

J A E R I - M
89-001

高温工学試験研究炉の炉内 2 次元温度分布解析
コードTAC-NCとその検証

1 9 8 9 年 2 月

国富 一彦・中川 繁昭・鈴木 勝男
和田 穂積*・平野 光将

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

JAERI-M 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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

高温工学試験研究炉の炉内 2 次元温度分布解析
コード TAC-NC とその検証

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉設計室

国富一彦・中川繁昭・鈴木勝男⁺・和田穂積^{*}

平野光将

(1989年1月6日受理)

2次元熱計算コード TAC-NC は、高温工学試験研究炉 (HTTR : High-Temperature engineering Test Reactor) の 1 次冷却設備二重管破断事故 (減圧事故) などの温度分布解析のために、非定常温度挙動を解析する計算コード TAC-2D の解析モデルを拡張し、自然循環量の計算ができるようにしたものである。

本報は、上記の解析モデルと TAC-NC の検証解析の結果をまとめたものである。検証解析としては、HTTR の配管破断を模擬した配管破断時空気侵入実験との比較検討を行った。

その結果、温度分布及び自然循環量とも、検証解析結果は実験結果とよく一致し、モデル及び使用したデータの妥当性が確認された。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀3607

+ 原子炉工学部

* 三菱原子力工業株式会社

Two-dimensional Thermal Analysis Code "TAC-NC" for High Temperature
Engineering Test Reactor and its Verification

Kazuhiko KUNITOMI, Shigeaki NAKAGAWA, Katsuo SUZUKI⁺
Hozumi WADA^{*} and Mitsumasa HIRANO

HTTR Designing Laboratory
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 6, 1989)

The two-dimensional thermal analysis code "TAC-NC" is revised from the analytical code "TAC-2D" for transient thermal behaviour to calculate natural convection in case of loss of forced cooling accidents or phenomena such as a depressurization accident of HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor).

This report describes the analytical model of the "TAC-NC" code and its verification results. Analytical results of the "TAC-NC" code were compared with the experimental results of the air ingress test apparatus which is a small scale simulation of HTTR. Analytical results on temperature and flow rate of natural convection were in good agreement with those of experimental results.

Keywords : HTTR, Depressurization Accidents, Natural Convection, Code Verification, Thermal and Hydraulic Design

+ Department of Reactor Engineering

* Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

目 次

1. 緒 言	1
2. 2次元温度分布の解析モデル	2
2.1 熱 計 算	2
2.2 自然循環流量計算	3
2.3 計 算 手 順	4
3. 検 証 解 析	5
3.1 実験装置と実験内容の概要	5
3.2 解析条件と解析モデル	5
3.3 解 析 結 果	6
4. 結 言	8
謝 辞	9
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Analytical Model of Two Dimensional Temperature Distribution ...	2
2.1 Heat Transfer Analysis	2
2.2 Natural Convection Analysis	3
2.3 Calculation Process	4
3. Verification Analysis	5
3.1 Outline of Test Apparatus and Contents	5
3.2 Analytical Conditions and Model	5
3.3 Analytical Results	6
4. Conclusions	8
Acknowledgements	9
References	9

1. 緒 言

現在日本原子力研究所では、熱出力30MW、原子炉出口冷却材温度 950°C の高温工学試験研究炉 (HTTR : High Temperature engineering Test Reactor) の設計を進めている⁽¹⁾。

HTTR の構造断面図を Figs 1.1～1.2 に示す。HTTR の炉心は、6 角柱状の燃料体及び可動反射体を積み重ねたカラムの集合体からなり、炉心外周は黒鉛製の固定反射体により囲まれている。これらの炉心は、高温プレナムブロック、炉床部断熱層、炉心支持格子等の炉内構造物を介して、圧力容器下部で支持されている。炉心の冷却材であるヘリウムガスは、1 次ヘリウム配管 (高温二重配管外管) より炉心内へ流入し、圧力容器を冷却しながら上昇する。ここで流れは反転して炉心で 950°C に加熱された後、再び 1 次ヘリウム配管 (高温二重配管内管) より圧力容器外へ流出する。

HTTR ではこのように、炉心部に熱容量の大きい黒鉛を使用し、化学的に不活性なヘリウムガスを冷却材として用いることにより、冷却能力の異常な低下などが生じても、炉心温度変化が緩慢で、冷却材と燃料などとの化学的相互作用が少ないという特徴を有している。

HTTR の安全評価では、軽水炉の安全評価指針を参考として、HTTR 固有の特性を考慮し、予想される運転時の異常な過渡変化及び事故事象を抽出している。事故事象の中で一次冷却設備二重管破断事故 (減圧事故) は、1 次系の主配管の破断により、冷却材が系外へ放出して、一次冷却材圧力が急速に低下する事象である。また、1 次冷却設備二重管内管破損事故 (内管破損事故) は、二重管内管の破損により、1 次冷却材が炉心をバイパスする事象である。いずれの事象も、1 次冷却材による炉心の冷却が不可能となるため、炉心及び圧力容器の温度などが上昇する可能性がある。

このため、減圧事故及び内管破損事故時の炉心、炉内構造物及び圧力容器の温度分布、炉内の自然循環量を詳細に評価する必要がある。そこで、GA 社で開発された汎用 2 次元伝熱計算コード TAC-2D⁽²⁾⁽³⁾ を自然循環をモデル化できるように拡張し TAC-NC とした。TAC-NC では、従来からの機能である熱伝導、熱放射及び冷却材と構造物との熱伝達の計算に加えて、自然循環の計算、自然循環による構造材と冷却材との伝熱量が計算できる。

自然循環モデルの妥当性、計算精度の検証は、配管破断時空気侵入実験⁽⁴⁾との比較解析を実施することにより行った。本報では、追加した自然循環モデルを 2.2 章に示すとともに、配管破断時空気侵入実験との比較解析の結果を示す。

2. 2次元温度分布の解析モデル

2.1 热計算

热計算は、(2.1)式に示す非定常热伝導方程式で表わすことができる。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla K \cdot \nabla T + q \quad (2.1)$$

ここで、
k : 热伝導率
T : 温度
t : 時間

q : 発熱量
 ρ : 密度
C : 構造材の比热

(2.1)式を差分方程式に変換し、Peaceman and Rachfordの繰り返し法：ADI法(Alternating Direction Implicit Iterative Method)を用いて解く。

冷却材の温度計算については(2.2)式で表わすことができる。

$$WC_p \cdot dT_c = hS (T_b - T_c) dz \quad (2.2)$$

ここで、
C_p : 冷却材の比熱
h : 热伝達率
S : 伝熱面積
T_b : 構造物温度
T_c : 冷却材温度
W : 冷却材流量

冷却材は座標軸(円筒座標の場合r, z, 直行座標の場合x, y)に平行な流れ方向のみの取り扱いが可能である。また、冷却材流路において、流れ方向と垂直な面においての温度差はないものとする。

ふく射については、冷却材流路をはさむ構造物間、構造物と構造物の間の取り扱いが可能であり、(2.2)式で表わすことができる。

$$q_r = \frac{A \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2.3)$$

ここで、
q_r : ふく射伝熱量
A : ふく射面の伝熱面積
T₁ : ふく射面1の温度

T_2 : ふく射面 2 の温度 σ : ステファンボルツマン定数 ε_1 : ふく射面 1 のふく射率 ε_2 : ふく射面 2 のふく射率

2.2 自然循環流量計算

自然循環流量の計算においては、Fig. 2.1 に示すような流路及びプレナムを仮定する。各流路に運動方程式、プレナムに連続の式及び状態方程式を適用して、これらを連立にして解くことにより自然循環量を求める。

各流路の運動方程式は、次のように表わすことができる。

$$\frac{D u_i}{Dt} = - \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial P_i}{\partial z} - g - \left(\frac{\lambda_i}{d_i} + c_i \right) \frac{1}{2} |u_i| u_i \quad (2.4)$$

ここで c : 流路の出入口損失係数

d : 流路の等価直径

P : 冷却材圧力

u : 流速

ρ : 密度

λ : 流路の摩擦損失係数

i : 流路番号

z : 流れ方向の座標

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial z}$$

(2.4) 式の左辺は流体に作用する慣性力、右辺第 1 項は圧力勾配による力、第 2 項は重力による力、第 3 項は摩擦力を示す。

プレナムに適用する連続の式及び状態方程式は次のように表わすことができる。

$$\frac{dM}{dt} = \sum_i^n u_i \rho_i g A_i \quad (2.5)$$

ここで M : プレナム中の気体の質量

i : プレナムと結合している流路の番号

A : 流路断面積

$$P_j V_j = M_j R_j T_j \quad (2.6)$$

ここで P : プレナムの圧力

V : プレナムの体積

R : 気体定数

T : プレナムの温度

j : プレナムの番号

自然循環による冷却材と構造材との熱計算は、自然循環流量を求める計算ステップとは独立して行う。すなわち、流路については流体と構造物との間の交換熱量を各時間ステップごとに計算し、次の時間ステップの熱計算の発熱項((2.1)式のq)として考慮する。また、プレナムについては、プレナム内の熱量の変化を次の時間ステップの熱計算の発熱項として考慮する。

(1) 流路の熱計算

$$C_{pi} W_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = h_i A_i (T_{Bi} - T_i) \quad (2.7)$$

ここで A : 伝熱面積

C_P : 流体の比熱

W : 流量

T : 流体の温度 (計算上は要素の入口部のヘリウムガス温度と
出口部のヘリウムガス温度の平均値)

h : 流体の熱伝達率

T_B : 流路のまわりの構造物温度

h : 热伝達率

z : 流体の流れ方向の座標

(2.7) 式を書き変えると、各要素の出口温度は(2.8)式のように表せる。

$$T_{out} = T_B - (T_{in} - T_B) \cdot e^{-\frac{hA\Delta Z}{C_p W}} \quad (2.8)$$

T_{in} : ブロック入口の冷却材温度T_{out} : 冷却材が ΔZ だけ流れた後の温度

(2) プレナム部の熱計算

$$\nabla K \nabla T + S = \rho_c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

Sは、プレナム内へ流入する熱量を示し、プレナムと結合する流路のエネルギーバランスより(2.10)式で示すことができる。

$$S = \sum_{i=1}^n W_i C_{pi} T_i \quad (2.10)$$

2.3 計算手順

TAC-NCの計算手順のフローチャートをFig.2.2に示す。まず、自然循環が発生していない

状況での定常の温度分布計算を実施する。自然循環流路の初期圧力、プレナム部の初期質量等を設定した後、各流路の流量計算を行う。その後、流体と構造物の伝熱計算を行い、さらに解析モデル全体での構造物の温度分布計算を行う。このようなステップを繰り返して非定常温度分布解析を実施する。

3. 検証解析

本コードの検証解析は、配管破断時空気侵入実験⁽⁴⁾の結果を用いて実施した。配管破断時空気侵入実験は、高温工学試験研究炉の1次冷却設備二重配管が完全破断した場合に、圧力容器内へ侵入する空気の挙動及び温度挙動を把握するための実験である。実験装置は、試験研究炉の約1/6スケールの実験容器、炉心部を模擬した電気ヒータ部、二重配管等で構成されており、実験装置内各部の温度及び侵入する空気の流量等を計測することができる。検証解析では、これらの実験装置を2次元軸対称でモデル化し、実験装置内の各部の温度及び侵入する空気の流量について、実験結果と解析結果の比較を行った。

3.1 実験装置と実験内容の概要

実験装置の概略図をFig.3.1に主要仕様をTable 3.1に示す。本装置では、試験研究炉の炉心部を43本のパイプヒータで模擬した。パイプヒータの長さは1200 mm、内径は12.7 mmであり、1本あたりの最大発热量は36 Wで、空気またはヘリウムガスを最高450°Cまで加熱することができる。実験容器は内径約520 mm、高さ約2360 mm、上鏡部及び下鏡部の内半径は250 mmである。実験容器内の各部には、温度計測用のK型熱電対が設置してある。温度計測点及び点数をTable 3.2に、主な計測位置をFig.3.2に示す。また、実験開始後、実験容器内へ侵入する空気の流量を実験容器入口部で計測した。

実験は、まず初めに実験容器の出入口管部をフランジ蓋により閉じておき、加熱ヒータにより模擬炉心を所定の温度まで加熱した。加熱中は、下鏡部に設けた均圧弁を開とすることにより、実験容器内の内圧を一定に保ち、実験容器の温度が定常になったことを確認した後、出入管部のフランジ蓋を取りはずし、実験を開始した。

3.2 解析条件と解析モデル

本検証解析では、Table 3.3に示す条件の実験との比較解析を実施した。解析モデルをFig.3.3に示す。また、解析用メッシュ図をFig.3.4に示す。実験装置を2次元軸対称で模擬する。ただし、上鏡部及び下鏡部については、半球形状を平面形状でモデル化した。また、模擬炉心部については、パイプヒータとパイプヒータ間の断熱材（ファインフレックス）を体積平均して、等価な熱伝導率及び等価な比熱を求めて用いた。また、上部プレナム、下部プレナム及び高温ブ

状況での定常の温度分布計算を実施する。自然循環流路の初期圧力、プレナム部の初期質量等を設定した後、各流路の流量計算を行う。その後、流体と構造物の伝熱計算を行い、さらに解析モデル全体での構造物の温度分布計算を行う。このようなステップを繰り返して非定常温度分布解析を実施する。

3. 検証解析

本コードの検証解析は、配管破断時空気侵入実験⁽⁴⁾の結果を用いて実施した。配管破断時空気侵入実験は、高温工学試験研究炉の1次冷却設備二重配管が完全破断した場合に、圧力容器内へ侵入する空気の挙動及び温度挙動を把握するための実験である。実験装置は、試験研究炉の約1/10スケールの実験容器、炉心部を模擬した電気ヒータ部、二重配管等で構成されており、実験装置内各部の温度及び侵入する空気の流量等を計測することができる。検証解析では、これらの実験装置を2次元軸対称でモデル化し、実験装置内の各部の温度及び侵入する空気の流量について、実験結果と解析結果の比較を行った。

3.1 実験装置と実験内容の概要

実験装置の概略図をFig.3.1に主要仕様をTable 3.1に示す。本装置では、試験研究炉の炉心部を43本のパイプヒータで模擬した。パイプヒータの長さは1200 mm、内径は12.7 mmであり、1本あたりの最大発热量は36 Wで、空気またはヘリウムガスを最高450°Cまで加熱することができる。実験容器は内径約520 mm、高さ約2360 mm、上鏡部及び下鏡部の内半径は250 mmである。実験容器内の各部には、温度計測用のK型熱電対が設置してある。温度計測点及び点数をTable 3.2に、主な計測位置をFig.3.2に示す。また、実験開始後、実験容器内へ侵入する空気の流量を実験容器入口部で計測した。

実験は、まず初めに実験容器の出入口管部をフランジ蓋により閉じておき、加熱ヒータにより模擬炉心を所定の温度まで加熱した。加熱中は、下鏡部に設けた均圧弁を開とすることにより、実験容器内の内圧を一定に保ち、実験容器の温度が定常になったことを確認した後、出入管部のフランジ蓋を取りはずし、実験を開始した。

3.2 解析条件と解析モデル

本検証解析では、Table 3.3に示す条件の実験との比較解析を実施した。解析モデルをFig.3.3に示す。また、解析用メッシュ図をFig.3.4に示す。実験装置を2次元軸対称で模擬する。ただし、上鏡部及び下鏡部については、半球形状を平面形状でモデル化した。また、模擬炉心部については、パイプヒータとパイプヒータ間の断熱材（ファインフレックス）を体積平均して、等価な熱伝導率及び等価な比熱を求めて用いた。また、上部プレナム、下部プレナム及び高温ブ

レナムについては、プレナムを介して対する表面でのふく射を考慮した。解析に用いた主な物性値を Table 3.4 に示す。

自然循環流路のモデル図を Fig.3.5 に示す。自然循環流路は、模擬炉心部流路、模擬炉心側部流路、出口管及び入口管より構成され、各流路は上部プレナム、下部プレナム、又は高温プレナムのいずれかと結合している。各流路の自然循環量の計算に用いる摩擦損失係数(λ)及び流路の出入口損失係数(c)を Table 3.5 に示す。また、各流路の熱伝達率は、次の(3.1)(3.2)式に基いて決定した。⁽⁵⁾⁽⁶⁾

円管流路

$$R_e \geq 6000$$

$$N_u = 0.02 R_e^{0.8} Pr^{0.4} (T_b/T_w)^{0.5} \quad (3.1)$$

$$R_e < 6000$$

(3.1) 式の $R_e = 6000$ の N_u 数を用いる。

環状流路

$$R_e \geq 5000$$

$$N_u = 0.018 (1/\alpha)^{0.16} R_e^{0.8} \cdot Pr^{0.4} (T_b/T_w)^{0.5} \quad (3.2)$$

$$R_e < 5000$$

(3.2) 式の $R_e = 5000$ の N_u 数を用いる。

ここで

N_u : ヌッセルト数

Pr : プラントル数

R_e : レイノルズ数

T_b : バルク温度

T_w : 壁面温度

α : 内外径比

3.3 解析結果

(1) 側部断熱材熱伝導率

模擬炉心側部の断熱材の熱伝導率は、断熱材中の自然対流及び断熱材支持用の構造材の熱伝導等の影響で、断熱材単体の熱伝導率よりはかなり大きくなると考えられる。⁽⁷⁾しかし、これらの影響を含めた断熱材の等価熱伝導率は、定量的に求められていない。そこで、断熱材の等価熱伝導率をパラメータとして、実験装置を加熱した時の定常温度分布解析を実施し、実験結果との比較を行った上で、断熱材の等価熱伝導率を選定した。Fig. 3.6 に、加熱時の定常状態における半径方向の温度分布と軸方向の温度分布の実験値と解析値の比較を示す。比較する実験として、模擬炉心中心温度 300°C (実験番号 1 及び 2) を選び、解析としては断熱材の熱伝導を断熱材単体の値及び断熱材の単体の 4 倍の 2 ケースを実施した。これらの結果、断熱材の熱伝導率を 4 倍とした解析ケースでは、模擬炉心の半径方向、軸方向とも、実験値と解析値がよく一致した。従って非定常解析は、断熱材の等価熱伝導率を断熱材単体の 4 倍の値を用いて実施するものとした。

(2) 模擬炉心温度

Figs. 3.7～3.8に実験番号1(Table 3.3参照)の模擬炉心ヒータパイプ温度の実測値と解析値の比較を示す。Fig. 3.7は模擬炉心中央部のヒータパイプ温度、Fig. 3.8は模擬炉心周辺部のヒータパイプ温度をそれぞれ軸方向に3点示したものである。模擬炉心の下部及び中央部においては実測値と解析値はよく一致している。模擬炉心の上部のヒータパイプ温度は、実験開始後約2時間までは上昇している。これは、実験開始後に発生した自然循環により、模擬炉心の下部及び中央部の熱が模擬炉心の上部へ運ばれたためであり、解析値も実測値と同様の傾向を示している。しかし、実測値が解析値に比べて約15°C高くなっている。

Figs. 3.9～3.11は実験番号2についての模擬炉心のヒータパイプ温度を、それぞれ軸方向に3点示したものである。また、Figs. 3.12～3.14は実験番号3についての模擬炉心のヒータパイプ温度を、それぞれ軸方向に3点示したものである。これらについても、実験番号1と同様に模擬炉心の上部において、実測値が解析値より高い傾向を示している。

Fig. 3.15に模擬炉心側部の空気温度の実測値と解析値の比較を示す。実験開始後5時間までは解析値が実測値に比べて約15°C高くなっているが、その後はよく一致している。

Figs. 3.16～3.18は、実験番号1について解析より得られた等温線図と実測値の比較を示したものである。実験開始前においては、実験装置内の最高温度は模擬炉心の中央部に発生する。実験開始後は時間が経過するにしたがって、実験装置内の最高温度は模擬炉心の上部に移動する。また、時間の経過に伴って最高温度は低下する。これらの傾向は、実測値及び解析値とも同様の傾向を示している。

これらの結果のうち、実験装置内の最高温度については解析値の方が実測値より高くなっているが、模擬炉心上部におけるヒータパイプ温度については実測値が解析値よりも約15°C高くなっている。この原因是次のように考えられる。実験装置内の初期温度分布を一致させるために、断熱材の等価熱伝導率をパラメータとして温度分布解析を実施し、最適な等価熱伝導率を決定した。しかし、実験装置内のすべての部分の温度について実測値と解析値を一致させるためには、実験装置内各部分の等価熱伝導率のばらつき等を考慮して、各部分の等価熱伝導率の最適化をする必要がある。今回の検証解析においては、模擬炉心部の等価熱伝導率は各部分の温度依存性は考慮しているが、物性値のばらつき等については考慮していない。したがって、実測値と解析値が異ったと考えられる。

そこで、模擬炉心上部の等価熱伝導率の見直しを行い実測値と解析値の比較を行った。模擬炉心上部のヒータパイプ温度の実測値と解析値の比較をFigs. 3.19～3.20に示す。実験開始後の実測値と解析値はよく一致しており、等価熱伝導率の局所的な違い等を詳細に評価すれば、解析モデルが妥当だと考えられる。

HTTRの炉内温度分布解析を実施するにあたっては、解析結果が十分に保守的になるように等価熱伝導率を次のように決定する。

- ① 炉心を構成する黒鉛材等の物性値については、その照射による変化、温度依存性等を考慮し、さらにそのばらつきとして±20%を考慮し評価対象に応じて安全側に使い分ける。
- ② 炉心の燃料ブロック及び制御棒ブロックの等価熱伝導率を決定するためには、熱伝導率の方向性を考慮して、対角方向及び対面方向の熱伝導率を計算し、評価対象に応じて、熱伝導率の

大きさの使い分けを行う。

また、炉心構成材料のふく射率についても評価対象に応じて最大値と最小値の使い分けを行う。さらに、燃料ブロック内の冷却材流路を流れる冷却材の熱伝達率は、燃料ブロックの温度を高めに評価するように、その熱伝達率に-13%の保守性を考慮している。

以上のような保守性を考慮することにより、解析値の初期温度が実測値の初期温度に比べて十分高くなり、解析結果が十分に保守的になる。

(3) 自然循環量

Figs. 3.21～3.22に、実験番号1における自然循環量及自然循環力の時間変化を示す。自然循環力の実測値は、模擬炉心部と模擬炉心側部の空気温度の実測値により密度差を求めたものであり、解析値とよく一致している。このことは、温度分布の実測値と解析値がよく一致していることを示している。しかし、自然循環量は、解析値が実測値の約1.5倍になる。この原因としては、実験装置の流路の圧力損失が、解析モデルの圧力損失より大きいためと考えられる。そこで、模擬炉心部流路の摩擦損失係数を約2倍とした。自然循環量の初期値は、実測値と解析値がよく一致したが、試験開始後の自然循環量は依然解析値の方が大きい結果となった。Figs. 3.23～3.24は、それぞれ実験番号2、実験番号3に対応する自然循環量の実測値と解析値の比較を示したものであるが、実験番号1と同様に解析値の方が大きくなつた。

しかし、HTTRの減圧事故の炉心温度評価においては、自然循環量の絶対量が小さいため炉心温度への影響を無視できる。一方、燃料ブロック及び炉内構造物の酸化、FP評価においては自然循環量が支配的となる。従って、事故後の自然循環量を大き目に評価すれば、酸化量及びFP放出量を保守的に評価できるため、この意味でTAC-NCを用いた自然循環量の評価は十分に妥当であると考えられる。

4. 結 言

配管破断時空気侵入実験の結果を用いて、炉内2次元温度分布解析TAC-NCの検証を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 自然循環量は、解析値が実測値に比べて多くなつておる、HTTR減圧事故時における黒鉛酸化評価、FP放出評価の観点からは十分安全側である。また、自然循環力については、解析値は実測値によく一致した。自然循環力については解析値が実測値とよく一致しているのに対して、自然循環量については解析値が実測値より多くなるのは、自然循環流路の圧力損失が安全側に小さく見積られているためである。
- (2) 温度評価については、実験装置内の断熱材、ヒータパイプ等の構造物の等価熱伝導率を用いることにより、解析値は実測値によく一致した。特に、実験装置内の最高温度を評価する観点からは、十分に安全側である。

以上のことから、TAC-NCによりHTTRの減圧事故等の安全評価を行うことが十分に妥当であることがわかった。

大きさの使い分けを行う。

また、炉心構成材料のふく射率についても評価対象に応じて最大値と最小値の使い分けを行う。さらに、燃料ブロック内の冷却材流路を流れる冷却材の熱伝達率は、燃料ブロックの温度を高めに評価するように、その熱伝達率に-13%の保守性を考慮している。

以上のような保守性を考慮することにより、解析値の初期温度が実測値の初期温度に比べて十分高くなり、解析結果が十分に保守的になる。

(3) 自然循環量

Figs. 3.21～3.22に、実験番号1における自然循環量及自然循環力の時間変化を示す。自然循環力の実測値は、模擬炉心部と模擬炉心側部の空気温度の実測値により密度差を求めたものであり、解析値とよく一致している。このことは、温度分布の実測値と解析値がよく一致していることを示している。しかし、自然循環量は、解析値が実測値の約1.5倍になる。この原因としては、実験装置の流路の圧力損失が、解析モデルの圧力損失より大きいためと考えられる。そこで、模擬炉心部流路の摩擦損失係数を約2倍とした。自然循環量の初期値は、実測値と解析値がよく一致したが、試験開始後の自然循環量は依然解析値の方が大きい結果となった。Figs. 3.23～3.24は、それぞれ実験番号2、実験番号3に対応する自然循環量の実測値と解析値の比較を示したものであるが、実験番号1と同様に解析値の方が大きくなつた。

しかし、HTTRの減圧事故の炉心温度評価においては、自然循環量の絶対量が小さいため炉心温度への影響を無視できる。一方、燃料ブロック及び炉内構造物の酸化、FP評価においては自然循環量が支配的となる。従って、事故後の自然循環量を大き目に評価すれば、酸化量及びFP放出量を保守的に評価できるため、この意味でTAC-NCを用いた自然循環量の評価は十分に妥当であると考えられる。

4. 結 言

配管破断時空気侵入実験の結果を用いて、炉内2次元温度分布解析TAC-NCの検証を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 自然循環量は、解析値が実測値に比べて多くなつておる、HTTR減圧事故時における黒鉛酸化評価、FP放出評価の観点からは十分安全側である。また、自然循環力については、解析値は実測値によく一致した。自然循環力については解析値が実測値とよく一致しているのに対して、自然循環量については解析値が実測値より多くなるのは、自然循環流路の圧力損失が安全側に小さく見積られているためである。
- (2) 温度評価については、実験装置内の断熱材、ヒータパイプ等の構造物の等価熱伝導率を用いることにより、解析値は実測値によく一致した。特に、実験装置内の最高温度を評価する観点からは、十分に安全側である。

以上のことから、TAC-NCによりHTTRの減圧事故等の安全評価を行うことが十分に妥当であることがわかった。

謝 辞

本報をまとめるに当たり、実験データの御提示を頂いた高温工学部高温熱工学研究室武田哲明氏並びに有益な御助言を頂いた同室長菱田誠氏、高温工学試験研究炉設計室数土幸夫氏及び同室長齊藤伸三氏に深く感謝します。また、多大な御援助を頂いた高温工学試験研究炉設計室の各位に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 原研“高温工学試験研究の現状”，1987.
- (2) Petersen, J.F., "TAC-2D, A General Purpose Two-Dimensional Heat Transfer Computer Code - User's Manual", USAEC Report, GA-8868, September 1969.
- (3) Clark, S.S. and Petersen, J.F., "TAC-2D, A General Purpose Two-Dimensional Heat Transfer Computer Code - Mathematical Formulation and Programmers' Guide", USAEC Report, GA-9262, September 1969.
- (4) 武田他, 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集 vol. 2 P 283~285, 1988.
- (5) 原研：多目的高温ガス実験炉設計資料集
- (6) Dalle Donne, M and Meerweald, E., Int. J. Heat Mass Transfer, 16-4 (1973), 787.
- (7) 菱田他, 日本原子力学会誌 vol. 26. No. 6. P 506~518.

謝 辞

本報をまとめるに当たり、実験データの御提示を頂いた高温工学部高温熱工学研究室武田哲明氏並びに有益な御助言を頂いた同室長菱田誠氏、高温工学試験研究炉設計室数土幸夫氏及び同室長齊藤伸三氏に深く感謝します。また、多大な御援助を頂いた高温工学試験研究炉設計室の各位に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 原研“高温工学試験研究の現状”，1987.
- (2) Petersen, J.F., "TAC-2D, A General Purpose Two-Dimensional Heat Transfer Computer Code - User's Manual", USAEC Report, GA-8868, September 1969.
- (3) Clark, S.S. and Petersen, J.F., "TAC-2D, A General Purpose Two-Dimensional Heat Transfer Computer Code - Mathematical Formulation and Programmers' Guide", USAEC Report, GA-9262, September 1969.
- (4) 武田他, 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集 vol. 2 P 283~285, 1988.
- (5) 原研: 多目的高温ガス実験炉設計資料集
- (6) Dalle Donne, M and Meerweald, E., Int. J. Heat Mass Transfer, 16-4 (1973), 787.
- (7) 菱田他, 日本原子力学会誌 vol. 26. No. 6. P 506~518.

Table 3.1 主要仕様

① 使用流体	空気又はヘリウムガス
② 圧力	大気圧～2 kg/cm ² ・G
③ 最高温度	ヒーターパイプ壁温 450 °C
④ 所要電力	36 W/1本×43本 単相 100 V
⑤ 冷却水流量	最大 500 cc/s
⑥ 試験部寸法	模擬炉心部 内径 300 mm 外径 400 mm 高さ 1220 mm ヒーターパイプ 本数 43 本 内径 12.7 mm 全長 1230 mm 有効発熱長 1190 mm 外胴部 外径 600 mm 全長 3980 mm

Table 3.2 溫度計測点

項目番号	名 称	点 数	図面上の番号
1	ヒータパイプ壁温度	84	T _w : 84
2	上下支持板壁温度	12	T _w : 6
3	支持円筒内外壁温度	18	T _w : 16
4	下部プレナム内ガス温度	6	T _g : 6
5	上鏡部内ガス温度	13	T _g : 13
6	外胴部流路内ガス温度	16	T _g : 8
7	下鏡部内ガス温度	2	T _g : 2
8	支持台端子箱内ガス温度	2	-
9	出入口管ガス温度	4	T _g : 4
10	冷却水出入口温度	6	-
		163	

Table 3.3 比較解析を実施した実験条件

項目 実験番号	注1 内部炉心発熱量 [W]	注2 外部炉心発熱量 [W]	冷却水温度 [°C]	吸入空気温度 [°C]
1	100 → 0 (0 時間) 注3	100 → 0 (0 時間)	25	27
2	100 → 0 (1 時間後)	100 → 0 (1 時間後)	25	27
3	100 → 0 (0 時間)	300 → 0 (0 時間)	24	24

注 1) 内部炉心は模擬炉心中心部 19 本のヒーターピンの合計発熱量

(Fig. 3.1 参照)

注 2) 外部炉心は模擬炉心外周部 $18 + 6 = 24$ 本のヒーターピンの合
計発熱量 (Fig. 3.1 参照)

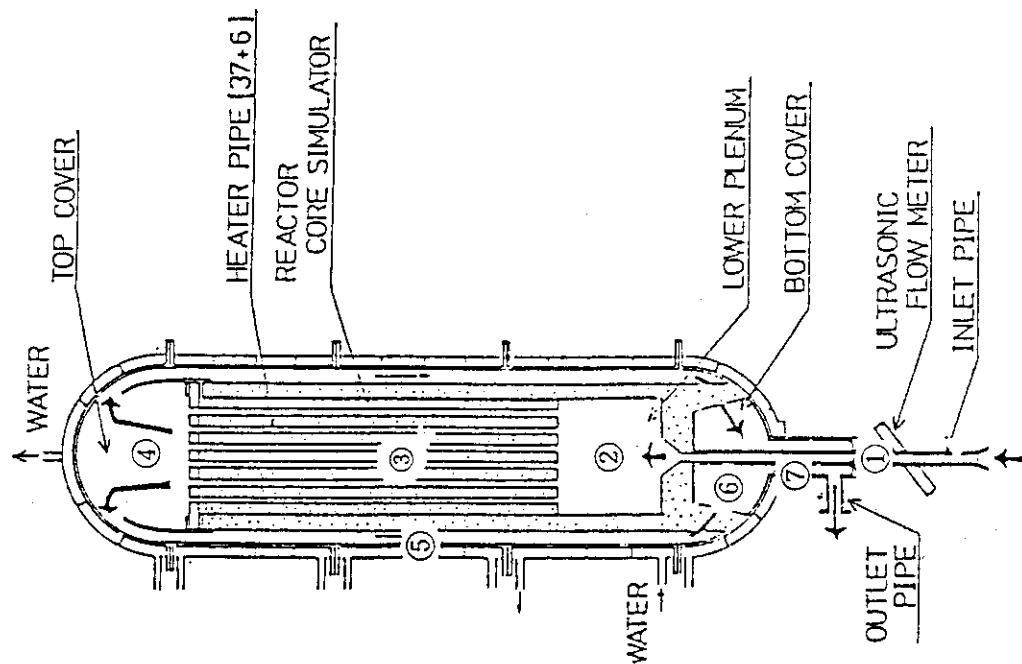
注 3) 試験装置下部のフランジ蓋を開いてからの時間

Table 3.4 解析に用いた物性値

番号	材 料 名	λ : 热伝導率 [kcal/m ² ·m°C]	C _p : 体積比熱 [kcal/m ³ ·°C]		ϵ : 放射率	備考
			C _p : 比熱 [kcal/kg°C] × ρ : 密度 [kg/m ³]	C _p : 比熱 [kcal/kg°C] × ρ : 密度 [kg/m ³]		
1	フライントン & SUS (炉心部)	$\lambda_{\text{R}} = 1.00 \times 10^{-7} \times T^2 + 2.13 \times 10^{-4}$ $\times T + 2.22 \times 10^{-2}$	$\left. \begin{array}{l} \text{フライントン} \\ C_{p1} = 0.25 \times 200 \end{array} \right\}$ $\left. \begin{array}{l} \text{SUS} \\ C_{p2} = 0.11 \times 7820 \end{array} \right\}$ \downarrow $C'_{p} = 0.77548 \times C_{p1}$ $+ 0.10352 \times C_{p2}$	—	—	等価物性値
2	"	$\lambda_{\text{R}} = 0.77548 \times \lambda_5$ $+ 0.10352 \times 1.4$	(T : 温度°C)	—	"	
3	"			—	"	
4	S U S 鋼	1.4		8 6 0.2	0.48	伝熱工学資料より
5	フライントン & SUS (T : 温度°C)	$\lambda_5 = 7.9286 \times 10^{-8} \times T^2 + 1.3096 \times 10^{-4}$ $\times T + 1.4660 \times 10^{-2}$		5 0.0	—	メータ (ニチアス) のカタログより
6	SS 鋼	4.6		9 3 9.6	0.79	伝熱工学資料より
8	SS 鋼 (STP Y)	4.6		9 3 9.6	0.79	伝熱工学資料より
1 2	"	$\lambda_{\text{R}} = 10^4$ $\lambda_{\text{Z}} = 0$		0.12 × 7830	0.48	—
1 3	"	$\lambda_{\text{R}} = 0$ $\lambda_{\text{Z}} = 10^4$		0.24 × 1.2	0.288	—
1 4	"	$\lambda_{\text{R}} = 10^4$ $\lambda_{\text{Z}} = 0$		0.24 × 1.2	0.288	—
1 5	"	$\lambda_{\text{R}} = 10^4$ $\lambda_{\text{Z}} = 10^4$		0.24 × 1.2	0.288	—

Table 3.5 各部の圧損係数

		圧損係数	圧損式
①入口管	入口の吸い込みの縮流	C = 0.5	
	配管の摩擦	$\lambda = \frac{6.4}{Re}$	$\Delta P = C \frac{\rho u^2}{2g}$
②下部フレーム	出口の吹き出しの拡流	C = 1.0	↓
	摩擦	≠ 0	
③炉心	吸い込みによる縮流	C = 0.5	$\Delta P = \lambda \frac{L \rho u^2}{d 2g}$
	ヒーターバイブの摩擦	$\lambda = \frac{6.4}{Re}$	
④トッパー	炉心からの吹き出し	C = 1.0	
	曲り及び縮流	≠ 0	
⑤炉壁バス	摩擦	$\lambda = \frac{6.4}{Re}$	
	縮流とボトムカバーへの拡流	= 1.5	
⑥ボトムカバー	摩擦	≠ 0	
⑦出入口管	吸い込みの縮流と衝突	1.0	
	摩擦(含む単管)	$\lambda = \frac{6.4}{Re}$	
	曲りと吹き出しの拡流	1.5	



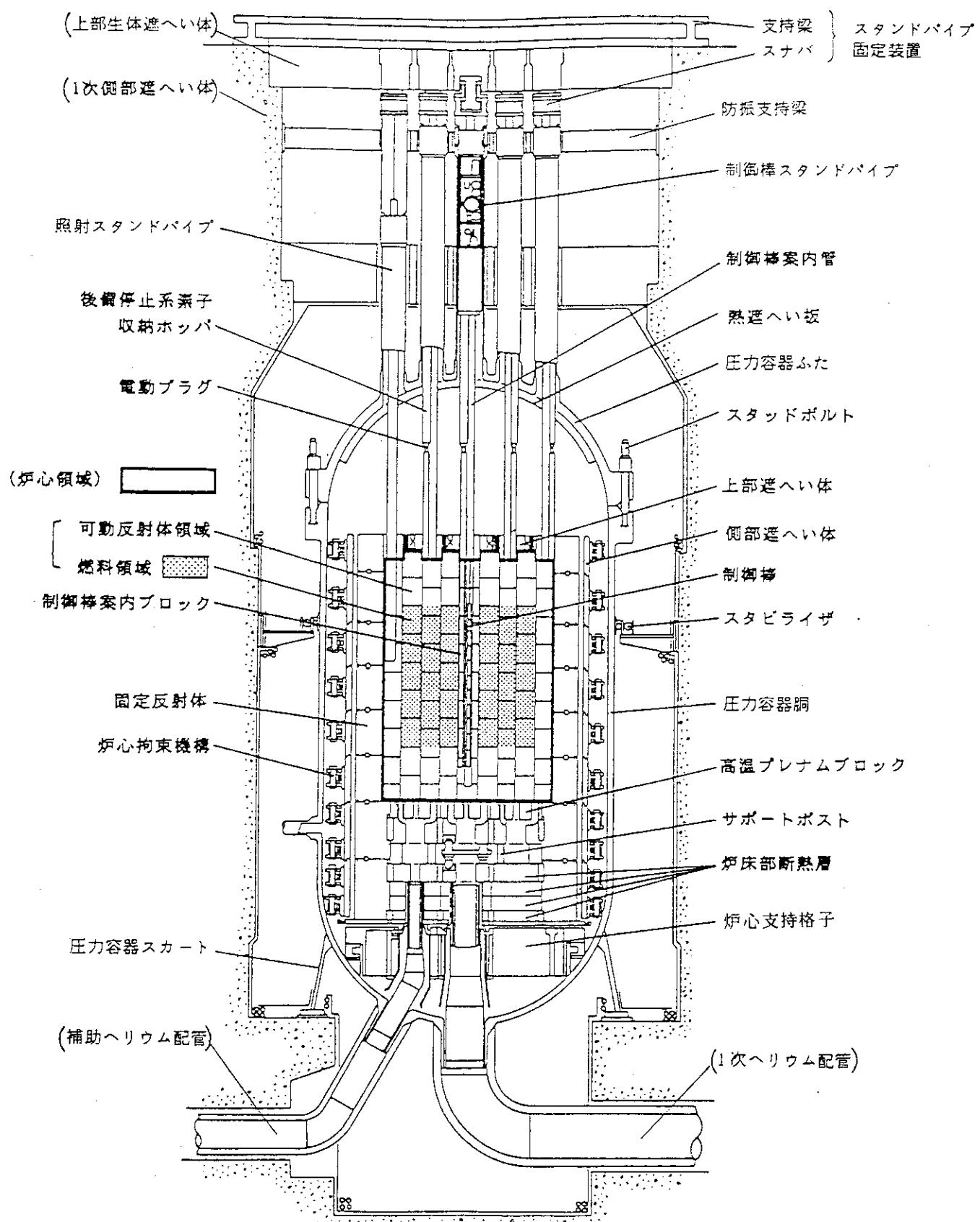


Fig. 1.1 HTTR 原子炉縦断面図

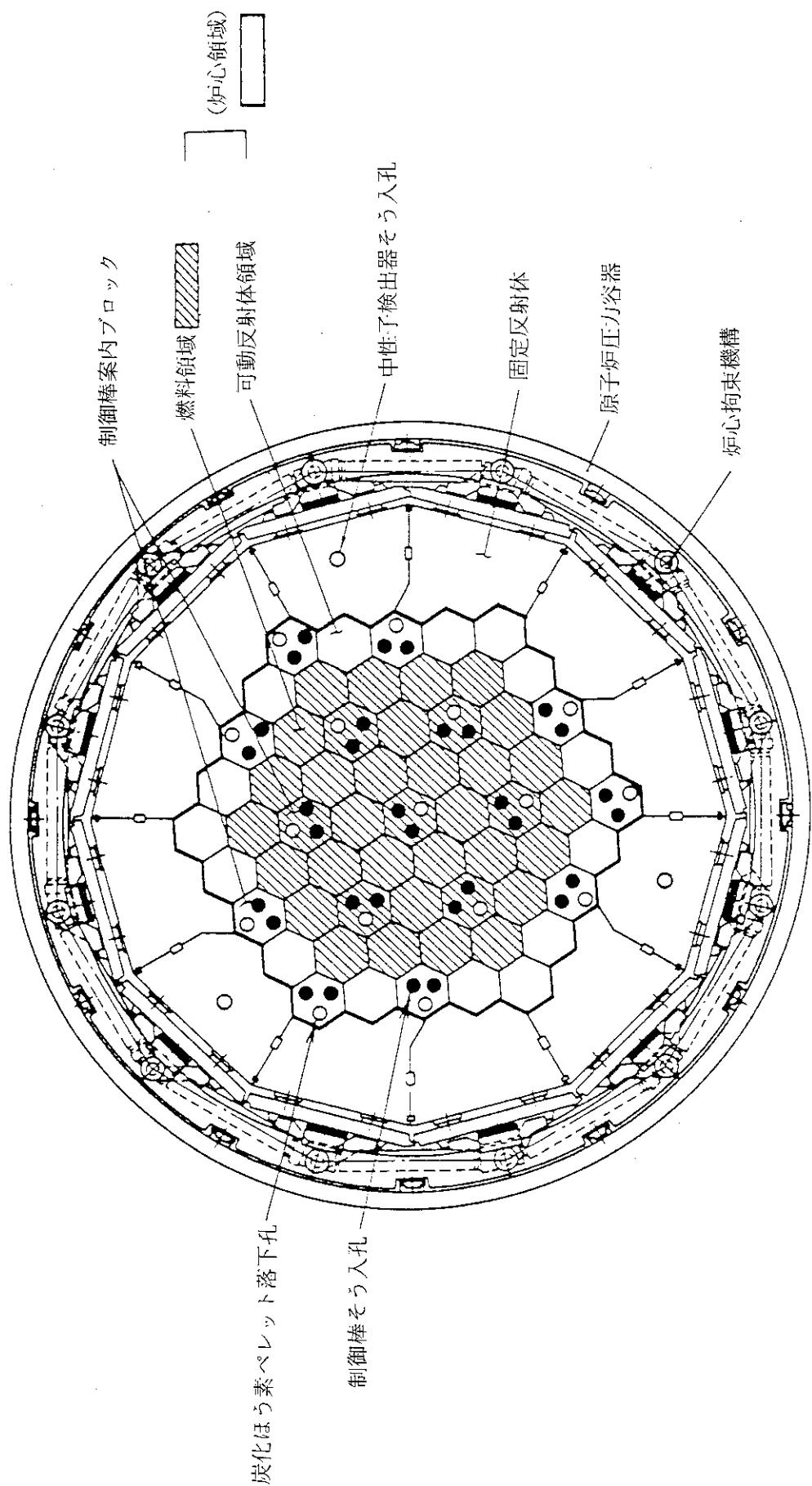
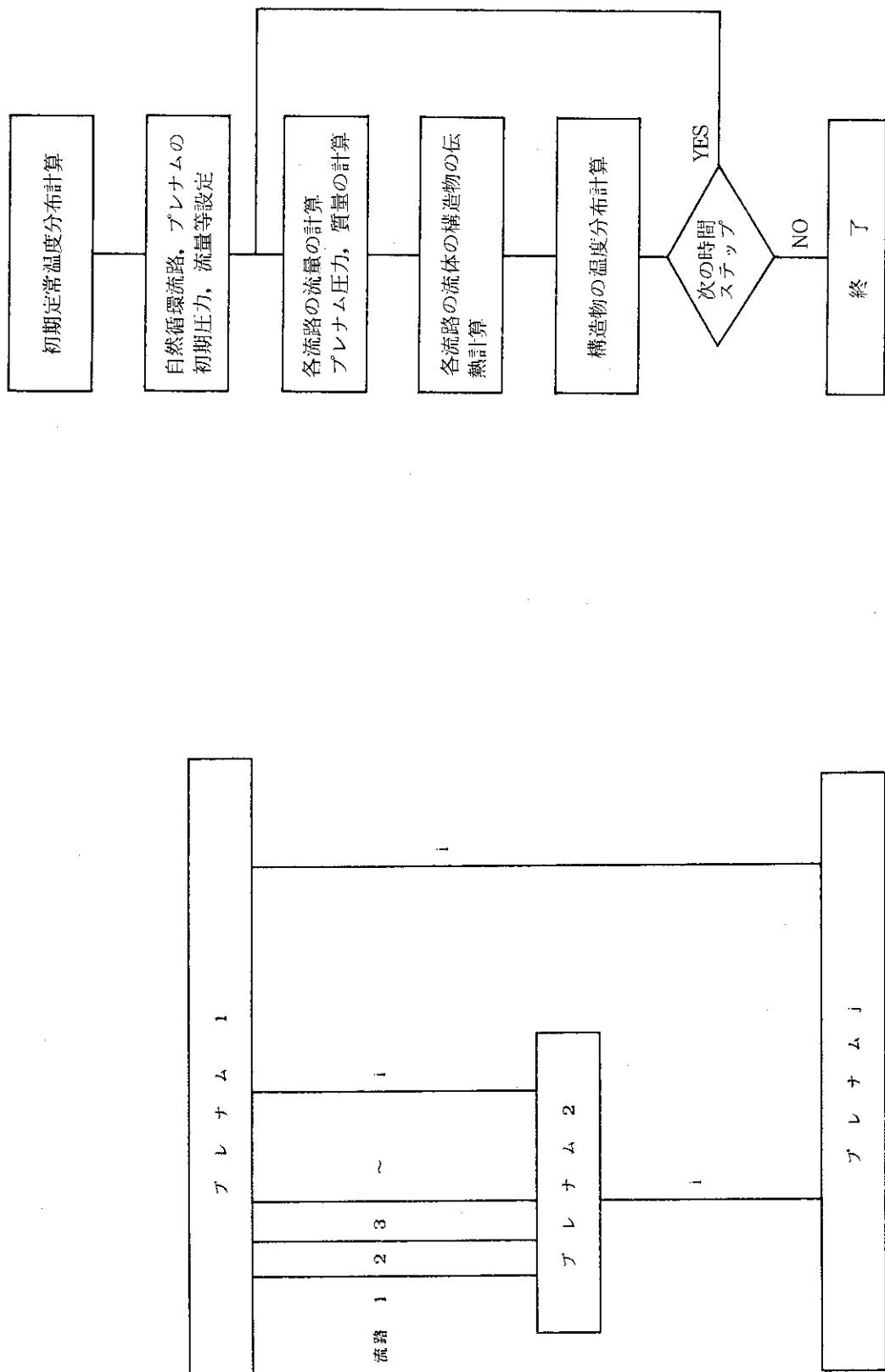


Fig. 1.2 HTTR 廉心水平断面図



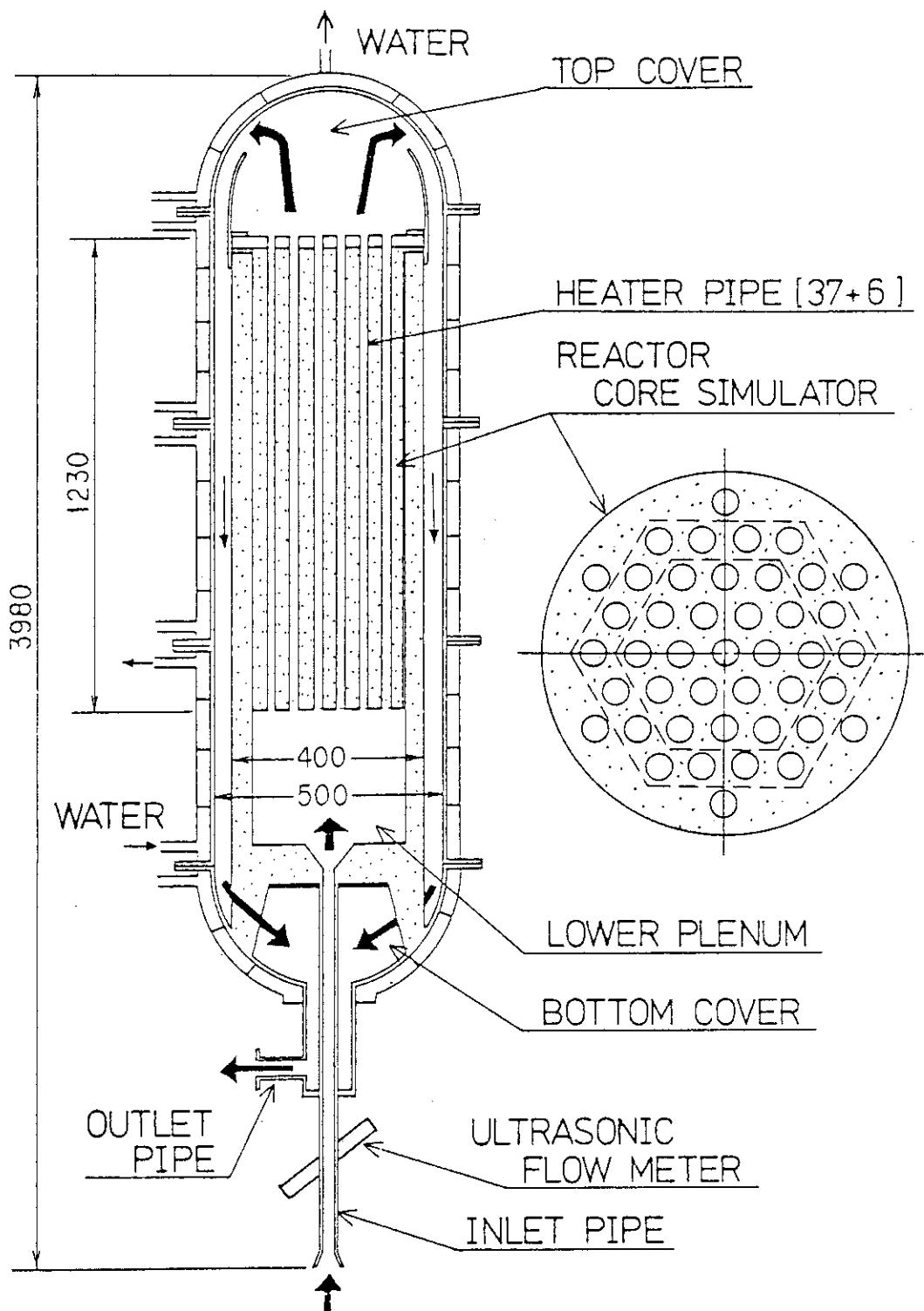


Fig. 3.1 試験装置断面図

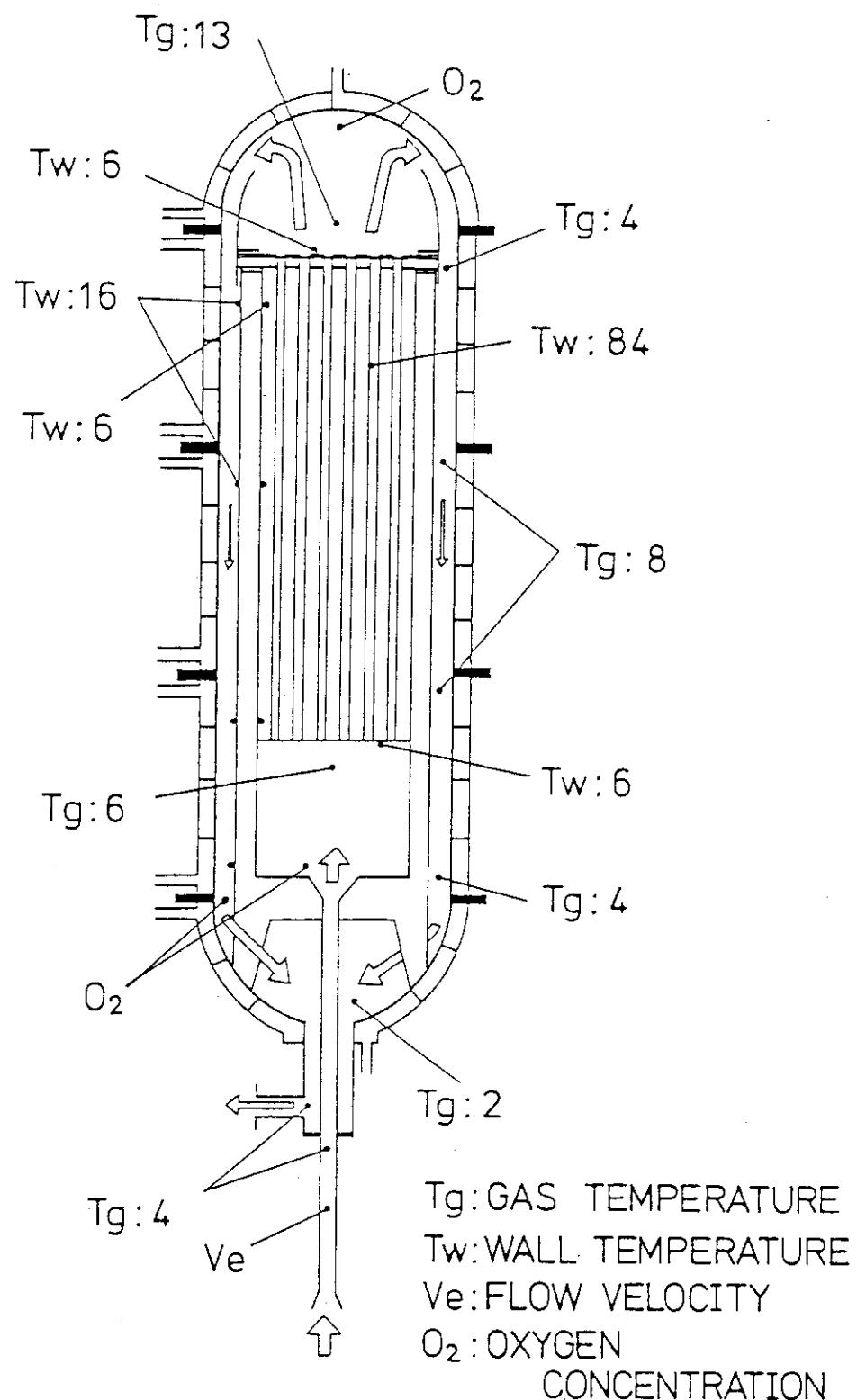


Fig. 3.2 計測点位置

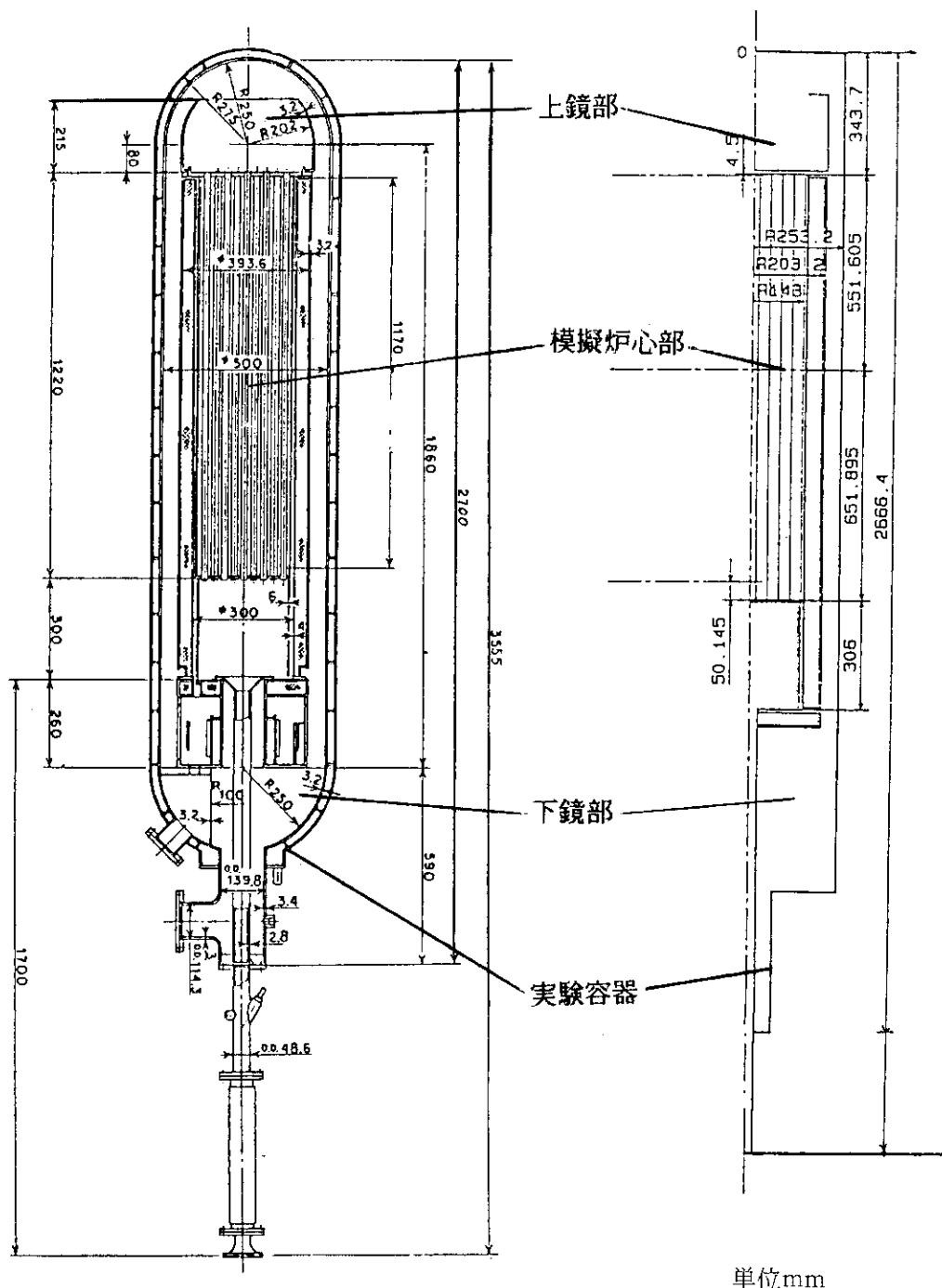


Fig. 3.3 解析モデル図

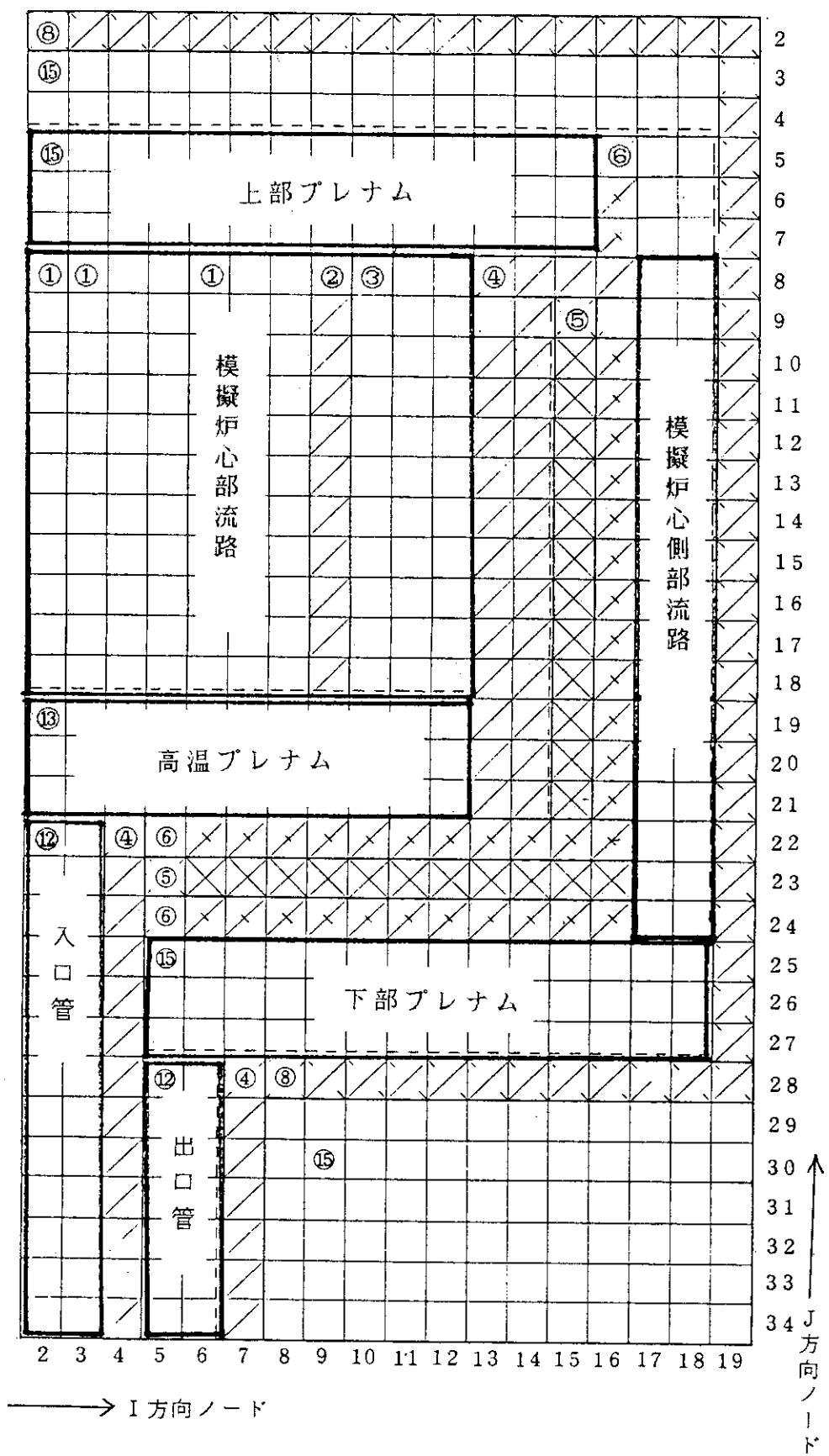


Fig. 3.4 解析用メッシュ図

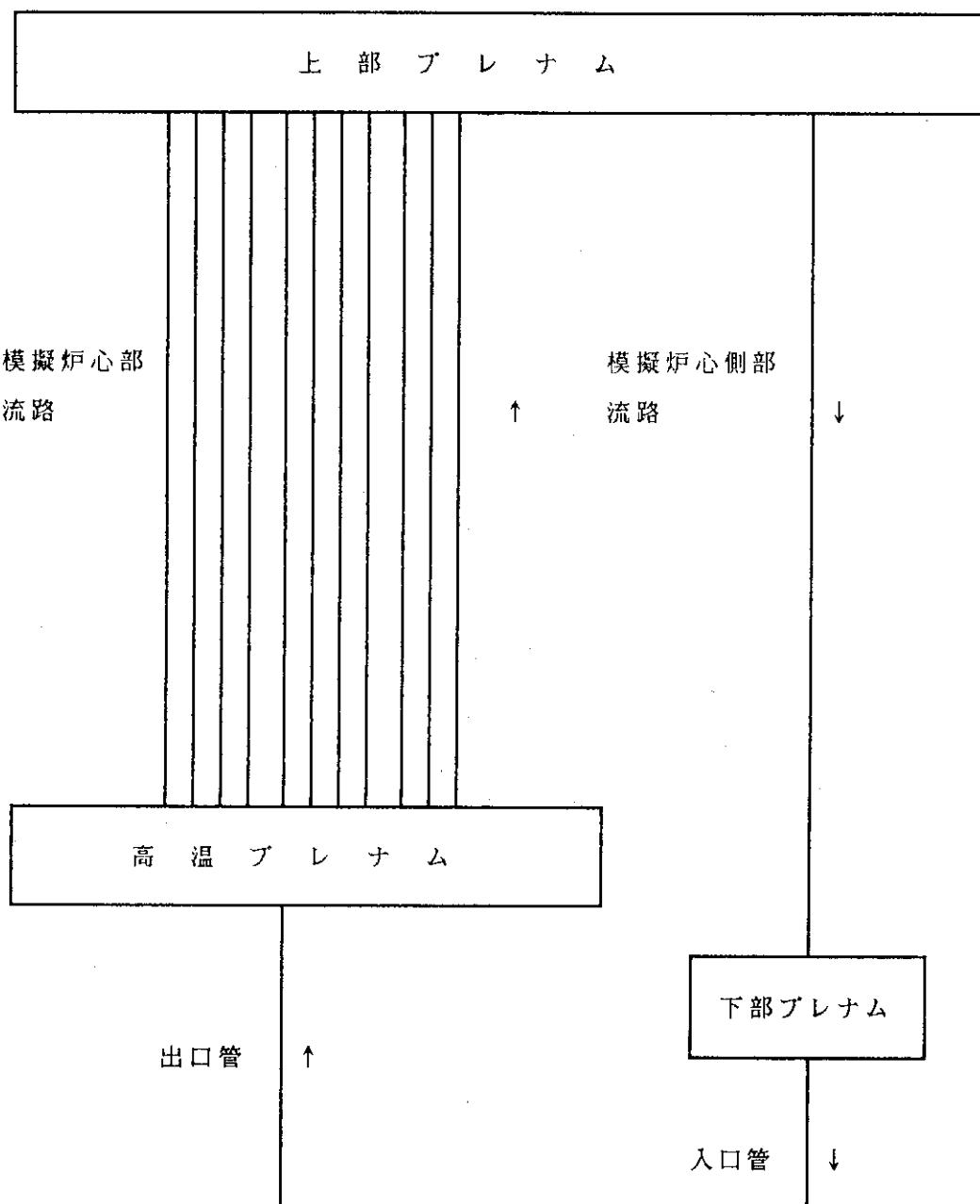


Fig. 3.5 自然循環流路モデル

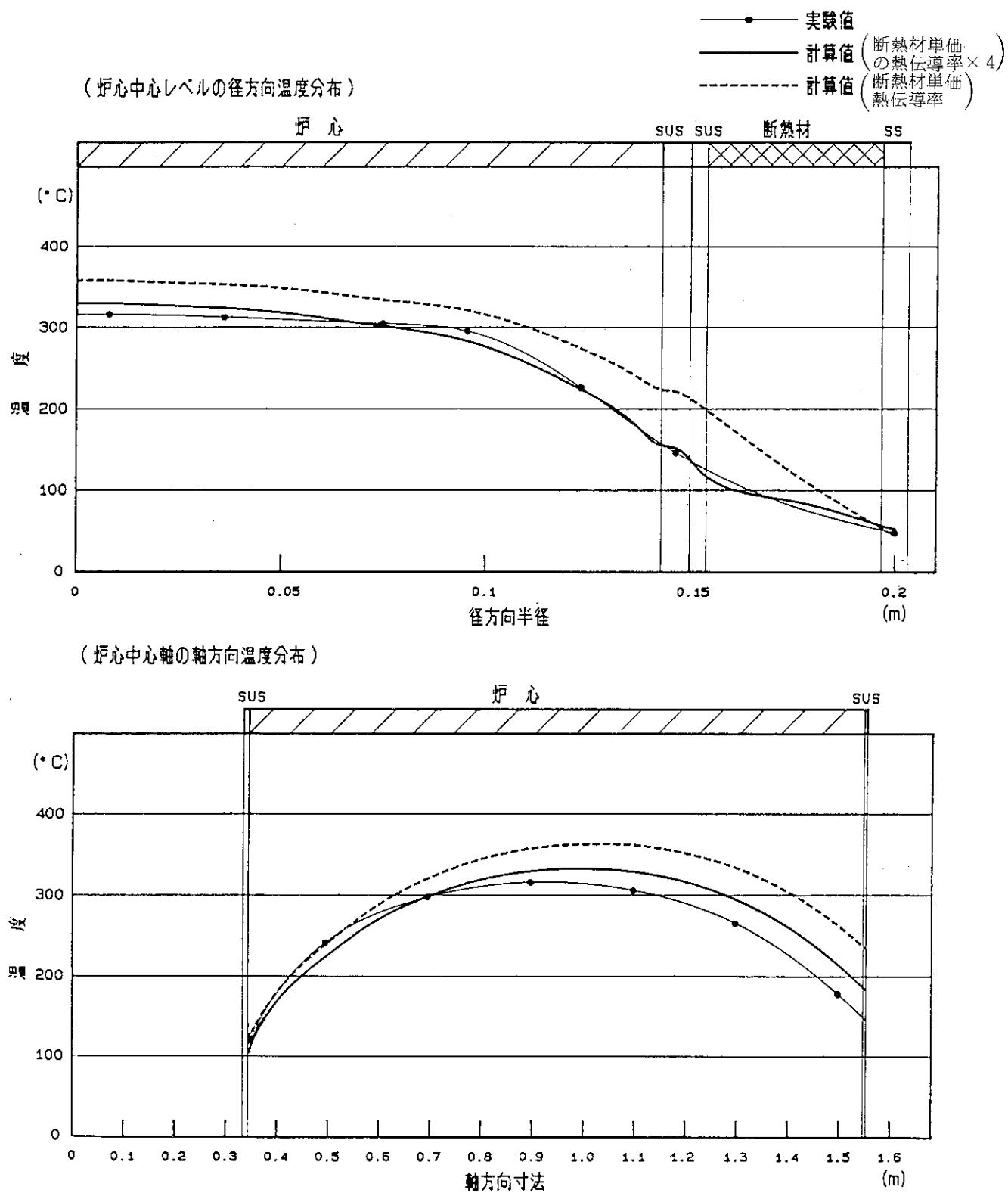


Fig. 3.6 実験装置の初期定常温度分布（模擬炉心中心温度 300 °C）

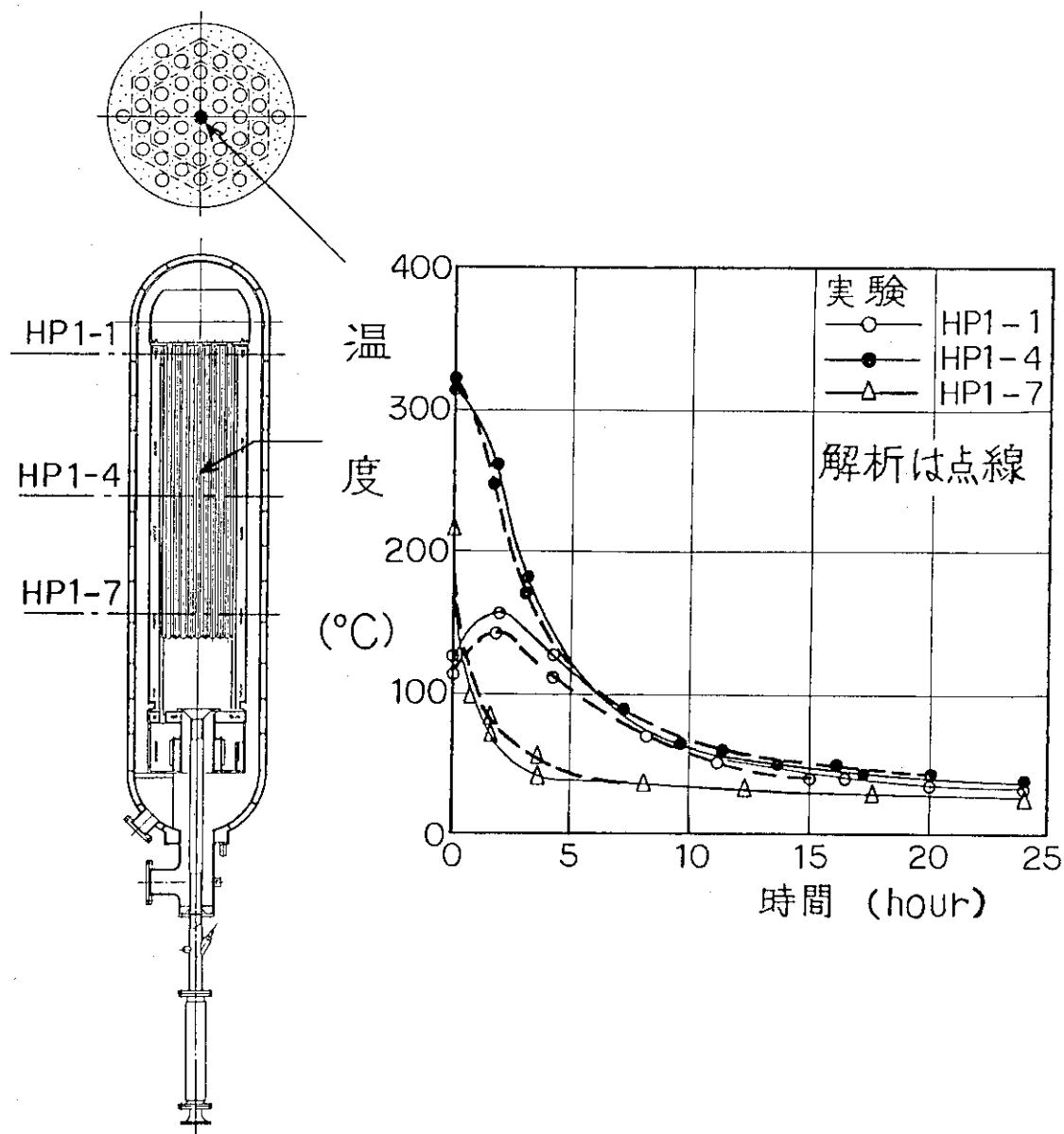


Fig. 3.7 模擬炉心中央部ヒータパイプ温度（実験番号 1）

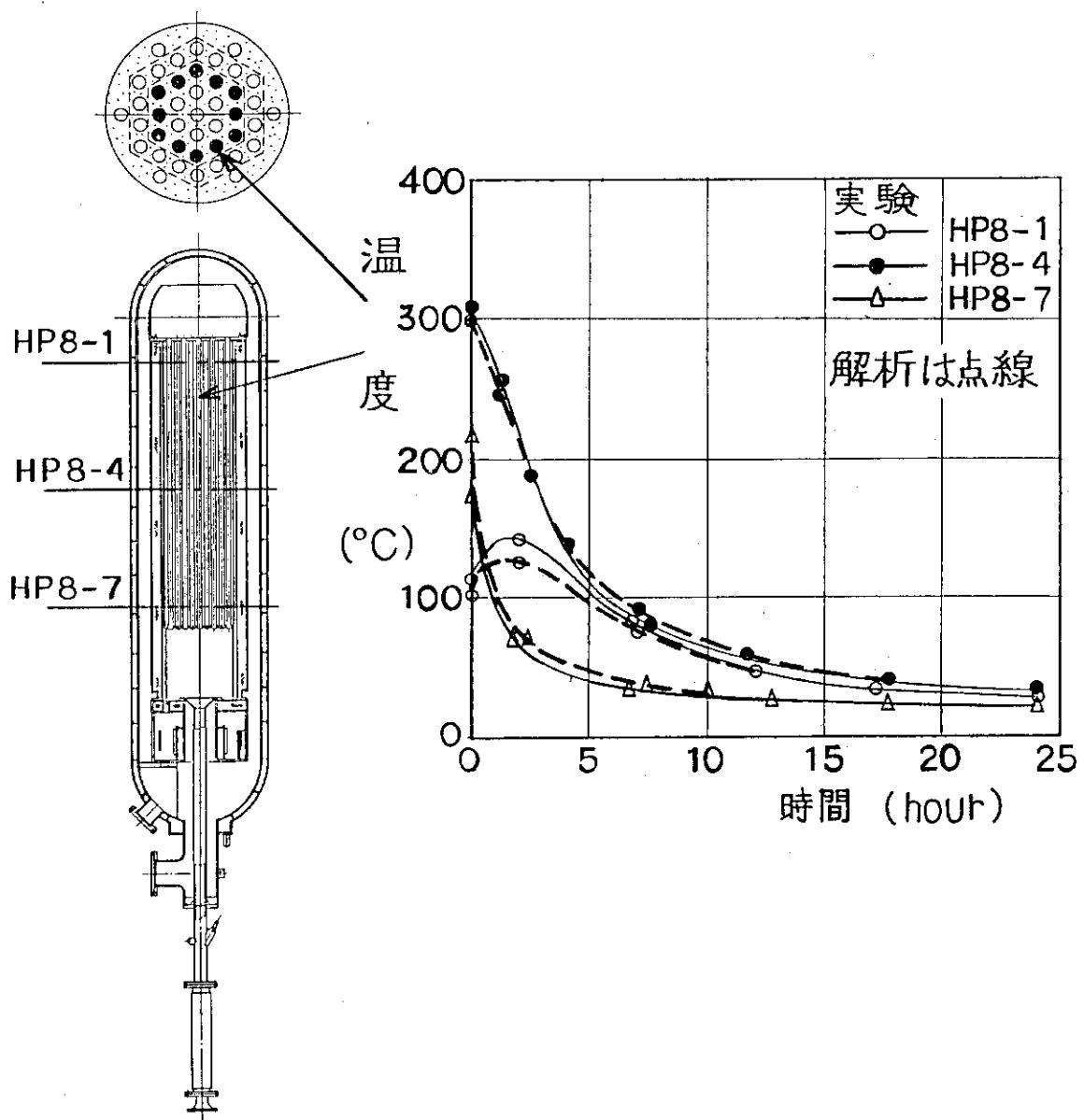


Fig. 3.8 模擬炉心周辺部ヒータパイプ温度（実験番号 1）

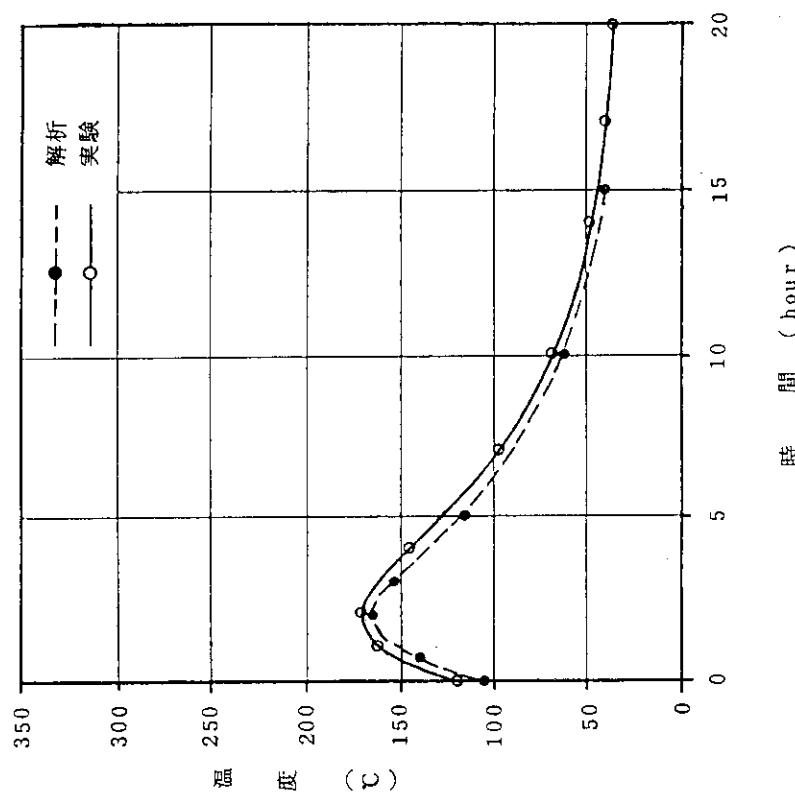


Fig. 3.9 模擬炉心中央部ヒータパイプ温度(上部, 実験番号2)

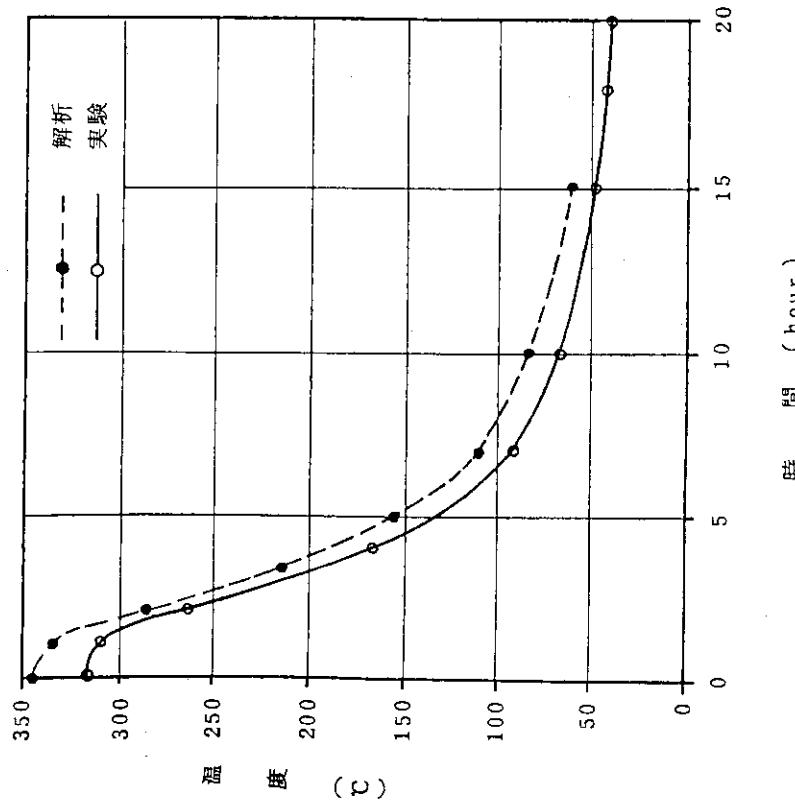


Fig. 3.10 模擬炉心中央部ヒータパイプ温度(中央, 実験番号2)

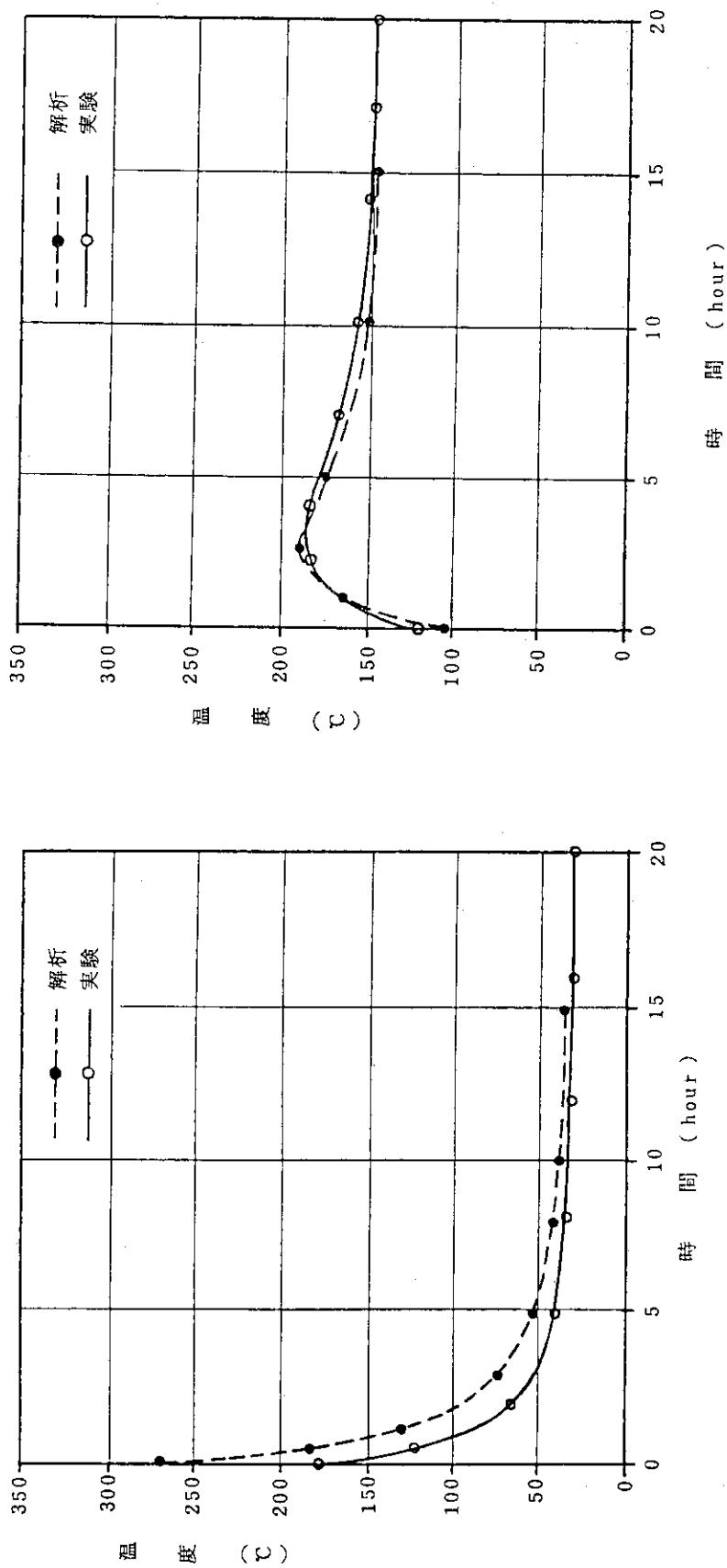


Fig. 3.11 模擬炉心中央部ヒータパイプ温度(下部, 実験番号2)

Fig. 3.12 模擬炉心中央部ヒータパイプ温度(上部, 実験番号3)

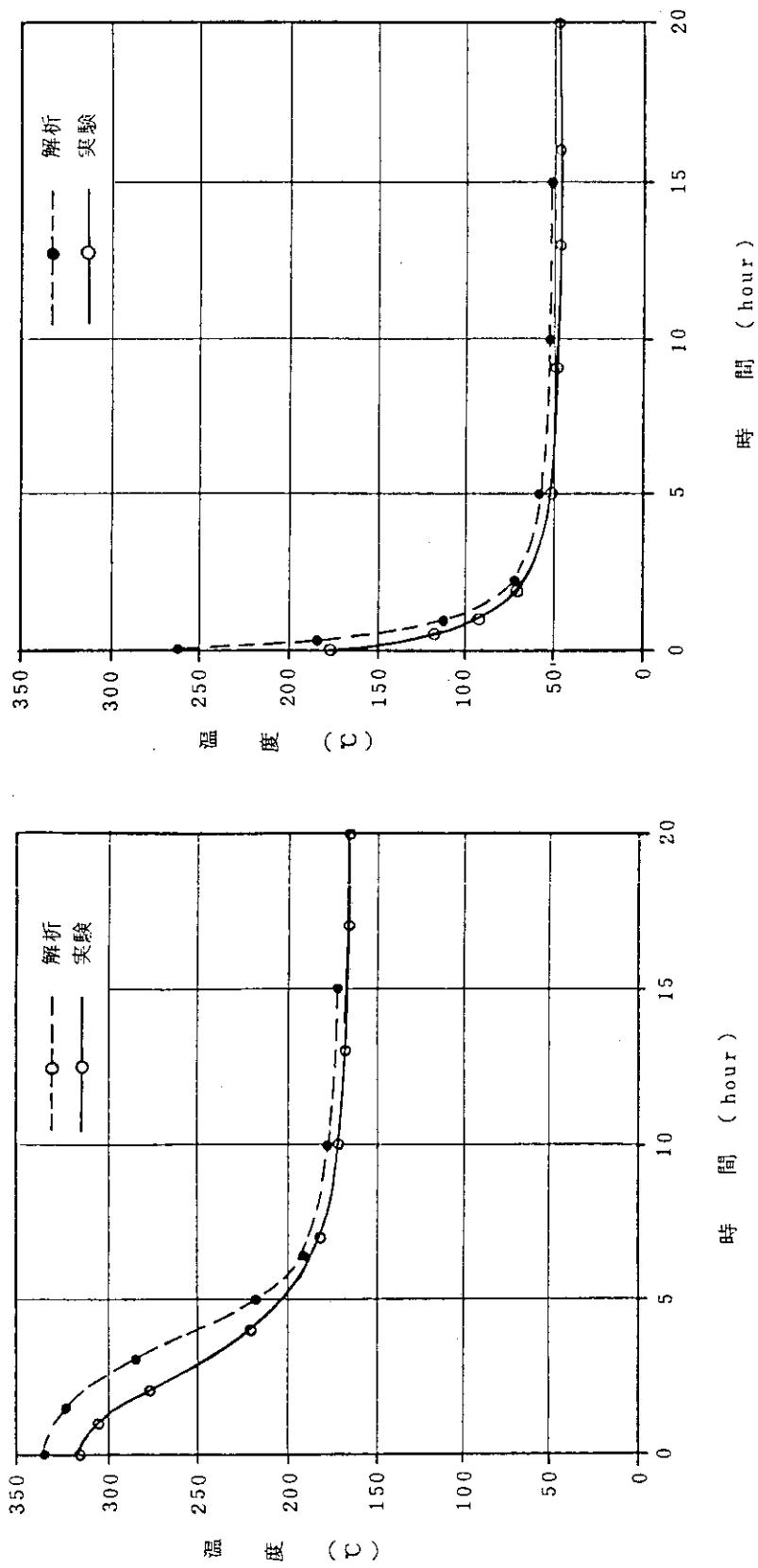


Fig. 3.13 模擬炉心中央部ヒータパイプ温度(中央, 実験番号 3)

Fig. 3.14 模擬炉心中央部ヒータパイプ温度(下部, 実験番号 3)

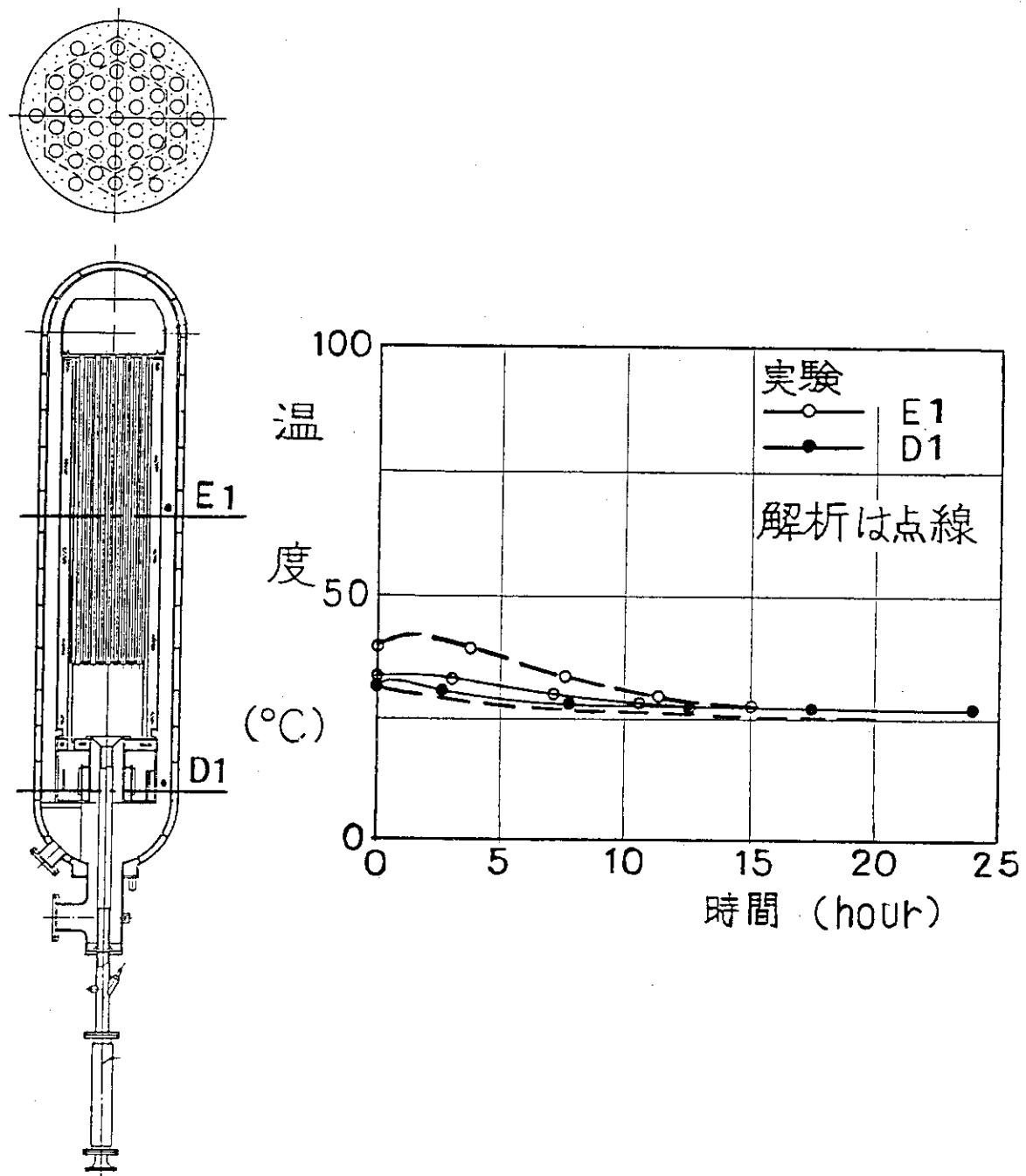


Fig. 3.15 模擬炉心側部の空気温度（実験番号 1）

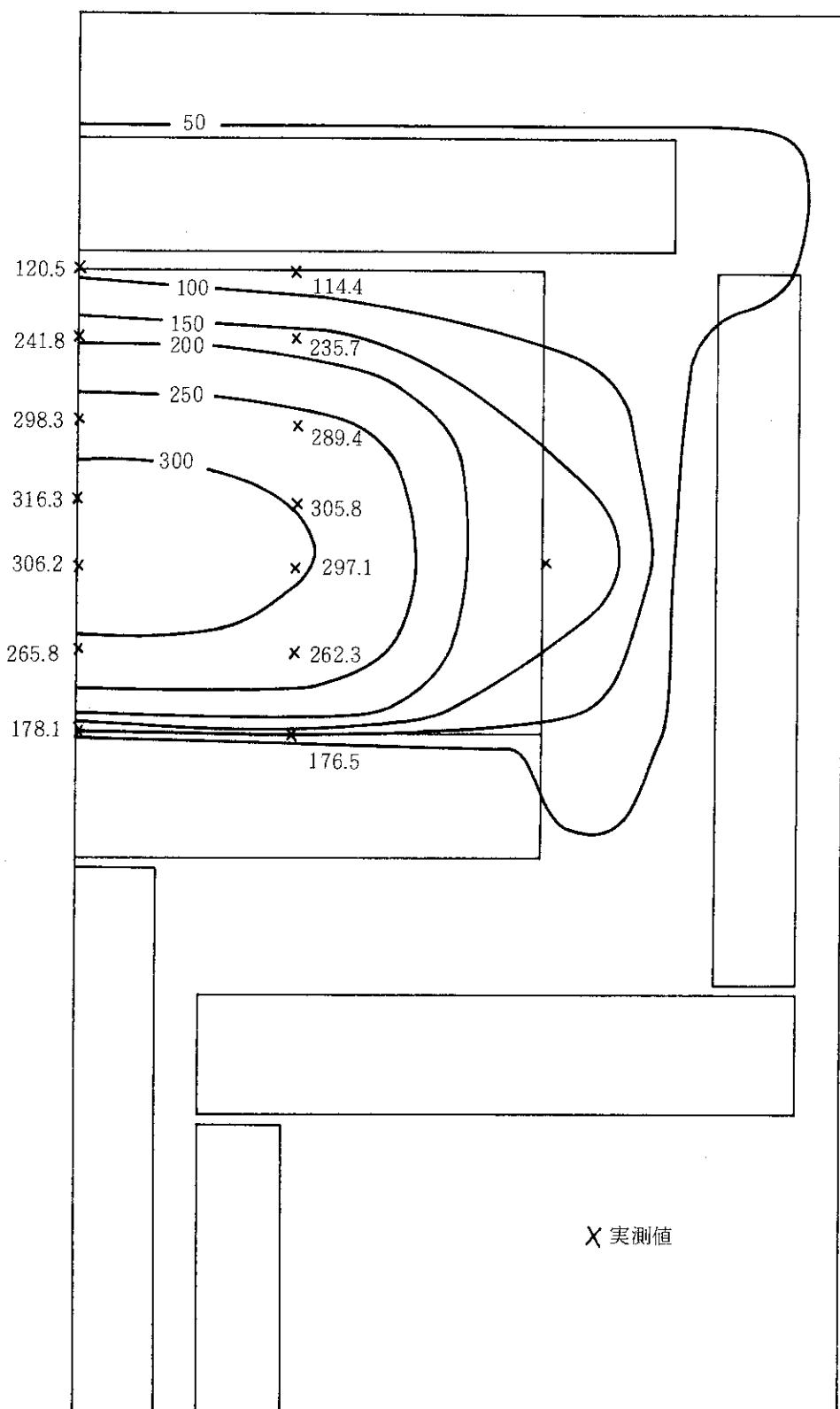


Fig. 3.16 実験装置内部の等温線図（実験番号 1, 0 時間）

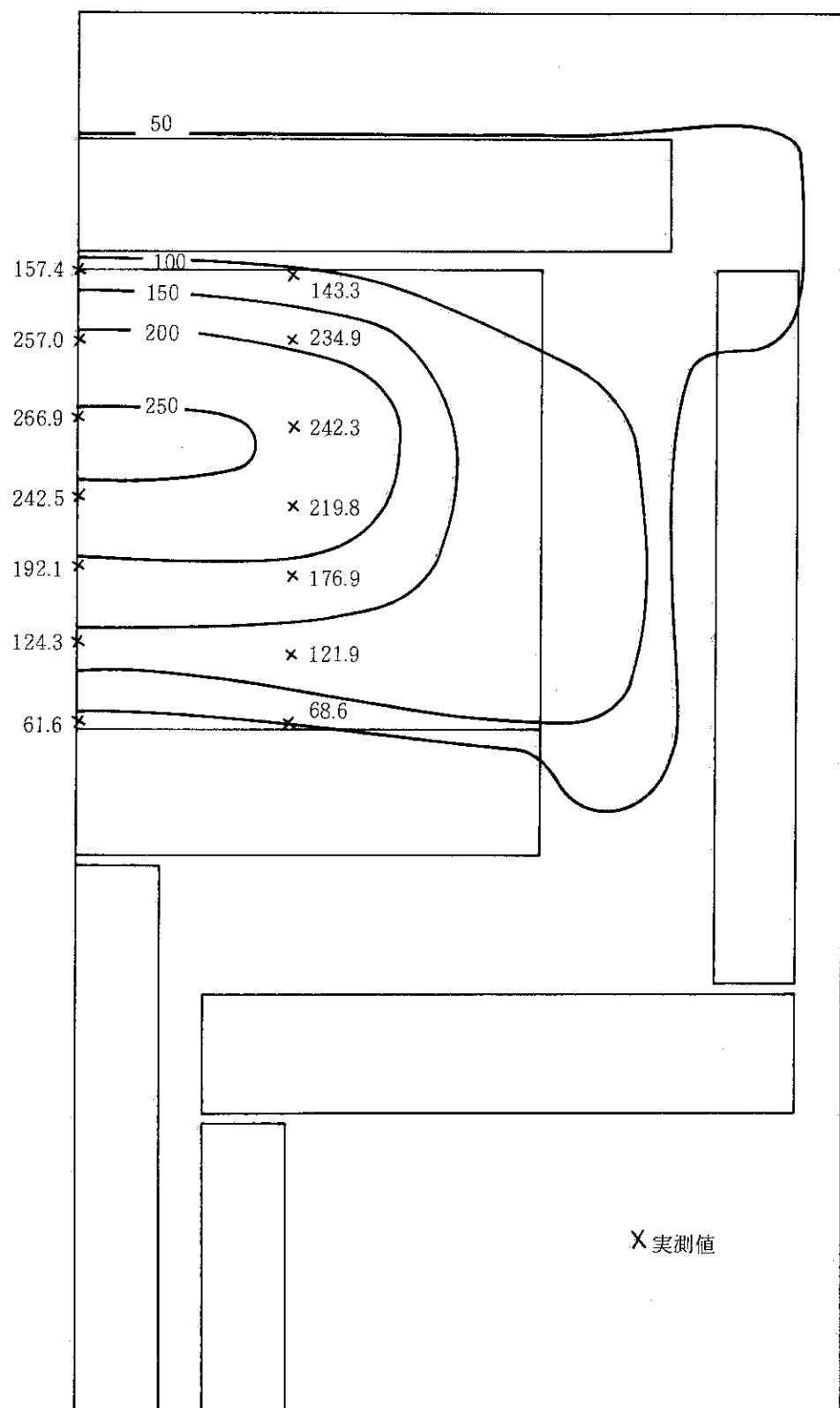


Fig. 3.17 実験装置内部の等温線図（実験番号 1, 2 時間）

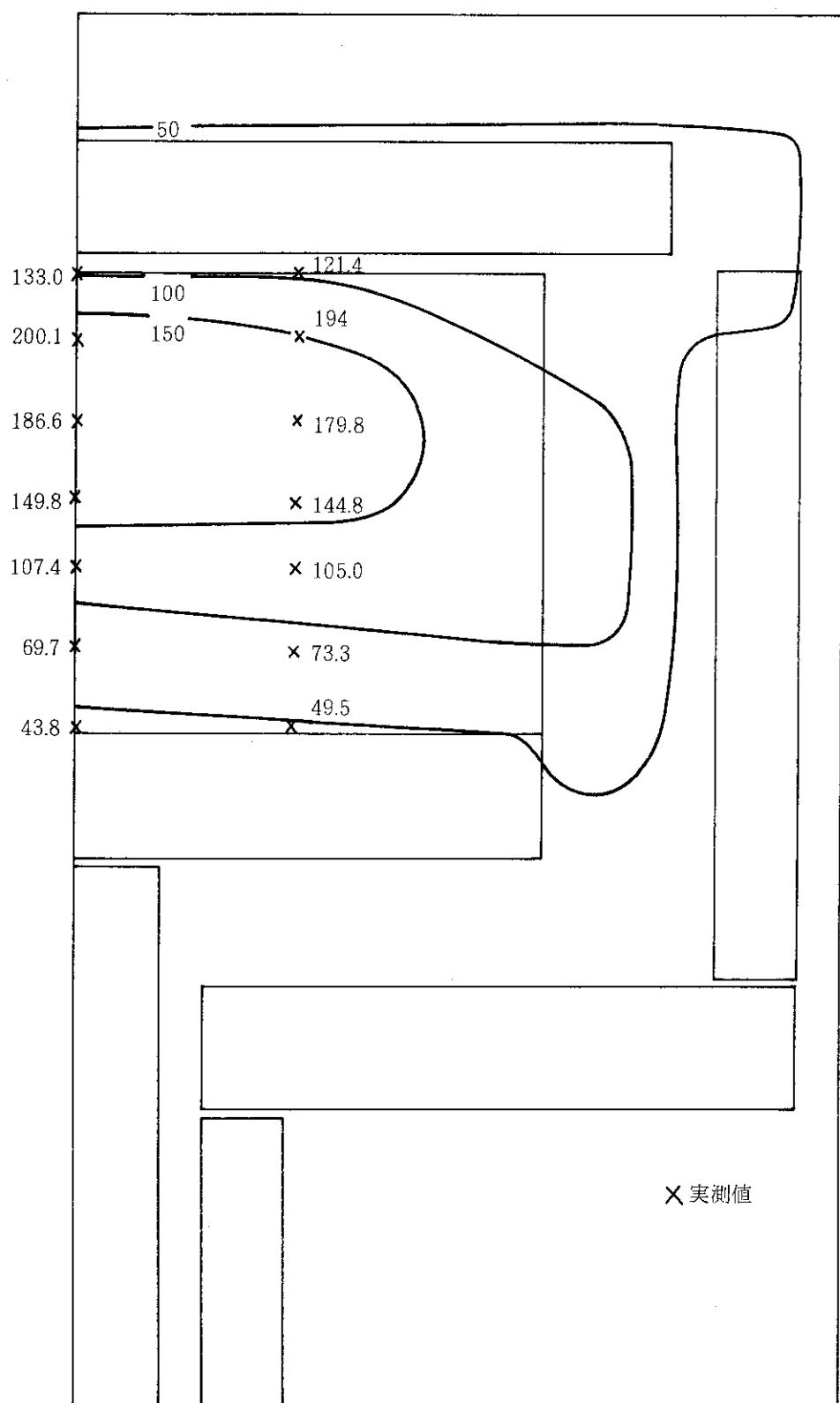


Fig. 3.18 実験装置内部の等温線図（実験番号 1, 4 時間）

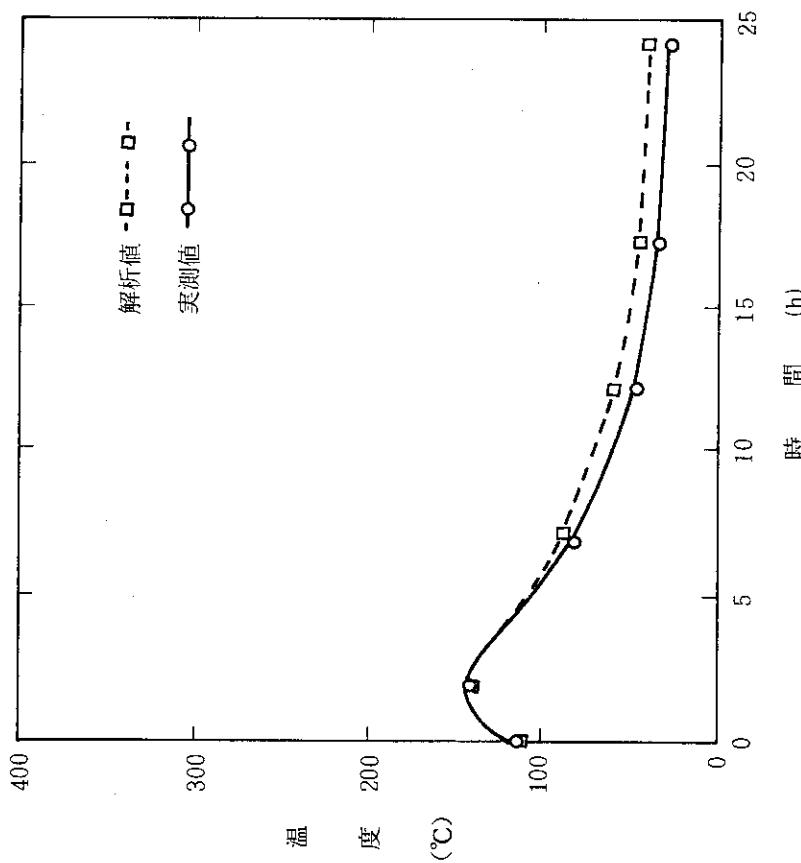


Fig. 3.19 模擬炉心上部のヒータパイプ温度(中央部, 実験番号1)

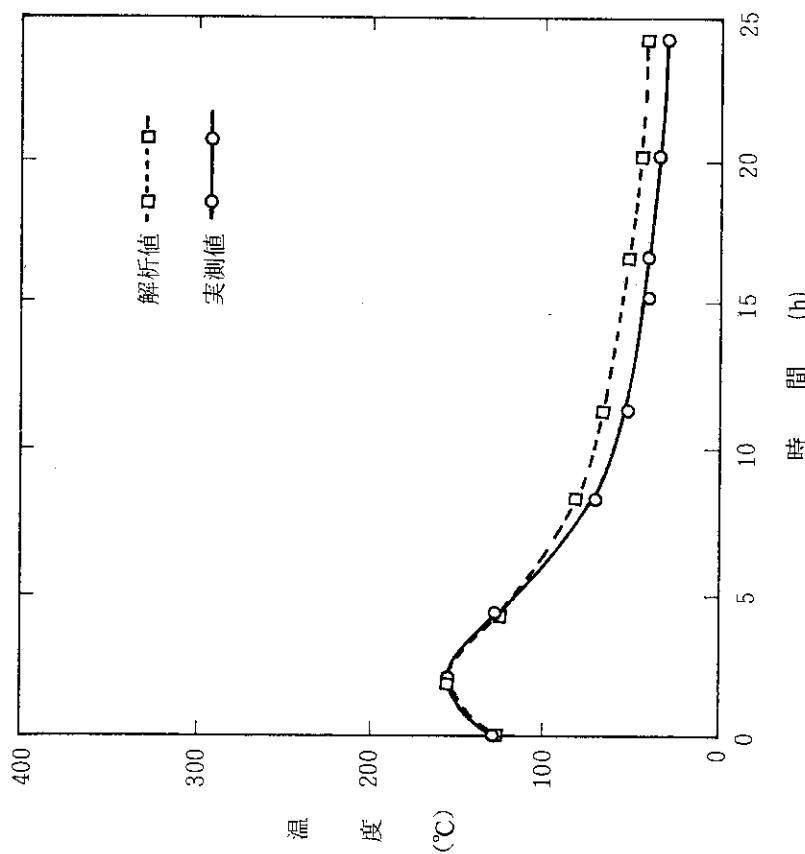


Fig. 3.20 模擬炉心上部のヒータパイプ温度(周辺部, 実験番号1)

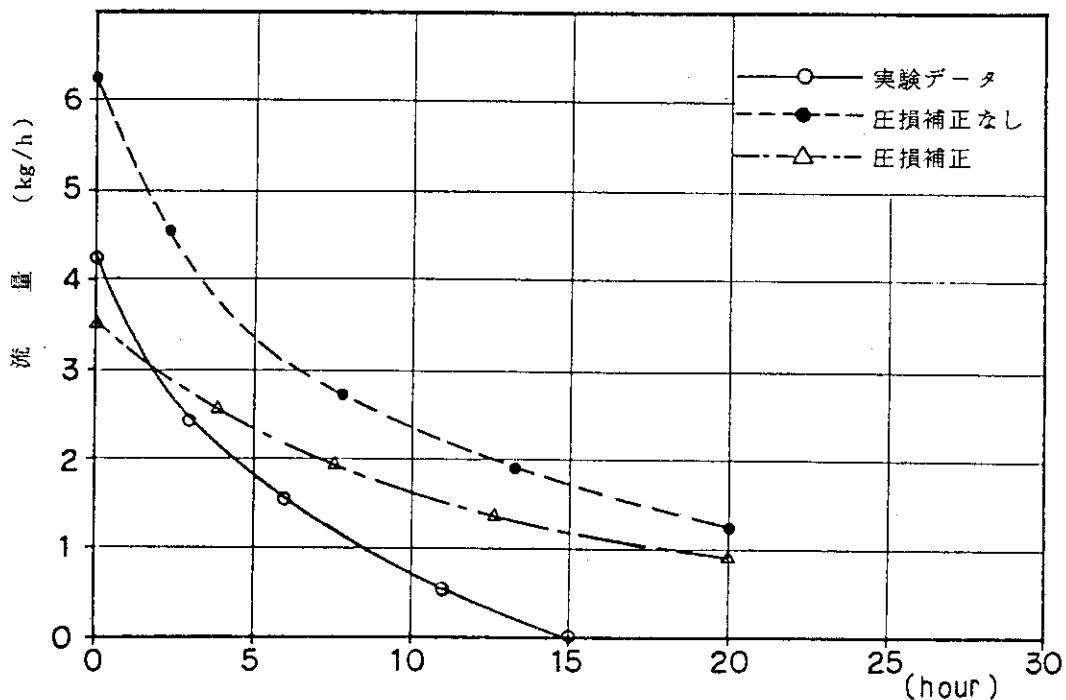


Fig. 3.21 自然循環流量の時間変化（実験番号 1）

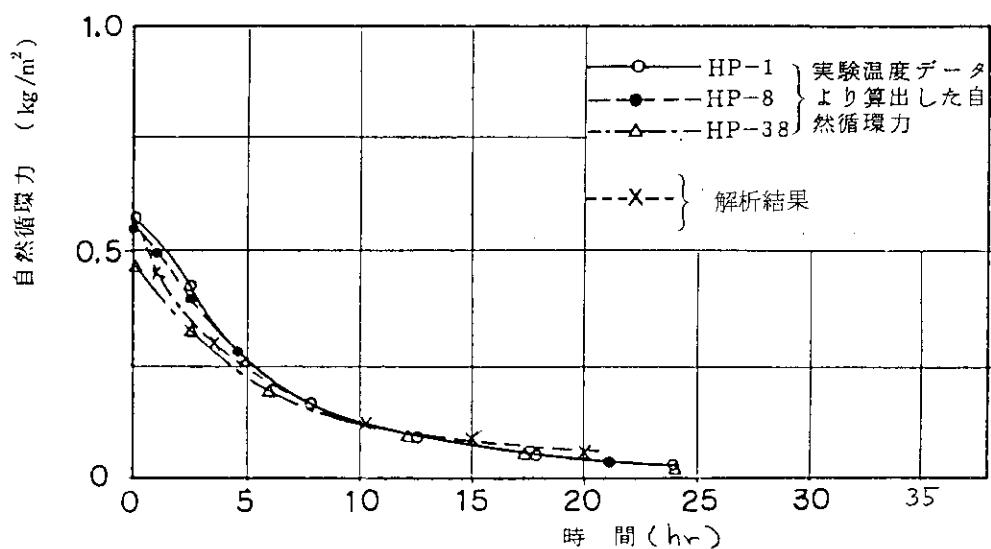


Fig. 3.22 自然循環力の時間変化（実験番号 1）

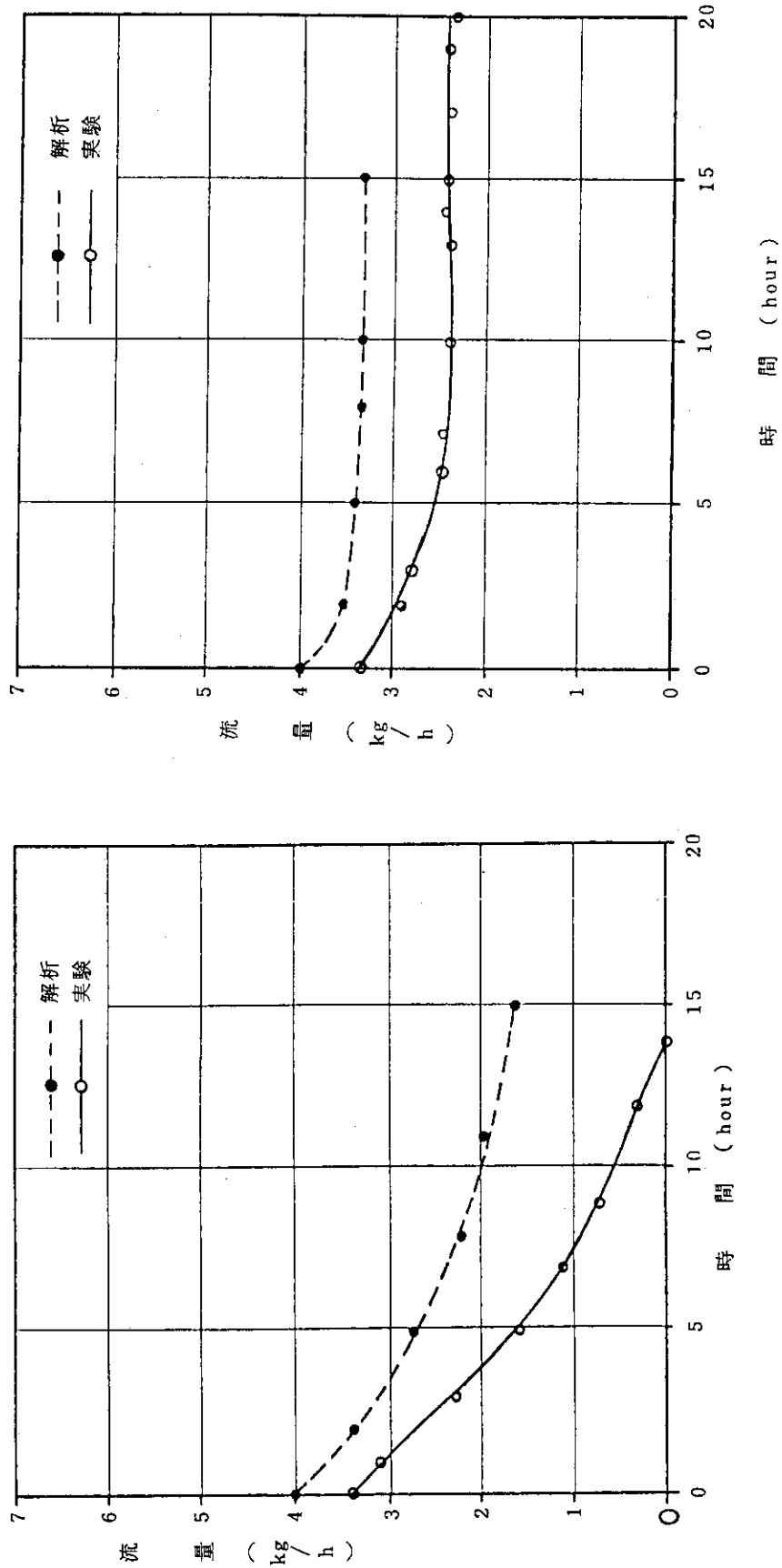


Fig. 3.23 自然循環量の時間変化 (実験番号 2)

Fig. 3.24 自然循環量の時間変化 (実験番号 3)