

# 単チャンネルNa沸騰リエントリー解析 コード開発

( 受託研究 )

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

2001. 11. 30

[技術情報室]

1 9 7 2 年 2 月

株式会社 日立製作所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

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

単チャンネルNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>リエンリー解析コード開発

### 要 旨

動力炉核燃料開発事業団では、FBR安全研究(事故解析)専門委員会を中心として、高速炉々心事故解析統合コードの開発をすすめている。日立は昭和45年度に、この統合コードの一部として、単チャンネルのナトリウム<sub>2</sub>炭酸を単気泡モデルで解析する計算コードSUSIEを作成したが、今年度はSUSIEをもとに、<sub>2</sub>炭酸後ボイドがチャンネルより抜け出したあと、再びチャンネル内に流体ナトリウムが流入する現象を計算するコードを作成した。

この結果、作成されたSUSIE-IIでは1) 流路閉塞、2) 反応度増加、3) チャンネル入口圧の低下等に伴って、チャンネル内のナトリウムが<sub>2</sub>炭酸するまでの時間、ボイドがチャンネルを抜け出る時間、リエンリーの時間、および各時間での燃料、被覆およびNaの温度分布等が計算できる。

SUSIE-IIではチャンネルを軸方向に10領域、100×10mmまで、燃料ピンを半径方向に20×10mmまで分割して、計算することが可能である。

1972年2月20日

桜岡 直樹

坂口 晴一郎

内田 俊介

本報告は、株式会社日立製作所日立研究所が、動力炉・核燃料開発事業団の委託により行った研究の成果である。

A Digital Computer Code for calculating  
Reentry Phenomena in the Heated FBR Core

Abstract

A new code system of safety analysis for the FBR core accidents is being developed by Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation. Supporting this project, Hitachi Research Laboratory of Hitachi Ltd. developed a digital code, SUSIE, in 1970, to explain the sodium boiling phenomena in a single channel by "single bubble model".

Here, the above code is improved to calculate the reentry phenomena of sodium into the boiled channel in case of heat up accidents of FBR core. The new code SUSIE-II can calculate the time intervals from disturbance initiation to sodium boiling, growth rate of the bubble, condition of sodium reentry temperature distribution of the fuel and so on.

Feb., 20, 1972

Naoki Sakurama

Seiichiro Sakaguchi

Shunsuke Uchida

The work performed under contract between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation and Hitachi Research Laboratory of Hitachi Ltd..

## LIST OF TABLES

Table 1.1	Main Different Features between SUSIE and SUSIE-II
Table 5.1	Library Data
Table 5.2	Input Format of SUSIE-II
Table 5.3	Example of Input Data
Table 5.4	Accident Types and Their Functions
Table 5.5	Example of Output Data
Table 6.1	Input Data for "HONJU"
Table 6.2	Parameters

## LIST OF FIGURES

- Fig. 1.1 Model of Calculation of Temperature Distribution in Fuel and Clad
- Fig. 1.2 Model of Calculation of Temperature Distribution in Flowing Sodium
- Fig. 1.3 Model of Boundary Surface between Void and Liquid Sodium outside of the Channel
- Fig. 2.1 Model of Vapourization and Condensation at Void Surface
- Fig. 4.1 Block Diagram of SUSIE-II
- Fig. 6.1 Dimension of Fuel and Channel
- Fig. 6.2 Distribution of Heat Generation in Fuel
- Fig. 6.3 Time Dependence of Void Interface Position
- Fig. 6.4 Time Dependence of Void Vapor Pressure
- Fig. 6.5 Time Dependence of Liquid Column Temperature
- Fig. 6.6 Time Dependence of Clad Temperature
- Fig. 6.7 Time Dependence of Film Thickness
- Fig. 6.8 Time Dependence of Vapor Pressure at Initial Stage
- Fig. 6.9 Effect of Superheat on Void Position
- Fig. 6.10 Effect of Condensation Coefficient on Void Position
- Fig. 6.11 Effect of Initial Film Thickness on Void Position
- Fig. 6.12 Effect of Blanket Power rate on Void Position
- Fig. 6.13 Mesh Dependence of Void Interface Position
- Fig. 6.14 Time Dependence of Void Interface Position in Decrease of Pressure at Channel Entrance
- Fig. 6.15 Comparison Between Channel Blockage and Pressure Drop Accident

# 単チャンネルNa<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>リエンتری解析コード用巻

## 目次

### まえがき

### 1. SUSIE-II の特徴

### 2. リエンتریモデルとリエントリーの条件

### 3. 計算の基本式

### 4. 計算コードの説明

### 5. 入出力形式とその説明

### 6. サンプル計算の結果とその検討

### おわりに

### 謝辞

### 記号表

### 参考文献



まえがき

現在開発のすゝめられているナトリウム冷却高速増殖炉では、何らかの原因によって、炉心冷却材流量の喪失あるいは炉心出力の増大が生じた場合、急速な安全動作が行なわれなければ、事故が急速に発展し、炉心の溶融、さらには再臨界事故にも至るおそれがある。

特に、炉心内で生ずることが飽和になりとほいえないような局所的な流路閉塞のような場合でも、それが大事故へ急速に発展してゆかないことは、現在のところまだ保証できない。

従来の安全解析では、この種の事故の発展過程を十分に検討することができなかつたので、起因事故の解析を行つた上で、炉心のかなりの部分が溶融して再集合した場合を想定して、その爆発エネルギーを解析することが一般に行なわれているが、起因事故と再臨界事故の関連の定量的検討はまだ十分に行なわれていない。

これらの関連を明確にすると共に、現在行なわれている再臨界事故が起り得ないものであることを計算によ

て保証して、高速増殖炉系型炉“もんじり”以降の安全  
審査から、これを除外することも目的として、動力炉核  
燃料開発事業団（以下動燃事業団と略記する。）では、  
FBR安全研究（事故解析）専門委員会を組織し、これを  
中心として、ナトリウム冷却高速増殖炉炉心事故解析綜  
合コードの開発をはじめた。

総合コードの開発の第一段階では総合コードの系の  
作成として、総合コードのサブルーチンとしての各種危  
険事故解析コード、事故の発展を計算するコード、エネ  
ルギー放出計算コード等の作成を行っている。

日立では、昭和45年度に本目的による総合コードのサ  
ブルーチンの一つとして、炉心燃料チャンネルでのナト  
リウム融騰解析コードの開発を委託し、単チャンネルの  
ナトリウム融騰を単気泡モデルで計算するコード SLSIE  
を作成した。

SLSIEでは、炉心冷却材流量の衰減あるいは反応度投  
入による炉心発熱量の変化に伴って生ずる燃料チャン  
ネルでのナトリウムの融騰現象を、幾つかある融騰解析

モデルのうち、現在最も実験とよく一致すると云われて  
いる単純なモデル（ピストンモデル）で解析する。

昭和45年度は、SUSIEの雛型を作成し、事故発生後十  
チャンネル内でのボイド発生までの温度変化、汽騰開始後  
ボイドの成長、燃料、被覆等の温度変化等の計算が行な  
えるようになった。しかし、SUSIEでは一度チャンネル  
からナトリウムが抜け出たあとのリエントリーは取扱わなかった。

このため、昭和46年度は、主としてこの汽騰後のナト  
リウムのチャンネルへのリエントリー（再流入）を計算  
できるようにすることを中心に、SUSIEの改良を行なっ  
た。チャンネル内へのナトリウムのリエントリーについては、  
モデルの決定、リエントリーする条件の設定等に幾つかの問題  
があると思われていたので、これらの検討からはじめ、  
改良された新しいコード SUSIE-II の作成および SUSIE  
-II を用いて計算した結果の検討を行なった。本報告では  
リエントリーの取扱い方、コードの基本式とその説明、コード  
の特徴、入出力形式の説明と使用の手引、および計算結  
果とその検討等を記す。

リエントリーの計算を行なうことにより、SUSIEでポイントが抜け出たあと、新聞で計算して11E被覆の透度上昇が緩和されることが期待できる。

### 1. SUSIE-II の特徴

SUSIE-II は昭和 45 年度日立が開発した単気泡モデルによる Na 蒸騰解析コード SUSIE の性能を高めたものである。計算の基本式等はあとに示すが、本質的には、SUSIE とほとんど変わらない。また、SUSIE の場合十分に計算できなかったボイド端面の振動、ボイドがチャンネルより抜け出たあとの液体ナトリウムのリエントリーによる冷却効果等の計算が出来るようにした。このように、コードの計算技法上の改良を中心として、新しい幾つかの計算機能を SUSIE に付加したものが SUSIE-II である。

Table 1.1 では新しく作られた SUSIE-II と SUSIE の主な差異を比較して示す。

## 計算モデル

計算の基本は SUSIE のモデルと同じである。

### 1.1.1 液熱側

(i) Fig. 1.1 に示すように、燃料ピン、被覆のまわりを液膜、ナトリウム流がとり囲んだ円筒モデルを考える。

流路外径はナトリウムの流路断面積より決まる。

(ii) 燃料、被覆、液膜は固定と考える。液膜部以外のナトリウムのみ flows。

(iii) 固定側では軸方向の伝熱を無視する。

(iv) 沸騰が開始するまで、本モデルで流路のナトリウムの温度分布も計算する。

### 1.1.2 ナトリウム側 (但し、沸騰開始以降の計算)

(i) Fig. 1.2 に示すように、液膜は被覆に密着し、ボイドの成長につれて、その厚さが変わる。

(ii) 液膜の厚さは軸方向のメッシュによって異なり、各々が時々刻々変化する。

(iii) 液膜の厚さが零になると、被覆材表面で熱絶縁を考える。

### 1.1.3 蒸熱側とナトリウム側のつなぎ

- (i) 液膜表面での熱流束を用いて、Fig.1.1のモデルで燃料ピン、被覆、液膜の温度を求める。
- (ii) 液膜表面の温度を用いて、ボイド圧力、体積、ナトリウム温度および液膜表面の熱流束を求める。
- (iii) (i)と(ii)を各時間きざりごとくり返して計算する。

### 1.2 リエントリーモデル

- (i) 蒸熱側計算は変らなリ。
- (ii) チャンネル出口を出口ボイドは、Fig.1.3示す仮想チャンネル内を上昇(下降)するものと考える。
- (iii) 仮想チャンネルの断面はチャンネルの断面と同じで、その壁は軸方向に等温度(チャンネル出口のバルクのナトリウムの温度に等しい)のナトリウムとする。
- (iv) ナトリウム蒸気はチャンネル上部(ブラケット等)および仮想チャンネル表面で凝縮し、ボイド圧が低下して、ナトリウムのチャンネルへのリエントリーが始まると考える。
- (v) チャンネルおよび仮想チャンネル内でのボイド端面の位置、ボイド圧力等を計算する。

### 1.3 時間メッシュ

リエントリーに伴う振動現象を計算するため、従来の一定の時間メッシュ中の計算では無理が注ぎるので、時間メッシュ中はボイラの圧力変化 $\Delta P_V$ を一定範囲に押えるように変えながら計算する。

### 1.4 事故因子

- (i) 発熱量変化：初期値として発熱量の分布を与え、その絶対値の時間変化を入力で与え、関数によって決める。
- (ii) 流路閉塞：流路閉塞に伴う流量変化関数を入力で与える。
- (iii) チャンネル入口：ポンプ事故等に伴うチャンネル入口の圧力変化関数を入力で与える。



1.5 その他 SLSIE からの改修点.

(i) 液膜の表面温度が蒸発凝縮の際に大きく変化し、不安定であるので、クラウドと液膜を合せて「メッシュ」として平均化した。実際にも、液膜内での温度勾配は無視できるものと思われる。

(ii) ボイド上下の界面での蒸発凝縮の考慮

ボイド上下界面の温度が高いので、この部分からの蒸気供給も考慮した。計算手法は液膜からの蒸発と全く同様である。蒸発表面積としては、流路断面積をとっている。

(iii) 液膜厚さの変化

液膜の厚さは時間と位置で異なる。ある時刻  $t$  での液膜の厚さを  $\delta(t)$  とすれば

$$\delta(t+\Delta t) = \delta(t) - \gamma \Delta t \tag{1.1}$$

ここに  $\gamma$  : 蒸発が凝縮による液膜の厚さの変化率。

ボイドが成長するとき、その端面を含む被覆側のメッシュ奥での液膜の厚さは次のようにして決まるものと考えられる。なお、メッシュ内で液膜の厚さは一律とする。

$$S(t+\Delta t) = \left[ S(t) + (S_0 - S(t)) * \Delta z / (z + \Delta z) \right] - v \Delta t \tag{1.2}$$

ここに  $S_0$  : 初期液膜の厚さ

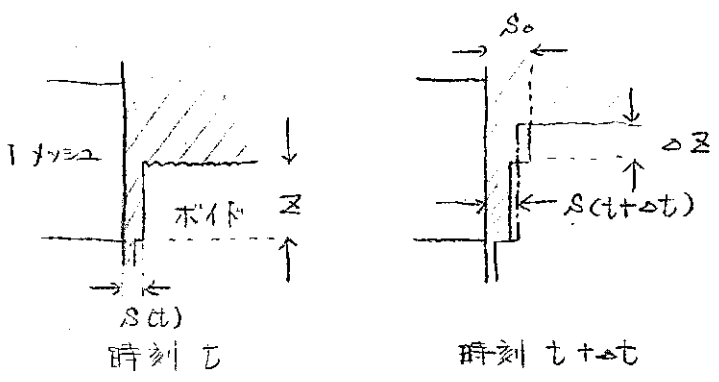
$\Delta z$  : 端面を含むメッシュでの時刻

$t$ におけるボイドの長さ

$$\Delta z = v \Delta t$$

$v$  : 端面の速度

この仮定は次の図を見ればよくわかると思われる。



## 2. リエントリーモデルとリエントリーの条件

### 2.1 リエントリーモデルの検討

SUSIE-IIで用いたリエントリーモデルについては前章にも示した。本コードで採用されたモデル以外にも、幾つかのモデルが考えられる。ボイドのチャンネル出口から外での取扱いについては、Fig. 2.1に示すようなモデルを検討した。

(i) ボイドをチャンネル上部(下部)に同じ断面で延長し、その表面ではボイド内の蒸気と液面の温度差で凝縮が起ると考える。チャンネルの延長上に仮想的なチャンネルが接続されたと考えるモデルである。

(ii) ボイドの蒸気のうち、チャンネルの上下部から外へはみ出したものは直ちに凝縮するとする。その際の凝縮過程の詳細は考えない。このため、ボイド端面はチャンネル出口外へは出ることはない。

(iii) ボイドはチャンネル出口から外へは特殊な形状で噴出すると考えられる。但し、その形状は定かではない。このため、その表面積だけに注目し、(i)のモデルの出口から外のボイド表面積に相当なファクターを乗じて計算する。このファクターはパラメータとして検討する。

蒸発に寄与する液膜の厚さは有限であり、液膜がなくなれば蒸発は止り、やがて凝縮が蒸発を上まわる手うになるので、ボイドの圧力が下、てくる。

先に示した (i), (ii), (iii) のモデルはいずれも蒸発凝縮のバランスからボイド圧力を求めるので 基本的には同じ取扱いと考えられる。Fig. 2.1 には各モデルでの蒸発凝縮の定性的な挙動を示す。

SILSIE-II では (i), (ii), (iii) のモデルがほぼ類似のものと考えられることから、一応 (i) のモデルで採用することにした。但し (i) から (ii) への変更は難かしいものではないので 将来 (iii) のモデルについても検討したい。

### 2.2 リエントリーの条件

ボイドが成長し、ボイド領域がサブクールセル領域へ広がってゆくにつれて、凝縮量が蒸発量に打勝つようになり、ボイド内の圧力は低下してくる。

ボイドの圧力が外部の圧力より小さくなると、ボイドの成長速度も鈍り、やがて成長が止まる。さらに、外部圧力との差によって、ボイド内にナトリウムがリエントリーしてくる。

したがって、リエントリーの必要条件は

$$P_2(\text{出口圧力}) > P_v(\text{ボイド圧力})$$

であり、実際にはボイド上下のナトリウム液柱の慣性を考慮すると、 $P_2 > P_v$  より若干遅れてリエントリーが始まると考えられる。

この場合、特にチャンネル出口の外にボイドが出ている場合の液柱の長さの定義が難かしいが、SUSIE-IIでは、ボイド端面がチャンネル内にあるときは液柱の長さとして、ボイド端面からチャンネル出口までの長さをとることにする。但し、ボイド端面がチャンネル出口に近づくと、液柱の長さは短くなるが、本モデルで

は、その最小値として、液柱の「メッシュ」分の長さをとることとする。ポイドがチャンネルから抜け出した場合の液柱の長さには届けても、この取扱いを延長し、液柱の長さとして、「メッシュ」分の長さをとる。

本コードでは、次章に示す液柱の運動方程式を上述の仮定を用いて解く。

### 3. 計算の基本式

本コードに用いられる計算の基本式について述べる。計算は発熱側計算とナトリウム側計算とに分けて行なわれるが、発熱側計算でもボイドを含まない限り、流れるナトリウムについての計算が可能であり、沸騰開始まではナトリウム側計算を用いる必要はない。沸騰開始後は液膜までを発熱側計算で、ボイドを含むナトリウムの諸量をナトリウム側計算で計算する。

沸騰開始後の発熱側計算はさらに二分され、燃料部を発熱側計算 (HEATUP) で、複層と液膜を被覆計算 (CLAD) で計算する。これは計算上、解の振動を抑えるため、および計算時間の短縮のために分けられたものである。基本式においては、分割前と変る点はない。

#### 3.1 発熱側の計算

燃料

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_p} \left\{ \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q \right\} \quad (3.1)$$

こゝに  $T$  : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$Q$  : 発熱量 ( $\text{Kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ )

- $k$  : 熱伝導度 (Kcal/mh<sup>°C</sup>)
- $c$  : 比熱 (Kcal/kg<sup>°C</sup>)
- $\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $t$  : 時間 (h)
- $r$  : 燃料中心からの距離 (m)

燃料 - 被覆面

$$q_g = h_g (T_F - T_c) \tag{3.2}$$

- こゝに  $q_g$  : 燃料・被覆面の熱流束
- $h_g$  : ギャップコンダクタンス
- $T_F$  : 燃料表面温度
- $T_c$  : 被覆内面温度

被覆面手ひ液膜

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} \tag{3.3}$$

液膜・ナトリウム面

$$q_L = h_L (T_w - T_N) \tag{3.4}$$

- こゝに  $q_L$  : 液膜からの熱流束
- $h_L$  : 液膜表面の熱伝達係数



$T_w$  : 液膜外面温度

$T_w$  : ナトリウム温度

熱伝達係数

$$h_L = k \cdot Nu / D \quad (3.5)$$

$$Nu = 5.333 + 0.019 * (Pe^{0.8}) \quad (3.6)$$

こゝに  $Nu$  : ヌッセルト数

$D$  : 等価直径

$Pe$  : ペクレ数

ナトリウム

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{2\pi r_0 q_L}{S \rho} - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ T \frac{W}{S} \right\} \quad (3.7)$$

こゝに  $\alpha$  : 熱拡散率 ( $m^2/h$ )

$z$  : チャンネル入口からの距離 ( $m$ )

$r_0$  : 液膜外半径 ( $m$ )

$S$  : 流路断面積 ( $m^2$ )

$\rho$  : ナトリウム密度 ( $Kg/m^3$ )

$W$  : 流量 ( $Kg/h$ )

定常状態の諸量は(3.1)~(3.7)を用いて求める。その後流量あるいは発熱量を变化させた計算に入る。その際、チャンネル入口温度、流量、発熱量を入力として、与える。

### 3.2 ナトリウム側の計算

ボイド部

蒸発量

$$\alpha = \frac{f_k}{1 - 0.5 f_k} \frac{1}{\sqrt{2\pi R A}} \left\{ \frac{P_{fs}}{\sqrt{T_s}} - \frac{P_{vs}}{\sqrt{T_v}} \right\} \quad (3.8)$$

ここに  $\alpha$  : 蒸発量 ( $\text{Kg}^*/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )

$h_{fg}$  : 蒸発潜熱 ( $\text{Kcal}/\text{Kg}^*$ )

$f_k$  : 凝縮係数

$R$  : 気体定数 ( $\text{Kg}^*/\text{m}^2 \cdot \text{C}$ )

$T_s$  : 液膜表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_v$  : ボイド温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$P_{fs} = f(T_s)$  飽和圧係式 ( $\text{Kg}^*/\text{m}^2$ )

$P_{vs} = f(T_v)$  " " ( $\text{Kg}^*/\text{m}^2$ )

$A$  : 1モルのナトリウム重量 ( $\text{Kg}^*/\text{m}^3$ )

熱流束

$$q_v = h_{fg} \cdot \dot{m} \tag{3.9}$$

ボイド内蒸気増加

$$\frac{dN}{dt} = \int_{\text{surface}} \dot{m} \, ds \tag{3.10}$$

状態式

$$P_v V = N R T_v / A \tag{3.11}$$

こゝに  $V$  : ボイド体積 ( $m^3$ )

$N$  : ボイドの蒸気重量 ( $Kg$ )

体積増加

$$dV/dt = (v_1 - v_2) / S \tag{3.12}$$

こゝに  $S$  : 流路断面積 ( $m^2$ )

$v_1$  : ボイド上端面の移動速度 ( $m/h$ )

$v_2$  : " 下 " (" )

流量

$$W_1 = \rho_s S v_1 \tag{3.13}$$

$$W_2 = \rho_s S v_2 \tag{3.14}$$

こゝに  $W_1, W_2$  : ボイド上部および下部のナトリウム流量 ( $Kg/h$ )

## ナトリウム部

## 運動量の式

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{P_V - P_1}{\rho h_1} + g - \frac{\lambda_1 V_1 |V_1|}{2D} - \zeta V_1 |V_1| \quad (3.15)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{P_V - P_2}{\rho h_2} - g - \frac{\lambda_2 V_2 |V_2|}{2D} - \zeta V_2 |V_2| \quad (3.16)$$

ここに  $P_V$  : ボイド圧力 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P_1$  : チャンネル入口の圧力 (")

$P_2$  : " 出口の " (")

$$h_i = h_{oi} - \int_0^t V_i dt \quad (i=1,2)$$

$h_{oi}$  : ナトリウムコラムの長さ (m)

$\lambda_i$  : 圧力損失係数

$\zeta$  : 流路閉塞箇所での閉塞による

圧力損失係数

## エネルギーの式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\rho v}{229 C_p} + \frac{4D\beta}{(D-2l)^2 \rho C_p} + \frac{\alpha}{2Z} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{4D\beta}{(D-2l)^2 \rho C_p} + \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad (3.18)$$

ここに (3.17)式は気液界面での式、(3.18)式は

その他以外の位置での式である。

$q_v$  : ボイドへの熱流束 (Kcal/m<sup>2</sup>h)

$h$  : 液膜からの ( " )

$l$  : 液膜の厚さ (m)

$C_p$  : 比熱 (Kcal/kg<sup>o</sup>C)

ナトリウム側の計算では、液膜表面温度が発熱側計算  
 によって与えられたのち、ボイドの成長を(3.8)~(3.16)  
 を用いて計算し、ナトリウムの温度は(3.17)と(3.18)に  
 よって計算する。

### 3.3 時間メッシュ

計算の時間メッシュ  $\Delta t$  は  $\epsilon$  の最大値を与え、次式を満足しないときは、満足するように小さくする。

$$\epsilon_1 \leq \Delta P_v / P_v \leq \epsilon \tag{3.19}$$

ここに  $\epsilon_1, \epsilon_2$  : 圧力変化の上下限

$\Delta P_v$  : ボイドの圧力変化

$P_v$  : ボイドの圧力

### 3.4 液膜の厚さ

初期の液膜の厚さは  $S_0$  である。

i) ボイド端面を含むメッシュ奥での厚さ  $S(t)$  は次式で与えられる。

$$S(t + \Delta t) = S(t) - \delta \Delta t \tag{3.20}$$

ここに  $\delta$  : 単位時間に変化する液膜の厚さ (cm/h)

$$\delta = \alpha_i A / \rho \tag{3.21}$$

ii) ボイド端面を含むメッシュ奥での厚さ (但し、ボイド成長時)

$$S(t + \Delta t) = \left[ S(t) + \frac{S_0 - S(t)}{(\Delta z + \delta z)} \cdot \Delta z \right] - \delta \Delta t \tag{3.22}$$

$$\Delta z = v \Delta t \tag{3.23}$$

ここに  $\Delta z$  :  $t$  でのこのメッシュ内でのボイド長さ (cm)

$v$  : 端面の移動速度 (cm/h)

#### 4. 計算コードの説明

SUSIE-IIを構成するサブルーチンは SUSIE の場合と同じである。但し、各サブルーチンの内容はリエントリ計算用に改修されている。Fig 4.1 に SUSIE-II のブロック線図を示す。

各サブルーチンの機能を以下に示す。

MAIN	Fig.4.1 の全体のコントロールおよび時刻 ごとの調整
INPUT	データの入力
OUTPUT	シミュレーションの出力
STEADY	定常時の温度計算
HEATUP	昇温時温度計算。シミュレーション始後は燃料の温度計算のみ。
NABOIL	シミュレーション始後のボイド成長およびナトリウムの温度計算。シミュレーション始後の出力
CLAD	シミュレーション始後の被覆および熱膜の温度計算
FLOWRT	流量変化の関数
HEATVL	発熱量変化の関数
PRESSF	チャンネル入口圧力の関数

PROPNA Naの物性値

PROPFL 燃料の

PROPSL ステルスの

なお、判定指数 NNVOID は定常状態から引騰開始に至る  
手では変。引騰開始後は NNVOID = 1 とする。

NNVOID = 1 とするのほ、(即ち、引騰開始と考えられる時  
間とするのほ)、Naの最高温度が引騰温度プラス過熱度  
(入力で与えられる。)を越えた場合である。



## 5. 入出力形式とその説明

### 5.1 入力形式

SUSIE-IIの入力データはライブラリーデータと普通の入力データとに分けられる。ライブラリーデータはサブルーチン PRQPNA において、飽和圧力と飽和温度の関係を求めるために用いられるもので、普通のデータの読み込みの前に一度読み込ませなければならない。Table 5.1 に SUSIE-II に現在用いられているライブラリーデータを示す。

普通の入力データ（以下、単に入力データと呼ぶ。）の記載の形式は Table 5.2 に示されている。Table 5.2 の形式で実際に書かれた入力例を Table 5.3 に示す。

事故因子は必要な関数をユーザーが自分で作成して、その係数を入力するように考えられている。現在、幾つかの関数がすでに作られ、使用される状態にあるので、その関数形とオプション記号を Table 5.4 にまとめる。

SUSIE-IIの入力制限条件は次の通りである。

- |               |            |
|---------------|------------|
| (i) 半径方向メッシュ数 | $\leq 20$  |
| (ii) 軸方向      | $\leq 100$ |
| (iii) 軸方向領域数  | $\leq 10$  |

## 5.2 出力形式

Table 5.5 に出力の一例を示す。これは氫騰開始後サブルーチン NABQIL の中で打出されるもので、競争の意味を以下に示す。

SEC	氫騰開始の時間 (sec)
I	後の時間メッシュ数
TIME	事故発生後の時間 (sec)
TMESH	I での時間メッシュ中 (sec)
X1, X2	ボイド下端面 (1), 上端面 (2) の位置 (cm)
W1, W2	ボイド各面の移動速度 (m/sec)
DZ	ボイドの長さ (cm)
PGAS, TGAS, NGAS	ボイドのガスの圧力 (Kg/cm <sup>2</sup> )
	温度 (°C) およびモル数
LOW TEMLOD, UP TEMLOD	上下液柱のナトリウム温度 (位置はボイド端面からとる)
TFUEL CENTER	燃料中心温度 (°C)
" SURFACE	" 表面 " (" )
TCLAD	クラッド " (" )

TFILM      液膜表面温度      ( $^{\circ}\text{C}$ )

SFILM      " 厚さ      (m)

QFILM      " からの熱流束      ( $\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}$ )

## 6 サンプル計算の結果とその検討

### 6.1 入力数値の検討

ナトリウムリイソリに影響すると思われる因子として次のものを検討する。

- (1) 初期過熱度
- (2) 初期発泡核有効半径
- (3) 凝縮係数
- (4) 初期残留液膜の厚さ

(1)の初期過熱度は、沸騰が発生する際に必要な、液体温度と飽和温度との差であり、次式で定義されるものである。

$$\Delta T_s = T_l - T_{sat} \quad (6.1)$$

ここで、 $\Delta T_s =$  初期過熱度

$T_l =$  沸騰しはじめた液体の温度

$T_{sat} =$  沸騰をしはじめた点の液体の圧力に対応する飽和温度

初期過熱度の値は、ナトリウム等の液体金属では特に大きいといわれるが、多数の実験データは非常にばらついており、いかなる因子が影響しているかを定量的に把握するため、目下、かなりの研究者による努

(1)~(2)  
 力がはらわれている。影響しそうな因子としては、圧力、ナトリウム中不純物（例えば、ナトリウム酸化物や溶解アルゴンガス）、伝熱面の表面状態（粗さや枝料の違い）、熱流束、沸騰以前の温度や圧力の履歴などが考えられている。本計算では  $50^{\circ}\text{C}$  の値を用いる。

(2)の初期発泡核有効半径は、気泡の力学的バランスの式と、クラペイロン・クラジウスの式から理論的に導かれた次式により、<sup>(3)</sup> 逆に推定するしかないが、過熱度の実験値が大きくばらついている現時点では、気泡核半径の見積りも不確かなものになるをえない。すなわち、

$$\Delta T_s = \frac{2 R_v T_s^2 \sigma}{J h_{fg} \rho_c P_s} \quad (6.2)$$

ここで、 $\Delta T_s$  = 気泡生成に必要な初期過熱度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_s$  = 飽和温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )

$\sigma$  = 表面張力 ( $\text{kg}/\text{m}$ )

$h_{fg}$  = 蒸発潜熱 ( $\text{kcal}/\text{kg}^*$ )

$P_s$  = 飽和圧力 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$\rho_c$  = 発泡核有効半径 (m)

$R_v$  = ガス定数 ( $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{kg}^*\cdot^{\circ}\text{K}$ )

$J$  = ジュール換算係数 ( $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{kcal}$ )

ナトリウムの  $\rho_c$  の値を推定したものは、文献の中にはみあたらない

ので、よく似た性質をもつ、カリウムの研究例を引用すると  
 $\tau_c$  の値は、 $10^{-2}$  mil から 3 mil の間 (即ち  $0.25 \mu$  から  $75 \mu$ )  
 に分布していることが Hoffman らによって示された<sup>(3)</sup>。  
 ナトリウムについても、上記のオーダの値を示すもの  
 として、計算では  $100 \mu$  の値を用いた。

(3) の凝縮係数の値は、水の蒸発に関する研究で理  
 論、実験の両面から明らかにされようとしているが、測  
 定技術の問題もあって実験値がばらついている。Mills &  
 Seban の研究によると<sup>(4)</sup>、従来の実験値が 1 から 0.002 の間  
 にばらついているのは、実験値の整理の仕方が悪いのであって  
 再整理をやってみると、ほとんど 1 に近い値を示すよう  
 になり、1 から大きくはなれるのは信じがたいとしてい  
 る。

ナトリウムに関して、上記の類の研究はない。ただ、  
 イタリアで作られた単気泡モデルによる沸騰解析コード  
 NEM1 で、凝縮係数の値をパラメトリックに変化させ、  
 ボイドの位置が実験値と理論値で一致するときの凝縮係  
 数の値として 0.01 なる値が得られた研究例がある。<sup>(5)</sup>

本計算では一つの目安として 0.1 を用いる。

(4) の初期残留液膜の厚さは、Reentry現象を支配する最も影響度の大きい因子の一つである。このことは、計算結果のところでも詳しく述べるが、今回の計算で重点的に検討した炉心入口流路閉塞事故では顕著である。

液膜厚さは、流れの場から決まり、境界層内の層流底層の厚さかそれであるとある説がある。今の場合、沸騰開始直後の流速は小さく、上記の説が成立することは疑わしいけれど、一つの目安として、その厚さを求めてみる。

Prandtlの境界層理論によると、円管内乱流境界層厚さは

$$\delta = 0.379 Re^{-\frac{1}{5}} x \quad (6.3)$$

で与えられる。(6)

$$Re = \frac{Wx}{\nu}$$

$W =$  流れの平均速度  $(m/s)$

$\nu =$  動粘性係数  $(m^2/s)$

$x =$  管入口から流れ軸方向の距離  $(m)$

$Re =$  レイノルズ数  $(-)$

$\delta =$  乱流境界層厚さ  $(m)$

乱流境界層内には直線速度分布の層流底層があり、その

$$\text{厚さ } \delta_L \text{ は, } \delta_L = 80 (Re)^{-\frac{7}{8}} \delta \quad (6.4)$$

である。今、ボイド両端の液柱の速さが

$$W = 1 \text{ m/sec}$$

気泡が発生した点からの距離が 0.01 m なり点をとると、そこのレイノルズ数は 沸点における  $\nu$  の値  $\nu = 2.3 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$  を用いて、

$$Re = 1 \times 0.01 / 2.3 \times 10^{-7} = 4.35 \times 10^4$$

$$\therefore \delta = 0.379 (4.35 \times 10^4)^{-\frac{1}{5}} \times 0.01 = 4.48 \times 10^{-4} \text{ (m)}$$

$$\therefore \delta_L = 80 \times (4.35 \times 10^4)^{-\frac{7}{8}} \times 3.20 \times 10^{-4} = 2.21 \times 10^{-6} \text{ (m)}$$

すなわち、初期に於ては、境界層厚さが 0.45 mm, 層流底層厚さは 2.2  $\mu$  程度となり、非常に薄い。

一方、円管内のナトリウム沸騰実験によると、液膜厚さは初期において 0.1 mm 程度残存しているものと推定されているので、今回の計算では、0.1 mm オークの値を用いた。



## 6.2 計算結果

高速原型炉「もんじゅ」を解析の対象として、SUSIE-IIで計算した結果を次に示す。計算に必要な種々の設計諸元を Table 6.1 に示し、燃料、チャンネル寸法および発熱分布を Fig. 6.1、Fig. 6.2 に示す。

また、6.1節で検討したパラメータ、初期過熱度  $\Delta T_s$ 、初期液膜厚さ  $s$ 、凝縮係数  $C$ 、初気泡半径  $r_c$  の他に、ブランケット発熱量  $Q_b$ 、軸方向計算メッシュ数  $M_Z$  の影響度を調べるため、Table 6.2 示すような数値をインプットデータとして用いている。

Table 6.2 中で標準ケースとしたのは、「もんじゅ」炉の設計値を用い、 $\Delta T_s = 50^\circ\text{C}$ 、 $s = 0.1\text{ mm}$ 、 $C = 0.1$ 、 $r_c = 0.1\text{ mm}$ 、 $Q_b = 0.07\text{ kW/cm}$ 、 $M_Z$  を炉心で 10メッシュ、上部ブランケットで 4メッシュに分割して計算したものである。

燃料ピン側の軸方向きざみ巾は、約 8.9 cm としているのに対し、液体ナトリウム側は、沸騰後ボイド上下液柱ともに 4.4 cm の長さをメッシュ中としている。また、ボイドの中のクラッドに付着する液膜のメッシュ巾はクラッドの軸方向巾と同一である。ただし、ボイド端面（ピストン形の上下端）に接するところだけは、ボイドの移動につれ長さが変わる。

## 6.2.1 標準ケースにおける計算結果

標準ケースにおける、ボイド端面位置、ボイド内圧力、ナトリウム温度、クラッド温度、液膜厚さの時間変化を示す。

### (1) ボイド端面位置、ボイド内圧力の時間的变化

Fig.6.3は、横軸に沸騰開始後の時間を秒単位でとり、たて軸に、ピストン形ボイドの上部端面と、下部端面とを、炉心入口を座標軸の原点にとってメートル単位でプロットしたものである。

今、入口流路閉塞事故を想定し、アセンブリ入口に異物がつまり、流れがスラップ状に定格の1%に低下したとする。入口部の閉塞物は、沸騰がおこっても取り除かれず、現象のおこっている向中その絞り効果が働いているとしている。

従って、ボイドの下端面はほとんど移動しない。

Fig.6.3からも、このことは明らかである。今後は、ポンプトリップ事故などのように下方にもボイドが動く可能性のある事故の検討時以外、特に断らないかぎり、ボイド上端面のみに着目する。

Fig. 6.3 の中で、たて軸上に記入した ×印は、クラウドの軸方向分割位置、斜つてボイドが成長したときの液膜の分割位置を示す。また、軸に沿って記した ①~⑨の数字は液膜の軸方向位置を表示したラベルであり、ボイド上端面の移動曲線に併記した ①~⑨の数字も、たて軸上のものと対応する。

炉心部 0.935 m 付近で発生した気泡は、加速的に大きくなり、不作上端面は、約 0.07 秒後には炉心部を通過して、上部ブランケット部にはいり、0.10 秒でブランケット部を抜け、出口フレナムに達する。この間、ボイドの上方にあるナトリウムの液柱は、押し出され、フレナム内のナトリウムと混合される。

前述の計算モデルのところで説明したように、上部のフレナムに仮想的なボイドの凝縮コラムを考慮しているから、Fig. 6.3 中の、⑨と記した点（時間 0.098 秒）から、0.12 秒まで、気液界面がブランケット部より上方にあることになる。0.11 秒でその位置はピークとなり、その後下向きに反転して、急速に炉心部へと戻り、ほぼ発泡位置近くでボイドは消滅する。

上昇するときの速さは、Fig. 6.3 中の勾配から求められ

最大約  $10 \text{ m/sec}$  であるのに対し、リエントリ時には、それより速い約  $20 \text{ m/sec}$  の速さで落下してくる。

Fig 6.4 は ホイド内の圧力の時間的变化を示したものである。沸騰直前で  $1 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$  程度であった圧力は、ホイドの急激な成長とともに、 $1 \text{ msec}$  以内に  $1.85 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$  に上昇し、その後、徐々に圧力が上がっていくが、ホイド界面がフランケット域に達する  $0.07 \text{ sec}$  付近で急に低下しはじめ、 $200 \text{ kHz}$  程度の振動をしながら  $1.6 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$  程度まで下がり、フランケット域の上端にホイドが達すると、上部でシムのあるところで急激な凝縮がおこるため急に圧力が下がり、 $0.15 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$  を最低にして再び振動しながら  $1 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$  の値へともどっていく。

標準ケースの計算では、 $0.155 \text{ sec}$  付近でリエントリが完了し、気泡は消滅してしまう。このとき、液柱の衝突による衝撃圧が発生することが予想されるが、このモデルでは考慮に入れていない。

Fig. 6.3 において、リエントリの速さがエジェクション時よりも大きいのは、図 6.4 の圧力の変化をみれば納得できる。すなわち、エジェクション時には、移動するナトリウム液柱の質量が

はじめは大きく上方で小さくなるため、初期の加速度が小さいのに対し、リエントリ時には初期の質量が小さいため急激に加速されるものと思われる。

ボイドが負圧になるのは、炉心、フラッシュ部およびナトリウム蒸気凝縮がおこるからで、0.1秒程度の時間では、クラウドの温度はあまり変化しないことを考え合わせると、沸騰直前の温度分布が重要な因子になることがわかる。

次に軸方向の温度分布についての計算結果を示す。

(2) ナトリウム温度およびクラウド温度の時間変化。

Fig. 65は、沸騰開始後、ボイド上部のナトリウム液柱の軸方向温度分布が時間と共に変化する様子を示している。すなわち、横軸にナトリウム温度、たて軸に軸方向の位置を示し、パラメータに時間をとっている。

図中、実線で示したのはボイドが成長するとき（エジクション）のナトリウム温度であり、破線で示したのは、ボイドが小さくなるとき（リエントリ）のナトリウム温度分布である。ボイドの成長、消滅に直接さくのはボイド界面に接するナトリウム温度であり、ボイド上下端のナトリウム温度と、後述するクラウド温度（液膜温度に等しい）が重要な因子となる。点線で示したのは、液柱の最下端すなわちボイドに接する部分の液体温度の軌跡である。ボイド境界ナトリウム温度

が、①→②→③→④→⑤→⑥→⑦→⑧→⑨ の方向に、点線に沿って変化  
 するのは エジェクションの場合、逆に ⑧→⑦→⑥→⑤→④→③→②→①  
 と変化するの は リエントリーの場合である。

標準ケースを示した Fig. 6.3. について <sup>さらに詳しく</sup> 説明する。沸騰直  
 後、ナトリウム液柱温度は、図中の で表示された分布になっており、最高温度は、沸  
 騰開始点の  $950^{\circ}\text{C}$  で、炉心出口では  $895^{\circ}\text{C}$ 、ブランケット部で  
 は  $750^{\circ}\text{C}$  まで低下し、ブランケット出口付近では  $730^{\circ}\text{C}$  程  
 度の値を示している。

時間の経過と共に、空間に固定した座標系からみたナ  
 トリウム温度は急激に上昇していくが、ボイド上端面す  
 なわちナトリウム液柱に座標系を固定してみると、ほと  
 んど温度分布はかわらず、わずかに炉心からブランケット部  
 へと移行する領域で温度分布の変化がみられるだけである。この  
 ことは現象が  $0.1\text{ sec}$  程度のものであるから、フラッドと  
 の熱伝達による温度変化はほとんど無視できることを示  
 している。

ボイド境界ナトリウム温度は、ボイド上端面が ③→④ 付近におよぶまでは上昇  
 する。これは、炉心部で燃料によって熱せられるからと思われる。  
 しかし、その量は高々  $6^{\circ}\text{C}$  で、非常に小さい。⑤以後は、温

度か下がるが、⑨に至ってブラケット出口に達するまでわずか20°ほど下がるだけである。

出口ナトリウムアルミニウムを出たボイドは、アルミニウム中に仮想的に設けた流路内で凝縮し、かつ、チャンネルから放出されたナトリウムは、周囲の640°Cのナトリウムアルミニウムによって冷却され、沸騰後0.12秒で再びブラケット部にリエントリして(図中⑧、Fig 6.3 参照)くる。そのときの温度は端面で875°である。

その後さらにブラケット下方にはいるにつれて、より低い温度のクラウドにより、冷却され⑦→⑥→⑤---→④と温度が下がる。

Fig 6.5に示すように、リエントリ開始時点において、ボイド境界面のナトリウム温度は860°C程度であるのに対し、それより上方にある液柱のナトリウム温度はほぼ640°Cになっている(図中破線の最左端)。この温度は、ブラケット部から炉心へと流入するにつれて上昇するけれど、上昇分は小さく25°C程度である。ボイド境界ナトリウム温度が炉心にはいってからも低下していくのは、その上方のナトリウム温度が低いために熱伝導によって

冷却され、炉心での加熱が追いつかないためである。

Fig 6.6 は、標準ケースにおけるクラッドの軸方向分布の時間変化をみるため、炉心の代表点のクラッド温度と、ブランケット部の代表点のクラッド温度を時間に対してプロットしたものである。

図中  $\longrightarrow$  で記したのが、チャンネル入口からの距離  $z$  が 1.02 m の点でのクラッド温度であり、 ~~$\times \times \times$~~  で記したのが  $z = 1.39$  m の点でのクラッド温度である。また、比較のためボイドの温度も、プロットされている。

沸騰初期においては、炉心クラッド温度はボイド温度より高く、緩やかに上昇していく。この 0.025 sec までの区間は、今着目している位置までボイド上端面が達していないときで、温度上昇は燃料による加熱のためである。さらに、沸騰開始後 0.025 sec から 0.045 秒の間は、<sup>着目している</sup>クラッドの軸方向マッシュに液柱と液膜が共存している期間であり、液膜部と液柱部とを平均化しているためにクラッド温度がやや上昇している。図中 a と記した 0.045 sec 付近になると、クラッド温度はボイド温度に近い値を示し、その後は、液膜がドライアウトして断熱状態になる C 点まで、ボイド温度との差



はほとんどない。c点になると、冷却効果はなくなり、燃料による加熱のために温度が上昇していく。

一方、ブランケットのクラッド温度は、はじめ730℃程度であるが、炉心からの高温のナトリウムのために加熱されて急速に温度が上がり、b点では、ホイドに接するようになって炉心のクラッド温度との差がなくなる。その後c点でドライアウトした炉心部とは異なり、ブランケット部では液膜が残っているため、ホイドの圧力（従って温度）に支配されて温度が決まり、d点までホイド温度とほぼ等しい変化をする。d点はリエントリしてきた冷たいナトリウム液柱のためにクラッドが冷やされ始める点である。

上述のごとく、液膜は重要な因子であるが、次に、その厚さが蒸発もしくは凝縮によってどのように変化していくかを見てみよう。

### (3) 液膜厚さの時間的变化

Fig 6.7に軸方向各メッシュ2の液膜厚さを時間に対してプロットしたものを示す。図中、たて軸は、まがらわしさをさげるために各メッシュごとに座標軸をシフトしている。

が、時間軸の横軸は各々同一のものである。また、図中の数字はボイド内にある軸方向の液膜メッシュ数を示す。ボイドより下方にある液体がほとんど移動しないうちに流路閉塞事故では①と記したメッシュ点はそのまま最初に存在した液膜ということになり、図中の①～⑤は液膜の発生した（換言すればボイドが通過した）順序を示すこととなる。

今、標準ケースについて考えると、初期の液膜厚さを  $0.1\text{mm}$  としておるので、①の液膜厚さは  $0.1\text{mm}$  から始まり、時間の経過につれてわずかに増減があるが  $0.025$  秒付近まではほぼ  $0.1\text{mm}$  程度である。その後  $0.085$  秒で液膜がなくなるまで減少しつづける。②、③、④、⑤の液膜についても大体同様の傾向を示す。途中で振動しているのはボイドの左側の振動のためと思われる。(Fig 6.4参照)

## 6.2.2 パラメータの影響度

先にエジェクションおよびリエントリに影響すると思われるパラメータを調べた。ここでは、標準ケースを対象とし、パラメータを各々変化させてそれらの影響度を調べてみよう。影響度を判定するときの一つの基準としてボイドの界面の位置と、時間の関係とを試みることにする。

### (1) 初期過熱度

Fig 6.8 は初期過熱度  $\Delta T_s$  を 50, 100, 200°C と変えた場合のボイドの位置の違いを表わしたものである。結果は歴然としている。ブランク出口にボイドが達するまでの時間は  $\Delta T_s$  が 200°C の場合は  $\Delta T_s$  が 50°C の場合の半分以下である。ブランク部までリエントリし始め、液体がブランク部にはいり始めるまでに要する時間は、過熱度が 200°C の場合は、40 msec であるのに対し、50°C のときは 20 msec で、大きい過熱度のときの方がリエントリまでの時間が長い傾向がある。しかしながら、一度リエントリし始めると、リエントリが完了するまでに要する時間（ブランク部=液柱がはいり始めてから、気泡が崩壊してしまうまでの時間）は  $\Delta T_s = 200^\circ\text{C}$  では 25 msec であるが  $\Delta T_s = 50^\circ\text{C}$  では、35 msec

と、 $\Delta T_s$ が大きい方が速い。

仮想的に設けたブランケット上部のナトリウムプレート内でボイド端面が上昇する最高点は、過熱度が大きい方が高いこともわかる。

液柱運動の駆動力 になっているのは蒸気の圧力である。その全体の様子は Fig. 6.4 で既に示した。ここでは初期 ( $\mu\text{sec}$  オーダーのもの) について、 $\Delta T_s$  および次に述べる凝縮係数  $C$  の値の影響度を示したのが Fig. 6.9 である。 $\Delta T_s$  の大きい方がいかに大きいかわかる。図中一実鎖線を示したのは過熱度分を飽和温度に加えたところの沸騰時のナトリウム温度に対し、その飽和圧力を示したものである。すなわち、もし現象が緩やかならばこの一実鎖線上の圧力を示すはすのものであるから、ここで計算した圧力の値と一実鎖線との差が実沸の程度を表わしているといえる。

凝縮係数  $C$  の大きい方は、時間がきわめて短い間 (約  $10^{-5}$  秒) までは、大きく大きく、それ以後は、 $\Delta T_s$  の特性に飽和してしめて差違は著しく無い。しかも、初期の  $10^{-5}$  秒間程度は、液柱の慣性力のため、現象を支配するまでに至らない。

このことを証明しているのが、次のCの書き方を示した図である。

## (2) 凝縮係数

Fig. 6.10はCの値を0.1と0.5にとった場合の差違をみたものである。結果はほとんど違いがないうえ、とくにエжекシヨンの初期においては完全に一致している。エжекシヨンの後半、およびリエントリ時になると、凝縮係数の大小がきいてくるので図のような差違が表われくるものであろう。

## (3) 初期液膜厚さ

Fig. 6.11に液膜の厚さの差かどの位きくかを示す。液膜はボイドの蒸発源とみなされる。従って、もし液膜がなければボイドの成長も抑制されるし、その意味でうすい液膜が早期にドライアウトしてしまえば、現象に変化を与えるはずである。Fig. 6.7でも示したように、液膜が最初にドライアウトするのは、0.85秒後(0.1 mm厚さのとき)である。従って影響するとすればそれ以後であらう。図は、このことを明確にいうあらわしている。液膜が厚いほどボイド圧の低下が遅れ、従ってリエントリ開始時刻も遅れることになる。

#### (4) ブランケット部発熱量

ブランケット部の発熱量が異なると、沸騰直前のナトリウム、クラッドの軸方向温度分布が異なり、ボイドの成長に影響することが考えられる。

Fig 6.12 は ブランケットのパワを 0.07, 0.14, 0.21  $\frac{kW}{cm}$  と変えた場合のボイドの位置の違いをみたしのである。一般にブランケット部は沸騰直前には炉心より温度が低く、ボイドはブランケット部で一部凝縮する。ブランケットのパワが高く、沸騰直前のクラッド温度が高ければ凝縮量も少なくボイド成長の抑制効果も小さくなる。

図は、このことを明らかに示しているが、その効果はあまり大きくない。

#### (5) 空間メッシュの数

本計算コードはモンテカルロ、エネルギーの式の差分法による数値解を求めているので、メッシュの数が解に影響していないことをチェックする必要がある。

Fig 6.13 は、標準ケースの場合のメッシュ数(炉心 10, 上部ブランケット 4)を2倍にした場合の結果を、標準ケースのものと比較したものである。沸騰開始時刻がなれてくるの

は、メッシュの腹で位置ぎめをしているからであり、玉注クシンの時の差違は沸騰開始点のずれによるものであるから本質的ではなく、一致は満足すべきものといえる。

しかし、リエントリ時については、かなりのくいちかいかみられ、今後の問題点となろう。

### (6) 気泡核の大きさ

初期泡の大きさは、沸騰初期のボイド圧力変化に影響しそうだから、 $10^{-4}$  と  $10^{-3}$  (m) の値で比較してみたが、ボイドの位置等の影響はなかった。これは、凝縮係数の大か沸騰初期でさかない理由と同じ理由のため、すなわち初期 ( $10^{-6}$  sec オーダー) のボイド圧力の高低は液体の慣性のためにはさかないためと思われる。

### 6.2.3 ポンプ事故に伴う凶騰

チャンネル入口が閉塞され、その結果、流量が低下し、凶騰する現象は6.2.1および6.2.2で解析した。この場合、チャンネル入口にある閉塞物の効果、およびチャンネル入口の圧力がまだ定格であることに等しい効果のため、ボイドは下方には成長せず、従って、リエントリーも上部からのものしか見られなかった。

チャンネル入口の圧力が出口の圧力と同じ等しいかつ、閉塞物の邪魔のない場合、ボイドは上下両方に成長することが予想される。この場合の事故は、ポンプトリップ等によって、流量低下する事故にその一例が見える。

すなわち、ポンプが何らかの原因によって、一定の時間数で、その押し込み圧力を低下させた場合、チャンネル入口の圧力は、同じ同じ時間数で低下するものと思われる。

ここでは、圧力低下の時間数が1.0 secの場合、および0.1 secの場合について、凶騰現象を解析して見た。チャンネル入口の圧力の低下に伴って、チャンネル流量は低下する。SUSIE-IIの計算では、圧力低下の関数、およびそれに伴う流量低下を次式で与えている。



$$P_{\lambda 0} = (P_1 - P_2) e^{-t/\tau} + P_2 \quad (6.5)$$

$$W = \left[ (P_1 - P_2 - \rho h g) * (2 * D \rho S^2) / \lambda h \right]^{1/2} \quad (6.6)$$

こゝに	$P_{\lambda 0}$	チャンネル入口の圧力 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
	$P_1$	定常時の入口圧力 ( " )
	$P_2$	出口 " ( " )
	$\tau$	コ-スタタウ-ンの時定数 ( $\text{sec}$ )
	$\rho$	Naの平均密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
	$g$	重力加速度 ( $\text{m}/\text{sec}^2$ )
	$D$	チャンネルの等価直径 (m)
	$S$	流路断面積 ( $\text{m}^2$ )
	$h$	長さ (m)
	$\lambda$	圧力損失係数

Fig. 6.14に計算結果を示す。  $\tau = 1.0 \text{ sec}$  の場合、沸騰開始時には流量が約20%であり、流体の攪拌等の影響もあるため、ボイドは下方へは成長せず、ブラケット領域に入って、つぶれる。

$\tau = 0.1 \text{ sec}$  の場合、沸騰開始時には流量はほぼ零となり、しかも、チャンネル入口と出口の圧力がほぼ等

しい。Fig. 6.13 にも見られるように、ボイドは振動してあり、下方から、一度抜け落ちると、準静定的な約  $0.4 \text{ sec}$  でつぶれている。

$\tau = 0.1 \text{ sec}$  の場合と流路閉塞事故の場合の計算結果とを Fig. 6.15 に比較して示す。これから、次のことがわかる。

- (i) ボイド発生量はほとんど同じである。
- (ii) 流路閉塞ではボイドの成長は上方だけであるが、圧力低下の場合は上下に成長する。
- (iii) 単一ボイドの寿命が圧力低下の場合は、流路閉塞の場合の約 3 倍である。

上述した (ii) および (iii) の現象は相関関係がある。すなわち、流路閉塞の場合、ボイドが下方に成長しないため、ボイド領域のうち、炉心部（ホットゾーン）の占める割合はボイドの成長に伴って減少する。リエントリを麻痺する頃は、炉心部の一部はすでにドライアウトしている。従って、リエントリ後、再びボイドを成長させるだけの蒸気量は得られず、比較的短時間でつぶれる。一方、圧力低下の場合、ボイドは下方にも成長するため、炉心部のボイド全体に占める割合が流路閉塞の場合

に比べて大きく、蒸発量がその分だけ大きくなるため、  
振動しつつではあるがボイド寿命が長くなる。

但し、現実に起る事故としては、 $T=0.1\text{ sec}$ のまうを入口  
圧力低下は考えにくく、流路閉塞の場合の方が一般的  
では無いかと思われる。

## おまけ

本受託研究で作成した SUSIE-II コードにより、リエントリまで含めた単チャンネル内の沸騰の挙動を計算により求めることができた。

本研究で明らかになった主な事柄は

- (1) 入口流路閉塞事故（流量が定格の 1% に低下）の場合、ナトリウム炉心へのリエントリは、ここで考慮したパラメータの範囲で必ず起こる。
- (2) ポンプトリップ事故などの入口圧力の減少事故では、ボイド上下端の位置は時間的に振動し、下方へとボイド端面が抜けることもある。
- (3) ボイドの運動の様子を典型的に示しているのは、流路閉塞事故では Fig 6.3, 入口圧力減少事故では Fig 6.14 である。
- (4) 現象に支配的な最大の因子は過熱度であり、凝縮係数の値にはあまり依存しない。また、液膜の厚さ、沸騰直前の温度分布の違いも、かなり影響を与える、等のことがわかった。

今後の問題点として、

- (1) リエントリの開始時点に影響するフランク部外でのボイドの取扱いを実際に即したものにすること。
- (2) リエントリして消滅してしまった気泡が、再度同一の位置もしくは、他所から成長をはじめ、沸騰がおこる場合のことも取り扱えるようにすること。この場合、複数個の気泡（ピストン型ボイド）ができる可能性があるので安定性等のところが問題になる。
- (3) 入力にしている各種のパラメータの、より一層のつめと行うことにより、実際に合ったものにすること。

そして、

- (4) 1アセンブリ単位（多チャンネル）の現象の解析へ応用する場合の手法の検討等  
が考えられる。

## 謝 辞

本コードは動力炉・核燃料開発事業団の委託により、  
 開発工を行ったものである。開発に当たっては、同事業団内部  
 のFBR安全研究（事故解析）専門委員会において、数々  
 の御指導、御検討をいただいた。同委員会の

安 成文 主査

近藤駿介 氏

ほかの委員諸氏にも厚く謝意を表す。

また、データの提供等の他で本コード開発に積極的に  
 御協力下さった、動力事業団FBR本部の

川口 信 氏

大坪 章 氏

にも厚く謝意を表す。

## 記号表

T	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
t	時間 (h)
c	比熱 ( $\text{Kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )
k	熱伝導度 ( $\text{Kcal}/\text{cm}^{\circ}\text{C}$ )
Q	発熱量 ( $\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}$ )
r	半径方向の距離 (m)
$q_g$	ギャップ熱流束 ( $\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}$ )
$h_g$	ギャップコンダクタンス ( $\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ )
$\alpha$	熱拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{h}$ )
Nu	ヌッセルト数
Pe	ペクレ数
D	等価直径 (m)
z	チャンネル入口からの距離 (m)
W	流量 ( $\text{kg}/\text{h}$ )
S	管路断面積 ( $\text{m}^2$ )

$\eta$	蒸発率	( $\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )
$h_{fg}$	蒸発潜熱	( $\text{Kcal}/\text{Kg}$ )
$f_R$	凝縮係数	
$R$	気体定数	( $\text{Kg} \cdot \text{cm}^3/\text{EU} \cdot ^\circ\text{C}$ )
$T_f$	液膜表面温度	( $^\circ\text{C}$ )
$T_v$	ボイド温度	( $^\circ\text{C}$ )
$A$	1モルのナトリウム重量	( $\text{Kg}/\text{EU}$ )
$N$	ボイド内の蒸気重量	( $\text{Kg}$ )
$V$	ボイド体積	( $\text{m}^3$ )
$v$	ボイド界面向移動速度	( $\text{m}/\text{h}$ )
$g$	重力加速度	( $\text{cm}/\text{h}^2$ )
$\lambda$	圧力損失係数	
$\zeta$	オリフィス係数	( $\text{m}^{-1}$ )
$l$	液膜の厚さ	( $\text{m}$ )



## 参考文献

- (1) R.M. Singer & R.E. Holtz : On the Role of Inert Gas in Incipient Boiling Liquid Metal Boiling. *Int. J. Heat Mass Transfer* 12 (1969) PP. 1045-1060
- (2) R.E. Holtz & H.K. Fauske : The Prediction of Incipient Boiling Superheats in Liquid Metal Cooled Reactor Systems, *Nuclear Engineering and Design* 16 (1971) pp. 253-265
- (3) Edward & Hoffman : ANL-7100 (1965) p. 515  
Superheat with Boiling Alkali Metals
- (4) A.F. Mills & R.A. Seban : The Condensation Coefficient of Water, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 10, (1967), pp. 1815-1827
- (5) Pezzilli et al : The NEMI model for Sodium Boiling and Its Experimental Basis. ASME 1970 Winter Meeting.
- (6) J.M. Kay : *Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Cambridge Press (1957) p. 170

Table 1.1 Main Different Features between SUSIE and SUSIE-II  
 表 1.1 SUSIE と SUSIE-II の主要相違点

	SUSIE	SUSIE-II
計算の基本モデル	単気流モデル	単気流モデル
乗数因子	乗数周壁熱熱量変化	流路周壁熱熱量変化、チャンネル入口圧力変化(スクラム考慮可)
リエントリー	否	リエントリーの計算可能
液膜、被覆の温度計算(半値法)	各々をメッシュにおいて計算	兩者を一体として平均的に取扱う(液膜と被覆は同じ温度とする；但し、3晩後の計算のみ)
時間メッシュ	一定時間中でモジュール	自動的にメッシュ調整(ポイントの圧力変化に依存)

Table 5.1 Library  
表 5.1 ライブラリ

properties of water

温度 T(C)	体積 ガス比容 V(103/100)	飽和圧力 P(Atm)	温度 T(C)	体積 ガス比容 V(103/100)	飽和圧力 P(Atm)	温度 T(C)	体積 ガス比容 V(103/100)	飽和圧力 P(Atm)
0.000E+03	0.170E+03	0.103E-01	0.000E+03	0.170E+03	0.231E-01	0.000E+03	0.919E+02	0.322E-01
0.020E+03	0.082E+02	0.442E-01	0.040E+03	0.510E+02	0.297E-01	0.020E+03	0.571E+02	0.501E-01
0.050E+03	0.301E+02	0.100E+00	0.700E+03	0.235E+02	0.138E+00	0.720E+03	0.185E+02	0.178E+00
0.100E+03	0.147E+02	0.227E+00	0.750E+03	0.110E+02	0.255E+00	0.780E+03	0.956E+01	0.361E+00
0.200E+03	0.761E+01	0.540E+00	0.800E+03	0.049E+01	0.522E+00	0.840E+03	0.533E+01	0.670E+00
0.300E+03	0.445E+01	0.821E+00	0.850E+03	0.375E+01	0.787E+00	0.900E+03	0.318E+01	0.119E+01
0.400E+03	0.271E+01	0.100E+01	0.900E+03	0.255E+01	0.105E+01	0.960E+03	0.201E+01	0.194E+01
0.500E+03	0.174E+01	0.227E+01	0.100E+04	0.151E+01	0.204E+01	0.102E+04	0.132E+01	0.305E+01
0.100E+04	0.110E+01	0.551E+01	0.100E+04	0.102E+01	0.403E+01	0.105E+04	0.906E+00	0.460E+01
0.110E+04	0.805E+00	0.525E+01	0.112E+04	0.718E+00	0.592E+01	0.114E+04	0.642E+00	0.668E+01
0.116E+04	0.570E+00	0.751E+01	0.118E+04	0.518E+00	0.642E+01	0.120E+04	0.408E+00	0.941E+01
0.122E+04	0.425E+00	0.105E+02	0.124E+04	0.364E+00	0.110E+02	0.126E+04	0.299E+00	0.129E+02
0.128E+04	0.310E+00	0.142E+02	0.131E+04	0.291E+00	0.157E+02	0.135E+04	0.234E+00	0.193E+02
0.140E+04	0.191E+00	0.205E+02	0.145E+04	0.158E+00	0.301E+02	0.150E+04	0.151E+00	0.364E+02
0.150E+04	0.111E+00	0.450E+02	0.155E+04	0.239E-01	0.517E+02	0.165E+04	0.604E-01	0.607E+02
0.170E+04	0.095E-01	0.707E+02	0.175E+04	0.605E-01	0.817E+02	0.180E+04	0.527E-01	0.937E+02
0.185E+04	0.404E-01	0.107E+03	0.190E+04	0.411E-01	0.121E+03	0.195E+04	0.367E-01	0.136E+03
0.200E+04	0.329E-01	0.152E+03	0.205E+04	0.290E-01	0.170E+03	0.210E+04	0.265E-01	0.188E+03
0.215E+04	0.244E-01	0.207E+03	0.220E+04	0.223E-01	0.223E+03	0.225E+04	0.205E-01	0.249E+03
0.230E+04	0.169E-01	0.272E+03	0.235E+04	0.174E-01	0.295E+03	0.240E+04	0.162E-01	0.320E+03
0.245E+04	0.151E-01	0.345E+03	0.250E+04	0.141E-01	0.371E+03			

Table 5.2 Input Format of SUSIE-I (1)

表 5.2 SUSIE-I の入力形式

TITLE <sup>1)</sup>				10X, 6E15
1) タイトル				
RFUEL <sup>2)</sup>	RCLDF <sup>3)</sup>	RCLDL <sup>4)</sup>	DLIQI <sup>5)</sup>	10X, 6E10.3
2) 燃料半径 (cm)    3) 被覆内半径 (cm)    4) 被覆外半径 (cm)				
MFUEL <sup>6)</sup>	MCLD <sup>7)</sup>	MLIQ <sup>8)</sup>		10X, 6I10
6) 燃料の半径方向メッシュ数    7) 被覆の半径方向メッシュ数    8) 冷却の半径方向メッシュ数				
MZME <sup>9)</sup>				10X, 6I10
9) 軸方向の領域数				
ZREQ(I) <sup>10)</sup>	I=1, MZME			10X, 6E10.3
10) 軸方向領域 I の長さ (cm)				
MZRE(I) <sup>11)</sup>	I=1, MZME			10X, 6I10
11) 軸方向領域 I のメッシュ数				
PINPH <sup>12)</sup>				10X, 6E10.3
12) ヒート管節距 (cm)				
HEATPH(I) <sup>13)</sup>	HEATPL(I) <sup>14)</sup>	HEATAA(I) <sup>15)</sup>	[注1] (MZME 枚数)	10X, 6E10.3
13) 領域 I の最大出力 (kW/cm)				
14) での最大出力の位置 (チャンネル入口から節距) (cm)				
15) での出力分布の傾度				

[注1] 出力は次式で与えられる  $Q_z(z) = \text{HEATPH}(I) * \cos \{ \text{HEATAA}(I) * (z - \text{HEATPL}(I)) \}$  (kW/cm)

THODEM <sup>1)</sup>	DENFR <sup>2)</sup>
----------------------	---------------------

1) 燃料の理論密度 (Kg/m<sup>3</sup>)      2) 燃料密度の理論密度に与える比

10x, 6E10.3

TEMNAI <sup>3)</sup>	PRES1 <sup>4)</sup>	PRES2 <sup>5)</sup>
----------------------	---------------------	---------------------

3) チャンネル入口温度 (°C)      4) チャンネル入口圧力 (Kg/cm<sup>2</sup>)      5) チャンネル出口圧力 (Kg/cm<sup>2</sup>)

10x, 6E10.3

FLOWI <sup>6)</sup>	ARAMI <sup>7)</sup>	HFACI <sup>8)</sup>
---------------------	---------------------	---------------------

6) チャンネル流量 (Kg/hr)      7) チャンネルの圧損係数      8) 燃料・被覆ギャップコンダクタンス (Kg/cm<sup>2</sup>h°C)

10x, 6E10.3

SPHEAT <sup>9)</sup>	CPI <sup>10)</sup>	CP4 <sup>11)</sup>
----------------------	--------------------	--------------------

9) 最終温度 (°C)      10) 凝縮係数      11) 初期燃料の径 (cm)

10x, 6E10.3

DTIME <sup>12)</sup>	TMAX <sup>13)</sup>	EPS <sup>14)</sup>
----------------------	---------------------	--------------------

12) 時間メニュー中 (sec)      13) 計算打切時間 (sec)      14) 定常値収斂計算の精度

10x, 6E10.3

ISKIT <sup>15)</sup>	ITIMEM <sup>16)</sup>
----------------------	-----------------------

15) 出力の時間メニューマップ      16) 当該初期の時間メニューの細分

10x, 6E10

NVRVL <sup>17)</sup>	(註2)
----------------------	------

17) 事故種数

8x, I2, 7E10.3

INVRVL <sup>18)</sup>	VRVL(I) <sup>19)</sup>	I=1.7	(註3)
-----------------------	------------------------	-------	------

18) 事故種数のパーセント      19) 同左項数の係数

8x, I2, 7E10.3



Table 5.4 Accident Types and Their Functions  
 表 5.4 事故の種類とその関数

NVRVL	Type	INVRVL	Function
1	流量減少 (管路閉塞に よる)	0  1	$f = (1 - VRVL(2)) e^{-VRVL(1)t + VRVL(2)}$  $f = VRVL(2)$ (ステップ関数) f は流量変化率
2	入口圧力変化	0	$P = (P_1 - P_2) e^{-VRVL(1)t} + P_2$  $P_1, P_2$ は入口、出口の初期圧力
3	管径変化 オリフィス径変化		—
4	発熱量変化*	0	$h = 1 + (VRVL(2) - 1) e^{-VRVL(1)t}$ h は発熱量変化率

\* 反応度ネトバック、あるいはスクラムを考慮するときは NVRVL を 2 桁の数字で用いる。  
 現在使用できるものは、次のとおりである。

NVRVL      INVRVL      Function

4.2

0

$$P = (P_1 - P_2) e^{-VRVL(1)t} + P_2$$

管路閉塞後 VRVL(3) の状態でスクラムが起き

$$h = e^{-VRVL(4)t}$$

Table 5.5 Example of Out Put

表 5.5 出力示例

SEL= 0.000E+00 I= 4231 TIME= 0.750E+00 IMESH= 0.230E-10  
 0.937 0.942 0.657 1.304 0.574E-02

PUMP TO GAS IN GAS	0.157E+00	0.200E+00	0.400E-01							
LOW FLWD	500.513	536.133	526.130	907.072	905.027	802.601	856.434	805.339	798.351	
LOW FLWD	121.321	636.271	642.330	476.630	464.116	460.583	459.799	455.449	424.810	
LOW FLWD	440.413	533.130								
UP FLWD	950.578	948.047	948.023	929.048	928.650	895.632	894.449	747.565	738.481	
UP FLWD	120.663	129.733	730.677	733.943	727.378					
IFUEL CENTER	556.785	504.613	579.122	575.313	1203.904	1979.135	1642.615	2048.649	2179.201	
IFUEL CENTER	2100.797	2054.608	1853.430	1611.599	665.324	369.595	874.175	878.766		
IFUEL SURFACE	405.643	432.722	437.914	501.748	797.413	913.335	1011.303	1090.688	1146.183	
IFUEL SURFACE	1102.413	1101.659	1114.912	1043.635	774.674	765.055	768.203	776.409		
IFLWD	449.063	457.297	402.410	465.833	654.309	741.919	816.202	878.908	927.230	
IFLWD	974.393	572.261	949.936	916.316	746.431	729.869	732.424	743.427		
IFLEM	950.578	950.613	950.578							
SIFLEM	0.903E-04	0.100E+13	0.101E+13							
GFLEM	0.110E+07	0.105E+07	0.110E+07							

SEL= 0.000E+00 I= 4301 TIME= 0.751E+00 IMESH= 0.230E-10  
 0.937 0.942 0.657 1.304 0.574E-02

PUMP TO GAS IN GAS	0.157E+00	0.200E+00	0.400E-01						
LOW FLWD	500.613	536.133	526.130	907.072	905.027	802.601	856.434	805.339	798.351
LOW FLWD	121.321	636.271	642.330	476.630	464.116	460.583	459.799	455.449	424.810
LOW FLWD	440.413	533.130							
UP FLWD	950.578	948.047	948.023	929.048	928.650	895.632	894.449	747.565	738.481
UP FLWD	120.663	129.733	730.677	733.943	727.378				
IFUEL CENTER	556.785	504.613	579.122	575.313	1204.017	1979.135	1642.615	2048.669	2179.211
IFUEL CENTER	2100.614	2054.620	1853.422	1611.020	665.340	369.009	874.168	878.769	
IFUEL SURFACE	405.651	432.733	437.930	501.783	797.406	913.335	1011.383	1090.174	1146.271
IFUEL SURFACE	1102.304	1101.715	1114.900	1043.613	774.707	765.072	768.243	776.430	
IFLWD	449.063	457.297	402.410	465.833	654.310	741.925	816.203	878.919	927.250
IFLWD	974.403	572.274	949.934	916.324	746.431	729.869	732.424	743.427	
IFLEM	950.578	950.613	950.578						
SIFLEM	0.903E-04	0.100E+13	0.101E+13						
GFLEM	0.110E+07	0.105E+07	0.110E+07						



Table 6.1 INPUT DATA FOR MONJU  
表 6.1 主要入力データ

半径方向メッシュ	燃料 (10), 被覆 (3), 液膜 (2)
軸方向メッシュ	下部ブランケット (5), 燃料 (10) 上部ブランケット (5)
ピッチ	0.00790 m
燃料密度	理論密度 ( $1.10 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ ) $\times$ 0.87
チャンネル入口温度	390.0 °C
チャンネル入口圧力	$4.12 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$
チャンネル出口圧力	$1.0 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$
チャンネル流量	$3.76 \times 10^2 \text{ kg/h}$
ギャップコンダクタンス	$7.33 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2\text{h}$
過熱度	50 °C
凝縮係数	0.1
初期気泡半径	$1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$

Table 6.2 PARAMETERS

表 6.2 パラメータの値

ケース	$\Delta T_{sc}$	$S$	$C$	$r$	$Q_b$	$MZ$	参照図
単位	$^{\circ}C$	mm		mm	$KW/cm$		
標準	50	0.1	0.1	0.1	0.07	炉心・175 フィート 10・4	6.3
過熱度の 影響	100	*	*	*	*	*	6.8
	200	*	*	*	*	*	
液膜厚さ の影響	*	0.3	*	*	*	*	6.11
	*	0.5	*	*	*	*	
収縮係数	*	*	0.5	*	*	*	6.10
気泡核大さ	*	*	*	1	*	*	—
フラクツト 発熱量	*	*	*	*	0.14	*	6.12
	*	*	*	*	0.21	*	
軸方向 ムシ数	*	*	*	*	*	20・8	6.13

(注) \* は 標準ケースと同一の数値。

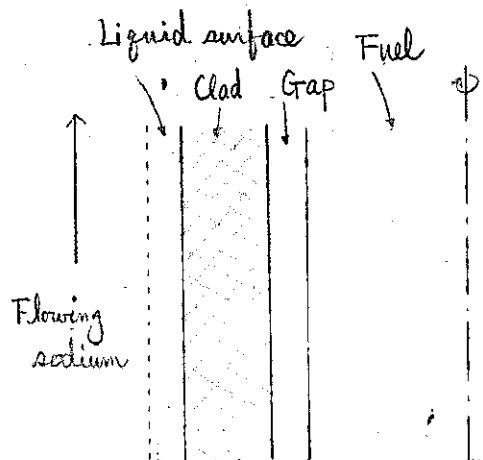


図 1.1 燃料と被覆温度計算のモデル

Fig. 1.1 Model of Calculation of Temperature Distribution in Fuel and Clad

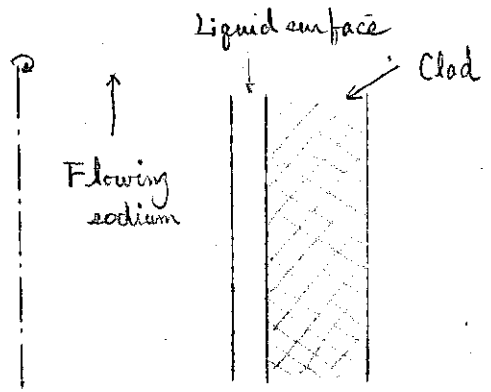


図 1.2 流れているナトリウムの温度計算モデル

Fig. 1.2 Model of Calculation of Temperature Distribution in Flowing Sodium

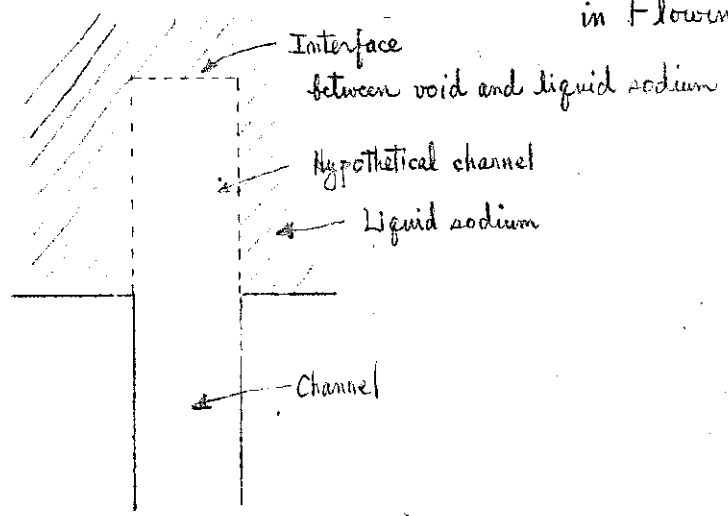


図 1.3 チャンネル外のボイド境界モデル

Fig. 1.3 Model of Boundary surface between Void and Sodium outside the Channel.

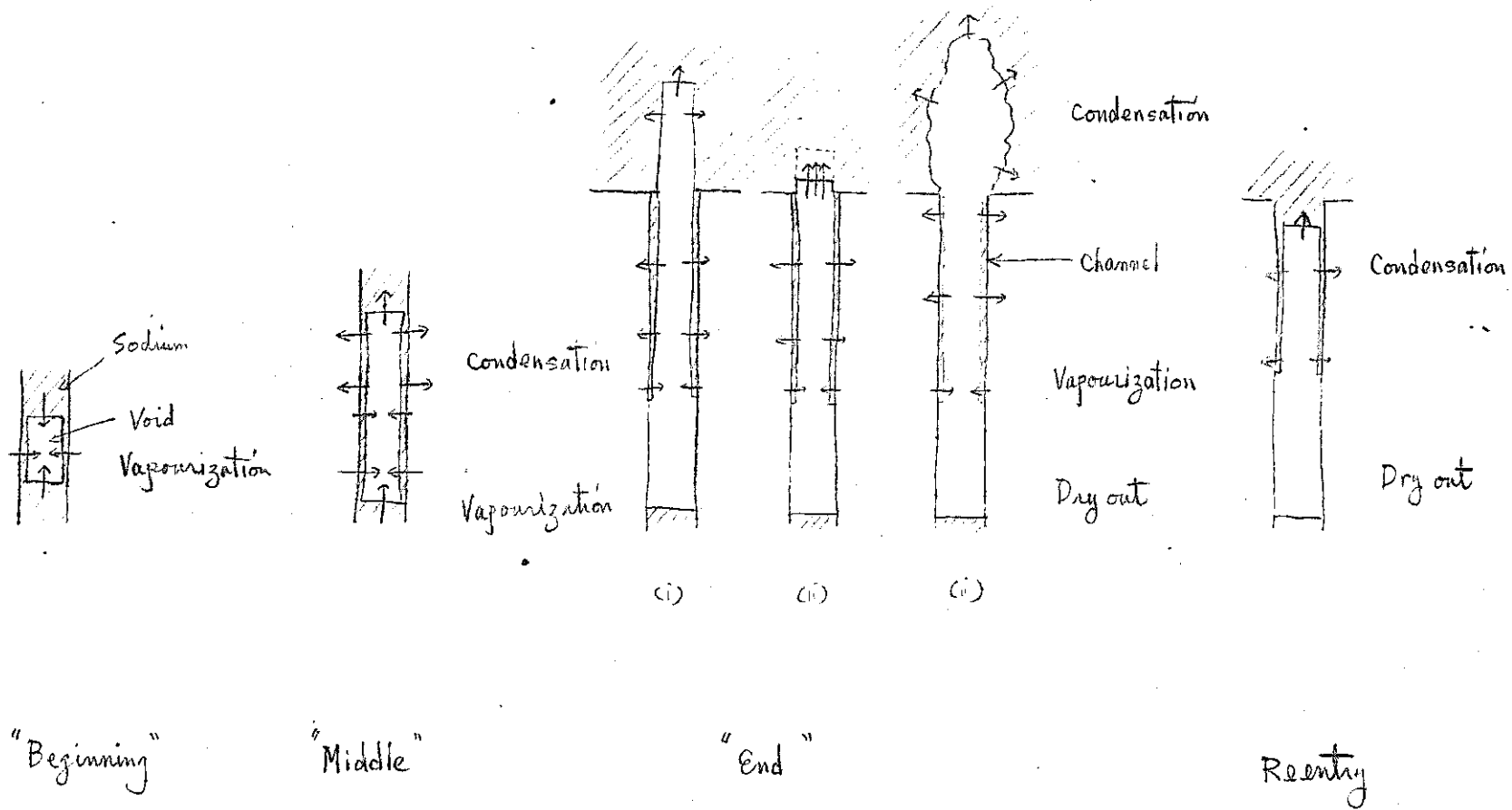


図 2.1 蒸発凝縮のモデル

Fig 2.1 Model of Vaporization and condensation in void

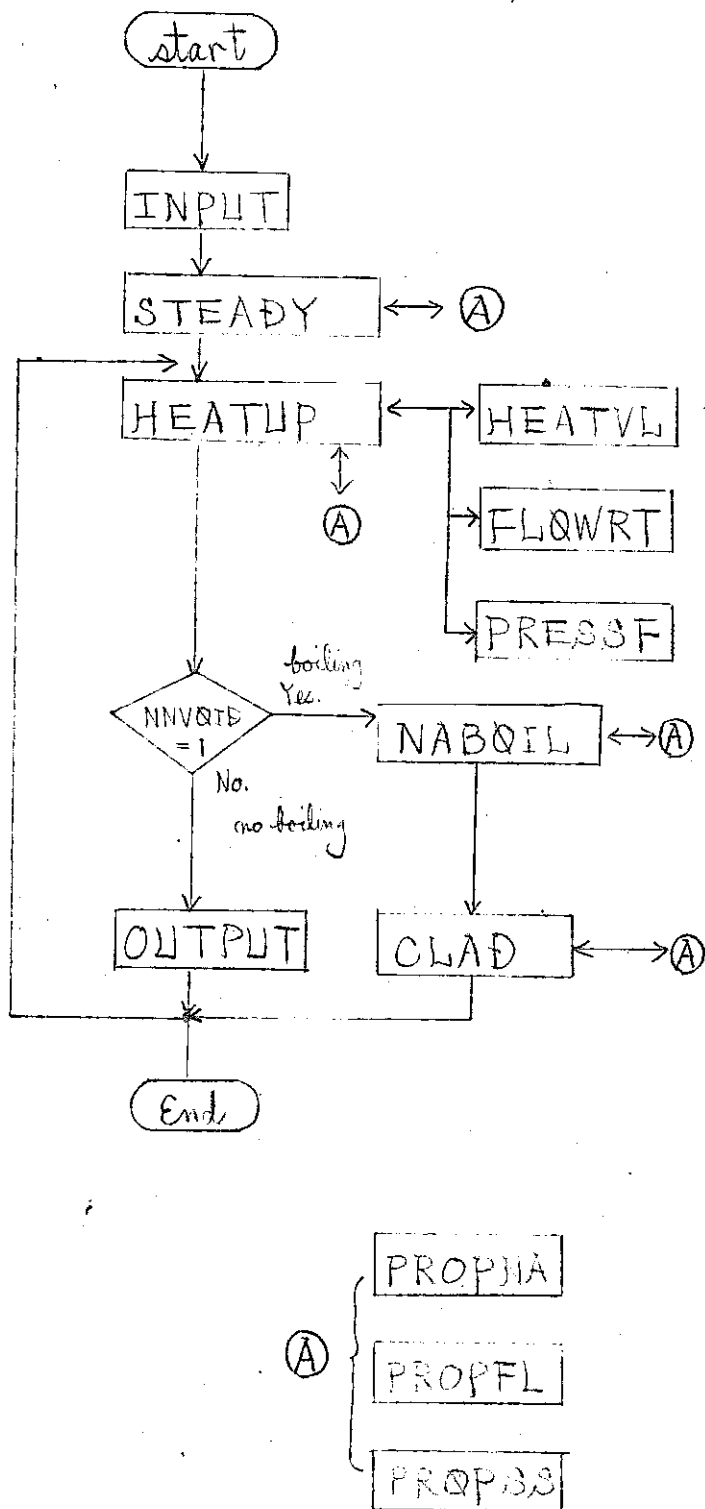


図 4.1 SUSIE-IIのブロック線図  
 Fig. 4.1 Block Diagram of SUSIE-II

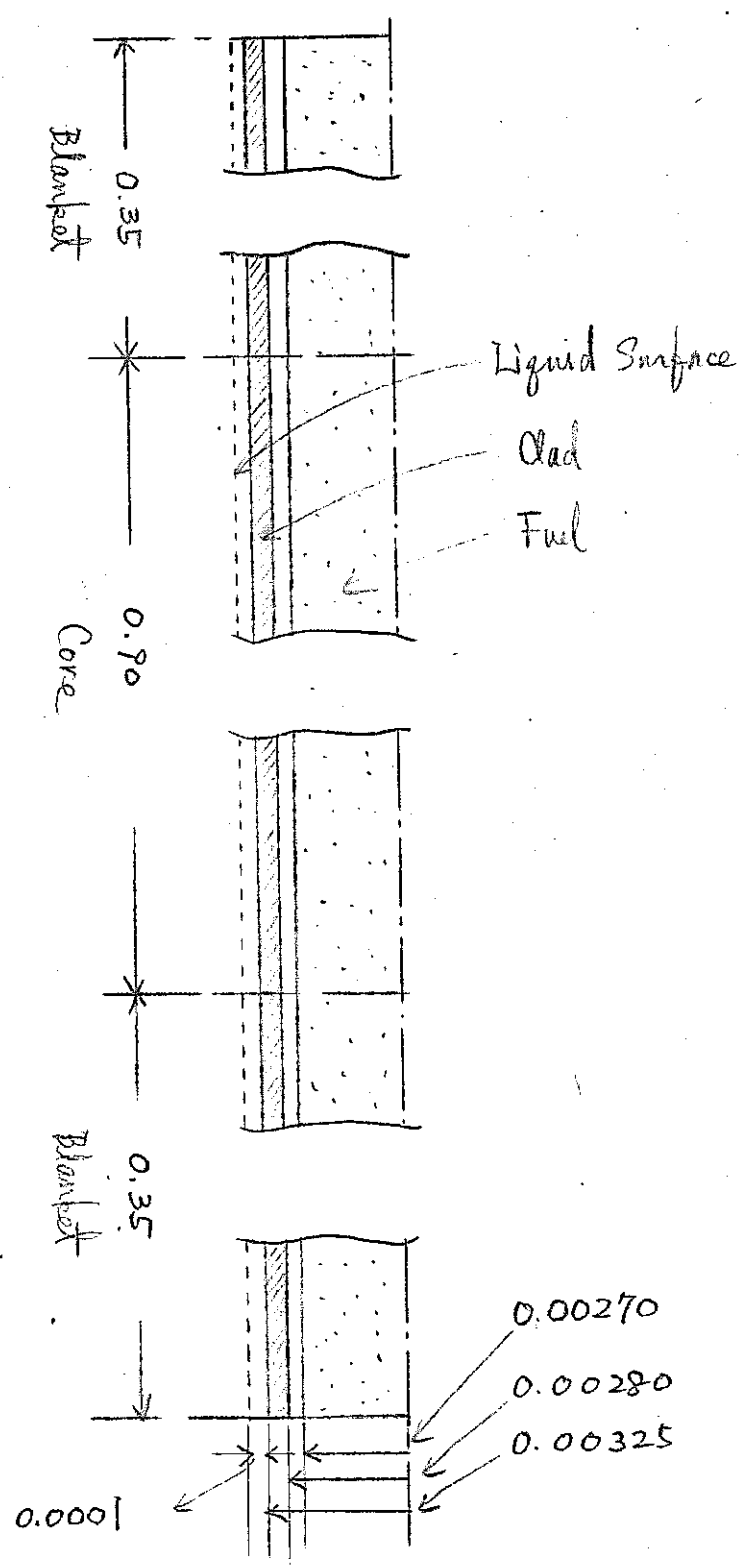


図 6.1 燃料ピン寸法 (井ノ口計算)  
 Fig. 6.1 Dimension of Fuel and Channel

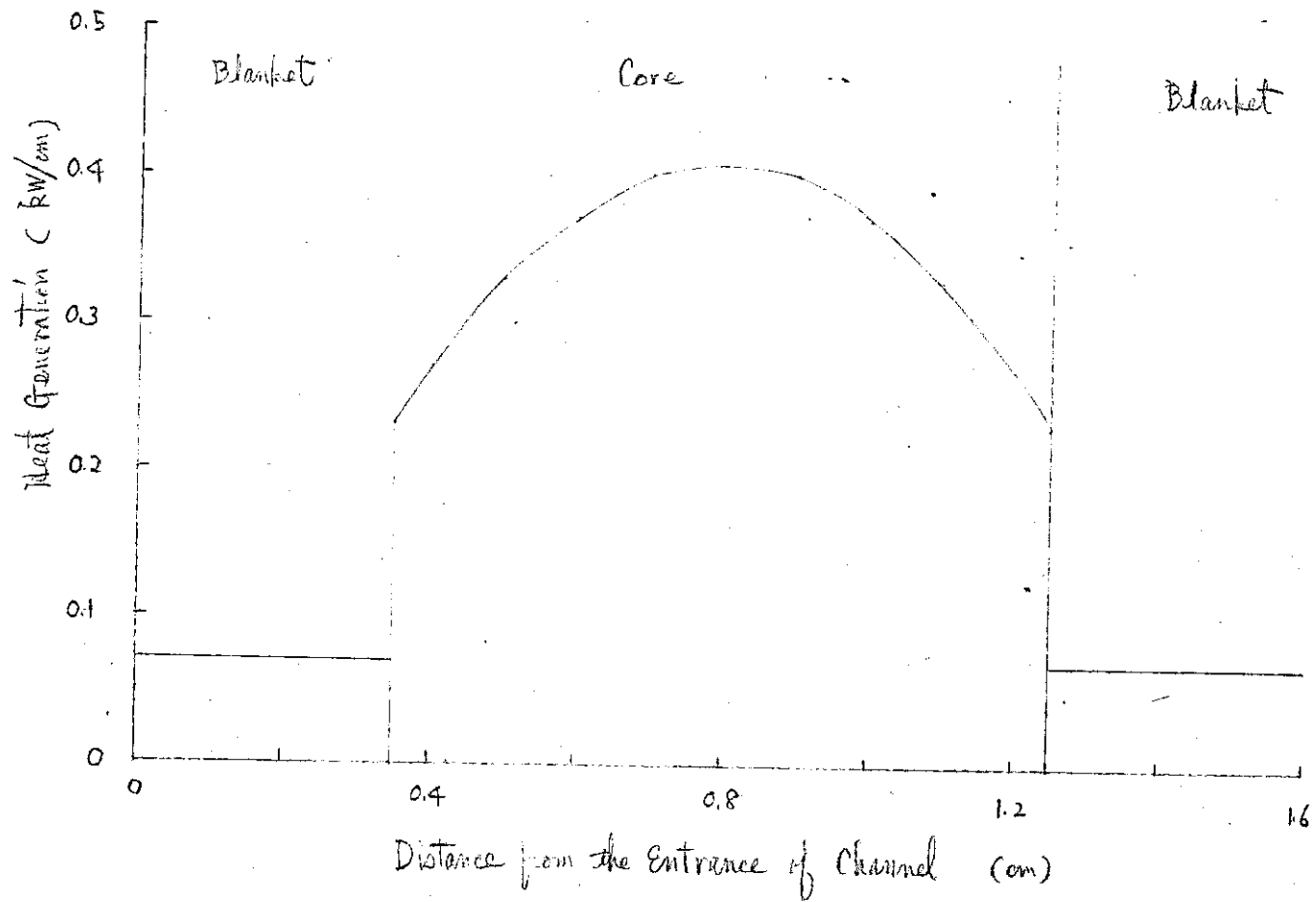


图 6.2 燃料中热量分布

Fig. 6.2 Distribution of Heat Generation in Fuel

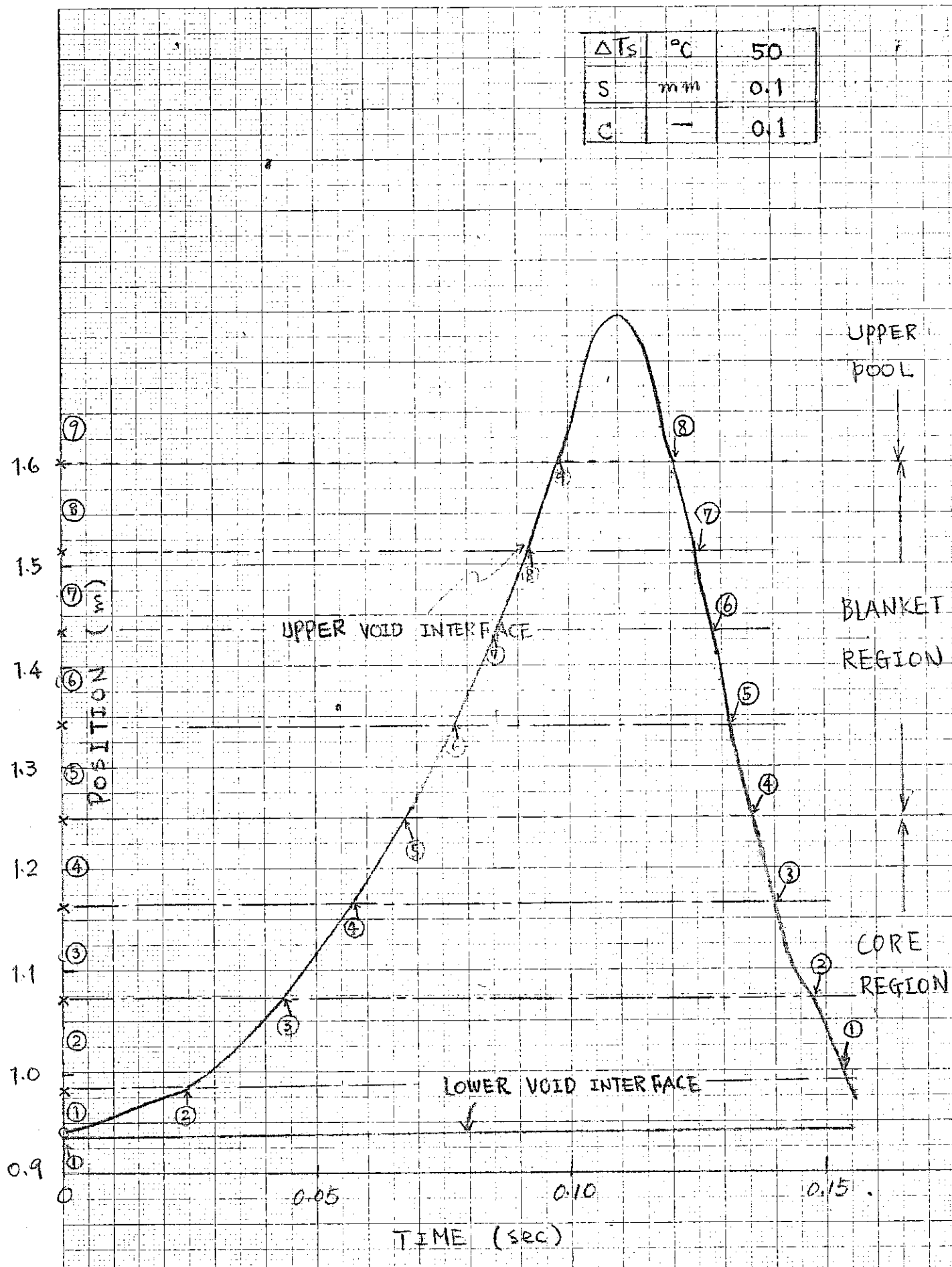


図6.3 SA-402 燃料棒端面の時間変化 (標準ケース)

Fig. 6.3 TIME DEPENDENCE OF VOID INTERFACE POSITION



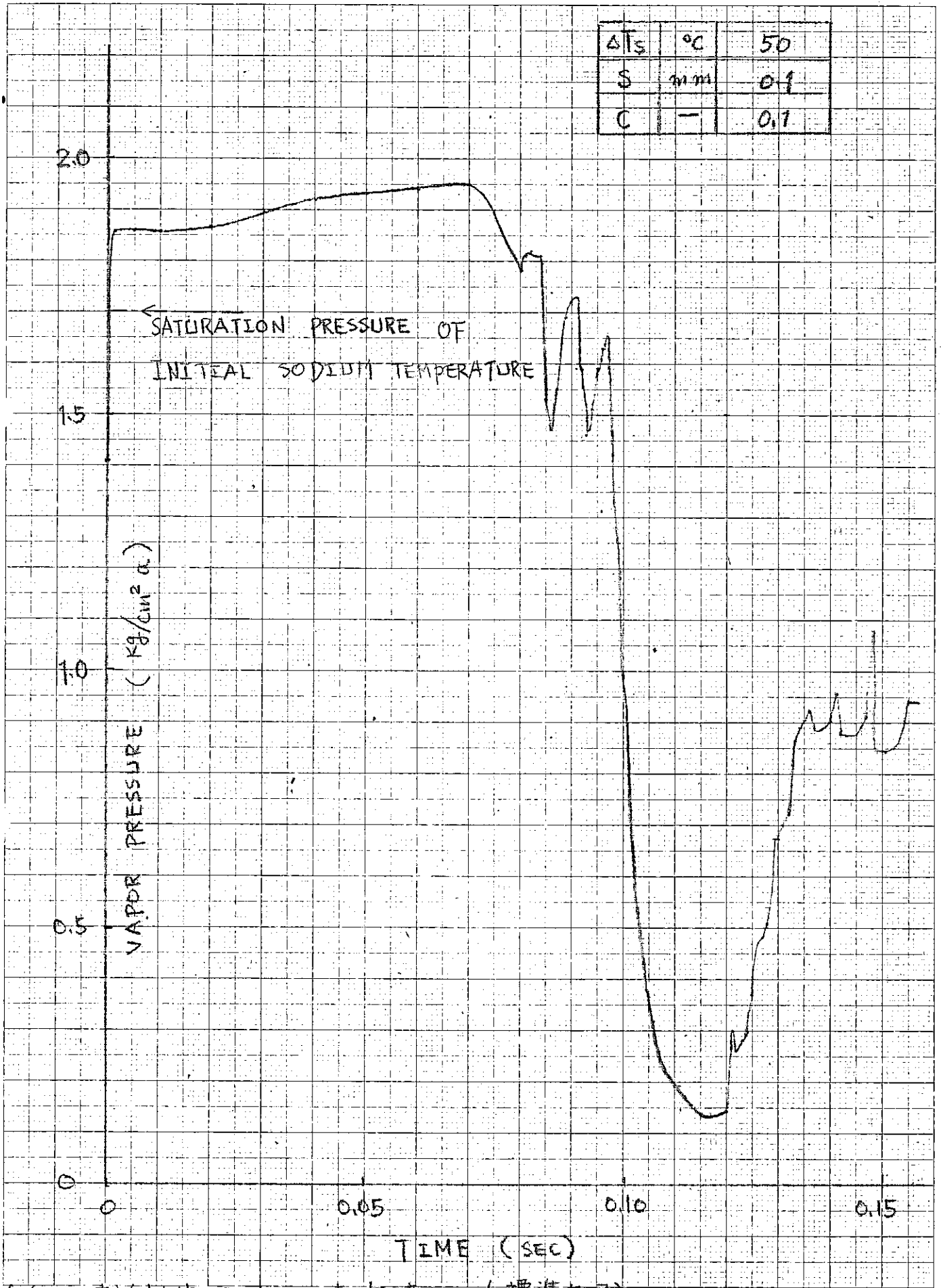


図6.4のa) 和体内圧力の時間変化 (標準ケース)  
 fig 6.4 TIME DEPENDENCE OF VOID VAPOR PRESSURE

CASE	$\Delta T_s$	C	S
BASIC	50	0.1	0.1

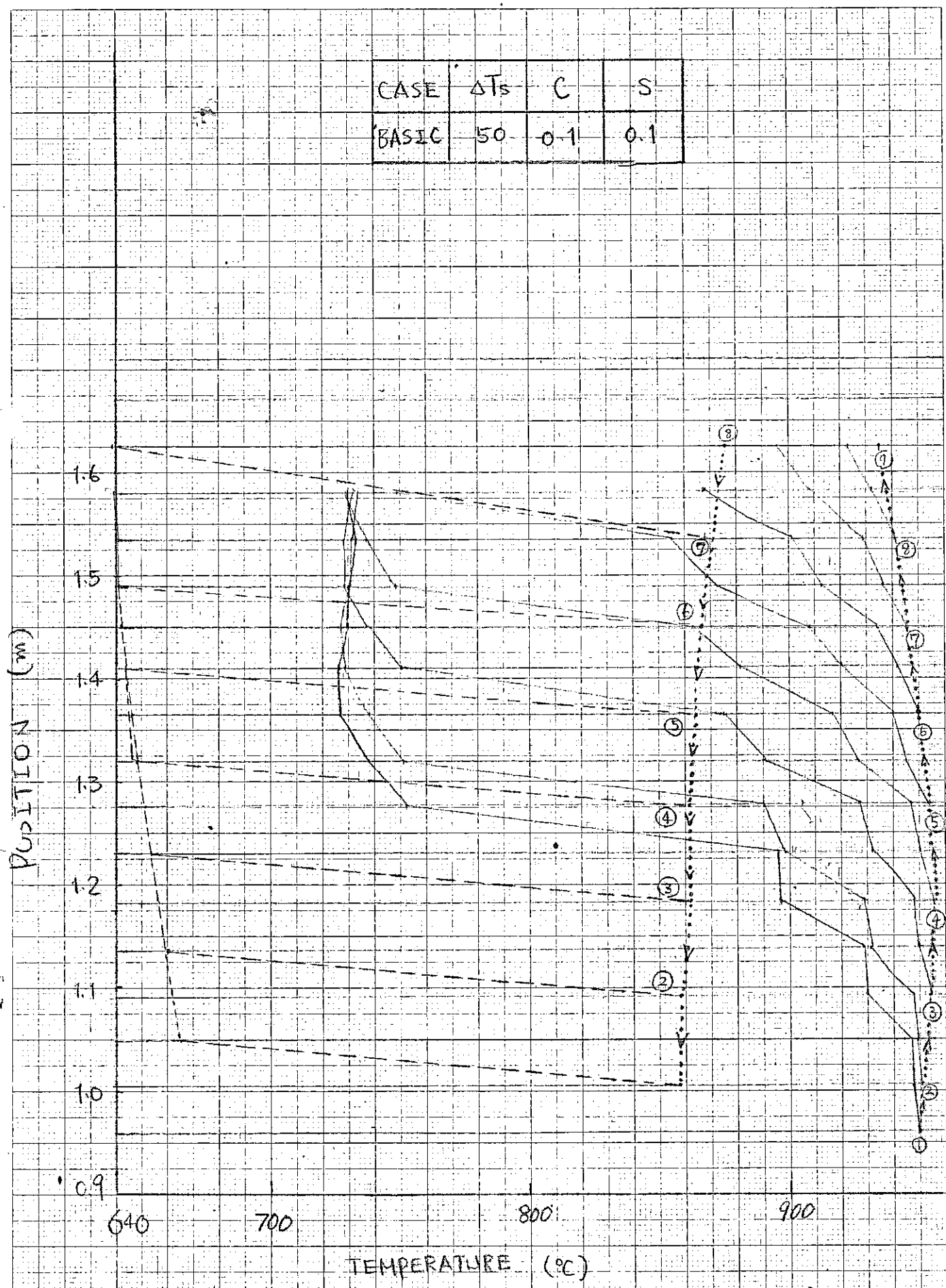


図6.5 液体柱上部の温度分布の時間変化 (標準ケース)  
 Fig 6.5 TIME DEPENDENCE OF LIQUID COLUMN TEMPERATURE

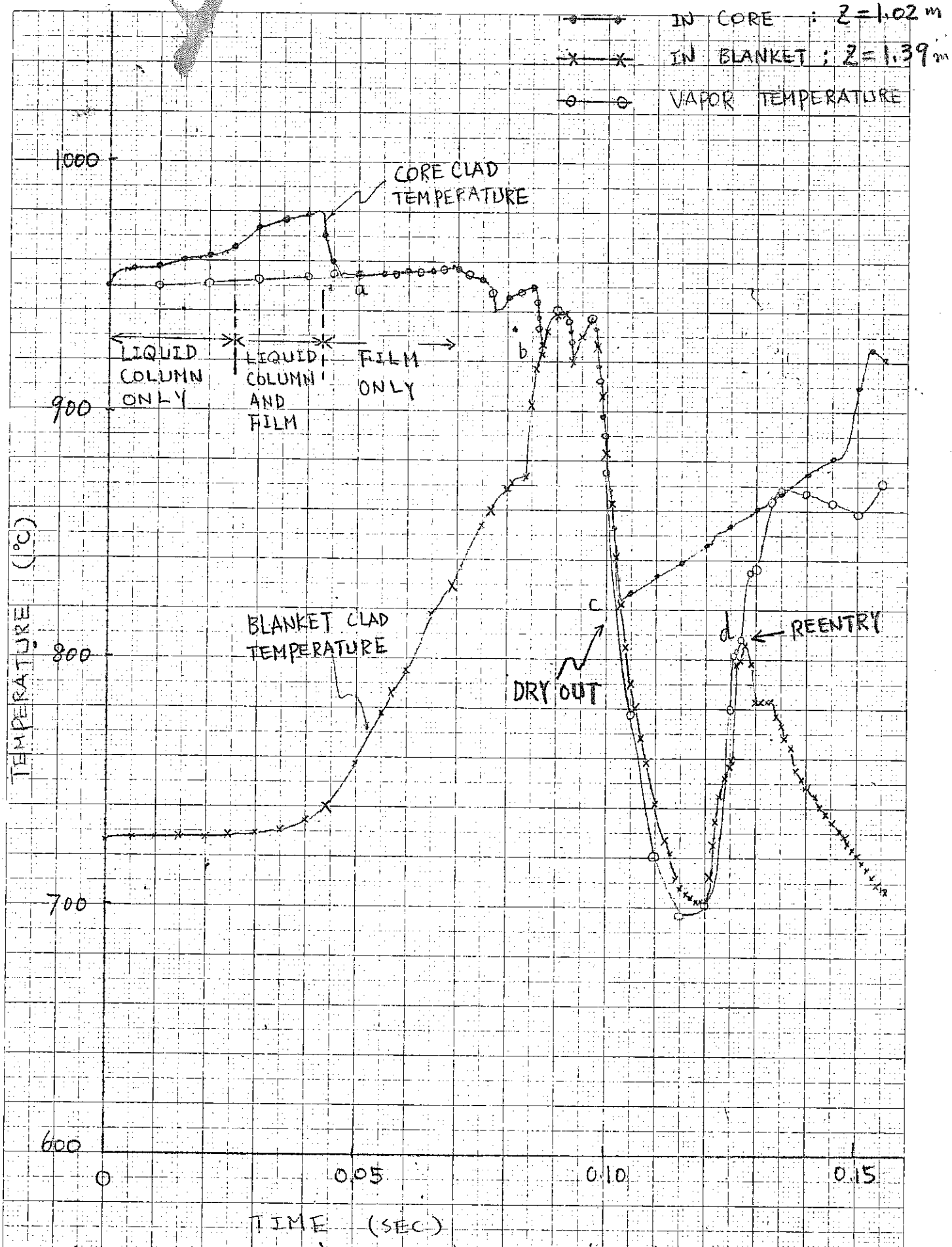


図 6.6 クラッド温度の時間変化 (標準ケース)  
 Fig 6.6 TIME DEPENDENCE OF CLAD TEMPERATURE

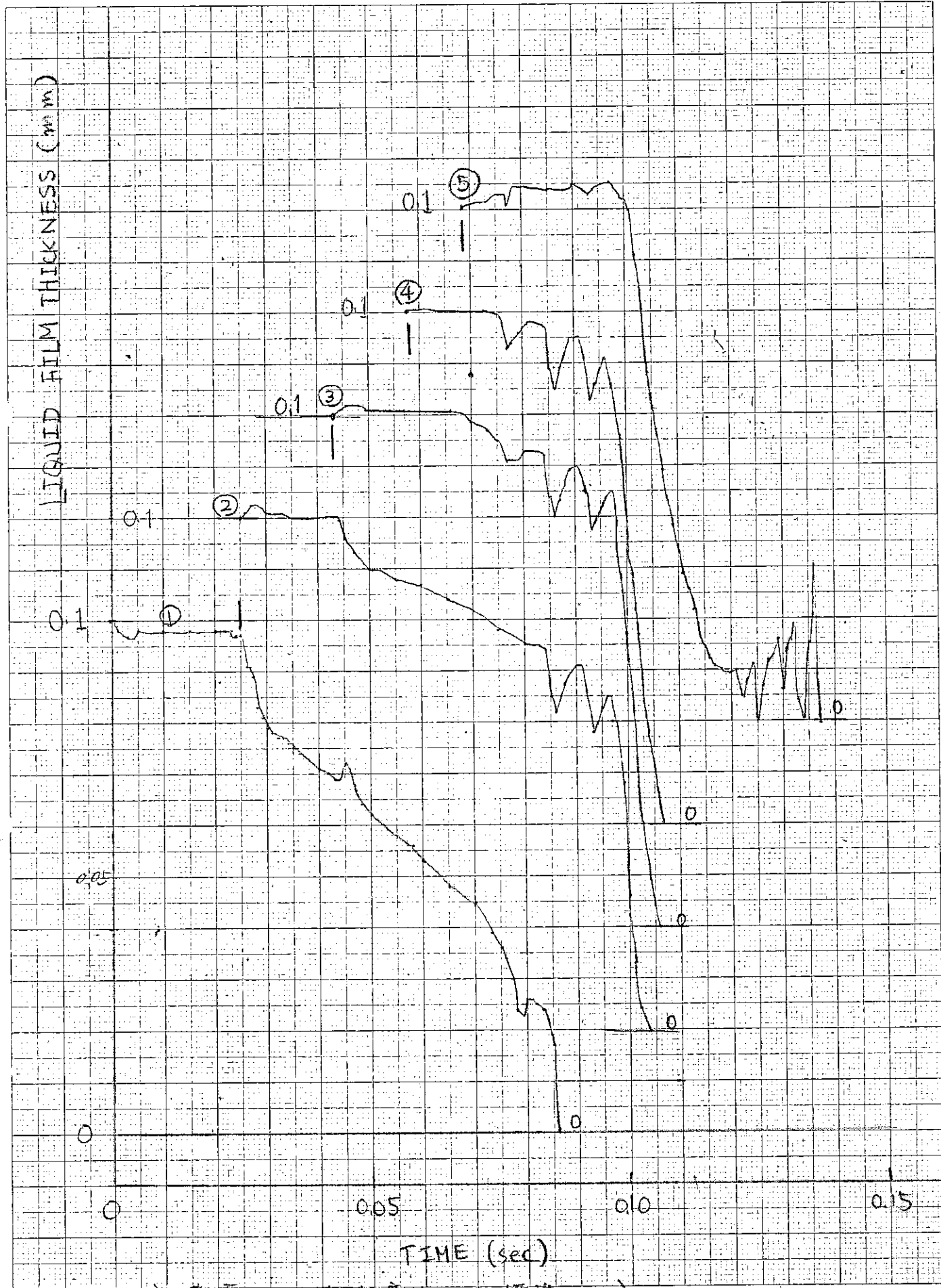


図 6.7 180° 液膜厚さの時間変化 (標準ケース)

Fig 6.7 TIME DEPENDENCE OF FILM THICKNESS

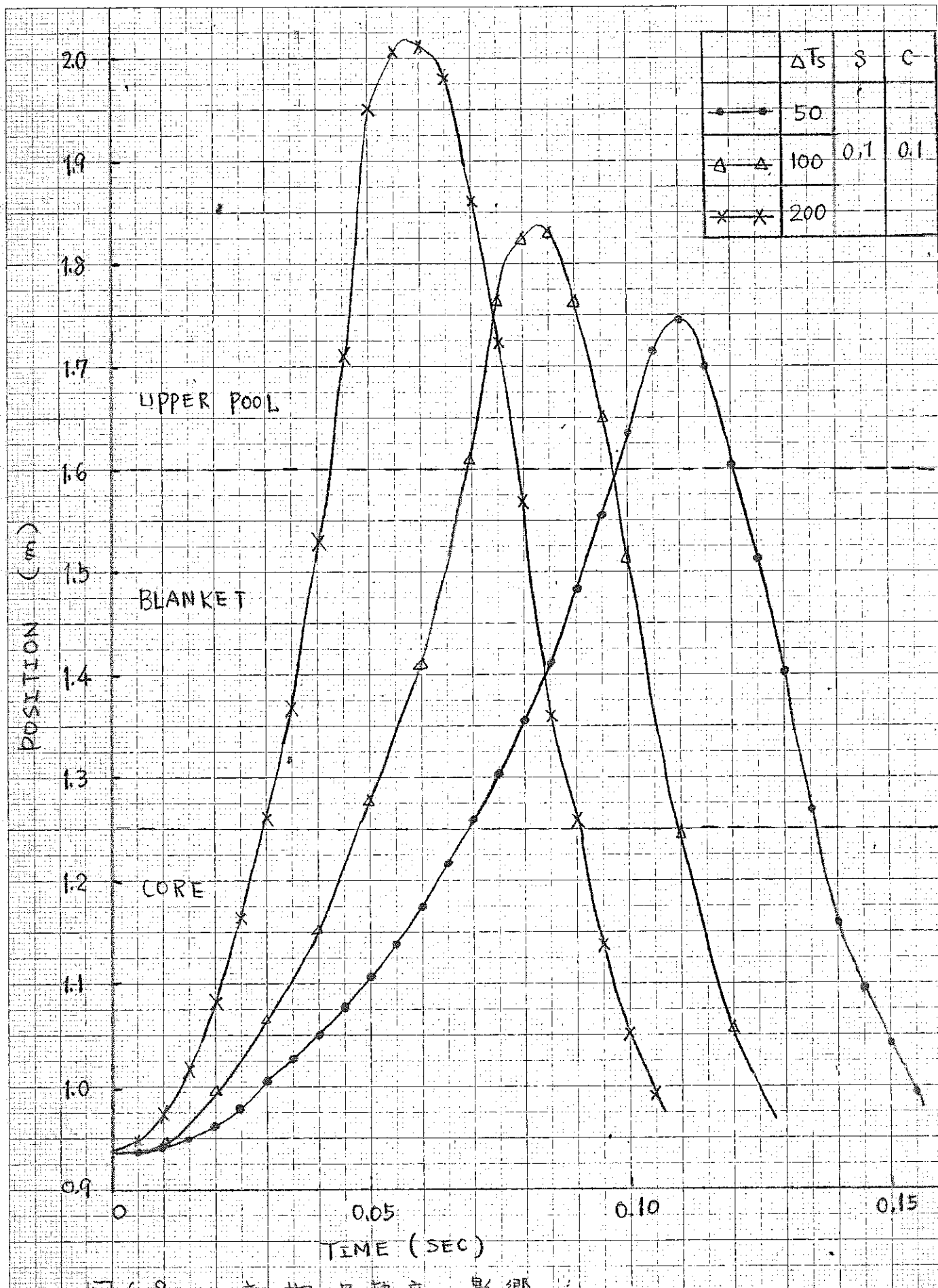


図 6.8 初期過熱度の影響

Fig 6.8 EFFECT OF SUPERHEAT ON VOID POSITION

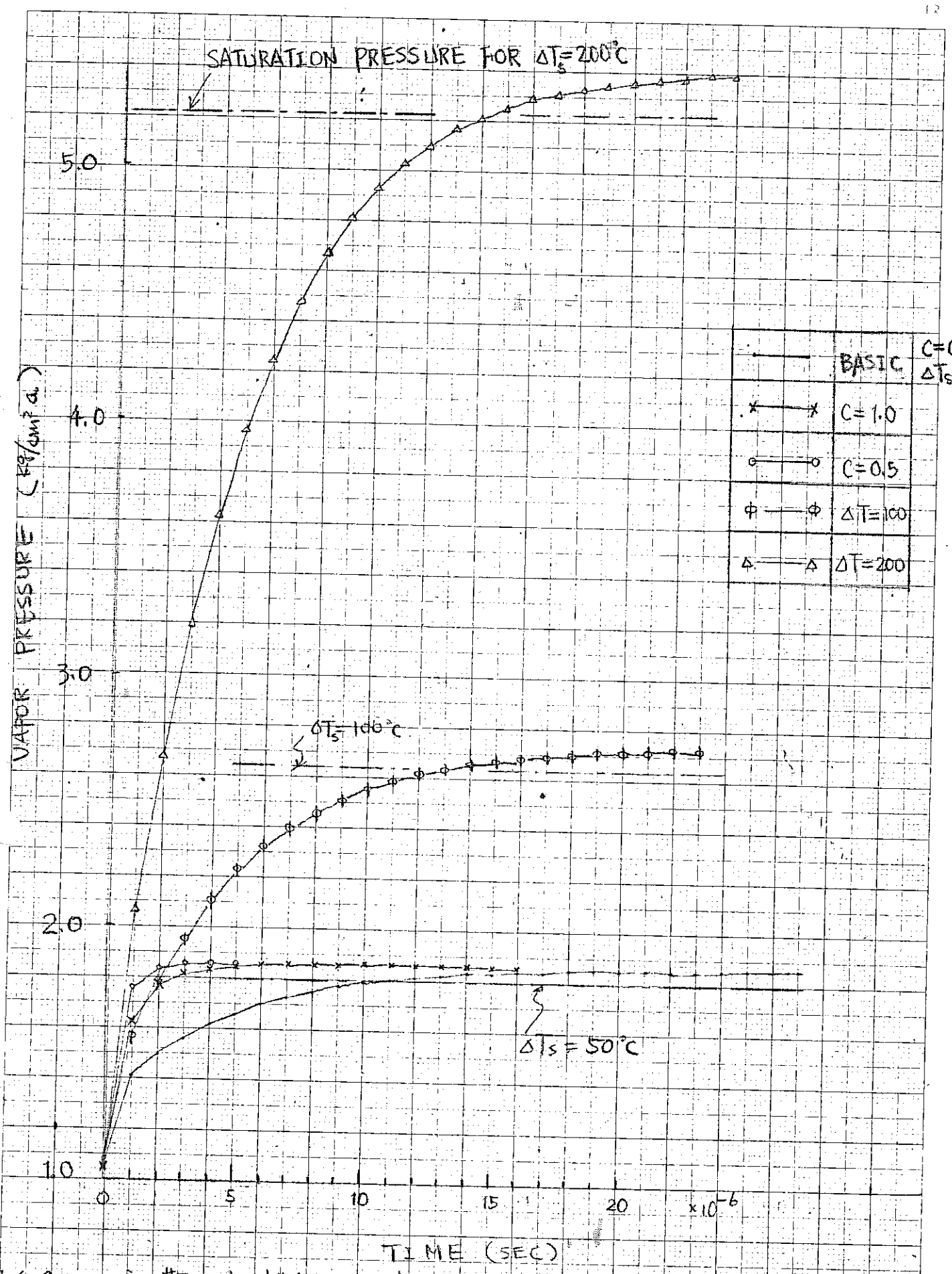
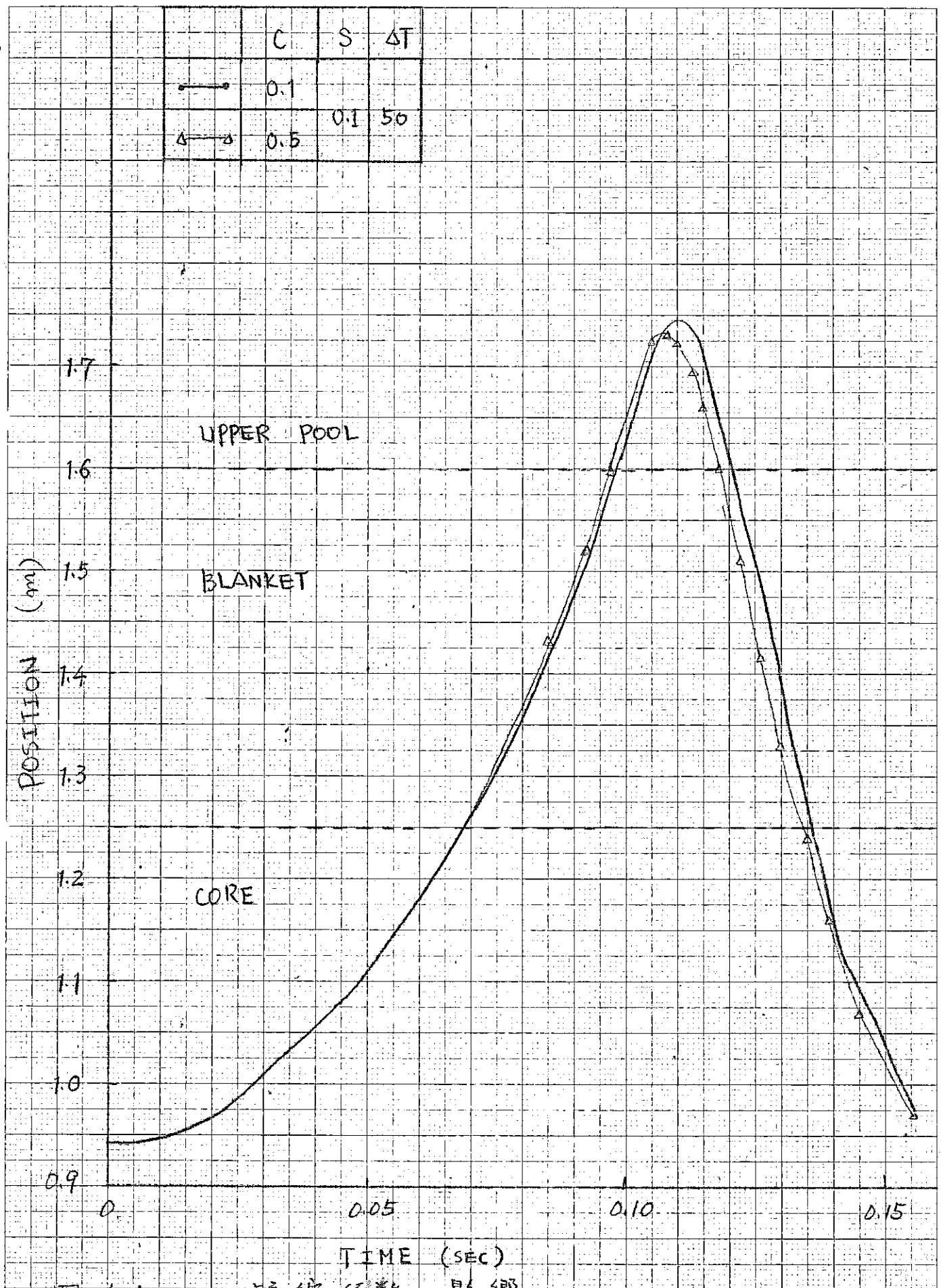


图 6.9 初期 水計管内圧力の変化  
 fig 6.9 TIME DEPENDENCE OF VAPOR PRESSURE AT INITIAL STAGE



JIS A 図 16 × 10 mm

凝縮係数の影響

Fig 6.10

EFFECT OF CONDENSATION COEFFICIENT ON VOID POSITION

1 頁目

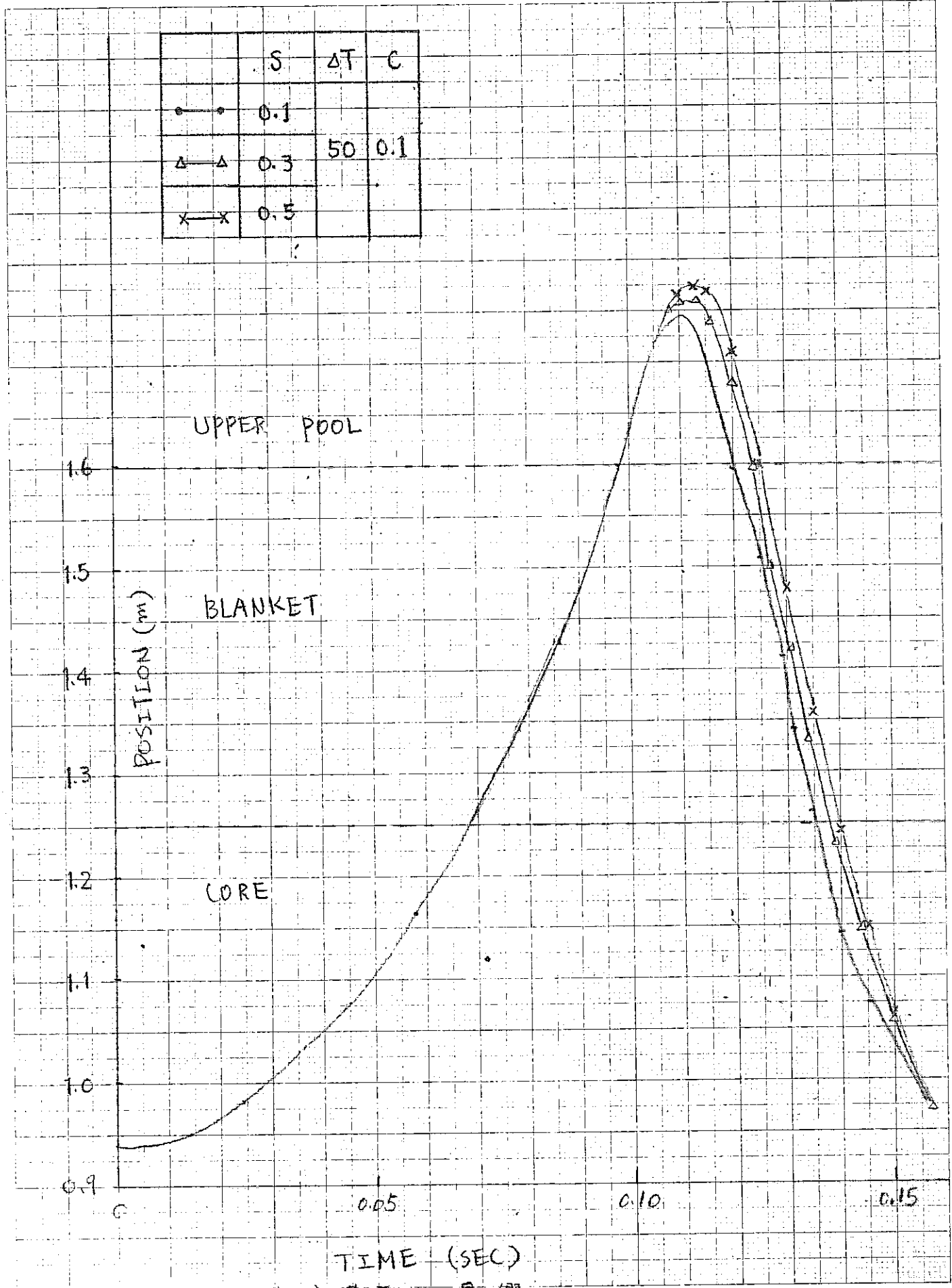


図 6.11 初期液膜厚さの影響

Fig 6.11 EFFECT OF INITIAL FILM THICKNESS ON VOID POSITION



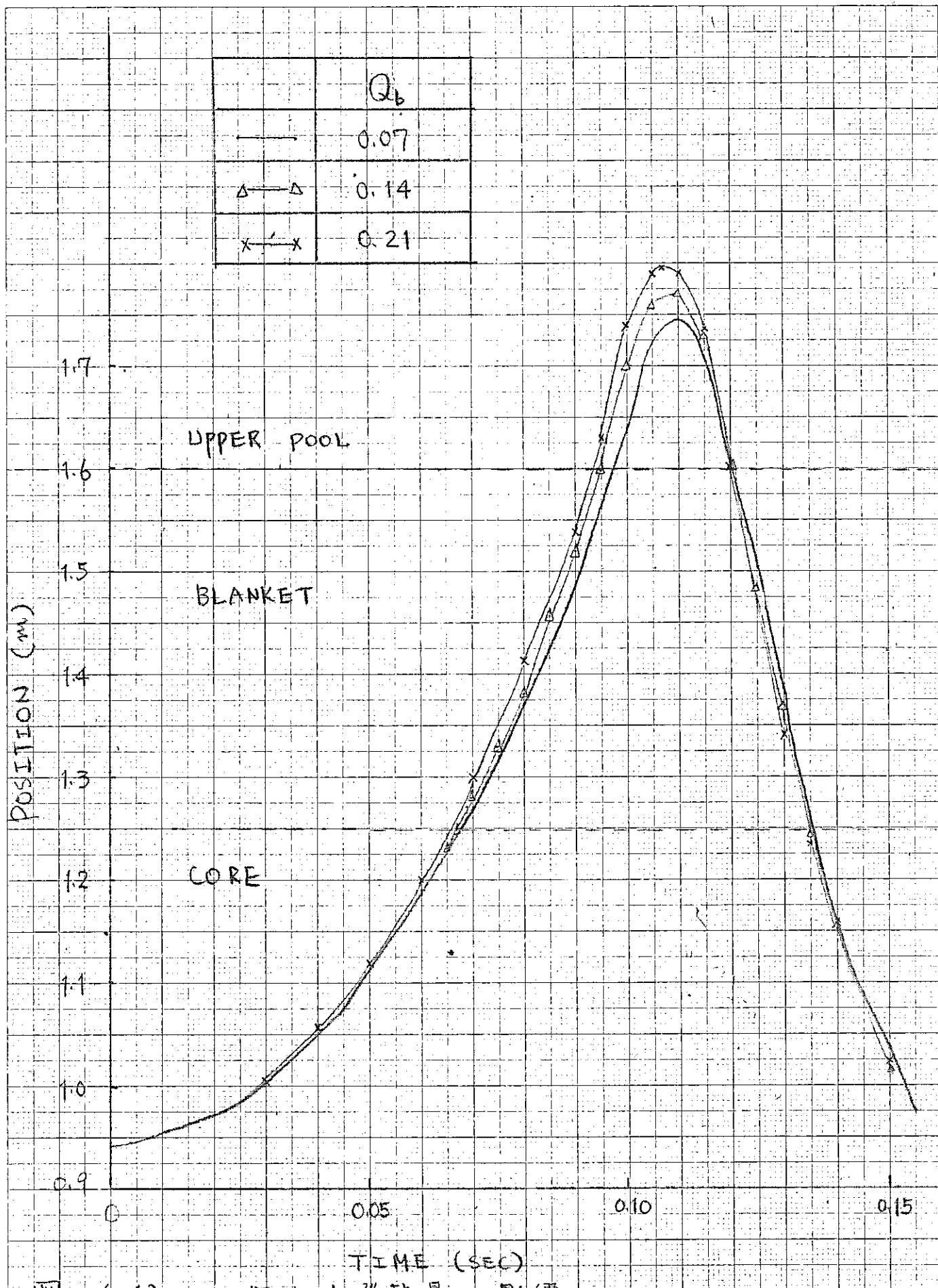
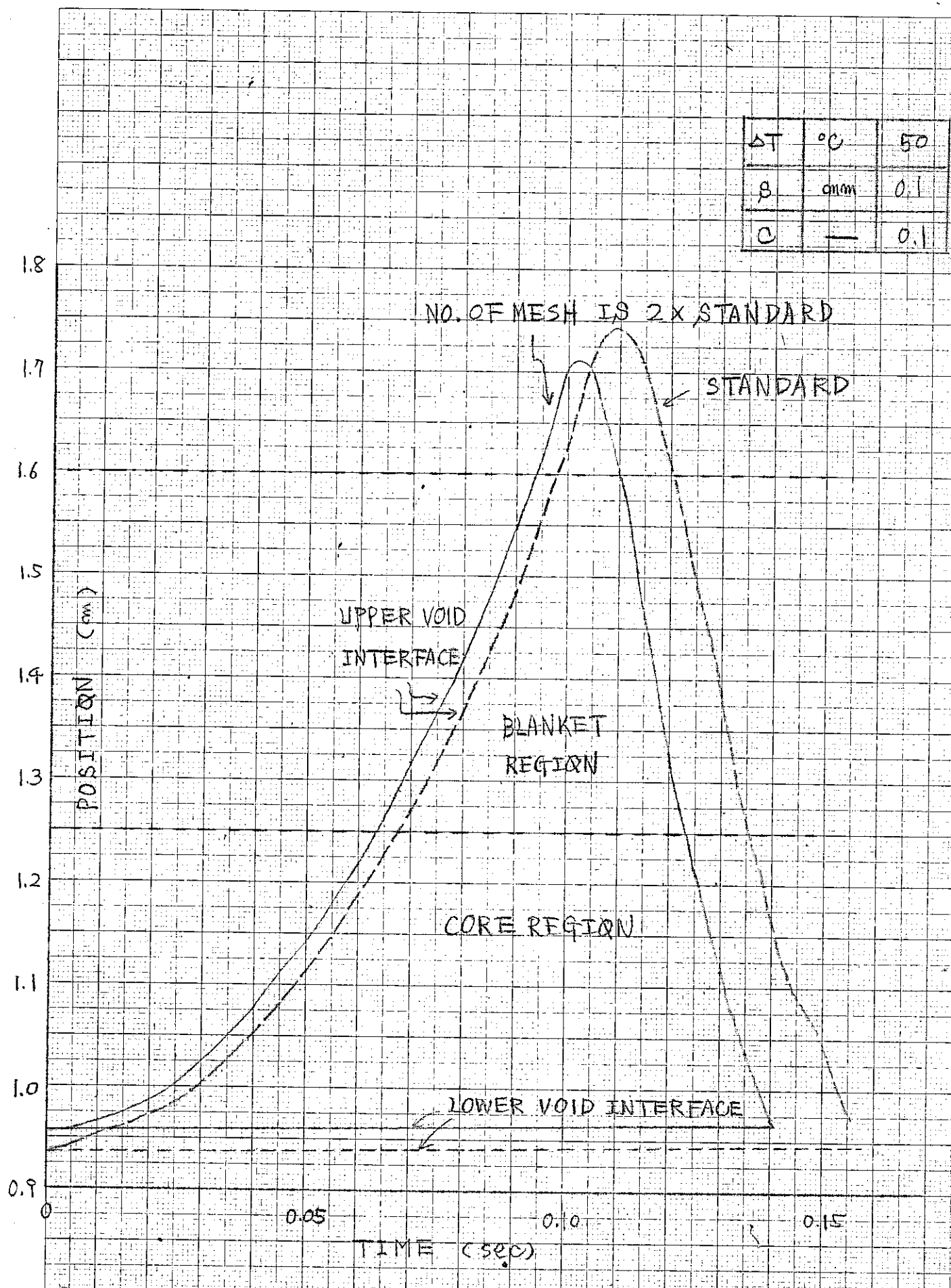


図 6.12 ブランケット発熱量の影響

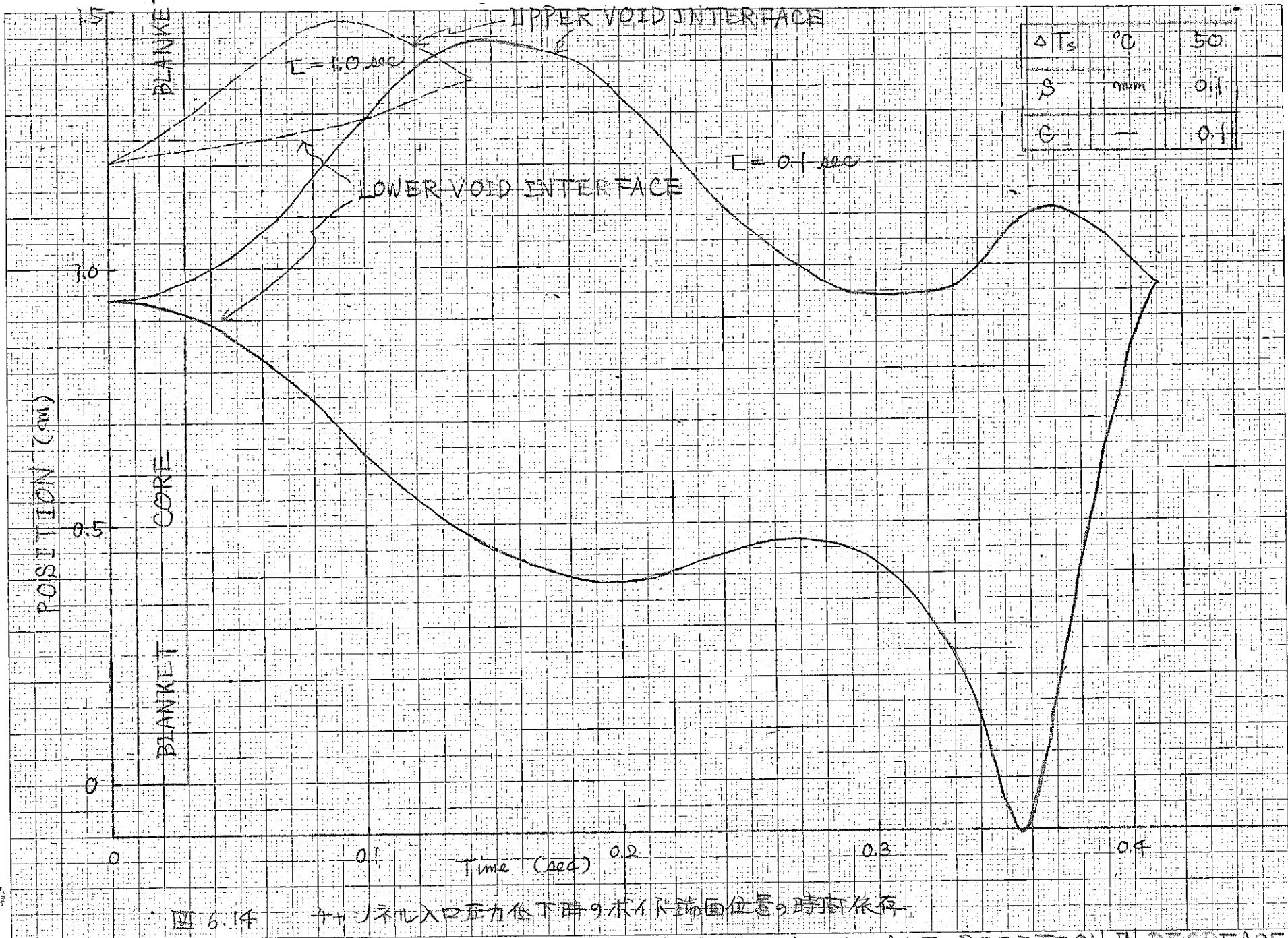
Fig 6.12 EFFECT OF BLANKET POWER RATE ON VOID POSITION



JIS A4 180x250mm

図 6.13 軸方向メッシュ数の影響

Fig 6.13 MESH DEPENDENCE OF VOID INTERFACE POSITION



四 6.14 入口圧力低下時、核内端の気泡位置の時間依存性

Fig. 6.14 TIME DEPENDENCE OF VOID INTERFACE POSITION IN DECREASE OF PRESSURE AT CHANNEL ENTRANCE

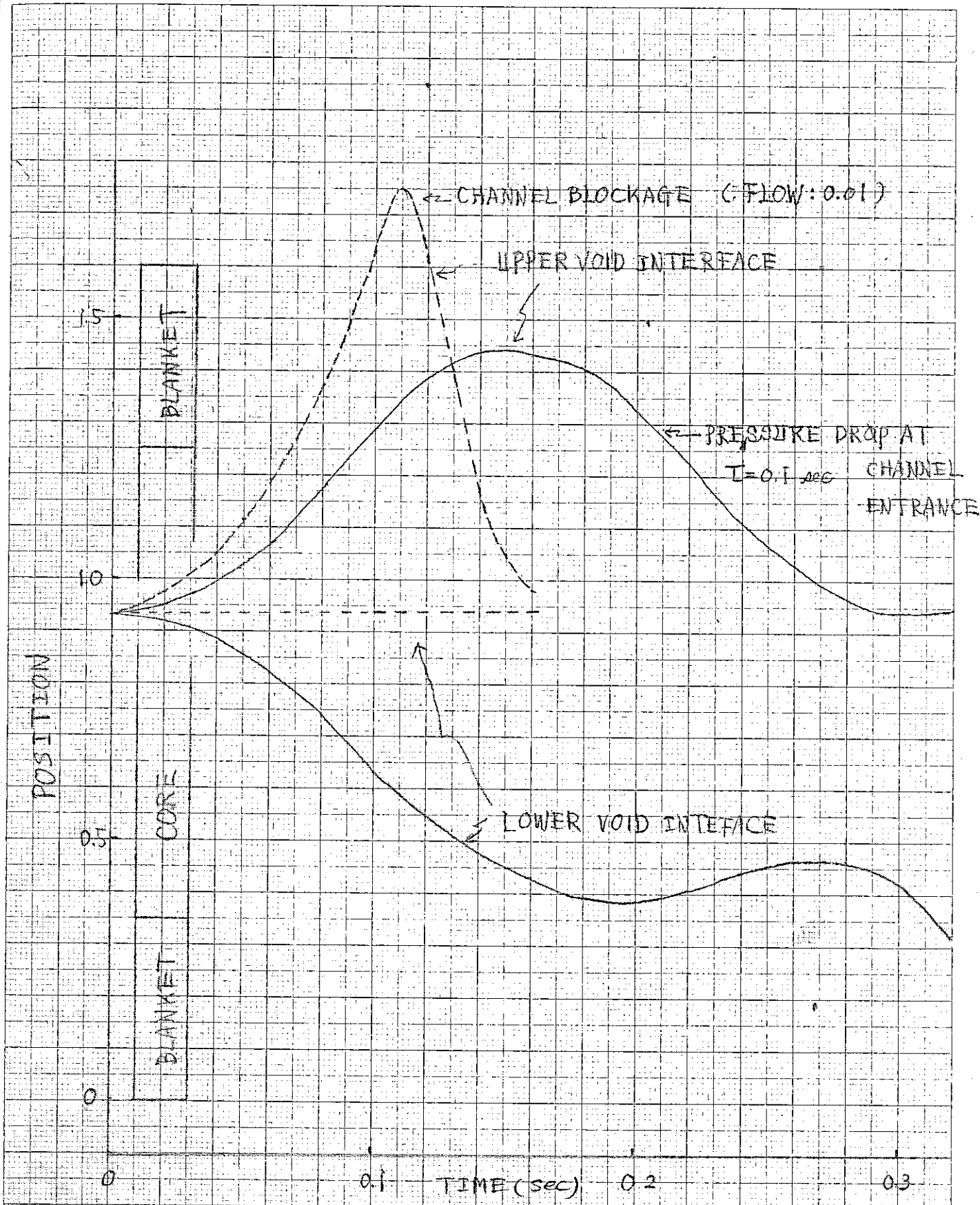


图 6.15 流路堵塞事故与压力低下事故之比较

Fig. 6.15 COMPARISON BETWEEN CHANNEL BLOCKAGE AND

PRESSURE DROP ACCIDENT