、出入口圧力境界条件で炉心部の計算を行う。この時のコントロールボリューム単位の状態量をもとに、運動量式を炉心全体で積分して得ることができる炉心部の流量-圧力相関式を構築し、その係数を熱輸送系解析モジュールへ送信する。熱輸送系解析モジュールは、炉心部のモデルを一つの Path で代表する。炉心用 Path では、炉心解析モジュールから受け取った相関式を代わりに使用し、システム全体の流動に関する連立方程式を解く。その後、炉心解析モジュールの炉心部出口温度を境界条件とし、システム全体のエネルギーに関する連立方程式を解く。

炉心部の流量-圧力相関式の導出

i) 運動量式 (微分形)

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \rho u u = -\nabla P - k u + \rho g \quad (3-41)$$

(3-41) 式を炉心全体で積分すると、以下の積分形の運動量式が得られる。

ii) 運動量式 (積分形)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho u dv + \int_{A_{cout}} \rho u u \cdot n da - \int_{A_{cin}} \rho u u \cdot n da = - \int_{A_{cout}} P \cdot n da + \int_{A_{cin}} P \cdot n da - \int_{V_c} k u dv + \int_{V_c} \rho g dv \quad (3-42)$$

各項の離散化

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho u dv = \frac{\partial}{\partial t} \int_{lc} \int_{Ac} \rho u da dl \approx \frac{\partial}{\partial t} lc W \rightarrow lc \frac{W^{n+1} - W^n}{\Delta t} \quad (3-43)$$

$$\int_{A_{cout}} \rho u u \cdot n da - \int_{A_{cin}} \rho u u \cdot n da \rightarrow \sum_i (\Delta A \rho u u)_{i,out}^n - \sum_i (\Delta A \rho u u)_{i,in}^n \quad (3-44)$$

$$- \int_{A_{cout}} P \cdot n da + \int_{A_{cin}} P \cdot n da \rightarrow - \frac{V_c}{lc} (P_{out}^{n+1} - P_{in}^{n+1}) \quad (3-45)$$

$$- \int_{V_c} k u dv \rightarrow \left(\sum_i \sum_l k_{im} u^{n+1} \Delta v \right) \frac{W^{n+1}}{W^n} + \left(\sum_i \sum_l k_{ex} u^n \Delta v \right) = K W^{n+1} + F_{ex} \quad (3-46)$$

$$\int_{V_c} \rho g dv \rightarrow g \sum_i \sum_l \rho \Delta v \quad (3-47)$$

これらの項を整理すると以下のように炉心部全体を代表する流量-圧力相関式が得られる。

$$\frac{lc}{V_c} \left(\frac{lc}{\Delta t} + K \right) W^{n+1} = \frac{lc}{V_c} \left(\frac{lc}{\Delta t} W^n + const. \right) + P_{in}^{n+1} - P_{out}^{n+1} \quad (3-48)$$

ここで、 A_{cin} 、 A_{cout} は炉心部入口、出口面積を lc 、 V_c は、それぞれ炉心長、炉心部体積を示す。

炉心部 Path では、(3-19) 式の代わりに (3-48) 式を解くことになる。この方法は、炉心解析モジュールを圧力境界条件とすることで集合体毎に圧力方程式が閉じることによる並列性の向上と、炉心解析モジュールの炉心部の特性を熱輸送系解析モジュールの炉心部における流量-圧力相関式中の係数に陽に反映することで炉心解析モジュールの連立方程式と熱輸送系解析モジュールの連立方程式を分離することを可能にする。但し、この手法は

炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールの流量を時間ステップ毎に完全には一致させることができない。(圧力は完全に一致する。)しかしながら、(3-48)式が積分形の運動量式から求められており、炉心解析モジュールのコントロールボリューム単位の情報が反映されているため、両者の流量の一致性は良く、速い流量変化時にも十分な精度で追従する。

3.2.6 炉心内初期値設定方法

過渡解析開始時の定常状態の再現や定常解析は Null Transient 計算により行うが、そのための初期値は、極力定常解に近い方が計算時間を短縮できる。また、初期値設定も計算時間をあまり必要としないことが望ましい。

集合体熱流解析部(炉心槽解析も兼ねる)には、軸方向流速のみ考慮してパラレル1次元で集合体内の流量配分を計算する初期計算機能が備わっている。局所閉塞の解析や詳細なワイヤーモデルを使用する解析に対しては、そのまま定常解とすることはできないが、正常なベアバンドルに対しては、定常解として十分に使用できる。一方、入口流量ゼロ、自然循環という条件である炉心槽内に対しては、この機能は使用できない。このため炉心槽内部においては、流速計算を行わず熱伝導計算のみ行うようにした。

また、集合体-炉心槽間の熱流束を評価する方法として、炉心全体で繰り返し計算を行うことも考えられるが、このために要するであろう多大な計算時間や炉心槽内の流動を無視することなどのバランスから適切とは言えない。このため、個々の集合体の外側は断熱として先に計算し、これで求めた集合体の周辺サブチャンネルの温度を炉心槽内の熱伝導式の境界条件とすることにした。

集合体の初期計算には、個々の集合体の入口流量が必要である。ここでは集合体内流量配分と同じアルゴリズムにより、炉心内の集合体間流量配分を求める。これは SUBDIS により行われる。SUBDIS は、炉心全体の流量が熱輸送系解析モジュールから受け取った初期ポンプ流量と一致するように流量配分を計算し、炉心解析モジュール(集合体と炉心槽解析部)に結果を渡す。

冷却系を担当する熱輸送系解析モジュールも、もともと炉心解析モジュールと同様に Null Transient 計算により定常解を求めるコードであり、初期設定はラフである。計算は軽いが、炉心解析モジュールと結合するとそのままでは計算効率が悪い。定常解を得るには、おおよそ冷却材が熱輸送系を一巡するくらいの時間を必要とすると想定し、炉心解析モジュールとの結合モデルでは、Null Transient 計算開始前に熱輸送系解析モジュール単独の Null Transient 計算を行い、冷却系側のみ定常計算を行えるアルゴリズムとした。この時、熱輸送系解析モジュールでは、炉心部に対応するパスの圧力と流量の関係式が必要となるが、これは、前に説明した炉心部の初期計算の後で、流量境界条件による炉心解析モジュールの計算で得られる値で評価する。

3.3 タスクコントロール

ここでは、全炉心解析システム上で並列に動作するタスクの制御方法に関して詳細を述べる。

3.3.1 MPI (MPICH)について

MPI(Message Passing Interface)は、PVM(Parallel Virtual Machine)と並んで並列化プログラミングツールとして広く利用されている。MPIは、MPI Forumによって標準化がされており、現在利用可能なものは、MPI-1の標準によるものである。これよりさらに機能の拡張されたMPI-2も標準化がなされているが、実装されたソフトは現地点では存在していない。

MPIの実装には、ANL(Argonne National Laboratory)で管理運用されているfree softであるMPICHの最新バージョンMPICH version1.1.1を使用した。これもMPI-1の標準に準拠している(MPI-2の一部の機能も反映されている)。このMPICHが実質的に標準のMPIとして多くの実績がある。なお、MPIの標準化はライブラリーの仕様を限定するもので、実行コマンド等の仕様までは限定しない。このため、実行方法に関わる部分はMPICHの仕様に基づく。

MPI-1には、PVMのような動的なタスク生成の機能はないものの(全てのタスクは静的に最初から割り当てるのが前提で、実行時に同時にスタートする。しかし、MPI-2では取り入れられる)、PVMより通信機能が豊富(特に演算などの加工を伴う通信機能が多く用意されている)で利用者にとって便利である。

3.3.2 タスク分割方法とグループ分割方法

(1)タスク分割方法

システムの大半は領域分割によるタスク分割を行っているが、領域分割以外に特別な機能を独立させたタスクとして、集合体初期流量設定するものもある(SUBDIS)。当システムでは、これに炉心出入口の流量や温度をモニターする機能を付け加えた。

炉心内の熱流解析を担当する炉心解析モジュールでは、集合体管壁の外側と集合体内部の任意の軸方向メッシュ境界上でタスク分割することができるようにした。このため、集合体の種類や数、個々の集合体の規模に応じて適切な分割が可能となる。

また、冷却系を担当する熱輸送系解析モジュールは、集合体解析部に比べて計算負荷が少ないので1つのタスクとして扱い内部の並列化は行わない。

全タスクの種類を以下に示す。

- ・ 個々の集合体毎に分割したタスク（さらに任意の集合体について内部を軸方向に沿って分割することも可能である。分割数も任意。）（炉心解析モジュール）
- ・ 炉心槽を担当するタスク（集合体と同様に軸方向に沿って分割可能である。）（炉心解析モジュール）
- ・ 冷却系を担当するタスク（熱輸送系解析モジュール）
- ・ 集合体初期流量設定およびモニターを担当するタスク（SUBDIS）

なお、炉心解析モジュールのプログラムは集合体か炉心槽かに関わらず共通のものを使用するがそれぞれの体系の違いに応じて配列サイズは異なったものを使用できる。（記憶容量を無駄無く利用することができる。）

(2) グループ分割方法

MPI の通信には、大きく分けて Point-to-Point と Global 通信の 2 種類がある。Global 通信には、同期やブロードキャストなどの種類があり同一グループ内全体で通信を行う。

この Global 通信機能は、個々の集合体内タスク間、炉心槽内タスク間、炉心全体のタスク間等で使用すると通信制御に便利である。このため、以下のようにグループ分けをした。

- a. タスク全体
- b. 炉心全体
- c. 炉心槽内
- d. 集合体内
- e. 炉心槽と集合体のルートタスク

ここで、ルートタスクは、炉心槽内部、もしくは集合体内部の代表タスクを表し、入口部を含むタスクとしている。

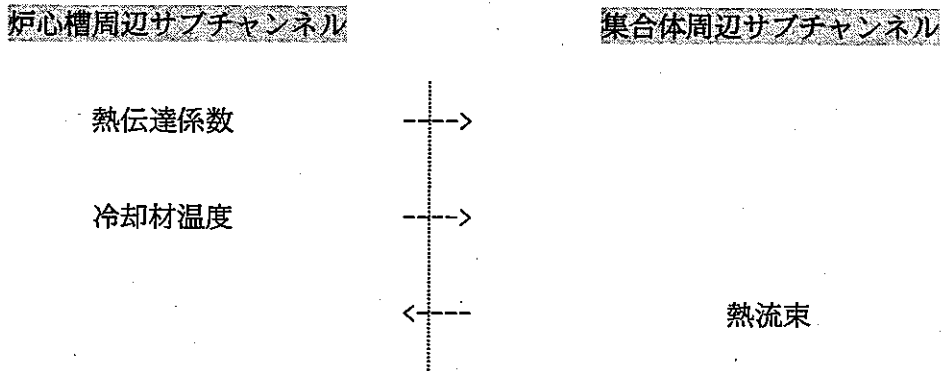
3.3.3 タスク間通信

システム全体が連成しながらうまく動作するためには、タスク間でのデータのスムーズなやり取りが必要であり、データとしては 3.3.2 節で示した分割境界における隣り合う領域間での状態量等のやり取りや、時間の制御等がある。以下に、本システム内のタスク間通信についてももう少し詳細に説明する。

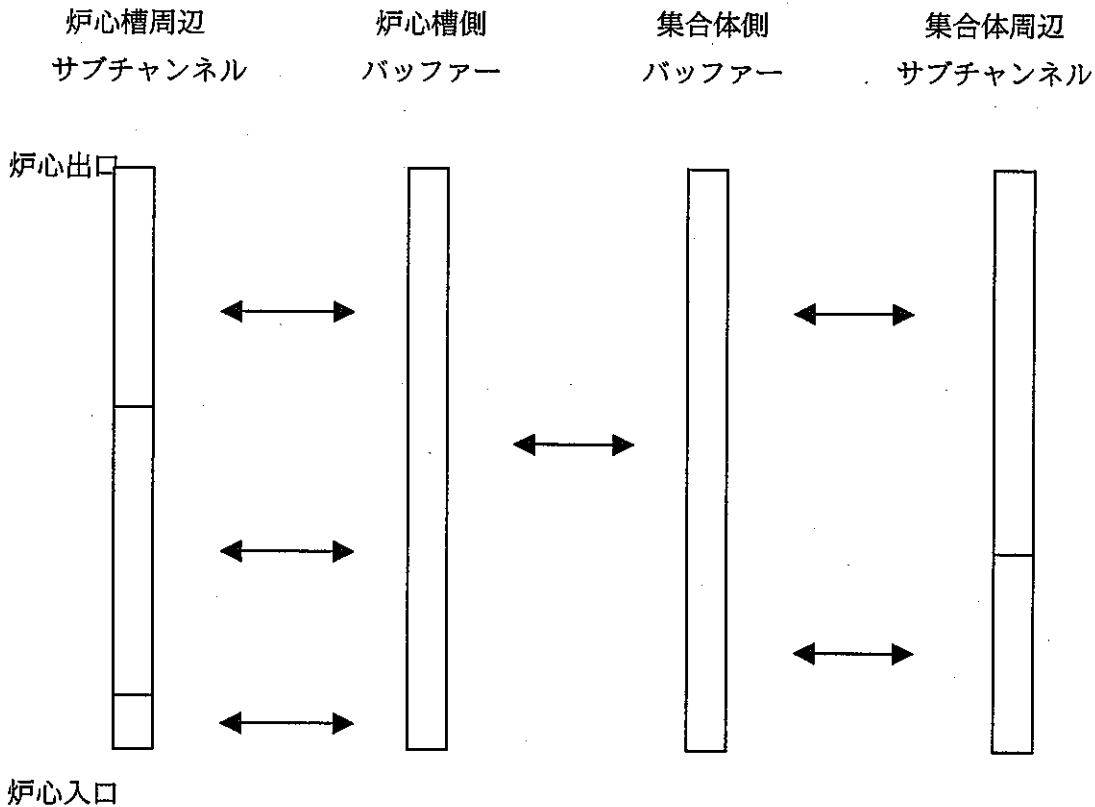
(1) 燃料集合体管壁外側境界

集合体管壁の外側境界では、集合体熱移行に関わる集合体と炉心槽の対応するサブチャンネル間の熱流束を評価するために必要な熱伝達に関わるパラメータが通信によってやり取りされる。熱伝導式は、集合体側のタスクで計算され、周辺サブチャンネルに対応する炉心槽のサブチャンネルで評価する熱流束も求める。

ここでやり取りされるデータの通信を以下に示す。



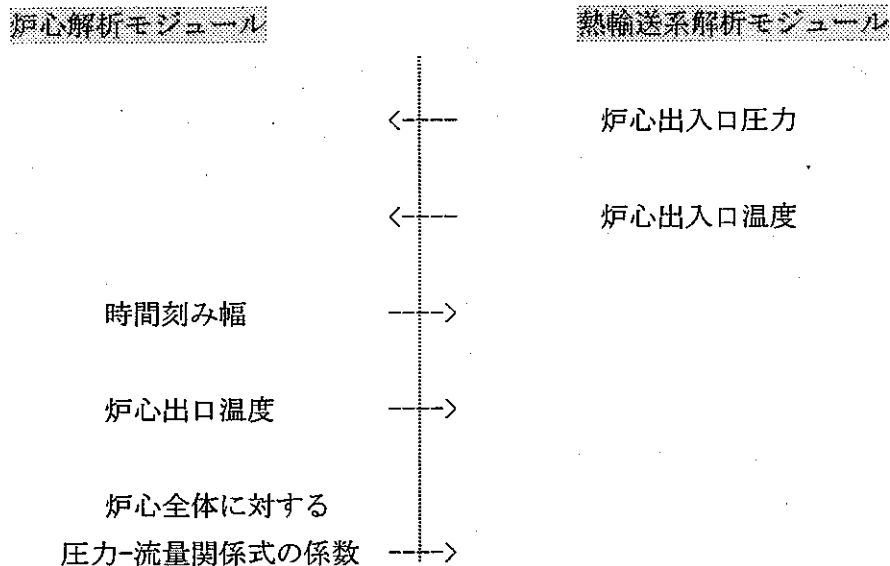
ここで、炉心槽や個々の集合体内の領域分割数を任意に指定できるように、これらの通信データのバッファを設けた。このバッファは、全軸方向のデータを格納する。なお、バッファ間の通信は集合体（もしくは炉心槽）のルートタスク間で行う。



(2) 炉心-冷却系間境界

炉心-冷却系間の境界(集合体の出入口)(炉心解析モジュール-熱輸送系解析モジュール間)においてタスク間でのデータのやり取りは、炉心槽のルートタスクと熱輸送系解析モジュール間で行う。

ここでやり取りされるデータを以下に示す。



(3) 燃料集合体内境界

ここでは、主に各保存式における軸方向の空間微分項の離散化で生じるメッシュ間の関係から領域境界で通信が必要になるものや各コントロールボリューム内の値を炉心全体で加算する時に領域内の部分和をルートタスクに送信するものなどがある。ここでの通信データの種類は多いので個々の列挙は省略する。

(4) SUBDIS の計算条件と結果

集合体の初期流量配分計算を担当する SUBDIS は、炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールから計算条件を受け取り、炉心解析モジュールに結果を返す。

(5) モニターデータ

主要変数のモニターは、特に長時間の解析時に途中結果の妥当性を確認するために必要となる。MPI(MPI-1)は、PVM のように動的なタスクの生成・終了は行えない。このため、SUBDIS が、集合体の初期流量を計算した後は、モニターとして働くようにした。

(6) 終了処理

計算時間のコントロールは、炉心解析モジュールで行う。時間刻み幅の大きさと計算終了の決定は炉心解析モジュールが行い、熱輸送系解析モジュールと SUBDIS に終了を知らせる。MPI では、特定のタスクのみ先に終了させようとするとうエラーになるので注意が必要である。

以上をまとめたシステムフローを図 3-3 に示す。

第4章 機能検証解析

改良したプログラムの基本動作および改良前と改良後の解析結果が一致することを確認するとともに並列化の効果を評価するため、炉心と冷却ループを模擬した PLANDTL-DHX^[4]の試験を模擬する計算を行った。

比較した改良前のプログラムは CRAY T3D 用に開発されたもので、並列化プログラミングツールとして PVM と CRAFT と用いている。これと今回 MPI を用いて開発したコードで、同じ計算条件下の計算を行い計算結果を比較する。計算条件には、PLANDTL-DHX 試験の崩壊熱除去レベルでの自然循環を模擬したデータを用いた。

4.1 計算条件

計算方法は、まず、ポンプによる強制循環条件で Null Transient 計算による初期定常計算を行い、その後、ポンプを停止し Transient 計算を行い自然循環を再現する。この時の自然循環流量等の比較を行う。

以下に解析に用いた計算体系と境界条件を記す。

4.1.1 計算体系

(1) 冷却系

PLANDTL-DHX の試験ループの構成図を図 4-1 に示す。

構成要素を以下に示す。

- ・炉心
- ・下部プレナム
- ・上部プレナム
- ・PRACS
- ・DRACS
- ・IHX
- ・ポンプ
- ・配管

但し、本ケースでは DRACS の起動は行わない。

(2) 炉心

炉心は、中心に燃料集合体を模擬した 37 本ピンバンドル一体とその周辺に配置された 7 本ピンバンドル 6 体と炉心槽で構成される。表 4-1 から表 4-3 に炉心槽、中心集合体および周辺集合体の主な幾何形状パラメータを示す。

中心集合体と周辺集合体三体毎に配管が接続しているが（中心集合体と周辺集合体用で長さ、径が異なる）、この部分の形状圧損は集合体入口に振り分け、配管は一本で模擬した。

炉心槽と集合体のサブチャンネル分割方法は図 4-2 参照。また、軸方向メッシュ分割方法を表 4-4 に示す。

炉心槽中には、直径 3 mm、長さ 50 mm の円柱上のスパーサが集合体間の所々に配置されている。これはポラス閉塞物としてモデル化した。スパーサは炉心槽内の集合体間ギャップにあるために、体積ポロシティーと軸方向面ポロシティーを実際の値で評価し、横方向面ポロシティーに 0 に近い値を指定し、ここでの横方向流速が無視できる程度に小さくした。

4.1.2 境界条件

ポンプ稼動時は、上部プレナム圧力、ポンプ流量、集合体内部のヒーターピン出力および PRACS 二次側の流量と温度がシステムの境界条件となる。ポンプ停止時は、ポンプ自体は流動抵抗のみとして働き、炉心内の発熱と熱交換器の除熱により生じる自然循環力でループ流量が維持される。

以下に境界条件を示す。

初期ポンプ流量	0.8367	Kg/sec
上部プレナム圧力	1.0132×10^5	N/m ²
中心集合体出力	18.3	kW
周辺集合体出力（単体）	18.22	kW
PRACS 二次側流量	1.331	Kg/sec
PRACS 二次側入口温度	274.91	℃

4.2 計算結果

図 4-3 に流量の比較図を示す。ポンプ稼動時の強制循環からポンプ停止後、流量は一旦急激に減少し、その後炉心内の発熱と熱交換器及び PRACS による除熱に起因する自然循環力で次第に流量が回復していく。

両解析結果ともこのような現象を再現しているが、流量回復開始時間、回復時の流量増加率に違いが見られる。両者は同じ定常状態に向かっているように見えるが、T3D 版は原因不明のトラブルで計算が停止してしまった。MPI 版は、流量が一定の状態まで達しており、計算トラブルは生じていない。ポンプ停止からの急激な流量減少カーブは両者一致している。

ポンプ稼働中とポンプ停止後一定時間の流量は、入力データで指定する流量で決まる。従って、初期の流量減少カーブはこの区間での一致と考えられ、これは両コードとも炉心

解析部（炉心解析モジュール）と冷却系解析部（熱輸送系解析モジュール）の結合に関して、同じ処理をしていることを示す。

自然循環流量の回復速度が異なることについては、今後も調査が必要であるが、現時点での判断では、CRAY-T3D での計算は流量回復が遅すぎると予想される。炉心槽と集合体間の熱伝達に関する通信で何らかのトラブルが生じている可能性が高い。これは、今回作成した MPI 版で集合体側から炉心槽側への熱流束だけをゼロとしたケースと、流量回復時の流量増加率が CRAY T3D 版の結果と近くなることや（これを図 4-4 に示した）、ポンプ停止後の流量減少時に集合体側周辺サブチャンネルの温度が上昇しているのに対し、炉心槽側でほとんど変化が見られないことがデジタル値で確認されたことによる。おそらく、集合体管壁でやり取りされる集合体-炉心槽間の熱伝達パラメータの通信に関するトラブルで、集合体内の温度が十分上昇せず、自然循環力が得られていないようである。

この CRAY T3D 版のトラブルの原因としては、CRAY T3D の PE 毎のメモリーサイズに対して、限界に近い計算体系であったことが考えられる。初期の静的な状態でのメモリーサイズが使用可能サイズを超えていなくても通信時に動的な割り当てが生じており、この時オーバーした可能性がある。筆者も、以前同様なトラブルが生じて計算体系を小さくした経験がある。この時には shared 変数絡みのトラブルが生じた。CRAY T3D 版で炉心槽と集合体間の通信は、全て shared 変数を使用している。

この問題に対しては、メッシュ数を減らして両コードで計算し直すことで確認することも可能であるが、試験解析として評価するにはこれ以上メッシュを減らすことはできない上、CRAY-T3D 版の計算に多大な計算時間を要する。このため、MPI 版の結果の妥当性を現在までに得られた結果からできる限り検討することに止めた。

今回作成した MPI 版のコードの結果は、デジタル値によって集合体-炉心槽間の熱流束収支の正しさが確認できており、ポンプ停止後から定常の自然循環に至るまでの遷移過程も妥当なものであると言える。

第5章 まとめ

流体計算工学研究グループでは、燃料集合体内と炉心槽および熱輸送系を解析するコード群を全てカップリングし、冷却系システム全体を解くことができる炉心熱流解析コードの開発を行っている。このコードに対して、大規模な体系への適用性を確保すること、および今後予定されている他の計算モジュール・コードとの結合性を確保することを目的として、燃料集合体解析部の改良および超並列マシンやクラスターマシンなどで動作するメッセージパッシング方式によるコードの並列化を実施した。また、併せて機能検証解析を実施し改良されたコードの性能評価を行った。

これらの結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ・実証炉等の大型炉心への本コードの適用には、注目する燃料集合体以外の集合体について、熱流挙動が同等となる簡易モデルを適用する方法が計算効率および予測精度ともに有効であることを確認した。
- ・コード内部の計算負荷やデータフローを分析することにより、4～8プロセッサエレメントで構成される並列マシン環境（富士通 VPP300 や DEC クラスターマシン等）を前提として、数値計算アルゴリズムの見直しを含む最適なプログラムの並列化を行った。並列化プログラミングツールには MPI (Message Passing Interface) を用いた。
- ・炉心と冷却ループを模擬した PLANDTL-DHX の試験を模擬する計算を行い、改良したプログラムの基本動作を確認した。

参考文献

- 1) 大高雅彦、大島宏之、「複数の熱流動解析コードをカップリングした全炉心熱流動解析コード ACT の開発 -コードの概要と炉心槽解析部の開発-」、JNC レポート TN9410 96-118、1996.
- 2) 大高雅彦、大島宏之、「全炉心熱流動解析コード ACT の開発 (II) -炉心詳細熱流動モデルの開発とナトリウム炉外実験による検証-」、JNC レポート TN9410 97-091、1997.
- 3) 大高雅彦、大島宏之、「全炉心熱流動解析コード ACT の開発 (III) -炉心詳細熱流動モジュールと熱輸送系解析モジュールとのカップリング-」、JNC レポート TN9400 98-004、1998.
- 4) 桃井一光他、「高速炉の自然循環時インターラッパーフロー現象に関する実験研究-炉心冷却効果と自然循環流量低減効果の評価-」、JNC レポート TN9410 97-047、1997.
- 5) H. Ohshima, H. Ninokata, "Thermal-Hydraulic Analysis of Fast Reactor Fuel Subassembly with Porous Blockages," Proc. of 4th Int. Seminar on Subchannel Analysis, Tokyo, pp.323, 1997.
- 6) 上出英樹, 吉川信治, 山口彰, 佐藤和二郎, 柴公倫、「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究 (I) -LEDHER コードの開発と自然循環除去能力の検討-」、JNC レポート TN9410 87-132、1987.

表2-1 217本ピンバンドルと7本ピンバンドル体系のサブチャンネル数の対応

サブチャンネル種類	7本ピン	217本ピン	7本ピンバンドル体系の 1ヶのサブチャンネルに 対応するサブチャンネル数
中心	6	384	64
エッジ	6	48	8
コーナー	6	6	1

表2-2 217本ピンバンドル体系形状データ

燃料ピン本数	217
燃料ピン外径	8.5 [mm]
燃料ピン配列ピッチ	9.65 [mm]
ラッパー管内対面間距離	144.5 [mm]
ワイヤスベーサ外径	1.1 [mm]
ワイヤスベーサ巻きピッチ	200 [mm]
発熱部長	1500 [mm]

表 2-3 217 本ピンバンドル軸方向流路の形状パラメータ

サブチャンネル種類	流路断面積 [m ²]	合計* ¹ [m ²]	濡れ縁長さ [m]	合計* ² [m]	等価直径 [m]
中心	1.1470×10^{-5}	4.4045×10^{-3}	1.5099×10^{-2}	5.7981	3.0386×10^{-3}
エッジ	2.6538×10^{-5}	1.2738×10^{-3}	2.4750×10^{-2}	1.1880	4.2891×10^{-3}
コーナー	9.4046×10^{-6}	5.6428×10^{-5}	1.1661×10^{-2}	6.9966×10^{-2}	3.2260×10^{-3}
合計又は平均* ³		5.7348×10^{-3}		7.0560	3.2510×10^{-3}

*1：各サブチャンネルタイプの流路断面積の合計

*2：各サブチャンネルタイプの濡れ縁長さの合計

*3：流路断面積及び濡れ縁長さは合計、等価直径は平均

表 2-4 217 本ピンバンドル横方向流路の形状パラメータ

横方向流路	ギャップ幅 [m]	中心間距離 [m]
中心-中心* ¹	1.15×10^{-3}	5.57×10^{-3}
中心-エッジ	1.15×10^{-3}	7.78×10^{-3}
エッジ-エッジ	1.49×10^{-3}	9.65×10^{-3}
エッジ-コーナー	1.49×10^{-3}	7.71×10^{-3}

*1：中心サブチャンネルと中心サブチャンネルに跨るギャップ（横方向流路）

表 2-5 7 本ピンバンドル軸方向流路の形状パラメータ

サブチャンネル種類	流路断面積 [m ²]	等価直径 [m]	結合割合 [-]
中心	7.3408×10^{-4}	3.0386×10^{-3}	10.67
エッジ	2.1230×10^{-4}	4.2891×10^{-3}	2.000
コーナー	9.4046×10^{-6}	3.2260×10^{-3}	0.1677

表 2-6 7本ピンバンドル横方向流路の形状パラメータ

横方向流路	ギャップ幅 [m]	中心間距離 [m]
中心-中心	9.20×10^{-3}	5.57×10^{-3}
中心-エッジ	9.20×10^{-3}	7.78×10^{-3}
エッジ-エッジ	-	-
エッジ-コーナー	1.49×10^{-3}	7.71×10^{-3}

表 2-7 軸方向メッシュ分割

軸方向ブロック No.	含有メッシュ No.	メッシュ数	メッシュ長(mm)	軸方向ブロック長(mm)	備考
1	1~10	10	50.0	500.0	下部非発熱部
2	11~40	30	50.0	1500.0	発熱部
3	41~50	10	50.0	500.0	上部非発熱部

表 2-8 境界条件

集合体流量	30.0 [kg/sec] 又は 0.9 [kg/sec]
集合体入口温度	400 [°C]
集合体発熱量	7.5 [MW] 又は 0.225 [MW]
発熱形態	軸方向フラット

表 2-9 集合体出入口圧力差及び温度差

	ケース 1		ケース 2	
	217 本	7 本	217 本	7 本
出入口圧力差 [Pa]	2.954×10^5	2.954×10^5	2.069×10^4	2.069×10^4
出入口温度差 [°C]	197.80	197.82	197.80	197.81

表 3-1 MPI 版 ASFRE の計算負荷 (過渡計算部)

	経過時間 (sec)		cpu 時間 (sec)	
	1PE	4PE	1PE	4PE
FRICOF	11.42	4.699	11.407	4.250
RELMOM	11.033	2.519	11.006	2.378
CONVEC	8.691	2.422	8.665	2.320
FCONXT	3.726	13.632	3.721	4.702
ILUBCG	22.884	31.953	22.675	18.537
NDECMP	0.960	1.966	0.958	0.595
NLU	14.847	41.824	14.816	13.143
NUTLT	14.724	37.707	14.718	12.755
NAXSUB	8.679	1.873	8.729	1.926
NATSUB	8.187	2.408	8.275	2.452
ILUBCG_	69.091	93.207	68.440	60.254
NDECMP_	0.070	0.015	0.071	0.015
NLU_	6.558	1.831	6.658	1.866
NUTLT_	11.694	2.627	11.692	2.657
NAXSUB_	25.638	5.998	25.799	6.127
NATSUB_	25.984	8.470	26.143	8.587
内積計算	3.959	8.820	3.928	4.045

表4-1 炉心槽の主な幾何形状パラメータ

集合体数	7	体
集合体の対面距離 (外側)	71	mm
集合体間ピッチ	78	mm
集合体間ギャップ	7	mm
集合体-炉心槽壁間ギャップ	3	mm
スペーサ径	3 mm および 7 mm	
全長	3070	mm

表4-2 中心集合体の主な幾何形状パラメータ

ピン本数	37	本
ピン径	8.3	mm
ピッチ	9.9	mm
ワイヤースペーサ径	1.5	mm
ワイヤースペーサ巻きピッチ	165	mm
全長	3070	mm
下部非発熱部長さ	920	mm
発熱部長さ	1000	mm
上部非発熱部長さ	400	mm
中性子遮蔽体	750	mm
発熱分布形状	chopped cosine	
集合体管壁厚さ	4	mm

表4-3 周辺集合体の主な幾何形状パラメータ

ピン本数	7	本
ピン径	20.8	mm
ピッチ	22.4	mm
ワイヤースペーサ径	1.5	mm
ワイヤースペーサ巻きピッチ	165	mm
全長	3070	mm
下部非発熱部長さ	920	mm
発熱部長さ	1000	mm
上部非発熱部長さ	400	mm
中性子遮蔽体	750	mm
発熱分布形状	chopped cosine	
集合体管壁厚さ	4	mm

表4-4 集合体の軸方向メッシュ分割

軸方向メッシュNo	軸方向メッシュサイズ (m)
1~3	0.068
4	0.05 *
5~7	0.8917
8	0.05 *
9~12	0.07
13	0.05 *
14~17	0.07
18	0.05 *
19~22	0.07
23	0.05 *
24~27	0.07
28	0.05 *
29~32	0.07
33	0.05 *
34~35	0.085
36	0.05 *
37~41	0.0925
42	0.05 *
43~45	0.06

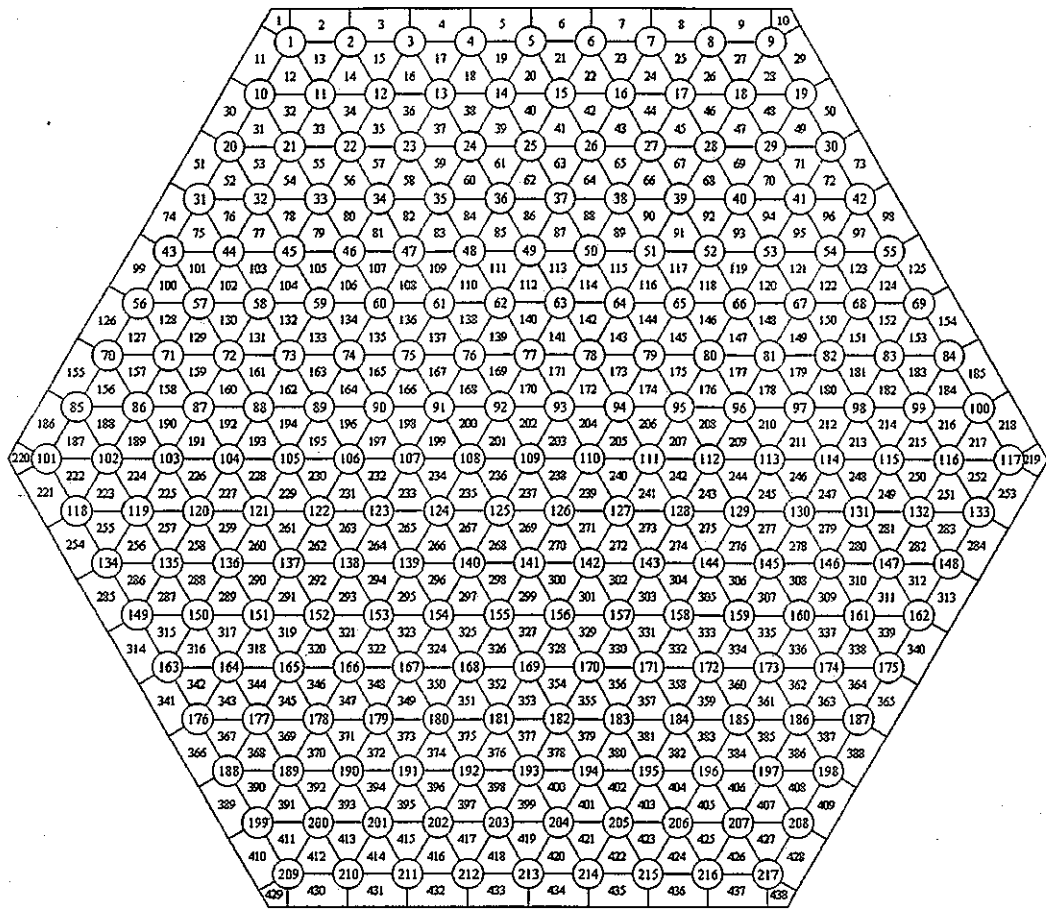


図 2-1 217 本ピンバンドルサブチャンネル分割方法

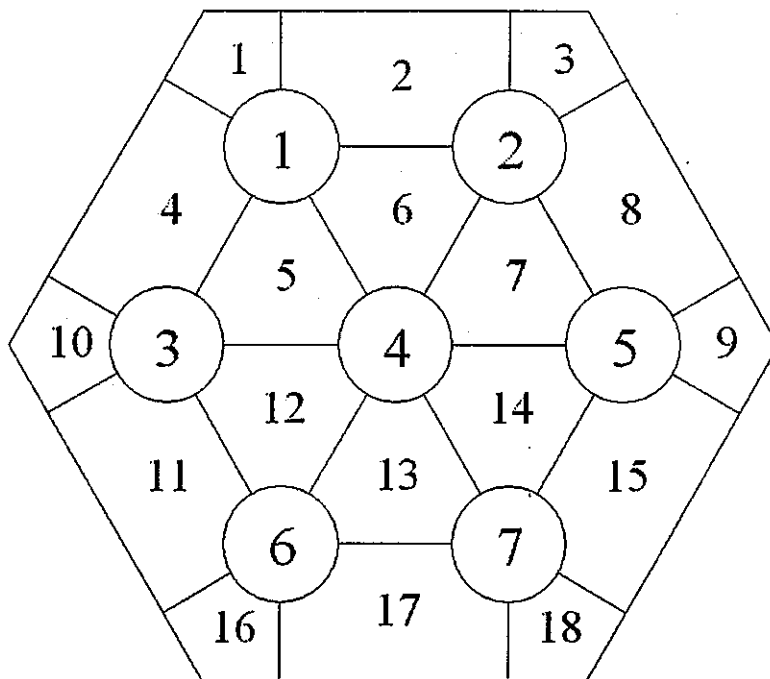


図 2-2 7 本ピンバンドルサブチャンネル分割方法

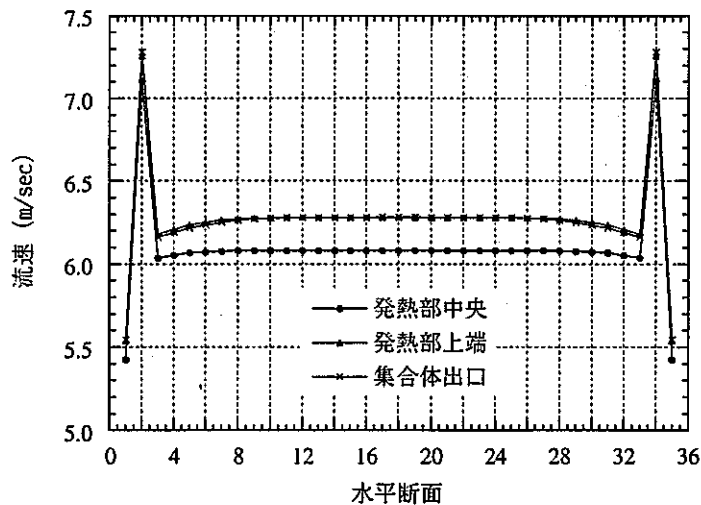
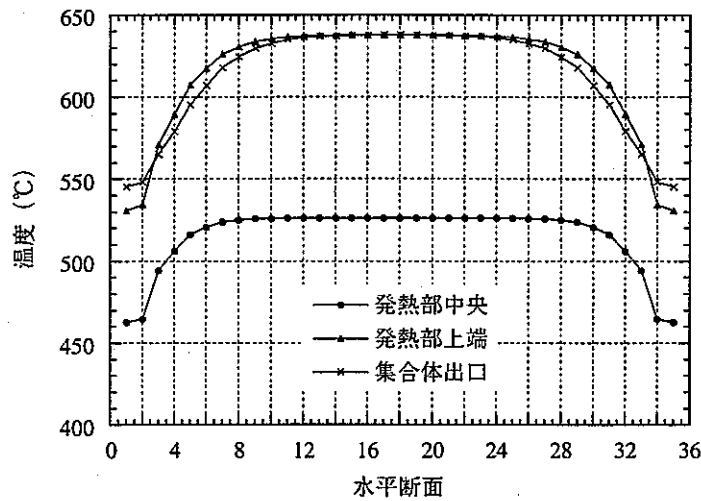
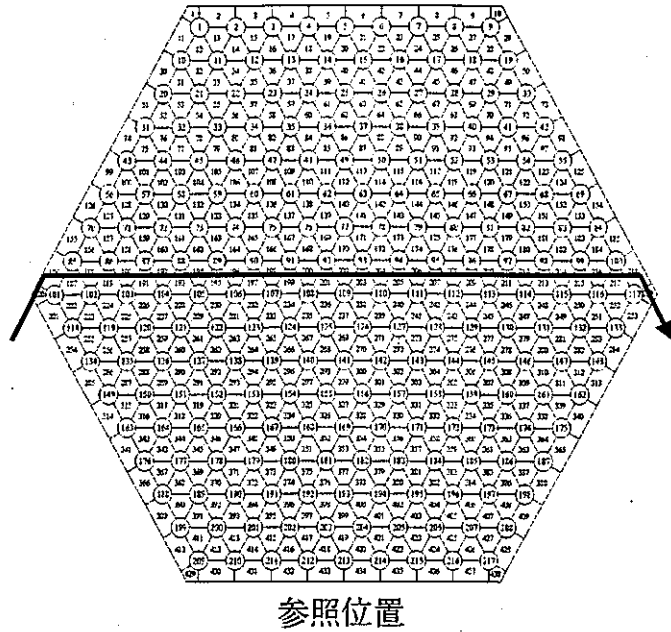
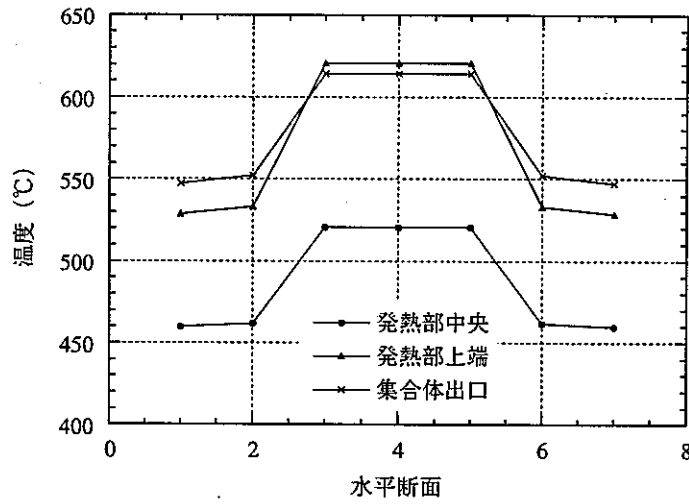
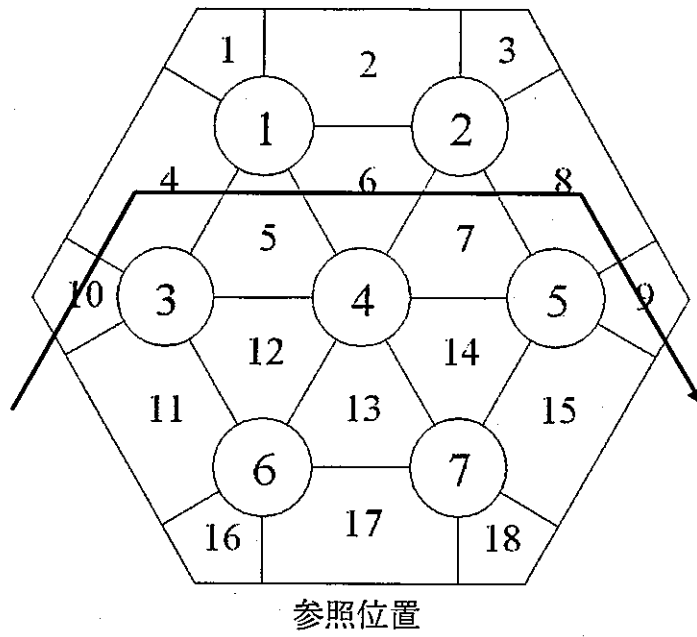
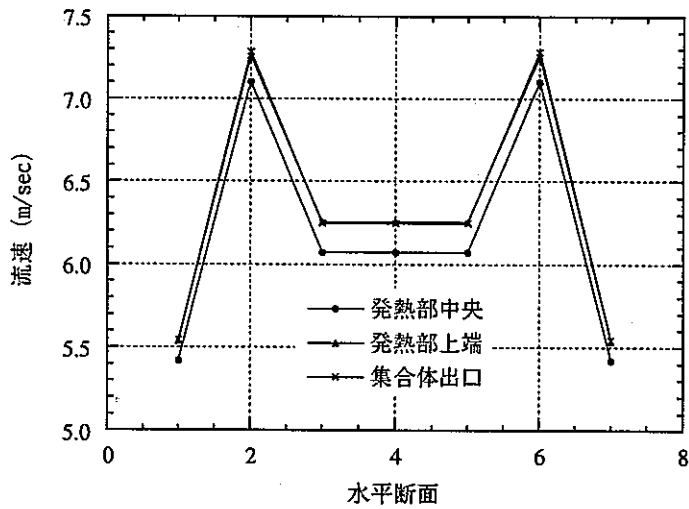


図 2-3 217 本ピンバンドル解析結果 (定格運転条件)



7本ピンバンドル温度分布



7本ピンバンドル軸方向流速分布

図 2-4 7本ピンバンドル解析結果 (定格運転条件)

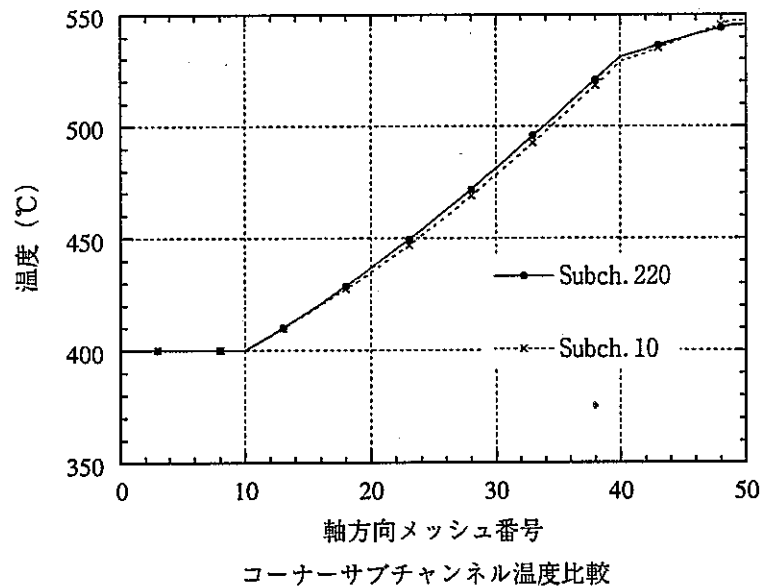
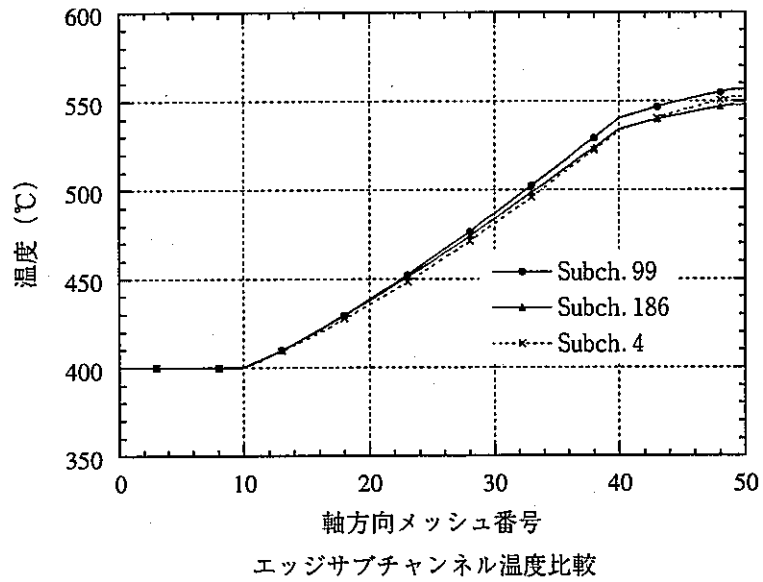
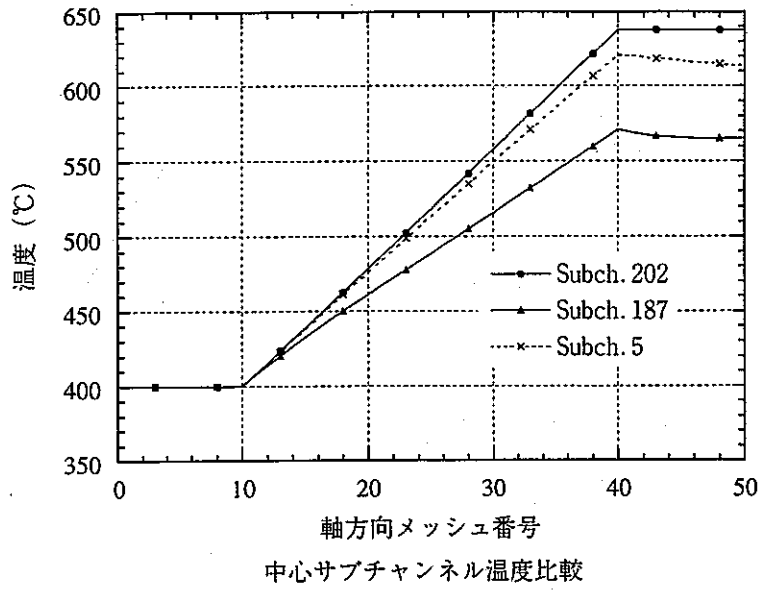
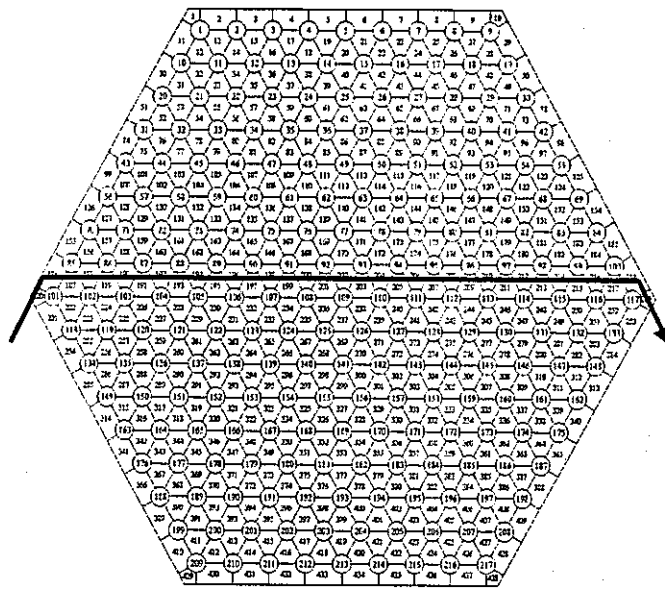
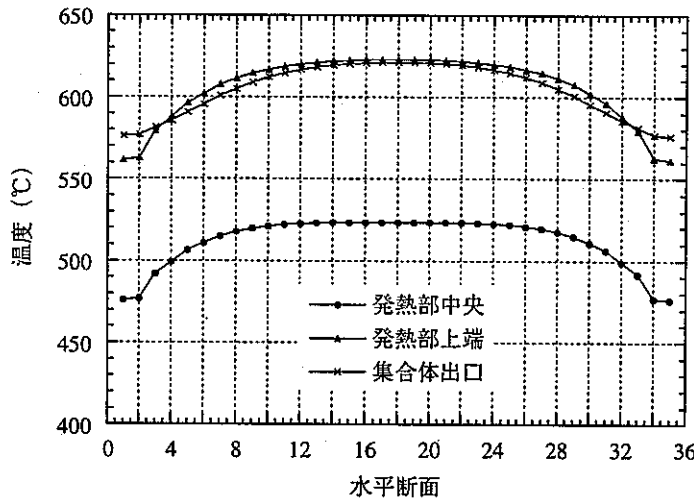


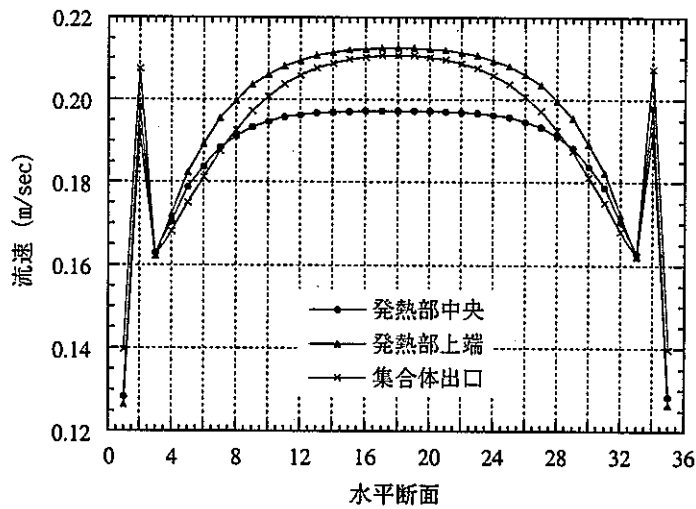
図 2-5 217 本体系と 7 本体系の軸方向温度分布の比較 (定格運転条件)



参照位置



217本ピンバンドル温度分布



217本ピンバンドル軸方向流速分布

図 2-6 217 本ピンバンドル解析結果 (自然循環条件)

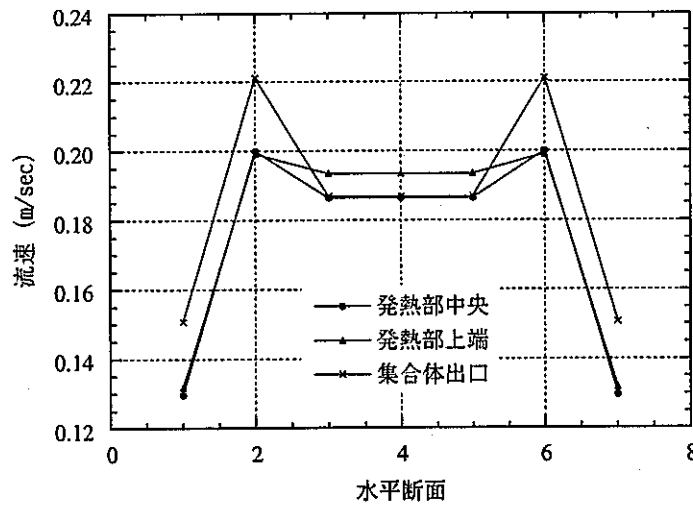
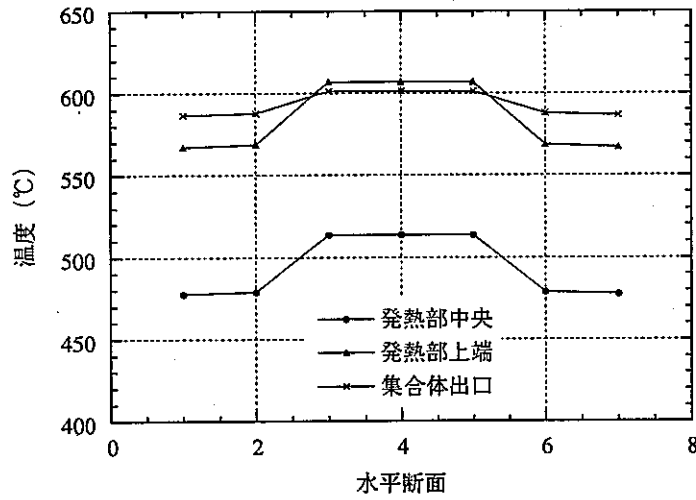
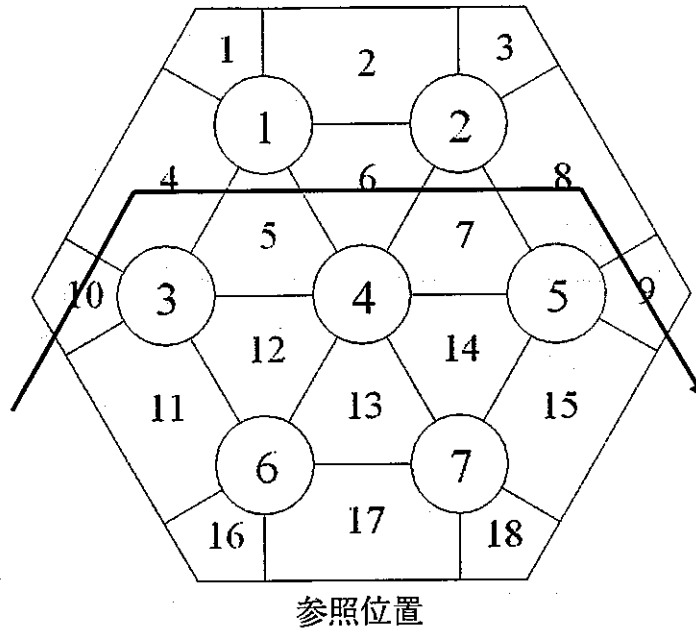


図 2-7 7本ピンバンドル解析結果 (自然循環条件)

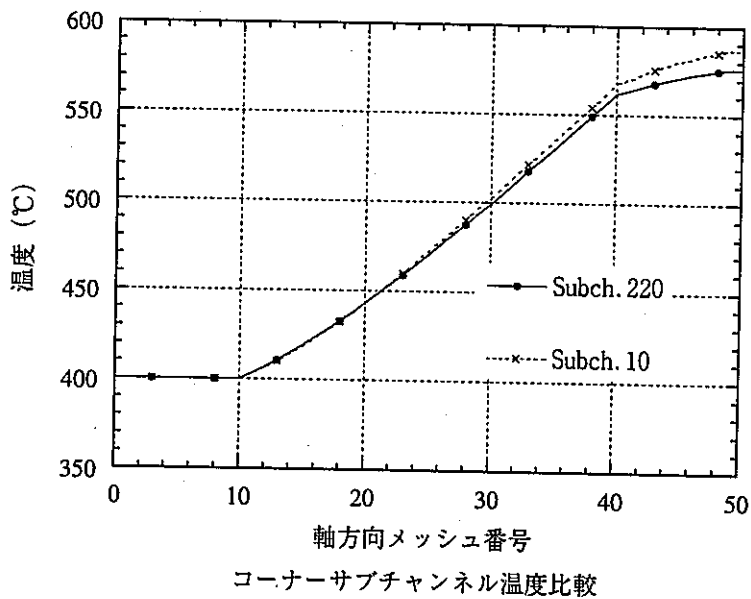
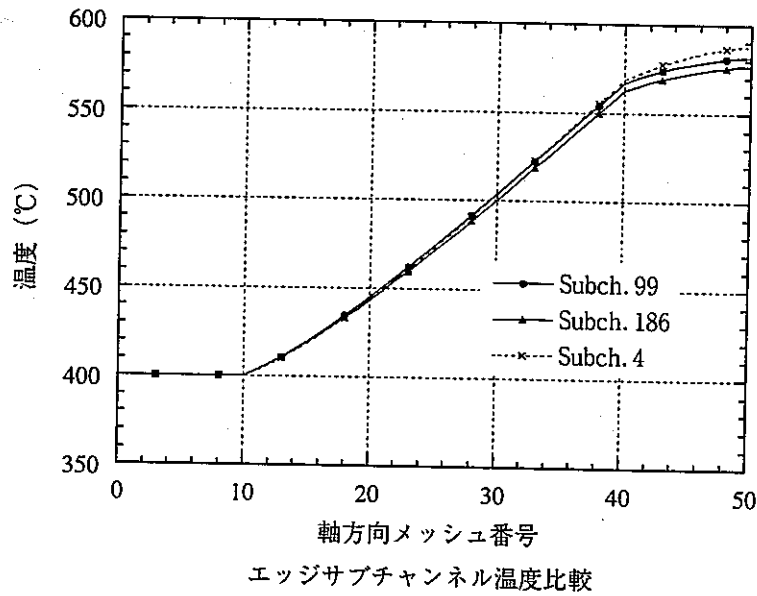
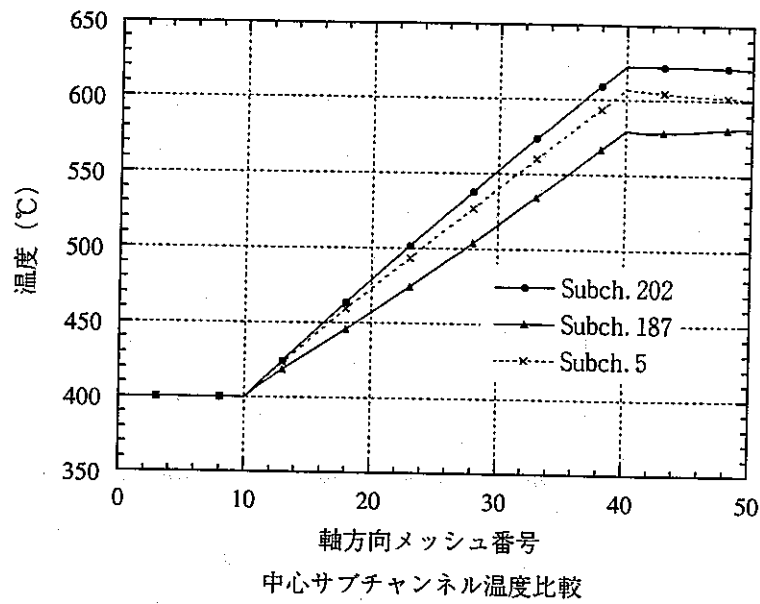


図 2-8 217 本体系と 7 本体系の軸方向温度分布の比較 (自然循環条件)

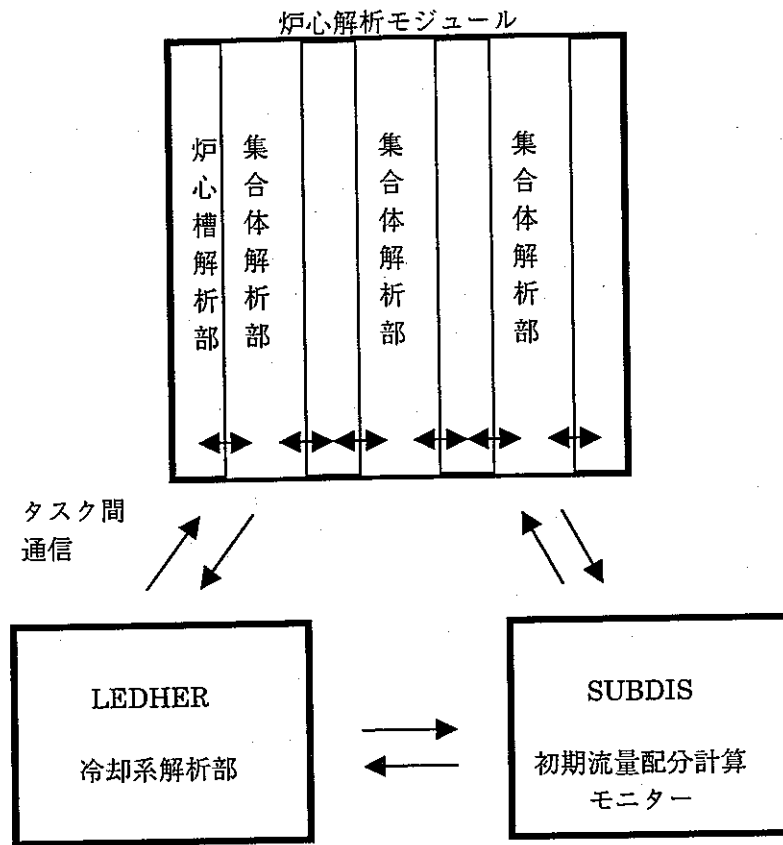


図3-1 全炉心熱流解析システムの構成

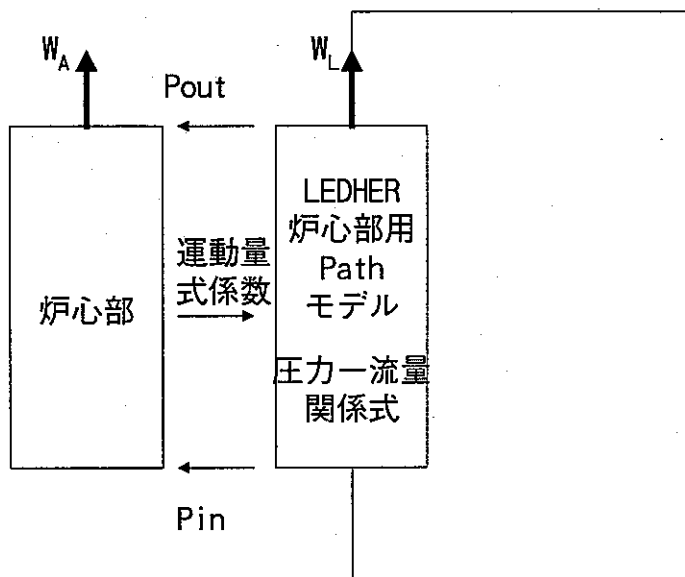


図 3-2 炉心解析モジュールとループ解析モジュールの結合

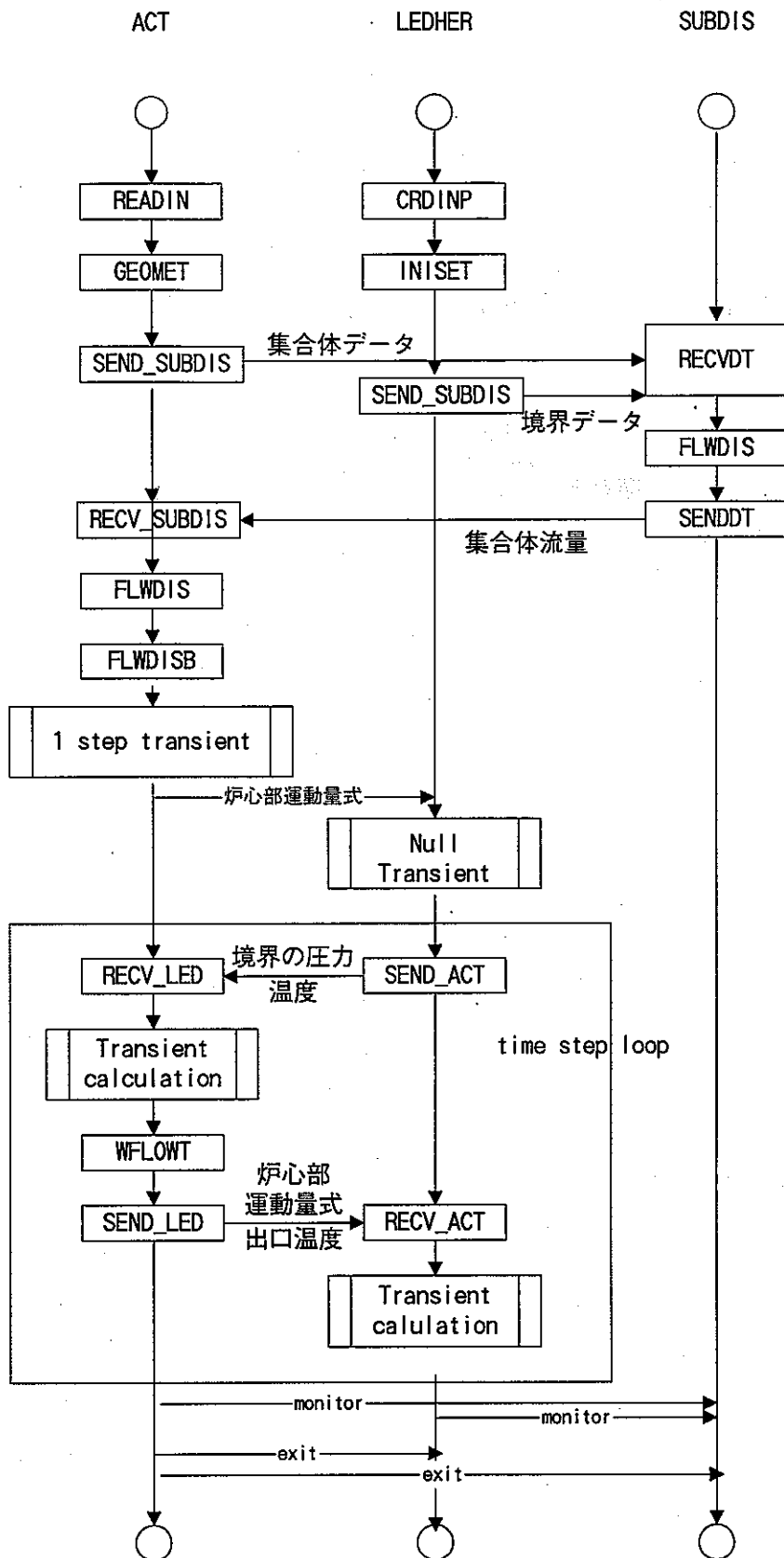


図 3-3 システムフロー

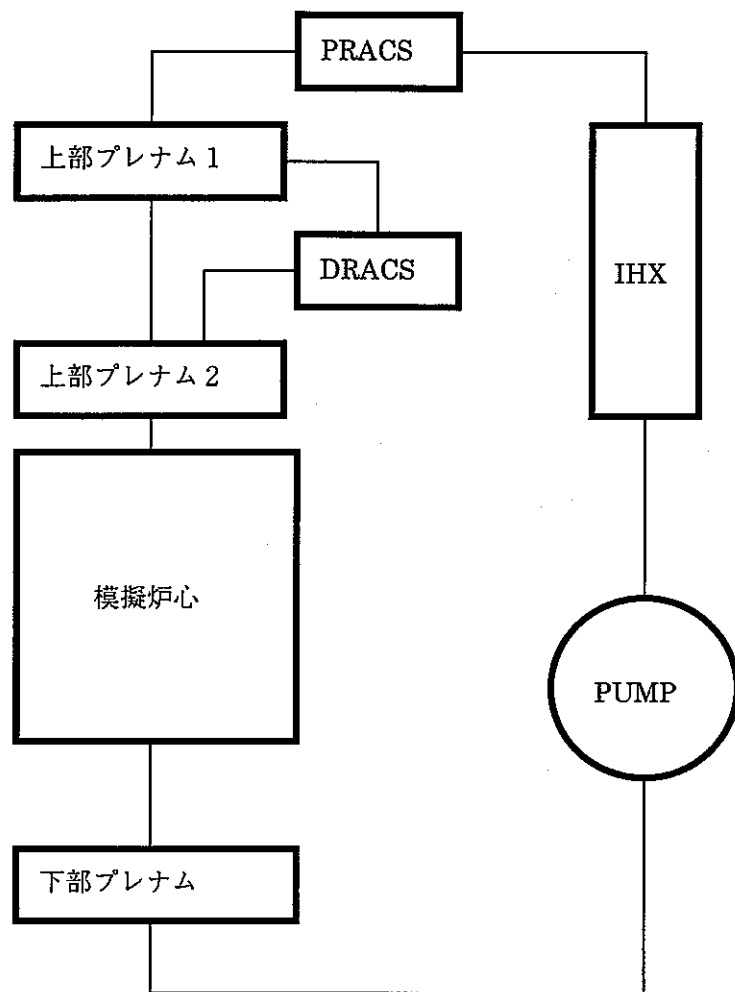


図 4 - 1 冷却系ループの構成

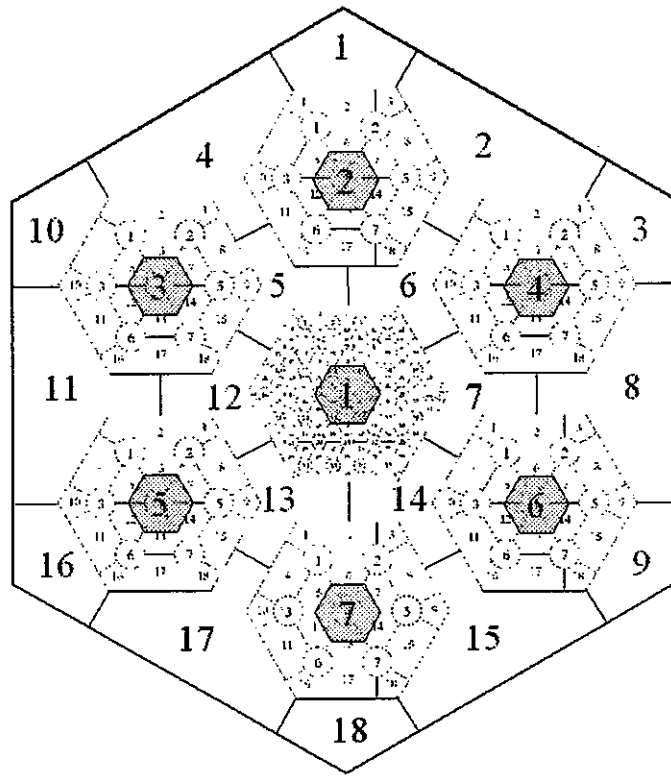
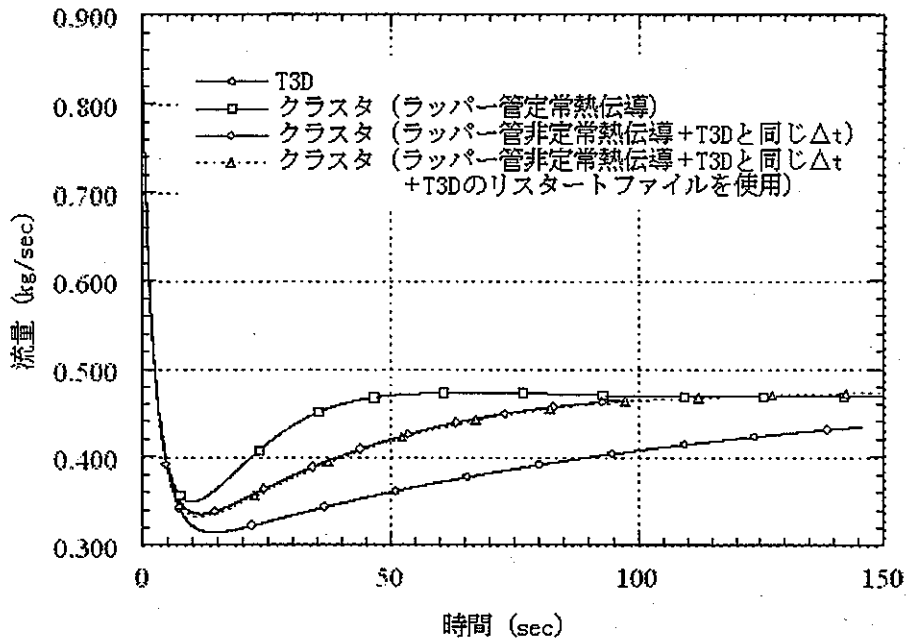
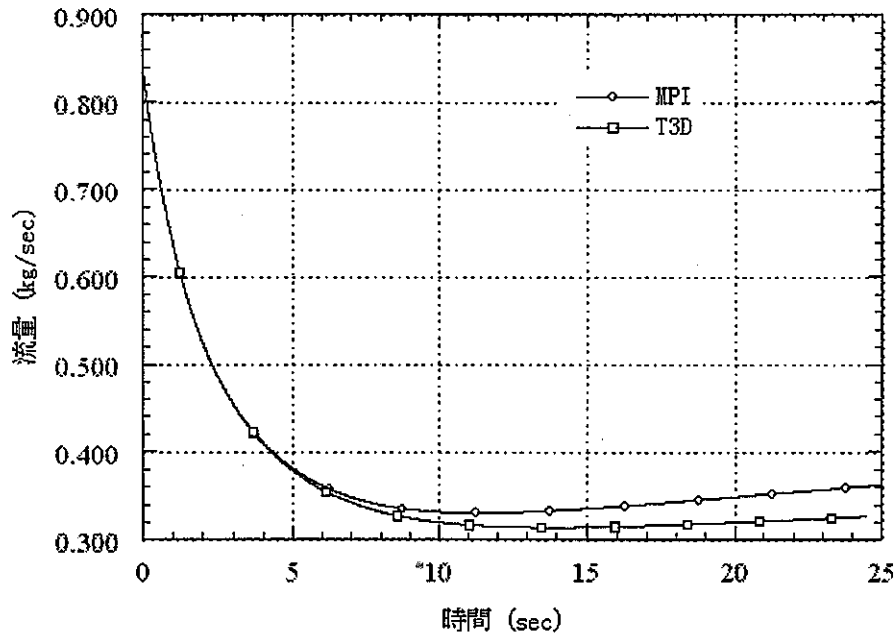


図 4 - 2 炉心槽と集合体のサブチャンネル分割方法

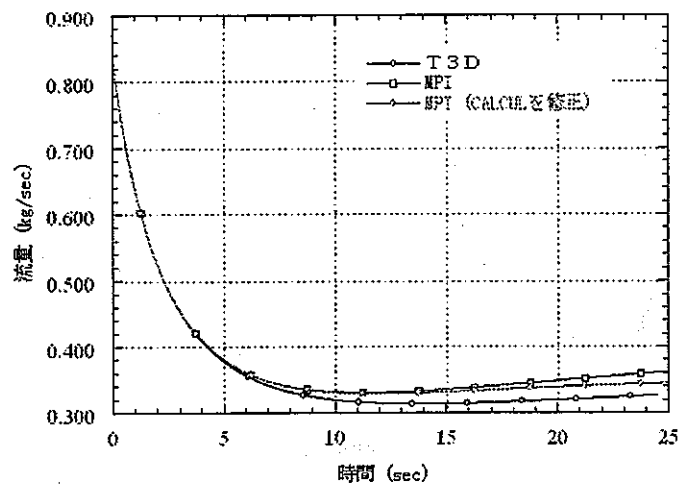


PLANDTL-DHX一次系流量変化 (Cheng-Todreasモデル使用)



PLANDTL-DHX一次系流量変化 (Novendsternモデル使用)

図4-3 流量変化に対する両コードの比較



FLANDTL-DHX一次系流量変化 (Novendsternモデル使用)

図4-4 集合体から炉心槽への熱流束を無視したケースとの流量の比較

付 録

付録 A コード解説書

(1) 概要

今回改良を行った ACT コードのプログラミング手法についてまとめる。

本コードは、これまでに開発してきた炉心解析モジュール(燃料集合体内解析コード ASFRE をベースに構築)とループ解析モジュール (LEDHER コード) に加え、炉心解析モジュールの一部の機能を抽出し作成した SUBDIS モジュールで構成される。これら各モジュールの作成方法の概要は以下のとおりである。

炉心解析モジュールに対する変更は、主に、①他の解析モジュールとの通信部の作成、②ループ解析モジュールから受け取ったデータを境界条件に反映するための変更、③集合体内や炉心槽内の流量配分などの初期値設定方法の充実、④ループ解析モジュールへ渡すための炉心全体に対する流量-圧力差特性の計算部追加などである。また、炉心槽解析機能の追加と集合体と炉心槽間の MPI 用のインターフェースも作成した。

ループ解析モジュールでは、①他の解析モジュールとの通信部の作成、②流動の式の変更、③炉心解析モジュールの炉心出口温度を境界条件として与えるための変更などが変更主要項目である。

SUBDIS は、炉心解析モジュールの幾つかのサブルーチンを抽出、変更、再構成して作成したもので、他コードとの通信部以外は、受信データの加工部、流配計算部からなる。これを MPI 用に変更し、さらに過渡計算中の炉心解析モジュールとループ解析モジュールの主要データをチェックできるようにモニター機能を付け加えた。

(2) 処理内容

図 A-1 にシステムフローを示す。縦の列はタスクのプロセスの進行を、横線はタスク間の通信を表わす。

(3) 新規・変更サブルーチン

本作業で新規に作成したサブルーチンや変更したサブルーチンの仕様を表 A-1 に示す。なお、新規・変更の基準は、ASFRE の MPI 版と LEDHER のオリジナルを基準とした。

なお、便宜上、表中において炉心解析モジュールを ACT、ループ解析モジュールを LEDHER と記述している。

表 A-1 新規・変更サブルーチン

モジュール名	サブルーチン名	処理内容	新規/変更
ACT	MAIN	MPI の初期化と終了処理ルーチンの call。	変更
ACT	CONTRL	通信用サブルーチンの call	変更
ACT	FLWDIS	集合体内の流量配分計算	変更
ACT	FLWDISB	炉心槽の流量配分計算	新規
ACT	GEOMET	集合体単位の幾何形状計算	変更
ACT	HTPSET	熱伝達項の計算 (炉心槽初期計算中の集合体側の処理)	新規
ACT	HTPSET_PLUG	熱伝達項の計算 (炉心槽初期計算中の炉心槽側の処理)	新規
ACT	INITAL	集合体内のエンタルピー計算	変更
ACT	INITALB	炉心槽内のエンタルピー計算	新規
ACT	SCONDT	スラブの熱伝導方程式	変更
ACT	SFLUXT	スラブの熱流束 (過渡計算用)	変更
ACT	SFLUXT_INI	スラブの熱流束 (初期計算用)	新規
ACT	WFLOWT	炉心流量、出口温度、流量-圧力変化率	新規
ACT	SEND_LED	LEDHER へ境界条件データを送信	新規
ACT	RECV_RED	LEDHER から境界条件データを受信	新規
ACT	SEND_SUBDIS _REST	SUBDIS ヘリスタートフラグを送信	新規
ACT	SEND_SUBDIS_ MONI	SUBDIS ヘモニターデータ送信	新規
ACT	SEND_SUBDIS_ END	SUBDIS へ計算終了を通知	新規
ACT	RECV-SUBDIS	SUBDIS から各集合体の初期流量を受信	新規
ACT	CONST_GROUP	炉心内コミュニケイターの作成	新規
ACT	CONST_GROUP_ CODE	システム全体のコミュニケイターの作成	新規
ACT	DEST_GROUP	コミュニケイターの解除 (ダミー)	新規
ACT	DEST_GROUP_ CODE	コミュニケイターの解除(ダミー)と MPI の 終了処理	新規
ACT	CMMINI	ファイルオープン	変更
ACT	CMMEND	ファイルクローズ	変更
ACT	MABORT	異常発生時の強制終了	変更
ACT	MBARRR	集合体単位の同期	変更
ACT	MBAR_ACT	炉心全体の同期	新規
ACT	MBAR_ALL	システム全体の同期	新規
ACT	MRBCST	集合体内のブロードキャスト(実数)	変更
ACT	MIBCST	集合体内のブロードキャスト(整数)	変更
ACT	MRBCST_ACT	炉心内のブロードキャスト (実数)	新規
ACT	MIBCST_ACT	炉心内のブロードキャスト (整数)	新規
ACT	MRGTHV	集合体内の	変更
ACT	MRGTVB	集合体内の	変更
ACT	MRGTHS	集合体内の	変更
ACT	MRSHFT	集合体内の軸方向領域間で境界値の通信	変更

モジュール名	サブルーチン名	処理内容	新規/変更
ACT	MRSFT1	集合体内の軸方向領域間で境界値の通信	変更
ACT	MRSFT2	集合体内の軸方向領域間で境界値の通信	変更
ACT	MRREDC	集合体内の和、最大、最小 (実数)	変更
ACT	MIREDC	集合体内の和、最大、最小 (整数)	変更
ACT	MRREDC_ROOT	集合体ルート内の和、最大、最小 (実数)	変更
ACT	MRSEND	集合体内の送信 (1:1 通信)	変更
ACT	MRSEND	集合体内の送信 (1:1 通信)	変更
ACT	MSQSM1	タスク間での内積計算	変更
ACT	MSQSM2	タスク間での内積計算	変更
ACT	MSQSM3	タスク間での内積計算	変更
ACT	MSQSM4	タスク間での内積計算	変更
ACT	MSQSM5	タスク間での内積計算	変更
ACT	MSQSM6	タスク間での内積計算	変更

モジュール名	サブルーチン名	処理内容	新規/変更
LEDHER	PATH6H	炉心部の流動の式	変更
LEDHER	PATH6E	炉心上部の温度固定	変更
LEDHER	TRNSNT	通信用サブルーチンの c a l l	変更
LEDHER	INISSET	初期設定。	変更
LEDHER	MAIN	MPI の初期化と終了処理ルーチンの call	変更
LEDHER	SEND-SUBDIS	SUBDIS へ境界条件データを送信	新規
LEDHER	SEND_ACT	ACT へ境界条件データを送信	新規
LEDHER	RECV_ACT	ACT から境界条件データを受信	新規
LEDHER	SEND_SUBDIS_ REST	SUBDIS へリスタートフラグを送信	新規
LEDHER	SEND_SUBDIS_ MONI	SUBDIS へモニターデータを送信	新規
LEDHER	CONST_GROUP	炉心内コミュニケイターの作成	新規
LEDHER	CONST_GROUP_ CODE	システム全体のコミュニケイターの作成	新規
LEDHER	DEST_GROUP	コミュニケイターの解除 (ダミー)	新規
LEDHER	DEST_GROUP_ CODE	コミュニケイターの解除(ダミー)と MPI の 終了処理	新規
LEDHER	MABORT	異常発生時の強制終了	新規
LEDHER	MBAR_ALL	システム全体の同期	新規

モジュール名	サブルーチン名	処理内容	新規/変更
SUBDIS	ASIZE	配列のサイズパラメータ設定	
SUBDIS	CLADPR	被覆管の物性値	
SUBDIS	CLR	配列のクリアー	
SUBDIS	CONTRL	計算制御	
SUBDIS	CPFUEL	燃料の比熱	
SUBDIS	EDCOND	熱伝導率	
SUBDIS	EQSTAT	密度、内部エネルギー	
SUBDIS	FCOND1	構造材熱伝導方程式	
SUBDIS	FCONXT	構造材熱伝導方程式	
SUBDIS	FLWDIS	流量配分の計算	
SUBDIS	FRICOF	摩擦係数の計算	
SUBDIS	GEOMET	幾何形状データ設定	
SUBDIS	GPRINT	配列変数の印刷	
SUBDIS	HTCOEF	熱伝達率	
SUBDIS	INITIAL	エンタルピー計算	
SUBDIS	MATPRO	構造材のテーブル	
SUBDIS	NAPRO1	物性値関数ライブラリー	
SUBDIS	NAPRO2	物性値関数ライブラリー	
SUBDIS	NAPRO4	物性値関数ライブラリー	
SUBDIS	POLI1	補間関数	
SUBDIS	POLI2	補間関数	
SUBDIS	PRAN1L	プラントル数	
SUBDIS	READIN	受信データの加工	
SUBDIS	RENOLD	レイノルズ数	
SUBDIS	ROFUEL	燃料の密度	
SUBDIS	SENDDT	ACTとLEDHERからの計算条件データ受信	
SUBDIS	RECVDT	ACTへ各集合体の流量を送信	
SUBDIS	RECV_REST	ACTとLEDHERからリスタートフラグを受信	
SUBDIS	RECV_END	ACTから計算終了フラグを受信	
SUBDIS	MONITR	ACTとLEDHERの主要データのモニター	
SUBDIS	MAIN	MPIの初期化と終了処理ルーチンのcall	
SUBDIS	CONST_GROUP	炉心内コミュニケイターの作成	新規
SUBDIS	CONST_GROUP_CODE	システム全体のコミュニケイターの作成	新規
SUBDIS	DEST_GROUP	コミュニケイターの解除(ダミー)	新規
SUBDIS	DEST_GROUP_CODE	コミュニケイターの解除(ダミー)とMPIの終了処理	新規

(4) 新規・変更 COMMON 変数

本作業で新規に追加した COMMON 変数や変更した COMMON 変数の仕様を表 A-2 に示す。

表 A-2 新規・変更 COMMON

モジュール名	ブロック名	変数名			
ACT	HTPARM	QIWF	熱流束用バッファ		
		QBIWF	熱流束用バッファ		
		TIWF	炉心槽温度用バッファ		
		TBIWF	炉心槽温度用バッファ		
		HIWF	炉心槽熱伝達係数用バッファ		
		HBIWF	炉心槽熱伝達係数用バッファ		
		PIWF	炉心槽コントロールボリュウムの圧力		
		CQIWF	炉心槽ソース項の係数のバッファ		
		QSUM	炉心槽サブチャンネルのスラブ熱量		
		QBSUM	炉心槽サブチャンネルのスラブ熱量		
		CQSUM	炉心槽初期計算用ソース項の係数		
			GEOMC	VCORE	全集合体内の体積
		DZCORE	集合体全長		
	GEOMSA	AREASA	集合体の流路面積		
		DHSA	集合体の等価直径		
	RODFLX	COF32	熱流束の変換係数		
	MSGSUB	IDATSA	SUBDIS への送信データ用配列 (整数)		
		RDATSA	SUBDIS への送信データ用配列 (実数)		
		WDATSA	SUBDIS からの受信データ用配列		
	LEDHER	T_TO_LEDHER	炉心出口温度		
		W_TO_LEDHER	炉心出口流量		
		DPDWC_TO_LEDHER	$\Delta DP / \Delta W$		
		YOBI_TO_LEDHER	LEDHER 側炉心部で使用する定数		
	COMMACT	COMM_WORLD	集合体内コミュニケータ		
		COMM_IWF	炉心槽内コミュニケータ		
		COMM_ROOT	集合体ルートタスク間コミュニケータ		
		COMM_ACT	炉心内コミュニケータ		
		COMM_ACT_H	炉心内 (ハンドル) コミュニケータ		
		COMM_CODE	システム内コミュニケータ		
	RANKACT	IRANK_IWF	炉心槽タスク内ランク		
		IRANK_ROOT	集合体ルートタスク間ランク		

ACT	WHANDL	MPI_GROUP_WORLD	MPI_COMM_WORLD (デフォルトコミュニケータ) のハンドル
	IWFCOM	IRQS	非同期通信時のリクエスト認識用
		IRQR	非同期通信時のリクエスト認識用
	LED_SUB	COMM_LED_SUB	未使用
		COMM_LED_SUB_H	未使用
	CALC_STATUS	I_STATUS_ACT	計算終了フラグ
LEDHER			
	CALC_STATUS	I_STATUS_ACT	計算終了フラグ
	MSG_BUF	RDATLD	受信バッファ
		SDATLD	送信バッファ
	ACT	NCRPT	炉心部バス No
		DPDWC	$\Delta DP / \Delta W$
		WTOFCN	炉心流量
		TCOREO	炉心出口温度
		DELT	時間刻み幅
		YOBI	炉心部運動量式の定数
		I_STATUS	計算終了フラグ
		PRE_RES	初期炉心圧力差

(5) サイズパラメータの追加

本システムの並列処理は分散メモリーを採用しているため、炉心槽と各集合体内の体系に応じて配列のサイズパラメータを変えることが望ましい。

以下に追加したサイズパラメータを示す。

- ① MPE : 炉心槽および各集合体の軸方向領域分割数 (タスク分割数)。
最大値ではない。各集合体毎に実際に使用する値を指定する必要がある。

以下は、最大値でも使用可能である。

- ② NSAMAX : 炉心槽に対して総集合体数。集合体の場合は 1。
③ MAXSA : 集合体数。
④ MAXPRC : 集合体内タスク数。

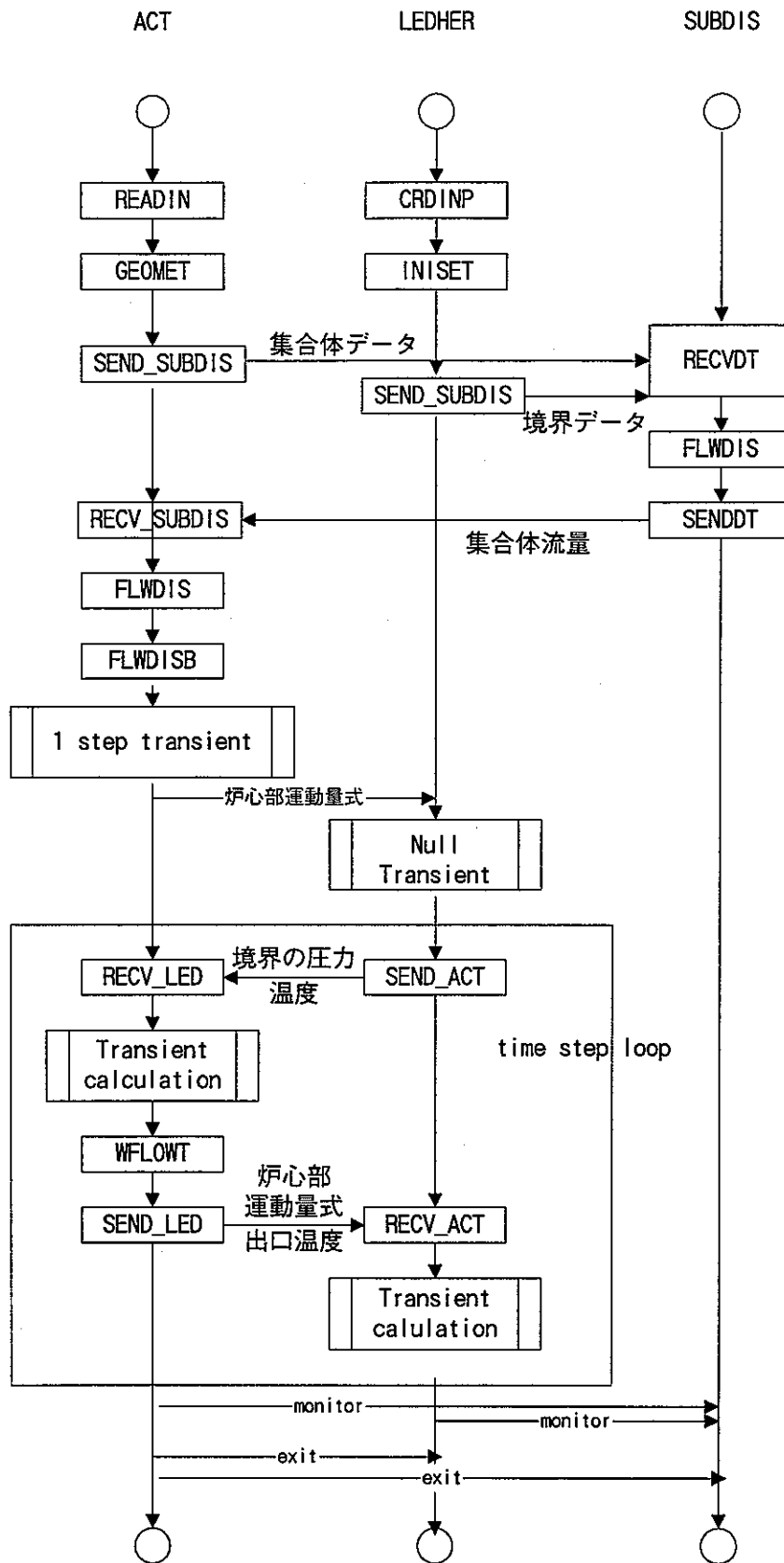


図 A-1 システムフロー

- 【レコード 34】 N セット目
 【レコード 35】
 【レコード 36】
 【レコード 37】

B.1 プログラムコントロール

【レコード 1】～【レコード 3】では、プログラムサイズの決定とリスタートデータの読み込みと書き出しを制御する。

【レコード 1】 タイトル

変数名	FORMAT	内容	単位
ITITLE	20A4	タイトル 問題の内容などを記す。コメントカード。	—

【レコード 2】 メッシュ数

変数名	FORMAT	内容	単位
LMAX	16I5	軸方向メッシュ数	—
IMAX		サブチャンネル数	—
KMAX		ギャップ数	—
NMAX		燃料ピン数	—
NSMAX		ヒートスラブ（ラッパ管壁）の数	—
NODROD		燃料ピンの半径方向メッシュ数 半径方向メッシュ分割の境界の数を入力する。	—
		詳細は[R-31]～[R-37]の燃料ピン半径方向メッシュ分割で説明。	—
NODSLB		ヒートスラブの径方向（厚み方向）メッシュ数 燃料ピンと同じ様に、径方向メッシュ分割の境界の数を入力する。詳細は[R-38]～[R-42]のヒートスラブの径方向メッシュ分割で説明。	—
			—
NBAND		マトリックスの最大バンド幅 ILUBCG 法の場合：1 直接法及びSORの場合：サブチャンネル数×2+1	—
MX		ILUBCG 解法用メッシュの横方向の大きさ	—
MY		ILUBCG 解法用メッシュの縦方向の大きさ	—
MZ		ILUBCG 解法用メッシュの軸方向の大きさ ILUBCG 法を使用する時のみ有効。その他の場合は0を入力する。	—

【レコード3】 リスタート及びプロット制御

変数名	FORMAT	内容	単位
IREST	2I5	初期、リスタート計算の区別 0：初期定常から計算 1：リスタート計算	—
IDRST		リスタートファイル編集のタイムステップ間隔	—
TIRES	E10.0	リスタート後の最初のプリント出力時間	sec
IDPLT	3I5	プロット編集のタイムステップ間隔	—
IFPLT		プロット編集データの初期化フラグ 1：初期化する プロットファイルの先頭に形状データを書き込み、次に IDPLT ステップ毎にプロットファイルに書き込む。 2：初期化しない プロットファイルを NPLOT ステップまたは EOF (END OF FILE)まで読み飛ばし、そこから IDPLT ステップ 毎にプロットファイルに書き込む。 リスタート計算時のプロット編集制御	—
NPLOT			—

B.2 計算条件

【レコード4】～【レコード13】では、計算の制御、基本的な形状データ、熱計算のフラグ等を設定する。

【レコード4】 計算フラグ

変数名	FORMAT	内容	単位
LSS	2I5	初期計算、過渡計算の区分 0：初期定常計算のみ 1：過渡計算 2：過渡計算（閉塞モデル使用時）	—
LOOP		ループ計算フラグ 0：ループを考慮しない 1：ループを考慮する（未使用）	—
EPST	3E10.0	定常判定値（温度）デフォルト 1.0E-8	—
EPSW		定常判定値（軸方向流速）デフォルト 1.0E-8	—
EPSU		定常判定値（横方向流速）デフォルト 1.0E-8	—

【レコード5】計算モデル

変数名	FORMAT	内容	単位
LGEOM	7I5	サブチャンネルとギャップの幾何形状 0：コード内で計算する 1：インプットで与える 2：炉心槽用。コード内で計算する。	—
LQROD		燃料ピンの熱計算フラグ 1：燃料ピンの発熱をヒートフラックス[R-59]で与え、燃料ピン内部の温度は計算しない 2：燃料ピンの発熱を体積発熱[R-48]又は[R-59]で与え、燃料ピン内部の温度計算をする 3：燃料ピン内部の温度計算を行わず、燃料ピンの表面温度を与える	—
LQROP1		燃料ピンの周方向の熱伝導 0：考慮しない 1：考慮する	—
LQROP2		燃料ピンの軸方向の熱伝導 0：考慮しない 1：考慮する	—
LQSLB		ヒートスラブの熱計算フラグ 1：ヒートスラブの発熱をヒートフラックスで与え、ヒートスラブ内部の温度は計算しない 2：温度計算を行う（外側断熱） 3：温度計算を行う（1メッシュ簡易モデル） 4：温度計算を行う（外側表面温度を与える） 5：温度計算を行う（外側の熱伝達率と外部流体温度を与える）	—
LQ3ROD		燃料ピンの熱計算入力方法 0：ヒートソースデータを与える[R-48] 1：軸方向の発熱分布を[R-59]に指定する	—
LITER		圧力方程式の解法 0：直接法 1：Plane-SOR 2：ILUBCG法 3：簡易版 ILUBCG法	—

【レコード6】軸方向メッシュ

変数名	FORMAT	内容	単位
NBOT	2I5	最下端メッシュ番号。通常 1	—
NTOP		最上端メッシュ番号。通常 LMAX	—

【レコード7】ピン形状

変数名	FORMAT	内容	単位
DPIN	5E10.0	ピン直径 (炉心槽に対しては集合体の対面外径)	m
PITCH		ピンピッチ (炉心槽に対しては集合体配列ピッチ)	m
REGRH		ピン表面 (または集合体表面) の相対的な粗さ (ベアバンドルの時有効)	—
DWGAP		最外周ピン (または最外周集合体) の中心からラッパ管表面までの距離	m
COF32		熱流束データの 6.5mm 径への変換係数。 SUBDIS では、ピン径を 6.5mm として計算するため。 また、熱流束が W/m^3 の時は、 W/m^2 への変換も含む。 (炉心槽に対しては不要)	

【レコード8】臨界パラメータ ([R-13]Novendstern モデル使用時のみ有効)

変数名	FORMAT	内容	単位
REMIN	2E10.0	臨界レイノルズ数 (層流側)	—
REMAX		臨界レイノルズ数 (乱流側)	—

【レコード9】重力など

変数名	FORMAT	内容	単位
GRAV	3E10.0	重力加速度	m/sec^2
PAI		円周率 π	—
CCENT		熱伝導に関するサブチャンネル間距離の補正	—

【レコード10】ミキシングパラメータ

変数名	FORMAT	内容	単位
CFMIX	8E10.0	ミキシング係数	—
CDRM		ワイヤに垂直方向の抗力係数 通常 1.3	—
CDRMR		軸方向の抗力係数 通常 1.0	—
CDRML		横方向の抗力係数 通常 1.0	—
CTURB		軸方向モーメント乱流拡散係数 通常 1.0	—
AFACT		周辺サブチャンネル流路調整ファクタ	—
CWMIX		ミキシング係数 (Cheng-Todreas モデルのみ有効)	—
HLENG		軸方向発熱部長さ (Cheng-Todreas モデルのみ有効)	m

【レコード 11】 コントロールデータ

変数名	FORMAT	内容	単位
ITMAX	2I5	タイムステップ当たりの最大反復回数	—
ITPMAX		圧力方程式解法の最大反復回数	—
EPS	5E10.0	タイムステップ当たりの反復計算の収束判定値	—
EPSP		圧力方程式解法の反復計算の収束判定値	—
OMEG		差分化手法の選択 0.0：中心差分 1.0：風上差分	—
ACCL		SOR 法の加速係数	—
EXPNT		未使用	—

【レコード 12】 軸方向ブロック数

変数名	FORMAT	内容	単位
NZBLOK	I5	軸方向ブロック数	—

【レコード 13】 軸方向ブロックデータ→[R-12]NZBLOK 個繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
DZ1(N)	E10.0 4I5	軸方向ブロック N のメッシュサイズ D.R.M.使用時はワイヤ巻きピッチの 1/12 とする	m
LZS(N)		軸方向ブロック N の下端のメッシュ番号	—
LZE(N)		軸方向ブロック N の上端のメッシュ番号	—
LFWI(N)		軸方向ブロック N の軸方向壁面摩擦モデル 1：パイプ壁面摩擦 (ベアバンドル) 2：Novendstern モデル (ワイヤバンドル) 3：グリッドスペーサ 4：D.R.M. (ワイヤバンドル) 5：Cheng-Todreas モデル 6：平行平板モデル	—
LHTR(N)		軸方向ブロック N の熱伝達モデル 1：FFTF 相関 2：Aoki モデル 3：Dittus-Boelter モデル 4：Subbotin モデル	—
LFWLI(N)		軸方向ブロック N の横方向壁面摩擦モデル 0：Gunter-Show モデル 1：ENEА モデル 2：パイプ壁面摩擦 3：平行平板モデル	—

B.3 サブチャンネルパラメータ

【レコード14】～【レコード17】では、軸方向流路（サブチャンネル）及び横方向流路（ギャップ）のパラメータの入力を行う。

【レコード14】サブチャンネル数

変数名	FORMAT	内容	単位
NCHAN	I5	サブチャンネル数	—

【レコード15】サブチャンネル形状

変数名	FORMAT	内容	単位
I IDCHAN(I,1)	6I5	サブチャンネル番号 サブチャンネルタイプ番号 1：中心サブチャンネル 2：エッジサブチャンネル 3：コーナーサブチャンネル	— —
ISYM(I)		サブチャンネル形状 0：フルサブチャンネル 1：ハーフサブチャンネル	—
(LC(I,M),M=1,3)		隣接するサブチャンネル番号	—
AFZ1(I)		隣接するサブチャンネル番号を3個入力する。3個無い場合は、足りない分に0を入力する。 軸方向流路断面積	m ²
DHEQ(I)		[R-5]LGEOM=0の場合は、コード内で計算されるため使用されない。 軸方向流路水力等価直径 [R-5]LGEOM=0の場合は、コード内で計算されるため使用されない。	m

【レコード16】ILUBCG メッシュ→[R-2]MX*MY 個繰り返す→ILUBCG 法使用時のみ入力

変数名	FORMAT	内容	単位
I ISCN(I)	5I5	ILUBCG 解法用 XY 断面メッシュ番号 Iに対応するサブチャンネル番号	— —
IPTR(I)		ILUBCG 解法用メッシュ接続パターン	—
(JSN(I,J),J=1,2)		インターメディアイトメッシュに対して実サブチャンネルの位置を規定するフラグ	—

【レコード 17】サブチャンネルの接続方向

変数名	FORMAT	内容	単位
(ICB(M,I),I=1, NCHAN)	I2I5	サブチャンネル I からみた LC(I,M)番目のサブチャンネル の方向	—

【レコード 18】ラッパ管壁に隣接するサブチャンネル数

変数名	FORMAT	内容	単位
NWRAP	I5	ラッパ管壁に隣接するサブチャンネル数	—

【レコード 19】ラッパ管壁とサブチャンネルの接続関係→NWRAP 個繰り返す

変数名	FORMAT	内容	単位
IWRAP(I)	2I5	ラッパ管壁に隣接するサブチャンネル番号	—
MWRAPT(I)		IWRAP(I)のタイプ 1: エッジサブチャンネル 2: コーナーサブチャンネル	—

【レコード 20】～【レコード 21】→ギャップ数分繰り返す

【レコード 20】ギャップデータ

変数名	FORMAT	内容	単位
K	5I5,5X	ギャップ番号	—
(KGLF(K,M), M=1,2)		ギャップ番号 K の左に位置するギャップ番号	—
(KGRT(K,M), M=1,2)		ギャップ番号 K の右に位置するギャップ番号	—
ANGL(K)	E10.0	ギャップの角度	DEG

【レコード 21】ギャップデータ→[R-5]LGEOM=1 の時入力。その他は入力しない。

変数名	FORMAT	内容	単位
K	I5,5X	ギャップ番号	—
GWID1(K)	2E10.0	ギャップ幅	m
GCEN1(K)		サブチャンネル中心間距離	m

B.4 燃料ピン及びヒートスラブデータ

炉心槽に対しては、集合体データを燃料ピンデータとして入力する。ヒートスラブデータは、炉心槽に対しては、入力不要。

【レコード 22】～【レコード 43】では、燃料ピン（または集合体）とヒートスラブのサブチャンネ

ルの結合、ピーキングタイプの設定、更に径方向メッシュ分割を行う。

【レコード 22】 燃料ピン数（または集合体数）

変数名	FORMAT	内容	単位
NROD	I5	燃料ピン数（炉心槽に対しては集合体数）	—

【レコード 23】 燃料ピンデータ（または集合体データ）→NROD 個繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
N	I4	燃料ピン番号（または集合体番号）	—
IDFUEL(N,1)	2I3	燃料ピンタイプ番号（未使用 1 を入力）	—
IAXP(N)		軸方向発熱分布タイプ番号（炉心槽では未使用） [R-50]のどの分布タイプを用いるか選択する。	—
RADIAL(N)	E7.0	燃料ピンの発熱割合（炉心槽では未使用）	—
NC	I3	隣接するサブチャンネル数	—
(IADROD(N, M)	6(I3,E7.0)	隣接するサブチャンネル番号 燃料ピンとサブチャンネルの結合割合（炉心槽では未使用）	—
PHIROD(N,M ,M=1,NC)		IADROD と PHIROD はペアで入力する	—

【レコード 24】 ワイヤ情報

変数名	FORMAT	内容	単位
IWIRE	2I5	ワイヤフラグ 0：D.R.M.を使用しない 1：D.R.M.を使用	—
IWTYP		ワイヤタイプ 0：全てのワイヤが同一方向を向く 1：ワイヤの巻き方向が異なる（未使用）	—

【レコード 25】 ワイヤ形状

変数名	FORMAT	内容	単位
DWIRE	3E10.0	ワイヤ直径	m
HLEAD		ワイヤ巻きピッチ	m
ETA0D		ワイヤ巻き始め位置（角度）	DEG

【レコード 26】 サブチャンネルとピンの関係→サブチャンネル数分繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
(INEARP(I,M ,M=1,3)	3I5	サブチャンネル I に接するピン番号	—

【レコード 27】 ギャップとピンの関係→ギャップ数分繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
(KNEARP(K, M),M=1,2)	2I5	ギャップ K の左右に位置するピン番号 左↓右	—

【レコード 28】 ヒートスラブ数

変数名	FORMAT	内容	単位
NSLAB	I5	ヒートスラブ数	—

【レコード 29】 ヒートスラブデータ→NSLAB 個繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
N	I4	ヒートスラブ番号	—
IDSLAB(N,1)	I3	ヒートスラブのタイプ番号 (未使用)	—
IAXS(N)	I3	軸方向分布タイプ番号 [R-50]のどの分布タイプを用いるか選択する。	—
CFTSLB(N), NC	E7.0 I3	外側温度の代表値に対する割合 隣接するサブチャンネル数	—
(IADSLB(N,M)	6(I3,E7.0)	隣接するサブチャンネル番号	—
PHISLB(N,M), M=1,NC)		ヒートスラブとサブチャンネルの結合割合 IADSLB と PHISLB はペアで入力する	—

【レコード 30】 ヒートスラブデータ 2 (炉心槽との接続データ) →NSLAB 個繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
N	I4,3X	ヒートスラブ番号	—
IDSLAB(N,1)	I3	接続する炉心槽サブチャンネルが炉心槽データの個々集 合体データ中で何番目に入力されているかを指定	—

【レコード 31】 ~ 【レコード 37】 で、軸方向ブロック毎の径方向メッシュ分割、物性値などを入力する。[R-12]NZBLOK (軸方向ブロック数) 個繰り返し (LA=1,NZBLOK)

【レコード 31】 燃料ピンの半径方向メッシュ分割 I

変数名	FORMAT	内容	単位
NFREG(LA)	2I5	燃料ピンの半径方向領域の数	—
NFGAP(LA)		燃料-被覆管ギャップのメッシュ番号 ギャップが存在しない場合は0を入力する。 LA: 軸方向ブロック番号	—

【レコード 32】 燃料ピンの半径方向メッシュ分割Ⅱ

変数名	FORMAT	内容	単位
MESH(J)	16I5	燃料ピン半径方向領域境界のメッシュ番号 半径方向領域数 +1 個入力 (J=1,NI N1=NFREG(LA)+1)	—

【レコード 33】 燃料ピンの半径方向メッシュ分割Ⅲ

変数名	FORMAT	内容	単位
RAD(J)	8E10.0	燃料ピン半径方向領域境界の半径 半径方向領域数 +1 個入力 (J=1,NI N1=NFREG(LA)+1) 最内側 (RAD(1)) は、中心空孔がある場合はその半径を、 無い場合は 0.0 を入力する。	m

【レコード 34】 ギャップコンダクタンス→[R-31]NFGAP=0 の時入力しない

変数名	FORMAT	内容	単位
GAPCON(J)	8E10.0	軸方向メッシュに対するギャップコンダクタンス 軸方向のブロックの下端から上端のメッシュの数だけ入 力する。 (J=LZS(L),LZE(L) LZS,LZE は[R-13]で入力)	W/m ² K

【レコード 35】 燃料ピンの半径方向メッシュ分割Ⅳ

変数名	FORMAT	内容	単位
KLROD(L)	2I5	燃料ピン最内周のメッシュ番号 通常、1 を入力する。	—
KRROD(L)		燃料ピン最外周のメッシュ番号 (= [R-2]NODROD)	—

【レコード 36】 燃料ピンの物性値

変数名	FORMAT	内容	単位
IMAT1(J,LA)	30I1	燃料ピン半径方向メッシュの物性値番号 (メッシュ数-1) 個入力 (J=NI,N2 NI=MESH(1),N2=MESH(N1)-1) [R-44]で設定される物性値番号を入力する。	—

【レコード 37】 燃料ピン半径方向出力分布

変数名	FORMAT	内容	単位
PKFL(J,LA)	8E10.0	燃料ピン半径方向メッシュでの出力割合 (メッシュ数-1) 個入力 通常、発熱部は 1.0、非発熱部は 0.0 を入力する。	—

【レコード 38】～【レコード 42】で、軸方向ブロック毎のヒートスラブの径方向（ラッパー管の厚み方向）メッシュ分割、物性値などを入力する。→[R-12]NZBLOK（軸方向ブロック数）個繰り返し

【レコード 38】 ヒートスラブの径方向メッシュ分割Ⅰ

変数名	FORMAT	内容	単位
NSREG(L)	I5,5X	ヒートスラブの径方向領域の数	—
PHTSLB(L)	E10.0	発熱部分の周長	m

【レコード 39】 ヒートスラブの径方向メッシュ分割Ⅱ

変数名	FORMAT	内容	単位
MESH(J)	16I5	径方向領域境界のメッシュ番号 NSREG+1 個入力	—

【レコード 40】 ヒートスラブの径方向メッシュ分割Ⅲ

変数名	FORMAT	内容	単位
RAD(J)	8E10.0	径方向ブロックの境界の半径 NSREG+1 個入力	m

【レコード 41】 ヒートスラブの径方向メッシュ分割Ⅳ

変数名	FORMAT	内容	単位
KLSLB(L)	2I5	ヒートスラブの最内メッシュ番号	—
KRSLB(L)		ヒートスラブの最外メッシュ番号	—

【レコード 42】 ヒートスラブの物性値

変数名	FORMAT	内容	単位
IMAT2(J,LA)	30I1	ヒートスラブの径方向メッシュの物性値番号 (メッシュ数-1) 個入力	—

【レコード 43】 物性値の個数

変数名	FORMAT	内容	単位
NMAT	I5	燃料ピンとラッパー管壁の物性値の数	—

【レコード 44】 構造材物性値→[R-43] NMAT (物性値の数) 繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
M	2I5	物性値番号 [R-36]IMAT1、[R-42]IMAT2はこの番号を参照する。 また、物性値番号の割当は、 1~2: ドライバー燃料又はブランケット、 3~: 被覆管及びラッパー管となる。	—
ICODE(M)		入力選択 0:input で与える 1:SSC モデルを用いてコード内で計算する 2:TRAC モデルを用いてコード内で計算する	—
RHOST(M)		密度 ICODE=0 の時使用される	kg/m ³
CPST(M)		定圧比熱 C _p "	J/kg·K
TKST(M)		熱伝導度 κ "	W/m·K
PUFRC(M)	5E10.0	Pu fraction 燃料に対するプルトニウムの割合を入力する。 SSC モデル、TRAC モデルで使用する。	—
PORE(M)		Porosity 燃料のポロシティ (空洞率) を入力する。	—

B.5 形状圧損

【レコード 45】 ~ 【レコード 47】 では、形状圧損の設定をする。なお、形状圧損係数 K は以下の式で定義される。

$$\Delta P = K \rho W^2 / 2$$

【レコード 45】 形状圧損の数

変数名	FORMAT	内容	単位
NFLOC	I5	形状圧損係数を入力する軸方向メッシュ番号の数	—

【レコード 46】 形状圧損メッシュ

変数名	FORMAT	内容	単位
LFNODE(L)	16I5	形状圧損係数を入力する軸方向メッシュ番号 NFLOC 個	—

【レコード 47】 形状圧損→サブチャンネルの数繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
I	I5,5X	サブチャンネル番号	—
FLOC(I,L)	7E10.0/ 10X,7E10.0	形状圧損係数 NFLOC 個入力	—

B.6 燃料ピンのヒートソースデータ

以下の入力で、ヒートソースデータ又は軸方向の出力分布を与える。

【レコード 48】 体積発熱割合→[R-5]LQ3ROD≠0 の時入力しない→燃料ピン数繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
N	I5,5X	燃料ピン番号	—
Q3ROD(N,L)	7E10.0/ 10X,7E10.0	体積発熱割合 下部より順に軸方向メッシュ数個入力する。 [R-5]LQ3ROD≠0 の時は、体積発熱割合は、 [R23]RADIAL*[R-50]APKF より求める。	W/m ³

【レコード 49】 ~ 【レコード 50】 →[R-5]LQ3ROD=0 の時入力しない

【レコード 49】 軸方向出力分布タイプの数

変数名	FORMAT	内容	単位
NAXTP	I5	軸方向出力分布タイプの数 軸方向出力分布の種類がいくつあるか入力する。	—

【レコード 50】 軸方向出力分布→NAXTP (軸方向出力分布タイプの数) 繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
M	I5,5X	軸方向出力分布タイプ番号 [R-23] IAXP はこの番号を参照する。	—
APKF(L,M)	7E10.0/ (10X,7E10.0)	軸方向各メッシュ位置でのピーキングファクター 下部より順に軸方向メッシュ数個入力する。	—

B.7 初期条件

【レコード 51】 初期条件 I

変数名	FORMAT	内容	単位
TINL	4E10.0	初期定常時入口温度	K
PRINL		ゝ 入口圧力	Pa
PREXT		ゝ 出口圧力	Pa
WTMSF		ゝ 質量流量	kg/sec

【レコード 52】 初期条件 II → サブチャンネルの個数繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
I	I5,5X	サブチャンネル番号	—
WINL(I)	2E10.0	(各サブチャンネルの) 初期定常入口軸方向流速	m/sec
TEXT(I)		ゝ 出口温度	K

【レコード 53】 初期条件 III

変数名	FORMAT	内容	単位
PRES0	3E10.0	初期圧力	Pa
TLO		初期液相温度	K
ULO		初期液相径方向流速	m/sec

B.8 境界条件

以下に入口及び出口の境界条件をタイムテーブルとして与える。

【レコード 54】 境界条件の個数

変数名	FORMAT	内容	単位
NBCON	I5	境界条件の個数 (30 個まで)	—

【レコード 55】 ~ 【レコード 57】 → [R-54] NBCON (境界条件の個数) 繰り返し

【レコード 55】境界条件 I

変数名	FORMAT	内容	単位
BTIME(K)	E10.0	境界条件入力時刻	sec
LBOT(K)	2I5	入口境界条件の種類 1: 圧力境界 2: 流量境界	—
LTOP(K)		出口境界条件の種類 3: 圧力境界 (温度、密度、エンタルピーは 入力値を使用) 4: 圧力境界 (逆流の時、温度、密度、 エンタルピーは入力値を使用) 5: 圧力境界 (逆流の時、温度のみ入力値を使用)	—

【レコード 56】境界条件 II (入口)

変数名	FORMAT	内容	単位
PRSIN	3E10.0	(BTIME での) 入口圧力	Pa
TLINP		◇ 入口温度	K
WTLIN		◇ 入口液相質量流量	kg/sec

【レコード 57】境界条件 III (出口)

変数名	FORMAT	内容	単位
PRSEX	3E10.0	(BTIME での) 出口圧力	Pa
TLEXT		◇ 出口温度	K
WTLEX		◇ 出口液相質量流量	kg/sec

【レコード 58】出力変化の数

変数名	FORMAT	内容	単位
NPOWR	I5	出力変化の入力個数 (30 個まで)	—

【レコード 59】出力変化→[R-58] NPOWR (出力変化の入力個数) 繰り返し

変数名	FORMAT	内容	単位
QTIME	3E10.0	時刻	sec
AQ2Q3		([R-5] LQROD=1 の時) 燃料ピンの表面熱流束	W/m ²
		([R-5] LQROD=2 の時) ロッドの体積発熱率	W/m ³
AQ2SLB		ラッパ管壁の熱流束 ([R-5] LQSLB≠1 の時使わない)	W/m ²

B.9 タイムステップコントロール

ASFRE コードでは最適なタイムステップをコントロールしながら計算を行っているが、解が発散してしまう様な場合、以下の入力で最大のタイムステップサイズをコード内で計算されたものより小さくすることにより、計算を安定化することができる。

【レコード 60】 タイムステップコントロールの数

変数名	FORMAT	内容	単位
NDTIME	I5,5X	タイムステップコントロールデータの個数	—
TMAX	E10.0	計算終了時間	sec

【レコード 61】 タイムステップコントロール→[R-60]NDTIME 個繰り返す (K=1,NDTIME)

変数名	FORMAT	内容	単位
DTIME(K)	3E10.0	タイムステップコントロールの時間	sec
DTMIN(K)		最小のタイムステップサイズ	sec
DTMAX(K)		最大のタイムステップサイズ	sec

B.10 プリントコントロール

以下の入力でプリントアウトの制御を行う。

【レコード 62】 プリントコントロールの数

変数名	FORMAT	内容	単位
NPRNT	I5	プリントコントロールデータの個数	—

【レコード 63】 プリントコントロール I →[R-62]NPRNT 個繰り返す (K=1,NPRNT)

変数名	FORMAT	内容	単位
KDPRT(K)	I5,5X	プリント出力の数	—
DTPRT(K)	E10.0	プリント出力の時間間隔	sec

【レコード 64】 プリントコントロール II

変数名	FORMAT	内容	単位
LPBS	I5	プリント出力をする基本変数の個数	—
BSVAR(K)	15(A4,1X)	基本変数の識別子 P : 圧力 [Pa] TL : 流体温度 [K] TS : 飽和温度 [K] RHL : 液相密度 [kg/m ³] EL : 液相の内部エネルギー [J/kg]	—

		UL : 液相の径方向流速 [m/sec]	
		VL : 液相の軸方向流速 [m/sec]	

【レコード 65】 プリントコントロールⅢ

変数名	FORMAT	内容	単位
LPAX	I5	プリント出力をする補助変数の個数	—
AXVAR(K)	15(A4,1X)	補助変数の識別子 HTC : 熱伝達率と熱伝達係数 VPR : 流速-圧力の関係 FRC : 摩擦因子 CON : 燃料ピンとヒートスラブの温度 RES : 質量とエネルギーの残差 TB : 閉塞物の温度	—

【レコード 66】 燃料ピンプロットⅠ

変数名	FORMAT	内容	単位
NRBLC	I5	プロット出力する燃料ピンの本数	—

【レコード 67】 燃料ピンプロットⅡ→[R-66]NRBLC 個繰り返す (N=1,NRBLC)

変数名	FORMAT	内容	単位
NPROD(N)	16I5	プロット出力する燃料ピン番号	—

【レコード 68】 ヒートスラブプロットⅠ

変数名	FORMAT	内容	単位
NSBLC	I5	プロット出力するヒートスラブの個数	—

【レコード 69】 ヒートスラブプロットⅡ→[R-68]NSBLC 個繰り返す (N=1,NSBLC)

変数名	FORMAT	内容	単位
NPSLB(N)	16I5	プロット出力するヒートスラブ番号	—

【レコード 70】 プロットコントロール

変数名	FORMAT	内容	単位
NPLBL(2)	2I5	プロット出力する軸方向メッシュ範囲 燃料ピン及びヒートスラブの軸方向のプロット範囲を下 端、上端の順で入力する。	—

【レコード71】簡易プリントコントロール I

変数名	FORMAT	内容	単位
LOCPR	3I5	簡易出力をするメッシュの個数	—
MODPR		簡易出力をするタイムステップ間隔	—
LDEBUG		デバッグ出力オプション 0：出力しない 1：全てのイタレーション毎に出力	—

【レコード72】簡易プリントコントロール II

変数名	FORMAT	内容	単位
IVOL(J,I)	16I5	簡易出力をするメッシュ番号 サブチャンネル番号と軸方向メッシュ番号をペアで入力する。LOCPR 個繰り返す。	—

【レコード73】デバッグ出力（マトリックス表示）コントロール

変数名	FORMAT	内容	単位
LST1	2I10	デバッグ出力の最小のタイムステップ番号	—
LST2		デバッグ出力の最大のタイムステップ番号	—
LITR1	6I5	デバッグ出力の最小のイタレーション数	—
LITR2		デバッグ出力の最大のイタレーション数	—
ICN1		デバッグ出力の最小のサブチャンネル番号	—
ICN2		デバッグ出力の最大のサブチャンネル番号	—
LAZ1		デバッグ出力の最小の軸方向メッシュ番号	—
LAZ2		デバッグ出力の最大の軸方向メッシュ番号	—

B.11 閉塞モデル

ここでは、ポーラス状閉塞モデルのパラメータを設定する。

【レコード74】閉塞モデルパラメータ

変数名	FORMAT	内容	単位
NBLCK	3I5	閉塞領域の数	—
IBFRI		圧力損失相関式 0：Blasius、1：Ergun、2：Carman	—
IBHTM		熱伝達相関式 0：Simplified、1：Modified、 2：等価熱伝導モデル	—

【レコード 75】 閉塞物形状

変数名	FORMAT	内容	単位
DHBP	6E10.0	閉塞物粒子直径 (熱伝達計算用) IBHTM=1,2 の時使用される。	m
DHBA		IBFRI=0 : 閉塞部内軸方向水力等価直径	m
		IBFRI=1,2 : 閉塞物粒子平均直径	m
DHBL		閉塞部内横方向水力等価直径 IBFRI=0 の時使用される。	m
CEL		燃料ピン-冷却材接触面積割合 IBFRI=0,1 の時使用される。	—
CSHAP		形状係数 (デフォルト 0.8、通常 0.6~0.8) IBFRI=2 の時使用される。	—
CVEL1		圧力計算参照流速ファクタ (通常 1.0) IBFRI=1,2 の時使用される。	—

【レコード 76】 閉塞領域内流路形状

変数名	FORMAT	内容	単位
FVOL	8E10.0	閉塞領域内のボリュームポロシティ	—
FARA		閉塞領域内の軸方向パーミアビリティ	—
FARL		閉塞領域内の横方向パーミアビリティ	—
TKBLK		閉塞物熱伝導率	W/mK
HWB		構造物-閉塞物間熱伝達係数 IBHTM=0,1 の時使用される。	W/m ² K
HBLI		閉塞物-流体間熱伝達係数 IBHTM=0 の時使用される。	W/m ² K
ABLI		閉塞物-流体接触面積割合	1/m
CVEL2		熱伝達計算参照流速ファクタ (通常 1.0) IBFRI=1,2 の時使用される。	—

【レコード 77】 閉塞位置→[R-74]NBLCK 個繰り返す (K=1,NBLCK)

変数名	FORMAT	内容	単位
LBLC(K)	2I5	閉塞領域(K)が占める軸方向メッシュ数	—
IBLC(K)		閉塞領域(K)が占めるサブチャンネル数	—
LBL(L,K)	16I5	閉塞領域(K)の軸方向位置 (L=1,LBLC(K))	—
LBI(I,K)	16I5	閉塞領域(K)のサブチャンネル番号 (I=1,IBLC(K))	—

B.12 グリッドスペーサ

ここでは、グリッドスペーサモデルのパラメータを設定する。

【レコード 78】 グリッドスペーサの規定

変数名	FORMAT	内容	単位
LGRC	I5,5X	グリッドスペーサ位置（軸方向位置）の数	—
BLPCT(J)	5E10.0	グリッドスペーサによる流動領域の縮減 J=1：中心サブチャンネルに対して規定 J=2：エッジサブチャンネルに対して規定 J=3：コーナーサブチャンネルに対して規定	—
FKAH		グリッドスペーサの抗力係数（定数）	—
DZGR		グリッドスペーサの長さ	m

【レコード 79】 グリッドスペーサの位置

変数名	FORMAT	内容	単位
LGL(L)	16I5	グリッドスペーサの軸方向位置	—

【レコード 80】 グリッドスペーサとサブチャンネルの関係

変数名	FORMAT	内容	単位
LGS(I,LG)	16I5	サブチャンネルとグリッドスペーサの接続 0：グリッドスペーサと接続しない 1：グリッドスペーサと接続	—

付録 C ループ解析モジュール用入力データマニュアル

ループ解析モジュールの入力データの仕様は、元とする LEDHER PLANDTL-DHX バージョンのオリジナルの入力データとほとんど同じである。

異なる点は、まず、オリジナルが炉心部に対して詳細なモデル化が必要なものに対して、本システムの炉心モデルは、ループ解析モジュールが独立した炉心解析モジュールから炉心の熱流動特性に関するデータを受け取るための Dummy Path モデル 1 個のみで全炉心を担当させて冷却ループ全体を構成する。このため、入力された Path データのどれが炉心に相当するかを指定する必要がある。(データ番号 5 を参照)

この炉心用の Path データで指定する幾何データや物理モデルデータ等は計算結果に影響しないので適当な値でよい。

また、過渡計算での時間のコントロール(時間刻み、計算終了等)は炉心解析モジュールで行い、ループ解析モジュールで指定するものは、過渡計算開始前のループ解析モジュール単独での Null Transient 計算用に使用する。(データ番号 6 ~ 14 参照)

CRDINP. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
1	TITLE	A(80)		解析ケースのタイトル
2	IREST	I(1)	OPTN	リスタートオプション 0 : 初期条件で計算 1 : リスタート計算
	NREST	I(1)		リスタートデータ出力インターバル
3	IOUTC	I(1)	OPTN	コンパクト出力オプション 0 : 全ての情報を出力する 1 : コンパクト出力をする (タイムステップの 収束状況のみ)
4	MTXCHK	I(1)	OPTN	デバッグ用ソルバーにかかるマトリックスダンプ オプション 0 : ダンプしない 1 : ダンプする

CRDINP. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
5	NCRPT	I(1)	(NEW)	ACT側と接続するPATHのID番号 (ACTオリジナル)
6	NTURN	I(1)	TIME	タイムステップ幅変更回数
7	NENGT	I(1)	TIME	・ 回目のタイムステップ幅変更時の出力インターバル時 間に進める エネルギー計算ステップ数 (エネルギー計算のタイムステップ幅 ΔTe は $\Delta Te = \text{OUTIVT}(\cdot) / \text{NENGT}(\cdot)$ と定義される)
8	NHYDT	I(10)	TIME	・ 回目のタイムステップ幅変更時にエネルギー計算を 1ステップ進める間に行う運動量計算の回数 (運動量計算のタイムステップ幅 ΔTh は $\Delta Th = \Delta Te(\cdot) / \text{NHYDT}(\cdot)$ と定義される)
9	NCALCT	I(10)	TIME	・ 回目のタイムステップ幅変更時の出力回数
10	OUTIVT	R(10)	TIME	・ 回目のタイムステップ幅変更時の出力インターバル (sec)
11	CRITU	R(10)	TIME	各ステップ毎に許される物理量の最大変化率
12	CRITL	R(10)	TIME	ステップ毎の物理量の変化率がこれを下回るとタイム ステップ幅をTFACTで指定しただけ自動的に大きくする。
13	TFACT	R(10)	TIME	タイムステップ幅の最適化ファクタ
14	MONI	I(1)	TIME	モニターオプション 0 : 出力しない 1 : 全てのOUTLISTを出力する

CRDINP.f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
15	NPRESS	I(1)	GBL	圧力定義点の総数
16	NPATH	I(1)	GBL	コンポーネントPATHの総数
17	NVOLUM	I(1)	GBL	コンポーネントVOLUMEの総数
18	NMPATH	I(1)	GBL	コンポーネントMPATHの総数
19	NPUMP	I(1)	GBL	コンポーネントPUMPの総数
20	NSTRUC	I(1)	GBL	コンポーネントSTRUCTUREの総数
21	NPIN	I(1)	GBL	コンポーネントPINの総数 (ACT-LEDDERではPINを使用していないのでLEDDER内部では0が入るが、並び入力方式のT3D型入力データでは何か数値を入れなければならない)
22	NHX	I(1)	GBL	コンポーネントHXの総数
23	HHX2	I(1)	GBL	コンポーネントHX2の総数
24	ELEV	R(150)	GBL	圧力定義点の高さ (m)

PATINP.f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
25	IINP	I(150)	PATH	各PATHの入口 (圧力定義点) 番号
26	IEXP	I(150)	PATH	各PATHの出口 (圧力定義点) 番号
27	AREAP	R(150)	PATH	各PATHの流路面積 (m ²)
28	XLENP	R(150)	PATH	各PATHの流路長 (m)
29	EQDIAP	R(150)	PATH	各PATHの水力等価直径 (m)
30	ITREP	I(150)	PATH	各PATHの代表温度選択フラグ 0 : 出口温度 (過渡計算時必ず使用する) 1 : 入口温度と出口温度の平均 (伝熱特性を見るときのみ使用する。ただし、定常状態のみ)
31	NCORRP	I(150)	PATH	各PATHの摩擦圧力損失係数算出オプション -1 : CHECK VALVE 0 : F = 0 (形状損失のみ) 1~9 : 任意入力選択オプション (PRDROPの項を参照) F = A*Re**B 10 : 円管の式 Re ≤ 1189 F = 64/Re Re > 1189 F = 0.336/Re**2 (ブラジウスの式)
32	PLOS	R(150)	PATH	各PATHの形状圧力損失係数
33	IMPAT	I(150)	PATH	各PATHの物性値番号 1 : ナトリウム 2 : 水 3 : 空気

VOLINP. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
34	NINV	I(15)	VOLUM	各VOLUMEの入口数
35	NEXV	I(15)	VOLUM	各VOLUMEの出口数
36	IINVA	I(50)	VOLUM	各VOLUMEの入口 (圧力定義点) 番号
37	IEXVA	I(50)	VOLUM	各VOLUMEの出口 (圧力定義点) 番号
38	VOLUME	R(15)	VOLUM	各VOLUMEの体積 (m ³)
39	IABSVL	I(1)	VOLUM	プラントの絶対圧力を定義しているVOLUME番号
40	ABSPRS	R(1)	VOLUM	絶対圧力 (通常は1.0132E+05 Pa)
41	IMPVOL	I(15)	VOLUM	各VOLUMEの物性値番号 1 : ナトリウム 2 : 水 3 : 空気
42	TVINIT	R(15)	VOLUM	各VOLUMEの初期温度 (°C) (通常は0.0を入力) これは主としてVOLUMEを大気として用いるときに使用する。 0以上の値を入力したときのみ有効となる。 0を入力するとTINITで設定した値が入力される

STRINP. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
43	XHCAPA	R(500)	STRUC	各STRUCTUREの熱容量 (J/°C)
44	NCONP	I(500)	STRUC	各STRUCTUREがPATHと熱交換する数
45	ICONPA	I(500)	STRUC	各STRUCTUREが熱交換するPATHのID番号
46	ACONPA	R(500)	STRUC	各STRUCTUREがPATHと熱交換する伝熱面積 (m ²)
47	ICORPA	I(500)	STRUC	各STRUCTUREがPATHと熱交換する相関式のオプション 1 : 二重円管の式 2 : 単管の式
48	NCONV	I(500)	STRUC	各STRUCTUREがVOLUMEと熱交換する数
49	ICONVA	I(500)	STRUC	各STRUCTUREが熱交換するVOLUMEのID番号
50	ACONVA	R(500)	STRUC	各STRUCTUREがVOLUMEと熱交換する伝熱面積 (m ²)
51	ICORVA	I(500)	STRUC	各STRUCTUREがVOLUMEと熱交換する相関式のオプション
52	NCONS	I(500)	STRUC	各STRUCTUREがSTRUCTUREと熱交換する数
53	ICONSA	I(500)	STRUC	各STRUCTUREが熱交換するSTRUCTUREのID番号
54	AHSSA	R(500)	STRUC	伝熱面積 S × 熱伝導率 h
55	POWER	R(500)	STRUC	各STRUCTUREの初期熱出力 (W)
56	RHEAT	R(500)	STRUC	各STRUCTUREが熱交換する際の内部抵抗 (?°C/W)
57	NQTAB	I(1)	STRUC	熱出力過渡カーブのテーブルの数
58	IDQTAB	I(500)	STRUC	各STRUCTUREが過渡カーブに用いるテーブル番号
59	NQTABL	I(500)	STRUC	過渡カーブテーブルの長さ
60	ANUSTR	R(10)	STRUC	ヌセルト数を求める時相関式に代入する値
61	BNUSTR	R(10)	STRUC	Re > 2,000の時
62	CNUSTR	R(10)	STRUC	Nu = ANUSTR × (Re**BNUSTR) × (Pr**CNUSTR)
63	XNULAM	R(10)	STRUC	Re ≤ 2,000の時 Nu = XNUSTR
64	IHFOT	I(500)	STRUC	各PATHと熱交換するSTRUCTUREのID番号

過渡テーブルはオリジナルLEDHERではNAMELIST文の終わりを示す&ENDの後に入力する。
 NAMELIST文を使用しないT-3D用ACTのデータではIHFXTの次の行から入力する

```
DO 100 I = 1, NQTAB
DO 100 J = 1, NQTABL(I)

READ(IREAD, *) QTAB(I, J, 1), QTAB(I, J, 2)
```

100
 CONTINUE

とプログラムでは過渡テーブルを読み込むようになっている。QTAB(I, J, 1)には時間、
 QTAB(I, J, 2)にはFrictionを入力すればよい。

(入力例)

```
0.0      1.0
100.0    1.0
```

MPAINP. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
65	IINMP	I(10)	MPATH	各MPATHの入口 (圧力定義点) 番号
66	IEXMP	I(10)	MPATH	各MPATHの出口 (圧力定義点) 番号
67	XLENMP	R(10)	MPATH	各MPATHの流路長 (m?)
68	NCORMP	I(10)	MPATH	各MPATHの摩擦圧力損失係数算出オプション 0 : F = 0 (形状損失のみ) 1~9 : 任意入力選択オプション (PRDROPの項を参照) $F = A \times Re^{**B}$ 10 : 円管の式 $Re \leq 1189$ $F = 64/Re$ $Re > 1189$ $F = 0.336/(Re^{**0.25})$ (ブラジウスの式)
69	MESHMP	I(10)	MPATH	各MPATHのメッシュ分割数
70	PLOSMF	R(10)	MPATH	各MPATHの形状圧力損失係数
71	AREAMP	R(10)	MPATH	各MPATHの流路面積 (m ²)
72	IMPMPA	I(10)	MPATH	各MPATHの物性値番号 1 : ナトリウム 2 : 水 3 : 空気
73	IOPELV	I(1)	MPATH	各MPATHのメッシュのエレベーションマニュアル入力オプション ≠ 0 : 次項目のELVNODから入力 = 0 : 出入口高さのみ考慮

74	ELVNOD	R(150)	MPATH	MPATHの各メッシュのエレベーション
75	EQDMPA	R(10)	MPATH	各MPATHの水力等価直径 (m?) ただし、EQDIAPが0の場合は $EQDIAP = \sqrt{AREAP/\pi} \times 2$ が与えられる。

HXINP. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
76	IINHx	I(5)	Hx	各Hxの一次側入口 (圧力定義点) 番号
77	IEXHx	I(5)	Hx	各Hxの一次側出口 (圧力定義点) 番号
78	IINTUB	I(5)	Hx	各Hxの伝熱管の内側選択オプション 1 : 一次側 2 : 二次側
79	DIHx	R(5)	Hx	各Hxの伝熱管の内径 (m)
80	DOHx	R(5)	Hx	各Hxの伝熱管の外径 (m)
81	A1Hx	R(5)	Hx	各Hxの一次側流路断面積 (m ²)
82	A2Hx	R(5)	Hx	各Hxの二次側流路断面積 (m ²)
83	XL1Hx	R(5)	Hx	各Hxの一次側流路長さ (m)
84	XL2Hx	R(5)	Hx	各Hxの二次側流路長さ (m)
85	W2Hx	R(5)	Hx	各Hxの二次側初期流量 (kg/sec)
86	NWTAB	I(1)	Hx	二次側の流量過渡カーブのテーブルの数
87	NWTABL	I(5)	Hx	流量過渡カーブテーブル(・)の長さ
88	IDWTAB	I(5)	Hx	各Hxの二次側流量過渡カーブに用いるテーブルの番号
89	T2INHx	R(5)	Hx	各Hxの二次側入口温度 (°C)
90	NTTAB	I(1)	Hx	二次側の入口温度過渡カーブのテーブルの数
91	NTTABL	I(5)	Hx	温度過渡カーブテーブル(・)の長さ
92	IDTTAB	I(5)	Hx	各Hxの二次側の入口温度過渡カーブに用いるテーブルの 番号
93	NTUB	I(5)	Hx	各Hxの伝熱管本数
94	MESHx	I(5)	Hx	各Hxのメッシュ分割数
95	MATTUB	I(5)	Hx	各Hxの伝熱管材質 1 : Cu 2 : CuZn 3 : SUS
96	IPLSHx	I(5)	Hx	各Hxの摩擦圧力損失係数の算出オプション 1 : $F = 81.4/Re$ 2 : $F = 96.0/Re$
97	DSHEL	R(5)	Hx	各HxのShell Sideの水力等価直径 (m)
98	ICO1Hx	I(5)	Hx	各Hxの一次側熱伝達式オプション
99	ICO2Hx	I(5)	Hx	各Hxの二次側熱伝達式オプション
100	IDWNCM	I(5)	Hx	各Hxのダウンカマーオプション 0 : なし 1 : あり
101	ICENTR	I(5)	Hx	熱伝達にかかる代表温度の選び方 0 : 流れ方向出口温度 (過渡計算の時は必ず 使用する)

102	IMPHXP	I (5)	HX	1 : 出入口温度の平均 (伝熱特性を見るときのみ使用する。ただし、定常状態のみ) 各HXの一次側流体の物性値番号 1 : ナトリウム 2 : 水 3 : 空気
103	IMPHXS	I (5)	HX	各HXの二次側流体の物性値番号 1 : ナトリウム 2 : 水 3 : 空気

HXINP. f (つづき)

No.	変数名	配列	旧ネームリスト名	内容
104	IAREAH	I (5)	HX	各HXの伝熱面積マニュアル入力オプション = 1 : 伝熱面積をマニュアルで入力 ≠ 1 : 一次側伝熱管内径をもとに計算
105	AREAHP	R (5)	HX	各HXの一次側の伝熱面積 (m ²)
106	AREAHS	R (5)	HX	各HXの二次側の伝熱面積 (m ²)
107	H1NUPA	R (5)	HX	一次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数A
108	H1NUPB	R (5)	HX	一次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数B
109	H1NUPC	R (5)	HX	一次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数C
110	H1NUSA	R (5)	HX	二次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数A
111	H1NUSB	R (5)	HX	二次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数B
112	H1NUSC	R (5)	HX	二次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数C

過渡テーブルはオリジナルLEDHERではNAMELIST文の終わりを示す&ENDの後に入力する。

NAMELIST文を使用しないT-3D用ACTのデータではH1NUSCの次の行から入力する

```

DO 100 I = 1, NWTAB
DO 100 J = 1, NWTABL(I)

READ(IREAD, *)WTAB(I, J, 1), WTAB(I, J, 2)
    
```

100
CONTINUE

```

DO 200 I = 1, NTTAB
DO 200 J = 1, NTTABL(I)

READ(IREAD, *)TTAB(I, J, 1), TTAB(I, J, 2)
    
```

200
CONTINUE

とプログラムでは過渡テーブルを読み込むようになっている。
WTAB(I, J, 1), TTAB(I, J, 1)には

時間、WTAB(I, J, 2)およびTTAB(I, J, 2)にはFrictionを入力すればよい。

(入力例)

0.0	1.0
100.0	1.0
0.0	1.0
100.0	1.0

HX2INP. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
113	IINHXP	I(5)	HX2	各HX2の一次側入口 (圧力定義点) 番号
114	IEXHXP	I(5)	HX2	各HX2の一次側出口 (圧力定義点) 番号
115	IINHXS	I(5)	HX2	各HX2の二次側入口 (圧力定義点) 番号
116	IEXHXS	I(5)	HX2	各HX2の二次側出口 (圧力定義点) 番号
117	IINTB2	I(5)	HX2	各HX2の伝熱管の内側選択オプション 1 : 一次側 2 : 二次側
118	DIHX2	R(5)	HX2	各HX2の伝熱管の内径 (m)
119	DOHX2	R(5)	HX2	各HX2の伝熱管の外径 (m)
120	A1HX2	R(5)	HX2	各HX2の一次側流路断面積 (m ²)
121	A2HX2	R(5)	HX2	各HX2の二次側流路断面積 (m ²)
122	XL1HX2	R(5)	HX2	各HX2の一次側流路長さ (m)
123	XL2HX2	R(5)	HX2	各HX2の二次側流路長さ (m)
124	NTUB2	I(5)	HX2	各HX2の伝熱管本数
125	DSHEL2	R(5)	HX2	各HX2のShell Sideの水力等価直径 (m)
126	MESHX2	I(5)	HX2	各HX2のメッシュ分割数
127	MATTB2	I(5)	HX2	各HX2の伝熱管材質 1 : Cu 2 : CuZn 3 : SUS
128	IC1HC2	I(5)	HX2	各HX2の一次側熱伝達式オプション
129	IC2HX2	I(5)	HX2	各HX2の二次側熱伝達式オプション
130	PRSHX2	R(5)	HX2	各HX2の二次側の絶対圧力 (Pa)
131	IMHX2P	I(5)	HX2	各HX2の一次側流体の物性値番号 1 : ナトリウム 2 : 水 3 : 空気
132	IMHX2S	I(5)	HX2	各HX2の二次側流体の物性値番号 1 : ナトリウム 2 : 水 3 : 空気
133	IAREA2	I(5)	HX2	各HX2の伝熱面積マニュアル入力オプション = 1 : 伝熱面積をマニュアルで入力 ≠ 1 : 一次側伝熱管内径をもとに計算
134	AREA2P	R(5)	HX2	各HX2の一次側の伝熱面積 (m ²)

135	AREA2S	R(5)	HX2	各HX2の二次側の伝熱面積 (m ²)
136	H2NUPA	R(5)	HX2	一次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数A
137	H2NUPB	R(5)	HX2	一次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数B
138	H2NUPC	R(5)	HX2	一次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数C
139	H2NUSA	R(5)	HX2	二次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数A
140	H2NUSB	R(5)	HX2	二次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数B
141	H2NUSC	R(5)	HX2	二次側熱伝達相関式 (A+B×Pe**C)の係数C

PMPINP. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
142	IINPMP	I(5)	PUMP	各PUMPの入口 (圧力定義点) 番号
143	IEXPMP	I(5)	PUMP	各PUMPの出口 (圧力定義点) 番号
144	WIPUMP	R(5)	PUMP	各PUMPの初期流量 (kg/sec)
145	TIMNC	R(5)	PUMP	各PUMPが自然循環にスイッチする時間 (sec)
146	NTAB	I(1)	PUMP	PUMPの過渡カーブテーブルの数
147	IDTAB	I(5)	PUMP	各PUMPの過渡カーブに用いるテーブルのID番号
148	NTABL	I(5)	PUMP	各過渡カーブテーブルの長さ
149	IMPPMP	I(5)	PUMP	各PUMPの物性値番号 1 : ナトリウム 2 : 水 3 : 空気

過渡テーブルはオリジナルLEDHERではNAMELIST文の終わりを示す&ENDの後に入力する。

NAMELIST文を使用しないT-3D用ACTのデータではIMPPMPの次の行から入力する

```
DO 100 I = 1,NTAB
DO 100 J = 1,NTABL(I)

READ(IREAD,*) TAB(I, J, 1),TAB(I, J, 2)
```

100
CONTINUE

とプログラムでは過渡テーブルを読み込むようになっている。TAB(I, J, 1)には時間、TAB(I, J, 2)にはFrictionを入力すればよい。

(入力例)

```
0.0      1.0
100.0    1.0
```


PRDINP. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
150	ALAM	R(9)	PRDROP	層流での管摩擦損失係数($F=ALAM \times Re^{**}BLAM$) の係数ALAM
151	BLAM	R(9)	PRDROP	層流での管摩擦損失係数($F=ALAM \times Re^{**}BLAM$) の係数BLAM
152	ATUR	R(9)	PRDROP	乱流での管摩擦損失係数($F=ATUR \times Re^{**}BTUR$) の係数ATUR
153	BTUR	R(9)	PRDROP	乱流での管摩擦損失係数($F=ATUR \times Re^{**}BTUR$) の係数BTUR
154	RETRN	R(9)	PRDROP	レイノルズ数の境界値

INISET. f

No.	変数名	配列	旧ネーム リスト名	内容
155	TINIT	R(1)	ISET	初期設定温度 (°C)

付録D コンパイルと実行方法

コンパイルや実行手続きは、MPICH が容易しているコマンド mpif77 及び mpirun の仕様に基づく。なお、これらのコマンドの仕様は、MPI の標準化で規定されるものではない。

(1) コンパイルとリンク

一つの fortran ソースファイル foo.f の実行形式 foo を作るには以下の手続きによる。

コンパイル

コマンド形式

```
mpif77 -c foo.f
```

リンク

コマンド形式

```
mpif77 -o foo foo.o
```

コンパイルとリンクを以下のように一度の手続きで行うこともできるが、MPICH では推奨していない。

コマンド形式

```
mpif77 -o foo foo.f
```

実際の運用には、ソースファイルが多いためメイクファイルを使用する。

a. 炉心解析モジュール用メイクファイル

```
#
CMD=act-mpi
#CF= f77
#CF= f90
#CF= /usr/local/mpi/mpich/lib/hpux/ch_p4/mpif77
CF= mpif77
#CFFLG= -fast -I/usr/local/mpi/include
#CFFLG= -C -I/usr/local/mpi/include
#CFFLG= -fast
CFFLG= -c -r8
#CFFLG= -R8
LDR= $(CF)
#LDRFLG= -non_shared
LDRFLG=
#LIBS = -L/usr/local/mpi/lib/alpha/ch_p4 -lmpi
#
```

```

.f.o:
    $(CF) $(CFFLG) $<
#
OBJS= asize.o  bhtcal.o  blcond.o  cladpr.o  contrl.o  cpfuel.o  cputim.o  ¥
dfec2.o  dinvrt.o  edcond.o  fagang.o  fagmgs.o  fgcal.o  fintg.o  ¥
fncal.o  funelp.o  funlmd.o  funsrf.o  funwar.o  fwral.o  gprint.o  ¥
icth.o   ilubcg.o  isig.o   isiga.o  matpro.o  naprol.o  napro2.o  ¥
napro4.o natsub.o  naxsub.o  ndecmp.o  ictype.o  nlu.o   nd.o     ¥
ngkind.o nutlt.o  poll.o   pol2.o   cagang.o  bcgslv.o  bcnset.o  ¥
calcul.o calkm.o  convec.o  eqstat.o  fcondt.o  fconxt.o  flwdis.o  ¥
fricof.o funwra.o  funwrg.o  fwrgl.o  funwrl.o  geomet.o  gisign.o  ¥
htrcof.o inital.o  momeqn.o  outgem.o  readin.o  relmom.o  ¥
sbedit.o subgem.o  isigl.o   isigld.o  timstp.o  update.o  wrgema.o  ¥
wrgeml.o restat.o  rofuel.o  rvcal.o   setwar.o  shtcal.o  sorslv.o  ¥
tidvar.o tkfuel.o  wfric.o   wier.o    wrasg.o   clr.o     condbl.o  ¥
cpbl.o   densbl.o  dhbltd.o  hentbl.o  peclet.o  prantl.o  renold.o  ¥
thdifs.o second.o  xmut.o    clr.p.o   gprint_.o  zzzzzz.o  ¥
ilubcg_.o  ndecmp_.o  nlu_.o   nutlt_.o  mpisub.o  ¥
scondt.o  sconxt.o  htrcos.o  sfluxt.o  sfluxt_.ini.o  ¥
flwdisb.o  initalb.o  htpset_plug.o  htpset.o  ¥
const_group.o  dest_group.o  ¥
const_group_code.o  dest_group_code.o  ¥
    mpi_func.o  wflowt.o  ¥
etm77.o
#
etm90.o
#
$(CMD):      $(OBJS)
             $(LDR) $(LDRFLG) -o $(CMD) $(OBJS) $(LIBS)

```

b. ループ解析モジュール用メイクファイル

```

#
CMD=act-mpi
#CF= f77
#CF= f90
#CF= /usr/local/mpi/mpich/lib/hpux/ch_p4/mpif77
CF= mpif77
#CFFLG= -fast -I/usr/local/mpi/include
#CFFLG= -C -I/usr/local/mpi/include
#CFFLG= -fast
CFFLG= -c
#CFFLG=
LDR= $(CF)
#LDRFLG= -non_shared
LDRFLG=
#LIBS = -L/usr/local/mpi/lib/alpha/ch_p4 -lmpi
#
.f.o:
    $(CF) $(CFFLG) $<
#

```

```

OBJS= ACONP.o ACONV.o AHCLAD.o AHCLGA.o AHFD.o AHPEGA.o AHPELE.o ¥
AHSS.o AROFD.o ATHCFD.o AVISFD.o BOTYO.o CLCAPA.o CONCHK.o ¥
CONERR.o CPLIQ.o CRDINP.o DLAX.o DSDH.o DUMP1.o DUMP2.o ¥
EDRIV.o ERRCHK.o FBTCAL.o FCPAIR.o FCPCU.o FCPCUZ.o FCPFD.o ¥
FCPNIT.o FCPSUS.o FFRIC.o FFRIC1.o FFRIC2.o FFRIC3.o FHFD.o ¥
FKAIR.o FKCOL.o FKCU.o FKCUZN.o FKINS.o FKSUS.o FMUAIR.o ¥
FMUCOL.o FMUFD.o FNUHX.o FRAIR.o FRCOL.o FRCU.o FRCUZN.o ¥
FRE.o FRMIT.o FROFD.o FRSUS.o FTABLE.o FTHCFD.o GACAPA.o ¥
HCOEFP.o HCOEFV.o HCOFHX.o HCOPIN.o HDRIV.o HOSYA.o HX2ENG.o ¥
HX2HYD.o HX2INP.o HX2OUT.o HX6E.o HX6H.o HXINP.o HXOUT.o ¥
HXPDCR.o ICONP.o ICONS.o ICONV.o ICORP.o ICORV.o IEXV.o ¥
IINV.o INISET.o INPLST.o MONIT.o MPAINP.o MPAOUT.o MPAT6E.o ¥
MPAT6H.o MTXMAP.o MTXSLV.o NPROPS.o OUTPUT.o PATH6H.o PATINP.o ¥
PATOUT.o PDCORM.o PDCORP.o PDCORR.o PECAPA.o PHEAT.o PINENG.o ¥
PININP.o PININT.o PINOUT.o PMPINP.o PMPOUT.o POLY.o PPOW.o ¥
PRDINP.o PSAT1.o PUMP6E.o PUMP6H.o QGENER.o RAMC.o RAMG.o ¥
RAMP.o RENEWE.o RENEWH.o S.o SDRDHL.o SECOND.o SGEFA.o ¥
SGESL.o SHFD.o SNDS.o SROFD.o STHCFD.o STORE.o STRC6E.o ¥
STRINP.o STROUT.o SVISFD.o TIMOPT.o TIMREC.o TIMSET.o ¥
TLIQ.o TRNSNT.o TSAT11.o VOLINP.o VOLM6E.o VOLM6H.o VOLOUT.o ¥
WDRDHL.o WHFD.o WOSET.o WROFD.o WTHCFD.o WVISFD.o XLEN.o ¥
const_group_code.o dest_group_code.o mpi_func.o path6e.o ¥
mpisub.o const_group.o dest_group.o NULLTR.o ¥
zzzzzz.o
#
$(CMD):      $(OBJS)
             $(LDR) $(LDRFLG) -o $(CMD) $(OBJS) $(LIBS)

```

c. SUBDIS 用メイクファイル

```

#
CMD=act-mpi
#CF= f77
#CF= f90
#CF= /usr/local/mpi/mpich/lib/hpux/ch_p4/mpif77
CF= mpif77
#CFFLG= -fast -I/usr/local/mpi/include
#CFFLG= -C -I/usr/local/mpi/include
#CFFLG= -fast
CFFLG= -c -r8
LDR= $(CF)
#LDRFLG= -non_shared
LDRFLG=
#LIBS = -L/usr/local/mpi/lib/alpha/ch_p4 -lmpi
#
.f.o:
    $(CF) $(CFFLG) $<
#
OBJS= asize.o cladpr.o clr.o const_group_code.o contrl.o ¥
cpfuel.o dest_group_code.o edcond.o eqstat.o fcondt.o ¥

```

```

fconxt.o flwdis.o fricof.o geomet.o gprint.o htrcof.o ¥
initial.o matpro.o naprol.o napro2.o napro4.o poll.o ¥
pol2.o prantl.o readin.o recvdt.o renold.o rofuel.o ¥
sbedit.o senddt.o shtcal.o sorslv.o tkfuel.o wfri.o ¥
xmut.o zzzzzz.o ¥
recv_end.o recv_rest.o mpisub.o const_group.o dest_group.o ¥
monitr.o
#
$(CMD):      $(OBJS)
              $(LDR) $(LDRFLG) -o $(CMD) $(OBJS) $(LIBS)

```

(2) 実行方法

一種類の実行形式のみで計算が行える場合は、一般に以下の形式で行う。

コマンド形式

```
mpirun -np プロセス数 実行形式名称
```

本システムでは、複数の種類の実行形式を用いるため、次の形式で行う。

コマンド形式

```
mpirun -p4pg プロセスグループファイル名称 実行形式名称
```

ここで、プロセスグループファイルとは、全プロセス（タスク）と使用するマシンとの対応を指定するためのファイルで、ホスト名、実行形式のパスを指定するものである。

この mpirun の形式から、実行形式名称は、異なる実行形式も含めて全て同一の名称とすることが必要となる。また、MPI の通信を行う時に各プロセスの ID として使用するランクは、プロセスグループ内の順序に従う。

本システムでは、以下の順序でプロセスのランク付けを制限する。

ランク

1. SUBDIS
2. LEDHER
3. 炉心槽ルート
4. 炉心槽
 - ・
 - ・
 - a 集合体ルート
 - a 集合体
 - ・
 - ・
 - b 集合体ルート

b 集合体

・
・
・

以下に実際に使用したプロセスグループファイルを示す。1 ホスト (ホスト名: lion) で全タスクを実行する場合のものである。

a. プロセスグループファイル

```
lion 0 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/SUBDIS/act-mpi
lion 1 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/LEDHER/act-mpi
lion 1 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_IWF/act-mpi
lion 1 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA1/act-mpi
lion 1 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA2/act-mpi
lion 1 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA3/act-mpi
lion 1 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA4/act-mpi
lion 1 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA5/act-mpi
lion 1 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA6/act-mpi
lion 1 /home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA7/act-mpi
```

さらに mpirun のパラメータとは別に、炉心部の各実行形式に対して入出力ファイルの場所を認識するためや集合体のタスク構成を認識するために以下のファイルを使用する。ファイルが存在する必要がある場所は、mpirun を実行するディレクトリーである。

b. 集合体ルートタスクのディレクトリファイル(dirfile)

```
/home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_IWF
/home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA1
/home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA2
/home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA3
/home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA4
/home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA5
/home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA6
/home/deguchi/pnc/MPI/LOOP/EXEC/ACT_SA7
```

c. 集合体構成ファイル(sa_org)

```
7           : 集合体数
0 1        : 集合体 No、タスク数
1 1
2 1
3 1
4 1
5 1
```

6 1

7 1

内容は、第1レコードが総集合体数（炉心槽は含まない。）以下、炉心槽の集合体Noを0とし、各集合体のタスク分割数を指定する。