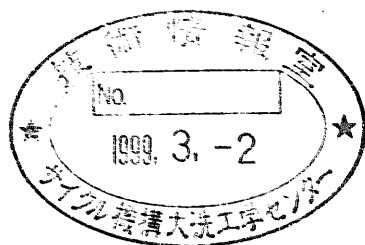


# 全炉心熱流動解析コードACTの開発(Ⅲ)

—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—

1998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。

〒319-1194 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 319-1194,  
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1998

# 全炉心熱流動解析コード ACT の開発 (III)

一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—

大高 雅彦\* 大島 宏之\*

## 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場合の過渡時まで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、必要となる機能を有する複数の解析モジュールをカップリングすることにより、炉心部のみならず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評価するものである。

本報告では、既報の炉心詳細熱流動モジュールに熱輸送系解析モジュールをカップリングした結果について述べる。この改良によりシステムコンポーネントの運転状況や自然循環時のシステム循環流量を考慮した炉心部熱流挙動を評価することが可能となった。この解析処理を効率良く実施するために、複数の計算機上で並列処理可能なように PVM (Parallel Virtual Machine) を使用するコードシステムを構築した。

開発したコードの妥当性を確認するために、7体の模擬燃料集合体で構成された PLANDTL-DHX 炉外ナトリウム実験装置と同等のシステム体系をモデル化し、定常状態から自然循環に移行するまでのフローコストダウンを模擬した過渡解析を行った。その結果、カップリング手法および計算結果の妥当性を確認した。

---

\* 核燃料サイクル開発機構大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ

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

### — Coupling Core Module with Primary Heat Transport System Module —

Masahiko Ohtaka\*, Hiroyuki Ohshima\*

#### 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 inter-wrapper flow under various reactor operation conditions.

In this work, the core module as a main part of the ACT developed last year, which simulates thermal-hydraulics in the subassemblies and the inter-subassembly gaps, was coupled with an one dimensional plant system thermal-hydraulic analysis code LEDHER to simulate transients in the primary heat transport system and to give appropriate boundary conditions to the core model.

The effective algorithm to couple these two calculation modules was developed, which required minimum modification of them. In order to couple these two calculation modules on the computing system, parallel computing technique using PVM(Parallel Virtual Machine) programming environment was applied. The code system was applied to analyze an out-of-pile sodium experiment simulating core with 7 subassemblies under transient condition for code verification. It was confirmed that the analytical results show a similar tendency of experimental results.

---

\* Thermal-Hydraulics Research Group, System Engineering and Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

## 図リスト

|      |  |    |
|------|--|----|
| 図 1  | ACT コード概念図                             | 17 |
| 図 2  | LEDHER コード PATH モデル概念図                 | 18 |
| 図 3  | 炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールの<br>カップリング方式     | 19 |
| 図 4  | カップリング計算フロー                            | 20 |
| 図 5  | コードシステム                                | 21 |
| 図 6  | 炉心部の出力および流量変化曲線                        | 22 |
| 図 7  | テスト計算結果 炉心入口出口圧力差の時系列                  | 23 |
| 図 8  | テスト計算結果<br>炉心モジュールと熱輸送系モジュールの炉心部総流量の比較 | 24 |
| 図 9  | テスト計算結果 発熱上端部炉心部径方向温度分布の時系列            | 25 |
| 図 10 | 実験結果 発熱上端部炉心部径方向温度分布の時系列               | 26 |
| 図 11 | テスト計算結果 炉心出口冷却材温度の時系列                  | 27 |
| 図 12 | 実験結果 中心集合体中心サブチャンネル<br>発熱上端部冷却材温度の時系列  | 28 |

## 目 次

|  |    |
|--|----|
| 第1章 緒言                                     | 1  |
| 第2章 炉心解析モジュールと熱輸送系モジュールのカップリング             | 3  |
| 2.1 方針                                     | 3  |
| 2.2 カップリング対象とした<br>1次元システム解析コード LEDHER の概要 | 3  |
| 2.2.1 コード概要                                | 3  |
| 2.2.2 基本モデル                                | 3  |
| 2.2.3 数値計算法                                | 5  |
| 2.3 カップリング手法                               | 6  |
| 2.4 コードシステム                                | 8  |
| 第3章 テスト計算および検討                             | 10 |
| 3.1 テスト計算                                  | 10 |
| 3.2 結果と検討                                  | 11 |
| 第4章 結言                                     | 13 |
| 謝辞   | 14 |
| 参考文献                                       | 15 |

## 第1章 緒言

高速炉の実用化へ向けには、安全性と信頼性の確保と経済性の向上を高い次元で両立させることが必要である。その具体的な方策の一つとして、安全性・信頼性向上のための自然循環による崩壊熱除去システムの採用等が挙げられる。これ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、炉心の冷却性能や構造物の熱過渡特性を把握しそれらの裕度を確認することが必要となる。この時、直接炉心冷却系(DRACS)作動時のインターラッパフロー(集合体間ギャップ流れ)<sup>(1)</sup>や、炉心ープレナム相互作用等<sup>(2)</sup>の熱流動現象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フローは、炉心上部機構下部領域に整流設備を設けた原子炉体系の強制循環時にも考慮する必要がある。すなわち、炉上部機構に衝突した燃料集合体からの高温出口流が集合体間ギャップに潜り込むという現象が発生する。この高温冷却材の潜り込みと下部プレナムから集合体間ギャップへの低温冷却材のリークフローによって炉心槽内に温度成層化現象が発生するため、構造物の健全性評価等の観点から、この評価手法の開発が必要な状況にある。これらの諸現象を精度良く評価するためには、炉心内の詳細な熱流動解析のみならず炉心部に対し適切な境界条件を設定することが必要となり、そのためには上部プレナム内や冷却系システムの熱流動挙動等も適切に考慮しなければならない。以上の要求から炉心(燃料集合体、インターラッパ部を含む)解析モジュール、上部プレナム解析モジュール、熱輸送系解析モジュールで構成される全炉心熱流動解析コードACT(Analysis program of whole Core Thermal-hydraulics)の開発が継続されてきている<sup>(3)</sup>。

ACTコードの概念図を図1に示す。ACTコードは、十分な検証と解析実績が豊富で信頼性の高いプラントシステムやコンポーネントシステムに対する熱流動解析コード等をベースに、それらをカップリングすることによってプラントシステム全体を解析可能とするものである。これまでに、インターラッパフロー部(炉心槽)を対象とした熱流動解析モジュール(炉心槽解析部)の開発<sup>(3)</sup>、このインターラッパフロー熱流動解析モジュールと燃料集合体熱流動解析コードASFRE-III<sup>(4)(5)(6)</sup>(燃料集合体内解析モジュールとして適用)をカップリングした炉心部詳細熱流動解析モジュールの開発およびその検証について報告を行った<sup>(7)</sup>。

本報では、上記の炉心部詳細熱流動解析モジュールに対して、冷却系システムの熱流動挙動を境界条件として与える目的のために、熱輸送系解析モジュールをカッ

プリングしたコードシステムの数値計算法等について報告する。カップリングする熱輸送系解析モジュールのベースは、高速炉の自然循環崩壊熱除去時の除熱性能を評価することを目的として開発と検証が実施されている一次元システム熱流動解析コード LEDHER<sup>(8)</sup> である。これらのモジュールを、プログラム修正によって既検証部分を損なうことなく且つ計算効率を向上させる数値計算法を用いカップリングし、これを実現するために異機種の間や異なるコード間でのデータ送受信を可能とする PVM (Parallel Virtual Machine) を使用したコードシステムを構築した。コードシステムの動作確認および数値計算法の妥当性を確認することを目的として、サイクル機構の炉外ナトリウム実験装置 PLANDTL-DHX で実施された実験に相当するものを解析対象として検証解析を実施し、その妥当性を確認した。



## 第2章 炉心解析モジュールと熱輸送系モジュールのカップリング

### 2.1 方針

ACTコードの解析対象である崩壊熱除去時の自然循環における集合体間熱移行やインターラッパーフローの諸現象は、温度分布と流速分布が強く影響を及ぼしあうことから、その詳細な熱流挙動を解析的に評価するためには、基礎式である運動量保存式において浮力項を精度良く評価する必要がある。前年度までに開発した炉心詳細熱流動モデル単体で自然循環時の現象を対象とする場合には、その境界となる炉心の下部や頂部の熱流力的な境界条件を明確に与えることが必要である。今回は従来までに開発を行った炉心詳細熱流動モジュールに熱輸送系モジュール（一次元システム解析コード LEDHER）をカップリングし、ループ側の熱流動条件を境界条件として反映できるようにする。

### 2.2 カップリング対象とした一次元システム解析コード LEDHER の概要

#### 2.2.1 コード概要

LEDHER コード<sup>(8)</sup>は、大型炉の長期間（1～30 日間）にわたる自然循環崩壊熱除去時の除熱性能をパラメトリックにサーベイが行えるようにするために開発された。このような長期間の解析を実現するために LEDHER コードでは、空間ノード数を減らし且つ時間積分法に陰解法を採用することにより計算の高速化が図られている。また配管等の基本コンポーネントを簡易なモデルとしているが、それらを組み合わせることでプラントの主要コンポーネントの詳細な特性を表現することが可能で、入力データ規定の簡易性やメンテナンス性と汎用性を合わせ持つ特徴がある。

LEDHER コードによる実験解析もこれまでいくつか実施されており、自然循環時におけるプラント動特性の評価<sup>(9)</sup>や炉心内熱流動現象把握のため実施された実験の解析<sup>(10)</sup>等を通じて検証がなされてきている。

#### 2.2.2 基本モデル

本項では、炉心熱流動モデルとカップリングをする上で必要な LEDHER コードの基本モデルである PATH、VOLUME、STRUCTURE、ポンプの各モデルについて示す。

##### (1) PATH モデル

図2にモデル概念図を示す。PATH モデルは流路を表現し、その長さで出入口高低差で規定され、出入口間は直線でモデル化される。冷却材の温度定義点、圧力定義点は出入口に1点ずつ取られる。STRUCTURE モデル等との熱交換も可能で配管などをモデル化することができる。

(運動量保存式)

$$\frac{L}{A} \frac{dW}{dt} = P_1 - P_2 - \Delta P - \rho g Z \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ここで } \Delta P = \frac{L}{D} f \frac{1}{2} \frac{W|W|}{\rho A^2} + K \frac{W|W|}{\rho A^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(エネルギー保存式)

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

ここで  $T_{pj} = T_2$  (Wが順流の場合)

$T_{pj} = T_1$  (Wが逆流の場合)

(2) VOLUME モデル

VOLUME は流体質量を表現し、プレナム等をモデル化する。任意の数の出入口を設定できる。

(質量保存式)

$$\sum_j W_j^{in} = \sum_j W_j^{out} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$P_j = P_{ref} - \rho g Z_j \quad \dots\dots\dots (5)$$

(エネルギー保存式)

$$\rho V_i C_p \frac{dT_{vi}}{dt} = \sum_j W_j^{in} C_p T_j - \sum_j W_j^{out} C_p T_{vi} - h_{ik} A_{vs} (T_{vi} - T_{sk}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

(3) STRUCTURE モデル

STRUCTURE モデルは伝熱要素で、PATH や VOLUME との熱交換を規定するために用いられる。

(エネルギー保存式)

$$MC_p \frac{dT_{sk}}{dt} = \sum_i h_{ik} A(T_{vi} - T_{sk}) + \sum_j h_{jk} A(T_{pi} - T_{sk}) + Q_k(t)$$

..... (7)

(4) ポンプモデル

定格運転、フローコストダウン時、ポニーモーター運転において、流量を直接与えるモデルである。自然循環時には、自然循環へ移行するポンプ全停止時刻を設定し、その時点からポンプには流動抵抗を与え、流量は自然循環ヘッドと流動抵抗のバランスによって算出される。

(質量保存式)

$$W = W_{set} \times \alpha$$

..... (8)

$$t_p = t - t_0$$

$$\alpha = 1.0 \quad t_p < 0.0$$

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

$$\alpha = f_c \quad \exp(-t_p / \tau) > f_c \text{ かつポニーモータ起動}$$

$$\alpha = 0.0 \quad \exp(-t_p / \tau) > f_c \text{ かつポニーモータ起動せず}$$

但し、 $\alpha = 0.0$ の場合（フローコストダウンから自然循環に移行した後）には上式の代わりに以下の式を用いる。

$$P_i - P_o = \Delta P + \rho g Z$$

..... (9)

$$\Delta P = K_p \frac{W|W|}{W_{ref}^2}$$

.....(10)

2.2.3 数値計算法

長時間のシミュレーションが必要となる自然循環の解析を対象とするため、短時間で解析が行えるように時間積分法として時間刻み幅を大きく設定することが可能な陰解法が採用されている。計算手法としては、前述のような各モデルの運動量、質量およびエネルギー保存の各基礎式を差分化し、それらをモデル毎に運動量保存式計算用とエネルギー保存式計算用のマトリクス上に展開して、直接法によってそれらを解く。一例として PATH モデルに関する運動量保存式およびエネルギー保存式計算用のマトリクスをそれぞれ式(11)と式(12)に示す。ここで NPRESS、NPATH はそれぞれ圧力定義点総数、PATH 総数を示す。

$$\begin{pmatrix} \text{連続の式の係数} \\ \hline \text{運動量式の係数} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{\text{NPRESS}} \\ W_1 \\ \cdot \\ W_{\text{NPATH}} \end{pmatrix} = \text{RHS} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\begin{pmatrix} \text{代表温度の式の係数} \\ \hline \text{エネルギー式の係数} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{\text{NPRESS}} \\ T_1 \\ \cdot \\ T_{\text{NPATH}} \end{pmatrix} = \text{RHS} \quad \dots\dots\dots(12)$$

また、これらの流動式とエネルギー式は別個に解かれるが、流動式を解く場合にはエネルギー計算の結果として反映される摩擦損失係数の温度依存性は小さいとの判断のもとに、時間積分する際に流動式とエネルギー式で異なる時間刻み幅を採用している。具体的には流動式の計算N回につき1回の割合で、流動式のN回分の時間刻み幅でエネルギー計算を行う。これにより計算の高速化が達成されている。

### 2.3 カップリング手法

カップリングにあたり、炉心解析モジュールで計算される炉心熱流力特性を精度良く熱輸送系解析モジュール (LEDHER コード) へ反映しながらも、プログラムに加える修正を最小限とし、計算効率も高いものとなるような方法を目標とした。カップリングモデルを図3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取って炉心部の計算を行い、その計算結果からコントロールボリューム

単位での状態量に基づき、運動量保存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-圧力関係式を構築し、熱輸送系解析モジュールへ戻す。エネルギーに関しては前章で示したように、熱輸送系解析モジュールでは運動量保存式とエネルギー保存式が分離されていることから、炉心解析モジュールで計算された結果を熱輸送系解析モジュールの境界条件として与える。

熱輸送系解析モジュールでは、炉心解析モジュールに対応する炉心部を1つの PATH モデルで代表し、その炉心 PATH モデルで解く運動量保存式に炉心解析モジュールから受け取った炉心部の流量-圧力関係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。その後に、炉心解析モジュールで各燃料集合体および炉心槽の出口温度から1点に平均化(再上端メッシュから1メッシュ下の全メッシュのエンタルピと圧力の平均値を取って温度を算出)した炉心出口温度を境界条件としてシステム全体のエネルギーに関する連立方程式を解く。

炉心解析モジュールで計算される炉心の流量-圧力関係式の導出を以下に示す。

(1) 炉心運動量式 (微分形)

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \rho u u = -\nabla P - k u + \rho g \quad \dots\dots\dots(13)$$

(2) 炉心運動量式 (積分形)

上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。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho u dv + \int_{Ac\_out} \rho u u \cdot nda - \int_{Ac\_in} \rho u u \cdot nda \\ = - \int_{Ac\_out} P \cdot nda + \int_{Ac\_in} P \cdot nda - \int_{V_c} k u dv + \int_{V_c} \rho g dv \quad \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

各項の離散化

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho u dv = \frac{\partial}{\partial t} \int_{lc} \int_{Ac} \rho u da dl \approx \frac{\partial}{\partial t} lc W \rightarrow lc \frac{W^{n+1} - W^n}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\int_{Ac\_out} \rho u u \cdot nda - \int_{Ac\_in} \rho u u \cdot nda \rightarrow \sum_i (\Delta A \rho u u)_{i,out}^n - \sum_i (\Delta A \rho u u)_{i,in}^n \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$- \int_{Ac\_out} P \cdot nda + \int_{Ac\_in} P \cdot nda \rightarrow - \frac{V_c}{lc} (P_{out}^{n+1} - P_{in}^{n+1}) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$- \int_{V_c} k u dv \rightarrow \left( \sum_i \sum_l k_{im} u^{n+1} \Delta v \right) \frac{W^{n+1}}{W^n} + \left( \sum_i \sum_l k_{im} u^{n+1} \Delta v \right) = K W^{n+1} + F_{ex} \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$\int_{V_c} \rho g dv \rightarrow g \sum_i \sum_l \rho \Delta v \quad \dots\dots\dots(19)$$

これらの各項を式(14)に代入し書き直すと、以下の炉心部全体を代表する

流量－圧力関係式が得られる。

$$\frac{lc}{Vc} \left( \frac{lc}{\Delta t} + K \right) W^{n+1} = \frac{lc}{Vc} \left( \frac{lc}{\Delta t} W^n + \text{const.} \right) + P_{in}^{n+1} - P_{out}^{n+1} \dots\dots\dots(20)$$

ここで、 $A_{c\_in}$ 、 $A_{c\_out}$  は炉心部入口、出口面積を、 $lc$ 、 $Vc$  はそれぞれ炉心長、炉心部体積を示す。

LEDHER コード本来の PATH モデルでは流動に関して運動量保存式 (1) を解くが、炉心部 PATH モデルでは、代わりに式 (20) を解く。具体的には流動に関する式 (11) では、 $W$  および  $P$  を求める解とするようなマトリクスで構成されるが、マトリクス中の炉心 PATH 部に該当する部分で左辺の  $W$  および  $P$  の係数と右辺に式 (20) の係数を代入し解く。

このカップリング方法の利点は、第一に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を閉じることが可能であることになり、昨年度までに開発した炉心解析モジュール単体での並列性を保ちながら計算が可能となることである。また炉心解析モジュールで計算される炉心部の熱流力特性を熱輸送系解析モジュールの炉心部における流量－圧力関係式中の係数に陽的に反映しているため、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は分離されたままで解くことが可能である点にある。このため、連立方程式を組み直し陰的なカップリングとする場合と比較し、プログラム修正量が少なく済むため両コードの既往検証部分を損なうことがない。これに対して、炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールの境界である炉心下部と頂部におけるそれぞれの圧力は完全に一致するものの、炉心流量に関しては炉心全体の運動量を陽に評価するため時間ステップ毎に完全には一致させることはできないといった点がある。

図4に炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールをカップリングした場合の計算アルゴリズムを示す。ここで両者の時間刻み幅の統一を取る必要があるが、熱輸送系解析モジュールの時間刻み幅よりも炉心解析モジュールの時間刻み幅の方が十分に小さいことから、コードシステム全体で使用する時間刻み幅は炉心解析モジュールの値が使用される。

## 2.4 コードシステム

前項で示したように、今回のカップリングの場合、炉心解析モジュールと熱輸送系解

析モジュールの双方は、カップリングのための境界条件を授受する以外は、それぞれ単独に計算させることが可能である。このように複数のモジュール（タスク）が協調して動作する場合には、両コードでの間でのデータ通信やその同期制御、また異機種の複数のコンピュータ群を単一のコンピュータとして動作させることができる PVM (Parallel Virtual Machine) の利用が有効である。そこで今回は PVM に関する文献<sup>(11)</sup>の中で有用なプログラミングパラダイムとして紹介されている MASTER-SLAVE 形態として、図 5 に示すようなシステムを構築した。MASTER は複数の SLAVE プログラムを生成・制御する機能を担い、各 SLAVE プログラムは MASTER や他の SLAVE プログラムと通信をしながら計算を行う機能を持つ。本コードシステムでは炉心解析モジュールや熱輸送系解析モジュールが SLAVE プログラムとなり、双方で境界条件データを送受信しながら計算が進められる。

## 第3章 テスト計算および検討

### 3.1 テスト計算

第2章に示したカップリング方法の妥当性およびコードシステムの動作を確認するためテスト計算を行った。解析体系としてサイクル機構の炉外ナトリウム実験装置 (PLANDTL-DHX) <sup>(12)</sup> 相当の冷却系システムを想定した。炉心に関しては中心に1体 (37本ピン)、周辺に6体 (7本ピン) の計7体の燃料集合体で構成されるものとし、熱輸送系は主配管、上部プレナムおよびポンプから構成されるものとした。解析において想定する過渡は、これまでに PLANDTL-DHX で実施された実験ケース (社内呼称: TR043) <sup>(13)</sup> 相当のものとした。

本実験は原子炉のスクラムから自然循環に移行するまでの過渡時を模擬したものであり、初期定常状態は、中心集合体については実機定格の12%に相当するピン表面熱流束、集合体内平均流速とし、周辺集合体に対しては中心集合体と等しい出力/流量比を設定することで中心集合体と同様な熱的条件 (等温条件) を仮定する。

|            |              |             |
|------------|--------------|-------------|
| 流量 (l/min) | 中心集合体：49.0、  | 周辺集合体：49.0  |
| 発熱量 (kW)   | 中心集合体：144.3、 | 周辺集合体：144.3 |
| 入口温度 (℃)   | 300          |             |

過渡時の条件としては、出力変化は実機崩壊熱カーブを模擬して中心・周辺集合体ともにはほぼ同一の時間変化カーブとして炉心詳細解析モジュールに与える。但し過渡開始初期の10秒間はスクラム直後の温度低下を模擬するとともに出力/流量比を実機と合わせるために、流量は初期状態を維持したままで出力のみ低下させる条件とした。崩壊熱出力に関するこれらの過渡条件は炉心詳細解析モジュール側で設定する。流量変化についてはフローコストダウンの流量半減時間を7秒とし、100%から12%まで低下する時間に相当する区間は初期流量を維持する。その後は実機で想定される流量変化カーブをトレースさせることとし、自然循環流量を2%相当と想定して、熱輸送系解析モジュール側でポンプ流量を入力データで与える。図6にこれらの発熱および流量の初期値に対する相対変化カーブを示す。

なお、今回開発したコードシステムでは、第2章にも示したように炉心解析モジュールの炉心の下部と頂部の境界条件を1点の圧力境界としているため、解析で求まる各集合体流量は、各集合体間の圧損バランスから決定される。一方、実験では各集合体毎に流入流量を設定しているため、実験と解析の炉心総流量は一致するが、各集合体の流量は一致しない。このため、今回のテスト計算では、カップリングに用いた炉



心の流量－圧力関係式の妥当性確認に主眼を置くこととして、過渡状態における集合体内温度場の変化等の比較は定性的な検討にとどめる。

### 3.2 結果と検討

今回のカップリング方法では、炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールの境界である炉心下部と頂部におけるそれぞれの圧力は完全に一致するものの、炉心流量に関しては時間ステップ毎に完全には一致させることはできない。よって、まず双方のコードで求まる炉心部流量の比較を行うことでカップリングに用いた炉心の流量－圧力関係式の妥当性を確認し、次に集合体内の温度場等について確認をする。

#### (1) 炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールの炉心部流量の比較

図7に炉心入口出口圧力差の結果を示し、図8に炉心部の発熱・流量が大きく変化する過渡開始から約100秒までの炉心部総流量についての結果を示す。図7では、熱輸送系解析モジュールで指定された炉心流量の時間変化に追従し圧力も変動していることが分かる。図8より、熱輸送系解析モジュールと炉心解析モジュールの流量はグラフ上ではほとんど一致していることが分かる。なお同図中には、熱輸送系解析モジュールの炉心流量に対する炉心解析モジュールの炉心流量差をプロットした。炉心流量差グラフからいくつかの点で流量差がスパイク状に大きくなり曲線が不連続になっていることが読みとれる。これは熱輸送系解析モジュール側の入力データとして与えた流量変化曲線と対応させると以下のように解釈できる。すなわち熱輸送系解析モジュール側の解析条件では、過渡の流量変化を流量変化点をいくつか与えその間の流量変化率を線形補間することにより設定しているが、その流量変化の傾きの切り替え点において流量差が大きくなっている。したがってスパイク状の変化は解析条件による外乱と考えることができる。なお、この流量差が大きくなる原因は、熱輸送系解析モジュールにおいて、炉心詳細モデル側で求まる炉心内運動量を陽的に評価していることに起因するものであり、流量差は流量変化の傾きが変化するステップでのみ大きくなるものの、このような外乱が有りながらも次ステップ以降では両者の流量は一致する方向へと向う。結果として熱輸送系解析モジュールの炉心流量を基準とした場合の炉心解析モジュールの流量差も0.1%以内に収まっており、十分な精度を有していることが分かる。以上から今回のカップリングで適用した炉心流量－圧力関係式は妥当なものと考えられる。

#### (2) 発熱上端部での炉心部径方向温度分布の時系列

図9に過渡開始後の発熱上端部における炉心部径方向温度分布をほぼ実験に対応する時間（4秒,約60秒,約150秒,400秒）で出力した結果を示す。過渡開始後61秒の結果では、流量低下と崩壊熱相当の発熱によって集合体内の温度分布が急峻なものとなるが、次の150秒以降には集合体間および集合体内の流量再配分効果によってその温度分布が平坦化していく様子が分かる。図10に実験結果を参考として示すが、過渡開始後に急峻な分布が付き、その後平坦化する過渡的挙動が見られる。以上より解析結果は実験結果を定性的に再現していると判断できる。

### (3) 炉心出口温度

炉心出口部において断面平均した冷却材温度の時系列を図11に示す。また図12に実験での中心集合体中心サブチャンネルの発熱上端部における冷却材温度の時系列を示す。過渡開始後約20秒で温度が最低となり、その後に2次ピークが発生する。解析結果は実験結果と比較して2次ピークの発生時刻が遅れているが、この原因は実験結果の温度測定位置が発熱上端部なのに対し解析結果がそれよりも軸方向高さが高い炉心出口部であるための輸送遅れによるものである。この2次ピーク発生後に温度は実験と同様な変化で徐々に低下しており、以上から解析結果は実験結果を定性的に再現していると判断できる。

以上のテスト計算から、カップリングで適用した数値モデルの妥当性ととも解析結果が実験と定性的に一致することを確認した。今後は、熱輸送系解析モジュール側でPLANDTL-DHX ループ部の忠実なモデル化を行い実験結果と解析結果の定量的な比較を実施する予定である。

## 第4章 結言

全炉心熱流動解析コード ACT の開発作業として、これまでに開発された炉心詳細解析モジュールと熱輸送系解析モジュールをカップリングすることによって、冷却系システム全体での解析が可能なコードシステムを開発した。熱輸送系解析モジュールには一次元システム解析コード LEDHER を適用し、炉心詳細解析モジュールとのカップリングに際しては、炉心解析モジュールで計算される炉心部の熱流力特性を LEDHER コード内の炉心部において解く流量-圧力関係式の係数に陽的に反映するカップリング方法を選択した。この方法は、プログラム修正によって既検証部分を損なうことなく且つ計算効率を向上させることが可能で効率が最も良い。これらの炉心解析モジュールおよび熱輸送系解析モジュールのカップリングを実現するため PVM を使用した MASTER-SLAVE 形態のコードシステムを構築した。さらにカップリング方法およびコードシステムが妥当なことを確認するためテスト計算を実施した。この結果カップリングに用いた数値解析モデルが妥当であることを確認した。

今回の作業によって、従来の炉心解析モジュールでは取り扱うことができなかった冷却系システムとの熱流動相互作用など、システム動特性を考慮した炉心部の詳細な熱流力挙動を解析することが可能となった。

今後は、DRACS 起動時の DHX から炉心頂部への低温流体の降下や強制循環時におけるインターラッパーフロー現象が扱えるよう、今回開発したコードシステムにさらに上部プレナム多次元解析モジュールをカップリングする作業を予定している。この統合化作業および検証解析の実施により、ACT コードが完成することとなる。

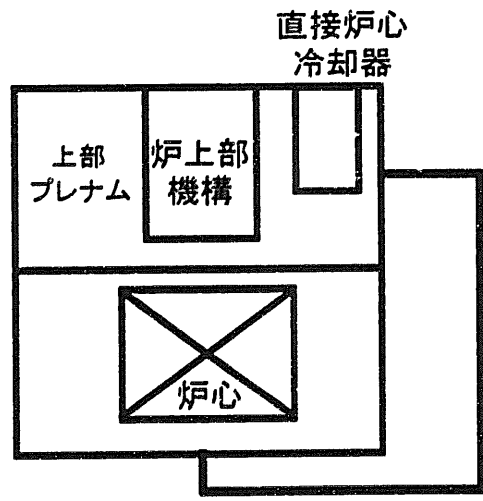
## 第5章 謝辞

本研究を実施するにあたり、カップリング方法の検討やプログラムコーディングにおいて有限会社イーエヌオー数理解析リサーチの出口明氏、株式会社エヌデーデーの橋本昭彦氏、JNC 経営企画本部の佐藤和二郎氏、JNC 技術展開部の宇都成昭氏に、また熱流体技術開発グループの山口彰リーダーをはじめ同グループチームリーダーの村松寿晴氏、堺公明氏には社内の研究発表会や室内検討会で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。

## 第6章 参考文献

- 1) 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) 成田 均, 大島 宏之, サブチャンネル解析コード ASFRE-IIIの整備 - 燃料ピン熱伝導モデルの改良 - : PNC TN9410 96-116, (1996)
- 5) 大島 宏之, サブチャンネル解析コード ASFRE-IIIの整備・改良 - ポーラス状閉塞モデルの高度化 - : PNC ZN9410 96-128, (1996)
- 6) 成田 均, 大島 宏之, サブチャンネル解析コード ASFRE-IIIの整備 - 燃料ピン熱伝導モデルおよび圧力損失モデルの検証解析 - : PNC TN9410 97-104, (1997)
- 7) 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 - : PNC TN9410 97-091, (1997)
- 8) 上出 英樹, 1/20 縮尺模型 RAMONA によるタンク型炉自然循環試験: 日本原子力学会 1991 年春の年会予稿集, (1991)
- 9) 江沼 康弘, 上出 英樹, 高速炉における自然循環過渡熱流動特性に関する研究 - 空気冷却器起動時の逆流防止方策の検討 - : 日本原子力学会 1994 年秋の大会予稿集, D42, (1994)
- 10) 木村 暢之, 西村 元彦, 高速炉の自然循環崩壊熱除去時の炉内熱流動現象に関する研究 - 一次元ネットワークコードによる解析手法の検討 - : 日本原子力学会 1997 年秋の大会予稿集, G34, (1997)
- 11) Al Geist, Adam Beguelin, et al., (訳)村田 英明: PVM3 ユーザーズガイド & リファレンスマニュアル 日本語版, (1995)
- 12) 桃井 一光, 林 謙二 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 - : PNC TN9410 97-047, (1997)

- 13) 西村 元彦, 上出 英樹, 大島 宏之, 高速炉燃料集合体内非定常多次元熱流動解析へのミキシング係数モデルの適用: PNC TN9410 96-289, (1996)



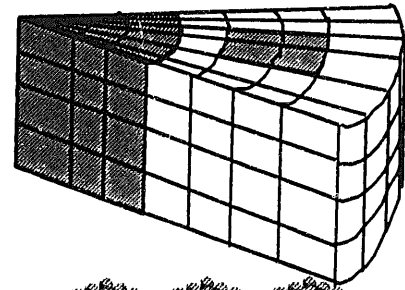
実際の原子炉の冷却系システム

これまでに開発・検証された解析コードをベースとして、それらを改良、カップリングすることでコードシステムを構成

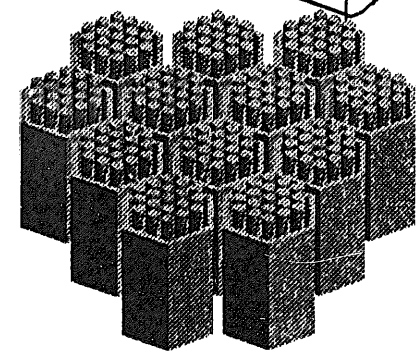
- 例) 燃料集合体 : ASFER
- 上部プレナムなど : AQUA
- システム : LEDHER

# ACT

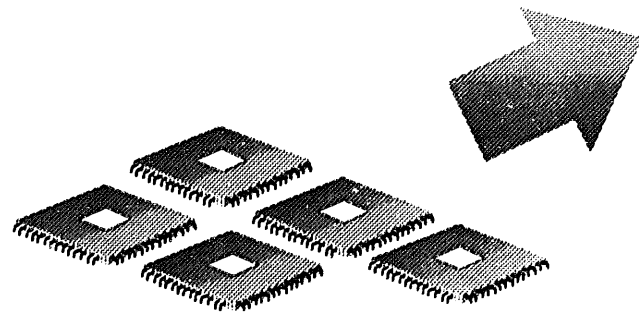
上部プレナム解析モジュール



熱輸送系解析モジュール

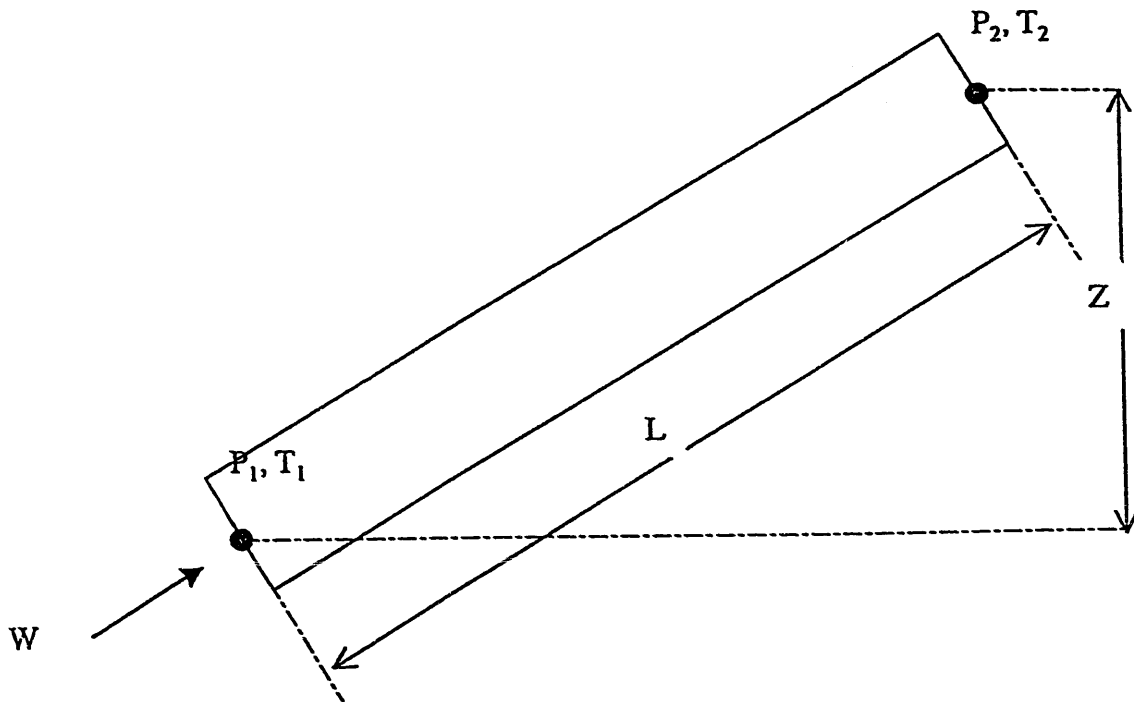


炉心詳細解析モジュール (燃料集合体、炉心槽)



大規模計算となるため並列計算機やネットワークコンピューティング技術を利用

## 図1 ACTコードの概念図



Z:配管高低差

L:配管全長

W:通過流量

$P_1$ :入口圧力

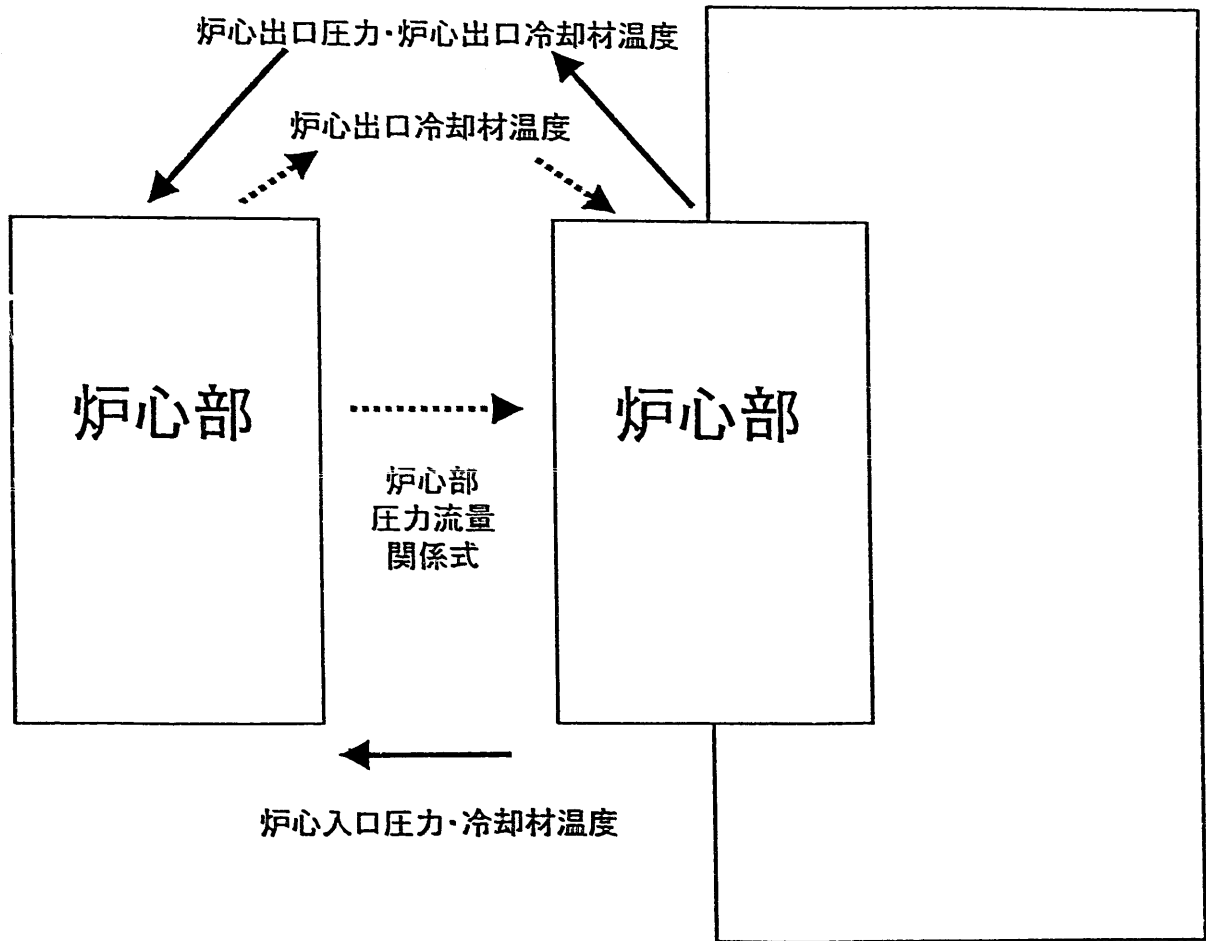
$P_2$ :出口圧力

$T_1$ :入口流体温度

$T_2$ :出口流体温度

図2 LEDHERコードPATHモデル概念図





<炉心解析モジュール>

<熱輸送系解析モジュール>

← 熱輸送系解析モジュールから炉心解析モジュールへ

←..... 炉心解析モジュールから熱輸送系解析モジュールへ

図3 炉心解析モジュールと熱輸送系解析モジュールのカップリング方式

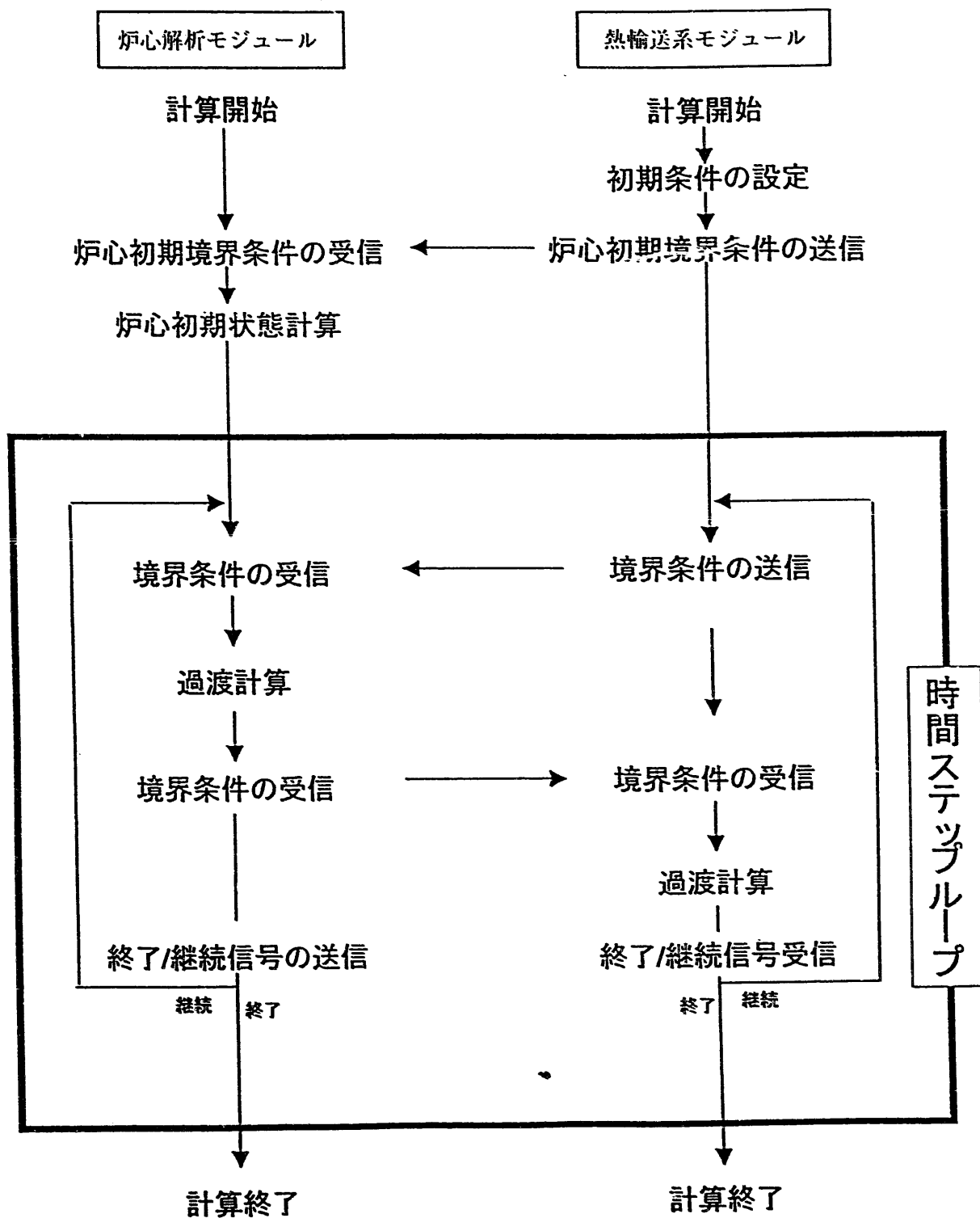


図4 カップリング計算フロー

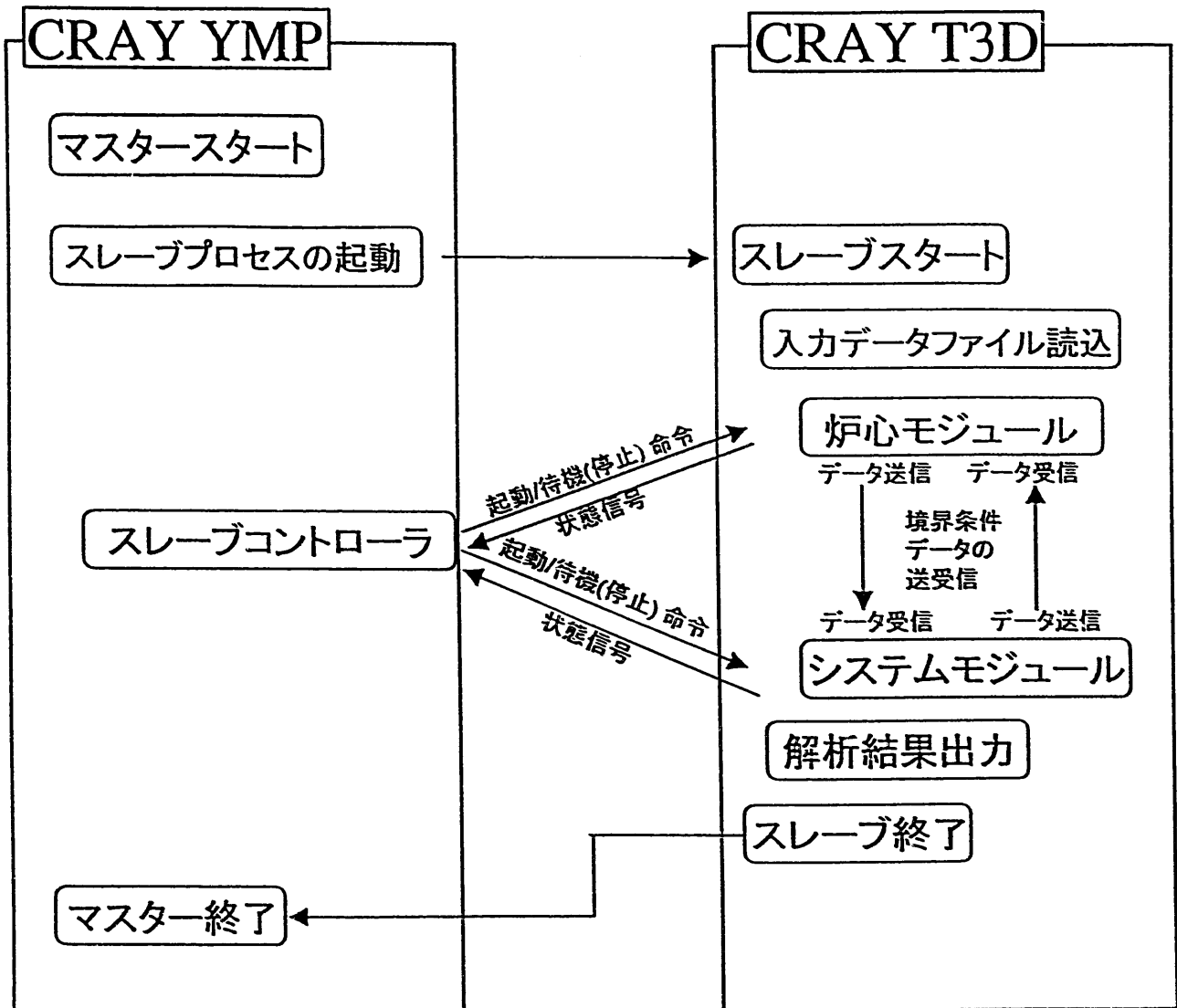


図 5 コードシステム

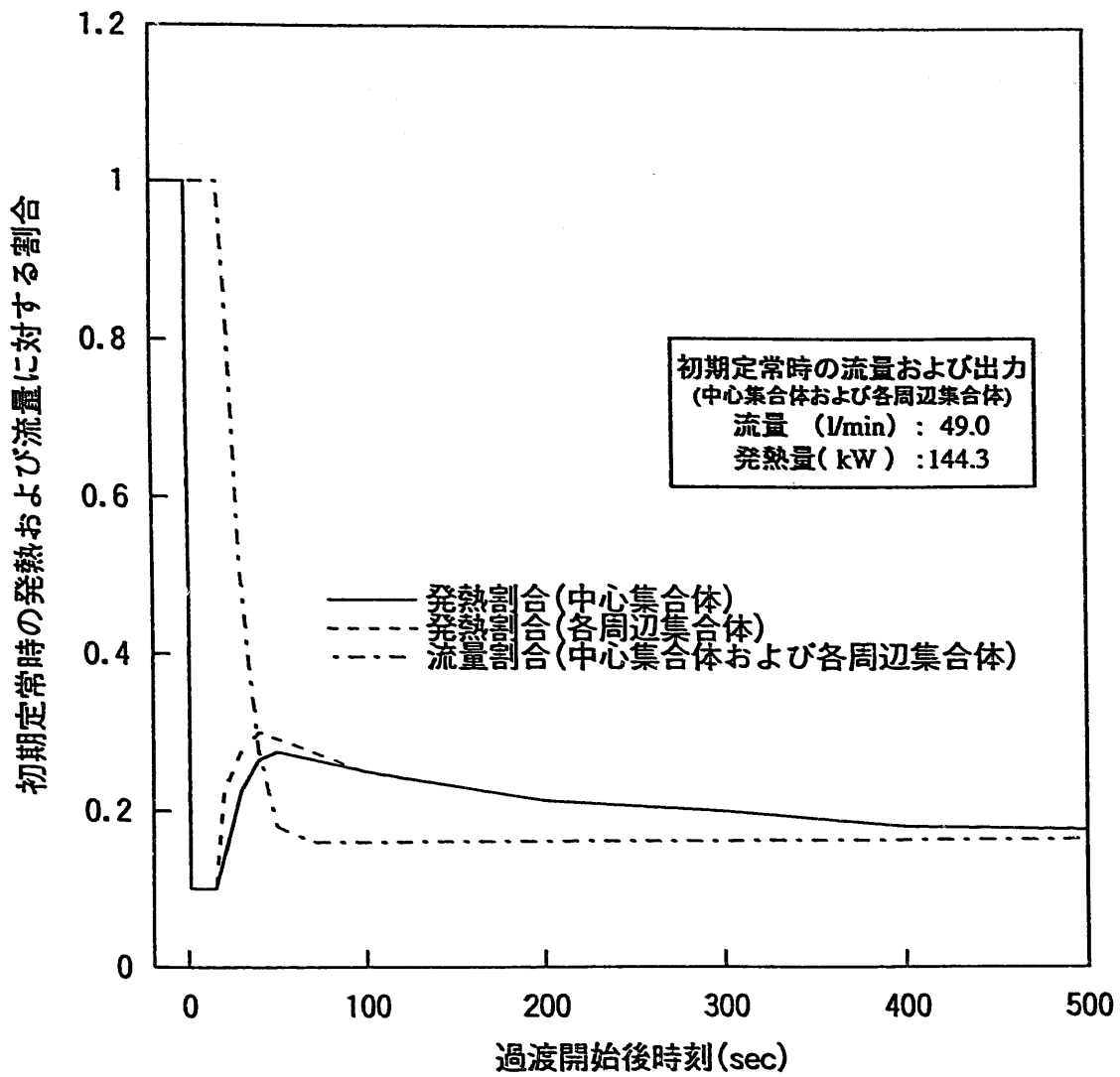


図6 炉心部の出力および流量変化曲線

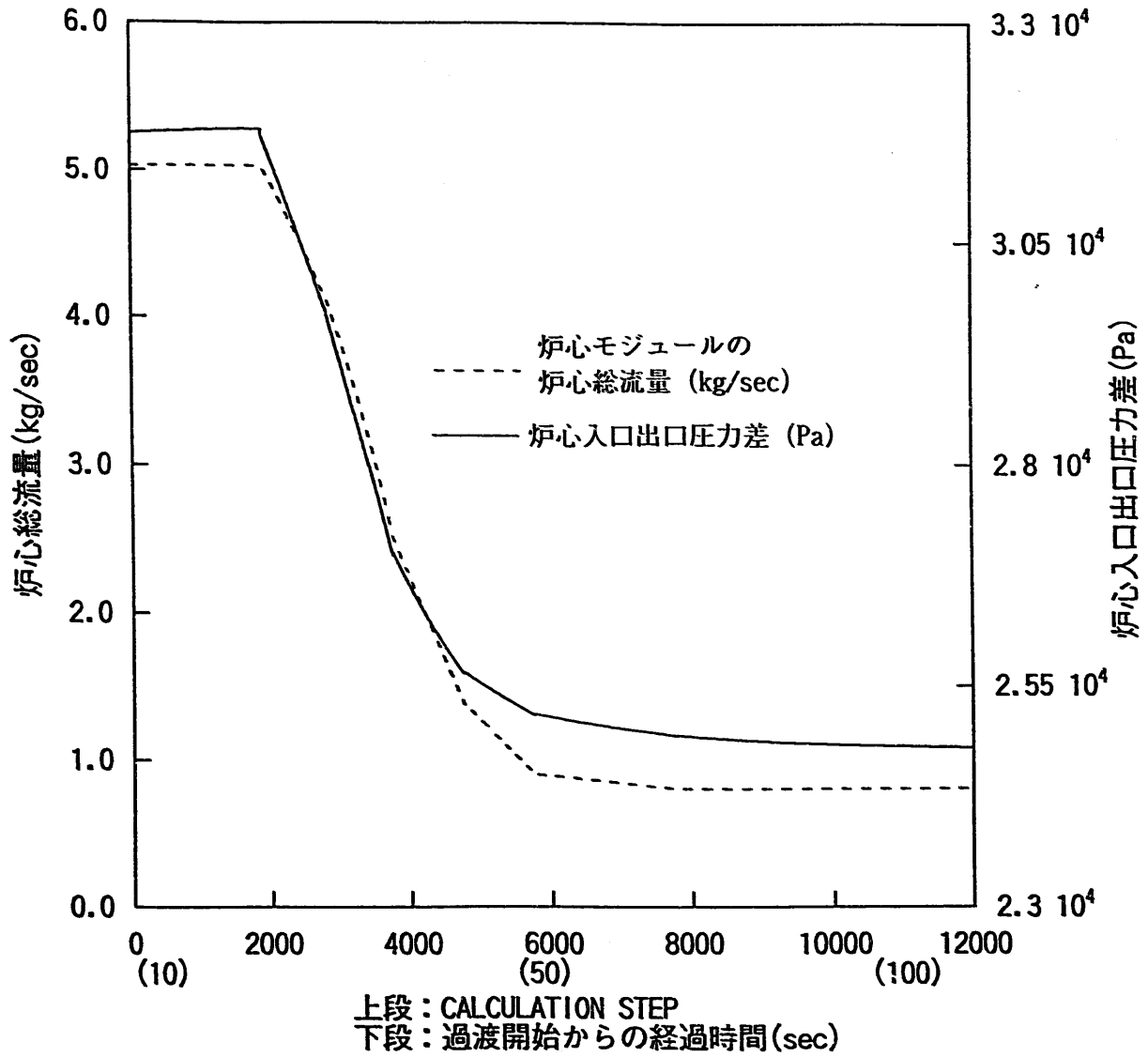


図7 テスト計算結果  
 炉心入口出口圧力差の時系列

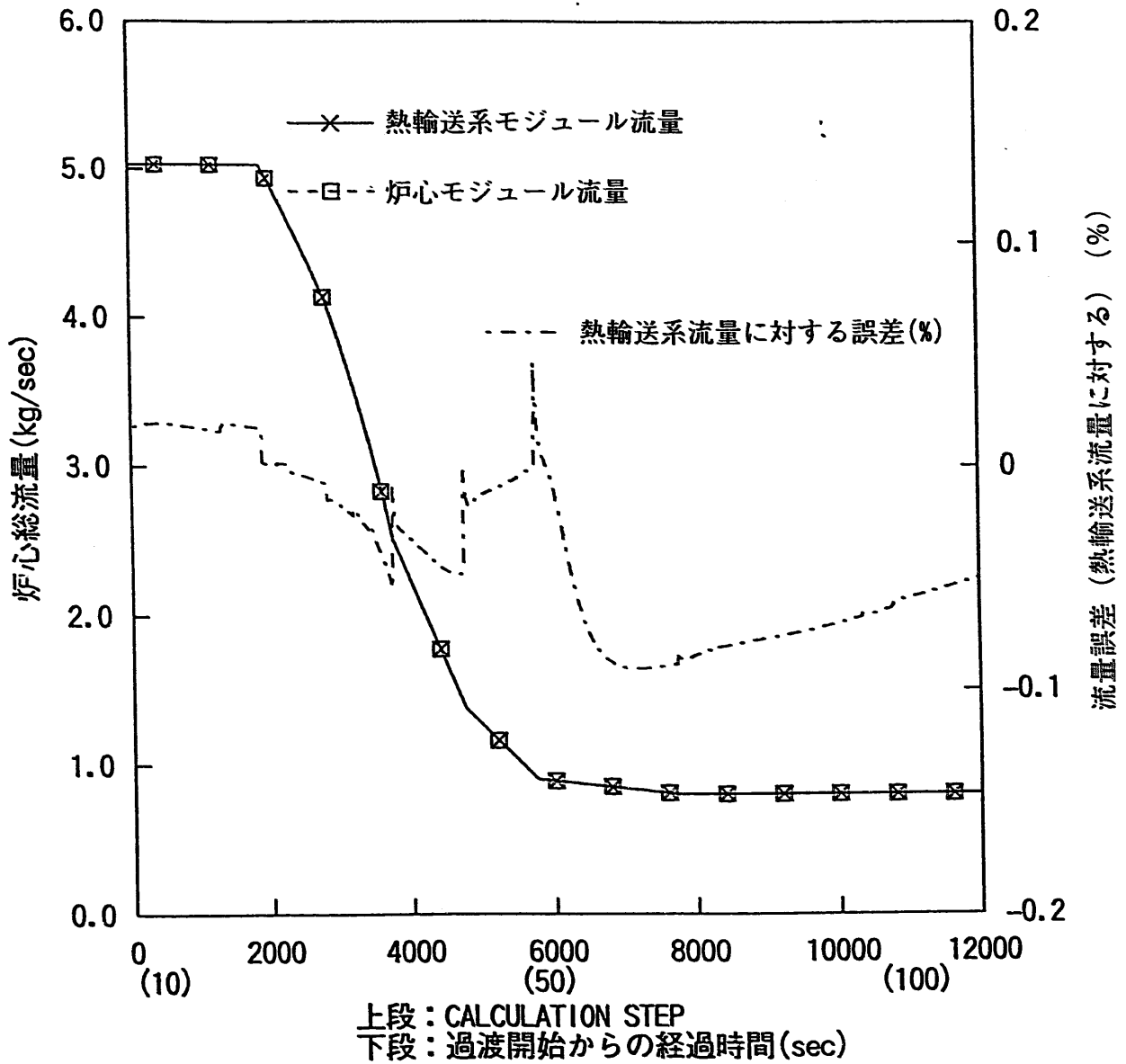


図8 テスト計算結果  
 炉心モジュールと熱輸送系モジュールの炉心部総流量の比較

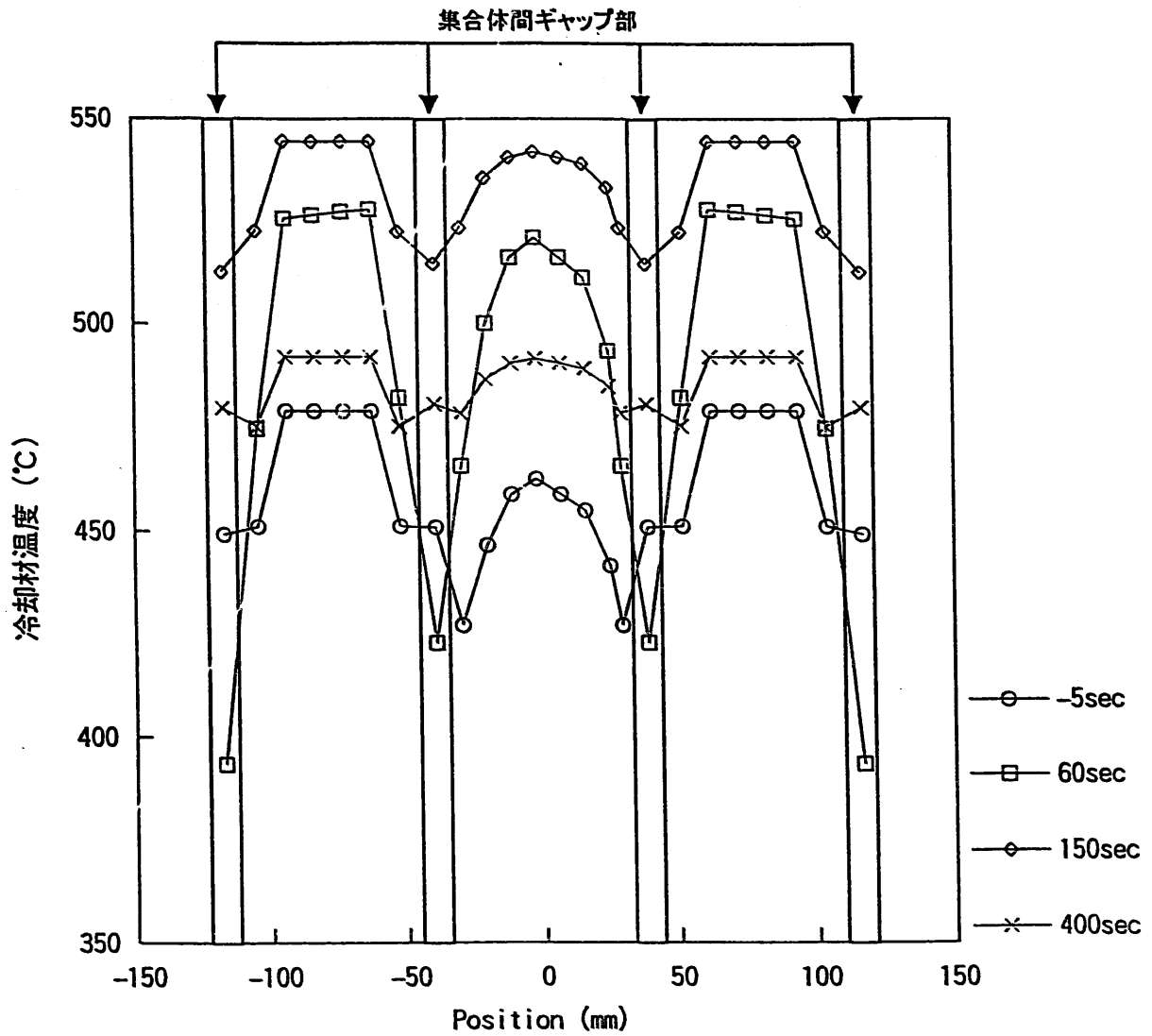


図9 テスト計算結果  
発熱上端部炉心部径方向温度分布の時系列

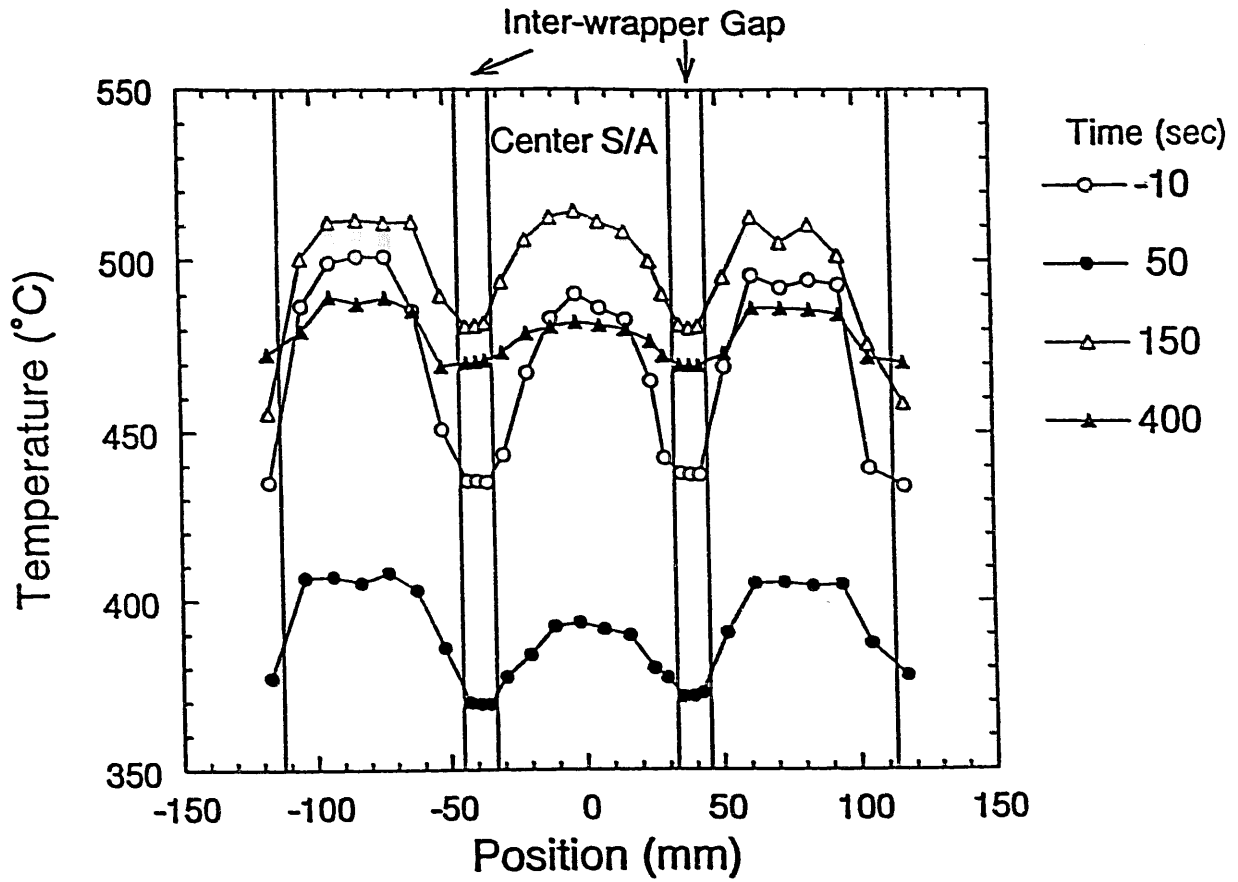


図 10 実験結果  
 発熱上端部炉心部径方向温度分布の時系列  
 (PNC TN9410 96-268 から引用)



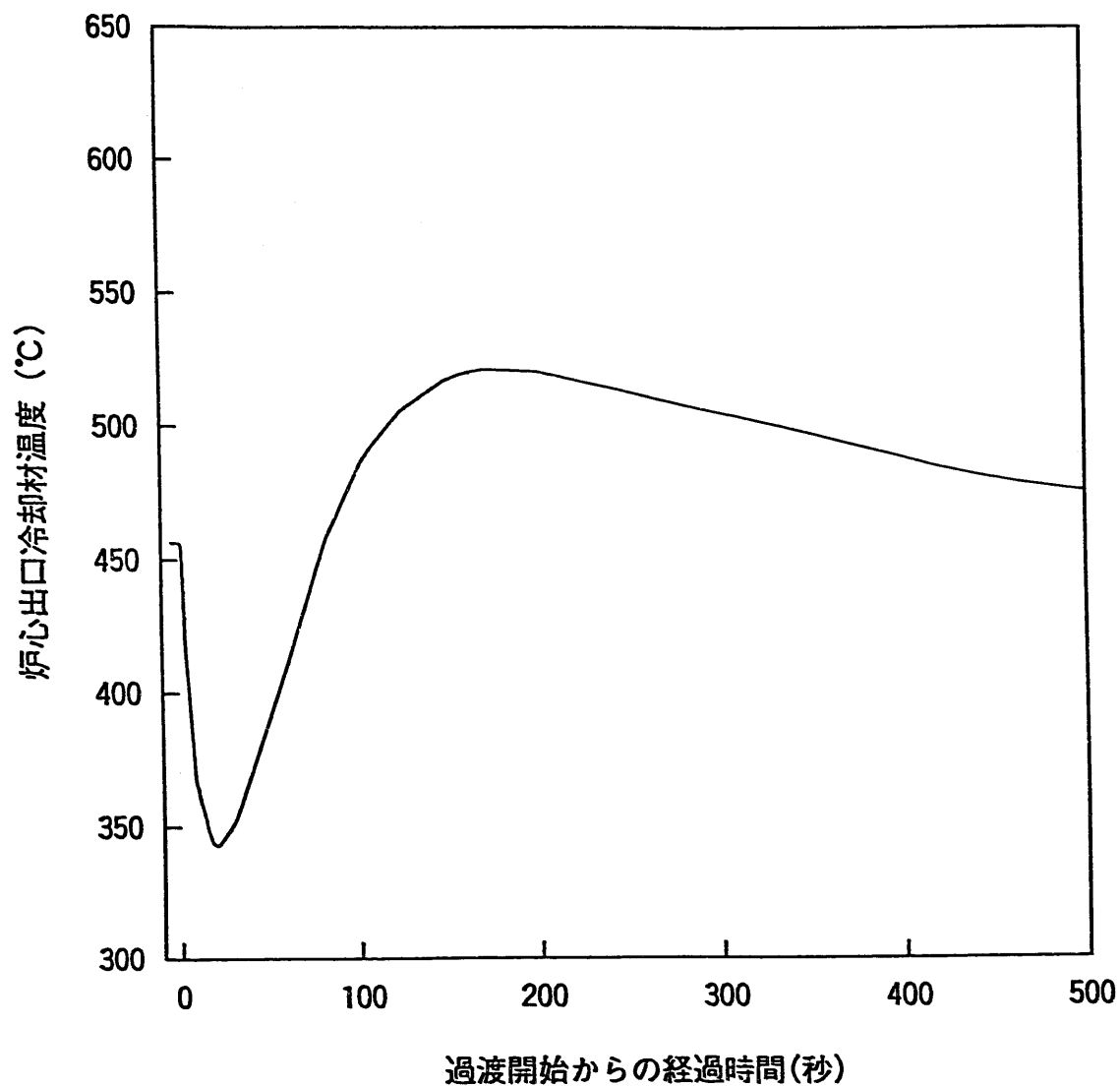


図 1 1    テスト計算結果  
          炉心出口冷却材温度の時系列

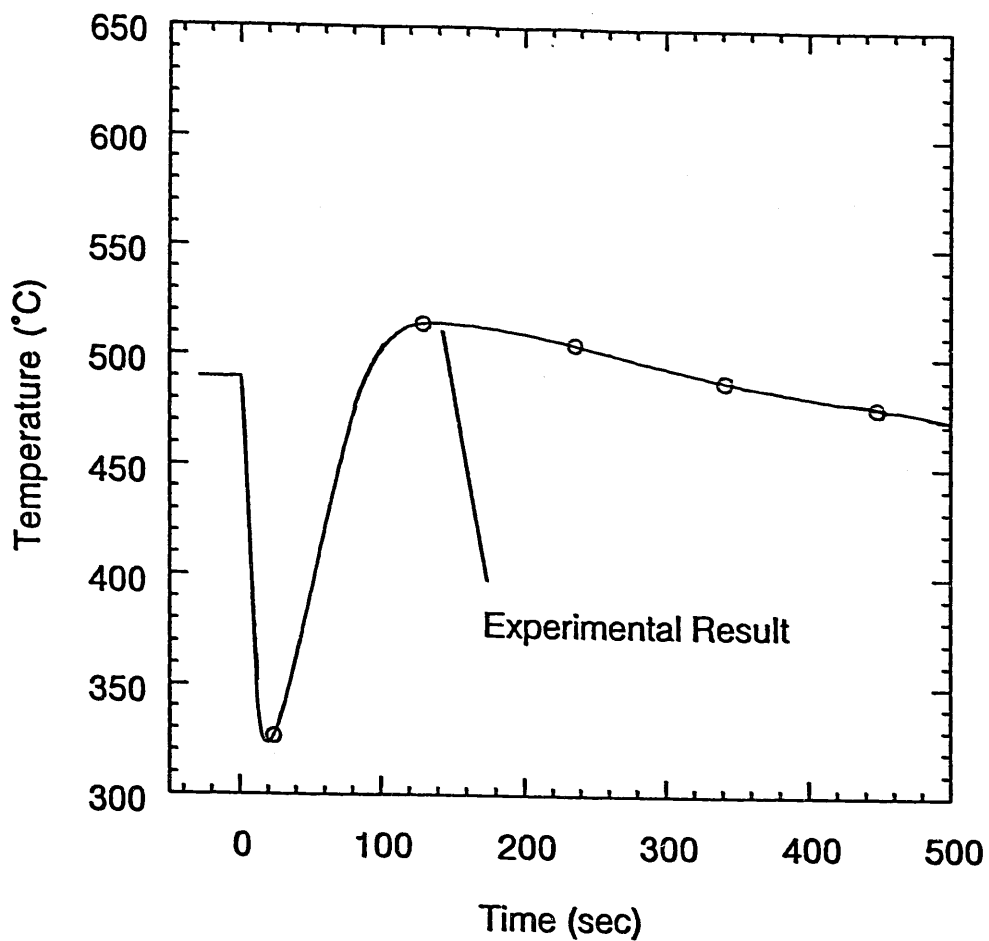


図 1 2 実験結果

中心集合体中心サブチャンネル発熱上端部冷却材温度の時系列  
(PNC TN9410 96-268 から引用)