

JAERI-Tech

JP0350226

2003-045



熱流動解析コードPHOENICSを組み込んだ燃料溶液体系の  
動特性解析コードの開発及びTRACYの自然冷却特性実験の解析  
(受託研究)

2003年3月

渡辺 庄一・山根 祐一・三好 慶典

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、  
お申し越しください。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡  
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,  
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Nakagun,  
Ibarakiken 319-1195, Japan.

熱流動解析コード PHOENICS を組み込んだ燃料溶液体系の  
動特性解析コードの開発及び TRACY の自然冷却特性実験の解析  
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部  
渡辺 庄一・山根 祐一・三好 慶典

(2003 年 2 月 7 日受理)

燃料溶液体系の臨界事故では、正確な情報が必ずしも得られないことから、その熱流動の振舞いを把握するためにはパラメータサーベイ計算が必要である。しかし、一方では従来の熱流動解析計算は時間を要するため、許容できる計算精度の範囲内で計算時間を短縮できる実用的な計算手法が必要である。このため、汎用熱流体解析コード PHOENICS を結合し、熱流動を考慮した多領域動特性方程式に基づく中性子エネルギー 1 群の二次元(R-Z)動特性解析コードを作成した。核熱計算と流動計算の時間刻み幅を分離し、さらに出力の時間変化に応じて時間刻み幅を自動調整することによってコードの計算時間短縮化を図った。

TRACY を用いた 0.5 ドルの反応度投入後の過渡出力に引き続く、緩やかな出力変化が 5 時間持続する自然冷却特性実験について解析計算を行った。実用的な時間の範囲内で計算が可能であり、出力及び温度変化についての解析値は実験値をほぼ再現する見通しを得た。

Development of a Kinetics Analysis Code for Fuel Solution Combined with Thermal-hydraulics  
Analysis Code PHOENICS and Analysis of Natural-cooling Characteristic Test of TRACY  
(Contract Research)

Shouichi WATANABE, Yuichi YAMANE and Yoshinori MIYOSHI

Department of Fuel Cycle Safety Research

Nuclear Safety Research Center

Tokai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 7, 2003)

Since exact information is not always acquired in the criticality accident of fuel solution, parametric survey calculations are required for grasping behaviors of the thermal-hydraulics. On the other hand, the practical methods of the calculation which can reduce the computation time with allowable accuracy will be also required, since the conventional method takes a long calculation time. In order to fulfill the requirement, a two-dimensional(R-Z) nuclear-kinetics analysis code considering thermal-hydraulic based on the multi-region kinetic equations with one-group neutron energy was created by incorporating with the thermal-hydraulics analysis code PHOENICS for all-purpose use. The computation time of the code was shortened by separating time mesh intervals of the nuclear- and heat-calculations from that of the hydraulics calculation, and by regulating automatically the time mesh intervals in proportion to power change rate.

A series of analysis were performed for the natural-cooling characteristic test using TRACY in which the power changed slowly for 5 hours after the transient power resulting from the reactivity insertion of a 0.5 dollar. It was found that the code system was able to calculate within the limit of practical time, and acquired the prospect of reproducing the experimental values considerably for the power and temperature change.

**Keywords:** Thermal-hydraulics Analysis, PHOENICS, Kinetic-analysis Code,  
TRACY, Natural-cooling Characteristics, Calculation Time

---

This report includes the result of research conducted under the contract with the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of JAPAN.

## 目 次

1.はじめに .....	1
2. PHOENICS を用いた溶液系過渡解析コード .....	2
2.1 概要 .....	2
2.2 数学モデル .....	2
2.3 計算時間の短縮化 .....	4
3. TRACY の熱流動解析 .....	35
3.1 TRACY の自然冷却特性実験 .....	35
3.2 解析方法 .....	36
3.3 解析結果 .....	39
4.まとめ .....	61
謝辞.....	61
参考文献.....	61
付録 入力データの作成 .....	62

## Contents

1 . Introduction .....	1
2 . Transient Analysis Code for Fuel-solution System Using PHOENICS .....	2
2.1 Outline .....	2
2.2 Mathematical Model .....	2
2.3 Shortening of Computation Time .....	4
3 . Thermal-hydraulics Analysis for TRACY Experiment .....	35
3.1 Natural-cooling Characteristic of TRACY Experiment .....	35
3.2 Method of Analysis .....	36
3.3 Result of Analysis .....	39
4 . Summary.....	61
Acknowledgements .....	61
References .....	61
Appendix Input Generator .....	62

**This is a blank page.**

## 1. はじめに

溶液燃料体系の臨界事故では初期出力バースト発生後も熱的に有意な出力レベルが長時間持続される可能性が高いと考えられる。しかし、温度等の核的フィードバック効果及び空間依存を考慮した従来の熱流動の解析計算例では、初期出力バースト部のみでも数十時間程度の時間を要しているのが現状である。長時間にわたる事象を把握するためには、パラメータサーベイ計算が必要である。このため、計算精度を大きく損なわずに計算時間を短縮できる実用的な計算手法の開発が望まれている。

ここでは、既存の汎用熱流体解析コード PHOENICS に、中性子エネルギー 1 群の多領域動特性方程式に基づく計算時間短縮化を図った核計算用サブルーチンを結合し、熱流動を考慮した二次元 (R-Z) 動特性解析計算コードを作成した。さらに、過渡臨界実験装置 TRACY を用いた実験の解析計算例として、比較的小さい反応度投入後の過渡出力に引き続く、緩やかな出力変化が長時間持続する自然冷却特性実験<sup>1)</sup>について解析計算を行い、本計算コードの性能を検証した。

中性子束、遅発中性子先行核濃度及び流体の温度の時間変化に比べて、PHOENICS コードで計算される流体の流れの場の時間変化が、緩やかであることに着目し、核熱計算は時間刻み幅を短くする一方で、流れの場は比較的大きな時間刻みで計算をすることにより、核熱計算と流動計算の時間幅を分離し、計算精度を劣化させず計算時間の短縮化を図った。さらに、核熱計算においても出力が急激に立ち上がる反応度投入直後には時間の刻み幅を小さくし、出力がピークを過ぎた後はある程度時間刻み幅を大きく設定するように調節することにより、出力あるいは中性子束や遅発中性子先行核濃度の時間変化率に応じて自動的に時間幅を設定する方法をとり、計算時間の短縮化を図った。

TRACY では一連の自然冷却特性実験を行なっている。その中の代表的ケースとして、ステップ状の 0.5 ドルの反応度投入直後に過渡出力を発生し、その後自然放熱による温度フィードバックにより遅発臨界・未臨界状態を繰返し、約 5 時間にわたって出力がゆっくり変化するケースについて解析計算を行い、出力及び温度について実験値と比較した。

## 2. PHOENICS を用いた溶液系過渡解析コード

### 2.1 概要

#### (1) 汎用熱流体解析コード PHOENICS

汎用熱流体解析コード PHOENICS<sup>2)</sup> は、流体解析を主としたコードであり、流れの基礎式である Navier-Stokes 式とエネルギー保存式を同時に解き、流体内の温度、速度分布が必要とされる熱工学の解析に用いられている。本コードは基礎方程式として、(i) 流体の質量保存式、(ii) 流体の運動方程式、(iii) 流体のエネルギー方程式を解き、有限体積法（コントロールボリューム法）により方程式の離散化を行っている。有限体積法は、計算領域を多数のセルに分割し支配方程式（単位体積あたりの運動量、エネルギー等の保存則を表す）を各々のセルにおいて積分することにより、各セルにおける保存則が満たされるように元の方程式を離散化する方法である。

#### (2) 热流動を考慮した二次元動特性解析コードシステム

PHOENICS コードに多領域動特性方程式による核計算用サブルーチンを結合し、熱流動を考慮した二次元(R-Z)動特性解析コードシステムを作成した。本解析計算では基礎方程式として、PHOENICS コードに組み込まれている (i) 流体の質量保存式、(ii) 流体の運動方程式、及び(iii) 流体のエネルギー方程式に加え、新たに構築したユーザーサブルーチンとして (iv) 中性子束( $\phi$ ) の拡散方程式及び (v) 遅発中性子先行核濃度( $C_i$ ) 方程式を解いている。元来 PHOENICS では、任意の変数に対して対流-拡散型の方程式を解くことができるため、 $\phi$  および  $C_i$  に関しても解くことができるが、これらの変数 ( $\phi$  および  $C_i$ ) の値は短時間に  $10^5$  から  $10^{10}$  倍程度の大きさとなり得るため、単精度で計算を行っている PHOENICS の標準変数として扱うと精度よく解くことができない。そこで  $\phi$  と  $C_i$  に対しては倍精度の変数を用いて方程式を解くルーチンを PHOENICS のユーザーサブルーチン GROUND 内に組み込んで解いている。GROUND に組み込んだ  $\phi$  と  $C_i$  の離散化については、PHOENICS で標準的に解いている方程式の離散化方法の考え方と同じである。計算時間の短縮化については、2.3 節で述べる。

### 2.2 数学モデル

現象を記述する方程式を以下に示す。流体は非圧縮性の粘性流体とし、中性子はエネルギー 1 群とした。また、核分裂核種は 1 種類とした。前節 2.1 で述べた基礎方程式を以下に示す。

#### (1) 流体の質量保存式

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

#### (2) 流体の運動方程式

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \operatorname{grad}) \mathbf{u} \right] = -\operatorname{grad} p + \operatorname{div} \boldsymbol{\tau} - \rho \mathbf{g} \alpha_T (T - T_0)$$

#### (3) 流体のエネルギー方程式

$$\rho \frac{\partial (C_p T)}{\partial t} = -\rho \operatorname{div}(C_p T \mathbf{u}) + \operatorname{div}(\kappa \cdot \operatorname{grad} T) + Q$$

## (4) 中性子束の拡散方程式

$$\frac{1}{U} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \operatorname{div}(D \cdot \operatorname{grad} \phi) - \Sigma_a \phi + (1 - \beta) \nu \Sigma_f \phi + \sum_i \lambda_i C_i + S_\phi$$

## (5) 遅発中性子先行核濃度の方程式

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\lambda_i C_i + \beta_i \nu \Sigma_f \phi - \operatorname{div}(C_i \mathbf{u}) \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

各変数の意味は下記のとおりである。

$\phi$  : 中性子束 (1/cm<sup>2</sup>/s)

$C_i$  : 先行核濃度 (1/cm<sup>3</sup>)

$\mathbf{u}$  : 流体の速度 (cm/s)

$p$  : 流体の圧力 (dyn/cm<sup>2</sup>)

$T$  : 流体の温度 (°C)

$U$  : 中性子の速度 (cm/s)

$D$  : 中性子拡散係数 (cm)

$\Sigma_a$  : 中性子吸収断面積 (1/cm)

$\Sigma_f$  : 核分裂断面積 (1/cm)

$\beta_i$  :  $i$  番目の群の遅発中性子割合

$\beta$  : 遅発中性子割合 =  $\sum_i \beta_i$

$\nu$  : 1回の核分裂で放出される中性子数の平均値

$\lambda_i$  :  $i$  番目の群の先行核の崩壊定数 (1/s)

$S_\phi$  : 中性子生成項 (1/cm<sup>3</sup>/s)

$\rho$  : 流体密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$\tau$  : せん断応力テンソル (dyn/cm<sup>2</sup>)

$g$  : 重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>)

$\alpha_T$  : 体膨張率 (1/°C)

$T_0$  : 基準圧力 (°C)

$C_p$  : 定圧比熱 (erg/g/°C)

$\kappa$  : 熱伝導率 (erg/cm/s/°C)

$Q$  : 热生成項 (erg/cm<sup>3</sup>/s)

ここで、運動方程式に現れるせん断応力テンソル  $\tau$  は、

$$\tau = \eta(\operatorname{grad} \mathbf{u} + \operatorname{grad} \mathbf{u}^T)$$

と表される。ここで  $\eta$  は粘性係数(g/cm/s)である。また、流体のエネルギー方程式に現れる熱生成項  $Q$  は、

$$Q = w_f \Sigma_f \phi$$

である。 $w_f$  は1回の核分裂によって放出される有効熱量である。

## 2.3 計算時間の短縮化

### 2.3.1 核計算と熱流動計算の時間幅の分離

中性子束、遅発中性子発生割合及び流体の温度の変化に比べて、PHOENICS コードで計算される流体の流れの場の変化が、緩やかであることに着目し、核熱計算は時間刻み幅を短くする一方で、流れの場は比較的大きな時間刻みで計算を行うようアルゴリズムを構築した。これによって核熱計算と流動計算の時間幅を分離し、計算精度を劣化させず計算時間短縮化を行い、さらに温度（エネルギー）に関しても時間分離を行い、さらなる計算時間の短縮を図った。

#### (1) 温度に対する離散化

PHOENICS は、有限体積法（コントロールボリューム法）により支配方程式の離散化を行っている。有限体積法は、計算領域を多数のセルに分割し支配方程式（単位体積あたりの運動量、エネルギー等の保存則を表す）をおのおののセルにおいて積分することにより、各セルにおける保存則が満たされるように元の方程式を離散化する方法である。元来任意の変数に対して対流－拡散型の方程式を解くことができるため温度 T に対しても PHOENICS で解くことができるが、温度は中性子束  $\phi$  や先行核濃度  $C_i$  と同様の時定数で変化するため、これらと同様の時間刻みで計算を行う必要がある。そこで T に対しても倍精度の変数を用いて方程式を解くルーチンを PHOENICS のユーザーサブルーチン GROUND 内に組み込んで解くようプログラムコードを改良した。

#### (2) 計算のタイミング

##### 【従来のアルゴリズム】

PHOENICS は SIMPLE 法をベースにしたアルゴリズムを用いている。その計算の流れの中で、各変数がどのようなタイミング（順序）で計算されるかを以下に示す。

PHOENICS の計算においては以下の反復が行われる。

```

DO  ISTEP=1,LSTEP ..... (A) タイムステップのループ
    DO  ISWEEP=1,LSWEEP ..... (B) 非線型のためのループ(スイープ)
        ここで  $\phi$  や  $C_i$  を解くルーチンを呼ぶ
        DO  IZSTEP=1,NZ ..... (C) IZ スラブのループ
            圧力補正及び流速補正をおこなう
            温度 (T) を解く
            速度 (u,v,w) を解く
            質量保存則の誤差を計算する
        ENDDO
        圧力補正式を解く
    ENDDO
    ENDDO

```

このように圧力補正式以外は原則として IZ スラブ (IZ=一定の二次元的なセルの集まり) ごとに連立方程式が解かれる。NZ は z 方向のセル分割数である。 $\phi$  と  $C_i$  は毎スイープの最初に SOR(Successive Over Relaxation) 法を用いて解く。SOR 法の収束判定は次のように行った。

まず ISWEEP が 1 のときに、SOR 法の反復で解を求める前の  $\phi$  の値を用いて max ノルムを

計算しそれを  $E_0$  とする。max ノルムとは各セルにおける離散化式の左辺と右辺の差の絶対値の中で、一番値の大きなものである。この  $E_0$  を基準値として SOR 法反復による max ノルムを  $E$  としたとき、 $E/E_0 < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  は与えられた小さな値) を SOR の収束判定としている。

#### 【本計算でのアルゴリズム】

- A)  $n = 0$ 、 $\tau = \tau_n$  と置く。
- B)  $n=n+1$
- C)  $m = 0$  とおく。
- D)  $m=m+1$
- E) エネルギーの式を解き  $T^m$  ( $\tau_n$ ) を求める。
- F) 中性子束拡散式を解き  $\phi^m$  ( $\tau_n$ ) を求める。
- G) 遅発中性子先行核濃度方程式を解き  $C_i^m$  ( $\tau_n$ ) を求める。
- H) D) へもどる。  
D)から H)を数回繰り返し、時刻  $\tau_n$  における  $T$ 、 $\phi$ 、 $C_i$  を求める。
- I) B) へ戻る。
- B)から I)をNステップ繰り返し時刻  $\tau_N$  まで計算を進める。
- J) PHOENICS の標準解法で運動方程式と質量保存式を解いて時刻  $t + \Delta t$  における  
圧力と流速を求める

ここで  $m$  は D)から H)の反復のカウンターである。 $T^m$ 、 $\phi^m$ 、 $C_i^m$  はそれぞれ  $m$  回目の反復における解を表す。 $T^m$ 、 $\phi^m$ 、 $C_i^m$  各々は陰解法を用いて解くが、 $T^m$ 、 $\phi^m$ 、 $C_i^m$  の連成に関しては、計算効率的には陽的のほうが演算量は少ないため、連成に関しては陽的な扱いを基本に考える。

#### (3) 精度検証のためのテスト計算

本テスト計算での臨界体系は、ウラン硝酸水溶液部の半径 24.7cm、高さ 31.2cm の単純な円柱体系とし、初期溶液温度は 25°C とした。この体系は、約 0.5 ドル相当の反応度が加わった体系であり、200 秒後までの出力、温度変化を求めた。溶液の物性値及び核定数は、TRACY 体系の代表的な定数の例を用いた。体系のメッシュは等分割とし、分割数は半径方向で 5、高さ方向で 6 とした。

##### 1) 溶液の物性値：

密度;	1.54761 g/cm <sup>3</sup>
動粘性係数;	0.015734 cm <sup>2</sup> /s
定圧比熱;	$2.59582 \times 10^7$ erg/g/°C
熱伝導率;	$6.06835 \times 10^4$ erg/cm/s/°C
体膨張率;	$4.0535 \times 10^{-4}$ 1/°C

密度  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>) は温度を  $t$  (°C)、ウラン濃度を  $C_u$  (g/L)、硝酸濃度を  $C_{HN}$  (N) とし、次式より求めた<sup>3)</sup>。

$$\rho = 1.0125\rho_{25} + 0.000145t - 0.0005\rho_{25}t - 0.0036$$

$$\rho_{25} = 1.0171 + 1.2944 \times 10^{-3} C_u + 0.0289 C_{HN}$$

動粘性係数は25°Cにおける粘性係数を次の式で求め、それを密度の値で割った値を用いた<sup>4)</sup>。

$$\log_{10} \mu_{25} = 0.9527 + 0.2426M_u + 0.01M_u^2 + (0.0089 - 0.0023M_u)C_{HN}$$

ここで $\mu_{25}$ は25°Cにおける粘性係数(mPoise)、Muはウラン濃度(mol/L)である。定圧比熱C<sub>p</sub>(cal/g/°C)は、次式で算出した<sup>4)</sup>。

$$C_p = 0.998 - 9.630 \times 10^{-4} C_u - 4.850 \times 10^{-2} C_{HN}$$

熱伝導率 $\kappa$ (mW/m/K)は、絶対温度をTとして

$$\kappa = 275.69 + 1.0996T$$

として求まる水の値を用いた<sup>5)</sup>。

これらの式に運転初期条件における値を代入して物性値を求め、計算においては定数として扱った。

## 2) 核定数:

核分裂あたり中性子発生数 $\nu$ は2.3、中性子速さVは22,000 cm/sとした。

$$D = 3 \times 10^{-6} t^2 - 3 \times 10^{-6} t + 0.6776 \quad cm$$

$$\nu\Sigma_f = -1.0 \times 10^{-7} t^2 - 3 \times 10^{-5} t + 0.0379 \quad 1/cm$$

$$\Sigma_a = -8 \times 10^{-8} t^2 - 2 \times 10^{-5} t + 0.0275 \quad 1/cm$$

遅発中性子発生割合;

$$\beta_1 = 2.53641e-4 \quad \beta_2 = 1.64637e-3 \quad \beta_3 = 1.48583e-3$$

$$\beta_4 = 2.99124e-3 \quad \beta_5 = 8.86989e-4 \quad \beta_6 = 3.22655e-4$$

先行核の崩壊定数(1/s);

$$\lambda_1 = 1.27031e-2 \quad \lambda_2 = 3.17039e-2 \quad \lambda_3 = 1.15256e-1$$

$$\lambda_4 = 3.11631e-1 \quad \lambda_5 = 1.40030 \quad \lambda_6 = 3.87411$$

流動計算(流速と圧力)の時間刻みを1秒に固定し、その他の計算の時間刻みを変えた場合の中性子束(メッシュ点座標(3,3)位置)、平均温度、出力(同(3,3)位置)及び積算出力(同(3,3)位置))の時間変化をそれぞれ図2.3-1から図2.3-4に示す。

同様に、図2.3-5から図2.3-8には流体(速度、圧力)以外の時間刻みを0.0001秒に固定し、流体の計算の時間刻みを変更した場合の結果を示す。流体の計算の時間刻みが0.0001秒の場合の計算は180秒まで実施し、それ以外は200秒までの計算を行った。

図2.3-1から図2.3-8の結果より、流体(速度、圧力)に関する計算の時間刻みに関しては、1秒程度としても計算の精度に対して影響をあまり与えないと考えられるが、それ以外の変数に関しては時間刻みが計算結果に与える影響は大きいと言える。本計算の条件下においては、流体のエネルギー方程式、中性子束の拡散方程式及び遅発中性子先行核濃度方程式に関して0.0001秒程度の時間刻みが妥当と考えられる。

### 2.3.2 核計算における時間刻み幅の自動決定機能

出力が急激に立ち上がる反応度投入直後には核熱計算時間の刻み幅を小さくし、出力がピークを過ぎた後はある程度時間刻み幅を大きく設定するように調節し、全体として計算時間を短縮化を図る。ここでは、出力あるいは中性子束や遅発中性子先行核濃度の時間変化率に応じてコードが自動的に核熱計算の時間幅を設定できるようにして計算時間短縮化を図った。

ここでは、核計算における時間進行のタイムステップを  $n$  とし、 $n$  ステップ目の空間点  $p$  における中性子束を  $\phi_p^n$  と表す。中性子束の 1 タイムステップにおける下記の相対変化量  $R$  を、時間刻み幅  $\Delta \tau$  を制御する指標にして  $\Delta \tau$  を決定する。

$$a) R = \max_p \left( \frac{|\phi_p^n - \phi_p^{n-1}|}{|\phi_p^n|} \right) > A \text{ となったとき } \Delta \tau_{n+1} = \gamma \Delta \tau_n \text{ として } n+1 \text{ ステップの計算を行なう。}$$

ここで  $A$  及び  $\gamma$  は与えられた正数である。ただし、下限  $\Delta \tau_{\text{low}}$  を設けておき、 $\Delta \tau_n < \Delta \tau_{\text{low}}$  となつた場合は  $\Delta \tau_n = \Delta \tau_{\text{low}}$  とする。

b)  $R < A$  となつたときは、 $\Delta \tau_{n+1} = \gamma^{-1} \Delta \tau_n$  として計算を行う。ここでも上限  $\Delta \tau_{\text{up}}$  を設けておき、 $\Delta \tau_n > \Delta \tau_{\text{up}}$  となつた場合は  $\Delta \tau_n = \Delta \tau_{\text{up}}$  とする。

#### (1) 試計算

時間刻み幅の自動決定機能の精度を検証するための計算を行なった。計算体系を図 2.3-9 に示す。図中の形状寸法は、第 3 章に後述する TRACY の寸法形状に相当する。熱計算の境界条件を図 2.3-10 に、計算格子を図 2.3-11 に示す。熱伝達を考慮した部分に関しては、熱伝達率を  $4.056 \times 10^4 \text{ erg/cm}^2/\text{sec}$  とし、外気温度  $22^\circ\text{C}$  一定とした。温度は図 2.3-10 の全域に関して解いた。流体の壁面に相当する部分（図 2.3-9 中の左右端部と底部）は non-slip 境界条件とし、上面は slip 境界条件とした。また、核計算は液体の部分のみを対象とし、中性子束の境界条件は、中性子束がゼロとなる体系表面から外側への距離として、体系内側で  $8.8\text{cm}$ 、外側で  $1.45\text{cm}$ 、上、下で  $5\text{cm}$  とした。先行核濃度の境界条件としては解析対象端部において法線方向微分 0 の条件とした。格子は全体で  $29 \times 30$  分割（870 セル）とした。底部の SUS は高さ方向に 5 分割し、外筒の SUS は 3 分割した。液位は、定常計算として溶液部高さ  $55\text{cm}$  の場合、約 80 セント相当の反応度を加えた場合として  $60\text{cm}$  の場合を設定した。

##### 1) 機能確認計算（液位 $55\text{cm}$ の場合）

流体とその他の物理量の時間刻みを同じとし、時間刻みを変更させた場合の計算を実施した。計算モデルの厳密解が未知のため、時間刻みを統一して計算を実施し、信頼可能な解を導くことが主眼の計算である。

液位  $55\text{cm}$  で時間刻みを  $0.001, 0.01, 0.1$  秒とした場合の出力の結果を図 2.3-12 に示す。初期条件として、各物理量の空間分布は一定とし、計算は 5 秒間実施した。ここでは定常に近い体系での計算を行なっている。初期の段階では出力の数値計算が収束途中にあるが、その後ほぼ一定の値に落ち着く。時間刻みの違いにより計算結果に大きな違いがあるが、時間刻みが大きいほど初期の急な物理量の変化を解像できていないことが、その理由として考えられる。すなわち

ち、時間刻みを小さくすることで、急峻な物理量の変化を捉えられることが精度に関して大きな影響を及ぼすといえる。

## 2) 追加した機能の確認計算（液位 55cm の場合）

液位 55cm で流体の時間刻みを 1 秒に固定し、その他の物理量に関する時間刻みを自動的に計算させた。本計算の狙いは、今回追加した機能によって物理量の変化が急峻な箇所は小さな時間刻みで、緩やかな箇所は大きな時間刻みで計算することにより、計算精度を維持しながら全体の計算時間を短縮できることの確認にある。

### a) 時間刻みの影響を考慮した閾値( $\alpha \Delta t$ )を用いた場合

本計算では、時間刻み  $\Delta t$  の制御として、閾値( $\alpha \Delta t$ )を時間刻み幅  $\Delta t$  を制御する指標として下記を用いた。

$$\frac{|\xi^{n+1} - \xi^n|}{|\xi^n|} \leq \alpha \Delta t \text{ の場合に } \Delta t^{n+1} = 1.25 \Delta t^n$$

$$\frac{|\xi^{n+1} - \xi^n|}{|\xi^n|} > \alpha \Delta t \text{ の場合に } \Delta t^{n+1} = 0.25 \Delta t^n$$

ここで、 $\xi$  は中性子束、遅発中性子先行核濃度及び温度を表わす。

$\Delta t$  の最小値は  $10^{-4}$  秒とし、流体以外の物理量の時間刻みの初期値は  $10^{-4}$  秒とした。

図 2.3-13 に  $\alpha$  を 0.1、1.0、10 に変化させた場合の出力の計算結果を、すべての時間刻みを 0.001 秒とした場合の結果と合わせて示す。

係数  $\alpha$  が 0.1, 1.0 の場合には時間刻み 0.001 秒の結果に近く、精度は良好と言える。 $\alpha$  が 10.0 の場合には、初期の急な変化を解像しきれていないが、0.5 秒の時点の値についてはほぼ同様の値となっている。

時間刻みの初期値が計算に与える影響を確認するために、時間刻み一定の 0.001 秒とした場合の計算、流体以外の物理量の時間刻みの初期値  $10^{-4}$  秒での計算、 $10^{-3}$  秒での計算を実施した。その結果を図 2.3-14 に示す。図 2.3-14 から初期の時間刻みの影響はないといえる。

図 2.3-15 に時間刻みの初期値  $10^{-4}$  秒の場合の時間刻み変化を示すが、初期は時間刻みの下限を推移しているのがわかる。すなわち、時間刻みの初期値が最小値よりも大きな場合には、自動時間刻み計算機能によって安定に計算がなされる値に時間刻みが変更される。時間刻みの制御について、閾値を時間刻みの関数とする方法は一見正常に動作しているように見えるが、図 2.3-15 の結果から、時間刻みが大きくなった場合には閾値も大きくなり、時間刻みの調整感度も低下する。従って、時間刻みが大きくなるほど、物理量の変化が大きくなないと時間刻みが調整されないことになる。

### b) 時間刻みの影響を考慮しない閾値( $\alpha$ )を用いた場合

時間刻みの制御として以下の式を用いた場合の結果を図 2.3-16 に示す。グラフはその  $\alpha$  を 0.0001, 0.001, 0.01 に変化させた場合の結果である。

$$\frac{|\xi^{n+1} - \xi^n|}{|\xi^n|} \leq \alpha \text{ の場合に } \Delta t^{n+1} = 1.25 \Delta t^n$$

$$\frac{|\xi^{n+1} - \xi^n|}{|\xi^n|} > \alpha \text{ の場合に } \Delta t^{n+1} = 0.25 \Delta t^n$$

$\Delta t$  の最小値として  $10^{-4}$  秒とし、流体以外の物理量の時間刻みの初期値を  $10^{-4}$  秒とした。

$\alpha$  が 0.0001 の場合の計算では時間刻みが下限値の  $10^{-4}$  秒以上になることはほとんどなく、実質時間刻み  $10^{-4}$  秒の計算に相当する。 $\alpha$  が 0.001 の計算では図 2.3-17 のように時間刻みが細かく振動しながら推移するが、概ね出力他の物理量の推移に応じた時間刻みとなる。 $\alpha = 0.01$  では物理量の変化がなだらかな部分ではほぼ時間刻みの上限値である  $10^{-2}$  秒で推移するが、時間刻みの増加が急峻であるため、精度が低下している。

以上の結果から判断すると、時間刻みの制御に関しては、時間刻みを考慮した閾値  $\alpha \Delta t$  の値を用いるよりも一定値  $\alpha$  を用い、かつその値は  $10^{-3}$  秒以下が望ましいと考えられる。

### 3) 追加した機能の確認計算（液位 60cm）

液位を 60cm とした計算を行った。基本的な条件は液位 55cm の場合と同様である。時間刻みの制御には前記 2) の結果に基づき、 $\alpha$  として一定の値を用いる方法を採用した。図 2.3-18 に出力の結果を示す。図には  $\alpha$  が 0.0001, 0.001, 0.01 の結果を示す。 $\alpha$  が 0.0001, 0.001 では類似した傾向を示すが、 $\alpha$  が 0.01 では出力が非常に小さく評価される結果となった。液位 55cm の場合、 $\alpha$  が 0.01 では  $\alpha = 0.0001, 0.001$  の場合とそれほど乖離した結果ではないが、出力の変化が急峻で、かつ絶対値が大きくなる場合にはその誤差が顕著に表れたと考えられる。

平均温度及び最高温度の推移をそれぞれ図 2.3-19 及び図 2.3-20 に示すが、出力変化と同様に  $\alpha$  が 0.01 の場合には誤差が大きい結果となった。時間刻みの変化については、図 2.3-21 に示すように、時間刻みの制御に関しては、時間刻み等の値を用いるよりも一定値を用い、かつその値は 0.001 以下が望ましいと考えられる。

図 2.3-22 から図 2.3-33 に C1 分布、 $\phi$  分布、温度分布、速度ベクトルを示す。 $\alpha = 0.01$  の場合には計算精度が不充分なため、見かけ上温度上昇が小さい結果となり、浮力による流動が発達しておらず、移流の影響を受ける温度及び C1 の分布は  $\phi$  の分布と同様である。それに対して  $\alpha$  が 0.0001, 0.001 の場合の C1 及び温度の分布は移流の影響を受けた結果となっている。

### 4) 流体の時間刻みの影響

$\alpha$  値を 0.001 とし、流体の計算時間刻みを 0.01 秒、0.1 秒、1.0 秒に固定した場合の出力及び温度変化を図 2.3-34 から図 2.3-36 に示す。また、10 秒時点での C1、中性子束、温度及び速度の分布を順に図 2.3-37 から図 2.3-40 に示す。出力に関しては流体の時間刻みの影響は殆どないと考えられる。温度に関しても、流体の時間刻みが 1 秒以下であれば問題ない範囲で計算できると考えられる。また、過渡出力が静定した後は、流体の移動速度が大幅に低下し、これに応じて

流体の時間刻みを大きくすることが可能と考えられる。

### 5) 時間積分方法による影響

本計算法では核に関する支配方程式の時間積分方法として1次精度の陰解法を採用している。ここでは陽解法としての時間積分方法が計算時間と計算の安定性、精度に与える影響について検討し、本計算法と比較した。今回、時間積分方法を4段階4次のルンゲ・クッタ法に変更して試算を行った。計算条件としては基本条件は前述のものと同じで、液位は60 cm とし5秒までの計算を流体の時間刻みを1秒、その他を自動時間刻みで実施した。 $\alpha$ は0.01とした。

図2.3-41に出力の時間変化を陰解法を用いた場合の結果( $\alpha=0.0001, 0.001$ )と合わせて示す。陰解法の結果から類推すると、ルンゲ・クッタ法の結果はより高精度と考えられるが、5秒までの計算に対して Pentium4(1.5GHz)の PC を用いて約 6.5 時間を要し、陰解法では Pentium3(0.8GHz)の PC で約 0.5 時間以下であった。その理由としては、ルンゲ・クッタ法は基本的には陽解法であり、時間刻みに関しては陰解法よりも小さくとる必要があることが挙げられる。ルンゲ・クッタ法による計算の時間刻みは概ね  $10^{-7}$  から  $10^{-6}$  秒であり、陰解法の 100 倍から 1000 倍小さくとらなければ安定しなかった。短時間レンジの計算を行う場合には本方法は非常に高精度と考えられるが、長時間レンジの計算を行う場合には実用的なレベルとは言い難い。

以上の結果を整理すると下記のことが言える。

- ① 制御に時間刻みの影響を考慮した閾値( $\alpha \Delta t$ )を用いることは精度上避けるべきである。
- ② 閾値  $\alpha$  の値によらず計算は安定的に実行されるが、計算精度は大きく異なる。今回実施した条件の範囲では、閾値  $\alpha$  として 0.0001 から 0.001 の範囲であれば、ほぼ妥当な結果が得られると考えられる。
- ③ 流体の時間刻みとしては過渡時でも 1 秒程度以下であれば問題がないと考えられる。
- ④ 時間積分方法として陽的な方法では、時間刻みを小さくとる必要があり、計算時間を要するため実用的ではない。計算精度を大きく損なわずに計算時間を短縮する観点から、本計算法で用いる1次精度の陰解法の方が、より好適と考えられる。

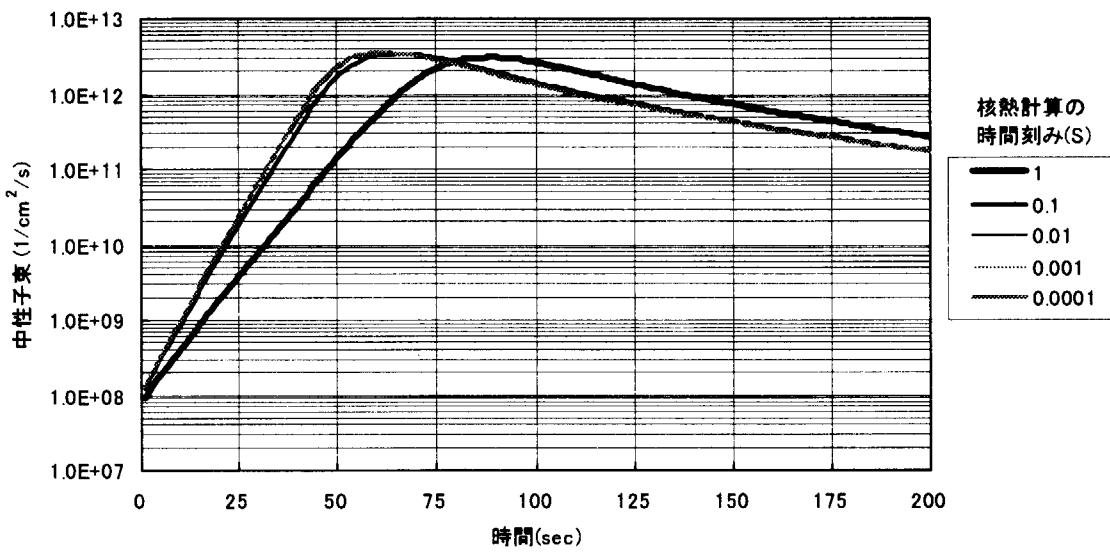


図 2.3-1 中性子束の時間変化 (セル (3, 3))  
(流動計算の時間刻みは 1 秒に固定)

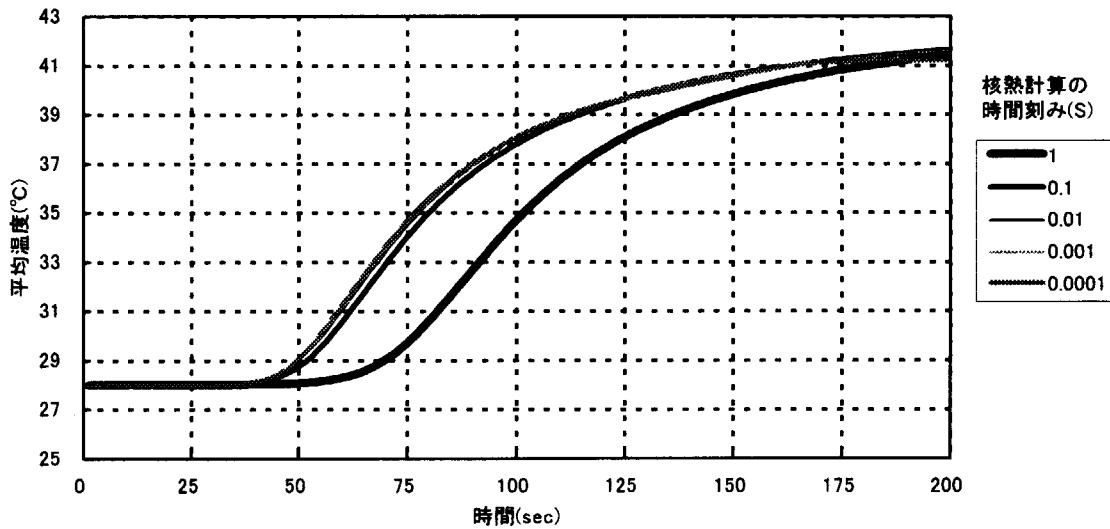


図 2.3-2 平均温度の時間変化  
(流動計算の時間刻みは 1 秒に固定)

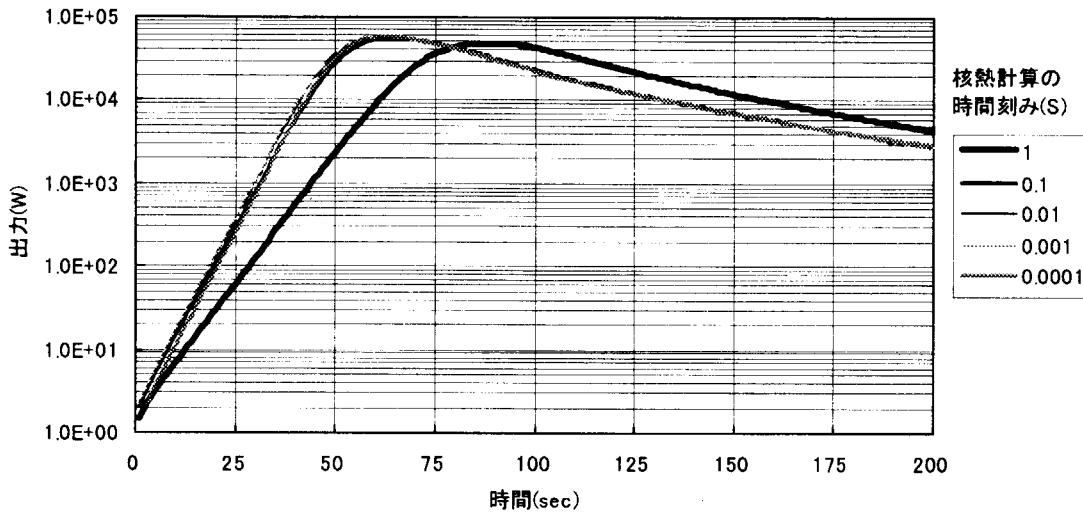


図 2.3・3 出力の時間変化（セル（3，3））  
(流動計算の時間刻みは1秒に固定)

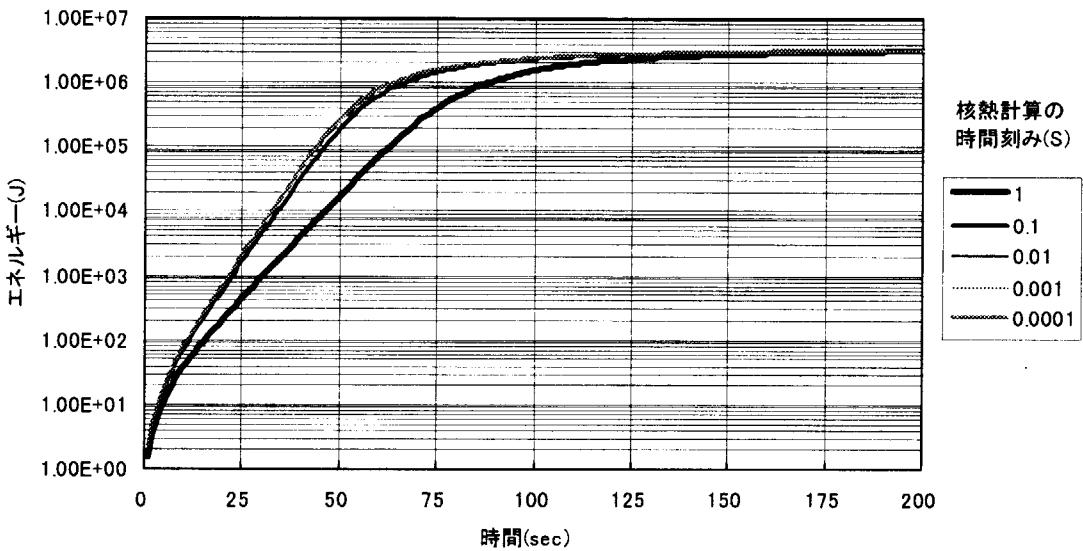


図 2.3・4 積算出力の時間変化（セル（3，3））  
(流動計算の時間刻みは1秒に固定)

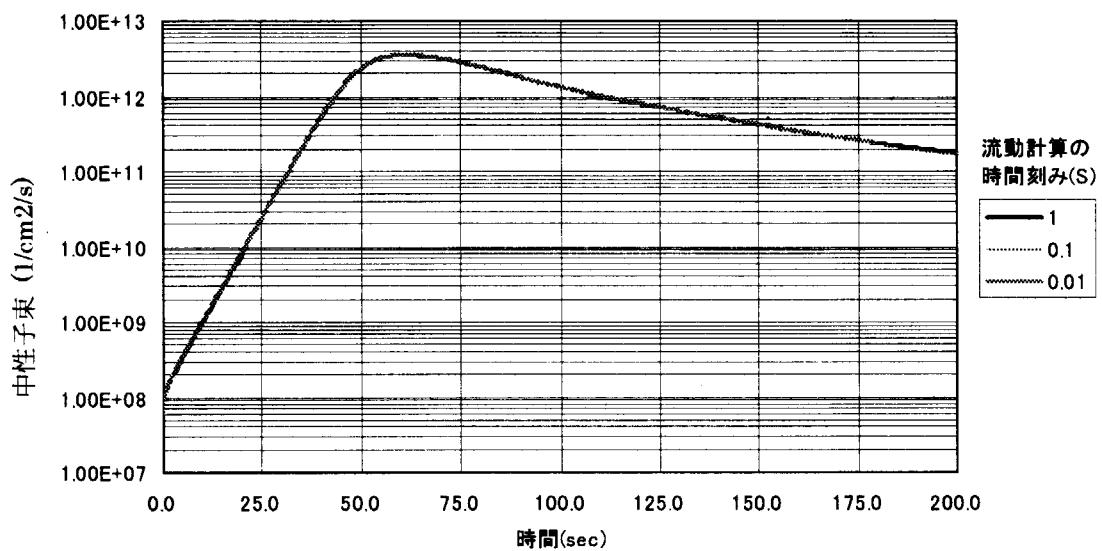


図 2.3-5 中性子束  $\phi$  の時間変化 (セル (3, 3))  
(核熱計算の時間刻みは 0.0001 秒に固定)

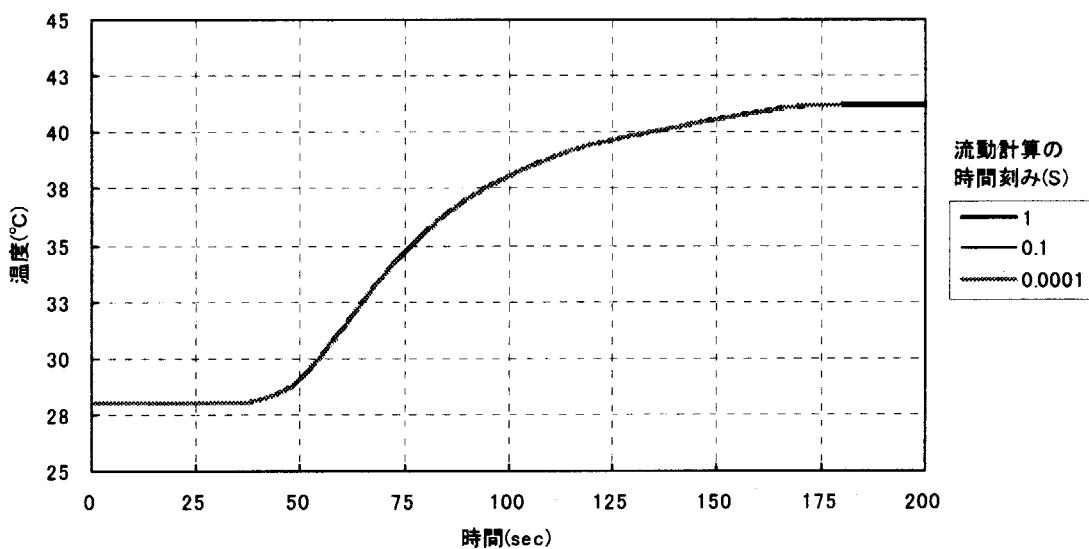


図 2.3-6 平均温度の時間変化

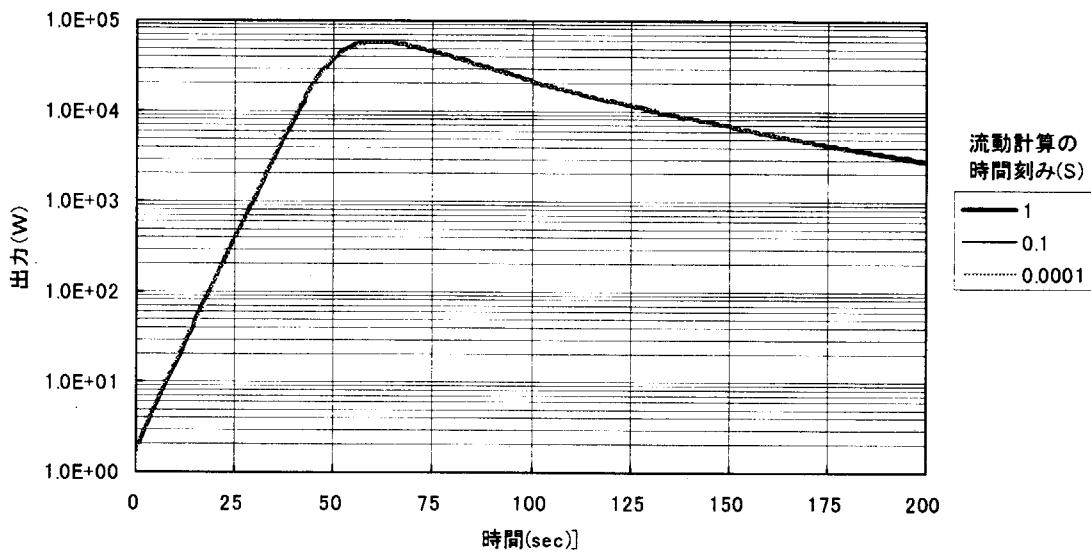


図 2.3-7 出力の時間変化 (セル (3, 3))

(核熱計算の時間刻みは 0.0001 秒に固定)

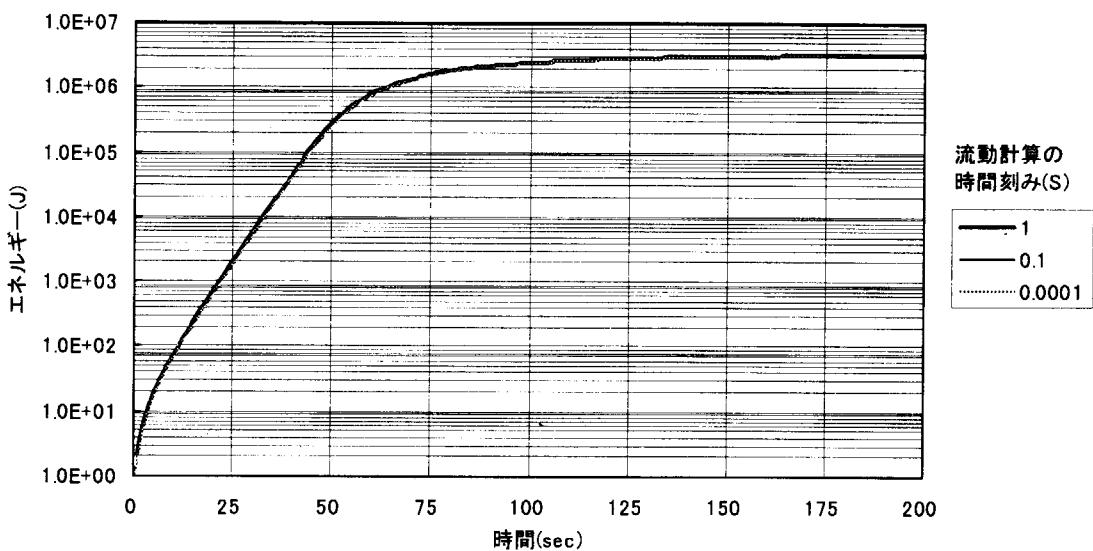


図 2.3-8 積算出力の時間変化 (セル (3, 3))

(核熱計算の時間刻みは 0.0001 秒に固定)

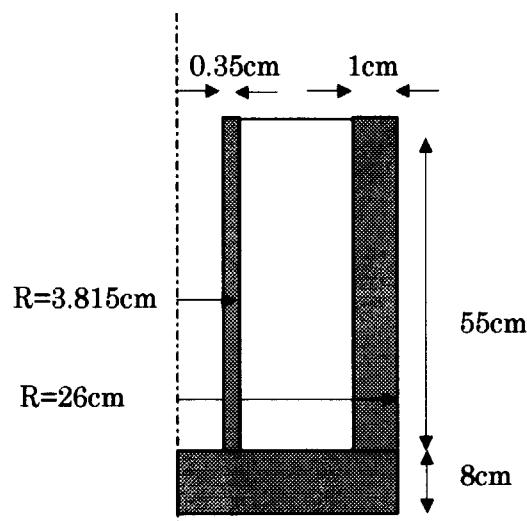


図 2.3-9 解析体系

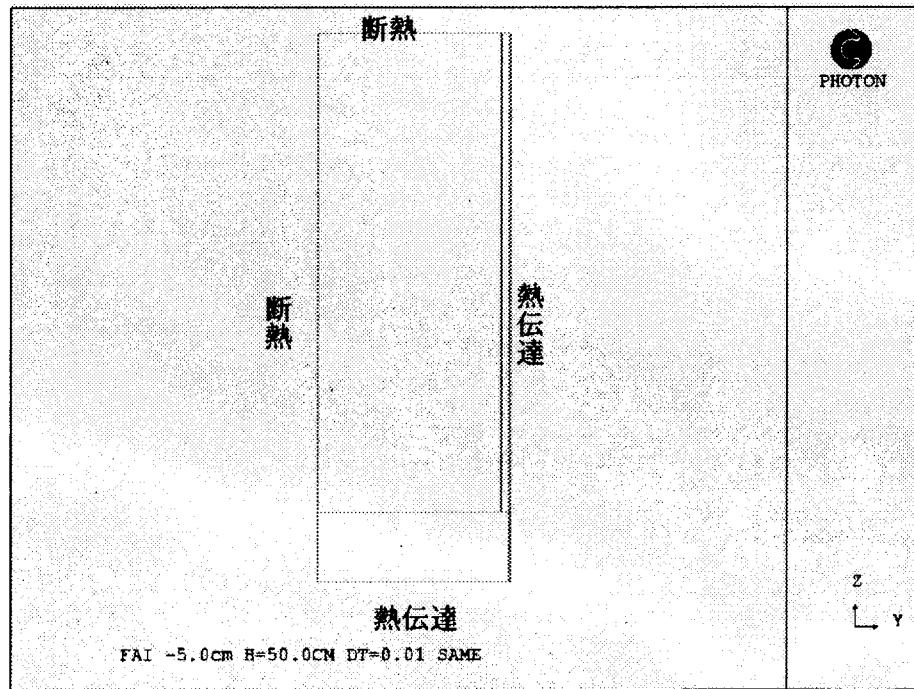


図 2.3-10 热境界条件

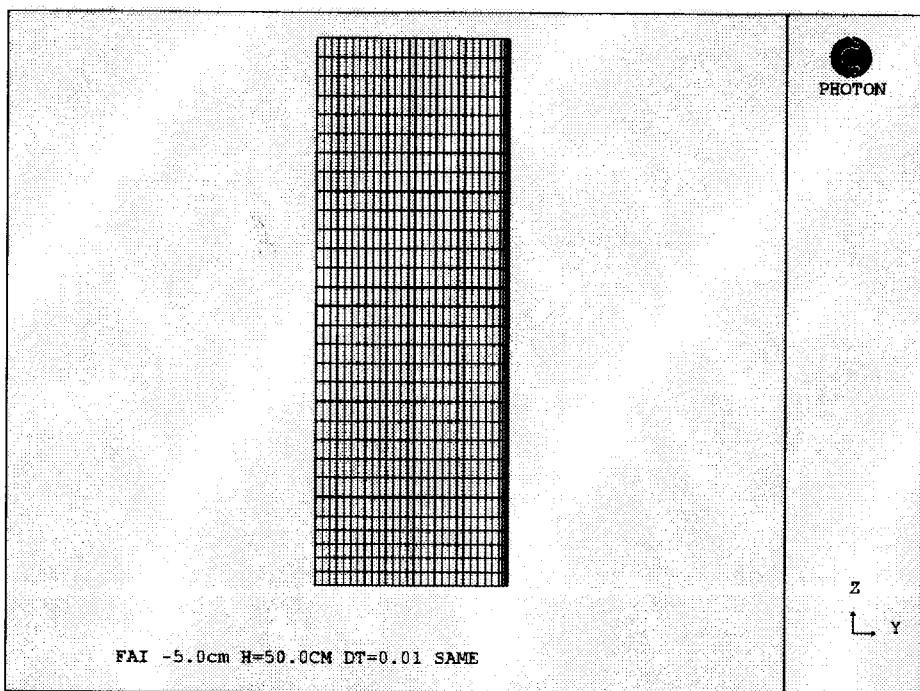


図 2.3-11 計算格子

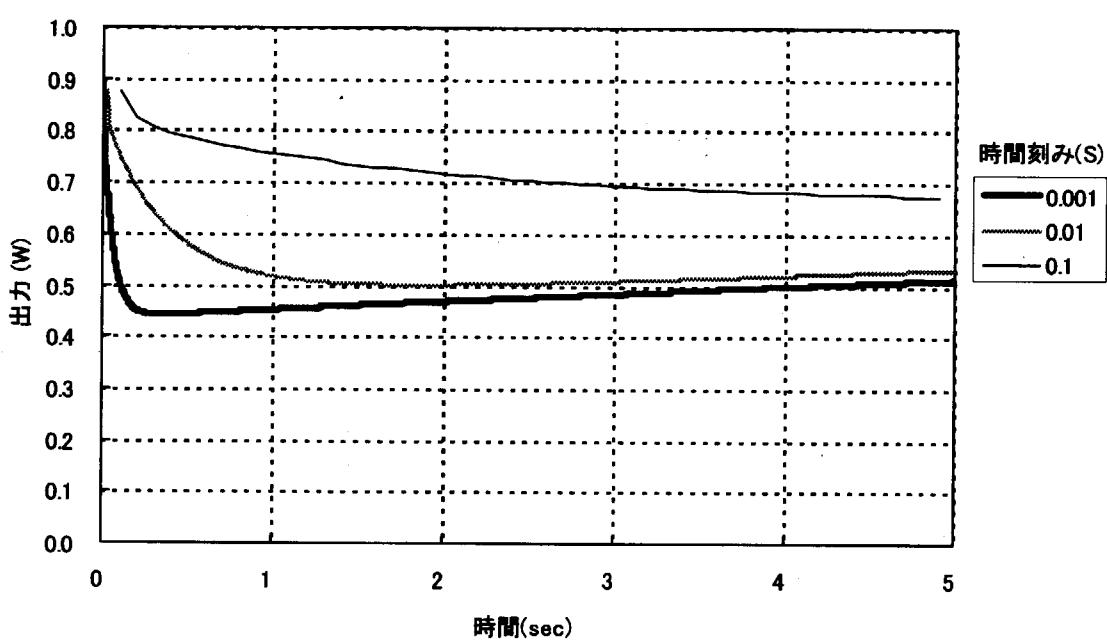


図 2.3-12 時間刻みを一定とした場合の出力変化

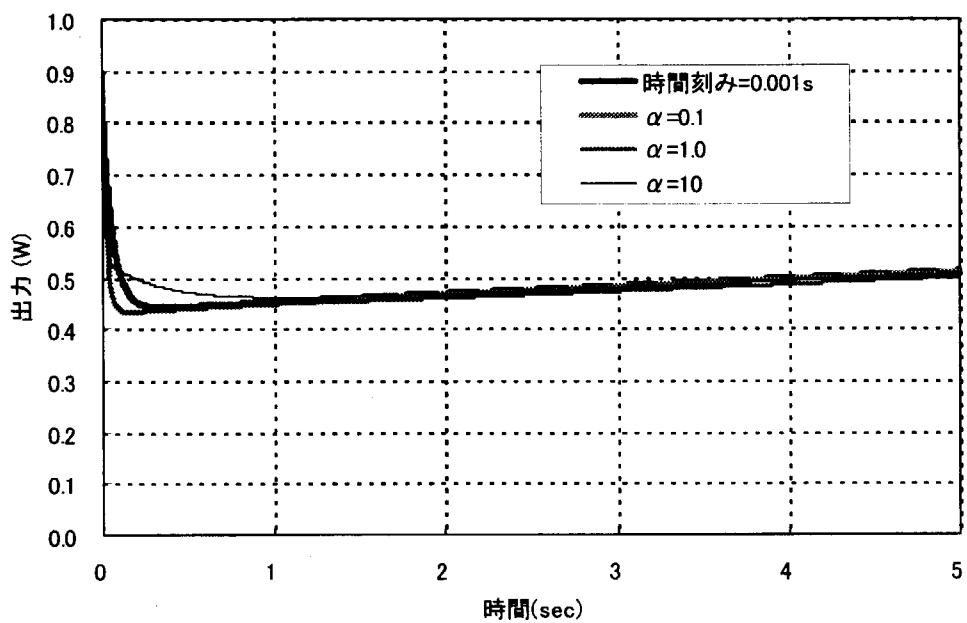


図 2.3-13 時間刻みを自動調整した場合の出力変化

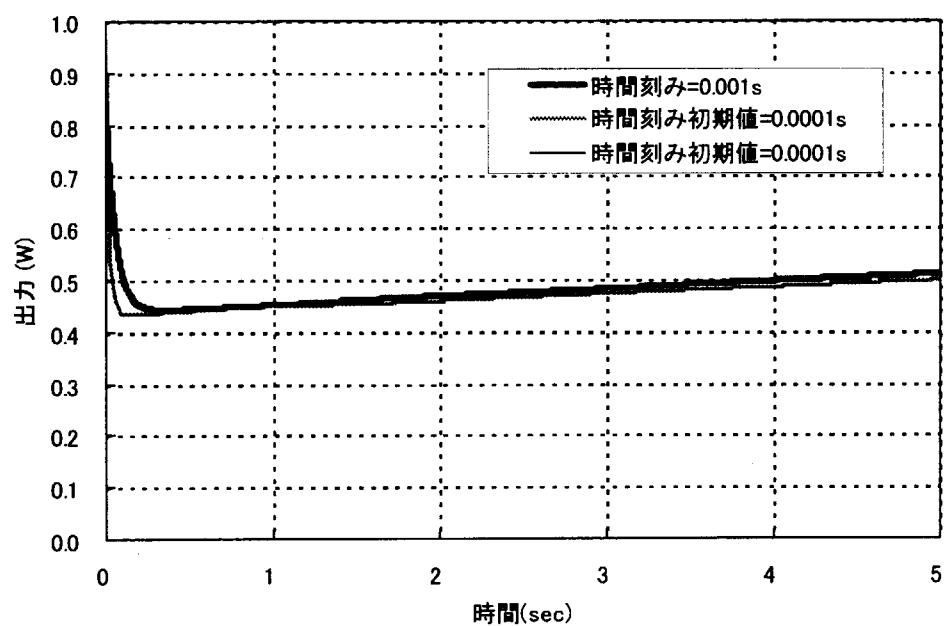


図 2.3-14 時間刻みの初期値が計算に与える影響

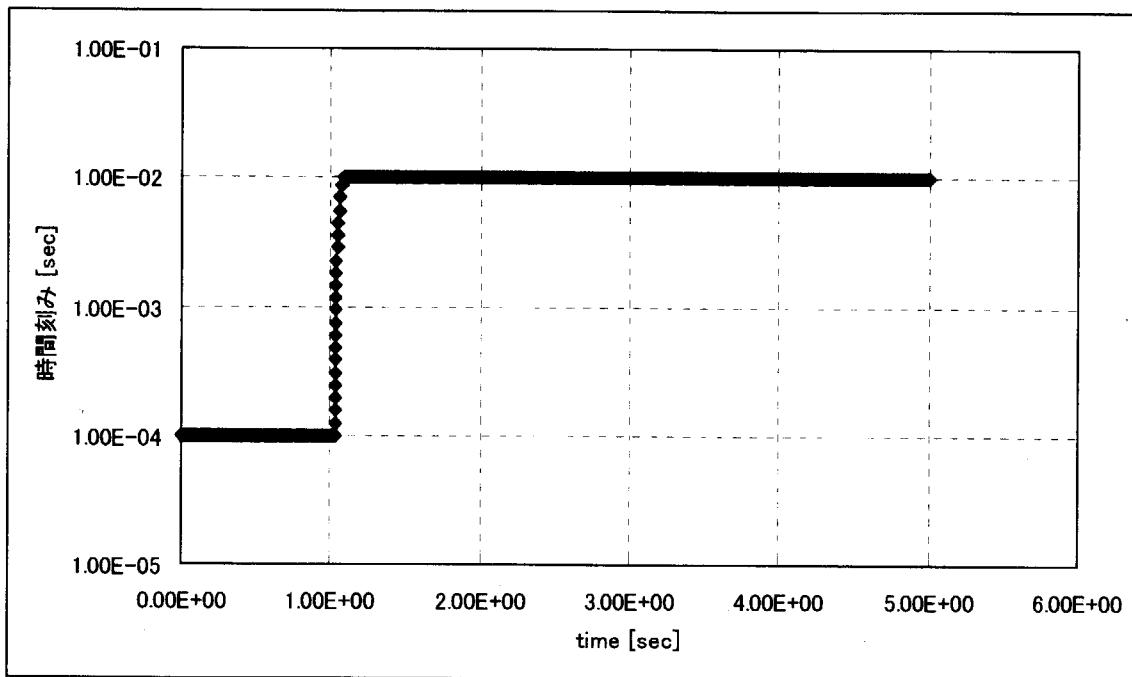


図 2.3-15 時間刻み変化

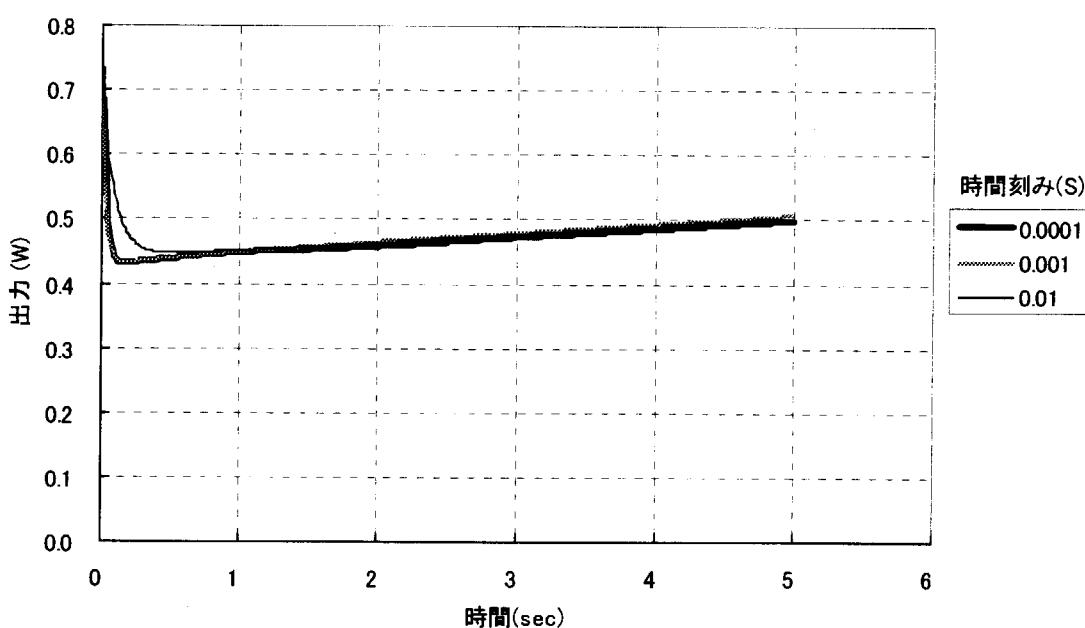


図 2.3-16 時間刻みの初期値が計算に与える影響 2

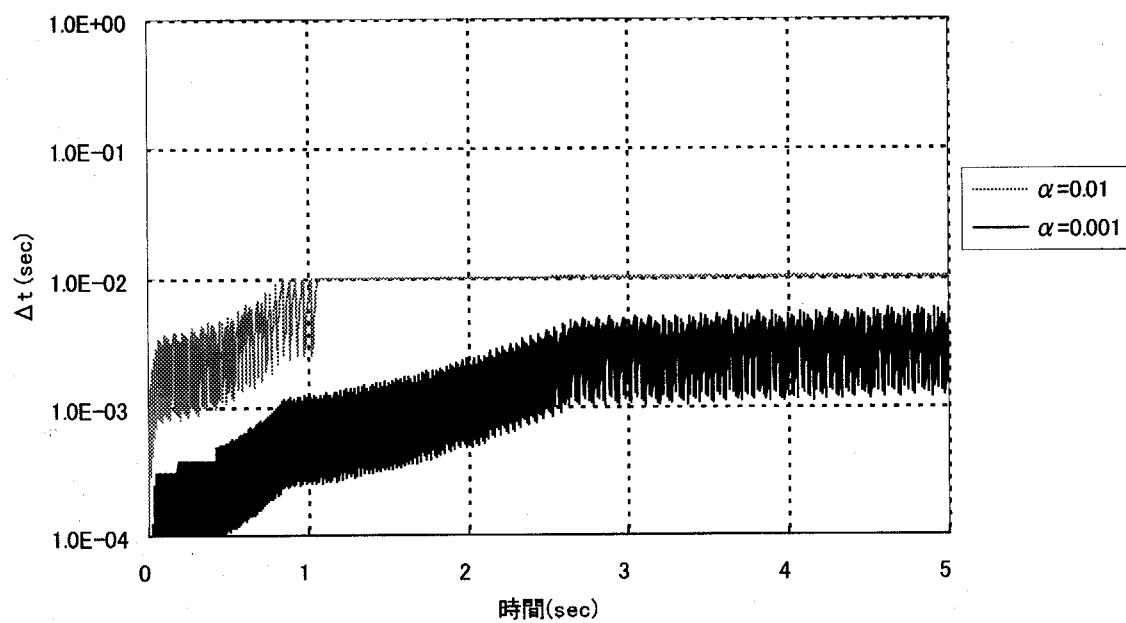


図 2.3-17 時間刻み変化

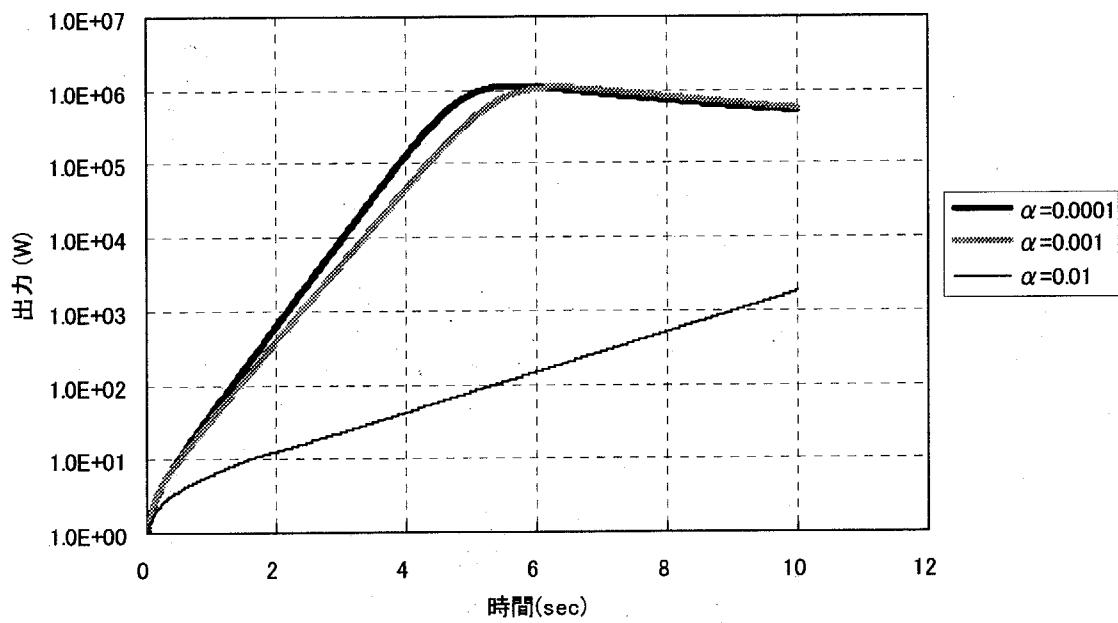


図 2.3-18 出力変化

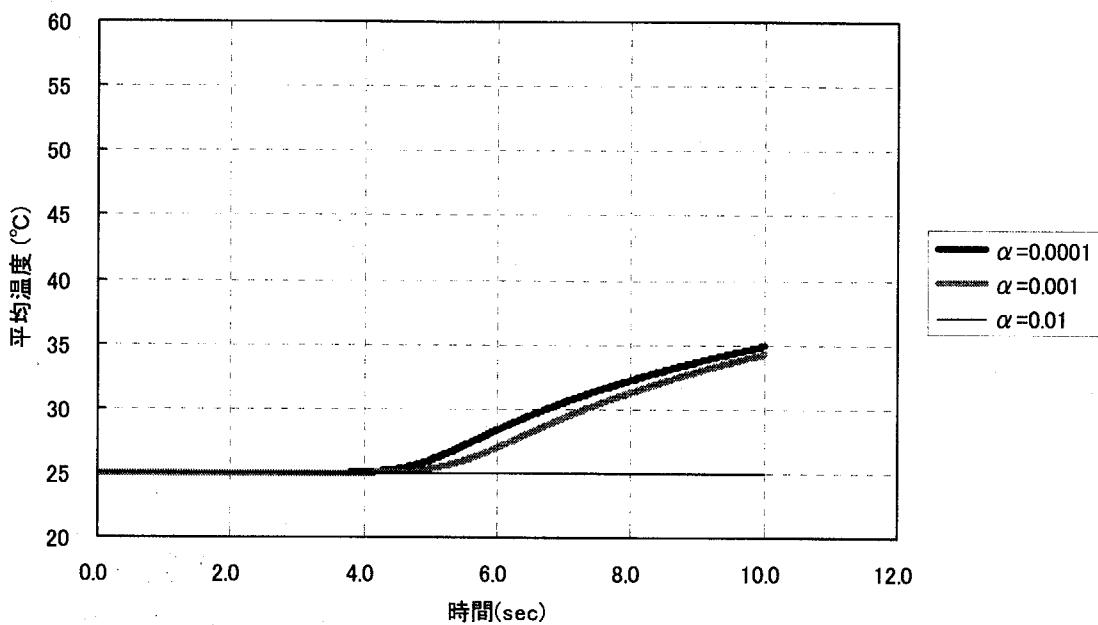


図 2.3-19 平均温度変化

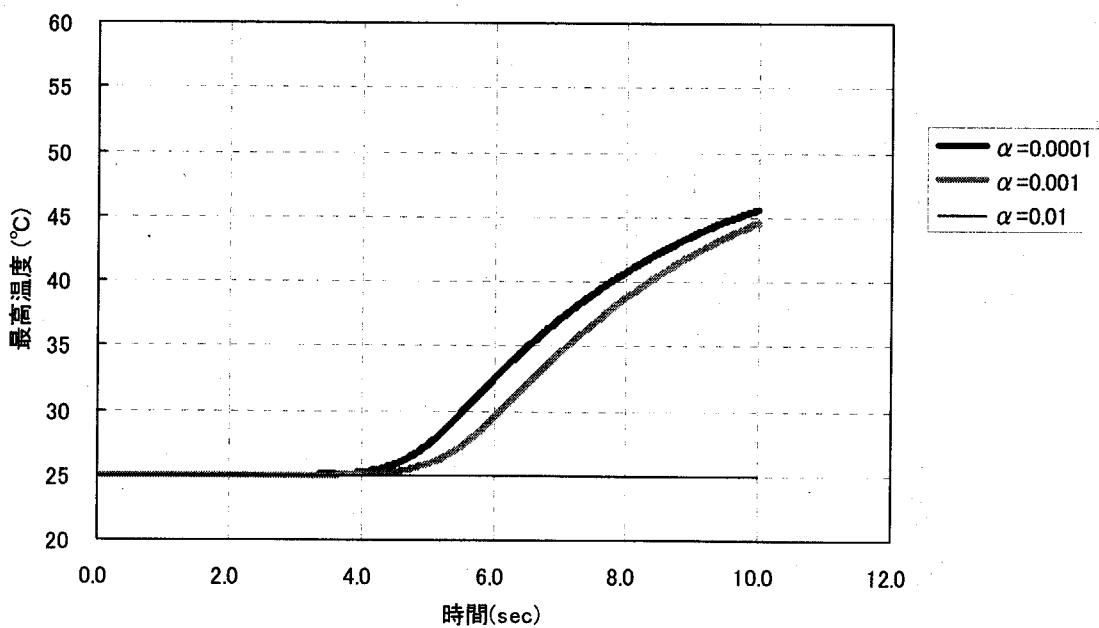


図 2.3-20 最高温度変化

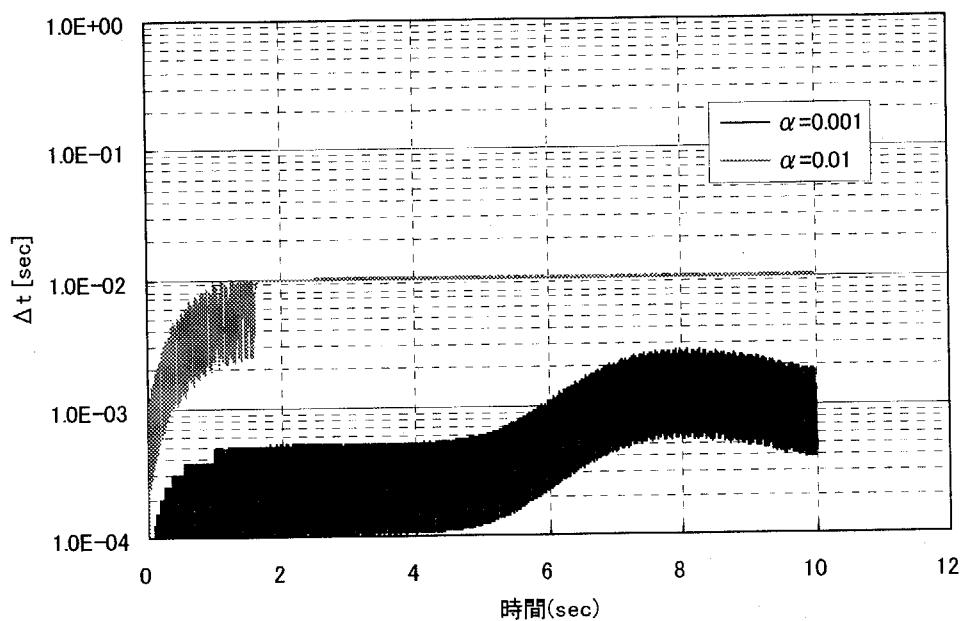
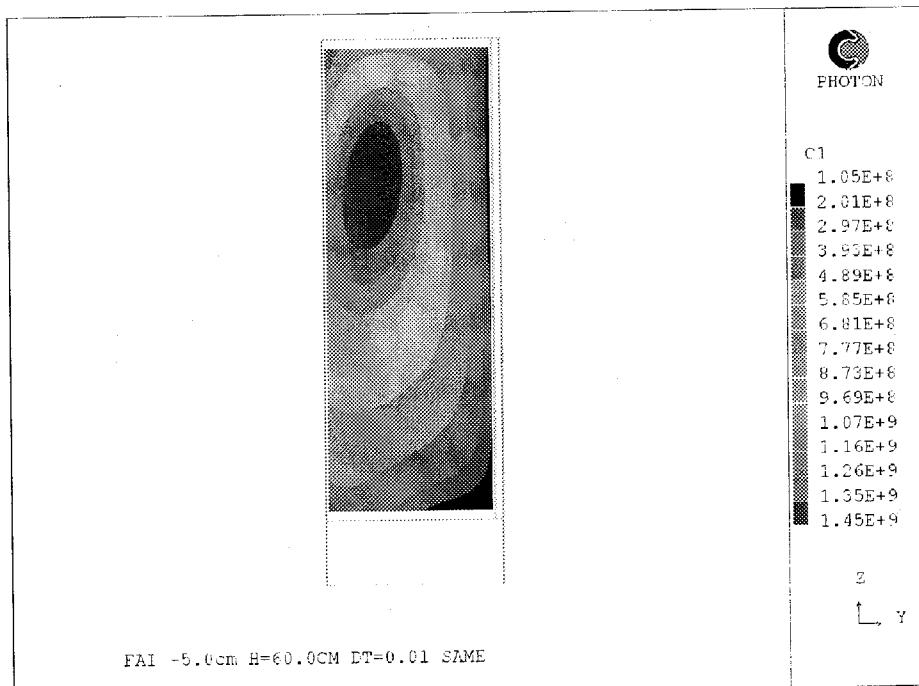
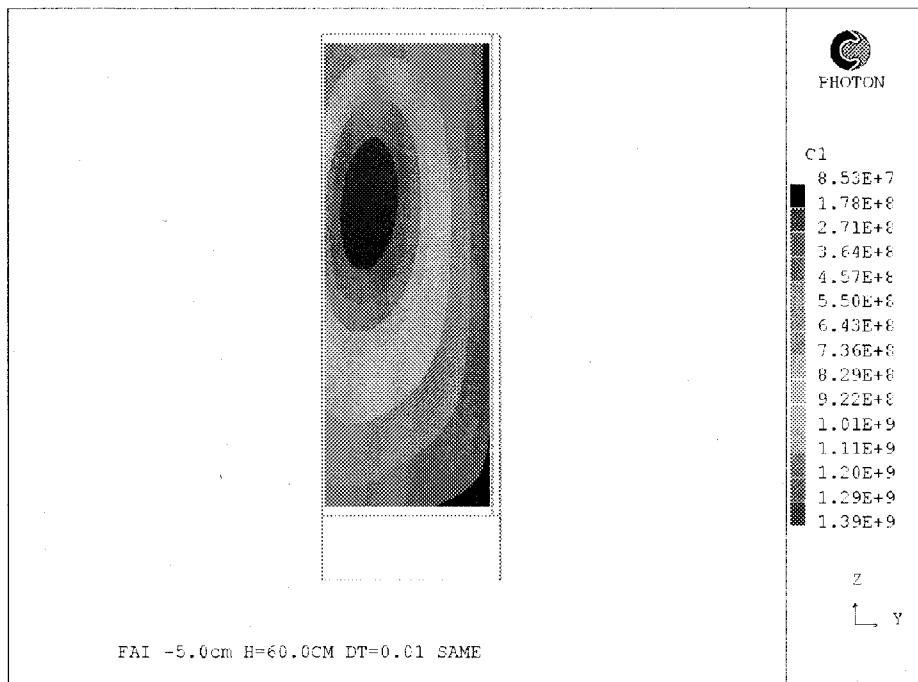
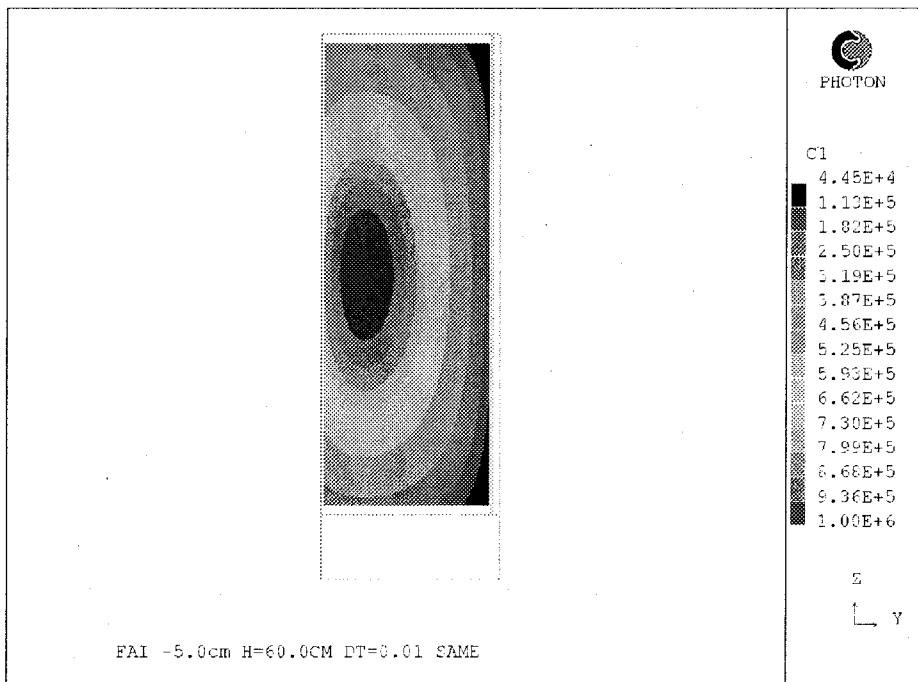


図 2.3-21 時間刻み変化

図 2.3-22 C1 分布 ( $\alpha=0.0001$ 、10秒後)

図 2.3-23 C1 分布 ( $\alpha=0.001$ 、10秒後)図 2.3-24 C1 分布 ( $\alpha=0.01$ 、10秒後)

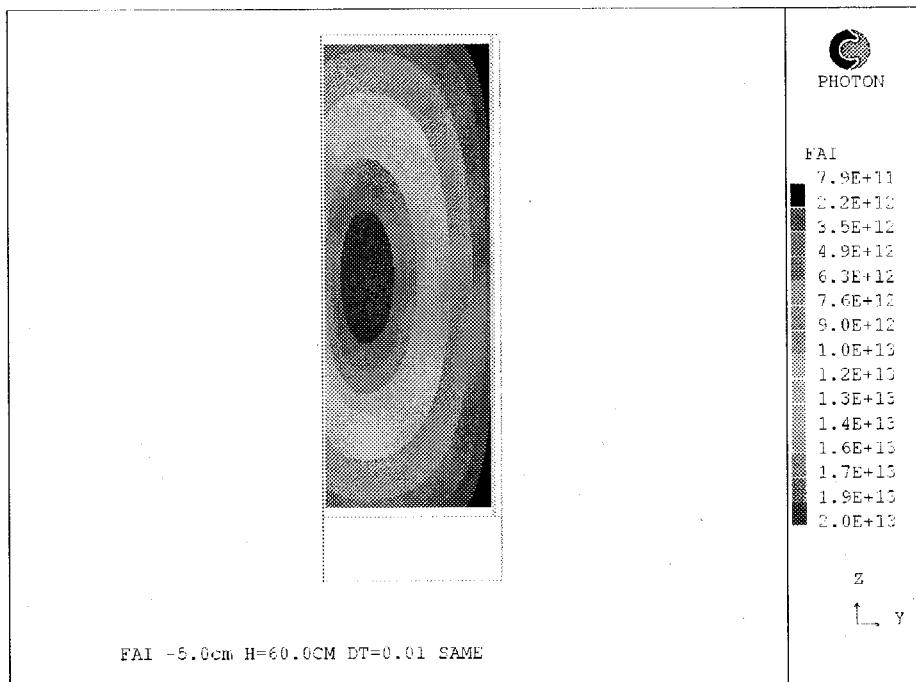


図 2.3-25 中性子束分布 ( $\alpha=0.0001$ 、10秒後)

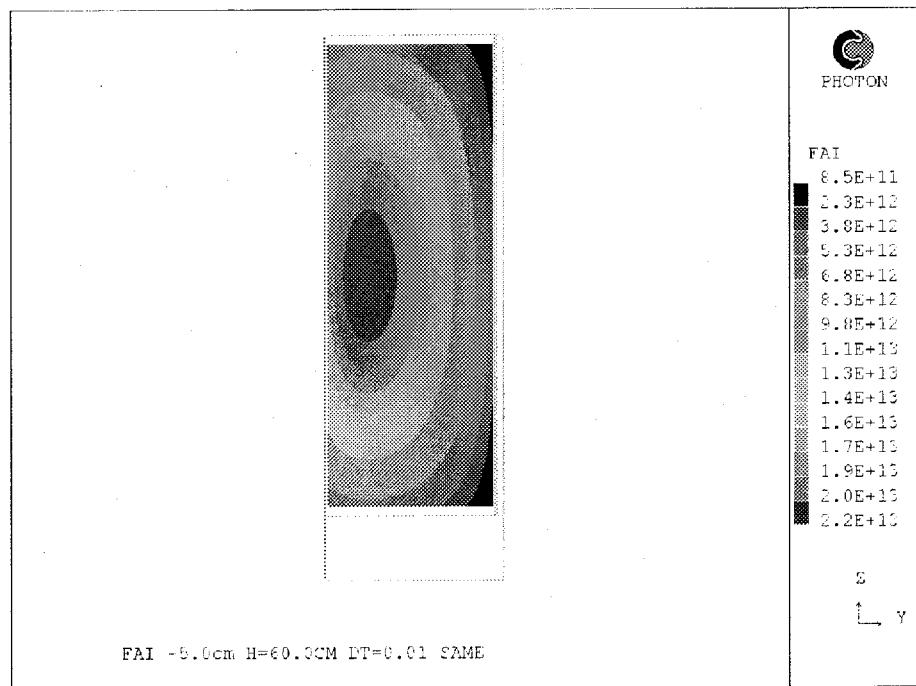
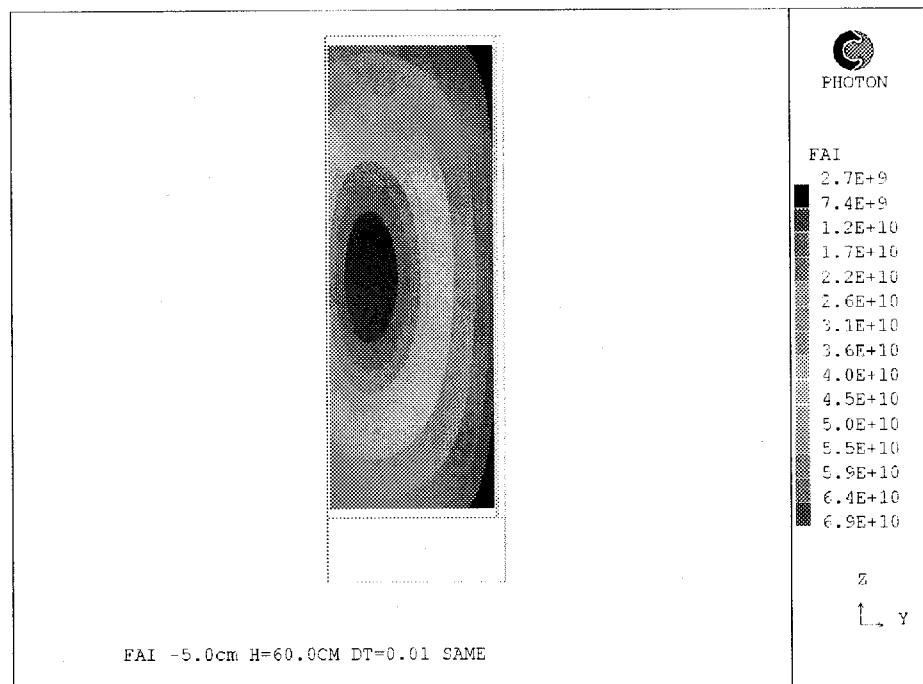
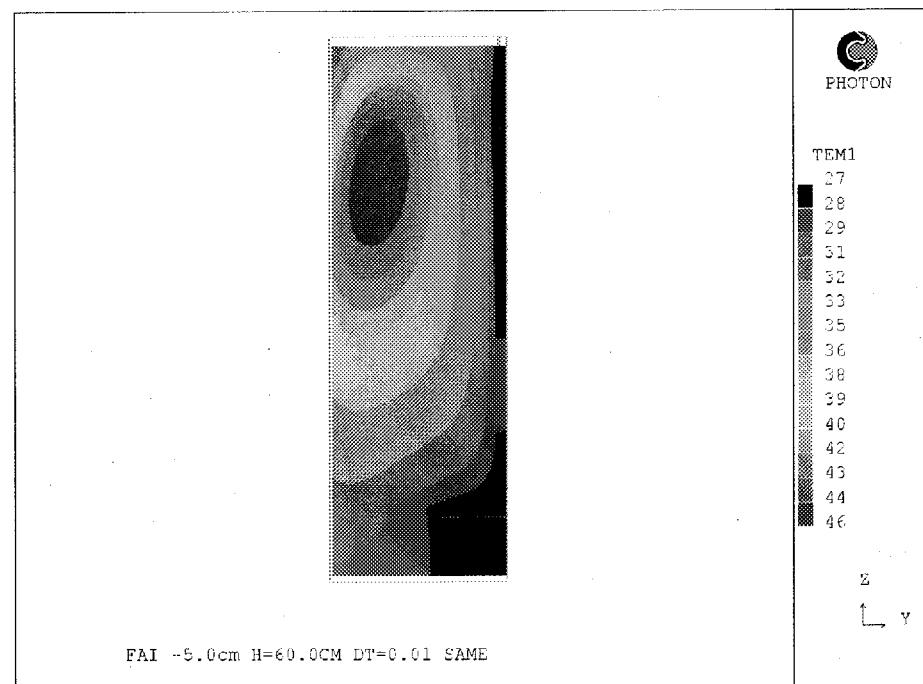


図 2.3-26 中性子束分布 ( $\alpha=0.001$ 、10秒後)

図 2.3-27 中性子束分布 ( $\alpha=0.01$ 、10秒後)図 2.3-28 温度分布 ( $\alpha=0.0001$ 、10秒後)

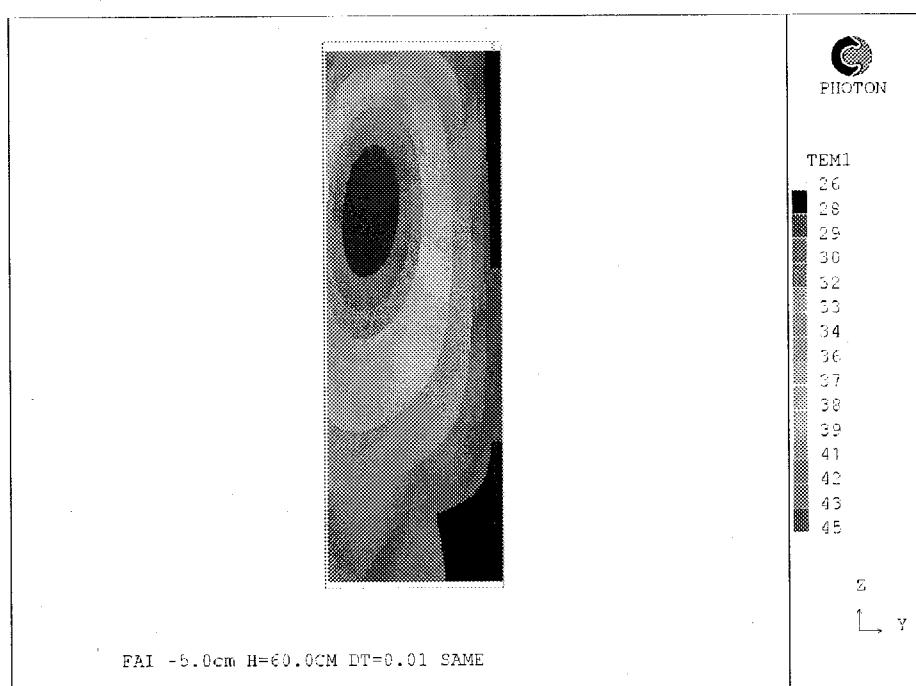


図 2.3-29 溫度分布 ( $\alpha=0.001$ 、10秒後)

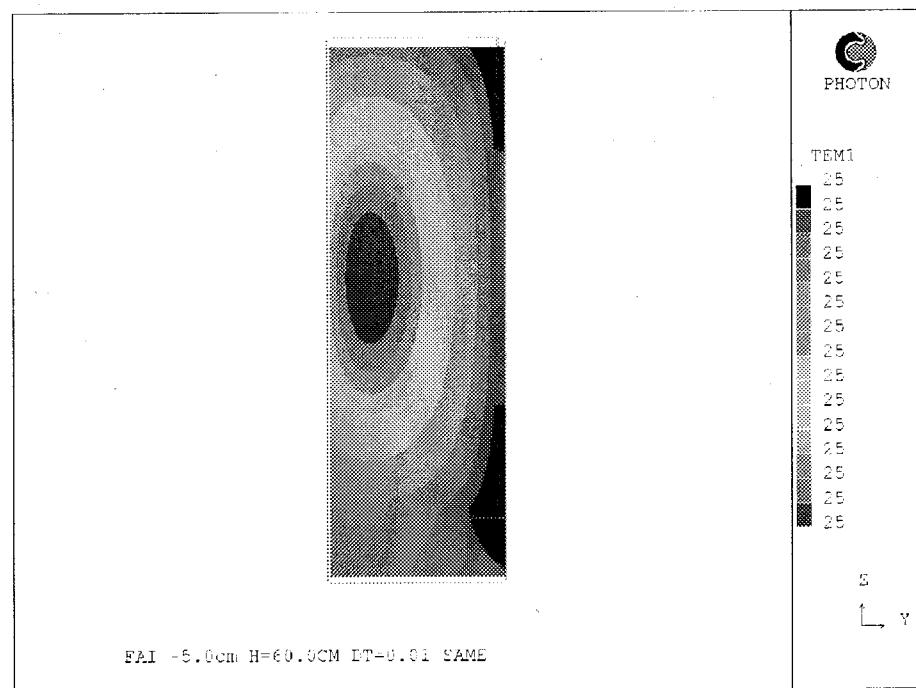
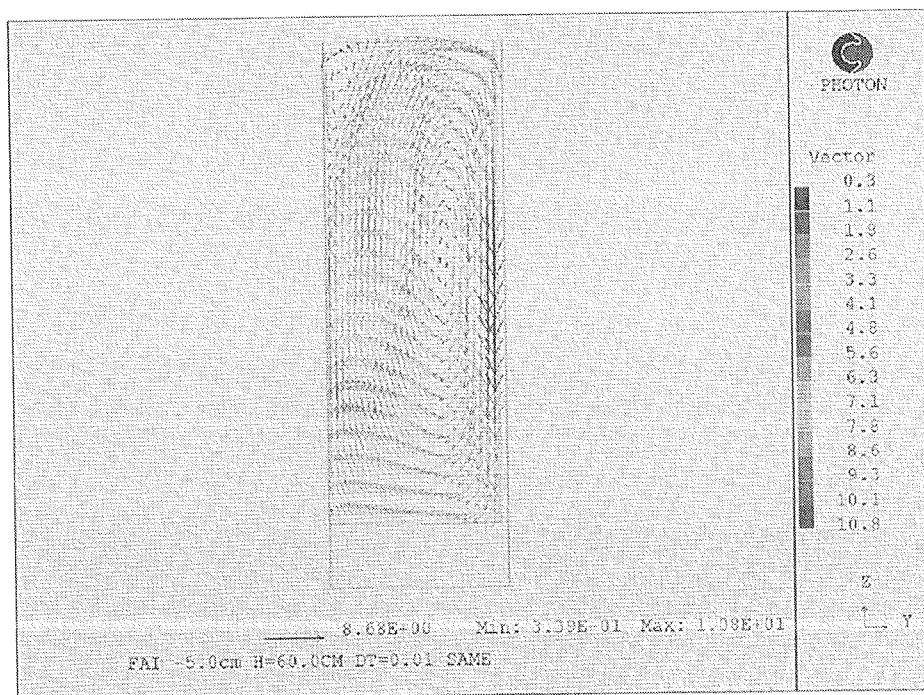
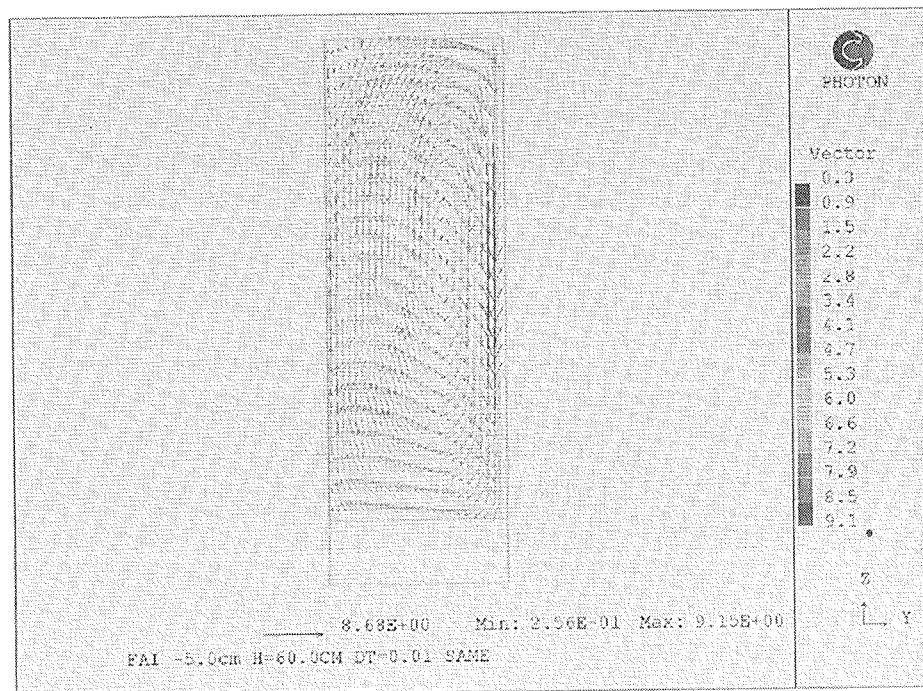
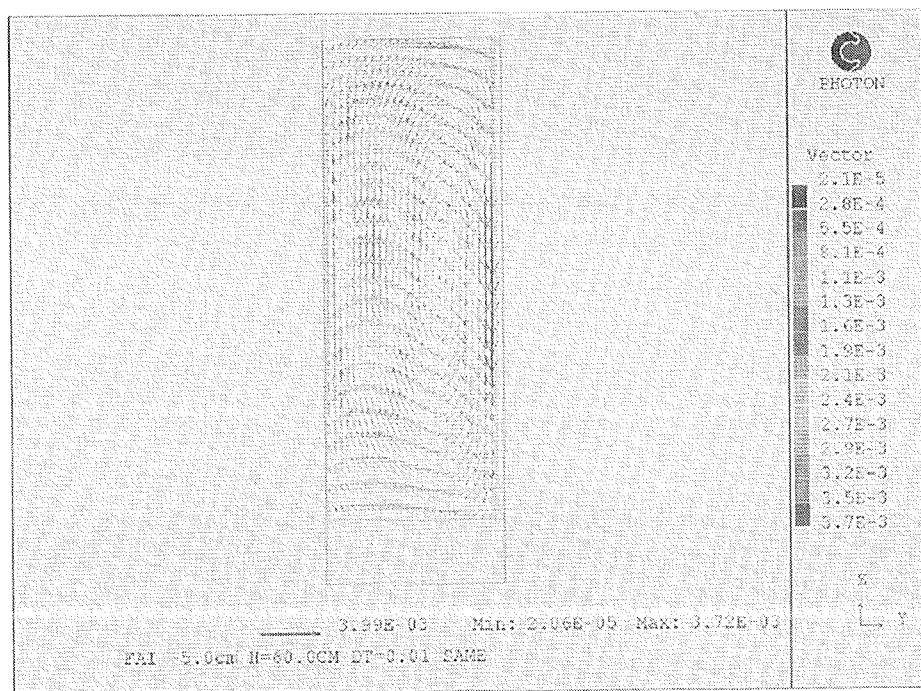
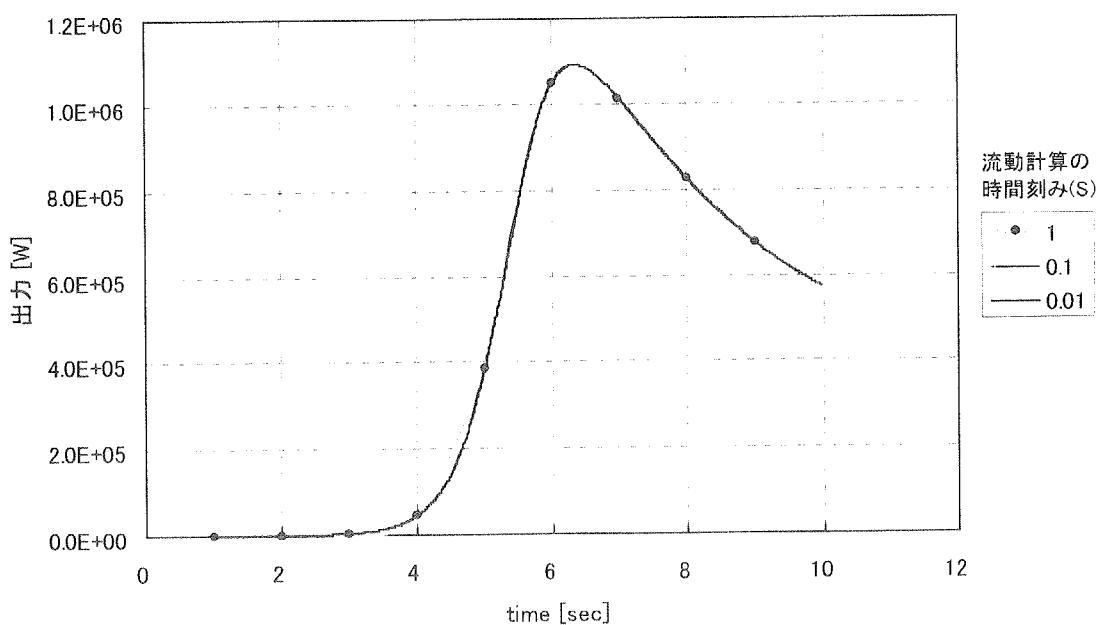


図 2.3-30 溫度分布 ( $\alpha=0.01$ 、10秒後)

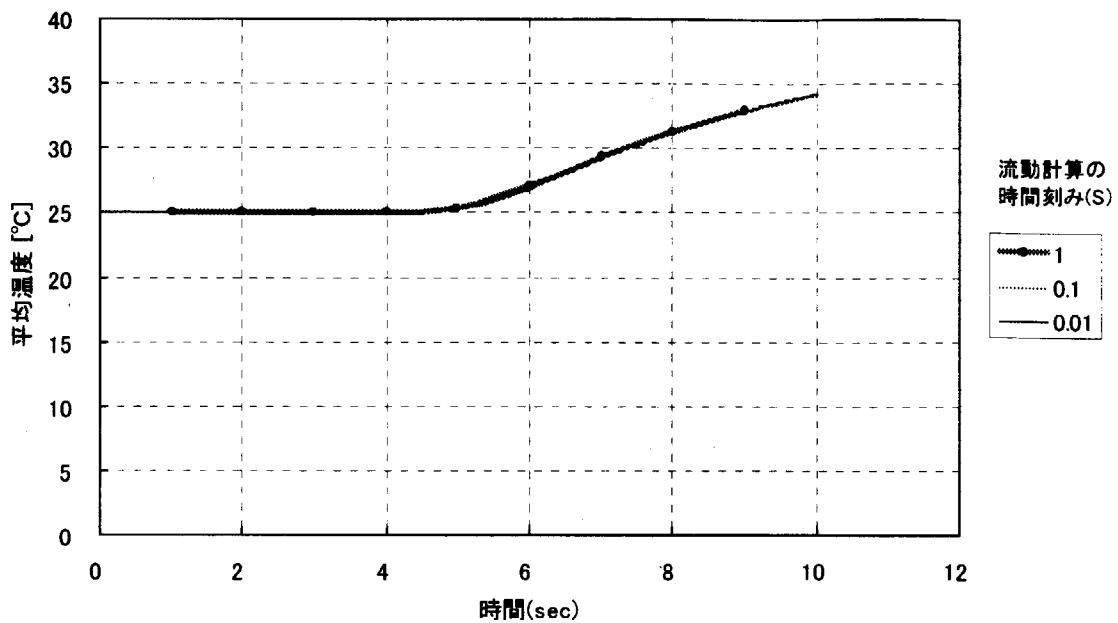
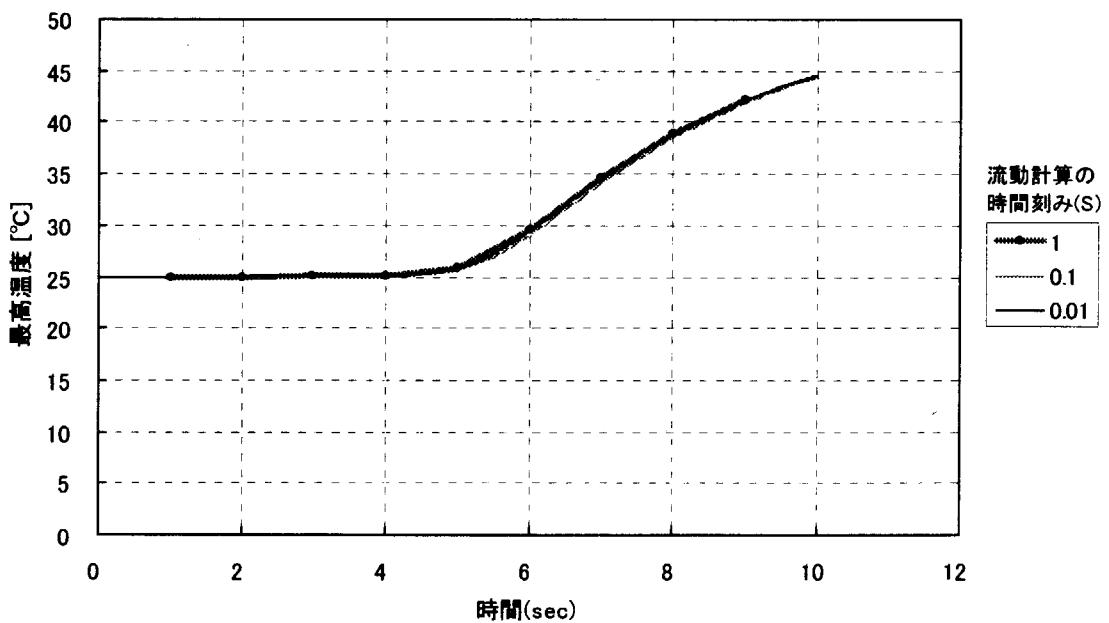
**This is a blank page.**

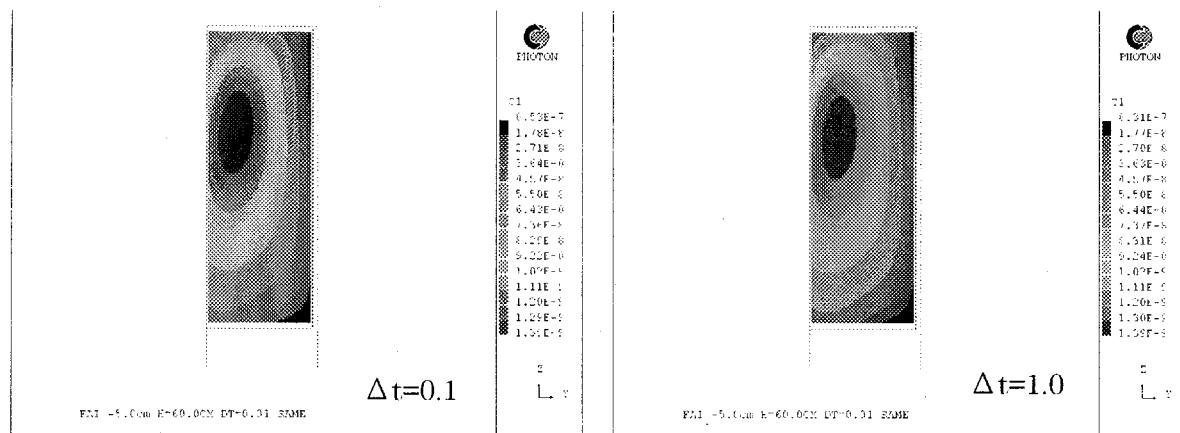
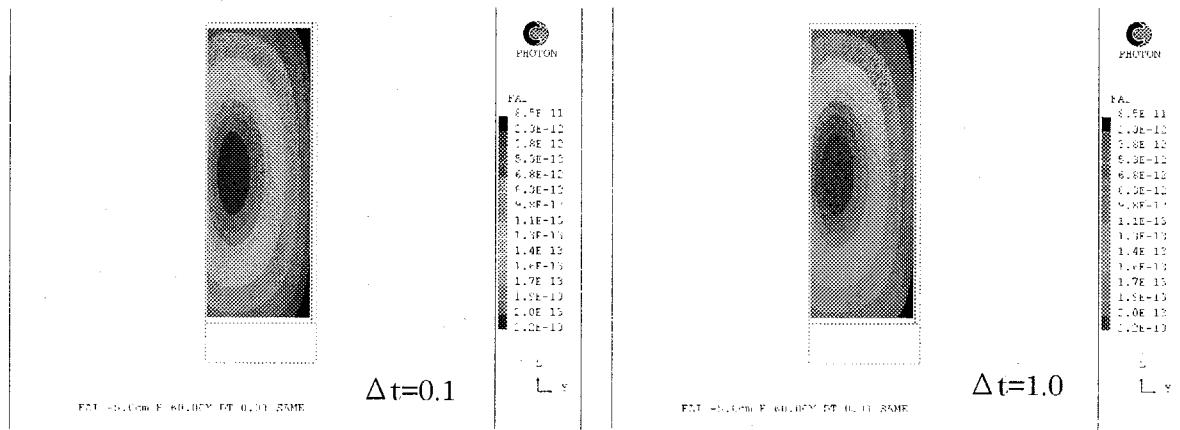
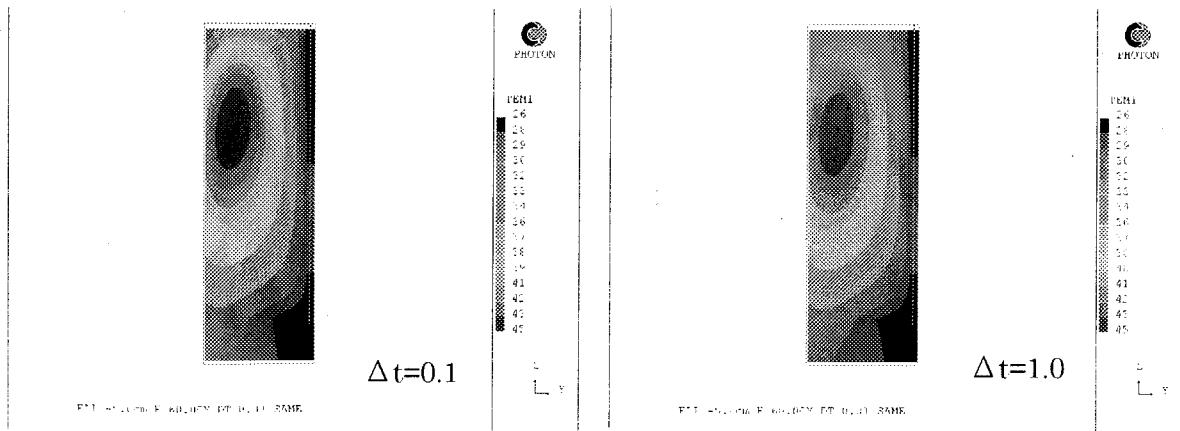
図 2.3-31 速度ベクトル ( $\alpha = 0.0001$ 、10秒後)図 2.3-32 速度ベクトル ( $\alpha = 0.001$ 、10秒後)

**This is a blank page.**

図 2.3-33 速度ベクトル ( $\alpha=0.01$ 、10秒後)図 2.3-34 出力変化( $\alpha=0.001$ 、流動計算時間刻みをパラメータ)

This is a blank page.

図 2.3-35 平均温度の時間変化( $\alpha=0.001$ 、流動計算時間刻みをパラメータ)図 2.3-36 最高温度の時間変化( $\alpha=0.001$ 、流動計算時間刻みをパラメータ)

図 2.3-37 C1 分布( $\alpha=0.001$ 、流動計算時間刻みをパラメータ)図 2.3-38  $\phi$  分布( $\alpha=0.001$ 、流動計算時間刻みをパラメータ)図 2.3-39 溫度分布( $\alpha=0.001$ 、流動計算時間刻みをパラメータ)

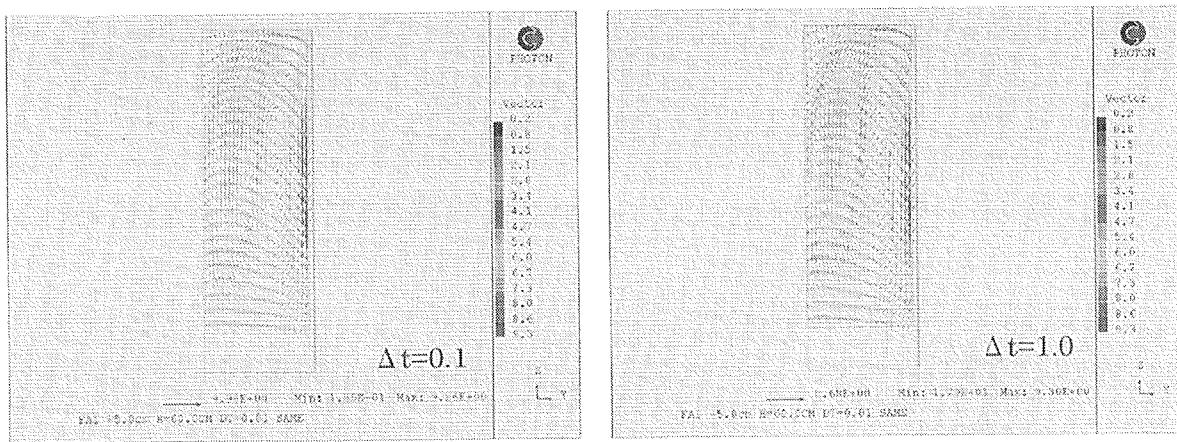
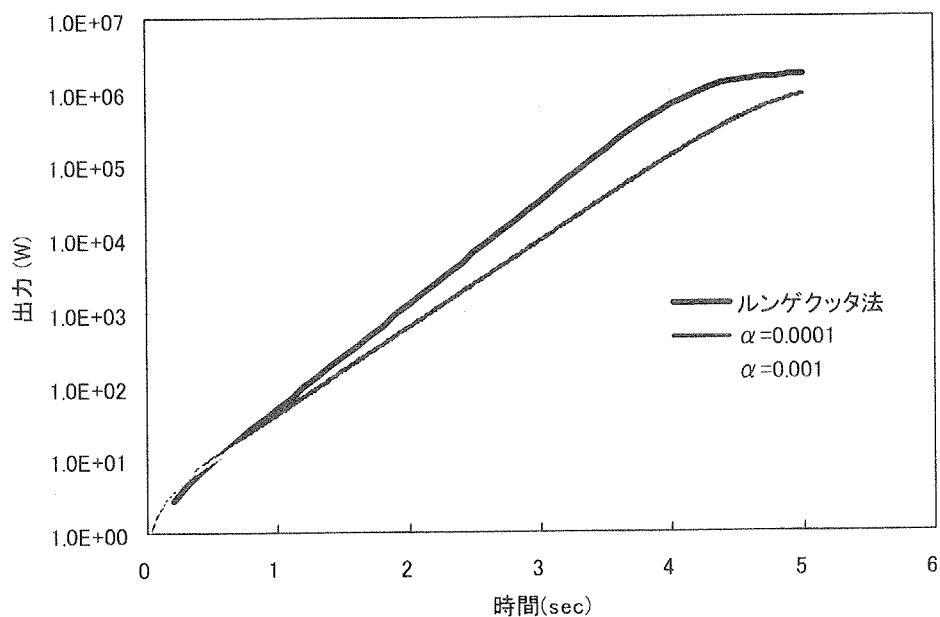
図 2.3-40 速度分布( $\alpha=0.001$ 、流動計算時間刻みをパラメータ)

図 2.3-41 出力変化

This is a blank page.

### 3. TRACY の熱流動解析

#### 3.1 TRACY の自然冷却特性実験

溶液燃料体系の臨界事故では初期出力バースト発生後も熱的に有意な出力レベルが持続される可能性が高く、温度等の核的フィードバック効果による出力の変動等、熱的挙動を把握することが不可欠である。臨界事故において、自然放熱により長時間事故が継続した場合の出力挙動を把握することを目的として、初期添加反応度を 0.5~1.5 ドルの範囲で変え、TRACY により一連の自然冷却特性実験が行われた<sup>1)</sup>。この実験では、炉心タンク内にウラン燃料溶液を注入するか、又はタンク中心軸にあらかじめ挿入された調整トランジエント棒を引抜くことにより、反応度を添加して初期出力バースト発生後約 5 時間にわたる出力および温度変化を測定した。

##### (1) TRACY 炉心及び温度測定点

TRACY 炉心タンクの立面図を図 3.1-1 に示す。TRACY 炉心タンクの構造材は SUS 製であり、内径(溶液部の直径)は 50 cm、胴板厚さは 1 cm、底板厚さは 8 cm である。タンク中心軸には調整トランジエント棒用の外径 7.63 cm、肉厚 0.35 cm の案内管が配置されている。燃料溶液部の上部は空気であるが、一定の風量で換気を行っており、タンク上部に換気口がある。タンク内の温度計(熱電対)の配置をそれぞれ図 3.1-2 に示す。燃料溶液部内には計 10 点(T-1~T-10)の温度計が同一平面上に配置されている。

##### (2) 実験条件

TRACY の自然冷却特性実験ケースのうち、ここでは調整トランジエント棒をステップ引抜により、ステップ状の 0.5 ドルの反応度を添加したケース(Run174)を選定した。TRACY 実験の初期条件を下記に示す。

- ① U235濃縮度 : 9.98 (wt%)
- ② ウラン濃度 : 382.3 (g/L)
- ③ 硝酸濃度(N) : 0.62 (mol/L)
- ④ 初期液位 : 511.1 (mm)
- ⑤ 初期溶液温度 : 25.1 (°C)
- ⑥ 室温 : 22.0 (°C)
- ⑦ 添加反応度 : 0.52 (\$)

##### (3) 出力及び溶液温度測定データ

出力及び溶液温度測定値の時間変化をそれぞれ図3.1-3及び図3.1-4に示す。出力はいったんピークに達した後、温度による負のフィードバック効果のため、単調に減少するが、約1時間後には自然冷却効果により溶液温度が数度低下し、この結果正の反応度が加わって出力は再び上昇する。出力が1kW前後に達すると溶液温度が再び上昇し、出力が低下する。数時間にわたり、この出力振動を繰り返した後、出力と溶液温度は平衡状態に近づく様子が示された。ここに示されるT-2、T-5及びT-9の温度測定値はいずれも同程度の値となっている。なお、図3.1-4に示されていない他の7つの測定点での温度測定値も図中の値と殆ど同じとなっており、ここではT-2、T-5及びT-10を代表点として選び、実験値と解析値を比較した。

なお、溶液の流動の振舞いについては、反応度添加直後のバースト出力発生時には溶液中

に放射線分解ガスボイドが発生するが、その後は単相流の形で推移すると考えられる。

### 3.2 解析方法

#### 3.2.1 計算条件

##### (1) 計算モデル

###### 1) 計算体系

実験は図 3.1-1 のような体系で行なわれているが、計算は対称性を考慮した軸対称モデルとし、基本的な寸法は図 3.2-1 に示すように実寸法に合わせた。側壁の SUS は液位よりも上部まであるが、液位と同じ高さまでをモデル化した。計算は対称性を考慮した軸対称モデルとした。核計算は、中性子エネルギー 1 群の拡散方程式に基づき、計算対象領域は溶液部のみとした。伝熱流動計算は、溶液部、タンク胴板及び底板を含めた領域とした。計算のメッシュ分割及び境界条件を図 3.2-2 に示す。溶液部は径方向 26 分割、高さ方向 25 分割とし、側壁の SUS は 3 分割し、底部の SUS は 5 分割して熱伝導を考慮した。

###### 2) 拡散計算の境界条件

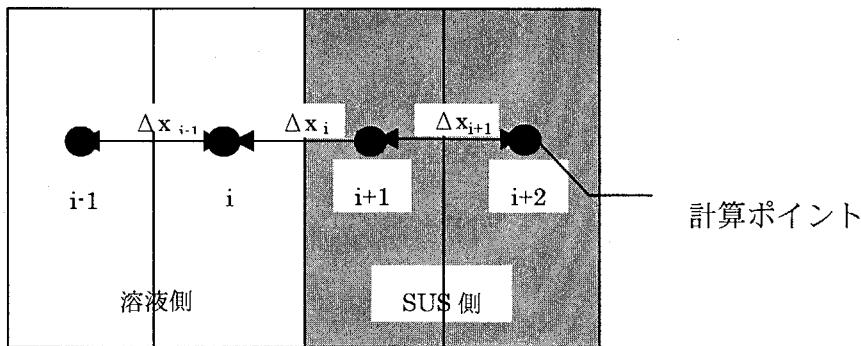
外挿距離は、高さ方向については中性子束分布の測定結果 10 cm が得られており、これに基づいて上下方向ともに 5cm とした。外周部については、外部真空境界の中性子輸送理論に基づき、別途中性子輸送計算を行って求めた燃料領域の拡散係数を用いて 1.45cm とした。内管部境界については、内側がボイドであること、計算体系では SUS 製の案内管がないことを考慮する必要がある。外挿距離  $d$  は、境界での中性子束  $\phi$ 、径方向での境界位置  $r$  に対して、 $d = -\phi / (d\phi/dr)$  の形で与えられるが、ここでは、境界の  $\phi$  及び  $\phi$  の傾きを個々に与える代わりに、 $d$  値を変化させることにより、外挿距離を変化させた場合の計算を行い、中性子束分布を中性子輸送計算による結果と比較した。液位を 52cm として  $d$  値を変えたときの径方向出力分布を図 3.2-3 に示す。ここでは、 $d$  値として径方向位置  $d'$  で表わし、-10 ~ 2 cm の範囲で変えた。また、SRAC-TWODANT 計算による径方向出力分布の例を図 3.2-4 に示す。分布の形状に若干の相異は見られるものの、径方向ピーク位置としては中心から約 8cm 程度であることを根拠に、中性子束分布が図 3.2-4 の分布に近くなるような  $d'$  値として-8.8 cm を採用することとした。

###### 3) 热計算の境界条件

境界条件は、図 3.2-5 に示すように内管部境界及び上部の溶液表面では断熱、外周部及び底部は自然放熱とした。

###### 4) 溶液と容器間の热の収支

溶液と容器間の热の収支は熱伝導を仮定し、下図のような変数配置として下記の式を用いて近似した。



## ・溶液側

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\bar{\lambda} \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_i} - \lambda_l \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x_{i-1}}}{\frac{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}}{2}}$$

## ・側壁側

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\lambda_s \frac{T_{i+2} - T_{i+1}}{\Delta x_{i+1}} - \bar{\lambda} \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_i}}{\frac{\Delta x_{i+1} + \Delta x_i}{2}}$$

ここで

 $T$  : 溶液温度 $\lambda_l$  : 溶液熱伝導率 $\lambda_s$  : 側壁熱伝導率

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_l + \lambda_s}{2}$$

である。

流体の境界条件としては、SUS と中心部以外の SUS と接する部分は non-slip 境界条件とし、それ以外は slip とした。

## (2) 計算に用いた定数及び定数の計算式

核定数は、TRACY の溶液体系を二次元 RZ 体系で近似し、SRAC と輸送計算コード TWODANT を用いて計算を行なって求めた 1 群縮約定数であり、温度点 25、40 及び 60°C での値を求め、温度に関する 2 次式で表わした。

・初期ウラン濃度	388.4 g/L
・硝酸濃度	0.62 mol/L
・初期出力	1 W
・初期温度	25.1°C
・室内温度	22°C (一定)
・初期液位	51.10 cm (初期臨界液位)

(計算ではサーベイ計算により求めた)

- ・添加反応度 0.52 \$
- ・遅発中性子割合  $\beta$  及び先行核崩壊定数  $\lambda$  (1/sec)

$\beta$ 1	$2.53641 \times 10^{-4}$
$\beta$ 2	$1.64637 \times 10^{-3}$
$\beta$ 3	$1.48583 \times 10^{-3}$
$\beta$ 4	$2.99124 \times 10^{-3}$
$\beta$ 5	$8.86989 \times 10^{-4}$
$\beta$ 6	$3.22655 \times 10^{-4}$
$\lambda$ 1	$1.27031 \times 10^{-2}$
$\lambda$ 2	$3.17039 \times 10^{-2}$
$\lambda$ 3	$1.15256 \times 10^{-1}$
$\lambda$ 4	$3.11631 \times 10^{-1}$
$\lambda$ 5	$1.40030 \times 10^{+0}$
$\lambda$ 6	$3.87411 \times 10^{+0}$

- ・中性子吸収断面積  $\Sigma_a$  [1/cm] と温度(T)の関係式

$$\Sigma_a = -7.7755 \times 10^{-8} T^2 + 2.0179 \times 10^{-5} T + 2.7842 \times 10^{-2} \quad (1/\text{cm})$$

T は絶対温度 ( $0^\circ\text{C} = 273.15\text{ K}$ )

- ・核分裂断面積  $\Sigma_f$  [1/cm] と温度(T)の関係式

$$\nu \Sigma_f = -1.0301 \times 10^{-7} T^2 + 2.2402 \times 10^{-5} T + 3.9457 \times 10^{-2} \quad (1/\text{cm})$$

T は絶対温度

- ・中性子拡散係数 D[cm] と温度(T)の関係式

$$D = 2.9496 \times 10^{-6} T^2 - 1.6202 \times 10^{-3} T + 8.9789 \times 10^{-1} \quad (\text{cm})$$

T は絶対温度

- ・流体の密度 <sup>3)</sup> [g/cm<sup>3</sup>]

$$\rho = 1.0125 \rho_{25} + 0.000145 t - 0.0005 \rho_{25} t - 0.0036$$

$$\rho_{25} = 1.0171 + 1.2944 \times 10^{-3} C_u + 0.0289 C_{HN}$$

C<sub>u</sub> : ウラン濃度(g/L)C<sub>HN</sub> : 硝酸濃度(N)

t : 摂氏(°C)

- ・流体の粘性係数 <sup>4)</sup> [millipoise]

$$\mu_T = \mu_{25} \exp(3.8t_{BP} (1/(t+273.15) - 1/(298.15)))$$

ここで、 t<sub>BP</sub> = 105(°C) とする。

t : 摂氏(°C)

- ・流体の定圧比熱 <sup>4)</sup> C<sub>p</sub> [cal/g/°C]

$$C_p = 0.998 - 9.630 \times 10^{-4} C_u - 4.850 \times 10^{-2} C_{HN}$$

- ・流体の熱伝導率 <sup>4)</sup>  $\kappa$  [W/m/K]

$$\kappa = -1.7187 \times 10^{-5} T^2 + 1.2157 \times 10^{-2} T - 1.4964$$

T : 絶対温度

注) 上記は 0.64 N の硝酸水溶液の値である。

- ・中性子の平均速度[cm/s]

220,000 cm/s

- ・1回の核分裂で放出される中性子数の平均 $\nu$

$\nu=2.3$

### 3.2.2 計算方法

計算は次の手順で行った。

- (1) 定常液位サーベイ計算を行い、初期臨界液位を設定する。ここでは、出力が時間変化しない液位を初期臨界液位とし、実験値をそのまま用い過渡計算により得られる出力が一定となるときの液位をサーベイして求めた。
- (2) ステップ状の反応度添加を再現するよう、液位上昇時サーベイ計算を行い、上昇液位を設定する。実験ではトランジエント棒を急に引抜くことによりステップ状の反応度を添加した。本計算では調整トランジエント棒が入った体系の計算機能を持たないため、ここでは、実験と等価な反応度添加条件を得るため、液位をある高さだけステップ状に増す方法を用い、初期出力の上昇割合が実験値と同じとなるような液位上昇幅を求めた。
- (3) 上記(1)、(2)で設定した初期液位及び液位上昇幅の条件のもとで、出力バーストから長時間の自然冷却特性の解析を行った。なお、炉心タンクの放熱係数はパラメータ的に与えた。

上記方法による解析結果を次節 3.3 に示す。

## 3.3 解析結果

### 3.3.1 定常液位サーベイ計算

液位をパラメータとして変更した計算を 200 秒まで行った結果を図 3.3-1 に示す。本条件では、液位 51.45cm でほぼ定常の結果となった。実験による初期臨界液位が 51.1cm に対してほぼ同程度の値となった。なお、ここではタンク外周部及び底部熱伝達係数を 30W/m<sup>2</sup>/K とした。

### 3.3.2 液位上昇時計算

初期臨界液位を 51.45 cm とし、前記で求めた定常時の各物理量の空間分布を初期条件として、液位をステップ状に上昇させた場合の 200 秒後までの計算を行ない、実験値と比較した。計算では添加反応度に相当する上昇液位を決定する必要があるため、反応度添加直後の出力上昇率と合うような上昇液位をサーベイ計算により求めた。流動の時間刻みは 1.0 秒とし、その他の変数の時間刻みは、第 2 章で述べた時間刻みを考慮しない閾値  $\alpha$  を 0.001 として自動時間刻みとした。この場合の計算時間は Pentium3(0.8GHz) の CPU による PC で約 5 分であった。結果を図 3.3-2 に示す。図中には、液位上昇を 2.70 cm 及び 2.80 cm とした場合について示す。また、比較のため実験値を併記してある。同図より、初期液位 51.45 cm

から 2.80cm 上昇させた場合の出力上昇率が実験値と比較的良く一致した結果となった。実験では約 80 秒で急峻に出力が低下するが、計算ではその傾向は見られない。計算では、バースト出力時で放射線分解ガスボイドの効果を考慮していないことが影響しているものと考えられる。しかし、全体的な傾向としては実験値を再現しているものとみなした。

液位を 2.80 cm 上昇させた場合の 200 秒までの温度推移を図 3.3-3 に示す。図には、溶液部半径方向のおよそ中心部において上下方向に上部(T9)、中央部(T5)、下部(T2)に設けた 3 つの温度測定点位置の溶液温度の時間変化を測定値とともに示す。本計算では流動と発熱に伴う浮力を考慮していることから、上部が温度が高い値となっている。

図 3.3-4～3.3-6 には実験値と合わせて計算値を示す。低部 (T2) における温度推移は、実験値と良い一致をしているが、上部 (T9) に向かうに従って計算値の方が高い温度を示している。これは計算体系の方が溶液中の温度勾配がより大きいことを示すものであり、溶液の熱伝導率の計算値が小さめに評価されている可能性が考えられる。しかし、全体的な傾向としては概ね一致していると言える。

### 3.3.2 自然冷却特性試験の解析

初期液位を 51.45 cm とし、添加反応度として液位を 2.80 cm 上昇させて 200 秒まで計算した前記のケースに引き続き、20,000 秒(約 5.6 時間)まで計算した結果を図 3.3-7～3.3-13 に示す。動特性計算は  $\alpha$  を 0.001 とした自動時間刻みを用いた。流動の時間刻みは、過渡出力が静定した後は流体の移動速度が低下することを考慮して、5.0 秒一定として 3,960 ステップで計算した。この場合の計算時間は Pentium3(0.8GHz) の PC で約 6 時間程度であった。図 3.3-7 には側壁と底面の熱伝達率を変更した場合の出力変化を実験値と合わせて示す。図 3.3-7 の上図の各々の線は、CASE\_A で熱伝達率を 15 W/m<sup>2</sup>/K、CASE\_B で 30 W/m<sup>2</sup>/K、CASE\_C で 35 W/m<sup>2</sup>/K とした場合の結果である。熱伝達率が大きいほど出力の振動の周期は長くなるが、出力はいずれのケースも一定値に近づく。ここでは熱伝達率 30 W/m<sup>2</sup>/K のケースが実験値を比較的良く再現した。図 3.3-7 の下図には熱伝達率 30 W/m<sup>2</sup>/K の出力を実験値を合わせて示す。実験では約 10,000 秒と 17,000 秒で出力のピークが見られるが、計算では約 11,000 秒と約 15,000 秒でのピークとなっており、傾向的には良い一致といえる。図 3.3-8 にはエネルギー(積算出力)の推移を実験値と合わせて示すが、計算値のほうが初期において高い値となっている。また、5,000 秒程度までの出力とエネルギーの計算値は熱伝達率を変更した場合でも殆ど同じ傾向を示しており、初期の出力とエネルギーに関しては熱伝達率はあまり影響しないといえる。エネルギーの計算値が実験値よりも大きめとなっているのは、図 3.3-2 の実験値に見られる約 75 秒前後の急峻な出力の低下が原因と考えられる。この急峻な出力の低下を計算モデルで再現することによって、エネルギーの計算値はより実験値に一致するものと考えられる。

図 3.3-9 には熱伝達率を変更した場合の溶液の体積平均した温度推移を示す。図 3.3-7 の出力と同様のピークの傾向を示している。図 3.3-10 には T2、T5 及び T9 平均の温度推移を実験結果とともに示す。1,000 秒程度までは実験値よりも計算値の方が温度が高いが、以降はより低くなる傾向を示す。ピークを示す時刻は計算値と実験値は良い一致を示している。温度の計算値と実験値の差異の原因として、本計算でのタンク表面からの放熱のモデル、核

計算法等が実体系を再現しきれていないことが考えられるが、現状のモデルが熱伝達率を一定としたモデルであること、中性子エネルギー1群のみの考慮であること等を鑑みると、ある程度良い一致であると考えられる。図3.3-11～図3.3-13には各々の測定点における温度の推移を示す。T2～T5の平均温度の場合と同様の傾向を示しており、現モデルの中性子エネルギー多群への拡張や、タンク外での流動場の考慮などのモデルを追加していくことで精度はより向上していくものと考えられる。

熱伝達率30W/m<sup>2</sup>/Kのケースについて中性子束分布、流速分布及び温度分布の時間変化の例をそれぞれ図3.3-14、図3.3-15及び図3.3-16に示す。図3.3-14より中性子束分布の時間変化は見られない。図3.3-15より反応度投入後200秒では内部に対流が起こっているのがわかる。図3.3-16より、そのために温度分布も上側に高温部ができている。一方、5,000秒以降では、熱流動は静定して上下方向に温度成層が形成される様子が示される。

以上の計算結果をまとめると、

- 1) 本計算での流動計算と温度計算の時間刻みの分離と核計算関連の時間刻みの自動化によって、ある程度の計算時間の効率化を図ることができることが確認された。時間刻み幅は、流動計算では初期の過渡状態では1秒、それ以後で5秒とした。それ以外の物理量の計算では自動決定の機能を用いて10<sup>-4</sup>秒程度とした。計算時間は、従来では数十時間～数日程度必要であったものが市販のパソコンを用いて約6時間とし、実用的な時間の範囲内で計算が可能であり、解析値は実験値をほぼ再現する見通しを得た。
- 2) 本計算のモデルは、下記のように熱伝達率や添加反応度をある程度最適化することによって、計算精度を向上し実験値を予測することが可能であると考えられる。
  - ・ 中性子エネルギー1群数を複数とするとともに、中性子実効増倍率の計算機能をもたせる。
  - ・ 本解析では、実験値を再現するような熱伝達率をサーベイしたが、熱伝達率は容器周りの環境（特に流動場）等によって大きく異なってくることから、タンク外周の流動場を考慮した流動解析機能の追加が効果的であると考えられる。
  - ・ さらに効率化、高精度化を行うためには自動時間刻み調整に物理量の時間変化の2次微分まで考慮すること、等が挙げられる。

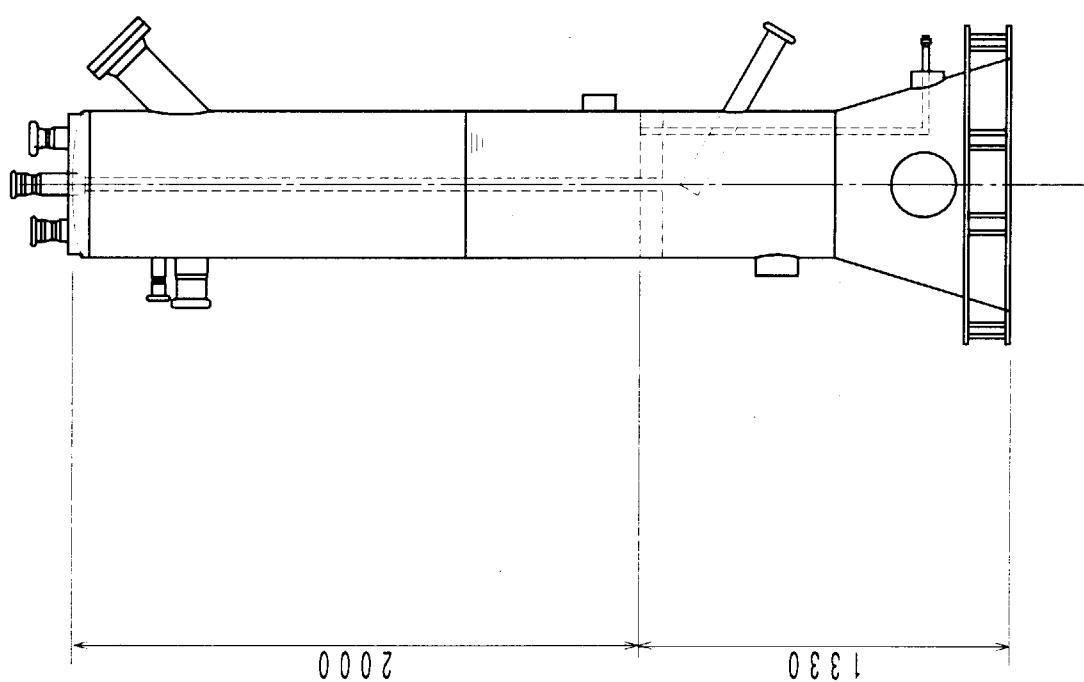


図 3.1-1 TRACY 級心タンク概略図

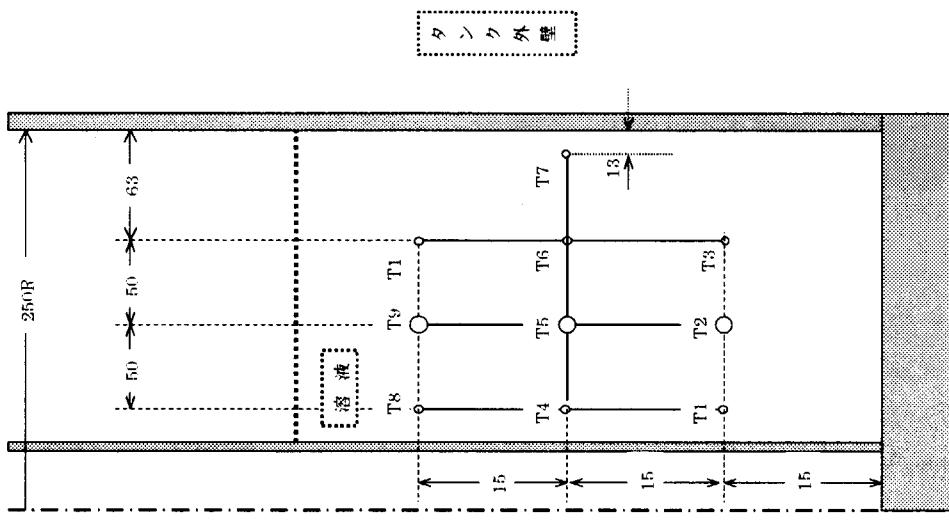


図 3.1-2 TRACY タンク内の温度測定点

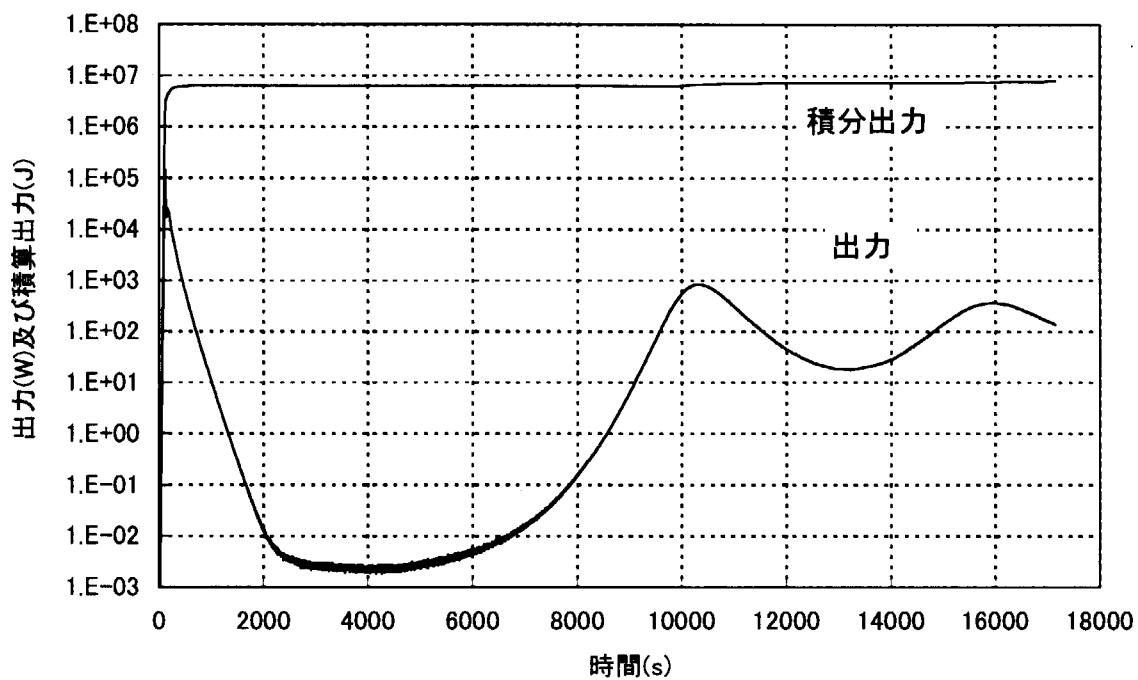


図 3.1-3 出力及び積算出力の時間変化(Run174)

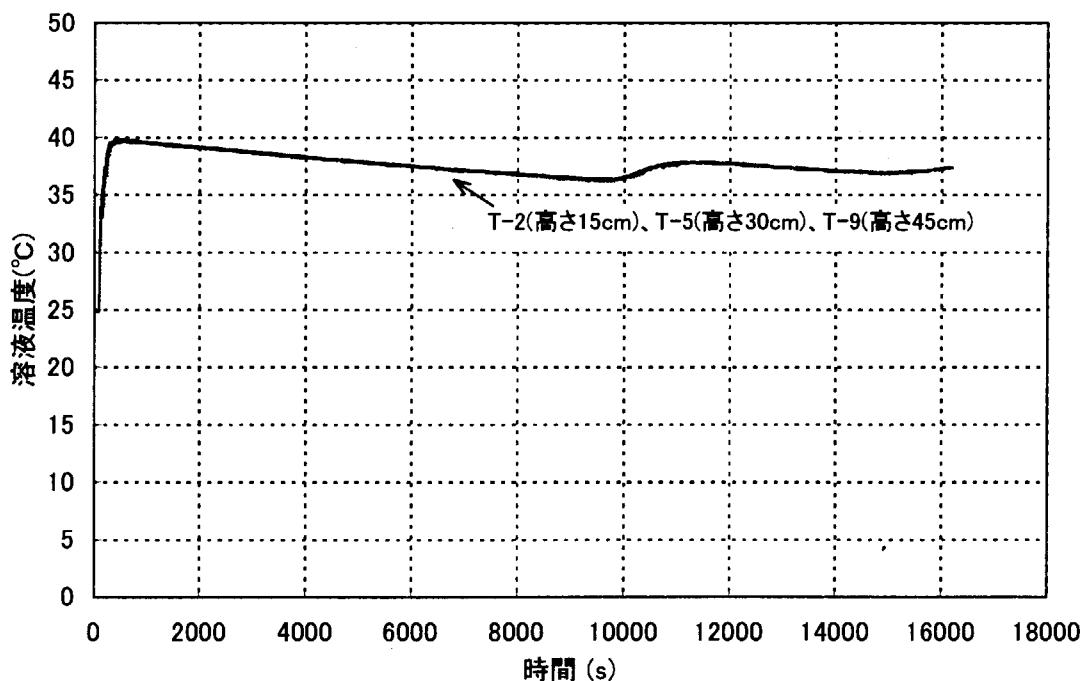


図 3.1-4 溶液温度の時間変化(Run174)

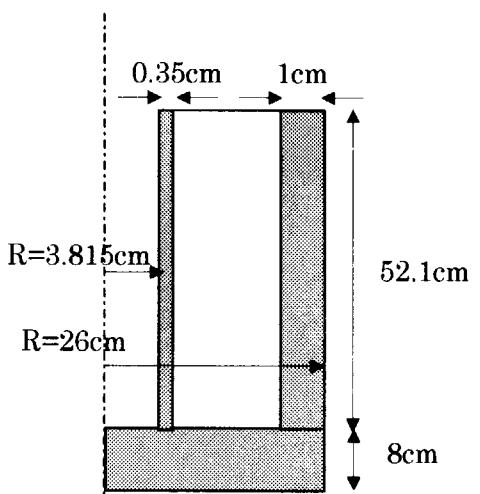


図 3.2.1 計算体系(寸法)

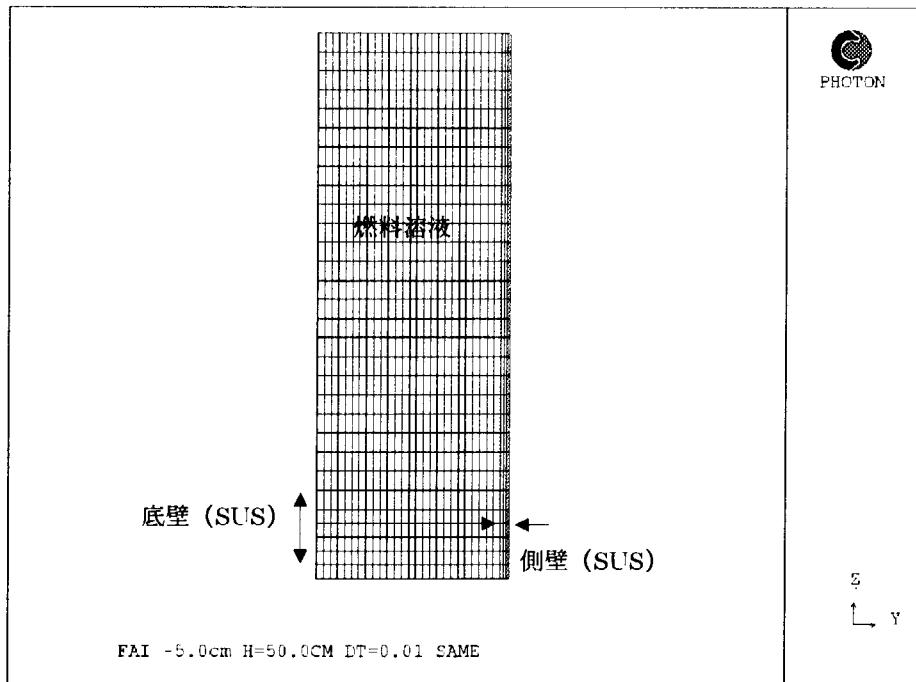


図 3.2.2 計算体系(メッシュ分割と領域分け)

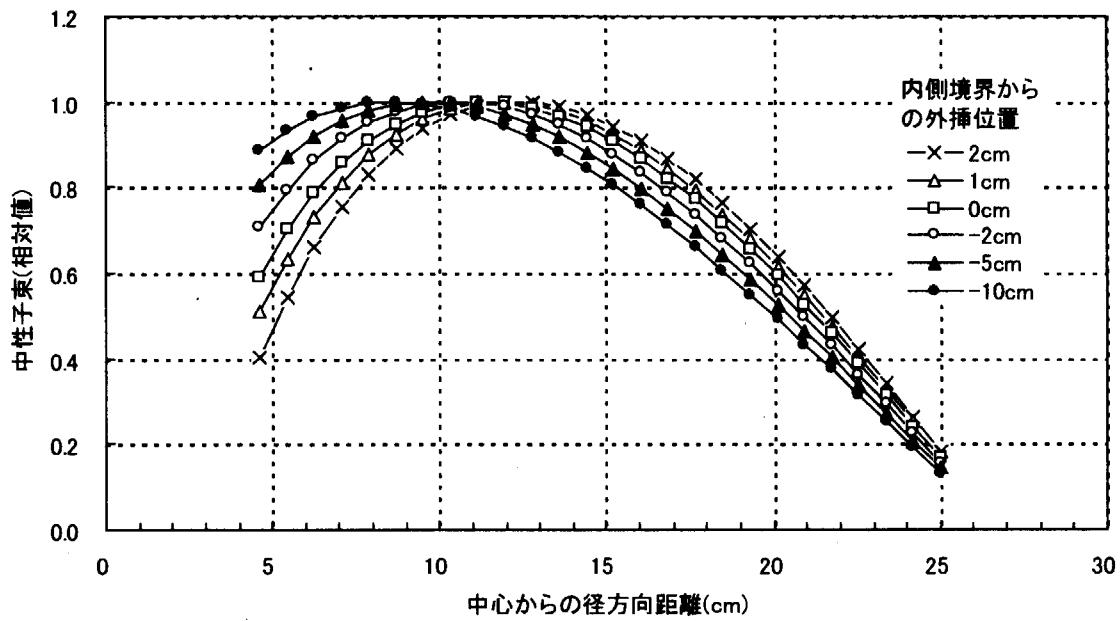


図 3.2.3 径方向中性子束分布の相対値(高さ方向中央部位置)

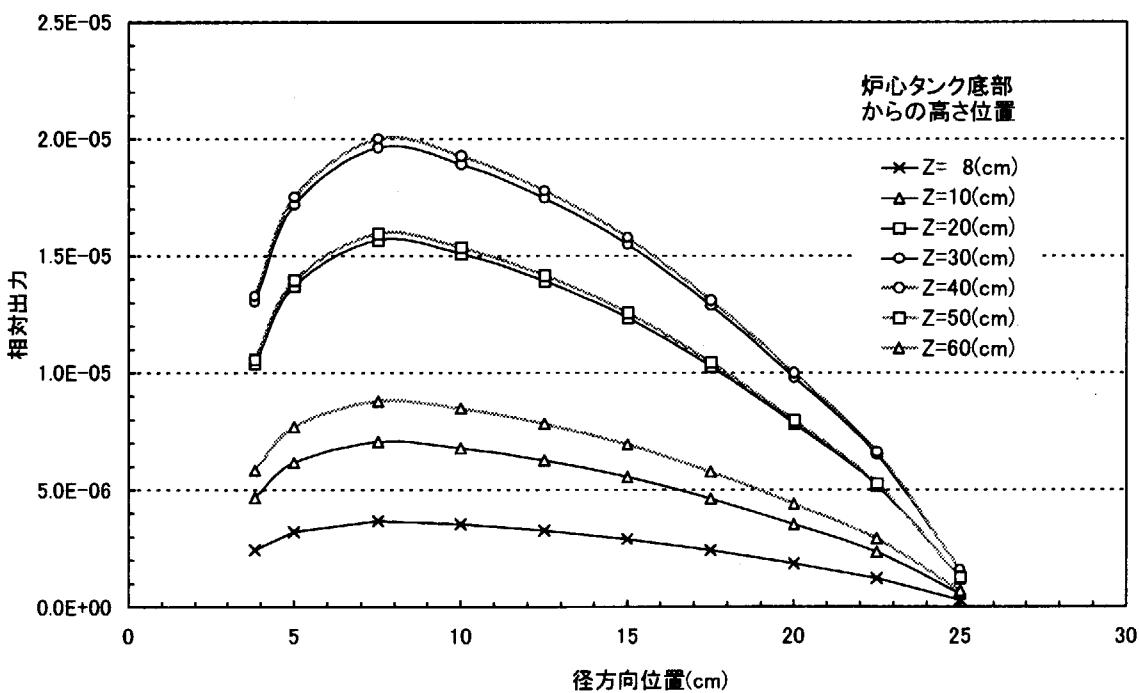


図 3.2.4 径方向中性子束分布の相対値(中性子輸送計算)

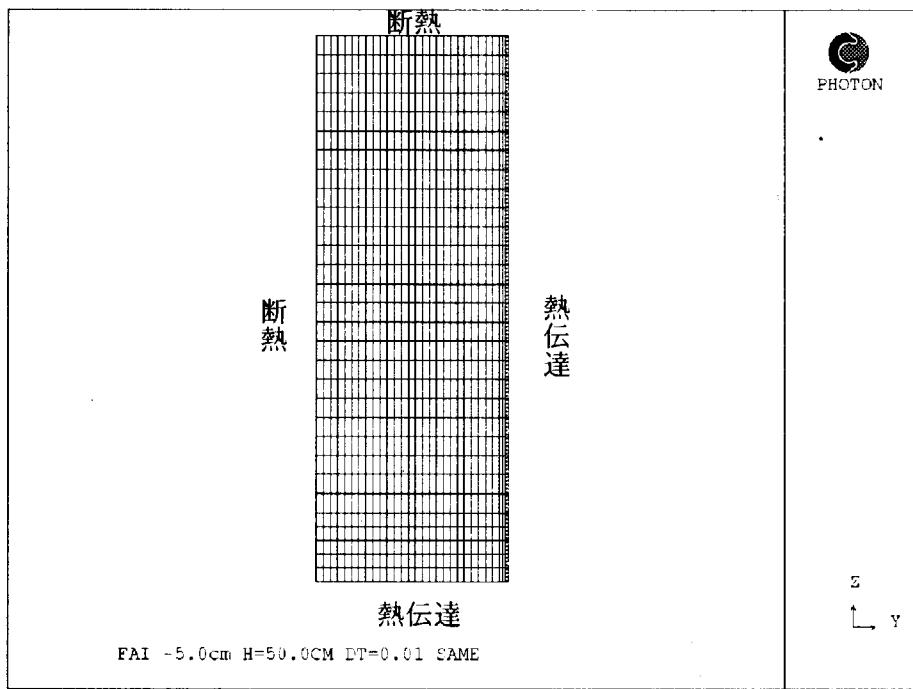


図 3.2-5 溫度境界条件

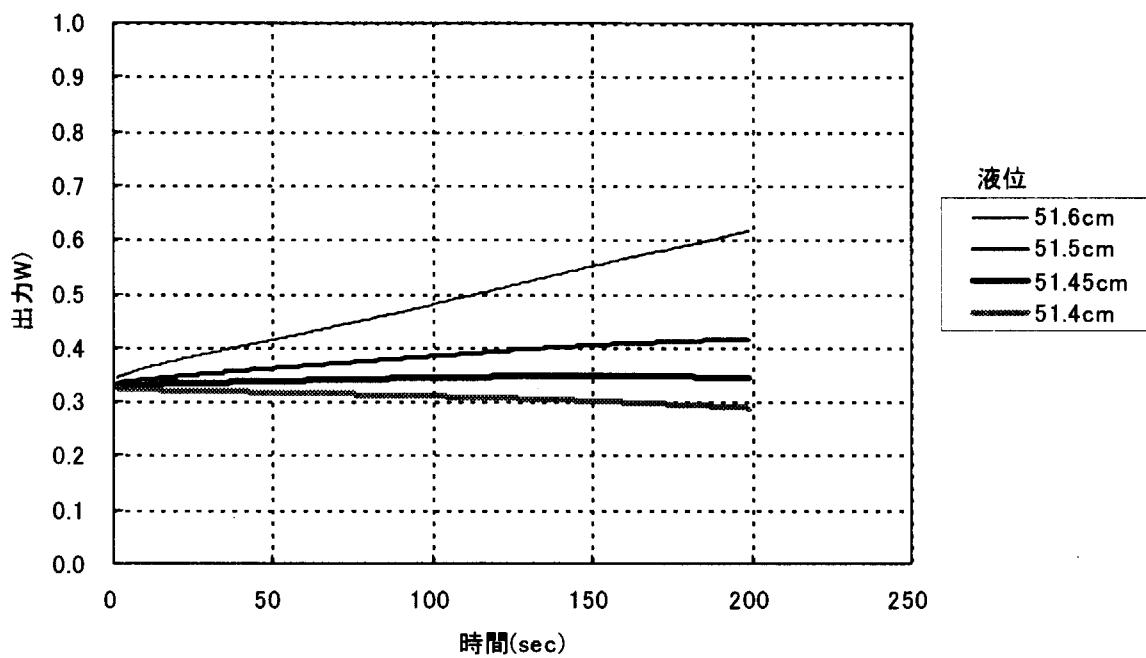


図 3.3・1 液位による出力の時間変化

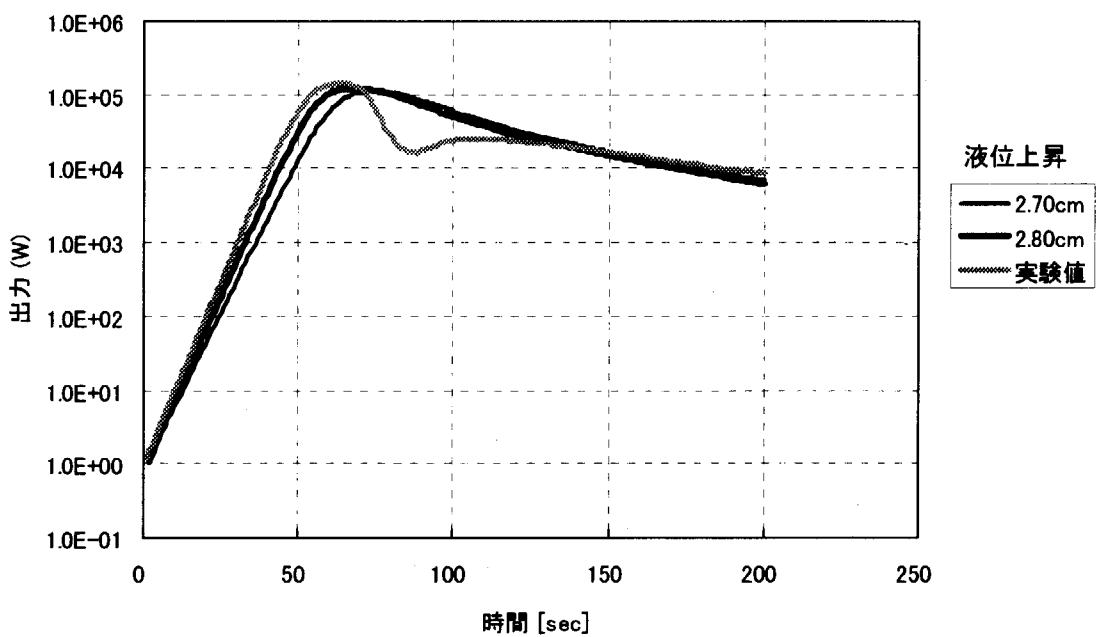


図 3.3・2 液位を上昇させた場合の過渡出力変化

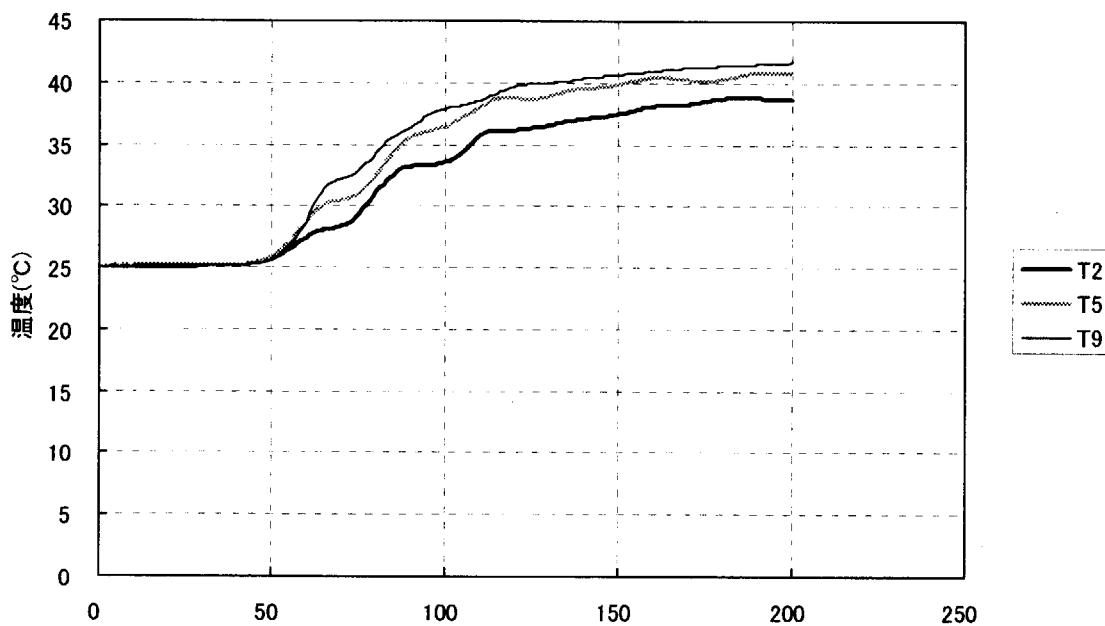


図 3.3-3 液位を 2.9cm 上昇させた場合の溶液温度の時間変化

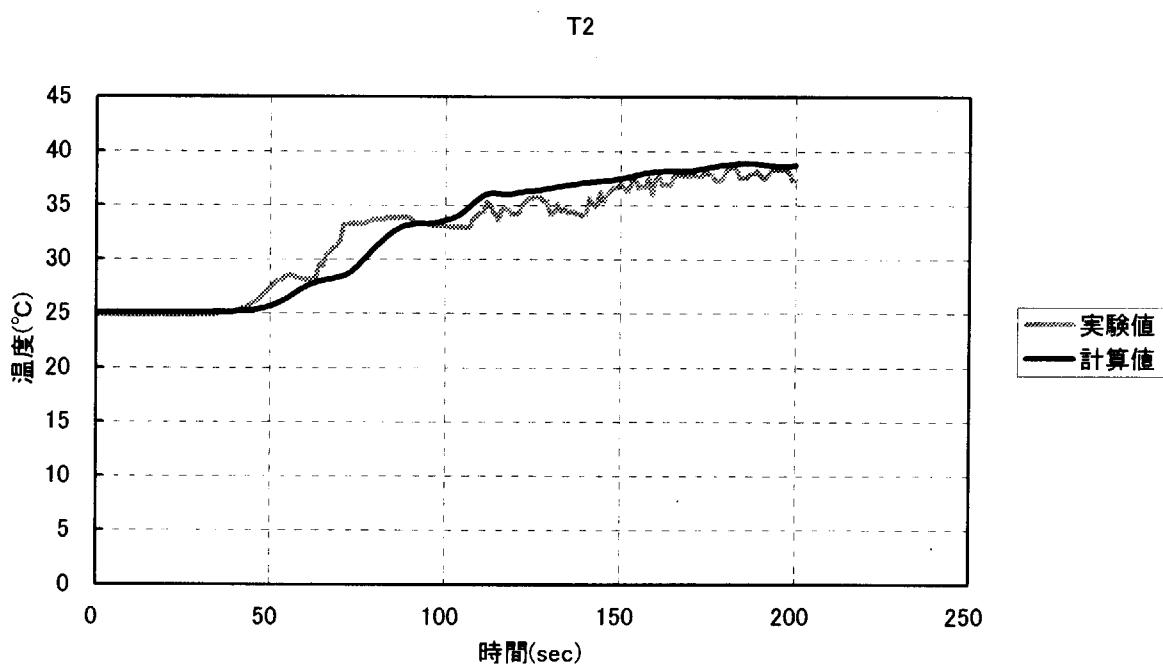


図 3.3-4 T2 における溶液温度の時間変化

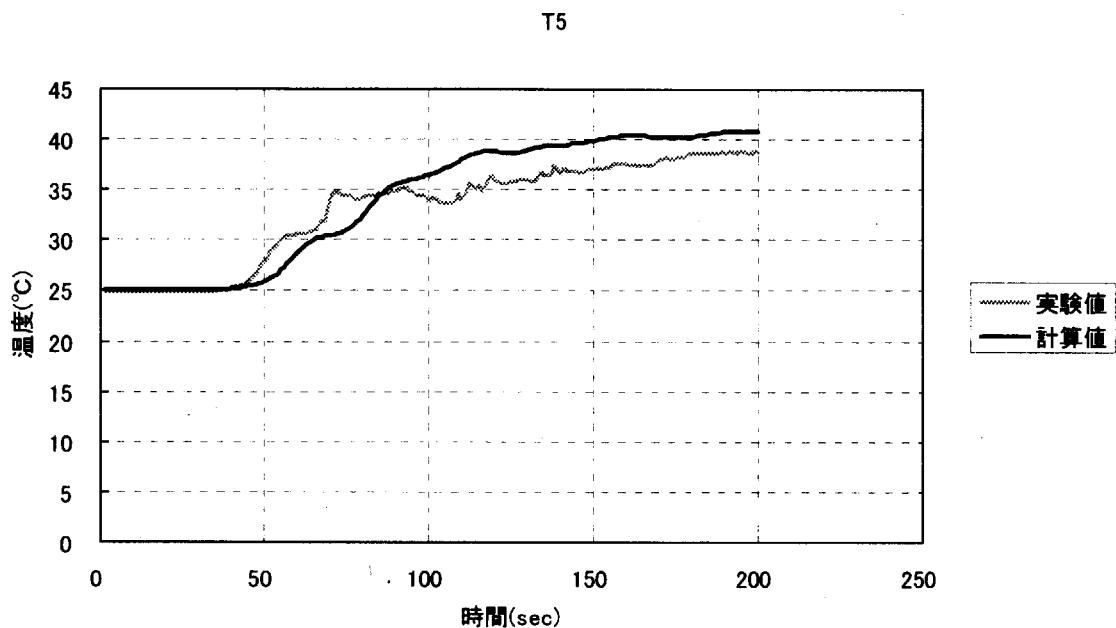


図 3.3-5 T5 における溶液温度の時間変化

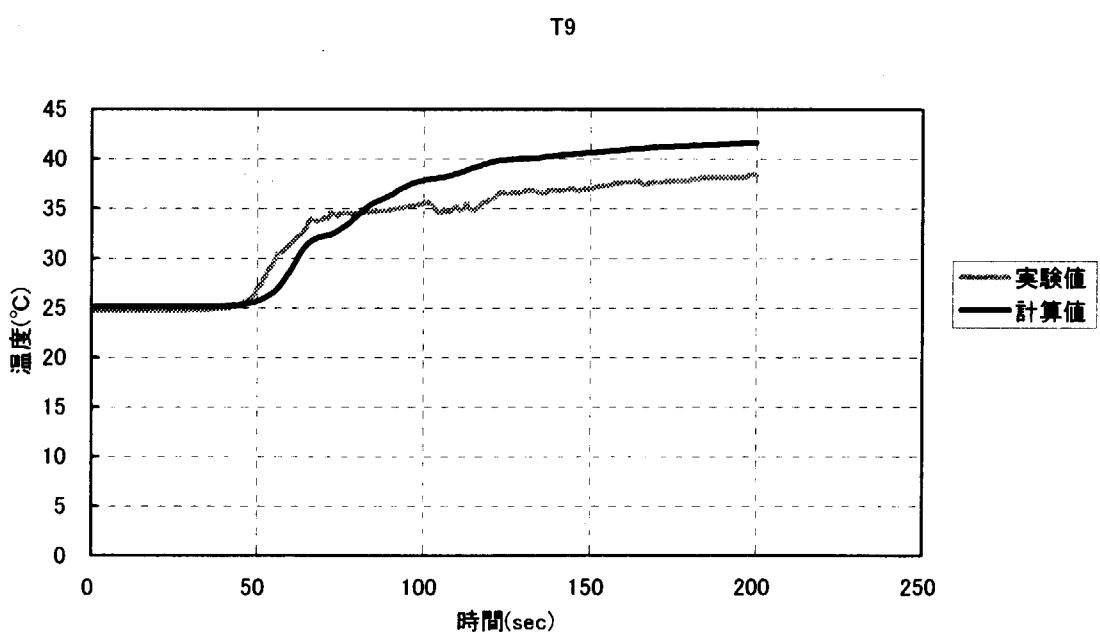


図 3.3-6 T9 における溶液温度の時間変化

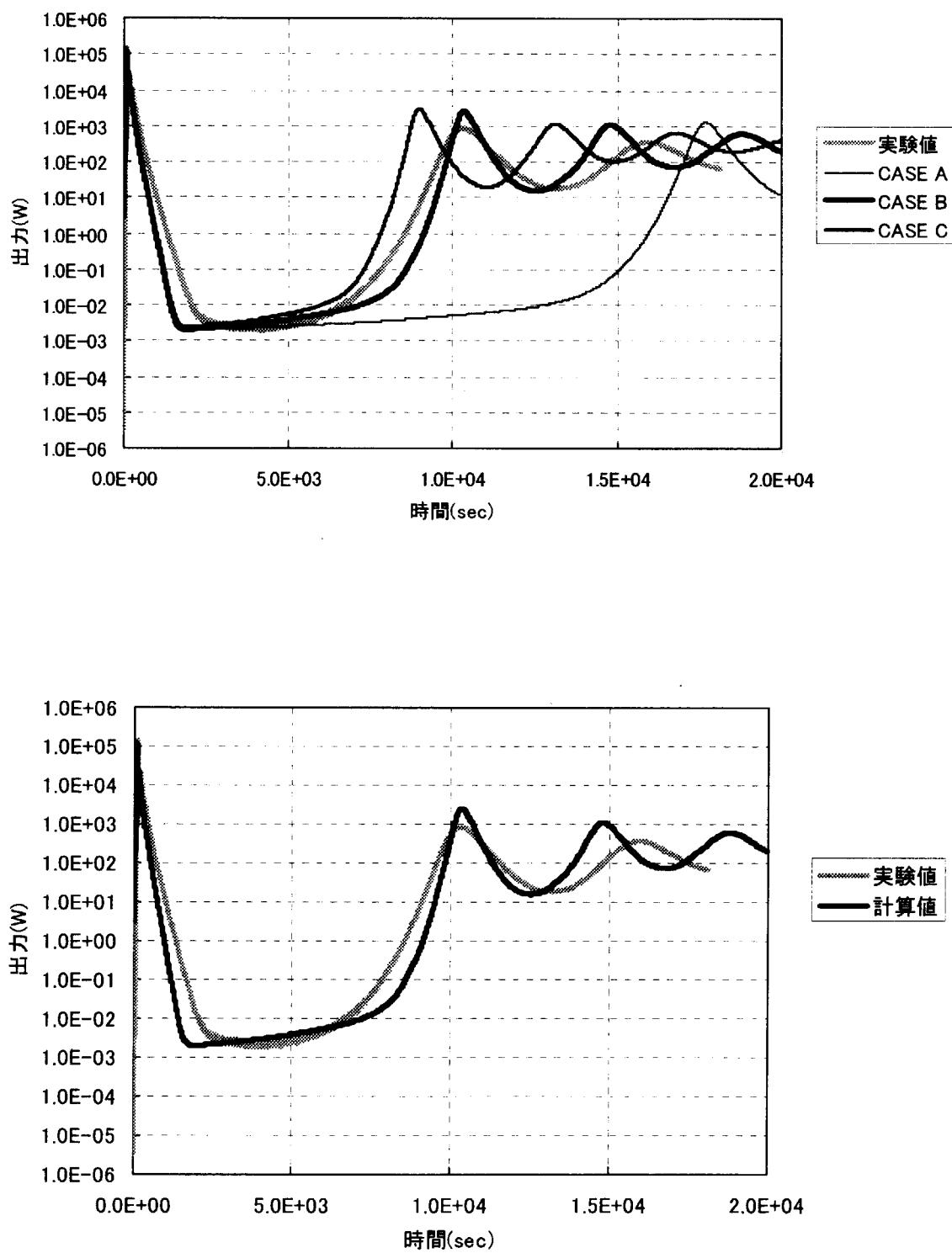


図 3.3-7 热伝達率による出力の時間変化

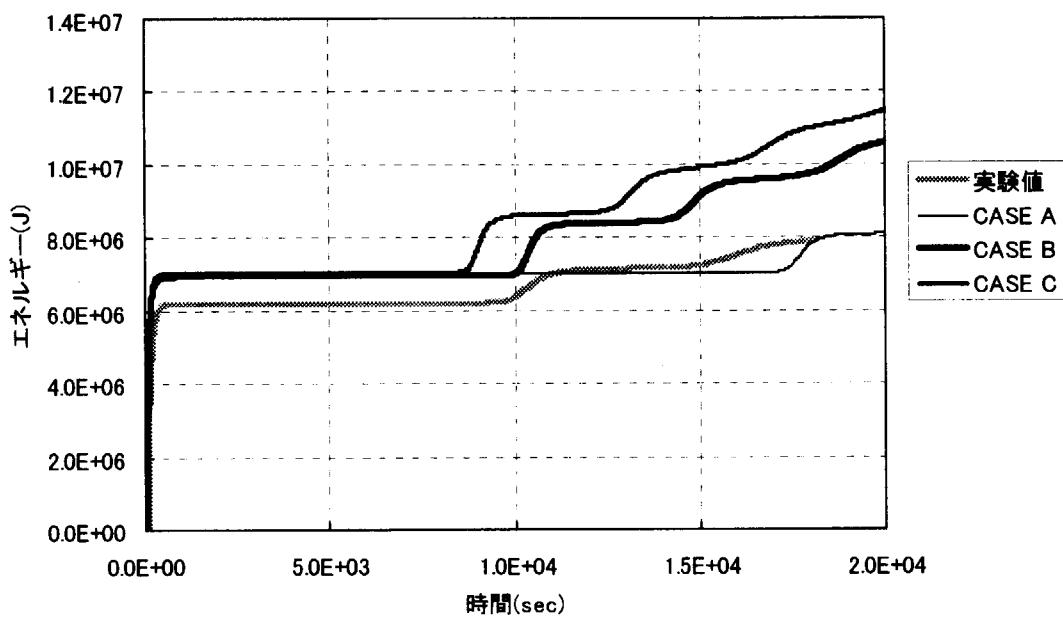


図 3.3-8 エネルギーの熱伝達率依存

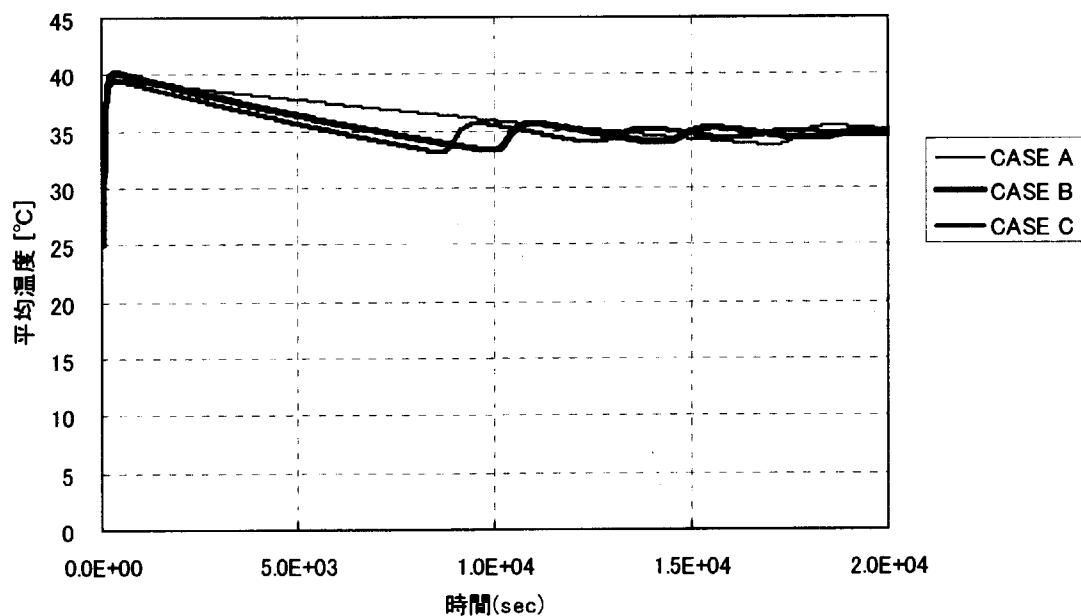


図 3.3-9 体積平均した溶液温度の熱伝達率依存

T2,T5,T9の平均

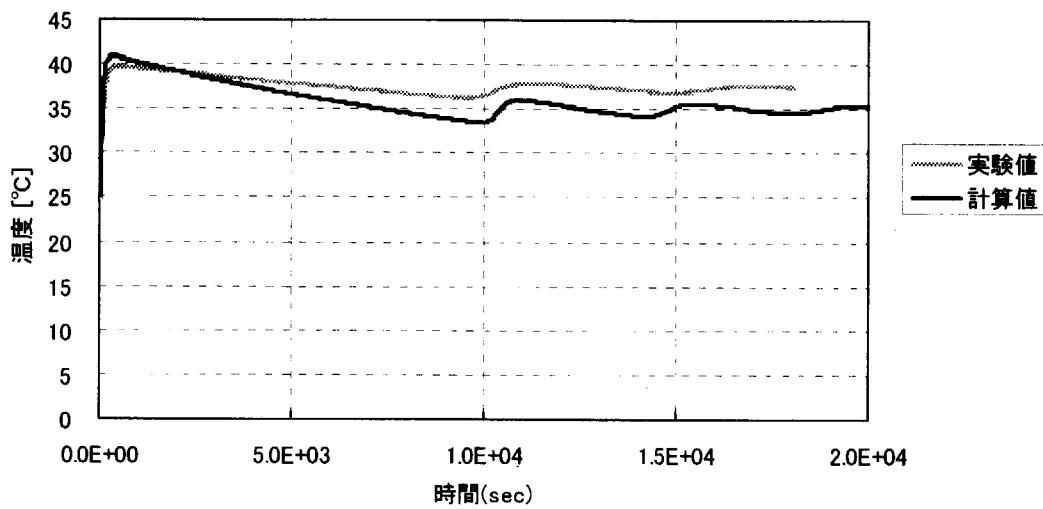


図 3.3-10 溶液温度の平均値の時間変化

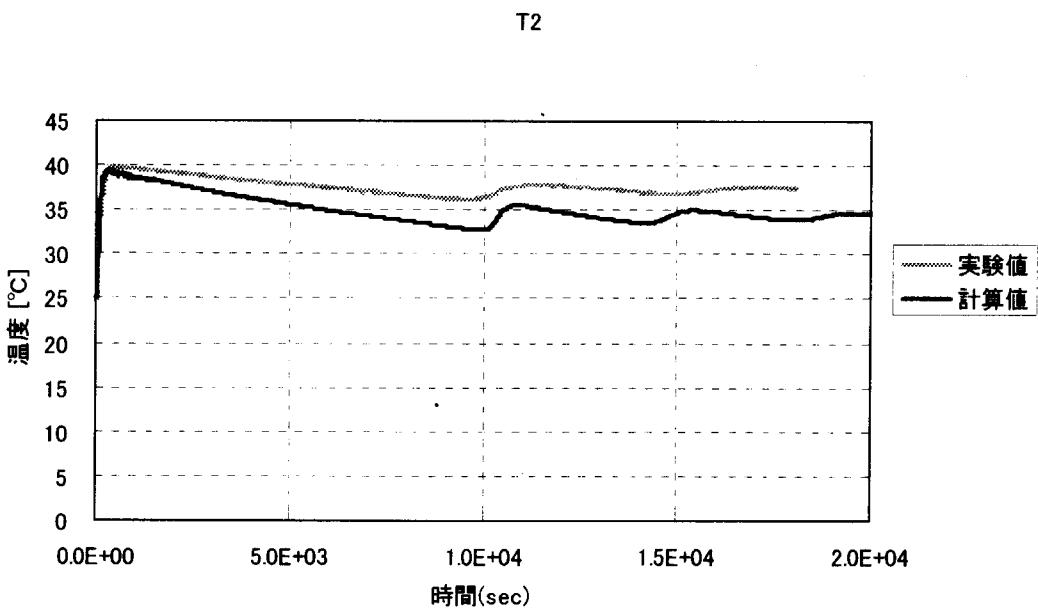


図 3.3-11 T2 における溶液温度の時間変化

T5

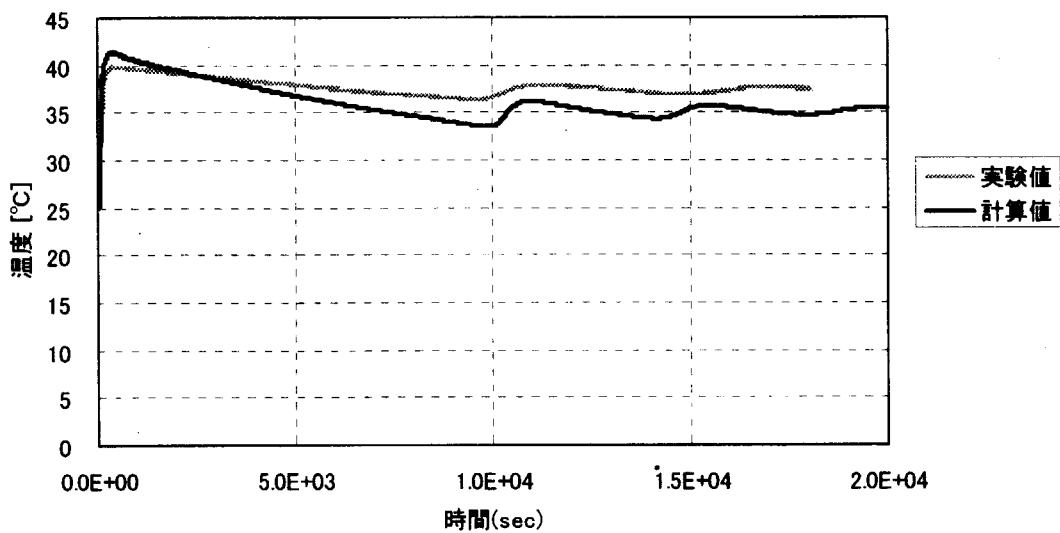


図 3.3-12 T5 における溶液温度の時間変化

T9

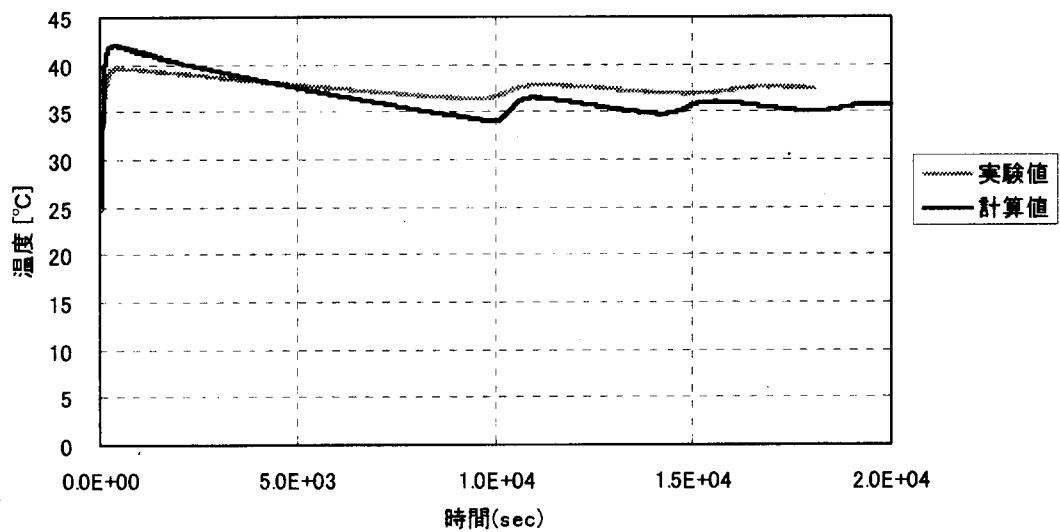


図 3.3-13 T9 における溶液温度の時間変化

This is a blank page.

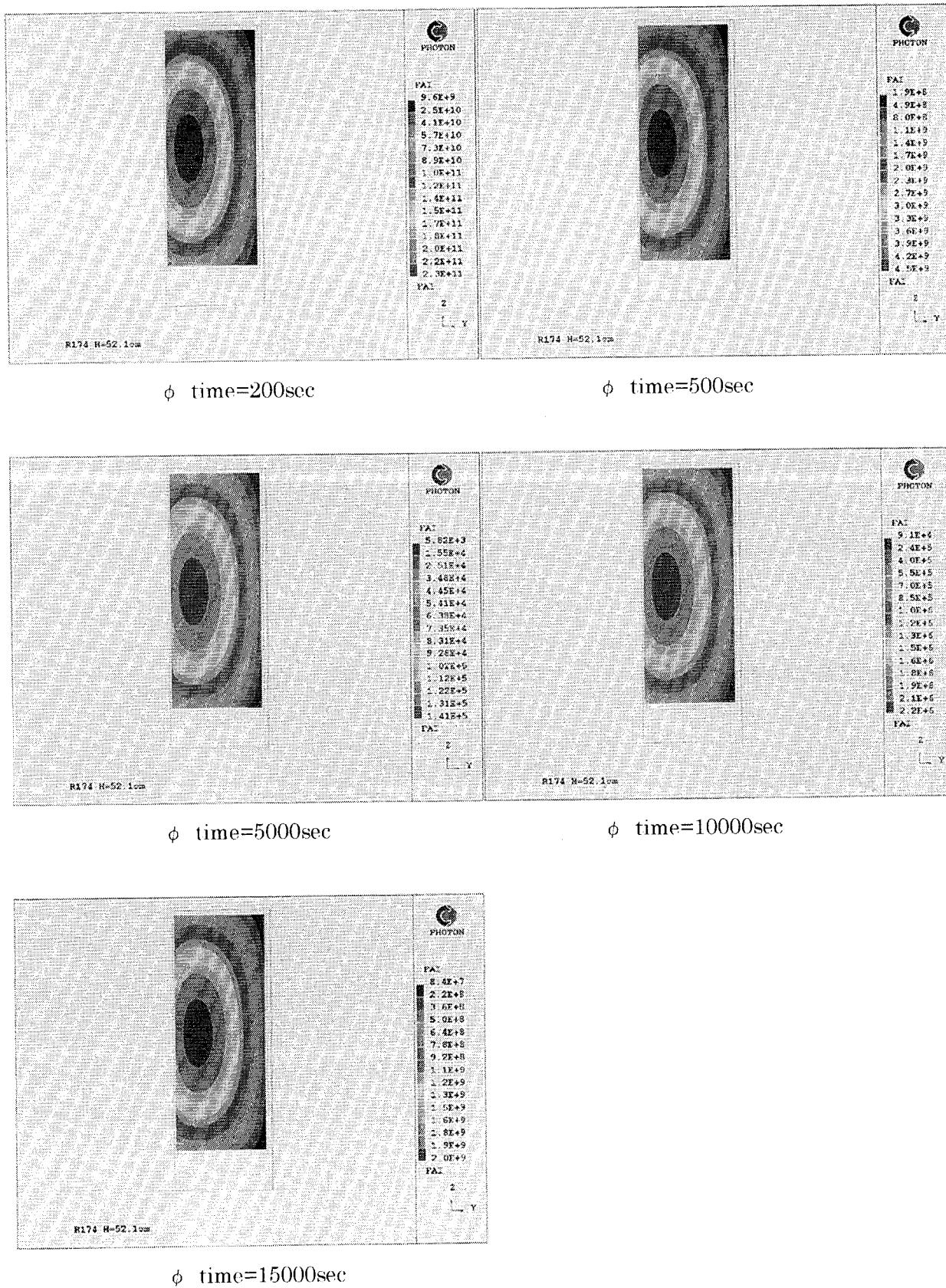


図 3.3-14 中性子束分布の時間変化

This is a blank page.

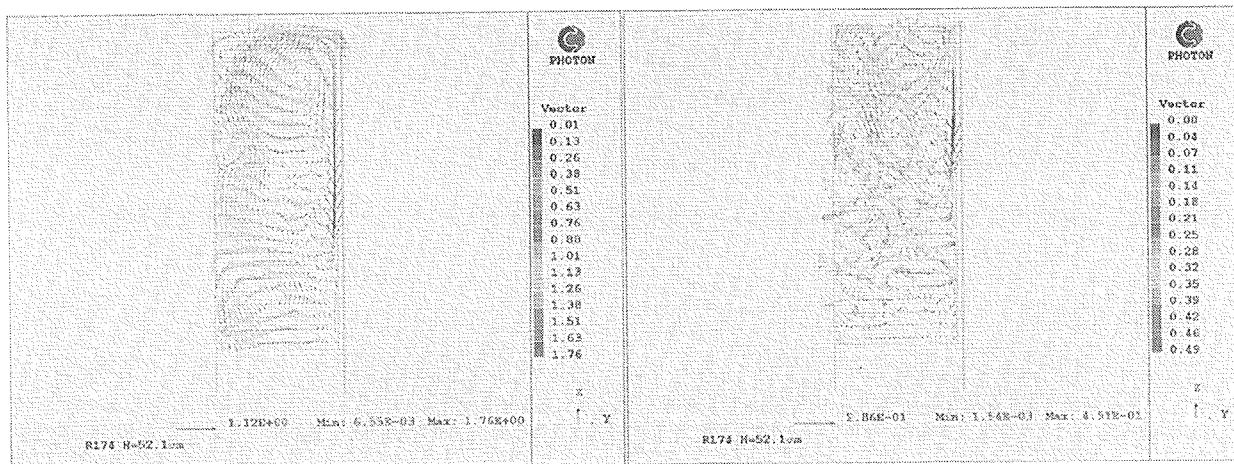
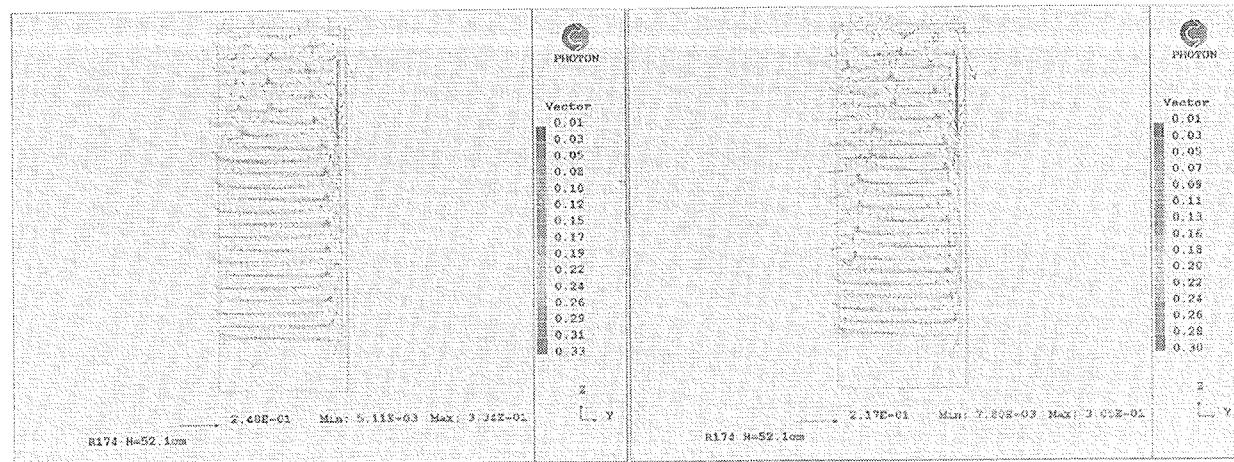
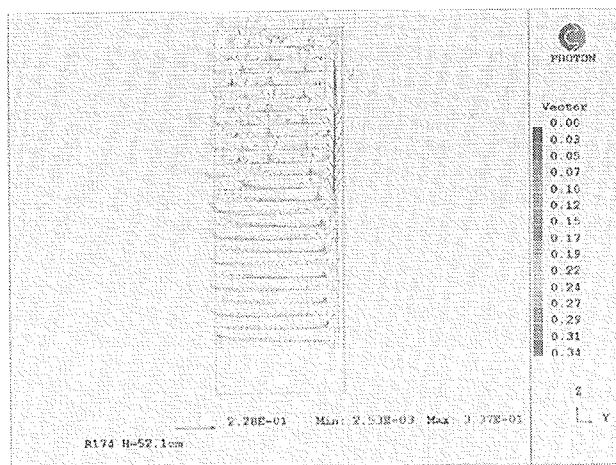
 $V$  time=200sec $V$  time=500sec $V$  time=5000sec $V$  time=10000sec $V$  time=15000sec

図 3.3-15 流速分布の時間変化

**This is a blank page.**

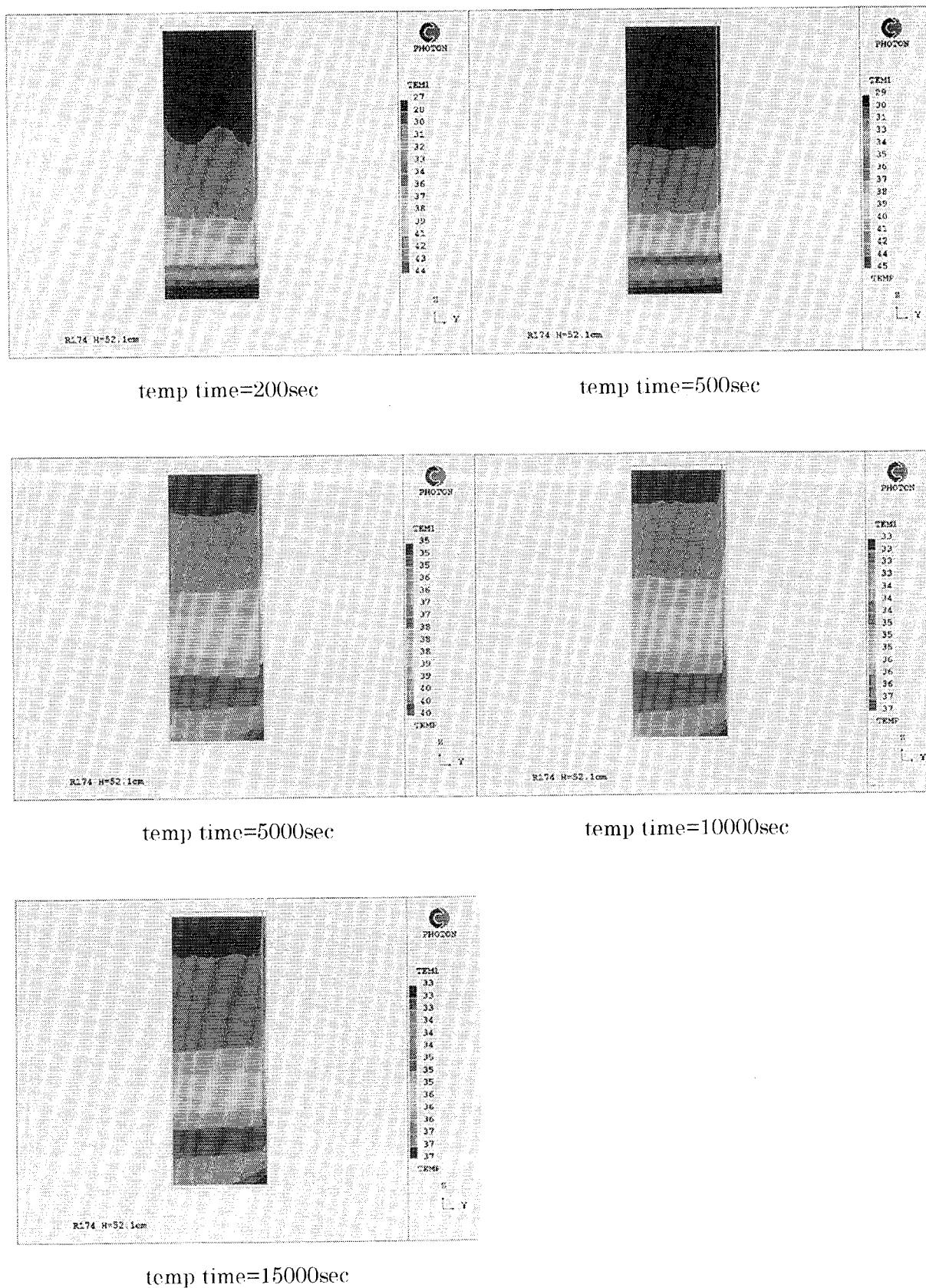


図 3.3-16 溫度分布の時間変化

This is a blank page.

#### 4. まとめ

汎用熱流体解析コード PHOENICS に中性子エネルギー 1 群の多領域動特性方程式による核計算用サブルーチンを結合し、熱流動を考慮した二次元(R-Z)動特性解析コードシステムを作成した。核熱計算と流動計算の時間刻み幅を分離し、さらに出力の時間変化に応じて時間刻み幅を自動調整することによってプログラムの計算時間短縮化を図った。さらに、比較的投入反応度の小さい TRACY 実験体系の解析を行った。反応度投入後の過渡出力に引き続き、約 5 時間緩やかに出力が変化する体系での自然冷却特性実験について解析計算を行い、出力及び温度について実験値と比較した。

時間刻み幅は、流動計算では初期の過渡状態では 1 秒、それ以降で 5 秒とした。核熱計算では自動決定の機能を用いて~ $10^{-4}$  秒とした。計算時間は、市販のパソコンを用いて約 6 時間で実用的な範囲内で計算が可能であり、解析値は実験値をほぼ再現する見通しを得た。

今後の課題としては、核計算の精度向上のため中性子エネルギー群数を複数群とすること、溶液上部表面での放熱及びタンク外放熱の流動場を考慮すること、放熱面積の観点から計算体系は液面よりも上のタンク壁も扱うこと、さらには出力バースト部で放射線分解ガスによるフィードバックの考慮等が挙げられる。

#### 謝辞

本計算コードの作成にあたり、(株)CRC ソリューションズの川原仁志氏にご協力を頂き、厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

1. K.Nakajima et al, "TRACY Transient Experiment Databook 1) Pulse Withdrawl Experiment" Accident," JAERI-Data/Code 2002-005
2. 日本機械学会、「熱と流れのコンピュータアナリシス」、コロナ社、昭和 61 年 6 月
3. H.H.Ph.Moeken, Anal. Chem. Acta., 44, 225 (1969)
4. 杉川進他、「蒸発缶計算コードによるウラン蒸発缶の特性解析(I)」、日本原子力学会 1997 年春の年会 K20

## 付録 入力データの作成

### 1. 定常液位の計算

#### 1) 計算条件の計算

##### ① $\phi$ の初期値の設定

添付資料の Excel シートに必要項目を入力し、 $\phi$  の初期値を求める。

##### ② C1～C6 の初期値の設定

添付資料の Excel シートに必要項目を入力し、C1～C6 の初期値を求める。

$\phi$  と C の初期値は以下の方法で求める。

槽内が均一な状態として定常状態を仮定すると、次式が成り立つ。

$$0 = -\lambda_i C_i + \beta_i v \Sigma_f \phi$$

また全体の発熱量を  $Q_{tot}$ 、槽の体積を V とすれば

$$Q_{tot} = QV = (200 \times 1.602 \times 10^{-6} \Sigma_f \phi) V$$

である。従って、Q と体積を与えれば  $\phi$  が求まり、 $\phi$  が求まれば C1～C6 までの値が求まる。

ここで、

$\lambda$  : 崩壊定数

$\beta$  : 遅発中性子割合

$v$  : 1 回の核分裂で放出される中性子数の平均値

である。

## 2) PHOENICS 入力データの作成

## ① 使用変数

表 A.1 に PHOENICS 入力データに追加する変数名一覧を示す。これらのデータはエディタを用いて直接ファイルに追記する。

表 A.1 入力データに追記する変数一覧

配列名	配列番号	備考
IG	1	未使用
	11	出力用モニタポイントのxセル
	12	出力用モニタポイントのyセル
	13	出力用モニタポイントのzセル
	21	計算回数(リストート回数+1)
	31	SOR反復最大値( $\phi$ )
	32	SOR反復最大値
	33	$\phi$ のエラーノルムの選択(1:それ以外、2:それ以外)
	34	エラーノルムの選択(1:それ以外、2:それ以外)
	35	出力(1:アスキー、2:バイナリ)
	LG	1 リスタートフラグ(T:液位上昇時,F:それ以外)
	RG	1 $\nu$
	2	中性子平均速度
	3	下側外挿距離
	4	上側外挿距離
	5	外側外挿距離
	6	未使用
RG	11	$\phi$ のSOR収束残差
	12	$\phi$ のSOR加速係数
	13	SOR収束残差
	14	SOR加速係数
	20	時間刻みファクター
	40	熱伝達係数
	41	SUS密度
	42	SUS比熱
	43	SUS熱伝導率
	44	外気温度
	30	ウラン濃度(g/L)
	31	硝酸濃度(mol/L)
	101	$\beta$ 1
	102	$\beta$ 2
	103	$\beta$ 3
	104	$\beta$ 4
	105	$\beta$ 5
	106	$\beta$ 6
	111	$\lambda$ 1
	112	$\lambda$ 2
	113	$\lambda$ 3
	114	$\lambda$ 4
	115	$\lambda$ 5
	116	$\lambda$ 6
	121	C1初期値
	122	C2初期値
	123	C3初期値
	124	C4初期値
	125	C5初期値
	126	C6初期値
	127	$\phi$ 初期値
	128	温度初期値

② VR-Editor (PHOENICS のプリプロセッサ) によるデータの作成

a) 解析対象の大きさ、計算時間の変更

- ・ PHOENICS の Editor を起動すると図 A.1 の画面が表示される。
- ・ 画面上部の「Options」の「Change working directory」を選択し、データが保存されて いるフォルダを選択する。

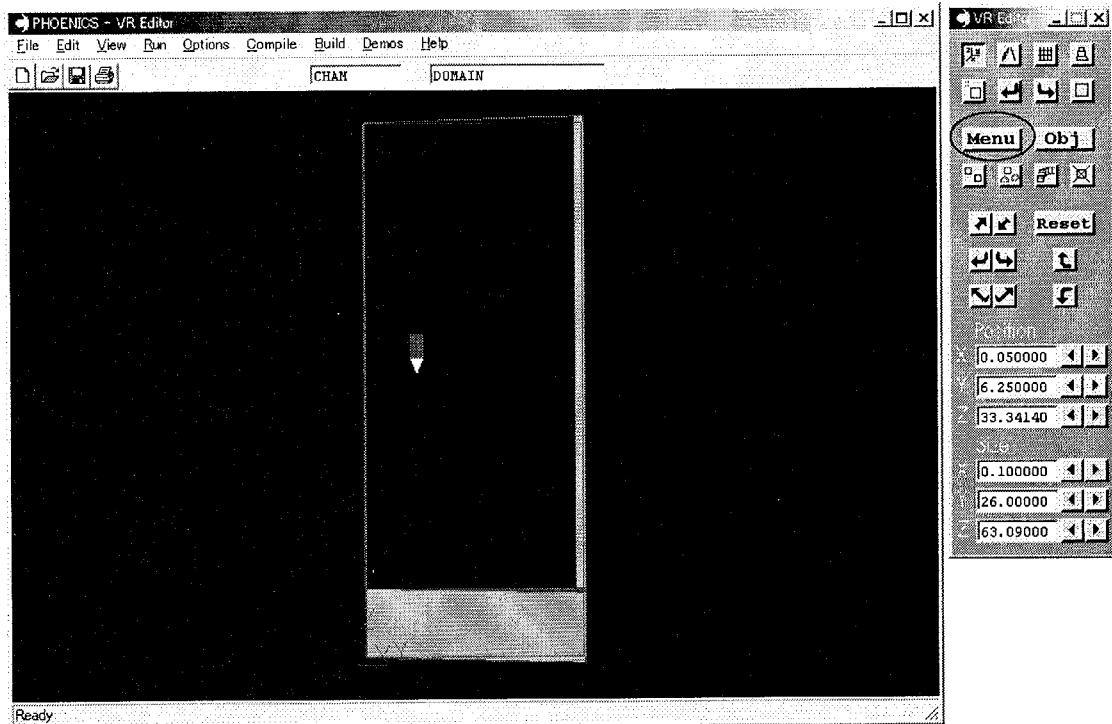


図 A.1 VR-Editor 初期画面

図 A.1 の右メニュー画面の「MENU」ボタンを押下すると図 A.2 の画面が表示される。解析対象の大きさや非定常計算の計算時間を調整する場合にはこの画面から配下のメニューにより行う。解析対象の大きさ、計算時間を変更する場合には図 A.2 画面の左上の「Geometry」ボタンを押下し図 A.3 の画面を表示させる。

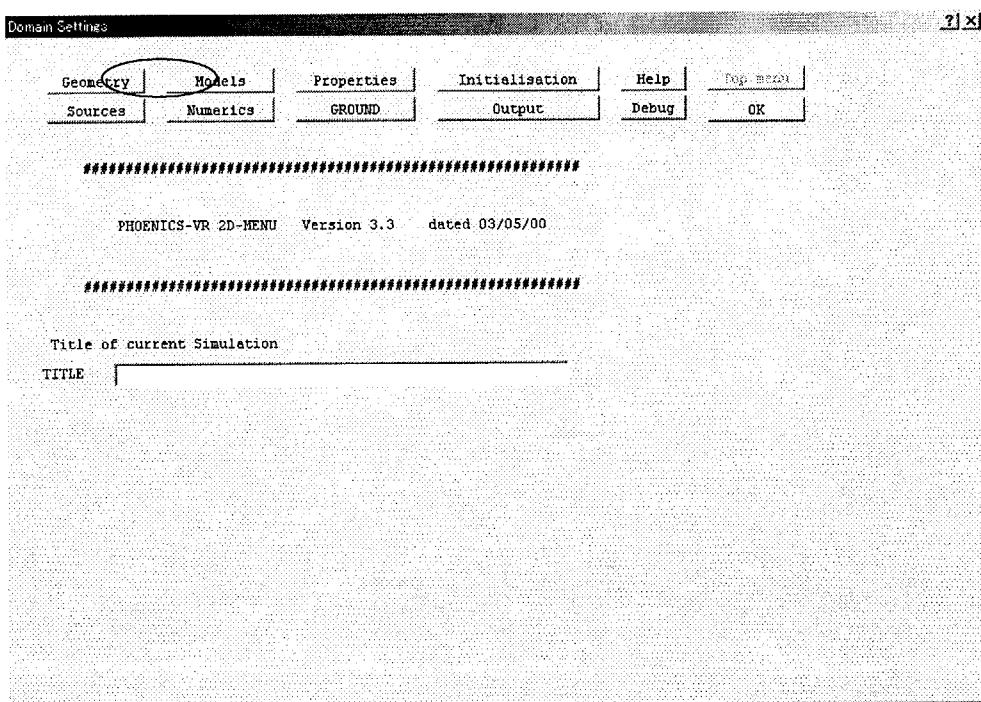


図 A.2 VR-Editor MENU 画面

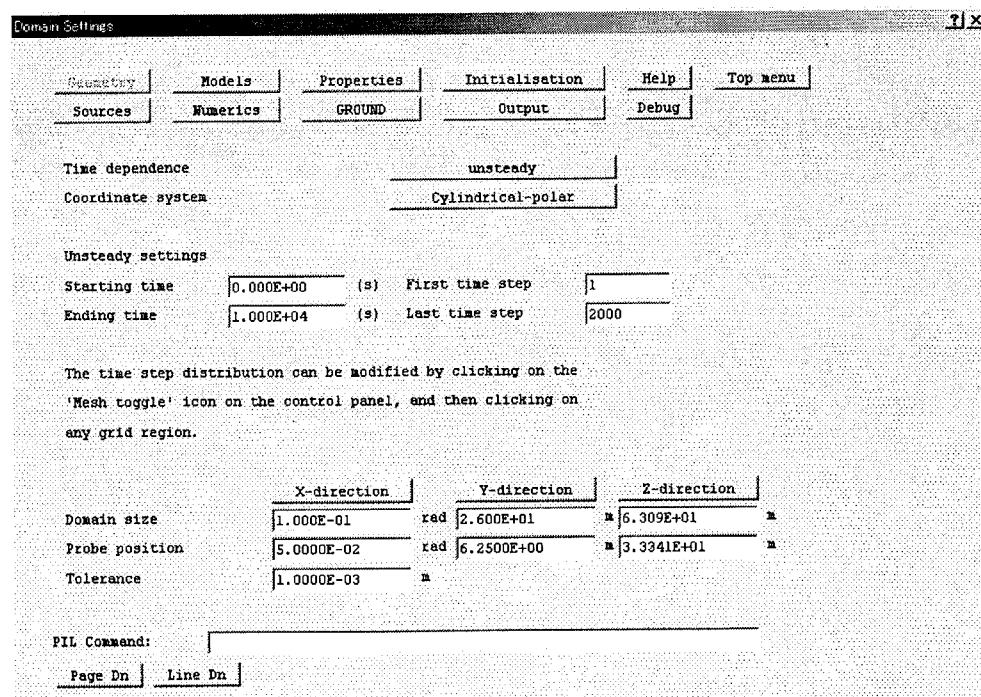


図 A.3 VR-Editor Geometry 画面 1

図 A.3 の下部に表示されている「Domain size」部分が解析対象の大きさを定義する部分である。

半径を変更する場合には「Y-direction」部分を変更する。また高さを変更する場合には「Z-direction」部分を変更する。内径を変更する場合には、図 A.3 画面の下部にある「Page Dn」ボタンを押下して図 A.4 画面を表示させ、「Inner radius」の値を変更する。図 A.4

画面において「Number of cells」の部分には計算格子の分割数が表示されるがこれは変更してはならない。

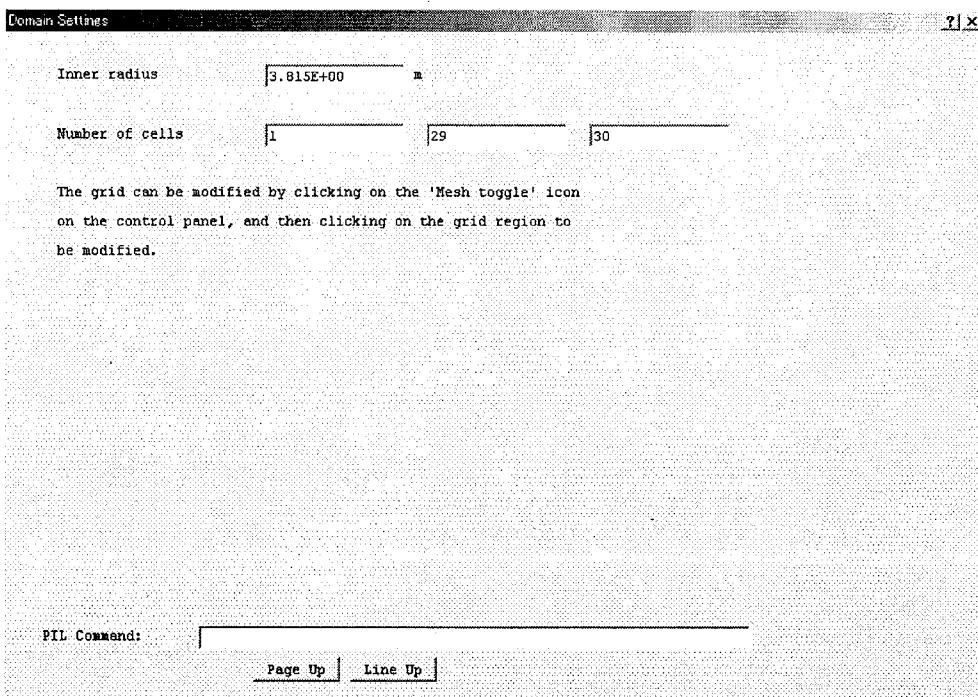


図 A.4 VR-Editor Geometry 画面 2

非定常計算の時間を変更する場合には、図 A.3 画面の中段に表示されている「Starting time」「Ending time」を変更する。本モデルにおいては「Starting time」は”0”固定で、「Ending time」（最終時刻）を変更する。同時に「First time step」「Last time step」の値を変更する。本モデルでは「Last time step」の値のみを変更する。ここで、「Ending time」に入力された値を「Last time step」の値で除した値が、流動の非定常計算の時間刻みとなる。

物性他の条件はエディタを用いて直接入力データファイル（Q1）ファイルに記述するので特に VR-Editor を用いて指定する必要はないが、VR-Editor の「Properties」ボタンを押下して表示される図 A.5 の画面において、「Density」「Viscosity」が「USER」となっていることを確認する。

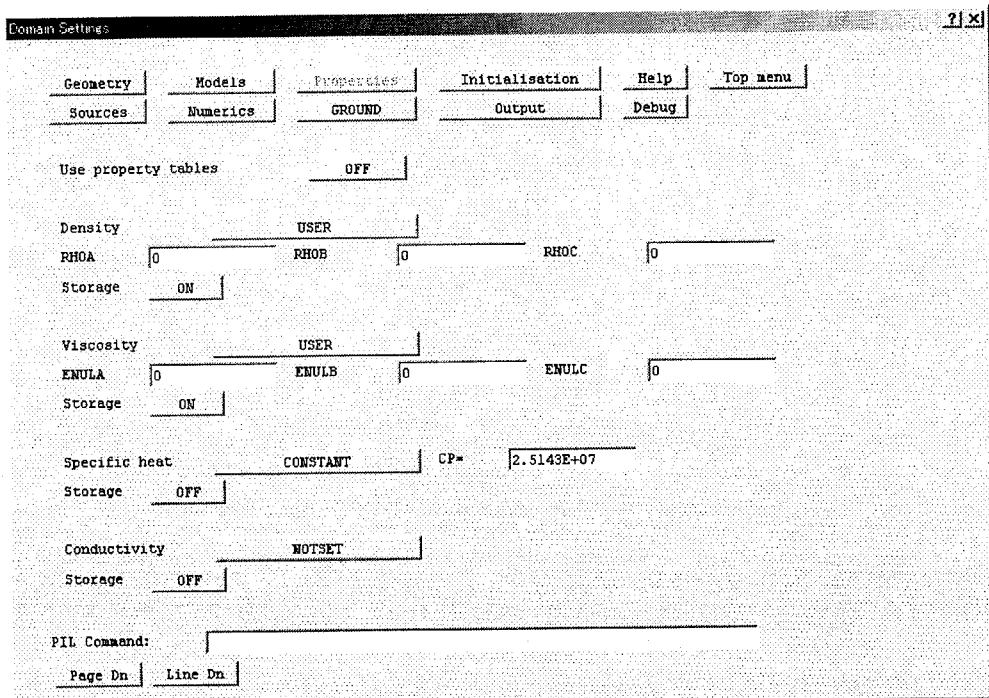


図 A.5 VR-Editor Properties 画面

### b) 障害物 (SUS) の大きさの変更

解析対象の大きさを変更する場合には、既に定義されている障害物（オブジェクト）の大きさも同時に変更する必要がある。

オブジェクトの大きさを変更する場合には、図 A.1において表示されている障害物を画面上でダブルクリックして図 A.6 画面を表示させる。

図 A.6 画面の「XPos」「YPos」「ZPos」部分は障害物が配置される位置（一般的にはオブジェクトの左下の位置）である。「XSize」「YSize」「ZSize」で障害物の大きさを定義する。

図 A.6 画面のその他の部分は特に操作する必要はない。

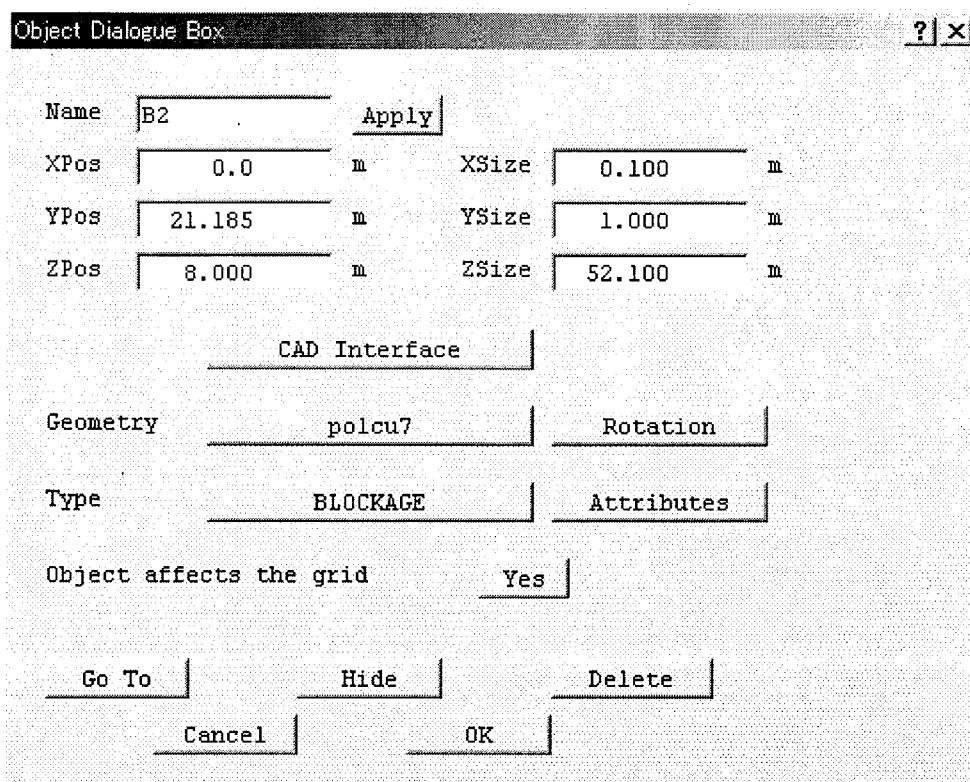


図 A.6 オブジェクト諸元

### ③ PHOENICS 入力データ (Q1 ファイル)

#### a) ファイルの保存

②において作成したデータは図 A.1 画面の左上「File」メニューの「Save working files」を選択して保存する。

#### b) 物性他の定義

a)で保存したデータ (Q1 ファイル) に物性情報他を追記する。

以下に Q1 ファイルを示す。

赤字の部分はエディタを用いてファイルに直接追記する。それ以外の部分は変更しない。

青字は注記であり Q1 ファイルには記述しない。

TALK=T;RUN( 1, 1)

```
*****
Q1 created by VDI menu, Version 3.4, Date 10/08/01
CPVNAM=VDI;SPPNAM=Core
*****
IRUNN = 1 ;LIBREF = 0
*****
Group 1. Run Title
TEXT(R174 H=52.1cm )
*****
Group 2. Transience
STEADY=F
```

```

* Set overall time and no. of steps
RSET(U,0.000000E+00,2.000000E+02,200)
* Modify regions
*****
Groups 3, 4, 5 Grid Information
* Overall number of cells, RSET(M,NX,NY,NZ,tolerance)
RSET(M,1,29,30)
* Set overall domain extent:
*      xulast yvlast zwlast
      name
XSI= 1.000000E-01; YSI= 2.218500E+01; ZSI= 6.300000E+01
RSET(D,CHAM )
* Cylindrical-polar grid
CARTES=F;RINNER=3.8150E+00
*****
Group 6. Body-Fitted coordinates
* X-cyclic boundaries switched
XYIZ( 2, T ) ; XYIZ( 3, T ) ; XYIZ( 4, T )
XYIZ( 5, T ) ; XYIZ( 6, T ) ; XYIZ( 7, T )
XYIZ( 8, T ) ; XYIZ( 9, T ) ; XYIZ( 10, T )
XYIZ( 11, T ) ; XYIZ( 12, T ) ; XYIZ( 13, T )
XYIZ( 14, T ) ; XYIZ( 15, T )
*****
Group 7. Variables: STOREd,SOLVED,NAMED
ONEPHS = T
* Non-default variable names
NAME( 22 ) =FAI ; NAME(148) =ENUL
NAME(149) =DEN1 ; NAME(150) =TEM1
* Solved variables list
SOLVE(P1 ,U1 ,V1 ,W1 )
* Stored variables list
STORE(TEM1,DEN1,ENUL,FAI ,C6 ,C5 ,C4 ,C3 )
STORE(C2 ,C1 )
* Additional solver options
SOLUTN(P1 ,Y,Y,Y,N,N,Y)
*****
Group 8. Terms & Devices
NEWRH1 = T
NEWENL = T
*****
Group 9. Properties
RHO1 = GRND
PRESS0 = 1.000000E+07
TEMPO = 2.730000E+02
CP1 = 2.514260E+07
ENUL = GRND ;ENUT = 0.000000E+00
DVO1DT = 4.053500E-04
*****
Group 10. Inter-Phase Transfer Processes
*****
Group 11. Initialise Var/Porosity Fields
FIINIT(C1 ) = 6.243710E+03 ;FIINIT(C2 ) = 1.622140E+04 C1···,φの初期値
FIINIT(C3 ) = 4.026970E+03 ;FIINIT(C4 ) = 2.998360E+03
FIINIT(C5 ) = 1.978650E+02 ;FIINIT(C6 ) = 2.601590E+01
FIINIT(FAI ) = 1.948120E+07 ;FIINIT(TEM1) = 2.754000E+01
No PATCHes used for this Group

```

INIADD = F

\*\*\*\*\*  
Group 12. Convection and diffusion adjustments

No PATCHes used for this Group

\*\*\*\*\*  
Group 13. Boundary & Special SourcesPATCH (GRV ,PHASEM,1,1,1,29,1,30,1,5000) 重力加速度の定義  
COVAL (GRV ,W1 , FIXFLU , GRND )

BUOYE = 2.500000E+01

\*\*\*\*\*  
Group 14. Downstream Pressure For PARAB\*\*\*\*\*  
Group 15. Terminate Sweeps

LSWEEP = 10

RESREF(P1 ) = 1.000000E-06 ;RESREF(V1 ) = 1.000000E-06

RESREF(W1 ) = 1.000000E-06

SELREF = F

\*\*\*\*\*  
Group 16. Terminate Iterations\*\*\*\*\*  
Group 17. Relaxation

RELAX(P1 ,LINRLX, 8.000000E-01)

RELAX(V1 ,FALSDT, 5.000000E-01)

RELAX(W1 ,FALSDT, 5.000000E-01)

\*\*\*\*\*  
Group 18. Limits

VARMAX(P1 ) = 1.000000E+10 ;VARMIN(P1 ) = -1.000000E+07

VARMAX(U1 ) = 1.000000E+06 ;VARMIN(U1 ) = -1.000000E+06

VARMAX(V1 ) = 1.000000E+06 ;VARMIN(V1 ) = -1.000000E+06

VARMAX(W1 ) = 1.000000E+06 ;VARMIN(W1 ) = -1.000000E+06

\*\*\*\*\*  
Group 19. EARTH Calls To GROUND Station

USEGRD = T ;USEGRX = T

ASAP = T

IDISPB = 1 ;IDISPC = 5000

RADIA = 0.000000E+00 ;RADIB = 0.000000E+00

EMISS = 0.000000E+00

CSG1 ='A'

IG( 1) = 1

IG( 11)= 1

IG( 12)= 1

IG( 13)= 17

IG( 21)= 1

IG( 31)= 7000

IG( 32)= 7000

IG( 33)= 1

IG( 34)= 1

IG( 35)= 1

RG( 1)= 2.300000E+00

RG( 2)= 2.200000E+05

RG( 3)= 5.000000E+00

RG( 4)= 5.000000E+00

RG( 5)= 1.450000E+00

RG( 6)= 2.000000E+02

RG( 11)= 1.000000E-07

RG( 12) = 1.700000E+00  
 RG( 13) = 1.000000E-07  
 RG( 14) = 1.400000E+00  
 RG( 20) = 1.000000E-03  
 RG( 30) = 3.884000E+02  
 RG( 31) = 6.000000E-01  
 RG( 40) = 3.000000E+04  
 RG( 41) = 7.800000E+00  
 RG( 42) = 6.000000E+06  
 RG( 43) = 2.000000E+06  
 RG( 44) = 2.200000E+01  
 RG(101) = 2.536410E-04  
 RG(102) = 1.646370E-03  
 RG(103) = 1.485830E-03  
 RG(104) = 2.991240E-03  
 RG(105) = 8.869890E-04  
 RG(106) = 3.226550E-04  
 RG(111) = 1.270310E-02  
 RG(112) = 3.170390E-02  
 RG(113) = 1.152560E-01  
 RG(114) = 3.116310E-01  
 RG(115) = 1.400300E+00  
 RG(116) = 3.874110E+00  
 RG(121) = 6.237100E+03  
 RG(122) = 1.622140E+04  
 RG(123) = 4.026970E+03  
 RG(124) = 2.998360E+03  
 RG(125) = 1.978650E+02  
 RG(126) = 2.601590E+01  
 RG(127) = 1.948120E+07  
 RG(128) = 2.754000E+01

\*\*\*\*\*

**Group 20. Preliminary Printout**

ECHO = T

\*\*\*\*\*

**Group 21. Print-out of Variables**

OUTPUT(P1 ,N,Y,Y,N,Y,Y)  
 OUTPUT(U1 ,Y,Y,Y,N,Y,Y)  
 OUTPUT(V1 ,N,Y,Y,N,Y,Y)  
 OUTPUT(W1 ,N,Y,Y,N,Y,Y)  
 OUTPUT(C1 ,N,N,Y,N,Y,N)  
 OUTPUT(C2 ,N,N,Y,N,Y,N)  
 OUTPUT(C3 ,N,N,Y,N,Y,N)  
 OUTPUT(C4 ,N,N,Y,N,Y,N)  
 OUTPUT(C5 ,N,N,Y,N,Y,N)  
 OUTPUT(C6 ,N,N,Y,N,Y,N)  
 OUTPUT(FAI ,N,N,Y,N,Y,N)  
 OUTPUT(TEM1,N,N,Y,Y,Y,N)

\*\*\*\*\*

**Group 22. Monitor Print-Out**

IXMON = 1 ;IYMON = 9 ;IZMON = 20  
 NPMRMON = 100000  
 NPMRMT = 1  
 TSTSWP = -1  
 UWATCH = F

\*\*\*\*\*

**Group 23. Field Print-Out & Plot Control**

NPRINT = 100000

```

NTPRIN = 99999 ;ISTPRF =      1 ;ISTPRL = 10000
NYPRIN =      1
NZPRIN =      1
YZPR =      T
ISWPRF =      1 ;ISWPRL = 100000
No PATCHes used for this Group
*****
Group 24. Dumps For Restarts
NOWIPE =      T
IDISPA = 1000 ;IDISPB =      1 ;IDISPC = 5000
CSG1 = 'A'

GVIEW(P,-1.000000E+00,0.000000E+00,0.000000E+00)
GVIEW(UP,0.000000E+00,1.000000E+00,0.000000E+00)

> DOM,      SIZE,      1.000000E-01, 2.218500E+01, 6.300000E+01
> DOM,      MONIT,     5.000000E-02, 6.925870E+00, 3.990000E+01
> DOM,      SCALE,     1.000000E+00, 1.000000E+00, 1.000000E+00
> DOM,      SNAPSIZ,   1.000000E-02
> GRID,    RSET_Y_1,   26, 1.000000E+00
> GRID,    RSET_Y_2,   3, 1.000000E+00
> GRID,    RSET_Z_1,   5, 1.000000E+00
> GRID,    RSET_Z_2,   25, 1.000000E+00
> DOM,      RELAX,    1.000000E-01

> OBJ1,    NAME,      B1
> OBJ1,    POSITION,   0.000000E+00, 0.000000E+00, 0.000000E+00
> OBJ1,    SIZE,      1.000000E-01, 2.218500E+01, 8.000000E+00
> OBJ1,    CLIPART,   polcu7
> OBJ1,    ROTATION24, 1
> OBJ1,    TYPE,      BLOCKAGE
> OBJ1,    MATERIAL,  111
> OBJ1,    TIME_LIMITS, ALWAYS_ACTIVE
> OBJ1,    HEAT_FLUX,  0.000000E+00, 0.000000E+00
> OBJ1,   INI_TEMP,   2.500000E+01

> OBJ2,    NAME,      B2
> OBJ2,    POSITION,   0.000000E+00, 2.118500E+01, 8.000000E+00
> OBJ2,    SIZE,      1.000000E-01, 1.000000E+00, 5.500000E+01
> OBJ2,    CLIPART,   polcu7
> OBJ2,    ROTATION24, 1
> OBJ2,    TYPE,      BLOCKAGE
> OBJ2,    MATERIAL,  111
> OBJ2,    TIME_LIMITS, ALWAYS_ACTIVE
> OBJ2,    HEAT_FLUX,  0.000000E+00, 0.000000E+00
> OBJ2,   INI_TEMP,   2.500000E+01

> OBJ3,    NAME,      B3
> OBJ3,    POSITION,   0.000000E+00, 0.000000E+00, 8.000000E+00
> OBJ3,    SIZE,      1.000000E-01, 8.146153E-01, 2.080000E+00
> OBJ3,    CLIPART,   polcubt2
> OBJ3,    ROTATION24, 1
> OBJ3,    TYPE,      PRESSURE_RELIEF
> OBJ3,    PRES_RELIEF, 1.000000E+03, 0.000000E+00
STOP

```

### 3) 計算実行

- ①図 A.1 画面の上部「Compile」メニューの「Ground」を選択。DOS 窓が表示されるので、メッセージに従い窓を閉じる。
- ②図 A.1 画面上部の「Build」メニューの「Earth」を選択。Compile と同じく DOS 窓が表示されるのでメッセージに従い窓を閉じる。
- ③図 A.1 画面の上部「Options」の Run Version→Earth→Private を選択
- ④図 A.1 画面上部の「Run」メニューの「Earth」を選択する。

### 4) 結果確認

計算実行後、正常に終了していればカレントのフォルダに「ascfai.dat」と「aaa1.dat」「bbb1.dat」というファイルが作成される。ascfai.dat はリストア用のファイルであり、aaa1.dat は $\phi$ と C1~C6 の時系列データが保存され、bbb1.dat には出力、エネルギーの時系列データが保存される。Excel を用いて aaa1.dat、bbb1.dat の結果を実験結果と比較する。

## 2. 液位を上昇させた場合の計算

### 1) データの移動

「1. 定常液位の計算」終了後、1.定常液位の計算で用いたフォルダを別名コピーし、コピー先のフォルダを PHOENICS のワークディレクトリとする（1章2）PHOENICS 入力データの作成の②を参照）。ascfai.dat と tpower.dat ファイルがリストア用データとして使用される。

### 2) PHOENICS 入力データ（Q1）の作成

#### ①液位上昇分の設定。

「1章 2」VR-Editor (PHOENICS のプリプロセッサ) によるデータの作成 ②PHOENICS 入力データの作成 a) 解析対象の大きさ、計算時間の変更」を参照し液位上昇分の解析体系に変更する。合わせて所定の時間を設定

②1章で用いたものと殆ど同じであるが、Q1 ファイルに “LG(1)=T” を 1 行追加する。

### 3) 計算実行

「1章 3) 計算実行」と同じ手順

### 4) 結果確認

「1章 4」 結果確認」と同じ手順

以上

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラクタン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	L, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV =  $1.60218 \times 10^{-19}$  J

1 u =  $1.66054 \times 10^{-27}$  kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
ペニン	b
ペニル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å =  $0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$

1 b =  $100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$

1 bar =  $0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$

1 Gal =  $1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$

1 Ci =  $3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

1 R =  $2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$

1 rad =  $1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$

1 rem =  $1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、メット、アール、ヘクトアルも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

## 換 算 表

力	N( $=10^5$ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$

動粘度  $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$

圧力	MPa( $=10 \text{ bar}$ )	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-4}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J( $=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	9.47813 $\times 10^{-4}$	0.737562	6.24150 $\times 10^{18}$	$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$	
9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	9.29487 $\times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$	$= 4.1855 \text{ J (15 }^\circ\text{C)}$	
$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^4$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$	
4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-4}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仮馬力)	
1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	$= 75 \text{ kgf}\cdot\text{m/s}$	
1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-1}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	$= 735.499 \text{ W}$	
$1.60218 \times 10^{19}$	$1.63377 \times 10^{20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	$2.70270 \times 10^{11}$	1	1	100	
$3.7 \times 10^{19}$	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1		3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量	Sv	rem
1		100
0.01		1

(86年12月26日現在)

熱流動解析コード PHOENICSを組み込んだ燃料溶液体系の動特性解析コードの開発及びTRACYの自然冷却特性実験の解析（受託研究）



古紙配合率100%  
白色度70%の再生紙を使用しています