

高速炉燃料集合体ポーラス状局所閉塞事象の研究

—37本ピンバンドルナトリウム試験の事前サブチャンネル解析—

1998年3月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-1393, Japan

動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

高速炉燃料集合体ポーラス状局所閉塞事象の研究
—37本ピンバンドルナトリウム試験の事前サブチャンネル解析—

飯塚 透*、大木 義久*、川島 滋代**
西村 元彦*、磯崎 正*、上出 英樹*

要 旨

高速炉の集合体内局所事故の安全評価において、微小粒子による厚みのあるポーラス状閉塞を想定した場合、閉塞領域内被覆管のホットスポットの発生位置及び温度を予測することが重要となる。このような課題を念頭に置き、ポーラス状閉塞の熱流動特性を総合的に評価するため、筆者らは、37本ピンバンドルに閉塞物を設置したナトリウム試験（以下、ナトリウム試験と略）を実施する予定である。

ナトリウム試験に先立ち、水を作動流体として閉塞物単体の圧力損失測定試験を実施し、閉塞物の圧力損失評価式を求めた。また、ナトリウム試験の試験条件の設定に資することを目的として、ポーラス状閉塞をモデル化することが可能なサブチャンネル解析コードASFRE-IIIによる事前解析を実施した。その結果、今回のナトリウム試験の検討範囲（ヒータピン出力100～400 W/cm、流量200～480 ℓ/min）では、最高温度と入口温度との差は出力／流量比にほぼ比例し、ナトリウム試験における目安制限温度650°Cを超える加熱条件は、出力／流量比が 0.75 (W/cm)/(ℓ/min) 以上の場合であるとの予測結果を得た。また、解析結果に基づき、試験条件からヒータピン最高温度が予想できるマップを作成した。

* 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

** 原子力システム（株）

March, 1998

Study for Subassembly Porous Blockage in Fast Breeder Reactors**— Pre-Subchannel Analysis of 37-Pin Bundle Sodium Test —**

Toru Iitsuka*, Yoshihisa Oki*, Sigeyoshi Kawashima**,
Motohiko Nishimura*, Tadashi Isozaki*, Hideki Kamide*

Abstract

Assessment of the maximum temperature and the position of the hot spot is the most important issues on the reactor safety when the local subchannel porous blockage is occurred. From these background, authors are going to perform a sodium experiment with 37-pin bundle test rig simulating the porous blockage, to understand the phenomena and acquire data for thermal-hydraulic analysis code validation.

Before the execution of sodium test, one basic experiment and some using subchannel analysis code ASFRE-III had been done. The basic experiment was a water test to examine the pressure loss characteristics of the porous blockage. The pressure loss correlation derived from the water test was applied to the subsequent subchannel analysis of the 37-pin bundle sodium test rig. The analysis such predicted that the difference between the maximum temperature and the inlet temperature would be in proportion to the power to flow rate ratio, within the condition of the power =100~400 W/cm and the flow rate =200~480 l/min. And it was also shown that the maximum subchannel temperature would not over the operational limit temperature 650°C, if the power to flow rate ratio were kept lower than 0.75(W/cm)/(l/min). The map was made to predict the maximum temperature from the experimental conditions.

* Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC

** Nuclear Energy System Inc.

目 次

1. 序論	1
2. 閉塞物単体圧力損失測定試験	2
2.1 試験装置	2
2.2 試験条件	2
2.2.1 Re数範囲	2
2.2.2 温度条件	3
2.2.3 流動方向	4
2.3 試験結果	4
2.4 まとめ	6
3. ASFRE-IIIコードによる事前解析	7
3.1 解析対象試験装置	7
3.1.1 試験体概要	7
3.1.2 閉塞物	7
3.2 解析コード及びコードの改造	7
3.3 解析条件	8
3.3.1 実証炉運転条件	8
3.3.2 実証炉運転条件を模擬する場合のNa試験条件	8
3.3.3 解析条件	9
3.4 解析結果	10
3.4.1 ヒータピン表面最高温度	10
3.4.2 ナトリウム温度及び流速分布	10
3.5 まとめ	11
4. 結論	13
謝辞	15
参考文献	16

表リスト

表2.1-1 模擬閉塞物粒子の寸法

表2.1-2 模擬閉塞物ポロシティの計算

表2.3-1 閉塞物単体圧力損失測定試験ケース

表2.3-2 閉塞物単体圧力損失測定試験結果

表3.1.1-1 37本ピンバンドルナトリウム試験体の主要仕様

表3.4-1 解析結果一覧

図リスト

- 図2.1-1 閉塞物単体圧力損失測定試験装置系統図
- 図2.1-2 模擬閉塞物の寸法
- 図2.3-1 閉塞物単体圧力損失測定試験結果
- 図2.3-2 試験結果のErgunの式からの差異
- 図3.1.1-1 炉心・機器熱流動試験施設の概要
- 図3.1.1-2 37本ピンバンドルナトリウム試験体の概要
- 図3.1.1-3 閉塞物取付位置断面図
- 図3.1.1-4 閉塞物取付位置鳥瞰図
- 図3.3.3-1 解析モデルメッシュ分割
- 図3.4.1-1 ヒータピン表面最高温度
- 図3.4.2-1 軸方向ナトリウム温度分布 (400 ℓ/min、250 W/cm、実験圧損式)
- 図3.4.2-2 軸方向ナトリウム温度分布 (400 ℓ/min、250 W/cm、Ergunの式)
- 図3.4.2-3 流速及びナトリウム温度分布 (400 ℓ/min、250 W/cm、実験圧損式)
- 図3.4.2-4 流速及びナトリウム温度分布 (400 ℓ/min、250 W/cm、Ergunの式)
- 図3.4.2-5 流路断面の流速及びナトリウム温度分布 (400 ℓ/min、250 W/cm、Ergunの式)

1. 序論

安全評価上の高速炉の炉心形状特性に鑑みた安全評価事象として、集合体内局所事故が想定されている。すなわち、高速炉1次系冷却材に何らかの原因で異物が混入した場合、燃料ピンサブチャンネルに堆積し、流路を閉塞させて冷却を阻害する可能性を考えるものである。この局所閉塞現象の既往研究においてはワイヤースペーサ型バンドル内での閉塞形態は平板状ではなく、微小粒子による厚みのあるポーラス状閉塞であると予想されている。本現象の冷却性評価においては、閉塞領域内被覆管のホットスポットの発生位置及び温度を予測するための知見を得ることが重要となっている。筆者らは、ポーラス状閉塞の熱流動特性を総合的に評価するため、37本ピンバンドルナトリウム試験を実施する予定である。

37本ピンバンドルナトリウム試験の事前評価及び試験結果の評価における解析の精度を向上させるためには、閉塞物内流動の支配因子である閉塞物による流体の圧力損失を把握することが重要である。そこで、試験体に装着されたものとほぼ同一条件のポーラス状閉塞物について、閉塞物単体圧力損失測定試験を実施した。圧力損失測定に用いる模擬閉塞物は、円管内に閉塞物粒子を詰め、円管と共に焼結することにより、円管と閉塞物粒子の密着度を向上させたものを2体用いた。試験の作動流体は水を用い、ナトリウム試験において想定されるRe数範囲を包絡する条件とした。閉塞物単体圧力損失測定試験については第2章に示す。

更に、37本ピンバンドルナトリウム試験に先立ち、試験条件の設定に資する目的で、単相サブチャンネル解析コードASFRE-III^[1]を用いて事前解析を実施した。本来はワイヤースペーサのある体系に閉塞が形成されるが、試験では閉塞位置のワイヤーを取り除き、そこに焼結金属をポーラス状閉塞物として設置している。そこで、解析に先立ち、試験体を忠実にモデル化するため、閉塞物内のワイヤを削除したモデル化を採用できるようにASFRE-IIIコードに機能を追加した。解析では前述の閉塞物単体圧力損失測定試験結果に基づいて設定した閉塞物圧力損失式及び既往相関式としてErgunの式^[2]を使用した。解析結果は、ナトリウム流量及びヒータピン線出力に対するヒータピン最高温度マップの形でまとめ、試運転時の運転限界の予想値が把握できるようにしている。ASFRE-IIIコードによる事前解析については第3章に示す。

2. 閉塞物単体圧力損失測定試験

2.1 試験装置

(1) 試験系統

試験装置系統図を図2.1-1に示す。

試験装置は、ヘッドタンク、入口配管、模擬閉塞物、出口配管及び計量器からなり、等温に保持されたヘッドタンク内の純水を、窒素ガスにより加圧することで流動させ、系外に流出させるワンスルーワー方式である。模擬閉塞物の上流及び下流には圧力タップが設けられ差圧が測定される。また、系外に流出した水をビーカに受け、計量器により重量を計測することで流量を測定した。

重量の計測は、弁開度調整による流量設定後、流れが十分に安定した状態で実施しており、弁開閉の影響を排除している。また、流れの乱れの影響を排除するため、重量計測値の回帰直線を求め、その直線の勾配から流量を算出した。

試験体の上流側には $1 \mu\text{m}$ のフィルターを2段設置し、異物の混入を防止している。

(2) 模擬閉塞物

模擬閉塞物は、SUS304の粒子を円管内に詰め、円管と共に焼結することにより、円管と閉塞物粒子を完全に密着させている。粒子は、SUS304ワイヤを切断し、平行平板で挟んで回転させることにより球形に加工したものである。粒子径は平均で0.340mmである。閉塞物自体の制作方法、条件等は37本ピンバンドルナトリウム試験に用いたものと同様であり、本実験で得られた圧力損失係数は37本ピンバンドルナトリウム試験に適用できるものと考える。

模擬閉塞物の寸法を図2.1-2に示す。

模擬閉塞物粒子の寸法を表2.1-1に、ポロシティの計算値を表2.1-2に示す。

2.2 試験条件

2.2.1 Re数範囲

圧力損失測定試験はRe数一致を相似則とし、ナトリウム試験において想定されるRe数範囲を包絡する条件において実施した。

(1) 最小Re数

第3章に示すASFRE-IIIによる事前解析によれば、閉塞物の圧力損失式としてErgunの式を用いた場合、閉塞物内の軸方向流速は集合体内平均流速の約7～1%となる。そこで、0.1%程度の条件までデータを取得することとした。

閉塞物内の最小流速を集合体内平均流速の0.1%とすれば最小Re数は以下とな

る。

- ・ 実証炉集合体内平均流速；5.85 m/s
- ・ 閉塞物内最小流速；0.00585 m/s
- ・ 閉塞物内最小Re_i数；6.2（代表長さ；粒子径 0.340mm、動粘性係数；427°C とし $3.21 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ ）

なお、粒子層圧力損失の既往相関式であるErgunの式と同様に、閉塞物内の流速を見かけの流速（ポロシティを1と仮定した場合の流速＝閉塞物内流速×ポロシティ）で定義した場合、以下となる。

- ・ 閉塞物内最小流速；0.00234 m/s（見かけの流速、ポロシティ；0.4）
- ・ 閉塞物内最小Re_i数；2.5（代表長さ；粒子径 0.340mm、代表流速；見かけの流速、動粘性係数；427°C とし $3.21 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ ）

(2) 最大Re数

第3章に示すASFRE-IIIによる事前解析によれば、閉塞物の圧力損失式としてErgunの式を用いた場合、閉塞物内の軸方向流速は集合体内平均流速の約7～1%である。そこで、閉塞物内の最大流速を集合体内平均流速の10%と仮定すれば最大Re数は以下となる。

- ・ 閉塞物内最大流速；0.585 m/s
- ・ 閉塞物内最大Re_i数；620.（代表長さ；粒子径 0.340mm、動粘性係数；427°C とし $3.21 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ ）

なお、Ergunの式と同様に、閉塞物内の流速を見かけの流速で定義した場合、以下となる。

- ・ 閉塞物内最小流速；0.234 m/s（見かけの流速、ポロシティ；0.4）
- ・ 閉塞物内最小Re_i数；250（代表長さ；粒子径 0.340mm、代表流速；見かけの流速、動粘性係数；427°C とし $3.21 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ ）

(3) Re数範囲

圧力損失測定試験におけるRe数範囲は、ナトリウム試験における閉塞物内Re数の予想に基づき以下のように設定した。ここで、Re_i数の代表長さは粒子径、代表流速は見かけの流速である。

- ・ $2.5 \leq Re_i \leq 250.$

2.2.2 溫度条件

高Re数域における圧力損失の低減を図るために、常温の他に温度を上昇（動粘性係数を低下）させた試験を実施する。温度条件は、常温（20°C）、35°Cの2ケースとする。

る。

2.2.3 流動方向

閉塞物の取付方向を逆転させ、流動方向を逆転させた試験を実施する。これにより、閉塞物内の流路が混入粒子等により閉塞する影響を低減できる。

2.3 試験結果

試験ケース毎の内容及びデータ点数を表2.3-1に、試験結果を表2.3-2に示す。また、Re数と圧力損失係数の関係を図2.3-1に、Ergunの式と試験結果との差異を図2.3-2に示す。ここで、圧力損失係数として閉塞物の単位長さ当たりの値を用いるものとし、定義を以下に示す。

$$\zeta = \Delta P \frac{2g}{L\rho V^2}$$

ζ ; 単位長さ当たりの圧力損失係数 (1/m)

ΔP ; 圧力損失 (kg/m²)

g ; 重力加速度 (m/s²)

L ; 閉塞物厚さ (m)

ρ ; 流体密度 (kg/m³)

V ; 見かけの流速 (m/s)

(1) 粘性の効果

表2.3-1に示すとおり、試験体C-2を正方向に取り付けた試験 (Case0A、Case0C、Case1A再、Case3) は、18~34°Cの範囲で実施しており、動粘性係数は 10.5×10^{-7} ~ 7.39×10^{-7} m²/sの範囲で変化する。これらの試験で得られた圧力損失係数をRe数に対してプロットすれば、図2.3-1に示すとおり、動粘性係数に依らずほぼ同一の線上に乗ることが分かる。すなわち、従来の粒子層圧力損失の式と同様に、粘性の効果はRe数を用いて整理することで考慮できることが確認された。

(2) 異物混入による圧力損失の増加

流体内に異物が混入した場合、模擬閉塞物内に蓄積されポロシティの低下を招き、圧力損失が上昇する可能性がある。そのため、今回の試験では試験体の上流側に1 μmのフィルターを2段設置している。また、試験結果から以下のことが言える。

表2.3-1に示すとおり、試験体C-2については、1カ月以上の期間に90点以上のデータを取得しており、試験体の取付方向を逆転させた試験も実施している。しかし、図2.3-1を見ると、試験体C-2に対する試験結果はほぼ同一の線上に乗ってお

り、異物混入による圧力損失の増加は生じなかつたことが分かる。

(3) 試験体間の差異

図2.3-1を見ると、試験体C-2とC-1で圧力損失係数に約10~15%の差異が生じている。これは、端部効果により、粒子の偏りに差があるために生じている可能性がある。粒子の偏りが発生すると、ポロシティの大きい部分に流路パスが形成されるため、偏りがない場合に比べ圧力損失が低下する。ポロシティの偏りは計測していないが、試験体を光に空かしてみると、試験体C-2には閉塞物内を光線が通過していく点が存在するのに対し、試験体C-1にはそのような光線の通過は認められない。従って、試験体C-2の方がC-1より粒子の偏りが大きく、圧力損失係数が低下した可能性がある。

試験体C-2とC-1は同一手順で同時に製作しており、これ以上条件を一致させることは非現実的である。従って、模擬閉塞物を用いた37本ピンバンドルナトリウム試験結果の評価にあたっては、試験体によって15%程度の個体差があることを考慮する必要がある。

(4) Ergunの式との比較

図2.3-2を見ると、試験で得られた圧力損失係数はErgunの式に対し-5~-40%と、やや低めの値を示しており、高Re数域において差異が大きくなる傾向を示している。また、2体の模擬閉塞物の間に約10~15%の差異が生じているが、Ergunの式からの差異の傾向は一致している。

Ergunの式から差異が生じた原因としては以下が考えられる。

- ・閉塞物粒子の最外層は管壁に接しているため、ポロシティが増加している可能性がある。外層部分のポロシティが増加している場合、最外層部に流路パスが形成され、平均ポロシティから算出した圧力損失より低い圧力損失を示す。このことは、平均ポロシティを用いてErgunの式から算出した圧力損失係数より試験結果が低めの値を示すことと定性的に一致する。

(5) 圧力損失式の設定

37本ピンバンドルナトリウム試験について、より精度の高い解析を実施するためには、圧力損失試験結果から得られた圧力損失式を使用することが考えられるが、試験体によって15%程度の個体差があることを考慮する必要がある。この差は、壁面近傍の粒子の詰まり方により生ずると考えられ、決定論的に平均の圧力損失あるいは閉塞物のポロシティを予測することは困難である。実機のポーラス状閉塞についても同じ不確かさがあるので、厳しい条件を包絡するために、高めの圧力損失値

を示した試験体C-1のデータ（Case4）に基づいて設定した圧力損失式を37本ピンバンドルナトリウム試験解析において用いることを考える。圧力損失式を以下に示す。圧力損失式は、基本形状をErgunの式と一致させ、係数を試験結果に基づいて設定したものである。

$$\Delta P = \zeta L \frac{\rho}{2g} V^2$$

$$\zeta = \frac{277}{d \cdot \text{Re}^{0.972}} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{2.29}{d} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

ε ; ポロシティ (—)

d ; 粒子径 (m)

Re ; レイノルズ数 (—)

$$\text{Re} = \frac{Vd}{\nu}$$

ν ; 動粘性係数 (m^2/s)

参考として、上記と同様の定義で式を変形した場合のErgunの式を以下に示す。

$$\zeta = \frac{300}{d \cdot \text{Re}} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{3.5}{d} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

2.4まとめ

37本ピンバンドルナトリウム試験で使用されるものとほぼ同一条件のポーラス状閉塞物（ポロシティ；約0.4）について閉塞物単体圧力損失測定試験を実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) 試験結果は、粒子層圧力損失の既往相関式であるErgunの式に対し-5~-40%と、やや低めの値を示した。これは、閉塞物の最外層が管壁に接していることにより均一な粒子分布とならず、管壁近傍でポロシティが増加し、流路パスが形成された効果と考えられる。
- (2) 2体の模擬閉塞物は同一スペック、同一条件で製作されているにもかかわらず、圧力損失係数には約10~15%の差異が生じており、ナトリウム試験結果の評価にあたっては、閉塞物によって15%程度の個体差があることを考慮する必要がある。
- (3) 閉塞物形成状態の個体差を考慮するために、高めの圧力損失値を示した閉塞物のデータに基づいて圧力損失式を設定した。

3. ASFRE-IIIコードによる事前解析

3.1 解析対象試験装置

3.1.1 試験体概要

解析対象とする試験体は、炉心・機器熱流動試験施設（Core&Component Thermal-hydraulics Test Loop: CCTL）に据え付けられている37本ピンバンドルナトリウム試験体である。CCTLの概要を図3.1.1-1に、37本ピンバンドルナトリウム試験体の構造を図3.1.1-2～図3.1.1-4に示す。また、37本ピンバンドルナトリウム試験体の主要仕様を表3.1.1-1に示す。

37本ピンバンドルナトリウム試験体は、実証炉の炉心燃料集合体の部分モデルとして設計されており、ピン外径、ピンピッチ、ワイヤスペーサ外径、ワイヤスペーサ巻きピッチ及び最大線出力は実証炉と同等である。ただし、ピン数は37本とし、ピン発熱部は軸方向に平坦な発熱分布とし、発熱長さは650mmに縮小している。なお、閉塞部の前後には十分な発熱長（300mm）を取っており、閉塞部回りの熱流動条件には発熱分布、発熱長の影響は小さいと考えられる。

3.1.2 閉塞物

閉塞物は、SUS304粒子（ $\phi 0.34\text{ mm}$ ）を焼結したもので、平均ポロシティ（空隙率）は40%である。

閉塞物の設置位置は、軸方向にはヒータピン発熱部中心であり、径方向には外側2列のサブチャンネルを閉塞する形で設置されている。（図3.1.1-2、図3.1.1-3参照）

3.2 解析コード及びコードの改造

(1) 解析コード

解析は、単相サブチャンネル解析コードASFRE-III^[1]を用いて実施する。ASFRE-IIIは、定格から過渡状態に至るまで、高速炉燃料集合体内の熱流動挙動評価を目的として、熱流体技術開発室にて開発・整備を進められたサブチャンネル解析コードである。ASFRE-IIIはグリッドスペーサ及びワイヤスペーサのピンバンドル体系について適用可能であり、ポーラス状閉塞物を取り扱えるポーラスボディモデルを有している。

(2) 解析コードの機能追加

ナトリウム試験の閉塞物は、製作性の観点から閉塞物内のワイヤスペーサを削除している。しかし、ASFRE-IIIには閉塞物内のワイヤを削除する機能がなかったため、閉塞物内のワイヤを削除した条件でポロシティ及びパーミアビリティ（透過率）を設定できるよう解析コードに機能を追加した。

3.3 解析条件

ナトリウム試験は実証炉の運転条件を基本とし、試験体温度が設計温度を上回らない範囲で実施される。そこで、実証炉の運転条件に基づいてナトリウム試験条件を検討し、解析条件を設定する。

3.3.1 実証炉運転条件

実証炉の運転条件を以下に示す。

(1) 最大線出力

各炉心条件毎の最大線出力を以下に示す。

- ・平衡炉心初期 BOEC ; 410 W/cm (径ブランケット無し)
- ・平衡炉心末期 EOEC ; 409 W/cm (径ブランケット無し)
- ・移行炉心初期 BOC ; 422 W/cm (径ブランケット無し)
- ・移行炉心末期 EOC ; 421 W/cm (径ブランケット無し)

実証炉の最大線出力は、移行第3サイクルBOC (径ブランケット無し) の422 W/cmである。

(2) 最大流量

流量は、最大線出力を生じる内側炉心第1領域において最大となる。

- ・最大集合体流量 ; 30.2 kg/s (径ブランケット無し)

なお、集合体平均流速は6.33m/sである。ここで、密度は857.4 kg/m³ (395°C) とする。

3.3.2 実証炉運転条件を模擬する場合のナトリウム試験条件

実証炉の運転条件を模擬する場合のナトリウム試験条件を検討する。

(1) 線出力

ヒータピン出力は、平坦分布であり、26.1 kW/本である。発熱部は65cmであるため、線出力は401.5 W/cmとなる。

これは、実証炉の最大線出力422 W/cmとほぼ同等の値である。

(2) 流量

集合体内の平均質量流速が実証炉と一致する条件とした場合、以下に示すとおり、試験体流量は400 l/minとなる。

- ・実証炉集合体流路断面積； $5.563 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

- ・試験体集合体流路断面積； $1.081 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$$30.2 \text{ kg/s} \times \frac{1.018 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{5.563 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 5.868 \text{ kg/s}$$

$$\Rightarrow 400 \text{ l/min}$$

ここで、密度は 880.0 kg/m^3 (300°C) とする。

試験装置主循環系の最大循環流量の予想値は、約 480 l/min であり、実証炉運転条件の模擬は可能である。

(3) ナトリウム試験条件

ナトリウム試験は、流量及びヒータ出力をパラメータとして、試験体の設計温度を上回らない範囲で実施する予定である。具体的には、流量を所定の値に固定し、試験体の設計温度を上回らない範囲までヒータ出力を徐々に増加させる。従って、流量については、試験装置主循環系の最大循環流量まで試験が可能であるが、ヒータ出力は、試験体の設計温度を上回らない範囲とする必要がある。

試験を実施する最大流量は、実証炉の運転条件を包絡していることが望ましいため、 400 l/min 以上とすべきであり、ポンプ性能上可能であれば 400 l/min を上回る流量（約 480 l/min ）についてもデータを取得すべきである。

ナトリウム試験のパラメータ範囲を以下に示す。

- ・流量 (%) ; $0 \sim 120$ (480 l/min)

- ・出力 (%) ; $0 \sim 100$ (401.5 W/cm)

(ただし、試験体の設計温度を上回らない範囲)

3.3.3 解析条件

実証炉の運転条件を模擬する場合のナトリウム試験条件（ 400 l/min 、 401.5 W/cm ）を基準として、解析条件を設定する。

入口ナトリウム温度は、試験体の設計上限温度からの余裕を大きくするために試験全体の温度を低下させ、実証炉条件の 395°C から 300°C に変更する。

流量は、 480 l/min （予想最大流量）、 400 l/min （実証炉条件）、 300 l/min 及び 200 l/min とし、線出力はヒータピン表面の最高温度が設計温度（ 650°C ）近傍となる条件を念頭に置いて設定する。 400 l/min において、異なる線出力の解析を3ケース実施し、線出力に対するヒータピン表面最高温度の依存性を把握する。なお、 480 l/min 、 300 l/min 及び 200 l/min については1ケースの解析を実施し、同様の依存性があるものとして評価する。

閉塞物の圧力損失式は、閉塞物単体圧力損失測定試験の結果を使用する。なお、比較として、粒子層圧力損失の既往相関式であるErgunの式を用いた解析も実施する。

閉塞物のポロシティ及びパーミアビリティは0.4とする。

メッシュ分割は閉塞物内の軸方向メッシュ幅を2.5mmとした。解析モデルのサブチャンネル分割及び軸方向分割を図3.3.3-1に示す。

3.4 解析結果

解析結果の一覧を表3.4.1に示す。

3.4.1 ヒータピン表面最高温度

流量及び線出力とヒータピン表面最高温度の関係を図3.4.1-1に示す。流量一定の条件では線出力とヒータピン表面最高温度の入口からの温度上昇幅はほぼ比例関係にある。また、線出力一定の条件では流量とヒータピン表面最高温度の入口からの温度上昇幅はほぼ反比例関係にある。

ヒータピン表面最高温度が設計温度（650°C）に到達するのは、400 ℓ/minで約300 W/cmであり、上記比例、反比例の関係を式で表せば概ね以下となる。

$$T_{\max} = 467 \frac{Q}{W} + 300$$

ここで、 T_{\max} ：ヒータピン表面最高温度（°C）

Q ：ヒータピン線出力（W/cm）

W ：流量（ℓ/min）

ヒータピン表面最高温度は、全ての解析ケースにおいてNo. 8のサブチャンネル（図3.3.3-1参照）で発生している。なお、No. 10及びNo. 12のサブチャンネルの最高温度もNo. 8とほぼ同等である。これらのサブチャンネルは周辺の3サブチャンネルの全てが閉塞物で塞がれた条件であることからヒータピン表面温度が最高になっている。なお、周辺サブチャンネル（ラッパ管に接する）は中心サブチャンネルより流路断面積が大きいため、温度の上昇は中心サブチャンネルより小さい。

ヒータピン表面最高温度に到達する軸方向位置は、閉塞物の圧力損失式に試験結果を使用した場合、閉塞物上端から1.25mmの位置（最上部メッシュ）となり、Ergunの式を使用した場合、閉塞物上端から3.75mmの位置（2メッシュ目）となる。ただし、最上部メッシュと2メッシュ目の温度差は3°C程度であり、有為な差は無いと言える。

3.4.2 ナトリウム温度及び流速分布

ヒータピン最高温度が単純な比例及び反比例の関係で整理できることからも分かるように、ナトリウム温度及び流速分布は各解析ケースとも同様な傾向を示している。そこで、ナトリウム温度及び流速分布については代表として400 ℓ/min、250 W/cmのケースを示す。

主なサブチャンネルの軸方向ナトリウム温度分布を、図3.4.2-1（実験圧損式を使用）及び図3.4.2-2（Ergunの式を使用）に示す。

サブチャンネルNo. 1、2、8におけるナトリウム温度は閉塞物の上端近傍において最高となっている。一方、サブチャンネルNo. 9においては、閉塞物の上端部で温度が低下している。これは、サブチャンネルNo. 9が健全サブチャンネルに接しており、閉塞物上端部で健全サブチャンネルからナトリウムが流入することによる（図3.4.2-3及び図3.4.2-4参照）。閉塞物の圧力損失計算に実験圧損式を用いた場合とErgunの式を用いた場合では、全体の傾向は同様であるが、実験圧損式の方がErgunの式より圧力損失値を低めに算出するためナトリウム最高温度が約50°C低下している。

閉塞物に関して線対称となる中心線に沿ったサブチャンネル（No. 3、10、9、19、20、32、31、46、47、59、58、68、69、76）の流速及びナトリウム温度分布を、図3.4.2-3（実験圧損式を使用）及び図3.4.2-4（Ergunの式を使用）に示す。

閉塞物内の下側では閉塞サブチャンネルから健全サブチャンネルへの流れが形成され、上側では健全サブチャンネルから閉塞サブチャンネルへの流れが形成されている。また、全体の流況としては、閉塞物を回避する流れが生じ、閉塞物の下流側では弱い逆流も発生している。ただし、温度分布は閉塞物内のみが極端に高温となっており、閉塞物下流側においてホットスポットのような部分は発生していない。閉塞物の圧力損失計算に実験圧損式を用いた場合とErgunの式を用いた場合では、全体の傾向は同様であるが、実験圧損式の方がErgunの式より圧力損失値を低めに算出するため閉塞物内の流速が上昇している。

図3.4.2-5に、各流路水平断面の流速及びナトリウム温度分布（Ergunの式を使用）を示す。

3.5 まとめ

37本ピンバンドルナトリウム試験に先立ち、ASFRE-IIIを用いて事前解析を実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) ヒータピン表面温度は、水平断面内の3方向を閉塞サブチャンネルで囲まれた中心サブチャンネルの閉塞物内上端近傍で最高となり、今回の検討範囲、ヒータピン出力（ $Q = 100 \sim 400 \text{ W/cm}$ ）、流量（ $F = 200 \sim 480 \ell/\text{min}$ ）では、最高温度が発生するサブチャンネル位置は一定であった。
- (2) 試験における目安制限温度650°Cを超える加熱条件は、出力／流量比が 0.75 ($\text{W/cm}/(\ell/\text{min})$) 以上であると予想される。
- (3) ヒータピン表面最高温度の入口からの温度上昇幅は、出力／流量比にはほぼ比例する。従って、ナトリウム試験において一定流量条件下でヒータ出力を順次上昇

させる場合に、温度が急上昇する恐れはないと予測できる。

- (4) 閉塞物内の下側（上流側）では閉塞サブチャンネルから健全サブチャンネルへの流れが形成され、上側（下流側）では健全サブチャンネルから閉塞サブチャンネルへの流れが形成されている。また、全体の流況としては、閉塞物を回避する流れが生じ、閉塞物の下流側では弱い逆流も発生している。ただし、温度分布は閉塞物内のみが極端に高温となっており、閉塞物下流側においてホットスポットのような部分は発生していない。

4. 結論

ポーラス状閉塞物による局所閉塞事象の評価を目的とする37本ピンバンドルナトリウム試験を実施するに当たり、I. 閉塞物単体圧力損失測定試験、及びII. ASFRE-IIIを用いた事前解析を実施した。

I. 37本ピンバンドルナトリウム試験で使用されるものとほぼ同一条件のポーラス状閉塞物（ポロシティ；約0.4）について閉塞物単体圧力損失測定試験を実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) 試験結果は、粒子層圧力損失の既往相関式であるErgunの式に対し-5~-40%と、やや低めの値を示した。これは、閉塞物の最外層が管壁に接していることにより均一な粒子分布とならず、管壁近傍でポロシティが増加し、流路パスが形成された効果と考えられる。
- (2) 2体の模擬閉塞物は同一スペック、同一条件で製作されているにもかかわらず、圧力損失係数には約10~15%の差異が生じており、ナトリウム試験結果の評価にあたっては、閉塞物によって15%程度の個体差があることを考慮する必要がある。
- (3) 閉塞物形成状態の個体差を考慮するために、高めの圧力損失値を示した閉塞物のデータに基づいて圧力損失式を設定した。

II. 37本ピンバンドルナトリウム試験に先立ち、ASFRE-IIIを用いて事前解析を実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) ヒータピン表面温度は、水平断面内の3方向を閉塞サブチャンネルで囲まれた中心サブチャンネルの閉塞物内上端近傍で最高となり、今回の検討範囲、ヒータピン出力 ($Q = 100 \sim 400 \text{ W/cm}$)、流量 ($F = 200 \sim 480 \ell/\text{min}$) では、最高温度が発生するサブチャンネル位置は一定であった。
- (2) 試験における目安制限温度650°Cを超える加熱条件は、出力／流量比が 0.75 ($\text{W/cm}/(\ell/\text{min})$) 以上であると予想される。
- (3) ヒータピン表面最高温度の入口からの温度上昇幅は、出力／流量比にほぼ比例する。従って、ナトリウム試験において一定流量条件下でヒータ出力を順次上昇させる場合に、温度が急上昇する恐れはないと予測できる。
- (4) 閉塞物内の下側（上流側）では閉塞サブチャンネルから健全サブチャンネルへの流れが形成され、上側（下流側）では健全サブチャンネルから閉塞サブチャンネルへの流れが形成されている。また、全体の流況としては、閉塞物を回避する

流れが生じ、閉塞物の下流側では弱い逆流も発生している。ただし、温度分布は閉塞物内のみが極端に高温となっており、閉塞物下流側においてホットスポットのような部分は発生していない。

謝辞

本報告書で報告した試験の実施に際し、常陽産業（株）の伊藤真美氏、小沼英良氏、佐伯不二生氏には、温度、流速測定及びデータ処理に協力していただいた。また、解析の実施に当たり、基盤技術開発部熱流体技術開発室の大島宏之副主任研究員、成田均研究員、（株）エヌデーターの橋本昭彦氏には大変有益な御助言を頂くと共に、多大な御協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 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 TN9410 96-128 1996年4月
- (2) Ergun, S., Chemical Engineering Progress, Vol.48, No.2, pp. 89-94 (1952)

表2.1-1 模擬閉塞物粒子の寸法

	単位	閉塞物（C-1）	閉塞物（C-2）
材質	—	SUS304	
平均粒子径	mm	0.340	

・平均粒子径は、同時に製作した粒子群から抜き取り検査した結果である。

表2.1-2 模擬閉塞物ポロシティの計算

	単位	閉塞物（C-1）	閉塞物（C-2）
閉塞物体積	m^3	2.627×10^{-6}	2.629×10^{-6}
閉塞物重量	kg	0.01237	0.01235
閉塞物密度	kg/m^3	4.709×10^3	4.697×10^3
SUS304 密度	kg/m^3	7.93×10^3	7.93×10^3
ポロシティ	—	0.4062	0.4077

表2.3-1 閉塞物単体圧力損失測定試験ケース

ケース名	試験開始日	試験体	試験体方向	試験温度	データ点数
単位	—	—	—	°C	点
Case0A	'97/4/10	C-2	正	29~34	26
Case0C	'97/5/20	C-2	正	32~34	14
Case1A再	'97/4/14	C-2	正	18~20	41
Case3	'97/5/22	C-2	逆	33~36	22
Case4	'97/5/27	C-1	正	33~37	33

表2.3-2(1/6) 閉塞物単体圧力損失測定試験結果

圧損試験 4 D (表)

ケース名	試験日	差圧	前面流速	温度	密度	動粘性係数	粒子径	閉塞物長さ	Re数(みかけ)	圧損係数	ボロジティ	Ergunの式	式との差異
CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0	CASE0
Case0A03	1997/4/10	1.3270E+03	8.3472E-03	30.801	995.06	7.9035E-07	3.401E-04	3.461E-02	3.5919E+00	1.1061E+06	0.4077	1.3613E+06	-18.746
Case0A04	1997/4/10	1.2665E+03	7.8031E-03	30.865	995.04	7.8929E-07	3.401E-04	3.461E-02	3.3623E+00	1.2080E+06	0.4077	1.4481E+06	-16.578
Case0A05	1997/4/10	1.2671E+03	7.7975E-03	30.863	995.04	7.8933E-07	3.401E-04	3.461E-02	3.3597E+00	1.2103E+06	0.4077	1.4491E+06	-16.479
Case0A06	1997/4/10	2.0368E+03	1.1865E-02	30.061	995.27	8.0288E-07	3.401E-04	3.461E-02	5.0260E+00	8.4005E+05	0.4077	9.9851E+05	-15.869
Case0A07	1997/4/10	2.2219E+03	1.2961E-02	29.683	995.38	8.0939E-07	3.401E-04	3.461E-02	5.4461E+00	7.6786E+05	0.4077	9.2842E+05	-17.294
Case0A08	1997/4/11	2.5548E+03	1.5822E-02	33.687	994.18	7.4447E-07	3.401E-04	3.461E-02	7.2280E+00	5.9320E+05	0.4077	7.2171E+05	-17.806
Case0A09	1997/4/11	2.6809E+03	1.5912E-02	32.499	994.55	7.6281E-07	3.401E-04	3.461E-02	7.0944E+00	6.1524E+05	0.4077	7.3361E+05	-16.136
Case0A10	1997/4/11	2.9548E+03	1.7826E-02	31.840	994.75	7.7331E-07	3.401E-04	3.461E-02	7.8398E+00	5.4018E+05	0.4077	6.7241E+05	-19.665
Case0A11	1997/4/11	3.3399E+03	1.9506E-02	31.531	994.84	7.7831E-07	3.401E-04	3.461E-02	8.5235E+00	5.0989E+05	0.4077	6.2569E+05	-18.507
Case0A12	1997/4/11	3.7067E+03	2.1276E-02	31.309	994.91	7.8194E-07	3.401E-04	3.461E-02	9.2538E+00	4.7562E+05	0.4077	5.8341E+05	-18.476
Case0A13	1997/4/11	4.3723E+03	2.4260E-02	31.093	994.97	7.8551E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.0504E+01	4.3147E+05	0.4077	5.2469E+05	-17.767
Case0A14	1997/4/11	4.6457E+03	2.5863E-02	30.867	995.04	7.8925E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.1145E+01	4.0335E+05	0.4077	4.9968E+05	-19.279
Case0A15	1997/4/11	6.8807E+03	3.5281E-02	30.715	995.08	7.9179E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.5154E+01	3.2101E+05	0.4077	3.9127E+05	-17.957
Case0A16	1997/4/11	6.3094E+03	3.3169E-02	29.568	995.42	8.1140E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.3903E+01	3.3293E+05	0.4077	4.1840E+05	-20.429
Case0A17	1997/4/11	7.1572E+03	3.6814E-02	29.432	995.45	8.1378E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.5386E+01	3.0657E+05	0.4077	3.8674E+05	-20.732
Case0A18	1997/4/11	7.6872E+03	4.1748E-02	34.279	993.99	7.3561E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.9302E+01	2.5642E+05	0.4077	3.2653E+05	-21.472
Case0A19	1997/4/11	8.4403E+03	4.4451E-02	34.018	994.07	7.3950E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.0443E+01	2.4832E+05	0.4077	3.1332E+05	-20.746
Case0A20	1997/4/11	9.2723E+03	4.8904E-02	33.874	994.12	7.4166E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.2426E+01	2.2537E+05	0.4077	2.9357E+05	-23.232
Case0A22	1997/4/11	1.2502E+04	6.2708E-02	33.537	994.22	7.4675E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.8560E+01	1.8480E+05	0.4077	2.4984E+05	-26.033
Case0A24	1997/4/11	1.7422E+04	8.1169E-02	33.509	994.23	7.4718E-07	3.401E-04	3.461E-02	3.6947E+01	1.5369E+05	0.4077	2.1354E+05	-28.028
Case0A26	1997/4/11	2.3311E+04	9.8254E-02	33.679	994.18	7.4460E-07	3.401E-04	3.461E-02	4.4878E+01	1.4036E+05	0.4077	1.9170E+05	-26.782
Case0A28	1997/4/11	3.2438E+04	1.2496E-01	33.568	994.21	7.4628E-07	3.401E-04	3.461E-02	5.6948E+01	1.2074E+05	0.4077	1.7013E+05	-29.029
Case0A30	1997/4/11	4.5304E+04	1.5550E-01	32.699	994.48	7.5967E-07	3.401E-04	3.461E-02	6.9617E+01	1.0887E+05	0.4077	1.5554E+05	-30.006
Case0A32	1997/4/11	6.2623E+04	1.9030E-01	32.766	994.46	7.5863E-07	3.401E-04	3.461E-02	8.5313E+01	1.0048E+05	0.4077	1.4347E+05	-29.962

表2.3-2(2/6) 閉塞物単体圧力損失測定試験結果

圧損試験 4 D (表)

ケース名	試験日	差圧	前面流速	温度	密度	動粘性係数	粒子径	閉塞物長さ	Re数(みかけ)	圧損係数	ボロジティ	Ergunの式	式との差異
Case0A34	1997/4/11	9.0018E+04	2.4292E-01	32.619	994.51	7.6093E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.0857E+02	8.8639E+04	0.4077	1.3200E+05	-32.852
Case0A36	1997/4/11	1.2318E+05	2.9691E-01	32.567	994.53	7.6174E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.3256E+02	8.1191E+04	0.4077	1.2439E+05	-34.730
CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C	CASE0C
Case0C01	1997/5/20	6.7962E+02	4.2905E-03	31.527	994.84	7.7839E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.8746E+00	2.1445E+06	0.4077	2.5258E+06	-15.097
Case0C02	1997/5/20	9.4126E+02	6.2308E-03	32.820	994.45	7.5778E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.7965E+00	1.4089E+06	0.4077	1.7229E+06	-18.226
Case0C03	1997/5/20	1.3185E+03	8.4048E-03	32.587	994.52	7.6142E-07	3.401E-04	3.461E-02	3.7541E+00	1.0845E+06	0.4077	1.3063E+06	-16.978
Case0C04	1997/5/20	1.5642E+03	1.0051E-02	32.874	994.43	7.5694E-07	3.401E-04	3.461E-02	4.5160E+00	8.9974E+05	0.4077	1.1011E+06	-18.288
Case0C05	1997/5/20	3.5116E+03	2.1020E-02	33.349	994.28	7.4961E-07	3.401E-04	3.461E-02	9.5368E+00	4.6191E+05	0.4077	5.6876E+05	-18.788
Case0C06	1997/5/20	2.3436E+04	9.8622E-02	33.853	994.12	7.4197E-07	3.401E-04	3.461E-02	4.5206E+01	1.4006E+05	0.4077	1.9096E+05	-26.653
Case0C07	1997/5/20	2.9975E+05	5.0968E-01	34.116	994.04	7.3803E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.3487E+02	6.7079E+04	0.4077	1.0939E+05	-38.678
Case0C08	1997/5/20	1.2688E+05	2.9961E-01	33.798	994.14	7.4280E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.3718E+02	8.2159E+04	0.4077	1.2323E+05	-33.331
Case0C09	1997/5/20	1.6065E+05	3.4603E-01	33.829	994.13	7.4233E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.5853E+02	7.7991E+04	0.4077	1.1875E+05	-34.323
Case0C10	1997/5/20	1.8919E+05	3.8652E-01	33.844	994.13	7.4210E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.7714E+02	7.3611E+04	0.4077	1.1572E+05	-36.391
Case0C11	1997/5/20	2.5569E+05	4.6402E-01	34.071	994.06	7.3871E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.1363E+02	6.9033E+04	0.4077	1.1132E+05	-37.987
Case0C12	1997/5/20	2.7489E+05	4.8452E-01	34.058	994.06	7.3890E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.2301E+02	6.8069E+04	0.4077	1.1042E+05	-38.355
Case0C13	1997/5/20	3.4565E+05	5.5423E-01	34.079	994.05	7.3858E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.5521E+02	6.5414E+04	0.4077	1.0784E+05	-39.341
Case0C14	1997/5/20	3.4324E+05	5.4821E-01	34.084	994.05	7.3851E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.5246E+02	6.6394E+04	0.4077	1.0803E+05	-38.543
CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再	CASE1再
Case1A01	1997/4/14	2.3011E+03	1.1145E-02	19.969	997.84	1.0107E-06	3.401E-04	3.461E-02	3.7505E+00	1.0729E+06	0.4077	1.3075E+06	-17.945
Case1A02	1997/4/14	2.4540E+03	1.1780E-02	19.680	997.90	1.0178E-06	3.401E-04	3.461E-02	3.9363E+00	1.0241E+06	0.4077	1.2500E+06	-18.076
Case1A03	1997/4/14	2.5792E+03	1.2313E-02	19.362	997.97	1.0258E-06	3.401E-04	3.461E-02	4.0825E+00	9.8509E+05	0.4077	1.2085E+06	-18.486
Case1A04	1997/4/14	2.7658E+03	1.3163E-02	19.397	997.96	1.0249E-06	3.401E-04	3.461E-02	4.3681E+00	9.2432E+05	0.4077	1.1354E+06	-18.587
Case1A05	1997/4/14	3.0378E+03	1.4394E-02	19.373	997.96	1.0255E-06	3.401E-04	3.461E-02	4.7738E+00	8.4900E+05	0.4077	1.0465E+06	-18.873
Case1A06	1997/4/14	3.2744E+03	1.5503E-02	19.032	998.04	1.0341E-06	3.401E-04	3.461E-02	5.0986E+00	7.8884E+05	0.4077	9.8556E+05	-19.961

表2.3-2(3/6) 閉塞物単体圧力損失測定試験結果

圧損試験 4 D (表)

- 21 -

ケース名	試験日	差圧	前面流速	温度	密度	動粘性係数	粒子径	閉塞物長さ	Re数(みかけ)	圧損係数	ボロジティ	Ergunの式	式との差異
Case1A07	1997/4/15	3.7120E+03	1.7218E-02	19.782	997.88	1.0153E-06	3.401E-04	3.461E-02	5.7678E+00	7.2510E+05	0.4077	8.8166E+05	-17.757
Case1A08	1997/4/15	4.1756E+03	1.9140E-02	19.493	997.94	1.0225E-06	3.401E-04	3.461E-02	6.3665E+00	6.6002E+05	0.4077	8.0720E+05	-18.234
Case1A09	1997/4/15	4.6872E+03	2.1220E-02	19.361	997.97	1.0258E-06	3.401E-04	3.461E-02	7.0356E+00	6.0274E+05	0.4077	7.3899E+05	-18.437
Case1A10	1997/4/15	5.2616E+03	2.3361E-02	19.266	997.99	1.0282E-06	3.401E-04	3.461E-02	7.7274E+00	5.5826E+05	0.4077	6.8089E+05	-18.010
Case1A11	1997/4/15	5.9396E+03	2.6258E-02	19.101	998.02	1.0324E-06	3.401E-04	3.461E-02	8.6505E+00	4.9879E+05	0.4077	6.1783E+05	-19.266
Case1A12	1997/4/15	6.5797E+03	2.8701E-02	18.926	998.06	1.0368E-06	3.401E-04	3.461E-02	9.4146E+00	4.6247E+05	0.4077	5.7498E+05	-19.568
Case1A13	1997/4/15	7.4882E+03	3.2331E-02	18.907	998.06	1.0373E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.0600E+01	4.1477E+05	0.4077	5.2073E+05	-20.348
Case1A14	1997/4/15	8.5172E+03	3.6210E-02	18.725	998.10	1.0420E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.1819E+01	3.7609E+05	0.4077	4.7631E+05	-21.041
Case1A15	1997/4/15	9.6462E+03	4.0346E-02	18.674	998.11	1.0433E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.3152E+01	3.4309E+05	0.4077	4.3715E+05	-21.517
Case1A16	1997/4/15	1.1130E+04	4.5531E-02	18.728	998.10	1.0419E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.4862E+01	3.1083E+05	0.4077	3.9720E+05	-21.745
Case1A17	1997/4/15	1.2480E+04	5.0134E-02	18.688	998.11	1.0429E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.6349E+01	2.8747E+05	0.4077	3.6926E+05	-22.149
Case1A18	1997/4/15	1.4093E+04	5.5459E-02	18.781	998.09	1.0405E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.8127E+01	2.6529E+05	0.4077	3.4186E+05	-22.398
Case1A19	1997/4/15	1.6232E+04	6.2622E-02	18.862	998.07	1.0385E-06	3.401E-04	3.461E-02	2.0509E+01	2.3965E+05	0.4077	3.1260E+05	-23.336
Case1A20	1997/4/15	1.8291E+04	6.8818E-02	18.920	998.06	1.0370E-06	3.401E-04	3.461E-02	2.2570E+01	2.2362E+05	0.4077	2.9227E+05	-23.487
Case1A21	1997/4/15	2.1531E+04	7.8123E-02	18.887	998.07	1.0378E-06	3.401E-04	3.461E-02	2.5601E+01	2.0425E+05	0.4077	2.6831E+05	-23.876
Case1A22	1997/4/15	2.4219E+04	8.6007E-02	18.698	998.11	1.0427E-06	3.401E-04	3.461E-02	2.8054E+01	1.8955E+05	0.4077	2.5272E+05	-24.995
Case1A23	1997/4/15	2.8393E+04	9.7193E-02	18.739	998.10	1.0416E-06	3.401E-04	3.461E-02	3.1734E+01	1.7402E+05	0.4077	2.3384E+05	-25.582
Case1A24	1997/4/15	3.2728E+04	1.0810E-01	18.864	998.07	1.0384E-06	3.401E-04	3.461E-02	3.5405E+01	1.6216E+05	0.4077	2.1892E+05	-25.931
Case1A25	1997/4/15	3.7916E+04	1.2057E-01	18.896	998.07	1.0376E-06	3.401E-04	3.461E-02	3.9520E+01	1.5101E+05	0.4077	2.0549E+05	-26.511
Case1A26	1997/4/15	4.5213E+04	1.3555E-01	18.862	998.07	1.0385E-06	3.401E-04	3.461E-02	4.4393E+01	1.4247E+05	0.4077	1.9281E+05	-26.108
Case1A27	1997/4/15	5.2442E+04	1.5140E-01	18.797	998.09	1.0401E-06	3.401E-04	3.461E-02	4.9504E+01	1.3246E+05	0.4077	1.8219E+05	-27.295
Case1A28	1997/4/15	6.0887E+04	1.6867E-01	18.730	998.10	1.0419E-06	3.401E-04	3.461E-02	5.5060E+01	1.2391E+05	0.4077	1.7288E+05	-28.328
Case1A29	1997/4/15	7.1661E+04	1.8964E-01	18.478	998.15	1.0484E-06	3.401E-04	3.461E-02	6.1519E+01	1.1536E+05	0.4077	1.6417E+05	-29.733
Case1A30	1997/4/15	8.4218E+04	2.1283E-01	18.597	998.13	1.0453E-06	3.401E-04	3.461E-02	6.9247E+01	1.0764E+05	0.4077	1.5589E+05	-30.950
Case1A31	1997/4/15	1.0051E+05	2.3838E-01	18.872	998.07	1.0382E-06	3.401E-04	3.461E-02	7.8090E+01	1.0241E+05	0.4077	1.4842E+05	-31.003
Case1A32	1997/4/15	1.2106E+05	2.6980E-01	18.949	998.06	1.0362E-06	3.401E-04	3.461E-02	8.8550E+01	9.6295E+04	0.4077	1.4151E+05	-31.954

表2.3-2(4/6) 閉塞物単体圧力損失測定試験結果

圧損試験 4 D (表)

ケース名	試験日	差圧	前面流速	温度	密度	動粘性係数	粒子径	閉塞物長さ	Re数(みかけ)	圧損係数	ボロティ	Ergunの式	式との差異
Case1A33	1997/4/15	1.3419E+05	2.8832E-01	18.808	998.08	1.0398E-06	3.401E-04	3.461E-02	9.4300E+01	9.3464E+04	0.4077	1.3837E+05	-32.453
Case1A34	1997/4/15	1.7357E+05	3.3974E-01	18.808	998.08	1.0399E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.1112E+02	8.7064E+04	0.4077	1.3104E+05	-33.560
Case1A35	1997/4/15	1.9995E+05	3.7307E-01	18.783	998.09	1.0405E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.2194E+02	8.3175E+04	0.4077	1.2739E+05	-34.709
Case1A36	1997/4/15	2.4368E+05	4.1816E-01	18.864	998.07	1.0384E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.3695E+02	8.0685E+04	0.4077	1.2329E+05	-34.556
Case1A37	1997/4/15	2.9445E+05	4.6965E-01	18.422	998.17	1.0498E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.5214E+02	7.7285E+04	0.4077	1.1996E+05	-35.574
Case1A38	1997/4/15	3.4395E+05	5.1688E-01	18.476	998.15	1.0484E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.6767E+02	7.4532E+04	0.4077	1.1718E+05	-36.395
Case1A39	1997/4/15	3.6652E+05	5.3532E-01	18.669	998.11	1.0434E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.7448E+02	7.4050E+04	0.4077	1.1612E+05	-36.228
Case1A40	1997/4/15	3.6839E+05	5.3779E-01	18.403	998.17	1.0503E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.7414E+02	7.3740E+04	0.4077	1.1617E+05	-36.524
Case1A41	1997/4/15	3.8739E+05	5.5483E-01	18.545	998.14	1.0466E-06	3.401E-04	3.461E-02	1.8029E+02	7.2856E+04	0.4077	1.1527E+05	-36.797
CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3	CASE3
Case3_01	1993/5/21	1.1185E+03	7.4199E-03	33.6545	994.19	7.4496E-07	3.401E-04	3.461E-02	3.3874E+00	1.1809E+06	0.4077	1.4380E+06	-17.877
Case3_02	1993/5/21	1.4186E+03	9.4700E-03	33.678	994.18	7.4460E-07	3.401E-04	3.461E-02	4.3255E+00	9.1946E+05	0.4077	1.1457E+06	-19.744
Case3_03	1993/5/21	1.8977E+03	1.2365E-02	32.9785	994.40	7.5531E-07	3.401E-04	3.461E-02	5.5677E+00	7.2128E+05	0.4077	9.1011E+05	-20.748
Case3_04	1993/5/21	2.0988E+03	1.4011E-02	33.876	994.12	7.4162E-07	3.401E-04	3.461E-02	6.4253E+00	6.2148E+05	0.4077	8.0064E+05	-22.377
Case3_05	1993/5/21	2.6282E+03	1.7145E-02	34.0655	994.06	7.3878E-07	3.401E-04	3.461E-02	7.8928E+00	5.1975E+05	0.4077	6.6850E+05	-22.251
Case3_06	1993/5/21	3.1319E+03	1.9933E-02	34.06	994.06	7.3886E-07	3.401E-04	3.461E-02	9.1752E+00	4.5823E+05	0.4077	5.8764E+05	-22.021
Case3_07	1993/5/22	3.9950E+03	2.4362E-02	33.955	994.09	7.4043E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.1190E+01	3.9129E+05	0.4077	4.9802E+05	-21.432
Case3_08	1993/5/22	5.0100E+03	2.9862E-02	34.623	993.88	7.3054E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.3902E+01	3.2666E+05	0.4077	4.1841E+05	-21.929
Case3_09	1993/5/22	6.5895E+03	3.7822E-02	34.912	993.79	7.2632E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.7710E+01	2.6785E+05	0.4077	3.4779E+05	-22.984
Case3_10	1993/5/22	8.3857E+03	4.5570E-02	34.7065	993.85	7.2931E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.1251E+01	2.3479E+05	0.4077	3.0483E+05	-22.976
Case3_11	1993/5/22	1.0834E+04	5.6276E-02	34.3325	993.97	7.3481E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.6047E+01	1.9889E+05	0.4077	2.6526E+05	-25.021
Case3_12	1993/5/22	1.4440E+04	7.0089E-02	34.415	993.95	7.3359E-07	3.401E-04	3.461E-02	3.2494E+01	1.7090E+05	0.4077	2.3048E+05	-25.850
Case3_13	1993/5/22	1.9573E+04	8.8613E-02	34.4415	993.94	7.3320E-07	3.401E-04	3.461E-02	4.1104E+01	1.4492E+05	0.4077	2.0104E+05	-27.914
Case3_14	1993/5/22	2.6903E+04	1.1158E-01	34.3515	993.97	7.3453E-07	3.401E-04	3.461E-02	5.1663E+01	1.2563E+05	0.4077	1.7833E+05	-29.556
Case3_15	1993/5/22	3.7013E+04	1.3863E-01	34.156	994.03	7.3743E-07	3.401E-04	3.461E-02	6.3936E+01	1.1196E+05	0.4077	1.6137E+05	-30.617

表2.3-2(5/6) 閉塞物単体圧力損失測定試験結果

圧損試験4D(表)

ケース名	試験日	差圧	前面流速	温度	密度	動粘性係数	粒子径	閉塞物長さ	Re数(みかけ)	圧損係数	ボロジイ	Ergunの式	式との差異
Case3_16	1993/5/22	5.1540E+04	1.7308E-01	34.4105	993.95	7.3366E-07	3.401E-04	3.461E-02	8.0234E+01	1.0003E+05	0.4077	1.4686E+05	-31.890
Case3_17	1993/5/22	7.2772E+04	2.1705E-01	34.273	993.99	7.3569E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.0034E+02	8.9803E+04	0.4077	1.3546E+05	-33.703
Case3_18	1993/5/22	1.0698E+05	2.7841E-01	35.6395	993.55	7.1590E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.3226E+02	8.0274E+04	0.4077	1.2447E+05	-35.508
Case3_19	1993/5/22	1.5537E+05	3.4755E-01	35.677	993.54	7.1537E-07	3.401E-04	3.461E-02	1.6523E+02	7.4811E+04	0.4077	1.1758E+05	-36.375
Case3_20	1993/5/22	2.3041E+05	4.4124E-01	35.6535	993.54	7.1571E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.0968E+02	6.8832E+04	0.4077	1.1172E+05	-38.392
Case3_21	1993/5/22	3.2852E+05	5.4242E-01	35.6765	993.54	7.1538E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.5787E+02	6.4944E+04	0.4077	1.0765E+05	-39.673
Case3_22	1993/5/22	3.3990E+05	5.5309E-01	35.7705	993.51	7.1405E-07	3.401E-04	3.461E-02	2.6343E+02	6.4627E+04	0.4077	1.0728E+05	-39.758
CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4	CASE4
Case4_00	1997/5/27	6.9933E+02	3.9240E-03	32.505	994.54	7.6271E-07	3.401E-04	3.479E-02	1.7497E+00	2.6253E+06	0.4062	2.7433E+06	-4.303
Case4_01	1997/5/27	1.0277E+03	5.7567E-03	32.596	994.52	7.6129E-07	3.401E-04	3.479E-02	2.5718E+00	1.7927E+06	0.4062	1.8956E+06	-5.432
Case4_02	1997/5/27	1.5971E+03	8.8640E-03	32.970	994.40	7.5545E-07	3.401E-04	3.479E-02	3.9906E+00	1.1751E+06	0.4062	1.2541E+06	-6.294
Case4_03	1997/5/27	1.8907E+03	1.0489E-02	33.157	994.34	7.5256E-07	3.401E-04	3.479E-02	4.7403E+00	9.9357E+05	0.4062	1.0702E+06	-7.156
Case4_04	1997/5/27	2.4595E+03	1.3419E-02	33.541	994.22	7.4668E-07	3.401E-04	3.479E-02	6.1121E+00	7.8977E+05	0.4062	8.5042E+05	-7.132
Case4_05	1997/5/28	3.1627E+03	1.6926E-02	33.486	994.24	7.4753E-07	3.401E-04	3.479E-02	7.7008E+00	6.3832E+05	0.4062	6.9379E+05	-7.995
Case4_06	1997/5/28	3.7468E+03	1.9770E-02	34.148	994.03	7.3756E-07	3.401E-04	3.479E-02	9.1163E+00	5.5440E+05	0.4062	6.0022E+05	-7.634
Case4_07	1997/5/28	4.6524E+03	2.4047E-02	34.413	993.95	7.3363E-07	3.401E-04	3.479E-02	1.1148E+01	4.6533E+05	0.4062	5.0746E+05	-8.300
Case4_08	1997/5/28	5.9106E+03	2.9482E-02	34.113	994.04	7.3807E-07	3.401E-04	3.479E-02	1.3585E+01	3.9327E+05	0.4062	4.3277E+05	-9.128
Case4_09	1997/5/28	7.7584E+03	3.7271E-02	34.597	993.89	7.3092E-07	3.401E-04	3.479E-02	1.7342E+01	3.2305E+05	0.4062	3.5877E+05	-9.955
Case4_10	1997/5/28	1.0284E+04	4.6423E-02	34.809	993.82	7.2782E-07	3.401E-04	3.479E-02	2.1693E+01	2.7604E+05	0.4062	3.0510E+05	-9.524
Case4_11	1997/5/28	1.3073E+04	5.6595E-02	34.892	993.79	7.2662E-07	3.401E-04	3.479E-02	2.6490E+01	2.3611E+05	0.4062	2.6636E+05	-11.359
Case4_12	1997/5/28	1.7784E+04	7.1720E-02	34.769	993.83	7.2841E-07	3.401E-04	3.479E-02	3.3487E+01	2.0000E+05	0.4062	2.2976E+05	-12.954
Case4_13	1997/5/28	2.6053E+04	9.4419E-02	34.930	993.78	7.2607E-07	3.401E-04	3.479E-02	4.4227E+01	1.6906E+05	0.4062	1.9610E+05	-13.793
Case4_14	1997/5/28	3.3597E+04	1.1388E-01	35.157	993.71	7.2279E-07	3.401E-04	3.479E-02	5.3585E+01	1.4987E+05	0.4062	1.7778E+05	-15.698
Case4_15	1997/5/28	4.5337E+04	1.3939E-01	34.955	993.77	7.2570E-07	3.401E-04	3.479E-02	6.5325E+01	1.3498E+05	0.4062	1.6221E+05	-16.787
Case4_16	1997/5/28	6.3898E+04	1.7499E-01	35.075	993.73	7.2397E-07	3.401E-04	3.479E-02	8.2205E+01	1.2072E+05	0.4062	1.4763E+05	-18.229

表2.3-2(6/6) 閉塞物単体圧力損失測定試験結果

圧損試験 4 D (表)

表3.1.1-1 37本ピンバンドルナトリウム試験体の主要仕様

項目 Item	試験体仕様 Test Section	実機仕様 600MWe Class Reactor
ピン外径 Diameter of Pin	8.5mm	8.5mm
ピン全長 Length of Pin	1,650mm	3,135mm
ピン発熱部長さ Heated Length	650mm	1,000mm (Active Core)
発熱量最大線出力 Max. Heat Flux	402W/cm	409W/cm(EOEC)
発熱分布 Heat Flux Shape	均一 Flat	コサイン Chopped-Cosine
ピン数 Number of Pins	37	217
ワイヤスペーサ外径 Diameter of Wire Spacer	1.1mm	1.1mm
ワイヤスペーサ巻きピッチ Wrapping Pitch of Wire Spacer	200mm	200mm
主要部材質 Material of Main Part	SUS316	SS・PNC1520鋼 SS・PNC1520Steel
閉塞物長さ Length of Blockage	35mm	—
閉塞物粒子径、ポロシティ Diameter of Particle of Blockage, Porosity	0.3mm、40%	—
閉塞物材質 Material of Blockage	SUS304	—

表3.4-1 解析結果一覧

No.	流量	線出力	閉塞部の 圧損式	入口温度	出口温度	ナトリウム 最高温度	ピン表面 最高温度	備 考
単位	ℓ/min	W/cm	—	℃	℃	℃	℃	
1	480	401.5	実験式	300	406.7	678.7	687.5	
2	400	401.5	実験式	300	428.4	755.4	764.5	
3	400	250	実験式	300	379.5	581.9	597.0	
4	400	250	Ergun	300	379.5	629.8	635.1	
5	400	100	実験式	300	331.6	411.9	413.8	
6	300	187.5	実験式	300	379.5	585.5	589.4	
7	200	125	実験式	300	379.5	595.1	597.7	

・実証炉と平均流量を一致させた場合、5.868Kg/sec (400 ℓ/min、300℃) となる。

・ヒータピン定格出力は、401.5W/cmである。

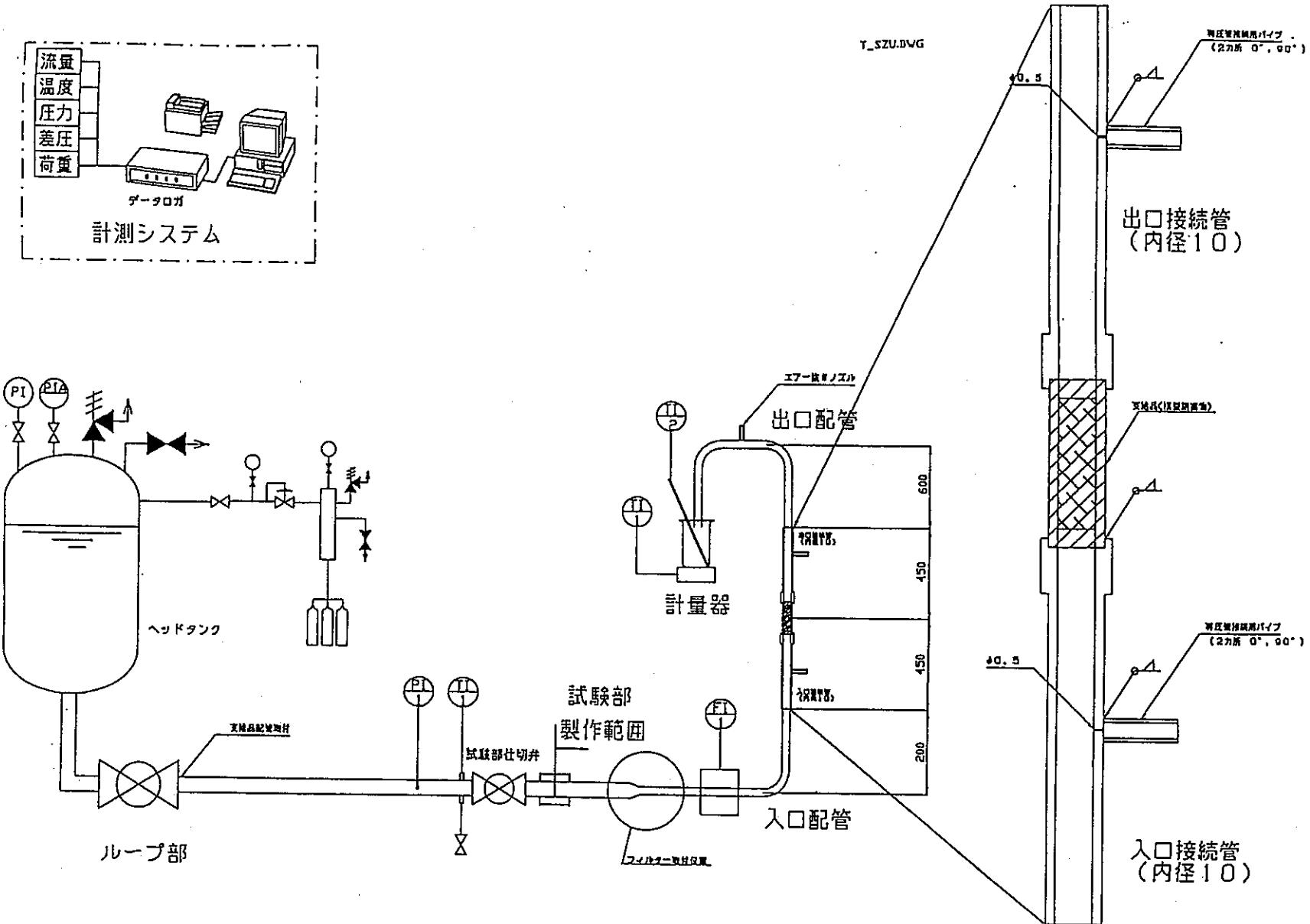
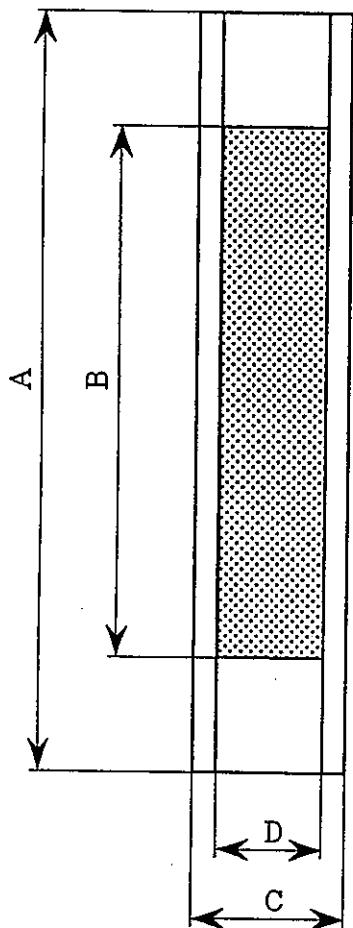


図2.1-1 閉塞物単体圧力損失測定試験装置系統図

閉塞物C-1

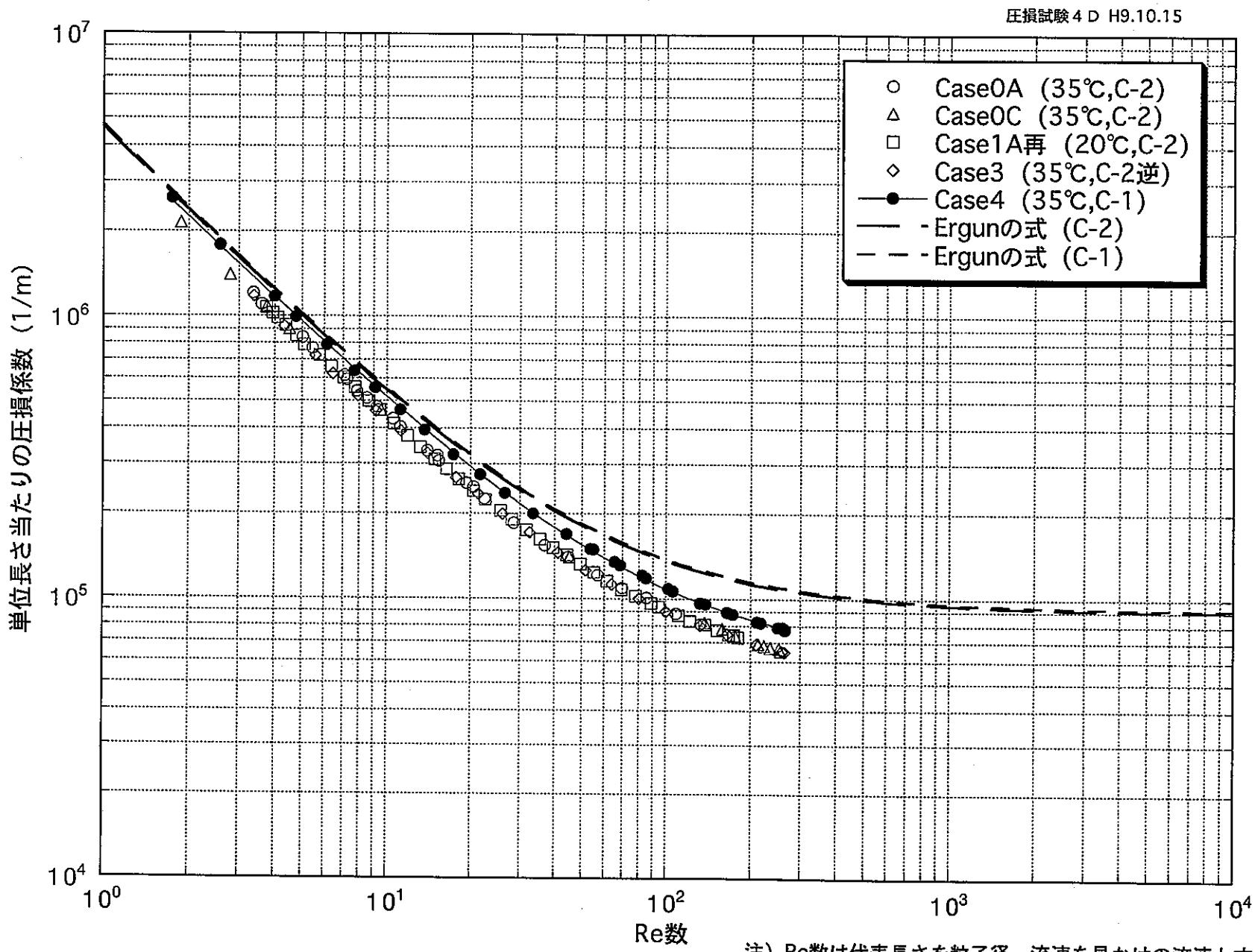


測定箇所	設計寸法	実測値
A	45 ± 0.3	45.09
B	35 ± 0.5	34.79
C	$\phi 15 \pm 0.5$	0° 14.99 90° 14.99
D	$\phi 10 \pm 0.5$	0° 9.85 90° 9.76

閉塞物C-2

測定箇所	設計寸法	実測値
A	45 ± 0.3	44.93
B	35 ± 0.5	34.61
C	$\phi 15 \pm 0.5$	0° 14.97 90° 14.97
D	$\phi 10 \pm 0.5$	0° 9.85 90° 9.82

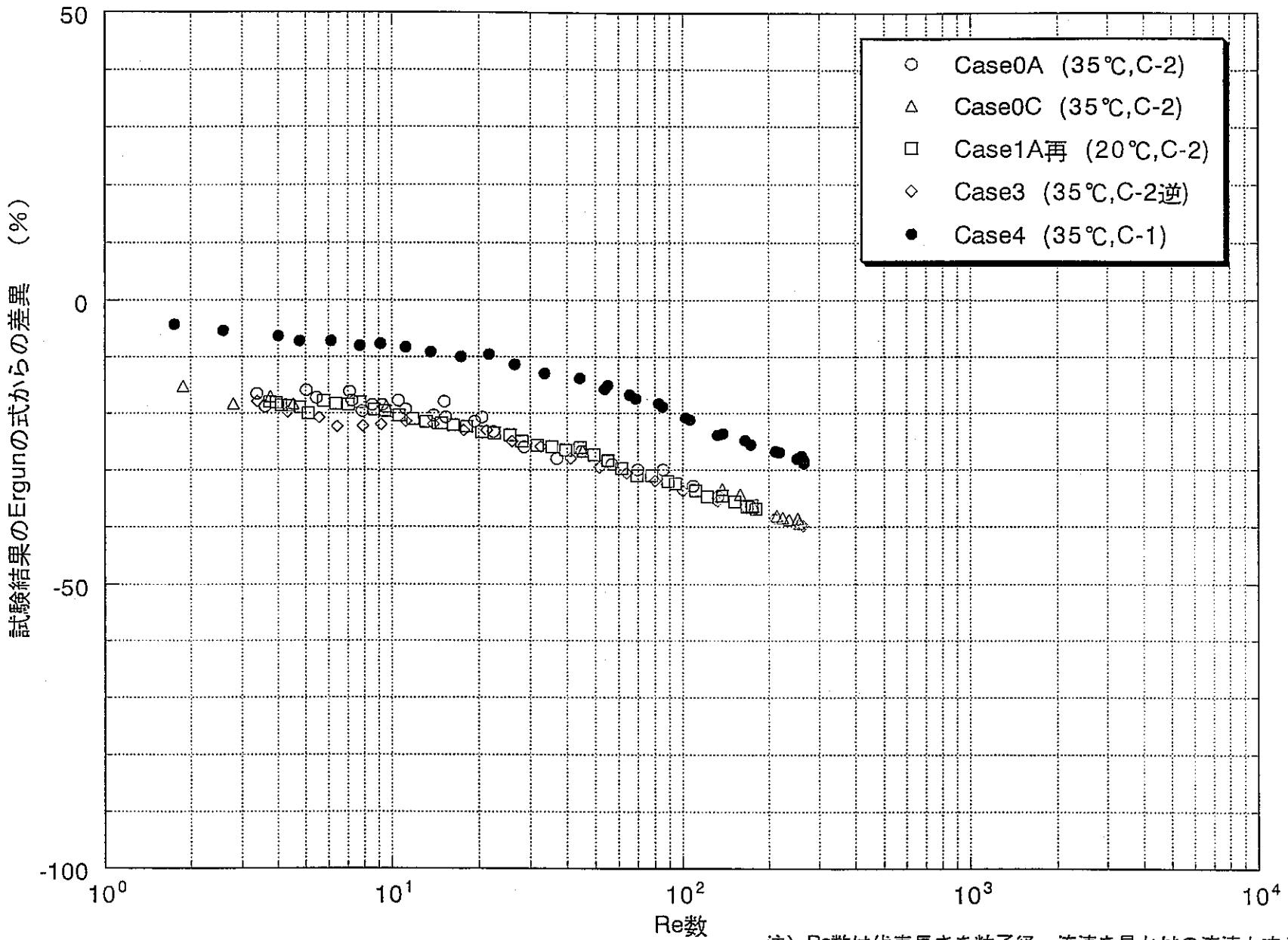
図2.1-2 模擬閉塞物の寸法



注) Re数は代表長さを粒子径、流速を見かけの流速とする。

図2.3-1 閉塞物単体圧力損失測定試験結果

圧損試験4 D% H9.10.15



注) Re数は代表長さを粒子径、流速を見かけの流速とする。

図2.3-2 試験結果のErgunの式からの差異

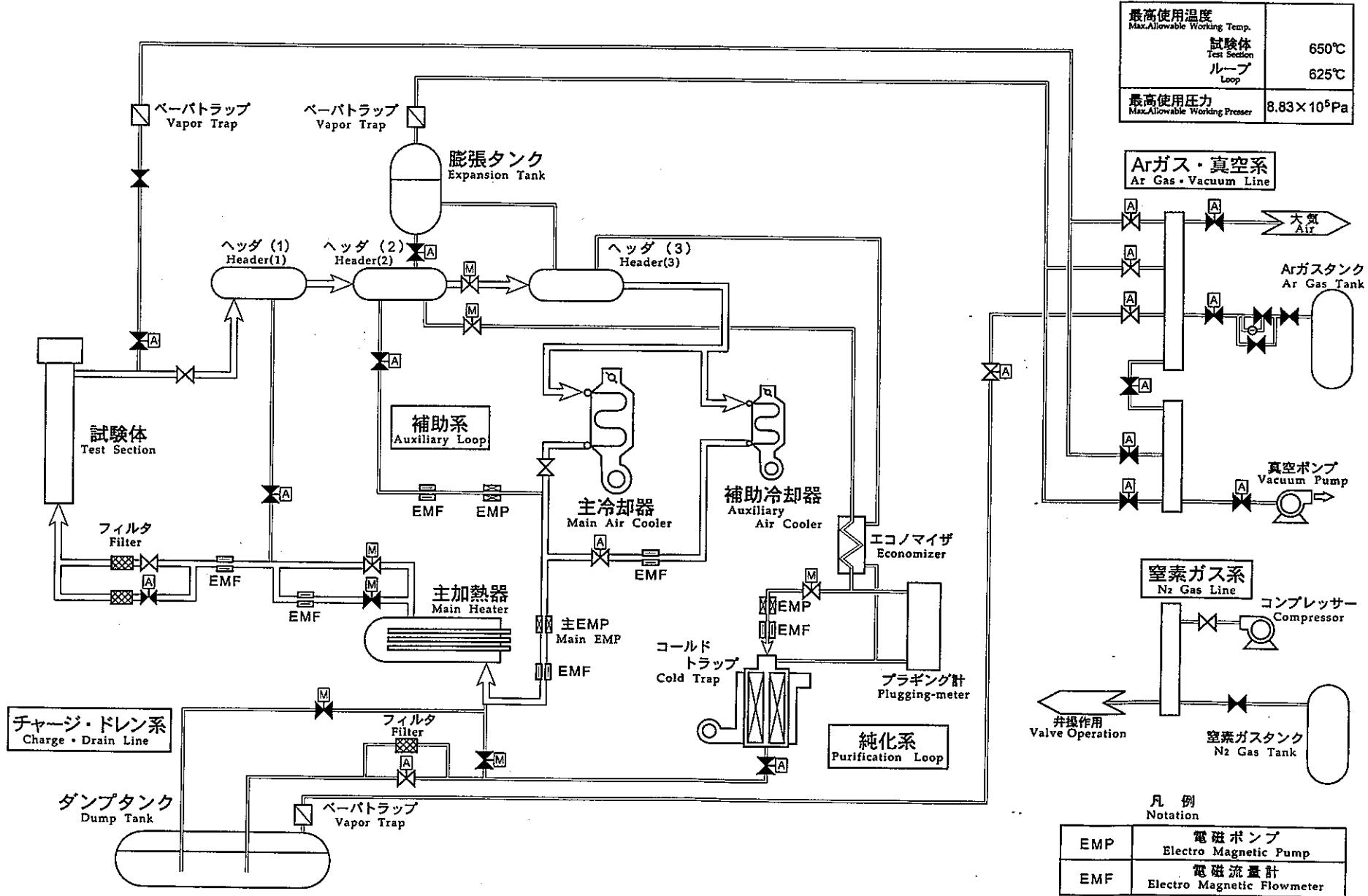


図3.1.1-1 炉心・機器熱流動試験施設の概要

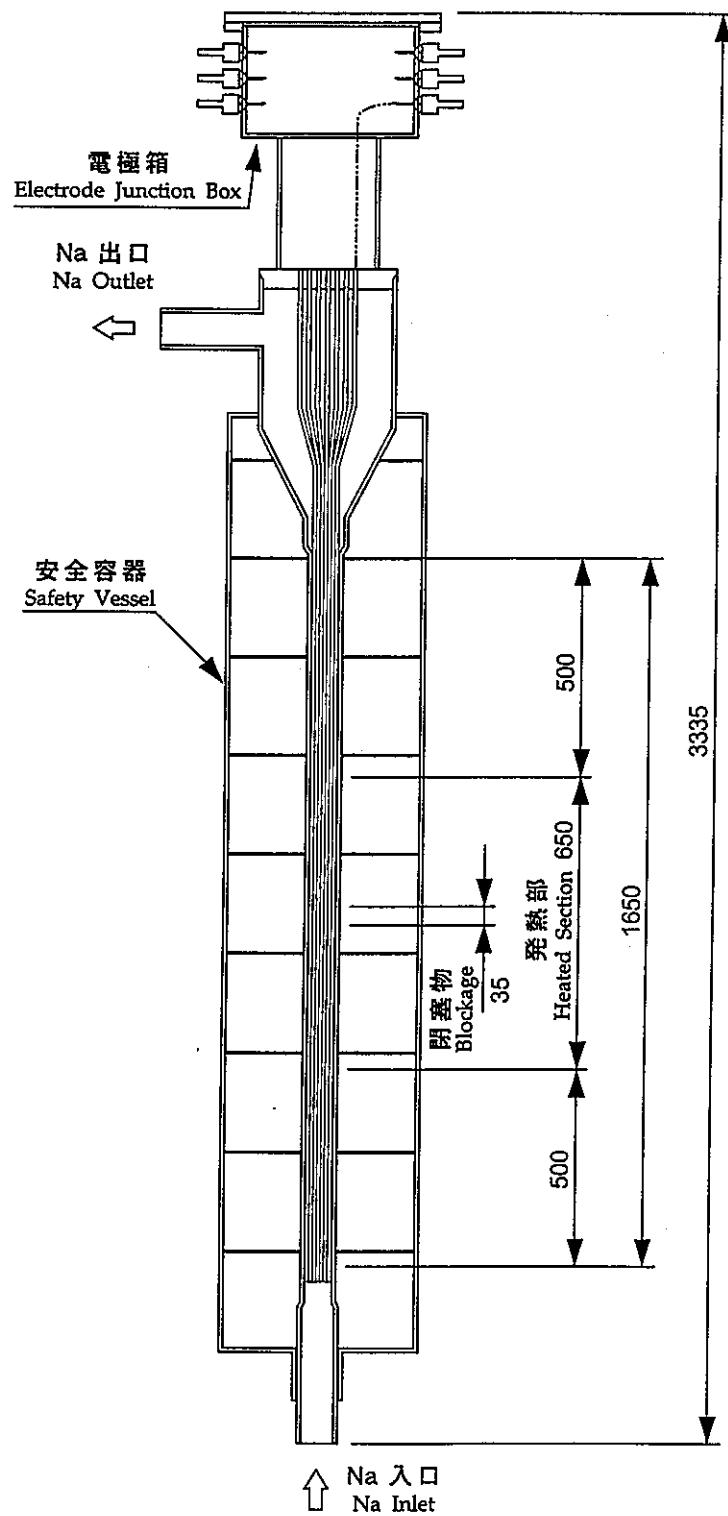


図3.1.1-2 37本ピンバンドルナトリウム試験体の概要

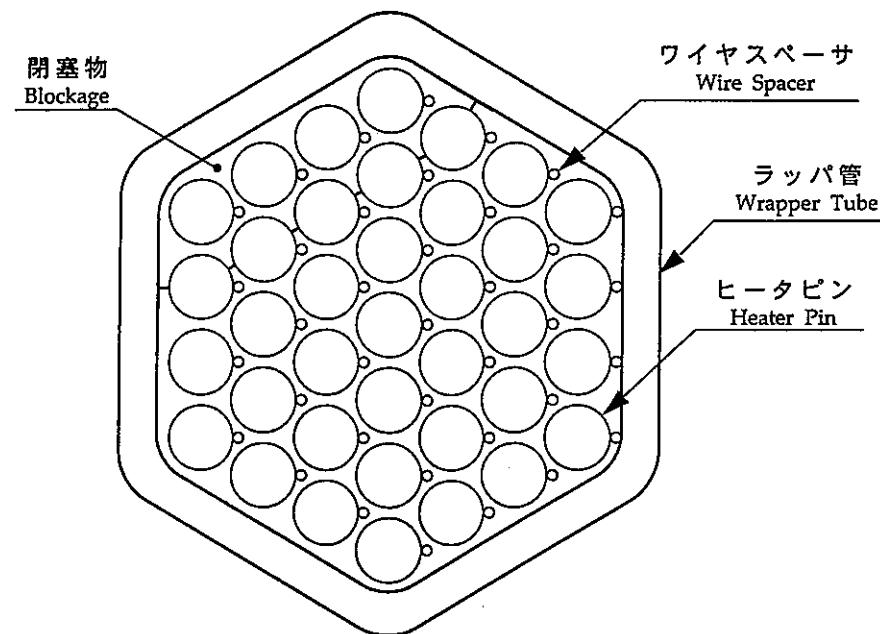


図3.1.1-3 閉塞物取付位置断面図

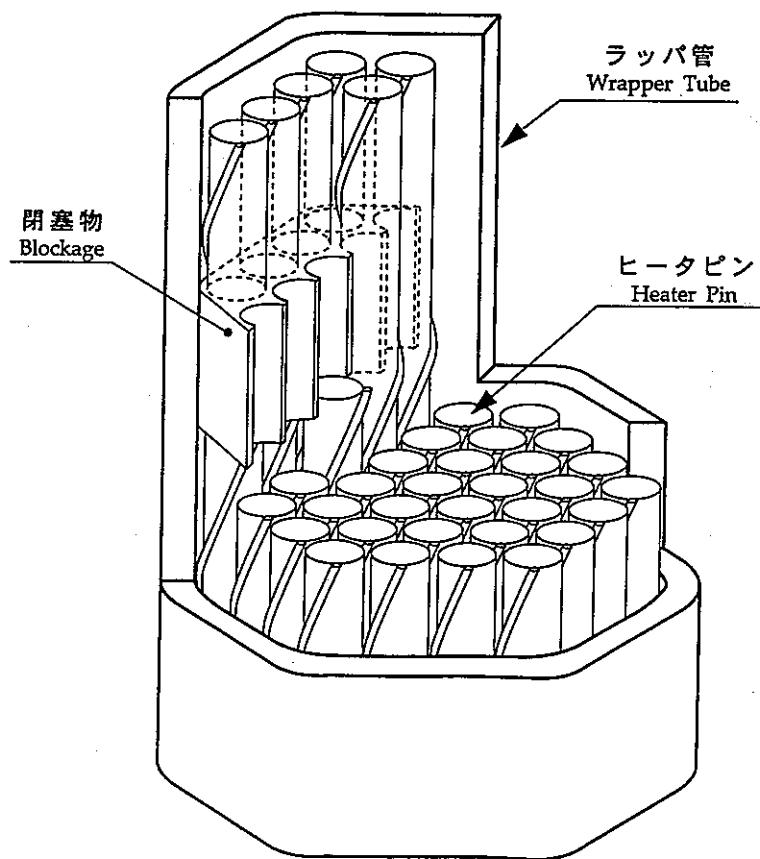


図3.1.1-4 閉塞物取付位置鳥瞰図

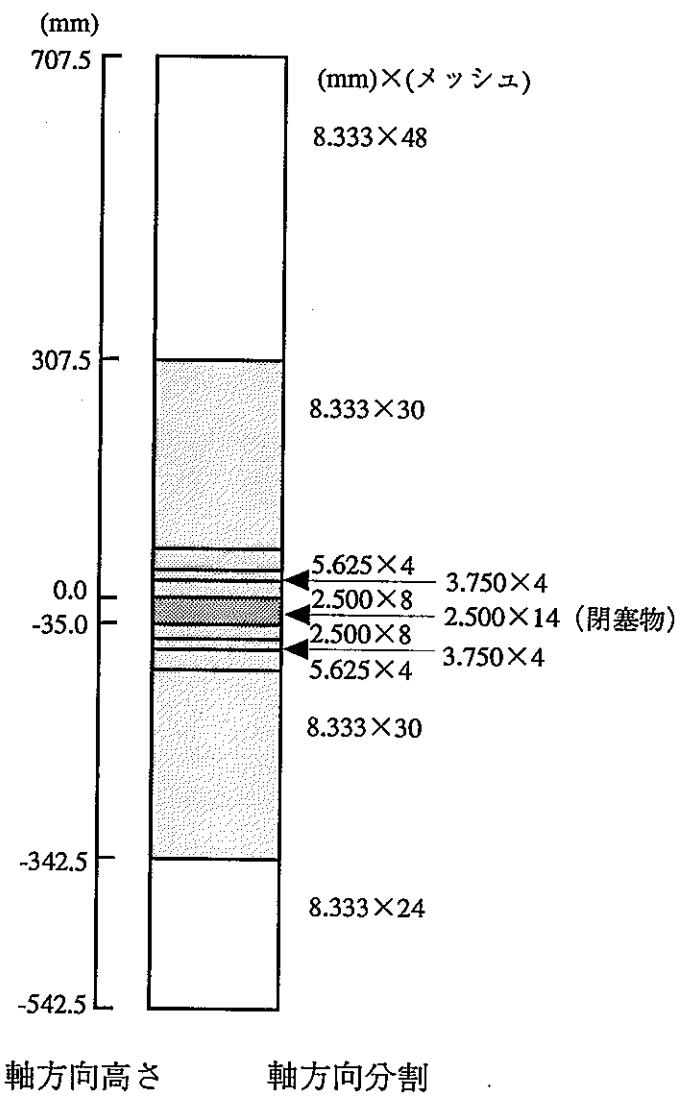
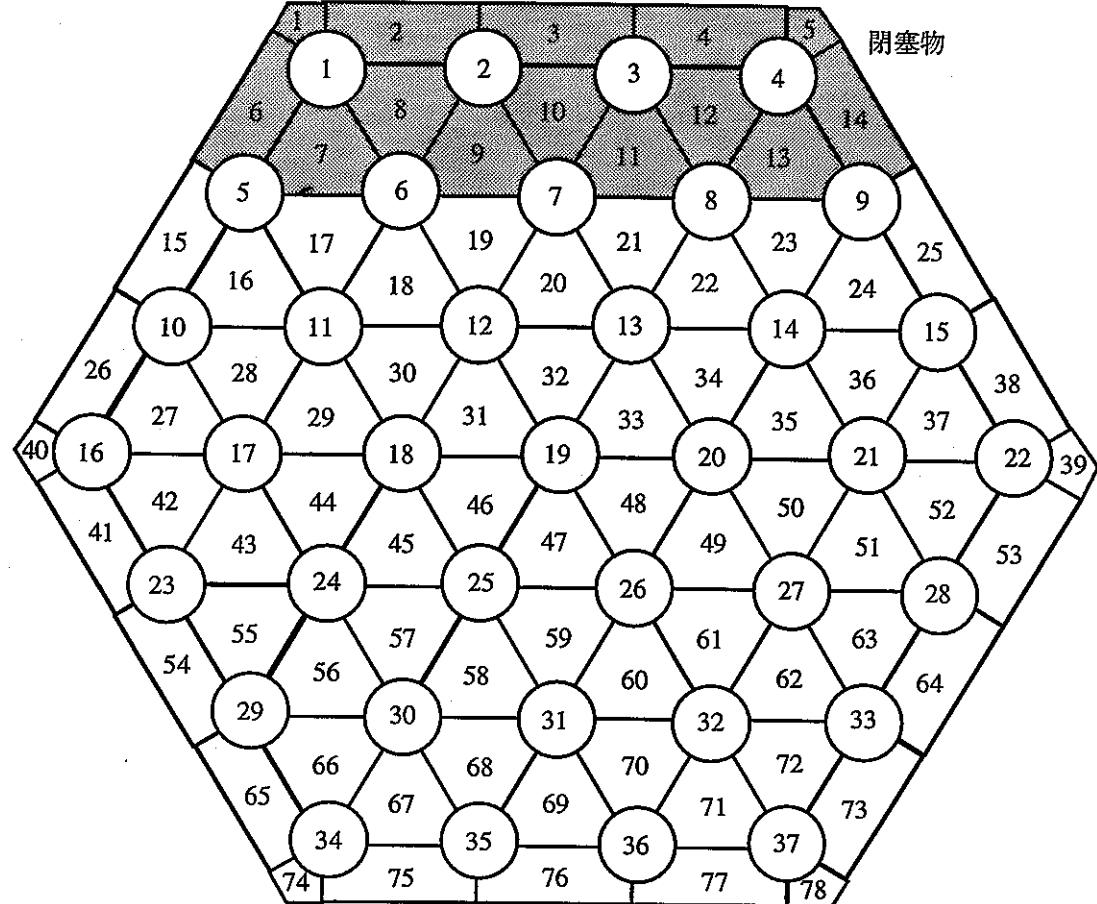


図3.3.3-1 解析モデルメッシュ分割

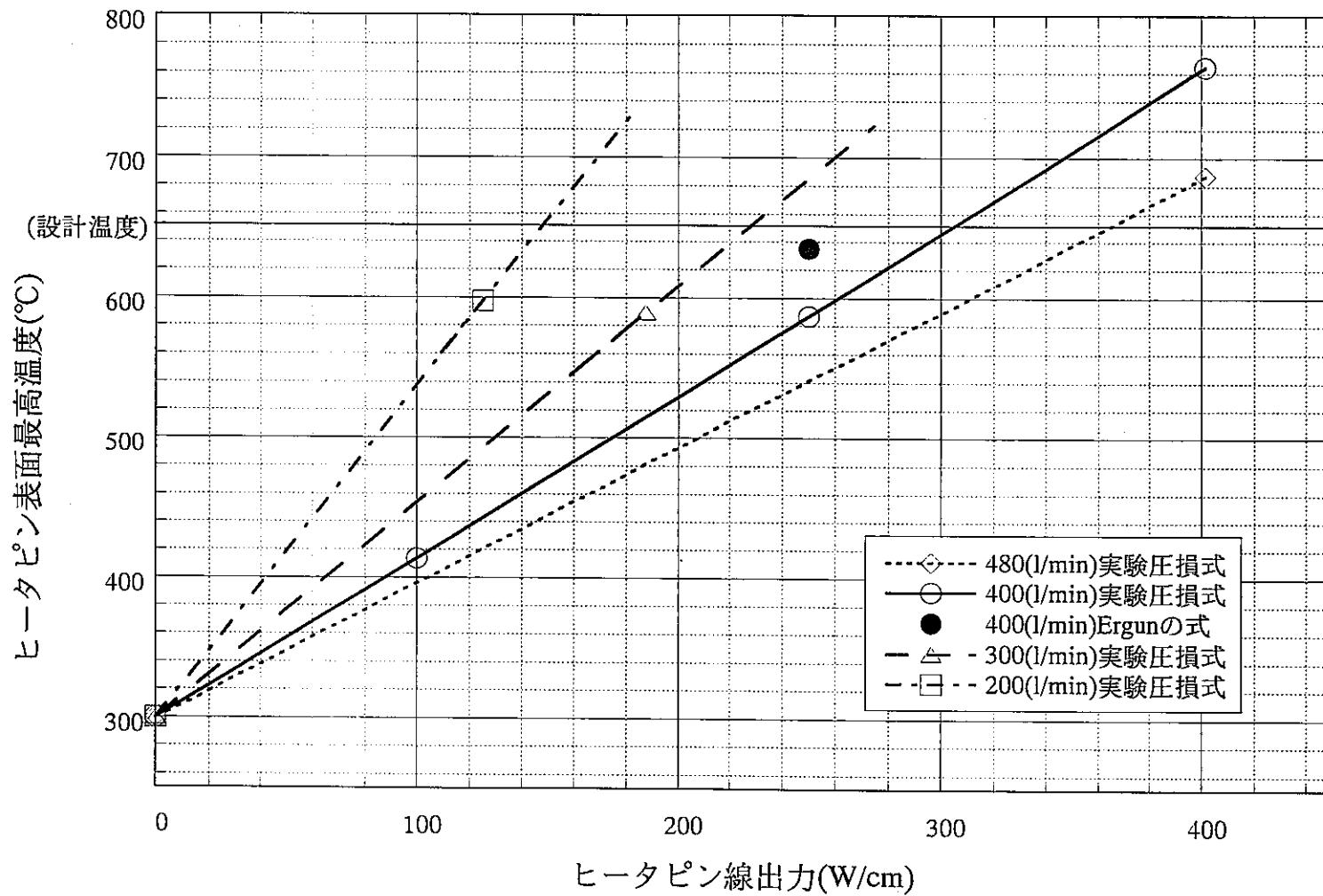


図3.4.1-1 ヒータピン表面最高温度

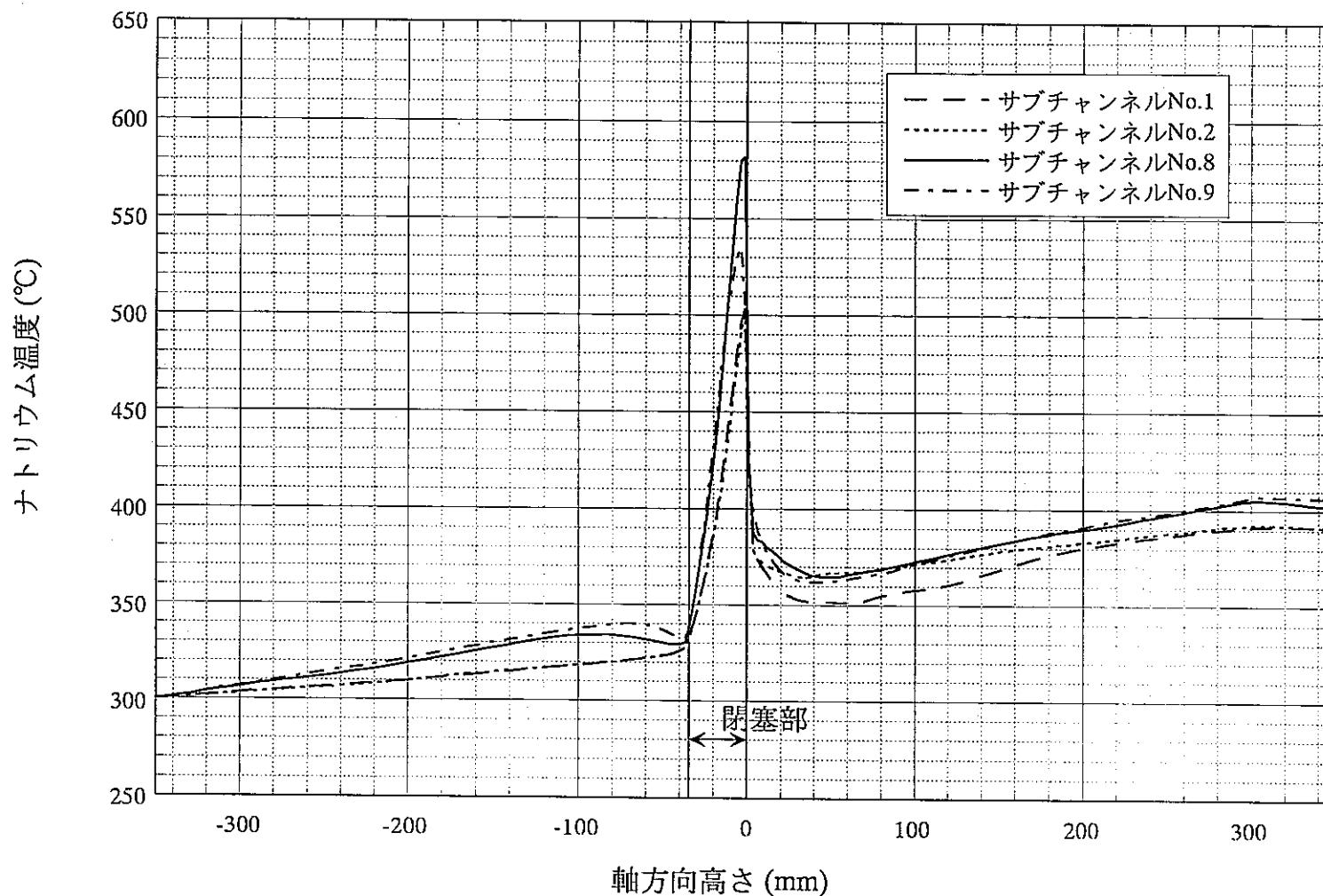


図3.4.2-1 (1/2) 軸方向ナトリウム温度分布 (400 ℓ/min, 250W/cm, 実験圧損式)

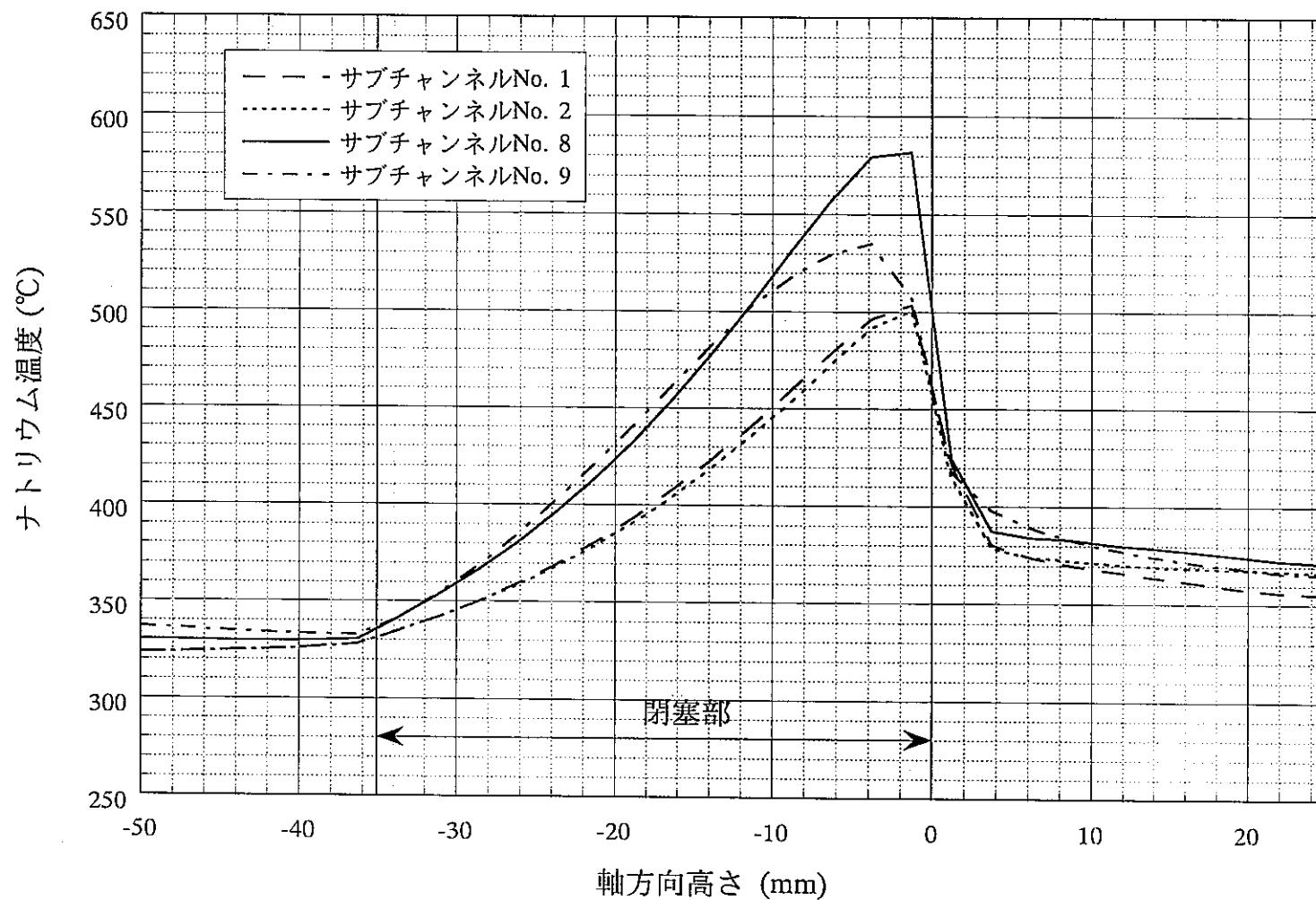


図3.4.2-1 (2/2) 軸方向ナトリウム温度分布 (400 ℓ/min, 250W/cm, 実験圧損式)

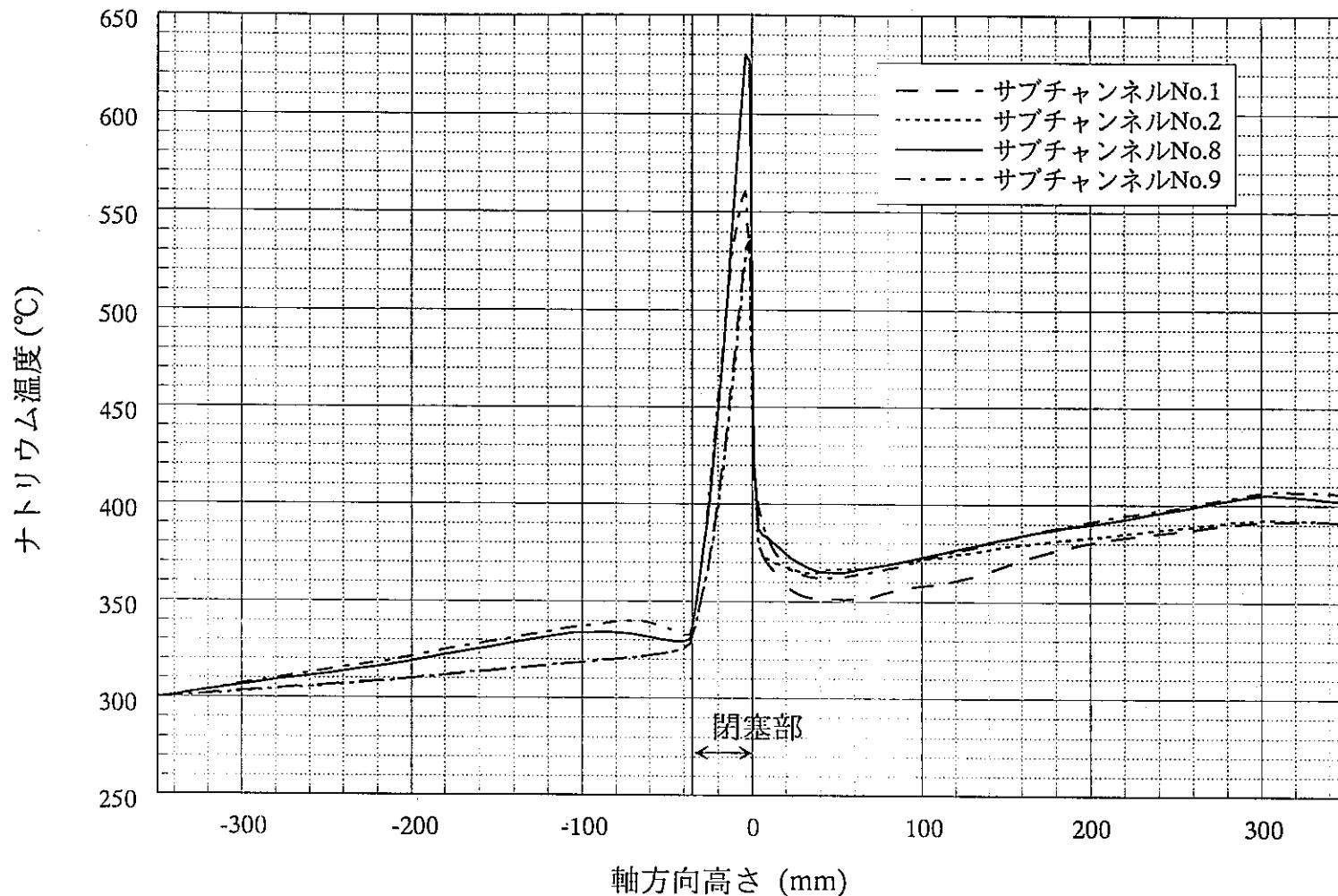


図3.4.2-2 (1/2) 軸方向ナトリウム温度分布 (400 l/min, 250W/cm, Ergunの圧損式)

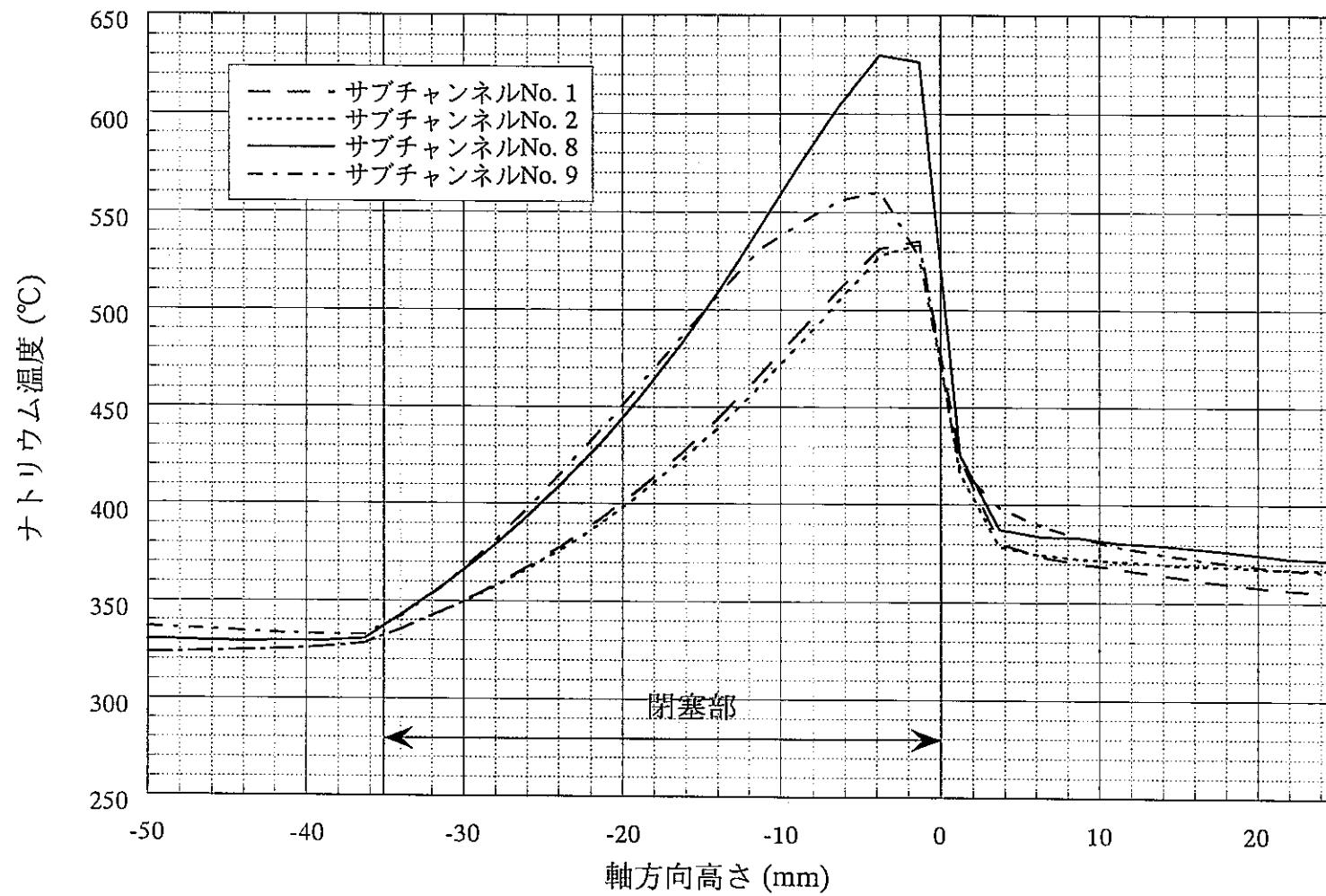


図3.4.2-2 (2/2) 軸方向ナトリウム温度分布 (400 ℥/min, 250W/cm, Ergunの圧損式)

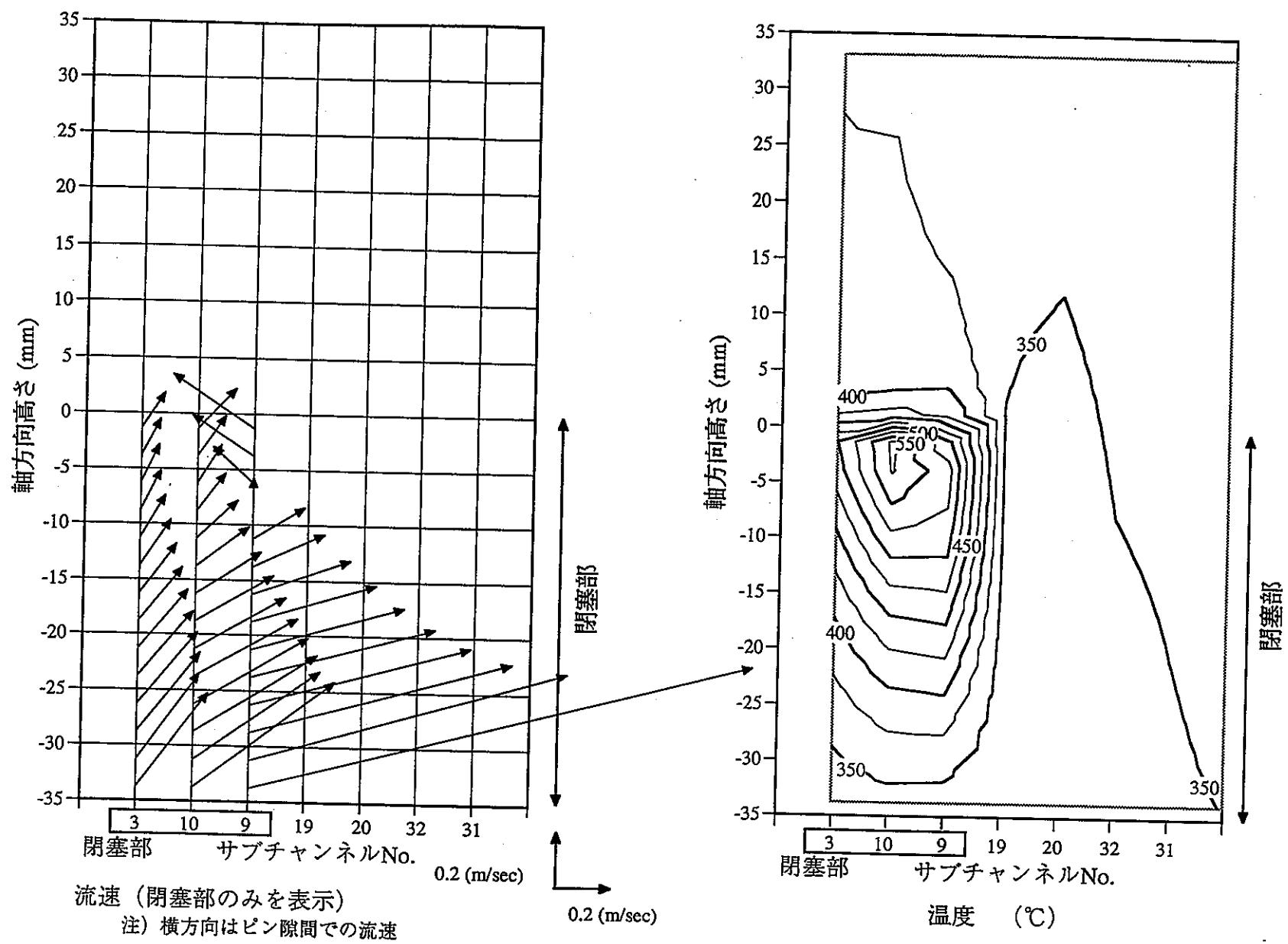


図3.4.2-3 流速及びナトリウム温度分布 (400 ℓ/min, 250W/cm, 実験圧損式)

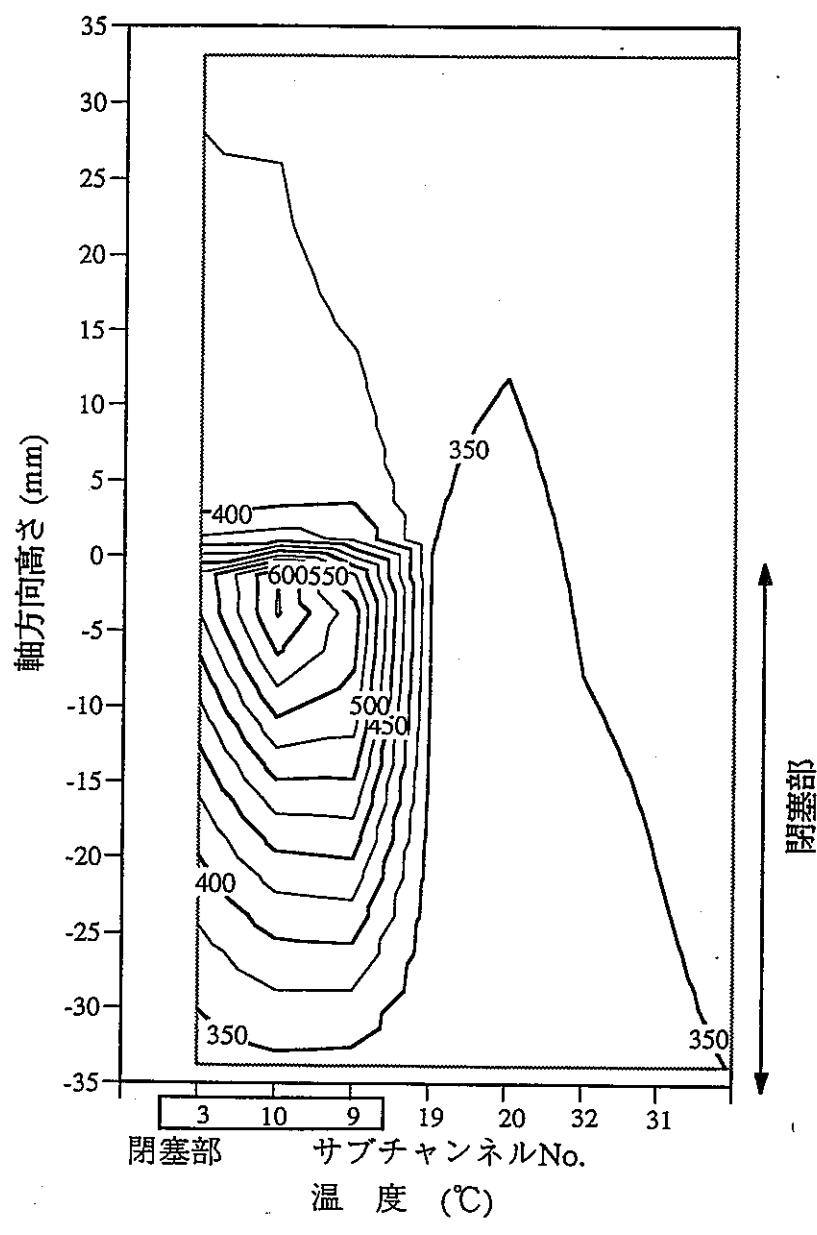
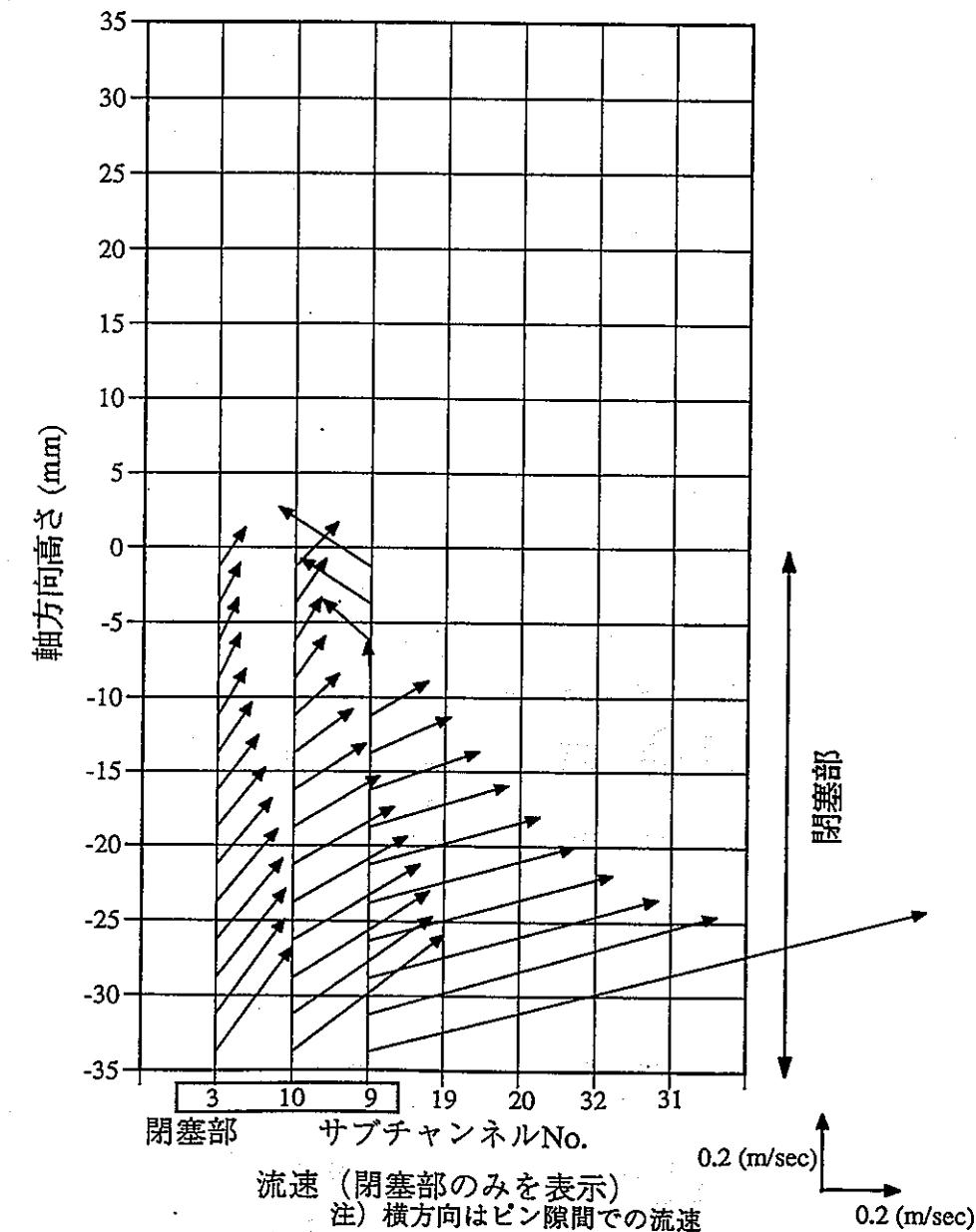


図3.4.2-4 (1/5) 流速及びナトリウム温度分布 ($400 \ell/\text{min}$, $250\text{W}/\text{cm}$, Ergunの式)

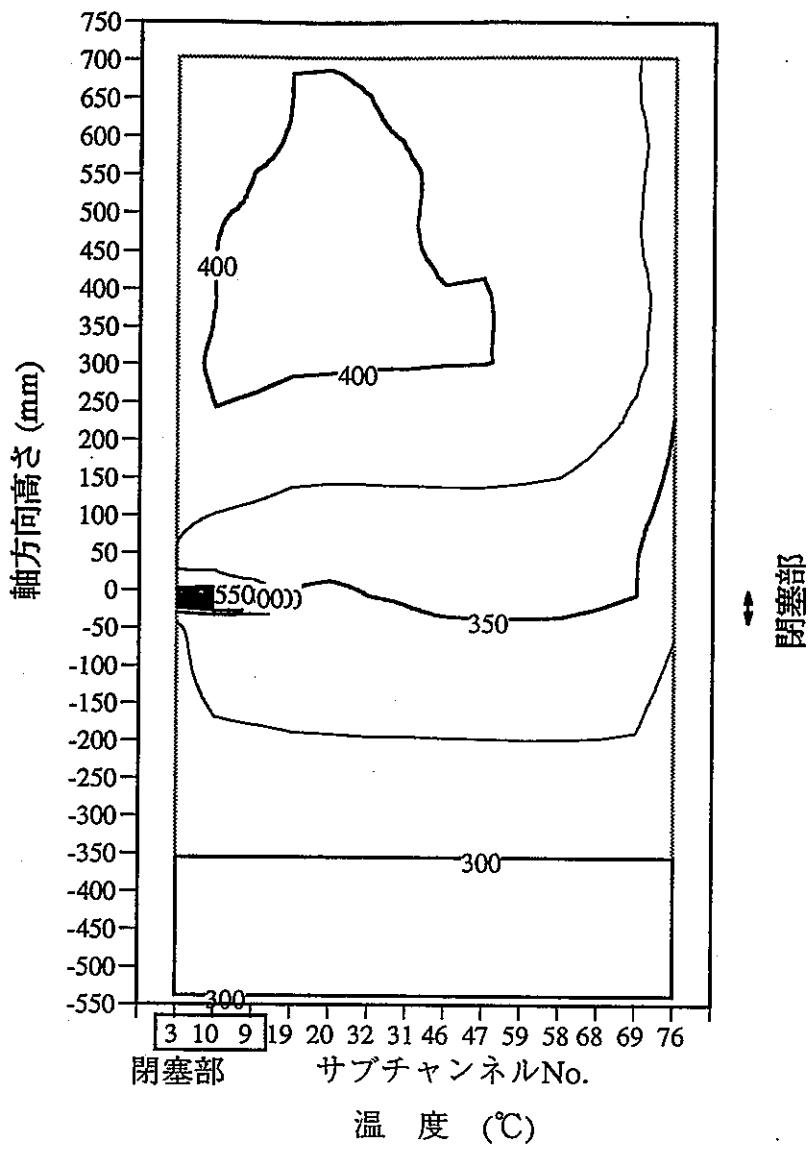
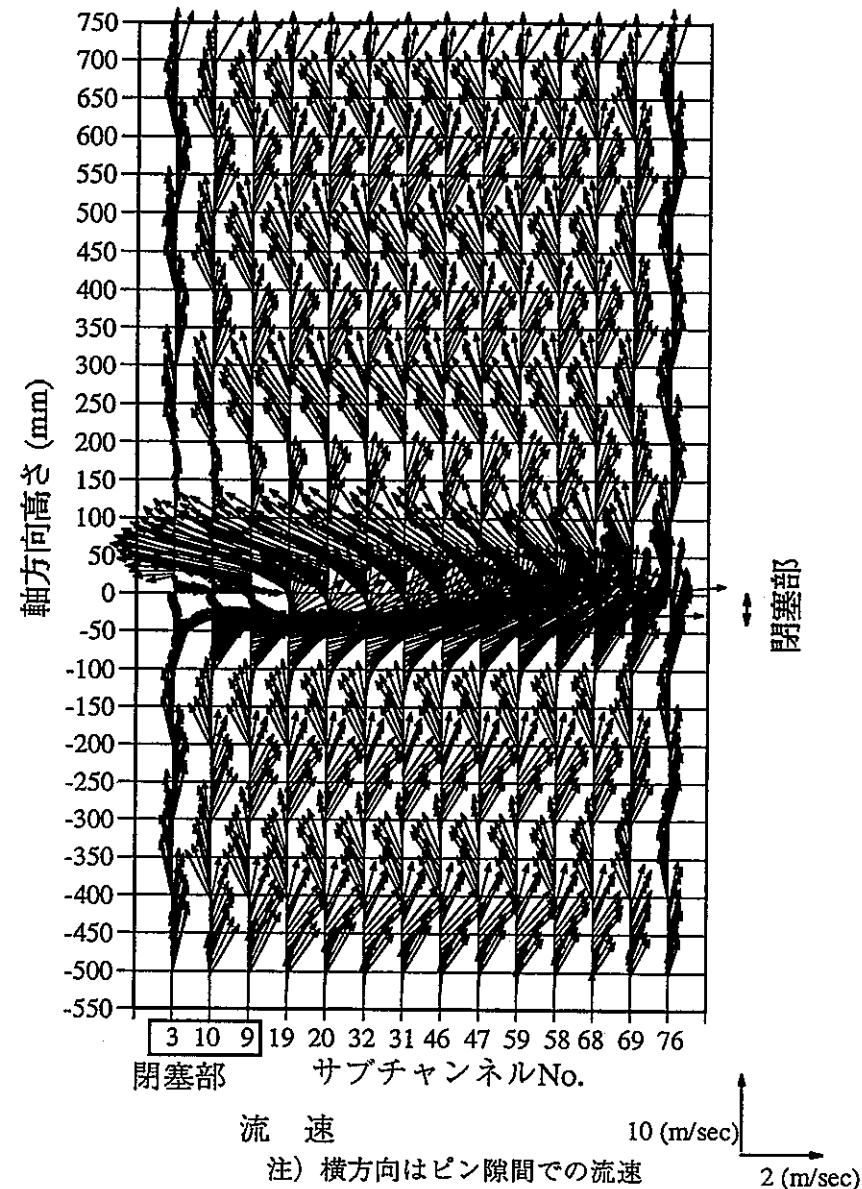


図3.4.2-4 (2/5) 流速及びナトリウム温度分布 ($400 \ell/\text{min}$, 250W/cm , Ergunの式)

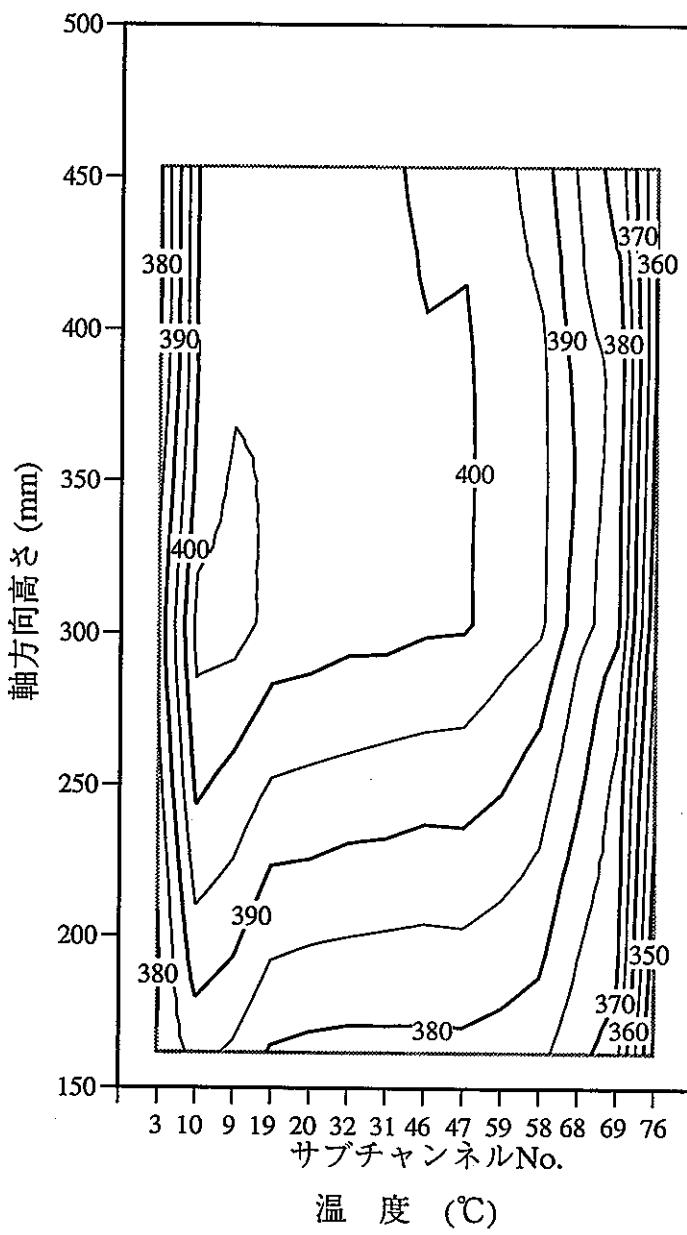
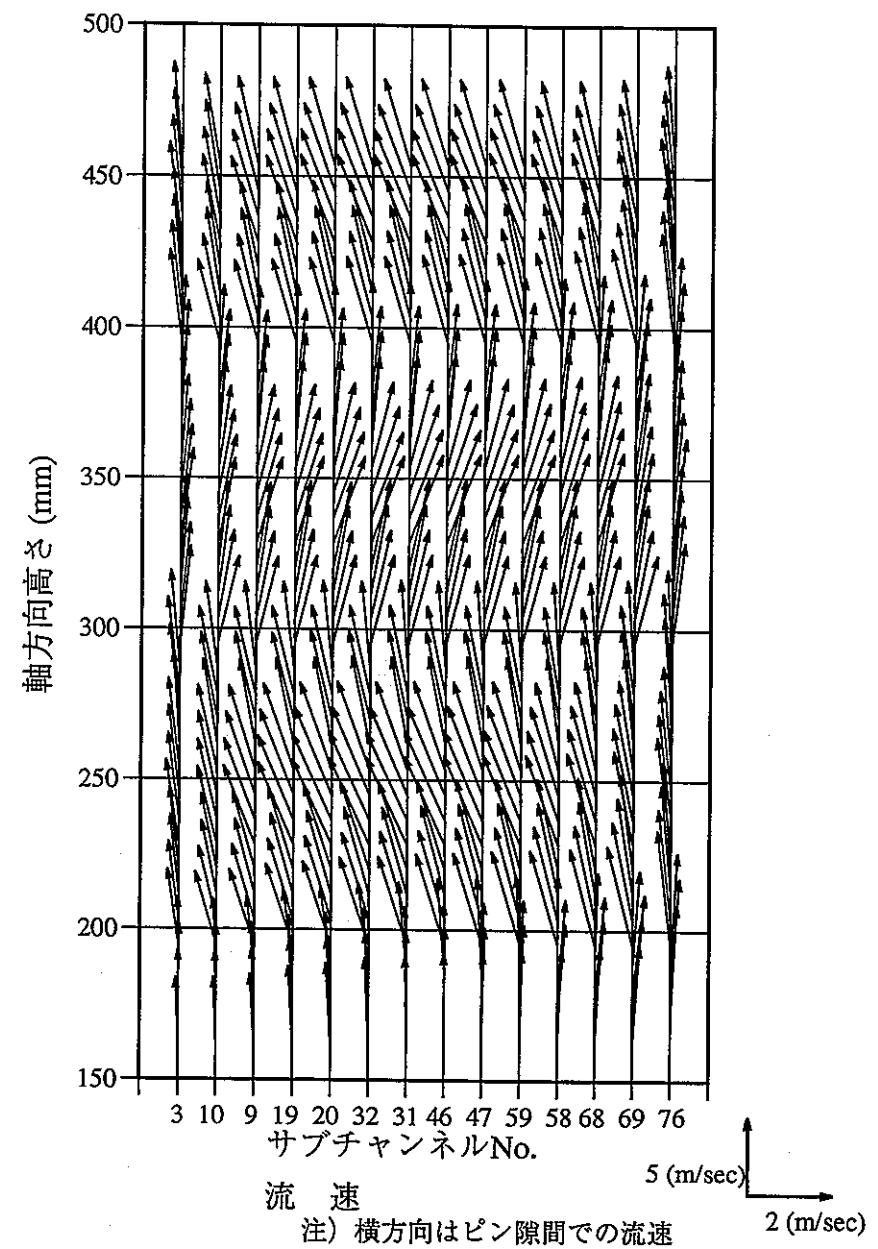


図3.4.2-4 (3/5) 流速及びナトリウム温度分布 (400 ℥ /min, 250W/cm, Ergunの式)

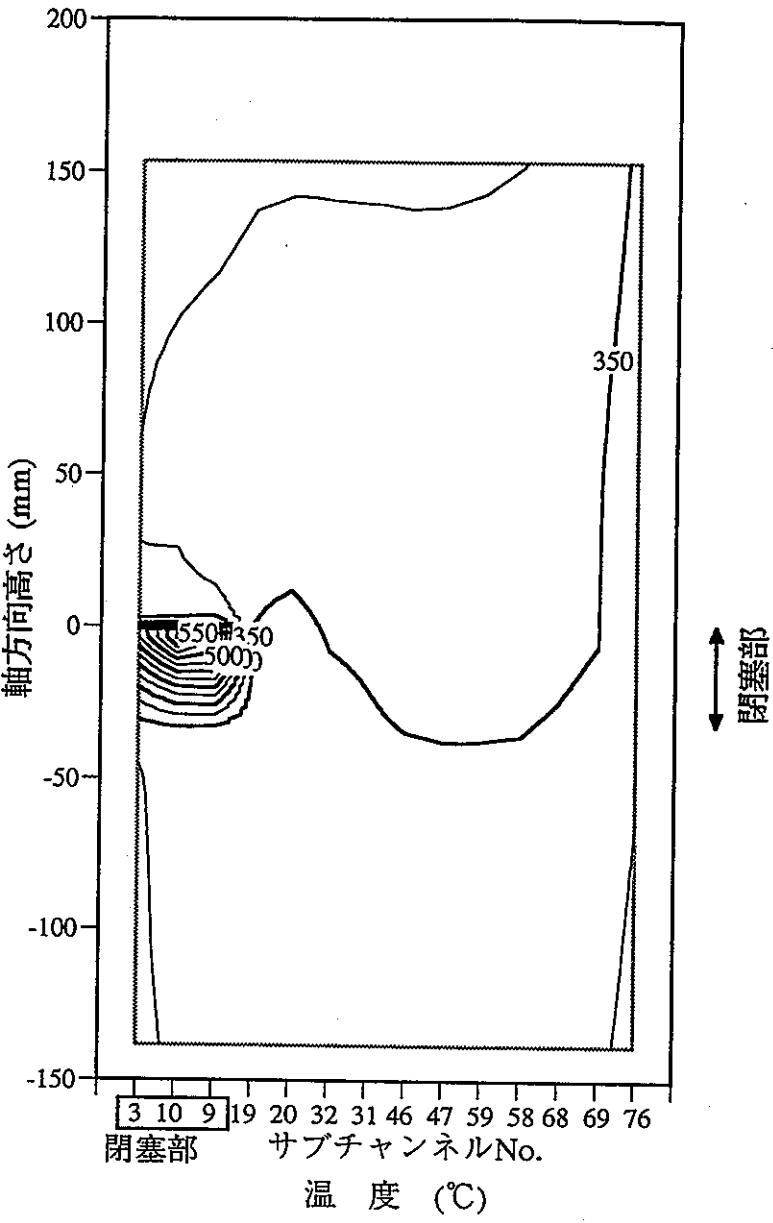
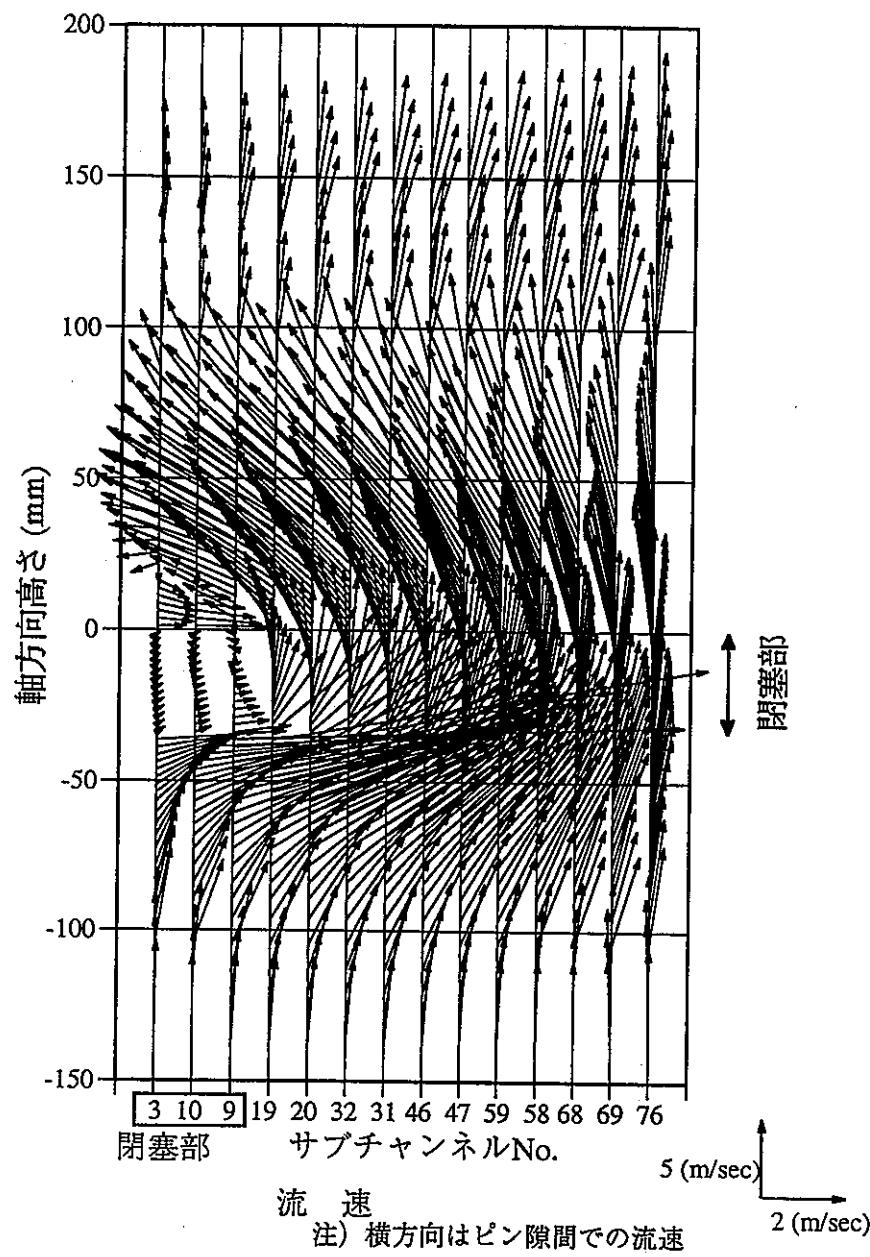


図3.4.2-4 (4/5) 流速及びナトリウム温度分布 (400 ℓ/min, 250W/cm, Ergunの式)

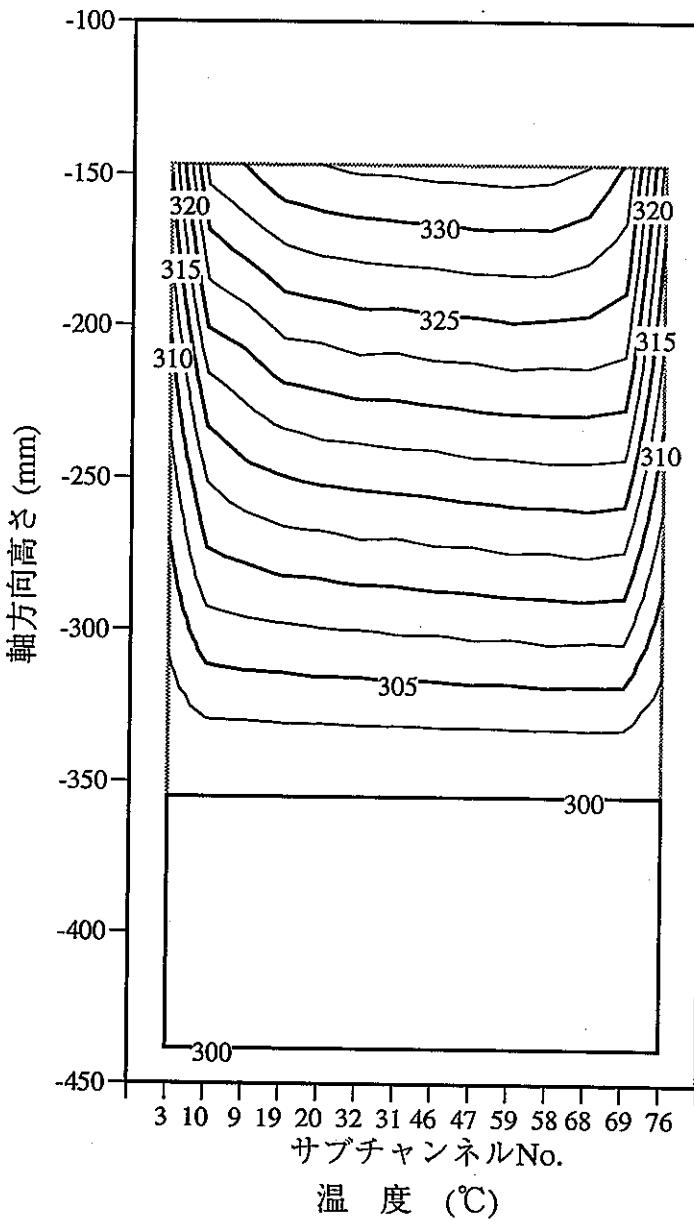
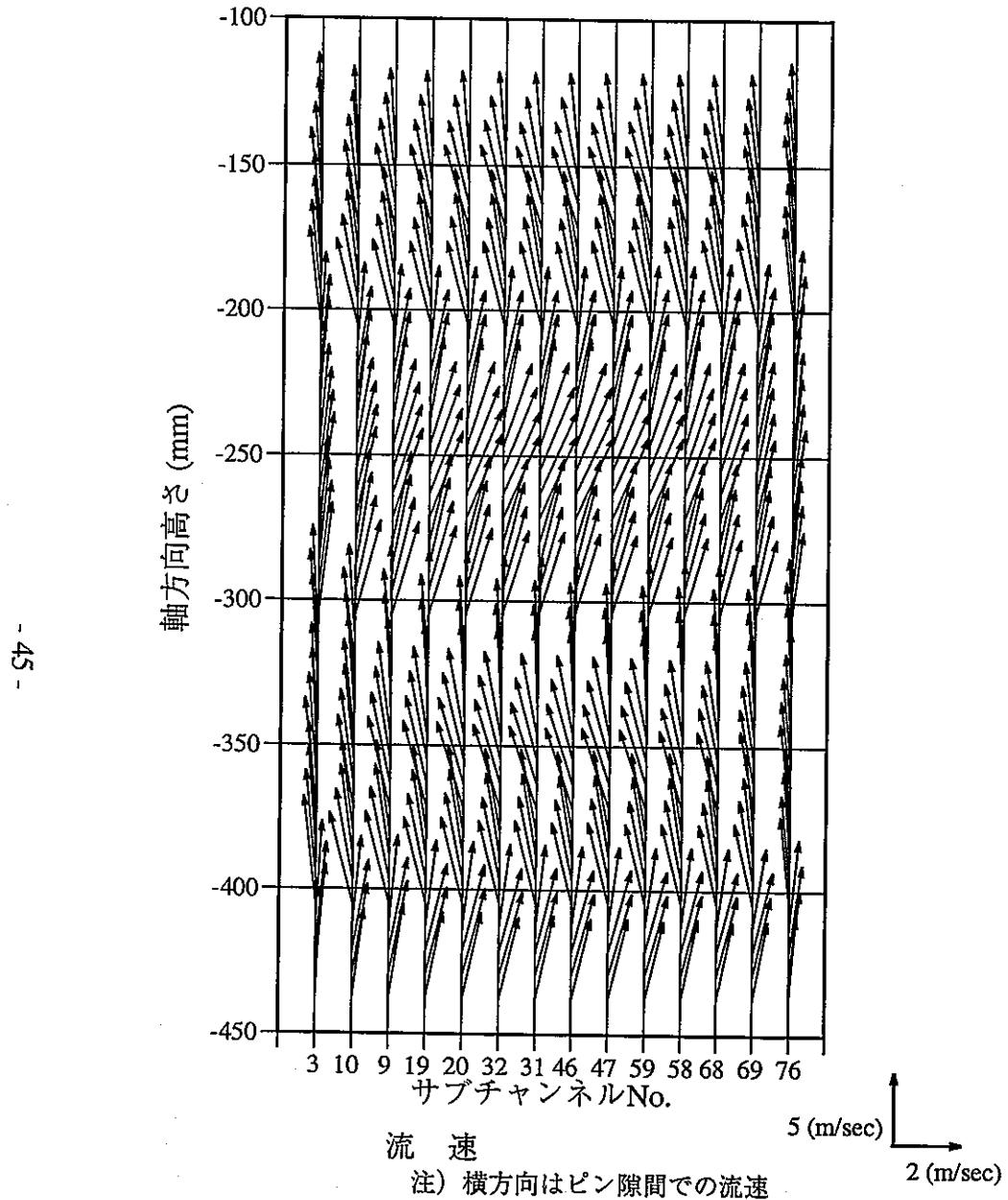
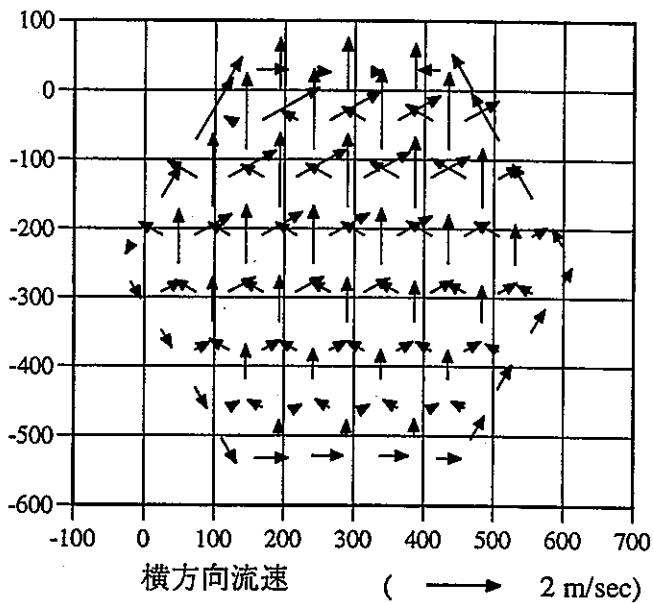
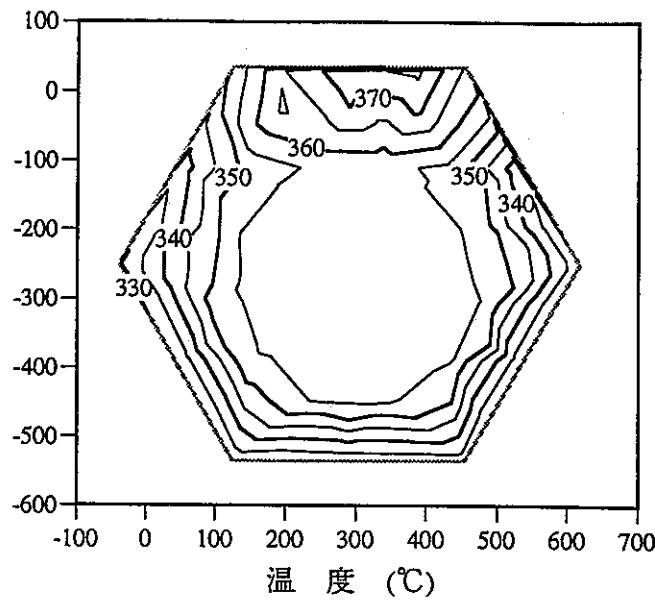
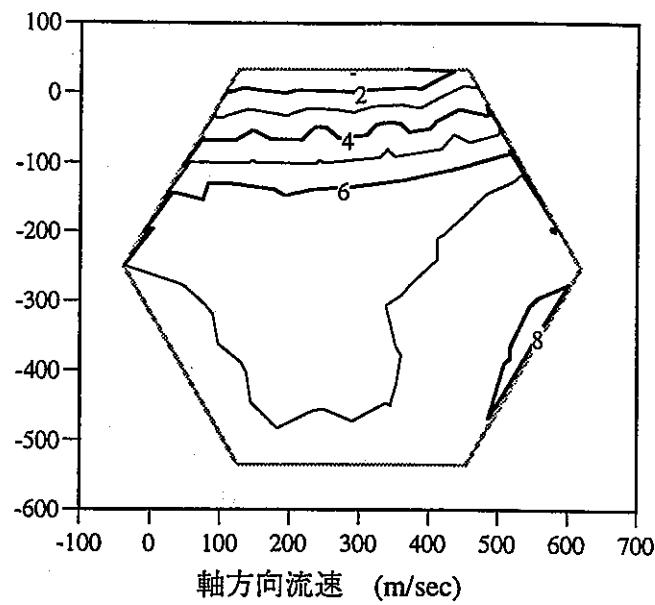


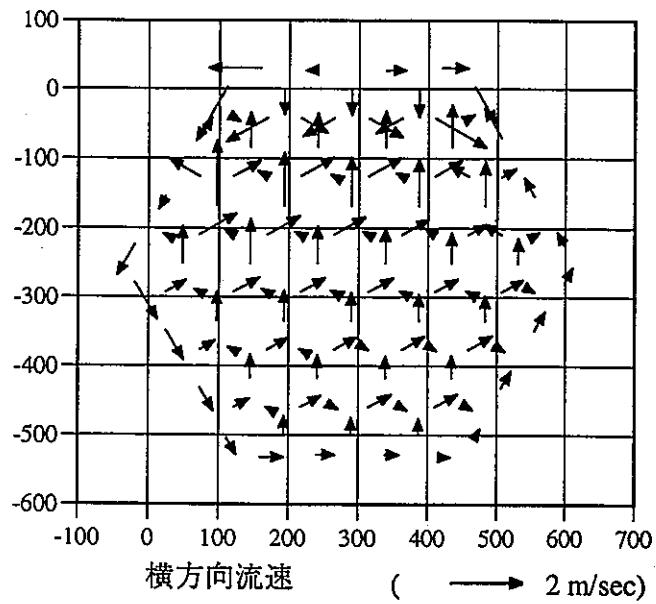
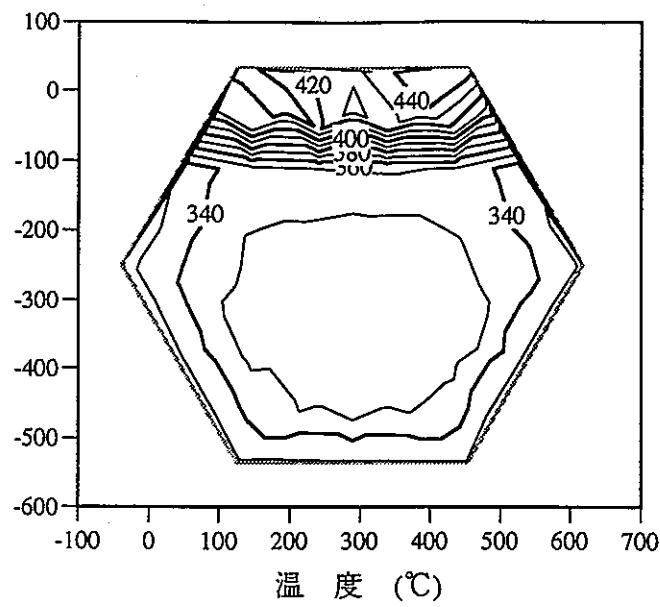
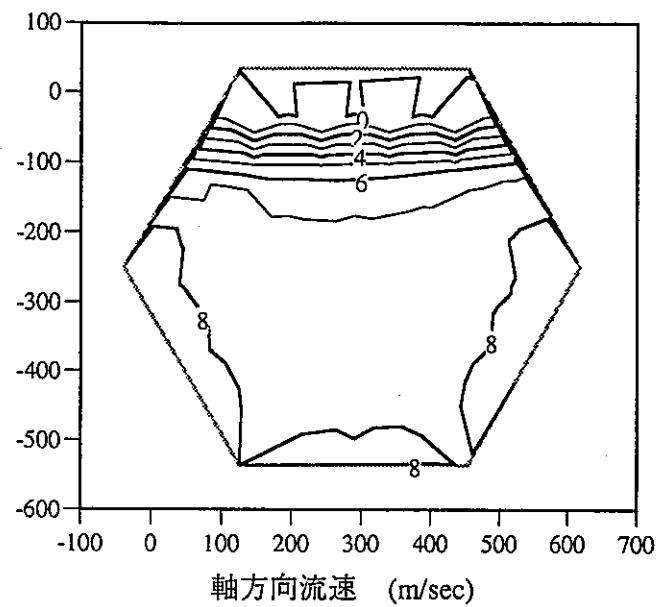
図3.4.2-4 (5/5) 流速及びナトリウム温度分布 (400 ℥ /min, 250W/cm, Ergunの式)



位置：閉塞物上端より 37.8125mm

注) 横方向流速、温度はメッシュ中点
軸方向流速はメッシュ上面にて計算

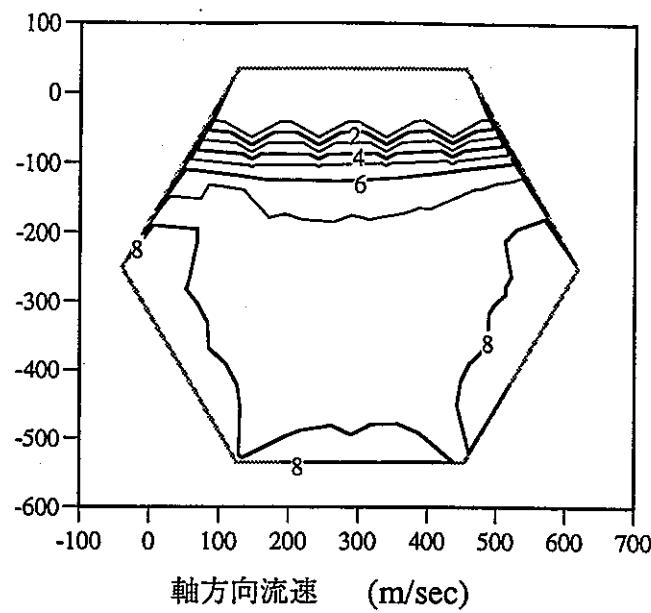
図3.4.2-5 (1/6) 流路断面の流速及びナトリウム温度分布 (400 l/min, 250W/cm, Ergunの式)



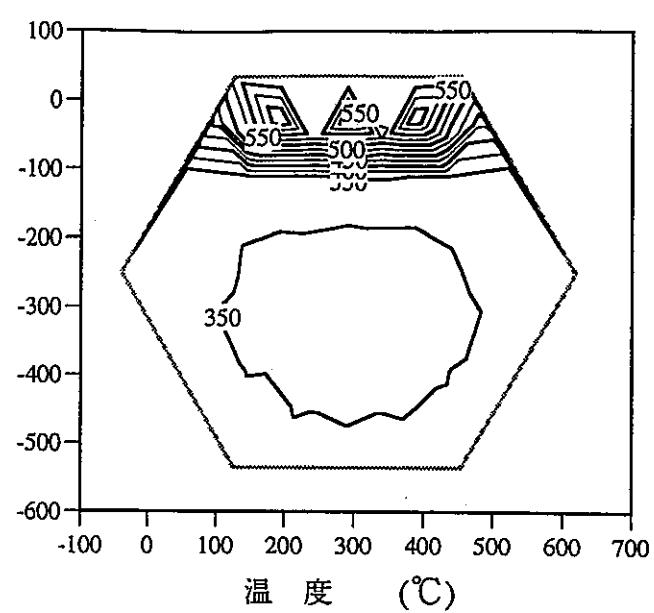
位置：閉塞物上端より 1.25 mm

注) 横方向流速、温度はメッシュ中点
軸方向流速はメッシュ上面にて計算

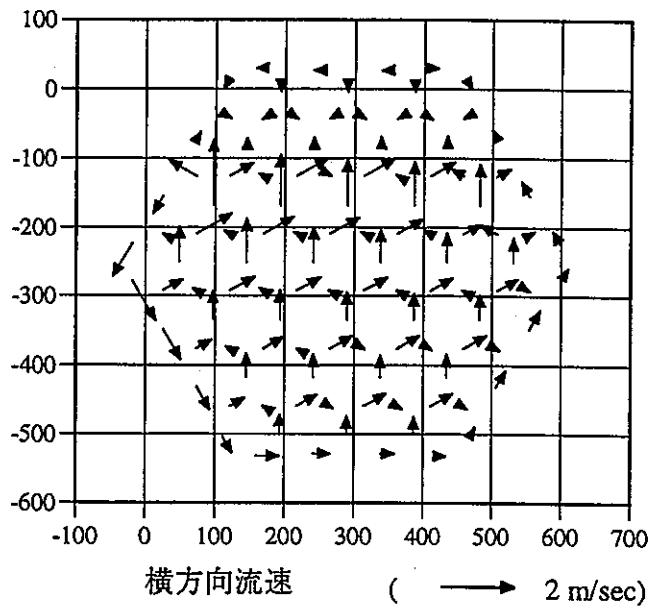
図3.4.2-5 (2/6) 流路断面の流速及びナトリウム温度分布 (400 l/min, 250W/cm, Ergunの式)



軸方向流速 (m/sec)



温 度 (°C)

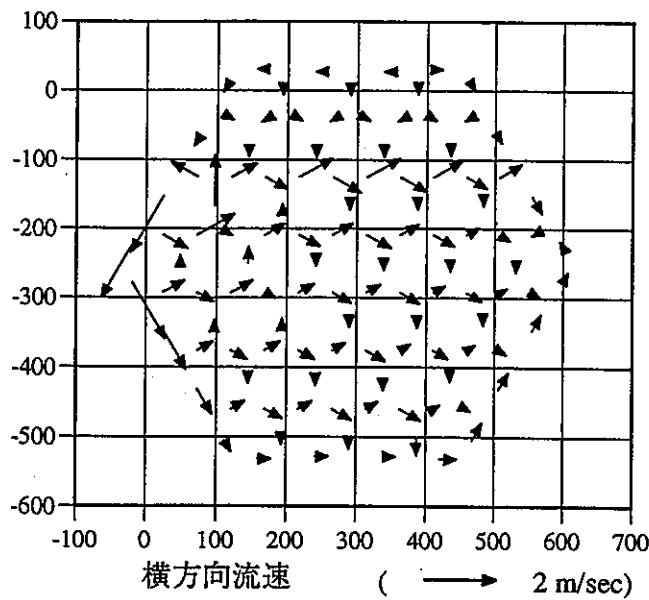
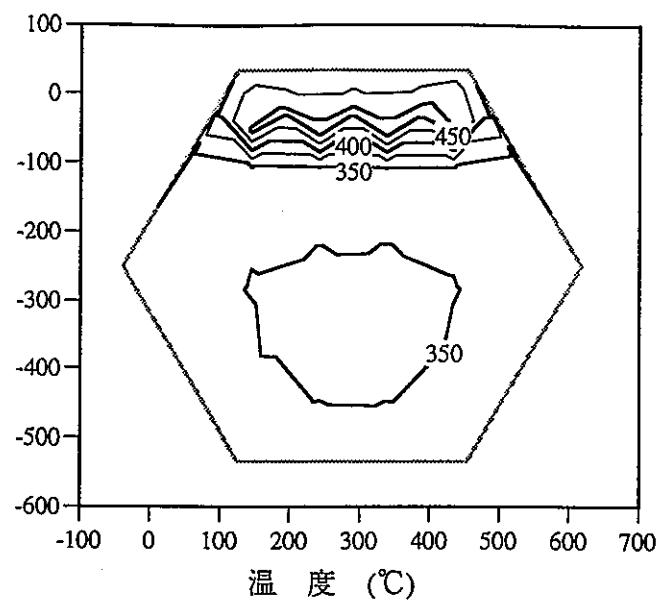
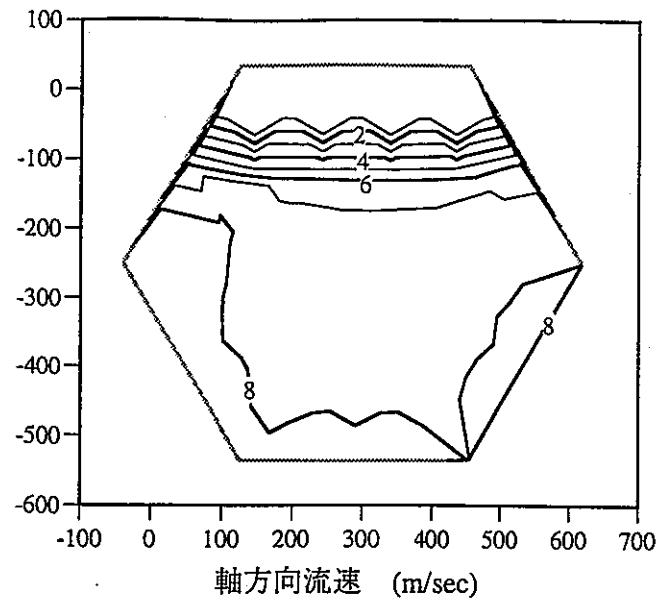


横方向流速 (→ 2 m/sec)

位置：閉塞物上端より - 1.25 mm (閉塞断面)

注) 横方向流速、温度はメッシュ中点
軸方向流速はメッシュ上面にて計算

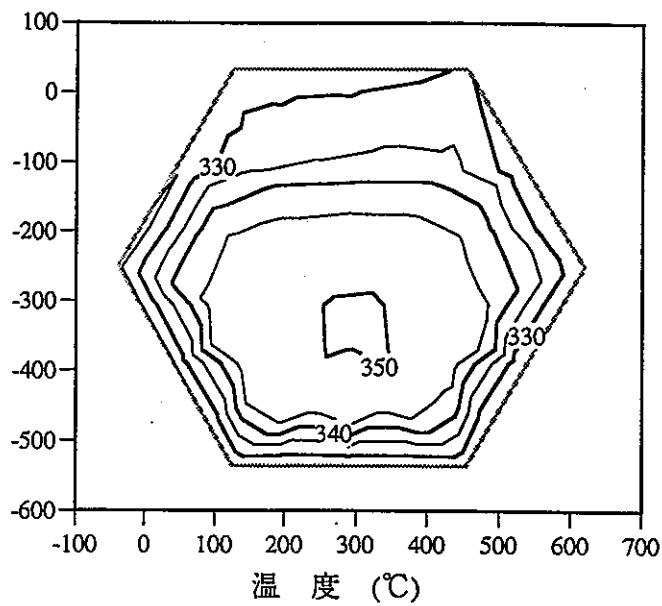
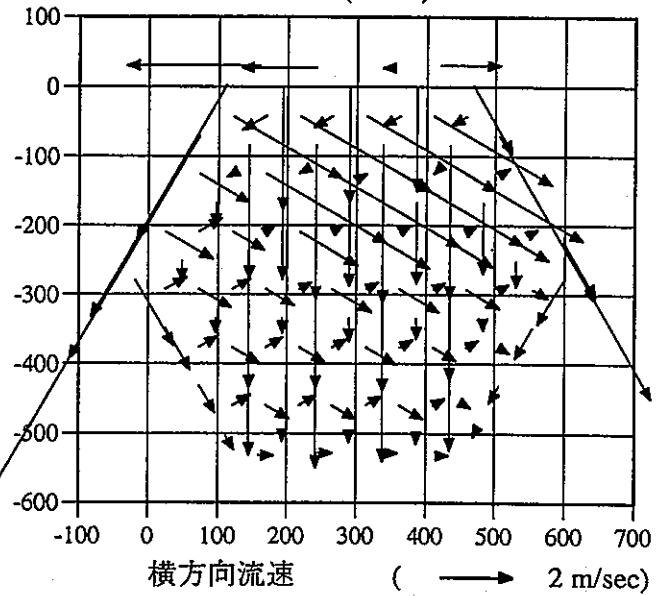
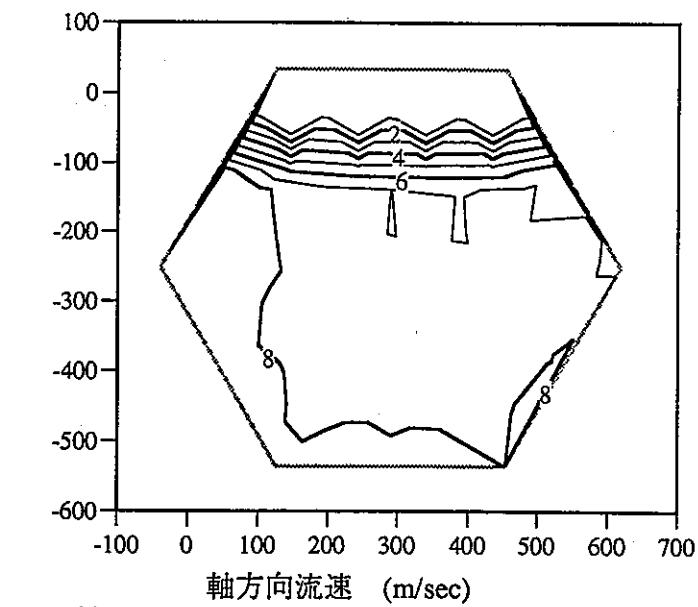
図3.4.2-5 (3/6) 流路断面の流速及びナトリウム温度分布 (400 ℥/min, 250W/cm, Ergunの式)



位置：閉塞物上端より -18.75 mm (閉塞断面)

注) 横方向流速、温度はメッシュ中点
軸方向流速はメッシュ上面にて計算

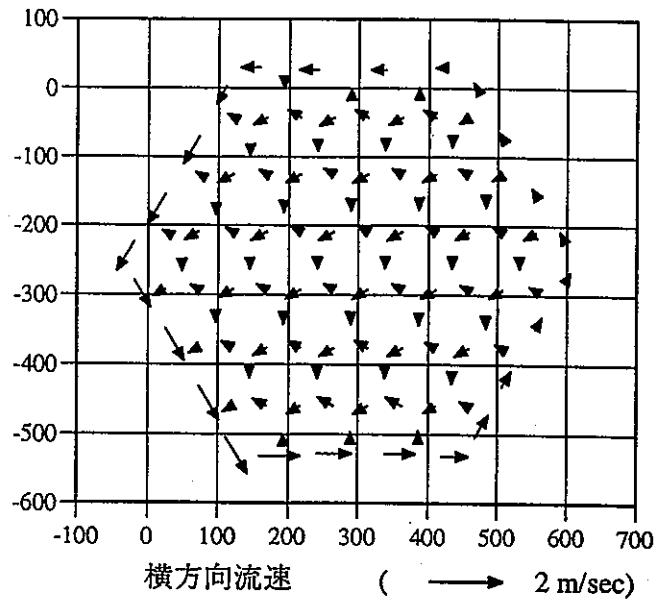
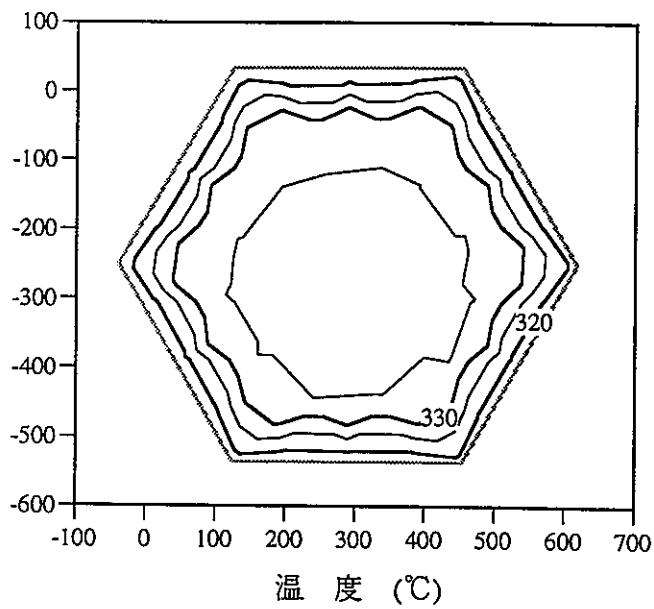
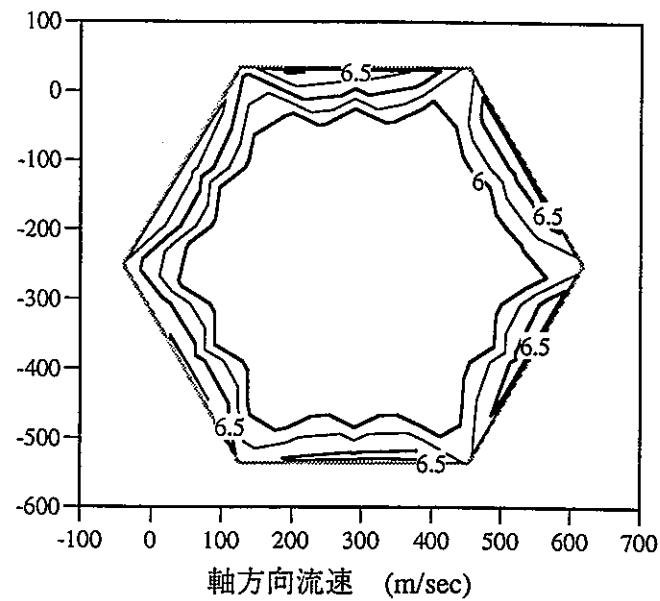
図3.4.2-5 (4/6) 流路断面の流速及びナトリウム温度分布 (400 l/min, 250W/cm, Ergunの式)



位置：閉塞物上端より -36.25 mm

注) 横方向流速、温度はメッシュ中点
軸方向流速はメッシュ上面にて計算

図3.4.2-5 (5/6) 流路断面の流速及びナトリウム温度分布 (400 l/min, 250W/cm, Ergunの式)



位置：閉塞物上端より -130.0mm

注) 横方向流速、温度はメッシュ中点
軸方向流速はメッシュ上面にて計算

図3.4.2-5 (6/6) 流路断面の流速及びナトリウム温度分布 (400 l/min, 250W/cm, Ergunの式)