

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—

1997年10月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

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—

大高 雅彦*、大島 宏之*

要旨

高速炉の定格および強制循環から自然循環へ移行する場合の過渡までを含む様々な運転モードに対し、炉心部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。本コードは複数の解析コードをカップリングすることで、炉心のみならずシステム全体を詳細にモデル化するものである。前報では、燃料集合体間の隙間（集合体間ギャップ部）に存在する冷却材の熱流動挙動を解析する炉心槽解析部の開発について報告した。今回は、集合体内の熱流動解析を行う燃料集合体解析部と炉心槽解析部をカップリングすることで ACT の炉心詳細熱流動モデルの開発を実施した。併せてコードの並列化を行うことで大規模計算が可能なものとした。本モデルの開発によって、集合体間ギャップ部の熱流動を考慮した上で、集合体内の温度を精度良く評価することが初めて可能となった。

開発したモデルの妥当性を確認するために、7 体の集合体で炉心部を模擬したナトリウム炉外実験データを用い検証解析を行った。その結果、集合体内の冷却材温度は実験誤差以内で一致し ACT の炉心部の熱流動解析モデルとして適用できることを確認した。

* 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター 基盤技術開発部 熱流体技術開発室

Development of Whole Core Thermal-Hydraulic Analysis program ACT (II)

— Development of Core Model and Verification Analysis —

Masahiko Ohtaka*, Hiroyuki Ohshima*

Abstract

Whole core thermal-hydraulic analysis program ACT is being developed for the purpose of evaluating detailed in-core thermal hydraulic phenomena of fast reactors under various operation conditions, e.g., normal operation and transition from forced to natural circulation. This second report describes the core model and its verification analysis.

ACT consists of several thermal-hydraulic calculation modules related to the following regions:

- 1) subassemblies (fuel, blanket and control rods)
- 2) inter-subassembly gaps,
- 3) upper plenum and
- 4) primary heat transport system.

The subassembly module is almost equivalent to the subchannel analysis code ASFRE-III, which was developed and validated at Thermal Hydraulic Research Section, and is applied to each subassembly of the core. The inter-subassembly gap module is used for calculating the flow and temperature fields in the gaps between the wrapper tubes (inter-wrapper flow) and was also developed based on ASFRE-III code (the first report described last year). The upper plenum and primary heat transport system modules are utilized to offer complicated boundary conditions to the whole-core analysis especially under natural circulation conditions with the operation of the direct reactor auxiliary coolant system. In this work, the core model as the main part of ACT was developed by coupling the subassembly modules and the inter-subassembly gap module and it has made possible to calculate flow and temperature fields in the whole core including thermal interaction between the inner subassemblies and the inter-subassembly gaps. The coupling was made explicitly through the heat exchange on the wrapper tube outer surface from the viewpoints of flexibility to model various core geometry and program parallelization for large-scale simulation. The core model

was applied to the analysis of PLANDTL-DHX sodium experiment whose test section consisted of 7 subassemblies for code verification. It was confirmed that the predicted sodium temperature distributions agreed with the measured data within the measurement error.

* Thermal Hydraulic Research Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, PNC

目 次

第1章 緒言	1
第2章 炉心詳細熱流動モデル	3
2.1 モデル概要	3
2.2 カップリング方法	3
2.2.1 構造（ラッパ管）と流体の熱的カップリング	3
2.2.2 ラッパ管から流体への熱伝達量	4
2.3.3 ラッパ管熱伝導方程式	5
2.2.4 流体のエネルギー保存式の変更	6
2.3 コードの並列化概略	7
第3章 検証解析	9
3.1 PLANDTL-DHX 実験	9
3.1.1 実験装置	9
3.1.2 解析対象ケースと実験条件	10
3.2 解析条件	10
3.2.1 使用関連式	10
3.2.2 メッシュ分割	11
3.3 解析結果	12
3.3.1 集合体内温度分布	12
3.3.2 集合体間ギャップ冷却材温度	12
3.4 考察	13
3.4.1 集合体内温度分布の誤差要因	13
3.4.2 集合体間ギャップ冷却材温度の誤差要因	13
第4章 結言	16
謝辞	17
参考文献	18

表リスト

表 1	PLANDTL-DHX 実験装置形状データ	2 0
表 2	解析対象とした実験ケースの実験条件	2 0
表 3	軸方向メッシュ分割	2 0

図リスト

図 1	カップリング計算手順模式図	2 1
図 2	ラッパ管メッシュ分割図	2 2
図 3	PLANDTL-DHX 装置ループ構成	2 3
図 4	解析結果との比較熱電対位置	2 4
図 5	径方向メッシュ分割図	2 5
図 6	集合体解析部の PE への分割	2 6
図 7	径方向温度分布 (ケース 1)	2 7
図 8	径方向温度分布 (ケース 2)	2 8
図 9	径方向温度分布 (ケース 3)	2 9
図 1 0	径方向温度分布 (ケース 2 : 集合体間ギャップに流入を与えた場合)	3 0

第1章 緒言

高速炉の実用化へ向けには、安全性、信頼性の十分な確保と経済性の向上を両立させることが重要である。その具体的な方策の一つとして、高性能大型炉心の開発（高燃焼度化、炉心長寿命化）や自然循環による崩壊熱除去の採用等が挙げられる。これらを実現するためには、炉心部全体の詳細な熱流挙動を解明することによって、炉心の冷却性や構造物に対する熱過渡を把握しその耐性等を確認することが一つの大きな課題である。

高性能大型炉心の開発に関しては、燃料ピンのスウェリングなどによる燃料集合体内の冷却材流路変形に伴う熱流特性の変化や、集合体の炉内滞在長期化によるラップ管の照射及び熱変形の影響を考慮した燃料ピンやラップ管の温度を精度良く予測することが必要である。一方、自然循環による崩壊熱除去時には、DRACS（直接炉心冷却系）作動時のインターラッパーフロー（集合体間ギャップ流れ）⁽¹⁾や、炉心-プレナム相互作用等⁽²⁾を精度良く予測することが必要である。特にインターラッパーフローは強制循環時にも発生する現象で、炉心出口部において燃料集合体からの出口流が炉上部機構に衝突し、押し戻された流れが集合体間ギャップに潜り込むものである。これにより炉心槽内に温度成層界面を形成することが実験や解析で確認されており、予測評価手法の開発が望まれている。これらの諸現象を精度良く評価するには、炉心内の詳細な熱流動解析のみならず炉心に対し適切な境界条件を設定することが必要であり、そのためには、上部プレナム内や冷却系システム等の熱流動挙動も同時に考慮しなければならない。これらの要求を満たすべく炉心解析部、上部プレナム解析部、システム解析部で構成する全炉心熱流動解析コードACT（Analysis program of whole Core Thermal-hydraulics）の開発に着手した⁽³⁾。

ACTは、プラントシステムやコンポーネントに対する熱流動解析コードとして開発され、十分な検証と解析実績が豊富で信頼性の高いものを相互にカップリングすることによって、プラント全体をモデル化するものである。このように複数のコードのカップリングによって、適用する個々のコード単独では得ることができなかった結果が得られて

いる事例が様々な産業分野において報告されており、開発や検証に多大な労力が注がれた解析コードとしての資産を継承しつつ、解析精度を向上させる手法として注目されている⁽⁴⁾。

本報は、各解析部のうち炉心解析部の開発について述べるものである。ACTの炉心熱流動モデルは、動燃で開発された炉心に関わる熱流動解析コードを適用し構築する。燃料集合体内の熱流動解析コードとしては、これまでにサブチャンネル解析コードASFRE-III⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾の開発・整備を実施し、模擬燃料集合体を用いた炉外ナトリウム実験データによって検証を行い、大型燃料集合体への適用性を確認した。現在、変形バンドルへの適用を図るべく開発が継続されている。集合体間ギャップ部については、ACTへの適用を目的として開発し、既報⁽³⁾で紹介した炉心槽解析コードを適用する。これらのコードをカップリングすることによって(燃料集合体は複数)炉心熱流動モデルを構築する。これによって従来には不可能であった集合体間ギャップ部の熱流動を考慮した上で炉心全体および集合体内の詳細な温度分布の予測が可能となる。

本報告書では、上記の2つのコードのカップリングによる炉心詳細熱流動モデルの開発と7体の模擬燃料集合体で炉心を模擬した炉外ナトリウム実験データに基づいた検証について記す。

第2章 炉心詳細熱流動モデル

2.1 モデル概要

本研究では、炉心を燃料集合体およびブランケット等（以下燃料集合体部）と炉心内に三角格子配列された燃料集合体間の隙間（以下集合体間ギャップ部とする）に大別し、それぞれの領域に動燃がこれまでに開発を行ってきた熱流動解析コードを適用することで、炉心部全体のモデル化を行うものである。適用する熱流動解析コードは、燃料集合体内熱流動解析コード ASFRE-III⁽⁵⁾ と炉心槽解析コード⁽³⁾ である。具体的には、燃料集合体部の熱流動解析およびラッパ管の温度解析を燃料集合体解析コードで、炉心構成要素の外側に存在する集合体間ギャップ部の熱流動解析を炉心槽解析コードに分担することで炉心全体の熱流動モデルを構築する。これらのコードは、個々の炉心構成要素のラッパ管と集合体間ギャップの冷却材の間で熱交換を行うことによりカップリングを行う。また実機の全炉心体系のような大規模計算にも適用すべく計算の並列化を行う。

2.2 カップリング方法

燃料集合体解析部（ラッパ管外表面）と炉心槽解析部（集合体間ギャップ冷却材）との間での熱交換をするようにカップリングをする。具体的には燃料集合体解析部でラッパ管外表面と集合体間ギャップ流体間での熱移行量を計算し、双方のエネルギー保存式中に熱移行量を新たに付加することによってカップリングをする。次節以降に詳細を記す。

2.2.1 構造（ラッパ管）と流体の熱的カップリング

構造と流体との熱的カップリング方法として、ラッパ管を境界として集合体間ギャップ部側および燃料集合体側に接する流体はラッパ管からの熱流束を陽に評価するようにした。

- (step1) 前タイムステップの $h_{iwf}, h_{sub}, T_{w_iwf}, T_{f_iwf}, T_{w_sub}, T_{f_sub}$ を使用し、ラッパ管から集合体間ギャップ流体および集合体内流体へ与える熱流束を計算
- (step2) step1 の熱流束値を使用して集合体間ギャップ流体および集合体内の熱流動を計算
- (step3) step2 で更新された流体温度を境界条件としてラッパ管熱伝導方程式を計算

ここで、 $h_{iwf}, h_{sub}, T_{w_iwf}, T_{f_iwf}, T_{w_sub}, T_{f_sub}$ は、それぞれ、集合体間ギャップ側ラッパ管表面熱伝達率、燃料集合体側ラッパ管表面熱伝達率、集合体間ギャップ側ラッパ管表面温度、集合体間ギャップ流体温度、燃料集合体側ラッパ管表面温度、燃料集合体側流体温度を表す。

上記のカップリングのための計算手順を模式的に表したものを図1に示す。このように、熱流束を陽的な扱いに変更した場合、時間刻み幅に制約が生じるが、全集合体と炉心槽を同時に連立させ大規模な方程式を解くよりは、高効率で解くことが可能となる。

2.2.2 ラッパ管から流体への熱伝達量

ラッパ管表面から集合体間ギャップ流体および燃料集合体内流体への熱伝達量は陽的に次式で表される。この値を2.2.4に示す流体のエネルギー保存式で使用する。

$$Q_{fw} = A_{fw} h_{fw} (T_w - T_f) \dots \dots \dots (1)$$

式中の A_{fw}, h_{fw}, T_w, T_f はそれぞれ、ラッパ管と流体との境界面積、ラッパ管と流体との熱伝達率、ラッパ管表面温度、ラッパ管に接する流体温度を表す。

2.2.3 ラッパ管熱伝導方程式

ASFRE-III コードが備えるラッパ管の温度を計算するための熱伝導方程式を以下に示す。ラッパ管の熱伝導は軸および周への熱伝導を考慮しない径方向の1次元熱伝導方程式である。基礎式は以下ようになる。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = 0 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 ρ 、 C_p 、 λ 、 T は、それぞれ構造材の密度、比熱、熱伝導率、温度を表す。

図2に示すようなメッシュ分割をし、式を $x_{i-1/2}$ から $x_{i+1/2}$ まで積分すると、

$$\rho C_p \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{\partial T}{\partial t} dx - \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] dx = 0 \dots \dots \dots (3)$$

積分区間を分けて表示すると次式を得る。

$$-\frac{\lambda_{i-1/2}^n}{\Delta x_{i-1}} T_i^{n+1} + \left\{ \frac{\lambda_{i-1/2}^n}{\Delta x_{i-1}} + \frac{\lambda_{i+1/2}^n}{\Delta x_i} + \frac{1}{2\Delta t} \left[(\rho C_p)_{i-1/2}^n \Delta x_{i-1} + (\rho C_p)_{i+1/2}^n \Delta x_i \right] \right\} T_i^{n+1} - \frac{\lambda_{i+1/2}^n}{\Delta x_i} T_{i+1}^{n+1} = \frac{1}{2\Delta t} \left[(\rho C_p)_{i-1/2}^n \Delta x_{i-1} + (\rho C_p)_{i+1/2}^n \Delta x_i \right] T_i^n \dots \dots \dots (4)$$

ラッパ管の両側表面での境界条件は以下ようになる。

【集合体間ギャップ側 ($x = x_n$)】

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = h_{iwf} (T_{w_iwf}^{n+1} - T_{f_iwf}^{n+1}) \dots \dots \dots (5)$$

【燃料集合体側 ($x = x_1$)】

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = h_{sub} (T_{w_sub}^{n+1} - T_{f_sub}^{n+1}) \dots \dots \dots (6)$$

式(4)を T について整理すると次式のような形を得る。

$$A_i T_{i-1}^{n+1} + B_i T_i^{n+1} + C_i T_{i+1}^{n+1} = D_i \dots \dots \dots (7)$$

更に燃料集合体側から集合体間ギャップ側までの全メッシュに対する式 (7) を左から並べ行列表示すると次のような3重対角行列となる。(未知ベクトルである上付き添え字 n+1 を省略して記す)

$$\begin{bmatrix} B_1 & C_1 & & & & & \\ A_2 & B_2 & C_2 & & & & \\ & A_3 & B_3 & C_3 & & & \\ & & * & * & * & & \\ & & & * & * & * & \\ & 0 & & & A_{N-1} & B_{N-1} & C_{N-1} \\ & & & & & A_N & B_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{N-1} \\ T_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ D_{N-1} \\ D_N \end{bmatrix} \dots \dots \dots (8)$$

この行列を消去すると最終行は次式で表すことができる。

$$T_{w_iwf} = C_{w_iwf} + d_{w_iwf} h_{w_iwf} T_{f_iwf} \dots \dots \dots (9)$$

ここで T_{w_iwf} はラッパ管外表面温度 (= T_N) を表す。ここで、ラッパ管外表面の流体温度は既知なので、行列演算を施せばラッパ管の温度解を得ることができる。

2.2.4 流体のエネルギー保存式の変更

ここでは、燃料集合体解析コードと炉心槽解析コードにおける流体のエネルギー保存式を記す。保存形で表すと以下のように書ける。

$$\frac{\partial \langle \rho_f e_f \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_T} \int_{A_{ff}} \rho_f e_f \mathbf{v} dA = -\frac{1}{V_T} \int_{A_{fw}} \mathbf{q}''_f \cdot \mathbf{n} dA - \frac{1}{V_T} \int_{A_{ff}} \mathbf{q}''_f \cdot \mathbf{n} dA \dots (10)$$

式中の、 ρ 、 \mathbf{v} 、 e 、 \mathbf{q}'' はそれぞれ、密度、流速、内部エネルギー、熱流束を表し、 V_T はコントロールボリュームの全体積、 A_{ff} 、 A_{fw} は流体-流体間、流体-燃料ピンやラッパ管等の壁面間の面積を表す。 $\langle \rangle$ は体積平均を意味し、例えばある状態量 ϕ を用いると、次式で表すことができる。

$$\langle \phi \rangle = \frac{1}{V} \int_V \phi dV \dots \dots \dots (11)$$

これをサブチャンネルコントロールボリュームに適用した差分形で表すと

$$V_{f,i,l} \frac{(\rho_f e_f)_{i,l}^{n+1} - (\rho_f e_f)_{i,l}^n}{\Delta t} + \langle A_{fa} \rho_f^n e_f^n w^{n+1} \rangle_{i,l+1/2} - \langle A_{fa} \rho_f^n e_f^n w^{n+1} \rangle_{i,l-1/2} + \sum_k [\sigma_k \langle A_{fl} \rho_f^n e_f^n u^{n+1} \rangle_{k,l}] = Q_{fw,i,l}^{n+1} - Q_{ff,i,l}^n \cdots (12)$$

式中の、 u 、 w 、 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コントロールボリューム内収支を表す。 $V_{f,i,l}$ 、 A_{fa} 、 A_{fl} はそれぞれ、着目するコントロールボリュームにおいて流体が占める体積、軸方向流路面積、横方向流路面積を表す。 i 、 l 、 k はそれぞれサブチャンネルの番号、サブチャンネルの軸方向位置、横方向の隣接サブチャンネルとの境界部に付ける番号を表し、 σ_k は横方向流速の向きの定義に合わせるための記号である。

燃料集合体解析コードと炉心槽解析コードは、12式に示した流体のエネルギー式の右辺に、2.2.2の1式に示すラップ管からの熱伝達量を付加しカップリングする。

2.3 コードの並列化概略

動燃では128個の計算処理のプロセッサ (Processing Element : 以下 PE) を持つ超並列計算機 CRAY-T3D が導入されており、この T3D 上で動作するようにプログラムの並列化を行った。並列計算の形態は、一つの PE に対し燃料集合体やブランケット等1体当たりの解析領域を計算させるもので、解析領域間で境界条件データを授受しながら炉心全体を同時に解析するものである。T3D では、PVM⁽⁸⁾ や MPI⁽⁹⁾ のメッセージパッシングプログラミングモデルとデータ・パラレルとワークシェアリングの分散共有メモリ型のプログラミング (CRAFT) の両者がサポートされている。今回のモデル開発には両者のプログラミングモデルを適用することが可能であるが、適用する燃料集合体解析コードや炉心槽解析コードのような逐次処理システムの場合、比較的コーディングが容易と考えられる分散共有メモリ型プログラミングモデルによって並列化することにした。ワークシェアリングは、同じ処理が複数の PE で実行されるものであるが、対象とするプログラム中にプログラミングモデルでサポートされる変数や配列を PE へ分

散配置したり、各 PE で処理されるプログラムの実行過程で同期を取るようなディレクティブを組合せ使用することで、PE によって異なる処理をさせることが可能である。本モデルで取った方法は、燃料集合体解析コードと炉心槽解析コードを1つのコードとしてまとめ、そのコード中に、PE の識別、入出力データの I/O、プログラム実行過程での同期制御、境界条件の授受、時間ループ内の時間刻み幅を全ての PE で一致させる等の機能を付加し並列化を行った。

第3章 検証解析

開発したコードの妥当性を確認するために、動燃の PLANDTL-DHX 実験データを用いて検証解析を実施した。

3.1 PLANDTL-DHX 実験

PLANDTL-DHX 実験は、崩壊熱除去系として炉内冷却器システム (DRACS) を有する高速炉の炉心部での自然循環時の熱流動について着目した実験である。実験では主に、DRACS が作動しインターラッパーフローが発生した時の除熱効果や集合体間熱移行現象および過渡時の集合体内流量再配分ならびに熱移行の効果によるピーク温度低下に関する特性等を明らかにした^{(10) (11) (12)}。以下に実験装置概要、検証解析で使用した実験条件等を示す。

3.1.1 実験装置

実験装置のループ構成を図3に示す。炉心部に関しては中心に1体(以下中心集合体とする。)、その中心の1体を取り囲むように周囲に6体(以下周辺集合体とする。)、計7体の模擬燃料集合体から構成され、集合体間に存在する集合体間ギャップも模擬されている。模擬燃料集合体は、正六角形のダクト管(ラッパ管)の中にワイヤースペーサを巻いた電気ヒータ内蔵の模擬燃料ピンを正三角形格子状に配列したものである。中心の模擬燃料集合体は、ピン径、燃料ピンの配列ピッチ、ワイヤースペーサの巻きピッチなどが100万kW級大型炉に相当する37本の模擬燃料ピンから構成され、周辺集合体は7本の模擬燃料ピンから構成される。周辺集合体は中心集合体に対して熱的境界条件を軸方向に適正に与えることを主たる目的としたものであり、必ずしも実体系を模擬した形状ではない。実験条件の設定は、流量に関しては、中心集合体および周辺集合体の左右各3体ずつがグループ化され、それぞれが流量調節弁(計3個)を持っており、指定流量を設定することが可能である。発熱量に関しては、各模擬燃料ピンは軸方向に1mの発熱長を持ち、実機と同様にチョップドコサイン発熱分布を与えることができる。

模擬燃料集合体内には、冷却材温度計測のための多数の熱電対を設置しているが、解析結果との比較をした位置は、軸方向にわたる発熱長手方向に対し中央部と上端部での径方向断面のある位置についてである。解析結果と比較をした発熱中央部と発熱上端部での径方向断面における熱電対位置を図4に示す。表1に装置の主要な形状データを示す。

3.1.2 解析対象ケースと実験条件

検証解析には、中心集合体に設定した発熱量と流量が実機定格の2%程度に相当するもので、周辺集合体の発熱量を変化させ集合体間の温度差が熱移行現象に及ぼす影響を把握するために実施した3ケースの実験データを使用した。各々の実験条件を表2に示す。発熱量と流量で換算される発熱上端部での冷却材温度をもとに、中心集合体に対する周辺集合体との差（中心集合体温度－周辺集合体温度）を0℃（中心集合体に対して等温）、+30℃（中心集合体に対して冷却）、-50℃（中心集合体に対して加熱）の場合を設定した定常実験である。尚、これらの実験ケースは、周辺集合体の周囲を断熱とし、またDRACSを作動させていないため、集合体間の温度差による熱移行現象のみに着目できる実験で、炉心詳細熱流動モデルを開発する際の燃料集合体解析コードと炉心槽解析コードの熱的カップリング機能を検証するには最適である。

3.2 解析条件

境界条件として、各集合体と集合体間ギャップに、それぞれ表2に示した実験条件の入口流量、出口圧力、発熱量を与えた。ここで、集合体間ギャップに関しては、流入無し、出口で逆流が生じた場合、実験で測定された集合体間ギャップ部の出口温度を参照するような温度境界条件を設定した。燃料集合体解析コードや炉心槽解析コードで使用する圧力損失や壁面熱伝達相関式やメッシュ分割は以下の通りである。

3.2.1 使用相関式

燃料集合体内や集合体間ギャップ部の壁面熱伝達や圧力損失などの相関式（工学モデル）には以下のものを使用した。

【燃料集合体部】

- ・ 軸方向圧力損失、エネルギーミキシング： Cheng-Todreas モデル⁽¹³⁾
- ・ 熱伝達： FFTF (CRBRP) モデル⁽¹⁴⁾

【集合体間ギャップ部】

- ・ 軸方向圧力損失： 円管のモデル⁽¹⁵⁾
- ・ 横方向圧力損失： 平行平板のモデル⁽¹⁵⁾
- ・ 壁面熱伝達： Subbotin のモデル⁽¹⁶⁾

ここで、上記中で集合体部に適用した軸方向圧力損失モデルを周辺集合体内に適用する場合には、7本ピンバンドルゆえに専用のモデルを使用するが、1つの実験体系から開発したものであるため、今回のようにピン径や配列ピッチが異なる場合に適用する場合には、モデルで保証する誤差以上になる可能性がある。集合体間ギャップの壁面熱伝達や圧力損失式に関しては、形状に則した相関式は導出されていないため、様々な流路形状の流動抵抗に関する相関式を集めた文献(15)に示された最も適切と考えられるモデルを使用した。

3.2.2 メッシュ分割

表1に示したテストセクションの形状データをもとにメッシュ分割を行った。径方向のメッシュ分割を図5に軸方向のメッシュ分割を表3に示す。燃料集合体内は、燃料集合体解析コードで解析をするが、単体の燃料集合体をメッシュ分割する場合と同様にサブチャンネル分割を行い、集合体間ギャップについても同様な分割をした。ラップ管については、燃料集合体解析コード側でメッシュ分割を行い、周方向の分割については、集合体間ギャップのサブチャンネルの境界とラップ管の周方向のメッシュの境界が一致するような分割を行った。軸方向のメッシュ分割は、実験体系と同様に軸方向の1mにわたる発熱区間と上下に非発熱区間を設けた。並列計算機上で各集合体の解析は、任意のPEで計算をさせることが可能であるが、図6示すように各PE

へ配置し、ラップ管のメッシュと集合体間ギャップサブチャンネルの対応情報を入力データによって与えた。

3.3 解析結果

図4で示したテストセクション径方向断面の冷却材温度プロファイルについて発熱中央部と発熱上端部で比較を行ったグラフを図7（ケース1）、図8（ケース2）、図9（ケース3）に示す。

3.3.1 集合体内部温度分布

【中心集合体】

37本ピン集合体である中心集合体を見ると、何れのケースも温度プロファイルは実験に近いプロファイルを良く模擬していることが分かる。解析を実施した3ケースは、中心集合体の発熱量と流入流量は等しいが、周辺集合体の発熱量が異なり中心集合体に対する熱的境界条件が異なる。周囲から与えられる熱的境界条件の違いによって等温条件のケース1を基準プロファイルとすると、冷却条件のケース2が急峻、加熱条件のケース3がフラットなプロファイルとなっており実験の傾向と同様であることが分かる。

実験と一致しない点については、各ケースとも温度レベルが異なることである。ケース毎に見ると、等温条件→発熱中央・上端共に温度レベルを高く評価、冷却条件→発熱中央・上端共に温度レベルを高く評価、加熱条件→発熱上端だけ温度レベルを低く評価している。

【周辺集合体】

7本ピン集合体である周辺集合体内部の温度プロファイルは、中心付近でワイヤスペーサによる旋回流によると考えられる温度分布の変動がいずれのケースにも見られるとともに、大きく非対称となった分布となった。

3.3.2 集合体間ギャップ冷却材温度

3 ケース全て、解析の方が温度を高く評価している。その程度は、発熱中央部の方が発熱上端部よりも過大に評価していることが分かる。実験も解析も境界形状ともに対称条件を設定しているが、不安定な系でない限り、完全に対称な解となるが、数度程度の偏りが確認できる。

3.4 考察

3.4.1 集合体内温度分布の誤差要因

【中心集合体】

温度レベルが一致しないことが実験と解析の大きな誤差であるが、その原因として、①実験時に設定した発熱量や流入流量の誤差、②解析における周辺集合体からの熱移行量の評価誤差、等が考えられる。

①実験での計測制御量に関する誤差は、発熱量は 2%以内、流量は 5%程度（最大 10%程度の可能性がある。）である。流量誤差を温度誤差に換算すれば、解析値は流量誤差 10%以内の範囲に入っており、実験誤差の範囲内とすることができる。

②の原因として、メッシュ分割数の影響、壁面熱伝達モデルの誤差、インターラッパフローの影響が主な誤差要因となったものとして考えられる。

【周辺集合体】

温度プロファイルが解析ではフラットになったが実験では非対称になっている。この要因としては解析側にはサブチャンネル解析の解像度の限界（7本ピンバンドルであるという集合体の最小体系であるため、径方向断面におけるメッシュの分割数が少ない）や、3.2 で示した軸方向圧力損失モデルの適用性の問題、実験側では、燃料ピンの変形に伴う流路変形、ラッパ管内での燃料束の偏り等が考えられる。温度レベルについては、径方向中心部で実験と一致しているが、周辺サブチャンネル部で実験は非対称となっているため解析値との差が大きく、全体の温度レベルについては言及はできない。

3.4.2 集合体間ギャップ冷却材温度の誤差要因

3 ケース全てにおいて、発熱中央・上端部ともに温度を高め評価しており、発熱中央部の方が発熱上端部よりも相対的にその差が大きい。この原因としては次のことが考えられる。

第1には、集合体間ギャップの冷却材温度に影響を与えるラップ管表面温度が高く評価されたことが考えられる。これは、中心集合体と周辺集合体の周辺サブチャンネル温度を実験よりも高く評価したためである。解析では、中心集合体内の温度プロファイルは実験とほぼ一致しているが、周辺集合体内のプロファイルは実験と異なり、周辺サブチャンネルの温度を高く評価している。特に周辺集合体の周辺サブチャンネルは7本ピンバンドルであることから相対的に領域が大きく、ラップ管へ向かって低くなるような温度勾配が付いているにも関わらず、解析ではコントロールボリュームの体積平均値1点で評価してしまう。このため、ラップ管内表面の温度が実験値よりも高く評価される。実験値を見ると3 ケース全てで対称な位置関係にある周辺サブチャンネルの温度に差があることから温度勾配の存在の可能性を確認することができる。さらに周辺集合体が7本ピンバンドルである故に圧力損失相関式の適用性に起因する流量配分誤差が生じた可能性も考えられる。

第2にインターラッパーフローの発生が考えられる。流動に関しては実験では測定ができないので推測の域を出ないが上部プレナムの流動や、集合体の発熱バランスがインターラッパーフローを引き起こすきっかけとなったということが可能性として考えられる。

そこで、インターラッパーフローの影響を把握すべく集合体間ギャップ下部からのリークフローを与え、数ミリ程度の流入（流入温度は集合体と同じ300℃）を強制的に与えたパラメータ解析を実施した。本来は、上部プレナムの流動の影響を加味して圧力境界条件を炉心上部に与えるべきであるが、ここでは圧力一定として境界条件を与えた。流入流速を4mm/sec ~8mm/sec の間で設定した結果を図11に示す。結果として、この実験ケースの場合は、集合体間ギャップの温度レベルと中心集合体の温度レベルが下がりインターラッパーフローが集合体内温度分布に与える影響が大きい

ことを確認した。これはインターラッパフローが集合体内温度プロファイル予測の誤差要因となる可能性を示唆するものである。

第4章 結言

燃料集合体解析コードと炉心槽解析コードのカップリングを行うことで全炉心熱流動解析コード ACT の炉心熱流動解析機能を担うモデルの開発を実施した。このモデルでは、実機の炉心のような大規模体系でも可能なものとするためプログラムの並列化をあわせて行い、燃料集合体やブランケット等を並列計算機上の複数の PE に分割し処理させるものとした。

開発した炉心モデルの機能検証をするために、動燃で実施した7体（中心集合体1体とその周囲を取囲む6体の周辺集合体）の模擬燃料集合体で炉心を模擬した炉外ナトリウム実験（PLANDTL-DHX）の解析を実施した。実験で測定された集合体内の発熱中央と発熱上端での径方向冷却材温度と比較したところ、実験時の発熱量や流量誤差によると考えられる実験誤差以内の温度レベル差はあるものの、中心集合体内の温度プロファイルは実験と良く一致した。周辺集合体内の温度プロファイルは、解析が実験よりもフラットなものとなった。集合体間ギャップについては、周辺集合体の周辺部の冷却材温度が高く評価されることによって集合体間ギャップ部に接するラッパ管表面温度も高く評価され、結果として実験よりも若干高めの温度となった。これは、周辺集合体が7本ピンバンドル故、解析での解像度と使用した相関式の適用性の面で解析側での再現が困難であることに起因するものである。37本ピン以上で実施した燃料集合体解析コードの検証⁽¹⁷⁾では、温度プロファイルのみならず絶対温度も実験と良く一致していることから、適用性には問題がないと考えられる。

今後、今回開発を行った炉心詳細熱流動モデルに対し自然循環時の自然循環ヘッドや炉心上部の流動等の境界条件を与えるため、上部プレナムモデルやシステム解析モデルとカップリングする予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、カップリングおよび並列化のアルゴリズム検討やプログラムコーディング作業において、以前から ASFRE の開発に携わってこられた有限会社イーエヌオー数理解析リサーチの出口明氏に、プログラムコーディング作業やデバッグ作業において、株式会社エヌデーの橋本昭彦氏に様々なアドバイスを頂き、検証解析対象とした実験装置に関するデータや計測データの準備等で株式会社エヌデーの三宅康洋氏に、解析作業においては、情報センターの安部博文氏に、長時間の計算を何ケースも同時に実行できるような環境を整えて頂くなど無理を聞いて頂いた。また、熱流体技術開発室の非常勤嘱託である二ノ方壽東工大教授、前熱流体技術開発室室長で現在ヴァーチャル・エンジニアリング開発室の佐藤和二郎室長、熱流体技術開発室山口彰室長代理をはじめグループリーダーの大平博昭氏、村松寿晴氏、堺公明氏には社内の研究発表会や室内研究会で、また原子炉工学室の上出英樹氏、西村元彦氏、木村暢之氏には解析結果と PLANDTL-DHX 実験に関して多くの助言や協力をして頂いた。謹んでここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 上出 英樹, 林 謙二 他, 高速炉の自然循環除熱時におけるインターラッパーフロー現象の評価-PLANDTL-DHX を用いた 7 集合体ナトリウム実験-: 日本原子力学会 1995 年秋の大会予稿集, E55, (1995)
- 2) 小林 順, 上出 英樹 他, 高速炉の自然循環崩壊熱除去に関する研究(V) -炉心プレナム相互作用-: 日本原子力学会 1993 年秋の大会予稿集, A41, (1993)
- 3) 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-: PNC TN9410 96-118, (1996)
- 4) Zoran Stosic, Enhancing The Scope of Applications of Standard Thermal Hydraulic Codes by Linking with Others: International Conference on Nuclear Engineering, Vol.1-PartB, (1996)
- 5) H.Ninokata, A.Deguchi, K.Baba, ASFRE-III: A Computer Program for Triangular Rod Array Thermohydraulic Analysis of Fast Breeder Reactors: PNC N941 85-106, July(1985)
- 6) 大島宏之, 高速炉における燃料集合体内局所異常に関する研究-ポラス状閉塞事象に対する ASFRE-III コードの適用-: 日本原子力学会 1994 年秋の大会予稿集, D38, (1994)
- 7) 大島宏之, サブチャンネル解析コード ASFRE-III の並列計算機への適用-コードの概要と炉心槽解析部の開発-: 日本原子力学会 1996 年春の年会予稿集, D21, (1996)
- 8) Beguelin. A, et al., A User's Guide to PVM: Parallel Virtual Machine Technical Report: TM-11826, Oak Ridge National Laboratory, (1991)
- 9) Message Passing Interface Forum: MPI : A Message-Passing Interface Standard: The International Journal of Supercomputing Application and High Performance Computing, Vol.8, No.3/4, pp.165-416, (1994)
- 10) 上出英樹, 林謙二, 他, 高速炉の自然循環時におけるインターラッパーフロー現象の評価-PLANDTL-DHX を用いた 7 集合体ナトリウム試験-: 日本原子力学会 1995 年秋の年会予稿集, D21, (1995)

- 1 1) 桃井一光, 林謙二, 他, 高速炉の自然循環崩壊熱除去時のシステム間相互作用に関する試験研究－炉心及び主冷却系の過渡熱流動現象の解明－: PNC TN9410 96-280, (1996)
- 1 2) S. Cheng and N. E. Todreas, Hydrodynamic Model and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles – Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters, : Nucl. Eng. and Design, 92, pp. 227-251, (1986)
- 1 3) M.S.Kazimi, and M.D.Carelli, Heat Transfer Correlation for Analysis of CRBRP Assemblies: CRBRP-ARD-0034, November, (1976)
- 1 4) I. E. Idelchik, HAND BOOK of HYDRAULIC RESISTANCE 3rd Edition: CRC Press, pp.110-120, (1994)
- 1 5) 伝熱工学資料, 日本機械学会, (1996)
- 1 6) 大高雅彦, 大島宏之, 他, サブチャンネル解析コード ASFRE-III の検証: PNC TN9410 96-212, (1996)

表1 PLANDTL-DHX 実験装置形状データ

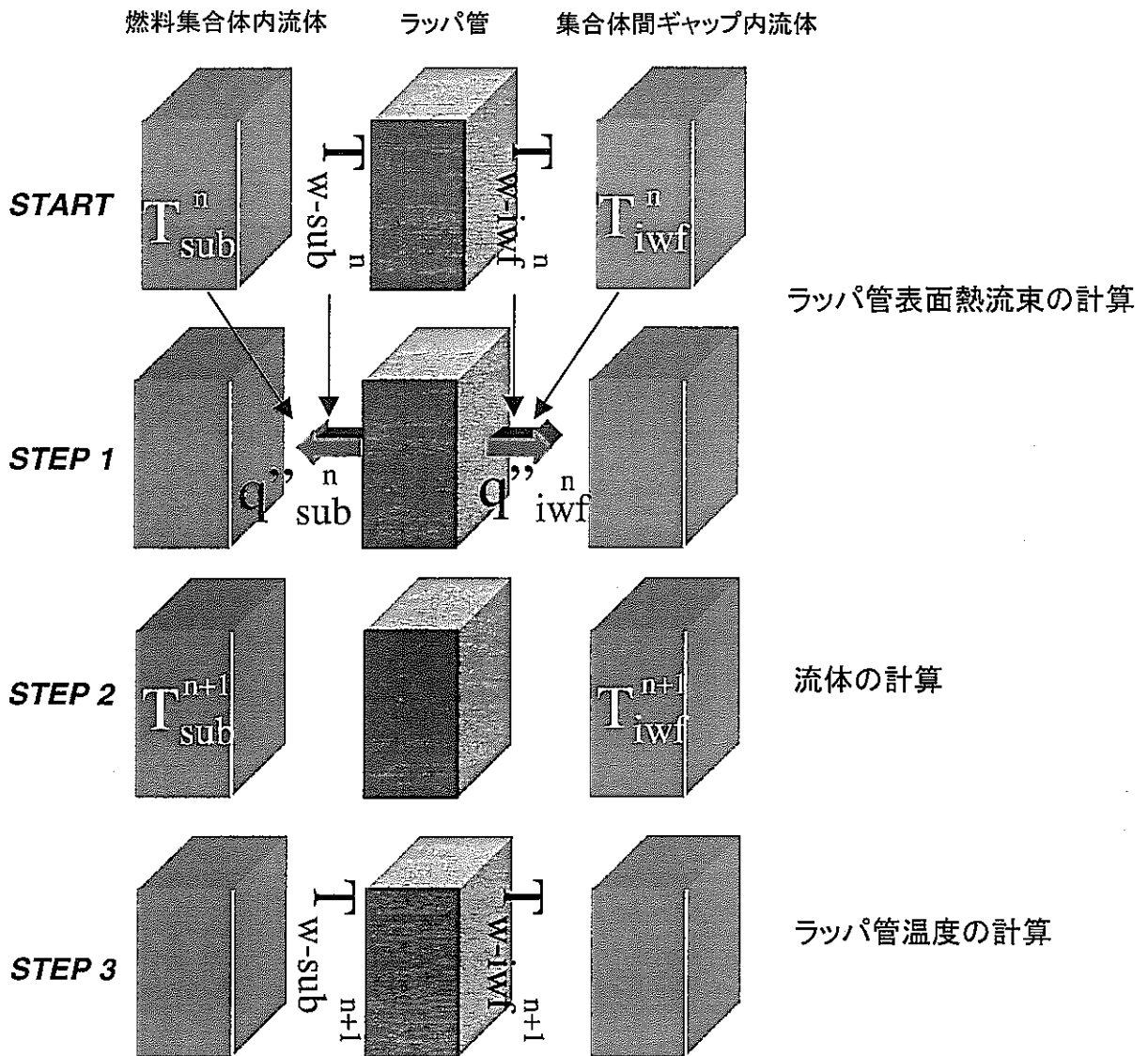
	中心集合体	周辺集合体
集合体数	1	7
対面間距離 (mm)	63	63
ラッパ管肉厚 (mm)	4	4
集合体間ギャップ幅 (mm)	7	7
ヒータピン数 (本)	37	7
ピン直径 (mm)	8.3	20.8
ピン配列ピッチ (mm)	9.9	22.4
ワイヤスペーサ径 (mm)	1.5	1.5
ワイヤスペーサ巻きピッチ (mm)	165	165
発熱分布	Chopped Cosine	Chopped Cosine

表2 検証計算に使用した PLANDTL-DHX 実験データ

実験 No. 実験名称	ケース 1 ST070 DTS8F0T-01	ケース 2 ST072 DTSFM50T	ケース 3 ST080 DTS8FP30T
入口流量 (l/min)			
中心集合体	8.0	8.0	8.0
周辺集合体	15.3	15.3	15.3
発熱量 (kW)			
中心集合体	24.0	24.0	24.0
周辺集合体	46.0	31.8	55.0
入口冷却材温度 (°C)	300	300	300

表3 軸方向メッシュ分割

分割ブロック	軸方向ブロック No.	軸方向 ブロック長 (mm)	メッシュ数	単位メッシュ長 (mm)	含有メッシュ No.
下部非発熱部	1	94.5	21	4.5	1~21
発熱部	2	5.0	1	5	22
発熱部	3	90.0	20	4.5	23~42
発熱部	4	5.0	1	5.0	43
上部非発熱部	5	38.5	7	5.5	44~50



T_{sub}	集合体内冷却材温度	q''_{sub}	集合体側ラッパ管表面熱流束
T_{iwf}	集合体間ギャップ内冷却材温度	q''_{iwf}	集合体間ギャップ側ラッパ管表面熱流束
T_{w-sub}	集合体側ラッパ管表面温度		
T_{w-iwf}	集合体間ギャップ側ラッパ管表面温度		

図1 カップリング計算手順模式図

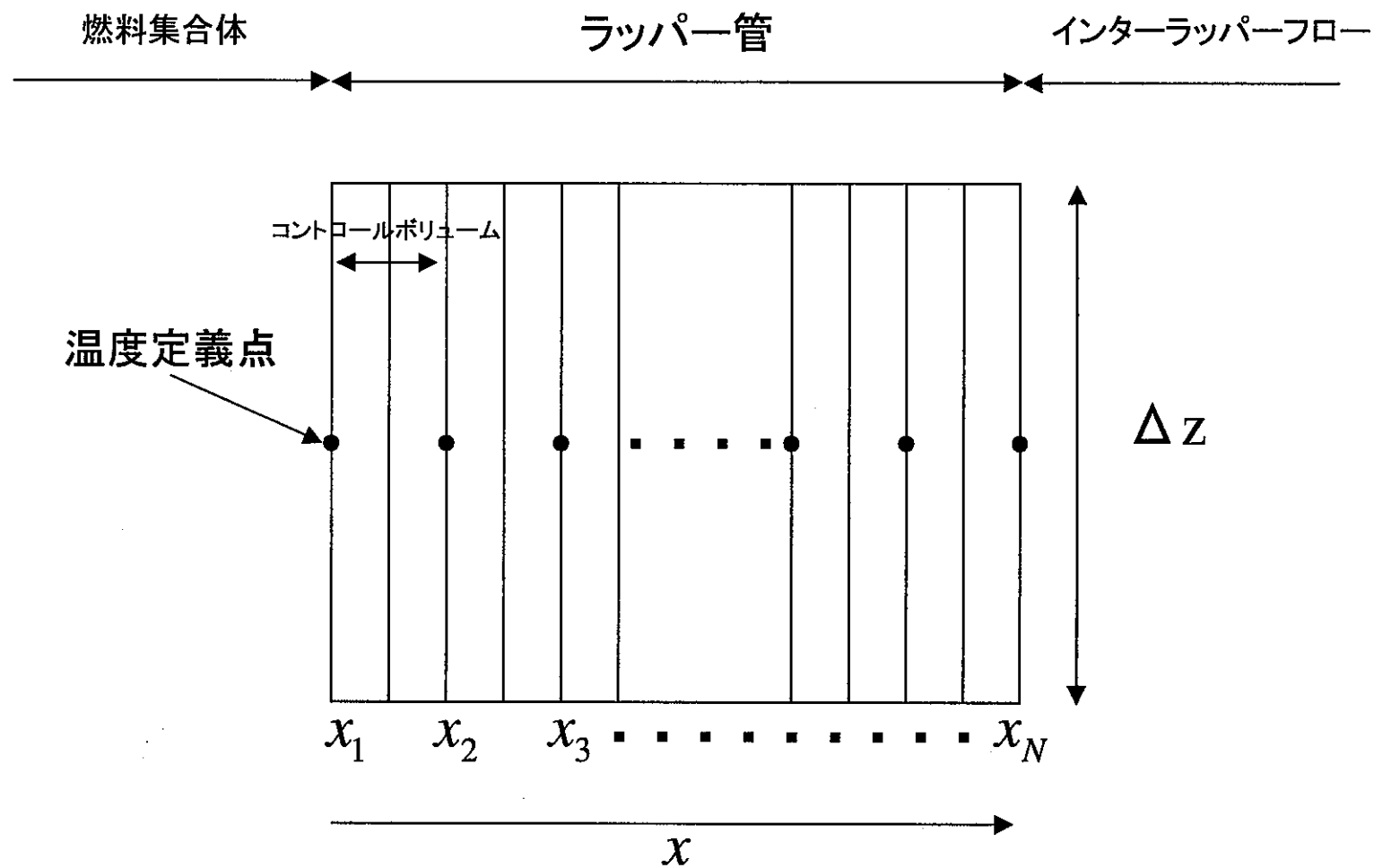


図2 ラッパ管メッシュ分割図

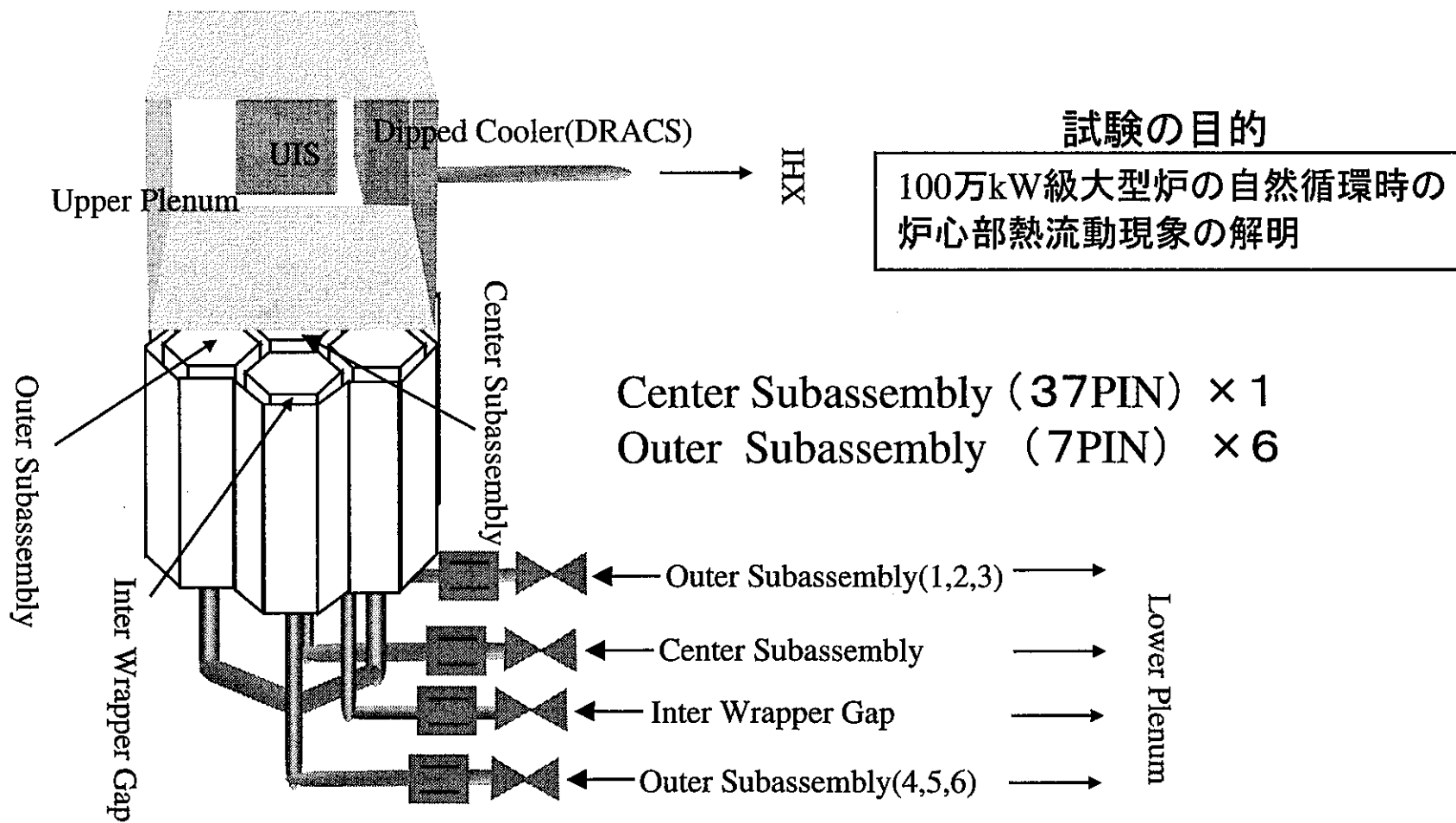
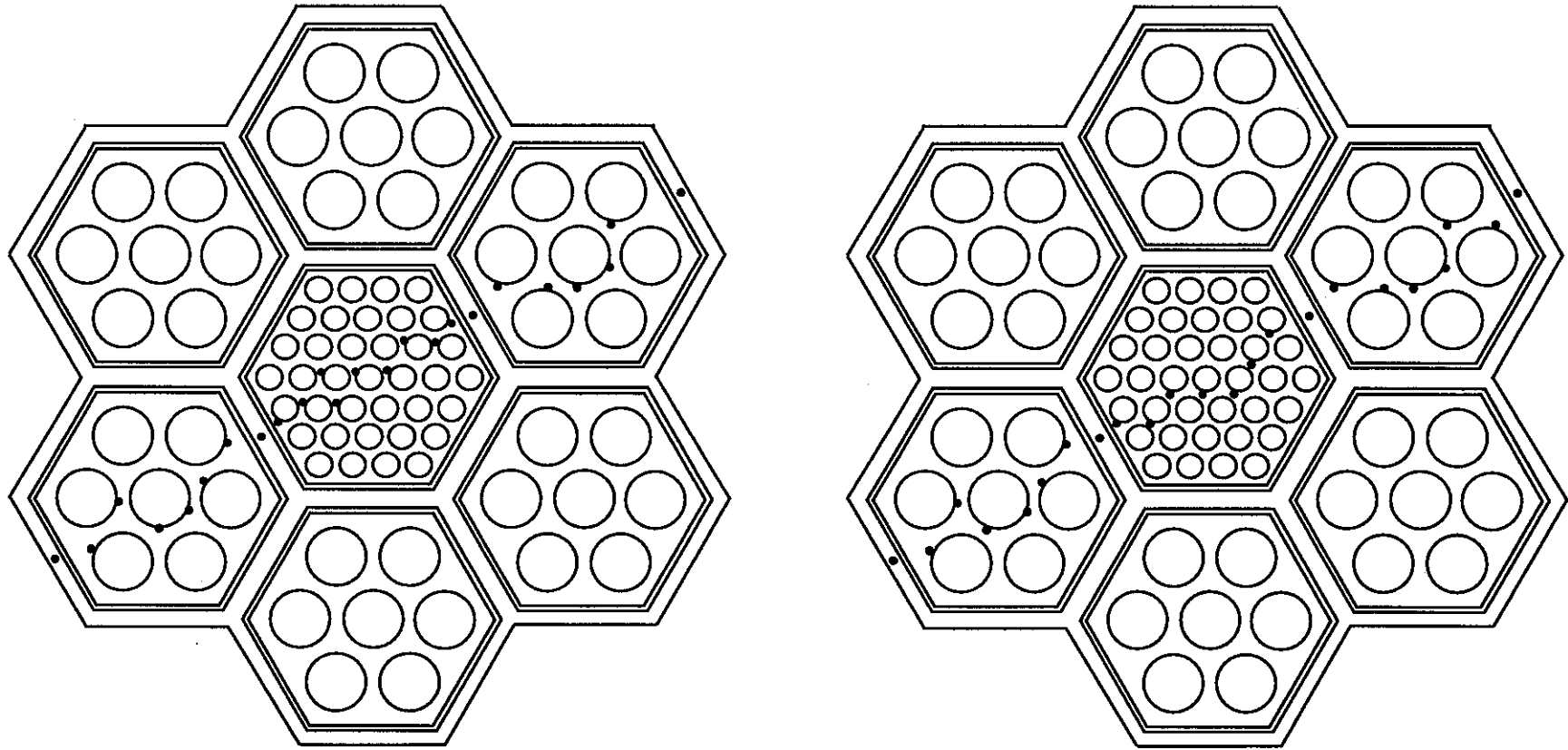


図3 PLANDTL-DHX装置ループ構成



発熱中央部

発熱上端部

図4 解析結果との比較熱電対位置

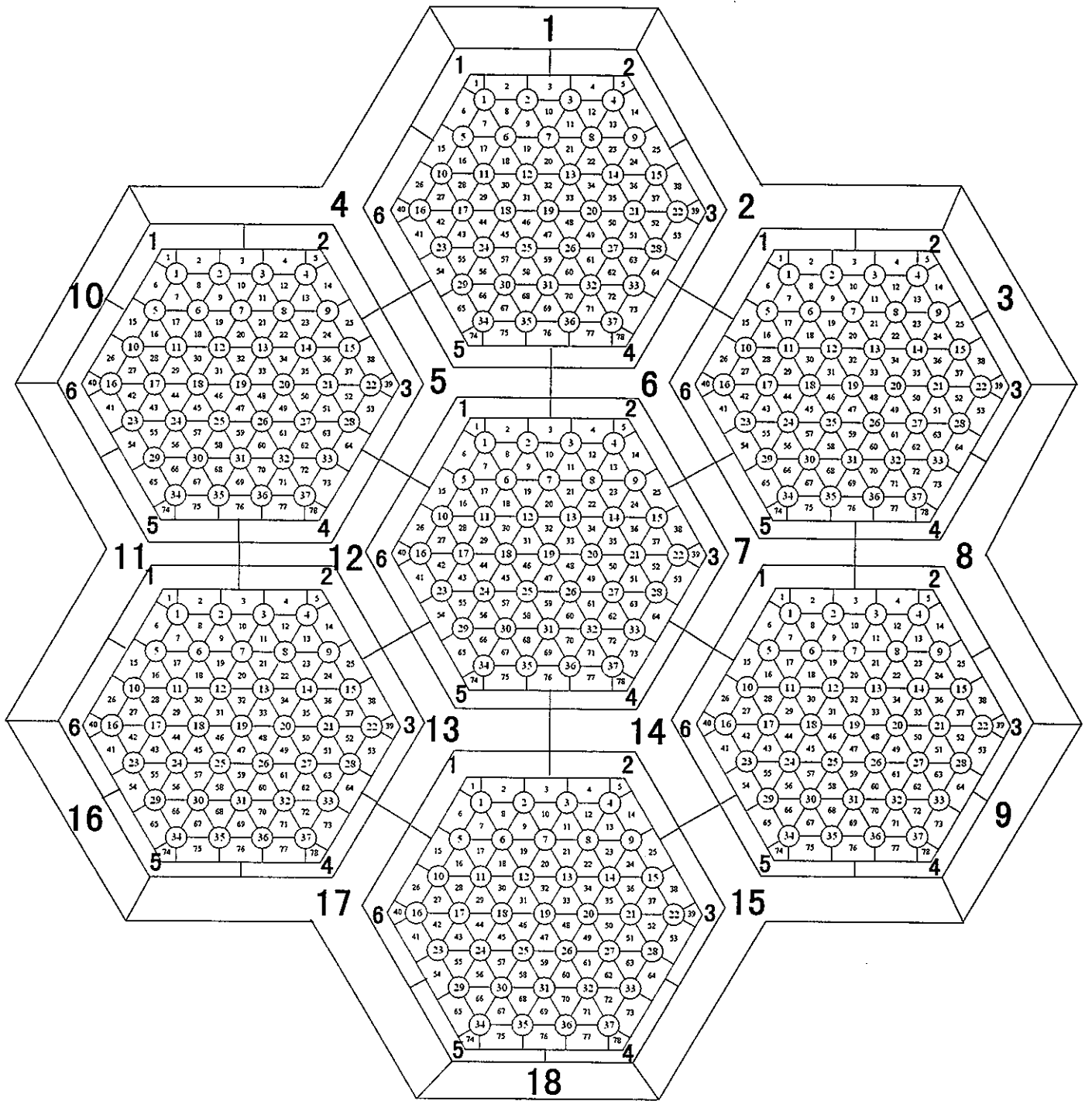


図5 径方向メッシュ分割図

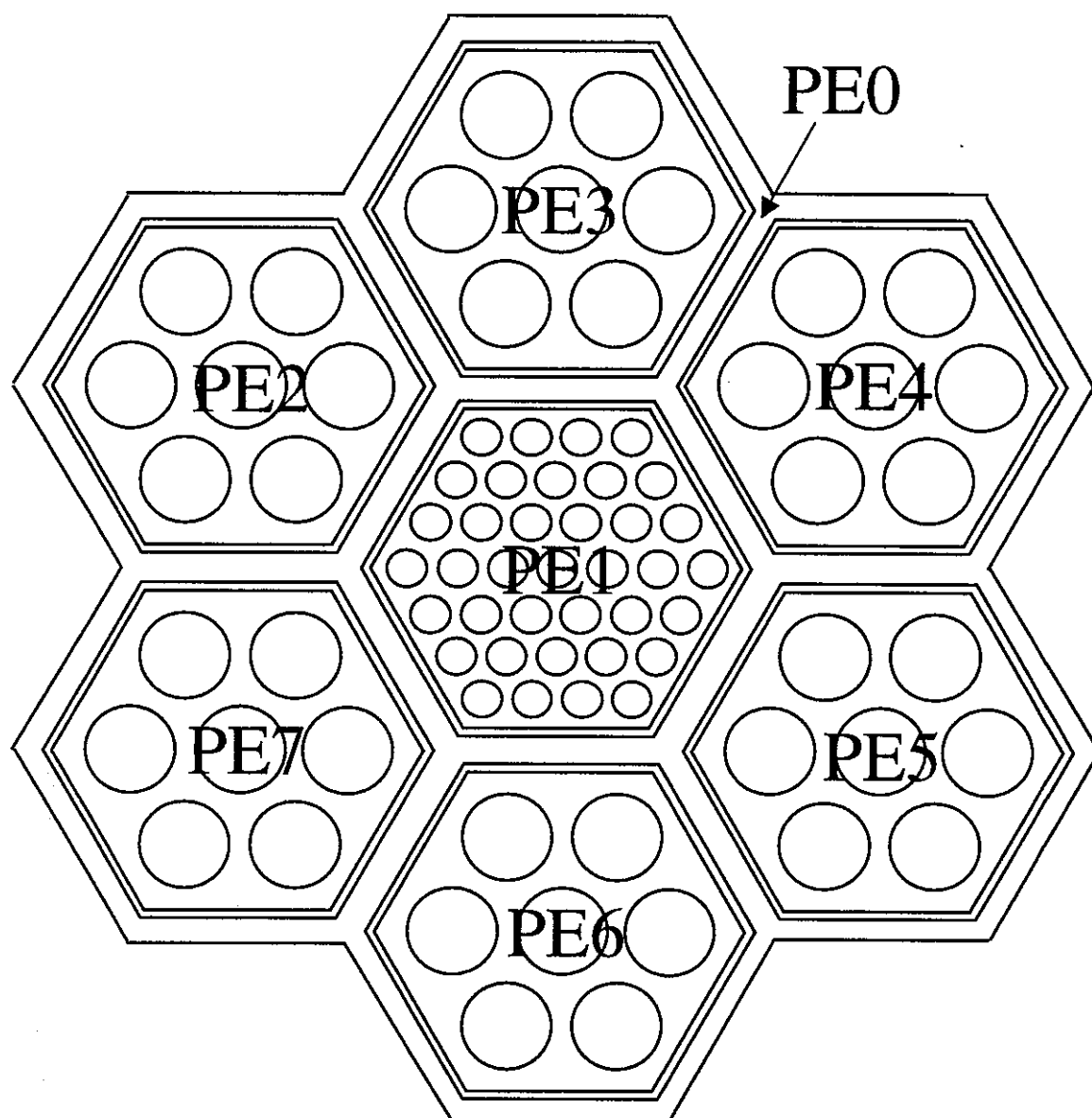


図6 集合体解析部のPEへの分割

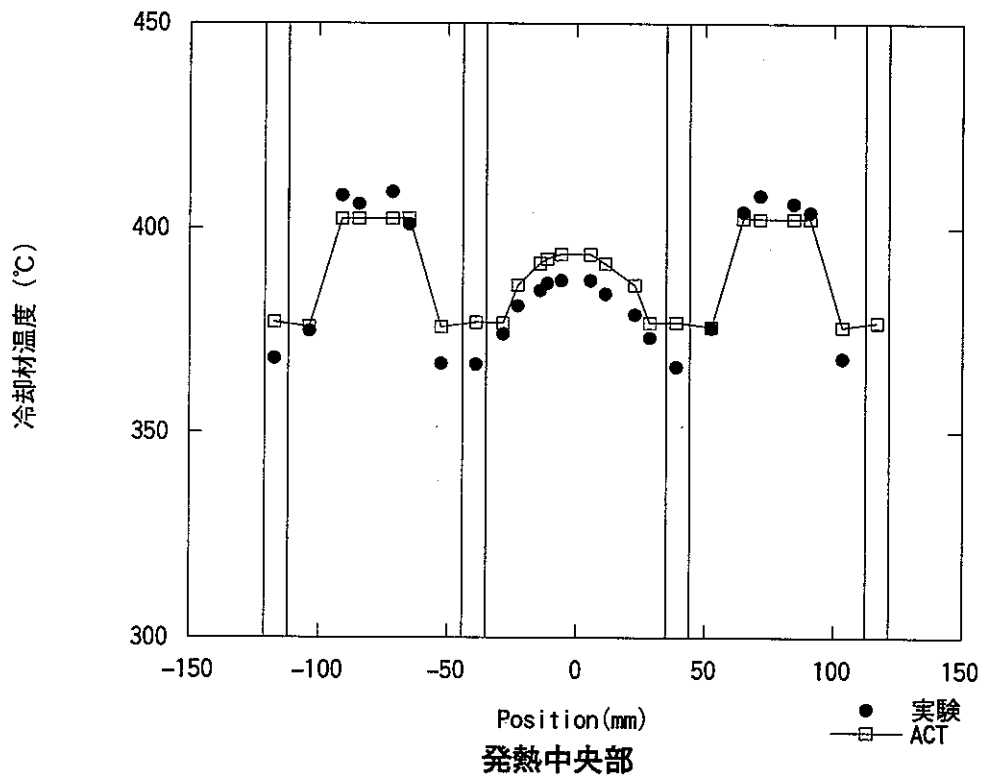
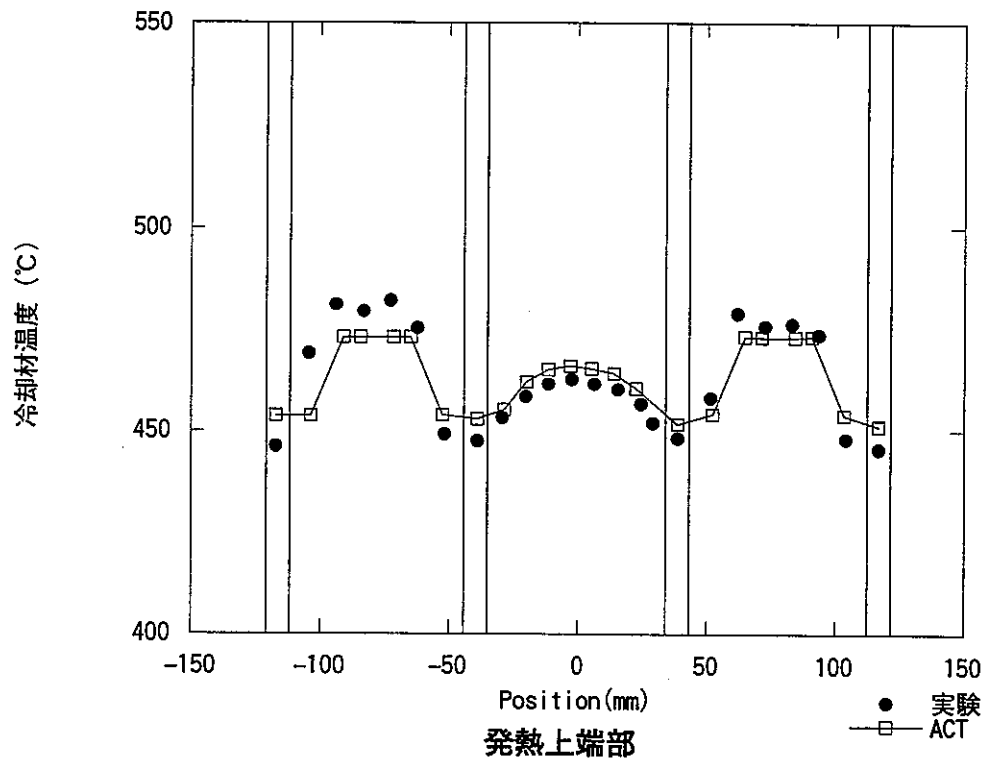


図7 径方向温度分布 (ケース1)

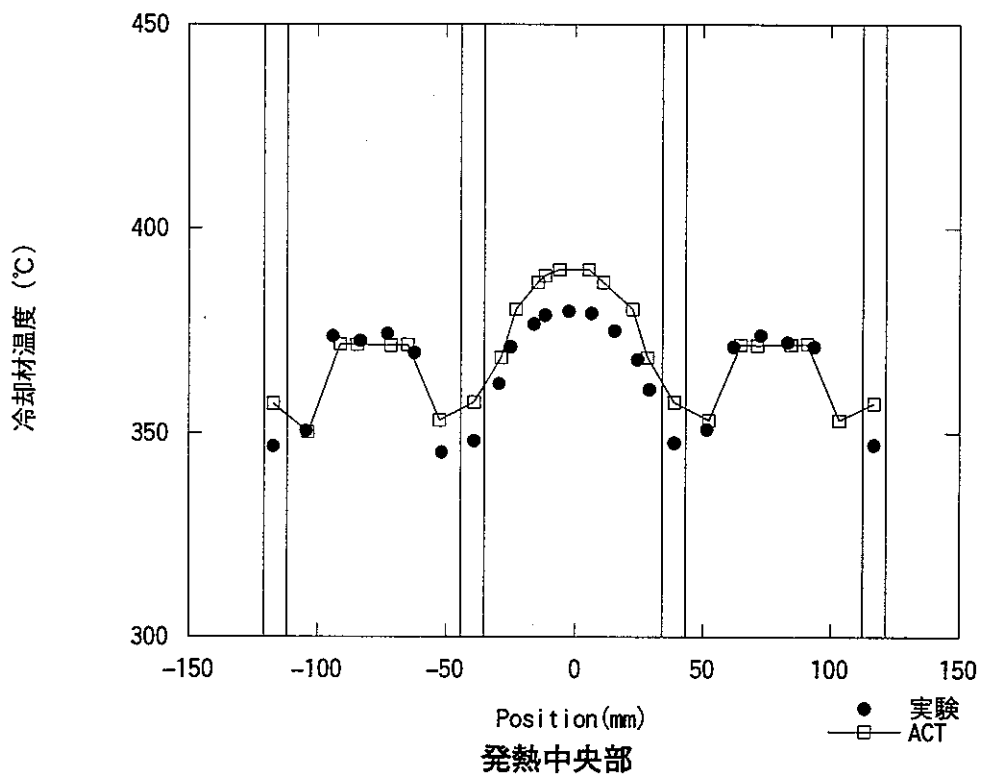
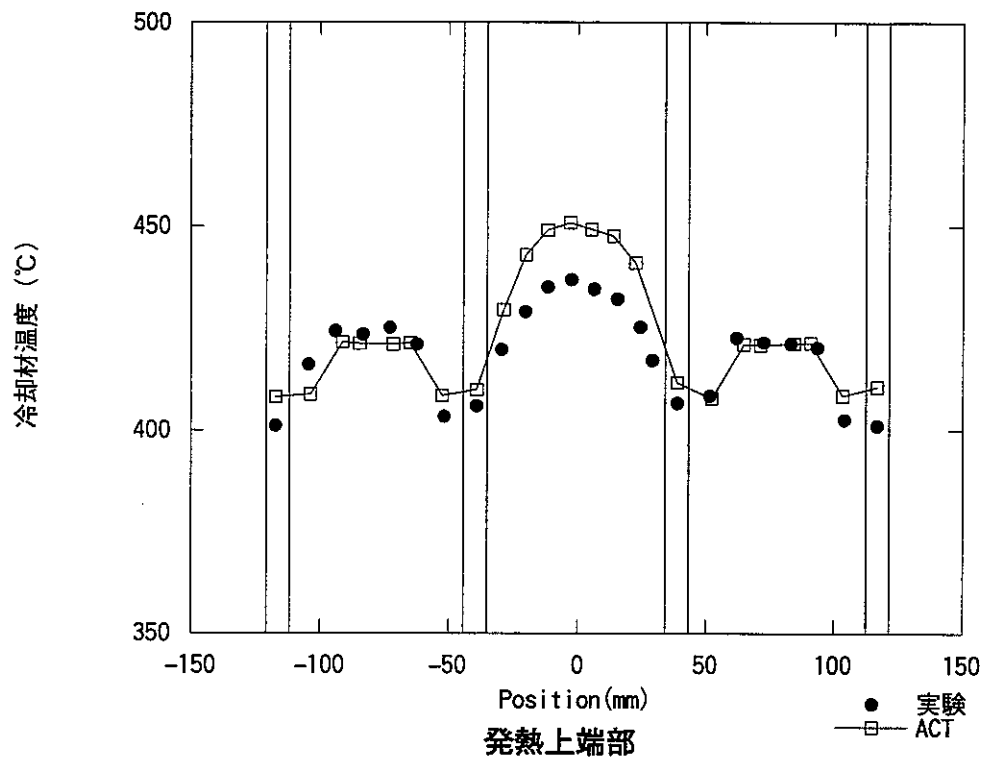


図 8 径方向温度分布 (ケース 2)

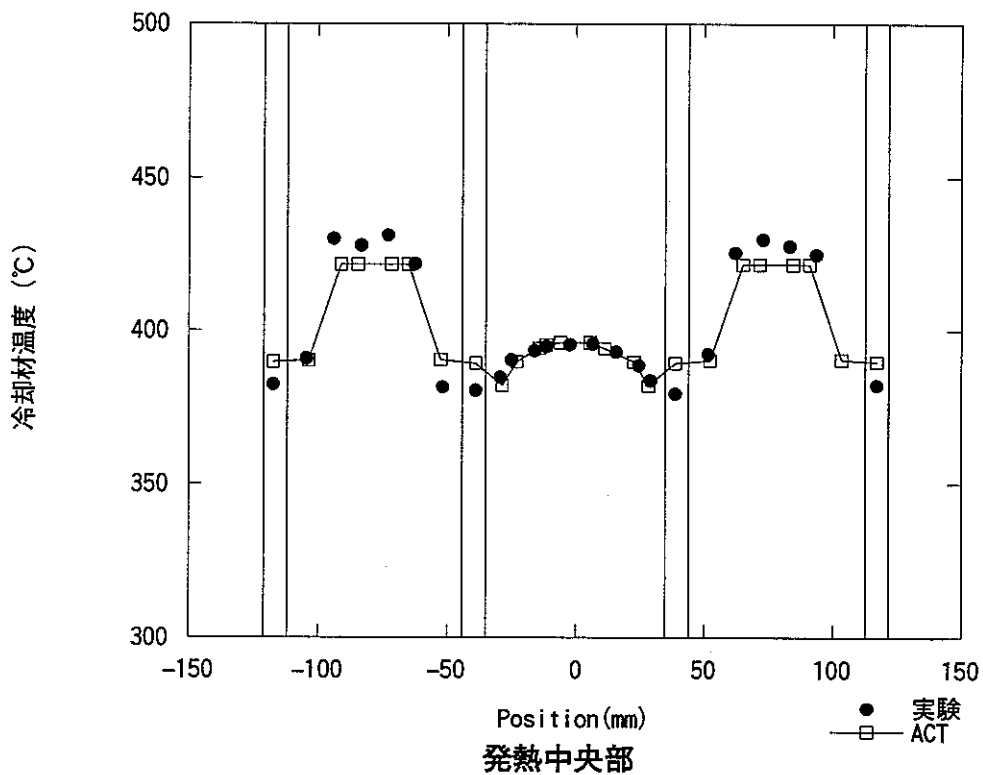
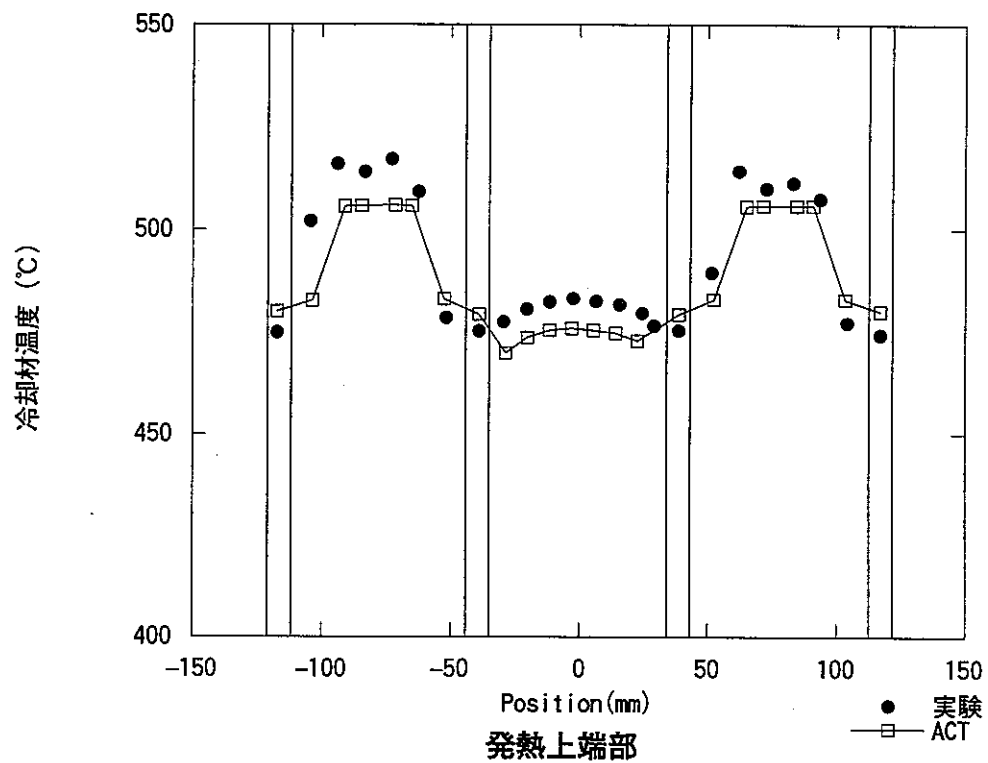


図9 径方向温度分布 (ケース 3)

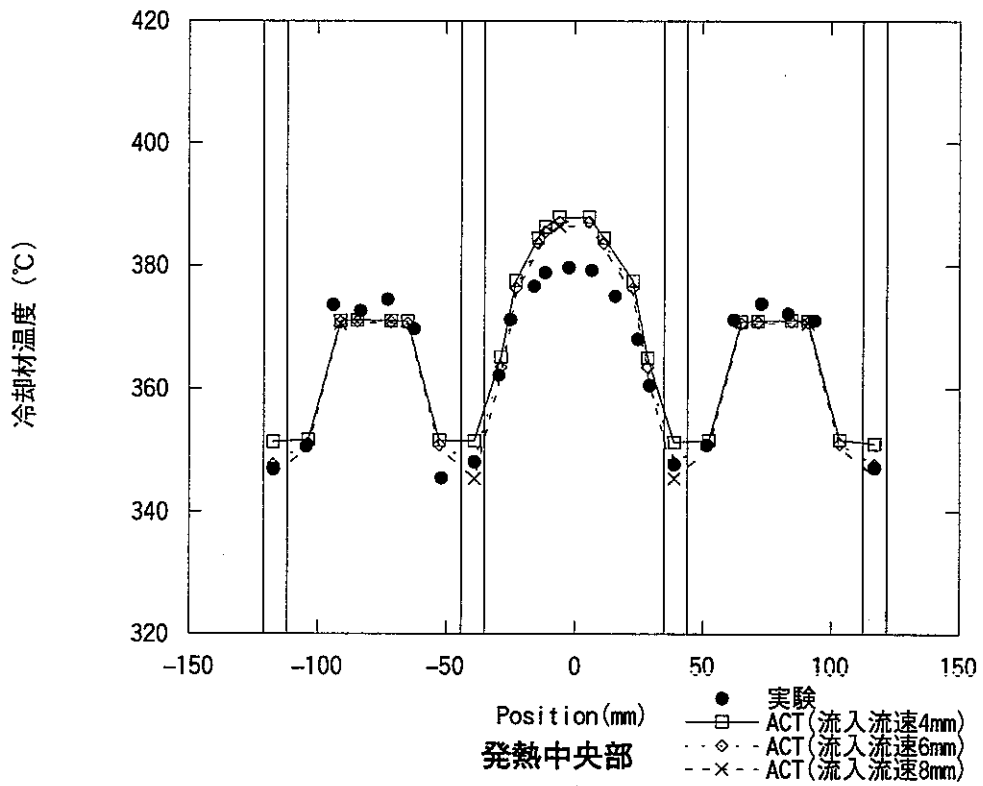
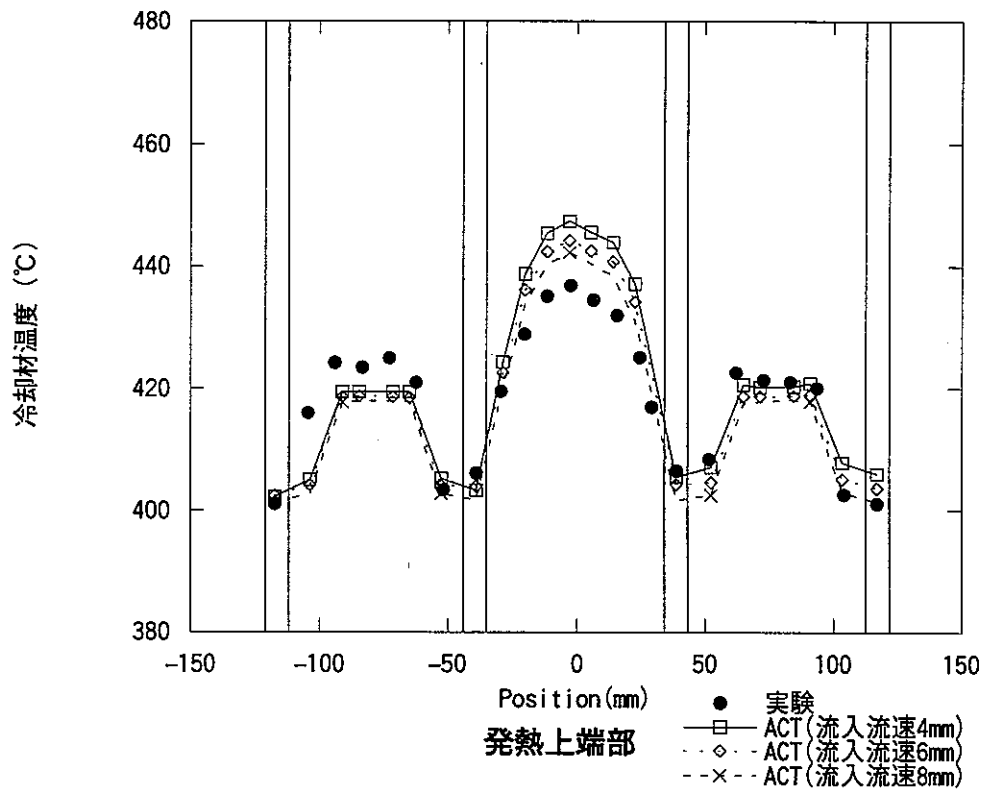


図10 径方向温度分布
(ケース2：集合体間ギャップに流入を与えた場合)